VNUHCM Journal of Environment and Earth Sciences 2026, 10(1):1256-1271

Bài nghiên cứu

Open Access Full Text Article

Đánh giá chất lượng nước dưới đất theo chỉ số GWQI, và rủi ro sức khỏe con người tại tầng chứa nước chính (Pliocen) phục vụ cấp nước sinh hoạt trên địa bàn tỉnh Long An (cũ)

Lê Việt Thắng*

Use your smartphone to scan this QR code and download this article

TÓM TẮT

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá hệ thống diễn biến chất lượng nước dưới đất (NDĐ), xác định các yếu tố chính chi phối chất lượng nước, và định lượng rủi ro sức khỏe tích lũy tại tầng chứa nước Pliocen, tỉnh Long An (cũ). Dữ liệu từ 170 mẫu NDĐ thu thập trong giai đoạn 2019–2023 đã được phân tích bằng thống kê mô tả, phân tích đa biến (PCA/FA), chỉ số chất lượng NDĐ (GWQI) và mô hình tác động hỗn hợp (Mixed-Effects Model). Kết quả cho thấy GWQI trung bình đạt 65 (xếp loại Tốt), tuy nhiên chất lượng nước có sự phân hóa rõ rệt. Mô hình tác động hỗn hợp đã phát hiện sự biến động suy giảm ở biên độ thấp và có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$) trong giai đoạn 2022–2023 và giữa hai mùa vụ (GWQI mùa khô thấp hơn mùa mưa), cho thấy khả năng tự bảo vệ và tính ổn định của tầng chứa nước sâu Pliocen trước các biến động bề mặt là có giới hạn. Các thông số sắt (Fe) và mangan (Mn) vượt ngưỡng QCVN 01-1:2024/BYT trên diện rộng (70% mẫu vượt Fe, 32% mẫu vượt Mn). Phân tích PCA/FA xác định bốn thành phần chính, trong đó các quá trình khoáng hóa/ảnh hưởng mặn (PC1) và khử/giải phóng kim loại (PC2) là chi phối chính. Phân tích độ nhạy GWQI bằng hồi quy bội khẳng định tổng chất rắn hòa tan (TDS) (59,95%), Fe (19,25%) và Mn (7,78%) là các yếu tố chính làm suy giảm chất lượng nước. Về rủi ro sức khỏe, tổng rủi ro không gây ung thư (HI) cho cả người lớn và trẻ em đều dưới ngưỡng an toàn là 1. Tuy nhiên, nguy cơ gây ung thư (CR) do asen (As) vượt ngưỡng không thể chấp nhận được ($>1\times10^{-4}$) tại 18% vị trí mẫu cho người lớn và 24% cho trẻ em, mặc dù nồng độ asen trung bình thấp. Nghiên cứu kết luận rằng chất lượng NDĐ tầng Pliocen bị chi phối bởi các quá trình địa hóa tự nhiên, với thách thức lớn nhất là Fe, Mn và nguy cơ asen cục bộ.

Từ khoá: Nước dưới đất, Tầng Pliocen, GWQI, PCA/FA, Rủi ro sức khỏe, Long An

Viện Khoa học Công nghệ và Quản lý môi trường, Trường Đại học Công nghiệp thành phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Liên hệ

Lê Việt Thắng, Viện Khoa học Công nghệ và Quản lý môi trường, Trường Đại học Công nghiệp thành phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Email: levietthangmt@gmail.com

Lịch sử

- Ngày nhận: 15-12-2025
- Ngày sửa đổi: 12-03-2026
- Ngày chấp nhận: 08-06-2026
- Ngày đăng: 25-06-2026

DOI : https://doi.org/10.32508/vnuhcmj-ees.v10i1.867

Check for updates

Bản quyền

© Tạp chí ĐHQG-HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

MỞ ĐẦU

Chất lượng nước dưới đất (NDĐ) đóng vai trò thiết yếu đối với sức khỏe cộng đồng và phát triển kinh tế xã hội, đặc biệt tại các khu vực phụ thuộc vào nguồn nước này cho sinh hoạt và sản xuất [1,2]. Tuy nhiên, quá trình đô thị hóa, công nghiệp hóa và các hoạt động nông nghiệp đã và đang gây áp lực lớn lên chất lượng NDĐ, dẫn đến nguy cơ ô nhiễm và ảnh hưởng tiêu cực đến sức khỏe con người [1,3]. Việc đánh giá chất lượng NDĐ một cách toàn diện và định lượng rủi ro sức khỏe liên quan là vô cùng cần thiết để đưa ra các biện pháp quản lý và bảo vệ hiệu quả [4,5]. Chỉ số chất lượng NDĐ (GWQI) là một công cụ toán học được sử dụng rộng rãi để đánh giá khả năng sử dụng NDĐ cho mục đích sinh hoạt và xác định mức độ ô nhiễm của nguồn nước này trên toàn cầu [6,7]. GWQI giúp tổng hợp nhiều thông số hóa lý thành một giá trị duy nhất, từ đó đơn giản hóa việc phân loại và so sánh chất lượng nước (CLN) [8]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng GWQI có khả năng phân loại chất lượng NDĐ cho mục đích ăn uống một cách hiệu quả [1,9,10]. Nhiều mô hình GWQI sáng tạo cũng đang được phát triển và thử nghiệm để nâng cao độ chính xác và khả năng ứng dụng [11]. Bên cạnh việc đánh giá CLN, việc định lượng rủi ro sức khỏe con người (HRA) do tiếp xúc với các chất ô nhiễm trong NDĐ là một khía cạnh quan trọng khác. HRA giúp xác định bản chất, mức độ và phân bố không gian của các rủi ro sức khỏe tích lũy từ các chất gây ô nhiễm trong NDĐ [12]. Đây là yếu tố then chốt để đánh giá các nguy cơ tiềm ẩn liên quan đến CLN [13]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng rủi ro sức khỏe con người từ NDĐ có liên quan đến nhiều yếu tố và chất gây ô nhiễm khác nhau như NO_3-N, NO_2-N, NH_4-N và F^- [14] và các kim loại nặng như: Mn, Cr, Cd, Cu, As [4,5]. Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (USEPA) cũng sử dụng phương pháp đánh giá rủi ro dựa trên phơi nhiễm mãn tính hoặc dài hạn để xác định nguy cơ ung thư vượt mức [15].

Tại Việt Nam, NDĐ là nguồn cung cấp nước chính cho sinh hoạt ở nhiều khu vực nông thôn [16]. Đặc biệt là tại các khu vực đồng bằng ven biển như Đồng bằng

Trích dẫn bài báo này: Việt Thắng L. **Đánh giá chất lượng nước dưới đất theo chỉ số GWQI, và rủi ro sức khỏe con người tại tầng chứa nước chính (Pliocen) phục vụ cấp nước sinh hoạt trên địa bàn tỉnh Long An (cũ)**. *VNUHCM J. Environ. Earth Sci.* 2026; 10(1):1256-1271.

Sông Cửu Long (ĐBSCL), nơi các tầng nước mặt bị nhiễm mặn [17–19]. Tại tỉnh Long An (cũ), NDĐ từ các tầng chứa nước sâu, đặc biệt là tầng Pliocen, là nguồn tài nguyên chiến lược do các tầng chứa nước nông hơn thường xuyên bị nhiễm mặn và nhiễm phèn [20]. Tuy nhiên, việc khai thác NDĐ trên diện rộng, kết hợp với các quá trình thủy địa hóa tự nhiên phức tạp, đang đặt ra những thách thức lớn về chất lượng và tính bền vững của nguồn tài nguyên này. Các nghiên cứu trước đây về NDĐ tại ĐBSCL đã chỉ ra rằng CLN thường bị chi phối bởi các quá trình địa hóa khử, dẫn đến nồng độ cao của sắt (Fe) và mangan (Mn), cùng với nguy cơ xâm nhập mặn và huy động asen (As) cục bộ [21]. Đặc biệt, việc tập trung khai thác tại các khu vực phát triển kinh tế trọng điểm đang làm thay đổi cân bằng thủy động lực, tiềm ẩn nguy cơ làm trầm trọng thêm các vấn đề ô nhiễm và gây lún sụt bề mặt [19,21]. Do đó, việc đánh giá toàn diện, định lượng các yếu tố chi phối CLN và rủi ro sức khỏe liên quan là vô cùng cấp thiết để đưa ra các quyết định quản lý tài nguyên hiệu quả. Trong bối cảnh đó, mục tiêu của nghiên cứu này tập trung vào việc: (1) Đánh giá chất lượng NDĐ theo chỉ số GWQI, (2) Xác định các yếu tố chính chi phối CLN, và (3) Định lượng rủi ro sức khỏe con người tại tầng chứa nước chính (Pliocen) phục vụ cấp nước sinh hoạt trên địa bàn tỉnh Long An (cũ). Kết quả nghiên cứu sẽ là cơ sở khoa học quan trọng để đề xuất các giải pháp quản lý bền vững, góp phần bảo vệ nguồn NDĐ và sức khỏe cộng đồng trên khu vực tỉnh Long An (cũ).

DỮ LIỆU QUAN TRẮC VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu là tỉnh Long An (cũ), nằm trong vùng ĐBSCL, với tổng diện tích tự nhiên là 4.494,74 km^2. Tỉnh mang đặc điểm khí hậu nhiệt đới gió mùa, với nhiệt độ trung bình 26,6–28,2 °C và lượng mưa hàng năm 1417–1485 mm, phân chia thành mùa khô (tháng 11–tháng 4) và mùa mưa (tháng 5–tháng 10). Địa hình chủ yếu là đồng bằng thấp, cao độ trung bình 0,75 m, chịu ảnh hưởng mạnh mẽ của chế độ bán nhật triều từ Biển Đông và lũ từ hệ thống sông Mê Kông [20]. Về mặt thủy địa chất, NDĐ tại Long An tồn tại trong các trầm tích Kainozoi có tuổi từ Miocen thượng đến Holocen. Các tầng chứa nước chính được khai thác cho mục đích sinh hoạt và công nghiệp là tầng chứa nước lỗ hổng Pliocen trung (n_2^2) và Pliocen hạ (n_2^1), nằm ở độ sâu trung bình 200–350 m. Đặc điểm thủy hóa của NDĐ phức tạp, với tổng độ khoáng hóa biến đổi từ nhạt đến mặn, và thường có tính chất áp lực. Việc khai thác NDĐ tập trung tại các khu vực phát triển kinh tế trọng điểm (Đức Hòa, Bến Lức, Tân An) đang tạo ra áp lực lớn, tiềm ẩn nguy cơ hạ thấp mực nước, thay đổi ranh giới mặn-nhạt và gây lún sụt bề mặt [22].

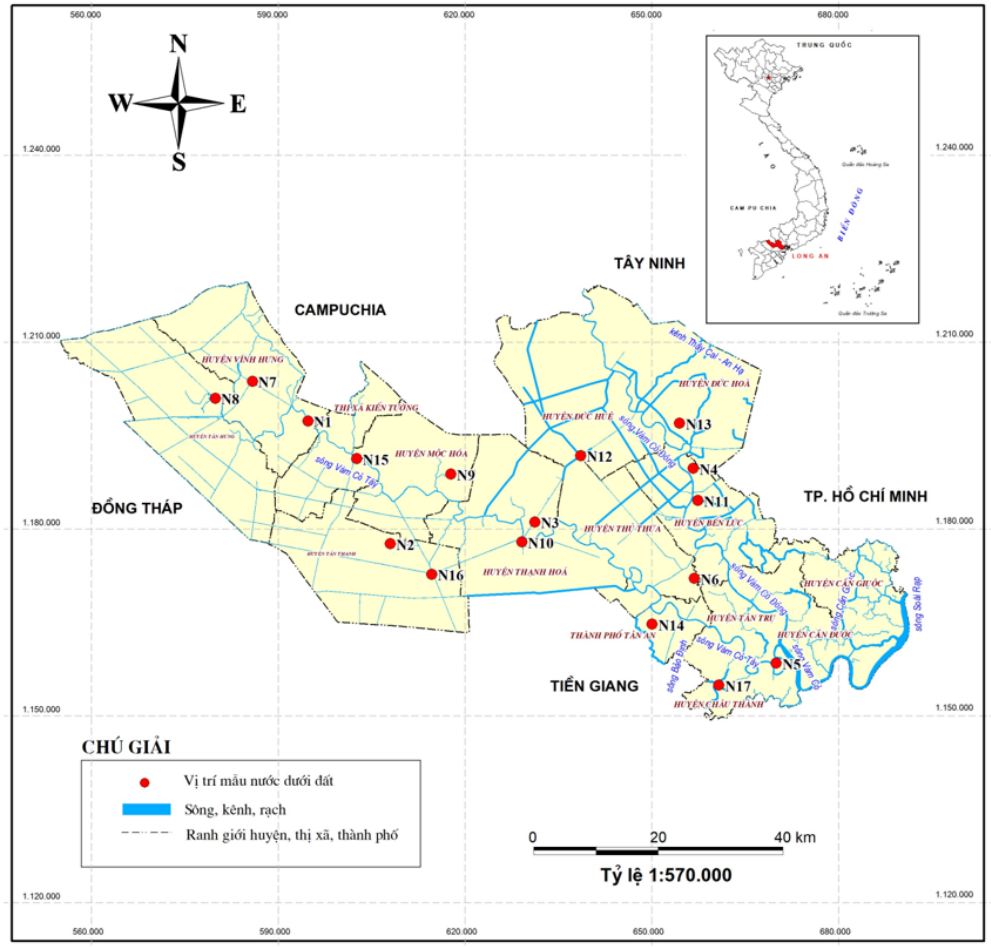
Lấy và phân tích mẫu

Nghiên cứu được thực hiện dựa trên dữ liệu quan trắc chất lượng NDĐ thu thập từ 170 mẫu (n=170) trong giai đoạn 2019–2023, phân tích 12 thông số gồm: pH, tổng chất rắn hòa tan (TDS), nhu cầu oxy hóa học (COD) hay chỉ số pemanganat, độ cứng (Hard), clorua (Cl^-), amoni ($N\text{-}NH_4$), sunfat (SO_4^{2-}), florua (F^-), sắt (Fe), mangan (Mn), chì (Pb) và asen (As). Các mẫu nước được lấy từ 17 giếng khai thác phục vụ mục đích sinh hoạt và sản xuất, phân bố trải rộng trên toàn bộ diện tích tỉnh (Hình 1), tập trung vào tầng chứa nước Pliocen trung và hạ (n_2^2 và n_2^1), là đối tượng khai thác chính tại tỉnh Long An (cũ). Việc lấy mẫu được tiến hành theo hai mùa, và phân thành hai đợt (mùa khô vào tháng 03 và mùa mưa vào tháng 09) trên toàn khu vực nghiên cứu. Phương pháp lấy và phân tích mẫu được thực hiện theo quy định kỹ thuật quan trắc môi trường do Bộ Tài nguyên và Môi trường ban hành [23]. Hiện nay, tại Long An (cũ), các giếng khai thác tại tầng Pliocen chủ yếu phục vụ cho mục đích cấp nước sinh hoạt ăn uống, do đó, trong nghiên cứu này, các kết quả phân tích sẽ được so sánh với Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về CLN sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt (QCVN 01-1:2024/BYT) [24] để đánh giá, đây là cách tiếp cận "phù hợp để sử dụng" nhằm đánh giá khả năng ăn uống trực tiếp và xác định khoảng cách xử lý, thay vì đánh giá tuân thủ quy chuẩn môi trường đối với nguồn nước thô.

Phân tích thống kê

Dữ liệu chất lượng NDĐ được xử lý bằng các kỹ thuật phân tích thống kê mô tả và đa biến nhằm xác định các quá trình thủy địa hóa chi phối và đánh giá sự biến động của CLN. Mọi phân tích được thực hiện bằng phần mềm thống kê RStudio.

Phân tích thành phần chính và phân tích nhân tố (PCA/FA) đã được áp dụng để xác định các nguồn ô nhiễm tiềm ẩn và các quá trình địa hóa chính chi phối CLN. Quy trình PCA/FA trong nghiên cứu này được thực hiện theo các bước chuẩn đã được kiểm chứng [25,26]. Đầu tiên dữ liệu đầu vào được chuẩn hóa để loại bỏ ảnh hưởng của đơn vị và thang đo [27]. Độ phù hợp của dữ liệu được kiểm tra bằng chỉ số Kaiser-Meyer-Olkin ($KMO \geq 0,5$) [28], và kiểm định Bartlett ($p < 0,05$) [29]. Các thành phần chính (PC) được trích xuất dựa trên tiêu chuẩn giá trị riêng (eigenvalue) lớn hơn 1 [30]. Sau đó, phép xoay Varimax được áp dụng



Hình 1: Bản đồ khu vực nghiên cứu và vị trí lấy mẫu quan trắc NDĐ tại tầng Pliocen [Nguồn: Tác giả]

để tối đa hóa sự phân hóa của tải trọng nhân tố (factor loading), từ đó chuyển PCA thành FA, giúp đơn giản hóa và dễ dàng diễn giải các nguồn ô nhiễm tiềm năng. Tải trọng nhân tố được phân loại thành mạnh ($\geq$ 0,75), trung bình (0,50–0,75) và yếu (0,30–0,50) [31]. Sau khi xác định các nhân tố, phân tích hồi quy bội (hồi quy tuyến tính đa biến) được sử dụng để định lượng phần trăm đóng góp của thông số riêng lẻ vào tổng thể CLN [32,33], trong đó: biến phụ thuộc là giá trị GWQI tổng và các biến độc lập là các giá trị thành phần đã được trọng số hóa (q^w). Kế tiếp, tỷ lệ đóng góp (%) của từng thông số thành phần đối với sự biến thiên (phản ánh độ nhạy) của chỉ số GWQI được xác định dựa trên tổng bình phương các độ lệch (Sum of squares) trích xuất từ mô hình hồi quy. Các biến có giá trị $p < 0,05$ được xem là có đóng góp ý nghĩa về mặt thống kê đối với chỉ số GWQI tổng. Ngoài ra, mô hình tác động hỗn hợp (Mixed-Effects Model) đã được sử dụng để phân tích sự biến đổi của chỉ số GWQI theo thời gian [34]. Trong đó, "Năm" và "Mùa" được xác định là các biến cố định, và vị trí giếng được xử lý như một biến ngẫu nhiên để kiểm soát tính phụ thuộc của dữ liệu quan trắc lặp lại.

Chỉ số CLN ngầm (GWQI)

Mười hai thông số NDĐ quan trắc được sử dụng để tính GWQI. Giá trị GWQI được tính toán theo phương trình 1 [9,27]. Đây là công thức dạng tích, và nó có khả năng phản ánh chính xác tác động dù chỉ một thông số có chất lượng rất kém lên chỉ số tổng thể, tránh được hiệu ứng "mờ" hoặc "che khuất" (eclipsing) thường gặp ở công thức dạng tổng [9,27]. Quy trình xây dựng chi tiết của công thức GWQI theo dạng tích đã được Kiên và cộng sự mô tả chi tiết trong tính toán chất lượng NDĐ ở Hà Tĩnh [9], Quảng Trị [10].

$$GWQI = \prod_{i=1}^{n} q_i^{wi} \quad (1)$$

Trong đó:

- q_i: là chỉ số thông số, thể hiện chất lượng của thông số CLN thứ i (i gồm 12 thông số quan trắc ở trên);
- w_i: là trọng số của thông số thứ i.

q_i và w_i được tính toán như sau:

Phương pháp xác định chỉ số thông số q_i:

q_i được xây dựng dựa vào mức giới hạn của các thông số trong chất lượng NDĐ sử dụng cho mục đích cấp nước sinh hoạt, tức là đáp ứng theo QCVN 01-1:2024/BYT: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về CLN sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt (viết tắt là QCVN 01-1)[24], từ đó thiết lập hàm tính dạng y = q = a + bx. Trong đó, hệ số a và b trong phương trình tuyến tính được suy ra từ hai phương trình tuyến tính (2) và (3):

100 = a + b × (giới hạn cho phép của QCVN 01-1 đối với thông số) (2)

trong đó, y = q = 100 tương ứng với chất lượng tốt của thông số; Khi kết quả quan trắc thông số (x) < giới hạn cho phép của QCVN 01-1, giá trị q của nó = 100.

1 = a + b × (giới hạn cho phép của QCVN 01-1 đối với thông số + 3 × S) (3)

trong đó, y = q = 1 ứng với chất lượng kém của thông số; Khi kết quả quan trắc của thông số (x) > giới hạn cho phép + 3×S, giá trị q của nó = 1. Với S là độ lệch chuẩn của quần thể, số 3 là giá trị của biến chuẩn hóa (z) ứng với xác suất tin cậy P = 0,9987[9]. Trong nghiên cứu này, tham số S đại diện cho độ không đảm bảo đo kỳ vọng của phương pháp phân tích, được xác định thông qua hàm thực nghiệm Horwitz[35]. Việc tích hợp S vào hàm tính toán chỉ số thông số q_i nhằm mục đích phân biệt giữa sự biến động do sai số đo lường ngẫu nhiên và sự suy giảm chất lượng môi trường thực tế. Cụ thể, ngưỡng 3× thiết lập một khoảng tin cậy nghiêm ngặt (99,87%), đảm bảo rằng các giá trị quan trắc vượt quá giới hạn quy chuẩn cộng với sai số phân tích mới bị xem là có chất lượng kém (q=1). Lưu ý đối với thông số pH theo QCVN 01-01 ngưỡng áp dụng từ 6-8,5, do đó, trong nghiên cứu này khi giá trị pH nằm ngoài ngưỡng ở mức 8,5 thì "1= a + b ×8,5 +3S", còn đối với giá trị pH nằm ngoài ngưỡng ở mức 6 thì "1= a + b ×6 -3S".

Độ lệch chuẩn S được tính toán từ độ lệch chuẩn tương đối (RSD, %):

$$S = \frac{RSD\ x\ \overline{m}}{100} \quad (4)$$

trong đó , $\overline{m}$ (trung bình số học) chính là giới hạn cho phép của thông số CLN trong QCVN 01-1; RSD được xác định dựa vào phương trình Horwitz[35] :

$$RSD = 2^{1-0,5lgC} \quad (5)$$

với C là nồng độ biểu diễn bằng phân số và là giới hạn cho phép theo QCVN 01-1. Chẳng hạn C = 1 mg/L, tương đương = 1×10^{-6}.

Phương pháp xác định trọng số w_i:

Trọng số (w_i) thể hiện tầm quan trọng của các thông số CLN trong đánh giá GWQI. Trong nghiên cứu này, w_i được xác định dựa trên phương pháp PCA/FA như được mô tả ở mục 2.3, nhiều nghiên cứu CLN mặt[27,36] và NDĐ[9,10,37] đã sử dụng PCA/FA để xác định trọng số w_i trong xác định chỉ số CLN.

$$w_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^{n} p_i} \quad (6)$$

Trong đó, p_i là tổng tải trọng bình phương của các thông số i (i=12) trên các PC được giữ lại.

Thang điểm phân loại chất lượng NDĐ

Nghiên cứu này áp dụng một thang điểm phân loại thuận tiện để đánh giá chất lượng NDĐ dựa trên chỉ số GWQI, tương tự như thang phân loại tiêu chuẩn do Tổng cục Môi trường quy định[38], và đã được Kiên và cộng sự kiểm chứng theo một nghiên cứu chất lượng NDĐ trên địa bàn tỉnh Hà Tĩnh[9]. Theo nguyên tắc này, GWQI có mối quan hệ đồng biến với CLN: GWQI càng lớn, CLN càng tốt và ngược lại (Bảng 1). Sử dụng phần mềm Mapinfo 15 và phương pháp nội suy trọng số khoảng cách nghịch đảo (IDW) để lập bản đồ phân bố không gian của chỉ số CLN GWQI, nhằm thể hiện minh họa xu thế không gian CLN trên địa bàn nghiên cứu.

Đánh giá rủi ro sức khỏe

Nghiên cứu này tiến hành đánh giá rủi ro sức khỏe con người theo hướng dẫn của Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (USEPA)[15] nhằm lượng hóa rủi ro không gây ung thư và rủi ro gây ung thư từ việc sử dụng NDĐ cho mục đích ăn uống thông qua đường miệng. Rủi ro không gây ung thư được xác định cho các chất hóa học sau có trong NDĐ: NH_4^+, F^-, Fe, Mn, Pb và As. Đáng chú ý, As được phân loại là "chất gây ung thư ở người" nhóm A theo phân loại của USEPA[39], do đó cần được đánh giá cả rủi ro không gây ung thư và rủi ro gây ung thư.

Cả rủi ro không gây ung thư và rủi ro gây ung thư được tính toán dựa trên lượng tiêu thụ hàng ngày mãn tính (CDI) của thông số thứ i, và được thể hiện theo công thức sau:

$$CDI_i = \frac{C_i\ x\ IR\ x\ EF\ x\ ED}{BW\ x\ AT} \quad (7)$$

Trong công thức trên, CDI là lượng tiêu thụ hàng ngày mãn tính của hóa chất (mg/kg/ngày); C là nồng độ thông số thứ i trung bình tiêu thụ trong thời gian phơi nhiễm (mg/L); IR là tốc độ hấp thụ (lượng nước tiêu thụ) (L/ngày); EF là tần suất phơi nhiễm (ngày/năm); ED là thời gian phơi nhiễm (năm); BW là trọng lượng

Bảng 1: Phân loại chất lượng NDĐ theo chỉ số GWQI [9]

Chỉ số GWQI	Phân loại đánh giá chất lượng nước
81 - 100	Rất tốt (RT)
61 - 80	Tốt (T)
41 - 60	Trung bình (TB)
21 - 40	Kém (K)
< 20	Rất kém (RK/ không phù hợp cho ăn uống)

cơ thể trung bình trong thời gian phơi nhiễm (kg); AT là thời gian phơi nhiễm trung bình (ngày). Các giá trị trên đã được Xiao và cộng sự thể hiện cụ thể trong nghiên cứu [40].

Đối với các thông số trong NDĐ không có khả năng gây ung thư, mức độ rủi ro cá nhân được định lượng thông qua hệ số nguy cơ (HQ). HQ được tính bằng tỷ lệ giữa lượng tiêu thụ hàng ngày mãn tính (CDI) và liều tham chiếu (RfD) qua đường miệng, theo công thức sau [41]:

$$HQ_i = \frac{ADD}{RfD_i} \quad (8)$$

Trong đó, RfD (mg/kg/ngày) là ngưỡng phơi nhiễm an toàn được thiết lập. Các giá trị RfD cho phơi nhiễm qua đường miệng, được tham khảo từ USEPA [15] và từ Xiao và cộng sự [40], đã được áp dụng cho các chỉ tiêu: NH_4^+ (0,97), F^- (0,04), Fe (0,7), Mn (0,14), Pb (0,0014) và As (0,0003).

Tổng rủi ro không gây ung thư từ sự phơi nhiễm đa chất được xác định bằng chỉ số nguy hiểm (HI), là tổng đại số của các HQ riêng lẻ [41]:

$$HI = \sum_{i=6}^{6} HQ_i \quad (9)$$

Việc giải thích kết quả dựa trên nguyên tắc: nếu HI $\leq$ 1, không có tác động xấu đến sức khỏe nào được dự đoán. Ngược lại, nếu HI > 1, quần thể phơi nhiễm đang đối mặt với nguy cơ tiềm tàng về các ảnh hưởng bất lợi đến sức khỏe [41].

Ô nhiễm asen trong NDĐ từ lâu đã được xác định là một vấn đề nghiêm trọng tại khu vực ĐBSCL [42], tiềm ẩn nguy cơ gây ung thư đáng kể đối với cộng đồng địa phương. Nguy cơ ung thư (CR) đối với As được ước tính dựa trên lượng tiêu thụ hàng ngày mãn tính (CDI) và hệ số độ dốc (SF), thể hiện qua phương trình sau [41]:

$$CR = CDI \; x \; SF \quad (10)$$

Trong đó: SF là hệ số độ dốc đặc trưng cho độc tính gây ung thư của chất ô nhiễm As, với đơn vị (mg/kg/ngày). SF của As đối với phơi nhiễm qua đường miệng được xác định là 1,5 (mg/kg/ngày) [41]. Phạm vi nguy cơ ung thư (CR) được USEPA [15] quy định nằm trong khoảng từ 1 x 10^{-6} đến 1 x 10^{-4}, và được phân ngưỡng là rủi ro không thể chấp nhận được: CR > 1 x 10^{-4}, nguy cơ được xác định là không thể chấp nhận được, đòi hỏi các biện pháp quản lý rủi ro khẩn cấp; Rủi ro nằm trong giới hạn cho phép: nếu CR nằm trong khoảng 1 x 10^{-6} đến 1 x 10^{-4}, rủi ro được coi là nằm trong giới hạn chấp nhận được. Nguy cơ không đáng kể: nếu CR < 1 x 10^{-6}, nguy cơ ung thư được đánh giá là không đáng kể đối với sức khỏe con người [41,43].

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Thống kê tổng thể nồng độ các thông số chất lượng NDĐ

Kết quả phân tích thống kê mô tả 170 mẫu NDĐ tại tỉnh Long An (cũ) trong giai đoạn 2019-2023 (Bảng 2) cho thấy CLN có sự biến động lớn và một số thông số đã vượt ngưỡng giới hạn cho phép theo QCVN 01-1:2024/BYT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về CLN dùng cho mục đích sinh hoạt. Các thông số vượt ngưỡng đáng chú ý bao gồm: Fe và Mn: đây là hai chỉ tiêu có mức độ ô nhiễm nghiêm trọng nhất. Giá trị trung bình của Fe và Mn lần lượt vượt 7,5 lần và 1,7 lần so với giới hạn cho phép (Fe: 0,3 mg/L; Mn: 0,1 mg/L). Tỷ lệ mẫu vượt chuẩn (k%) rất cao, với 70% số mẫu có hàm lượng Fe và 32% số mẫu có hàm lượng Mn không đạt chuẩn. Hệ số biến động đặc biệt lớn (Fe: 204%, Mn: 177%) khẳng định tình trạng ô nhiễm Fe và Mn phổ biến nhưng không đồng nhất trên toàn khu vực nghiên cứu. Tình trạng này không phải là hiện tượng cá biệt mà mang tính đặc trưng cho các tầng chứa nước ở ĐBSCL, theo một nghiên cứu tổng hợp của Ha và cộng sự [19]. Nguyên nhân chính được cho là do điều kiện địa hóa khử chiếm ưu thế trong các tầng trầm tích giàu vật liệu hữu cơ. Trong môi trường yếm khí (thiếu oxy), các hợp chất Fe (III) và Mn (IV) không tan trong đất và trầm tích bị khử hóa thành các dạng Fe (II) và Mn (II) hòa tan, làm tăng

nồng độ của chúng trong NDĐ [19,44]. Giá trị pH trung bình (6,88) hơi nghiêng về tính axit cũng là điều kiện thuận lợi thúc đẩy quá trình hòa tan này [21].

Tổng chất rắn hòa tan (TDS), độ cứng (Hardness) và clorua (Cl^-): các thông số này có giá trị trung bình lần lượt là 618 mg/L, 220 mg/L và 196 mg/L, đều nằm trong giới hạn cho phép. Tuy nhiên, khoảng dao động nồng độ rất rộng, với giá trị tối đa của TDS (2337 mg/L), độ cứng (1000 mg/L) và Cl^- (943 mg/L) đều vượt xa quy chuẩn. Giá trị trung bình của TDS là 618 mg/L chứng tỏ đa số các mẫu nước ở tầng Pliocen trong nghiên cứu thuộc tầng nước ngọt (<1000 mg/L). Tỷ lệ mẫu vượt chuẩn ở mức tương đối (TDS: 18%, độ cứng: 22%, Cl^-: 21%) cho thấy nguồn nước ở một số khu vực có dấu hiệu bị nhiễm mặn hoặc chịu ảnh hưởng từ các tầng chứa khoáng. Tỷ lệ này không hẳn là dấu hiệu của xâm nhập mặn từ bên ngoài, mà nhiều khả năng là biểu hiện của nước biển cổ đại hoặc sự hòa tan các khoáng chất có sẵn trong chính tầng chứa nước. Các nghiên cứu về thủy địa hóa ĐBSCL đã chỉ ra rằng các tầng chứa nước sâu (như tầng Pliocen) thường chứa nước có độ tổng khoáng hóa cao do bị ảnh hưởng bởi các chu kỳ biển tiến - biển lùi trong quá khứ. Nghiên cứu của Ha và cộng sự chỉ ra rằng tại các khu vực miền Nam (bao gồm cả vùng ĐBSCL), tại các tầng chứa nước Pliocen tỷ lệ mẫu quan trắc vượt mức 1000 mg/L (NDĐ lợ hoặc mặn) là từ 26-44% [21]. Tuy nhiên, mức độ xâm nhập mặn do con người gây ra có thể trở nên nghiêm trọng tại các khu vực ven biển, đặc biệt là những nơi diễn ra hoạt động khai thác NDĐ quá mức [21].

Nhìn chung, các chỉ tiêu khác như pH, $N\text{-}NH_4$, SO_4^{2-}, F^-, Pb và As có giá trị trung bình nằm trong giới hạn cho phép của quy chuẩn. Tuy nhiên, hệ số biến động (CV%) của SO_4^{2-} (125%), Pb (140%) và As (160%) rất cao, cho thấy sự phân bố không đồng đều và có khả năng tồn tại các điểm ô nhiễm cục bộ đối với các thông số này. Tóm lại, chất lượng NDĐ tại khu vực nghiên cứu trong giai đoạn 2019-2023 không đồng đều. Vấn đề ô nhiễm nổi bật nhất là hàm lượng Fe và Mn vượt mức cho phép trên diện rộng. Bên cạnh đó, các hiện tượng nhiễm mặn hoặc tăng độ khoáng hóa (biểu thị qua TDS, độ cứng, Cl^-) cũng xảy ra cục bộ tại nhiều vị trí. Sự biến động CLN được quy kết chủ yếu do quá trình thủy địa hóa đặc trưng của tầng chứa nước sâu. Do các tầng Pliocen và Miocen ở ĐBSCL có khả năng bổ cập từ nước mặt và nước mưa rất thấp [18,45], nguồn ô nhiễm từ bề mặt được xem không phải là yếu tố chi phối.

Đánh giá CLN phục vụ cho cấp nước sinh hoạt dựa vào chỉ số GWQI

Xác định chỉ số thông số q_i

Các hàm tuyến tính sau đây (xem Bảng 3) được sử dụng để xác định chỉ số thông số q_i (đại diện cho chất lượng NDĐ) từ nồng độ thực tế (x) của thông số i (với $y = q_i$). Các hàm này được thiết lập dựa trên các giới hạn cho phép của QCVN 01-1 [24], và các giá trị $RSD_{Horwitz}$, S được thể hiện ở Bảng 2.

Phân tích PCA/FA và xác định trọng số của các thông số CLN

Để xác định các quá trình thủy địa hóa chính chi phối chất lượng NDĐ trong tầng chứa nước Pliocen như trình bày ở mục 3.1 trên, phương pháp phân tích thành phần chính (PCA/FA) đã được áp dụng. Kết quả đã rút ra được bốn thành phần chính (PC) có giá trị riêng lớn hơn 1, giải thích được tổng cộng 69,4% tổng phương sai của bộ dữ liệu (Bảng 4). Các giá trị Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) phép thử Bartlett lần lượt là 0,75 và bằng 0, chứng tỏ dữ liệu hoàn toàn phù hợp để tiến hành phân tích PCA [28].

Thành phần chính 1 (PC1): Giải thích 31,0% tổng phương sai, PC1 có tải trọng dương và cao đối với các thông số TDS (0,96), Cl^- (0,94), độ cứng (0,91), trung bình với SO_4^{2-} (0,71) và $N\text{-}NH_4$ (0,57). Mối tương quan chặt chẽ giữa các ion chính này đặc trưng cho quá trình khoáng hóa NDĐ. Tải trọng cao của TDS và Cl^- cho thấy sự ảnh hưởng mạnh mẽ của các quá trình liên quan đến độ mặn, có thể là do tương tác với vật liệu trầm tích nguồn gốc biển của tầng Pliocen hoặc sự hiện diện của nước biển cổ đại [21]. Do đó, PC1 có thể là đại diện cho "nguồn gốc khoáng hóa và ảnh hưởng mặn".

Thành phần chính 2 (PC2): Đóng góp 16,4% tổng phương sai, PC2 thể hiện tải trọng dương cao với Mn (0,77), trung bình đối với Fe (0,68) và F^- (0,63). Sự liên kết giữa Fe và Mn là điển hình cho các quá trình oxy hóa-khử trong môi trường địa hóa yếm khí, vì Fe và Mn là hai trong số những kim loại phổ biến nhất trong lớp vỏ Trái đất, kết quả là, trong môi trường khử đặc trưng của hầu hết các tầng chứa nước, quá trình hòa tan khử của các oxit hoặc khoáng chất chứa Fe và Mn là cơ chế chính giải phóng chúng, cùng các nguyên tố vi lượng khác vào pha NDĐ [19,44,46]. Sự xuất hiện của F^- trong cùng nhóm có thể gợi ý về việc chúng cùng được giải phóng từ các khoáng vật trong tầng chứa nước dưới điều kiện khử. Vì vậy, PC2 có thể đại diện cho "quá trình khử và giải phóng kim loại" từ trầm tích.

Thành phần chính 3 (PC3): Giải thích 11,7% tổng phương sai, PC3 thể hiện cấu trúc đồng biến giữa pH (0,65) và Pb (0,67), đồng thời nghịch biến với COD (-0,52). Sự hiệp biến này chỉ xuất hiện có ý nghĩa

Bảng 2: Thống kê mô tả nồng độ của 12 thông số chất lượng NDĐ phục vụ sinh hoạt (tầng Pliocen) trên địa bàn tỉnh Long An (cũ) từ năm 2019-2023 (n=170)

Đơn vị	pH	TDS	COD	Hard	Cl-	N-NH_4	SO_4^{2-}	F-	Fe	Mn		As
	-	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
min	5,11	90	0,25	8,71	1	0,01	2,5	0,02	0,005	0,0005	0,001	0,00035
max	8,27	2337	4,61	1000	943	0,91	147,7	0,95	27,3	2,54	0,017	0,0159
mean	6,88	618	0,63	220	196	0,25	22,57	0,24	**2,24**	**0,17**	0,0016	0,0020
std	0,48	532	0,75	180	265	0,17	28,11	0,18	4,56	0,30	0,0023	0,0031
CV %	7%	86%	120%	82%	135%	66%	125%	77%	204%	177%	140%	160%
k %	4%	18%	6%	22%	21%	0%	0%	0%	70%	32%	2%	3%
QCVN 01-1	6-8,5	1000	2	300	300	1	250	1,5	0,3	0,1	0,01	0,01
$RSD_{Horwitz}$	12,2 và 11,6	5,7	6,8	14,4	6,8	16,0	7,0	15,1	19,2	22,6	32,0	32,0
	0,73 và 0,99	56,6	20,3	0,29	20,3	0,16	17,4	0,23	0,06	0,02	0,003	0,003

Ghi chú: Min và Max: giá trị nhỏ nhất và giá trị lớn nhất; Mean: trung bình số học; Std: Độ lệch chuẩn; CV(%): hệ số biến động; Chỉ số k: % mẫu vượt so với quy chuẩn so sánh; QCVN 01-1: viết tắt của QCVN 01-1:2024/BYT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về CLN dùng cho mục đích sinh hoạt; RSD Horwitz và S: tương ứng là độ lệch chuẩn tương đối và độ lệch chuẩn được tính từ phương trình Horwitz với C được biểu diễn bằng phân số (C là mức giới hạn của thông số được quy định trong QCVN 01-1).

[Nguồn: Tác giả]

Bảng 3: Tóm tắt các hàm chuyển đổi qi (phương trình tuyến tính)

Stt	Thông số	Đơn vị	Phạm vi tối ưu (qi =100)	Phạm vi suy giảm (1<qi <100)	Hàm tuyến tính cho phạm vi suy giảm (y = qi=a+bx)	Phạm vi không chấp nhận (qi =1)
1	pH	-	6<pH<8,5	4,9<pH<6	y=90x-440	pH<4,9
				8,5<pH<9,98	y=-66,9x+668,6	pH>9,98
2	TDS	mg/L	TDS<1000	1000<TDS<1170	y=-0,583x+683,36	TDS>1170
3	Hard	mg/L	Hard <300	300< Hard <361	y=-1,62x+586,65	Hard >361
4	COD	mg/L	COD<2,0	2,0<COD<2,9	y=-114,47x+328,92	COD>2,9
5	Cl-	mg/L	Cl-<300	300< Cl-<361	y=-1,62x+586,65	Cl->361
6	N-NH_4	mg/L	N-NH4<1	1<N-NH_4<1,48	y=-206,25x+306,25	N-NH_4>1,48
7	SO_4^{2-}	mg/L	SO42- <250	250< SO_4^{2-} <302	y=-1,894x+573,5	SO_4^{2-} >302
8	F-	mg/L	F-<1,5	1,5< F-<2,18	y=-145,59x+318,38	F->2,18
9	Fe	mg/L	Fe<0,3	0,3<Fe<0,47	y=-573,55x+272,07	Fe>0,47
10	Mn	mg/L	Mn<0,1	0,1<Mn<0,17	y=-1414,29x+241,43	Mn>0,17
11		mg/L	Pb <0,01	0,01< Pb <0,02	y=-9900x+199	Pb >0,02
12	As	mg/L	As <0,01	0,01< As <0,02	y=-9900x+199	As >0,02

[Nguồn: Tác giả]

thống kê trong mùa mưa (với R_{pH-COD} = -0,33, và R_{pH-Pb} = 0,29), gợi ý về một quá trình thủy địa hóa nhạy cảm với biến động thủy văn theo mùa.Trong bối cảnh tầng chứa nước Pliocen được ngăn cách bởi các lớp sét dày [18,45], sự xuất hiện đồng thời của các thông số này có thể phản ánh quá trình tương tác nước-đá và sự pha trộn nguồn nước cục bộ hơn là sự bổ cập trực tiếp từ bề mặt. Sự gia tăng áp suất thủy tĩnh trong mùa mưa có thể thúc đẩy sự giải phóng các thành phần hữu cơ (COD) và kim loại (Pb) vốn đã tồn tại sẵn trong cấu trúc trầm tích (nguồn gốc địa chất). Sự phân hủy chất hữu cơ kỵ khí dẫn đến giảm pH cục bộ, tạo ra mối tương quan nghịch với COD. Trong khi đó, sự gia tăng pH ở một số vị trí khác có thể liên quan đến quá trình trao đổi ion hoặc hòa tan khoáng vật cacbonat, thúc đẩy sự di chuyển của Pb. Mặc dù các yếu tố nhân sinh như khai thác nước hay nguồn thải bề mặt có thể đóng vai trò kích hoạt các xung thủy lực này, nhưng trong điều kiện thiếu dữ liệu về mực nước động và gradient thủy lực chi tiết, các cơ chế này hiện được xem là giả thuyết cần được kiểm chứng thêm bằng các nghiên cứu thủy động lực học chuyên sâu. Vì vậy, PC3 có thể đại diện cho "quá trình tương tác thủy lực-địa hóa cục bộ" mang tính thời vụ.

Thành phần chính 4 (PC4): Với 10,3% phương sai, PC4 bị chi phối gần như hoàn toàn bởi tải trọng dương rất cao của As (0,88). Việc asen tách thành một thành phần riêng biệt cho thấy nguồn gốc và cơ chế huy động của nó khác biệt so với các thông số khác. Có thể đến từ thế oxy hóa, và không bao gồm thế khử như ở PC2. Trong nghiên cứu này các mẫu nước được lấy ở tầng sâu, và theo nghiên cứu của Sato và cộng sự [47] về thành phần hóa học NDĐ của khu vực ĐBSCL thì tại các tầng sâu của NDĐ (>250m), hàm lượng Asen xuất hiện ở thế oxy hóa do hai nguyên nhân: (1) quá trình phân hủy oxy hóa các khoáng chất chứa Sun-fua như Pirit [46], tuy nhiên tương tự như trong nghiên cứu trên của Sato và cộng sự [47], trong nghiên cứu này mối tương quan giữa asen và Fe, SO_4^{2-} là rất thấp và tương quan nghịch (R_{As-Fe} = -0,15, và R_{As-SO4} = -0,02), vì vậy khả năng này khó xảy ra; (2) Nguyên nhân thứ hai là do rò rỉ và nén các lớp sét chứa asen do bơm quá mức, và Asen buộc phải di chuyển từ các trầm tích chứa asen sang các trầm tích có giá trị thế oxy hóa khử dương (thế oxy hóa) do rò rỉ và nén [42]. Hiện nay, trên toàn vùng ĐBSCL, mực NDĐ ở tầng Pliocen đang giảm đáng kể [19,48], giúp củng cố thêm nhận định trên. Do đó, PC4 có thể liên quan đến "nguồn gốc địa hóa asen và có liên quan đến rò rỉ và nén các sét chứa asen do bơm quá mức".

Đánh giá chất lượng NDĐ thông qua chỉ số GWQI

Chỉ số chất lượng NDĐ (GWQI) đã được áp dụng để đánh giá tổng thể CLN tại 17 vị trí giám sát. Kết quả cho thấy chất lượng NDĐ tại khu vực nghiên cứu có sự phân hóa rõ rệt, với giá trị GWQI trung bình là 65, xếp loại Tốt (T). Phân tích chi tiết 17 vị trí cho thấy sự phân bố CLN không đồng đều (Bảng 5). Phần lớn các mẫu (chiếm 64,7%) đạt chất lượng Tốt (T) và Rất tốt (RT), với GWQI dao động từ 69 đến 100. Điều này khẳng định chất lượng NDĐ tại nhiều khu vực vẫn còn tốt và phù hợp cho mục đích sinh hoạt. Tuy nhiên, vẫn tồn tại các điểm nóng có chất lượng kém. Có 3 vị trí (17,6%) xếp loại Trung bình (TB) (GWQI 46-59), và 3 vị trí (17,6%) xếp loại Kém (K) và Rất kém (RK) (GWQI 12-38). Đặc biệt, các vị trí N5 (GWQI 12) và N8 (GWQI 18) cho thấy CLN bị suy giảm nghiêm trọng không phù hợp để cấp nước sinh hoạt (RK), cần được ưu tiên giám sát và xử lý.

Bản đồ phân bố không gian chất lượng NDĐ ở Hình 3 cho thấy: 2 vị trí có chất lượng NDĐ RK gồm 1 điểm (N8) thuộc thượng nguồn sông Vàm Cỏ Tây (vùng Đồng Tháp Mười) cách rất xa biển và 1 điểm thuộc khu vực hạ nguồn sát biển (N5). Điều này có thể liên quan đến hàm lượng TDS cao, ảnh hưởng đến khoảng 60% sự biến động của chỉ số GWQI như trình bày ở phần dưới. Giá trị trung bình của TDS ở N8 và N5 lần lượt là 1910 mg/L và 1718 mg/L vượt 1,9 và 1,7 lần QCVN 01-1 (1000 mg/L) càng khẳng định nhận định trên. Trong khi đó TDS là chỉ số thể hiện độ mặn của NDĐ, việc độ mặn cao phân bố ở 2 điểm gần và cách rất xa biển cho thấy rằng: Ngoài yếu tố có thể bị ảnh hưởng xâm nhập nước biển từ tầng nước mặt, và tầng NDĐ đã bị nhiễm mặn ở trên tại khu vực sát biển (N5), vì rằng tốc độ khai thác NDĐ mạnh hiện nay có thể gây rò rỉ giữa các tầng chứa nước và làm tăng độ mặn, dẫn đến suy thoái tài nguyên NDĐ ở vùng đồng bằng [3,49] Nó cũng liên quan đến nước biển cổ đại trong thời kỳ biển tiến ở kỷ Holocen, thậm chí ở sâu trong đất liền tới 150 km tính từ đường bờ biển [21], và được lưu giữ trong các lỗ rỗng của tầng đá trầm tích cho đến hiện nay. Theo bản đồ phân vùng mặn, ngọt của Ha và cộng sự trên khu vực ĐBSCL [21] thì NDĐ mặn (TDS>1000 mg/L) chiếm từ 52-63% thể tích nước trong tầng Pliocen, và việc bơm quá mức từ một tầng chứa nước có thể gây ra tình trạng nhiễm mặn từ các tầng chứa nước mặn bên dưới và/hoặc bên trên [49].

Phân tích biến động chất lượng NDĐ bằng mô hình tác động hỗn hợp (Mixed-Effects Model) đã chỉ ra những xu hướng quan trọng trong giai đoạn 2019–2023 (Hình 2). Mặc dù giá trị GWQI trung bình hàng

Bảng 4: Hệ số tải trọng của bốn nhân tố chính (PC) trong phân tích PCA/FA, và trọng số w_i của các thông số NDĐ

Thông số	PC1	PC2	PC3	PC4	Tổng tải trọng bình phương	Trọng số wi
pH	0,08	-0,17	0,65	0,45	0,667	0,080
TDS	0,96	0,11	0,00	-0,07	0,942	0,113
COD	0,37	0,33	-0,52	-0,01	0,524	0,063
Hard	0,91	0,06	-0,06	-0,03	0,843	0,101
Cl-	0,94	0,14	-0,02	-0,11	0,919	0,110
$N\text{-}NH_4$	0,57	-0,37	-0,16	0,18	0,521	0,063
SO_4^{2-}	0,71	0,43	-0,17	-0,12	0,728	0,087
F-	-0,01	0,63	0,22	0,35	0,563	0,068
Fe	0,02	0,68	-0,37	-0,07	0,613	0,074
Mn	0,29	0,77	-0,02	-0,12	0,690	0,083
	-0,07	0,14	0,67	-0,23	0,525	0,063
As	-0,13	0,03	-0,08	0,88	0,799	0,096
Giá trị riêng	3,72	1,97	1,41	1,24		
% Phương sai	31,0	16,4	11,7	10,3		
% Phương sai cộng dồn	31,0	47,4	59,1	69,4		

Ghi chú: Các hệ số tải trọng được tô đậm tại các PC thể hiệntương ứng các thông số đại diện cho các PC đó.
[Nguồn: Tác giả]

năm dao động trong khoảng 61–69 và duy trì ở mức phân loại Tốt (60 < GWQI < 80), mô hình đã phát hiện sự suy giảm có ý nghĩa thống kê về chất lượng nước trong giai đoạn 2022–2023 ($p < 0,05$). Kết quả này cho thấy chất lượng NDĐ không hoàn toàn ổn định trong dài hạn mà đang chịu những tác động biến đổi rõ rệt hơn ở biên độ thấp trong những năm gần đây. Tương tự, sự biến đổi theo mùa vụ cũng cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$). Giá trị GWQI trung bình trong mùa khô (63) thấp hơn so với mùa mưa (67), phản ánh sự suy giảm chất lượng nước tương đối trong giai đoạn thiếu hụt nguồn bổ cập. Sự khác biệt có ý nghĩa này cho thấy tính ổn định và khả năng tự bảo vệ của tầng chứa nước Pliocen trước các biến động bề mặt là có giới hạn, đồng thời khẳng định hệ thống đang phản ứng nhạy bén với các chu kỳ khí hậu và áp lực khai thác theo mùa. Sự cải thiện nhẹ của chỉ số GWQI trong mùa mưa có thể liên quan đến quá trình pha loãng cục bộ hoặc sự thay đổi động lực học thủy văn trong hệ thống tầng chứa nước sâu dưới tác động của xung thủy lực mùa mưa.

Phân tích độ nhạy của chỉ số GWQI bằng hồi quy bội (Bảng 6) đã xác định được các thông số có ảnh hưởng lớn nhất đến sự suy giảm CLN: Tổng chất rắn hòa tan (TDS) là yếu tố chi phối mạnh mẽ nhất, đóng góp tới 59,95% tổng phương sai của GWQI. Điều này cho thấy độ khoáng hóa cao là nguyên nhân chính làm giảm chất lượng NDĐ tại khu vực nghiên cứu. Fe và Mn là hai yếu tố quan trọng tiếp theo, với tỷ lệ đóng góp lần lượt là 19,25% và 7,78%. Sự đóng góp đáng kể này khẳng định vấn đề ô nhiễm Fe và Mn, đã được xác định trong phân tích thống kê mô tả trước đó, là một thách thức lớn đối với việc sử dụng nước. Các thông số Cl^- và độ cứng (Hard) cũng có đóng góp phần nhỏ (4,27% và 2,81%), củng cố thêm kết luận về ảnh hưởng của quá trình khoáng hóa và độ mặn cục bộ.

Đánh giá rủi ro sức khỏe con người

Dữ liệu về rủi ro sức khỏe không gây ung thư, được tính toán cho các nhóm đối tượng (người lớn và trẻ em) thông qua con đường phơi nhiễm chính là qua đường miệng (ăn, uống), được tóm tắt trong Bảng 7. Đối với người lớn, tổng rủi ro không gây ung thư qua đường ăn uống (HI_{Ln}) dao động trong khoảng 0,22 - 0,96, với giá trị trung bình là 0,54. Tất cả các vị trí mẫu quan trắc có giá trị HI_{Ln} đều thấp hơn ngưỡng an toàn là 1, điều này cho thấy việc tiêu thụ nguồn NDĐ qua đường ăn uống tại khu vực vẫn an toàn, và chưa có khả năng gây ra rủi ro không gây ung thư cho nhóm đối tượng người lớn. Đối với trẻ em, chỉ số HI_{Tr} có xu hướng cao hơn so với ở người lớn, HI ở trẻ dao động từ 0,23 – 1,00, trung bình là 0,56. Chứng tỏ,

Bảng 5: Giá trị GWQI và lớp chất lượng cho từng vị trí giám sát

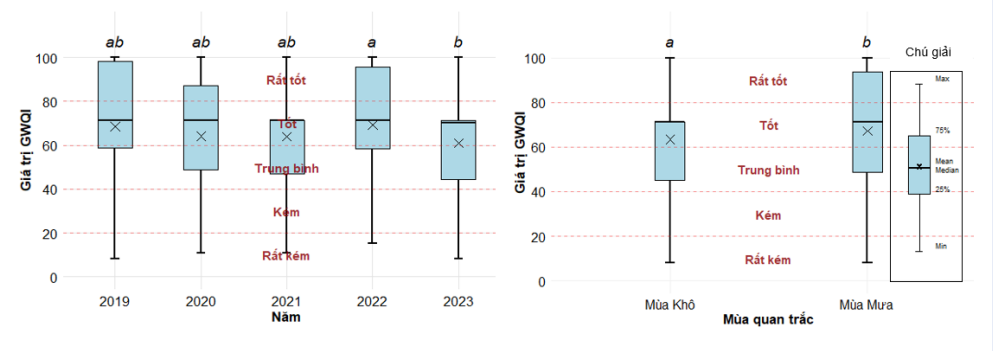
Vị trí	Giá trị GWQI	Phân loại
N1	89	RT
N2	38	K
N3	95	RT
N4	59	TB
N5	12	RK
N6	46	TB
N7	57	TB
N8	18	RK
N9	71	T
N10	86	RT
N11	69	T
N12	71	T
N13	69	T
N14	76	T
N15	100	RT
N16	81	RT
N17	73	T
Trung bình	65	T

[Nguồn: Tác giả]

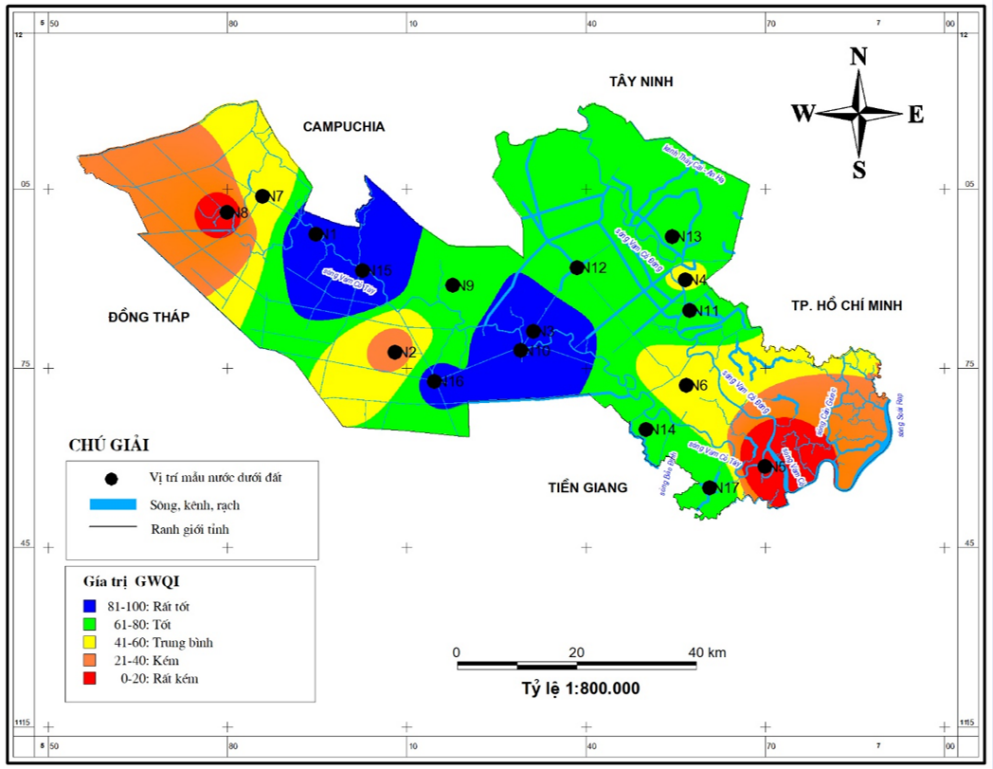
Bảng 6: Tỷ lệ phần trăm đóng góp của các thông số trong việc giải thích tổng phương sai của GWQI

Thông số	Tổng bình phương	Giá trị p	Đóng góp %
pH	57	0,18	0,05%
TDS	74.312	<0,000001	59,95%
COD	2.169	<0,000001	1,75%
Hard	3.484	<0,000001	2,81%
Cl-	5.293	<0,000001	4,27%
Fe	23.863	<0,000001	19,25%
Mn	9.646	<0,000001	7,78%
	38	0,27	0,03%
As	89	0,09	0,07%
Error (lỗi)	5.006	-	4,04%
Tổng phương sai	123.957	-	100,00%

[Nguồn: Tác giả]



Hình 2: Biểu đồ diễn biến chất lượng NDĐ theo chỉ số GWQI theo thời gian trên địa bàn tỉnh Long An (cũ). Ghi chú: Sự khác biệt có ý nghĩa thống kê (p <0,05): thể hiện qua các chữ cái a, b.
[Nguồn: Tác giả]



Hình 3: Bản đồ phân bố không gian chất lượng NDĐ trên địa bàn tỉnh Long An (cũ). [Nguồn: Tác giả]

trẻ em là nhóm đối tượng nhạy cảm hơn trước nguy cơ từ NDĐ ô nhiễm, chủ yếu do khối lượng cơ thể thấp hơn, làm tăng liều lượng chất ô nhiễm hấp thụ theo tỷ lệ cân nặng[5]. Mặc dù tất cả 17 vị trí quan trắc đều có chỉ số HI ở trẻ không vượt quá ngưỡng quy ước (HI $\leq$ 1), nhưng đã có dấu hiệu ngưỡng báo động tại vị trí N4 (HI=1, trong đó: HI riêng lẻ đóng góp cao nhất ở thông số Fe là 48%, F^-: 24%, và 04 thông số còn lại đóng góp từ 1-15%), do đó cần được ưu tiên giám sát chặt chẽ và triển khai các biện pháp dự phòng trong quản lý CLN cấp sinh hoạt tại tầng Pliocen. Một số nghiên cứu khác tại vùng ĐBSCL cho thấy việc sử dụng NDĐ phục vụ ăn uống trên địa bàn có thể gây ra các nguy cơ sức khỏe không gây ung thư cho trẻ em và người lớn, như: trong nghiên cứu của Giao và cộng sự trên địa bàn tỉnh Sóc Trăng đã kết luận rằng tỷ lệ trẻ em và người lớn bị đe dọa bởi các tác động xấu đến sức khỏe do uống NDĐ chứa các chất không gây ung thư dao động từ 5 đến 40%[4]; Trong khi đó, cũng trên địa bàn tỉnh Sóc Trăng, Trần và cộng sự thể hiện rằng tỷ lệ mẫu vượt ngưỡng nguy cơ từ 7,1% - 15,2%[50]. Sự khác biệt về mức độ ô nhiễm, có thể xuất phát từ việc các nghiên cứu này bao gồm cả các mẫu nước được lấy từ các tầng chứa nước nông (Holocen, Pleistocen) thuộc tầng địa chất khu vực. Các tầng chứa nước phía trên này có khả năng dễ bị tác động bởi các hoạt động nhân sinh trên bề mặt, bao gồm dòng chảy nông nghiệp, sự lạm dụng phân bón chứa nitơ, và việc xả thải công nghiệp, dẫn đến suy giảm chất lượng NDĐ[4].

Nguy cơ gây ung thư (CR) được xác định là thấp hơn đáng kể so với nguy cơ không gây ung thư đối với cả người lớn và trẻ em. Kết quả chi tiết về CR được trình bày trong Bảng 7. Đối với người lớn, nguy cơ gây ung thư do uống NDĐ nhiễm As dao động từ $1{,}55 \times 10^{-5}$ đến $1{,}7 \times 10^{-4}$, với giá trị trung bình là $8{,}68 \times 10^{-5}$ vẫn nằm trong khoảng 1 x 10^{-6} đến 1 x 10^{-4}, là ngưỡng trong giới hạn chấp nhận được theo USEPA [15]. Giá trị CR cao ở ngưỡng rủi ro không thể chấp nhận được (CR >1 x 10^{-4}) được quan sát thấy ở các vị trí N1, N7 và N11, chiếm khoảng 18% các vị trí quan trắc. Trong khi đó, ở trẻ em nguy cơ gây ung thư do uống NDĐ có nhiễm As trong ngưỡng dao động từ $1{,}61 \times 10^{-5}$ đến $1{,}77 \times 10^{-4}$, trung bình là $9{,}02 \times 10^{-5}$ - nằm trong ngưỡng chấp nhận được, và có 4/17 vị trí mẫu nghiên cứu (chiếm khoảng 24%) ở mức không thể chấp nhận được tại các điểm N1, N7, N11 và N12.

Các giá trị nguy cơ gây ung thư (CR) ước tính trong nghiên cứu hiện tại cho thấy sự khác biệt đáng kể, với mức độ thấp hơn nhiều so với kết quả được báo cáo bởi Nguyễn và cộng sự[16]. Cụ thể, nghiên cứu trước đó đã ước tính tỷ lệ mắc ung thư cao hơn (với CR ở trẻ em là 24×10^{-4} , và ở người lớn là 9×10^{-4} tại Long An). Sự chênh lệch này chủ yếu được lý giải bởi hai yếu tố: Thứ nhất, nồng độ As trong nghiên cứu này thấp hơn đáng kể (chỉ khoảng 3% tổng số mẫu vượt ngưỡng quy chuẩn 0,01 mg/L) so với nghiên cứu so sánh; Thứ hai, có sự khác biệt về tầng chứa nước được khảo sát: trong khi nghiên cứu hiện tại tập trung vào tầng Pliocen sâu hơn, thì các nghiên cứu trước đó lại bao gồm cả các tầng chứa nước nông hơn, vốn dễ bị ảnh hưởng bởi các hoạt động nhân sinh trên bề mặt. Do đó, để rõ ràng hơn cần có sự nghiên cứu chuyên sâu trong các nghiên cứu tương lai nhằm đánh giá ảnh hưởng tổng hợp của nguồn nước mặt tiếp giáp, lịch sử khai thác của giếng khoan, và các đặc điểm địa chất cục bộ đối với sự di chuyển và tích tụ của chất ô nhiễm.

KẾT LUẬN

Nghiên cứu về chất lượng NDĐ tại tầng chứa nước Pliocen, tỉnh Long An (cũ) giai đoạn 2019–2023 cho thấy mặc dù chỉ số chất lượng nước tổng thể đạt mức Tốt (GWQI trung bình 65), nhưng nguồn nước này đang đối mặt với những thách thức nghiêm trọng về ô nhiễm kim loại nặng và biến động thủy địa hóa. Phân tích bằng mô hình tác động hỗn hợp đã xác định sự biến thiên CLN có ý nghĩa thống kê ($p < 0{,}05$) giữa hai mùa và giai đoạn 2022–2023, phản ánh khả năng tự bảo vệ hạn chế của tầng chứa nước sâu trước áp lực khai thác và chu kỳ khí hậu. Sự suy giảm CLN chủ yếu bị chi phối bởi TDS (59,95%), Fe (19,25%) và Mn (7,78%), với tỷ lệ mẫu vượt chuẩn Fe và Mn lần lượt lên tới 70% và 32%. Thông qua phân tích PCA/FA, bốn cơ chế thủy địa hóa chủ đạo đã được nhận diện, bao gồm quá trình khoáng hóa/xâm nhập mặn, quá trình khử giải phóng kim loại đặc trưng của trầm tích, tương tác thủy lực-địa hóa cục bộ nhạy cảm với mùa vụ và cơ chế huy động asen độc lập. Mặc dù rủi ro không gây ung thư (HI) vẫn nằm trong ngưỡng chấp nhận được ($\leq$ 1), nhưng rủi ro ung thư (CR) do asen đã vượt ngưỡng tại 18% vị trí đối với người lớn và 24% đối với trẻ em. Từ những kết quả này, nghiên cứu kiến nghị cần triển khai khẩn cấp các hệ thống lọc asen chuyên dụng và cung cấp nguồn nước thay thế tại các điểm nóng (N1, N7, N11, N12), đồng thời thiết lập mạng lưới quan trắc nghiêm ngặt kết hợp quy hoạch khai thác hợp lý để ngăn ngừa các biến đổi cấu trúc thủy địa hóa bất lợi trong tương lai.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin bày tỏ lời cảm ơn chân thành tới Sở Tài nguyên và Môi trường tỉnh Long An (cũ) đã hỗ trợ, giúp đỡ, góp phần hoàn thành công trình nghiên cứu này.

Bảng 7: Kết quả đánh giá rủi ro sức khỏe qua con đường miệng (ăn, uống)

Vị trí mẫu	Rủi ro không gây ung thư		Rủi ro gây ung thư	
	HI Lớn	HI Trẻ	CR Lớn	CR Trẻ
N1	0,65	0,68	1,70E-04	1,76E-04
N2	0,42	0,44	8,96E-05	9,32E-05
N3	0,55	0,57	3,61E-05	3,75E-05
N4	0,96	1,00	4,18E-05	4,35E-05
N5	0,57	0,59	8,32E-05	8,65E-05
N6	0,46	0,48	7,77E-05	8,08E-05
N7	0,59	0,61	1,70E-04	1,77E-04
N8	0,46	0,48	5,80E-05	6,03E-05
N9	0,22	0,23	1,55E-05	1,61E-05
N10	0,49	0,51	8,98E-05	9,34E-05
N11	0,45	0,47	1,04E-04	1,08E-04
N12	0,53	0,55	9,66E-05	1,00E-04
N13	0,32	0,34	5,23E-05	5,44E-05
N14	0,72	0,75	9,08E-05	9,44E-05
N15	0,56	0,58	3,72E-05	3,86E-05
N16	0,59	0,62	2,29E-05	2,38E-05
N17	0,53	0,56	3,66E-05	3,81E-05
Trung bình	0,54	0,56	8,68E-05	9,02E-05
Min	0,22	0,23	1,55E-05	1,61E-05
Max	0,96	1,00	1,70E-04	1,77E-04

[Nguồn: Tác giả]

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Lê Việt Thắng: Hình thành ý tưởng nghiên cứu, phân tích dữ liệu, viết bản thảo gốc, rà soát và chỉnh sửa bản thảo, nộp bài (gửi bản thảo).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Giao NT, Nhien HTH, Anh PK, Thuptimdang P. Groundwater quality assessment for drinking purposes: a case study in the Mekong Delta, Vietnam. Scientific Reports. 2023;13(1):4380. Available from: https://doi.org/10.1038/s41598-023-31621-9.
2. Jasechko S, Seybold H, Perrone D, Fan Y, Shamsudduha M, Taylor RG, et al. Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. Nature. 2024;625(7996):715–21. Available from: https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8.
3. Tran DA, Tsujimura M, Vo LP, Nguyen VT, Kambuku D, Dang TD. Hydrogeochemical characteristics of a multi-layered coastal aquifer system in the Mekong Delta, Vietnam. Environmental geochemistry and health. 2020;42(2):661–80. Available from: https://doi.org/10.1007/s10653-019-00400-9.
4. Giao NT, Anh PK, Nhien HTH. Groundwater quality assessment using groundwater quality index and multivariate statistical methods and human health risk assessment in a coastal region of the Vietnamese Mekong Delta. Applied Environmental Research. 2022;44(2):68–85. Available from: https://doi.org/10.35762/AER.2022.44.2.6.
5. Zhang Q, Xu P, Qian H. Groundwater quality assessment using improved water quality index (WQI) and human health risk (HHR) evaluation in a semi-arid region of northwest China. Exposure health. 2020;12(3):487–500. Available from: https://doi.org/10.1007/s12403-020-00345-w.
6. Ali S, Verma S, Agarwal MB, Islam R, Mehrotra M, Deolia RK, et al. Groundwater quality assessment using water quality index and principal component analysis in the Achnera block, Agra district, Uttar Pradesh, Northern India. Sci Rep. 2024;14(1):5381. Available from: https://doi.org/10.1038/s41598-024-56056-8.
7. Mohammed MA, Khleel NA, Szabó NP, Szűcs P. Modeling of groundwater quality index by using artificial intelligence algorithms in northern Khartoum State, Sudan. Modeling Earth Systems Environment. 2023;9(2):2501–16. Available from: https://doi.org/10.1007/s40808-022-01638-6.

8. J BF, IB O. Development of a groundwater quality index: GWQI, for the aquifers of the state of Bahia, Brazil using multivariable analyses. Scientific Reports. 2021;11(1):16520. Available from: https://doi.org/10.1038/s41598-021-95912-9.
9. Truong TK, Nguyen DGC, Nguyen VH, Truong QT. Assessment of Groundwater Quality in Ha Tinh Province Using Water Quality Index. VNU Journal of Science: Natural Sciences Technology. 2025;41(3). Available from: https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5845.
10. Trung KT, Mai TTT, Trương QT, Nguyễn VH. Xây dựng chỉ số chất lượng nước dưới đất (GWQI) và áp dụng cho Huyện Hải Lăng, Tỉnh Quảng Trị. Hue University Journal of Science: Natural Science. 2024;133(1C):159–69. Available from: https://doi.org/10.26459/hueunijns.v133i1C.7301.
11. Sajib AM, Diganta MTM, Rahman A, Dabrowski T, Olbert AI, Uddin MG. Developing a novel tool for assessing the groundwater incorporating water quality index and machine learning approach. Groundwater for Sustainable Development. 2023;23:101049. Available from: https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101049.
12. Eggers MJ, Sigler WA, Kiekover N, Bradley PM, Smalling KL, Parker A, et al. Statewide cumulative human health risk assessment of inorganics-contaminated groundwater wells, Montana, USA. Environmental Pollution. 2025;369:125810. Available from: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125810.
13. Shukla S, Saxena A, Khan R, Li P. Spatial analysis of groundwater quality and human health risk assessment in parts of Raebareli district, India. Environmental Earth Sciences. 2021;80(24):800. Available from: https://doi.org/10.1007/s12665-021-10109-7.
14. Lan T, Wang F, Bao S, Miao J, Bai Y, Jia S. The human health risk assessment and countermeasures study of groundwater quality. Environmental geochemistry and health. 2023;45(6):3215–28. Available from: https://doi.org/10.1007/s10653-022-01384-9.
15. A USEP. Risk Assessment Guidance for Superfund Vol. 1 Human Health Evaluation Manual, Part E, Supplemental Guidance from Dermal Risk Assessement. : Office of Emergency and Remedial Response, US Environmental Protection Agency; 2004.
16. Nguyen VT, T-D-H V, Tran TD, T-N-K N, Nguyen TB, Dang BT, et al. Arsenic-contaminated groundwater and its potential health risk: A case study in Long An and Tien Giang provinces of the Mekong Delta, Vietnam. Environmental Science Pollution Research. 2021;28(45):63558–71. Available from: https://doi.org/10.1007/s11356-020-10837-6.
17. Bui T, Lam D, Van L, Ha K, Nguyen T, Lee E, et al.. Groundwater issues and hydrogeological survey of the Mekong River basin in Vietnam. Current status issues of groundwater in the Mekong river basin; 2015.
18. N LD, TVK N, DV N, AT T, HT N, et al. Groundwater dynamics in the Vietnamese Mekong Delta: Trends, memory effects, and response times. Journal of Hydrology: Regional Studies. 2021;33:100746. Available from: https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100746.
19. Ha QK, Phung TH, Phan NL, Pham VT, Pham VH, Minderhoud PS, et al. Groundwater resource challenges and abstraction-induced land subsidence in the Vietnamese Mekong Delta. The Mekong River Basin. 2024;p. 421–51. Available from: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90814-6.00006-1.
20. UBND tỉnh Long An. Báo cáo quy hoạch tỉnh Long An thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050. Long An, 2023.
21. Ha QK, Kim K, Phan NL, Phung TH, Lee J, Nguyen VK, et al. A hydrogeological and geochemical review of groundwater issues in southern Vietnam. Geosciences Journal. 2019;23(6):1005–23. Available from: https://doi.org/10.1007/s12303-019-0021-z.
22. Sở Tài nguyên và Môi trường tỉnh Long An. Báo cáo hiện trạng môi trường tỉnh Long An giai đoạn 2016-2020. Long An, 2020. Long An.
23. Bộ Tài nguyên và Môi trường. QCVN 09-MT:2015/BTNMT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước dưới đất. Hà Nội, 2015;.
24. Bộ Y tế. QCVN 01-1:2024/BYT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt. Hà Nội, 2024;.
25. Phung D, Huang C, Rutherford S, Dwirahmadi F, Chu C, Wang X, et al. Temporal and spatial assessment of river surface water quality using multivariate statistical techniques: a study in Can Tho City, a Mekong Delta area, Vietnam. Environmental monitoring and assessment. 2015;187:4474. Available from: https://doi.org/10.1007/s10661-015-4474-x.
26. Fu D, Wu X, Chen Y, Yi Z. Spatial variation and source apportionment of surface water pollution in the Tuo River, China, using multivariate statistical techniques. Environmental Monitoring Assessment. 2020;192:1–11. Available from: https://doi.org/10.1007/s10661-020-08706-3.
27. H N, H NV, K TT, P NH, C NDG. A comprehensive procedure to develop water quality index: A case study to the Huong river in Thua Thien Hue province, Central Vietnam. Plos one. 2022;17(9):e0274673. Available from: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274673.
28. Kaiser HF. An index of factorial simplicity. psychometrika. 1974;39(1):31–6.
29. Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE. Multivariate data analysis: Pearson new international edition PDF. eBook: Pearson Higher Ed; 2013.
30. Kaiser HF. The application of electronic computers to factor analysis. Educational psychological measurement. 1960;20(1):141–51. Available from: https://doi.org/10.1177/001316446002000011.
31. Liu CW, Lin KH, Kuo YM. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. Science of the total environment. 2003;313(1-3):77–89. Available from: https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00683-6.
32. Putri M, Lou CH, Syai'in M, Ou SH, Wang YC. Long-Term River Water Quality Trends and Pollution Source Apportionment in Taiwan. Water. 2018;10(1394). Available from: https://doi.org/10.3390/w10101394.
33. Le TV, Nguyen BT. Heavy metal pollution in surface water bodies in provincial Khanh Hoa, Vietnam: Pollution and human health risk assessment, source quantification, and implications for sustainable management and development. Environmental Pollution. 2024;343:123216. Available from: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123216.
34. Romić D, Castrignanò A, Romić M, Buttafuoco G, Kovačić MB, Ondrašek G. Modelling spatial and temporal variability of water quality from different monitoring stations using mixed effects model theory. Science of the total environment. 2020;704(135875). Available from: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135875.
35. Rivera C, Rodriguez R. Horwitz equation as quality benchmark in ISO. IEC. 2011;17025:1–7.
36. Nguyen BT, Le LB, Le AH, Thai NV. The interactive effects of the seawater intrusion-affected zones and types of waterways on the surface water quality from the coastal Tien Giang Province, Vietnam. Environmental Monitoring Assessment. 2021;193(4). Available from: https://doi.org/10.1007/s10661-021-09015-z.
37. Adimalla N, Qian H. Groundwater quality evaluation using water quality index (WQI) for drinking purposes and human health risk (HHR) assessment in an agricultural region of Nanganur, south India. Ecotoxicology environmental safety. 2019;176:153–61. Available from: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.066.
38. Tổng Cục Môi trường. Quyết định số 1460/QĐ-TCMT về việc ban hành hướng dẫn kỹ thuật tính toán và công bố chỉ số chất lượng nước Việt Nam (VN_WQI). Hà Nội, 2019;.
39. A USEP. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment: Office of Emergency and Remedial Response, US Environmental Protection Agency. 2025;.

40. Xiao J, Wang L, Deng L, Jin Z. Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau. Science of the Total Environment. 2019;650:2004–12. Available from: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.322.
41. Kumar V, Parihar RD, Sharma A, Bakshi P, Sidhu GPS, Bali AS, et al. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. Chemosphere. 2019;236(124364). Available from: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124364.
42. Erban LE, Gorelick SM, Zebker HA, Fendorf S. Release of arsenic to deep groundwater in the Mekong Delta, Vietnam, linked to pumping-induced land subsidence. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2013;110(34):13751–6. Available from: https://doi.org/10.1073/pnas.1300503110.
43. Tong NX, Thao NTT. Assessment of water quality, heavy metal pollution and human health risks in the Canal system of Ho Chi Minh City, Vietnam. Environmental Research Communications. 2024;6(7):075007. Available from: https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad5ad7.
44. Hoang TH, Bang S, Kim KW, Nguyen MH, Dang DM. Arsenic in groundwater and sediment in the Mekong River delta, Vietnam. Environmental Pollution. 2010;158(8):2648–58. Available from: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.05.001.
45. H P, FC G, VB T, and Oude Essink GH DW. Paleohydrogeological reconstruction of the fresh-saline groundwater distribution in the Vietnamese Mekong Delta since the late Pleistocene. Journal of Hydrology: Regional Studies. 2019;23(100594). Available from: https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100594.
46. Nguyen KP, Itoi R. Source and release mechanism of arsenic in aquifers of the Mekong Delta, Vietnam. Journal of Contaminant Hydrology. 2009;103(1-2):58–69. Available from: https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2008.09.005.
47. HS HS, N S, HM L, NV L, TTK O. Characteristics on distribution of chemical composition in groundwater along the Mekong and Bassac (Hậu) river, Vietnam. Vietnam Journal of Earth Sciences. 2019;41(13969). Available from: https://doi.org/10.15625/0866-7187/41/3/13969.
48. Osenbrück K, Steinel A, Montcoudiol N, Manh L, Bäumle R. Geochemical evolution and flow of groundwater impacted by long-term abstraction in the Mekong Delta, Vietnam. Journal of Hydrology: Regional Studies. 2025;655(132881). Available from: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132881.
49. Dang DN, Nguyen KC. Formation and chemistry of the groundwater resource in the Mekong river delta, South Vietnam. Vietnam Journal of Science, Technology Engineering. 2018;60(1):57–67. Available from: https://doi.org/10.31276/VJSTE.60(1).57.
50. Tran DA, Tsujimura M, Loc HH, Dang DH, Vo PL, Ha DT, et al. Groundwater quality evaluation and health risk assessment in coastal lowland areas of the Mekong Delta, Vietnam. . Groundwater for Sustainable Development. 2021;15(100679). Available from: https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100679.

VNUHCM Journal of Environment and Earth Sciences 2026, 10(1):1256-1271

Research Article

Open Access Full Text Article

Assessment of groundwater quality using the Groundwater Quality Index (GWQI), and Human Health Risk in the main aquifer (Pliocene) used for domestic water supply in the Long An province (former administrative boundaries)

Le Viet Thang*

Use your smartphone to scan this QR code and download this article

ABSTRACT

This study aims to systematically evaluate the evolution of groundwater quality, identify key governing factors, and quantify cumulative health risks within the Pliocene aquifer in Long An Province (former administrative boundaries), Vietnam. Data from 170 groundwater samples collected between 2019 and 2023 were analyzed using descriptive statistics, multivariate analysis (PCA/FA), the Groundwater Quality Index (GWQI), and a Mixed-Effects Model. The results indicate an average GWQI of 65 (classified as ``Good''); however, significant spatial and temporal variations in water quality were observed. The Mixed-Effects Model revealed a statistically significant ($p < 0.05$) low-amplitude decline in water quality during the 2022–2023 period and between seasons (with lower GWQI in the dry season compared to the rainy season), suggesting limited self-protection and stability of the deep Pliocene aquifer against surface fluctuations. Iron (Fe) and Manganese (Mn) concentrations exceeded the QCVN 01-1:2024/BYT standards extensively (70% and 32% of samples, respectively). PCA/FA identified four principal components, with Mineralization/Saline Influence (PC1) and Reduction/Metal Release (PC2) as the primary governing processes. Sensitivity analysis of the GWQI via multiple regression confirmed that Total Dissolved Solids (TDS) (59.95%), Fe (19.25%), and Mn (7.78%) are the main factors contributing to water quality degradation. Regarding health risks, the total non-carcinogenic hazard index (HI) for both adults and children remained below the safety threshold of 1.0. However, the carcinogenic risk (CR) associated with Arsenic (As) exceeded the unacceptable threshold ($>1\times10^{-4}$) at 18% of sampling sites for adults and 24% for children, despite low average Arsenic concentrations. The study concludes that groundwater quality in the Pliocene aquifer is predominantly governed by natural geochemical processes, with the most significant challenges being Fe, Mn, and localized Arsenic risks.

Key words: Groundwater, Pliocene aquifer, GWQI, PCA/FA, Health risk, Long An

Institute of Environmental Science, Engineering and Management, Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam

Correspondence

Le Viet Thang, Institute of Environmental Science, Engineering and Management, Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam

Email: levietthangmt@gmail.com

History

- Received: 15-12-2025
- Revised: 12-03-2026
- Accepted: 08-06-2026
- Published Online: 25-06-2026

DOI : https://doi.org/10.32508/vnuhcmjees.v10i1.867

Check for updates

Copyright

© VNUHCM Journal. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

Cite this article : Viet Thang L. **Assessment of groundwater quality using the Groundwater Quality Index (GWQI), and Human Health Risk in the main aquifer (Pliocene) used for domestic water supply in the Long An province (former administrative boundaries)**. *VNUHCM J. Environ. Earth Sci.* 2026;10(1):1256-1271.