

doi: 10.12029/gc20200424003

刘军平, 杨爱平, 王小虎, 罗光明, 田素梅, 朱勋早, 殷伟, 张坤. 2023. 滇西凤庆地区小湾花岗岩年代学、地球化学特征及其弧-陆俯冲向碰撞汇聚作用[J]. 中国地质, 50(4): 1188-1202.

Liu Junping, Yang Aiping, Wang Xiaohu, Luo Guangming, Tian Sumei, Zhu Xunzao, Yin Wei, Zhang Kun. 2023. Zircon geochronology, geochemistry characteristics and arc-continent subduction to collision of the Xiaowan granite in Fengqing area, western Yunnan Province[J]. Geology in China, 50(4): 1188-1202(in Chinese with English abstract).

滇西凤庆地区小湾花岗岩年代学、地球化学特征及其弧-陆俯冲向碰撞汇聚作用

刘军平^{1,2,3}, 杨爱平^{1,3}, 王小虎^{1,3}, 罗光明⁴, 田素梅¹, 朱勋早¹, 殷伟¹, 张坤¹

(1. 云南省地质调查院, 云南昆明 650216; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 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. 云南省国土规划设计院, 云南昆明 650216)

摘要:【研究目的】滇西临沧地块岩浆岩带内凤庆县小湾花岗岩体的形成机制对限定临沧壳源岩浆弧成因、洋盆俯冲消减及碰撞闭合时间等问题具有重要意义。【研究方法】本文首次报道了小湾花岗岩体的锆石 U-Pb 年代学、岩相学、全岩主量和微量元素地球化学特征。【研究结果】小湾花岗岩主要由黑云二长花岗岩组成, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年显示其形成年龄为 (260.4 ± 1.3) Ma (MSWD=0.32, $n=18$), 表明小湾岩体形成于中二叠世晚期, 而非前人认为的中元古代。全岩地球化学分析显示黑云母二长花岗岩 A/CNK 大于 1 (1.02~1.47), 表明小湾花岗岩体为一套弱过铝质花岗岩组成。该岩体具有高硅 ($\text{SiO}_2=67.54\% \sim 78.66\%$)、富碱 ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=6.20\% \sim 8.52\%$)、贫钙 ($\text{CaO}=0.25\% \sim 3.20\%$)、镁 ($\text{MgO}=0.11\% \sim 1.95\%$)、磷 ($\text{P}_2\text{O}_5=0.03\% \sim 0.16\%$) 等元素的特征; 富集 Rb、Th、Ce 等大离子亲石元素 (LILE), 相对亏损 Ta、Nb、Zr、Ti、Hf、Y 等高场强元素 (HFSE), 在 (Y+Nb) vs. Rb、Yb vs. Ta 图解中具有弧花岗岩及同碰撞花岗岩双重地球化学特征。【结论】结合区域资料, 本文认为小湾花岗岩体应属于“三江”昌宁—孟连古特提斯洋向东俯冲向汇聚转换背景下, 上地壳泥质岩夹部分杂砂岩成分发生部分熔融的产物。本研究为青藏高原西南“三江”昌宁—孟连古特提斯洋弧-陆俯冲向碰撞汇聚的转换提供了重要的年代学及岩石学证据。

关键词: 黑云母二长花岗岩; 锆石 U-Pb 年代学; 古特提斯洋; 中二叠世晚期; 地质调查工程; 三江地区

创新点: 厘定了滇西临沧地块凤庆县小湾花岗岩体成岩年代学、岩石学、地球化学特征及构造背景, 为限定昌宁—孟连古特提斯洋弧-陆俯冲、碰撞汇聚时间等提供了新的资料。

中图分类号: P588.121; P597.3; P542 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)04-1188-15

Zircon geochronology, geochemistry characteristics and arc-continent subduction to collision of the Xiaowan granite in Fengqing area, western Yunnan Province

收稿日期: 2020-04-24; 改回日期: 2020-08-14

基金项目: 云南省地质勘查基金项目“云南省 1:5 万撒马基幅、因民幅、贵城幅、舒姑幅区域地质调查(D201905)”及中国地质调查局项目“云南 1:5 万二街、易门、鸣矣河、上浦贝幅区域地质调查(DD20160017)、云南区域地质调查片区总结与服务产品开发(121201102000150012-02)”、腾冲—潞西地区新生代以来地质环境演化及高原特色农业耦合关系研究(CY21624103)及云南省技术创新人才培养对象资助项目(202305AD160031)联合资助。

作者简介: 刘军平, 男, 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 从事区域地质与构造地质调查研究; E-mail: 271090834@qq.com。

通讯作者: 杨爱平, 男, 1963 年生, 学士, 高级工程师, 从事基础地质调查及矿产资源调查与评价工作; E-mail: 1542257684@qq.com。

LIU Junping^{1,2,3}, YANG Aiping^{1,3}, WANG Xiaohu^{1,3}, LUO Guangming⁴,
TIAN Sumei¹, ZHU Xunzao¹, YIN Wei¹, ZHANG Kun¹

(1. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, Yunnan, China; 2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. MLR Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Kunming 650051, Yunnan, China; 4. Yunnan Institute of Land and Resources Planning and Design, Kunming 650216, Yunnan, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] The formation mechanism of the Xiaowan granitic pluton, located in the magmatic belt of the Lincang terrane in the Fengqing County, western Yunnan province, is very important for constraining the petrogenesis of the Lincang magmatic arc derived from crust, subduction of the ocean basin, and the time of collision closure. **[Methods]** This paper reports for the first time the zircon U–Pb chronology, petrography, and geochemical characteristics of major and trace elements in the Xiaowan granitic pluton. **[Results]** The Xiaowan granite is mainly composed of biotite monzogranite. Zircon U–Pb LA–ICP–MS dating shows that its formation age is (260.4 ± 1.3) Ma (MSWD=0.32, $n=18$), suggesting that the Xiaowan granite was formed in the Late Mid–Permian, rather than the Middle Proterozoic as previously considered. Whole–rock geochemical analysis shows that the A/CNK of biotite monzogranite is greater than 1 (1.02–1.47), indicating that the Xiaowan granitic pluton is composed of weakly peraluminous granite. These rocks are characterized by high silica ($\text{SiO}_2 = 67.54\%–78.66\%$), alkali rich ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O} = 6.20\%–8.52\%$), poor in the elements of calcium ($\text{CaO}=0.25\%–3.20\%$), magnesium (MgO content 0.11%–1.95%) and phosphorus (P_2O_5 content 0.03%–0.16%). Meanwhile, they are enriched in large ion lithophile elements (LILE) such as Rb, Th, Ce, relatively depleted in high field strength elements (HFSE) such as Ta, Nb, Zr, Ti, Hf, Y. In the (Y+Nb) vs. Rb, Yb vs. Ta diagrams, they exhibit dual geochemical characteristics of arc and collisional granite. **[Conclusions]** Based on regional geological data, we suggest that the Xiaowan granitic pluton is the product of partial melting of the mudstone mixing with sandstone at the upper crustal level, under the setting of the eastward subduction shifting to the convergence of the Changning–Menglian ocean (also called as “Three Rivers” ancient Tethys ocean). This study provides important chronological and petrological evidences for the transition of the Changning–Menglian ocean from arc–continental subduction to collision in the southwestern Qinghai–Tibet Plateau.

Key words: biotite monzogranite; zircon U–Pb geochronology; Proto–Tethys ocean; Late Mid–Permian; geological survey engineering; Sanjiang area

Highlights: Determination of the chronology, petrology, geochemical characteristics, and tectonic background of the Xiaowan granitic pluton in the Lincang terrane, western Yunnan province, providing new data to constrain the subduction and collision time of the Changning–Menglian ocean.

About the first author: LIU Junping, male, born in 1983, master, senior engineer, engaged in regional geological and structural geological investigation and research; E–mail: 271090834@qq.com.

About the corresponding author: YANG Aiping, male, born in 1963, bachelor, senior engineer, engaged in basic geological survey and mineral resource survey and evaluation work; E–mail: 1542257684@qq.com.

Fund support: Supported by the Project of 1:50000 Regional Geological Survey of Samaki, Yinmin, Guicheng and Shugu Sheets in Yunnan Province by Land and Resources Department of Yunnan Province (No. D201905); the project of 1:50000 Regional Geological Survey of Erjie, Yimen, Mingyihe and Shangpubei Sheets in Yunnan Province (No. DD20160017); Regional Geological Survey Area Summary and Service Product Development in Yunnan Province by China Geological Survey (No. 121201102000150012–02) and Joint Foundation Project between Yunnan Science and Technology Department and Yunnan University (No. CY21624103), training Object of chnological innovation talents in Yunnan Province (No. 202305AD160031).

1 引言

西南“三江”地区构造位置属于特提斯构造域(图1a),地质构造及成矿作用极其复杂地区,许多

学者认为西南“三江”南段地区古特提斯构造演化阶段存在多个陆壳地块与洋盆相间排列的多岛洋构造格局(莫宣学等,1993;刘本培等,2002;俞赛赢等,2003;王立全等,2008,2013;潘桂棠等,2013;任

飞等,2017;尹福光等,2017;刘军平等,2017;王保弟等,2018;Liu et al., 2020, 2021;李生喜等,2023),而昌宁—孟连古特提斯洋的构造演化及其转换时限是目前三江地区构造演化研究中最热门的科学问题之一。

目前昌宁—孟连古特提斯构造演化研究比较成熟,经历了早古生代中晚期—晚古生代特提斯洋俯冲消减、晚二叠世—早三叠世主碰撞汇聚、晚三叠世晚碰撞造山等阶段的演化过程(刘本培等,2002;李文昌等,2010;孔会磊等,2012;潘桂棠等,2013;任飞等,2017;尹福光等,2017;刘军平等,2017;王保弟等,2018)。晚古生代特提斯洋俯冲消减过程沉积了以鲕粒—生物碎屑灰岩为主的石炭系—二叠系渔塘寨组(CPy),以洋盆深水硅质岩、硅质泥岩、放射虫硅质岩、大洋玄武岩为主的石炭系—二叠系光色组(CPg),及中酸性火山岩为主的石炭系—二叠系龙洞河组(CPl)总体构成了洋盆—洋岛—海山—弧后盆地古地理格局;而在其东侧的临沧—勐海地块,由于昌宁—孟连洋壳向东俯冲消减,在临沧—景洪一带出现中酸性岩浆活动,锆石U—Pb年龄主要集中在280~334 Ma,显示了汇聚型大陆边缘岩浆弧花岗岩的特点(魏君奇等,2008;Peng et al., 2008;孔会磊等,2012;徐桂香等,2015;孙载波等,2015;刘军平等,2017;王保弟等,2018),但昌宁—孟连古特提斯洋弧—陆俯冲向碰撞、汇聚转换的具体时限及岩石学证据目前尚未报道。

笔者首次在风庆县小湾地区发现一套中二叠世晚期弱过铝质花岗岩岩体,目前并未有类似岩体的报道。本次运用锆石U—Pb LA—ICP—MS定年、岩石地球化学分析及岩石学对其进行详细研究,探讨了其岩石组合、侵位时代、岩浆演化、构造背景及源区,进而讨论了与昌宁—孟连古特提斯洋弧—陆俯冲向碰撞汇聚转换的关系,极大地丰富了昌宁—孟连古特提斯洋构造演化时限及岩浆岩记录。

2 地质背景和样品特征

研究区位于西南“三江”南段,构造上位于羌塘—三江造山系(VII)和班公湖—双湖—怒江—昌宁—孟连对接带(VIII),地层属于华南地层大区、羌北—昌都—思茅地层区、兰坪—思茅地层分区的澜沧地层小区及漾濞地层小区^{①②}。研究区出露地层仅

有古元古界崇山岩群,岩浆岩以二叠纪、三叠纪花岗岩为主,少量白垩纪花岗岩(图1c);小湾花岗岩岩体与古元古界崇山岩群呈侵入接触关系,岩体中富含黑云母和暗色残留体包体,被后期三叠纪黑云二长花岗岩、白垩纪细粒钾长花岗岩侵入。1:25万凤庆幅把小湾花岗岩岩体时代置于中元古代,仅因其普遍糜棱岩化,发育片麻状构造等现象^③,但未有同素位年龄约束;其主要岩石类型以糜棱岩化片麻状似斑状中粒黑云二长花岗岩为主,少量糜棱岩化片麻状细粒花岗闪长岩及片麻状粗粒二长花岗质变晶初糜棱岩,岩石结构上由细粒向粗粒演化,变化的有序性和单向性明显,且在空间上紧密共生,形成时间、成分及结构变化上表现出清楚的亲缘和演化关系,说明它们是同一岩浆热事件的产物。野外三者为渐变过渡接触,整个岩体由中心至边部矿物颗粒由粗粒变为中细粒;本次以小湾花岗岩岩体为研究对象,采集了同位素、薄片、地球化学样品,野外特征见图2a。

糜棱岩化片麻状似斑状中粒黑云二长花岗岩:具变余似斑状花岗结构,中粒结构,片麻状构造。主要矿物成分由斜长石(27%)、钾长石(37%)、石英(31%)、黑云母(5%)组成,副矿物有磷灰石、锆石。矿物粒径多在2~5 mm。斜长石呈自形、半自形板状,内见聚片双晶、环带结构,已不同程度钠黝帘石化;钾长石呈他形、半自形板状,以具格子双晶微斜长石为主,部分为条纹长石,内见自形较好的斜长石包裹体及石英的穿孔交代结构,边缘见蠕英石包裹体,少部分粒度较粗大,构成斑晶;石英他形不规则粒状、集合状,充填于长石的间隙中。黑云母自形、半自形的片状,Ng—棕红色、Np—淡黄色,绿泥石化。手标本见图2b及镜下特征见图2c。

糜棱岩化片麻状细粒花岗闪长斑岩:具变余似斑状花岗结构,细粒结构,网结—网纹状定向构造。矿物成分主要由钾长石(15%~20%)、斜长石(50%~55%)、石英(20%~25%)、黑云母(3%~4%)、白云母(1%~2%)、长英质(1%~7%)组成,其中斑晶以斜长石为主,少量石英;基质主要为石英、钾长石及黑云母。副矿物主要有磷灰石、磁铁矿。镜下特征见图2d。

片麻状粗粒二长花岗质变晶初糜棱岩:具变余初糜棱结构,粗粒结构,分异流动状、条痕状构造。矿物成分主要为斜长石(25%)、钾长石(39%)、石英

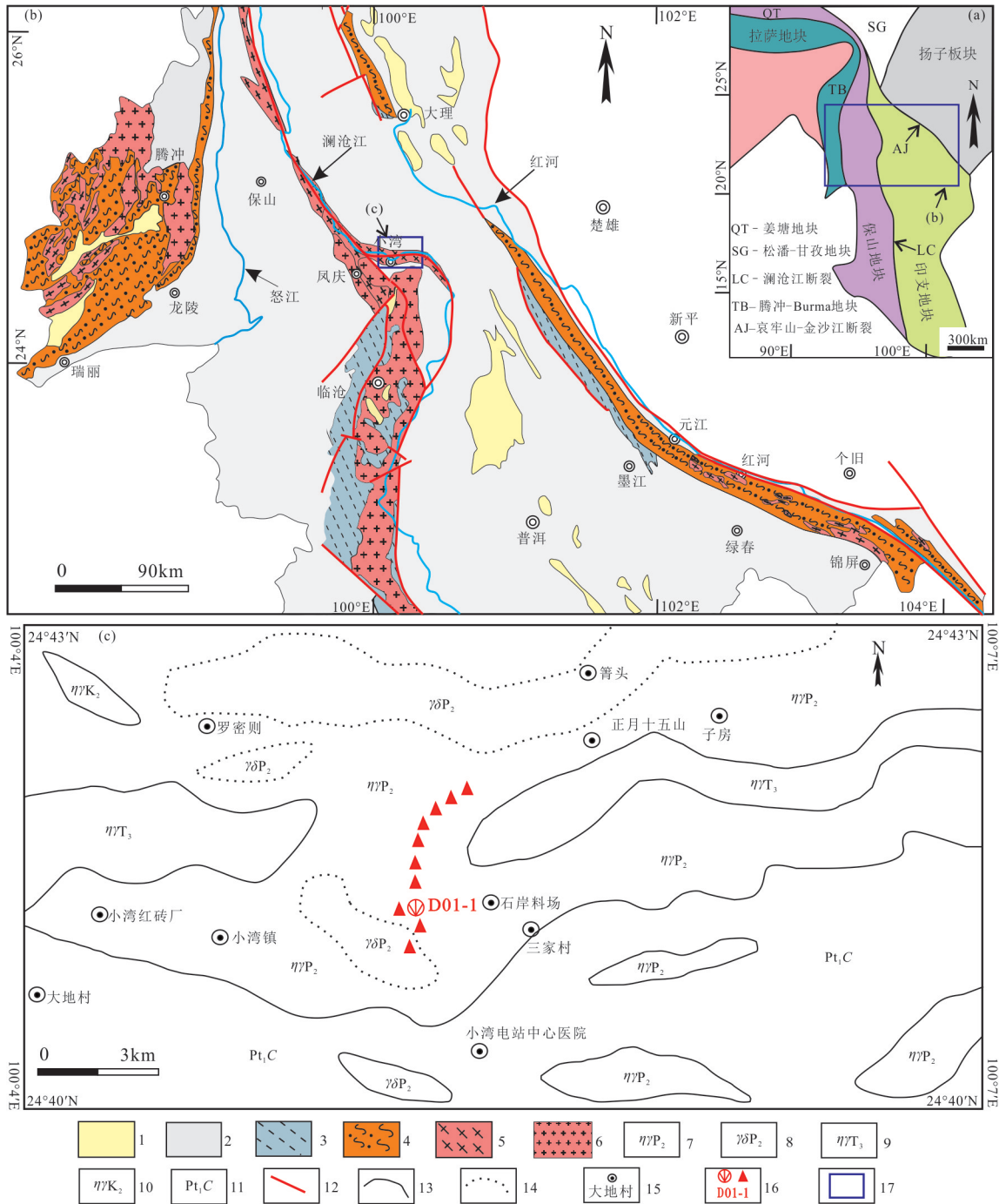


图1 西南三江地区大地构造位置图(a, b, 据王保弟等, 2018)、地质简图及采样点(c, 据云南省地质调查院, 2016^①)
 1—第四系; 2—古生代—中生代盖层; 3—低级变质带; 4—高级变质带; 5—糜棱岩化花岗岩质岩石; 6—花岗岩; 7—二叠纪二长花岗岩; 8—二叠纪花岗岩闪长岩; 9—三叠纪二长花岗岩; 10—白垩纪二长花岗岩; 11—崇山岩群; 12—断裂带; 13—侵入界线; 14—渐变过渡界线; 15—地名;
 16—测年样品号及采样位置; 17—研究区

Fig. 1 Geotectonic location map(a, b, after Wang Baodi et al., 2018) and simplified geological map (c, modified from Yunnan Institute of Geological Survey, 2016^①) in Sanjiang area

1—Quaternary; 2—Paleozoic—Mesozoic caprock; 3—Low metamorphic zone; 4—High metamorphic zone; 5—Mylonitized granitic rock; 6—Granite; 7—Permian adamellite; 8—Permian granodiorite; 9—Triassic adamellite; 10—Cretaceous adamellite; 11—Chongshan group; 12—Fault zone; 13—Intrusion boundary; 14—Gradual transition boundary; 15—Toponym; 16—Dating sample number and location; 17—Research area

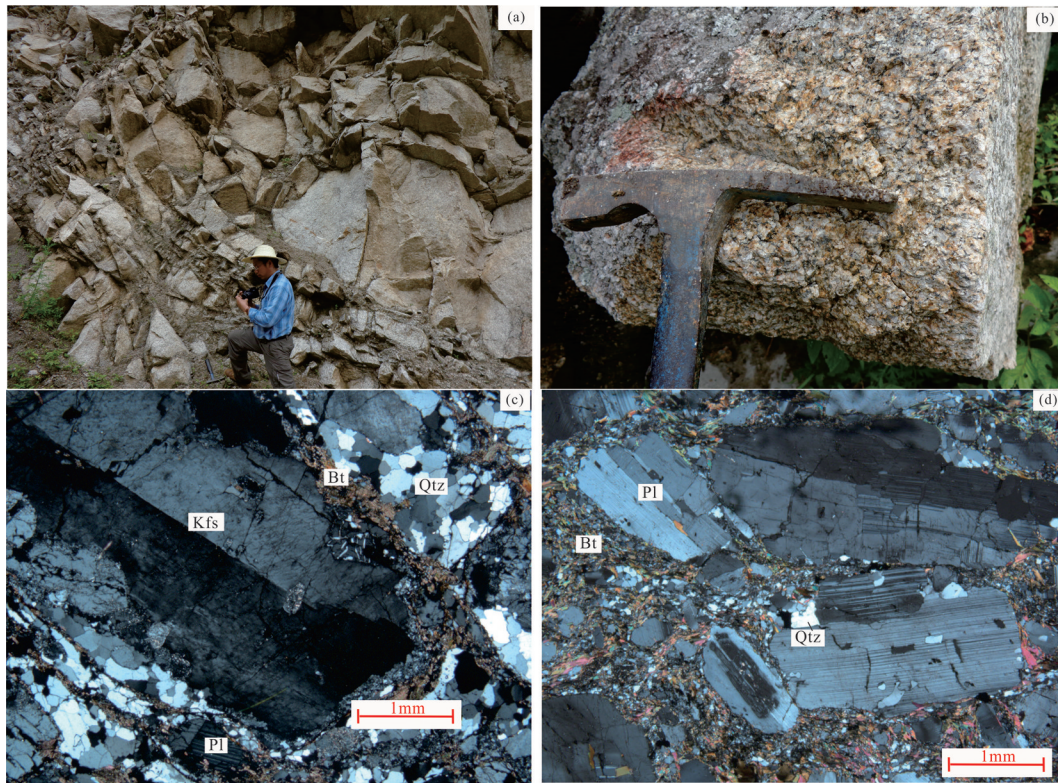


图2 云南凤庆地区小湾花岗岩岩体野外照片和镜下照片特征

a—野外露头;b—黑云二长花岗岩手标本;c—黑云二长花岗岩正交偏光照片;d—花岗闪长斑岩正交偏光照片;Kfs—钾长石;Qtz—石英;Pl—斜长石;Bt—黑云母

Fig.2 Photographs and granite features for the Xiaowan granite in Fengqing area, Yunnan

a—Field outcrop;b—Biotite feldspar granite hand specimen;c—Biotite feldspar granite orthogonal polarization photo;d—Granodiorite orthogonal polarization photo;Kfs—K—feldspar;Qtz—Quartz;Pl—Plagioclase;Bt—Biotite

(30%)、黑云母(1%)、电气石(<5%);副矿物有磷灰石、锆石。矿物粒径多在0.1~2 mm。斜长石他形微细粒变晶状(部分不同程度地保留其半自形的板状特征,残余岩浆组构特征),部分粒度较粗大,保留原透镜状、眼球状碎斑外形,内见聚片双晶、环带结构,已不同程度钠黝帘石化。钾长石他形微细粒变晶状,以具格子双晶微斜长石为主,部分为条纹长石,部分粒度较粗大,保留原眼球状、透镜状碎斑外形,边缘普遍见蠕英石及斜长石包裹体。石英大部分呈多晶条带、矩形条带产出,重结晶。黑云母显微鳞片状,沿糜棱面理呈断续线痕状聚集产出,Ng—褐绿色、Np—淡黄色。电气石自形、半自形的柱状,沿长轴方向沿糜棱面理定向分布,为后期电气石化作用形成。

3 样品测试

锆石分选在南京宏创地质勘查技术服务有限

公司完成,原岩样品经人工粉碎后,经人工淘洗后去除轻矿物部分,将得到的重砂部分经电磁选后得到含有少量杂质的锆石样品,最后在双目镜下挑选出晶型较好的锆石,制成锆石样品靶。对锆石进行反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)图像分析,最后根据反射光、透射光及锆石CL图像选择代表性的锆石颗粒和区域进行U—Pb测年。

U—Pb同位素定年在湖北省地质实验室测试中心重点实验室利用LA—ICP—MS分析完成。测试仪器采用的是由美国Coherent Inc公司生产的GeoLasPro全自动版193 nm ArF准分子激光剥蚀系统(LA)和美国Agilent公司生产的7700X型电感耦合等离子质谱仪(ICP—MS)联用构成的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱分析系统(LA—ICP—MS)。样品的同位素比值和元素含量采用ICPMSDataCal 9.0进行处理分析,加权平均年龄的计算及锆石年龄谱和图的绘制采用Isoplot3.0(Ludwing, 2003)来完

成。采用年龄为²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄,其加权平均值的误差为2σ,²⁰⁶Pb/²³⁸U(和²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb)平均年龄误差为95%置信度(王海然等,2013;刘军平等,2018)。

选择10件岩体样品进行主量元素、稀土和微量元素分析。样品磨碎至200目后,在武汉上谱分析科技有限公司岩石矿物研究室进行主量和微量元素分析测试。主量元素使用X-射线荧光光谱仪(XRF-1500)法测试。用0.6 g样品和6 g四硼酸锂制成的玻璃片在ShimadzuXRF-1500上测定氧化物的质量分数值,精度优于2%~3%。微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品,使用ICP-MS (Element II)测试,分析精度(按照GSR-1和GSR-2国家标准):当元素质量分数值大于10×10⁻⁶时,精度优于5%,当质量分数值小于10×10⁻⁶时,精度优于10%。

4 分析结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石U-Pb定年

本次用于锆石U-Pb LA-ICP-MS年龄测试的样品采集位置见图1,样品分析数据见表1。样品糜棱岩化似斑状中粒黑云二长花岗岩斑岩(D01-1)为浅灰色,具不等粒半自形-自形短柱状结构,片麻状构造。将样品先经手工粉碎,后按常规重力及电磁法浮选出锆石颗粒,最后在实体镜下挑选出晶型较

好的锆石约150余粒。锆石多为浅紫红色,个别呈褐色,粒状、短柱状、碎粒状,金刚光泽,透明,部分具磨蚀特征,锆石长100~150 μm,少数达200 μm。

根据样品阴极发光(CL)图像锆石自形程度较好,棱角分明,发育较宽的韵律环带,Th/U比值较大,为典型的酸性岩浆结晶锆石(Hoskin and Schaltegger, 2003; 吴元保等, 2004; 刘军平等, 2018);部分锆石外围发育较亮较窄的变质增生边,可能是后期发生变质作用所致(图3)。

本次对糜棱岩化片麻状似斑状中粒黑云二长花岗岩(D01-1)共完成18个测点的锆石年龄测定(表1),获得有效数据18个,18个有效分析点均具有较好的谐和度,谐和度均大于91%,从图4a可以看出,分析的18个点均沿谐和线分布且较集中,且振荡环带清楚,Th/U比值较大(值为0.4~0.8),均为岩浆成因锆石,18个分析点获得²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(260.4±1.30) Ma(MSWD=0.32, n=18),代表黑云二长花岗岩侵位时代,说明其形成于中二叠世晚期,而非前人认为的中元古代。

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素

小湾花岗岩的主量元素分析数据列于表2。岩石化学成分SiO₂含量为67.54%~78.66%, Al₂O₃含量

表1 云南凤庆地区小湾花岗岩岩体中锆石LA-ICP-MS U-Pb同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from the Xiaowan granite in Fengqing area, Yunnan

测点号	含量/10 ⁻⁶			Th/U	同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	Pb	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
1	5623	237415	410675	0.6	0.0555	0.0014	0.3226	0.0089	0.0413	0.0006	432	55.6	284	6.8	261	3.6	91
2	4946	270261	332108	0.8	0.0560	0.0013	0.3221	0.0070	0.0411	0.0004	454	17.6	283	5.4	260	2.3	91
3	2356	113009	178526	0.6	0.0550	0.0020	0.3147	0.0126	0.0411	0.0006	409	86.1	278	9.7	260	3.5	93
4	3404	165119	254447	0.6	0.0544	0.0015	0.3153	0.0086	0.0411	0.0005	391	61.1	278	6.7	260	3.3	93
5	4171	215854	291005	0.7	0.0540	0.0013	0.3084	0.0071	0.0411	0.0004	369	55.6	273	5.5	259	2.3	94
6	6187	234923	485188	0.5	0.0541	0.0013	0.3105	0.0072	0.0410	0.0004	376	51.8	275	5.6	259	2.3	94
7	7610	319522	578163	0.6	0.0484	0.0010	0.2805	0.0058	0.0414	0.0005	120	46.3	251	4.6	262	2.9	95
8	2990	145817	210920	0.7	0.0531	0.0015	0.3099	0.0080	0.0419	0.0004	332	64.8	274	6.2	265	2.5	96
9	20196	807168	1714081	0.5	0.0496	0.0009	0.2841	0.0058	0.0411	0.0005	176	42.6	254	4.6	259	3.4	97
10	3101	116568	246470	0.5	0.0520	0.0012	0.3002	0.0074	0.0414	0.0005	287	53.7	267	5.8	261	3.2	97
11	4343	158354	338354	0.5	0.0522	0.0012	0.2994	0.0066	0.0410	0.0004	295	51.8	266	5.1	259	2.5	97
12	2252	81497	189546	0.4	0.0522	0.0015	0.2984	0.0083	0.0413	0.0006	295	67.6	265	6.5	261	3.8	98
13	3493	168219	261240	0.6	0.0517	0.0013	0.2963	0.0073	0.0410	0.0004	272	55.5	263	5.8	259	2.7	98
14	5055	197448	410682	0.5	0.0518	0.0011	0.2963	0.0061	0.0411	0.0005	276	48.1	264	4.8	260	2.8	98
15	2393	120327	168469	0.7	0.0520	0.0016	0.2966	0.0086	0.0412	0.0005	283	70.4	264	6.7	261	2.9	98
16	2895	112815	222685	0.5	0.0499	0.0014	0.2862	0.0074	0.0412	0.0004	191	63.0	256	5.8	260	2.6	98
17	2465	130211	177389	0.7	0.0509	0.0014	0.2922	0.0082	0.0412	0.0005	235	64.8	260	6.4	260	3.2	99
18	1867	77476	153162	0.5	0.0518	0.0018	0.2970	0.0105	0.0417	0.0008	276	77.8	264	8.2	263	4.7	99

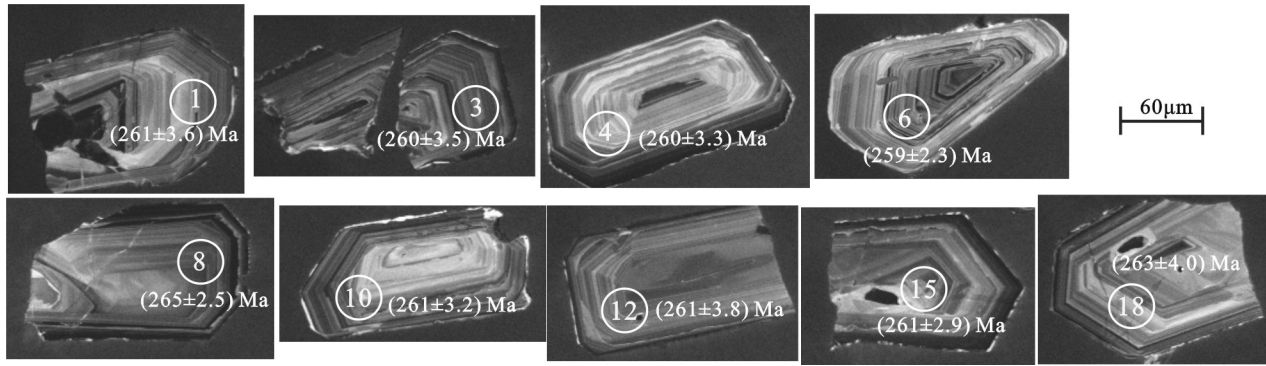


图3 云南凤庆小湾地区花岗岩岩体代表性锆石阴极发光(CL)图像
Fig.3 The CL images of zircons from the Xiaowan granite in Fengqing area, Yunnan

为 11.34%~14.30%， $K_2O + Na_2O$ 含量为 6.20%~8.52%，里特曼指数 σ 为 1.31~2.51，显示岩石属过铝质钙碱性岩类；在深成岩的 $SiO_2-(Na_2O+K_2O)$ 图解中(图 5a)样品投影点多数样品落入花岗岩区内，一件样品投影点落入花岗闪长岩区，与镜下矿物命名一致，均为亚碱性岩石；岩体 A/CNK-A/NK 图解中大部分样品落入准铝质区-过铝质区过渡区域，表现出弱过铝质的特点，仅 1 件样品落入过铝质区(图 5b)。在 SiO_2-K_2O 图解中大部分落入高钾钙碱性系列区(图 6)，1 件样品落入钙碱性系列。样品 CIPW 标准矿物显示，岩石为高硅富铝的特点，与岩石地球化学含量较为一致。

4.2.2 微量和稀土元素

稀土元素、微量元素分析成果及特征参数见表 1。小湾花岗岩稀土总量(ΣREE)为 125.64×10^{-6} ~

300.04×10^{-6} ，平均为 198.54×10^{-6} ，含量较低；轻稀土元素(LREE)含量为 83.70×10^{-6} ~ 243.04×10^{-6} ，重稀土元素(HREE)含量为 31.23×10^{-6} ~ 55.54×10^{-6} ，LREE/HREE 为 2.04~4.93，显示轻稀土元素相对于重稀土元素有一定程度的富集； $(La/Yb)_N=3.86$ ~15.84，平均 10.99； $(La/Sm)_N=2.66$ ~7.08，平均 5.37； $(Gd/Yb)_N=1.02$ ~1.98，平均 1.42；上述特征显示轻、重稀土之间具有明显分异特征，轻稀土元素内部的分异程度较高，稀土元素分异程度高，反映源区地壳具有较高的成熟度。小湾花岗岩 δEu 介于 0.27~0.81，平均为 0.53，在球粒陨石标准化图解上(图 7a)配分曲线 Eu 负异常明显，具有向右缓倾的 V 型特征，暗示岩石可能经历了强烈的斜长石分离结晶作用，长石矿物的分离结晶作用也可以解释花岗岩中 Ba、Sr 的亏损。且普遍具有弱程度的负铈异常($\delta Ce=0.89$ ~

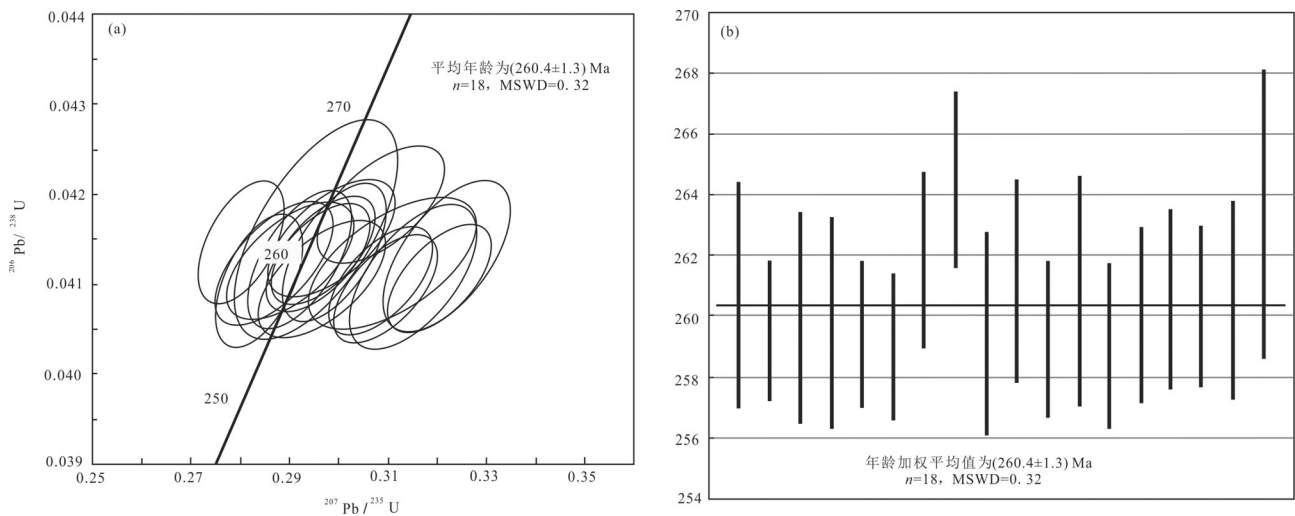


图4 云南凤庆地区小湾花岗岩岩体锆石U-Pb年龄谐和图
Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams of the Xiaowan granite in Fengqing area, Yunnan

表2 云南凤庆地区小湾花岗岩岩体的主量元素(%)和微量元素(10^{-6})组成及有关参数

Table 2 Analytical results of major elements (%) and trace elements (10^{-6}) of the Xiaowan granite in Fengqing area, Yunnan

样品编号	D01-1	D01-2	D01-3	D01-4	D01-5	D01-6	D01-7	D01-8	D01-9	D01-10
SiO ₂	78.66	76.53	76.23	76.02	76.22	75.99	71.04	72.68	71.93	67.54
TiO ₂	0.10	0.15	0.09	0.14	0.11	0.10	0.43	0.29	0.34	0.74
Al ₂ O ₃	11.34	13.11	11.95	11.83	12.29	11.92	14.30	13.94	14.20	15.07
Fe ₂ O ₃	1.00	1.08	1.36	1.44	1.02	1.32	1.59	1.41	1.49	1.97
FeO	1.33	1.47	1.64	1.76	1.21	1.53	2.03	1.68	1.74	3.06
MnO	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.07	0.05	0.04	0.09
MgO	0.11	0.30	0.31	0.19	0.20	0.13	0.60	0.37	0.42	1.95
CaO	0.45	0.25	0.39	0.71	0.70	0.53	2.01	1.20	1.13	3.20
Na ₂ O	4.96	1.71	4.46	3.35	3.42	3.22	3.68	3.65	4.35	3.29
K ₂ O	1.87	5.20	3.40	4.40	4.68	5.08	3.99	4.54	4.17	2.91
P ₂ O ₅	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.14	0.09	0.09	0.16
LOI	0.40	1.42	0.30	0.30	0.23	0.42	0.27	0.47	0.68	1.04
Total	99.87	99.87	99.89	99.88	99.92	99.88	99.89	99.90	99.91	99.99
Na ₂ O+K ₂ O	6.83	6.91	7.86	7.75	8.10	8.30	7.67	8.19	8.52	6.20
La	15.60	42.60	24.70	38.30	25.60	29.00	69.00	59.50	55.70	54.10
Ce	44.90	83.10	42.70	66.80	48.40	53.40	117.00	102.00	102.00	97.40
Pr	4.09	10.10	4.79	7.05	5.61	5.99	11.90	10.30	10.40	10.20
Nd	15.40	36.80	16.30	22.60	18.80	19.60	38.80	33.70	34.60	34.50
Sm	3.70	7.40	3.19	3.76	3.60	3.39	6.33	5.29	5.46	5.76
Eu	0.84	1.01	0.37	0.44	0.30	0.41	1.47	1.13	1.15	1.53
Gd	3.57	6.06	2.95	3.49	3.22	3.22	6.20	5.18	5.26	5.59
Tb	0.71	0.90	0.51	0.50	0.53	0.51	0.94	0.74	0.75	0.81
Dy	5.33	5.14	3.55	3.12	3.53	3.42	5.85	4.38	4.61	4.98
Ho	1.07	0.97	0.72	0.63	0.72	0.72	1.15	0.87	0.91	0.95
Er	2.99	2.64	2.13	1.92	2.18	2.25	3.36	2.55	2.76	2.64
Tm	0.45	0.39	0.35	0.31	0.37	0.37	0.49	0.38	0.43	0.36
Yb	2.73	2.47	2.28	2.11	2.37	2.55	3.09	2.53	2.80	2.34
Lu	0.38	0.35	0.35	0.34	0.38	0.40	0.47	0.40	0.45	0.36
Y	23.90	25.20	18.40	19.30	20.00	22.20	34.00	25.70	26.50	28.00
ΣREE	125.64	225.16	123.19	170.61	135.65	147.34	300.04	254.81	253.54	249.47
Zr	164	185	103	122	114	100	257	211	254	185
Zn	244.00	96.60	43.10	70.40	36.80	19.70	53.90	35.50	30.80	149.00
V	18.70	24.00	22.10	19.40	18.10	17.70	34.80	27.30	28.40	78.30
Th	16.50	19.40	39.60	36.80	41.20	41.30	18.00	21.60	20.90	14.70
Sc	3.11	6.38	3.16	2.45	2.53	1.91	6.38	4.38	5.39	11.60
Sr	85.50	46.40	35.50	67.90	62.70	75.10	235.00	176.00	131.00	363.00
Rb	46.70	195.00	99.40	204.00	213.00	184.00	132.00	152.00	111.00	117.00
Ni	6.44	3.31	7.81	6.22	3.66	5.40	3.73	4.37	4.41	7.61
Nb	27.40	31.60	21.10	13.90	18.00	17.60	20.70	20.40	23.50	20.00
Cu	26.50	13.80	12.70	16.70	6.74	13.40	8.39	9.04	8.89	11.50
Cr	56.10	20.80	56.20	46.10	36.00	45.70	42.90	44.00	49.40	69.70
Co	3.03	4.48	2.84	2.78	1.62	2.96	4.18	2.77	3.24	8.94
Ba	400	550	156	211	102	215	691	679	668	829
Hf	7.95	9.39	4.16	3.86	6.24	4.77	17.20	15.90	13.00	11.80
Ta	1.55	1.43	1.85	1.37	1.35	1.40	1.22	1.06	1.35	1.35
U	2.99	1.95	9.36	6.66	9.99	6.26	2.00	3.06	3.12	1.65
(La/Yb) _N	3.86	11.63	7.30	12.23	7.27	7.65	15.06	15.84	13.40	15.61
DI	93.94	90.26	93.09	91.44	92.76	93.13	83.45	88.23	88.65	71.66
δEu	0.70	0.45	0.36	0.36	0.27	0.38	0.71	0.65	0.65	0.81
δCe	1.32	0.94	0.89	0.91	0.93	0.93	0.90	0.91	0.95	0.93

注: D01-1~D01-8—黑云二长花岗岩; D01-9—二长花岗质变晶初糜棱岩; D01-10—花岗闪长岩。

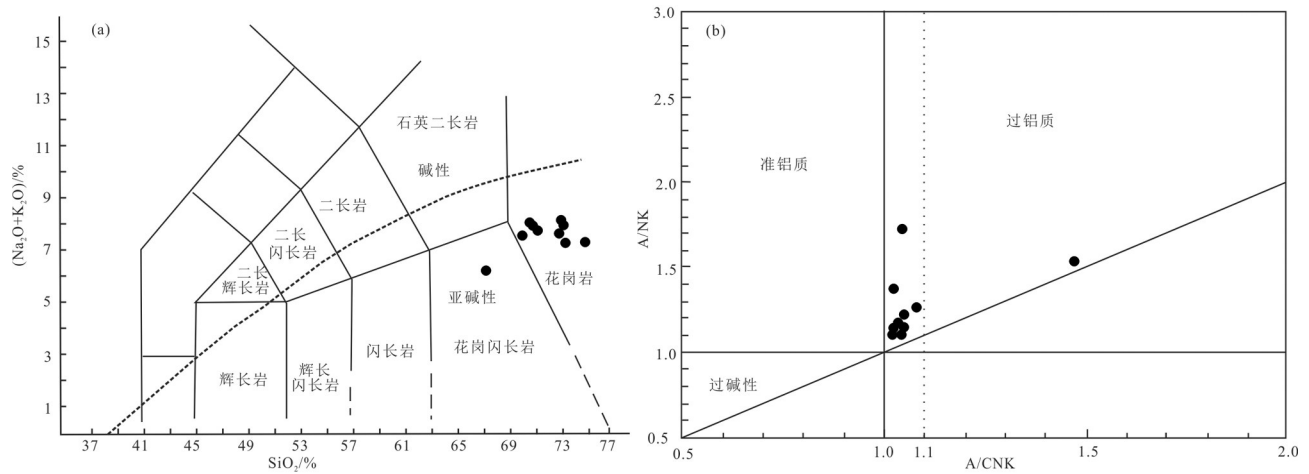


图5 云南凤庆小湾地区花岗岩岩体 SiO₂-(Na₂O+K₂O)(a) and (A/CNK)-(A/NK)(b)图解(a, 据 Middlemost et al., 1994; b, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig.5 SiO₂-(Na₂O+K₂O)(a) and (A/CNK)-(A/NK) (b) diagrams of the Xiaowan granite in Fengqing area, Yunnan (a, after Middlemost et al., 1994; b, after Maniar and Piccoli, 1989)

1.32, 平均为 0.96), 暗示了岩浆形成于较高的氧逸度环境(刘洪等, 2016; 刘军平等, 2017, 2020a, 2020b)。

小湾花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图解(图 7b)显示, 样品具有明显的负 Eu 异常, 相对富集 Rb、Th、Ce 等大离子亲石元素(LILE), 相对亏损 Ta、Nb、Zr、Ti、Hf、Y 等高场强元素(HFSE)的特征;

样品曲线形态趋势相近, 它们应该具有相似的源区(刘洪等, 2016; 张洪亮等, 2019; Liu et al., 2023)。

5 讨论

5.1 小湾花岗岩源区性质及形成机制

研究区小湾花岗岩 A/CNK 值均在 1.0 以上, 最高达 1.47, 表现出弱过铝质特点。CIPW 标准矿物中出现刚玉分子(平均值为 0.94%), Eu 负异常明显, δEu 平均为 0.53, 且具有低 FeO^T/MgO、低 P₂O₅ (0.03%~0.16%)和高 K₂O+Na₂O(6.20%~8.52%)等地球化学特征, 与弧火山岩及同碰撞花岗岩有部分类似特点(吴福元等, 2007), 可能与昌宁—孟连洋壳俯冲消亡向弧—陆碰撞汇聚对接转换有关, 为过渡类型。

不同性质的源岩形成了不同构造环境中的弱过铝质花岗岩; 判别弱过铝质花岗岩的形成环境则需要判别其形成的源岩性质, 对于判别弱过铝质花岗岩的源岩性质, 斜长石是一个很好的指示矿物, 泥质源岩贫斜长石(<5%), 而杂砂岩则富斜长石(>5%)。一般 CaO/Na₂O<0.3 表明原岩为泥质岩石的部分熔融, 同时岩石 Rb/Sr 比值>0.1 和 Rb/Ba 比值>0.3, 反之若 CaO/Na₂O<0.3 表明原岩为杂砂岩的部分熔融, 其 Rb/Sr 和 Rb/Ba 比值较低(Barbarin,

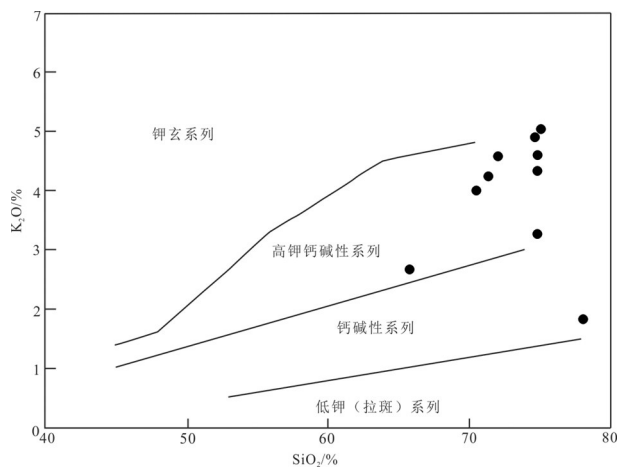


图6 云南凤庆地区小湾花岗岩岩体 SiO₂-K₂O 图解(据 Richwood, 1989)

Fig.6 SiO₂-K₂O diagrams of the Xiaowan granite in Fengqing area, Yunnan (after Richwood, 1989)

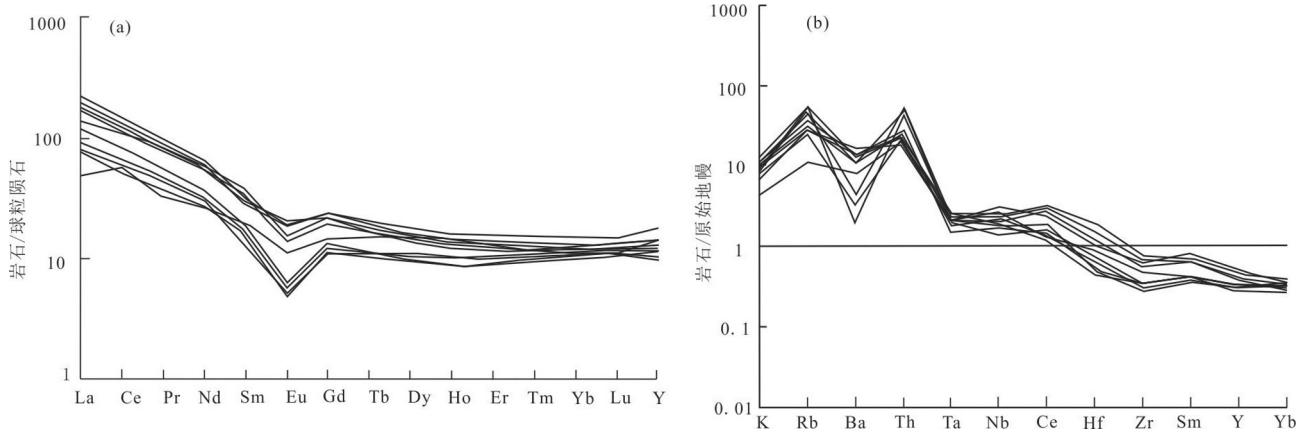


图7 云南凤庆地区小湾花岗岩岩体稀土元素配分形式(a)与微量元素蛛网图(b)(原始地幔标准化数据、球粒陨石标准化数据引自文献Sun and McDonough, 1989)

Fig.7 Chondrite-normalized rare earth elements patterns(a) and primitive mantle-normalized trace elements patterns(b) of the Xiaowan granite in Fengqing area, Yunnan (Chondrite and primitive mantle normalized data after Sun and McDonough, 1989)

1999; 邓晋福等, 2004)。小湾花岗岩的 CaO/Na_2O 比值大部分 < 0.3 (3个样品大于 0.3), Rb/Sr 比值均 > 0.1 和大部分 Rb/Ba 比值 > 0.3 为特征, 结合 $CaO/(MgO+FeO^T) - Al_2O_3/(MgO+FeO^T)$ 图解(图8a), 显示其应为泥质岩石夹部分杂砂岩局部熔融而形成。

研究区的小湾花岗岩在张旗的 $Yb-Sr$ 图解(图b)中样品落入极低 Sr 高 Yb 区和低 Sr 高 Yb (图9a), 样品表现为低 Sr 高 Yb 型向高 Sr 低 Yb 型演化趋势, 指示出地壳厚度增厚压力增大, 可能与昌宁—孟连洋俯冲、碰撞造山有关。小湾花岗岩岩体6件样品

(D01-1~D01-6), DI 指数为 $93.94 \sim 90.26$, 分异程度较强, 另一组4件样品(D01-7~D01-10), DI 指数为 $71.66 \sim 88.65$, 分异程度弱或基本未分异, 可能与本区花岗岩具弧花岗岩及同碰撞花岗岩双重过渡性质有关, 应处于两者间的过渡类型。

5.2 小湾花岗岩形成背景

花岗质岩石可以形成于多种构造环境, 比如活动大陆边缘、岛弧造山带、大陆碰撞带等构造部位。

小湾花岗岩岩体富集轻稀土及大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 且具弱过铝质特点, 在稀土元

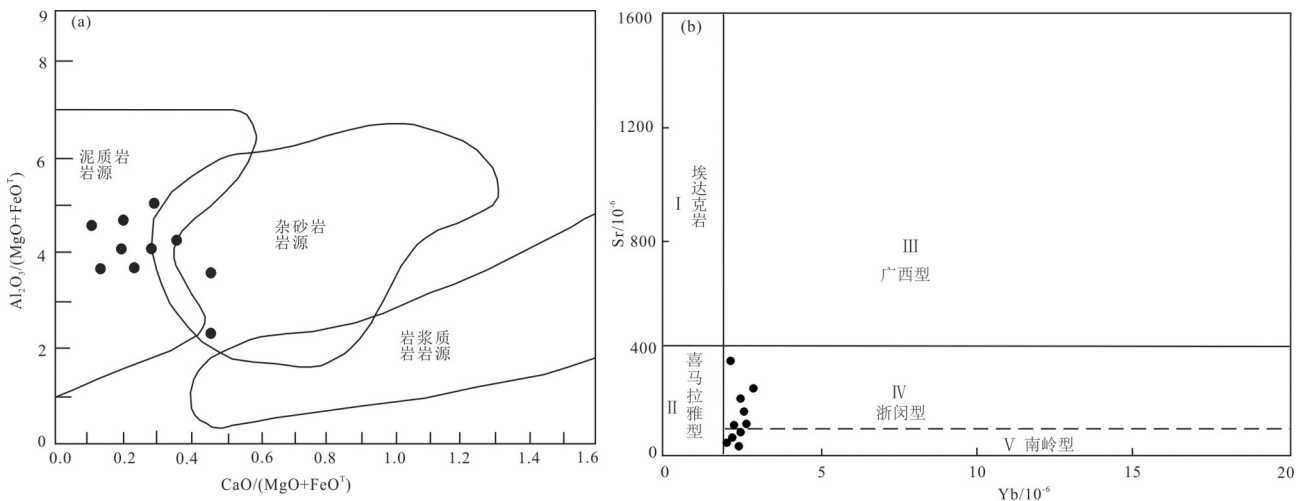


图8 云南凤庆地区小湾花岗岩岩体 $CaO/(MgO+FeO^T) - Al_2O_3/(MgO+FeO^T)$ (a)及 $Yb-Sr$ (b)构造判别图(a, 据Alter et al., 2000; b, 据张旗等, 2006)

Fig.8 $(CaO/(MgO+FeO^T) - Al_2O_3/(MgO+FeO^T))$ (a)- $(Yb-Sr)$ (b) tectonic discrimination diagrams of the Xiaowan granite in Fengqing area, Yunnan (a, after Alter et al., 2000; b, after Zhang Qi et al., 2006)

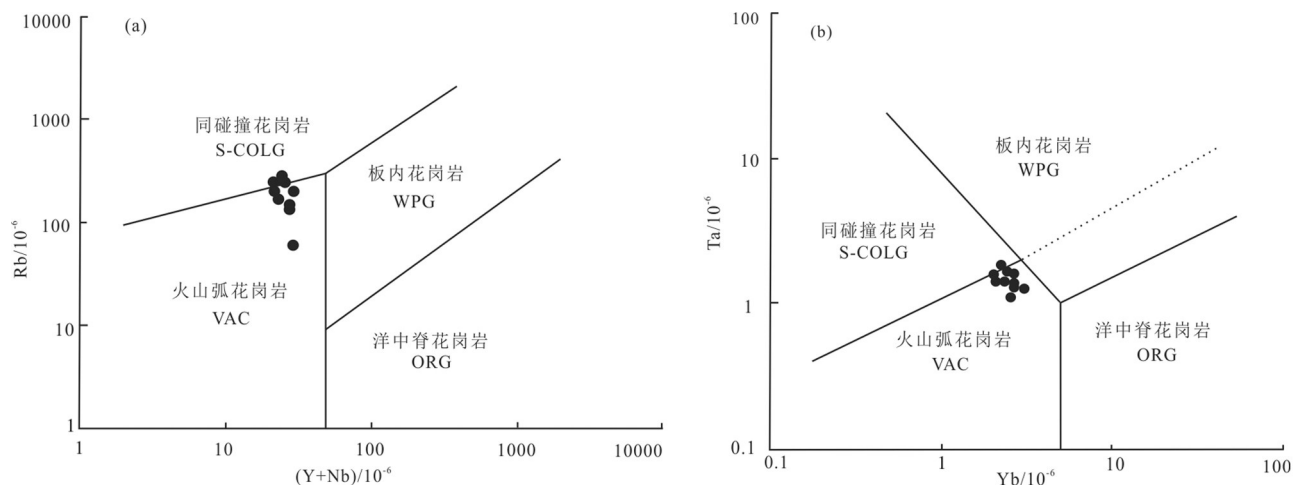


图9 云南凤庆地区小湾花岗岩岩体(Y+Nb)-Rb(a)及Yb-Ta(b)图解(据Pearce et al., 1984)

Fig.9 (Y+Nb)-Rb(a) and Yb-Ta (b) diagram of the Xiaowan granite in Fengqing area, Yunnan(after Pearce et al., 1984)

素和微量元素图解方面显示出岛弧花岗岩及同碰撞花岗岩双重特征,在(Y+Nb)-Rb图解(图9a)及Yb-Ta图解(图9b)中样品落入火山弧花岗岩及同碰撞花岗岩交汇处,应具两者双重性质,为两者过渡类型。微量元素Sr的负异常和Th的正异常也显示了岛弧岩浆岩的特征,暗示着岩浆源区可能受到俯冲板块流体或熔体的交代作用。中晚二叠世时期为昌宁—孟连洋向东俯冲末期,由于俯冲板块体或熔体的交代作用导致楔形地幔源区发生部分熔融作用,幔源岩浆上涌,从而导致上地壳物质升温发生熔融,研究区中二叠世晚期具有典型岛弧地球化学特征的小湾花岗岩即为该事件的岩石学记录,相对于大规模俯冲消减作用的弧岩浆岩记录(280~305 Ma),本期花岗岩滞后了约20 Ma,此时区域上开始转入弧-陆碰撞阶段,由于本期花岗岩侵位时代处于二次构造事件转换阶段,故同时兼具弧花岗岩及同碰撞花岗岩双重地球化学特征。结合区域资料,昌宁—孟连带在早二叠世末—早三叠世全区进入弧-陆俯冲向碰撞汇聚转换阶段(280~245 Ma);早三叠世—晚三叠世全区进入主碰撞阶段(245~210 Ma);之后全区进入伸展拉张阶段(~210 Ma),主要沉积了以早侏罗统芒汇河组,小红桥组为代表的火山岩夹碎屑岩沉积(刘军平,2017,2020c;王保弟等,2018;吕留彦等,2019)。由些,笔者认为小湾花岗岩可能是昌宁—孟连洋壳俯冲消亡向弧-陆碰撞、汇聚对接作用的产物(Collins and Richards, 2008;王保弟等,2018),而非碰撞后花岗岩。

5.3 小湾花岗岩构造意义

石炭纪—晚二叠世是昌宁—孟连古特提斯洋盆扩张、俯冲消减及弧-陆碰撞、汇聚转换的重要时期;其岩浆作用在凤庆、澜沧、景洪等地区均有该期侵入岩及火山岩的报道,该期典型代表有曼秀岩体、早石炭世平掌组(C₁p_z)火山岩,显示岛弧岩浆岩的地球化学特征,可能代表了昌宁—孟连洋壳发生(洋内)俯冲消减开始的记录,其岩浆记录主要集中在334 Ma以及320~348 Ma锆石U-Pb年龄(孔会磊等,2012,孙载波等,2015;王保弟等,2018);具有典型的俯冲形成的岛弧型岩浆岩年龄主要集中在280~305 Ma,代表性岩体主要有南联山岩体锆石年龄为300~305 Ma(徐桂香等,2016);雅口岩体堆晶辉长岩的锆石年龄为296 Ma^①;半坡岩体锆石年龄为284~288 Ma(Wang et al., 2010);吉岔岩体锆石年龄280~297 Ma(魏君奇等,2008)。

本次发现的小湾花岗岩锆石U-Pb LA-ICP-MS年龄为260.4 Ma,为弱过铝质花岗岩,具弧火山岩及同碰撞花岗岩双重特征,应为过渡类型;260.4 Ma是目前临沧岩浆弧发现的最为年轻的具弧岩浆岩及同碰撞花岗岩双重性质的酸性岩浆记录,与云县漫湾地区龙洞河组(CP1)中二叠世弧火山岩年龄(262.5±3.1 Ma)^②(刘军平等,2022)及景洪大勐龙怕冷具岛弧性质的辉长-辉绿岩岩体258~262 Ma的年龄相当^③(王保弟等,2018)。因此,结合前人的研究成果,昌宁—孟连洋构造体制由弧-陆碰撞到汇聚对接作用的转换可能发生在280~258 Ma,并引发

一定规模的构造热事件,本文所报道的小湾花岗岩体应是该期事件的产物,其转换时限可能为260.4 Ma。笔者推测在云南境内昌宁—孟连洋盆向东俯冲消减作用最早碰撞发生在凤庆小湾、云县漫湾及景洪大勐龙一带,后逐渐相向延伸。

6 结 论

(1)小湾花岗岩岩体结晶年龄为(260.4±1.3) Ma(MSWD=0.32, $n=18$),表明岩体形成于中二叠世晚期,而非前人认为的中元古代,是目前临沧岩浆弧发现的最为年轻的具弧花岗岩及同碰撞花岗岩双重性质的酸性岩浆记录。

(2)小湾花岗岩岩体是在昌宁—孟连洋壳向东俯冲向汇聚转换背景下,上地壳泥质岩石夹部分杂砂岩成分发生部分熔融作用形成的弱过铝质亚碱性花岗岩。

(3)小湾花岗岩岩体应是昌宁—孟连洋壳俯冲消亡向弧-陆碰撞、汇聚对接作用的产物,其转换时限可能为260.4 Ma;结合区域资料,云南境内昌宁—孟连洋盆向东俯冲消减作用最早碰撞可能发生在凤庆小湾、云县漫湾及景洪大勐龙一带,后逐渐相向延伸。

致谢:论文写作过程中得到了云南省地质调查教授级高工李静的热心帮助,锆石 LA-ICP-MS 分析和英文润色得到了何小虎、袁秋云、朱波、潘诗洋的帮助。审稿人提出了宝贵的修改意见。在此一并表示衷心感谢。

注释

①云南省地质调查院. 2008. 云南1:25万凤庆幅区域地质矿产调查报告[R].

②云南省地质调查院. 2016. 云南1:5万诗礼幅、大河幅、犀牛街幅、老家库幅、哨街幅区域地质矿产调查报告[R].

③云南省地质调查院. 2012. 云南1:25万澜沧幅、景洪幅、勐腊幅、勐海幅区域地质调查报告[R].

References

Alther R, Holl A Hegner E, Langer C, Kreuzer H. 2000. High-potassium, calcalkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. *Lithos*, 50: 51-73.

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*,

46(3): 605-626.

Collins W J, Richards S W. 2008. Geodynamic significance of S-type granites in circum-Pacific orogens[J]. *Geology*, 36(7): 559-562.

Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo, Mo Xuanxue, Yu Bingsong, Lai Xingzuo, Chen Hongwei. 2004. Petrogenesis, Tectonic Setting and Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 33-49(in Chinese).

Green T H. 1976. Experimental generation of cordierite-orthopyroxene bearing granitic liquids from a pelitic composition[J]. *Geology*, 4(2): 85-88.

Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 27-62.

Kong Huilei, Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, Wang Shuo, Li Rong, Wang Qiaolin. 2012. Petrogenesis of Lincang granites in Sanjiang area of western Yunnan Province: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1438-1452 (in Chinese with English abstract).

Li Shengxi, He Bi, Yang Bo, Wei Zhifu, Tao Gang, Gan Baoping, Zhao Fei, Sun Pingyuan, Zhao Zhenguan, Huang Pengfei. 2023. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Tagelake monzogranites in South Tianshan block: Constraints on crustal magmatic origin and tectonic setting[J]. *Geology in China*, 50(2): 622-639(in Chinese with English abstract).

Li Wenchang, Pan Guitang, Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Wang Liquan. 2010. The Multi-Island ArcBasin-Collisional Orogenic Metallogenic Theory and Exploration Technology of "Three Rivers" in Southwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Liu Benpei, Feng Qinglai, Chonglakmani C, Helmcke D. 2002. Framework of Paleotethyan Archipelago ocean of Western Yunnan and its elongation towards north and south[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(3): 161-171 (in Chinese with English abstract).

Liu Benpei, Feng Qinglai, Fang Nianqiao, Jia Jinhua, He Yanxiang. 1993. Tectonic evolution of Pale-Tethys poly-island-ocean in Changning-Menglian and Lancangjiang belts, Southwestern Yunnan[J]. *Earth Science*, 18(5): 529-538(in Chinese with English abstract).

Liu Hong, Zhang Hui, Li Guangming, Huang Hanxiao, Xiao Wanfeng, You Qin, Ma Dongfang, Zhang Hai, Zhang Hong. 2016. Petrogenesis of the Early Cretaceous Qingcaoshan strongly peraluminous S-type granitic pluton, Southern Qiangtang, Northern Tibet: Constraints from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb geochronology[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 52(5): 848-860(in Chinese with English abstract).

- Liu Junping, Hu Shaobin, Li Jing, Sun Baidong, Sun Zaibo, Wang Wei, Guan Xueqing, Xu Guixiang. 2018. U–Pb age of zircon from metamorphic rocks of the Tuanliangzi Formation in western Yunnan Province and its tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 37(11): 2079–2086(in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Li Jing, Wang Genhou, Sun Baidong, Hu Shaobin, Yu Saiying, Wang Xiaohu, Song Donghu. 2020b. Geochemistry and U–Pb age of zircons of mafic intrusion in the southwestern margin of the Yangtze plate: Response to breakup of the Columbia supercontinent[J]. Geological Review, 66(2): 350–364(in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Song Sicun, Wang Wei, Tang Feng, Li Jing, Duan Xiangdong, Wang Xiaohu, Sun Baidong, Yu Saiying, Hu Shaobin, Duan Wenting. 2020. Protoconodont fossils for refining the Cambrian bottom and the contribution to shale gas formation along the southwest margin of Yangtze Block[J]. China Geology, 3: 558–566.
- Liu Junping, Sun Baidong, Cui Xiaozhuang, Xiong Bo, Song Donghu, Bai Chungong, Zhang Kun, Yang Shipan. 2020. Geochronology, geochemistry, zircon Hf isotopic composition and genesis of Shihushan granite in Anning, Yunnan Province[J]. Geology in China, 47(3): 693–708 (in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Sun Baidong, Wang Xiaofeng, Liu Wei, Ma Jinhua, Guan Xueqing, Song Donghu, Lü Boye. 2020a. The zircon U–Pb age, geochemical characteristics and tectonic significance of the spherical basalt in the early Mesoproterozoic in Lufeng area central Yunnan[J]. Geological Review, 66(1): 35–51(in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Tian Sumei, Cong Feng, Sun Baidong, Huang Xiaoming, Xu Yunfei. 2017. The Shale granites from the southern part of the Lancang River, western Yunnan: Zircon U–Pb age, geochemistry and geological implications[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 37(4): 29–40(in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Tian Sumei, Zhu Xunzao, Ma Jinhua, Li Jing, Hu Shaobin, Yu Saiying, Zhang Hu, She Zhongming, Li Xugui. 2021. Discovery of rhyolitic tuffaceous slate in the southwestern margin of Yangtze Craton: Zircon U–Pb ages (2491 Ma) and tectonic–thermal events[J]. China Geology, 4: 616–629.
- Liu Junping, Wan Sheng, Tian Sumei, Wang Wei, Bao Jiafeng. 2022. Discovery of the Middle Permian volcanic rocks in the Yunxian area, western Yunnan and constraints on subduction of the Changning–Menglian Paleo–Tethys Ocean[J]. Acta Geologica Sinica, 96(3): 942–953(in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Yin Wei, Yang Shipan, Zhao Jiangtai, Zeng Wentao, Tang Feng, He Shijun, Li Weike. 2023. Response to the Lomagundi–Jatuli event at the southwestern margin of the Yangtze Block: Evidence from the carbon and oxygen isotopes of the Paleoproterozoic Yongjingshao Formation[J]. China Geology, 6: 50–60.
- Lü Liuyan, Li Jing, Zeng Wentao, Yu Saiying, Sun Zaibo, Wang Xiaofeng. 2019. The discovery of Early Jurassic volcanic rocks along the Southern Lancangjiang tectonic magmatic belt in southwest Yunnan, with a discussion on the upper limit of Indosinian tectonic cycles in Yunnan Province[J]. Geology in China, 46(6): 1270–1283(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for microsoft Excel[J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California 39.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids Geological[J]. Society of America Bulletin, 101: 635–643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth–Science Reviews, 37: 215–224.
- Mo Xuanxue, Lu Fengxiang, Shen Shangyue, Zhu Qinwen, Hou Zengqian, Yang Kaihui, Deng Jinfu, Liu Xiangpin, He Changxiang. 1993. Tethys Volcanism and Mineralization in the Sanjiang Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–77(in Chinese).
- Pearce J A, Harris B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petroleum Geology, 25(4): 956–983.
- Peng Touping, Wang Yuejun, Fan Weizheng, Liu Dunyi, Shi Yurou, Miao Laicheng. 2006. Zircon SHRIMP dating of early Mesozoic felsic volcanic rocks from the southern Lancangjiang Zone and tectonic implications[J]. Science in China (Series D), 36(2): 123–132 (in Chinese).
- Ren Fei, Pan Guitang, Yin Fuguang, Chang Mengyao, Xiao Qinghui. 2017. Oceanic plate stratigraphy and tectonic evolution of the Nuijiang–Lancangjiang–Jinshajiang Area in Southwest China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 37(4): 9–16(in Chinese with English abstract).
- Richwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 22(4): 247–263.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 42: 313–345.
- Sun Zaibo, Lü Xiaoping, Yu Saiying, Liu Junping, Tian Sumei, Li Xugui. 2015. Zircon U–Pb ages and petro–geochemical characteristics of Manxiu Diorite Pluton, Jinghong City, Yunnan Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 35(4): 473–480(in Chinese with English abstract).
- Wang Baodi, Wang Liquan, Wang Dongbing, Yin Fuguang, He Juan, Peng Zhimin, Yan Guochuan. 2018. Tectonic evolution of the

- Changning-Menglian Proto-Paleo Tethys ocean in the Sanjiang area, Southwestern China[J]. *Earth Science*, 43(8): 2527-2550(in Chinese with English abstract).
- Wang Dongbing, Luo Liang, Tang Yuan, Yin Fuguang, Wang Baodi, Wang Liqun. 2016. Zircon U-Pb dating and petrogenesis of Early Paleozoic adakites from the Niujingshan ophiolitic mélange in the Changning-Menglian suture zone and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2317-2329 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hairan, Zhao Hongge, Qiao Jianxin, Gao Shaohua. 2013. Theory and application of zircon U-Pb isotope dating technique[J]. *Geology and Resources*, 22(3): 229-242(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqun, Pan Guitang, Li Cai, Dong Yongsheng, Zhu Dicheng, Yuan Sihua, Zhu Tongxing. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of Eopaleozoic cumulate in Guoganjianian Mt. from central Qiangtang area of northern Tibet-Considering the evolvement of Proto and Paleo Tethys[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2045-2056(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuejun, Zhang Aimei, Fan Weiming, Peng Touping, Zhang Feifei, Zhang Yanhua, Bi Xiawu. 2010. Petrogenesis of late Triassic post-collisional basaltic rocks of the Lancangjiang tectonic zone, southwest China, and tectonic implications for the evolution of the eastern Paleotethys: Geochronological and geochemical constraints[J]. *Lithos*, 120: 529-46.
- Wei Junqi, Wang Xiaodi, Zhuang Xiao, Liu Yunhua. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of diorite among Jicha serpentine and Eza gabbro from Lancangjiang belt, Yunnan Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1297-1301(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1254 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Study on the mineralogy of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604(in Chinese).
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, Hong Dawei, Mo Xuanxue, Lu Xinxiang, Li Zhichang, Wang Xiongwu, Ma Changqian, Wu Fuyuan, Luo Zhaohua, Wang Tao. 2002. The Ways of Investigation on Granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-88(in Chinese).
- Xu Guixiang, Liu Guichun, Liu Junping, Tian Sumei. 2016. The U-Pb age and significance of zircon in Nanlianshan diorite body in Jinghong, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 35(2): 131-136(in Chinese with English abstract).
- Yin Fuguang, Wang Dongbing, Wang Baodi, Ren Fei. 2017. Stratigraphic classification in the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang orogenic zone in southwest China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37(4): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Yu Saiying, Li Kunqiong, Shi Yuping, Zhang Huihua. 2003. A study on the granodiorite in the middle part of Lincang granite batholith[J]. *Yunnan Geology*, 22(4): 426-442 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongliang, Yang Wenguang, Zhu Lidong, Lu Zhiyou, Su Xin, Li Chengzhi. 2019. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and geological significance of highly differentiated S-type granites in the south Lhasa block[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 39(1): 52-62 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdon, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249-2269(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 莫宣学, 于炳松, 赖兴运, 谌宏伟. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 33-49.
- 孔会磊, 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 王硕, 李荣, 王乔林. 2012. 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*, 28(5): 1438-1452.
- 李生喜, 碧碧, 杨博, 魏志福, 陶刚, 甘保平, 赵飞, 孙平原, 赵振琯, 黄鹏飞. 2023. 南天山地块塔格拉克地区二长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征: 对壳源岩浆成因和构造背景的限定[J]. *中国地质*, 50(2): 622-639.
- 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 莫宣学, 王立全. 2010. 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.
- 刘本培, 冯庆来, Chonglakmani C, Helmcke D. 2002. 滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸[J]. *地学前缘*, 9(3): 161-171.
- 刘本培, 冯庆来, 方念乔, 贾进华, 何馥香. 1993. 滇西南昌宁-孟连带和澜沧江带古特提斯多岛洋构造演化[J]. *地球科学*, 18(5): 529-538.
- 刘洪, 张晖, 李光明, 黄瀚霄, 肖万峰, 游钦, 马东方, 张海, 张红. 2016. 藏北羌塘南缘早白垩世青草山强过铝质 S 型花岗岩的成因: 来自地球化学和锆石 U-Pb 年代学的约束[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 52(5): 848-860.
- 刘军平, 胡绍斌, 李静, 孙柏东, 孙载波, 王伟, 关学卿, 徐桂香. 2018. 滇西云县地区团梁子岩组变质岩锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. *地质通报*, 37(11): 2079-2086.
- 刘军平, 李静, 王根厚, 孙柏东, 胡绍斌, 俞赛赢, 王小虎, 宋冬虎. 2020b. 扬子板块西南缘基性侵入岩锆石定年及地球化学特征——Columbia 超级大陆裂解的响应[J]. *地质论评*, 66(2): 350-364.
- 刘军平, 孙柏东, 崔晓庄, 熊波, 宋冬虎, 白春东, 张坤, 杨仕潘. 2020c. 云南安宁地区石虎山花岗岩年代学、地球化学特征和锆石

- Hf同位素组成及其成因[J]. 中国地质, 47(3): 693-708.
- 刘军平, 孙柏东, 王晓峰, 刘伟, 马进华, 关学卿, 宋冬虎, 吕勃焯. 2020a. 滇中禄丰地区中元古代早期球状玄武岩的锆石U-Pb年龄、地球化学特征及其大地构造意义[J]. 地质论评, 66(1): 35-51.
- 刘军平, 田素梅, 丛峰, 孙柏东, 黄晓明, 徐云飞. 2017. 滇西澜沧江构造带南段沙乐花岗岩的锆石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, 37(4): 29-40.
- 刘军平, 宛胜, 田素梅, 王伟, 包佳风. 2022. 滇西云县地区中二叠世火山岩的发现及其对昌宁-孟连古特提斯洋俯冲作用的约束[J]. 地质学报, 96(3): 942-953.
- 吕留彦, 李静, 曾文涛, 俞赛赢, 孙载波, 王晓峰. 2019. 滇西南南澜沧江构造岩浆岩带早侏罗世火山岩的发现——兼论云南省境内印支构造旋回的上限[J]. 中国地质, 46(6): 1270-1283.
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 朱勤文, 侯增谦, 杨开辉, 邓晋福, 刘祥品, 何昌祥. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1-77.
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 刘敦一, 石玉若, 苗来成. 2006. 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), 36(2): 123-132.
- 任飞, 潘桂棠, 尹福光, 常梦瑶, 肖庆辉. 2017. 西南三江地区洋板块地层特征及构造演化[J]. 沉积与特提斯地质, 37(4): 9-16.
- 孙载波, 卢晓萍, 俞赛赢, 刘军平, 田素梅, 李序贵. 2015. 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]. 矿物岩石, 35(4): 473-480.
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 尹福光, 贺娟, 彭智敏, 闫国川. 2018. 三江昌宁-孟连带原-古特提斯构造演化[J]. 地球科学, 43(8): 2527-2550.
- 王冬兵, 罗亮, 唐渊, 尹福光, 王保弟, 王立全. 2016. 昌宁-孟连结合带牛井山早古生代埃达克岩锆石U-Pb年龄、岩石成因及其地质意义[J]. 岩石学报, 32(8): 2317-2329.
- 王海然, 赵红格, 乔建新, 高少华. 2013. 锆石U-Pb同位素测年原理及应用[J]. 地质与资源, 22(3): 229-242.
- 王立全, 潘桂棠, 李才, 董永胜, 朱弟成, 袁四化, 朱同兴. 2008. 藏北羌塘中部果干加山早古生代堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄—兼论原—古特提斯洋的演化[J]. 地质通报, 27(12): 2045-2056.
- 魏君奇, 王晓地, 庄晓, 刘云华. 2008. 澜沧江缝合带吉岔蛇纹岩中闪长岩和俄咱辉长岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(6): 1297-1301.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1254.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589-1604.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 洪大卫, 莫宣学, 卢欣祥, 李志昌, 汪雄武, 马昌前, 吴福元, 罗照华, 王涛. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1-88.
- 徐桂香, 刘桂春, 刘军平, 田素梅. 2016. 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, 35(2): 131-136.
- 尹福光, 王冬兵, 王保弟, 任飞. 2017. 西南三江造山带地层区划[J]. 沉积与特提斯地质, 37(4): 1-8.
- 俞赛赢, 李昆琼, 施玉萍, 张惠华. 2003. 临沧花岗岩基中段花岗闪长岩类研究[J]. 云南地质, 22(4): 426-442.
- 张洪亮, 杨文光, 朱利东, 卢志友, 苏鑫, 李成志. 2019. 南拉萨地块高分异S型花岗岩锆石U-Pb年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 矿物岩石, 39(1): 52-62.
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的Sr-Yb分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9): 2249-2269.