

DOI:10.22144/ctujos.2025.070

DIỄN BIẾN PHÙ SA Ở VÙNG THƯỢNG NGUỒN ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG, ĐOẠN QUA TÂN CHÂU VÀ CHÂU ĐỐC, GIAI ĐOẠN 2000 - 2023

Giáp Minh Nhật¹, Đặng Thị Hồng Ngọc^{1,2}, Nguyễn Đình Giang Nam¹, Lâm Văn Thịnh¹ và Huỳnh Vương Thu Minh^{1*}

¹Khoa Môi trường và Tài nguyên Thiên nhiên, Trường Đại học Cần Thơ, Việt Nam

²Khoa Tài nguyên và Môi trường, Trường Đại học Kiên Giang, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): hvtminh@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 24/02/2025

Sửa bài (Revised): 26/03/2025

Duyệt đăng (Accepted): 09/04/2025

Title: Sediment dynamics in the upper Mekong Delta, the section through Tan Chau and Chau Doc, phase 2000 - 2023

Author(s): Giáp Minh Nhật¹, Đặng Thị Hồng Ngọc^{1,2}, Nguyễn Đình Giang Nam¹, Lâm Văn Thịnh¹ and Huỳnh Vương Thu Minh^{1*}

Affiliation(s): ¹College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Viet Nam; ²Faculty of Natural Resources and Environment, Kien Giang University, Viet Nam

TÓM TẮT

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá xu thế thay đổi của phù sa sông Mê Kông chảy vào đồng bằng sông Cửu Long trong giai đoạn 2000-2023 thông qua số liệu quan trắc phù sa tại trạm thủy văn Tân Châu trên sông Tiền và trạm thủy văn Châu Đốc trên sông Hậu. Trong nghiên cứu, phương pháp kiểm định phi tham số Mann-Kendall được sử dụng nhằm đánh giá xu thế và độ dốc Sen's Slope để ước lượng mức độ biến động phù sa theo thời gian. Tổng lượng phù sa qua Tân Châu và Châu Đốc có xu hướng giảm có ý nghĩa thống kê trong các tháng mùa mưa. Trong đó, tỉ lệ phần trăm thay đổi cao nhất tương ứng là -4,11% vào tháng 6 tại Châu Đốc, -3,23% vào tháng 1 tại Tân Châu. Tương tự, lưu lượng tại Châu Đốc cũng có xu hướng giảm mạnh đáng kể, nổi bật là trong tháng 1, với tỉ lệ phần trăm thay đổi là -3,23%. Trong khi đó, Tân Châu chỉ có lưu lượng nước tăng đáng kể vào tháng 4, với tỉ lệ phần trăm thay đổi là 2,93%. Những phát hiện trong nghiên cứu này có thể giúp cho các nhà quản lý môi trường về diễn biến tổng lượng phù sa hiện nay, nhằm góp phần cung cấp một bức tranh toàn cảnh về tình hình phù sa sông Mê Kông.

Từ khóa: Biến đổi khí hậu, đồng bằng sông Cửu Long của Việt Nam, kiểm định xu hướng Mann – Kendall, phù sa, xu hướng

ABSTRACT

This study was carried out to calculate the total amount and change trend of Mekong River sediment flowing into the Mekong Delta between 2000 and 2023 by using sediment monitoring data from 2 Hydrological Stations: Tan Chau on the Tien river, and Chau Doc on the Hau River. To analyze trends, the study used the Mann-Kendall non-parametric test method, while Sen's Slope was used for estimating the degree of sediment variations with time. The total sediment load passing through Tan Chau and Chau Doc shows a rapid decreasing trend. Among these, the highest percentage change was recorded at -4.11% in June at Chau Doc and -3.23% in January at Tan Chau. The water discharge at Chau Doc has shown a significant decline, most notably in January, with a percentage change of -3.23%. Meanwhile, Tan Chau experienced a notable increase in water discharge in April, with a percentage change of 2.93%. The findings of this study can help environmental managers and those interested in the current sediment situation by providing a comprehensive picture of the Mekong River sediment situation.

Keywords: Climate change, Mann – Kendall trend test, sediment, trend, Vietnamese Mekong Delta

1. GIỚI THIỆU

Đoạn sông Mê Kông chảy qua lãnh thổ Việt Nam có chiều dài xấp xỉ 220 km (với tên gọi là sông Tiền ở Việt Nam) và một nhánh của sông Mê Kông là Basaac (tức là sông Hậu ở Việt Nam). Sông Tiền và sông Hậu không chỉ bồi đắp nên vùng đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) suốt 7000 năm, mà còn cung cấp nguồn nước cho sản xuất và sinh hoạt, bồi đắp phù sa cho đồng bằng, cải tạo môi trường và giúp người dân có thể nuôi trồng, đánh bắt thủy sản. Tuy nhiên, lưu vực sông Mê Kông lại rất dễ bị tổn thương trước các mối nguy hiểm tự nhiên và do con người gây ra, do các đặc điểm địa lý, địa chất và tác động của con người. Biến đổi khí hậu đã làm phức tạp thêm hệ sinh thái tự nhiên và nhân tạo, đặc biệt là các quá trình thủy văn xảy ra trong sông và các hệ thống tự nhiên và nhân tạo xung quanh (Stryker et al., 2018).

Từ thập niên 1990, ngày càng nhiều con đập lớn, cao trên 15 m, được xây dựng và quy hoạch tại lưu vực sông Mê Kông. Bên cạnh đó, hoạt động khai thác cát và sỏi trên dòng chính của hạ lưu sông Mê Kông đã gây biến đổi mạnh mẽ chế độ dòng chảy và giảm lượng phù sa ở khu vực này (Lu & Siew, 2006; Kummu & Varis, 2007; Bravard et al., 2013; Räsänen et al., 2017). Hệ quả là các tác động tiêu cực lên hình thái sông, xói mòn bờ biển, hệ sinh thái, giao thông đường thủy và sản xuất nông nghiệp (Bravard et al., 2013; Dai & Liu, 2013). Sau khi đập Manwan được xây dựng vào năm 1993, tải lượng phù sa đã giảm hơn 60% tại trạm Gajiu (cách đập 2 km về phía hạ lưu) và hơn 50% tại Chiang Saen (Lu & Siew, 2006; Fu et al., 2008). Sáu đập chính trên dòng Mê Kông được dự báo giữ lại tới 83% lượng phù sa từ thượng nguồn, tương đương 40% tổng lượng phù sa toàn sông. Thậm chí, con số này có thể lên đến 94%. Nếu toàn bộ 133 con đập theo kế hoạch được xây dựng, chỉ khoảng 4% lượng phù sa của sông Mê Kông sẽ đến ĐBSCL mỗi năm, (Kummu & Varis, 2007; Kondolf et al., 2014).

Hiện nay, việc nghiên cứu về chế độ dòng chảy, vận chuyển phù sa và động lực học hình thái tại ĐBSCL còn hạn chế do sự phức tạp của hệ thống thủy văn cũng như thiếu dữ liệu thực địa. Với diện tích 39.000 km², ĐBSCL chỉ có 5 trạm đo giám sát dòng chảy và phù sa lơ lửng. Một số nghiên cứu đã tập trung phân tích dữ liệu tại các trạm này (Dang et al., 2016; Ha et al., 2018; Doan et al., 2020), trong khi một số khác chỉ nghiên cứu tại những khu vực cụ thể (Wolanski et al., 1996; Nguyen et al., 2014). Lượng phù sa hiện tại chảy ra biển được ước tính khoảng 40 triệu tấn mỗi năm, dao động trên dưới 20

triệu tấn tùy thuộc vào ENSO. Ảnh hưởng của ENSO (được đo lường bằng chỉ số dao động Phương Nam—SOI) đến Q (lưu lượng nước) và Qs (lượng phù sa) đạt mức cao nhất với độ trễ thời gian từ 8 đến 9 tháng.

Tuy đã có những nghiên cứu được thực hiện về diễn biến phù sa chảy qua vùng ĐBSCL, song những nghiên cứu liên quan đến phân tích phù sa trong khoảng thời gian dài hơn (cụ thể là từ năm 2000 đến năm 2023) vẫn chưa được cập nhật. Do vậy, nghiên cứu này được thực hiện là cần thiết với mục đích xác định xu thế biến đổi phù sa vào vùng ĐBSCL trong giai đoạn từ năm 2000 đến năm 2023. Việc so sánh biến động phù sa khoảng thời gian trước và sau khi xây dựng những siêu đập thủy điện trên dòng chính sông Mê Kông thông qua hai trạm Tân Châu và Châu Đốc cũng được thực hiện. Trong nghiên cứu, mối tương quan giữa lưu lượng dòng chảy và phù sa trong khu vực nghiên cứu đã được xây dựng, điều này giúp tìm hiểu rõ được quy luật biến đổi phù sa theo năm và theo từng tháng. Bên cạnh đó, diễn biến phù sa qua các khung thời gian khác nhau (năm, mùa và tháng) cũng được đánh giá trong nghiên cứu. Từ đó, kết quả giúp hiểu rõ hơn về quy luật của lượng phù sa trên sông Tiền và sông Hậu, đồng thời nâng cao nhận thức, tìm các giải pháp quản lý, khai thác hiệu quả nguồn tài nguyên phù sa, cũng như xác định các mặt bất lợi gây ra bởi sự biến đổi thất thường của phù sa nhằm hỗ trợ sự phát triển bền vững của ĐBSCL.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp thu thập số liệu

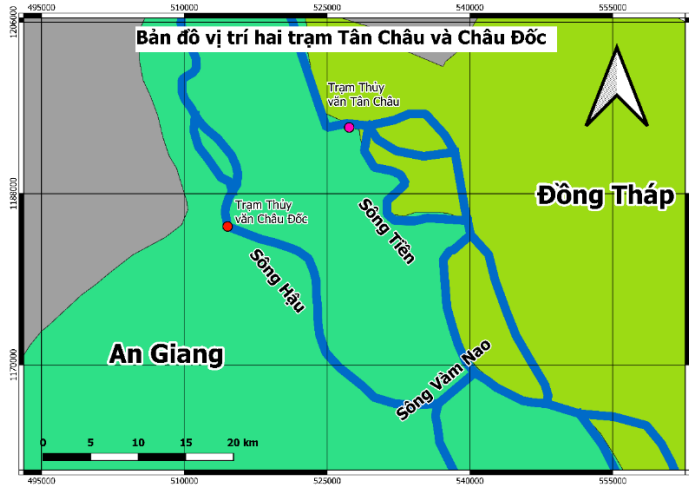
Trong nghiên cứu này, số liệu lưu lượng nước và phù sa của hai trạm Thủy văn Tân Châu và Châu Đốc trong giai đoạn từ năm 2000 đến năm 2023 đã được sử dụng. Đây là bộ số liệu chính biên của Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ, được đo đạc và chỉnh biên theo đúng quy trình quy phạm hiện hành (General Department of Meteorology and Hydrology, 2021, 2024a, 2024b).

Trạm Tân Châu và trạm Châu Đốc là hai trạm thủy văn hạng I được xây dựng nằm ở thượng nguồn sông Cửu Long, với nhiệm vụ đo đạc đầy đủ các yếu tố thủy văn ở vùng sông ảnh hưởng triều, ngoại trừ yếu tố bùn cát di đáy do chưa có phương pháp thích hợp. Trước năm 1996, yếu tố lưu lượng được đo đạc theo mùa (vài tháng trong mùa cạn và mùa lũ), từ năm 1996, trạm bắt đầu đo lưu lượng liên tục hàng ngày trong năm. Trong mùa lũ (khoảng từ đầu tháng 8 đến giữa tháng 11) khi dòng chảy chịu ảnh hưởng triều yếu, lưu lượng được đo theo cấp mực nước

hoặc vài ngày đo 1 lần, trong mùa cạn (khoảng từ giữa tháng 11 đến cuối tháng 7 năm sau) khi dòng chảy chịu ảnh hưởng triều mạnh, lưu lượng được đo theo phương pháp đại biểu với thủy đo được neo cố định tại thủy trực đại biểu và lưu tốc được đo hàng giờ tại 6 điểm trên thủy trực. Ngoài ra, lưu lượng mặt ngang chi tiết cũng được đo mỗi năm 3 đợt.

Về phù sa, trước năm 2008, mẫu phù sa không được lấy liên tục, nhưng từ năm 2008, công tác đo

đặc phù sa được thực hiện hàng ngày tại thủy trực đại biểu. Trong mùa cạn, mẫu được lấy 2 lần trong ngày (1 lần triều lên và 1 lần triều xuống), trong mùa lũ, mẫu được lấy hàng ngày vào lúc 7 giờ sáng cũng tại thủy trực đại biểu. Thủy trực đại biểu được đặt tại một vị trí cố định ở mặt cắt ngang đo lưu lượng của trạm, cách bờ phải khoảng 300 m ở trạm Tân Châu và 150 m ở trạm Châu Đốc. Mẫu phù sa được lấy theo phương pháp tích sâu với dụng cụ chuyên dùng, được xử lý và tính toán tuân theo quy phạm hiện hành.



Hình 1. Bản đồ thể hiện vị trí hai trạm Tân Châu và Châu Đốc

2.2. Phương pháp xử lý số liệu

Trong nghiên cứu này, phương pháp thống kê được sử dụng để đánh giá phân tích và tính toán chủ yếu bao gồm: phương pháp kiểm định xu hướng phi tham số Mann – Kendall (MK), Sequential Mann-Kendall và Innovative Trend Analysis (ITA).

2.3. Kiểm định xu hướng Mann – Kendall (MK)

Kiểm định Mann – Kendall (MK) là một thử nghiệm phi tham số được xây dựng bởi Mann (Mann, 1945), để phát hiện xu hướng và phân phối thống kê thử nghiệm được đưa ra bởi Kendall (Kendall, 1948). Mục đích chính của Mann – Kendall (Gilbert, 1987) là để đánh giá thống kê xem dữ liệu có xu hướng tăng hay giảm đơn điệu của biến quan tâm theo thời gian hay không. Kiểm định Mann – Kendall (MK) kiểm định xu hướng của một chuỗi thời gian được thể hiện trong phương trình (1).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

Trong đó x_i và x_j là các giá trị dữ liệu tuần tự, n là độ dài của chuỗi thời gian và:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if}(x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if}(x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if}(x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Mann (1945) và Kendall (1975) (Gilbert, 1987; Wu & Qian, 2017) tuyên bố rằng khi $n \geq 8$, S gần như có phân phối chuẩn với giá trị trung bình và phương sai như sau:

$$E(S_k) = 0 \quad (4)$$

Giá trị của S gần bằng 0, dương và âm hàm ý không có xu hướng tăng và giảm tương ứng đáng kể. Độ lớn của S đo lường sức mạnh của xu hướng. Lưu ý rằng, nếu giá trị tuyệt đối của S lớn hơn giá trị tới hạn của S cho thấy xu hướng có ý nghĩa thống kê.

$$\text{Var}(S_k) = \frac{1}{8} \left[\sum_{i=1}^n t_i(t_i - 1)(2t_i + 5) - \frac{n(n-1)(2n+5)}{2} \right] \quad (5)$$

Trong đó: t_i là số lượng mối quan hệ của phạm vi i và n là số lượng quan sát trong tập hợp. Thống kê Z_{sk} tiêu chuẩn được tính như sau:

$$Z_{sk} = \begin{cases} \frac{S_k - 1}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} S_k > 0 \\ 0 & S_k = 0 \\ \frac{S_k + 1}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} S_k < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó: Z_{sk} theo chuỗi phân phối chuẩn chuẩn với $\mu = 0$ và $\delta = 1$. Độ dốc của Sen được sử dụng để xác định độ lớn của xu hướng. Thống kê Z được hình thành và so sánh với điểm tới hạn từ phân phối chuẩn chuẩn. Ngoài ra, độ lớn của xu hướng chuỗi thời gian được đánh giá bằng quy trình phi tham số đơn giản do Sen, T_i phát triển giữa hai giá trị bất kỳ của chuỗi thời gian (cung cấp tổng số $n(n-1)/2$ cặp dữ liệu có thể là được tính theo phương trình 7.

$$T_i = \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad (7)$$

Trong đó: X_j và X_i là các giá trị tại thời điểm j và i ($1 < i < j < n$), n là số lượng dữ liệu. Trung vị của n giá trị T_i này được biểu diễn dưới dạng ước tính độ dốc của Sen. Các giá trị dương và âm của T_i lần lượt biểu thị xu hướng tăng và giảm trong chuỗi thời gian.

Phương pháp kiểm định Pettitt: Trong một số cuộc điều tra khí hậu thủy văn, kiểm định Pettitt phi tham số đã được sử dụng để xác định các biến đổi đột ngột trong trung bình phân phối của biến quan tâm. Việc thử nghiệm này cho phép phát hiện một ca duy nhất tại một thời điểm không xác định và dựa trên thử nghiệm hai mẫu Mann – Whitney (kiểm định dựa trên thứ hạng) (Mallakpour & Villarini, 2016). Phương pháp phi tham số này được đề xuất bởi Pettitt (1979) (Wang et al., 2021) để phát hiện điểm thay đổi trong chuỗi thời gian, tìm điểm thay đổi trên quy mô hàng tháng hoặc hàng năm.

Kiểm định Pettitt được thực hiện dựa trên thử nghiệm hai mẫu Mann – Whitney và cho phép phát hiện một sự dịch chuyển tại một thời điểm không xác định theo phương trình 8.

$$D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j) = \begin{cases} -1 & (X_i - X_j) < 0 \\ 0 & (X_i - X_j) = 0 \\ +1 & (X_i - X_j) > 0 \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó: X_i và X_j là các biến ngẫu nhiên với X_i theo sau X_j theo thời gian. Thống kê kiểm tra $U_{t,T}$ phụ thuộc vào D_{ij} theo phương trình 9.

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T D_{ij} \quad (9)$$

Thống kê $U_{t,T}$ giống như thống kê Mann – Whitney để phân tích khi hai mẫu X_1, \dots, X_t và X_{t+1}, \dots, X_T xuất phát từ cùng một quần thể. Thống kê kiểm tra $U_{t,T}$ được đánh giá cho tất cả các biến ngẫu nhiên từ 1 đến T sau đó, điểm thay đổi quan trọng nhất được chọn nơi giá trị của $|U_{t,T}|$ là lớn nhất:

$$K_T = \max_{1 \leq t \leq T} |U_{t,T}| \quad (10)$$

Một điểm thay đổi xảy ra tại thời điểm t khi thống kê K_T khác biệt đáng kể so với không tại một mức nhất định. Mức độ ý nghĩa xấp xỉ được cho bởi phương trình 11.

$$p = 2 \cdot \exp \left(\frac{-6K_T^2}{T^2 + T^3} \right) \quad (11)$$

Khi giá trị p nhỏ hơn mức ý nghĩa đã được chỉ định trước α , chúng ta có thể bác bỏ giả thuyết không và chia dữ liệu thành hai chuỗi con (trước và sau vị trí của điểm thay đổi) với hai hàm phân phối khác nhau.

2.4. Sequential Mann-Kendall

Phương pháp kiểm nghiệm phi tham số SMK được phát triển nhằm mục đích, kiểm tra xu hướng đơn điệu của biến quan tâm khi dữ liệu được thu thập theo thời gian dự kiến sẽ thay đổi theo cùng một hướng (lên hoặc xuống) trong một hoặc nhiều mùa. SMK được áp dụng cho chuỗi dữ liệu theo tháng, theo mùa, đặc biệt SMK không nhạy cảm đối với các trường hợp bị thiếu dữ liệu và dữ liệu lỗi (Hirsch et al., 1982; Helsel & Hirsch, 1993; Kitayama et al., 2012).

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (12)$$

Trong đó: N là số lượng điểm dữ liệu. Giả sử $(X_j - X_i) = 0$, giá trị của $\text{sgn}(\theta)$ được tính như sau:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} +1, & \theta > 1 \\ 0, & \theta = 1 \\ -1, & \theta < 1 \end{cases} \quad (13)$$

Thông kê này thể hiện số chênh lệch dương trừ đi số chênh lệch âm cho tất cả các khác biệt được xem xét. Đối với các mẫu lớn ($N > 0$), phép thử được tiến hành sử dụng phân phối chuẩn giá trị trung bình và phương sai như sau:

$$E[S] = 0$$

$$\text{Var}(S) = \frac{N(N-1)(2N-5) - \sum_{k=1}^n (t_k - 1)(2t_k + 1)}{18} \quad (14)$$

Trong đó: n là số lượng nhóm bị ràng buộc (chênh lệch bằng 0 giữa các giá trị được so sánh) và t_k là số lượng điểm dữ liệu trong nhóm ràng buộc thứ k . Khi đó độ chênh lệch chuẩn (thông kê Z) được tính như sau:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (15)$$

Giá trị của Z được tính toán và nếu giá trị nằm trong giới hạn $\pm 1,96$ thì giả thuyết về việc không có xu hướng trong chuỗi không thể bị bác bỏ ở mức độ tin cậy 95%.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bảng 1. Kết quả phân tích tổng lượng phù sa tại Châu Đốc sử dụng Mann-Kendall test

Biến	Hệ số biến thiên	Kendall's tau	p-value	Sen's slope	Phần trăm thay đổi (%)
I	51,8	-0,159	0,286	-1,444	-2,03
II	40,8	-0,043	0,785	-0,178	-0,62
III	38,7	0,076	0,62	0,142	0,76
IV	44,4	0,123	0,413	0,179	0,97
V	86,4	-0,279	0,059	-1,262	-3,43
VI	73,3	-0,326	0,027	-6,425	-4,11
VII	68,3	-0,272	0,066	-22,205	-4,13
VIII	51,0	-0,007	0,98	-1,356	-0,12
IX	31,5	-0,319	0,031	-30,526	-2,1
X	32,8	-0,159	0,286	-5,911	-0,62
XI	44,8	0,072	0,637	2,716	0,67
XII	55,5	-0,188	0,206	-4,386	-2,39
Mùa mưa	27,4	-0,225	0,13	-12,331	-1,37
Mùa khô	46,8	-0,275	0,063	-2,157	-2,94
Trung bình cả năm	27,4	-0,275	0,063	-7,287	-1,74

3.1. Kết quả phân tích tổng lượng phù sa

Trong giai đoạn 2000-2023, kết quả kiểm định xu thế Mann-Kendall test cho tổng lượng phù sa tại Châu Đốc và Tân Châu theo tháng, mùa và năm được thể hiện ở Bảng 1 và Bảng 2.

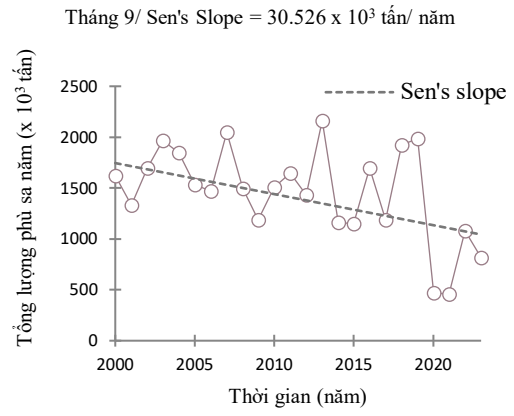
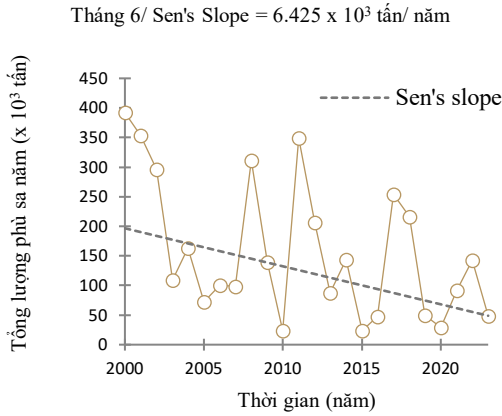
3.1.1. Tại Châu Đốc

Kết quả được thể hiện ở Bảng 1 cho thấy tổng lượng phù sa trong từng tháng, mùa và năm đều có xu thế giảm, ngoại trừ tháng 3, 4 và 11 dựa trên kết quả của Mann-Kendall's tau. Tuy nhiên, chỉ có tháng 6 và tháng 9 là giảm có ý nghĩa thông kê ở mức ý nghĩa 95%. Tổng lượng phù sa tháng 6 và tháng 9 giảm lần lượt khoảng 6.425×10^3 tấn và 30.526×10^3 tấn mỗi năm (tương ứng phần trăm thay đổi lần lượt là -4,11% và -2,10%).

Kết quả ở Hình 2 thể hiện các mức độ giảm tổng lượng phù sa tháng 6 và tháng 9 tại trạm Châu Đốc.

Kết quả được thể hiện ở Hình 2a cho thấy có sự dao động đáng kể theo từng năm, với các đỉnh cao trong khoảng năm 2005 và 2010, nhưng xu hướng chung là giảm dần. Kết quả ở Hình 2b cho thấy nhiều đỉnh cao trong giai đoạn từ năm 2000 đến năm 2010. Cả hai hình đều cho thấy từ sau năm 2010, biên độ dao động dần nhỏ hơn, sau đó rất thấp vào năm 2020 đến năm 2021.

Khi xét về phần trăm thay đổi, kết quả cho thấy tháng 6 là tháng có tỉ lệ phần trăm giảm cao nhất (-4,11%), còn tháng 9 thì có tỉ lệ phần trăm giảm nhỏ nhất (-2,10%).



(a)

(b)

Hình 2. Tổng lượng phù sa tại Châu Đốc trong tháng 6 (a) và tháng 9 (b)

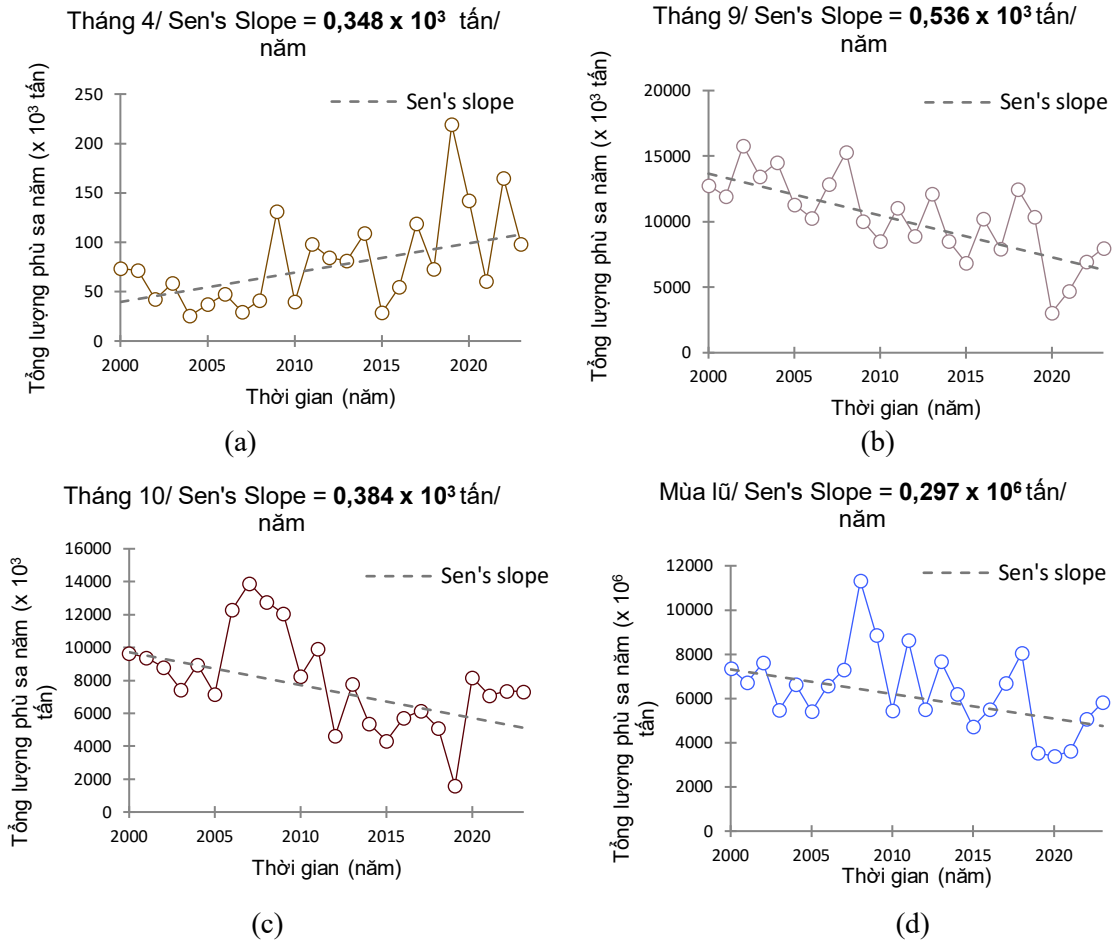
3.1.2. Tại Tân Châu

Kết quả được thể hiện ở Bảng 2 cho thấy cho thấy tổng lượng phù sa trong từng năm, mùa và tháng đều có xu thế giảm, ngoại trừ tháng 2, 3, 4, 5 và 8 dựa trên kết quả của Mann-Kendall's test. Chỉ có tổng lượng phù sa tháng 4, 9, 10, và mùa lũ là có xu thế giảm đáng kể ở mức ý nghĩa 95%, lần lượt khoảng $0,348 \times 10^3$ tấn, $0,536 \times 10^3$, $0,384 \times 10^3$ và $0,297 \times 10^6$ tấn mỗi năm (tương ứng phần trăm thay đổi lần lượt là 3,7%, - 3,08%, - 2,51% và - 1,74%).

Tổng lượng phù sa tại Tân Châu tháng 4, 9, 10, và mùa lũ đều rất cao vào năm 2008 và 2009, nhưng lại trở nên thấp nhất trong phạm vi từ năm 2019 đến năm 2021. Về phần trăm thay đổi, tháng 4 là tháng có giá trị tăng duy nhất có ý nghĩa và cao nhất (3,7%), tháng 9 là tháng có giá trị giảm cao nhất (- 3,08%), còn mùa lũ có giá trị giảm thấp nhất (- 1,74%).

Bảng 2. Kết quả phân tích tổng lượng phù sa tại Tân Châu sử dụng Mann-Kendall test

Biến	Hệ số biến thiên	Kendall's tau	p-value	Sen's slope	Phần trăm thay đổi (%)
I	57,5	-0,272	0,066	-0,272	-2,16
II	57,3	0,007	0,98	0,007	0,08
III	55,0	0,284	0,056	0,284	2,35
IV	59,8	0,348	0,018	0,348	3,7
V	75,9	0,134	0,372	0,134	1,28
VI	80,7	-0,072	0,637	-0,072	-1,11
VII	65,7	-0,087	0,568	-0,087	-1,26
VIII	51,7	0,051	0,747	0,051	0,37
IX	30,9	-0,536	0	-0,536	-3,08
X	36,5	-0,384	0,009	-0,384	-2,51
XI	44,5	-0,094	0,535	-0,094	-1,13
XII	47,1	-0,261	0,078	-0,261	-2,77
Mùa mưa	28,8	-0,297	0,045	-0,297	-1,74
Mùa khô	40,1	-0,188	0,206	-0,188	-1,63
Trung bình cả năm	28,9	-0,29	0,05	-0,29	-1,76



Hình 3. Tổng lượng phù sa tại Tân Châu trong tháng 4 (a), trong tháng 9 (b), trong tháng 10 (c) và trong mùa lũ (d)

Kết quả được thể hiện ở Hình 3 cho thấy sự biến động của tổng lượng phù sa tại sông Mê Kông qua các thời điểm khác nhau trong năm cho thấy một xu hướng giảm rõ rệt kéo dài từ năm 2000 đến năm 2023.

Tháng 4 là tháng mà lượng phù sa tự nhiên vốn dĩ đã thấp vào thời điểm mùa khô, nhưng kết quả ở Hình 3a cho thấy rằng tổng lượng phù sa có xu hướng tăng $0,348 \times 10^3$ tấn/năm. Mặc dù vậy, tổng lượng phù sa vào các thời điểm 2003 - 2004, 2009 - 2010, 2014 - 2015 và 2020 - 2021 có sự sụt giảm rất mạnh.

Tháng 9 được xem là giai đoạn đỉnh điểm của mùa mưa, thường là lúc lượng phù sa đạt đỉnh cao nhất. Tuy nhiên, kết quả ở Hình 3b cho thấy lượng phù sa có xu hướng giảm mạnh đáng kể với hệ số $0,536 \times 10^3$ tấn/năm. Tổng lượng phù sa vào các thời điểm 2004 - 2005, 2009 - 2010, 2014 - 2015 và có sự sụt giảm mạnh.

Ở Hình 3c ghi nhận được mức giảm phù sa $0,384 \times 10^3$ tấn/năm vào tháng 10. Tổng lượng phù sa trong giai đoạn này từng đạt đỉnh cao trước năm 2010 nhưng sau đó liên tục giảm dần. Tổng lượng phù sa vào các thời điểm 2004 - 2005, 2009 - 2010, 2011 - 2012, 2013 - 2015, 2017 - 2019 và 2020 - 2021 và có sự sụt giảm mạnh.

Cuối cùng, kết quả ở Hình 3d thể hiện xu hướng giảm phù sa trong toàn bộ mùa lũ $0,297 \times 10^6$ tấn/năm. Tổng lượng phù sa vào các thời điểm 2003 - 2005, 2008 - 2010, 2011 - 2012, 2013 - 2015, 2018 - 2020 có xuất hiện sự sụt giảm mạnh.

3.2. Kết quả phân tích lưu lượng nước chảy qua Tân Châu và Châu Đốc

Trong giai đoạn 2000-2023, kết quả phân tích lưu lượng nước tại Châu Đốc và Tân Châu cho năm và theo từng tháng được thể hiện như sau:

3.2.1. Tại Châu Đốc

Trong giai đoạn 2000-2023, kết quả phân tích lưu lượng nước tại Châu Đốc theo năm được thể hiện ở Bảng 3.

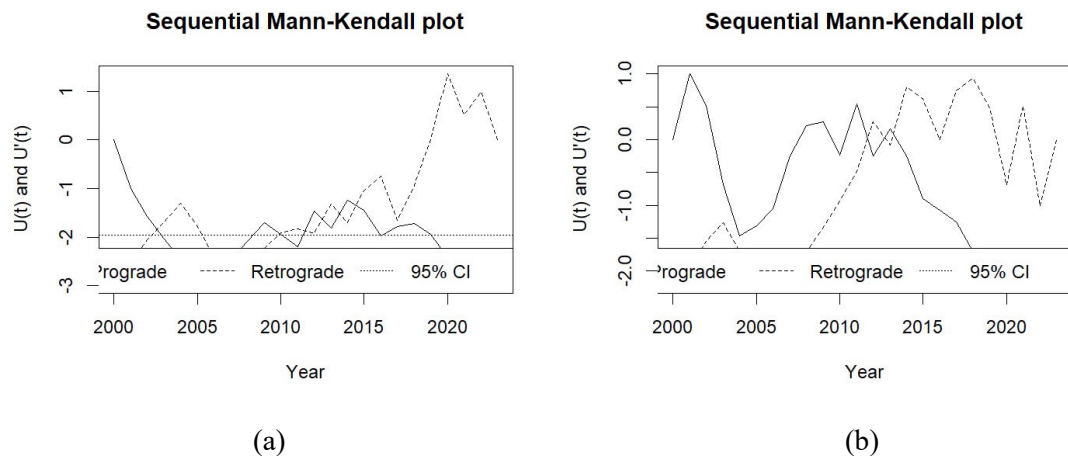
Kết quả được thể hiện ở Bảng 3 cho thấy các giá trị lưu lượng nước có đều có xu thế giảm, ngoại trừ tháng 4 và tháng 5.

Các giá trị tháng 1, 2, từ 7 đến 12, cùng với mùa lũ, mùa cạn và giá trị trung bình của lưu lượng nước

trung bình năm tại Châu Đốc là giảm ở mức ý nghĩa 95%. Ngoài ra, các giá trị lưu lượng nước giảm ở mức ý nghĩa như trên có xu thế giảm lần lượt khoảng 37,8; 15,05; 71,15; 101,88; 112,67; 74,02; 48,29; 50; 87,25; 16,24; 42,97 m³/s mỗi năm (tương ứng phần trăm thay đổi lần lượt là - 3,23; - 2,18; - 2,89; - 2,37; - 2,13; - 1,39; - 1,31; - 2,43; - 2,07; - 2,67; - 1,67; - 1,82%). Trong đó, phần trăm thay đổi của lưu lượng nước trung bình tháng 1 có giá trị giảm cao nhất (- 3,23%), còn lưu lượng nước trung bình tháng 11 có giá trị giảm thấp nhất (- 1,31%).

Bảng 3. Kết quả phân tích lưu lượng nước trung bình theo tháng và mùa tại Châu Đốc sử dụng Mann-Kendall Test

Biến	Hệ số biến thiên	Kendall's tau	p-value	Sen's slope	Phần trăm thay đổi (%)
I	33,3	-0,432	0,003	-37,801	-3,23
II	28,9	-0,355	0,016	-15,05	-2,18
III	25,5	-0,094	0,535	-2,671	-0,55
IV	27,1	0,225	0,13	7,406	1,55
V	35,3	0,043	0,785	2,606	0,41
VI	40,3	-0,225	0,13	-27,683	-2,15
VII	41,4	-0,348	0,018	-71,152	-2,89
VIII	29,9	-0,352	0,017	-101,875	-2,37
IX	23,0	-0,493	0,001	-112,667	-2,13
X	19,5	-0,446	0,002	-74,02	-1,39
XI	26,2	-0,313	0,035	-48,286	-1,31
XII	30,7	-0,367	0,013	-50	-2,43
Mùa mưa	22,4	-0,428	0,004	-87,25	-2,07
Mùa khô	24,1	-0,341	0,021	-16,238	-1,67
Trung bình cả năm	21,8	-0,428	0,004	-42,972	-1,82



Hình 4. Lưu lượng nước tại Châu Đốc trong tháng 1 (a) và tháng 11 (b) được thể hiện bằng phương pháp SMK

Dựa trên biểu đồ hình 4a, ta có thể thấy trong giai đoạn 2000-2015, lưu lượng nước tại Châu Đốc vào tháng 1 trong giai đoạn này không có xu hướng

rõ ràng. Nhưng từ khoảng năm 2015 trở đi, đường Retrograde tăng mạnh và vượt qua ngưỡng 95% CI, cho thấy rằng lưu lượng nước có xu hướng giảm có ý nghĩa từ năm 2015 đến năm 2023. Điều này cho

thấy rằng lưu lượng nước tại Châu Đốc vào tháng 1 có xu hướng ổn định trong giai đoạn đầu (2000 - 2015), nhưng đã giảm đáng kể sau năm 2015.

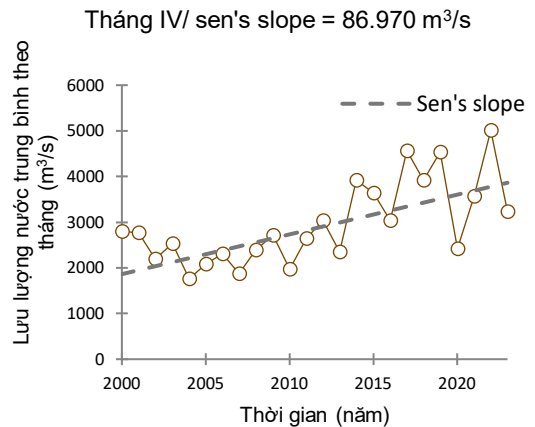
Ngoài ra, dựa trên kết quả ở hình 4b đã cho thấy có sự dao động mạnh nhưng không có xu hướng rõ ràng trong giai đoạn từ năm 2000 đến năm 2010, Tuy nhiên, từ khoảng năm 2010 trở đi, xu hướng trở nên phức tạp hơn, với 2 đường Prograde và Retrograde giao nhau 2 lần.

3.2.2. Tại Tân Châu

Trong giai đoạn 2000-2023, kết quả phân tích lưu lượng nước tại Tân Châu theo năm được thể hiện ở Bảng 4.

Kết quả được thể hiện ở Bảng 4 cho thấy các giá trị lưu lượng nước đều có xu thế giảm, ngoại trừ từ tháng 3 đến tháng 5, tháng 10 và tháng 11 dựa trên kết quả tính Mann-Kendall's test.

Chỉ có giá trị tháng 4 là tăng ở mức ý nghĩa 95%, tức là tăng 86,97 m³/s mỗi năm và phần trăm thay đổi là 2,93%.



Hình 5. Lưu lượng nước tại Tân Châu trong tháng 4

Bảng 4. Kết quả phân tích lưu lượng nước trung bình theo tháng và mùa tại Tân Châu sử dụng Mann-Kendall test

Biên	Hệ số biến thiên	Kendall's tau	p-value	Sen's slope	Phần trăm thay đổi (%)
I	20,9	-0,127	0,399	-39,396	-0,63
II	22,7	-0,091	0,552	-26,012	-0,63
III	25,6	0,21	0,157	38,571	1,26
IV	30,4	0,458	0,002	86,97	2,93
V	32,3	0,262	0,078	77,091	1,96
VI	34,7	-0,094	0,535	-74,5	-1
VII	30,4	-0,153	0,309	-128,571	-1,05
VIII	16,3	-0,157	0,297	-79,167	-0,44
IX	11,7	-0,098	0,519	-81,197	-0,41
X	11,5	0,143	0,345	49,524	0,26
XI	17,3	0,149	0,321	86,667	0,59
XII	19,8	-0,058	0,71	-35,333	-0,36
Mùa mưa	12,3	-0,043	0,785	-25,25	-0,15
Mùa khô	16,4	-0,072	0,637	-10,295	-0,13
Trung bình cả năm	12,8	-0,007	0,98	-3,445	-0,42

Hình 5 là biểu đồ thể hiện lưu lượng nước trung bình theo tháng trong tháng 4 trên sông Mê Kông từ năm 2000 đến năm 2023, kết quả cho thấy một xu hướng tăng dần rõ rệt với hệ số Sen's Slope là 86.970 m³/s. Trong giai đoạn từ năm 2000 đến năm 2005, lưu lượng nước trung bình dao động ở khoảng 1.500 – 3.000 m³/s, tương đối thấp và ổn định. Tuy nhiên, từ năm 2005 đến năm 2010, lưu lượng nước bắt đầu tăng lên, giảm khoảng cách dao động thành 2.000 – 3.000 m³/s. Sau năm 2010, xu hướng tăng này tiếp tục rõ nét hơn với nhiều thời điểm vượt 3000 m³/s, cho thấy sự gia tăng đáng kể trong dòng chảy so với đầu những năm 2000. Đáng để ý là trong các giai

đoạn năm 2003 - 2004, 2009 - 2010, 2014 - 2016, 2019 - 2020 và 2020 - 2023 có chiều hướng giảm mạnh.

3.3. Thảo luận

Các đập và hồ chứa lân cận có thể gây ảnh hưởng đáng kể đến chế độ thủy văn của sông, chủ yếu thông qua sự biến đổi của năm thành phần quan trọng trong chế độ dòng chảy: biên độ, tần suất, thời gian kéo dài, thời điểm và tốc độ thay đổi. Cuối cùng, những thay đổi này tạo ra một chế độ thủy văn sau khi có đập khác biệt đáng kể so với chế độ dòng chảy tự nhiên (Poff et al., 1997; Magilligan &

Nislow, 2005). Nhìn chung, hoạt động của các con đập giữ nước từ mùa mưa sang mùa khô thông qua việc tích trữ chúng trong hồ chứa, dẫn đến lưu lượng dòng chảy tối đa trung bình thấp hơn, sự biến động giữa các năm của lưu lượng tối đa và tối thiểu hàng ngày ít hơn, đồng thời làm tăng biên độ của lưu lượng tối thiểu (Poff et al., 2007).

Trong giai đoạn 2000–2023, kết quả từ các nghiên cứu về lượng phù sa và lưu lượng nước tại Châu Đốc và Tân Châu cho thấy xu hướng giảm rõ rệt về cả phù sa và lưu lượng nước. Các phân tích sử dụng Mann-Kendall’s tau đã chỉ ra rằng, mặc dù có một số tháng (như tháng 3, 4, 11 ở Châu Đốc và tháng 2, 3, 4, 5, 8 ở Tân Châu) có xu hướng tăng hoặc giảm không đồng nhất, nhưng về tổng thể xu hướng lại cho thấy sự suy giảm đáng kể, đặc biệt ở các tháng có ý nghĩa thống kê 95%. Các hiện tượng này không chỉ phản ánh sự thay đổi tự nhiên của dòng chảy mà còn có liên quan mật thiết đến tác

động của các công trình thủy điện quy mô lớn trong lưu vực sông Mê Kông.

Theo Doan et al. (2018), đến năm 2015 có 64 đập thủy điện lớn đã được xây dựng trong lưu vực sông Mê Kông với tổng dung tích hồ chứa hơn 80,2 km³, chiếm 96,8% và 20,1% lưu lượng dòng chảy trung bình hàng năm tại Chiang Saen và Kratie tương ứng. Hơn 50% dung tích này (41,2 km³) đến từ sáu siêu đập trên dòng chính ở thượng lưu sông Mê Kông thuộc Trung Quốc. Nổi bật nhất trong số đó là các đập thuộc chuỗi đập Lan Thương bao gồm: Manwan, Dachaoshan, Jinghong, Xiaowan, Gongguoqiao, Nuozhadu. Trong đó, đập Xiaowan và đập Nuozhadu là 2 trong số những con đập lớn nhất thế giới, chứa 50% dung tích nước trong lưu vực sông Mê Kông.

Ngoài ra, còn có một số con đập khác được xây trên dòng chính trong giai đoạn từ năm 2000 đến năm 2023 như: Miaowei, Dahuapiao, Wunonglong, Huangdeng, Xayaburi và Don Sahong.

Bảng 5. Tổng hợp các Đập Thủy Điện nằm trên dòng chính sông Mê Kông

	Tên đập thủy điện	Thời gian bắt đầu hoạt động (năm)	Tổng dung tích hồ chứa (km ³)
Các đập thuộc chuỗi đập Lan Thương	Manwan	1995	1,06
	Dachaoshan	2003	0,88
	Jinghong	2008	1,23
	Xiaowan	2010	15,13
	Gongguoqiao	2011	0,51
	Nuozhadu	2014	22,37
Các đập khác trên dòng chính sông Mê Kông	Miaowei	2017	0,66
	Dahuapiao	2018	0,29
	Wunonglong	2018	0,27
	Huangdeng	2019	0,27
	Xayaburi	2019	1,3
	Don Sahong	2020	

Những con đập này có khả năng giữ lại gần như toàn bộ lượng phù sa đầu vào, gây nên tình trạng giảm sạt phù sa tại ĐBSCL.

3.3.1. Giai đoạn 2000 – 2010

Trong giai đoạn nghiên cứu này, kết quả tính toán tổng lượng phù sa tại các trạm Châu Đốc và Tân Châu cho thấy xu hướng biến động mạnh mẽ, với các khoảng thời gian giảm sút rõ rệt xoay quanh các năm 2005, 2008 và 2010. Các năm này trùng khớp với thời điểm mà các con đập như Dachaoshan, Xiaowan và Jinghong bắt đầu đi vào hoạt động. Việc các đập đi vào hoạt động đã gây ra hiệu ứng cản trở tự nhiên của dòng chảy, dẫn đến việc tích trữ phù sa trong hồ chứa và làm giảm lượng phù sa được chuyển tải xuống các trạm Châu Đốc

và Tân Châu. Điều này có thể khẳng định mối liên hệ chặt chẽ giữa vận hành đập và sự thay đổi của phù sa tại hạ lưu, không chỉ làm giảm tổng lượng phù sa được bồi đắp cho ĐBSCL mà còn có thể thay đổi cấu trúc phân bố kích cỡ và thành phần của phù sa, từ đó gây nên ảnh hưởng đến tính chất đất đai và hệ sinh thái ven sông.

3.3.2. Giai đoạn 2011 – 2023

Trong giai đoạn từ năm 2011 đến năm 2023, xu hướng giảm tổng lượng phù sa tại Châu Đốc và Tân Châu càng trở nên rõ rệt, với các đợt giảm mạnh đặc biệt xuất hiện vào các năm 2015 và 2019. Trong khoảng thời gian này, tác động của các đập thủy điện quy mô lớn, đặc biệt là các đập thuộc chuỗi đập Lan Thương như Xiaowan và Nuozhadu, đã gia tăng đáng kể. Với dung tích hồ chứa khổng lồ (Xiaowan:

15,13 km³, Nuozhadu: 22,37 km³), các đập này có khả năng giữ lại gần như toàn bộ lượng phù sa đầu vào, từ đó làm giảm đáng kể dòng chảy và khả năng vận chuyển phù sa về hạ lưu. Thêm vào đó, sự ra đời của các siêu đập được xây dựng trước đó cùng với đập Xayaburi đi vào hoạt động vào năm 2019 đã góp phần làm trầm trọng thêm xu hướng giảm phù sa. Cùng với đó, các hiện tượng El Niño cực đoan xảy ra trong các năm 2015 – 2016 và 2019 – 2020 càng làm giảm lưu lượng nước và khả năng vận chuyển phù sa, dẫn đến tổng lượng phù sa sụt giảm khi đi qua các trạm Tân Châu và Châu Đốc.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu về xu thế thay đổi của phù sa sông Mê Kông chảy vào ĐBSCL qua hai trạm Tân Châu và Châu Đốc trong giai đoạn 2000–2023 cho thấy, cả tổng lượng phù sa và lưu lượng nước đều có xu hướng giảm mạnh. Cụ thể, tại Châu Đốc, tổng lượng phù sa giảm mạnh với tỷ lệ giảm cao nhất vào tháng 6 (- 4,11%) và giảm nhẹ nhất vào tháng 9 (- 2,10%). Đồng thời, lưu lượng nước trung bình giảm, trong đó tháng 1 giảm mạnh nhất (- 3,23%) còn tháng 11 giảm nhẹ nhất (- 1,31%). Ở Tân Châu, mặc dù tổng lượng phù sa chủ yếu giảm, thì tháng 4

lại ghi nhận mức tăng duy nhất có ý nghĩa (3,7%), trong khi tháng 9 giảm cao nhất (- 3,08%) và mùa lũ giảm thấp nhất (- 1,74%). Về lưu lượng nước trung bình, chỉ có tháng 4 tăng có ý nghĩa thống kê (tăng 86,97 m³/s mỗi năm, tương đương 2,93%).

Những xu hướng giảm mạnh này, đặc biệt sau khi các đập thủy điện lớn như Xiaowan, Nuozhadu và Xayaburi bắt đầu đi vào hoạt động cho thấy khả năng bồi đắp phù sa cho ĐBSCL đang bị suy giảm. Điều này có thể dẫn đến tình trạng sạt lở và xâm nhập mặn nghiêm trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến hệ sinh thái và sinh kế của hàng triệu người dân sống ven sông.

Kết quả nghiên cứu này cho thấy rằng việc xây dựng và vận hành các đập thủy điện trên dòng chính sông Mê Kông luôn là vấn đề gây tranh luận về tác động đến môi trường và sinh kế. Để đảm bảo phát triển bền vững, cần có sự hợp tác chặt chẽ giữa các quốc gia liên quan trong quản lý nguồn nước, từ đó cân bằng giữa lợi ích kinh tế và bảo vệ môi trường, đảm bảo cuộc sống cho cộng đồng phụ thuộc vào con sông này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

- Doan, Binh V., Kantoush, S., Sumi, T., & Nguyen, Mai P. (2018). Impact of Lancang Cascade Dams on Flow Regimes of Vietnamese Mekong Delta. *土木学会論文集b1 (水工学)*, 74(4), 1_487-1_492. https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.I_487
- Bravard, J. P., Goichot, M., & Gaillot, S. (2013). Geography of Sand and Gravel Mining in the Lower Mekong River. *EchoGéo* (26), 0-20. <https://doi.org/10.4000/echogeo.13659>
- Dai, Z., & Liu, J. T. (2013). Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: An example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River). *Journal of Hydrology*, 480, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.003>
- Fu, K. D., He, D. M., & Lu, X. X. (2008). Sedimentation in the Manwan reservoir in the Upper Mekong and its downstream impacts. *Quaternary International*, 186(1), 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.09.041>
- General Department of Meteorology and Hydrology. (2021). *TCVN 12636-11:2021 on Regulations for Suspended Sediment Discharge Monitoring in Tidal-Influenced Rivers (in Vietnamese)*.
- General Department of Meteorology and Hydrology. (2024a). *TCVN 12636-17:2024 on Editing Documents on Suspended Sediment Discharge in River Water (in Vietnamese)*.
- General Department of Meteorology and Hydrology. (2024b). *TCVN 12636-16:2024 Standard on Editing Documents on River Flow in Tidal Influence Areas (in Vietnamese)*.
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. John Wiley & Sons.
- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (1993). *Statistical methods in water resources*. Elsevier.
- Hirsch, R. M., Slack, J. R., & Smith, R. A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18(1), 107–121.
- Nguyen, Hung N., Delgado, J. M., Güntner, A., Merz, B., Bárdossy, A., & Apel, H. (2014). Sedimentation in the floodplains of the Mekong Delta, Vietnam. Part I: Suspended sediment dynamics. *Hydrological Processes*, 28(7), 3132–3144. <https://doi.org/10.1002/hyp.9856>
- Kendall, M. G. (1948). *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin, London.
- Kitayama, K., Seto, S., Sato, M., & Hara, H. (2012). Increases of wet deposition at remote sites in Japan from 1991 to 2009. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 69, 33–46. <https://doi.org/10.1007/s10874-012-9228-3>

- Kondolf, G. M., Rubin, Z. K., & Minear, J. T. (2014). Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. *Water Resources Research*, 50(6), 5158–5169. <https://doi.org/10.1002/2013WR014651>
- Kummu, M., & Varis, O. (2007). *Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the Lower Mekong River*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X06003229>
- Lu, X. X., & Siew, R. (2006). Water discharge and sediment flux changes over the past decades in the Lower Mekong River: Possible impacts of the Chinese dams. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 181–195. <https://doi.org/10.5194/hess-10-181-2006>
- Magilligan, F. J., & Nislow, K. H. (2005). Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 71(1), 61–78. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.017>
- Mallakpour, I., & Villarini, G. (2016). A simulation study to examine the sensitivity of the Pettitt test to detect abrupt changes in mean. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2), 245–254. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1008482>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 13, 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The Natural Flow Regime. *BioScience*, 47(11), 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
- Poff, N. L., Olden, J. D., Merritt, D. M., & Pepin, D. M. (2007). Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(14), 5732–5737. <https://doi.org/10.1073/pnas.0609812104>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.023>
- Stryker, J., Wemple, B., & Bomblies, A. (2018). Modeling the impacts of changing climatic extremes on streamflow and sediment yield in a northeastern US watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 17, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.003>
- Wang, D., Fu, X., Luan, Q., Liu, J., Wang, H., & Zhang, S. (2021). Effectiveness assessment of urban waterlogging mitigation for low impact development in semi-mountainous regions under different storm conditions. *Hydrology Research*, 52(1), 284–304. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.052>
- Wolanski, E., Ngoc Huan, N., Trong Dao, L., Huu Nhan, N., & Ngoc Thuy, N. (1996). Fine-sediment Dynamics in the Mekong River Estuary, Vietnam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 43(5), 565–582. <https://doi.org/10.1006/ecss.1996.0088>
- Wu, H., & Qian, H. (2017). Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2582–2592. <https://doi.org/10.1002/joc.4866>