

ĐÁNH GIÁ DIỄN BIẾN CHẤT LƯỢNG NƯỚC MẶT VÀ XÁC ĐỊNH NGUỒN Ô NHIỄM THEO TIỂU VÙNG Ở ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG GIAI ĐOẠN 2017-2024

Đoàn Thanh Vũ⁽¹⁾, Trần Đăng An⁽²⁾,
Nguyễn Đức Nhật Trường⁽³⁾, Phan Thị Thùy Dương⁽¹⁾
⁽¹⁾Trường ĐH Tài nguyên và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh
⁽²⁾Trường Đại học Thủy lợi
⁽³⁾Công ty TNHH Dịch vụ Môi trường Đại Lợi

Ngày nhận bài: 17/8/2025; ngày gửi phản biện: 18/8/2025; ngày chấp nhận đăng: 9/9/2025

Tóm tắt: Nghiên cứu này đánh giá hiện trạng, phân hóa theo không gian - thời gian và các yếu tố chi phối chất lượng nước mặt tại Đồng bằng Sông Cửu Long (ĐBSCL) giai đoạn 2017-2024, trên bốn tiểu vùng: Tứ giác Long Xuyên (TGLX), Bán đảo Cà Mau (BĐCM), giữa Sông Tiền-Hậu (G2SO) và Tả Sông Tiền (TST). Kết quả cho thấy hầu hết thông số (trừ NO_3^-) vượt QCVN 08-MT:2015 A1; ghi nhận giá trị trung bình hữu cơ khá cao (BOD_5 10 mg/L; COD 25 mg/L) kèm vi sinh và kim loại, gây rủi ro cho cấp nước sinh hoạt. WQI rất thấp ở kênh nội đồng (6-29) nhưng đạt mức trung bình-khá trên trục sông chính (50-65), phản ánh vai trò pha loãng/tự làm sạch của Sông Tiền-Hậu. Phân tích PCA chỉ ra sáu nhóm nguồn chính (hữu cơ-kim loại, địa hoá/phèn, mặ-n-oxy hoá, vi sinh, dinh dưỡng, và pH-Hg). AHC phân cụm hơn 2.500 mẫu thành các cụm ô nhiễm hữu cơ-kim loại cao, cụm nền phổ biến, và cụm dị thường nhỏ cần giám sát. Lần đầu tiên, WQI theo mùa cho thấy mùa mưa cải thiện chất lượng trên sông chính nhưng làm xấu nước nội đồng, còn mùa khô thì ngược lại. Kết quả cung cấp cơ sở nhận diện “điểm nóng” và đề xuất kiểm soát nguồn thải thích ứng thủy văn - khí hậu cho ĐBSCL.

Từ khóa: Chỉ số WQI, Mann-Kendall, Sen's Slope, phân tích PCA, AHC, ĐBSCL.

1. Đặt vấn đề

ĐBSCL là khu vực có hệ thống sông ngòi dày đặc, là trung tâm nông nghiệp, thủy sản lớn nhất cả nước với khoảng 17 triệu dân, nhưng địa hình thấp, bằng phẳng khiến khu vực dễ tổn thương trước biến đổi khí hậu (nước biển dâng, lũ, hạn hán, xâm nhập mặn) [1-3]. Bên cạnh đó, thâm canh nông nghiệp, mở rộng nuôi trồng thủy sản, công nghiệp hóa - đô thị hóa cùng hạ tầng xử lý chất thải hạn chế đã làm tình trạng ô nhiễm nghiêm trọng hơn [4]. Ngoài ra, thủy điện thượng nguồn Mekong làm giảm phù sa, dòng chảy, gia tăng xói lở và xâm nhập mặn, đe dọa an ninh nguồn nước và phát triển bền vững vùng [1], [3].

Việc đánh giá toàn diện và xác định nguyên nhân ô nhiễm nguồn nước là cấp thiết cho quản

lý bền vững [5]. Trong đó, chỉ số WQI giúp tổng hợp nhiều thông số thành một giá trị duy nhất, hỗ trợ phân loại nhanh tình trạng nguồn nước. Các phương pháp thống kê đa biến như PCA và AHC cho phép nhận diện yếu tố chi phối và nguồn ô nhiễm chính [1], [5]. Nhiều nghiên cứu trước đây đã kết hợp WQI với PCA/AHC để phân tích biến động không - thời gian chất lượng nước. Đồng thời, phân tích xu thế thời gian cũng rất quan trọng. Do đó, nghiên cứu này nhằm (i) Đánh giá hiện trạng và biến động không - thời gian chất lượng nước mặt ĐBSCL giai đoạn 2017-2024, (ii) Phân tích xu thế bằng kiểm định Mann-Kendall, và (iii) Nhận diện nhóm nguyên nhân ô nhiễm, qua đó đề xuất định hướng giải pháp quản lý. So với nghiên cứu trước của chúng tôi [4], nghiên cứu này cập nhật thêm dữ liệu của năm 2023 và năm 2024 để phản ánh rõ hơn xu hướng trong những năm gần đây.

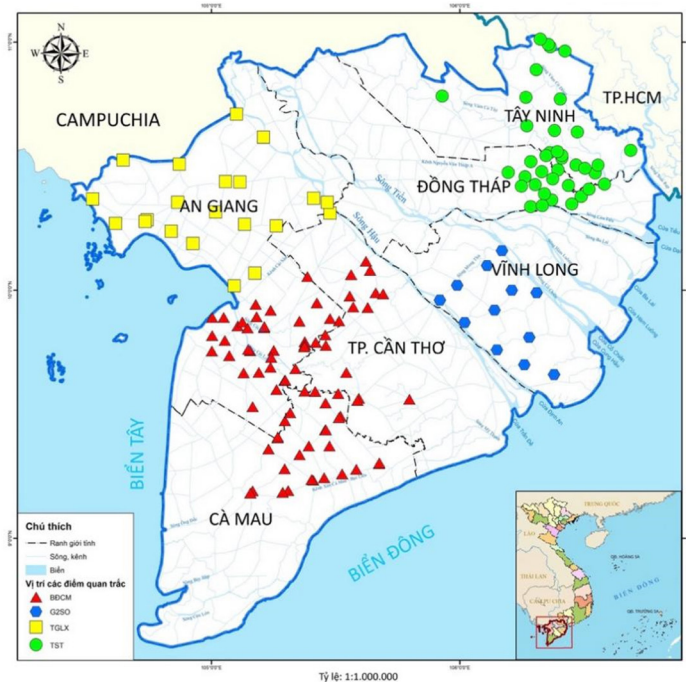
Liên hệ tác giả: Phan Thị Thùy Dương
Email: pttduong@hcmunre.edu.vn

2. Phương pháp và tài liệu nghiên cứu

2.1. Phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện trên địa bàn 13 tỉnh/thành phố ĐBSCL (nay là 6 tỉnh nhưng không bao gồm diện tích của Tỉnh Tây Ninh

trước đây) và tập trung vào bốn tiểu vùng đặc trưng: (1) tiểu vùng TGLX, (2) tiểu vùng BĐCM, (3) tiểu vùng G2SO, và (4) tiểu vùng TST đại diện cho các khu vực địa lý - thủy văn khác nhau của ĐBSCL (Hình 1).



Hình 1. Bản đồ vị trí vùng nghiên cứu được phân chia theo 4 tiểu vùng đặc trưng: (1) Tứ Giác Long Xuyên, (2) Bán đảo Cà Mau, (3) Giữa Sông Tiền - Sông Hậu, (4) Tả Sông Tiền và sơ đồ vị trí các điểm quan trắc chất lượng nước mặt

2.2. Dữ liệu và thu thập mẫu

Nghiên cứu sử dụng tập dữ liệu quan trắc chất lượng nước mặt giai đoạn 2017-2024 lên tới 2.548 mẫu (Bảng 1) do Bộ TN&MT, Bộ NN&PTNT và Sở TN&MT của 13 tỉnh ĐBSCL thực hiện. Các mẫu trên được thu tại các điểm cố định trên hệ thống sông kênh của vùng ĐBSCL cho cả mùa khô và mùa mưa, với tần suất tháng hoặc quý. Mẫu lấy ở độ sâu $\approx 0,3$ m vào buổi sáng (8-10 giờ), bảo quản lạnh 4°C và phân tích trong phòng thí nghiệm theo TCVN và SMEWW (APHA) cho các thông số pH, nhiệt độ, TSS, DO, BOD_5 , COD, NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , NO_2^- , Coliform... Kết quả được so sánh với QCVN 08-MT:2015/BTNMT để đánh giá mức độ ô nhiễm. Để đảm bảo chất lượng, khoảng 5% số mẫu là mẫu trắng và mẫu lặp; dữ liệu dưới ngưỡng phát hiện được thay thế bằng 1/2 giá trị LOD. Các biến lệch phải

được log10, toàn bộ dữ liệu chuẩn hóa z-score trước khi phân tích PCA/AHC. Do hạn chế tiếp cận và chia sẻ, mạng lưới quan trắc chưa đồng đều, gây thiếu hụt và giảm độ tin cậy không gian; để khắc phục, nghiên cứu áp dụng phân tích thống kê đa biến nhằm nhận diện cụm ô nhiễm và xu thế theo vùng.

2.3. Phương pháp phân tích và đánh giá số liệu

So sánh với quy chuẩn: Kết quả phân tích được đối chiếu với Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt (QCVN 08-MT:2015/BTNMT) cột A1 để đánh giá mức độ ô nhiễm. Dù quy chuẩn này được cập nhật từ năm 2023 nhưng nghiên cứu vẫn sử dụng phiên bản 2015 nhằm đảm bảo thống nhất cho toàn giai đoạn 2017-2024.

Chỉ số chất lượng nước (WQI): Chỉ số chất lượng nước (WQI) được tính theo Quyết định

1460/QĐ-TCMT (2019) của Tổng cục Môi trường và xem thêm nghiên cứu của [4]. Với các thông số đầu vào gồm 16 thông số thuộc 4 nhóm: Nhóm I (pH), nhóm III (kim loại nặng), nhóm IV (hữu cơ và dinh dưỡng), nhóm V (Coliform); mỗi thông số được gán trọng số theo mức độ ảnh hưởng. Trường hợp thiếu dữ liệu, việc tính toán được xử lý theo hướng dẫn của QĐ 1460, bảo đảm số liệu để tính toán WQI phải bao gồm tối thiểu 03/05 nhóm thông số, trong đó bắt buộc phải có nhóm IV và trong nhóm IV có tối thiểu 03 thông số được sử dụng để tính toán. Kết quả WQI được phân hạng theo ngưỡng: 91-100 (rất tốt), 76-90 (tốt), 51-75 (trung bình), 26-50 (xấu), 10-25 (kém), <10 (ô nhiễm rất nặng). Trong nghiên cứu [4] chỉ tính WQI chung cho toàn giai đoạn, nghiên cứu này tính riêng cho từng mùa (mưa, khô) để làm rõ yếu tố mùa vụ của khu vực.

Phân tích thành phần chính (PCA) được áp dụng để giảm chiều dữ liệu và xác định các thành phần chính (các PC) giải thích phần lớn phương sai của tập dữ liệu chất lượng nước [1]. Kết quả PCA cho phép phân nhóm các thông số theo các tác nhân ô nhiễm tiềm ẩn như ô nhiễm hữu cơ (BOD₅, COD), dinh dưỡng (N, P), vi sinh (Coliform, E. coli) hay nước mặn (độ mặn, Cl⁻) tùy dữ liệu [4]. Đồng thời, phương pháp phân cụm phân cấp (Ward, khoảng cách Euclid) được sử dụng để gom các điểm quan trắc thành cụm có chất lượng nước tương tự, nhận diện các vùng đồng nhất về ô nhiễm [1]. Các phân tích được thực hiện bằng phần mềm SPSS, công cụ XLSTAT, với kiểm định ý nghĩa ở mức tin cậy 95% ($\alpha = 0,05$).

Kiểm định xu thế thời gian: Được thực hiện bằng phương pháp phi tham số Mann-Kendall (MK) kết hợp hệ số Sen's Slope trên chuỗi số liệu quan trắc 2017-2024 tại từng điểm quan trắc. MK giúp xác định xu hướng tăng hoặc giảm có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$), còn Sen's Slope ước lượng độ lớn của xu hướng [8]. Phương pháp này phổ biến trong nghiên cứu môi trường do không yêu cầu phân phối chuẩn và phù hợp với dữ liệu biến động thất thường.

Nghiên cứu đã kết hợp đánh giá định lượng (WQI) với phân tích định tính - chẩn đoán (PCA, CA, xu thế) trên bộ dữ liệu quy mô lớn ĐBSCL giai đoạn 2017-2024. Cách tiếp cận đa chiều này giúp nhận diện toàn diện diễn biến chất lượng nước, làm rõ nguồn gốc ô nhiễm theo phân vùng và theo dõi xu hướng biến đổi, từ đó hỗ trợ cảnh báo và quản lý hiệu quả trong tương lai.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả

3.1.1. Đặc điểm hoá học của nước mặt

Kết quả tổng hợp được trình bày tóm tắt tại Bảng 1. Các thông số quan trắc cho thấy tình trạng ô nhiễm hữu cơ, dinh dưỡng và vi sinh tương đối nghiêm trọng, riêng phạm vi rộng, với nhiều chỉ tiêu có giá trị trung bình và cực đại vượt xa giới hạn cho phép của quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt (QCVN 08-MT:2015, cột A1), như: BOD₅, COD, TOC, NH₄⁺, NO₂⁻, PO₄³⁻, trong khi NO₃⁻ nằm trong giới hạn (≤ 2 mg/L). Các trường hợp cao bất thường có thể là ngoại lệ đến từ nước thải nông độ đậm đặc tại một kênh nội đồng.

Bảng 1. Tổng hợp các thông số chất lượng nước cho toàn vùng ĐBSCL

Chỉ tiêu	Tổng số mẫu	Nhỏ nhất	Lớn nhất	Trung bình	Độ lệch chuẩn	QCVN 08-MT:2015
pH	2.548	3,1	9,0	7,0	0,6	6,5-8,5
DO	2.548	2	11	6	1	≥ 6
BOD5	2.548	4	173	10	8	4
COD	2.548	6	473	25	19	10
TOC	2.548	6	160	16	7	4
NH4+	2.548	0,05	2,8	0,5	0,4	0,3
NO3-	2.548	0,1	2,0	0,4	0,3	2
NO2-	2.548	0,04	1,00	0,37	0,24	0,05
PO43-	2.548	KPH	45,8	1,8	5,0	0,1

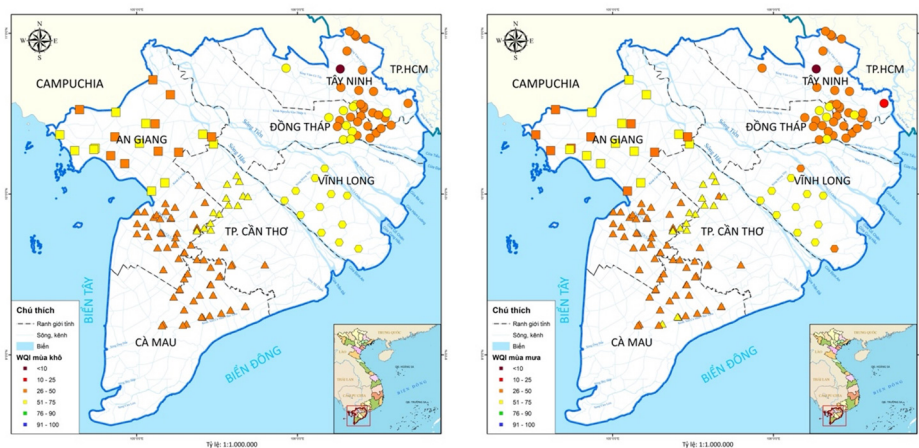
Chỉ tiêu	Tổng số mẫu	Nhỏ nhất	Lớn nhất	Trung bình	Độ lệch chuẩn	QCVN 08-MT:2015
Coliform	2.548	KPH	45.100	4.552	2.978	2.500
TSS	2.548	1	913	38	41	20
As	2.548	0,01	0,03	0,02	0,003	0,01
Cd	2.548	KPH	0,863	0,010	0,023	0,005
Pb	2.548	KPH	0,02	0,004	0,003	0,02
Cr6+	2.548	KPH	1,96	0,02	0,05	0,01
Cu	2.548	KPH	0,05	0,004	0,003	0,1
Hg	2.548	KPH	0,142	0,002	0,006	0,001
Độ mặn	2.548	0,1	39,40	4,76	8,76	-
Cl ⁻	2.548	0,15	42.186	1.425	4.207	250

Các đơn vị tính: Hầu hết là mg/L, riêng Coliform là MPN/100 mL, pH là không đơn vị, KPH là không phát hiện.

Coliform và TSS đều vượt chuẩn, phản ánh độ đục cao và nguy cơ vi sinh lớn. Một số kim loại nặng cũng đáng lo ngại, với As, Cd, Cr⁶⁺, Hg vượt chuẩn, trong khi Pb trung bình 0,004 mg/L (dưới ngưỡng 0,020). Độ mặn dao động 0,1-39,4‰ (trung bình 4,8‰) và nồng độ Cl⁻ nhiều nơi vượt 250 mg/L, cho thấy xâm nhập mặn vẫn diễn biến phức tạp. Nhìn chung, hầu hết thông số trung bình (trừ NO₃⁻) đều cao hơn QCVN cột A1, phản ánh tình trạng ô nhiễm đa thành phần. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu trước, khẳng định ô nhiễm hữu cơ - vi sinh nghiêm trọng (BOD₅ tối đa 173 mg/L, COD tối đa 473 mg/L), tiềm ẩn rủi ro lớn cho cấp nước sinh hoạt [4], [9].

3.1.2. Chỉ số chất lượng nước (WQI)

Chỉ số WQI được tính cho các tiểu vùng đặc trưng của ĐBSCL, kết quả WQI trung bình năm, mùa khô và mùa mưa tại các điểm quan trắc được thể hiện ở Hình 2. Nhìn chung, WQI năm dao động trên phạm vi rộng, từ mức rất thấp (từ 6 đến 29) tại một số điểm kênh nội đồng, đến mức trung bình khá (từ 50 đến 65) trên các trục sông chính. Phân bố không gian cho thấy chất lượng nước suy giảm nhiều ở các vùng trũng, khu vực nội đồng nơi xa các tuyến sông lớn và khu đô thị, trong khi các vị trí trên dòng Sông Tiền, Sông Hậu có WQI cao hơn nhờ khả năng tự làm sạch và pha loãng lớn.



Hình 2. Kết quả tính toán chỉ số WQI cho nước mặt tại 4 tiểu vùng của ĐBSCL trong mùa khô (a) và mùa mưa (b) từ 2017 đến 2024. Các điểm quan trắc có chất lượng Rất tốt có số điểm từ 91-100 (Xanh nước biển), chất lượng Tốt có số điểm từ 76-90 (Xanh lá cây), chất lượng Trung bình có số điểm từ 51-75 (Vàng), chất lượng Xấu có số điểm từ 26-50 (Da cam), chất lượng Kém có số điểm từ 10-25 (Đỏ) và chất lượng Ô nhiễm rất nặng có số điểm <10 (Nâu)

Kết quả cho thấy chất lượng nước khác biệt rõ giữa các tiểu vùng: Tiểu vùng BĐCM có WQI_năm chủ yếu khoảng 40-60 (kém-trung bình), nhiều kênh nội đồng ô nhiễm nặng, trong khi cụm OMXN đạt cao hơn (55-64). Tiểu vùng TGLX duy trì mức trung bình 45-56, WQI mùa mưa thường cao nhờ lũ pha loãng, nhưng vùng phèn và nông nghiệp chỉ 44-50. Tiểu vùng G2SO tốt hơn, WQI 53-63 (trung bình khá), ít biến động mùa, trừ điểm NMT013 ô nhiễm (43). Tiểu vùng TST phân hóa mạnh: Sông chính 50-53 (trung bình), kênh nội đồng 26-40, riêng Vàm Cỏ có nơi rất thấp (6) do phèn hoạt động, tương đồng nghiên cứu trước đây [10].

Tóm lại, WQI cho thấy chất lượng nước mặt ĐBSCL phân hóa rõ theo không gian, tốt nhất

trên Sông Tiền, Hậu và kém nhất ở vùng xa nguồn, đất phèn hoặc đô thị chưa xử lý nước thải. Mùa khô thường làm chất lượng nước vùng ven biển xấu đi (do mặn) nhưng giảm ô nhiễm nội đồng. Ngược lại, mùa mưa cải thiện nước trên sông chính (do pha loãng) nhưng có thể làm xấu nước nội đồng (do rửa trôi) [9].

3.1.3. Phân tích đa thống kê (PCA, AHP)

+ Kết quả phân tích PCA: Cho thấy 6 thành phần đầu tiên đã giải thích khoảng 70% tổng phương sai của bộ dữ liệu (xem Bảng 2). Qua đó cho thấy sự tồn tại của 6 nhóm nguyên nhân ô nhiễm đặc trưng chi phối chất lượng nước mặt vùng ĐBSCL. Kết quả này cũng tương tự với nghiên cứu của [4] trước đó trên phạm vi toàn vùng ĐBSCL.

Bảng 2. Giá trị riêng, phân phối phương sai, tích lũy phương sai của các thành phần chính và ma trận xoay thành phần của ĐBSCL giai đoạn 2017-2024

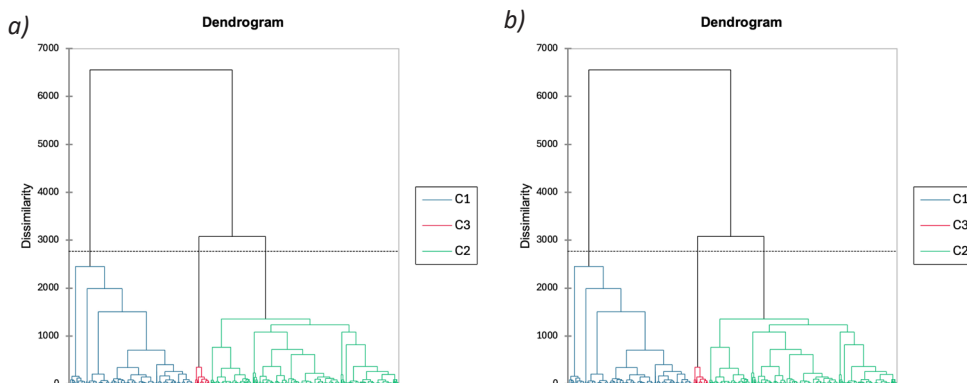
Các thành phần chính	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Giá trị riêng	4,612	2,273	1,902	1,790	1,544	1,252
Phương sai (%)	24,274	11,966	10,009	9,419	8,125	6,590
% tích lũy	24,274	36,240	46,249	55,668	63,793	70,383
Các chỉ tiêu	Ma trận xoay thành phần					
pH	-0,018	0,166	0,140	0,023	-0,011	0,811
DO	0,295	0,867	-0,010	0,054	0,000	0,225
BOD5	0,958	0,153	0,029	0,021	0,032	-0,031
COD	0,949	0,201	0,031	0,027	0,017	-0,015
TOC	0,854	0,463	0,037	0,035	0,005	0,075
N-NH ₄	0,074	0,190	-0,148	0,025	0,083	-0,058
N-NO ₃	-0,007	0,004	-0,013	0,019	0,934	-0,018
N-NO ₂	-0,077	0,001	0,519	0,061	-0,115	0,003
P-PO ₄	0,128	0,388	0,662	0,021	0,001	0,014
Coliform	0,019	0,045	0,009	0,982	0,026	0,019
TSS	0,012	-0,586	-0,303	-0,012	0,028	0,147
As	0,271	0,865	0,000	0,055	-0,008	0,241
Cd	0,859	-0,001	-0,011	-0,020	0,010	0,049
Pb	0,053	0,031	-0,019	0,014	0,938	-0,014
Cr ⁶⁺	0,048	0,089	0,775	0,080	-0,012	-0,013
Cu	0,018	0,065	0,080	0,979	0,010	0,016
Hg	0,046	-0,020	-0,014	0,007	-0,032	0,797
Độ mặn	0,296	0,021	0,413	0,023	0,120	0,256
Cl ⁻	-0,009	-0,144	0,738	-0,083	0,093	0,073

Thành phần chính thứ nhất PC1 ($\approx 24\%$ phương sai) có tải trọng rất cao ở BOD₅ (0,958), COD (0,949), TOC (0,854) và Cd (0,859), đại diện cho nhóm ô nhiễm hữu cơ kèm kim loại nặng từ nước thải sinh hoạt - công nghiệp và chế biến nông/thủy sản; nhóm này gắn với rủi ro suy giảm DO cục bộ khi tải hữu cơ tăng. PC2 ($\approx 12\%$ phương sai) nổi bật với DO (0,867) và As (0,865) (kèm pH tải lên PC6: 0,811), phản ánh tác động địa hóa - đất phèn và tương tác trầm tích - nước, trong đó biến thiên oxy hòa tan liên quan đến điều kiện nền và quá trình mặn - ngọt theo thời gian. PC3 ($\approx 10\%$ phương sai) ghi nhận tải cao ở Cr⁶⁺ (0,775), Cl⁻ (0,738), độ mặn (0,413) và NO₂⁻ (0,519), PO₄³⁻ (0,662), hàm ý tín hiệu oxy-hóa/khử và ảnh hưởng ion chloride (mặn) cùng tích lũy nitrit trong điều kiện hiếm khí và nguồn phân lân rửa trôi đầu mùa mưa, tiềm ẩn nguy cơ phú dưỡng thủy vực nội đồng. PC4 ($>9\%$ phương sai) có Coliform (0,982) và Cu (0,979) cao hơn các chỉ tiêu còn lại, đặc trưng cho ô nhiễm vi sinh đi kèm vết kim loại (Cu) - thường gặp ở khu dân cư nông thôn/đô thị, vùng nuôi và khu sản xuất sử dụng chế phẩm chứa Cu. PC5 ($>8\%$ phương sai) tập trung NO₃⁻ (0,934) và Pb (0,938), thể hiện nguồn dinh dưỡng vô cơ (nitrat) cùng kim loại nặng (Pb) từ nước rửa trôi đô thị - giao thông - nông nghiệp. PC6 ($>6\%$ phương sai) gắn pH (0,811) và Hg (0,797), biểu thị nền axit-kiểm của thủy vực kèm vết thủy ngân, dấu hiệu này hữu ích để nhận diện những khu vực nhạy cảm khi pH biến động (xem Bảng 2).

+ Kết quả phân tích AHC: Phân tích AHC

(Ward-Euclid) trên 2.548 quan sát chuẩn hóa đã chia dữ liệu thành ba cụm với hai kịch bản: (a) Có xét đến yếu tố mặn/Cl⁻ và (b) Loại bỏ yếu tố này. Kết quả cho thấy:

Trong kịch bản (a), Cụm 1 chiếm 66,48% mẫu, đặc trưng bởi giá trị Cl⁻ (+0,341) và TSS (+0,271) cao hơn trung bình, trong khi các biến khác gần 0. Đây được xem là cụm nền phổ biến của hệ thống sông kênh, chịu ảnh hưởng ion/độc nhẹ nhưng không cực đoan. Cụm 2 (28,81%) nổi bật bởi TOC (+0,949), COD (+0,857), BOD₅ (+0,823), DO (+0,775) cùng As/Cd dương ($\sim +0,66-0,74$), đồng thời có TSS và Cl⁻ âm. Cụm này phản ánh các nguồn thải hữu cơ-kim loại cao từ đô thị, công nghiệp hoặc nuôi trồng, chế biến thủy sản, song ít liên quan đến mặn. Cụm 3 (4,71%) thể hiện nhiều biến âm mạnh (Cr⁶⁺ -4,052; PO₄³⁻ -2,572; Cl⁻ -1,757; NO₂⁻ -1,392) nhưng TSS dương (+0,708), đại diện cho cụm dị thường hiếm gặp với đặc điểm ion-oxy hóa khác biệt, cần được giám sát chặt chẽ (xem Hình 3a và Bảng 3). Trong kịch bản (b), khi loại bỏ mặn/Cl⁻, Cụm 1 (38,27%) trở thành cụm hữu cơ-kim loại nổi trội (TOC, COD, BOD₅, DO và As/Cd đều dương), phản ánh các kênh đô thị và khu vực sản xuất. Cụm 2 (57,03%) có hữu cơ-kim loại và DO âm nhẹ, TSS dương (+0,331), cho thấy nền pha loãng bùn cát gần hơn với trạng thái “tự nhiên” khi không chịu tác động mặn. Cụm 3 (4,71%) tiếp tục giữ dấu âm mạnh ở Cr⁶⁺, PO₄³⁻ và NO₂⁻, cùng TSS cao, tương đồng với cụm dị thường trong kịch bản (a) (xem Hình 3b và Bảng 4).



Hình 3. Kết quả phân tích cụm chất lượng nước mặt tại ĐBSCL bằng phương pháp phân tích AHC: (a) có xét và (b) không xét đến yếu tố mặn

Bảng 3. Giá trị trung bình của từng chỉ tiêu trong mỗi cụm với trường hợp có xét đến yếu tố mặn

Các cụm	Cụm 1	Cụm 2	Cụm 3	Các cụm	Cụm 1	Cụm 2	Cụm 3
pH	-0,039	0,234	-0,878	Coliform	-0,076	0,210	-0,210
DO	-0,285	0,775	-0,718	TSS	0,271	-0,742	0,708
BOD ₅	-0,330	0,823	-0,374	As	-0,266	0,735	-0,734
COD	-0,348	0,857	-0,334	Cd	-0,277	0,660	-0,127
TOC	-0,371	0,949	-0,568	Pb	0,010	-0,030	0,036
N-NH ₄	-0,071	0,145	0,114	Cr ⁶⁺	0,218	0,160	-4,052
N-NO ₃	0,048	-0,106	-0,024	Cu	-0,051	0,224	-0,655
N-NO ₂	0,100	-0,003	-1,392	Hg	-0,059	0,200	-0,395
P-PO ₄	-0,105	0,663	-2,572	Độ mặn	-0,026	0,160	-0,613
				Cl ⁻	0,341	-0,499	-1,757
Các thông số		Cụm 1	Cụm 2			Cụm 3	
Tổng số quan sát		1.694	734			120	
Tổng phương sai nội cụm		14,351	18,413			11,021	
% số quan sát		66,48	28,81			4,71	

Bảng 4. Giá trị trung bình của từng chỉ tiêu trong mỗi cụm với trường hợp không xét đến yếu tố mặn

Các cụm	Cụm 1	Cụm 2	Cụm 3	Các cụm	Cụm 1	Cụm 2	Cụm 3
pH	0,267	-0,107	-0,878	Coliform	0,287	-0,175	-0,210
DO	0,803	-0,479	-0,718	TSS	-0,580	0,331	0,708
BOD ₅	0,669	-0,418	-0,374	As	0,776	-0,460	-0,734
COD	0,712	-0,450	-0,334	Cd	0,548	-0,357	-0,127
TOC	0,827	-0,508	-0,568	Pb	0,095	-0,067	0,036
N-NH ₄	0,218	-0,155	0,114	Cr ⁶⁺	0,187	0,209	-4,052
N-NO ₃	0,050	-0,031	-0,024	Cu	0,299	-0,147	-0,655
N-NO ₂	0,006	0,111	-1,392	Hg	0,179	-0,087	-0,395
P-PO ₄	0,506	-0,127	-2,572				
Các thông số		Cụm 1	Cụm 2			Cụm 3	
Tổng số quan sát		975	1.453			120	
Tổng phương sai nội cụm		14,05	12,92			10,34	
% số quan sát		38,27	57,03			4,71	

So sánh hai kịch bản cho thấy yếu tố mặn/Cl⁻ có vai trò tách riêng một cụm nước lợ-mặn, đồng thời làm suy giảm tín hiệu về nguồn thải hữu cơ, dinh dưỡng và vi sinh. Do đó, mặn/Cl⁻ cần được xem xét độc lập để tránh che khuất bản chất ô nhiễm. Nhìn chung, hai “trục” phân hóa chính được nhận diện gồm: (i) Cụm hữu cơ-kim loại cao và (ii) Cụm nền phổ biến, bên cạnh một cụm dị thường ổn định (P-NO₂-Cr⁶⁺ thấp,

TSS cao) cần tiếp tục giám sát định kỳ.

3.1.4. Kiểm định xu thế (MK, Sen's Slope)

Phân tích xu thế thời gian (Mann-Kendall và hệ số Sen) được thực hiện cho từng tiểu vùng để đánh giá diễn biến chất lượng nước giai đoạn 2017-2024. Kết quả phân tích cho thấy một số xu hướng diễn biến đáng chú ý với độ tin cậy cao ($p < 0,05$), cụ thể như sau:

Phân tích Mann-Kendall và Sen's slope cho

thấy sự phân hóa rõ giữa các tiểu vùng. Tại TGLX, nhiều thông số tăng mạnh: BOD₅ (+373, $p = 6,8 \times 10^{-6}$, +0,14 mg/L/năm), COD (+205, $p = 0,014$), TOC (+140, $p = 0,009$), NH₄⁺ (+373, $p = 6,8 \times 10^{-6}$) và PO₄³⁻ (+164, $p = 0,044$), trong khi NO₃⁻ giảm (-255, $p = 0,002$). DO trung bình toàn vùng đạt 6 mg/L nhưng trung vị tại TGLX chỉ 4-5 mg/L, cho thấy môi trường yếm khí, khó oxy hóa amoni. Coliform tăng mạnh (+355, $p = 1,85 \times 10^{-5}$), trong khi TSS giảm (-221, $p = 0,008$), phù hợp với xu thế suy giảm phù sa do thủy điện và đê bao. Cd có xu hướng tăng, Cr⁶⁺ biến động nhẹ, còn As, Cu, Hg ổn định; mangan và Cl⁻ giảm nhưng không ý nghĩa.

Ở BĐCM, DO giảm (-291, $p = 0,031$), BOD₅ (+323, $p = 0,016$) và NH₄⁺ (+517, $p = 1,18 \times 10^{-4}$) tăng, NO₃⁻ giảm mạnh (-583, $p = 1,41 \times 10^{-5}$), trong khi PO₄³⁻ giảm đáng kể (-545, $p = 5 \times 10^{-5}$). Coliform tăng vọt (+785, $p = 5 \times 10^{-9}$), TSS giảm nhẹ, độ mặn và Cl⁻ tiếp tục giảm nhờ công trình kiểm soát. Cấu hình này phản ánh cải thiện quản lý dinh dưỡng nhưng kiểm soát hữu cơ-vi sinh chưa hiệu quả. Tại G2SO, đa số thông số không có xu thế rõ ($p > 0,1$), ngoại trừ Cr⁶⁺ tăng nhẹ ($p \approx 0,019$) và Cl⁻ giảm ($p \approx 0,009$), phù hợp với tác động công trình kiểm soát mặn. Ở TST, nhiều thông số cải thiện: NH₄⁺ (-90, $p \approx 0,038$), NO₃⁻ (-114, $p \approx 0,008$) và Pb (-114, $p \approx 0,008$) đều giảm; mangan và Cl⁻ giảm mạnh ($p < 0,001$), trong khi pH và DO tăng nhẹ nhưng chưa ý nghĩa.

Tổng thể, TGLX và BĐCM đang chịu áp lực hữu cơ, dinh dưỡng và vi sinh gia tăng; G2SO ổn định; TST có dấu hiệu phục hồi. Xu thế giảm mặn rộng khắp và suy giảm một số kim loại độc phản ánh hiệu quả quản lý nguồn nước và thải. Tuy nhiên, nguy cơ phú dưỡng ngày càng rõ, đòi hỏi các giải pháp kiểm soát tải hữu cơ và dinh dưỡng trong tương lai.

3.2. Thảo luận

3.2.1. Hiện trạng chất lượng nước

Kết quả thống kê toàn vùng (Bảng 1) cho thấy ô nhiễm đa thành phần từ sinh hoạt, nông nghiệp và công nghiệp. Nhóm hữu cơ vượt chuẩn nhiều lần (BOD₅ TB 10 mg/L, tối đa 173; COD 25 mg/L, tối đa 473; TOC 16 mg/L, tối đa 160), phản ánh áp lực thải lớn và tồn tại điểm nóng. Dinh dưỡng vô cơ (NH₄⁺ TB 0,5 mg/L; PO₄³⁻ TB

1,8 mg/L) vượt chuẩn 1,5-18 lần; NO₂⁻ cao bất thường (0,37 mg/L, gấp 7 lần), gợi ý yếm khí kéo dài và nguy cơ phú dưỡng - độc tính nitrit. Ô nhiễm vi sinh nghiêm trọng với Coliform TB 4.500 MPN/100 mL, nhiều điểm > 45.000, liên quan trực tiếp đến xả thải sinh hoạt. Về kim loại, As (0,02 mg/L) và Cd (0,01 mg/L) vượt chuẩn, Cr⁶⁺ có nơi 1,96 mg/L, phản ánh điểm nóng công nghiệp; Pb, Hg, Cu dưới ngưỡng nhưng tiềm ẩn nguy cơ tích lũy. Xâm nhập mặn rõ rệt với độ mặn trung bình là 4,76‰, Cl⁻ là 1.425 mg/L (chuẩn 250), đe dọa trực tiếp cấp nước và sinh kế nông-ngư nghiệp.

Tổng thể, nước mặt vùng ĐBSCL đặc trưng bởi ô nhiễm hữu cơ - dinh dưỡng - vi sinh cao, kèm As, Cd vượt chuẩn và ảnh hưởng mặn/Cl⁻ trên diện rộng. Kết quả này phù hợp với các PC chính từ PCA, phản ánh sự chi phối mạnh của các nhóm yếu tố đến biến động chất lượng nước. Đây là thách thức lớn cho quản lý tài nguyên và sức khỏe cộng đồng, đồng thời khẳng định tầm quan trọng của việc nhận diện đặc trưng theo không gian-thời gian.

3.2.2. Diễn biến chất lượng nước theo không gian và thời gian

WQI giai đoạn 2017-2024 cho thấy phân hóa rõ rệt. Sông chính (G2SO) duy trì mức khá (50-65), trong khi vùng nội đồng, đất phèn và ven biển thường thấp hơn (30-50, thậm chí <30). Mùa mưa giúp cải thiện chất lượng trên trục sông nhờ pha loãng, nhưng làm tăng tải hữu cơ, dinh dưỡng, vi sinh tại kênh nội đồng; ngược lại mùa khô chịu tác động mặn, làm suy giảm chất lượng vùng ven biển và kênh nhạy cảm. Theo tiểu vùng, TGLX chịu ảnh hưởng đất phèn và kênh nội đồng, dễ phát sinh pH thấp và Coliform cao vào mùa mưa. Ở BĐCM, mặn/Cl⁻ chi phối mùa khô, còn mùa mưa gia tăng rửa trôi hữu cơ - dinh dưỡng, làm WQI phân hóa mạnh từ ven biển đến nội địa. G2SO nhờ dòng chính pha loãng nên chất lượng tốt hơn, song vẫn tồn tại điểm nóng đô thị. TST thể hiện rõ tính đặc thù: Sông chính cải thiện mùa lũ, nhưng kênh nội đồng vẫn thấp do phèn và tích tụ ô nhiễm trong điều kiện khép kín. Phân tích mùa vụ cho thấy tác động hai mặt: Mùa mưa cải thiện sông chính nhưng làm xấu nội đồng; mùa khô ngược lại,

kèm xâm nhập mặn nhiều nơi >10‰ (như năm 2016, 2020) buộc nhà máy nước phải dừng hoạt động. Sau năm 2016, độ mặn có xu hướng giảm nhưng nguy cơ vẫn cao dưới tác động BĐKH.

Tóm lại, chất lượng nước ĐBSCL phân hóa mạnh theo không gian (tốt nhất ở sông chính, kém nhất vùng ven biển) và theo mùa (mưa tốt hơn trên sông, khô dễ suy giảm). Kết quả phù hợp PCA/AHC, cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho quản lý - kiểm soát trong bối cảnh BĐKH và phát triển kinh tế-xã hội.

3.2.3. Phân tích xác định nguyên nhân gây ô nhiễm nguồn nước mặt

Phân tích PCA và AHC đã nhận diện rõ các nguồn ô nhiễm chi phối chất lượng nước mặt ĐBSCL. Tại TGLX, đất phèn hoạt tính gây nước chua đầu mùa mưa (pH 3-4), Coliform tăng mạnh (MK +355, $p \approx 1,8 \times 10^{-5}$), PO_4^{3-} tăng ($p \approx 0,044$) và TSS giảm ($p \approx 0,008$). Các nguồn chính gồm đất phèn tự nhiên (Fe, As), nước thải nông nghiệp - NTTS và sinh hoạt; nhiều điểm WQI <30 trùng với cụm ô nhiễm nặng trong AHC. Ở BĐCM, mùa khô độ mặn 5-30‰, mùa mưa BOD và COD tăng; PO_4^{3-} vẫn cao nhưng giảm theo thời gian, As >0,01 mg/L và Cr^{6+} tới 1,36 mg/L ($p \approx 0,004$). Kênh xáng ven biển, như QLPH02 (2/2016), từng đạt mặn 39,40‰. Các nguồn gồm thải NTTS - nông nghiệp, sinh hoạt, xâm nhập mặn làm tăng As, Cr và ảnh hưởng đất phèn U Minh, trong đó vận hành cống kiểm soát mặn có vai trò quyết định. G2SO ít chịu mặn nhờ đê bao và cống, WQI cao (~60) nhưng vẫn ô nhiễm cục bộ quanh đô thị, khu công nghiệp với $BOD_5 \approx 10,9$ mg/L, $COD \approx 29,7$ mg/L. Tại TST, nước phèn mùa mưa làm WQI nội đồng thấp (pH <4, Fe, Al, Mn cao), nguồn từ đất phèn, phân bón - thuốc BVTV và chất hữu cơ nông thôn. Tổng hợp toàn vùng, năm nhóm nguyên nhân chính được xác định: (i) Ô nhiễm hữu cơ từ nước thải sinh hoạt, công nghiệp và chế biến với BOD_5 trung bình 10 mg/L (tối đa 173) và COD 25 mg/L (tối đa 473); (ii) Ô nhiễm dinh dưỡng (N, P) do phân bón dư thừa, vùng lúa-tôm còn tồn dư Hg; (iii) Ô nhiễm vi sinh từ thải sinh hoạt và chăn nuôi với Coliform vượt xa chuẩn; (iv) Xâm nhập mặn và BĐKH làm tăng As, Cr^{6+} ở ven biển, nhiều nơi mùa khô mặn >10‰; (v) Ô nhiễm tổng hợp tại vùng nuôi

trồng - nông thôn từ sự cộng hưởng giữa thải sinh hoạt và rửa trôi nông nghiệp.

Nhìn chung, kết quả nghiên cứu phù hợp với nhiều tài liệu trước đây, cho thấy ô nhiễm đa thành phần là vấn đề nổi cộm của nước mặt ĐBSCL, với hàm lượng hữu cơ, dinh dưỡng và vi sinh vật vượt chuẩn trên diện rộng [11], [12]. So với quá khứ, mức độ một số chất độc hại đã tăng đáng kể. So sánh với các châu thổ lớn ở châu Á như sông Hằng, Chao Phraya, sông Châu Giang cho thấy mô hình ô nhiễm tương đồng: hữu cơ và vi sinh cao do hạn chế xử lý nước thải, dinh dưỡng tăng từ thâm canh nông nghiệp, kim loại từ cả nguồn tự nhiên và công nghiệp [4], [12-14]. Điều này nhấn mạnh tính phức tạp, cấp bách và yêu cầu giải pháp quản lý tổng hợp, phối hợp đa ngành để giảm ô nhiễm và thích ứng BĐKH.

3.2.4. Giải pháp quản lý chất lượng nước

Kết quả nghiên cứu trên cho thấy mỗi tiểu vùng tại ĐBSCL có những tác nhân gây ô nhiễm khác nhau, từ tự nhiên đến con người, chúng mang tính đặc thù, nghiên cứu xác định có năm nhóm gây ô nhiễm chính. Để các giải pháp bảo vệ, quản lý nguồn nước mặt thực sự bám sát thực tế của vùng nghiên cứu cũng như đảm bảo tính khả thi cao. Trong nghiên cứu này, các nhóm giải pháp được đề xuất gắn với từng nhóm ô nhiễm cụ thể: (i) Nguồn thải sinh hoạt và công nghiệp: Mở rộng hệ thống xử lý tập trung, áp dụng công nghệ tiên tiến, tăng giám sát xả thải, nhân rộng biogas, hồ sinh học ở nông thôn; (ii) Nguồn thải nông nghiệp (trồng trọt, chăn nuôi và thủy sản): Giảm dư thừa N, P bằng phân hữu cơ, luân canh, vùng đệm cây xanh, ao/hồ lắng, áp dụng tuần hoàn nước trong nuôi trồng; (iii) Xâm nhập mặn hòa tan kim loại (As, Cr): Xây cống, đập điều tiết, quan trắc nước, xử lý As bằng hấp phụ, điều chỉnh mùa vụ và cây trồng chịu mặn; (iv) Ưu tiên theo tiểu vùng: BĐCM tập trung kiểm soát mặn, Cr^{6+} và hữu cơ - vi sinh; TGLX và TST chú trọng xử lý phèn, dinh dưỡng và vi sinh; G2SO cần giám sát nghiêm ngặt điểm xả đô thị và khu công nghiệp.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã áp dụng cách tiếp cận tích hợp giữa đánh giá định lượng bằng chỉ số WQI,

phân tích thống kê đa biến (PCA, AHC) và phân tích xu thế (Mann-Kendall, Sen's Slope) nhằm vừa lượng hóa tổng thể chất lượng nước, vừa nhận diện cấu trúc nguyên nhân và phân loại theo không gian.

(1) Về hiện trạng và diễn biến chất lượng nước: Chất lượng nước mặt ĐBSCL nhìn chung ở mức trung bình, phân hóa rõ giữa vùng ven sông lớn ($WQI > 60$) và vùng nội đồng (40-55), có nơi ô nhiễm nặng (WQI chỉ 6, BOD_5 tới 170 mg/L). Trong 8 năm, BĐCM ghi nhận DO giảm, NH_4^+ và Coliform tăng, trong khi PO_4^{3-} và TSS giảm nhẹ, phản ánh giảm dư thừa phân bón nhưng rủi ro vi sinh - hữu cơ ngày càng lớn.

(2) Về nguyên nhân và nguồn gây ô nhiễm:

Các nguồn chính gồm: (i) Chủ yếu từ nước thải sinh hoạt - công nghiệp chưa xử lý; (ii) Nước chảy tràn nông nghiệp mang N, P, thuốc BVTV; (iii) Xâm nhập mặn hòa tan kim loại (As, Cr); (iv) Đất phèn tự nhiên; (v) và Vận hành công trình kiểm soát mặn/triều chưa hợp lý gây tù đọng.

(3) Về giải pháp quản lý: Cần đồng bộ các biện pháp: (i) Vận hành linh hoạt hệ thống cống để giảm tù đọng; (ii) Xây dựng hệ thống xử lý nước thải tập trung ở đô thị, khu sản xuất, nuôi thủy sản; (iii) Thúc đẩy nông nghiệp thông minh, kinh tế tuần hoàn; (iv) Đồng thời tăng cường quan trắc, cảnh báo sớm và lồng ghép quản lý chất lượng nước vào quy hoạch tài nguyên nước và thích ứng BĐKH.

Đóng góp của từng tác giả trong bài báo: Xây dựng nghiên cứu ý tưởng: Đoàn Thanh Vũ, Trần Đăng An; phương pháp nghiên cứu: Đoàn Thanh Vũ, Trần Đăng An; phân tích tài liệu, viết bản thảo bài báo: Đoàn Thanh Vũ, Phan Thị Thùy Dương, Nguyễn Đức Nhật Trường; chỉnh sửa bài báo: Phan Thị Thùy Dương.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn Cục Thủy lợi (Bộ NN&PTNT nay là Bộ NN&MT), Viện Kỹ thuật Biển, Viện Quy hoạch Thủy lợi miền Nam (nay là Trung tâm Quy hoạch và Điều tra tài nguyên nước quốc gia) đã hỗ trợ cung cấp số liệu quan trắc quý báu trong giai đoạn 2017-2024. Xin chân thành cảm ơn Bộ NN&MT đã hỗ trợ kinh phí thực hiện đề tài cấp Bộ mã số: TNMT.ĐL.2025.05.03 để nhóm tác giả có thể khai thác số liệu, tài liệu phục vụ nghiên cứu này.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. T. T. K. Hong and N. T. Giao (2022), "Analysis of surface water quality in upstream prov-ince of Vietnamese Mekong Delta using multivariate statistics", *Water*, 14(12), p.1975, <https://doi.org/10.3390/w14121975>.
2. UNDP Viet Nam (2021), "55% of Mekong Delta population affected by climate change by 2100", *United Nations Development Programme (UNDP) Viet Nam*. Online: <https://www.undp.org/vietnam/55-mekong-delta-population-affected-climate-change-2100>
3. E. Park et al. (2022), "The worst 2020 saline water in-trusion disaster of the past century in the Mekong Delta: Impacts, causes, and man-agement implications", *Ambio*, 51(3), 691-699.
4. V. T. Doan et al. (2025), "Comprehensive Statistical Analysis for Characterizing Water Quali-ty Assessment in the Mekong Delta: Trends, Variability, and Key Influencing Fac-tors", *Sustainability*, 17(12), 5375. <https://doi.org/10.3390/su17125375>.
5. Vo Quoc Bao et al. (2024), "Understanding watershed sources of pollution in Vinh Long Prov-ince, Vietnamese Mekong Delta", *Discover Applied Sciences*, 6(6), 310.
6. Nguyen Thanh Giao (2022), "Analysis of Surface Water Quality using Multivariate Statistical Approaches: A case study in Ca Mau Peninsula, Vietnam", *Pollution*, 8(2), 463-477. <http://10.22059/POLL.2021.329252.1165>.
7. Trần Quang Hợp, Nguyễn Thị Thùy Linh (2017), "Ảnh hưởng của biến đổi khí hậu đến xâm nhập mặn ở vùng Tứ giác Long Xuyên", *Tạp chí khoa học Tài nguyên và Môi trường*, 17, 100-104.
8. C. Jeon et al. (2020), "Countrywide groundwater quality trend and suitability for use in key sectors

- of Korea", *Water*, 12(4), 1193. <https://doi.org/10.3390/w12041193>.
9. T. G. Nguyen, K. A. Phan, and T. H. N. Huynh (2022), "Major concerns of surface water quality in south-west coastal regions of Vietnamese Mekong Delta", *Sustainable Environment Research*, 32(1), 46.
 10. G. T. Nguyen et al. (2023), "Pollution and risk level assessment of pollutants in surface water bodies", *Civil Engineering Journal*, 9(8), 1851-1862.
 11. J. Buschmann et al. (2008), "Contamination of drinking water resources in the Me-kong delta floodplains: Arsenic and other trace metals pose serious health risks to population", *Environment international*, 34(6), 756-764. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.025>.
 12. E. Strady et al. (2017), "Spatial variation and risk assessment of trace metals in water and sediment of the Mekong Delta", *Chemosphere*, 179, 367378.
 13. F. Chen et al. (2021), "Microbiological assessment of ecological status in the Pearl River Estuary, China", *Ecological Indicators*, 130, 108084. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108084>.
 14. K. Cheung et al. (2003), "Assessment of metal and nutrient concentrations in river water and sediment collected from the cities in the Pearl River Delta, South China", *Chemosphere*, 52(9), 1431-1440. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00479-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00479-X).

ASSESSMENT OF SURFACE WATER QUALITY TRENDS AND IDENTIFICATION OF POLLUTION SOURCES BY SUB-REGION IN THE MEKONG DELTA (2017-2024)

Doan Thanh Vu⁽¹⁾, Tran Dang An⁽²⁾,
Nguyen Duc Nhat Truong⁽³⁾, Phan Thi Thuy Duong⁽¹⁾
⁽¹⁾Ho Chi Minh City University of Natural Resources and Environment
⁽²⁾Thuyloi University
⁽³⁾Dai Loi Environmental Services Co., Ltd.

Received: 17/8/2025; Accepted: 09/9/2025

Abstract: This study evaluates the status, spatio-temporal differentiation, and key drivers of surface water quality in the Mekong Delta (2017-2024), focusing on four sub-regions: the Long Xuyen Quadrangle (TGLX), Ca Mau Peninsula (BĐCM), the interfluvial area between the Tien and Hau rivers (G2SO), and the left bank of the Tien River (TST). Results indicate that most parameters (except NO_3^-) exceeded the QCVN 08-MT:2015 A1 threshold; mean concentrations of organic matter were relatively high ($\text{BOD}_5 \sim 10 \text{ mg/L}$; $\text{COD} \sim 25 \text{ mg/L}$), accompanied by microbial and metal contamination, posing risks to domestic water supply. Water Quality Index (WQI) values were very low in inland canals (6-29) but moderate to fair along the main rivers (50-65), highlighting the dilution and self-purification capacity of the Tien-Hau system. Principal Component Analysis (PCA) identified six dominant pollution groups: Organic-metal, geochemical/acid-sulfate, salinity-redox, microbial, nutrient, and pH-Hg. Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC) of more than 2,500 samples classified the dataset into three clusters: High organic-metal pollution, widespread background conditions, and a small anomalous cluster requiring monitoring. For the first time, seasonal WQI analysis demonstrated that water quality improved in the main rivers during the wet season but deteriorated in inland canals, while the opposite occurred in the dry season. These findings provide a scientific basis for identifying pollution "hotspots" and for proposing adaptive source-control strategies tailored to the hydrological and climatic conditions of the Mekong Delta.

Keywords: WQI, Mann-Kendall, Sen's Slope, PCA, AHC, Mekong Delta.