

攀西裂谷南段水口菁碱性杂岩体磷灰石 U-Pb 年代学和地球化学特征

赵鹏鹏¹, 应元灿^{1*}, 余海军^{1,2,3}, 李文昌¹, 蒋少涌⁴

1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093
2. 云南省地质调查院, 云南昆明 650051
3. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南昆明 650051
4. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 水口菁碱性杂岩体是攀西裂谷南段出露面积最大的基性-超基性环状杂岩体。前人研究认为该杂岩体与晚二叠纪峨眉山大火成岩省岩浆活动紧密相关, 但一直缺乏精确的年代学限定, 制约了对攀西裂谷南段碱性杂岩体的成因演化及构造动力学背景的认识。本文在详细的岩相学和地球化学研究基础上, 利用 LA-(MC)-ICP-MS 分析技术对主要副矿物磷灰石开展了 U-Pb 定年、微量元素组成及 Sr 同位素分析, 从而探讨其成因演化和对应的构造动力学背景。结果显示辉长岩和辉石闪长岩中的磷灰石 U-Pb 年龄分别为 263 ± 11 Ma 和 262.8 ± 6.4 Ma, 磷灰石原位 Sr 同位素组成均一 ($0.7041 \sim 0.7045$) 且具有典型的幔源特征。其原始岩浆的形成与峨眉山大火成岩省的活动紧密相关, 起源于板内拉张环境下的岩石圈地幔低程度部分熔融, 并经历了快速的岩浆分异演化。攀西裂谷南段发育的这些碱性杂岩体很可能是最早期峨眉山大火成岩省初始岩浆演化的产物。

关键词: 水口菁; 磷灰石; 攀西裂谷; 碱性杂岩体

中图分类号: P597

收稿日期: 2024-12-11

U-Pb Geochronology and Geochemical Characteristics of the Apatite from the Shuikoujing Alkaline Complex in the Southern Panxi Rift

Zhao Pengpeng¹, Ying Yuancan^{1*}, Yu Haijun^{1,2,3}, Li Wenchang¹, Jiang Shaoyong⁴

1. Faculty of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China
2. Institute of Yunnan Geology Survey, Kunming 650051, China
3. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Ministry of Natural and Resources, Kunming 650051, China
4. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan, 430074, China

Abstract: The Shuikoujing alkaline complex, the largest basic-ultrabasic complex exposed in the southern Panxi Rift. Previous studies suggest that the complex is closely related to the Late Permian Emeishan Large Igneous Province (ELIP) magmatic activity, but precise

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2344217), 云南省基础研究计划项目 (202301CF070317) 和云南省有色地质局 308 队专家工作站项目 (2024)。

作者简介: 赵鹏鹏 (2000—), 男, 硕士, 主要从事碱性岩-碳酸岩相关的稀有稀土金属成矿研究。ORCID: 0009-0009-8570-7833. E-mail: zpp200010@qq.com

***通讯作者:** 应元灿, ORCID: 0000-0001-5669-7255. E-mail: yeying@cug.edu.cn

geochronological constraints have been lacking, which has hindered the understanding of the genesis, evolution, and tectono-dynamic background of the alkaline complex in the southern Panxi rift. In this study, based on detailed petrographic and geochemical investigations, using LA-(MC)-ICP-MS analytical techniques to conduct U-Pb dating, trace element composition, and Sr isotopic analysis on apatite from various lithologies. These analyses aim to explore the genesis, evolution, and the associated tectono-dynamic background of the complex. The results show that the U-Pb ages of apatite from the gabbro and pyroxene diorite are 263 ± 11 Ma and 262.8 ± 6.4 Ma, The in situ Sr isotope composition of apatite is uniform (0.7041~0.7045) and exhibits typical mantle-derived characteristics. Suggesting that the formation of the primary magma is closely related to the activity of the ELIP, originating from low-degree partial melting of the lithospheric mantle in an intraplate extensional setting, and subsequently underwent rapid magmatic differentiation and evolution. Additionally, these alkaline complexes in the southern Panxi Rift are inferred to be products of the initial magmatic evolution of the ELIP.

Key words: ShuikouJing; Apatite; Panxi Rift; Alkaline complex.

攀西裂谷位于扬子板块西缘, 同时也在峨眉山大火成岩省的内带与中带交界之处, 是我国重要的构造带之一(刘红英, 2005). 研究表明, 随着峨眉山大火成岩省的岩浆活动, 沿攀西裂谷中南段产出有一系列基性-超基性碱性杂岩体, 南北延伸约 300 km(郭远生等, 2012).

攀西裂谷南段以滇中罗茨一带出露的环状基性-超基性碱性杂岩体群为代表, 严格受控于罗茨-易门断裂, 主要包括水口菁、猫街和鸡街等 7 个碱性杂岩体(颜以彬, 1985; 吴静等, 1994). 碱性岩通常被认为是稳定大陆裂谷或深大断裂活动的产物, 这种深源浅成的特性可以为我们带来地球深部的物质组成、岩浆演化、构造和物理化学环境等重要信息, 同时也伴随着 REE、Nb、Ta 等战略性关键金属的富集(吴静等, 1994; 周金胜和王强, 2022; 曹俊等, 2024; 赖绍聪等, 2024). 随着近年来找矿勘查和研究的不断深入, 发现滇中罗茨一带出露的碱性杂岩体普遍都具有较高的 Sc 含量, 尤其是其中富含辉石的岩石类型(如辉石岩、辉长岩、霓霞钠辉岩、钛铁霞辉岩)在风化后可直接形成大型-超大型钽矿床(郭远生等, 2012; Zhou *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2023).

然而, 目前对罗茨地区碱性杂岩体的研究非常薄弱, 且主要集中在鸡街碱性杂岩体的矿物学、年代学和岩石地球化学方面(颜以彬, 1985; 夏斌等, 2004; 刘红英等, 2004a). 滇中罗茨地区碱性岩的年代学研究结果较少, 年龄较为混乱, 其成岩年龄跨度大(239~204Ma), 约为 35 Myr, 暗示攀西裂谷南段碱性杂岩体存在多期岩浆活动记录, 晚于峨眉山大火成岩省玄武岩主喷发期(~260 Ma; Zhou *et al.*, 2005; 罗震宇等, 2006; Zhong *et al.*, 2009; Shellnutt, 2014; Tang *et al.*, 2021). 导致该区碱性岩与攀西裂谷中段的攀枝花、白马、红格等碱性侵入岩成因关系不清, 限制了对攀西裂谷南段碱性岩成因及构造演化的认识.

水口菁杂岩体作为滇中罗茨地区出露面积最大的一个基性-超基性环状杂岩体, 其出露的辉长岩、辉石闪长岩和霞石正长岩中均含有大量的磷灰石, 通过对其开展详细的 LA-(MC)-ICP-MS U-Pb 年代学和地球化学分析可以准确限定杂岩体的形成时代及岩浆演化过程, 并为区域地质构造背景演化提供指示意义.

1 地质背景与岩体特征

1.1 地质背景

攀西裂谷夹持于扬子板块西缘和峨眉山大火成岩省内部，是一个岩浆活动频发、矿产资源丰富、断裂带发育的区域。沿断裂带分布有太和、白马、红格和攀枝花等数个大型层状侵入岩体，这些岩体主要由基性至超基性侵入岩组成，穿插于峨眉山玄武岩中，并伴有少量中酸性至碱性侵入岩（图 1）。其中，环状碱性超基性杂岩体主要出露在攀西裂谷的中南段，大体沿安宁河-易门断裂带和东部的普雄河-普渡河断裂带产出，南北延伸约 300 公里（颜以彬，1985；黄智龙等，1995）。这些碱性杂岩体在空间上多呈孤立的同心环状小岩体或小岩株群产出，单个岩体出露面积通常较小，出露面积最大的为四川会理县境内的猫猫沟碱性杂岩体（约 35 km²）（刘红英等，2004b）。目前认为这些碱性杂岩体的形成与晚二叠世峨眉山大火成岩省岩浆活动紧密相关(吴静等，1994)。

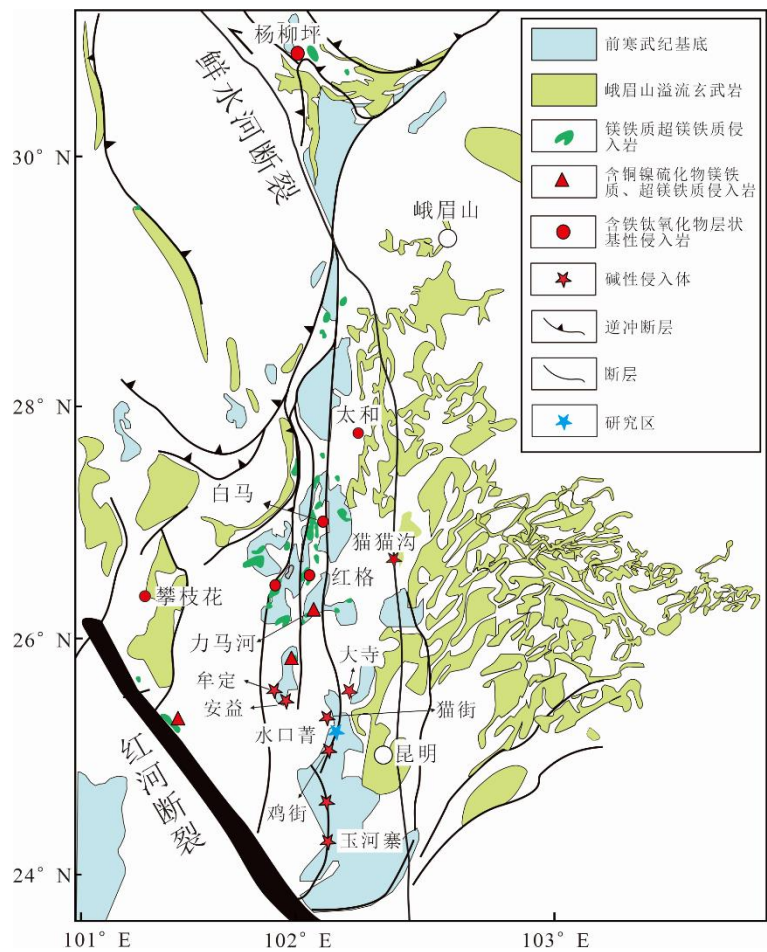


图 1 攀西裂谷与峨眉山大陆溢流玄武岩构造地质简图（改自 Zhou et al., 2022）

Fig. 1 Simplified geological map of the Panxi rift and Emeishan flood basalts

攀西裂谷南段的滇中罗茨地区出露有一系列碱性杂岩体，这些碱性杂岩体多呈小岩株断续展布，主要包括大寺、猫街、水口菁、鸡街等 7 个岩体，南北延伸约 16 km（吴静等，1994）。该区出露的岩体虽小，但多为复杂的多期次环状侵入体，岩体结构复杂，岩石类型多，不同岩石类型之间成因演化机制尚不清楚。研究区所出露的地层主要为震旦系下统的澄江组红色砂岩和碱性火山岩系，部分地段可见昆阳群美党组板岩夹白云质大理岩（颜以彬，1985；吴静等，1994；赵正等，2010）。

1.2 岩体特征

水口菁碱性杂岩体地理位置上属于云南省禄丰县水口箐村，岩石类型复杂多样，具有典型的环状杂岩体结构特征。该杂岩体空间上完全受南北向的罗茨断裂控制，在平面上呈现长轴为 NNE 向的椭圆状出露，长约 1470 m，宽 400~600 m，出露面积约 0.67 km²，与围岩接触产状较为陡峭，倾向东（Zhao *et al.*, 2023）。根据岩石的结构、矿物组成及岩相分带，可划分为 6 种岩石类型：内环主要由辉石岩和辉长岩组成，核心部位可见碳酸岩细脉；中间环主要由不同粒度的钛铁霞辉岩组成；外环主要为中-细粒的霓霞钠辉岩；杂岩体西侧存在一系列的辉石闪长岩和霞石正长岩脉（图 2）。整个杂岩体遭受了不同程度的风化作用，其表层风化壳具有显著的 Sc 富集特征（平均 Sc 含量约为 71×10⁻⁶；Zhou *et al.*, 2022），按一般工业标准，全岩 Sc₂O₃>50×10⁻⁶ 即达到边界品位（张玉学，1997）。



图 2 水口菁杂岩体地质简图（改自 Zhou *et al.*, 2022）

Fig. 2 Simplified geological map of the Shuikoujing complex

水口菁杂岩体内环以单斜辉石和基性斜长石的不同比例而构成了辉石岩和辉长岩，无明显的岩相分界线，岩石整体呈灰黑色，中-粗粒或不等粒结构，块状构造（图 3a-b）。往核部方向的辉石粒径往往越粗且辉石比例也更高（可达 95%以上），粒径可达 3~4 cm。副矿物主要有磁铁矿、橄榄石、角闪石、磷灰石、榍石等（图 4a-b）。中间环带主要为钛铁霞辉岩，同样呈灰黑色，中-粗粒结构，块状构造，野外表现为磁性更强；副矿物有磁铁矿、钛铁矿、角闪石、黑云母、磷灰石等。

外环主要为灰白色的霓霞钠辉岩，中-细粒结构或不等粒结构，主要由辉石、钠长石、霞

石及霓石组成, 其中辉石多呈半自形-他形, 粒径较小, 具有霓石化特征 (图 3c). 霞石主要为半自形-他形的粒状结构, 粒径较大, 无解理, 极低突起, 最高干涉色一级灰; 钠长石多为长条状, 可见两组完全解理和双晶纹, 大多具有蚀变特征; 角闪石则基本都蚀变成了阳起石, 呈墨绿色或深褐色的长柱状, 发育多孔结构 (图 4c). 副矿物主要有磷灰石、榍石、磁铁矿、云母、绿泥石、绿帘石等.

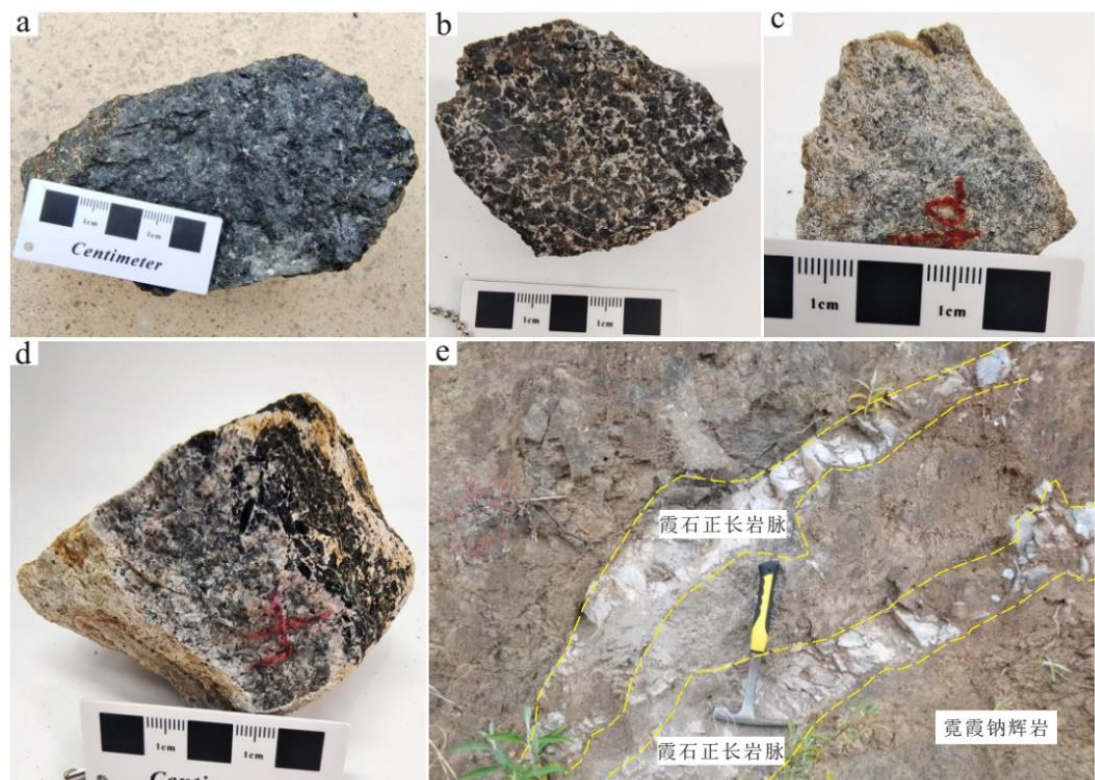


图 3 水口菁杂岩体中辉石岩 (a)、辉长岩 (b)、霓霞钠辉岩 (c)、辉石闪长岩 (d) 和霞石正长岩脉 (e) 的手标本及野外照片

Fig. 3 Photographs of hand specimen and field of pyroxenite (a), gabbro (b), ijolite (c), diorite (d), and nepheline syenite veins (e) from the Shuikoujing complex

值得注意的是, 在该杂岩体的西侧出露有一些偏中性岩石, 即辉石闪长岩和霞石正长岩脉 (图 3d-e). 霞石正长岩呈脉状产出, 脉宽 0.3~1.5 m, 走向延伸约 10 m, 整体呈灰白色, 穿插于霓霞钠辉岩中, 蚀变较为强烈 (图 3e). 辉石闪长岩仅见一个地表露头, 出露宽度约 0.5~1 m, 推断为脉状产出 (图 3d). 其主要由斜长石 (~30%) 和角闪石 (~30%) 构成, 次要矿物有辉石、云母、阳起石、钠长石, 副矿物有磷灰石、榍石、霓石、阳起石等. 辉石闪长岩具有典型的不等粒结构, 整体以灰白色为主, 可见细粒针状角闪石和粗粒板柱状角闪石, 部分粗晶角闪石沿 c 轴粒径可达 2 cm; 斜长石为半自形-他形的板状或不规则状, 可见聚片双晶. 镜下观察发现辉石闪长岩基本上都被霞石细脉穿插交代并形成网脉状结构, 导致角闪石和斜长石晶体较为破碎, 岩石整体蚀变严重, 形成了大量阳起石和蚀变云母 (图 4d). 此外, 辉石闪长岩产出有较多半自形-他形磷灰石, 粒径 50~400 μm , 多分布于角闪石和云母间隙之中, 也可见少数细粒磷灰石包裹在角闪石内.

2 分析方法

本次研究主要采集了相对新鲜的辉石岩、辉长岩、钛铁霞辉岩、霓霞钠辉岩、辉石闪长岩和霞石正长岩,通过室内岩相学观察和全岩主微量分析查明不同岩石类型的矿物组成以及地球化学特征.重点对辉长岩和辉石闪长岩中的磷灰石开展了详细的 U-Pb 定年、Sr 同位素及微量元素分析.全岩主微量分析以及磷灰石的分选、制靶、阴极发光图像拍摄在南京顺科检测有限公司完成.

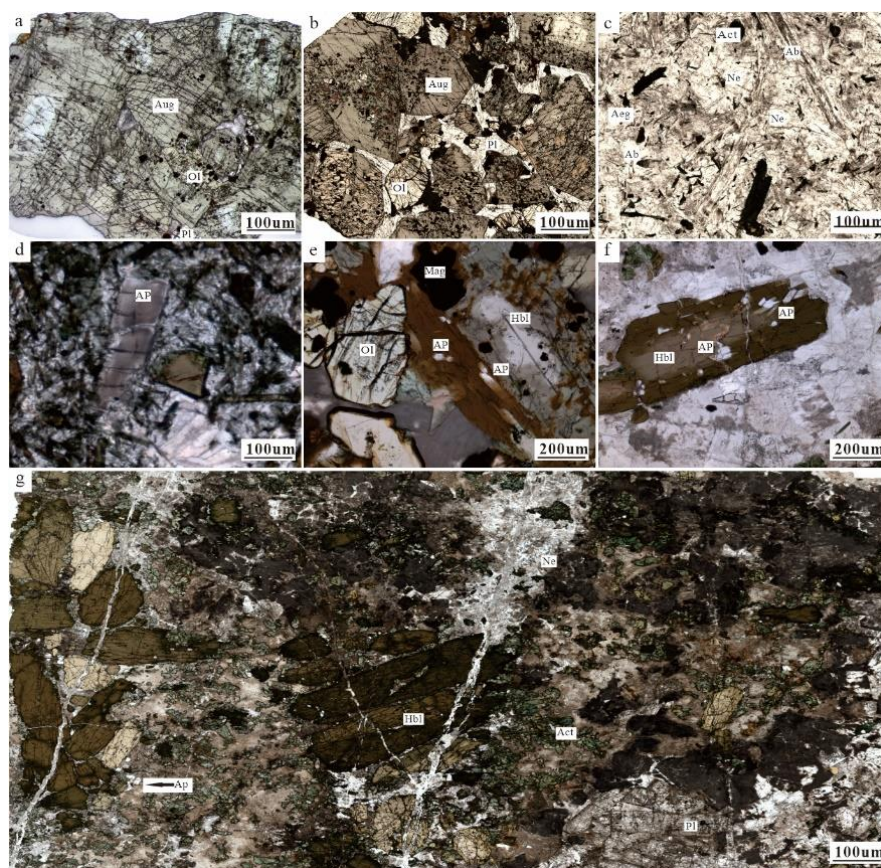


图 4 水口菁杂岩体中辉石岩 (a)、辉长岩 (b)、霓霞钠辉岩 (c)、霓霞钠辉岩中磷灰石 (d)、辉长岩中磷灰石 (e)、辉石闪长岩中磷灰石 (f) 及辉石闪长岩 (g) 镜下特征

Fig. 4 Petrographic characteristics of pyroxenite (a), gabbro (b), ijolite (c), apatite in ijolite (d), apatite in gabbro (e), apatite in pyroxene diorite (f), and pyroxene diorite (g) within the Shuikoujing complex

矿物缩写: Aug:辉石 Ol:橄榄石 Pl:斜长石 Ab:钠长石 Act:阳起石 Aeg:霓石 Ne:霞石 Ap:磷灰石 Hbl:角闪石

全岩化学前处理与主量元素测定具体流程包括:酸法消解(40mg 样品加入 0.5ml 浓硝酸和 1.0ml 浓氢氟酸, 195°C密封加热 3 天后蒸至湿盐状,加入 Rh 内标并用 15%硝酸复溶)后,采用 Agilent 7700x ICP-MS 测定微量元素, Agilent 5110 ICP-OES 测定 Na、Mg、Al、P、K、Ca、Ti、Mn、Fe 等主量元素;另通过碱熔消解法测定 Si 元素.质量控制采用地质矿产部 GSR、GSD 岩石及水系沉积物标物监控主量元素,美国 USGS 玄武岩(BHVO-2、

BCR-2)、安山岩 (AGV-2)、流纹岩 (RGM-2) 及花岗闪长岩 (GSP-2) 标物监控微量元素, 确保分析准确性.

磷灰石的 U-Pb 测年在北京燕都中实测试技术有限公司利用 LA-ICP-MS 完成. 所采用的激光剥蚀系统为美国 ESI 公司产的 NWR193nm ArF 准分子激光器, ICP-MS 为德国产的 Analytikjena PlasmaQuant MSQ 电感耦合等离子质谱仪. 磷灰石 U-Pb 定年中使用 MAD 磷灰石标样 (485.2 ± 0.8 Ma; Thomson *et al.*, 2012) 进行 U-Pb 同位素分馏校正, 并利用 Kovdor 磷灰石标样 (377.5 ± 3.5 Ma; Chew *et al.*, 2011) 进行质量监控. 测试过程中采用 NIST610 做外标, 采用 ^{44}Ca 做为内标进行 U、Pb 含量计算, 每分析 10 个样品点, 分析一组标样. 激光剥蚀过程中采用氦气作载气, 由一个 T 型接头将氦气和氙气混合后进入 ICP-MS 中. 每个采集周期包括 20 s 的空白信号和 50 s 的样品信号, 激光束斑大小为 $32\text{ }\mu\text{m}$, 能量密度 $4\text{ J}/\text{cm}^2$, 剥蚀频率为 9 Hz. 数据离线处理采用 ICPMSDataCal 10.2 软件 (Liu *et al.*, 2008) 完成, 对磷灰石的普通铅校正采用 ^{207}Pb 校正法, U-Pb 年龄数据成图采用 Isoplot v3.0 插件完成.

磷灰石的微量元素组成在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 完成. 本次分析所采用的激光剥蚀系统为 193 nm ArF 准分子激光 (型号为 Resonetics-S155), 电感耦合等离子体质谱仪为美国产的 Thermo iCAP-Qc 型四级杆质谱. 激光束斑直径为 $33\text{ }\mu\text{m}$, 能量密度为 $3.5\text{ J}/\text{cm}^2$, 剥蚀频率为 8 Hz, 剥蚀时间 40s. 剥蚀过程与气路连接装置同上. 本次分析采用多外标-无内标校正方法, 所采用的参考物质有 BIR-1G、BCR-2G、BHVO-2G、NIST 610, 数据结果由 ICPMSDataCal 10.2 软件离线处理完成 (Liu *et al.*, 2008).

磷灰石的原位 Sr 同位素分析也在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-MC-ICP-MS 完成. 所用多接收电感耦合等离子体质谱仪型号为 Nu Plasma II. 本次分析使用的激光束斑为 $50\text{ }\mu\text{m}$, 剥蚀频率 10 Hz, 剥蚀时间 50 s. 分析过程中因为有部分 Sr 的同质异位素会干扰 Sr 的质谱测定, 其中主要为 Rb、Kr 和稀土二价离子的干扰, 因此, 需要进行干扰校正. 详细的校正方法参考 Ramos *et al.* (2004) 和 Yang *et al.* (2011). 本次分析中使用的标样为实验室内部标样, 包括印度洋和青岛的现代珊瑚 (Coral), 标样分析的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.70918 ± 0.00005 (2σ , $n=20$) 与文献报道值一致 (Chen *et al.*, 2018). 由于磷灰石的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值极低 (<0.001), 因此 ^{87}Sr 的放射成因贡献可以忽略不计, 所以单颗粒获得的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 实测值即为其初始 Sr 同位素组成.

3 分析结果

3.1 磷灰石 U-Pb 年龄及微量元素组成

水口菁辉长岩中的磷灰石多呈自形-半自形的短柱状, 少数呈自形粒状晶, 整体颗粒较大, 长轴 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$, 短轴 $40\sim 100\text{ }\mu\text{m}$. 阴极发光图像显示内部分带弱, 多数颗粒均有细小裂纹, 少数颗粒较为破碎且呈不规则状 (图 5a).

水口菁辉石闪长岩中的磷灰石多呈自形-半自形的长柱状, 整体颗粒较大, 长轴 $50\sim 400\text{ }\mu\text{m}$, 短轴为 $40\sim 80\text{ }\mu\text{m}$. 阴极发光图像同样显示无环带结构, 少数颗粒较为破碎, 整体结构较为均一 (图 5b).

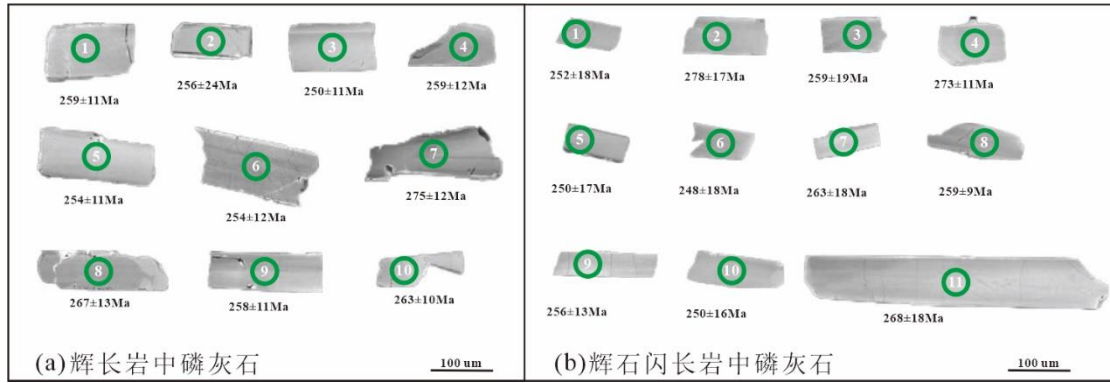


图 5 水口菁辉长岩中磷灰石 (a) 和辉石闪长岩中磷灰石 (b) 阴极发光图像

Fig. 5 Cathodoluminescence images of apatite from the Shuikoujing gabbro (a) and diorite(b).

辉长岩中磷灰石 U-Pb 定年共分析了 25 个点, 具体年龄数据见附表 1, 因磷灰石含有一定量的普通铅, 故采用反等时线 (Tera-Wasserburg) 进行普通铅校正 (娄元林等, 2024), 其下交点年龄为 263 ± 11 Ma (MSWD=1.01), 与 ^{207}Pb 校正加权平均年龄为 266.5 ± 4.9 Ma (MSWD=3.5) 基本一致 (图 6a), 表明辉长岩的形成时代约为 263 Ma.

辉石闪长岩中磷灰石 U-Pb 定年共分析了 48 个点, 其中有效点 43 个, 具体年龄数据见附表 1, 通过 Tera-Wasserburg 图解获得下交点年龄为 262.8 ± 6.4 Ma (MSWD=0.54), 与 ^{207}Pb 校正加权平均年龄为 261.9 ± 3.5 Ma (MSWD=0.58) 一致 (图 6b), 表明闪长岩的侵位时代与辉长岩一致, 都为 263 Ma.

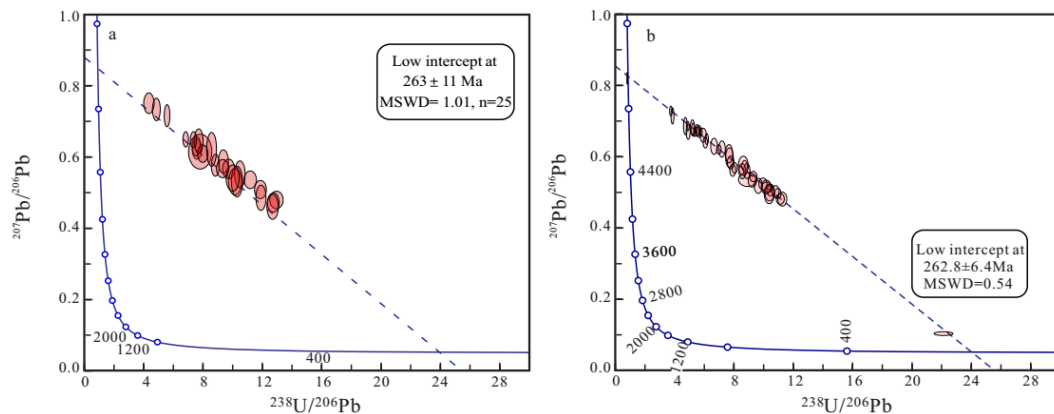


图 6 水口菁杂岩体辉长岩中磷灰石 (a) 和辉石闪长岩中磷灰石 (b) 年龄谐和图

Fig. 6 Concordia diagrams of ages for apatite from the gabbro (a), apatite from the pyroxene diorite (b), within the Shuikoujing complex.

辉长岩中的磷灰石微量元素结果显示 U 含量相对较低 ($3.87 \sim 12.1 \times 10^{-6}$), Th 含量相对较高 ($38.0 \sim 154 \times 10^{-6}$), 同时还有较高的 Sr 含量 ($1499 \sim 1951 \times 10^{-6}$), ΣREE 含量也较高 ($2080 \sim 2679 \times 10^{-6}$), ΣLREE 含量在 $1853 \sim 2354 \times 10^{-6}$ 之间, 平均为 2084×10^{-6} , ΣHREE 含量在 $226 \sim 324 \times 10^{-6}$ 之间, 平均为 264×10^{-6} , $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$ 为 7.25~8.92 之间, 平均为 7.90, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 在 17.6~21.9 之间, 平均 19.8, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 在 4.30~5.65, 平均 4.69, $(\text{Sm}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 在 3.53~4.82

之间, 平均 4.24, Sr/Y 在 3.04~4.68 之间, 平均 3.78, Eu/Eu* 在 1.01~1.11 之间, 平均 1.06 (附表 2)。在球粒陨石标准化稀土配分模式图上呈右倾型, 富集轻稀土、亏损重稀土, 轻微的 Eu 正异常 (图 7a)。这些地球化学特征与大多数碱性岩-碳酸岩中磷灰石类似 (Hu *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2021)。

辉石闪长岩中磷灰石微量元素结果显示具有相对较低的 U ($4.53\sim10.7\times10^{-6}$) 和较高的 Th ($87.1\sim130\times10^{-6}$) 含量, Sr 含量相对于辉长岩中磷灰石偏低 ($1291\sim1871\times10^{-6}$), ΣREE 含量与辉长岩中磷灰石相近 ($1900\sim2599\times10^{-6}$), ΣLREE 含量在 $1714\sim2368\times10^{-6}$ 之间, 平均为 2032×10^{-6} , ΣHREE 含量在 $186\sim232\times10^{-6}$ 之间, 平均为 210×10^{-6} , $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 9.21~10.1 之间, 平均为 9.66, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 在 13.5~16.7 之间, 平均 14.6, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 在 2.60~3.57, 平均 2.98, $(\text{Sm}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 在 4.24~5.62 之间, 平均 4.94, Sr/Y 在 2.42~5.34 之间, 平均 3.68, Eu/Eu* 在 1.03~1.12 之间, 平均 1.07 (附表 2)。在球粒陨石标准化稀土配分模式图上同样呈右倾型, 富集轻稀土、亏损重稀土以及轻微的 Eu 正异常 (图 7b)。

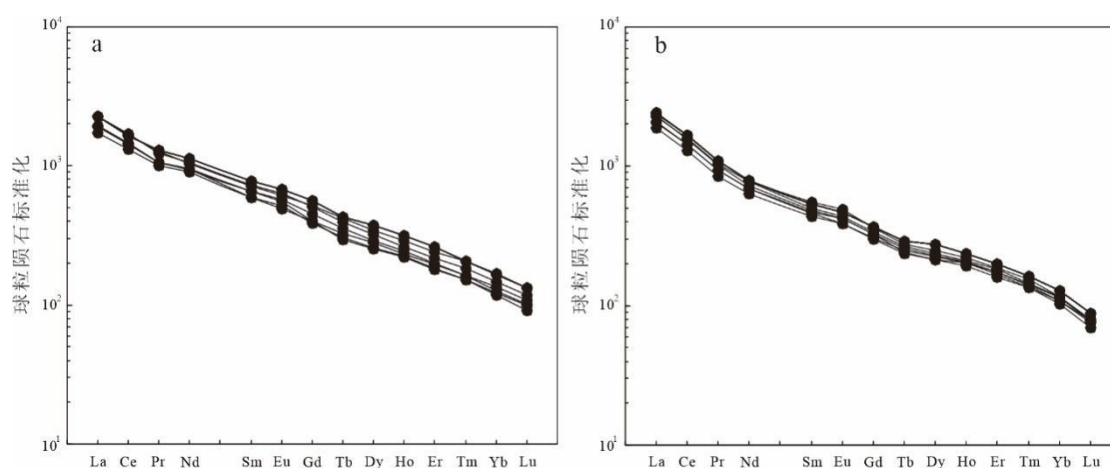


图 7 辉长岩中磷灰石 (a) 和辉石闪长岩中磷灰石 (b) 稀土配分模式图 (标准化值据 Sun and Mc Donough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized rare earth element (REE) distribution patterns of apatite from gabbro (a), apatite from pyroxene diorite (b).

3.2 磷灰石 Sr 同位素组成

水口菁辉长岩和辉石闪长岩中磷灰石的 Sr 同位素分析结果见附表 3。结果显示辉长岩和辉石闪长岩中磷灰石的初始 Sr 同位素比值均较低, 具有典型的幔源特征。其中, 辉长岩中磷灰石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.70414~0.70446, 平均值为 0.7043; 辉石闪长岩中磷灰石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.70410~0.70430, 平均值 0.7042。这一结果与邻区鸡街杂岩体 Sr 同位素组成范围基本一致 (赵正等, 2012), 也与峨眉山高钛玄武岩初始岩浆阶段 Sr 同位素范围一致 (Shellnutt, 2014; Tang *et al.*, 2021)。

3.3 全岩地球化学特征

本次研究对水口菁杂岩体中具有代表型的岩石开展了全岩主微量分析, 具体分析结果见

附表 4.

水口菁地区辉石岩、辉长岩、钛铁霞辉岩、霓霞钠辉岩、霞石正长岩和辉石闪长岩 SiO_2 含量分别为 42.4%、44.6%、40.8%、48.5%、54.5%和 50.0%。按 SiO_2 含量划分，辉石岩、辉长岩和钛铁霞辉岩属超基性岩石，霓霞钠辉岩和辉石闪长岩为基性岩石，霞石正长岩属中性岩，此处的辉石闪长岩中因含有大量的角闪石和少量辉石导致 SiO_2 含量偏低，故不属于典型的闪长岩。岩石全碱含量方面：辉石岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 4.31%、辉长岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 3.47%、钛铁霞辉岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 3.47%、霓霞钠辉岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 10.9%、霞石正长岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 13.09%、辉石闪长岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 11.80%。可以看出，水口菁岩体样品整体 SiO_2 含量较低，而 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 的含量较高，说明水口菁岩体具有碱性亲和力。从超基性岩向基性岩演化，岩体的 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、全碱含量等都出现增高，岩体总体向着富硅、富碱方向发展。

根据主量数据的 TAS 图解，所有样品均落入碱性区域（图 8a），其中 23SKJ-7A、7B 样品落在霞石正长岩区域内，23SKJ-6 样品落入辉长岩区域内，与岩相学观察结果一致；而 23SKJ-7C、7D 样品则落入似长岩区域，根据岩相学观察表明其主要由角闪石和斜长石及少量辉石组成，故定名为辉石闪长岩。

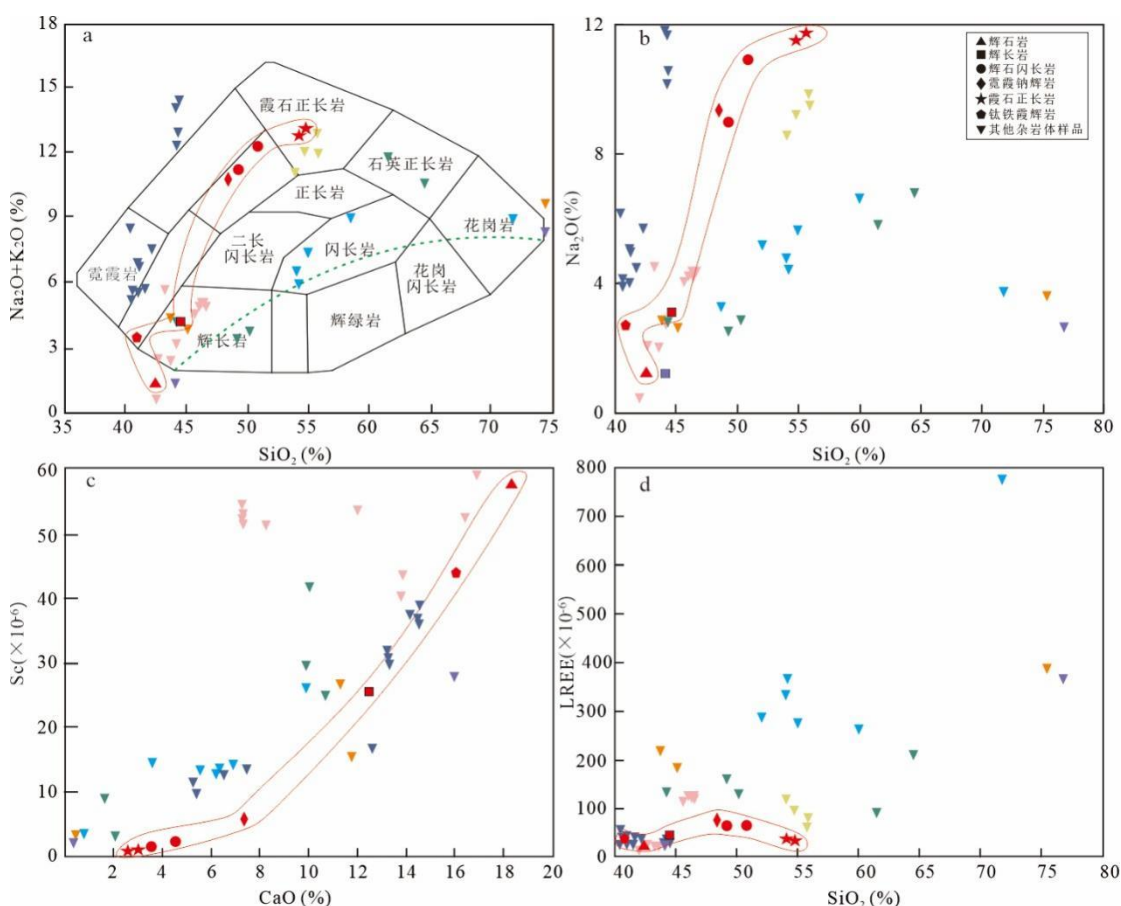


图 8 攀西裂谷杂岩体地球化学分类图解

图例颜色指代：红色—水口菁杂岩体（本次研究）；粉色—水口菁杂岩体（前人）；橙色—红格杂岩体；黄色—猫猫沟杂岩体；紫色—太和杂岩体；青色—攀枝花杂岩体；绿色—白

马杂岩体；蓝色—鸡街杂岩体（数据来自于 Zhong et al., 2011；罗震宇等，2006；赵正等，2012）（底图自 Middlemost, 1994）

Fig. 8 Geochemical classification diagram of the Panxi rift

(a) TAS 图解；(b) $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ 图解；(c) CaO-Sc 投图；(d) $\text{SiO}_2\text{-LREE}$ 投图

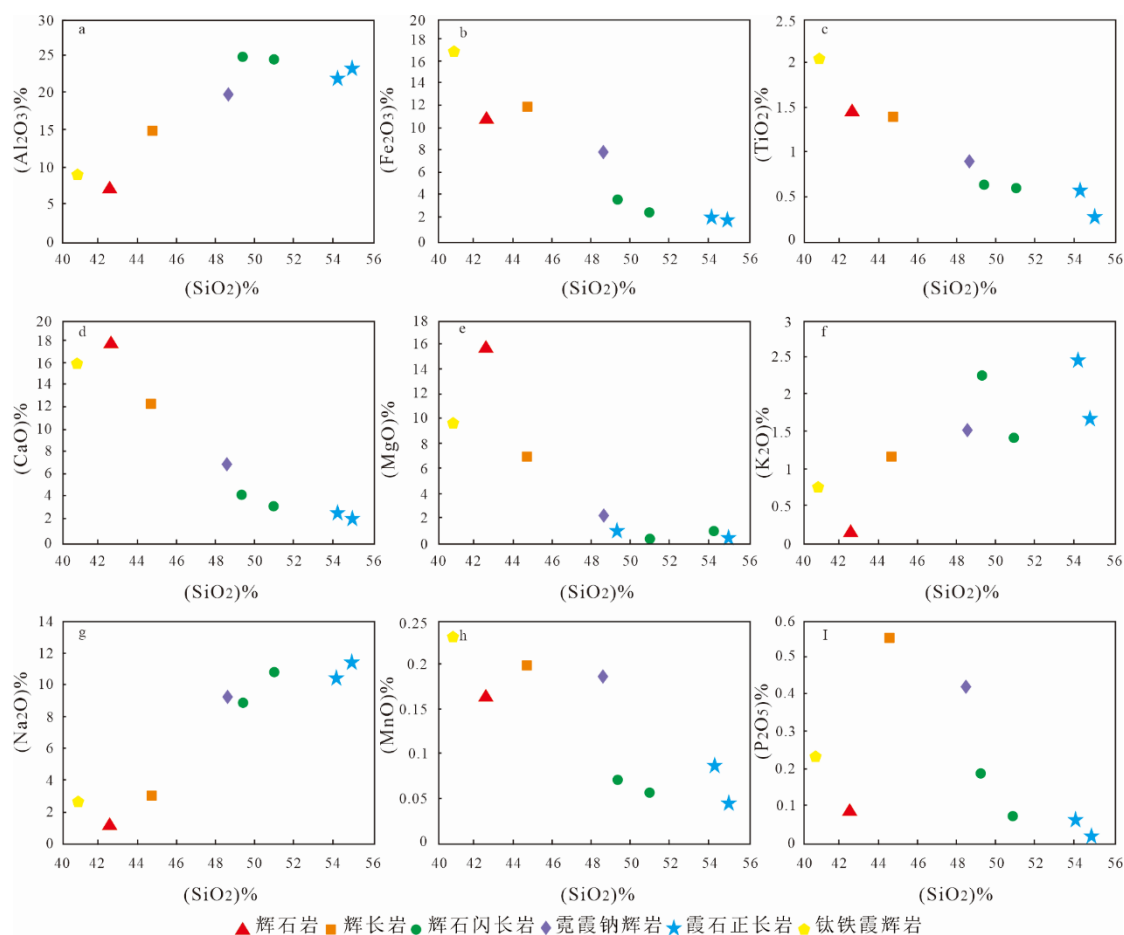


图 9 水口菁碱性岩哈克图解

Fig. 9 Harker diagrams of Shuikoujing alkaline rocks

水口菁地区辉石岩 CaO 、 TFe_2O_3 和 MgO 含量分别为 18.34%、11.26%、15.93%；辉长岩 CaO 、 TFe_2O_3 和 MgO 含量分别为 12.48%、12.35%、7.06%；钛铁霞辉岩 CaO 、 TFe_2O_3 和 MgO 含量分别为 16.04%、17.22%、9.72%；霓霞钠辉岩 CaO 、 TFe_2O_3 和 MgO 含量分别为 7.36%、8.02%、2.28%；霞石正长岩 CaO 、 TFe_2O_3 和 MgO 含量为 2.81%、2.22%、0.65%；闪长岩 CaO 、 TFe_2O_3 和 MgO 含量分别为 4.08%、3.40%、0.68%。辉石岩、辉长岩、钛铁霞辉岩、霓霞钠辉岩、霞石正长岩和闪长岩的 $\text{Mg}^\#$ 依次为 73.7、53.2、52.8、36.0、32.5、27.1，表明从超基性岩到中性岩遵循了很好的岩浆分异演化过程。结合 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ 主量投图可知，随着岩浆演化的进行，水口菁各类碱性岩之间呈现出良好的线性关系，且演化过程中由结晶分异作用主导(图 8b)。

在微量元素组成上，辉石岩、辉长岩、钛铁霞辉岩、霓霞钠辉岩、霞石正长岩和闪长岩

的 ΣREE 分别为 33.3×10^{-6} 、 56.5×10^{-6} 、 46.9×10^{-6} 、 89.5×10^{-6} 、 40.9×10^{-6} 、 73.1×10^{-6} 。LREE/HREE 比值分别为 3.44、3.11、3.92、4.97、5.59、6.12。由此可见，这六类岩石稀土总量均不高，相对富集轻稀土元素且轻、重稀土存在不同程度的分馏，其中霞石正长岩和闪长岩分异程度最高。在球粒陨石标准化稀土配分模式图上，这些岩石均呈现为轻稀土元素富集的右倾型配分模式（图 9a），且有轻微的正 Eu 异常， δEu 分别为 1.29、1.15、1.26、1.22、1.38、1.21，表明没有斜长石的结晶分异（Yang *et al.*, 2022）。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上，可观察到从超基性岩向中性岩演化过程中，大离子亲石元素（Rb、K、Ba 和 Sr）具有逐渐升高的趋势。高场强元素（Nb、Ta、Zr 和 Hf）虽然相对亏损，但仍然具有随岩浆演化逐渐升高的趋势。而 P 和 Ti 元素则在不同岩石中分异较为明显，Ti 元素相对富集于超基性的辉石岩、辉长岩和钛铁霞辉岩中，随岩浆的演化，在基性的霓霞钠辉岩和闪长岩及中性的霞石正长岩中，Ti 含量逐渐降低。P 元素相对富集于辉长岩、钛铁霞辉岩及霓霞钠辉岩中，在霞石正长岩中含量较低，整体上来看，同样是随着岩浆的演化，P 元素含量逐渐降低。推断 Ti 和 P 元素含量的变化可能与岩浆演化早期大量磁铁矿、钛铁矿和磷灰石的分离结晶有关。

总体上来看，水口菁岩体具有富 Ca、Na、Al、Fe、Mg，贫 K、Mn、P、Ti 的特征，同时也注意到 Sc 在辉石岩、钛铁霞辉岩和辉长岩中含量较高，由于 Ca 主要赋存于辉石中，通过 CaO 与 Sc 元素投图，发现 CaO 与 Sc 含量具有很好的正相关关系（图 8c），表明 Sc 主要赋存于辉石中，这也与前人的研究结论相符（Zhou *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2023）。

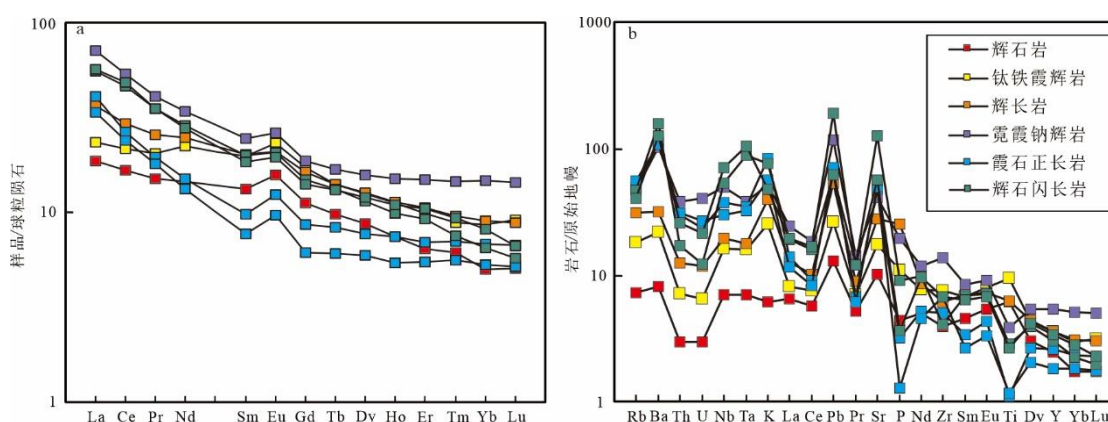


图 10 水口菁杂岩体球粒陨石标准化稀土配分模式图 (a) 原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b) (标准化值据 Sun and Mc Donough, 1989)

Fig. 10 Chondrite-normalized rare earth element distribution pattern diagram (a) and the primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of the Shuikoujing complex

4 讨论

4.1 水口菁杂岩体形成时代

前人研究通常把攀西裂谷内的峨眉山玄武岩、中酸性碱性侵入岩和基性-超基性侵入岩共生特征称为“三位一体”（罗震宇等，2006；赵正等，2012）。例如，攀枝花、白马、太和、红格、新街、猫猫沟等碱性侵入岩的形成时代均为 260 Ma 左右，与峨眉山玄武岩主喷

发时间基本一致（罗震宇等，2006; Zhou *et al.*, 2005; Zhong *et al.*, 2011; Shellnutt, 2014; Tang *et al.*, 2021）。本文通过对水口菁辉长岩和辉石闪长岩中大量结晶的磷灰石开展 U-Pb 测年，首次获得了与峨眉山玄武岩主喷发期较为一致的年龄，分别为 263 ± 11 Ma 和 262.8 ± 6.4 Ma，表明水口菁碱性侵入岩的形成时代为~263 Ma，结合磷灰石一致的 Sr 同位素特征进一步表明水口菁地区基性-超基性岩与偏中性的辉石闪长岩是同源岩浆快速分异演化的产物。由此可见，攀西裂谷南段的碱性杂岩体仍然与峨眉山大火成岩省早期岩浆活动存在紧密联系。

表 1 攀西裂谷部分碱性侵入岩年龄统计

Table. 1 Age statistics of the complex in the Panxi Rift

矿床或成矿岩体	分析对象	测试方法	年龄(Ma)	资料来源
水口菁	辉长岩	磷灰石 LA-ICP-MS	263 ± 11	本次研究
	闪长岩	磷灰石 LA-ICP-MS	262.8 ± 6.4	本次研究
	辉长岩	斜锆石 LA-ICP-MS	210 ± 3	Yang <i>et al.</i> (2022)
猫猫沟	霞石正长岩	锆石 SHRIMP	261.6 ± 4.4	罗震宇等 (2006)
白马	辉长岩	锆石 LA-ICP-MS	258.2 ± 2.2	Zhong <i>et al.</i> (2011)
	辉长岩	锆石 SHRIMP	261 ± 2	Shellnutt <i>et al.</i> (2009)
太和	辉长岩	锆石 LA-ICP-MS	258.8 ± 2.3	Zhong <i>et al.</i> (2011)
	辉长岩	锆石 SHRIMP	259 ± 3	Shellnutt <i>et al.</i> (2014)
攀枝花	辉长岩	锆石 LA-ICP-MS	255.4 ± 3.1	Zhong <i>et al.</i> (2011)
	辉长岩	锆石 LA-ICP-MS	257.9 ± 2.4	Zhong <i>et al.</i> (2011)
红格	辉长岩	锆石 SHRIMP	263 ± 3	Zhou <i>et al.</i> (2005)
	辉长岩	锆石 SIMS	258.7 ± 2	Zhong <i>et al.</i> (2011)
	辉长岩	锆石 SIMS	258.9 ± 2.1	Zhong <i>et al.</i> (2011)
鸡街	霞辉岩	全岩 $^{40}\text{Ar}-\text{Ar}^{39}$	193.5 ± 3.3	刘红英等 (2004)

（数据收集自 Yang *et al.*, 2022; 罗震宇等，2006; Zhong *et al.*, 2011; Shellnutt *et al.*, 2009; She *et al.*, 2014; 刘红英等，2004a）

值得注意的是，Yang *et al.* (2022) 对水口菁辉长岩中斜锆石开展了 U-Pb 定年结果为 210 ± 3 Ma，但在定年过程中所采用的校正标样为锆石标样，因锆石和斜锆石存在较为显著的基体效应（李艳广等，2015），故而导致其斜锆石年龄不太准确。此外，前人对邻区的鸡街碱性杂岩体也开展过一些年代学研究，夏斌等（2004）从霞辉岩中分选出 9 颗锆石获得 5 个数据点的 U-Pb 年龄为~204 Ma，但难以解释其中存在岩浆复合型锆石老核的年龄（~2000 Ma、~680 Ma 和~300 Ma）。基性-超基性等硅不饱和岩浆中难以结晶出锆石，这些锆石很可能是晚期中性岩脉中携带的锆石，不能准确代表鸡街碱性岩的形成时代。刘红英等（2004a）对鸡街霞辉岩开展了 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年结果为~194 Ma，但其年龄谱线并非一条直线，而具有明显的离散现象，表明 K-Ar 同位素体系受到了后期地质事件的扰动，所以该年龄也不能准确代表岩体形成时代。本次研究选取了水口菁碱性岩中最为常见的副矿物磷灰石开展 U-Pb 定年工作，其年龄结果具有代表性，为攀西裂谷南段分布的碱性杂岩体与峨眉山大火成岩省早期岩浆活

动之间的成因联系提供了可靠的年代学证据。

本次获得的水口菁杂岩体形成时代与攀西裂谷内的其他碱性侵入体具有高度可对比性（表 1）。攀枝花岩体位于峨眉山大火成岩省中心位置，大量研究显示其层状辉长岩的形成时代集中在~260 Ma 左右，其岩浆成因与峨眉山地幔柱作用有关（Zhou *et al.*, 2009; Zhong *et al.*, 2011; Shellnutt, 2014）。紧邻攀枝花的红格、白马、太和等碱性侵入岩也被报道其岩体形成时代为 262~258 Ma 之间（Zhong *et al.*, 2011; Shellnutt *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2021），且往往伴随初始岩浆分异结晶形成的花岗岩等中酸性岩石。位于川西会理的猫猫沟霞石正长岩和闪长岩具有与水口菁相似的岩相组合特征，其形成时代为 261.6 ± 4.4 Ma，与峨眉山玄武岩具有相似的源区，都与峨眉山地幔柱活动有关（罗震宇等，2006）。综上所述，沿攀西裂谷发育的碱性杂岩体在形成时代上集中为~260 Ma，其形成背景均与峨眉山地幔柱作用有关。本次研究所报道的水口菁杂岩体年龄（~263 Ma）进一步明确了攀西裂谷南段碱性岩与峨眉山玄武岩的成因联系，且在年龄分布上略早于峨眉山玄武岩的主喷发期，因此，攀西裂谷南段发育的这些碱性杂岩体很可能是最早期峨眉山大火成岩省岩浆演化的产物。

4.2 岩浆演化与分异

全岩地球化学分析表明水口菁杂岩体中各类岩石均属于碱性岩系列，稀土配分模式均具有富集 LREE，轻、重稀土分馏大，富集大离子亲石元素及微弱的 Eu 正异常特征，表明岩浆源区未经历斜长石的分离结晶过程。结合哈克图解可知水口菁杂岩体经历了从辉石岩、辉长岩到钛铁霞辉岩、霓霞钠辉岩再到霞石正长岩的岩浆演化过程（图 9）。综合前人研究认识，在幔源岩浆演化初期阶段，Mg、Co、Ni 主要赋存于橄榄石中，Ca 和 Sc 主要赋存于辉石和角闪石中，MgO 和 CaO 与 Sc、Co、Ni 的线性关系表明岩浆演化过程受橄榄石和辉石的分离结晶控制，这些证据表明水口菁碱性岩中 Sc 含量变化主要受辉石和角闪石分离结晶作用控制（Zhou *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2023）。岩相学观察显示辉石和角闪石存在典型的环带结构以及辉长岩和辉石闪长岩一致的侵位时代表明水口菁杂岩体早期经历了一个快速侵位、分异结晶、固结成岩的过程。这些特征与鸡街碱性杂岩体的结晶分异演化过程基本相似（赵正等，2010）。

值得注意的是，水口菁辉长岩和辉石闪长岩在化学成分上具有较好的连续性，表明水口菁碱性杂岩体从基性岩到偏中性的闪长岩是一个快速分异演化的产物，这与两类岩石中磷灰石一致的 Sr 同位素组成相吻合（附表 3）。水口菁辉长岩和辉石闪长岩中磷灰石均有富 Sr 和 LREE 以及右倾型稀土配分模式特征，与典型碱性岩体系中磷灰石微量元素组成特征相似（Hu *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2021）。从辉长岩到辉石闪长岩，随着磷灰石 Sr 含量的降低，有 $(La/Sm)_N$ 增加而 $(Sm/Yb)_N$ 降低的趋势（图 11a-b），表明在相对早期的辉长岩结晶过程中，磷灰石对 LREE 和 Sr 均有着较强的相容性；而在相对晚期的辉石闪长岩中，角闪石和榍石的分离结晶导致熔体中的 M-HREE 被分配进入到角闪石和榍石，致使晚期结晶的磷灰石中 $(La/Sm)_N$ 的升高和 $(Sm/Yb)_N$ 的降低（吴渴等，2024）。通常来说，磷灰石中 Sr 含量的下降可能与斜长石分离结晶作用有关，两类磷灰石中 Sr/Y 与 Eu 异常存在一定程度的负相关性（图 11c），尤其是辉石闪长岩中磷灰石相对下降的 Sr 含量，说明在岩浆分异演化过程中 Sr 元素的变化也受斜长石结晶的控制。此外，岩相学观察显示辉石闪长岩中角闪石包裹有磷灰石，其晶体特征与辉长岩中磷灰石基本一致（图 4），也暗示辉长岩和辉石闪长岩属于同源

岩浆并经历了一个快速岩浆分异演化过程。

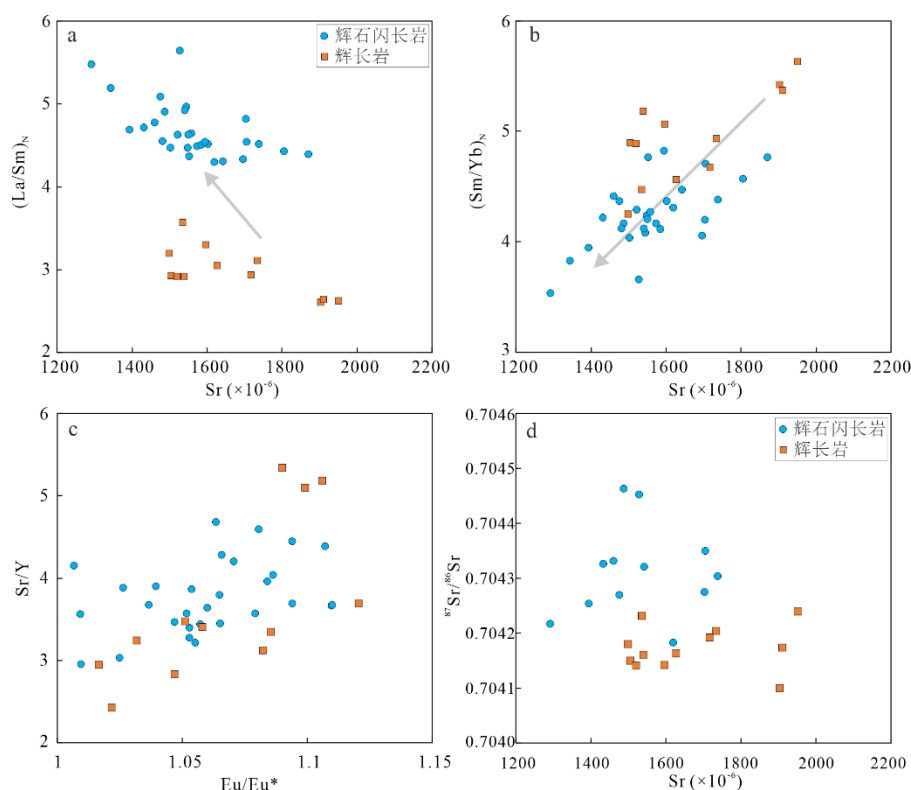


图 11 水口菁辉长岩和辉石闪长岩中磷灰石微量元素二元图解及 Sr 同位素组成

Fig. 11 Binary diagram and Sr isotopic composition of trace elements in apatite from the Shuikoujing gabbro and pyroxene diorite.

水口菁的岩石地球化学特征与邻区鸡街杂岩体基本相似，都具有贫硅富碱、富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素以及轻稀土富集的稀土配分模式，以及相似的 Sr 同位素组成，表明它们可能源自同一地幔源区（吴静等，1994；黄智龙等，1995；赵正等，2012）。与之不同的是，鸡街碱性杂岩体在岩浆演化过程基本没有地壳物质的混染（黄智龙等，1995；赵正等，2010；2012）。Nb 和 Ta 作为孪生元素在岩浆演化过程中通常具有一致的行为，不易受到分离结晶的控制，水口菁地区辉石闪长岩明显降低的 Nb/Ta 比值（16.1~18.7）暗示其可能受到地壳物质的混染。进一步结合 SiO₂ 与 Nb/La 和 Ce/Pb 呈现的良好负相关性（图 12a-b），表明水口菁碱性杂岩体在岩浆演化过程中受到一定程度的地壳混染作用，同时也与全岩微量元素蛛网图上显示的 Pb 正异常相互佐证（图 10b）。

通过对攀西裂谷分布的不同杂岩体中辉长岩样品主微量数据分析发现白马、红格等辉长岩中 CaO、MgO 含量低于水口菁辉长岩，且 Rb、Sr 等大离子亲石元素含量均高于水口菁地区。通过地球化学特征对比，进一步发现白马、红格、太和等杂岩体 LREE 含量及 SiO₂ 明显高于水口菁和鸡街杂岩体（图 8b、d），表明攀西裂谷中段的杂岩体岩浆演化分异程度更高，这也与这些岩体通常伴生有酸性花岗岩的产出相对应；而水口菁和鸡街地区的碱性杂岩体均为硅不饱和岩浆，且无同期酸性岩浆的出现。通过 CaO-Sc 图解可以发现，攀西裂谷南段水口菁和鸡街杂岩体的 Sc 含量显著高于北边的其他杂岩体（图 8c），

故合理推测 Sc 优先富集于峨眉山地幔柱作用的早期岩浆辉石中,而这些早期岩浆活动主要发生在攀西裂谷南段.

4.3 水口菁杂岩体形成构造背景

碱性侵入岩是一类富含碱质元素(钠、钾)的火成岩,这些岩石在探讨幔源岩浆演化过程中具有重要的指示作用,而且它们的形成常常与特定的大地构造环境相关联(周玲棣和赵振华, 1994). 例如,碱性岩-碳酸岩主要沿裂谷带分布,碱性花岗岩主要沿裂谷、板内深断裂、大陆板块边缘深断裂带分布(赵振华和周玲棣, 1994; 杨学明和杨晓勇, 1998).

前人研究表明,攀西裂谷的岩浆活动与峨眉山大火成岩省的岩浆活动在时间上具有同步性,并且攀西地区的中酸性碱性侵入岩与峨眉山玄武岩、基性-超基性侵入岩在空间上紧密伴生(夏斌等, 2004). 攀西地区作为扬子板块西缘的重要组成部分,从元古代至新生代经历了复杂的构造演化,前人针对攀西裂谷分布的太和、白马、猫猫沟、攀枝花、新街等一系列基性-超基性碱性杂岩体进行了大量研究. 水口菁碱性杂岩体在形成时代和空间分布及地球化学特征方面与攀西裂谷带内分布的其他碱性杂岩体具有高度可比性. 在区域上,水口菁杂岩体位于攀西裂谷南段,地处滇中罗茨地区,空间上与峨眉山玄武岩紧密伴生. 在 Nb-Zr-Y 图解中,除辉石岩样品落在地幔柱型洋中脊玄武岩区域内(P-MORB),其它样品均落在板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩区域内(图 12c-d). 在 w(Th/Hf)-w(Ta/Hf)图解上,辉石岩及钛铁霞辉岩落在大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区,霓霞钠辉岩和闪长岩落在陆内裂谷碱性玄武岩区,辉长岩和闪长岩落入地幔热柱玄武岩区(图 12). 综上所述,我们认为水口菁杂岩体主要显示了与洋岛玄武岩 OIB 类似的板内构造背景,岩体的产出构造环境应为大陆型板内拉张环境.

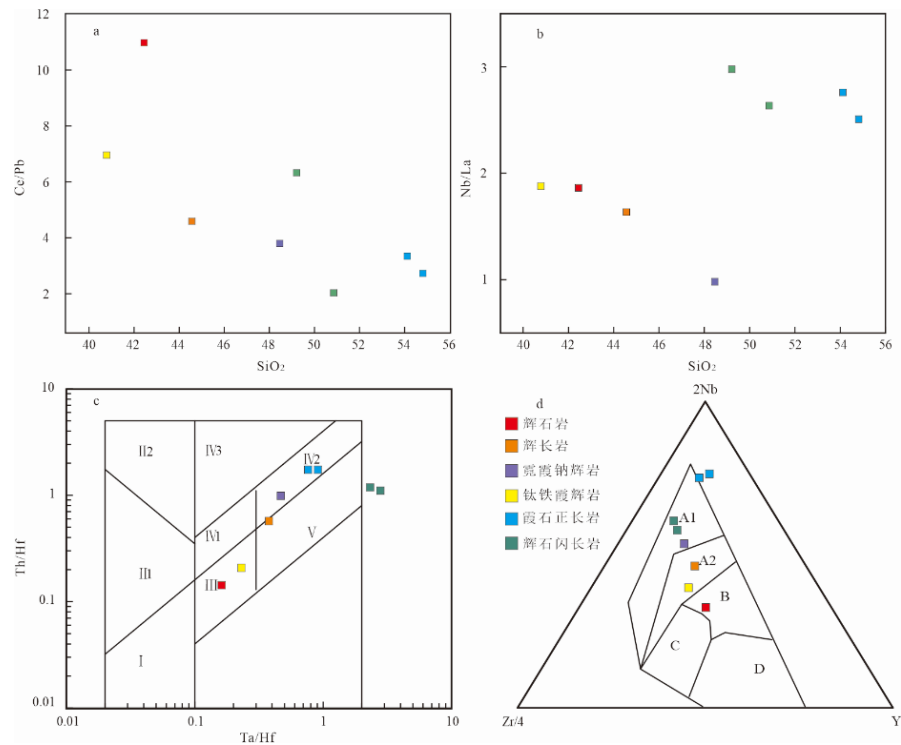


图 12 水口菁杂岩体 SiO₂-Ce/Pb 图解 (a)、SiO₂-Nb/La 图解 (b)、Th/Hf-Ta/Hf 图解

(c) 及 2Nb-Zr/4-Y 图解 (d)、

Fig. 12 SiO₂-Ce/Pb discrimination diagram (a)、SiO₂-Nb/La discrimination diagram (b)、Th/Hf-Ta/Hf discrimination diagram (c) and 2Nb-Zr/4-Y discrimination diagram (d) of the Shuikoujing complex

(I: 板块发散边缘 N-MORB 区; II: 板块汇聚边缘 (III1: 大洋岛弧玄武岩区 II2: 陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区); III: 大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区; IV: 大陆板内 (IV1: 陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区 IV2: 陆内裂谷碱性玄武岩区 IV3: 大陆拉张带或初始裂谷玄武岩区); V: 地幔热柱玄武岩区)

(A1: 板内碱性玄武岩 A2: 板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩 B: P 型洋中脊玄武岩 (P-MORB) C: 板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩 D: N 型洋中脊玄武岩 (N-MORB) 和火山弧玄武岩)

5 结论

(1) 磷灰石 U-Pb 年龄表明水口菁碱性杂岩体形成时代为~263 Ma, 与峨眉山大火成岩省主喷发时间及攀西地区其他碱性杂岩体早期侵位时间一致.

(2) 全岩地球化学分析表明水口菁杂岩体经历了从超基性-基性到偏中性的岩浆演化, 辉石-辉长岩与辉石闪长岩应该是同源岩浆快速分异演化的产物.

(3) 水口菁碱性杂岩体在形成时代和地球化学特征方面与攀西裂谷带内分布的其他碱性杂岩体具有高度可比性, 其原始岩浆的形成与攀西裂谷和峨眉山地幔柱的活动紧密相关, 起源于板内拉张环境下的岩石圈地幔低程度部分熔融, 并经历了快速的岩浆分异演化.

参考文献

References

- Chew, D. M., Sylvester, P. J., Tubrett, M. N., 2011. U-Pb and Th-Pb dating of apatite by LA-ICPMS. *Chemical Geology*, 280(1-2): 200-216. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.11.010>
- Chen, Z., Zeng, Z., Wang, X., et al., 2018. U-Th/He dating and chemical compositions of apatite in the dacite from the southwestern Okinawa Trough: Implications for petrogenesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 161: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.04.032>
- Cao, J., Chen, M. M., Wan, S. M., et al., 2024. Petrogenesis and deep geodynamic processes in the Permian alkaline brilliant porphyry of the Tarim Large Igneous Province. *Earth Sciences*, 49 (07): 2448-2474. (in Chinese with English abstract)
- Guo, Y. S., Zen, P. S., Guo, X., et al., 2012. Problems related to scandium and the study of scandium-bearing nature of basal-ultramafic rocks in central Yunnan. *Journal of Earth Sciences*, 33(05): 745-754. (in Chinese with English abstract)
- Hu, L., Li, Y., Wu, Z., et al., 2019. Two metasomatic events recorded in apatite from theore-hosting dolomite marble and implications for genesis of the giant Bayan Obo REE deposit, Inner Mongolia, Northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 172: 56-65. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.08.022>
- Huang, Z. L., Yang, Y. B., Wu, J., et al., 1995. Geochemical characterization and genesis of alkaline ultramafic rocks in the Lufeng Jijie mafic body, Yunnan. *Geochemistry*, (03):276-286. (in Chinese)
- Liu, Y., Hu, Z., 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. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Lu, J., Chen, W., Ying, Y., et al., 2021. Apatite texture and trace element chemistry of carbonatite-related REE deposits in China: Implications for petrogenesis. *Lithos*, 398-399: 106276. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106276>
- Lai, S. C., Yang, H., Zhang, F. Y., et al., 2024. Geochemical characteristics of Early Paleozoic alkaline rocks in the South Qinling Mountains and their genesis mechanisms: research progress and prospects. *Journal of Geology*, 98(03): 799-828. (in Chinese with English abstract)
- Lou, Y. L., Liu, X. H., Zeng, H., et al., 2024. Genesis of the Xingfengshan gold-tungsten deposit, Xiangzhong: hydrothermal apatite U-Pb dating and in situ S isotope constraints. *Earth Science*, 49 (12): 4265-4277. (in Chinese with English abstract)
- Li, Y. G., Wang, S. S., Liu, M. W., et al., 2015. Baddeleyite LA-ICP-MS U-Pb dating method and application. *Journal of Geology*, 89(12): 2400-2418. (in Chinese)
- Liu, H. Y., 2005. Chronologic study of alkaline rocks in West Panzhi and their geologic significance. Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry). (in Chinese with English abstract)
- Liu, H. Y., Xia, B., Zhang, Y. Q., 2004a. ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of ultramafic alkaline rocks and layered gabbro within the West Rift Zone of Panxi - an example from the Jijie, Daxiangping and Taihe bodies. *Geological Review*, (02): 175-179. (in Chinese)
- Liu, H. Y., Xia, B., Zhang, Y. Q., 2004b. Zircon SHRIMP dating of the Huili Cat Cat Gou nannofossil alkalic rocks from Huili, West Panxi, and its geological significance. *Science Bulletin*, 49(14): 1431-1438. (in Chinese)
- Luo, Z. Y., Xu, Y. G., He, B., et al., 2006. On the diagenetic link between the Xia Shi orthogneiss of Cat Cat Gou, Panxi, and the Emeishan Great Igneous Province: Chronological and petrogeochemical evidence. *Science Bulletin*, (15): 1802-1810. (in Chinese)
- Wu, J., Yan, Y. B., Huang, Z. L., 1994. Composition and evolution of olivine, pyroxene and hornblende in ultramafic alkaline rock belts of the Roots area, central Yunnan. *Yunnan Geology*, (01). (in Chinese)
- Wu, K., Yan, X. Y., Yang, D. H., 2024. Petrogenesis of the Early Cretaceous Jiguanshan granite porphyry, Liaodong Peninsula: petrographic geochemistry and constraints from monomineral U-Pb-Hf-Nd isotopes. *Geological Frontiers*, 1-24. (in Chinese with English abstract)
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4), 215 – 224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Ramos, F. C., Wolff, J. A., Tollstrup, D. L., 2004. Measuring $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in minerals and groundmass from basalts using LA-MC-ICPMS. *Chemical Geology*, 211(1-2): 135-158. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.025>
- Shellnutt, J. G., Zhou, M., Zellmer, G. F., 2009. The role of Fe-Ti oxide crystallization in the formation of A-type granitoids with implications for the Daly gap: An example from the Permian Baima igneous complex, SW China. *Chemical Geology*, 259(3-4): 204-217. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.044>
- Shellnutt, J. G., 2014. The Emeishan large igneous province: A synthesis. *Geoscience Frontiers*, 5(3): 369-394. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.07.003>

- Sun, S. S., Mc Donough, 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>
- Tang, Q., Li, C., Ripley, E. M., et al., 2021. Sr-Nd-Hf-O isotope constraints on crustal contamination and mantle source variation of three Fe-Ti-V oxide ore deposits in the Emeishan large igneous province. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 292: 364-381. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.10.006>
- Thomson, S. N., Gehrels, G. E., Ruiz, J., et al., 2012. Routine low-damage apatite U-Pb dating using laser ablation-multicollector-ICPMS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(2): 1-23. <https://doi.org/10.1029/2011GC003928>.
- Xia, B., Liu, H. Y., Zhang, Y. Q., 2004. Zircon SHRIMP U-Pb ages and geologic significance of sodic alkaline rocks from the Paleorift Valley, West Panzhi - An example from the Hongge, Baima and Jijie bodies. *Geotectonics and Metallogeny*, (02): 149-154. (in Chinese)
- Yang, Y. H., Wu, F. Y., Xie, L. W., et al., 2011. High-precision direct determination of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio of bottled Sr-rich natural mineral drinking water using multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 66: 656-660. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2011.07.004>
- Yang, B., Wang, Z. Z., Zhou, Q., et al., 2022. A Petrological, Geochemical, and Geochronological Study of Shuikou Ultra-basic Rock Mass in Wuding County, Yunnan Province, China. *Open Journal of Geology*, 12, 587-612. <https://doi.org/10.4236/ojg.2022.128027>
- Yang, Y. B., 1985. Magma series of the Central Yunnan Paleorift Belt. *Yunnan Geology*, (04): 353-372. (in Chinese)
- Yang, X. M., Yang, X. Y., M. J. LeBas., 1998. Geogeochemical characterization of carbonate rocks and their geotectonic significance. *Progress in Earth Sciences*, 13(5): 1-10. (in Chinese)
- Zhao, W. W., Zhou, M., Wang, Z., et al., 2023. Potentially important regolith-hosted Sc deposits related to alkaline igneous complexes of the Permian Emeishan large igneous Province, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 252: 105698. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105698>
- Zhong, H., Zhu, W., Hu, R., et al., 2009. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Panzhihua A-type syenitic intrusion in the Emeishan large igneous province, southwest China and implications for growth of juvenile crust. *Lithos*, 110(1-4): 109-128. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.12.006>
- Zhong, H., Campbell, I. H., Zhu, W., et al., 2011. Timing and source constraints on the relationship between mafic and felsic intrusions in the Emeishan large igneous province. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(5): 1374-1395. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.12.016>
- Zhou, M., ROBINSON, P. T., LESHER, C. M., et al., 2005. Geochemistry, Petrogenesis and Metallogenesis of the Panzhihua Gabbroic Layered Intrusion and Associated Fe-Ti-V Oxide Deposits, Sichuan Province, SW China. *Journal of Petrology*, 46(11): 2253-2280. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi054>
- Zhou, M., Zhao, J., Jiang, C., et al., 2009. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: Implications for a possible Permian large igneous province. *Lithos*, 113(3-4): 583-594. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.027>
- Zhou, M., Wang, Z., Zhao, W. W., et al., 2022. A reconnaissance study of potentially important scandium deposits associated with carbonatite and alkaline igneous complexes of the

- Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 236: 105309. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105309>
- Zhao, Z., Qi, L., Huang, Z. L., et al., 2010. Mineralogy and petrochemistry of the Jijie alkaline ultramafic rocks in the southern section of the West Rift Valley, Panxi. *Geological Frontiers*, 17(02): 320-335. (in Chinese with English abstract)
- Zhao, Z., Qi, L., Huang, Z. L., et al., 2012. Trace element and Sr-Nd isotope geochemistry of alkaline ultramafic rocks from Jijie in the southern section of the Phnom Penh Rift Valley and its genesis. *Journal of Petrology*, 28(06): 1915-1927. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, H. Y., Geng, J. Z., Cui, Y. R., et al., 2012. In situ LA-MC-ICP-MSU-Pb isotope dating of apatite microzones. *Earth Journal*, 33(06): 857-864. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, J. S., Wang, J., 2022. Magma-dynamic processes within the Earth's crust and their resource and environmental effects. *Journal of Petrology*, 38(5): 1399-1418. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, L. L., Zhang, Z. H., 1994. Petrological and petrochemical characterization of alkali-rich intrusive rocks in China. *Chinese Science (Series B)*, (10): 1093-1101. (in Chinese)
- Zhang, Y. X., 1997. Types of deposits of the dispersed element scandium and prospects for research. *Geogeochemistry*, (04): 93-97. (in Chinese)

中文参考文献

- 曹俊, 陈苗苗, 万淑敏, 等, 2024. 塔里木大火成岩省二叠纪碱性煌斑岩的岩石成因和深部地球动力学过程. *地球科学*, 49 (07): 2448-2474.
- 郭远生, 曾普胜, 郭欣, 等, 2012. 钕的有关问题暨滇中地区基性-超基性岩含钕性研究. *地球学报*, 33(05): 745-754.
- 黄智龙, 颜以彬, 吴静, 1995. 云南禄丰鸡街杂岩体中碱性超基性岩地球化学特征及成因探讨. *地球化学*, (03): 276-286.
- 赖绍聪, 杨航, 张方毅, 2024. 南秦岭早古生代碱性岩地球化学特征及其成因机制: 研究进展与展望. *地质学报*, 98(03): 799-828.
- 娄元林, 刘贤红, 曾昊, 等, 2024. 湘中杏枫山金钨矿床成因: 热液磷灰石 U-Pb 定年和原位 S 同位素制约. *地球科学*, 49 (12): 4265-4277.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等, 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用. *地质学报*, 89(12): 2400-2418.
- 刘红英, 2005. 攀西地区碱性岩的年代学研究及其地质意义. 中国科学院研究生院 (广州地球化学研究所).
- 刘红英, 夏斌, 张玉泉, 2004a. 攀西裂谷带内超基性碱性岩和层状辉长岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄——以鸡街、大向坪和太和岩体为例. *地质论评*, (02): 175-179.
- 刘红英, 夏斌, 张玉泉, 2004b. 攀西会理猫猫沟钠质碱性岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. *科学通报*, 49(14): 1431-1438.
- 罗震宇, 徐义刚, 何斌, 等, 2006. 论攀西猫猫沟霞石正长岩与峨眉山大火成岩省的成因联系: 年代学和岩石地球化学证据. *科学通报*, (15): 1802-1810.
- 吴静, 颜以彬, 黄智龙, 1994. 滇中罗茨地区超基性碱性岩带中橄榄石、辉石和角闪石的成份及演化浅析. *云南地质*, (01).
- 吴渴, 闫相宇, 杨冬红, 2024. 辽东半岛早白垩世鸡冠山花岗斑岩的岩石成因: 岩石地球化学及单矿物 U-Pb-Hf-Nd 同位素的制约. *地学前缘*, 1-24.

- 夏斌, 刘红英, 张玉泉, 2004. 攀西古裂谷钠质碱性岩锆石SHRIMP U-Pb年龄及地质意义——以红格、白马和鸡街岩体为例. 大地构造与成矿学, (02): 149-154.
- 颜以彬, 1985. 滇中古裂谷带岩浆系列. 云南地质, (04): 353-372.
- 杨学明, 杨晓勇, M. J. LeBas., 1998. 碳酸岩的地质地球化学特征及其大地构造意义. 地球科学进展, 13(5): 1-10.
- 赵正, 漆亮, 黄智龙, 等, 2010. 攀西裂谷南段鸡街碱性超基性岩矿物学与岩石化学. 地学前缘, 17(02): 320-335.
- 赵正, 漆亮, 黄智龙, 等., 2012. 攀西裂谷南段鸡街碱性超基性岩微量元素和Sr-Nd同位素地球化学及其成因探讨. 岩石学报, 28(06): 1915-1927.
- 周红英, 耿建珍, 崔玉荣, 等, 2012. 磷灰石微区原位LA-MC-ICP-MSU-Pb同位素定年. 地球学报, 33(06): 857-864.
- 周金胜, 王强, 2022. 地壳内的岩浆动力学过程及其资源与环境效应. 岩石学报, 38(5): 1399-1418.
- 周玲棣, 赵振华, 1994. 我国富碱侵入岩的岩石学和岩石化学特征. 中国科学(B辑), (10): 1093-1101.
- 张玉学, 1997. 分散元素钪的矿床类型与研究前景. 地质地球化学, (04): 93-97.