

关于峨眉山大火成岩省一些问题的研究现状

梁莹*, 陈开煌

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年3月18日; 录用日期: 2025年5月5日; 发布日期: 2025年5月15日

摘要

文章综述了峨眉山大火成岩省(ELIP)的研究现状, 重点探讨了其形成机制、喷发时间、岩石类型及成矿作用等方面的研究进展, 并对存在的争议进行了分析。ELIP的形成被认为是地幔柱上涌活动的结果, 主要证据包括地壳快速隆升、高温苦橄岩的存在等。研究表明, ELIP的喷发时间较短, 但不同研究方法得到的年龄数据存在一定差异, 可能与其复杂的岩浆活动和后期热事件有关。ELIP中的高钛和低钛玄武岩成因存在争议, 有研究认为它们起源于不同深度的地幔部分熔融, 也有观点指出是同一源区经不同演化路径形成。此外, ELIP还与丰富的金属矿产资源相关, 成矿作用与特定岩浆岩类型紧密联系。研究表明, 成矿岩浆系统与地幔柱引发的深部熔融过程密切相关, 同时古老大陆岩石圈地幔的参与显著提升了岩浆的成矿潜力。尽管已有诸多重要进展, 但ELIP的形成机制、喷发时间及其与生物灭绝事件的关系等关键问题仍存在争议。未来的研究需要进一步结合多学科手段, 开展高精度年代学和地球化学研究, 以深入理解ELIP的形成过程及其与地球深部动力学的联系, 为揭示大火成岩省的成因和地球各圈层相互作用提供更丰富的科学依据。

关键词

峨眉山大火成岩省, 地幔柱, 峨眉山玄武岩

Research Status of Some Problems about Emeishan Large Igneous Province

Ying Liang*, Kaihuang Chen

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

Received: Mar. 18th, 2025; accepted: May 5th, 2025; published: May 15th, 2025

Abstract

This paper reviews the research status of the Emeishan Large Igneous Province (ELIP), focusing on

*通讯作者。

文章引用: 梁莹, 陈开煌. 关于峨眉山大火成岩省一些问题的研究现状[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(5): 626-637.

DOI: 10.12677/ag.2025.155061

its formation mechanism, eruption time, rock type and mineralization, and analyzes the existing disputes. The formation of the ELIP is considered to be the result of the upwelling of the mantle plume. The main evidence includes the rapid uplift of the crust and the existence of high-temperature picrite. Studies have shown that the eruption time of ELIP is relatively short, but there are some differences in the age data obtained by different research methods, which may be related to its complex magmatic activity and later thermal events. The genesis of high-titanium and low-titanium basalts in ELIP is controversial. Some studies suggest that they originate from partial melting of mantle at different depths, and some point out that they are formed by different evolution paths in the same source area. In addition, ELIP is also associated with abundant metal mineral resources, and mineralization is closely related to specific magmatic rock types. Studies have shown that the ore-forming magmatic system is closely related to the deep melting process caused by the mantle plume, and the participation of the ancient continental lithospheric mantle significantly enhances the metallogenic potential of the magma. Although there have been many important advances, the key issues such as the formation mechanism of ELIP, the eruption time and its relationship with the biological extinction event are still controversial. Future research needs to further combine multidisciplinary means to carry out high-precision chronology and geochemical studies to deeply understand the formation process of ELIP and its relationship with the deep dynamics of the earth, and to provide a richer scientific basis for revealing the genesis of large igneous provinces and the interaction of various spheres of the earth.

Keywords

Emeishan Large Igneous Province, Mantle Plume, Emeishan Basalt

Copyright © 2025 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

LIP 体积巨大($>0.1 \times 10^6 \text{ km}^3$, 通常会 $>1 \times 10^6 \text{ km}^3$), 主要为板内的镁铁质岩浆事件。LIP 在大陆和海洋中都会存在, 它们的出现被认为与地幔柱相关, 且以短时间形成为特征, 形成时间小于 5 Ma, 通常小于 2 Ma, 还有一些由持续时间超过几十个百万年的多个短脉冲构成[1]-[3]。LIP 由火山包(溢流玄武岩)和区域岩墙群(线性、反放射状、环形)、岩床复合体、层状镁铁质-超镁铁质侵入体和地壳镁铁质地板组成[4]。Bryan and Enst (2008)将 LIP 划分为 2 种类型, 即以镁铁质岩石为主的镁铁质大火成岩省, 镁铁质大火成岩省可以有少量长英质岩石(含石英的富硅长英质岩石), 但占比 $<10\%$; 以及由长英质岩石为主的硅质大火成岩省(镁铁质岩石占比 $<10\%$) [1]。镁铁质大火成岩省和硅质大火成岩省分别代表了 LIP 的两个端元。然而, Cheng *et al.* (2020)基于我国塔里木 LIP 的长英质岩石出露面积达 $0.48 \times 10^3 \text{ km}^2$, 约占总面积的 18%, 提出还存在第三种类型 LIP 称之为过渡型大火成岩省, 即镁铁质岩石和长英质岩石各占一定比例, 介于镁铁质大火成岩省和硅质大火成岩省之间[5]。LIP 近几十年来一直是国内外学者研究的热点, 研究内容涉及到 LIP 的形成与地幔柱之间的联系, 以及与成矿作用、大陆增生、大陆裂解和生物灭绝的关系[6] [7]。

位于扬子板块西缘的峨眉山大火成岩省(ELIP, 图 1(a))是中国首个被国际地学界承认的大火成岩省, 自二十一世纪开始, ELIP 成为中国的研究热点。ELIP 广泛分布于我国云贵川三省, 少量分布于广西西部以及越南北部(图 1(b))。通常将哀牢山-红河走滑断裂带当作该大火成岩省的西南边界, 其面积超 $0.3 \times 10^6 \text{ km}^2$, 横跨中国西南部和越南北部[8], 并且其紧邻三江构造带, 总体上与太平洋构造域和特提斯构造

域的交接部位重合, 同时受西太平洋构造域和特提斯构造域的复合影响[9]-[11]。峨眉山地幔柱活动的最早记录是泥盆纪的基性-酸性岩浆岩, 其大规模发育于晚古生代二叠纪至整个中生代, 可延续到新生代早期[12]。ELIP 的主要岩石类型包括大陆溢流玄武岩、镁铁质侵入体(如辉绿岩、辉长岩等)、苦橄质玄武岩、粗面岩和流纹岩等[13]-[18]。经过二十余年的研究, 前人在其空间分布[19]-[21]、年代学[22]-[24]、岩石成因[9][25]-[27]、地球化学特征[28][29]、富集成矿[30]等多方面取得了很多重要的进展, 但是对于其喷发时限、形成机制等还存在一些争议。本文主要围绕前人的研究重点及存在的一些争议进行阐述, 尝试厘清并总结 ELIP 的研究现状。

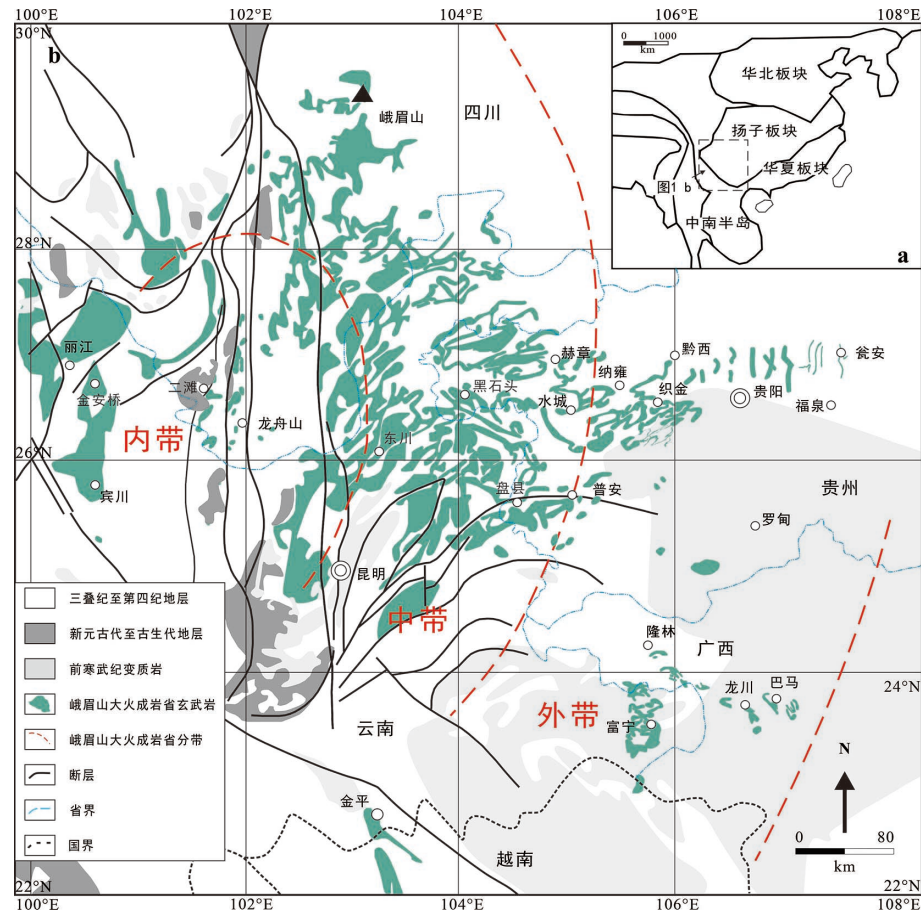


Figure 1. Distribution of emeishan large igneous province (modified according to [8])
图 1. 峨眉山大火成岩省分布图(据文献[8]修改)

2. ELIP 与地幔柱的关系

ELIP 的形成机制一直是地质学界关注的焦点, 其中地幔柱理论得到了广泛支持[4][31][32]。地幔柱被认为是由地球深部(核幔边界)上升的高温岩石柱, 其上升过程中会导致大规模的火山活动和地壳抬升。ELIP 的形成被认为与地幔柱的活动密切相关, 主要证据包括地壳的快速隆升[33][34]、高温苦橄岩的存在[35]以及地球物理[36]和地球化学特征[37]等。

He 等(2003, 2006)考察了扬子西缘峨眉山玄武岩下伏茅口灰岩, 并进行了区域生物地层对比, 发现茅口灰岩在玄武岩喷发前存在差异剥蚀, 而且茅口灰岩等厚线呈似圆状分布[38][39]。剥蚀程度在空间上呈有规律的变化, 自西到东可分为深度剥蚀带(内带)、部分剥蚀带(中带)、古风化壳或短暂沉积间断带(外带)

和连续沉积带[39]。剥蚀区与峨眉山玄武岩分布区范围高度重合(图 1(b))。综合考虑剥蚀地层厚度及热带环境下灰岩剥蚀速率,可推断地壳抬升时限不足 3 Ma,川滇古陆东北缘冲积扇及茅口灰岩剥蚀特征显示,地壳抬升幅度超过 1 km [38] [39]。由此可知,在峨眉山玄武岩喷发前夕,扬子西缘经历了一次快速且规模达千米级的弯状隆起。这一现象与地幔柱上升致地表抬升的理论模型高度契合,有力支撑了 ELIP 形成于地幔柱上涌的成因模式。值得注意的是,这是大陆型 LIP 中首次发现火山喷发前存在弯状隆起的关键地质证据,为地幔柱理论提供了独立且有利的判断依据。目前,除地幔柱作用外,尚无证据表明存在其他机制能在几百万年内形成半径超 1000 km、高度超 1 km 的地壳弯隆。快速隆升现象表明,ELIP 的形成是地幔柱上涌所致[40]。此外,He 等人(2010)基于 ELIP 地区油气钻井资料,在茅口组顶部发现古喀斯特地貌[41],进一步验证了 ELIP 的地幔柱模型,为该区域地质演化研究提供了新的视角和证据。

ELIP 中苦橄岩的形成机制是揭示地幔柱动力学过程的关键研究对象。Zhang 等(2021)针对丽江苦橄岩的苦橄石熔体包裹体开展了系统性研究,发现其地幔源区具有二元混合特征:主体由具 FOZO 端元特征(类似于洋岛玄武岩源区)的亏损组构成,并叠加了显著的古元古代再循环物质贡献[42]。基于 Sr-Nd 同位素模拟结果,研究团队提出其中 EM1 型富集组分的形成可追溯至约 2.35 Ga 的俯冲沉积物再循环事件,这一过程导致古老地壳物质通过俯冲带进入深部地幔[42]。这种源区混合特征揭示了地幔柱上升过程中与岩石圈地幔存在多尺度相互作用,为解析 ELIP 岩浆系统深部过程提供了重要约束。在物理化学条件方面,丽江苦橄岩的苦橄石斑晶表现出异常高的镁含量($MgO > 18\%$),电子探针分析证实其母岩浆具有超镁铁质特征[43]。通过热力学反演计算获得的地幔潜能温度高达约 1500°C,较正常软流圈地幔(~1300°C)显着提升约 200°C [43]。这一热异常值与经典地幔柱模型高度吻合,表明 ELIP 岩浆作用与深部地幔柱带来的热扰动存在成因联系。高温条件不仅促进了地幔物质的高程度熔融,也为苦橄质原始岩浆的形成提供了必要的热力学基础。同位素地球化学证据进一步深化了对地幔柱-岩石圈耦合机制的理解。ELIP 玄武岩整体呈现与洋岛玄武岩相似的 Sr-Nd-Pb 同位素组成,但低钛与高钛玄武岩存在显著分异特征。具体而言,低钛玄武岩的同位素特征与地幔柱轴部的高温熔融产物一致,可能代表地幔柱头部直接熔融的产物[13];而高钛玄武岩则显示出与地幔柱边缘或衰退期熔融相关的同位素信号,其成因可能涉及岩石圈地幔的混染作用或地幔柱不同演化阶段的熔融程度差异[44]。这种空间分带性不仅反映了地幔柱热结构的横向不均一性,也暗示岩浆演化过程中存在多阶段的源区混合与熔体-围岩相互作用[43] [44]。上述研究成果系统揭示了地幔柱活动在 ELIP 形成中的主导作用,为大火成岩省成因理论研究提供了关键的地球化学与热力学证据。

地幔柱模型预测,在大规模火山作用前,地表会发生大规模穹状隆升,隆升幅度可达 500 m 以上。研究显示,ELIP 在喷发前确实经历了快速的公里级隆升,这一现象为地幔柱的存在提供了有力证据[40]。此外,高温苦橄岩的存在也是地幔柱活动的重要标志,因为苦橄岩通常形成于高温条件下,代表了地幔柱头部的熔融产物[45]。然而,也有学者对地幔柱理论提出质疑,认为 ELIP 的形成可能与地幔柱无关,而是由其他地质过程如岩石圈拆沉或地壳裂解等引起[46]。

3. 地幔柱与岩石圈地幔的相互作用

峨眉山地幔柱作为 ELIP 的主要热源,其与岩石圈地幔的相互作用一直是地质学界的热点问题。近年来的研究揭示了地幔柱活动对岩石圈地幔的复杂影响,但关于地幔柱的起源、性质及其与岩石圈地幔的相互作用机制仍存在诸多争议。本文综合分析了最新的地质、地球化学和地球物理数据,尝试构建一个更为全面的解释框架。

传统地幔柱模型将峨眉山大火成岩省的形成归因于深部地幔柱的上涌作用,认为其高温特性引发岩石圈地幔的部分熔融和大规模玄武岩喷发,并通过地壳隆升与岩浆活动的时空耦合关系得到支持。Wang

等(2022)基于锆石 U-Pb 定年与 Sr-Nd-O 同位素分析, 揭示了峨眉山幔柱的异质性特征及其与大火成岩省成因的密切联系[31]。然而, 该模型对地幔柱与岩石圈地幔相互作用的动力学机制和化学过程解释仍存在局限性。近年研究指出, 俯冲事件可能对地幔柱源区产生重要改造。Yu 等(2017)通过橄榄石氧同位素研究发现, 乌龙坝地区橄榄岩样品中的橄榄石具有较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(5.3‰~6.0‰, 平均 5.6‰), 可能来源于一个富集 ^{18}O 的地幔源, 表明其源区可能经历了新元古代俯冲带流体/熔体的交代作用[47]。另外, Lin *et al.* (2023)提出古特提斯洋俯冲板块的脱水熔融过程为地幔柱提供了物质与热源[21], 揭示了俯冲改造地幔与地幔柱活动的潜在联系。

关于地表形变的争议性发现对传统模型提出了挑战。Zhu *et al.* (2018)通过地质记录重建发现火山喷发初期存在显著地表沉降而非隆升, 推测地幔柱内含有 10%~20%高密度再循环洋壳组分[48], 导致其浮力不足以引发千米级隆升。这一现象与地球物理模型计算结果相吻合, 但与传统地幔柱理论的预测存在矛盾。针对岩石圈地幔的响应机制, Zhang *et al.* (2024)通过多观测数据(瑞利波相速度、地表热流、重力异常和绝地高程数据)的贝叶斯概率反演方法研究发现: 内带岩石圈地幔 Mg# 较低(<90.6), 呈现富集特征; 而外带保持较高 Mg#(>90.6), 显示亏损特性[49]。这种空间分异表明地幔柱在上涌过程中与岩石圈地幔发生了差异性熔融-交代作用, 其引发的热扰动导致岩石圈减薄和小尺度热对流, 进而改变地幔柱的运移路径。Wang *et al.* (2022)对镁铁质岩墙的解剖进一步揭示, 高钛与低钛岩墙分别源自地幔柱不同深度, 其时空分布受控于岩石圈厚度变化和组成非均质性[31]。

综合现有证据, 峨眉山幔柱与岩石圈相互作用的复杂性可归因于三个核心因素: 首先, 地幔柱的多相性特征, 即再循环洋壳组分的加入(占比 10%~20%)不仅降低浮力, 还通过 Fe-Ti 富集相的改变诱发壳-幔化学相互作用; 其次, 区域岩石圈地幔在厚度和地球化学属性上存在显著空间差异, 导致熔融程度与岩浆成分的分带性; 最后, 地幔柱上涌引发的动态响应过程, 包括岩石圈热侵蚀、热-机械剥蚀以及熔体-围岩反应, 共同塑造了地表形变与岩浆活动的复杂格局。这些发现凸显了深部地幔过程与浅部岩石圈响应的多尺度耦合机制在理解大火成岩省成因中的关键作用。

4. ELIP 的喷发时间与持续时间

准确确定 ELIP 的喷发时间对于理解其形成过程和与生物灭绝事件的关系具有重要意义。前人对 ELIP 的年代学研究成果丰富(表 1)。云南宾川地区火山序列的研究显示, 最底部红层样品的锆石 U-Pb 年龄为 $260.55 \pm 0.07 \text{ Ma}$, 代表火山活动的最早喷发年龄; 顶部流纹岩样品的年龄为 $257.22 \pm 0.37 \text{ Ma}$, 表明火山喷发结束于约 257 Ma [27]。然而, 不同研究方法得到的年龄数据存在一定差异, 这可能是由于样品采集位置、测试方法以及后期热事件的干扰等多种因素造成的。

前人通过对峨眉山玄武岩及相关岩石的锆石 U-Pb 等年代学研究, 认为 ELIP 的主喷发时间较短。但也有研究指出, ELIP 的喷发可能持续了更长时间, 存在多期次的岩浆活动。古地磁研究表明, 下部玄武岩岩浆喷发与较年轻的上部岩浆喷发之间发生了地磁倒转, 说明喷发发生在 3 Ma 以内或者更短[63] [64]。然而, 高精度的放射性同位素地质年代学表明, 岩浆作用和可能的火山作用超过 3 Ma [54] [65]。这种时间上的差异反映了 ELIP 形成过程的复杂性, 需要进一步的高精度年代学研究来约束。

ELIP 的喷发可能表现为“脉冲式”特征, 主喷发期内包含多次短暂的高强度喷发事件, 而整体岩浆作用(包括侵入与喷发)可能持续更久。火山碎屑岩与熔岩互层的岩性组合支持多期次喷发模型, 不同期次可能受控于地幔柱上升的脉动式活动。结合高精度年代学与火山沉积记录, 认为 ELIP 的喷发可分为三个阶段: ① 初始喷发期: 约 262~260 Ma, 以水下玄武岩溢流相喷发为主, 伴随少量凝灰岩沉积, 与茅口组灰岩的假整合或喀斯特不整合基础关系表明在喷发前期存在一次短暂的地壳抬升。② 主喷发期: 约 260~257 Ma, 大规模陆相溢流玄武岩喷发, 形成厚度达 400~500 m 厚的熔岩序列, 同位素年龄多集中在

此期间。③ 喷发末期：约 257~255 Ma，局部酸性岩浆活动(如流纹岩喷发)及火山碎屑沉积。

Table 1. Statistical table of rock age of Emeishan Large Igneous Province
表 1. 峨眉山大火成岩省有关岩石年龄统计表

岩性	地点	样品	年龄 ± 误差(Ma)	测试方法	文献来源
火山岩	广西巴马	玄武岩	259.6 ± 5.9	SHRIMP U-Pb	[15]
	广西百色阳圩	玄武岩	259.1 ± 4.0	SHRIMP U-Pb	
	广西	玄武岩	257 ± 9	LA-ICP-MS U-Pb	[50]
	云南洱源双廊	玄武岩	259.8 ± 1.6	LA-ICP-MS U-Pb	[27]
	云南宾川上沧	流纹岩	255.6 ± 1.2	LA-ICP-MS U-Pb	
	云南宣威	玄武岩的桐石	259.6 ± 4.3	LA-ICP-MS U-Pb	[51]
	广西凭祥	玄武岩	258.2 ± 4.8	LA-ICP-MS U-Pb	[52]
中酸性侵入岩	四川白马	碱长石英正长岩	225 ± 3	SHRIMP U-Pb	[53]
	四川米易	偏铝质正长岩	259.6 ± 0.5	CA-TIMS	[54]
	四川大黑山	偏铝质正长岩	259.1 ± 0.5	CA-TIMS	
	广西凭祥	闪长岩	253.2 ± 3.3	LA-ICP-MS U-Pb	[52]
镁铁 - 超镁铁 侵入岩	四川攀枝花	辉长岩	259 ± 3	SHRIMP U-Pb	[22]
	四川米易	堆晶角闪辉长岩	260.3 ± 1.0	LA-ICP-MS U-Pb	[55]
	云南甸中	辉石岩	260.2 ± 1.6	LA-ICP-MS U-Pb	[16]
	云南甸中	辉长岩	264.0 ± 1.3	LA-ICP-MS U-Pb	
	广西马雄	辉绿岩	257.1 ± 1.3	LA-ICP-MS U-Pb	[57]
	广西巴马那桃	辉长辉绿岩	260.1 ± 1.6	LA-ICP-MS U-Pb	[58]
	广西巴马乙圩	正长辉长岩	259.7 ± 1.3	LA-ICP-MS U-Pb	
	广西巴马燕洞	辉长辉绿岩	257.1 ± 3.8	LA-ICP-MS U-Pb	
岩墙/岩脉	四川盐源	橄榄辉长岩	262 ± 3	SHRIMP U-Pb	[59]
	贵州罗甸	辉绿岩	255.0 ± 0.62	LA-ICP-MS U-Pb	[60]
	四川米易	基性岩脉	259.2 ± 0.4	CA-TIMS	[54]
	贵州罗甸	基性岩墙	261.2 ± 2.6	SHRIMP U-Pb	[61]
	四川米易	基性岩脉	259.9 ± 1.2	LA-ICP-MS U-Pb	[62]

5. ELIP 高钛和低钛玄武岩

ELIP 玄武岩的岩石成因问题一直是地学界研究的焦点之一。其中，高低钛玄武岩的成因差异和源区特征等问题尤为突出。前人基于各自的实验数据和理论模型，提出了多种观点和解释，但至今尚未形成统一的认识。Xu 等(2001)最先根据 Ti/Y 比值(500)和 TiO₂ 含量(2.5 wt.%)将玄武岩划分为高钛和低钛两类。这一分类方法为后续研究提供了基础框架，但在实际应用中也存在一些争议。Xu 等(2001)认为高钛玄武岩起源于地幔柱在深部(石榴子石稳定区)低程度部分熔融(1.5%)，而低钛玄武岩则是在相对较浅的环境(<60 km 的尖晶石稳定区)经过较高程度部分熔融(16%)形成的，强调地幔柱深源或浅部物质的直接贡献，认为地幔柱在上升过程中，由于压力和温度的变化，发生了部分熔融，形成了钛含量不同的岩浆。然而，

Hou 等(2011)提出了不同的观点, 他们认为高钛和低钛岩浆具有相同的源区, 但经历了不同的演化路径[66]。他们提出铁钛氧化物的分离结晶过程是控制岩浆成分变化的主要因素, 而铁钛氧化物的结晶受到地壳混染所引起的氧逸度变化的影响, 导致玄武岩浆因上升过程中受到不同程度的地壳混染而形成钛含量不同的玄武岩。

随着研究的深入, 有学者提出峨眉山大火成岩省中的岩石成分是连续变化的, 不存在高钛和低钛岩浆成分的间断[24] [67]。Shellnutt and Jahn (2011)的模拟显示, 石榴石橄榄岩在逐步熔融过程中, 随着熔融程度增加(5%~25%), 熔体 Ti/Y 比值从高钛特征逐渐过渡至低钛范围, 同时伴随 La/Yb 比值下降, 与 ELIP 玄武岩成分连续分布一致。这一发现挑战了传统的分类方法, Shellnutt and Jahn (2011)建议不再继续使用 Ti/Y 比值对峨眉山玄武岩进行高钛和低钛系列的划分。他们的模拟研究表明, 岩石成分的变化可能是多种地质过程共同作用的结果, 而不仅仅是源区或单一熔融过程的产物。此外, Zhang *et al.*, (2019)通过对微量元素的模拟研究, 进一步揭示了峨眉山大火成岩省中高钛、中钛和低钛玄武岩的地幔源区组成, 认为其由 84% 的原始地幔、15% 的洋壳和 1% 的远洋沉积物构成[68]。他们指出钛含量和 Ti/Y 比值主要受到部分熔融压力和程度的控制, 这一研究强调了源区物质组成和熔融条件的综合影响, 为理解不同钛含量玄武岩的形成机制提供了新的视角。

高低钛玄武岩的成因争议本质反映了地球深部过程的多尺度耦合。传统分类方案虽具启发性, 但可能过度简化自然界的连续性。整合熔融动力学、壳幔相互作用及挥发分行为的多参数模型, 将是揭示 ELIP 形成机制的关键。基于上述争议, 本文提出“源区组成 - 熔融过程 - 演化路径”三元控制模型。源区组成: 地幔与再循环组分(洋壳、俯冲板片、沉积物)的比例决定初始熔体的钛含量; 熔融条件: 部分熔融的温度、压力及熔融程度调控石榴石或尖晶石残留相比比例, 影响 Ti/Y 比值与 REE 分异; 演化路径: 地壳混染与分离结晶作用通过改变矿物组合及氧逸度等, 进一步修饰岩浆成分。

6. ELIP 层状岩体与成矿作用

ELIP 以其丰富的金属矿产资源著称, 区内发育多期次岩浆侵入活动并形成特色矿床组合。前人研究表明, 该区成矿作用与特定类型岩浆岩存在密切成因联系[30] [69]。基于成矿元素组合及母岩特征, 主要可划分两大成矿系统: 其一为与正长岩 - 辉长岩杂岩密切相关的 Fe-Ti-V 氧化物超大型矿床, 典型实例包括攀枝花、白马等矿区, 这类矿床的形成与富集 Fe-Ti 的基性岩浆分异作用直接相关; 其二则以低钛基性 - 超基性杂岩为容矿岩体, 形成具有重要经济价值的 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床群, 代表性矿床包括金山、力马河及朱布等。进一步研究表明, 含矿玄武质岩浆系统具有独特的地球化学指纹特征。对比分析显示, 含矿岩体在微量元素配分模式、同位素组成等方面与贫矿岩体存在显著差异。这种差异可能源于深部源区的本质区别: 成矿岩浆系统往往与地幔柱引发的深部熔融过程相关联, 同时古老大陆岩石圈地幔的参与是成矿的有利条件。具体而言, 稳定的岩石圈根部不仅为幔源岩浆提供了有利的存储环境, 其内部富集的金属元素更可通过熔体 - 地幔相互作用显著提升岩浆成矿潜力。这种深部构造 - 岩浆耦合机制, 可能是控制 ELIP 地区大规模成矿作用的关键地质因素。除了前面提及的两种与 ELIP 岩体直接相关的矿床外, 还有一些与 ELIP 玄武岩具成因联系的表生/次生成因矿床, 如滇东北巧家 - 会泽地区的“沉积型”铜矿、沐川地区宣威组底部的古风化壳 - 沉积型 Nb-REE 矿床等[70]-[72]。

Hou 等(2012) [73]提出攀枝花矿床的形成与深部岩浆房中的岩浆分异过程密切相关, 并得到了 Tang 等(2023) [74]研究的进一步支持和扩展。Hou 等(2012)认为, 高镁橄榄石的早期结晶导致残余岩浆富铁, 进而形成钒钛磁铁矿床。不同类型的岩石(如辉岩、块状矿石、斜长岩等)是在深部岩浆房中分异后侵入到高位岩浆房的。他们提出的新成矿模型指出, 钒钛磁铁矿床的形成是由于岩浆在深部岩浆房中经历了双扩散对流和重力沉降, 形成了不同成分的岩浆层。其中, 钒钛磁铁矿熔体和富含铁的岩浆侵入到主岩体

中, 形成了矿体。同时, 斜长岩熔体和含橄榄石晶体的超镁铁质岩浆上升到高位, 形成了层状的辉长岩和斜长岩。另外, Tang 等(2023)通过对红格、攀枝花和太和三个大型钒钛磁铁矿床进行磷灰石 Sr-Nd 同位素和磷灰石-锆石微量元素组成研究, 揭示了不同钒钛磁铁矿床的岩浆控制机制差异。他们的研究发现, 磷灰石 Sr-Nd 同位素显示红格矿床经历了与前寒武纪片麻岩-片岩的混染, 而攀枝花和太和矿床则与大理岩混染。此外, 太和矿床的幔源成分可能包含再循环的高温改造洋壳。攀枝花矿床的岩浆经历了更高的斜长石结晶分异程度, 其成矿岩浆的稀土元素模式比其他两个矿床更为分异, 表明其岩浆源区较浅。这些发现为理解 ELIP 内矿床的形成提供了新的视角, 表明不同矿床的形成不仅与岩浆在深部岩浆房中的分异过程有关, 还受到地壳混染和幔源成分的影响。结合 Hou 等(2012)的模型, 可以更全面地理解钒钛磁铁矿床的形成机制, 即岩浆在深部岩浆房中的物理分异过程与地壳物质的相互作用共同控制了矿床的形成和演化。

7. 结语

尽管 ELIP 的研究已经取得了许多重要的进展, 但在一些关键问题上仍存在争议, 如其形成机制、喷发时间以及与生物大规模灭绝的关系等。未来的研究需要加强不同学科的结合和国际合作对比, 同时开展更深入的基础地质调查和高精度年代学研究, 以推动 ELIP 研究的进一步深入, 为理解地球深部动力学过程和各圈层相互作用提供更丰富的科学依据。

参考文献

- [1] Bryan, S.E. and Ernst, R.E. (2008) Revised Definition of Large Igneous Provinces (LIPs). *Earth-Science Reviews*, **86**, 175-202. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.08.008>
- [2] Bryan, S.E. and Ferrari, L. (2013) Large Igneous Provinces and Silicic Large Igneous Provinces: Progress in Our Understanding over the Last 25 Years. *Geological Society of America Bulletin*, **125**, 1053-1078. <https://doi.org/10.1130/b30820.1>
- [3] Ernst, R.E. (2014) Large Igneous Provinces. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139025300>
- [4] Ernst, R.E., Liikane, D.A., Jowitt, S.M., Buchan, K.L. and Blanchard, J.A. (2019) A New Plumbing System Framework for Mantle Plume-Related Continental Large Igneous Provinces and Their Mafic-Ultramafic Intrusions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **384**, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.07.007>
- [5] Cheng, Z., Zhang, Z., Wang, Z., Wang, F., Mao, Q., Xu, L., et al. (2020) Petrogenesis of Transitional Large Igneous Province: Insights from Bimodal Volcanic Suite in the Tarim Large Igneous Province. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125**, e2019JB018382. <https://doi.org/10.1029/2019jb018382>
- [6] 王德滋, 周金城. 大火成岩省研究新进展[J]. 高校地质学报, 2005(1): 1-8.
- [7] 夏林圻, 徐学义, 李向民, 夏祖春, 马中平. 亚洲 3 个大火成岩省(峨眉山、西伯利亚、德干)对比研究[J]. 西北地质, 2012, 45(2): 1-26.
- [8] Shellnutt, J.G. (2014) The Emeishan Large Igneous Province: A Synthesis. *Geoscience Frontiers*, **5**, 369-394. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.07.003>
- [9] Ali, J.R., Thompson, G.M., Zhou, M. and Song, X. (2005) Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Lithos*, **79**, 475-489. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.013>
- [10] 刘希军, 时毓, 陈雪峰, 黄文龙, 郭琳, 廖帅, 吴伟男. 印支期古特提斯洋俯冲与峨眉山地幔柱相互作用对桂西地区构造——岩浆作用的影响[C]//中国地球物理学会, 全国岩石学与地球动力学研讨会组委会, 中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会, 中国地质学会区域地质与成矿专业委员会. 2014 年中国地球科学联合学术年会——专题 49: 华南大陆构造论文集. 北京: 中国和平音像电子出版社, 2014: 20-23.
- [11] 张治国, 刘希军, 张起钻, 时毓, 廖帅, 覃显著, 李政林. 峨眉山地幔柱与特提斯俯冲相互作用及成矿[C]//中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会, 中国地质学会矿床地质专业委员会, 矿床地球化学国家重点实验室. 第八届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要文集. 贵阳: 矿物学报, 2017: 153.
- [12] 聂爱国. 峨眉山幔柱活动控制贵州西部成矿系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [13] Xu, Y., Chung, S., Jahn, B. and Wu, G. (2001) Petrologic and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Permian-

- Triassic Emeishan Flood Basalts in Southwestern China. *Lithos*, **58**, 145-168.
[https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(01\)00055-x](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(01)00055-x)
- [14] 张招崇, 王福生, 范蔚茗, 邓海琳, 徐义刚, 许继峰, 王岳军. 峨眉山玄武岩研究中的一些问题的讨论[J]. 岩石矿物学杂志, 2001(3): 239-246.
- [15] Fan, W., Zhang, C., Wang, Y., Guo, F. and Peng, T. (2008) Geochronology and Geochemistry of Permian Basalts in Western Guangxi Province, Southwest China: Evidence for Plume-Lithosphere Interaction. *Lithos*, **102**, 218-236.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.09.019>
- [16] Zhong, H., Campbell, I.H., Zhu, W., Allen, C.M., Hu, R., Xie, L., *et al.* (2011) Timing and Source Constraints on the Relationship between Mafic and Felsic Intrusions in the Emeishan Large Igneous Province. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **75**, 1374-1395. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.12.016>
- [17] 廖宝丽, 张招崇, 寇彩化, 李宏博. 贵州水城二叠纪钠质粗面玄武岩的地球化学特征及其源区[J]. 岩石学报, 2012, 28(4): 1238-1250.
- [18] Huang, H., Du, Y., Yang, J., Zhou, L., Hu, L., Huang, H., *et al.* (2014) Origin of Permian Basalts and Clastic Rocks in Napo, Southwest China: Implications for the Erosion and Eruption of the Emeishan Large Igneous Province. *Lithos*, **208**, 324-338. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.09.022>
- [19] Liu, X., Liang, Q., Li, Z., Castillo, P.R., Shi, Y., Xu, J., *et al.* (2017) Origin of Permian Extremely High Ti/Y Mafic Lavas and Dykes from Western Guangxi, SW China: Implications for the Emeishan Mantle Plume Magmatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, **141**, 97-111. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.09.005>
- [20] Shellnutt, J.G., Pham, T.T., Denyszyn, S.W., Yeh, M. and Tran, T. (2020) Magmatic Duration of the Emeishan Large Igneous Province: Insight from Northern Vietnam. *Geology*, **48**, 457-461. <https://doi.org/10.1130/g47076.1>
- [21] Lin, H., Wu, X., Qin, H., Li, C., Li, Y., Su, H., *et al.* (2023) Contribution from Ancient Subducted Slab to the Emeishan Large Igneous Province: Constraints from the Petrogenesis of Mafic Intrusions in the Western Guangxi Area, South China. *Lithos*, **446**, Article ID: 107131. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107131>
- [22] Zhou, M., Malpas, J., Song, X., Robinson, P.T., Sun, M., Kennedy, A.K., *et al.* (2002) A Temporal Link between the Emeishan Large Igneous Province (SW China) and the End-Guadalupian Mass Extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, **196**, 113-122. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(01\)00608-2](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(01)00608-2)
- [23] He, B., Xu, Y., Huang, X., Luo, Z., Shi, Y., Yang, Q., *et al.* (2007) Age and Duration of the Emeishan Flood Volcanism, SW China: Geochemistry and SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Silicic Ignimbrites, Post-Volcanic Xuanwei Formation and Clay Tuff at the Chaotian Section. *Earth and Planetary Science Letters*, **255**, 306-323.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.021>
- [24] Shellnutt, J.G. and Jahn, B.-. (2011) Origin of Late Permian Emeishan Basaltic Rocks from the Panxi Region (SW China): Implications for the Ti-Classification and Spatial-Compositional Distribution of the Emeishan Flood Basalts. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **199**, 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.10.009>
- [25] Song, X., Qi, H., Robinson, P.T., Zhou, M., Cao, Z. and Chen, L. (2008) Melting of the Subcontinental Lithospheric Mantle by the Emeishan Mantle Plume; Evidence from the Basal Alkaline Basalts in Dongchuan, Yunnan, Southwestern China. *Lithos*, **100**, 93-111. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.023>
- [26] Wang, C.Y., Zhou, M. and Qi, L. (2010) Chalcophile Element Geochemistry and Petrogenesis of High-Ti and Low-Ti Magmas in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **161**, 237-254. <https://doi.org/10.1007/s00410-010-0529-8>
- [27] Huang, H., Cawood, P.A., Hou, M., Xiong, F., Ni, S., Deng, M., *et al.* (2022) Zircon U-Pb Age, Trace Element, and Hf Isotopic Constrains on the Origin and Evolution of the Emeishan Large Igneous Province. *Gondwana Research*, **105**, 535-550. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.09.023>
- [28] 姜常义, 钱壮志, 姜寒冰, 唐冬梅, 张蓬勃, 朱士飞. 云南宾川-永胜-丽江地区低钛玄武岩和苦橄岩的岩石成因与源区性质[J]. 岩石学报, 2007(4): 777-792.
- [29] 田雨露, 李亚, 孟凡超, 赵立可, 吴智平, 杜青. 峨眉山大火成岩省岩石成因与空间差异性研究——基于全区高Ti玄武岩地球化学数据分析与模拟[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(4): 687-703.
- [30] Zhou, M., Arndt, N.T., Malpas, J., Wang, C.Y. and Kennedy, A.K. (2008) Two Magma Series and Associated Ore Deposit Types in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Lithos*, **103**, 352-368.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.10.006>
- [31] Wang, Y., Xue, S., Klemd, R., Yang, L., Zhao, F. and Wang, Q. (2022) Late Permian Plume and Neoproterozoic Subduction-Modified Mantle Interaction: Insights from Geochronology and Sr-Nd-O Isotopes of Mafic Dikes of the Western Emeishan Large Igneous Province. *American Journal of Science*, **322**, 993-1018.
<https://doi.org/10.2475/08.2022.02>

- [32] 孙自明, 卞昌蓉, 刘光祥. 峨眉山地幔柱主要研究进展及四川盆地二叠纪成盆动力学机制[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1089-1099.
- [33] 何斌 徐, 肖龙, 王康明, 沙绍礼. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布: 来自沉积地层学的新证据[J]. 地质学报, 2003(2): 194-202.
- [34] Xu, Y., He, B., Chung, S., Menzies, M.A. and Frey, F.A. (2004) Geologic, Geochemical, and Geophysical Consequences of Plume Involvement in the Emeishan Flood-Basalt Province. *Geology*, **32**, 917-920. <https://doi.org/10.1130/g20602.1>
- [35] 张招崇, 王福生. 峨眉山玄武岩区两类玄武岩的地球化学: 地幔柱-岩石圈相互作用的证据[J]. 地质学报, 2002(2): 287-288.
- [36] 陈赟, 赵与同, 刘佳乐, 梁晓峰, 李玮, 徐义刚. 峨眉山大火成岩省的岩石圈结构: 对地幔柱-岩石圈相互作用的启示[J]. 岩石学报, 2023, 39(9): 2541-2553.
- [37] 张招崇, Mahoney, J.J., 王福生, 赵莉, 艾羽, 杨铁铮. 峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学: 地幔柱头部熔融的证据[J]. 岩石学报, 2006(6): 1538-1552.
- [38] He, B., Xu, Y., Wang, Y. and Luo, Z. (2006) Sedimentation and Lithofacies Paleogeography in Southwestern China before and after the Emeishan Flood Volcanism: New Insights into Surface Response to Mantle Plume Activity. *The Journal of Geology*, **114**, 117-132. <https://doi.org/10.1086/498103>
- [39] He, B., Xu, Y., Chung, S., Xiao, L. and Wang, Y. (2003) Sedimentary Evidence for a Rapid, Kilometer-Scale Crustal Doming Prior to the Eruption of the Emeishan Flood Basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, **213**, 391-405. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00323-6](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00323-6)
- [40] 徐义刚, 何斌, 黄小龙, 罗震宇, 朱丹, 马金龙, 邵辉. 地幔柱大辩论及如何验证地幔柱假说[J]. 地学前缘, 2007(2): 1-9.
- [41] He, Q., Xiao, L., Balta, B., Gao, R. and Chen, J. (2010) Variety and Complexity of the Late-Permian Emeishan Basalts: Reappraisal of Plume-Lithosphere Interaction Processes. *Lithos*, **119**, 91-107. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.020>
- [42] Zhang, L., Ren, Z., Zhang, L., Wu, Y., Qian, S., Xia, X., et al. (2021) Nature of the Mantle Plume under the Emeishan Large Igneous Province: Constraints from Olivine-Hosted Melt Inclusions of the Lijiang Picrites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **126**, [page]. <https://doi.org/10.1029/2020jb021022>
- [43] 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学, 2001, 30(1): 1-9.
- [44] Xu, J., Xia, X., Wang, Q., Spencer, C.J., He, B. and Lai, C. (2021) Low- $\delta^{18}\text{O}$ A-Type Granites in SW China: Evidence for the Interaction between the Subducted Paleotethyan Slab and the Emeishan Mantle Plume. *GSA Bulletin*, **134**, 81-93. <https://doi.org/10.1130/b35929.1>
- [45] Zhang, Z. (2006) Geochemistry of Picritic and Associated Basalt Flows of the Western Emeishan Flood Basalt Province, China. *Journal of Petrology*, **47**, 1997-2019. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl034>
- [46] 史仁灯, 郝艳丽, 黄启帅. Re-Os 同位素对峨眉山大火成岩省成因制约的探讨[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2515-23.
- [47] Yu, S., Shen, N., Song, X., Ripley, E.M., Li, C. and Chen, L. (2017) An Integrated Chemical and Oxygen Isotopic Study of Primitive Olivine Grains in Picrites from the Emeishan Large Igneous Province, SW China: Evidence for Oxygen Isotope Heterogeneity in Mantle Sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **215**, 263-276. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.08.007>
- [48] Zhu, J., Zhang, Z., Reichow, M.K., Li, H., Cai, W. and Pan, R. (2018) Weak Vertical Surface Movement Caused by the Ascent of the Emeishan Mantle Anomaly. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **123**, 1018-1034. <https://doi.org/10.1002/2017jb015058>
- [49] Zhang, A., Guo, Z., Afonso, J.C., Shellnutt, J.G. and Yang, Y. (2024) Mantle Plume-Lithosphere Interactions beneath the Emeishan Large Igneous Province. *Geophysical Research Letters*, **51**, e2023GL106973. <https://doi.org/10.1029/2023gl106973>
- [50] Lai, S., Qin, J., Li, Y., Li, S. and Santosh, M. (2012) Permian High Ti/Y Basalts from the Eastern Part of the Emeishan Large Igneous Province, Southwestern China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, **47**, 216-230. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.07.010>
- [51] Du, S., Ling, K., Luo, C., Li, Y. and Wen, H. (2024) Origins of Titanite in the Emeishan Basalts: Implications for Niobium Enrichment in the Upper Permian Xuanwei Formation, Eastern Yunnan-Western Guizhou Region, Southwest China. *Lithos*, **476**, Article ID: 107607. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107607>
- [52] Hu, L., Cawood, P.A., Du, Y., Zhu, D., Lai, Z., Wang, Q., et al. (2024) Oib-type Mafic-ultramafic Rocks in South Guangxi, South China: A Record of Interaction between Paleo-Tethys Subduction and Emeishan Large Igneous Province.

- Lithos*, **468**, Article ID: 107497. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107497>
- [53] Xiao, L., Xu, Y.G., Mei, H.J., Zheng, Y.F., He, B. and Pirajno, F. (2004) Distinct Mantle Sources of Low-Ti and High-Ti Basalts from the Western Emeishan Large Igneous Province, SW China: Implications for Plume-lithosphere Interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, **228**, 525-546. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.002>
- [54] Shellnutt, J.G., Denysyn, S.W. and Mundil, R. (2012) Precise Age Determination of Mafic and Felsic Intrusive Rocks from the Permian Emeishan Large Igneous Province (SW China). *Gondwana Research*, **22**, 118-126. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.10.009>
- [55] Zhang, Z., Qin, J., Lai, S., Long, X., Ju, Y., Wang, X., *et al.* (2019) Origin of Late Permian Syenite and Gabbro from the Panxi Rift, SW China: The Fractionation Process of Mafic Magma in the Inner Zone of the Emeishan Mantle Plume. *Lithos*, **346**, Article ID: 105160. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105160>
- [56] 刘军平, 王晓峰, 王小虎, 杨爱平, 宋冬虎, 田素梅, 夏彩香, 张坤, 杨仕潘. 滇中甸中地区中二叠世晚期镁铁-超镁铁质岩体特征及其与峨眉山地幔柱关系——来自锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学证据[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1284-1298.
- [57] 赵兵, 刘希军, 李政林, 时毓, 招传, 覃显著. 桂西马雄辉绿岩的 Sr-Nd-Hf 同位素和铂族元素特征: 对岩浆演化和硫化物成矿作用的启示[J]. 岩石学报, 2022, 38(9): 2848-2864.
- [58] 吴祥珂, 梁国科, 李玉坤, 赵兵, 蒋剑, 尹庭旺. 桂西巴马基性岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征: 与峨眉山大火成岩省的成因联系[J]. 桂林理工大学学报, 2023, 43(1): 14-29.
- [59] Guo, F., Fan, W., Wang, Y. and Li, C. (2004) When Did the Emeishan Mantle Plume Activity Start? Geochronological and Geochemical Evidence from Ultramafic-Mafic Dikes in Southwestern China. *International Geology Review*, **46**, 226-234. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.3.226>
- [60] 韩伟, 罗金海, 樊俊雷, 曹远志, 张静艺. 贵州罗甸晚二叠世辉绿岩及其区域构造意义[J]. 地质论评, 2009, 55(6): 795-803.
- [61] 祝明金, 田亚洲, 聂爱国, 张恒, 杨华荣. 黔南基性岩墙岩石地球化学、SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及地质意义[J]. 地球科学, 2018, 43(4): 1333-1349.
- [62] Zou, H., Hu, C., Santosh, M., Chen, H., Huang, C., Chen, X., *et al.* (2022) Crust-Derived Felsic Magmatism in the Emeishan Large Igneous Province: New Evidence from Zircon U-Pb-Hf-O Isotope from the Yangtze Block, China. *Geoscience Frontiers*, **13**, Article ID: 101369. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101369>
- [63] Zheng, L., Yang, Z., Tong, Y. and Yuan, W. (2010) Magnetostratigraphic Constraints on Two-Stage Eruptions of the Emeishan Continental Flood Basalts. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **11**, Q12014. <https://doi.org/10.1029/2010gc003267>
- [64] Xu, Y., Yang, Z., Tong, Y. and Jing, X. (2018) Paleomagnetic Secular Variation Constraints on the Rapid Eruption of the Emeishan Continental Flood Basalts in Southwestern China and Northern Vietnam. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **123**, 2597-2617. <https://doi.org/10.1002/2017jb014757>
- [65] Shen, S., Crowley, J.L., Wang, Y., Bowring, S.A., Erwin, D.H., Sadler, P.M., *et al.* (2011) Calibrating the End-Permian Mass Extinction. *Science*, **334**, 1367-1372. <https://doi.org/10.1126/science.1213454>
- [66] Hou, T., Zhang, Z., Kusky, T., Du, Y., Liu, J. and Zhao, Z. (2011) A Reappraisal of the High-Ti and Low-Ti Classification of Basalts and Petrogenetic Linkage between Basalts and Mafic-Ultramafic Intrusions in the Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Ore Geology Reviews*, **41**, 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.07.005>
- [67] Kamenetsky, V.S., Chung, S., Kamenetsky, M.B. and Kuzmin, D.V. (2012) Picrites from the Emeishan Large Igneous Province, SW China: A Compositional Continuum in Primitive Magmas and Their Respective Mantle Sources. *Journal of Petrology*, **53**, 2095-2113. <https://doi.org/10.1093/petrology/egs045>
- [68] Zhang, L., Ren, Z., Handler, M.R., Wu, Y., Zhang, L., Qian, S., *et al.* (2019) The Origins of High-Ti and Low-Ti Magmas in Large Igneous Provinces, Insights from Melt Inclusion Trace Elements and Sr-Pb Isotopes in the Emeishan Large Igneous Province. *Lithos*, **344**, 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.06.014>
- [69] Zhang, Z., Hao, Y., Ai, Y., Li, Y. and Zhao, L. (2009) Phase Equilibria Constraints on Relations of Ore-Bearing Intrusions with Flood Basalts in the Panxi Region, Southwestern China. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, **83**, 295-309. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2009.00037.x>
- [70] 王居里, 郭健, 刘忠奎, 张云峰, 张蓉, 王伟涛, 冯士信, 冯娟萍, 井继峰, 李领军. 滇东北峨眉山玄武岩区的沉积型铜矿床[J]. 矿床地质, 2006(6): 663-671.
- [71] 王富东, 朱笑青, 王中刚. 与峨眉山玄武岩有关的沉积型铜矿——“马豆子式”铜矿的成因研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(12): 1851-1861.
- [72] 文俊, 竹合林, 张金元, 张航飞, 郭文彦, 游学军, 赵伟, 李鹏程, 陈东方. 川南沐川地区首次发现宣威组底部古

风化壳-沉积型铌、稀土矿[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 970-971.

- [73] Hou, T., Zhang, Z. and Pirajno, F. (2012) A New Metallogenic Model of the Panzhihua Giant V-Ti-Iron Oxide Deposit (Emeishan Large Igneous Province) Based on High-Mg Olivine-Bearing Wehrlite and New Field Evidence. *International Geology Review*, **54**, 1721-1745. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.665211>
- [74] Tang, Q., Li, C., Liu, C., Xue, S., Xu, S., Zhang, Y., *et al.* (2023) Contrasting Magmatic Controls on the Genesis of Fe-Ti-V Oxide Deposits in the Emeishan Large Igneous Province Using Apatite Sr-Nd Isotopes and Apatite-Zircon Trace Elements. *Mineralium Deposita*, **58**, 1279-1296. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01180-0>