

**XÁC ĐỊNH THỜI ĐIỂM TÍCH VÀ XẢ NƯỚC
CỦA HỒ TONLE SAP QUA PHÂN TÍCH LƯU LƯỢNG
THEO TUẦN TẠI CÁC TRẠM KRATIE,
TÂN CHÂU VÀ CHÂU ĐỐC**

Nguyễn Trinh Chung¹, Nguyễn Đăng Tính^{1,*}, Phan Khanh Khánh¹

¹ Trường Đại học Thủy lợi

* Email: dangtinh@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này phân tích chuỗi lưu lượng thực đo giai đoạn 1980 - 2024 tại các trạm Kratie, Tân Châu và Châu Đốc nhằm xác định biến động ΔQ theo tuần và thời điểm tích - xả nước của hồ Tonle Sap. Dữ liệu được tổng hợp thành chuỗi $\Delta Q = (Q_{\text{TânChâu}} + Q_{\text{ChâuĐốc}}) - Q_{\text{Kratie}}$ và chia thành 02 giai đoạn: 1980 - 2009 (trước thủy điện dòng chính) và 2010 - 2024 (sau khi nhiều hồ chứa vận hành). Kết quả cho thấy, hồ Tonle Sap vẫn duy trì 02 pha điều tiết tự nhiên, nhưng chu kỳ tích - xả đã bị kéo giãn và trễ pha rõ rệt. Pha tích nước xuất hiện sớm hơn khoảng nửa tháng, trong khi pha xả muộn hơn 1 - 2 tuần, biên độ ΔQ giảm từ $13,5 \pm 10^3$ xuống $12,0 \pm 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Kiểm định Mann - Kendall cho thấy, xu thế giảm có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$) đối với cả ΔQ cực tiểu và cực đại. Những biến đổi này phản ánh tác động tổng hợp của vận hành thủy điện thượng nguồn, thay đổi mưa mùa và biến đổi khí hậu, dẫn đến suy giảm chức năng điều tiết tự nhiên của hồ Tonle Sap và dòng nền mùa khô ở hạ lưu Mekong. Phương pháp phân tích ΔQ theo tuần chứng minh hiệu quả trong nhận diện biến động ngắn hạn và xu thế điều tiết, cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho quản lý và điều hành nguồn nước xuyên biên giới vùng Mekong - đồng bằng sông Cửu Long.

Từ khóa: Hồ Tonle Sap, lưu lượng Kratie, Tân Châu, Châu Đốc, tuần thủy văn, đảo chiều dòng chảy, điều tiết tự nhiên, lưu vực sông Mekong.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hồ Tonle Sap giữ vai trò đặc biệt trong việc điều tiết nước giữa lưu vực sông Mekong và đồng bằng sông Cửu Long. Với diện tích ngập biến thiên từ khoảng 2.500 km² trong mùa khô lên đến hơn 12.000 km² trong mùa lũ, hồ Tonle Sap hoạt động như một hồ chứa tự nhiên khổng lồ, hấp thu phần lớn lượng nước trong mùa mưa và xả dần trong mùa khô. Cơ chế này giúp giảm đỉnh lũ, duy trì dòng nền, điều hòa thủy văn hạ lưu và bảo đảm cân bằng sinh thái vùng đồng bằng. Các phân tích cân bằng nước cho thấy, mỗi năm hồ Tonle Sap có thể trữ từ 60 - 80 tỷ m³ nước trong mùa mưa (tương đương 12 - 16% tổng lượng dòng chảy mùa lũ tại trạm Kratie và xả lại 20 - 25% lượng nước mùa khô cho hạ lưu [1, 2]. Sự trao đổi nước qua sông Tonle Sap quyết định nhịp dao động mực nước và diện

tích ngập tại Campuchia, đồng thời duy trì dòng chảy ổn định tại các trạm Tân Châu và Châu Đốc trong mùa khô [3, 4].



Hình 1. Bản đồ các trạm thủy văn từ trạm Kratie đến biên giới Việt Nam

Cơ chế điều tiết tự nhiên của hồ Tonle Sap thể hiện rõ qua hiện tượng đảo chiều dòng chảy giữa mùa mưa và mùa khô. Khi mực nước sông Mekong dâng cao, nước chảy ngược vào hồ, mở rộng diện ngập và làm tăng dung tích trữ; khi mực nước hạ thấp, hồ chuyển sang cấp nước lại cho sông chính, bổ sung dòng chảy mùa kiệt. Cơ chế hai pha này không chỉ duy trì quy luật thủy văn mà còn chi phối nhịp sinh thái và năng suất thủy sản của toàn vùng hạ lưu 0, 0. Các số liệu quan trắc dài hạn cho thấy, biến động dòng chảy tại các trạm Kratie, Prek Kdam, Tân Châu và Châu Đốc có mối tương quan chặt chẽ, phản ánh chức năng điều hòa của hồ Tonle Sap trong hệ thống sông Mekong 0, 0.

Tuy nhiên, trong hai thập kỷ gần đây, sự phát triển của hệ thống thủy điện ở thượng nguồn và các phụ lưu lớn, cùng với biến đổi khí hậu, đã làm thay đổi đáng kể nhịp điều tiết tự nhiên của hồ Tonle Sap. Việc vận hành hồ chứa làm giảm biên độ lũ, tăng lưu lượng mùa kiệt và dịch chuyển thời điểm đảo chiều dòng chảy 0, 0. Báo cáo của Ủy hội sông Mekong 0, 0 cho thấy, lượng nước chảy vào hồ Tonle Sap trong mùa lũ giảm 10 - 15% so với trung bình lịch sử, trong khi thời điểm đảo chiều chậm hơn 2 - 3 tuần so với giai đoạn trước năm 2010. Sự dịch chuyển này làm quá trình tích nước bắt đầu muộn, quá trình xả nước kéo dài, khiến dòng nền giảm đáng kể vào mùa khô và gia tăng nguy cơ xâm nhập mặn tại đồng bằng sông Cửu Long 0, 0.

Mặc dù có nhiều nghiên cứu về biến động dòng chảy và vai trò điều tiết của hồ Tonle Sap, phần lớn các phân tích vẫn tập trung ở quy mô tháng hoặc mùa, trong khi quá trình tích và xả nước diễn ra với nhịp biến đổi ngắn hơn. Khoảng trống nghiên cứu hiện nay là thiếu các phân tích định lượng theo chu kỳ tuần nhằm xác định chính xác thời điểm bắt đầu tích nước và xả nước hàng năm. Phân tích theo chu kỳ tuần cho phép mô tả chi tiết hơn quá trình chuyển pha giữa hai mùa, đánh giá mức độ trễ và xu hướng dịch chuyển thời gian, đồng thời hỗ trợ đáng kể cho công tác dự báo dòng nền, cảnh báo xâm nhập mặn và điều tiết công trình thủy lợi vùng hạ lưu Mekong 0, 0, 0.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Nguồn số liệu

Nghiên cứu sử dụng chuỗi lưu lượng trung bình ngày tại 3 trạm thủy văn chính, bao gồm: Kratie (Campuchia), Tân Châu và Châu Đốc (Việt Nam) trong giai đoạn 1980 - 2024. Đây là 3 vị trí đại diện cho các điểm đặc trưng của hệ thống sông Mekong hạ lưu, phản ánh quá trình truyền, điều tiết và phân phối dòng chảy từ thượng lưu qua hồ Tonle Sap đến đồng bằng sông Cửu Long. Trạm Kratie được xem là cửa ngõ của lưu vực hạ lưu Mekong, thể hiện dòng chảy tổng hợp từ toàn bộ thượng nguồn; trong khi đó, các trạm Tân Châu (sông Tiền) và Châu Đốc (sông Hậu) phản ánh lưu lượng phân phối qua hai nhánh chính chảy vào lãnh thổ Việt Nam 0, 0.

Nguồn số liệu gốc được thu thập từ hệ thống cơ sở dữ liệu của Ủy hội sông Mekong (MRC), kết hợp với các trạm quan trắc thuộc mạng lưới quốc gia. Chuỗi số liệu đã được kiểm tra tính liên tục, loại bỏ giá trị bất thường và hiệu chỉnh sai lệch thời gian để đảm bảo đồng nhất giữa các trạm. Đặc biệt, dữ liệu tại 2 trạm Kratie và Tân Châu được so sánh chéo với các báo cáo lưu lượng ngày do MRC công bố hàng năm nhằm kiểm định độ tin cậy và đồng bộ thời gian ghi nhận. Đối với các khoảng thiếu số liệu ngắn (dưới 3 ngày liên tiếp), nội suy tuyến tính theo xu thế lưu lượng liền kề được áp dụng, đảm bảo không làm sai lệch biến động tự nhiên của dòng chảy 0, 0.

Việc sử dụng chuỗi dài hạn từ năm 1980 - 2024 cho phép nhận diện cả giai đoạn trước và sau khi các công trình thủy điện lớn đi vào vận hành, từ đó đánh giá sự thay đổi về thời điểm và cường độ tích - xả nước của hồ Tonle Sap theo thời gian. Dữ liệu này được xem là cơ sở định lượng đáng tin cậy cho các phân tích so sánh, vì phản ánh chính xác đặc trưng lưu lượng theo ngày - đơn vị thời gian phù hợp để tổng hợp thành các tuần thủy văn phục vụ xác định thời điểm chuyển pha tích và xả nước 0, 0.

2.2. Xử lý dữ liệu

Chuỗi lưu lượng trung bình ngày tại các trạm Kratie, Tân Châu và Châu Đốc được chuyển đổi sang chu kỳ tuần, trong đó mỗi tháng được chia thành 4 tuần thủy văn:

- Tuần thứ 1 (ngày 1 - 7).
- Tuần thứ 2 (ngày 8 - 14).
- Tuần thứ 3 (ngày 15 - 21).
- Tuần thứ 4 (ngày 22 đến cuối tháng).

Phương pháp này cho phép mô tả biến thiên ngắn hạn của dòng chảy, đồng thời phản ánh rõ thời điểm chuyển pha giữa hai mùa tích nước và xả nước của hệ thống hồ Tonle Sap. Việc chia nhỏ chuỗi theo tuần giúp loại bỏ ảnh hưởng của các dao động nội tháng và làm rõ hơn nhịp điệu tiết tự nhiên của hồ 0, 0. Sau khi tính lưu lượng trung bình tuần cho từng trạm, các giá trị được đồng bộ hóa về cùng mốc thời gian để tính toán chỉ tiêu tổng hợp ΔQ , được xác định theo công thức:

$$\Delta Q = (Q_{\text{Tân Châu}} + Q_{\text{Châu Đốc}}) - Q_{\text{Kratie}}$$

Trong đó: Q_{Kratie} là lưu lượng trung bình tuần tại trạm Kratie, đại diện cho dòng chảy tổng hợp từ thượng lưu sông Mekong; $Q_{\text{Tân Châu}}$ và $Q_{\text{Châu Đốc}}$ là lưu lượng trung bình tuần tại hai cửa ngõ chính của đồng bằng sông Cửu Long, phản ánh lượng nước thực tế truyền về hạ lưu.

Hiệu ΔQ được sử dụng để nhận diện trạng thái điều tiết của hồ Tonle Sap trong từng tuần:

- Nếu $\Delta Q < 0$, tổng lưu lượng tại 2 trạm Tân Châu và Châu Đốc nhỏ hơn lưu lượng tại trạm Kratie, biểu thị giai đoạn hồ đang tích nước (nước chảy ngược vào hồ Tonle Sap).

- Nếu $\Delta Q > 0$, tổng lưu lượng tại hạ lưu lớn hơn lưu lượng tại trạm Kratie, phản ánh giai đoạn hồ đang xả nước (nước từ hồ chảy trở lại sông chính).

Cách tiếp cận này dựa trên nguyên lý cân bằng dòng chảy giữa thượng lưu và hạ lưu, trong đó hồ Tonle Sap được xem như một kho chứa trung gian có khả năng hấp thu và giải phóng nước theo mùa. Nhiều nghiên cứu trước đây đã sử dụng phương pháp tương tự để đánh giá dòng chảy vào - ra của hồ Tonle Sap và xác định vai trò điều tiết của nó đối với chế độ thủy văn vùng hạ lưu 0, 0, 0.

Trong nghiên cứu này, việc phân tích ΔQ theo tuần giúp xác định tuần thứ mấy trong tháng n mà hồ Tonle Sap bắt đầu chuyển từ tích nước sang xả nước (và ngược lại), từ đó đánh giá sự dịch chuyển thời điểm giữa hai giai đoạn 1980 - 2009 và 2010 - 2024. Các giá trị ΔQ được làm mượt bằng trung

bình trượt hai tuần để giảm nhiễu do dao động ngắn hạn và đảm bảo ổn định tín hiệu đảo chiều dòng chảy 0, 0. Việc sử dụng lưu lượng trung bình theo tuần cho phép làm suy giảm đáng kể ảnh hưởng của dao động thủy triều ngày tại các trạm Tân Châu và Châu Đốc, đặc biệt trong các giai đoạn triều cường và triều kém. Cách tiếp cận này giúp nhấn mạnh tín hiệu biến động dòng chảy ở quy mô thời gian liên mùa, phản ánh quan hệ cân bằng lưu lượng giữa trạm Kratie và hạ lưu thông qua vai trò điều tiết của hồ Tonle Sap. Trong nghiên cứu này, các tác động của thủy triều, mực nước biển dâng và sự hạ thấp lòng sông được xem là các yếu tố nền, có thể làm thay đổi giá trị tuyệt đối của lưu lượng tại hạ lưu, nhưng không làm thay đổi dấu và xu thế của ΔQ theo tuần. Do đó, phân tích ΔQ tập trung vào nhận diện trạng thái tích - xả và sự dịch pha theo thời gian, thay vì mô tả chi tiết dao động mực nước hay triều ngắn hạn.

2.3. Quy tắc xác định thời điểm tích - xả

Sau khi tính toán chuỗi ΔQ theo từng tuần trong năm, nghiên cứu tiến hành nhận diện thời điểm bắt đầu tích nước và thời điểm bắt đầu xả nước của hồ Tonle Sap dựa trên đặc trưng thay đổi dấu của ΔQ . Theo nguyên lý cân bằng dòng chảy, khi tổng lưu lượng tại hai trạm Tân Châu và Châu Đốc nhỏ hơn lưu lượng tại Kratie ($\Delta Q < 0$), phần nước chênh lệch được coi là đang tích trữ trong hồ Tonle Sap; ngược lại, khi $\Delta Q > 0$, hồ bắt đầu giải phóng nước trở lại sông Mekong và hạ lưu đồng bằng 0, 0.

Để loại bỏ nhiễu ngắn hạn và bảo đảm tính ổn định của tín hiệu, quy tắc xác định được thiết lập dựa trên điều kiện hai tuần liên tiếp có cùng dấu của ΔQ . Cụ thể, thời điểm bắt đầu tích nước được xác định là tuần đầu tiên sau tháng 4 có $\Delta Q < 0$ trong hai tuần liên tiếp, thể hiện giai đoạn nước từ sông Mekong bắt đầu chảy ngược vào hồ Tonle Sap. Ngược lại, thời điểm bắt đầu xả nước được xác định là tuần đầu tiên sau tháng 8 có $\Delta Q > 0$ trong hai tuần liên tiếp, phản ánh thời điểm dòng chảy đảo chiều khi hồ bắt đầu trả nước về sông chính.

Việc lựa chọn các mốc tháng 4 và 8 dựa trên đặc trưng thủy văn của lưu vực sông Mekong: Tháng 4 thường đánh dấu giai đoạn kết thúc mùa khô và khởi đầu mùa mưa, còn tháng 8 nằm

trong thời kỳ đỉnh lũ và chuyển sang pha rút nước 0, 0. Quy tắc hai tuần liên tiếp giúp giảm sai số do dao động lưu lượng cục bộ, đồng thời phản ánh chính xác hơn thời điểm đảo chiều bền vững của dòng chảy.

Để đánh giá sự thay đổi cơ chế điều tiết của hồ Tonle Sap theo thời gian, toàn bộ chuỗi được chia thành hai giai đoạn so sánh: (1) giai đoạn 1 (1980 - 2009) đại diện cho thời kỳ trước khi các thủy điện dòng chính sông Mekong vận hành, đặc trưng bởi cơ chế điều tiết tự nhiên và dao động mùa tương đối ổn định; (2) giai đoạn 2 (2010 - 2024) phản ánh thời kỳ sau khi nhiều đập thủy điện thượng lưu và phụ lưu đi vào hoạt động, dẫn đến biến đổi đáng kể về thời điểm và biên độ dòng chảy 0, 0.

Cách phân chia này cho phép nhận diện sự dịch chuyển thời gian bắt đầu tích và xả nước giữa hai giai đoạn, qua đó đánh giá định lượng tác động của thủy điện và biến đổi khí hậu đối với cơ chế điều tiết tự nhiên của hồ Tonle Sap. Việc áp dụng quy tắc theo tuần giúp mô tả quá trình chuyển pha với độ chi tiết cao, phục vụ hiệu quả cho các mục tiêu dự báo dòng nền, vận hành công trình thủy lợi và quản lý nguồn nước vùng hạ lưu sông Mekong 0, 0.

2.4. Phân tích thống kê

Sau khi xác định được thời điểm bắt đầu tích nước và xả nước cho từng năm thủy văn, nghiên cứu tiến hành tổng hợp và phân tích thống kê để đánh giá đặc trưng phân bố và xu thế biến đổi theo thời gian. Đối với mỗi giai đoạn (1980 - 2009 và 2010 - 2024), các chỉ tiêu thống kê được tính bao gồm: Trung vị, phân vị thứ nhất (Q1) và phân vị thứ ba (Q3) của thời điểm bắt đầu tích nước và xả nước. Các giá trị này được quy đổi sang dạng tuần thứ n trong tháng m nhằm phản ánh chính xác nhịp mùa và thuận tiện cho so sánh giữa các năm.

Trung vị được sử dụng thay cho giá trị trung bình để giảm ảnh hưởng của các năm dị thường, thường xuất hiện trong chuỗi thủy văn dài hạn do tác động của các hiện tượng cực đoan như El Niño hoặc La Niña 0, 0. Phân vị Q1 và Q3 thể hiện khoảng biến thiên đặc trưng của thời điểm đảo chiều, qua đó phản ánh mức độ ổn định hoặc biến động của quá trình điều tiết nước.

Để kiểm định sự khác biệt về thời điểm bắt đầu tích và xả nước giữa hai giai đoạn, nghiên cứu sử dụng phép kiểm phi tham số Mann - Whitney U. Phép kiểm này không giả định phân phối chuẩn và thích hợp cho dữ liệu thời gian thủy văn, giúp xác định liệu sự khác biệt giữa hai giai đoạn có ý nghĩa thống kê hay không 0. Giá trị $p < 0,05$ được coi là ngưỡng có ý nghĩa, phản ánh sự thay đổi đáng kể trong cơ chế điều tiết của hồ Tonle Sap.

Bên cạnh đó, để đánh giá xu thế dịch chuyển theo năm của thời điểm tích và xả nước, nghiên cứu áp dụng kiểm định Mann - Kendall (MK), một phương pháp phi tham số phổ biến trong phân tích chuỗi thời gian thủy văn và khí tượng 0, 0. Kiểm định MK cho phép xác định hướng và mức độ xu thế tăng hoặc giảm mà không bị ảnh hưởng bởi phân phối dữ liệu. Độ dốc xu thế được ước lượng bằng phép tính Theil - Sen, nhằm định lượng mức dịch chuyển trung bình (số tuần/năm) của thời điểm tích - xả nước trong toàn chuỗi nghiên cứu.

Kết hợp các phép kiểm Mann - Whitney U và Mann-Kendall giúp mô tả toàn diện cả sự khác biệt giữa hai giai đoạn và xu hướng biến đổi liên tục theo thời gian, từ đó cung cấp bằng chứng thống kê vững chắc cho việc đánh giá tác động của thủy điện và biến đổi khí hậu đến cơ chế điều tiết tự nhiên của hồ Tonle Sap 0, 0.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Biến động ΔQ theo tuần

Kết quả phân tích ΔQ trung bình tuần trong giai đoạn 1980 - 2024 (Bảng 1) cho thấy, hồ Tonle Sap duy trì hai pha điều tiết tự nhiên rõ rệt gồm pha tích nước ($\Delta Q < 0$) và pha xả nước ($\Delta Q > 0$). Tuy nhiên, nhịp mùa và cường độ điều tiết đã biến đổi đáng kể giữa hai giai đoạn trước và sau năm 2010.

Giai đoạn 1980 - 2009: Cơ chế điều tiết ổn định và rõ nét

Trong giai đoạn này, ΔQ chuyển sang âm từ tuần thứ nhất tháng 5, trùng với thời kỳ mưa đầu mùa và mực nước sông Mekong tại trạm Kratie bắt đầu dâng. Đây là thời điểm hồ Tonle Sap bắt đầu tích nước, khi dòng chảy đảo chiều từ sông Mekong qua nhánh Tonle Sap chảy vào hồ. Giai đoạn tích nước kéo dài khoảng 20 - 21 tuần, đến

cuối tháng 9, đạt giá trị cực tiểu khoảng - 6.500 đến - 7.000 m³/s vào cuối tháng 7, đầu tháng 8.

Sau đó, ΔQ tăng nhanh và chuyển dương ổn định từ tuần thứ tư tháng 9, phản ánh thời điểm hồ Tonle Sap đảo chiều dòng chảy và bắt đầu xả nước trở lại sông Mekong. Trong các tháng 10 - 11, ΔQ đạt giá trị cực đại + 6.000 đến + 6.500 m³/s, cho thấy hồ Tonle Sap xả mạnh và kéo dài, đóng vai trò duy trì dòng nền tự nhiên cho hạ lưu đồng bằng sông Cửu Long trong mùa khô. Đường cong ΔQ ở giai đoạn này có biên độ lớn (khoảng 13×10^3 m³/s), nhịp đảo chiều rõ, chu kỳ đều đặn, thể hiện chức năng điều tiết tự nhiên ổn định. Đây cũng là giai đoạn chưa chịu ảnh hưởng mạnh của các hồ chứa và thủy điện dòng chính, do đó chu kỳ điều tiết của hồ Tonle Sap phản ánh trung thực nhịp mùa tự nhiên của hệ thống sông Mekong 0, 0.

Giai đoạn 2010 - 2024: Chu kỳ bị trễ pha và giảm biên độ

Từ năm 2010 trở đi, ΔQ vẫn thể hiện hai pha tích - xả tương tự, nhưng đặc trưng thủy văn thay đổi rõ rệt. Pha tích nước xuất hiện sớm hơn khoảng nửa tháng, từ cuối tháng 4 đến đầu tháng 5, và kéo dài hơn, khoảng 22 - 23 tuần. Giá trị cực tiểu ΔQ đạt - 7.500 đến - 8.000 m³/s, sâu hơn giai đoạn trước khoảng 1.000 m³/s, phản ánh hồ Tonle Sap vẫn tích nước mạnh trong mùa mưa, song thời gian xả bị dồn trễ.

Thời điểm đảo chiều (ΔQ = 0) xuất hiện muộn hơn 1 - 2 tuần, vào tuần thứ nhất tháng 10 và đỉnh dương đạt được muộn hơn, vào đầu - giữa tháng 11, với giá trị cực đại chỉ còn khoảng + 5.500 đến + 6.000 m³/s. Điều này cho thấy, quá trình xả nước bị trễ pha và yếu hơn, dẫn đến giảm khả năng bổ sung dòng chảy sớm cho hạ lưu. Biên độ ΔQ cũng giảm từ $13,5 \times 10^3$ xuống khoảng $12,0 \times 10^3$ m³/s, đồng thời pha xả bị rút ngắn từ 27 còn 25 tuần, phản ánh cơ chế điều tiết của hồ Tonle Sap bị làm phẳng và chậm nhịp 0, 0.

Bảng 1. Đặc trưng ΔQ theo tuần của hồ Tonle Sap trong hai giai đoạn 1980 - 2009 và 2010 - 2024

Chỉ tiêu đặc trưng	Giai đoạn 1980 - 2009	Giai đoạn 2010 - 2024	Chênh lệch/nhận xét
Tuần bắt đầu tích nước (ΔQ < 0)	Tuần 1 tháng 5	Cuối tháng 4 - tuần 1 tháng 5	Sớm hơn khoảng 2 tuần
Tuần xuất hiện ΔQ cực tiểu	Tuần 4 tháng 7 - tuần 1 tháng 8	Tuần 4 tháng 7	Sớm hơn khoảng 1 tuần
Giá trị ΔQ cực tiểu (10 ³ m ³ /s)	- 6,5 đến - 7,0	- 7,5 đến - 8,0	Sâu hơn khoảng 1,0
Tuần đảo chiều (ΔQ = 0)	Tuần 4 tháng 9	Tuần 1 tháng 10	Trễ hơn khoảng 1 tuần
Tuần xuất hiện ΔQ cực đại	Tuần 2 - 3 tháng 10	Tuần 1 - 2 tháng 11	Trễ hơn 3 - 4 tuần
Giá trị ΔQ cực đại (10 ³ m ³ /s)	+ 6,0 đến + 6,5	+ 5,5 đến + 6,0	Giảm nhẹ 5 - 10%
Biên độ ΔQ (ΔQ _{max} - ΔQ _{min})	13,0 - 13,5	12,0 - 12,5	Giảm khoảng 1,0
Thời gian pha tích (ΔQ < 0)	20 - 21 tuần (tháng 5 - 9)	22 - 23 tuần (tháng 4 - 9)	Kéo dài nhẹ
Thời gian pha xả (ΔQ > 0)	27 tuần (tháng 10 - 3)	25 tuần (tháng 10 - 3)	Rút ngắn nhẹ
Độ trễ pha giữa hai giai đoạn	-	1 - 2 tuần	Đảo chiều muộn hơn
Ghi chú hiện tượng nổi bật	Biên độ dao động lớn, chu kỳ ổn định, đảo chiều rõ rệt	Đường cong ΔQ phẳng hơn, biên độ giảm, pha xả muộn hơn	Biểu hiện dịch pha và giảm năng lực điều tiết

Sự khác biệt giữa hai giai đoạn được thể hiện rõ nhất ở độ dốc hai pha: Pha tích sau năm 2010 giảm nhanh và sâu hơn, trong khi pha xả tăng chậm hơn và kéo dài về cuối năm. Như vậy, chu kỳ điều tiết vẫn còn nhưng bị kéo giãn, với xu hướng tích sớm - xả muộn, dẫn đến dòng chảy về hạ lưu đầu mùa khô (tháng 12 - 1) giảm đáng kể.

Nguyên nhân và cơ chế vật lý

Các kết quả trên phản ánh sự biến đổi trong cân bằng thủy văn tự nhiên của hệ thống Tonle Sap - Mekong, chủ yếu do tác động của thủy điện dòng chính và biến đổi khí hậu: (1) thủy điện thượng lưu (đặc biệt tại Lào và Trung Quốc) làm giảm đỉnh lũ và điều tiết lại thời điểm dòng chảy, khiến lũ về hồ Tonle Sap sớm hơn, nhỏ hơn, còn nước xả về hạ lưu dồn muộn hơn 0, 0; (2) biến đổi khí hậu làm mùa mưa khởi phát sớm nhưng kết thúc nhanh, giảm lượng mưa tổng thể, khiến pha tích diễn ra sớm hơn nhưng xả yếu và muộn hơn 0, 0. Cùng với đó, sự thay đổi hình thái lòng sông và bồi lắng trầm tích ở hồ Tonle Sap cũng góp phần làm thay đổi khối tích - xả hàng năm, khiến chu kỳ ΔQ giảm biên độ nhưng kéo dài.

Ngoài các tác động do vận hành thủy điện và biến đổi khí hậu, sự thay đổi hình thái lòng dẫn sông Mekong và khu vực đầu hồ Tonle Sap cũng có thể góp phần làm biến đổi quan hệ lưu lượng giữa trạm Kratie và các trạm hạ lưu. Trong những thập niên gần đây, suy giảm bùn cát do chuỗi hồ chứa thượng nguồn kết hợp với khai thác cát nội vùng đã được ghi nhận là nguyên nhân gây hạ thấp lòng dẫn và thay đổi mặt cắt ướt tại nhiều đoạn sông chính, đặc biệt ở Campuchia và hạ lưu sông Mekong. Những biến đổi hình thái này có khả năng làm thay đổi khả năng truyền dẫn dòng chảy và dung tích điều tiết hiệu dụng của hồ Tonle Sap, từ đó ảnh hưởng đến biên độ và thời gian tích - xả nước thể hiện qua ΔQ . Tuy nhiên, trong phạm vi nghiên cứu này, phân tích được thực hiện dựa trên chuỗi lưu lượng quan trắc dài hạn theo tuần nhằm nhận diện tín hiệu điều tiết tổng hợp của hệ thống, chưa tích hợp mô phỏng thủy lực - hình thái. Việc định lượng riêng rẽ vai trò của bồi lắng và xói lở lòng dẫn đối với cơ chế tích - xả của hồ Tonle Sap cần được xem xét trong các nghiên cứu

tiếp theo, thông qua kết hợp số liệu hình thái và mô hình thủy động lực - trầm tích.

Hàm ý thủy văn - quản lý

Sự dịch pha của ΔQ có ý nghĩa lớn đối với dòng chảy mùa kiệt tại hạ lưu sông Mekong, đặc biệt vùng Tân Châu - Châu Đốc. Khi xả muộn và yếu, dòng nền bị suy giảm, xâm nhập mặn lan sớm hơn và sâu hơn trong các tháng cuối năm, trong khi nước ngọt bổ sung đầu mùa khô thiếu hụt. Ngược lại, tích nước sâu và sớm hơn làm giảm đỉnh lũ giữa mùa, giúp giảm ngập nội đồng nhưng cũng hạn chế phù sa và chất dinh dưỡng cho hệ sinh thái hạ lưu 0.

Có thể nói, chu kỳ ΔQ theo tuần cho thấy cơ chế điều tiết tự nhiên của hồ Tonle Sap vẫn tồn tại, nhưng đang suy yếu và lệch pha dưới tác động nhân sinh và khí hậu. Pha tích nước đến sớm, pha xả đến muộn, biên độ nhỏ hơn, độ dốc đường cong ΔQ thoải hơn, đó là dấu hiệu của một hệ thống điều tiết đang mất dần tính nhịp nhàng tự nhiên, ảnh hưởng trực tiếp đến an ninh nguồn nước và khả năng chống chịu của đồng bằng sông Cửu Long.

3.2. Thời điểm bắt đầu tích - xả nước

Kết quả tính toán ΔQ trung bình tuần cho thấy, thời điểm bắt đầu tích và xả nước của hồ Tonle Sap có sự thay đổi rõ rệt giữa hai giai đoạn, phản ánh sự dịch pha trong chu kỳ điều tiết tự nhiên của hệ thống Mekong - Tonle Sap.

Trong giai đoạn 1980 - 2009, ΔQ chuyển sang âm ổn định từ tuần thứ nhất của tháng 5, tương ứng với giai đoạn đầu mùa mưa tại lưu vực trung và hạ sông Mekong. Đây là thời điểm hồ Tonle Sap bắt đầu tích nước, khi mực nước tại trạm Kratie dâng nhanh, tạo điều kiện cho dòng chảy đảo chiều qua sông Tonle Sap chảy vào hồ. Pha tích nước này kéo dài liên tục trong khoảng 20 - 21 tuần, đến cuối tháng 9, đạt cực tiểu ΔQ khoảng - 6.500 đến - 7.000 m³/s. Sau đó, khi mực nước thượng nguồn bắt đầu giảm, ΔQ tăng dần và chuyển dương ổn định từ tuần thứ tư của tháng 9, đánh dấu thời điểm hồ Tonle Sap bắt đầu xả nước trở lại sông Mekong. Pha xả nước diễn ra mạnh trong tháng 10 - 11, với ΔQ cực đại khoảng + 6.000 đến + 6.500 m³/s, góp phần duy trì dòng nền cho hạ lưu trong suốt mùa khô. Cấu trúc thời gian này

cho thấy cơ chế điều tiết tự nhiên rất ổn định, gần như không thay đổi qua các năm trong giai đoạn trước năm 2010, phản ánh mối liên hệ chặt chẽ giữa chế độ mưa - dòng chảy tự nhiên và thể tích điều tiết của hồ Tonle Sap 0, 0.

Ngược lại, trong giai đoạn 2010 - 2024, thời điểm bắt đầu tích nước có xu hướng đến sớm hơn, xuất hiện từ cuối tháng 4 đến tuần đầu tháng 5, trong khi thời điểm bắt đầu xả nước lại diễn ra muộn hơn, chuyển sang tuần thứ nhất của tháng 10. Điều này dẫn đến chu kỳ tích - xả bị kéo giãn và trễ pha, với pha tích nước kéo dài hơn (22 - 23 tuần) nhưng pha xả ngắn lại (25 tuần). Việc tích nước sớm hơn cho thấy dòng lũ đầu mùa sông Mekong về hồ Tonle Sap sớm hơn, có thể do mưa đầu mùa xảy ra sớm hơn hoặc xung dòng chảy bị dồn về giữa mùa do vận hành hồ chứa thượng lưu. Tuy nhiên, việc xả nước muộn hơn 1 - 2 tuần phản ánh rằng dòng xả bị chậm nhịp và yếu hơn, khiến lượng nước bổ sung cho hạ lưu trong giai đoạn đầu mùa khô giảm đáng kể 0, 0. Cùng với đó, cực tiểu ΔQ sâu hơn (- 7,5 đến - 8,0 $\times 10^3$ m³/s) và cực đại ΔQ thấp hơn nhẹ (+ 5,5 đến + 6,0 $\times 10^3$ m³/s) so với giai đoạn trước, chứng tỏ tổng lượng nước tích - xả vẫn tương đương, nhưng nhịp thời gian đã lệch: Nước tích sớm, xả muộn và kéo dài hơn, dẫn đến giảm khả năng duy trì dòng nền đầu mùa khô.

Về mặt thủy văn, sự dịch chuyển thời điểm đảo chiều dòng chảy là kết quả tổng hợp của 3 nhóm nguyên nhân chính. Thứ nhất, tác động của hồ chứa và thủy điện dòng chính tại thượng lưu đã làm phẳng xung lũ tự nhiên, khiến nước lũ về hồ Tonle Sap đến sớm hơn và thấp hơn, còn dòng xả từ hồ chứa dồn muộn hơn về cuối năm, dẫn đến pha xả bị trễ pha rõ rệt 0, 0. Thứ hai, biến đổi khí hậu và thay đổi thời gian mưa mùa đã làm dịch thời điểm khởi phát và kết thúc mùa mưa: Mưa đầu mùa có xu hướng xuất hiện sớm hơn 1 - 2 tuần, nhưng lượng mưa chính vụ lại tập trung ngắn hơn, làm giảm khả năng phục hồi nhanh của dòng xả cuối mùa. Thứ ba, sự thay đổi hình thái lòng hồ và lắng đọng trầm tích lâu dài cũng góp phần làm giảm khối tích thực tế có khả năng điều tiết, khiến pha xả kéo dài nhưng yếu hơn so với trước.

Có thể khẳng định rằng, hồ Tonle Sap vẫn duy trì chu kỳ tích - xả tự nhiên, nhưng đã bị kéo giãn, trễ pha và giảm biên độ điều tiết. Thời điểm bắt đầu tích nước sớm hơn khoảng nửa tháng, trong khi thời điểm xả nước muộn hơn khoảng 1 - 2 tuần, dẫn đến dòng chảy mùa khô tại hạ lưu đến muộn và yếu hơn. Đây là biểu hiện đặc trưng của một hệ thống điều tiết bị biến đổi nhịp mùa, chịu ảnh hưởng đồng thời của tác động nhân sinh và khí hậu. Nếu xu thế này tiếp tục duy trì, khả năng duy trì dòng nền và giảm thiểu xâm nhập mặn của hồ Tonle Sap sẽ tiếp tục suy giảm, đặc biệt trong các năm khô hạn kéo dài.

3.3. Xu hướng biến đổi theo thời gian

Phân tích chuỗi ΔQ trung bình năm giai đoạn 1980 - 2024 cho thấy sự thay đổi có hệ thống trong nhịp điều tiết tự nhiên của hồ Tonle Sap, được thể hiện qua xu hướng dịch pha, giảm biên độ và biến động bất đối xứng theo mùa.

Kết quả kiểm định Mann - Kendall áp dụng cho chuỗi ΔQ cực tiểu (pha tích) và cực đại (pha xả) cho thấy xu hướng biến đổi có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$) đối với cả hai pha. Cụ thể, ΔQ cực tiểu có xu hướng giảm theo thời gian, với hệ số Theil - Sen ước tính khoảng - 35 m³/s/năm, phản ánh mức độ tích nước ngày càng sâu hơn trong mùa mưa. Ngược lại, ΔQ cực đại có xu hướng giảm nhẹ (- 28 m³/s/năm) và xuất hiện muộn hơn trung bình 0,3 tuần mỗi thập kỷ, cho thấy pha xả nước ngày càng yếu và trễ hơn. Điều này hàm ý rằng, khả năng điều tiết hai chiều của hồ Tonle Sap đang bị mất cân đối dần, khi quá trình tích nước diễn ra mạnh hơn trong khi quá trình xả nước lại yếu và đến muộn hơn 0, 0.

Phân tích thời điểm đảo chiều dòng chảy ($\Delta Q = 0$) theo từng năm cho thấy xu hướng trễ dần qua các thập kỷ. Trước năm 2000, thời điểm đảo chiều trung bình rơi vào tuần thứ tư của tháng 9, song đến giai đoạn 2010 - 2024, thời điểm này đã dời sang tuần thứ nhất của tháng 10, tức muộn hơn trung bình 7 - 10 ngày. Mức dịch pha này tương ứng với độ trễ trung bình khoảng 0,15 - 0,2 chu kỳ thủy văn của hồ Tonle Sap. Cùng với đó, độ lệch chuẩn của thời điểm đảo chiều tăng từ 1,2 lên 2,1 tuần, phản ánh tính bất ổn cao hơn trong phản ứng

điều tiết của hồ, có thể do sự chi phối không đều của vận hành hồ chứa và biến động mưa giữa các năm 0, 0.

Xu hướng biến đổi này cũng thể hiện qua sự phẳng dần của đường cong ΔQ trung bình thập kỷ. Trong giai đoạn 1980 - 1989, ΔQ dao động mạnh với biên độ khoảng $13,5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, trong khi thập kỷ 2010 - 2019 biên độ chỉ còn $12,0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, giảm khoảng 10 - 12%. Sự giảm biên độ cho thấy hồ Tonle Sap đã mất dần khả năng tích - xả linh hoạt, làm giảm tính đàn hồi của hệ thống thủy văn tự nhiên. Đặc biệt, trong các năm cực đoan như 2016 và 2020, ΔQ dương giảm trên 30% so với trung bình nhiều năm, tương ứng với những năm hạn nặng tại đồng bằng sông Cửu Long, khi hồ Tonle Sap không còn xả đủ lượng nước để duy trì dòng nền mùa khô 0, 0.

Xét theo chuỗi dài hạn, có thể nhận diện 3 xu thế chính: (1) dịch pha sớm ở đầu mùa mưa: Pha tích bắt đầu ngày càng sớm hơn, phản ánh sự khởi phát sớm của mùa mưa và dòng chảy đầu mùa; (2) dịch pha muộn ở cuối mùa mưa: Pha xả nước dời muộn, làm mất cân đối nhịp điều tiết tự nhiên giữa hai mùa; (3) giảm biên độ và tăng tính bất ổn liên năm: Đường cong ΔQ ngày càng phẳng hơn, biểu hiện tác động tổng hợp của vận hành nhân sinh và biến đổi khí hậu.

Các kết quả cho thấy, hệ thống Tonle Sap - Mekong đang chuyển từ trạng thái điều tiết tự nhiên sang trạng thái bị chi phối mạnh bởi con người. Việc đỉnh ΔQ dương suy giảm và bị trễ pha không chỉ là biểu hiện thủy văn đơn thuần, mà còn là chỉ dấu của sự suy giảm chức năng hồ đệm của hồ Tonle Sap, vốn giữ vai trò cực kỳ quan trọng trong duy trì dòng chảy mùa khô, phân phối phù sa và ổn định sinh thái vùng hạ lưu 0, 0.

3.4. Hàm ý thủy văn và quản lý dòng chảy hạ lưu

Kết quả phân tích ΔQ theo tuần giai đoạn 1980 - 2024 cho thấy, chu kỳ điều tiết tự nhiên của hồ Tonle Sap đã và đang bị suy giảm, thể hiện qua pha tích nước đến sớm, pha xả muộn và biên độ ΔQ giảm dần. Sự dịch pha này phản ánh tác động tổng hợp của hệ thống hồ chứa thượng nguồn, thay đổi thời điểm mưa mùa và biến đổi khí hậu,

làm mất dần tính ổn định của nhịp điều tiết tự nhiên. Về phương diện thủy văn, sự trễ pha của quá trình xả nước khiến lượng nước bổ sung cho hạ lưu trong giai đoạn đầu mùa khô (tháng 12 - 1) giảm đáng kể, dẫn đến mực nước tại trạm Tân Châu - Châu Đốc xuống thấp sớm hơn và xâm nhập mặn đến sớm, lan sâu hơn vào nội đồng. Ngược lại, tích nước sớm và sâu hơn trong mùa mưa có thể giúp giảm đỉnh lũ trung lưu nhưng lại làm hạn chế lượng nước trả về hạ lưu, gây mất cân bằng giữa hai mùa.

Trong bối cảnh pha xả nước của hồ Tonle Sap đến muộn và yếu hơn, tác động của thủy triều và mực nước biển dâng tại vùng hạ lưu sông Mekong có xu hướng được khuếch đại. Khi dòng nền mùa khô suy giảm, ảnh hưởng của triều cường và nước biển dâng trở nên rõ rệt hơn tại các trạm Tân Châu và Châu Đốc, làm gia tăng nguy cơ xâm nhập mặn sớm và sâu vào nội đồng. Do đó, sự dịch pha của ΔQ không chỉ phản ánh biến đổi điều tiết thượng nguồn, mà còn là yếu tố gián tiếp làm tăng tính nhạy cảm của hạ lưu đối với các tác động ven biển.

Về mặt quản lý, kết quả này khẳng định rằng, hồ Tonle Sap giữ vai trò then chốt trong ổn định dòng chảy mùa khô của đồng bằng sông Cửu Long. Việc phối hợp vận hành giữa các hồ chứa thượng lưu và chu kỳ điều tiết của hồ Tonle Sap là cần thiết nhằm giảm sự trễ pha và bảo đảm dòng nền liên tục cho hạ lưu. Cụ thể, giai đoạn chuyển mùa (tháng 9 - 11) cần được xem là thời điểm nhạy cảm để điều chỉnh vận hành xả nước của các đập dòng chính, nhằm đồng bộ với quá trình đảo chiều dòng chảy của hồ Tonle Sap.

Bên cạnh đó, việc theo dõi ΔQ theo tuần nên được xem như một chỉ số thủy văn sớm trong quản lý nguồn nước vùng hạ lưu sông Mekong. Dữ liệu ΔQ có thể được tích hợp vào mô hình dự báo dòng nền và xâm nhập mặn, phục vụ điều hành khai thác - cấp nước và vận hành công trình thủy lợi - thủy điện ở đồng bằng sông Cửu Long. Về lâu dài, duy trì và bảo tồn nhịp điều tiết tự nhiên của hồ Tonle Sap không chỉ là nhiệm vụ của Campuchia mà là trách nhiệm chung của toàn lưu vực sông Mekong, gắn với mục tiêu đảm bảo an ninh nguồn nước, sinh kế và hệ sinh thái vùng hạ lưu trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng phức tạp.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

4.1. Kết luận

Hồ Tonle Sap vẫn duy trì cơ chế điều tiết tự nhiên với hai pha tích và xả nước rõ rệt, song chu kỳ này đã biến đổi đáng kể về thời gian và cường độ. Giai đoạn 1980 - 2009 thể hiện chu kỳ điều tiết ổn định, với pha tích nước bắt đầu từ tháng 5 và xả nước vào cuối tháng 9, biên độ ΔQ trung bình khoảng $13,5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Sau năm 2010, chu kỳ này có xu hướng kéo giãn và trễ pha, pha tích đến sớm hơn khoảng nửa tháng, trong khi pha xả muộn hơn 1 - 2 tuần, biên độ giảm còn $12,0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Kết quả kiểm định Mann - Kendall cho thấy, cả ΔQ cực tiểu và cực đại đều có xu hướng giảm có ý nghĩa thống kê, phản ánh sự suy yếu dần của khả năng điều tiết tự nhiên.

Sự trễ pha của ΔQ dẫn đến giảm đáng kể lượng nước bổ sung cho hạ lưu trong đầu mùa khô, khiến dòng nền đến muộn, xâm nhập mặn sớm và sâu hơn. Các biến động này cho thấy tác động tổng hợp của vận hành thủy điện dòng chính, thay đổi mưa mùa và biến đổi khí hậu, làm hồ Tonle Sap mất dần tính đàn hồi điều tiết. Việc phân tích ΔQ theo tuần chứng minh hiệu quả vượt trội trong nhận diện thời điểm đảo chiều, độ sâu tích nước và xu thế dịch pha theo năm, cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho dự báo thủy văn và điều hành nguồn nước xuyên biên giới.

4.2. Kiến nghị

Kết quả đạt được cho thấy, tiềm năng mở rộng phân tích xuống các thời đoạn ngắn hơn, chẳng hạn chu kỳ 3 ngày hoặc theo ngày, nhằm làm rõ hơn động lực điều tiết ngắn hạn của hệ thống. Tuy nhiên, các phân tích ở thang thời gian này cần được kết hợp với các kỹ thuật lọc nhiễu, số liệu mực nước và mô hình thủy động lực phù hợp để tách riêng ảnh hưởng của triều và các dao động cục bộ. Đây là hướng nghiên cứu tiếp theo có ý nghĩa nhằm hoàn thiện khung phân tích tích - xả nước của hồ Tonle Sap và nâng cao năng lực dự báo dòng chảy cho hạ lưu sông Mekong.

Trong bối cảnh đó, cần tăng cường quan trắc và chia sẻ dữ liệu lưu lượng giữa các quốc gia Mekong, kết hợp điều phối vận hành hồ chứa thượng lưu theo nhịp điệu điều tiết của hồ Tonle Sap,

đặc biệt trong thời kỳ chuyển mùa (tháng 9 - 11). Với vùng đồng bằng sông Cửu Long, cần tích hợp dữ liệu ΔQ vào các mô hình dự báo dòng nền và xâm nhập mặn, đồng thời nâng cao năng lực tích trữ nước ngọt nội vùng để thích ứng với biến động dòng chảy ngày càng phức tạp. Nghiên cứu cũng mở ra hướng phát triển tiếp theo trong định lượng mối liên hệ giữa ΔQ , phù sa và dinh dưỡng, nhằm phục vụ điều phối nguồn nước bền vững và bảo đảm an ninh thủy văn - sinh thái của hạ lưu sông Mekong.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Kumm, M., Penny, D., Sarkkula, J. & Koponen, J. (2014). Water balance analysis for the Tonle Sap lake - floodplain system. *Hydrological Processes*, 28(4): 1722 - 1733.
2. Arias, M. E., Holtgrieve, G. W., Dang, T. D., Nguyen, K. H., Mason, S. A. & Piman, T. (2020). Maintaining perspective of ongoing environmental change in the Mekong floodplains. *Environmental Research Letters*, 15(11), 114029.
3. Li, D., Long, D., Zhao, J. & Scanlon, B. R. (2017). Changes in streamflow timing and magnitude across the Mekong river basin: Impacts of climate change and dam operation. *Journal of Hydrology*, 551: 760 - 775.
4. Mekong River Commission (2021). State of the basin report 2021. Vientiane, Lao PDR: Mekong River Commission Secretariat. 310 pp.
5. Arias, M. E., Cochrane, T. A., Kumm, M., Lauri, H., Holtgrieve, G. W., Koponen, J. & Piman, T. (2014). Impacts of hydropower and climate change on the flood pulse of the lower Mekong basin and the Tonle Sap system. *Environmental Management*, 54(6): 1223 - 1238.
6. Räsänen, T. A., Koponen, J., Lauri, H. & Kumm, M. (2017). Downstream hydrological impacts of hydropower development in the upper Mekong basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1): 541 - 557.
7. Sabo, J. L., Ruhi, A., Holtgrieve, G. W., Elliott, V., Arias, M. E., Ngor, P. B., Räsänen, T. A. & Nam, S. (2021). Designing river flows to

improve food security futures in the lower Mekong basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(26), e2026129118.

8. Piman, T., Tingsanchali, T. & Rakwatin, P. (2020). Hydrological alteration of the Mekong river basin under dam construction scenarios. *Water Resources Management*, 34(3): 861 - 879.

9. Mekong River Commission (2024). Technical report on hydrological changes and drought assessment in the lower Mekong basin. MRC Secretariat, Vientiane, Lao PDR. Unpublished technical report. 325 pp.

10. Helsel, D. R., Hirsch, R. M., Ryberg, K. R., Archfield, S. A. & Gilroy, E. J. (2020). Statistical Methods in Water Resources (2nd ed.). U.S. geological survey techniques and methods, Book 4, Chapter A3, 458 pp. U.S. Geological Survey, Reston, VA. DOI: 10.3133/tm4A3.

11. Kendall, M. G. (1975). Rank Correlation Methods (4th ed.). Charles Griffin & Co., London. viii + 202 pp., ISBN: 978-0852641996.

12. Yue, S., Pilon, P., Phinney, B. & Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Sciences Journal*, 47(4): 597 - 610.

TIMING OF WATER STORAGE AND RELEASE OF THE TONLE SAP LAKE BASED ON WEEKLY DISCHARGE ANALYSIS AT KRATIE, TAN CHAU AND CHAU DOC STATIONS

Nguyen Trinh Chung¹, Nguyen Dang Tinh¹, Phan Khanh Khanh¹

¹Thuyloi University

Abstract

This study analyzes the weekly discharge variations (ΔQ) during 1980 - 2024 using observed data from the Kratie, Tan Chau and Chau Doc stations hydrological stations to identify the timing and dynamics of water storage and release of the Tonle Sap lake. The discharge difference was defined as $\Delta Q = (Q_{\text{TanChau}} + Q_{\text{ChauDoc}}) - Q_{\text{Kratie}}$ and examined for two periods: 1980 - 2009 (pre-mainstream dams) and 2010 - 2024 (post-dam construction). Results reveal that the Tonle Sap continues to maintain its natural dual-phase regulation, yet the storage-release cycle has become phase-shifted and flattened. The storage phase starts about half a month earlier, while the release phase occurs 1 - 2 weeks later, and the amplitude of ΔQ has decreased from 13.5×10^3 to $12.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. The Mann - Kendall trend test indicates a statistically significant ($p < 0.05$) decline in both ΔQ minima and maxima, evidencing the progressive weakening of the lake's natural regulation capacity. These changes reflect the combined impacts of upstream dam operations, altered monsoon timing and climate change, leading to reduced dry-season baseflow and earlier salinity intrusion in the Mekong delta. The weekly ΔQ approach proves effective in detecting short-term hydrological fluctuations and phase shifts, providing a robust scientific basis for transboundary water management and adaptive flow regulation in the lower Mekong basin.

Keywords: *Tonle Sap lake, Kratie discharge, Tan Chau, Chau Doc, hydrological week, flow reversal, natural regulation, Mekong river basin.*

Ngày nhận bài: 22/9/2025

Ngày chuyển phản biện: 10/11/2025

Ngày thông qua phản biện: 28/11/2025

Ngày duyệt đăng: 13/02/2026