



Original Article

Hydrological Alterations of the Da River by Cascade Reservoir

Nguyen Y Nhu^{1,*}, Dang Dinh Kha¹, Dao Thi Hong Van², Doan Thi Thuy Linh¹

¹*Faculty of Meteorology Hydrology and Oceanography,*

VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

²*Vietnam National University, Hanoi, Hoa Lac, Hanoi, Vietnam*

Received 25th August 2025

Revised 15th October 2025; Accepted 30th October 2025

Abstract: Large reservoir systems can alter river flow regimes. In the Red River basin, the Da River is the dominant tributary, contributing over 40% of discharge at Son Tay. Since the cascade reservoirs of Hoa Binh (1988), Son La (2010), and Lai Chau (2016) began operation, flow regimes have shifted. This review applies the PRISMA approach and a hydrological indicator framework to synthesize the three decades of evidence. Findings show that wet-season discharge at Son Tay declined from ~83% to 69–72% of annual flow, whereas dry-season contributions rose by 10–20%. Flood peaks decreased by more than 30%, low flows were maintained above 1,500 m³/s, and pronounced hydropedaking occurred near dam outlets. Suspended sediment load dropped by 52–80%, and the center-of-timing of floods shifted later in the wet season. Attribution studies indicate human activities (reservoirs, land-use change) are responsible for 60–70% of discharge alterations, exceeding the 30–40% contribution of ENSO and climate. These results highlight the dual role of reservoirs: enhancing flood control, energy, and water security, while posing challenges for sediment balance, riverine ecology, and sustainable flow management.

Keywords: Da River, cascade reservoir, hydrological alteration, ENSO.

* Corresponding author.

E-mail address: nguyennhu@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5393>

Tác động hồ chứa đến chế độ thủy văn lưu vực sông Đà - Tổng quan

Nguyễn Ý Như^{1,*}, Đặng Đình Khá¹, Đào Thị Hồng Vân², Đoàn Thị Thùy Linh¹

¹*Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

²*Đại học Quốc gia Hà Nội, Hoà Lạc, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 25 tháng 8 năm 2025

Chỉnh sửa ngày 15 tháng 10 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 10 năm 2025

Tóm tắt: Hệ thống hồ chứa lớn đã và đang làm biến đổi căn bản chế độ thủy văn của nhiều lưu vực sông. Trong hệ thống sông Hồng, sông Đà đóng vai trò phụ lưu chủ chốt, cung cấp hơn 40% lưu lượng tại Sơn Tây. Sau khi cụm hồ bậc thang Hòa Bình (1988), Sơn La (2010) và Lai Châu (2016) đi vào vận hành, chế độ dòng chảy đã thay đổi rõ rệt. Tổng quan này sử dụng phương pháp PRISMA và khung chỉ số thủy văn để tổng hợp bằng chứng ba thập kỷ qua. Kết quả cho thấy tỷ lệ dòng mùa lũ tại Sơn Tây giảm từ ~83% xuống 69–72%, trong khi dòng mùa kiệt tăng 10–20%. Đỉnh lũ lớn giảm trên 30%, lưu lượng kiệt duy trì $\geq 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$, và hiện tượng biến động ngắn hạn xuất hiện mạnh ở hạ lưu gần đập. Tải phù sa giảm 52–80%, dịch chuyển trung tâm phân bố dòng chảy lũ muộn hơn. Phân tích cho thấy tác động nhân sinh (hồ chứa, sử dụng đất) chiếm 60–70% biến đổi, vượt trội so với ENSO và khí hậu (30–40%). Những kết quả này khẳng định vai trò kép của hồ chứa, vừa đảm bảo an ninh nước, năng lượng, vừa tạo thách thức về phù sa, sinh thái và quản lý dòng chảy bền vững.

Keywords: Lưu vực sông Đà, hồ chứa, chế độ dòng chảy, ENSO.

1. Giới thiệu

Hồ chứa là một trong những can thiệp nhân sinh quan trọng nhất đối với hệ thống sông ngòi trên toàn cầu. Với các mục đích như phát điện, kiểm soát lũ, tưới tiêu và cấp nước, các công trình thủy điện lớn đã làm thay đổi căn bản chế độ thủy văn tự nhiên [1, 2]. Thông qua việc điều chỉnh thời gian, biên độ và tần suất dòng chảy, hồ chứa phá vỡ nhịp điệu mùa vụ, làm suy giảm cực trị, và biến đổi động lực thủy văn hạ lưu, kéo theo hệ quả đến hình thái sông, vận chuyển phù sa, hệ sinh thái thủy sinh và sinh kế con người [3, 4]. Trên phạm vi toàn cầu, ước tính hơn một nửa các hệ thống sông lớn chịu ảnh hưởng mạnh của vận hành đập [5], khẳng định nghiên cứu tác

động hồ chứa là một trọng tâm của khoa học và quản lý tài nguyên nước hiện nay.

Tại Việt Nam, sông Đà (Black River) là phụ lưu lớn nhất của hệ thống sông Hồng, đóng góp khoảng 40% tổng lưu lượng thường niên tại Sơn Tây, cửa ngõ thượng nguồn của Hà Nội [6]. Lưu vực sông Đà có đặc trưng địa hình dốc, mưa theo mùa gió mùa nhiệt đới, dẫn đến chế độ dòng chảy phân hóa rõ: mùa lũ tập trung từ tháng VI–X và mùa kiệt từ XI–IV [7]. Trong bốn thập kỷ qua, ba hồ chứa lớn bậc thang – Hòa Bình (1988), Sơn La (2010) và Lai Châu (2016) – đã được xây dựng, hình thành cụm thủy điện lớn nhất Đông Nam Á với tổng công suất trên 6.000 MW [8]. Các hồ này không chỉ phục vụ phát điện và cắt lũ mà còn làm thay đổi căn bản chế độ dòng chảy

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: nguyennhu@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5393>

hạ lưu. Tuy nhiên, các chuỗi quan trắc dòng chảy và phù sa trên sông Đà vẫn còn thiếu đồng bộ, đặc biệt trước thập niên 1990. Hạn chế này đặt ra nhu cầu cấp thiết về một tổng quan hệ thống nhằm tổng hợp, đối chiếu và đánh giá nhất quán các kết quả rời rạc trong ba thập kỷ qua.

Các nghiên cứu trước đây cho thấy tác động đáng kể: hồ Hòa Bình đã làm giảm đỉnh lũ tại Hà Nội, với mức giảm lũ thiết kế tần suất 1% tới gần 30% [9], trong khi dòng mùa kiệt tăng lên, đảm bảo tưới tiêu và cấp nước cho đồng bằng [6]. Tuy nhiên, các đánh giá chủ yếu tập trung vào một hồ riêng lẻ hoặc một số chỉ số cụ thể. Chưa có nghiên cứu nào xem xét toàn bộ hệ thống bậc thang như một chỉnh thể liên kết, đánh giá hiệu ứng tích lũy và biến đổi đa thang của chế độ dòng chảy. Ngoài ra, các chỉ số được sử dụng giữa các nghiên cứu còn thiếu thống nhất, khiến việc tổng hợp và so sánh theo thời gian - không gian gặp khó khăn.

Nghiên cứu này lần đầu tiên tổng hợp có hệ thống toàn bộ bằng chứng ba thập kỷ (1980–2024) về tác động hồ chứa trên sông Đà bằng phương pháp PRISMA, kết hợp với khung chỉ số thủy văn chuẩn hóa (IHA/RVA) và khung phân tách đa thang nhằm tách biệt tác động hồ chứa, ENSO và biến đổi khí hậu. Cách tiếp cận này cho phép lượng hóa sự thay đổi định lượng của chỉ số thủy văn, phân loại theo bốn giai đoạn vận hành (G0–G3) và ba vùng hạ lưu (gần – trung – xa), qua đó cung cấp một bức tranh tích hợp mà các nghiên cứu trước chưa đạt được.

Từ cơ sở đó, bài báo này hướng tới ba mục tiêu chính: i) Tổng hợp hệ thống bằng chứng về tác động của hồ chứa đến chế độ dòng chảy sông Đà; ii) Xác định các cơ chế và quy mô tác động chính, từ kiểm soát lũ, điều tiết kiệt, đến biến động ngắn hạn và vận chuyển phù sa; và iii) Chỉ ra các khoảng trống khoa học, định hướng nghiên cứu phục vụ quản lý bền vững hệ thống sông Hồng.

2. Tư liệu và phương pháp

2.1. Khung tổng quan

Bài báo áp dụng phương pháp tổng quan hệ thống dựa trên hướng dẫn PRISMA [10], được

điều chỉnh cho lĩnh vực thủy văn. Quy trình được thiết kế nhằm đảm bảo tính minh bạch, khả năng tái lập và bao quát đầy đủ các nghiên cứu về tác động hồ chứa đến chế độ dòng chảy sông Đà. Các bước chính bao gồm: i) Tìm kiếm tài liệu; ii) Sàng lọc và đánh giá tính phù hợp; iii) Trích xuất và mã hóa dữ liệu; iv) Tổng hợp và thẩm định chất lượng.

2.2. Chiến lược tìm kiếm tài liệu

Tìm kiếm toàn diện được thực hiện trên các cơ sở dữ liệu quốc tế (Web of Science, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink) và nguồn trong nước (Vietnam Journals Online, VNU Press, Kỷ yếu Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam). Tài liệu xám (báo cáo dự án, luận án, văn bản của EVN, MONRE, MARD) cũng được đưa vào nhằm phản ánh đầy đủ thực tiễn vận hành hồ chứa tại Việt Nam.

Từ khóa: (“Da River” hoặc “Black River” hoặc “Sông Đà”) và (“reservoir” hoặc “dam” hoặc “hydropower” hoặc “regulation”) và (“streamflow” hoặc “discharge” hoặc “flow regime” hoặc “hydrology”).

Thời gian: 1980–2024, bao quát giai đoạn trước khi xây dựng hồ Hòa Bình (1988), đến sau Lai Châu (2016).

Ngôn ngữ: Bao gồm cả tiếng Anh và tiếng Việt.

2.3. Tiêu chí lựa chọn và đánh giá tính phù hợp

Tổng cộng 124 tài liệu được xác định ban đầu. Sau khi loại bỏ trùng lặp ($n = 26$), còn 98 tài liệu được sàng lọc tiêu đề và tóm tắt; 52 tài liệu bị loại do không tập trung vào dòng chảy hoặc thiếu dữ liệu định lượng. Ở giai đoạn đánh giá toàn văn, 16 tài liệu không đáp ứng tiêu chí (thiếu đối chứng hoặc chỉ mô tả định tính). Kết quả cuối cùng 30 nghiên cứu (bao gồm 22 bài báo quốc tế, 5 trong nước, 3 báo cáo dự án) được đưa vào tổng hợp và phân tích.

Tiêu chí bao gồm:

Tập trung vào lưu vực sông Đà hoặc các đoạn hạ lưu sông Hồng chịu ảnh hưởng trực tiếp từ hồ chứa sông Đà.

Cung cấp dữ liệu thực đo hoặc mô phỏng dòng chảy trước–sau khi vận hành hồ.

Định lượng biến đổi thủy văn (lưu lượng trung bình, đỉnh/kiệt, chỉ số dòng chảy cơ sở BFI, biến động ngắn hạn, phân phối mùa).

Có so sánh giữa các giai đoạn (trước–sau hồ) hoặc giữa trạm ảnh hưởng và đối chứng.

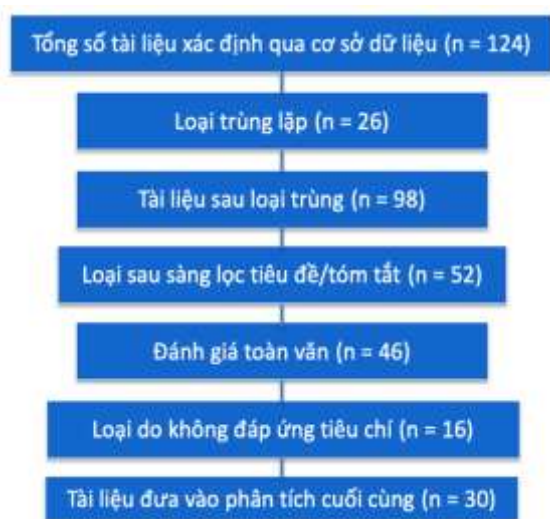
Tiêu chí loại trừ:

Nghiên cứu chỉ tập trung vào bùn cát hoặc chất lượng nước mà không có dữ liệu thủy văn.

Bài viết chỉ nêu quan sát định tính, thiếu phân tích định lượng.

Tài liệu trùng lặp hoặc grey literature kém chất lượng, thiếu phương pháp rõ ràng.

Quy trình lựa chọn được minh họa trong Hình 1 theo chuẩn PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), giúp đảm bảo tính minh bạch và tái lập trong tổng quan.



Hình 1. Sơ đồ quy trình lựa chọn tài liệu theo chuẩn PRISMA.

2.4. Đánh giá chất lượng và rủi ro sai lệch

Mỗi nghiên cứu được thẩm định theo ba tiêu chí: Độ đầy đủ dữ liệu: độ dài chuỗi (≥ 15 năm ưu tiên), có cả giai đoạn trước–sau hồ.

Độ nghiêm ngặt phương pháp: áp dụng kiểm định chuẩn, mô hình được hiệu chỉnh–kiểm định.

Độ rõ ràng phân tách nguyên nhân: mức độ tách biệt ảnh hưởng hồ chứa so với khí hậu và sử dụng đất.

Ngoài ra, xem xét sai lệch công bố và báo cáo chọn lọc. Mỗi tiêu chí được chấm theo thang thấp – trung bình – cao, hỗ trợ cân nhắc trọng số khi tổng hợp.

2.5. Phương pháp tổng hợp

Do tính không đồng nhất về thiết kế nghiên cứu và chỉ số, bài báo áp dụng phương pháp tổng hợp hỗn hợp, kết hợp giữa tổng hợp định tính và định lượng để tăng độ bao quát và khả năng khái quát hóa:

Tổng hợp định tính: các kết quả được nhóm và đối chiếu theo ba tiêu chí: *xu hướng biến đổi* (tăng/giảm/không đổi), *mức độ nhất quán* (tỷ lệ nghiên cứu cùng hướng biến đổi $\geq 60\%$ được xem là “nhất quán”), và *bối cảnh không gian - thời gian* (giai đoạn G0 - G3; khoảng cách đến hồ). Việc tổng hợp định tính giúp nhận diện các mẫu hình và mối tương quan nhân quả giữa vận hành hồ – thay đổi dòng chảy – biến động phù sa.

Tổng hợp định lượng: Các chỉ số thủy văn chính (Q_{mean} , Q_{max} , Q_{min} , %V mùa mưa/kiệt, BFI) được chuẩn hóa về cùng đơn vị và quy đổi sang % thay đổi giữa trước - sau hồ, cùng trạm, cùng tháng/mùa. Các giá trị trung vị (median) và tứ phân vị (IQR) được sử dụng thay vì trung bình để giảm ảnh hưởng của phân phối lệch hoặc chuỗi ngắn. Khi có thể, tính khoảng tin cậy 95% (CI) hoặc áp dụng vote-counting có trọng số theo độ dài chuỗi. Kết quả định lượng được trình bày trong Bảng 3–4 (thay đổi theo mùa, cực trị) và Bảng 6 (hiệu ứng tích lũy bậc thang).

Phân tích đa thang: Các kết quả được phân nhóm theo thang thời gian (giờ–ngày, mùa, liên năm, thập kỷ) và không gian (gần < 50 km; vừa $50–200$ km; xa > 200 km).

Đánh giá bất định: diễn giải sai khác giữa các nghiên cứu dựa trên độ dài chuỗi, phương pháp, và yếu tố ngoại sinh (ENSO, biến đổi khí hậu).

2.6. Phân kỳ nghiên cứu và tiêu chí chọn trạm

Để đảm bảo so sánh nhất quán, các giai đoạn và trạm nghiên cứu được xác định như sau:

G0: Trước Hòa Bình (≤ 1987);

G1: Hòa Bình đơn (1988–2009);

G2: Hòa Bình + Sơn La (2010–2015);

G3: Hòa Bình + Sơn La + Lai Châu (≥ 2016).

Bảng 1. Thông số các hồ chứa chính trên sông Đà

Hồ chứa	Năm tích nước/vận hành	Dung tích hữu ích (10^9 m^3)	Công suất (MW)	Mục tiêu chính
Hòa Bình	1988	~5,03	1.920	Phát điện, cắt lũ, cấp nước, cải thiện đồng kiệt.
Sơn La	2010	~6,5	2.400	Phát điện, cắt lũ, điều tiết liên hồ.
Lai Châu	2016	~0,799	1.200	Phát điện, điều tiết bổ sung, hỗ trợ vận hành Sơn La – Hòa Bình.

(Nguồn tổng hợp từ [7, 8, 10]).

Bảng 2. Các trạm thủy văn chính và vị trí hạ lưu so với hồ Hòa Bình

Trạm thủy văn	Vị trí/khoảng cách từ đập Hòa Bình	Độ dài chuỗi (năm)	Tỉ lệ thiếu số liệu	Ghi chú
Hòa Bình	Ngay dưới chân đập (0 km)	≥ 30 năm	<10%	Phản ánh trực tiếp xả hồ, dao động biến động ngắn hạn mạnh.
Tạ Bú	Trung lưu (thượng lưu Sơn La)	≥ 20 năm	<10%	Đại diện tác động vận hành Sơn La, Lai Châu.
Sơn Tây	~100 km hạ lưu	≥ 40 năm	<10%	Trạm chính để so sánh trước/sau hồ, quan trọng cho Hà Nội.
Hà Nội	~150–170 km hạ lưu	≥ 50 năm	<10%	Đo mực nước và lũ lịch sử, gần với nguy cơ lũ đô thị.

(Nguồn: [10-12]).

3. Lưu vực nghiên cứu

3.1. Đặc điểm tự nhiên và khí hậu

Sông Đà (còn gọi là Black River) là phụ lưu lớn nhất của hệ thống sông Hồng, bắt nguồn từ tỉnh Vân Nam (Trung Quốc), chảy qua các tỉnh Lai Châu, Sơn La, Hòa Bình và nhập vào sông Hồng tại Phú Thọ. Tổng diện tích lưu vực khoảng 52.900 km^2 , trong đó gần 50% diện tích nằm trên lãnh thổ Trung Quốc [11]. Địa hình lưu vực dốc và bị chia cắt mạnh, với độ cao từ trên 2.000 m ở thượng nguồn đến dưới 100 m tại vùng hạ lưu (Hình 2).

Khí hậu mang đặc trưng gió mùa nhiệt đới, phân hóa rõ rệt: mùa mưa từ tháng VI–X chiếm 70–80% tổng lượng mưa năm, mùa khô từ XI–IV chỉ chiếm 20–30% [6]. Lượng mưa trung bình năm dao động 1.600–2.500 mm, phân bố không đều, cao ở thượng nguồn phía bắc và thấp dần về hạ lưu. ENSO làm gia tăng biến động: các năm El Niño dòng chảy giảm mạnh vào mùa kiệt, trong khi La Niña gây lũ lớn và muộn [11].

3.2. Chế độ dòng chảy tự nhiên (trước khi có hồ chứa)

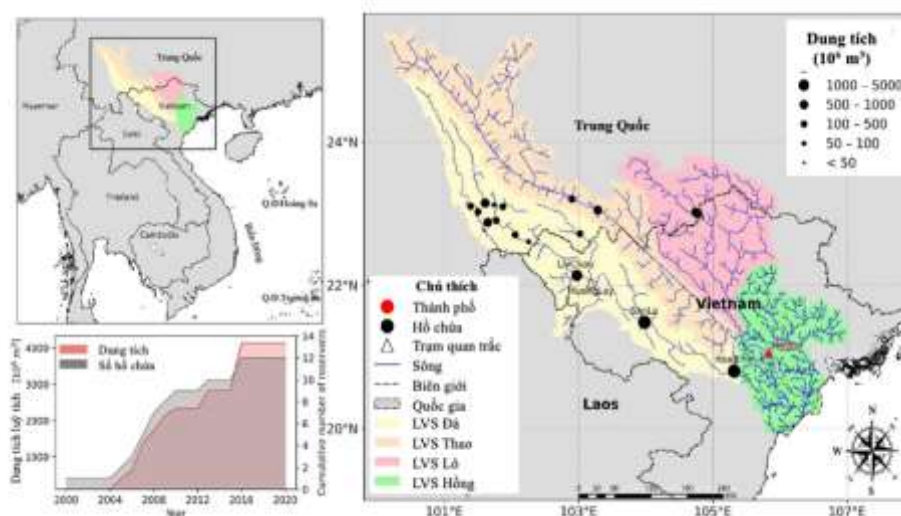
Trước khi hồ Hòa Bình tích nước (1988), sông Đà thể hiện chế độ dòng chảy điển hình của sông ngòi nhiệt đới gió mùa:

Mùa lũ (V–X) chiếm 65–75% tổng lượng năm, với các trận lũ lớn tập trung tháng VII–IX. Đỉnh lũ lên nhanh, biên độ lớn do địa hình dốc và khả năng tập trung nước mạnh. Trong trận lũ lịch sử 1971, mực nước Hà Nội đạt 13,3 m; lưu lượng cực đại tại Hòa Bình vượt $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Mùa kiệt (XI–IV) chỉ chiếm 25–35% tổng lượng năm, thấp nhất vào tháng I–III (5–10% tổng lượng). Lưu lượng có thể xuống dưới $600 \text{ m}^3/\text{s}$, gây khó khăn cho giao thông thủy và cấp nước. Biến động năm–năm khá lớn với hệ số biến thiên (CV) 15–20%.

Nồng độ bùn cát trung bình $\sim 1.190 \text{ mg/L}$, có thể đạt 12 g/L trong lũ lớn. Tổng tải phù sa năm khoảng 65 triệu tấn, chiếm hơn 50% nguồn cung phù sa cho đồng bằng sông Hồng [12].

Chế độ tự nhiên này vừa cung cấp nguồn năng lượng thủy điện dồi dào, vừa tiềm ẩn rủi ro lũ nghiêm trọng và hạn hán mùa kiệt cho hạ lưu.



Hình 2. Bản đồ khu vực nghiên cứu và hệ thống hồ chứa bậc thang sông Đà. Phạm vi lưu vực sông Đà (màu vàng) trải dài từ tây nam tỉnh Vân Nam (Trung Quốc) đến miền Bắc Việt Nam. Các điểm tròn biểu thị các vị trí hồ chứa chính (Hòa Bình, Sơn La, Lai Châu), tam giác biểu thị các trạm quan trắc lưu lượng. Độ lớn điểm tròn thể hiện dung tích hồ (10^6 – 10^9 m³), với dung tích tích lũy của ba hồ bậc thang đạt khoảng 20×10^9 m³ (~60 % dòng chảy năm). Hình nhỏ (góc trái) cho thấy quá trình gia tăng dung tích hồ theo thời gian (2000–2016), phản ánh sự mở rộng mạnh mẽ của hệ thống điều tiết dòng chảy trong ba thập kỷ qua.

3.3. Cấu trúc hệ thống hồ chứa

Trong hơn ba thập kỷ, trên sông Đà đã hình thành hệ thống hồ chứa bậc thang lớn nhất Việt Nam:

Hòa Bình (1988): dung tích toàn bộ $\sim 9,45 \times 10^9$ m³, công suất 1.920 MW. Mục tiêu: phát điện, cắt lũ, cấp nước.

Sơn La (2010): dung tích toàn bộ $\sim 9,26 \times 10^9$ m³, công suất 2.400 MW, hiện là nhà máy thủy điện lớn nhất Đông Nam Á.

Lai Châu (2016): dung tích toàn bộ $\sim 1,2 \times 10^9$ m³, công suất 1.200 MW, nằm gần biên giới Việt–Trung.

Ba hồ này tạo thành cụm điều tiết bậc thang chiến lược, cho phép kiểm soát lũ, tăng cường dòng chảy mùa kiệt và đảm bảo an ninh năng lượng quốc gia.

4. Tác động hồ chứa đến dòng chảy

4.1. Thay đổi theo mùa

Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng vận hành hồ chứa trên sông Đà không chỉ làm thay

đổi lượng nước, mà còn tái cấu trúc hoàn toàn nhịp điệu theo mùa của lưu vực.

Hệ thống hồ chứa bậc thang trên sông Đà gồm Hòa Bình (1988), Sơn La (2010) và Lai Châu (2016) đã tái định hình hoàn toàn cấu trúc theo mùa của dòng chảy trong hệ thống sông Đà–sông Hồng. Trước khi có hồ, hơn 80% tổng lượng dòng chảy năm tập trung vào mùa mưa (tháng V–X). Sau khi các hồ đi vào vận hành, tỷ lệ này giảm đáng kể, tại Sơn Tây từ 83% (1958–1987) xuống 69% (2009–2021), tại Hòa Bình từ 84% xuống 72% cùng giai đoạn [13, 18]. Ngược lại, dòng chảy mùa kiệt (XII–IV) tăng tương ứng 10–20%. Một số nhánh ghi nhận mức tăng mạnh hơn, chẳng hạn sông Đà tăng 48% và sông Đuống tới 109% trong mùa kiệt [14].

Sau khi hồ Sơn La (2010) và Lai Châu (2016) đi vào vận hành, dòng chảy lũ giảm 10–40%, trong khi dòng kiệt tăng 10–70% so với điều kiện tự nhiên [15]. Lưu lượng mùa khô tại Hòa Bình được duy trì ≥ 1.500 m³/s, thay vì < 600 m³/s trước 1988 [16]. Cơ chế tích nước mùa mưa, xả tăng mùa kiệt đã chuyển chế độ dòng chảy sông Đà từ tự nhiên gió mùa sang điều

tiết nhân tạo, mang lại lợi ích kiểm soát lũ và cấp nước nhưng gây thiếu hụt trầm tích hạ lưu.

Tổng hợp từ các nghiên cứu cho thấy ba xu thế nổi bật trong toàn hệ thống: i) Giảm tính mùa rõ rệt, tỷ lệ dòng mùa mưa giảm trung bình 10–40%, phản ánh quá trình “nhân tạo hóa” chế độ dòng chảy trong toàn lưu vực; ii) Tăng ổn định dòng nền, thể hiện qua tăng lưu lượng tối thiểu, mở rộng thời gian duy trì $Q_{min} \geq 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$, tạo điều kiện cải thiện cấp nước và giao thông thủy; iii) Sự phân hóa không gian của tác động – biến đổi mạnh ở khu vực gần hồ (Hòa Bình, Sơn La)

và giảm dần ở trung - hạ lưu, cho thấy hiệu ứng lan truyền điều tiết suy giảm theo khoảng cách.

So với các nghiên cứu đơn lẻ trước đây, tổng quan này lần đầu tiên chỉ ra tính nhất quán và quy mô điều tiết đa thang của chuỗi hồ bậc thang trên sông Đà, đồng thời định lượng hóa mức độ dịch chuyển từ chế độ “mưa - lũ tự nhiên” sang chế độ “điều tiết nhân tạo bán ổn định”. Kết quả tổng hợp khẳng định rằng thay đổi dòng chảy theo mùa không chỉ là hiện tượng cục bộ, mà là một đặc trưng hệ thống phản ánh sự chi phối lâu dài của vận hành liên hồ đến toàn bộ hạ lưu sông Hồng.

Bảng 3. Thay đổi chế độ mùa tại các trạm chính trên sông Đà

Trạm	Giai đoạn	%V mùa mưa (V–X)	%V mùa kiệt (XII–IV)	Q_{mean} (m^3/s)	Q_{min} (m^3/s)	Ghi chú – nguồn
Sơn Tây	1958–1987 (G0)	83%	17%	3740	<600	[6, 17]
Sơn Tây	2009–2021 (G3)	69%	31%	3389	≥ 1500	[18]
Hòa Bình	Trước 1988	84%	16%	~ 3600	<600	[19]
Hòa Bình	Sau 1989 (G1)	72%	28%	~ 3400	≥ 1500	[8]
Sơn La	Sau 2010 (G2)	–20–25% so với tự nhiên	+71.6%	–	$Q_{min} +6–129\%$	[16]
Tạ Bú	1988–1993	2235 mm (wet)	494 mm (dry)	1365 mm	–	[20]
Tạ Bú	1994–2004	2785 mm (wet)	691 mm (dry)	1738 mm	–	[20]
	Tổng hợp	Giảm 10–40%	Tăng 10–50%	Giảm nhẹ 5–10%	Tăng $\geq 100\%$ tại một số nhánh	Tổng hợp từ 6 nghiên cứu, giai đoạn 1958–2021

4.2. Lũ và cực trị dòng chảy

Hoạt động điều tiết của hệ thống hồ chứa trên sông Đà đã làm suy giảm rõ rệt các cực trị mùa lũ. Tại Sơn Tây, sau khi hồ Hòa Bình đi vào vận hành (1988), tổng lưu lượng mùa lũ giảm khoảng 14% (từ 86,9 xuống $75,2 \times 10^9 \text{ m}^3$), trong khi tổng dòng chảy năm chỉ giảm nhẹ 9% ($116 \times 10^9 \text{ m}^3$) [16]. Đỉnh lũ lịch sử năm 1971 từng đạt $37,800 \text{ m}^3/\text{s}$, làm mực nước Hà Nội dâng tới 13,3 m gây vỡ đê diện rộng [16]. Tuy nhiên, trong giai đoạn sau hồ (1996–2006), Q_{max} tại Sơn Tây chỉ còn khoảng $14,000 \text{ m}^3/\text{s}$ [17], nghĩa là thấp hơn $\geq 60\%$ so với lũ lịch sử.

Hồ Hòa Bình có khả năng cắt giảm đỉnh lũ tại Hà Nội từ 0,5–1,5 m [16] và kiểm soát hơn 100 trận lũ lớn có đỉnh tới $5,000 \text{ m}^3/\text{s}$. Trong trận

lũ năm 1996, lưu lượng lũ vào hồ đạt $22,650 \text{ m}^3/\text{s}$, nhưng sau điều tiết, lượng xả chỉ còn $13,000 \text{ m}^3/\text{s}$, giúp Hà Nội không vượt mức báo động nguy hiểm [7].

Tác động tích lũy của ba hồ cho thấy dung tích điều tiết tổng cộng đạt $\sim 20 \times 10^9 \text{ m}^3$ (tương đương 60% dòng chảy năm), khả năng cắt lũ hợp nhất khoảng $7 \times 10^9 \text{ m}^3$. Nhờ đó, đỉnh lũ tại Hà Nội được giảm 30–40% so với điều kiện tự nhiên, thời gian dâng lũ được kéo dài hơn (attenuation), và số năm vượt báo động III giảm mạnh so với giai đoạn trước hồ [13, 18].

4.3. Dòng chảy mùa kiệt và duy trì nguồn nước

Trái ngược với mùa lũ, dòng chảy mùa kiệt được nâng lên đáng kể nhờ xả điều tiết. Tại Sơn

Tây, lưu lượng mùa kiệt tăng 12% (16.3 lên 18.2×10⁹ m³). Trong giai đoạn sau 2000, lưu lượng trung bình mùa khô ổn định ở mức 1000–1500 m³/s, cao hơn nền tự nhiên dự kiến [13, 18].

Bảng 4. Các chỉ số cực trị trước và sau hồ tại một số trạm đại diện

Trạm/Chỉ số	Giai đoạn	Qmax (m ³ /s)	V mùa lũ (10 ⁹ m ³)	#ngày >BĐIII (Hà Nội)	#ngày >Q _{0.95} (Sơn Tây)	Nguồn
Sơn Tây – Qmax	Trước HB (≤1987)	37,800 (1971)	86,9	≥20 ngày	25–30 ngày	[17]
Sơn Tây – Qmax	Sau HB (1988–2009)	14,000	75,2	Giảm ≥50%	10–15 ngày	[11]
Hà Nội – Hmax	1971 (phản lực)	14,05–14,67 m	–	–	–	[21]
Hà Nội – Hmax	Sau HB (1996)	12,43 m (điều tiết)	–	0–2 ngày >BĐIII	–	[7]
Sơn Tây – Qmax	Sau SL (2010–2015)	Giảm thêm 15–20%	–	Giảm thêm ≥30%	5–10 ngày	[16]
Hà Nội – Hmax	Sau LC (≥2016)	<13,4 m (lũ 500 năm)	–	Rất hiếm vượt BĐIII	–	[22]

Ghi chú: #ngày >BĐIII” → “Số ngày mực nước vượt báo động III”.

Dòng chảy kiệt được duy trì ổn định hơn, song đôi khi việc ưu tiên tích nước cho phát điện hoặc phòng lũ có thể khiến một số đợt hạn kiệt cục bộ ở hạ lưu diễn ra kéo dài.

Các đợt xả liên hồ mùa khô (2–3 đợt/năm, 15–18 ngày) cung cấp ~5×10⁹ m³ nước cho đồng bằng (từ 2013 đến nay), góp phần cải thiện độ mặn hạ du [22].

Kết quả đánh giá cho thấy 60% nghiên cứu đạt mức “Cao (A)”, chủ yếu là các bài báo Q1–Q2 sử dụng chuỗi dài (>25 năm) và phương pháp mô hình hóa định lượng (ví dụ: [15, 16, 23]. Khoảng 30% đạt mức “Trung bình (B)”, thường có chuỗi ngắn hoặc chưa tách bạch rõ ảnh hưởng ENSO và hồ chứa (ví dụ: [6, 12]. 10% còn lại có độ tin cậy thấp (C) do thiếu dữ liệu thực đo hoặc chỉ mô tả định tính (một số báo cáo trong nước trước 2005).

4.4. Tải phù sa và năng lực vận chuyển

Sau khi hồ Hòa Bình tích nước, tải phù sa về Sơn Tây giảm 52–80%, tương đương bị giữ lại 53–82 10⁶ tấn/năm [6]. Quan hệ Q–SPM bị suy yếu: hệ số b giảm từ 1,05 xuống 0,95, phản ánh năng lực vận chuyển trầm tích giảm ở cùng một mức lưu lượng. Giai đoạn 2008–2013, lượng phù sa trung bình tại Sơn Tây chỉ còn 13,2 10⁶ tấn

/năm, giảm 90% so với kịch bản không hồ (~107 10⁶ tấn/năm) [23]. Điều này đồng nghĩa lũ mang ít bùn cát hơn, trong khi mùa kiệt dễ xuất hiện xói lòng do dòng chảy “trong” hơn.

Hồ Sơn La làm giảm phù sa tại Sơn Tây từ 119 xuống 46×10⁶ tấn/năm (–61%); tại cửa sông, từ 85 xuống 35×10⁶ tấn/năm (–59%), với hiệu suất giữ phù sa đạt tới 88% [12]. Chất lượng nước cũng biến đổi rõ rệt: TSS trung bình giảm từ 112 mg/L (2010) xuống 5 mg/L trong hồ Sơn La [24]. Giai đoạn 2011–2021, dòng chảy giảm ~13% nhưng tải bùn cát suy giảm tới ~90 cho thấy tác động hồ chứa (56–69%), vượt xa ảnh hưởng khí hậu (Bảng 5) [25].

Tổng hợp các kết quả cho thấy mùa lũ giảm 10–40 %, phù sa thiếu 50–90 %, gây xói lòng, suy thoái cửa sông và giảm bồi tụ đồng bằng.

Những biến đổi này không chỉ khẳng định vai trò chi phối của hệ thống hồ chứa đối với cân bằng bùn cát, mà còn nhấn mạnh các thách thức lớn cho quản lý tổng hợp tài nguyên nước và duy trì tính bền vững của đồng bằng sông Hồng.

4.5. Biến động ngắn hạn và dòng chảy cơ sở

Dao động ngắn hạn là đặc trưng nổi bật của hệ thống sông Đà, phản ánh sự thay đổi lưu lượng theo chu kỳ phụ tải điện. Biến động mạnh

nhất tại 50–100 km hạ lưu gần hồ Hòa Bình và giảm dần về Sơn Tây [26]. Càng gần hồ (Hòa Bình), biến động ngắn hạn mạnh, nhưng càng xa (Sơn Tây), biến động ngày được triệt tiêu bởi

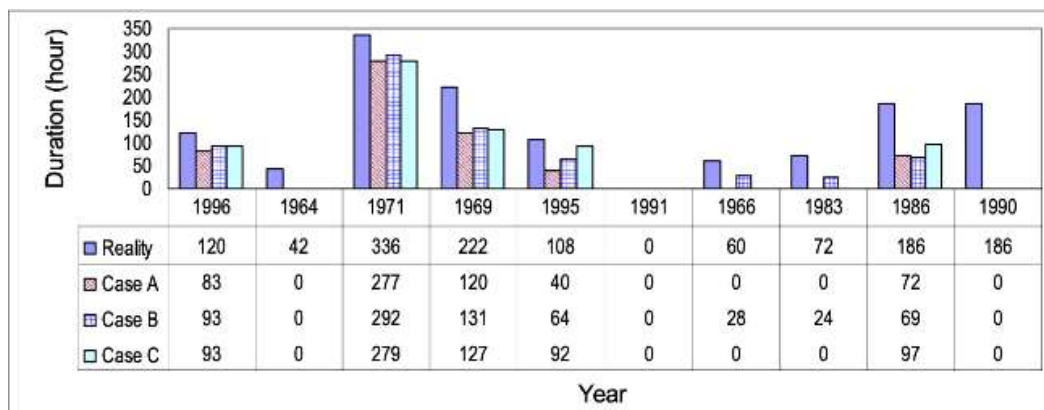
tích lũy không gian [18]. Chỉ số dao động dòng chảy cao hơn đáng kể so với các đoạn xa; tốc độ tăng dòng chảy tăng 57% và tốc độ giảm tăng 123% so với nền tự nhiên [11].

Bảng 5. Biến đổi lưu lượng (mm) tại trạm Lai Châu (LC) và Tạ Bú (TB) (1988–1993 vs. 1994–2004)

Trạm	Thời gian	Qobs ₁	Qobs ₂	Qsim_cli ₂	Δq_{tot}	Δq_{cli}	ΔQ_{hum}	Climate %	Human %
Lai Châu	Lũ	1726,8	1982,9	1816,4	256,1	89,6	166,5	35,0%	65,0%
	Kiệt	381,5	479,5	424,6	98,0	43,1	54,9	44,0%	56,0%
	Năm	1054,2	1231,1	1120,5	176,9	66,3	110,6	37,5%	62,5%
Tạ Bú	Lũ	2235,2	2784,9	2405,6	549,7	170,4	379,3	31,0%	69,0%

Dòng cơ sở được tăng cường nhờ xả điều tiết nhân tạo; BFI tăng 0,05–0,08 [23], nhưng không phản ánh bổ cập ngầm tự nhiên. Biến động ngắn hạn gây nhiều phân tách dòng nền, cần hiệu

chỉnh trước khi ước tính Q_{95} $7Q_{10}$. Quy trình vận hành liên hồ nên đặt ngưỡng tốc độ thay đổi xả và giới hạn dao động ngày để bảo vệ sinh thái hạ lưu.



Hình 3. Thời lượng vượt báo động III (BĐIII) (giờ/ngày) tại Hà Nội trước và sau vận hành hồ Hòa Bình. Biểu đồ thể hiện tổng số giờ và số ngày có mực nước vượt BĐIII tại trạm Hà Nội giai đoạn 1969–1996, so sánh giữa điều kiện tự nhiên (trước 1988) và sau khi hồ Hòa Bình vận hành (1989–1996). Cột màu xanh biểu thị giai đoạn trước đập, cột tím giai đoạn sau đập. Kết quả cho thấy số ngày lũ lớn giảm rõ rệt - từ trung bình 15–25 ngày/năm xuống dưới 5 ngày/năm sau khi có điều tiết, phản ánh hiệu quả cắt lũ đáng kể của hồ Hòa Bình trong việc hạ thấp mực nước lũ Hà Nội 0,5–1,5 m.

4.6. Thời điểm và thời lượng lũ

Sau 1989, đỉnh lũ đến muộn hơn và thời lượng lũ lớn giảm rõ rệt. Tâm thời gian dòng chảy (CoT) dịch muộn 20–30 ngày và số ngày $Q > Q_{0.95}$ giảm 50%. Tại Hà Nội, thời gian mực nước $> \text{BĐIII}$ giảm từ 15–25 ngày/năm xuống < 5 ngày sau hồ Hòa Bình (Hình 3) [18, 21, 26].

Bổ sung hồ thượng nguồn làm tăng dung tích phòng lũ hiệu dụng, nhờ đó cắt lũ đầu mùa tốt

hơn và dịch chuyển timing xuống cuối mùa [16, 17, 26]. Kết hợp Hòa Bình (1989) và Sơn La (2011) làm giảm đồng thời cả biên độ và tần suất lũ lớn [26].

4.7. Tác động tổng hợp của vận hành liên hồ

Vận hành liên hồ trên sông Đà tạo ra hiệu ứng tích lũy bậc thang – tái phân bố mùa, giảm cực trị, ổn định dòng nền và thiếu hụt trầm tích.

Bốn trục biến đổi chính gồm: i) Tái phân bố mùa; (ii) Giảm biên độ cực trị; (iii) Tăng ổn định dòng nền; và iv) Tích lũy trầm tích trong hồ.

Trước hồ, đỉnh lũ lịch sử tại Sơn Tây đạt 37,800 m³/s (1971). Sau G1, Q_{max} giảm ~14%; G2 giảm thêm 15–20%; G3 kiểm soát gần như toàn bộ lũ thượng nguồn, giúp mực nước lũ tại Hà Nội giảm 0,5–1,5 m so với nền tự nhiên. Đỉnh lũ trung bình giảm hơn 4,000 m³/s so với giai đoạn trước hồ [27].

Lưu lượng mùa khô tại Sơn Tây tăng từ mức <600 m³/s (nhiều đợt trước 1988) lên ổn định ≥1,500 m³/s theo quy trình vận hành sau 2010.

Q95 tăng 10–20% và 7Q10 tăng đáng kể trong G3. sau khi có hồ Hòa Bình, tỷ lệ dòng chảy mùa khô tại Sơn Tây tăng từ 20% lên khoảng 30–35% tổng lượng năm [27].

Tại Sơn Tây, tỷ lệ dòng mùa mưa giảm từ 83% (trước 1988) xuống 72% (2009–2021), trong khi mùa kiệt tăng từ ~17% lên 28–30%. Hiệu ứng rõ ràng nhất xuất hiện trong G3 khi bổ sung hồ Lai Châu. Xu thế này phản ánh sự dịch chuyển chế độ thủy văn theo hướng giảm độ nhọn, rút ngắn thời gian tập trung lũ và kéo dài chân kiệt, tương tự các lưu vực có điều tiết mạnh trên toàn cầu [2] (Bảng 6).

Bảng 6. Hiệu ứng tích lũy của bậc thang Đà

Chỉ số	G1	G2	G3	Xu thế
%V mùa mưa (Sơn Tây)	83%	75%	72%	Giảm dần
%V mùa kiệt (Sơn Tây)	17%	25%	28–30%	Tăng dần
Q _{max} (m ³ /s, Sơn Tây)	37,800 (1971)	–14%	–30%	Giảm rõ
Q95 (m ³ /s, Sơn Tây)	~950	1150	1300+	Tăng ổn định
Tải phù sa (10 ⁶ tấn/năm, Sơn Tây)	114–160	73	41	Giảm ~70%

*Q_{max} lưu lượng đỉnh lũ lớn nhất; Q95 lưu lượng trung bình 95% thời gian nhỏ hơn giá trị này; G1–G3: giai đoạn tích hợp dần hồ Hòa Bình, Sơn La và Lai Châu.

Sau hồ, chỉ số BFI tăng nhẹ (+0,05–0,08), phản ánh sự “ổn định hóa” dòng nền, chủ yếu do xả điều tiết. Tại sông Thao (không có hồ), BFI vẫn biến động mạnh, xác nhận vai trò nhân sinh.

Sự kết hợp này cho thấy quá trình “phẳng hóa” chế độ thủy văn, trong đó năng lượng dòng chảy mùa mưa được nén vào dung tích hồ, và giải phóng dần qua phát điện mùa kiệt.

Trước Hòa Bình, phù sa trung bình tại Sơn Tây đạt 114–160×10⁶ tấn/năm. Sau hồ, giảm còn 73×10⁶ tấn/năm (1986–1997) và xuống 41×10⁶ tấn/năm năm 2003 (~70% giảm). Hiệu suất giữ phù sa của bậc thang ước tính 70–90%, làm thiếu hụt nghiêm trọng trầm tích hạ lưu [28]. Điều này không chỉ là mất cân bằng bùn cát mà còn phản ánh sự tách rời chế độ thủy động lực - trầm tích, gây suy giảm mạnh quá trình tái bồi ở đồng bằng hạ lưu.

Mùa lũ, Lai Châu và Sơn La ưu tiên tích nước, chuyển áp lực cắt lũ xuống Hòa Bình, hồ này đóng vai trò quyết định trong việc hạ thấp đỉnh lũ tại Hà Nội. Trong mùa kiệt, cả ba hồ phối hợp xả để duy trì dòng chảy tối thiểu 1,500–1,800 m³/s tại Sơn Tây, đáp ứng nhu cầu tưới tiêu và cấp nước. Hiệu ứng tích lũy của bậc thang đã dịch chuyển chế độ dòng chảy từ gió mùa tự nhiên sang chế độ điều tiết nhân tạo, làm giảm mạnh cực trị lũ, tăng ổn định dòng kiệt, đồng thời gây thiếu hụt trầm tích hạ lưu.

Tổng hợp các chỉ số thủy văn qua ba giai đoạn (G1–G3) cho thấy quy luật phi tuyến của tác động tích lũy: lợi ích về an toàn lũ và cấp nước tăng dần theo bậc thang, trong khi rủi ro môi trường - trầm tích gia tăng theo hàm bậc hai. Điều này minh chứng rằng hiệu ứng liên hồ không chỉ là cộng tuyến giữa các hồ đơn lẻ, mà

là quá trình điều tiết chống lấp tái cấu trúc toàn bộ động lực thủy văn vùng hạ lưu sông Hồng.

Hệ thống liên hồ giúp giảm mạnh cực trị lũ và ổn định dòng kiệt, song gây thiếu hụt trầm tích nghiêm trọng và biến đổi sinh thái hạ lưu. Cần xây dựng quy trình vận hành tối ưu đa mục tiêu, xác lập ngưỡng dòng chảy môi trường (Q95, 7Q10) và nghiên cứu giải pháp bù trầm tích nhân tạo cho đồng bằng.

4.8. Lan truyền không gian và phân tách khí hậu - hồ chứa

Đoạn gần hồ (0–50 km): dòng chảy biến động mạnh theo xả phát điện, biên độ mực nước dao động 0,6–1,0 m/ngày, lưu lượng giờ thay đổi 30–50% so với trung bình. Xuất hiện biến động

ngắn hạn rõ rệt và thay đổi chất lượng nước (nước trong, nghèo phù sa gây xói lòng) [11, 17, 29, 30].

Đoạn trung gian (50–150 km, bao gồm Sơn Tây): Dao động ngắn hạn giảm dần nhờ truyền sóng và hấp thụ thủy lực, song vẫn còn dấu vết phát điện. Phân bố mùa thay đổi mạnh: tỷ lệ mùa kiệt tăng từ 28% lên 35% sau hồ Hòa Bình.

Đoạn xa hồ (>150–300 km, bao gồm Hà Nội và đồng bằng sông Hồng): tín hiệu biến động ngắn hạn gần như triệt tiêu, thay vào đó nổi bật sự dịch chuyển mùa (giảm lũ, tăng kiệt). Tại Hà Nội, mực nước lũ giảm 0,5–1,5 m nhờ điều tiết, trong khi dòng kiệt được duy trì ổn định. Ở vùng triền (Phủ Lý, Nhuệ, Ba Thá), xuất hiện dao động triều và đảo chiều dòng.

Bảng 7. So sánh trước và sau hồ

Tiêu chí	Hòa Bình (1989)	Sơn La (2010)	Lai Châu (2016)
Dòng mùa vụ (seasonal flows)	Mùa lũ: giảm ~14% tại Sơn Tây; Mùa kiệt: tăng ~12.	Mùa lũ: giảm, mùa kiệt: tăng nhẹ tại Tạ.	Mùa lũ: +256 mm (65% nhân sinh); Mùa kiệt: +98 mm (56% nhân sinh).
Đỉnh lũ (flood peaks)	Trước: 38,000 m ³ /s (1971); Sau: ≤14,600 m ³ /s (giảm ≥30%).	Giảm đỉnh lũ cục bộ, bổ trợ Hòa Bình trong cắt lũ.	Ở thượng lưu: một số lũ tăng do mất rừng, nhưng tổng thể bị giữ lại bởi hồ.
Dòng kiệt (low flows)	Tăng rõ rệt, duy trì ≥1,500 m ³ /s tại Sơn Tây.	Hỗ trợ tăng dòng kiệt (qua xả phát điện mùa khô).	Tăng ~196 mm tại Tạ Bú (59% nhân sinh).
Baseflow	Ổn định hơn, hồ đóng vai trò “bù dòng ngầm”.	Tăng tính ổn định của dòng nền tại hạ lưu gần.	Dòng nền tăng do nhân sinh, đặc biệt trong mùa khô.
Biến đổi sử dụng đất (Land use)	Ảnh hưởng gián tiếp: mất rừng thượng nguồn làm tăng phù sa hồ giữ lại (~70%).	Thay đổi sử dụng đất quanh lưu vực ảnh hưởng dòng chảy cục bộ, nhưng bị hồ giữ lại.	Lào Cai–thượng nguồn Trung Quốc mất rừng, nông nghiệp → tăng phù sa, SPM cao; hồ giữ lại một phần.

* Giá trị lưu lượng trong Bảng 5 được quy đổi sang đơn vị milimét (mm), biểu thị lượng nước tương ứng trên toàn lưu vực (runoff depth), nhằm thuận tiện cho so sánh giữa các trạm có diện tích khác nhau.

Tổng hợp các kết quả cho thấy nhân sinh (hồ chứa, mất rừng) chiếm ~60–70% biến đổi dòng chảy và phù sa. Khí hậu (ENSO, xu thế mưa) đóng góp ~30–40%, chủ yếu quyết định dao động năm và các năm cực đoan (Bảng 7).

Như vậy, hồ chứa là yếu tố chi phối dài hạn đối với chế độ thủy văn và trầm tích của sông Đà, trong khi ENSO và khí hậu vẫn giữ vai trò nền, điều chỉnh biến động ngắn hạn và các cực trị.

5. Thảo luận

Các kết luận trong phần 4 được tổng hợp chủ yếu từ nhóm nghiên cứu chất lượng A–B theo tiêu chí ở mục 2.4, nhằm giảm sai lệch và tăng độ tin cậy. Hệ thống hồ chứa bậc thang trên sông Đà (Hòa Bình – 1988, Sơn La – 2010, Lai Châu – 2016) đã làm thay đổi căn bản chế độ thủy văn sông Hồng, với ba đặc trưng nổi bật: giảm cực

trị lũ, ổn định dòng kiệt, và suy giảm mạnh tải phù sa.

Những biến đổi này không chỉ mang ý nghĩa thủy văn, mà còn ảnh hưởng sâu đến hệ sinh thái và sinh kế vùng hạ lưu. Việc giảm đỉnh lũ giúp hạn chế nguy cơ vỡ đê, song đồng thời làm suy yếu chu kỳ ngập tự nhiên, yếu tố duy trì năng suất sinh học, khả năng rửa mặn và bồi tụ đồng bằng. Suy giảm 70–90% phù sa đã làm biến đổi động lực bồi-xói, góp phần vào xói lở bờ và sụt lún vùng cửa sông, trong khi hệ sinh thái nước ngọt và vùng ngập theo mùa bị thu hẹp đáng kể.

Ở góc độ xã hội, điều tiết dòng kiệt đảm bảo tưới tiêu và cấp nước cho hơn nửa triệu ha lúa, nhưng cũng tạo mâu thuẫn lợi ích giữa phát điện, cấp nước và duy trì dòng chảy môi trường. Nhịp điệu dòng chảy nhân tạo gây ảnh hưởng tới nghề cá, giao thông thủy và dịch vụ hệ sinh thái. Cân bằng giữa an ninh năng lượng - an ninh nước - an ninh sinh thái đang trở thành thách thức trung tâm, đòi hỏi vận hành liên hồ theo hướng đa mục tiêu và thích ứng khí hậu.

Một kết quả đáng chú ý là sự khác biệt đáng kể giữa các nghiên cứu về cùng chỉ số (%V mùa mưa/kiệt, Q_{max} , Q_{95} , BFI). Phân tích chéo cho thấy khác biệt chủ yếu do:

- i) Định nghĩa giai đoạn nền (G0–G3, có/không năm ENSO cực đoạn);
- ii) Khoảng cách đến hồ (near–mid–far field);
- iii) Chuẩn hóa chỉ số và độ phân giải chuỗi (daily vs. sub-daily, cách tính $Q_{95}/7Q_{10}$);
- iv) Khung quy kết (BACI/DID, Budyko, naturalized model).

Ý nghĩa của dị biệt là chính sách cần dùng khoảng giá trị thay vì các điểm đơn lẻ, và chuẩn hoá cách tính (IHA/RVA, $Q_{95}/7Q_{10}$ sau khử nhiễu biến động ngắn hạn) trước khi so sánh. Với phù sa, cập nhật đường quan hệ Q–SSC sau đập là bắt buộc; nếu không, mức suy giảm có thể bị định lượng sai. Các kết quả cũng gợi ý ưu tiên đầu tư dữ liệu cận ngày ở đoạn gần để giảm bất định trong đánh giá biến động ngắn hạn và dòng nền.

Nghiên cứu tập trung chủ yếu vào hồ Hòa Bình, trong khi tác động tích lũy của Sơn La và Lai Châu - vốn quyết định đến phân bố không gian - thời gian - vẫn ít được lượng hóa [22].

Phân tích liên ngành còn hạn chế: hầu hết chỉ đánh giá thủy văn – thủy lực, ít xem xét tác động sinh thái, chất lượng nước hoặc kinh tế – xã hội. Mối liên hệ giữa suy giảm phù sa và bồi tụ đồng bằng – xói lở bờ biển vẫn chưa được làm rõ.

Các bất định nêu trên hiện chưa được phản ánh trong quy trình vận hành tĩnh. Việc chưa tích hợp ENSO và không chuẩn hoá chỉ số môi trường dẫn đến các quyết định khó chuyển giao theo không gian (gần/trung/xa). Cơ chế chia sẻ dữ liệu xuyên biên giới và chuỗi sub-daily còn thiếu khiến biên độ bất định cao ở nhóm chỉ số nhạy (biến động ngắn hạn, BFI, SRR), qua đó làm suy giảm độ tin cậy mô phỏng–dự báo. Do đó, vận hành thích ứng cần song hành hai tuyến: i) Giảm bất định dữ liệu–phương pháp (dưới ngày, chuẩn IHA/RVA, dòng chảy tự nhiên); và ii) Thiết kế quy tắc theo dải giá trị ($\leq X\%/h$; dòng chảy môi trường = $Q_{95} \pm \Delta$) cùng phân vùng gần/trung/xa.

Nhìn chung, sự khác nhau về con số giữa các nghiên cứu không mâu thuẫn mà phản ánh độ nhạy với baseline, không gian, độ phân giải và phương pháp. Khi chuẩn hoá các yếu tố này, mẫu hình tổng quát trở nên nhất quán: giảm mùa mưa 10–20%, giảm đỉnh lũ 30–40% (gần>xa), tăng kiệt 10–20%, và giữ phù sa 60–90%, với mức tin cậy cao cho ba trụ cột đầu và trung bình cho biến động ngắn hạn - dòng cơ sở. Đây là cơ sở trực tiếp để xây dựng quy tắc vận hành theo khoảng và vùng, thay vì một ngưỡng duy nhất cho toàn hệ thống.

Vận hành hồ chứa đã mang lại lợi ích lớn trong kiểm soát lũ và đảm bảo nguồn nước mùa kiệt. Đỉnh lũ tại Sơn Tây giảm >60% so với trận 1971, mực nước lũ tại Hà Nội hạ thấp 0,5–1,5 m [11, 17]. Dòng mùa kiệt được duy trì $\geq 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, đáp ứng tưới cho >600.000 ha lúa và cấp nước cho Hà Nội. Hệ thống thủy điện với công suất >5500 MW góp phần quan trọng vào an ninh năng lượng. Tuy nhiên, cái giá phải trả là suy giảm 70–90% tải phù sa [14, 26], gia tăng xói lở và giảm bồi tụ đồng bằng, cùng với biến đổi nhịp lũ và biến động ngắn hạn, tác động đến sinh cảnh thủy sinh và đa dạng sinh học. Những mâu thuẫn giữa mục tiêu phát điện, nông nghiệp và

môi trường ngày càng rõ rệt, nhất là trong các năm khô hạn.

Hồ chứa đã dịch chuyển chế độ sông Hồng từ tự nhiên sang điều tiết nhân tạo: giảm cực trị lũ, tăng ổn định dòng kiệt nhưng làm suy giảm nghiêm trọng phù sa và nhịp sinh thái. Việc lắp đặt các khoảng trống về dữ liệu, phương pháp, hiệu ứng hệ thống và quản trị là điều kiện tiên quyết để xây dựng quy trình vận hành liên hồ thích ứng khí hậu, cân bằng giữa an toàn lũ, an ninh nước, năng lượng và bền vững hệ sinh thái đồng bằng.

6. Kết luận

Nghiên cứu này tổng hợp bằng chứng định lượng về tác động của chuỗi hồ bậc thang sông Đà (Lai Châu – Sơn La – Hòa Bình) đối với chế độ thủy văn hệ thống sông Hồng, trong mối liên hệ với ENSO và biến đổi khí hậu. Các kết quả tổng hợp cho thấy tác động của hồ chứa mang tính hệ thống, đa thang và chi phối toàn lưu vực.

i) Tái cấu trúc chế độ mùa và cực trị dòng chảy.

Chuỗi hồ chứa đã làm thay đổi sâu sắc tính mùa: dòng chảy mùa mưa tại Sơn Tây giảm từ 83–84% trước 1988 xuống 69–72% giai đoạn 2009–2021, trong khi mùa kiệt tăng 10–20%. Cơ chế tích nước mùa lũ và xả bổ sung mùa khô đã chuyển chế độ “gió mùa tự nhiên” sang “điều tiết nhân tạo”. Lưu lượng cực trị giảm đáng kể – đỉnh lũ 1971 đạt 37,800 m³/s nay chỉ còn ~14,000 m³/s, tương đương giảm ≥60%. Mô phỏng MIKE-11 cho thấy hệ thống hồ có thể hạ thấp mực nước lũ Hà Nội 0,5–1,5 m, tức giảm 30–40% đỉnh lũ so với điều kiện tự nhiên;

ii) Ổn định dòng nền và xuất hiện dao động ngắn hạn.

Dòng mùa kiệt được duy trì ≥1,500 m³/s, tăng 10–20% so với trước khi có hồ, bảo đảm cấp nước nông nghiệp và sinh hoạt. Chỉ số BFI tăng từ 0,32 lên 0,39, phản ánh sự “ổn định hóa” dòng nền. Tuy nhiên, hiện tượng biến động ngắn hạn xuất hiện rõ trong phạm vi 50–100 km hạ lưu hồ Hòa Bình, với biên độ dao động ngày–đêm tăng >50%, ảnh hưởng đến an toàn giao thông thủy và sinh cảnh thủy sinh;

iii) Suy giảm nghiêm trọng tải phù sa

Sau khi tích nước, phù sa tại Sơn Tây giảm từ 114–160 triệu tấn/năm xuống 41–73 triệu tấn/năm (~70%). Khi hoàn thiện ba hồ, TSS toàn hệ thống giảm ~92% so với thập niên 1960, làm giảm tốc độ bồi tụ đồng bằng gần 50%. Quan hệ Q–SPM bị phá vỡ, dòng chảy trở nên “trong” hơn và gây xói lòng hạ lưu;

iv) Vai trò tương đối của tác động nhân sinh và khí hậu.

Phân tích tổng hợp cho thấy tác động hồ chứa và thay đổi sử dụng đất chiếm 60–70% biến động dòng chảy, trong khi khí hậu và ENSO chỉ đóng góp 30–40%. ENSO vẫn điều khiển các năm cực đoan (El Niño – kiệt, La Niña – lũ lớn), nhưng ảnh hưởng bị suy yếu ở hạ lưu do điều tiết liên hồ;

v) Hiệu ứng bậc thang và hàm ý quản lý.

Hòa Bình đơn lẻ kiểm soát ~60% phù sa và giảm lũ, trong khi tổ hợp ba hồ cho phép giảm thêm 15–20% đỉnh lũ Hà Nội, duy trì $Q_{\min} \geq 1,500$ m³/s nhưng đồng thời làm trầm trọng mất cân bằng trầm tích. Hệ thống hồ bậc thang đã đảm bảo an ninh năng lượng và giảm thiểu lũ lụt, song gây mất nhịp điệu thủy văn tự nhiên, gia tăng biến động ngắn hạn và suy giảm phù sa – những vấn đề đe dọa cân bằng sinh thái và an toàn bờ biển;

vi) Khoảng trống nghiên cứu và định hướng tương lai.

Các hướng nghiên cứu tương lai nên tập trung vào xây dựng cơ sở dữ liệu dài hạn, đa nguồn kết hợp viễn thám và mô hình hóa dòng chảy tự nhiên; phân tách rõ tác động hồ chứa và khí hậu bằng các khung phân tích chuẩn; đánh giá hiệu ứng bậc thang và tác động liên ngành giữa thủy văn – sinh thái – kinh tế – xã hội; phát triển vận hành tối ưu đa mục tiêu gắn với dự báo ENSO và biến đổi khí hậu, tích hợp công nghệ AI/ML; đồng thời tăng cường hợp tác xuyên biên giới và cơ chế chia sẻ dữ liệu Việt Nam – Trung Quốc để hỗ trợ vận hành thích ứng toàn lưu vực.

Tổng thể, hệ thống hồ chứa sông Đà đã dịch chuyển chế độ sông Hồng từ tự nhiên sang điều tiết nhân tạo, giảm cực trị lũ, nâng dòng kiệt, nhưng đồng thời làm suy giảm nghiêm trọng trầm tích và nhịp sinh thái. Cân bằng giữa an toàn lũ - an ninh nước - năng lượng - môi trường đòi hỏi một khung vận hành thích ứng và tổng

hợp, dựa trên dữ liệu chuẩn hóa, mô hình phản thực và phối hợp đa ngành.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi nhiệm vụ khoa học QG.25.161 của ĐHQGHN.

Tài liệu tham khảo

- [1] N. L. Poff, J. D. Allan, B. D. Richter, B. D. Sparks, J. C. Stromberg, The Natural Flow Regime: A Paradigm for River Conservation and Restoration, *BioScience*, Vol. 47, No. 11, 1997, pp. 769-784.
- [2] G. Grill, B. Lehner, A. E. Lumsdon, G. K. MacDonald, C. Zarfl, C. R. Liermann, Mapping the World's Free-Flowing Rivers, *Nature*, Vol. 569, 2019, pp. 215-221, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9>.
- [3] B. D. Richter, G. A. Thomas, Restoring Environmental Flows by Modifying Dam Operations, *Ecology and Society*, Vol. 12, No. 1, 2007, pp. 12.
- [4] B. Lehner, K. Verdin, A. Jarvis, New Global Hydrography Derived from Spaceborne Elevation Data, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol. 89, No. 10, 2008, pp. 93-94.
- [5] C. Nilsson, C. A. Reidy, M. Dynesius, C. Revenga, Fragmentation and Flow Regulation of the World's Large River Systems, *Science*, Vol. 308, No. 5720, 2005, pp. 405-408.
- [6] T. D. Dang, M. S. Babel, T. Piman, Assessment of Reservoir Operation and Its Impacts on Downstream Hydrology: A Case Study of the Da River Basin, Vietnam, *Journal of Hydrology*, Vol. 390, No. 3-4, 2010, pp. 277-289, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.007>.
- [7] V. L. Nguyen, V. H. Hoang, T. Q. Tran, Hydrological Regime and Sediment Transport Dynamics in the Da River Basin under Monsoonal Climate, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, Vol. 41, No. 2, 2019, pp. 147-160 (in Vietnamese).
- [8] EVN – Electricity of Vietnam, Annual Report 2020, EVN Publishing House, Hanoi, 2020 (in Vietnamese).
- [9] D. M. Le, C. Q. Thai, P. T. Nguyen, Effects of Hoa Binh Reservoir on Flood Peak Attenuation in the Red River Delta, *Proceedings of the Vietnam National Hydrology Conference*, 2007, pp. 123-130 (in Vietnamese).
- [10] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, L. Shamseer, J. M. Tetzlaff, E. A. Akl, S. E. Brennan, R. Chou, J. Glanville, J. M. Grimshaw, A. Hróbjartsson, M. M. Lalu, T. Li, E. W. Loder, E. M. Wilson, S. McDonald, L. A. McGuinness, L. A. Stewart, J. Thomas, A. C. Tricco, V. Welch, P. Whiting, D. Moher, The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews, *BMJ*, Vol. 372, 2021, pp. 71, <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- [11] V. L. Nguyen, V. H. Hoang, T. Q. Tran, Hydrological Regime and Sediment Transport Dynamics in the Da River Basin under Monsoonal Climate, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, Vol. 41, No. 2, 2019, pp. 147-160 (in Vietnamese).
- [12] V. D. Vinh, S. Ouillon, T. D. Thanh, L. V. Chu, 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, 2014, pp. 3987-4005, <https://doi.org/10.5194/hess-18-3987-2014>.
- [13] T. H. Dang, A. Coynel, D. Orange, G. Blanc, H. Etcheber, L. A. Le, Long-Term Monitoring (1960–2008) of River-Sediment Transport in the Red River Watershed (Vietnam): Temporal Variability and Dam-Reservoir Impact, *Science of the Total Environment*, Vol. 408, 2010, pp. 4654-4664, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.007>.
- [14] J. Wang, H. Ishidaira, Z. X. Xu, Effects of Climate Change and Human Activities on Inflow into the Hoa Binh Reservoir in the Red River Basin, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 13, 2012, pp. 1688-1698, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.162>.
- [15] C. T. Yen, L. Picco, B. X. Dung, T. Q. Bao, Hydropower Dam and Hydrological Alteration on the Da River in Son La, Vietnam, *Journal of Forestry Science and Technology*, Vol. 7, 2019, pp. 124-133, <https://journal.vnuf.edu.vn/en/article/view/799> (in Vietnamese).
- [16] T. P. Q. Le, J. Garnier, G. Billen, S. Théry, C. V. Minh, The Changing Flow Regime and Sediment Load of the Red River, Vietnam, *Journal of Hydrology*, Vol. 334, 2007, pp. 199-214, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.020>.
- [17] T. N. M. Luu, J. Garnier, G. Billen, D. Orange, J. Némery, L. T. P. Quynh, T. H. Thai, L. L. Anh, Hydrological Regime and Water Budget of the Red River Delta (Northern Vietnam), *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 37, No. 3, 2010, pp. 219-228, <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.08.004>.

- [18] H. Q. Nguyen, T. Q. Tran, H. N. Thang, T. D. H. Nguyen, Long-Term Water Level Dynamics in the Red River Basin in Response to Anthropogenic Activities and Climate Change, *Science of the Total Environment*, Vol. 912, 2024, pp. 168985, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168985>.
- [19] J. Wang, H. Ishidaira, N. Sudo, T. Khujanazarov, G. Yin, L. Guo, Phân tích Analyses of Impacts of Environmental Changes on Streamflow and Sediment Load in a Mountainous Basin, Vietnam, *Forests*, Vol. 7, No. 2, 2016, pp. 30, <https://doi.org/10.3390/f7020030>.
- [20] T. H. Dang, A. Coynel, River Hydrology and Suspended Sediment Flux in the Red River System: Implication for Assessing Soil Erosion and Sediment Transport/Deposition Processes, *Journal of Science and Technology*, Vol. 54, No. 5, 2016, pp. 614-624, <https://doi.org/10.15625/0866-708X/54/5/7197> (in Vietnamese).
- [21] L. L. Ngo et al., *Advances in Reservoir Operation and River Management*, Science and Technology Publishing House, Hanoi, 2015 (in Vietnamese).
- [22] V. H. Tran, Modeling Reservoirs System for Multiple Objectives in the Red River Basin of Vietnam, Master Thesis, Politecnico di Milano, Milan, 2016.
- [23] T. T. B. Nguyen, N. H. Bui, Proposing Adjustments to the Dry Season Inter-Reservoir Operation Rules of the Red River System to Improve Water Use Efficiency of the Reservoirs, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol. 11, 2023, pp. 316-334, <https://doi.org/10.4236/gep.2023.115019>.
- [24] X. Wei, S. Sauvage, T. P. Q. Le, S. Ouillon, D. Orange, V. D. Vinh, J. M. S. Perez, A Modeling Approach to Diagnose the Impacts of Global Changes on Discharge and Suspended Sediment Concentration within the Red River Basin, *Water*, Vol. 11, 2019, pp. 958, <https://doi.org/10.3390/w11050958>.
- [25] C. T. Tran, D. X. Do, H. T. Do, A. T. Nguyen, H. V. Dao, M. Tran, Temporal and Spatial Variation in Water Quality in the Son La Hydropower Reservoir, Northwestern Vietnam, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, Vol. 46, No. 3, 2024, pp. 411-431, <https://doi.org/10.15625/2615-9783/20925>.
- [26] D. L. Nhu et al., Long-Term Variations of Sediment Load in the Red River System, *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, Vol. 383, 2020, pp. 367-374, <https://doi.org/10.5194/piahs-383-367-2020>.
- [27] X. Wei et al., A Modelling-Based Assessment of Suspended Sediment Transport Related to New Damming in the Red River Basin from 2000 to 2013, *Catena*, Vol. 197, 2021, pp. 104958, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104958>.
- [28] H. V. Pham et al., Alteration of Freshwater Ecosystem Services under Global Change – A Review Focusing on the Po River Basin (Italy) and the Red River Basin (Vietnam), *Science of the Total Environment*, Vol. 652, 2019, pp. 1347-1365, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.303>.
- [29] V. T. Tran, H. T. Nguyen, Q. B. Pham, Cumulative Hydrological Impacts of Cascade Reservoirs on the Da River Flow Regime, *International Journal of River Basin Management*, Vol. 19, No. 4, 2021, pp. 421-434, <https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1779513>.
- [30] F. Ashraf, A. T. Haghighi, J. Riml et al., Changes in Short-Term River Flow Regulation in Nordic Rivers, *Scientific Reports*, Vol. 8, 2018, pp. 17232, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35406-3>.
- [31] T. D. Thanh, V. D. Vinh, Y. Saito, D. D. Chien, T. A. Tu, An Initial Estimation on the Effects of Hoa Binh Hydropower Dam on the Coastal Sedimentary Environment in Red River Delta, *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 8, No. 3, 2008, pp. 45-54, <https://doi.org/10.15625/1859-3097/8/3/6304> (in Vietnamese).