

西藏山南早白垩世双峰式火山岩与地幔柱裂谷成因——年代学和地球化学的制约

严应伟¹, 龚照程¹, 张 沥², 陈 乾¹, 王世明^{2,3}, 戴鼎诚²,
甘保平^{2,3}, 裴秋明^{2,3*}

1. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 成都 610036;

2. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756;

3. 四川省环青藏高原交通廊道地质灾害生态化防治工程技术研究中心, 成都 611756

[摘要] 双峰式火山岩对于探讨区域构造演化和地球动力学背景具有重要意义。本文以西藏山南卡达地区新识别出的一套双峰式火山岩为研究对象, 对其开展了岩相学、年代学、全岩地球化学及 Sr-Nd-Pb 同位素测试。遮拉组中的双峰式火山岩的基性端元为玄武岩, 酸性端元为流纹英安岩, 前者的锆石 U-Pb 年龄为(132.4±2.6) Ma, 后者锆石 U-Pb 年龄为(133.6±2.8) Ma、独居石 U-Pb 年龄为(136.1±1.5) Ma, 3 个年龄测试值在误差范围内一致, 指示该双峰式火山岩形成于早白垩世。玄武岩具有较高的 Ti、P、Nb、Ta、Y 和轻稀土元素(LREE), 亏损 Rb、K 等元素, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 平均值为 0.705 56, ε_{Nd}(*t*) 平均值为 1.56, 具有洋岛玄武岩的特征, 起源于尖晶石-石榴石-二辉橄榄岩的部分熔融。流纹英安岩为富硅、过铝质的钙碱性系列, 富集 LREE, 亏损 Sr、Ti 和 P 等元素, 具有明显的 Eu 负异常和较高的 10 000 Ga/Al 比值, 与 A 型花岗岩特征相似, 为减薄地壳部分熔融的产物。卡达地区的双峰式火山岩形成于大陆裂谷环境, 为东冈瓦纳大陆早期裂解事件的响应, 主要受 Kerguelen 地幔柱活动驱动。

[关键词] 双峰式火山岩; Kerguelen 地幔柱; 早白垩世; 特提斯喜马拉雅; 大火成岩省

[分类号] P581; P597

[文献标志码] A

Genesis of Early Cretaceous bimodal volcanic rocks and a mantle-plume-related rift in the Shannan Prefecture of Xizang: constraints from geochronology and geochemistry

YAN Yingwei¹, GONG Zhaocheng¹, ZHANG Li², CHEN Qian¹, WANG Shiming^{2,3},
DAI Dingcheng², GAN Baoping^{2,3}, PEI Qiuming^{2,3*}

收稿日期: 2024-10-27; 改回日期: 2024-11-25。 责任编辑: 甘娟娟。

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20220983); 四川省自然科学基金面上项目(2022NSFSC0410); 西藏自治区科技计划项目(XZ202401ZY0054)。

第一作者: 严应伟(1995—), 男, 助理工程师, 研究方向: 基础地质调查; E-mail: yanyingwei085@163.com。

*通信作者: 裴秋明(1989—), 男, 副教授, 研究方向: 矿产勘查与遥感地质, E-mail: pqm@swjtu.edu.cn。

引用格式: 严应伟, 龚照程, 张沥, 等, 2026. 西藏山南早白垩世双峰式火山岩与地幔柱裂谷成因——年代学和地球化学的制约[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(3): 634—654.

Yan Y W, Gong Z C, Zhang L, et al., 2026. Genesis of Early Cretaceous bimodal volcanic rocks and a mantle-plume-related rift in the Shannan Prefecture of Xizang: constraints from geochronology and geochemistry[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(3): 634—654.

1. Civil-Military Integration Center of China Geological Survey, Chengdu 610036, China;

2. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

3. Sichuan Province Engineering Technology Research Center of Ecological Mitigation of Geohazards in Tibet Plateau Transportation Corridors, Chengdu 611756, China

Abstract: Bimodal volcanic rocks are of considerable significance in exploring specific tectonic evolution and information related to their geodynamic background. This study concentrates on a set of recently identified bimodal volcanic rocks in the Karda area of Shannan Prefecture, Tibet. A comprehensive analysis was conducted, including petrography, geochronology, whole-rock geochemistry, and Sr-Nd-Pb isotope analyses. The basic endmember of the bimodal volcanic rocks of the Zhela Formation is basalt, while the acidic endmember is rhyodacite. The zircon U-Pb age of the basalt is (132.4 ± 2.6) Ma, while the rhyodacite has zircon and monazite U-Pb ages of (133.6 ± 2.8) Ma and (136.1 ± 1.5) Ma, respectively. The above U-Pb isotopic ages are consistent within the errors, suggesting that the bimodal volcanic rocks of the Zhela Formation formed in the Early Cretaceous. The basalt has high contents of Ti, P, Nb, Ta, Y, and LREE, and is depleted in elements such as Rb and K. The average value of $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ is 0.705 56 and 1.56, respectively. The aforementioned geochemical compositions indicate that the basalt is similar in characteristics to OIB-type basalts, which originate from the partial melting of spinel-garnet lherzolite. The rhyodacite is a silica-rich, peraluminous calc-alkaline series, characterized by LREE enrichment and a depletion in elements such as Sr, Ti, and P. The rhyodacite also presents an obvious Eu negative anomaly and a high 10 000Ga/Al ratio, which is similar to the characteristics of A-type granite. Collectively, it is concluded that the rhyodacite is a product of partial melting of the Earth's crust. The bimodal volcanic rocks from the Zhela Formation formed in a continental rift environment, primarily driven by Kerguelen mantle plume activity, and thus represent a response to early rifting events in East Gondwana.

Key words: bimodal volcanic rocks; Kerguelen mantle plume; Early Cretaceous; Tethyan Himalaya; large igneous province

岩浆系统,特别是大规模的岩浆活动,通常与特定的构造背景对应,其成因和起源对于理解大地构造演化至关重要(Condle, 1982; Moyen and Laurent 2018)。新特提斯洋的俯冲以及随后的印度—亚洲板块的碰撞形成了地球上最大的喜马拉雅—青藏高原造山带(Şengör, 1979)。岩浆岩作为探寻地球深部的“探针”和“窗口”(莫宣学, 2019),在喜马拉雅造山带大量分布,记录了长期的大地构造演化历程,并被广泛用于追踪板块的启动—俯冲—碰撞事件(Chung et al., 2005; Ji et al., 2009; Weinberg, 2016; Cao et al., 2022; Chen et al., 2023; Pei et al., 2023; Xu et al., 2024)。从印度与欧亚大陆的碰撞视角分析,可以将岩浆活动划分为碰撞前、同碰撞和碰撞后3个主要时期(Wang et al., 2022)。关于印度—亚洲碰撞过程的讨论中,至少提出了4种假说:(1)大印度洋模型(Van Hinsbergen et al., 2012, 2019);(2)大印度陆块模型(Ingalls et al., 2016; Meng et al., 2019);(3)洋内俯冲模型(Aitchison et al., 2007);(4)弧后盆地模型

(Kapp and Decelles 2019)。上述现有的解释清楚地表明了印度—亚洲碰撞之前的海陆分布格局(Ding et al., 2022)。因此,了解特提斯喜马拉雅地区的前新生代地质历史对于约束印度—亚洲碰撞过程至关重要(Chen et al., 2018)。

特提斯喜马拉雅东部和西部广泛分布早白垩世火成岩(Zhu et al., 2008, 2009; Hu et al., 2010; 裘碧波等, 2010; Wei et al., 2017; Huang et al., 2019; 丁枫等, 2020; Liang et al., 2023; Zhang et al., 2023)。这些岩浆岩最早在特提斯喜马拉雅东部地区(西藏东南部)被识别,年龄多被限定于140~130 Ma,在~132 Ma处达到峰值,被命名为措美—班伯里(Comei-Bunbury)大火成岩省(朱弟成等, 2013)。随后,在特提斯喜马拉雅中部地区新发现了早白垩世火成岩和双峰式岩浆岩组合(裘碧波等, 2010; Chen et al., 2018)。近年来,整个特提斯喜马拉雅早白垩世火成岩带均被认为与Kerguelen(凯尔盖朗)地幔柱活动的产物有关,并被命名为“特提斯喜马拉雅大火成岩省”(Wei et al., 2017;

Chen et al., 2021)。然而,关于特提斯喜马拉雅早白垩世火成岩的起源,仍然存在争议。例如,与地幔柱模型相反,一些学者认为它们是由澳大利亚—南极板块和印度板块的裂离触发的(Jiang et al., 2006; 童劲松等, 2007; Hu et al., 2016; Zeng et al., 2019)。前人研究中报道了该区晚侏罗世—早白垩世沉积—火山岩中广泛出露的双峰式岩浆岩,但主要集中在桑秀组、拉康组和维美组等地层内(Zhu et al., 2009; Liu et al., 2015; 吕晓春等, 2016; Shi et al., 2018; Tian et al., 2019; 田京京等, 2021; Peng et al., 2022; Zhang et al., 2023; 蔡磊等, 2023),对遮拉组内的双峰式火山岩关注较少。另一方面,关于遮拉组火山岩的形成时代亦存在争议,1:25 万区域地质调查报告将遮拉组的时代厘定为中侏罗世卡洛夫期(Callovia 期),时限为 164~159 Ma,火山岩产于该组上部(朱弟成等, 2004),但近年来对喜马拉雅卓德、塔嘎等地区出露的遮拉组火山岩的年代学研究指示该组火山岩形成于晚侏罗世—早白垩世(Bian et al., 2019; Peng et al., 2022; Liang et al., 2023)。

基于此,在前期地质调查工作的基础上,本研究以藏南卡达地区遮拉组地层中新发现的双峰式火山岩为研究对象,开展年代学、地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素数据测试分析工作。综合特提斯喜马拉雅地区同时代的火成岩数据,以期探讨藏南卡达地区双峰式火山岩(遮拉组)的形成时代、岩石成因及其地球动力学背景,并为特提斯喜马拉雅地区中生代的构造—岩浆演化和地球动力学背景提供约束。

1 地质背景

青藏高原位于特提斯构造域的东段(图 1-A),经历了长期复杂的大洋扩张与俯冲、陆—陆/弧—陆碰撞到陆内张裂等多阶段构造演化历程,由多个大陆块和地块拼贴而成(Metcalf, 2013; Li et al., 2023)。从北向南,可识别出 4 个主要构造单元,分别为松潘—甘孜、羌塘、拉萨和喜马拉雅(印度)地块(Pan et al., 2012)。其中,喜马拉雅地块通过印度河—雅鲁藏布江缝合带(IYSZ)与北部的拉萨地块分隔,并通过主前锋逆冲断裂(MFT)与南部的印度地块分隔,标志着印度大陆的北缘(Yin and Harrison 2000)。作为印度—欧亚板块碰撞的前沿,喜马拉雅造山带内部形成了几个复杂

的褶皱、逆冲断层和韧性—脆性剪切带系统(Yin, 2006; Montomoli et al., 2023)。自北向南可以进一步划分为:特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅、低喜马拉雅和次喜马拉雅(Hodges, 2000),它们分别被 3 个断裂系统,即藏南拆离系(STDS)、主中央逆冲断裂(MCT)和主边界逆冲断裂(MBT)依次分隔开(图 1-B)。

特提斯喜马拉雅从克什米尔和赞斯卡尔(印度西北部)延伸了 2000 多千米,几乎到达藏南地区的东构造结(Ding et al., 2016)。该区保留了古生代至中生代印度半岛被动大陆边缘的地层记录(Sciunnach and Garzanti 2012; Cao et al., 2018),这与最初的高喜马拉雅序列地层具有连续性(Guillot et al., 2008)。这些地层单元的特点是向南逐渐变年轻(特别是在东特提斯喜马拉雅地区),从三叠纪碎屑岩为主的层序演变为侏罗纪—白垩纪碳酸盐岩、硅质碎屑岩和海相碎屑岩(Liu and Einsele 1994; Pan et al., 2004),并且在变形过程中普遍经历了极低—低级变质作用(Montomoli et al., 2023)。而在特提斯喜马拉雅南部,靠近藏南拆离系(STDS)的地区,广泛发育了绿片岩相至角闪岩相变质作用。特提斯喜马拉雅地区发生了强烈的岩浆活动,可分为以下 6 个时期(Cao et al., 2023a):早古生代(520~460 Ma)、二叠纪(290~260 Ma)、晚三叠纪(240~210 Ma)、早侏罗纪(195~175 Ma)、晚侏罗纪—早白垩纪(150~120 Ma)和新生代(45~1 Ma)。

在特提斯喜马拉雅东部卡达地区(图 1-C),根据作者所在团队及中国地质调查局成都地质调查中心近年来开展的 1:5 万区域矿产地质调查资料(Cao et al., 2023b),主要出露的地层单元为陆热组($J_{1-2}I$)和遮拉组(J_3-K_2z),主体为晚三叠世至早白垩世的被动大陆边缘沉积序列,广泛出露基性熔岩、镁铁质岩墙和岩脉,并伴有少量的长英质火成岩。其中,陆热组可分为 3 段,陆热组一段为中薄层状钙质粉砂质板岩夹粉砂岩及灰岩条带,陆热组二段为薄层粉砂质板岩与中厚层钙质砂岩、砂屑灰岩互层,陆热组三段为中厚层泥晶灰岩夹中薄层泥晶灰岩;遮拉组可分为 2 段,其中遮拉组一段主要为灰色、深灰色中薄层粉砂质板岩、粉砂岩夹中厚层石英砂岩,遮拉组二段主要为杏仁状、局部枕状玄武岩与薄层碎屑岩互层,夹凝灰质熔岩和长英质火山

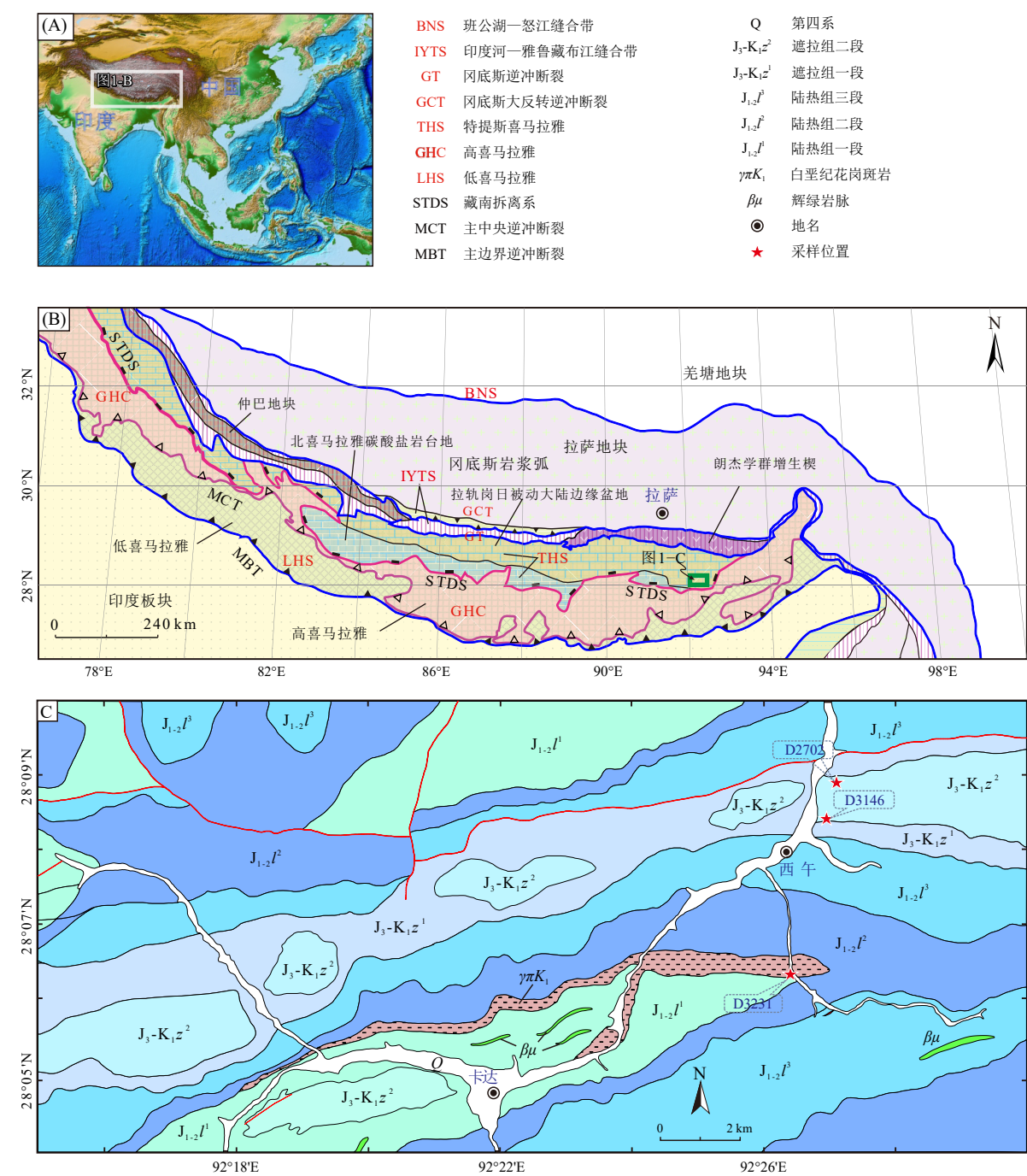


图 1 喜马拉雅地质构造简图与藏南卡达地区地质简图

Fig. 1 Geological framework of the Himalaya and simplified geological map of the Karda area, southern Tibet

(A)喜马拉雅地理位置(据 Pei et al., 2023); (B)喜马拉雅地质构造简图(据 Cao et al., 2021 修改);

(C)藏南卡达地区地质简图

岩等。

2 岩石学特征

本次研究样品主要采自于藏南卡达乡东北部的遮拉组二段地层中(图 1-C)。其中共有基性火山岩样品 5 件(编号为 D2702-1、D2702-2、D3146-1、D3146-2 和 D3146-3)和酸性火山岩样品 4 件(编号为 D3231-02、D3231-03、D3231-04 和 D3231-05)。

遮拉组火山岩与粉砂质板岩、薄层灰岩互层产出,主要为基性火山岩和酸性火山岩。火山岩的基性端元主要为玄武岩,风化面为黄褐色(图 2-A),新鲜面为深灰色—灰黑色,发育杏仁状、气孔状

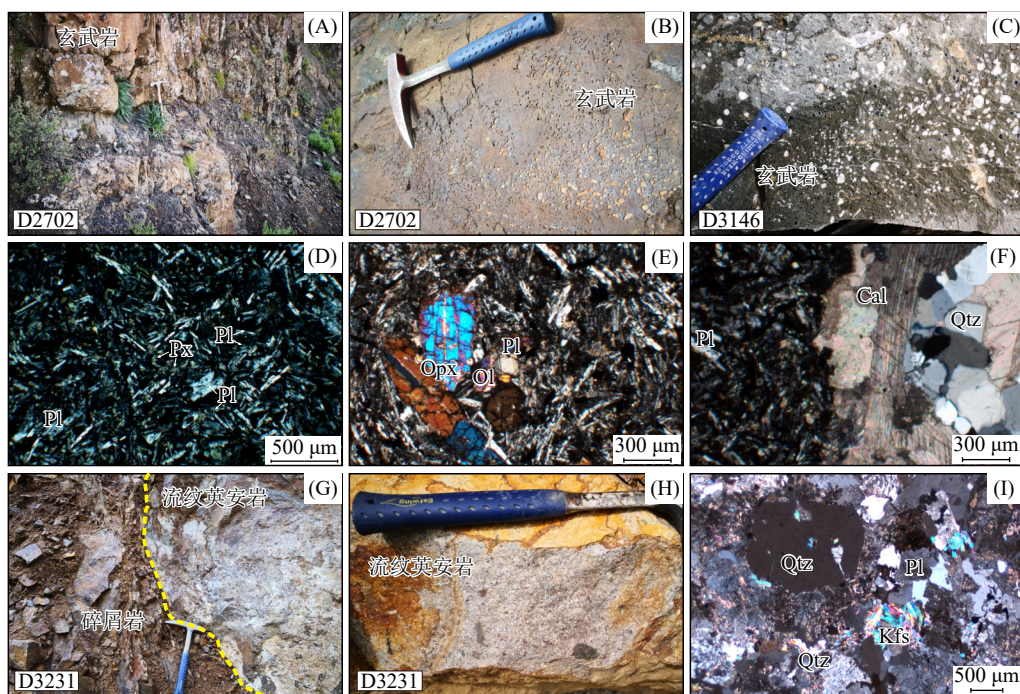


图 2 藏南卡达地区遮拉组双峰式火山岩野外和镜下特征照片

Fig. 2 Field photographs and photomicrographs of bimodal volcanic rocks from the Zhela Formation, Karda area, southern Tibet

(A) 玄武岩野外露头特征; (B) 气孔-杏仁状玄武岩; (C) 杏仁状玄武岩; (D) 玄武岩无斑隐晶结构, (+);

(E) 玄武岩斑状结构, (+); (F) 杏仁状玄武岩的显微照片, (+); (G) 流纹英安岩与碎屑岩接触关系;

(H) 流纹英安岩露头照片; (I) 流纹英安岩的显微照片, (+)

(Cal. 方解石; Kfs. 钾长石; Ol. 橄榄石; Opx. 斜方辉石; Pl. 斜长石; Px. 辉石; Qtz. 石英)

构造(图 2-B、C), 具间粒-间隐结构。玄武岩样品 D2702 为无斑隐晶结构(图 2-D), 基质主要矿物成分为斜长石、辉石和火山玻璃。样品 D3146 与 D2702 特征相似, 但可见少量斑晶, 为斑状结构, 斑晶体积分数约为 10%, 斑晶成分主要为斜方辉石、斜长石和少量橄榄石(图 2-E), 粒径为 0.2~1.3 mm。基质体积分数为 80%~90%, 主要由斜长石微晶、辉石微晶、橄榄石微晶和火山玻璃组成。杏仁体多呈椭圆状或不规则状, 分布不均匀, 粒径大小相差较大, 多在 3 mm 以上, 成分以方解石和石英为主(图 2-F)。

本次采集的酸性火山岩与碎屑岩界线清晰(图 2-G), 风化面呈土黄色, 新鲜面为灰白色, 块状构造, 含少量岩屑(图 2-H)。岩石为斑状结构, 斑晶主要为石英、斜长石, 粒径为 0.3~1.5 mm, 其边缘有熔蚀, 并含少量钾长石, 基质主要为隐晶质长英质矿物, 此外还零星分布绢云母等矿物, 从矿物组成来看, 酸性火山岩具有英安岩与流纹岩的过渡特征, 结合化学组成特征(后文叙述), 本次研究将其定为流纹英安岩。

3 分析方法

用于 U-Pb 测年的样品在广州市拓岩检测技术有限公司进行破碎、清洗及单矿物分选(锆石和独居石), 然后置于环氧树脂表面固定, 后续 U-Pb 定年的目标位置基于阴极发光(CL)和背散射电子(BSE)图像确定。锆石和独居石的 U-Pb 定年在武汉上谱分析科技有限责任公司采用激光电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)测试完成。分析过程中应用了 GeoLasPro 激光剥蚀系统, 其 ICP-MS 型号为 Agilent 7700e, 该系统包括 COMPEXPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统。氦气在激光过程中被用作载气, 在进入 ICP 之前, 通过 T 型连接器与氩气(补充气体)混合。激光剥蚀系统和 ICP-MS 仪器的操作条件及分析流程的详细描述见 Zong et al.(2017)。本次实验对锆石颗粒进行分析的激光剥蚀束斑直径为 24 μm , 频率为 5 Hz。在锆石 U-Pb 定年中选取锆石 91500 (~1 064 Ma) 作为外标, 将锆石 GJ-1 (~599 Ma) 作为监控样品, 以监测数据质量, 微量元素含量

以 NIST610 为外标, Si 为内标进行定量计算; 对于独居石 U-Pb 定年, 激光剥蚀束斑直径被设定为 50 μm , 频率设定为 10 Hz。独居石标准样品 44069、玻璃标准物质 NIST610 和 TRE 分别用作 U-Pb 定年、微量元素校准和同位素比值监测的外标。单点分析包含 20~30 s 的背景信号采集和 50 s 的激光剥蚀。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序在离线状态下进行 (Liu et al., 2008)。样品锆石谐和年龄、加权平均年龄应用 IsoplotR 软件 (Vermeesch, 2018) 完成。

在进行全岩地球化学分析之前, 先去除风化表面, 将样本在玛瑙磨机中研磨至大约 200 目。全岩主微量元素测试分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成, 主量元素分析采用的仪器为飞利浦 PW2404 型 X 射线荧光光谱仪 (XRF)。试样在 950~1 000 $^{\circ}\text{C}$ 的马弗炉中灼烧, 进行烧失量 (LOI) 的测定。全岩的微量元素则利用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, 型号为 Finnigan MAT Element 1) 测定。主微量元素测试的分析不确定度和详细测试程序描述见文献 Pei et al. (2018)。

全岩 Sr-Nd-Pb 分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心的 IsoProbe-T 热电离质谱仪 (TIMS) 上进行。首先将样品粉末溶解在 HF + HNO₃ + HClO₄ 的酸性混合物中。随后, 将消解后的样品干燥, 并溶解在 6 mol/L 的 NH₄Cl 中。再次干燥后, 将它们重新溶解在 0.5 mol/L NH₄Cl (用于 Sr 和 Nd 的分离) 或 0.5 mol/L NHBr (用于 Pb 的分离) 中 (Li et al., 2018)。动态多接收器法被用于测量 Sr-Nd 同位素组成, 而静态接收系统则被用于测量 Pb 同位素。Sr、Nd 同位素比值分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.119\,4$ 、 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\,9$ 进行质量分馏校正。本研究使用的 NBS987 Sr 标准的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和 SHINESTU Nd 标准的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值分别为 $0.710\,250 \pm 7(2\sigma)$ 和 $0.512\,118 \pm 3(2\sigma)$ 。NBS981 Pb 标准的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值分别为 $2.164\,940 \pm 15(2\sigma)$ 、 $0.914\,418 \pm 7(2\sigma)$ 和 $0.059\,110 \pm 2(2\sigma)$, 在 95% 置信水平下不确定度优于 0.1%。

4 测试结果

4.1 锆石和独居石 U-Pb 同位素年龄

本次研究对基性岩样品进行了锆石 U-Pb 定年, 对酸性岩样品同时进行了锆石和独居石 U-Pb 定年, 基于锆石和独居石颗粒的透射光、反射光

和阴极发光照片, 选择合适的位置进行 LA-ICP-MS 测试, 分析结果见附表 1, 代表性锆石和独居石的 CL 图像、测点位置和 U-Pb 同位素年龄谐和图见图 3。

基性火山岩样品 (D2702) 中的锆石多呈灰黑色至灰白色自形、半自形结构的棱柱状或不规则状, 长轴为 50~180 μm , 长宽比为 1:1~3:1, 大部分锆石在阴极发光照片中可见清晰的韵律震荡环带, 部分发育核边结构, 存在继承锆石的残留核, 少部分锆石阴极发光较弱, 整体较为均一, 锆石较为复杂的内部结构也指示了其多来源的可能。Th 和 U 质量分数分别为 $(7\sim 288) \times 10^{-6}$ 和 $(21\sim 479) \times 10^{-6}$, 对应 Th/U 值变化范围为 0.18~1.95, 平均值为 0.68, 以上特征显示锆石主要为岩浆成因 (吴元保和郑永飞, 2004)。本次测试所获得的 22 个有效测点均位于谐和线附近 (图 3-A), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值跨度较大, 为 2 615.3~130.1 Ma。在 2 000 Ma 以上共有 3 个测点, 1 000~160 Ma 共有 15 个测点, 离散度均较高, 为基性岩浆侵位过程中捕获的继承锆石年龄; 140~130 Ma 共有 3 个测点, 为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的最小区间, 其加权平均年龄为 (132.4 ± 2.6) Ma (MSWD=2.6), 该年龄与 Bian et al. (2019) 在东特提斯喜马拉雅洛扎地区遮拉组获得的玄武岩 SHRIMP U-Pb 年龄 [(135.3 ± 2.7) Ma] 一致, 代表了玄武岩的结晶年龄, 即形成时代为早白垩世。

对于酸性火山岩样品 D3231, 同时采用锆石与独居石 2 种副矿物来确定其形成年龄。锆石颗粒以长柱状为主, 部分为短柱状, 长宽比为 1:1~2:1, 粒径为 40~200 μm , 环带结构比较发育。锆石 Th 和 U 质量分数较低, 分别为 $(48\sim 122) \times 10^{-6}$ 和 $(12\sim 152) \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.51~6.09, 平均值为 2.88, 属于岩浆成因锆石。13 个有效分析测试点均落在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线上 (图 3-B), 指示锆石颗粒内部 U-Pb 体系一直保持封闭状态。单颗粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 141.5~126.7 Ma, 加权平均年龄为 (133.6 ± 2.8) Ma (MSWD=0.45), 代表了流纹英安岩的结晶年龄。独居石主要呈半自形粒状产出 (图 3-C), 长宽比接近 1:1, 大多数颗粒无明显分带现象, 结构均匀, 内部裂隙较少, 偶见生长环带, 其粒径范围为 30~140 μm 。独居石的 Th 和 U 的质量分数较高, 分别为 $(37\,626\sim 53\,443) \times 10^{-6}$ 和 $(146\sim 1\,110) \times 10^{-6}$, Th/U 值为 48.13~257.28。

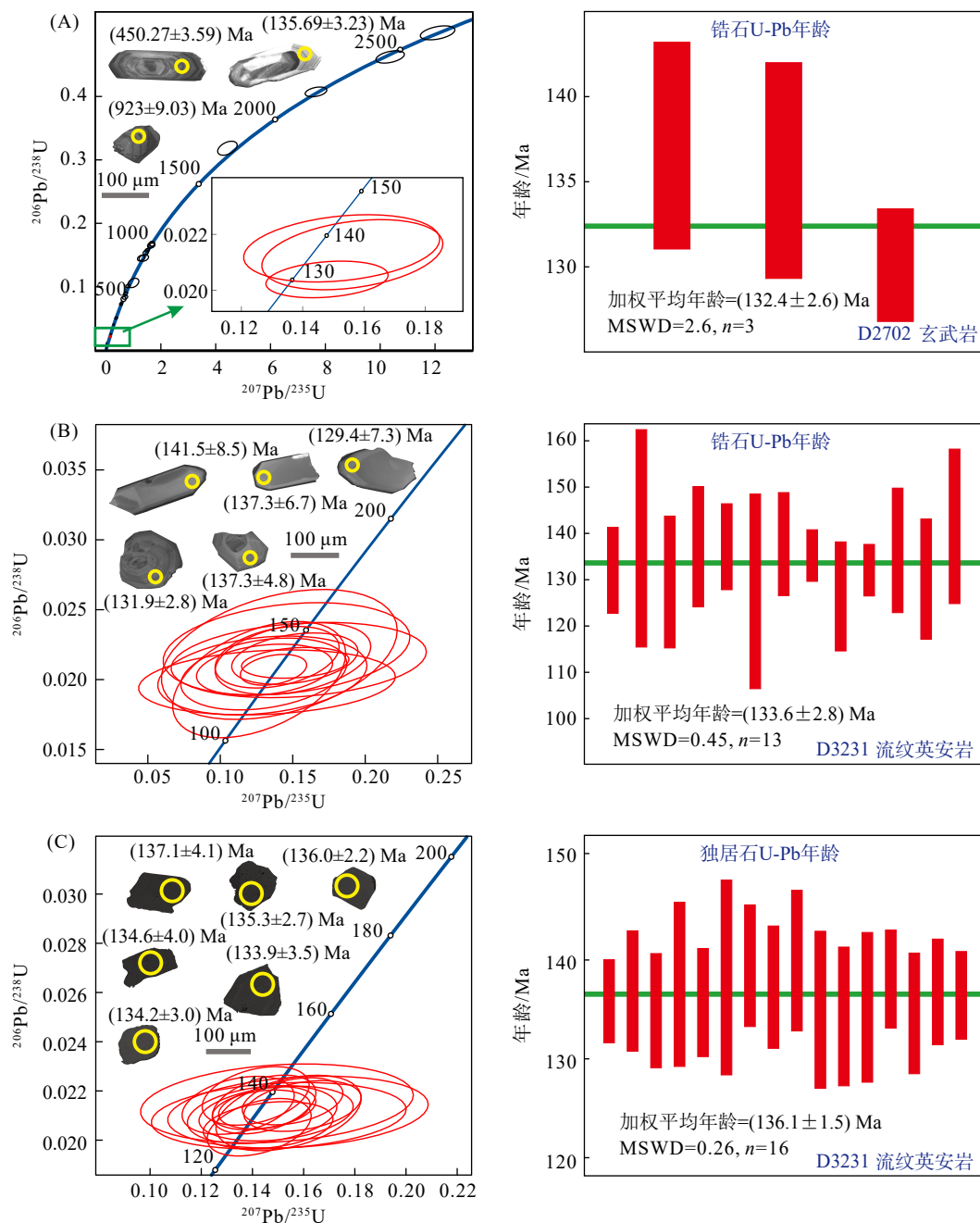


图 3 遮拉组火山岩中代表性锆石和独居石阴极发光图像及 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Representative CL images and U-Pb concordia diagrams of zircons and monazites derived from the volcanic rocks of the Zhela Formation

(A) 基性火山岩锆石 U-Pb 年龄; (B) 酸性火山岩锆石 U-Pb 年龄; (C) 酸性火山岩独居石 U-Pb 年龄

本次共获取 16 个有效数据, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值分布集中, 为 139.4~133.9 Ma, 加权平均年龄为 $(136.1 \pm 1.5) \text{ Ma}$ (MSWD=0.26)。流纹英安岩中锆石与独居石 U-Pb 同位素年龄指示其形成于早白垩世。

4.2 全岩地球化学特征

4.2.1 主量元素

遮拉组火山岩样品的全岩主量元素分析结

果见附表 2。遮拉组火山岩的 SiO_2 含量与岩石学特征一致, 明显分为 2 个端元, 基性火山岩的 SiO_2 质量分数为 47.03%~51.35%, 酸性火山岩的 SiO_2 质量分数为 72.52%~73.05%。在火山岩 TAS 图解中, 基性火山岩全部落入玄武岩区域, 酸性火山岩全部落入流纹岩区域(图 4-A); 在 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001\text{-SiO}_2$ 图解中, 基性火山岩全部落

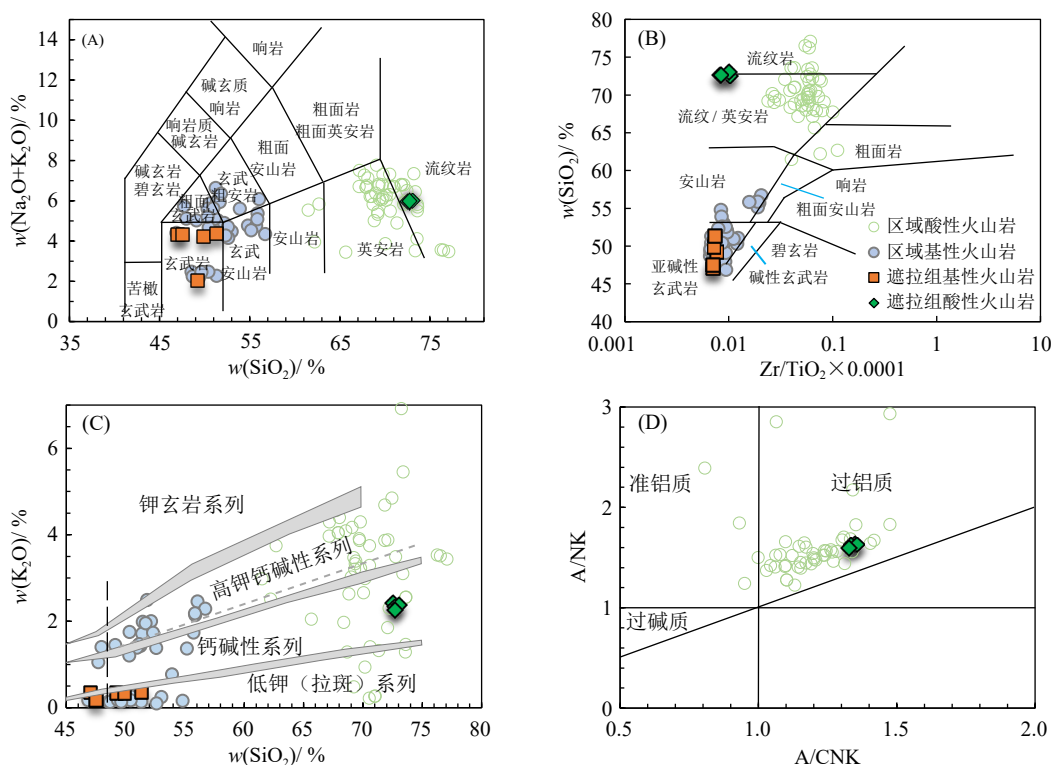


图4 遮拉组火山岩分类判别图解

Fig. 4 Classification diagrams of volcanic rocks from the Zhela Formation

(A) TAS 图解 (Middlemost, 1994); (B) $Zr/TiO_2 \times 0.0001$ - SiO_2 图解 (Winchester and Floyd, 1976); (C) SiO_2 - K_2O 图解 (Peccerillo and Taylor, 1976); (D) A/NK - A/CNK 图解 (Maniar and Piccoli, 1989)

(特提斯喜马拉雅东部早白垩世基性和酸性火山岩数据来源: Zhu et al., 2005; 林彬等, 2014; 吕晓春等, 2016; Zhou et al., 2018; Huang et al., 2019; 田京京等, 2021; Zhang et al., 2023; 蔡磊等, 2023)

入亚碱性玄武岩区域, 酸性火山岩落入流纹岩与英安岩的边界附近(图 4-B), 与岩相学特征一致。玄武岩中具有较高的 TiO_2 (3.03%~3.98%)、 MgO (5.14%~8.69%) 和 CaO (4.8%~9.89%), $Fe_2O_3^T$ 质量分数为 12.17%~13.86%, Al_2O_3 质量分数为 11.78%~14.45%, $Mg^\#$ 值在 31.4~41.7, 低于原生岩浆范围的 $Mg^\#$ 值 (68~75)。 Na_2O 和 K_2O 质量分数分别为 1.69%~4.17% 和 0.18%~0.36%, 对应全碱 (Na_2O+K_2O) 质量分数为 2.03%~4.36%, 在 SiO_2 - K_2O 图解中位于低钾(拉斑)系列(图 4-C)。流纹英安岩样品中主量元素含量变化较小, 与玄武岩相比, 除较高的 SiO_2 质量分数外, TiO_2 、 MgO 、 CaO 和 $Fe_2O_3^T$ 质量分数明显降低, 分别为 0.27%~0.28%、0.20%~0.22%、0.95%~1.02% 和 2.85%~2.90%。 Al_2O_3 质量分数为 13.65%~14.00%, 平均值为 13.81%, 在 SiO_2 - K_2O 图解中落入钙碱性系列(图 4-C)。铝饱和指数 A/NK [$Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$] 为 1.33~1.36, 里特曼指数 δ 平均值为 1.20, 为钙碱性岩石, 在 A/CNK - A/NK 图解(图 4-D)上, 流纹英

安岩样品落入过铝质区域, 整体显示高硅、富铝的钙碱性酸性火山岩特征。

4.2.2 微量元素

遮拉组火山岩的微量元素分析结果见附表 2。在原始地幔标准化图解中(图 5-A), 基性火山岩中富集 Ba、U、Nb、Ta、Zr、Hf 等元素, 亏损 Rb、Th 等元素。基性岩中稀土元素总量 ($\sum REE$) 为 $(125.9 \sim 163.2) \times 10^{-6}$, 平均值为 146×10^{-6} , 明显高于洋中脊玄武岩 (MORB) (39.1×10^{-6})。在球粒陨石标准化稀土配分模式(图 5-B)中, 基性岩的稀土元素配分曲线为右倾型, $LREE/HREE$ 值为 4.83~5.06, 平均值为 4.95, La_N/Yb_N 为 4.48~5.51, 平均值为 4.94, 为轻稀土富集型, 与洋岛玄武岩 (OIB) 的配分曲线接近。Eu 与 Ce 无明显异常, δEu 为 1.06~1.14, δCe 为 0.94~0.97。酸性岩样品显示出近似的微量元素组成, 根据原始地幔标准化蛛网图(图 5-A), 样品明显富集 Rb、Th 和 U, 亏损 Nb、Sr、Zr、Hf 等。酸性岩的稀土元素含量较高, $\sum REE$ 为 $(189.9 \sim 210.7) \times 10^{-6}$, 平均值为 $198.4 \times$

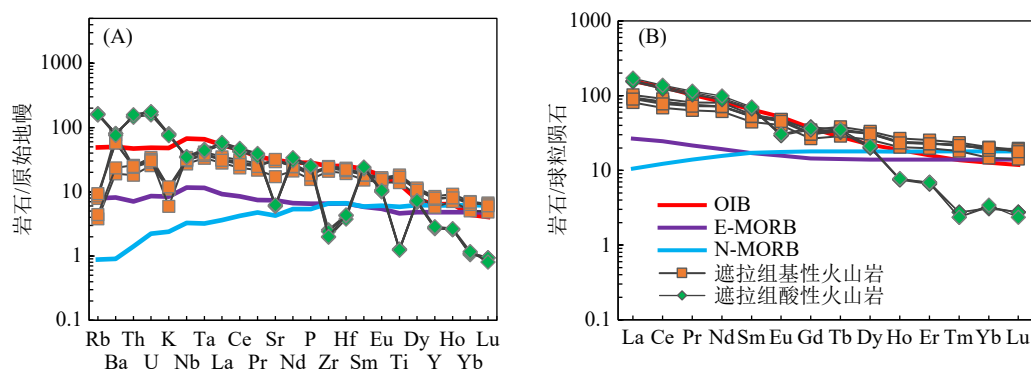


图 5 遮拉组火山岩原始地幔标准化微量元素蛛网图和球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

Fig. 5 Primitive mantle-normalized spider diagrams and chondrite-normalized REE patterns of volcanic rocks from the Zhela Formation

(A) 原始地幔标准化微量元素蛛网图; (B) 球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

(标准化数据、OIB、E-MORB 和 N-MORB 引自 Sun and Mcdonough, 1989)

10^{-6} 。酸性岩轻重稀土元素分异明显, LREE/HREE 值为 11.0~11.8, 平均值为 11.3, La_N/Yb_N 为 45.5~49.3, 平均值为 47, 其球粒陨石标准化分布形式为右倾的“海鸥”型(图 5-B)。 δCe 为 0.94~0.96, Ce 异常不明显; δEu 为 0.54~0.62, 表明为明显的负 Eu 异常, 暗示样品中的斜长石可能经历了结晶分异过程或源区有残留。

4.3 Sr-Nd-Pb 同位素

遮拉组火山岩的 Sr-Nd-Pb 同位素测试结果列于附表 3。全岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 T_{DM2} 、 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 、 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 和 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 基于本次 U-Pb 同位素定年结果计算所得, 其中, 基性火山岩采用 132.4 Ma 计算, 酸性火山岩采用 133.6 Ma 计算。基性火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测试值分别为 0.705 448~0.705 743 和 0.512 649~

0.512 691, 计算所得的全岩初始 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 平均值为 0.705 6 和 0.512 5, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 1.1~2.0, 二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 840~762 Ma; 酸性火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测试平均值分别为 0.714 762 和 0.512 342, 计算所得的全岩初始 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 平均值为 0.710 5 和 0.512 2, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -4.9~-4.8, 对应二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 1 331~1 317 Ma。

基性火山岩与酸性火山岩中均富含放射性成因 Pb, 二者 Pb 同位素组成均一, 其值均分布在同一范围内, 计算得到的初始 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 、 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 和 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 分别为 18.329~18.671、15.553~15.655 和 38.425~38.876。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图 6-A)和 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ - $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图解(图 6-B)中, 遮拉组火山岩样品显示出与 Kerguelen 地幔

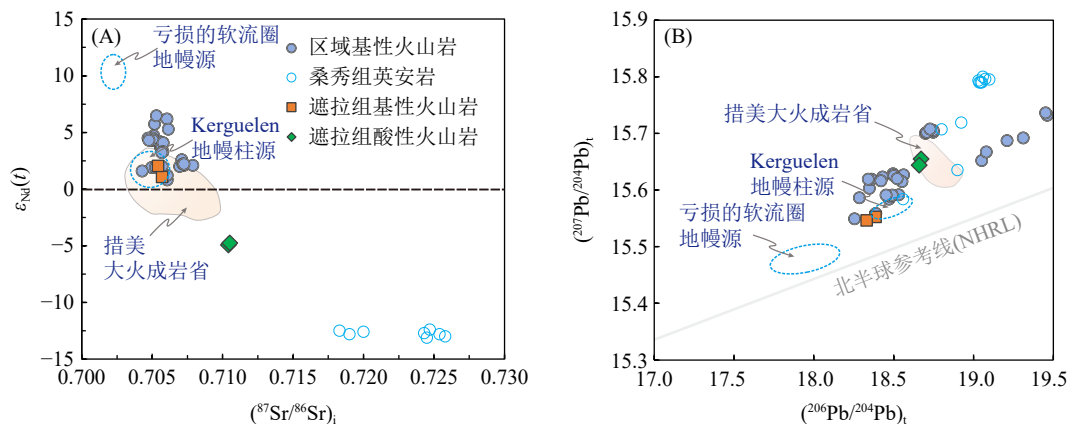


图 6 遮拉组火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素图解(底图据 Olierook et al., 2019)

Fig. 6 Sr-Nd-Pb isotope diagrams of volcanic rocks from the Zhela Formation

(A) $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解; (B) $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ - $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图解

(区域基性岩数据和桑秀组英安岩数据来源: Zhou et al., 2018; 董磊等, 2019; Chen et al., 2021;

Lian et al., 2021; Wang et al., 2023)

柱的亲缘性。

5 讨论

5.1 形成时代

本次研究同时采用了锆石和独居石2种副矿物对遮拉组双峰式火山岩的形成时代予以约束,其酸性端元(流纹英安岩)的锆石 U-Pb 同位素年龄为 (133.6 ± 2.8) Ma, 同一样品的独居石 U-Pb 同位素年龄为 (136.1 ± 1.5) Ma, 且锆石与独居石的微观结构与成分特征均指示岩浆成因, 锆石和独居石 U-Pb 年龄均具有较高的谐和度和可信度, 指示酸性火山岩形成于早白垩世。对于基性端元(玄武岩)而言, 尽管22个有效测点的 U-Pb 年龄数据范围跨度很大($2615.3 \sim 130.1$ Ma), 但整体谐和度较高, 年龄大于160 Ma 的锆石颗粒为捕获锆石, 反映了该区多期岩浆构造事件。测点年龄最小区间的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (132.4 ± 2.6) Ma, MSWD 为2.6, 可以代表玄武岩的结晶年龄, 即形成时代为早白垩世。本次研究同时获取了遮拉组双峰式火山岩基性端元和酸性端元的 U-Pb 同位素年龄, 二者在误差范围内一致, 指示遮拉组双峰式火山岩形成于136.1~132.4 Ma, 时代为早白垩世。

如前所述, 关于遮拉组的时代归属目前仍存在争议。1:25万隆子县幅区调资料依据菊石类组合(*Dolikephalites-Indocephalites* 和 *Dorsetensia-Garantiana*)将该组时代定为中侏罗世, 后期有学者在西藏浪卡子、哈热等地区出露的遮拉组中发现时代跨度较大的双壳类、菊石类、箭石类等生物化石, 时代归属为中晚侏罗世(Hu et al., 2008; 陈尚品和朱国宝, 2022)。遮拉组内火山岩夹层普遍发育, 在西藏错那塔嘎地区(隆子县图幅), 利用锆石 U-Pb 定年获得的遮拉组玄武岩喷发时代为147~140 Ma(Liang et al., 2023), 并不是之前认为的中侏罗世。前已提及, 西藏洛扎地区遮拉组玄武岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (135.3 ± 2.7) Ma(Bian et al., 2019), 为早白垩世。上述遮拉组火山岩年代学测试结果也与塔嘎地区遮拉组沉积地层中最年轻的碎屑锆石年龄(138~127 Ma)一致(焦显伟等, 2021)。结合本次研究所获得的藏南卡达地区遮拉组双峰式火山岩的 U-Pb 年龄(136.1~132.4 Ma), 认为遮拉组不是早期认为的中侏罗世, 而是晚侏罗世—早白垩世。

5.2 岩石成因及源区特征

遮拉组火山岩在 SiO_2 含量上出现明显的戴利(Daly)间隔, 为玄武岩与流纹英安岩的组合, 缺失中性端元(图4-A), 区域研究资料表明, 特提斯喜马拉雅早白垩世火山岩主要为铁镁质和长英质端元的组合(Zhou et al., 2018; 董随亮等, 2018; Lian et al., 2021; 田京京等, 2021; Zhang et al., 2023), 本次锆石和独居石 U-Pb 同位素年龄也指示其形成时代均为早白垩世, 由此可见遮拉组火山岩为一套典型的双峰式火山岩。

5.2.1 遮拉组基性火山岩

遮拉组基性火山岩的烧失量(LOI)均小于5%, 反映了其受到蚀变的影响程度不显著, 与镜下观察到的岩相学特征一致, 且稀土元素、高场强元素(如 Nb、Ta、Zr、Hf、Y、Ti、Th)和过渡元素(Cr、Ni、V)化学性质稳定(Bienvenu et al., 1990), 可用于探讨岩石成因及其构造背景。遮拉组基性火山岩富集 Ti、P、Ba、Ta、Nb、Y 和轻稀土元素(LREE), 亏损 Rb 和 K 等元素, Nb/Th 与 La/Nb 比值分别为0.95~1.03 和 10.24~12.60, 在 Nb-Nb/Th 图解(图7-A)和 La-La/Nb 图解(图7-B)上均落入 OIB 型玄武岩区域。遮拉组基性火山岩中具有较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值(平均为0.70556), 较低的 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ (0.51255)及 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (平均为1.56)。遮拉组基性火山岩以上主微量成分及同位素组成特征与 OIB 型玄武岩特征相似, 并与特提斯喜马拉雅地区桑秀组、拉康组和维美组的基性火山岩特征一致(Peng et al., 2022; Zhang et al., 2023; 蔡磊等, 2023)。

玄武质岩浆起源较深, 而幔源岩浆形成及侵位过程中, 很可能受地壳混染(王亚莹等, 2016)。由于地壳组分亏损 Nb, 幔源岩浆经历混染会导致 $(\text{Th}/\text{Nb})_{\text{PM}}$ 等比值呈现高值(Yang et al., 2023)。 $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}}-(\text{Th}/\text{Nb})_{\text{PM}}$ 图解和 Nb/Tb-Th/Tb 图解被广泛应用于判别幔源岩浆是否经历地壳混染, 遮拉组玄武岩样品在上述图解中分别落入 MORB&OIB 玄武岩区域(图8-A)和靠近 OIB 区域(图8-B), 均远离地壳或壳幔相互作用区域, 显示其未经受地壳混染。Nb/U、Ce/Pb 等元素比值也是判断岩浆源区性质的有效指标(Klein and Karsten, 1995; Campbell, 2002), 在 Nb/U-Ce/Pb 图解(图8-C)中, 遮拉组玄武岩样品同样落入靠近 MORB&OIB 玄武岩区域。地幔柱来源的岩浆具有低的 La/Ta 比

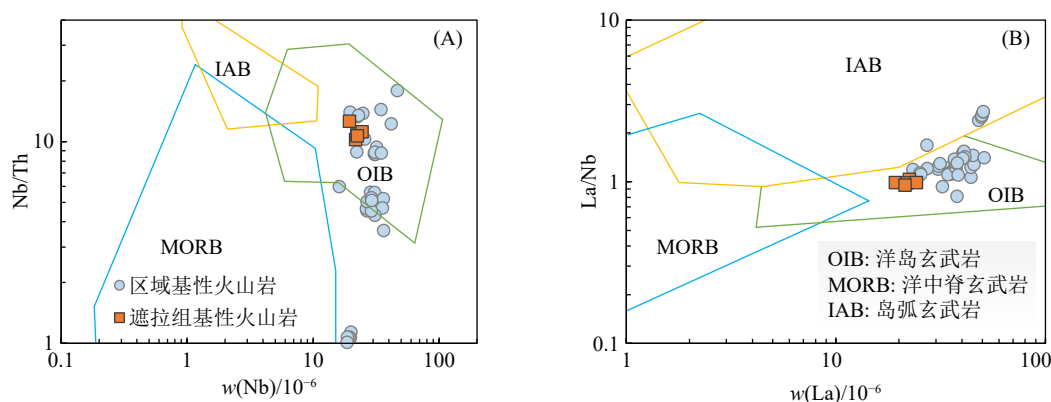


图 7 遮拉组基性火山岩成因类型判别图解

Fig. 7 Genetic classification diagrams of basic volcanic rocks from the Zhela Formation

(A) Nb-Nb/Th 图解; (B) La-La/Nb 图解(底图据李曙光, 1993)

值,一般为 8~15,受岩石圈地幔混染后,其比值迅速增大,一般>25,另一个元素对 La/Sm 值则保持稳定,但对地壳混染作用敏感,其比值受地壳组分影响会迅速增大到 5 以上(Lassiter and Depaolo, 1997; 张招崇等, 2004)。遮拉组玄武岩样品的 La/Ta 值为 13.38~14.34, La/Sm 值为 2.64~2.85,指示遮拉组基性岩浆具有地幔柱来源特征,且岩浆源区未受地壳混染。

源区物质会显著影响基性火山岩的化学组成,重稀土元素(HREE)在石榴石中表现为相容元素,而在其他地幔矿物中不相容,由尖晶石二辉橄榄岩部分熔融生成的火成岩,其 HREE 配分形式相对平坦,而由石榴石二辉橄榄岩部分熔融则会发生 HREE 的显著分馏, Ce/Yb 比值较大(Mysen, 1979)。遮拉组玄武岩样品的 Ce/Yb 比值中等,为 13.88~16.84,在 Zr/Nb-Ce/Y 图解上落入

石榴石二辉橄榄岩和尖晶石二辉橄榄岩之间(图 9-A),这也与文献中报道的措美大火成岩省同时期镁铁质辉长-辉绿岩的源区可类比(Liu et al., 2015)。在 Sm-Sm/Yb 图解(图 9-B)上,遮拉组玄武岩样品落在尖晶石+石榴石二辉橄榄岩(石榴石>尖晶石)附近,表明遮拉组基性岩起源于尖晶石-石榴石二辉橄榄岩的部分熔融。

5.2.2 遮拉组酸性火山岩

遮拉组酸性火山岩为高硅、过铝质的钙碱性系列。样品富集 REE, 亏损 Sr、Ti 和 P 等元素,明显的负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.54\sim 0.62$),稀土配分形式为明显右倾的“海鸥”型(图 5-B), 10 000Ga/Al 比值较高,平均值为 3.67,显示出典型的 A 型花岗岩特征。在 10 000Ga/Al-(Zr+Nb+Ce+Y)图解(图 10-A)和 10 000Ga/Al-FeO^T/MgO 图解(图 10-B)上均落入 A 型花岗岩区域。

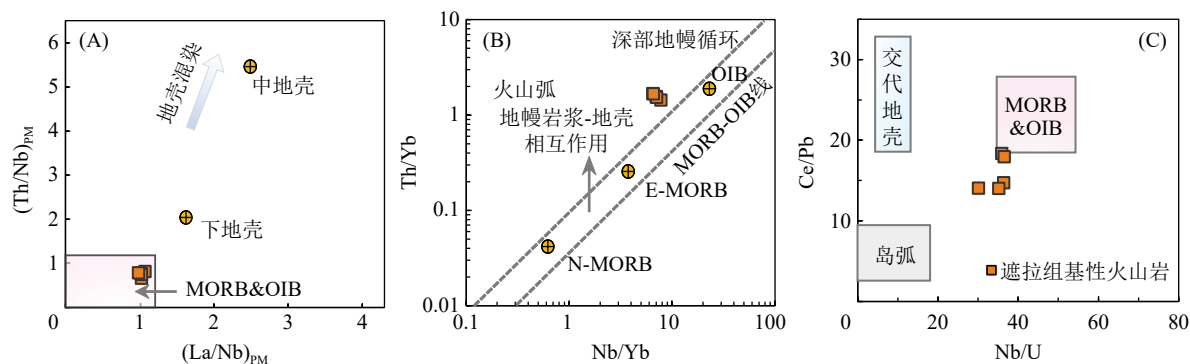


图 8 遮拉组基性火山岩壳幔混染判别图解

Fig. 8 Diagrams for testing crust-mantle contamination of basic volcanic rocks from the Zhela Formation

(A) $(\text{Th}/\text{Nb})_{\text{PM}}-(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}}$ 图解; (B) Nb/Tb-Th/Tb 图解; (C) Nb/U-Ce/Pb 图解

(底图据 Klein and Karsten, 1995; Neal et al., 2002; Olierook et al., 2016)

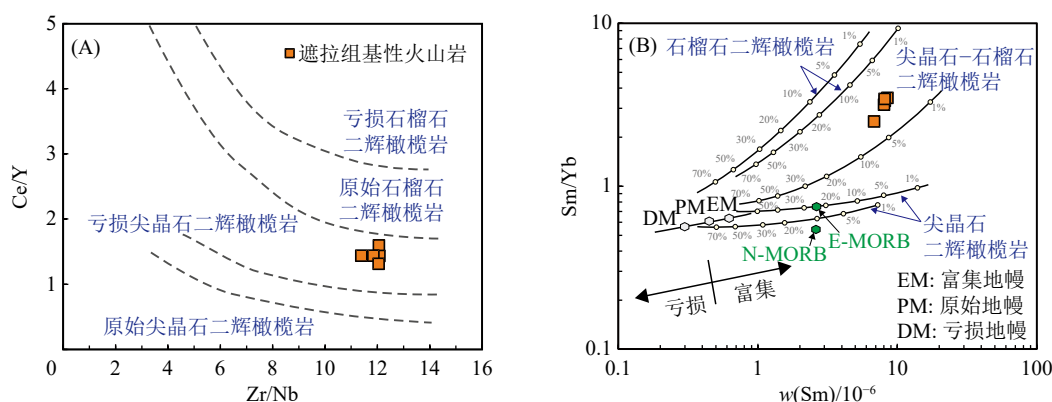


图9 遮拉组基性火山岩岩浆源区判别图解

Fig. 9 Diagrams for determining the magma source of basic volcanic rocks from the Zhela Formation

(A) Zr/Nb-Ce/Y 图解; (B) Sm-Sm/Yb 图解(底图据 Deniel, 1998; Zhang et al., 2023)

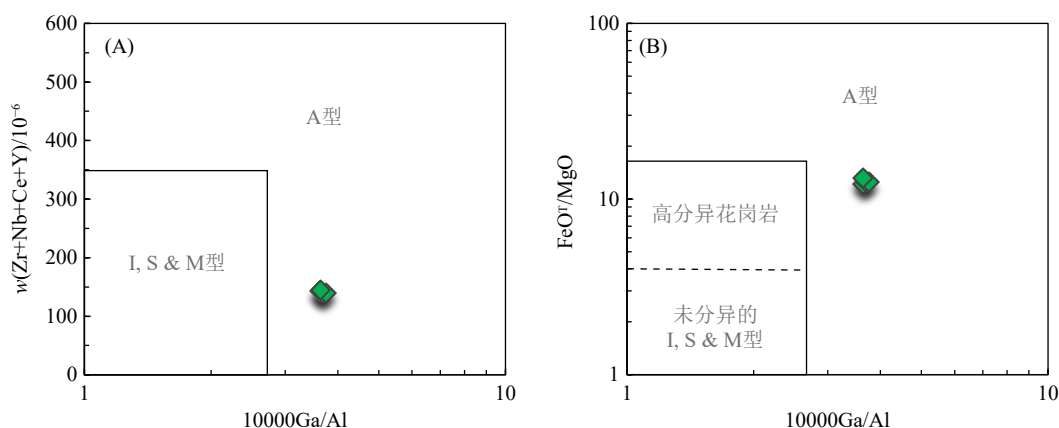


图10 遮拉组酸性火山岩成因类型判别图解

Fig. 10 Genetic classification diagrams of acidic volcanic rocks from the Zhela Formation

(A) 10 000Ga/Al-(Zr+Nb+Ce+Y) 图解; (B) 10 000Ga/Al-FeO^T/MgO 图解(底图据 Whalen et al., 1987)

该类岩石一般有2种成因模式(Eby, 1992): (1)地幔玄武质岩浆通过高度结晶分异形成; (2)地壳部分熔融形成。2种不同成因的酸性火山岩具有明显不同的地球化学组成,前者富集Zr和Nb, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与伴生的基性火山岩类似;后者富集Al、LREE和Th, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为负值(Eby, 1992; 王焰等, 2000)。遮拉组酸性火山岩中亏损Zr和Nb, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为-4.9~-4.8,与遮拉组玄武岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 正值存在明显差异,同时遮拉组酸性岩中具有较高的初始Pb同位素组成,以上化学成分和同位素组成特征显示遮拉组酸性火山岩主要为地壳部分熔融的产物,与桑秀组英安岩特征相似(Zhou et al., 2018)。前人研究指出 Kerguelen地幔柱在早白垩世时期(~ 141 Ma)已经位于东特提斯喜马拉雅(Zhang et al., 2023),可为地壳部分熔融提

供必要的热源。

5.3 地球动力学背景

遮拉组火山岩是一套发育在东特提斯喜马拉雅的玄武岩+流纹英安岩的双峰式火山岩。双峰式火山岩可以在多种地质背景中产出,如大陆裂谷、弧后盆地、洋岛、洋内岛弧等(王焰等, 2000),要探讨其构造背景,不仅需要挖掘其化学成分和同位素组成蕴含的地质信息,还需要结合区域地质背景和演化过程综合分析。遮拉组基性火山岩富集Zr和Ti,具有高的Nb/Yb、Th/Yb比值,在Zr-Zr/Y图解(图11-A)和Zr-TiO₂图解(图11-B)中均落入板内玄武岩区域,在Nb $\times$ 2-Zr/4-Y图解(图11-C)中落入板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩的边界附近,在Ti/100-Zr-Y $\times$ 3图解(图11-D)中同样落入板内玄武岩区域,并均与措美大火成

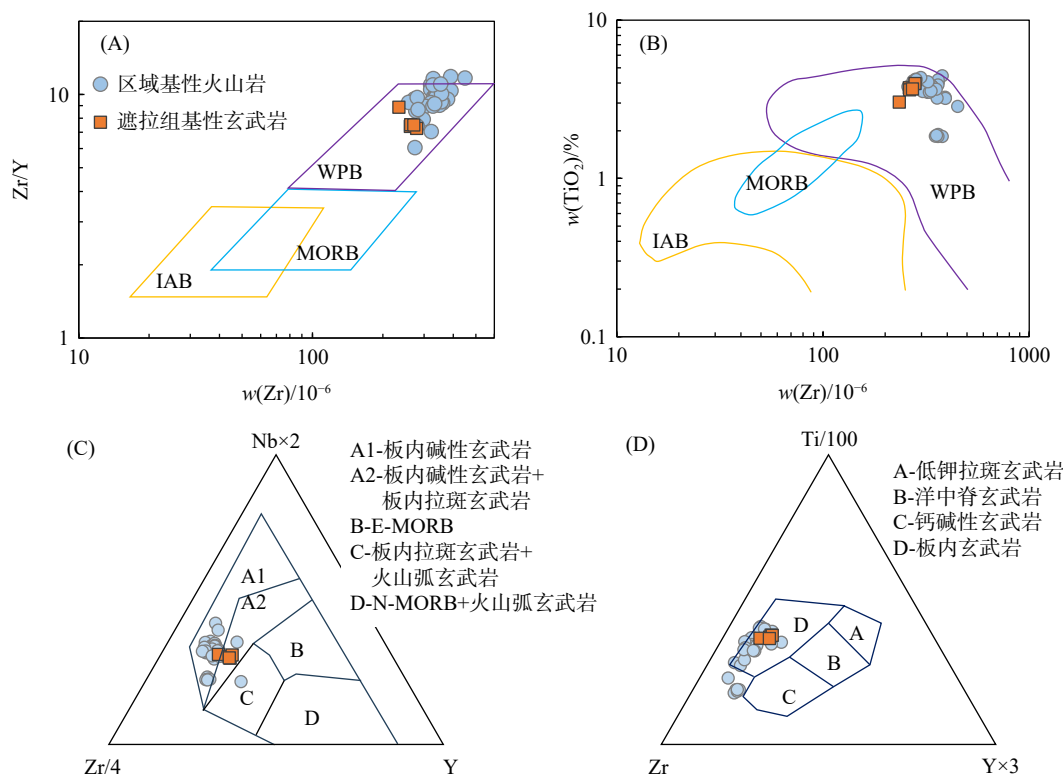


图 11 遮拉组基性火山岩构造背景判别图解(底图据 Pearce, 1982; Meschede, 1986)

Fig. 11 Diagrams for determining the tectonic setting of basic volcanic rocks from the Zhela Formation

(A) Zr-Zr/Y 图解; (B) Zr-TiO₂ 图解; (C) Nb×2-Zr/4-Y 图解; (D) Ti/100-Zr-Y×3 图解

岩省内桑秀组、拉康组、维美组基性火山岩区域高度重叠(图 11-A~D), 指示遮拉组 OIB 型基性火山岩可能为板内环境。

值得注意的是, 在东特提斯喜马拉雅, 除了广泛出露早白垩世 OIB 型基性岩以外, 还存在大量 N-MORB 型基性岩 (Zhu et al., 2008; 王亚莹等, 2016; Huang et al., 2019; Wang et al., 2023), 关于前者的成因前文已讨论, 不再赘述; 而对于后者, 则认为其是来源于亏损的尖晶石二辉橄榄岩的部分熔融 (Huang et al., 2019)。尽管正常洋中脊或弧后背景均能同时产出同时期的 N-MORB 和 OIB 型基性岩 (Dilek and Furnes, 2011), 但一般规模有限。遮拉组基性火山岩的 Ti/V 值为 71.3~79.3, 与典型的板内玄武岩 Ti/V 值(>50)一致 (Shervais, 1982)。在 Ti-V 判别图解上(图 12), 遮拉组基性火山岩落入 OIB 和大陆溢流玄武岩区域, 与前人统计的特提斯喜马拉雅早白垩世 OIB 型基性岩的范围一致 (俞有志和刘志超, 2023)。根据前人估算, 措美大火成岩省的面积可达 10 000~40 000 km² (Zhu et al., 2009; Liu et al., 2015), 如此大范围分布的溢流玄武岩和基性岩墙也不太可能仅由区域

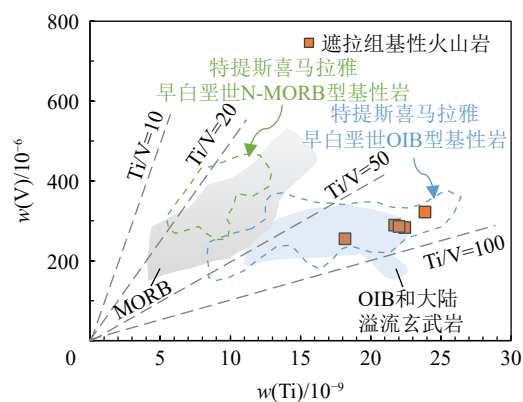


图 12 遮拉组基性火山岩 Ti-V 判别图解

Fig. 12 Ti vs. V diagram of basic volcanic rocks from the Zhela Formation

(底图据 Shervais, 1982; N-MORB&OIB 基性岩范围据俞有志和刘志超, 2023)

应力场相互作用或岩石圈减薄诱发的减压熔融诱发, 因此, 由 Kerguelen 地幔柱活动导致的板内裂谷则是更为合理的解释 (Zhu et al., 2009; Zhou et al., 2018; Chen et al., 2021; Zhang et al., 2023)。另一方面, 遮拉组酸性火山岩具有 A 型花岗岩特征, 亏损 Sr、P 和 Ti 元素, 一般形成于地壳伸展减薄

的构造环境(张旗等, 2012; Pei et al., 2018), 与特提斯喜马拉雅桑秀组酸性火山岩的特征一致(Zhou et al., 2018; 田京京等, 2021; 蔡磊等, 2023), 同样支持板内裂谷环境。

本次研究进一步统计了特提斯喜马拉雅东部早白垩世岩浆岩年龄(共计106个样品/891个测点), 无论是单颗粒锆石 U-Pb 测点统计值(图 13-A)还是样品 U-Pb 年龄统计值(图 13-B), 均显示本区在 147~115 Ma(早白垩世)发生了强烈的岩浆活动。统计文献中岩石类型, 发现该区火成岩以镁铁质岩墙、岩脉、熔岩等基性岩为主, 同时包含少量以英安岩为代表的酸性岩。这些岩石主要出露在前人所厘定的措美大火成岩省范围内, 即特提斯喜马拉雅东部。根据本次统计数据, 该区火成岩出现 2 个明显岩浆爆发峰值年龄, 分别在 ~140 Ma 和 ~133 Ma, 符合大火成岩省的短期、大面积且以镁铁质岩石为主的岩浆活动规律(Bryan and Ernst, 2008)。大火成岩省的形成常与地幔柱活动和岩石圈伸展所引发的大规模减压熔融相关, 并与超大陆的裂解等重大地质事件相关联(朱弟成等, 2013)。特提斯喜马拉雅曾为东冈瓦纳大陆的一部分(Yin, 2006), 关于该大陆裂解的动力学背景及时限仍存在争议(Zeng et al., 2019), 而双峰式火山岩作为大陆裂解的重要标志性产物, 可用于限定东冈瓦纳裂解事件。

在藏南塔嘎地区, 遮拉组火山岩的年龄被厘

定为 147~140 Ma(Liang et al., 2023), 在邻近的错那和索努地区双峰式岩浆岩/火山岩组合年龄为 140~137 Ma(Tian et al., 2019; 蔡磊等, 2023), 此外研究学者还报道了在本研究区(卡达)的 OIB 型辉长岩形成于 (138.5±1.6) Ma(Lian et al., 2021), 特提斯喜马拉雅东部地区第一期岩浆活动(147~135 Ma, 峰值在 ~140 Ma), 为东冈瓦纳大陆初期裂解的响应(图 14-A、B), 为 Kerguelen 地幔柱早期活动所触发(Zhang et al., 2023)。同样基于本次统计, 该区第二期岩浆活动时限持续时间短(135~130 Ma, 峰值在 ~133 Ma)、且规模最大, 同时存在 OIB 型和 N-MORB 型基性岩以及 A 型英安岩/流纹岩岩石组合, 对应东冈瓦纳大陆更大规模的裂解事件(图 14-C), 本区(卡达)双峰式火山岩产生于此背景。前人基于古地磁数据重建, 措美大火成岩省的原始喷发位置为 39.6°~55.5°S(Liang et al., 2023), 这与基于改进的古地磁参考模型重建的 Kerguelen 地幔柱大火成岩省喷出时的中心位置(45.4°~52.3°S)相匹配(Torsvik et al., 2008)。此外, 还存在 130~115 Ma 岩浆岩活动, 但强度和分布范围均明显变小, 随着印度板块逐渐北移, 该时期 Kerguelen 地幔柱已经逐渐远离特提斯喜马拉雅(图 14-D), 因此该区晚于 130 Ma 的岩浆活动更有可能对应于伸展背景, 不是 Kerguelen 地幔柱活动的直接产物(王亚莹等, 2016; Chen et al., 2018)。

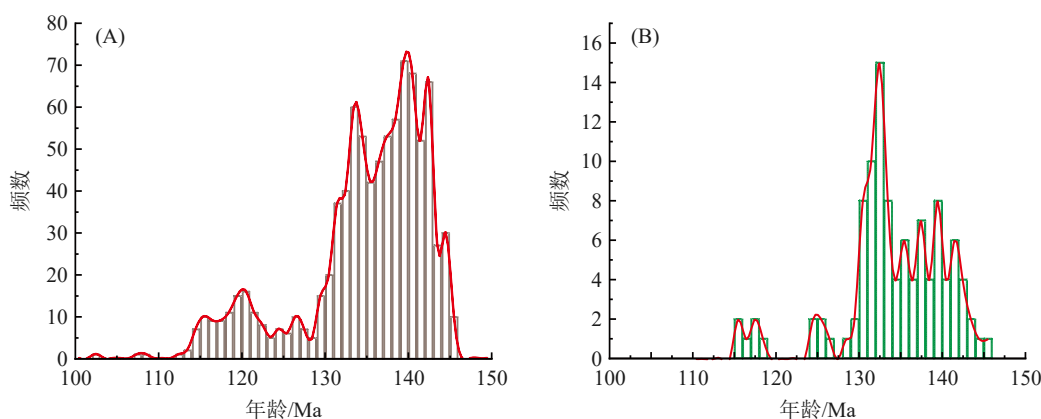


图 13 东特提斯喜马拉雅早白垩世岩浆岩年龄统计直方图

Fig. 13 Age histograms of Early Cretaceous magmatic rocks within the eastern Tethys Himalaya

(A) 锆石测点 U-Pb 同位素年龄统计图; (B) 样品的锆石 U-Pb 同位素年龄统计图

(数据来源: Zhu et al., 2005; 林彬等, 2014; Liu et al., 2015; 吕晓春等, 2016; 王亚莹等, 2016; Ao et al., 2018; Chen et al., 2018; Ma et al., 2018; Wang et al., 2018; 周邦国等, 2018; Huang et al., 2019; Tian et al., 2019; 董磊等, 2019; Xia et al., 2020; 丁枫等, 2020; Chen et al., 2021; 田京京等, 2021; Liang et al., 2023; Wang et al., 2023; Yang et al., 2023; Zhang et al., 2023; 蔡磊等, 2023)

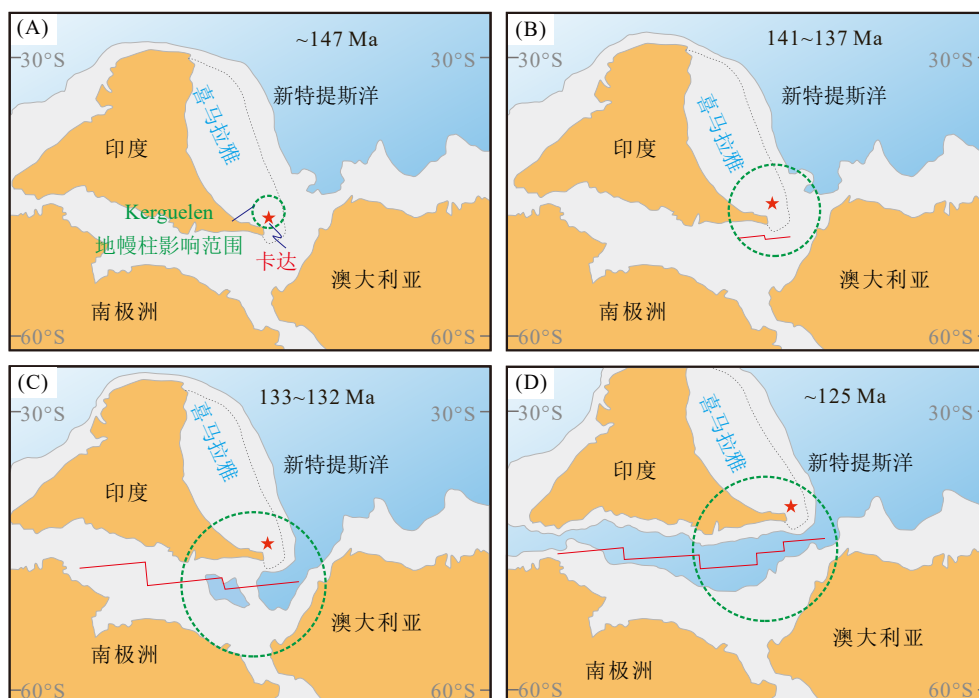


图 14 早白垩世东冈瓦纳与 Kerguelen 地幔柱大地构造重建图(据 Wang et al., 2022; Liang et al., 2023 修改)

Fig. 14 A sketch map showing the eastern Gondwana and Kerguelen plume reconstruction in the Early Cretaceous

6 结论

(1)藏南卡达地区遮拉组火山岩为一套双峰式火山岩,其基性端元为玄武岩,酸性端元为流纹英安岩。玄武岩锆石 U-Pb 年龄为 (132.4 ± 2.6) Ma; 流纹英安岩锆石 U-Pb 年龄为 (133.6 ± 2.8) Ma, 独居石 U-Pb 年龄为 (136.1 ± 1.5) Ma, 在误差范围内一致,指示卡达地区遮拉组双峰式火山岩形成时代为 136.1~132.4 Ma, 为早白垩世。

(2)遮拉组基性岩富集 Ti、P、Ta、Nb、Y 和 LREE, 具有较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和较低的正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 与 OIB 型玄武岩特征相似, 起源于尖晶石-石榴石二辉橄榄岩的部分熔融, 具有地幔柱来源特征, 且岩浆源区未受地壳混染; 遮拉组酸性岩亏损 Sr、Ti 和 P 等元素, 具有明显的负 Eu 异常, 10 000Ga/Al 值较高, 显示出 A 型花岗岩特征, 主要为地壳部分熔融的产物。

(3)特提斯喜马拉雅东部在早白垩世有多期岩浆活动, 卡达地区双峰式火山岩形成于区域第二期岩浆活动(135~130 Ma, 峰值在 ~133 Ma), 为东冈瓦纳大陆早期裂解的响应, 与 Kerguelen 地幔柱活动相关联。

附加材料: 附表由作者提供, 数据真实性由

作者负责, 在线查看网址: <https://xbzrkx.cdut.edu.cn/article/doi/10.12474/cdlgzrkx.2024102702>。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

[参 考 文 献]

- 蔡磊, 霍艳, 丁枫, 等, 2023. 特提斯喜马拉雅东部早白垩世双峰式火山岩地球化学特征及地质意义[J]. 矿物岩石, 43(1): 42—60.
- Cai L, Huo Y, Ding F, et al., 2023. Geochemical characteristics and geological significance of Early Cretaceous bimodal volcanic rocks in Eastern Tethyan Himalaya[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 43(1): 42—60. (in Chinese)
- 陈尚品, 朱国宝, 2022. 藏南哈热地区中—晚侏罗世遮拉组生物特征及沉积环境分析[J]. 四川地质学报, 42(增刊 2): 2—7.
- 丁枫, 高建国, 徐琨智, 2020. 西藏南部绒布地区基性岩脉岩石地球化学、年代学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 36(2): 391—408.
- Ding F, Gao J G, Xu K Z, 2020. Geochemistry, geochronology and geological significances of the basic dykes in Rongbu area, southern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(2): 391—408. (in Chinese)

- 董磊,李光明,张志,等,2019.藏南雪莎地区辉绿岩脉的锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素[J].成都理工大学学报(自然科学版),46(6):734—745.
- Dong L, Li G M, Zhang Z, et al., 2019. Zircon U-Pb age, petro-geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of the diabase dykes in the Xuesha area, southern Tibet, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 46(6): 734—745. (in Chinese)
- 董随亮,张志,张林奎,等,2018.藏南曲卓木地区酸性火山岩地球化学、Hf-Sr-Nd 同位素特征及其成因[J].地球科学,43(8):2701—2714.
- Dong S L, Zhang Z, Zhang L K, et al., 2018. Geochemistry, Hf-Sr-Nd isotopes and petrogenesis of acidic volcanic rocks in Quzhuomu Region of southern Tibet[J]. Earth Science, 43(8): 2701—2714. (in Chinese)
- 焦显伟,石玉若,杨天水,等,2021.东特提斯喜马拉雅下白垩统碎屑锆石 U-Pb 年代学及其古地理[J].地球科学,46(8):2850—2859.
- Jiao X W, Shi Y R, Yang T S, et al., 2021. U-Pb age of detrital zircons from Lower Cretaceous in Eastern Tethyan Himalaya and its paleogeography[J]. Earth Science, 46(8): 2850—2859. (in Chinese)
- 李曙光,1993.蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图[J].岩石学报,9(2):146—157.
- Li S G, 1993. Ba-Nb-Th-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite[J]. Acta Petrologica Sinica, 9(2): 146—157. (in Chinese)
- 林彬,唐菊兴,郑文宝,等,2014.藏南扎西康矿区流纹岩的岩石地球化学、锆石 U-Pb 测年和 Hf 同位素组成[J].地质论评,60(1):178—189.
- Lin B, Tang J X, Zheng W B, et al., 2014. Petrochemical features, zircon U-Pb dating and Hf isotopic composition of the rhyolite in Zhaxikang Deposit, southern Xizang (Tibet)[J]. Geological Review, 60(1): 178—189. (in Chinese)
- 吕晓春,任冲,武睿,等,2016.藏南隆子地区早白垩世双峰式火山岩的发现——来自 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学的证据[J].地质论评,62(4):945—954.
- Lv X C, Ren C, Wu R, et al., 2016. Discovery of bimodal volcanics in Longzi area, southern Xizang: evidences from SHRIMP U-Pb zircon age and geochemical analysis[J]. Geological Review, 62(4): 945—954. (in Chinese)
- 莫宣学,2019.岩浆作用与地球深部过程[J].地球科学,44(5):1487—1493.
- Mo X X, 2019. Magmatism and deep geological process[J]. Earth Science, 44(5): 1487—1493. (in Chinese)
- 裘碧波,朱弟成,赵志丹,等,2010.藏南措美残余大火成岩省的西延及意义[J].岩石学报,26(7):2207—2216.
- Qiu B B, Zhu D C, Zhao Z D, et al., 2010. The westward extension of Comei fragmented large igneous province in southern Tibet and its implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(7): 2207—2216. (in Chinese)
- 田京京,丁枫,郝盛蓝,等,2021.特提斯喜马拉雅中东部桑秀组酸性火山岩岩石成因:东冈瓦纳大陆裂解的响应?[J].地球科学,46(11):3926—3944.
- Tian J J, Ding F, Hao S L, et al., 2021. Petrogenesis of acidic volcanic rocks in Sangxiu Formation, east-central segment of Tethyan-Himalaya: response to break-up of Eastern Gondwana Continent?[J]. Earth Science, 46(11): 3926—3944. (in Chinese)
- 童劲松,刘俊,钟华明,等,2007.藏南洛扎地区基性岩墙群锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及构造意义[J].地质通报,26(12):1654—1664.
- Tong J S, Liu J, Zhong H M, et al., 2007. Zircon U-Pb dating and geochemistry of mafic dike swarms in the Lhozag area, southern Tibet, China, and their tectonic implications[J]. Geological Bulletin of China, 26(12): 1654—1664. (in Chinese)
- 王亚莹,高利娥,曾令森,等,2016.藏南特提斯喜马拉雅带内江孜—康马地区白垩纪多期基性岩浆作用[J].岩石学报,32(12):3572—3596.
- Wang Y Y, Gao L E, Zeng L S, et al., 2016. Multiple phases of Cretaceous mafic magmatism in the Gyangze-Kangma area, Tethyan Himalaya, southern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(12): 3572—3596. (in Chinese)
- 王焰,钱青,刘良,等,2000.不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征[J].岩石学报,16(2):169—173.
- Wang Y, Qian Q, Liu L, et al., 2000. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments[J]. Acta Petrologica Sinica, 16(2): 169—173. (in Chinese)
- 吴元保,郑永飞,2004.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J].科学通报,49(16):1589—1604.
- Wu Y B, Zheng Y F, 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 49(15): 1554—1569.
- 俞有志,刘志超,2023.特提斯喜马拉雅然巴地区早白垩世变基性岩的岩浆源区和成因机制[J].高校地质学报,29(4):527—542.

- Yu Y Z, Liu Z C, 2023. Origin and genetic mechanism of the Early Cretaceous metabasite from the Ramba area, Tethyan Himalaya[J]. *Geological Journal of China Universities*, 29(4): 527—542. (in Chinese)
- 张旗, 冉麒, 李承东, 2012. A 型花岗岩的实质是什么?[J]. *岩石矿物学杂志*, 31(4): 621—626.
- Zhang Q, Ran H, Li C D, 2012. A-type granite: what is the essence?[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 621—626. (in Chinese)
- 张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等, 2004. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J]. *地质学报*, 78(2): 171—180.
- Zhang Z C, Wang F S, Hao Y L, et al., 2004. Geochemistry of the picrites and associated basalts from the Emeishan large igneous basalt province and constraints on their source region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 171—180. (in Chinese)
- 周邦国, 张志, 李光明, 等, 2018. 藏南柯月铅锌矿床辉绿岩年代学及地球化学特征研究[J]. *矿物岩石*, 38(1): 27—34.
- Zhou B G, Zhang Z, Li G M, et al., 2018. Study of zircon U-Pb chronology and geochemistry of diabase in the Keyue Pb-Zn deposit, southern Tibet[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 38(1): 27—34. (in Chinese)
- 朱弟成, 王立全, 潘桂棠, 等, 2004. 藏南特提斯喜马拉雅带中段中侏罗统遮拉组 OIB 型玄武岩浆的识别及其意义[J]. *地质科技情报*, 23(3): 15—24.
- Zhu D C, Wang L Q, Pan G T, et al., 2004. Discrimination of OIB-type magma and its significances of basalts from Middle Jurassic Zhela Formation in the central belt of Tethyan Himalayas, south Tibet[J]. *Geological Science and Technology Information*, 23(3): 15—24. (in Chinese)
- 朱弟成, 夏瑛, 裴碧波, 等, 2013. 为什么要提出西藏东南部早白垩世措美大火成岩省[J]. *岩石学报*, 29(11): 3659—3670.
- Zhu D C, Xia Y, Qiu B B, et al., 2013. Why do we need to propose the Early Cretaceous Comei large igneous province in southeastern Tibet?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3659—3670. (in Chinese)
- Aitchison J C, Ali J R, Davis A M, 2007. When and where did India and Asia collide?[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B5): B05423.
- Ao S J, Xiao W J, Windley B F, et al., 2018. Components and structures of the eastern Tethyan Himalayan Sequence in SW China: not a passive margin shelf but a mélange accretionary prism[J]. *Geological Journal*, 53(6): 2665—2689.
- Bian W W, Yang T S, Ma Y M, et al., 2019. Paleomagnetic and geochronological results from the Zhela and Weimei Formations lava flows of the eastern Tethyan Himalaya: new insights into the breakup of eastern Gondwana[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(1): 44—64.
- Bienvenu P, Bougault H, Joron J L, et al., 1990. MORB alteration: rare-earth element/non-rare-earth hygromagmaphile element fractionation[J]. *Chemical Geology*, 82: 1—14.
- Bryan S E, Ernst R E, 2008. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs)[J]. *Earth-Science Reviews*, 86(1/2/3/4): 175—202.
- Campbell I H, 2002. Implications of Nb/U, Th/U and Sm/Nd in plume magmas for the relationship between continental and oceanic crust formation and the development of the depleted mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(9): 1651—1661.
- Cao H W, Huang Y, Li G M, et al., 2018. Late Triassic sedimentary records in the northern Tethyan Himalaya: tectonic link with Greater India[J]. *Geoscience Frontiers*, 9(1): 273—291.
- Cao H W, Li G M, Zhang R Q, et al., 2021. Genesis of the Cuonadong tin polymetallic deposit in the Tethyan Himalaya: evidence from geology, geochronology, fluid inclusions and multiple isotopes[J]. *Gondwana Research*, 92: 72—101.
- Cao H W, Pei Q M, Santosh M, et al., 2022. Himalayan leucogranites: a review of geochemical and isotopic characteristics, timing of formation, genesis, and rare metal mineralization[J]. *Earth-Science Reviews*, 234: 104229.
- Cao H W, Pei Q M, Yu X, et al., 2023a. The long-lived partial melting of the Greater Himalayas in southern Tibet, constraints from the Miocene Gyirong anatectic pegmatite and its prospecting potential for rare element minerals[J]. *China Geology*, 6(2): 303—321.
- Cao H W, Pei Q M, Yu X, et al., 2023b. Discovery of the large-scale Eocene Xiwu Pb-Zn-Ag deposit in the Tethyan Himalaya: geochronology, geochemistry, and C-H-O-S-Pb-Sr-Nd isotopes[J]. *Gondwana Research*, 124: 165—187.
- Chen S S, Fan W M, Shi R D, et al., 2018. 118–115 Ma magmatism in the Tethyan Himalaya igneous province: constraints on Early Cretaceous rifting of the northern margin of Greater India[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 491: 21—33.
- Chen S S, Fan W M, Shi R D, et al., 2021. The Tethyan Himalaya igneous province: early melting products of the Kerguelen mantle plume[J]. *Journal of Petrology*, 62(11): egab069.
- Chen W, Liu Z B, Wang N, et al., 2023. Early Cretaceous bimodal

- volcanic rocks in Wuga Co area, central Tibet: the first identification of direct products derived from slab sinking in the Bangong-Nujiang suture zone[J]. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1108655.
- Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, et al., 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism[J]. *Earth-Science Reviews*, 68(3/4): 173—196.
- Condie K C, 1982. Plate-tectonics model for Proterozoic continental accretion in the southwestern United States[J]. *Geology*, 10(1): 37—42.
- Deniel C, 1998. Geochemical and isotopic (Sr, Nd, Pb) evidence for plume-lithosphere interactions in the genesis of Grande Comore magmas (Indian Ocean)[J]. *Chemical Geology*, 144(3/4): 281—303.
- Dilek Y, Furnes H, 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere[J]. *GSA Bulletin*, 123(3/4): 387—411.
- Ding H X, Zhang Z M, Dong X, et al., 2016. Early Eocene (*c.* 50 Ma) collision of the Indian and Asian continents: constraints from the North Himalayan metamorphic rocks, southeastern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 435: 64—73.
- Ding L, Kapp P, Cai F L, et al., 2022. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10): 652—667.
- Eby G N, 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641—644.
- Guillot S, Mahéo G, de Sigoyer J, et al., 2008. Tethyan and Indian subduction viewed from the Himalayan high- to ultrahigh-pressure metamorphic rocks[J]. *Tectonophysics*, 451(1/2/3/4): 225—241.
- Hodges K V, 2000. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives[J]. *GSA Bulletin*, 112(3): 324—350.
- Hu X M, Garzanti E, Wang J G, et al., 2016. The timing of India-Asia collision onset—facts, theories, controversies[J]. *Earth-Science Reviews*, 160: 264—299.
- Hu X M, Jansa L, Chen L, et al., 2010. Provenance of Lower Cretaceous Wölong Volcaniclastics in the Tibetan Tethyan Himalaya: implications for the final breakup of Eastern Gondwana[J]. *Sedimentary Geology*, 223(3/4): 193—205.
- Hu X M, Jansa L, Wang C S, 2008. Upper Jurassic–Lower Cretaceous stratigraphy in south-eastern Tibet: a comparison with the western Himalayas[J]. *Cretaceous Research*, 29(2): 301—315.
- Huang Y, Zhang L K, Liang W, et al., 2019. Petrogenesis of the Early Cretaceous Kada igneous rocks from Tethyan Himalaya: implications for initial break-up of eastern Gondwana[J]. *Geological Journal*, 54(3): 1294—1316.
- Ingalls M, Rowley D B, Currie B, et al., 2016. Large-scale subduction of continental crust implied by India–Asia mass-balance calculation[J]. *Nature Geoscience*, 9(11): 848—853.
- Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, et al., 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 262(3/4): 229—245.
- Jiang S H, Nie F J, Hu P, et al., 2006. An important spreading event of the Neo-Tethys Ocean during the late Jurassic and early Cretaceous: evidence from zircon U-Pb SHRIMP dating on diabase in Nagarze, southern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 80(4): 522—527.
- Kapp P, DeCelles P G, 2019. Mesozoic–Cenozoic geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen and working tectonic hypotheses[J]. *American Journal of Science*, 319(3): 159—254.
- Klein E M, Karsten J L, 1995. Ocean-ridge basalts with convergent-margin geochemical affinities from the Chile Ridge[J]. *Nature*, 374(6517): 52—57.
- Lassiter J C, DePaolo D J, 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: chemical and isotopic constraints[M]//Mahoney J J, Coffin M F. Large igneous provinces: continental, oceanic, and planetary flood volcanism. Washington: American Geophysical Union: 335—355.
- Li L, Sun F Y, Li B L, et al., 2018. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of No. I complex from the Shitoukengde Ni-Cu sulfide deposit in the eastern Kunlun Orogen, Western China: implications for the magmatic source, geodynamic setting and genesis[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(1): 106—126.
- Li P S, Li D, Hu Y L, et al., 2023. Brittle failures and vein formation in the evolution of the South Qiangtang accretionary complex in the Tibetan Plateau[J]. *Geological Journal*, 58(8): 3043—3062.
- Lian D Y, Liu F, Yang J S, et al., 2021. Fingerprints of the Kerguelen mantle plume in southern Tibet: evidence from Early Cretaceous magmatism in the Tethyan Himalaya[J]. *The Journal of Geology*, 129(2): 207—231.

- Liang J C, Bian W W, Jiao X W, et al., 2023. Geochronological results from the Zhela Formation volcanics of the Tethyan Himalaya and their implications for the breakup of eastern Gondwana[J]. *Scientific Reports*, 13(1): 20035.
- Liu G H, Einsele G, 1994. Sedimentary history of the Tethyan basin in the Tibetan Himalayas[J]. *Geologische Rundschau*, 83(1): 32—61.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34—43.
- Liu Z, Zhou Q, Lai Y, et al., 2015. Petrogenesis of the Early Cretaceous Laguila bimodal intrusive rocks from the Tethyan Himalaya: implications for the break-up of Eastern Gondwana[J]. *Lithos*, 236/237: 190—202.
- Ma L, Kerr A C, Wang Q, et al., 2018. Early Cretaceous (~ 140 Ma) aluminous A-type granites in the Tethyan Himalaya, Tibet: products of crust-mantle interaction during lithospheric extension[J]. *Lithos*, 300/301: 212—226.
- Maniar P D, Piccoli P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *GSA Bulletin*, 101(5): 635—643.
- Meng J, Gilder S A, Wang C S, et al., 2019. Defining the limits of Greater India[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(8): 4182—4191.
- Meschede M, 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 56(3/4): 207—218.
- Metcalfe I, 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1—33.
- Middlemost E A K, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3/4): 215—224.
- Montomoli C, Epard J L, Garzanti E, et al., 2023. Geological evolution of the Tethys Himalaya[M]//Cattin R, Epard J L. Himalaya, dynamics of a giant 2: tectonic units and structure of the Himalaya. London: ISTE Ltd.: 55—79.
- Moyen J F, Laurent O, 2018. Archaean tectonic systems: a view from igneous rocks[J]. *Lithos*, 302/303: 99—125.
- Mysen B O, 1979. Trace-element partitioning between garnet peridotite minerals and water-rich vapor: experimental data from 5 to 30 kbar[J]. *American Mineralogist*, 64(3/4): 274—287.
- Neal C R, Mahoney J J, Chazey III W J, 2002. Mantle sources and the highly variable role of continental lithosphere in basalt petrogenesis of the Kerguelen Plateau and Broken Ridge LIP: results from ODP Leg 183[J]. *Journal of Petrology*, 43(7): 1177—1205.
- Olierook H K H, Jiang Q, Jourdan F, et al., 2019. Greater Kerguelen large igneous province reveals no role for Kerguelen mantle plume in the continental breakup of eastern Gondwana[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 511: 244—255.
- Olierook H K H, Jourdan F, Merle R E, et al., 2016. Bunbury Basalt: Gondwana breakup products or earliest vestiges of the Kerguelen mantle plume?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 440: 20—32.
- Pan G T, Ding J, Wang L Q, et al., 2004. Geological map (1: 1500 000) of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and adjacent areas[M]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House.
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, et al., 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3—14.
- Pearce J A, 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[M]//Thorpe R S. Andesites: orogenic andesites and related rocks. Chichester: John Wiley and Sons: 525—548.
- Peccerillo A, Taylor S R, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81.
- Pei Q M, Ma S B, Li C H, et al., 2023. In-situ boron isotope and chemical composition of tourmaline in the Gyirong pegmatite, southern Tibet: implications for petrogenesis and magma source[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 1037727.
- Pei Q M, Zhang S T, Hayashi K I, et al., 2018. Permo-Triassic granitoids of the Xing'an-Mongolia segment of the Central Asian Orogenic Belt, Northeast China: age, composition, and tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 60(9): 1172—1194.
- Peng W X, Yang T S, Shi Y R, et al., 2022. Role of the Kerguelen mantle plume in breakup of eastern Gondwana: evidence from Early Cretaceous volcanic rocks in the eastern Tethyan Himalaya[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 588: 110823.
- Sciunnach D, Garzanti E, 2012. Subsidence history of the Tethys Himalaya[J]. *Earth-Science Reviews*, 111(1/2): 179—198.

- Şengör A M C, 1979. Mid-Mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications[J]. *Nature*, 279(5714): 590—593.
- Shervais J W, 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(1): 101—118.
- Shi Y R, Hou C Y, Anderson J L, et al., 2018. Zircon SHRIMP U-Pb age of Late Jurassic OIB-type volcanic rocks from the Tethyan Himalaya: constraints on the initial activity time of the Kerguelen mantle plume[J]. *Acta Geochimica*, 37(3): 441—455.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, Special Publications*, 42(1): 313—345.
- Tian Y H, Gong J F, Chen H L, et al., 2019. Early Cretaceous bimodal magmatism in the eastern Tethyan Himalayas, Tibet: indicative of records on precursory continental rifting and initial breakup of eastern Gondwana[J]. *Lithos*, 324/325: 699—715.
- Torsvik T H, Steinberger B, Cocks L R M, et al., 2008. Longitude: linking Earth's ancient surface to its deep interior[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 276(3/4): 273—282.
- Van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Dupont-Nivet G, et al., 2012. Greater India Basin hypothesis and a two-stage Cenozoic collision between India and Asia[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(20): 7659—7664.
- Van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Li S H, et al., 2019. Reconstructing Greater India: paleogeographic, kinematic, and geodynamic perspectives[J]. *Tectonophysics*, 760: 69—94.
- Vermeesch P, 2018. IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology[J]. *Geoscience Frontiers*, 9(5): 1479—1493.
- Wang R, Weinberg R F, Zhu D C, et al., 2022. The impact of a tear in the subducted Indian plate on the Miocene geology of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *GSA Bulletin*, 134(3/4): 681—690.
- Wang Y Y, Zeng L S, Asimow P D, et al., 2018. Early Cretaceous high-Ti and low-Ti mafic magmatism in Southeastern Tibet: insights into magmatic evolution of the Comei Large Igneous Province[J]. *Lithos*, 296/297/298/299: 396—411.
- Wang Z, Shi Y R, Yang T S, et al., 2023. Early activity of the Kerguelen mantle plume: geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of mafic dykes and sills from the Tethyan Himalaya[J]. *International Geology Review*, 65(4): 512—526.
- Wei Y S, Liang W X, Shang Y M, et al., 2017. Petrogenesis and tectonic implications of ~130 Ma diabase dikes in the western Tethyan Himalaya (western Tibet)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 143: 236—248.
- Weinberg R F, 2016. Himalayan leucogranites and migmatites: nature, timing and duration of anatexis[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(8): 821—843.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W, 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407—419.
- Winchester J A, Floyd P A, 1976. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 28(3): 459—469.
- Xia Y, Wang Q, Zhu D C, et al., 2020. Intermediate rocks in the Comei large igneous provinces produced by amphibole crystallization of tholeiitic basaltic magma[J]. *Lithos*, 374/375: 105731.
- Xu B Y, Li D P, Xu J F, et al., 2024. Tholeiitic magmatic record on an extensional passive continental margin: constraints from Late Paleozoic Woniusi rock associations in the Baoshan block, SE Tibetan Plateau[J]. *Lithos*, 468/469: 107517.
- Yang K, Dai J G, Shen J, et al., 2023. Episodic continental extension in eastern Gondwana during the Mid-Late Mesozoic: insights from geochronology and geochemistry of mafic rocks in the Tethyan Himalaya[J]. *International Geology Review*, 65(2): 278—295.
- Yin A, 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation[J]. *Earth-Science Reviews*, 76(1/2): 1—131.
- Yin A, Harrison T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211—280.
- Zeng Y C, Xu J F, Chen J L, et al., 2019. Breakup of Eastern Gondwana as inferred from the Lower Cretaceous Charong dolerites in the central Tethyan Himalaya, southern Tibet[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 515: 70—82.
- Zhang Z, Li G M, He X Z, et al., 2023. The evolution of Kerguelen mantle plume and breakup of eastern Gondwana: new

- insights from multistage Cretaceous magmatism in the Tethyan Himalaya[J]. *Gondwana Research*, 119: 68—85.
- Zhou Q, Liu Z, Lai Y, et al., 2018. Petrogenesis of mafic and felsic rocks from the Comei large igneous province, south Tibet: implications for the initial activity of the Kerguelen plume[J]. *GSA Bulletin*, 130(5/6): 811—824.
- 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(7): 583—586.
- Zhu D C, Mo X X, Pan G T, et al., 2008. Petrogenesis of the earliest Early Cretaceous mafic rocks from the Cona area of the eastern Tethyan Himalaya in south Tibet: interaction between the incubating Kerguelen plume and the eastern Greater India lithosphere?[J]. *Lithos*, 100(1/2/3/4): 147—173.
- Zhu D C, Pan G T, Mo X X, et al., 2005. SHRIMP U-Pb zircon dating for the dacite of the Sangxiu Formation in the central segment of Tethyan Himalaya and its implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(6): 563—568.
- Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, et al., 2017. The assembly of Rodinia: the correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB)[J]. *Precambrian Research*, 290: 32—48.