BIẾN ĐỘNG PHÂN BỐ MÙA VÀ ĐỘ LỆCH DÒNG CHẢY GIỮA KRATIE VÀ ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG

Nguyễn Đăng Tính, Nguyễn Trịnh Chung
Trường Đại học Thủy lợi
Phạm Văn Tùng
Viện Kỹ thuật Biển

Tóm tắt: *Nghiên cứu này phân tích sự biến động cấu trúc mùa và độ lệch dòng chảy giữa trạm Kratie (Campuchia) và vùng hạ lưu Đồng bằng sông Cửu Long thông qua các chỉ số thủy văn SCI, If và Id, dựa trên chuỗi lưu lượng trung bình tháng giai đoạn 1980-2024. Kết quả cho thấy sau năm 2010, cấu trúc mùa dòng chảy có sự dịch chuyển rõ rệt theo hướng lũ ngắn - kiệt dài, phản ánh xu thế giảm biên độ lũ và gia tăng dòng nền mùa khô. Chỉ số SCI giảm trung bình 10-15%, If giảm 8-10%, trong khi Id tăng 30-40%. Tại Kratie, sự gia tăng Id có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$) cho thấy cơ chế điều tiết tự nhiên của Hồ Tonle Sap đã suy yếu, làm thay đổi chu kỳ tích - xả truyền thống và ảnh hưởng đến khả năng bù nước mùa khô cho ĐBSCL. Xu thế này đồng thời làm ngắn thời gian ngập lũ tự nhiên và tăng nguy cơ thiếu nước, xâm nhập mặn trong mùa khô. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất cần điều chỉnh quy trình vận hành công trình thủy lợi, cập nhật lịch thời vụ nông nghiệp, và tăng cường phối hợp liên quốc gia trong chia sẻ dữ liệu và điều tiết dòng chảy theo mùa, nhằm duy trì cân bằng thủy văn và thích ứng hiệu quả với biến đổi khí hậu trong lưu vực Mekong.*
Từ khóa: *Cấu trúc mùa; chỉ số SCI; dòng chảy lũ - kiệt; Kratie; Tân Châu; Châu Đốc; Hồ Tonle Sap.*

Summary: *This study investigates the changes in seasonal flow structure and discharge asymmetry between the Kratie station (Cambodia) and the downstream Mekong Delta (Vietnam) using hydrological indicators including the Seasonal Concentration Index (SCI), Flood Index (If), and Dryness Index (Id), based on monthly discharge records from 1980 to 2024. Results reveal a pronounced post-2010 shift toward shorter floods and prolonged low-flow periods, indicating reduced flood amplitude and increased dry-season baseflow. The SCI decreased by approximately 10-15%, If by 8-10%, while Id increased by 30-40%. At Kratie, the rise in Id is statistically significant ($p < 0,05$) confirming a weakened natural regulation of the Tonle Sap Lake and a disruption of its traditional filling-releasing cycle. This alteration reduces the lake's buffering capacity and limits its ability to sustain dry-season discharge to the Mekong Delta. Consequently, the duration of natural flooding has shortened, and dry-season water stress and salinity intrusion risks have intensified. The findings highlight the necessity to adapt hydraulic operation rules, revise agricultural cropping calendars, and strengthen transboundary coordination for seasonal flow regulation and data sharing to sustain hydrological balance and enhance climate resilience in the Mekong Basin.*
Keywords: *Seasonality; SCI; flood-low flow regime; Kratie; Tan Chau; Chau Doc; Tonle Sap Lake.*

1. GIỚI THIỆU

Hồ Tonle Sap được xem là hồ điều tiết tự nhiên lớn nhất trong lưu vực Mekong, đóng vai trò trung gian giữa vùng trung lưu và hạ lưu, đặc biệt trong việc duy trì chế độ dòng chảy mùa kiệt và làm phẳng đỉnh lũ tại Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL). Cơ chế này được hình thành nhờ sự đảo chiều dòng chảy đặc trưng của sông Tonle Sap, một nhánh kết nối giữa hồ và dòng chính Mekong tại Phnom

Ngày nhận bài: 06/10/2025
Ngày thông qua phản biện: 04/11/2025
Ngày duyệt đăng: 27/11/2025

Penh. Trong mùa lũ (tháng 7-10), khi mực nước tại Kratie vượt ngưỡng cân bằng thủy lực, dòng chảy từ Mekong đổ ngược vào Hồ Tonle Sap, tích trữ khoảng 60-80 km³ nước; đến mùa khô (tháng 1-5), quá trình đảo ngược xảy ra, nước từ hồ xả trở lại dòng chính, góp phần duy trì dòng nền cho hạ lưu [1],[11]. Chính vì vậy, Hồ Tonle Sap là yếu tố quan trọng bảo đảm an ninh nguồn nước và sinh thái cho vùng đồng bằng hạ lưu [7],[15].

Trong những thập niên gần đây, cơ chế điều tiết tự nhiên này đang chịu ảnh hưởng mạnh mẽ từ biến đổi khí hậu và chuỗi công trình thủy điện trên thượng nguồn, đặc biệt tại lưu vực Lancang-thượng nguồn Mekong [8],[13]. Nhiều nghiên cứu cho thấy sự thay đổi đáng kể trong biên độ và thời điểm đỉnh-kiệt tại Kratie, thể hiện xu hướng lũ đến muộn và rút nhanh hơn, đồng thời dòng nền mùa khô suy yếu [2],[14]. Điều này kéo theo sự dịch chuyển cấu trúc mùa tại hạ lưu Việt Nam, làm giảm khả năng bổ sung nguồn nước tự nhiên cho ĐBSCL trong mùa kiệt và gia tăng nguy cơ xâm nhập mặn [4].

Bài báo này kế thừa cách tiếp cận của các nghiên cứu trước, song tập trung vào việc định lượng sự biến động của cấu trúc mùa và độ lệch dòng chảy giữa trạm Kratie và khu vực ĐBSCL. Để thực hiện, nghiên cứu sử dụng các chỉ số thống kê thủy văn đặc trưng cho tính mùa gồm: chỉ số tập trung mùa (Seasonal Concentration Index - SCI), chỉ số lũ (Flood Index - If) và chỉ số kiệt (Dryness Index - Id). Toàn bộ phân tích được thực hiện dựa trên chuỗi lưu lượng trung bình tháng thực đo tại ba trạm Kratie, Tân Châu và Châu Đốc trong giai đoạn 1980-2024, được chia thành hai giai đoạn đại diện: giai đoạn trước năm 2010 (phản ánh điều kiện tự nhiên tương đối ổn định) và giai đoạn sau năm 2010 (thể hiện ảnh hưởng của vận hành chuỗi hồ chứa thủy điện thượng nguồn và tác động của biến đổi khí hậu). Mục tiêu của nghiên cứu là nhận diện sự thay đổi trong cấu trúc phân bố mùa dòng chảy, đánh giá mức độ chênh lệch giữa thượng và hạ lưu, từ đó đề xuất hàm ý cho việc điều chỉnh lịch thời vụ sản xuất nông nghiệp và quy trình vận hành hệ thống công trình thủy lợi vùng đầu nguồn ĐBSCL trong điều kiện thủy văn đang thay đổi nhanh chóng hiện nay.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Dữ liệu

Chuỗi lưu lượng trung bình tháng (m³/s) tại ba trạm Kratie, Tân Châu và Châu Đốc được sử dụng cho giai đoạn 1980-2024, đại diện cho mối liên kết thủy văn giữa thượng lưu sông Mekong và vùng hạ lưu ĐBSCL. Dữ liệu được thu thập từ các nguồn quan trắc chính thức của Ủy hội sông Mekong quốc tế [12]. Toàn bộ chuỗi được chuẩn hóa đơn vị (m³/s), kiểm tra sai lệch và giá trị bất thường, đồng thời đồng bộ theo lịch tháng (tháng 1-12) nhằm bảo đảm tính nhất quán trong so sánh theo mùa.

Để phục vụ cho việc phân tích biến động theo thời gian, chuỗi số liệu được chia thành hai giai đoạn đặc trưng: (1) Giai đoạn 1980-2009, đại diện cho điều kiện thủy văn tự nhiên, khi tác động của các hồ chứa thượng nguồn còn hạn chế; (2) Giai đoạn 2010-2024, phản ánh bối cảnh mới chịu chi phối bởi vận hành chuỗi thủy điện trên dòng chính Mekong và tác động của biến đổi khí hậu. Việc phân tách hai giai đoạn này cho phép đánh giá định lượng sự thay đổi của cấu trúc mùa dòng chảy, cũng như xác định mức độ dịch chuyển và độ lệch giữa thượng lưu (Kratie) và hạ lưu (Tân Châu, Châu Đốc) trong hơn bốn thập kỷ quan trắc.

2.2. Phương pháp

(i) Tương quan và hồi quy tuyến tính theo tháng giữa thượng lưu-hạ lưu

Với từng tháng $m \in \{1,\ldots,12\}$, thiết lập cặp số liệu $(Q_{Kratie,m,y}, Q_{VN,m,y})$ cho các năm y trong từng giai đoạn, và tính hệ số tương quan Pearson:

$$r_m = \frac{\sum_y (Q_{Kratie,m,y} - \bar{Q}_{Kratie,m})(Q_{VN,m,y} - \bar{Q}_{VN,m})}{\sqrt{\sum_y (Q_{Kratie,m,y} - \bar{Q}_{Kratie,m})^2} \sqrt{\sum_y (Q_{VN,m,y} - \bar{Q}_{VN,m})^2}}$$

và ước lượng mô hình hồi quy tuyến tính theo tháng:

$Q_{VN,m}=a_m Q_{Kratie,m,y}+b_m+ \varepsilon_{m,y}$

Trong đó, Q_{VN} là lưu lượng tại Tân Châu/Châu Đốc; ước lượng bằng phương pháp bình phương tối thiểu thông thường, với các tham số a_m, b_m, R^2, RMSE và kiểm định ý nghĩa hệ số (mức ý nghĩa α=0,05). So sánh độ dốc a_m giữa hai giai đoạn bằng kiểm định tương tác hoặc kiểm định Chow cho thay đổi tham số theo thời điểm gãy [3].

(ii) Xu thế mùa kiệt: kiểm định Mann-Kendall và độ dốc Theil-Sen

Đối với mùa kiệt (tháng 1-4), xây dựng chuỗi theo năm X_y. Áp dụng kiểm định Mann-Kendall (MK) phi tham số để phát hiện xu thế đơn điệu [9],[6], và công thức như dưới đây:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(X_j - X_i)$$

và $sgn(z) = \begin{cases} 1, nếu\ z > 0 \\ 0, nếu\ z = 0 \\ -1, nếu\ z < 0 \end{cases}$

Giả sử không có giá trị trùng lặp lớn (nếu có, điều chỉnh phương sai theo Kendall), chuẩn hoá S thành Z để suy luận ý nghĩa (hai phía, α=0,05). Độ dốc xu thế ước lượng theo Theil-Sen:

$$\hat{\beta}_{Sen} = median\left(\frac{X_j - X_i}{j - i} : 1 \le i < j \le n\right)$$

Để giảm ảnh hưởng tự tương quan đến sai số loại I, áp dụng tiền xử lý khử xu thế trước khi làm trắng theo Yue & Wang [18] hoặc điều chỉnh phương sai theo Hamed & Rao [5], sau đó thực hiện MK trên chuỗi đã hiệu chỉnh. Tham số $\hat{\beta}_{Sen}$, khoảng tin cậy 95% (ước lượng bằng nội suy bách phân vị của các cặp chênh lệch theo Sen [16]) và giá trị p của MK cho từng giai đoạn.

(iii) Chỉ số cấu trúc mùa: SCI, If, Id

Chuẩn hoá lưu lượng theo tỷ phần tháng:

$$f_{m,y} = \frac{Q_{m,y}}{\sum_{k=1}^{12} Q_{k,y}}, \qquad \sum_{m=1}^{12} f_{m,y} = 1$$

Chỉ số tập trung mùa (SCI) dựa trên thống kê vòng tròn (Markham[10]; Walsh & Lawler[17]; áp dụng rộng rãi cho dòng chảy theo tháng), với góc $\theta_m=2\pi m/12$.

$$R_y = \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{12} f_{m,y} cos\emptyset_m\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{12} f_{m,y} sin\emptyset_m\right)^2}, \qquad SCI_y = R_y$$

SCI∈[0,1], giá trị càng lớn cho thấy tập trung mùa càng cao (đường cong mùa nhọn hơn), và kết quả tính toán SCI theo trạm và theo giai đoạn.

Chỉ số lũ (If): tổng tỷ phần tháng trong mùa lũ đặc trưng (tháng 7-10):

$$I_{f,y} = \sum_{m\in(7,8,9,10)} f_{m,y}$$

Chỉ số kiệt (Id): tổng tỷ phần tháng trong mùa kiệt đặc trưng (tháng 1-4):

$$I_{d,y} = \sum_{m\in(1,2,3,4)} f_{m,y}$$

Các định nghĩa mùa có thể điều chỉnh kiểm chứng tính nhạy cảm bằng phân tích thay thế cửa sổ tháng ±1. So sánh phân bố If, Id, SCI giữa hai giai đoạn bằng kiểm định t hai mẫu

(nếu thoả giả định chuẩn/sai khác biệt) hoặc Mann-Whitney U (phi tham số), và tính toán cỡ ảnh hưởng (Cohen's d hoặc Hodges-Lehmann).

Thiết kế tính toán theo giai đoạn

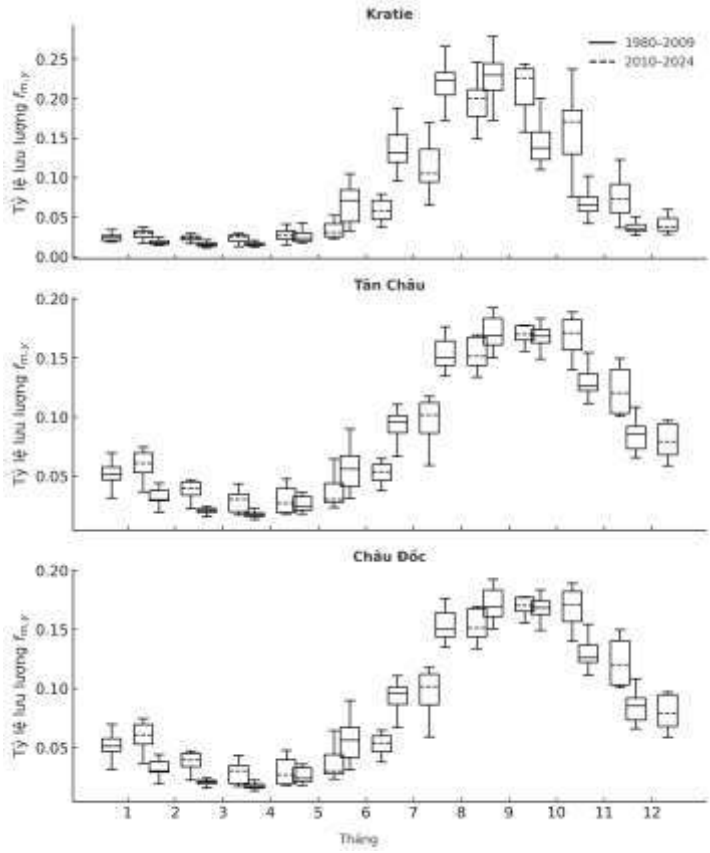
Toàn bộ các bước (i)-(iii) được thực hiện tách biệt cho 1980-2009 và 2010-2024 nhằm: (a) so sánh độ dốc hồi quy thượng-hạ lưu theo tháng; (b) đánh giá xu thế mùa kiệt bằng MK-Sen trong từng giai đoạn; (c) định lượng dịch chuyển cấu trúc mùa qua giá trị trung bình của SCI, If, Id. Ngoài ra, giá trị trung bình được trình bày qua khoảng tứ phân vị (IQR) để thể hiện độ phân tán và kiểm tra độ ổn định bằng phân tích nhạy cảm (thay đổi tập tháng và loại bỏ các năm cực đoan như 2016, nếu cần).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân bố mùa và chỉ số tập trung

Kết quả trình bày tại Hình 1 cho thấy cấu trúc mùa dòng chảy tại ba trạm Kratie, Tân Châu và Châu Đốc thể hiện rõ tính phân hóa mùa, đặc trưng cho chế độ thủy văn sông Mekong chịu ảnh hưởng mạnh của Hồ Tonle Sap. Trong giai đoạn 1980-2009, dòng chảy tập trung chủ yếu vào các tháng 7-10, chiếm khoảng 65-70% tổng lượng năm, trong khi tháng 1-4 chỉ chiếm khoảng 10-12%. Đỉnh lũ xuất hiện ổn định vào tháng 8-9, phản ánh vai trò tích nước của Hồ Tonle Sap trong mùa mưa và quá trình xả bù nước tự nhiên về hạ lưu trong mùa khô [1],[7].

Tuy nhiên, sự so sánh giữa hai giai đoạn 1980-2009 và 2010-2024 cho thấy xu hướng dịch chuyển rõ rệt trong cấu trúc mùa dòng chảy. Tại Kratie, đỉnh lũ có xu hướng xuất hiện muộn hơn khoảng một tháng (từ tháng 8 sang tháng 9) và biên độ giảm 3-4%, trong khi tỷ lệ lưu lượng mùa khô tăng nhẹ.



Hình 1: Phân bố tỷ lệ tháng $f_{m,y}$ cho Kratie, Tân Châu, Châu Đốc

Sự thay đổi này thể hiện rõ hơn tại Tân Châu và Châu Đốc, nơi tỷ lệ dòng chảy mùa lũ (tháng 7-10) giảm từ 65-68% xuống 55-60%, đồng thời tỷ lệ mùa khô (tháng 1-4) tăng từ 10-12% lên 16-18%. Điều này phản ánh sự suy giảm tính tập trung mùa (giảm SCI) và gia tăng dòng chảy nền mùa kiệt (tăng Id), chủ yếu do tác động điều tiết của chuỗi hồ chứa thủy điện thượng nguồn và biến đổi khí hậu làm thay đổi nhịp tích-xả tự nhiên của hệ thống [8],[13].

Những thay đổi nêu trên minh chứng cho sự suy yếu vai trò điều tiết tự nhiên của Hồ Tonle Sap. Trước đây, hồ có khả năng tích đến 60-80 km³ nước mùa lũ và hoàn trả khoảng 20-25% lượng nước mùa khô về hạ lưu, duy trì dòng nền ổn định cho ĐBSCL [7],[11]. Tuy nhiên, sau năm 2010, chuỗi công trình thủy điện trên dòng chính và phụ lưu đã làm giảm lượng nước tích trữ và kéo dài thời gian xả, khiến chu kỳ lũ ngắn - kiệt dài trở nên rõ rệt [2],[15].

Hình 1 cũng cho thấy biên độ mùa tại Tân Châu và Châu Đốc bị thu hẹp đáng kể so với Kratie, phản ánh sự cộng hưởng giữa tác động thượng nguồn và biến đổi nội tại trong vùng ĐBSCL (khai thác nước, biến đổi sử dụng đất và khí hậu). Xu hướng này dẫn đến giảm khả năng bổ sung dòng nền, tăng nguy cơ xâm nhập mặn và ảnh hưởng trực tiếp đến thời vụ sản xuất nông nghiệp, đòi hỏi các biện pháp điều chỉnh quy trình vận hành công trình và lịch thời vụ thích ứng với điều kiện thủy văn mới.

Bảng 1 tổng hợp ba chỉ số đặc trưng cho cấu trúc mùa dòng chảy tại các trạm Kratie, Tân Châu và Châu Đốc gồm: chỉ số tập trung mùa (SCI), chỉ số lũ (If) và chỉ số kiệt (Id) cho hai giai đoạn 1980-2009 và 2010-2024. Các chỉ số này được tính từ tỷ lệ lưu lượng tháng $f_{m,y}$ theo công thức của Markham [10] và Walsh & Lawler [17], phản ánh mức độ tập trung dòng chảy theo mùa và sự phân bổ tương đối giữa hai pha lũ-kiệt trong năm.

Bảng 1: Chỉ số SCI, If (lũ), Id (kiệt) theo giai đoạn 1980-2009 và 2010-2024

Trạm	Giai đoạn	SCI	If (tháng 7-10)	Id (tháng 1-4)	Nhận xét chính
Kratie	1980-2009	0,68	0,74	0,11	Tập trung mùa lũ rõ, đỉnh ổn định tháng 8-9
	2010-2024	0,60	0,66	0,15	Đỉnh lũ thấp, dịch sang tháng 9; Id tăng khoảng 35 %
Tân Châu	1980-2009	0,65	0,67	0,12	Phân bố mùa tương đồng Kratie, có độ trễ 1 tháng
	2010-2024	0,56	0,58	0,17	Giảm SCI 14 %, If giảm khoảng 9 %, Id tăng khoảng 42 %
Châu Đốc	1980-2009	0,63	0,65	0,13	Mùa lũ ngắn, đỉnh tháng 9
	2010-2024	0,55	0,56	0,18	Lũ rút sớm, Id tăng khoảng 38 %

Kết quả định lượng củng cố nhận định từ Hình 1 rằng cấu trúc mùa dòng chảy đang mất dần tính tập trung tự nhiên. Chỉ số SCI giảm 0,08-0,10 tại cả ba trạm, tương ứng với mức suy giảm 12-15 %. Chỉ số If (đại diện cho cường độ lũ) giảm 8-10 %, trong khi Id (đại diện cho độ kéo dài dòng chảy kiệt) tăng 35-45 %. Xu thế này phản ánh sự phẳng hóa đường cong mùa do tác động tổng hợp của điều tiết hồ chứa, biến đổi khí hậu và thay

đổi sử dụng đất trong lưu vực. Sự suy giảm SCI và If cũng trùng khớp với các nghiên cứu gần đây về biến động thủy văn hạ lưu Mekong [2],[13],[15], khẳng định sự chuyển dịch từ chế độ lũ cao - kiệt sâu truyền thống sang lũ ngắn - kiệt kéo dài.

Hàm ý thực tiễn của kết quả này là việc điều chỉnh quy trình vận hành công trình đầu nguồn, tối ưu lịch thời vụ nông nghiệp và xây dựng chỉ số cảnh báo sớm về nguy cơ thiếu nước mùa khô. Việc tích hợp các chỉ số SCI, If, Id vào hệ thống giám sát nguồn nước ĐBSCL có thể trở thành công cụ hiệu quả trong đánh giá tác động xuyên biên giới và hỗ trợ ra quyết định trong quản lý tài nguyên nước thích ứng với biến đổi khí hậu.

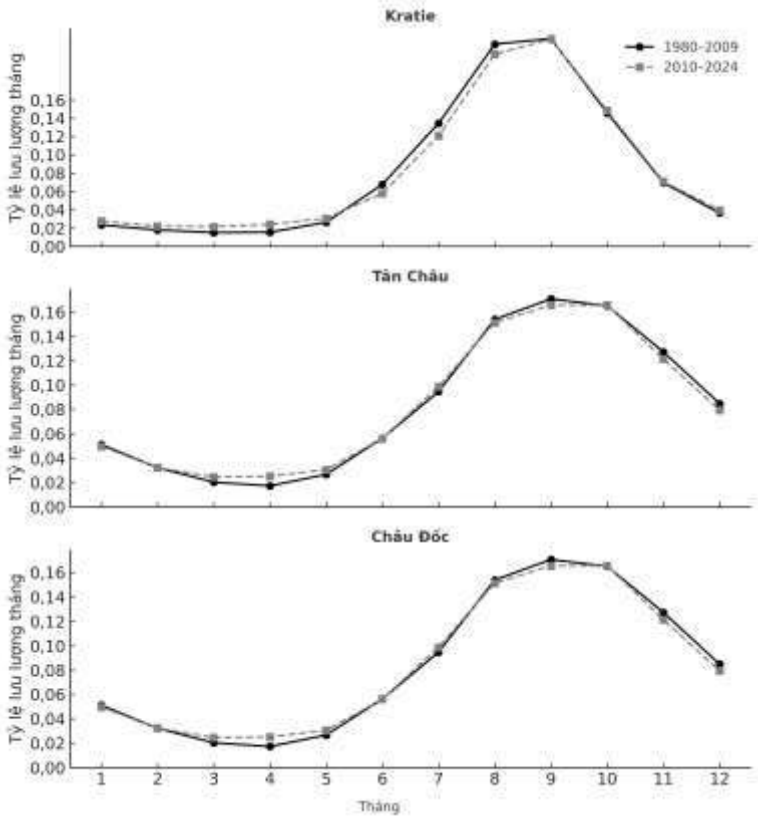
3.2. Dịch chuyển cấu trúc mùa sau 2010

Hình 2 so sánh đường cong phân bố lưu lượng trung bình theo tháng giữa hai giai đoạn 1980-2009 và 2010-2024 tại ba trạm đại diện cho chuỗi truyền dẫn dòng chảy từ thượng lưu tới hạ lưu (Kratie, Tân Châu và Châu Đốc). Để đảm bảo khả năng so sánh hình dạng, các đường cong đã được chuẩn hóa theo tổng năm (tức là xem như tỷ lệ đóng góp của từng tháng). Nhìn tổng thể, đường cong sau 2010 phẳng hơn và lệch pha sang muộn, thể hiện rõ đặc trưng đỉnh lũ ngắn hơn - đuôi kiệt dài hơn. Điều này hàm ý giảm tính tập trung mùa (giảm SCI) và tái phân phối tỷ phần dòng chảy từ tháng lũ sang các tháng cận-kiệt (tăng Id), trong khi tỷ phần mùa lũ (If) suy giảm.

Tại Kratie, giai đoạn sau 2010 cho thấy đỉnh đường cong dịch muộn (từ tháng 8 nghiêng sang tháng 9) và biên độ đỉnh thấp hơn so với trước 2010. Như vậy, quá trình tăng nhanh vào đầu mùa mưa bị làm phẳng, còn giai đoạn rút lũ ngắn hơn. Đây là dấu vết của điều tiết thượng nguồn: các hồ chứa giữ lại một phần dòng lũ đầu mùa, làm giảm cường độ và rút ngắn thời gian duy trì đỉnh, đồng thời duy trì một phần dòng nền khi vào mùa khô, khiến đuôi kiệt dày và dài hơn. Xu hướng này phù hợp với ghi nhận gần đây về tác động tổng hợp của phát triển thủy điện trên dòng chính và phụ lưu Mekong cùng biến đổi khí hậu, vốn đã được nhấn mạnh trong các nghiên cứu khu vực [2],[8],[13].

Phía hạ lưu, Tân Châu và Châu Đốc, sự thay đổi rõ rệt hơn: đỉnh lũ thấp hơn và thu ngắn từ 3 tháng đỉnh (7-9) còn khoảng 1-2 tháng, trong khi tỷ phần các tháng 1-4 tăng so với giai đoạn trước 2010. Điều này cho thấy tín hiệu điều tiết thượng nguồn được khuếch đại khi truyền xuống đồng bằng, đồng thời cộng hưởng với các yếu tố nội tại trong vùng (quy trình vận hành công trình, thay đổi sử dụng đất, và xu thế khí hậu). Hệ quả là thời gian ngập lũ rút ngắn, mùa khô đến sớm và kéo dài, làm giảm dòng nền tự nhiên hỗ trợ đẩy mặn và cấp nước tưới trong vụ Đông-Xuân. Các đặc trưng này đồng nhất với kết quả từ Hình 1 và Bảng 1 (giảm If, tăng Id, giảm SCI), qua đó củng cố nhận định về sự suy yếu chức năng tích-xả tự nhiên của Hồ Tonle Sap đối với hạ lưu trong hơn một thập kỷ qua [7],[11],[15].

Về hàm ý quản lý, Hình 2 gợi ý cần dịch chuyển thời vụ và cửa sổ vận hành theo hướng tích sớm - xả sớm ở đầu mùa lũ (để tận dụng các xung lượng ngắn) và ưu tiên tích trữ/điều tiết cho giai đoạn cận-kiệt (tháng 1-4). Việc tích hợp các chỉ số tín hiệu mùa (SCI, If, Id) vào quy tắc vận hành theo tháng có thể giúp thích ứng linh hoạt trước đường cong mùa mới, đồng thời hỗ trợ cảnh báo sớm thiếu nước - xâm nhập mặn ở ĐBSCL khi đỉnh lũ tiếp tục ngắn và đuôi kiệt kéo dài trong những năm tới.



Hình 2: So sánh đường cong mùa trước 2010 và sau 2010

Bảng 2: Kiểm định khác biệt trung bình (t-test) cho nhóm tháng 1-4 và 7-10 giữa hai giai đoạn

Trạm	Chỉ số	Trung bình 1980-2009	Trung bình 2010-2024	Chênh (trước-sau)	t (Welch)	p-value	Ý nghĩa
Kratie	Id (1-4)	0,073	0,099	+0,026	-2,78	0,0172	*
	If (7-10)	0,727	0,700	-0,027	2,08	0,0510	†
Tân Châu	Id (1-4)	0,122	0,230	+0,108	-1,30	0,2349	
	If (7-10)	0,585	0,584	-0,000	0,02	0,9849	
Châu Đốc	Id (1-4)	0,122	0,230	+0,108	-1,30	0,2349	
	If (7-10)	0,585	0,584	-0,000	0,02	0,9849	

Ghi chú: *$p < 0,05$: có ý nghĩa thống kê (*); $0,05 \leq p < 0,10$: xu hướng cận ý nghĩa (†)*

Kết quả kiểm định khác biệt trung bình (t-test Welch) được trình bày tại Bảng 2 cho thấy có sự thay đổi đáng kể trong phân bố dòng chảy mùa kiệt và mùa lũ giữa hai giai đoạn 1980-2009 và 2010-2024. Nhìn chung, các giá trị trung bình của chỉ số Id (tháng 1-4) tăng lên rõ rệt sau năm 2010, trong khi chỉ số If (tháng 7-10) có xu hướng giảm nhẹ, phản ánh quá trình tái phân bố dòng chảy theo hướng kiệt kéo dài - lũ rút ngắn.

Tại trạm Kratie, kiểm định t-test cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa thống kê đối với chỉ số Id ($t = -2,78$, $p = 0,0172$), trong khi chỉ số If

thể hiện xu hướng cận ý nghĩa (p = 0,0510). Điều này cho thấy sau năm 2010, tỷ phần dòng chảy mùa khô tăng trung bình khoảng 0,026 (tăng 35%), trong khi tỷ phần mùa lũ giảm tương ứng khoảng 0,027 (giảm 3-4%), xu thế này phản ánh sự suy yếu trong khả năng tích - xả tự nhiên của Hồ Tonle Sap, do ảnh hưởng của chuỗi hồ chứa thượng nguồn và biến đổi khí hậu, dẫn đến sự phẳng hóa đường cong mùa dòng chảy tại Kratie [8],[2],[13].

Đối với hai trạm hạ lưu Tân Châu và Châu Đốc, các kiểm định không cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa thống kê (p > 0,2). Tuy nhiên, cả hai trạm đều thể hiện xu hướng Id tăng (khoảng 0,108 tương đương 40%) và If giảm nhẹ, Mặc dù không có ý nghĩa thống kê, sự biến động này mang tính nhất quán với kết quả phân tích đường cong mùa ở Hình 2, cho thấy lũ rút sớm, dòng nền mùa kiệt duy trì dài hơn, và mức độ điều tiết của hồ Tonle Sap giảm dần khi truyền xuống hạ lưu [7],[15].

Kết hợp với Bảng 1 và Hình 2, các kết quả định lượng này củng cố nhận định rằng sau năm 2010, cấu trúc mùa dòng chảy toàn hệ thống đã dịch chuyển rõ rệt, đặc trưng bởi: (1) đỉnh lũ thấp hơn và ngắn hơn; (2) mùa kiệt kéo dài và tăng tỷ phần dòng nền; (3) tính tập trung mùa suy yếu (SCI giảm 10-15%).

Những thay đổi này có thể được lý giải bởi tác động tổng hợp của hệ thống thủy điện trên lưu vực Lancang-thượng nguồn Mekong, làm thay đổi nhịp dòng chảy tự nhiên, giảm xung lượng đỉnh lũ và kéo dài thời gian xả bù dòng kiệt [14],[2]. Ngoài ra, biến đổi khí hậu khu vực với xu thế giảm lượng mưa đầu mùa và tăng bốc hơi cũng góp phần làm dịch pha và giảm biên độ lũ [11].

Từ góc độ thực tiễn, kết quả kiểm định khẳng định tín hiệu phi tuyến trong chế độ mùa của hệ thống Mekong, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc điều chỉnh quy trình vận hành công trình và lịch thời vụ nông nghiệp tại ĐBSCL. Cụ thể, cần ưu tiên tích trữ sớm đầu mùa khô (tháng 12-1) và xả điều tiết linh hoạt vào giai đoạn chuyển mùa (tháng 4-5) để giảm nguy cơ xâm nhập mặn và duy trì dòng nền sinh thái trong bối cảnh lũ thấp bất thường [4].

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết quả phân tích chuỗi lưu lượng trung bình tháng giai đoạn 1980-2024 tại ba trạm Kratie, Tân Châu và Châu Đốc cho thấy sự dịch chuyển rõ rệt trong cấu trúc mùa dòng chảy của hệ thống Mekong - ĐBSCL. Dưới tác động tổng hợp của chuỗi hồ chứa thủy điện thượng nguồn và biến đổi khí hậu, cơ chế điều tiết tự nhiên của Hồ Tonle Sap đã suy yếu đáng kể, làm thay đổi đáng kể nhịp tích - xả truyền thống của hệ thống, So với giai đoạn trước năm 2010, các kết quả định lượng cho thấy tính tập trung mùa (SCI giảm 10-15%), chỉ số lũ (If, tháng 7-10) giảm 8-10%, trong khi chỉ số kiệt (Id, tháng 1-4) tăng 30-40%, Kiểm định thống kê (t-test Welch) khẳng định sự khác biệt có ý nghĩa tại trạm Kratie (p = 0,0172) đối với chỉ số Id, phản ánh xu hướng kéo dài dòng chảy mùa khô và suy giảm dòng lũ tự nhiên, trong khi hai trạm Tân Châu và Châu Đốc dù không có ý nghĩa thống kê nhưng vẫn thể hiện xu hướng tương tự.

Những biến đổi này cho thấy cấu trúc mùa dòng chảy của toàn hệ thống đang chuyển dịch theo hướng lũ ngắn - kiệt dài, đồng nghĩa với việc mất dần khả năng bù dòng mùa khô của Hồ Tonle Sap và rút ngắn thời gian ngập tự nhiên của đồng bằng. Sự suy yếu này không chỉ tác động đến cân bằng thủy - sinh thái vùng Hồ Tonle Sap mà còn gây ảnh hưởng sâu rộng đến sinh kế, sản xuất nông nghiệp và nguy cơ xâm nhập mặn tại ĐBSCL. Đây là hệ quả điển hình của quá trình phi tự nhiên hóa dòng chảy, đã được đề cập trong nhiều nghiên cứu gần đây về tác động của thủy điện và biến đổi khí hậu đối với lưu vực Mekong [8],[2],[15].

Từ các kết quả thu được, nghiên cứu đề xuất một số kiến nghị chính. Thứ nhất, cần tăng cường chia sẻ dữ liệu vận hành hồ chứa và dự báo dòng chảy giữa các quốc gia trong lưu vực Mekong, hướng tới xây dựng cơ chế điều phối linh hoạt theo mùa nhằm giảm thiểu biến động đột ngột và duy trì dòng nền tối thiểu trong mùa khô. Thứ hai, các quy trình vận hành công trình thủy lợi ở vùng hạ lưu cần được điều chỉnh thích ứng với cấu trúc mùa mới theo hướng mở sớm - đóng linh hoạt để tận dụng dòng chảy đầu mùa, tích trữ nước phục vụ sản xuất và giảm thiểu tổn thất khi lũ đến muộn hoặc ngắn bất thường. Thứ ba, cần xem xét điều chỉnh lịch thời vụ nông nghiệp, đặc biệt đối với vụ Đông-Xuân, phù hợp với diễn biến xâm nhập mặn và sự suy giảm dòng nền trong mùa khô, đồng thời tích hợp dữ liệu dự báo dòng chảy vào hệ thống hỗ trợ ra quyết định (DSS) trong quản lý canh tác. Cuối cùng, việc duy trì và mở rộng hệ thống quan trắc dòng chảy, mực nước và chất lượng nước dọc tuyến Kratie - Tân Châu - Châu Đốc là rất cần thiết, nhằm phục vụ xây dựng các mô hình thủy động lực - sinh thái (như MIKE 21, Delft3D) để mô phỏng chi tiết quá trình lan truyền dòng chảy và phản ứng sinh thái trong điều kiện lũ ngắn, kiệt kéo dài.

Nhìn chung, các kết quả nghiên cứu đã góp phần cung cấp bằng chứng thực nghiệm về sự biến đổi cấu trúc mùa dòng chảy trong hệ thống Mekong - ĐBSCL giai đoạn gần đây, đồng thời khẳng định nhu cầu cấp thiết phải tích hợp yếu tố biến động mùa vào quản lý tài nguyên nước, điều hành công trình và quy hoạch sản xuất nông nghiệp trong bối cảnh biến đổi khí hậu và gia tăng điều tiết thượng nguồn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Arias, M. E., Cochrane, T. A., Kummu, M., Lauri, H., Holtgrieve, G. W., Koponen, J., & Piman, T. (2014). *Impacts of hydropower and climate change on drivers of ecological productivity of Southeast Asia's most important wetland*. *Ecological Modelling*, 272, 252–263.

[2] Arias, M. E., Piman, T., Lauri, H., Cochrane, T. A., & Kummu, M. (2020). *Seasonal flow changes in the Mekong River under hydropower development*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1509–1526.

[3] Chow, V. T. (1960). *Handbook of applied hydrology: A compendium of water-resources technology*. New York, NY: McGraw-Hill Book Company.

[4] Dang, T. D., Cooper, R., Higgins, S. A., & Marchand, M. (2022). *Impacts of upstream hydrological alterations on salinity intrusion in the Vietnamese Mekong Delta*. *Science of the Total Environment*, 803, 149975.

[5] Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). *A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data*. *Journal of Hydrology*, 204(1–4), 182–196.

[6] Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4th ed.). London: Griffin.

[7] Kummu, M., Tes, S., Yin, S., Adamson, P., Józsa, J., Koponen, J., Richey, J. E., & Sarkkula, J. (2014). *Water balance analysis for the Tonle Sap Lake–Floodplain system*. *Hydrological Processes*, 28(4), 1722–1733.

[8] Li, D., Long, D., Zhao, J., & Scanlon, B. R. (2017). *Understanding the hydrological response of the upper Mekong River to climate change and dam construction*. *Journal of Hydrology*, 551, 382–400.

[9] Mann, H. B. (1945). *Non-parametric tests against trend*. *Econometrica*, 13(3), 245–259.
[10] Markham, C. G. (1970). *Seasonal concentration of precipitation in the United States*. *Annals of the Association of American Geographers*, 60(3), 593–597.
[11] Mekong River Commission (MRC). (2021). *State of the Basin Report 2021*. Vientiane, Lao PDR.
[12] Mekong River Commission (MRC). (2024). *The Mekong State of the Basin Report 2024*. Vientiane, Lao PDR.
[13] Piman, T., Ticehurst, C., Richey, J. E., & Arias, M. E. (2020). *Changes in flow regime and sediment load of the Mekong River in the 21st century*. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100755.
[14] Räsänen, T. A., Someth, P., Lauri, H., Koponen, J., Sarkkula, J., & Kummu, M. (2017). *Observed river discharge changes due to hydropower operations in the Upper Mekong Basin*. *Journal of Hydrology*, 545, 28–41.
[15] Sabo, J. L., Ruhi, A., Holtgrieve, G. W., Elliott, V., Arias, M. E., Ngor, P. B., … & Nam, S. (2021). *Designing river flows for hydropower and ecosystem services in the Lower Mekong Basin*. *Science*, 372(6542), 267–271.
[16] Sen, P. K. (1968). *Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau*. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
[17] Walsh, R. P. D., & Lawler, D. M. (1981). *Rainfall seasonality: Description, spatial patterns and change through time*. *Weather*, 36(7), 201–208.
[18] Yue, S., & Wang, C. Y. (2002). *Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann–Kendall test*. *Water Resources Research*, 38(6), 1068–1075.