

桂东南各构造时期含稀土矿物花岗岩岩相学及稀土成矿影响因素探讨

黄美玲, 蒋军领, 黄延凤, 谢海银, 祝靖骅, 周云*

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年5月12日; 录用日期: 2026年6月16日; 发布日期: 2026年6月25日

摘要

桂东南位于华南著名的钦杭断裂带西南端, 隶属于著名的大容山-十万大山构造-岩浆岩带, 是研究扬子板块与华夏板块碰撞造山过程的重要地区。本论文旨在通过桂东南各时期含稀土矿物花岗岩的岩相等分析探讨该区域各时期花岗岩中稀土矿物的分布、种类及其与花岗岩成因的关联。本论文系统分析了桂东南地区各时期与稀土矿相关的花岗岩的岩相学特征、矿物组合、地球化学性质及构造背景等, 揭示了各时期花岗岩的形成构造背景。研究表明发育离子吸附型稀土矿的花岗岩岩体富含萤青石、紫苏辉石及独居石、磷钇矿等稀土副矿物。高初始稀土含量、易风化矿物组合及长期风化历史是成矿的关键因素。本论文通过研究稀土矿物在花岗岩中的分布特征、富集特点及其对源区岩浆演化的指示作用, 旨在揭示稀土元素在花岗岩中的地球化学行为及其对花岗岩成分变化的影响机制, 研究成果将为稀土资源勘查、花岗岩成因研究及地质构造解析提供重要科学依据。

关键词

花岗岩, 稀土矿, 岩石地球化学, 桂东南, 印支期

Petrology of Rare Earth Element-Bearing Granites from Different Tectonic Periods in Southeastern Guangxi and a Study on the Factors Influencing Rare Earth Mineralization

Meiling Huang, Junling Jiang, Yanfeng Huang, Haiyin Xie, Jinghua Zhu, Yun Zhou*

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: May 12, 2026; accepted: June 16, 2026; published: June 25, 2026

*通讯作者。

文章引用: 黄美玲, 蒋军领, 黄延凤, 谢海银, 祝靖骅, 周云. 桂东南各构造时期含稀土矿物花岗岩岩相学及稀土成矿影响因素探讨[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(6): 940-954. DOI: 10.12677/ag.2026.166085

Abstract

Southeastern Guangxi is located at the southwestern end of the well-known Qinzhou-Hangzhou fault zone and belongs to the famous Darongshan-Shiwandashan tectono-magmatic belt. It is a key area for studying the collisional orogenic process between the Yangtze Block and the Cathaysia Block. This paper aims to investigate the distribution, types, and genetic relationships of rare earth minerals in granites of different periods in southeastern Guangxi through petrological and related analyses. A systematic study is conducted on the petrological characteristics, mineral assemblages, geochemical properties, and tectonic settings of granites associated with rare earth mineralization in different periods in the region, revealing the tectonic backgrounds of granite formation at each stage. The results indicate that granite bodies hosting ion-adsorption type rare earth deposits are enriched in cordierite, hypersthene, and accessory rare earth minerals such as monazite and xenotime. High initial rare earth element contents, easily weathered mineral assemblages, and prolonged weathering history are identified as key factors controlling mineralization. By examining the distribution patterns and enrichment characteristics of rare earth minerals in granites, as well as their implications for source region and magmatic evolution, this study aims to clarify the geochemical behavior of rare earth elements in granitic systems and the mechanisms influencing compositional variations in granites. The findings provide important scientific evidence for rare earth resource exploration, granite genesis studies, and tectonic interpretation.

Keywords

Granite, Rare Earth Ore, Petrological Geochemistry, Southeastern Guangxi, Indosinian Period

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国稀土资源呈现“北轻南重”的分布格局，轻稀土主要分布在内蒙古、山东及四川等北部地区，而中重稀土则集中分布于华南地区，如江西赣州、广东粤东、广西、福建和湖南等地。我国稀土矿床类型主要包括与黑色及稀有金属共生的内生矿床和风化壳离子吸附型矿床，其中后者研究较为深入。离子吸附型稀土矿主要赋存于花岗岩风化壳的全风化层中，其形成受母岩成分、气候、地貌、构造及风化壳pH值等因素控制。

通过对广西桂东南各时期含稀土矿物花岗岩开展系统的岩相学分析，揭示稀土矿物在花岗岩中的赋存状态、分布规律及富集特征，进而探讨其对花岗岩成因与演化过程的指示意义。同时分析稀土元素在岩浆-热液体系中的活化迁移机制与富集规律，预测区域稀土资源潜力和分布格局，为华南稀土资源的战略勘查与高效开发提供科学依据；同时，研究成果将深化花岗岩成岩成矿理论认知，推动地质学科发展。此外，稀土元素作为关乎国防安全与高新技术产业的核心战略资源(如原子能、航空航天、电子技术等领域)，其富集特征研究对资源安全保障和岩石工程应用均具有显著的经济与社会价值。

2. 地质背景

桂东南位于钦杭成矿带南段，印支期(250~200 Ma)花岗岩广泛分布，构成大容山-十万大山复式岩体

的核心[1]。该期岩体以强过铝质 S 型花岗岩为主(A/CNK > 1.1)，含堇青石、紫苏辉石等特征矿物，并富含独居石、磷钇矿等稀土副矿物[2]，风化后易形成离子吸附型稀土矿(IREE)，如大容山、那蓬岩体已发现多个矿床[3]。

赣南地区是我国离子吸附型稀土矿的发现地和主要矿产地(见图 1)。大埠复式岩体是赣南地区重要的重稀土成矿母岩，此外还与钨锡、铋钼和铀矿床等关系密切，地表出露面积达 515 km² [4]。研究表明，高稀土含量的花岗岩母岩、变质或岩浆热液蚀变、湿热气候和平缓地势等因素是形成离子吸附型稀土矿床的重要条件。陆蕾等(2023)对邦棍尖山花岗岩研究发现了多种含稀土矿物[5]，如榍石、锆石、褐钇铋矿等，这些矿物的存在为形成离子吸附型稀土矿床提供了物质基础。

近年来，研究发现稀土元素(REE)和高场强元素(HFSE)在富碱、富 F 的花岗质岩浆-热液体系中可显著活化迁移并超常富集，形成具有经济价值的矿床。许成及其研究团队在江西风化壳研究中发现风化层顶部和底部均存在高轻、重稀土含量矿物，Ce 负异常与稀土富集程度呈正相关，并且，他们在花岗岩中发现三类新型稀土矿物(REE-1、REE-2、REE-3)，其形成与高氧逸度环境下富稀土俯冲流体的交代作用密切相关，为稀土成矿机制提供了新的研究方向[6]。

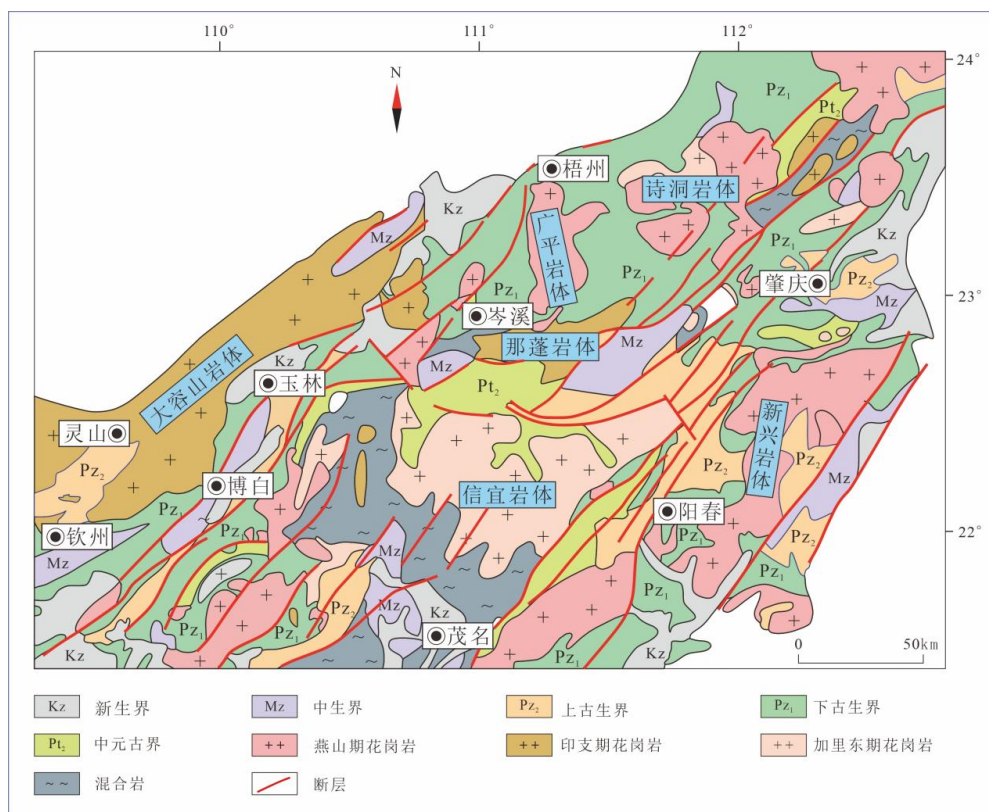


Figure 1. Geological background map of granite in southeastern Guangxi (Base map based on [7])
图 1. 桂东南花岗岩地质背景图(底图根据[7])

3. 花岗岩岩相学及地球化学特征分析

3.1. 桂东南花岗岩岩相学特征

桂东南各时期花岗岩不论是造岩矿物还是稀土载体矿物都呈现出各自明显特征，其特征指示了花岗岩的演化形成特征，也反映了其岩浆分异作用过程(见图 2~5，表 1)。

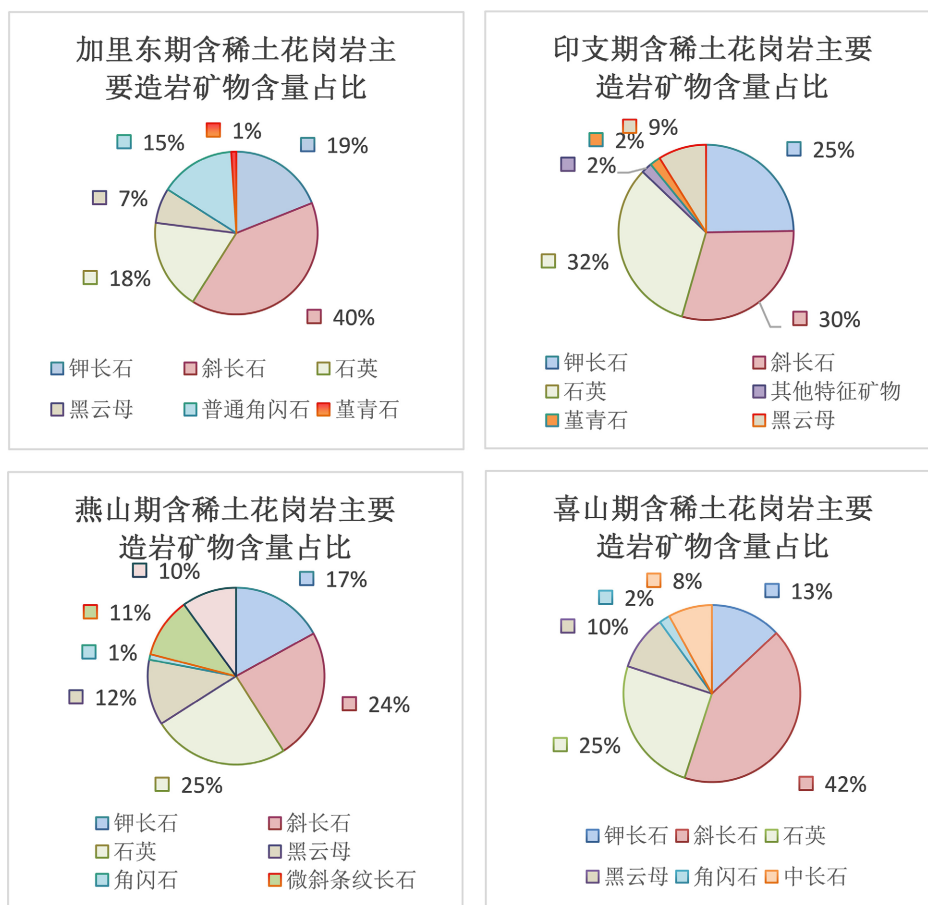


Figure 2. The proportion of major rock-forming minerals in rare earth-bearing granites of different periods in the southeast of Guangxi (Data from [8]-[13])

图 2. 桂东南各时期含稀土花岗岩主要造岩矿物含量占比(数据来源于[8]-[13])

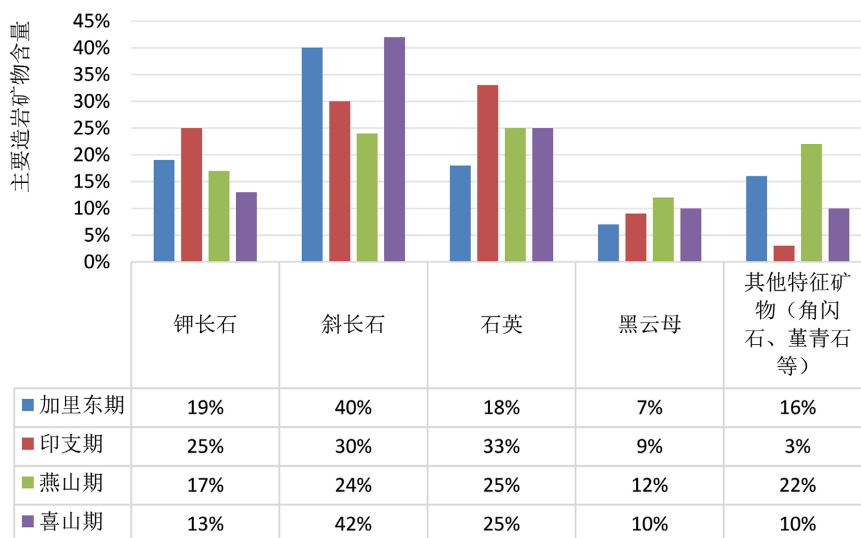


Figure 3. Comparison of the content of major rock-forming minerals in different periods of Guangxi South-East Region (Data from [8]-[13])

图 3. 桂东南各时期主要造岩矿物含量对比(数据来源于[8]-[13])

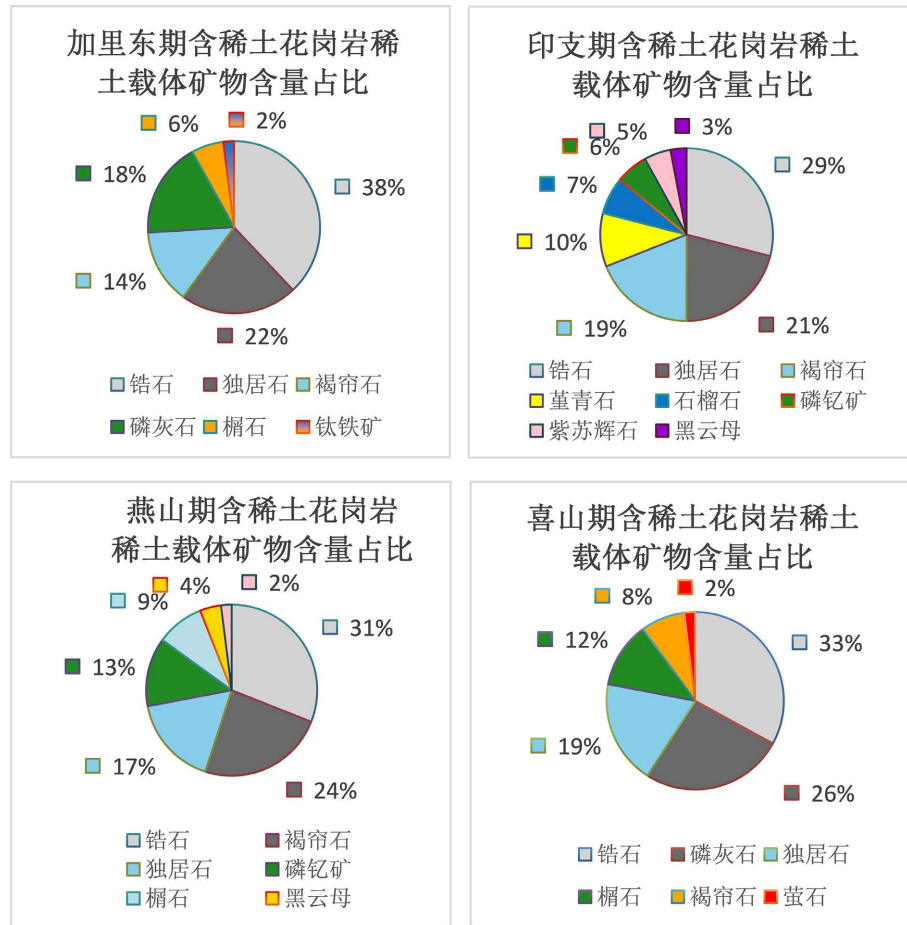


Figure 4. The distribution proportion of rare earth carrier minerals in each period in the south-eastern Guangxi region (Data from [1]-[3] [7] [8] [11] [12] [14]-[21])
图 4. 桂东南各时期稀土载体矿物分布占比(数据来源于[1]-[3] [7] [8] [11] [12] [14]-[21])

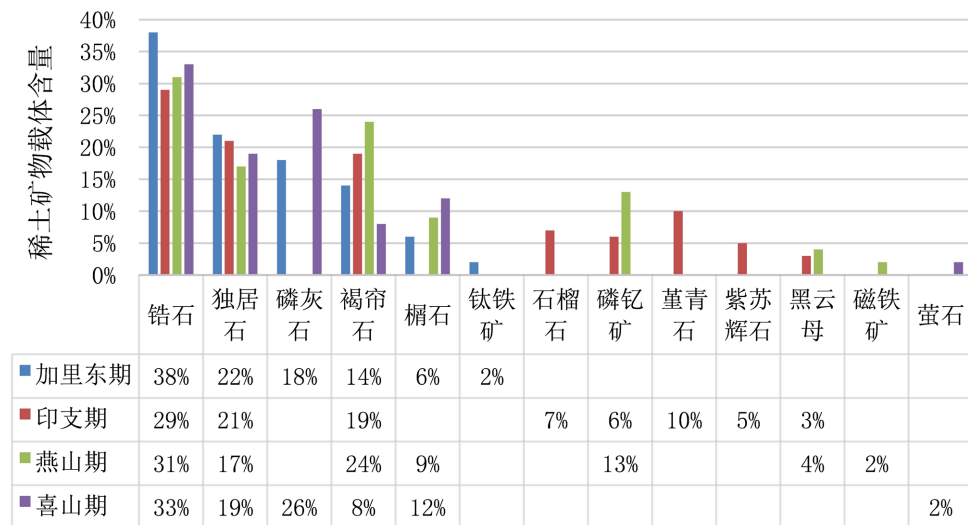


Figure 5. Comparison of the main rare earth mineral carrier contents in different periods of Guangxi South-East Region (Data from [1]-[3] [7] [8] [11] [12] [14]-[21])
图 5. 桂东南各时期主要稀土矿物载体含量对比(数据来源于[1]-[3] [7] [8] [11] [12] [14]-[21])

Table 1. The petrographic and mineralogical characteristics of granitic rocks in the southeastern Guangxi region during various periods**表 1.** 桂东南各时期花岗岩岩相学及矿物学特征

时期/年代	岩体	岩石类型	花岗岩类型	主要矿物	副矿物	结构、构造	数据来源
加里东期	桂东南十万大山 - 大容山复式岩体、大明山岩体、英桥岩体、钦甲岩体、龙新岩体、夏郢岩体、莲垌岩体、古龙岩体	S型、I型、S型和I型过渡带	(含)斑堇青黑云正长花岗岩、堇青黑云二长花岗岩、斑状花岗岩、片麻状花岗岩、斑状花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩、二长花岗岩	钾长石、斜长石、石英、黑云母、普通角闪石	针状磷灰石、锆石、磁铁矿、磷灰石、堇青石	似斑状结构、花岗结构、斑状结构、细粒结构、中-细粒粒状结构、中-粗粒花岗岩结构、块状构造、片麻状构造	[22]-[25]
印支期	六万山岩体、浦北岩体、旧州岩体、台马岩体、大寺岩体、那垌岩体、永安岩体、那蓬岩体、大容山岩体、台马岩体	S型、I型	黑云母二长花岗岩、含(紫苏辉石)堇青石黑云母二长花岗(斑)岩、含紫苏辉石花岗斑岩、堇青石黑云母花岗岩、黑云母花岗岩、花岗斑岩、紫苏花岗斑岩、斑状堇青黑云花岗闪长岩、中细粒花岗岩	钾长石、斜长石、石英、黑云母	堇青石、紫苏辉石、石榴子石、麻粒岩包体、电气石、绿帘石、重晶石、独居石、磁铁矿、黄铜矿	中-细粒花岗岩结构、中-粗粒花岗岩结构、花岗结构、似斑状结构、显微花岗岩结构、块状构造	[1]-[3] [10] [12]
燕山期	岑溪花岗岩体、英桥花岗岩体、岑溪花岗岩体	A型、I型	黑云母二长花岗岩、石英二长岩、二长岩、似斑状角闪黑云二长花岗岩、黑云母花岗岩	钾长石、斜长石、石英、黑云母、角闪石、奥长石、微斜条纹长石	锆石、钛铁矿、磁铁矿、磷灰石、榍石、绿帘石、褐帘石、独居石	花岗结构、细粒花岗岩结构、粗粒花岗岩结构、粗粒花岗岩结构、细粒花岗岩结构、中粗粒似斑状结构、块状构造	[7] [26] [27]
喜山期	邦棍尖山岩体	S型	似斑状中粗粒黑云角闪二长花岗岩、中细粒黑云母二长花岗岩	钾长石、斜长石、石英、黑云母	磁铁矿、钛铁矿、榍石、磷灰石、锆石	似斑状、中粗粒结构、中细粒粒状结构、块状构造	[5]

3.1.1. 桂东南加里东期含稀土矿物花岗岩岩相学特征

加里东期岩体主体以花岗闪长岩和二长花岗岩为主，具中-粗粒花岗岩结构或中-细粒花岗岩结构，块状构造(见表 2)。包体特征：岩体中普遍含闪长岩包体(3~20 cm)，呈浑圆状或棱角状，与寄主岩接触面无渐变关系，暗示包体可能来源于同源岩浆混合或围岩捕获。包体以细粒结构为主，矿物组合与寄主岩存在差异。

Table 2. Granite rock masses in the southeastern Guangxi region at different periods**表 2.** 桂东南不同时期花岗岩岩体

时期	岩体	数据来源
加里东期	龙新岩体(英云闪长岩)	[23]-[25] [28]
	龙新岩体(闪长岩包体)	
	龙新岩体(花岗闪长岩)	
	夏郢岩体(花岗闪长岩)	
加里东期	夏郢岩体(二长花岗岩)	[23]-[25] [28]
	夏郢岩体(英云闪长岩)	
	莲垌岩体(花岗闪长岩)	
	古龙岩体(花岗闪长岩)	

续表

加里东期	钦甲岩体(斑状花岗岩)	[23]-[25] [28]
	大明山岩体(斑状花岗岩)	
	英桥岩体(片麻状花岗岩)	
印支期	六万山岩体(黑云二长花岗岩)	[1] [3] [10] [14]
	永安岩体(堇青黑云花岗闪长岩)	
	那蓬岩体(黑云二长花岗岩)	
	大容山岩体(中细粒花岗岩)	
燕山期	台马岩体(中细粒花岗岩)	[26] [27]
	英桥岩体(黑云母二长花岗岩)	
喜山期	岑溪花岗岩体(黑云二长花岗岩、二长岩)	[5]
	邦棍尖山岩体(黑云母二长花岗岩)	

主要矿物为斜长石、石英、钾长石、暗色矿物(普通角闪石和黑云母为主)。副矿物有磷灰石(柱状或针状)、磁铁矿、锆石等常见副矿物,其中磷灰石可能与稀土元素富集相关。含独居石、氟碳钙铈矿等稀土矿物,赋存于高演化矿物相中。岩石具高演化岩浆特征:斜长石环带结构、石英高含量及暗色矿物的溶蚀现象(如黑云母被溶蚀成港湾状)表明岩浆经历强烈分异作用,有利于稀土元素富集。

3.1.2. 桂东南印支期含稀土矿物花岗岩岩相学特征

印支期岩浆岩以十万大山-六万大山-大容山岩体为代表,主要分布于博白-岑溪与灵山-藤县两大断裂所挟持的区域,主要岩性为中粗粒含堇青石黑云母二长花岗岩(见表2)。桂东南印支期含稀土矿物花岗岩为中细粒结构,块状构造,主要矿物包括石英、黑云母、钾长石以及斜长石;副矿物有电气石、绿帘石、重晶石、独居石、磁铁矿、磷钇矿、磷灰石和锆石等,部分含有少量石榴子石;稀土矿物主要为独居石、磷钇矿、磷灰石和锆石。

3.1.3. 桂东南燕山期含稀土矿物花岗岩岩相学特征

燕山期岩浆岩沿区内断裂分布,数量多,规模小,岩石类型主要有黑云母花岗岩、石英二长岩、二长花岗岩等。从岩石结构和构造来看,桂东南岑溪地区的花岗岩样品具有粗粒结构,块状构造,新鲜面颜色呈肉红色,主要由长石(约40%)、石英(约35%)和黑云母(约20%)组成,副矿物包括锆石、独居石、磷灰石等(约5%)。这些特征表明该花岗岩属于典型的酸性侵入岩,具有较高的硅含量和富碱特征。从稀土矿物的种类和分布来看,桂东南燕山期花岗岩中富含多种稀土矿物,包括磷灰石、锆石、独居石、氟碳钙铈矿等。其中,独居石和氟碳钙铈矿的稀土氧化物含量分别高达58.07%~67.66%和64.25%~64.59%。这些稀土矿物的富集与花岗岩的高分异演化特征密切相关,表明其在岩浆演化过程中经历了显著的分异作用,导致稀土元素的富集。

3.1.4. 桂东南喜山期含稀土矿物花岗岩岩相学特征

喜山期花岗岩的结构特征主要为似斑状中粗粒结构和中细粒结构,稀土矿物(如榍石、褐帘石)多以副矿物形式存在,粒径多为微米至毫米级,部分自形半自形晶。常见块状构造,局部受后期热液影响可见浸染状构造,稀土矿物沿矿物间隙或裂隙分布(如褐帘石沿长石边缘产出)。

造岩矿物组成:主要矿物有钾长石:占比35%~45%,以条纹微斜长石为主,部分高岭土化。斜长石:含量15%~25%,多为中长石,局部被钾长石交代(钾长石化)。石英:含量20%~28%。黑云母:含量5%~15%,含钛铁矿、磷灰石等包裹体。

3.2. 花岗岩及风化壳稀土元素含量特征分析

3.2.1. 桂东南加里东期含稀土矿物花岗岩稀土元素含量特征分析

桂东南加里东期花岗岩 ΣREE 含量变化区间广泛, 从 65.70×10^{-6} 至 590×10^{-6} , 整体呈现中等偏低的富集特征, 多数岩体的 ΣREE 集中在 70×10^{-6} 至 150×10^{-6} 之间, 且普遍低于维氏花岗岩平均值(258×10^{-6})。桂东南加里东期花岗岩均表现出轻稀土(LREE)相对富集、重稀土(HREE)相对亏损的特征, 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线总体呈右倾型。其中 LREE/HREE 比值范围在 3.55~10.73 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值介于 2.85~14.33 之间, 整体轻重稀土分馏程度为一般至中等。此外, 多数岩体表现出负 Eu 异常特征, 其中博白地区岩体为中等 - 强负 Eu 异常($\delta\text{Eu} = 0.15\sim 0.42$), 莲垌、古龙岩体为中等负 Eu 异常($\delta\text{Eu} = 0.68\sim 0.77$), 仅夏郢岩体晚期二长花岗岩出现弱正 Eu 异常($\delta\text{Eu} \approx 1.19$)。Eu 异常特征直观反映了岩浆过程: 负 Eu 异常指示源区存在斜长石残留或岩浆结晶过程中斜长石的分离结晶, 而弱正 Eu 异常可能与后期岩浆演化中角闪石的分离结晶有关(见图 6~8)。

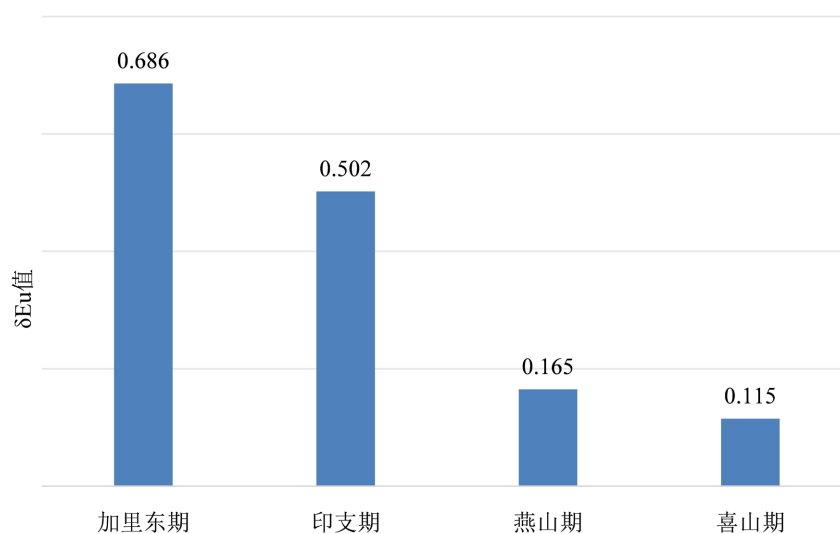


Figure 6. Histogram of the mean values of Eu anomalies in each period (Data from [1] [3] [5] [10] [14] [20] [23]-[28])

图 6. 各时期 δEu 值均值直方图(数据来源于[1] [3] [5] [10] [14] [20] [23]-[28])

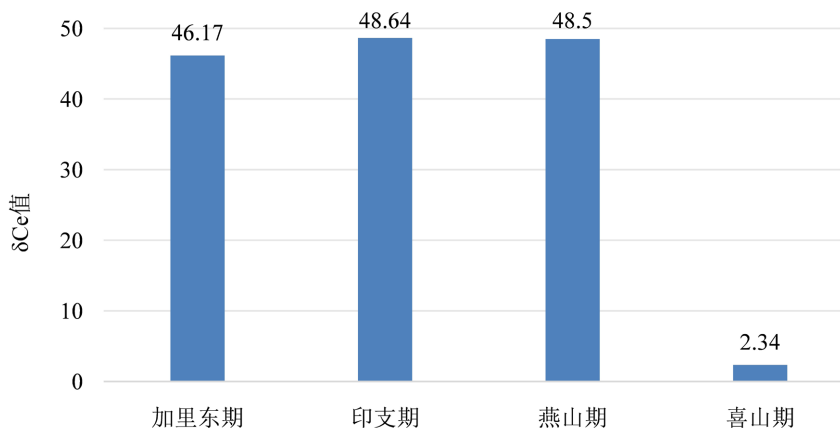


Figure 7. Histogram of the mean values of Ce anomalies in each period (Data from [1] [3] [5] [10] [14] [20] [23]-[28])

图 7. 各时期 δCe 值均值直方图(数据来源于[1] [3] [5] [10] [14] [20] [23]-[28])

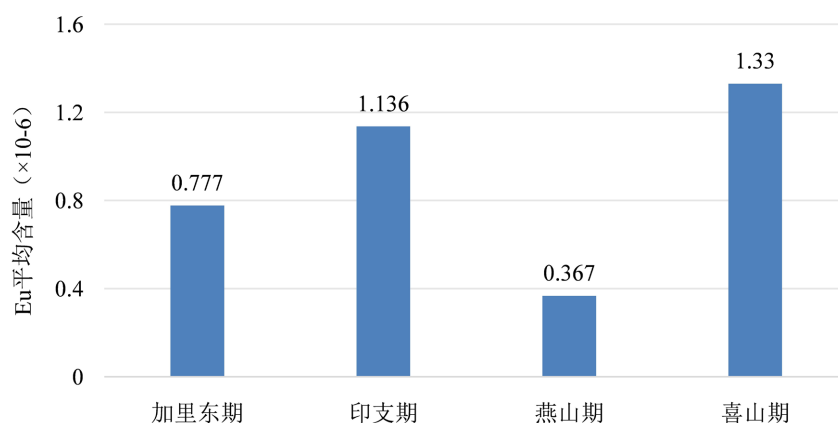


Figure 8. Histogram of the average Eu content for each period (Data from [1] [3] [5] [10] [14] [20] [23]-[28])

图 8. 各时期 Eu 含量均值直方图(数据来源于[1] [3] [5] [10] [14] [20] [23]-[28])

3.2.2. 桂东南印支期含稀土矿物花岗岩稀土元素含量特征分析

桂东南印支期花岗岩的 ΣREE 含量变化范围较大, 从 76.30×10^{-6} 至 536.92×10^{-6} , 但大部分岩体集中在 150×10^{-6} 至 300×10^{-6} 之间, 显示出中等富集的特征。 ΣREE 的广泛分布表明, 源区物质的不均一性和后期岩浆-热液过程的差异是控制稀土初始总量的重要因素, 而并非所有印支期花岗岩都初始富稀土, 只有那些具备有利源区和经历充分分异演化的岩体才具备高 ΣREE 的潜力。所有桂东南印支期花岗岩均表现出轻稀土(LREE)相对富集、重稀土(HREE)相对亏损的特征。LREE/HREE 比值是衡量分异程度的关键指标, 该区该比值范围在 2.47~14.28 之间。

3.2.3. 桂东南燕山期含稀土矿物花岗岩稀土元素含量特征分析

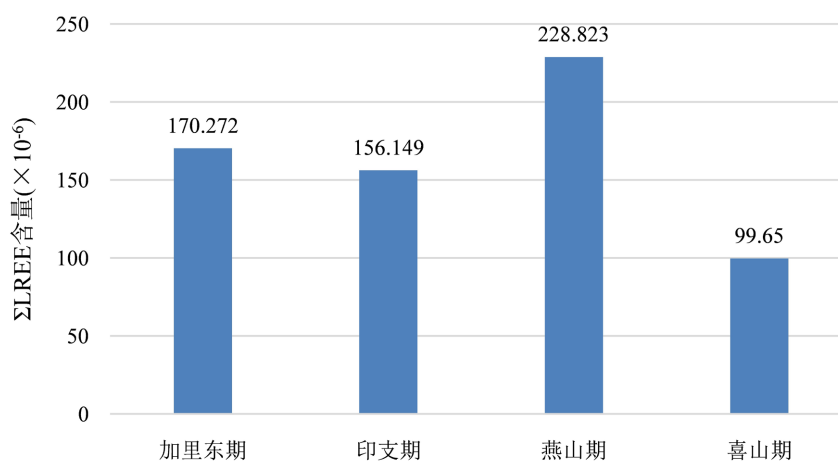


Figure 9. Bar chart of the average content of light rare earth elements in granites in the south-eastern Guangxi region during various periods (Data from [1]-[3] [5] [7] [14]-[18] [20])

图 9. 桂东南各时期花岗岩轻稀土含量均值柱状图(底图根据[1]-[3] [5] [7] [14]-[18] [20])

桂东南燕山期花岗岩 ΣREE 含量变化范围较大, 从 145.68×10^{-6} 至 1592.53×10^{-6} , 平均值介于 275.00×10^{-6} 至 788.28×10^{-6} 之间。 ΣREE 的极高值表明, 燕山期花岗岩经历了极为充分的岩浆分异演化或强烈的后期热液-风化改造(见图 9、图 10)。特别是六陈岩体, 其成因为“高强度风化作用, 稀土元素经历了显著的富集和分异”, 说明表生风化过程中的次生富集是其达到超高 ΣREE 水平的关键机制。黑复稀金

矿和磷钇矿的富集是粤东岩体 HREE 超常富集的根本原因，它们是重稀土矿床的直接物质来源，且易风化的特性使其能高效释放 HREE 离子。氟碳钙铈矿在岑溪区岩体中出现，这是一种典型的热液成因的 LREE 矿物。独居石和磷钇矿是基础性稀土矿物，在多个岩体中广泛分布。

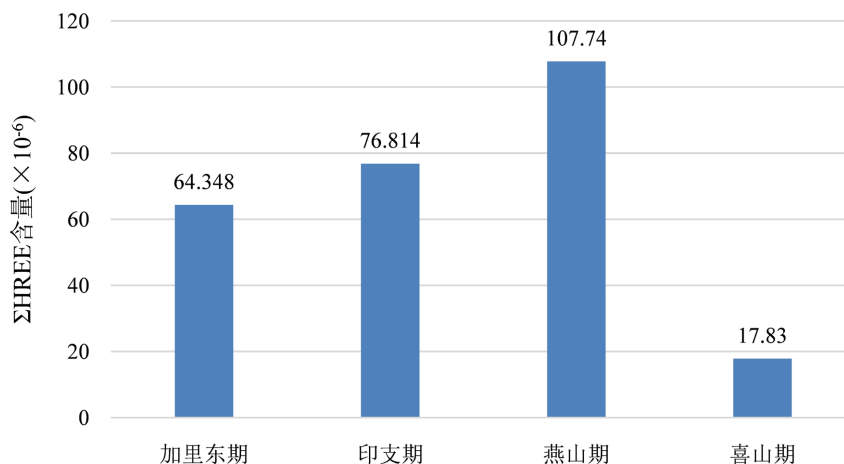


Figure 10. Bar chart of the average heavy rare earth content of granites in the southeastern Guangxi region during various periods (Data from [1]-[3] [5] [7] [14]-[18] [20])

图 10. 桂东南各时期花岗岩重稀土含量均值柱状图(底图根据[1]-[3] [5] [7] [14]-[18] [20])

3.2.4. 桂东南喜山期含稀土矿物花岗岩稀土元素含量特征分析

桂东南喜山期花岗岩具有极低的 ΣREE 含量， ΣREE 含量仅为 2.34×10^{-6} ~ 51.33×10^{-6} ，平均值为 27.50×10^{-6} 。这一数值远低于地壳中花岗岩的平均值(约 150×10^{-6})，这表明岩浆源区本身并不富集稀土，或者原始岩浆在上升侵蚀过程中未能有效富集稀土元素。尽管 ΣREE 极低，但喜山期花岗岩的 LREE 和 HREE 之间发生了极其强烈的分异作用，LREE/HREE 比值范围极宽(0.04~13.80)，平均值为 2.66。HREE 高度富集：平均值 2.66 以及最低值 0.04 表明，桂东南喜山期花岗岩在局部极度富集 HREE。 ΣHREE 的平均含量超过了 ΣLREE 的平均含量，这是典型的 HREE 富集型花岗岩特征。

4. 讨论

4.1. 桂东南花岗岩形成时代及岩石成因

4.1.1. 桂东南地区加里东期含稀土矿物花岗岩

桂东南地区加里东期含稀土矿物花岗岩形成时代主要集中于早志留世 - 晚志留世(~447~420 Ma)，与华南加里东期陆内造山作用及随后的后碰撞伸展阶段相吻合，其成因与华南板块陆内造山后伸展背景下壳 - 幔相互作用密切相关。在扬子地块与华夏地块发生陆内碰撞造山后，岩石圈经历伸展减薄，软流圈地幔物质上涌并底侵于下地壳底部，为地壳物质的部分熔融提供了关键热源。该期花岗岩的源区物质以中 - 下地壳前寒武纪基底变火成岩及变质沉积岩为主，在幔源岩浆的热输入和物质混染作用下发生部分熔融，形成具有不同壳 - 幔混合程度的母岩浆。其中，龙新岩体与夏郢岩体表现出不同程度的壳 - 幔混合特征，夏郢花岗质母岩浆与基性岩浆的混合程度较强，而龙新寄主岩母岩浆与基性岩浆的混合程度相对较弱，随后经历斜长石、角闪石等矿物的分离结晶作用，最终固结形成花岗闪长岩及二长花岗岩[24]。莲垌岩体与古龙岩体则分别代表了新生地壳熔融型及新生地壳与古老地壳混合熔融型的不同成因类型[25]。在岩浆演化过程中，稀土元素主要富集于锆石、磷灰石、榍石等副矿物中，部分岩体(如龙新岩体)经历了斜长石及含钛矿物的分离结晶作用，对稀土元素的分异富集产生了重要影响[24]。综上，桂东南加里东期含稀土矿物花岗岩形

成于早志留世 - 晚志留世陆内造山后伸展构造背景, 是幔源岩浆底侵诱发下地壳物质部分熔融、并经历壳 - 幔混合及分离结晶作用的产物, 其稀土元素富集特征与岩浆源区性质及岩浆演化过程密切相关。

4.1.2. 桂东南地区印支期含稀土矿物花岗岩

桂东南地区印支期含稀土矿物花岗岩的形成时代主要集中于中 - 晚三叠世(~250~200 Ma), 与华南板块印支期构造 - 岩浆事件的高峰期相吻合, 该期花岗岩的形成与古特提斯洋北向俯冲 - 碰撞及随后的华南陆内造山后伸展密切相关[29]。晚二叠世 - 中三叠世(~260~230 Ma), 古特提斯洋的俯冲导致华南板块南缘发生陆缘增生和挤压变形; 中 - 晚三叠世(~230~200 Ma), 区域构造体制由挤压转为伸展, 引发大规模地壳熔融和花岗岩浆侵入。桂东南印支期花岗岩的锆石 U-Pb 年龄主要集中在 409~200 Ma, 表明其形成于印支主造山期后的伸展阶段。部分岩体可能显示多期岩浆活动。含稀土矿物的结晶年龄通常略晚于寄主花岗岩的侵位年龄, 表明稀土富集主要发生于岩浆期后热液阶段, 与区域伸展背景下热液活动增强有关。印支期含稀土矿物花岗岩的形成, 深刻受控于华南板块碰撞造山后的伸展构造背景。其成因模型主要涉及壳 - 幔相互作用: 在古太平洋板块俯冲的远程效应下, 地幔或软流圈物质上涌导致地壳减薄, 并伴随显著的地幔底侵作用, 为成岩提供关键热源。此热事件促使富含稀土元素的古老壳源物质(主要为中元古 - 古元古代变质沉积岩)在麻粒岩相条件下发生高温部分熔融, 泥质岩源的熔融对此过程贡献显著。稀土元素的富集与特定的岩浆分异阶段紧密相关, 表现为具有较弱 Eu 负异常的中粗粒至中粒花岗岩更有利于稀土成矿。矿物学记录揭示了稀土矿化的两阶段过程: 原生稀土矿物, 如锆石、磷灰石等, 主要形成于岩浆结晶阶段, 以自形晶形式赋存于造岩矿物, 如黑云母等中; 次生稀土矿物, 如磷钇矿、独居石则主要形成于热液蚀变阶段, 通过溶解 - 再沉淀机制沿原生矿物的边缘或裂隙交代生成。综上, 印支期含稀土矿物花岗岩是伸展背景下, 由深部地幔热输入驱动古老地壳熔融, 并经历岩浆 - 热液多阶段演化的产物。

4.1.3. 桂东南地区燕山期含稀土矿物花岗岩

桂东南地区燕山期含稀土矿物花岗岩形成时代主要集中于晚侏罗世(~155 Ma), 与华南燕山期大规模岩浆活动的高峰期相吻合, 其成因与岩石圈伸展减薄背景下古老地壳物质的重熔密切相关。在燕山期华南陆内伸展的构造体制下, 岩石圈减薄导致软流圈上涌, 为地壳熔融提供了热源, 促使富含稀土元素的中 - 古元古代变质沉积岩发生部分熔融。岩浆在演化过程中经历了强烈的分离结晶作用, 稀土元素在岩浆结晶分异过程中初步富集于独居石、氟碳钙铈矿、锆石、磷灰石等副矿物中, 其中独居石和氟碳钙铈矿富含轻稀土元素, 是轻稀土型离子吸附型稀土矿的主要物质来源[7]。岩浆演化晚期, 富挥发分(F、CO₂等)的热液流体从残余熔体中出溶, 对早期结晶的稀土矿物进行交代, 形成萤石、褐帘石等热液成因的稀土矿物, 热液作用进一步促进了稀土元素的迁移、分馏和再沉淀, 增强了稀土矿化强度。成矿母岩中稀土元素的原始含量及赋存状态是控制风化成矿效应的关键因素, 含独居石、氟碳钙铈矿等易风化稀土矿物的花岗岩, 在热带 - 亚热带风化条件下易释放稀土元素, 被粘土矿物吸附富集, 形成离子吸附型稀土矿床[15]。综上, 桂东南燕山期含稀土矿物花岗岩形成于晚侏罗世岩石圈伸展减薄的构造背景, 是古老地壳物质重熔、岩浆强烈分离结晶及晚期热液叠加改造共同作用的产物, 具有轻稀土富集特征, 是华南地区形成轻稀土型离子吸附型稀土矿床的重要成矿母岩。

4.1.4. 桂东南地区喜山期含稀土矿物花岗岩

桂东南地区喜山期含稀土矿物花岗岩形成时代主要集中于始新世 - 渐新世(~55~25 Ma), 与印度 - 亚洲大陆碰撞及青藏高原东缘构造挤出事件的高峰期相吻合[30], 该期花岗岩的形成与印度板块北向俯冲引发的陆内汇聚及随后的走滑伸展构造体制密切相关。古新世 - 始新世(~65~40 Ma), 印度板块与欧亚板块的强烈碰撞导致青藏高原东缘发生地壳增厚与大规模剪切变形[31]; 始新世中晚期 - 渐新世(~45~25 Ma), 区域构造体制由挤压向走滑拉分转换, 高黎贡山等大型走滑断裂系统发生强烈的右行走滑运动[32],

引发区域性减压熔融,促使花岗质岩浆侵位。腾冲地区喜山期花岗岩的锆石 U-Pb 年龄主要集中于 50~35 Ma [33],表明其形成于喜山主碰撞期后的伸展-走滑转换阶段。其成因模型概括为:青藏高原东缘大型走滑断裂系统的活动诱发了壳-幔相互作用[34],岩石圈地幔拆沉导致软流圈物质上涌,为地壳熔融提供热源,促使富含稀土元素的古老变质基底(主要为高黎贡山岩群中新元古代变质沉积岩)发生部分熔融。在岩浆结晶阶段,稀土元素以类质同象形式初步富集于锆石、磷灰石、独居石等副矿物中;岩浆演化至晚期,富挥发分(F、CO₂等)的热液流体从残余熔体中出溶,对早期结晶的原生稀土矿物进行强烈交代,通过溶解-再沉淀作用使稀土元素(尤其是重稀土元素)从原生矿物中迁出。在热液体系中,重稀土元素因与 F 等配体形成稳定络合物而更易于迁移,并在温度、压力降低条件下于岩体内部裂隙带及接触带沉淀富集,形成氟碳钙钇矿、磷钇矿、萤石等重稀土矿物。这一过程表明,热液作用是喜山期花岗岩中稀土元素超常富集的关键,其中岩浆分异为稀土提供初始富集,晚期热液交代促使稀土元素进一步迁移、分馏和再沉淀。综上,喜山期古近纪含稀土矿物花岗岩是青藏高原东缘走滑伸展构造背景下,由深部热输入驱动古老地壳熔融,并经历岩浆-热液多阶段演化的产物。

4.2. 桂东南花岗岩构造背景

桂东南地区地处华南大陆西南缘关键构造部位,横跨扬子板块与华夏板块拼贴结合带及钦杭成矿带南段核心区域,同时处于特提斯构造域与太平洋构造域的叠加交汇部位,其大地构造格局受多板块长期相互作用与多构造旋回演化过程的共同控制,为含稀土矿物花岗岩的形成、演化及稀土元素富集提供了独特的构造动力学背景[35]。印支期(三叠纪)是区域构造演化的关键转折阶段,也是含稀土矿物花岗岩集中形成的核心时期,随着扬子板块与华夏板块的持续汇聚,钦防海槽逐渐收缩闭合,海西地槽褶皱带全面隆升,两板块完成最终拼贴碰撞,区域构造体制从伸展状态转换为强烈的挤压-剪切环境,灵山褶皱冲断带呈现典型的薄皮逆冲式变形,构造变形强度由南向北西逐渐减弱,完整记录了板块碰撞的动力学过程[12]。构造挤压作用导致地壳加厚,叠加古太平洋板块俯冲引发的地幔或软流圈物质上涌,为地壳物质部分熔融提供了充足热源,诱发中元古-古元古代变质沉积岩发生高温熔融,形成了大规模的 S 型花岗岩带;印支晚期,区域构造环境从碰撞挤压逐渐过渡为后碰撞拉张,地壳减压松弛促进了花岗岩浆的侵位与结晶,形成了大容山-十万大山花岗岩带内多样的岩相类型,稀土元素在岩浆演化过程中发生显著分异富集,为含稀土矿物(堇青石、石榴石、独居石等)的形成创造了有利条件[9]。燕山期,区域构造动力学背景受古太平洋板块俯冲方向与速率调整的影响显著,构造活动以强烈的断裂伸展与岩浆分异为主要特征[11]。该时期桂东南地区岩浆活动强度达到峰值,大容山-十万大山花岗岩带内形成了一系列高分异花岗岩体,岩浆演化过程中稀土元素发生强烈活化迁移,褐帘石、磷钇矿等活性稀土载体矿物占比显著提升。同时,区域主干断裂的多期活动为花岗岩浆的侵位提供了更多通道,形成了中浅成相粒似斑状花岗岩、次火山岩相等多样岩相类型,不同岩相中稀土矿物组合存在明显差异,反映了构造-岩浆演化的耦合关系[20]。喜山期,区域构造环境转入后碰撞伸展阶段,地壳伸展作用导致岩石圈减薄,地幔物质部分熔融形成的岩浆与地壳物质发生混合作用,形成了以浅成侵入体为主的花岗岩类。该时期花岗岩具有富硅、富碱、贫钙镁的地球化学特征,磷灰石、榍石等矿物结晶效率提高,萤石作为稀土流体载体矿物少量出现,稀土元素富集以惰性载体矿物为主,活动性相对较弱[35]。

4.3. 稀土矿物富集形成机制

离子吸附型稀土矿床的形成是内生地质条件、构造运动、外生环境作用及表生风化改造等多因素协同的结果,各类因素相互作用,推动稀土元素从母岩中释放并在风化壳中完成二次富集,最终实现成矿[7] [36] [37]。

稀土元素在母岩中的预富集与花岗岩的岩浆演化密切相关,母岩 REE 地球化学特征和易风化稀土副矿物的发育程度是制约稀土成矿类型的关键因素,强烈的分异结晶作用为稀土的预富集奠定基础,后期热液流体的交代叠加作用则能促使易风化稀土矿物形成,为后续表生风化过程中稀土元素的释放创造条件,风化壳中 REE 的富集因此受花岗岩中 REE 矿物组合和表生风化过程的双重控制[36]。构造运动是稀土成矿的重要控矿因素,区域内的多期次构造运动调控了稀土成矿的期次,推动该区进入成矿高峰期,同时深大断裂构造不仅控制了岩矿体的空间分布,还为岩浆活动、热液交代及后期的风化改造过程提供了必要的空间条件[37]。

印支期花岗岩形成于古特提斯洋北向俯冲-碰撞及随后华南陆内造山后的伸展背景,与加里东期的陆内造山后伸展、燕山期的岩石圈伸展减薄、喜山期的印度-亚洲大陆碰撞及青藏高原东缘构造挤出背景明显不同。印支期是区域构造从挤压向伸展转换的关键阶段,地壳加厚与后续减压熔融耦合,形成了大规模 S 型花岗岩带。印支期花岗岩的源区以中元古-古元古代变质沉积岩为主,在麻粒岩相条件下发生高温部分熔融,幔源热输入(底侵作用)是关键热源。而加里东期具有显著的壳-幔混合特征,燕山期主要为古老地壳物质重熔,喜山期则涉及地幔拆沉与走滑断裂诱发的减压熔融。印支期是典型的地壳深熔作用主导型。

岩浆演化与稀土富集阶段:印支期稀土矿化表现为明确的两阶段过程-岩浆结晶阶段形成原生稀土矿物(锆石、磷灰石等),岩浆期后热液阶段通过溶解-再沉淀机制形成次生稀土矿物(磷钇矿、独居石)。这与燕山期强烈分离结晶+晚期热液叠加、喜山期热液主导重稀土超常富集的模式相比,热液作用的时间与强度存在差异。印支期的热液改造更侧重于对已结晶矿物的交代,而非独立的热液矿化。

矿物组合与稀土配分特征:印支期花岗岩富含堇青石、紫苏辉石、独居石、磷钇矿等特征矿物, ΣREE 中等富集,轻稀土相对富集但轻重分馏程度中等, Eu 负异常变化较大。相比之下,加里东期 ΣREE 偏低,燕山期 ΣREE 极高且轻稀土高度富集,喜山期 ΣREE 极低但局部重稀土高度富集。印支期在稀土总量和分馏程度上处于“中等”位置,体现了成熟地壳熔融与有限分异的特点。

综合研究表明,花岗岩型离子吸附型稀土矿的成矿富集是一个多阶段、多因素耦合的系统过程,内生条件是成矿的物质与基础前提,岩浆演化与热液改造的内生作用实现了稀土的预富集和易风化矿物的形成,构造运动在成矿过程中起调控作用,外生环境为稀土元素的风化释放创造了适宜的外部条件,而表生风化的吸附与富集作用则是将成矿潜力转化为稀土矿床,内生作用和外部风化共同影响了离子吸附型稀土矿床的形成。

5. 结论

桂东南地区各构造期含稀土矿物花岗岩形成时代主要集中于 447~25 Ma,是早志留世-渐新世岩浆活动的产物。

各构造期花岗岩的稀土富集特征均受控于源区性质与岩浆演化过程。加里东期含稀土矿物花岗岩形成于华南陆内造山后伸展背景,印支期与古特提斯洋北向俯冲-碰撞及随后陆内造山后伸展有关,燕山期对应岩石圈伸展减薄背景下的古老地壳物质重熔,喜山期则与印度-亚洲大陆碰撞及青藏高原东缘构造挤出事件相吻合。

桂东南地区花岗岩离子吸附型稀土矿的成矿是内生-外生共同作用的结果。岩浆演化与热液改造实现稀土预富集并形成易风化矿物,为成矿提供物质基础。外生风化环境促进稀土释放,表生吸附富集最终将成矿潜力转化为稀土矿床。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(项目编号:42372102);桂林理工大学大学生创新创业训练计划立项项目

(桂东南印支期含稀土矿物花岗岩岩相学研究)。

参考文献

- [1] 袁永盛, 刘胜, 南争路, 等. 桂东南永安岩体锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(6): 869-883.
- [2] 田梦宇. 桂东南印支期火成岩的岩石组合及其地质意义[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [3] 杨栎娅, 周云, 付伟, 等. 广西十万大山——大容山风化壳型稀土矿成矿母岩的地球化学特征及其对成矿的指示[J]. 地球化学, 2025, 60(3): 890-909.
- [4] 张青, 陈斌锋, 张兴文. 江西赣县峰山重稀土矿床地质、地球化学特征及意义[J]. 华东地质, 2020, 41(4): 359-367.
- [5] 陆蕾, 王成辉, 王登红, 何高文, 孙艳. 云南邦棍尖山花岗岩的岩石学、地球化学和年代学特征对离子吸附型稀土成矿的制约[J]. 地质学报, 2023, 97(5): 1494-1507.
- [6] 许成, 宋文磊, 何晨, 等. 外生稀土矿床的分布、类型和成因概述[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(2): 234-241.
- [7] 赵永山, 周云, 许成, 等. 桂东南燕山期花岗岩地球化学特征及其对稀土成矿的指示[J]. 地质科学, 2023, 58(3): 890-909.
- [8] 方清浩, 何绍渊. 广西大容山花岗岩套的稀土元素地球化学[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1988(3): 255-262.
- [9] 祁昌实, 邓希光, 李武显, 等. 桂东南大容山-十万大山 S 型花岗岩带的成因: 地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 403-412.
- [10] 覃小锋, 王宗起, 曹洁, 等. 桂南钦防构造带西南段印支早期花岗岩的成因: 年代学和地球化学约束[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(5): 1471-1488.
- [11] 赵芝, 王登红, 潘华, 等. 广西某地花岗岩风化壳中稀土元素特征与 iREE 矿床成矿机制[J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1697-1706.
- [12] 王文宝, 李建华, 辛宇佳, 等. 华南大容山——十万大山花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及地质意义[J]. 地球学报, 2018, 39(2): 179-194.
- [13] 韩泽恩, 邓昌州, 田振东, 等. 花岗岩型稀土矿床研究进展[J]. 矿物学报, 2025, 45(2): 342-359.
- [14] 田梦宇, 狄永军, 王帅, 等. 广西云开地区那蓬岩体黑云母二长花岗岩年代学、地球化学特征及成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 749-766.
- [15] 傅旋霓, 白艳萍, 付伟, 等. 花岗岩(含)稀土副矿物组合对稀土元素风化富集的制约——以桂东南六陈与大容山岩体为例[J]. 桂林理工大学学报, 2025, 45(1): 1-15.
- [16] 陶继华, 岑涛, 龙文国, 李武显, 等. 华南印支期弱过铝质和强过铝质花岗岩中黑云母的矿物化学及其岩石成因制约[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 64-78.
- [17] 张民, 李杨, 何显川, 等. 滇西临沧花岗岩中段离子吸附型稀土矿成矿特征研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2018, 38(4): 37-47.
- [18] 李瑞, 王建荣, 凌慧, 等. 粤东丰顺-揭西地区离子吸附型重稀土矿床内生成矿条件探讨[J]. 华南地质, 2021, 37(2): 177-192.
- [19] 吴澄宇, 白鸽, 黄典豪, 等. 南岭富重稀土花岗岩类的特征和意义[C]//矿床地质研究所, 中国地质科学院区划研究室. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊(25). 北京: 地质出版社, 1992: 46-61+149.
- [20] 卢见昆, 黄长帅, 李学彪, 等. 广西大容山东北部花岗岩地球化学特征及地质意义[J]. 矿产与地质, 2019, 33(6): 1026-1033.
- [21] 蒙杨, 夏小平, 何斌, 等. 大容山-十万大山花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 地球化学, 2025, 54(5): 679-700.
- [22] 詹华思, 丁伟品, 何波, 等. 桂东南博白地区片麻状花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造环境研究[J]. 矿产与地质, 2020, 34(4): 724-733.
- [23] 陈家浩. 华南板块西南缘加里东期花岗岩地球化学特征与岩石成因[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [24] 刘明辉, 时毓, 唐远兰, 等. 华南桂东南地区加里东期I型花岗岩类的岩石成因及构造意义[J]. 地球科学, 2021, 46(11): 3965-3992.

- [25] 周予茜, 时毓, 黄椿文, 等. 桂东南莲垌和古龙岩体加里东期I型花岗岩类的岩石成因及构造意义[J]. 地学前缘, 2024, 31(2): 224-248.
- [26] 宋兴旺, 谢志鹏, 王建荣, 张源, 窦磊, 王维. 桂东南岑溪燕山期 A 型花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J/OL]. 地球学报: 1-20. <https://link.cnki.net/urlid/11.3474.p.20250917.1430.002>, 2026-06-16.
- [27] 王祖伟, 周永章, 张海华, 等. 粤西庞西垌-桂东南金山银金成矿带晚燕山期花岗岩的性质与成矿作用[J]. 岩石矿物学杂志, 1998(2): 2-8.
- [28] 农军年, 邹瑜, 邱恩露, 等. 桂东南大村和古龙岩体的成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素制约[J]. 地质通报, 2017, 36(Z1): 224-237.
- [29] 覃悦, 蔡永丰, 刘军, 等. 古特提斯演化的岩浆作用记录: 来自桂东南印支期火山岩证据[J]. 地球科学, 2024, 49(9): 3140-3154.
- [30] 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 1996(4): 289-295.
- [31] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报, 2011, 85(1): 1-33.
- [32] 唐渊, 王冬兵, 廖世勇, 等. 滇西高黎贡变质岩带南段淡色花岗岩脉年代学特征及构造意义[J]. 岩石学报, 2016, 32(8): 2347-2366.
- [33] 董方浏, 侯增谦, 高永丰, 等. 滇西腾冲新生代花岗岩: 成因类型与构造意义[J]. 岩石学报, 2006(4): 927-937.
- [34] 李心怡, 李抒予, 高原, 等. 青藏高原东部深部构造与动力学机制研究进展——来自第 9 届与第 10 届 WTGTP 研讨会的启示[J]. 地球与行星物理论评(中英文), 2024, 55(2): 205-216.
- [35] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- [36] 黄海钊, 付伟. 桂东南糯垌花岗岩地球化学特征及其对离子吸附型稀土成矿的指示意义[J]. 矿产勘查, 2025, 16(S1): 373.
- [37] 陈宏毅, 张波, 何辉, 等. 华南离子吸附型稀土矿床成矿规律与找矿方向初探[J]. 南方国土资源, 2012(12): 26-28.