

姚尧, 王勤. 2026. 大火成岩省对陆壳结构、大陆裂解和全球气候变化的影响[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 57(1): 27-50. doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-021.

Yao Y, Wang Q. 2026. Effects of large igneous provinces on the continental crustal structure, continental break-up and global climate changes[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 57(1): 27-50 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2024-021.

大火成岩省对陆壳结构、大陆裂解和全球气候变化的影响

姚 尧, 王 勤*

南京大学关键地球物质循环与成矿全国重点实验室 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023

摘要: 大火成岩省 (large igneous provinces, LIPs) 在地壳生长、金属元素成矿、全球气候变化和生命演化等地质过程中发挥重要作用, 目前研究集中于 LIPs 的地表地质记录, 对同期形成的中下地壳侵入岩的认识还很有限. 本文通过对比峨眉山 LIP、西伯利亚 LIP、中大西洋岩浆省的地质和地球物理资料, 探讨 LIPs 岩浆通道系统对陆壳结构和全球气候的影响. 受构造应力场、上覆岩石圈厚度以及壳幔相互作用差异性的影响, 每个 LIP 可能都拥有独特的岩浆通道系统, 并影响大陆岩石圈的动力学演化. 地幔柱对岩石圈底部的热力学侵蚀可使岩石圈减薄, 在区域远程拉张应力下, LIPs 沿先存岩石圈薄弱带喷发, 热弱化效应可促进岩石圈伸展, 导致大陆裂解. 如果 LIPs 远离板块离散边界或者处于挤压应力场, 岩浆底侵和壳内侵入岩可提高壳幔耦合的程度和岩石圈强度, 使克拉通保持长期稳定. LIPs 的火山作用是驱动全球气候变化的重要因素之一, 而岩浆侵位时与围岩的接触变质作用可能释放大量 CO₂ 或者甲烷, 从而加剧气候变化. LIPs 的岩浆通道系统是连接深部地幔过程与地球表层系统的桥梁. 识别和模拟 LIPs 的岩浆通道系统将为研究地幔柱-岩石圈相互作用、LIPs 的成矿机制以及 LIPs 与全球气候变化和生物灭绝事件的关系提供新视角.

关键词: 大火成岩省; 地幔柱; 岩浆通道系统; 地壳结构; 岩浆底侵; 全球气候变化

doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-021

中图分类号: P313

文献标识码: A

Effects of large igneous provinces on the continental crustal structure, continental break-up and global climate changes

Yao Yao, Wang Qin*

State Key Laboratory of Critical Earth Material Cycling and Mineral Deposits, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Large igneous provinces (LIPs) play an important role in crustal growth, metallogenesis of metal elements, global climate changes and life evolution. Despite extensive studies of near-surface geological records of LIPs, our knowledge about the middle-lower crustal intrusions of LIPs is very limited. By comparing geological and geophysical data from the Emeishan LIP, the Siberian Traps, and the Central Atlantic Magmatic Province, we investigate the effects of the magmatic plumbing system of LIPs on the continental crustal structure and global climate. Due to differences in the stress regime, the lithospheric thickness, and plume-lithosphere interaction, each LIP may contain a unique plumbing system and crustal structure, which will affect the dynamic evolution of the continental lithosphere. Thermal-mechanical erosion of the lithosphere by a mantle plume will cause lithospheric thinning. Under regional far-field extensional stress, the thermal weakening effect by eruption of LIPs along pre-ex-

收稿日期: 2024-05-21; 录用日期: 2025-08-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41825006); 国家重点研发计划资助项目 (2023YFF0803304)

Supported by the National Natural Science Foundations of China (Grant No. 41825006) and National Key R&D Plan of China (Grant No. 2023YFF0803304)

第一作者: 姚尧 (1996-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事地球物理方面的研究. E-mail: 997222146@qq.com

*通信作者: 王勤 (1974-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事流变学和岩石物理学等方面的研究. E-mail:

qwang@nju.edu.cn



isting weak zones can enhance the lithospheric extension and trigger the continental break-up. By contrast, if LIPs are far away from divergent plate boundaries or under regional compression, magma underplating and crustal intrusions will increase the crust-mantle coupling and the lithospheric strength, and consequently allow the long-term stability of cratons. Volcanism of LIPs is one of the controlling factors of global climate change, meanwhile large amounts of CO₂ and methane released by contact metamorphism between intrusions and surrounding rocks also contribute to climate changes. The plumbing system of LIPs establishes a bridge between deep mantle processes and the Earth's surface system. Recognition and modeling of the plumbing system of LIPs will provide new insights into the plume-lithosphere interaction, metallogenic mechanisms of LIPs, as well as the relationships between LIPs, the global climate change and massive extinction events.

Keywords: large igneous provinces; mantle plume; plumbing system; crustal structure; magma underplating; global climate changes

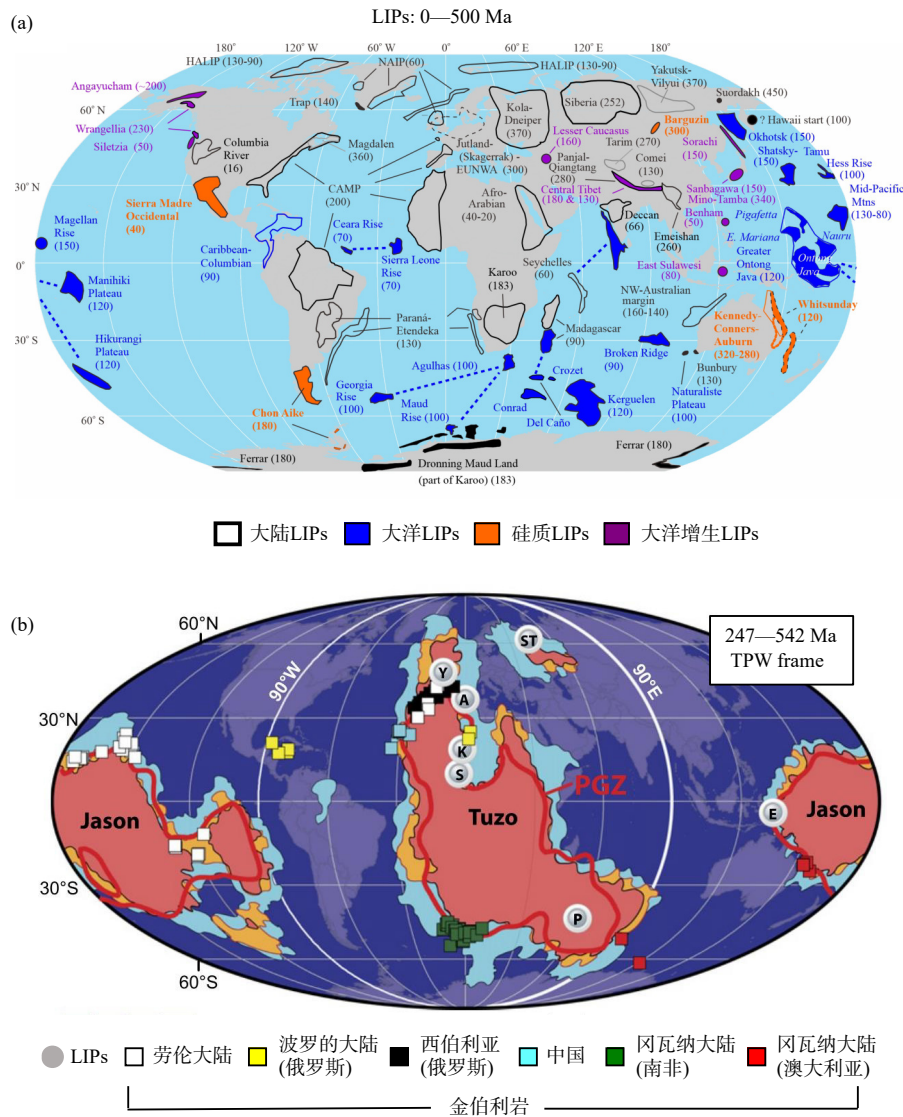
0 引言

大火成岩省 (large igneous provinces, LIPs) 作为地球历史中的大规模板内岩浆事件, 以巨量 ($>0.1 \times 10^6 \text{ km}^3$, 通常 $>1 \times 10^6 \text{ km}^3$) 岩浆在 1—5 百万年的快速喷发为特征 (Bryan and Ernst, 2008; Bryan and Ferrari, 2013). LIPs 以基性岩浆岩为主, 例如: 印度德干 LIP (也称为德干暗色岩, Deccan Traps)、西伯利亚 LIP (也称为西伯利亚暗色岩, Siberian Traps)、中大西洋岩浆省 (Central Atlantic Magmatic Province, CAMP)、美国哥伦比亚河溢流玄武岩省 (Columbia River flood basalt province)、南非 Bushveld 杂岩体、Ontong Java 洋底高原都是典型的 LIPs. LIPs 在全球广泛分布, 目前已知最古老的 LIP 年龄为 3.79 Ga (Isley and Abbott, 1999, 2002). 统计表明 LIPs 自元古宙以来 ($<2.5 \text{ Ga}$) 平均 20—30 百万年发生一次, 在超大陆裂解时 LIPs 频率增加, 而太古宙 LIPs 由于缺乏足够的证据, 发生频率尚不明确 (Ernst et al., 2021). 受大洋岩石圈俯冲消亡的影响, 由洋底高原和大洋溢流玄武岩组成的大洋 LIPs 很难长期保存, 在增生型造山带里保留的洋底高原和海山与 LIPs 的相关性需谨慎分析. 基性岩浆沿壳幔边界的底侵是地壳垂向生长的重要机制 (Arndt, 2013; Thybo and Artemieva, 2013), 而 LIPs 脉冲式的巨量岩浆喷发会造成全球气候和环境的骤变, 从而影响生命演化甚至引发生物大灭绝 (Ernst et al., 2021). 因此, LIPs 记录并参与了早期地球和板块构造体制下的圈层相互作用, 对理解圈层分异、大陆生长、全球碳循环、水循环、硫循环和地球宜居性演化具有重要意义 (Black and Gibson, 2019; Black et al., 2021; Condie et al., 2015; Ernst and Youbi, 2017; Liu J et al.,

2017).

虽然 LIPs 岩浆通道系统的活动周期可达几十个百万年, 但超过总体积 75% 的岩浆岩形成于 1—5 百万年 (通常 <2 百万年), 这意味着 LIPs 来源于快速的大规模地幔熔融事件, 目前普遍认为只有起源于核幔边界的地幔柱才能提供 LIPs 所需的热量、熔体体积和熔体喷发速率 (Campbell, 2007; Pearce et al., 2021; Richards et al., 1989; Saunders, 2005). 地幔柱是地球跨圈层物质与能量循环的重要通道, 在地球系统的热演化、构造体制转变和超大陆循环中发挥重要作用 (Gerya, 2014; Mitchell et al., 2021; Zhong et al., 2024). LIPs 通常被认为是地幔柱头部减压熔融的产物, 而狭窄的地幔柱尾部熔融形成了热点或无震海岭 (Campbell and Griffiths, 1990; Jellinek and Manga, 2004; Koppers et al., 2021; Richards et al., 1989; Torsvik et al., 2014). 显生宙以来 LIPs 与热点型火山岛链的时空联系为 LIPs 的地幔柱成因提供了有力证据, 例如: 德干 LIP 与 Reunion 热点、北大西洋火成岩省与冰岛热点 (Campbell, 2007; Richards et al., 1989; Zhao, 2007) (图 1a). 全球板块重建模型发现, 除了西伯利亚 LIP 和哥伦比亚河 LIP 之外, 显生宙绝大多数 LIPs 和金伯利岩都分布于下地幔两个大低剪切波速省的边缘, 表明超级地幔柱起源于核幔边界并在 500 Ma 以来保持稳定 (图 1b) (Torsvik et al., 2008, 2014).

地幔柱对大陆岩石圈成分、热结构和克拉通稳定性的影响是大陆动力学演化中的热点问题 (Holbrook et al., 2001; Hu et al., 2018; Lavecchia et al., 2025; Liu et al., 2021; Pearce et al., 2021). LIPs 已成为古大陆重建的重要依据, 虽然很多 LIPs 伴随大陆裂解, 但也有 LIPs 位于稳定的克拉通, 例如: 西伯利亚 LIP、峨眉山 LIP、塔里木 LIP、南非



注: HALIP: 北极高地 LIP (121—126 Ma 和 95 Ma); CAMP: 中大西洋岩浆省 (201 Ma); NAIP: 北大西洋火成岩省 (~62 Ma); K: Kalkarindji (510 Ma, 澳大利亚); A: Altay-Sayan (400 Ma, 西伯利亚); Y: Yakutsk (360 Ma, 西伯利亚); S: Skagerrak (297 Ma, 欧洲); P: Panjal Traps (285 Ma, 印度/喜马拉雅西北); E: 峨眉山 (260—258 Ma); ST: Siberian Traps (251 Ma)

图 1 (a) 全球 500 Ma 以来的 LIPs 分布示意图 (引自 Ernst et al., 2021); (b) 大低剪切波速省与古生代 LIPs (251—510 Ma) 和金伯利岩 (247—542 Ma) 的分布关系图 (引自 Torsvik et al., 2014). 图 a 括号中的数字为 LIPs 喷发时间, 单位是 Ma; 图 b 为经过 450 Ma 真极移校正后重建的地幔参考坐标系, 红线勾勒出位于非洲下方 (Tuzo) 和太平洋下方 (Jason) 核幔边界的大低剪切波速省

Fig. 1 (a) Schematic distribution of LIPs since 500 Ma (from Ernst et al., 2021); (b) Relationship between large low shear-wave velocity provinces and distribution of Paleozoic LIPs (251–510 Ma) and kimberlites (247–542 Ma) (from Torsvik et al., 2014). Numbers in parentheses in (a) indicate the eruption time of LIPs in Ma. (b) is 450-Ma true polar wander (TPW)-corrected mantle frame reconstruction. Red lines in (b) delineate two large low shear-wave velocity provinces on the core-mantle boundary beneath Africa (Tuzo) and the Pacific (Jason)

Bushveld 杂岩体等 (图 1) (Koptev and Cloetingh, 2024; 张栓宏等, 2022). LIPs 的岩浆通道系统包括侵入岩、喷出岩和火山通道等, 目前对 LIPs 规模的估计主要基于地表溢流玄武岩和基性岩墙群的分布, 对 LIPs 相关的中下地壳侵入岩知之甚少. 随着高精度年代学、地球化学和古生物数据的积累, 显生宙以来 LIPs 的火山作用与生物大灭绝和大洋缺

氧事件的时间相关性已得到了广泛认可 (Black et al., 2021; Ernst et al., 2021; Fan et al., 2020; 沈树忠等, 2024), 但是如何估算 LIPs 侵入岩对陆壳结构和全球气候的影响一直是研究难点.

为深入理解 LIPs 对大陆演化和全球气候变化的影响, 本文聚焦 LIPs 的岩浆通道系统及其与大陆裂解的关系, 选择峨眉山 LIP、西伯利亚 LIP、

CAMP 代表不同构造环境下的 LIPs, 系统对比它们的地质背景、壳幔波速结构、气候和环境效应, 为探讨 LIPs 在地球系统演化中的作用提供新视角。

1 大火成岩省的岩浆通道系统

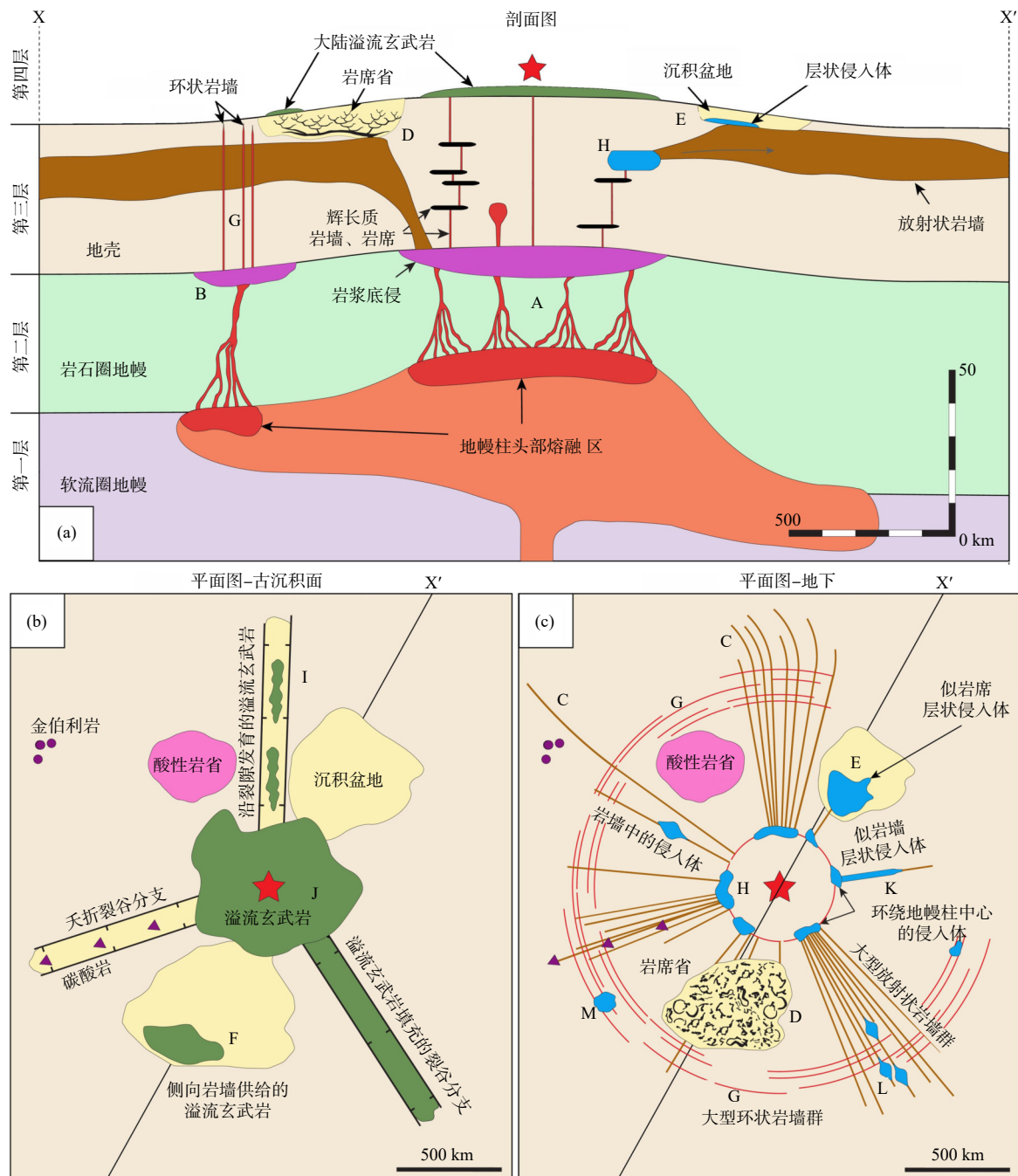
随着全球 LIPs 岩石学、地球化学、高精度年代学和壳幔结构数据的积累, 岩浆通道系统 (magmatic plumbing system) 已成为 LIPs 的研究热点, 为认识岩浆从地幔源区上升、存储 (岩浆房) 到喷出地表的输运过程提供了重要基础。根据地质记录、地球物理观察和动力学模拟, 地幔柱头部的直径约 1000 km, 当地幔柱上升至岩石圈底部时, 地幔柱头部压扁变平, 水平直径可达 2000~2500 km, 高温苦橄岩和低钛玄武岩位于 LIPs 火山活动的中心, 代表了地幔柱头部在尖晶石-石榴子石稳定域早期高程度熔融的产物; 而 LIPs 外带以高钛玄武岩为主, 代表了地幔柱尾部在石榴子石稳定域的低程度熔融 (Campbell and Griffiths, 1990; Campbell, 2007; Xu et al., 2004)。此外, 与地幔柱相关的壳-幔相互作用不仅是地壳垂向生长的主要机制, 而且导致金属元素大规模迁移和富集, LIPs 的成矿效应一直是国际研究热点 (张招崇等, 2022)。例如: 2055—2060 Ma 的南非 Bushveld 杂岩体是全球最大的铂族金属产地和最大的层状铬铁矿, 也富集铜镍硫化物, 提供了 LIPs 岩浆房成矿作用的典型实例 (Buick et al., 2001; Cawthorn, 1999; Cole et al., 2013; Scoates and Friedman, 2008)。位于峨眉山 LIP 内带的四川攀西地区是全球最大的钒钛磁铁矿床聚集区, 攀枝花、红格、白马、太和等超大型钒钛磁铁矿床都位于镁铁-超镁铁质层状岩体的下部和中部岩相带, 成矿时间与峨眉山 LIP 的玄武岩喷发时间一致, 可能与幔源岩浆在不同深度的分离结晶、流动分选和同化混染有关 (宋谢炎等, 2018; Zhou et al., 2005)。位于西伯利亚克拉通西北缘的 Noril'sk 是全球最大的岩浆型铂族元素-铜镍硫化物矿集区, 含矿的镁铁-超镁铁质岩体沿深大断裂产出, 与西伯利亚 LIP 溢流玄武岩在时空上密切相关, 其成矿机制还存在争议 (Krivolutskaya et al., 2019; 舒思齐等, 2015)。因此, 重建岩浆通道系统并追踪其中的物理-化学过程对研究 LIPs 相关的大规模成矿作用具有重要意义。

Ernst 等 (2019) 系统总结了大陆 LIPs 的岩浆通道系统, 包括大规模溢流玄武岩、岩墙群和岩席、

壳内层状镁铁-超镁铁质侵入体、壳幔边界的岩浆底侵以及火山通道等, 大陆 LIPs 还可能包括酸性侵入岩、碳酸岩和金伯利岩。他们把 LIPs 的形成过程分为四个阶段: 首先地幔柱穿过软流圈到达岩石圈底部, 地幔柱头部和上覆岩石圈底部发生部分熔融; 然后幔源岩浆向上运移穿过岩石圈并在壳幔边界聚集, 岩浆冷却形成高密度的镁铁-超镁铁质侵入体, 造成地壳增厚。在地幔柱头部中心位置之上, 位于壳幔边界的镁铁-超镁铁质侵入体在水平方向可延伸数百千米 (图 2a 中的 A); 而在地幔柱边缘岩石圈较薄的位置, 地幔柱头部减压熔融, 之后岩浆底侵可在 Moho 面形成规模较小的镁铁-超镁铁质侵入体 (图 2a 中的 B)。

第三阶段是壳内岩浆通道系统形成的关键期, 来自地幔柱头部以及岩石圈地幔部分熔融的岩浆继续向上迁移, 在地壳内形成广泛分布的岩墙和岩席 (图 2a 和图 2c)。部分熔体在上升过程中可发生结晶分异和地壳混染, 而地幔柱的高热通量也可能引发地壳部分熔融和热液循环。岩墙群可以呈线状、放射状和环状, 规模分别可达总长 2000 km、半径 2500 km 及直径 2000 km 以上。放射状岩墙群通常呈扇形分布, 其汇聚方向指向地幔柱头部的理论中心 (图 2c), 例如: 大西洋沿岸的 CAMP 放射状岩墙群半径约 2800 km, 北美 Mackenzie LIP 的放射状岩墙群半径超过 2500 km (Buchan and Ernst, 2021), 峨眉山 LIP 的放射状岩墙群半径约 400 km (Li et al., 2015)。此外, 放射状岩墙群靠近地幔柱中心时与下地壳岩浆底侵区连接, 岩浆沿岩墙迁移, 可导致在距离地幔柱中心几百千米处形成岩席省 (sill province) (图 2a 中的 D)、镁铁-超镁铁质层状侵入体 (图 2a 中的 E) 以及溢流玄武岩 (图 2b 中的 F)。Buchan 和 Ernst (2018) 根据对北极高地 LIP 的研究, 提出大型环状岩墙群可能来自于压扁的地幔柱头部外缘的熔体 (图 2a 和图 2c 的 G), 而小型环状岩墙群则可能来自于地幔柱头部压扁过程早期、从地幔过渡带上升的小型地幔柱或从地壳岩浆底侵区边缘上升的熔体 (图 2a 和图 2c 的 H)。在第四阶段, 岩浆通过火山机构到达地幔柱头部上方的中心区域, 形成大规模溢流玄武岩 (图 2b 的 J), 少量岩浆可沿岩墙水平运移几百千米后再喷发形成溢流玄武岩 (图 2b 的 F), 而地幔柱活动引发地壳伸展, 沿裂谷盆地也会发育溢流玄武岩 (图 2b 的 I)。

此外, 少量的酸性岩浆岩、金伯利岩和碳酸岩



注: 岩浆底侵 (紫色), 镁铁-超镁铁质侵入体 (蓝色), 镁铁质岩席 (黑色), 放射状镁铁质岩墙群 (棕色), 环状镁铁质岩墙群 (红色), 溢流玄武岩 (绿色), 硅质岩浆岩 (粉色), 碳酸岩 (紫色三角), 金伯利岩 (紫色圆点), 注意图 a 的横纵比例尺不同。

图 2 大陆大火成岩省岩浆通道系统示意图 (引自 Ernst et al., 2019)。(a) 剖面图; (b) 古地表平面图; (c) 侵入岩的地下平面分布图

Fig. 2 Framework for the magmatic plumbing system of continental large igneous provinces. (a) Cross section, (b) paleosurface plan view, and (c) subsurface plan view of intrusive rocks (from Ernst et al., 2019)

会出现在 LIPs 岩浆区的外围, 靠近克拉通边缘或者沿裂谷分布 (图 2), 例如: 16 Ma 哥伦比亚河 LIP、66 Ma 德干 LIP、183 Ma 南非 Karoo LIP、260 Ma 峨眉山 LIP、~280 Ma 塔里木 LIP (Ernst and Bell, 2010; Ernst et al., 2018, 2019; Torsvik et al., 2014)。少量大陆 LIPs 以远离板块边界的巨量酸性、

中酸性熔结凝灰岩为主, 伴有同期的花岗岩以及流纹质、安山质和玄武质熔岩、碳酸岩和金伯利岩, 岩浆活动时间可达 40 百万年, 被称为酸性大火成岩省或者长英质大火成岩省 (silicic large igneous provinces), 例如: 120 Ma 澳大利亚 Whitsunday LIP、188 Ma 南美 Chon Aike LIP (图 1a) (薄弘

泽和张招崇, 2020; Bryan and Ferrari, 2013; Pankhurst et al., 2011). 这些酸性大火成岩省代表了地幔柱导致的基性岩浆分异或者下地壳部分熔融的最后产物, 其与板块构造的关系还存在争议.

LIPs 岩浆通道系统的概念模型能较好地刻画环状岩墙群、放射状岩墙群和溢流玄武岩在地表的分布, 解释 LIPs 演化过程中在岩石圈—软流圈边界 (lithosphere-asthenosphere boundary, LAB)、岩石圈地幔、地壳和地表形成的岩浆岩的时空关系 (Buchan and Ernst, 2021; Ernst et al., 2019). 但是, 近年来的地质和地球物理观测表明, 地幔柱头部可能是不规则且不对称的, 而非连续的扁平圆盘状, 从地幔柱主体向外可形成小尺度的指状对流单元, 这些放射状分布的指状结构提供了岩浆迁移通道, 最终岩浆喷发形成 LIPs 外带的小规模溢流玄武岩 (Li et al., 2024; Schoonman et al., 2017; Wang and Li, 2021). 此外, 虽然东非大裂谷常被作为地幔柱驱动的大陆主动张裂的典型, Koptev 等 (2015) 通过三维动力学模拟揭示, 在远程拉张应力下, 上升的 Kenyan 地幔柱物质受克拉通岩石圈根的影响发生偏移, 围绕坦桑尼亚克拉通同时形成富岩浆活动的东裂谷和贫岩浆活动的西裂谷. 这意味着地幔柱形成的岩浆通道系统可能是不对称的, 从而导致地表火山岩和裂谷的分布偏离地幔柱头部熔融区. 因此, 地幔柱内部结构、LIPs 中下地壳侵入岩的分布及其形成机制等关键问题仍有待深入研究.

2 大火成岩省与大陆裂解的关系

大火成岩省与超大陆循环的关系可以追溯到古元古代 (Ciborowski et al., 2017; Ernst and Bleeker, 2015; Heaman, 1997; Peng et al., 2022). 统计表明全球蛇绿岩形成和就位的峰期常伴随广泛分布的 LIPs, 并与超大陆聚合时的主要造山事件同步, 这意味着超级地幔柱活动加速了 LIPs 的形成和洋底扩张, 从而促进板块碰撞和蛇绿岩构造增生 (Dilek and Ernst, 2008). LIPs 常与大陆裂解和新洋盆的形成密切相关, 例如: 31 Ma 喷发的 Afar LIP 与红海-亚丁湾的形成相关 (Sembroni et al., 2016); 201 Ma 喷发的 CAMP 与潘吉亚大陆的初始裂解相关, 造成大西洋的打开 (Davies et al., 2017); 华北燕辽地区 1320—1300 Ma 大规模辉绿岩床群与北澳大利亚 Derim Derim-Galiwinku LIP 属于同一个 LIP, 在 1300—1220 Ma 华北克拉通与北澳大利亚克拉通

分离, 华北克拉通从哥伦比亚超大陆裂解 (Zhang et al., 2017, 2022). 但是, 也有许多包含大火成岩省的克拉通保持长期稳定, 例如: 西伯利亚克拉通经历了西伯利亚 LIP 在 252—251 Ma 的喷发 (Reichow et al., 2009), 扬子克拉通经历了峨眉山 LIP 在 260—258 Ma 的喷发 (Shellnutt, 2014), 塔里木克拉通经历了塔里木 LIP 在 290—280 Ma 的喷发 (Xu et al., 2014), 南非 Kaapvaal 克拉通有 2060—2055 Ma 的 Bushveld 杂岩体 (Bryan and Ferrari, 2013; Zeh et al., 2015). 这些 LIPs 的规模差异很大, 表明不同构造环境下地幔柱与岩石圈的相互作用具有显著差异, LIPs 地表岩浆岩的体积不是决定大陆是否裂解的主要因素.

根据动力来源, Fitton (1983) 将大陆裂解分为主动张裂和被动张裂: 前者由软流圈热物质上涌驱动上覆岩石圈水平伸展、显著减薄和大陆裂解, 表现为岩石圈热隆起之后出现大量火山活动, 形成裂陷盆地, 最后盆地发生热沉降; 而后者由区域拉张应力导致岩石圈伸展, 地壳减薄, 因此先发育裂陷盆地, 荷载降低导致软流圈物质上涌, 火山活动的时间晚于陆内裂谷作用. 这一分类虽然为认识大陆裂谷的形成机制提供了重要基础, 但忽略了大陆岩石圈在构造应力场、岩石圈厚度、流变结构和早期演化历史的差异性, 难以解释 LIPs 与大陆裂解的复杂关系.

Koptev 和 Cloetingh (2024) 根据显生宙 LIPs 与大陆裂解的时空关系, 将 LIPs 分为六类. 他们将未导致大陆裂解的 LIPs 称为“聚敛型” (LIP-Shirker), 例如: 西伯利亚 LIP、峨眉山 LIP、塔里木 LIP. 这些地区虽然发育了大规模溢流玄武岩及同期的陆内裂谷, 但是克拉通仍保持稳定. 西伯利亚 LIP 是全球大陆上出露面积最大的大火成岩省, 上升的地幔柱在 LAB 横向扩展, 形成蘑菇状的头部和多个岩浆通道, 252—250 Ma 喷发的溢流玄武岩覆盖了从西伯利亚克拉通到西西伯利亚盆地 (West Siberian Basin)、Taimyr 半岛的广大地区, 面积达到 $\sim 5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 但是西西伯利亚裂谷系在中三叠世停止活动, 活动时间约 10 百万年, 并没有造成岩石圈裂解 (Nikishin et al., 2002; Reichow et al., 2009) (图 3a). 欧洲新生代裂谷系 (European Cenozoic rift system) 虽然在岩浆岩的规模上还达不到 LIP 的标准, 但为理解构造应力场如何影响 LIPs 演化提供了参考 (Koptev and Cloetingh, 2024). 该裂谷系位于欧洲西部和中部, 从北海之

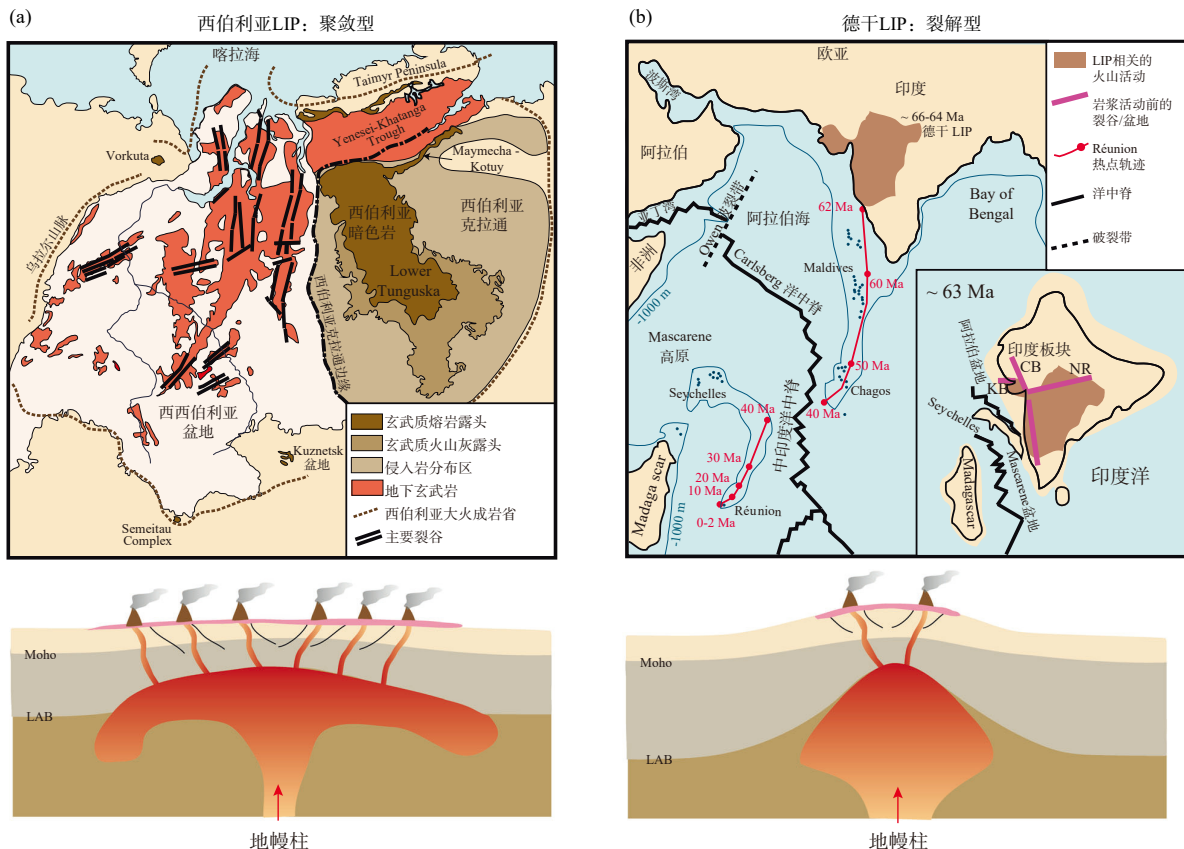


图 3 聚敛型和裂解型 LIPs 的典型实例 (引自 Koptev and Cloetingh, 2024). (a) 西伯利亚 LIP 代表聚敛型 LIPs, 地质图上的虚线为根据地表玄武质熔岩流、火山灰和地下玄武岩分布划定的西伯利亚 LIP 范围, 裂谷的分布表明地幔柱头部上方存在多个岩浆通道, 但是并没有造成岩石圈裂解; (b) 德干 LIP 代表裂解型 LIPs, 在 66—64 Ma 地幔柱导致的大规模火山作用后, Seychelles 微陆块与印度大陆在~63 Ma 裂解, Réunion 热点记录了大陆裂解、洋盆扩张的历史, 62—40 Ma Réunion 热点与 Carlsberg 洋中脊相互作用, 40 Ma 至今 Réunion 热点位于非洲板块下方

Fig. 3 Typical examples of LIP-Shrinker and LIP-Producer (from Koptev and Cloetingh, 2024). (a) Siberian LIP as a LIP-Shrinker, (b) Deccan LIP as a LIP-Producer

滨延伸至地中海西部, 包括莱茵裂谷系、中央高原地堑、Bresse 地堑、莱茵河谷地堑和 Eger 地堑, 总长度约 1 100 km. 始新世晚期至中新世, 随着新特提斯洋盆的关闭, 该地区发生东西向伸展, 被动裂谷作用导致火山岩广泛发育, 中新世以来莱茵裂谷系仍在活动, 而中央高原地堑和莱茵河谷地堑在中新世早期停止活动. 从渐新世晚期开始的地幔柱热侵蚀导致欧洲新生代裂谷系的岩石圈减薄至 80 km, 地表持续隆升, 但是岩石圈水平伸展不超过 7 km (Geissler et al., 2010; Sobolev et al., 1997; Ziegler and Dèzes, 2005). 因此, 构造应力场是影响大陆裂解的重要因素.

Koptev 和 Cloetingh (2024) 将在大陆裂解过程中发挥重要作用的 LIPs 划分为“裂解型”(LIP-Producer)、“触发型”(LIP-Trigger)、“吸引型”(LIP-Attractor). 裂解型 LIPs 对应于大陆主动张裂模型 (Fitton, 1983), 即上升的地幔柱决定了大陆裂解的位置和时间, 地幔柱导致的岩浆活动

和岩石圈弱化早于大陆裂谷作用, 大陆裂解前的岩石圈减薄、基性岩浆喷发和地表隆升都集中于地幔柱头部上方, 例如: 66—64 Ma 的德干 LIP、93—90 Ma 的马达加斯加 LIP. 动力学模拟揭示了裂解型 LIPs 的形成机制: 地幔柱对上覆岩石圈底部的热力学侵蚀降低了岩石圈的流变强度 (Davies, 1994; Heyn and Conrad, 2022), 而熔体渗滤进一步弱化岩石圈, 从而在区域伸展背景下导致岩石圈裂解 (Koptev et al., 2021; Lavecchia et al., 2017). 以德干 LIP 为例 (图 3b), 新特提斯洋盆向北持续俯冲产生的板片拉力使后方的印度大陆岩石圈处于远程拉张应力下, 在 66—64 Ma 德干大规模溢流玄武岩喷发之后, 弱化的印度大陆随即在~63 Ma 与 Seychelles 微陆块分离, 发生大陆裂解, Carlsberg 洋中脊打开. 德干高原大规模溢流玄武岩代表地幔柱头部减压熔融的产物, 而从德干 LIP 向西南的一系列洋岛则是地幔柱尾部熔融形成的 Réunion 热点在上覆岩石圈的连续记录 (Koptev and Cloet-

ingh, 2024)。

触发型 LIPs 对应于大陆被动张裂模型 (Fitton, 1983), 其岩浆活动的时间晚于大陆裂谷作用, 并沿着岩石圈强烈减薄的位置分布, 即平行于最终的大陆裂解轴分布。因此, 触发型 LIPs 的岩浆活动只是加强了岩石圈伸展的应变局部集中, 触发大陆裂解, 并不是大陆裂解的主控因素。触发型 LIPs 喷发之前的陆内裂谷作用可能被大陆裂解中止, 形成夭折的陆内裂谷。根据 LIPs 基性岩浆岩和大陆裂谷分布的时空关系, ~201 Ma 的 CAMP (图 4a)、184—182 Ma 的 Karoo LIP、132—130 Ma 的 Comei-Bunbury LIP 都属于触发型 LIPs。在 CAMP 和 Karoo LIP 喷发前, 所在地区的裂谷作用已经持续了数十百万年, 二者都没有相关的热点轨迹。在 CAMP 喷发后约 10 Ma, 中大西洋于 ~190 Ma 打开, 北美—非洲大陆沿洋中脊裂解 (Sibuet et al., 2012)。在 Karoo LIP 喷发后 ~15 Ma, 南非、南极洲、马达加斯加在 168—164 Ma 分开 (Mueller and Jokat, 2017)。早白垩世 Kerguelen 地幔柱活动形成了 ~130 Ma 的 Kerguelen 洋底高原 (Bredow and

Steinberger, 2018) 和 132—130 Ma 的 Comei-Bunbury LIP (Coffin et al., 2002; Zhu et al., 2009)。板块重建表明, Comei-Bunbury LIP 与印度—澳大利亚 (Williams et al., 2013) 和印度—南极洲 (Gaina et al., 2007) 的初始裂解同时发生, 但是该地区的大陆裂谷作用起始于 ~160 Ma (Seton et al., 2012), 远早于 Comei-Bunbury LIP 的形成时间。

与裂解型和触发型 LIPs 相关的大陆裂解都发生在地幔柱上升区, 首先形成富火山活动被动陆缘 (volcanic passive margins), 之后随着洋底扩张, 形成无火山活动的被动陆缘 (non-volcanic passive margins)。但是, 吸引型 LIPs 的作用仅限于引导已存在的大洋扩张过程。例如: Afar LIP (也称为埃塞俄比亚暗色岩, Ethiopian Traps) 归因于 Afar 地幔柱在 ~30 Ma 的大规模熔融事件 (Hofmann et al., 1997), 而位于亚丁湾东端的无火山作用被动陆缘开始于 19—17 Ma (Leroy et al., 2004), 远早于 ~1 Ma 形成的位于 Afar 三联点的富火山活动被动陆缘 (Ahmed et al., 2013)。Afar 三联点是红海裂谷、亚丁湾裂谷和东非大裂谷的交汇点, 红海和亚

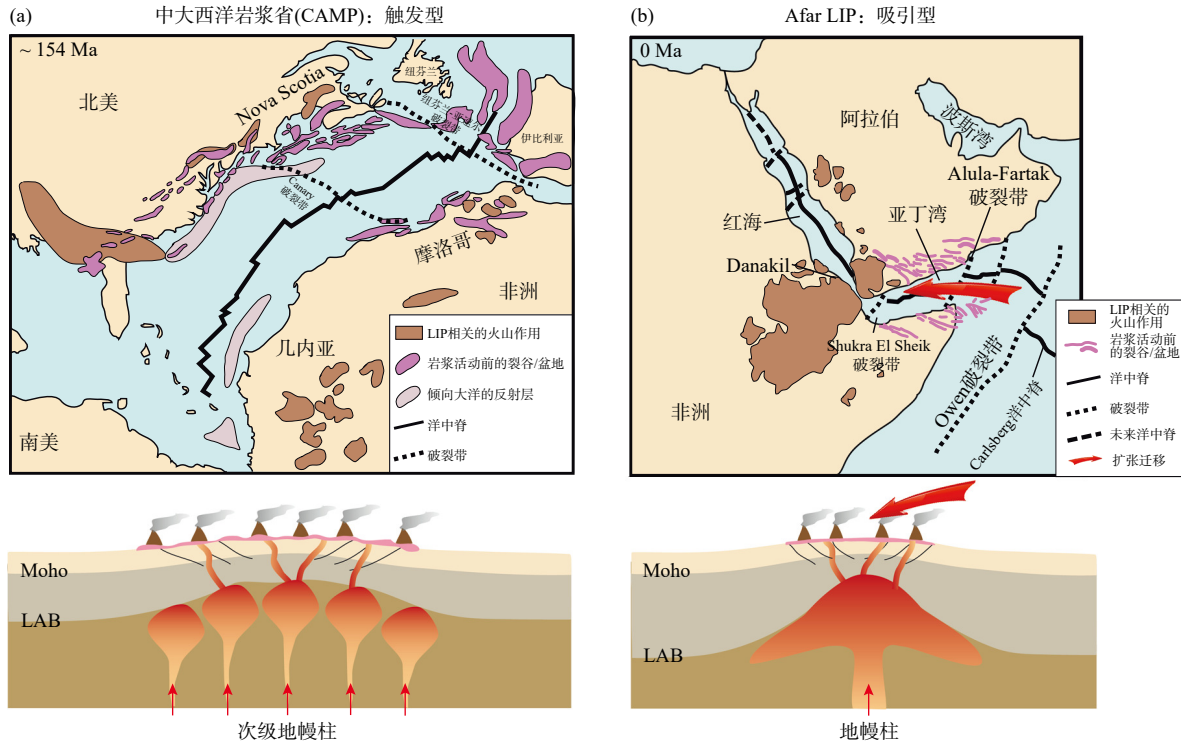


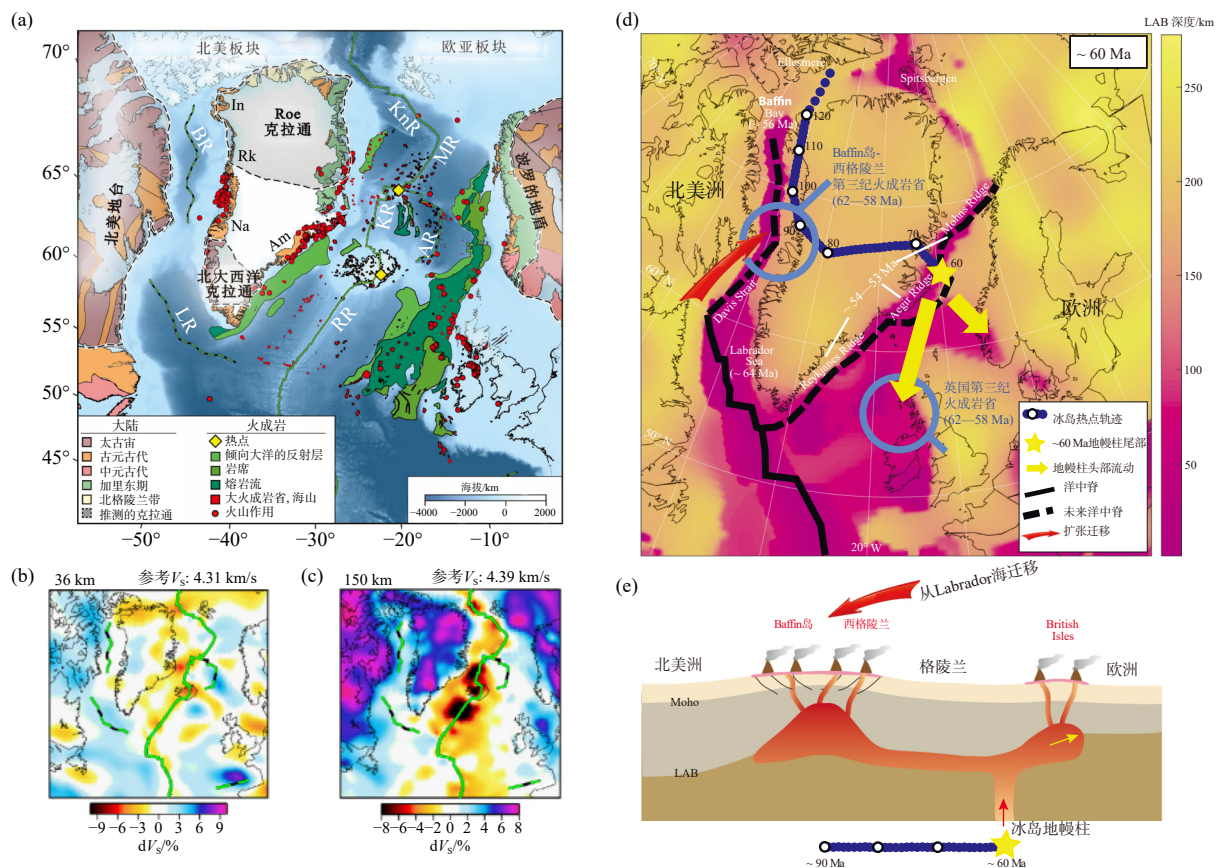
图 4 触发型和吸引型 LIPs 的典型实例 (引自 Koptev and Cloetingh, 2024)。 (a) 中大西洋岩浆省 (CAMP) 代表触发型 LIPs, 在减薄岩石圈下方, 多个次级地幔柱同时活动导致岩浆活动分散, ~10 Ma 之后北美-非洲大陆沿洋中脊裂解, 由地幔柱触发的岩石圈裂解在大西洋两侧形成了富火山活动被动陆缘; (b) Afar LIP 代表吸引型 LIPs, ~30 Ma 地幔柱活动导致的岩石圈薄弱区控制了 Calsberg 洋中脊的水平扩展方向, 使亚丁湾在 19—17 Ma 形成无火山作用被动陆缘

Fig. 4 Typical examples of LIP-Trigger and LIP-Attractor (from Koptev and Cloetingh, 2024). (a) Central Atlantic Magmatic Province as a LIP-Trigger; (b) Afar LIP as a LIP-Attractor

丁湾已发育洋壳, 而东非大裂谷仍处于大陆裂谷阶段. Koptev 和 Cloetingh (2024) 推测由于~30 Ma 的 Afar 地幔柱活动使上覆岩石圈减薄而且强度降低, 这一岩石圈薄弱区“吸引”了形成于~63 Ma 的 Carlsberg 洋中脊向西扩展, 并导致非洲—阿拉伯板块在~20 Ma 沿亚丁湾裂解, 使亚丁湾在 19—17 Ma 形成无火山作用被动陆缘 (图 4b)。

此外, Koptev 和 Cloetingh (2024) 将岩石圈裂解和洋底扩张存在时空错位的 LIPs 分为“复苏型”(re-awakened LIPs) 和“沉睡型”(dormant LIPs)。复苏型 LIPs 以北大西洋火成岩省 (North

Atlantic Igneous Province) 为例。现今格陵兰岛中部的岩石圈最薄, 热流值最高, 地震层析成像显示格陵兰西部具有加厚下地壳和克拉通岩石圈, 而冰岛地幔柱表现为显著的低速异常 (图 5a、5b), 反映了冰岛地幔柱对格陵兰岛的影响 (Celli et al., 2021; Lebedev et al., 2018; Rysgaard et al., 2018)。北大西洋火成岩省的形成机制目前还存在争议, Koptev 和 Cloetingh (2024) 推测冰岛地幔柱在 90 Ma 就已经位于格陵兰岛西部之下, 热点轨迹表明 90—60 Ma 冰岛地幔柱从西向东经过格陵兰岛, 但是由于格陵兰岛西部岩石圈很厚, 地幔柱并没有产生显



注: 图 a 中的绿色虚线表示古老的洋中脊, 绿色实线表示现今的洋中脊: AR: Aegir; BR: Baffin Bay; KR: Kolbeinsey; KnR: Knipovich; LR: Labrador; MR: Mohs; RR: Reykjanes. 活动带: Am: Ammassalik; In: Inglefield-Melville; Na: Nagssug-toqidian; Rk: Rinkia.

图 5 北大西洋火成岩省代表复苏型 LIPs. (a) 北大西洋区域构造简图 (引自 Celli et al., 2021), 北美板块与欧洲板块以过冰岛的大西洋洋中脊为界, 倾向大洋的地震反射层代表地下火山岩, 记录了大陆裂解过程中的陆缘岩浆活动; 北大西洋 S 波层析成像模型在 (b) 36 km 和 (c) 150 km 深度的水平切片 (引自 Celli et al., 2021); (d) 60 Ma 北大西洋火成岩省和白垩纪冰岛热点轨迹重建图, ~64 Ma Labrador 洋中脊扩展到格陵兰西缘, 62—58 Ma 形成了由 Baffin 岛-西格陵兰和 British 第三纪火成岩省 (两个蓝色圆圈) 组成的北大西洋火成岩省 (引自 Koptev and Cloetingh, 2024; Lebedev et al., 2018); (e) 复苏的冰岛地幔柱热物质同时向格陵兰西缘和东缘的减薄岩石圈迁移的剖面示意图

Fig. 5 North Atlantic Igneous Province as a "re-awakened" LIP. (a) Simplified regional geological map of North Atlantic (from Celli et al., 2021); Horizontal slices of S-wave velocity anomalies at depths of (b) 36 km and (c) 150 km (from Celli et al., 2021); (d) A ~60 Ma reconstruction of the North Atlantic Igneous Province and the Iceland hotspot trajectory in the Cretaceous (from Koptev and Cloetingh, 2024), the lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) depth is based on Lebedev et al. (2018); (e) Schematic profile showing the coeval flow of "re-awakened" Iceland plume materials towards the thinned lithosphere in the western and eastern margins of Greenland

著的火山活动,直到 64—56 Ma 洋中脊从 Labrador Sea 扩展到 Baffin Island, 潜伏的地幔柱才被“再次唤醒”,地幔柱热物质同时向格陵兰岛东侧和西侧减薄的岩石圈流动,62—58 Ma 在 Baffin Island、西格陵兰到 British Isles 的广大地区发育了大规模溢流玄武岩和基性岩墙群,形成北大西洋火成岩省,随后在 54—53 Ma 格陵兰岛与欧洲大陆裂解,北大西洋沿 Reykjanes–Aegir–Mohns 洋脊打开 (图 5c、5d)。值得注意的是,在厚岩石圈下方潜伏的地幔柱热物质受洋脊扩展或者岩石圈伸展的影响而再次活动,向岩石圈减薄区迁移并形成 LIPs,这一现象可能在地质历史上多次发生,并与触发型和吸引型 LIPs 有相似之处 (Koptev and Cloetingh, 2024)。例如:哥伦比亚超大陆聚合时,2200—1800 Ma 俯冲板片在核幔边界的聚集可能诱发了 1800—1600 Ma 熊耳地幔柱的上升,并在上覆板块形成了多个 LIPs (Peng et al., 2022)。17—16 Ma 哥伦比亚河 LIP 可能与黄石地幔柱的复苏相关 (Hooper et al., 2007)。

沉睡型 LIPs 的地幔柱虽然在地震层析成像上表现为相对连续的深部地幔低速异常,但是尚未产生与热点相关的岩浆活动,也与大陆裂解或者洋底扩张无关,例如:西太平洋 Manus 弧后盆地下方的隐伏地幔柱 (Koptev and Cloetingh, 2024)。如果有合适的地球动力学条件,沉睡型 LIPs 的地幔柱可能会转变为复苏型。复苏型和沉睡型 LIPs 的分类和解译还存在很多不确定性,需要更多实例和动力学模拟进行检验。

3 大火成岩省对陆壳结构的影响

研究 LIPs 对陆壳结构的影响不仅需要确定地表火山岩和岩墙群的分布,还需要识别中下地壳的侵入岩。与大多数地壳岩石相比,镁铁-超镁铁质侵入岩具有较高的波速和密度,为根据地球物理资料识别 LIPs 相关的岩浆底侵及壳内侵入岩奠定了基础 (Thybo and Artemieva, 2013; Wang et al., 2013, 2016)。因此,本文选取研究程度很高的峨眉山 LIP、西伯利亚 LIP 和 CAMP,结合这些地区的高精度地壳波速结构,对比聚敛型和触发型 LIPs 对大陆地壳结构的影响。

3.1 峨眉山大火成岩省

峨眉山 LIP 位于青藏高原东南缘,其喷发的大

陆溢流玄武岩覆盖了扬子克拉通西缘和松潘—甘孜地体南缘,受哀牢山—红河断裂带在 34—17 Ma 左行走滑的影响,部分峨眉山 LIP 被错动到越南北部 Song Da 地区,峨眉山 LIP 整体面积超过 $0.3 \times 10^6 \text{ km}^2$, 体积约 $0.6 \times 10^6 \text{ km}^3$ (Ali et al., 2005, 2010; Shellnutt et al., 2012, 2020; Tran et al., 2015; Xu et al., 2004, 2010) (图 6)。峨眉山 LIP 以溢流玄武岩为主,包含超基性到中酸性的整个火山岩序列及层状基性-超基性侵入岩、中酸性深成岩,火山岩覆盖在中二叠世晚期茅口组灰岩之上。广泛分布的峨眉山溢流玄武岩平均厚度约 700 m,在宾川地区厚度可达 5 km,东部最薄的地方不到 100 m。高精度年代学研究显示,峨眉山 LIP 的喷发时间为 257.6—262.5 Ma,可能导致了~260 Ma 二叠纪瓜德鲁普世末期的生物灭绝事件 (Shellnutt et al., 2012; Yan et al., 2020; Yang et al., 2018; Zhong et al., 2014; Zhou et al., 2002)。

由西向东,茅口组灰岩地层逐渐变厚,暗示在峨眉山 LIP 喷发前地壳发生了穹隆状的抬升。根据茅口组灰岩的剥蚀程度可将峨眉山 LIP 分为:内带(深度剥蚀带,半径 200 km)、中带(部分剥蚀带,半径 500 km)、外带(古风化壳或短暂沉积间断带,半径 800 km) (He et al., 2003; Xu et al., 2004) (图 6)。在熔岩流的下部,峨眉山内带和越南 Song Da 地区还出现了苦橄岩, MgO 含量为 14~27 wt.%,低钛玄武岩是苦橄质岩浆通过橄榄石和单斜辉石分离结晶形成,二者代表地幔柱头部在高温下 ($>1560^\circ\text{C}$) 发生高程度熔融的产物;而外带则主要发育高钛玄武岩,代表在石榴子石稳定域的地幔柱头部低程度部分熔融,熔融温度 $<1500^\circ\text{C}$ (Xu et al., 2001; Xu et al., 2020; Zhang et al., 2006)。峨眉山 LIP 玄武岩成分的空间变化暗示地幔柱头部上方的岩石圈厚度更薄,地幔柱上升时形成了岩石圈尺度的穹隆构造,从而导致地幔柱中心区经历了更强烈的减压熔融。同时期放射状镁铁质岩墙群的汇聚区与喷发前地壳的最大隆升区一致,并且靠近苦橄岩喷发区,也支持内带为地幔柱头部高程度熔融区 (Li et al., 2015)。峨眉山 LIP 的侵入岩主要分布于攀枝花至西昌的攀西裂谷地区,层状基性-超基性岩体和钒钛磁铁矿共生,形成了全球最大的钒钛磁铁矿集区 (宋谢炎等, 2018; 张招崇等, 2022; Zhou et al., 2005)。另外,还有少量的铜镍硫化物-铂族元素矿床,但规模远不如西伯利亚 Noril'sk (Zhang et al., 2009)。

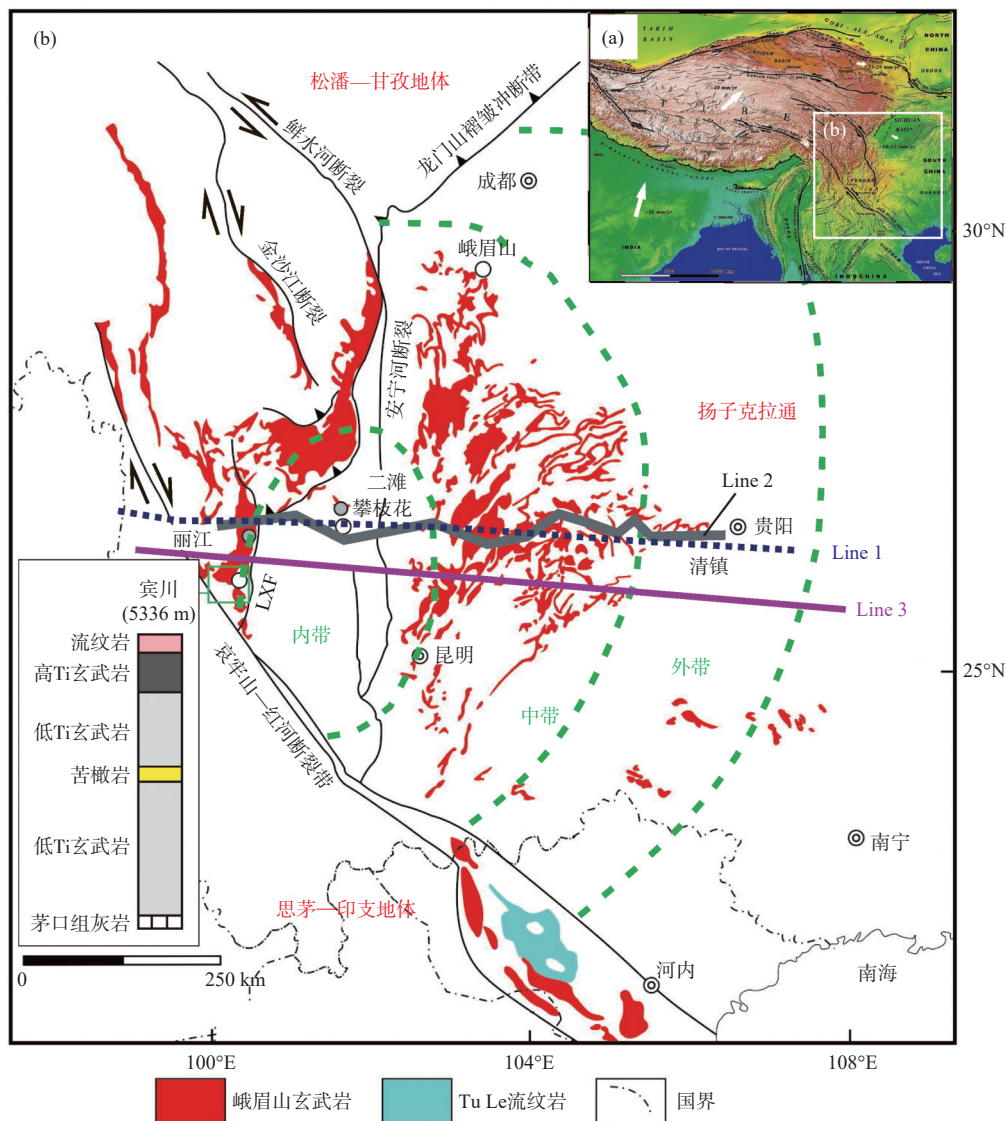


图 6 峨眉山 LIP 的构造位置以及喷出岩分布图。(a) 峨眉山 LIP 的位置 (引自 [Tapponnier et al., 2001](#)), 白色方框为研究区。(b) 峨眉山 LIP 的溢流玄武岩和流纹岩分布 (引自 [Huang et al., 2022](#); [Xu et al., 2004](#))。绿色虚线为峨眉山 LIP 的内带、中带和外带的边界, 宾川岩性柱状图显示内带的二叠纪岩浆岩分段。Line 1 为峨眉山综合地球物理剖面 ([Chen et al., 2015](#)), Line 2 为丽江—清镇宽角地震反射剖面 ([Xu et al., 2015](#)), Line 3 为虚拟深地震测深剖面 ([Liu Z et al., 2017](#))。LXF: 丽江—小金河断裂

Fig. 6 Tectonic location and distribution of extrusive rocks of the Emeishan LIP. (a) Location of the Emeishan LIP (from [Tapponnier et al., 2001](#)). White box is the study area. (b) Distribution of flood basalts and rhyolites of the Emeishan LIP (from [Huang et al., 2022](#); [Xu et al., 2004](#)). Dashed green line are the boundaries between the inner zone, intermediate zone and outer zone. The Binchuan petrological column represents different units of Permian extrusive rocks. Line 1 is the Emeishan integrated geophysical profile ([Chen et al., 2015](#)), Line 2 is the Lijiang-Qingzhen wide-angle seismic profile ([Xu et al., 2015](#)), and Line 3 is the virtual deep seismic sounding profile ([Liu Z et al., 2017](#)). LXF: Lijiang-Xiaojinhe fault

受印度—欧亚板块新生代陆陆碰撞的影响, 青藏高原东南缘变形强烈, 峨眉山 LIP 被多条新生代断裂带切割, 其西边界哀牢山—红河断裂带是青藏高原东缘块体挤出 ([Tapponnier et al., 2001](#)) 或者下地壳流动的重要边界 ([Royden et al., 2008](#)), 在约 16—5.5 Ma 从左行走滑转变为右行走滑, 并伴随在绿片岩相条件下的快速冷却 ([Leloup et al., 2001](#); [Schoenbohm et al., 2006](#))。根据地震分布和 GPS 观测, 扬子克拉通的西缘已经卷入新生代构造

变形, 以红河断裂带、丽江—小金河断裂和小江断裂为界限定的菱形区域被称为滇中块体, 与峨眉山 LIP 的内带基本重合, 沿断裂带地震活动强烈, 而内带地震活动性较弱。对青藏高原东南缘地壳结构与变形的研究发现, 川滇地区地壳结构的横向不均一性很强, 峨眉山 LIP 的中下地壳具有高波速、低各向异性、高 Q 值和高电阻率的特点 ([Bao et al., 2015](#); [Huang and Chevrot, 2021](#); [Li et al., 2020](#); [Liu et al., 2023](#); [Wang et al., 2017](#))。

横跨峨眉山 LIP 的地震剖面揭示了地幔柱对地壳结构和成分的影响. 沿北纬 27° 的 P 波接收函数剖面显示, 从内带向外带地壳厚度和 V_p/V_s 比值都逐渐降低, Moho 面在内带为 50~60 km, 在内带东侧达到最大值 60 km, 中带为 40~50 km, 外带为~40 km (图 7a), 而 V_p/V_s 比值在内带为 1.75~1.85, 中带为 1.70~1.80, 外带为 1.65~1.75 (图 7d), 表明二叠纪地幔柱活动引起的岩浆底侵使内带的地壳加厚并且地壳基性成分增加 (Chen et al., 2015). 接收函数获得的 Moho 面与 Xu 等 (2015) 通过丽江—清镇宽角地震剖面探测获得的地壳 P 波速度结构一致. 如图 7b 所示, 峨眉山 LIP 内带的 Moho 面深度为 47~53 km 并局部上隆, 下地壳 P 波速度在中带和外带为 6.7~7.0 km/s, 在内带显著升高为 6.9~7.2 km/s, 中地壳平均 P 波速度为 6.2~6.6 km/s, 在内带局部升高了 0.1~0.2 km/s. 接收函数获得的 Moho 面深度与根据布格重力异常和 Airy 模型计算的结果在中带和外带基本一致, 但在内带东侧有较大差距 (图 7c). 大地热流值在哀牢山—红河断裂带显著升高, 但在内带降低 (图 7d), 可能与基性岩的生热率远小于中酸性岩石有关.

与宽角地震反射剖面 (Xu et al., 2015) 揭示的峨眉山 LIP 内带 Moho 面上隆不同, Liu Z 等 (2017) 使用虚拟深地震反射方法对 Chen 等 (2015) 的数据重新处理, 发现峨眉山 LIP 内带下方 60~70 km 深度处存在一组强反射, 解释为加厚地壳的 Moho 面, 同时下地壳底部存在一个厚达~17 km 的高速异常体 (图 7e), 重新估计的峨眉山 LIP 的岩浆量可达 $(1.76\sim3.2)\times10^6$ km³, 与正常 LIPs 的岩浆量一致. Hu 等 (2023) 使用 >750 个宽频地震台的 P 波和 S 波接收函数, 验证了峨眉山 LIP 内带东北方向的 Moho 面由于基性岩浆底侵加厚到~60 km, 底侵的下地壳高速异常体的厚度为 15~20 km, 东西方向的长度为 150~200 km, 南北方向长度~400 km.

3.2 西伯利亚大火成岩省

西伯利亚 LIP 分布于西伯利亚克拉通、西西伯利亚盆地、Taimyr 半岛、Kara 海和 Laptev 海, 面积超过 5×10^6 km², 体积约 3.67×10^6 km³ (Augland et al., 2019; Ernst et al., 2021) (图 3a). 西伯利亚克拉通面积约 4×10^6 km², 西伯利亚 LIP 的喷出岩覆盖了西伯利亚克拉通约 40% 的面积, 熔岩流的平均厚度为 3500 m (局部 > 6 km), 向东南方向减薄为几十米, 而在西西伯利亚盆地沉积层下方的

玄武岩分布由钻孔、地震和重磁数据估计 (Reichow et al., 2009). 西伯利亚 LIP 产生了大量的玄武质熔岩 (Reichow et al., 2005)、火山碎屑岩 (Jerram et al., 2016)、次火山岩以及岩席和岩墙, 岩席厚度可达 350~1200 m (Svensen et al., 2009, 2018). 高精度定年数据显示西伯利亚 LIP 的快速喷发时间为 251.3—252.3 Ma, 导致了二叠纪末生物大灭绝事件 (Augland et al., 2019; Burgess and Bowring, 2015; Corso et al., 2022; Reichow et al., 2009).

西伯利亚克拉通西部的 Tunguska 盆地中部可能是西伯利亚 LIP 的喷发中心之一, 这里分为 Noril'sk 火山、Putorana 高原、Maymecha-Kotuy、Lower Tunguska 四个区域, 总面积约 2.5×10^6 km² (Reichow et al., 2009). Lower Tunguska 北部和 Putorana 高原的熔岩都是相对均质的玄武岩, Noril'sk 火山以玄武质熔岩为主, 含少量苦橄岩、亚碱性玄武岩和安山岩, 整个火山岩层剖面的厚度达 3.2 km. Maimecha-Kotuy 具有碱性-超镁铁质岩石、玄武岩、粗面玄武岩和粗面岩, 以及相关的碳酸岩和金伯利岩. 作为西伯利亚 LIP 岩浆通道系统的组成部分, 广泛分布于 Tunguska 盆地及周缘的岩席属于低 Ti 玄武岩和玄武质安山岩, 岩浆侵位到上地壳时与寒武纪蒸发岩相互作用, 形成富挥发份的爆发式火山 (Callegaro et al., 2021).

西伯利亚克拉通大部分地区覆盖了几千米厚的沉积层, 由太古宙和元古宙地体组成的基底目前仅出露于 Anabar 地盾、东北部 Olenek 高地、西部 Yenisey 山脊、西南部 Biryusa 地块、东南部 Aldan 地盾和 Stanovoy 地块 (图 8) (Cherepanova et al., 2013; Rosen et al., 1994). 1.8 Ga 以来, 西伯利亚克拉通经历了多期与哥伦比亚超大陆裂解有关的裂谷作用, 形成了一系列克拉通内部盆地和克拉通边缘盆地, 例如: 形成于 1.73—1.68 Ga 的 Ulkan-Bilikchan 地堑 (Larin et al., 1997), 被 1.53 Ga 花岗岩侵入的 Urik-Iya 地堑 (Gladkochub et al., 2002). 进入古生代, 与地幔柱相关的晚泥盆纪热事件 (370—373 Ma) 显著影响了西伯利亚克拉通东南部, 形成了 12~14 km 深的 Viluy 裂谷盆地, 在随后的沉降过程中堆积了 7~8 km 厚的泥盆纪—下石炭世地层, 同时该裂谷作用还伴随着大量的镁铁质和金伯利岩岩浆作用 (Courtilot et al., 2010; Ricci et al., 2013; Skuzovatov et al., 2021). 沉积作用停止于晚二叠世, 之后西伯利亚 LIP 喷发. 这意味着与扬子克拉通相比, 西伯利亚克拉通经历了多期地幔

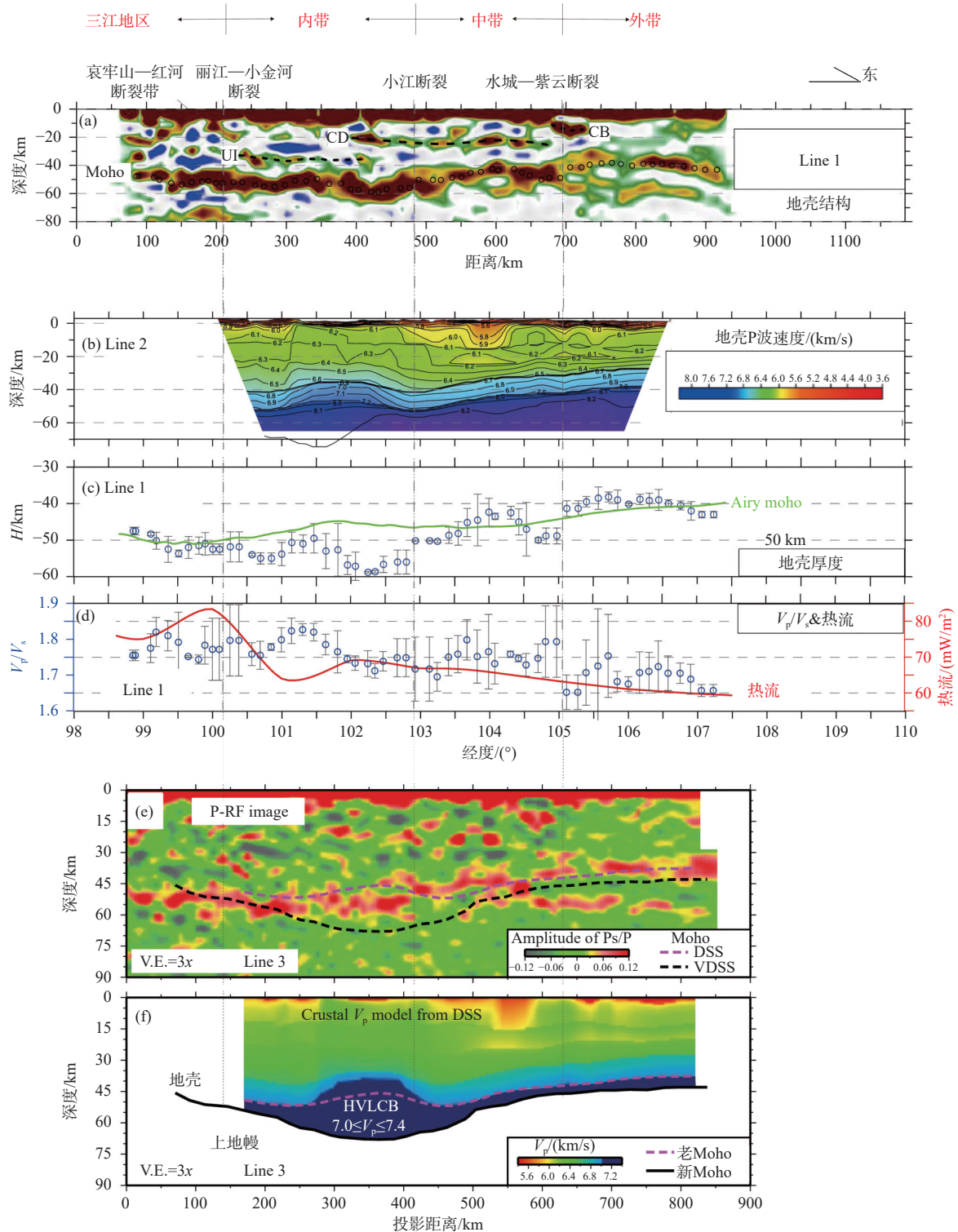


图 7 横跨峨眉山 LIP 的东西向地球物理探测剖面。(a) 接收函数揭示的地壳结构剖面 (引自 Chen et al., 2015); (b) 宽角反射揭示的地壳 P 波速度结构 (引自 Xu et al., 2015); (c) 接收函数和 Airy 模型获得的地壳厚度对比 (引自 Chen et al., 2015); (d) 地壳平均 V_p/V_s 值和大地热流值 (引自 Chen et al., 2015); (e) 虚拟深地震反射方法获得的 Moho 面; (f) 下地壳高速异常体 (HVLCB) (引自 Liu Z et al., 2017), 剖面位置见图 6b

Fig. 7 Multidisciplinary geophysical observations along the E-W profiles across the Emeishan LIP. (a) Migrated image of the crustal structure based on receiver functions (from Chen et al., 2015); (b) Crustal P-wave velocity derived from the wide-angle reflection profile (from Xu et al., 2015); (c) Crustal thickness derived from receiver functions (blue circles) and the Moho depth estimated from the Airy isostatic equilibrium (green line) (from Chen et al., 2015); (d) V_p/V_s ratios (blue circles) derived from the $H-\kappa$ analysis of receiver functions, and heat flow (red line) (from Chen et al., 2015); (e-f) the new Moho structure with the unusually thickened crust and the high-velocity lower crustal body (HVLCB) (from Liu Z et al., 2017). Profile locations are given in Fig. 6b

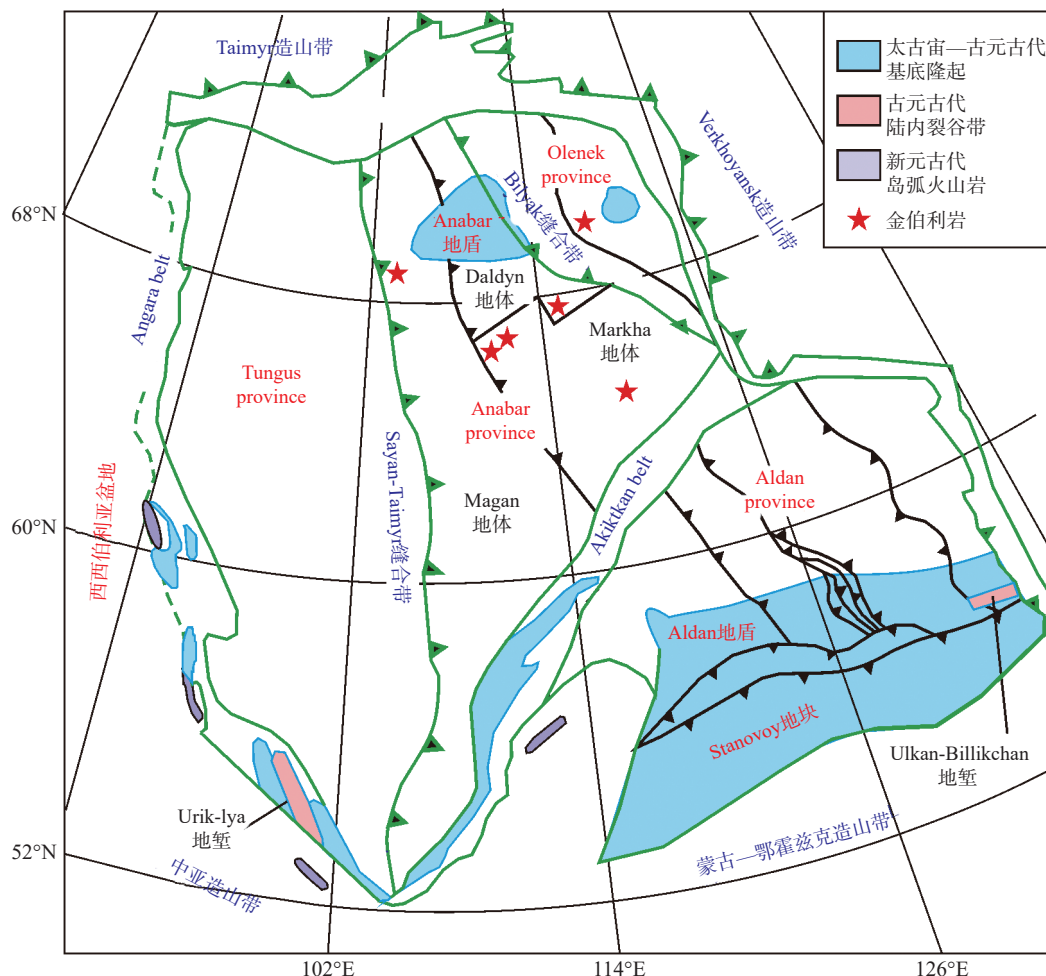


图8 西伯利亚克拉通构造简图 (引自 Rosen et al., 1994; Shatsky et al., 2018)

Fig. 8 Simplified geological map of the Siberian Craton (from Rosen et al., 1994; Shatsky et al., 2018)

柱活动, 如何识别二叠纪末期地幔柱活动对地壳结构的影响是一个难点。

Cherepanova 等 (2013) 建立了西伯利亚地壳结构模型 SibCrust, 发现西伯利亚克拉通稳定区的 Moho 面深度为 38~45 km, 盆地区的沉积盖层厚度变化较大, 上、中、下地壳的厚度大致相同 (各约 15 km), 从西伯利亚克拉通 Tunguska 盆地中部到 Markha 地体, 下地壳底部出现异常高速层 ($V_p = 7.2 \sim 7.6$ km/s), 其厚度可达 12 km (图 9)。西伯利亚克拉通以低热流、冷且厚的岩石圈为特征, 岩石圈厚度超过 250 km, 在 Tunguska 盆地下方 100~200 km 深度存在上地幔高速异常 (Artemieva, 2009; Melnik et al., 2015)。Wang 等 (2016) 根据西伯利亚克拉通金伯利岩携带的岩石包体和高温高压下的岩石波速, 提出下地壳底部的异常高速层由富石榴子石麻粒岩、二辉麻粒岩、富石榴子石辉石岩组成, 反映了 Moho 面附近新太古代以来的多期岩浆底侵, 而西伯利亚克拉通上地幔的高速异常体 ($V_p = 8.3 \sim 8.6$ km/s) 对应于榴辉岩和强烈亏损的

橄榄岩, 可能代表了与西伯利亚 LIP 相关的岩浆房遗迹 (fossil magma chamber)。

3.3 中大西洋岩浆省 (CAMP)

约 201 Ma 喷发的 CAMP 分布于欧洲、非洲、北美洲和南美洲的环大西洋地区, 面积约 11.28×10^6 km², 触发了潘吉亚超大陆裂解和大西洋打开 (图 4a 和图 10) (Ernst et al., 2021; Koptev and Cloetingh, 2024; Marzoli et al., 2011, 2018)。与许多 LIPs 不同, CAMP 以玄武质和玄武安山质岩浆岩为主, 缺少同期的高硅和碱性岩浆岩 (Marzoli et al., 2018)。根据主微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素组成, CAMP 溢流玄武岩、岩墙和岩席可分为 Tiourjdal、Prevalent-CAMP、Holyoke、Recurrent、Carolina、High-Ti 六个组, 前 5 个组为低钛火成岩 ($\text{TiO}_2 < 2$ wt.%), 占比超过 90%, 而在南美洲东部和西非东南缘的高钛火成岩 $\text{TiO}_2 > 2.1$ wt.% (De Min et al., 2003; Deckart et al., 2005; Merle et al., 2011)。Prevalent-CAMP 组广泛分布, 而其它

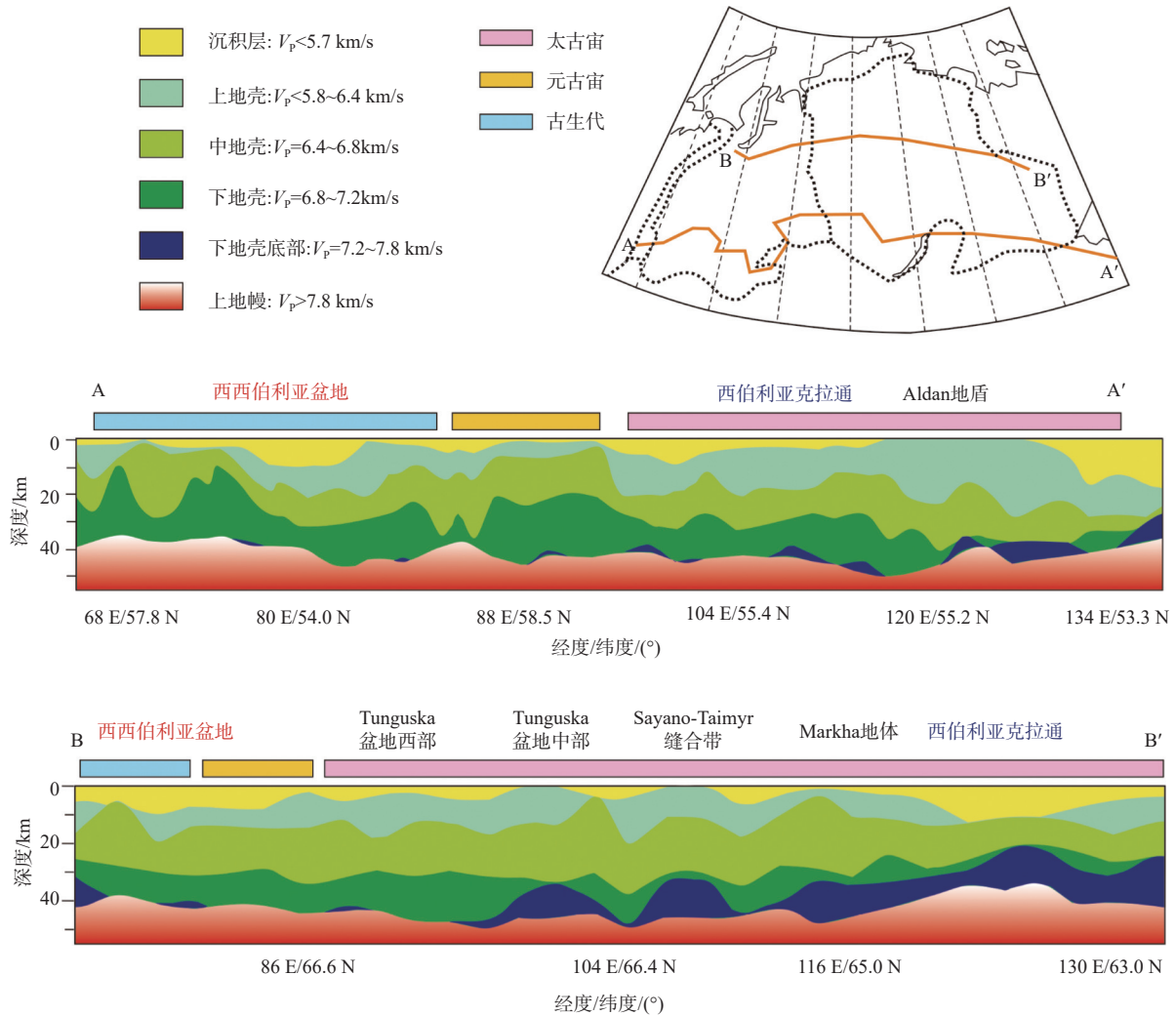


图9 西西伯利亚盆地和西伯利亚克拉通的東西向地壳结构剖面 (引自 Cherepanova et al., 2013)

Fig. 9 East-West crustal cross-sections of the West Siberian basin and the Siberian craton (from Cherepanova et al., 2013)

组都是局部出现 (图 10). CAMP 岩石的地壳同化混染程度低 ($<10\%$), CAMP 玄武岩的地球化学特征表明岩浆源区以亏损上地幔为主, 但是有不同富集组分参与. 低 Ti 火成岩的地幔源区可能受到俯冲的大陆沉积物的影响, 而高 Ti 火成岩的地幔源区有大陆岩石圈地幔富集组分的贡献 (Marzoli et al., 2018). 值得注意的是, 160—120 Ma 形成的大西洋早期洋壳的地球化学特征与 CAMP 高 Ti 火成岩和 Ontong Java 洋底高原相似, 表明地幔柱物质持续影响了新生的大西洋上地幔 (Janney and Castillo, 2001).

与峨眉山和西伯利亚 LIPs 不同, CAMP 的熔岩流面积有限, 以规模巨大的岩席和岩墙为特征, 数百个岩墙组成的岩墙群占据了数千 km^2 的区域 (例如: 美国东南部、马里、利比里亚、圭亚那、巴西), 单个岩墙的长度可达数百千米 (最长约 800 km), 宽度可达 300 m (例如: 西班牙、葡萄牙、摩洛哥、阿尔及利亚、美国、加拿大、巴

西). 由数十个浅层侵入体形成的岩席群覆盖了数百至数千 km^2 (例如: 法国、西班牙、美国、摩洛哥、阿尔及利亚、马里和几内亚), 巴西北部亚马逊盆地中的单个岩席体积达到了 $1 \times 10^6 \text{ km}^3$ (De Min et al., 2003). CAMP 岩浆活动的峰期为 201 Ma, 对应于三叠纪—侏罗纪边界, 持续时间小于 1 百万年, 被认为是三叠纪末生物大灭绝事件的主要原因 (Blackburn et al., 2013; Davies et al., 2017; Marzoli et al., 2011), 而晚期岩浆活动则延续到 192 Ma, 进入到早侏罗世 Sinemurian 阶 (Marzoli et al., 2018).

南美洲 CAMP 主要分布于圭亚那地盾、亚马逊盆地、Guaporé 地盾、Parnaíba 盆地、Borboréma 省和玻利维亚的安第斯山脉地区 (Marzoli et al., 2018), 前三者组成了亚马逊克拉通. 南美 CAMP 大部分地区的地壳厚度为 35~40 km, 但亚马逊克拉通东部地壳厚度可达 50~60 km (Assumpção et al., 2013; Lloyd et al., 2010). 南美洲 CAMP 目前还

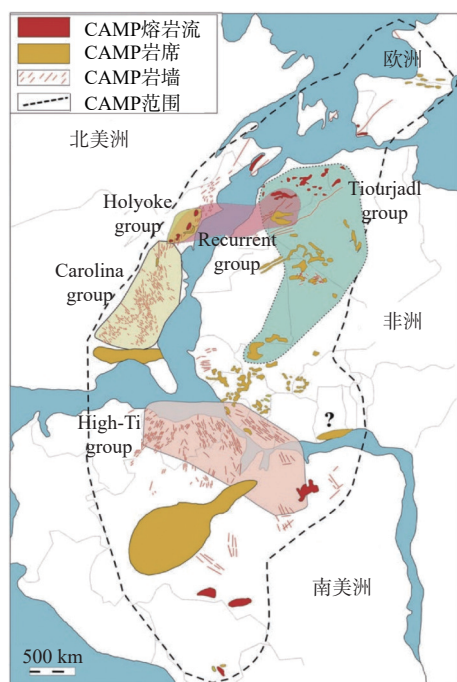


图 10 潘吉亚超大陆的中大西洋岩浆省示意图 (引自 Marzoli et al., 2018)

Fig. 10 Schematic map of the Central Atlantic Magmatic Province in the Pangaea supercontinent (from Marzoli et al., 2018)

没有地壳波速结构信息, 岩石圈厚度一般为~160 km, 东部达~200 km (Feng et al., 2007). 圭亚那地盾西部地势高, 同时该地区 200 km 以下深度的 S 波速度极低, 暗示有软流圈上涌 (Celli et al., 2020; Feng et al., 2007). 根据布格重力异常正演, 亚马逊克拉通南部的岩席和岩墙侵入到巴西的新元古代-古生代地层中, 侵入岩体积达 $3 \times 10^6 \text{ km}^3$ (Rezende et al., 2021). 在北美东北部 Hartford 裂谷盆地下方, 环境噪声成像揭示了低速的中地壳 ($V_s = 3.3 \sim 3.6 \text{ km/s}$) 和高速的下地壳 ($V_s = 4.0 \sim 4.5 \text{ km/s}$), 下地壳高速异常可能与 CAMP 的岩浆底侵相关 (Gao et al., 2020). 而在北美大陆东南的三叠纪 South Georgia 裂谷盆地的宽角反射地震剖面揭示, 在裂谷沉积中心 Moho 面上隆, 地壳减薄并且下地壳底部的高速层非常有限, 这暗示了 CAMP 在此处的岩浆活动来源于裂谷伸展减压导致的地幔部分熔融 (图 11) (Marzen et al., 2020).

4 讨 论

4.1 大火成岩省岩浆通道系统的独特性与多解性

Pearce 等 (2021) 对全球 LIPs 的基性熔岩流、岩席和岩墙的地球化学成分进行统计分析, 发现没

有两个相同的 LIPs (“no two LIP prints are alike”), 这意味着地幔柱成分、构造背景、上盘岩石圈性质等因素的差异导致 LIPs 的岩浆通道系统各具特色. 与地表地质记录相比, 对 LIPs 中下地壳侵入岩的研究非常有限. 根据地震波速资料和岩石物理性质, 建立 LIPs 地壳物质组成模型是确定 LIPs 侵入岩分布的基础, 但是存在多解性. 横跨峨眉山 LIP 的地壳结构探测揭示了不同的 Moho 面形态和下地壳高速异常体的分布 (图 7). 峨眉山 LIP 的岩浆底侵究竟是造成内带 Moho 面上隆、中下地壳基性成分增加 (Chen et al., 2015; Xu et al., 2015), 还是在壳幔边界形成一个岩浆房, 岩浆房分异结晶后导致地壳加厚和新的 Moho 面形成 (Liu Z et al., 2017) 还存在争议, 二者意味着不同的壳-幔相互作用过程、流变学效应和表层响应. 结合峨眉山 LIP 岩石圈地幔的波速结构, 有望建立岩浆底侵与地幔柱上涌的关系 (Wang et al., 2024).

对西伯利亚 LIP (图 9) 和 CAMP 的地壳结构 (图 11) 研究表明, Moho 面的起伏与下地壳高速异常体的分布可能是一个地区长期演化的结果 (Cherepanova et al., 2013; Marzen et al., 2020), 并不是某个 LIP 岩浆通道系统演化的必然结果. 值得注意的是, 在西伯利亚克拉通下地壳底部出现高速异常, 而西西伯利亚盆地下地壳波速正常, 而大陆溢流玄武岩主要覆盖在西伯利亚克拉通, 这暗示了西伯利亚地幔柱头部位于西伯利亚克拉通下方, 但是大陆裂谷作用主要发生在西西伯利亚盆地. 这一现象可能是由于西伯利亚 LIP 的大规模岩席或放射状岩墙群提供了岩浆横向迁移的通道 (图 2), 或者地幔柱头部上方存在多个次级喷发中心 (图 3).

显生宙 LIPs 与大陆裂解的时空关系表明: 如果缺少合适的地球动力学条件 (例如: LIPs 沿先存的岩石圈薄弱带侵位, 长期稳定的岩石圈远程拉张应力), 即使地幔柱上升导致巨量溢流玄武岩喷发和广泛的大陆裂谷作用, 也不足以使大陆裂解 (Koptev and Cloetingh, 2024). 不同类型 LIPs 的岩浆通道系统、地表响应和对大陆岩石圈结构和动力学演化的影响还需要更多地质记录和动力学模拟检验. 三维动力学数值模拟表明, 在地幔柱抵达 LAB 之前, 地幔柱上涌会导致地表穹隆状抬升; 而地幔柱与岩石圈的相互作用会增强动力地形, 促进部分熔融, 并使熔体集中于地幔柱中心, 地表抬升的高度随地幔柱尺寸、温度和黏度的增加而增大 (Wang and Li, 2021). He 等 (2003) 发现在峨眉

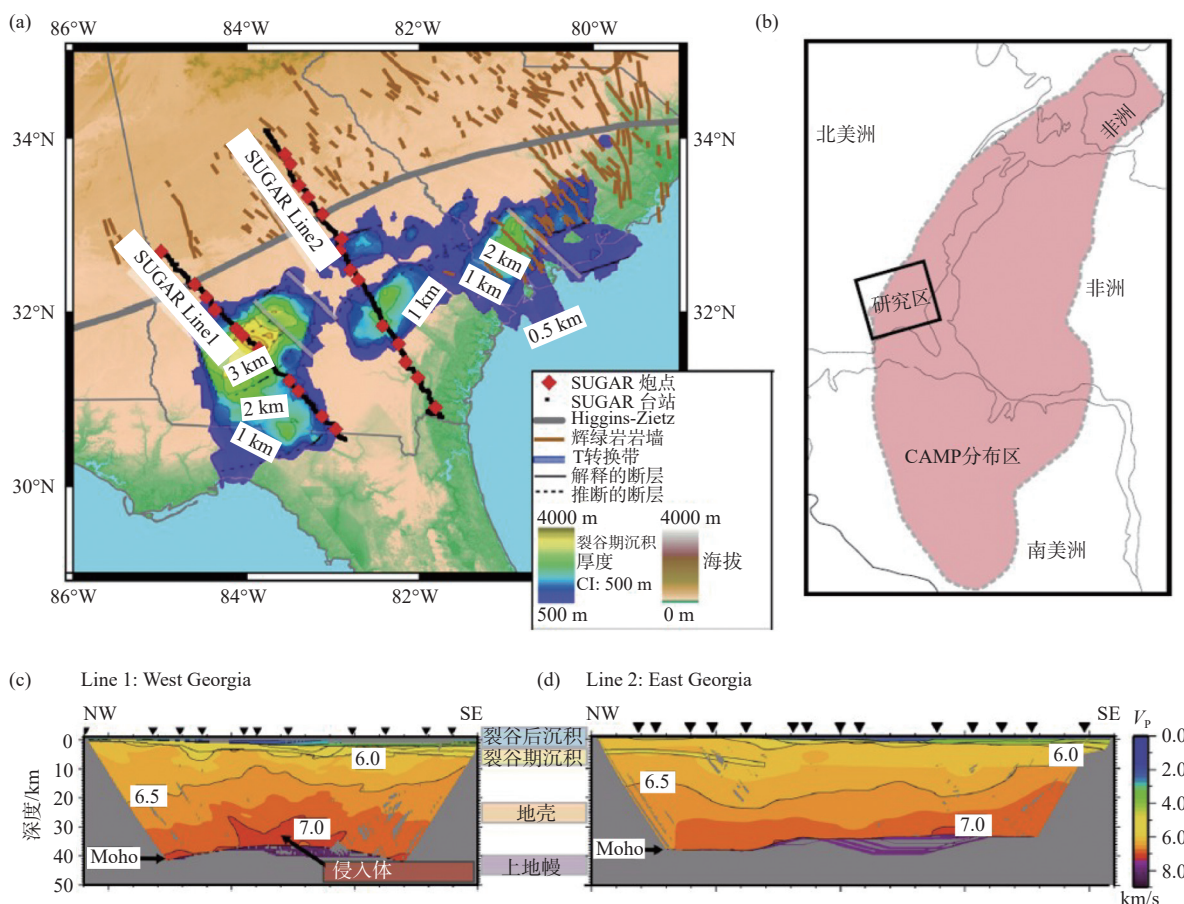


图 11 北美大陆 South Georgia 裂谷盆地的宽角反射地震剖面 and 地壳波速结构 (引自 Marzen et al., 2020). (a) 横跨 South Georgia 裂谷盆地的宽角反射地震剖面的位置; (b) South Georgia 裂谷盆地在 CAMP 的位置; (c-d) South Georgia 裂谷盆地西部和东部的地壳波速结构

Fig. 11 Wide-angle seismic reflection profiles and crustal velocity structure of the South Georgia rift basin in the southeastern North America (from Marzen et al., 2020). (a) Locations of wide-angle seismic reflection profiles across the South Georgia rift basin; (b) Location of the South Georgia rift basin in the CAMP; (c-d) Crustal velocity structure in the West Georgia and East Georgia

山大规模溢流玄武岩喷发之前, 地表穹隆构造的直径约 1600 km, 抬升高度超过 1000 m, 地表抬升的时间小于 3 百万年, 与地幔柱上升导致的地表抬升模型 (Campbell, 2007; Griffiths and Campbell, 1990) 一致, 为峨眉山 LIP 的地幔柱成因提供了有力证据. 但是, 在印度德干 LIP 经历与地幔柱相关的火山作用之前, 该地区并没有出现大范围的地表隆升 (Sheth, 2007). 这是否意味着聚敛型和裂解型 LIPs 经历了不同的地幔柱-岩石圈相互作用还有待验证. 此外, 地球动力学模拟大多聚焦于单个地幔柱的演化过程, 但是很多 LIPs 有多个火山喷发中心, 次级小地幔柱对上覆岩石圈伸展减薄、地形起伏、岩浆分布和大陆裂解的影响值得进一步研究 (Koptev et al., 2021).

4.2 大火成岩省对全球气候和环境变化的影响

LIPs 对全球气候和环境变化的影响体现了地球

演化过程中的圈层相互作用, 是地学领域长期关注的热点问题. LIPs 至少与显生宙四次生物灭绝事件在时间上重合: (1) 德干 LIP 与白垩纪末 (~66 Ma) 的生物灭绝; (2) CAMP 与三叠纪—侏罗纪之交的生物灭绝 (201 Ma); (3) 西伯利亚 LIP 与二叠纪末的生物灭绝 (~252 Ma); (4) 峨眉山 LIP 与二叠纪瓜德鲁普世末期的生物灭绝 (~260 Ma) (Davies et al., 2017; Ernst and Youbi, 2017; Reichow et al., 2009; Ruhl et al., 2020; Saunders, 2005; Schoene et al., 2019; Sobolev et al., 2011; Xu et al., 2010). 广泛分布的大陆溢流玄武岩是 LIPs 火山作用的主要产物, 溢流玄武岩释放的大量 CO_2 可导致全球变暖 (温室效应), 而随后的玄武岩风化和/或含硫酸的气溶胶会降低大气中 CO_2 含量, 使全球变冷甚至被冰川覆盖. 目前主要从地质记录去推测大陆溢流玄武岩喷发时释放的火山碎屑物质和挥发分成分, 并建立 LIPs 与环境变化和生物灭绝的

相关性。Black 等 (2013) 首次使用三维全球气候动力学模拟研究西伯利亚 LIP 释放的硫和卤素, 提出广泛分布的酸雨和全球臭氧层破坏是造成二叠纪末生物大灭绝的原因。但是, 由于岩浆侵位特征、气体释放速率、火山活动的时间和间隔等关键参数难以确定, 大陆溢流玄武岩喷发与生物灭绝事件的因果关系仍存在争议, 并不是每一个 LIP 都导致生物大灭绝, 也并不是每一次生物灭绝事件都伴随 LIPs 喷发 (Fan et al., 2020; Mather and Schmidt, 2021; Self et al., 2014)。

研究表明, 大陆溢流玄武岩的覆盖面积并不决定 LIPs 的环境效应, 更为重要的是 LIPs 产生的火山碎屑物质和挥发分有多少能抵达平流层。除了大陆溢流玄武岩的脱气作用 (释放 H_2O 、 CO_2 、 SO_2 、卤素), 基性岩浆侵位导致围岩 (尤其是蒸发岩、煤层、页岩) 的变质交代作用也能释放大量气体, 并加剧全球气候变化 (Black et al., 2018; Cui et al., 2021; Ganino and Arndt, 2009; Liu et al., 2025; Retallack and Jahren, 2008; Svensen et al., 2009, 2018)。此外, 与 LIPs 相关的生物灭绝机制可能还包括: 海洋缺氧、海洋酸化、有毒金属输入 (例如: 汞)、以及必需营养素的减少等 (Ernst et al., 2021; 沈树忠等, 2024)。对 5 亿多年以来地球重大生物与气候事件的环境背景、过程及其原因的统计分析表明: 生物多样性变化的根本驱动因素可能不是简单的温度、大气 CO_2 浓度等环境因子的背景值, 而是环境因子的变化速率。当环境相对稳定时, 生物有足够的时间适应环境变化并保持生物多样性; 如果环境因子的变化太快而超出了生态系统的承受力, 生物多样性就会显著降低, 甚至引发大灭绝 (沈树忠等, 2024)。与大陆溢流玄武岩环境效应的研究相比, 我们对 LIPs 侵入岩的环境效应知之甚少。确定二者如何共同影响环境因子变化速率对我们理解地幔柱对地球宜居性演化的贡献、厘清 LIPs 与全球气候变化和生物灭绝事件的关系至关重要。

高精度年代学和岩石学为厘清 LIPs 的岩浆通道系统与生物灭绝事件之间的因果关系奠定了基础。以峨眉山 LIP 为例, 内带侵入岩的结晶时间为 257—260 Ma (Shellnutt et al., 2012), 而最上部长英质熔结凝灰岩的年龄 259.1 ± 0.5 Ma (Zhong et al., 2014) 和火山灰的年龄 259.5 ± 0.2 Ma (Yang et al., 2018) 限定了峨眉山 LIP 的结束时间。Yan 等 (2020) 对峨眉山溢流玄武岩下伏的黏土层进行了物源和年龄分析, 发现在 260—262.5 Ma 发生了海

底枕状熔岩的喷发。由于海底火山喷发释放的大量挥发分 (例如: SO_2 、 CO_2) 会使海洋发生酸化, 因此峨眉山 LIP 的早期海底喷发可能造成了 ~260 Ma 瓜德鲁普世末期海洋生物灭绝事件。该推论被峨眉山 LIP 东部大量的 257.9—260.7 Ma 海相玄武岩验证 (Zhu et al., 2021), 这一早期喷发阶段与攀枝花岩体、白马岩体的侵位和成矿时间重合 (宋谢炎等, 2018)。此外, 峨眉山 LIP 的长英质火山岩 (Xu et al., 2010)、越南北部 Tu Le 流纹岩 (Shellnutt et al., 2020) 和扬子西缘凝灰岩 (Zhong et al., 2014; Zhu et al., 2021) 的年龄表明: 峨眉山 LIP 的酸性火山作用时间与瓜德鲁普世末期的生物灭绝事件和之后吴家坪期全球气候变冷事件重合。该阶段也与新街岩体和红格岩体的侵位和成矿时间重合 (宋谢炎等, 2018)。因此, 重建 LIPs 岩浆通道系统不仅有助于探索 LIPs 的成矿机制, 还可以为开展深部过程与全球气候耦合的动力学模拟提供重要约束。

5 结论与展望

LIPs 岩浆通道系统是由侵入岩和喷出岩组成的大规模三维网络, 垂向上从 LAB 到地表, 水平方向上可达上千公里。LIPs 与大陆裂解的时空关系非常复杂, 仅有地幔柱上升、大规模溢流玄武岩和陆内裂谷, 还不足以使克拉通裂解, 区域远程拉张应力在大陆裂解中发挥关键作用。对 LIPs 中下地壳侵入岩的分布和壳幔相互作用的研究还很薄弱, 基于地壳波速结构厘定 LIPs 镁铁-超镁铁质侵入岩的分布还存在多解性。对峨眉山 LIP、西伯利亚 LIP 和 CAMP 的对比表明, 每个 LIP 的岩浆通道系统和地壳结构都有所不同, 下地壳底部广泛出现的高速异常可能反映了地幔柱导致的岩浆底侵。

LIPs 岩浆通道系统是连接深部地幔过程与表层环境变化和生物多样性演化之间的桥梁。LIPs 火山作用的主要产物 (溢流玄武岩、长英质火山岩) 是目前估算 LIPs 规模的主要参数, 也被认为是全球气候变化和生物灭绝事件的原因之一, 但是 LIPs 岩浆侵位导致围岩 (尤其是蒸发岩、煤层、页岩) 的变质交代作用也在全球气候变化中扮演重要角色。如何估算 LIPs 侵入岩的分布及其气候环境效应是地球系统科学研究中的难点。将岩石学、地球化学、高精度年代学、高精度壳幔结构探测和动力学模拟相结合, 有望重建 LIPs 岩浆通道系统的形成

过程, 从而深入理解 LIPs 对陆壳结构、大陆裂解和全球气候变化的影响, 揭示 LIPs 形成过程中从地幔到大气圈的圈层耦合作用。

致谢

感谢三位审稿人提出的建设性意见, 感谢 Richard Ernst 博士提供全球大火成岩省分布图。

References

- Ahmed A, Christel T, Sylvie L, et al. 2013. Crustal structure of the rifted volcanic margins and uplifted plateau of Western Yemen from receiver function analysis[J]. *Geophysical Journal International*, 193: 1673-1690.
- Ali J R, Thompson G M, Zhou M F, et al. 2005. Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 79: 475-489.
- Ali J R, Fitton J R, Herzberg C. 2010. Emeishan large igneous province (SW China) and the mantle-plume up-doming hypothesis[J]. *Journal of the Geological Society*, 167: 953-959.
- Arndt N T. 2013. Episodic Earth evolution[J]. *Tectonophysics*, 609: 661-674.
- Artemieva I M. 2009. The continental lithosphere: Reconciling thermal, seismic, and petrologic data[J]. *Lithos*, 109: 23-46.
- Assumpção M, Feng M, Tassara A, et al. 2013. Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography[J]. *Tectonophysics*, 609: 82-96.
- Augland L E, Ryabov V V, Vernikovsky V A, et al. 2019. The main pulse of the Siberian Traps expanded in size and composition[J]. *Scientific Reports*, 9: 18723.
- Bao X W, Sun X X, Xu M J, et al. 2015. Two crustal low-velocity channels beneath SE Tibet revealed by joint inversion of Rayleigh wave dispersion and receiver functions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 415: 16-24.
- Black B A, Lamarque J F, Shields C A, et al. 2013. Acid rain and ozone depletion from pulsed Siberian Traps magmatism[J]. *Geology*, 42: 67-70.
- Black B A, Neely R R, Lamarque J F, et al. 2018. Systemic swings in end-Permian climate from Siberian Traps carbon and sulfur outgassing[J]. *Nature Geosciences*, 11: 949-954.
- Black B A, Gibson S A. 2019. Deep carbon and the life cycle of large igneous provinces[J]. *Elements*, 15: 319-324.
- Black B A, Karlstrom L, Mather T A. 2021. The life cycle of large igneous provinces[J]. *Nature Reviews*, 2: 840-857.
- Blackburn T J, Olsen P E, Bowring S A, et al. 2013. Zircon U-Pb geochronology links the end-Triassic extinction with the Central Atlantic Magmatic Province[J]. *Science*, 340: 941-945.
- Bo H Z, Zhang Z C. 2020. Genesis of silicic large igneous provinces and effects of recourses and environment[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(7): 1976-1985 (in Chinese).
- Bredow E, Steinberger B. 2018. Variable melt production rate of the Kerguelen hotspot due to long-term plume-ridge interaction[J]. *Geophysical Research Letters*, 45: 126-136.
- Bryan S E, Ernst R E. 2008. Revised definition of large igneous provinces (LIPs)[J]. *Earth-Science Reviews*, 86(1-4): 175-202.
- Bryan S E, Ferrari L. 2013. Large igneous provinces and silicic large igneous provinces: Progress in our understanding over the last 25 years[J]. *GSA Bulletin*, 125(7-8): 1053-1078.
- Buchan K L, Ernst R E. 2018. A giant circumferential dyke swarm associated with the High Arctic Large Igneous Province (HALIP)[J]. *Gondwana Research*, 58: 39-57.
- Buchan K L, Ernst R E. 2021. Plumbing systems of large igneous provinces (LIPs) on Earth and Venus: Investigating the role of giant circumferential and radiating dyke swarms, coronae and novae, and mid-crustal intrusive complexes[J]. *Gondwana Research*, 100: 25-43.
- Buick I S, Maas R, Gibson R. 2001. Precise U-Pb titanite age constraints on the emplacement of the Bushveld Complex, South Africa[J]. *Journal of the Geological Society*, 158: 3-6.
- Burgess S D, Bowring S A. 2015. High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction[J]. *Science Advances*, 1(7): e1500470.
- Callegaro S, Svensen H H, Neumann E R, et al. 2021. Geochemistry of deep Tunguska Basin sills, Siberian Traps: Correlations and potential implications for the end-Permian environmental crisis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 176: 49.
- Campbell I H, Griffiths R W. 1990. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 99: 79-93.
- Campbell I H. 2007. Testing the plume theory[J]. *Chemical Geology*, 241: 153-176.
- Cawthorn R G. 1999. Platinum-group element mineralization in the Bushveld Complex—a critical reassessment of geochemical models[J]. *South African Journal of Geology*, 102(3): 268-281.
- Celli N L, Lebedev S, Schaeffer A J, et al. 2020. The upper mantle beneath the South Atlantic Ocean, South America and Africa from waveform tomography with massive data sets[J]. *Geophysical Journal International*, 221(1): 178-204.
- Celli N L, Lebedev S, Schaeffer A J, et al. 2021. The tilted Iceland Plume and its effect on the North Atlantic evolution and magmatism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 569: 117048.
- Chen Y, Xu Y G, Xu T, et al. 2015. Magmatic underplating and crustal growth in the Emeishan Large Igneous Province, SW China, revealed by a passive seismic experiment[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 432: 103-114.
- Cherepanova Y, Artemieva I M, Thybo H, et al. 2013. Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data[J]. *Tectonophysics*, 609: 154-183.
- Ciborowski T J R, Minifie M J, Kerr A C, et al. 2017. A mantle plume origin for the Palaeoproterozoic Circum-Superior Large Igneous Province[J]. *Precambrian Research*, 294: 189-213.
- Coffin M F, Pringle M S, Duncan R A, et al. 2002. Kerguelen hotspot magma output since 130 Ma[J]. *Journal of Petrology*, 43: 1121-1137.
- Cole J, Finn C A, Webb S J. 2013. Overview of the magnetic signatures of the Palaeoproterozoic Rustenburg Layered Suite, Bushveld Complex, South Africa[J]. *Precambrian Research*, 236: 193-213.
- Condie K C, Davaile A, Aster R C, Arndt N. 2015. Upstairs-down-

- stairs: Supercontinents and large igneous provinces, are they related?[J]. *International Geology Review*, 57: 1341-1348.
- Corso J D, Song H J, Callegaro S, et al. 2022. Environmental crises at the Permian–Triassic mass extinction[J]. *Nature Reviews*, 3: 197-214.
- Courtillot V, Kravchinsky V A, Quidelleur X, et al. 2010. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): Eruption at the time of Late Devonian extinction events?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 300: 239-245.
- Cui Y, Li M S, van Soelen E E, et al. 2021. Massive and rapid predominantly volcanic CO₂ emission during the end-Permian mass extinction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118: e2014701118.
- Davies G F. 1994. Thermomechanical erosion of the lithosphere by mantle plumes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99: 15709-15722.
- Davies J, Marzoli A, Bertrand H, et al. 2017. End-Triassic mass extinction started by intrusive CAMP activity[J]. *Nature Communications*, 8: 15596.
- De Min A, Piccirillo E M, Marzoli A, et al. 2003. The Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) in Brazil: Petrology, Geochemistry, ⁴⁰Ar/³⁹Ar Ages, Paleomagnetism and Geodynamic Implications [M]// Hames W, Mchone J G, Renne P, et al. The Central Atlantic magmatic province: Insights from fragments of Pangaea. AGU, 91-128.
- Deckart K, Bertrand H, Liégeois J P. 2005. Geochemistry and Sr, Nd, Pb isotopic composition of the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) in Guyana and Guinea[J]. *Lithos*, 82: 289-314.
- Dilek Y, Ernst R E. 2008. Links between ophiolites and large igneous provinces (LIPs) in Earth history: Introduction[J]. *Lithos*, 100: 1-13.
- Ernst R E, Bell K. 2010. Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites[J]. *Mineralogy and Petrology*, 98: 55-76.
- Ernst R, Bleeker W. 2015. Large igneous provinces (LIPs), giant dyke swarms, and mantle plumes: Significance for breakup events within Canada and adjacent regions from 2.5 Ga to the Present[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 47: 695-739.
- Ernst R E, Youbi N. 2017. How large igneous provinces affect global climate, sometimes cause mass extinctions, and represent natural markers in the geological record[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 478: 30-52.
- Ernst R E, Davies D R, Jowitt S M, Campbell I H. 2018. Can mantle plumes destroy diamonds?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 502: 244-252.
- Ernst R E, Liikane D A, Jowitt S M, et al. 2019. A new plumbing system framework for mantle plume-related continental Large Igneous Provinces and their mafic-ultramafic intrusions[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 384: 75-84.
- Ernst R E, Bond D P G, Zhang S H, et al. 2021. Large Igneous Province Record Through Time and Implications for Secular Environmental Changes and Geological Time-Scale Boundaries[M]// Ernst R E, Dickson A J, Bekker A. In Large Igneous Provinces: a driver of global environmental and biotic changes. Hoboken: Wiley, 1-26.
- Fan J X, Shen S Z, Erwin D H, et al. 2020. A high-resolution summary of Cambrian to Early Triassic marine invertebrate biodiversity[J]. *Science*, 367: 272-277.
- Feng M, van der Lee S, Assumpção M. 2007. Upper mantle structure of South America from joint inversion of waveforms and fundamental mode group velocities of Rayleigh waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112: B04312.
- Fitton J G. 1983. Active versus passive continental rifting: Evidence from the West African rift system[J]. *Tectonophysics*, 94: 473-481.
- Gaina C, Müller R D, Brown B, et al. 2007. Breakup and early seafloor spreading between India and Antarctica[J]. *Geophysical Journal of International*, 170: 151-169.
- Ganino C, Arndt N T. 2009. Climate changes caused by degassing of sediments during the emplacement of large igneous provinces[J]. *Geology*, 37: 323-326.
- Gao H, Yang X, Long M D, et al. 2020. Seismic evidence for crustal modification beneath the Hartford rift basin in the northeastern United States[J]. *Geophysical Research Letters*, 47: e2020GL089316.
- Geissler W H, Sodoudi F, Kind R. 2010. Thickness of the central and eastern European lithosphere as seen by S receiver functions[J]. *Geophysical Journal International*, 181: 604-634.
- Gerya T. 2014. Precambrian geodynamics: Concepts and models[J]. *Gondwana Research*, 25: 442-463.
- Gladkochub D P, Donskaya T V, Mazukabzov A M, et al. 2002. The Urik–Iya graben of the Sayan inlier of the Siberian craton: New geochronological data and geodynamic implications[J]. *Doklady Earth Sciences*, 386: 737-741.
- Griffiths R W, Campbell I H. 1990. On the dynamics of long-lived plume conduits in the convecting mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 103: 214-227.
- He B, Xu Y, Chung S, et al. 2003. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 213: 391-405.
- Heaman L M. 1997. Global mafic magmatism at 2.45 Ga: Remnants of an ancient large igneous province?[J]. *Geology*, 25: 299-302.
- Heyn B H, Conrad C P. 2022. On the relation between basal erosion of the lithosphere and surface heat flux for continental plume tracks[J]. *Geophysical Research Letters*, 49: e2022GL098003.
- Hofmann C, Courtillot V, Féraud G, et al. 1997. Timing of the Ethiopian flood basalt event and implications for plume birth and global change[J]. *Nature*, 389: 838-841.
- Holbrook W S, Larsen H C, Korenaga J, et al. 2001. Mantle thermal structure and active upwelling during continental breakup in the North Atlantic[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 190: 251-266.
- Hooper P R, Camp V E, Reidel S P, et al. 2007. The Columbia River Basalts and their relationship to the Yellowstone hotspot and Basin and Range extension[M]// Foulger G R, Jurdy J M, Plumes, Plates, and Planetary Processes: Geological Society of America Special Paper 430: 635-668.
- Hu J F, Yang H Y, Badal J, et al. 2023. Decoding the Emeishan Permian mantle plume in the southeastern margin of Tibet from the seismic signature of the local lithosphere[J]. *Geophysical Journal Inter-*

- national, 232: 81-96.
- Hu J S, Liu L J, Faccenda M, et al. 2018. Modification of the Western Gondwana craton by plume-lithosphere interaction[J]. *Nature Geoscience*, 11: 203-210.
- Huang H, Gawood P A, Hou M C, et al. 2022. Zircon U-Pb age, trace element, and Hf isotopic constrains on the origin and evolution of the Emeishan large igneous province[J]. *Gondwana Research*, 105: 535-550.
- Huang Z, Chevrot S. 2021. Mantle dynamics in the SE Tibetan Plateau revealed by teleseismic shear-wave splitting analysis[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 313: 106687.
- Isley A E, Abbott D H. 1999. Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 104: 15461-15478.
- Isley A E, Abbott D H. 2002. Implications of the temporal distribution of high-Mg magmas for mantle plume volcanism through time[J]. *Journal of Geology*, 110: 141-158.
- Janney P E, Castillo P R. 2001. Geochemistry of the oldest Atlantic oceanic crust suggests mantle plume involvement in the early history of the Central Atlantic Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 192: 291-302.
- Jellinek A M, Manger M. 2004. Links between long-lived hot spots, mantle plumes, D", and plate tectonics[J]. *Review of Geophysics*, 42: RG3002.
- Jerram D A, Svensen H H, Planke S, et al. 2016. The onset of flood volcanism in the north-western part of the Siberian Traps: Explosive volcanism versus effusive lava flows[J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 441: 8-50.
- Koppers A A P, Becker T W, Jackson M G, et al. 2021. Mantle plumes and their role in Earth processes[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2: 382-401.
- Koptev A, Calais E, Burov E, et al. 2015. Dual continental rift systems generated by plume-lithosphere interaction[J]. *Nature Geoscience*, 8: 388-392.
- Koptev A, Cloetingh S, Kovács I J, et al. 2021. Controls by rheological structure of the lithosphere on the temporal evolution of continental magmatism: Inferences from the Pannonian Basin system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 565: 116925.
- Koptev A, Cloetingh S. 2024. Role of Large Igneous Provinces in continental break-up varying from "Shirker" to "Producer"[J]. *Communications Earth & Environment*, 5: 27.
- Krivolutskaya N A, Latyshev A V, Dolgal A S. 2019. Unique PGE-Cu-Ni Noril'sk deposits, Siberian Trap Province: Magmatic and tectonic factors in their origin[J]. *Minerals*, 9: 66.
- Larin A M, Amelin Yu V, Neymark L A, et al. 1997. The origin of the 1.73-1.70 Ga anorogenic Ulsan volcano-plutonic complex, Siberian Platform, Russia: Inferences from geochronological, geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic data[J]. *Annales de Academia Brasiliiana Ciencias*, 69: 295-312.
- Lavecchia A, Thieulot C, Beekman F, et al. 2017. Lithosphere erosion and continental breakup: Interaction of extension, plume upwelling and melting[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 467: 89-98.
- Lavecchia A, Kovács I, Koptev A, Cloetingh S. 2025. Plume-lithosphere interaction and the role of the mid-lithospheric discontinuity in craton delamination[J]. *Geophysical Research Letters*, 52: e2025GL116938.
- Lebedev S, Schaeffer A J, Fullea J, et al. 2018. Seismic tomography of the Arctic region: Inferences for the thermal structure and evolution of the lithosphere[J]. *Geological Society of London, Special Publication*, 460: 419-440.
- Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. 2001. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 106: 6683-6732.
- Leroy S, Razin P, Autin J, et al. 2004. From rifting to spreading in the eastern Gulf of Aden: A geophysical survey of a young oceanic basin from margin to margin[J]. *Terra Nova*, 16: 185-192.
- Li H B, Zhang Z C, Ernst R, et al. 2015. Giant radiating mafic dyke swarm of the Emeishan large igneous province: Identifying the mantle plume centre[J]. *Terra Nova*, 27: 247-257.
- Li H B, Zhang, Z C, Liu R, et al. 2024. Anatomy of the Emeishan mantle plume head: Insights from new geochronologic, geochemical, and geologic data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25: e2024GC011635.
- Li X, Ma X B, Chen Y, et al. 2020. A plume-modified lithospheric barrier to the southeastward flow of partially molten Tibetan crust inferred from magnetotelluric data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 548: 116493.
- Liu J, Xia Q K, Kuritani T, et al. 2017. Mantle hydration and the role of water in the generation of large igneous provinces[J]. *Nature Communications*, 8: 1824.
- Liu J, Pearson D G, Wang L H, et al. 2021. Plume-driven recretionization of deep continental lithospheric mantle[J]. *Nature*, 592: 732-736.
- Liu S A, Xiong Z, Wu T, Zhao M. 2025. Plume-induced emissions of deep methane linked to the end-Guadalupian mass extinction[J]. *Nature Communications*, 16: 5865.
- Liu Y, Yu Z, Zhang Z, et al. 2023. The high-resolution community velocity model V2.0 of southwest China, constructed by joint body and surface wave tomography of data recorded at temporary dense arrays[J]. *Science China Earth Sciences*, 66: 2368-2385.
- Liu Z, Tian X, Chen Y, et al. 2017. Unusually thickened crust beneath the Emeishan large igneous province detected by virtual deep seismic sounding[J]. *Tectonophysics*, 721: 387-394.
- Lloyd S, van der Lee S, França G S, et al. 2010. Moho map of South America from receiver functions and surface waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 115: B11315.
- Marzen R E, Shillington D J, Lizarralde D, et al. 2020. Limited and localized magmatism in the Central Atlantic Magmatic Province[J]. *Nature Communications*, 11: 3397.
- Marzoli A, Jourdan F, Puffer J H, et al. 2011. Timing and duration of the Central Atlantic Magmatic Province in the Newark and Culpeper basins, eastern U. S. A[J]. *Lithos*, 122: 175-188.
- Marzoli A, Callegaro S, Dal Corso J, et al. 2018. The Central Atlantic Magmatic Province (CAMP): A Review[M]// Tanner L H. The Late Triassic World: Earth in a Time of Transition. Springer, 91-125.

- Mather T A, Schmidt A. 2021. Environmental Effects of Volcanic Volatile Fluxes From Subaerial Large Igneous Provinces[M]// Ernst R E, Dickson A J, Bekker A. Large Igneous Provinces: A Driver of Global Environmental and Biotic Changes, Geophysical Monograph 255, 103-116.
- Melnik E A, Suvorov V D, Pavlov E V, et al. 2015. Seismic and density heterogeneities of lithosphere beneath Siberia: Evidence from the craton long-range seismic profile[J]. *Polar Science*, 9: 119-129.
- Merle R, Marzoli A, Bertrand H, et al. 2011. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and Sr-Nd-Pb-Os geochemistry of CAMP tholeiites from Western Maranhão basin (NE Brazil)[J]. *Lithos*, 122: 137-151.
- Mitchell R N, Zhang N, Salminen J, et al. 2021. The supercontinent cycle[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2: 358-374.
- Mueller C O, Jokat W. 2017. Geophysical evidence for the crustal variation and distribution of magmatism along the central coast of Mozambique[J]. *Tectonophysics*, 712: 684-703.
- Nikishin A M, Ziegler P A, Abbott D, et al. 2002. Permo-Triassic intraplate magmatism and rifting in Eurasia: Implications for mantle plumes and mantle dynamics[J]. *Tectonophysics*, 351: 3-39.
- Pankhurst M J, Schaefer B F, Betts P G. 2011. Geodynamics of rapid voluminous felsic magmatism through time[J]. *Lithos*, 123: 92-101.
- Pearce J A, Ernst R D, Peate D W, Rogers C. 2021. LIP printing: Use of immobile element proxies to characterize large igneous provinces in the geologic record[J]. *Lithos*, 392-393: 106068.
- Peng P, Xu H R, Mitchell R N, et al. 2022. Earth's oldest hotspot track at ca. 1.8 Ga advected by a global subduction system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 585: 117530.
- Reichow M K, Saunders A D, White RV, et al. 2005. Geochemistry and petrogenesis of basalts from the West Siberian Basin: An extension of the Permo-Triassic Siberian Traps, Russia[J]. *Lithos*, 79: 425-452.
- Reichow M K, Pringle M S, Al'Mukhamedov A I, et al. 2009. The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 277: 9-20.
- Retallack G, Jahren A H. 2008. Methane release from igneous intrusion of coal during Late Permian extinction events[J]. *Journal of Geology*, 116: 1-20.
- Rezende G L, Martins C M, Nogueira A C R, et al. 2021. Evidence for the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) in Precambrian and Phanerozoic sedimentary basins of the southern Amazonian Craton, Brazil[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 108: 103216.
- Ricci J, Quidelleur X, Pavlov V, et al. 2013. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar ages of the Viluy traps (Eastern Siberia): Further evidence for a relationship with the Frasnian-Famennian mass extinction[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386: 531-540.
- Richards M A, Duncan R A, Courtillot V E. 1989. Flood basalts and hotspot tracks: Plume heads and tails[J]. *Science*, 246: 103-107.
- Rosen O M, Condie K C, Natapov L M, et al. 1994. Archean and Early Proterozoic Evolution of the Siberian Craton, a Preliminary Assessment[M]// Condie K C. Archean Crustal Evolution. Elsevier, Amsterdam, 411-459.
- Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 321: 1054.
- Ruhl M, Hesselbo S P, Al-Suwaidi A, et al. 2020. On the onset of Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) volcanism and environmental and carbon-cycle change at the Triassic-Jurassic transition (Neuquén Basin, Argentina)[J]. *Earth-Science Reviews*, 208: 103229.
- Rysgaard S, Bendtsen J, Mortensen J, et al. 2018. High geothermal heat flux in close proximity to the northeast Greenland Ice stream[J]. *Scientific Reports*, 8: 1344.
- Saunders A D. 2005. Large igneous provinces: Origin and environmental consequences[J]. *Elements*, 1: 259-263.
- Schoenbohm L M, Burchfiel B C, Chen L Z, et al. 2006. Miocene to present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper-crustal rotation, and lower-crustal flow[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 118: 672-688.
- Schoene B, Eddy M P, Samperton K M, et al. 2019. U-Pb constraints on pulsed eruption of the Deccan Traps across the end-Cretaceous mass extinction[J]. *Science*, 363: 862-866.
- Schoonman C M, White N J, Pritchard D D. 2017. Radial viscous fingering of hot asthenosphere within the Icelandic plume beneath the North Atlantic Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 468: 51-61.
- Scoates J S, Friedman R M. 2008. Precise age of the platiniferous Merensky Reef, Bushveld Complex, South Africa, by the U-Pb zircon chemical abrasion ID-TIMS technique[J]. *Economic Geology*, 103(3): 465-471.
- Self S, Schmidt A, Mather T A. 2014. Emplacement characteristics, time scales, and volcanic gas release rates of continental flood basalt eruptions on Earth[J]. *The Geological Society of America Special Papers*, 505: 319-337.
- Sembroni A, Faccenna C, Becker T W, et al. 2016. Long-term, deep-mantle support of the Ethiopia-Yemen Plateau[J]. *Tectonics*, 35: 469-88.
- Seton M, Muller R D, Zahirovic S, et al. 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 113: 212-270.
- Shatsky V S, Malkovets V G, Belousova E A, et al. 2018. Multi-stage modification of Paleoproterozoic crust beneath the Anabar tectonic province (Siberian craton)[J]. *Precambrian Research*, 305: 125-144.
- Shellnutt J G, Denyszyn S W, Mundil R. 2012. Precise age determination of mafic and felsic intrusive rocks from the Permian Emeishan large igneous province (SW China)[J]. *Gondwana Research*, 22: 118-126.
- Shellnutt J G. 2014. The Emeishan large igneous province: A synthesis[J]. *Geoscience Frontiers*, 5: 369-394.
- Shellnutt J G, Pham T T, Denyszyn S W, et al. 2020. Magmatic duration of the Emeishan large igneous province: Insight from northern Vietnam[J]. *Geology*, 48: 457-461.
- Shen S Z, Zhang F F, Wang W Q, et al. 2024. Deep-time major biological and climatic events versus global changes: Progresses and challenges[J]. *Chinese Science Bulletin*, 69: 268-285 (in Chinese).
- Sheth H C. 2007. Plume-related Regional Prevolcanic Uplift in the Dec-

- can Traps: Absence of Evidence, Evidence of Absence[M]// Foulger G R, Jurdy D M. Plates, Plumes, and Planetary Processes. Geological Society of America, 785-813.
- Shu S Q, Pei R F, Xing B, et al. 2015. The progress in the study of the Noril'sk Cu-Ni-PGE sulfide deposit in Russia[J]. *Geological Bulletin of China*, 34: 1100-1109 (in Chinese).
- Sibuet J C, Rouzo S, Srivastava S. 2012. Plate tectonic reconstructions and paleogeographic maps of the central and North Atlantic Oceans[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 49: 1395-1415.
- Skuzovatov S Y, Shatsky V S, Wang Q, et al. 2021. Multiple tectonomagmatic reactivation of the unexposed basement in the northern Siberian craton: From Paleoproterozoic orogeny to Phanerozoic kimberlite magmatism[J]. *International Geology Review*, 64: 1119-1138.
- Sobolev S V, Zeyen H, Granet M, et al. 1997. Upper mantle temperatures and lithosphere-aesthenosphere system beneath the French Massif Central constrained by seismic, gravity, petrologic and thermal observations[J]. *Tectonophysics*, 275: 143-164.
- Sobolev S V, Sobolev A V, Kuzmin D V, et al. 2011. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes[J]. *Nature*, 477: 312-316.
- Song X Y, Chen L M, Yu S Y, et al. 2018. Geological features and genesis of the V-Ti magnetite deposits in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37: 1003-1019 (in Chinese).
- Svensen H H, Planke S, Polozov A G, et al. 2009. Siberian gas venting and the end-Permian environmental crisis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 277: 490-500.
- Svensen H H, Frolov S, Akhmanov G G, et al. 2018. Sills and gas generation in the Siberian Traps[J]. *Philosophical Transactions Series A-Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 376(2130): 20170080.
- Tapponnier P, Zhiqin X, Roger F O, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294: 1671-1677.
- Thybo H, Artemieva I M. 2013. Moho and magmatic underplating in continental lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 609: 605-619.
- Torsvik T H, Müller R D, Van der Voo R, et al. 2008. Global plate motion frames: Toward a unified model[J]. *Reviews of Geophysics*, 46: RG3004.
- Torsvik T H, Van der Voo R, Doubrovine P V, et al. 2014. Deep mantle structure as a reference frame for movements in and on the Earth[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111: 8735-8740.
- Tran T H, Lan C Y, Usuki T, et al. 2015. Petrogenesis of Late Permian silicic rocks of Tu Le basin and Phan Si Pan uplift (NW Vietnam) and their association with the Emeishan large igneous province[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 109: 1-19.
- Wang Q, Bagdassarov N, Ji S. 2013. The Moho as a transition zone: A revisit from seismic and electrical properties of minerals and rocks[J]. *Tectonophysics*, 609: 395-422.
- Wang Q, Bagdassarov N, Shatsky V S. 2016. Origin of high-velocity anomalies beneath the Siberian craton: A fingerprint of multistage magma underplating since the Neoproterozoic[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 57: 713-722.
- Wang S X, Liu H, Zheng Y, et al. 2024. Translithospheric magma plumbing system fossilized in the Emeishan large igneous province[J]. *Communications Earth & Environment*, 5: 458.
- Wang W L, Wu J P, Fang L H, et al. 2017. Crustal thickness and Poisson's ratio in southwest China based on data from dense seismic arrays[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122: 7219-7235.
- Wang Y M, Li M M. 2021. The interaction between mantle plumes and lithosphere and its surface expressions: 3-D numerical modeling[J]. *Geophysical Journal International*, 225: 906-925.
- Williams S E, Whittaker J M, Granet R, et al. 2013. Early India-Australia spreading history revealed by newly detected Mesozoic magnetic anomalies in the Perth Abyssal Plain[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118: 3275-3284.
- Xu R, Liu Y S, Lambart S. 2020. Melting of a hydrous peridotite mantle source under the Emeishan large igneous province[J]. *Earth Science Reviews*, 207: 103253.
- Xu T, Zhang Z J, Liu B F, et al. 2015. Crustal velocity structure in the Emeishan large igneous province and evidence of the Permian mantle plume activity[J]. *Science China Earth Sciences*, 58: 1133-1147.
- Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, et al. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. *Lithos*, 58: 145-168.
- Xu Y G, He B, Chung S L, et al. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. *Geology*, 32(10): 917-920.
- Xu Y G, Chung S L, Shao H, et al. 2010. Silicic magmas from the Emeishan large igneous province, Southwest China: Petrogenesis and their link with the end-Guadalupian biological crisis[J]. *Lithos*, 119: 47-60.
- Xu Y G, Wei X, Lou Z Y, et al. 2014. The Early Permian Tarim large igneous province: Main characteristics and a plume incubation model[J]. *Lithos*, 204: 20-35.
- Yan H, Pi D H, Jing S Y, et al. 2020. New constraints on the onset age of the Emeishan LIP volcanism and implications for the Guadalupian mass extinction[J]. *Lithos*, 360-361: 105441.
- Yang J H, Cawood P A, Du Y S, et al. 2018. Early Wuchiapingian cooling linked to Emeishan basaltic weathering?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 492: 102-111.
- Zeh A, Ovtcharova M, Wilson A H, Schaltegger U. 2015. The Bushveld Complex was emplaced and cooled in less than one million years—results of zirconology, and geotectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 418: 103-114.
- Zhang S H, Zhao Y, Li X H, et al. 2017. The 1.33–1.30 Ga Yanliao large igneous province in the North China Craton: Implications for reconstruction of the Nuna (Columbia) supercontinent, and specifically with the North Australian Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 465: 112-125.
- Zhang S H, Ernst R E, Munson T J, et al. 2022. Comparisons of the Paleoproterozoic large igneous provinces and black shales in the North China and North Australian cratons[J]. *Fundamental Research*, 2: 84-100.
- Zhang S H, Zhao Y, Pei J L, et al. 2022. A review on large igneous

- provinces (LIPs) and their implications for paleogeographic reconstruction and continental breakup[J]. *Geological Review*, 68: 1635-1652(in Chinese).
- Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, et al. 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China[J]. *Journal of Petrology*, 47: 1997-2019.
- Zhang Z C, Mao J W, Saunders A D, et al. 2009. Petrogenetic modeling of three mafic-ultramafic layered intrusions in the Emeishan large igneous province, SW China, based on isotopic and bulk chemical constraints[J]. *Lithos*, 113: 369-392.
- Zhang Z C, Hou T, Cheng Z G. 2022. Mineralization related to large igneous provinces[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96: 131-154 (in Chinese).
- Zhao D P. 2007. Seismic images under 60 hotspots: Search for mantle plumes[J]. *Gondwana Research*, 12: 335-355.
- Zhong X Y, Li Z H, Wang Y. 2024. Evaluation of plume-induced continental crust growth rate in early Earth: Insight from integrated petrological-thermo-mechanical modeling[J]. *Precambrian Research*, 410: 107506.
- Zhong Y T, He B, Mundil R, et al. 2014. CA-TIMS zircon U-Pb dating of felsic ignimbrite from the Binchuan section: Implications for the termination age of Emeishan large igneous province[J]. *Lithos*, 204: 14-19.
- Zhou M F, Malpas J, Song X Y, et al. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction[J]. *Earth Planet Science Letters*, 196: 113-122.
- Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, et al. 2005. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China[J]. *Journal of Petrology*, 46: 2253-2280.
- Zhu D C, Chung S L, Mo X X, et al. 2009. The 132 Ma Comei-Bunbury large igneous province: Remnants identified in present-day southeastern Tibet and southwestern Australia[J]. *Geology*, 37: 583-586.
- Zhu J, Zhang Z C, Santosh M, et al. 2021. Submarine basaltic eruptions across the Guadalupian-Lopingian transition in the Emeishan large igneous province: Implication for end-Guadalupian extinction of marine biota[J]. *Gondwana Research*, 92: 228-238.
- Ziegler P A, Dèzes P. 2005. Evolution of the lithosphere in the area of the Rhine Rift System[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 94: 594-614.

附中文参考文献

- 薄弘泽, 张招崇. 2020. 硅质大火成岩省的形成机制及其与资源环境的关系[J]. *岩石学报*, 36(7): 1976-1985.
- 沈树忠, 张飞飞, 王文倩, 等. 2024. 深时重大生物和气候事件与全球变化: 进展与挑战[J]. *科学通报*, 69: 268-285.
- 舒思齐, 裴荣富, 邢波, 等. 2015. 俄罗斯诺里尔斯克铜镍硫化物矿床研究进展[J]. *地质通报*, 34: 1100-1109.
- 宋谢炎, 陈列锰, 于宋月, 等. 2018. 峨眉大火成岩省钒钛磁铁矿床地质特征及成因[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 37: 1003-1019.
- 张栓宏, 赵越, 裴军令, 等. 2022. 大火成岩省及其在古大陆重建及裂解研究中的应用[J]. *地质论评*, 68: 1635-1652.
- 张招崇, 侯通, 程志国. 2022. 大火成岩省的成矿效应[J]. *地质学报*, 96: 131-154.