

Phân tích mạng tương quan các nguyên tố đất hiếm, Urani, Thori trong quặng đất hiếm gốc và quặng đất hiếm phong hóa khu vực Thèn Thầu - Tả Chu Phùng, tỉnh Lai Châu

Trịnh Đức Thiện¹, Trịnh Đình Huân¹, Nguyễn Văn Lâm²,
Hoàng Văn Dũng¹, Ngô Xuân Đắc^{3*}

¹Liên đoàn Địa chất Xạ-Hiếm, Xuân Phương, Hà Nội, Việt Nam;

²Tổng hội Địa chất Việt Nam. 6 Phạm Ngũ Lão, Hoàn Kiếm, Hà Nội

³Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản. 67 Chiến Thắng, Văn Quán, Hà Đông, Hà Nội

*Tác giả liên hệ: nxdac@mae.gov.vn

Từ khóa: Mạng Tương Quan, Đất Hiếm, Thèn Thầu, Tả Chu Phùng.

Tóm tắt: Nghiên cứu đã áp dụng phương pháp phân tích mạng tương quan nhằm làm rõ mối quan hệ giữa các nguyên tố đất hiếm, urani (U) và thori (Th) trong các mẫu quặng đất hiếm tại khu vực Thèn Thầu – Tả Chu Phùng (Lai Châu). Tổng cộng 296 mẫu quặng gốc và 147 mẫu quặng phong hóa đã được phân tích hàm lượng bằng phương pháp ICP-MS. Kết quả cho thấy: trong quặng gốc có 119 cặp nguyên tố thể hiện mối tương quan, trong đó 114 cặp tương quan thuận và 5 cặp tương quan nghịch; mật độ mạng đạt 0,78, phản ánh cấu trúc liên kết chặt chẽ giữa các nguyên tố. Đối với quặng phong hóa có 109 cặp tương quan giữa các nguyên tố (gồm 101 thuận, 08 nghịch), mật độ mạng giảm còn 0,71; điều đó cho thấy cấu trúc mạng bị suy giảm dưới tác động của quá trình phong hóa.

Trong quặng gốc, các nguyên tố Th, Dy, Er, Y, Gd, Nd giữ vai trò trung tâm, thể hiện nguồn gốc nội sinh; Th là nút chủ đạo, là nguyên tố đóng vai trò chỉ thị địa hóa trong khoanh vùng dự báo triển vọng quặng đất hiếm gốc theo kết quả tìm kiếm địa hóa nguyên sinh. Trong quặng phong hóa, cấu trúc mạng thay đổi rõ rệt, các nguyên tố Sm, Eu, Gd và Sc trở nên nổi bật, với Sc thay thế vai trò trung tâm của Th, các nguyên tố này có vai trò chỉ thị trong tìm kiếm quặng REE phân bố trong vỏ phong hóa (quặng thứ sinh). U có độ trung tâm rất thấp, cho thấy xu hướng phân tán mạnh của các nguyên tố này trong môi trường oxy hóa.

1. Giới thiệu chung

1.1. Đặt vấn đề

Phân tích tương quan giữa các nguyên tố đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu địa chất, đặc biệt là trong lĩnh vực tìm kiếm khoáng sản. Các kết quả nghiên cứu trong bài báo này sẽ góp phần cung cấp thêm thông tin cho các nhà địa chất trong việc đánh giá đặc

điểm phân bố, các quá trình thành tạo khoáng sản, làfd thông tin quan trọng trong xây dựng mô hình dự báo quặng hóa. Với sự phát triển của khoa học máy tính và thống kê, phân tích tương quan ngày càng được nghiên cứu chuyên sâu hơn nhờ vào phương pháp phân tích mạng tương quan (correlation network-CN). Trong hai thập kỷ qua, các công cụ từ

khoa học mạng và lý thuyết đồ thị đã được ứng dụng thành công vào phân tích dữ liệu địa chất. Một ma trận tương quan có thể được biểu diễn dưới dạng mạng tương quan, trong đó: Các nút đại diện cho các nguyên tố và các cạnh thể hiện mối liên kết giữa chúng, được xác định dựa trên mức độ tương quan của từng cặp nguyên tố. Phân tích mạng tương quan cho phép trích xuất thông tin hữu ích từ dữ liệu, chẳng hạn như xác định dạng tương tác giữa các nguyên tố, tức là cấu trúc tổ chức và mức độ liên kết giữa các nguyên tố trong mạng, hoặc đánh giá vai trò và tầm quan trọng của từng nguyên tố trong mạng tương đó. Ngoài ra, phân tích tương quan có ý nghĩa rất quan trọng trong địa chất và tìm kiếm khoáng sản như:

+ Xác định tổ hợp nguyên tố đặc trưng: xác định được tổ hợp các nguyên tố có xu hướng đi cùng trong thành tạo khoáng sản nào đó, là cơ sở để lựa chọn các nguyên tố có giá trị trong tìm kiếm khoáng sản (dấu hiệu địa hóa) bằng phương pháp địa hóa, dự báo khoáng sản đi cùng khoáng sản chính; đồng thời cũng là cơ sở để khoanh định các khu vực có tiềm năng khoáng sản theo kết quả điều tra, đánh giá khoáng sản bằng phương pháp địa hóa. Ví dụ: Th, U thường liên quan các nguyên tố đất hiếm (REEs) trong quặng carbonatit hoặc pegmatit; do đó đó có thể sử dụng phương pháp địa vật lý xạ để tìm kiếm quặng đất hiếm.

+ Hiểu về quá trình tạo quặng, nhận diện các quá trình địa chất liên quan quá trình tạo quặng như: nhiệt dịch, phong hóa, biến chất hay kết tinh từ magma, qua đó giải thích cơ chế tập trung nguyên tố trong khoáng sản. Ví dụ: Nếu các nguyên tố đất hiếm có tương quan chặt chẽ với Th, U trong quặng gốc, nhưng mối tương quan này giảm dần trong quặng phong hóa, có thể phản ánh sự tái phân bố nguyên tố trong quá trình phong hóa (Nash, 2010; Huang et al., 2020).

Phân tích tương quan giữa các nguyên tố đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu địa chất và thăm dò khoáng sản, đặc biệt trong bối cảnh xử lý dữ liệu đa biến, với số lượng lớn. Với sự phát triển của khoa học máy tính và các phương pháp thống kê hiện đại, phân tích

mạng tương quan (correlation network analysis) ngày càng được ứng dụng rộng rãi để khai thác hiệu quả thông tin từ các tập dữ liệu địa hóa học.

+ Dự báo khu vực có tiềm năng khoáng sản: Phân tích tương quan nguyên tố giúp xây dựng các mô hình tổ hợp nguyên tố đặc trưng cho từng kiểu khoáng hóa. Khi các tổ hợp này được phát hiện ở các khu vực chưa được khảo sát chi tiết, chúng có thể đóng vai trò như tín hiệu gián tiếp (proxy) để dự báo khả năng tồn tại khoáng sản. Cách tiếp cận này cho phép mở rộng phạm vi thăm dò, hỗ trợ định hướng công tác khảo sát thực địa một cách có cơ sở khoa học hơn (Bonham-Carter, 1994; Wang et al., 2020).

+ Tối ưu hóa chương trình thăm dò và phân tích mẫu: Dựa trên các mối tương quan chặt chẽ giữa một số nguyên tố, có thể lựa chọn các nguyên tố chỉ thị (pathfinder elements) đại diện cho nhóm nguyên tố cùng nguồn gốc hoặc cùng chịu ảnh hưởng của một quá trình địa chất nhất định. Điều này giúp rút gọn số lượng nguyên tố cần phân tích trong quá trình thăm dò, từ đó tiết kiệm chi phí và nâng cao hiệu quả khoanh vùng triển vọng. Ví dụ, trong các hệ đất hiếm, các nguyên tố như Ce, La hoặc Y thường được sử dụng như chỉ thị cho nhóm REE nhẹ (Hou et al., 2005; Chakhmouradian & Wall, 2012).

+ Đánh giá mức độ biến đổi thứ sinh và chất lượng quặng: Khi khoáng vật chứa quặng chịu ảnh hưởng của các quá trình phong hóa, nhiệt dịch hoặc biến chất, sự tái phân bố nguyên tố có thể làm thay đổi các mối quan hệ tương quan ban đầu giữa chúng. Việc so sánh mạng tương quan giữa các nhóm mẫu khác nhau (ví dụ: đá gốc và quặng phong hóa) cho phép đánh giá mức độ biến đổi, hướng tái phân bố nguyên tố và những thay đổi về chất lượng quặng. Một ví dụ điển hình là sự giảm tương quan giữa các nguyên tố đất hiếm với Th và U trong các hệ phong hóa laterit, phản ánh quá trình rửa trôi Th-U trong điều kiện phong hóa đới nóng ẩm (Nash, 2010; Sanematsu et al., 2013).

Trong bài báo này, tác giả áp dụng phương pháp phân tích mạng tương quan (CN) để đánh giá mức độ tương quan giữa các nguyên

tổ đất hiếm, urani và thori trong quặng đất hiếm gốc và quặng phong hóa. Mục tiêu nghiên cứu là so sánh mối quan hệ tương quan giữa các nguyên tố đất hiếm ở hai loại quặng tự nhiên quặng khác nhau. Trục quan hóa sự thay đổi của từng cặp nguyên tố, xác định các nguyên tố đóng vai trò quan trọng trong tìm kiếm, đánh giá quặng đất hiếm trên cơ sở phân tích mạng tương quan trong tại khu vực Thèn Thầu - Tả Chu Phùng, Lai Châu. Kết quả nghiên cứu sẽ góp phần làm rõ hơn về đặc điểm quặng hóa của khu vực, hỗ trợ công tác thăm dò và định hướng khai thác khoáng sản hiệu quả hơn.

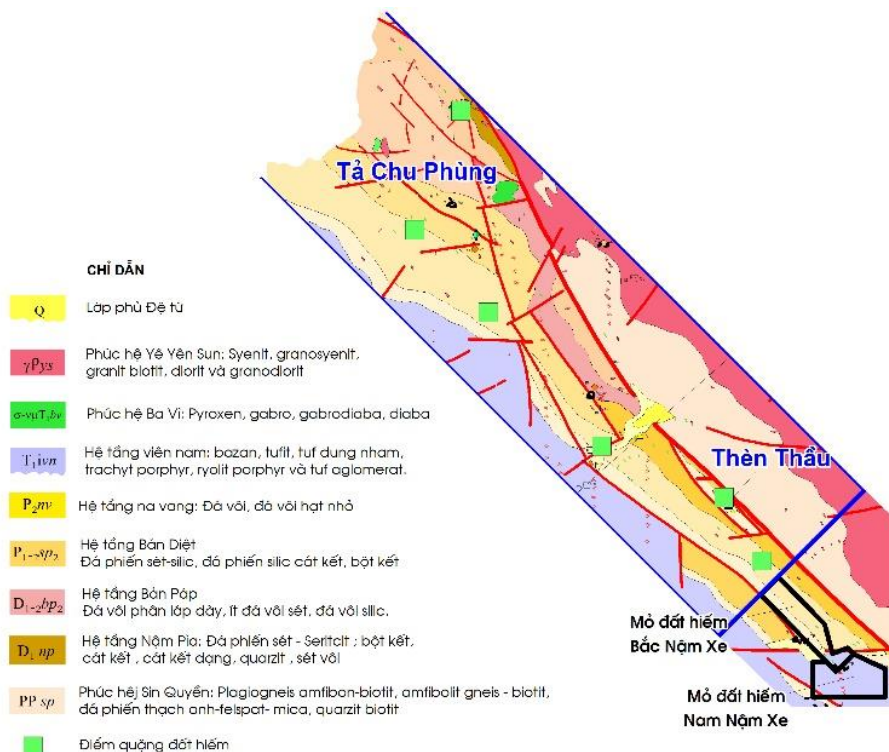
1.2. Đặc điểm địa chất

Địa tầng: Khu vực nghiên cứu thuộc đới cấu trúc Sông Đà - Tú Lệ [6, 7], với các thành tạo địa chất chính bao gồm hệ tầng Viên Nam ($T_1 vn$), hệ tầng Na Vàng ($P_2 nv$), hệ tầng Bản Diệt ($P_1 bd$), hệ tầng Bản Páp

($D_{1-2 bp}$) và phức hệ Sinh Quyền (PP sq) [5]. Các thành tạo này chủ yếu tồn tại dưới dạng dải hẹp, kéo dài theo phương Tây Bắc - Đông Nam và được khống chế bởi hệ thống đứt gãy cùng phương.

Magma: Trong khu vực nghiên cứu, các thành tạo magma chủ yếu bao gồm đá pegmatit và aplit thuộc pha muộn của phức hệ Yên Yên Sun (G/Eys). Ngoài ra, còn có sự xuất hiện của nhiều loại đá mạch xuyên cắt trong hệ tầng Na Vàng và Si Phay, phổ biến nhất là các đá minet hạt nhỏ và minet hạt lớn.

Kiến tạo: Khu vực nghiên cứu trải qua lịch sử phát triển địa chất lâu dài, qua nhiều giai đoạn kiến tạo phức tạp. Các thành tạo địa chất đóng vai trò chủ đạo trong cấu trúc khu vực đã bị chia cắt, biến dạng mạnh mẽ dưới tác động của nhiều hệ thống đứt gãy, tạo nên các khối cấu trúc phức tạp. Hệ thống đứt gãy chính có phương Tây Bắc - Đông Nam.



Hình 1. Sơ đồ địa chất khu vực Thèn Thầu-Tả Chu Phùng, Lai Châu tỷ lệ 1: 50.000 (tham khảo từ nhóm tờ Phong Thổ)

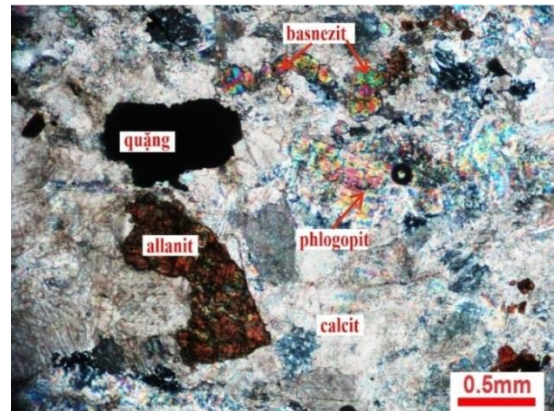
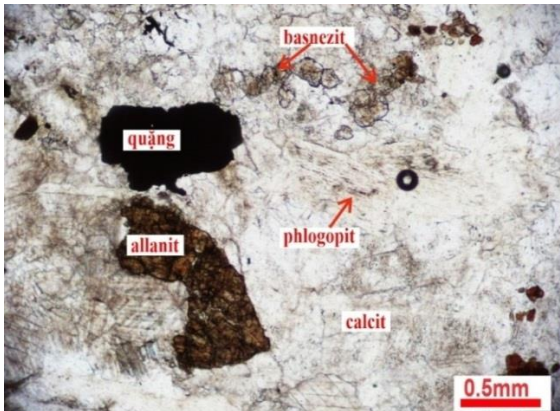
Đặc điểm khoáng sản đất hiếm: Quặng gốc chủ yếu chứa các khoáng vật bastnäsite, allanite, parisite, thorite và xenotime, phân bố trong các đá biến chất trao đổi sáng màu. Các

loại đá chứa quặng bao gồm đá biến chất trao đổi calcit - flogopit - thạch anh có quặng đất hiếm, barit, cùng các thấu kính đá biến chất trao đổi sẫm màu (biotit - felspat - calcit; biotit -

phlogopit - calcit; pyroxen - amphibol - calcit - phlogopit; felspat - calcit - thạch anh - phlogopit - pyroxen, v.v.) thuộc hệ tầng Na Vang.

Quặng phong hóa được hình thành từ quá trình phong hóa quặng gốc [1]. Dưới tác động của quá trình phong hóa tại chỗ, quặng gốc đất hiếm dần bị phân hủy, dẫn đến sự giải phóng các ion REE (rare earth elements) và tích tụ thứ sinh trong lớp vỏ phong hóa. Các khoáng vật đất hiếm nguyên sinh phổ biến như bastnäsite, allanite và parisite bị phá vỡ cấu trúc, tạo điều kiện cho các ion REE được hấp phụ hoặc kết tủa dưới nhiều dạng khoáng vật thứ sinh. Trong môi trường phong hóa đặc trưng bởi pH trung tính đến axit nhẹ và giàu Fe-Mn, các dạng tồn tại chính của đất hiếm thứ sinh gồm: (1) dạng hấp phụ ion – nơi các ion REE³⁺ gắn kết yếu trên bề mặt khoáng sét

như kaolinite, halloysite hoặc montmorillonite thông qua trao đổi ion; (2) dạng hydroxyt và oxit-hydroxyt – như cerit (CeO₂), Nd(OH)₃ và Y(OH)₃, hình thành khi dung dịch phong hóa bão hòa hoặc hơi kiềm; và (3) dạng carbonate, phosphate hoặc sulfate thứ sinh – gồm các khoáng như kozoite, synchysite và rhabdophane [(Ce,La)PO₄·H₂O], kết tinh từ dung dịch giàu REE trong những điều kiện đặc biệt. Quặng phong hóa thường xuất hiện trong lớp vỏ phong hóa phủ trên đá gốc, có màu vàng nâu đến nâu đỏ, cấu trúc rời rạc, dễ khai thác, và được đánh giá cao về mặt kinh tế do thuận lợi trong tuyển tách và chế biến so với quặng gốc. Sự hình thành các khoáng vật thứ sinh này thể hiện rõ quá trình biến đổi khoáng vật học phức tạp trong hệ phong hóa đất hiếm.



Ảnh 1. Quặng đất hiếm gốc basnezit dưới kính hiển vi phân cực Axiokop 40 - 02 nicon. Người chụp Nguyễn Thị Hồng Hạnh-Trịnh Đức Thiện [1]. Ghi chú: quặng: manhetit

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Cơ sở phương pháp

Phân tích mạng tương quan giữa các nguyên tố là công cụ hữu hiệu trong nghiên cứu địa chất, đặc biệt trong tìm kiếm và đánh giá khoáng sản đất hiếm. Phương pháp này giúp nhận diện mối quan hệ địa hóa giữa các nguyên tố, làm sáng tỏ quá trình hình thành – biến đổi quặng và xác định các nguyên tố chỉ thị khoáng sản.

Trong quặng đất hiếm nguyên sinh, các nguyên tố REE (La-Lu, Y) thường liên kết chặt với Th và U – phản ánh nguồn gốc nội sinh và khoáng hóa granit. Khi phong hóa, cấu trúc mạng bị biến đổi, các nguyên tố như LREE có xu hướng bị rửa trôi, trong khi

HREE, Y và Th thường tích tụ lại. Quá trình này làm thay đổi tương quan giữa các nguyên tố và cho phép đánh giá mức độ biến đổi khoáng vật [...].

Phân tích mạng tương quan không chỉ hỗ trợ xây dựng mô hình dự báo phân bố quặng dựa trên tổ hợp nguyên tố, mà còn có ứng dụng trong khai thác và chế biến khoáng sản. Trong khai thác, hiểu được cấu trúc liên kết giúp lựa chọn phương pháp phù hợp với loại quặng (gốc hay phong hóa). Trong chế biến, phân tích mạng giúp tối ưu hóa quy trình tuyển và xử lý, đặc biệt trong kiểm soát phóng xạ (Th và U).

Trong nghiên cứu này, số liệu đầu vào bao gồm kết quả phân tích hàm lượng các nguyên

tổ đất hiếm (REE) và một số nguyên tố phóng xạ (Th, U) trong 296 mẫu quặng gốc và 147 mẫu quặng phong hóa. Các mẫu được phân tích bằng phương pháp ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), cho phép xác định chính xác hàm lượng vết của 18 nguyên tố, bao gồm: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc, Y, Th và U.

Các số liệu sau phân tích được tổng hợp và xử lý thống kê sơ bộ, bao gồm: giá trị trung bình (Mean), độ lệch chuẩn (Standard Deviation), giá trị nhỏ nhất – lớn nhất (Min–Max), trung vị (Median), hệ số lệch (Skewness) và độ nhọn (Kurtosis). Các thống kê này giúp đánh giá phân bố của dữ liệu và phát hiện những sai lệch hoặc bất thường trong tập hợp mẫu.

Để xác định mối quan hệ tương quan giữa các thông số địa chất, người ta thường sử dụng hệ số tương quan cặp (Pearson's product-moment correlation coefficient). Đây là một chỉ số thống kê đo lường mức độ và chiều hướng của mối quan hệ giữa hai biến liên tục x và y. Về mặt toán học, hệ số tương quan cặp - Pearson (r) được xác định theo công thức:

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Trong đó: x_i, y_i, \dots . Hệ số tương quan r dao động trong khoảng từ -1 đến +1. Khi $r > 0$ hai biến có mối tương quan thuận; ngược lại, khi $r < 0$, hai biến có mối tương quan nghịch. Giá trị r càng tiến gần đến ± 1 , mức độ tương quan thuận hoặc nghịch giữa hai biến càng chặt chẽ.

Ý nghĩa thống kê của hệ số tương quan r được kiểm định thông qua suy diễn thống kê.

Giá trị thống kê kiểm định (t-statistic) được tính theo công thức:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2)$$

Trong đó r: là hệ số tương quan Pearson
n là số lượng quan sát (cỡ mẫu)

t: tuân theo phân phối Student với bậc tự do $n - 2$ (degrees of freedom).

Giá trị t này được so sánh với giá trị tới hạn t_{tb} từ bảng phân phối Student.

Nếu $|t| < t_{tb}$: hai biến (nguyên tố) không có mối tương quan; ngược lại, nếu $|t| \geq t_{tb}$ quan giữa hai biến có quan hệ tương quan.

Quá trình phân tích mạng tương quan từ kết quả phân tích tương quan đa biến được thực hiện theo bốn bước sau:

+ Biên tập và chuẩn bị dữ liệu đầu vào cho từng nhóm nghiên cứu.

+ Tính toán ma trận tương quan giữa các biến.

+ Xây dựng mạng lưới tương quan từ ma trận tương quan, dựa trên giá trị tương quan của từng cặp biến.

+ Phân tích các đặc điểm của mạng tương quan được tạo ra [2].

Phân tích mạng lưới bao gồm việc tính toán các thông số quan trọng như: số lượng cặp tương quan, mật độ mạng lưới, giá trị trung tâm và xác định các nhân tố có vai trò quan trọng trong mạng. Từ đó, đặc điểm tương quan của các nhóm nghiên cứu được làm rõ, bao gồm nhóm nguyên tố trong quặng gốc (nhóm quặng gốc) và nhóm nguyên tố trong quặng phong hóa (nhóm quặng phong hóa).

2.2. Kết quả và thảo luận

2.2.1. Đặc điểm phân bố thống kê các nguyên tố theo kết quả phân tích ICP – MS

a. Tập mẫu quặng gốc

Số liệu đầu vào là kết quả phân tích ICP-MS của 18 nguyên tố (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc, Y, U, Th) trong 296 mẫu. Kết quả xử lý thống kê được thể hiện ở bảng 1.

b. Tập mẫu quặng phong hóa

Tập mẫu bao gồm kết quả phân tích hàm lượng (ppm) của 147 mẫu, gồm 16 nguyên tố đất hiếm (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) và 2 nguyên tố phóng xạ (Th, U). Các thống kê đặc trưng thống kê được tính toán và tổng hợp trong Bảng 2.

Bảng 1. Các thông số thống kê tập mẫu quặng gốc

TT	Biến số	Số lượng (N)	Trung bình (Mean)	Độ lệch chuẩn (SD)	Giá trị nhỏ nhất (Min)	Giá trị lớn nhất (Max)	Trung vị (Median)	Độ lệch (Skew)	Độ nhọn (Kurt)
1	La	296	9.806,18	4.698,19	3.137,49	25.769,51	8.528,58	1,21	1,19
2	Ce	296	17.142,33	6.925,83	4.808,57	39.828,42	15.871,65	0,86	0,13
3	Pr	296	1.712,72	759,79	565,48	4.529,37	1.544,55	1,22	1,21
4	Nd	296	5.512,08	2.583,37	1.729,84	17.975,77	4.831,45	1,49	2,58
5	Sm	296	475,99	328,23	24,38	2.367,23	418,28	1,60	4,27
6	Eu	296	88,41	65,34	4,33	443,75	76,29	1,68	4,28
7	Gd	296	336,66	238,87	23,31	1.280,85	283,03	1,52	2,55
8	Tb	296	18,07	13,29	1,31	105,15	14,84	2,44	8,76
9	Dy	296	45,06	30,99	1,98	292,61	39,37	2,91	18,04
10	Ho	296	5,90	3,92	0,25	40,74	5,27	2,77	19,60
11	Er	296	16,68	9,76	1,35	97,70	15,72	2,44	15,24
12	Tm	296	1,40	0,98	0,05	10,36	1,22	2,96	21,74
13	Yb	296	8,07	5,51	0,37	52,55	7,06	2,36	13,58
14	Lu	296	1,06	0,73	0,05	7,18	0,93	2,52	15,54
15	Sc	296	11,60	8,29	1,22	79,74	9,73	2,61	14,89
16	Y	296	223,56	132,18	9,88	1.125,92	208,51	1,74	7,27
17	Th	296	393,38	325,29	8,26	3.012,35	306,24	2,95	15,71
18	U	296	58,56	87,89	1,06	1.050,47	32,71	6,56	62,14

Bảng 2. Các thông số thống kê tập mẫu quặng phong hóa

TT	Biến số	Số lượng (N)	Trung bình (Mean)	Độ lệch chuẩn (SD)	Giá trị nhỏ nhất (Min)	Giá trị lớn nhất (Max)	Trung vị (Median)	Độ lệch (Skew)	Độ nhọn (Kurt)
1	La	147,00	10.359,60	6.256,71	3.137,49	39.523,06	8.554,72	2,27	5,95
2	Ce	147,00	17.278,87	8.953,83	4.808,57	65.803,69	15.769,54	2,42	7,92
3	Pr	147,00	1.622,56	881,89	565,48	6.383,23	1.414,02	2,57	8,63
4	Nd	147,00	5.038,96	2.672,32	1.729,84	20.142,93	4.472,11	2,65	9,52
5	Sm	147,00	471,00	276,91	59,45	2.358,81	423,91	2,92	14,71
6	Eu	147,00	91,43	60,03	12,63	570,31	84,01	3,82	25,99
7	Gd	147,00	337,44	223,16	43,58	1.964,77	286,62	3,72	20,61
8	Tb	147,00	19,71	15,70	3,43	167,73	17,75	5,97	51,57
9	Dy	147,00	54,93	45,38	9,83	485,80	48,39	6,32	54,68
10	Ho	147,00	6,97	4,05	1,37	40,74	6,54	4,00	30,77
11	Er	147,00	18,41	9,79	3,84	97,70	17,85	3,63	27,13
12	Tm	147,00	1,66	1,00	0,32	10,36	1,61	4,48	36,10
13	Yb	147,00	9,57	5,41	1,94	52,55	9,28	3,52	25,14
14	Lu	147,00	1,24	0,71	0,24	7,18	1,19	4,01	30,69
15	Sc	147,00	14,98	8,62	1,53	79,74	13,26	3,21	19,85
16	Y	147,00	227,20	173,61	51,31	1.853,84	211,28	6,54	54,49
17	Th	147,00	365,24	462,03	32,92	5.502,72	285,07	9,39	101,10
18	U	147,00	79,93	97,67	4,67	1.050,47	61,28	6,93	63,98

2.2.2. Xây dựng bảng ma trận tương quan

Để xây dựng ma trận tương quan các nguyên tố trên cơ sở kết quả phân tích các mẫu quặng gốc và quặng phong hóa như được

thể hiện ở bảng 3, hình 2 (quặng gốc), bảng 4, hình 3 (quặng phong hóa). Kết quả phân tích ma trận tương quan cô điển:

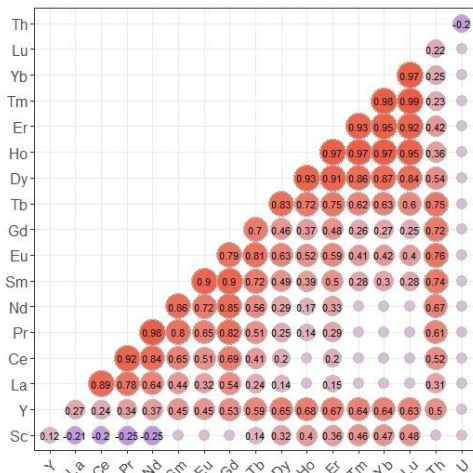
Bảng 3. Ma trận tương quan các nguyên tố trong quặng đất hiếm gốc

	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	U
Sc	1.000	0.122	-0.211	-0.204	-0.251	-0.248	-0.059	0.014	-0.076	0.145	0.319	0.395	0.360	0.458	0.469	0.476	-0.009	-0.058
Y	0.122	1.000	0.269	0.245	0.342	0.366	0.450	0.451	0.529	0.591	0.649	0.677	0.674	0.643	0.642	0.628	0.505	0.020
La	-0.211	0.269	1.000	0.887	0.776	0.638	0.442	0.318	0.544	0.236	0.145	0.089	0.149	0.003	-0.005	-0.016	0.312	0.042
Ce	-0.204	0.245	0.887	1.000	0.915	0.835	0.647	0.508	0.693	0.409	0.198	0.093	0.195	-0.013	-0.016	-0.027	0.521	-0.047
Pr	-0.251	0.342	0.776	0.915	1.000	0.978	0.803	0.649	0.819	0.507	0.253	0.145	0.289	0.030	0.038	0.016	0.609	-0.081
Nd	-0.248	0.366	0.638	0.835	0.978	1.000	0.863	0.722	0.847	0.565	0.286	0.169	0.326	0.053	0.066	0.043	0.671	-0.112
Sm	-0.059	0.450	0.442	0.647	0.803	0.863	1.000	0.901	0.898	0.717	0.494	0.392	0.501	0.285	0.300	0.279	0.744	-0.043
Eu	0.014	0.451	0.318	0.508	0.649	0.722	0.901	1.000	0.786	0.814	0.626	0.522	0.586	0.411	0.425	0.403	0.764	-0.046
Gd	-0.076	0.529	0.544	0.693	0.819	0.847	0.898	0.786	1.000	0.698	0.464	0.366	0.478	0.262	0.274	0.252	0.720	-0.062
Tb	0.145	0.591	0.236	0.409	0.507	0.565	0.717	0.814	0.698	1.000	0.827	0.721	0.753	0.621	0.634	0.603	0.747	-0.082
Dy	0.319	0.649	0.145	0.198	0.253	0.286	0.494	0.626	0.464	0.827	1.000	0.932	0.911	0.863	0.873	0.837	0.541	0.010
Ho	0.395	0.677	0.089	0.093	0.145	0.169	0.392	0.522	0.366	0.721	0.932	1.000	0.966	0.930	0.974	0.953	0.361	0.040
Er	0.360	0.674	0.149	0.195	0.289	0.326	0.501	0.586	0.478	0.753	0.911	0.966	1.000	0.930	0.949	0.916	0.415	0.017
Tm	0.458	0.643	0.003	-0.013	0.030	0.053	0.285	0.411	0.262	0.621	0.863	0.973	0.930	1.000	0.981	0.994	0.233	0.055
Yb	0.469	0.642	-0.005	-0.016	0.038	0.066	0.300	0.425	0.274	0.634	0.873	0.974	0.949	0.981	1.000	0.973	0.249	0.055
Lu	0.476	0.628	-0.016	-0.027	0.016	0.043	0.279	0.403	0.252	0.603	0.837	0.953	0.916	0.994	0.973	1.000	0.219	0.056
Th	-0.009	0.505	0.312	0.521	0.609	0.671	0.744	0.764	0.720	0.747	0.541	0.361	0.415	0.233	0.249	0.219	1.000	-0.200
U	-0.058	0.020	0.042	-0.047	-0.081	-0.112	-0.043	-0.046	-0.062	-0.082	0.010	0.040	0.017	0.055	0.055	0.056	-0.200	1.000

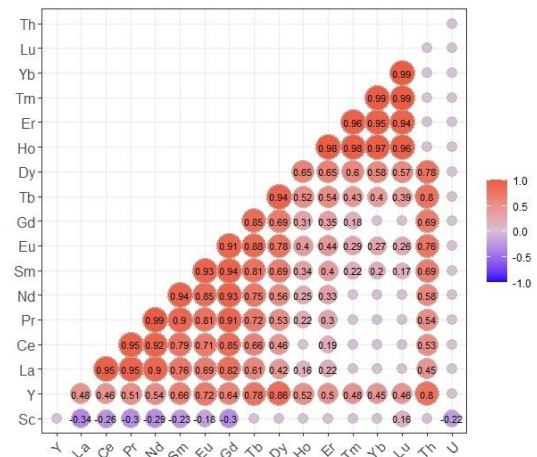
Bảng 4. Ma trận tương quan các nguyên tố trong quặng đất hiếm phong hóa

	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	U
Sc	1.000	-0.151	-0.336	-0.264	-0.295	-0.294	-0.231	-0.183	-0.299	-0.129	-0.043	0.056	0.024	0.136	0.130	0.162	-0.073	-0.224
Y	-0.151	1.000	0.478	0.456	0.514	0.539	0.659	0.724	0.644	0.780	0.864	0.516	0.495	0.482	0.452	0.458	0.799	0.103
La	-0.336	0.478	1.000	0.947	0.948	0.903	0.760	0.694	0.823	0.607	0.424	0.164	0.222	0.042	0.006	-0.001	0.450	0.131
Ce	-0.264	0.456	0.947	1.000	0.950	0.920	0.793	0.712	0.851	0.658	0.462	0.126	0.192	0.005	-0.038	-0.038	0.530	0.041
Pr	-0.295	0.514	0.948	0.950	1.000	0.991	0.896	0.811	0.912	0.716	0.526	0.225	0.297	0.088	0.053	0.038	0.542	0.031
Nd	-0.294	0.539	0.903	0.920	0.991	1.000	0.937	0.852	0.927	0.746	0.565	0.251	0.326	0.112	0.080	0.061	0.576	0.003
Sm	-0.231	0.659	0.760	0.793	0.896	0.937	1.000	0.932	0.941	0.813	0.687	0.343	0.400	0.218	0.196	0.175	0.694	-0.006
Eu	-0.183	0.724	0.694	0.712	0.811	0.852	0.932	1.000	0.914	0.883	0.785	0.403	0.439	0.289	0.274	0.255	0.756	-0.045
Gd	-0.299	0.644	0.823	0.851	0.912	0.927	0.941	0.914	1.000	0.846	0.686	0.306	0.354	0.182	0.144	0.140	0.688	-0.016
Tb	-0.129	0.780	0.607	0.658	0.716	0.746	0.813	0.883	0.846	1.000	0.937	0.517	0.541	0.429	0.404	0.392	0.804	-0.075
Dy	-0.043	0.864	0.424	0.462	0.526	0.565	0.687	0.785	0.686	0.937	1.000	0.652	0.653	0.599	0.582	0.571	0.780	-0.041
Ho	0.056	0.516	0.164	0.126	0.225	0.251	0.343	0.403	0.306	0.517	0.652	1.000	0.983	0.980	0.968	0.962	0.131	-0.016
Er	0.024	0.495	0.222	0.192	0.297	0.326	0.400	0.439	0.354	0.541	0.653	0.983	1.000	0.956	0.949	0.936	0.119	-0.003
Tm	0.136	0.482	0.042	0.005	0.088	0.112	0.218	0.289	0.182	0.429	0.599	0.980	0.956	1.000	0.990	0.994	0.068	-0.004
Yb	0.130	0.452	0.006	-0.038	0.053	0.080	0.196	0.274	0.144	0.404	0.582	0.968	0.949	0.990	1.000	0.990	0.047	-0.001
Lu	0.162	0.458	-0.001	-0.038	0.038	0.061	0.175	0.255	0.140	0.392	0.571	0.962	0.936	0.994	0.990	1.000	0.041	0.002
Th	-0.073	0.799	0.450	0.530	0.548	0.576	0.694	0.756	0.688	0.804	0.780	0.131	0.119	0.068	0.047	0.041	1.000	-0.111
U	-0.224	0.103	0.131	0.041	0.031	0.003	-0.006	-0.045	-0.016	-0.075	-0.041	-0.016	-0.003	-0.004	-0.001	0.002	-0.111	1.000

Bảng ma trận tương quan trên có thể được biểu diễn thông qua biểu đồ, các biểu đồ dưới đây sau khi đã loại bỏ các cặp tương quan không có ý nghĩa thống kê ($P - \text{value} > 0.05$).



Hình 2. Biểu đồ tương quan các nguyên tố trong quặng gốc



Hình 3. Biểu đồ tương quan các nguyên tố trong quặng phong hóa

Việc xây dựng ma trận tương quan (Bảng 3, 4) và biểu đồ trực quan (Hình 2, 3) đã giúp làm rõ mối quan hệ giữa các nguyên tố đất hiếm và một số nguyên tố đi kèm trong hai tập mẫu: quặng gốc và quặng phong hóa. Các kết quả thu được cho thấy những đặc điểm nổi bật như sau:

+ Trong cả hai tập mẫu, các nguyên tố đất hiếm nhẹ (LREE: La, Ce, Pr, Nd, Sm) và đất hiếm nặng (HREE: Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) đều thể hiện mối tương quan thuận rất mạnh ($r > 0.9$ trong nhiều cặp). Trong quặng gốc (Bảng 3, Hình 2): sự phân nhóm giữa LREE và HREE khá rõ rệt, với mức độ tương quan cao trong từng nhóm, nhưng thấp hơn giữa hai nhóm. Trong quặng phong hóa (Bảng 4, Hình 3): mức độ tương quan không chỉ cao trong từng nhóm mà còn lan rộng giữa hai nhóm, phản ánh xu hướng đồng hóa hành vi địa hóa do ảnh hưởng của quá trình phong hóa.

+ Yttrium thể hiện tương quan chặt với các nguyên tố HREE như Dy, Ho, Er, cho thấy hành vi địa hóa tương đồng và có thể được xem như một đại diện của nhóm HREE. Mối tương quan này ổn định trong cả quặng gốc và phong hóa, khẳng định vai trò đặc biệt của Y trong tổ hợp các nguyên tố đất hiếm.

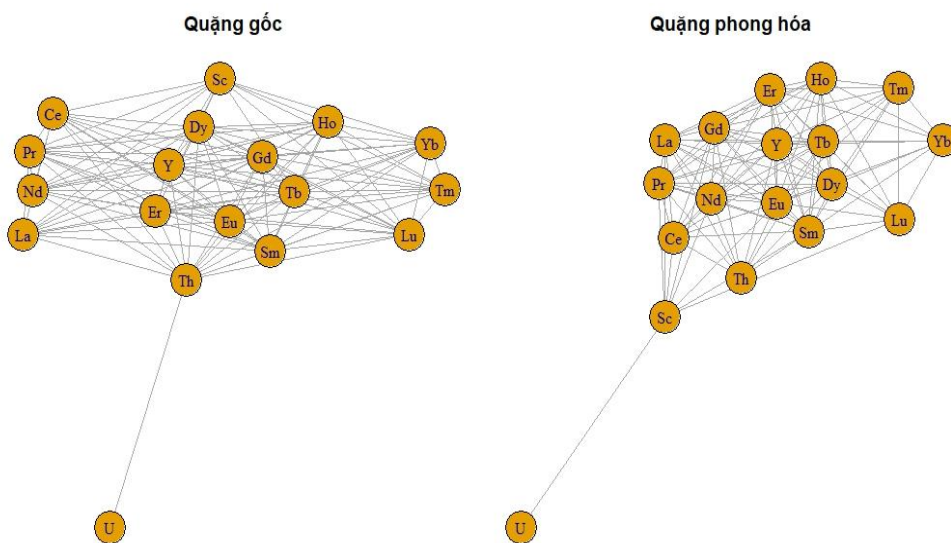
+ Ba nguyên tố Scandium (Sc), Thori (Th) và Urani (U) thể hiện xu hướng khác biệt rõ rệt: Sc có hệ số tương quan âm hoặc thấp với REE trong cả hai môi trường, phản ánh nguồn

gốc khác biệt và không cùng pha khoáng vật chứa REE. Th và U có mức tương quan yếu trong quặng gốc, và mặc dù có tăng nhẹ trong quặng phong hóa (đặc biệt là với LREE), nhưng nhìn chung vẫn thể hiện xu hướng tách biệt, có thể do sự dịch chuyển khác nhau trong môi trường phong hóa.

+ So sánh giữa quặng gốc và phong hóa cho thấy quá trình phong hóa đã làm tăng đáng kể mức độ tương quan giữa các nguyên tố, hệ số tương quan cặp (r) giữa REE tăng lên trong quặng phong hóa, điều đó có thể cho thấy quá trình phong hóa đã thúc đẩy giải phóng đồng thời các nguyên tố từ khoáng vật chủ, làm tăng tính đồng hành trong sự tích tụ thứ sinh. Biểu đồ Hình 3 thể hiện rõ các vòng tròn lớn, màu đỏ đậm xuất hiện nhiều hơn so với Hình 2, minh họa cho nhận định này.

2.2.3. Phân tích mạng tương quan

Để hiểu rõ hơn về cấu trúc của các mối quan hệ tương quan giữa các nguyên tố trong quặng đất hiếm khu vực nghiên cứu, tác giả tiến hành phân tích mạng tương quan giữa các nguyên tố đất hiếm, urani, thori; đồng thời mô tả và so sánh cấu trúc mạng tương quan giữa quặng gốc và quặng phong hóa. Mục tiêu là cung cấp những thông tin chi tiết có cơ sở khoa học về đặc trưng liên kết của các nguyên tố trong hai loại quặng đất hiếm (gốc, phong hóa), từ đó góp phần làm sáng tỏ cơ chế hình thành và mối liên hệ giữa các nhóm nguyên tố.



Hình 4. Sơ đồ mạng tương quan các nguyên tố trong quặng gốc và quặng phong hóa

Trong sơ đồ mạng (hình 2.3), các nguyên tố được mô hình hóa dưới dạng mạng tương quan gồm hai thành phần: các nút (vertices) đại diện cho nguyên tố và các liên kết (edges) thể hiện mối tương quan giữa các cặp nguyên tố. Mỗi liên kết có thể phản ánh mức độ tương quan (mạnh hoặc yếu), cho phép nhận diện các tương tác tiềm ẩn giữa các nguyên tố. Hiện có nhiều phương pháp phân tích tương quan và ghép nhóm các nguyên tố có vai trò trong tìm kiếm, thăm dò khoáng sản; mỗi phương pháp có ưu, nhược điểm khác nhau. Trong bài báo

này, nhóm tác giả chọn phương pháp phân tích mạng tương quan, vì phương pháp này tính trực quan và khả năng làm nổi bật cấu trúc tổng thể của hệ thống, bao gồm cả các mối liên hệ không tuyến tính và có tính dị hướng. Cách tiếp cận này đặc biệt hữu ích trong việc khảo sát sự khác biệt và đặc trưng của các nhóm nguyên tố trong hai loại quặng (gốc và phong hóa) dưới góc nhìn mạng hệ thống.

Các thông số về mức độ tương quan được phân tích chi tiết trình bày trong bảng 5, bảng 6.

Bảng 5. Kết quả phân tích các thông số cơ bản mạng tương quan các nguyên tố trong quặng gốc

```
Thuộc tính mạng lưới:
vertices = 18
directed = KHÔNG
hyper = KHÔNG
loops = KHÔNG
multiple = KHÔNG
bipartite = KHÔNG
tổng số cạnh = 119
cạnh bị thiếu = 0
cạnh không bị thiếu = 119
mật độ = 0.777778
Thuộc tính đỉnh:
tên đỉnh:
giá trị kiểu ký tự
18 tên đỉnh hợp lệ
Thuộc tính cạnh:
Hướng:
giá trị kiểu ký tự
tóm tắt giá trị thuộc tính:
Inv Pro
5 114
r:
giá trị kiểu số
tóm tắt thuộc tính:
Nhỏ nhất Q1 Trung vị Trung bình Q3 Lớn nhất
-0.2510 0.3185 0.5290 0.5334 0.7585 0.9940
sig:
giá trị kiểu số
tóm tắt thuộc tính:
Nhỏ nhất Q1 Trung vị Trung bình Q3 Lớn nhất
0.000000 0.000000 0.000000 0.0007731 0.000000 0.036000
Mức độ liên kết:
Mạnh Yếu
66 53
```

Bảng 6. Kết quả phân tích các thông số cơ bản mạng tương quan các nguyên tố trong quặng phong hóa

```
Thuộc tính mạng lưới:
vertices = 18
directed = KHÔNG
hyper = KHÔNG
loops = KHÔNG
multiple = KHÔNG
bipartite = KHÔNG
tổng số cạnh = 109
cạnh bị thiếu = 0
cạnh không bị thiếu = 109
mật độ = 0.7124183
Thuộc tính đỉnh:
tên đỉnh:
giá trị kiểu ký tự
18 tên đỉnh hợp lệ
Thuộc tính cạnh:
Hướng:
giá trị kiểu ký tự
tóm tắt giá trị thuộc tính:
Inv Pro
8 101
r:
giá trị kiểu số
tóm tắt thuộc tính:
Nhỏ nhất Q1 Trung vị Trung bình Q3 Lớn nhất
-0.3360 0.4000 0.6070 0.5691 0.8510 0.9940
sig:
giá trị kiểu số
tóm tắt thuộc tính:
Nhỏ nhất Q1 Trung vị Trung bình Q3 Lớn nhất
0.000000 0.000000 0.000000 0.002376 0.000000 0.049000
Mức độ liên kết:
Mạnh Yếu
68 41
```

Từ bảng 5 và 6 có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Trong quặng gốc, tổng số cặp tương quan là 119 (trong đó có 114 cặp tương quan thuận và 5 cặp tương quan nghịch), cao hơn so với quặng phong hóa, nơi có tổng cộng 109 cặp tương quan (gồm 101 cặp tương quan thuận và 8 cặp tương quan nghịch).

- Mật độ mạng tương quan ở quặng gốc (density = 0,78) cao hơn so với quặng phong hóa (density = 0,71), cho thấy quặng gốc có sự liên kết chặt chẽ hơn giữa các nguyên tố. Mật độ mạng (network density) được tính bằng tỷ lệ giữa số liên kết thực tế (actual edges) và tổng số liên kết tối đa có thể có giữa các nút trong mạng (maximum possible edges), theo công thức:

$$\text{Density} = \frac{2E}{N(N-1)}$$

Trong đó: E là số cạnh (cặp tương quan) và N là số nút (số nguyên tố tham gia mạng). Chỉ số mật độ càng cao phản ánh mức độ

tương tác giữa các nguyên tố càng chặt chẽ trong mạng.

- Với $r > 0,5$, trong quặng gốc có 66 cặp tương quan chặt chẽ (mạnh) và 53 cặp tương quan yếu; còn trong quặng phong hóa, có 68 cặp tương quan mạnh và 41 cặp tương quan yếu.

Bảng 7. Giá trị phân tích các 06 thông số đánh giá độ trung tâm (centrality) của các nguyên tố đất hiếm, U, Th trong quặng gốc và quặng phong hóa

TT	Nguyên tố	Loại quặng	Các thông số phân tích độ trung tâm						
			Bậc (Degree)	Khoảng cách gần (Closeness)	Vị trí trung gian (Betweenness)	Giá trị riêng (Eigen)	Lực Bonacich (BonPow)	Trung tâm thông tin (InfoCent)	Tổng
1	Sc	Gốc	12	0,74	1,45	0,20	2,28	5,09	21,76
2	Tb	Gốc	16	0,94	1,87	0,27	-0,05	5,67	24,70
3	Dy	Gốc	16	0,94	1,87	0,27	-0,05	5,67	24,70
4	Ho	Gốc	14	0,85	1,02	0,24	-0,09	5,41	21,43
5	Er	Gốc	16	0,94	1,87	0,27	-0,05	5,67	24,70
6	Tm	Gốc	12	0,77	0,42	0,21	-0,27	5,09	18,22
7	Yb	Gốc	12	0,77	0,42	0,21	-0,27	5,09	18,22
8	Lu	Gốc	12	0,77	0,42	0,21	-0,27	5,09	18,22
9	Th	Gốc	16	0,94	17,45	0,26	-2,00	5,77	38,41
10	U	Gốc	1	0,50	0,00	0,02	-1,64	0,94	0,82
11	Y	Gốc	16	0,94	1,87	0,27	-0,05	5,67	24,70
12	La	Gốc	12	0,77	0,42	0,21	-0,32	5,09	18,18
13	Ce	Gốc	12	0,77	0,42	0,21	-0,32	5,09	18,18
14	Pr	Gốc	13	0,81	0,60	0,23	-0,18	5,25	19,71
15	Nd	Gốc	13	0,81	0,60	0,23	-0,18	5,25	19,71
16	Sm	Gốc	15	0,89	1,45	0,26	-1,37	5,54	21,78
17	Eu	Gốc	15	0,89	1,45	0,26	-1,37	5,54	21,78
18	Gd	Gốc	15	0,89	1,45	0,26	-1,37	5,54	21,78
19	Sc	Phong hóa	9	0,680	16,63	0,15	-2,11	4,26	28,62
20	Y	Phong hóa	15	0,850	2,74	0,28	-0,51	5,18	23,54
21	La	Phong hóa	13	0,810	1,88	0,25	-0,82	4,95	20,07
22	Ce	Phong hóa	12	0,773	1,39	0,23	-0,78	4,80	18,41
23	Pr	Phong hóa	13	0,810	1,88	0,25	-0,82	4,95	20,07
24	Nd	Phong hóa	13	0,810	1,88	0,25	-0,82	4,95	20,07
25	Sm	Phong hóa	16	0,944	5,48	0,29	-1,17	5,32	26,86
26	Eu	Phong hóa	16	0,944	5,48	0,29	-1,17	5,32	26,86
27	Gd	Phong hóa	14	0,850	3,07	0,26	-0,84	5,08	22,43
28	Tb	Phong hóa	15	0,850	2,74	0,28	-0,51	5,18	23,54
29	Dy	Phong hóa	15	0,850	2,74	0,28	-0,51	5,18	23,54
30	Ho	Phong hóa	13	0,773	1,41	0,25	-0,87	4,93	19,49
31	Er	Phong hóa	14	0,810	1,97	0,26	-0,87	5,06	21,24
32	Tm	Phong hóa	10	0,680	0,24	0,19	-0,82	4,43	14,72
33	Yb	Phong hóa	9	0,654	0,00	0,17	-0,79	4,22	13,26
34	Lu	Phong hóa	10	0,708	2,45	0,19	-1,45	4,46	16,35
35	Th	Phong hóa	10	0,680	0,00	0,20	-0,08	4,44	15,24
36	U	Phong hóa	1	0,415	0,00	0,01	-1,32	0,89	1,00

Các kết quả này cũng chỉ ra rằng, các nguyên tố đất hiếm và các nguyên tố phóng xạ (U, Th) trong quặng gốc có sự tương quan ổn định hơn so với trong quặng phong hóa. Điều này có thể được lý giải bởi quặng gốc ít bị tác động bởi các yếu tố ngoại sinh, trong khi quặng phong hóa chịu ảnh hưởng mạnh mẽ từ các yếu tố môi trường như khí hậu, nước mặt, độ pH và vật chất ngoại lai.

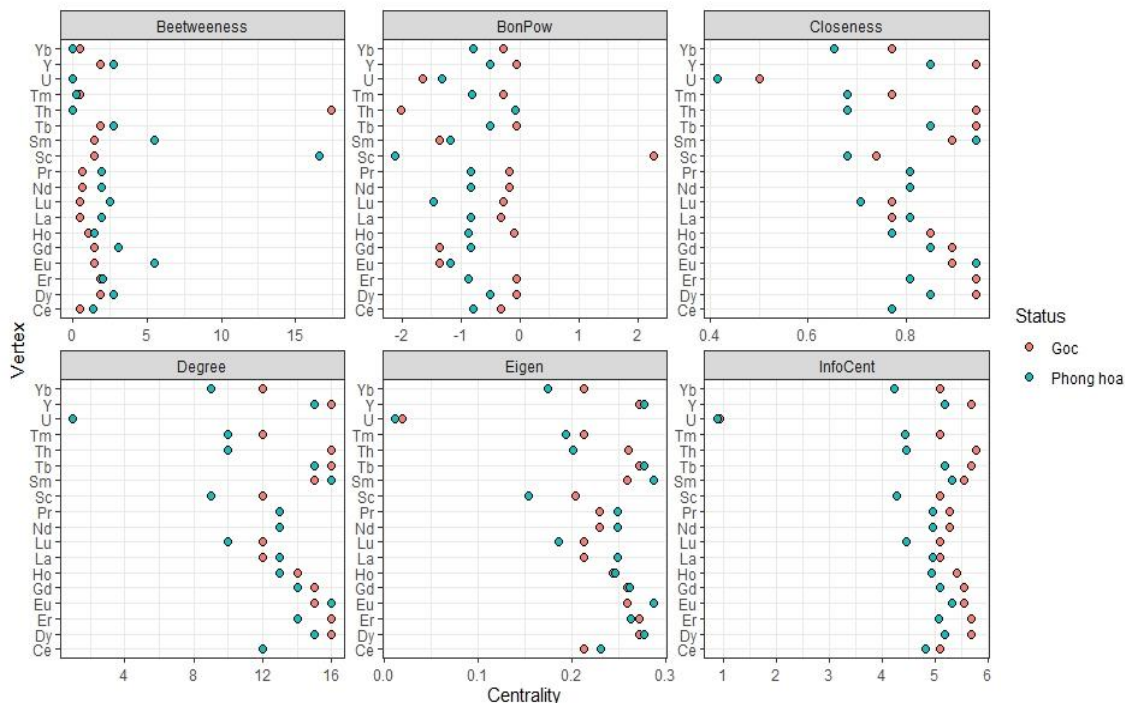
Ngoài ra, mạng lưới tương quan cũng cho phép đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng nguyên tố trong mạng liên kết. Việc đánh giá này được thực hiện thông qua các chỉ số độ trung tâm (centrality measures), bao gồm các thông số như Degree, Betweenness, Closeness, Eigenvector, Bonacich Power, Information, và Harary Graph. Các chỉ số này được sử dụng phổ biến trong phân tích mạng để xác định tầm quan trọng tương đối của các nút trong hệ thống (Freeman, 1979; Bonacich, 1987; Wasserman & Faust, 1994; Newman, 2010). Bảng 7 trình bày kết quả tính toán và biểu

diễn các chỉ số này cho các nguyên tố trong quặng gốc và quặng phong hóa.

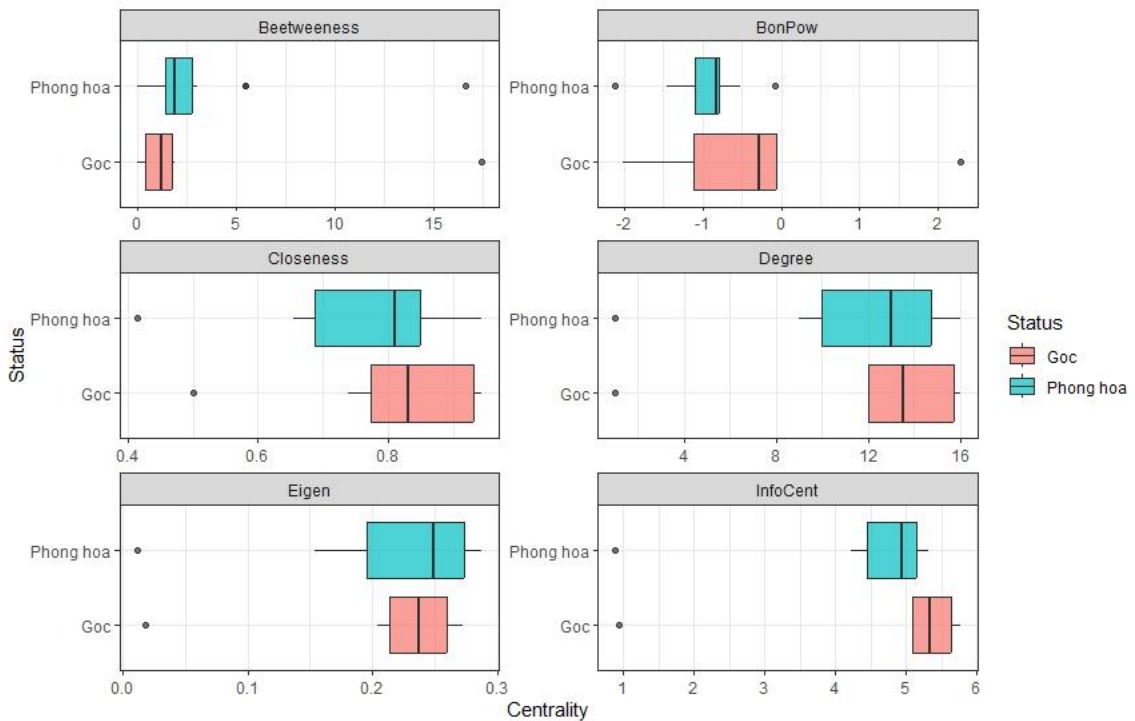
Kết quả phân tích cho thấy trong quặng gốc, nguyên tố có số điểm trung tâm cao nhất là Th với giá trị 38,4, tiếp theo là Y, Tb, Dy và Er, mỗi nguyên tố có cùng số điểm là 24,7. Điều này chỉ ra rằng, trong quặng gốc, Th đóng vai trò quan trọng nhất trong mạng tương quan, theo sau là các nguyên tố Y, Tb, Dy và Er.

Trong khi đó, đối với quặng phong hóa, nguyên tố có số điểm trung tâm cao nhất là Sc với giá trị 28,6, tiếp theo là Sm và Eu, mỗi nguyên tố có cùng số điểm là 26,8. Kết quả này cho thấy trong quặng phong hóa, Sc có vai trò quan trọng nhất trong mạng tương quan, sau đó đến Sm và Eu.

Các kết quả này được thể hiện trực quan qua các biểu đồ (hình 5, hình 6, hình 7 và hình 8), giúp làm rõ hơn vai trò của từng nguyên tố trong các mạng tương quan của quặng gốc và quặng phong hóa.



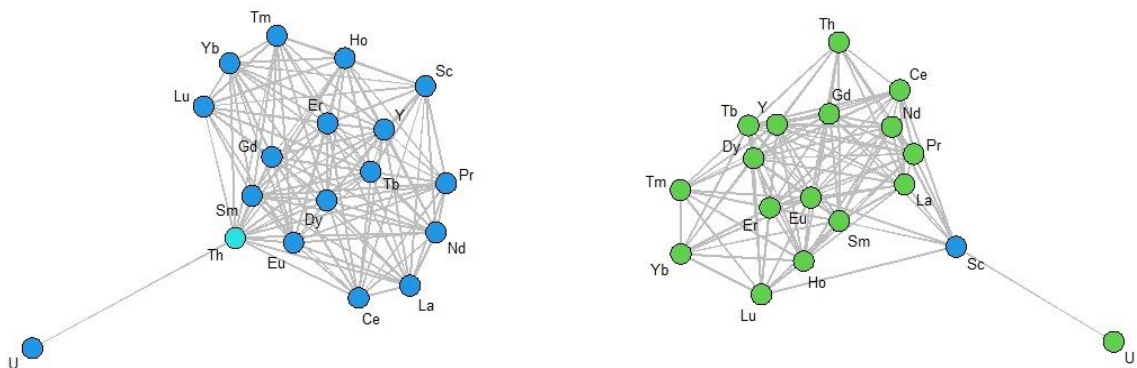
Hình 5. Biểu đồ các thông số mức độ trung tâm (centrality): Bậc (Degree), Vị trí trung gian (Betweenness), Khoảng cách gần (Closeness), Giá trị riêng (Eigen vector), Lực Bonacich (Bonacich power), Trung tâm thông tin (Information) của quặng gốc (đỏ) và quặng phong hóa (xanh).



Hình 6. Biểu đồ hộp so sánh các thông số trung tâm của quặng gốc và quặng phong hóa.

Quặng gốc

Quặng phong hóa



Hình 7. Biểu đồ mạng tương quan và nguyên tố chủ đạo - Quặng gốc (Th); Quặng phong hóa (Sc).

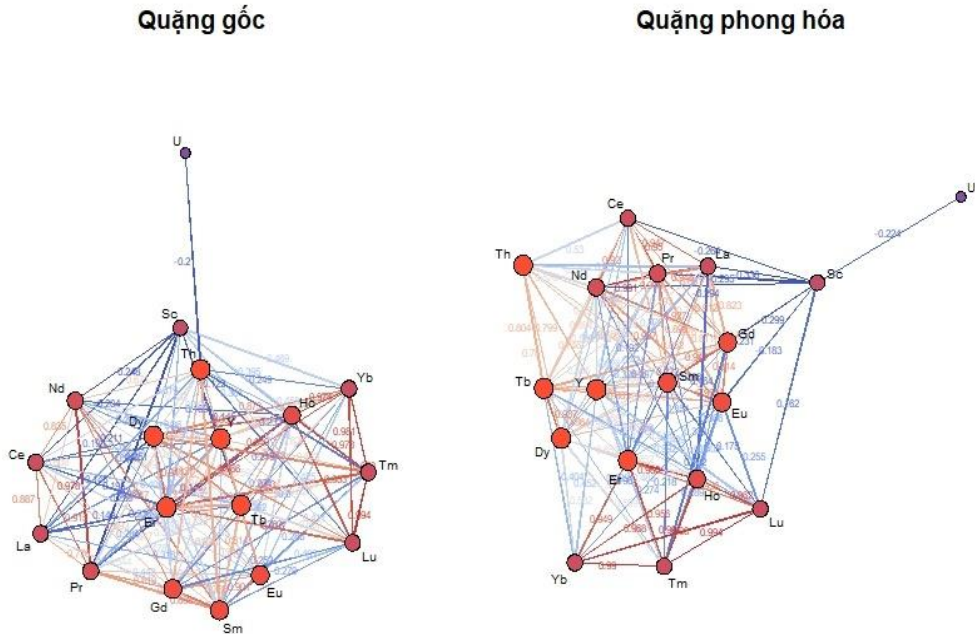
2.2.4. Thảo luận

Dựa trên các phân tích mạng địa hóa (Bảng 7) và biểu đồ trực quan (Hình 5– 8), nghiên cứu đã góp phần làm rõ đặc điểm phân bố và vai trò trung tâm của các nguyên tố đất hiếm, U và Th trong quặng gốc và quặng phong hóa khu vực Thèn Thầu – Tả Chu Phùng. Các kết quả chính đạt được như sau:

- Trong quặng gốc, các nguyên tố như Th, Dy, Er, Y, Gd đều có các chỉ số Degree, Closeness và InfoCent cao (Bảng 7, Hình 5), phản ánh sự liên kết mạnh giữa chúng trong hệ thống. Đặc biệt, Th có giá trị Betweenness vượt trội (17.45) và được xác định là nút chủ đạo (hub) (Hình 7), điều này cho thấy vai trò trung tâm của Th trong việc kết nối các nguyên tố đất hiếm nhóm nặng trong mạng.

Từ hình 6, nhận thấy phân bố chỉ số trung tâm trong quặng gốc có xu hướng cao hơn và ổn định hơn so với quặng phong hóa, cho thấy hệ

thống liên kết nội sinh bền vững, ít bị ảnh hưởng bởi môi trường.



Hình 8. Biểu đồ thể hiện mức độ tương quan của các nguyên tố trong quặng gốc và quặng phong hóa.

- Trong quặng phong hóa, mặc dù một số nguyên tố như Sm, Nd, Gd, Eu vẫn giữ vai trò khá quan trọng (có giá trị bậc - Degree và trung tâm thông tin - InfoCent cao, Hình 5), nhưng vị trí trung gian - Bonacich Power và giá trị riêng - Eigenvector giảm rõ rệt) U gần như bị tách biệt khỏi mạng (Degree = 1), phản ánh quá trình phân rã liên kết và thất thoát nguyên tố trong điều kiện phong hóa mạnh. Sc trở thành trung tâm mạng (Hình 7), cho thấy quá trình phong hóa có thể làm thay đổi cấu trúc mạng và vai trò của các nguyên tố.

- So sánh tổng quát giữa hai mạng (Hình 6) cho thấy: các chỉ số như Closeness, Degree và InfoCent trong quặng phong hóa có xu hướng giảm nhẹ hoặc biến động nhiều hơn so với quặng gốc. Trên hình 8 cho thấy mạng tương quan trong quặng gốc có mật độ liên kết mạnh hơn, ngược lại quặng phong hóa có xu hướng hình thành các cụm nguyên tố nhỏ và liên kết yếu hơn.

- Trong điều kiện nội sinh (quặng gốc), các nguyên tố đất hiếm nhóm nặng và actinoid có xu hướng đồng hành, bền vững, các

nguyên tố có thể được dùng làm dấu hiệu chỉ thị trong tìm kiếm, thăm dò quặng gốc. Trong điều kiện phong hóa, cấu trúc mạng thay đổi, một số nguyên tố bền hơn (Sm, Eu) có thể tích tụ thứ sinh, ngược lại U và Th dễ bị rửa trôi, đây là dấu hiệu để tìm kiếm, điều tra đánh giá quặng đất hiếm phân bố trong vỏ phong hóa (quặng phong hóa) và dự báo, khoanh định diện tích có tiềm năng phân bố quặng đất hiếm phong hóa.

- Phân tích mạng tương quan và các chỉ số trung tâm cho thấy sự khác biệt giữa cấu trúc mạng tương quan giữa các nguyên tố đất hiếm và nguyên tố phóng xạ trong quặng gốc và quặng phong hóa. Những kết quả này không chỉ góp phần làm sáng tỏ đặc điểm địa hóa của hệ đất hiếm U – Th, mà còn có ý nghĩa thực tế quan trọng trong tìm kiếm, điều tra đánh giá và khoanh vùng triển vọng quặng đất hiếm; đặc biệt đối với quặng phong hóa.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã ứng dụng phương pháp phân tích mạng tương quan để đánh giá đặc điểm liên kết giữa các nguyên tố đất hiếm, U

và Th trong quặng gốc và quặng phong hóa tại khu vực Thèn Thâu – Tả Chu Phùng. Kết quả nghiên cứu rút ra một số kết luận sau:

- Các nguyên tố REE trong cả hai loại quặng đều có sự biến thiên rộng, đặc biệt ở quặng phong hóa (Ce, Nd, Th, Yb có Kurtosis > 20), phản ánh sự không đồng đều về phân bố và ảnh hưởng mạnh của quá trình phong hóa.

- Trong quặng gốc, mạng tương quan có mật độ liên kết cao (density = 0,78), nhiều cặp tương quan mạnh (với 66 cặp có $r > 0,5$); mạng tương quan trong quặng phong hóa có mật độ thấp hơn (density = 0,71) và cấu trúc phân tán hơn. Th giữ vai trò trung tâm trong quặng gốc (Betweenness = 17.45, tổng centrality cao nhất = 38.41), ngược lại nguyên tố Sc là nút chủ đạo trong mạng quặng phong hóa (tổng centrality = 28.54), phản ánh sự tái phân bố của nguyên tố này trong môi trường phong hóa.

- Trong quặng gốc, các nguyên tố Dy, Er, Y, Gd và Th có giá trị Degree và Closeness cao, cho thấy mạng liên kết khá chặt chẽ và ổn định. Trong quặng phong hóa, các nguyên tố như Sm, Nd, Eu và Gd vẫn giữ vai trò tương đối quan trọng, nhưng với mức độ phân tán cao hơn; nguyên tố U có Degree = 1 và các chỉ số trung tâm rất thấp, phản ánh xu hướng tách rời khỏi mạng tương quan; điều đó có thể lý giải do U có tính di động cao và dễ bị rửa trôi trong điều kiện oxy hóa.

- Phân tích mạng tương quan và các chỉ số trung tâm chỉ rõ sự khác biệt về cấu trúc mạng tương quan giữa các nguyên tố đất hiếm với nguyên tố phóng xạ trong quặng gốc và quặng phong hóa. Những kết quả này không chỉ góp phần làm sáng tỏ đặc điểm địa hóa của hệ đất hiếm U – Th, mà còn có ý nghĩa thực tiễn quan trọng trong tìm kiếm, điều tra đánh giá và khoanh vùng triển vọng, là cơ sở định hướng điều tra khoáng sản đất hiếm; đặc biệt đối với quặng đất hiếm phong hóa trong khu vực nghiên cứu nói riêng, trên lãnh thổ Việt Nam (phần đất liền) nói chung.

Lời cảm ơn: Bài báo được hỗ trợ bởi đề tài cấp Bộ: Nghiên cứu xây dựng bộ tiêu chí nhận dạng đất hiếm trong vỏ phong hóa và đề xuất quy trình điều tra, đánh giá, Mã số: TNMT. 2024.02.01.

Tài liệu tham khảo

- Bauer, P., & Della, R.** (2006). "Geochemistry and tectonic setting of rare earth elements in magmatic and hydrothermal deposits." *Ore Geology Reviews*.
- Bonacich, P.** (1987). Power and centrality: A family of measures. *American Journal of Sociology*, 92(5), 1170–1182.
- Bonham-Carter, G.F.** (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon Press.
- Borgatti, S. P.** (2005). Centrality and network flow. *Social Networks*, 27(1), 55–71.
- Chakhmouradian, A.R., & Wall, F.** (2012). Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and More). *Elements*, 8(5), 333–340.
- Freeman, L. C.** (1979). Centrality in social networks: Conceptual clarification. *Social Networks*, 1(3), 215–239.
- Hou, Z., Zaw, K., et al.** (2005). Characteristics and genesis of the Mianning–Dechang REE belt, Sichuan Province, China. *Mineralium Deposita*, 40(1), 84–98.
- Huang, H., Zhao, Y., & Wang, Y.** (2020). Application of network analysis in geochemical data interpretation: A case study of rare earth elements. *Journal of Geochemical Exploration*, 212, 106494.
- Masuda, Naoki.** (2024). "Correlation networks: Interdisciplinary approaches beyond thresholding". *arXiv:2311.09536v2 [physics.soc-ph]*.
- Nash, J.T.** (2010). Geochemistry of Rare Earth Elements in Weathering Environments. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1006*.
- Newman, M. E. J.** (2010). *Networks: An Introduction*. Oxford University Press.
- Nguyễn Trung Thịnh và nnk.** (2014). Báo cáo kết quả thăm dò mỏ đất hiếm Bắc Nậm Xe, xã Nậm Xe, huyện Phong Thổ, tỉnh Lai Châu. *Lưu trữ Liên đoàn Địa chất xạ – hiếm*.
- Nguyễn Văn Hòa, Trịnh Đình Huấn và nnk.** (2014). Báo cáo kết quả thăm dò mỏ đất hiếm Nam Nậm Xe, xã Nậm Xe, huyện Phong Thổ, tỉnh Lai Châu.

Parisutham, Nirmala. (2023). "How do centrality measures help to predict similarity patterns in molecular chemical structural graphs?". <https://doi.org/10.1016/j.aichem.2023.100007>.

Sanematsu, K., Watanabe, Y., et al. (2013). Mobility of Rare Earth Elements in Basalt-Derived Laterite at the Bolaven Plateau, Southern Laos. *Resource Geology*, 63(2), 137–152.

Trần Văn Trị, Vũ Khúc và nnk. (2008). *Địa chất và tài nguyên Việt Nam*. NXB Khoa học tự nhiên và công nghệ.

Trịnh Đức Thiện và nnk. (2020). Điều tra, đánh giá tiềm năng quặng đất hiếm và khoáng sản đi kèm (U, Th) khu vực Tây Bắc. *Liên đoàn Địa chất Xạ - Hiếm*.

Tô Văn Thụ. (1996). Báo cáo đo vẽ Địa chất và Khoáng sản 1:50.000 nhóm tờ Phong Thổ, Lai Châu. *Lưu trữ Trung tâm Thông tin, Lưu trữ và Tạp chí Địa chất, Hà Nội*.

Wang, L., Zhao, Y., et al. (2020). Application of machine learning-based geochemical models in mineral prospectivity mapping. *Ore Geology Reviews*, 122, 103516.

Wasserman, S., & Faust, K. (1994). *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press.

Yang, H., and Zheng, Y. (2009). "Geochemistry and mineralization of rare earth elements in the volcanic rocks of China." *Earth Science Frontiers*.

Summary

Correlation network analysis of rare earth elements, uranium, and thorium in primary and weathered rare earth ore in the Then Thau-Ta Chu Phung area, Lai Chau province

Trinh Duc Thien¹, Trinh Dinh Huan¹, Nguyen Van Lam², Hoang Van Dung¹, Ngo Xuan Duc^{3*}

¹Geological division for radioactive and rare elements. Xuan Phuong, Ha Noi, Vietnam

²Vietnam Geological Association. 6 Pham Ngu Lao, Hoan Kiem, Ha Noi, Vietnam

³Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources. 67 Chien Thang, Van Quan, Ha Dong, Ha Noi

*Corresponding author: nxdac@mae.gov.vn

Abstract: The study applied correlation network analysis to clarify the relationships among rare earth elements (REEs), uranium (U), and thorium (Th) in rare earth ore samples from the Thèn Thầu – Tả Chu Phụng area (Lai Châu province). A total of 296 primary ore samples and 147 weathered ore samples were analyzed for elemental concentrations using the ICP-MS method. The results show that, in the primary ores, 119 elemental pairs exhibited correlations, including 114 positive and 5 negative correlations; the network density reached 0.78, reflecting a tightly interconnected elemental structure. In the weathered ores, there were 109 correlated elemental pairs (101 positive and 8 negative correlations), with the network density decreasing to 0.71, indicating that the network structure was weakened due to weathering processes.

In the primary ores, elements such as Th, Dy, Er, Y, Gd, and Nd played central roles, reflecting an endogenous origin; Th was the dominant node and served as a geochemical indicator for delineating primary rare earth ore prospects based on primary geochemical anomalies. In the weathered ores, the network structure changed significantly, with elements such as Sm, Eu, Gd, and Sc becoming prominent, and Sc replacing Th as the central element. These elements act as indicators for the exploration of REE mineralization within the weathered crust (secondary ores). U exhibited very low centrality, indicating a strong tendency for dispersion of this element in oxidizing environments.

Keyword: Correlation Network, Rare Earth, Then thau, Ta Chu Phung.