

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.062>



滇西点苍山新元古代辉长岩的识别及其大地构造意义

陈丛敏¹, 周云¹, 冯佐海^{1,2}, 李政林¹, 蔡瑾¹, 焦显杨¹, 蔡永丰^{1,2*}

1. 桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西桂林 541004

2. 桂林理工大学有色金属矿产勘查与资源高效利用省部共建协同创新中心, 广西桂林 541004

摘要: 滇西点苍山—哀牢山构造带保存有大量前寒武纪岩石学记录, 为探究扬子地块西南缘前寒武纪的构造演化历史提供了理想窗口。对点苍山地区出露的辉长岩进行了元素地球化学和同位素年代学研究。研究结果显示, 辉长岩的侵入年龄为 771~769 Ma, 表明点苍山地区发育新元古代基性岩浆活动。点苍山辉长岩的全碱(K_2O+Na_2O)含量变化介于 4.40%~4.49%, Na_2O/K_2O 值为 2.30~2.34, 属于钙碱性系列; 具有较高的 $Fe_2O_3^+$ (7.36%~7.50%)、 MgO (7.15%~7.30%) 和 $Mg^\#$ (69.46~69.52), 相对富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素。样品相对富集轻稀土, 轻重稀土元素分馏明显, Eu 显示轻微正异常 ($Eu/Eu^*=1.17\sim1.29$), 具有较高的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 (6.72~10.84)。综合有关数据资料表明, 辉长岩形成于弧后盆地环境, 来源于受俯冲带流体交代地幔楔橄榄岩的部分熔融。新元古代时期, 扬子地块西南缘发育弧—盆体系, 这一时期华南大陆的古地理位置处于 Rodinia 超大陆的边缘。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 辉长岩; 板块俯冲; 新元古代; 点苍山; 岩石学; 地球化学。

中图分类号: P543, P581, P597

文章编号: 1000-2383(2024)12-4434-16

收稿日期: 2023-10-11

Identification of Neoproterozoic Gabbro from Diancangshan in West Yunnan and Its Geotectonic Implication

Chen Congmin¹, Zhou Yun¹, Feng Zuohai^{1,2}, Li Zhenglin¹, Cai Jin¹, Jiao Xianyang¹, Cai Yongfeng^{1,2*}

1. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2. Collaborative Innovation Center for Exploration of Nonferrous Metal Deposits and Efficient Utilization of Resources in Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract: The Diancangshan-Ailaoshan tectonic belt in the West Yunnan has developed numerous Precambrian rocks and thus provides an ideal window for revealing the Precambrian tectonic history of the southwestern margin of the Yangtze block. In this study, elemental geochemistry and isotopic geochronology of gabbro in the Diancangshan area are presented. The results show that the intrusion age of the gabbro is 771–769 Ma, indicating that Neoproterozoic mafic magmatic activity developed in the Diancangshan area. The gabbro of the Diancangshan area exhibits a variation in total alkali content (K_2O+Na_2O) of 4.40%–4.49%, with low Na_2O/K_2O ratios (2.30–2.34), and thus belongs to the calc-alkaline series. The samples have relatively high contents of $Fe_2O_3^+$ (7.36%–7.50%), MgO (7.15%–7.30%), and $Mg^\#$ (69.46–69.52). They are characterized by

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 42072259, 41502180)。

作者简介: 陈丛敏 (1997–), 女, 硕士研究生, 研究方向为矿物学、岩石学、矿床学。ORCID: 0009-0003-8522-749X. E-mail: ccm18285364807@163.com

*** 通讯作者:** 蔡永丰, ORCID: 0000-0002-0110-1335. E-mail: caiyongfeng@glut.edu.cn

引用格式: 陈丛敏, 周云, 冯佐海, 李政林, 蔡瑾, 焦显杨, 蔡永丰, 2024. 滇西点苍山新元古代辉长岩的识别及其大地构造意义. 地球科学, 49 (12): 4434–4449.

Citation: Chen Congmin, Zhou Yun, Feng Zuohai, Li Zhenglin, Cai Jin, Jiao Xianyang, Cai Yongfeng, 2024. Identification of Neoproterozoic Gabbro from Diancangshan in West Yunnan and Its Geotectonic Implication. *Earth Science*, 49(12): 4434–4449.

enrichment in large ion lithophile elements (LILE) such as Rb, Ba, and Sr, and depletion in high field strength elements (HFSE) such as Nb, Ta, and Ti. The samples display a relative enrichment of light rare earth elements with a pronounced fractionation between light and heavy rare earth elements, and have slightly positive anomalies of Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.17 - 1.29$). They have depleted zircon Hf isotopic compositions with positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of 6.72–10.84. Comprehensive data show that the gabbro formed in back-arc basin environment and is the product of partial melting of mantle wedge peridotite that was metasomated by subducted fluid. During the Neoproterozoic, arc-basin system was developed at the southwestern Yangtze Block, and the South China located at the margin of the Rodinia Supercontinent during this period.

Key words: zircon U-Pb geochronology; gabbro; plate subduction; Neoproterozoic; Diancangshan; petrology; geochemistry.

0 引言

新元古代是地球演化历史的关键时期, Rodinia 超大陆在这一时期发生了聚合和裂解 (Hoffman, 1991; Nishiya *et al.*, 2001). 已有的研究显示, 华南板块保存了大量新元古代时期的构造热事件, 扬子地块是华南板块的重要组成部分, 其周缘的造山带/构造带中广泛出露新元古代岩浆岩 (图 1), 被众多学者认为其在探索 Rodinia 超大陆的形成与演化过程中起着关键作用 (李献华等, 2012), 并提出了

地幔柱模式 (Li *et al.*, 1999)、板块深俯冲模式 (Zhou *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2017) 和板块—裂谷模式 (Zheng *et al.*, 2008) 等多种不同的动力学成因机制. 相较于扬子地块北缘、西缘和东南缘, 其西南缘新元古代岩浆岩的研究相对薄弱, 不利于完整认识新元古代时期扬子地块的构造演化特征.

点苍山—哀牢山构造带位于云南省西南部, 是扬子地块西南缘的重要组成部分. 作为分隔印支地块和扬子地块的重要构造分界线, 该构造带岩浆活动频繁. 前人对带内古生代特提斯演化和新生代大

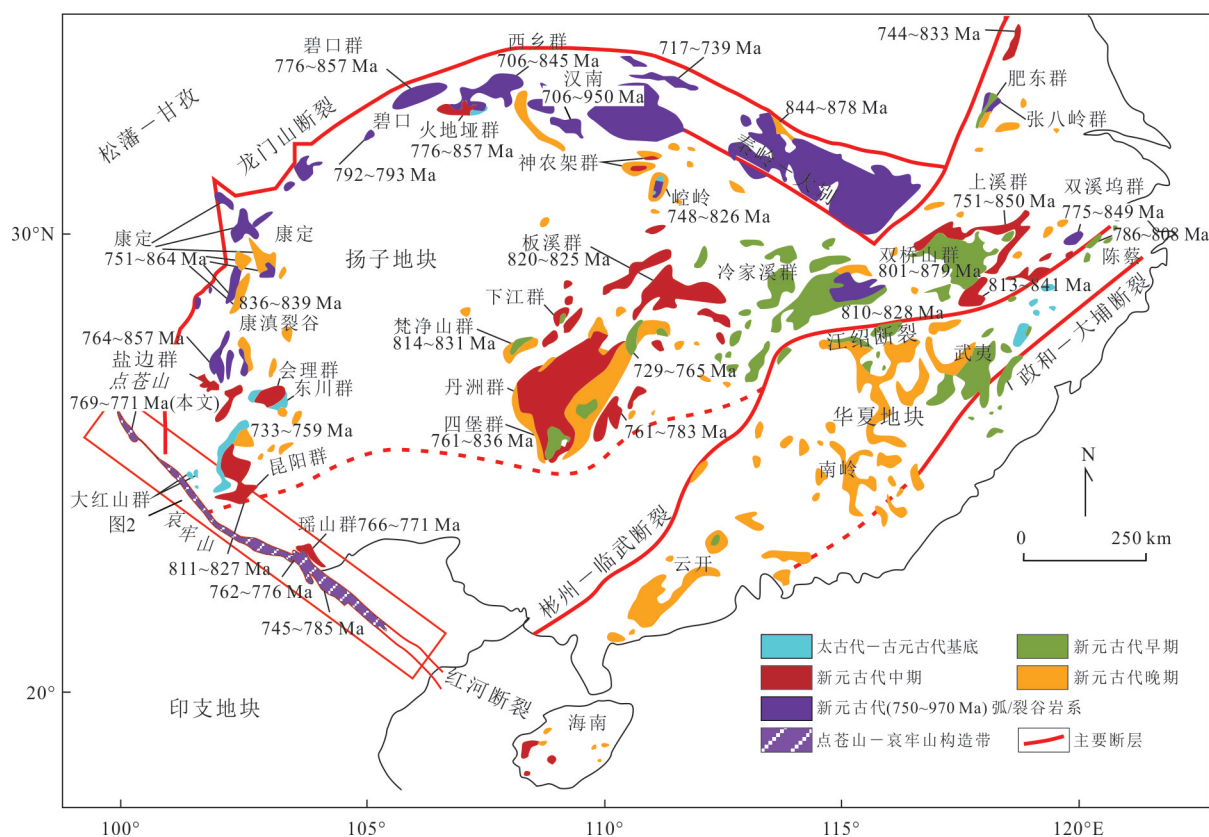


图 1 扬子地块周缘新元古代岩浆岩分布地质简图

Fig.1 Simplified geotectonic map showing the distribution of Neoproterozoic magmatic rocks of the Yangtze block and its surrounding areas

据 Cai *et al.* (2014) 修改, 年龄数据来自附表 1

规模走滑剪切活动引发的岩浆作用开展了大量研究(Chung *et al.*, 1997; Deng *et al.*, 2014),而对构造带内新元古代岩浆活动的关注相对较少.已有的新元古代岩浆岩报道多集中于中酸性岩,如花岗质岩石(刘俊来等, 2008; Chen *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2022)、闪长岩(戚学祥等, 2010)等,这些岩石的形成时代被限定在 872~701 Ma,而整个构造带内,尤其是北段的点苍山地区目前少有新元古代基性岩类的研究资料.应当注意的是,花岗类岩石的地球化学特征通常易受到其源区性质和岩浆形成与演化过程等多种因素影响,对构造环境的指示往往不够明确,相较之下,来源于幔源岩浆的基性岩更能作为反映地幔组成、结构及其构造背景的有效指标(李献华等, 2012).因此,点苍山—哀牢山构造带内基性岩数据资料的缺少制约了对新元古代时期扬子地块构造演化特征的正确认识.鉴于此,本文选取点苍山—哀牢山构造带北段点苍山地区的辉长岩为研究对象,对其开展 U-Pb 年代学和元素地球化学分析测试,揭示了其形成时代、讨论了其岩石成因及构造背景,在此基础上进一步探讨了扬子地块新元古代时期构造演化的动力学机

制,为深入理解前寒武纪时期华南大陆的构造演化特征提供了新的理论依据.

1 区域地质背景与样品描述

云南点苍山—哀牢山构造带在大地构造位置上位于扬子地块西南缘,其西北端起始于点苍山,向东南延伸进入越南,总体呈 NW-SE 向展布 800 km 有余,宽为 20~30 km,分布面积约 3 800 km² (图 2a).点苍山—哀牢山构造带经历了新元古代岩浆作用、古生代特提斯演化、始新世地壳重熔和渐新世大规模左行走滑等多次构造活动,记录了丰富的大地构造演化历史,形成了包含多个时期地质单元的复合构造带(Chung *et al.*, 1997; 刘俊来等, 2011; Deng *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2017),主要包括早石炭世—早三叠世混杂岩带、晚二叠世—早三叠世裂谷带、新生代走滑剪切带和晚太古代—新元古代深变质岩系(刘俊来等, 2011).构造带内的岩石发生了绿片岩相—麻粒岩相变质作用,普遍存在强烈的变质变形现象(刘俊来等, 2011).点苍山—哀牢山构造带两侧变质程度明显不同,以哀牢山断裂为

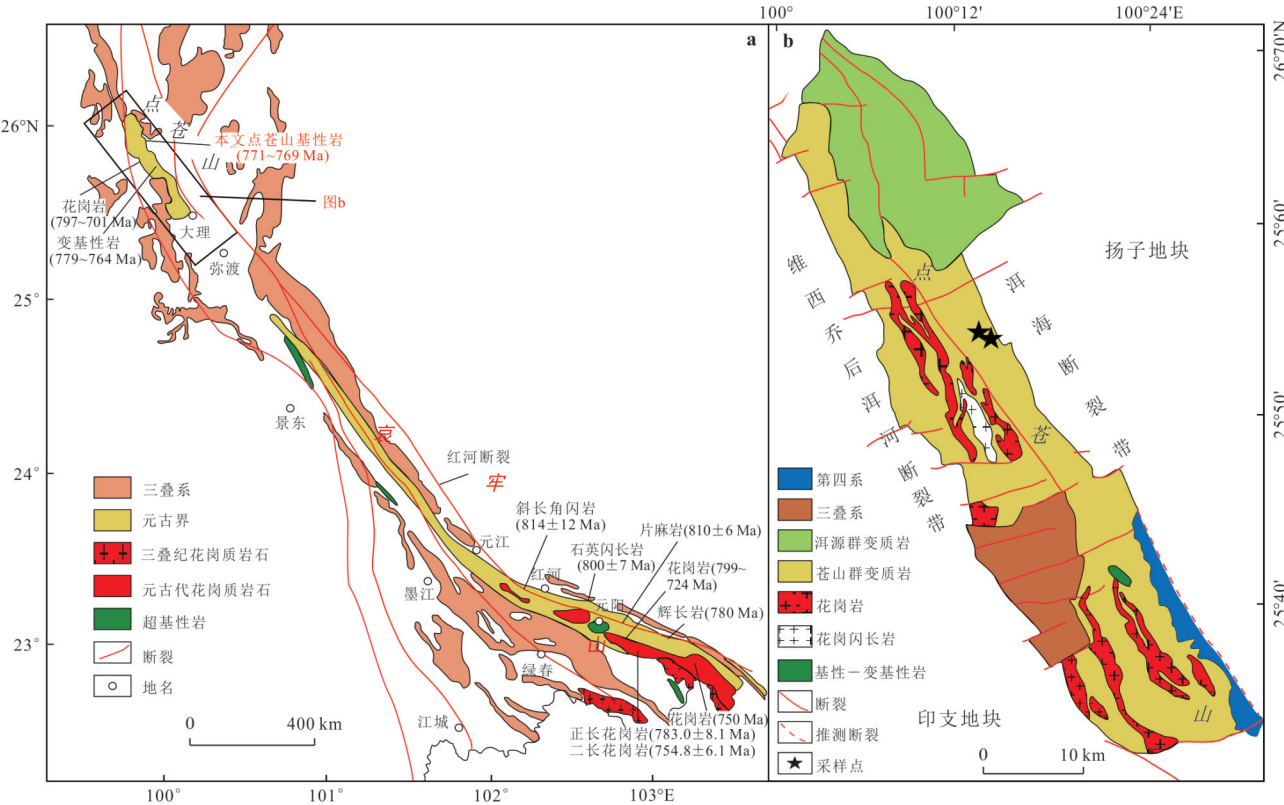


图 2 点苍山—哀牢山构造带(a)及点苍山地区地质简图(b)
Fig.2 Simplified geological maps of the Diancangshan-Ailaoshan tectonic belt (a) and Diancangshan area (b)
据麻艺超等(2021)修改,年龄数据来自附表 1

界,东侧为低压高温变质带,西侧为高压低温变质带.在哀牢山断裂与红河断裂之间分布有一套NW-SE向的元古代地层,前人将其划分为苍山群、哀牢山群以及瑶山群(麻艺超等,2021).

点苍山变质带位于云南省大理市西侧,地处甘孜—理塘构造带与金沙江构造带交汇处(刘俊来等,2008),南起大理点苍山,北至洱源罗平山,是哀牢山构造带的北延部分,在地理分布上与弥渡—下关的中生界未变质地层南北相对.该变质带主要被乔后—剑川断裂、洱海断裂、大合江断裂等断裂所围限,组成一构造混杂岩体(即前人提出的“苍山群”).哀牢山断裂向北纵贯点苍山变质带,致使点苍山变质岩发生强烈塑性形变,糜棱岩化明显,变形变质特征与哀牢山深变质岩系相似(李宝龙等,2008).点苍山变质带长约80 km,宽为8~12 km,总体呈NNW-SSE向展布,1:5万区域调查成果将点苍山变质带划分为古元古代沟头箐岩群、中元古代

苍山岩群以及新元古代罗平山岩组(李宝龙等,2008).变质带中部出露古—中元古代角闪岩—麻粒岩相深变质岩,西南缘出露三叠系浅变质岩(图2b),主要岩石类型为圆球状、条带状和条痕状黑云母长英质片麻岩、斜长角闪岩、大理岩和云母片岩等(刘俊来等,2008).

本文研究的基性岩样品采自点苍山东侧,岩性为辉长岩,呈脉状侵入于苍山群长英质片麻岩中(图3a).岩石手标本呈灰黑色,中粒—粗粒结构,块状构造(图3b);显微镜下可观察到较典型的辉长结构,其主要矿物由斜长石(30%~45%)、角闪石(30%~35%)、辉石(10%~20%)组成,副矿物主要包括磷灰石、锆石、钛铁矿、磁铁矿等.其中,斜长石多呈半自形,局部可见聚片双晶,部分发生明显的泥化和绿帘石化;辉石多呈自形一半自形柱状,二组近直交解理明显(图3c);角闪石主要呈黄褐色,半自形柱状,多色性显著,部分发生绿泥石化(图3d).

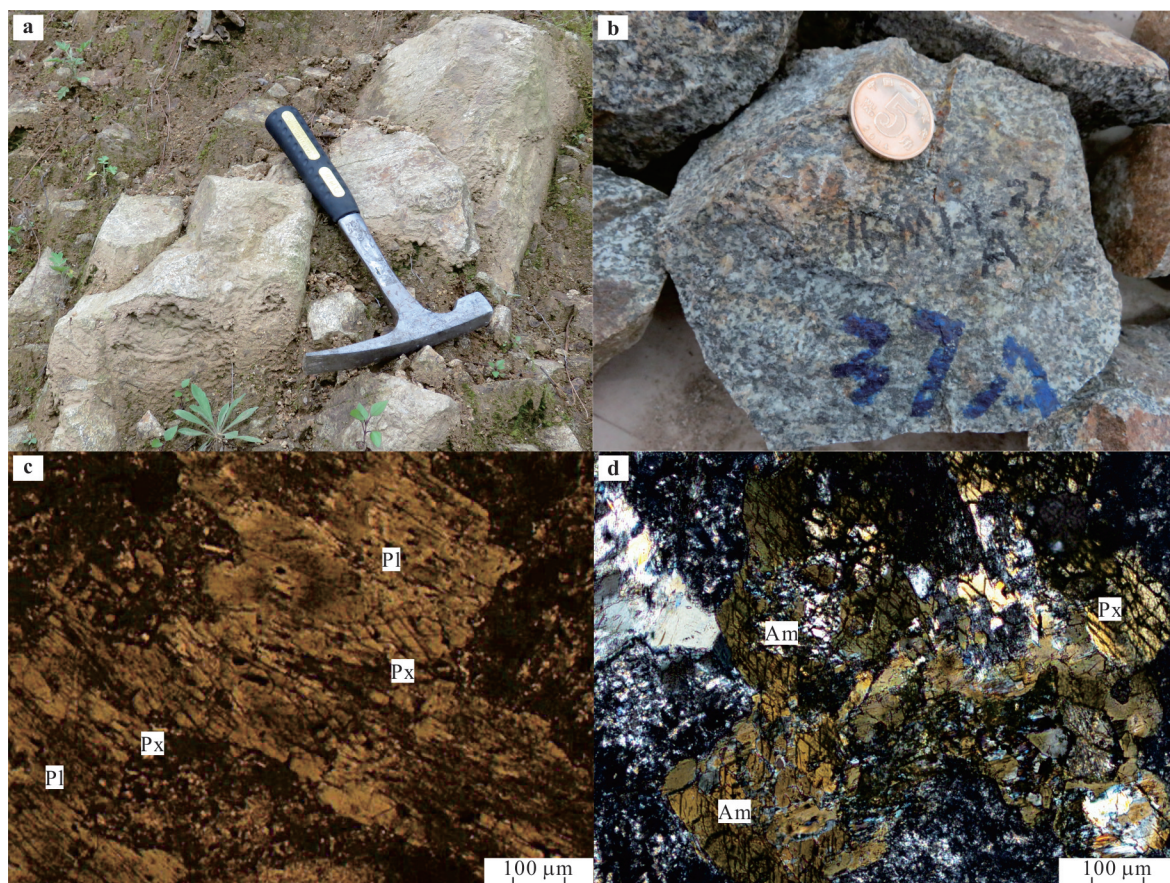


图3 点苍山辉长岩野外照片(a)、手标本照片(b)和显微照片(c,d)

Fig.3 Field photo (a), hand specimens (b), and photomicrographs (c, d) of the gabbro from the Diancangshan area

Pl. 斜长石; Am. 角闪石; Px. 辉石

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 年代学

锆石的挑选和制靶由重庆宇劲科技有限公司完成, 锆石透反射照片和阴极发光图像拍摄以及锆石 U-Pb 年龄测定于桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成. 样品在分析前通过透反射照片和阴极发光图像选好分析点, 再利用 LA-ICP-MS (激光—电感耦合等离子质谱仪) 对其进行 U-Pb 同位素测定. 本次测试所用仪器型号为 Agilent-7500cx, 所用激光束斑直径为 32 μm , 使用 He 作为载气, 采用国际标准锆石 91500 (1 064 Ma) 和标准硅酸盐玻璃 NIST SRM610 分别校正锆石 U-Pb 同位素比值和计算元素含量. 实验测试所得数据通过 ICPMSDataCal12.2 软件进行分析、处理. 锆石 U-Pb 年龄谐和图的绘制、加权平均年龄的计算采用国际标准程序 Isoplot4.15 进行, 单个数据点误差均为 1σ .

2.2 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素组成分析在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成, 使用配备 193 nm 激光采样系统的多接收电感耦合等离子体质谱仪 (LA-MC-ICPMS) 进行分析测试. 激光束斑直径大小设置为 45 μm , 激光脉冲频率为 8~10 Hz, 激光烧蚀时间为 26 s, 激光束能量为 100 MJ, 以 He 气作为载气. 采用锆石标样 NIST610 在测量过程中作外部标样. 基性岩的亏损地幔模式年龄 (T_{DM}) 参照 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.283\ 25$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM0}}=0.038\ 40$ 计算.

2.3 全岩主量、微量元素

样品主量和微量元素测试在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室进行. 主量元素使用 X 射线荧光光谱法 (X-ray fluorescence spectrometer, XRF). 首先将样品放入马弗炉中恒温 1 h, 以去除吸附水和杂质, 之后取出样品计算加热前后的重量值差即得到样品烧失量. 将测完烧失量的样品准确称取 0.5 g 样品与 5 g 四硼酸锂混匀, 而后将混合的四硼酸锂和样品粉末全部转移到铂金坩埚中, 分散加入 6 滴溴化铵 (脱模剂), 完成后将铂金坩埚置于已预热好 (1 150 $^{\circ}\text{C}$) 的 XRF 熔样机中熔融. 样品熔化后快速取出并晃动铂金坩埚使熔体均匀分布至无气泡, 待熔体降温成型后取出送往实验室测试分析.

样品微量元素使用电感耦合等离子质谱法 (ICP-MS). 称取 40 mg 样品、2 个标样、1 个空白样

和 1 个平行样, 加入 2 mL 纯化浓 HNO_3 + 浓 HF 混合酸 (1:3), 封盖超声震荡 30 min, 于 100 $^{\circ}\text{C}$ 电热板上保温 12 h, 开盖蒸干. 再次加入 2 mL 上述混合酸, 密封后于 190 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内加热 48 h, 冷却后取出, 开盖置于电热板上加入 0.25 mL HClO_4 , 调至 150 $^{\circ}\text{C}$ 完全蒸干. 而后加入 5 mL 4 N 纯化 HNO_3 , 密封后于 150 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内加热 12 h, 冷却后取出置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 电热板上保温, 快速以 2% 纯化 HNO_3 稀释至 500 倍重量. 用离心管取 2 g 上述溶液, 加入 6 g 2% 纯化 HNO_3 摇匀, 最后进行 ICP-MS 测试.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

样品的锆石 U-Pb 年代学分析结果见表 1. 用于定年的锆石绝大多数呈柱状, 颜色以浅棕、浅褐色为主, 呈透明—半透明状. 锆石长度约 100 μm , 在阴极发光图像 (CL) 上可以看出, 锆石具有典型的岩浆生长振荡环带 (图 4), 其 Th/U 值较高, 绝大多数 >0.5 , 表明是典型的岩浆成因锆石.

样品 16MH37A: 共选取了 20 个锆石颗粒进行分析, 结果显示其 Th、U 含量分别为 57×10^{-6} ~ $1\ 464 \times 10^{-6}$ 和 106×10^{-6} ~ $1\ 086 \times 10^{-6}$, Th/U 值范围为 0.50~1.35. 所有分析点均落在谐和线上, 年龄较为集中 (图 4a), 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 769 ± 3 Ma ($N=20$, MSWD=0.32), 代表了该样品的形成年龄.

样品 16MH37B: 共选取了 20 个锆石颗粒进行分析, 显示其 U 含量为 50×10^{-6} ~ 365×10^{-6} , Th 含量为 37×10^{-6} ~ 607×10^{-6} , Th/U 值范围为 0.43~1.66. 所有分析点均落在谐和线上 (图 4b), 且年龄较为集中, 给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 771 ± 3.5 Ma ($N=20$, MSWD=0.51), 代表了该样品的侵入年龄.

3.2 锆石 Hf 同位素

对已进行锆石 U-Pb 年龄分析的样品 16MH37A 中的 10 颗代表性锆石开展了微区原位 Hf 同位素测定, 测定结果见表 2. 样品的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 498~0.282 610, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值, 为 6.72~10.84 (表 2), 对应的二阶段模式年龄 T_{DMH2} 为 944~1 148 Ma.

3.3 岩石地球化学特征

点苍山辉长岩样品的主量、微量和稀土元素测试结果见表 3. 辉长岩样品 SiO_2 含量为 49.75%~

表 1 点苍山辉长岩锆石 U-Pb 同位素测试结果															
Table 1 Zircon U-Pb isotopic analyses results of the gabbro from the Diancangshan area															
点号	元素(10^{-6})		Th/ U	同位素比值						年龄(Ma)					
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$				
样品 16MH37A															
01	234	250	0.94	0.064 6	0.001 8	1.125 0	0.030 8	0.126 9	0.001 5	761	59	765	15	770	9
02	149	209	0.71	0.064 1	0.001 8	1.118 5	0.031 9	0.126 7	0.001 3	744	258	762	15	769	7
03	216	208	1.04	0.063 2	0.003 0	1.112 8	0.057 6	0.127 5	0.002 1	722	102	760	28	774	12
04	213	399	0.53	0.063 6	0.001 4	1.114 6	0.025 3	0.127 0	0.001 1	729	46	760	12	771	6
05	161	278	0.58	0.064 5	0.007 1	1.122 0	0.120 2	0.126 2	0.001 9	761	233	764	58	766	11
06	283	433	0.65	0.065 3	0.001 1	1.145 2	0.020 9	0.127 4	0.001 2	783	35	775	10	773	7
07	1 464	1 086	1.35	0.063 7	0.001 9	1.097 3	0.032 4	0.124 9	0.001 0	731	63	752	16	759	6
08	436	439	0.99	0.064 7	0.002 0	1.129 7	0.031 7	0.127 0	0.001 2	765	65	768	15	771	7
09	96	110	0.87	0.065 5	0.001 9	1.130 2	0.032 4	0.126 8	0.001 5	791	59	768	15	769	9
10	777	796	0.98	0.066 3	0.001 3	1.160 6	0.033 0	0.126 5	0.002 4	817	41	782	16	768	14
11	299	395	0.76	0.066 2	0.001 2	1.162 4	0.022 8	0.127 2	0.000 9	813	38	783	11	772	5
12	256	418	0.61	0.064 4	0.001 3	1.123 7	0.021 0	0.126 7	0.000 8	767	38	765	10	769	5
13	67	127	0.52	0.062 3	0.006 9	1.072 4	0.104 8	0.127 2	0.003 6	683	239	740	51	772	20
14	214	426	0.50	0.064 9	0.002 8	1.134 9	0.044 8	0.127 1	0.001 7	772	91	770	21	771	9
15	405	720	0.56	0.064 9	0.001 8	1.136 5	0.031 9	0.126 9	0.001 5	772	55	771	15	770	9
16	179	192	0.93	0.063 6	0.002 2	1.109 5	0.040 9	0.126 8	0.002 1	728	73	758	20	769	12
17	295	313	0.94	0.067 3	0.002 2	1.174 8	0.038 2	0.127 0	0.001 6	856	73	789	18	771	9
18	84	121	0.69	0.062 9	0.003 8	1.093 6	0.065 9	0.127 0	0.002 6	702	130	750	32	770	15
19	120	142	0.84	0.062 0	0.002 7	1.070 6	0.045 3	0.126 7	0.002 1	672	94	739	22	769	12
20	57	106	0.54	0.061 5	0.004 0	1.065 9	0.067 3	0.126 8	0.003 0	657	132	737	33	770	17
样品 16MH37B															
01	385	312	1.23	0.067 4	0.002 5	1.076 4	0.029 3	0.126 7	0.001 8	850	78	742	14	769	10
02	49	73	0.67	0.065 0	0.003 5	1.107 8	0.045 1	0.127 8	0.001 5	776	114	757	22	776	8
03	37	50	0.75	0.064 7	0.004 9	1.113 8	0.065 1	0.128 1	0.002 2	765	159	760	31	777	13
04	270	199	1.36	0.069 7	0.002 3	1.144 2	0.030 5	0.125 9	0.001 2	920	69	775	14	764	7
05	607	365	1.66	0.066 9	0.002 1	1.115 3	0.030 9	0.126 1	0.001 4	835	67	761	15	765	8
06	86	111	0.78	0.060 9	0.003 7	1.118 2	0.037 1	0.126 6	0.001 6	635	134	762	18	768	9
07	68	111	0.62	0.062 6	0.003 0	1.096 3	0.042 0	0.130 0	0.001 7	694	104	752	20	788	10
08	49	64	0.77	0.065 2	0.004 8	1.122 6	0.065 2	0.126 3	0.002 0	789	156	764	31	767	11
09	74	175	0.43	0.069 1	0.008 6	1.145 0	0.060 6	0.124 8	0.002 6	902	259	775	29	758	15
10	86	77	1.11	0.060 7	0.005 4	1.085 3	0.063 6	0.129 3	0.002 4	628	188	746	31	784	13
11	205	154	1.33	0.063 4	0.004 5	1.133 5	0.037 2	0.126 4	0.001 7	724	150	769	18	768	10
12	142	134	1.06	0.068 1	0.002 8	1.127 5	0.035 3	0.128 1	0.001 4	872	92	767	17	777	8
13	58	103	0.56	0.066 2	0.003 4	1.110 7	0.040 8	0.127 5	0.001 4	813	107	759	20	774	8
14	106	146	0.73	0.067 7	0.003 8	1.097 1	0.044 9	0.127 0	0.001 5	859	117	752	22	771	9
15	121	113	1.08	0.067 5	0.004 0	1.096 1	0.047 9	0.127 5	0.001 3	854	124	751	23	774	7
16	187	150	1.25	0.062 8	0.004 4	1.071 0	0.046 2	0.127 2	0.001 3	702	155	739	23	772	7
17	242	180	1.35	0.065 1	0.003 6	1.083 7	0.044 2	0.130 1	0.001 3	776	115	745	22	789	8
18	81	96	0.85	0.061 9	0.003 7	1.083 3	0.040 5	0.128 7	0.001 5	733	97	745	20	780	9
19	333	253	1.32	0.066 7	0.002 7	1.100 7	0.034 5	0.127 1	0.001 5	828	83	754	17	771	8
20	119	125	0.96	0.068 9	0.007 9	1.170 0	0.042 1	0.126 0	0.003 3	898	239	787	20	765	19

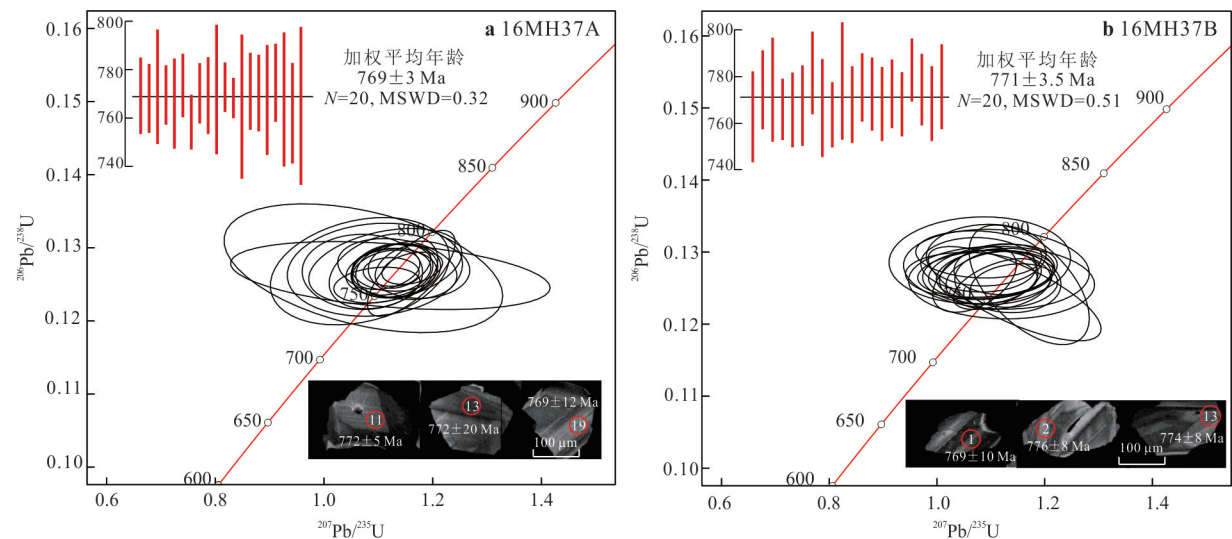


图 4 点苍山辉长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图及其代表性锆石阴极发光图像

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams and representative CL images for the gabbro from the Diancangshan area

表 2 点苍山辉长岩锆石 Hf 同位素测试结果

Table 2 Zircon Hf isotopic analyses results of the gabbro from the Diancangshan area

分析点	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	年龄(Ma)	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DMHf2}}(\text{Ma})$
01	0.018 905	0.000 847	0.282 610	0.000 018	0.282 598	770	10.84	944
02	0.023 133	0.001 037	0.282 498	0.000 022	0.282 483	768	6.72	1 148
03	0.013 724	0.000 619	0.282 577	0.000 019	0.282 568	761	9.59	999
04	0.021 500	0.001 081	0.282 564	0.000 018	0.282 549	762	8.92	1 033
05	0.018 658	0.000 889	0.282 565	0.000 021	0.282 552	757	8.94	1 028
06	0.022 564	0.001 137	0.282 567	0.000 027	0.282 550	786	9.49	1 025
07	0.050 668	0.002 172	0.282 567	0.000 017	0.282 536	769	8.62	1 054
08	0.036 675	0.001 507	0.282 577	0.000 020	0.282 555	786	9.67	1 016
09	0.023 825	0.001 008	0.282 587	0.000 018	0.282 572	786	10.27	986
10	0.024 894	0.001 173	0.282 564	0.000 021	0.282 547	781	9.29	1 031

50.46%，TiO₂ 含量为 0.81%~0.83%，Al₂O₃ 含量为 18.24%~18.68%，Fe₂O₃⁺ 含量为 7.36%~7.50%，MgO 含量为 7.15%~7.30%，CaO 含量为 8.65%~8.81%，Mg[#] 较高，为 69.46~69.52，全碱 (K₂O+Na₂O) 含量变化于 4.40%~4.49%，Na₂O/K₂O 值为 2.30~2.34。其里特曼指数为 2.43~2.55，整体属于钙碱性系列岩石(图 5)。

微量元素分析结果显示，辉长岩样品富集 LILE(大离子亲石元素，Rb、Ba、Sr)，相对富集 Zr、Hf，亏损 HFSE(高场强元素，Th、Nb、Ta、Ti)。总体展现出类似 M 型的多峰谷形态，与 IAB(岛弧玄武岩) 较为接近(图 6a)。样品的稀土总量为 51.85×10⁻⁶~53.57×10⁻⁶，远高于原始地幔(7.43×10⁻⁶)，与 N-MORB(正常型洋中脊玄武岩)(39.11×10⁻⁶)较为

接近。LREE/HREE 为 9.57~10.13，LREE/MREE 为 5.57~5.79，MREE/HREE 为 1.67~1.76，(La/Yb)_N 值为 3.44~3.75，(La/Sm)_N 为 1.99~2.09，(Gd/Yb)_N 为 1.43~1.57，说明样品的轻、重稀土发生了强烈分馏，轻、中稀土有微弱分馏，中、重稀土无明显分馏。Eu 显示出轻微正异常(Eu/Eu^{*}=1.17~1.29)，可能与斜长石的堆晶有关。在稀土元素配分图上，样品总体呈现出轻稀土相对富集，重稀土相对亏损的右倾型(图 6b)。

4 讨论

4.1 滇西点苍山—哀牢山构造带新元古代岩浆作用时序特征

前人研究显示，扬子地块周缘地区普遍发育新

表 3 点苍山辉长岩主量(%)和微量(10^{-6})元素测试结果Table 3 Analytical results of major (%) and trace elements (10^{-6}) of the gabbro from the Diancangshan area

样品号	16MH37A	16MH37B	16MH37C	16MH37D	16MH37E
SiO ₂	50.21	49.75	50.15	50.46	50.46
TiO ₂	0.83	0.81	0.81	0.82	0.82
Al ₂ O ₃	18.68	18.24	18.45	18.50	18.50
Fe ₂ O ₃ ^T	7.50	7.36	7.40	7.45	7.44
MgO	7.32	7.15	7.24	7.29	7.27
CaO	8.81	8.65	8.74	8.76	8.74
K ₂ O	1.35	1.33	1.34	1.34	1.35
Na ₂ O	3.14	3.07	3.12	3.13	3.11
MnO	0.15	0.14	0.15	0.14	0.14
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
烧失量	2.53	2.57	2.50	2.51	2.53
总量	100.55	99.10	99.93	100.43	100.39
Mg [#]	69.46	69.36	69.51	69.52	69.49
La	8.20	8.40	8.30	8.00	8.00
Ce	17.50	18.30	17.80	17.60	17.40
Pr	2.44	2.39	2.38	2.38	2.40
Nd	10.30	10.50	10.50	10.20	10.20
Sm	2.47	2.54	2.53	2.53	2.49
Eu	1.12	1.05	1.08	1.10	1.05
Gd	2.86	2.94	2.73	2.70	2.79
Tb	0.44	0.45	0.46	0.44	0.47
Dy	2.92	2.84	2.91	2.96	2.82
Ho	0.57	0.59	0.61	0.55	0.56
Er	1.59	1.58	1.69	1.65	1.63
Tm	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25
Yb	1.54	1.51	1.51	1.45	1.57
Lu	0.23	0.24	0.24	0.23	0.22
V	160	156	186	178	163
Cr	360	370	360	370	360
Ni	78.58	78.58	78.58	78.58	78.58
Ga	17.60	18.30	17.70	17.80	17.60
Rb	33.40	34.30	34.00	34.40	33.50
Sr	379	387	383	386	377
Y	17.00	17.30	17.30	17.30	17.00
Zr	124	128	125	123	118
Nb	3.40	3.50	3.50	3.40	3.50
Cs	1.22	1.26	1.33	1.24	1.24
Ba	320	326	326	323	322
Hf	3.30	3.40	3.20	3.30	2.90
Ta	0.30	0.30	0.30	0.20	0.30
Th	0.37	0.37	0.35	0.37	0.37
U	0.12	0.11	0.10	0.14	0.12
ΣREE	52.42	53.57	52.98	52.04	51.85
LREE	40.91	42.13	41.51	40.71	40.49
MREE	7.34	7.28	7.18	7.20	7.13

续表					
样品号	16MH37A	16MH37B	16MH37C	16MH37D	16MH37E
HREE	4.17	4.16	4.29	4.13	4.23
LREE/HREE	9.81	10.13	9.68	9.86	9.57
LREE/MREE	5.57	5.79	5.78	5.65	5.68
MREE/HREE	1.76	1.75	1.67	1.74	1.69
(La/Yb) _N	3.59	3.75	3.71	3.72	3.44
(La/Sm) _N	2.09	2.08	2.06	1.99	2.02
(Gd/Yb) _N	1.50	1.57	1.46	1.50	1.43
Eu/Eu*	1.29	1.17	1.25	1.28	1.21

元古代岩浆活动,年代学数据统计显示这些岩浆岩年龄多集中在 900~700 Ma(附表 1),且普遍具有富集轻稀土和 LILE,亏损重稀土和 HFSE 的地球化学特征(Chen *et al.*, 2017; Ao *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020; 刘佩雯等, 2023; 杨振宁等, 2023).滇西点苍山—哀牢山构造带也相继识别出了一系列新元古代岩浆作用信息,如哀牢山群发育的酸性岩(833~724 Ma)、中性岩(810~782 Ma)以及基性—变基性岩(814~766 Ma);瑶山群保存的花岗质岩石(801~748 Ma)和变基性岩(766~711 Ma)(附表 1).近些年来,点苍山地区也保存有新元古代岩浆作用记录,如在苍山群识别出的酸性岩(797~701 Ma)(Li *et al.*, 2018)和变基性岩(779~764 Ma)(麻艺超等, 2021).本文在点苍山地区识别出的辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果为 771~769 Ma,表明点苍山地区发育新元古代基性岩浆活动.上述数据表明,滇西点苍山—哀牢山构造带与扬子地块其他周缘地区相似,亦广泛发育新元古代岩浆活动,形成了从酸性岩到基性岩等不同的岩石类型,形成时代主要集中在 870~720 Ma.

4.2 源区特征

从样品微量元素蛛网图可以看出,点苍山辉长岩明显富集 LILE(Rb、Ba、Sr),亏损 HFSE(Th、Nb、Ta)(图 6a),这些地球化学特征可能与大洋俯冲板片熔体(流体)的交代或地壳物质的混染作用有关(Cai *et al.*, 2020).受到大陆地壳物质或岩石圈混染作用的岩石往往会表现出俯冲带岩石的地球化学特征,从而易将大陆玄武岩误判成岛弧玄武岩(Ernst *et al.*, 2005).若幔源岩浆经历了地壳物质混染作用,其对应元素含量或比值必然会发生变化,高(Th/Nb)_N值(远大于 1)和(La/Sm)_N值(>4.5)通常被认为是识别地壳物质混染作用的微量元素指标(Xu *et al.*, 2016).点苍山辉长岩具有较低的(Th/

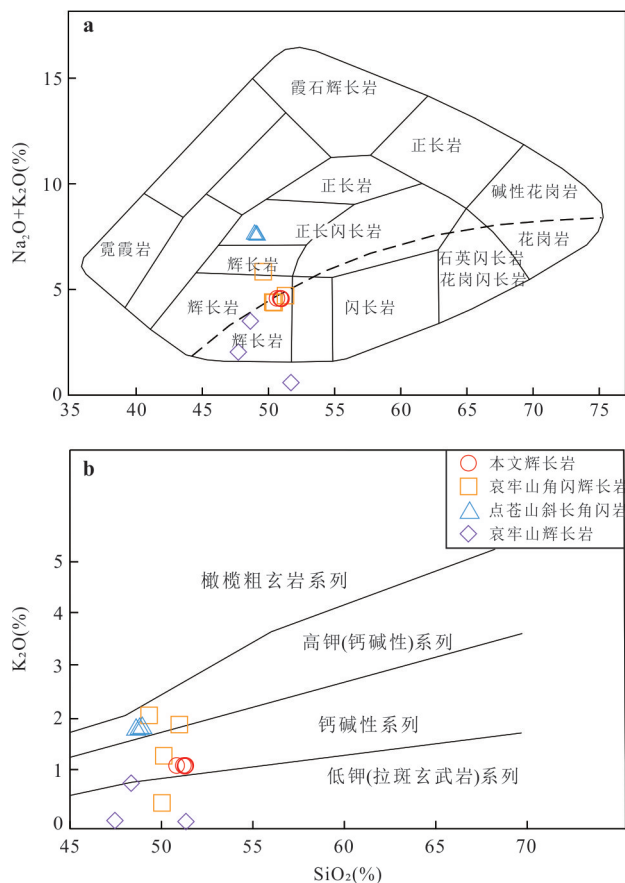


图 5 点苍山辉长岩 TAS 图解(a)和 SiO₂-K₂O 图解(b)
Fig.5 Plots of TAS (a) and SiO₂-K₂O (b) of the gabbro from the Diancangshan area

点苍山斜长角闪岩、哀牢山角闪辉长岩和辉长岩数据分别引自麻艺超等(2021)、戚学祥等(2010)和 Cai *et al.* (2020)

Nb)_N值(0.84~0.91)和(La/Sm)_N值(2.04~2.15),表明该样品受到地壳物质混染影响微弱.前人研究表明,幔源岩浆通常具有较高的 Nb/U 值(47)(Sun and McDonough, 1989),而大陆地壳具有较低的 Nb/U 值(~12)(Taylor and McLennan, 1995),本文研究的辉长岩样品 Nb/U 值为 24.29~35.00,平均值为 29.72,明显高于大陆地壳.在图 7 上,样品未见明

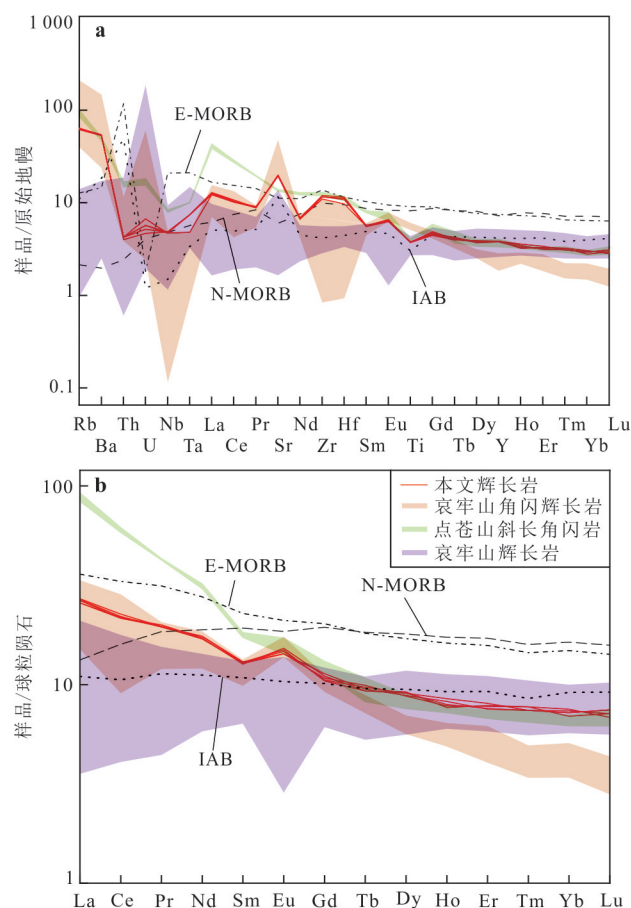


图 6 点苍山辉长岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土配分模式图(b)

Fig.6 Primitive mantle - normalized trace element spidergrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the gabbro from the Diancangshan area

原始地幔标准化值数据引自 Sun and McDonough (1989); 球粒陨石标准化值引自 Boynton (1984); N-MORB (正常型洋中脊玄武岩) 和 E-MORB (异常型洋中脊玄武岩) 数据引自 Niu *et al.* (2002); IAB (岛弧玄武岩) 数据引自 Ewart *et al.*, (1998); 样品数据来源同图 5

显线性相关关系, 同样说明地壳混染不明显 (Xu *et al.*, 2016). 因此, 推测样品受地壳物质的混染影响较小, 其表现出的 Nb、Ta 亏损可能与大洋俯冲板片熔体 (流体) 的交代熔融有关.

点苍山辉长岩锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\,498 \sim 0.282\,610$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值 ($+6.72 \sim +10.84$) (表 2), 表明其来源于相对亏损的地幔源区. 前人研究表明基性岩可以来自软流圈地幔或岩石圈地幔, 来自于软流圈地幔的岩浆一般具有类似于 OIB (洋岛玄武岩) 的地球化学特征, 如富集 LILE 和 HFSE, 而来自于岩石圈地幔的岩石往往具有弧型岩浆地球化学特征, 包括轻稀土与 LILE 的富集和 Nb、Ta 的亏损 (徐夕生和邱检生, 2010). 点苍山辉长岩具有富集轻

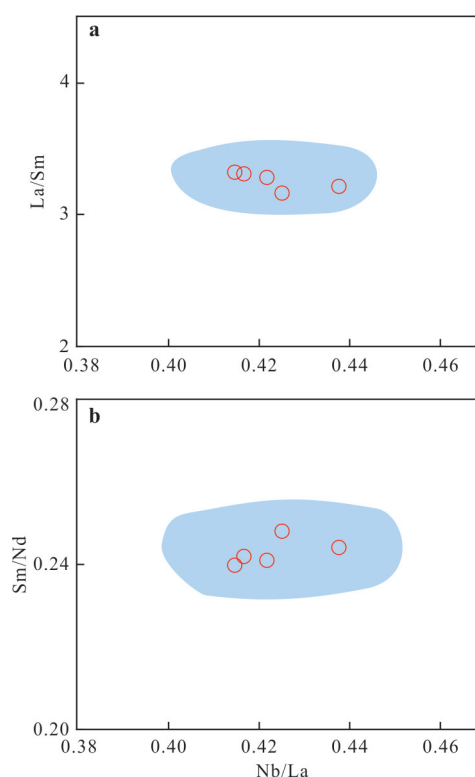


图 7 点苍山辉长岩 Nb/La-La/Sm(a)和 Nb/La-Sm/Nd(b)图解

Fig.7 Plots of Nb/La-La/Sm (a) and Nb/La-Sm/Nd (b) for the gabbro in the Diancangshan area

稀土, 亏损 Nb、Ta 等特征, 与来源于岩石圈地幔的岩浆相似. 此外, 点苍山辉长岩具有低的 Nb/La 值 ($0.41 \sim 0.44$), 与岩石圈地幔 ($0.3 \sim 0.4$) 相似, 而明显不同于软流圈地幔 (>1) (Smith *et al.*, 1999). 因此, 推测点苍山辉长岩来自亏损的岩石圈地幔.

前人研究提出, La/Yb 和 Sm/Yb 比值的相互关系可以用于分析岩浆熔融程度 (杨振宁等, 2023), 点苍山辉长岩具有较低的 La/Yb 值 ($5.10 \sim 5.56$) 和 Sm/Yb ($1.59 \sim 1.74$) 值, 样品点主要沿石榴石橄榄岩部分熔融曲线分布, 且显示出其部分熔融程度 $>20\%$ (图 8a), 与图 8b 所示的趋势基本一致. 石榴石橄榄岩发生部分熔融的深度通常 $>70\text{ km}$, 且一般需要流体的加入 (徐文涛和刘福来, 2020). 在俯冲带, 俯冲板块及其携带沉积物中含水蚀变矿物随温度、压力变化脱水产生流体, 流体上升渗入上覆地幔楔并诱发其部分熔融形成岩浆, HFSE (Nb、Ta、Ti) 在板片脱水过程中不易活动, 而 LILE (Rb、Sr、Ba、Cs) 活动性较强, 使得来源于地幔楔部分熔融的岩浆亏损 HFSE 而富集 LILE (McCulloch and Gamble, 1991), 这一特征与本文研究样品所展现的微量

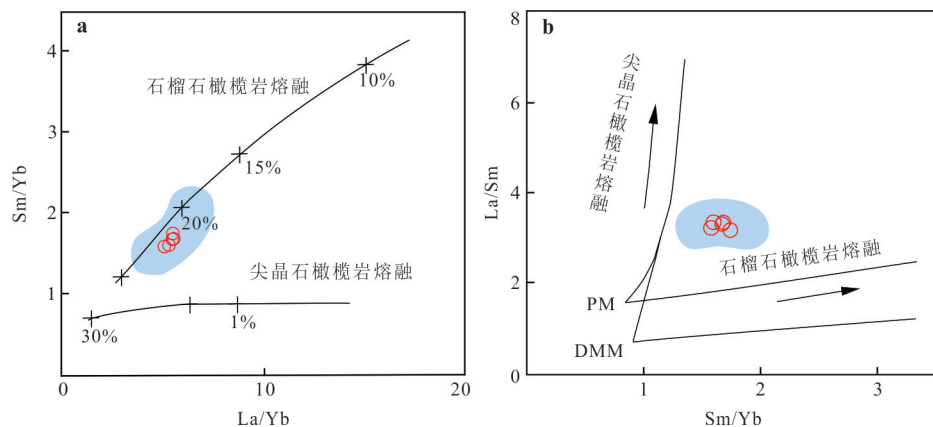


图8 点苍山辉长岩 La/Yb-Sm/Yb(a)和 Sm/Yb-La/Sm(b)图解

Fig.8 Plots of La/Yb-Sm/Yb (a) and Sm/Yb-La/Sm (b) of the gabbro in the Diancangshan area

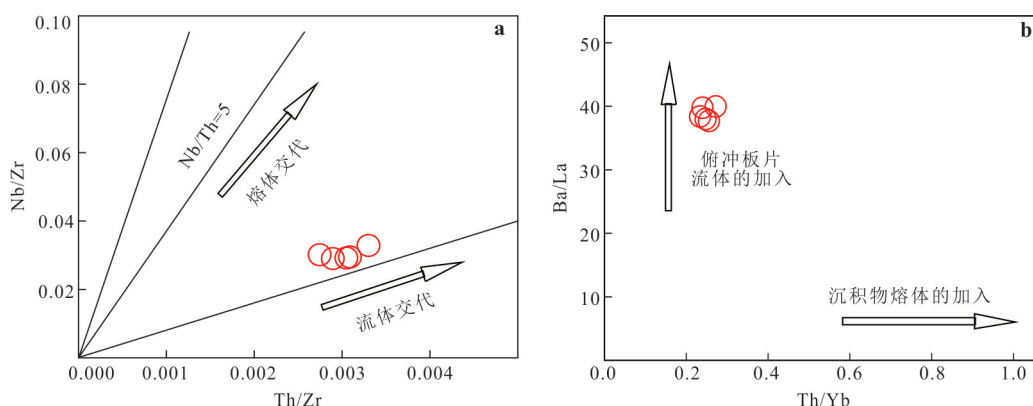


图9 点苍山辉长岩 Th/Zr-Nb/Zr(a)和 Th/Yb-Ba/La (b)图解

Fig.9 Plots of Th/Zr-Nb/Zr (a) and Th/Yb-Ba/La (b) for the gabbro in the Diancangshan area

元素变化特征一致(图6).因此,进一步推测点苍山辉长岩的形成与地幔楔橄榄岩的部分熔融有关.

源于俯冲板块且富集 LILE 的含水流体能够为地幔楔的含水熔融提供条件(Cai *et al.*, 2020).点苍山辉长岩具有较低的 P_2O_5 和 TiO_2 含量,较高的 Ba/La (38~40) 和 Ba/Th (864~931) 值,与受俯冲带流体交代的基性岩的地球化学特征相似(Plank and Langmuir, 1998).Th 元素一般不随俯冲流体运动,但可以跟随俯冲沉积物从俯冲板片转移至上覆地幔源区,因此可以用来指示俯冲沉积物熔体的贡献(赖绍聪和朱毓, 2020).在原始地幔蛛网图中,点苍山辉长岩的 Th 显示出明显亏损(图6),其 Th/Ce 值 (0.019~0.021) 低于全球俯冲沉积物 (Th/Ce=0.08~0.27) (Plank and Langmuir, 1998),说明辉长岩样品无明显沉积物的加入.此外,样品 Th/Zr 与 Nb/Zr、Th/Yb 和 Ba/La 的相互关系亦支持其未受到俯冲沉积物的明显影响,而是受到了俯冲流体的交代作用(图9).因此,点苍山辉长岩在成岩过程中

受到了俯冲流体的改造.

综合以上论述,本文认为点苍山辉长岩是受俯冲流体交代的、亏损的地幔楔橄榄岩部分熔融的产物.

4.3 构造背景

与钙碱性岩浆系列有关的基性岩相较于 MORB (洋中脊玄武岩),经常出现较高的 Al_2O_3 含量 (17%~21%),此类基性岩的形成限于俯冲带环境,是岩浆起源于岛弧或活动大陆边缘的标志(Brophy and Marsh, 1986).点苍山辉长岩具有较高 Al_2O_3 含量 (18.24%~18.68%),结合其源区特征,推测其形成于与俯冲作用相关的构造环境.在微量元素蛛网图中,点苍山辉长岩呈现出与岛弧玄武岩相似的地球化学特征,如显著富集 K、Rb、Ba、Sr,亏损 Nb、Ta,以及具有较高的 Sr/La 值 (46.07~48.25) 和 Ba/Nb 值 (92~95),较低的 Th/Nb 值 (0.03~0.04), Ta/La 值 (0.03~0.04) 和 Th/Yb 值 (0.02) 等(Luhr and Haldar, 2006).样品的 Zr/Nb 值为 33.71~36.57,高

于 E-MORB (10) 和 OIB (<10) (Pearce and Norry, 1979), Nb/Yb 值 (2.21~2.34) 低于 E-MORB (3.50) 和 OIB (11.20) (Sun and McDonough, 1989), 这种更高的 Zr/Nb 值和更低的 Nb/Yb 值通常发生在岛弧或弧后盆地环境中 (Pearce and Norry, 1979). 在相关图解中, 样品也体现出与弧岩浆类似的地球化学属性 (图 10a). 前人的研究指出, 产生于岛弧背景的玄武岩, 其 Nb、Zr、V 和 Ti 含量比产生于弧后盆地环境中的玄武岩更低, 尤其是 Nb 含量一般 $<(2 \times 10^{-6})$ (Pearce and Peate, 1995), 点苍山辉长岩的 Nb 含量为 $3.40 \times 10^{-6} \sim 3.50 \times 10^{-6}$ (表 3), 大于 2×10^{-6} , 暗示其更可能形成于弧后拉张环境. Nb 元素通常在金红石等副矿物中相对富集, 在弧后盆地或洋中脊背景中, 由于伸展作用, 导致岩浆源区具有更高的熔融程度, 促使金红石等副矿物易于进入熔体相, 因此形成的岩浆中 Nb 含量往往较高 (麻艺超等, 2021).

值得注意的是, 辉长岩样品还表现出了与 MORB 相似的特征, 如中、重稀土元素之间没有明显分馏, 与 E-MORB 一样具有较高的轻重稀土分馏以及高 La/Sm 值. 前人的研究表明, 弧后盆地玄武岩由于在成岩过程中受到俯冲流体或沉积物的加入, 导致其兼具岛弧玄武岩和 MORB 的地球化学特征 (Gamble *et al.*, 1994). V 元素由于其分配系数与氧逸度密切相关, 其与不相容元素 Ti 之间的关系, 可以有效区分弧火山岩与 MORB 及板内玄武岩 (寇彩化等, 2022), 在 Ti-V 图解上 (图 10b), 本文研究的辉长岩主要分布在岛弧拉斑玄武岩和 MORB 的重叠范围内, 反映出样品兼具岛弧玄武岩和 MORB 的地球化学特征, 与弧后盆地玄武岩的特征相似. 此外, 区域沉积学资料显示, 在研究区相邻的盐边群, Sun *et al.* (2008) 识出别一套新元古代火山—沉积岩组合 (1 000~865 Ma), 该套岩石组合形成于弧后盆地环境, 进一步暗示区内可能存在广泛的弧后拉张作用.

综合以上论述, 本文认为点苍山地区的新元古代辉长岩形成于弧后盆地环境.

4.4 大地构造意义

近年来, 前人对扬子地块新元古代时期经历的频繁岩浆活动进行了大量研究, 为揭示新元古代时期华南板块构造演化的动力学机制及其与 Rodinia 超大陆的联系提供了重要依据 (李献华等, 2012; Li *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2020). 目前对于华南板块新

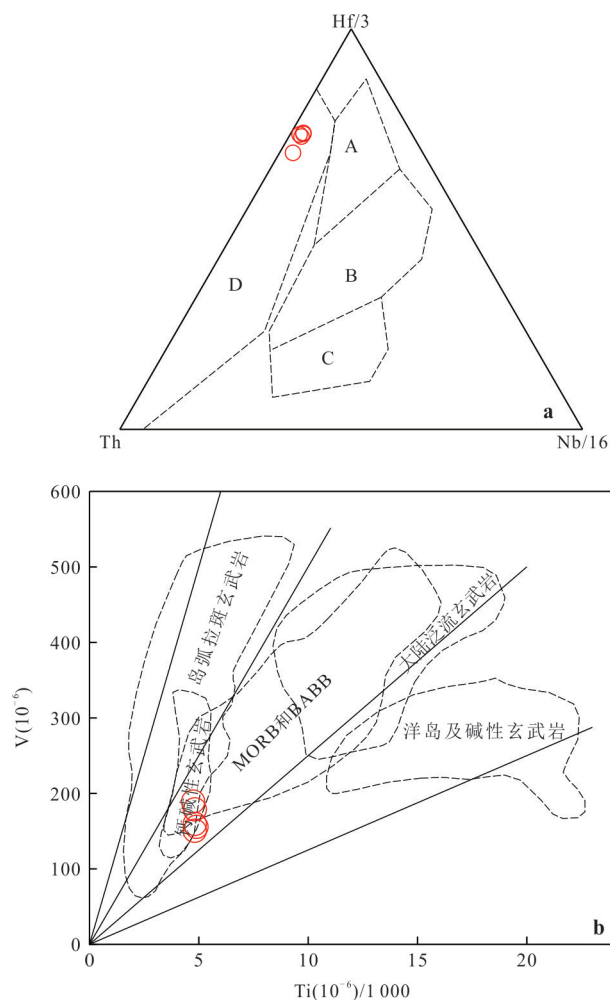


图 10 点苍山辉长岩 Th-Hf-Nb(a)和 Ti-V(b)图解
Fig.10 Plots of Th-Hf-Nb(a) and Ti-V(b) for the gabbro in the Diancangshan area

A. N-MORB; B. E-MORB 和板内拉斑玄武岩; C. 碱性板内玄武岩; D. 火山弧玄武岩

元古代岩浆活动的成因机制仍然存在激烈争议, 其中争议最大的当属地幔柱模式和板块深俯冲模式. 地幔柱成因模式认为新元古代时期扬子地块周缘的岩浆活动受控于超级地幔柱的上涌, 扬子地块处于 Rodinia 的中心位置 (Li *et al.*, 1999), 而板块深俯冲模式则认为新元古代时期扬子地块周缘岩浆活动是由大洋板块俯冲作用引起, 扬子地块处于 Rodinia 的边缘 (Cai *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2022). 大量研究资料表明, 地幔柱诱发的岩浆活动具瞬间性, 通常在 1~5 Ma 内快速喷发, 而且形成规模巨大, 常常伴随有大规模的大陆溢流玄武岩和基性岩墙群; 此外, 地幔柱成因的基性岩大多表现出类似 OIB 的地球化学特征, 包括 Nb、Ta 正异常和不相容元素含量富集等 (徐夕生和邱检生,

2010).从现有的数据资料来看,扬子地块周缘地区乃至整个华南板块新元古代岩浆活动的持续时间超过100 Ma(附表1),岩浆岩类型主要为中酸性岩,其次为基性岩,如扬子地块北缘的汉南奥长花岗岩(728 ± 3 Ma)、大汉山辉长岩($793\sim779$ Ma);扬子地块南缘四堡地区的辉长岩(~830 Ma);扬子地块东缘大别山的花岗岩(816 ± 17 Ma);扬子地块东南缘铺岭组的玄武安山岩(765 ± 15 Ma);扬子地块西北缘碧口的花岗闪长岩(821 ± 5.5 Ma);扬子地块西缘峨山的黑云母二长花岗岩(826.6 ± 2.5 Ma)和花岗闪长岩(818.3 ± 2.8 Ma),康滇裂谷的辉绿岩(~837 Ma)以及扬子地块西南缘哀牢山构造带的花岗岩($799\sim724$ Ma)、闪长岩(800 ± 7 Ma)、斜长角闪岩(814 ± 12 Ma)和本文的辉长岩($771\sim769$ Ma)等(附表1).上述岩浆岩普遍具有富集LREE和LILE(Rb、Ba、Sr),相对亏损HFSE(Nb、Ta)的典型弧岩浆岩地球化学特征,被认为形成于板块俯冲导致的岛弧、陆弧或弧后伸展环境(Cai *et al.*, 2020; 麻艺超等, 2021; Xu *et al.*, 2022).在本文研究中,点苍山辉长岩的锆石U-Pb年龄为771~769 Ma,表现出弧岩浆的地球化学特征.由前文讨论可知,它们源自受俯冲流体交代的地幔楔熔融,形成于弧后盆地环境.这些数据资料均表明点苍山辉长岩的形成与板块的俯冲作用有关.结合相关区域地质资料,点苍山—哀牢山构造带发育较大规模、持续时间长的新元古代($830\sim720$ Ma)酸性岩

和(变)基性岩等岩石类型(附表1),暗示本文研究的点苍山辉长岩的形成是对扬子地块西南缘板块持续俯冲的响应.

沉积学资料显示,扬子西南缘石鼓地区发育了一套含少量黏土物质和火山源物质的变沉积岩,被认为形成于活动大陆边缘到大陆岛弧的构造背景(罗改等, 2021),进一步表明扬子地块西南缘存在新元古代板块俯冲事件;扬子地块西缘前寒武纪地层的碎屑锆石研究结果显示,扬子地块西缘存在1 000~740 Ma的新生岩浆作用,与扬子地块西缘持续的俯冲进程相呼应(Sun *et al.*, 2009).值得注意的是,紧邻点苍山地区的扬子地块西缘盐边地区亦出露具有明显的弧地球化学特征的新元古代岩浆岩($934\sim797$ Ma),被认为形成于活动大陆边缘弧前盆地(刘佩雯等, 2023).这些数据资料表明,新元古代中期,弧系统沿着扬子地块西缘发展,同时存在东西向以及南北向的俯冲作用,导致扬子地块西缘与岛弧相关的岩浆岩由北向南呈带状展布(Xu *et al.*, 2022; 刘佩雯等, 2023).华南板块发育的新元古代俯冲带可能从扬子地块西北缘的攀西—汉南地区一直延伸到了扬子地块西南缘的点苍山—哀牢山构造带,反映了华南板块在新元古代时期应位于Rodinia超大陆的边缘位置(图11),从而可以经历长时间的持续俯冲作用,导致了扬子地块周缘地区时间跨度大于100 Ma岩浆活动的形成(附表1),并形成了一系列弧—盆体系.

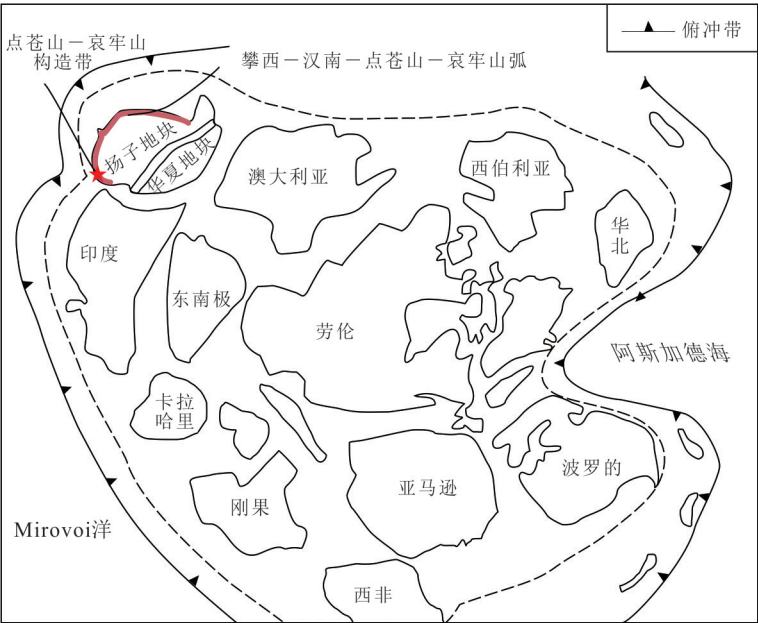


图 11 Rodinia超大陆新元古代古地理格局重建图(据 Xu *et al.*, 2022 修改)

Fig.11 Neoproterozoic paleogeographic reconstruction of the Rodinia Supercontinent (modified from Xu *et al.*, 2022)

5 结论

(1) 扬子地块西南缘点苍山辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 771~769 Ma, 表明滇西点苍山地区发育新元古代基性岩浆作用。

(2) 点苍山辉长岩属于钙碱性系列岩石, 相对富集大离子亲石元素、亏损高场强元素, 起源于受俯冲带流体交代的地幔楔熔融。

(3) 点苍山辉长岩产于弧后盆地构造背景, 其形成机制与扬子地块周缘地区发生的板块持续俯冲作用密切相关, 新元古代时期华南大陆的古地理位置应处于 Rodinia 超大陆的边缘。

附件文件见: <https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.062>

致谢: 感谢审稿专家以及编辑部老师对本文提出的宝贵意见和建议, 感谢赵永山、华洁文、刘昊茹、覃悦在实验数据分析方面的帮助。

References

- Ao, W. H., Zhao, Y., Zhang, Y. K., et al., 2019. The Neoproterozoic Magmatism in the Northern Margin of the Yangtze Block: Insights from Neoproterozoic (950—706 Ma) Gabbroic - Granitoid Rocks of the Hannan Complex. *Precambrian Research*, 333: 105442. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105442>
- Boynnton, W. V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. *Developments in Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 63—114. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-42148-7.50008-3>
- Brophy, J. G., Marsh, B. D., 1986. On the Origin of High-Alumina Arc Basalt and the Mechanics of Melt Extraction. *Journal of Petrology*, 27(4): 763—789. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.4.763>
- Cai, Y. F., Liu, H. C., Feng, Z. H., et al., 2020. Neoproterozoic Active Margin of the SW South China Block: Constraints from U-Pb Ages, Sr-Nd Isotopes and Geochemical Data for the Gabbro and Granodiorite along the Ailaoshan Tectonic Belt. *Lithos*, 358: 105387. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105387>
- Cai, Y. F., Wang, Y. J., Cawood, P. A., et al., 2014. Neoproterozoic Subduction along the Ailaoshan Zone, South China: Geochronological and Geochemical Evidence from Amphibolite. *Precambrian Research*, 245: 13—28. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.01.009>
- Chen, X. Y., Liu, J. L., Fan, W. K., et al., 2017. Neoproterozoic Granitoids along the Ailao Shan-Red River Belt: Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotope Analysis and Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 299: 244—263. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.06.024>
- Chung, S. L., Lee, T. Y., Lo, C. H., et al., 1997. Intraplate Extension Prior to Continental Extrusion along the Ailao Shan-Red River Shear Zone. *Geology*, 25(4): 311. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)0250311:ieptce>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)0250311:ieptce>2.3.co;2)
- Deng, J., Wang, Q. F., Li, G. J., et al., 2014. Cenozoic Tectono-Magmatic and Metallogenic Processes in the Sanjiang Region, Southwestern China. *Earth - Science Reviews*, 138: 268—299. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2014.05.015>
- Ernst, R. E., Buchan, K. L., Campbell, I. H., 2005. Frontiers in Large Igneous Province Research. *Lithos*, 79(3—4): 271—297. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.004>
- Ewart, A., Collerson, K. D., Regelous, M., et al., 1998. Geochemical Evolution within the Tonga - Kermadec - Lau Arc-Back - Arc Systems: The Role of Varying Mantle Wedge Composition in Space and Time. *Journal of Petrology*, 39(3): 331—368. <https://doi.org/10.1093/petrology/39.3.331>
- Gamble, J. A., Wright, I. C., Woodhead, J. D., et al., 1994. Arc and Back-Arc Geochemistry in the Southern Kermadec Arc-Ngatoro Basin and Offshore Taupo Volcanic Zone, SW Pacific. *Geological Society, London, Special Publications*, 81(1): 193—212. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1994.081.01.11>
- Hoffman, P. F., 1991. Did the Breakout of Laurentia Turn Gondwanaland Inside - Out? *Science*, 252(5011): 1409—1412. <https://doi.org/10.1126/science.252.5011.1409>
- Hu, P. Y., Zhai, Q. G., Wang, J., et al., 2020. U-Pb Zircon Geochronology, Geochemistry, and Sr - Nd - Hf - O Isotopic Study of Middle Neoproterozoic Magmatic Rocks in the Kangdian Rift, South China: Slab Rollback and Backarc Extension at the Northwestern Edge of the Rodinia. *Precambrian Research*, 347: 105863. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105863>
- Kou, C. H., Liu, Y. X., Li, J., et al., 2022. Geochronology and Geochemistry of 830 Ma Gabbro in the Western Segment of the Jiangnan Orogen and Constraint on Its Petrogenesis. *Earth Science Frontiers*, 29(2): 218—233(in Chinese with English abstract).
- Lai, S. C., Zhu, Y., 2020. Petrogenesis and Geodynamic Implications of Neoproterozoic Typical Intermediate - Felsic Magmatism in the Western Margin of the Yangtze Block, South China. *Journal of Geomechanics*, 26(5): 759—790(in Chinese with English abstract).

- Li, B.L., Ji, J.Q., Fu, X.Y., et al., 2008. Zircon SHRIMP Dating and Its Geological Implications of the Metamorphic Rocks in Ailao Shan-Diancang Mountain Ranges, West Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2322–2330(in Chinese with English abstract).
- Li, D.P., Chen, Y.L., Kang, H., et al., 2018. Neoproterozoic Continental Arc System along the NW Margin of Rodinia Supercontinent: Constraints from Geochronological and Geochemical Studies of Neoproterozoic Granitoids in the Diancangshan Massif. *Lithos*, 316: 77–91. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.07.011>
- Li, X.H., Li, W.X., He, B., 2012. Building of the South China Block and Its Relevance to Assembly and Breakup of Rodinia Supercontinent: Observations, Interpretations and Tests. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(6): 543–559(in Chinese with English abstract).
- Li, Z.X., Li, X.H., Kinny, P.D., et al., 1999. The Breakup of Rodinia: Did It Start with a Mantle Plume beneath South China? *Earth and Planetary Science Letters*, 173(3): 171–181. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(99\)00240-x](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(99)00240-x)
- Liu, J.L., Tang, Y., Song, Z.J., et al., 2011. The Ailaoshan Belt in Western Yunnan: Tectonic Framework and Tectonic Evolution. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1285–1303(in Chinese with English abstract).
- Liu, J.L., Wang, A.J., Cao, S.Y., et al., 2008. Geochronology and Tectonic Implication of Migmatites from Diancangshan, Western Yunnan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 413–420(in Chinese with English abstract).
- Liu, P.W., Zhang, J.B., Ding, X.Z., et al., 2023. Geochronology and Tectonic Significance of Neoproterozoic Volcanic Rocks from Yanbian Group in Western Yangtze Block. *Earth Science*, 48(12): 4508–4526(in Chinese with English abstract).
- Luhr, J.F., Haldar, D., 2006. Barren Island Volcano (NE Indian Ocean): Island-Arc High-Alumina Basalts Produced by Troctolite Contamination. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 149(3–4): 177–212. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.06.003>
- Luo, G., Zhang, T., Jia, X.C., et al., 2021. Geochronology, Geochemical Features and Geological Significance of the Granitic Gneiss in the Shigu Complex, Northwest Yunnan, China. *Acta Geologica Sinica*, 95(11): 3335–3351(in Chinese with English abstract).
- Ma, Y.C., Cai, Y.F., Ma, L.Y., et al., 2021. Genesis of Neoproterozoic Amphibolite in Diancangshan, West Yunnan: Evidence from Zircon U-Pb Age and Whole-Rock Geochemistry. *Earth Science*, 46(8): 2860–2872(in Chinese with English abstract).
- McCulloch, M.T., Gamble, J.A., 1991. Geochemical and Geodynamical Constraints on Subduction Zone Magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3–4): 358–374. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(91\)90029-h](https://doi.org/10.1016/0012-821x(91)90029-h)
- Nishiya, T., Watanabe, T., Yokoyama, K., 2001. Reconstruction and Breakup of the Rodinia Supercontinent: Constraints from Chronology in North Queensland, NE Australia. *Gondwana Research*, 4(4): 718. [https://doi.org/10.1016/s1342-937x\(05\)70515-3](https://doi.org/10.1016/s1342-937x(05)70515-3)
- Niu, Y., Gilmore, T., Mackie, S., et al., 2002. Mineral Chemistry, Whole-Rock Compositions, and Petrogenesis of Leg 176 Gabbros: Data and Discussion. In: Natland, J.H., Dick, H.J.B., Miller, D.J., et al., eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 176: 1–60. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.176.011.2002>
- Pearce, J.A., Norry, M.J., 1979. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33–47. <https://doi.org/10.1007/bf00375192>
- Pearce, J.A., Peate, D.W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic Arc Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251–286. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.23.050195.001343>
- Plank, T., Langmuir, C.H., 1998. The Chemical Composition of Subducting Sediment and Its Consequences for the Crust and Mantle. *Chemical Geology*, 145(3–4): 325–394. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00150-2)
- Qi, X.X., Wang, X.H., Zhu, L.H., et al., 2010. Validation on Age of Neoproterozoic Intrusions from Northeastern Margin of Indochina Block, Western Yunnan and Its Tectonic Implication: Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2141–2154(in Chinese with English abstract).
- Smith, E.I., Sánchez, A., Walker, J.D., et al., 1999. Geochemistry of Mafic Magmas in the Hurricane Volcanic Field, Utah: Implications for Small- and Large-Scale Chemical Variability of the Lithospheric Mantle. *The Journal of Geology*, 107(4): 433–448. <https://doi.org/10.1086/314355>
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>

- Sun, W.H., Zhou, M.F., Gao, J.F., et al., 2009. Detrital Zircon U-Pb Geochronological and Lu-Hf Isotopic Constraints on the Precambrian Magmatic and Crustal Evolution of the Western Yangtze Block, SW China. *Precambrian Research*, 172(1-2): 99-126. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.03.010>
- Sun, W.H., Zhou, M.F., Yan, D.P., et al., 2008. Provenance and Tectonic Setting of the Neoproterozoic Yanbian Group, Western Yangtze Block (SW China). *Precambrian Research*, 167(1-2): 213-236. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.08.001>
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1995. The Geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241-265. <https://doi.org/10.1029/95rg00262>
- Xu, J., Xia, X.P., Yin, C.Q., et al., 2022. Geochronology and Geochemistry of the Granitoids in the Diancangshan-Ailaoshan Fold Belt: Implications on the Neoproterozoic Subduction and Crustal Melting along the Southwestern Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, 383: 106907. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106907>
- Xu, W., Dong, Y.S., Zhang, X.Z., et al., 2016. Petrogenesis of High-Ti Mafic Dykes from Southern Qiangtang, Tibet: Implications for a ca. 290 Ma Large Igneous Province Related to the Early Permian Rifting of Gondwana. *Gondwana Research*, 36: 410-422. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.07.016>
- Xu, W.T., Liu, F.L., 2020. The Late Paleozoic Arc-Back Arc System in Western Ailaoshan: Evidence from Geochemistry and Geochronology of Basic Rocks. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(4): 406-422 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X.S., Qiu, J.S., 2010. *Igneous Petrology*. Science Press, Beijing, 317 (in Chinese).
- Yang, Z.N., Cai, X.Y., Yang, K.G., et al., 2023. Chronological and Geochemical Studies of the Middle Neoproterozoic Mafic Rock and Turbidite in the Dahongshan Orogenic Belt on the Northern Margin of the Yangtze Block: Implications for the Evolution of the Back-Arc Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 39(5): 1423-1440 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.F., Wu, R.X., Wu, Y.B., et al., 2008. Rift Melting of Juvenile Arc-Derived Crust: Geochemical Evidence from Neoproterozoic Volcanic and Granitic Rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Research*, 163(3-4): 351-383. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.01.004>
- Zhou, M.F., Yan, D.P., Wang, C.L., et al., 2006. Subduction-Related Origin of the 750 Ma Xuelongbao Adakitic Complex (Sichuan Province, China): Implications for the Tectonic Setting of the Giant Neoproterozoic Magmatic Event in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1-2): 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.032>

中文参考文献

- 寇彩化, 刘燕学, 李江, 等, 2022. 江南造山带西段桂北四堡地区 830 Ma 辉长岩锆石 SIMS U-Pb 年代学和岩石地球化学特征及其岩石成因研究. 地学前缘, 29(2): 218-233.
- 赖绍聪, 朱毓, 2020. 扬子板块西缘新元古代典型中酸性岩浆事件及其深部动力学机制: 研究进展与展望. 地质力学学报, 26(5): 759-790.
- 李宝龙, 季建清, 付孝悦, 等, 2008. 滇西点苍山-哀牢山变质岩系锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 岩石学报, 24(10): 2322-2330.
- 李献华, 李武显, 何斌, 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解: 观察、解释与检验. 矿物岩石地球化学通报, 31(6): 543-559.
- 刘俊来, 唐渊, 宋志杰, 等, 2011. 滇西哀牢山构造带: 结构与演化. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5): 1285-1303.
- 刘俊来, 王安建, 曹淑云, 等, 2008. 滇西点苍山杂岩中混合岩的地质年代学分析及其区域构造内涵. 岩石学报, 24(3): 413-420.
- 刘佩雯, 张继彪, 丁孝忠, 等, 2023. 扬子西缘新元古代盐边群火山岩年代学及大地构造背景. 地球科学, 48(12): 4508-4526.
- 罗改, 张彤, 贾小川, 等, 2021. 滇西北石鼓杂岩中花岗质片麻岩年代学、地球化学特征及地质意义. 地质学报, 95(11): 3335-3351.
- 麻艺超, 蔡永丰, 马莉燕, 等, 2021. 滇西点苍山新元古代斜长角闪岩的成因: 来自锆石 U-Pb 年龄和全岩地球化学的证据. 地球科学, 46(8): 2860-2872.
- 戚学祥, 王秀华, 朱路华, 等, 2010. 滇西印支地块东北缘新元古代侵入岩形成时代的厘定及其构造意义: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及地球化学证据. 岩石学报, 26(7): 2141-2154.
- 徐文涛, 刘福来, 2020. 哀牢山西部晚古生代岛弧-弧后盆地系统: 来自基性岩地球化学和年代学的证据. 岩石矿物学杂志, 39(4): 406-422.
- 徐夕生, 邱检生, 2010. 火成岩岩石学. 北京: 科学出版社, 317.
- 杨振宁, 蔡晓芸, 杨坤光, 等, 2023. 扬子北缘大洪山造山带中新元古代基性岩和浊积岩的年代学和地球化学研究: 对弧后盆地演化的指示. 岩石学报, 39(5): 1423-1440.