

南澜沧江构造带景洪怕冷岩体锆石 U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素特征及其对古特提斯构造演化的约束

王伟¹, 孙载波^{1,2,3*}, 周坤¹, 刘和松³, 吴嘉林¹, 丛峰⁴, 赵江泰¹, 刘卫东¹, 李小军¹, 刘梦琼⁵
WANG Wei¹, SUN Zaibo^{1,2,3*}, ZHOU Kun¹, LIU Hesong³, WU Jialin¹, CONG Feng⁴,
ZHAO Jiangtai¹, LIU Weidong¹, LI Xiaojun¹, LIU Mengqiong⁵

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 650061;

3. 云南大学地球科学学院, 云南 昆明 650500;

4. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;

5. 云南省建筑工程设计院有限公司, 云南 昆明 650217

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

2. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Ministry of Natural Resources, Kunming 650061, Yunnan, China;

3. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China;

4. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

5. Yunnan Architectural Engineering Design Company Limited, Kunming 650217, Yunnan, China

摘要:景洪怕冷岩体位于景洪市大勐龙镇西侧, 该岩体以闪长岩为主, 内部包裹了辉长岩、角闪岩、辉石岩、角闪橄榄岩等小型岩体。利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法对怕冷岩体中的辉长岩、黑云英闪长岩和斜长角闪岩进行精确定年, 获得其结晶年龄分别为 252.5 ± 1.6 Ma、 264.3 ± 2.0 Ma 和 273.6 ± 1.9 Ma, 表明该岩体的形成时代为中—晚二叠世。与该构造带上的其他岩体相比, 形成时代较晚, 可能为洋盆俯冲晚期岩浆流动分异作用较弱形成。全岩主量和微量元素研究表明, 闪长岩和辉长岩均具有典型岛弧岩浆岩的地球化学特征, 指示该岩体形成于与板块俯冲有关的大洋岛弧环境。斜长角闪岩锆石初始 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) 值为 $0.282833 \sim 0.282858$, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围在 $8.8 \sim 13.2$ 之间, 单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄 t_{DM1} 为 $370 \sim 549$ Ma (平均值为 470 Ma), 明显老于原岩结晶时代。结合区域地质资料分析, 滇西地区古特提斯洋(昌宁—孟连洋)的俯冲于晚石炭世开始, 直到晚二叠世末期洋盆才闭合进入弧陆碰撞造山阶段。

关键词: 岛弧; 晚古生代; 古特提斯洋; 锆石 U-Pb 定年; 景洪怕冷岩体

中图分类号: P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)07-1068-16

Wang W, Sun Z B, Zhou K, Liu H S, Wu J L, Cong F, Zhao J T, Liu W D, Li X J, Liu M Q. Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope of the Jinghong Paleng pluton in southern Lancangjiang tectonic belt, and its constraints on the tectonic evolution of the Paleo-Tethys. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(7): 1068-1083

Abstract: Outcropped in the western Damenglong Town of Jinghong City, the Paleng pluton is lithologically dominated by diorite in which several small gabbro, amphibolite, pyroxenite and hornblende peridotite plutons are emplaced. By means of LA-ICP-MS zircon

收稿日期: 2019-11-10; 修订日期: 2020-04-09

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)、国家自然科学基金项目《三江南段景洪大勐龙地区高压变质岩 p - T - t 轨迹及其对原-古特提斯构造演化的制约》(批准号: 42062005)、云南省自然资源厅地勘基金项目《云南 1:5 万曼各、小街、曼班、大勐龙、万纳兰、勐宋坝六幅区域地质调查》(编号: D2017014)

作者简介: 王伟 (1970-), 男, 教授级高工, 从事区域地质调查与微体古生物研究工作。E-mail: 1553974947@qq.com

* **通信作者:** 孙载波 (1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事区域地质调查与基础地质研究工作。E-mail: ynddyszb@163.com

U-Pb method, gabbro, tonalite and amphibolite in the Paleng pluton were dated, and yielded crystallization age of 252.5 ± 1.6 Ma, 264.3 ± 2.0 Ma and 273.6 ± 1.9 Ma, respectively, which indicates that the Paleng pluton was emplaced in Middle-Late Permian. Compared with other plutons along this tectonic belt, it was emplaced relatively late, and might be formed from weaker differentiation in the late stage of ocean basin subduction. The study of whole rock major and trace elements shows that both the diorite and gabbro have the geochemical characteristics of typical island-arc magmatism, indicating that the pluton was formed in the oceanic island arc environment related to plate subduction. The initial Hf isotope ratios ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i of the zircons from amphibolites range from 0.282833 to 0.282858, with corresponding $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of 8.8~13.2. These zircons have depleted mantle Hf model ages (t_{DM1}) of 416~499 Ma, with an average of 470 Ma, obviously older than the crystallization of the original rocks (273.6 Ma). Combined with the analysis of regional geological data, the subduction of the ancient Tethys Ocean (Changning-Menglian Ocean) in western Yunnan began in the Late Carboniferous, and the ocean basin closed and entered the arc-continent collision orogenic stage until the end of the Late Permian.

Key words: island-arc; Late Paleozoic; Paleo-Tethys Ocean; zircon U-Pb age; Jinghong Paleng pluton

滇西三江(怒江、澜沧江、金沙江)地区处于劳亚大陆与冈瓦纳大陆的结合部位,是原-古特提斯构造域的重要组成部分,保存了丰富的特提斯演化记录,因此一直是国内外特提斯研究的热点区域,也是特提斯及喜马拉雅巨型成矿域的重要组成部分和中国重要的多金属富集区^[1-8]。南澜沧江构造带位于三江特提斯构造带南部,带内广泛发育二叠纪—三叠纪岩浆岩,主要由规模宏大的临沧花岗岩基和三叠纪—侏罗纪火山岩系组成,构成了三江地区重要的构造岩浆岩带。在该带内沿澜沧江两侧出露一系列南北向带状展布的弧火山岩—侵入岩体,由北向南规模较大的岩体依次为德钦燕门—飞来寺岩体群、维西吉岔岩体、景谷半坡岩体、澜沧雅口岩体、旧街岩体、大谷地岩体、景洪曼秀岩体、景洪南林山岩体、景洪怕冷岩体等。有学者^[9]曾将这些杂岩体视为蛇绿混杂岩或弧后洋盆蛇绿混杂岩,即澜沧江洋盆俯冲消减后的残迹;而张魁武等^[10]、张旗等^[11]将其与阿拉斯加型岩体进行对比,认为属岛弧岩浆作用的产物。该构造带上许多岩体表现为中性—基性—超基性岩共生的杂岩体,部分岩体的基性岩中常见发育良好的火成堆积层理,旧街岩体、大谷地岩体、曼秀岩体则以闪长岩为主,云南省地质调查院^①将这一构造岩石组合命名为早二叠世陆缘俯冲(高)镁闪长岩—辉长岩—辉橄岩组合。前述不同的认识代表截然不同的地质涵义,并且制约了对西南三江古特提斯构造格局、演化历史等的认识,因此,有必要加强该构造岩浆岩带上各岩体的侵位时代、岩石类型、岩石地球化学特征及构造—岩浆类型等方面的研究,为滇西地区古特提斯的构造演化和古板块重建提供有力的岩石学资料。

2017—2019年,笔者在承担云南1:5万曼各、小街、曼班、大勐龙、万纳兰、勐宋坝幅区域调查项目时,对出露于该构造岩浆带最南端的怕冷岩体进行了详细的野外地质调查和剖面研究。该岩体野外露头较差,因此研究程度较低,主要集中于区域对比、岩石(相)学、岩石地球化学、构造属性等方面的研究^{[12]②},目前依然缺乏精确的年龄数据和系统的岩石地球化学研究。为解决上述问题,笔者在野外地质调查的基础上,采集了该岩体新鲜样品,对其进行精确定年及岩石地球化学研究,旨在限定该岩体的形成时代,并探讨其构造环境、岩石成因、岩浆岩区等,进一步揭示其蕴含的特提斯构造意义。

1 岩体地质特征与样品描述

景洪怕冷岩体位于勐海花岗岩基南段的东侧,主要由阿克甫、怕冷、曼庄尖、曼山等小岩体组成,呈岩墙、岩株、岩脉状沿澜沧江断裂带断续出露(图1),与景洪县城附近南联山岩体处于同一构造岩浆岩带上。阿克甫岩体呈岩墙状产出,以角闪辉长岩、黑云角闪辉长岩、透闪石化暗色辉长岩为主;怕冷岩体呈弯月状产出,以闪长岩为主体,内部包裹几个小的辉长岩、角闪岩、辉石岩及角闪橄榄岩体,由中心向外依次出现橄榄岩、辉石岩、辉长岩、闪长岩和花岗闪长岩,具环状分布的特征;曼庄尖岩体呈透镜状南北分布,以角闪辉长岩和角闪紫苏岩为主;曼山岩体呈岩墙状产出,以闪长岩为主,内部见几个南北向平行排列的小辉绿岩、辉绿玢岩岩脉。本次采集的3件样品中有1件位于阿克甫岩体内,另外2件位于曼山岩体内(图1),岩性为闪长辉长岩(PM003-62-1)、黑云英云闪长岩(DMBw-29-

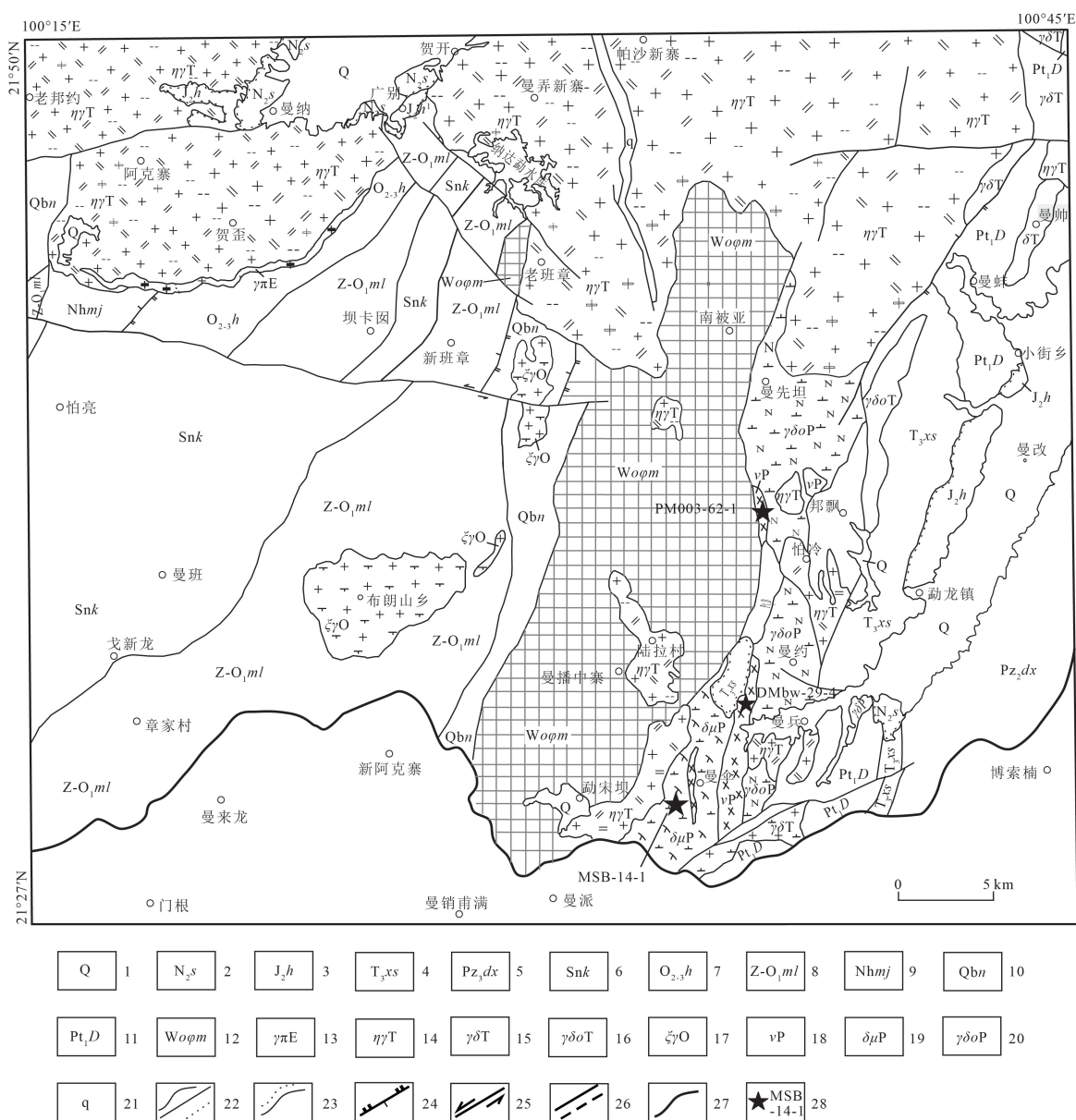


图1 景洪市大勐龙地区地质简图(底图据参考文献③)

Fig. 1 Simplified geological map of the Damenglong area of Jinghong City

1—第四系;2—新近系上新统三营组;3—中侏罗统花开左组;4—上三叠统雪山组;5—上古生界大新山岩组;6—志留系南坑河岩组;7—中—上奥陶统惠民岩组;8—震旦系—下奥陶统曼来岩组;9—南华系勐井山岩组;10—青白口系南木林岩组;11—元古界大勐龙岩群;12—湾河蛇绿混杂岩;13—古近纪花岗斑岩;14—三叠纪二长花岗岩;15—三叠纪花岗闪长岩;16—三叠纪英云闪长岩;17—奥陶纪正长花岗岩;18—二叠纪辉长岩;19—二叠纪闪长斑岩;20—二叠纪英云闪长岩;21—石英脉;22—实测/推测整合界线及侵入界线;23—实测不整合界线;

24—实测逆断层;25—实测平移断层;26—实测、推测性质不明断层;27—国境线;28—采样地点及样品编号

4)和斜长角闪岩(MSB-14-1)。

灰色块状变质辉长岩:岩石具变余中细粒半自形粒状辉长结构,不定向块状构造(图2-a),主要由斜长石(55%)、角闪石(40%)、单斜辉石(3%)和少

量金属矿物(2%)组成,镜下见较均匀分布的大量细粒半自形镶嵌状斜长石(Pl),以次生角闪石(Hbl)、绿泥石(Chl)为主,残留少量细粒普通辉石(图2-b)。

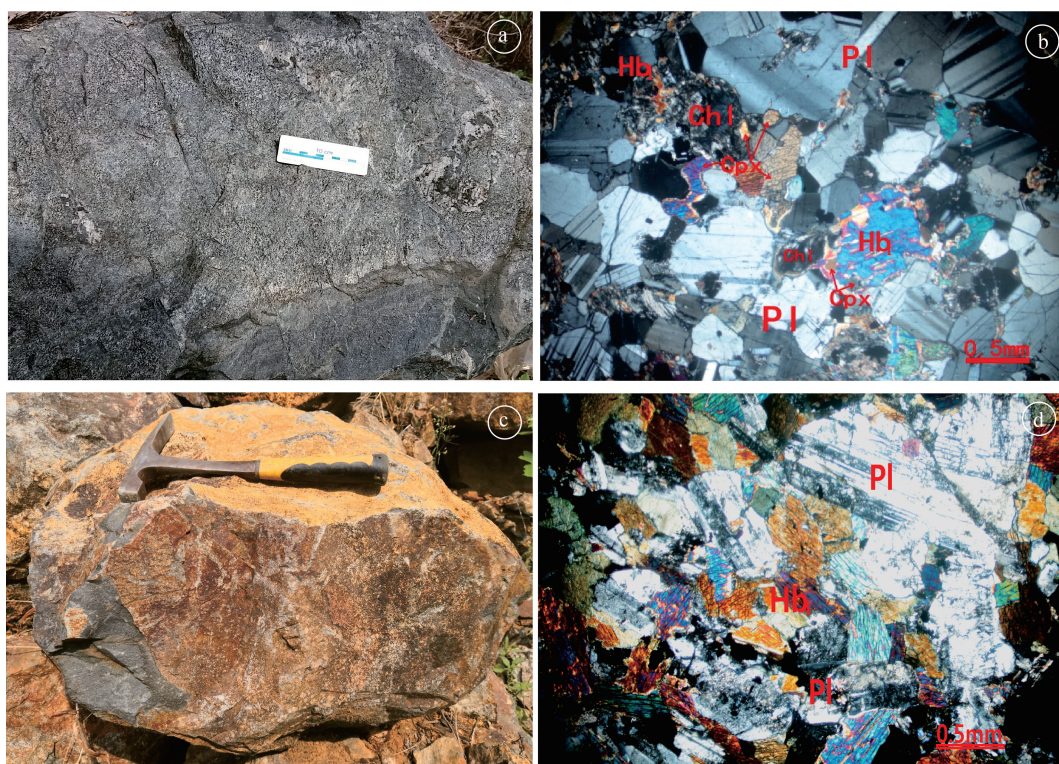


图 2 帕冷岩体变质辉长岩、斜长角闪岩野外露头照片(a,c)及显微镜下照片(b,d)

Fig. 2 Field photographs(a,c) and micrographs(b,d) of the Paleng pluton

Hb—角闪石; Pl—斜长石; Cpx—单斜辉石; Chl—绿泥石

深灰绿色斜长角闪岩(浅变质暗色闪长岩):岩石具不等粒状变晶结构,半定向构造(图 2-c),主要由斜长石(35%)、角闪石(62%)和少量金属矿物(3%)组成,镜下见岩石中粒度较粗的半自形板状斜长石($d \leq 6 \text{ mm}$),大量粒度较细的他形-半自形变晶柱状角闪石($d \leq 1.5 \text{ mm}$)呈半定向分布(图 2-d)。

浅灰色黑云英闪长岩:岩石具变余斑状细晶半自形粒状结构,不定向块状构造,主要矿物为石英(10%),次要矿物为黑云母(35%)。石英流变细粒化重结晶,呈细粒齿状镶嵌,短条痕状聚集;斜长石呈自形短板状,具弱钠黝帘石化、绢云母化;细粒状黑云母绿帘石化、铁泥化,呈条痕-微网纹状聚集;偶见全纤闪石化、绿帘石化角闪石。

2 分析方法

主量和微量元素在北京核工业地质研究院分析测试中心完成。主量元素采用日本理学 PrimusII

X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成;微量元素利用 Agilent 7700e ICP-MS 等离子体质谱仪分析完成。用于 ICP-MS 分析的样品处理如下:①将 200 目样品置于 105℃烘箱中烘干 12 h;②准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中;③先后依次缓慢加入 1 mL HNO_3 和 1 mL 高纯 HF;④将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190℃烘箱中加热 24 h 以上;⑤待溶样弹冷却,开盖后置于 140℃电热板上蒸干,然后加入 1 mL HNO_3 并再次蒸干;⑥加入 1 mL 高纯 HNO_3 、1 mL MQ 水和 1 mL 内标 In(浓度为 1×10^{-6}),再次将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190℃烘箱中加热 12 h 以上;⑦将溶液转入聚乙烯塑料瓶中,并用 2% HNO_3 稀释至 100 g,以备 ICP-MS 测试。同时,对美国地质调查局(USGS)标准参考物质 BHVO-2G, BCR-2G 和 BIR-1G 进行分析,结果表明,微量元素分析精度和准确度均优于 5%。

锆石单矿物分选工作由河北省廊坊市诚信地

质服务有限公司完成,在双目镜下手工挑纯。选取晶形较好、无裂隙的锆石颗粒制成环氧树脂样品靶。抛光后拍摄锆石的反射光、透射光及阴极发光(CL)显微照片,依据显微照片显示的锆石特点,选择合适的颗粒及其部位进行U-Pb同位素测定。锆石阴极发光照相在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,仪器为高真空扫描电子显微镜(JSM-IT 100),配备有GATAN MINICL系统,工作电场电压为10.0~13.0 kV,钨灯丝电流为80~85 μA 。

锆石U-Pb同位素定年和微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用LA-ICP-MS同时分析完成。详细的仪器参数和分析流程见Zong等^[13]。GeolasPro激光剥蚀系统由COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和MicroLas光学系统组成,ICP-MS型号为Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入ICP之前通过一个T型接头混合,激光剥蚀系统配置有信号平滑装置^[14]。本次分析的激光束斑和频率分别为32 μm 和5 Hz。U-Pb同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准91500和玻璃标准物质NIST610作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括20~30 s空白信号和50 s样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件ICPMSDataCal^[15-16]完成。锆石样品的U-Pb年龄谱和图绘制和年龄加权平均值计算采用Isoplot/Ex_ver3^[17]完成。

锆石原位Lu-Hf同位素组成分析是基于阴极发光图像和锆石U-Pb定年测试进行的。锆石Lu-Hf同位素原位分析在武汉上谱分析测试有限责任公司完成,所用的测试仪器为Neptune Plus多接受器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS),利用193 nm FX激光器对锆石进行剥蚀,激光剥蚀的束斑直径为32 μm ,能量密度为10~11 J/cm²,频率为8~10 Hz。详细仪器操作条件和分析方法见Hu等^[18]。¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf被用于计算Hf的质量分馏因子(0.7325,见参考文献[19])。

3 分析结果

3.1 主量和微量元素

对采自景洪大勐龙怕冷岩体的7件样品进行主量和微量元素分析,结果见表1。文中涉及的主量元素含量、比值及特征参数均使用扣除烧失量(0.09%~4.81%)后100%归一化的值。本次采集样品的SiO₂含量为48.40%~53.96%,属于基性岩范畴;MgO含量为5.08%~10.21%(平均值为7.01%),Mg[#]指数为55.47~69.94,略低于原生岩浆Mg[#]指数范围(68~75)^[20],属分异演化程度较高的岩浆;碱含量(K₂O+Na₂O)为2.71%~4.57%,富钠低钾(Na₂O/K₂O=6.46~19.77);TiO₂含量为0.51%~0.96%(平均值为0.65%),与岛弧玄武岩低Ti含量(TiO₂<0.85%)^[21]的特征相符;Al₂O₃含量为16.59%~20.09%(平均值为18.12%),大于岛弧环境中常见的高铝玄武岩(Al₂O₃≥17%)^[22];TiO₂/Al₂O₃值极低(0.03~0.05),具岛弧或弧后盆地基性岩特点;Fe₂O₃含量为0.64%~2.42%(平均值为1.19%),FeO含量为5.38%~8.96%(平均值为7.51%)。本次采集的7件样品总体具高铝质基性岩的特点(SiO₂≤54%,MgO≤7%,Al₂O₃≥16%),形成与板块俯冲有关^[23]。利用不活动元素Zr/TiO₂-Nb/Y图解(图3-a)和SiO₂-Nb/Y图解^[24](图3-b)判别,样品点落入亚碱性玄武岩区域;在火山岩TAS分类图解(图3-c)中,样品点全部落在亚碱性玄武岩区域;在SiO₂-K₂O图解(图3-d)中,除1件样品落入高钾钙碱性玄武岩内外,其余全部落入低钾拉斑玄武岩系列,二者与不活动元素判别图解结果一致。

样品的稀土元素总量(ΣREE)较低,为 38.08×10^{-6} ~ 85.47×10^{-6} ,平均为 49.28×10^{-6} ,球粒陨石标准化配分曲线总体向右缓倾(图4-a),轻稀土元素相对重稀土元素弱富集,其(La/Sm)_N=1.18~2.68,(Gd/Yb)_N=0.78~1.15, δEu 值为0.82~1.36,平均为1.04,无明显Eu异常, δCe 值为0.69~0.93,平均为0.75,无Ce异常,总体上与陆源弧后盆地Okinawa玄武岩(OTB)相似^[25]。在原始地幔标准化微量元素比值蛛网图(图4-b)上,大离子亲石元素Sr、K、Ba元素明显亏损,其中,样品PM003-62-1强烈亏损Ba元素,可能与样品变质、海水蚀变等因素有关。

表 1 景洪怕冷岩体基性岩主量、微量和稀土元素组成

Table 1 Major, trace element and REE compositions for the basites from the Paleng pluton in the Jinghong area

样品号	DMbp-16 -1	DMbp-16 -1-3	DMbw-29 -2	DMbw-29 -2-1	MSB-14 -1-1	MSB-14 -2-1	PM003-62 -1
SiO ₂	50.59	49.92	48.80	53.23	52.77	50.36	45.48
TiO ₂	0.96	0.67	0.52	0.51	0.58	0.78	0.55
Al ₂ O ₃	19.01	18.97	17.03	16.59	17.70	17.44	20.09
Fe ₂ O ₃	3.35	0.62	0.50	0.84	1.25	0.98	1.50
FeO	4.30	7.15	8.61	7.43	7.18	8.56	6.44
MnO	0.15	0.14	0.18	0.19	0.19	0.20	0.14
MgO	5.63	5.63	9.87	6.36	4.98	6.53	8.34
CaO	8.59	8.91	7.27	9.16	8.72	8.59	8.69
Na ₂ O	3.53	3.49	2.95	3.93	4.35	3.45	1.10
K ₂ O	0.54	0.54	0.31	0.32	0.22	0.38	1.61
P ₂ O ₅	0.13	0.21	0.08	0.08	0.11	0.08	0.03
烧失量	2.29	2.98	2.47	0.09	0.73	1.29	4.81
合计	99.07	99.23	98.59	98.73	98.78	98.64	98.78
Mg [#]	66.03	58.58	67.31	60.59	55.47	57.81	69.94
Na ₂ O+K ₂ O	3.87	4.03	3.26	4.25	4.57	3.83	2.71
Na ₂ O/K ₂ O	6.54	6.46	9.52	12.28	19.77	9.08	0.68
Cu	39.00	16.30	2.90	6.42	8.57	6.99	50.30
Zn	75.40	82.50	48.30	41.90	134.00	88.60	78.00
Cr	111.00	90.30	507.00	346.00	165.00	81.50	364.00
Ni	50.40	44.40	141.00	62.00	32.00	5.39	56.50
Co	31.30	31.80	37.90	25.20	28.10	23.20	36.80
Rb	27.20	29.00	13.00	12.70	8.31	14.30	130.00
Sr	524.00	412.00	208.00	299.00	512.00	220.00	299.00
Ba	96.20	67.60	81.40	62.50	66.10	99.80	0.39
V	255.00	167.00	244.00	217.00	261.00	153.00	218.00
Sc	29.00	33.80	38.80	35.30	35.10	37.90	49.60
Nb	2.38	1.48	1.55	1.94	2.73	1.63	0.60
Zr	12.00	9.17	8.62	13.20	11.30	8.27	11.60
Hf	0.53	0.40	0.41	0.60	0.68	0.47	0.56
U	0.06	0.12	0.14	0.20	0.94	0.42	4.38
Th	0.12	0.17	0.54	0.63	2.65	0.61	0.58
La	5.74	4.67	3.14	4.24	12.30	3.16	3.22
Ce	11.40	9.65	6.76	8.67	24.40	6.76	5.34
Pr	1.64	1.34	1.00	1.16	3.11	1.01	1.06
Nd	7.96	6.38	4.94	5.51	13.00	5.01	5.52
Sm	2.04	1.59	1.37	1.49	2.89	1.48	1.71
Eu	0.87	0.73	0.40	0.42	0.87	0.51	0.57

续表 1

样品号	DMbp-16 -1	DMbp-16 -1-3	DMbw-29 -2	DMbw-29 -2-1	MSB-14 -1-1	MSB-14 -2-1	PM003-62 -1
Gd	2.11	1.67	1.62	1.65	2.75	1.74	1.34
Tb	0.42	0.34	0.37	0.38	0.52	0.40	0.35
Dy	2.51	1.99	2.32	2.50	3.01	2.67	2.44
Ho	0.52	0.41	0.53	0.55	0.63	0.59	0.50
Er	1.43	1.11	1.47	1.56	1.79	1.63	1.18
Tm	0.25	0.19	0.25	0.28	0.34	0.29	0.23
Yb	1.66	1.17	1.61	1.70	2.22	1.76	1.34
Lu	0.24	0.17	0.22	0.23	0.34	0.25	0.18
Y	13.90	10.30	13.60	14.70	17.30	15.10	13.10
ΣREE	52.69	41.71	39.60	45.04	85.47	42.36	38.08
δEu	1.27	1.36	0.82	0.82	0.93	0.97	1.11
δCe	0.88	0.92	0.91	0.93	0.93	0.91	0.69
(La/Yb) _N	2.33	2.69	1.31	1.68	3.74	1.21	1.62
(Gd/Yb) _N	1.03	1.15	0.81	0.78	1.00	0.80	0.81
(La/Sm) _N	1.77	1.85	1.44	1.79	2.68	1.34	1.18

注:主量元素含量单位为%,微量元素和稀土元素含量单位为 10^{-6} ; $Mg^{\#} = 100 \times Mg / (Mg + Fe)$ (原子数); $\delta Eu = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$, $\delta Ce = 2Ce_N / (La_N + Pr_N)$, 其中 N 为球粒陨石标准化值

3.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

辉长岩 (PM003-62-1) 中的锆石多为浅黄色、自形-半自形、不完整晶体颗粒,多呈短柱状,长度一般为 100~250 μm ,锆石阴极发光图像 (图 5-a) 显示大多数锆石为板状无分带结构,少量锆石具有较宽的弱振荡环带,无继承性核,总体上,显示岩浆锆石特征,属岩浆结晶产物,且与高温基性岩锆石特征类似^[28]。对该样品中 30 颗锆石进行了 30 个点 U-Th-Pb 同位素测定,获得的同位素比值及年龄结果见表 2 和图 5, Th/U 值为 2.28~5.49,具有典型岩浆锆石特征。所有数据投影点均分布在 U-Pb 谐和图中谐和线上,30 个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 252.5±1.6 Ma (MSWD=0.043, n=30) (图 5-b),代表岩浆结晶年龄。

黑云英云闪长岩 (DMbw-29-4) 样品中锆石较多,多为浅黄色、晶形完整,晶形以短柱状为主,长度一般为 50~100 μm ,锆石阴极发光图像 (图 5-c) 显示,具有明显的岩浆结晶振荡环带、偶有少量残留核,总体显示出典型岩浆锆石特征。对该样品中

30 颗锆石进行了 30 个点 U-Th-Pb 同位素测定,获得的同位素比值及年龄结果见表 2 和图 5, Th/U 值为 0.42~0.71,具有典型岩浆岩锆石特征。30 个点中 11 号年龄值较老 (294±3.2 Ma),可能为捕获老锆石,其余 29 个数据投影点均分布在 U-Pb 谐和图中谐和线上,29 个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 262.5±1.5 Ma (MSWD=0.051, n=29) (图 5-d),代表岩浆结晶年龄。

斜长角闪岩 (MSB-14-1) 样品中锆石晶形较好,呈短柱状或板状,颜色为浅褐色-深褐色,半透明,长度一般为 50~150 μm ,锆石阴极发光图像 (图 5-e) 显示,大多数锆石具有弱韵律环带,表现出岩浆锆石的特征。对该样品中 24 颗锆石进行了 24 个点 U-Th-Pb 同位素测定,获得的同位素比值及年龄结果见表 2 和图 5, Th/U 值为 0.26~0.92,具有典型岩浆锆石特征。所有数据投影点均分布在 U-Pb 谐和图中谐和线上,24 个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 273.6±1.9 Ma (MSWD=1.1, n=24) (图 5-f),代表岩浆结晶年龄。

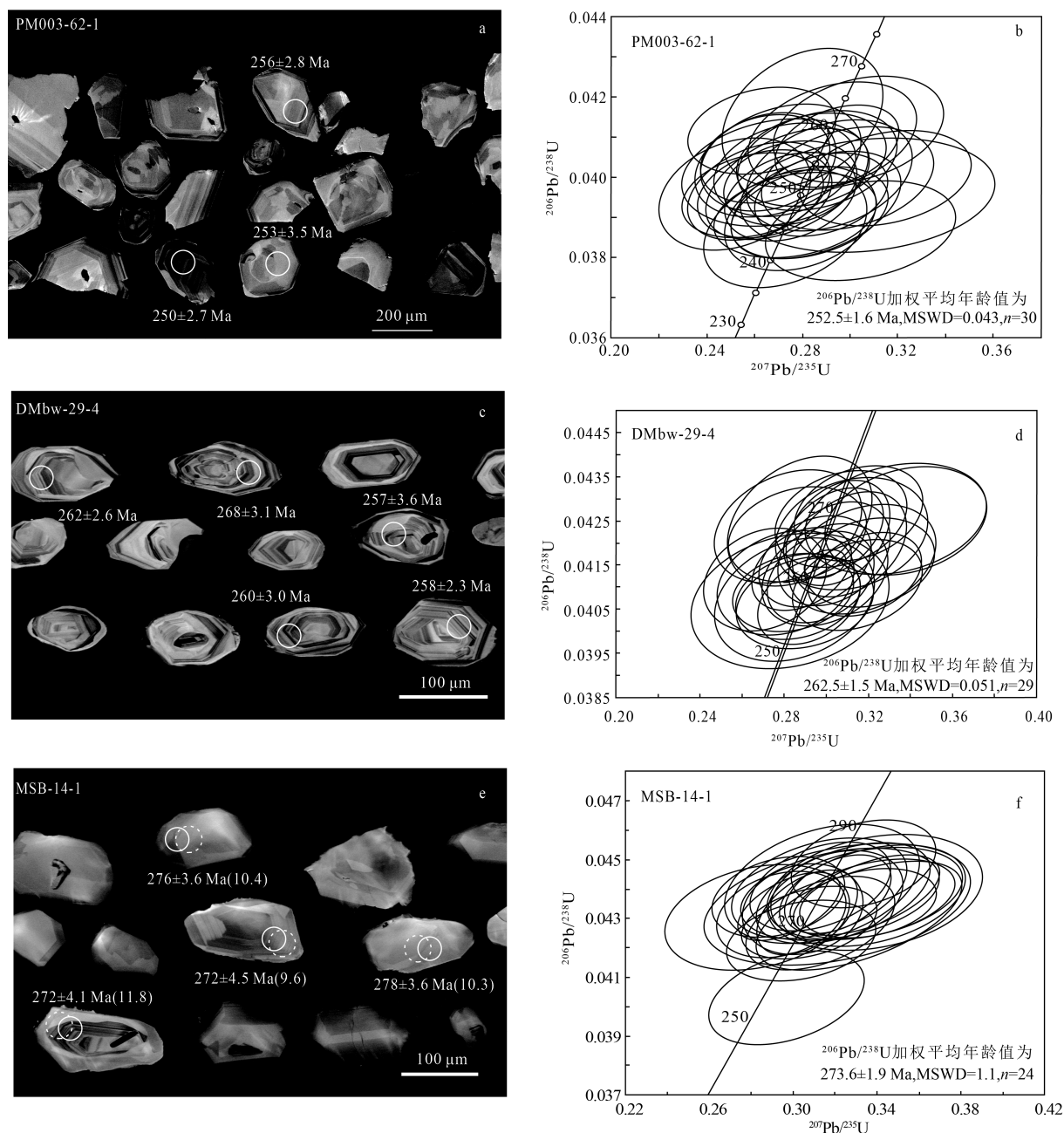


图5 样品锆石阴极发光(CL)图像和U-Pb年龄谐和图

(实线圆圈代表U-Pb分析点,虚线圆圈代表Hf分析点)

Fig. 5 CL images and the concordia diagrams of the zircon U-Pb age for the samples

3.3 锆石 Hf 同位素

在U-Th-Pb同位素分析的基础上,利用LA-ICP-MS对样品MSB-14-1中20颗锆石进行了20个点的Lu-Hf同位素分析,结果列于表3和图6。16个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282870~0.282993,

以锆石结晶年龄(273.6 Ma)计算出锆石初始值为0.282833~0.282858,对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围在8.8~13.2之间,平均值为10.7;计算得到锆石单阶段亏损地幔Hf模式年龄 t_{DM} 变化范围为370~549 Ma,平均值为470 Ma。

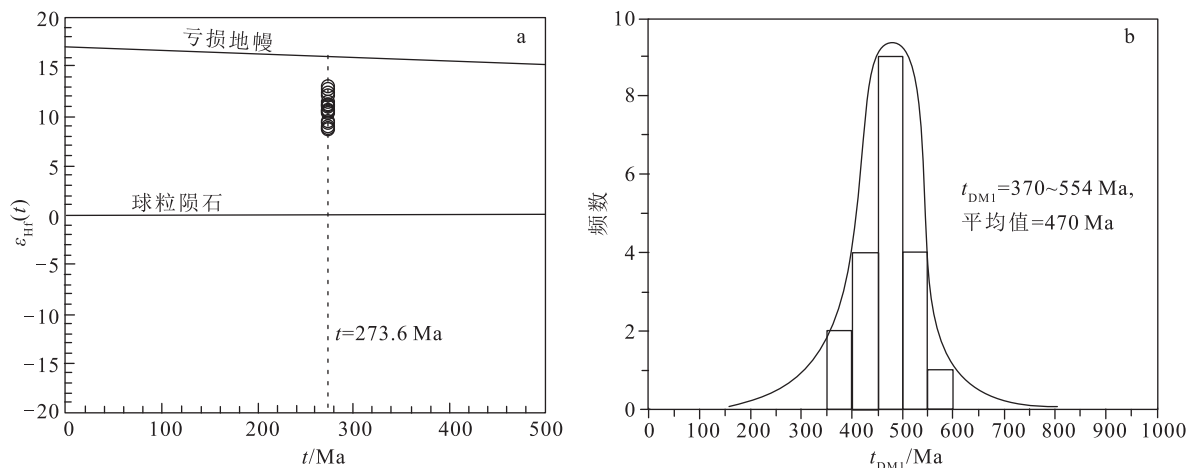


图 6 斜长角闪岩(D3507-1)锆石 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(a)和亏损地幔 Hf 模式年龄 t_{DM1} 频数直方图(b)

Fig. 6 Diagram of crystallization age- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values(a) and frequency histogram of depleted mantle Hf model ages(t_{DM1})(b) of zircons from the amphibolite sample(D3507-1)

4 讨论

4.1 原岩形成时代及构造环境

前人对该构造岩浆岩带上几个较大的岩体进行了详细研究,并获得多组高精度的锆石 U-Pb 年龄。景洪南联山岩体锆石 U-Pb 年龄为 298~305 Ma^[29-30],景洪曼秀闪长岩体锆石 U-Pb 年龄为 291~327 Ma^[31-32],澜沧县雅口基性岩体堆晶辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 296.3 Ma^[33],景谷县半坡基性杂岩体锆石 U-Pb 年龄为 295~313 Ma^[34-35]④,景谷县旧街闪长岩体锆石 U-Pb 年龄为 334 Ma^⑤。本次采用 LA-ICP-MS 获得该岩体 3 件样品锆石 U-Pb 年龄分别为 252.5±1.6 Ma、262.5±1.5 Ma 和 273.6±1.9 Ma,表明该岩体形成于中—晚二叠世,与 Hennig 等^[31]获得的 258~262 Ma 年龄值相近,但与该构造岩浆岩带上的其他岩体形成时代相比明显较晚,可能反映沿澜沧江断裂带分布的橄榄岩—辉长岩—闪长岩等一系列杂岩体属洋盆早期开始俯冲消减岩浆流动分异作用较强的产物,而晚期俯冲作用岩浆流动分异作用较弱形成岩性较单一的岩体。

冷岩体内基性岩具高铝基性岩($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 16\%$)特征,稀土元素球粒陨石标准化图解和微量元素蛛网图显示为类似于大洋岛弧玄武岩特征。在 Hf/3-Th-Ta 判别图解(图 7-a)和 Hf/3-Th-Nb/16 判别图解(图 7-b)中,样品点主要落入岛弧钙碱性玄武岩区域内,有 2 件样品落入富集型洋中脊玄武

岩内;在 $\text{TiO}_2-10\text{MnO}-10\text{P}_2\text{O}_5$ 判别图解(图略)中,样品点落入岛弧拉斑玄武岩和洋中脊拉斑玄武岩区;结合该岩体内闪长岩、花岗闪长岩具火山弧花岗岩的特点^②,表明南澜沧江构造岩带内冷岩体总体具有典型的弧火山岩的特征,形成于与板块俯冲有关的岛弧环境,与昌宁—孟连结合带内蛇绿混杂岩明显不同,并不是蛇绿混杂岩组成部分。

4.2 源区特征

一般认为,锆石 Hf 同位素对于地质演化示踪具有一系列的优越性^[37]。锆石形成时的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值代表了其物源区的 Hf 同位素性质,故研究者经常用 Hf 同位素作原岩示踪。本次对该岩体内斜长角闪岩(D3507-1)进行了 Lu-Hf 同位素分析, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 8.8~13.2 之间,平均值为 10.7;锆石单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄 t_{DM} 变化范围为 370~549 Ma,平均值为 470 Ma。斜长角闪岩样品无继承或捕获锆石及均一的 Hf 同位素组成,表明锆石结晶于均一、无污染的岩浆源区,较正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值反映了锆石母岩浆的亏损幔源属性。一般情况下,直接来自亏损地幔的基性岩浆 Hf 同位素应近似等于其形成时亏损地幔的 Hf 同位素,且锆石 Hf 亏损地幔模式年龄应与其形成年龄近似。然而,如图 6-a 所示,没有锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值达到或近似等于其形成时(273.6 Ma)亏损地幔的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,锆石亏损地幔 Hf 模式年龄($t_{\text{DM1}}=370\sim549$ Ma,平均值 470 Ma)也明显大于其结晶年龄(273.6 Ma)(图 6-b),研究者一

表 2 景洪冷岩体锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素数据

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating data of the Paleng pluton in the Jinghong area

点号	元素/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
PM003-62-1 变质辉长岩																
01	219	540	98.3	5.49	0.0513	0.0025	0.2868	0.0137	0.0404	0.0005	257	109.2	256	10.8	255	3.2
02	237	586	118	4.97	0.0483	0.0023	0.2625	0.0121	0.0397	0.0005	122	111.1	237	9.8	251	3.1
03	179	451	102	4.42	0.0502	0.0025	0.2718	0.0130	0.0396	0.0005	211	117.6	244	10.4	250	3.3
04	263	634	128	4.95	0.0509	0.0024	0.2794	0.0130	0.0400	0.0005	235	109.2	250	10.3	253	3.1
05	190	474	95.4	4.97	0.0555	0.0034	0.3073	0.0218	0.0395	0.0006	435	132.4	272	17.0	250	3.6
06	152	314	90.9	3.46	0.0542	0.0028	0.2988	0.0148	0.0400	0.0005	389	119.4	265	11.6	253	3.2
07	224	568	127	4.47	0.0509	0.0024	0.2840	0.0131	0.0404	0.0005	235	109.2	254	10.3	256	2.9
08	357	889	177	5.02	0.0525	0.0020	0.2950	0.0105	0.0408	0.0004	309	85.2	262	8.2	258	2.6
09	184	452	111	4.08	0.0496	0.0025	0.2804	0.0138	0.0415	0.0007	176	125.0	251	10.9	262	4.3
10	297	714	147	4.85	0.0475	0.0021	0.2644	0.0121	0.0404	0.0005	76.0	113.0	238	9.7	255	3.3
11	245	635	160	3.96	0.0472	0.0020	0.2642	0.0111	0.0405	0.0005	61.2	105.5	238	8.9	256	2.8
12	175	439	109	4.02	0.0461	0.0022	0.2635	0.0126	0.0412	0.0004	400	-278	238	10.2	260	2.8
13	214	536	151	3.55	0.0494	0.0023	0.2726	0.0122	0.0402	0.0005	165	109.2	245	9.8	254	2.9
14	168	418	121	3.44	0.0479	0.0024	0.2595	0.0121	0.0396	0.0004	100	105.5	234	9.8	250	2.7
15	159	401	114	3.51	0.0466	0.0026	0.2514	0.0127	0.0396	0.0006	33.4	120.4	228	10.3	250	3.5
16	273	685	190	3.60	0.0527	0.0021	0.2886	0.0114	0.0396	0.0004	317	116.7	257	9.0	250	2.7
17	142	370	107	3.45	0.0533	0.0026	0.2914	0.0141	0.0401	0.0006	343	108.3	260	11.1	253	3.5
18	155	386	108	3.59	0.0515	0.0028	0.2732	0.0140	0.0388	0.0006	261	128.7	245	11.1	245	3.7
19	137	354	117	3.04	0.0518	0.0026	0.2774	0.0139	0.0391	0.0005	276	116.7	249	11.0	247	2.9
20	181	470	161	2.92	0.0483	0.0021	0.2640	0.0113	0.0396	0.0005	122	101.8	238	9.1	250	2.8
21	181	463	148	3.14	0.0569	0.0029	0.3048	0.0162	0.0387	0.0005	487	111.1	270	12.6	245	3.2
22	104	270	105	2.58	0.0490	0.0031	0.2691	0.0162	0.0401	0.0005	146	140.7	242	13.0	254	3.4
23	196	526	164	3.20	0.0505	0.0021	0.2751	0.0113	0.0395	0.0004	217	94.4	247	9.0	250	2.8
24	194	539	150	3.59	0.0518	0.0023	0.2794	0.0129	0.0389	0.0005	276	101.8	250	10.3	246	2.9
25	120	305	125	2.45	0.0537	0.0026	0.3038	0.0145	0.0412	0.0005	367	104.6	269	11.3	260	3.3
26	127	296	130	2.28	0.0569	0.0026	0.3153	0.0147	0.0400	0.0005	487	100.0	278	11.3	253	3.0
27	126	333	135	2.47	0.0538	0.0025	0.2903	0.0128	0.0394	0.0005	361	101.8	259	10.1	249	3.1
28	137	378	135	2.81	0.0531	0.0027	0.2833	0.0135	0.0391	0.0005	345	119.4	253	10.7	247	3.0
29	145	389	136	2.86	0.0516	0.0025	0.2926	0.0145	0.0410	0.0005	333	111.1	261	11.4	259	3.4
30	119	315	122	2.59	0.0493	0.0027	0.2718	0.0137	0.0405	0.0006	167	125.0	244	11.0	256	3.4
DMbw-29-4 黑云英云闪长岩																
01	15.6	207	307	0.67	0.0536	0.0021	0.3154	0.0125	0.0427	0.0004	354	90.7	278	9.7	269	2.7
02	11.1	120	232	0.52	0.0554	0.0026	0.3170	0.0144	0.0417	0.0005	432	105.5	280	11.1	263	3.1
03	14.1	183	285	0.64	0.0539	0.0019	0.3110	0.0109	0.0420	0.0005	365	79.6	275	8.5	265	3.0
04	11.6	123	245	0.50	0.0558	0.0023	0.3144	0.0126	0.0411	0.0004	443	92.6	278	9.7	259	2.6
05	18.9	262	380	0.69	0.0514	0.0019	0.2948	0.0109	0.0416	0.0004	257	87.0	262	8.6	263	2.6
06	4.9	44.5	105	0.42	0.0510	0.0039	0.2827	0.0190	0.0407	0.0006	243	174.1	253	15.1	257	3.8
07	20.5	238	428	0.56	0.0506	0.0018	0.2879	0.0097	0.0414	0.0004	220	50.9	257	7.6	262	2.3
08	10.9	111	230	0.48	0.0561	0.0022	0.3206	0.0126	0.0416	0.0004	457	88.9	282	9.7	262	2.6
09	12.4	146	258	0.57	0.0549	0.0026	0.3143	0.0138	0.0422	0.0005	406	105.5	278	10.7	267	3.2
10	7.6	92.3	161	0.57	0.0506	0.0027	0.2845	0.0155	0.0407	0.0006	220	119.4	254	12.2	257	3.6
12	12.6	152	251	0.61	0.0575	0.0025	0.3379	0.0155	0.0425	0.0005	522	96.3	296	11.8	268	3.1
13	10.4	141	206	0.69	0.0570	0.0029	0.3324	0.0174	0.0425	0.0005	500	119.4	291	13.2	268	3.2

续表 2-1

点号	元素/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
14	11.9	135	242	0.56	0.0525	0.0022	0.3070	0.0127	0.0426	0.0004	309	94.4	272	9.9	269	2.7
15	8.7	102	176	0.58	0.0482	0.0024	0.2819	0.0142	0.0424	0.0005	109	111.1	252	11.2	268	3.2
16	7.4	86.3	150	0.58	0.0497	0.0025	0.2878	0.0141	0.0425	0.0006	183	118.5	257	11.1	268	3.7
17	14.8	192	303	0.63	0.0532	0.0021	0.3021	0.0112	0.0414	0.0004	339	91.7	268	8.7	262	2.4
18	9.2	112	187	0.60	0.0497	0.0025	0.2864	0.0135	0.0421	0.0005	183	116.7	256	10.7	266	2.9
19	15.1	167	317	0.53	0.0523	0.0018	0.2918	0.0099	0.0407	0.0004	298	81.5	260	7.8	257	2.5
20	8.3	81.9	176	0.47	0.0479	0.0021	0.2710	0.0118	0.0412	0.0005	94.5	103.7	243	9.4	260	3.0
21	16.2	202	325	0.62	0.0560	0.0019	0.3182	0.0108	0.0413	0.0004	450	77.8	280	8.3	261	2.4
22	13.3	170	272	0.62	0.0510	0.0021	0.2867	0.0121	0.0408	0.0004	239	96.3	256	9.5	258	2.5
23	15.5	223	312	0.71	0.0502	0.0020	0.2842	0.0118	0.0409	0.0004	206	94.4	254	9.3	258	2.3
24	11.1	140	219	0.64	0.0523	0.0021	0.3030	0.0114	0.0422	0.0005	298	88.0	269	8.9	267	3.1
25	10.4	128	210	0.61	0.0525	0.0021	0.2992	0.0122	0.0413	0.0005	306	94.4	266	9.5	261	2.9
26	11.8	157	239	0.66	0.0513	0.0023	0.2898	0.0134	0.0407	0.0004	254	110.2	258	10.5	257	2.6
27	13.3	148	273	0.54	0.0527	0.0019	0.3037	0.0111	0.0418	0.0005	322	85.2	269	8.6	264	2.9
28	10.6	125	219	0.57	0.0499	0.0025	0.2807	0.0133	0.0411	0.0005	191	112.0	251	10.6	260	3.0
29	17.4	190	353	0.54	0.0514	0.0017	0.3015	0.0104	0.0423	0.0004	261	77.8	268	8.1	267	2.6
30	14.8	179	306	0.59	0.0522	0.0019	0.2974	0.0104	0.0412	0.0004	295	81.5	264	8.2	261	2.6
MSB-14-1 斜长角闪岩																
01	21.39	340	393	0.87	0.0536	0.0022	0.3325	0.0141	0.0448	0.0006	354	99.1	291	10.7	283	3.7
02	22.77	334	428	0.78	0.0489	0.0023	0.2951	0.0139	0.0437	0.0006	139	111.1	263	10.9	276	3.6
03	20.77	217	415	0.52	0.0560	0.0021	0.3371	0.0129	0.0435	0.0005	454	117.6	295	9.8	275	3.1
04	6.36	35.0	137	0.26	0.0527	0.0039	0.3144	0.0195	0.0441	0.0008	322	137.9	278	15.0	278	5.0
05	4.84	32.4	102	0.32	0.0565	0.0040	0.3317	0.0204	0.0435	0.0008	472	163.9	291	15.5	275	5.0
06	12.23	140	261	0.54	0.0536	0.0029	0.2973	0.0154	0.0403	0.0006	354	125.0	264	12.1	254	3.9
07	8.72	60.7	181	0.33	0.0546	0.0032	0.3247	0.0180	0.0437	0.0007	398	131.5	286	13.8	276	4.6
08	7.07	67.7	142	0.48	0.0492	0.0038	0.2857	0.0194	0.0431	0.0007	167	161.1	255	15.3	272	4.5
09	18.31	250	353	0.71	0.0502	0.0024	0.2965	0.0134	0.0432	0.0006	211	117.6	264	10.5	273	3.7
10	14.96	106	312	0.34	0.0568	0.0027	0.3416	0.0155	0.0436	0.0006	483	103.7	298	11.8	275	3.5
11	23.25	397	430	0.92	0.0534	0.0022	0.3175	0.0131	0.0430	0.0005	343	89.8	280	10.1	272	3.3
12	29.3	447	537	0.83	0.0525	0.0021	0.3184	0.0120	0.0441	0.0006	306	88.9	281	9.2	278	3.4
13	25.9	413	483	0.86	0.0522	0.0019	0.3119	0.0113	0.0430	0.0004	300	81.5	276	8.8	272	2.8
14	13.13	124	263	0.47	0.0528	0.0026	0.3167	0.0147	0.0437	0.0006	320	113.0	279	11.3	276	3.8
15	24.51	263	492	0.54	0.0521	0.0022	0.3169	0.0131	0.0439	0.0006	300	94.4	280	10.1	277	3.5
16	12.65	176	248	0.71	0.0516	0.0026	0.3039	0.0151	0.0423	0.0005	333	119.4	269	11.7	267	3.3
17	7.99	91.7	157	0.58	0.0526	0.0036	0.3193	0.0208	0.0440	0.0007	322	155.5	281	16.0	278	4.2
18	12.83	121	261	0.46	0.0533	0.0028	0.3228	0.0156	0.0440	0.0006	343	118.5	284	12.0	278	3.6
20	28.92	336	588	0.57	0.0523	0.0020	0.3097	0.0119	0.0426	0.0005	298	87.0	274	9.2	269	3.0
21	7.19	70.5	143	0.49	0.0531	0.0033	0.3180	0.0168	0.0438	0.0008	332	144.4	280	12.9	276	4.7
22	7.73	79.3	156	0.51	0.0552	0.0035	0.3234	0.0183	0.0431	0.0007	420	147.2	284	14.0	272	4.1
23	22.95	249	460	0.54	0.0509	0.0021	0.3040	0.0122	0.0431	0.0006	239	94.4	270	9.5	272	3.5
24	6.69	69.3	132	0.52	0.0551	0.0041	0.3352	0.0228	0.0438	0.0008	413	166.7	293	17.3	277	4.9

表 3 斜长角闪岩(D3507-1)锆石 Hf 同位素数据

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of the amphibolite sample(D3507-1)

测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM}/Ma	t_{DMC}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
01	0.044439	0.002098	0.282917	0.000030	4.7	10.4	488	607	-0.94
02	0.023963	0.001226	0.282926	0.000027	5.0	10.8	465	578	-0.96
03	0.027106	0.001363	0.282993	0.000030	7.4	13.2	370	426	-0.96
04	0.010873	0.000602	0.282956	0.000026	6.1	12.0	415	501	-0.98
05	0.003159	0.000178	0.282922	0.000022	4.8	10.9	458	575	-0.99
06	0.022416	0.001131	0.282883	0.000025	3.4	9.3	526	675	-0.97
07	0.017125	0.000926	0.282889	0.000023	3.7	9.6	513	657	-0.97
08	0.029747	0.001493	0.282925	0.000027	5.0	10.8	469	582	-0.96
09	0.035089	0.001686	0.282912	0.000031	4.5	10.3	490	614	-0.95
10	0.013654	0.000742	0.282909	0.000020	4.4	10.3	483	610	-0.98
11	0.039804	0.001947	0.282871	0.000031	3.0	8.8	554	711	-0.94
12	0.042567	0.002038	0.282933	0.000030	5.2	11.0	465	571	-0.94
13	0.020519	0.001069	0.282870	0.000027	3.0	8.9	542	702	-0.97
14	0.032379	0.001575	0.282871	0.000030	3.0	8.8	549	707	-0.95
15	0.036359	0.001788	0.282939	0.000030	5.4	11.2	454	555	-0.95
16	0.039328	0.001953	0.282957	0.000030	6.1	11.8	429	515	-0.94
17	0.027146	0.001356	0.282940	0.000026	5.5	11.3	446	547	-0.96
18	0.018016	0.000959	0.282942	0.000027	5.5	11.5	439	539	-0.97
19	0.016588	0.000870	0.282976	0.000026	6.7	12.7	390	460	-0.97
20	0.015335	0.000775	0.282930	0.000021	5.1	11.1	454	564	-0.98

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \times \left[\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_s - \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_s \times (e^{\lambda t} - 1) \right] / \left[\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR},0} - \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1) \right] - 1$, $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln \left\{ 1 + \left[\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_s - \left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \right] / \left[\left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_s - \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \right] \right\}$, $t_{\text{DMC}} = t_{\text{DM}} - (t_{\text{DM}} - t) \times [(f_{\text{cc}} - f_s) / (f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})]$, $f_{\text{Lu/Hf}} = \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_s / \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} - 1$, 其中: $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} / \text{a}$; $\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_s$ 和 $\left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_s$ 为样品测量值; $\left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} = 0.0332$; $\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR},0} = 0.282772$; $\left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} = 0.0384$, $\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} = 0.28325$; $\left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{平均地壳}} = 0.015$; $f_{\text{cc}} = \left[\left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{平均地壳}} / \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} \right] - 1$; $f_s = f_{\text{Lu/Hf}}$; $f_{\text{DM}} = \left[\left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} / \left(\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} \right] - 1$; t 为锆石结晶年龄

般用锆石母岩浆来自受富集组分影响的地幔源区解释这种现象^[38]。锆石上述的 Lu-Hf 同位素特征充分表明, 怕冷岩体内基性岩的原岩应起源于早古生代一个受到富集组分影响的地幔, 这种富集特征可能是特提斯洋连续演化过程中早期俯冲作用带入的壳源物质对地幔造成的。

4.3 大地构造意义

近年来, 大量关于后碰撞岩浆岩锆石 U-Pb 年龄数据相继被报道, 包括侵入岩^[31, 39-46] 和火山岩^[47-52], 将代表古特提斯洋主支的昌宁-孟连洋闭合时间限定在中三叠世(约 235 Ma)。在东侧哀牢山缝合带内, 大量研究成果表明^[53-58], 哀牢山洋的闭合时间于晚二叠世(约 260 Ma)开始, 随后的碰撞

造山作用一直持续至中三叠世。在该结合带北段的金沙江洋, Zi 等^[59] 基于岩浆岩年代学与地层不整合接触关系, 将北段金沙江洋闭合时代限定在早三叠世初(约 245 Ma), 之后的碰撞造山作用可能一直持续至晚三叠世。在南澜沧江构造岩浆岩带内, 笔者对怕冷岩体旁曼兵花岗闪长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得 251.5 ± 2.7 Ma 和 253.8 ± 2.7 Ma 两组年龄(未发表数据), 地球化学特征显示为岛弧向弧陆碰撞转换的构造环境; 刘军平等^[60] 报道了南涧沙乐花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 246.4 ± 2.6 Ma 和 245.7 ± 3.6 Ma, 形成于俯冲-碰撞岩浆弧转换环境。结合本次研究, 认为澜沧江古特提斯弧后小洋盆的闭合时限始于中二叠世(约 260

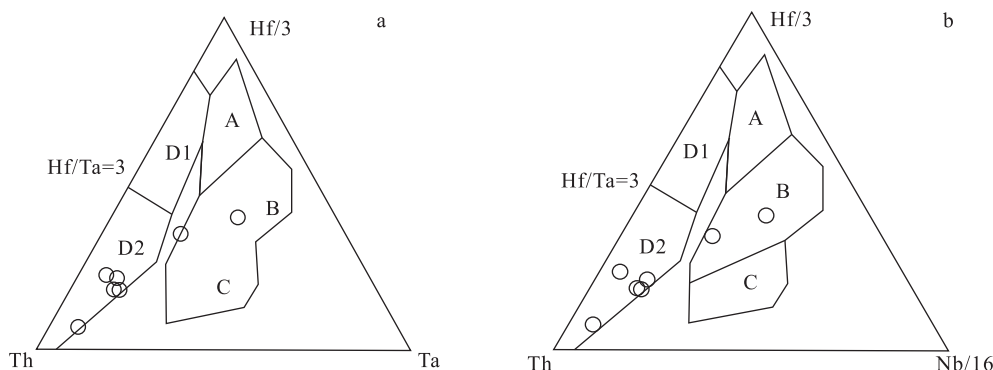


图 7 景洪怕冷岩体基性岩 Hf/3-Th-Ta(a) 和 Hf/3-Th-Nb/16(b) 构造环境判别图解^[36]

Fig. 7 Hf/3-Th-Ta(a) and Hf/3-Th-Nb/16(b) tectonic discrimination diagrams for the basites from the Paleng pluton in the Jinghong area

A—正常大洋中脊玄武岩; B—富集型大洋中脊玄武岩和板内玄武岩; C—板内玄武岩; D1—岛弧拉斑玄武岩; D2—岛弧钙碱性玄武岩

Ma), 而随后的造山作用可能一直持续至中三叠世, 该构造带演化与哀牢山构造带演化相似。从另一方面也反映了滇西三江地区古特提斯洋发展演化的复杂性, 不同的洋盆闭合时限不同, 同一洋盆不同地段闭合时限也不一样。

5 结 论

(1) 南澜沧江构造岩浆岩带怕冷岩体内辉长岩、黑云英云闪长岩和斜长角闪岩的锆石 U-Pb 加权平均年龄分别为 252.5 ± 1.6 Ma, 262.5 ± 1.5 Ma 和 273.6 ± 1.9 Ma, 表明该岩体形成时代为中—晚二叠世, 与该构造岩浆岩带上其他岩体相比, 形成时代略晚。

(2) 岩石地球化学特征及锆石 Hf 同位素研究表明, 怕冷岩体内基性岩原岩应起源于早古生代一个受到了富集组分影响的地幔。

(3) 怕冷岩体内基性岩具岛弧岩浆岩性质, 形成于与板块俯冲有关的大洋岛弧环境。南澜沧江弧后小洋盆的闭合时间为晚二叠世, 与哀牢山洋的闭合时限几乎一致, 早于西侧昌宁—孟连洋的闭合时限。

致谢: 云南省地质调查院李静教授级高工提出了详细修改意见, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试得到了武汉上谱分析测试有限公司的支持和帮助, 两位审稿专家提出了许多建设性意见, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

[1] 刘本培, 冯庆来, 方念桥, 等. 滇西昌宁—孟连和澜沧江带带古特提

- 斯多岛洋构造演化[J]. 地球科学, 1993, 18(5): 529-539.
- [2] 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: 123-132.
- [3] 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-231.
- [4] 潘桂棠, 徐强, 侯增谦, 等. 西南“三江”多岛弧造山过程、成矿系统与资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 106-112.
- [5] Sone M, Metcalfe I. Parallel Tethyan Sutures in mainland SE Asia: new insights for Palaeo-Tethys closure[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2008, 340(2/3): 166-179.
- [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: 92-104.
- [7] 邓军, 王庆飞, 李龚健. 复合造山和复合成矿系统: 三江特提斯例析[J]. 岩石学报, 2016, 32(8): 2225-2247.
- [8] 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等. 三江昌宁—孟连带原—古特提斯构造演化[J]. 地球科学, 2018, 43(8): 2527-2550.
- [9] 张翼飞, 段锦荪, 张罡, 等. 滇西蛇绿岩带地质构造演化与澜沧江板块缝合线研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2001: 1-101.
- [10] 张魁武, 张旗, 李达周. 云南景洪南联山橄榄岩—闪长岩型岩体的特征及地质意义[J]. 矿物岩石, 1991, 11(3): 21-28.
- [11] 张旗, 张魁武, 李达周, 等. 横断山区镁铁—超镁铁岩[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 1-126.
- [12] 赵大升, 张旗, 王明新, 等. 云南景洪县怕冷橄榄岩—闪长岩型杂岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 矿物岩石, 1991, 11(9): 688-690.
- [13] Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, et al. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. Precambrian Research, 2017, 290: 32-48.
- [14] Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, et al. “Wave” signal smoothing and mercury removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS analysis: application to lead isotope analysis [J]. Analytical Chemistry, 2015, 87: 1152-1157.
- [15] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling—induced melt—peridotite interactions in the Trans-North China

- Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51: 537-571.
- [16] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [17] Ludwig K R. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 2003: 1-39.
- [18] Hu Z C, Liu Y S, Gao S, et al. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2012, 27(9): 1391-1399.
- [19] Lin J, Liu Y S, Yang Y H, et al. Calibration and correction of LA-ICP-MS and LA-ICP-MS analyses for element contents and isotopic ratios[J]. *Solid Earth Sciences*, 2016, 1(1): 5-27.
- [20] Wilson M. Igneous Petrogenesis[M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1-416.
- [21] Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. *Lithos*, 1989, 23(1/2): 1-18.
- [22] 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-182.
- [23] Kersting A B, Arculus R J. Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia: The role of high-flux recharged, tapped, and fractionated magma chamber(s) in the genesis of high-Al₂O₃ from high-MgO basalt[J]. *Journal of Petrology*, 1994, 35(1): 1-41.
- [24] Winchester J A, Floddy P A. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rocks[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1977, 28: 459-469.
- [25] Shinjo R, Chung S L, Kato Y, et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 10591-10608.
- [26] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackell Scientific Publications, 1985: 54-372.
- [27] Sun S, McDonough W. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: for Implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A, Norry M. Magmatism in the Ocean Basin. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [28] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [29] 李钢柱, 苏尚国, 雷玮琰, 等. 三江地区澜沧江带南段南林山基性岩体锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征[J]. *地学前缘*, 2011, 18(5): 206-212.
- [30] 徐桂香, 刘桂春, 刘军平, 等. 云南景洪南联山闪长岩体锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. *云南地质*, 2016, 35(2): 131-136.
- [31] Hennig D, Lehmann B D, Frei D, et al. Early Permian seafloor to continental arc magmatism in the eastern Paleo-Tethys: U-Pb age and Nd-Sr isotope data from the southern Lancangjiang zone, Yunnan China[J]. *Lithos*, 2009, 113(3): 408-422.
- [32] 孙载波, 卢晓萍, 俞赛赢, 等. 云南景洪曼秀闪长岩体锆石 U-Pb 年龄与岩石地球化学特征[J]. *矿物学报*, 2015, 35(4): 473-480.
- [33] 王晓峰. 滇西南南澜沧江镁铁-超镁铁杂岩的岩石学研究——以雅口岩体为例[D]. 昆明理工大学硕士学位论文, 2012: 1-58.
- [34] 李钢柱, 苏尚国, 段向东, 等. 三江地区澜沧江带南段半坡杂岩体锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及板块构造环境[J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 96-109.
- [35] 张海, 金灿海, 范文玉, 等. 云南景谷半坡铂钨多金属矿床辉长岩锆石 U-Pb 同位素定年及其意义[J]. *中国地质*, 2013, 40(5): 1433-1442.
- [36] Wood D A. The application of a Th, Hf, Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1980, 50(1): 11-30.
- [37] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185-219.
- [38] Peter D K, Roland M. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 327-341.
- [39] 刘德利, 刘继顺, 张彩华, 等. 滇西南澜沧江结合带北段云县花岗岩的地质特征及形成环境[J]. *岩石矿物学杂志*, 2008, 27(1): 23-31.
- [40] 孔会磊, 董国臣, 莫宣学, 等. 滇西三江地区临沧花岗岩的岩石成因——地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J]. *岩石学报*, 2012, 28(5): 1438-1452.
- [41] Dong G C, Mo X X, Zhao Z D, et al. Zircon U-Pb dating and the petrological and geochemical constraints on Lincang granite in western Yunnan, China: Implications for the closure of the Paleo-Tethys Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2013, 62(62): 282-294.
- [42] Peng T P, Wilde S A, Wang Y J, et al. Mid-Triassic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang Zone, SW China: Petrogenesis and implications for the evolution of Paleo-Tethys[J]. *Lithos*, 2013, 168/169(2): 15-32.
- [43] 王舫, 刘福来, 刘平华, 等. 澜沧江南段临沧花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(10): 3034-3050.
- [44] Wang C M, Deng J, Santosh M, et al. Age and origin of the Bulangshan and Mengsong granitoids and their significance for post-collisional tectonics in the Changning-Menglian Paleo-Tethys Orogen[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2015, 113(4): 656-676.
- [45] 曾文涛, 孙载波, 周坤, 等. 滇西双江县勐库地区临沧花岗岩中暗色包体锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2018, 38(1): 23-36.
- [46] 赵枫, 李龚健, 张鹏飞, 等. 西南三江临沧花岗岩基成因与构造启示: 元素地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素约束[J]. *岩石学报*, 2018, 34(5): 1397-1412.
- [47] 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 等. 澜沧江南段早中生代酸性火成岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及构造意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 2006, 36(2): 123-132.
- [48] 范蔚茗, 彭头平, 王岳军. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录[J]. *地学前缘*, 2009, 16(6): 291-302.
- [49] 王硕, 董国臣, 莫宣学, 等. 澜沧江南带三叠纪火山岩岩石学、地球化学特征、Ar-Ar 年代学研究及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(4): 1148-1162.

- [50] 韦诚, 戚学祥, 常裕林, 等. 澜沧江构造带中南段小定西组火山岩形成时代的厘定及其构造意义[J]. 地质学报, 2016, 90(11): 3192-3214.
- [51] 李国昌, 王巍, 杨立刚, 等. 滇西凤庆三岔河晚三叠世火山岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2018, 32(6): 1263-1271.
- [52] 吴嘉林, 孙载波, 周坤, 等. 云南双江县勐库地区三叠纪火山岩的发现及其意义[J]. 云南地质, 2018, 37(3): 261-268.
- [53] 简平, 汪啸风, 何龙清, 等. 云南新平县双沟蛇绿岩 U-Pb 年代学初步研究[J]. 岩石学报, 1998, 14(2): 207-211.
- [54] 简平, 刘敦一, 孙晓猛, 等. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿混杂岩 SHRIMP 测年: 古特提斯洋壳演化的同位素年代学制约[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 1-13.
- [55] 刘翠, 邓晋福, 刘俊来, 等. 哀牢山构造岩浆岩带晚二叠世—早三叠世火山岩特征及其构造环境[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3590-3602.
- [56] 李龚健, 王庆飞, 禹丽, 等. 哀牢山古特提斯洋缝合时限: 晚二叠世花岗岩类锆石 U-Pb 年代学与地球化学制约[J]. 岩石学报, 2013, 29(11): 3883-3900.
- [57] 刘汇川, 王岳军, 蔡永丰, 等. 哀牢山构造带晚二叠世末期过铝质花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(1): 87-98.
- [58] 孙崇波, 李忠权, 王道永, 等. 哀牢山构造带南段马玉花岗闪长岩花岗岩地球化学特征及其锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 2019, 38(2/3): 223-230.
- [59] Zi J W, Cawood P A, Fan W M, et al. Generation of Early Indosinian enriched mantle-derived granitoid pluton in the Sanjiang Orogen (SW China) in response to closure of the Paleo-Tethys[J]. Lithos, 2012, 140(5): 166-182.
- [60] 刘军平, 田素梅, 丛峰, 等. 滇西澜沧江构造带沙乐花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2017, 37(4): 29-40.
- ① 云南省地质调查院. 云南省成矿地质背景研究报告. 2013.
- ② 云南省地质调查院. 1: 250 000 澜沧县、勐海县区域地质调查报告. 2012.
- ③ 云南省地质调查院. 1: 50 000 曼各、小街、曼班、大勐龙、万纳兰、勐宋坝幅区域地质调查报告. 2020.
- ④ 云南省地质调查院. 1: 50 000 半坡、大山、谦六、芒蚌街、丫口街、官房幅区域地质调查报告. 2014.
- ⑤ 云南省地质调查院. 1: 50 000 那许、黄竹林、弯手寨、黄草坝幅区域地质调查报告. 2000.