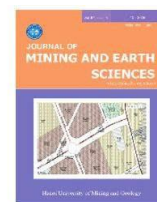




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <https://jmes.humg.edu.vn>



Petrography, U–Pb zircon ages and zircon geochemistry of the Khanh Thien syenite complex and their tectonic implications for northeastern Vietnam during the Early Cambrian



Dung Van Chu¹, Dung My Tran¹, Truong Xuan Le², Hoa Xuan Trinh³, Thanh Xuan Ngo^{2,*}

¹Vietnam Department of Geology and Minerals, Hanoi, Vietnam

²Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

³Institute of Geological Sciences and Mineral Resources, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10th Mar. 2026

Revised 5th Jul. 2026

Accepted 30th Jul. 2026

Keywords:

A-type granitoid,
Early Paleozoic,
Northeastern Vietnam,
Syenite,
Zircon U–Pb dating.

ABSTRACT

The Khanh Thien syenite complex, exposed in the Yen Bai area, represents an important episode of alkaline magmatism during the Early Paleozoic tectonic evolution of the Northeastern Vietnam. The studied rocks are characterised by high K-feldspar contents, low proportions of plagioclase and quartz, and locally contain biotite ± hornblende. Zircon U–Pb dating yields a crystallisation age of 520.7 ± 1.5 Ma, indicating emplacement during the Early Cambrian. Petrographic features and zircon trace-element compositions, including $(Ce/Ce^) > 1$, $(Eu/Eu^*) < 1$, low P contents and relatively high Hf concentrations, suggest highly oxidised magmatic conditions and strong feldspar fractionation, typical of fractionated A-type granitoid magmas. Zircon Nb/Hf, Th/U, Th/Nb and Hf/Th ratios, together with low $\epsilon Nd(t)$ values and relatively high $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios, are consistent with derivation from a slightly crustally enriched mantle source. These characteristics may reflect syenitic magmatism developed in a post-collisional extensional tectonic setting. The Khanh Thien syenites are interpreted to be related to deep lithospheric modification and reworking within an orogenic belt following the final assembly of the Gondwana supercontinent. This study provides new geochronological and zircon geochemical constraints on the Early Paleozoic tectonic framework of northeastern Vietnam and highlights the role of alkaline magmatism in regional lithospheric evolution.*

Copyright © 2026 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: ngoxuanthanh@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(5).08



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang diện tử: <https://tapchi.humg.edu.vn>



Đặc điểm thạch học, tuổi U-Pb và thành phần zircon của các đá syenit phức hệ Khánh Thiện và ý nghĩa kiến tạo của chúng với khu vực Đông Bắc Việt Nam trong giai đoạn Cambri sớm

Chu Văn Dũng¹, Trần Mỹ Dũng¹, Lê Xuân Trường², Trịnh Xuân Hoà³, Ngô Xuân Thành^{2,*}

¹Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

³Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 10/3/2026

Sửa xong 5/7/2026

Chấp nhận đăng 30/7/2026

Từ khóa:

Đông Bắc Việt Nam,

Granitoid kiểu A,

Paleozoi sớm,

Syenit,

U-Pb zircon.

TÓM TẮT

Các đá syenit phức hệ Khánh Thiện phân bố tại khu vực Yên Bái đại diện cho một pha magma kiềm quan trọng trong tiến hóa kiến tạo Paleozoi sớm của Đông Bắc Việt Nam. Các mẫu nghiên cứu đặc trưng bởi hàm lượng K-feldspar cao, nghèo plagioclas và thạch anh, một số mẫu chứa biotit ± hornblend. Kết quả phân tích tuổi U-Pb zircon cho giá trị $520,7 \pm 1,5$ Tr.n, phản ánh tuổi kết tinh của đá magma vào Cambri sớm. Đặc điểm thạch học, thành phần nguyên tố zircon bao gồm $(Ce/Ce^*) > 1$, $(Eu/Eu^*) < 1$, hàm lượng P thấp và Hf tương đối cao, phản ánh điều kiện oxy hóa cao, có sự phân dị feldspar mạnh, đặc trưng của magma kiểu A đã qua kết tinh phân đoạn. Các tỷ số Nb/Hf, Th/U, Th/Nb và Hf/Th trong zircon và giá trị đồng vị $\epsilon Nd(t)$ thấp trong khi $^{87}Sr/^{86}Sr$ tương đối cao cho thấy nguồn magma được thành tạo từ nguồn manti đã được làm giàu bởi vật chất vỏ, đặc trưng cho magma syenit được hình thành trong bối cảnh tách giãn sau va chạm. Các thành tạo đá magma syenit phức hệ Khánh Thiện có thể được hình thành liên quan đến quá trình phá hủy và tái cấu trúc thạch quyển sâu trong đại tạo núi sau hợp nhất siêu lục địa Gondwana. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ bản chất kiến tạo Paleozoi sớm của Đông Bắc Việt Nam và vai trò của magma kiềm trong tiến hóa thạch quyển khu vực.

© 2026 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: ngoxuanthanh@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(5).08

1. Giới thiệu

Các đá magma syenit và syenit nephelin là những thành tạo xâm nhập giàu kiềm, thường gắn với các bối cảnh kiến tạo đặc thù như nội mảng và tách giãn sau va chạm tạo núi (Eby, 1992; Bonin, 2007; Whalen và nnk., 2010). Khu vực Đông Bắc Việt Nam nằm tại vị trí chuyển tiếp kiến tạo quan trọng giữa Địa khối Nam Trung Hoa và Địa khối Đông Dương, thường được xem là phần kéo dài hoặc miền rìa tây nam của khối Cathaysia (Trần và Vũ, 2009; Tran, 2023). Trong Mesoproterozoic–Neoproterozoic, Cathaysia được cho là gắn với rìa siêu lục địa Rodinia. Sau khi Rodinia tan rã, khu vực này trải qua giai đoạn tách giãn và tái cấu trúc kiến tạo quy mô lớn. Đến cuối Neoproterozoic–Cambri sớm, Cathaysia được cho là đã chịu ảnh hưởng của các quá trình kiến tạo liên quan đến sự kiện tạo núi Pan-African (khoảng 650–500 Ma) và sự hợp nhất của siêu lục địa Gondwana, mặc dù không trực tiếp nằm trên các đai tạo núi chính (X. H. Li và nnk., 2008; Cawood và nnk., 2013). Tuy nhiên, cho đến nay, các bằng chứng magma rõ ràng phản ánh giai đoạn Neoproterozoic muộn – Cambri sớm trên khối Cathaysia ở Trung Quốc hầu như chưa được ghi nhận.

Tại khu vực Đông Bắc Việt Nam, các thành tạo magma Cambri sớm đã được thể hiện trên một số bản đồ địa chất (nhóm tờ Bắc Quang–Mã Quang (Trần, 1988); nhóm tờ Na Hang–Ba Bể (Nguyễn, 1992); nhóm tờ Đoan Hùng–Yên Bình (Hoàng, 1997); nhóm tờ Bảo Yên (Luu, 1998)), song vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống về tuổi thành tạo, nguồn magma và ý nghĩa kiến tạo của chúng. Đặc biệt, các đá syenit trong khu vực còn tồn tại nhiều tranh luận về tuổi và bối cảnh hình thành, với các kết quả trước đây cho thấy sự biến thiên từ Paleozoic sớm đến Permi (Nguyễn và Nguyễn, 2009). Điều này cho thấy cần có các nghiên cứu chi tiết hơn nhằm làm rõ tuổi thành tạo và bản chất kiến tạo của magma syenit trong khu vực. Trong khu vực Yên Bái, các thành tạo syenit trong khối Khánh Thiện là một trong những thể magma kiềm tiêu biểu của Đông Bắc Việt Nam, các đá này được cho là tuổi Paleozoic giữa trên cơ sở nghiên cứu quan hệ địa tầng khu vực Yên Bái và được xếp vào phức hệ Khánh Thiện trong bản đồ Địa chất tỷ lệ 1:50.000 nhóm tờ Bảo Yên (Luu, 1998). Tuy nhiên nhận định này mang tính luận giải gián tiếp, thiếu dữ liệu định tuổi hiện đại, tin

cậy. Bên cạnh đó, các nghiên cứu trước đây phần lớn dựa trên địa hóa đá tổng, trong khi các chỉ thị nhạy cảm hơn như tuổi U–Pb zircon, thành phần nguyên tố vết zircon và đồng vị Sr–Nd vẫn chưa được áp dụng một cách đầy đủ.

Trong nghiên cứu này, nhằm làm sáng tỏ nguồn gốc và ý nghĩa kiến tạo của các thành tạo syenit Cambri sớm khu vực Đông Bắc Việt Nam chúng tôi trình bày các kết quả mới về thạch học, tuổi U–Pb zircon, thành phần nguyên tố zircon và đồng vị Sr–Nd của các đá syenit phức hệ Khánh Thiện khu vực Yên Bái (Lào Cai) kết hợp với số liệu đá syenit khu vực Phia Ma đã nghiên cứu trước đây. Mục tiêu của nghiên cứu nhằm (i) xác định tuổi kết tinh và đặc điểm tiến hóa magma của các đá syenit phức hệ Khánh Thiện; (ii) làm rõ nguồn magma và bối cảnh kiến tạo hình thành; và (iii) thảo luận ý nghĩa của magma kiềm Cambri sớm đối với tiến hóa kiến tạo khu vực Đông Bắc Việt Nam trong bối cảnh sau sự kiện tạo núi Pan-African và quá trình hợp nhất Gondwana.

2. Đặc điểm địa chất khu vực Đông Bắc Việt Nam

Khu vực Đông Bắc Việt Nam nằm tại vị trí chuyển tiếp kiến tạo quan trọng giữa Địa khối Nam Trung Hoa và Địa khối Đông Dương, đồng thời gần rìa đông nam của khối Cathaysia trong Proterozoic (Hình 1a, b). Khu vực Đông Bắc bị khống chế bởi các hệ thống đứt gãy quy mô khu vực phương tây bắc – đông nam, bao gồm đứt gãy Sông Chảy, Sông Hồng và Sông Mã, đóng vai trò then chốt trong việc phân chia các đơn vị kiến tạo và ghi nhận lịch sử biến dạng – magma phức tạp từ Tiền Cambri đến Kainozoic (Trần, 1988; Nguyễn, 1992; Hoàng, 1997; Luu, 1998). Theo phân chia kiến tạo-địa tầng của Trần và Vũ (2009), Đông Bắc Việt Nam bao gồm các đới Sông Chảy, Lô-Gâm, Bắc Lạng, Sông Hiến, An Châu, Quảng Ninh (Hình 1b).

Các thành tạo cổ nhất trong khu vực bao gồm các đá trầm tích biến chất Neoproterozoic–Cambri sớm thuộc loạt Sông Chảy, với thành phần chủ yếu là quartzit, đá phiến sét, đá biến chất giàu thạch anh và amphibolit. Các đặc trưng tuổi zircon và thành phần đồng vị Hf cho thấy các đá này có sự tương đồng chặt chẽ với các tổ hợp trầm tích Neoproterozoic của khối Cathaysia (X. H. Li và nnk., 2008; Cawood và nnk., 2013), phản ánh mối liên hệ kiến tạo mật thiết giữa Đông Bắc Việt Nam và

phức hệ Pia Ma, Khánh Thiện với hai pha xâm nhập (Trần, 1988; Nguyễn, 1992; Hoàng, 1997; Lưu, 1998). Pha sớm bao gồm granit pyroxen, granosyenit, syenit aegirin-hastingsit và monzosyenit, phản ánh quá trình phân dị magma kèm theo sự gia tăng hàm lượng kiềm. Pha muộn phát triển các đá syenit nephelin, syenit hastingsit-nephelin và syenit biotit dạng gneis, mang đặc trưng magma kiềm đến kiềm-siêu kiềm. Tuổi thành tạo các đá syenit trong khu vực vẫn còn tranh luận, điển hình như các thành tạo syenit khu vực Phia Ma và Chợ Đồn được cho là có tuổi từ Paleozoi sớm (~520 Tr.n) đến Mesozoi sớm dựa trên tuổi mô hình Nd-Sm (Nguyễn và Nguyễn, 2009). Trên cơ sở đặc điểm đồng vị Rb-Sr và Sm-Nd và số liệu địa hóa (nghèo Nb, Ta, Ti và giàu các nguyên tố LILEs), các đá syenit khu vực Phia Ma (~520 Tr.n) được cho là có nguồn từ manti được làm giàu (Nguyễn và Nguyễn, 2009). Ngoài ra, các thể granodiorit tuổi Ordovic (~440–450 Tr.n) đã được ghi nhận tại khu vực Cao Bằng, tuy nhiên bối cảnh kiến tạo của chúng vẫn chưa được thảo luận đầy đủ.

Các đá granit kiểu S bị biến dạng mạnh của phức hệ Sông Chảy, phân bố dọc biên giới Việt Nam – Trung Quốc, có tuổi chủ yếu khoảng Silur (khoảng 436–423 Tr.n) và chúng xâm nhập vào các đá trầm tích biến chất Neoproterozoi–Cambri (Lưu, 1998). Các thể granit này thường phát triển cấu tạo phiến phương đông bắc – tây nam, phản ánh sự tái hoạt động kiến tạo mạnh mẽ sau khi magma kết tinh. Ở phần đông bắc khối Sông Chảy, các thành tạo peridotit bị serpentinit hóa mạnh đi kèm meta-gabbro của phức hệ Nậm Bút được coi là tổ hợp ophiolit Nam Hà Giang (Tran, 2023), mặc dù bản chất kiến tạo và tuổi thành tạo của chúng vẫn chưa được làm rõ.

Phủ bất chỉnh hợp lên các thành tạo Paleozoi sớm là các trầm tích Devon phát triển liên tục từ Devon sớm đến Devon muộn, bao gồm đá vôi, đá vôi silic, đá silic, quartzit, cát kết, bột kết và đá phiến sét, cục bộ có cuội kết, với bề dày từ vài trăm đến trên 600 m. Các trầm tích Carbon muộn – Permian tiếp tục phủ bất chỉnh hợp, chủ yếu là đá vôi khối và đá vôi silic, phản ánh môi trường biển nông thềm lục địa ổn định, chuyển sang trầm tích đa dạng hơn trong Permian với sự gia tăng vật liệu lục địa. Trầm tích Trias chủ yếu gồm đá phiến sét, cát kết, bột kết, xen kẹp đá vôi và đá vôi silic. Trong giai đoạn Permian – Trias, các thể magma mafic-siêu

mafic và felsic xuất hiện cục bộ, tập trung dọc các đới Sông Hiến và An Châu (Trần và Vũ, 2009).

Trong Kainozoi, khu vực Đông Bắc Việt Nam bị ảnh hưởng mạnh bởi pha kiến tạo do va chạm mảng Ấn Độ với mảng Âu Á, dẫn đến dịch chuyển trượt trái lớn dọc đới đứt gãy Sông Hồng (~250–600 km) và sự xoay theo chiều kim đồng hồ của khối Đông Dương (S. Li và nnk., 2017; Tapponnier và nnk., 1990; Wang và Burchfiel, 2000). Hoạt động kiến tạo này đã tái cấu trúc mạnh mẽ kiến trúc địa chất khu vực, hình thành các bồn trũng và đới trượt, đồng thời phá hủy và làm phức tạp việc nhận diện các dấu tích kiến tạo cổ hơn.

3. Đặc điểm mẫu nghiên cứu

Khu vực Khánh Thiện nằm ở phần đông nam của cấu trúc phức nếp lồi Sông Chảy, kéo dài theo phương tây bắc – đông nam. Rìa tây nam khu vực được khống chế bởi đới đứt gãy Sông Chảy, trong khi rìa đông bắc bị giới hạn bởi hệ đứt gãy phương tây bắc – đông nam, về phía bắc, khu vực được khống chế bởi các đới đứt gãy phương vĩ tuyến (Hình 1b). Trong khu vực nghiên cứu và lân cận, các thành tạo địa chất lộ ra chủ yếu gồm các đá trầm tích biến chất hệ tầng Thác Bà và đá hoa hệ tầng An Phú tuổi Proterozoi muộn; các đá trầm tích lục nguyên và đá vôi bị biến chất yếu thuộc hệ tầng Hà Giang tuổi Cambri; các thể đá xâm nhập axit đến kiềm thuộc phức hệ Khánh Thiện và phức hệ Điện Biên (Hình 1c). Các thành tạo địa chất này tạo nên mối quan hệ không gian phức tạp, chịu ảnh hưởng mạnh của biến dạng kiến tạo đa kỳ tác động lên khu vực Đông Bắc (Tran, 2023). Vị trí kiến tạo và đặc điểm địa tầng của khu vực phản ánh lịch sử tiến hóa địa chất phức tạp, chịu ảnh hưởng của nhiều pha biến dạng và tái hoạt động kiến tạo kéo dài. Các quá trình này đã làm biến đổi mạnh các đặc điểm cấu trúc ban đầu, khiến phần lớn các cấu tạo cổ bị biến dạng, tái tạo hoặc xóa nhòa dưới tác động của các pha kiến tạo trẻ hơn.

Khối syenit Khánh Thiện trong nghiên cứu này lộ ra dưới dạng một khối chính có diện tích khoảng 3 km² cùng một số khối vệ tinh nhỏ. Các mô tả trước đây cho rằng các đá syenit này xuyên cắt các đá trầm tích biến chất thuộc hệ tầng Hà Giang và hệ tầng An Phú (Nguyễn và Nguyễn, 2009). Tuy nhiên, các quan sát thực địa chi tiết trong nghiên cứu này cho thấy tại nhiều vị trí, các đá của hệ tầng Thác Bà bị phiến hóa mạnh, cục bộ phát triển cấu tạo mylonit, tạo thành các đới biến



Hình 2. Ảnh nghiên cứu thực địa thể hiện thành phần thạch học và quan hệ kiến tạo chòm nghịch trong đá phiến hệ tầng Thác Bà (a) và giữa hệ tầng Thác Bà với các đá syenit phức hệ Khánh Thiện (b).

dạng dày hàng mét chòm phủ trực tiếp lên các đá syenit của phức hệ Khánh Thiện (Hình 2a, b).

Mối quan hệ chòm phủ này cho thấy các đá syenit được thành tạo trước pha biến dạng và sau đó đã chịu tác động của một pha biến dạng nén ép-chòm nghịch, dẫn đến sự biến vị và tái cấu trúc cấu tạo ban đầu của đá. Dựa trên đặc điểm biến dạng khu vực, pha biến dạng kiến tạo này nhiều khả năng liên quan đến hoạt động tạo núi Indosini trong Trias sớm-giữa tạo nên hệ thống đứt gãy chòm nghịch quy mô khu vực phát triển mạnh và chi phối biến dạng kiến tạo ở Đông Bắc Việt Nam đồng thời xóa nhòa các cấu tạo của các pha biến dạng sớm hơn.

Về mặt thạch học, đá syenit phức hệ Khánh Thiện có thể được chia thành hai pha xâm nhập chính. Pha sớm ($\xi_1 PZ_2 kt$) phân bố hạn chế, thường gặp dưới dạng các thấu kính hoặc khối nhỏ xen kẹp trong pha muộn. Thành phần đá chủ yếu là syenit và syenit thạch anh, màu xám sẫm đến xám lục, hạt trung bình đến thô. Đá thường phát triển cấu tạo định hướng khá rõ, phản ánh mức độ biến dạng cao. Pha muộn ($\xi_2 PZ_2 kt$) chiếm phần lớn diện tích lộ ra của khối syenit Khánh Thiện, tạo nên các khối lộ lớn và liên tục. Đá chủ yếu là syenit hạt trung bình đến thô, màu xám sáng đến hồng nhạt, có cấu tạo khối, đôi khi có dạng porphy. Mức độ biến dạng của pha này nhìn chung yếu hơn rõ rệt so với pha sớm, cục bộ, đá bị đập vỡ và biến đổi nhẹ dọc theo các đới đứt gãy muộn. Tuy nhiên, phần lớn đá vẫn bảo tồn tốt các đặc điểm thạch học nguyên sinh, thuận lợi cho các nghiên cứu địa hóa và đồng vị nhằm luận giải nguồn gốc magma và bối cảnh kiến tạo.

Trong nghiên cứu này, các mẫu đá được lấy từ các khối magma pha 2 của phức hệ Khánh Thiện nhằm nghiên cứu đặc điểm thạch học, đồng vị Rb-Sr, Nd-Sm (đá tổng), cấu trúc tinh thể zircon, tuổi đồng vị U-Pb và thành phần khoáng vật của zircon.

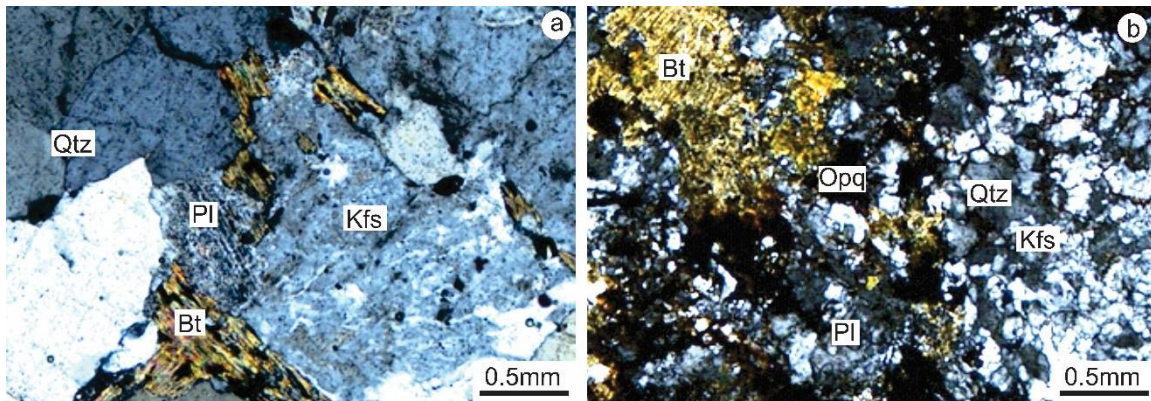
4. Phương pháp phân tích

4.1. Phân tích thạch học

Các mẫu đá đã mài mỏng được dán lên tấm lam kính hình chữ nhật có kích thước dài $\times$ rộng = 3×2 cm và được phủ lamelle bên trên để bảo vệ mẫu. Các mẫu lát mỏng được phân tích dưới kính hiển vi phân cực Meiji MT4200H của Nhật Bản tại Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản Việt Nam, nhằm xác định kiến trúc, thành phần, đặc điểm khoáng vật tạo đá, các quá trình biến đổi, thay thế xảy ra trong đá.

4.2. Định tuổi U-Pb và thành phần zircon

Mẫu cục được đưa đến trung tâm phân tích, sau đó được đập và nghiền thành hạt từ 0,27 đến 0,1 mm. Dựa theo độ hạt của zircon có thể điều chỉnh độ hạt mẫu nghiền cho phù hợp với yêu cầu. Tiếp theo, mẫu được đãi bằng bàn đãi để phân loại các khoáng vật theo tỷ trọng (dùng nước để tuyển chọn đơn khoáng zircon), sau đó dùng phương pháp tuyển từ để tách các khoáng vật nhiễm từ ra, zircon ở hợp phần không từ tính được chiết tách bằng dung dịch Bromoform ($CHBr_3$) và cuối cùng lựa chọn phân loại zircon dưới kính hiển vi. Các bước lựa chọn zircon được tiến hành một cách tỉ



Hình 3. Ảnh lát mỏng thạch học đá magma phức hệ Khánh Thiện. (a) Đá syenit thạch anh biotit, (b) đá syenit biotit, hornblend (Qtz: Thạch anh, Pl: Plagioclas, Kfs: K-feldspar, Bt: Biotit, Opq: Khoáng vật quặng).

mỉ, loại bỏ những hạt zircon chứa bao thể, những zircon có vết rạn nứt trên bề mặt.

Các hạt zircon được gắn trên đĩa nhựa epoxy và sau đó được đánh bóng để cắt các tinh thể nhằm mục đích phân tích. Các mẫu được chụp ảnh bằng kính hiển vi truyền qua, phản xạ và hình ảnh phát quang (CL) để kiểm tra cấu trúc bên trong của các hạt zircon. Định tuổi zircon U-Pb được thực hiện bằng phương pháp LA-ICP-MS tại Phòng thí nghiệm Trọng điểm Quốc gia về Nghiên cứu Khoáng sản thuộc Đại học Nam Kinh-Trung Quốc, sử dụng thiết bị Agilent 7500a ICP-MS được trang bị laser excimer 193 nm. Zircon GJ-1 tiêu chuẩn và zircon Mud Tank được sử dụng để hiệu chỉnh phân đoạn liên nguyên tố và NIST 610 được sử dụng để tối ưu hóa thiết bị. Các hiệu chỉnh Pb thông thường được xử lý bằng phương pháp của Andersen (2002). Dữ liệu được xử lý bằng phần mềm Glitter và Isoplot (Ludwig, 2003). Chi tiết về quy trình phân tích tương tự như mô tả của Yuan và nnk. (2003). Sai số trong từng phân tích LA-ICP-MS được trích dẫn ở mức độ tin cậy 95% (one-sigma).

4.3. Phân tích đồng vị Sr-Nd đá tổng

Thành phần đồng vị Sr-Nd của mẫu đá tổng được phân tích tại Phòng thí nghiệm Trọng điểm Quốc gia về Nghiên cứu Mỏ Khoáng sản thuộc Đại học Nam Kinh, Trung Quốc. Thành phần đồng vị Sr được phân tích bằng máy quang phổ khối ion hóa nhiệt (TIMS; Finnigan Triton TI) tham khảo phương pháp của Pu và nnk. (2004, 2005), trong khi đồng vị Nd được phân tích bằng máy MC-ICP-MS (Thermo Scientific Neptune Plus). Đối với phân tích đồng vị Sr-Nd đá tổng, khoảng 50 mg bột mẫu đá tổng được hòa tan theo quy trình

tương tự phân tích nguyên tố vết. Các hệ Rb-Sr và Sm-Nd được tách bằng nhựa trao đổi cation AG50W8 kết hợp với các dung dịch rửa giải chọn lọc. Trước tiên, các nguyên tố đất hiếm (REEs) được tách khỏi Rb-Sr bằng sắc ký trao đổi cation với HCl. Sau đó, Rb và Sr được tách và tinh sạch bằng dung dịch hỗn hợp pyridinium và phức DCTA, còn Sm và Nd được tách bằng HIBA qua cột nhựa thể tích nhỏ (0,6 mL).

Các tỷ số $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ và $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ được chuẩn hóa theo $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0,1194$ và $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$ nhằm hiệu chỉnh phân đoạn khối lượng thiết bị. Trong quá trình phân tích, mẫu chuẩn JNdi-1 cho giá trị $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512096 \pm 0,000008$ ($n = 18; 2\sigma$), và chuẩn NIST SRM 987 cho giá trị $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,710248 \pm 0,000004$ (2σ), cho thấy độ chính xác và độ ổn định cao của hệ thống đo.

5. Kết quả phân tích

5.1. Đặc điểm thạch học

Kết quả phân tích thạch học khu Khánh Thiện có thể phân loại đá thành các nhóm sau:

Nhóm mẫu syenit biotit, hornblend có khối lượng khá hạn chế, đá có màu xám đến xám sáng, cấu tạo phiến, kiến trúc tàn dư nửa tự hình (Hình 3b). Thành phần khoáng vật chủ yếu gồm: feldpat kali ~73–78%; thạch anh ~4–5%; biotit ~8–10%; hornblend ~4–5% (cục bộ); carbonat ~7–10%. Khoáng vật phụ: allanit (orthit) ~1%; sfen 1–2%; zircon, apatit vài hạt; quặng ~1–4%. Đặc trưng bởi feldpat kali bị nứt nẻ, đập vỡ mạnh; biotit-carbonat-quặng lấp đầy khe nứt, phản ánh quá trình biến dạng và biến đổi nhiệt dịch muộn.

Bảng 1. Số liệu phân tích nguyên tố hiếm vết khoáng vật zircon mẫu Syenit Khánh Thiện.

Điểm phân tích	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13
P	79,9	108,2	82,4	37,2	39,3	74,9	102,9	36,4	69,3	96,5	181,4	102,0	85,2
Ca	846,1	120,0	0,0	0,0	130,7	41,0	45,6	0,0	0,0	0,0	384,1	0,0	34,2
Sc	271,4	270,5	277,1	281,3	269,7	274,1	272,4	274,0	273,4	271,4	269,7	268,3	267,3
Ti	5,6	8,2	8,0	7,9	4,5	7,6	9,3	4,7	7,0	8,0	10,7	8,7	4,7
Y	2821,2	1335,0	562,2	1441,3	1022,0	525,5	1017,4	186,3	659,3	1551,3	4115,8	808,2	1797,5
Nb	4,3	6,7	2,1	3,2	3,4	2,1	3,1	2,7	2,6	4,6	31,4	3,9	2,7
La	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Ce	6,3	14,8	3,3	18,7	5,7	2,4	8,0	2,6	3,9	10,3	66,4	7,0	6,0
Pr	0,4	0,2	0,1	1,9	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	1,0	0,1	0,3
Nd	5,8	2,5	0,9	25,9	1,8	0,8	1,7	0,2	1,0	2,5	15,9	1,5	4,8
Sm	10,5	4,8	1,4	32,3	3,2	1,5	3,5	0,5	1,8	4,9	29,4	2,7	7,2
Eu	1,3	0,2	0,2	1,7	0,2	0,2	0,3	0,0	0,2	0,3	2,0	0,2	0,3
Gd	53,4	26,5	8,5	91,9	18,1	8,4	19,0	3,2	11,7	27,3	134,9	16,3	36,1
Tb	18,2	9,5	3,2	22,2	6,4	3,1	6,7	1,1	4,1	9,7	40,2	5,7	12,2
Dy	230,4	119,8	43,6	199,6	82,5	41,6	86,6	15,1	55,7	124,9	438,4	73,0	152,8
Ho	84,6	43,1	17,4	52,4	31,3	16,3	32,3	6,1	21,1	47,3	139,8	27,2	56,5
Er	400,4	189,1	89,0	198,6	150,3	84,7	151,3	29,8	104,4	224,5	571,0	125,0	259,9
Tm	77,8	35,7	18,6	35,2	30,0	18,6	29,4	6,2	21,2	43,3	97,4	24,5	48,7
Yb	612,4	274,6	156,5	266,0	240,9	165,1	231,9	52,0	177,0	340,1	741,4	197,5	381,8
Lu	94,1	42,1	25,8	38,5	38,6	29,8	36,4	8,9	30,1	53,9	116,0	32,4	61,3
Hf	7206,5	9275,5	6985,0	5943,1	8507,5	6321,0	7736,5	9127,6	7896,0	7717,6	6663,4	8195,5	8519,9
Ta	1,6	3,8	0,7	0,8	2,0	0,8	1,6	1,0	1,2	1,9	9,1	1,6	1,2
Hg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pb	90,7	71,8	69,7	15,5	28,2	42,2	66,6	5,9	17,6	41,6	90,4	23,2	23,2
Th	775,2	544,6	567,3	58,4	185,7	207,2	595,9	22,1	82,0	291,2	1205,4	146,1	146,1
U	863,1	648,6	634,0	160,0	266,9	423,1	590,6	60,1	174,9	388,5	690,8	221,3	221,3
Eu/Eu*	0,2	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ce/Ce*	6,6	55,7	34,4	7,3	43,6	57,5	63,9	75,3	66,8	34,4	47,7	44,7	14,9

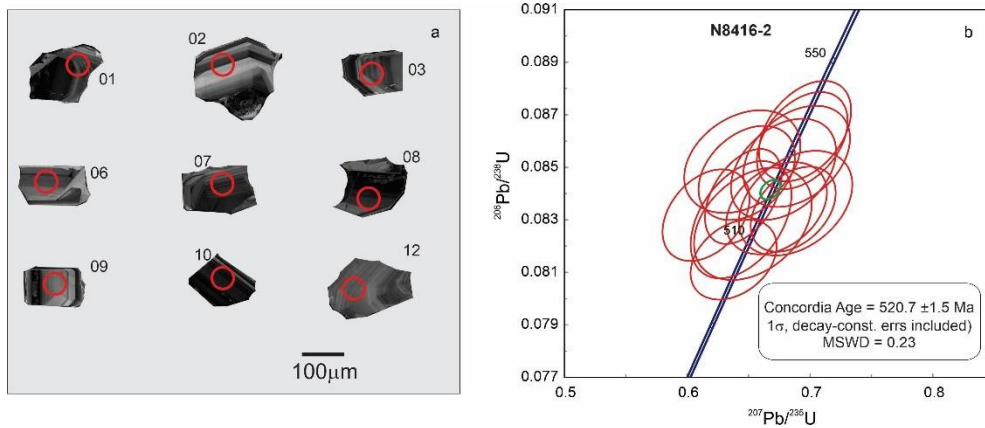
Nhóm mẫu syenit thạch anh biotit chiếm khối lượng lớn trong khối, đá có màu xám sáng, cấu tạo khối cả nát, kiến trúc tàn dư nửa tự hình (Hình 3a). Thành phần khoáng vật gồm: feldspar kali ~75–80%; thạch anh ~8–10%; biotit ~5–10%; carbonat ~3–6%. Khoáng vật phụ: allanit (orthit) ≤1%; sfen, zircon, apatit ít; quặng ~2–6%. Thạch anh dạng tha hình, thường bị ép dẹt và tắt lờn sóng mạnh; biotit và carbonat xâm nhiễm, tạo vi mạch cắt xuyên đá.

Tuy nhiên, ngoài thực địa chưa quan sát được quan hệ rõ ràng giữa hai nhóm đá này. Do đó, sự khác biệt về thành phần thạch học nhiều khả năng chỉ phản ánh sự biến đổi về thành phần khoáng vật theo không gian, hơn là sự tồn tại của các đơn vị magma riêng biệt.

5.2. Đặc điểm địa hóa đá tổng và nguyên tố hiếm vết của zircon

Về đặc điểm địa hóa đá, trong nghiên cứu của Chu và nnk. (2026), các đá syenit khối Khánh Thiện có thành phần SiO₂ và tổng kiềm cao, thuộc loại kiềm đến vôi-kiềm kali cao, với hàm lượng

MgO, CaO và TiO₂ thấp, phản ánh magma felsic đã trải qua quá trình phân đoạn. Thành phần đất hiếm đặc trưng bởi sự giàu LREE so với HREE, dị thường Eu không rõ rệt, cho thấy vai trò hạn chế của quá trình phân dị plagioclas. Các nguyên tố vi lượng thể hiện sự giàu các nguyên tố ái thạch quyển (LILEs) và nghèo các nguyên tố trường lực cao (HFSE; Nb, Ta, Ti), cùng dị thường Ti âm đặc trưng. Mặc dù mang dấu hiệu nghèo Nb-Ta điển hình của magma liên quan hút chìm, các mẫu đều nằm trong trường granite kiểu A trên các sơ đồ phân loại địa hóa, phản ánh bản chất của magma kiểu A có nguồn gốc từ manti được làm giàu trong các đới tách giãn. Các đá syenit và syenit nephelin khối Pia Ma (~520 Ma; Nguyễn và Nguyễn, 2009) có nhiều đặc điểm địa hóa tương đồng với syenit phức hệ Khánh Thiện, bao gồm hàm lượng kiềm tổng cao, phổ REE giàu LREE so với HREE và phổ nguyên tố vi lượng giàu LILE, nghèo HFSE với các dị thường âm Nb-Ta và Ti, phản ánh đặc trưng của magma kiềm đã tiến hóa. Tuy nhiên, các đá Pia Ma có dị thường Eu âm rõ rệt hơn và thành phần giàu Al hơn, cho thấy quá trình phân dị plagioclas diễn ra mạnh hơn so với syenit Khánh Thiện.



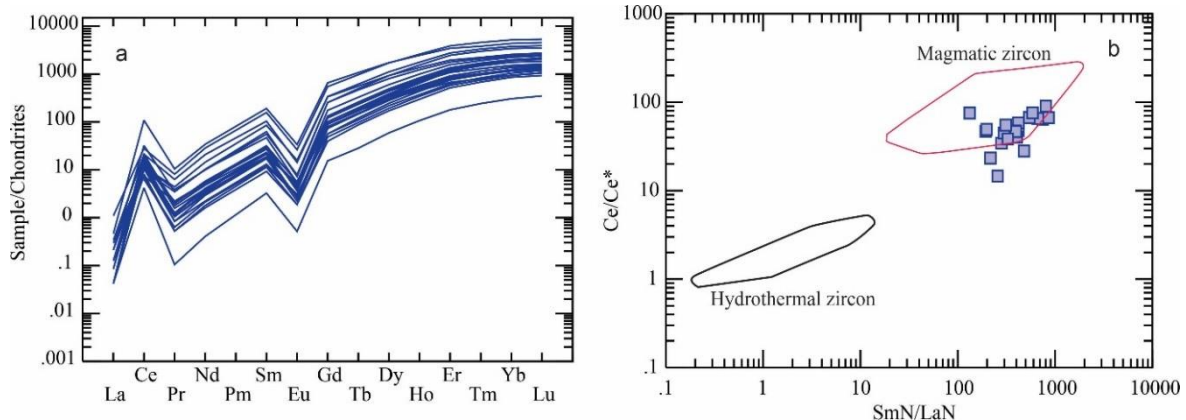
Hình 5. (a) Ảnh CL (cathodoluminescence) của các hạt zircon đại diện, thể hiện rõ cấu tạo phân đới dao động đặc trưng cho zircon nguồn gốc magma; các vòng tròn đỏ chỉ vị trí phân tích thành phần và tuổi U-Pb. (b) Biểu đồ concordia U-Pb của mẫu N8416-2 và kết quả tuổi Concordia.

Kết quả nghiên cứu thành phần nguyên tố chính và nguyên tố vết của các tinh thể zircon các đá syenit kiềm phức hệ Khánh Thiện (Bảng 1) cho thấy hàm lượng Hf cao, thay đổi từ 5943,1 đến 9275,5 ppm, hàm lượng các nguyên tố phóng xạ Th và U biến thiên rộng, với Th = 22,09–1205,36 ppm và U = 60,14–863,10 ppm. Trên biểu đồ REEs/Chondrit của zircon (Hình 4a) cho thấy sự giàu mạnh các nguyên tố đất hiếm nặng (HREE: Gd–Lu), trong khi các nguyên tố đất hiếm nhẹ (LREE: La–Nd) bị nghèo rõ rệt, tạo nên dạng phổ dốc mạnh từ trái sang phải. Zircon thể hiện dị thường Ce dương rõ rệt ($\text{Ce}/\text{Ce}^* > 1$) và dị thường Eu âm ($\text{Eu}/\text{Eu}^* < 1$), phản ánh điều kiện kết tinh trong môi trường magma oxy hóa và sự phân dị của plagioclas trong quá trình tiến hóa magma. Trên biểu đồ phân biệt $\text{Ce}/\text{Ce}^* - \text{SmN}/\text{LaN}$ (Hình 4b), các điểm phân tích zircon tập trung chủ yếu trong trường zircon hình thành trong magma

(Magmatic zircon), với giá trị Ce/Ce^* cao và SmN/LaN lớn, hoàn toàn tách biệt với trường zircon nhiệt dịch (Hydrothermal zircon). Điều này khẳng định zircon được hình thành chủ yếu từ quá trình kết tinh magma, không chịu ảnh hưởng đáng kể của tái kết tinh hay biến đổi nhiệt dịch về sau.

5.3. Đặc điểm tuổi đồng vị U-Pb

Zircon quan sát dưới ảnh cathodoluminescence (CL) (Hình 5a) chủ yếu có hình lăng trụ ngắn đến trung bình, biên cạnh sắc, thể hiện cấu trúc phân đới (oscillatory zoning) rõ ràng, đều, đặc trưng cho zircon nguồn gốc magma. Một số tinh thể có lõi được cho là zircon di sót từ nguồn và chúng bị mọc chồng bởi thể hệ zircon mới phần ngoài. Đặc điểm cấu trúc trên cho thấy zircon kết tinh trực tiếp từ dung thể magma và được bảo tồn tốt.



Hình 4. (a) Biểu đồ REE chuẩn hóa chondrite của zircon (b) Biểu đồ $\text{Ce}/\text{Ce}^* - \text{SmN}/\text{LaN}$ cho thấy các zircon nghiên cứu nằm trong trường zircon magma (Magmatic zircon) và phân biệt với trường zircon liên quan đến nhiệt dịch (Hydrothermal zircon).

Bảng 3. Thành phần Rb, Sr, Sm, Nd và tỷ lệ đồng vị trong các đá kiềm khu vực Khánh Thiện.

Số hiệu mẫu	loại đá	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Rb ⁸⁷ /Sr ⁸⁶	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(i)
K.293*	Syenit (Phia Ma)	50,59	177,47	0,8251	0,711950±0,0021
K.287*		85,38	48,42	5,1202	0,708197±0,0027
K.320*		92,29	1087,77	0,2455	0,708235±0,0016
YN01**	Syenit (Khánh Thiện)	70,9	189	0,3751	0,7105916±0,000004
YN02**		70,2	220	0,3186	0,7105729±0,000004
YN04**		57,8	255	0,2266	0,7102429±0,000005
Số hiệu mẫu	loại đá	Sm (ppm)	Nd (ppm)	Sm ¹⁴⁷ /Nd ¹⁴⁴	eNd(t)
K.293*	Syenit (Phia Ma)	0,26	1,19	0,13434	-6,83
K.287*		0,14	0,91	0,12508	-6,77
K.320*		0,47	4,39	0,11796	-5,11
YN01**	Syenit (Khánh Thiện)	3,94	20,8	0,18923	-6,0
YN02**		5,64	29,5	0,19129	-6,3
YN04**		4,26	22,6	0,18860	-6,4

* Các mẫu tham khảo theo số liệu của Nguyễn và Nguyễn (2009). Tỷ lệ Sr⁸⁷/Sr⁸⁶ chuẩn = 0,710248 ± 0,000008 (theo tiêu chuẩn Sr - NBS SRM). Kết quả tuổi của mẫu K.293 - K.287 - K.320 = 519 ± 40 Tr.n với Sr (I) = 0,706150.

** Số liệu của tác giả. Kết quả tuổi của mẫu được tính YN01 - YN02 - YN04 theo tuổi 520,7 ± 1,5 Tr.n. Số liệu Rb, Sr, Sm, Nd được lấy theo Chu và nnk. (2026).

Các tinh thể zircon có tỷ lệ Th/U cao, chủ yếu >0,4 (phổ biến 0,5–1,7; Bảng 2). Kết hợp với đặc điểm phân đới của khoáng vật zircon quan sát được trên ảnh CL cho thấy zircon kết tinh trực tiếp từ dung thể magma và không chịu ảnh hưởng đáng kể của tái kết tinh do quá trình biến chất hay biến đổi nhiệt dịch muộn. Kết quả định tuổi U–Pb zircon cho thấy phần lớn các điểm phân tích tập trung trong khoảng ~490–540 Tr.n, chúng phân bố chặt chẽ quanh đường concordia (Hình 5b) và xác định tuổi concordia 520,7 ± 1,5 Tr.n (1σ, MSWD = 0,23). Tuổi này được xác định là tuổi kết tinh magma của mẫu syenit nghiên cứu và là bằng chứng hoạt động magma kiềm giai đoạn Cambri sớm tại khu vực Khánh Thiện.

5.4. Đặc điểm đồng vị Sm–Nd và Rb–Sr

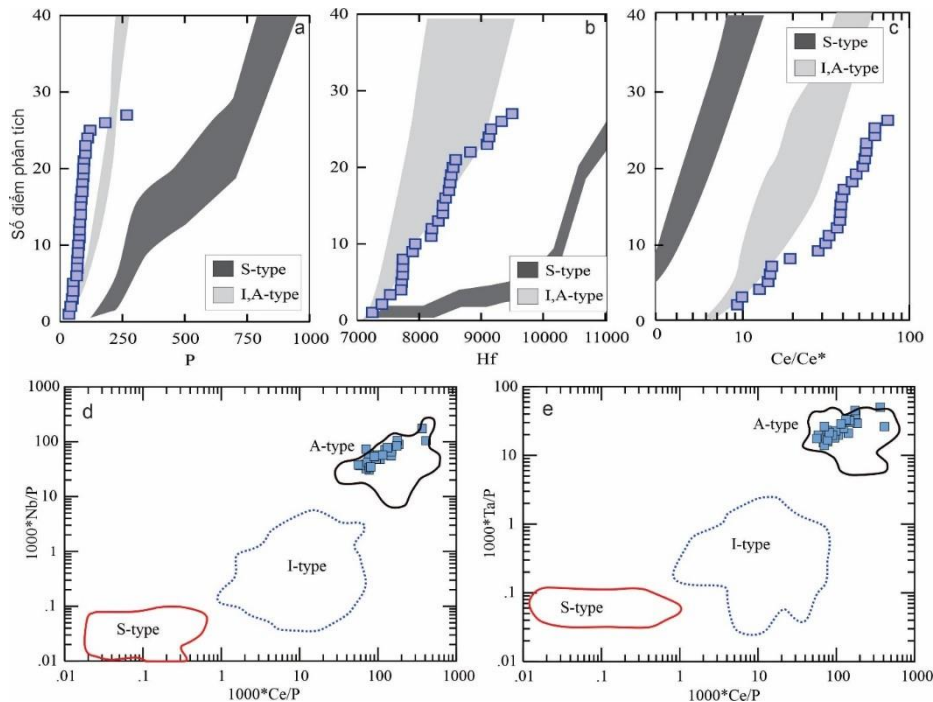
Đồng vị Sr–Nd. Ba mẫu đá syenit đại diện của phức hệ Khánh Thiện đã được lựa chọn để phân tích đồng vị Sr–Nd toàn đá trong nghiên cứu này và ba mẫu được thu thập từ công bố trước đây

(Nguyễn và Nguyễn (2009) để đối sánh (Bảng 3). Các mẫu nghiên cứu có hàm lượng Rb ở mức trung bình (50,6–92,3 ppm) và hàm lượng Sr biến đổi đáng kể (48,4–1087,8 ppm), với tỷ số Rb/Sr dao động từ 0,23 đến 5,12. Tỷ số ban đầu ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr nằm trong khoảng tương đối hẹp từ 0,70582 đến 0,70856. Tỷ số ban đầu ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd dao động từ 0,51161 đến 0,51238, cho thấy sự biến thiên đồng vị Nd không đáng kể giữa các mẫu nghiên cứu.

So với các số liệu đã được công bố trước đây (Bảng 3), các mẫu phân tích mới có khoảng biến thiên của tỷ số đồng vị Sr ban đầu tương tự, nhưng nhìn chung có giá trị tỷ số đồng vị Nd ban đầu thấp hơn. Sự biến thiên hẹp của các thành phần đồng vị Sr–Nd ban đầu cho thấy các đá syenit Khánh Thiện có nguồn gốc từ một nguồn magma giàu đồng vị (isotopically enriched source) với mức độ không đồng nhất về đồng vị tương đối hạn chế. Sự kết hợp giữa tỷ số ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ban đầu tương đối cao và thành phần Nd kém phóng xạ (unradiogenic Nd) phù hợp với nguồn manti giàu đã trải qua quá

Bảng 2. Số liệu phân tích đồng vị U–Pb khoáng vật zircon mẫu Syenit Khánh Thiện.

	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1s	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1s	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1s	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1s	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1s
'01	1,7	0,05895	0,00137	0,68638	0,01524	0,08340	0,00071	564,9	47,2	530,6	9,2	516,4	4,2
'02	0,7	0,05969	0,00196	0,69448	0,02236	0,08347	0,00090	590,8	70,4	535,5	13,4	516,8	5,3
'03	0,4	0,05487	0,00153	0,64856	0,01727	0,08478	0,00079	405,6	67,6	507,6	10,6	524,6	4,7
'04	0,6	0,05801	0,00163	0,68915	0,01910	0,08542	0,00085	531,5	56,5	532,3	11,5	528,4	5,0
'05	0,8	0,06048	0,00183	0,70822	0,02102	0,08433	0,00084	620,4	64,8	543,7	12,5	521,9	5,0
'06	0,6	0,05712	0,00219	0,66561	0,02392	0,08486	0,00095	498,2	89,8	518,0	14,6	525,1	5,7
'07	0,8	0,05749	0,00200	0,65346	0,02110	0,08284	0,00094	509,3	75,9	510,6	13,0	513,1	5,6
'08	1,0	0,05671	0,00113	0,67112	0,01320	0,08518	0,00072	479,7	44,4	521,4	8,0	527,0	4,3
'09	0,6	0,05914	0,00206	0,69956	0,02418	0,08559	0,00105	572,3	80,5	538,5	14,5	529,4	6,2
'10	1,6	0,05591	0,00158	0,64392	0,01804	0,08300	0,00098	450,0	63,0	504,7	11,1	514,0	5,9
'11	1,2	0,05528	0,00115	0,64570	0,01371	0,08388	0,00080	433,4	50,9	505,8	8,5	519,3	4,7
'12	0,7	0,05463	0,00177	0,64492	0,02082	0,08521	0,00086	398,2	76,8	505,3	12,9	527,2	5,1
'13	0,8	0,05924	0,00214	0,68608	0,02424	0,08365	0,00091	576,0	79,6	530,4	14,6	517,9	5,4
'14	0,6	0,05765	0,00206	0,66575	0,02356	0,08351	0,00096	516,7	79,6	518,1	14,4	517,0	5,7



Hình 6. Biểu đồ phân biệt zircon trong các loại magma granit I-, S- và A-type dựa trên thành phần nguyên tố vết. (a) Sự phân bố hàm lượng P (ppm), (b) Hf (ppm) và (c) Ce/Ce* theo điểm phân tích thành phần zircon (Burnham và Berry, 2017). (d) Biểu đồ tương quan Nb/P và Ta/P (e) so với Ce/P (Sawaki và nnk., 2024) zircon từ đá syenit phức hệ Khánh Thiện.

trình biến đổi hoặc tái làm giàu bởi vật chất vỏ (metasomatism hoặc crustal modification) trong thời gian dài trước khi xảy ra quá trình nóng chảy tạo magma.

6. Thảo luận

6.1. Phân loại đá magma

Các đặc điểm địa hóa cho thấy đá magma syenit phức hệ Khánh Thiện trong nghiên cứu này thuộc kiểu magma giàu kiềm, đặc biệt giàu K. Thành phần thạch học của đá đặc trưng nghèo plagioclas, thạch anh và giàu K-feldspar (chiếm khoảng 73–80%), phù hợp với kiểu đá magma syenit, syenit thạch anh. Sự hiện diện của khoáng vật biotit ± hornblend trong mẫu phản ánh magma ban đầu giàu vật chất H₂O. Sự gia tăng hàm lượng thạch anh cùng với sự suy giảm của hornblend và xu hướng ưu thế K-feldspar từ syenit biotit–hornblend sang syenit thạch anh biotit có thể phản ánh quá trình kết tinh phân đoạn tiến hóa của magma. Sự xuất hiện một số cấu tạo porphy trong đá cũng phản ánh quá trình kết tinh phân đoạn của đá.

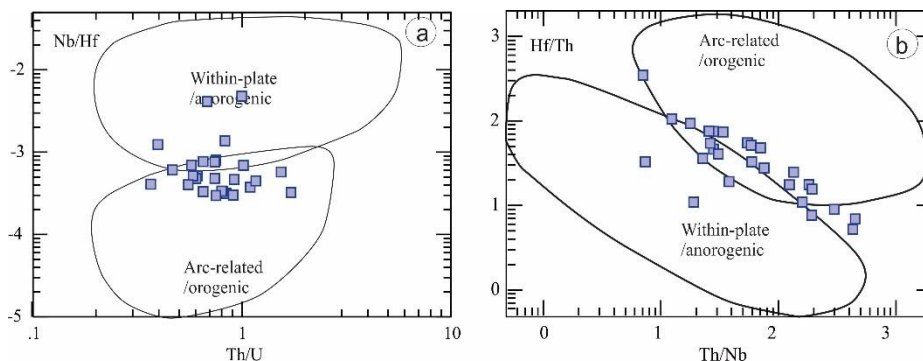
Theo phân loại của Chappell và White (1974) và Loiselle và Wones (1979), các đá magma xâm nhập felsic được chia thành các kiểu I, S, M và A, trong đó đá magma syenit chủ yếu thuộc kiểu I hoặc A (Bonin, 2007). Trong nghiên cứu của Chu và nnk. (2026) cho các đá khối Khánh Thiện và Nguyễn và Nguyễn (2009) cho các đá syenit khu vực Phia Ma, các đá syenit khu vực Đông Bắc có hàm lượng kiềm tổng ($\Sigma\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) cao (9,62–14,23%), Al_2O_3 tương đối cao (17,16–22,98%), chỉ số kiềm–nhôm $\text{Al} < 1$ đặc trưng cho kiểu miaskitic. Các chỉ số $\text{A/NK} > 1$ cùng với $\text{A/CNK} < 1$ (chỉ số Shand) phản ánh magma thuộc kiểu I hoặc A. Sự có mặt các khoáng vật hornblend trong các mẫu đá và vắng mặt các khoáng vật giàu Al như muscovit, cordierit, garnet cũng cho thấy đá nghiên cứu không thuộc magma kiểu S mà phù hợp hơn với đặc trưng của magma kiểu I hoặc kiểu A (Chappell và White, 1974).

Theo Burnham và Berry (2017), zircon kết tinh từ magma kiểu I và A có hàm lượng P và Hf thấp hơn, trong khi giá trị Ce/Ce* cao hơn so với zircon từ magma kiểu S. Sự khác biệt này phản ánh nguồn magma giàu oxy hóa hơn và ít ảnh hưởng của vật chất trầm tích (giàu P, Hf) trong các

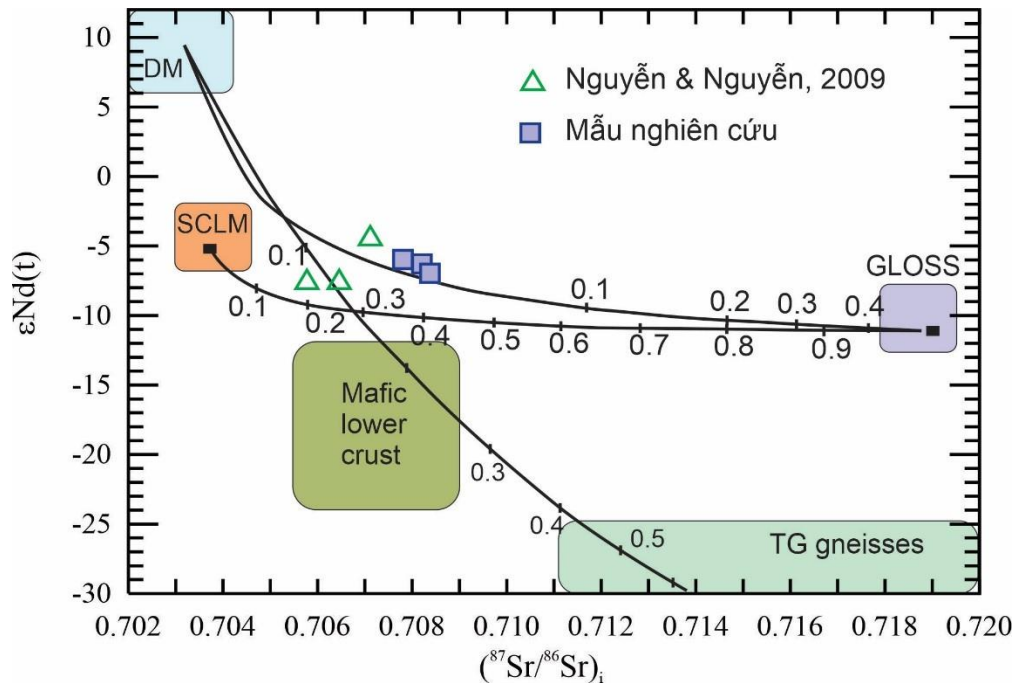
magma kiểu I và A. Trên hình 6a, b, c, sự phân bố thành phần P, Hf và Ce/Ce* của zircon từ các đá syenit phức hệ Khánh Thiện chủ yếu nằm trong hoặc tiệm cận các trường magma kiểu I, A, đặc điểm này hoàn toàn phù hợp với nghiên cứu của Chu và nnk. (2026) và Nguyễn và Nguyễn (2009) cho các đá magma syenit khu vực Đông Bắc. Nghiên cứu của Sawaki và nnk. (2024), thành phần zircon từ các đá granitoid kiểu A thể hiện các tương quan tỷ số nguyên tố Nb/P, Ta/P và Ce/P cao hơn so sánh với zircon từ granitoid kiểu I và S. Trong magma kiểu A, các nguyên tố HFSEs như Nb và Ta ít tương thích vào các pha khoáng vật sớm kết tinh và do đó chúng tích lũy tương đối cao trong pha magma còn lại, trong khi đó zircon trong đá granitoid kiểu I thường nghèo Nb và Ta, còn zircon từ granitoid S-type đặc trưng bởi nguyên tố P cao và Ce thấp do ảnh hưởng của môi trường magma giàu nhôm và kết tinh sớm của apatit (làm nghèo P trong pha lỏng; Sawaki và nnk., 2024). Sử dụng biểu đồ tương quan Nb/P so với Ce/P và Ta/P so với Ce/P (Hình 6d, e) cho thấy các mẫu đá syenit phức hệ Khánh Thiện tập trung hoàn toàn trong trường syenit kiểu A, tách biệt rõ rệt so với các trường magma kiểu I và S. Đặc điểm thành phần zircon trong nghiên cứu này cũng hoàn toàn tương đồng với địa hóa nguyên tố các đá tổng, điển hình như giàu các nguyên tố lithophil, nghèo (HFSEs như Ta, Nb, Ti) thuộc syenit kiểu A (Chu và nnk., 2026). Từ các kết quả nghiên cứu về đặc điểm địa hóa và thạch học cho thấy các thành tạo syenit phức hệ Khánh Thiện thuộc granit kiềm kiểu A.

Đá magma syenit, đặc biệt là syenit kiểu A, là nhóm đá magma xâm nhập giàu kiềm, thường được cho là hình thành trong bối cảnh kiến tạo tách giãn nội mảng hoặc tách giãn sau va chạm mảng (Eby, 1992; Le Maitre và nnk., 2002). Trong nhiều trường hợp, các bối cảnh kiến tạo nội mảng hoặc sau va chạm khó nhận dạng rõ ràng trên cơ sở số liệu địa hóa đá tổng, đặc biệt là các đá cổ đã bị tác động bởi nhiều pha kiến tạo và ít nhiều bị biến đổi. Do đó, các số liệu thành phần nguyên tố vết của zircon, kết hợp với đồng vị Nd, Sr (các số liệu thường không bị biến đổi do tác động biến đổi do tác động của biến chất về sau) được xem là công cụ hữu hiệu để luận giải nguồn và bản chất kiến tạo của các đá magma (Bonin, 2007; Grimes và nnk., 2007, 2015; Sawaki và nnk., 2024). Các tỷ số nguyên tố như Nb/Hf, Th/U, Th/Nb và Hf/Th trong zircon phản ánh đồng thời nguồn magma và mức độ ảnh hưởng của các quá trình kiến tạo hình thành magma (Grimes và nnk., 2007, 2015). Trên biểu đồ Nb/Hf so với Th/U (Hình 7a) và Hf/Th so với Th/Nb (Hình 7b), phần lớn các điểm phân tích zircon tập trung trong vùng chuyển tiếp giữa trường nội mảng và magma cung. Các giá trị Nb/Hf tương đối cao, trong khi tỷ số Hf/Th và Th/Nb trung bình đến thấp, phản ánh nguồn magma đã chịu ảnh hưởng của quá trình làm giàu bởi vật chất vỏ lục địa. Các kết quả này cũng hoàn toàn phù hợp với đặc điểm nghèo Nb, Ta, Ti ghi nhận trong thành phần đá tổng (Chu và nnk., 2026; Nguyễn và Nguyễn, 2009).

6.2. Bản chất kiến tạo các đá magma syenit phức hệ Khánh Thiện



Hình 7. Biểu đồ phân biệt bối cảnh kiến tạo dựa trên thành phần nguyên tố vết của zircon (Grimes và nnk., 2007, 2015) syenit phức hệ Khánh Thiện: (a) Nb/Hf – Th/U và (b) Hf/Th – Th/Nb. Các điểm zircon chủ yếu phân bố trong và gần các trường liên quan cung núi lửa-tạo núi (arc-related/orogenic), với xu hướng chồng lấn sang trường nội mảng (within-plate/anorogenic).



Hình 8. Biểu đồ đồng vị $\epsilon Nd(t)$ – $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ của syenit phức hệ Khánh Thiện. DM: nguồn manti nghèo, SCLM: nguồn manti thạch quyển, GLOSS: Nguồn trầm tích hút chìm.

Các giá trị đồng vị $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ cao và $\epsilon Nd(t)$ âm và biến thiên hẹp ghi nhận được trong các mẫu syenit không cho thấy bằng chứng nhiễm vỏ nông hoặc trầm tích mạnh trong quá trình xâm nhập (thường gây ra biến thiên lớn các giá trị đồng vị). Các đặc điểm địa hóa và đồng vị này phản ánh nguồn manti sinh magma syenit phức hệ Khánh Thiện đã bị làm giàu bởi vật chất có nguồn gốc vỏ lục địa. Các kết quả nghiên cứu này cũng tương đồng với các kết quả đã công bố đối với đặc điểm đồng vị đã được công bố đối với các đá syenit cùng tuổi ở khu vực Phia Ma (Hình 8; Nguyễn và Nguyễn, 2009). Do đó, đặc điểm đồng vị Nd, Sr ghi nhận trên các mẫu nghiên cứu nhiều khả năng là sản phẩm của các quá trình nóng chảy từ một nguồn manti đã được làm giàu do tác động của vỏ lục địa (Hình 8).

Đặc điểm thành phần zircon và đồng vị Nd, Sr cho thấy các đá syenit phức hệ Khánh Thiện không điển hình là sản phẩm trong bối cảnh nội mảng thuần túy kiểu nấm manti (plume, Hình 7a, b; Bảng 3). Các đá magma kiểu nấm manti thuần túy thường thành phần nguyên tố gần gũi với OIB, điển hình như Nb, Ta cao, $\epsilon Nd(t)$ dương hoặc xấp xỉ 0 và tỷ số $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ thấp đến trung bình, phản ánh nguồn manti sâu tương đối nguyên thủy. Tuy nhiên, các đặc điểm địa hóa và đồng vị này không

được ghi nhận trong các mẫu nghiên cứu. Mặc dù các nghiên cứu gần đây đã đề xuất sự tồn tại của các tỉnh magma felsic quy mô lớn (SLIP), trong đó Pinghe Silicic LIP (~510–460 Ma) được xem là có thể liên quan đến hoạt động nấm manti hoặc quá trình dâng trôi của manti quyển mềm dọc rìa Đông Bắc Gondwana. Tuy nhiên giả thuyết này vẫn còn nhiều tranh luận và chủ yếu dựa trên sự tương đồng về tuổi hơn là đặc điểm địa hóa magma, hiện chưa có bằng chứng địa chất hoặc địa hóa cho thấy khu vực Đông Bắc Việt Nam và phần phía nam khối Nam Trung Hoa là một phần của một sự kiện magma quy mô lớn tương tự, cũng như các đặc điểm địa hóa và đồng vị magma chưa phản ánh sự điển hình magma có nguồn plume nguyên thủy. Do đó, mặc dù không thể loại trừ hoàn toàn vai trò của các quá trình động lực manti sâu trong việc thúc đẩy nóng chảy vỏ và manti thạch quyển, các bằng chứng địa hóa, đồng vị Sr–Nd và đặc điểm zircon hiện có không ủng hộ mô hình nấm manti (LIP) như cơ chế chi phối sự hình thành magma syenit ở khu vực Đông Bắc Việt Nam.

Ngược lại, magma hình thành trong môi trường tách giãn sau va chạm mảng thường bắt nguồn từ manti thạch quyển đã bị biến đổi do tác động của vỏ mafic sâu, do đó chúng mang dấu ấn địa hóa kiểu chuyển tiếp giữa magma cung và nội

mảng, thể hiện qua sự làm giàu tương đối mạnh của nhóm LILEs và LREEs, trong khi Nb, Ta, Ti bị làm nghèo tương đối (Nguyễn và Nguyễn, 2009; Chu và nnk., 2026), cùng với các số liệu đồng vị $\epsilon\text{Nd}(t)$ âm và $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ tương đối cao (Hình 8). Quá trình metasomat hóa này cũng giải thích đặc điểm giàu LILEs và LREEs, nghèo tương đối các nguyên tố HFSE (Nb, Ta và Ti) của đá magma, đồng thời tạo nên các đặc trưng địa hóa zircon như Ce/Ce^* cao, Eu/Eu^* thấp và các tỷ số Nb/Hf, Th/U và Th/Nb (Chu và nnk., 2026).

6.3. Ý nghĩa kiến tạo khu vực và khả năng đất hiếm liên quan

Sự ghi nhận hoạt động magma syenit tuổi Cambri sớm (~520 Ma) khu vực Yên Bái, Đông Bắc Việt Nam, mang ý nghĩa đặc biệt quan trọng đối với việc luận giải bối cảnh kiến tạo Paleozoi sớm của khu vực. Các thành tạo syenit khu vực Phia Ma (Đông Bắc Việt Nam) cũng được mô tả bao gồm nhiều biến thể magma kiềm-siêu kiềm thành phần từ siêu mafic-mafic kiềm đến syenit nephelin và các mạch pegmatit (Nguyễn và Nguyễn, 2009). Các thành tạo syenit khu vực Phia Ma đã ghi nhận tuổi 519 ± 40 Tr.n bằng phương pháp phân tích đồng vị Sm-Nd, tuy nhiên bên cạnh đó cũng ghi nhận tuổi Permi muộn khu vực Chợ Đồn (Nguyễn và Nguyễn, 2009). Các kết quả nghiên cứu này khẳng định sự tồn tại các thành tạo magma syenit tuổi Cambri sớm hình thành trong chế độ kiến tạo tách giãn sau tạo núi khu vực Đông Bắc Việt Nam. Kết quả này cũng hoàn toàn phù hợp với nghiên cứu các thành tạo magma Cambri sớm khu vực Chợ Đồn (Nb, Sr thấp, giá trị $\epsilon\text{Nd}(t)$ âm và $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ cao; Nguyễn và Nguyễn, 2009). Trong khu vực Đông Bắc Việt Nam, các bằng chứng địa tầng đã ghi nhận sự hiện diện các đá trầm tích tuổi Neoproterozoi-Cambri sớm và chúng có mối liên hệ chặt chẽ với rìa nam khối Cathaysia (Nam Trung Hoa) trong Neoproterozoi - Paleozoi sớm (Trần và Vũ, 2009). Các nghiên cứu về tuổi U-Pb zircon mảnh vụn và đặc điểm đồng vị của các đá trầm tích trong khu vực cũng cho thấy phổ tuổi và đặc trưng nguồn vật liệu rất tương đồng với các tổ hợp trầm tích Neoproterozoi của Cathaysia, cho thấy chúng có một nền vỏ cổ chung hoặc ít nhất chúng nằm gần gũi nhau và khá đồng nhất về mặt kiến tạo (X. H. Li và nnk., 2008; Tran, 2023). Trong bối cảnh đó, Đông Bắc Việt Nam nhiều khả năng là phần kéo dài

về phía tây nam của hệ thống Cathaysia, hoặc nằm trong miền lân cận Cathaysia.

Trong Mesoproterozoi đến Neoproterozoi siêu lục địa Rodinia được hình thành và ổn định trong bối cảnh hợp nhất lục địa liên quan đến các sự kiện va chạm quy mô lớn cuối Mesoproterozoi - Neoproterozoi sớm (khoảng 1,3-0,9 tỷ năm). Sự tan rã của Rodinia trong Neoproterozoi, bắt đầu khoảng 825-800 Tr.n và kéo dài đến khoảng 750-700 Tr.n, đã dẫn đến sự phát triển rộng rãi các đá magma mafic và các bồn trầm tích, đánh dấu giai đoạn tái cấu trúc kiến tạo toàn cầu dẫn đến phân chia các lục địa và hình thành các đại dương Neoproterozoi (Z. X. Li và nnk., 2008; Cawood và nnk., 2013). Sau giai đoạn tách giãn này, các mảnh lục địa tách ra từ Rodinia, bao gồm Cathaysia, bắt đầu dịch chuyển và tham gia vào chuỗi các quá trình hút chìm, đóng đại dương và va chạm lục địa quy mô lớn trong khoảng 650-520 Tr.n dẫn đến sự hợp nhất hình thành siêu lục địa Gondwana và các đới tạo núi kéo dài dọc theo rìa của siêu lục địa này. Mặc dù Cathaysia không ghi nhận đầy đủ các đặc trưng của một đới tạo núi Pan-African điển hình (ví dụ: ophiolit, cung magma hay biến chất áp suất cao quy mô lớn), điều này chỉ ra rằng khu vực này nhiều khả năng không nằm trên các đới khâu chính của Gondwana mà thuộc miền ngoại vi, chịu ảnh hưởng gián tiếp của các quá trình hợp nhất lục địa (Collins và Pisarevsky, 2005; L. Li và nnk., 2017). Tuy nhiên, tuổi U-Pb zircon khoảng 533 Ma trên các đá biến chất nhiệt độ cao tại Cathaysia cho thấy khu vực này vẫn ghi nhận một pha tái hoạt động nhiệt - kiến tạo đồng thời với giai đoạn cuối của tạo núi Pan-African, phản ánh ảnh hưởng của quá trình hợp nhất Gondwana mặc dù không trực tiếp nằm trong các đới khâu chính (Collins và Pisarevsky, 2005; L. Li và nnk., 2017).

Quá trình tạo núi Pan-African diễn ra từ khoảng 650-500 Ma và thường được chia thành ba đới chính gồm đới phía Tây (Brasiliano-Damara, 630-600 Ma), đới trung tâm (East African-Mozambique, khoảng 540 Ma) và đới phía Đông (Kuunga Orogen, khoảng 530-515 Ma). Trong đó, đới Kuunga được hình thành do sự va chạm giữa Ấn Độ, Tây Úc và Đông Nam Cực trong giai đoạn cuối của quá trình hợp nhất Gondwana, đánh dấu pha tạo núi trẻ nhất của hệ Pan-African (Collins và Pisarevsky, 2005; L. Li và nnk., 2017). Theo các nghiên cứu về cổ địa lý, đặc điểm nguồn trầm tích gần đây, Cathaysia được cho là nằm ở rìa

phía bắc Đông Gondwana, tiếp giáp Tây Úc và Đông Nam Cực, ngay gần đới tạo núi phía Đông trong giai đoạn khoảng 540–530 Tr.n. Ghi nhận đá biến chất nhiệt độ cao tuổi khoảng 533 Ma cho thấy Cathaysia đã chịu ảnh hưởng của các quá trình tái hoạt động nhiệt – kiến tạo liên quan đến tiến hóa của đai tạo núi Đông Gondwana (L. Li và nnk., 2017). Sau khi quá trình tạo núi kết thúc, khu vực chuyển sang giai đoạn tách giãn sau tạo núi. Hoạt động magma kiềm đến á kiềm, bao gồm các tổ hợp syenit, syenit nephelin và granitoid kiểu A, cùng với biến chất nhiệt và tái hoạt động thạch quyển, đã phát triển rộng rãi ở nhiều khu vực như rìa Bắc Gondwana, Đông Phi, Ấn Độ, Úc... tuổi khoảng 550 – 537 Tr.n (Goodenough và nnk., 2010; Shellenutt và nnk., 2017). Các hoạt động magma này được giải thích là hệ quả của quá trình mỏng hóa thạch quyển, làm nóng chảy từng phần nguồn manti thạch quyển đã làm giàu do tác động của nóng chảy đồng thời của vỏ lục địa sâu hình thành các magma kiềm sau tạo núi (L. Li và nnk., 2017). Trong bối cảnh đó, Đông Bắc Việt Nam, được xem là phần rìa tây nam hoặc miền chuyển tiếp của khối Cathaysia, nhiều khả năng cũng chịu ảnh hưởng từ các quá trình tách giãn sau va chạm tạo núi của sự kiện hội nhập Gondwana hình thành nên các đá syenit tuổi khoảng 520 Tr.n ghi nhận trong khu vực Đông Bắc Việt Nam. Tuổi thành tạo syenit (~520 Ma) gần như đồng thời với tuổi biến chất khoảng 533 Ma của Cathaysia và thời gian hoạt động của đới Kuunga (khoảng 530–515 Ma), cho thấy khả năng các đá syenit khu vực Đông Bắc Việt Nam có thể là sản phẩm của giai đoạn tách giãn sau tạo núi của đai Kuunga. Mô hình này cũng phù hợp với đặc điểm địa hóa và đồng vị Nd–Sr của đá nghiên cứu, phản ánh quá trình nóng chảy từng phần của manti thạch quyển đã bị làm giàu do tác động của nguồn vỏ, điển hình bối cảnh tách giãn sau va chạm hơn là liên quan đến hoạt động của nham manti. Kết quả nghiên cứu này góp phần củng cố giả thuyết rằng Đông Bắc Việt Nam là phần kéo dài về phía tây nam của Cathaysia. Đồng thời, sự ghi nhận hoạt động magma syenit hậu tạo núi tuổi khoảng 520 Ma cũng ủng hộ mô hình cho rằng Cathaysia nằm ở rìa bắc Đông Gondwana, có quan hệ gần gũi với Tây Úc, chịu ảnh hưởng của đới tạo núi Kuunga trong giai đoạn khoảng 530–515 Tr.n.

Bên cạnh ý nghĩa về magma kiến tạo khu vực, các đá syenit phức hệ Khánh Thiện cũng cho thấy

tiềm năng khoáng sản đất hiếm đáng được quan tâm. Đặc điểm thạch học của đá cho thấy các mẫu đá chứa các khoáng vật phụ giàu REEs điển hình như allanit, cùng với sphen, apatit. Trong đó, allanit (đạt tới khoảng 1%) là pha chứa LREEs chủ yếu, trong khi sphen và apatit cũng có khả năng tích lũy REEs, Th và Y ở mức độ nhất định. Tổ hợp khoáng vật phụ này, kết hợp với đặc điểm giàu LREEs của đá tổng (Chu và nnk., 2026; Nguyễn và Nguyễn, 2009), phản ánh sự làm giàu các nguyên tố không tương thích trong quá trình tiến hóa magma. Sự xuất hiện của allanit cũng phản ánh điều kiện oxy hóa tương đối cao và/hoặc dung thể magma giàu chất bốc của syenit phức hệ Khánh Thiện. Sự kết tinh sớm của allanit cho thấy các nguyên tố đất hiếm đã được làm giàu ngay từ giai đoạn đầu của quá trình tiến hóa magma. Trong bối cảnh hình thành magma sau tạo núi, nguồn manti thạch quyển đã bị làm giàu bởi vật chất vỏ kết hợp với quá trình phân đoạn mạnh của magma đã tạo điều kiện thuận lợi cho sự tập trung các nguyên tố không tương thích, bao gồm REEs, Th và U, trong pha nóng chảy còn lại.

Mặc dù hàm lượng allanit (sphen, apatit) trong đá không phản ánh trực tiếp giá trị kinh tế của quặng đất hiếm, sự hiện diện phổ biến của các khoáng vật phụ này cùng với đặc điểm địa hóa của syenit cho thấy phức hệ Khánh Thiện có khả năng có triển vọng đối với khoáng hóa REEs liên quan magma kiềm. Các nghiên cứu tiếp theo về thành phần hóa học khoáng vật allanit, apatit, sphen, cũng như đánh giá sự phân bố của REE trong các pha khoáng vật phụ và các đới biến đổi nhiệt dịch, sẽ là cơ sở quan trọng để làm rõ tiềm năng khoáng sản đất hiếm của khu vực.

7. Kết luận

Trên cơ sở tổng hợp các đặc điểm thạch học, định tuổi U–Pb zircon và thành phần địa hóa nguyên tố vết zircon, có thể rút ra rằng các đá syenit phức hệ Khánh Thiện có thành phần thạch học đặc trưng của magma kiềm–giàu K và đã trải qua quá trình phân dị kết tinh mạnh. Tuổi U–Pb zircon $520,7 \pm 1,5$ Tr.n xác định pha magma hình thành trong giai đoạn Cambri sớm của phức hệ. Đặc trưng địa hóa nguyên tố vết của zircon cho thấy magma thuộc kiểu A, liên quan đến môi trường kiến tạo tách giãn. Các đá syenit phức hệ Khánh Thiện được hình thành từ nóng chảy từng phần của nguồn manti thạch quyển đã bị làm giàu

yếu bởi vật chất vỏ, nhiều khả năng gắn liền với môi trường tách giãn sau va chạm kế tiếp các pha tạo núi trong quá trình hình thành siêu lục địa Gondwana. Các kết quả nghiên cứu này góp phần làm sáng tỏ hơn khả năng phần Đông Bắc Việt Nam là phần kéo dài của lục địa Cathaysia trong Proterozoi – Paleozoi sớm.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện với sự hỗ trợ từ đề tài nghiên cứu “Đặc điểm các thành tạo granitoid và sinh khoáng nội sinh liên quan vùng ĐKrông - A Lưới”, mã số. TNMT.ĐL.2025.03.02.

Đóng góp của các tác giả

Chu Văn Dũng - Xây dựng ý tưởng nghiên cứu; thực hiện phân tích và xử lý số liệu; xây dựng nội dung bản thảo; viết bản thảo ban đầu; Trần Mỹ Dũng - Tham gia phân tích kết quả; rà soát, chỉnh sửa bản thảo; đóng góp ý kiến cho phần thảo luận và diễn giải số liệu; Lê Xuân Trường - Rà soát và chỉnh sửa bản thảo; đóng góp ý kiến chuyên môn và hoàn thiện nội dung khoa học của bài báo; Trịnh Xuân Hòa - Tham gia hiệu chỉnh nội dung khoa học của bản thảo; Ngô Xuân Thành - Đề xuất và phát triển ý tưởng nghiên cứu; xây dựng cấu trúc bài báo; định hướng và phát triển nội dung thảo luận; rà soát, chỉnh sửa và hoàn thiện bản thảo.

Tài liệu tham khảo

Andersen, T. (2002). Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192, 59-79.

Bonin, B. (2007). A-type granites and related rocks: Evolution of a concept. *Lithos*, 97, 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.12.007>.

Burnham, A. D., & Berry, A. J. (2017). Formation of Hadean granites by melting of igneous crust. *Nature Geoscience*, 10, 457-461. <https://doi.org/10.1038/ngeo2942>.

Cawood, P. A., Hawkesworth, C. J., & Dhuime, B. (2013). The continental record and the generation of continental crust. *Earth-Science Reviews*, 120, 77-93. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.002>.

Chappell, B. W., & White, A. J. R. (1974). Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8, 173-174.

Chu, V. D., Tran, M. D., & Ngo, X. T. (2026). Post-collisional extension during the Early Paleozoic in Northeast Vietnam: Evidence from syenitic complex. *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Critical Mineral Resource Development for Energy Transition (ISCMRD 2026)*. ISBN: 978-604-76-3351-7.

Collins, A. S., & Pisarevsky, S. A. (2005). Amalgamating eastern Gondwana: The evolution of the Circum-Indian Orogens. *Geology*, 33, 821-824. <https://doi.org/10.1130/G21300.1>.

Eby, G. N. (1992). Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7), 641-644. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0641:CSOTAT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0641:CSOTAT>2.3.CO;2)

Goodenough, K., Thomas, R. J., De Waele, B., et al. (2010). Post-collisional magmatism in the central East African Orogen: The Maevarano Suite of north Madagascar. *Lithos*, 116-117, 18-34.

Grimes, C. B., John, B. E., Kelemen, P. B., Mazdab, F. K., Wooden, J. L., Cheadle, M. J., Hanghøj, K., & Schwartz, J. J. (2007). Trace element chemistry of zircon from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geology*, 35, 643-646. <https://doi.org/10.1130/G23603A.1>

Grimes, C. B., Wooden, J. L., Cheadle, M. J., & John, B. E. (2015). Fingerprinting tectono-magmatic provenance using trace elements in zircon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170, 46. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1199-3>

Hoàng, T. S. và nnk. (1997). *Địa chất và Khoáng sản nhóm tờ Đoan Hùng - Yên Bình, tỷ lệ 1:50.000*. Lưu trữ Địa chất.

Le Maitre, R. W. et al. (2002). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press.

- Li, L., Lin, S., Xing, G., Jiang, Y., & He, J. (2017). First direct evidence of Pan-African Orogeny associated with Gondwana assembly in the Cathaysia Block of Southern China. *Scientific Reports*, 7, 794. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00950-x>
- Li, S. et al. (2017). Paleomagnetic constraints on the Mesozoic-Cenozoic paleolatitudinal and rotational history of Indochina and South China: review and updated kinematic reconstruction. *Earth-Science Reviews*, 171, 58-77.
- Li, X. H. et al. (2008). Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks. *Precambrian Research*, 159, 79-94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.06.004>
- Li, Z. X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S., Davidson, A., De Waele, B., Ernst, R. E., Fitzsimons, I. C. W., Fuck, R. A., Gladkochub, D. P., Jacobs, J., Karlstrom, K. E., Lu, S., Natapov, L. M., Pease, V., Pisarevsky, S. A., Thrane, K., & Vernikovsky, V. (2008). Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Research*, 160, 179-210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.018>
- Loiselle, M. C., & Wones, D. R. (1979). Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11(7), 468.
- Ludwig, K. R. (2003). *User's manual for a geochronological toolkit for Microsoft Excel (Isoplot/Ex version 3.0)*.
- Lưu, H. H. (1998). *Bản đồ địa chất tỷ lệ 1:50.000 nhóm tờ Bảo Yên* [Bản đồ địa chất]. Liên đoàn Bản đồ Địa chất miền Bắc.
- Nguyễn, T. C., và Nguyễn, T. D. (2009). Nguồn gốc syenit nephelin Đông Bắc Việt Nam. *Tạp chí Các Khoa học về Trái Đất*, 31(1), 73-84.
- Nguyễn, V. Q. và nnk. (1992). *Địa chất và Khoáng sản nhóm tờ Na Hang - Ba Bể F48-56A (Thomthay), F48-56c (Ba Bể) 1:50.000*. Lưu trữ Địa chất.
- Pu, W., Gao, J. F., Zhao, K. D., Ling, H. F., & Jiang, S. Y. (2005). Separation method of Rb-Sr, Sm-Nd using DCTA and HIBA. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 41(4), 445-450.
- Pu, W., Zhao, K., Ling, H., & Jiang, S. (2004). High precision Nd isotope measurement by means of Triton TI mass spectrometry. *Acta Geoscientia Sinica*, 271-274.
- Roger, F., Leloup, P. H., Jolivet, M., Lacassin, R., Trinh, P. T., Brunel, M., & Seward, D. (2000). Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology. *Tectonophysics*, 321, 449-466.
- Sawaki, Y., Asanuma, H., Sakata, S., Abe, M., Ueda, H., Fujisaki, W., & Ohno, T. (2024). Zircon trace-element compositions in Cenozoic granitoids in Japan: Revised discrimination diagrams for zircons in I-type, S-type, and A-type granites. *Island Arc*, 33, e12539. <https://doi.org/10.1111/iar.12539>
- Shellnutt, J. G., Pham, N. H. T., Denyszyn, S. W., et al. (2017). Timing of collisional and post-collisional Pan-African Orogeny silicic magmatism in south-central Chad. *Precambrian Research*, 301.
- Tapponnier, P. et al. (1990). Extrusion tectonics in Asia. *Geological publications*.
- Tran, V. T. (Ed.) (2023). *Geology and Georesources of Việt Nam*. Youth Publishing House, Hanoi.
- Trần, V. T., và Vũ, K. (chủ biên) (2009). *Địa chất và tài nguyên Việt Nam*. Nhà xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội, 589 trang.
- Trần, X. (1988). *Địa chất và Khoáng sản 1:200.000 Nhóm tờ Bắc Quang - Mã Quang, Hà Tuyên (Hà Giang) F-48-XV và F-48-IX*. Lưu trữ Địa chất.
- Wang, & Burchfiel (2000). Structural and tectonic evolution of Asia.
- Whalen, J. B., Currie, K. L., & Chappell, B. W. (2010). A-type granites and syenites. *Lithos*, 119, 1-23.
- Yuan, H. L., Wu, F. Y., Gao, S., Liu, X. M., Xu, P., & Sun, D. Y. (2003). Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern

China by laser ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48, 2411-2421.