

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

**Khương Văn Hải**

**NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG  
MÔ PHỎNG DÒNG CHẢY SÔNG ĐÀ VÀO VIỆT NAM  
TRONG ĐIỀU KIỆN BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ THỦY VĂN HỌC**

**Hà Nội - 2026**

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Khương Văn Hải

NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG  
MÔ PHỎNG DÒNG CHẢY SÔNG ĐÀ VÀO VIỆT NAM  
TRONG ĐIỀU KIỆN BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU

Chuyên ngành: Thủy văn học

Mã số: 9440224

LUẬN ÁN TIẾN SĨ THỦY VĂN HỌC

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- PGS.TS. Nguyễn Tiền Giang
- PGS.TS. Nguyễn Cao Đơn

Hà Nội - 2026

## **LỜI CAM ĐOAN**

Tôi xin cam đoan luận án này được hình thành từ các kết quả nghiên cứu khoa học do tôi trực tiếp thực hiện. Một phần nội dung đã được công bố trong các bài báo khoa học mà tôi là tác giả chính; phần còn lại được kế thừa và phát triển từ đề tài ĐTĐL.CN-06/23 do PGS.TS. Nguyễn Tiền Giang làm chủ nhiệm, trong đó tôi trực tiếp đảm nhiệm các nội dung nghiên cứu [5]. Toàn bộ số liệu, kết quả và nhận xét trình bày trong luận án là trung thực, có nguồn gốc rõ ràng và tuân thủ đầy đủ các quy định về nghiên cứu khoa học.

**Nghiên cứu sinh**

**Khương Văn Hải**

## LỜI CẢM ƠN

Luận án này không thể hoàn thành nếu thiếu sự hướng dẫn tận tình, sự động viên kịp thời và những hỗ trợ quý báu từ nhiều cá nhân và tổ chức.

Trước hết, tôi xin bày tỏ lòng kính trọng và biết ơn sâu sắc tới PGS.TS. Nguyễn Tiền Giang và PGS.TS. Nguyễn Cao Đơn, những người thầy đã trực tiếp hướng dẫn, định hướng khoa học và luôn tận tâm động viên tôi trong suốt quá trình nghiên cứu và thực hiện luận án. Những nhận xét, đánh giá khoa học nghiêm túc cùng các gợi ý về phương pháp và hướng tiếp cận vấn đề của các Thầy không chỉ có ý nghĩa quyết định đối với việc hoàn thiện luận án, mà còn là những bài học chuyên môn vô cùng quý báu đối với tôi trong quá trình nghiên cứu và công tác khoa học sau này.

Bên cạnh đó, thông qua việc tham gia thực hiện đề tài ĐTĐL.CN-06/23, tôi đã có cơ hội trực tiếp tham gia các hoạt động nghiên cứu khoa học cùng với chủ nhiệm đề tài và các thành viên tham gia [5]. Quá trình này đã tạo điều kiện thuận lợi để tôi được trao đổi học thuật, tiếp cận và vận dụng các phương pháp nghiên cứu, cũng như tham gia thảo luận và giải quyết các vấn đề khoa học đặt ra trong khuôn khổ đề tài. Những trải nghiệm thực tiễn này đã giúp tôi từng bước tích lũy kiến thức chuyên môn, rèn luyện kỹ năng nghiên cứu độc lập và làm việc nhóm, đồng thời nâng cao kinh nghiệm nghiên cứu khoa học, qua đó đóng góp quan trọng vào việc hoàn thiện nội dung và kết quả của luận án.

Tôi xin trân trọng cảm ơn Trường Đại học Khoa học Tự nhiên đã tạo điều kiện thuận lợi để tôi được học tập và nghiên cứu trong môi trường học thuật nghiêm túc, chuyên nghiệp. Tôi cũng xin gửi lời cảm ơn tới tập thể giảng viên và cán bộ Khoa Khí tượng, Thủy văn và Hải dương học, nơi tôi học tập và nghiên cứu, đã luôn quan tâm, hỗ trợ và tạo điều kiện giúp tôi hoàn thành chương trình đào tạo và luận án. Đồng thời, tôi xin chân thành cảm ơn các đồng nghiệp tại Trung tâm Công nghệ Phần mềm Thủy lợi – Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam đã luôn chia sẻ, động viên và hỗ trợ tôi cả về chuyên môn lẫn tinh thần trong suốt quá trình thực hiện luận án. Tôi xin trân trọng ghi nhận và biết ơn sâu sắc đối với những hỗ trợ quý báu này.

Cuối cùng, tôi xin bày tỏ lòng tri ân sâu sắc tới gia đình, những người đã luôn đồng hành, động viên và hỗ trợ tôi vô điều kiện về thời gian, vật chất và tinh thần, là chỗ dựa vững chắc giúp tôi hoàn thành luận án này.

**NCS: Khương Văn Hải**

## MỤC LỤC

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| LỜI CAM ĐOAN.....                                                                                 | 4  |
| LỜI CẢM ƠN.....                                                                                   | 5  |
| MỤC LỤC.....                                                                                      | 7  |
| DANH MỤC BẢNG.....                                                                                | 11 |
| DANH MỤC HÌNH.....                                                                                | 13 |
| DANH MỤC KÍ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT.....                                                               | 16 |
| MỞ ĐẦU.....                                                                                       | 18 |
| 1.1. Tính cấp thiết.....                                                                          | 18 |
| 1.2. Mục tiêu luận án.....                                                                        | 20 |
| 1.3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....                                                         | 20 |
| 1.4. Hướng tiếp cận nghiên cứu.....                                                               | 21 |
| 1.5. Câu hỏi nghiên cứu.....                                                                      | 22 |
| 1.6. Điểm mới của luận án.....                                                                    | 22 |
| 1.7. Luận điểm bảo vệ.....                                                                        | 22 |
| 1.8. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn.....                                                           | 23 |
| 1.8.1. Ý nghĩa khoa học.....                                                                      | 23 |
| 1.8.2. Ý nghĩa thực tiễn.....                                                                     | 23 |
| 1.9. Cấu trúc của luận án.....                                                                    | 24 |
| CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU.....                                                      | 26 |
| 1.1. Tổng quan về đối tượng và khu vực nghiên cứu.....                                            | 26 |
| 1.1.1. Đặc điểm các lưu vực sông xuyên biên giới và vấn đề chia sẻ dữ liệu.....                   | 26 |
| 1.1.2. Đặc điểm khu vực nghiên cứu: lưu vực sông Đà.....                                          | 27 |
| 1.1.3. Những thách thức trong quản lý và dự báo dòng chảy sông Đà vào Việt Nam.....               | 31 |
| 1.1.4. Tổng quan các nghiên cứu mô phỏng dòng chảy (trên lưu vực sông Hồng – sông Đà)<br>.....    | 32 |
| 1.2. Tổng quan các nghiên cứu thống kê tìm điểm biến đổi.....                                     | 34 |
| 1.3. Tổng quan phân tích xu thế trong chuỗi thủy văn không dừng.....                              | 37 |
| 1.4. Tổng quan nghiên cứu mô phỏng dòng chảy trong điều kiện thiếu thông tin, dữ liệu.....        | 39 |
| 1.5. Tổng quan phương pháp đánh giá tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh<br>..... | 43 |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.6. Ứng dụng công nghệ viễn thám trong xác định các thông số hồ chứa khu vực thiếu dữ liệu ..... | 46 |
| 1.7. Cơ sở khoa học và định hướng nghiên cứu của luận án .....                                    | 48 |
| 1.7.1. Phân tích khoảng trống nghiên cứu.....                                                     | 48 |
| 1.7.2. Đề xuất khung nghiên cứu tích hợp .....                                                    | 49 |
| 1.8. Tiểu kết chương 1.....                                                                       | 53 |
| CHƯƠNG 2 PHƯƠNG PHÁP VÀ SỐ LIỆU SỬ DỤNG TRONG NGHIÊN CỨU .....                                    | 55 |
| 2.1. Dữ liệu sử dụng.....                                                                         | 55 |
| 2.1.1. Các bộ dữ liệu, thông số cho mô hình VIC.....                                              | 55 |
| 2.1.2. Các dữ liệu sử dụng .....                                                                  | 57 |
| 2.2. Phương pháp xác định điểm biến đổi .....                                                     | 57 |
| 2.2.1. Kiểm định Pettitt.....                                                                     | 58 |
| 2.2.2. Kiểm định tính đồng nhất chuẩn (Standard Normal Homogeneity Test) .....                    | 58 |
| 2.2.3. Kiểm định phạm vi của Buishand .....                                                       | 59 |
| 2.2.4. Kiểm định tỷ lệ khả năng của Buishand .....                                                | 59 |
| 2.2.5. Kiểm định U của Buishand .....                                                             | 59 |
| 2.3. Phương pháp phân tích hồi quy tuyến tính.....                                                | 60 |
| 2.4. Lựa chọn mô hình tính toán.....                                                              | 60 |
| 2.4.1. Mô hình bề mặt đất.....                                                                    | 61 |
| 2.4.2. Một số các mô hình thủy văn bề mặt phổ biến.....                                           | 63 |
| 2.4.3. Tiêu chí lựa chọn mô hình phù hợp .....                                                    | 72 |
| 2.4.4. Giới thiệu mô hình VIC.....                                                                | 76 |
| 2.5. Phương pháp hiệu chỉnh thông số mô hình .....                                                | 80 |
| 2.5.1. Thuật toán tối ưu hóa tiến hóa phức hợp (SCE-UA) .....                                     | 80 |
| 2.5.2. Điều kiện dừng.....                                                                        | 83 |
| 2.5.3. Các thông số được tối ưu cũng như khoảng giá trị của chúng.....                            | 85 |
| 2.5.4. SPOTPY cho tối ưu hóa các thông số của VIC.....                                            | 85 |
| 2.5.5. Các chỉ số đánh giá chất lượng mô hình (hàm mục tiêu) .....                                | 87 |
| 2.5.6. Các chỉ số (hàm mục tiêu) đơn .....                                                        | 87 |
| 2.5.7. Các chỉ số (hàm mục tiêu) tổ hợp .....                                                     | 89 |
| 2.6. Phương pháp phân tích tác động của các nhân tố lên dòng chảy.....                            | 90 |
| 2.6.1. Hạn chế công thức hệ số tác động của Wang.....                                             | 90 |

|                                                                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.6.2. Các cải tiến công thức hệ số tác động mở rộng .....                                                                        | 92         |
| 2.6.3. Khung nghiên cứu theo công thức hệ số tác động mở rộng .....                                                               | 95         |
| 2.7. Phương pháp khai thác dữ liệu viễn thám để xác định thông số hồ chứa .....                                                   | 96         |
| 2.7.1. Dữ liệu viễn thám.....                                                                                                     | 96         |
| 2.7.2. Phương pháp xây dựng đường đặc tính hồ từ dữ liệu vệ tinh .....                                                            | 96         |
| 2.7.3. Phương pháp xây dựng quy luật vận hành của các hồ chứa từ dữ liệu viễn thám.....                                           | 97         |
| 2.8. Tiểu kết chương 2.....                                                                                                       | 98         |
| <b>CHƯƠNG 3 KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN.....</b>                                                                              | <b>100</b> |
| 3.1. Điểm biến đổi trong chế độ thủy văn trên lưu vực sông Đà .....                                                               | 100        |
| 3.2. Phân tích xu thế của một số yếu tố khí hậu .....                                                                             | 102        |
| 3.3. Phân tích, xử lý dữ liệu trong thiết lập mô hình VIC.....                                                                    | 104        |
| 3.3.1. Phân tích, xử lý dữ liệu trong thiết lập Module 1 - mô hình VIC .....                                                      | 104        |
| 3.3.2. Phân tích, xử lý dữ liệu trong thiết lập Module 2 - mô hình ROUTING .....                                                  | 110        |
| 3.4. Kết quả hiệu chỉnh, kiểm định mô hình VIC trước khi hồ chứa phía Trung Quốc đi vào hoạt động giai đoạn 1981-2008.....        | 119        |
| 3.5. Đánh giá tác động của BĐKH và hoạt động nhân sinh lên dòng chảy.....                                                         | 124        |
| 3.5.1. Tính toán tỷ lệ chênh lệch giữa dòng chảy khôi phục và dòng chảy tự nhiên.....                                             | 124        |
| 3.5.2. Phân tách tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người.....                                                    | 125        |
| 3.6. Kết quả phân tích, xác định thông số và quy luật vận hành hồ chứa từ dữ liệu vệ tinh đa nguồn cho thiết lập mô hình VIC..... | 132        |
| 3.6.1. Các đường đặc tính lòng hồ.....                                                                                            | 132        |
| 3.6.2. Quy luật vận hành của các hồ chứa .....                                                                                    | 133        |
| 3.6.3. Xác định các thông số hồ chứa và các biểu đồ điều phối.....                                                                | 134        |
| 3.6.4. Thông số hoá quy trình vận hành hồ chứa cho mô hình VIC .....                                                              | 136        |
| 3.7. Đánh giá chất lượng mô phỏng dòng chảy sông Đà sau khi hồ chứa phía Trung Quốc đi vào hoạt động giai đoạn 2009-2020.....     | 138        |
| 3.7.2. Đánh giá sự cải thiện chất lượng mô phỏng dòng chảy của mô hình VIC khi tích hợp thông số vận hành hồ chứa.....            | 143        |
| 3.8. Kết quả phân tích biến động mặt đệm và nhu cầu tưới .....                                                                    | 146        |
| 3.8.1. Phân tích sự thay đổi mặt đệm trên lưu vực giai đoạn 1992 đến 2020.....                                                    | 146        |
| 3.8.2. Tính toán nhu cầu sử dụng nước giai đoạn 2016 đến 2020 .....                                                               | 152        |
| 3.9. Đánh giá kết quả mô phỏng khi tính đến thay đổi mặt đệm và sử dụng nước.....                                                 | 154        |
| 3.10. Thảo luận chung về độ tin cậy và khả năng ứng dụng .....                                                                    | 157        |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.10.1. Độ tin cậy của phương pháp tích hợp đa nguồn dữ liệu .....                | 157 |
| 3.10.2. Đánh giá hiệu quả của thuật toán SCE-UA trong hiệu chỉnh mô hình VIC..... | 159 |
| 3.10.3. Các hạn chế còn tồn tại của nghiên cứu.....                               | 161 |
| 3.11. Tiểu kết chương 3.....                                                      | 162 |
| KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....                                                        | 164 |
| DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN .....          | 166 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO.....                                                           | 168 |

## DANH MỤC BẢNG

|                                                                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Bảng 2.1. Tổng quan về các bộ dữ liệu được sử dụng và nguồn của chúng .....</i>                                                   | <i>57</i>  |
| <i>Bảng 2.2. Các tiêu chí nhóm 1 - khả năng mô phỏng và phân tích tác động thủy văn .....</i>                                        | <i>73</i>  |
| <i>Bảng 2.3. Các tiêu chí nhóm 2 - phù hợp với đặc điểm lưu vực sông Đà .....</i>                                                    | <i>74</i>  |
| <i>Bảng 2.4. Các tiêu chí nhóm 3 - tính linh hoạt, mở rộng và chuyển giao .....</i>                                                  | <i>75</i>  |
| <i>Bảng 2.5. So sánh đánh giá một số mô hình thủy văn bề mặt phổ biến theo các tiêu chí ..</i>                                       | <i>75</i>  |
| <i>Bảng 2.6. Sáu thông số được tối ưu trong mô hình VIC cho lưu vực sông Đà .....</i>                                                | <i>85</i>  |
| <i>Bảng 2.7. Các thông số của thuật giải SCE-UA trong gói SPOTPY .....</i>                                                           | <i>86</i>  |
| <i>Bảng 2.8. Các chỉ số đơn sử dụng với dòng chảy quan trắc và mô phỏng .....</i>                                                    | <i>88</i>  |
| <i>Bảng 2.9. Chỉ số tổ hợp với dòng chảy quan trắc và mô phỏng .....</i>                                                             | <i>89</i>  |
| <i>Bảng 3.1. Mô tả yêu cầu số liệu khí tượng đầu vào Mô hình VIC .....</i>                                                           | <i>105</i> |
| <i>Bảng 3.2. Các thông số trong tệp thông số đất .....</i>                                                                           | <i>106</i> |
| <i>Bảng 3.3. Các thông số thư viện thảm phủ thực vật .....</i>                                                                       | <i>109</i> |
| <i>Bảng 3.4. Kết quả hiệu chỉnh mô hình VIC chỉ số NSE, RMSE, BIAS .....</i>                                                         | <i>120</i> |
| <i>Bảng 3.5. Kết quả các thông số mô hình VIC được hiệu chỉnh .....</i>                                                              | <i>122</i> |
| <i>Bảng 3.6. Kết quả kiểm định mô hình VIC chỉ số NSE, RMSE, BIAS .....</i>                                                          | <i>122</i> |
| <i>Bảng 3.7. Kết quả thống kê dòng chảy tự nhiên và dòng chảy tự nhiên tại trạm đo Mường Lay. ....</i>                               | <i>125</i> |
| <i>Bảng 3.8. Tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người đến dòng chảy của sông Đà .....</i>                            | <i>126</i> |
| <i>Bảng 3.9 Bảng tổng hợp các thông số hồ chứa phía Trung Quốc[48, 188] .....</i>                                                    | <i>135</i> |
| <i>Bảng 3.10. Thông số vận hành hồ Longma theo lựa chọn 5 (OP5) .....</i>                                                            | <i>137</i> |
| <i>Bảng 3.11. Thông số vận hành hồ Tukahe theo lựa chọn 3(OP3) .....</i>                                                             | <i>138</i> |
| <i>Bảng 3.12. Kết quả hiệu chỉnh bộ thông số vận hành hồ chứa mô hình VIC .....</i>                                                  | <i>141</i> |
| <i>Bảng 3.13. Kết quả kiểm nghiệm mô hình VIC chỉ số NSE, RMSE, BIAS .....</i>                                                       | <i>142</i> |
| <i>Bảng 3.14. Bảng kết quả đánh giá chất lượng mô phỏng theo các giai đoạn khi chỉ tính đến ảnh hưởng của các hồ chứa nước .....</i> | <i>143</i> |
| <i>Bảng 3.15. Bảng thống kê diện tích sử dụng đất Lưu vực 1: thượng lưu sông Đà .....</i>                                            | <i>147</i> |
| <i>Bảng 3.16. Bảng thống kê diện tích sử dụng đất Lưu vực 2: thượng lưu sông nhánh Nậm Na đến biên giới Việt – Trung .....</i>       | <i>150</i> |

|                                                                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Bảng 3.17. Bảng thống kê diện tích sử dụng đất Lưu vực 3: Lưu vực sông Đà từ biên giới Việt – Trung đến trạm Mường Lay.....</i> | <i>151</i> |
| <i>Bảng 3.18. Kết quả đánh giá chất lượng mô phỏng khi có và không xét đến thay đổi mặt đệm và sử dụng nước.....</i>               | <i>154</i> |

## DANH MỤC HÌNH

|                                                                                                                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Hình 1.1. Khu vực nghiên cứu .....</i>                                                                                                                                           | <i>27</i>  |
| <i>Hình 1.2. Sơ đồ phương pháp nghiên cứu .....</i>                                                                                                                                 | <i>52</i>  |
| <i>Hình 2.1 Sơ đồ các file đầu vào cho (I) Module 1 - mô hình VIC và (II) Module 2 - mô hình ROUTING.....</i>                                                                       | <i>56</i>  |
| <i>Hình 2.2 Sơ đồ biểu diễn mô hình thủy văn VIC .....</i>                                                                                                                          | <i>77</i>  |
| <i>Hình 2.3 Sơ đồ biểu diễn mô hình VIC Routing .....</i>                                                                                                                           | <i>79</i>  |
| <i>Hình 2.4. Sơ đồ khối mô tả các bước tính toán trong thuật toán SCE-UA.....</i>                                                                                                   | <i>80</i>  |
| <i>Hình 2.5. Sơ đồ khối mô tả các bước thuật toán tiến hóa phức hợp được sử dụng trong SCE .....</i>                                                                                | <i>84</i>  |
| <i>Hình 2.6 Các trường hợp dòng chảy chịu tác động từ thay đổi khí hậu và hoạt động của con người.....</i>                                                                          | <i>93</i>  |
| <i>Hình 2.7 Sơ đồ nghiên cứu định lượng tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người đối theo công thức hệ số tác động mở rộng .....</i>                                | <i>95</i>  |
| <i>Hình 2.8. Quy trình các bước tính toán xây dựng quy luật vận hành hồ chứa.....</i>                                                                                               | <i>98</i>  |
| <i>Hình 3.1. Kết quả phát hiện điểm biến động của chuỗi thời gian dòng chảy tháng, năm và mùa tại trạm đo Mường Lay trong hai giai đoạn: 1981 - 2015 (a) và 1981-2020 (b) .....</i> | <i>100</i> |
| <i>Hình 3.2. Biến động lưu lượng trung bình năm tại trạm đo Mường Lay (1981 – 2021)...</i>                                                                                          | <i>101</i> |
| <i>Hình 3.3. Xu hướng nhiệt độ năm và theo mùa (a), bốc hơi tiềm năng (b), lượng mưa (c) và dòng chảy (d) tại trạm đo Mường Lay trong giai đoạn 1981 đến 2020.....</i>              | <i>104</i> |
| <i>Hình 3.4. Sơ đồ xử lý số liệu của tệp khí tượng.....</i>                                                                                                                         | <i>105</i> |
| <i>Hình 3.5. Quy trình tạo tệp thông số đất trong Vic_auto.py .....</i>                                                                                                             | <i>108</i> |
| <i>Hình 3.6. Quy trình tạo tệp thông số thực vật trong Vic_auto.py .....</i>                                                                                                        | <i>110</i> |
| <i>Hình 3.7. Định dạng tệp hướng dòng chảy.....</i>                                                                                                                                 | <i>111</i> |
| <i>Hình 3.8. Quá trình xử lý tệp “Flow direction” .....</i>                                                                                                                         | <i>111</i> |
| <i>Hình 3.9. Tệp hướng dòng chảy khu vực nghiên cứu .....</i>                                                                                                                       | <i>112</i> |
| <i>Hình 3.10. Hướng dòng chảy lưu vực Sông Đà.....</i>                                                                                                                              | <i>113</i> |
| <i>Hình 3.11. Quá trình xử lý tệp “file Fraction” .....</i>                                                                                                                         | <i>114</i> |
| <i>Hình 3.12. Tệp phần trăm trọng số lưu vực trong ô lưới .....</i>                                                                                                                 | <i>115</i> |
| <i>Hình 3.13. Nội dung tệp thủy văn đơn vị – UH .....</i>                                                                                                                           | <i>116</i> |
| <i>Hình 3.14. Định dạng của vị trí các trạm thủy văn .....</i>                                                                                                                      | <i>116</i> |

|                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Hình 3.15. Định dạng thông tin vận tốc dòng chảy cho từng ô lưới (ảnh từ website) .....                                                                                                 | 117 |
| Hình 3.16. Vận tốc dòng chảy các ô được định nghĩa bằng 1,2 m/s trước khi hiệu chỉnh                                                                                                    | 117 |
| Hình 3.17. Định dạng thông tin độ khuếch tán dòng chảy cho từng ô lưới (ảnh từ website) .....                                                                                           | 118 |
| Hình 3.18. Độ khuếch tán dòng chảy các ô được định nghĩa đều bằng 800 m <sup>2</sup> /s .....                                                                                           | 118 |
| Hình 3.19. Định nghĩa kích thước ô trong mô hình (12500 m) .....                                                                                                                        | 119 |
| Hình 3.20. Sơ đồ quy trình hiệu chỉnh tự động mô hình VIC (Calibration.py) .....                                                                                                        | 119 |
| Hình 3.21. Biến trình hội tụ chỉ số RMSE trong thuật toán SCE-UA.....                                                                                                                   | 120 |
| Hình 3.22. Biến trình lưu lượng trung bình tháng tính toán và thực đo tại Mường Lay giai đoạn (1981-1995) .....                                                                         | 121 |
| Hình 3.23. Biến trình lưu lượng tính toán và thực đo tại Mường Lay giai đoạn 1996-2008 .....                                                                                            | 122 |
| Hình 3.24. Biến động dòng chảy tự nhiên hàng năm và dòng chảy quan trắc được, cho thấy sự thay đổi về lượng nước tích lũy của các hồ chứa trong UDRB từ năm 2009 đến năm 2020. ....     | 128 |
| Hình 3.25. Biến động dòng chảy tự nhiên và dòng chảy quan trắc được do sự thay đổi về lượng nước tích lũy của các hồ chứa trong UDRB từ năm 2009 đến năm 2020, trong mùa lũ .....       | 130 |
| Hình 3.26. Sự thay đổi trong dòng chảy tự nhiên và dòng chảy quan trắc được tương quan với những thay đổi trong tổng lượng nước lưu trữ của các hồ chứa trong lưu vực vào mùa kiệt..... | 131 |
| Hình 3.27. Đường đặc tính lòng hồ của hồ Longma (trái) và Lai Châu (phải) .....                                                                                                         | 133 |
| Hình 3.28. Mức nước hồ Gelantan – điều tiết ngày/tuần (trái) và hồ Longma - điều tiết năm/mùa (phải) giai đoạn 2016-2023 .....                                                          | 134 |
| Hình 3.29. Biểu đồ điều phối hồ chứa Longma, điều tiết mùa/năm được xây dựng .....                                                                                                      | 135 |
| Hình 3.30. Sơ đồ các hồ chứa, trạm thủy văn trên lưu vực sông Đà đến trạm Mường Lay .....                                                                                               | 139 |
| Hình 3.31. Sơ đồ quy trình hiệu chỉnh tự động mô hình VIC (Calibration_res.py) .....                                                                                                    | 140 |
| Hình 3.32. Biến trình hội tụ chỉ số RMSE trong thuật toán SCE-UA.....                                                                                                                   | 140 |
| Hình 3.33. Lưu lượng trung bình tháng về hồ Lai Châu theo 3 phương án tính toán giai đoạn 2016-2020.....                                                                                | 141 |
| Hình 3.34. Lưu lượng trung bình tháng tại trạm Pô Léch theo 2 phương án tính toán giai đoạn 2009-2011 .....                                                                             | 142 |
| Hình 3.35. Phân chia vùng đánh giá tác động của các yếu tố lên dòng chảy sông Đà ....                                                                                                   | 146 |

|                                                                                                                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Hình 3.36. Tỷ lệ phần trăm các loại đất năm 1992 và tỷ lệ phần trăm thay đổi sử dụng đất trên Lưu vực 1 - thượng lưu sông Đà đến biên giới Việt – Trung.....</i>                 | <i>147</i> |
| <i>Hình 3.37. Tỷ lệ phần trăm các loại đất năm 1992 và tỷ lệ phần trăm thay đổi sử dụng đất trên lưu vực 2 - thượng lưu sông nhánh Nậm Na đến biên giới Việt – Trung.....</i>       | <i>149</i> |
| <i>Hình 3.38. Tỷ lệ phần trăm các loại đất năm 1992 và tỷ lệ phần trăm thay đổi sử dụng đất trên lưu vực 3 - Lưu vực sông Đà từ biên giới Việt – Trung đến trạm Mường Lay .....</i> | <i>150</i> |
| <i>Hình 3.39. Nhu sử dụng nước trên thượng lưu lưu vực sông Đà tính đến hồ Lai Châu giai đoạn 2016 - 2020.....</i>                                                                  | <i>153</i> |
| <i>Hình 3.40. Lưu lượng trung bình tháng về hồ Lai Châu khi có và không xét đến thay đổi mặt đệm và nhu cầu sử dụng nước giai đoạn 2016-2020.....</i>                               | <i>154</i> |

## DANH MỤC KÍ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

| <b>Kí hiệu, chữ viết tắt</b> | <b>Giải thích</b>                                                                                                                                                |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CESM                         | Mô hình Hệ thống Trái Đất Cộng đồng (Community Earth System Model)                                                                                               |
| CHM                          | Bộ dữ liệu mưa lưới ngày trên toàn lãnh thổ Trung Quốc                                                                                                           |
| CLM                          | Mô hình bề mặt đất Community (Community Land Model)                                                                                                              |
| DEM                          | Mô hình số độ cao                                                                                                                                                |
| DGVM                         | Mô hình thảm thực vật động (Dynamic Global Vegetation Model)                                                                                                     |
| DREAM                        | Thuật toán Metropolis thích nghi dựa trên tiến hóa vi phân (DiffeRential Evolution Adaptive Metropolis)                                                          |
| EIFF                         | công thức hệ số tác động mở rộng (Extended Impact Factor Formula)                                                                                                |
| ERA5                         | ECMWF Reanalysis version 5                                                                                                                                       |
| ET                           | bốc hơi từ tầng tán của từng lớp thực vật, thoát hơi nước từ từng lớp thực vật và bốc hơi từ tầng đất trống                                                      |
| GA                           | Thuật toán di truyền (Genetic Algorithm)                                                                                                                         |
| GCMs                         | mô hình khí hậu toàn cầu (Global Climate Models)                                                                                                                 |
| GFS                          | Hệ thống dự báo toàn cầu (Global Forecast System)                                                                                                                |
| IAHS                         | Hiệp hội Khoa học Thủy văn Quốc tế (International Association of Hydrological Sciences)                                                                          |
| IUCN                         | Tổ chức Bảo tồn Thiên nhiên Quốc tế (International Union for Conservation of Nature)                                                                             |
| LAI                          | Chỉ số diện tích lá cây                                                                                                                                          |
| LSMs, HLSMs, GHMs            | Mô hình bề mặt đất (Land Surface Models), Mô hình thủy văn bề mặt đất (Hydrological Land Surface Models), Mô hình thủy văn toàn cầu (Global Hydrological Models) |
| LULC                         | Sử dụng đất / Lớp phủ bề mặt (Land Use / Land Cover)                                                                                                             |
| MCMC                         | Phương pháp Monte Carlo chuỗi Markov (Markov Chain Monte Carlo)                                                                                                  |
| MRC                          | Ủy hội sông Mê Công quốc tế (Mekong River Commission)                                                                                                            |
| NASA                         | Cơ quan hàng không vũ trụ quốc gia Hoa Kỳ, (National Aeronautics and Space Administration)                                                                       |

|                                          |                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NCAR                                     | Trung tâm Nghiên cứu Khí quyển Quốc gia Hoa Kỳ (National Center for Atmospheric Research)                                                        |
| NDWI                                     | Chỉ số nước khác biệt chuẩn hóa (Normalized Difference Water Index)                                                                              |
| Noah LSM                                 | Mô hình bề mặt đất Noah (Noah Land Surface Model)                                                                                                |
| PDM                                      | Mô hình động lực lớp rỗng trong miền đa lớp (Porous-layer Dynamics in a Multilayered Domain)                                                     |
| PEST                                     | Ước lượng (hiệu chỉnh) thông số (Parameter ESTimation)                                                                                           |
| PSO                                      | Thuật toán tối ưu dựa trên trí tuệ bầy đàn (Particle Swarm Optimization)                                                                         |
| SAC                                      | Mô hình thuật toán đơn giản mô tả (đặc trưng hóa) các quá trình bề mặt đất (Simple Algorithm for the Characterization of Land Surface Processes) |
| SAR                                      | Radar khẩu độ tổng hợp                                                                                                                           |
| SCE-UA                                   | Thuật toán tiến hóa phức hợp xáo trộn (Shuffled Complex Evolution – University of Arizona)                                                       |
| SiB                                      | Mô hình sinh quyển đơn giản (Simple Biosphere Model)                                                                                             |
| SM                                       | Soil moisture                                                                                                                                    |
| SNHT                                     | Xem trong Thử nghiệm U của Buishand                                                                                                              |
| SNHT                                     | Standard Normal Homogeneity Test                                                                                                                 |
| SVR, SVM, ANN, SVR, DL, RNN, LSTM và GRU | Các mô hình AI thường dùng trong thủy văn                                                                                                        |
| TC                                       | Tiêu chí                                                                                                                                         |
| UDRB                                     | Dòng chảy trên thượng nguồn lưu vực sông Đà                                                                                                      |
| UNWC                                     | Công ước về Luật sử dụng các nguồn nước quốc tế cho các mục đích phi giao thông thủy (United Nations Watercourses Convention)                    |
| VIC                                      | Mô hình Khả năng thấm biến thiên (Variable Infiltration Capacity)                                                                                |
| VNGP                                     | Bộ dữ liệu mưa lưới ngày trên toàn lãnh thổ Việt Nam                                                                                             |
| WMO                                      | Tổ chức Khí tượng Thế giới                                                                                                                       |
| Z – F – W                                | mức nước – diện tích mặt nước – dung tích                                                                                                        |

## MỞ ĐẦU

### 1.1. Tính cấp thiết

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu ngày càng gia tăng, các biến khí tượng – thủy văn đang có xu hướng biến đổi phức tạp cả về cường độ, tần suất và quy luật phân bố theo thời gian và không gian. Nhiệt độ tăng, sự thay đổi chế độ mưa và sự gia tăng của các hiện tượng cực đoan đã và đang tác động trực tiếp đến chu trình nước, làm thay đổi đặc trưng dòng chảy trên nhiều lưu vực sông. Những biến đổi này khiến các đặc trưng thống kê của chuỗi số liệu thủy văn không còn duy trì ổn định theo thời gian như trong các giả định truyền thống, từ đó đặt ra thách thức lớn đối với công tác phân tích, mô phỏng và dự báo tài nguyên nước.

Tại Việt Nam, tác động của biến đổi khí hậu được thể hiện rõ thông qua sự gia tăng của các hiện tượng như mưa lớn cường độ cao, lũ bất thường, hạn hán kéo dài và sự biến động về phân bố dòng chảy theo mùa. Những thay đổi này không chỉ ảnh hưởng đến khả năng khai thác và sử dụng nước mà còn làm gia tăng rủi ro đối với phát triển kinh tế – xã hội, đặc biệt tại các khu vực miền núi và trung du, nơi điều kiện tự nhiên biến động mạnh và khả năng thích ứng còn hạn chế. Trong bối cảnh đó, yêu cầu nâng cao độ tin cậy của các công cụ mô phỏng và dự báo dòng chảy trở nên ngày càng cấp thiết nhằm hỗ trợ hiệu quả công tác quản lý và điều hành tài nguyên nước.

Đối với các lưu vực sông liên quốc gia, công tác quản lý tài nguyên nước trở nên phức tạp hơn do chịu chi phối bởi các yếu tố bên ngoài lãnh thổ. Theo Bộ Tài nguyên và Môi trường Việt Nam (2020), Việt Nam nằm ở hạ lưu của 5 trong số 8 hệ thống sông liên quốc, vì vậy chế độ dòng chảy chịu ảnh hưởng rõ rệt không chỉ từ điều kiện khí hậu mà còn từ các hoạt động khai thác và sử dụng nước ở các quốc gia thượng nguồn. Trong những năm gần đây, sự phát triển mạnh mẽ của hệ thống hồ chứa, đặc biệt là các công trình thủy điện ở thượng nguồn, đã làm biến đổi rõ rệt chế độ dòng chảy tự nhiên, nhất là về thời gian xuất hiện và biên độ của dòng chảy mùa lũ và mùa kiệt. Những biến đổi này làm gia tăng tính bất định của dòng chảy, gây khó

khẩn cho công tác dự báo và vận hành hệ thống công trình ở hạ lưu. Một thách thức lớn trong nghiên cứu và mô phỏng dòng chảy tại các lưu vực sông xuyên biên giới là sự hạn chế về dữ liệu, đặc biệt là dữ liệu khí tượng – thủy văn và thông tin liên quan đến hoạt động điều tiết hồ chứa ở thượng nguồn. Sự thiếu hụt số liệu quan trắc trực tiếp không chỉ làm giảm khả năng phản ánh đầy đủ trạng thái của hệ thống thủy văn mà còn gây khó khăn trong quá trình hiệu chỉnh và kiểm định mô hình. Trong khi đó, các phương pháp mô phỏng truyền thống chủ yếu dựa trên dữ liệu lịch sử và giả định về tính ổn định của chuỗi số liệu, nên đã bộc lộ nhiều hạn chế khi áp dụng trong điều kiện hệ thống có sự biến đổi theo thời gian. Đồng thời, các tác động của con người như vận hành hồ chứa và khai thác nguồn nước có thể làm thay đổi đáng kể quy luật dòng chảy tự nhiên, làm gia tăng tính phi tuyến và bất định của hệ thống. Vì vậy, việc xem xét tổng hợp các yếu tố tự nhiên và nhân sinh trong quá trình mô phỏng là cần thiết nhằm phản ánh sát hơn điều kiện thực tế của lưu vực.

Sông Đà là lưu vực có vai trò đặc biệt quan trọng trong hệ thống sông Hồng và khu vực Bắc Bộ, đóng góp khoảng 50% tổng lượng dòng chảy của toàn hệ thống [166]. Trên sông Đà tập trung ba hồ chứa thủy điện vào loại lớn nhất cả nước và khu vực là Lai Châu, Sơn La và Hòa Bình. Tuy nhiên, với đặc điểm xuyên biên giới của lưu vực sông, cùng với sự phát triển mạnh mẽ các công trình ở thượng nguồn, đã làm gia tăng đáng kể mức độ phức tạp của chế độ dòng chảy khi vào Việt Nam. Trong điều kiện thiếu thông tin đầy đủ về dữ liệu và hoạt động điều tiết từ thượng nguồn, việc mô phỏng chính xác dòng chảy sông Đà trở thành một thách thức lớn, ảnh hưởng trực tiếp đến công tác dự báo, vận hành hồ chứa và đảm bảo an ninh nguồn nước ở hạ lưu.

Vì vậy, nghiên cứu “*Nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy sông Đà vào Việt Nam trong điều kiện biến đổi khí hậu*” là cần thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn lớn. Nghiên cứu góp phần hoàn thiện cách tiếp cận mô hình hóa trong bối cảnh chuỗi số liệu có sự biến đổi theo thời gian, điều kiện dữ liệu bị hạn chế và hệ thống chịu tác động tổng hợp của các yếu tố tự nhiên và nhân sinh; đồng thời cung cấp cơ

sở khoa học nhằm nâng cao độ tin cậy của mô phỏng, phục vụ công tác dự báo, vận hành hồ chứa và quản lý, đảm bảo an ninh nguồn nước ở hạ lưu.

## **1.2. Mục tiêu luận án**

Nâng cao được chất lượng mô phỏng dòng chảy sông Đà vào lãnh thổ Việt Nam thông qua việc phát triển các phương pháp phân tách một cách định lượng các tác động do hoạt động của con người và biến đổi khí hậu lên chế độ dòng chảy, bổ sung dữ liệu thiếu hụt và tích hợp các hoạt động nhân sinh vào mô hình mô phỏng thủy văn bề mặt.

### **Mục tiêu cụ thể:**

1. Xác định được điểm biến đổi và phân tích xu thế của chuỗi khí tượng – thủy văn trong điều kiện biến đổi khí hậu.
2. Tích hợp được các nguồn dữ liệu thay thế (như: viễn thám, tái phân tích,...) nhằm cải thiện dữ liệu đầu vào cho mô hình.
3. Mô phỏng dòng chảy và phân tách được một cách định lượng tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh.
4. Đánh giá được mức độ cải thiện độ chính xác mô phỏng sau khi tích hợp các hoạt động của con người vào mô hình mô phỏng thủy văn bề mặt và đề xuất ứng dụng trong quản lý tài nguyên nước.

## **1.3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

*Đối tượng nghiên cứu:* Quá trình biến đổi dòng chảy trên các lưu vực sông xuyên biên giới trong điều kiện tác động của biến đổi khí hậu với trọng tâm là mô phỏng dòng chảy sông Đà vào lãnh thổ Việt Nam.

*Phạm vi nghiên cứu:* tập trung vào lưu vực sông Đà, xét dòng chảy từ khu vực thượng nguồn thuộc lãnh thổ Trung Quốc vào Việt Nam trong giai đoạn 1981–2020. Nội dung nghiên cứu bao gồm phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến chế độ dòng chảy trong điều kiện chuỗi số liệu không dừng và thiếu hụt dữ liệu. Phương pháp tiếp cận

là mô phỏng tất định bằng mô hình thủy văn dựa vật lý kết hợp với các phương pháp xử lý số liệu phù hợp.

#### **1.4. Hướng tiếp cận nghiên cứu**

Nghiên cứu được triển khai theo hướng tiếp cận tổng hợp lưu vực sông, trong đó chế độ dòng chảy được xem xét như kết quả của sự tương tác giữa các yếu tố khí hậu, đặc điểm lưu vực và các tác động nhân sinh, đặc biệt là hoạt động điều tiết hồ chứa và khai thác, sử dụng nước ở thượng nguồn. Cách tiếp cận này phù hợp với lưu vực sông Đà, nơi dòng chảy vào Việt Nam chịu chi phối đồng thời bởi các quá trình tự nhiên và các hoạt động khai thác, điều tiết ngoài lãnh thổ.

Trên cơ sở đó, bài toán mô phỏng dòng chảy được tiếp cận theo hướng kết hợp giữa phân tích đặc điểm biến đổi của chuỗi số liệu và mô hình thủy văn dựa vật lý, nhằm phản ánh sát hơn điều kiện thực tế của lưu vực trong bối cảnh biến đổi khí hậu và gia tăng tác động của con người. Cách tiếp cận này cho phép xem xét đồng thời sự biến đổi của các yếu tố đầu vào, đặc tính không ổn định của dòng chảy và ảnh hưởng của các hoạt động điều tiết nhân tạo, qua đó nâng cao độ tin cậy của kết quả mô phỏng.

Một hướng tiếp cận trọng tâm khác là khai thác và tích hợp đa nguồn dữ liệu cho mô hình. Bên cạnh số liệu khí tượng – thủy văn truyền thống, nghiên cứu sử dụng các nguồn dữ liệu mở như mưa lưới (VNGP, CHM), mưa vệ tinh, dữ liệu tái phân tích và viễn thám nhằm bổ sung thông tin cho khu vực thiếu số liệu, đặc biệt là phần lưu vực ngoài lãnh thổ Việt Nam. Việc tích hợp đa nguồn dữ liệu góp phần nâng cao tính đầy đủ và nhất quán của dữ liệu đầu vào.

Đồng thời, mô hình được hiệu chỉnh và đánh giá một cách hệ thống nhằm đảm bảo khả năng mô tả hợp lý các quá trình hình thành và diễn biến dòng chảy, cũng như duy trì độ tin cậy trong các giai đoạn có biến động. Các yếu tố nhân sinh, đặc biệt là hoạt động điều tiết hồ chứa và khai thác nước, được xem xét và tích hợp ở mức độ phù hợp nhằm phản ánh sát hơn cơ chế chi phối dòng chảy thực tế.

Với các cách tiếp cận nêu trên, NCS hướng tới việc xây dựng cơ sở khoa học và phương pháp phù hợp nhằm nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy sông Đà vào Việt Nam trong điều kiện biến đổi khí hậu, thiếu hụt dữ liệu và gia tăng tác động của hoạt động nhân sinh.

### **1.5. Câu hỏi nghiên cứu**

1. Chế độ dòng chảy sông Đà vào Việt Nam biến đổi như thế nào, và tính không ổn định của chuỗi dòng chảy ảnh hưởng ra sao đến độ tin cậy của mô phỏng?
2. Những yếu tố nào chi phối sự biến đổi chế độ dòng chảy, và vai trò tương đối của biến đổi khí hậu và các tác động nhân sinh được thể hiện ra sao?
3. Trong điều kiện thiếu hụt thông tin thượng nguồn, việc tích hợp các nguồn dữ liệu mở, đặc biệt là dữ liệu viễn thám, có thể cải thiện chất lượng đầu vào mô hình đến mức nào?
4. Việc tích hợp các hoạt động điều tiết hồ chứa và sử dụng nước vào mô hình cải thiện độ chính xác và độ tin cậy của mô phỏng dòng chảy như thế nào?

### **1.6. Điểm mới của luận án**

- ✓ Đã suy luận được các đường cong vận hành của các hồ chứa điều tiết năm/mùa tại khu vực thượng nguồn không có thông tin từ dữ liệu viễn thám đa nguồn và mã hóa, tích hợp thành công vào mô hình VIC;
- ✓ Đã đề xuất một khung phương pháp mới để định lượng tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động con người lên biến động dòng chảy, có khả năng áp dụng rộng rãi cho các lưu vực sông.

### **1.7. Luận điểm bảo vệ**

- ✓ Luận điểm 01: Chuỗi số liệu thủy văn trên lưu vực sông Đà thể hiện tính không dừng do tác động đồng thời của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người;

- ✓ Luận điểm 02: Việc khai thác dữ liệu khí tượng thủy văn và viễn thám từ các nguồn dữ liệu mở cho phép bổ sung dữ liệu thiếu hụt và suy diễn quy luật vận hành các hồ chứa thượng nguồn;
- ✓ Luận điểm 03: Việc tích hợp thông tin vận hành hồ chứa và sử dụng nguồn nước vào mô hình thủy văn dựa vật lý giúp nâng cao độ chính xác mô phỏng dòng chảy trong điều kiện chuỗi dữ liệu thủy văn không dừng.

## **1.8. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn**

### **1.8.1. Ý nghĩa khoa học**

- + Luận án làm rõ bản chất biến đổi của chế độ dòng chảy thượng nguồn sông Đà trong điều kiện chịu tác động tổng hợp của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh, góp phần bổ sung nhận thức về tính không ổn định của hệ thống thủy văn trên các lưu vực sông xuyên biên giới.
- + Luận án phát triển cách tiếp cận mô hình hóa tích hợp, kết hợp mô hình thủy văn dựa vật lý với các nguồn dữ liệu mở, đặc biệt là dữ liệu viễn thám, qua đó nâng cao khả năng mô phỏng trong điều kiện thiếu hụt số liệu quan trắc.
- + Luận án đề xuất và áp dụng một khung phương pháp định lượng mới nhằm phân tách và đánh giá vai trò tương đối của các yếu tố khí hậu và nhân sinh đối với biến đổi dòng chảy, có xét đến bất định của mô hình.
- + Kết quả nghiên cứu góp phần hoàn thiện cơ sở lý luận trong nghiên cứu thủy văn lưu vực sông xuyên biên giới, đặc biệt trong bối cảnh gia tăng tác động điều tiết công trình ở thượng nguồn và biến đổi khí hậu.

### **1.8.2. Ý nghĩa thực tiễn**

- + Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và công cụ phục vụ mô phỏng, dự báo dòng chảy sông Đà vào Việt Nam, góp phần nâng cao hiệu quả vận hành hệ thống hồ chứa và quản lý tài nguyên nước vùng hạ lưu sông Đà thuộc Việt Nam

- + Cách tiếp cận tích hợp dữ liệu viễn thám và dữ liệu mở cho phép cải thiện thông tin đầu vào trong điều kiện thiếu dữ liệu thượng nguồn, hỗ trợ ra quyết định trong các tình huống bất định.
- + Mô hình và phương pháp đề xuất có thể hỗ trợ xây dựng và đánh giá các kịch bản điều tiết dòng chảy, cấp nước và giảm thiểu rủi ro thiên tai trên lưu vực sông Đà.
- + Quy trình và phương pháp nghiên cứu có tính khái quát, có thể áp dụng cho các lưu vực sông xuyên biên giới khác của Việt Nam trong điều kiện tương tự.

### **1.9. Cấu trúc của luận án**

Ngoài phần mở đầu và kết luận, luận án được chia làm 3 chương

#### **CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU**

Chương này tổng quan các nghiên cứu về mô phỏng dòng chảy trên các lưu vực sông xuyên biên giới, tập trung vào lưu vực sông Đà. Nội dung bao gồm phân tích đặc điểm tự nhiên, kinh tế – xã hội và hiện trạng vận hành hệ thống hồ chứa; tổng quan các phương pháp mô phỏng dòng chảy trong điều kiện thiếu dữ liệu; làm rõ vai trò của dữ liệu viễn thám, vấn đề bất định và hiệu chỉnh mô hình thủy văn. Đồng thời, chương 1 nhấn mạnh tính không dừng của chuỗi dòng chảy dưới tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh, từ đó xác định những khoảng trống trong các nghiên cứu và đề xuất hướng tiếp cận tích hợp cho luận án.

#### **CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP VÀ SỐ LIỆU SỬ DỤNG TRONG NGHIÊN CỨU**

Chương 2 trình bày phương pháp luận và hệ thống dữ liệu phục vụ nghiên cứu. Nội dung chính bao gồm lựa chọn mô hình thủy văn VIC làm công cụ mô phỏng trung tâm; phương pháp hiệu chỉnh thông số bằng thuật toán SCE-UA; khai thác dữ liệu viễn thám và dữ liệu nguồn mở để xây dựng thông số và suy luận quy luật vận hành hồ chứa thượng nguồn; các phương pháp phân tích điểm biến đổi và xu thế nhằm nhận diện tính không dừng; khung định lượng tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh; cùng với hệ thống dữ liệu đa nguồn (mưa lưới, tái phân tích, viễn thám) được xử lý đồng bộ phục vụ mô phỏng.

### CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

Chương 3 trình bày kết quả mô phỏng và phân tích biến đổi dòng chảy sông Đà vào Việt Nam. Nội dung tập trung làm rõ tính không dừng của chuỗi dòng chảy và vai trò của các điểm biến đổi; đánh giá hiệu quả mô hình VIC trong các giai đoạn trước và sau khi hệ thống hồ chứa thượng nguồn đi vào vận hành; phân tích sự khác biệt theo mùa, đặc biệt giữa mùa lũ và mùa kiệt; và lượng hóa mức độ đóng góp của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh. Kết quả cũng chứng minh hiệu quả của việc tích hợp dữ liệu viễn thám, dữ liệu nguồn mở và thông tin vận hành hồ chứa trong việc nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy trong điều kiện thiếu dữ liệu ở vùng thượng lưu vực sông Đà.

## CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU

### 1.1. Tổng quan về đối tượng và khu vực nghiên cứu

#### 1.1.1. Đặc điểm các lưu vực sông xuyên biên giới và vấn đề chia sẻ dữ liệu

Sông quốc tế còn được gọi là sông xuyên biên giới. Theo định nghĩa của Tổ chức Bảo tồn Thiên nhiên Quốc tế (IUCN), sông quốc tế là các con sông có dòng chảy (mặt và ngầm) chảy qua biên giới của một hoặc nhiều quốc gia [184].

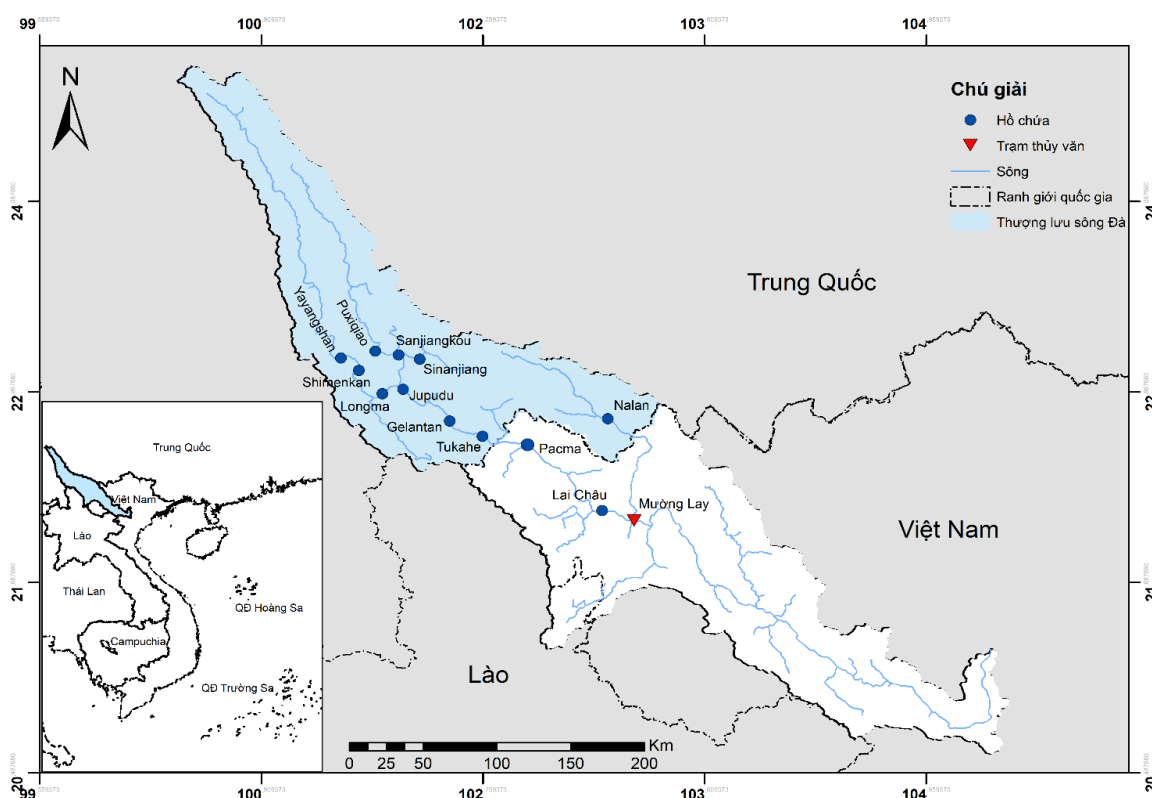
Trên thế giới hiện có khoảng 260 lưu vực sông quốc tế, chiếm gần một nửa diện tích bề mặt Trái Đất và là nơi sinh sống của khoảng 40% dân số toàn cầu. Các lưu vực sông này cung cấp xấp xỉ 60% tổng lượng nước ngọt trên thế giới [102,176], do đó đóng vai trò thiết yếu trong phát triển kinh tế - xã hội và đảm bảo an ninh nguồn nước của nhiều quốc gia. Do tầm quan trọng của các dòng sông quốc tế cũng như tính chất phức tạp trong quan hệ khai thác và sử dụng tài nguyên nước giữa các quốc gia liên quan, Liên hợp quốc đã nỗ lực xây dựng khuôn khổ pháp lý chung thông qua các hiệp ước và công ước quốc tế, trong đó nổi bật là Công ước về Luật sử dụng các nguồn nước quốc tế cho các mục đích phi giao thông thủy (UNWC) được thông qua năm 1997. Công ước này đề ra một số nguyên tắc cơ bản, đáng chú ý là nguyên tắc “sử dụng công bằng và hợp lý” và nguyên tắc “trao đổi thông tin định kỳ giữa các quốc gia liên quan về tình trạng dòng sông thuộc phạm vi quản lý của mình” [115]. Tuy nhiên, việc thực thi Công ước hiện vẫn còn nhiều hạn chế. Phần lớn các quốc gia chưa tích cực tham gia hoặc triển khai đầy đủ các nội dung cam kết, dẫn đến tình trạng khai thác và sử dụng nguồn nước sông quốc tế còn thiếu công bằng, thiếu minh bạch, đặc biệt trong việc chia sẻ thông tin và dữ liệu quan trắc. Sự thiếu hụt thông tin từ khu vực thượng nguồn khiến các quốc gia hạ nguồn gặp nhiều khó khăn trong công tác điều tiết, vận hành và bảo vệ tài nguyên nước, đồng thời chịu nhiều rủi ro và thiệt hại, đặc biệt trong mùa kiệt hoặc khi xảy ra thiên tai cực đoan.

Trong bối cảnh nhu cầu sử dụng nước gia tăng để phục vụ mục tiêu phát triển kinh tế, các quốc gia – dù có hay không có lưu vực sông quốc tế – đều gia tăng mức độ khai thác các nguồn tài nguyên nước hiện có. Điều này dẫn đến nguy cơ xung đột

nguồn nước giữa các quốc gia cùng chia sẻ một lưu vực, đồng thời làm gia tăng mức độ suy thoái của hệ sinh thái nước ngọt và toàn lưu vực. Trong thực tiễn quản lý và khai thác, các quốc gia thượng nguồn thường nắm quyền chủ động và thu được lợi ích lớn hơn từ việc điều tiết và khai thác dòng chảy, trong khi các quốc gia hạ nguồn lại dễ bị tổn thương bởi các tác động tiêu cực như thiếu nước trong mùa khô hoặc lũ lụt cực đoan trong mùa mưa.

### 1.1.2. Đặc điểm khu vực nghiên cứu: lưu vực sông Đà

#### 1.1.2.1. Vị trí địa lý



Hình 1.1. Khu vực nghiên cứu: lưu vực sông Đà

Sông Đà là phụ lưu lớn và quan trọng nhất của hệ thống sông Hồng, bắt nguồn từ vùng núi cao thuộc tỉnh Vân Nam (Trung Quốc) và chảy vào lãnh thổ Việt Nam tại xã Ka Long, huyện Mường Tè, tỉnh Lai Châu, sau đó qua các tỉnh Điện Biên, Sơn La và Hòa Bình trước khi hợp lưu với sông Thao tại Trung Hà. Sông có chiều dài khoảng 1.042 km, diện tích lưu vực khoảng 50.530 km<sup>2</sup>, trong đó phần lưu vực nằm ngoài lãnh thổ Việt Nam chiếm gần 19.000 km<sup>2</sup>, với độ chênh cao địa hình lớn

(khoảng 1.790 m), tạo điều kiện đặc biệt thuận lợi cho việc khai thác tiềm năng năng lượng nước. Phần thượng nguồn sông Đà (Lý Tiên Giang) nằm ở tọa độ từ  $100^{\circ}23'45,6'' \sim 102^{\circ}36'\text{Đ}$  và  $22^{\circ}23'52,8'' \sim 24^{\circ}56'2,4''\text{B}$  thuộc địa bàn tỉnh Vân Nam, trải rộng qua các huyện Cảnh Đông, Trấn Nguyên, Mặc Giang, Ninh Nhĩ, Giang Thành và Lục Xuân.

#### *1.1.2.2. Đặc điểm địa hình và thổ nhưỡng*

Địa hình lưu vực sông Đà có sự phân hóa mạnh theo không gian, với khoảng 65% diện tích là vùng núi, 26% là đồi và phần còn lại là đồng bằng. Đặc điểm địa hình bị chia cắt mạnh, độ dốc lớn cùng mạng lưới sông suối dày đặc đã hình thành tiềm năng thủy điện lớn trên toàn lưu vực. Khu vực thượng nguồn có địa hình phức tạp với các dãy núi cao, thung lũng hẹp và các bồn địa xen kẽ, tạo điều kiện hình thành dòng chảy tập trung nhanh. Ở trung lưu, địa hình đặc trưng bởi núi cao, thung lũng sâu, độ dốc lớn và bờ sông hiểm trở. Trong khi đó, khu vực hạ lưu có địa hình thoải hơn, thung lũng mở rộng và dòng chảy ổn định hơn [2, 4].

Về thổ nhưỡng, lưu vực có sự đa dạng về loại đất, trong đó chủ yếu là các nhóm đất đỏ bazan, đất Acrisols, Cambisols và Luvisols theo phân loại của cơ sở dữ liệu đất toàn cầu (HWSD). Các loại đất này có đặc tính khác nhau về độ phì, khả năng giữ nước và mức độ phong hóa, ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình hình thành dòng chảy và xói mòn trong lưu vực.

#### *1.1.2.3. Đặc điểm khí hậu*

Lưu vực sông Đà nằm trong vùng khí hậu gió mùa cận nhiệt đới khu vực Nam Á, có độ che phủ thực vật cao và nguồn tài nguyên thiên nhiên phong phú. Lượng mưa trung bình năm thường vượt 1.500 mm, cùng với điều kiện nhiệt ẩm tương đối thuận lợi. Tuy nhiên, do sự phân hóa mạnh về địa hình và cao độ, cũng như ảnh hưởng của các yếu tố nguồn ẩm, khí hậu trong lưu vực có tính phân dị rõ rệt theo không gian. Đặc trưng khí hậu thể hiện qua mùa đông – xuân khô lạnh và mùa hè – thu ẩm ướt, với biên độ nhiệt không quá lớn nhưng sự phân hóa theo độ cao rất rõ nét.

Khu vực thượng nguồn như Cảnh Đông và Trấn Nguyên có lượng mưa trung bình năm khoảng 750–1.100 mm, riêng vùng núi cao có lượng mưa lớn hơn. Ở trung và hạ lưu, đặc biệt tại Ninh Nhĩ, Mặc Giang và Giang Thành, lượng mưa tăng lên đáng kể, dao động từ 1.200 đến 2.250 mm/năm. Mưa tập trung chủ yếu trong mùa mưa từ tháng 5 đến tháng 10, chiếm khoảng 85% tổng lượng mưa năm, với xu thế gia tăng từ thượng nguồn xuống hạ lưu [2].

#### *1.1.2.4. Đặc điểm dòng chảy*

Mùa lũ trên lưu vực sông Đà thường tập trung từ tháng 6 đến tháng 10, trong khi mùa nước cạn kéo dài từ tháng 2 đến tháng 5; giai đoạn chuyển tiếp từ tháng 11 đến tháng 1 năm sau có chế độ dòng chảy ở mức trung bình. Lũ lụt chủ yếu hình thành do các đợt mưa lớn diện rộng, với nguồn ẩm chính đến từ các khối không khí ẩm và ẩm xuất phát từ vịnh Bengal ở phía tây nam và biển Đông ở phía đông nam lưu vực. Do chịu chi phối mạnh bởi chế độ mưa, đặc biệt là mưa mùa và các hình thái thời tiết cực đoan, biến động lũ giữa các năm trên sông nhìn chung không quá lớn so với các lưu vực có tính bất ổn cao hơn.

Quá trình lũ trên lưu vực có đặc trưng điển hình của lưu vực miền núi, với thời gian truyền lũ ngắn, tốc độ dâng nhanh, đỉnh lũ nhọn và thời gian duy trì lũ không dài. Lượng nước lũ thường tập trung trong một số đợt chính, phản ánh tính tập trung cao của dòng chảy trong mùa mưa. Đỉnh lũ lớn nhất trong năm thường xuất hiện trong khoảng từ tháng 7 đến tháng 9, chiếm khoảng 70–75% tổng lượng dòng chảy mùa lũ.

Ngoài ra, sự phân hóa rõ rệt giữa mùa lũ và mùa kiệt dẫn đến chế độ dòng chảy có tính mùa sâu sắc, với sự chênh lệch lớn giữa lưu lượng cực đại và cực tiểu trong năm. Trong những năm gần đây, dưới tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động của hệ thống hồ chứa thượng nguồn, chế độ dòng chảy có xu hướng biến đổi theo hướng giảm đỉnh lũ và tăng dòng chảy mùa kiệt, làm thay đổi quy luật phân bố dòng chảy theo thời gian [2, 4].

#### *1.1.2.5. Hệ thống hồ chứa*

Tài nguyên nước thuộc phần thượng nguồn sông Đà trên lãnh thổ Trung Quốc (tỉnh Vân Nam) đã được khai thác rất mạnh mẽ với tốc độ rất nhanh trong thời gian qua, thông qua việc xây dựng hệ thống thủy điện bậc thang trên dòng chính và dòng nhánh. Chuỗi hồ chứa chính gồm: Yayangshan, Shimenkan, Longma, Jufudu, Gelantan và Tukahe, cùng với một số công trình trên các phụ lưu. Các hồ chứa này chủ yếu phục vụ mục tiêu phát điện, với quy mô dung tích từ nhỏ đến trung bình và chế độ điều tiết chủ yếu theo mùa, kết hợp với điều tiết ngắn hạn theo tuần và ngày. Tổng dung tích trữ của hệ thống hồ chứa đạt khoảng 2,84 tỷ m<sup>3</sup>, phần lớn các công trình được đưa vào vận hành trong giai đoạn 2005–2010 (Bảng 3.9). Trong chuỗi bậc thang này, hồ Tukahe (Thổ Khả Hà) là công trình cuối cùng trên dòng chính sông Lý Tiên trước khi dòng chảy chuyển sang lãnh thổ Việt Nam.

#### *1.1.2.6. Kinh tế – xã hội*

Khu vực thượng nguồn lưu vực sông Đà thuộc tỉnh Vân Nam có quy mô dân số khoảng 1,28 triệu người, với tổng sản phẩm kinh tế đạt xấp xỉ 35 tỷ nhân dân tệ. Hoạt động kinh tế chủ yếu dựa vào nông – lâm nghiệp, với giá trị sản xuất nông, lâm, chăn nuôi và thủy sản đạt khoảng 16,3 tỷ nhân dân tệ[2]. Không gian kinh tế có sự phân hóa theo lưu vực. Ở thượng nguồn (Cảnh Đông, Trấn Nguyên), sản xuất nông nghiệp giữ vai trò chủ đạo với các sản phẩm chính như lương thực, mía đường và cây ăn quả nhiệt đới. Khu vực trung lưu (Mặc Giang) ngoài các cây lương thực truyền thống còn phát triển mạnh các sản phẩm đặc thù như cà phê, cánh kiến đỏ và các loại hạt, trong đó sản lượng cánh kiến đỏ chiếm vị trí hàng đầu. Trong khi đó, khu vực hạ lưu (Giang Thành, Lục Xuân) có mức độ phát triển kinh tế thấp hơn, nhưng lại có tiềm năng lớn về tài nguyên sinh thái, với các sản phẩm chủ lực như chè phổ nhĩ, dược liệu, cây ăn quả và cao su.

Khu vực thượng nguồn sông Đà bao gồm các đơn vị hành chính chủ yếu thuộc thành phố Phổ Nhĩ (tỉnh Vân Nam), gồm các huyện Cảnh Đông, Trấn Nguyên, Mặc Giang, Ninh Nhĩ, Giang Thành và Lục Xuân. Đây là khu vực có đặc điểm đa dân tộc,

với nhiều nhóm dân tộc thiểu số sinh sống như Hà Nhì, Di, Thái, Lahu, Va, Blang và Dao, trong đó tỷ lệ dân tộc thiểu số chiếm trên 50% dân số. Mật độ dân cư trong lưu vực tương đối thấp, phân bố không đồng đều và tập trung chủ yếu ở các khu vực có điều kiện địa hình thuận lợi. Trình độ phát triển kinh tế – xã hội còn hạn chế, sinh kế chủ yếu dựa vào sản xuất nông – lâm nghiệp. Nhìn chung, khu vực chưa phát triển mạnh về công nghiệp và dịch vụ, đồng thời các yếu tố hạ tầng và văn hóa – xã hội còn ở mức thấp so với các khu vực phát triển hơn trong tỉnh [2].

### ***1.1.3. Những thách thức trong quản lý và dự báo dòng chảy sông Đà vào Việt Nam***

Việt Nam là quốc gia nằm ở hạ lưu của 5 trong số 8 hệ thống sông lớn có tính chất xuyên quốc gia. Trong đó, sông Mê Công là lưu vực lớn nhất với 92% diện tích nằm ngoài lãnh thổ Việt Nam; sông Hồng có 51% diện tích thuộc Trung Quốc; sông Đồng Nai có 17% lưu vực nằm trong lãnh thổ Campuchia; sông Mã và sông Cả lần lượt có khoảng 38% và 35% lưu vực thuộc nước bạn Lào (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2020). Trong số đó, chỉ có lưu vực sông Mê Công có cơ chế hợp tác chính thức giữa các quốc gia thông qua Ủy hội sông Mê Công quốc tế (MRC). Đối với lưu vực sông Hồng – sông Đà, mặc dù là một lưu vực sông quốc tế, cho đến nay chưa tồn tại bất kỳ thỏa thuận song phương hay hiệp định hợp tác nào giữa Việt Nam và Trung Quốc liên quan đến chia sẻ tài nguyên nước.

Thực tế cho thấy, việc khai thác, vận hành và điều tiết dòng chảy của Trung Quốc trên phần thượng lưu sông Hồng – sông Đà chủ yếu mang tính đơn phương, tập trung vào mục tiêu khai thác tối đa nguồn lợi nội địa, trong khi ít quan tâm đến tác động lan truyền xuống hạ lưu phía Việt Nam. Ở chiều ngược lại, Việt Nam – tuy ít có khả năng tác động đến thượng nguồn – cũng vận hành khai thác dòng chảy ở hạ lưu một cách đơn phương, do thiếu các thông tin liên quan đến lưu lượng, chế độ xả hồ, và nhu cầu sử dụng nước phía Trung Quốc.

Như vậy, mặc dù cùng chia sẻ một dòng sông, có chung lợi ích trong việc khai thác và bảo vệ tài nguyên nước lưu vực sông Hồng – sông Đà, việc thiếu cơ chế chia sẻ thông tin, phối hợp vận hành hoặc phân tích lợi ích – tổn hại hai chiều giữa Việt

Nam và Trung Quốc là một tồn tại lớn. Trong bối cảnh đó, quốc gia ở hạ lưu như Việt Nam có thể phải chịu tác động lớn hơn cả về kinh tế, môi trường lẫn an ninh nguồn nước.

#### ***1.1.4. Tổng quan các nghiên cứu mô phỏng dòng chảy trên lưu vực sông Hồng – sông Đà***

Mô phỏng dòng chảy trên lưu vực sông Hồng – sông Đà đã được nghiên cứu theo nhiều hướng tiếp cận khác nhau theo các mục đích khác nhau, phản ánh quá trình phát triển của khoa học tính toán và các phương pháp trong thủy văn. Sự chuyển dịch này gắn liền với yêu cầu nâng cao độ chính xác trong mô phỏng và dự báo dòng chảy, trong bối cảnh chế độ thủy văn ngày càng chịu chi phối mạnh bởi các hoạt động nhân sinh, đặc biệt là hệ thống hồ chứa bậc thang trên sông Đà

Ở giai đoạn đầu, các nghiên cứu chủ yếu sử dụng các phương pháp thống kê và thực nghiệm nhằm thiết lập mối quan hệ giữa mưa và dòng chảy. Nghiên cứu của Nguyễn Viết Thi và cộng sự (1994) đã áp dụng hồi quy nhiều biến và phân tích tương quan để dự báo tổng lượng và đỉnh lũ đến hồ Hòa Bình [10]. Cách tiếp cận này có ưu điểm là đơn giản, phù hợp trong điều kiện hạn chế về số liệu, nhưng phụ thuộc mạnh vào giả định tính dừng của chuỗi số liệu và không phản ánh được các quá trình vật lý trong lưu vực, khó áp dụng khi điều kiện khí hậu và hoạt động nhân sinh tác động mạnh đến dòng chảy.

Bước phát triển tiếp theo là việc ứng dụng các mô hình thủy văn thông số tập trung (lumped models) như NAM, Tank. Các nghiên cứu của Nguyễn Viết Thi (2008) và Nguyễn Lan Châu (2006) cho thấy việc kết hợp mô hình mưa – dòng chảy với mô hình thủy lực (MIKE 11, IMECH-1D) có thể mô phỏng tương đối tốt quá trình hình thành và lan truyền lũ trên hệ thống sông [1, 11]. Cách tiếp cận này cho phép liên kết mô phỏng từ lưu vực đến mạng sông, qua đó phục vụ trực tiếp công tác dự báo và vận hành hồ chứa. Tuy nhiên, do bản chất tổng hợp của các mô hình thông số tập trung, tính không đồng nhất theo không gian của các quá trình thủy văn chưa được phản ánh đầy đủ, đặc biệt đối với các lưu vực lớn và phức tạp như sông Đà.

Nhằm khắc phục những hạn chế nêu trên, các mô hình thủy văn bán phân bố và phân bố đã được đưa vào ứng dụng trên lưu vực sông Hồng, tiêu biểu là mô hình MARINE trong nghiên cứu của Bùi Đình Lập (2017). Các mô hình này cho phép xem xét sự khác biệt theo không gian của các yếu tố như địa hình, thổ nhưỡng và thảm phủ, qua đó nâng cao khả năng mô phỏng dòng chảy trên toàn lưu vực. Việc kết hợp với các phương pháp diễn toán dòng chảy như Muskingum–Cunge và kỹ thuật đồng hóa dữ liệu (lọc Kalman) cũng góp phần cải thiện chất lượng dự báo [8]. Tuy nhiên, hiệu quả của các mô hình bán phân bố và phân bố phụ thuộc lớn vào mức độ đầy đủ và độ tin cậy của dữ liệu đầu vào, trong khi đây lại là một trong những hạn chế cơ bản đối với lưu vực sông Hồng – sông Đà.

Song song với đó, một hướng tiếp cận quan trọng là tích hợp mô phỏng dòng chảy với vận hành hệ thống hồ chứa. Các nghiên cứu của Nguyễn Đức Điện (2020) và Vũ Thị Minh Huệ (2017) cho thấy việc đưa quy trình vận hành hồ vào mô hình giúp cải thiện đáng kể khả năng tái hiện dòng chảy hạ du, đặc biệt trong điều kiện dòng chảy chịu ảnh hưởng mạnh của điều tiết [3, 6]. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp, vận hành hồ vẫn được biểu diễn dưới dạng điều kiện biên hoặc các kịch bản giả định, chưa được tích hợp động và liên kết chặt chẽ với dự báo dòng chảy đến hồ.

Một đặc điểm nổi bật của lưu vực sông Hồng – sông Đà là tính xuyên biên giới, với phần lớn diện tích lưu vực sông Đà nằm ngoài lãnh thổ Việt Nam. Điều này dẫn đến tình trạng thiếu hụt nghiêm trọng số liệu khí tượng và thủy văn ở thượng nguồn, làm suy giảm độ tin cậy của các mô hình, đặc biệt là các mô hình thông số tập trung [11]. Trong bối cảnh đó, trong nghiên cứu Đặng Đình Khá (2021) đã đề xuất sử dụng dữ liệu vệ tinh và dữ liệu tái phân tích nhằm thay thế hoặc bổ sung số liệu quan trắc, chứng minh tính đúng đắn của hướng tiếp cận mới trong cải thiện dữ liệu đầu vào cho mô hình [7].

Gần đây, xu hướng tích hợp giữa mô hình dựa vật lý và mô hình dựa dữ liệu ngày càng được quan tâm. Nghiên cứu của Nguyễn Đăng Giáp (2025) đã xây dựng

các mô hình tích hợp phục vụ dự báo dòng chảy lũ, trong đó kết hợp mô hình học máy RNN để dự báo dòng chảy thượng nguồn xuyên biên giới, mô hình HEC-HMS cho khu giữa và mô hình thủy lực HEC-RAS để diễn toán dòng chảy. Đồng thời, mô hình tích hợp thêm mô-đun vận hành hồ chứa dựa trên hệ suy luận mờ nhằm mô phỏng ảnh hưởng của điều tiết. Kết quả cho thấy hệ thống có khả năng mô phỏng tốt quá trình lũ, cải thiện đáng kể độ chính xác dự báo, đặc biệt trong việc xác định thời gian xuất hiện đỉnh lũ và hình dạng đường quá trình lũ, với thời hạn dự báo từ 24 đến 72 giờ [4].

Tổng hợp các nghiên cứu cho thấy mô phỏng dòng chảy trên lưu vực sông Hồng – sông Đà đã phát triển theo hướng ngày càng tích hợp và chi tiết hơn, từ các phương pháp thống kê đến các mô hình dựa vật lý, mô hình dựa dữ liệu và các hệ thống có xét đến vận hành hồ chứa. Tuy nhiên, trong thực tế, chế độ dòng chảy trên lưu vực đã và đang biến đổi mạnh mẽ dưới tác động tổng hợp của các yếu tố khí hậu và hoạt động nhân sinh, đặt ra thách thức đối với các phương pháp mô phỏng truyền thống. Trong bối cảnh đó, mặc dù một số nghiên cứu đã bước đầu khai thác các nguồn dữ liệu thay thế như dữ liệu vệ tinh và tái phân tích, việc tích hợp hiệu quả các nguồn dữ liệu này nhằm bổ sung thông tin thiếu hụt và làm rõ đặc trưng điều tiết của các hồ chứa thượng nguồn vẫn còn hạn chế. Các nghiên cứu hiện nay phần lớn chưa xem xét đầy đủ vai trò của các quá trình điều tiết hồ chứa và khai thác nước trong cấu trúc mô hình, dẫn đến sai số đáng kể khi mô phỏng dòng chảy. Những hạn chế này cho thấy nhu cầu cần thiết phải phát triển các cách tiếp cận mô phỏng tích hợp hơn, trong đó kết hợp chặt chẽ giữa cơ sở vật lý của quá trình thủy văn, thông tin từ các nguồn dữ liệu mở và các yếu tố nhân sinh, nhằm nâng cao độ tin cậy của mô phỏng dòng chảy trên lưu vực sông Hồng – sông Đà.

## **1.2. Tổng quan các nghiên cứu tìm điểm biến đổi trong thống kê thủy văn, khí hậu**

Trong lĩnh vực thủy văn và khí hậu, phân tích và thiết kế thủy văn đóng vai trò nền tảng cho các hoạt động kỹ thuật và quản lý tài nguyên nước [47, 143]. Truyền

thống, các chuỗi dữ liệu thủy văn thường được giả định là dừng (stationary) và tuân thủ các điều kiện thống kê nhất quán [134]. Tuy nhiên, trong những thập kỷ gần đây, hệ thống thủy văn ngày càng thể hiện sự biến động rõ rệt, dưới tác động tổng hợp của biến đổi khí hậu toàn cầu [18] và các hoạt động của con người như xây dựng hạ tầng nước, điều tiết dòng chảy, cải tạo sông ngòi và thay đổi sử dụng đất [105].

Một trong những biểu hiện điển hình của biến động thủy khí hậu là sự xuất hiện của các điểm biến đổi – tức thời điểm mà đặc tính thống kê của chuỗi thời gian có sự gián đoạn, phản ánh sự chuyển đổi nhanh chóng từ trạng thái này sang trạng thái khác. Các điểm biến đổi có thể là hậu quả của yếu tố vật lý (ví dụ như xây dựng đập, thay đổi lớp phủ đất), kỹ thuật (thay đổi thiết bị đo đạc, vị trí quan trắc), hoặc khí hậu (biến đổi quy luật mưa, nhiệt độ) [101, 175]. Việc phát hiện và xác định chính xác các điểm biến đổi có ý nghĩa lớn trong việc đánh giá tác động của biến đổi khí hậu và hiệu chỉnh các mô hình thiết kế thủy văn [38, 71].

Trên thực tế, việc đồng nhất chuỗi thời gian – tức kiểm tra xem liệu dữ liệu có bị ảnh hưởng bởi các điểm biến đổi không mong muốn – là điều kiện tiên quyết trước khi tiến hành phân tích xu thế hay thiết lập mô hình khí hậu. Các nghiên cứu như [27, 43, 61] nhấn mạnh rằng xu thế tuyến tính chỉ đáng tin cậy khi chuỗi thời gian không có điểm gián đoạn. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp, các điểm biến đổi không được ghi chép trong siêu dữ liệu, và do đó, khó đảm bảo tính đồng nhất cho các chuỗi số liệu dài hạn.

Nhằm phát hiện các điểm biến đổi trong chuỗi số liệu thủy khí hậu, nhiều phương pháp đã được phát triển và áp dụng. Chúng có thể chia thành hai nhóm chính: kiểm định thông số và kiểm định phi thông số [58]. Các phương pháp thông số như kiểm định T động [174] hay kiểm định F động yêu cầu giả định phân phối xác suất cụ thể và ước lượng thông số từ dữ liệu quan trắc [140]. Ngược lại, các phương pháp phi thông số như kiểm định Mann-Kendall [81] hay kiểm định Pettitt [122] không phụ thuộc vào giả định phân phối và thường được ưu tiên sử dụng do tính linh hoạt cao.

Mặc dù đã có nhiều phương pháp được đề xuất, song hiệu quả và độ tin cậy của các phương pháp phát hiện điểm biến đổi vẫn còn nhiều tranh cãi [76, 94]. Ví dụ, các kiểm định Pettitt và Buishand thường nhạy hơn trong việc phát hiện các điểm biến đổi nằm ở giữa chuỗi thời gian, trong khi kiểm định SNHT có xu hướng phát hiện tốt hơn các điểm biến đổi xảy ra gần đầu hoặc cuối chuỗi, cũng như tại các vị trí có biến động lớn của dữ liệu [32, 78]. Kiểm định Mann-Kendall không đáng tin cậy nếu chuỗi thời gian chứa nhiều điểm biến đổi [53]. Ngoài ra, một số phương pháp như phân tích phạm vi điều chỉnh (adjusted range analysis) chủ yếu dựa trên sự khác biệt về đặc tính thống kê giữa hai đoạn chuỗi trước và sau điểm biến đổi [100].

Một số nghiên cứu gần đây đã tập trung so sánh các phương pháp phát hiện điểm biến đổi để tìm ra các cách tiếp cận phù hợp hơn trong bối cảnh chuỗi khí hậu không đồng nhất. Các hướng dẫn của Tổ chức Khí tượng Thế giới (WMO) đã liệt kê ít nhất 14 phương pháp kiểm định tính đồng nhất của chuỗi khí hậu (Llanso, 2003), và nhiều nghiên cứu đã khảo sát, sửa đổi hoặc đánh giá hiệu suất của các phương pháp này, trong đó có Easterling & Peterson (1995), Ducré-Robitaille (2003), Rodionov (2004), DeGaetano (2006). Tuy nhiên, do các phương pháp thường được thiết kế cho các mục tiêu hoặc bối cảnh khác nhau, việc so sánh trực tiếp là không đơn giản và đòi hỏi đặt chúng trên một nền tảng phân tích chung để làm rõ điểm mạnh – điểm yếu của từng kỹ thuật [35, 42, 43, 136].

Trong bối cảnh chuỗi thủy khí hậu ngày càng thể hiện tính không dừng, việc phát hiện điểm biến đổi (change point) đóng vai trò then chốt nhằm xác định xem liệu một sự thay đổi đáng kể về đặc tính thống kê của chuỗi thời gian có xảy ra hay không. Trên thực tế, các kiểm định tính đồng nhất thường được sử dụng như một công cụ cơ bản để phát hiện một hoặc nhiều điểm gián đoạn trong chuỗi số liệu. Tuy nhiên, do sự phức tạp của dữ liệu thủy văn – bao gồm nhiễu, ngoại lai, tự tương quan và ảnh hưởng đa yếu tố – không tồn tại một phương pháp duy nhất có thể đảm bảo hiệu quả tối ưu trong mọi trường hợp. Do đó, kết quả phát hiện điểm biến đổi có thể khác nhau đáng kể giữa các phương pháp, đặc biệt trong các chuỗi dài hạn và không đồng nhất. Chính vì vậy, xu hướng hiện nay không phải là tìm kiếm một phương pháp “tốt nhất”,

mà là kết hợp nhiều phương pháp phổ biến nhằm tăng độ tin cậy và tính nhất quán của kết quả phân tích. Trong nghiên cứu này, năm kiểm định tính đồng nhất của chuỗi thời gian được lựa chọn bao gồm: kiểm định Pettitt, kiểm định tính đồng nhất chuẩn (SNHT), kiểm định phạm vi Buishand, kiểm định tỷ lệ khả năng của Buishand và kiểm định U của Buishand. Đây là các phương pháp đã được sử dụng rộng rãi trong phân tích chuỗi khí tượng – thủy văn và được khuyến nghị trong nhiều hướng dẫn quốc tế.

### **1.3. Tổng quan phân tích xu thế trong chuỗi thủy văn không dừng**

Phân tích xu thế là một nội dung quan trọng trong nghiên cứu chuỗi thời gian khí tượng – thủy văn, nhằm nhận diện các biến đổi dài hạn của các đặc trưng như lượng mưa, dòng chảy và các chỉ số cực trị. Tuy nhiên, cho đến nay vẫn chưa tồn tại một định nghĩa thống nhất về “xu thế”, cũng như chưa có phương pháp duy nhất có thể trích xuất xu thế tối ưu cho mọi loại dữ liệu. Trong nhiều nghiên cứu, xu thế thường được hiểu là thành phần biến đổi chậm theo thời gian và có thể được xấp xỉ bằng một hàm đơn điệu hoặc gần đơn điệu trong một khoảng thời gian nhất định.

Trong thủy văn truyền thống, các phương pháp phân tích thường dựa trên giả định tính dừng (stationarity), theo đó các đặc trưng thống kê như kỳ vọng và phương sai được coi là không đổi theo thời gian. Giả định này là nền tảng trong thiết kế và quản lý tài nguyên nước trong nhiều thập kỷ [105]. Tuy nhiên, dưới tác động của biến đổi khí hậu và các hoạt động nhân sinh, giả định này ngày càng trở nên không phù hợp. Milly và cộng sự (2008) đã chỉ ra rằng “stationarity is dead”, nhấn mạnh rằng các hệ thống thủy văn không còn dao động trong một miền biến thiên ổn định do ảnh hưởng của biến đổi khí hậu toàn cầu [105]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng các yếu tố như biến đổi khí hậu, thay đổi sử dụng đất và phát triển hạ tầng thủy lợi có thể làm biến đổi đáng kể cấu trúc thống kê của chuỗi thủy văn, dẫn đến tính không dừng ngày càng rõ rệt [151]. Trong bối cảnh đó, việc lựa chọn và phát triển các phương pháp phân tích xu thế phù hợp với chuỗi không dừng trở thành một yêu cầu cấp thiết.

Các phương pháp phân tích xu thế trong thủy văn hiện nay có thể được chia thành hai nhóm chính: phương pháp phi thông số và phương pháp thông số. Nhóm phương pháp phi thông số, tiêu biểu là kiểm định Mann–Kendall kết hợp với kiểm định Sen's Slope, được sử dụng rộng rãi do không yêu cầu giả định về phân phối dữ liệu và có khả năng chống chịu tốt với nhiễu và giá trị ngoại lai. Nghiên cứu của Stojković và cộng sự (2014) đã áp dụng kiểm định Mann–Kendall để đánh giá xu thế dòng chảy sông Sava trong lưu vực Danube, đồng thời chỉ ra sự tồn tại của chu kỳ dài hạn khoảng 40 năm ảnh hưởng đáng kể đến xu thế tổng thể [149]. Tuy nhiên, các phương pháp này chủ yếu phục vụ phát hiện xu thế, trong khi khả năng mô hình hóa định lượng còn hạn chế.

Ngược lại, các phương pháp thông số, đặc biệt là hồi quy tuyến tính và các biến thể của nó, được sử dụng để lượng hóa xu thế và mô tả mối quan hệ giữa biến thủy văn và thời gian. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của phương pháp này trong việc phân tích và dự báo các biến khí tượng – thủy văn. Didarul và cộng sự (2018) đã chỉ ra xu thế gia tăng đáng kể của nhiệt độ tại Bangladesh thông qua phân tích dữ liệu quan trắc kết hợp với mô hình khí hậu CMIP5 [37], trong khi Ibrahim và cộng sự (2013) ghi nhận xu thế suy giảm lượng mưa tại khu vực Sahel trong nhiều thập kỷ [69]. Bên cạnh đó, các mô hình hồi quy tuyến tính đa biến cũng được áp dụng trong các lĩnh vực liên quan, như nghiên cứu của Babatunde và cộng sự (2019) về ảnh hưởng của khí hậu đến năng suất nông nghiệp [23], hay mô hình hồi quy tuyến tính bội tăng cường (EMLRM) của Shaker Reddy và cộng sự (2019) trong dự báo lượng mưa theo mùa [141].

Ngoài các phương pháp truyền thống, một số hướng tiếp cận hiện đại dựa trên phân tích đa thang thời gian và xử lý tín hiệu cũng đã được đề xuất nhằm phân tích các chuỗi phi tuyến và không dừng. Ví dụ, phương pháp hợp nhất dữ liệu không gian – thời gian dựa trên hồi quy tuyến tính nâng cao (ELRFM) do Bai và cộng sự (2020) đề xuất cho thấy khả năng nắm bắt tốt các biến đổi chi tiết và nâng cao độ chính xác dự báo so với các phương pháp truyền thống [24]. Tuy nhiên, các phương pháp này

thường có độ phức tạp cao và khó diễn giải về mặt vật lý, do đó chưa được áp dụng rộng rãi trong thực tiễn quản lý tài nguyên nước.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về phân tích xu thế trong thủy văn, vẫn tồn tại một số hạn chế chính. Thứ nhất, nhiều nghiên cứu chưa xem xét đầy đủ tính không dừng, đặc biệt là sự tồn tại của các điểm biến đổi làm thay đổi cấu trúc chuỗi theo thời gian. Thứ hai, các phương pháp phi thông số chủ yếu dừng ở phát hiện xu thế, trong khi hồi quy tuyến tính thường giả định một xu thế đồng nhất cho toàn bộ chuỗi, chưa phản ánh được sự biến đổi theo từng giai đoạn. Thứ ba, các phương pháp hiện đại tuy xử lý tốt chuỗi không dừng nhưng còn phức tạp và khó ứng dụng thực tiễn. Từ đó, NCS lựa chọn hướng tiếp cận kết hợp giữa phương pháp thống kê phát hiện điểm biến đổi và hồi quy tuyến tính theo từng giai đoạn. Cách tiếp cận này cho phép vừa nhận diện chính xác sự thay đổi cấu trúc của chuỗi, vừa mô hình hóa xu thế một cách đơn giản, rõ ràng và phù hợp với điều kiện chuỗi thủy văn không dừng.

#### **1.4. Tổng quan nghiên cứu mô phỏng dòng chảy trong điều kiện thiếu thông tin, dữ liệu**

Mô phỏng dòng chảy là một vấn đề then chốt trong thủy văn, đặc biệt tại các lưu vực sông thiếu hoặc không có trạm quan trắc. Theo Sivapalan và cộng sự (2003), các lưu vực không có trạm quan trắc (ungauged basins) là những nơi bị hạn chế nghiêm trọng về dữ liệu khí tượng và thủy văn, dẫn đến việc các nghiên cứu liên quan đến tài nguyên nước, lũ và hạn thường có độ tin cậy thấp [77]. Sáng kiến “Dự báo thủy văn tại các lưu vực không có trạm quan trắc” (PUB) do Hiệp hội Khoa học Thủy văn Quốc tế (IAHS) phát động giai đoạn 2003–2012 đã đặt nền móng cho việc giải quyết bài toán thiếu dữ liệu này bằng cách xem xét các yếu tố không chắc chắn trong mô phỏng [145]. Một số nghiên cứu sớm hơn như Ibrahim và Cordery (1995) cũng đã cố gắng khắc phục việc thiếu dữ liệu bằng cách phân loại lưu vực dựa trên đặc điểm địa hình và địa mạo thay vì dựa hoàn toàn vào phương pháp hồi quy truyền thống [70].

Số lượng trạm quan trắc thủy văn hạn chế là một trong những rào cản lớn đối với việc dự báo chính xác dòng chảy trong sông, đặc biệt tại các lưu vực thiếu dữ liệu [108]. Dù áp dụng bất kỳ phương pháp dự báo nào – từ mô hình dựa vật lý cho đến mô hình học máy – kết quả dự báo dòng chảy vẫn cần được kiểm chứng dựa trên dữ liệu quan trắc thực tế [109]. Khi không có số liệu đo đạc trực tiếp tại vị trí nghiên cứu, việc đánh giá độ chính xác mô hình thường dựa vào dữ liệu từ các trạm quan trắc lân cận, đóng vai trò như nguồn tham chiếu để đối chiếu kết quả mô phỏng. Gần đây, một cách tiếp cận ngày càng phổ biến là kết hợp dữ liệu lớn (big data) thu thập từ nhiều lưu vực khác nhau với các kỹ thuật khu vực hóa (regionalization) để dự báo dòng chảy cho các lưu vực thiếu dữ liệu [84, 85]. Phương pháp này đã chứng minh được hiệu quả trên quy mô lớn, điển hình qua các nghiên cứu sử dụng bộ dữ liệu CAMELS-US với 671 lưu vực tại Hoa Kỳ [15] hoặc CAMELS-GB tại Vương quốc Anh [33]. Phương pháp khu vực hóa cho phép nội suy các đặc tính thủy văn cho các lưu vực chưa được đo đạc thông qua việc khai thác mối tương quan về địa hình, địa chất, đặc điểm khí hậu và sử dụng đất giữa các lưu vực lân cận [55, 130]. Đây là một giải pháp hữu hiệu trong bối cảnh thiếu dữ liệu quan trắc đầu vào, cho phép xây dựng mô hình dự báo dòng chảy tại những vị trí chưa có hoặc rất ít dữ liệu đo đạc thực tế. Tuy nhiên, độ tin cậy của kết quả dự báo phụ thuộc lớn vào mức độ tương đồng về đặc điểm tự nhiên và nhân sinh giữa lưu vực mục tiêu và các lưu vực tham chiếu. Khi sự tương đồng này cao, mô hình có thể mang lại độ chính xác chấp nhận được trong cả mô phỏng và dự báo. Ngược lại, nếu các lưu vực được dùng để chuyển giao thông tin có khác biệt đáng kể về điều kiện địa hình, khí hậu hoặc ảnh hưởng của con người, thì kết quả nội suy có thể không đại diện đúng cho quá trình thủy văn thực tế tại lưu vực chưa đo đạc. Trong trường hợp này, sai số dự báo có thể gia tăng đáng kể, ảnh hưởng đến hiệu lực của các quyết định quản lý tài nguyên nước dựa trên mô hình. Do đó, phương pháp khu vực hóa mặc dù khả thi về mặt kỹ thuật, nhưng cần được ứng dụng một cách thận trọng, có đánh giá định lượng về mức độ tương đồng giữa các lưu vực và tốt nhất nên kết hợp với các nguồn thông tin bổ sung (ví dụ như dữ liệu vệ tinh, sản phẩm tái phân tích khí hậu) để nâng cao độ tin cậy cho kết quả dự báo.

Một trong những thách thức lớn nhất trong mô phỏng dòng chảy hiện nay chính là sự can thiệp của con người vào chế độ dòng chảy tự nhiên. Các tác động nhân sinh thường mang tính chủ quan, khó dự đoán và có khả năng làm thay đổi đáng kể quy luật thủy văn. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, mức độ ảnh hưởng từ hoạt động của con người thậm chí còn vượt qua cả tác động của biến đổi khí hậu đối với chế độ dòng chảy [30,173]. Các thay đổi sử dụng đất làm biến dạng quá trình sinh thủy theo xu thế ngày càng rõ rệt [72], trong khi việc khai thác dòng chảy mặt phục vụ tưới tiêu đã trực tiếp làm giảm lưu lượng sông [31]. Việc phân bổ và điều tiết nước mặt cũng có thể làm gia tăng hoặc giảm mức độ nghiêm trọng của các đợt hạn hán thủy văn [163]. Ngoài ra, các biện pháp quản lý như quy định dòng chảy tối thiểu, gia tăng khai thác nước ngầm hay phục hồi hệ sinh thái đều tác động mạnh đến tần suất và mức độ kéo dài của dòng chảy thấp [165]. Trong số đó, vận hành hồ chứa đa mục tiêu là một trong những yếu tố gây biến động mạnh nhất và khó mô tả nhất trong mô hình thủy văn. Các quyết định xả – tích nước thường không tuân theo quy luật tự nhiên, mà phụ thuộc vào nhu cầu điện, phòng lũ, cấp nước hay thậm chí là mục tiêu kinh tế – xã hội của từng thời kỳ [26, 87].

Thách thức này trở nên nghiêm trọng hơn ở các lưu vực sông liên quốc gia, nơi thông tin vận hành hồ chứa của các quốc gia thượng nguồn thường được xếp vào diện tài liệu mật theo chính sách tài nguyên nước quốc gia. Điều này dẫn tới tình trạng thiếu hụt nghiêm trọng dữ liệu xả hồ, quy luật vận hành và số liệu thủy văn nền tảng, gây khó khăn cho việc đánh giá tác động nhân sinh và xây dựng mô hình dự báo đáng tin cậy. Trong bối cảnh đó, các mô hình học máy và mô hình dữ liệu (data-driven models) được xem là một hướng tiếp cận tiềm năng và đã được áp dụng rộng rãi. Ji và cộng sự (2014) sử dụng SVR để xây dựng quy luật vận hành tối ưu cho hệ thống hồ đập Jinsha dựa trên chuỗi dữ liệu kéo dài 48 năm [107]. Su và cộng sự (2014) kết hợp SVM và thuật toán di truyền để dự báo dung tích hồ Miyun – nguồn cấp nước chính cho Bắc Kinh [150]. Zhang và cộng sự (2018, 2019) sử dụng ANN, SVR, DL, RNN, LSTM và GRU để dự báo dòng xả tại các hồ chứa lớn như Gezhouba hay Xiluodu [181, 182]. Mặc dù vậy, điểm hạn chế chung của các nghiên cứu này là yêu

cầu chuỗi dữ liệu dài hạn (thường > 20 năm) và đầy đủ về khí tượng, thủy văn và vận hành hồ chứa. Đây là một rào cản rất lớn ở những lưu vực thiếu quan trắc hoặc không được chia sẻ dữ liệu – tình huống phổ biến ở các lưu vực liên quốc gia. Khi dữ liệu bị thiếu hoặc không minh bạch, hiệu quả của các mô hình học máy suy giảm đáng kể, đặc biệt trong bối cảnh dòng chảy chịu tác động mạnh bởi hoạt động dân sinh và vận hành hồ chứa liên hồ.

Trong khi các mô hình dựa vật lý (physical-based models) thường đòi hỏi lượng dữ liệu đầu vào phong phú để mô phỏng chính xác các quá trình thủy văn, thì nhiều nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng, với việc sử dụng các nguồn dữ liệu thay thế hoặc dữ liệu ước lượng, mô hình dựa vật lý vẫn có thể đạt được kết quả dự báo chấp nhận được. Các dữ liệu thay thế có thể bao gồm ảnh viễn thám, dữ liệu tái phân tích (reanalysis), số liệu mô phỏng khí hậu, hoặc các nguồn dữ liệu không gian số, được sử dụng để bổ sung cho các thiếu hụt trong quan trắc truyền thống. Khi được hiệu chỉnh cẩn thận, các mô hình dựa vật lý không chỉ duy trì được tính chính xác tương đối trong dự báo dòng chảy mà còn có ưu thế trong việc mô phỏng các tác động của vận hành hồ chứa, khai thác nước, và các thay đổi kinh tế - xã hội trong lưu vực [68, 172, 183]. Nhờ đó, mô hình dựa vật lý tiếp tục giữ vai trò quan trọng như một công cụ nền tảng trong dự báo thủy văn, đặc biệt tại các khu vực có đặc điểm vận hành phức tạp và chịu tác động mạnh từ hoạt động nhân sinh.

Mặc dù dự báo dòng chảy ở các lưu vực thiếu dữ liệu, đặc biệt là lưu vực liên quốc gia, gặp nhiều thách thức do thiếu minh bạch về vận hành hồ chứa và tác động mạnh của con người, mô hình dựa vật lý vẫn cho thấy ưu thế rõ rệt. Khác với mô hình học máy vốn phụ thuộc vào chuỗi số liệu dài, mô hình dựa vật lý có thể hoạt động hiệu quả hơn khi kết hợp với các nguồn dữ liệu thay thế như viễn thám, tái phân tích hay dữ liệu không gian số. Nhờ mô tả trực tiếp quá trình thủy văn và cơ chế điều tiết dòng chảy, chúng cho phép đánh giá tốt hơn các tác động nhân sinh và duy trì độ tin cậy trong điều kiện vận hành phức tạp. Vì vậy, mô hình dựa vật lý vẫn là công cụ cốt lõi trong dự báo thủy văn tại các khu vực thiếu quan trắc và chịu tác động mạnh từ hoạt động của con người.

### **1.5. Tổng quan phương pháp đánh giá tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh**

Dòng chảy là một thành phần thiết yếu trong chu trình thủy văn, đóng vai trò nền tảng trong việc duy trì sự sống và phát triển bền vững trên Trái đất. Tuy nhiên, trong bối cảnh gia tăng dân số, phát triển kinh tế – xã hội nhanh chóng và các hoạt động can thiệp của con người, chế độ dòng chảy toàn cầu đang có xu thế biến đổi rõ rệt. Các yếu tố như chuyển đổi mục đích sử dụng đất, xây dựng hồ chứa và khai thác quá mức nguồn nước mặt và nước ngầm đã làm gia tăng mức độ biến động này một cách đáng kể [19, 64, 79, 133]. Bên cạnh đó, biến đổi khí hậu cũng được xác định là một yếu tố tác động mạnh mẽ đến dòng chảy, thông qua sự thay đổi về lượng mưa và bốc thoát hơi nước, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến cân bằng nước trong các lưu vực [71, 106, 124, 127].

Có ba cách tiếp cận chính đã được sử dụng rộng rãi để định lượng mức độ chi phối của thay đổi, trong đó yếu tố khí hậu cũng như các can thiệp nhân tạo tới động lực học dòng chảy, đó là mô hình thủy văn dựa trên dữ liệu, khái niệm, và quá trình vật lý.

*Phương pháp tiếp cận dựa trên dữ liệu:* bao gồm nhiều phương pháp khác nhau, như hồi quy tuyến tính đơn, đường tích phân kép, tỷ lệ thay đổi độ dốc của lượng tích lũy [16, 28, 144] và mô hình học máy [169]. Cách tiếp cận này góp phần phát triển mô hình dựa dữ liệu và mối quan hệ giữa các yếu tố khí hậu và dòng chảy [20]. Phương pháp trên tạo lợi thế trong việc nhanh chóng thu được kết quả, tiết kiệm tài nguyên cho việc phát triển mô hình, và có thể phân tích các hệ thống có đa tác nhân chi phối [117, 179]. Song, phương pháp này yêu cầu nhiều dữ liệu chi tiết với chuỗi thời gian dài [146].

*Phương pháp tiếp cận dùng mô hình khái niệm:* bằng cách kết hợp yếu tố lượng mưa, bốc thoát hơi nước và phương trình cân bằng nước, cách tiếp cận dựa trên khái niệm cho thấy tính thực tế hơn so với cách tiếp cận dựa trên dữ liệu. Phương pháp dùng mô hình khái niệm có thể đóng vai trò nền tảng trung gian giữa các mô

hình thủy văn dựa dữ liệu và dựa vật lý. Có nhiều nghiên cứu áp dụng lý thuyết đường cong Budyko, chủ yếu là do sự đơn giản và khả năng khắc phục các hạn chế về dữ liệu. Các phương pháp khác có thể yêu cầu lượng dữ liệu phong phú, nhưng giả thuyết Budyko chủ yếu tập trung vào các đặc điểm bề mặt lưu vực, thường là những yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến sự biến đổi dòng chảy [67, 92, 147]. Hơn nữa, cách tiếp cận dựa Budyko mang lại một số lợi điểm, bao gồm giảm mức độ bất định do phụ thuộc vào ít thông số hơn và xây dựng mô hình ít phức tạp hơn. Dù giả thuyết Budyko đã đưa ra một khung nghiên cứu có giá trị lớn cho các nghiên cứu sau này, nhưng khả năng phân tách định lượng của tác nhân gây biến đổi dòng chảy ở quy mô dài hạn (theo năm) là khá hạn chế. Điều này tương đương với việc ở quy mô ngắn hạn (như theo mùa hoặc theo tháng), phân tích và phân tách các tác nhân chi phối này sẽ không hiệu quả [49,154].

*Phương pháp tiếp cận sử dụng mô hình thủy văn dựa vật lý:* cách tiếp cận này liên quan đến việc xây dựng chuỗi dòng chảy tự nhiên nhờ sử dụng mô hình thủy văn dựa vật lý như mô hình VIC [93] và mô hình SWAT [22]. Các mô hình này mô phỏng chi tiết các quá trình thủy văn, cung cấp kiến thức toàn diện hơn về động lực học dòng chảy. Kỹ thuật này xác định tác động của biến đổi khí hậu và can thiệp nhân tạo đối với dòng chảy bằng cách thay đổi giá trị một biến nhiều lần và giữ nguyên giá trị của các biến còn lại. Việc định lượng mức độ tác động của nhân tố khí hậu và con người sẽ thực hiện qua so sánh số liệu dòng chảy quan trắc thực tế và số liệu dòng chảy tái mô phỏng tự nhiên [74, 75, 135, 170]. Phương pháp mô hình hóa dựa vật lý được nhắc đến có một số ưu điểm, bao gồm khả năng phân tích dữ liệu mà không cần phụ thuộc vào các giả thuyết thống kê; cung cấp thông tin chi tiết có giá trị về nguyên nhân thay đổi và tách biệt hiệu quả tác động của hoạt động nhân sinh ra khỏi các tác động của biến đổi khí hậu [117]. Tuy nhiên, cách tiếp cận mô hình hóa có những hạn chế nhất định do nhu cầu lớn về độ chi tiết của dữ liệu, tính bất định trong cấu trúc mô hình, dữ liệu đầu vào, bộ thông số mô hình, cũng như các hạn chế trong khả năng đại diện cho một hệ thống thủy văn - xã hội phức tạp của các mô hình đang có hiện nay [137, 169].

So sánh và lựa chọn các phương pháp tiếp cận nói trên cho các khu vực nghiên cứu thực tế là một chủ đề mới nổi đã được nghiên cứu rộng rãi trong các thập kỷ gần đây [20, 152]. Mỗi cách tiếp cận đều có ưu và nhược điểm riêng, và các cách tiếp cận khác nhau luôn tạo ra kết quả khác nhau cho cùng một khu vực. Bằng cách kết hợp các phương pháp này, có thể giảm bớt những hạn chế riêng lẻ của từng phương pháp, tạo kết quả đánh giá toàn diện và đáng tin cậy hơn. Việc tiếp cận kết hợp này có thể cung cấp kiến thức vững chắc về động lực dòng chảy kèm cung cấp thông tin hỗ trợ việc đưa ra quyết định [179]. Hướng tiếp cận kết hợp này mang lại kiến thức đầy đủ và chính xác hơn về các quá trình thủy văn. Tuy nhiên, như Ansari Mahabadi và Delavar (2024) đã khẳng định, "việc tích hợp các phương pháp này, nếu không có đánh giá kỹ lưỡng và các mô tả đặc trưng về độ bất định của từng phương pháp, có thể gây ra các lỗi/sai sót nghiêm trọng hơn" [20]. Hơn nữa, Ansari Mahabadi và Delavar (2024) nhấn mạnh tầm quan trọng của việc đánh giá cẩn thận kết quả của bất kỳ phương pháp nào được chọn so với số liệu thực tế để đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy [20].

Thông qua đánh giá tài liệu, phương pháp mô hình hóa dựa vật lý được ưa chuộng và được cân nhắc rộng rãi để cung cấp kết quả đáng tin cậy hơn so với hai cách tiếp cận còn lại [20, 99, 117, 139, 179, 155]. Mặc dù có tiềm năng, phương pháp mô hình thủy văn dựa vật lý vẫn tồn tại một số thách thức khó khắc phục:

- + Một trong những thách thức chủ yếu liên quan đến phương pháp tiếp cận mô hình thủy văn dựa vật lý là việc khan hiếm dữ liệu, đặc biệt là ở các lưu vực sông xuyên biên giới, nơi việc tiếp cận các nguồn dữ liệu bên ngoài lãnh thổ quốc gia có thể hoặc phần lớn bị hạn chế.
- + Độ bất định phát sinh từ các nguồn khác nhau có thể làm giảm đáng kể độ chính xác và khả năng giải thích của kết quả của mô hình, đặt ra thách thức đối với việc sử dụng hiệu quả mô hình thủy văn dựa vật lý.
- + Việc gia tăng độ bất định từ các nguồn khác nhau tới dòng chảy có thể hạn chế độ chính xác trong đánh giá tác động của các nhân tố, thường dẫn tới việc quá tập trung vào quy mô thời gian hàng năm trong khi các quy mô ngắn hơn như theo mùa hay hàng tháng bị bỏ qua. Wang và cộng sự (2010)

nhấn mạnh tính cần thiết của các nghiên cứu xa hơn để xem xét về vấn đề sai số mô hình với các nghiên cứu ở quy mô theo mùa trong đánh giá tác động của sự biến đổi khí hậu và các hoạt động của con người đối với dòng chảy [171].

Ngoài những thách thức đã đề cập ở trên, còn tồn tại những hạn chế chung trong nghiên cứu về nguyên nhân chi phối gắn liền với việc phân chia các giai đoạn và phân tích các phản ứng thủy văn đối với biến đổi khí hậu và hoạt động của con người, việc mà nhiều nhân tố được xem xét đến. Để phân tích phản ứng thủy văn đối với những thay đổi, phương pháp phát hiện điểm biến đổi đơn (một điểm) như đường tích phân kép hoặc kiểm tra Pettitt thường được sử dụng để chia chuỗi thời gian thủy văn thành các giai đoạn cơ sở và bị biến đổi. Tuy nhiên, Wang và cộng sự (2022) nhấn mạnh rằng các nghiên cứu khác nhau sử dụng các phương pháp khác nhau đã tạo ra các kết quả khác biệt, dẫn đến độ bất định tương đối lớn [169].

#### **1.6. Ứng dụng công nghệ viễn thám trong xác định các thông số hồ chứa khu vực thiếu dữ liệu**

Quản lý tài nguyên nước xuyên biên giới là một trong những thách thức lớn mà các quốc gia có chung lưu vực sông phải đối mặt, đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu, gia tăng dân số và nhu cầu sử dụng nước ngày càng cao [176]. Trong các lưu vực sông liên quốc gia, các công trình thủy điện và hồ chứa đa mục tiêu phía thượng lưu có tác động mạnh mẽ chế độ dòng chảy hạ lưu, ảnh hưởng trực tiếp đến sản xuất nông nghiệp, thủy sản, giao thông thủy, an ninh nguồn nước và cả các vấn đề môi trường – sinh thái [148]. Thông tin về quy luật vận hành hồ chứa thượng nguồn đóng vai trò hết sức quan trọng trong quản lý tài nguyên nước xuyên biên giới, liên quan trực tiếp đến quyền lợi và trách nhiệm của các bên liên quan trong sử dụng, phân bổ và bảo vệ nguồn nước chung.

Quy luật vận hành hồ chứa là tập hợp các nguyên tắc và quy trình điều tiết mực nước, dung tích và lưu lượng xả theo thời gian nhằm đáp ứng các mục tiêu như phát điện, cấp nước, phòng chống lũ, bảo đảm dòng chảy môi trường hoặc các yêu cầu đa mục tiêu khác [180]. Trong điều kiện một lưu vực sông có nhiều quốc gia cùng

chia sẻ, nắm được các quy luật vận hành của các hồ chứa phía thượng lưu giúp quốc gia nằm ở hạ lưu dự báo chính xác hơn dòng chảy, chủ động điều tiết hồ chứa nội địa, lập kế hoạch sản xuất và ứng phó với thiên tai.

Tuy nhiên, khó khăn lớn nhất hiện nay là hầu hết các quốc gia thượng nguồn không công khai đầy đủ dữ liệu vận hành hồ chứa. Điều này bắt nguồn từ nhiều nguyên nhân, bao gồm yếu tố an ninh – quốc phòng, lợi ích kinh tế, thiếu cơ chế chia sẻ dữ liệu quốc tế hoặc đơn giản là không có quy định bắt buộc [176]. Trong nhiều trường hợp, dữ liệu mực nước, lưu lượng xả và kế hoạch điều tiết được coi là thông tin nhạy cảm, chỉ lưu hành nội bộ. Điều này khiến các quốc gia hạ lưu gặp khó khăn nghiêm trọng trong dự báo và quản lý nguồn nước. Ngay cả khi có các thỏa thuận chia sẻ thông tin, việc dữ liệu đến chậm hoặc thiếu độ tin cậy vẫn là vấn đề thường xuyên xảy ra. Trong bối cảnh đó, viễn thám nổi lên như một công cụ quan trọng, mở ra khả năng giám sát mực nước và dung tích hồ chứa từ xa [50, 119] mà không phụ thuộc hoàn toàn vào dữ liệu đo ở phía thượng nguồn. Công nghệ viễn thám quang học và radar hiện nay cho phép đo đặc diện tích mặt nước hồ chứa theo thời gian thực hoặc gần thời gian thực, với tần suất cao và phạm vi rộng. Kết hợp với dữ liệu độ cao địa hình đáy hồ (bathymetry) hoặc quan hệ dung tích – diện tích, có thể ước tính được dung tích chứa của hồ tại từng thời điểm. Ngoài ra, các cảm biến radar xuyên mây và đo cao vệ tinh (altimetry) còn cung cấp thông tin mực nước mặt hồ ngay cả trong điều kiện thời tiết xấu. Đây là bước tiến lớn trong giám sát hồ chứa xuyên biên giới, đặc biệt tại các khu vực có xung đột lợi ích hoặc hạn chế hợp tác về dữ liệu.

Một câu hỏi nghiên cứu quan trọng đặt ra là: **Liệu có thể suy ra quy luật vận hành hồ chứa chỉ từ dữ liệu viễn thám hay không?** Đây là vấn đề vừa mang tính khoa học vừa mang ý nghĩa thực tiễn cao. Về nguyên tắc, dữ liệu viễn thám cung cấp chuỗi thời gian về mực nước và dung tích, qua đó phản ánh gián tiếp các quyết định điều tiết của chủ hồ chứa. Nếu phân tích các chuỗi dữ liệu đủ dài và kết hợp với thông tin khí tượng – thủy văn (lượng mưa, dòng chảy vào hồ, nhu cầu điện, v.v.), có thể nhận diện được các mô hình xả – tích đặc trưng theo mùa hoặc theo sự kiện. Từ đó, một dạng “*quy luật vận hành*” có thể được suy luận và mô hình hóa. Tuy nhiên, quá

trình này đối mặt với một số thách thức lớn. Thứ nhất, dữ liệu viễn thám, dù ngày càng chính xác, vẫn có sai số do ảnh hưởng của mây che, độ phân giải không gian – thời gian lớn, và các yếu tố kỹ thuật khác. Thứ hai, quy luật vận hành hồ chứa thực tế thường không hoàn toàn cố định, mà thay đổi linh hoạt tùy theo điều kiện thời tiết, tình hình nhu cầu điện, hoặc yêu cầu phòng lũ, cấp nước. Thứ ba, việc suy luận quy luật cần kết hợp nhiều nguồn dữ liệu bổ trợ và các phương pháp phân tích thống kê – mô hình thủy văn để giảm bất định.

Một hướng nghiên cứu mới NCS hướng đến là xây dựng quy luật vận hành hồ chứa dựa trên dữ liệu viễn thám. Quy luật vận hành là yếu tố then chốt trong việc tích hợp hồ chứa vào các mô hình thủy văn, quyết định cách điều tiết dòng chảy giữa các mùa và trong các tình huống cực đoan. Từ góc độ quản lý tài nguyên nước, phương pháp này đặc biệt hữu ích cho các quốc gia ở hạ lưu, nơi việc tiếp cận dữ liệu vận hành từ thượng nguồn thường bị hạn chế. Bằng cách khai thác các dữ liệu, thông tin viễn thám như mực nước, dung tích hồ, các quốc gia hạ lưu có thể chủ động hơn trong việc điều hành các công trình thủy lợi nội địa, nâng cao độ chính xác của dự báo lũ, hạn và các rủi ro liên quan. Ngoài ra, các kết quả thu được còn có thể đóng vai trò là bằng chứng khoa học trong các cuộc đàm phán quốc tế, thúc đẩy minh bạch thông tin và tăng cường hợp tác quản lý tài nguyên nước xuyên biên giới.

## **1.7. Cơ sở khoa học và định hướng nghiên cứu của luận án**

### ***1.7.1. Phân tích khoảng trống trong các nghiên cứu***

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về phân tích chuỗi thủy văn, mô phỏng dòng chảy và đánh giá tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh, vẫn tồn tại những khoảng trống đáng kể. Trước hết, các nghiên cứu về chuỗi thủy văn không dừng chủ yếu tập trung riêng rẽ vào phát hiện xu thế hoặc điểm biến đổi, trong khi thiếu các cách tiếp cận tích hợp cho phép nhận diện đa điểm biến đổi và phân tích xu thế theo từng giai đoạn. Bên cạnh đó, các phương pháp thống kê và mô hình thủy văn thường được áp dụng độc lập, chưa có sự liên kết chặt chẽ nhằm phản ánh sự thay đổi cấu trúc của hệ thống theo thời gian.

Trong điều kiện lưu vực thiếu dữ liệu, đặc biệt là lưu vực sông xuyên biên giới, các phương pháp hiện có còn nhiều hạn chế do phụ thuộc vào số liệu quan trắc và chưa khai thác hiệu quả các nguồn dữ liệu thay thế như viễn thám, tái phân tích cũng như dữ liệu công bố từ các quốc gia trong lưu vực. Đồng thời, việc phân tách tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh còn gặp nhiều bất định, nhất là khi việc phân chia giai đoạn thường dựa trên một điểm biến đổi đơn giản hoặc theo các mốc thời gian hành chính – kinh tế (như chu kỳ 5 năm hoặc theo thập kỷ), chưa xét đầy đủ tính không dừng của chuỗi. Ngoài ra, mặc dù viễn thám đã được ứng dụng trong giám sát hồ chứa, việc suy luận quy luật vận hành và tích hợp vào mô hình thủy văn vẫn còn hạn chế.

Tổng hợp các nghiên cứu cho thấy, những khoảng trống chủ yếu tập trung vào: (i) xử lý tính không dừng và xác định đa điểm biến đổi, (ii) kết hợp phân tích xu thế với phân đoạn chuỗi theo thời gian, (iii) nâng cao khả năng mô phỏng trong điều kiện thiếu hụt dữ liệu, và (iv) khai thác hiệu quả dữ liệu viễn thám và các nguồn dữ liệu công bố phục vụ suy luận và mô tả vận hành hồ chứa. Do đó, việc phát triển một cách tiếp cận tích hợp, kết hợp các phương pháp thống kê, mô hình thủy văn và dữ liệu viễn thám là cần thiết nhằm nâng cao độ tin cậy trong phân tích và dự báo dòng chảy, đặc biệt đối với các lưu vực sông liên quốc gia như sông Đà.

### ***1.7.2. Đề xuất khung nghiên cứu tích hợp***

Từ những khó khăn nêu trên, việc nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy trên lưu vực sông Đà đòi hỏi một cách tiếp cận theo hướng phát triển mô hình thủy văn dựa vật lý tích hợp, có khả năng phản ánh các quá trình thủy văn trong điều kiện tác động đồng thời của BĐKH và hoạt động nhân sinh. Cách tiếp cận này cần cho phép khai thác hiệu quả các nguồn dữ liệu thay thế như dữ liệu viễn thám, các sản phẩm mưa lưới của các quốc gia trong lưu vực và dữ liệu tái phân tích, nhằm bổ sung và bù đắp sự thiếu hụt, gián đoạn của số liệu quan trắc truyền thống, đặc biệt tại khu vực thượng nguồn ngoài lãnh thổ. Bên cạnh đó, cần phát triển các phương pháp hiệu chỉnh và thiết lập mô hình phù hợp với điều kiện thiếu dữ liệu, có khả năng tích hợp

và đồng hóa thông tin từ các nguồn dữ liệu không đồng nhất về không gian và thời gian. Đồng thời, việc lồng ghép các yếu tố nhân sinh, bao gồm vận hành hệ thống hồ chứa, khai thác và sử dụng nước, cần được xem xét như một thành phần cấu trúc của mô hình, thay vì chỉ là điều kiện biên, nhằm phản ánh sát hơn đặc trưng biến đổi của chế độ dòng chảy trên lưu vực.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu hướng tới xây dựng một khung mô hình tích hợp, trong đó kết hợp chặt chẽ giữa mô hình thủy văn dựa vật lý với các nguồn dữ liệu mở và thông tin điều tiết hồ chứa, nhằm nâng cao độ tin cậy trong mô phỏng và đánh giá chế độ dòng chảy trong bối cảnh chịu tác động đồng thời của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người.

Các nội dung nghiên cứu và giải pháp thực hiện được tổng hợp và thể hiện trong khung nghiên cứu tại Hình 1.2, gồm 06 bước chính, có mối liên kết kế tiếp và bổ trợ lẫn nhau như sau:

(i) Thu thập, xử lý và xây dựng cơ sở dữ liệu: Thu thập, tổng hợp và chuẩn hóa các nguồn dữ liệu phục vụ nghiên cứu, bao gồm dữ liệu khí tượng, thủy văn, viễn thám, tái phân tích, đặc tính đất và thảm phủ thực vật, cũng như thông tin về hồ chứa và các đặc trưng dòng chảy.

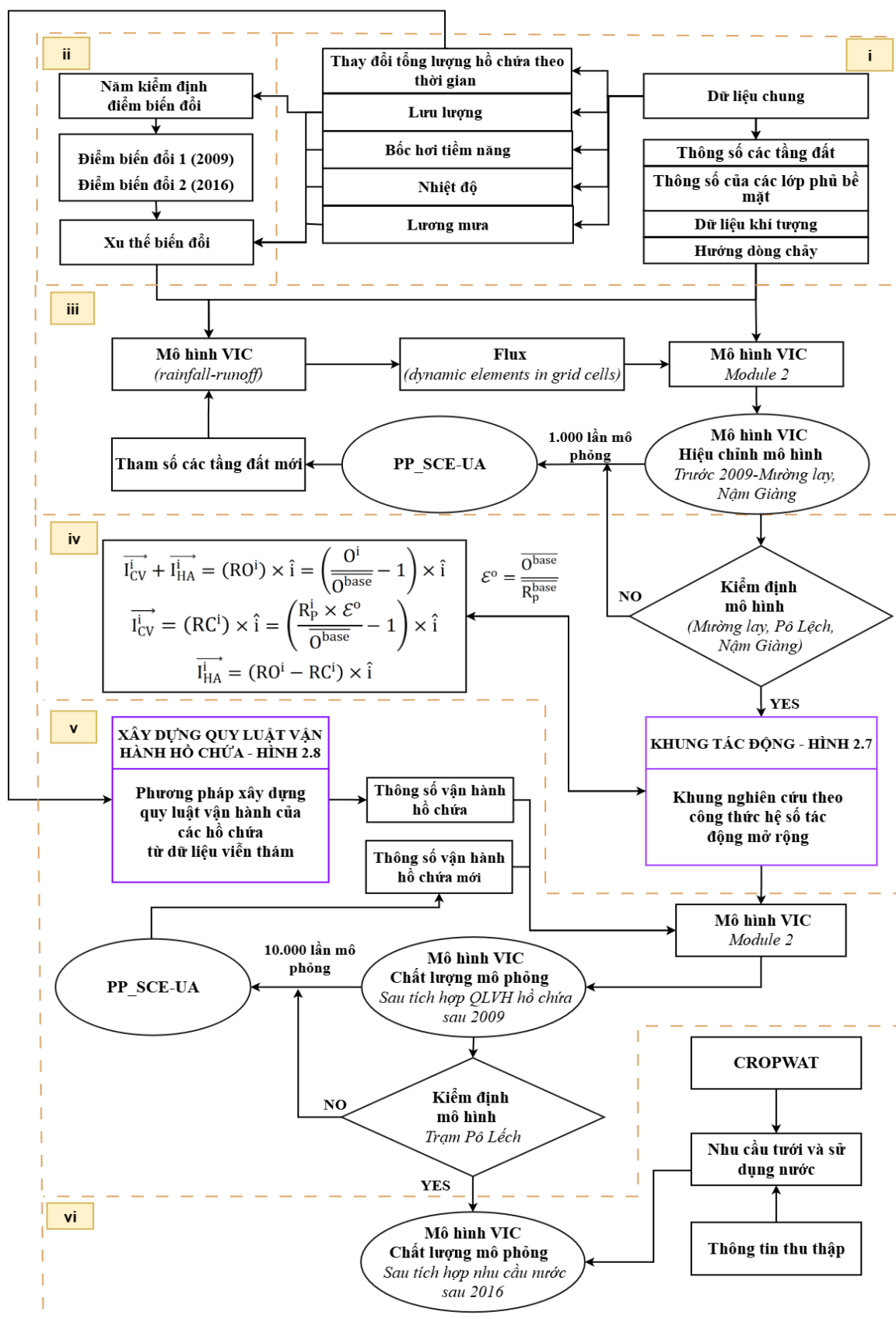
(ii) Phân tích xu thế và xác định điểm biến đổi: Áp dụng các phương pháp phân tích xu thế và kiểm định điểm biến đổi đối với các chuỗi khí tượng, thủy văn nhằm đánh giá đặc điểm biến động và tính không dừng của chế độ dòng chảy.

(iii) Mô phỏng dòng chảy trong điều kiện tự nhiên và hiệu chỉnh, kiểm định mô hình: Xây dựng và áp dụng mô hình thủy văn VIC để mô phỏng quá trình hình thành dòng chảy trong điều kiện trước khi chịu tác động đáng kể của các hồ chứa thượng nguồn. Thực hiện hiệu chỉnh các tham số mô hình bằng phương pháp SCE-UA, đánh giá chất lượng mô phỏng và kiểm định mô hình tại các trạm thủy văn đại diện. Kết quả mô phỏng sau hiệu chỉnh và kiểm định được sử dụng làm cơ sở xác lập chế độ dòng chảy tự nhiên và làm đầu vào cho các bước đánh giá tác động tiếp theo.

(iv) Xây dựng khung đánh giá tác động theo công thức hệ số tác động mở rộng: Trên cơ sở kết quả phân tích xu thế, điểm biến đổi và mô phỏng dòng chảy, xây dựng và áp dụng khung tác động theo công thức hệ số tác động mở rộng nhằm định lượng và phân tách mức độ đóng góp của các nhóm tác động đến sự biến đổi dòng chảy. Phương pháp cho phép xem xét đồng thời ảnh hưởng của các yếu tố khí hậu và hoạt động của con người, đồng thời hạn chế sai số do mô phỏng khi xác định mức độ tác động của từng nhóm nhân tố.

(v) Mô phỏng dòng chảy có xét đến vận hành hồ chứa: Xây dựng và tích hợp quy luật vận hành hồ chứa vào mô hình VIC thông qua việc khai thác thông tin vận hành và dữ liệu viễn thám để xác định các thông số, quan hệ và quy luật điều tiết đặc trưng của hồ chứa. Các tham số vận hành được hiệu chỉnh bằng phương pháp SCE-UA trên cơ sở so sánh kết quả mô phỏng với quan trắc, sau đó tích hợp với mô hình routing để mô phỏng sự biến đổi dòng chảy trong điều kiện có tác động của hệ thống hồ chứa thượng nguồn.

(vi) Mô phỏng dòng chảy có xét đồng thời vận hành hồ chứa và nhu cầu sử dụng nước: Tiếp tục mở rộng mô hình bằng cách tích hợp nhu cầu tưới và sử dụng nước được xác định từ thông tin sử dụng đất, cây trồng và các điều kiện khí tượng thông qua mô hình CROPWAT. Nhu cầu nước được đưa vào mô hình nhằm mô phỏng tác động của hoạt động khai thác, sử dụng nước kết hợp với điều tiết của hồ chứa đối với chế độ dòng chảy. Kết quả cuối cùng là cơ sở để đánh giá tổng hợp sự biến đổi dòng chảy dưới tác động đồng thời của biến đổi khí hậu, vận hành hồ chứa và nhu cầu sử dụng nước, qua đó làm rõ mức độ và cơ chế tác động của các yếu tố tự nhiên và nhân sinh đến chế độ thủy văn lưu vực sông Đà.



Hình 1.2. Sơ đồ phương pháp nghiên cứu

## 1.8. Tiểu kết chương 1

Chương 1 đã tổng hợp một cách có hệ thống các cơ sở lý luận và các hướng nghiên cứu liên quan đến mô phỏng dòng chảy trong điều kiện lưu vực sông xuyên biên giới, với trọng tâm là lưu vực sông Đà. Kết quả tổng quan cho thấy chế độ dòng chảy trên lưu vực chịu tác động tổng hợp của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh, đặc biệt là vận hành hệ thống hồ chứa thượng nguồn, đồng thời bộc lộ rõ tính không dừng của chuỗi thủy văn, làm suy giảm hiệu quả của các phương pháp và mô hình truyền thống dựa trên giả thiết dừng của chuỗi số liệu.

Các nghiên cứu trước đây đã phát triển đa dạng các phương pháp mô phỏng dòng chảy, từ thống kê, mô hình thủy văn đến học máy. Tuy nhiên, trong điều kiện lưu vực xuyên biên giới thiếu dữ liệu, các mô hình dựa trên cơ sở vật lý vẫn chiếm ưu thế nhờ khả năng mô tả cơ chế thủy văn và tích hợp các tác động nhân sinh. Bên cạnh đó, việc khai thác dữ liệu thay thế như viễn thám, mưa lưới và tái phân tích ngày càng được quan tâm, song việc tích hợp hiệu quả các nguồn dữ liệu này vào mô hình vẫn còn hạn chế. Đồng thời, do hạn chế về dữ liệu vận hành hồ chứa thượng nguồn, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu dựa trên các giả định đơn giản hoặc thông tin gián tiếp, nên chưa mô tả đầy đủ và chính xác tác động điều tiết của hồ chứa đến dòng chảy xuyên biên giới.

Từ tổng quan nghiên cứu các khoảng trống khoa học chính được xác định gồm: (i) chưa xử lý đầy đủ tính không dừng và phân đoạn chuỗi dòng chảy theo các giai đoạn tác động khác nhau; (ii) thiếu các cách tiếp cận tích hợp giữa mô hình thủy văn dựa vật lý với dữ liệu viễn thám và dữ liệu thay thế trong điều kiện thiếu quan trắc; (iii) chưa mô tả và tích hợp hiệu quả quy luật vận hành hồ chứa thượng nguồn vào mô hình; và (iv) còn hạn chế trong việc định lượng đồng thời tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh đến dòng chảy.

Trên cơ sở đó, luận án đề xuất hướng tiếp cận tích hợp, kết hợp mô hình thủy văn dựa vật lý với dữ liệu viễn thám đa nguồn, dữ liệu mưa lưới và tái phân tích, đồng thời lồng ghép thông tin vận hành hồ chứa và sử dụng nước nhằm nâng cao chất lượng

mô phỏng dòng chảy trong điều kiện lưu vực xuyên biên giới thiếu dữ liệu. Đây là cơ sở khoa học và phương pháp luận cho các nội dung nghiên cứu được triển khai trong các chương tiếp theo.

## CHƯƠNG 2 : PHƯƠNG PHÁP VÀ SỐ LIỆU SỬ DỤNG TRONG NGHIÊN CỨU

### 2.1. Dữ liệu sử dụng

#### 2.1.1. Các bộ dữ liệu, thông số cho mô hình VIC

##### 2.1.1.1. Module 1 - Mô hình VIC

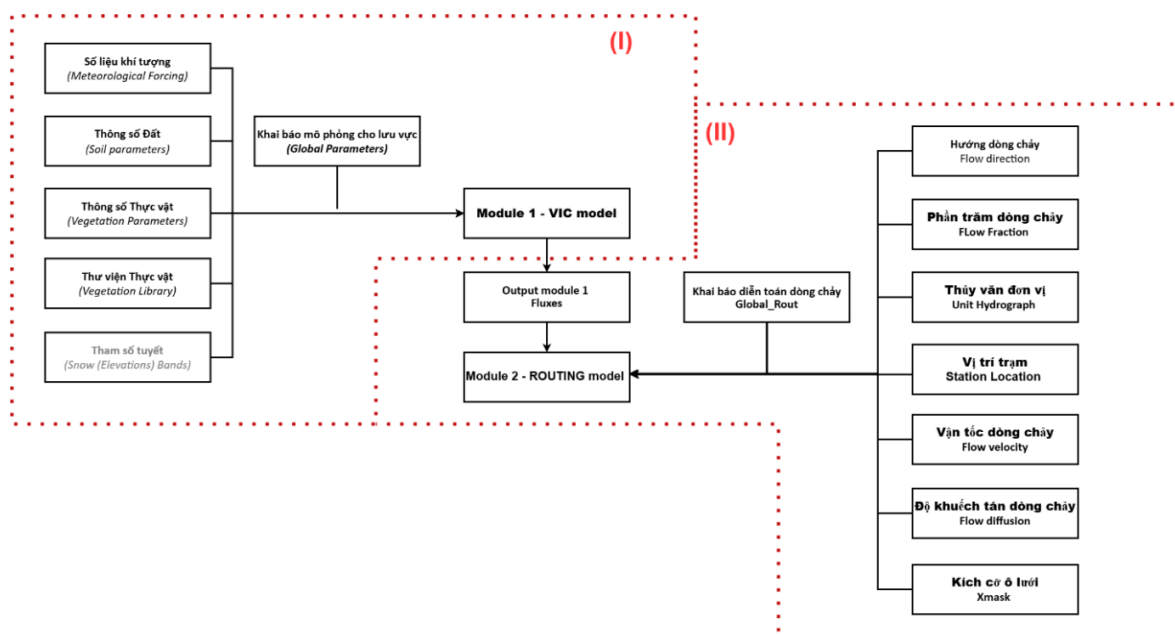
Yêu cầu một số bộ dữ liệu đầu vào và được phân loại thành:

- + Tập dữ liệu khí tượng: VIC có thể lấy chuỗi thời gian hàng ngày hoặc dưới ngày (ốp, giờ) của các biến khí tượng làm đầu vào cho từng ô lưới riêng biệt.
- + Tập thông số đất: Chủ yếu xác định các thông số thủy lực của đất theo ô lưới, theo lớp cùng với các thông số điều khiển mô hình. Các thông số thủy lực của đất bao gồm: độ dẫn thủy lực bão hòa, mật độ, khả năng giữ ẩm tối đa của đất, v.v.
- + Tập thông số & thư viện thảm thực vật: Các loại che phủ đất, tỷ lệ diện tích của từng loại che phủ đất trong ô lưới (fractional areas), độ sâu của rễ và LAI theo tháng (12 tháng) của các ô che phủ đất khác nhau trong mỗi ô lưới.
- + Tập thông số khai báo (global parameters): Đây là file đầu vào chính của VIC. Nó dẫn VIC đến vị trí của các tệp đầu vào/đầu ra khác và đặt các thông số chi phối quá trình mô phỏng và chạy mô hình.

Số liệu đầu vào sử dụng cho Mô hình được lựa chọn và xử lý theo các yêu cầu và thiết lập ban đầu của mô hình. Các tệp số liệu trong Hình 2.1 là các thành phần bắt buộc để kết nối với nhau trong tệp khai báo “*Global Parameters*” – tệp bắt buộc cho mô hình VIC. Tệp khai báo bao gồm các thông tin về bước thời gian mô phỏng, các trạng thái cân bằng nước, năng lượng, tuyết. Thời gian mô phỏng của mô hình bao gồm thời gian bắt đầu, kết thúc tính toán (ngày/tháng/ năm). Cân bằng năng lượng, nước và tuyết trong mô hình VIC được tính toán và quyết định bằng chế độ FALSE hoặc TRUE.

### 2.1.1.2. Module 2 - mô hình ROUTING

Module 2 - Mô hình ROUTING: Mô hình diễn toán dòng chảy được phát triển bởi Lohmann và cộng sự (1996, 1998). Mô hình vận chuyển dòng chảy bề mặt các ô lưới (grid cell) và dòng chảy cơ sở trong mỗi ô lưới chuyển đến đầu ra của ô sau đó đi vào hệ thống sông (river). Diễn toán dòng chảy bên trong ô sử dụng phương pháp Thủy văn đơn vị (UH) và diễn toán trong sông/ kênh sử dụng phương trình Saint-Venant tuyến tính. Mô hình diễn toán trong sông giả định tất cả dòng chảy thoát ra khỏi ô theo một hướng dòng chảy duy nhất.



Hình 2.1 Sơ đồ các file đầu vào cho (I) Module 1 - mô hình VIC và (II) Module 2 - mô hình ROUTING

Tập khai báo đầu vào cho mô hình diễn toán chứa tên tập thông số và giá trị thông số theo yêu cầu của mô hình diễn toán. Tập này có tên là `global_rout`, trong tập sẽ liên kết các tập/ file khác mô tả trong Hình 2.1 với một số file được lựa chọn ở chế độ FALSE/TRUE các giá trị cho các yêu cầu đầu vào sẽ được mặc định bằng các giá trị cụ thể giống hoặc khác nhau. Ngoài ra, mô hình diễn toán cần sản phẩm đầu ra của Module 1.

### 2.1.2. Các dữ liệu sử dụng

Luận án sử dụng các bản đồ về sử dụng đất và lớp phủ thực vật, cùng với các thuộc tính thực vật như chỉ số diện tích Lá (LAI), suất phản chiếu (albedo), và chuỗi thời gian dữ liệu khí tượng toàn cầu và khu vực. Ngoài ra, luận án còn sử dụng mô hình số độ cao (DEM), bản đồ hướng dòng chảy, đặc tính dòng chảy, bản đồ đất với các thuộc tính đất, và chuỗi thời gian quan trắc lưu lượng dòng chảy. Bảng 2.1 ở dưới liệt kê các tập dữ liệu được sử dụng.

*Bảng 2.1. Tổng quan về các bộ dữ liệu được sử dụng và nguồn của chúng*

| Dữ liệu                                       | Thời gian   | Mục đích                           | Nguồn dữ liệu                                                            |
|-----------------------------------------------|-------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Lưu lượng dòng chảy                           | 1981-2020   | Hiệu chỉnh, kiểm định mô hình      | Kế thừa dữ liệu từ đề tài mã số ĐTĐL.CN-06/23 [5]                        |
| Mưa lưới Việt Nam (VnGP)                      | 1981-2020   | Dữ liệu đầu vào mô hình VIC        | Bộ dữ liệu lượng mưa lưới Việt Nam (VnGP): Xây dựng và xác thực[118]     |
| Mưa lưới Trung Quốc (CHM)                     | 1981-2020   | Dữ liệu đầu vào mô hình VIC        | Bộ dữ liệu Thủy văn Khí tượng Trung Quốc (Đại học Sư phạm Bắc Kinh) [59] |
| Lưới vận tốc gió, nhiệt độ lớn nhất, nhỏ nhất | 1981-2020   | Dữ liệu đầu vào mô hình VIC        | ECMWF - EU[188]                                                          |
| Mô hình số độ cao (DEM)                       | -           | Dữ liệu thiết lập mô hình VIC      | ALOS30[189]                                                              |
| Bản đồ đất và các đặc tính của các loại đất   | 1992-2020   | Dữ liệu thiết lập mô hình VIC      | FAO - Unesco, “Bản đồ đất thế giới” [192]                                |
| Bản đồ sử dụng đất                            | 1992-2020   | Dữ liệu thiết lập mô hình VIC      | FAO -Sử dụng sản phẩm CCI về đất đai Phiên bản 2[193]                    |
| Dữ liệu viễn thám (Sentinel 1,2)              | 2016 - 2023 | Dữ liệu thiết lập thông số hồ chứa | Kế thừa dữ liệu từ đề tài mã số ĐTĐL.CN-06/23 [5]                        |

### 2.2. Phương pháp xác định điểm biến đổi

Việc phát hiện điểm biến đổi là rất quan trọng để xác định xem liệu một thay đổi đáng kể có xảy ra trong một chuỗi thời gian hay không. Trong hầu hết các trường hợp, thử nghiệm tính đồng nhất có thể được áp dụng để phát hiện một hoặc nhiều thay đổi hoặc điểm dừng trong một chuỗi thời gian. Có một số thử nghiệm có sẵn để kiểm tra tính đồng nhất của chuỗi thời gian, chẳng hạn như Thử nghiệm của Pettitt, Thử nghiệm về tính đồng nhất thông thường tiêu chuẩn, Thử nghiệm phạm vi của Buishand, Thử nghiệm tỷ lệ khả năng của Buishand và Thử nghiệm U của Buishand. Những thử nghiệm này đã được áp dụng rộng rãi trong việc phát hiện các điểm biến

đôi trong chuỗi dòng chảy của sông. Chi tiết về các bài kiểm tra điểm biến đổi được sử dụng trong nghiên cứu này được mô tả ngắn gọn dưới đây:

### 2.2.1. Kiểm định Pettitt

Kiểm định Pettitt (1979) là một công cụ phổ biến được sử dụng để kiểm tra mức độ phổ biến của sự thay đổi khí hậu nhanh chóng trong dữ liệu lịch sử [162]. Thử nghiệm có thể phát hiện sự thay đổi đáng kể về giá trị trung bình của chuỗi thời gian khi không xác định được thời gian chính xác của sự thay đổi [73]. Militino và cộng sự (2020), Güçlü (2020), Ryberg và cộng sự (2020) và nhiều tác giả khác đã giải thích phương pháp này [56, 104, 138]. Các biến T tuân theo một hoặc nhiều phân phối có cùng thông số vị trí (không thay đổi), ngược lại với phương án thay thế: tồn tại một điểm biến đổi [126]. Kiểm định Pettitt được định nghĩa về mặt toán học như sau:

$$K = \text{Max} \left| \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sign}(x_i - x_j) \right| \quad (2.1)$$

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{khi } x_i > x_j \\ 0 & \text{khi } x_i = x_j \\ -1 & \text{khi } x_i < x_j \end{cases}$$

trong đó điểm biến đổi của chuỗi nằm ở K. Mức độ tin cậy liên quan  $\rho$  cho chiều dài mẫu n có thể được mô tả như sau:

$$\rho \approx 2e^{\frac{-6K^2}{T^2+T^3}} \quad (2.2)$$

Giả thuyết không bị bác bỏ khi  $\rho$  nhỏ hơn mức độ tin cậy cụ thể. Xác suất ý nghĩa xấp xỉ  $p$  cho một điểm biến đổi được định nghĩa là:

$$p = 1 - \rho \quad (2.3)$$

### 2.2.2. Kiểm định tính đồng nhất chuẩn (Standard Normal Homogeneity Test)

Thống kê kiểm định  $T_k$  được sử dụng để so sánh giá trị trung bình của n quan sát đầu tiên với giá trị trung bình của n-k quan sát còn lại với n điểm dữ liệu [17, 52, 73]:

$$N = \frac{1}{k} \left( \sum_{i=1}^n \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \right)^2 + \frac{1}{n-k} \left( \sum_{i=k+1}^n \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \right)^2 \quad (2.4)$$

trong đó  $\bar{x}$  và  $\sigma_x$  là giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của chuỗi thời gian. Năm  $k$  có thể được coi là điểm biến đổi và bao gồm một điểm ngắt tại đó giá trị của  $T_k$  đạt giá trị cực đại.

### 2.2.3. Kiểm định phạm vi của Buishand

Kiểm định phạm vi của Buishand (1982) dựa trên giả thuyết không  $H_0$  rằng chuỗi số liệu là đồng nhất, tức là các quan sát là độc lập và có cùng giá trị trung bình theo thời gian [142, 153]. Kiểm định phạm vi của Buishand được mô tả như sau:

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \quad (2.5)$$

trong đó tổng một phần đã điều chỉnh  $S_k$  là độ lệch tích lũy từ trung bình đối với quan sát thứ  $k$  của một chuỗi  $x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n$  với trung bình  $\bar{x}$ .

Một chuỗi có thể đồng nhất mà không có bất kỳ điểm biến đổi nào nếu  $S_k \cong 0$  vì, trong chuỗi ngẫu nhiên, độ lệch so với trung bình sẽ được phân phối ở cả hai phía của trung bình của chuỗi. Ý nghĩa của sự dịch chuyển có thể được đánh giá bằng cách tính toán các tỷ lệ điều chỉnh lại theo phạm vi ( $R$ ) sử dụng phương trình sau:

$$R = \frac{\text{Max}(S_k) - \text{Min}(S_k)}{\bar{x}} \quad (2.6)$$

### 2.2.4. Kiểm định tỷ lệ khả năng của Buishand

Buishand (1984) [53] đã sửa đổi bài kiểm tra tỷ lệ khả năng Worsley (1979) [82] khi thời điểm thay đổi không được biết. Bài kiểm tra được mô tả như sau:

$$V' = \max_{1 \leq k \leq n-1} \left\{ \frac{|S'_k|}{\left[ D_e \sqrt{k(n-k) - \left( \frac{k(\bar{x}_k - \bar{x})}{D_x} \right)^2} \right]} \right\} \quad (2.7)$$

trong đó  $\bar{x}_k$  là trung bình của  $x_1, \dots, x_k$  và  $D_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}$

### 2.2.5. Kiểm định $U$ của Buishand

Giả thuyết không giống như trong phép thử phạm vi của Buishand (1984). Thống kê kiểm định là:

$$U = \frac{1}{n(n+1)} \sum_{k=1}^{n-1} \left( \frac{S_k}{D_x} \right)^2 \quad (2.8)$$

$$\text{với } D_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

### 2.3. Phương pháp phân tích hồi quy tuyến tính

Phương pháp hồi quy tuyến tính được sử dụng để xác định xu thế biến đổi của các yếu tố khí tượng, thủy văn [37, 149] và các đặc trưng dòng chảy theo thời gian. Phương pháp này cho phép lượng hóa mức độ và chiều hướng biến đổi thông qua hệ số góc của đường xu thế, đồng thời đánh giá mức độ phù hợp của xu thế tuyến tính với chuỗi số liệu quan trắc.

Với chuỗi số liệu  $X_t$  tại thời điểm  $t$ , phương trình hồi quy tuyến tính được biểu diễn:

$$X_t = a + bt + \varepsilon_t$$

trong đó:  $X_t$  là giá trị của biến nghiên cứu tại thời điểm  $t$ ;  $a$  là hệ số chặn;  $b$  là hệ số góc của đường xu thế;  $\varepsilon_t$  là sai số ngẫu nhiên.

Hệ số góc  $b$  được xác định theo:

$$b = \frac{\sum_{t=1}^n (t - \bar{t}) (X - \bar{X})}{\sum_{t=1}^n (t - \bar{t})^2}$$

trong đó,  $n$  là số lượng quan trắc;  $\bar{t}$  và  $\bar{X}$  lần lượt là giá trị trung bình của thời gian và chuỗi số liệu.

Giá trị  $b > 0$  thể hiện xu thế tăng,  $b < 0$  thể hiện xu thế giảm, trong khi  $b$  gần bằng 0 cho thấy xu thế tuyến tính không đáng kể. Để đánh giá mức độ giải thích của mô hình hồi quy, hệ số xác định  $R^2$  được sử dụng. Giá trị  $R^2$  càng lớn cho thấy sự biến thiên của chuỗi số liệu càng được giải thích tốt bởi xu thế tuyến tính.

### 2.4. Lựa chọn mô hình tính toán

Trong bối cảnh hiện nay, biến đổi khí hậu đang gây ra những thay đổi sâu sắc đối với chế độ mưa – dòng chảy, đồng thời làm gia tăng tần suất và cường độ của các hiện tượng cực đoan như hạn hán kéo dài, lũ quét, và ngập lụt đô thị,.... Những biến

đổi và biến động này đặt ra yêu cầu cấp thiết về việc sử dụng các mô hình thủy văn có khả năng phản ánh chính xác tác động của các yếu tố khí hậu đến chu trình nước. Bên cạnh đó, các tác động nhân sinh như quá trình đô thị hóa nhanh, chuyển đổi mục đích sử dụng đất, khai thác nước phục vụ tưới tiêu nông nghiệp, cũng như chế độ vận hành hồ chứa, đã và đang làm thay đổi đáng kể điều kiện thủy văn tự nhiên của các lưu vực. Những thay đổi này đòi hỏi các mô hình thủy văn phải có cấu trúc linh hoạt và khả năng mô phỏng sát thực tế hơn.

Trong khi các mô hình thủy văn truyền thống – bao gồm mô hình hộp đen và mô hình thông số tập trung – thường chỉ thích hợp trong những điều kiện ổn định, ít biến động và không thể hiện được rõ tính không đồng nhất về không gian và thời gian, thì các mô hình thủy văn bề mặt đất (Hydrological Land Surface Models – HLSMs) ngày càng được quan tâm và ứng dụng rộng rãi. HLSMs có khả năng tích hợp dữ liệu đầu vào đa dạng như địa hình, thảm phủ, đất đai, và điều kiện khí hậu, đồng thời mô phỏng chi tiết các quá trình tương tác đất – nước – khí quyển dựa trên nguyên lý cân bằng khối lượng và năng lượng. Nhờ đó, chúng có ưu thế vượt trội trong việc mô phỏng các quá trình phi tuyến của hệ thống thủy văn dưới tác động đồng thời của khí hậu và con người. Do vậy, trong khuôn khổ luận án này, chỉ tập trung xem xét và ứng dụng các mô hình thủy văn bề mặt đất nhằm đáp ứng yêu cầu mô phỏng thực tế và nâng cao độ tin cậy của kết quả đánh giá trong điều kiện lưu vực chịu ảnh hưởng mạnh của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh.

#### ***2.4.1. Mô hình bề mặt đất***

Mô hình bề mặt đất (Land Surface Models - LSMs) là công cụ số học mô phỏng các quá trình trao đổi năng lượng, nước và carbon giữa bề mặt đất và khí quyển, có xét đến tác động của con người và động lực sinh thái. Chúng đóng vai trò quan trọng trong việc hiểu và dự đoán tác động của biến đổi khí hậu đến hệ sinh thái và xã hội loài người. Ban đầu, các LSMs được xây dựng để cung cấp điều kiện biên cho các mô hình khí hậu, thông qua việc mô phỏng sự phân bố năng lượng, độ phản xạ và độ gồ ghề bề mặt. Tuy nhiên, trước các vấn đề của biến đổi khí hậu toàn cầu, hai

phát hiện quan trọng đã thúc đẩy sự phát triển của LSMs: (1) phản ứng sinh lý của thảm thực vật đối với sự gia tăng nồng độ CO<sub>2</sub> có thể tác động rõ rệt đến khí hậu toàn cầu; và (2) sự tương tác giữa chu trình carbon và khí hậu có thể làm gia tăng tốc độ nóng lên toàn cầu. Do đó, các mô hình hiện đại ngày càng tập trung vào mô phỏng phản hồi sinh – lý và sinh – hóa giữa bề mặt đất và khí quyển.

Ngày nay, các LSMs hiện đại đã tích hợp mô phỏng động lực độ ẩm đất, chu trình carbon – nitơ, phân bố thảm thực vật, quá trình quang hợp, các hoạt động sử dụng đất (land use), tác động đô thị hóa, và gần đây là cả chu trình phospho, cấu trúc phát triển cây trồng, cũng như các quá trình sinh học khác như hoạt động vi sinh vật, ảnh hưởng của côn trùng và các giới hạn sinh trưởng do thiếu dinh dưỡng. Việc mở rộng phạm vi biểu diễn này cho phép các LSMs không chỉ mô phỏng các dòng năng lượng và vật chất trong hệ sinh thái, mà còn cung cấp nền tảng đánh giá tác động của biến đổi khí hậu đến năng suất mùa vụ, hạn hán, nguy cơ cháy rừng, lũ lụt, tài nguyên nước và sức khỏe hệ sinh thái.

Sự tiến bộ trong công nghệ tính toán và khả năng truy cập hệ thống dữ liệu vệ tinh, viễn thám và quan trắc toàn cầu đã cho phép các LSMs vận hành ở độ phân giải không gian ngày càng cao (100–1000m), cho phép mô phỏng chi tiết các quá trình ở quy mô địa phương. Đồng thời, các mô hình này đang ngày càng tích hợp các quá trình thủy văn quan trọng như dòng chảy ngang, chuyển động nước trên mặt, và mô-đun diễn toán dòng sông. Một số LSMs hiện đại đã bao gồm mô phỏng hoạt động tưới tiêu, vận hành hồ chứa và khai thác nước – các thành phần cốt lõi trong mô hình thủy văn nhân sinh (human-influenced hydrology), và cũng là những đặc điểm quan trọng của các Mô hình Thủy văn Bề mặt Đất (Hydrologic-Land Surface Models – H-LSMs).

Trong vài thập kỷ gần đây, các mô hình thủy văn bề mặt đất đã không ngừng mở rộng cả về phạm vi biểu diễn lẫn mức độ phức tạp. Cùng với sự phát triển này, các H-LSMs đã tích hợp ngày càng nhiều quá trình thủy văn quan trọng. Bên cạnh khả năng mô phỏng dòng chảy ngang, chuyển động của nước gần mặt đất và diễn

toán dòng chảy sông – những quá trình vốn đặc trưng của các mô hình thủy văn truyền thống[21, 34]– nhiều HLSMs hiện nay còn được bổ sung các mô-đun mô phỏng hoạt động tưới tiêu và quản lý nước [57, 128, 167], các mô-đun này trước đây chủ yếu phát triển trong các mô hình thủy văn toàn cầu (Global Hydrological Models – GHMs) [121, 168]. Việc tích hợp các quá trình trên đã mở rộng đáng kể phạm vi ứng dụng của HLSMs, giúp các mô hình này không chỉ phục vụ mô phỏng tương tác đất – khí quyển mà còn có thể áp dụng cho nhiều bài toán thủy văn khác nhau. Những mô hình kết hợp đầy đủ các quá trình vật lý và các tác động của con người như vậy thường được gọi là Mô hình Thủy văn Bề mặt Đất (Hydrologic Land Surface Models – HLSMs) [125].

Các mô hình thủy văn bề mặt đất (Hydrologic Land Surface Models – HLSMs) yêu cầu một số lượng lớn các thông số để mô tả các quá trình liên quan đến thảm thực vật, đặc tính đất và tuyết. Thông thường, các thông số này được thiết lập trước dựa trên các bảng tra cứu (lookup tables) [103] và hiếm khi được hiệu chỉnh, đặc biệt là trong các ứng dụng ở quy mô lưu vực lớn hoặc toàn cầu [54]. Việc hiệu chỉnh thông số trong HLSMs gặp nhiều hạn chế chủ yếu do khó khăn trong việc xử lý và quản lý số lượng lớn thông số, cũng như đòi hỏi cao về năng lực tính toán. Những thách thức này trở nên nghiêm trọng hơn khi mô hình được áp dụng cho các lưu vực có điều kiện địa hình, sử dụng đất và hệ thống quản lý nước phức tạp – như trường hợp lưu vực sông Đà. Để khắc phục các hạn chế này, một số hướng tiếp cận đã được đề xuất nhằm nâng cao hiệu quả hiệu chỉnh mô hình, bao gồm: giảm số lượng thông số cần hiệu chỉnh thông qua các chiến lược đơn giản hóa cấu trúc mô hình [65, 114], áp dụng các thuật toán hiệu chỉnh hiện đại với hiệu suất tính toán cao [161], sử dụng các chiến lược tiền hiệu chỉnh (preconditioning strategies) [131], hoặc xây dựng các mô hình thay thế (surrogate models) [132].

#### ***2.4.2. Một số các mô hình thủy văn bề mặt phổ biến***

Dưới đây là một số ví dụ về các mô hình thủy văn bề mặt phổ biến hiện nay:

##### **1. Mô hình Noah Land Surface Model (Noah LSM)**

Noah LSM là một trong những mô hình thủy văn bề mặt đất phổ biến nhất hiện nay, được phát triển bởi Trung tâm bay vũ trụ Goddard của NASA (NASA Goddard Space Flight Center) và sau này được ứng dụng rộng rãi trong hệ thống Dự báo Mô hình Toàn cầu (Global Forecast System – GFS) và các mô hình khu vực như WRF (Weather Research and Forecasting). Mô hình này được thiết kế nhằm mô phỏng chính xác quá trình trao đổi nước và năng lượng giữa bề mặt đất và khí quyển, đặc biệt tập trung vào các yếu tố như lượng bốc hơi, thấm nước vào đất, dòng chảy mặt và dòng chảy ngầm, cũng như các đặc tính nhiệt động của đất.

Một trong những ưu điểm nổi bật của Noah LSM là khả năng mô phỏng toàn diện các quá trình thủy văn và năng lượng mặt đất. Cấu trúc mô hình cho phép mô tả chi tiết các lớp đất với các thông số như độ ẩm, nhiệt độ và khả năng truyền nhiệt, đồng thời tích hợp nhiều yếu tố đầu vào từ dữ liệu quan sát hoặc mô hình khí tượng như nhiệt độ không khí, bức xạ mặt trời, lượng mưa, và tốc độ gió. Chính sự kết hợp này giúp mô hình có khả năng phản ánh tương đối chính xác sự biến động của điều kiện mặt đất theo thời gian.

Ngoài ra, Noah LSM cũng cho phép người dùng tùy chỉnh nhiều thông số mô hình để phù hợp với điều kiện thực tế của từng lưu vực hoặc khu vực nghiên cứu. Tính linh hoạt này giúp mô hình có thể ứng dụng hiệu quả trong các nghiên cứu quy mô từ khu vực nhỏ (như một tiểu lưu vực) đến cấp vùng hoặc quốc gia.

Tuy nhiên, một số hạn chế cũng cần được lưu ý. Mặc dù Noah LSM mô phỏng khá tốt các quá trình vật lý cơ bản, nhưng mô hình vẫn còn thiếu các mô đun phản ánh tác động của con người như tưới tiêu, điều tiết hồ chứa, hoặc thay đổi sử dụng đất có tính linh hoạt cao. Việc hiệu chỉnh và kiểm nghiệm mô hình ở những khu vực có dữ liệu hạn chế cũng gặp nhiều khó khăn do số lượng thông số lớn và mối quan hệ phi tuyến giữa chúng.

Tổng thể, Noah LSM là một công cụ mạnh mẽ trong mô phỏng chu trình nước và năng lượng mặt đất. Với khả năng tích hợp trong các mô hình khí hậu và thời tiết hiện đại, mô hình này đã và đang đóng vai trò quan trọng trong các nghiên cứu liên

ngành về khí hậu, thủy văn và quản lý tài nguyên nước, đặc biệt là trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng phức tạp.

## **2. Mô hình Community Land Model (CLM)**

Community Land Model (CLM) là một mô hình thủy văn bề mặt đất tiên tiến, được phát triển bởi Trung tâm Nghiên cứu Khí quyển Quốc gia Hoa Kỳ (NCAR) trong khuôn khổ Dự án Mô hình Hệ thống Trái Đất Cộng đồng (Community Earth System Model – CESM). CLM được thiết kế nhằm mô phỏng một cách toàn diện các quá trình vật lý, sinh học và hóa học diễn ra tại bề mặt đất và trong lớp đất gần bề mặt, từ đó đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu về môi trường và biến đổi khí hậu toàn cầu.

CLM nổi bật với khả năng tích hợp đa dạng các quá trình liên quan đến nước, năng lượng và khí quyển. Cụ thể, mô hình mô phỏng chi tiết các quá trình như bốc thoát hơi, dòng chảy mặt, dòng chảy ngầm, truyền nhiệt, trao đổi khí CO<sub>2</sub>, cũng như sự phát triển và phản ứng của thảm thực vật. Nhờ vào cấu trúc mô-đun linh hoạt, CLM cho phép người dùng cấu hình các thành phần theo mục tiêu nghiên cứu cụ thể, bao gồm mô hình thảm thực vật động (Dynamic Global Vegetation Model – DGVM), mô hình băng tuyết, và mô hình tương tác giữa đất và vi sinh vật.

Một trong những thế mạnh lớn nhất của CLM là khả năng mở rộng không gian và thời gian mô phỏng. Mô hình có thể được áp dụng từ quy mô lưu vực nhỏ đến toàn cầu, và từ các chu kỳ thời gian ngắn như ngày, tuần đến hàng thập kỷ hoặc thế kỷ. Đồng thời, CLM thường được tích hợp trong các mô hình khí hậu lớn như CESM, cho phép mô phỏng đồng thời sự tương tác giữa bề mặt đất và các thành phần khác của hệ thống khí hậu như khí quyển, đại dương và băng quyển. Điều này giúp nâng cao độ chính xác và tính liên ngành trong các nghiên cứu dự báo khí hậu và phân tích tác động môi trường.

Tuy nhiên, chính sự toàn diện và tính tích hợp cao cũng khiến CLM trở thành một mô hình có độ phức tạp lớn. Người dùng cần có kiến thức chuyên sâu không chỉ về thủy văn mà còn về khí tượng, sinh thái học và mô hình hóa toán học để có thể

cấu hình, hiệu chỉnh và phân tích kết quả từ mô hình một cách hiệu quả. Bên cạnh đó, yêu cầu về dữ liệu đầu vào của CLM là rất cao, đòi hỏi các thông tin chi tiết về địa hình, khí hậu, thảm thực vật, tính chất đất và các điều kiện biên khác. Việc thu thập và xử lý các dữ liệu này, đặc biệt ở những khu vực có ít dữ liệu quan trắc, có thể gặp nhiều khó khăn.

Thêm vào đó, CLM có khả năng hiệu chỉnh tại địa phương tương đối hạn chế, nhất là trong các khu vực có điều kiện đất đai và thảm phủ không điển hình. Việc này có thể ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả mô phỏng trong các nghiên cứu ứng dụng cụ thể. Ngoài ra, do quy mô và độ chi tiết của mô hình, việc vận hành CLM đòi hỏi một hạ tầng tính toán mạnh mẽ, thường là các siêu máy tính hoặc hệ thống máy chủ hiệu năng cao, điều này có thể là rào cản đối với một số nhóm nghiên cứu hoặc các cơ quan quản lý tài nguyên nhỏ.

Tóm lại, Community Land Model là một công cụ mô hình hóa mạnh mẽ, cung cấp cái nhìn toàn diện về tương tác giữa nước, năng lượng và sinh quyển tại bề mặt đất. Mặc dù còn tồn tại một số thách thức liên quan đến vận hành và yêu cầu dữ liệu, CLM vẫn là lựa chọn ưu tiên trong các nghiên cứu hiện đại về thủy văn, khí hậu và sinh thái học, đặc biệt trong bối cảnh cần đánh giá tác động lâu dài của biến đổi khí hậu lên hệ thống đất – nước – khí quyển toàn cầu.

### **3. Mô hình Variable Infiltration Capacity (VIC)**

Mô hình Variable Infiltration Capacity (VIC) là một mô hình thủy văn bề mặt quy mô lớn, bán phân bố (semi-distributed), được phát triển nhằm mô phỏng chu trình thủy văn trên bề mặt đất, đặc biệt tập trung vào các quá trình thấm nước, bốc thoát hơi, dòng chảy mặt và dòng chảy ngầm. VIC được thiết kế để phục vụ các nghiên cứu từ quy mô lưu vực đến toàn cầu, với khả năng tích hợp các quá trình năng lượng – thủy văn nhằm phân tích mối quan hệ giữa khí hậu và nguồn nước.

VIC vận hành dựa trên nguyên lý cân bằng năng lượng và cân bằng nước, sử dụng cấu trúc gồm nhiều lớp đất để mô phỏng sự phân bố độ ẩm theo chiều sâu. Trong đó, lớp đất trên cùng đảm nhận vai trò chính trong quá trình bốc hơi và truyền nhiệt,

trong khi các lớp sâu hơn điều khiển sự thấm nước và dòng chảy ngầm. Mô hình cho phép tính toán sự thấm không đồng đều theo không gian nhờ vào phương pháp phân bố khả năng thấm biến thiên (variable infiltration curve), phản ánh thực tế rằng các khu vực khác nhau trên cùng một ô lưới có khả năng hấp thụ nước khác nhau.

Một ưu điểm nổi bật của VIC là khả năng mô phỏng trên nhiều quy mô không gian – từ lưu vực nhỏ cho đến toàn cầu – và thời gian – từ ngày đến hàng thập kỷ. Nhờ đó, mô hình được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về thủy văn, biến đổi khí hậu, dự báo dòng chảy và quản lý tài nguyên nước. VIC cũng thường được tích hợp vào các mô hình hệ thống khí hậu để mô phỏng tương tác giữa khí quyển và bề mặt đất, đặc biệt là nhằm đánh giá ảnh hưởng của biến đổi khí hậu đến vòng tuần hoàn nước.

Cấu trúc mô đun của VIC cho phép người dùng tùy chỉnh các thông số mô hình và các thành phần mô phỏng tùy theo mục tiêu nghiên cứu và điều kiện địa phương. Mô hình hỗ trợ tích hợp các dữ liệu đầu vào về địa hình, thảm thực vật, đất, khí tượng... với định dạng và độ phân giải linh hoạt. Chính điều này đã góp phần đưa VIC trở thành một công cụ phổ biến trong cộng đồng nghiên cứu thủy văn, với nhiều tài liệu hướng dẫn, dữ liệu mẫu và hỗ trợ kỹ thuật từ các nhóm phát triển.

Tuy nhiên, cũng như nhiều mô hình thủy văn bề mặt khác, VIC tồn tại một số hạn chế. Trước hết, quá trình cấu hình mô hình tương đối phức tạp, đòi hỏi người dùng có kiến thức chuyên sâu về thủy văn, mô hình hóa và kỹ năng xử lý dữ liệu đầu vào. Hơn nữa, mô hình yêu cầu dữ liệu đầu vào đa dạng và có độ chính xác cao, đặc biệt là về thảm thực vật, tính chất đất và các yếu tố khí tượng. Việc thu thập và xử lý những dữ liệu này tại các khu vực thiếu thông tin quan trắc có thể gây ra khó khăn lớn trong việc ứng dụng mô hình hiệu quả.

Một nhược điểm khác của VIC là khả năng hiệu chỉnh tại khu vực cụ thể còn hạn chế. Do đặc tính mô phỏng bán phân bố, các điều kiện đất và thảm phủ địa phương không phải lúc nào cũng được phản ánh đầy đủ, dẫn đến độ chính xác của mô phỏng bị ảnh hưởng trong các trường hợp đặc thù. Cuối cùng, do các phép tính thủy lực

phức tạp và việc mô phỏng nhiều lớp đất trên không gian lớn, VIC yêu cầu tài nguyên tính toán đáng kể, bao gồm cả phần cứng mạnh mẽ và thời gian xử lý dài.

Tóm lại, mô hình Variable Infiltration Capacity là một công cụ có giá trị cao trong việc nghiên cứu chu trình thủy văn và tác động của khí hậu đến tài nguyên nước. Với khả năng mô phỏng linh hoạt và tích hợp đa dạng các quá trình vật lý, VIC đã và đang được ứng dụng rộng rãi trong các nghiên cứu thủy văn hiện đại. Tuy nhiên, hiệu quả ứng dụng của mô hình phụ thuộc lớn vào khả năng thu thập dữ liệu đầu vào, năng lực kỹ thuật của người sử dụng và hệ thống tính toán được triển khai.

#### **4. Mô hình Simple Biosphere (SiB)**

Mô hình Simple Biosphere (SiB) là một trong những mô hình bề mặt đất được phát triển nhằm mô phỏng mối quan hệ tương tác giữa thảm thực vật và môi trường khí quyển. Được xây dựng trên cơ sở kết hợp giữa các quy luật vật lý và sinh học, SiB cung cấp một cách tiếp cận hiệu quả để mô tả các quá trình truyền năng lượng, truyền khối, và cân bằng nước giữa bề mặt đất và khí quyển thông qua vai trò của thực vật.

SiB đóng vai trò như một mô hình trung gian giữa bề mặt đất và khí quyển trong các mô hình khí hậu toàn cầu (GCMs), cho phép mô phỏng các quá trình như bốc thoát hơi từ lá (transpiration), bốc hơi từ bề mặt đất (evaporation), hấp thụ bức xạ mặt trời và truyền nhiệt. Mô hình sử dụng các thông tin về loại thảm thực vật, tính chất đất và điều kiện khí tượng để tính toán dòng năng lượng và nước giữa bề mặt đất và tầng khí quyển thấp.

Một trong những ưu điểm nổi bật của SiB là sự tập trung vào mô phỏng tương tác giữa thực vật và môi trường. Điều này giúp tăng cường hiểu biết về vai trò sinh lý của thực vật trong điều hòa chu trình thủy văn và năng lượng, đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu đang ảnh hưởng mạnh mẽ đến cấu trúc thảm thực vật toàn cầu. SiB là một mô hình có cấu trúc tương đối đơn giản và tối ưu hóa cho việc tích hợp vào các mô hình khí hậu lớn, điều này giúp giảm thiểu chi phí tính toán mà vẫn đảm bảo mức độ chi tiết cần thiết trong mô phỏng.

Ngoài ra, SiB cho phép hiệu chỉnh các thông số mô hình dựa trên dữ liệu thực tế tại địa phương như kiểu thảm thực vật, độ ẩm đất, chỉ số diện tích lá (LAI), hệ số phản xạ mặt đất (albedo), nhờ đó nâng cao khả năng mô phỏng tại các khu vực có điều kiện đặc thù. Mô hình đã được ứng dụng rộng rãi trong các nghiên cứu liên quan đến biến đổi khí hậu, đánh giá tác động môi trường, và phân tích các cơ chế tương tác giữa sinh quyển và khí quyển.

Tuy nhiên, mô hình SiB cũng tồn tại một số hạn chế nhất định. Trước hết, do cấu trúc đơn giản, SiB thường phù hợp cho các nghiên cứu tổng quan ở quy mô lớn như lục địa hoặc toàn cầu, nhưng không thích hợp để mô phỏng chi tiết các quá trình thủy văn ở quy mô lưu vực hoặc quy mô nhỏ hơn. Ngoài ra, SiB chưa tích hợp đầy đủ các quá trình thủy văn phức tạp như dòng chảy ngầm, thấm nước sâu hoặc chuyển động ngang của nước trong đất, điều này hạn chế khả năng sử dụng mô hình cho các nghiên cứu chuyên sâu về thủy văn bề mặt.

Một điểm hạn chế khác là khả năng hiệu chỉnh mô hình đối với các điều kiện môi trường đa dạng còn tương đối thấp so với các mô hình phức tạp hơn. Việc hiệu chỉnh mô hình trong điều kiện biến đổi thực vật theo thời gian cũng chưa được thực hiện hiệu quả, do mô hình giả định sự ổn định của các đặc tính thực vật trong suốt quá trình mô phỏng. Điều này ảnh hưởng đến độ chính xác khi mô phỏng các hiện tượng dài hạn như suy thoái rừng, thay đổi sử dụng đất hoặc tác động của biến đổi khí hậu đến sinh quyển.

Tóm lại, mô hình Simple Biosphere (SiB) là một công cụ hiệu quả và dễ tích hợp để nghiên cứu tương tác giữa thảm thực vật và khí quyển trong bối cảnh khí hậu. Với cấu trúc đơn giản và khả năng tích hợp vào các mô hình khí hậu quy mô lớn, SiB đặc biệt phù hợp cho các nghiên cứu tổng quát về năng lượng và chu trình nước ở bề mặt đất. Tuy nhiên, việc sử dụng mô hình cần được cân nhắc trong bối cảnh yêu cầu mô phỏng chi tiết các quá trình thủy văn hoặc đánh giá tác động dài hạn có sự thay đổi mạnh về sinh quyển.

## 5. Mô hình PDM (Porous-layer Dynamics in a Multilayered Domain)

Mô hình PDM là một mô hình thủy văn tiên tiến được phát triển nhằm mô phỏng chi tiết các quá trình thấm và dòng chảy ngầm trong môi trường đất đa lớp. Với khả năng mô tả chính xác cấu trúc địa chất phức tạp cùng sự tương tác giữa các lớp đất khác nhau, PDM được xem là công cụ hữu hiệu trong nghiên cứu các quá trình thủy văn ngầm đa chiều, bao gồm cả lớp đất bề mặt và các lớp phía sâu bên dưới.

Một ưu điểm nổi bật của mô hình PDM là khả năng mô phỏng tương tác đa chiều giữa địa hình đa lớp và các quá trình thủy văn như thấm nước, dòng ngầm, và dòng chảy bề mặt. Nhờ tính linh hoạt cao trong cấu trúc mô hình, người dùng có thể tùy chỉnh các thông số mô hình sao cho phù hợp với đặc điểm địa phương và điều kiện môi trường cụ thể. Điều này giúp nâng cao độ chính xác và tính khả thi của các mô phỏng thủy văn tại các khu vực có điều kiện đất đá và địa hình phức tạp.

Cấu trúc đa lớp của PDM cho phép mô hình mở rộng khả năng mô phỏng đến các môi trường đất đá phức tạp, từ đó đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá dòng chảy ngầm, cân bằng nước dưới bề mặt và tương tác giữa các lớp đất với nguồn nước mặt. Các thông số vật lý như độ thấm, trữ lượng nước và khả năng dẫn nước được mô hình hóa chi tiết theo từng lớp, cho phép mô phỏng chính xác quá trình lưu chuyển nước trong lòng đất.

Tuy nhiên, mô hình PDM cũng có những hạn chế đáng kể. Đầu tiên là độ phức tạp cao trong việc xây dựng và vận hành mô hình, đòi hỏi khối lượng lớn dữ liệu đầu vào với độ chính xác cao, bao gồm thông tin chi tiết về địa hình, tính chất đất, đặc điểm thảm thực vật, cũng như dữ liệu khí tượng. Việc thu thập và xử lý các dữ liệu này không chỉ tốn kém về thời gian mà còn phụ thuộc nhiều vào điều kiện thực tế và khả năng truy cập dữ liệu tại khu vực nghiên cứu. Bên cạnh đó, quá trình hiệu chỉnh mô hình đòi hỏi năng lực chuyên môn sâu về thủy văn và mô hình hóa, làm cho việc áp dụng mô hình trở nên khó khăn trong những khu vực thiếu dữ liệu hoặc không có sự hỗ trợ từ các chuyên gia giàu kinh nghiệm. Ngoài ra, do tính phức tạp về mặt tính toán, PDM yêu cầu sử dụng tài nguyên phần cứng mạnh mẽ và thời gian mô phỏng

kéo dài, gây hạn chế trong việc ứng dụng rộng rãi trong thực tế hoặc nghiên cứu với quy mô lớn.

Tóm lại, mô hình PDM là một công cụ mạnh mẽ và chi tiết để mô phỏng các quá trình thấm và dòng chảy ngầm trong môi trường đất đa lớp. Với khả năng mô tả đa chiều và tương tác phức tạp giữa các lớp đất, PDM đóng vai trò quan trọng trong các nghiên cứu thủy văn ngầm. Tuy nhiên, việc ứng dụng mô hình đòi hỏi sự đầu tư lớn về dữ liệu, chuyên môn và tài nguyên tính toán, cần được cân nhắc kỹ lưỡng tùy theo mục tiêu và điều kiện nghiên cứu cụ thể.

## **6. Mô hình SAC (Simple Algorithm for the Characterization of Land Surface Processes)**

Mô hình SAC là một mô hình thủy văn đơn giản được phát triển nhằm mô phỏng các quá trình thủy văn bề mặt một cách nhanh chóng và hiệu quả. Với cấu trúc thiết kế gọn nhẹ và thuật toán đơn giản, SAC được ứng dụng rộng rãi trong các nghiên cứu có quy mô lớn hoặc những trường hợp yêu cầu tính toán nhanh, đặc biệt trong các mô hình khí hậu tổng hợp hoặc các hệ thống quản lý tài nguyên nước.

Ưu điểm nổi bật nhất của mô hình SAC chính là khả năng triển khai nhanh chóng và dễ dàng tích hợp vào các hệ thống mô phỏng tổng hợp. Mô hình cho phép hiệu chỉnh linh hoạt các thông số phù hợp với điều kiện đặc thù của từng khu vực nghiên cứu, từ đó cung cấp cái nhìn tổng quan về mối quan hệ giữa nước, năng lượng và địa hình trong quá trình thủy văn. Nhờ vào đặc tính này, SAC rất phù hợp cho các nghiên cứu quy mô lưu vực lớn hoặc toàn cầu, nơi mà việc đánh giá sơ bộ các quá trình thủy văn có vai trò quan trọng và không cần thiết phải mô phỏng chi tiết từng thành phần riêng lẻ.

Tuy nhiên, do thiết kế theo hướng đơn giản hóa các quá trình thủy văn, SAC có những hạn chế đáng kể khi áp dụng cho các nghiên cứu cần mô phỏng chính xác và chi tiết các tương tác phức tạp giữa các tầng đất, thực vật và khí quyển. Khả năng hiệu chỉnh mô hình cũng bị giới hạn do cấu trúc mô hình đơn giản, điều này dẫn đến khó khăn trong việc mở rộng hoặc tùy chỉnh cho các khu vực có điều kiện địa hình,

khí hậu hoặc sinh thái đặc thù. Do vậy, mô hình SAC không thích hợp cho các nghiên cứu chuyên sâu hoặc các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao về mô phỏng các quá trình thủy văn đa dạng và phức tạp.

Tóm lại, mô hình SAC là một công cụ hiệu quả và tiện lợi cho việc mô phỏng nhanh các quá trình thủy văn bề mặt trong các nghiên cứu quy mô lớn hoặc khi cần đánh giá tổng quan về chu trình thủy văn. Tuy nhiên, việc sử dụng SAC cần cân nhắc kỹ về tính phù hợp với mục tiêu nghiên cứu và điều kiện thực tế do các hạn chế trong khả năng mô phỏng chi tiết và hiệu chỉnh mô hình.

#### ***2.4.3. Tiêu chí lựa chọn mô hình phù hợp***

Để đạt được mục tiêu của luận án là nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy trong điều kiện chịu ảnh hưởng tổng hợp của biến đổi khí hậu và các hoạt động nhân sinh, đặc biệt là điều tiết hồ chứa, việc lựa chọn mô hình thủy văn phù hợp đóng vai trò then chốt. Nghiên cứu tập trung vào việc xác định nguyên nhân và định lượng mức độ đóng góp của từng nhân tố vào sự thay đổi chế độ thủy văn tại khu vực thượng lưu sông Đà. Các nhân tố được xem xét bao gồm: (i) biến đổi khí hậu, (ii) hoạt động kinh tế – xã hội trong khu vực, và (iii) tác động từ hệ thống các hồ chứa lớn ở thượng nguồn thuộc lãnh thổ Trung Quốc. Do đó, việc lựa chọn mô hình mô phỏng dòng chảy cần được cân nhắc một cách toàn diện, dựa trên các tiêu chí liên quan đến khả năng mô phỏng chi tiết các quá trình thủy văn – khí hậu, mức độ tương thích với điều kiện dữ liệu đầu vào, khả năng mô phỏng tác động điều tiết hồ chứa, cũng như khả năng phân tích các kịch bản tác động linh động. Các tiêu chí được đề xuất gồm:

Nhóm 1 - Khả năng mô phỏng và phân tích tác động thủy văn (TC1): Mô hình phải có khả năng mô phỏng đồng thời các yếu tố biến đổi khí hậu, hoạt động khai thác, sử dụng nước của con người, và vận hành hồ chứa, nhằm phản ánh chính xác sự tương tác phức tạp giữa các nhân tố tự nhiên và nhân sinh trong lưu vực.

*Bảng 2.2. Các tiêu chí nhóm 1 - khả năng mô phỏng và phân tích tác động thủy văn*

| <b>Mã</b> | <b>Nhóm tiêu chí</b>                                                    | <b>Diễn giải cụ thể</b>                                                                                                                                                                                                 |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TC1.1     | Khả năng mô phỏng đa nhân tố tác động                                   | Mô phỏng đồng thời hoặc riêng biệt ảnh hưởng của khí hậu, hoạt động nhân sinh (sử dụng nước, đất), và vận hành hồ chứa                                                                                                  |
| TC1.2     | Khả năng cung cấp đầu ra chi tiết và đa dạng về các thành phần thủy văn | Phân tách được các thành phần dòng chảy: dòng chảy mặt, dòng chảy cơ sở, mưa hiệu quả, bốc hơi tiềm năng...                                                                                                             |
| TC1.3     | Độ phân giải không gian – thời gian linh hoạt                           | Có thể mô phỏng với độ phân giải cao ( $\leq 5\text{km}$ ) và bước thời gian linh hoạt (giờ/ngày/tháng), phù hợp lưu vực đồi núi rộng lớn                                                                               |
| TC1.4     | Mức độ bao quát các quá trình thủy văn                                  | Mô hình có khả năng mô phỏng toàn diện các quá trình thủy văn chính, bao gồm: mưa, bốc hơi (tiềm năng và thực tế), dòng chảy mặt và dòng chảy ngầm, thấm nước, truyền ẩm trong đất, và tương tác giữa đất và khí quyển. |
| TC1.5     | Khả năng hiệu chỉnh – xác thực                                          | Dễ hiệu chỉnh thông số (parameter calibration), hỗ trợ đánh giá sai số (RMSE, NSE, PBIAS...)                                                                                                                            |

Nhóm 2 – Phù hợp với đặc điểm lưu vực sông Đà (TC2): Mô hình thủy văn được lựa chọn cần thể hiện mức độ thích nghi cao với điều kiện tự nhiên và bối cảnh quản lý tài nguyên nước đặc thù của lưu vực sông Đà. Cụ thể, mô hình phải có khả năng mô phỏng hiệu quả chế độ thủy văn đặc trưng bởi địa hình phân cắt mạnh, lượng mưa phân bố không đồng đều theo mùa và sự chi phối của hệ thống hồ chứa lớn với chức năng điều tiết đa mục tiêu. Đặc biệt, mô hình cần hỗ trợ mô phỏng tác động xuyên biên giới từ các hồ chứa thượng nguồn ngoài lãnh thổ Việt Nam, nhằm phản ánh đầy đủ các yếu tố điều khiển dòng chảy trong lưu vực. Bên cạnh đó, mô hình phải cho phép vận hành ổn định với các mức độ sẵn có khác nhau của dữ liệu khí tượng – thủy văn, thảm phủ bề mặt và sử dụng đất, bảo đảm khả năng áp dụng trong điều kiện hạn chế dữ liệu và tính khả thi trong các nghiên cứu ứng dụng thực tiễn.

*Bảng 2.3. Các tiêu chí nhóm 2 - phù hợp với đặc điểm lưu vực sông Đà*

| <b>Mã</b> | <b>Nhóm tiêu chí</b>                                                 | <b>Diễn giải cụ thể</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TC2.1     | Khả năng mô phỏng chế độ thủy văn theo mùa                           | Mô hình có khả năng tái hiện được đặc trưng dòng chảy theo mùa rõ rệt của lưu vực sông Đà, bao gồm mùa lũ tập trung và mùa kiệt kéo dài                                                                                                                                                                                                                            |
| TC2.2     | Khả năng mô phỏng tác động điều tiết liên hồ trên lưu vực            | Mô hình có khả năng mô phỏng ảnh hưởng tổng hợp của hệ thống các hồ chứa trên toàn lưu vực sông Đà, bao gồm cả các hồ thuộc lãnh thổ Trung Quốc, đến chế độ dòng chảy hạ lưu. Điều này bao gồm các tác động do quy trình vận hành hồ đơn lẻ và liên hồ, thay đổi dòng chảy tự nhiên theo không gian và thời gian.                                                  |
| TC2.3     | Linh hoạt trong cấu hình thông số hồ chứa khi thiếu dữ liệu chi tiết | Mô hình cho phép thiết lập và điều chỉnh thông số vận hành hồ chứa trong điều kiện thiếu dữ liệu đo đạc thực tế, đồng thời hỗ trợ áp dụng linh hoạt các quy luật điều tiết khác nhau như theo ngày, tuần, mùa hoặc năm. Điều này giúp mô phỏng sát với đặc điểm vận hành thực tế của các hồ chứa trong và ngoài lãnh thổ, đặc biệt ở khu vực thượng nguồn sông Đà. |
| TC2.4     | Khả năng hoạt động hiệu quả với điều kiện dữ liệu hạn chế            | Mô hình có thể hiệu chỉnh và vận hành ổn định trong điều kiện dữ liệu đầu vào không đầy đủ hoặc không đồng nhất, phù hợp với bối cảnh thiếu hụt số liệu quan trắc tại khu vực biên giới và vùng núi cao. Mô hình cho phép linh hoạt trong cấu hình đầu vào, từ chi tiết đến đơn giản hóa, nhưng vẫn đảm bảo độ tin cậy của kết quả mô phỏng dòng chảy.             |

**Nhóm 3 – Tính linh hoạt, mở rộng và chuyển giao (TC3):** Mô hình được lựa chọn cần có khả năng thích ứng và phát triển lâu dài, nhằm hỗ trợ hiệu quả cho nghiên cứu cũng như ứng dụng thực tiễn. Việc lựa chọn một mô hình linh hoạt, dễ mở rộng và có tính chuyển giao cao sẽ giúp tiết kiệm thời gian, chi phí đào tạo, đồng thời nâng cao khả năng kết nối, hợp tác nghiên cứu trong nước và quốc tế.

*Bảng 2.4. Các tiêu chí nhóm 3 - tính linh hoạt, mở rộng và chuyển giao*

| Mã    | Nhóm tiêu chí                         | Diễn giải cụ thể                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TC3.1 | Mã nguồn mở và khả năng phát triển    | Mô hình có mã nguồn mở hoặc dễ tiếp cận, cho phép người dùng tùy biến, hiệu chỉnh và mở rộng theo mục tiêu nghiên cứu cụ thể. Cấu trúc mã rõ ràng, có khả năng tích hợp với các công cụ và mô hình khác.                                                 |
| TC3.2 | Cộng đồng sử dụng rộng rãi            | Mô hình được ứng dụng rộng rãi trong nghiên cứu và quản lý tài nguyên nước tại nhiều quốc gia, đặc biệt trong các nghiên cứu về biến đổi khí hậu và quản lý lưu vực, qua đó tạo điều kiện thuận lợi cho học hỏi, chia sẻ kinh nghiệm và hỗ trợ kỹ thuật. |
| TC3.3 | Tài liệu hướng dẫn đầy đủ và cập nhật | Hệ thống tài liệu kỹ thuật chi tiết, bao gồm hướng dẫn cài đặt, cấu hình, hiệu chỉnh, chạy mô hình và phân tích đầu ra, được duy trì và cập nhật thường xuyên.                                                                                           |
| TC3.4 | Dễ dàng chuyển giao và đào tạo        | Mô hình dễ cài đặt và sử dụng, thuận tiện trong việc chuyển giao công nghệ cho các cơ quan quản lý, đơn vị tư vấn hoặc các nhóm nghiên cứu mới. Yêu cầu về hạ tầng tính toán và kỹ năng lập trình không quá cao.                                         |

Để có thể đáp ứng được mục tiêu của của luận án là nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy phần thượng lưu vực sông Đà dưới tác động tổng hợp của biến đổi khí hậu, hoạt động KTXH và hệ thống các hồ chứa chính thuộc Trung Quốc đến biên giới Việt Trung thì mô hình mô phỏng dòng chảy được lựa chọn sử dụng cần hội tụ ưu điểm của 3 nhóm tiêu chí trên.

*Bảng 2.5. So sánh đánh giá một số mô hình thủy văn bề mặt phổ biến theo các tiêu chí*

| Tiêu chí               |        | Mô hình thủy văn bề mặt |     |     |     |     |     |
|------------------------|--------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                        |        | Noah<br>LSM             | CLM | VIC | SiB | PDM | SAC |
| <b>TC 1 – Khả năng</b> | TC 1.1 | √                       | √   | √   | √   | √   | √   |
|                        | TC 1.2 |                         | √   | √   |     |     |     |

| Tiêu chí                                                                           |        | Mô hình thủy văn bề mặt |     |     |     |     |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                                                    |        | Noah<br>LSM             | CLM | VIC | SiB | PDM | SAC |
| <b>của mô hình</b>                                                                 | TC 1.3 |                         |     | √   |     |     |     |
|                                                                                    | TC 1.4 | √                       | √   | √   | √   | √   | √   |
|                                                                                    | TC 1.5 |                         |     | √   |     | √   |     |
| <b>TC 2 –<br/>Phù hợp<br/>với đặc<br/>trưng của<br/>khu vực<br/>nghiên<br/>cứu</b> | TC2.1  | √                       |     | √   |     | √   | √   |
|                                                                                    | TC2.2  | √                       | √   | √   | √   | √   | √   |
|                                                                                    | TC2.3  |                         |     | √   |     |     |     |
|                                                                                    | TC2.4  |                         |     | √   |     |     |     |
| <b>TC 3 –<br/>Tính linh<br/>hoạt, mở<br/>rộng và<br/>chuyển<br/>giao</b>           | TC 3.1 | √                       | √   | √   | √   | √   | √   |
|                                                                                    | TC 3.2 | √                       | √   | √   | √   | √   | √   |
|                                                                                    | TC 3.3 | √                       | √   | √   | √   |     |     |
|                                                                                    | TC 3.4 | √                       |     | √   |     |     |     |

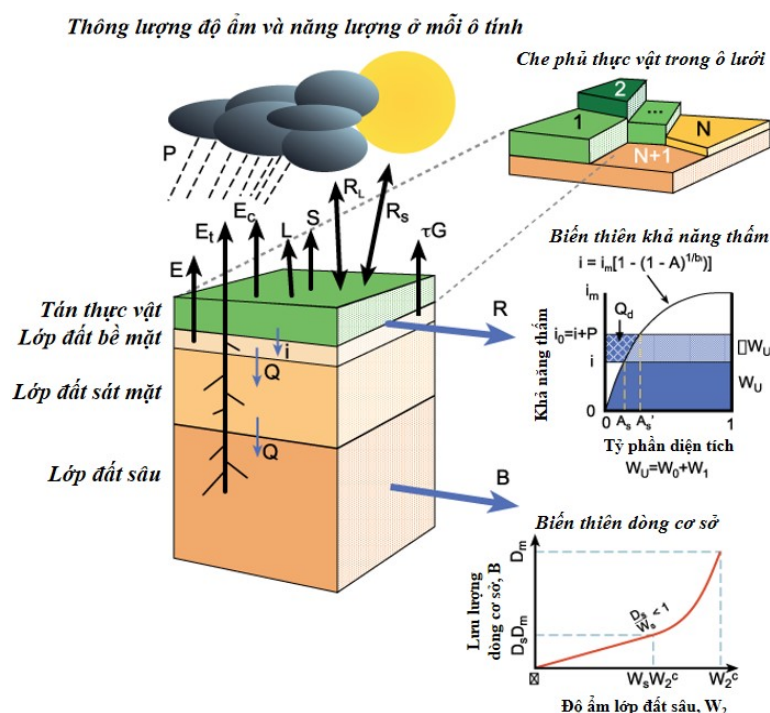
Qua so sánh theo các nhóm tiêu chí về (i) năng lực mô phỏng thủy văn, (ii) mức độ phù hợp với điều kiện lưu vực sông Đà, và (iii) tính linh hoạt và khả năng chuyển giao, mô hình VIC cho thấy sự vượt trội so với các mô hình khác. VIC mô phỏng tốt các thành phần dòng chảy, hoạt động ổn định trong điều kiện dữ liệu hạn chế, phù hợp với đặc điểm địa hình – khí hậu phân hóa mạnh của lưu vực, đồng thời dễ hiệu chỉnh và mở rộng cho các kịch bản biến đổi khí hậu và tác động nhân sinh. Vì vậy, mô hình VIC được lựa chọn là mô hình tối ưu cho nghiên cứu này.

#### **2.4.4. Giới thiệu mô hình VIC**

Trong điều kiện khó khăn về nguồn tài liệu ở thượng lưu vực sông Đà thuộc Trung Quốc, để đạt được mục tiêu, luận án đã lựa chọn công cụ hỗ trợ tiên tiến của thế giới được áp dụng nhiều trong tính toán dòng chảy hình thành trên lưu vực trong

những năm gần đây. Đó là mô hình Biến thiên khả năng thấm VIC (Variable Infiltration Capacity).

Mô hình VIC nằm trong nhóm mô hình dựa vật lý (physical-based model). Các nhà khoa học tính toán đã xác định mô hình dựa vật lý là một công cụ mạnh được sử dụng để mô tả và dự đoán hành vi của một hệ thống hoặc hiện tượng thực tế bằng cách vận dụng các nguyên lý và định luật của vật lý. Thay vì chỉ dựa vào dữ liệu hoặc các phương pháp thống kê, mô hình này có thể tái tạo lại các quá trình vật lý bên trong hệ thống để đưa ra dự đoán. Mô hình VIC là mô hình thủy văn bán phân bố dựa trên các quy luật vật lý của chu trình thủy văn, nó giải quyết đồng thời cả hai vấn đề cân bằng nước và cân bằng năng lượng (Hình 2.2).



Hình 2.2 Sơ đồ biểu diễn mô hình thủy văn VIC

Trong Hình 2.2: B: Dòng ngầm chảy ra ở mỗi ô tính; Q: dòng thấm; E: bốc hơi; P: Lượng mưa.

Mô hình VIC là mô hình thủy văn mã nguồn mở và đã được ứng dụng rộng rãi trên nhiều lưu vực sông trên thế giới, tiêu biểu như lưu vực sông Dương Tử (Trung Quốc) [184], sông Arkansas–Red [14] và thượng nguồn sông Mississippi (Hoa Kỳ) [29]. Trong VIC, quá trình thấm và sự hình thành dòng chảy bề mặt được mô phỏng dựa trên sơ đồ thấm Xinanjiang Zhao (1980), vốn là một trong những mô hình kinh

điển trong thủy văn mưa–dòng chảy. VIC ban đầu được mô tả như một mô hình một lớp đất bởi Wood và cộng sự (1992) [177]. Sau đó, mô hình đã được phát triển và tích hợp vào các mô hình khí hậu toàn cầu (GCM) của Phòng thí nghiệm Động lực học chất lưu địa vật lý (GFDL, Hoa Kỳ) và Viện Khí tượng Max Planck (MPI, Đức), góp phần mô phỏng tương tác thủy văn – khí hậu ở quy mô lớn.

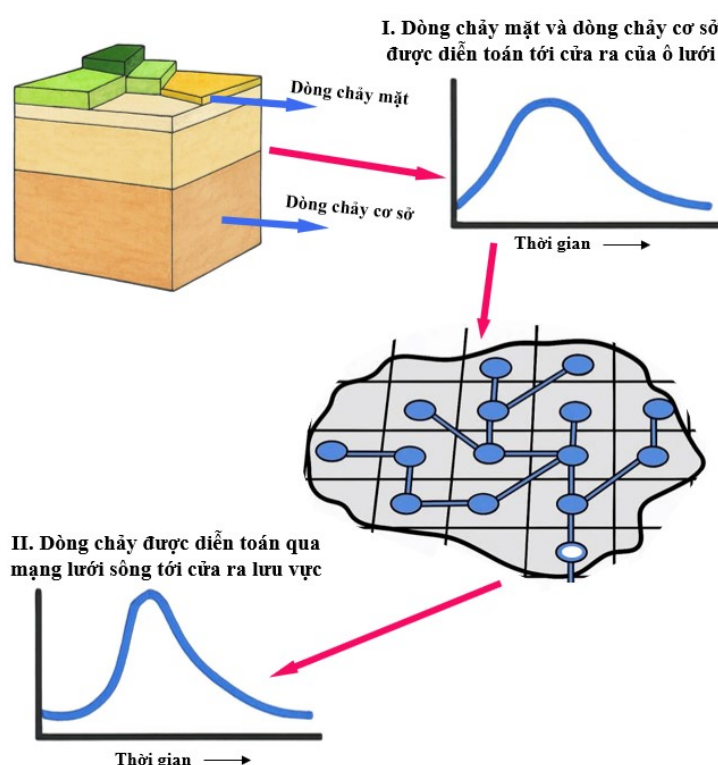
Mô hình VIC có khả năng phân chia bức xạ tới (sóng ngắn và sóng dài) ở bề mặt đất thành ẩn nhiệt và cảm nhiệt và phân chia lượng mưa (hoặc tuyết tan) thành dòng chảy trực tiếp/ dòng chảy sát mặt cùng thấm. VIC sử dụng sơ đồ tương tác khí quyển-thực vật-đất có tính đến ảnh hưởng của thảm thực vật và độ ẩm của đất đối với các tương tác giữa đất và khí quyển. Mô hình chia lớp đất thành nhiều lớp đất. Mỗi lớp đặc trưng cho phản ứng đặc trưng thủy văn của đất như mật độ khối, khả năng thấm, độ dẫn thủy lực bão hòa, độ sâu của lớp đất và các thông số khuếch tán độ ẩm của đất.

Mô hình VIC thể hiện rõ tính không đồng nhất của lưới phụ trong các lớp che phủ đất có tính đến những thay đổi trong sinh quyển như chỉ số diện tích lá (LAI), suất phản chiếu, sức cản của tán cây và tỷ lệ tương đối của rễ trong mỗi lớp đất. Bốc thoát hơi nước từ mỗi loại lớp phủ đất được mô phỏng bằng cách sử dụng khả năng thoát hơi nước tiềm năng cụ thể của lớp thực vật, sức cản của tán cây, sức cản khí động học đối với sự vận chuyển của nước và các hệ số sức cản kiến trúc như được xác định trong phương trình Penman-Monteith. Trong mô hình, ET bao gồm bốc hơi từ tầng tán của từng lớp thực vật, thoát hơi nước từ từng lớp thực vật và bốc hơi từ tầng đất trống. Tổng lượng thoát hơi nước ET trên mỗi ô lưới được tính bằng tổng trọng số diện tích của ba thành phần này. VIC dùng cơ chế thấm được sử dụng trong mô hình Xinanjiang của Zhao (1980) để tạo ra dòng chảy từ lượng mưa vượt thấm có sẵn và dòng cơ sở được tính toán bằng mô hình khái niệm Arno [160].

Trong mô hình VIC, sự phân bố độ ẩm của đất, sự thâm thấu, thoát nước giữa các lớp đất, dòng chảy trên bề mặt và dòng chảy dưới bề mặt đều được tính toán cho từng ô che phủ đất tại mỗi bước thời gian. Sau đó, đối với mỗi ô lưới, tổng thông

lượng nhiệt (nhiệt tiềm ẩn, nhiệt hiện có và nhiệt mặt đất), nhiệt độ bề mặt hiệu quả, và tổng dòng chảy bề mặt và dưới bề mặt thu được bằng cách tính tổng trên tất cả các ô che phủ đất có trọng số theo độ che phủ phân số.

### Mô hình diễn toán - Routing



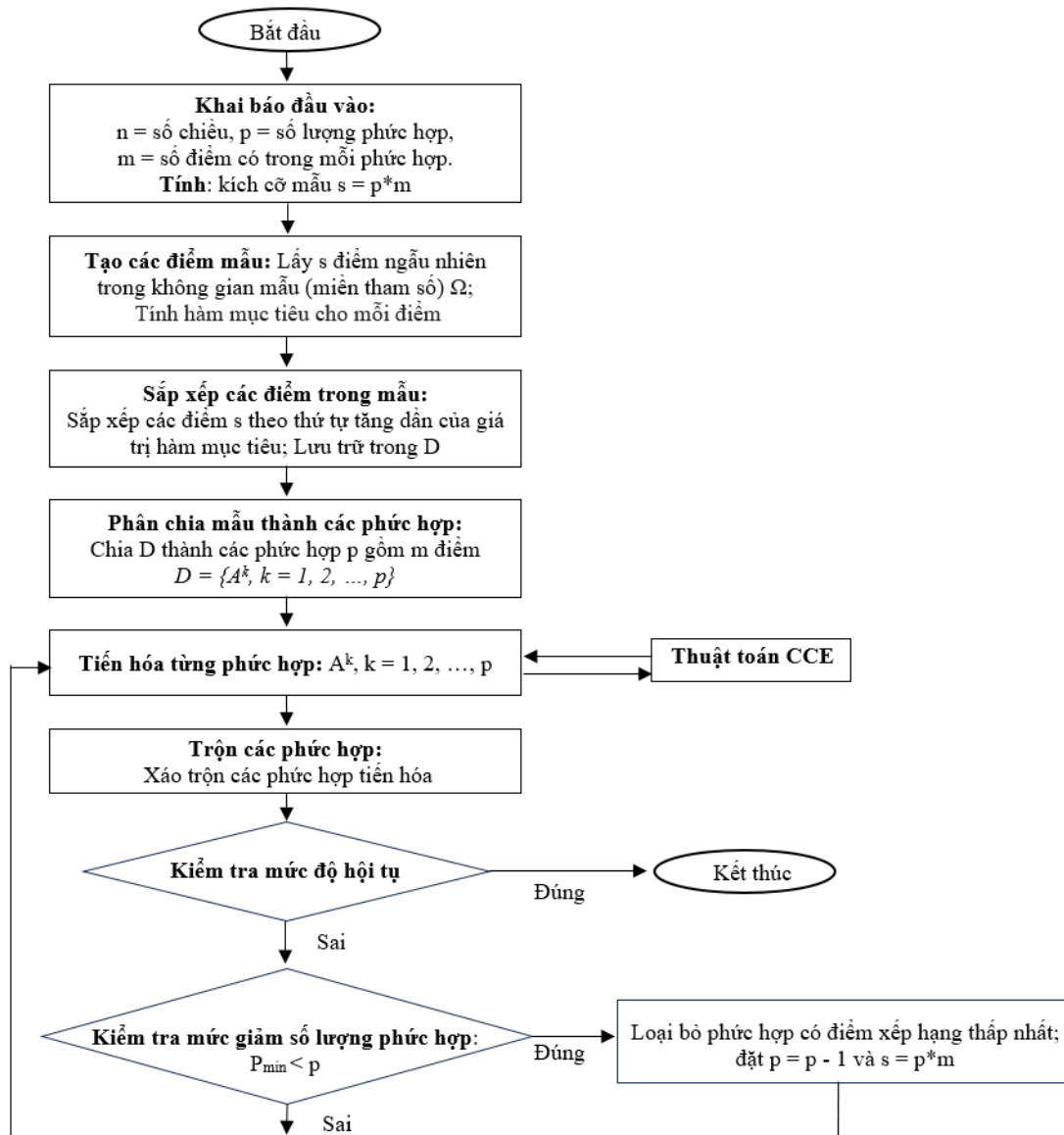
Hình 2.3 Sơ đồ biểu diễn mô hình VIC Routing

Mô hình VIC được thiết kế với mỗi ô lưới được mô hình độc lập mà không có dòng chảy hướng ngang. Mô hình VIC dựa trên lưới mô phỏng chuỗi thời gian của dòng chảy chỉ cho từng ô lưới, được phân phối không đồng đều trong mỗi ô. Mô hình diễn toán - Routing được thiết kế để nước không bao giờ được phép chảy từ kênh trở lại ô lưới. Sau đó, bằng cách giả sử tất cả dòng chảy thoát ra khỏi một ô theo một hướng dòng chảy duy nhất, diễn toán dòng chảy trong kênh dựa trên phương trình Saint-Venant tuyến tính hóa được sử dụng để mô phỏng lưu lượng tại cửa ra (outlet) của lưu vực Hình 2.3. Mô hình diễn toán được mô tả chi tiết bởi [95, 96].

## 2.5. Phương pháp hiệu chỉnh thông số mô hình

### 2.5.1. Thuật toán tối ưu hóa tiến hóa phức hợp (SCE-UA)

Thuật toán SCE-UA (Shuffled Complex Evolution – University of Arizona), do Duan và cộng sự (1992, 1994) phát triển, được thiết kế để hiệu chỉnh mô hình thủy văn và tài nguyên nước, đặc biệt hiệu quả trong các bài toán có nhiều cực trị cục bộ. Thuật toán dựa trên sự kết hợp của bốn nguyên lý: (1) kết hợp giữa tìm kiếm tất định và ngẫu nhiên; (2) tiến hóa có hệ thống của các “phức hợp” điểm trong không gian thông số; (3) tiến hóa cạnh tranh; và (4) xáo trộn các phức hợp.



Hình 2.4. Sơ đồ khối mô tả các bước tính toán trong thuật toán SCE-UA

Các ưu điểm nổi bật của SCE-UA là :

- + Khả năng tìm kiếm nghiệm tối ưu toàn cục trong không gian hàm mục tiêu nhiều cực trị;
- + Tránh mắc kẹt tại cực trị cục bộ;
- + Không phụ thuộc vào đạo hàm hay biểu thức cụ thể của hàm mục tiêu;
- + Thích ứng với các thông số có độ nhạy và quan hệ phức tạp;
- + Có thể xử lý các bài toán nhiều thông số.

Một thành phần chính của phương pháp SCE-UA là thuật toán tiến hóa phức hợp, như đã đề cập trong Bước 4. Thuật toán này, dựa trên sơ đồ tìm kiếm đơn hình xuồng dốc của Nelder và Mead (1965) [116], được trình bày ngắn gọn như sau:

1. Xây dựng một phức hợp con (subcomplex) bằng cách chọn ngẫu nhiên  $q$  điểm từ phức hợp (cộng đồng) theo phân bố xác suất hình thang. Phân phối xác suất được xác định sao cho điểm tốt nhất (tức là điểm có giá trị hàm mục tiêu tốt nhất) có cơ hội được chọn cao nhất để tạo thành phức hợp con và điểm kém nhất có ít cơ hội nhất.
2. Xác định điểm kém nhất của phức hợp con và tính trọng tâm của phức hợp con khi loại bỏ điểm tệ nhất.
3. Tiến hành một bước phản xạ bằng cách chiếu đối xứng điểm kém nhất qua trọng tâm. Nếu điểm mới được tạo nằm trong không gian khả thi, chuyển sang Bước IV; nếu không, tạo ngẫu nhiên một điểm trong không gian khả thi và chuyển sang Bước VI.
4. Nếu điểm mới tạo tốt hơn điểm kém nhất thì thay điểm kém nhất bằng điểm mới. Chuyển sang Bước VII. Nếu không, chuyển sang Bước V.
5. Thực hiện bước “*rút ngắn*” bằng cách tính ra điểm nằm ở giữa điểm trọng tâm và điểm kém nhất. Nếu điểm “*rút ngắn*” này tốt hơn điểm kém nhất, thay điểm

kém nhất bằng điểm rút ngắn và chuyển sang Bước VII. Nếu không, chuyển sang Bước VI.

6. Tạo ngẫu nhiên một điểm trong không gian khả thi. Thay thế điểm kém nhất bằng điểm được tạo ngẫu nhiên.
7. Lặp lại các bước II-VI  $\alpha$  lần, trong đó  $\alpha \geq 1$  là số con cái liên tiếp được tạo ra bởi cùng một phức hợp con.
8. Lặp lại các bước I-VII  $\beta$  lần, trong đó  $\beta \geq 1$  là số bước tiến hóa được thực hiện bởi mỗi phức hợp trước khi các phức hợp được xáo trộn.

Sơ đồ khối mô tả các bước thuật toán tiến hóa phức hợp (SCE) khi hệ số  $\alpha = 1$  được thể hiện trong Hình 2.5. Như vậy việc sử dụng giải thuật SCE-UA chỉ được thực hiện khi các thông số của giải thuật được xác định. Các thông số này bao gồm:

$m$ : số điểm trong một phức hợp (complex);

$q$ : số điểm trong một phức hợp con (subcomplex);

$p$ : số lượng phức hợp ( từ đó có thể tính  $s = p * m$ );

$P_{min}$ : số lượng phức hợp tối thiểu cần có trong quần thể;

$\alpha$ : số lượng con cái liên tiếp được tạo ra bởi mỗi phức hợp con;

$\beta$ : số bước tiến hóa được thực hiện bởi mỗi tổ hợp.

Theo Duan và công sự (1994), các giá trị sau có thể dùng và được coi là giá trị mặc định cho các chương trình được thiết lập:

+  $m = 2n + 1$ , trong đó  $n$  là số thông số cần tối ưu hóa;

+  $q = n + 1$ ;

+  $p$ , số phức hợp cần thiết, phụ thuộc rất nhiều vào bản chất của bài toán. Mức độ khó càng cao thì số lượng phức hợp cần thiết để xác định vị trí tối ưu toàn cục càng lớn. Thông thường  $p$  được thử dần và thường lớn hơn  $n$ , số lượng các thông số cần tối ưu.

- +  $p_{min}$ , số lượng phức hợp tối thiểu (có giá trị từ 1 đến  $p$ ) cần có trong quần thể, được đưa vào thuật toán SCE-UA để nâng cao hiệu quả. Lý do là khi quá trình tìm kiếm diễn ra, quần thể đang hội tụ vào một không gian ngày càng nhỏ hơn và cần ít điểm hơn để cung cấp mật độ mẫu phù hợp. Giá trị mặc định của  $p_{min}$  được khuyến nghị bằng  $p$ .
- +  $\alpha$ , số lượng con cái mà mỗi phức hợp con tạo ra trước khi nó được đưa trở lại tổ hợp, có thể là bất kỳ số nào lớn hơn hoặc bằng 1. Nếu  $\alpha$  bằng 1 thì chỉ một cặp cha mẹ ban đầu được thay thế. Khi  $\alpha$  tăng, việc tìm kiếm trở nên thiên về tìm kiếm cục bộ trong không gian thông số. Giá trị mặc định của  $\alpha$  được khuyến nghị bằng 1.
- +  $\beta$ , số bước tiến hóa được thực hiện bởi mỗi phức hợp trước khi các phức hợp được xáo trộn, có thể là số nguyên dương bất kỳ. Nếu  $\beta$  nhỏ, các phức hợp sẽ bị xáo trộn thường xuyên, nhưng sẽ không thể tiến hành khám phá độc lập nhiều không gian thông số; nếu  $\beta$  lớn, mỗi tổ hợp sẽ nhanh chóng co lại thành một cụm nhỏ và hiệu quả tìm kiếm toàn cầu có thể bị mất. Giá trị mặc định của  $\beta$  được khuyến nghị bằng  $m (=2n+1)$ .

### 2.5.2. Điều kiện dừng

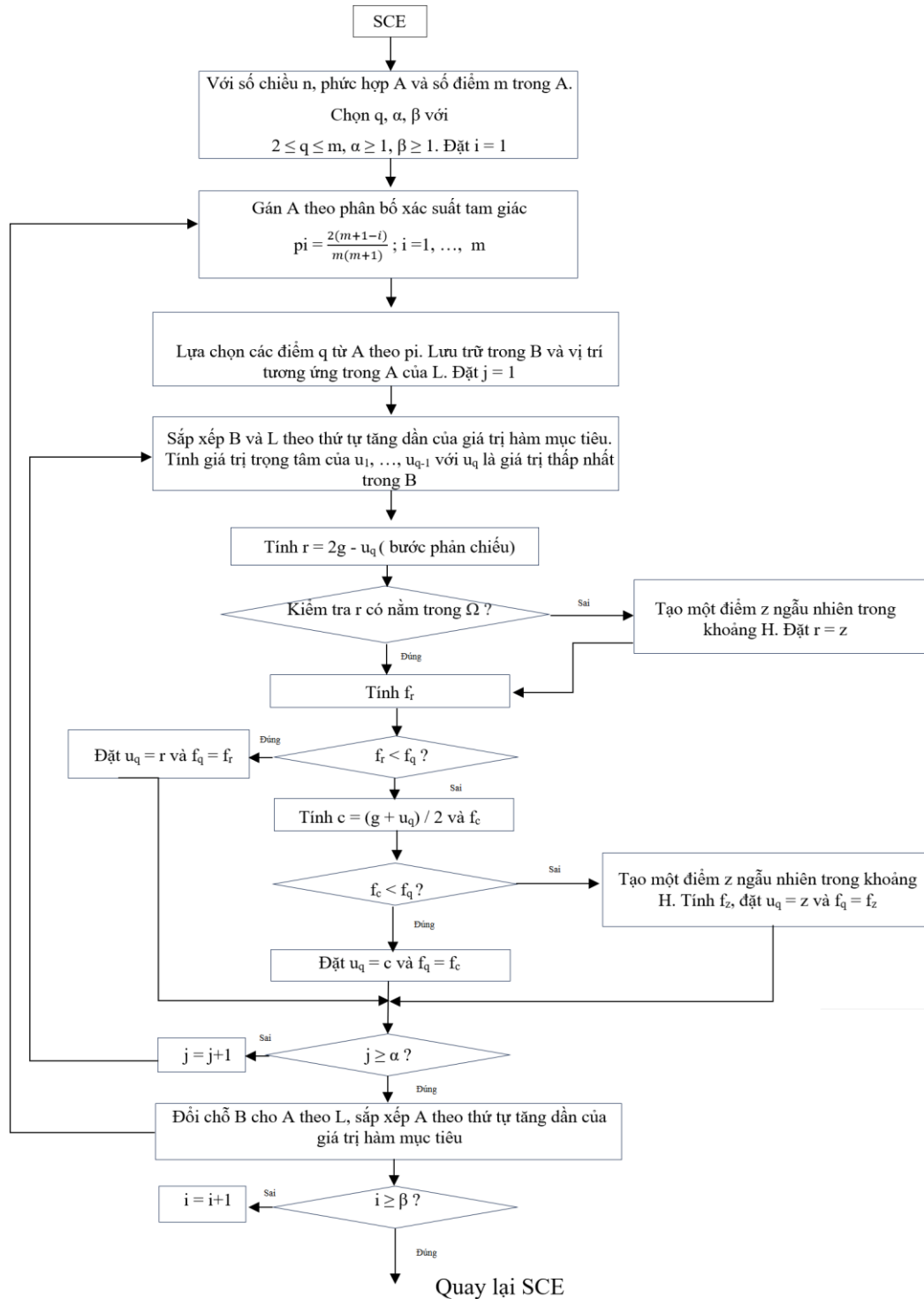
Đối với bất kỳ thuật giải tối ưu tìm kiếm nào đều cần điều kiện dừng. Thông thường điều kiện dừng của thuật giải tối ưu sẽ gồm 2 điều kiện và thuật giải sẽ tự dừng khi 1 trong 2 điều kiện sau đây được thỏa mãn:

Số lần lặp đã đạt mức tối đa. Điều kiện này để giới hạn quá trình tìm kiếm nghiệm trong một số hữu hạn vòng lặp, được xác định bởi năng lực tính toán của hệ thống máy tính. Thường đối với thuật giải SCE-UA được lấy bằng 5000.

Việc tìm kiếm sẽ tự dừng nếu như thuật toán đã tìm ra sự thay đổi của hàm mục tiêu sau N bước lặp không lớn hơn (nhỏ hơn) một số  $\gamma$  cho trước.

$$\left| \frac{f(\vec{x}^*)^{t-N} - f(\vec{x}^*)^t}{f(\vec{x}^*)^{t-N}} \right| < \gamma \quad (2.9)$$

Trong phương trình trên,  $F(X)$  là hàm mục tiêu. Giá trị  $\gamma$  càng nhỏ thì khả năng tìm được nghiệm gần nghiệm tối ưu càng lớn. Số này thường có khoảng giá trị dao động từ 0.01 đến 0.0000001.



Hình 2.5. Sơ đồ khối mô tả các bước thuật toán tiến hóa phức hợp được sử dụng trong SCE

### 2.5.3. Các thông số được tối ưu cũng như khoảng giá trị của chúng

Có sáu thông số đất đặc biệt khó đo đạc vì chúng mang tính khái niệm và không tương ứng với các đại lượng thực tế có thể quan sát được, đó là những thông số được các nhà phát triển mô hình VIC coi là những thông số nhạy cảm nhất [36]. Các thông số này ban đầu được ước tính nhưng sau đó được hiệu chỉnh bằng thuật giải tối ưu SCE-UA. Các thông số khác của mô hình được coi là không đổi và không được tối ưu. Khoảng biến động của các thông số được xác định bằng cách sử dụng nguyên tắc khu vực hóa và được tham khảo nghiên cứu của Dang và cộng sự (2020) cho lưu vực sông Mê Kông liên kề (Bảng 2.6) [41].

*Bảng 2.6. Sáu thông số được tối ưu trong mô hình VIC cho lưu vực sông Đà*

| Thông số  | Mô tả                                                           | Phạm vi hiệu chỉnh |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|--------------------|
| $b_{inf}$ | Thông số đường cong thấm thay đổi                               | 0,002 – 0,495      |
| $D_s$     | Phần của $D_{s_{max}}$ nơi bắt đầu dòng cơ sở phi tuyến tính    | 0,019 – 0,875      |
| $D_{max}$ | Vận tốc lớn nhất của dòng chảy đáy (mm/ngày)                    | 2,653 – 29,983     |
| $W_s$     | Tỷ lệ độ ẩm đất tối đa nơi diễn ra dòng chảy nền phi tuyến tính | 0,1 – 0,984        |
| $D_2$     | Độ dày của lớp đất thứ hai ( mét)                               | 0,497 – 1,491      |
| $D_3$     | Độ dày của lớp đất thứ ba ( mét)                                | 0,497 – 1,491      |

### 2.5.4. SPOTPY cho tối ưu hóa các thông số của VIC

SPOTPY là Công cụ tối ưu hóa thông số thống kê, được xây dựng bởi Houska và cộng sự (2015) [66]. SPOTPY bao gồm gói python nguồn mở chứa một bộ phương pháp toàn diện được sử dụng để hiệu chỉnh, phân tích và tối ưu hóa các thông số cho nhiều loại mô hình sinh thái. Luận án đã áp dụng SPOTPY để tối ưu hóa bộ thông số cho mô hình VIC với một thư viện hàm trong python. Hiện SPOTPY có 8 thuật toán được sử dụng rộng rãi, 11 hàm mục tiêu và có thể lấy mẫu từ 8 phân bố thông số. SPOTPY có cấu trúc độc lập với mô hình và có thể chạy song song từ máy trạm đến các cụm tính toán lớn bằng Giao diện truyền tin nhắn (MPI). Các gói ước lượng thông số bao gồm một số mô-đun: thuật toán tìm kiếm thông số, hàm mục tiêu, mô-đun lưu kết quả chạy mô hình vào đĩa và mô hình đã sử dụng. Bằng cách sử dụng cách tiếp

cận mô-đun nghiêm ngặt, mọi thuật toán tìm kiếm nhất định đều có thể dễ dàng được kết hợp với bất kỳ hàm mục tiêu nào, mang lại cho người dùng sự tự do tối đa để áp dụng một phương pháp cho một câu hỏi khoa học nhất định.

Hàm mục tiêu (còn được gọi là hàm phạt hoặc chỉ số đánh giá) định lượng mức độ phù hợp của dữ liệu mô phỏng với dữ liệu thực đo. Có nhiều hàm mục tiêu khác nhau đã được đề xuất để giải quyết các loại lỗi khác nhau trong mô phỏng. SPOTPY cung cấp một tập hợp rộng các hàm mục tiêu, từ đó người dùng có thể chọn một hoặc nhiều hàm cho một bài toán cụ thể (BIAS; hệ số Nash-Sutcliffe (NSE); hệ số Nash-Sutcliffe logarit (logNSE); hệ số tương quan ( $r$ ); hệ số xác định ( $r^2$ ); hiệp phương sai (cov); hệ số RMSE phân tách (dRMSE), hệ số RMSE Tương đối (rRMSE) và sai số bình phương trung bình gốc (RMSE); sai số tuyệt đối trung bình (MAE); Hệ số thỏa thuận Wilmott (AI)). Người dùng có tùy chọn tổ hợp các hàm mục tiêu khác nhau vì chỉ một hàm có thể không chính xác.

Các thuật giải tối ưu có trong SPOTPY bao gồm các phương pháp tối ưu thông số được sử dụng rộng rãi từ các phương pháp tiếp cận khác nhau trong các ấn phẩm gần đây. Chúng có thể được kết nối với các tệp cài đặt chứa thông tin về phân bố thông số, dữ liệu mô phỏng và đánh giá cũng như các hàm mục tiêu. Trong SPOTPY, SCE-UA được cho là rất mạnh trong việc tìm ra mô hình thủy văn tối ưu toàn cục và là một trong những thuật toán được sử dụng rộng rãi nhất trong các ứng dụng thủy văn hiện nay.

*Bảng 2.7. Các thông số của thuật giải SCE-UA trong gói SPOTPY*

| Thuật toán | Thiết lập (cài đặt)                                                |         |           | Nguồn trích dẫn |
|------------|--------------------------------------------------------------------|---------|-----------|-----------------|
|            | Mô tả                                                              | Ký hiệu | Giá trị   |                 |
| SCE-UA     | Số lượng thông số                                                  | dim     |           | [39, 40]        |
|            | số lượng phức hợp (số nhóm)                                        | ngs     | 8(dim)    |                 |
|            | Số vòng lặp tối đa không cải thiện thì dừng                        | Kstop   | 50        |                 |
|            | Phần trăm thay đổi tối thiểu trong vòng lặp Kstop trước khi hội tụ | pcento  | $10^{-5}$ |                 |

| Thuật toán | Thiết lập (cài đặt)                    |         |           | Nguồn trích dẫn |
|------------|----------------------------------------|---------|-----------|-----------------|
|            | Mô tả                                  | Ký hiệu | Giá trị   |                 |
|            | Ngưỡng dừng tuyệt đối của hàm mục tiêu | peps    | $10^{-4}$ |                 |

Bảng 2.7 chứa các thông số có thể thay đổi bởi người sử dụng để thuật giải có thể giải quyết tốt nhất bài toán đặt ra. Các thông số còn lại được lấy mặc định như đã được đề cập ở phần trên.

#### 2.5.5. Các chỉ số đánh giá chất lượng mô hình (hàm mục tiêu)

Một thành phần quan trọng trong quá trình hiệu chỉnh tự động cũng như kiểm định mô hình là sự lựa chọn một hàm mục tiêu phù hợp để tối ưu hóa tự động. Ứng dụng các mô đun hiệu chỉnh tự động chủ yếu dựa trên một hàm mục tiêu đơn giản, đo đặc sự sai khác giữa giá trị tính toán và giá trị thực đo, ví dụ RMSE, MAE,  $r^2$ . Một chỉ số đơn thường không đủ để xem xét đủ các đặc trưng thủy văn quan trọng của một hệ thống. Do vậy, có 2 hướng chính trong hiệu chỉnh tự động là sử dụng các tối ưu đơn mục tiêu và tối ưu đa mục tiêu. Trong tối ưu đơn mục tiêu lại có 3 hướng tiếp cận để giải quyết vấn đề trên. Cụ thể:

- Tối ưu một chỉ số (hàm mục tiêu) đơn, đồng thời xem xét đến các hàm mục tiêu khác để lựa chọn bộ thông số và quyết định độ tin cậy của mô hình.
- Dựa vào mục đích nghiên cứu (ví dụ nghiên cứu dòng chảy lũ hay dòng chảy kiệt) mà sử dụng các biến thể của các hàm mục tiêu đơn.
- Sử dụng hàm tối ưu kết hợp của các hàm mục tiêu đơn, tức là giản hóa bài toán tối ưu đa mục tiêu thành bài toán đơn mục tiêu với hàm mục tiêu tổng hợp của nhiều hàm mục tiêu đơn.

#### 2.5.6. Các chỉ số (hàm mục tiêu) đơn

Do các yếu tố của dòng chảy không cùng được đánh giá bởi một chỉ số nhất định, nên cần phải lựa chọn nhiều hơn một chỉ số hiệu quả để đánh giá toàn diện mức độ phù hợp của bộ thông số. Trong những chỉ số được dùng phổ biến trong đánh giá chất lượng mô hình thủy văn là Nash–Sutcliffe (NSE - Nash) và sai số trung bình

quân phương (RMSE) chỉ số này được nhận xét phù hợp với mô phỏng đỉnh lũ, các giá trị dòng chảy cao và không quá nhạy với các mô phỏng trong thời kỳ dòng chảy thấp [86, 123, 164]. Hệ số tương quan  $r^2$  cũng được sử dụng rộng rãi trong đánh giá các mô hình thủy văn nhưng lại quá nhạy với các giá trị lớn (có thể bao gồm các điểm ngoại lệ) và không nhạy với các giá trị thấp hơn nên luôn được cân nhắc cẩn thận khi sử dụng [88]. Pbias - độ lệch phần trăm của hai chuỗi số liệu, khuyến nghị nên sử dụng với mô phỏng dài hạn, phù hợp với chuỗi sai số ngoài ra chỉ số còn chỉ ra mức độ không thỏa mãn của mô hình khá tốt [110, 110]. Pbias không được sử dụng cho các mô phỏng xác định sự khác biệt về thời gian và cường độ của dòng chảy đỉnh và hình dạng của các đồ thị thủy văn.

*Bảng 2.8. Các chỉ số đơn sử dụng với dòng chảy quan trắc và mô phỏng*

| Chỉ số                          | Mục tiêu                                                                   | Công thức                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Khoảng giới hạn      |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b>NSE</b><br>[113]             | Xác định độ lớn tương đối của phương sai 2 chuỗi                           | $NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim\ i} - Q_{obs\ i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\ i} - \overline{Q_{obs}})^2}$ $= 1 - \frac{MSE}{(\overline{Q_{obs\ i}} - \overline{Q_{obs}})^2}$                                                                                                                                                                                                 | $(-\infty; 1]$       |
| <b>MAE</b><br>[62, 63]          | Sai số tuyệt đối trung bình                                                | $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  Q_{obs\ i} - Q_{sim\ i} $                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $[0; +\infty)$       |
| <b>RMSE</b><br>[62, 63]         | Sai số bình phương trung bình                                              | $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs\ i} - Q_{sim\ i})^2}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | $[0; +\infty)$       |
| <b>Pbias</b><br>[63]            | Xác định độ lệch tính toán theo tỷ lệ phần trăm                            | $Pbias = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\ i} - Q_{sim\ i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs\ i}} * 100 (\%)$                                                                                                                                                                                                                                                                                      | $(-\infty; +\infty]$ |
| <b><math>r^2</math></b><br>[89] | Hệ số tương quan                                                           | $r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\ i} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim\ i} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\ i} - \overline{Q_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim\ i} - \overline{Q_{sim}})^2}} \right)^2$ $= 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + \left(\frac{Q_{sim\ i}}{Q_{obs\ i}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\overline{Q_{sim}}}{\overline{Q_{obs}}} - 1\right)^2}$ | $[0; 1]$             |
| <b>KGE</b><br>[129]             | Mức độ tương quan, độ phân tán số liệu và độ lệch trung bình chuỗi số liệu | $CC = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\ i} - \overline{Q_{obs}}) * (Q_{sim\ i} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs\ i} - \overline{Q_{obs}})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim\ i} - \overline{Q_{sim}})^2}}$                                                                                                                                                              | $(-\infty; 1]$       |

### 2.5.7. Các chỉ số (hàm mục tiêu) tổ hợp

Các vấn đề tối ưu hóa liên quan đến bài toán đa mục tiêu xung đột nhau thường được xử lý bằng cách kết hợp các mục tiêu thành một hàm vô hướng và tiếp theo là giải quyết vấn đề tối ưu hóa đơn tương đương để xác định giải pháp thỏa hiệp tốt nhất.

Các hàm mục tiêu tổ hợp ban đầu thường dựa trên các số liệu thống kê như sai số bình phương trung bình của các nhóm dòng chảy như đỉnh lũ, dòng chảy cao, thấp [44]. Ngoài ra việc đa mục tiêu các chỉ số còn được thực hiện ở nhiều biến khác nhau (ET, SM) và nhiều vị trí trong cùng lưu vực, tuy nhiên để tài chỉ đề cập tới dòng chảy. Chỉ số RMSE đưa ra sai số giữa số liệu mô phỏng và quan trắc và được tiếp cận nhiều trong đa mục tiêu với các thành phần tập trung khác nhau, kèm theo các trọng số của bộ tham số đích đang cần. Ngoài ra Gupta, 2009 đã đưa ra chỉ số KGE có thể kết hợp các yếu tố trong chuỗi số liệu thể hiện mức độ tương quan, độ phân tán số liệu và độ lệch trung bình [83, 129, 162]. Bảng 2.9 đưa ra một số các chỉ số áp dụng cho hàm đa mục tiêu.

Bảng 2.9. Chỉ số tổ hợp với dòng chảy quan trắc và mô phỏng

| Chỉ tiêu                         | Mục tiêu                   | Công thức                                                                                                    | Khoảng giới hạn |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>RMSE<sub>p</sub></b>          | Đỉnh lũ                    | $= \frac{1}{M_p} \sum_{j=1}^{M_p} \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (Q_{obs\ i} - Q_{sim\ i})^2}$         | $[0; +\infty)$  |
| <b>RMSE<sub>l</sub></b>          | Dòng chảy thấp             | $= \frac{1}{M_l} \sum_{j=1}^{M_l} \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (Q_{obs\ i} - Q_{sim\ i})^2}$         | $[0; +\infty)$  |
| <b>RMSE tương đối</b>            | Tổng thể dòng chảy         | $= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Q_{obs\ i} - Q_{sim\ i}}{Q_{obs\ i} + Q_{sim\ i}} \right)^2}$ | $[0; +\infty)$  |
| <b>RMSE<sub>p</sub> trọng số</b> | Đỉnh lũ có trọng số        | $= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_{obs\ i} (Q_{obs\ i} - Q_{sim\ i})^2}$                                   | $[0; +\infty)$  |
| <b>RMSE<sub>l</sub> trọng số</b> | Dòng chảy thấp có trọng số | $= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_{obs\ i} (Q_{obs\ i} - Q_{sim\ i})^2}$                                   | $[0; +\infty)$  |

N tổng số bước thời gian đang xét cả dòng chảy; Mp: số lần xuất hiện đỉnh lũ; Ml số lần xuất hiện dòng chảy thấp; nj số bước thời của lần xuất hiện lũ/ dòng chảy thấp thứ j; wobs là hàm trọng số của đỉnh lũ và dòng chảy thấp.

## 2.6. Phương pháp phân tích tác động của các nhân tố lên dòng chảy

### 2.6.1. Hạn chế công thức hệ số tác động của Wang

Dòng chảy quan trắc tại các trạm thủy văn thường là kết quả tổng hợp của nhiều quá trình phức tạp, bao gồm cả tác động của biến động khí hậu tự nhiên và các hoạt động của con người. Điều này khiến cho việc xác định trực tiếp dòng chảy tự nhiên trở nên khó khăn, bởi dòng chảy quan trắc luôn chứa đựng thành phần nhân sinh. Để giải quyết thách thức này, phương pháp tự nhiên hóa (naturalization methods) đã được đề xuất nhằm loại bỏ ảnh hưởng của con người khỏi chuỗi dòng chảy quan trắc, từ đó thu được chuỗi dòng chảy đại diện cho điều kiện tự nhiên. Một trong những cách tiếp cận được sử dụng phổ biến là phương pháp mở rộng (extension method), trong đó mô hình thủy văn được sử dụng để mô phỏng dòng chảy giả định trong điều kiện không có tác động nhân sinh [157]. Phương pháp này cho phép đánh giá toàn diện hơn vai trò của khí hậu trong biến đổi dòng chảy thông qua việc tái tạo chuỗi tự nhiên hóa.

Trên cơ sở đó, Wang và cộng sự (2010) đã xây dựng một khung phân tích định lượng nhằm tách biệt ảnh hưởng của khí hậu và hoạt động nhân sinh đối với biến đổi dòng chảy [171]. Theo giả thuyết của các tác giả, dòng chảy tự nhiên hóa phản ánh trung thực phản ứng thủy văn trước biến động khí hậu, vốn chịu chi phối bởi các yếu tố như lượng mưa, gió, nhiệt độ cực trị. Tác động này được ký hiệu là  $I_{CV}^i$  (Impact of Climate Variability). Ngược lại, sự thay đổi dòng chảy do các hoạt động nhân sinh như xây dựng và vận hành hồ chứa, khai thác nước, chuyển đổi sử dụng đất... được ký hiệu là  $I_{HA}^i$  (Impact of Human Activities). Với cách tiếp cận này, dòng chảy quan trắc trong giai đoạn chịu tác động có thể coi là tổng hợp của hai yếu tố:

$$RO^i = I_{CV}^i + I_{HA}^i = \frac{O^i}{\overline{O^{base}}} - 1 \quad (2.10)$$

Trong đó,  $RO^i$  là biến đổi tương đối của dòng chảy quan trắc trong giai đoạn  $i$  so với giai đoạn chuẩn,  $O^i$  là dòng chảy trung bình quan trắc trong giai đoạn  $i$ , còn  $\overline{O^{base}}$  là giá trị trung bình quan trắc trong giai đoạn chuẩn.

Tương tự, biến đổi tương đối của dòng chảy tự nhiên hóa trong giai đoạn tác động được tính như sau:

$$RC^i = I_{CV}^i = \frac{R^i}{\overline{R^{base}}} - 1 \quad (2.11)$$

Trong đó,  $RC^i$  là biến đổi tương đối của dòng chảy tự nhiên hóa trong giai đoạn  $i$  so với giai đoạn chuẩn,  $R^i$  là dòng chảy trung bình tự nhiên hóa trong giai đoạn  $i$ , và  $\overline{R^{base}}$  là giá trị trung bình dòng chảy tự nhiên hóa trong giai đoạn chuẩn. Với cách phân tách này, tác động của khí hậu ( $I_{CV}^i$ ) được xác định trực tiếp từ chuỗi dòng chảy tự nhiên hóa, còn phần dư khi so sánh với dòng chảy quan trắc sẽ phản ánh tác động của hoạt động nhân sinh ( $I_{HA}^i = RO^i - RC^i$ )

Một điểm cần lưu ý là trong nghiên cứu gốc, Wang và cộng sự (2010) coi dòng chảy tự nhiên tương đương với dòng chảy hoàn nguyên. Tuy nhiên, trong nhiều ứng dụng, hai đại lượng này có thể sai khác do tồn tại sai số mô hình, được xem như một thành phần bất định cần được đánh giá. Sai số này bắt nguồn từ hạn chế của mô hình thủy văn trong việc mô tả đầy đủ các quá trình tự nhiên cũng như từ chất lượng dữ liệu khí tượng đầu vào. Do đó, khi áp dụng khung phân tích này, việc kiểm tra độ tin cậy mô hình, phân tích bất định và hiệu chỉnh sai số là cần thiết để đảm bảo tính chính xác của kết quả.

Khung phân tích của Wang và cộng sự (2010) có ưu điểm là đơn giản, dễ áp dụng và có tính minh bạch cao trong việc định lượng vai trò tương đối của khí hậu và con người trong biến đổi dòng chảy. Đây là lý do phương pháp được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu phân tích tác động tổng hợp của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh ở quy mô lưu vực. Tuy nhiên, khung phân tích này còn một số hạn chế. Giả định tuyến tính chỉ phù hợp khi  $I_{CV}^i$  và  $I_{HA}^i$  cùng chiều; trong trường hợp hai tác động ngược dấu, phương pháp không còn giá trị áp dụng. Bên cạnh đó, việc đồng nhất dòng chảy tự nhiên với dòng chảy tự nhiên hóa dễ gây sai số do mô hình, và khung nghiên cứu chưa đưa ra quy trình rõ ràng để xác định giai đoạn cơ sở cũng như

giai đoạn tính toán. Do đó, kết quả cần được diễn giải thận trọng và hỗ trợ bằng các kiểm định xu thế, biến đổi mùa vụ và phân tích bất định.

### 2.6.2. Các cải tiến công thức hệ số tác động mở rộng

Trong thực tế, khi áp dụng Phương trình (2.10) và (2.11) cho thượng nguồn lưu vực sông Đà (UDRB), các phương trình này chỉ có thể sử dụng được khi các tác động  $I_{CV}^i$  và  $I_{HA}^i$  cùng một thế/ hướng (cả hai tác động đều làm tăng hoặc giảm dòng chảy). Nếu,  $I_{CV}^i$  và  $I_{HA}^i$  ở hướng ngược chiều, hai phương trình này không được áp dụng.

Để giải quyết hạn chế này, vector đại số được sử dụng trong nghiên cứu này để đánh giá tác động của các hoạt động của con người và biến đổi khí hậu đối với dòng chảy (Hình 2.6). Phương trình (2.10) có thể được viết lại như sau:

$$(RO^i) \times \hat{i} = \overrightarrow{I_{CV}^i} + \overrightarrow{I_{HA}^i} = \left( \frac{O^i}{O_{base}} - 1 \right) \times \hat{i} \quad (2.12)$$

với  $\hat{i}$  là vector đơn vị trong không gian vector một chiều. Phương trình (2.11) được viết lại như sau:

$$(RC^i) \times \hat{i} = \overrightarrow{I_{CV}^i} = \left( \frac{R^i}{R_{base}} - 1 \right) \times \hat{i} \quad (2.13)$$

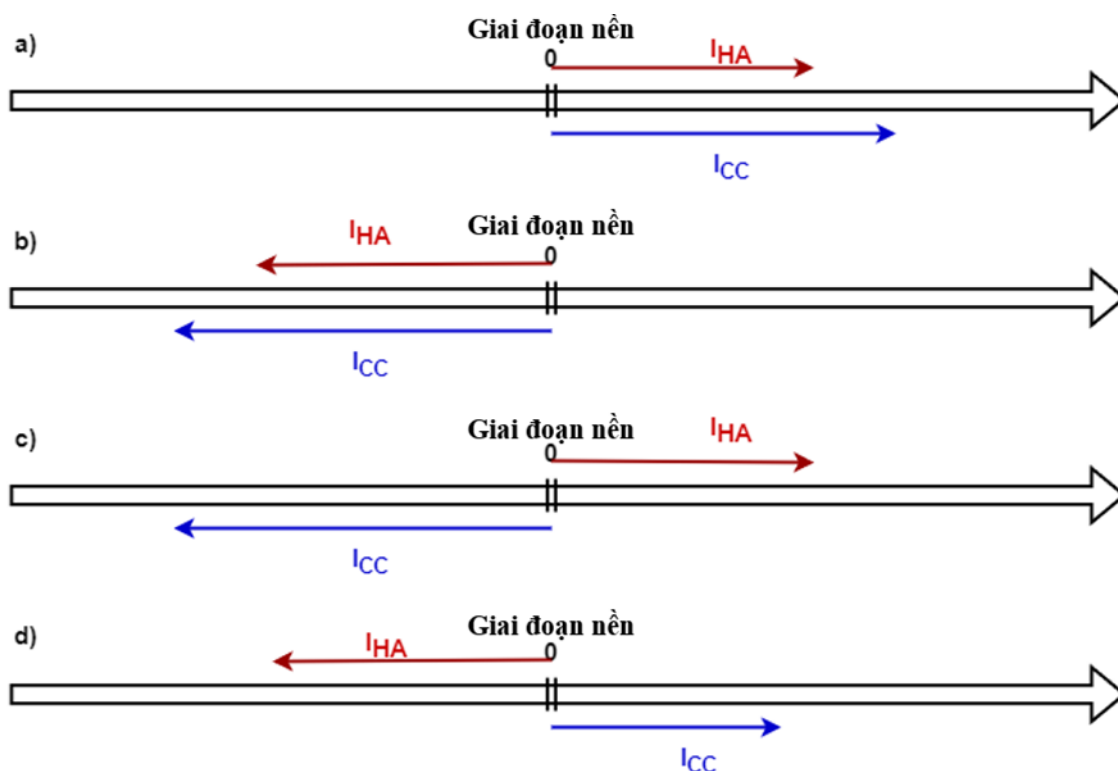
Bên cạnh đó, để xem xét tính bất định của các kết quả từ mô hình thủy văn, cả sai số hệ thống và ngẫu nhiên trong dòng chảy tự nhiên hóa đều được tính đến và được thể hiện trong Phương trình (2.14), với giả định sai số mô phỏng dòng chảy tự nhiên hóa trong mỗi thời kỳ đánh giá  $i$  bằng tổng cộng của sai số hệ thống trong mô phỏng dòng chảy tự nhiên ở giai đoạn cơ sở ( $\mathcal{E}^i$ ) và sai số ngẫu nhiên  $\Delta \mathcal{E}^i$ . cơ sở khoa học của phần mở rộng này dựa trên khái niệm được công nhận rộng rãi về "*các lỗi ngẫu nhiên*" là các lỗi độc lập từ bước thời gian này sang bước thời gian tiếp theo, đặc biệt liên quan tới các mô phỏng ngắn hạn (theo ngày hoặc theo giờ). ngược lại, "*các lỗi hệ thống*" tồn tại trong toàn bộ thời gian mô phỏng, ảnh hưởng chủ yếu đến độ chính xác của các đánh giá trong cân bằng nước theo mùa và năm [45]. Ngoài ra, theo kết quả thu được bởi Nanding và cộng sự (2021), mối quan hệ tuyến tính được

giả định cho sự gia tăng/lan truyền sai số trong mô phỏng lưu lượng dòng chảy theo mùa và năm [112].

Phần mở rộng của công thức Wang và cộng sự (2010) được mô tả từ Phương trình (2.14) đến (2.19).

$$R^i = R_p^i \times \mathcal{E}^i = R_p^i \times (\mathcal{E} + \Delta\mathcal{E}^i) \quad (2.14)$$

$R_p^i$  đại diện cho "dòng chảy tự nhiên hóa" được mô phỏng bởi mô hình;  $R^i$  đại diện cho dòng chảy tự nhiên "thực tế"- không thể đo được trong giai đoạn bị ảnh hưởng  $i$ ;  $\mathcal{E}^i$  là tỷ lệ chênh lệch của dòng chảy được mô hình tự nhiên hóa từ mô hình so với dòng chảy tự nhiên trong giai đoạn cơ sở (giai đoạn trước tác động);  $\Delta\mathcal{E}^i$  là sai số ngẫu nhiên của dòng chảy tự nhiên hóa so với dòng chảy tự nhiên "thực tế" trong giai đoạn thứ  $i$ .



Hình 2.6 Các trường hợp dòng chảy chịu tác động từ thay đổi khí hậu và hoạt động của con người

Với các điều kiện trên, giả sử tác động từ can thiệp con người gây ra đối với dòng chảy trong giai đoạn cơ sở là rất nhỏ, dòng chảy quan trắc được coi là đại diện

cho phần lớn cho dòng chảy tự nhiên. Tỷ lệ chênh lệch giữa dòng chảy tự nhiên và quan trắc chính là tỷ lệ chênh lệch giữa dòng chảy tự nhiên hóa và dòng chảy tự nhiên, có giá trị được ký hiệu là  $\mathcal{E}^i$ . Ở quy mô thời gian đủ lớn, sai số ngẫu nhiên,  $\Delta\mathcal{E}^i$  tiệm cận 0 vì vậy  $\frac{\Delta\mathcal{E}^i}{R^{\text{base}}}$  có thể bị bỏ qua. Thay phương trình (2.14) vào Phương trình (2.13) ta có Phương trình (2.15):

$$(RC^i) \times \hat{i} = \overrightarrow{I_{CV}^i} = \left( \frac{R^i}{R^{\text{base}}} - 1 \right) \times \hat{i} = \left( \frac{R_P^i \times \mathcal{E}}{R^{\text{base}}} - 1 \right) \times \hat{i} \quad (2.15)$$

Giả sử dòng chảy quan trắc trong giai đoạn cơ sở bằng dòng chảy tự nhiên, Phương trình (2.15) có thể được viết lại thành:

$$\overrightarrow{I_{CV}^i} = (RC^i) \times \hat{i} = \left( \frac{R^i}{O^{\text{base}}} - 1 \right) \times \hat{i} = \left( \frac{R_P^i \times \mathcal{E}}{O^{\text{base}}} - 1 \right) \times \hat{i} \quad (2.16)$$

Từ Phương trình (2.12), (2.13) và (2.16) vector tác động của con người được tính toán như sau:

$$\overrightarrow{I_{HA}^i} = (RO^i - RC^i) \times \hat{i} \quad (2.17)$$

Từ các Phương trình (2.13) và (2.16), tỷ lệ phần trăm tác động do biến đổi khí hậu,  $I_{CV}^i$ , có thể được tách khỏi tác động kết hợp bằng cách sử dụng Phương trình (2.18):

$$P_{CV}^i = \frac{|\overrightarrow{I_{CV}^i}|}{|\overrightarrow{I_{CV}^i}| + |\overrightarrow{I_{HA}^i}|} \times 100\% \quad (2.18)$$

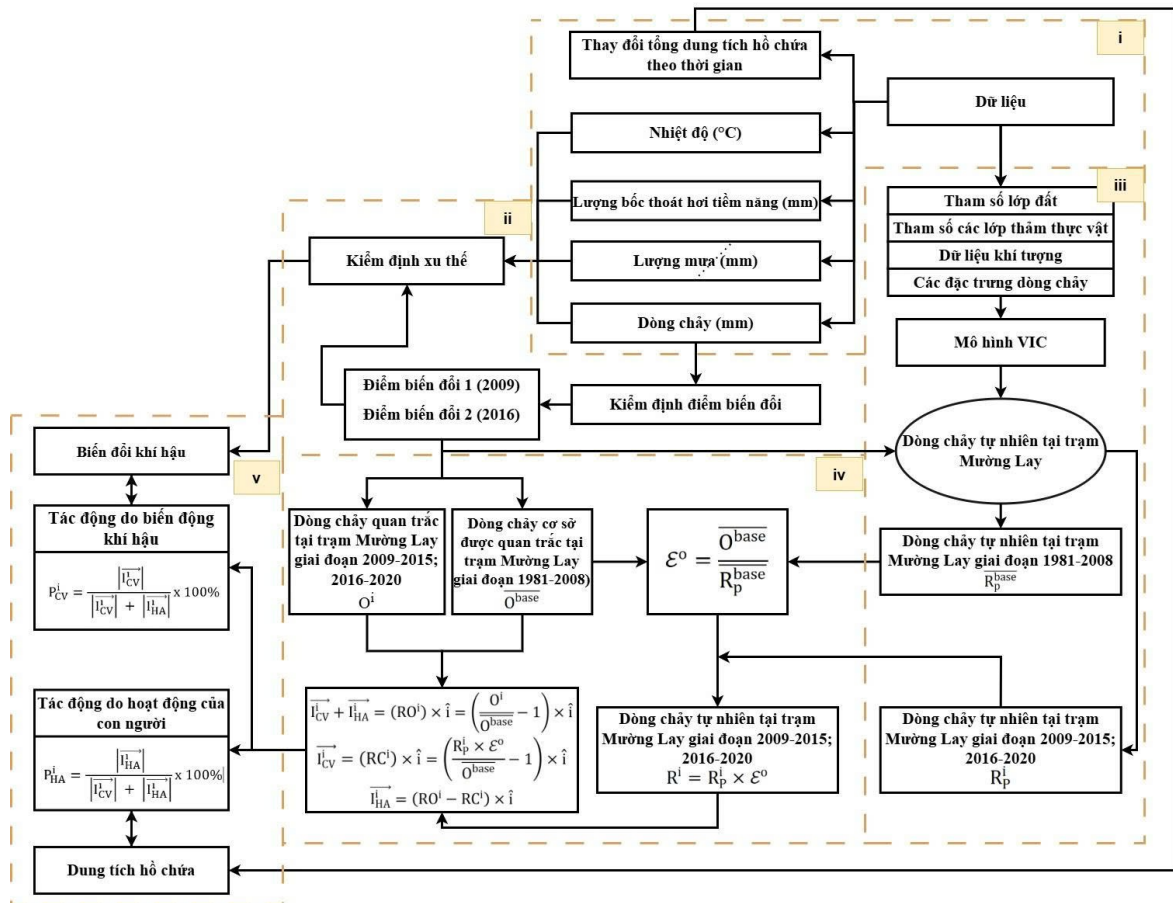
Tương tự, tỷ lệ phần trăm thay đổi của dòng chảy do hoạt động của con người có thể được tính như sau:

$$P_{HA}^i = \frac{|\overrightarrow{I_{HA}^i}|}{|\overrightarrow{I_{CV}^i}| + |\overrightarrow{I_{HA}^i}|} \times 100\% \quad (2.19)$$

Trong đó,  $P_{HA}^i$  là tỷ lệ phần trăm thay đổi của dòng chảy do hoạt động của con người,  $P_{CV}^i$  là tỷ lệ phần trăm thay đổi do biến đổi khí hậu.

Phương trình (2.12) - (2.19) cho phép định lượng các tác động từ thay đổi khí hậu và các can thiệp do con người gây ra đối với sự biến đổi dòng chảy trên thượng nguồn lưu vực sông Đà (UDRB) trong giai đoạn từ năm 1981 đến năm 2020.

### 2.6.3. Khung nghiên cứu theo công thức hệ số tác động mở rộng



Hình 2.7 Sơ đồ nghiên cứu định lượng tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người đối với sự biến đổi dòng chảy trên thượng nguồn lưu vực sông Đà (UDRB) trong giai đoạn từ năm 1981 đến năm 2020.

Sơ đồ nghiên cứu được phát triển để định lượng tác động của biến đổi khí hậu và các can thiệp của con người đối với sự thay đổi dòng chảy ở cả quy mô hàng năm và theo mùa về cơ bản bao gồm năm quy trình: i) Thu thập và xử lý dữ liệu; ii) Phân tích xu hướng và điểm biến đổi; iii) Mô hình thủy văn dựa trên vật lý; iv) Áp dụng Công thức hệ số tác động mở rộng; v) Đối chiếu kết quả quy kết với bằng chứng dựa trên kết quả kiểm tra xu hướng và dữ liệu thu thập được về hoạt động của con người. Để xác định điểm biến đổi, năm kiểm định được sử dụng đồng thời và điểm biến đổi chỉ được xác định khi ít nhất 3/5 kiểm định cho kết quả với ý nghĩa thống kê (xem

chi tiết Mục 3.1). Sơ đồ khối minh họa năm quy trình nêu trên với ứng dụng của chúng vào UDRB được mô tả trong Hình 2.7.

## **2.7. Phương pháp khai thác dữ liệu viễn thám để xác định thông số hồ chứa**

### **2.7.1. Dữ liệu viễn thám**

Trong luận án này, dữ liệu viễn thám được sử dụng làm cơ sở phục vụ xác định đặc tính và diễn biến mực nước hồ chứa thượng nguồn sông Đà, gồm ảnh Sentinel-1, Sentinel-2 [186, 187] và mô hình số độ cao SRTM [46]. Tập ảnh được thu thập trong giai đoạn 2016–2023, gồm 5.620 ảnh Sentinel-1 và 333 ảnh Sentinel-2, phục vụ xác định diện tích mặt nước của 10 hồ chứa chính thuộc lưu vực sông Đà phía Trung Quốc. Luận án kế thừa kết quả diễn biến mực nước của 10 hồ chứa thuộc lưu vực sông Đà phía Trung Quốc trong giai đoạn 2016–2023 từ đề tài ĐTĐL.CN-06/23 do PGS.TS. Nguyễn Tiền Giang làm chủ nhiệm [5]. Trên cơ sở chuỗi diễn biến mực nước được kế thừa, NCS phân tích và suy luận quy luật vận hành của các hồ chứa để tích hợp vào mô hình VIC.

### **2.7.2. Phương pháp xây dựng đường đặc tính hồ từ dữ liệu vệ tinh**

#### **2.7.2.1. Xác định quan hệ mực nước - diện tích mặt nước hồ chứa ( $Z - F$ )**

Mô hình số độ cao (DEM) được sử dụng như nguồn dữ liệu nền để tái hiện không gian ba chiều của lòng hồ, phản ánh chi tiết cao độ địa hình tại từng vị trí trong phạm vi nghiên cứu. Trên cơ sở này, việc xây dựng các quan hệ  $Z - F$  (mực nước – diện tích mặt nước) hoặc  $Z - W$  (mực nước – dung tích) được thực hiện bằng cách xác định diện tích mặt nước ứng với từng cao trình  $Z$  cụ thể. Quy trình tính toán bao gồm phân tích lớp DEM và xác định phần diện tích bị ngập nước thông qua việc thống kê các pixel tương ứng.

#### **2.7.2.2. Xác định quan hệ mực nước - dung tích hồ chứa ( $Z - W$ )**

Dung tích hồ chứa  $V_h$  tại một mực nước ( $Z_{min} + h$ ) được xác định bằng tổng thể tích nước tích lũy trong toàn bộ vùng ngập tính từ đáy hồ đến cao trình đó. Khi sử dụng dữ liệu mô hình số độ cao (DEM), quá trình tính toán được thực hiện theo

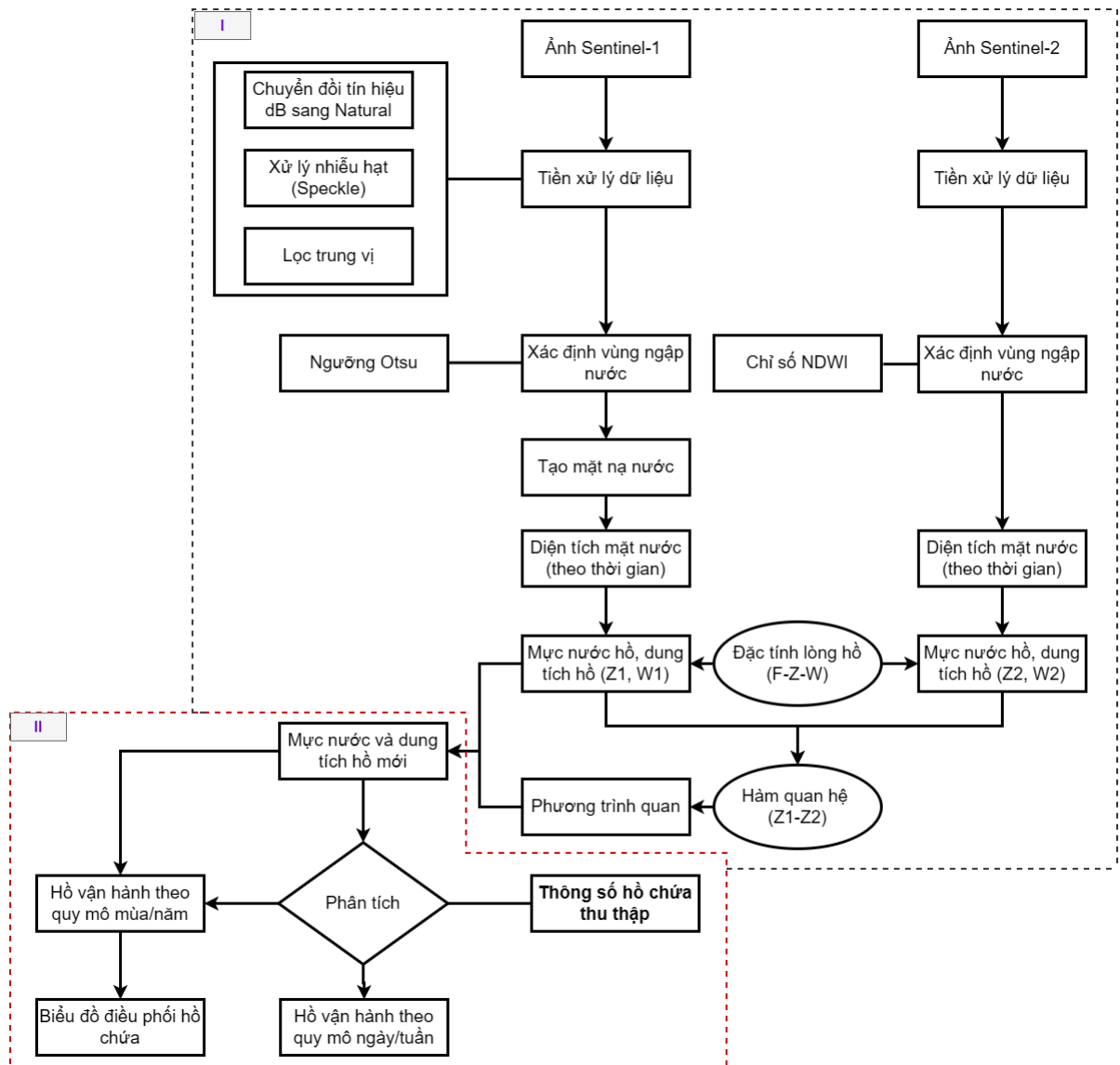
nguyên lý tích phân thể tích rời rạc, trong đó mỗi ô raster được xem như một phần tử thể tích nhỏ có diện tích đáy cố định và chiều cao bằng chênh lệch giữa mực nước và cao độ địa hình tại ô đó. Tại một mực nước  $Z_{min} + h$ , thể tích nước trong hồ được xác định theo công thức [120]:

$$V_h = A_{pix} \sum_{pix \in A_h} (Z_{min} + h - Z_{pix})$$

trong đó:  $A_{pix}$  là diện tích của một ô raster;  $A_h$  là tập hợp các ô có cao độ  $Z_{pix} \leq h$ ;  $Z_{min}$  là cao độ của ô DEM thứ  $pix$ ;  $z_{min}$  là cao độ thấp nhất trong phạm vi hồ (đáy hồ hoặc mực nước chết);  $Z_{min} + h$  là mực nước đang xét;  $(Z_{min} + h - Z_{pix})$  là chiều cao cột nước tại mỗi ô;  $h$  là mực nước hồ dao động từ 0 đến  $h_{max}$  (so với gốc  $Z_{min}$ ).

### **2.7.3. Phương pháp xây dựng quy luật vận hành của các hồ chứa từ dữ liệu viễn thám**

Quy trình phương pháp xây dựng quy luật vận hành của các hồ chứa từ dữ liệu viễn thám được trình bày trong Hình 2.8, gồm hai hợp phần chính. Hợp phần (I) là nội dung được kế thừa từ kết quả của Đề tài ĐTĐL.CN-06/23 do PGS.TS. Nguyễn Tiền Giang làm chủ nhiệm [5], tập trung khai thác dữ liệu Sentinel-1 và Sentinel-2 để xác định diện tích mặt nước, xây dựng quan hệ mực nước – diện tích – dung tích (F-Z-W) và xác định chuỗi biến động mực nước, dung tích hồ chứa. Trên cơ sở các kết quả kế thừa, NCS phát triển hợp phần (II), tập trung phân tích chuỗi biến động mực nước và dung tích hồ theo thời gian để xác định quy luật vận hành ở các quy mô ngày, tuần và mùa/năm, qua đó xây dựng các thông số và quy luật vận hành phục vụ tích hợp vào mô hình VIC.



Hình 2.8. Quy trình các bước tính toán xây dựng quy luật vận hành hồ chứa

## 2.8. Tiểu kết chương 2

Chương 2 đã xây dựng cơ sở phương pháp luận và hệ thống dữ liệu phục vụ mô phỏng, phân tích và đánh giá sự biến đổi dòng chảy thượng lưu sông Đà trong điều kiện lưu vực xuyên biên giới và thiếu hụt thông tin quan trắc. Hệ thống phương pháp được lựa chọn và xây dựng phù hợp với đặc điểm chuỗi dòng chảy không dừng, điều kiện thiếu dữ liệu thượng nguồn và yêu cầu xem xét đồng thời các tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh.

Trên cơ sở các tiêu chí về năng lực mô phỏng, mức độ phù hợp với đặc điểm lưu vực và khả năng mở rộng, mô hình VIC được lựa chọn làm mô hình thủy văn chính của luận án. Phương pháp phân tích điểm biến đổi và hồi quy tuyến tính được sử dụng để nhận diện sự biến đổi và xu thế của các yếu tố khí tượng – thủy văn, làm cơ sở xác định các giai đoạn nghiên cứu và phân tích sự thay đổi chế độ dòng chảy. Phương pháp hiệu chỉnh thông số bằng thuật toán SCE-UA thông qua SPOTPY được lựa chọn nhằm xác định bộ thông số phù hợp cho mô hình VIC trên cơ sở tối ưu hóa các chỉ tiêu đánh giá chất lượng mô phỏng.

Để định lượng mức độ đóng góp của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh đối với sự biến đổi dòng chảy, luận án kế thừa và phát triển công thức hệ số tác động của Wang thành công thức hệ số tác động mở rộng (EIFF), trong đó xem xét đồng thời ảnh hưởng của các yếu tố khí hậu, hoạt động nhân sinh và sai số mô hình. Khung nghiên cứu theo EIFF được sử dụng làm cơ sở phân tách và định lượng mức độ đóng góp của các nhóm tác động đối với sự biến đổi dòng chảy giữa các giai đoạn nghiên cứu.

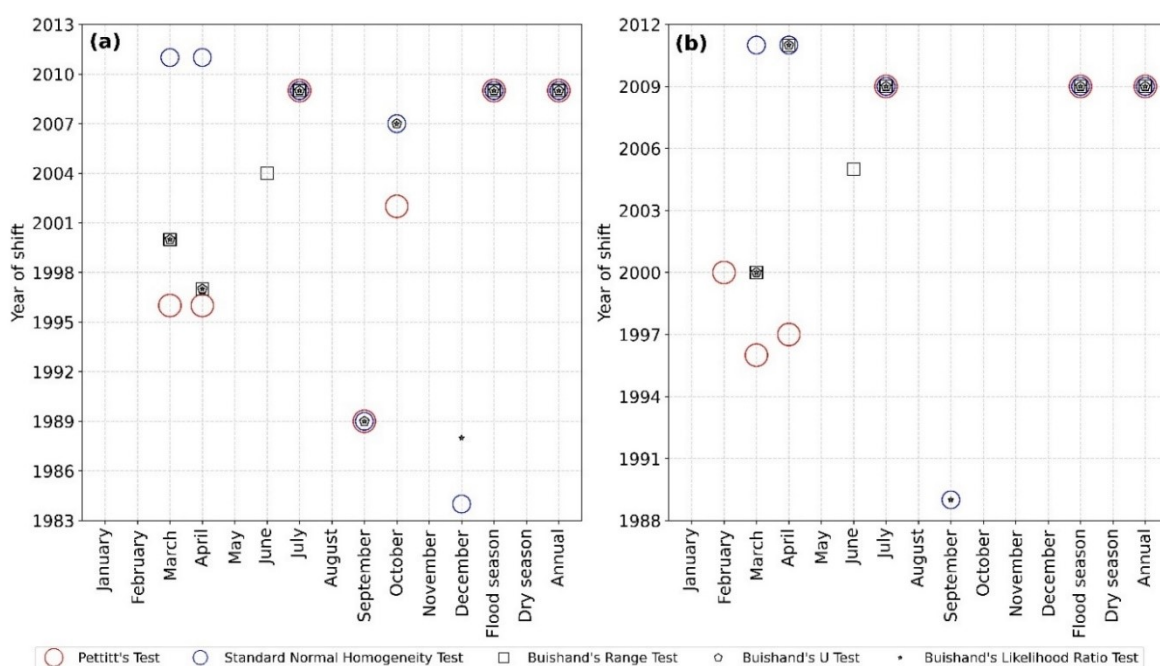
Để xác định thông tin vận hành hồ chứa phục vụ mô phỏng dòng chảy, luận án khai thác dữ liệu viễn thám đa nguồn để phân tích diễn biến mực nước và dung tích hồ theo thời gian, từ đó suy luận quy luật vận hành ở các quy mô ngày/tuần và mùa/năm. Trên cơ sở quy luật vận hành xác định được, các thông số vận hành hồ chứa được xây dựng và tích hợp vào mô hình VIC, làm cơ sở đánh giá tác động điều tiết của hệ thống hồ chứa đến chế độ dòng chảy sông Đà.

Hệ thống dữ liệu đầu vào đa nguồn, bao gồm khí tượng – thủy văn, địa hình, đất, thảm phủ, viễn thám, mưa lưới và tái phân tích, đã được xử lý đồng bộ, đảm bảo tính nhất quán không gian – thời gian. Nhìn chung, Chương 2 đã thiết lập được một cách tiếp cận tích hợp giữa mô hình thủy văn, dữ liệu viễn thám và các nguồn dữ liệu thay thế, làm nền tảng cho các phân tích mô phỏng và đánh giá trong các chương tiếp theo.

## CHƯƠNG 3 : KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Điểm biến đổi trong chế độ thủy văn trên lưu vực sông Đà

Trong luận án này, hai chuỗi thời gian dòng chảy quan trắc tại trạm Mường Lay với hai giai đoạn khác nhau, bao gồm giai đoạn 1981–2015 và 1981–2020, đã được phân tích bằng cách kết hợp đồng thời năm kiểm định phát hiện điểm biến đổi, gồm Pettitt, SNHT, kiểm định phạm vi Buishand, kiểm định U Buishand và kiểm định tỷ lệ khả năng Buishand. Cách tiếp cận này nhằm nâng cao độ tin cậy và tính nhất quán trong việc xác định các điểm biến đổi trong chuỗi số liệu, trong đó một điểm biến đổi chỉ được chấp nhận khi có sự đồng thuận của ít nhất 3 trong số 5 kiểm định được sử dụng.

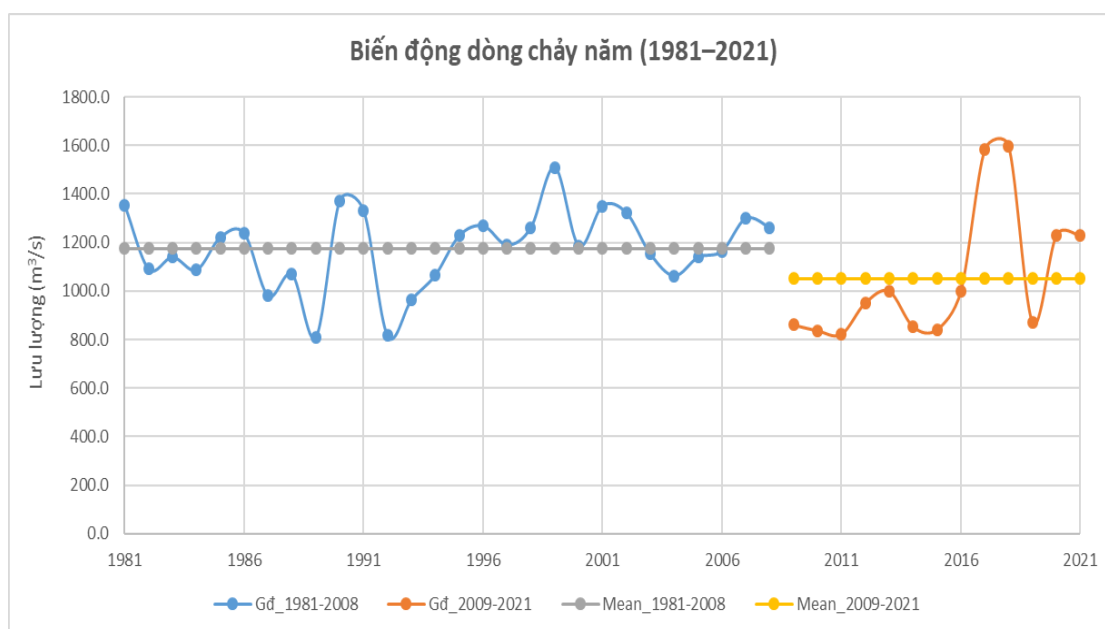


Hình 3.1. Kết quả phát hiện điểm biến động của chuỗi thời gian dòng chảy tháng, năm và mùa tại trạm đo Mường Lay trong hai giai đoạn: 1981 - 2015 (a) và 1981-2020 (b)

Đối với dòng chảy trung bình tháng kết quả cho thấy, đối với giai đoạn 1981–2015, ba điểm biến đổi đáng kể theo tháng đã được xác định vào tháng 9 năm 1989, tháng 10 năm 2007 và tháng 7 năm 2009, khi các kiểm định cho kết quả tương đối đồng thuận. Trong khi đó, đối với giai đoạn 1981–2020, hai điểm biến đổi chính được xác định, tương ứng với tháng 7 năm 2009 và tháng 4 năm 2011. Đối với dòng chảy

theo năm và mùa lũ, năm 2009 được xác định là điểm biến đổi nổi bật và ổn định trong cả hai giai đoạn (Hình 3.1). Ngược lại, không phát hiện được điểm biến đổi rõ ràng nào trong dòng chảy mùa kiệt ở cả hai chuỗi, điều này có thể liên quan đến sự gia tăng số lượng hồ chứa và tác động điều tiết dòng chảy trong giai đoạn nghiên cứu.

Năm 2009 được xác định là điểm biến đổi rõ rệt khi cả năm kiểm định đều cho kết quả đồng thuận đối với chuỗi dòng chảy năm, mùa lũ và tháng 7. Trên cơ sở đó, nghiên cứu phân tích các đặc trưng thống kê trước và sau điểm biến đổi, qua đó cho thấy sự thay đổi không chỉ ở giá trị trung bình mà còn ở mức độ biến động của dòng chảy. Giá trị trung bình giảm từ 1176 m<sup>3</sup>/s xuống 1052 m<sup>3</sup>/s, trong khi STDEV tăng từ 162 m<sup>3</sup>/s lên 275 m<sup>3</sup>/s và Cv tăng từ 0,14 lên 0,26 (Hình 3.2). Sự thay đổi đồng thời về vị trí trung tâm và mức độ phân tán của chuỗi, cùng với sự đồng thuận của các kiểm định, cho thấy chế độ dòng chảy tại Mường Lay đã có sự chuyển biến về đặc trưng thống kê sau năm 2009 và thể hiện rõ tính không dừng. Đây là cơ sở để luận án thực hiện các phân tích tiếp theo theo từng giai đoạn thay vì giả định một chế độ thủy văn thống nhất cho toàn bộ thời kỳ nghiên cứu.



Hình 3.2. Biến động lưu lượng trung bình năm tại trạm đo Mường Lay (1981 – 2021)

Năm 2016 không được xác định là điểm biến đổi thống kê trong chuỗi 1981–2020. Tuy nhiên, do gần với thời điểm hồ Lai Châu đi vào vận hành, năm 2016 được

lựa chọn làm mốc phân tích thực tiễn để phân biệt giai đoạn chịu tác động chủ yếu của các hồ chứa thượng nguồn phía Trung Quốc với giai đoạn có thêm tác động của hồ Lai Châu tại Việt Nam. Năm 2016 không được xác định là điểm biến đổi thống kê trong chuỗi 1981–2020. Tuy nhiên, do gắn với thời điểm hồ Lai Châu đi vào vận hành, năm 2016 được lựa chọn làm mốc phân tích thực tiễn để phân biệt giai đoạn chịu tác động chủ yếu của các hồ chứa thượng nguồn phía Trung Quốc với giai đoạn có thêm tác động của hồ Lai Châu tại Việt Nam. Trên cơ sở đó, năm 2009 và 2016 được lựa chọn và sử dụng thống nhất xuyên suốt luận án, trong đó năm 2009 là mốc thay đổi có cơ sở thống kê, còn năm 2016 là mốc thực tiễn. Hai mốc này được sử dụng làm cơ sở phân chia các giai đoạn và phục vụ các phân tích, đánh giá tác động trong các mục tiếp theo của luận án.

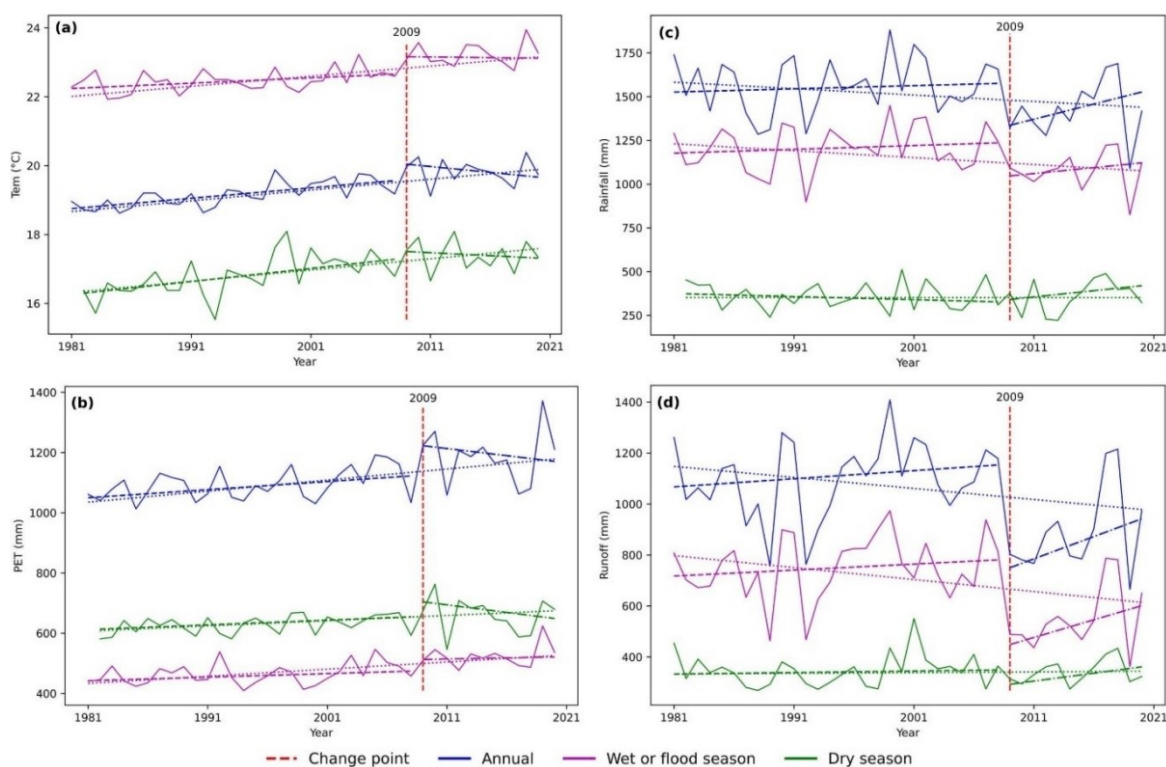
### **3.2. Phân tích xu thế của một số yếu tố khí hậu**

Kết quả phân tích xu hướng trong giai đoạn 1981-2015 trong nghiên cứu này tương tự như kết quả thu được của Wu và cộng sự (2019), trong đó nhiệt độ hàng năm tăng 0,30C/thập kỷ và lượng mưa hàng năm giảm 27 mm/thập kỷ trên toàn tỉnh Vân Nam[178]. Tại UDRB, các con số tương ứng là 0,350C/thập kỷ và 46,5 mm/thập kỷ. Hơn nữa, nghiên cứu này cũng phát hiện ra lượng bốc hơi tiềm năng (PET) hàng năm tăng 41,14 mm/thập kỷ. Với xu hướng PET tăng và lượng mưa giảm theo cả quy mô theo mùa và theo năm, xu hướng giảm nhẹ về lượng dòng chảy lũ và hàng năm, cũng như xu hướng bằng không về lượng dòng chảy mùa kiệt có thể phần lớn là do biến đổi khí hậu. Tuy nhiên, không thể bỏ qua những đóng góp của hoạt động của con người với các bằng chứng hiện tại. Kết quả phân tích điểm biến đổi trong giai đoạn 1981-2015 cho thấy có sự thay đổi đột ngột vào năm 2009 trong cả chuỗi thời gian dòng chảy hàng năm và theo mùa lũ. Sự thay đổi đột ngột này về dòng chảy có thể là do tác động tích lũy của các hồ chứa ở thượng nguồn, làm giảm dòng chảy hàng năm và lũ lụt do việc tích nước vào các hồ chứa được xây dựng và vận hành trong giai đoạn 2005-2009. Điểm biến đổi này về dòng chảy hàng năm cũng có thể là do lượng mưa hàng năm giảm nhẹ vào năm 2009 (Hình 3.3). Không tìm thấy điểm biến đổi đối với dòng chảy theo mùa kiệt do sự điều tiết của hồ chứa khiến dòng chảy tăng

nhẹ trong mùa kiệt. Các phần tác động do biến đổi khí hậu và hoạt động của con người trong mùa kiệt sẽ được thảo luận thêm trong các phần tiếp theo.

Phân tích cũng cho thấy xu hướng giảm nhẹ lượng mưa mùa lũ, lượng mưa hàng năm giảm ít hơn và không có xu hướng mưa mùa kiệt ở sông Đà trong giai đoạn 1981-2020 (Hình 3.3). Xu hướng giảm nhẹ lượng dòng chảy lũ và lượng dòng chảy hàng năm giảm ít hơn cho thấy biến đổi khí hậu đã ảnh hưởng đến chế độ thủy văn của sông Đà. Tuy nhiên, lượng dòng chảy mùa kiệt tăng nhẹ cho thấy tác động của hệ thống hồ chứa trong mùa kiệt. Ngoài ra, sự thay đổi đột ngột về lượng dòng chảy lũ năm 2009 xác nhận tầm quan trọng tương đối của hệ thống hồ chứa đối với chế độ lũ.

Tổng hợp kết quả phân tích điểm biến đổi và xu thế các yếu tố khí hậu trên lưu vực thượng nguồn sông Đà cho thấy chế độ thủy văn đã có sự thay đổi rõ rệt trong giai đoạn nghiên cứu. Sự gia tăng nhiệt độ và bốc hơi tiềm năng, cùng với xu thế giảm lượng mưa, đã làm suy giảm nguồn nước hiệu dụng, qua đó góp phần dẫn đến xu thế giảm của dòng chảy năm và dòng chảy mùa lũ. Bên cạnh đó, điểm biến đổi năm 2009 trùng với giai đoạn gia tăng mạnh hoạt động xây dựng và vận hành hồ chứa (2005–2009), cùng với xu thế tăng nhẹ của dòng chảy mùa kiệt, cho thấy vai trò điều tiết ngày càng rõ của hệ thống hồ chứa trong việc làm thay đổi phân bố dòng chảy theo thời gian. Những bằng chứng này khẳng định chuỗi dòng chảy tại trạm Mường Lay thể hiện rõ tính không dừng dưới tác động tổng hợp của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh. Việc lượng hóa mức độ đóng góp tương đối của các yếu tố này đối với sự thay đổi dòng chảy sẽ được NCS trình bày chi tiết trong Mục 3.5.



Hình 3.3. Xu hướng nhiệt độ năm và theo mùa (a), bốc hơi tiềm năng (b), lượng mưa (c) và dòng chảy (d) tại trạm đo Mùòng Lay trong giai đoạn 1981 đến 2020

### 3.3. Phân tích, xử lý dữ liệu trong thiết lập mô hình VIC

#### 3.3.1. Phân tích, xử lý dữ liệu trong thiết lập Module 1 - mô hình VIC

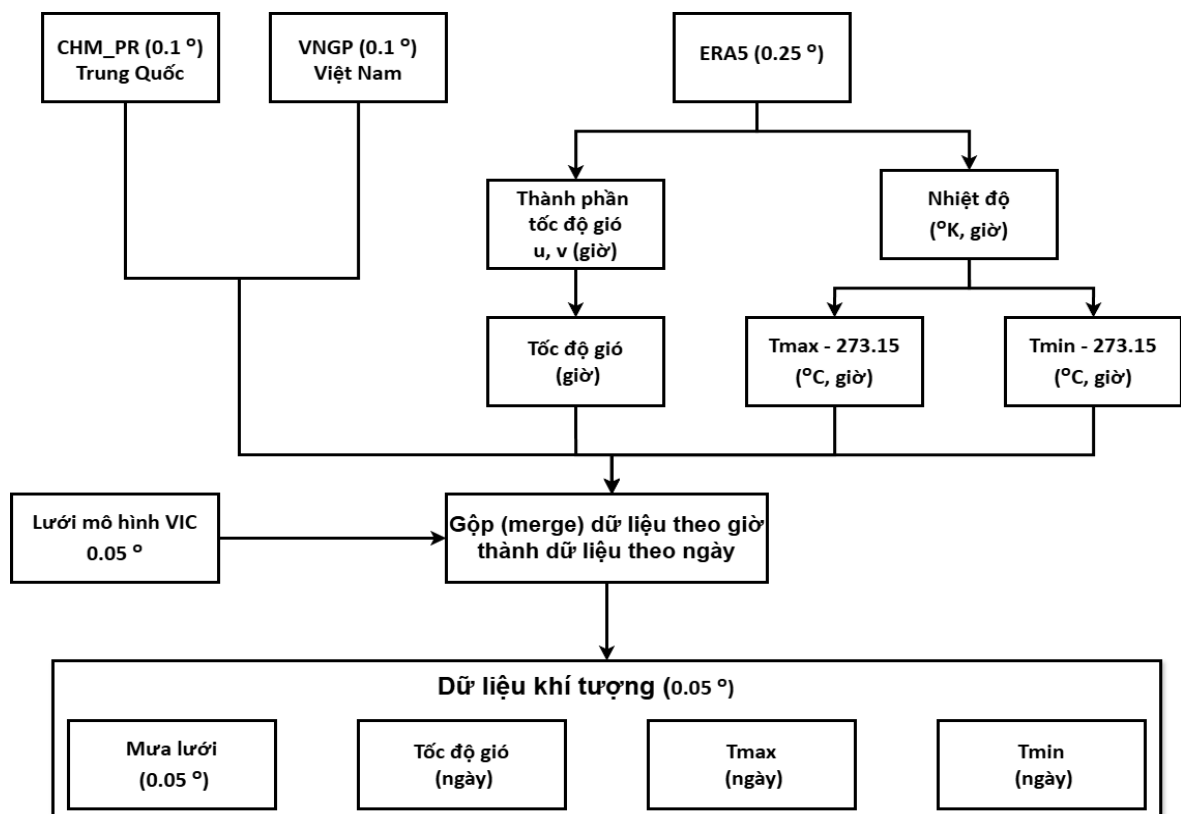
##### 3.3.1.1. Số liệu khí tượng – Meteorological Forcing

Trong mô hình VIC yêu cầu và cho phép các biến khí tượng để thực hiện các mô phỏng trong quá trình cân bằng nước và năng lượng bao gồm: lượng mưa, nhiệt độ không khí, tốc độ gió, áp suất và mật độ khí quyển, áp suất hơi (hoặc độ hút áp suất hơi hoặc độ ẩm tương đối hoặc độ ẩm tuyệt đối [25]), bức xạ tới sóng ngắn (mặt trời), và bức xạ tới sóng dài (hoặc nhiệt). Đối với phiên bản mô hình VIC.4.2.d yêu cầu biến tối thiểu là: tổng lượng mưa hàng ngày (mưa và/ hoặc tuyết), nhiệt độ tối cao và tối thấp hàng ngày và tốc độ gió trung bình hàng ngày. VIC sử dụng các thuật toán MTCLIM [80, 159] để chuyển đổi nhiệt độ tối cao và tối thấp hàng ngày thành độ ẩm và bức xạ tới sóng ngắn. VIC dùng thuật toán Tennessee Valley Authority [25] để ước lượng bức xạ tới sóng dài từ độ ẩm và nhiệt độ. VIC tính toán áp suất và mật

độ không khí từ độ cao của từng ô lưới và tốc độ mất áp suất trung bình toàn cầu [93, 97]. Vậy nên các yêu tố bắt buộc cần có trong phiên bản này được mô tả tại Bảng 3.1.

*Bảng 3.1. Mô tả yêu cầu số liệu khí tượng đầu vào Mô hình VIC*

| STT | Loại dữ liệu                   | Vùng Quốc gia        | Độ phân giải |           | Đơn vị | Định dạng số liệu |
|-----|--------------------------------|----------------------|--------------|-----------|--------|-------------------|
|     |                                |                      | Không gian   | Thời gian |        |                   |
| 1   | Nhiệt độ tối cao<br>$T_{max}$  | Trung Quốc, Việt Nam | 0,05         | Ngày      | °C     | text              |
| 2   | Nhiệt độ tối thấp<br>$T_{min}$ | Trung Quốc, Việt Nam | 0,05         | Ngày      | °C     | Text              |
| 3   | Tốc độ gió<br>$W_s$            | Trung Quốc, Việt Nam | 0,05         | Ngày      | m/s    | Text              |
| 4   | Mưa<br>P                       | Trung Quốc, Việt Nam | 0,05         | Ngày      | mm     | Text              |



*Hình 3.4. Sơ đồ xử lý số liệu của tệp khí tượng*

### 3.3.1.2. Thông số đất - Soil parameters

Tập thông số đất đóng vai trò quan trọng trong mô hình VIC, phục vụ ba mục đích chính:

- + **Xác định số ID của mỗi ô lưới:** Mỗi ô lưới được gán một số ID duy nhất, đóng vai trò như một khóa cơ sở dữ liệu để liên kết với các thông số tương ứng trong các tệp cấu hình khác của mô hình;
- + **Cung cấp thông tin địa lý và các thông số đất:** Bao gồm vĩ độ, kinh độ trung tâm ô lưới và các đặc trưng vật lý của đất như độ sâu tầng đất, khả năng trữ nước, hệ số thấm, hệ số truyền nhiệt,... Các thông số này là cơ sở để mô hình mô phỏng quá trình cân bằng nước và cân bằng năng lượng trên bề mặt;
- + **Xác định điều kiện độ ẩm ban đầu của đất:** Trong trường hợp không có tệp trạng thái đầu vào (initial state file), các giá trị độ ẩm đất ban đầu sẽ được lấy từ tệp thông số này để khởi tạo mô phỏng.

Tập thông số đất là tệp cấu hình trung tâm trong mô hình VIC, không chỉ định nghĩa các đặc tính của từng ô lưới mà còn xác định phạm vi mô phỏng thông qua tập hợp các ô lưới có tọa độ địa lý cụ thể. Do đó, việc thiết lập chính xác và đầy đủ tệp thông số đất là điều kiện tiên quyết để mô hình hoạt động hiệu quả và cho kết quả tin cậy. Các thông số của đất được chia thành 2 nhóm: (A) nhóm xác định bởi FAO, không thay đổi khi chạy mô hình VIC [51, 192] và (B) nhóm được thay đổi và hiệu chỉnh. Các thông số đất được cung cấp cho mô hình VIC dưới dạng một tệp ASCII, với một hàng riêng biệt cho mỗi ô lưới, với mỗi trường chứa một giá trị thông số khác nhau. Trong phiên bản VIC 4.x, tất cả các giá trị thông số đất hiện được đọc cho tất cả các lớp. Tập thông số đất gồm 54 thông số được thể hiện như bảng sau:

*Bảng 3.2. Các thông số trong tệp thông số đất*

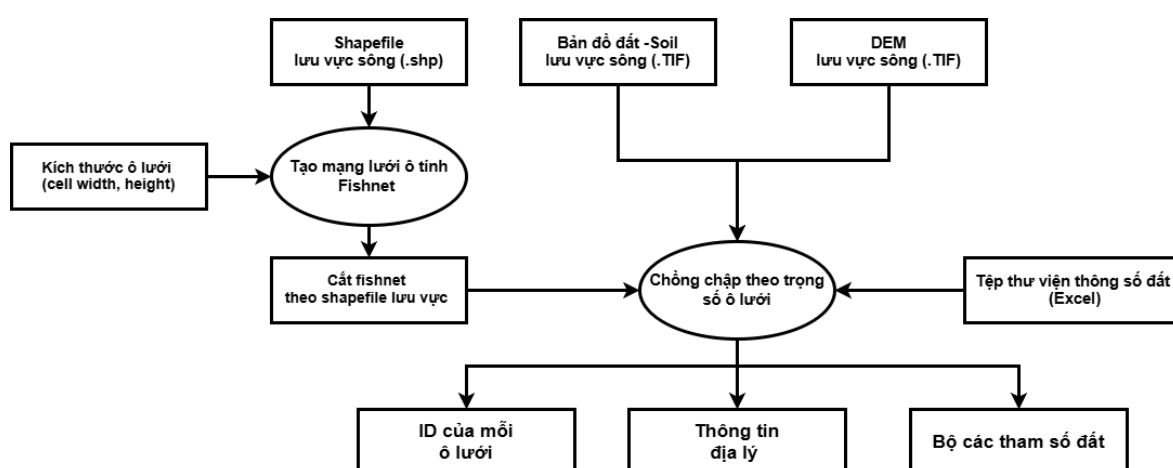
| Tên biến | Đơn vị | Số giá trị | Mô tả                           |
|----------|--------|------------|---------------------------------|
| run_cell |        | 1          | 1 = Chạy ô lưới, 0 = Không chạy |

| Tên biến     | Đơn vị            | Số giá trị | Mô tả                                                                                                                                                                        |
|--------------|-------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| gridcel      |                   | 1          | Số ô lưới                                                                                                                                                                    |
| lat          | độ                | 1          | Vĩ độ của ô lưới                                                                                                                                                             |
| lon          | độ                | 1          | Kinh độ của ô lưới                                                                                                                                                           |
| infiltr      |                   | 1          | Thông số đường cong thấm thay đổi (binfiltr)                                                                                                                                 |
| Ds           | phân số           | 1          | Phần của Dsmax nơi bắt đầu dòng cơ sở phi tuyến tính                                                                                                                         |
| Dsmax        | mm/ngày           | 1          | Vận tốc lớn nhất của dòng chảy đáy                                                                                                                                           |
| Ws           | phân số           | 1          | Tỷ lệ độ ẩm đất tối đa nơi xảy ra dòng chảy cơ sở phi tuyến tính                                                                                                             |
| c            |                   | 1          | Số mũ được sử dụng trong đường cong dòng cơ sở, thường được đặt thành 2                                                                                                      |
| expt         |                   | số lớp     | Số mũ n ( $=3+2/\lambda$ ) trong Campbell's eqn cho độ dẫn thủy lực, HBH 5.6 (trong đó $\lambda$ = thông số phân bố kích thước lỗ rỗng của đất). Giá trị nên được > 3.0.     |
| Ksat         | mm/ngày           | số lớp     | Độ dẫn thủy văn bão hòa                                                                                                                                                      |
| phi_s        | mm/mm             | số lớp     | Thông số khuếch tán độ ẩm của đất                                                                                                                                            |
| init_moist   | mm                | số lớp     | Độ ẩm lớp ban đầu                                                                                                                                                            |
| elev         | m                 | 1          | Cao độ trung bình của ô lưới                                                                                                                                                 |
| depth        | m                 | số lớp     | Độ dày của từng lớp ẩm đất                                                                                                                                                   |
| avg_T        | C                 | 1          | Nhiệt độ trung bình của đất, được sử dụng làm ranh giới dưới cùng cho các giải pháp thông lượng nhiệt của đất                                                                |
| dp           | m                 | 1          | Độ sâu giảm nhiệt của đất (độ sâu mà nhiệt độ đất không đổi trong năm, ~4 m)                                                                                                 |
| bubble       | cm                | số lớp     | Áp lực sủi bọt của đất. Các giá trị phải > 0.                                                                                                                                |
| quartz       | fraction          | số lớp     | Hàm lượng thạch anh trong đất                                                                                                                                                |
| bulk_density | kg/m <sup>3</sup> | số lớp     | Mật độ lớn của lớp đất                                                                                                                                                       |
| soil_density | kg/m <sup>3</sup> | số lớp     | Mật độ hạt đất, thông thường 2685 kg/m <sup>3</sup>                                                                                                                          |
| off_gmt      | giờ               | 1          | Múi giờ bù từ GMT.                                                                                                                                                           |
| Wcr_FRACT    | phân số           | số lớp     | Một phần độ ẩm của đất tại điểm tới hạn (~70% công suất hiện trường) (một phần độ ẩm tối đa)                                                                                 |
| Wpwp_FRACT   | phân số           | số lớp     | Một phần độ ẩm của đất tại điểm héo (phần của độ ẩm tối đa)                                                                                                                  |
| rough        | m                 | 1          | Độ nhám bề mặt của đất trống                                                                                                                                                 |
| snow_rough   | m                 | 1          | Độ nhám bề mặt của băng tuyết                                                                                                                                                |
| annual_prec  | mm                | 1          | Lượng mưa trung bình hàng năm.                                                                                                                                               |
| resid_moist  | phân số           | số lớp     | Độ ẩm lớp đất độ ẩm còn lại.                                                                                                                                                 |
| fs_active    | 1 hoặc 0          | 1          | Nếu được đặt thành 1, thì thuật toán đất đóng băng sẽ được kích hoạt cho ô lưới. Số 0 chỉ ra rằng đất đóng băng không được tính ngay cả khi nhiệt độ đất giảm xuống dưới 0C. |

| Tên biến    | Đơn vị | Số giá trị | Mô tả                                                                                      |
|-------------|--------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| frost_slope | C      | 1          | Độ dốc phân bố nhiệt độ đất đồng đều (nếu SPATIAL_FROST == TRUE trong tệp thông số chung). |

Việc xây dựng tệp thông số đất cho mô hình VIC là một trong những bước quan trọng và phức tạp nhất trong quá trình thiết lập mô hình. Tệp này không chỉ chứa thông tin về đặc tính vật lý của đất tại từng ô lưới, mà còn bao gồm tọa độ địa lý, các điều kiện biên ban đầu và mã định danh (ID) của từng ô lưới. Quá trình xây dựng tệp này đòi hỏi xử lý đồng bộ và chính xác nhiều loại dữ liệu không gian (GIS) khác nhau như bản đồ thổ nhưỡng, DEM, và ranh giới lưu vực. Các công đoạn xử lý, trích xuất và tổng hợp dữ liệu đầu vào để tạo thành tệp thông số đất bằng thủ công là rất phức tạp, tốn nhiều thời gian và dễ xảy ra sai sót. Vì vậy, Luận án đã thiết lập một chương trình xử lý tự động có tên là VIC\_AUTO.PY sử dụng ngôn ngữ lập trình Python.

Chương trình xử lý VIC\_AUTO.PY được thiết lập nhằm tự động hóa toàn bộ quá trình xây dựng tệp thông số đất, từ việc trích xuất dữ liệu từ các lớp bản đồ không gian đến việc tính toán các chỉ tiêu đầu vào cần thiết cho mô hình VIC. Nguyên tắc hoạt động và quy trình xử lý của chương trình VIC\_AUTO.PY được mô tả trong Hình 3.5. Việc sử dụng công cụ này không chỉ giúp rút ngắn đáng kể thời gian xây dựng mô hình mà còn đảm bảo tính chính xác và nhất quán trong dữ liệu đầu vào.



Hình 3.5. Quy trình tạo tệp thông số đất trong Vic\_auto.py

### 3.3.1.3. Thông số thảm phủ thực vật - *Vegetation Parameters*.

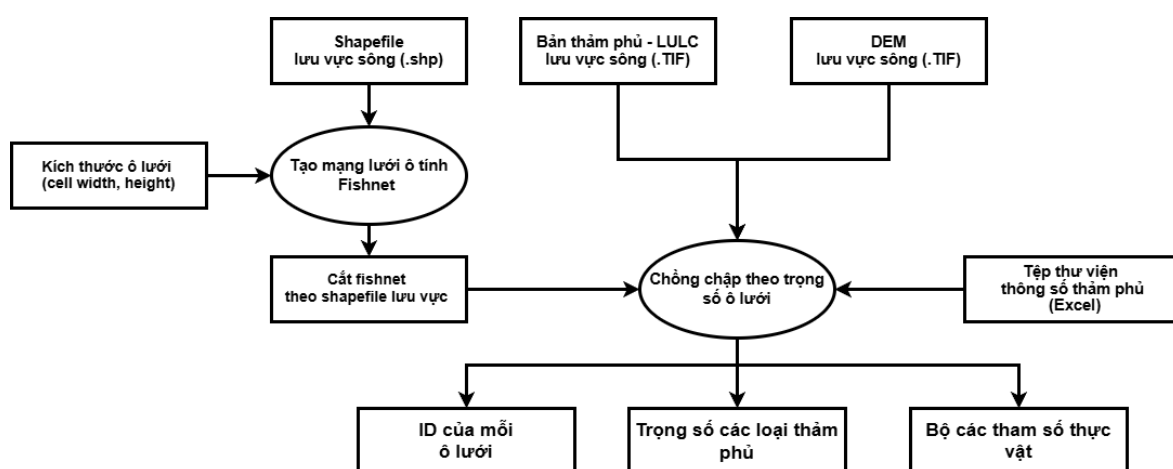
Tập thông số và thư viện thảm phủ thực vật cung cấp thông tin về số lượng các loại thực vật trên mỗi ô lưới, phạm vi bao phủ một phần của chúng và các thông số thực vật cần thiết cho từng loại thực vật được sử dụng trong mô hình VIC được cung cấp theo định dạng cột ở dạng tệp ASCII. Các thông số thư viện thảm phủ thực vật được cung cấp cho mô hình VIC dưới dạng một tệp ASCII, với một hàng riêng biệt cho mỗi ô lưới, với mỗi trường chứa một giá trị thông số khác nhau. Trong phiên bản 4.x, tất cả các giá trị thông số thư viện thảm phủ thực vật được thể hiện trong Bảng 3.3.

*Bảng 3.3. Các thông số thư viện thảm phủ thực vật*

| Tên biến     | Đơn vị           | Số giá trị | Mô tả                                                                                                                                                         |
|--------------|------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| veg_class    | N/A              | 1          | Số nhận dạng lớp thực vật (tham khảo bảng thư viện)                                                                                                           |
| overstory    | N/A              | 1          | Gắn cờ để biết loại thảm thực vật hiện tại có tầng phủ quá mức hay không (TRUE đối với tầng phủ quá mức (cây), FALSE nếu không có tầng phủ quá mức (cỏ)       |
| rarc         | s/m              | 1          | Sức cản kiến trúc của loại thảm thực vật (~2 s/m)                                                                                                             |
| rmin         | s/m              | 1          | Sức cản khí khổng tối thiểu của loại thảm thực vật (~100 s/m)                                                                                                 |
| LAI          | fraction         | 12         | Chỉ số diện tích lá của kiểu thảm thực vật                                                                                                                    |
| FCANOPY      | fraction         | 12         | Thảm thực vật che phủ một phần                                                                                                                                |
| albedo       | fraction         | 12         | Hệ số phản xạ sóng ngắn cho loại thảm thực vật                                                                                                                |
| rough        | m                | 12         | Chiều dài độ nhám của thảm thực vật (điển hình 0.123 * chiều cao cây)                                                                                         |
| displacement | m                | 12         | Chiều cao dịch chuyển của thực vật (điển hình 0.67 * chiều cao cây)                                                                                           |
| wind_h       | m                | 1          | Độ cao tại đó tốc độ gió được đo                                                                                                                              |
| RGL          | W/m <sup>2</sup> | 1          | Bức xạ sóng ngắn tối nhỏ nhất tại đó sẽ có sự thoát hơi nước. Đối với cây cối là khoảng 30 W/m <sup>2</sup> , đối với cây trồng khoảng 100 W/m <sup>2</sup> . |
| rad_atten    | fract            | 1          | Hệ số suy giảm bức xạ. Thông thường được đặt thành 0,5, mặc dù có thể cần được điều chỉnh ở vĩ độ cao.                                                        |
| wind_atten   | fract            | 1          | Suy giảm tốc độ gió thông qua tầng trên. Giá trị mặc định là 0,5.                                                                                             |
| trunk_ratio  | fract            | 1          | Tỷ lệ chiều cao toàn cây so với thân (không phân cành). Giá trị mặc định là 0,2.                                                                              |

Trong phiên bản VIC 4.x, thông số thảm phủ thực vật được thể hiện gồm: loại che phủ và số lượng loại che phủ trên từng ô lưới; tỷ lệ của từng loại che phủ; độ sâu

và phân bố vùng rẽ. Việc xây dựng tệp thông số thực vật cho mô hình VIC, tương tự như tệp thông số đất, đòi hỏi tổng hợp và xử lý đồng thời nhiều bộ dữ liệu không gian khác nhau như: bản đồ lớp phủ thực vật (LULC), dữ liệu địa hình (DEM) và các thông số sinh lý cây trồng,... Nếu thực hiện thủ công, quá trình này không chỉ tốn kém thời gian mà còn dễ phát sinh sai sót do phải lọc, chuyển đổi và nội suy dữ liệu trên lưới ô vuông với độ phân giải cao, vì vậy luận án đã tích hợp tệp thông số thực vật vào cùng chương trình xử lý tự động VIC\_AUTO.PY mà luận án đã thiết lập, nhằm tự động hóa toàn bộ quy trình xây dựng tệp thông số thực vật.



Hình 3.6. Quy trình tạo tệp thông số thực vật trong *Vic\_auto.py*

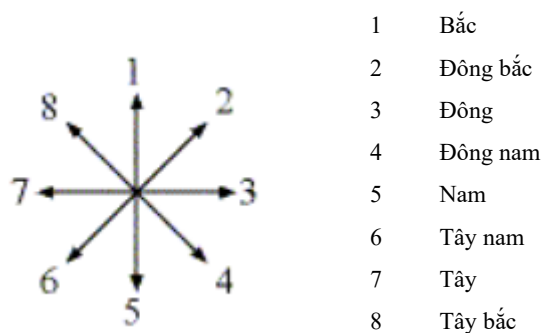
Chương trình **Vic\_auto.py** được thiết kế nhằm tự động hóa toàn bộ quá trình xây dựng tệp thông số thực vật, từ việc trích xuất dữ liệu từ các lớp bản đồ không gian đến việc tính toán các chỉ tiêu đầu vào cần thiết cho mô hình VIC. Nguyên tắc hoạt động và quy trình xử lý của chương trình được mô tả trong Hình 3.6.

### 3.3.2. Phân tích, xử lý dữ liệu trong thiết lập Module 2 - mô hình ROUTING

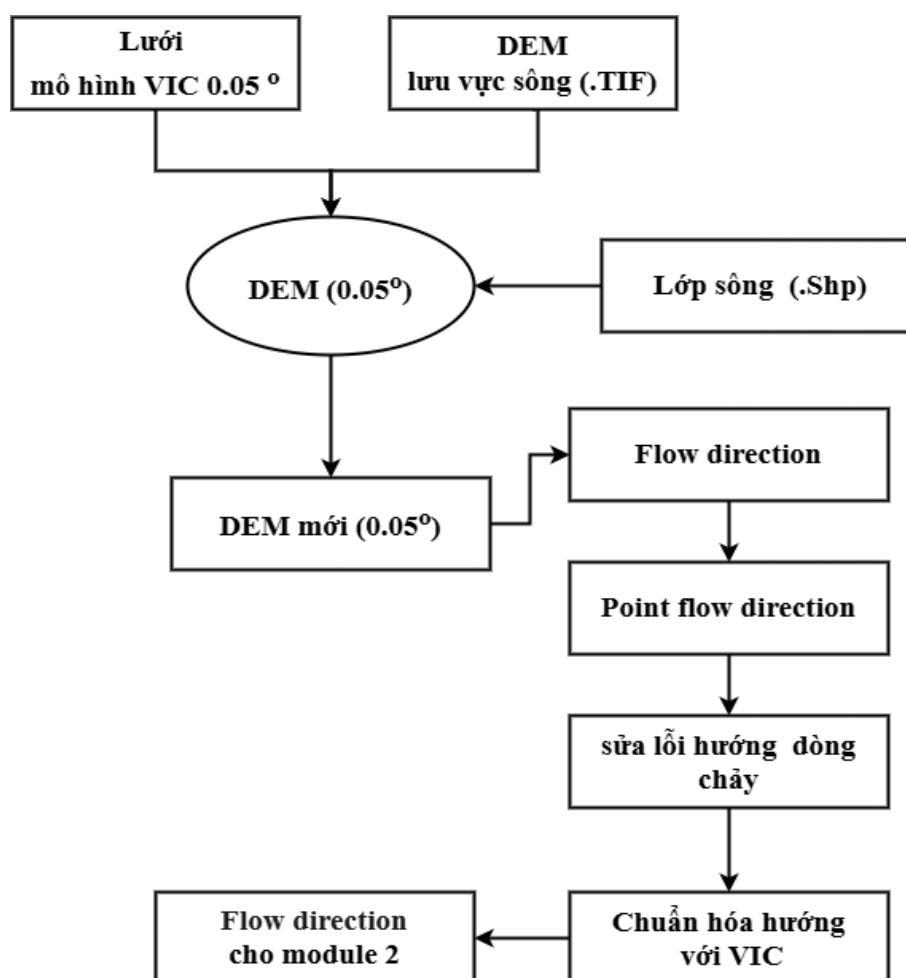
#### 3.3.2.1. Hướng dòng chảy – Flow Direction

Tập hướng dòng chảy cung cấp thông tin mô hình Routing nhận biết cách kết nối tất cả các ô lưới được tạo ra trong mô hình VIC thành mạng lưới sông cho một vùng nghiên cứu. Tập hướng dòng chảy cung cấp thông tin tiêu đề cho mô hình diễn toán biết vĩ độ và kinh độ dưới bên trái, số hàng và cột và độ phân giải ô lưới. Số

trong mỗi ô lưới được đại diện cho hướng dòng chảy trong mạng lưới sông suối như sau:



Hình 3.7. Định dạng tệp hướng dòng chảy



Hình 3.8. Quá trình xử lý tệp “Flow direction”

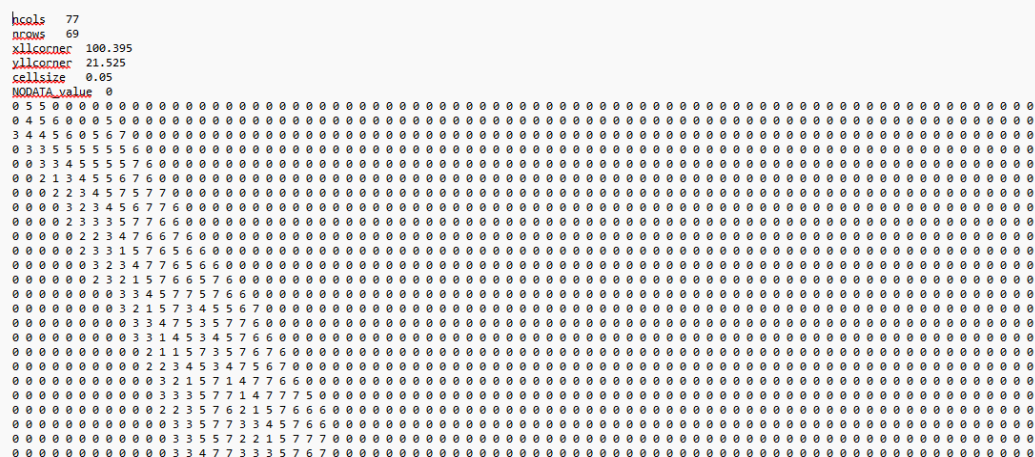
Tệp hướng dòng chảy cung cấp thông tin cho mô hình như sau:

ncols

Tổng số cột trong tệp

Nguồn số liệu để xác định hướng dòng chảy bao gồm:

- + Bản đồ mô hình số độ cao (DEM);
- + Lưới mô hình VIC (độ phân giải 0,05 độ);
- + Lớp sông suối trên lưu vực sông Đà đến trạm Mường Lay và lớp sông suối khu vực hồ Bản Chát, Hội Quảng.

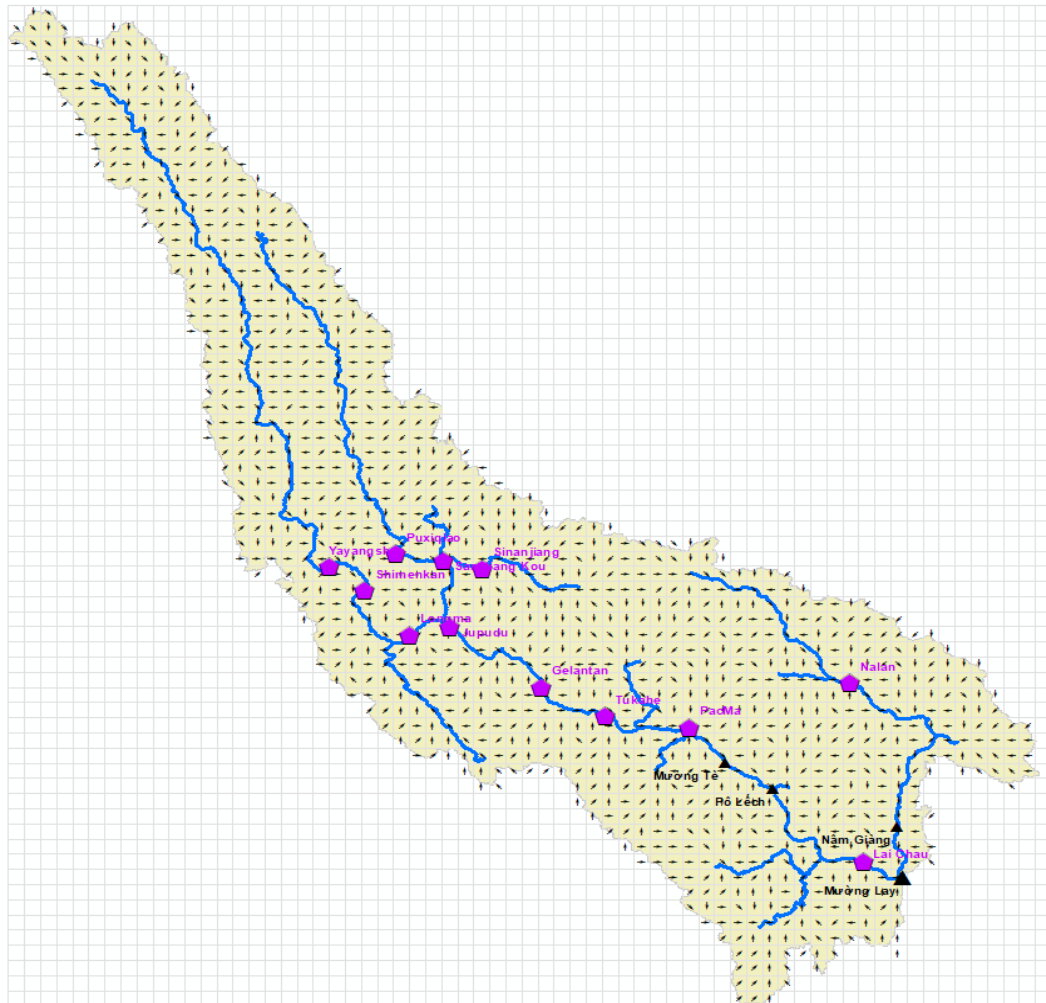


Hình 3.9. Tập hướng dòng chảy khu vực nghiên cứu

Từ các lớp bản đồ trên cần được chuẩn về cùng hệ tọa độ, chuyển về khu vực nghiên cứu bằng cách sử dụng công cụ Clip raster trong Arcgis tool. Công cụ Clip raster sử dụng lớp dữ liệu và vùng biên giới hạn của khu vực nghiên cứu dạng Shp. Sản phẩm thu được là các lớp bản đồ trong phạm vi khu vực sông Đà. Sau đó thực hiện theo các bước xử lý trong Hình 3.8.

Tập thông số hướng dòng chảy được luận án xây dựng bằng cách sử dụng các công cụ trong Arcgis như: Reconditionary, flow direction.... theo quy trình thể hiện trong Hình 3.8. Tập thông số hướng dòng chảy cho mô hình Routing dưới dạng một tệp ASCII, với mỗi trường chứa một giá trị thông số khác nhau từ 1 đến 8 thể hiện

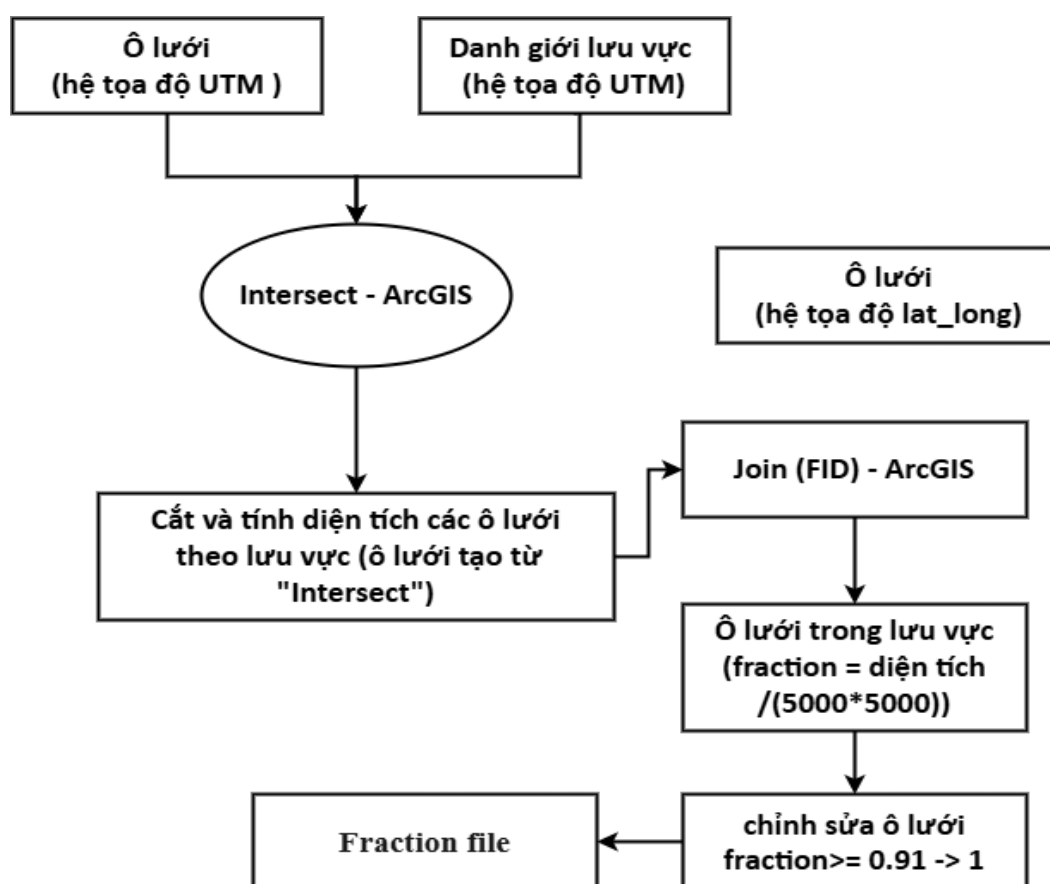
cho 8 hướng Hình 3.7. Tập thông số hướng dòng chảy được thể hiện trong Hình 3.9 và Hình 3.10.



Hình 3.10. Hướng dòng chảy lưu vực Sông Đà

### 3.3.2.2. Phân trăm trọng số lưu vực trong ô lưới – Fraction file

Tập phân trăm trọng số lưu vực trong ô lưới cung cấp thông tin mô hình Routing nhận biết và chính xác hóa phần lưu vực trong mỗi ô lưới được tạo ra trong mô hình VIC. Tập phân trăm trọng số lưu vực trong ô lưới lưu vực cung cấp thông tin trọng số phần lưu vực cho mô hình Routing, từ đó kết quả của dòng chảy tại các điểm giáp biên sẽ được nâng cao. Số trong mỗi ô lưới được đại diện cho 2 loại như sau: bằng 1 với các ô thuộc lưu vực; nhỏ hơn 1 là trong ô lưới có một phần không thuộc lưu vực.



Hình 3.11. Quá trình xử lý tệp “file Fraction”

Tập phần trăm trọng số lưu vực trong ô lưới cung cấp thông tin cho mô hình như sau:

|              |                                               |
|--------------|-----------------------------------------------|
| ncols        | Tổng số cột trong tệp                         |
| nrows        | Tổng số hàng trong tệp                        |
| xllcorner    | Kinh độ tại ô vị trí cuối bên trái            |
| yllcorner    | Vĩ độ tại ô vị trí cuối bên trái              |
| cellsize     | Độ phân giải/ kích cỡ ô lưới                  |
| NODATA_value | Số ô giá trị bị mất hoặc ô lưới không sử dụng |

Nguồn số liệu để xác định phần trăm trọng số lưu vực trong ô lưới bao gồm:

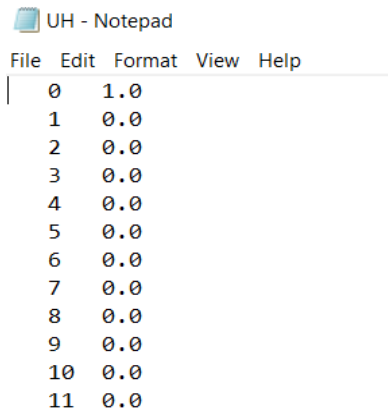
- + Bản đồ lưu vực;
- + Lưới mô hình VIC (độ phân giải 0,05 độ);

Từ các lớp bản đồ trên cần được chuẩn về cùng hệ tọa độ sử dụng công cụ trong Arcgis tool. Sau đó thực hiện theo các bước trong Hình 3.11.

[illegible]

#### 3.3.2.3. Thủy văn đơn vị - UH File (trọng số của UH)

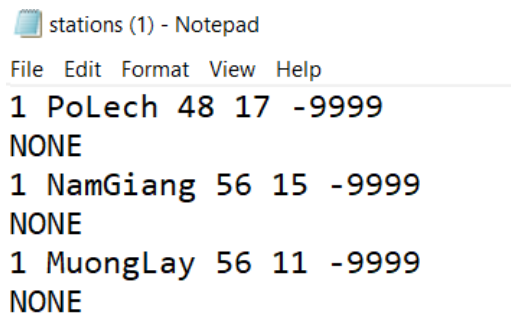
Trong mô hình VIC, tệp này cho phép tự định nghĩa với các bước thời gian từ 1 đến 12 (0-11) – cột 1 và tổng lượng mưa/trọng số UH - cột thứ 2 bằng 1. Khi xử lý tệp UH cho mô hình VIC, nhóm đề tài đã mặc định tệp này như Hình 3.13 dưới dạng Text.



*Hình 3.13. Nội dung tệp thủy văn đơn vị – UH*

Sau đó các trọng số khác nhau cho từng bước thời gian được thay đổi để ánh giá mức độ ảnh hưởng của chúng đến kết quả của mô hình.

#### 3.3.2.4. Vị trí các trạm - Station Location File



*Hình 3.14. Định dạng của vị trí các trạm thủy văn*

Tệp vị trí trạm cho biết mô hình diễn toán nhận biết các điểm đầu ra hoặc cửa xả của lưu vực trong khu vực nghiên cứu. Bất kỳ số lượng trạm nào cũng có thể được xác định trong lưu vực. Mỗi trạm được xác định theo sau bởi một dòng khác cho module routing và kết nối với tệp “uh\_s” (UH file) đã được tạo cho vị trí trạm hiện tại hay chưa. Nếu được đặt thành NONE, mô hình diễn toán sẽ tạo ra một tệp uh\_s mới. Nếu không nó sẽ đọc tệp uh\_s đã xác định ở trên Mục 3.3.2.3. Tệp vị trí trạm có định dạng như Hình 3.14 và sử dụng công cụ ArcGIS để biết vị trí các trạm theo ô lưới.

Các cột trong tệp được giải thích như sau: Cột đầu tiên cho biết trạm có hoạt động hay không (1 = hoạt động, 0 = không hoạt động); Cột thứ hai tên trạm thủy văn

không chế lưu vực; Cột thứ ba và bốn là vị trí của trạm thủy văn không chế lưu vực; Cột thứ năm là cờ hiệu để nhận biết tệp.

### 3.3.2.5. Vận tốc dòng chảy - Flow Velocity File

Tệp này chứa thông tin về vận tốc (m/s) của các ô lưới cho thành phần diễn toán sông của mô hình. Tệp được sử dụng theo 2 cách: (i) tạo các giá trị vận tốc trong ô lưới với các giá trị được tự định nghĩa hoặc (ii) mặc định các giá trị vận tốc cả lưu vực có chung một giá trị. Các cài đặt cho giá trị cho vận tốc dòng chảy được nêu ở Hình 3.15-Hình 3.16.

```
ncols      22
nrows      20
xllcorner  -97.000
yllcorner   38.000
cellsize    0.50
NODATA_value 0
0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1
0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Hình 3.15. Định dạng thông tin vận tốc dòng chảy cho từng ô lưới (ảnh từ website)

```
global_rout - Notepad
File Edit Format View Help
# Routing main file
# NAME OF FLOW DIRECTION FILE
./ROUT_SETUP/fdr05.txt
# NAME OF VELOCITY FILE
.false.
1.2
```

Hình 3.16. Vận tốc dòng chảy các ô được định nghĩa bằng 1,2 m/s trước khi hiệu chỉnh

### 3.3.2.6. Độ khuếch tán dòng chảy - Flow Diffusion File

|              |         |
|--------------|---------|
| ncols        | 22      |
| nrows        | 20      |
| xllcorner    | -97.000 |
| yllcorner    | 38.000  |
| cellsize     | 0.50    |
| NODATA_value | 0       |

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|------|------|------|------|------|
| 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 1000 | 1000 | 0    | 1000 | 1000 |
| 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 1000 | 1000 | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

Hình 3.17. Định dạng thông tin độ khuếch tán dòng chảy cho từng ô lưới (ảnh từ website)

Tập Độ khuếch tán dòng chảy ( $m^2/s$ ) được sử dụng trong phần diễn toán sông. Tương tự như tập vận tốc dòng chảy, tập này có thể để mặc định các ô trong lưu vực có giá trị khuếch tán khác nhau hoặc cùng một giá trị.

```

global_rout - Notepad
File Edit Format View Help
# Routing main file
# NAME OF FLOW DIRECTION F
./ROUT_SETUP/fdr05.txt
# NAME OF VELOCITY FILE
.false.
1.2
# NAME OF DIFF FILE
.false.
800

```

Hình 3.18. Độ khuếch tán dòng chảy các ô được định nghĩa đều bằng  $800 m^2/s$

### 3.3.2.7. Kích cỡ ô - Xmask file

Tập Xmask file cho biết kích thước từng ô lưới trong module Routing được tính theo mét (m). Chính là khoảng cách dòng chảy theo chiều ngang, chiều dọc và đường chéo thực tế cho mỗi ô lưới để tạo ra một tập xmask.

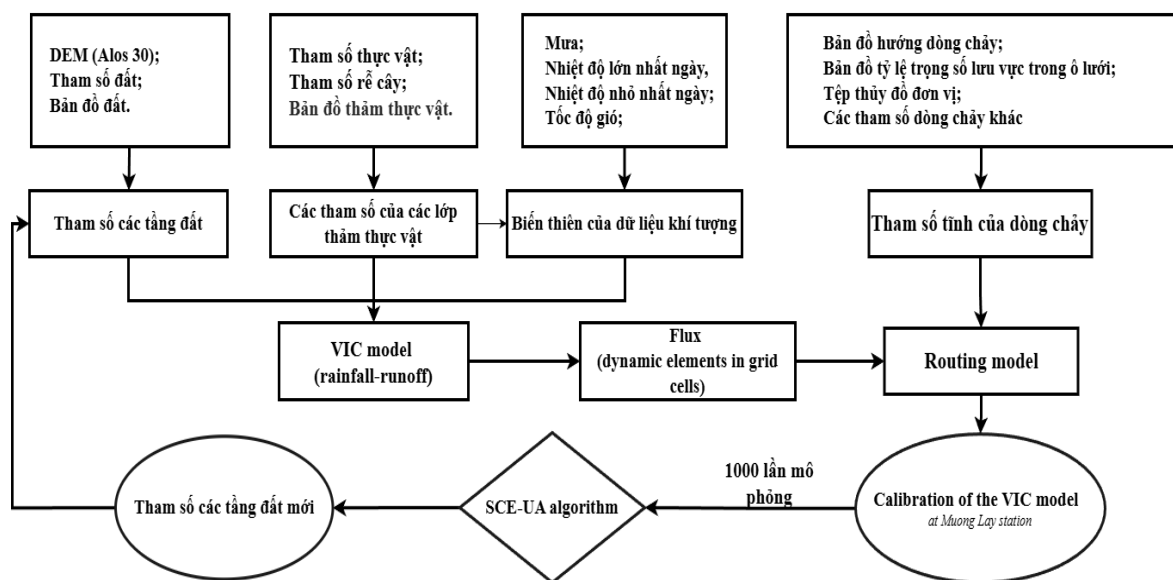
```
# NAME OF XMASK FILE|
.false.
12500
```

Hình 3.19. Định nghĩa kích thước ô trong mô hình (12500 m)

### 3.4. Kết quả hiệu chỉnh, kiểm định mô hình VIC trước khi hồ chứa phía Trung Quốc đi vào hoạt động giai đoạn 1981-2008

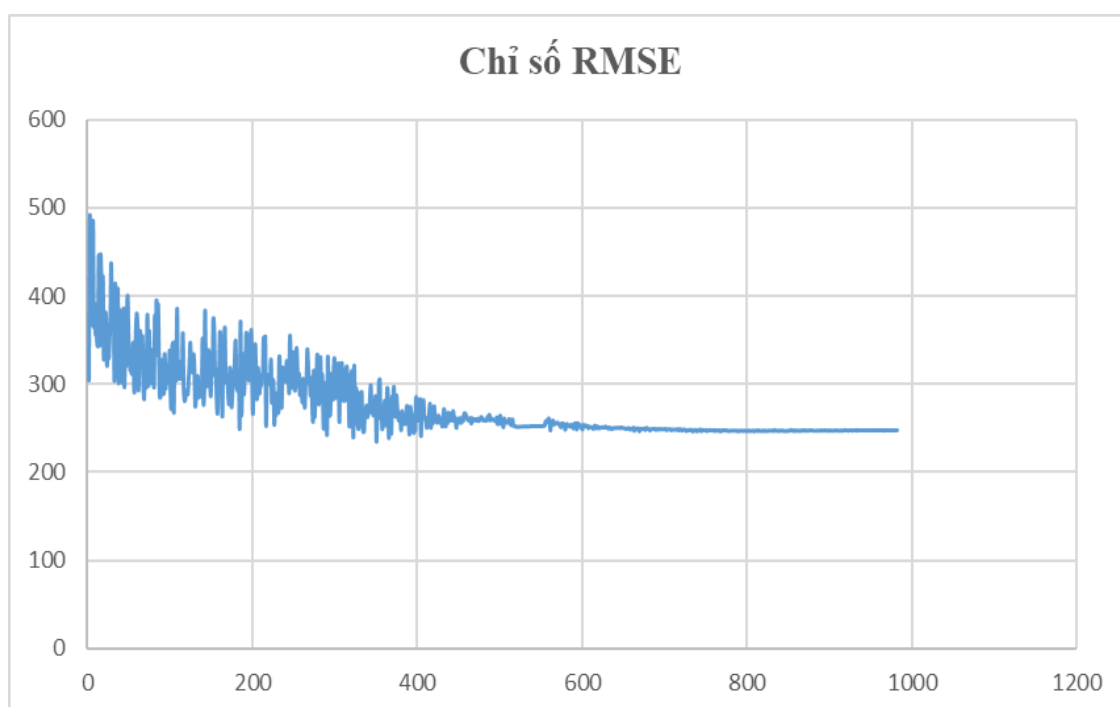
#### 3.4.1.1. Kết quả hiệu chỉnh mô hình VIC giai đoạn 1981-1995

Luận án sử dụng chuỗi lưu lượng quan trắc lưu vực sông Đà tại trạm Mường Lay từ 1981 đến năm 1995 để hiệu chỉnh các thông số mô hình. NCS sử dụng chương trình hiệu chỉnh tự động viết trên ngôn ngữ Python (Calibration.py) để hiệu chỉnh nhóm 6 thông số  $b_{in}$ ;  $D_2$ ;  $D_3$ ;  $D_s$ ;  $D_{max}$ ;  $W_s$ .



Hình 3.20. Sơ đồ quy trình hiệu chỉnh tự động mô hình VIC (Calibration.py)

Chương trình Calibration.py sử dụng hàm mục tiêu RMSE để tối ưu hóa 6 thông số được lựa chọn ở trên bằng cách tính toán sai số giữa thực đo tại trạm Mường Lay và tính toán mô hình trong giai đoạn 1981-1995, thông qua phép lặp 1000 lần các thông số. Kết quả của diễn biến phép lặp 1000 với chỉ số RMSE được thể hiện trong Hình 3.21. Các kết quả khác xem chi tiết trong Mục 2.1 PHỤ LỤC.

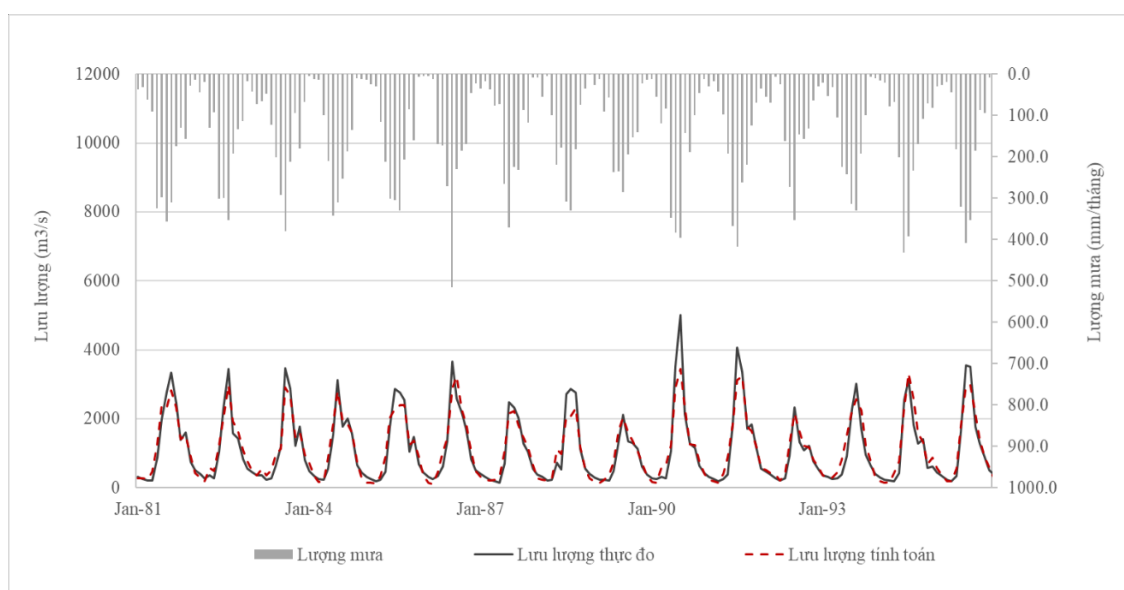


Hình 3.21. Biến trình hội tụ chỉ số RMSE trong thuật toán SCE-UA

Sau khi kết thúc quá trình lặp 1000 lần chương trình sẽ tự động chọn ra bộ thông số tốt nhất và tính toán lại, kết quả mô phỏng với thông số được chọn thể hiện Bảng 3.4 và Hình 3.22. Để lựa chọn bộ thông số phù hợp nhất ngoài chỉ số RMSE, NCS đồng thời sử dụng các chỉ số như NSE, BIAS,  $R^2$  và Sai số tổng lượng.

Bảng 3.4. Kết quả hiệu chỉnh mô hình VIC chỉ số NSE, RMSE, BIAS

| Trạm      | Bước tính toán | NSE  | RMSE  | BIAS   | Sai số tổng lượng (%) |
|-----------|----------------|------|-------|--------|-----------------------|
| Nậm Giàng | 01 ngày        | 0,74 | 136,5 | -52,5  | -19,48                |
|           | 01 tháng       | 0,82 | 95,27 | -52,2  | -19,48                |
| Mường Lay | 01 ngày        | 0,88 | 397,0 | -100,2 | -8,97                 |
|           | 01 tháng       | 0,91 | 306,0 | -99,2  | -8,97                 |



Hình 3.22. Biến trình lưu lượng trung bình tháng tính toán và thực đo tại Mưòng Lay giai đoạn (1981-1995)

Từ Bảng 3.4 cho thấy mô hình VIC sau hiệu chỉnh mô phỏng khá tốt đến tốt dòng chảy tại các trạm nghiên cứu trên lưu vực sông Đà. Tại trạm Nậm Giàng, chỉ số NSE đạt 0,74 ở bước thời gian ngày và tăng lên 0,82 ở bước thời gian tháng, cho thấy mức độ phù hợp khá và được cải thiện khi xét theo thang thời gian tháng; RMSE giảm từ 136,5 xuống 95,27, phản ánh sai số mô phỏng giảm. Giá trị BIAS âm (khoảng -52) cùng sai số tổng lượng -19,48% cho thấy mô hình có xu hướng mô phỏng thấp hơn thực đo. Tại trạm Mưòng Lay, NSE đạt 0,88 (ngày) và 0,91 (tháng), thể hiện chất lượng mô phỏng tốt và ổn định; RMSE giảm từ 397,0 xuống 306,0, trong khi BIAS âm (khoảng -100) với sai số tổng lượng -8,97% cho thấy xu hướng mô phỏng thấp nhưng mức sai lệch nhỏ hơn so với trạm Nậm Giàng. Nhìn chung, kết quả đánh giá theo bước thời gian tháng cho độ tin cậy cao hơn so với bước thời gian ngày.

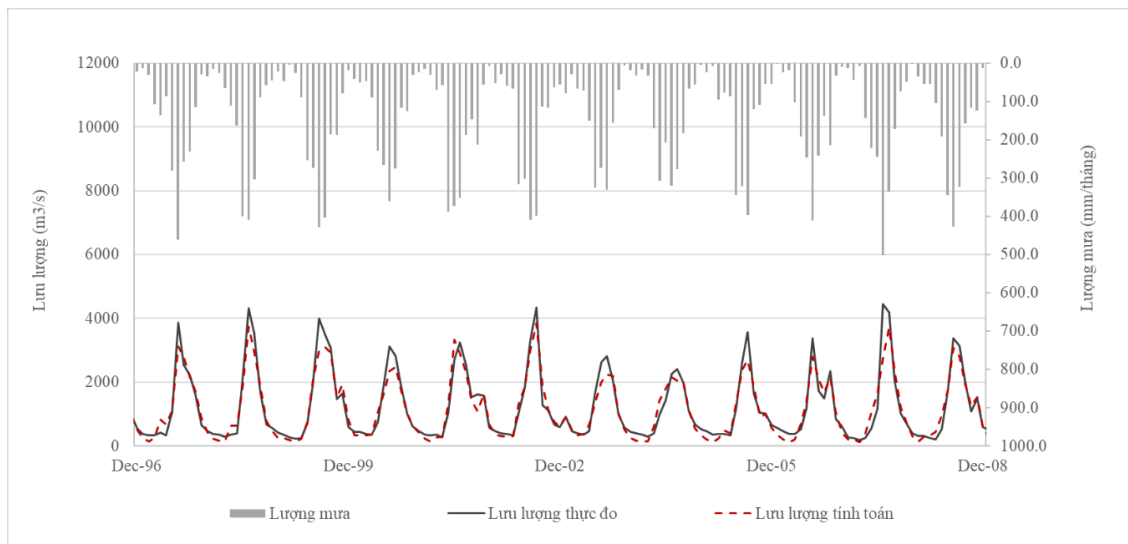
Các kết quả tính toán mô phỏng hiệu chỉnh cho thấy thông số mô hình VIC sau hiệu chỉnh là phù hợp sát với thực tế, điều này có ý nghĩa rằng các thông số sau hiệu chỉnh đã phản ánh tương đối phù hợp dòng chảy thực tế đã xảy ra từ năm 1981-1995 trên lưu vực sông Đà. Như vậy, bộ thông số trong Bảng 3.5 đã đủ điều kiện để tiến hành kiểm nghiệm độc lập nhằm khả định độ phù hợp của các thông số mô hình VIC cho lưu vực sông Đà.

*Bảng 3.5. Kết quả các thông số mô hình VIC được hiệu chỉnh*

| TT | Thông số   | Sau hiệu chỉnh | Khoảng hiệu chỉnh |        |
|----|------------|----------------|-------------------|--------|
| 1  | $b_{in}$   | 0,3151         | 0,002             | 0,495  |
| 2  | $D_s$      | 0,7065         | 0,019             | 0,875  |
| 3  | $D_{smax}$ | 27,1525        | 2,653             | 29,983 |
| 4  | $W_s$      | 0,7170         | 0,1               | 0,984  |
| 5  | $D_2$      | 0,3242         | 0,3               | 1,5    |
| 6  | $D_3$      | 1,4995         | 0,3               | 1,5    |

#### 3.4.1.2. Kết quả kiểm định mô hình VIC giai đoạn 1996-2008

Luận án sử dụng chuỗi dòng chảy quan trắc lưu vực sông Đà tại 2 trạm Mường Lay và Nậm Giàng giai đoạn 1996-2008 và Pô Lếch giai đoạn 2003-2008 để kiểm định các thông số mô hình VIC. NCS sử dụng nhóm 6 thông số  $b_{in}$ ;  $D_2$ ;  $D_3$ ;  $D_s$ ;  $D_{max}$ ;  $W_s$  đã được hiệu chỉnh trong Bảng 3.5 để kiểm định cho 3 trạm Mường Lay, Pô Lếch và Nậm Giàng. Kết quả kiểm định thể hiện trong Bảng 3.6 và Hình 3.23. Các kết quả khác xem chi tiết trong Mục 2.2 PHỤ LỤC.



*Hình 3.23. Biến trình lưu lượng tính toán và thực đo tại Mường Lay giai đoạn 1996-2008*

*Bảng 3.6. Kết quả kiểm định mô hình VIC chỉ số NSE, RMSE, BIAS*

| Trạm      | Bước tính toán | NSE  | RMSE  | BIAS  | Sai số tổng lượng (%) |
|-----------|----------------|------|-------|-------|-----------------------|
| Nậm Giàng | 01 ngày        | 0,76 | 145,0 | -58,6 | -21,48                |

| Trạm      | Bước tính toán | NSE  | RMSE   | BIAS   | Sai số tổng lượng (%) |
|-----------|----------------|------|--------|--------|-----------------------|
| Mường Lay | 01 tháng       | 0,79 | 113,6  | -58,2  | -21,48                |
|           | 01 ngày        | 0,87 | 462,2  | -181,4 | -14,61                |
|           | 01 tháng       | 0,90 | 347,50 | -180,2 | -14,61                |
| Pô Léch   | 01 ngày        | 0,81 | 315,0  | -138,9 | -19,77                |
|           | 01 tháng       | 0,85 | 158,54 | -61,0  | -19,77                |

Bảng 3.6 cho thấy kết quả kiểm định mô hình VIC đạt mức khá đến tốt tại các trạm nghiên cứu trên lưu vực sông Đà. Tại trạm Nậm Giàng, chỉ số NSE đạt 0,76 ở bước thời gian ngày và 0,79 ở bước thời gian tháng, RMSE giảm từ 145,0 xuống 113,6, cho thấy độ phù hợp khá và được cải thiện theo thang thời gian tháng; BIAS âm khoảng -58 cùng sai số tổng lượng -21,48% phản ánh xu hướng mô phỏng thấp hơn thực đo. Tại trạm Mường Lay, NSE đạt 0,87 (ngày) và 0,90 (tháng), thể hiện chất lượng mô phỏng tốt; RMSE giảm từ 462,2 xuống 347,5, trong khi BIAS âm lớn (khoảng -180) với sai số tổng lượng -14,61% cho thấy mức đánh giá thấp dòng chảy nhưng vẫn trong giới hạn chấp nhận được. Tại trạm Pô Léch, NSE đạt 0,81 (ngày) và 0,85 (tháng), RMSE giảm mạnh từ 315,0 xuống 158,54; BIAS âm và sai số tổng lượng -19,77% cho thấy mô hình tái hiện tương đối tốt biến động dòng chảy. Nhìn chung, kết quả kiểm định theo bước thời gian tháng cho độ tin cậy cao hơn so với bước thời gian ngày tại tất cả các trạm.

Kết quả kiểm định cho thấy bộ thông số mô hình VIC trong Bảng 3.5 có khả năng tái hiện tương đối phù hợp chế độ dòng chảy thực tế trong giai đoạn 1996–2008 trên lưu vực sông Đà. Do đó, bộ thông số này được sử dụng làm cơ sở cho các mô phỏng dòng chảy giai đoạn 2009-2020.

#### **Nhận xét:**

Trên cơ sở bộ thông số VIC được hiệu chỉnh, kiểm định cho giai đoạn trước năm 2009, NCS tiếp tục sử dụng bộ thông số này để mô phỏng dòng chảy giai đoạn sau năm 2009, gồm giai đoạn 2009–2011 tại trạm Pô Léch và giai đoạn 2016–2020

tại hồ Lai Châu. Kết quả tại Bảng 3.13 cho thấy, tại Pô Léch, khi không tính đến hồ chứa, NSE đạt 0,80, RMSE = 169,59 m<sup>3</sup>/s và sai số tổng lượng -22,76%; tương tự, tại hồ Lai Châu trong giai đoạn 2016–2020, khi không tính đến hồ, NSE chỉ đạt 0,59, RMSE = 392,00 m<sup>3</sup>/s và sai số tổng lượng 40,82% (Bảng 3.12). Kết quả cho thấy bộ thông số VIC được xác định trong giai đoạn trước năm 2009 không còn đủ để phản ánh đầy đủ chế độ dòng chảy thực tế trong giai đoạn sau khi các hồ chứa thượng nguồn đi vào vận hành. Mức độ sai lệch gia tăng rõ rệt khi không xét đến tác động điều tiết hồ chứa, đặc biệt trong giai đoạn 2016–2020. Đây là cơ sở để NCS củng cố nhận định tại Mục 3.1-3.2 và tiếp tục nghiên cứu tại Mục 3.5 nhằm định lượng vai trò của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh đối với sự biến đổi chế độ dòng chảy sông Đà.

### **3.5. Đánh giá tác động của BĐKH và hoạt động nhân sinh lên dòng chảy**

Những kết quả trên cho thấy bộ thông số mô hình được xác định trong giai đoạn trước năm 2009 không còn phản ánh đầy đủ chế độ dòng chảy trong các giai đoạn sau, khi điều kiện tự nhiên và hoạt động nhân sinh trên lưu vực có sự thay đổi. Do đó, trong mục này, NCS tiếp tục phân tích và định lượng mức độ đóng góp của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh đối với sự biến đổi chế độ dòng chảy sông Đà. Trên cơ sở phương pháp của Wang và cộng sự (2010) và Khung nghiên cứu theo công thức hệ số tác động mở rộng được trình bày tại Mục 2.6, NCS sử dụng bộ thông số mô hình VIC được xác định cho giai đoạn trước năm 2009 để khôi phục dòng chảy tự nhiên tại trạm Mường Lay trong giai đoạn 1981–2020, làm cơ sở cho việc phân tách và định lượng mức độ đóng góp của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh.

#### **3.5.1. Tính toán tỷ lệ chênh lệch giữa dòng chảy khôi phục và dòng chảy tự nhiên**

Để giảm thiểu tác động của lỗi mô hình lên kết quả được sử dụng để đánh giá tác động của biến đổi khí hậu và các can thiệp của con người lên biến động dòng chảy ở Sông Đà, nghiên cứu này đã xem xét tỷ lệ chênh lệch giữa dòng chảy khôi phục và dòng chảy tự nhiên. Phương pháp này dựa trên Phương trình (2.15) và (2.16). Bằng cách tính toán tỷ lệ chênh lệch này, nghiên cứu nhằm mục đích cô lập ảnh hưởng của

hoạt động của con người lên dòng chảy trong khi tính đến những bất định vốn có trong đầu ra của mô hình. Kết quả được trình bày trong Bảng 3.7. Điều quan trọng cần lưu ý là giai đoạn cơ sở (1981-2008) được coi là đại diện cho dòng chảy tự nhiên, trong đó tác động của con người vẫn chưa làm thay đổi đáng kể chế độ thủy văn quan sát được. Do đó, tỷ lệ độ lệch được tính toán trong giai đoạn này chủ yếu là do lỗi mô hình. Theo đó, lưu lượng dòng chảy tự nhiên trong các giai đoạn phân tích (2009-2015; 2016-2020) được xác định bằng Công thức (2.15), với thời gian đánh giá dựa trên phân tích chuỗi quan trắc dòng chảy cho thấy những thay đổi đáng kể. Tỷ lệ độ lệch của lưu lượng dòng chảy trung bình năm ( $\epsilon$ ) là 0,984 và các giá trị tương ứng cho lưu lượng dòng chảy mùa lũ và mùa kiệt lần lượt là 0,934 và 1,093.

*Bảng 3.7. Kết quả thống kê dòng chảy khôi phục và dòng chảy tự nhiên tại trạm đo Mưòng Lay.*

| Thời gian  | Dòng chảy quan trắc<br>(m <sup>3</sup> /s) |           |             | Dòng chảy khôi phục<br>(m <sup>3</sup> /s) |           |             | Dòng chảy tự nhiên<br>(m <sup>3</sup> /s) |           |             | Tỷ lệ sai khác ( $\epsilon$ )<br>(-) |           |             |
|------------|--------------------------------------------|-----------|-------------|--------------------------------------------|-----------|-------------|-------------------------------------------|-----------|-------------|--------------------------------------|-----------|-------------|
|            | $Q_{year}$                                 | $Q_{dry}$ | $Q_{flood}$ | $Q_{year}$                                 | $Q_{dry}$ | $Q_{flood}$ | $Q_{year}$                                | $Q_{dry}$ | $Q_{flood}$ | $Q_{year}$                           | $Q_{dry}$ | $Q_{flood}$ |
| 1981 -2008 | 1176,0                                     | 557,05    | 2380,0      | 1156,98                                    | 608,78    | 2223,4      | 1176,0                                    | 557,05    | 2380,0      |                                      |           |             |
| 2009 -2015 | 880,42                                     | 520,5     | 1580,3      | 981,25                                     | 541,89    | 1835,7      | 997,35                                    | 495,84    | 1965,0      | 0,984                                | 1,093     | 0,934       |
| 2016 -2020 | 1061,06                                    | 588,02    | 1981,9      | 1071,63                                    | 594,26    | 2000,9      | 1089,21                                   | 543,76    | 2141,8      |                                      |           |             |

### **3.5.2. Phân tách tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người**

#### **3.5.2.1. Phân tách tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người theo các giai đoạn**

Dựa trên các Phương trình (2.12) đến (2.19), sự khác biệt quan sát được giữa dòng chảy quan trắc được và dòng chảy tự nhiên có thể được quy cho các can thiệp của con người trong lưu vực ( $I_{HA}^i$ ). Các chỉ số tác động, được lấy từ công thức hệ số tác động, được trình bày trong Bảng 3.8 cho kết quả trung bình theo chu kỳ. Kết quả cho thấy tác động của biến đổi khí hậu ( $I_{CV}^i$ ) đối với dòng chảy của sông Đà vượt quá tác động của hoạt động của con người ( $I_{HA}^i$ ) đối với dòng chảy theo mùa lũ và hàng

năm. Trong khi đó, đối với mùa kiệt, tác động của các can thiệp của con người lớn hơn tác động của các thay đổi khí hậu sau năm 2015.

*Bảng 3.8. Tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người đến dòng chảy của sông Đà*

| Thời gian  | Thay đổi dòng chảy so với<br>dòng chảy cơ sở |                        |                          | Thay đổi dòng chảy do<br>biến đổi khí hậu so với<br>dòng chảy cơ sở |                        |                          | Tác động của biến đổi<br>khí hậu |                       |                         | Tác động của hoạt động<br>của con người |                       |                         |
|------------|----------------------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
|            | (RO)                                         |                        |                          | (RC)                                                                |                        |                          | (P <sub>CV</sub> - %)            |                       |                         | (P <sub>HA</sub> - %)                   |                       |                         |
|            | <i>Q<sub>year</sub></i>                      | <i>Q<sub>dry</sub></i> | <i>Q<sub>flood</sub></i> | <i>Q<sub>year</sub></i>                                             | <i>Q<sub>dry</sub></i> | <i>Q<sub>flood</sub></i> | <i>year</i>                      | <i>Dry<br/>season</i> | <i>Flood<br/>season</i> | <i>year</i>                             | <i>Dry<br/>season</i> | <i>Flood<br/>season</i> |
| 1981 -2008 | -                                            | -                      | -                        | -                                                                   | -                      | -                        | -                                | -                     | -                       | -                                       | -                     | -                       |
| 2009 -2015 | -0,251                                       | -0,066                 | -0,336                   | -0,152                                                              | -0,11                  | -0,174                   | 60,4                             | 71,24                 | 51,9                    | 39,6                                    | 28,76                 | 48,1                    |
| 2016 -2020 | -0,098                                       | 0,056                  | -0,167                   | -0,074                                                              | -0,024                 | -0,100                   | 75,5                             | 30,02                 | 59,8                    | 24,5                                    | 69,98                 | 40,2                    |

Kết quả phân tách cho thấy tỷ lệ đóng góp của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh có sự phân hóa rõ rệt theo quy mô thời gian và theo mùa. Ở quy mô năm, tỷ lệ đóng góp của biến đổi khí hậu tăng từ 60,4% trong giai đoạn 2009–2015 lên 75,5% trong giai đoạn 2016–2020. Tương tự, trong mùa lũ, tỷ lệ đóng góp của biến đổi khí hậu tăng từ 51,9% lên 59,8%. Kết quả này cho thấy ở quy mô năm và mùa lũ, biến đổi khí hậu vẫn là nhóm tác nhân có vai trò tương đối lớn đối với sự biến đổi dòng chảy.

Ngược lại, sự thay đổi thể hiện rõ hơn trong mùa kiệt. Tỷ lệ đóng góp của biến đổi khí hậu giảm từ 71,24% trong giai đoạn 2009–2015 xuống còn 30,02% trong giai đoạn 2016–2020, tương ứng với tỷ lệ đóng góp của hoạt động nhân sinh tăng từ 28,76% lên 69,98%. Sự chuyển dịch này cho thấy cơ chế chi phối dòng chảy mùa kiệt có sự thay đổi đáng kể giữa hai giai đoạn. Khi lượng dòng chảy tự nhiên trong mùa kiệt ở mức thấp, tác động của điều tiết hồ chứa và các hoạt động khai thác, sử dụng nước có xu hướng chiếm tỷ trọng lớn hơn trong biến động dòng chảy. Đặc biệt, giai đoạn 2016–2020 là thời kỳ hệ thống hồ chứa thượng nguồn tiếp tục phát triển, trong đó hồ Lai Châu đã đi vào vận hành, làm gia tăng khả năng điều tiết và tái phân bố dòng chảy theo thời gian.

Như vậy, kết quả phân tách không cho thấy sự gia tăng đồng nhất của tác động nhân sinh theo thời gian, mà thể hiện sự thay đổi về vai trò tương đối của các tác nhân theo quy mô và mùa. Đáng chú ý, trong khi đóng góp của biến đổi khí hậu tăng ở quy mô năm và mùa lũ, thì vai trò của hoạt động nhân sinh lại gia tăng rõ rệt trong mùa kiệt, đặc biệt trong giai đoạn 2016–2020. Đây là đặc điểm quan trọng cần được xem xét khi đánh giá biến đổi chế độ dòng chảy trên lưu vực sông Đà, bởi tác động của điều tiết hồ chứa và sử dụng nước có thể được thể hiện khác nhau giữa các thời kỳ và các thành phần dòng chảy.

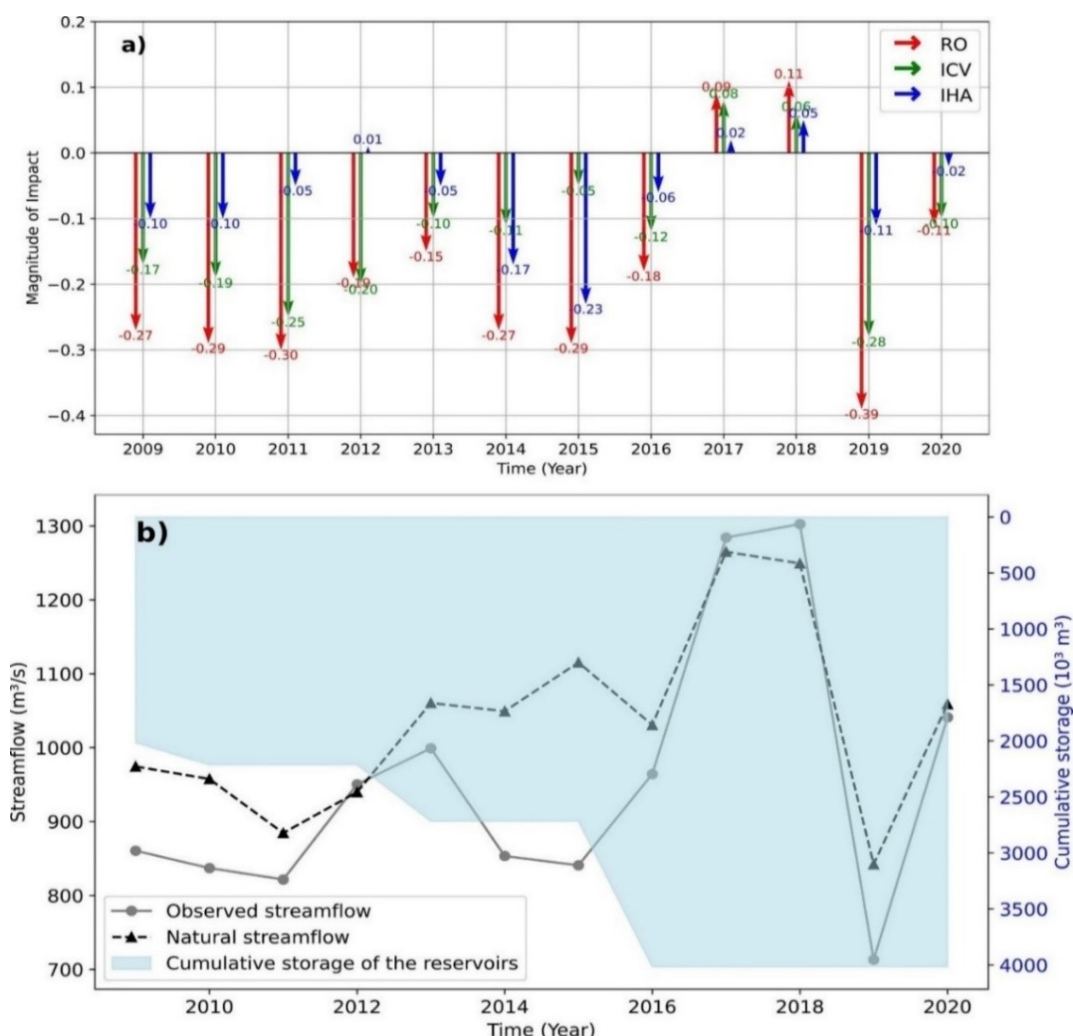
Để kiểm chứng kết quả của công thức cải tiến, NCS đã thực hiện đối chiếu định lượng với công thức gốc của Wang (2010) trên cùng bộ số liệu. Kết quả cho thấy hai phương pháp tương đồng ở quy mô năm và mùa lũ; trong khi ở mùa kiệt, khi các tác động ngược hướng, công thức Wang (2010) có thể cho tỷ lệ đóng góp âm hoặc vượt 100%, còn công thức cải tiến cho phép xác định tỷ lệ đóng góp của các tác nhân trong khoảng 0–100%. Kết quả đối chiếu được trình bày tại Table S6 và Text S2 của công trình do NCS công bố trên Climatic Change (Khuong et al., 2025).

#### *3.5.2.2. Phân tách tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người theo quy mô năm*

##### *a) Ở quy mô năm*

Ở quy mô năm, trong giai đoạn (2009-2015) khi các hồ chứa lớn ở Trung Quốc đi vào hoạt động, tỷ lệ phần trăm trung bình của sự thay đổi dòng chảy do biến động khí hậu lớn hơn tỷ lệ do hoạt động của con người gây ra, với đóng góp tương ứng là 60,4% và 39,6%. Trong giai đoạn này, tất cả các vector tác động hàng năm do khí hậu gây ra và tác động do con người gây ra đều có cùng hướng đi xuống (Hình 3.24a), khiến lưu lượng quan trắc được thấp hơn lưu lượng dòng chảy tự nhiên (Hình 3.24b). Điều này chỉ ra rằng giai đoạn 2009-2015 tương ứng với giai đoạn dòng chảy thấp, với một lượng nước nhất định được giữ lại trong các hồ chứa thượng nguồn và được sử dụng cho các mục đích khác. Hình 3.24a cho thấy một sự bất thường vào năm 2014 và 2015, trong đó tác động của con người lớn hơn tác động của khí hậu, đặc biệt

là vào năm 2015, với độ lớn của IHA là -0,23 so với ICV là -0,06. Điều này chứng tỏ rằng vào năm 2015, hoạt động của con người đã tác động đáng kể đến dòng chảy tự nhiên, khi điều tra, tương ứng với giai đoạn tích nước của Hồ chứa Lai Châu.



Hình 3.24. Biến động dòng chảy tự nhiên hàng năm và dòng chảy quan trắc được, cho thấy sự thay đổi về lượng nước tích lũy của các hồ chứa trong UDRB từ năm 2009 đến năm 2020.

Trong giai đoạn (2016-2020), khi các hồ chứa Lai Châu đi vào hoạt động ổn định, tỷ lệ phần trăm trung bình của các thay đổi dòng chảy do biến động khí hậu đã chiếm ưu thế so với các hoạt động của con người, với lần lượt đóng góp là 75,5% và 24,5%. Trong giai đoạn này (2016-2020), tác động của con người luôn nhỏ hơn tác động của khí hậu và theo hai xu hướng ngược nhau. Trong năm 2017-2018, cả tác động của con người và tác động của khí hậu đều tích cực, cho thấy những năm có

dòng chảy cao, với một số nước có thể được giữ lại trong các giai đoạn trước đó được xả xuống hạ lưu.

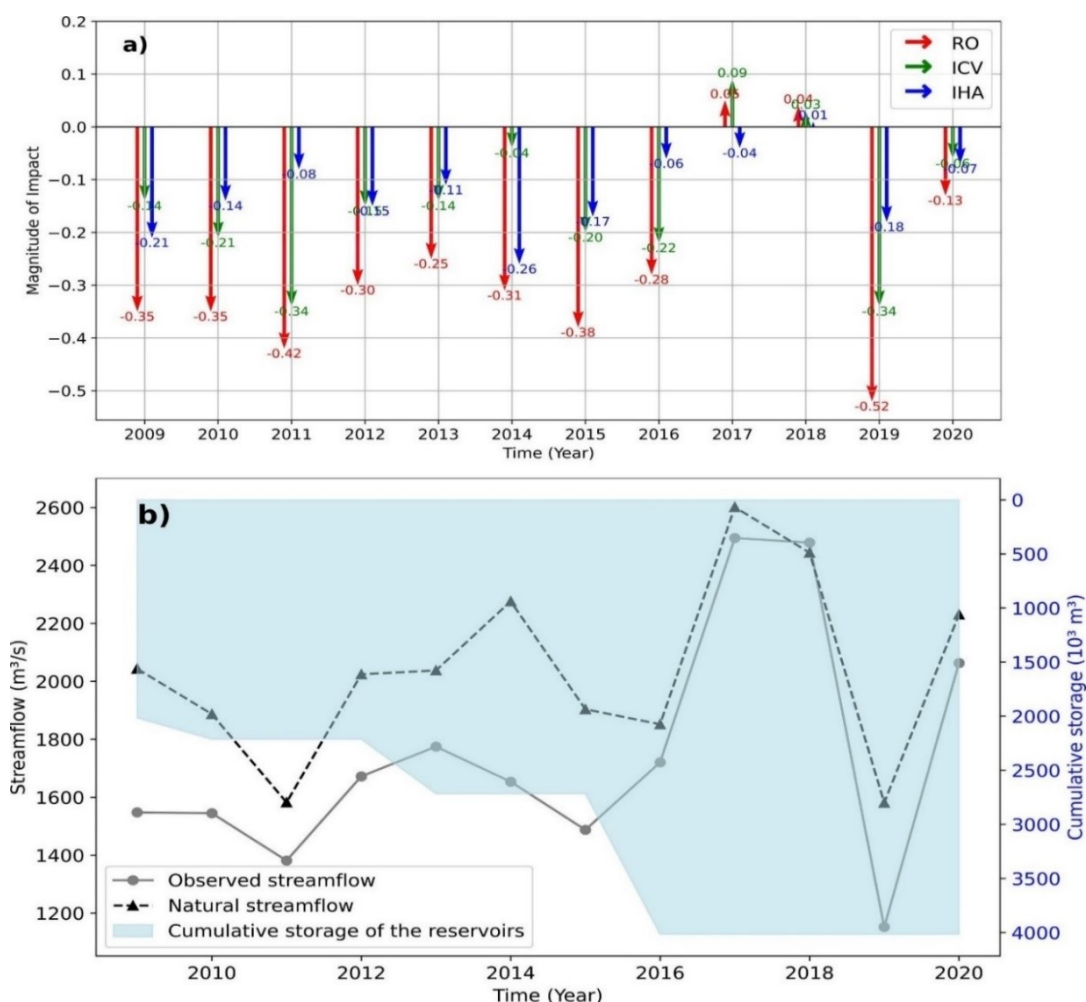
Những phát hiện của nghiên cứu này khá phù hợp với kết luận của Li và cộng sự (2016) liên quan đến thượng nguồn sông Thao, trong đó từ năm 2003 đến năm 2012, tỷ lệ phần trăm thay đổi dòng chảy do hoạt động của con người là khoảng 30%[90]. Tại UDRB, nơi có một số hồ chứa nước lớn, tỷ lệ tác động của con người trên quy mô hàng năm dao động từ 24,5% đến 39,6%. Sự biến động này chịu ảnh hưởng của hai điều kiện chính: những năm hạn hán và những năm các hồ chứa nước lớn bắt đầu hoạt động và tích trữ nước.

#### b) Ở quy mô mùa lũ

Ở quy mô mùa lũ, trong giai đoạn (2009-2015) khi các hồ chứa lớn ở Trung Quốc bắt đầu vận hành, tỷ lệ thay đổi dòng chảy do hoạt động của con người gần bằng với tỷ lệ do biến đổi khí hậu, với lần lượt là 48,1% và 51,9%. Trong giai đoạn này, biến đổi khí hậu và tác động của con người cho thấy xu thế tương tự ở quy mô hàng năm nhưng rõ rệt hơn (Hình 3.25a). Các vector tác động của con người liên tục cho thấy xu thế giảm, cho thấy một phần nước được giữ lại ở thượng nguồn và không chảy về hạ lưu trong mùa lũ, phù hợp với hoạt động thực tế của các hồ chứa tại UDRB. Điều này cũng được minh họa rõ ràng trong Hình 3.25b, trong đó lưu lượng dòng chảy theo mùa lũ quan sát được thấp hơn lưu lượng dòng chảy theo mùa lũ tự nhiên.

Trong giai đoạn (2016-2020), khi các hồ chứa Lai Châu đi vào hoạt động ổn định, tỷ lệ phần trăm trung bình của các thay đổi dòng chảy do biến đổi khí hậu trở nên chiếm ưu thế hơn so với các thay đổi do hoạt động của con người, với lần lượt là 59,8% và 41,2%. Trong giai đoạn này (2016-2020), tác động của con người luôn nhỏ hơn tác động của khí hậu, theo hai xu thế ngược nhau. Trong năm 2017-2018, cả vector tác động của con người và biến đổi khí hậu kết hợp đều có hướng đi lên, cho thấy những năm có dòng chảy lớn, với một số nước có khả năng được giải phóng ở hạ lưu sau khi được giữ lại trong những năm trước, mặc dù xu thế này không rõ ràng bằng ở quy mô hàng năm. Có thể quan sát thấy rằng, trong mùa lũ, vector tác động

của con người luôn có xu thế đi xuống, dẫn đến dòng chảy quan trắc được thấp hơn dòng chảy tự nhiên. Kết quả này phù hợp với hoạt động thực tế của các hồ chứa trong UDRB.

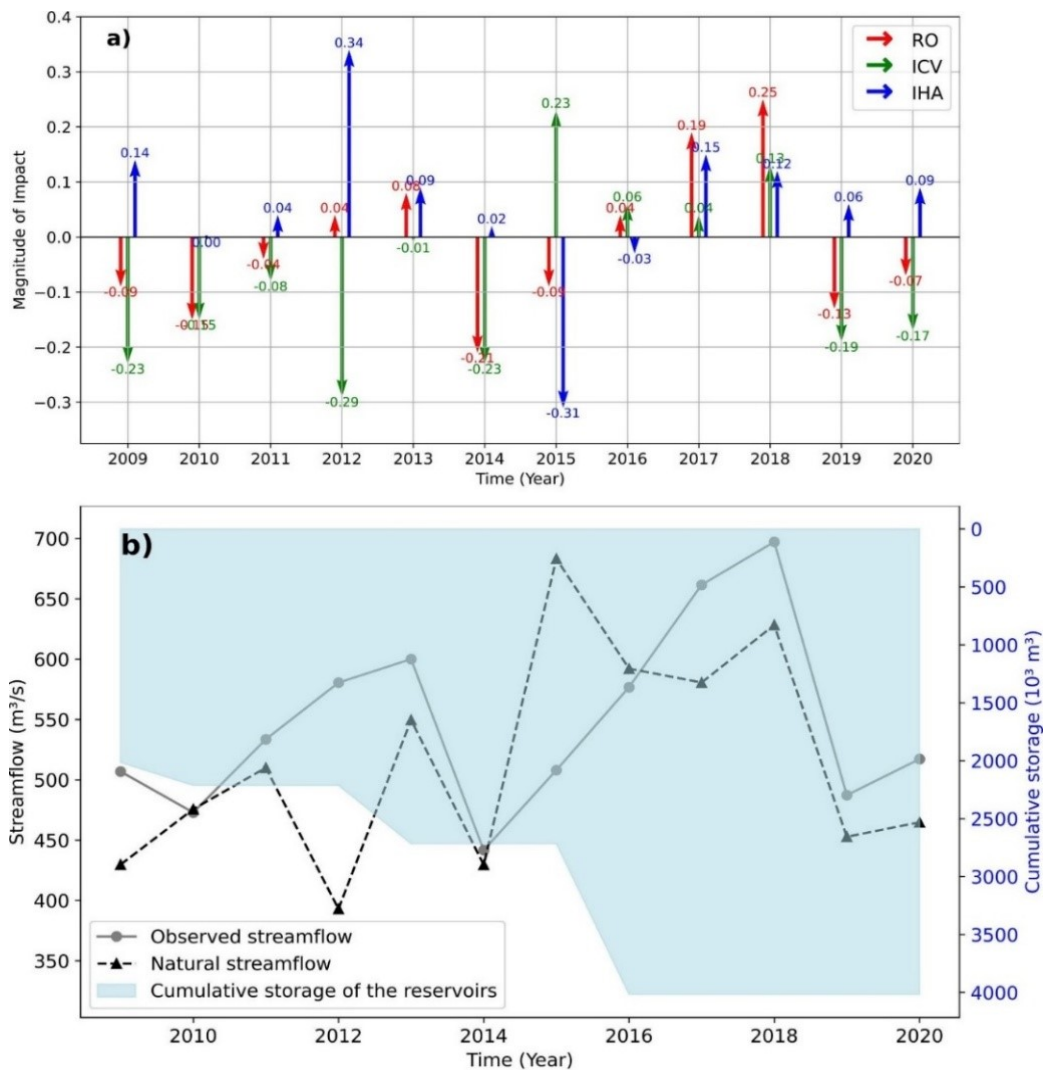


Hình 3.25. Biến động dòng chảy tự nhiên và dòng chảy quan trắc được do sự thay đổi về lượng nước tích lũy của các hồ chứa trong UDRB từ năm 2009 đến năm 2020, trong mùa lũ

### c) Ở quy mô mùa kiệt

Ở quy mô mùa kiệt, từ năm 2009 đến năm 2015, khi các hồ chứa lớn ở Trung Quốc bắt đầu vận hành, biến đổi khí hậu có tác động đáng kể hơn đến sự thay đổi dòng chảy so với hoạt động của con người, đóng góp 71,24% so với 28,76%. Trong giai đoạn đó, các vector tác động của con người thường biểu thị hướng đi lên, cho thấy một lượng nước dư thừa so với dòng chảy tự nhiên đã được xả từ thượng nguồn xuống hạ lưu trong mùa kiệt, phù hợp với hoạt động thực tế của các hồ chứa tại UDRB. Kết

quả này cũng được minh họa rõ ràng trong Hình 3.26b, trong đó dòng chảy mùa kiệt quan sát được cao hơn dòng chảy tự nhiên. Tuy nhiên, vào năm 2015, dòng chảy mùa kiệt quan sát được (bắt đầu vào tháng 11 năm 2024 và kết thúc vào tháng 5 năm 2025) thấp hơn dòng chảy tự nhiên, không phù hợp với các nguyên tắc vận hành hồ chứa. Điều này có thể được giải thích bởi hạn hán năm 2014-2015, gây ra dòng chảy cực kỳ thấp trong mùa kiệt năm 2015 (Hình 3.26b). Ngay cả lượng mưa trong mùa kiệt năm 2005 cao hơn mức trung bình của giai đoạn cơ sở (Hình 3.26.a), có khả năng một phần lớn nước được điều tiết bởi các hồ chứa thượng nguồn đã được sử dụng cho các hoạt động kinh tế xã hội (ví dụ: tưới tiêu nông nghiệp).



Hình 3.26. Sự thay đổi trong dòng chảy tự nhiên và dòng chảy quan trắc được tương quan với những thay đổi trong tổng lượng nước lưu trữ của các hồ chứa trong lưu vực vào mùa kiệt

**Nhận xét:**

Mục 3.5 đã chứng minh chế độ dòng chảy sông Đà chịu tác động đồng thời của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh, với mức độ đóng góp khác nhau theo thời kỳ, quy mô năm và mùa. Ở quy mô năm và mùa lũ, biến đổi khí hậu là yếu tố chi phối chính, trong khi vai trò của hoạt động nhân sinh gia tăng rõ rệt đối với dòng chảy mùa kiệt, đặc biệt trong giai đoạn 2016–2020. Kết quả này cho thấy Khung nghiên cứu theo công thức hệ số tác động mở rộng có khả năng áp dụng phù hợp đối với lưu vực phức tạp như lưu vực sông Đà và có tiềm năng áp dụng cho các lưu vực khác. Để tiếp tục kiểm chứng kết quả phân tách, các mục tiếp theo sẽ lần lượt tích hợp các yếu tố nhân sinh chủ yếu, gồm điều tiết hồ chứa và sử dụng nước, vào mô hình VIC, đồng thời đánh giá mức độ cải thiện chất lượng mô phỏng dòng chảy so với trường hợp chưa xét các tác động này.

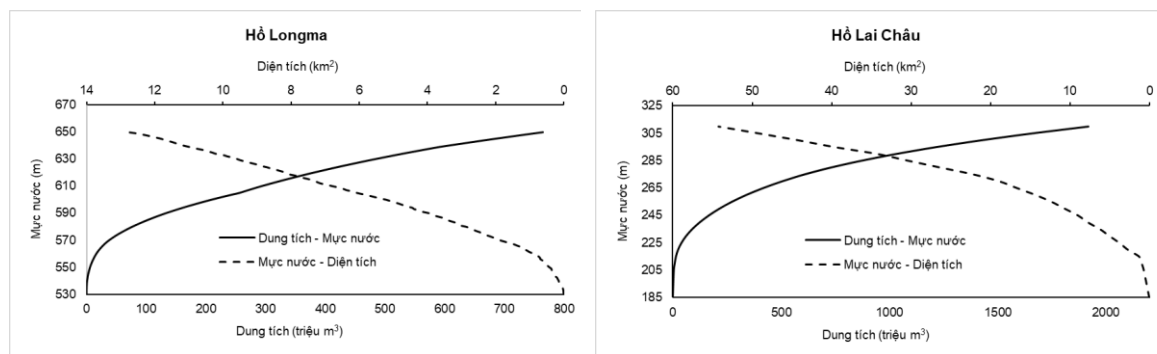
**3.6. Kết quả phân tích, xác định thông số và quy luật vận hành hồ chứa từ dữ liệu vệ tinh đa nguồn cho thiết lập mô hình VIC**

Trên cơ sở kết quả phân tích tại mục trước, mục này tập trung xác định các thông số đặc trưng và quy luật vận hành của các hồ chứa phía Trung Quốc trên lưu vực sông Đà từ dữ liệu vệ tinh đa nguồn, làm cơ sở thiết lập các thông số vận hành hồ chứa cho mô hình VIC. Các thông số và quy luật vận hành xác định được sẽ được tích hợp vào mô hình, qua đó đánh giá mức độ cải thiện chất lượng mô phỏng dòng chảy trong giai đoạn sau năm 2009 tại Mục 3.7.

**3.6.1. Các đường đặc tính lòng hồ**

Các đường đặc tính lòng hồ (quan hệ mực nước – diện tích – dung tích) của 10 hồ chứa phía Trung Quốc được kế thừa từ kết quả của Đề tài 562 do PGS.TS. Nguyễn Tiên Giang làm chủ nhiệm [5]. Đối với hai hồ Pắc Ma và Lai Châu, các thông số được tham khảo theo quy trình vận hành thực tế của từng hồ [12, 13]. Hình 3.27

thể hiện đường đặc tính lòng hồ của hồ Longma (Trung Quốc) và hồ Lai Châu (Việt Nam). Kết quả tương ứng của các hồ được trình bày chi tiết tại Mục 1.11 PHỤ LỤC.



Hình 3.27. Đường đặc tính lòng hồ của hồ Longma (trái) và Lai Châu (phải)

### 3.6.2. Quy luật vận hành của các hồ chứa

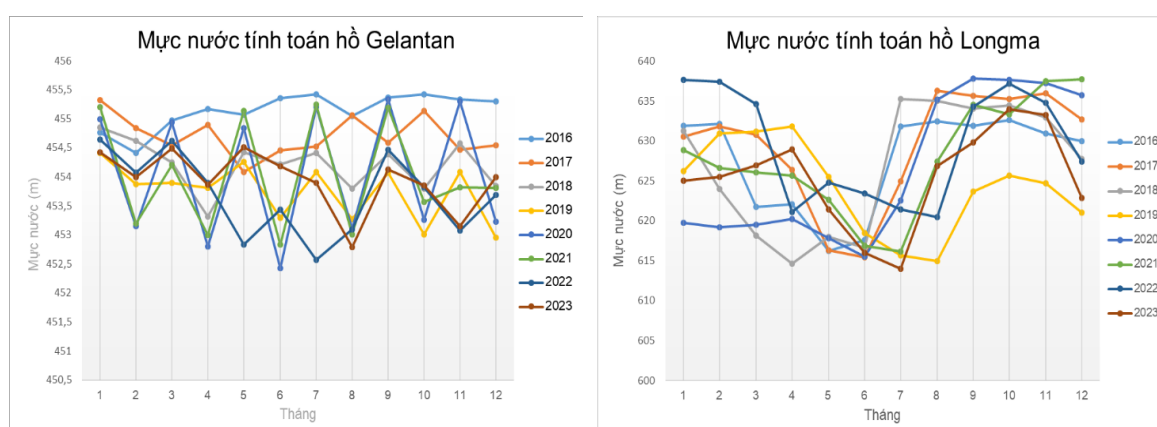
#### 3.6.2.1. Nhóm hồ vận hành điều tiết ngày/tuần

Biểu đồ biến động mực nước hồ Gelantan (Hình 3.28, trái) đại diện cho nhóm 4 hồ (Jupudu, Gelantan, Sanjiangkou và Tukahe) trong giai đoạn 2016–2023 cho thấy dao động mực nước theo tháng trong năm tương đối nhỏ, phản ánh chế độ vận hành ổn định và không có sự thay đổi mạnh theo mùa. Đặc điểm này khác biệt rõ rệt so với các hồ chứa điều tiết theo mùa – vốn thường có biên độ dao động lớn giữa mùa lũ và mùa kiệt nhằm tích nước hoặc xả nước theo chu kỳ dài. Đặc điểm dao động mực nước hẹp, ổn định quanh năm của cả bốn hồ (Jupudu, Gelantan, Sanjiangkou và Tukahe) cho thấy chúng đều được vận hành theo chế độ điều tiết ngày hoặc tuần. Kết quả này phù hợp với thông tin thu thập được trình bày trong Bảng 3.9. Kết quả tương tự cho các hồ Jupudu, Sanjiangkou và Tukahe xem chi tiết trong Mục 1.1.2.1 PHỤ LỤC

#### 3.6.2.2. Nhóm hồ vận hành điều tiết theo mùa/năm

Hình 3.28 (phải) thể hiện diễn biến mực nước hồ Longma đại diện nhóm 6 hồ (Yayangshan, Shimenkan, Longma, Puxiqiao, Sinanjiang và Nalan) trong giai đoạn 2016–2023. Có thể thấy xu hướng dao động mực nước theo tháng tương đối lớn, phản ánh chế độ vận hành điều tiết mạnh theo mùa/năm. Đặc điểm này phù hợp với các hồ chứa được thiết kế để tích nước trong mùa lũ và xả vào mùa kiệt, nhằm phục vụ các

mục tiêu như phát điện, cấp nước hoặc cắt lũ. Các hồ trong nhóm này đều cho thấy chu trình điều tiết nước mang tính chu kỳ dài theo mùa hoặc năm, với biên độ dao động mực nước lớn giữa các giai đoạn trong năm. Việc hiểu rõ đặc điểm vận hành thực tế của từng hồ là cơ sở quan trọng để xây dựng các chiến lược quản lý, dự báo và điều hành nguồn nước hiệu quả. Kết quả tương tự cho các hồ Yayangshan, Shimenkan, Longma, Puxiqiao, Sinanjiang và Nalan xem chi tiết trong Mục 1.1.2.2 PHỤ LỤC



Hình 3.28. Mực nước hồ Gelantan – điều tiết ngày/tuần (trái) và hồ Longma - điều tiết năm/mùa (phải) giai đoạn 2016-2023

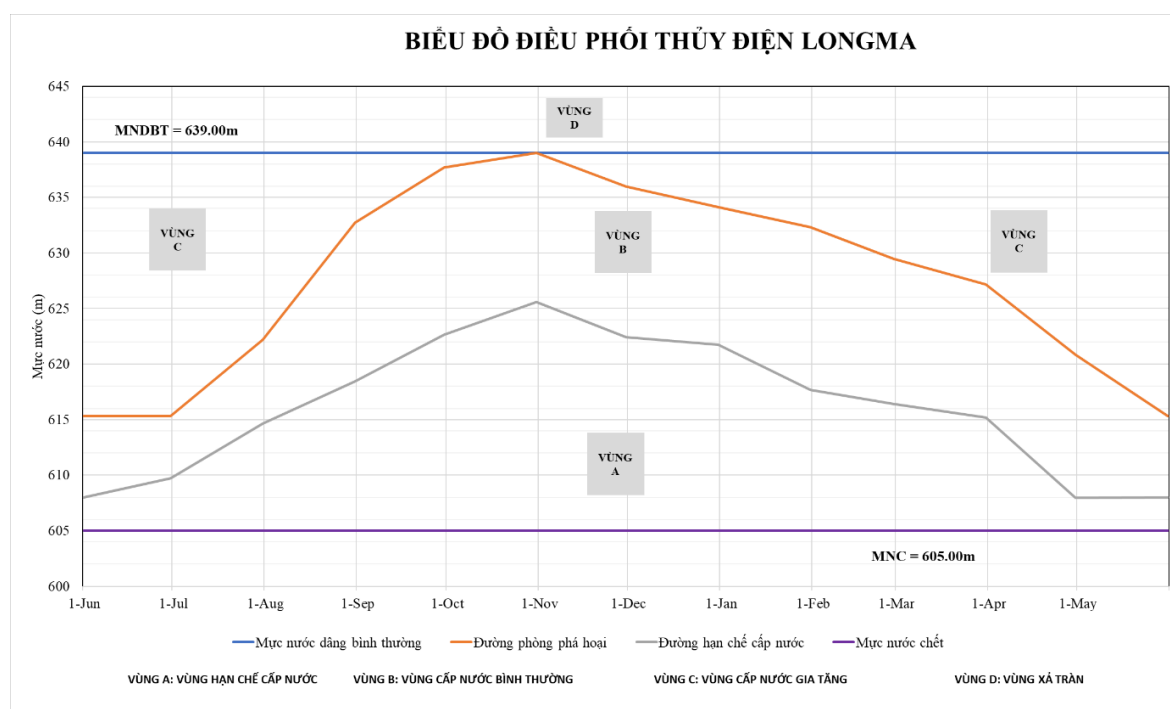
### Nhận xét:

Kết quả phân tích cho thấy các hồ chứa thượng nguồn có sự khác biệt rõ về quy mô thời gian điều tiết. Nhóm hồ điều tiết ngày/tuần chủ yếu làm thay đổi phân bố dòng chảy trong thời gian ngắn, trong khi nhóm hồ điều tiết mùa/năm có khả năng tác động rõ hơn đến sự phân bố dòng chảy giữa mùa lũ và mùa kiệt. Do đó, không thể sử dụng một quy luật vận hành thống nhất cho toàn bộ hệ thống hồ chứa; việc phân loại theo quy mô thời gian điều tiết là cơ sở để lựa chọn quy luật vận hành phù hợp khi tích hợp vào mô hình VIC và mô phỏng tác động của điều tiết hồ chứa đến dòng chảy vào Việt Nam.

### 3.6.3. Xác định các thông số hồ chứa và các biểu đồ điều phối

Như đã trình bày ở mục phương pháp, từ diễn biến mực nước và dung tích các hồ chứa bằng ảnh viễn thám, các thông số của các hồ chứa này có thể được ước tính.

Bảng 3.9 trình bày giá trị các thông số hồ chứa liên quan đến mực nước và dung tích thu thập từ các dữ liệu được công bố và các giá trị xác định từ các dữ liệu viễn thám. Ngoài ra, cũng từ dữ liệu này, các biểu đồ điều phối của 6 hồ điều tiết mùa/năm phía Trung Quốc được xây dựng. Hình 3.29 trình bày biểu đồ điều phối của hồ Longma như một ví dụ. Kết quả tương cho các Yayangshan, Shimenkan, Longma, Puxiqiao, Sinanjiang và Nalan xem chi tiết trong Mục 1.1.2.3 PHỤ LỤC.



Hình 3.29. Biểu đồ điều phối hồ chứa Longma, điều tiết mùa/năm được xây dựng  
Bảng 3.9 Bảng tổng hợp các thông số hồ chứa phía Trung Quốc[48, 188]

| TT | Tên hồ     | Năm vận hành | Chế độ điều tiết | Mực nước dâng bình thường (m) | Mực nước chết (m) | Dung tích tổng (triệu m <sup>3</sup> ) | Dung tích hữu ích (triệu m <sup>3</sup> ) |
|----|------------|--------------|------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1  | Yayangshan | 2006         | Mùa/năm*         | 835                           | 805*              | 247                                    | 212.6*                                    |
| 2  | Shimenkan  | 2010         | Tuần             | 756,0                         | 740,0             | 197                                    | 80.7                                      |
|    |            | 2010         | Mùa/năm*         | 756,0                         | 740,0             | 197                                    | 80,7                                      |
| 3  | Longma     | 2007         | Mùa              | 639                           | 605               | 590                                    | 334                                       |
| 4  | Jufudu     | 2007         | Tuần/Ngày*       | 522,0                         | 514               | 174                                    | 48                                        |

| TT | Tên hồ      | Năm vận hành | Chế độ điều tiết | Mức nước dâng bình thường (m) | Mức nước chết (m) | Dung tích tổng (triệu m <sup>3</sup> ) | Dung tích hữu ích (triệu m <sup>3</sup> ) |
|----|-------------|--------------|------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| 5  | Gelantan    | 2009         | Tuần/Ngày*       | 456                           | 446               | 409                                    | 125,3*                                    |
| 6  | PuxiQiao    | 2013         | Mùa/năm*         | 735                           | 705               | 504                                    | 314,4*                                    |
| 7  | SanJiangKou | 2007         | Tuần/Ngày*       | 614                           | 605*              | 84,52                                  | 31,8*                                     |
| 8  | Sinanjiang  | 2008         | Mùa/năm*         | 900                           | 860               | 271                                    | 228,8*                                    |
| 9  | Tukahe      | 2008         | Ngày             | 368                           | 365               | 78                                     | 12                                        |
| 10 | Nalan       | 2005         | Năm              | 434,1*                        | 420,4*            | 286                                    | 186                                       |

\* Được xác định từ kết quả phân tích, tính toán dựa trên ảnh vệ tinh

### 3.6.4. Thông số hoá quy luật vận hành hồ chứa cho mô hình VIC

#### 3.6.4.1. Thông số hoá hồ chứa có quy luật vận hành điều tiết mùa/năm

Trong bối cảnh vận hành liên hồ chứa trên hệ thống sông xuyên biên giới, việc xác định được chiến lược hay phương án điều tiết dòng chảy tại các hồ phía thượng lưu Trung Quốc là yếu tố then chốt nhằm dự báo chính xác dòng chảy về hạ lưu. Để phục vụ cho mục tiêu này, nghiên cứu đã xây dựng tệp thông số điều tiết mùa/năm cho các hồ chứa chính phía Trung Quốc theo hai phương án: (i) phương án điều tiết theo mức nước mục tiêu (OP2) và (ii) phương án điều tiết theo quy luật vận hành từng tháng với 48 thông số (OP5).

#### (i) Phương án điều tiết theo mức nước mục tiêu

Đối với phương án điều tiết theo mức nước mục tiêu, mức nước vận hành của các hồ chứa được giả định duy trì ổn định tại một số mức cụ thể theo mùa (mùa lũ – mùa cạn), dựa trên kết quả giải đoán ảnh viễn thám trong giai đoạn 2016–2023 (Hình 3.29). Phương pháp này được xây dựng trong bối cảnh thiếu dữ liệu quan trắc và quy trình vận hành công khai từ phía Trung Quốc, cho phép tái hiện tương đối chính xác đặc điểm vận hành thực tế trong quá khứ của các hồ chứa thượng nguồn. Việc sử dụng chuỗi mức nước mục tiêu được xác định từ ảnh vệ tinh không chỉ phản ánh xu

thể điều tiết lưu lượng trong điều kiện thực tiễn, mà còn góp phần cải thiện độ tin cậy trong mô phỏng dòng chảy về hạ lưu.

(ii) Phương án điều tiết theo quy luật vận hành từng tháng (48 thông số)

Các biểu đồ quy luật vận hành của các hồ chứa được trình bày trong Mục 3.6.3 đã được số hoá và chuyển đổi thành chuỗi quy luật vận hành theo từng tháng trong năm. Cụ thể, mỗi hồ được mô tả bởi 48 thông số, đại diện cho các mức dung tích giới hạn và dung tích mục tiêu trong chu kỳ 12 tháng, phản ánh quy luật vận hành theo mùa và khả năng điều tiết theo thời gian. Kết quả số hoá 48 thông số cho hồ Longma được trình bày trong Bảng 3.10. Kết quả tương tự cho các các hồ Yayangshan, Shimenkan, Longma, Puxiqiao, Sinanjiang và Nalan xem chi tiết trong Mục 1.1.3.1 PHỤ LỤC.

*Bảng 3.10. Thông số vận hành hồ Longma theo lựa chọn 5 (OP5)*

| OPERATION STRATEGY (OP5) |          |          |          |          |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 5                        |          |          |          |          |
| 96                       | 0,631846 | 357887,2 | 508921,0 | 0,137267 |
| 96                       | 0,631846 | 346734,9 | 477087,6 | 0,137267 |
| 96                       | 0,631846 | 335855,7 | 451855,5 | 0,137267 |
| 96                       | 0,631846 | 277381,6 | 387700,5 | 0,137267 |
| 96                       | 0,631846 | 256000,0 | 302317,1 | 0,137267 |
| 96                       | 0,631846 | 290614,4 | 336976,8 | 0,137267 |
| 96                       | 0,631846 | 331379,9 | 400966,0 | 0,137267 |
| 96                       | 0,631846 | 365043,5 | 513659,7 | 0,137267 |
| 96                       | 0,631846 | 405367,5 | 573721,0 | 0,137267 |
| 96                       | 0,631846 | 435305,4 | 590000,0 | 0,137267 |
| 96                       | 0,631846 | 402901,7 | 552305,2 | 0,137267 |
| 96                       | 0,631846 | 396239,8 | 530278,3 | 0,137267 |

Quy luật vận hành 48 thông số. Cột 1 là lưu lượng đảm bảo, các cột 2 đến 4 tương ứng là thông số x1 đến x4. Mỗi cột có 12 hàng, ứng với 12 tháng trong năm

#### 3.6.4.2. Thông số hoá hồ chứa có quy luật vận hành điều tiết ngày/tuần

Các thông số đặc trưng của từng hồ chứa được trình bày trong Mục 3.6.2.1 đã được số hoá và chuyển đổi thành bộ quy luật vận hành OP3 theo ngày hoặc tuần, nhằm mô phỏng sát hơn với thực tiễn điều hành hồ chứa. Mỗi hồ được mô tả bởi 4 thông số chính (x1 đến x4), đại diện cho các mức dung tích điều tiết đặc trưng trong chu kỳ ngắn hạn (Bảng 3.11). Kết quả tượng cho các hồ Jupudu, Gelantan, Sanjiangkou và Tukahe xem chi tiết trong Mục 1.1.3.2 PHỤ LỤC.

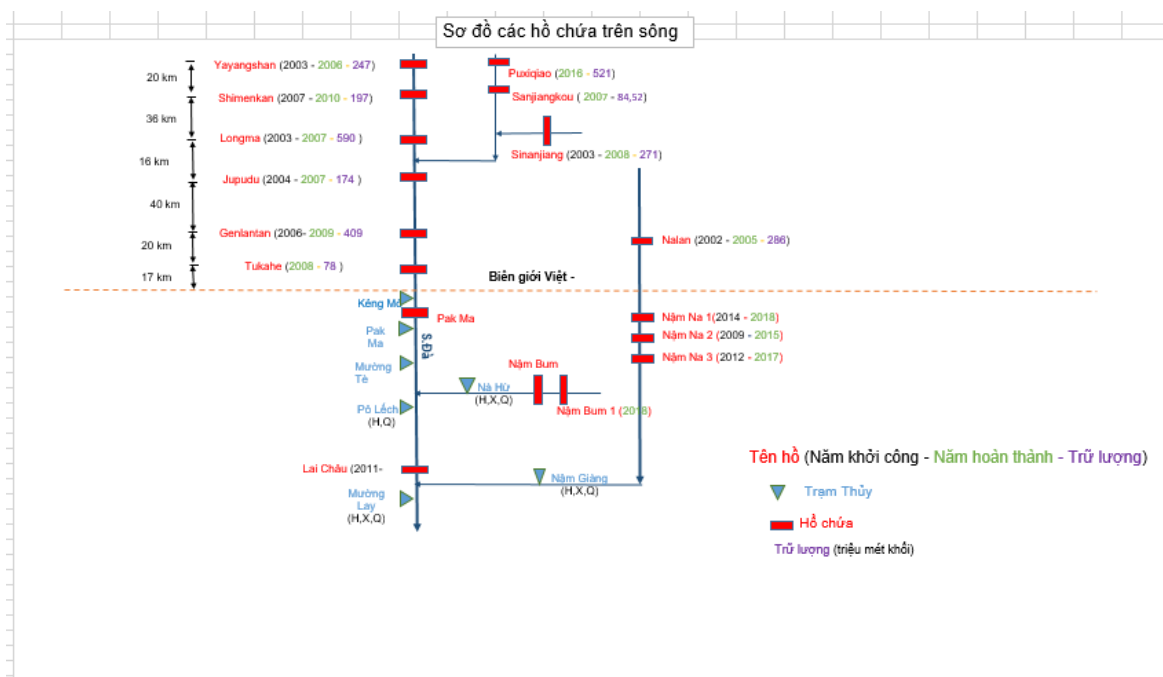
*Bảng 3.11. Thông số vận hành hồ Tukahe theo lựa chọn 3(OP3)*

| OPERATION STRATEGY (OP3) |       |             |       |       |
|--------------------------|-------|-------------|-------|-------|
| 3                        |       |             |       |       |
| 400                      | 0,196 | 69721,73336 | 78000 | 0,196 |

Quy luật vận hành 4 thông số điều tiết ngày/tuần. Cột 1 là lưu lượng đảm bảo, các cột 2 đến 4 tương ứng là thông số x1 đến x4.

### 3.7. Đánh giá chất lượng mô phỏng dòng chảy sông Đà sau khi hồ chứa phía Trung Quốc đi vào hoạt động giai đoạn 2009-2020

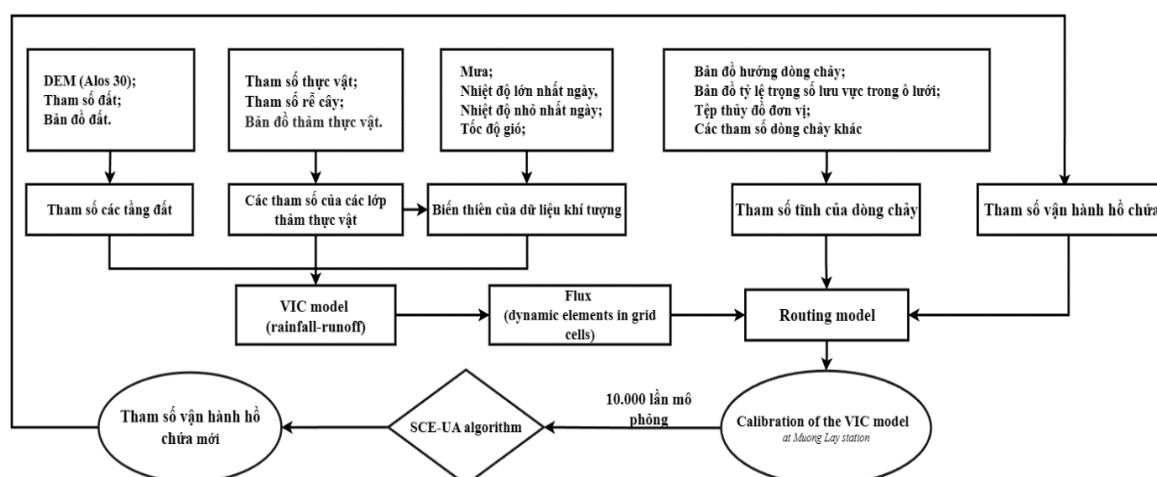
Luận án giữ nguyên bộ thông số mô hình VIC đã được hiệu chỉnh và kiểm định cho giai đoạn trước khi các hồ chứa phía Trung Quốc đi vào hoạt động, trình bày tại Mục 3.4. Đồng thời, các thông số và quy luật vận hành hồ chứa được xác định từ dữ liệu vệ tinh đa nguồn tại Mục 3.6.4 được tích hợp vào mô hình VIC để hiệu chỉnh và kiểm định các thông số vận hành hồ chứa cho giai đoạn sau khi các hồ chứa phía Trung Quốc đi vào hoạt động.



Hình 3.30. Sơ đồ các hồ chứa, trạm thủy văn trên lưu vực sông Đà đến trạm Mùòng Láy

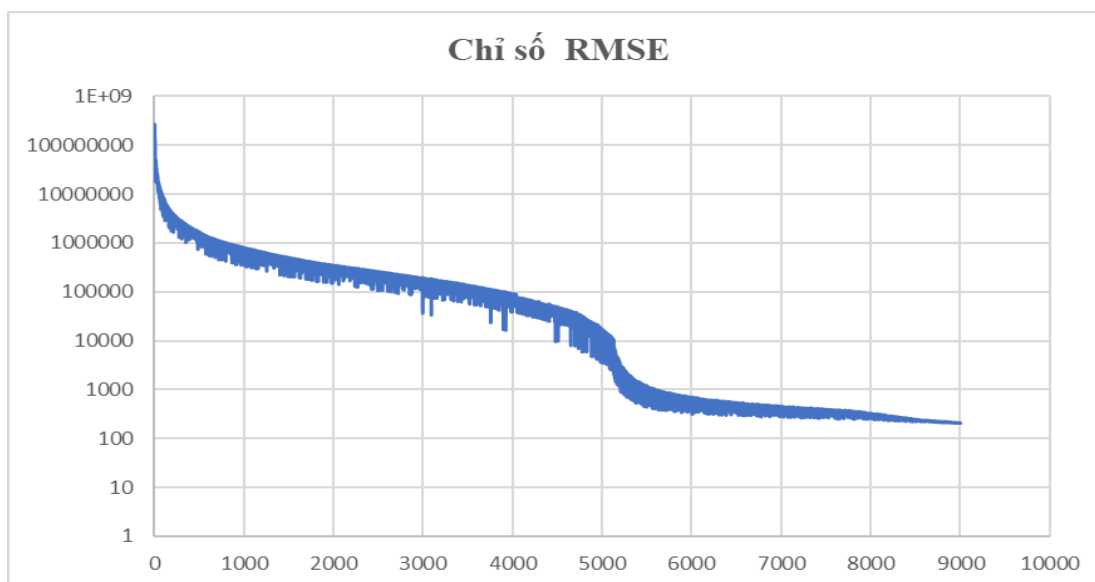
### 3.7.1.1. Kết quả hiệu chỉnh thông số vận hành hồ chứa trong mô hình VIC

Luận án sử dụng chuỗi lưu lượng thực đo về hồ Lai Châu trong giai đoạn 2016–2020 để hiệu chỉnh các thông số mô hình. NCS xây dựng 12 bộ thông số tương ứng với 12 hồ chứa lớn trong khu vực nghiên cứu, gồm 2 hồ phía Việt Nam và 10 hồ phía Trung Quốc, theo hai phương án hiệu chỉnh: (i) phương án điều tiết theo mực nước mục tiêu và (ii) phương án điều tiết theo quy luật vận hành. Đối với phương án (i), mực nước hồ thực đo và mực nước xác định từ ảnh vệ tinh được sử dụng làm cơ sở mô phỏng. Đối với phương án (ii), NCS sử dụng chương trình hiệu chỉnh tự động viết bằng Python (Calibration\_res.py) để hiệu chỉnh nhóm 6 bộ thông số tương ứng với 6 hồ phía Trung Quốc có chế độ vận hành điều tiết mùa/năm, theo sơ đồ tại Hình 3.31.

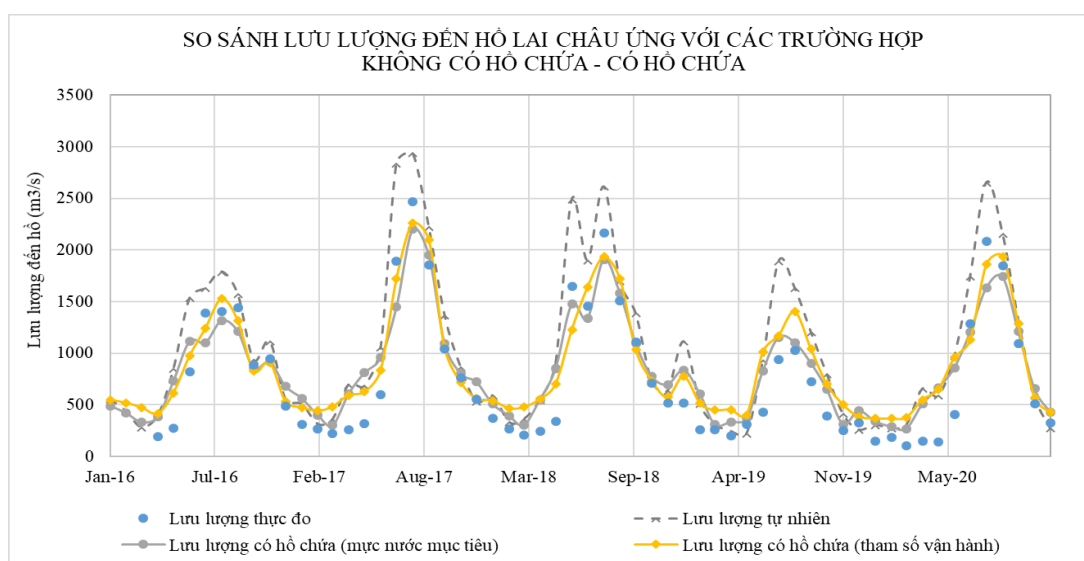


Hình 3.31. Sơ đồ quy trình hiệu chỉnh tự động mô hình VIC (*Calibration\_res.py*)

Sau khi kết thúc quá trình lặp 10.000 lần chương trình sẽ tự động chọn ra bộ thông số tốt nhất và tính toán lại, kết quả mô phỏng với thông số được chọn thể hiện Hình 3.32. Để đánh giá vai trò của các thông số của 10 hồ chứa thượng nguồn sông Đà (thuộc Trung Quốc), luận án tiến hành mô phỏng, đánh giá lưu lượng về hồ Lai Châu với 3 phương án (i), (ii) và (iii). Trong đó phương án (iii) không thiết lập mô phỏng qua hồ, chỉ sử dụng các thông số hiệu chỉnh trong Mục 3.4. Kết quả thể hiện trong Hình 3.33.



Hình 3.32. Biến trình hội tụ chỉ số RMSE trong thuật toán SCE-UA



*Hình 3.33. Lưu lượng trung bình tháng về hồ Lai Châu theo 3 phương án tính toán giai đoạn 2016-2020*

*Bảng 3.12. Kết quả hiệu chỉnh bộ thông số vận hành hồ chứa mô hình VIC*

| Hồ Lai Châu |                                     | NSE  | RMSE   | BIAS  | Sai số tổng lượng (%) |
|-------------|-------------------------------------|------|--------|-------|-----------------------|
| Hồ Lai Châu | Có tính hồ – vận hành theo mực nước | 0,84 | 247,03 | 113,7 | 14,96                 |
|             | Có tính hồ – vận hành quy luật      | 0,83 | 248,30 | 145,7 | 19,21                 |
|             | Không tính đến hồ                   | 0,59 | 392,00 | 306,9 | 40,82                 |

Bảng 3.12 và Hình 3.33 cho thấy sự khác biệt rõ rệt về chất lượng mô phỏng giữa các phương án tính toán. Khi không xét đến ảnh hưởng của hồ chứa, mô hình VIC đạt  $NSE = 0,59$ ,  $RMSE = 392,00 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $BIAS = 306,9 \text{ m}^3/\text{s}$  và sai số tổng lượng 40,82%, cho thấy mức độ sai lệch tương đối lớn giữa dòng chảy mô phỏng và thực đo. Khi tích hợp thông số và quy luật vận hành hồ chứa, chất lượng mô phỏng được cải thiện rõ rệt, với NSE tăng lên 0,83–0,84, RMSE giảm còn 247,03–248,30  $\text{m}^3/\text{s}$ , BIAS giảm còn 113,7–145,7  $\text{m}^3/\text{s}$  và sai số tổng lượng giảm xuống 14,96–19,21%. Kết quả cho thấy việc tích hợp thông tin vận hành hồ chứa đã cải thiện đáng kể chất lượng mô phỏng dòng chảy về hồ Lai Châu trong giai đoạn 2016–2020, đồng thời cho thấy cần xem xét tác động điều tiết của các hồ chứa thượng nguồn khi mô phỏng dòng chảy sông Đà trong giai đoạn sau năm 2009. Trên cơ sở kết quả hiệu chỉnh, bộ

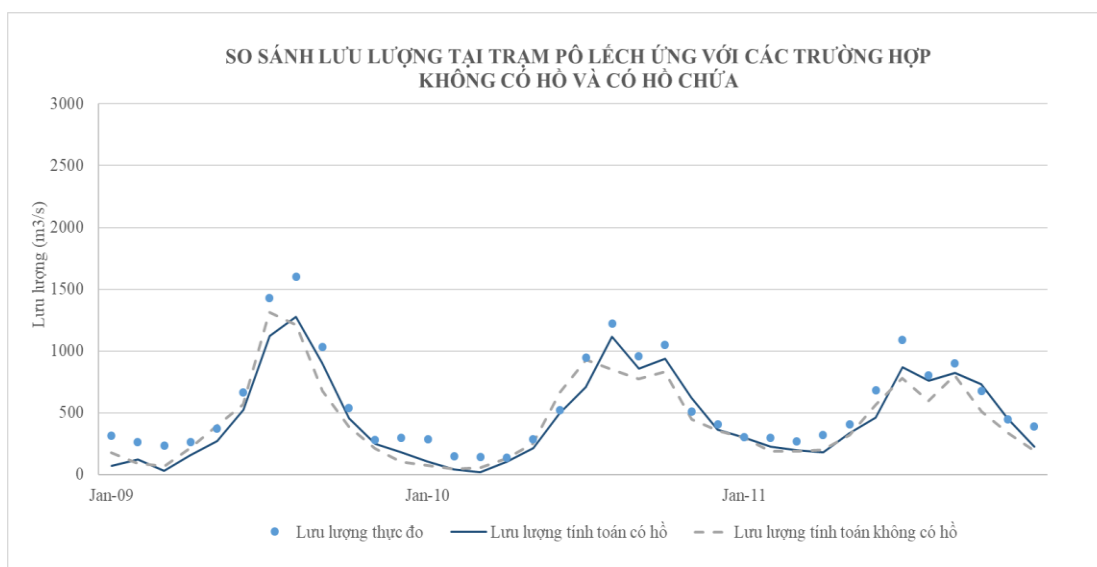
thông số vận hành hồ theo phương án (ii) được giữ nguyên để tiếp tục kiểm định, qua đó đánh giá khả năng duy trì chất lượng mô phỏng của mô hình VIC khi tích hợp thông tin vận hành hồ chứa.

### 3.7.1.2. Kết quả kiểm định bộ thông số vận hành hồ chứa trong mô hình VIC

Luận án lựa chọn chuỗi dòng chảy quan trắc tại trạm Pô Lếch trong giai đoạn 2009–2011 trên lưu vực sông Đà để kiểm định bộ thông số vận hành hồ chứa. Hình 3.34 và Bảng 3.13 trình bày kết quả mô phỏng theo hai phương án: có tính đến ảnh hưởng của hồ chứa và không tính đến ảnh hưởng của hồ chứa.

*Bảng 3.13. Kết quả kiểm nghiệm mô hình VIC chỉ số NSE, RMSE, BIAS*

| Trạm    |                   | NSE  | RMSE   | BIAS   | Sai số tổng lượng (%) |
|---------|-------------------|------|--------|--------|-----------------------|
| Pô Lếch | Có tính hồ        | 0,86 | 143,18 | -110,0 | -19,31                |
|         | Không tính đến hồ | 0,8  | 169,59 | -129,7 | -22,76                |



*Hình 3.34. Lưu lượng trung bình tháng tại trạm Pô Lếch theo 2 phương án tính toán giai đoạn 2009-2011*

Bảng 3.13 và Hình 3.34 cho thấy khi không tính đến ảnh hưởng của hồ chứa, mô hình VIC đạt  $NSE = 0,80$ ,  $RMSE = 169,59 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $BIAS = -129,7 \text{ m}^3/\text{s}$  và sai số

tổng lượng  $-22,76\%$ . Khi tích hợp thông số vận hành hồ chứa, chất lượng mô phỏng được cải thiện, với NSE tăng lên 0,86, RMSE giảm còn  $143,18 \text{ m}^3/\text{s}$ , độ lớn BIAS giảm còn  $110,0 \text{ m}^3/\text{s}$  và sai số tổng lượng giảm còn  $-19,31\%$ . Kết quả cho thấy việc tích hợp thông tin vận hành hồ chứa đã cải thiện khả năng mô phỏng dòng chảy tại trạm Pô Lếch trong giai đoạn 2009–2011. Kết quả kiểm định cho thấy bộ thông số vận hành hồ chứa được xác định có khả năng phản ánh tương đối phù hợp ảnh hưởng điều tiết của các hồ chứa phía Trung Quốc đến dòng chảy trên dòng chính sông Đà.

### **3.7.2. Đánh giá sự cải thiện chất lượng mô phỏng dòng chảy của mô hình VIC khi tích hợp thông số vận hành hồ chứa**

Để đánh giá hiệu quả của việc tích hợp thông số vận hành hồ chứa vào mô hình VIC, NCS phân tích chất lượng mô phỏng dòng chảy trên dòng chính sông Đà theo mùa lũ và mùa kiệt, trên cơ sở các mốc thời gian đã được xác định từ kết quả phân tích điểm biến đổi và điều kiện vận hành hồ chứa. Kết quả được đánh giá qua ba giai đoạn đại diện, gồm: 2003–2008, là giai đoạn cơ sở trước điểm biến đổi năm 2009; 2009–2011, là giai đoạn ngay sau điểm biến đổi năm 2009, khi các hồ chứa lớn phía thượng lưu Trung Quốc đi vào vận hành; và 2016–2020, là giai đoạn sau mốc thực tiễn năm 2016, khi hồ Lai Châu đi vào vận hành. Kết quả đánh giá được trình bày tại Bảng 3.14.

*Bảng 3.14. Bảng kết quả đánh giá chất lượng mô phỏng theo các giai đoạn khi chỉ tính đến ảnh hưởng của các hồ chứa nước*

| Trạm/hồ     | Quy mô | Giai đoạn | NSE   | BIAS   | PBIAS (%) | Sai số tổng lượng (%) |
|-------------|--------|-----------|-------|--------|-----------|-----------------------|
| Pô Lếch     | Lũ     | 2003-2008 | 0,81  | -259,3 | -20,85    | -20,89                |
|             | Kiệt   |           | 0,94  | -11,2  | -15,98    | -15,89                |
|             | Lũ     | 2009-2011 | 0,87  | -137,7 | -14,64    | -14,64                |
|             | Kiệt   |           | 0,82  | -90,18 | -29,0     | -29,76                |
| Hồ Lai Châu | Lũ     | 2016-2020 | 0,88  | 80,2   | 6,28      | 6,17                  |
|             | Kiệt   |           | -0,54 | 180,0  | 57,71     | 57,69                 |

Bảng 3.14 cho thấy chất lượng mô phỏng dòng chảy trên dòng chính sông Đà của mô hình VIC sau khi tích hợp thông số vận hành hồ chứa có sự phân hóa rõ rệt giữa mùa lũ và mùa kiệt qua các giai đoạn nghiên cứu. Trong khi chất lượng mô phỏng mùa lũ được duy trì tương đối tốt, chất lượng mô phỏng mùa kiệt có xu hướng suy giảm, đặc biệt trong giai đoạn 2016–2020. Cụ thể:

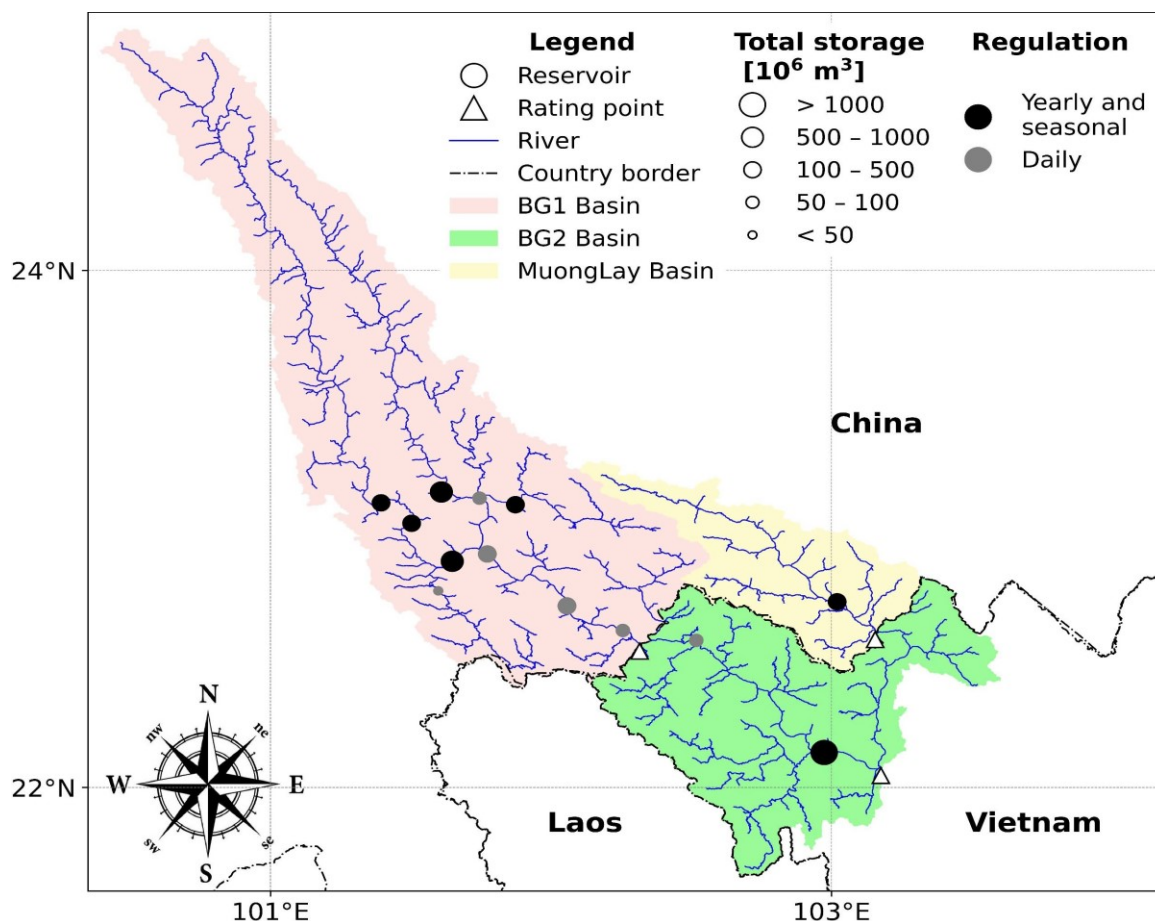
- + Trong giai đoạn 2003–2008, khi dòng chảy trên sông Đà chưa chịu ảnh hưởng rõ rệt của hệ thống hồ chứa phía Trung Quốc, mô hình cho kết quả mô phỏng tốt và ổn định ở cả hai mùa. Giá trị NSE đạt 0,81 trong mùa lũ và 0,94 trong mùa kiệt, trong khi sai số tổng lượng lần lượt là  $-20,89\%$  và  $-15,89\%$ . Kết quả cho thấy mô hình VIC sau khi tích hợp thông số vận hành hồ chứa vẫn duy trì khả năng mô phỏng tốt chế độ dòng chảy trên dòng chính sông Đà trong điều kiện tác động điều tiết của hệ thống hồ chứa phía Trung Quốc chưa rõ rệt.
- + Sang giai đoạn 2009–2011, khi các hồ chứa lớn phía thượng lưu Trung Quốc bắt đầu đi vào vận hành, chất lượng mô phỏng mùa lũ không những không suy giảm mà còn được cải thiện. Giá trị NSE tăng lên 0,87, trong khi sai số tổng lượng giảm còn  $-14,64\%$ , cho thấy việc tích hợp thông số vận hành hồ chứa đã góp phần nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy lũ trên dòng chính sông Đà. Ngược lại, đối với mùa kiệt, chất lượng mô phỏng có xu hướng giảm, với  $NSE = 0,82$  và sai số tổng lượng  $-29,76\%$ , cho thấy mức độ phù hợp của mô hình đối với dòng chảy mùa kiệt thấp hơn so với mùa lũ trong cùng giai đoạn.
- + Đến giai đoạn 2016–2020, sự phân hóa giữa mùa lũ và mùa kiệt trở nên đặc biệt rõ nét. Trong mùa lũ, mô hình vẫn duy trì chất lượng mô phỏng tốt với  $NSE = 0,88$  và sai số tổng lượng  $6,17\%$ , cho thấy việc tích hợp thông số vận hành hồ chứa đã giúp mô hình VIC mô phỏng tương đối tốt dòng chảy lũ trong giai đoạn này. Ngược lại, đối với mùa kiệt, chất lượng mô phỏng suy giảm rất rõ rệt, với  $NSE = -0,54$  và sai số tổng lượng lên tới  $57,69\%$ . Kết quả này cho thấy việc chỉ tích hợp thông số vận hành hồ chứa chưa đủ để phản ánh đầy đủ diễn biến dòng chảy mùa kiệt trong giai đoạn 2016–2020, đặt ra yêu cầu cần

tiếp tục xem xét và tích hợp các yếu tố nhân sinh khác có khả năng tác động đến dòng chảy mùa kiệt trên lưu vực.

Từ các kết quả định lượng trong Bảng 3.14, có thể nhận thấy chất lượng mô phỏng của mô hình VIC sau khi tích hợp thông số vận hành hồ chứa có sự khác biệt rõ rệt giữa mùa lũ và mùa kiệt qua các giai đoạn nghiên cứu. Đối với mùa lũ, chất lượng mô phỏng được duy trì tốt và có xu hướng cải thiện. Ngược lại, đối với mùa kiệt, chất lượng mô phỏng có xu hướng suy giảm rõ rệt khi giai đoạn nghiên cứu càng cách xa mốc thay đổi năm 2009. Kết quả này cho thấy việc tích hợp thông số vận hành hồ chứa đã góp phần nâng cao chất lượng mô phỏng, đặc biệt đối với dòng chảy mùa lũ; tuy nhiên, đối với mùa kiệt, tác động của hồ chứa chưa đủ để giải thích đầy đủ sự biến đổi dòng chảy trong các giai đoạn sau năm 2009. Do đó, tại Mục 3.8 và Mục 3.9, NCS tiếp tục xem xét và tích hợp các yếu tố nhân sinh khác có khả năng tác động đến dòng chảy mùa kiệt, qua đó đánh giá mức độ cải thiện và nâng cao chất lượng mô phỏng của mô hình VIC trên lưu vực sông Đà.

### 3.8. Kết quả phân tích biến động mật độ đệm và nhu cầu tưới

#### 3.8.1. Phân tích sự thay đổi mật độ đệm trên lưu vực giai đoạn 1992 đến 2020



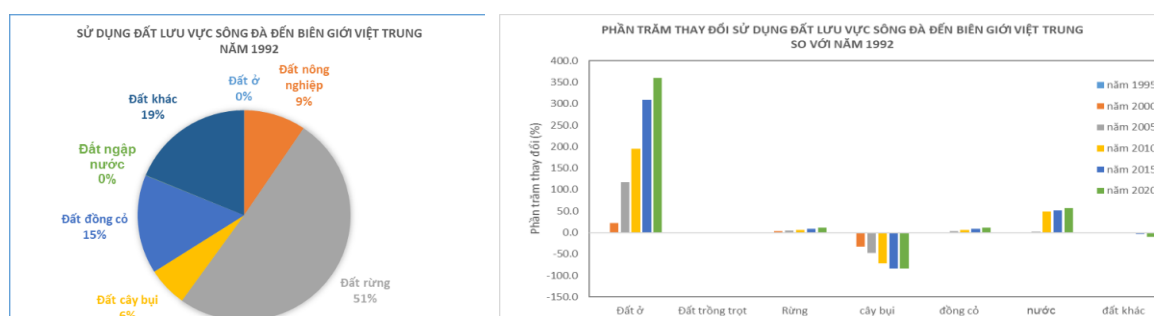
Hình 3.35. Phân chia vùng đánh giá tác động của các yếu tố lên dòng chảy sông Đà

Trong điều kiện hạn chế về số liệu quan trắc và thông tin sử dụng đất tại khu vực thượng nguồn sông Đà thuộc Trung Quốc, NCS sử dụng dữ liệu sử dụng đất của FAO để phân tích sự thay đổi mật độ đệm trên lưu vực trong giai đoạn 1992–2020. Dữ liệu này cung cấp thông tin về sự phân bố và biến động các loại hình sử dụng đất, qua đó hỗ trợ đánh giá sự thay đổi điều kiện mật độ đệm và các tác động nhân sinh có khả năng ảnh hưởng đến chế độ dòng chảy.

Để phân tích sự biến động theo không gian, khu vực nghiên cứu được phân chia thành ba tiểu lưu vực như thể hiện tại Hình 3.35, gồm: (1) thượng lưu sông Đà đến biên giới Việt Nam – Trung Quốc (màu hồng); (2) lưu vực sông Nậm Na từ thượng lưu đến biên giới Việt Nam – Trung Quốc (màu vàng); và (3) khu vực từ biên

giới Việt Nam – Trung Quốc đến trạm Mường Lay (màu xanh). Việc phân chia này là cơ sở để phân tích sự thay đổi mật độ theo không gian và xem xét sự khác biệt về mức độ tác động của các hoạt động nhân sinh đến dòng chảy trên các khu vực nghiên cứu. Trên cơ sở chuỗi dữ liệu sử dụng đất giai đoạn 1992–2020, NCS phân tích sự thay đổi diện tích và cơ cấu các loại hình sử dụng đất tại từng tiểu lưu vực, qua đó xác định những biến động đáng chú ý của mật độ và làm cơ sở đánh giá tác động của thay đổi sử dụng đất đến chế độ dòng chảy sông Đà.

### 3.8.1.1. Lưu vực 1: thượng lưu sông Đà đến biên giới Việt – Trung



Hình 3.36. Tỷ lệ phần trăm các loại đất năm 1992 và tỷ lệ phần trăm thay đổi sử dụng đất trên Lưu vực 1 - thượng lưu sông Đà đến biên giới Việt – Trung

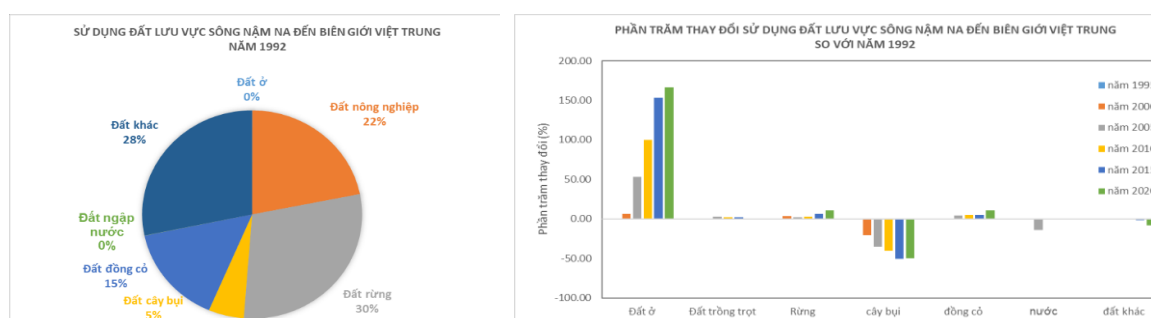
Bảng 3.15. Bảng thống kê diện tích sử dụng đất Lưu vực 1: thượng lưu sông Đà đến biên giới Việt – Trung

| TT | Loại sử dụng đất | Diện tích sử dụng đất<br>(Km <sup>2</sup> ) |          |          |          |          |          |          |
|----|------------------|---------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|    |                  | Năm 1992                                    | Năm 1995 | Năm 2000 | Năm 2005 | Năm 2010 | Năm 2015 | Năm 2020 |
| 1  | Đất ở            | 3,9                                         | 3,9      | 4,8      | 8,6      | 11,6     | 16,1     | 18,1     |
| 2  | Đất nông nghiệp  | 1826,2                                      | 1837,3   | 1844,3   | 1847,3   | 1843,6   | 1836,0   | 1789,6   |
| 3  | Đất rừng         | 9764,8                                      | 9765,4   | 10094,8  | 10204,9  | 10413,3  | 10556,9  | 10833,0  |
| 4  | Đất cây bụi      | 1175,1                                      | 1147,3   | 795,8    | 623,7    | 330,5    | 192,5    | 189,0    |
| 5  | Đất đồng cỏ      | 2943,2                                      | 2943,8   | 2975,2   | 3044,5   | 3141,4   | 3213,7   | 3272,7   |
| 6  | Đất ngập nước    | 8,4                                         | 8,4      | 8,4      | 8,6      | 12,5     | 12,7     | 13,2     |

| TT | Loại sử dụng đất | Diện tích sử dụng đất<br>(Km <sup>2</sup> ) |             |             |             |             |             |             |
|----|------------------|---------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|    |                  | Năm<br>1992                                 | Năm<br>1995 | Năm<br>2000 | Năm<br>2005 | Năm<br>2010 | Năm<br>2015 | Năm<br>2020 |
| 7  | Đất khác         | 3629,4                                      | 3645,0      | 3627,8      | 3613,5      | 3598,3      | 3532,8      | 3245,0      |

Trong giai đoạn 1992–2020, cơ cấu sử dụng đất tại lưu vực thượng lưu sông Đà (từ biên giới Việt – Trung) đã có nhiều biến đổi quan trọng, phản ánh đồng thời tác động của chính sách quản lý tài nguyên, quá trình đô thị hóa và chuyển dịch sinh kế. Giai đoạn 1992–1995, diện tích các loại đất hầu như ổn định, chỉ có sự suy giảm nhẹ đất cây bụi (giảm 27,8 km<sup>2</sup>, từ 1175,1 xuống 1147,3 km<sup>2</sup>) và gia tăng không đáng kể đất nông nghiệp (tăng 11,1 km<sup>2</sup>, từ 1826,2 lên 1837,3 km<sup>2</sup>). Từ 1995 đến 2000, xu thế biến động trở nên rõ rệt với sự gia tăng mạnh mẽ diện tích rừng (tăng 329,4 km<sup>2</sup>, từ 9765,4 lên 10094,8 km<sup>2</sup>), chủ yếu thay thế cho đất cây bụi (giảm 351,5 km<sup>2</sup>, từ 1147,3 xuống 795,8 km<sup>2</sup>), trong khi đất nông nghiệp (tăng 7 km<sup>2</sup>) và đồng cỏ (tăng 31,4 km<sup>2</sup>) tăng nhẹ. Giai đoạn 2000–2005 đánh dấu bước phát triển song song của hai xu thế: đô thị hóa bắt đầu xuất hiện qua việc đất ở tăng hơn gấp đôi (tăng 3,8 km<sup>2</sup>, từ 4,8 lên 8,6 km<sup>2</sup>), đồng thời diện tích rừng (tăng 110,1 km<sup>2</sup>) và đồng cỏ (tăng 69,3 km<sup>2</sup>) tiếp tục mở rộng trên nền suy giảm mạnh của đất cây bụi (giảm 172,1 km<sup>2</sup>). Đến giai đoạn 2005–2010, đất rừng có tốc độ tăng trưởng cao nhất (tăng 208,4 km<sup>2</sup>, từ 10204,9 lên 10413,3 km<sup>2</sup>), đất cây bụi tiếp tục giảm sâu (giảm 293,2 km<sup>2</sup>), còn đất nông nghiệp bắt đầu có xu thế suy giảm (giảm 3,7 km<sup>2</sup>). Giai đoạn 2010–2015 củng cố thêm xu thế này: diện tích rừng tăng thêm gần 144 km<sup>2</sup> (từ 10413,3 lên 10556,9 km<sup>2</sup>), trong khi đất cây bụi (giảm 138 km<sup>2</sup>, còn 192,5 km<sup>2</sup>) và đất khác (giảm 65,5 km<sup>2</sup>) giảm rõ rệt, đất nông nghiệp thu hẹp 7,6 km<sup>2</sup>. Từ 2015 đến 2020, rừng tiếp tục tăng nhanh, vượt mốc 10.800 km<sup>2</sup> (tăng 276,1 km<sup>2</sup>), trong khi đất khác giảm mạnh 287,8 km<sup>2</sup> và đất nông nghiệp giảm 46,4 km<sup>2</sup>; đất ở tăng chậm lại 2 km<sup>2</sup> nhưng vẫn phản ánh áp lực gia tăng dân cư.

### 3.8.1.2. Lưu vực 2: thượng lưu sông nhánh Nậm Na đến biên giới Việt – Trung



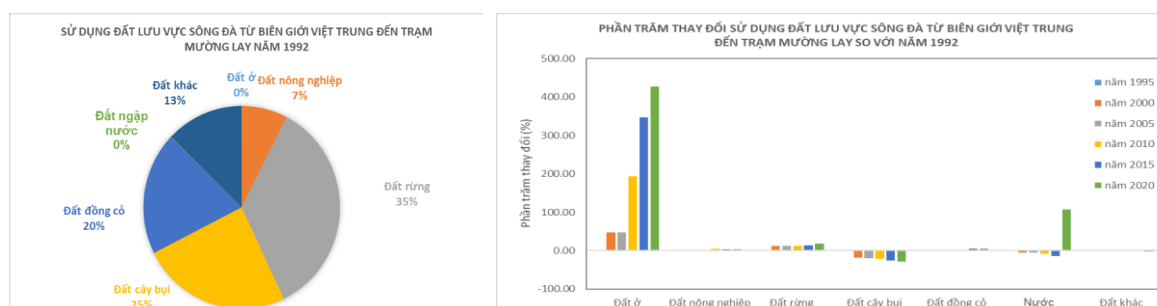
Hình 3.37. Tỷ lệ phân trăm các loại đất năm 1992 và tỷ lệ phân trăm thay đổi sử dụng đất trên lưu vực 2 - thượng lưu sông nhánh Nậm Na đến biên giới Việt – Trung

Trong giai đoạn 1992–2020, cơ cấu sử dụng đất tại lưu vực 2 (thượng lưu sông nhánh Nậm Na đến biên giới Việt – Trung) có nhiều biến đổi nhưng mức độ không mạnh bằng lưu vực 1, phản ánh đặc điểm địa hình, dân cư và tác động quản lý khác biệt. Giai đoạn 1992–1995, hiện trạng đất gần như ổn định, chỉ ghi nhận giảm nhẹ đất rừng (giảm 2,4 km<sup>2</sup>, từ 1229,4 xuống 1227,0 km<sup>2</sup>) và đất cây bụi (giảm 1,1 km<sup>2</sup>), trong khi đất nông nghiệp tăng không đáng kể (tăng 0,9 km<sup>2</sup>). Từ 1995 đến 2000, biến động rõ rệt hơn: diện tích rừng tăng 41,5 km<sup>2</sup> (từ 1227,0 lên 1268,5 km<sup>2</sup>), đất cây bụi giảm mạnh 43,3 km<sup>2</sup> (từ 217,0 xuống 173,7 km<sup>2</sup>), đồng thời đất đồng cỏ và đất nông nghiệp tăng lần lượt 5,8 và 1,4 km<sup>2</sup>. Giai đoạn 2000–2005 phản ánh sự giằng co: đất ở tăng mạnh hơn gấp rưỡi (từ 1,4 lên 2,0 km<sup>2</sup>), đất nông nghiệp mở rộng thêm 19,5 km<sup>2</sup>, đất đồng cỏ tăng 20,9 km<sup>2</sup>, nhưng diện tích rừng lại giảm nhẹ 14,3 km<sup>2</sup> và đất cây bụi tiếp tục giảm 32,5 km<sup>2</sup>. Đến giai đoạn 2005–2010, xu thế ổn định hơn: đất rừng tăng trở lại 6,8 km<sup>2</sup>, đất ở tăng 0,6 km<sup>2</sup>, đất đồng cỏ tăng 3,9 km<sup>2</sup>, trong khi đất nông nghiệp giảm nhẹ 0,9 km<sup>2</sup> và đất cây bụi giảm thêm 11,2 km<sup>2</sup>. Giai đoạn 2010–2015 đánh dấu sự mở rộng đáng kể diện tích rừng (tăng 46 km<sup>2</sup>, từ 1261,0 lên 1307,0 km<sup>2</sup>), song song với sự suy giảm đất cây bụi (giảm 22,4 km<sup>2</sup>) và đất khác (giảm 22,4 km<sup>2</sup>), còn đất ở và đồng cỏ tăng chậm. Đến giai đoạn 2015–2020, diện tích rừng tăng nhanh nhất (tăng 56,3 km<sup>2</sup>), đạt 1363,3 km<sup>2</sup>; đất đồng cỏ tăng thêm 33,8 km<sup>2</sup>; đất ở chỉ tăng 0,2 km<sup>2</sup>; trong khi đất nông nghiệp giảm khá mạnh (giảm 18,3 km<sup>2</sup>) và đất khác giảm sâu 73,7 km<sup>2</sup>.

Bảng 3.16. Bảng thống kê diện tích sử dụng đất Lưu vực 2: thượng lưu sông nhánh Nậm Na đến biên giới Việt – Trung

| TT | Loại sử dụng đất | Diện tích sử dụng đất<br>(Km <sup>2</sup> ) |          |          |          |          |          |          |
|----|------------------|---------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|    |                  | Năm 1992                                    | Năm 1995 | Năm 2000 | Năm 2005 | Năm 2010 | Năm 2015 | Năm 2020 |
| 1  | Đất ở            | 1,3                                         | 1,3      | 1,4      | 2,0      | 2,6      | 3,3      | 3,5      |
| 2  | Đất nông nghiệp  | 914,1                                       | 915,0    | 916,4    | 935,9    | 935,0    | 930,0    | 911,7    |
| 3  | Đất rừng         | 1229,4                                      | 1227,0   | 1268,5   | 1254,2   | 1261,0   | 1307,0   | 1363,3   |
| 4  | Đất cây bụi      | 218,1                                       | 217,0    | 173,7    | 141,2    | 130,0    | 107,6    | 109,3    |
| 5  | Đất đồng cỏ      | 640,6                                       | 640,5    | 646,3    | 667,2    | 671,1    | 674,3    | 708,1    |
| 6  | Đất ngập nước    | 1,2                                         | 1,2      | 1,2      | 1,2      | 1,2      | 1,2      | 1,2      |
| 7  | Đất khác         | 1182,4                                      | 1183,7   | 1178,2   | 1184,2   | 1184,7   | 1162,3   | 1088,6   |

### 3.8.1.3. Lưu vực 3: Lưu vực sông Đà từ biên giới Việt – Trung đến trạm Mường Lay



Hình 3.38. Tỷ lệ phân trăm các loại đất năm 1992 và tỷ lệ phân trăm thay đổi sử dụng đất trên lưu vực 3 - Lưu vực sông Đà từ biên giới Việt – Trung đến trạm Mường Lay

Trong giai đoạn 1992–2020, cơ cấu sử dụng đất tại lưu vực 3 có những biến động rõ rệt, đặc biệt là xu thế mở rộng diện tích rừng song song với sự thu hẹp đất cây bụi. Giai đoạn 1992–1995, hiện trạng đất hoàn toàn ổn định, hầu như không ghi nhận biến động. Đến giai đoạn 1995–2000, thay đổi diễn ra mạnh mẽ: diện tích rừng tăng 380,5 km<sup>2</sup> (từ 3160,4 lên 3540,9 km<sup>2</sup>), đồng thời đất cây bụi giảm 393,6 km<sup>2</sup> (từ 2197,5 xuống 1803,9 km<sup>2</sup>). Cùng lúc, đất ở tăng nhẹ 0,6 km<sup>2</sup>, đất đồng cỏ tăng 20,5 km<sup>2</sup>, trong khi đất khác giảm 8,6 km<sup>2</sup>. Giai đoạn 2000–2005 cho thấy sự ổn định

tương đối: đất rừng tăng thêm 5 km<sup>2</sup>, đất nông nghiệp mở rộng 7,8 km<sup>2</sup>, đất đồng cỏ tăng 15 km<sup>2</sup>; ngược lại, đất cây bụi giảm 33,8 km<sup>2</sup> và đất ngập nước giảm 0,3 km<sup>2</sup>. Trong giai đoạn 2005–2010, diện tích rừng tiếp tục tăng nhẹ 2,3 km<sup>2</sup>, trong khi đất nông nghiệp mở rộng mạnh hơn (+20,6 km<sup>2</sup>). Tuy nhiên, đất cây bụi vẫn giảm 47,1 km<sup>2</sup>, còn đất ngập nước tiếp tục giảm xuống 4,6 km<sup>2</sup>. Giai đoạn 2010–2015 ghi nhận sự chuyển dịch rõ hơn: đất rừng tăng 59,6 km<sup>2</sup> (lên 3607,8 km<sup>2</sup>), đất đồng cỏ tăng 42,7 km<sup>2</sup>, đất ở tăng thêm 2 km<sup>2</sup>; ngược lại, đất cây bụi giảm 98,3 km<sup>2</sup> và đất khác giảm 4,1 km<sup>2</sup>. Đến giai đoạn 2015–2020, đất rừng tăng nhanh nhất (+102,8 km<sup>2</sup>, đạt 3710,6 km<sup>2</sup>), đất ở tăng 1 km<sup>2</sup>, đất đồng cỏ tăng nhẹ 1,3 km<sup>2</sup>, trong khi đất cây bụi giảm tiếp 72,6 km<sup>2</sup> và đất khác giảm 39,3 km<sup>2</sup>. Đáng chú ý, diện tích đất ngập nước tăng vọt từ 4,4 km<sup>2</sup> lên 10,5 km<sup>2</sup>, gấp hơn hai lần, có thể liên quan đến sự hình thành hoặc mở rộng hồ chứa, công trình thủy điện.

*Bảng 3.17. Bảng thống kê diện tích sử dụng đất Lưu vực 3: Lưu vực sông Đà từ biên giới Việt – Trung đến trạm Mường Lay*

| TT | Loại sử dụng đất | Diện tích sử dụng đất (Km <sup>2</sup> ) |          |          |          |          |          |          |
|----|------------------|------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|    |                  | Năm 1992                                 | Năm 1995 | Năm 2000 | Năm 2005 | Năm 2010 | Năm 2015 | Năm 2020 |
| 1  | Đất ở            | 1,3                                      | 1,3      | 1,9      | 1,9      | 3,9      | 5,9      | 6,9      |
| 2  | Đất nông nghiệp  | 670,4                                    | 670,4    | 671,1    | 678,9    | 699,5    | 697,9    | 698,5    |
| 3  | Đất rừng         | 3160,4                                   | 3160,4   | 3540,9   | 3545,9   | 3548,2   | 3607,8   | 3710,6   |
| 4  | Đất cây bụi      | 2197,5                                   | 2197,5   | 1803,9   | 1770,1   | 1723,0   | 1624,7   | 1552,1   |
| 5  | Đất đồng cỏ      | 1751,0                                   | 1751,0   | 1771,5   | 1786,5   | 1794,9   | 1837,6   | 1838,9   |
| 6  | Đất ngập nước    | 5,1                                      | 5,1      | 4,8      | 4,8      | 4,6      | 4,4      | 10,5     |
| 7  | Đất khác         | 1138,0                                   | 1138,0   | 1129,4   | 1135,4   | 1149,5   | 1145,4   | 1106,1   |

#### **Nhận xét:**

Biến động diện tích rừng ở cả ba lưu vực thể hiện xu thế khá tương đồng. Từ sau năm 2000, diện tích rừng liên tục gia tăng và đạt mức tăng mạnh nhất trong giai

đoạn 2015–2020. Cụ thể, lưu vực 1 tăng thêm 276 km<sup>2</sup>, lưu vực 2 tăng 56 km<sup>2</sup>, và lưu vực 3 tăng 103 km<sup>2</sup>. Việc mở rộng diện tích rừng kéo theo nhu cầu sử dụng nước tưới lớn hơn, nhất là trong mùa kiệt, từ đó tiềm ẩn nguy cơ thiếu hụt nước ở khu vực hạ du.

Diện tích nước mặt (đất ngập nước/hồ chứa) có sự biến động khác biệt giữa các lưu vực. Ở lưu vực 1 và 2 (Trung Quốc), sự gia tăng diễn ra chủ yếu trong giai đoạn 2005–2010; trong đó, diện tích nước mặt của lưu vực 1 tăng từ 8,6 lên 12,5 km<sup>2</sup>, còn lưu vực 2 hầu như không thay đổi, ổn định ở mức 1,2 km<sup>2</sup>. Biến động này gắn liền với quá trình xây dựng và vận hành hàng loạt công trình thủy điện trên lưu vực 1 (Hình 3.30). Trái lại, tại lưu vực 3 (Việt Nam), diện tích nước mặt tăng mạnh đột biến muộn hơn, trong giai đoạn 2015–2020, từ 4,4 lên 10,5 km<sup>2</sup>, phản ánh rõ tác động của việc xây dựng và đưa vào khai thác các hồ chứa thủy điện lớn như Lai Châu và Pắc Ma trên sông Đà.

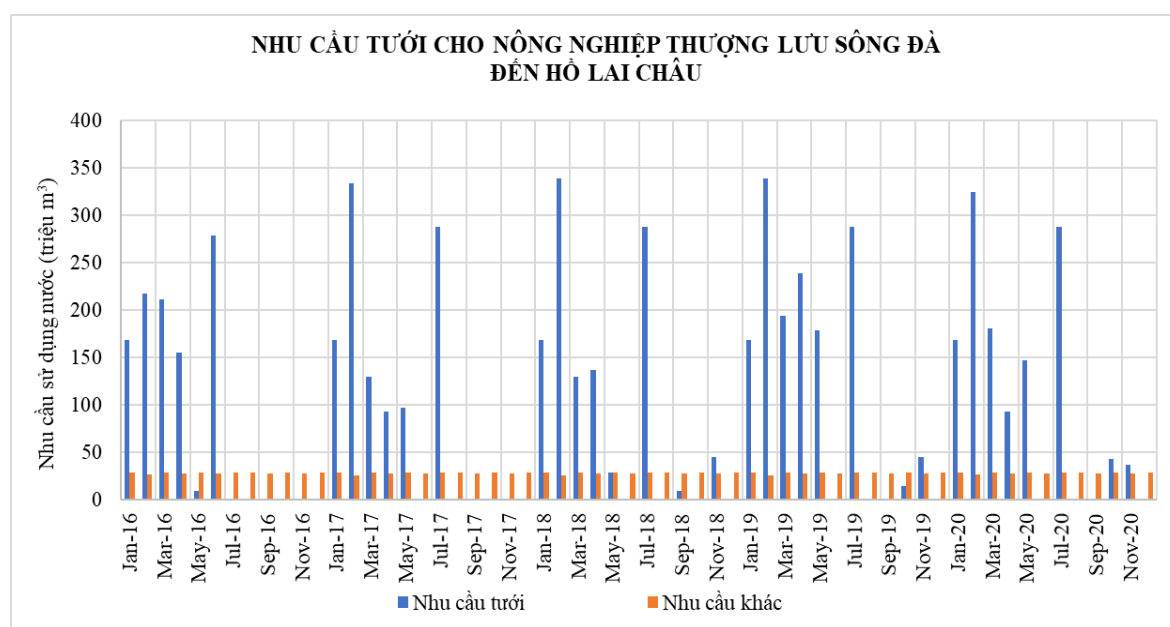
Diện tích đất nông nghiệp ở cả ba lưu vực có xu thế biến động theo từng giai đoạn. Trước năm 2010, đất trồng nhìn chung mở rộng nhẹ, phản ánh nhu cầu sản xuất nông nghiệp. Tuy nhiên, từ sau năm 2010, đặc biệt giai đoạn 2015–2020, diện tích đất nông nghiệp tại cả ba lưu vực đều có xu thế suy giảm (lưu vực 1 giảm 46 km<sup>2</sup>, lưu vực 2 giảm 18 km<sup>2</sup>, lưu vực 3 gần như ổn định). Sự suy giảm này gắn liền với việc chuyển đổi đất nông nghiệp sang trồng rừng và phát triển hạ tầng. Đáng chú ý, diện tích đất ở có xu thế tăng dần qua các giai đoạn, phản ánh quá trình đô thị hóa và gia tăng dân cư vùng thượng lưu. Xu thế này cho thấy áp lực cạnh tranh sử dụng đất ngày càng gay gắt giữa nông nghiệp, lâm nghiệp và nhu cầu phát triển dân sinh.

### ***3.8.2. Tính toán nhu cầu sử dụng nước giai đoạn 2016 đến 2020***

Sự biến động diện tích và cơ cấu đất nông nghiệp kéo theo sự thay đổi nhu cầu sử dụng nước cho sản xuất nông nghiệp, đặc biệt trong mùa kiệt khi nguồn nước có hạn. Trên cơ sở kết quả phân tích biến động mặt đệm, NCS tính toán nhu cầu nước tưới cho khu vực nghiên cứu trong giai đoạn 2016–2020. Nhu cầu nước được xác định trên cơ sở kết hợp các yếu tố khí tượng, lượng mưa và thông tin về mùa vụ, trong

đó các dữ liệu khí tượng và lượng mưa được cung cấp từ mô hình VIC với độ phân giải  $0,05^\circ$ . Kết quả tính toán từ mô hình VIC được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho công cụ CROPWAT 8.0 để xác định nhu cầu nước tưới.

Đối với khu vực thượng nguồn sông Đà thuộc tỉnh Vân Nam (Trung Quốc), nhu cầu tưới được tính toán bằng công cụ CROPWAT 8.0 trên cơ sở dữ liệu khí hậu, lượng mưa từ mô hình VIC và thông tin mùa vụ của tỉnh Vân Nam, với vụ 1 từ ngày thứ 70 đến ngày thứ 170 và vụ 2 từ ngày thứ 210 đến ngày thứ 310 [91]. Các nhu cầu sử dụng nước khác được xác định theo báo cáo sử dụng nước của tỉnh Vân Nam năm 2020, chiếm 21,5% tổng nhu cầu sử dụng nước [190].



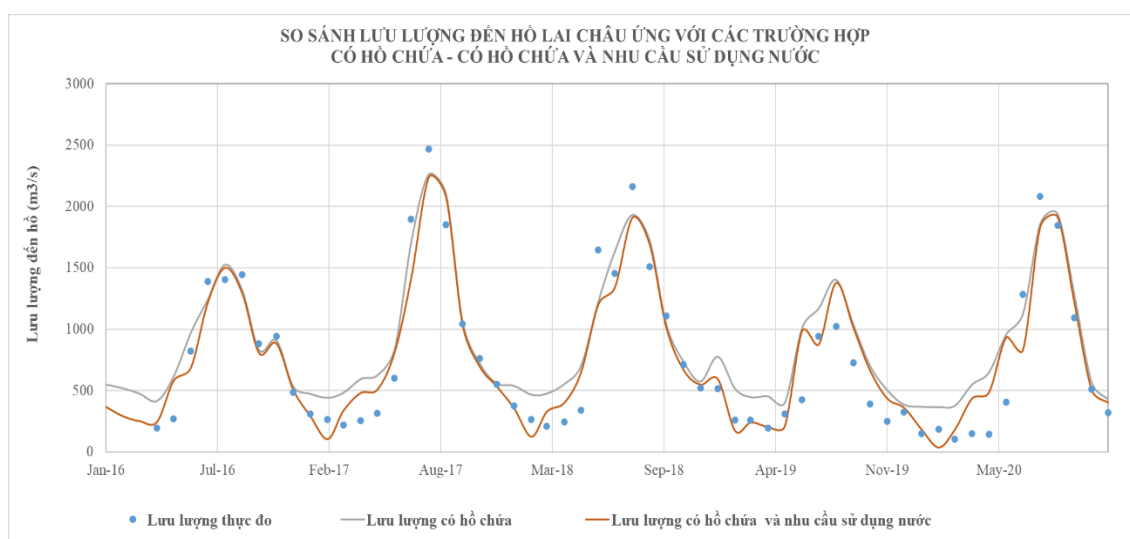
Hình 3.39. Nhu sử dụng nước trên thượng lưu lưu vực sông Đà tỉnh đến hồ Lai Châu giai đoạn 2016 - 2020

Kết quả tính toán cho thấy nhu cầu tưới tại khu vực thượng nguồn sông Đà có sự biến động giữa các năm trong giai đoạn 2016–2020. Tại khu vực phía Trung Quốc, nhu cầu tưới trung bình năm khoảng 811,10 triệu m³, cao nhất vào năm 2019 với 984,32 triệu m³ và thấp nhất vào năm 2016 với 698,53 triệu m³. Tại khu vực phía Việt Nam, tổng nhu cầu tưới trung bình năm khoảng 339,19 triệu m³ trong giai đoạn nghiên cứu. Kết quả này cung cấp cơ sở định lượng để xem xét tác động của nhu cầu sử dụng

nước đến dòng chảy mùa kiệt, đặc biệt trong giai đoạn 2016–2020, và làm dữ liệu đầu vào cho bước tích hợp sử dụng nước vào mô hình VIC.

### 3.9. Đánh giá kết quả mô phỏng khi tính đến thay đổi mặt đệm và sử dụng nước

Trên cơ sở mô hình VIC đã được tích hợp thông số vận hành hồ chứa và đánh giá tại Mục 3.7, NCS tiếp tục tích hợp các yếu tố thay đổi mặt đệm và sử dụng nước trong giai đoạn 2016–2020 nhằm đánh giá mức độ cải thiện chất lượng mô phỏng dòng chảy. Việc bổ sung các yếu tố này cho phép xem xét đầy đủ hơn tác động của các hoạt động nhân sinh đến chế độ dòng chảy, đặc biệt đối với dòng chảy mùa kiệt, qua đó đánh giá khả năng cải thiện của mô hình VIC so với trường hợp chỉ xét tác động điều tiết của hồ chứa. Kết quả mô phỏng và đánh giá được trình bày tại Bảng 3.18.



Hình 3.40. Lưu lượng trung bình tháng về hồ Lai Châu khi có và không xét đến thay đổi mặt đệm và nhu cầu sử dụng nước giai đoạn 2016-2020

Bảng 3.18. Kết quả đánh giá chất lượng mô phỏng khi có và không xét đến thay đổi mặt đệm và sử dụng nước

| Trạm/hồ     | Quy mô | Không/có sử dụng nước | NSE  | KGE  | PBIAS (%) | Sai số tổng lượng (%) |
|-------------|--------|-----------------------|------|------|-----------|-----------------------|
| Hồ Lai Châu | Năm    | Không                 | 0,83 | 0,73 | 19,78     | 19,21                 |
|             |        | Có                    | 0,88 | 0,87 | 4,1       | 4,04                  |

| Trạm/hồ | Quy mô | Không/có sử dụng nước | NSE   | KGE  | PBIAS (%) | Sai số tổng lượng (%) |
|---------|--------|-----------------------|-------|------|-----------|-----------------------|
|         | Lũ     | Không                 | 0,75  | 0,75 | -0,15     | -0,28                 |
|         |        | Có                    | 0,78  | 0,73 | 6,3       | 6,17                  |
|         | Kiệt   | Không                 | -0,54 | 0,28 | 57,71     | 57,69                 |
|         |        | Có                    | 0,18  | 0,55 | 34,75     | 35,09                 |

Hình 3.40 và Bảng 3.18 cho thấy chất lượng mô phỏng dòng chảy tại hồ Lai Châu được cải thiện rõ rệt khi mô hình có xét đến thay đổi mặt đệm và sử dụng nước, thể hiện ở cả quy mô năm, mùa lũ và mùa kiệt. Cụ thể như sau:

Ở quy mô năm, trong trường hợp không xét sử dụng nước, mô hình đạt  $NSE = 0,83$  và  $KGE = 0,73$ , cho thấy khả năng mô phỏng tương đối tốt nhưng vẫn tồn tại sai lệch đáng kể về tổng lượng, với  $PBIAS = 19,78\%$  và sai số tổng lượng  $= 19,21\%$ , phản ánh xu hướng mô phỏng cao hơn thực đo. Khi bổ sung yếu tố sử dụng nước, các chỉ số đánh giá được cải thiện đồng thời,  $NSE$  tăng lên 0,88,  $KGE$  tăng lên 0,87, trong khi  $PBIAS$  giảm xuống còn 4,10% và sai số tổng lượng chỉ còn 4,04%. Điều này cho thấy việc xét đến sử dụng nước đã giúp mô hình tái hiện tốt hơn cân bằng nước và tổng lượng dòng chảy năm.

Ở mùa lũ, chất lượng mô phỏng giữa hai phương án không có sự khác biệt lớn. Khi không xét sử dụng nước, mô hình đạt  $NSE = 0,75$ ,  $KGE = 0,75$ ,  $PBIAS = -0,15\%$  và sai số tổng lượng  $= -0,28\%$ , cho thấy tổng lượng dòng chảy mùa lũ được mô phỏng khá sát với số liệu thực đo. Khi bổ sung sử dụng nước,  $NSE$  tăng nhẹ lên 0,78, trong khi  $KGE$  giảm nhẹ xuống 0,73;  $PBIAS$  và sai số tổng lượng lần lượt đạt 6,30% và 6,17%. Nhìn chung, chất lượng mô phỏng mùa lũ vẫn được duy trì ở mức tốt. Kết quả này cho thấy ảnh hưởng của sử dụng nước trong mùa lũ không lớn do dòng chảy chủ yếu được chi phối bởi lượng mưa và quá trình điều tiết của các hồ chứa, trong khi lượng nước khai thác chỉ chiếm tỷ lệ nhỏ so với tổng lượng dòng chảy.

Ở mùa kiệt, sự khác biệt giữa hai phương án mô phỏng thể hiện rõ hơn so với quy mô năm và mùa lũ. Khi chưa xét đến sử dụng nước, mô hình cho chất lượng mô phỏng thấp, với  $NSE = -0,54$ ,  $KGE = 0,28$ ,  $PBIAS = 57,71\%$  và sai số tổng lượng =  $57,69\%$ . Các chỉ tiêu này cho thấy mô hình không chỉ hạn chế trong việc tái hiện biến động dòng chảy thấp mà còn tồn tại sai lệch đáng kể về tổng lượng dòng chảy. Khi tích hợp nhu cầu sử dụng nước,  $NSE$  tăng lên  $0,18$ ,  $KGE$  đạt  $0,55$ , trong khi  $PBIAS$  và sai số tổng lượng giảm tương ứng xuống  $34,75\%$  và  $35,09\%$ . Mặc dù chất lượng mô phỏng mùa kiệt vẫn còn hạn chế, kết quả cho thấy việc bổ sung hoạt động sử dụng nước đã giúp mô hình tái hiện tốt hơn chế độ dòng chảy mùa kiệt và giảm đáng kể sai lệch hệ thống.

#### **Nhận xét:**

Tuy nhiên, mức  $NSE = 0,18$  cho thấy việc tích hợp sử dụng nước mới chỉ giải thích được một phần sự biến động của dòng chảy mùa kiệt. Nguyên nhân là chế độ dòng chảy trong thời kỳ này chịu sự chi phối đồng thời của nhiều quá trình nhân sinh có quan hệ tương tác, trong đó đáng chú ý là điều tiết hồ chứa, tưới tiêu và khai thác sử dụng nước. Đối với các hồ chứa phía Trung Quốc trên lưu vực sông Đà, phần lớn là các hồ thủy điện, nên chế độ điều tiết trong mùa kiệt không chỉ phụ thuộc vào trạng thái thủy văn của lưu vực mà còn gắn với nhu cầu phụ tải và chế độ điều độ phát điện của hệ thống điện. Do đó, quan hệ giữa lượng nước đến, lượng nước xả và thời điểm xả có thể biến đổi theo thời gian và không hoàn toàn được quyết định bởi các biến khí tượng – thủy văn tại lưu vực. Trong điều kiện thông tin vận hành thực tế của các hồ phía Trung Quốc không được công bố đầy đủ, việc suy luận và tái hiện chính xác chế độ điều tiết, đặc biệt ở quy mô thời gian mùa kiệt, là một nguồn bất định đáng kể.

Mặt khác, dòng chảy mùa kiệt còn chịu tác động của tưới tiêu, khai thác và sử dụng nước và thay đổi sử dụng đất. Các tác động này phân bố không đồng đều theo không gian, biến đổi theo thời gian và có thể tương tác với chế độ điều tiết hồ chứa. Trong khi đó, thông tin định lượng về các hoạt động sử dụng nước, đặc biệt tại phần lưu vực phía Trung Quốc, còn hạn chế. Vì vậy, việc chỉ bổ sung nhu cầu sử dụng

nước vào mô hình chưa thể phản ánh đầy đủ toàn bộ các quá trình làm thay đổi dòng chảy mùa kiệt.

Kết quả này cần được nhìn nhận ở cả hai khía cạnh: thứ nhất, việc NSE tăng từ  $-0,54$  lên  $0,18$  cùng với sự cải thiện của KGE, PBIAS và sai số tổng lượng là bằng chứng định lượng cho thấy việc tích hợp hoạt động sử dụng nước có ý nghĩa trong nâng cao khả năng mô phỏng; thứ hai, NSE vẫn ở mức thấp cho thấy các tác động nhân sinh được tích hợp hiện chưa bao quát đầy đủ các cơ chế chi phối dòng chảy mùa kiệt, đặc biệt là chế độ vận hành thực tế của các hồ thủy điện phía Trung Quốc. Đây là một trong những nguyên nhân chính làm cho sai số mô phỏng mùa kiệt còn tương đối lớn.

### **3.10. Thảo luận chung về độ tin cậy và khả năng ứng dụng**

#### ***3.10.1. Độ tin cậy của phương pháp tích hợp đa nguồn dữ liệu***

Trong điều kiện thiếu hụt thông tin vận hành hồ chứa tại khu vực thượng nguồn sông Đà, việc khai thác và tích hợp các nguồn dữ liệu khác nhau có ý nghĩa quan trọng trong việc xác định đặc tính và diễn biến vận hành hồ chứa. Trong nghiên cứu này, dữ liệu viễn thám đa nguồn được kết hợp với các thông tin công bố và kết quả nghiên cứu đã có để xác định, kiểm chứng và bổ sung thông tin về mực nước, dung tích và quy luật vận hành của các hồ chứa phía thượng nguồn. Độ tin cậy của phương pháp được xem xét trên cả phương diện đối chứng với thông tin hiện có và khả năng phản ánh tác động của hồ chứa trong mô hình VIC.

Khi đối chiếu kết quả phân tích ảnh viễn thám với các thông tin công bố chính thức từ Bộ Thủy lợi Trung Quốc và các nghiên cứu về hệ thống hồ chứa tỉnh Vân Nam (Bảng 3.9) [48, 60, 180], sai số giữa mực nước dâng bình thường và dung tích hữu ích xác định từ dữ liệu viễn thám so với thông tin công bố nằm trong khoảng 5–15% đối với các hồ điều tiết mùa/năm. Mức sai số này nằm trong phạm vi chấp nhận được đối với việc xác định đặc tính hồ chứa từ dữ liệu viễn thám. Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu của Teunissen (2024) và Huy (2025) cho hai hồ Bản Chát và Sơn La cho thấy mực nước và dung tích xác định từ ảnh vệ tinh có mức độ phù hợp cao với

số liệu thực đo, với chỉ số NSE lần lượt đạt 0,96 và 0,88 [5, 158]. Những kết quả đối chứng này cho thấy dữ liệu viễn thám có độ tin cậy phù hợp để xác định diễn biến mực nước hồ, đặc biệt trong điều kiện thiếu số liệu quan trắc trực tiếp tại khu vực thượng nguồn.

Một điểm đáng chú ý của phương pháp là không chỉ bổ sung thông tin còn thiếu mà còn cho phép nhận diện những thay đổi trong thực tế vận hành hồ chứa. Trường hợp hồ Shimenkan là một ví dụ điển hình. Theo thông tin công bố của Bộ Thủy lợi Trung Quốc và các nghiên cứu về hồ chứa tại tỉnh Vân Nam, hồ Shimenkan được thiết kế và công bố vận hành theo chế độ tuần [192]. Tuy nhiên, phân tích chuỗi ảnh Sentinel-1 và Sentinel-2 trong giai đoạn 2016–2023 cho thấy diễn biến mực nước hồ có đặc trưng phù hợp hơn với chế độ điều tiết mùa/năm. Sự khác biệt này cho thấy quy luật vận hành thực tế có thể đã được điều chỉnh so với thông tin công bố ban đầu, hoặc hồ đã có những thay đổi về chế độ khai thác theo yêu cầu sử dụng nước. Như vậy, dữ liệu viễn thám không chỉ có giá trị kiểm chứng thông tin hiện có mà còn có khả năng cung cấp bằng chứng về những thay đổi trong trạng thái và quy luật vận hành hồ chứa theo thời gian.

Từ góc độ phương pháp, việc kết hợp các nguồn dữ liệu có ưu điểm là hạn chế sự phụ thuộc vào một nguồn thông tin đơn lẻ. Thông tin công bố cung cấp cơ sở ban đầu về quy mô và đặc tính hồ; dữ liệu viễn thám cung cấp chuỗi diễn biến diện tích mặt nước và mực nước; trong khi phân tích chuỗi mực nước và dung tích theo thời gian cho phép suy luận quy luật vận hành. Sự kết hợp này tạo cơ sở để bổ sung những thông tin chưa được công bố hoặc chưa được cập nhật, đồng thời xây dựng các thông số vận hành phục vụ tích hợp vào mô hình VIC. Đối với các hồ chứa phía Trung Quốc trên lưu vực sông Đà, cách tiếp cận này đặc biệt có ý nghĩa do hạn chế về khả năng tiếp cận trực tiếp các số liệu vận hành.

Độ tin cậy của thông tin vận hành được xây dựng từ dữ liệu đa nguồn còn được thể hiện qua kết quả mô phỏng dòng chảy về hồ Lai Châu giai đoạn 2016–2020. Khi không xét đến ảnh hưởng của hồ chứa, mô hình VIC đạt  $NSE = 0,59$ ,  $RMSE = 392,00$

$\text{m}^3/\text{s}$  và sai số tổng lượng 40,82%. Khi tích hợp thông tin và quy luật vận hành hồ chứa, chất lượng mô phỏng được cải thiện rõ rệt, với NSE đạt 0,83–0,84, RMSE giảm còn 247,03–248,30  $\text{m}^3/\text{s}$  và sai số tổng lượng giảm xuống 14,96–19,21%. Sự cải thiện đồng thời của các chỉ tiêu đánh giá cho thấy các thông tin về đặc tính và vận hành hồ chứa được xây dựng từ dữ liệu đa nguồn có khả năng phản ánh tương đối phù hợp tác động điều tiết của hệ thống hồ chứa đến dòng chảy. Kết quả cho phép sử dụng chuỗi diễn biến hồ chứa từ dữ liệu viễn thám làm nguồn thông tin bổ sung trong điều kiện thiếu số liệu vận hành, phục vụ thiết lập mô hình mô phỏng dòng chảy. Phương pháp có thể áp dụng cho các lưu vực xuyên biên giới hoặc các hệ thống hồ chứa mà thông tin vận hành không được công bố đầy đủ.

Bên cạnh những ưu điểm trên, phương pháp vẫn tồn tại một số nguồn bất định. Đối với ảnh quang học, mây và điều kiện khí quyển có thể ảnh hưởng đến khả năng xác định diện tích mặt nước tại một số thời điểm; ảnh SAR hạn chế được ảnh hưởng của mây nhưng vẫn chịu tác động của nhiễu và đặc điểm bề mặt. Sự khác biệt về độ phân giải không gian và thời gian giữa các nguồn ảnh, cũng như sự không đồng thời hoàn toàn giữa thời điểm thu nhận ảnh và thời điểm quan trắc thực tế, cũng có thể tạo ra sai số trong chuỗi mực nước và dung tích. Vì vậy, khi có điều kiện, kết quả xác định từ viễn thám cần tiếp tục được đối chứng với các nguồn số liệu độc lập để kiểm soát và đánh giá bất định.

### ***3.10.2. Đánh giá hiệu quả của thuật toán SCE-UA trong hiệu chỉnh mô hình VIC***

Lưu vực sông Đà có diện tích lớn, địa hình phức tạp, điều kiện tự nhiên không đồng nhất và nằm trên lãnh thổ hai quốc gia, trong khi số liệu quan trắc tại khu vực thượng nguồn còn hạn chế. Những đặc điểm này làm gia tăng mức độ phức tạp của bài toán hiệu chỉnh mô hình thủy văn. Đặc biệt, mô hình VIC được thiết lập theo phương pháp phân bố theo không gian, với nhiều thông số cần xác định cho các điều kiện tự nhiên khác nhau. Khi mô hình được mở rộng để xét đến tác động của hệ thống hồ chứa phía Trung Quốc sau năm 2009, bài toán hiệu chỉnh tiếp tục trở nên phức tạp

do phải xác định thêm các thông số mô tả quá trình điều tiết liên hồ chứa trên dòng chính sông Đà, trong khi thông tin vận hành thực tế còn hạn chế.

Trong điều kiện đó, thuật toán SCE-UA được lựa chọn để hiệu chỉnh bộ thông số mô hình VIC thông qua SPOTPY. Kết quả hiệu chỉnh trong giai đoạn trước năm 2009 cho thấy bộ thông số được xác định bằng SCE-UA cho chất lượng mô phỏng tốt tại các trạm nghiên cứu, với NSE đạt 0,74 tại Nậm Giàng và 0,85 tại Mường Lay ở bước thời gian ngày. Kết quả này cho thấy thuật toán có khả năng xác định bộ thông số phù hợp cho mô hình VIC trong điều kiện lưu vực có sự không đồng nhất cao về không gian và hạn chế về dữ liệu quan trắc mặt đất.

Khả năng đáp ứng của SCE-UA được thể hiện rõ hơn khi mô hình VIC được mở rộng để mô phỏng dòng chảy có xét đến điều tiết hồ chứa. Đây là bước mở rộng quan trọng vì dòng chảy sông Đà vào Việt Nam không chỉ phụ thuộc vào các quá trình khí tượng – thủy văn tự nhiên mà còn chịu ảnh hưởng của quy luật vận hành của hệ thống hồ chứa phía Trung Quốc. Trong khi đó, quy luật vận hành thực tế của các hồ chứa không được cung cấp đầy đủ và phải được xây dựng trên cơ sở thông tin viễn thám và các nguồn dữ liệu bổ sung. Kết quả hiệu chỉnh cho thấy quá trình hiệu chỉnh bằng SCE-UA đạt trạng thái hội tụ sau 10.000 lần lặp, cho phép xác định được bộ thông số vận hành phù hợp với chuỗi dòng chảy thực đo tại hồ Lai Châu.

Kết quả định lượng cho thấy sự thay đổi đáng kể về chất lượng mô phỏng khi tích hợp bộ thông số vận hành hồ chứa. Trong trường hợp không xét đến ảnh hưởng của hồ chứa, mô hình VIC đạt  $NSE = 0,59$ ,  $RMSE = 392,00 \text{ m}^3/\text{s}$  và sai số tổng lượng 40,82%. Khi tích hợp thông số vận hành hồ chứa, NSE tăng lên 0,83–0,84, RMSE giảm còn 247,03–248,30  $\text{m}^3/\text{s}$  và sai số tổng lượng giảm xuống 14,96–19,21%. Sự cải thiện đồng thời của các chỉ tiêu cho thấy quá trình hiệu chỉnh đã xác định được bộ thông số phù hợp để mô tả tác động điều tiết của hệ thống hồ chứa đến dòng chảy về hồ Lai Châu.

Kết quả của luận án được đối chiếu với một số nghiên cứu đã thực hiện trong khoảng 15 năm gần đây trên lưu vực sông Đà và sông Hồng. Trần Anh Phương và

Bùi Huyền Linh (2021), khi áp dụng mô hình HEC-HMS cho lưu vực sông Đà giai đoạn 2003–2019, thu được NSE trong khoảng 0,711–0,818 tại các trạm Tạ Bú và Mường Lay [9]. Nguyễn Đức Lương và cộng sự (2017), khi mô phỏng dòng chảy ngày trên lưu vực sông Hồng giai đoạn 2005–2014, đạt NSE từ 0,113 đến 0,487 tại các trạm Lào Cai, Yên Bái, Sơn Tây và Hà Nội [98], cho thấy những khó khăn trong hiệu chỉnh mô hình khi điều kiện dữ liệu chưa đồng bộ. Trên thượng nguồn sông Hồng phía Trung Quốc, Yungang Li và cộng sự (2016) đạt NSE cao hơn, trong khoảng 0,85–0,89 [90]; tuy nhiên, nghiên cứu này được thực hiện trong điều kiện có đầy đủ số liệu khí tượng – thủy văn quan trắc.

Tổng hợp các kết quả phân tích cho thấy thuật toán SCE-UA phù hợp với bài toán hiệu chỉnh mô hình VIC trên lưu vực sông Đà, đặc biệt trong điều kiện mô hình có nhiều thông số, lưu vực có tính không đồng nhất cao và chịu tác động của hệ thống hồ chứa phía thượng nguồn. Việc kết hợp SCE-UA với mô hình VIC cho phép xác định các bộ thông số phù hợp, nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy và duy trì được hiệu quả khi mô hình được mở rộng để xét đến tác động điều tiết của hồ chứa. Kết quả này là cơ sở để sử dụng các bộ thông số đã xác định trong các bài toán dự báo, phục vụ công tác vận hành hồ chứa và quản lý tài nguyên nước trong điều kiện biến đổi khí hậu và gia tăng rủi ro thủy văn.

### ***3.10.3. Các hạn chế còn tồn tại của nghiên cứu***

Mặc dù nghiên cứu đã đạt được mục tiêu nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy sông Đà vào lãnh thổ Việt Nam thông qua việc tích hợp mô hình thủy văn, dữ liệu viễn thám và các nguồn dữ liệu thay thế, kết quả vẫn tồn tại một số hạn chế và nguồn bất định, gắn liền với đặc thù của lưu vực xuyên biên giới và điều kiện thiếu hụt dữ liệu.

Trước hết, trong nghiên cứu này, chuỗi dòng chảy “tự nhiên” được hiểu là chuỗi dòng chảy ít chịu tác động của con người nhất có thể, thay vì phản ánh trạng thái hoàn toàn tự nhiên. Bên cạnh đó, một số yếu tố nhân sinh khác ngoài vận hành hồ chứa và sử dụng nước, như chuyển nước liên lưu vực, thay đổi cơ cấu cây trồng,

phát triển đô thị hay khai thác nước ngầm, chưa được xem xét đầy đủ trong mô hình, có thể gây sai lệch nhất định trong kết quả mô phỏng.

Thứ hai, mô phỏng dòng chảy trong giai đoạn sau khi các hồ chứa phía Trung Quốc đi vào vận hành chủ yếu được thực hiện ở quy mô tháng, do các thông số vận hành hồ được xây dựng theo bước thời gian này. Việc mở rộng mô phỏng xuống quy mô chi tiết hơn như ngày hoặc tuần chưa được triển khai trong phạm vi luận án, do đó còn hạn chế trong việc phản ánh các biến động ngắn hạn của dòng chảy, đặc biệt trong các sự kiện cực đoan.

Thứ ba, sai số mô phỏng mùa kiệt vẫn còn tương đối lớn, không chỉ do thiếu dữ liệu khí tượng – thủy văn và thông tin vận hành hồ chứa, mà còn do hạn chế trong mô tả các yếu tố kinh tế – xã hội như tưới tiêu, khai thác nước và thay đổi sử dụng đất. Đây là hạn chế phổ biến đối với các mô hình thủy văn trong điều kiện lưu vực xuyên biên giới thiếu dữ liệu. Kết quả nghiên cứu của Đề tài 562 do PGS.TS. Nguyễn Tiền Giang chủ trì, trong đó NCS tham gia thực hiện, cho thấy chất lượng mô phỏng có thể được cải thiện khi kết hợp mô hình dựa trên cơ sở vật lý với các phương pháp trí tuệ nhân tạo (AI) [5].

Thứ tư, kết quả mô phỏng và phân tách tác động còn chịu ảnh hưởng của ba nhóm bất định chính, gồm bất định cấu trúc mô hình, bất định thông số và bất định dữ liệu đầu vào. Trong luận án, NCS đã lựa chọn 06 thông số nhạy của mô hình VIC gồm  $b_{in}$ ,  $D_s$ ,  $D_{max}$ ,  $W_s$ ,  $D_2$  và  $D_3$  để hiệu chỉnh; tuy nhiên, chưa đánh giá độ nhạy của kết quả đối với sự biến động của các thông số này và các biến đầu vào của mô hình, đặc biệt là lượng mưa, cũng như chưa lượng hóa sự lan truyền của các bất định đó đến tỷ lệ đóng góp PCV và PHA. Do vậy, mức độ ổn định và độ tin cậy của các tỷ lệ đóng góp trước các nguồn bất định chưa được đánh giá đầy đủ. Đây là nội dung cần được tiếp tục nghiên cứu trong các nghiên cứu tiếp theo.

### **3.11. Tiểu kết chương 3**

Chương 3 đã trình bày các kết quả mô phỏng và phân tích biến đổi dòng chảy trên lưu vực sông Đà dưới tác động tổng hợp của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân

sinh. Kết quả phân tích chuỗi số liệu tại trạm Mường Lay cho thấy chế độ dòng chảy thể hiện tính không dừng rõ rệt, với điểm biến đổi quan trọng vào khoảng năm 2009, gắn với sự gia tăng hoạt động xây dựng và vận hành hồ chứa thượng nguồn. Điều này khẳng định rằng giả thiết chuỗi dừng không còn phù hợp trong nghiên cứu thủy văn tại lưu vực này.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đã thiết lập và kiểm định mô hình VIC, đồng thời từng bước tích hợp thông tin vận hành hồ chứa vào mô hình. Kết quả cho thấy mô hình VIC có khả năng mô phỏng phù hợp dòng chảy trong điều kiện cơ sở; việc tích hợp thông tin và quy luật vận hành hồ chứa giúp cải thiện rõ rệt chất lượng mô phỏng, đặc biệt trong giai đoạn sau năm 2009. Việc kết hợp dữ liệu khí tượng – thủy văn, dữ liệu viễn thám và các nguồn thông tin bổ sung đã góp phần khắc phục sự thiếu hụt dữ liệu tại khu vực thượng nguồn, tạo cơ sở xác định đặc tính và quy luật vận hành của các hồ chứa phía Trung Quốc và nâng cao khả năng mô phỏng dòng chảy của mô hình VIC.

Phân tích kết quả theo mùa cho thấy mô hình đạt độ tin cậy cao đối với dòng chảy mùa lũ khi xét đến tác động của hồ chứa, trong khi sai số mùa kiệt vẫn còn lớn nếu chỉ xét yếu tố điều tiết hồ. Điều này cho thấy vai trò ngày càng gia tăng của các hoạt động nhân sinh khác, đặc biệt là sử dụng nước. Khi tích hợp đồng thời thông tin vận hành hồ chứa và sử dụng nước vào mô hình, chất lượng mô phỏng được cải thiện đáng kể, qua đó khẳng định hiệu quả của cách tiếp cận tích hợp trong điều kiện chuỗi dòng chảy không dừng.

Kết quả phân tách tác động cho thấy biến đổi khí hậu là yếu tố chi phối chính đối với dòng chảy năm và mùa lũ, trong khi hoạt động nhân sinh giữ vai trò ngày càng quan trọng đối với dòng chảy mùa kiệt. Nhìn chung, Chương 3 đã làm rõ cơ chế và mức độ tác động của các yếu tố khí hậu và con người, đồng thời chứng minh rằng việc tích hợp dữ liệu đa nguồn và thông tin vận hành vào mô hình thủy văn dựa vật lý là hướng tiếp cận hiệu quả nhằm nâng cao độ chính xác mô phỏng dòng chảy trên lưu vực sông xuyên biên giới.

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### Kết luận

Luận án “Nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy sông Đà vào Việt Nam trong điều kiện biến đổi khí hậu” đã tiếp cận bài toán mô phỏng dòng chảy trong điều kiện lưu vực xuyên biên giới, chịu tác động đồng thời của biến đổi khí hậu và các hoạt động nhân sinh, trong đó nổi bật là sự phát triển và vận hành hệ thống hồ chứa ở thượng nguồn phía Trung Quốc. Kết quả phân tích cho thấy, chuỗi dòng chảy sông Đà có tính không dừng, với điểm biến đổi quan trọng được xác định vào khoảng năm 2009. Mốc biến đổi này phù hợp với giai đoạn các hồ chứa lớn phía Trung Quốc bắt đầu đi vào vận hành, cho thấy sự thay đổi chế độ dòng chảy có mối liên hệ rõ với sự gia tăng tác động của các hoạt động nhân sinh trên lưu vực.

Trong điều kiện hạn chế số liệu khí tượng – thủy văn và thiếu thông tin vận hành hồ chứa tại khu vực thượng nguồn, luận án đã khai thác và tích hợp dữ liệu viễn thám đa nguồn với các nguồn thông tin bổ sung để xác định đặc tính và diễn biến mực nước, dung tích hồ chứa, đồng thời suy luận quy luật vận hành theo các quy mô ngày, tuần và mùa/năm. Kết quả đối chứng với các thông tin đã công bố và các nghiên cứu đã có cho thấy, phương pháp có độ tin cậy phù hợp để bổ sung thông tin vận hành hồ chứa trong điều kiện thiếu số liệu thực đo. Ở trường hợp hồ Shimenkan cho thấy, dữ liệu viễn thám còn có khả năng nhận diện sự khác biệt giữa quy luật vận hành thực tế và thông tin đã công bố, qua đó cung cấp cơ sở cập nhật thông tin vận hành theo thời gian.

Trên cơ sở đó, luận án đã thiết lập và kiểm định mô hình VIC, đồng thời từng bước tích hợp thông tin vận hành hồ chứa, thay đổi mặt đệm và sử dụng nước vào mô hình. Kết quả cho thấy việc tích hợp thông tin vận hành hồ chứa cải thiện rõ rệt chất lượng mô phỏng dòng chảy, đặc biệt đối với dòng chảy năm và mùa lũ trong các giai đoạn sau năm 2009. Đối với mùa kiệt, chất lượng mô phỏng có xu hướng suy giảm khi càng xa mốc biến đổi năm 2009 nếu chỉ xét tác động của hồ chứa. Việc tiếp tục tích hợp thay đổi mặt đệm và sử dụng nước giúp cải thiện chất lượng mô phỏng mùa

kiệt, tuy nhiên kết quả vẫn chưa đạt mức tốt. Điều này cho thấy sự phức tạp của chế độ vận hành các hồ chứa thủy điện thượng nguồn phía Trung Quốc, trong đó nhu cầu phát điện và phân phối nguồn điện có thể chi phối chế độ điều tiết, vẫn là một trong những nguồn bất định quan trọng đối với mô phỏng dòng chảy mùa kiệt. Bên cạnh đó, những hạn chế về thông tin sử dụng nước, tưới tiêu, khai thác nước và thay đổi sử dụng đất cũng góp phần tạo ra sai số còn lại.

Luận án đã áp dụng công thức hệ số tác động mở rộng (EIFF) để phân tách và định lượng đồng thời ảnh hưởng của biến đổi khí hậu, hoạt động nhân sinh và sai số mô hình đối với sự biến đổi dòng chảy giữa các giai đoạn. Kết quả cho thấy biến đổi khí hậu giữ vai trò chi phối đối với biến động dòng chảy năm và mùa lũ, trong khi ảnh hưởng của hoạt động nhân sinh thể hiện rõ hơn đối với dòng chảy mùa kiệt và có xu hướng gia tăng trong các giai đoạn sau năm 2009. Kết quả phân tách này phù hợp với kết quả mô phỏng khi tích hợp tuần tự các yếu tố nhân sinh vào mô hình VIC, trong đó việc bổ sung thay đổi sử dụng đất và nhu cầu sử dụng nước góp phần cải thiện chất lượng mô phỏng, đặc biệt đối với dòng chảy mùa kiệt.

Nhìn chung, kết quả nghiên cứu cho thấy khung nghiên cứu tích hợp của luận án cho phép đánh giá đồng thời sự biến đổi dòng chảy và mức độ đóng góp của các tác động khí hậu – nhân sinh trên lưu vực sông Đà. Cách tiếp cận này không chỉ góp phần cải thiện chất lượng mô phỏng so với trường hợp chỉ xét điều kiện tự nhiên mà còn làm rõ sự thay đổi vai trò của các yếu tố tác động theo thời gian và theo mùa. Các bộ thông số và kết quả nghiên cứu là cơ sở để tiếp tục thực hiện các bài toán mô phỏng, dự báo dòng chảy và đánh giá tác động, phục vụ vận hành hồ chứa và quản lý tài nguyên nước trên lưu vực sông Đà trong điều kiện biến đổi khí hậu.

### **Kiến nghị**

Mặc dù các nghiên cứu của luận án đã đạt được mục tiêu đặt ra là nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy sông Đà vào Việt Nam bằng việc phát triển các phương pháp tiên tiến của thế giới hiện nay, phù hợp với điều kiện thực tế biến đổi của lưu vực, tuy nhiên vấn đề nghiên cứu là vô cùng phức tạp, nên cần thiết phải tiếp

tục nâng cao hoàn thiện hơn nữa các mô hình để gia tăng độ chính xác của kết quả tính toán. Cụ thể là:

- + Cần phát triển mô hình với bước thời gian chi tiết hơn (ngày hoặc tuần) nhằm nâng cao khả năng mô phỏng biến động dòng chảy ngắn hạn, đặc biệt trong các điều kiện cực đoan. Đồng thời, cần tăng cường tích hợp các thông tin về hoạt động kinh tế – xã hội và vận hành hồ chứa để cải thiện độ chính xác mô phỏng, nhất là trong mùa kiệt.
- + Cần tiếp tục nghiên cứu và ứng dụng các mô hình lai (hybrid), kết hợp giữa mô hình vật lý (VIC) và các phương pháp trí tuệ nhân tạo, nhằm nâng cao chất lượng của kết quả mô phỏng, đặc biệt đối với các lưu vực xuyên biên giới còn thiếu dữ liệu.

## **DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN**

1. **Hai Van Khuong**; Giang Tien Nguyen; Don Cao Nguyen; Bich Thi Ngoc Do; Minh Tran Duc Dang; A new framework for quantifying the impacts of climate variability and human activities on streamflow variation with an application to the upper Da river basin; Climatic Change, 2025, 178:234, doi: 10.1007/s10584-025-04072-6;
2. **Khuong Van Hai**; Dao Ba Huy; Nguyen Tien Giang; Developing Operation Rules for Reservoirs in the Upper Da River Basin Using Multi-source Remote Sensing Data; VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences. 2025, vol. 41, no. 1S, pp. 1–14, doi: 10.25073/2588-1094/VNUEES.5389;
3. **Khuong Van Hai**; Giang Nguyen Tien; Do Thi Ngoc Bich; Applying the variable infiltration capacity (VIC) model to reconstructing streamflow data in the Da River basin at MuongTe hydrological station. Journal of Hydro-Meteorology. 2024, vol. 09, no. 20, pp. 52–65, doi: 10.36335/VNJHM.2024(20).52-65;

4. Vinh Ngoc Tran; Hanh Duc Nguyen; **Hai Van Khuong**; Huy Ba Dao; Quan Huu Minh Le; Chi Que Nguyen; Giang Tien Nguyen; Reconstructing Long-Term Daily Streamflow Data at the Discontinuous Monitoring Station in the Ungauged Transboundary Basin Using Machine Learning. *Water Resources Management*. 2025, vol. 39, no. 7, pp. 3327–3348, doi: 10.1007/S11269-025-04109-6.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### Tiếng việt

1. Nguyễn Lan Châu (2006), Nghiên cứu xây dựng công nghệ dự báo lũ sông Đà phục vụ điều tiết hồ chứa Hòa Bình trong công tác phòng chống lũ lụt, *Báo cáo tổng kết đề tài*, Hà Nội.
2. Trần Mạnh Cường (2024), Nghiên cứu đánh giá tác động của hệ thống hồ chứa và sử dụng đất ngoài lãnh thổ Việt Nam trên lưu vực sông Đà ảnh hưởng đến biến đổi dòng chảy và hàm lượng phù sa bùn cát vào Việt Nam, *Báo cáo tổng kết đề tài*, Hà Nội.
3. Nguyễn Đức Điện (2020), Xây dựng phần mềm tích hợp phục vụ công tác dự báo lũ và tư vấn vận hành liên hồ chứa cho hệ thống sông Hồng, *Báo cáo tổng kết đề tài*, Hà Nội.
4. Nguyễn Đăng Giáp (2025), Nghiên cứu xây dựng phương pháp, công nghệ tính toán, dự báo dòng chảy lũ đến các hồ chứa trên lưu vực sông Đà, *Báo cáo tổng kết đề tài*, Hà Nội.
5. Nguyễn Tiên Giang (2025), Nghiên cứu xây dựng phương pháp, công nghệ dự báo dòng chảy mùa cạn, thời hạn 10 ngày, tháng, mùa đến biên giới Việt – Trung, *Báo cáo tổng kết đề tài, Báo cáo chuyên đề, Dữ liệu liệu và sản phẩm thuộc đề tài DTDL.CN-06/23*, Hà Nội.
6. Vũ Thị Minh Huệ (2017), *Nghiên cứu chế độ vận hành tích nước trong thời kỳ mùa lũ cho hệ thống hồ chứa bậc thang Hòa Bình và Sơn La*, Luận án Tiến sĩ thủy lợi, Trường Đại học Thủy lợi, Hà Nội.
7. Đặng Đình Khá (2021), *Nghiên cứu tính toán dòng chảy cho lưu vực thiếu/không có số liệu quan trắc (áp dụng cho lưu vực sông Mê Công)*, Luận án Tiến sĩ Thủy văn, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Hà Nội.

8. Bùi Đình Lập (2017), Nghiên cứu xây dựng công nghệ dự báo dòng chảy lũ đến các hồ chứa lớn trên hệ thống sông Hồng, *Báo cáo tổng kết đề tài*, Hà Nội.
9. Bùi Huyền Linh và Trần Anh Phương (2021), “Đánh giá ảnh hưởng của các hồ chứa đến dòng chảy trên sông Đà”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, vol. 731, pp. 97–107, doi: 10.36335/VNJHM.2021(731).97-107.
10. Nguyễn Viết Thi (1994), Dự báo tổng lượng dòng chảy và đỉnh lũ hồ chứa Hòa Bình thời kỳ tích nước 21/VII - 31/X, *Báo cáo tổng kết đề tài*, Hà Nội.
11. Nguyễn Viết Thi (2008), Xây dựng công nghệ dự báo dòng chảy 5 ngày đến các hồ chứa lớn trên hệ thống sông Đà và sông Lô, *Báo cáo tổng kết đề tài*, Hà Nội.
12. Bộ công thương (2018), Quy trình vận hành thủy điện Lai Châu, *Bộ công thương*.
13. UBND tỉnh Lai Châu (2021), Quy trình vận hành hồ chứa thủy điện Pắc Ma, *UBND tỉnh Lai Châu*.

## **Tiếng Anh**

14. F. A. Abdulla, D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and J. A. Smith (1996), “Application of a macroscale hydrologic model to estimate the water balance of the Arkansas-Red River Basin”, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 101, no. D3, pp. 7449–7459, doi: 10.1029/95JD02416.
15. N. Addor, A. J. Newman, N. Mizukami, and M. P. Clark (2017), “The CAMELS data set: catchment attributes and meteorology for large-sample studies”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, no. 10, pp. 5293–5313, doi: 10.5194/hess-21-5293-2017.
16. O. E. Adeyeri, P. Laux, A. E. Lawin, and J. Arnault (2020), “Assessing the impact of human activities and rainfall variability on the river discharge of Komadugu-Yobe Basin, Lake Chad Area”, *Environmental Earth Sciences*, vol. 79, no. 6, p. 143, doi: 10.1007/s12665-020-8875-y.

17. H. Alexandersson (1986), “A homogeneity test applied to precipitation data”, *Journal of climatology*, vol. 6, no. 6, pp. 661–675, doi: 10.1002/JOC.3370060607.
18. B. Allen, J. D. E. Creighton, É. É. Flanagan, and J. D. Romano (2002), “Robust statistics for deterministic and stochastic gravitational waves in non-Gaussian noise: Frequentist analyses”, *Physical Review D*, vol. 65, no. 12, p. 122002, doi: 10.1103/PhysRevD.65.122002.
19. D. T. Anh, L. P. Hoang, M. D. Bui, and P. Rutschmann (2019), “Modelling seasonal flows alteration in the Vietnamese Mekong Delta under upstream discharge changes, rainfall changes and sea level rise”, *International Journal of River Basin Management*, vol. 17, no. 4, pp. 435–449, doi: 10.1080/15715124.2018.1505735.
20. S. Ansari Mahabadi and M. Delavar (2024), “Evaluation and comparison of different methods for determining the contribution of climatic factors and direct human interventions in reducing watershed discharge”, *Ecological Indicators*, vol. 158, p. 111480, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2023.111480.
21. S. A. Archfield et al. (2015), “Accelerating advances in continental domain hydrologic modeling”, *Water Resources Research*, vol. 51, no. 12, pp. 10078–10091, doi: 10.1002/2015WR017498.
22. J. G. Arnold and N. Fohrer (2005), “SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling”, *Hydrological Processes*, vol. 19, no. 3, pp. 563–572, doi: 10.1002/HYP.5611.
23. G. Babatunde, A. A. Emmanuel, O. R. Oluwaseun, O. B. Bunmi, and A. E. Precious (2019), “Impact of Climatic Change on Agricultural Product Yield Using K-Means and Multiple Linear Regressions”, *International Journal of Education and Management Engineering*, vol. 3, pp. 16–26, doi: 10.5815/ijeme.2019.03.02.

24. B. Bai, Y. Tan, G. Donchyts, A. Haag, and A. Weerts (2020), “A Simple Spatio–Temporal Data Fusion Method Based on Linear Regression Coefficient Compensation”, *Remote Sensing*, vol. 12, no. 23, p. 3900, doi: 10.3390/RS12233900.
25. J. Bras, H. K. T. De Jonge, and J. P. R. Van Merkesteyn (1990), “Osteoradionecrosis of the mandible: pathogenesis”, *American Journal of Otolaryngology*, vol. 11, no. 4, pp. 244–250, doi: 10.1016/0196-0709(90)90084-9
26. A. Castelletti, S. Galelli, M. Restelli, and R. Soncini-Sessa (2010), “Tree-based reinforcement learning for optimal water reservoir operation”, *Water Resources Research*, vol. 46, no. 9, doi: 10.1029/2009WR008898.
27. J. Chen and A. K. Gupta (2000), “Parametric Statistical Change Point Analysis”, *Birkhauser Boston*, doi: 10.1007/978-1-4757-3131-6.
28. Y. Cheng, H. He, N. Cheng, and W. He (2016), “The Effects of Climate and Anthropogenic Activity on Hydrologic Features in Yanhe River”, *Advances in Meteorology*, vol. 2016, no. 1, p. 5297158, doi: <https://doi.org/10.1155/2016/5297158>.
29. K. A. Cherkauer and D. P. Lettenmaier (1999), “Hydrologic effects of frozen soils in the upper Mississippi River basin”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 104, no. D16, pp. 19599–19610, doi: 10.1029/1999JD900337.
30. Z. Z. Chi, C. Shoemaker, and J. Woodbury (2013), “Impact of human activities on stream flow in the Biliu River basin, China”, *Hydrological Processes*, vol. 27, pp. 2509–2523, doi: 10.5555/20133258507.
31. Z. Cong, D. Yang, B. Gao, H. Yang, and H. Hu (2009), “Hydrological trend analysis in the Yellow River basin using a distributed hydrological model”, *Water Resources Research*, vol. 45, no. 7, doi: 10.1029/2008WR006852.

32. A. C. Costa and A. Soares (2009), “Homogenization of climate data: review and new perspectives using geostatistics”, *Mathematical Geosciences*, vol. 41, no. 3, pp. 291–305, doi: 10.1007/s11004-008-9203-3.
33. G. Coxon et al. (2020), “CAMELS-GB: hydrometeorological time series and landscape attributes for 671 catchments in Great Britain”, *Earth System Science*, vol. 12, no. 4, pp. 2459–2483, doi: 10.5194/ESSD-12-2459-2020.
34. B. Davison, A. Pietroniro, V. Fortin, R. Leconte, M. Mamo, and A. M. K. Yau (2016), “What is missing from the prescription of hydrology for land surface schemes?”, *Journal of Hydrometeorology*, doi: 10.1175/JHM-D-15-0172.1.
35. A. T. DeGaetano (2006), “Attributes of Several Methods for Detecting Discontinuities in Mean Temperature Series”, *Journal of Climate*, vol. 19, no. 5, pp. 838–853, doi: 10.1175/JCLI3662.1.
36. E. M. Demaria, B. Nijssen, and T. Wagener (2007), “Monte Carlo sensitivity analysis of land surface parameters using the Variable Infiltration Capacity model”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 112, no. D11, doi: <https://doi.org/10.1029/2006JD007534>.
37. M. Didarul, I. Bhuyan, M. Islam, M. Ebrahim, and K. Bhuiyan (2018), “A Trend Analysis of Temperature and Rainfall to Predict Climate Change for Northwestern Region of Bangladesh”, *American Journal of Climate Change*, vol. 7, pp. 115–134, doi: 10.4236/ajcc.2018.72009.
38. N. S. Diffenbaugh, F. Giorgi, and J. S. Pal (2008), “Climate change hotspots in the United States”, *Geophysical Research Letters*, vol. 35, no. 16, doi: 10.1029/2008GL035075.
39. Q. Duan, S. Sorooshian, and V. Gupta (1992), “Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models”, *Water Resources Research*, vol. 28, no. 4, pp. 1015–1031, doi: 10.1029/91WR02985.

40. Q. Duan, S. Sorooshian, and V. K. Gupta (1994), “Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models”, *Journal of Hydrology*, vol. 158, no. 3–4, pp. 265–284, doi: 10.1016/0022-1694(94)90057-4.
41. T. Duc Dang, A. F. M. Kamal Chowdhury, and S. Galelli (2020), “On the representation of water reservoir storage and operations in large-scale hydrological models: Implications on model parameterization and climate change impact assessments”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 24, no. 1, pp. 397–416, doi: 10.5194/HESS-24-397-2020.
42. J. F. Ducre-Robitaille, L. A. Vincent, and G. Boulet (2003), “Comparison of techniques for detection of discontinuities in temperature series”, *International Journal of Climatology*, vol. 23, no. 9, pp. 1087–1101, doi: 10.1002/JOC.924.
43. D. R. Easterling and T. C. Peterson (1995), “A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series”, *International Journal of Climatology*, vol. 15, no. 4, pp. 369–377, doi: 10.1002/JOC.3370150403.
44. A. Efstratiadis and D. Koutsoyiannis (2010), “One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: a review,” *Hydrological Sciences Journal*, vol. 55, no. 1, pp. 58–78, doi: 10.1080/02626660903526292.
45. K. Engeland et al. (2016), “Effects of uncertainties in hydrological modelling. A case study of a mountainous catchment in Southern Norway”, *Journal of Hydrology*, vol. 536, pp. 147–160, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.036>.
46. T. G. Farr et al. (2007), “The Shuttle Radar Topography Mission”, *Reviews of Geophysics*, vol. 45, no. 2, doi: 10.1029/2005RG000183.

47. A. C. Favre, S. El Adlouni, L. Perreault, N. Thiémondge, and B. Bobée (2004), “Multivariate hydrological frequency analysis using copulas”, *Water resources research*, vol. 40, no. 1, doi: 10.1029/2003WR002456.
48. S. Feng, H. Chen, Y. Wang, C. Chen, and J. Wang (2023), “Duality and Economic Methods to Reveal and Interpret Marginal Market Values Based on a Weekly Scheduling Model of Cascaded Hydropower Reservoirs”, *Available at SSRN*, doi: 10.2139/SSRN.4388413.
49. G. Gan, Y. Liu, and G. Sun (2021), “Understanding interactions among climate, water, and vegetation with the Budyko framework”, *Earth-Science Reviews*, vol. 212, p. 103451, doi: 10.1016/J.EARSCIREV.2020.103451.
50. H. Gao, C. Birkett, and D. P. Lettenmaier (2012), “Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing”, *Water Resources Research*, vol. 48, no. 9, doi: 10.1029/2012WR012063.
51. H. Gao et al. (2010), “Water budget record from Variable Infiltration Capacity (VIC) model”.
52. Y. Getahun et al. (2021), “Trend and change-point detection analyses of rainfall and temperature over the Awash River basin of Ethiopia”, *Heliyon*, vol. 7, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08024
53. M. Gocic and S. Trajkovic (2013), “Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen’s slope estimator statistical tests in Serbia”, *Global and Planetary Change*, vol. 100, pp. 172–182, doi: 10.1016/J.GLOPLACHA.2012.10.014.
54. H. V. Gupta, L. A. Bastidas, S. Sorooshian, W. J. Shuttleworth, and Z. L. Yang (1999), “Parameter estimation of a land surface scheme using multicriteria methods”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 104, no. D16, pp. 19491–19503, doi: 10.1029/1999JD900154.

55. J. Götzinger and A. Bárdossy (2007), “Comparison of four regionalisation methods for a distributed hydrological model”, *Journal of Hydrology*, vol. 333, no. 2, pp. 374–384, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.008>.
56. Y. S. Güçlü, E. Şişman, and İ. Dabanlı (2020), “Innovative triangular trend analysis”, *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 13, no. 2, doi: 10.1007/S12517-019-5048-Y.
57. I. Haddeland, T. Skaugen, and D. P. Lettenmaier (2006), “Anthropogenic impacts on continental surface water fluxes”, *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no. 8, doi: 10.1029/2006GL026047.
58. K. H. Hamed and A. Ramachandra Rao (1998), “A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data”, *Journal of Hydrology*, vol. 204, no. 1, pp. 182–196, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X).
59. J. Han, C. Miao, J. Gou, H. Zheng, Q. Zhang, and X. Guo (2023), “A new daily gridded precipitation dataset for the Chinese mainland based on gauge observations”, *Earth System Science Data*, vol. 15, no. 7, pp. 3147–3161, doi: 10.5194/essd-15-3147-2023.
60. N. Hanasaki, S. Kanae, and T. Oki (2006), “A reservoir operation scheme for global river routing models”, *Journal of Hydrology*, vol. 327, no. 1–2, pp. 22–41, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2005.11.011.
61. J. M. Hanesiak and X. L. Wang (2005), “Adverse-Weather Trends in the Canadian Arctic”, *Journal of Climate*, vol. 18, no. 16, pp. 3140–3156, doi: 10.1175/JCLI3505.1.
62. R. D. Harmel and P. K. Smith(2007), “Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling”, *Journal of Hydrology*, vol. 337, no. 3–4, pp. 326–336.
63. R. D. Harmel, P. K. Smith, and K. W. Migliaccio (2010), “Modifying goodness-of-fit indicators to incorporate both measurement and model uncertainty in

- model calibration and validation”, *Transactions of the ASABE*, vol. 53, no. 1, pp. 55–63.
64. J. S. Hecht, G. Lacombe, M. E. Arias, T. D. Dang, and T. Piman (2019), “Hydropower dams of the Mekong River basin: A review of their hydrological impacts”, *Journal of Hydrology*, vol. 568, pp. 285–300, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.045>.
  65. P. R. Houser, H. V. Gupta, W. J. Shuttleworth, and J. S. Famiglietti (2001), “Multiobjective calibration and sensitivity of a distributed land surface water and energy balance model”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 106, no. D24, pp. 33421–33433, doi: 10.1029/2000JD900803.
  66. T. Houska, P. Kraft, A. Chamorro-Chavez, and L. Breuer (2015), “SPOTting Model Parameters Using a Ready-Made Python Package”, *PLoS One*, vol. 10, no. 12, p. e0145180, doi: 10.1371/journal.pone.0145180.
  67. Y. Hu, W. Duan, Y. Chen, S. Zou, P. M. Kayumba, and N. Sahu (2021), “An integrated assessment of runoff dynamics in the Amu Darya River Basin: Confronting climate change and multiple human activities, 1960–2017”, *Journal of Hydrology*, vol. 603, p. 126905, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2021.126905.
  68. D. Hughes, S. Birkinshaw, and G. Parkin (2021), “A method to include reservoir operations in catchment hydrological models using SHETRAN”, *Environmental Modelling & Software*, vol. 138, p. 104980, doi: 10.1016/J.ENVSOFT.2021.104980.
  69. B. Ibrahim, H. Karambiri, J. Polcher, H. Yacouba, and P. Ribstein (2013), “Changes in rainfall regime over Burkina Faso under the climate change conditions simulated by 5 regional climate models”, *Climate Dynamics*, vol. 42, no. 5, pp. 1363–1381, doi: 10.1007/S00382-013-1837-2.

70. A. B. Ibrahim and I. Cordery (1995), “Estimation of recharge and runoff volumes from ungauged catchments in eastern Australia”, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 40, no. 4, pp. 499–515, doi: 10.1080/02626669509491435.
71. IPCC (2014), “Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability”, *Cambridge University*, vol. 1, doi: DOI: 10.1017/CBO9781107415379.
72. S. Isik, E. Dogan, L. Kalin, M. Sasal, and N. Agiralioglu (2008), “Effects of anthropogenic activities on the Lower Sakarya River,” *Catena (Amst)*., vol. 75, pp. 172–181, doi: 10.1016/J.CATENA.2008.06.001.
73. R. K. Jaiswal, A. K. Lohani, and H. L. Tiwari (2015), “Statistical analysis for change detection and trend assessment in climatological parameters”, *Environmental Processes*, vol. 2, no. 4, pp. 729–749, doi: 10.1007/S40710-015-0105-3.
74. S. Jiang et al. (2023), “Quantifying the impact of climate change and human activities on the eco-hydrological regimes of the Weihe River Basin, Northwest China”, *Hydrology Research*, vol. 54, no. 1, pp. 49–64, doi: 10.2166/NH.2022.194.
75. S. Jiang et al. (2021), “Development of a comprehensive framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on river hydrological health variation”, *Journal of Hydrology*, vol. 600, p. 126566, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2021.126566.
76. S. Jo, G. Kim, and J. J. Jeon (2016), “Bayesian analysis to detect abrupt changes in extreme hydrological processes”, *Journal of Hydrology*, vol. 538, pp. 63–70, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2016.03.065.
77. C. Jothityangkoon and M. Sivapalan (2003), “Towards estimation of extreme floods: examination of the roles of runoff process changes and floodplain flows”,

- Journal of Hydrology*, vol. 281, no. 3, pp. 206–229, doi: 10.1016/S0022-1694(03)00237-3.
78. J. B. Wijngaard, A. M. G. Klein Tank and G. P. Konnen (2003), “Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series”, *International Journal of Climatology*, vol. 23, pp. 679–692, doi: 10.1002/joc.906.
  79. Khoi, D. N., Nguyen, V. T., Sam, T. T., & Nhi, P. T. T. (2019), “Evaluation on effects of climate and land-use changes on streamflow and water quality in the La Buong River Basin, Southern Vietnam”, *Sustainability (Switzerland)*, 11(24), doi: 10.3390/SU11247221.
  80. J. S. Kimball, S. W. Running, and R. Nemani (1997), “An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature”, *Agricultural and forest meteorology*, vol. 85, no. 1–2, pp. 87–98.
  81. O. Kisi and M. Ay (2014), “Comparison of Mann–Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey”, *Journal of Hydrology*, vol. 513, pp. 362–375, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2014.03.005.
  82. KJ Worsley (1979), “On the likelihood ratio test for a shift in location of normal populations”, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 74, no. 366a, pp. 365–367, doi: 10.1080/01621459.1979.10482519.
  83. W. J. M. Knoben, J. E. Freer, and R. A. Woods (2019), “Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, no. 10, pp. 4323–4331.
  84. G. Konapala and A. Mishra (2020), “Dynamics of virtual water networks: Role of national socio-economic indicators across the world,” *Journal of Hydrology*, vol. 589, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2020.125171.
  85. F. Kratzert, D. Klotz, G. Shalev, G. Klambauer, S. Hochreiter, and G. Nearing (2019), “Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors

- via machine learning applied to large-sample datasets”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, no. 12, pp. 5089–5110, doi: 10.5194/HESS-23-5089-2019.
86. P. Krause, D. P. Boyle, and F. Bäse (2005), “Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment”, *Advances in geosciences*, vol. 5, pp. 89–97, doi: <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
  87. L. Le Ngo, H. Madsen, and D. Rosbjerg (2007), “Simulation and optimisation modelling approach for operation of the Hoa Binh reservoir, Vietnam”, *Journal of Hydrology*, vol. 336, no. 3–4, pp. 269–281, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2007.01.003.
  88. D. R. Legates and G. J. McCabe Jr (1999), “Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation”, *Water Resources Research*, vol. 35, no. 1, pp. 233–241, 1999.
  89. D. R. Legates and G. J. McCabe Jr (1999), “Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation”, *Water Resources Research*, vol. 35, no. 1, pp. 233–241, 1999.
  90. Y. Li *et al.* (2016), “Contributions of Climate Variability and Human Activities to Runoff Changes in the Upper Catchment of the Red River Basin, China”, *Water*, vol. 8, no. 9, p. 414, doi: 10.3390/W8090414.
  91. H. Li *et al.* (2024), “ChinaRiceCalendar – seasonal crop calendars for early, middle, and late-season rice in China”, *Earth System Science Data*, vol. 16, no. 4, pp. 1689–1701, doi: 10.5194/ESSD-16-1689-2024.
  92. W. Liang *et al.* (2015), “Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China’s Loess Plateau”, *Water Resources Research*, vol. 51, no. 8, pp. 6500–6519, doi: 10.1002/2014WR016589.

93. X. Liang, D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges (1994), “A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, no. D7, pp. 14415–14428, doi: 10.1029/94jd00483.
94. C. E. M. Lloyd, J. E. Freer, A. L. Collins, P. J. Johnes, and J. I. Jonesv (2014), “Methods for detecting change in hydrochemical time series in response to targeted pollutant mitigation in river catchments”, *Journal of Hydrology*, vol. 514, pp. 297–312, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2014.04.036.
95. D. Lohmann, R. Nolte-holube, and E. Raschke (1996), “A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes”, *Tellus A*, vol. 48, no. 5, pp. 708–721, doi: 10.1034/J.1600-0870.1996.T01-3-00009.X.
96. D. Lohmann, E. Raschke, B. Nijssen, and D. P. Lettenmaier (1998), “Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model”, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 43, no. 1, pp. 131–141, doi: 10.1080/02626669809492107.
97. D. A. G. Lohmann, R. Nolte-Holube, and E. Raschke (1996), “A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes”, *Tellus A*, vol. 48, no. 5, pp. 708–721, doi: 10.1034/J.1600-0870.1996.T01-3-00009.X
98. N. D. LUONG (2017), “Application of VIC hydrological model for simulating river flow of red river system to support water resource management”, *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, vol. 11, no. 6, pp. 198–204, Apr. 2017.
99. M. Ma, Z. Wang, H. Cui, W. Wang, and L. Jiang (2023), “A new multi-scalar framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on streamflow variation”, *Water Supply*, vol. 23, no. 1, pp. 259–276, doi: 10.2166/WS.2022.432.

100. B. B. Mandelbrot and J. R. Wallis (1969), “Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence”, *Water resources research*, vol. 5, no. 5, pp. 967–988, doi: 10.1029/WR005I005P00967.
101. G. J. McCabe and D. M. Wolock (2002), “A step increase in streamflow in the conterminous United States”, *Geophysical Research Letters*, vol. 29, no. 24, pp. 38–1, doi: 10.1029/2002GL015999.
102. Melissa McCracken and Aaron T. Wolf (2019), “Updating the Register of International River Basins of the world”, *International Journal of Water Resources Development*, vol. 35, no. 5, pp. 732–782, doi: 10.1080/07900627.2019.1572497.
103. P. A. Mendoza et al. (2015), “Are we unnecessarily constraining the agility of complex process-based models?”, *Water Resources Research*, vol. 51, no. 1, pp. 716–728, doi: 10.1002/2014WR015820.
104. 104. A. F. Militino, M. Moradi, and M. D. Ugarte (2020), “On the Performances of Trend and Change-Point Detection Methods for Remote Sensing Data”, *Remote Sensing*, vol. 12, no. 6, p. 1008, doi: 10.3390/RS12061008.
105. P. C. D. Milly et al. (2008), “Climate change: Stationarity is dead: Whither water management?”, *Science*, vol. 319, no. 5863, pp. 573–574, doi: 10.1126/SCIENCE.1151-915.
106. P. C. D. Milly, K. A. Dunne, and A. V Vecchia (2005), “Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate”, *Nature*, vol. 438, no. 7066, pp. 347–350, doi: 10.1038/nature04312.
107. C. ming Ji, T. Zhou, and H. tao Huang (2014), “Operating Rules Derivation of Jinsha Reservoirs System with Parameter Calibrated Support Vector

- Regression”, *Water Resources Management*, vol. 28, no. 9, pp. 2435–2451, doi: 10.1007/S11269-014-0610-6.
108. H. Moradkhani and S. Sorooshian (2008), “General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis”, *Hydrological Modelling and the Water Cycle*, pp. 1–24, doi: 10.1007/978-3-540-77843-1\_1.
  109. H. Moradkhani, K. Hsu, and S. Sorooshian (2008), “Toward improved hydrologic prediction with reduced uncertainty using sequential multi,” in *World Environmental and Water Resources Congress 2008*, p. 316. doi: 10.1061/40976(316)576.
  110. D. N. Moriasi, et al. (2007), “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations”, *Transactions of the ASABE*, vol. 50, no. 3, pp. 885–900.
  111. D. N. Moriasi, M. W. Gitau, N. Pai, and P. Daggupati (2015), “Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria”, *Transactions of the ASABE*, vol. 58, no. 6, pp. 1763–1785.
  112. N. Nanding et al. (2021), “Uncertainty assessment of radar-raingauge merged rainfall estimates in river discharge simulations”, *Journal of Hydrology*, vol. 603, p. 127093, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2021.127093.
  113. J. E. Nash and J. V Sutcliffe (1970), “River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles”, *Journal of Hydrology*, vol. 10, no. 3, pp. 282–290.
  114. O. N. Nasonova, Y. M. Gusev, and Y. E. Kovalev (2009), “Investigating the ability of a land surface model to simulate streamflow with the accuracy of hydrological models: A case study using MOPEX materials”, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 10, pp. 1128–1150, doi: 10.1175/2009JHM1083.1.

115. United Nations (1997), “Convention on the Law of Non-navigational Uses of International Watercourses (1997)”, *United Nations*.
116. J. A. Nelder and R. Mead (1965), “A Simplex Method for Function Minimization”, *The Computer Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 308–313, doi: 10.1093/comjnl/7.4.308.
117. T. G. Nguyen et al. (2022), “Assessment of upbasin dam impacts on streamflow at Chiang Saen gauging station during the period 1960–2020 in the context of statistical studies”, *River Research and Applications*, vol. 38, no. 7, pp. 1237–1253, doi: 10.1002/RRA.4011.
118. T. Nguyen-Xuan et al. (2016), “The Vietnam Gridded Precipitation (VnGP) Dataset: Construction and Validation”, *SOLA*, vol. 12, no. 0, pp. 291–296, doi: 10.2151/SOLA.2016-057.
119. F. Papa and F. Frappart (2021), “Surface Water Storage in Rivers and Wetlands Derived from Satellite Observations: A Review of Current Advances and Future Opportunities for Hydrological Sciences”, *Remote Sensing*, vol. 13, no. 20, p. 4162, doi: 10.3390/RS13204162.
120. C. Pascal et al. (2024), “Monitoring Indian ungauged small reservoirs volume from remote sensing: Feasibility, bias and perspectives”, *PLOS Water*, vol. 3, no. 12, doi: 10.1371/JOURNAL.PWAT.0000260.
121. P. Döll, F. Kaspar, and B. Lehner (2003), “A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation,” *Journal of Hydrology*, vol. 270, pp. 105–134, doi: 10.1016/S0022-1694(02)00283-4.
122. A. N. Pettitt (1979), “A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem”, *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. 28, no. 2, pp. 126–135, doi: 10.2307/2346729.
123. M. Pfannerstill, B. Guse, and N. Fohrer (2014), “Smart low flow signature metrics for an improved overall performance evaluation of hydrological

- models”, *Journal of Hydrology*, vol. 510, pp. 447–458, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.044>
124. S. Piao et al. (2010), “The impacts of climate change on water resources and agriculture in China”, *Nature*, vol. 467, no. 7311, pp. 43–51, doi: 10.1038/nature09364.
  125. A. Pietroniro et al. (2007), “Development of the MESH modelling system for hydrological ensemble forecasting of the Laurentian Great Lakes at the regional scale”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, no. 4, pp. 1279–1294, doi: 10.5194/HESS-11-1279-2007.
  126. T. Pohlert (2015), “Projected Climate Change Impact on Soil Erosion and Sediment Yield in the River Elbe Catchment”, *Sediment Matters*, pp. 97–108, doi: 10.1007/978-3-319-14696-6\_7.
  127. Y. Pokhrel, M. Burbano, J. Roush, H. Kang, V. Sridhar, and D. W. Hyndman (2018), “A Review of the Integrated Effects of Changing Climate, Land Use, and Dams on Mekong River Hydrology”, *Water*, vol. 10, pp. 266, doi: 10.3390/w10030266.
  128. Y. N. Pokhrel, F. Felfelani, S. Shin, T. J. Yamada, and Y. Satoh (2017), “Modeling large-scale human alteration of land surface hydrology and climate”, *Geoscience Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 10–, doi: 10.1186/S40562-017-0076-5.
  129. S. Pool, M. Vis, and J. Seibert (2018), “Evaluating model performance: towards a non-parametric variant of the Kling-Gupta efficiency”, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 63, no. 13–14, pp. 1941–1953, doi: 10.1080/02626667.2018.1552002.
  130. T. Razavi and P. Coulibaly (2012), “Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods”, *American Society of Civil Engineers*, vol. 18, no. 8, pp. 958–975, doi: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000690.

131. S. Razavi, B. A. Tolson, L. S. Matott, N. R. Thomson, A. MacLean, and F. R. Seglenieks (2010), “Reducing the computational cost of automatic calibration through model preemption”, *Water Resources Research*, vol. 46, no. 11, p. 11523, doi: 10.1029/2009WR008957.
132. S. Razavi, B. A. Tolson, and D. H. Burn (2012), “Review of surrogate modeling in water resources”, *Water Resources Research*, vol. 48, no. 7, p. 7401, doi: 10.1029/2011WR011527.
133. F. Remondi, P. Burlando, and D. Vollmer (2016), “Exploring the hydrological impact of increasing urbanisation on a tropical river catchment of the metropolitan Jakarta, Indonesia”, *Sustainable Cities and Society*, vol. 20, pp. 210–221, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.10.001>.
134. B. Renard and M. Lang (2007), “Use of a Gaussian copula for multivariate extreme value analysis: Some case studies in hydrology”, *Advances in Water Resources*, vol. 30, pp. 897–912, doi: 10.1016/J.ADVWATRES.2006.08.001.
135. J. Rocha, C. Carvalho-Santos, P. Diogo, P. Beça, J. J. Keizer, and J. P. Nunes (2020), “Impacts of climate change on reservoir water availability, quality and irrigation needs in a water scarce Mediterranean region (southern Portugal)”, *Science of The Total Environment*, vol. 736, p. 139477, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.139477.
136. S. N. Rodionov (2004), “A sequential algorithm for testing climate regime shifts”, *Geophysical Research Letters*, vol. 31, no. 9, doi: 10.1029/2004GL019448.
137. M. Rogger et al. (2017), “Land use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research”, *Water Resources Research*, vol. 53, no. 7, pp. 5209–5219, doi: 10.1002/2017WR020723.
138. K. R. Ryberg, G. A. Hodgkins, and R. W. Dudley (2020), “Change points in annual peak streamflows: Method comparisons and historical change points in

- the United States”, *Journal of Hydrology*, vol. 583, p. 124307, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2019.124307.
139. J. Saedi, M. R. Sharifi, A. Saremi, and H. Babazadeh (2022), “Assessing the impact of climate change and human activity on streamflow in a semiarid basin using precipitation and baseflow analysis”, *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, pp. 1–17, doi: 10.1038/s41598-022-13143-y.
  140. S. Geisser and W. O. Johnson (2006), *Modes of parametric statistical inference*, Book, *University of Minnesota*, Minneapolis
  141. P. C. Shaker Reddy and A. Sureshababu (2019), “An Enhanced Multiple Linear Regression Model for Seasonal Rainfall Prediction”, *International Journal of Sensors Wireless Communications and Control*, vol. 10, no. 4, pp. 473–483, doi: 10.2174/2210327910666191218124350
  142. A. A. Shawul and S. Chakma (2020), “Trend of extreme precipitation indices and analysis of long-term climate variability in the Upper Awash basin, Ethiopia: AA Shawul, S. Chakma”, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 140, no. 1–2, pp. 635–652, doi: 10.1007/S00704-020-03112-8.
  143. R. S. G. Shih-Chieh Kao (2007), “A bivariate frequency analysis of extreme rainfall with implications for design”, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 112, no. 13, doi: 10.1029/2007JD008522.
  144. L. Shuqi, W. Wensheng, Z. Dan, L. Yueqing, and W. Guoqing (2020), “Quantifying the Impacts of Climate Change and Human Activities on Runoff Variation: Case Study of the Upstream of Minjiang River, China”, *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 25, no. 9, p. 5020025, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001980.
  145. M. Sivapalan, G. Blöschl, L. Zhang, and R. Vertessy (2003), “Downward approach to hydrological prediction”, *Hydrological Processes*, vol. 17, no. 11, pp. 2101–2111, doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.1425>.

146. L. J. Slater et al. (2021), “Nonstationary weather and water extremes: A review of methods for their detection, attribution, and management”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 25, no. 7, pp. 3897–3935, doi: 10.5194/HESS-25-3897-2021.
147. X. Song, W. Sun, Y. Zhang, S. Song, J. Li, and Y. Gao (2020), “Using hydrological modelling and data-driven approaches to quantify mining activities impacts on centennial streamflow”, *Journal of Hydrology*, vol. 585, p. 124764, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2020.124764.
148. A. Soukhaphon, I. G. Baird, and Z. S. Hogan, ‘The Impacts of Hydropower Dams in the Mekong River Basin: A Review’, *Water*, Vol. 13, Page 265, vol. 13, no. 3, p. 265, Jan. 2021, doi: 10.3390/W13030265.
149. M. Stojković, A. Ilić, S. Prohaska, and J. Plavšić (2014), “Multi-Temporal Analysis of Mean Annual and Seasonal Stream Flow Trends, Including Periodicity and Multiple Non-Linear Regression”, *Water Resources Management*, vol. 28, no. 12, pp. 4319–4335, doi: 10.1007/S11269-014-0753-5.
150. J. Su, X. Wang, Y. Liang, and B. Chen (2013), “GA-Based Support Vector Machine Model for the Prediction of Monthly Reservoir Storage”, *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 19, no. 7, pp. 1430–1437, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-584.0000915.
151. P. Sun, Q. Wen, Q. Zhang, V. P. Singh, Y. Sun, and J. Li (2018), “Nonstationarity-based evaluation of flood frequency and flood risk in the Huai River basin, China”, *Journal of Hydrology*, vol. 567, pp. 393–404, doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.10.031.
152. S. S. Swain, A. Mishra, C. Chatterjee, and B. Sahoo (2021), “Climate-changed versus land-use altered streamflow: A relative contribution assessment using three complementary approaches at a decadal time-spell”, *Journal of Hydrology*, vol. 596, p. 126064, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2021.126064.

153. TA Buishand (1982), “Some methods for testing the homogeneity of rainfall records”, *Journal of hydrology*, vol. 48, pp. 11–27, doi: 10.1016/0022-1694(82)90066-X.
154. X. Tan, B. Liu, X. Tan, and X. Chen (2022), “Long-Term Water Imbalances of Watersheds Resulting From Biases in Hydroclimatic Data Sets for Water Budget Analyses”, *Water Resources Research*, vol. 58, no. 3, p. e2021WR031209, doi: 10.1029/2021WR031209.
155. X. Tang et al. (2022), “Attribution of climate change and human activities to streamflow variations with a posterior distribution of hydrological simulations”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 26, no. 20, pp. 5315–5339, doi: 10.5194/HESS-26-5315-2022.
156. V. Te Chow, D. R. Maidment, and L. W. Mays (1988), “Applied hydrology”, *McGraw-Hill*, New York.
157. M. Terrier, C. Perrin, A. de Lavenne, V. Andréassian, J. Lerat, and J. Vaze (2021), “Streamflow naturalization methods: a review”, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 66, no. 1, pp. 12–36, doi: 10.1080/02626667.2020.1839080.
158. C. T. E. Teunissen (2024), “An satellite-guided derivation of reservoir Ban Chat”, Bachelor’s thesis, *University of Twente*.
159. P. E. Thornton and S. W. Running (1999), “An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation”, *Agricultural and forest meteorology*, vol. 93, no. 4, pp. 211–228.
160. E. Todini (1996), ‘The ARNO rainfall—runoff model’, *Journal of hydrology*, vol. 175, pp. 339–382, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80016-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80016-3).
161. B. A. Tolson and C. A. Shoemaker (2007), “Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration”, *Water Resources Research*, vol. 43, no. 1, p. 1413, doi: 10.1029/2005WR004723.

162. H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, and G. F. Martinez (2009), “Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling”, *Journal of Hydrology*, vol. 377, no. 1–2, pp. 80–91.
163. A. F. Van Loon et al. (2016), “Drought in the Anthropocene,” *Nature Geoscience*, vol. 9, no. 2, pp. 89–91, doi: 10.1038/ngeo2646.
164. K. van Werkhoven, T. Wagener, P. Reed, and Y. Tang (2008), “Characterization of watershed model behavior across a hydroclimatic gradient”, *Water Resources Research*, vol. 44, no. 1, doi: <https://doi.org/10.1029/2007WR006271>
165. S. M. Vicente-Serrano et al. (2017), “Extreme hydrological events and the influence of reservoirs in a highly regulated river basin of northeastern Spain”, *Journal of Hydrology*, vol. 12, pp. 13–32, doi: 10.1016/J.EJRH.2017.01.004.
166. V. D. Vinh, S. Ouillon, T. D. Thanh, and L. V. Chu (2014), “Impact of the Hoa Binh dam (Vietnam) on water and sediment budgets in the Red River basin and delta”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, no. 10, pp. 3987–4005, doi: 10.5194/HESS-18-3987-2014.
167. N. Voisin et al. (2013), “One-Way coupling of an integrated assessment model and a water resources model: Evaluation and implications of future changes over the US Midwest”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 17, no. 11, pp. 4555–4575, doi: 10.5194/HESS-17-4555-2013.
168. Y. Wada et al. (2017), “Human–water interface in hydrological modelling: current status and future directions”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, pp. 4169–4193, doi: 10.5194/hess-21-4169-2017.
169. L. Wang et al. (2022), “Comprehensive machine-learning survival framework develops a consensus model in large-scale multicenter cohorts for pancreatic cancer”, *Elife*, vol. 11, doi: 10.7554/ELIFE.80150.

170. G. Wang et al. (2017), “Investigating causes of changes in runoff using hydrological simulation approach”, *Applied Water Science*, vol. 7, no. 5, pp. 2245–2253, doi: 10.1007/S13201-016-0396-1/TABLES/2.
171. J. Wang, Y. Hong, J. Gourley, P. Adhikari, L. Li, and F. Su (2010), “Quantitative assessment of climate change and human impacts on long-term hydrologic response: a case study in a sub-basin of the Yellow River, China”, *International Journal of Climatology*, vol. 30, no. 14, pp. 2130–2137, doi: 10.1002/JOC.2023.
172. H. H. Ware, S. W. Chang, J. E. Lee, and I. M. Chung (2024), “Evaluating the Hydrological Impact of Reservoir Operation on Downstream Flow of Seomjin River Basin: SWAT Model Approach”, *Water*, vol. 16, no. 24, p. 3584, doi: 10.3390/W16243584.
173. X. Wei, S. Cai, P. Ni (2020), “Impacts of climate change and human activities on the water discharge and sediment load of the Pearl River, southern China”, *Scientific Reports*, vol. 10, p. 16743, doi: 10.1038/s41598-020-73939-8.
174. B. L. Welch (1947), “The generalization of Student’s problem when several different population variances are involved”, *Oxford Academic*, vol. 34, no. 1–2, pp. 28–35, doi: 10.1093/BIOMET/34.1-2.28.
175. R. L. Wilby and I. Harris (2006), “A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK”, *Water resources research*, vol. 42, no. 2, doi: 10.1029/2005WR004065.
176. A. T. Wolf, J. A. Natharius, J. J. Danielson, B. S. Ward, and J. K. Fender (1999), “International river basins of the world”, *International Journal of Water Resources Development*, vol. 15, no. 4, pp. 387–427, doi: 10.1080/07900629948682.
177. E. F. Wood, D. P. Lettenmaier, and V. G. Zartarian (1992), “A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation

- models”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 97, no. D3, pp. 2717–2728, doi: 10.1029/91JD01786.
178. W. Wu, Y. Li, X. Luo, Y. Zhang, X. Ji, and X. Li (2019), “Performance evaluation of the CHIRPS precipitation dataset and its utility in drought monitoring over Yunnan Province, China”, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 10, no. 1, pp. 2145–2162, doi: 10.1080/19475705.2019.1683082.
  179. R. Xu et al. (2023), “Quantifying climate and anthropogenic impacts on runoff using the SWAT model, a Budyko-based approach and empirical methods”, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 68, no. 10, pp. 1358–1371, doi: 10.1080/02626667.2023.2218551.
  180. I. Yoosefdoost, M. Basirifard, and J. Álvarez-García (2021), “Reservoir Operation Management with New Multi-Objective (MOEPO) and Metaheuristic (EPO) Algorithms”, *Water*, vol. 14, no. 15, p. 2329, doi: 10.3390/W14152329.
  181. D. Zhang et al. (2018), “Modeling and simulating of reservoir operation using the artificial neural network, support vector regression, deep learning algorithm”, *Journal of Hydrology*, vol. 565, pp. 720–736, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2018.08.050.
  182. D. Zhang et al. (2019), “Simulating Reservoir Operation Using a Recurrent Neural Network Algorithm”, *Water*, vol. 11, no. 4, p. 865, doi: 10.3390/W11040865.
  183. R. Zhong, T. Zhao, and X. Chen (2020), “Hydrological Model Calibration for Dammed Basins Using Satellite Altimetry Information”, *Water Resources Research*, vol. 56, no. 8, p. e2020WR027442, doi: 10.1029/2020WR027442.
  184. S. Zhou, X. Liang, J. Chen, and P. Gong (2004), “An assessment of the VIC-3L hydrological model for the Yangtze River basin based on remote sensing: a case

study of the Baohe River basin,” *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 30, no. 5, pp. 840–853, doi: 10.5589/M04-031.

### Website

185. J. R. Juan Carlos Sanchez (2014), “Transboundary Water Governance”, Accessed: Apr. 08, 2026. [Online]. Available: [www.iucn.org/law](http://www.iucn.org/law)
186. European Space Agency, “ESA - Sentinel-1 operations”. Accessed: Aug. 28, 2025. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Operations/Sentinel-1\\_operations](https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinel-1_operations)
187. European Space Agency, “Sentinel-2 MSI Level-1C data”, Copernicus Programme. Accessed: Apr. 28, 2025. [Online]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/copernicus/-sentinel-1>
188. ECMWF, “Datasets | ECMWF”. Accessed: Jun. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets>
189. JAXA EORC, “ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D - 30m” (AW3D30) Version 4.0”.
190. “Hydro Power Plants Across the Globe (World Map) | database.earth”. Accessed: Apr. 24, 2025. [Online]. Available: <https://database.earth/energy/power-plants/hydro-power>
191. Sở Tài nguyên Nước tỉnh Vân Nam (2020) “ Báo cáo tài nguyên nước tỉnh Vân Nam”. Accessed: Jan. 21, 2026. [Online]. Available: <https://wcb.yn.gov.cn/html/shuiziyuangongbao/>
192. Baidu, “Nhà máy thủy điện Shimenkan - Bách khoa toàn thư Baidu”. Accessed: Dec. 26, 2025. [Online]. Available: <https://baike.baidu.com/item/%E7%9F%B3%E9%97%A8%E5%9D%8E%E6%B0%B4%E7%94%B5%E7%AB%99/7123406>

193. G. Fischer, F. Nachtergaele, S. Prieler, H. T. Van Velthuizen, L. Verelst, and D. Wiberg (2008), “Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008)”, *IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy*, vol. 10.
194. ESA (2017), “Land Cover CCI PRODUCT USER GUIDE VERSION 2.0”, Accessed: Jun. 05, 2024. [Online]. Available: [https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2\\_2.0.pdf](https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf)

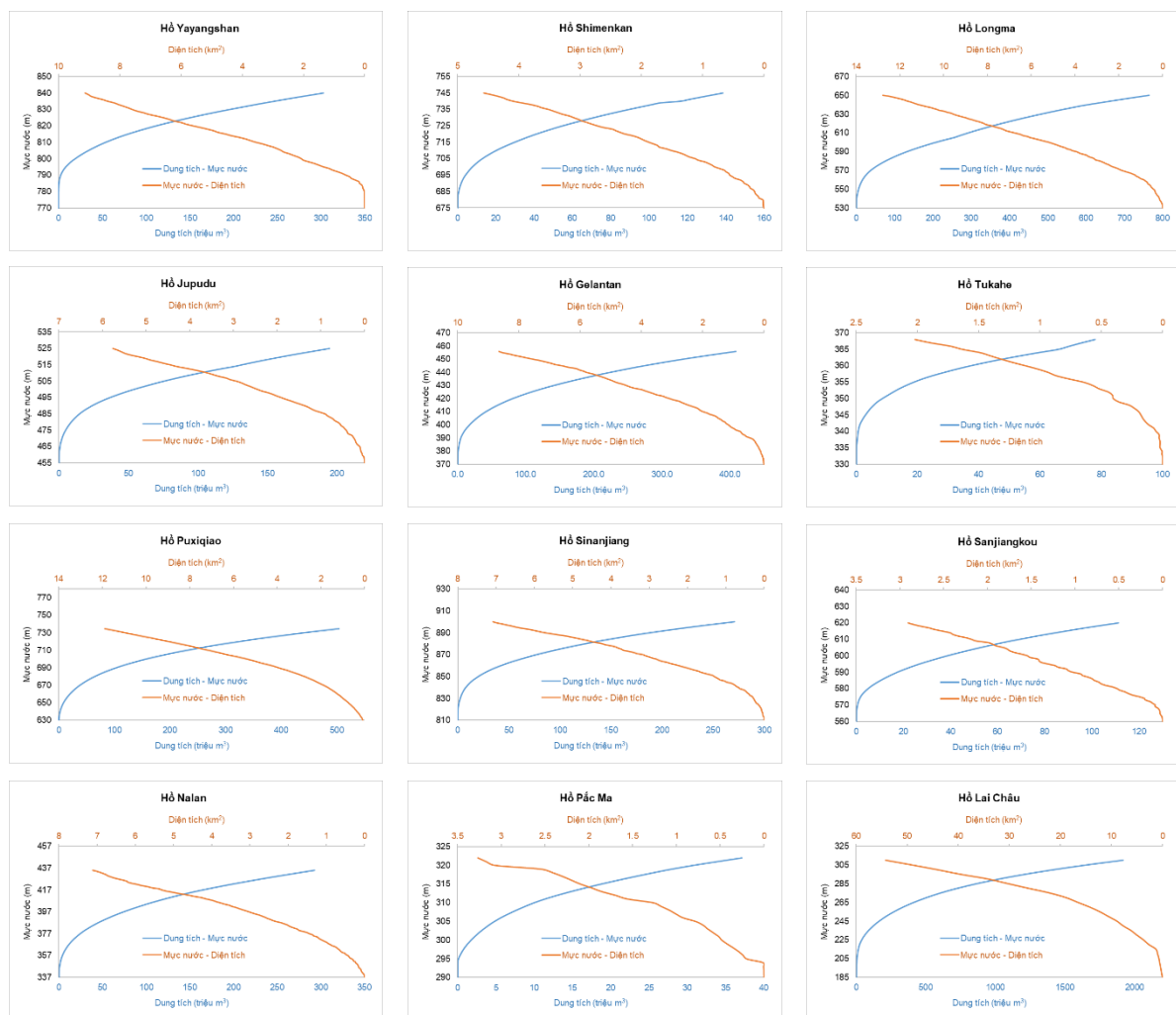
## PHỤ LỤC

### 1. PHÂN TÍCH, XỬ LÝ THAM SỐ HỒ CHỨA TỪ DỮ LIỆU VIỄN THÁM

#### 1.1. Kết quả xây dựng quy trình vận hành của các hồ chứa từ dữ liệu viễn thám

##### 1.1.1. Các đường đặc tính lòng hồ

Các đường đặc tính lòng hồ (quan hệ mực nước – diện tích – dung tích) của 10 hồ chứa phía Trung Quốc được xác định từ các ảnh viễn thám và DEM như đã trình bày ở trên. Hai hồ chứa là Pắc Ma và Lai Châu được tham khảo theo quy trình vận hành thực tế của từng hồ [12, 13]. Hình 1-1 thể hiện các đường đặc tính lòng hồ của 10 hồ ở Trung Quốc và 2 hồ Pắc Ma, Lai Châu ở Việt Nam.

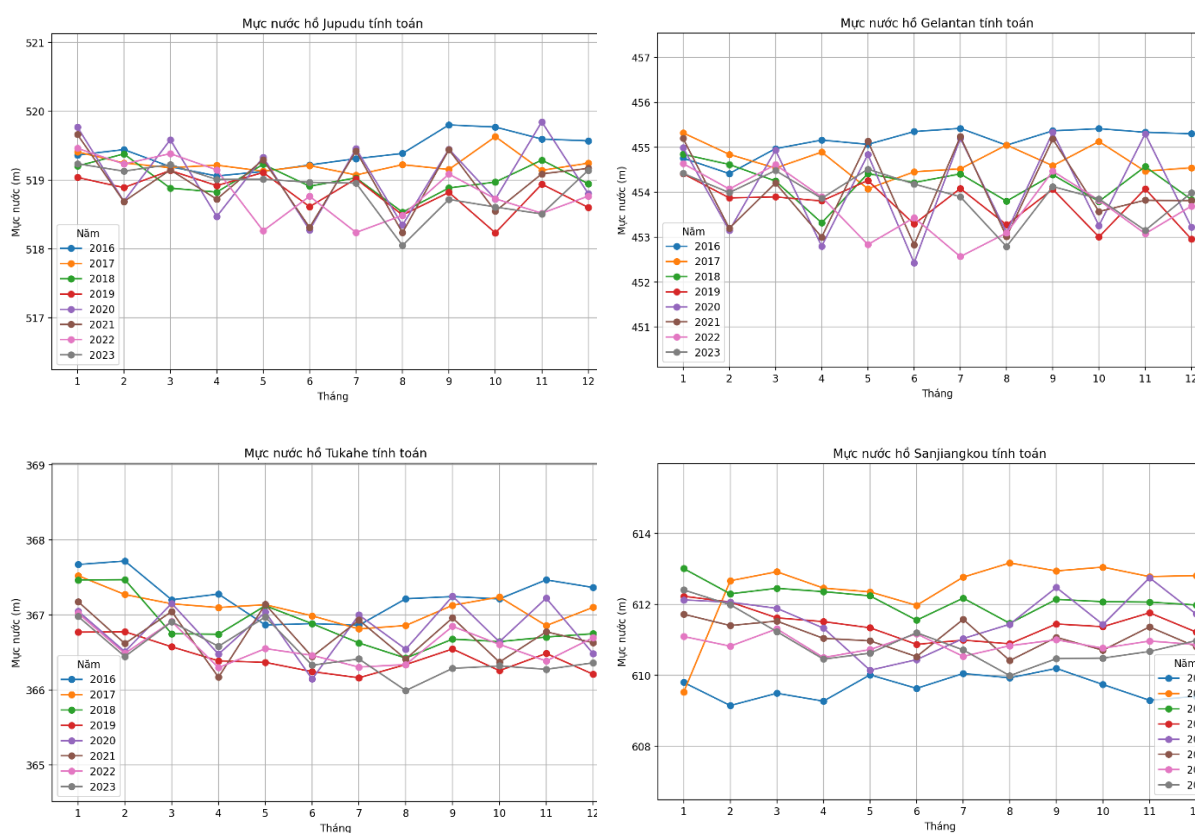


Hình 1-1 Đường đặc tính lòng hồ của các hồ chứa lớn trong khu vực nghiên cứu

### 1.1.2. Quy trình vận hành của các hồ chứa

#### 1. Nhóm hồ vận hành điều tiết ngày/tuần

Hình 1-2 là biểu đồ biến động mực nước 4 hồ (Jupudu, Gelantan, Sanjiangkou và Tukahe) trong giai đoạn 2016–2023 cho thấy dao động mực nước theo tháng trong năm tương đối nhỏ, phản ánh chế độ vận hành ổn định và không có sự thay đổi mạnh theo mùa. Đặc điểm này khác biệt rõ rệt so với các hồ chứa điều tiết theo mùa – vốn thường có biên độ dao động lớn giữa mùa mưa và mùa khô nhằm tích nước hoặc xả lũ theo chu kỳ dài. Đặc điểm dao động mực nước hẹp, ổn định quanh năm của cả bốn hồ (Jupudu, Gelantan, Sanjiangkou và Tukahe) cho thấy chúng đều được vận hành theo chế độ điều tiết ngày hoặc tuần. Kết quả này phù hợp với thông tin thu thập được trình bày trong Bảng 1-1.

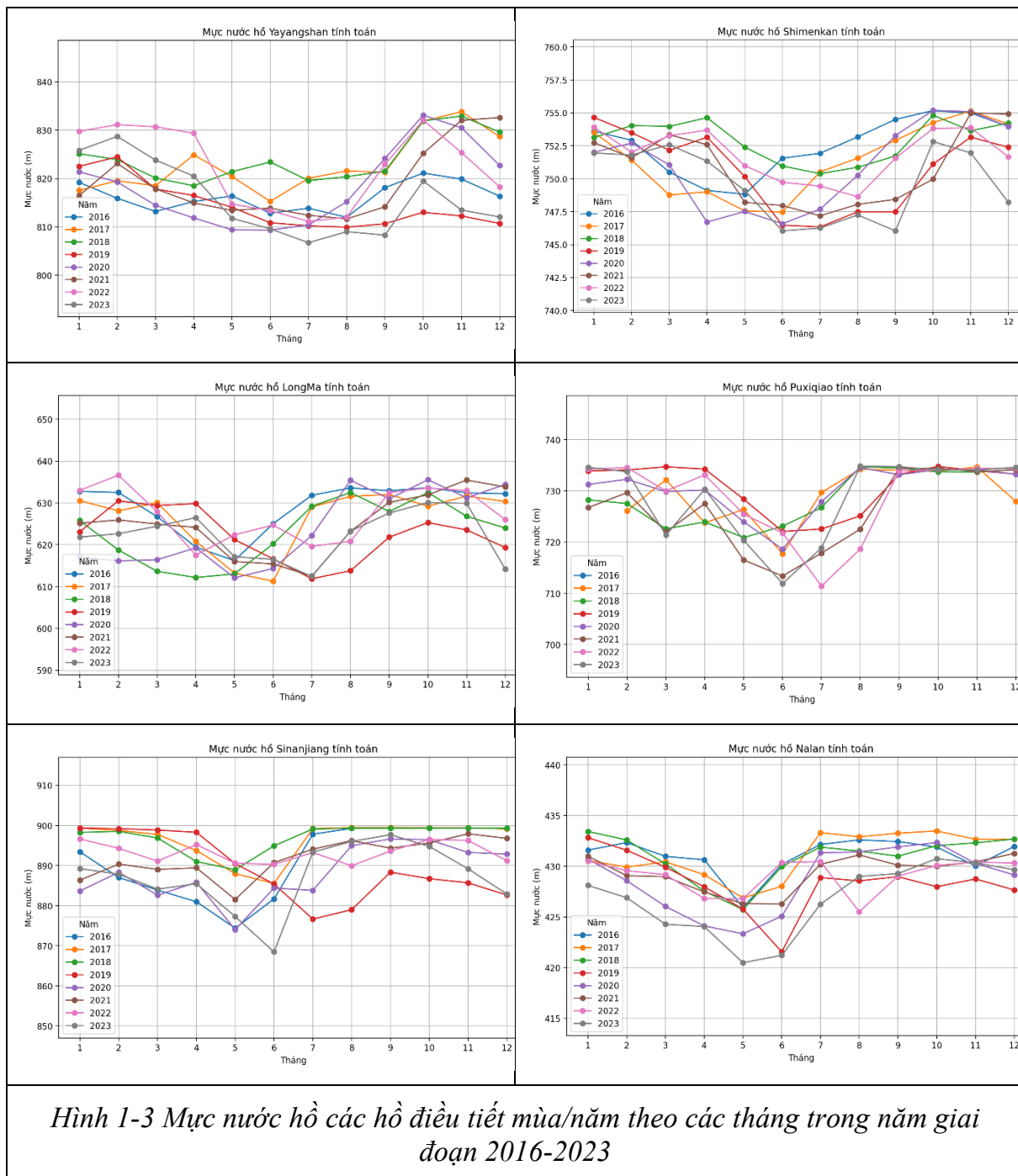


Hình 1-2 Mực nước hồ các hồ điều tiết ngày/tuần theo các tháng trong năm giai đoạn 2016-2023

#### 2. Nhóm hồ vận hành điều tiết theo mùa/năm

Hình 1-3 là biểu đồ biến động mực nước 6 hồ (Yayangshan, Shimenkan, Longma, Puxiqiao, Sinanjiang và Nalan) trong giai đoạn 2016–2023. Có thể thấy xu hướng dao động mực nước theo tháng tương đối lớn, phản ánh chế độ vận hành điều tiết mạnh theo mùa/năm. Đặc điểm này phù hợp với các hồ chứa được thiết kế để tích nước trong mùa mưa và xả vào mùa khô, nhằm phục vụ các mục tiêu như phát điện, cấp nước hoặc cắt lũ. Các hồ trong nhóm này đều cho thấy chu trình điều tiết nước mang tính chu kỳ dài

theo mùa hoặc năm, với biên độ dao động mực nước lớn giữa các giai đoạn trong năm. Việc hiểu rõ đặc điểm vận hành thực tế của từng hồ là cơ sở quan trọng để xây dựng các chiến lược quản lý, dự báo và điều hành nguồn nước hiệu quả.



### 3. Xác định các thông số hồ chứa và các biểu đồ điều phối

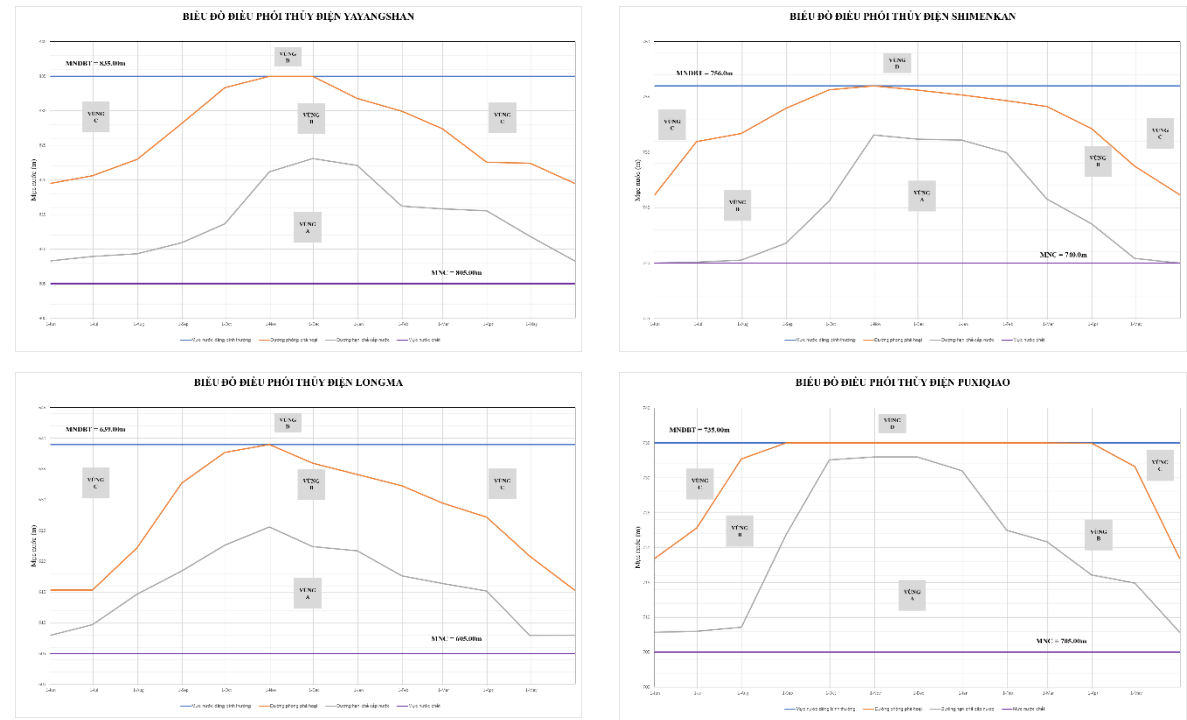
Như đã trình bày ở mục phương pháp, từ diễn biến mực nước và dung tích các hồ chứa bằng ảnh viễn thám, các tham số của các hồ chứa này có thể được ước tính. Bảng 1-1 trình bày giá trị các thông số hồ chứa liên quan đến mực nước và dung tích thu thập từ các dữ liệu được công bố và các giá trị xác định từ các dữ liệu viễn thám. Ngoài ra, cũng từ dữ liệu này, các biểu đồ điều phối của 6 hồ điều tiết mùa/năm phía

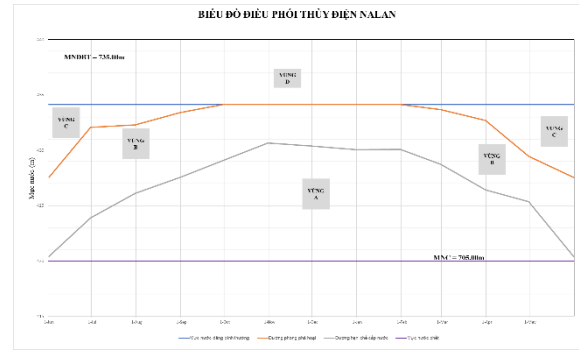
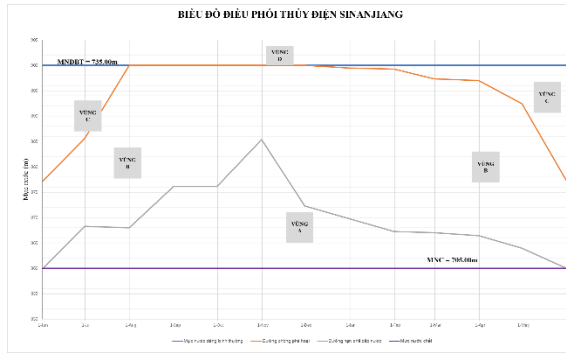
Trung Quốc được xây dựng. Hình 1-4 trình bày biểu đồ điều phối của 6 hồ phía Trung Quốc.

Bảng 1-1 Bảng tổng hợp các thông số hồ chứa phía Trung Quốc[48][188]

| TT | Tên hồ      | Năm vận hành | Chế độ điều tiết | Mức nước dâng bình thường (m) | Mức nước chết (m) | Dung tích tổng (triệu m <sup>3</sup> ) | Dung tích hữu ích (triệu m <sup>3</sup> ) |
|----|-------------|--------------|------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1  | Yayangshan  | 2006         | Mùa/năm*         | 835                           | 805*              | 247                                    | 212.6*                                    |
| 2  | Shimenkan   | 2010         | Tuần             | 756,0                         | 740,0             | 197                                    | 80.7                                      |
|    |             | 2010         | Mùa/năm*         | 756,0                         | 740,0             | 197                                    | 80.7                                      |
| 3  | Longma      | 2007         | Mùa              | 639                           | 605               | 590                                    | 334                                       |
| 4  | Jufudu      | 2007         | Tuần/Ngày*       | 522,0                         | 514               | 174                                    | 48                                        |
| 5  | Gelantan    | 2009         | Tuần/Ngày*       | 456                           | 446               | 409                                    | 125.3*                                    |
| 6  | PuxiQiao    | 2013         | Mùa/năm*         | 735                           | 705               | 504                                    | 314.4*                                    |
| 7  | SanJiangKou | 2007         | Tuần/Ngày*       | 614                           | 605*              | 84.52                                  | 31.8*                                     |
| 8  | Sinanjiang  | 2008         | Mùa/năm*         | 900                           | 860               | 271                                    | 228.8*                                    |
| 9  | Tukahe      | 2008         | Ngày             | 368                           | 365               | 78                                     | 12                                        |
| 10 | Nalan       | 2005         | Năm              | 434.1*                        | 420.4*            | 286                                    | 186                                       |

\* Được xác định từ kết quả phân tích, tính toán dựa trên ảnh vệ tinh





Hình 1-4 Biểu đồ điều phối các hồ chứa vận hành điều tiết mùa/năm vùng nghiên cứu

### 1.1.3. Tham số hoá quy trình vận hành hồ chứa cho mô hình VIC-RES

#### 1. Thông số hoá hồ chứa có quy luật vận hành điều tiết mùa/năm

Trong bối cảnh vận hành liên hồ chứa trên hệ thống sông xuyên biên giới, việc xác định được chiến lược hay phương án điều tiết dòng chảy tại các hồ phía thượng lưu Trung Quốc là yếu tố then chốt nhằm dự báo chính xác dòng chảy về hạ lưu. Để phục vụ cho mục tiêu này, nghiên cứu đã xây dựng tệp tham số điều tiết mùa/năm cho các hồ chứa chính phía Trung Quốc theo hai phương án: (i) phương án điều tiết theo mực nước mục tiêu (OP2) và (ii) phương án điều tiết theo quy trình vận hành từng tháng với 48 tham số (OP5).

##### (i) Phương án điều tiết theo mực nước mục tiêu

Đối với phương án điều tiết theo mực nước mục tiêu, mực nước vận hành của các hồ chứa được giả định duy trì ổn định tại một số mức cụ thể theo mùa (mùa lũ – mùa cạn), dựa trên kết quả giải đoán ảnh viễn thám trong giai đoạn 2016–2023 (Error! Reference source not found.). Phương pháp này được xây dựng trong bối cảnh thiếu dữ liệu quan trắc và quy trình vận hành công khai từ phía Trung Quốc, cho phép tái hiện tương đối chính xác đặc điểm vận hành thực tế trong quá khứ của các hồ chứa thượng nguồn. Việc sử dụng chuỗi mực nước mục tiêu được xác định từ ảnh vệ tinh không chỉ phản ánh xu thế điều tiết lưu lượng trong điều kiện thực tiễn, mà còn góp phần cải thiện độ tin cậy trong mô phỏng dòng chảy về hạ lưu.

##### (ii) Phương án điều tiết theo quy trình vận hành từng tháng (48 tham số)

OPERATION STRATEGY (OP5)

|    |       |             |             |       |
|----|-------|-------------|-------------|-------|
| 5  |       |             |             |       |
| 40 | 0.348 | 86981.17881 | 195524.8804 | 0.060 |
| 40 | 0.368 | 84423.69067 | 171958.8937 | 0.089 |
| 40 | 0.328 | 82825.87912 | 130982.3962 | 0.156 |
| 40 | 0.224 | 62808.39671 | 129975.0203 | 0.004 |
| 40 | 0.106 | 46821.80958 | 108355.3614 | 0.094 |
| 40 | 0.130 | 49411.20952 | 116340.6041 | 0.130 |
| 40 | 0.139 | 51135.25444 | 134391.9765 | 0.077 |
| 40 | 0.189 | 58312.81672 | 178830.9713 | 0.166 |
| 40 | 0.281 | 72086.43744 | 229796.5344 | 0.171 |
| 40 | 0.481 | 120534.3461 | 247000.0000 | 0.053 |
| 40 | 0.543 | 135279.9189 | 230004.2528 | 0.054 |
| 40 | 0.504 | 127417.8351 | 213891.6231 | 0.051 |

OPERATION STRATEGY (OP5)

|    |       |             |             |       |
|----|-------|-------------|-------------|-------|
| 5  |       |             |             |       |
| 40 | 0.311 | 163279.4845 | 193491.1976 | 0.007 |
| 40 | 0.203 | 142247.8748 | 186242.6739 | 0.045 |
| 40 | 0.114 | 131825.816  | 186281.8463 | 0.000 |
| 40 | 0.013 | 118021.0795 | 183990.4871 | 0.013 |
| 40 | 0.000 | 116300.000  | 144227.6816 | 0.239 |
| 40 | 0.003 | 116650.0501 | 168654.2848 | 0.003 |
| 40 | 0.008 | 117379.321  | 172582.2748 | 0.023 |
| 40 | 0.058 | 124023.8199 | 185304.3845 | 0.074 |
| 40 | 0.185 | 141429.6334 | 194886.744  | 0.055 |
| 40 | 0.357 | 171951.9504 | 197000.000  | 0.012 |
| 40 | 0.357 | 169801.4318 | 194806.9985 | 0.013 |
| 40 | 0.344 | 169393.5749 | 192255.1422 | 0.014 |

### Yayangshan

| OPERATION STRATEGY (OP5) |       |             |             |       |
|--------------------------|-------|-------------|-------------|-------|
| 5                        |       |             |             |       |
| 96                       | 0.388 | 357887.2123 | 508920.9552 | 0.059 |
| 96                       | 0.387 | 346734.8868 | 477087.584  | 0.100 |
| 96                       | 0.317 | 335855.7351 | 451855.4741 | 0.075 |
| 96                       | 0.098 | 277381.5886 | 387700.5436 | 0.208 |
| 96                       | 0.096 | 256000.000  | 302317.1369 | 0.176 |
| 96                       | 0.155 | 290614.4257 | 336976.7551 | 0.155 |
| 96                       | 0.302 | 331379.8911 | 400966.0035 | 0.219 |
| 96                       | 0.409 | 365043.5379 | 513659.6642 | 0.327 |
| 96                       | 0.532 | 405367.5239 | 573720.9543 | 0.165 |
| 96                       | 0.587 | 435305.3715 | 590000.000  | 0.042 |
| 96                       | 0.526 | 402901.6862 | 552305.1945 | 0.101 |
| 96                       | 0.495 | 396239.8346 | 530278.2603 | 0.059 |

### Shimenkan

| OPERATION STRATEGY (OP5) |       |             |             |       |
|--------------------------|-------|-------------|-------------|-------|
| 5                        |       |             |             |       |
| 96                       | 0.513 | 348056.0624 | 499087.7221 | 0.011 |
| 96                       | 0.514 | 330270.6774 | 503818.0638 | 0.013 |
| 96                       | 0.343 | 282423.0333 | 503454.1913 | 0.001 |
| 96                       | 0.319 | 271537.7016 | 458515.9449 | 0.112 |
| 96                       | 0.092 | 211208.3486 | 306089.0271 | 0.400 |
| 96                       | 0.100 | 189558.9316 | 351794.8744 | 0.100 |
| 96                       | 0.114 | 216725.3042 | 473252.7788 | 0.309 |
| 96                       | 0.498 | 341211.5123 | 504000.000  | 0.074 |
| 96                       | 0.743 | 471433.4166 | 503090.3189 | 0.002 |
| 96                       | 0.734 | 477073.4394 | 503090.3189 | 0.000 |
| 96                       | 0.751 | 477255.3756 | 501089.0205 | 0.005 |
| 96                       | 0.698 | 450692.6875 | 503636.1276 | 0.006 |

### Longma

| OPERATION STRATEGY (OP5) |       |             |             |       |
|--------------------------|-------|-------------|-------------|-------|
| 5                        |       |             |             |       |
| 40                       | 0.229 | 66349.57056 | 264549.8337 | 0.006 |
| 40                       | 0.245 | 65436.07039 | 247186.3653 | 0.070 |
| 40                       | 0.205 | 63379.75407 | 249801.9721 | 0.010 |
| 40                       | 0.131 | 54486.98924 | 206730.476  | 0.171 |
| 40                       | 0.000 | 42218.74444 | 110495.664  | 0.456 |
| 40                       | 0.269 | 70300.68139 | 157984.3272 | 0.269 |
| 40                       | 0.252 | 81215.2458  | 271000.000  | 0.436 |
| 40                       | 0.481 | 105208.659  | 271000.000  | 0.000 |
| 40                       | 0.493 | 105009.8665 | 271000.000  | 0.000 |
| 40                       | 0.686 | 156647.8823 | 271000.000  | 0.000 |
| 40                       | 0.389 | 86918.37944 | 271000.000  | 0.000 |
| 40                       | 0.146 | 56674.04    | 266185.0871 | 0.017 |

### PuxiQiao

| OPERATION STRATEGY (OP5) |       |             |             |       |
|--------------------------|-------|-------------|-------------|-------|
| 5                        |       |             |             |       |
| 80                       | 0.314 | 254402.2475 | 280782.3738 | 0.001 |
| 80                       | 0.302 | 244316.7069 | 282312.2558 | 0.007 |
| 80                       | 0.204 | 227273.1042 | 274569.7147 | 0.032 |
| 80                       | 0.176 | 219687.4086 | 249813.1266 | 0.107 |
| 80                       | 0.013 | 186000.000  | 235620.537  | 0.061 |
| 80                       | 0.129 | 209506.8376 | 269854.0865 | 0.129 |
| 80                       | 0.195 | 225149.4444 | 271546.8761 | 0.007 |
| 80                       | 0.239 | 235563.594  | 280109.2257 | 0.035 |
| 80                       | 0.294 | 246934.1654 | 286000.000  | 0.025 |
| 80                       | 0.331 | 258859.5448 | 285255.3952 | 0.003 |
| 80                       | 0.333 | 256779.4727 | 285255.3952 | 0.000 |
| 80                       | 0.314 | 254342.8169 | 280904.7643 | 0.018 |

### Sinanjiang

### Nalan

#### Hình 1-5 Tham số các hồ điều tiết mùa/năm theo quy tắc vận hành

Các biểu đồ quy trình vận hành của các hồ chứa được trình bày trong Mục 1.1.2 đã được số hoá và chuyển đổi thành chuỗi quy trình vận hành theo từng tháng trong năm. Cụ thể, mỗi hồ được mô tả bởi 48 tham số, đại diện cho các mức dung tích giới hạn và dung tích mục tiêu trong chu kỳ 12 tháng, phản ánh quy luật vận hành theo mùa và khả năng điều tiết theo thời gian. Kết quả số hoá 48 tham số cho 6 hồ phía Trung Quốc Hình 1-5.

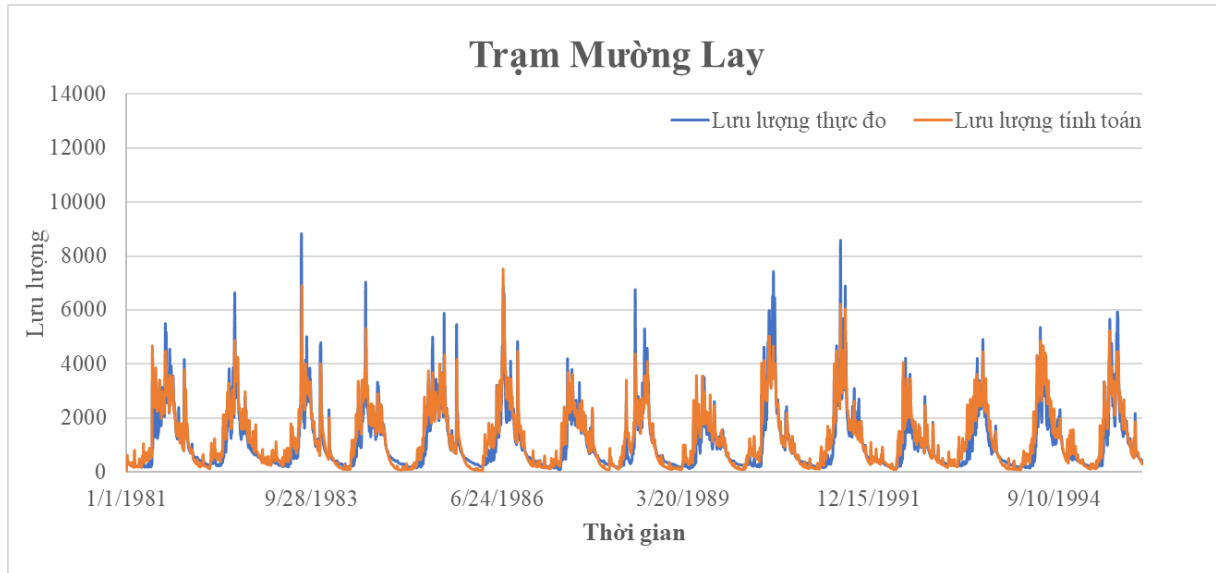
#### 2. Thông số hoá hồ chứa có quy luật vận hành điều tiết ngày/tuần

Các thông số đặc trưng của từng 4 hồ đã được số hoá và chuyển đổi thành bộ quy trình vận hành OP3 theo ngày hoặc tuần, nhằm mô phỏng sát hơn với thực tiễn điều hành hồ chứa. Mỗi hồ được mô tả bởi 4 thông số chính (x1 đến x4), đại diện cho các mức dung tích điều tiết đặc trưng trong chu kỳ ngắn hạn. Kết quả số hoá như sau:

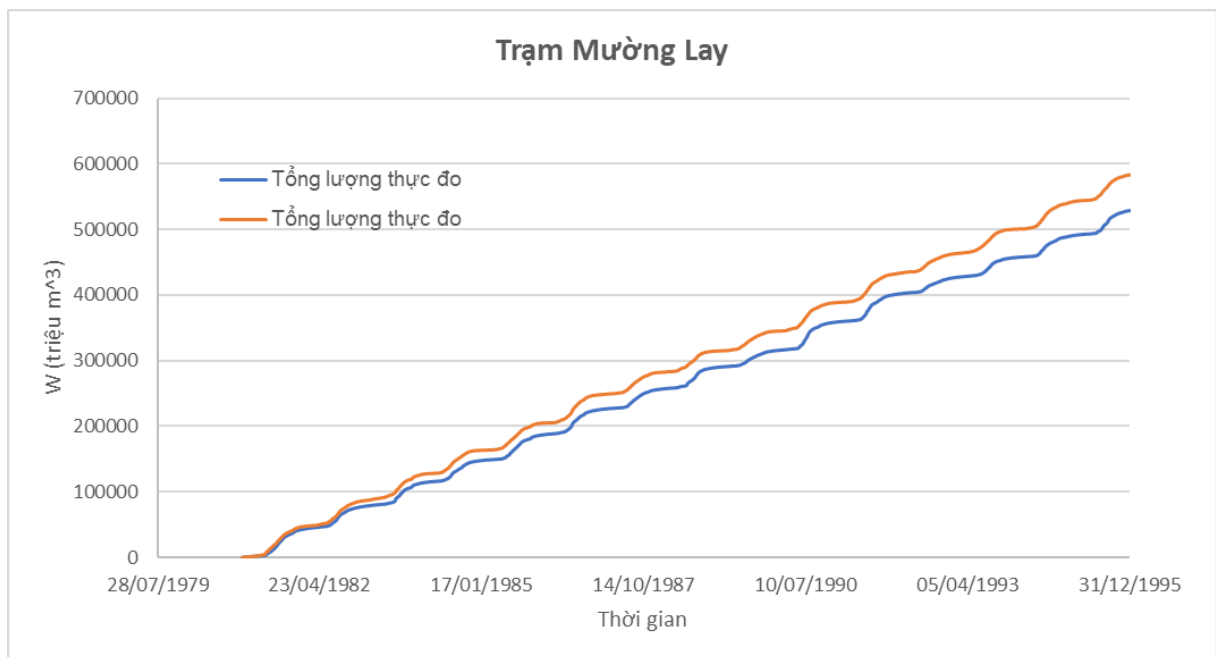
| OPERATION STRATEGY (OP3) |       |             |           |       | OPERATION STRATEGY (OP3) |       |             |        |       |
|--------------------------|-------|-------------|-----------|-------|--------------------------|-------|-------------|--------|-------|
| 3                        |       |             |           |       | 3                        |       |             |        |       |
| 96                       | 0.278 | 136864.1167 | 174000    | 0.278 | 128                      | 0.278 | 283735.3326 | 409000 | 0.278 |
| OPERATION STRATEGY (OP5) |       |             |           |       | OPERATION STRATEGY (OP3) |       |             |        |       |
| 3                        |       |             |           |       | 3                        |       |             |        |       |
| 96                       | 0.559 | 66891.70488 | 84520.000 | 0.559 | 400                      | 0.196 | 69721.73336 | 78000  | 0.196 |

## 2. KẾT QUẢ HIỆU CHỈNH VÀ KIỂM ĐỊNH CÁC THÔNG SỐ MÔ HÌNH VIC ÁP DỤNG CHO LƯU VỰC SÔNG ĐÀ

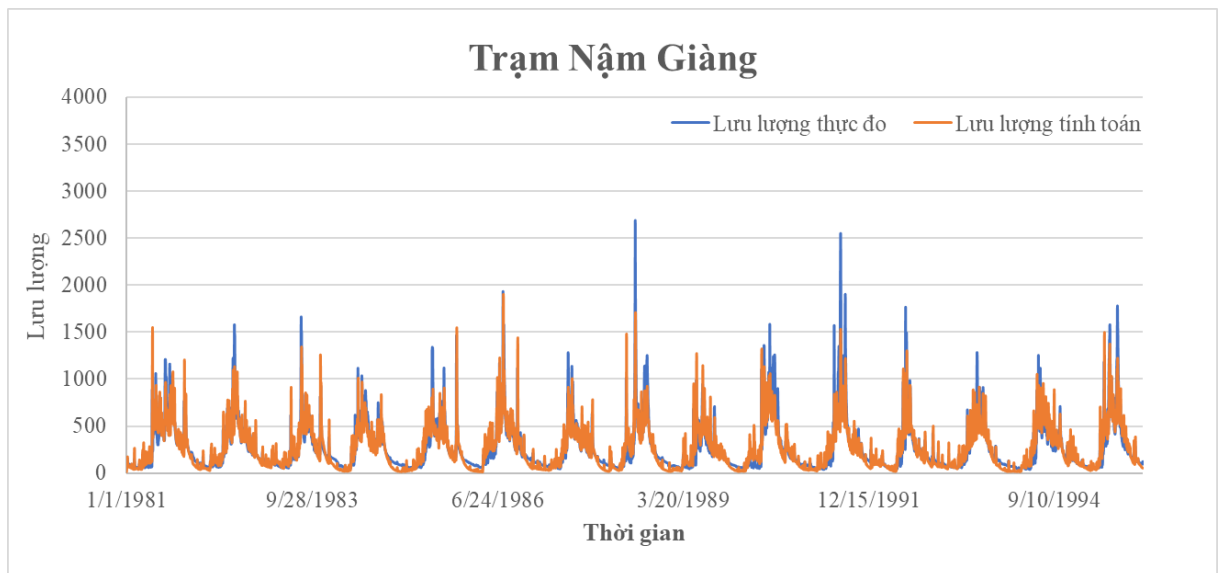
### 2.1. Kết quả hiệu chỉnh cho giai đoạn trước khi hồ chứa phía Trung Quốc đi vào hoạt động



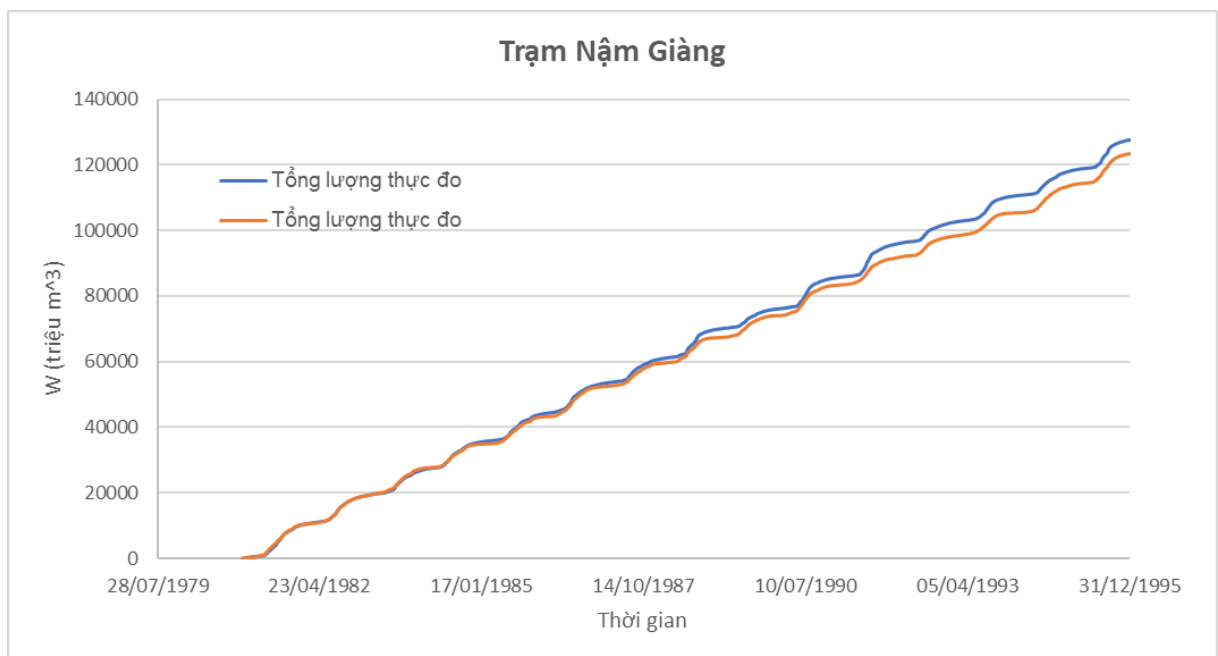
Hình 2-1. Biến trình lưu lượng tính toán và thực đo tại Mương Lay giai đoạn (1981-1995)



Hình 2-2. Biến trình tổng lượng tích lũy tính toán và thực đo tại Mương Lay giai đoạn (1981-1995)

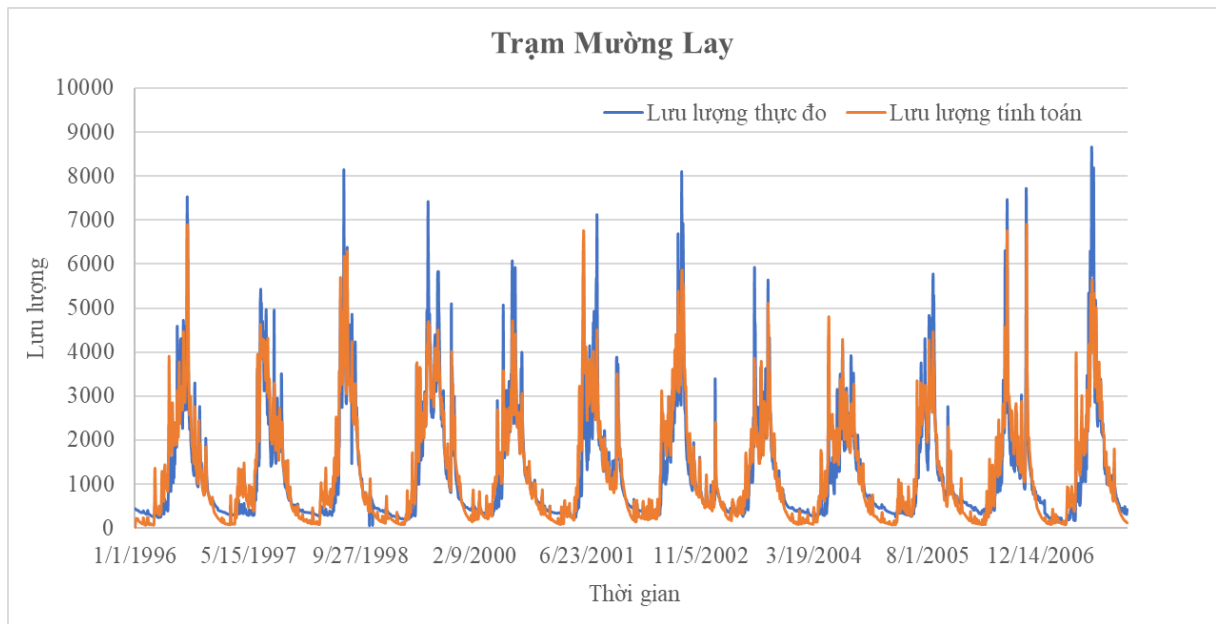


Hình 2-3. Biến trình lưu lượng tính toán và thực đo tại Nậm Giàng giai đoạn (1981-1995)

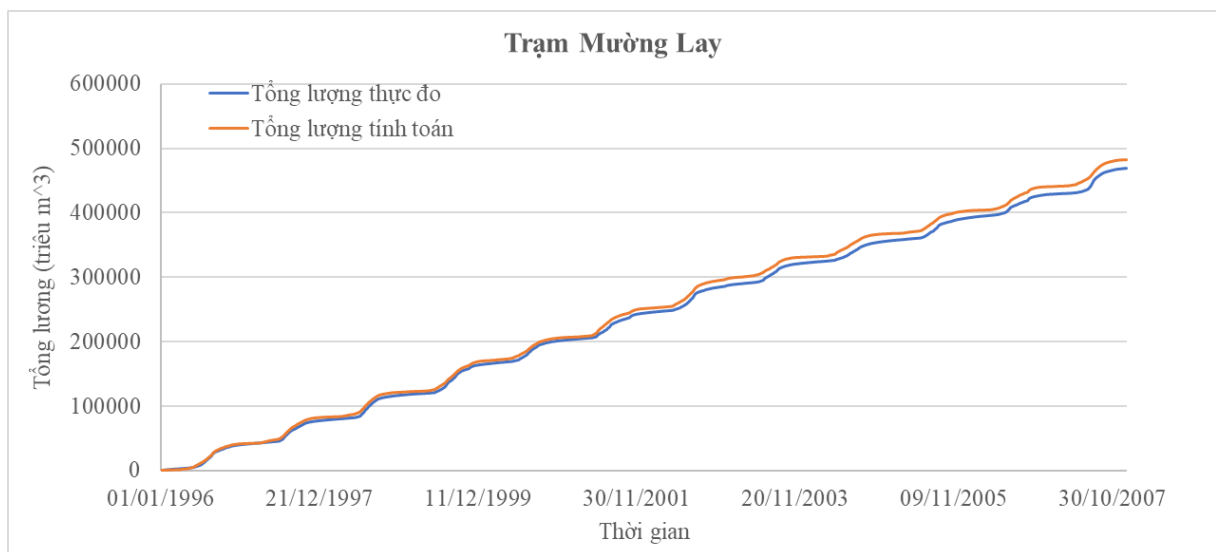


Hình 2-4. Biến trình tổng lượng tích lũy tính toán và thực đo tại Nậm Giàng giai đoạn 1981-1995

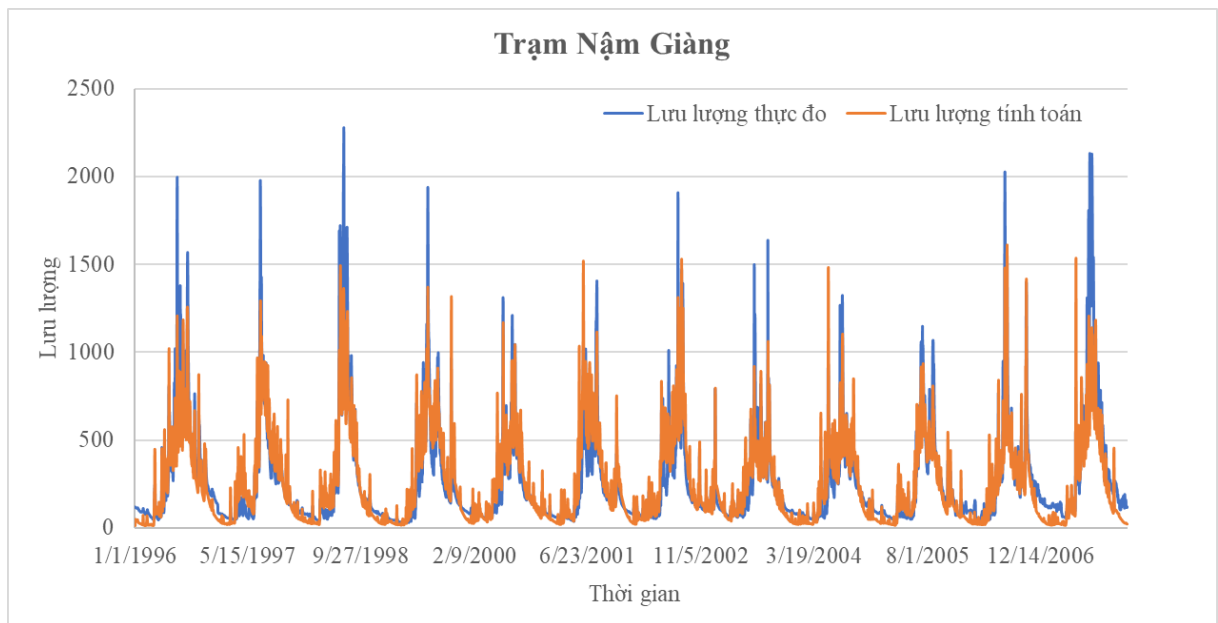
## 2.2. Kết quả kiểm định cho giai đoạn trước khi hồ chứa phía Trung Quốc đi vào hoạt động



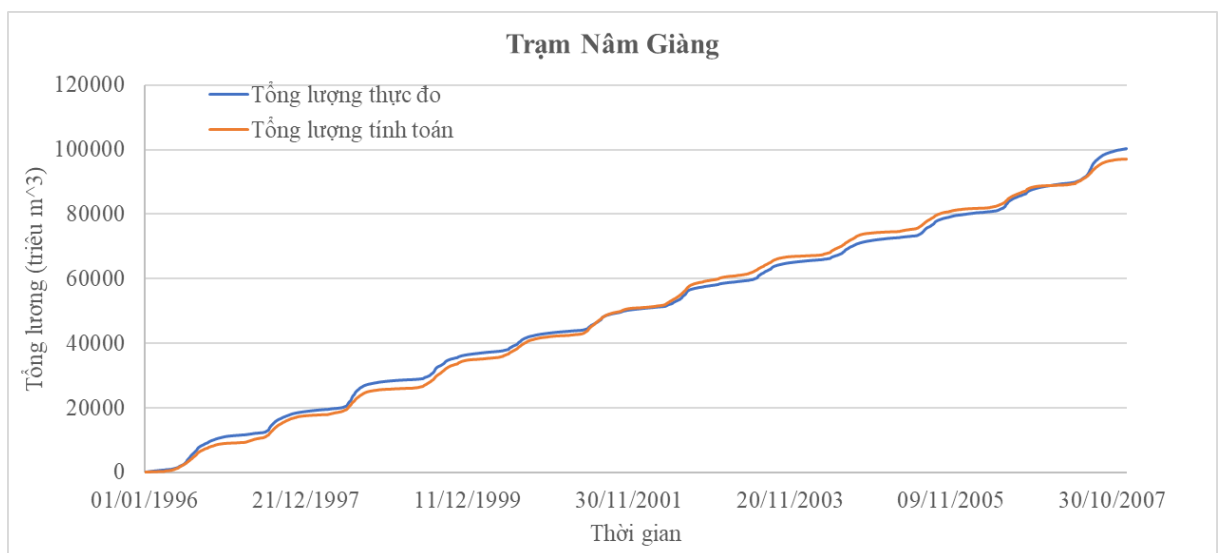
Hình 2-5. Biến trình lưu lượng tính toán và thực đo tại Mương Lay giai đoạn 1996-2007



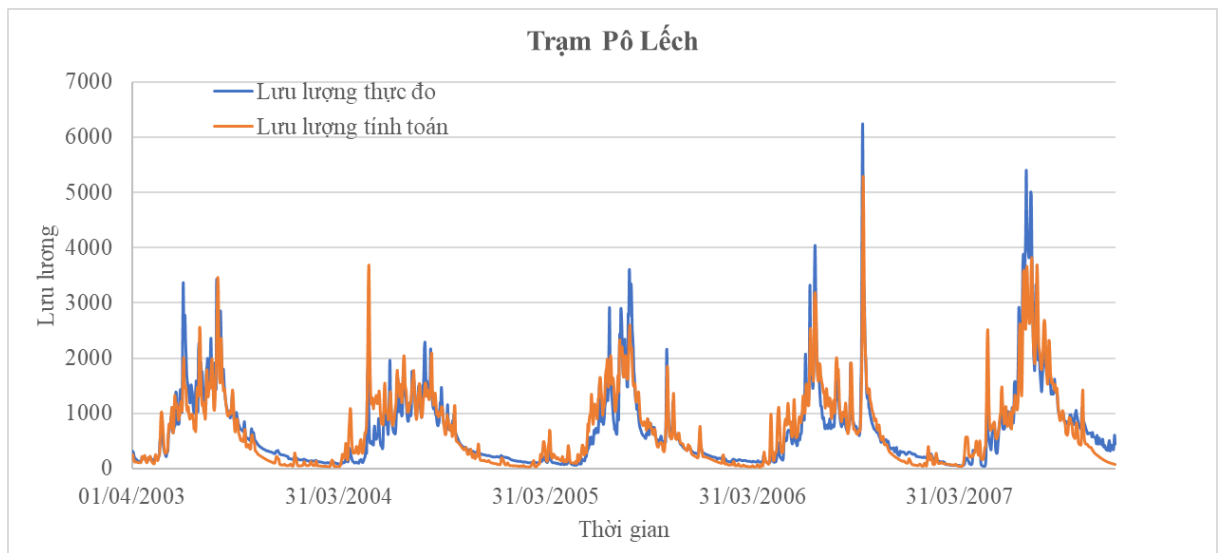
Hình 2-6. Biến trình tổng lượng tích lũy tính toán và thực đo tại Mương Lay giai đoạn 1996-2007



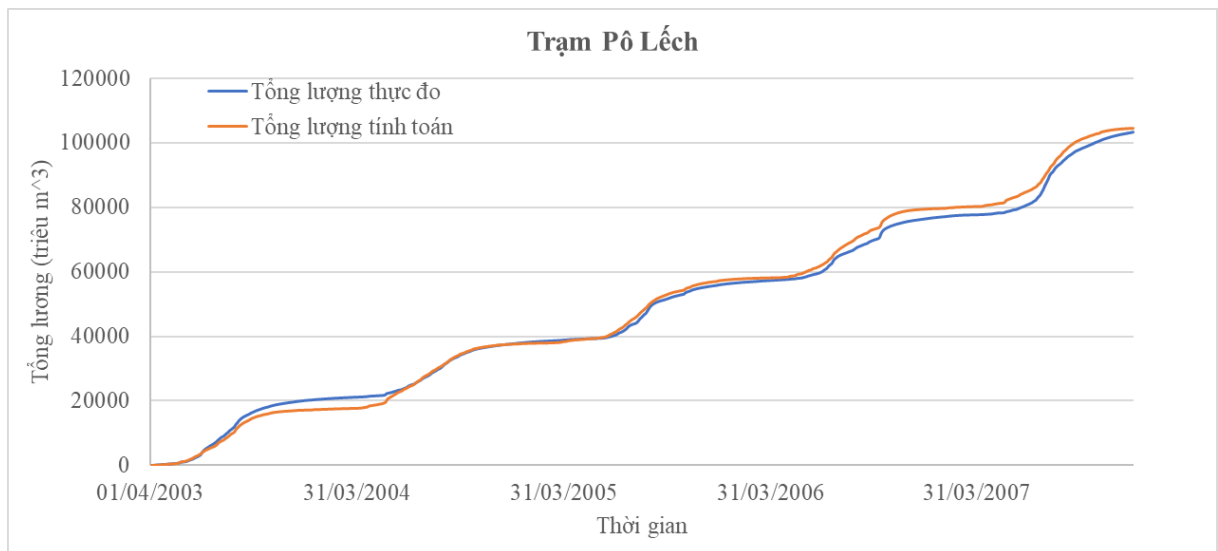
Hình 2-7. Biến trình lưu lượng tính toán và thực đo tại Nậm Giàng giai đoạn 1996-2007



Hình 2-8. Biến trình tổng lượng tích lũy tính toán và thực đo tại Mường Lay giai đoạn 1996-2007



Hình 2-9. Biến trình lưu lượng tính toán và thực đo tại Pô Lếch giai đoạn 2003-2007



Hình 2-10. Biến trình tổng lượng tích lũy tính toán và thực đo tại Pô Lếch giai đoạn 2003-2007