



Original Article

Application of Principal Component Analysis in Determining the Hydrogeochemistry Characteristics of Karst Water in Bac Kan and Cao Bang

Van Phu Hung*, Vu Thi Minh Nguyet, Bui Van Quynh, Ha Tung Lam

*Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology,
84 Alley, Chua Lang, Dong Da, Hanoi, Vietnam*

Received 06 November 2023

Revised 22 April 2024; Accepted 22 May 2024

Abstract: Research on the origin and processes affecting the hydrogeochemical characteristics of karst water provides useful information for the management and exploitation of karst water resources. Principal Component Analysis (PCA) was applied to the karst water physicochemical data, including temperature, pH, Electronic Conductivity (EC), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , and NO_3^- in Ba Be lake (Bac Kan province) and Ha Quang, Trung Khanh (Cao Bang province). The Piper diagram described the main type of hydrochemical facies in karst water at 24/25 survey points as Ca^{2+} - HCO_3^- . The combination of eleven physicochemical properties was reduced into four main components (PC1, PC2, PC3, PC4) based on eigenvalues of 4,0; 2,5; 1,3 and 1,2, respectively. A total of 81,53% of the variance was represented by four main components, in which PC1 (36,36%) represented the rock-water interaction, PC2 (22,88%) represented pollution sources related to human activities, PC3 and PC4 (22,29%) represented the dissolution of magnesium minerals. The moderate-strong correlation between parameters of the Mia Le Formation's sample in Ba Be Lake area and PC1 indicated that the major chemical composition of karst water is strongly influenced by the interaction between carbonate rocks and water. This process also occurs intensely at some survey points in the Bac Son, Song Hien, and Cao Bang formations. Meanwhile, some samples NK.19, NK.23, NK.25 of the Bac Son and Song Hien formations had a moderate positive correlation with PC2 and are affected by human activities. Research results have shown that the combination of principal component analysis PCA and correlation analysis is an effective tool in determining karst water characteristics in the area.

Keywords: PCA, hydrogeochemistry, karst water, Ba Be, Trung Khanh, Ha Quang.

* Corresponding author.

E-mail address: vphung@igs.vn.vast.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5030>

Ứng dụng phương pháp phân tích thành phần chính trong đánh giá đặc điểm thủy địa hóa nước karst tại Bắc Kạn và Cao Bằng

Văn Phú Hưng*, Vũ Thị Minh Nguyệt, Bùi Văn Quỳnh, Hà Tùng Lâm

*Viện Địa chất, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,
Ngõ 84, Chùa Láng, Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 06 tháng 11 năm 2023

Chỉnh sửa ngày 22 tháng 4 năm 2024; Chấp nhận đăng ngày 22 tháng 5 năm 2024

Tóm tắt: Nghiên cứu nguồn gốc và các quá trình ảnh hưởng tới đặc điểm thủy địa hóa nước karst sẽ cung cấp thông tin hữu ích phục vụ việc quản lý và khai thác tài nguyên nước karst. Phương pháp phân tích thành phần chính (Principal Component Analysis – PCA) được áp dụng cho tập hợp dữ liệu các kết quả phân tích lý-hóa trong nước karst bao gồm nhiệt độ, pH, độ dẫn điện (EC), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- ở khu vực hồ Ba Bể (Bắc Kạn) và Hà Quảng, Trùng Khánh (Cao Bằng). Biểu đồ Piper xác định tương thủy hóa chính trong nước karst là $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$. Tổ hợp 11 đặc tính lý-hóa được rút gọn thành 4 thành phần chính (PC1, PC2, PC3, PC4) dựa vào giá trị riêng lần lượt là 4,0; 2,5, 1,3 và 1,2. Tổng cộng 81,53% phương sai được thể hiện theo 4 thành phần chính, trong đó PC1 (36,36%) đại diện cho tương tác giữa nước và đá, PC2 (22,88%) thể hiện cho các nguồn ô nhiễm liên quan đến các hoạt động của con người, PC3 và PC4 (22,29 %) thể hiện cho quá trình hòa tan các khoáng chất giàu magie. Tương quan trung bình-mạnh giữa các chỉ tiêu phân tích mẫu thuộc hệ tầng Mia Lé khu vực hồ Ba Bể với PC1 chỉ ra rằng thành phần hóa cơ bản của nước karst bị chi phối mạnh bởi tương tác giữa đá carbonate và nước. Quá trình này cũng xảy ra mạnh tại một số điểm khảo sát thuộc hệ tầng Bắc Sơn, Sông Hiến, phức hệ Cao Bằng. Trong khi đó, một số mẫu NK.19, NK.23, NK.25 thuộc hệ tầng Bắc Sơn và Sông Hiến thành phần lý-hóa có tương quan đồng biến ở mức trung bình với PC2 và bị ảnh hưởng bởi hoạt động nhân sinh. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng, việc áp dụng tổ hợp phương pháp phân tích thành phần chính PCA và phân tích tương quan là công cụ hữu hiệu trong xác định đặc điểm nước karst tại khu vực.

Từ khóa: PCA, thủy địa hóa, nước karst, Ba Bể, Trùng Khánh, Hà Quảng.

1. Mở đầu

Các thành tạo carbonate là môi trường chứa nước tốt do phát triển nhiều khe nứt, hang hốc karst mặt và ngầm lớn. Nguồn gốc, sự vận động của nước karst và khả năng khai thác, sử dụng bền vững nước karst luôn là chủ đề được các nhà khoa học trên thế giới và trong nước quan tâm trong những năm trở lại đây [1, 2]. Phương pháp thống kê đa biến được sử dụng rộng rãi để đánh

giá chất lượng nước dưới đất. Roger P.C và cộng sự [1] thông qua phân tích thành phần chính đã xác định sự thay đổi của chất lượng nước karst theo không gian ở bang Yucatan (Mexico) bởi yếu tố xâm nhập của nước biển, tương tác đá-nước, lượng mưa và ô nhiễm do con người. Tổ hợp phương pháp phân tích thành phần chính (Principal Component Analysis) – PCA và tương quan Pearson với phân tích cụm (Cluster

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: vphung@igs.vn.vast.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5030>

Analysis-CA) xử lý cho 12 biến thành phần hóa lý nhằm tìm ra biến số có ảnh hưởng lớn nhất đến chất lượng nước dưới đất ở quận Gaya (Bihar-Ấn Độ) [3]. Giám sát chất lượng nước để đánh giá sự thay đổi theo không gian và thời gian là điều cần thiết cho việc quản lý nước và kiểm soát ô nhiễm. Một nghiên cứu của David A.C và các cộng sự [4] sử dụng phương pháp PCA và phân tích cụm (CA) cho 54 mẫu nước thu thập với 15 thông số phân tích để đưa ra thông số đóng góp nhiều nhất vào chất lượng nước, từ đó liên kết nó với các nguồn ô nhiễm chính được xác định trong cơ sở dữ liệu địa lý. Tại Việt Nam, phương pháp phân tích thành phần chính cũng đã bắt đầu được ứng dụng trong đánh giá chất lượng nước. Cụ thể ở khu vực Nam Bộ (tỉnh Bà Rịa – Vũng Tàu), phương pháp chỉ số chất lượng nước (GWQI) và PCA được kết hợp để tìm ra hai nhân tố đặc trưng gây ảnh hưởng đến chất lượng nước tầng chứa nước Pleistocen là tương tác của các thành phần hóa học trong trầm tích sông và hoạt động nhân sinh. Đối với riêng nước karst, việc xác định nguồn gốc, loại hình hóa học của nước đã được đề cập đến trong nghiên cứu của N. V. Lân và cộng sự [5] hay trong một phần nghiên cứu của T. D. Anh và cộng sự [2]. Biểu đồ Gibbs và một phương pháp thống kê đa biến là phân tích cụm (Cluster Analysis) đã nhóm thành phần hóa-lý và các nguyên tố kim loại nặng kiểm soát nhằm xác định quá trình chính kiểm soát chất lượng nước dưới đất tại Đồng Văn (Hà Giang). Phương pháp PCA và phân tích tương quan sẽ là nhóm phương pháp chính tác giả sử dụng trong nghiên cứu này nhằm xác định đặc điểm nước karst và mối tương quan giữa các chỉ tiêu hóa lý-hóa (variables) với các thành phần chính từ đó luận giải quá trình chính diễn ra tại Bắc Kạn và Cao Bằng cũng như dấu hiệu của ảnh hưởng bởi hoạt động nhân sinh.

2. Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu được phân thành 2 cụm: i) Hồ Ba Bể, và ii) các điểm xuất lộ nước karst tại huyện Hà Quảng và thác Bản Giốc tỉnh Cao Bằng.

Hồ Ba Bể là hồ nước ngọt nằm giữa hai huyện Ba Bể, chợ Đồn thuộc tỉnh Bắc Kạn. Hồ

có chiều dài tới 8 km, chỗ rộng nhất khoảng 3 km, sâu khoảng 20 m đến 30 m, diện tích khoảng 450 ha, nằm trên độ cao 145 m so với mặt nước biển và được hình thành từ cách đây hơn 200 triệu năm, đá vôi tại vùng hồ Ba Bể có niên đại 450 triệu năm và là đá vôi cổ có đặc điểm kiến tạo rất đặc biệt. Hồ nằm trong khuôn viên Vườn Quốc gia Ba Bể, nằm ở tiểu cánh cung sông Gâm ôm lấy tiểu lục địa cổ sông Chảy làm nên khối nâng dạng vòm Việt Bắc. Đây là khối nâng duy nhất trong phức nếp lồi Vân Nam của nền chuẩn Dương Tử. Khu vực này có mặt hầu như tất cả hệ đứt gãy miền Đông Bắc. Trong vùng này, các đá carbonate thuộc Thành hệ Bắc Sơn (C-P_{bs}) phân bố rải rác, tạo thành những khối riêng lẻ. Thành phần đất đá rất đồng nhất là đá vôi phân lớp dày và đá vôi dạng khối phát triển karst mặt mạnh mẽ. Các đá carbonate phân bố ở Chợ Rã, Ba Bể và nhiều khu vực khác thành các khối không liên tục.

Huyện Hà Quảng và huyện Trùng Khánh thuộc tỉnh Cao Bằng là nơi tập trung chủ yếu của vùng đá vôi chạy từ phía bắc dọc theo biên giới Việt - Trung, vòng xuống phía đông nam của tỉnh. Đá vôi khu vực có tuổi Devon (D), Carbon-Permi (C-P), Trias (T). Trong đó các điểm khảo sát thuộc huyện Hà Quảng nằm trong các hệ tầng Bắc Sơn, Đồng Đăng (C-P), hệ tầng sông Hiến, phức hệ Cao Bằng (T-T), trong khi đá vôi thác Bản Giốc (Trùng Khánh) thuộc hệ tầng Nà Quản kỷ Devon [6]. Các đá vôi này cấu tạo phân lớp và có sự xen lẫn với các lớp silic, sét vôi. Đá vôi chứa nhiều tạp chất sét nên quá trình hòa tan xảy ra yếu hơn. Lớp terarosa tại khu vực này tương đối dày và lớp phủ thực vật phát triển mạnh. Tại những khu vực này các hang động thường bị sét lấp nhét, các khe nứt và đứt gãy cũng nhanh chóng bị sét lấp kín nên khả năng lưu thông của nước kém [7].

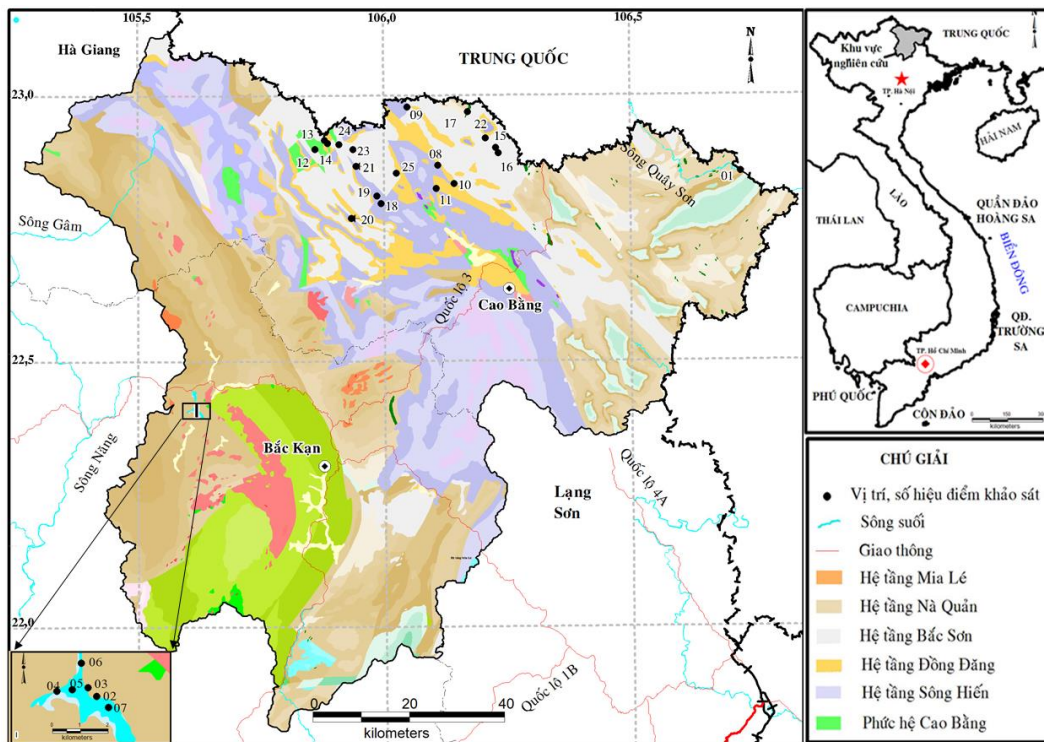
3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Phương pháp thu thập số liệu

Các chỉ tiêu phân tích chất lượng nước được sử dụng từ kho dữ liệu của Trung tâm Nghiên cứu Karst và Hang động qua các đợt khảo sát

thực địa tại Cao Bằng và Bắc Kạn. Tổng số 25 mẫu nước karst được lấy vào đầu mùa khô (tháng 01 năm 2021), tại hồ Ba Bể (thuộc hệ tầng Mia Lé), Hà Quảng và Trùng Khánh (phức hệ Cao Bằng, hệ tầng Sông Hiến, hệ tầng Đồng Đăng, hệ tầng Nà Quán, hệ tầng Bắc Sơn) (Hình 1). Các thông số hóa – lý gồm EC, pH, nhiệt độ được đo tại thực địa bằng thiết bị đo đa thông số Multi 3630 IDS (WTW- Đức). Mẫu nước lấy tại các điểm khảo sát được phân tích các chỉ tiêu hóa cơ

bản (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- và SO_4^{2-}) tại Viện Địa chất; trong đó Ca^{2+} , Mg^{2+} được xác định bằng cách chuẩn độ, Na^+ , K^+ đo bằng phương pháp hấp thụ nguyên tử, trên hệ máy quang phổ hấp thụ nguyên tử VARIAN AA280Fs, NO_3^- được xác định bằng phương pháp trắc phổ, hàm lượng HCO_3^- , Cl^- đều được xác định bằng cách chuẩn độ, SO_4^{2-} được xác định bằng phương pháp đo độ đục bằng Spectrophotometer.



Hình 1. Sơ đồ khu vực nghiên cứu và vị trí các điểm khảo sát. (Trích lược Bản đồ địa chất Việt Nam tỷ lệ 1:200.000).

3.2. Phương pháp phân tích số liệu

3.2.1. Phương pháp đồ thị thủy địa hóa

Biểu đồ Piper [8] được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu thủy địa hóa, để biểu thị thành phần phân hóa học, các thông số chất lượng nước và phân tích mối tương quan giữa các biến đó, từ đó xác định tương thủy hóa chính của nước. Đây cũng là nhóm phương pháp thường được áp dụng cho nghiên cứu về đặc điểm hóa học, nguồn gốc của nước tại nhiều nơi trên thế giới.

3.2.2. Phương pháp phân tích thành phần chính PCA

Phương pháp PCA cho phép giảm số chiều của dữ liệu, thay vì giữ lại các trục tọa độ không gian cũ. Mục tiêu của PCA là tìm một không gian mới với số chiều nhỏ hơn không gian cũ (số chiều trong không gian mới thường là 2 hoặc 3 chiều). Trong đó các trục tọa độ trong không gian mới được xây dựng sao cho trên mỗi trục độ biến thiên của dữ liệu trên đó là lớn nhất có thể (maximize the variability). PCA được ứng dụng

trong nghiên cứu thủy địa hóa [9, 10], khi mà tập dữ liệu mẫu nước với các chỉ tiêu phân tích có số lượng lớn. Trong nghiên cứu này, dữ liệu đầu vào là 8 thông số hóa cơ bản bao gồm Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- và HCO_3^- tương ứng với các biến (variables) và các đối tượng (individual) là các mẫu nước karst (25 mẫu). Phương pháp được thực hiện bằng phần mềm SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) và R-studio.

Thành phần chính PC1 có giá trị phương sai càng lớn thì vai trò của nó trong việc đánh giá tổng hợp càng lớn, lượng thông tin mà nó biểu đạt càng nhiều [3]. Nếu thành phần chính thứ nhất PC1 chưa đủ để biểu đạt tốt lượng thông tin của dữ liệu m biến ban đầu thì tiếp tục lựa chọn thành phần chính thứ hai (PC2), cứ như vậy cho đến m thành phần chính.

Các bước phân tích thành phần chính:

Bước 1: số liệu ban đầu được sắp xếp dưới dạng một ma trận $X = (X_{ij})_{n \times m}$. Trong đó n là số quan trắc, m là số biến. Vì các biến ban đầu có đơn vị khác nhau nên tiến hành chuẩn hóa dữ liệu thành $Z = (Z_{ij})_{n \times m}$

Bước 2: từ ma trận số liệu đã được chuẩn hóa, tính hệ số ma trận tương quan $R = (r_{ij})_{n \times m}$. Tính m giá trị riêng λ_p ($p = 1; 2; 3, \dots; m$), các vector riêng $L_p = L_{p1}; L_{p2}; \dots L_{pm}$. Rút ra công thức biểu diễn thành phần chính:

$$F_p = L_{p1}Z_1 + L_{p2}Z_2 + \dots + L_{pm}Z_m$$

Trong đó $p = 1; 2; 3; \dots; m$

Bước 3: xác định tỷ lệ đóng góp của các thành phần chính: Lựa chọn các giá trị riêng $\lambda_p > 1$. Tỷ lệ đóng góp tích lũy của các thành phần chính thứ k là tỷ lệ phần trăm lượng thông tin mà các thành phần chính đó bao hàm:

$$\frac{\lambda_k}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^p \lambda_i}, k = 1, 2, \dots, p$$

Tỷ lệ đóng góp tích lũy càng cao, càng gần với tình hình thực tế. Phạm vi chấp nhận được của tỷ lệ đóng góp tích lũy của các thành phần chính là từ 70%-90%.

3.3. Số liệu

Phân tích thành phần chính (PCA) sử dụng dữ liệu thành phần hóa học cơ bản bao gồm Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- và HCO_3^- của 25 mẫu nước tại 06 điểm thuộc hồ Ba Bể (Bắc Kạn), 01 điểm tại thác Bản Giốc (Cao Bằng) và 18 điểm thuộc Hà Quảng (Cao Bằng) (Bảng 1) nhằm trích xuất thông tin về các thông số có ý nghĩa nhất mô tả toàn bộ tập dữ liệu, trong trường hợp này là phản ánh tính chất nước karst, loại bỏ các thành phần không thể hiện được đặc điểm nước karst tại khu vực.

Bảng 1. Vị trí các điểm khảo sát tại Bắc Kạn và Cao Bằng

KHM	ĐKS	Tọa độ (WGS-84)		Vị trí địa lý
		Vĩ độ	Kinh độ	
1	NK.01	22,85°	106,72°	Thác Bản Giốc-Trùng Khánh-Cao Bằng
2	NK.02	22,40°	105,62°	Buồng 1 (Bến thuyền phía Bắc)-Hồ Ba Bể-Bắc Kạn
3	NK.03	22,41°	105,61°	Buồng 2-Hồ Ba Bể-Bắc Kạn
4	NK.04	22,40°	105,60°	Bờ kè cuối nhánh-Hồ Ba Bể-Bắc Kạn
5	NK.05	22,41°	105,61°	Giữa lòng hồ Ba Bể-Bắc Kạn
6	NK.06	22,42°	105,61°	Buồng 3 (hướng đi hồ Na Hang)-Ba Bể-Bắc Kạn
7	NK.07	22,40°	105,62°	Đảo Bà Góa-Hồ Ba Bể-Bắc Kạn
8	NK.08	22,87°	106,11°	Nà Dăm-Ngọc Đào-Hà Quảng-Cao Bằng
9	NK.09	22,97°	106,04°	Pác Pó-Trường Hà-Hà Quảng-Cao Bằng
10	NK.10	22,83°	106,14°	Bản Bó-Ngọc Đào-Hà Quảng-Cao Bằng
11	NK.11	22,82°	106,10°	Đào Nam-Ngọc Đào-Hà Quảng-Cao Bằng
12	NK.12	22,89°	105,85°	Bản Khau Giữa-Cần Nông-Hà Quảng-Cao Bằng
13	NK.13	22,91°	105,87°	Nậm Đông-Cần Nông-Hà Quảng-Cao Bằng
14	NK.14	22,91°	105,88°	Nậm Đông-Cần Nông-Hà Quảng-Cao Bằng

15	NK.15	22,90°	106,22°	Cột Phố-Tổng Cột-Hà Quảng-Cao Bằng
16	NK.16	22,89°	106,23°	Cột Phố-Tổng Cột-Hà Quảng-Cao Bằng
17	NK.17	22,96°	106,17°	Lũng Pán-Cải Viên-Hà Quảng-Cao Bằng
18	NK.18	22,79°	105,99°	Nà Lèng-Đa Thông-Hà Quảng-Cao Bằng
19	NK.19	22,81°	105,98°	Nam Hưng Đạo-Đa Thông-Hà Quảng-Cao Bằng
20	NK.20	22,76°	105,93°	Tắc Té-Thanh Long-Hà Quảng-Cao Bằng
21	NK.21	22,86°	105,94°	Quang Trung 1-Lương Thông-Hà Quảng-Cao Bằng
22	NK.22	22,91°	106,20°	Nhì Tảo-Nội Thôn-Hà Quảng-Cao Bằng
23	NK.23	22,89°	105,93°	Bản Ngắm-Cần Yên-Hà Quảng-Cao Bằng
24	NK.24	22,90°	105,90°	Bản Gải-Cần Yên-Hà Quảng-Cao Bằng
25	NK.25	22,85°	106,02°	Tênh Cà Lừa-Quý Quân-Hà Quảng-Cao Bằng

4. Kết quả nghiên cứu

4.1. Đặc điểm thủy địa hóa

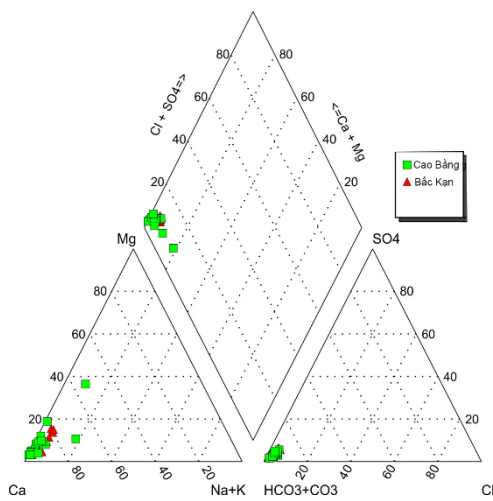
Nhìn chung, giá trị pH đo được tại 25 điểm khảo sát thuộc Bắc Kạn và Cao Bằng đều nằm trong khoảng từ 7,02-8,19. Nước có tính kiềm và kiềm yếu. Giá trị pH cực đại tại Bắc Kạn được xác định tại điểm NK-01 (pH=7,9) bùng 1 bên thuyền phía Bắc hồ Ba Bể. Giá trị pH cực đại tại Cao Bằng xác định tại 2 điểm bao gồm 01 điểm nước mặt thuộc thôn Nà Lèng - xã Đa Thông và 01 điểm nước xuất lộ thuộc Bản Ngắm - xã Cần Yên (pH=8,19). Độ dẫn điện (EC) của các mẫu nước thu được tại hồ Ba Bể trung bình (EC = 422,5 $\mu\text{S/cm}$) cao hơn nhiều so với các điểm khảo sát tại Cao Bằng (EC = 279,47 $\mu\text{S/cm}$), chủ yếu do đá vôi ngấp nước thường xuyên, quá trình hòa tan xảy ra mạnh mẽ và có tốc độ lớn. Độ dẫn điện của mẫu nước thu được ở đây cũng có diện

phân bố ổn định tập trung trong khoảng từ 417 $\mu\text{S/cm}$ – 511 $\mu\text{S/cm}$. Trong khi đó, do mẫu nước karst Cao Bằng được thu thập ở nhiều địa điểm và nguồn khác nhau nên độ dẫn điện đo được có khoảng dao động lớn hơn từ 100 $\mu\text{S/cm}$ – 511 $\mu\text{S/cm}$. Tại một số điểm khảo sát thuộc Cao Bằng, vẫn ghi nhận giá trị EC cao như Thác Bản Giốc (EC = 511 $\mu\text{S/cm}$), điểm xuất lộ thuộc thôn Nậm Đông, xã Cần Nông (EC = 481 $\mu\text{S/cm}$), điểm xuất lộ thuộc thôn Tênh Cà Lừa, xã Quý Quân, huyện Hà Quảng (EC = 431 $\mu\text{S/cm}$) (Bảng 2). Hàm lượng trung bình các cation và anion trong nước hồ Ba Bể đa số đều thấp hơn so với mẫu phân tích tại Cao Bằng. Điển hình, hàm lượng trung bình Ca^{2+} trong nước karst tại Cao Bằng là 66,33 mg/l, gấp 1,5 lần so với Bắc Kạn (44,22 mg/l). Hàm lượng ion HCO_3^- trong nước hồ Ba Bể cũng thấp hơn rất nhiều, trong khoảng từ 141 mg/l-149 mg/l trong khi giá trị này ở Cao Bằng là từ 73 mg/l-378 mg/l (Bảng 2).

Bảng 2. Bảng tổng hợp các chỉ tiêu hóa lý mẫu nước tại Bắc Kạn và Cao Bằng

Chỉ tiêu	Bắc Kạn			Cao Bằng		
	TB	Min	Max	TB	Min	Max
EC ($\mu\text{S/cm}$)	422,5	414	438	279,47	100	511
pH	7,79	7,67	7,90	7,73	7,02	8,19
Nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$)	25,77	25,5	26,0	24,32	23,2	28,3
K^+ (mg/l)	2,00	1,88	2,22	0,66	0,18	1,30
Na^+ (mg/l)	2,25	2,22	2,27	1,58	0,20	4,95
Ca^{2+} (mg/l)	44,22	41,08	46,09	66,33	17,83	124,25
Mg^{2+} (mg/l)	3,30	1,42	4,86	3,77	1,22	11,55
HCO_3^- (mg/l)	145,59	141,52	149,45	212,03	73,20	378,20
Cl^- (mg/l)	3,54	3,19	4,47	3,66	1,83	5,48
NO_3^- (mg/l)	2,15	1,74	2,9	3,18	1,03	6,15
SO_4^{2-} (mg/l)	6,96	6,66	7,17	5,18	2,86	11,23

Biểu đồ Piper [8] thường được sử dụng để xác định thành phần chính và tương thủy hóa của nước. Kết quả trên biểu đồ Piper (Hình 2) mô tả loại tương thủy hóa chính trong nước karst tại 24/25 điểm khảo sát là Ca^{2+} - HCO_3^- . Tại đó, hàm lượng ion thay đổi theo hướng $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$; $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$. Nước tại cả hai khu vực đều bị chi phối bởi HCO_3^- với nồng độ trung bình là 145,59 mg/l (Bắc Kạn), 192,56 mg/l (Cao Bằng), trong đó HCO_3^- lớn nhất tại điểm xuất lộ NK-21 thuộc thôn Quang Trung 1, xã Lương Thông, huyện Hòa Quang.



Hình 2. Biểu đồ Piper biểu diễn thành phần hóa học mẫu nước karst tại Bắc Kạn và Cao Bằng.

Hoạt động karst chủ yếu được hiểu là quá trình hòa tan các đá có khả năng hòa tan trong nước thiên nhiên, chủ yếu là đá carbonate, tạo nên các dạng địa hình karst khác nhau. Hoạt động karst gồm quá trình- hoạt động phá hủy

(chủ yếu là hòa tan), quá trình vận chuyển (sản phẩm hòa tan theo dòng nước tự nhiên) và quá trình tích tụ (tạo nên các thể địa chất mới). Nước trong tầng chứa nước karst thường có hàm lượng Ca, Mg và độ cứng cao [11].

Kết quả phân tích cho thấy, nước trong các thành tạo Carbonate có loại hình chủ yếu là loại nước Bicarbonate (Ca^{2+} - HCO_3^-). Trong nước có mặt ion HCO_3^- chiếm tỉ lệ rất cao (từ 68%-73%). Trong các cation thì ion Canxi chiếm vai trò chủ đạo, 25/25 mẫu nước có mặt ion Ca^{2+} với hàm lượng từ 61%-97%, ion Mg^{2+} nằm phần ít hơn, chỉ từ 1%-12% trong tổng các cation, duy chỉ có trong mẫu nước mặt ở Lũng Pán, xã Cải Viên, huyện Hà Quảng, tương thủy hóa của nước xác định là Ca - Mg - HCO_3 . Từ các đặc điểm thủy địa hóa cho thấy nước trong các thành tạo carbonate khu vực có nguồn gốc hòa tan - rửa lữa.

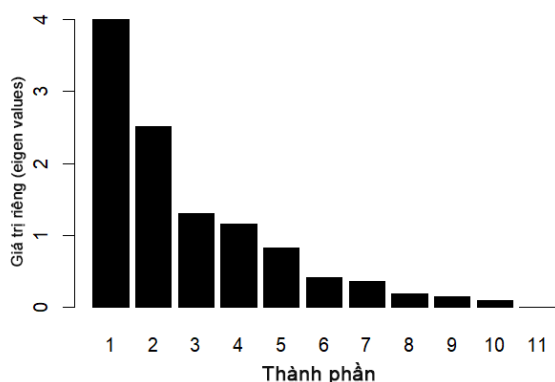
4.2. Kết quả phân tích thành phần chính PCA

Xác định thành phần chính

Kết quả phân tích 11 đặc tính lý hóa của nước karst được rút gọn thành 4 thành phần chính dựa vào giá trị riêng. Tổng cộng 81,53% phương sai được giải thích bởi 4 thành phần chính (Bảng 3). Thành phần đầu tiên có giá trị riêng cao nhất (eigen value = 3,99), đại diện cho 36,36% phương sai; 22,88% của tổng phương sai có thể được quy cho thành phần thứ hai (eigen value = 2,51). Thành phần thứ 3 và thành phần thứ tư có giá trị riêng lần lượt là 1,29 và 1,15 tương ứng với 11,80% và 10,49% trên tổng phương sai. Các giá trị riêng của 7 thành phần còn lại đều nhỏ hơn 1 và không được xác định là thành phần chính.

Bảng 3. Kết quả phân tích thành phần chính PCA cho 25 mẫu nước tại khu vực nghiên cứu

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	TP.7	TP.8	TP.9	TP.10	TP.11
Độ lệch chuẩn	1,99	1,59	1,14	1,07	0,91	0,65	0,60	0,44	0,38	0,30	0,001
% phương sai	36,36	22,88	11,80	10,49	7,47	3,78	3,31	1,76	1,30	0,84	0,01
Phương sai tích lũy	36,36	59,24	71,04	81,53	89,00	92,78	96,09	97,85	99,15	99,99	100

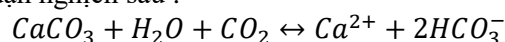


Hình 3. Đồ thị biểu diễn thông tin về các giá trị riêng (eigen values) của các thành phần.

Đồ thị biểu diễn thông tin về các giá trị riêng (eigen values) của tất cả các thành phần (Hình 3). Chỉ các giá trị riêng lớn hơn 1 mới được xem xét [12]. Bằng cách sử dụng bốn thành phần đầu tiên làm thành phần chính để biểu thị

tất cả các biến, có thể chứng minh rằng bốn thành phần đầu tiên cung cấp thông tin phù hợp hơn.

Ma trận tương quan giữa các biến với thành phần chính và đồ thị tương quan (biplots) giữa các biến với thành phần chính luôn được sử dụng trong phân tích PCA [13]. Kết quả phân tích tương quan giữa các biến với thành phần chính và đồ thị tương quan giữa các biến với thành phần chính của 25 mẫu nước tại Ba Bể và Hà Quảng được thể hiện tại Bảng 4 và Hình 4. PC1 đại diện cho 36,36% phương sai, tương ứng tương quan mạnh với các ion Ca^{2+} , HCO_3^- với giá trị $r = 0,905$ và $r = 0,897$. Cation K^+ và Na^+ cũng có tương quan mạnh với PC1 song mối quan hệ này là nghịch biến ($r = -0,729$, $r = -0,761$). PC1 được nhận định là biểu hiện của sự tương tác giữa nước- đá theo quan hệ hóa học thuận nghịch sau :

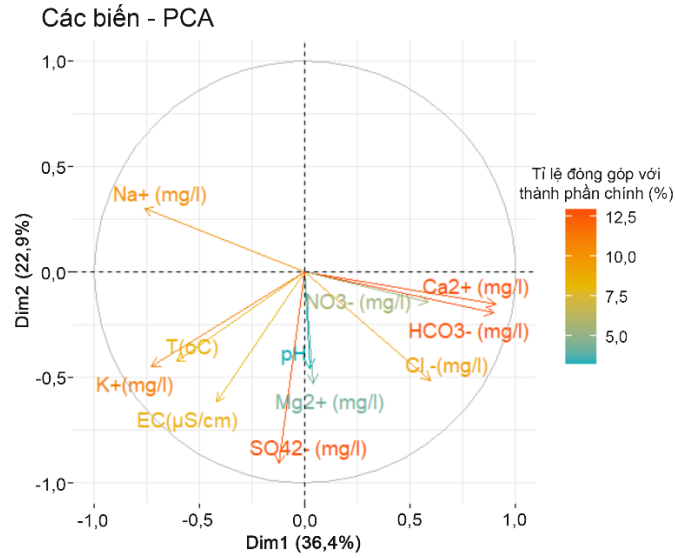


Bảng 4. Tương quan giữa các biến với các thành phần chính

Chỉ tiêu	Thành phần chính			
	PC1	PC2	PC3	PC4
pH	0,023	0,456	0,522	0,500
Nhiệt độ (°C)	-0,610	0,425	0,458	-0,309
EC ($\mu S/cm$)	-0,421	0,619	-0,425	-0,326
K^+	-0,729	0,450	0,264	-0,245
Na^+	-0,761	-0,300	-0,254	0,294
Ca^{2+}	0,905	0,153	-0,059	-0,334
Mg^{2+}	0,039	0,529	-0,551	0,523
HCO_3^-	0,897	0,195	-0,167	-0,261
Cl^-	0,597	0,513	0,164	0,084
NO_3^-	0,584	0,143	0,328	0,306
SO_4^{2-}	-0,127	0,909	-0,179	0,045

Đối với thành phần chính thứ 2 (đại diện cho 22,9% phương sai), kết quả cho thấy SO_4^{2-} có tương quan mạnh với giá trị $r = 0,909$. Các chỉ tiêu pH, Mg^{2+} , NO_3^- đều có tương quan ở mức trung bình ($0,3 \leq r < 0,6$) với hai thành phần PC3, PC4 (đại diện cho tổng cộng 22,7% phương sai) (Bảng 4). Theo [2] cho rằng nguồn gốc thành phần SO_4^{2-} , Cl^- trong nước mặt có thể là sản phẩm của tương tác của đá-nước như các loại đá

như thạch cao ($CaSO_4$), đá muối $NaCl$ hoặc có thể liên quan đến hoạt động của nhân sinh như khai thác khoáng sản, nông nghiệp,... PC3 và PC4 tương ứng chiếm phạm vi 11,80% và 10,49% trên tổng phương sai với ion Mg^{2+} luôn giữ ở mức tương quan trung bình ($r = 0,513$) thể hiện sự hòa tan yếu của các đá có Mg^{2+} trong thành phần hóa học.



Hình 4. Đồ thị biểu diễn tương quan giữa các biến (các kết quả phân tích lý-hóa tại Bắc Kạn và Cao Bằng) với PC1 (Dim 1) và PC2 (Dim 2).

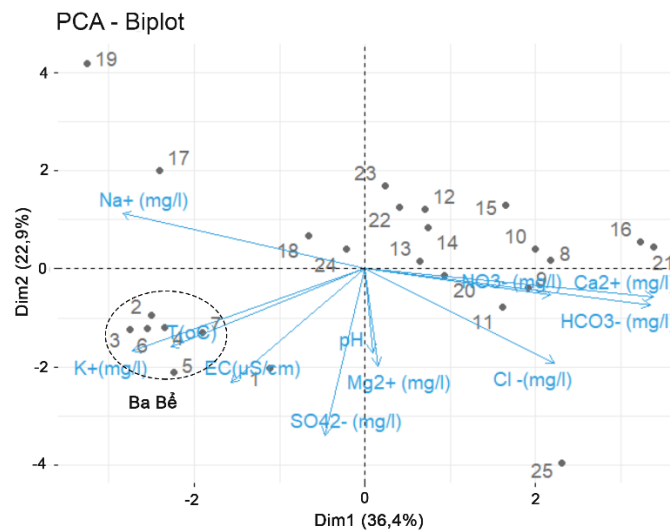
Bảng 5. Tương quan giữa kết quả phân tích mẫu với 04 thành phần chính

Khu vực	Điểm khảo sát	Thành phần chính			
		PC1	PC2	PC3	PC4
Cao Bằng	NK.01	0,11	0,37	0,30	0,02
	NK.02	0,67	0,09	0,08	0,10
Bắc Kạn	NK.03	0,74	0,14	0,01	0,04
	NK.04	0,67	0,17	0,02	0,07
	NK.05	0,42	0,37	0,01	0,01
	NK.06	0,72	0,16	0,03	0,05
	NK.07	0,49	0,23	0,04	0,08
Cao Bằng	NK.08	0,74	0,01	0,03	0,05
	NK.09	0,51	0,02	0,04	0,24
	NK.10	0,59	0,02	0,001	0,10
	NK.11	0,46	0,11	0,03	0,002
	NK.12	0,04	0,13	0,53	0,20
	NK.13	0,08	0,01	0,04	0,01
	NK.14	0,09	0,12	0,47	0,05
	NK.15	0,28	0,17	0,03	0,30
	NK.16	0,48	0,01	0,001	0,01
	NK.17	0,28	0,19	0,27	0,12
	NK.18	0,09	0,09	0,02	0,15
	NK.19	0,32	0,52	0,11	0,00
	NK.20	0,28	0,01	0,04	0,04
	NK.21	0,53	0,01	0,10	0,25
	NK.22	0,03	0,28	0,05	0,26
	NK.23	0,01	0,31	0,16	0,15
	NK.24	0,02	0,06	0,04	0,20
	NK.25	0,17	0,51	0,12	0,14

4.3. Tương quan kết quả phân tích lý hóa các mẫu với PCA

So sánh kết quả phân tích lý hóa mẫu nước karst tại Bắc Kạn và Cao Bằng với các thành phần chính có thể thấy rằng, chất lượng nước tại hồ Ba Bể (Bắc Kạn) ổn định hơn khi các mẫu tương đối tập trung trong chiều không gian mới (Hình 5). Điều này thể hiện thành phần hóa cơ bản của các mẫu nước tại hồ Ba Bể không có sự khác biệt. Kết quả phân tích tương quan giữa kết quả phân tích mẫu (là các thông số lý hóa của mẫu nước) với PC1 cho thấy NK.02, NK.03, NK.04, NK.05, NK.06 nằm trong khoảng $0,42 \leq r \leq 0,74$ (trung bình-mạnh) (Bảng 5) chứng tỏ rằng thành phần hóa học của nước karst tại các điểm khảo sát này là kết quả của quá trình hòa tan đá carbonate.

Khác với khu vực Bắc Kạn, các mẫu nước tại Cao Bằng cho thấy sự phân tán trong chiều không gian mới (Hình 5). Thành phần lý hóa của mẫu nước NK.09, NK.10, NK.11, NK.15, NK.16, NK.17, NK.19, NK.21 tương quan trung bình với PC1 ($0,3 \leq r \leq 0,53$) (Bảng 5). Các mẫu NK.09, NK.10, NK.11, NK.16, NK.21 có Ca^{2+} và HCO_3^- vượt trội hơn so với các mẫu nước còn lại (Hình 5) biểu hiện cho quá trình hòa tan đá carbonate ở đây diễn ra mạnh hơn. Bên cạnh đó các điểm khảo sát NK.19, NK.23, NK.25 có mối tương quan đồng biến ở mức trung bình với cả PC2 ($0,31 \leq r \leq 0,52$) trong đó NK.19 thể hiện sự vượt trội ở chỉ tiêu Na^+ so với các điểm còn lại và đối với NK.25 là Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , có thể do bị ảnh hưởng bởi hoạt động nhân sinh.



Hình 5. Đồ thị biểu diễn các mẫu tại Ba Bể (2-7), Cao Bằng (8-25) và thành phần lý hóa với PC1 (Dim 1) và PC2 (Dim 2).

Bên cạnh đó, ma trận tương quan Spearman [14] của 11 biến (chỉ tiêu lý hóa) cho 25 mẫu nước karst được sử dụng để đánh giá quan hệ giữa các biến với nhau (Bảng 6).

Bảng 6 đã chỉ ra mối tương quan từ mạnh ($0,6 \leq r \leq 1$), trung bình ($0,3 \leq r < 0,6$) đến tương quan yếu và rất yếu ($r < 0,3$) giữa các tham số đã chọn. Theo đó, Na^+ có mối tương quan mạnh (nghịch biến) với ion Ca^{2+} , HCO_3^- chứng tỏ sự tăng lên của hàm lượng ion Ca^{2+} , HCO_3^- sẽ làm

giảm sự xuất hiện của ion Na^+ trong các mẫu nước ($r = -0,79$; $r = -0,76$). Hàm lượng Ca^{2+} tương quan mạnh với HCO_3^- ($r = 0,96$) trong khi tương quan của cation này đối với anion NO_3^- hay SO_4^{2-} chỉ ở mức trung bình hoặc yếu ($r = 0,41$, $r = -0,12$). Hàm lượng Mg^{2+} và SO_4^{2-} có tương quan đồng biến với nhau ($r = 0,43$). Theo [2] nguồn SO_4^{2-} trong nước có thể từ nước mưa, phân bón, nước thải và sự hòa tan của các khoáng chất sunfua. Trong trường hợp này, khi hàm

lượng Mg^{2+} và SO_4^{2-} có tương quan trung bình, thành phần hóa các mẫu nước bị ảnh hưởng bởi các hoạt động nông nghiệp (cụ thể phân bón Magie Sunfat). Hơn nữa, hàm lượng HCO_3^- có tương quan trung bình-mạnh với SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- càng chỉ rõ hơn nước karst khu vực nghiên cứu chịu tác động của hoạt động nhân sinh. Hàm lượng K^+ và Cl^- ($r = -0,12$); Na^+ và SO_4^{2-} ($r = -0,07$) có mối tương quan kém với nhau, điều

này cho thấy các ion đó nguồn gốc khác nhau. Trong các thông số vật lý của nước, pH có mối tương quan yếu ($r < 0,3$) với hầu hết các biến (thành phần lý-hóa khác), trong khi nhiệt độ có tương quan trung bình với K^+ ($r = 0,49$), Ca^{2+} ($r = -0,4$), HCO_3^- ($r = -0,37$), SO_4^{2-} ($r = 0,47$) cho thấy rằng sự thay đổi nhiệt độ đều ít nhiều tác động tới thành phần hóa học nước karst.

Bảng 6. Tương quan Spearman của các chỉ tiêu lý hóa mẫu nước karst khu vực nghiên cứu

Thông số	pH	T ^o	EC	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
pH	1										
T (°C)	0,23	1									
EC	-0,27	0,1	1								
K ⁺	0,01	0,49	0,34	1							
Na ⁺	0,01	0,11	0,26	0,54	1						
Ca ²⁺	0,02	-0,40	-0,30	-0,63	-0,79	1					
Mg ²⁺	0,15	0,00	0,32	0,20	0,06	-0,01	1				
HCO ₃ ⁻	0,03	-0,37	-0,18	-0,55	-0,76	0,96	0,15	1			
Cl ⁻	0,22	-0,06	0,00	-0,12	-0,23	0,51	0,25	0,48	1		
NO ₃ ⁻	0,22	0,01	-0,21	-0,13	-0,35	0,41	-0,09	0,34	0,48	1	
SO ₄ ²⁻	0,25	0,47	0,61	0,43	0,07	-0,12	0,43	0,02	0,24	-0,04	1

5. Thảo luận

Trong nghiên cứu này, các chỉ tiêu hóa-lý của nước karst tại 25 điểm khảo sát thuộc Bắc Kạn và Cao Bằng đã được phân tích dựa trên phương pháp đồ thị Piper và phương pháp phân tích thành phần chính (PCA). Kết quả cho thấy mẫu nước karst thu được tại Bắc Kạn và Cao Bằng đều cho có tương thủy hóa chính là Ca^{2+} - HCO_3^- , tương đồng với kết quả từ các nghiên cứu trong nước [5, 15]. Phân tích PCA cho thấy tương quan mạnh giữa Ca^{2+} , HCO_3^- , Na^+ và K^+ với PC1 lần lượt là $r = 0,905$, $r = 0,897$, $r = -0,729$ và $r = -0,76$ có thể kết luận rằng áp dụng phương pháp phân tích thành phần chính PCA trong khu vực nghiên cứu là phù hợp. Kết quả nghiên cứu xác định được nước trong các thành tạo carbonate hệ tầng Mía Lé, Bắc Sơn, Sông Hiến, phức hệ Cao Bằng có nguồn gốc chính từ hòa tan - rửa lữa, thành phần và tính chất của đất đá (carbonate) có vai trò chủ yếu trong việc hình thành thành phần hóa học của nước karst. Áp

dụng tổ hợp phương pháp PCA và tương quan Pearson xác định sự vượt trội về thành phần lý-hóa của nước trong các công bố của [1, 12] đã thể hiện sự hiệu quả trong nghiên cứu này.

Ngoài ra, ảnh hưởng của Mg^{2+} , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} là đáng kể tại một số điểm khảo sát. Tương quan của các ion này với thành phần chính PC2 luôn ở mức mạnh - trung bình. Thể hiện sự ô nhiễm từ hoạt động nông nghiệp hay các hoạt động nhân sinh khác. Cụ thể tại các điểm khảo sát NK.19, NK.23, NK.25 thuộc hệ tầng Bắc Sơn và sông Hiến hàm lượng Mg^{2+} , SO_4^{2-} có tương quan từ trung bình đến mạnh với PC2 ($r = 0,529$; $r = 0,909$) thể hiện rõ ảnh hưởng của hoạt động dân sinh tới thành phần hóa học nước karst trong khu vực.

6. Kết luận

Biểu đồ Piper xác định tương thủy hóa nước karst tại 24/25 điểm khảo sát là Ca^{2+} - HCO_3^- . Tại đó, hàm lượng ion thay đổi theo hướng HCO_3^-

$> \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$; $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. Nước tại cả hai khu vực đều bị chi phối bởi HCO_3^- với nồng độ trung bình là 145,59 mg/l (Bắc Kạn), 192,56 mg/l (Cao Bằng).

Tập hợp 11 thông số lý hóa của 25 mẫu nước được rút gọn thành 4 thành phần chính dựa vào giá trị riêng. Tổng cộng 81,53% phương sai được thể hiện theo 4 thành phần chính. PC1 đại diện của sự tương tác giữa nước và đá khi Ca^{2+} , HCO_3^- có tương quan mạnh ($r = 0,905$ và $r = 0,897$); PC2 thể hiện cho các nguồn ô nhiễm liên quan đến các hoạt động của con người khi K^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} với tương quan trung bình-mạnh ($0,30 \leq r \leq 0,90$); PC3 và PC4 (tổng phương sai 22,29%) thể hiện cho quá trình hòa tan các khoáng chất giàu magie có tương quan trung bình ($r = 0,52$).

Tương quan giữa các chỉ tiêu phân tích của mẫu NK.02, NK.03, NK.04, NK.05, NK.06 với PC1 nằm trong khoảng $0,42 \leq r \leq 0,74$ (trung bình-mạnh) chỉ ra rằng thành phần hóa cơ bản của nước karst tại các điểm khảo sát thuộc hệ tầng Mía Lẻ chịu ảnh hưởng của tương tác giữa đá và nước. Điều này là tương tự với các điểm khảo sát NK.16, NK.17, NK.19, NK.21 (Hệ tầng Bắc Sơn, Sông Hiến, phức hệ Cao Bằng) khi kết quả phân tích PCA và tương quan cho thấy tương quan trung bình với PC1 ($0,3 \leq r \leq 0,53$). Bên cạnh đó, tại các điểm khảo sát NK.19, NK.23, NK.25 thuộc hệ tầng Bắc Sơn và Sông Hiến thành phần lý-hóa có tương quan đồng biến ở mức trung bình với PC2 ($0,31 \leq r \leq 0,52$) chứng tỏ nước ở đây đồng thời bị ảnh hưởng bởi hoạt động nhân sinh. Tuy nhiên, quá trình chính xảy ra tại hầu hết các điểm khảo sát vẫn là sự hòa tan - rửa lũa đá vôi và dolomite trong khu vực nghiên cứu. Các kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, việc áp dụng tổ hợp phương pháp phân tích thành phần chính PCA và phân tích tương quan là công cụ hữu hiệu trong xác định đặc điểm nước karst tại khu vực.

Lời cảm ơn

Bài báo được hoàn thành dựa trên nguồn số liệu của Trung tâm Nghiên cứu Karst và Hang động - Viện Địa chất và sự hỗ trợ hoạt động KHCN cấp cơ sở cho cán bộ nghiên cứu trẻ của

Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Trân trọng cảm ơn Đề tài: “Nghiên cứu xác lập bộ tiêu chí lựa chọn và quy trình điều tra các khu vực có khả năng áp dụng công nghệ bơm PAT cho vùng núi cao khan hiếm nước” – mã số ĐTĐL.2021.05 đã hỗ trợ công tác đo đạc, lấy mẫu ngoài thực địa.

Tài liệu tham khảo

- [1] R. P. Castro, J. P. Ávila, M. Ye, A. C. Sansores, Groundwater Quality: Analysis of its Temporal and Spatial Variability in A Karst Aquifer, *Groundwater*, Vol. 56, No. 1, 2018, pp. 62-72, <https://doi.org/10.1111/gwat.12546>.
- [2] T. D. Anh, N. Goeppert, N. Goldscheider, Use of Major Ion Chemistry and Trace and Rare Earth Elements to Characterize Hydraulic Relations, Mixing Processes and Water-Rock Interaction in the Dong Van Karst Aquifer System, Northern Vietnam, *Hydrogeol. J.*, Vol. 31, No. 7, 2023, pp. 1735-1753, <https://doi.org/10.1007/S10040-023-02689-4/tables/4>.
- [3] A. Alam, A. Singh, Groundwater Quality Assessment Using SPSS Based on Multivariate Statistics and Water Quality Index of Gaya, Bihar (India), *Environ. Monit. Assess.*, Vol. 195, No. 6, 2023, pp. 1-17, <https://doi.org/10.1007/S10661-023-11294-7/metrics>.
- [4] D. A. Costa, J. P. S. Azevedo, M. A. Santos, R. S. Assumpção, Water Quality Assessment Based on Multivariate Statistics and Water Quality Index of a Strategic River in the Brazilian Atlantic Forest, *Sci. Reports*, Vol. 10, No. 1, 2020, pp. 1-13, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78563-0>.
- [5] N. V. Lam, H. V. Hoan, H. C. H. Long, Formation and Distribution of Karstic Water in Northeastern Vietnam, *Journal of Mining and Earth Sciences*, Vol. 50, 2015, pp. 48-58 (in Vietnamese).
- [6] The Vietnam Geological Department, Geological and Mineral Map of Vietnam, Scale 1:200.000, Ha Long (Hon Gai) Page (F-48-XXX), 1999 (in Vietnamese).
- [7] V. Q. Lan, Geology and Mineral Map Group of Ha Quang, Project: Establishment of Geological Maps and Mineral Surveys at Scale 1:50.000 in Cao Bang and Bac Kan, Group Ha Quang, North Vietnam Geological Mapping Division, 2011 (in Vietnamese).
- [8] A. M. Piper, A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses, *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 25, No. 6, 1944, pp. 914-928, <https://doi.org/10.1029/TR025I006P00914>.

- [9] N. S. Rao, Spatial Control of Groundwater Contamination, Using Principal Component Analysis, *J. Earth Syst. Sci.*, Vol. 123, No. 4, 2014, pp. 715-728, <https://doi.org/10.1007/S12040-014-0430-3>.
- [10] T. Chen, H. Zhang, C. Sun, H. Li, Y. Gao, Multivariate Statistical Approaches to Identify The Major Factors Governing Groundwater Quality, *Appl. Water Sci.*, Vol. 8, 2018, pp. 215, <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0837-0>.
- [11] T. D. Thanh, M. T. Nhuan, T. Nghi, Chapter: Karst and Natural Heritage, T. H. Phuong, V. V. Phai, D. V. Bao, V. T. M. Nguyet, *Geological Encyclopedia*, VNU Publisher, Hanoi, 2014, pp. 888-898.
- [12] A. Fentahun, A. Mechal, S. Karuppanan, Hydrochemistry and Quality Appraisal of Groundwater in Birr River Catchment, Central Blue Nile River Basin, Using Multivariate Techniques and Water Quality Indices, *Environ. Monit. Assess.*, Vol. 195, No. 6, 2023, pp. 1-31, <https://doi.org/10.1007/S10661-023-11198-6>.
- [13] P. Schober, C. Boer, L. A. Schwarte, Correlation Coefficients, *Anesth. Analg.*, Vol. 126, No. 5, 2018, pp. 1763-1768, <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000002864>.
- [14] B. N. Bhat, S. Parveen, T. Hassan, Seasonal Assessment of Physicochemical Parameters and Evaluation of Water Quality of River Yamuna, India, *Adv. Environ. Technol.*, Vol. 4, No. 1, 2018, pp. 41-49, <https://doi.org/10.1213/ane.000000000000286410.22104/AET.2018.2415.1121>.
- [15] D. Tuyet, Research Result of Karst Geology in the Northwest Region Report, the Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources, Hanoi, 1998 (in Vietnamese).