

滇西漕涧地区两类晚奥陶世强过铝花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Hf 同位素特征及对泛非运动的指示

黄亮^{1,2}, 吕勃焱^{1*}, 王晓林¹, 丛峰³, 黄晓明³, 熊波^{2,4}, 宋冬虎⁴

HUANG Liang^{1,2}, LYU Boye^{1*}, WANG Xiaolin¹, CONG Feng³, HUANG Xiaoming³,
XIONG Bo^{2,4}, SONG Donghu⁴

1. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216;

2. 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;

3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;

4. 云南省国土资源规划设计研究院, 云南 昆明 650216

1. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, Yunnan, China;

2. MNR Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Kunming 650051, Yunnan, China;

3. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

4. Yunnan Land Resources Planning and Design Institute, Kunming 650216, Yunnan, China

摘要:滇西云龙县漕涧复式花岗岩体出露于保山地块北端东缘,由早奥陶世、晚奥陶世、晚白垩世、新近纪4期花岗岩组成。以晚奥陶世花岗质岩体为主体,主要岩性为中粒黑云二长花岗岩、似斑状中粗粒黑云二长花岗岩,岩石普遍发育片麻状构造。二者的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 453.9 ± 3.3 Ma 和 456.8 ± 3.5 Ma。二者均属后碰撞环境的高钾钙碱性强过铝花岗岩,富集 K、Rb 等大离子亲石元素,亏损 Zr、Ta、Nb、Th 等高场强元素。在 Sr-Yb 图解上,前者属喜马拉雅型花岗岩,为下地壳环境较高压力条件下的部分熔融物;而后者属南岭型花岗岩,指示了中-上地壳环境较低压力条件下的部分熔融作用;在 B-A 图解上,前者显示白云母过铝花岗岩的趋势,岩浆的形成主要与隆升减压作用相关;而后者显示了含堇青石富黑云母过铝花岗岩的特点,岩浆的形成主要与深部地幔物质上涌导致的增温加热作用有关。锆石 Hf 同位素分析表明,前者 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -11.65 \sim -0.28$, 平均为 -6.36 ; 后者 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -11.61 \sim -1.57$, 平均为 -6.78 , 二者具有大致相当的源区,均为古老的地壳物质,但中粒黑云二长花岗岩中可能有少量地幔物质的加入。综合研究表明,在泛非运动的后碰撞阶段背景下,深部壳-幔物质相互作用的过程可能首先是隆升减压导致下地壳物质的低度部分熔融,随后地幔物质上涌,导致中-上地壳物质的增温加热的较高度部分熔融。该两类晚奥陶世花岗岩属冈瓦纳大陆北缘的小地块之间相互挤压、碰撞的岩浆作用响应,也表明保山地块存在泛非运动。

关键词:滇西; 漕涧复式花岗岩; 晚奥陶世; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 泛非运动; 保山地块

中图分类号: P534.42; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)07-1033-14

Huang L, Lyu B Y, Wang X L, Cong F, Huang X M, Xiong B, Song D H. Zircon U-Pb age, geochemistry and Hf isotope of two types of Late Ordovician super-aluminum granites in the Caojian area of western Yunnan, and its indication to Pan-African movement. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(7): 1033-1046

Abstract: The Caojian complex granite located in Yunlong County of western Yunnan is exposed on the eastern edge of the northern end of the Baoshan block, which is composed of four period granites of Early Ordovician, Late Ordovician, Late Cretaceous and

收稿日期: 2019-05-10; 修订日期: 2020-12-10

资助项目: 中国地质调查局项目《全国陆域及海区地质图件更新与共享》子项目《云南省系列地质图件数据处理与洋板块地质研究》(编号: DD20190370)、《云南 1:5 万归州、宝丰、漕涧、功果街幅区域地质调查》(编号: 1212010000150007-26) 和云南省地勘基金项目《云南 1:5 万马鸣村幅纳章幅越州幅陆良县幅区域地质调查》(编号: D201901)

作者简介: 黄亮(1985-), 男, 高级工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: 409090169@qq.com

* 通信作者: 吕勃焱(1986-), 男, 工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: 121499669@qq.com

Neogene. The main Late Ordovician intrusive is lithologically made of medium grained biotite monzogranite and the porphyritic medium-coarse grained biotite monzogranite, in which gneissic structure is well developed. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages are 453.9 ± 3.3 Ma and 456.8 ± 3.5 Ma, respectively. Both belong to post-orogenic strongly-peraluminous high-K calcalkaline peraluminous granite with enrichment of K, Rb and other large ions lithophile element, but depletion of the high field strength element such as Zr, Ta, Nb, Th etc. According to the Sr-Yb diagram, the former belongs to the Himalayan granite, which is a partial melt under higher pressure in lower crust environment. The latter belongs to the Nanling granite, which indicates partial melting under the condition of lower pressure in the middle-upper crust environment. In the light of A-B diagram, the former shows the trend to muscovite peraluminous granite, and its magma is mainly related to uplift and decompression. The latter shows the characteristics of cordierite-bearing biotite-rich peraluminous granite, and its magma is mainly related to the warming and heating caused by upwelling of the deep mantle materials. Zircon Hf isotope analysis shows that the former yields $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value of $11.65 \sim 0.28$, averaging -6.36 . The latter gives $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value of $11.61 \sim -1.57$, averaging -6.78 . Both share the roughly equivalent source regions, and are ancient crustal materials, with a small amount of mantle material added to the medium grained biotite monzogranite. It shows that the process of deep crust-mantle interaction may be firstly uplift and decompression leading to lower crust materials low-degree partial melting, not far behind, because to upwelling of mantle materials, warmed and heated medium-upper crust materials happened to higher-degree partial melting, in the background of the post-collision phase of the Pan-African movement. The two types of the Late Ordovician granites are the magmatism responses of mutual extrusion and collision between small blocks on the northern edge of Gondwana continent, it shows that there is the Pan-African movement in Baoshan block.

Key words: western Yunnan; Caojian complex granite; Late Ordovician; zircon U-Pb age; Hf isotope; Pan-African movement; Baoshan block

许多地质学家认为,前寒武纪末—早古生代初,泛大陆解体形成三大陆块群,即冈瓦纳超大陆、劳亚超大陆和规模较小的泛华夏大陆,以及其间的原特提斯洋;随之,在劳亚和冈瓦纳超大陆之间不断地有微小陆块裂离出来,增生到位于北部的古亚洲地体,构成了全球规模的特提斯造山带^[1-6]。

滇西地区位于全球性的东特提斯造山带中段(图1),由多个规模不等的地块、构造带或造山带相间构成,该地区的大地构造格局和演化对全球特提斯研究具有重要的地质意义。区内构造-岩浆作用强烈,长期以来成为众多研究者的关注热点。在以往的研究中,东特提斯造山带早古生代的造山运动(泛非运动)研究主要集中于青藏高原南部喜马拉雅、拉萨、羌塘地体和滇西波密—腾冲弧一带^[7-15]①②,而对滇西保山地块研究较少。此外,早古生代以来滇西地区经历多期的造山改造作用,以及远离泛非运动主峰带的保山地块的早古生代运动痕迹早已被分解得不再完整,而前人多认为保山地块不存在泛非运动且为游离于原特提斯大洋中的陆壳残片^[6, 16]①②。

近年的研究表明,保山地块由六库、保山、镇康、潞西等数个小的地块拼合而成,西盟地区可能是一个更小的陆块^①。在这些微小的地块上都有早古生代的岩浆活动记录^[6, 17-19]①②③,因此对这些早古

生代花岗岩的深入研究,对探讨早古生代构造发展演化至关重要。

本次研究的漕涧复式花岗岩出露于六库微小地块南段,与保山地块北端接壤(图1)。前人研究认为漕涧复式花岗岩主期形成于早奥陶世,获得了全岩等时线年龄 472.7 Ma 和锆石 U-Pb 年龄 477.7 Ma^[2, 20]①③。笔者通过 1:5 万区域地质调查,发现早奥陶世花岗岩主要呈残留体分布于漕涧复式花岗岩中,出露面积占比小于 2%,主体部分为晚奥陶世花岗岩,约占 75%,其次为晚白垩世花岗岩,约占 18%,而新近纪花岗岩约为 5%^④(图1)。

本文对漕涧复式花岗岩的晚奥陶世花岗岩进行研究,通过岩石学、U-Pb 年代学、岩石地球化学、Hf 同位素特征分析等,结合区域地质背景,探讨其侵位时代、岩浆源区和区域构造意义。

1 区域地质背景

滇西保山地块位于藏-滇-泰-马中间板块中段,东与昌宁-孟连结合带以柯街-南定河断裂为界,西与波密-腾冲弧以泸水-潞西-瑞丽断裂相邻,北部在碧江一带由于澜沧江断裂和怒江断裂汇拢而消失(图1)。漕涧复式花岗岩产于六库微小地块南端,与保山地块接壤,区内出露的最老地层为上寒武统核桃坪组、沙河厂组、保山组,其为一套低绿

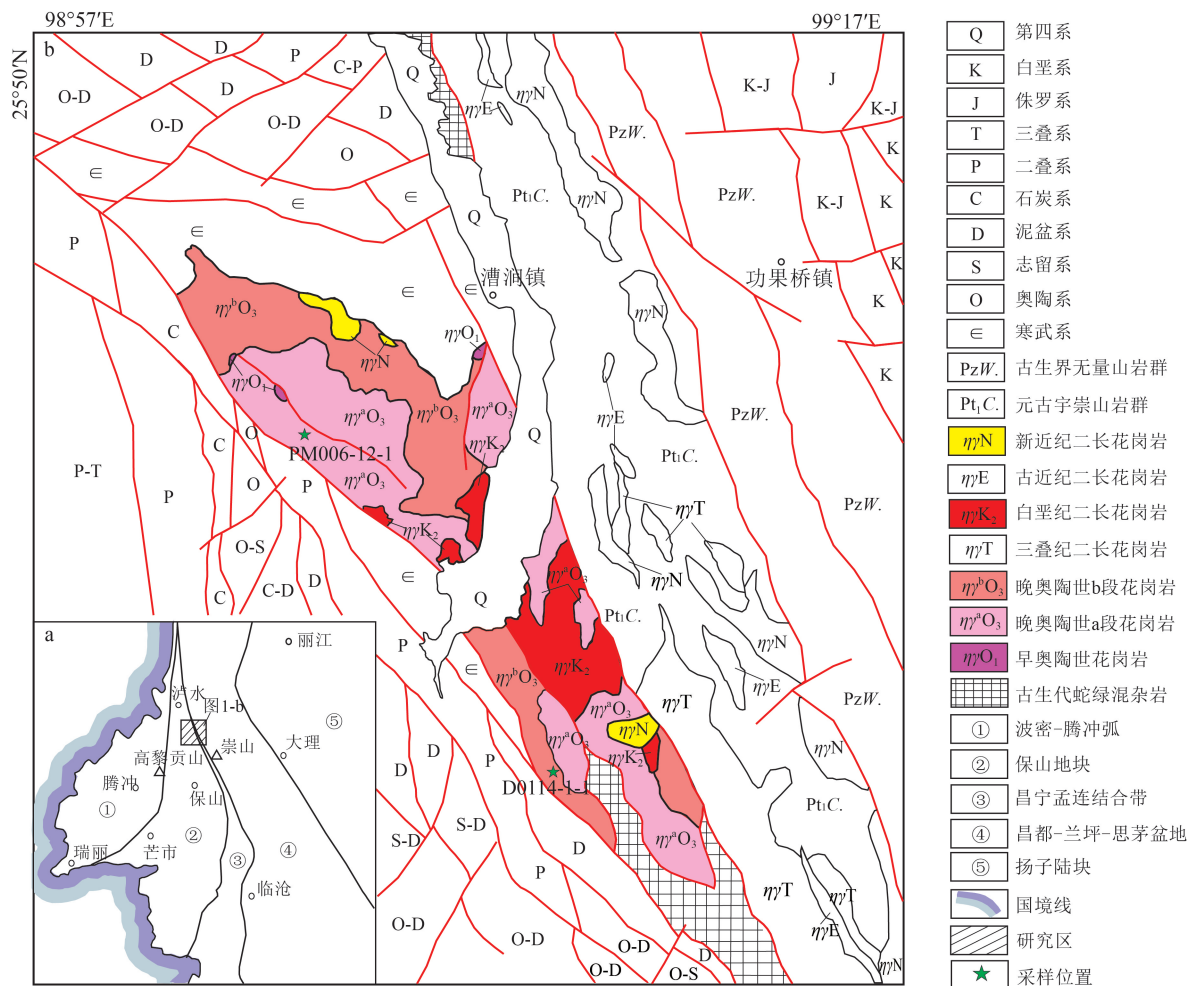


图 1 研究区区域地质背景简图(国境线据中国地图 GS(2019)3333 号图件修编)

Fig. 1 Schematic diagram of regional geological background in the study area

片岩相变质的碎屑岩夹少量火山岩的组合,经历了泛非运动阶段,上寒武统与中奥陶统之间为不整合接触^[21]。之后保山地块主体为一套浅海-滨海相的连续沉积,直至中三叠世印支造山运动而结束^{①③}。

保山地块岩浆活动强烈,以早古生代、中生代为主,其中早古生代以潞西地区的平河岩体为代表,侵位时间为 466~502 Ma^[20, 22-23]①⑤;晚古生代则主要表现为二叠纪卧牛寺组火山喷发活动和零星的二叠纪辉长-辉绿岩侵入^[24]①③;中生代早期表现为晚三叠世牛喝塘组火山岩喷发,以及晚白垩世酸性小岩株零星产出,其同位素年龄为 65~100 Ma^[25-27]④。

漕涧复式花岗岩体出露面积约 140 km²(图 1),东西两侧及南端均与围岩为断层接触关系,北侧侵入至寒武系中,岩体中部被第四系冲积-洪沉积物掩盖,将漕涧复式花岗岩分割成东、西两部分(图 1)。

晚奥陶世花岗岩是漕涧复式岩体的主体,由中粒黑云二长花岗岩($\eta^a\text{O}_3$)和似斑状中粗粒黑云二长花岗岩($\eta^b\text{O}_3$)组成,均普遍发育原生片麻状构造。前类花岗岩的钾长石似斑晶含量小于 5%,后者钾长石似斑晶含量大于等于 5%;2 类岩石的出露面积大致相当,不存在明显的先、后侵入关系,而表现为渐变过渡关系;似斑晶为近固相线条件下的结晶矿物,包含早期结晶的暗色矿物、石英、斜长石等。晚白垩世花岗岩为灰白色细粒黑云二长花岗岩,岩石基本没有变形-变质现象,新近纪花岗岩则为白色、灰白色含电气石二长花岗岩、伟晶岩等。

2 岩石学特征

中粒二长花岗岩($\eta^a\text{O}_3$): 浅灰色、灰白色,变

余中粒和少量中细粒花岗结构,不等粒鳞片粒状变晶结构,块状构造,片麻状构造(图 2-a)。主要造岩矿物为斜长石(22%~32%)、钾长石(17%~23%)、石英(22%~28%)、黑云母(6%~15%)和白云母(3%~8%),锆石等副矿物含量少。其中斜长石粒径小于等于 5 mm,他形粒状,正低突起,具钠长石双晶,一级灰白干涉色;核部包含细晶半自形细晶黑云母、他形石英。钾长石粒径小于等于 6 mm,他形粒状,具卡氏双晶、格子双晶;核部包含半自形细晶黑云母、他形石英、斜长石。黑云母片径小于等于 1.8 mm,鳞片状,Ng-棕褐色,Np-浅黄色,多流变细粒化分异重结晶呈具核幔构造的定向条痕状聚集,具细晶白云母次变边或白云母化。白云母片径小于等于 2.0 mm,无色鳞片状,多在黑云母或微粒长英质中晶出。石英呈无色他形粒状,流变半定向细粒镶嵌-齿状镶嵌的斑块-条痕状聚集。镜下(图 2-c)见岩石以较均匀分布的中晶、中细晶镶嵌状钾长石、斜长石、石英、黑云母为主,少量细粒化重结晶微粒长英质呈微网纹状-斑块状富集,黑云母多流变细粒化分异重结晶呈具核幔构造的定向条痕状聚集,石英流变半定向细粒-齿状镶嵌的斑

块-条痕状聚集,变形带发育。

似斑状中粗粒二长花岗岩($\eta\gamma^b\text{O}_3$):灰白色、少量浅灰黄色,巨-粗斑不等粒鳞片粒状变晶结构、变余中粗粒和少量中粒似斑状花岗结构,网结条痕片麻状构造(图 2-b)。巨-粗斑晶于岩石中占 5%~30%,少量可达 65%,斑晶的长轴主体为 15~55 mm,个别可达 120 mm,其主要由钾长石(大于 60%)和斜长石(小于等于 40%)组成,具眼球状、圆砾状,少量弱透镜状。基质的主要造岩矿物为斜长石(22%~30%)、钾长石(17%~25%)、石英(20%~28%)、黑云母(15%~22%)和白云母(1%~3%),副矿物含量少,仅见少量磷灰石、锆石、金属矿物等。其中斜长石粒径小于等于 8 mm,半自形板状-他形粒状,具钠长石双晶,细晶白云母化;多呈似斑状,包含似脉条痕状细粒镶嵌斜长石、钾长石、黑云母、石英,交代残余状细粒斜长石和石英。钾长石粒径小于等于 15 mm,他形粒状,部分保留其半自形的板状特征,具格子双晶。黑云母片径小于等于 2 mm,鳞片状,Ng-棕红色,Np-淡黄色,流变细粒化分异重结晶呈定向条痕状聚集,局部白云母化;石英无色他形粒状,流变细粒化分异重结晶呈半定

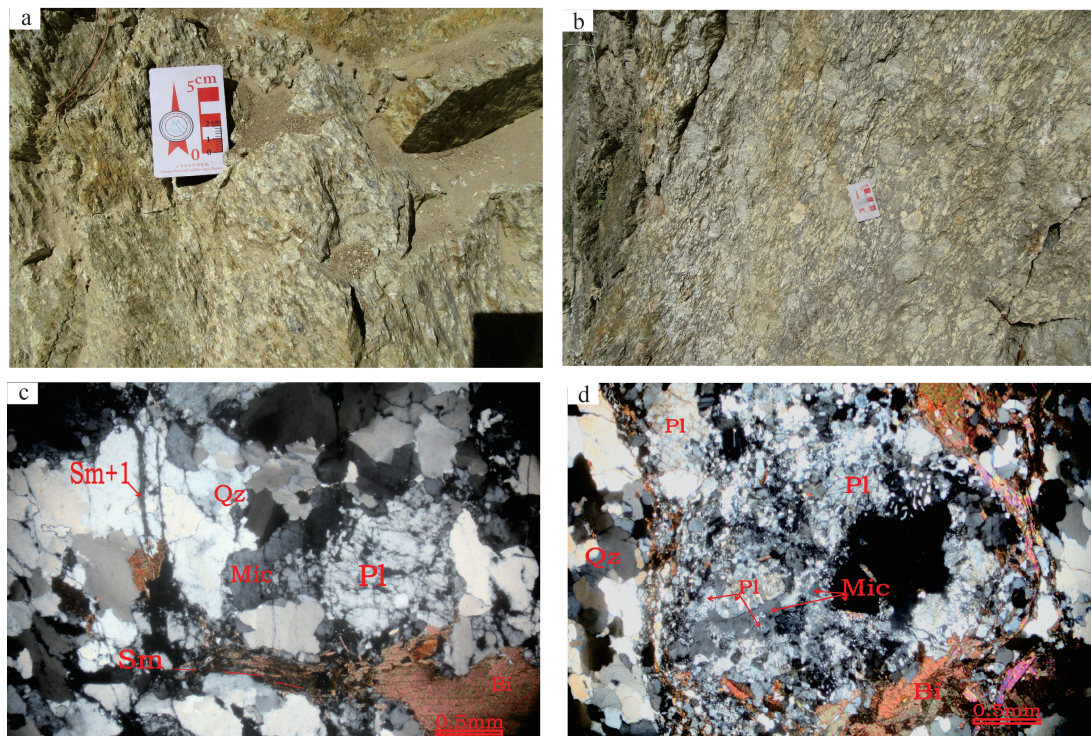


图 2 漕涧复式岩体晚奥陶世花岗岩的野外照片(a,b)和镜下显微照片(c,d,正交偏光)

Fig. 2 Field photographs(a,b) and microscopic photographs(c,d) of Late Ordovician granite from Caojian complex

Pl—斜长石;Mic—钾长石;Bi—黑云母;Qz—石英;Sm+1 中 Sm 表示主期面理,+1 表示新生面理

向细粒镶嵌-齿状镶嵌条痕状聚集,具变形带构造;白云母片径小于等于 0.8 mm,无色鳞片状,多呈黑云母次变边产出。镜下(图 2-d)见眼球-浑圆状弱应变域聚集的长石巨-粗粒斑晶间发育,残留状细粒镶嵌斜长石、钾长石、黑云母、石英;能干性弱-细粒化分异重结晶的褐黑色黑云母、石英分别呈网纹条痕状富集;糜棱岩化-重结晶的隐微粒长英质、黑云母、白云母各自富集,呈微细条痕状。

3 分析方法

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

锆石分选工作在河北省廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司完成。首先将样品破碎、清洗、烘干和筛选,采用磁选和重液分离技术将锆石选出,然后在双目镜下提纯。待锆石制靶完成后,进行锆石阴极发光(CL)照相,以观察其内部结构。

锆石 U-Pb 定年及微量元素含量分析是在湖北省地质实验室测试中心岩石矿物研究室利用 LA-ICP-MS 同时分析完成的。测试仪器采用由 GeoLasPro 全自动版 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统(LA)和 7700X 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)联用的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱分析系统(LA-ICP-MS)。锆石 U-Pb 定年分析采用锆石标准年龄物质 91500 作为外标进行同位素分馏校正。样品的同位素比值和元素含量采用 ICPMSDataCal 10.1 进行处理分析,年龄加权平均值的计算及锆石年龄谐和图采用 Isoplot 3.0 完成^[28]。

3.2 主量、微量元素

样品 D3016-1-1-1、D3016-1-1-2、D3017-1-1-1、D3017-1-1-2 和 PM012-7-1 全岩主量、微量元素分析由湖北省地质实验室测试中心完成,而其他 13 件样品则在自然资源部昆明矿产资源监督检测中心完成,测试分析方法分别如下。

湖北省地质实验室测试中心主量氧化物采用 X 荧光光谱仪(Magix_pro2440)和四硼酸锂熔片-XRF 法进行测定;15 项稀土元素采用质谱仪(Thermo Elemental X7)、1% 王水介质的混合标准绘制工作曲线,以及电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)方法完成测定;微量元素采用 1% 盐酸介质的混合标准绘制工作曲线,用质谱仪(Thermo Elemental X7)、等离子体发射光谱仪(ICAP6300)和四酸溶矿法-ICP-MS、四酸溶矿法-ICP-OES、X 射线荧光

光谱法(XRF)完成测定。

自然资源部昆明矿产资源监督检测中心的主量氧化物采用日本理学 ZSX Prius II 型 X-射线荧光光谱法(XRF)测定,对一系列标准样品回归求取标准曲线常数和基体校正系数,计算机自动校正测定。微量元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,采用混合标准制备工作曲线,用 XSeries II 型 ICP-MS 测定微量元素;稀土元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,采用混合标准制备工作曲线,用 XSeries II 型 ICP-MS 测定 15 项稀土元素。

3.3 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司实验室完成,仪器采用美国 Thermo Fisher Scientific 公司的 MC-ICP-MS(Neptune Plus)。MC-ICP-MS 采用 Jet+X 锥组合和干泵以提高仪器灵敏度。数据采集由 8 个 blocks 组成,每个 block 含 10 个 cycles,每个 cycle 为 4.194 s。Hf 同位素的仪器质量分馏采用内标指数法则校正,¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf 被用于计算 Hf 的质量分馏因子。通过在 2 个 Hf 同位素标样(JMC 475 和 AlfaHf)之间插入 7 个样品进行同位素分析。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Th-Pb 分析结果

在详细调研的基础上,对岩体不同部位/不同类型的代表性样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年。样品中锆石颗粒自形程度高,多为长柱状晶体,少部分短柱状,长 80~160 μm,长宽比为 3:2~2:1;锆石阴极发光图像可见清晰的振荡环带(图 3-b、d),锆石的 Th/U 值绝大部分大于 0.2,为典型的岩浆成因锆石^[28]。在分析测试过程中,选择锆石环带边部打点。根据成果数据剔除个别异常点,锆石的 U、Th、Pb 同位素成分数据及谐和年龄见表 1。

样品 D0114-1-1 为中粒二长花岗岩(γ^a O₃),14 个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 453.9±3.3 Ma(MSWD=0.49, n=14),在 U-Pb 年龄谐和图上分析点均分布在谐和线上并且沿线分布(图 3-a),14 个点谐和性十分良好。此外,2、12、14 和 18 号测点的年龄值为 471~494 Ma,属捕获的老锆石,且远离年龄集中区(图 3-a;表 1),未参与年龄加权平均值计算。

表 1 漕涧复式岩体晚奥陶世花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析结果

Table 1 Results of LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analysis of Late Ordovician granites from Caojian complex

测点号	元素/ 10^{-6}				同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{206}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{207}\text{Pb}/$	1σ	$^{206}\text{Pb}/$	1σ
					^{206}Pb		^{235}U		^{238}U		^{206}Pb		^{235}U		^{238}U	
D0114-1-1(中粒二长花岗岩, $\eta^a\text{O}_3$): 18 个测点 年龄加权平均值为 453.9 ± 3.3 Ma(MSWD=0.49, $n=14$)																
1	103.2	134.2	1435.0	0.10	0.0567	0.0010	0.5720	0.0127	0.0728	0.0011	479.7	37.0	459.3	8.2	453.1	6.9
2	64.4	134.7	420.5	0.35	0.0568	0.0011	0.5946	0.0133	0.0758	0.0012	483.4	42.6	473.8	8.5	471.3	7.3
3	79.1	194.0	618.0	0.35	0.0578	0.0011	0.5870	0.0130	0.0736	0.0012	520.4	40.7	468.9	8.3	457.7	7.0
4	71.4	221.3	291.5	0.82	0.0582	0.0016	0.5980	0.0231	0.0740	0.0014	538.9	59.3	476.0	14.7	459.9	8.5
5	125.1	317.9	1226.5	0.28	0.0568	0.0011	0.5676	0.0136	0.0723	0.0012	483.4	42.6	456.5	8.8	449.8	7.2
6	70.1	180.1	497.1	0.40	0.0599	0.0018	0.6031	0.0166	0.0731	0.0014	611.1	32.4	479.2	10.5	454.7	8.2
7	269.6	772.8	1396.9	0.56	0.0580	0.0012	0.5864	0.0125	0.0733	0.0010	527.8	44.4	468.6	8.0	455.8	6.3
8	78.1	167.0	782.1	0.17	0.0564	0.0015	0.5711	0.0119	0.0733	0.0010	477.8	59.3	458.8	7.7	456.2	6.0
9	67.5	134.5	826.5	0.15	0.0568	0.0012	0.5751	0.0114	0.0734	0.0010	483.4	48.1	461.3	7.4	456.3	6.0
10	86.6	132.3	1285.9	0.09	0.0571	0.0011	0.5781	0.0093	0.0734	0.0008	494.5	42.6	463.2	6.0	456.5	5.0
11	82.6	138.1	1179.0	0.10	0.0568	0.0010	0.6240	0.0123	0.0798	0.0013	483.4	40.7	492.3	7.7	494.6	7.8
12	69.3	119.2	970.2	0.11	0.0573	0.0010	0.5793	0.0113	0.0732	0.0010	505.6	38.9	464.0	7.2	455.7	5.8
13	134.1	381.4	869.8	0.38	0.0569	0.0010	0.6239	0.0137	0.0795	0.0013	487.1	34.3	492.3	8.5	493.4	7.7
14	124.8	193.6	2016.2	0.09	0.0569	0.0012	0.5540	0.0119	0.0708	0.0011	487.1	44.4	447.6	7.7	440.8	6.8
15	158.5	396.4	1350.2	0.25	0.0574	0.0009	0.5772	0.0112	0.0728	0.0010	505.6	35.2	462.7	7.2	453.2	5.8
16	93.8	129.8	1475.9	0.08	0.0584	0.0009	0.5881	0.0105	0.0730	0.0009	542.6	34.1	469.7	6.7	454.3	5.5
17	58.3	93.2	711.8	0.11	0.0578	0.0011	0.5744	0.0104	0.0721	0.0010	520.4	40.7	460.9	6.7	448.9	6.0
18	179.8	555.0	601.5	0.78	0.0581	0.0013	0.6253	0.0140	0.0782	0.0012	531.5	51.8	493.2	8.8	485.1	7.5
PM006-12-1(似斑状中粗粒二长花岗岩, $\eta^b\text{O}_3$): 19 个测点 年龄加权平均值为 456.8 ± 3.5 Ma(MSWD=1.2, $n=16$)																
1	76.4	122.6	608.6	0.19	0.0564	0.0010	0.5725	0.0117	0.0735	0.0011	464.9	38.9	459.6	7.6	457.4	6.8
2	120.1	255.3	941.8	0.26	0.0561	0.0009	0.5690	0.0100	0.0734	0.0010	457.5	33.3	457.4	6.5	456.5	6.0
3	81.1	152.5	711.7	0.21	0.0568	0.0009	0.5776	0.0103	0.0735	0.0010	483.4	33.3	462.9	6.7	457.4	6.0
4	94.0	141.1	1101.9	0.13	0.0575	0.0008	0.5756	0.0083	0.0724	0.0009	522.3	27.8	461.6	5.4	450.9	5.4
5	85.9	202.1	672.9	0.30	0.0565	0.0008	0.5914	0.0122	0.0755	0.0011	472.3	31.5	471.7	7.8	469.0	6.8
6	99.0	124.1	1489.0	0.08	0.0576	0.0008	0.5856	0.0088	0.0736	0.0009	522.3	31.5	468.1	5.7	457.9	5.4
7	71.3	138.0	684.7	0.20	0.0577	0.0009	0.5874	0.0112	0.0736	0.0010	520.4	35.2	469.2	7.2	457.6	6.0
8	61.8	105.4	761.8	0.14	0.0557	0.0009	0.5855	0.0114	0.0759	0.0011	442.6	35.2	468.0	7.3	471.7	6.4
9	67.7	123.3	800.6	0.15	0.0566	0.0009	0.5894	0.0108	0.0754	0.0011	476.0	35.2	470.5	6.9	468.7	6.8
10	131.1	158.3	2106.6	0.07	0.0571	0.0007	0.5717	0.0087	0.0723	0.0008	494.5	23.1	459.1	5.6	450.2	5.1
11	85.8	175.1	829.0	0.20	0.0569	0.0009	0.5779	0.0109	0.0736	0.0012	487.1	35.2	463.1	7.0	457.7	7.0
12	58.4	102.4	556.6	0.18	0.0575	0.0011	0.5838	0.0128	0.0735	0.0012	509.3	42.6	466.9	8.2	457.3	7.2
13	71.1	124.4	708.6	0.16	0.0562	0.0011	0.5697	0.0137	0.0735	0.0014	457.5	44.4	457.8	8.9	457.2	8.4
14	147.8	146.7	2760.7	0.05	0.0575	0.0010	0.5834	0.0147	0.0734	0.0016	509.3	38.9	466.6	9.4	456.4	9.3
15	98.5	145.6	1420.8	0.09	0.0572	0.0009	0.5728	0.0102	0.0725	0.0010	501.9	67.6	459.9	6.6	451.0	6.3
16	73.4	133.2	881.8	0.15	0.0591	0.0011	0.5743	0.0154	0.0702	0.0014	572.3	42.6	460.8	9.9	437.4	8.2
17	61.2	107.8	774.1	0.13	0.0569	0.0010	0.5788	0.0115	0.0737	0.0011	487.1	38.9	463.7	7.4	458.4	6.8
18	71.6	128.3	818.4	0.15	0.0572	0.0009	0.5714	0.0106	0.0724	0.0011	498.2	33.3	458.9	6.9	450.8	6.6
19	147.9	353.4	947.3	0.34	0.0578	0.0009	0.5847	0.0110	0.0733	0.0011	520.4	39.8	467.5	7.0	456.1	6.5

样品 PM006-12-1 为似斑状中粗粒二长花岗岩($\eta^b\text{O}_3$), 19 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 456.8 ± 3.5 Ma (MSWD=1.2, $n=19$), 在 U-Pb 年龄谐和图上分析点均分布在谐和线或其附近 (图 3-c), 显示很好的谐和性, 表明锆石形成后 U-Pb 同位素体系是基本封闭的, 没有 Pb 的明显丢失, 因此该样品的测试结果是可信的。此外, 5、8 和 9 号测点的年龄值为 468~471 Ma, 属捕获的老锆石。

总之, 本次测定的年龄结果误差较小, 精度较高, 表明漕涧复式花岗岩体主体部分的侵位年龄为 453.9~456.8 Ma, 属晚奥陶世。

4.2 地球化学特征

对中粒二长花岗岩($\eta^a\text{O}_3$)、似斑状中粗粒二长花岗岩($\eta^b\text{O}_3$) 分别采集了 9 件样品进行主量、稀土和微量元素分析测试。分析测试结果如表 2 所示。

4.2.1 主量元素

岩石主量元素地球化学分析结果 (表 2) 表明, 中粒二长花岗岩的 SiO_2 含量为 73.6%~76.17%, Al_2O_3 为 12.52%~13.43%, 全铁 FeO^* 为 13.18%~14.87%, MgO 为 0.17%~0.46%, CaO 为 0.18%~0.82%, Na_2O 为 2.6%~3.26%, K_2O 为 4.48%~5.44%, 全碱 alk 为 7.21%~8.70%。似斑状中粗粒二长花岗岩的 SiO_2 为 70.12%~75.32%, Al_2O_3 为 11.65%~13.62%, FeO^* 为 12.72%~15.74%, MgO 为 0.58%~1.24%, CaO 为 1.40%~1.96%, Na_2O 为 2.0%~2.85%, K_2O 为 3.15%~5.19%, 全碱 alk 为 5.50%~7.54%; 二者均表现出高硅、富碱、贫镁、贫钙的特点。

在 SiO_2 - K_2O 图解 (图 4-a) 中, 两类花岗岩均落入高钾钙碱性系列区。在 Q' -Anor 图解 (图略) 中, 中粒二长花岗岩主体落入二长花岗岩区, 似斑状中粗粒二长花岗岩落入花岗岩区和碱长花岗岩区。中粒二长花岗岩的 $A/\text{CNK}=1.05\sim1.42$, 平均

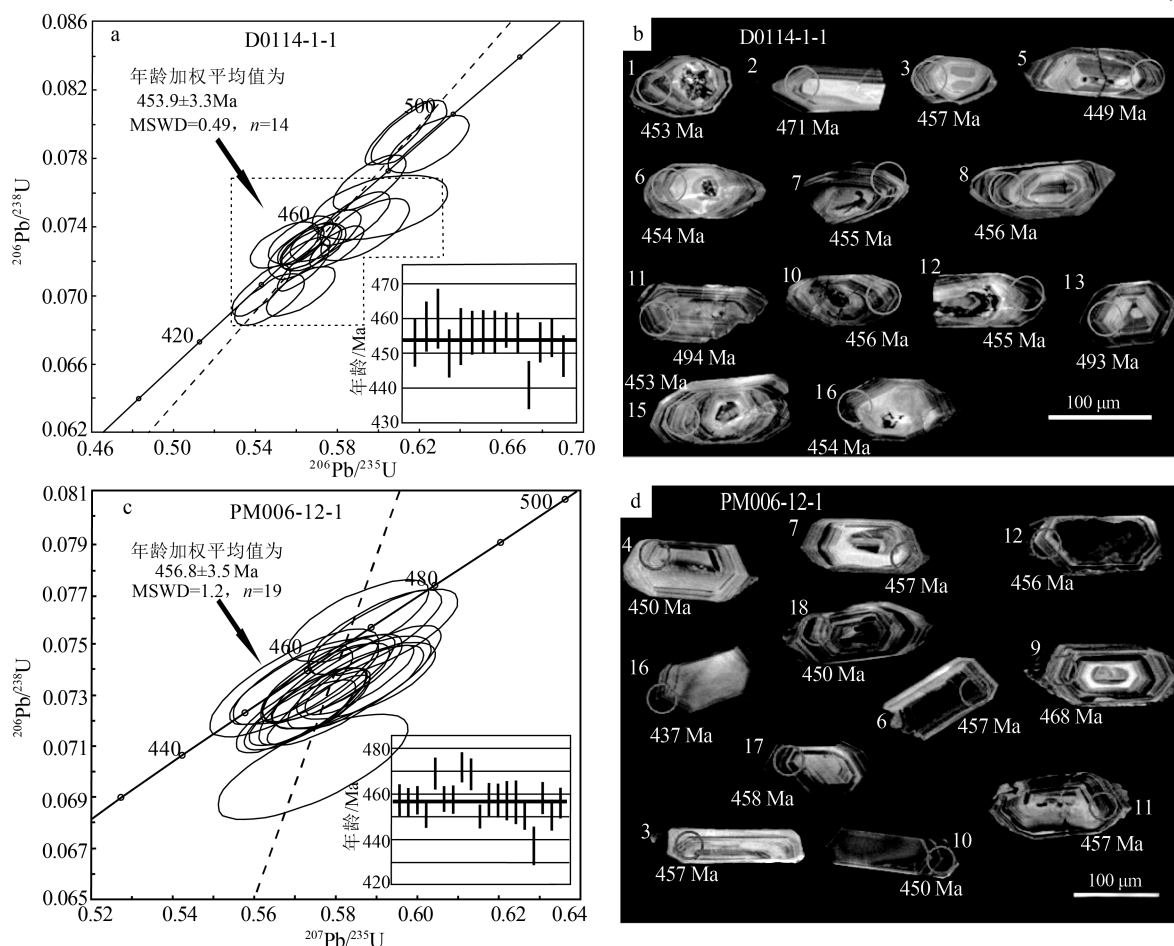


图 3 漕涧复式岩体晚奥陶世花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a,c)和阴极发光(CL)图像(b,d)
Fig. 3 U-Pb zircon age harmonic diagrams(a,c) and CL images(b,d) of Late Ordovician granites, from Caojian complex

表 2 漕涧复式岩体晚奥陶世花岗岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Analytical results of major, trace elements and REE of Late Ordovician granites from Caojian complex

元素	D0319-1-1	D0114-1-1-1	D0114-1-1-2	PM006-37-1	PM006-33-1	D3016-1-1-1	D3016-1-1-2	D3017-1-1-1	D3017-1-1-2	PM012-7-1	PM006-4-2	PM006-9-1	PM006-10-1	PM006-12-1	PM006-27-1	PM006-59-1	PM006-6-1	PM006-19-1
	中粒二长花岗岩($\eta\gamma^a\text{O}_3$)									似斑状中粗粒二长花岗岩($\eta\gamma^b\text{O}_3$)								
SiO ₂	76.17	74.42	75.33	73.6	76.09	75.52	75.83	76.06	76.16	73.81	72.49	70.35	70.12	71.38	70.69	72.22	75.32	70.86
TiO ₂	0.17	0.17	0.17	0.17	0.21	0.10	0.07	0.13	0.12	0.33	0.43	0.57	0.52	0.62	0.51	0.51	0.4	0.55
Al ₂ O ₃	12.52	13.29	13.19	13.2	12.67	13.64	13.43	12.80	12.81	12.69	13.62	13.15	13.32	13.41	13.49	13.46	11.65	13.13
Fe ₂ O ₃	1.82	1.02	0.81	1.67	1.48	0.37	0.35	0.38	0.39	0.45	0.91	1.40	1.43	2.33	1.36	1.61	1.07	1.66
FeO	0.92	0.72	0.69	0.75	0.96	0.92	0.82	1.02	1.05	2.33	2.45	2.57	2.52	2.17	2.66	2.68	2.08	2.9
MnO	0.03	0.02	0.02	0.032	0.036	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.05	0.06	0.056	0.064	0.058	0.055	0.048	0.058
MgO	0.32	0.46	0.37	0.29	0.36	0.26	0.17	0.28	0.28	0.58	0.83	1.09	0.99	1.24	0.97	0.89	0.76	1.08
CaO	0.73	0.82	0.79	0.75	0.73	0.18	0.20	0.43	0.44	1.40	1.65	1.82	1.61	1.96	1.41	1.54	1.41	1.90
Na ₂ O	3.13	3.26	3.08	2.94	2.6	2.69	2.69	2.84	2.83	2.46	2.77	2.82	2.82	2.35	2.27	2.50	2.00	2.85
K ₂ O	4.48	5.44	5.05	5.3	4.89	4.52	4.56	4.72	4.71	4.46	4.77	3.23	3.55	3.15	5.19	5.17	3.67	3.26
P ₂ O ₅	0.18	0.16	0.17	0.15	0.11	0.16	0.17	0.16	0.16	0.25	0.16	0.17	0.15	0.18	0.21	0.16	0.13	0.17
H ₂ O ⁺	0.32	0.40	0.42	1.03	0.36	1.26	1.33	0.64	0.66	0.91	0.22	0.91	0.73	1.36	0.55	0.35	0.59	0.64
H ₂ O ⁻	0.10	0.07	0.04	0.22	0.13	0.34	0.26	0.21	0.17	0.21	0.05	0.26	0.15	0.29	0.13	0.15	0.18	0.18
CO ₂	0.03	0.05	0.02	0.16	0.26	0.025	0.049	0.025	0.025	0.048	0.25	0.30	0.24	0.36	0.20	0.15	0.28	0.22
烧失量	0.37	0.56	0.63	0.94	0.84	1.32	1.20	0.86	0.72	0.71	0.50	1.18	0.90	1.68	0.87	0.43	0.90	0.90
La	16.7	13.4	12.9	17.6	21.0	5.20	5.67	10.96	12.01	41.0	34.6	45.7	40.0	58.5	37.6	33.3	33.1	46.2
Ce	40.3	27.9	26.7	35.1	43.4	10.49	11.10	22.43	24.82	85.5	72.0	93.4	83.7	108	78.1	69.3	66.4	93.4
Pr	4.20	3.32	3.25	4.60	5.37	1.44	1.62	2.91	3.16	10.2	8.91	11.4	10.4	14.9	9.84	8.70	8.28	11.6
Nd	16.1	12.5	12.2	17.7	19.8	5.87	5.82	10.56	11.12	38.3	34.5	43.8	40.6	57.7	38.2	33.4	31.8	44.5
Sm	4.05	2.90	2.93	4.19	4.67	1.73	1.82	2.98	3.08	8.49	7.20	9.01	8.44	11.7	8.21	7.04	6.74	9.01
Eu	0.35	0.37	0.35	0.49	0.43	0.17	0.11	0.23	0.26	1.17	1.02	1.07	1.19	1.59	0.99	1.10	0.79	1.09
Gd	3.56	2.91	2.84	4.14	4.58	1.91	1.84	3.28	3.44	8.10	6.75	8.46	7.91	10.9	7.68	6.67	6.29	8.25
Tb	0.70	0.55	0.55	0.86	0.97	0.35	0.35	0.60	0.65	1.51	1.15	1.46	1.34	1.86	1.38	1.19	1.07	1.39
Dy	4.18	3.32	3.26	5.28	6.01	2.27	2.39	4.24	4.23	9.91	6.38	8.50	7.91	10.5	7.99	7.15	6.05	7.69
Ho	0.75	0.59	0.60	0.95	1.10	0.49	0.47	0.84	0.86	1.98	1.19	1.68	1.53	1.94	1.52	1.42	1.13	1.43
Er	1.98	1.62	1.68	2.56	2.91	1.35	1.27	2.29	2.33	5.71	3.28	4.79	4.20	5.24	3.97	4.10	2.94	3.99
Tm	0.32	0.24	0.25	0.34	0.39	0.21	0.20	0.32	0.32	0.78	0.45	0.67	0.56	0.69	0.51	0.55	0.39	0.53
Yb	2.03	2.03	2.11	2.05	2.27	1.31	1.22	1.79	1.88	4.72	2.77	4.15	3.45	4.08	2.96	3.50	2.28	3.19
Lu	0.25	0.25	0.25	0.28	0.31	0.18	0.18	0.25	0.26	0.70	0.39	0.58	0.50	0.57	0.42	0.49	0.32	0.46
Y	21.0	21.9	22.1	27.2	31.5	13.46	13.11	24.42	24.56	51.8	30.2	43.5	38.0	50.6	39.0	36.8	29.2	36.9
ΣREE	116.4	93.8	92.0	123.3	144.7	46.4	47.2	88.1	93.0	270.5	210.7	278.1	249.7	338.3	238.4	214.8	196.8	269.7
Zr	78.2	81.2	80.6	88.0	95.6	44.6	43.2	66.1	68.2	195.0	151.7	211.6	196.2	255.6	185.9	182.1	136.3	211.4
Zn	45.9	20.2	17.1	30.88	32.79	39.71	39.78	29.96	28.14	59.2	44.81	57.87	55.23	63.35	57.87	47.80	44.13	56.13
V	12.2	22.3	24.3	35.53	36.69	11.6	4.7	9.2	9.3	20.5	47.15	60.23	58.08	59.37	52.77	55.25	50.85	56.84
Th	16.9	11.4	9.9	14.03	17.19	6.24	6.20	11.15	8.74	18.6	22.31	28.59	26.03	30.96	25.06	22.56	21.18	27.25
Sc	7.15	4.82	5.37	6.26	6.38	5.00	4.19	4.32	3.89	6.21	7.95	10.33	9.58	10.71	9.13	8.95	7.72	9.81
Sr	39.2	66.0	65.9	76.39	61.61	30.3	23.6	29.8	28.0	84.2	76.96	78.86	81.57	70.48	68.47	88.37	55.75	76.11
Rb	357	259	258	283.4	278.2	481.7	516.1	373.1	350.8	176	221.5	162.1	299.4	189.3	263.0	227.8	189.4	197.3
Ni	4.94	3.16	3.25	5.41	4.34	3.1	2.0	2.5	2.1	5.76	8.16	9.60	8.68	12.79	10.20	9.48	7.63	11.88
Nb	15.0	13.5	13.6	14.21	16.90	12.80	13.93	10.16	9.19	17.0	15.26	19.11	16.90	19.43	19.28	16.12	14.04	18.05
Cu	5.94	4.61	4.11	14.97	25.63	9.76	4.79	3.44	3.40	5.32	57.00	73.44	67.05	105.2	82.71	25.22	70.61	52.75
Cr	16.2	6.16	6.60	7.76	7.37	4.4	2.7	4.1	3.6	10.9	15.94	22.92	22.77	21.20	18.90	19.55	17.27	24.60
Co	2.56	21.6	25.6	2.52	2.74	2.01	0.95	1.80	1.56	3.69	5.57	7.81	6.87	8.45	5.77	6.99	5.99	7.22
Ba	172	268	237	252.3	196.5	37	33.7	78	68	609	645.4	473.3	716.8	352.7	626.2	839.9	286.1	365.1
Hf	5.11	4.19	3.50	4.72	7.29	4.7	4.7	4.1	4.2	4.7	9.75	15.35	6.52	18.87	7.97	9.62	8.96	11.37
Ta	1.48	1.99	2.29	1.57	2.52	4.44	5.27	1.84	1.94	1.73	1.50	1.68	1.38	1.56	1.68	1.23	1.34	1.61
U	6.05	3.81	3.00	5.87	7.05	3.91	3.21	3.29	5.68	2.76	2.28	2.53	3.15	3.46	4.75	2.82	2.58	3.60
Pb	31.5	11.0	13.2	31.43	28.77	13.05	12.91	24.70	22.90	29.5	32.19	26.32	29.85	21.52	32.41	35.17	25.34	22.90

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

为 1.20, 标准矿物刚玉分子 $c=0.93\% \sim 4.45\%$, 平均为 2.42; 似斑状中粗粒二长花岗岩的 $A/CNK = 1.08 \sim 1.24$, 平均为 1.14, 标准矿物刚玉分子 $c = 1.28\% \sim 3.04\%$, 平均为 2.02; 均属强过铝花岗岩。在 $A/CNK-A/NK$ 图解 (图 4-b) 中, 所有样品点均落入过铝质花岗岩区, 中粒二长花岗岩高硅、富碱、贫镁、贫钙的特点更明显。

4.2.2 稀土元素

漕涧复式岩体两类花岗岩的稀土元素如表 2 所示。中粒二长花岗岩的稀土元素总量 (ΣREE) 为 $46.36 \times 10^{-6} \sim 123.30 \times 10^{-6}$, $(La/Sm)_N = 1.89 \sim 2.91$, $(Gd/Yb)_N = 1.09 \sim 1.63$, $\delta Eu = 0.18 \sim 0.39$ 。似斑状中粗粒二长花岗岩的稀土元素总量为 $196.79 \times 10^{-6} \sim 338.26 \times 10^{-6}$, $(La/Sm)_N = 2.88 \sim 3.23$, $(Gd/Yb)_N = 1.38 \sim 2.23$, $\delta Eu = 0.37 \sim 0.48$ 。显然, 二者的稀土元素总量, 轻、重稀土元素的分异程度, 负 Eu 异常强度等具有明显的差异。在球粒陨石标准化稀土元

素配分曲线图 (图 5-a) 上, 两类样品几乎没有重叠的区域, 但同类样品的配分曲线表现出很大的相似性。

4.2.3 微量元素

漕涧复式岩体两类花岗岩的微量元素分析结果如表 2 所示。两类花岗岩的 Cr、Ni、Co、Sc 等强相容元素含量较低, 中粒二长花岗岩的这一特征比似斑状中粗粒二长花岗岩的特点更明显。在洋中脊玄武岩标准化微量元素蛛网图 (图 5-b) 上, 两类花岗岩表现出较大的相似性, 总体表现为大离子亲石元素 (LILE) K、Rb 及高场强元素 (HFSE) Th、Ce、Hf、Y、Yb 等富集, Ba、Ti 明显亏损, 且中粒二长花岗岩的亏损程度更明显, 总体上与后碰撞环境的花岗岩类似^[29-30]。此外, 中粒二长花岗岩还具有明显的负 Zr 异常, 而中粗粒似斑状二长花岗岩具有明显的负 Nb、Ta、P 异常, 具有类似受俯冲流体交代的岩浆岩源区常见的“T-N-T” (Ta-Nb-Ti) 型负异常的

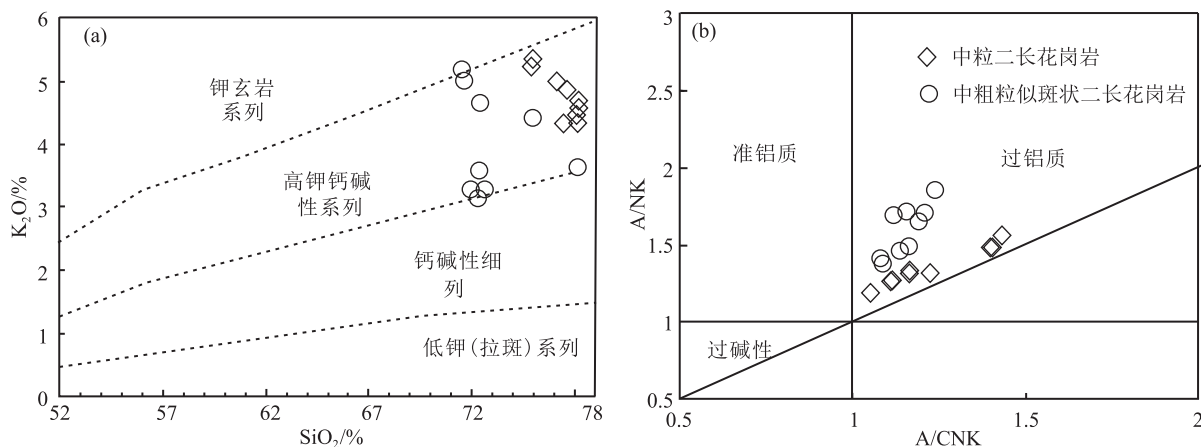


图 4 漕涧复式岩体中奥陶世花岗岩 SiO_2-K_2O 图解 (a) 和 $A/CNK-A/NK$ 图解 (b)

Fig. 4 SiO_2-K_2O (a) and $A/CNK-A/NK$ (b) diagrams of Late Ordovician granites from Caojian complex

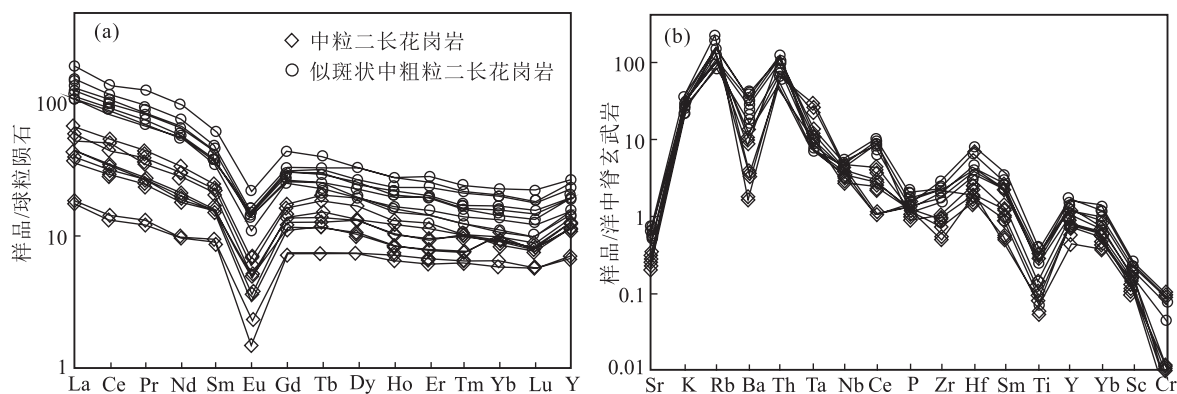


图 5 漕涧复式岩体晚奥陶世花岗岩稀土元素配分曲线 (a) 和微量元素蛛网图 (b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and trace elements spider diagrams (b) of Late Ordovician granites from Caojian complex

特点。

4.3 锆石 Hf 同位素特征

漕涧复式岩体晚奥陶世花岗岩的 Lu-Hf 同位素分析结果见表 3。对样品 D0114-1-1(中粒二长花岗岩, $\gamma^a\text{O}_3$) 已完成 U-Pb 测年的 16 颗锆石的微区原位 Hf 同位素分析得出, 初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较一致, 分布在 0.282191~0.282500 之间, 平均值为 0.282326, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -11.65~0.28, 平均值为 -6.36, 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 1445~2175 Ma。对样品 PM006-12-1(似斑状中粗粒二长花岗岩, $\gamma^b\text{O}_3$) 已完成 U-Pb 测年的 15 颗锆石的微区原位 Hf 同位素分析得出, 初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较一致, 分布在 0.281986~0.282398 之间, 平均值为 0.282265, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -11.61~-1.57, 平均值为 -6.78, 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 1679~2581 Ma。两类花岗岩的特征基本一致, 都是古老地壳物质的部分熔融物, 中粒二长花岗岩熔融过程中可能有极少量地幔物质的混入(图 6)。

在 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(图 6)上, 数据点几乎都落在球粒陨石 Hf 同位素演化线之下, 且主体位于 1.5 Ga 和 2.5 Ga 的地壳演化线之内及附近。其中, 中粒二长花岗岩的 Hf 地壳模式年龄为 1.11~1.61 Ga, 表明其岩浆的源岩主要来自中元古代的陆壳基底物质的部分熔融, 可能有少量地幔物质的混入; 似斑状中粗粒二长花岗岩的 Hf 地壳模式年龄为 1.25~1.83 Ga, 其源岩为中-古元古代的陆壳基底物质的部分熔融。

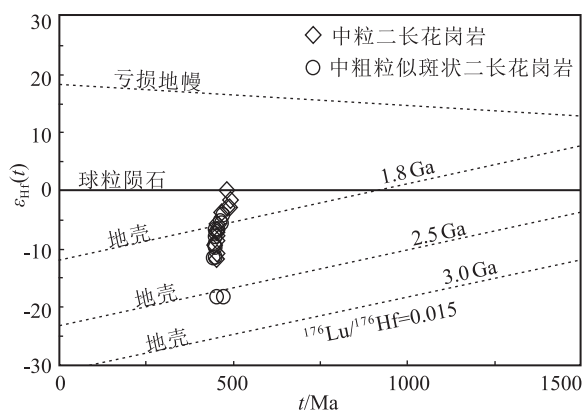


图 6 漕涧复式岩体晚奥陶世花岗岩 Hf 同位素组成

Fig. 6 Hf isotopic composition of Late Ordovician granites from Caojian complex

5 讨论

5.1 岩浆侵位时代

本次采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法, 在漕涧复式岩体南、北两端的 2 件花岗岩获得了 453.9 ± 3.3 Ma 和 456.8 ± 3.5 Ma 的侵位年龄, 表明漕涧复式岩体主体部分侵位于晚奥陶世。2 件样品锆石年龄虽有近 3 Ma 的间隔, 但在误差范围内二者可看作是同一时代侵位的岩浆。从野外特征上看, 二者为渐变过渡关系, 侵位的时间间隔应不长。根据一般的花岗岩成分演化、结构演化规律分析, 似斑状中粗粒二长花岗岩($\gamma^b\text{O}_3$) 的侵入时间应较中粒二长花岗岩($\gamma^a\text{O}_3$) 稍晚。

此外, 2 件花岗岩样品均捕获有 468~494 Ma 老锆石特点, 以及漕涧复式岩体中产出少量早奥陶世花岗岩残留体状的事实^{[20~21]①③}, 均说明漕涧地区存在早奥陶世—晚寒武世的岩浆活动, 与区域上泛非造山运动的主期时间吻合^[7, 9, 11, 19, 23]。

5.2 岩浆起源与成因

在 B-A 图解^[31] 中, 中粒二长花岗岩表现为随着 B 值的降低, 过铝指数 A 值急剧升高, 为白云母过铝花岗岩的变异趋势; 似斑状中粗粒花岗岩随着 B 值的减低, 过铝指数 A 值明显降低, 为富黑云母含堇青石过铝花岗岩的趋势^[31~33] (图 7-a)。这表明二者的岩浆形成过程存在较大差异, 前者与地壳的隆升减压作用相关, 而后者可能是地幔物质(或热流)上升导致地壳物质发生增温加热熔融作用的产物。

在张旗^[34] 的 Yb-Sr 图解(图 7-b)中, 中粒二长花岗岩主要属低 Sr 低 Yb 型花岗岩(喜马拉雅型), 少数样品向极低 Sr 高 Yb 型(南岭型)过渡; 总体上指示中-下地壳环境麻粒岩相-高压角闪岩相温-压条件下较低程度的部分熔融作用; 稀土元素配分曲线中强烈的负 Eu 异常暗示, 源区残留了大量的斜长石, 且辉石+角闪石也是重要的残留固相。似斑状中粗粒花岗岩的样品均落入极低 Sr 高 Yb 型(南岭型)花岗岩区, 指示中-上地壳环境低压角闪岩相条件下的部分熔融作用; 从稀土元素配分曲线分析, 残留固相中斜长石的比例较低, 而角闪石是主要的残留固相。

在判别花岗岩形成构造背景的 Rb/30-Hf-3Ta 图解(图 8-a)中, 中粒二长花岗岩的投影点大部分

表 3 漕涧复式岩体晚奥陶世花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素组成
Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of Late Ordovician granites from Caojian complex

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	年龄/Ma	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM2}/Ma
样品:D0114-1-1(中粒二长花岗岩, $\eta\gamma^a\text{O}_3$),16个测点							
1	0.282272	0.000012	0.003362	0.113807	453.1	-8.74	1476
2	0.282400	0.000011	0.001557	0.052312	471.3	-3.28	1223
3	0.282331	0.000011	0.002963	0.099929	457.7	-6.44	1373
5	0.282274	0.000013	0.002898	0.089091	449.8	-8.59	1454
6	0.282311	0.000010	0.001915	0.064862	454.7	-6.89	1363
7	0.282349	0.000017	0.003410	0.107901	455.8	-5.97	1363
8	0.282313	0.000011	0.002516	0.085391	456.2	-6.97	1382
9	0.282323	0.000009	0.002115	0.074838	456.3	-6.49	1353
10	0.282297	0.000014	0.002369	0.071411	456.5	-7.48	1400
11	0.282436	0.000010	0.001755	0.060555	494.6	-1.57	1178
12	0.282218	0.000014	0.003458	0.115773	455.7	-10.63	1561
13	0.282407	0.000013	0.001540	0.048189	493.4	-2.55	1212
15	0.282357	0.000010	0.002110	0.074469	453.2	-5.35	1303
16	0.282191	0.000017	0.003608	0.114469	454.3	-11.65	1608
17	0.282247	0.000014	0.002337	0.072042	448.9	-9.40	1471
18	0.282500	0.000011	0.002446	0.075493	485.1	0.28	1106
样品:PM006-12-1(似斑状中粗粒二长花岗岩, $\eta\gamma^b\text{O}_3$),15个测点							
1	0.282297	0.000010	0.002356	0.073152	457.4	-8.65	1399
2	0.282362	0.000009	0.002054	0.065267	456.5	-6.46	1294
3	0.282324	0.000009	0.002651	0.085745	457.4	-8.44	1371
4	0.282316	0.000008	0.003263	0.101955	450.9	-6.97	1406
5	0.281986	0.000029	0.001519	0.046398	471.3	-3.28	1807
6	0.282005	0.000016	0.002484	0.075600	457.9	-5.93	1827
7	0.282282	0.000008	0.002059	0.065822	457.6	-6.94	1409
8	0.282398	0.000009	0.002280	0.069062	494.6	-1.57	1250
9	0.282341	0.000009	0.000895	0.026983	493.4	-2.55	1284
10	0.282274	0.000009	0.003569	0.115270	450.2	-6.62	1482
11	0.282309	0.000009	0.001934	0.062157	457.7	-7.46	1366
12	0.282334	0.000009	0.001692	0.054063	457.3	-10.59	1322
13	0.282254	0.000009	0.001064	0.034355	457.2	-5.27	1411
14	0.282194	0.000009	0.002602	0.084404	456.4	-11.61	1559
15	0.282308	0.000009	0.002888	0.094373	451.0	-9.36	1404

落入同碰撞花岗岩区,似斑状中粗粒二长花岗岩主要落入火山弧型花岗岩区,且两类花岗岩均有个别落入碰撞后花岗岩区。在 R_1 - R_2 图解(图 8-b)中,中粒二长花岗岩的投影点均落入同碰撞花岗岩区与造山期后花岗岩区的过渡地带,属后碰撞环境的花岗岩类;似斑状中粗粒二长花岗岩的投影点主要落入同碰撞花岗岩区,少数样品向地幔分异花岗岩区过渡。

该两类花岗岩的侵位年代一致、产出位置相同,这些判别成因及主量、微量元素差异应是源区、部分熔融程度等因素造成的,而不是岩浆产出的构造背景差异所致。目前已有的资料表明,漕涧复式岩体的两类晚奥陶世花岗岩的岩浆源区及形成过程有一定的差异,其应属泛非造山运动后碰撞阶段,是深部壳-幔物质相互作用的产物。这一过程可能先是由于构造应力的消失,早期碰撞加厚的地

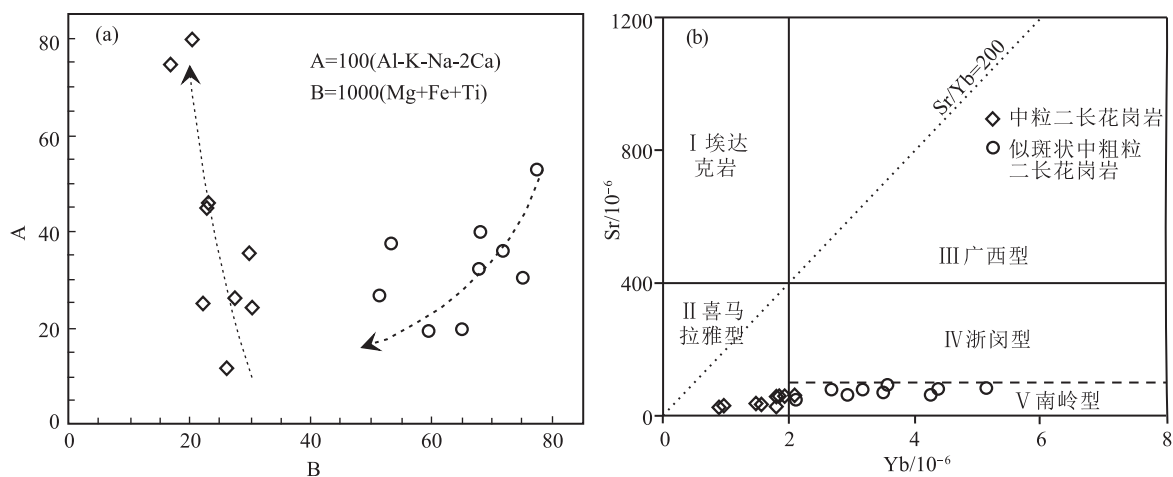
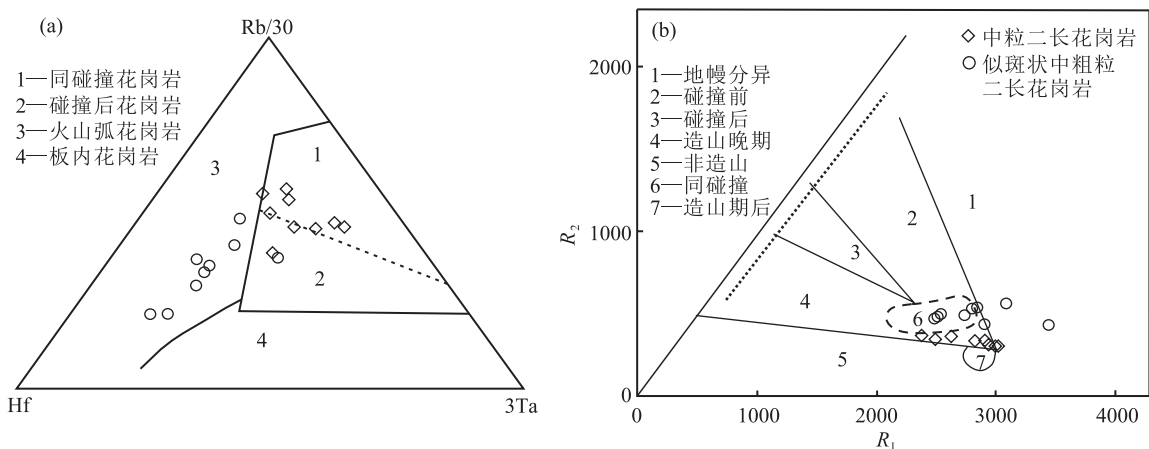


图7 漕涧复式岩体晚奥陶世花岗岩 B-A(a) 和 Yb-Sr(b) 图解

Fig. 7 B-A(a) and Yb-Sr(b) diagrams of Late Ordovician granites from Caojian complex

图8 漕涧复式岩体晚奥陶世花岗岩 Rb/30-Hf-3Ta(a) 和 R_1-R_2 (b) 图解Fig. 8 Rb/30-Hf-3Ta(a) and R_1-R_2 (b) diagrams of Late Ordovician granites from Caojian complex

壳发生隆升,中-下地壳物质减压作用导致了在较高压力条件下、较低程度的部分熔融,形成了中粒二长花岗岩($\gamma^a\text{O}_3$)的岩浆;紧随其后,地幔物质(或热流)上升,对中-上地壳物质进行加热、增温,导致其在较低压力条件下发生较高级程度的部分熔融,形成了似斑状中粗粒二长花岗岩($\gamma^b\text{O}_3$)。

5.3 区域构造意义

滇西地区最早厘定的早古生代花岗岩是潞西地区的平河岩体,随着研究程度的提高,近10余年来滇西地区发现的早古生代花岗岩越来越多^{②-⑥}[14-15,17-18];1:25万大理市幅从古元古界崇山岩群中识别出了漕涧奥陶纪花岗岩体;1:25万潞西市幅、腾冲县幅在怒江西岸识别出了大量的奥陶纪花岗岩;孙载波等^[17]对勐海布朗山花岗岩体的研

究也表明,其侵位年龄为 $458.5 \pm 3.0 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.3, n = 21$);鲁慧等^[18]对滇西南地区西盟县曼亨花岗岩体的研究表明,岩浆侵位的年龄为 $446.1 \pm 2.5 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.17, n = 18$);1:5万蚂蚁堆等4幅在云县蚂蚁堆附近的临沧花岗岩基中也识别出了大量的晚奥陶世花岗岩。随着奥陶纪湾河蛇绿混杂岩的厘定及其中高压+超高压变质的深入研究^[35-39],上述早古生代花岗岩与泛非造山运动、原特提斯构造演化之间的关系逐步引起了关注。

从区域构造资料分析,出露于昌宁-孟连结合带以东的云县蚂蚁堆、勐海布朗山一带的早古生代花岗岩与泛非造山运动基本不存在成因联系,可能是湾河蛇绿混杂岩代表的洋盆向东俯冲消减的产物。出露于怒江西岸、潞西平河一带的早古生代花

岗岩规模较大,与境外同一构造带上的一系列岩体构成了长度超过 320 km 的一条构造-岩浆岩带^⑦,应与三台山早古生代蛇绿混杂岩^⑧代表的洋盆关闭后的碰撞造山作用及泛非运动有关;产在该岩浆岩带同一构造单元北延和昌宁-孟连结合带以西的漕涧、西蒙地区的早古生代花岗岩应形成于该阶段,而现今呈现产出规模较小的特点,属远离碰撞主峰带和遭受了晚期构造-岩浆作用破坏所致。笔者认为,漕涧复式岩体为泛非运动后碰撞阶段,冈瓦纳大陆北缘小地块之间相互挤压、碰撞和深部壳-幔物质相互作用的产物,并指示了保山地块存在泛非运动。

黄勇等^[21]认为,保山地块施甸地区晚寒武世与中奥陶世地层的不整合接触关系,是泛非期造山作用的沉积记录,且保山地块存在泛非运动的事实与 Wang 等^[12, 19, 23, 40-44] 研究观点相统一。此外,李三忠等^[45-48]认为,保山地块具亲冈瓦纳古陆特征及昌宁-孟连结合带是原特提斯域的南界,均表明了保山地块存在泛非运动记录的合理性和正确性。

6 结 论

(1) 漕涧复式花岗岩以晚奥陶世花岗岩体为主体,其侵位年龄为 453.9~456.8 Ma。漕涧地区存在早奥陶世—晚寒武世岩浆活动。

(2) 中粒二长花岗岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -11.65~0.28,地壳模式年龄为 1.11~1.61 Ga,岩浆的源岩主要源自中元古代陆壳基底物质的部分熔融,并可能有极少地幔物质的混入;似斑状中粗粒二长花岗岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -11.61~-1.57,地壳模式年龄为 1.25~1.83 Ga,源岩为中—古元古代的陆壳基底物质。

(3) 两类花岗岩分别具白云母过铝花岗岩(MPG)和富黑云母含堇青石过铝花岗岩(CPG)的成分变异趋势,分别源自较高压力条件下中—下地壳物质的隆升减压导致的低度部分熔融和较低压力条件下中—上地壳物质的加热增温导致的较高程度部分熔融。

(4) 漕涧复式岩体的晚奥陶世花岗岩形成于泛非运动后碰撞阶段,是冈瓦纳大陆北缘小地块之间的相互挤压、碰撞和深部壳-幔物质相互作用的产物,并指示了保山地块存在泛非运动。

致谢:项目组成员参加了野外调查和研究工

作,锆石测年样品的制备和分析得到河北省廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司和湖北省地质实验室测试中心的大力支持,岩石地球化学方面的测试为自然资源部昆明矿产资源监督检测中心和湖北省地质实验室测试中心完成,锆石原位 Hf 同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司实验室完成,成文过程中得到李静、张虎两位正高级工程师和审稿专家的悉心指导,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 钟大赉. 滇西西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 李兴振, 刘文均, 王义昭, 等. 西南三江地区特提斯构造演化与成矿(总论)[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [3] 莫宣学, 沈上越, 朱勤文, 等. 三江中南段火山岩-蛇绿岩与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [4] 刘本培, 冯庆来, 方念乔, 等. 滇西昌宁-孟连和澜沧江带古特提斯多岛洋构造演化[J]. 地球科学, 1993, 18(5): 529-539.
- [5] 刘本培, 冯庆来, Chonglakmani C, 等. 滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸[J]. 地学前缘, 2002, 9(3): 67-76.
- [6] 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 等. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-490.
- [7] 许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 等. 喜马拉雅地体的泛非—古生代造山事件年龄纪录[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 1-12.
- [8] Cawood P A, Johnson M R W, Mchin N E. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly[J]. Earth and Planetary Science Letter, 2007, 255(1/2): 70-84.
- [9] 张泽明, 王金丽, 沈昆, 等. 环东冈瓦纳大陆周缘的古生代造山作用: 东喜马拉雅构造结南迎巴瓦岩群的岩石学和年代学证据[J]. 岩石学报, 2008, 24(7): 1627-1637.
- [10] 胡培远, 李才, 苏犁, 等. 青藏高原羌塘中部蜈蚣山花岗岩片麻岩锆石 U-Pb 定年——泛非与印支事件的年代学记录[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 1050-1064.
- [11] 李才, 李彦旺, 王明, 等. 青藏高原泛非—早古生代造山事件研究重大进展[J]. 地质通报, 2010, 29(1/2): 1733-1736.
- [12] Wang X X, Zhang J J, Santosh M, et al. Andean-type orogeny in the Himalayas of South Tibet: Implications for Early Paleozoic tectonics along the Indian margin of Gondwana[J]. Lithos, 2012, 154: 248-262.
- [13] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. Cambrian bimodal volcanism in the Lhasa Terrane, southern Tibet: Record of an Early Paleozoic Andean-type magmatic arc in the Australian proto-Tethyan margin[J]. Chemical Geology, 2012, 328(18): 290-308.
- [14] 熊昌利, 贾小川, 杨学俊, 等. 滇西龙陵地区勐冒奥陶纪二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造环境[J]. 地质通报, 2012, 31(2/3): 277-286.
- [15] 林仕良, 丛峰, 高永娟, 等. 滇西腾冲地块东南缘高黎贡山群片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(2/3): 258-263.

- [16] 潘桂棠,朱弟成,王立全,等.班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据[J].地学前缘,2004,11(4): 371-382.
- [17] 孙载波,胡绍斌,周坤,等.滇西南勐海布朗山奥陶纪花岗岩锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成特征及其构造意义[J].地质通报,2018,37(11): 2044-2054.
- [18] 鲁慧,孙载波,张虎,等.云南西盟曼亨花岗岩锆石 U-Pb 年龄与地质意义[J].矿物学报,2015,(4): 515-521.
- [19] 李再会,林仕良,丛峰,等.滇西腾冲-保山地块早古生代岩浆作用和地球化学: 岩石成因和构造背景[J].矿物岩石地球化学通报,2013,32(6): 689-703.
- [20] 陈吉琛.滇西花岗岩类时代划分及同位素年龄值选用的讨论[J].云南地质,1987,6(2): 101-113.
- [21] 黄勇,郝家翔,白龙,等.滇西施甸地区晚泛非运动的地层学和岩石学响应[J].地质通报,2012,31(2/3): 306-313.
- [22] 吕伯西,王增,张能德,等.三江地区花岗岩类及其成矿专属性[M].北京:地质出版社,1993: 1-328.
- [23] 董美玲,董国臣,莫宣学,等.滇西保山地块早古生代花岗岩类的年代学、地球化学及意义[J].岩石学报,2012,28(5): 1453-64.
- [24] 郝家翔,邹立志,陈刚,等.滇西施甸地区卧牛寺组火山岩的地质时代及喷发环境[J].中国地质调查,2015,2(7): 40-44.
- [25] 董美玲,董国臣,莫宣学,等.滇西保山地块中—新生代岩浆作用及其构造意义[J].岩石学报,2013,29(11): 3901-13.
- [26] 禹丽,李龚健,王庆飞,等.保山地块北部晚白垩世岩浆岩成因及其构造指示: 全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约[J].岩石学报,2014,30(9): 2709-24.
- [27] 孙柏东,王晓林,黄亮,等.保山地块澜洞复式岩体晚白垩世花岗岩地球化学特征及锆石 U-Pb 年代学意义[J].地质通报,2018,37(11): 2099-2111.
- [28] 周亮亮,魏均启,王芳,等.LA-ICP-MS 工作参数优化及在锆石 U-Pb 定年分析中的应用[J].岩矿测试,2017,36(4): 350-359.
- [29] 张旗,潘国强,李承东,等.花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三[J].岩石学报,2007,23(27): 2683-2698.
- [30] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. Lithos,1998,45: 9-44.
- [31] Barbarin B,张健奕.两种主要过铝质花岗岩的成因[J].地质科学译丛,1997,14(2): 11-14.
- [32] 林广春,马昌前.过铝花岗岩的成因类型与构造环境研究综述[J].华南地质与矿产,2003,(1): 65-70.
- [33] 葛文春,李献华,李正祥,等.桂北新元古代两类过铝花岗岩的地球化学研究[J].地球化学,2001,30(1): 24-34.
- [34] 张旗,王焰,李承东,等.花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J].岩石学报,2006,22(9): 2249-2269.
- [35] 李静,孙载波,徐桂香,等.滇西双江县勐库地区榴闪岩的发现与厘定[J].矿物学报,2015,35(4): 421-424.
- [36] 李静,孙载波,黄亮,等.滇西勐库退变质榴辉岩的 $P-T-t$ 轨迹及地质意义[J].岩石学报,2017,33(7): 2285-2291.
- [37] 徐桂香,曾文涛,孙载波,等.滇西双江县勐库地区(退变质)榴辉岩的岩石学、矿物学特征[J].地质通报,2016,35(7): 1036-1045.
- [38] 孙载波,李静,周坤,等.滇西双江县勐库地区退变质榴辉岩的锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J].地质通报,2018,37(11): 2032-2043.
- [39] 刘桂春,孙载波,曾文涛,等.滇西双江县勐库地区湾河蛇绿混杂岩的厘定、地球化学特征及其地质意义[J].岩石矿物学杂志,2017,36(2): 163-174.
- [40] Liu S, Hu R Z, Gao S, et al. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the age and origin of Early Palaeozoic I-type granite from the Tengchong-Baoshan block, western Yunnan Province, SW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36: 168-182.
- [41] 蔡志慧,许志琴,段向东,等.青藏高原东南缘滇西早古生代早期造山事件[J].岩石学报,2013,29(6): 2123-2140.
- [42] Wang Y J, Xing X W, Peter A, et al. Petrogenesis of early Paleozoic peraluminous granite in the Sibumasu Block of SW Yunnan and diachronous accretionary orogenesis along the northern margin of Gondwana. Lithos, 2013, 182/183: 67-85.
- [43] 毛晓光,尹福光,唐渊,等.保山地块西缘早古生代增生造山作用[J].地球科学—中国地质大学学报,2014,39(8): 1129-1139.
- [44] 邹雅棋,李向东,雷浩.滇西石缸河—平河地区早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J].矿产与地质,2017,31(1): 150-157.
- [45] 李三忠,赵淑娟,李玺瑶,等.东亚原特提斯洋(Ⅰ): 早古生代微陆块亲缘性与聚合[J].岩石学报,2016,32(9): 2609-2627.
- [46] 李三忠,赵淑娟,余珊,等.东亚原特提斯洋(Ⅱ): 早古生代微陆块亲缘性与聚合[J].岩石学报,2016,32(9): 2628-2644.
- [47] Metcalfe I. Gondwana land dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1996, 43: 605-623.
- [48] Ueno K. Permian fusulinacean faunas of the Sibumasu and Baoshan blocks: Implications for the paleogeographic reconstruction of the Cimmerian continent[J]. Geoscience Journal, 2000, 4: 160-163.
- ①云南省地质调查局.云南省成矿地质背景研究报告.2013.
- ②云南省地质调查院.1: 25 万腾冲县、潞西市幅区域地质调查报告.2008.
- ③云南省地质调查院.1: 25 万大理幅区域地质调查报告.2008.
- ④云南省地质调查院.云南省 1: 5 万归州、宝丰、澜洞、功果街幅区域地质调查报告.2019.
- ⑤云南省地质调查院.云南省 1: 5 万乌木寨、玉明珠、勐捧、尖山、勐稳、罗胡山 6 幅区域地质矿产调查报告.2016.
- ⑥重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队.云南省 1: 5 万头道水、涌宝、蚂蚁堆、大寨幅区域地质调查报告.2016.
- ⑦云南省地质科学院.东南亚中南半岛(五国)地质矿产图.2015.
- ⑧云南省地质调查院.云南省 1: 5 万曼彦、章凤街、户那街、遮放幅区域地质调查报告.2019.