

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

TÓM TẮT LUẬN ÁN
TIỀN SĨ THỦY VĂN HỌC

Hà Nội - 2026

Công trình được hoàn thành tại: Bộ môn Thủy văn Tài nguyên nước,
Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa
học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội.

Người hướng dẫn khoa học: 1. PGS.TS. Nguyễn Tiền Giang
2. PGS.TS. Nguyễn Cao Đơn

Phản biện: PGS. TS. Đoàn Quang Trí - Viện Các Khoa học Trái đất,
Viên HLKH&CN Việt Nam

Phản biện: PGS. TS. Nguyễn Viết Thanh - Bộ môn Công trình thủy,
Khoa Công trình và Môi trường, Trường ĐH Giao thông vận tải

Phản biện: PGS. TS. Trần Kim Châu - Khoa Kỹ thuật tài nguyên nước,
Trường ĐH Thủy lợi

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ
hợp tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - ĐHQGHN vào hồi giờ
ngày tháng năm 2026

Có thể tìm hiểu luân án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam;
- Trung tâm Thư viện và Tri thức số, Đại học Quốc gia Hà Nội

MỞ ĐẦU

1.1. Tính cấp thiết

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, các quá trình khí tượng – thủy văn đang biến đổi mạnh về cường độ và quy luật, làm thay đổi đặc trưng dòng chảy và khiến giả định ổn định của chuỗi số liệu không còn phù hợp. Tại Việt Nam, các hiện tượng như mưa lớn, lũ bất thường, hạn hán kéo dài diễn ra thường xuyên hơn, ảnh hưởng trực tiếp đến khai thác, sử dụng nước và gia tăng rủi ro phát triển kinh tế – xã hội. Do đó, yêu cầu nâng cao độ tin cậy của mô phỏng và dự báo dòng chảy ngày càng cấp thiết.

Đối với các lưu vực sông liên quốc gia, dòng chảy còn chịu tác động từ hoạt động khai thác và điều tiết nước ở thượng nguồn, đặc biệt là hệ thống hồ chứa thủy điện, làm gia tăng tính bất định. Trong khi đó, hạn chế về dữ liệu và thông tin vận hành khiến việc mô phỏng gặp nhiều khó khăn, nhất là khi các phương pháp truyền thống chưa phù hợp với điều kiện hệ thống biến đổi.

Sông Đà là lưu vực quan trọng của hệ thống sông Hồng, nhưng chế độ dòng chảy ngày càng phức tạp do tác động tổng hợp của biến đổi khí hậu và hoạt động thượng nguồn. Vì vậy, nghiên cứu nâng cao chất lượng mô phỏng dòng chảy sông Đà là cần thiết, nhằm cải thiện độ tin cậy của dự báo và hỗ trợ hiệu quả quản lý, vận hành và đảm bảo an ninh nguồn nước.

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.

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 và tích hợp các phương pháp xử lý chuỗi số liệu không dừng, bổ sung dữ liệu thiếu hụt và xem xét đồng thời tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh.

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. 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.

1.5. 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 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.

1.6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Luận án làm rõ cơ chế biến đổi dòng chảy sông Đà dưới tác động tổng hợp của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh, đồng thời phát triển cách tiếp cận mô hình hóa tích hợp kết hợp mô hình thủy văn, dữ liệu viễn thám và nguồn dữ liệu mở trong điều kiện thiếu số liệu. Kết quả góp phần nâng cao độ tin cậy mô phỏng, dự báo dòng chảy vào Việt Nam, phục vụ vận hành hồ chứa, quản lý tài nguyên nước và có khả năng áp dụng cho các lưu vực xuyên biên giới tương tự.

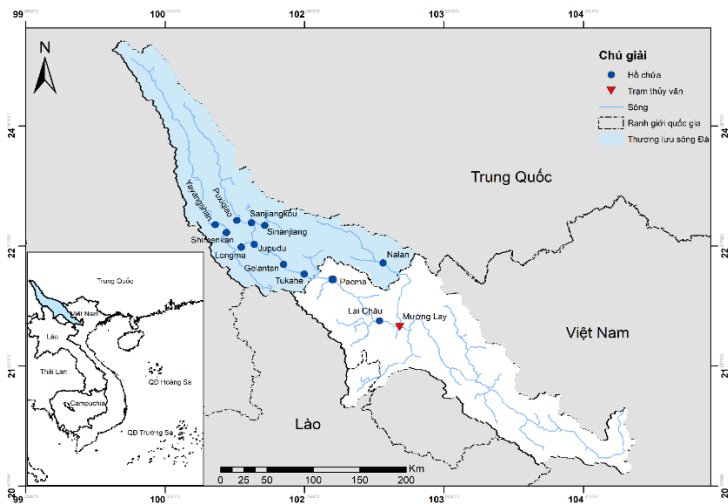
CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU

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

Các lưu vực sông xuyên biên giới là những hệ thống sông chảy qua từ hai quốc gia trở lên, giữ vai trò then chốt đối với phát triển kinh tế – xã hội và an ninh nguồn nước toàn cầu. Trên thế giới hiện có khoảng 260 lưu vực sông quốc tế, cung cấp gần 60% lượng nước ngọt và liên quan đến sinh kế của khoảng 40% dân số. Tuy đã có các khuôn khổ pháp lý quốc tế thúc đẩy sử dụng công bằng và chia sẻ thông tin, việc thực thi còn hạn chế; đặc biệt, thiếu minh bạch dữ liệu từ thượng nguồn đang gây nhiều khó khăn cho các quốc gia hạ lưu trong quản lý tài nguyên nước và làm gia tăng rủi ro thiếu nước, lũ lụt và xung đột nguồn nước.

Sông Đà là phụ lưu lớn nhất của hệ thống sông Hồng, bắt nguồn

từ Vân Nam (Trung Quốc) và chảy qua các tỉnh Tây Bắc Việt Nam trước khi hợp lưu với sông Thao. Lưu vực có diện tích khoảng 50.530 km², trong đó phần thượng nguồn Trung Quốc chiếm gần 19.000 km², địa hình núi cao, dốc lớn và giàu tiềm năng thủy điện. Khí hậu gió mùa tạo sự phân hóa dòng chảy theo mùa rõ rệt.



Hình 1.1. Khu vực nghiên cứu

1.2. Tổng quan các nghiên cứu mô phỏng dòng chảy

Trong nước:

Các nghiên cứu mô phỏng dòng chảy trên lưu vực sông Hồng – sông Đà đã phát triển từ phương pháp thống kê, mô hình tham số tập trung đến các mô hình bán phân bố, phân bố và mô hình tích hợp. Các nghiên cứu của Nguyễn Viết Thi (1994), Nguyễn Lan Châu (2006), Bùi Đình Lập (2017) cho thấy khả năng ứng dụng các phương pháp thống kê, mô hình mưa – dòng chảy và mô hình thủy văn – thủy lực trong mô phỏng, dự báo dòng chảy. Các nghiên cứu của Nguyễn Đức Điện (2020) và Vũ Thị Minh Huệ (2017) đã bước đầu xét đến ảnh hưởng của vận hành hồ

chứa; Đặng Đình Khá (2021) khai thác dữ liệu vệ tinh và tái phân tích để bổ sung số liệu; Nguyễn Đăng Giáp (2025) phát triển mô hình tích hợp học máy, thủy văn – thủy lực và vận hành hồ chứa.

Nhìn chung, các nghiên cứu trong nước đã từng bước nâng cao mức độ tích hợp của mô hình. Tuy nhiên, đối với lưu vực sông Đà, việc mô phỏng trong điều kiện thiếu dữ liệu thượng nguồn, chuỗi dòng chảy không dừng và chịu tác động đồng thời của biến đổi khí hậu, vận hành hồ chứa và sử dụng nước vẫn còn hạn chế.

Trên thế giới:

Các nghiên cứu quốc tế về mô phỏng dòng chảy đã phát triển theo hướng ngày càng tích hợp, từ các phương pháp thống kê đến mô hình thủy văn dựa trên cơ sở vật lý, mô hình học máy và các phương pháp kết hợp đa nguồn dữ liệu. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và gia tăng tác động của con người, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra sự suy giảm tính dừng của chuỗi thủy văn. Các phương pháp phát hiện điểm biến đổi như Pettitt, SNHT, Buishand và phân tích xu thế như Mann–Kendall được sử dụng rộng rãi để nhận diện sự thay đổi về đặc tính thống kê của chuỗi và phân tích xu thế theo các giai đoạn. Milly et al. (2008) nhấn mạnh sự cần thiết phải chuyển từ giả định hệ thống thủy văn dừng sang cách tiếp cận phù hợp với điều kiện không dừng.

Trong điều kiện thiếu dữ liệu, sáng kiến Prediction in Ungauged Basins (PUB) của Sivapalan et al. (2003) đã đặt nền tảng cho các nghiên cứu mô phỏng dòng chảy tại các lưu vực không hoặc thiếu quan trắc, với các hướng tiếp cận như khu vực hóa thông số, sử dụng dữ liệu quy mô lớn và khai thác các nguồn dữ liệu thay thế. Cùng với đó, các mô hình thủy văn dựa trên cơ sở vật lý như VIC, SWAT vẫn được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng mô tả các quá trình thủy văn, xét đến đặc điểm không

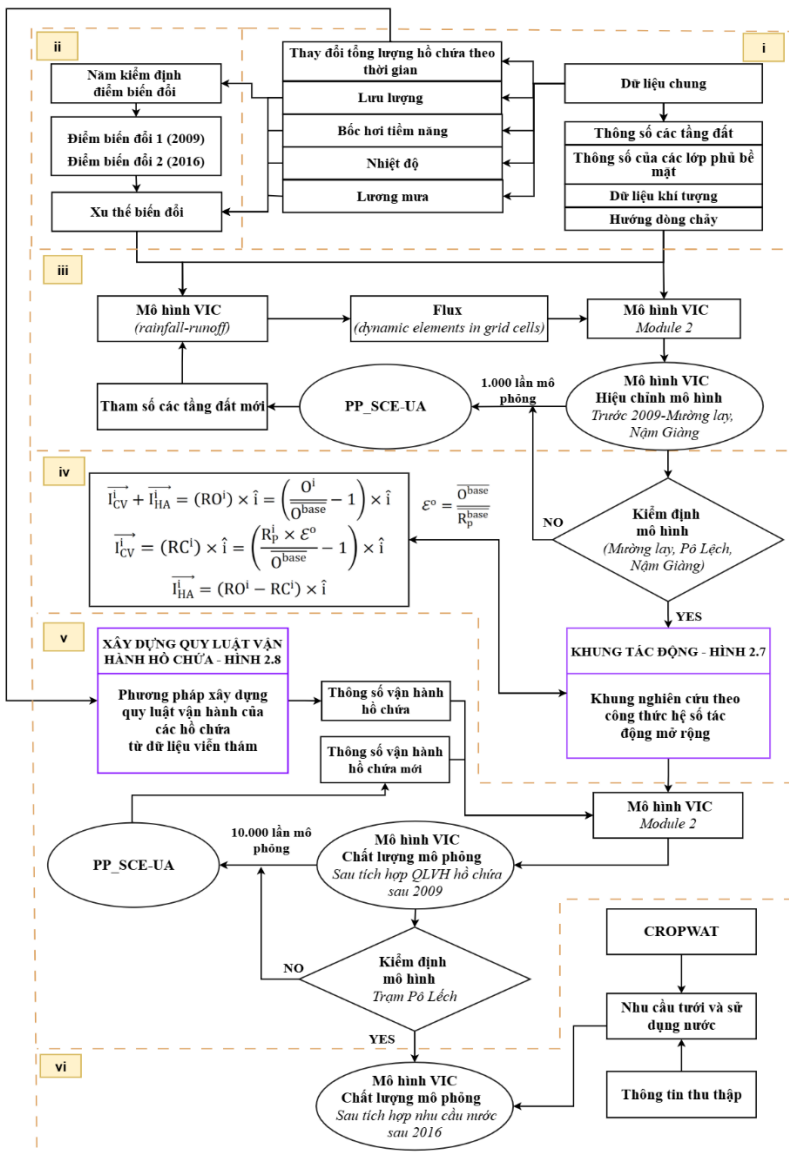
gian của lưu vực và tích hợp các tác động nhân sinh. Các mô hình học máy như SVR, ANN và LSTM cũng được ứng dụng trong mô phỏng, dự báo dòng chảy và vận hành hồ chứa, song hiệu quả phụ thuộc đáng kể vào chất lượng và độ dài của chuỗi dữ liệu.

Bên cạnh các phương pháp mô hình hóa, dữ liệu viễn thám, dữ liệu tái phân tích và các nguồn dữ liệu mở ngày càng được khai thác để bổ sung thông tin khí tượng – thủy văn tại các khu vực thiếu quan trắc. Đặc biệt, dữ liệu viễn thám được sử dụng để xác định diện tích mặt nước, mực nước, dung tích và các đặc trưng hồ chứa, từ đó hỗ trợ suy luận quy luật vận hành tại những khu vực thiếu thông tin trực tiếp. Tuy nhiên, việc chuyển các thông tin suy luận từ viễn thám thành quy luật vận hành có thể tích hợp trực tiếp vào mô hình thủy văn vẫn còn hạn chế.

Ngoài ra, các nghiên cứu quốc tế ngày càng quan tâm đến việc phân tách và định lượng tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh đối với biến động dòng chảy thông qua mô hình hóa, so sánh các kịch bản và các phương pháp phân tích tác động. Tuy nhiên, việc đồng thời xem xét tính không dừng, thiếu dữ liệu, tác động của hồ chứa và các hoạt động sử dụng nước trong một khung mô hình thống nhất vẫn còn là thách thức. Những kết quả này cho thấy xu hướng nghiên cứu hiện nay là phát triển cách tiếp cận tích hợp giữa mô hình thủy văn dựa trên cơ sở vật lý, dữ liệu đa nguồn, viễn thám và thông tin về hoạt động nhân sinh, đặc biệt đối với các lưu vực xuyên biên giới và thiếu dữ liệu. Đây cũng là cơ sở để luận án lựa chọn hướng tiếp cận tích hợp cho lưu vực sông Đà.

1.3. Đề xuất khung nghiên cứu tích hợp

Trên cơ sở đó, nghiên cứu xây dựng khung mô hình tích hợp giữa mô hình thủy văn, dữ liệu mở và thông tin điều tiết hồ chứa nhằm nâng cao độ tin cậy mô phỏng dòng chảy. Khung nghiên cứu được thể hiện tại Hình 1.2.



Hình 1.2 Sơ đồ phương pháp nghiên cứu

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

2.1. Các dữ liệu sử dụng

Các nguồn dữ liệu đầu vào phục vụ nghiên cứu được tổng hợp và trình bày trong Bảng 2.1.

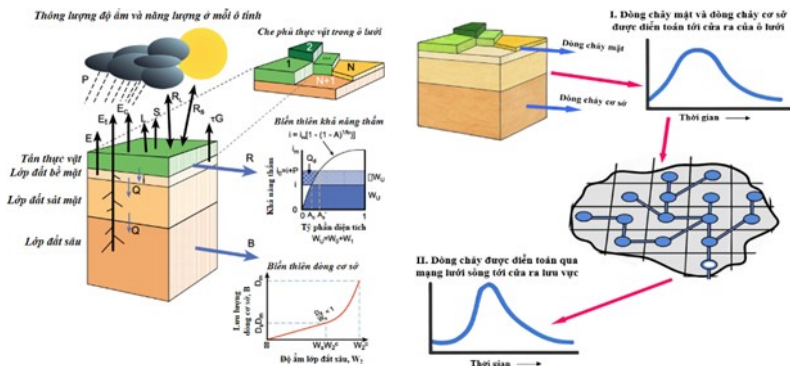
Bảng 2.1 Tổng quan về các bộ dữ liệu được sử dụng và nguồn của chúng

Dữ liệu	Thời gian	Mục đích
Lưu lượng dòng chảy	1981-2020	Hiệu chỉnh, kiểm định mô hình
Mưa lưới Việt Nam (VnGP)	1981-2020	Dữ liệu đầu vào mô hình VIC
Mưa lưới Trung Quốc (CHM)	1981-2020	Dữ liệu đầu vào mô hình VIC
Lưới vận tốc gió, nhiệt độ lớn nhất, nhỏ nhất	1981-2020	Dữ liệu đầu vào mô hình VIC
Mô hình số độ cao (DEM)	-	Dữ liệu thiết lập mô hình VIC
Bản đồ đất và các đặc tính của các loại đất	1992-2020	Dữ liệu thiết lập mô hình VIC
Bản đồ sử dụng đất	1992-2020	Dữ liệu thiết lập mô hình VIC
Dữ liệu viễn thám (Sentinel 1,2)	2016 - 2023	Dữ liệu thiết lập tham số hồ chứa

2.2. hương pháp xác định điểm biến đổi và phân tích xu thế trong chuỗi thủy văn không dừng

Nghiên cứu xác định điểm biến đổi của chuỗi khí tượng – thủy văn bằng các kiểm định Pettitt, SNHT và Buishand, qua đó nhận diện sự thay đổi về đặc trưng thống kê và phân chia chuỗi thành các giai đoạn tương đối đồng nhất. Trên cơ sở đó, hồi quy tuyến tính được áp dụng để phân tích xu thế của các yếu tố khí tượng – thủy văn theo từng giai đoạn.

2.3. Mô hình VIC



Hình 2.1 Sơ đồ biểu diễn mô hình thủy văn VIC

Mô hình Biến thiên khả năng thấm (VIC) (Liang và cộng sự, 1994) là mô hình thủy văn bán phân bố dựa trên các quy luật vật lý của chu trình thủy văn, mô phỏng đồng thời cân bằng nước và cân bằng năng lượng, trong đó xét đến tương tác khí quyển – thảm thực vật – đất cũng như ảnh hưởng của thảm thực vật và độ ẩm đất đến các quá trình trao đổi đất – khí quyển.

2.4. Phương pháp hiệu chỉnh tham số mô hình

Thuật toán SCE-UA (Shuffled Complex Evolution – University of Arizona), do Duan et al. (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 tham số; (3) tiến hóa cạnh tranh; và (4) xáo trộn các phức hợp.

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

2.5.1. Hạn chế công thức hệ số tác động của Wang

Trên cơ sở đó, Wang và cộng sự (2010) đề xuất một khung phân tích định lượng nhằm tách biệt ảnh hưởng của khí hậu và hoạt động con người đối với biến đổi dòng chảy. Theo cách tiếp cận này, biến đổi dòng chảy trong giai đoạn i được coi là tổng hợp của hai thành phần: tác động của biến động khí hậu I_{CV}^i và tác động của hoạt động con người I_{HA}^i , được biểu diễn như sau:

$$RO^i = I_{CV}^i + I_{HA}^i = \frac{O^i}{O^{base}} - 1 \quad (2.1)$$

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

$$RC^i = I_{CV}^i = \frac{R^i}{R^{base}} - 1 \quad (2.2)$$

Khung phân tích của Wang và cộng sự (2010) có ưu điểm là đơn giản, dễ áp dụng và minh bạch trong việc định lượng vai trò tương đối của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh đối với dòng chảy, nên được sử dụng rộng rãi ở quy mô lưu vực. Tuy nhiên, phương pháp này dựa trên giả định tuyến tính, chỉ phù hợp khi tác động của khí hậu và con người cùng chiều; trong trường hợp hai tác động ngược dấu, khả năng áp dụng bị hạn chế. Ngoài ra, việc đồng nhất dòng chảy tự nhiên với dòng chảy tự nhiên hóa có thể gây sai số do bất định mô hình, và khung phân tích chưa quy định rõ cách lựa chọn giai đoạn cơ sở và giai đoạn đánh giá.

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

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 (**Error! Reference source not**

found.). Phương trình (2.1) có thể được viết lại như sau:

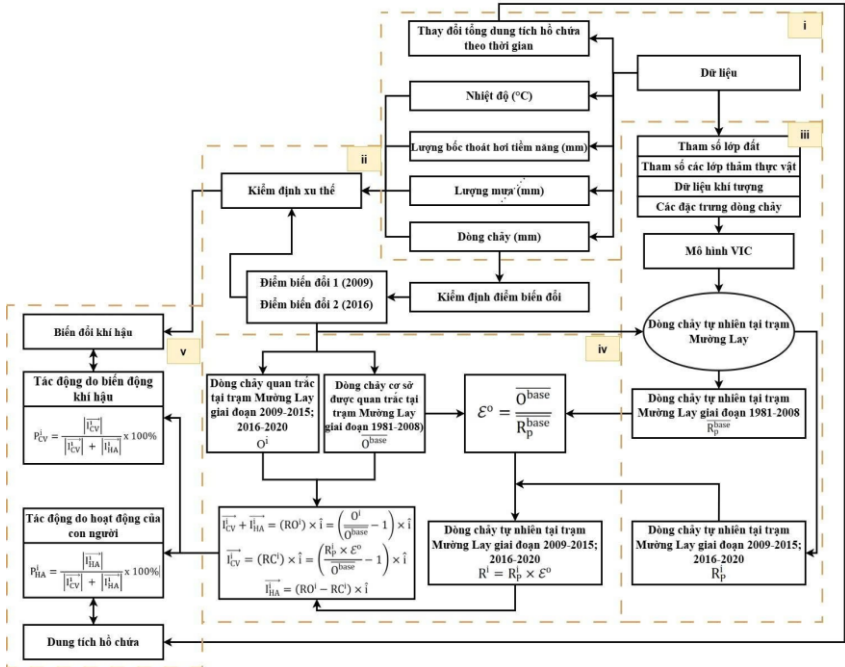
$$(RO^i) \times \hat{i} = \overrightarrow{I_{CV}^i} + \overrightarrow{I_{HA}^i} = \left(\frac{O^i}{O^{base}} - 1 \right) \times \hat{i} \quad (2.3)$$

với $\hat{i}$ là vector đơn vị trong không gian vector một chiều. Phương trình (2.2) được viết lại như sau:

$$(RC^i) \times \hat{i} = \overrightarrow{I_{CV}^i} = \left(\frac{R^i}{R^{base}} - 1 \right) \times \hat{i} \quad (2.4)$$

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

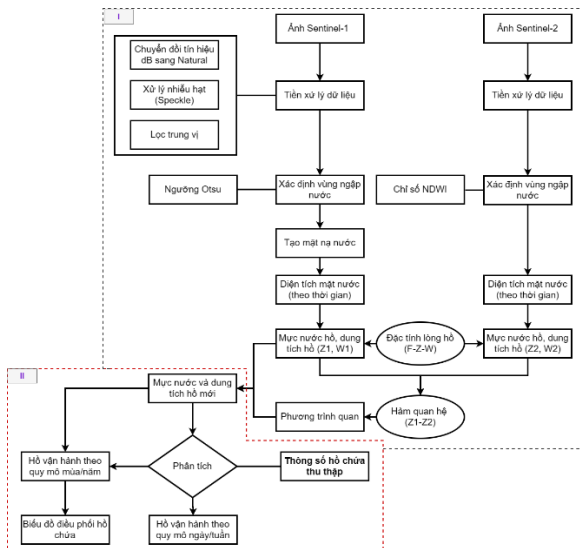
Sơ đồ khối các bước và cách áp dụng cho lưu vực sông Đà được minh họa trong Hình 2.2.



Hình 2.2 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

2.6. Phương pháp khai thác dữ liệu viễn thám để xác định tham số hồ chứa

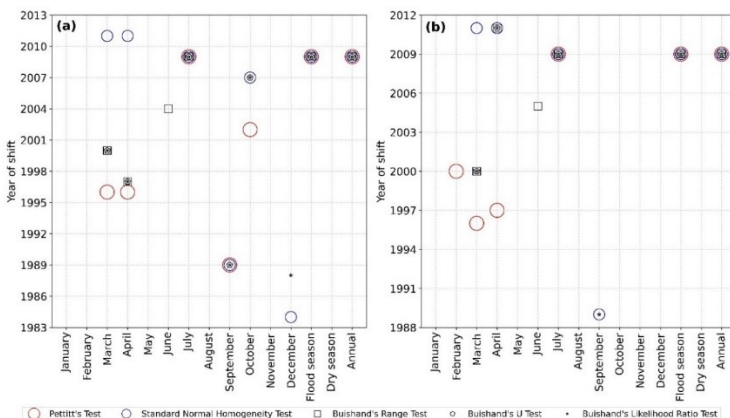
Quy trình phương pháp sử dụng ảnh Sentinel-1 và Sentinel-2 để trích xuất diện tích mặt nước theo thời gian, xây dựng quan hệ cao trình – diện tích – dung tích và suy ra mực nước, dung tích hồ. Trên cơ sở đó, quy tắc vận hành hồ chứa theo ngày, tuần hoặc mùa được suy luận và kiểm chứng bằng dữ liệu hiện có trước khi tích hợp vào mô hình thủy văn.



Hình 2.3 Quy trình các bước tính toán xây dựng quy tắc vận hành hồ chứa

CHƯƠNG 3 KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

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



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

Kết quả kết hợp 5 kiểm định cho thấy năm 2009 là điểm biến đổi rõ rệt của dòng chảy năm và mùa lũ; sau thời điểm này, lưu lượng trung bình giảm từ 1.176 xuống 1.052 m³/s, trong khi độ lệch chuẩn và hệ số biến thiên tăng đáng kể. Sự thay đổi đồng thời về mức trung bình và độ phân tán, cùng với sự đồng thuận của các kiểm định, khẳng định chuỗi dòng chảy tại Mường Láy có tính không dừng, là cơ sở để phân chia các giai đoạn nghiên cứu. Năm 2016 được chọn làm mốc thực tiễn gắn với vận hành hồ Lai Châu.

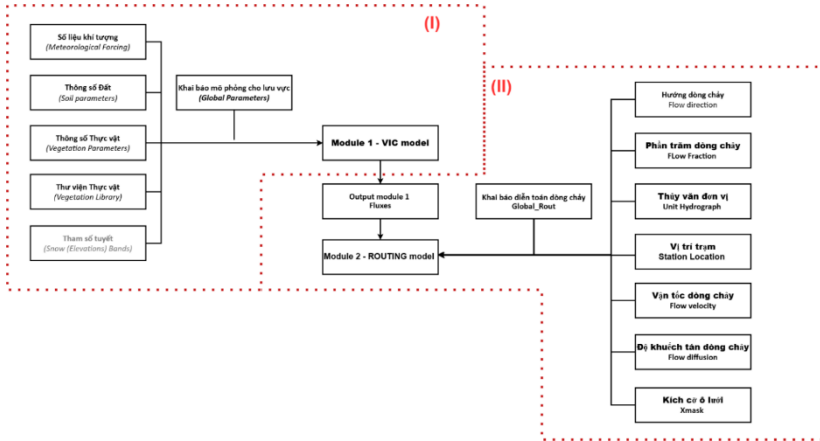
3.2. Phân tích xu thế của một số yếu tố khí hậu

Giai đoạn 1981–2020, nhiệt độ và bốc hơi tiềm năng trên lưu vực có xu thế tăng, trong khi lượng mưa, đặc biệt **mưa mùa lũ**, có xu thế giảm; sự kết hợp này làm giảm nguồn nước hiệu dụng và góp phần tạo xu

thể giảm của dòng chảy năm và mùa lũ. Ngược lại, **dòng chảy mùa kiệt có xu thế tăng nhẹ**, không hoàn toàn phù hợp với biến động khí hậu tự nhiên, cho thấy vai trò ngày càng rõ của điều tiết hồ chứa trong phân bổ lại dòng chảy theo mùa. Điểm biến đổi năm 2009, trùng với giai đoạn gia tăng xây dựng và vận hành các hồ chứa thượng nguồn (2005–2009), cùng với sự giảm dòng chảy năm và mùa lũ nhưng tăng dòng chảy mùa kiệt, cho thấy **BĐKH và hoạt động hồ chứa tác động đồng thời và theo những hướng khác nhau đến chế độ dòng chảy**. Đây là cơ sở để luận án tiếp tục định lượng riêng mức đóng góp của BĐKH và hoạt động nhân sinh ở Mục 3.5.

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

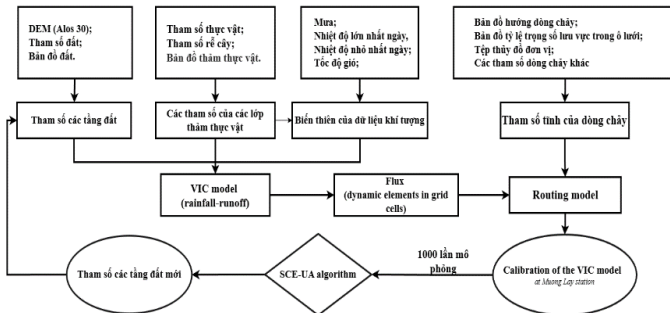
Việc thiết lập mô hình VIC được thực hiện thông qua hai mô-đun gồm Module 1 – VIC và Module 2 – ROUTING. Module 1 sử dụng các nhóm dữ liệu chính gồm khí tượng, tham số đất và thảm phủ thực vật, được chuẩn hóa theo không gian và thời gian để mô phỏng các quá trình cân bằng nước và năng lượng trên lưu vực. Module 2 sử dụng các thông tin hướng dòng chảy, tỷ lệ diện tích lưu vực trong ô lưới, thủy văn đơn vị (UH), vị trí trạm, vận tốc, độ khuếch tán dòng chảy và kích thước ô lưới, chủ yếu được xây dựng từ DEM, mạng sông và lưới mô hình bằng công cụ GIS. Các nhóm dữ liệu được đồng bộ về hệ tọa độ, phạm vi và cấu trúc đầu vào, qua đó thiết lập liên kết giữa các ô lưới, mạng sông và cửa ra lưu vực, phục vụ mô phỏng quá trình hình thành và truyền dòng chảy.



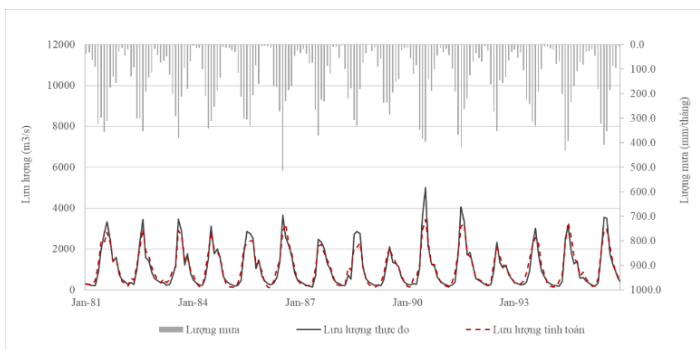
Hình 3.2 Sơ đồ các file đầu vào cho mô hình VIC

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

Luận án sử dụng chuỗi lưu lượng quan trắc tại trạm Mường Lay giai đoạn 1981–1995 để hiệu chỉnh và giai đoạn 1996–2008 để kiểm định mô hình VIC, thông qua chương trình hiệu chỉnh tự động viết bằng Python (Calibration.py) cho 6 tham số chính gồm bin, D2, D3, Ds, Dmax và Ws.



Hình 3.3. Sơ đồ quy trình hiệu chỉnh tự động mô hình VIC



Hình 3.4. Biến trình lưu lượng trung bình tháng tính toán và thực đo tại Mùòng Lay giai đoạn (1981-1995)

Mô hình VIC được hiệu chỉnh giai đoạn 1981–1995 tại Mùòng Lay bằng SCE-UA với 6 thông số, cho kết quả mô phỏng khá tốt, NSE đạt 0,88–0,91 tại Mùòng Lay và 0,74–0,82 tại Nậm Giàng. Bộ thông số sau hiệu chỉnh tiếp tục được kiểm định độc lập giai đoạn 1996–2008 tại Mùòng Lay, Nậm Giàng và Pô Lếch, với NSE đạt 0,76–0,90, cho thấy khả năng tái hiện tương đối tốt chế độ dòng chảy trước khi các hồ chứa thượng nguồn đi vào vận hành. Kết quả theo bước thời gian tháng nhìn chung tốt hơn bước ngày. Bộ thông số này được lựa chọn làm bộ thông số cơ sở cho mô phỏng giai đoạn sau năm 2009. Tuy nhiên, khi áp dụng cho giai đoạn sau 2009 mà chưa xét điều tiết hồ chứa, chất lượng mô phỏng giảm rõ rệt, đặc biệt tại hồ Lai Châu giai đoạn 2016–2020 (NSE = 0,59). Kết quả cho thấy chế độ dòng chảy sau năm 2009 biến đổi rõ rệt, cần định lượng mức đóng góp của BĐKH và hoạt động nhân sinh lên chế độ dòng chảy sông Đà.

3.5. Đánh giá tác động của BĐKH và hoạt động nhân sinh lên dòng chảy sông Đà

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

Để giảm thiểu ảnh hưởng của sai số mô hình trong đánh giá tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh lên dòng chảy sông Đà, nghiên cứu sử dụng tỷ lệ chênh lệch giữa dòng chảy khôi phục và dòng chảy tự nhiên theo các phương trình (2.15) và (2.16). Giai đoạn 1981–2008 được chọn làm giai đoạn cơ sở, đại diện cho điều kiện dòng chảy tự nhiên, trong đó độ lệch chủ yếu phản ánh sai số mô hình. Trên cơ sở đó, dòng chảy tự nhiên trong các giai đoạn 2009–2015 và 2016–2020 được hiệu chỉnh nhằm cô lập tác động của con người. Kết quả cho thấy hệ số độ lệch trung bình năm $\varepsilon = 0,984$, trong khi các giá trị tương ứng cho mùa lũ và mùa kiệt lần lượt là 0,934 và 1,093.

3.5.2. Phân tích tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người theo các giai đoạn

Dựa trên các phương trình (2.12)–(2.19), sự khác biệt giữa dòng chảy quan trắc và dòng chảy tự nhiên được quy cho tác động của hoạt động con người trong lưu vực. Kết quả cho thấy tác động của biến đổi khí hậu chiếm ưu thế so với hoạt động nhân sinh đối với dòng chảy năm và mùa lũ, với tỷ lệ đóng góp lần lượt đạt 60,4–75,5% (năm) và 51,9–59,8% (mùa lũ) trong các giai đoạn 2009–2015 và 2016–2020. Ngược lại, trong mùa kiệt, vai trò của hoạt động con người trở nên trội hơn sau năm 2015, khi tỷ lệ đóng góp của khí hậu giảm mạnh từ 71,24% xuống còn 30,02%. Điều này cho thấy biến đổi khí hậu chi phối chủ yếu dòng chảy lũ và năm, trong khi dòng chảy mùa kiệt ngày càng chịu ảnh hưởng mạnh từ các can thiệp của con người.

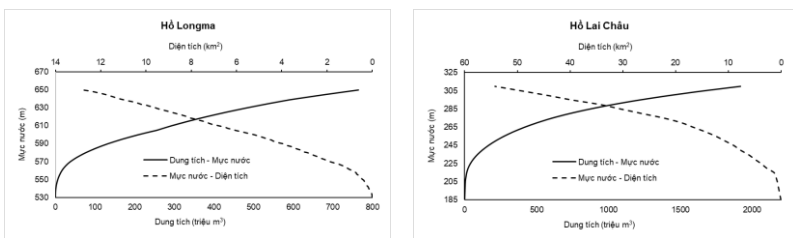
3.5.3. Phân tách tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động của con người theo quy mô từng năm

Kết quả đối chiếu với bằng chứng thực nghiệm cho thấy vai trò chi phối khác nhau của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh theo từng quy mô. Ở quy mô năm, biến đổi khí hậu là yếu tố trội (60–75%), trong khi tác động của con người chiếm khoảng 25–40% và tăng mạnh trong các giai đoạn tích nước hồ chứa (đặc biệt năm 2015). Ở mùa lũ, hai tác động có mức độ tương đương giai đoạn 2009–2015, nhưng về sau khí hậu chiếm ưu thế; tác động nhân sinh nhìn chung làm suy giảm dòng chảy do cơ chế tích nước và cất lũ. Ngược lại, ở mùa kiệt, biến đổi khí hậu vẫn chi phối, song hoạt động nhân sinh thường có xu hướng làm tăng dòng chảy thông qua xả nước hồ chứa, ngoại trừ các năm hạn hán nghiêm trọng khi nhu cầu sử dụng nước thượng nguồn làm suy giảm dòng chảy về hạ du.

3.6. Kết quả phân tích, xác định thông số và quy luật vận hành hồ chứa phía Trung Quốc

3.6.1. Các đường đặc tính lòng hồ

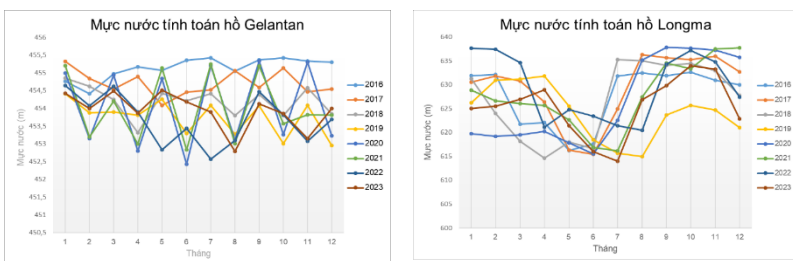
Các đường đặc tính lòng hồ (quan hệ mực nước – diện tích – dung tích) của 10 hồ chứa phía Trung Quốc được xác định từ các ảnh viễn thám và DEM như đã trình bày ở trên. Hai hồ chứa là Pắc Ma và Lai Châu được tham khảo theo quy trình vận hành thực tế của từng hồ. Hình 3.5 thể hiện các đường đặc tính lòng hồ của hồ Longma ở Trung Quốc và Hồ Lai Châu ở Việt Nam.



Hình 3.5 Đường đặc tính lòng hồ của hồ Longma (trái) và Lai Châu (phải)

3.6.2. Quy trình vận hành của các hồ chứa

Phân tích chuỗi mực nước giai đoạn 2016–2023 cho thấy các hồ chứa thượng nguồn sông Đà có thể chia thành hai nhóm vận hành chính. Nhóm điều tiết ngày/tuần (Jupudu, Gelantan, Sanjiangkou, Tukahe) có biên độ dao động mực nước nhỏ, ổn định quanh năm và ít biến đổi theo mùa, phản ánh chế độ vận hành ngắn hạn. Ngược lại, nhóm điều tiết theo mùa/năm (Yayangshan, Shimenkan, Longma, Puxiqiao, Sinanjiang, Nalan) thể hiện biên độ dao động mực nước lớn theo tháng, với chu trình tích nước mùa mưa và xả nước mùa khô phục vụ phát điện, cấp nước và cất lũ. Sự phân loại này phù hợp với thông tin công bố và là cơ sở quan trọng để mô phỏng, dự báo và quản lý nguồn nước hiệu quả.



Hình 3.6. Mực nước hồ Gelantan – điều tiết ngày/tuần (trái) và hồ Longma - điều tiết năm/mùa (phải) giai đoạn 2016-2023

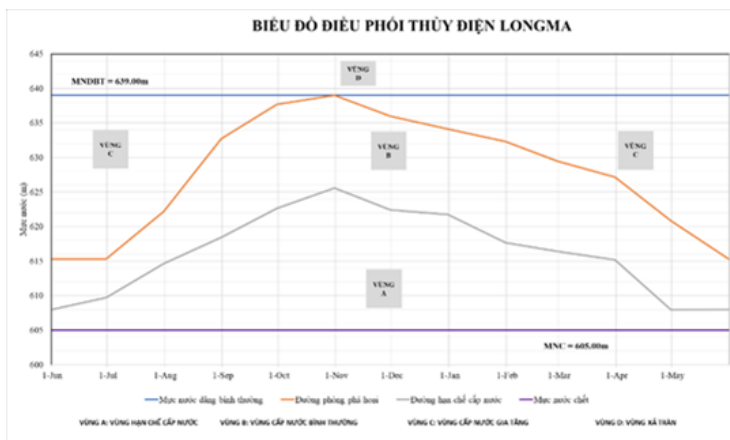
3.6.3. Xác định các thông số hồ chứa và các biểu đồ điều phối

Từ chuỗi mực nước và dung tích hồ xác định bằng ảnh viễn thám, các tham số đặc trưng của hồ chứa được ước tính và các biểu đồ điều phối cho nhóm hồ điều tiết theo mùa/năm phía Trung Quốc được xây dựng.

Hình 3.7 minh họa biểu đồ điều phối của hồ Longma, đại diện cho đặc điểm vận hành của các hồ Yayangshan, Shimenkan, Puxiqiao, Sinanjiang và Nalan.

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

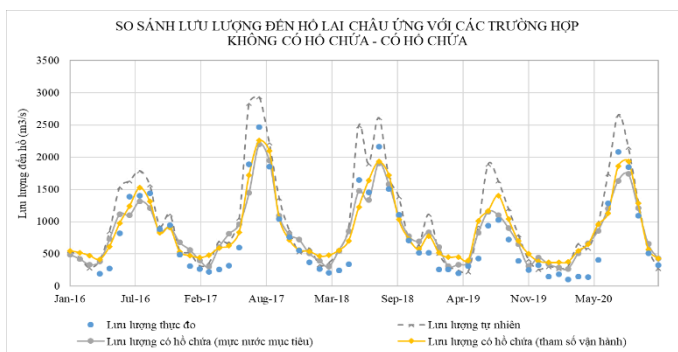
Nghiên cứu tham số hóa quy trình vận hành các hồ chứa thượng nguồn Trung Quốc theo hai nhóm chế độ điều tiết. Đối với các hồ điều tiết mùa/năm (Yayangshan, Shimenkan, Longma, Puxiqiao, Sinanjiang, Nalan), hai phương án được xây dựng gồm OP2 (điều tiết theo mực nước mục tiêu suy luận từ ảnh viễn thám) và OP5 (quy trình vận hành theo tháng với 48 tham số). Đối với các hồ điều tiết ngày/tuần (Jupudu, Gelantan, Sanjiangkou, Tukahe), phương án OP3 được áp dụng với 4 tham số đặc trưng cho chu kỳ ngắn hạn. Các phương án này tạo cơ sở linh hoạt để tích hợp vận hành hồ chứa vào mô hình VIC-RES và đánh giá tác động điều tiết thượng nguồn đến dòng chảy về Việt Nam.



Hình 3.7 Biểu đồ điều phối hồ chứa Longma, điều tiết mùa/năm được xây dựng

3.7. Đánh giá chất lượng mô phỏng dòng chảy sông Đà sau khi hồ chứa phía Trung Quốc

Mô hình VIC được tích hợp thông số và quy luật vận hành của 12 hồ chứa lớn xác định từ dữ liệu viễn thám đa nguồn, với hai phương án điều tiết theo mực nước mục tiêu và quy luật vận hành, để mô phỏng giai đoạn sau năm 2009.

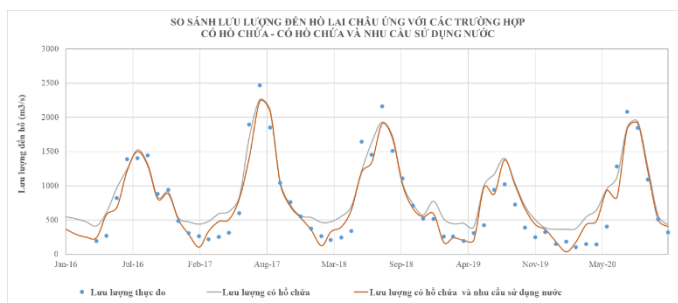


Hình 3.8 Lưu lượng trung bình tháng về hồ Lai Châu theo 3 phương án tính toán 2016-2020

Kết quả hiệu chỉnh tại hồ Lai Châu cho thấy khi xét vận hành hồ, NSE tăng từ 0,59 lên 0,83–0,84, đồng thời sai số tổng lượng giảm đáng kể; kiểm định tại Pô Lếch, NSE tăng từ 0,80 lên 0,86. Theo mùa, chất lượng mô phỏng mùa lũ được duy trì và cải thiện, đạt NSE 0,87 giai đoạn 2009–2011 và 0,88 giai đoạn 2016–2020; trong khi mùa kiệt suy giảm rõ rệt, đặc biệt giai đoạn 2016–2020 với $NSE = -0,54$ và sai số tổng lượng 57,69%. Kết quả cho thấy tích hợp vận hành hồ chứa cải thiện đáng kể mô phỏng, nhất là mùa lũ, nhưng chưa đủ giải thích biến động dòng chảy mùa kiệt, cần tiếp tục xem xét thay đổi mặt đệm và sử dụng nước.

3.8. Đánh giá kết quả mô phỏng khi tính đến thay đổi mặt đệm và lượng tưới

Nhu cầu nước tưới được tính bằng CROPWAT 8.0, sử dụng dữ liệu khí tượng, mưa từ VIC và thông tin mùa vụ. Nhu cầu tưới trung bình đạt khoảng 811,10 triệu m^3 /năm ở phía Trung Quốc và 339,19 triệu m^3 /năm ở phía Việt Nam, biến động theo điều kiện khí hậu và là cơ sở tích hợp sử dụng nước vào mô hình.



Hình 3.9 Lưu lượng trung bình tháng về hồ Lai Châu theo 2 phương án tính toán 2016-2020

Việc tích hợp thay đổi mặt đệm và sử dụng nước cải thiện rõ chất lượng mô phỏng quy mô năm, với NSE tăng từ 0,83 lên 0,88 và sai số tổng lượng giảm từ 19,21% xuống 4,04%. Hiệu quả đối với mùa lũ không

lớn, trong khi mùa kiệt được cải thiện nhưng vẫn hạn chế (NSE tăng từ $-0,54$ lên $0,18$), cho thấy còn các yếu tố nhân sinh khác, đặc biệt chế độ vận hành thực tế của hồ chứa và khai thác nước, cần tiếp tục được xem xét.

3.9. Thảo luận chung về độ tin cậy và khả năng ứng dụng

Nghiên cứu cho thấy phương pháp tích hợp dữ liệu viễn thám đa nguồn có độ tin cậy phù hợp trong xác định đặc tính và quy luật vận hành hồ chứa, đặc biệt trong điều kiện thiếu số liệu thượng nguồn; sai số đối chiếu mực nước và dung tích chủ yếu trong khoảng 5–15%. Việc tích hợp thông tin vận hành hồ chứa vào mô hình VIC giúp NSE tăng từ $0,59$ lên $0,83$ – $0,84$, khẳng định hiệu quả của cách tiếp cận này. Thuật toán SCE-UA cho thấy khả năng hiệu chỉnh tốt mô hình VIC và các thông số vận hành hồ chứa, kể cả trong điều kiện lưu vực phức tạp và thiếu dữ liệu. Tuy nhiên, mô hình vẫn còn hạn chế trong mô phỏng dòng chảy mùa kiệt, do chưa phản ánh đầy đủ các hoạt động nhân sinh và bất định về dữ liệu, cấu trúc và thông số mô hình. Nhìn chung, kết quả khẳng định khung tích hợp VIC – dữ liệu đa nguồn – vận hành hồ chứa có khả năng nâng cao độ tin cậy mô phỏng dòng chảy trên lưu vực sông Đà, đồng thời xác định rõ các hướng cần tiếp tục hoàn thiện.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận: Luận án đã làm rõ sự biến đổi chế độ dòng chảy sông Đà trong điều kiện tác động đồng thời của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh. Kết quả phân tích cho thấy chuỗi dòng chảy tại Mường Lay có tính không dừng rõ rệt, với điểm biến đổi quan trọng vào năm 2009; BĐKH có vai trò chủ yếu đối với biến động dòng chảy năm và mùa lũ, trong khi điều tiết hồ chứa và sử dụng nước ngày càng thể hiện rõ ảnh hưởng đối với dòng chảy mùa kiệt. Trên cơ sở đó, mô hình VIC được hiệu chỉnh, kiểm

định và tích hợp với dữ liệu viễn thám đa nguồn, thông tin vận hành hồ chứa, thay đổi mặt đệm và nhu cầu sử dụng nước, qua đó cải thiện đáng kể chất lượng mô phỏng, đặc biệt trong giai đoạn sau năm 2009. Phương pháp tích hợp cũng cho phép xác định và định lượng mức đóng góp tương đối của các nhóm tác động đến biến đổi dòng chảy, góp phần làm rõ cơ chế biến đổi chế độ thủy văn trên lưu vực sông Đà.

Kiến nghị: Trong thời gian tới, cần tiếp tục hoàn thiện thông tin vận hành hồ chứa và sử dụng nước, đặc biệt tại khu vực thượng nguồn thiếu dữ liệu; mở rộng mô phỏng ở bước thời gian ngày/tuần để phản ánh tốt hơn biến động ngắn hạn và các sự kiện cực đoan; đồng thời nghiên cứu kết hợp mô hình VIC với AI và các phương pháp đánh giá bất định nhằm nâng cao độ tin cậy mô phỏng và phân tách tác động. Kết quả nghiên cứu có thể làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về dự báo dòng chảy, đánh giá tác động xuyên biên giới và quản lý tài nguyên nước lưu vực sông Đà.

**Danh mục công trình khoa học của tác giả liên quan đến luận án
Tạp chí quốc tế:**

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. 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.

Tạp chí trong nước:

3. **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;
4. **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;