

班公湖-怒江缝合带西段昂龙岗日地区 中新世岩浆作用

吴建亮, 廖芝华, 白云, 王波, 秦宇龙, 刘文, 徐云峰, 张彤,
景阳, 熊昌利

(四川省综合地质调查所 稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室, 四川 成都 610081)

摘要: 拉萨地块中生代构造岩浆活动一直以来都是青藏高原基础地质研究热点之一。在该地块西部发育有较多的新生代尤其是中新世岩浆岩。本文以拉萨地块西部昂龙岗日地区新发现的中新世花岗岩为研究对象, 对其岩石类型、岩石成因与构造背景进行了探讨。昂龙岗日地区中新世花岗岩由细粒白云母二长花岗岩和中细粒二长花岗岩组成, 内部发育少量的暗色包体。细粒白云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 9.95 ± 0.14 Ma, 中细粒二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 10.68 ± 0.2 Ma, 均为中新世。二者都具有高硅 ($\text{SiO}_2 = 72.35\% \sim 74.74\%$)、富钾 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.15 \sim 1.45$, 均大于 1)、高铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.35\% \sim 14.83\%$) 和弱过铝质-过铝质 ($\text{A}/\text{CNK} = 1.08 \sim 1.14$) 的特征, CIPW 刚玉分子数均大于 1%。其轻重稀土元素分异十分明显, 具中等负 Eu 异常, 富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb 高场强元素, 相对富集 Hf、Zr 等高场强元素, Sr、Ba、P、Ti 等则表现出明显的负异常, 为高钾钙碱性系列的过铝质 S 型花岗岩。两者具有相对低 Sr、高 Sr/Y、La/Yb 值, 极低的 Y、Yb 含量。研究区花岗岩起源于加厚下地壳环境下, 并发生了一定程度的岩浆混合作用。综合区域研究成果, 昂龙岗日地区中新世花岗岩的形成, 可能与印度板块北向俯冲至北拉萨地块下发生板片撕裂后, 高热软流圈物质透过板片断离窗上涌诱发下地壳发生部分熔融有关。

关键词: S 型花岗岩; 北拉萨地块; 昂龙岗日; 中新世; 地质年代学; 地球化学

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)05-1251-17

Miocene magmatism in Anglonggangri area, western Bangong-Nujiang suture zone

WU Jian-liang, LIAO Zhi-hua, BAI Yun, WANG Bo, QIN Yu-long, LIU Wen, XU Yun-feng, ZHANG Tong,
JING Yang and XIONG Chang-li

(Sichuan Institute of Comprehensive Geological Survey Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare
Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610081, China)

Abstract: The Mesozoic and Cenozoic tectonic magmatic activity in the Lhasa block has always been one of the research hotspots in the basic geology of the Qinghai-Xizang Plateau. There are many Cenozoic, especially Miocene magmatic rocks developed in the western part of the Lhasa block. This article takes the newly discovered Miocene granite in the Anglonggangri area of the western Lhasa block as the research object, and explores its rock types, rock genesis, and tectonic background. The Miocene granites in the Anglonggangri area are composed of fine-

收稿日期: 2023-04-11; 接受日期: 2024-07-01; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局区域地质调查项目 (DD20160026); 四川省自然科学基金项目 (23NSFC1506); 四川省地质调查研究院科研项目 (SCIGS-CZDXM-2024003)

作者简介: 吴建亮 (1988-), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质矿产调查与勘探、活动断裂调查与地震风险普查及相关工作, E-mail: cugwujianliang@qq.com; 通讯作者: 熊昌利 (1980-), 男, 高级工程师, E-mail: xiongchangli@scsdzdcy.onaliyun.com。

网络首发时间: 2024-07-20; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240718.1158.002.html>

grained muscovite monzonitic granite and medium-fine-grained monzonitic granite, with a small amount of dark inclusions developed internally. The zircon U-Pb age of fine-grained muscovite monzonitic granite is 9.95 ± 0.14 Ma, and the zircon U-Pb age of medium-fine-grained monzonitic granite is 10.68 ± 0.2 Ma, both from the Miocene. Both of them have the characteristics of high silicon ($\text{SiO}_2 = 72.35\% \sim 74.74\%$), rich potassium ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.15 \sim 1.45$, all greater than 1), high aluminum ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.35\% \sim 14.83\%$), and weak peraluminum peraluminum ($A/\text{CNK} = 1.08 \sim 1.14$). The number of CIPW corundum molecules is greater than 1%. The differentiation of light and heavy rare earth elements is very obvious, with a moderate negative Eu anomaly, enriched in large ion lithophile elements such as Rb, Th, K, and depleted in high field strength elements such as Nb, relatively enriched in high field strength elements such as Hf and Zr, Sr, Ba, P, Ti, etc. These characteristics indicate that it is a high potassium calcium alkaline series of peraluminous S-type granite. Both of them have relatively low Sr, high Sr/Y, La/Yb ratios, and extremely low Y and Yb contents. The granite in the research area originated from a thickened lower crustal environment and underwent a certain degree of magma mixing. Based on the comprehensive regional research results, the formation of Miocene granites in the Anglónggāngri area may be related to the northward subduction of the Indian plate into the north Lhasa block, where plate tearing occurred and high-temperature asthenosphere material flowed through the plate fragments, causing partial melting of the lower crust.

Key words: S-type granite; north Lhasa block; Anglónggāngri area; Miocene; geochronology; geochemistry

Fund support: Project of China Geological Survey (DD20160026); National Natural Science Foundation of Sichuan Province (23NSFC1506); Project of Sichuan Institute of Geological Survey (SCIGS-CZDXM-2024003)

印度-亚洲大陆后碰撞岩浆作用一直是青藏高原的研究热点,受到了国内外众多学者的广泛关注。岩浆-火山作用作为高原岩石圈构造和生长演化过程研究的有效“窗口”和“探针”(莫宣学, 2011),是深入研究陆-陆碰撞引发地壳生长与物质演化作用机制的理想对象(赵志丹等, 2006; 莫宣学, 2011; 侯增谦等, 2018)。拉萨地块(冈底斯岩浆岩带)是分布于班公湖-怒江缝合带(BNSZ)和雅鲁藏布缝合带(YZSZ)之间的一条巨型构造-岩浆岩带,也是青藏高原规模最大的岩浆岩集中发育地区(潘桂棠等, 2006; 莫宣学, 2020),在新生代尤其是中新世广泛发育了后碰撞构造岩浆作用产物,如白云母强过铝花岗岩类和南北向展布的岩墙群等(莫宣学等, 2006; 侯增谦等, 2006a, 2006b; 赵志丹等, 2006, 2021; 莫宣学, 2011),空间上主要集中分布在中南部拉萨地块区域。北拉萨地块位于班公湖-怒江缝合带(BNSZ)以南,狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿(混杂)岩带以北,在新生代以陆内沉积作用(如牛堡组、丁青湖组、康托组等)为主,新生代岩浆作用主要集中在西部的狮泉河(侯增谦等, 2006b)和中部改则地区(张泽明等, 2019),为该地区后碰撞岩浆作用提供了高原后碰撞深部作用过程的最佳记录。随着地质调查工作的不断开展,近年来在北拉萨地块陆续发现了一些新生代的岩浆活动和成矿事件,如

角西地区(王立强等, 2017; Wang *et al.*, 2018, 2020; 王勇等, 2019),狮泉河左左乡(张博川等, 2022)、革吉县雄巴乡(张耀玲, 2018)等,岩石类型有钾质-超钾质石英二长岩、钾玄质流纹岩以及石英二长斑岩、黑云母二长花岗斑岩等,成岩年龄主要集中在 $25 \sim 12$ Ma(侯增谦等, 2006b),但规模较小,多以岩株形式产出。笔者在开展西藏日土县昂龙岗日地区 $1:5$ 万区域地质调查时,在北拉萨地块西部的昂龙岗日地区也发现了较大面积分布的中新世花岗岩体。本文在岩石学、锆石 U-Pb 年代学、全岩地球化学研究的基础上,探讨其岩石类型、岩石成因以及地球动力学背景,为探讨北拉萨西段的新生代构造岩浆作用和深部动力学过程提供了新的岩浆作用信息。

1 区域地质背景及岩石学特征

研究区位于北拉萨地块(图 1a)日土-昂龙岗日-班戈火山岩弧内部。区域内主要出露侏罗系、白垩系、古近系以及第四系,其中以白垩系和侏罗系分布面积最广(图 1b)。其中侏罗系主要为接奴群和拉贡塘组,主要由细碎屑岩夹酸性火山岩、火山碎屑岩组成;侏罗-白垩之交主要为沙木罗组的砂板岩夹安山岩及安山质火山碎屑岩;下白垩统多尼组和

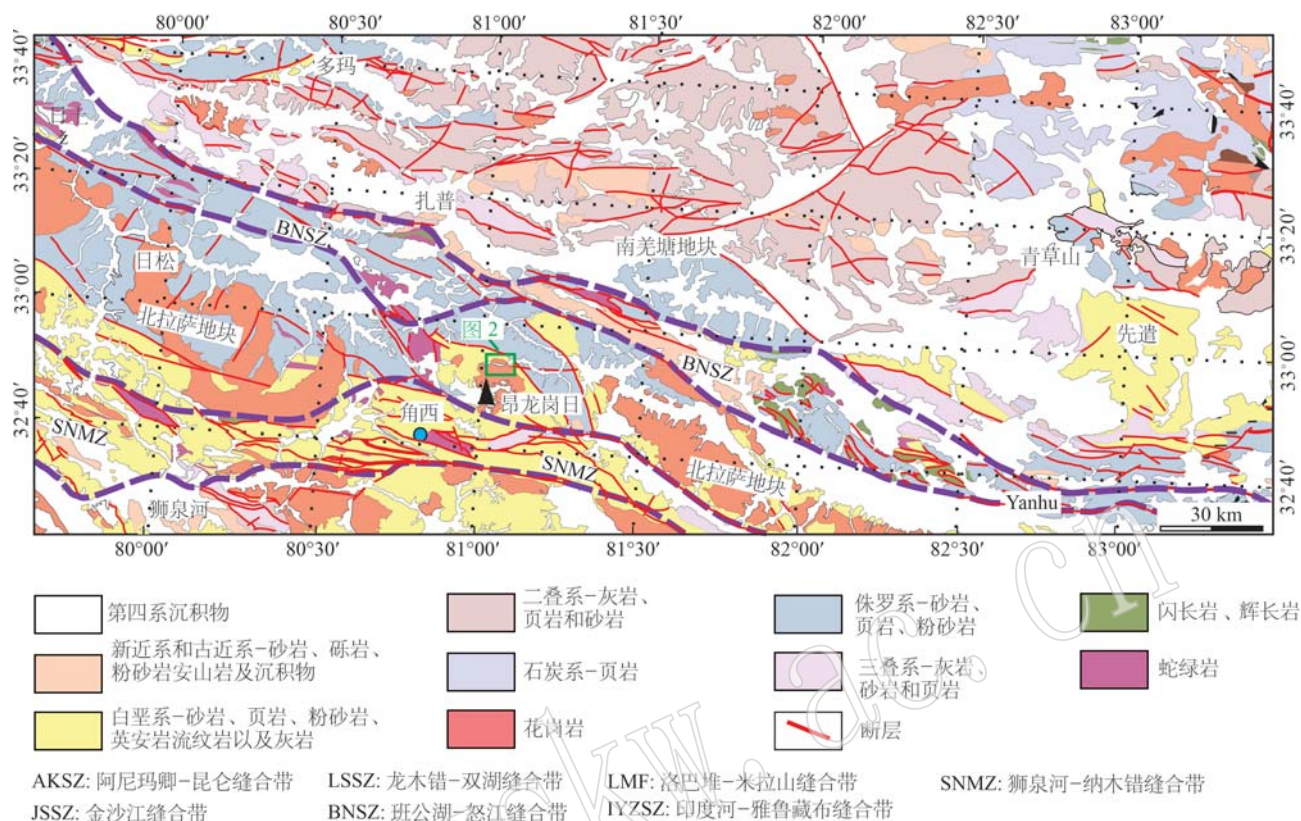


图 1 研究区区域地质简图[据 Wang 等(2018)修改]

Fig. 1 Regional geological map of the study area (modified by Wang *et al.*, 2018)

去申拉组则发育大量与岛弧有关的火山岩(朱弟成等, 2006; 马国林等, 2010; 吴建亮等, 2019a, 2021; 刘畅等, 2022)。区内断裂构造较为发育, 主体为北西向和东西向构造, 次为北东向构造, 形成了区内基本构造格架。研究区内大规模岩浆活动以白垩纪中基性火山岩和酸性花岗岩为主, 其正的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值表明北拉萨地块具有明显的新生地壳性质(侯增谦等, 2018)。

研究区中新世花岗岩主要分布在阿里地区昂龙岗日雪山主峰北缘,出露岩性为二长花岗岩,围岩为下白垩统去申拉组板岩夹变砂岩(图2)。区内中新世花岗岩可分为细粒白云母二长花岗岩和中细粒二长花岗岩,二者呈渐变过渡接触。

中细粒二长花岗新鲜面呈灰白色(图 3a),具中细粒花岗结构,块状构造。岩石由斜长石(33%±)、钾长石(39%±)、石英(23%)、少量黑云母(3%±)以及白云母(2%±)组成(图 3b),粒径在 0.2~5 mm 之间。其中斜长石为更长石,少量中长石,呈半自形板状,少量具环带结构,部分有弱的绢云母、黏土蚀变;钾长石为正长石,他形粒状,部分包含斜长石、

黑云母形成包含结构,或半包含斜长石形成嵌晶结构;石英为他形粒状,粒径与长石相近,部分形成集合体的不规则团状,或呈充填状分布,少量交代钾长石形成孔状;黑云母为褐色片状,充填状分布,局部有绿泥石蚀变;白云母为细片状。

细粒白云母二长花岗岩呈浅灰白色,具细粒花岗岩结构,块状构造(图 3d)。岩石由斜长石(32%±)、钾长石(40%±)、石英(23%)、白云母(5%±)组成(图 3e),粒径在 0.2~2 mm 之间。其中斜长石为更长石,少量中长石,呈半自形板状,少量具环带结构,有弱的绢云母、黏土蚀变,少量中心蚀变相对强烈;钾长石为正长石,部分半包含斜长石形成嵌晶结构;石英为他形粒状,充填于长石之间,少量交代钾长石呈孔状,蚀边状;白云母为细片状,半自形为主。

此外, 昂龙岗日地区的细粒白云母二长花岗岩中还见少量椭圆状、不规则状暗色微粒包体发育。这些暗色包体直径多在 3~5 cm 之间, 未见明显定向排列。一部分暗色微粒包体与寄主岩的接触关系截然, 其色率、粒度与寄主岩差异明显, 有时在暗色微粒包体一侧还能见到冷凝边(图 3c); 另一部分暗色

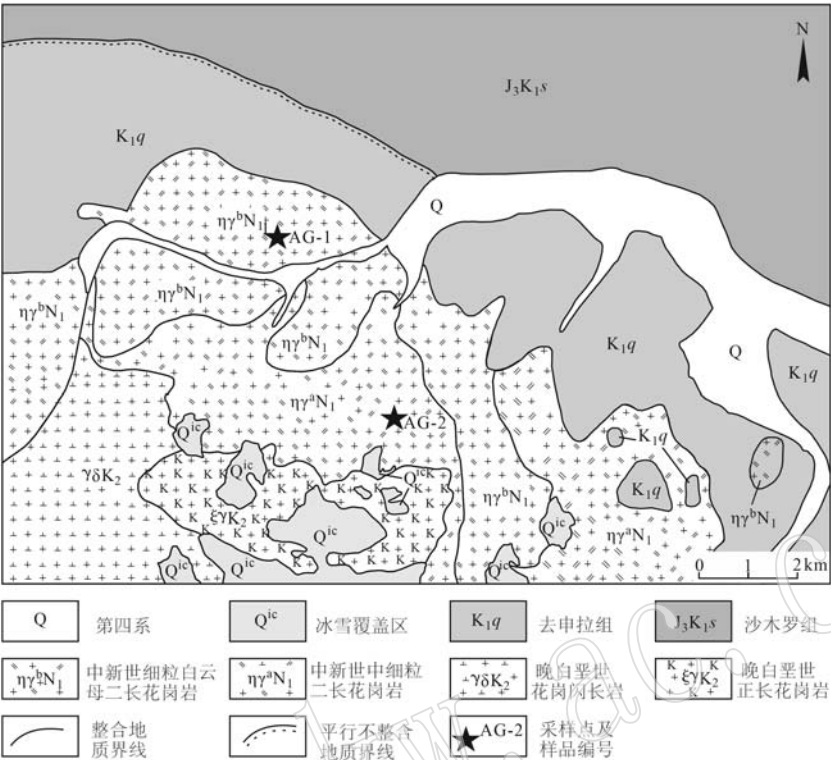


图 2 研究区地质简图
Fig. 2 Geological map of the study area

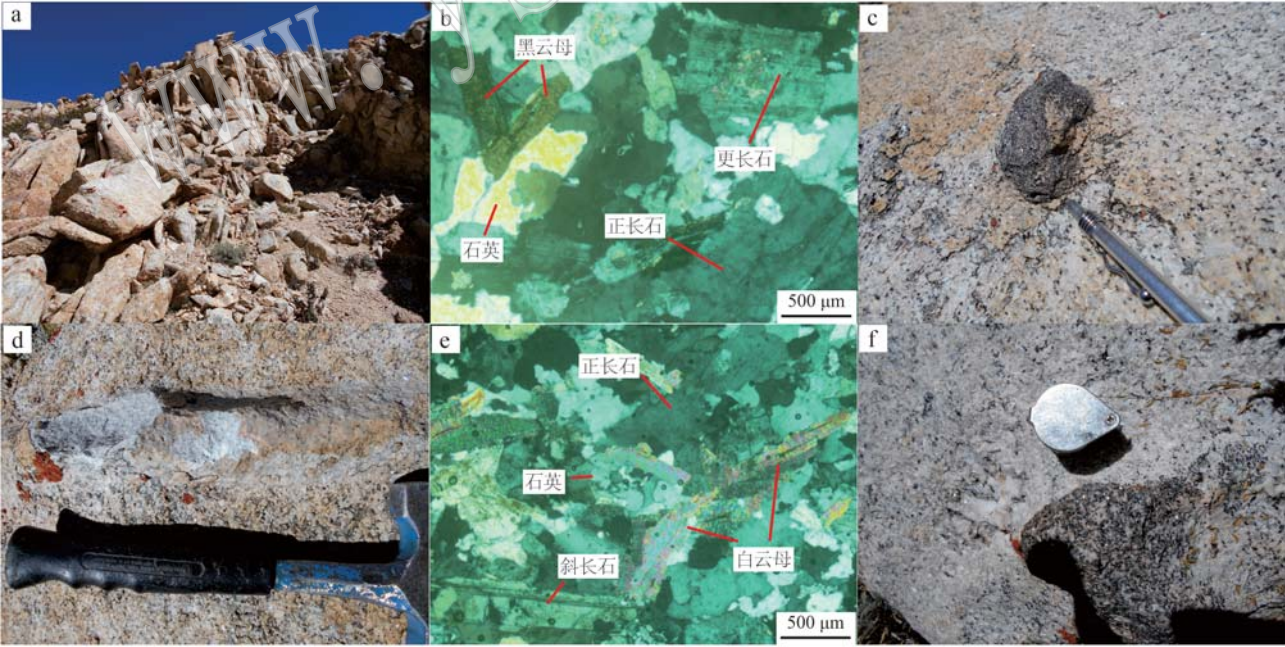


图 3 昂龙岗日地区中新世中细粒二长花岗岩野外特征(a)、中细粒二长花岗岩镜下(正交偏光)特征(b)、中细粒二长花岗岩暗色包体特征(c)、细粒白云母二长花岗岩野外特征(d)、细粒白云母二长花岗岩镜下(正交偏光)特征(e)、细粒白云母二长花岗岩暗色包体特征(f)
Fig. 3 The field characteristics of Miocene medium-fine grained monzonitic granite (a), the microscopic (orthogonal polarization) characteristics of medium-fine grained monzonitic granite (b), the dark inclusion characteristics of medium-fine grained monzonitic granite (c), the field characteristics of fine-grained muscovite monzonitic granite (d), the microscopic (orthogonal polarization) characteristics of fine-grained muscovite monzonitic granite (e), the dark inclusion characteristics of fine-grained muscovite monzonitic granite (f) in Anglongangri area

微粒包体与寄主岩呈渐变过渡,其色率和粒度差异相对较小,两者之间偶见微小的过渡带(图3f)。

2 样品采集制备及分析方法

本次研究用于锆石 U-Pb 测年、主量、微量和稀土元素分析的细粒白云母二长花岗岩(AG1)和中细粒二长花岗岩(AG2)均采于西藏日土县热邦乡昂龙岗日主峰北部(图2)的地表基岩露头,岩石较为新鲜。样品破碎及锆石分选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。锆石阴极发光照相、LA-ICP-MS 分析在武汉上谱科技有限公司测试完成。CL 照相在 JEOL-JXA-8100 电子探针仪器上拍摄,锆石 U-Pb 同位素和微量元素含量分析采用 Micro Las 公司的 GeoLas2005 准分子激光剥蚀系统在美国 Agilent 公司的 Agilent7500a 型 ICP-MS 仪器上进行。锆石年龄以国际标准锆石 91500 作为外标,以 GJ-1 作为内标样品。激光束斑直径 32 μm ,分析方法参见 Liu 等(2008)。单个数据点误差为 1σ ,样品年龄加权平均置信度为 2σ ,置信水平为 95%。主量和微

量元素分析在澳实分析检测集团-广州澳实矿物实验室进行。主量元素试样先加入包含硝酸锂在内的助熔剂,充分混合后,高温熔融。熔融物倒入铂金模子形成扁平玻璃片后,再用荷兰生产的 Axios 仪器利用荧光光谱分析仪(XRF)测试分析测得;同时称取另一份试样放入马弗炉中,于 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 加热 1 小时。冷却后称重,样品加热前后的重量差即是烧失量。 Fe^{2+} 采用滴定法测得。微量和稀土元素分析先将试样加入到偏硼酸锂/四硼酸锂熔剂中,混合均匀,在 1 025 $^{\circ}\text{C}$ 以上的熔炉中熔化。熔液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸定容,再用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析测得。主量元素分析偏差优于 5%,微量元素分析偏差优于 10%。

3 年代学特征

细粒白云母二长花岗岩(AG1)的锆石晶型完好,多呈自形长柱状,少部分呈自形短柱状,长径 200~350 μm ,长宽比约为 1.5:1~3:1,发育清晰的韵律震荡环带(图4a)。细粒白云母二长花岗岩(AG1)

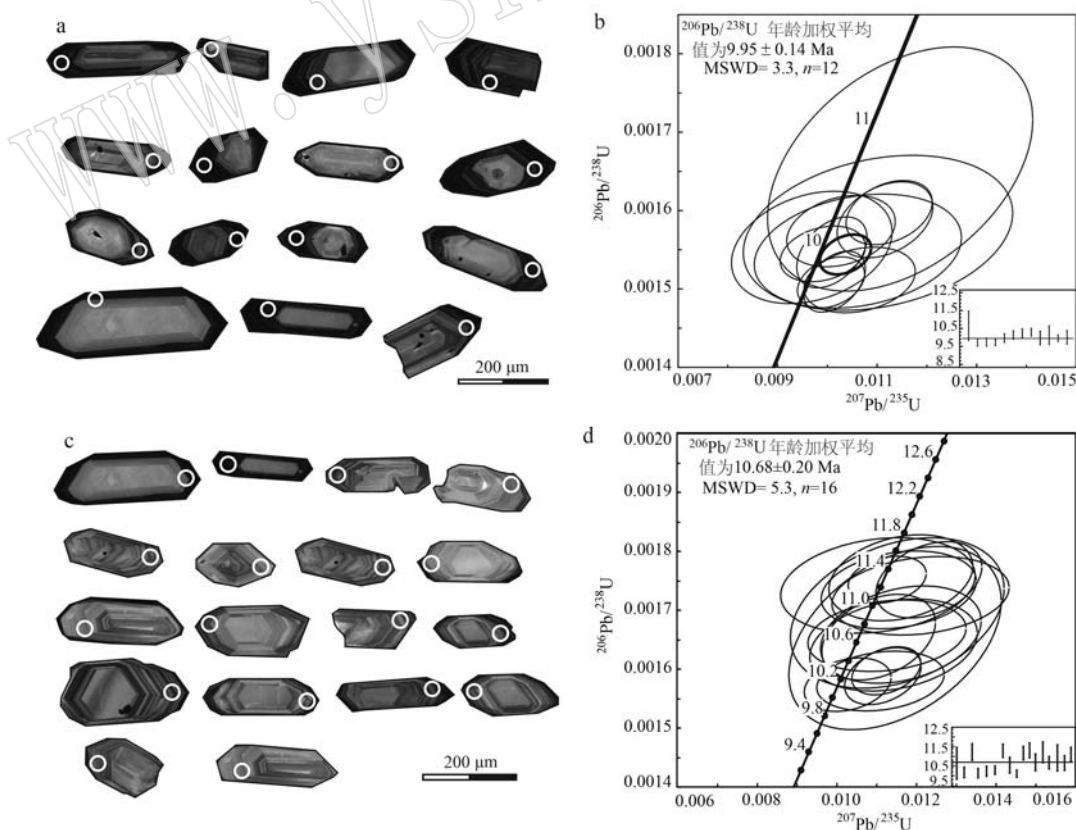


图4 研究区细粒白云母二长花岗岩(a、b)和中细粒二长花岗岩(c、d)锆石 U-Pb 谐和图解与频率分布直方图
Fig. 4 The zircon U-Pb concordant diagrams and frequency distribution histograms of fine-grained muscovite monzonitic granite (a, b) and medium-fine grained monzonitic granite (c, d) in the study area

共分析了 15 颗锆石的 15 个测点,结果显示 Th、U 含量分别为 $108 \times 10^{-6} \sim 2.073 \times 10^{-6}$ 和 $152 \times 10^{-6} \sim 4.540 \times 10^{-6}$,二者表现出良好的正相关性,Th/U 值为 0.13~0.89(表 1),明显大于 0.1,具有岩浆成因锆石的特征(Hoskin and Black, 2010)。所测的 15 个测点中,3 个测点(9、10、13)的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄不谐和,剔除以上 3 个测点,剩余 12 个测点均位于 U-Pb 谐和线上或其附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值分别为 9.95 ± 0.14 Ma(图 4b),为中新世。中细粒二长花岗岩(AG2)中锆石多呈自形-半自形粒状、宽板状、长柱状,粒径约 100~250 μm ,锆石韵律环带清晰可见,环带宽度不一,总体较为相近(图 4c),锆石的 Th/U 值变化于 0.14~0.89 之间(表 1),亦表现出典型岩浆成因锆石的特征(Hoskin and Black, 2010)。中细粒二长花岗岩(AG2)的 16 个测点均落在谐和线上,计算得出谐和年龄为 10.68 ± 0.2 Ma,亦为中新世(图 3d),与昂龙岗日地区西南部角西钨矿的黑云母二长花岗岩(14.1 ± 0.3 Ma, Wang *et al.*, 2018)和花岗斑岩(13.8 ± 0.33 Ma,王勇等, 2019; Wang *et al.*, 2020)的成岩年龄在误差范围内较为一致。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素特征

研究区细粒白云母二长花岗岩和中细粒二长花岗岩样品的岩石地球化学分析数据如表 2 所示。区内细粒白云母二长花岗岩样品的 SiO_2 含量为 72.81%~74.74%(均值 73.36%),属于酸性花岗岩; Na_2O 含量为 3.41%~3.75%(均值为 3.54%), K_2O 含量为 4.30%~4.68%(均值 4.51%),全碱 ALK($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)为 8.18%~8.50%(均值为 8.31%); $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值绝大部分普遍在 1.22~1.45(均值 1.31),钾相对钠明显富集,属于高钾钙碱性系列岩石(图 5a),有向钾玄岩过渡的趋势; Al_2O_3 含量为 14.35%~14.83%(均值 14.58%),里特曼指数(σ)为 2.22~2.45(均值 2.30),铝饱和指数 A/CNK 为 1.08~1.12(均值 1.10),CIPW 刚玉分子数大于 1%,为过铝质岩石(图 5b);样品具有较低的 MgO(0.14%~0.29%,均值 0.26%)、CaO(0.79%~1.37%,均值 1.20%) 和 Fe_2O_3 (0.91%~1.58%,均值 1.37%)。中细粒二长花岗岩样品的 SiO_2 含量介于 72.35%~73.24%之间,平均为 72.84%。 K_2O 介

于 4.39%~5.02%之间,平均含量为 4.64%; Na_2O 介于 3.46%~3.72%之间,平均含量为 3.58%;全碱含量 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 7.99%~8.09%,平均为 8.05%, Na_2O 含量明显小于 K_2O 含量, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值在 1.15~1.29 之间,平均为 1.25;里特曼指数介于 2.11~2.18 之间,平均值为 2.15,属钙碱性岩石,在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图中也位于高钾钙碱性系列岩石区(图 5a)。样品的 Al_2O_3 含量较高,介于 14.53%~14.76%之间,平均为 14.70%,铝饱和指数 A/CNK 介于 1.11~1.14 之间,平均为 1.12,A/NK 介于 1.35~1.38 之间,平均值为 1.37,CIPW 刚玉分子数大于 1,属于弱过铝质-过铝质系列(图 5b);CaO 含量介于 1.26%~1.44%之间,平均为 1.32%;MgO 含量介于 0.26%~0.33%之间,平均为 0.30%。总体而言,昂龙岗日地区的细粒白云母二长花岗岩和中细粒二长花岗岩均具有高硅、富铝、富钾、富碱、低钙、低镁的特征,CIPW 刚玉分子数均大于 1%,均为高钾钙碱性弱过铝质-过铝质系列岩石。

4.2 稀土和微量元素特征

研究区细粒白云母二长花岗岩样品的稀土元素总量 ΣREE 在 $135.27 \times 10^{-6} \sim 147.47 \times 10^{-6}$ 之间,均值 142.82×10^{-6} ,LREE 在 $128.83 \times 10^{-6} \sim 141.01 \times 10^{-6}$ 之间,HREE 在 $6.06 \times 10^{-6} \sim 6.50 \times 10^{-6}$ 之间,LREE/HREE 值在 20.0~22.1 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 40.6~51.4 之间, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值介于 5.0~5.4 之间,轻重稀土元素分异十分明显。中细粒二长花岗岩样品的稀土元素总量在 $135.94 \times 10^{-6} \sim 146.54 \times 10^{-6}$ 之间,均值 140.48×10^{-6} ,LREE 在 $130.29 \times 10^{-6} \sim 140.42 \times 10^{-6}$ 之间,HREE 在 $5.65 \times 10^{-6} \sim 6.59 \times 10^{-6}$ 之间,LREE/HREE 值在 20.2~23.1 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 43.3~53.2 之间, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值介于 4.8~5.3 之间,轻重稀土元素分异亦十分明显,在球粒陨石标准化稀土元素图解上(图 6a)表现为轻稀土元素明显富集的右倾特征。两类花岗岩的 Eu 均显示出中等负 Eu 异常(细粒白云母二长花岗岩 δEu 在 0.54~0.61 之间,均值 0.57;中细粒二长花岗岩 δEu 在 0.56~0.65 之间,均值 0.59),说明岩浆源区可能有斜长石残留或经历了部分斜长石的分离结晶作用。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6b)上,研究区花岗岩均呈现出多峰多谷的右倾形态,各元素分布模式较为接近,均富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素,亏损 Nb 高场强元素,相对富集 Hf、Zr 等高场强元素,Sr、Ba、P、Ti 等则表现出明显的

表 1 研究区花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb zircons analysis results of granite in Anglongangri area

测点号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值				年龄/Ma			
	Pb _{total}	²³² Th	²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	$\pm 1\sigma$	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	$\pm 1\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	$\pm 1\sigma$	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	$\pm 1\sigma$
细粒白云母二长花岗岩											
AG1-1	0.39	135	152	0.011 5	0.001 1	0.001 7	0.000 1	0.405 2	433	353	11.6
AG1-2	4.35	518	1 827	0.010 1	0.000 3	0.001 5	0.000 0	0.424 1	200	56	10.3
AG1-3	7.91	586	4 467	0.010 6	0.000 5	0.001 5	0.000 0	0.263 4	261	100	10.8
AG1-4	13.44	2 073	7 272	0.010 1	0.000 3	0.001 5	0.000 0	0.322 6	124	67	10.2
AG1-5	3.28	108	289	0.010 1	0.000 3	0.001 5	0.000 0	0.418 2	64.9	135	10.2
AG1-6	6.06	192	392	0.010 3	0.000 4	0.001 6	0.000 0	0.272 1	83.4	107	10.4
AG1-7	8.55	861	4 540	0.011 2	0.000 4	0.001 6	0.000 0	0.353 8	243	78	11.3
AG1-8	11.00	654	2 827	0.011 2	0.000 4	0.001 6	0.000 0	0.332 4	239	72	11.4
AG1-11	1.39	171	736	0.010 6	0.000 9	0.001 5	0.000 0	0.239 3	195	193	10.7
AG1-12	0.94	219	455	0.011 0	0.001 1	0.001 6	0.000 0	0.255 9	302	261	11.1
AG1-14	4.96	416	1 130	0.009 9	0.000 3	0.001 5	0.000 0	0.265 2	20.5	85	10.0
AG1-15	1.74	276	934	0.009 7	0.000 7	0.001 6	0.000 0	0.276 8	31.6	181	9.8
中细粒二长花岗岩											
AG2-1	0.39	135	152	0.011 5	0.001 1	0.001 7	0.000 1	0.405 2	433	353	11.6
AG2-2	6.70	503	3 349	0.010 4	0.000 3	0.001 6	0.000 0	0.411 8	109	57	10.5
AG2-3	6.71	595	3 662	0.011 1	0.000 7	0.001 6	0.000 0	0.223 2	233	145	11.2
AG2-4	0.53	111	239	0.011 5	0.001 6	0.001 7	0.000 1	0.244 1	589	418	11.6
AG2-5	2.67	316	1 313	0.011 0	0.001 0	0.001 7	0.000 0	0.210 5	53.8	200	11.1
AG2-6	6.28	108	289	0.010 1	0.000 3	0.001 5	0.000 0	0.418 2	64.9	135	10.2
AG2-7	4.06	192	1 392	0.010 3	0.000 4	0.001 6	0.000 0	0.272 1	83.4	107	10.4
AG2-8	6.05	866	2 823	0.012 3	0.000 5	0.001 8	0.000 0	0.342 8	257	106	12.4
AG2-9	1.39	171	736	0.010 6	0.000 9	0.001 5	0.000 0	0.239 3	195	193	10.7
AG2-10	0.94	219	455	0.011 0	0.001 1	0.001 6	0.000 0	0.255 9	302	261	11.1
AG2-11	1.74	276	934	0.009 7	0.000 7	0.001 6	0.000 0	0.276 8	31.6	181	9.8
AG2-12	3.78	309	2 022	0.011 6	0.000 8	0.001 7	0.000 0	0.226 4	176	191	11.7
AG2-13	4.02	200	1 200	0.011 6	0.000 7	0.001 8	0.000 0	0.267 9	106	167	11.7
AG2-14	4.54	633	1 015	0.011 3	0.000 4	0.001 8	0.000 0	0.261 3	35.3	85	11.4
AG2-15	1.62	248	822	0.011 9	0.001 0	0.001 7	0.000 0	0.278 3	350	237	12.0
AG2-16	1.43	222	753	0.010 8	0.001 5	0.001 8	0.000 1	0.210 9	100	328	10.9

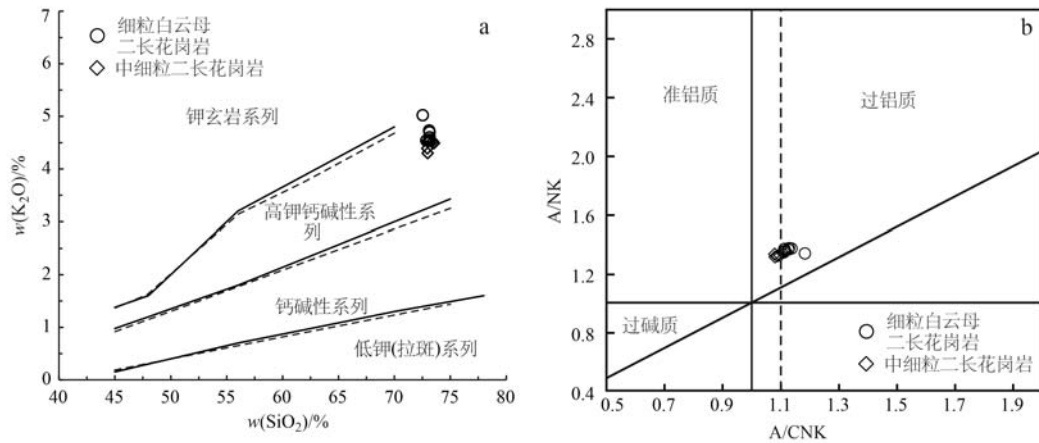


图 5 昂龙岗日地区中新世花岗岩 K₂O-SiO₂ 图解(a, 据 Peccherillo and Taylor, 1976)和 A/NK-A/CNK 图解 (b, Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 5 K₂O-SiO₂ diagram (a, after Peccherillo and Taylor, 1976) and A/NK-A/CNK diagram (b, after Maniar and Piccoli, 1989) of granite from the Anglonggangri area

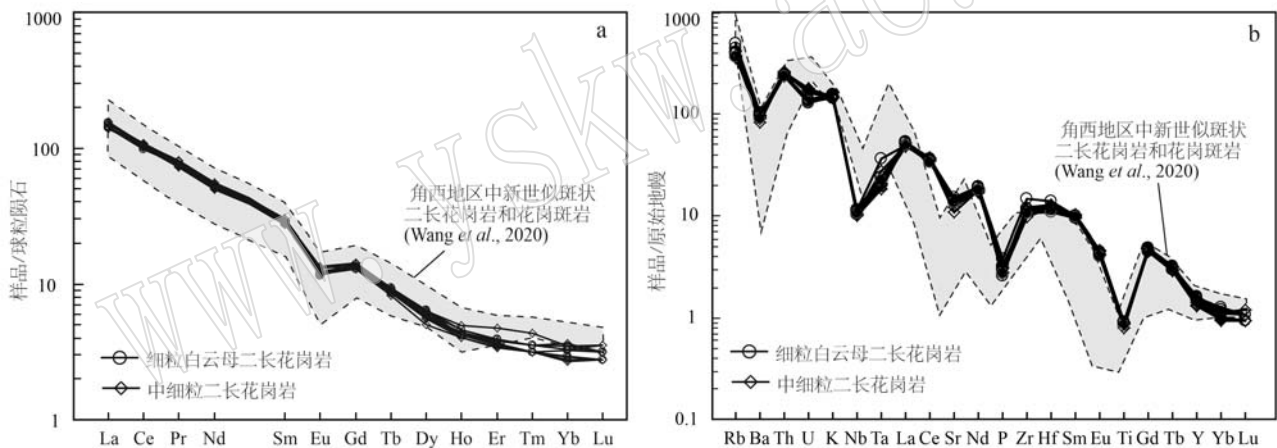


图 6 研究区花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (标准化数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element patterns(a) and chondrite-normalized REE patterns(b) of granite from the Anglonggangri area (standardized data cited from Sun and McDonough, 1989)

负异常,与角西地区中新世似斑状二长花岗岩和花岗斑岩表现出较为相近的分布模式(图 6)。

Nb 元素负异常表明岩浆源区存在金红石、榍石等矿物残留相;P、Ti 元素亏损则说明岩浆经历了磷灰石和钛铁矿等矿物的分离结晶作用。

5 讨论

5.1 岩石类型

镜下观察发现,研究区花岗岩黑云母部分发生

了少量的绿泥石化蚀变,可能导致了 Ba、K、Rb 等活性元素发生了一定的迁移和变化。Xiao 和 Chen (2020)研究表明黑云母绿泥石化过程中,黑云母中 Sc、Sr、Si、V、Li、K、Nb、Ba、Rb、Ti、Cl、Na、Sn 以及 Cu 等元素大部分没有进入绿泥石中,而是进入热液流体或者其他矿物相中。整体而言,研究区岩石样品烧失量 LOI 介于 0.42%~0.81%之间(表 2),岩石整体较为新鲜,黑云母含量较少,本区较低程度绿泥石化蚀变对岩石类型、岩石成因等讨论的影响十分有限。

表2 研究区花岗岩主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)组成
Table 2 Major($w_B/\%$), trace and REE($w_B/10^{-6}$) composition of granites in Anglonggangri area

样品 编号	细粒白云母二长花岗岩						中细粒二长花岗岩						
	AG1-01	AG1-02	AG1-03	AG1-04	AG1-05	AG1-06	AG2-01	AG2-02	AG2-03	AG2-04	AG2-05	AG2-06	AG2-07
SiO ₂	72.81	73.16	73.19	73.37	72.91	74.74	73.09	72.83	72.54	73.06	73.24	72.76	72.35
Al ₂ O ₃	14.73	14.40	14.51	14.64	14.83	14.35	14.76	14.72	14.53	14.68	14.73	14.75	14.75
CaO	1.37	1.25	1.28	1.22	1.28	0.79	1.29	1.37	1.31	1.33	1.26	1.44	1.26
TFe ₂ O ₃	1.58	1.45	1.50	1.31	1.48	0.91	1.52	1.51	1.47	1.42	1.50	1.48	1.50
FeO	1.34	1.20	1.25	1.08	1.21	0.74	1.24	1.27	1.24	1.15	1.22	1.20	1.20
MgO	0.29	0.27	0.29	0.26	0.29	0.14	0.31	0.31	0.30	0.26	0.28	0.31	0.33
TiO ₂	0.17	0.16	0.17	0.17	0.17	0.08	0.18	0.18	0.19	0.18	0.18	0.20	0.19
K ₂ O	4.54	4.49	4.53	4.49	4.30	4.68	4.39	4.51	4.60	4.73	4.70	4.54	5.02
Na ₂ O	3.53	3.53	3.51	3.51	3.75	3.41	3.62	3.55	3.51	3.67	3.50	3.72	3.46
MnO	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
P ₂ O ₅	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
LOI	0.55	0.59	0.53	0.70	0.73	0.81	0.86	0.58	0.53	0.42	0.52	0.45	0.69
Total	99.17	99.93	100.11	99.51	99.85	99.74	99.76	99.47	99.69	99.85	99.92	100.21	99.75
Mg [#]	26.67	26.95	27.70	28.22	27.97	23.36	28.78	28.91	28.79	26.62	27.00	29.33	30.36
σ	2.22	2.35	2.22	2.29	2.29	2.45	2.18	2.13	2.14	2.11	2.17	2.13	2.18
ALK	8.18	8.41	8.19	8.32	8.27	8.50	8.09	8.06	8.07	8.01	8.06	7.99	8.08
K ₂ O/Na ₂ O	1.31	1.29	1.34	1.23	1.22	1.45	1.29	1.27	1.29	1.28	1.15	1.21	1.27
A/NK	1.35	1.31	1.36	1.32	1.34	1.32	1.37	1.35	1.36	1.38	1.37	1.38	1.37
A/CNK	1.10	1.08	1.12	1.09	1.08	1.10	1.11	1.11	1.11	1.14	1.13	1.13	1.11
La	35.8	36.5	34.3	33.4	36.9	37.0	33.8	33.1	34.1	33.3	33.7	35.4	36.0
Ce	63.4	64.7	61.4	59.5	65.2	65.3	62.3	62.7	64.8	63.7	61.8	65.4	66.2
Pr	7.45	7.46	7.15	7.12	7.73	7.64	6.98	6.95	7.17	7.05	6.84	7.30	7.62
Nd	25.3	25.3	24.2	23.8	26	25.9	23.5	24.0	24.7	24.4	23.0	23.8	25.2
Sm	4.37	4.35	4.22	4.34	4.46	4.39	4.17	4.40	4.58	4.24	4.23	4.32	4.62
Eu	0.70	0.68	0.69	0.67	0.72	0.76	0.77	0.70	0.75	0.70	0.72	0.69	0.78
Gd	2.79	2.88	2.67	2.87	2.82	2.91	2.75	2.77	2.93	2.80	2.66	2.94	2.93
Tb	0.34	0.35	0.32	0.34	0.32	0.34	0.34	0.32	0.32	0.33	0.31	0.35	0.34
Dy	1.60	1.63	1.53	1.57	1.59	1.62	1.44	1.47	1.41	1.61	1.27	1.47	1.41
Ho	0.24	0.26	0.24	0.26	0.24	0.25	0.25	0.24	0.24	0.28	0.23	0.25	0.23
Er	0.60	0.65	0.59	0.64	0.63	0.6	0.63	0.59	0.59	0.78	0.56	0.60	0.57
Tm	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.11	0.08	0.08	0.08
Yb	0.50	0.56	0.55	0.59	0.62	0.59	0.56	0.50	0.46	0.59	0.47	0.50	0.49
Lu	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.07	0.07	0.09	0.07	0.07	0.07
Rb	261	255	286	235	251	316	236	240	236	244	266	241	224
Y	6.9	6.4	6.4	7.8	5.9	10.0	7.0	6.1	7.1	7.2	7.0	7.3	7.3
Ba	679	685	675	636	706	722	677	581	625	650	669	645	691
Th	20.2	20.7	19.8	20	20.5	20.5	20.6	21.5	21.8	20.7	20.2	21.0	22.3
U	2.70	2.82	2.73	2.76	2.88	2.98	2.83	3.40	3.74	7.89	3.74	3.68	3.52
Nb	7.4	7.7	8.2	7.6	8.1	7.9	7.4	8.0	7.3	7.9	7.6	7.9	7.2
Sr	290	291	292	283	323	304	287	231	258	280	288	292	292
P	280	250	310	260	360	290	300	260	270	200	320	300	290
Zr	120	123	121	118	166	132	126	109	121	122	121	134	129
Hf	3.5	3.5	3.4	3.4	4.3	3.7	4.0	3.7	3.7	3.9	3.8	4.0	4.0
Ti	1 200	1 100	1 200	1 100	1 200	1 200	1 120	1 030	1 110	1 160	1 120	1 150	1 180
Ga	21.9	21.7	22	21.4	22	22.6	21.8	22.7	22.3	22.8	22.7	22.7	22.4
Σ REE	143.24	145.49	138.02	135.27	147.4	147.47	137.67	137.89	142.2	139.98	135.94	143.17	146.54
LREE	137.02	138.99	131.96	128.83	141.01	140.99	131.52	131.85	136.1	133.39	130.29	136.91	140.42
HREE	6.22	6.5	6.06	6.44	6.39	6.48	6.15	6.04	6.1	6.59	5.65	6.26	6.12
LREE/HREE	22.0	21.4	21.8	20.0	22.1	21.8	21.4	21.8	22.3	20.2	23.1	21.9	22.9
(La/Yb) _N	51.4	46.8	44.7	40.6	42.7	45.0	43.3	47.5	53.2	51.4	50.8	52.7	51.4
(La/Sm) _N	5.3	5.4	5.2	5.0	5.3	5.4	5.2	4.9	4.8	5.1	5.3	5.0	5.3
δ Eu	0.57	0.55	0.58	0.54	0.58	0.61	0.65	0.57	0.58	0.58	0.61	0.56	0.60
$t_{Zr}/^{\circ}\text{C}$	768	768	770	765	793	774	772	761	770	773	770	780	775

注: $t_{Zr}/^{\circ}\text{C} = 12\ 900/(\ln D + 0.85 M + 2.95) - 273.15$; 其中 D 是指纯锆石中 Zr 含量($496\ 000 \times 10^{-6}$)与熔体中 Zr 浓度的比值; $M = (2\ \text{Ca} + \text{K} + \text{Na})/(\text{Si} + \text{Al})$; 令 $\text{Ca} + \text{K} + \text{Na} + \text{Si} + \text{Al} + \text{P} + \text{Fe} + \text{Mg} = 1$, Ca、K、Na、Si、Al、P、Fe、Mg 均为阳离子摩尔分数。

大陆地壳中的花岗岩由于岩浆源区性质、熔融条件和形成机制的差异可分为I型、S型、M型和A型等4类(Chappell, 1999; Frost and Frost, 2010),也是国内外最为常见的分类方案。其中M型花岗岩分布较少,其 K_2O 、Rb的含量极低,且几乎不含钾长石等高钾矿物(Coleman and Peterman, 1975; Amri *et al.*, 1996)。研究区细粒白云母二长花岗岩和中细粒二长花岗岩样品具有较高的 K_2O (4.30%~5.02%)和Rb (224×10^{-6} ~ 316×10^{-6})含量,发育大量的钾长石,明显与M型花岗岩特征不同。一般情况下,I型、S型以及A型花岗岩具有不同的矿物组成和地球化学特征,但在分异程度较高的情况下,上述3种花岗岩的矿物组成和地球化学特征都趋近于低共结的花岗岩,因此需要利用相关的偏基性岩石、形成温度以及综合地球化学图解进行判别(King *et al.*, 1997; Chappell, 1999; 吴福元等, 2007)。研

究区花岗岩的10 000 Ga/Al在2.93~3.19之间,符合A型花岗岩>2.6的范围(Whalen *et al.*, 1987),但其 $Zr+Nb+Y+Ce$ 在 186.1×10^{-6} ~ 246.6×10^{-6} 之间,明显低于A型花岗岩的最低下限(Whalen *et al.*, 1987);同时其较低的 FeO^T/MgO 值(4.09~4.91)也远低于A型花岗岩($FeO^T/MgO = 13.4$, Whalen *et al.*, 1987),也不发育A型花岗岩标志性的碱性暗色矿物,在 $(K_2O+Na_2O)/CaO-(Zr+Nb+Y+Ce)$ 图解上(图7a)位于未分异的M-S-I型花岗岩范围内。此外,A型花岗岩的一大特征是该类岩石的形成温度较高(吴福元等, 2007)。目前计算花岗岩的形成温度常用的方法是锆石饱和温度计算,其基本原理是利用Zr元素在岩浆中的含量与温度的相关性,而其他因素对Zr的分配系数没有明显影响(Miller *et al.*, 2003),可近似地代表花岗质岩石形成的温度。根据锆石饱和温度计(Watson and Harrison, 1983; Miller

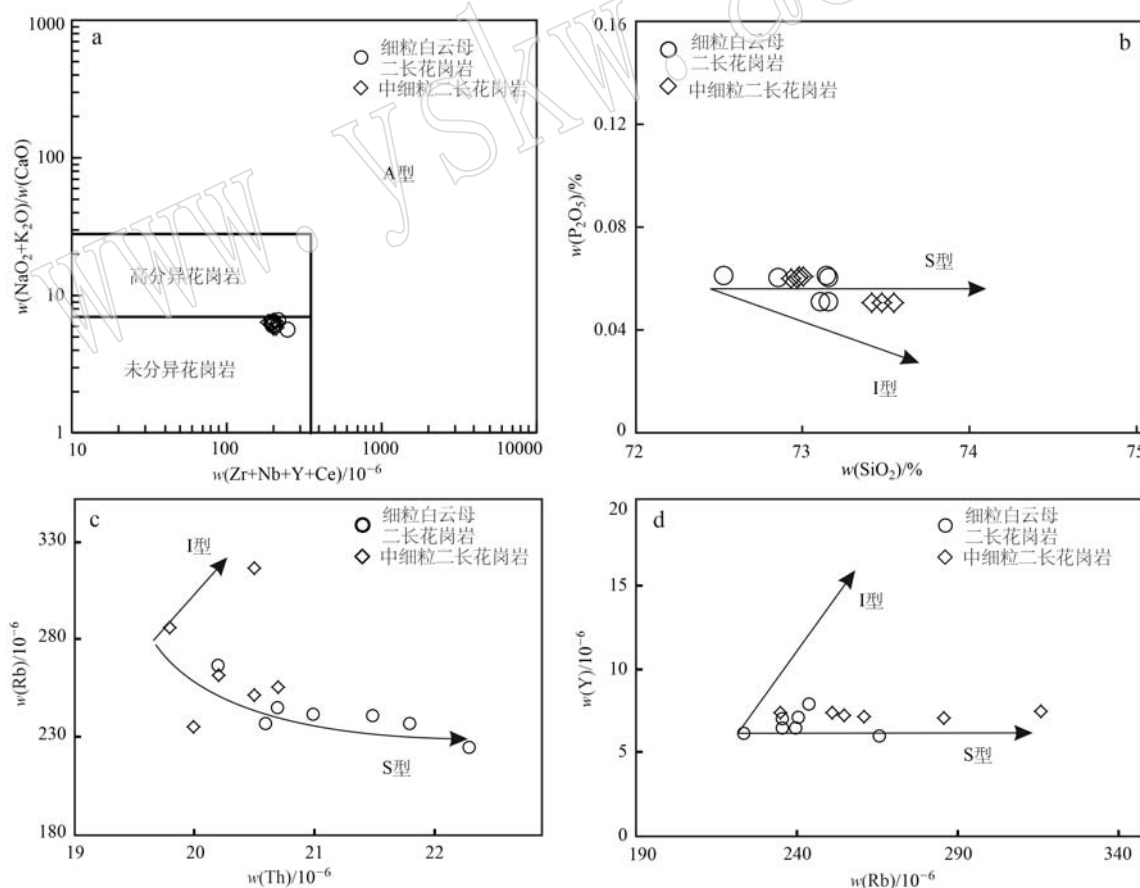


图7 昂龙岗日地区花岗岩 $(K_2O+Na_2O)/CaO-(Zr+Nb+Y+Ce)$ 图解(a, Whalen *et al.*, 1987)、 $P_2O_5-SiO_2$

图解(b, 李献华等, 2007)、Rb-Th图解(c, Li *et al.*, 2007)以及Y-Rb图解(d, Li *et al.*, 2007)

Fig. 7 $(K_2O+Na_2O)/CaO-(Zr+Nb+Y+Ce)$ diagram (a, Whalen *et al.*, 1987), $P_2O_5-SiO_2$ diagram (b, Li Xianhua *et al.*, 2007), Rb-Th diagram (c, Li *et al.*, 2007) and Y-Rb diagram (d, Li *et al.*, 2007) of granites in Anglonggangri area

et al., 2003) 计算得到研究区花岗岩的锆石饱和温度范围为 761~793℃ (表 2), 均值温度为 772℃, 明显低于普通 A 型花岗岩的形成温度 (839℃, Watson and Harrison, 1983; King *et al.*, 1997), 因此可以排除昂龙岗日地区中新世花岗岩属于 A 型花岗岩的可能性。

研究区细粒白云母二长花岗岩和中细粒二长花岗岩具有高硅 ($\text{SiO}_2 = 72.35\% \sim 74.74\%$)、富钾 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.15 \sim 1.45$, 均大于 1)、高铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.35\% \sim 14.83\%$) 和弱过铝质-过铝质 ($\text{A}/\text{CNK} = 1.08 \sim 1.14$) 的特征, CIPW 刚玉分子数均大于 1%, 与 S 型花岗岩典型特征相似, 其稀土元素球粒陨石标准化配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图解也与相邻角西地区的中新世 S 型花岗岩 (Wang *et al.*, 2020) 基本一致 (图 6), 且镜下也都发现了 S 型花岗岩的标志矿物之一的白云母。Chappell (1999) 提出 P_2O_5 、Th、Ba、Rb 等元素也是区分 I 型和 S 型花岗岩的可靠标志。S 型花岗岩中 P_2O_5 随 SiO_2 升高而逐渐升高或保持不变, 而 A 型和 I 型花岗岩的 P_2O_5 随 SiO_2 增加逐渐降低 (Chappell, 1999; 李献华等, 2007)。同时, Th、Y 元素在过铝质岩浆中优先进入独居石等矿物相, 因此在 S 型花岗岩中 Th、Y 含量随着 Rb 含量的增加而降低, 在 I 型花岗岩中则与 Rb 含量表现出正相关性 (李献华等, 2007), 因此可作为区分 I 型和 S 型花岗岩的有效判据。研究区二长花岗岩的 P_2O_5 含量随 SiO_2 含量升高基本保持不变 (图 7b), 在 Rb-Th 图解 (图 7c) 以及 Y-Rb 图解 (图 7d) 上也表现出 S 型花岗岩特征。综合来看, 昂龙岗日地区的中新世二长花岗岩应属于 S 型花岗岩。

5.2 岩石成因

在 Nb/Y-Th/Y 图解上, 研究区中新世二长花岗岩集中位于 $\text{Th}/\text{Nb} = 1$ 和 $\text{Th}/\text{Nb} = 10$ 趋势线之间, 接近于中下地壳的平均组分, 与上地壳的平均组成差异明显 (图 8a)。研究区中新世二长花岗岩样品的 Sr 含量为 $231 \times 10^{-6} \sim 323 \times 10^{-6}$ (均值 285.5×10^{-6} , 仅有样品 AG1-05 和 AG1-06 略大于 300×10^{-6} , 其余均低于 300×10^{-6}), Yb 含量为 $0.46 \times 10^{-6} \sim 0.62 \times 10^{-6}$, Y 含量为 $5.9 \times 10^{-6} \sim 10.0 \times 10^{-6}$, HREE 为 $5.65 \times 10^{-6} \sim 6.59 \times 10^{-6}$ 。Sr/Y 值在 30.40~54.75 之间, La/Yb 值介于 56.4~74.1 之间, 总体上具有相对低 Sr、高 Sr/Y、La/Yb 值, 极低的 Y、Yb 特征, 与张旗等 (2010) 划分的喜马拉雅型花岗岩较为相似 (图 8b), 说明其源区有石榴石残留 (张旗等, 2010)。张旗等

(2006, 2010) 研究认为花岗质熔体中 Sr/Y 值、Y 和 Yb 含量与岩石形成的压力和厚度明显相关; 在 0.8~1.2 GPa (700~800℃) 的中等压力环境下, 玄武岩熔体残留物中石榴子石和斜长石共存, 此时形成的熔体具有低 Sr 低 Yb、中等负 Eu 异常的特征; 当压力大于 1.2 GPa 时, 斜长石消失, 则形成高 Sr 低 Yb、无 Eu 异常特征的花岗岩。因此, 昂龙岗日地区这种相对低 Sr、高 Sr/Y、低 Yb、中等负 Eu 异常特征的中新世花岗岩与喜马拉雅型花岗岩均是来自于加厚地壳的深部 (张旗等, 2006; Chapman *et al.*, 2015)。已有实验岩石学结果表明石榴子石强烈富集重稀土元素 HREE (其中以 Yb 和 Yb 分配系数最大; Sisson, 1994), 角闪石则相对富集中稀土元素 MREE, 当源区主要残留相为石榴子石时, 其部分熔融产生的熔体具有右倾的 HREE 配分模式, 其 Y/Yb 值大于 10, $(\text{Ho}/\text{Yb})_N$ 值大于 1.2; 而角闪石作为源区的主要残留相部分熔融产生的熔体则具有较为平坦的 HREE 配分模式, 其 Y/Yb 值约等于 10, $(\text{Ho}/\text{Yb})_N$ 约等于 1 (Green, 1995)。昂龙岗日地区的中细粒二长花岗岩 $\text{Y}/\text{Yb} = 9.52 \sim 16.95$, $(\text{Ho}/\text{Yb})_N = 1.34 \sim 1.57$; 细粒白云母花岗岩 $\text{Y}/\text{Yb} = 12.20 \sim 15.43$, $(\text{Ho}/\text{Yb})_N = 1.16 \sim 1.44$; 具有相对右倾的 HREE 配分模式, 亦表明其源区残留相有石榴子石出现, 在 $(\text{La}/\text{Yb})_N - (\text{Yb})_N$ 图解 (图 8c) 上位于 10% 石榴子石角闪岩附近, 暗示其可能是下地壳含石榴子石角闪岩相的岩石经部分熔融形成的。在 $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ (图 8d)、 $\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$ (图 8e)、 $\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ 图解 (图 8f) 上均位于增厚下地壳部分熔融区域, 而与拆沉下地壳部分熔融和俯冲洋壳部分熔融产物有明显的区别。

热源也是花岗质岩浆形成的重要因素, 如软流圈地幔上涌和幔源岩浆底侵作用就可为花岗岩形成提供足够的热量 (吴福元, 2007; 张旗等, 2007), 而仅依靠地温梯度的增加则可能不会导致花岗岩发生部分熔融 (张旗等, 2014)。野外调查过程中, 我们在细粒白云母二长花岗岩中发现了少量椭圆状、不规则状暗色微粒包体发育 (图 3e、3f)。这些暗色包体的出现, 一方面表明幔源物质可为昂龙岗日地区花岗质岩浆的形成提供热来源的重要因素, 其较高的锆石饱和温度 (761~793℃) 也明显高于北喜马拉雅中新世淡色花岗岩 (645~745℃, Zhang *et al.*, 2019)。这种高温花岗质岩浆热的来源则很可能与软流圈上涌有关, 如辽东半岛早白垩世花岗岩 (吴福元, 2007); 另一方面花岗岩内部暗色包体常被认为是

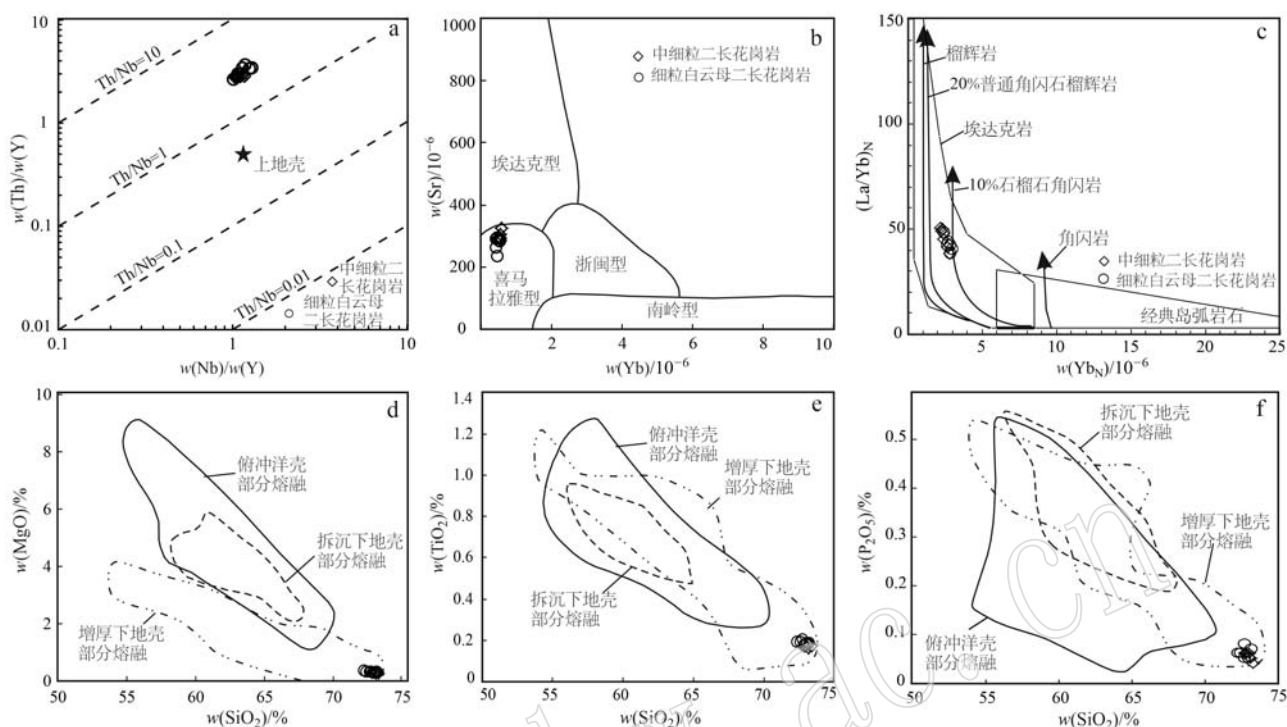


图8 昂龙岗日地区花岗岩 Th/Y-Nb/Y 图解(a, Chapman, 2015)、Sr-Y 图解(b, 张旗等, 2010)、 $(La/Yb)_N$ -Yb_N 图解(c, Defant and Drummond, 1990)、MgO-SiO₂ 图解(d, Green, 1995)、TiO₂-SiO₂ 图解(e, Green, 1995)以及 P₂O₅-SiO₂ 图解(f, Green, 1995)

Fig. 8 Th/Y-Nb/Y diagram (a, Chapman, 2015), Sr-Y diagram (b, Zhang Qi *et al.*, 2010), $(La/Yb)_N$ -Yb_N diagram (c, Defant and Drummond, 1990), MgO-SiO₂ diagram (d, Green, 1995), TiO₂-SiO₂ diagram (e, Green, 1995) and P₂O₅-SiO₂ diagram (f, Green, 1995)

岩浆混合作用的证据(吴福元等, 2007; 张旗等, 2007)。昂龙岗日地区内暗色微粒包体可分为两类, 其中第1类包体与寄主岩差异明显, 能观察到颜色很深冷边结构(图3e)的出现, 这种结构是在高温的基性岩浆作用注入到相对低温长英质岩浆房时, 温度显著降低发生淬火迅速冷却形成的, 同时也限制了包体与酸性熔体发生岩浆混合与化学置换(张旗等, 2007); 第2类暗色微粒包体与寄主岩呈渐变过渡的接触关系(图3f), 从包体内部到边部其色率逐渐降低, 反映包体岩浆与花岗岩之间温差较小, 发生了一定的混合作用和成分交换。在哈克图解(图9)中, 昂龙岗日地区中新世花岗岩的 TiO₂、MgO、CaO、Al₂O₃、^TFeO、Na₂O 等与 SiO₂ 表现出明显的线性关系, 指示岩浆发生了一定程度的混合作用。同时研究区二长花岗岩的 Zr/Hf 值(29.5~35.7)介于地幔和地壳(Zr/Hf=11.0~36.3; Green, 1995)之间, 亦能反映岩浆混合作用的存在(张超等, 2020)。限于花岗质岩浆自身的高黏度, 其与包体之间的岩

浆混合作用是有限的(张旗等, 2007), 故花岗岩中暗色包体既可以暗示岩浆混合作用的存在, 也能说明岩浆混合作用发生的有限(吴福元, 2007), 这从昂龙岗日地区二长花岗岩较低的 Mg[#] 和 Cr、Ni 含量也能反映出来。

5.3 构造背景

班-怒缝合带自晚白垩世竟柱山组磨拉石建造沉积以来就进入了陆内演化阶段(李华亮等, 2016; 吴建亮等, 2019b)。北拉萨地块新生代岩浆活动产于大陆碰撞环境已是不争的事实。莫宣学(2011)将青藏高原中新生代构造岩浆活动划分为3个阶段: 即碰撞前新特提斯洋板块俯冲阶段(约70/65 Ma)、同碰撞阶段(70/65~40 Ma)以及后碰撞阶段(约40 Ma至今)。自印度板块与亚洲板块碰撞以来, 青藏高原大致在50~25 Ma就已经通过构造加厚和岩浆作用增生加厚等两种机制作用形成了现今的巨厚型地壳(莫宣学, 2020)。Zhu等(2017)认为55~45 Ma之间青藏高原通过岩浆底侵作用使得地壳厚度达到

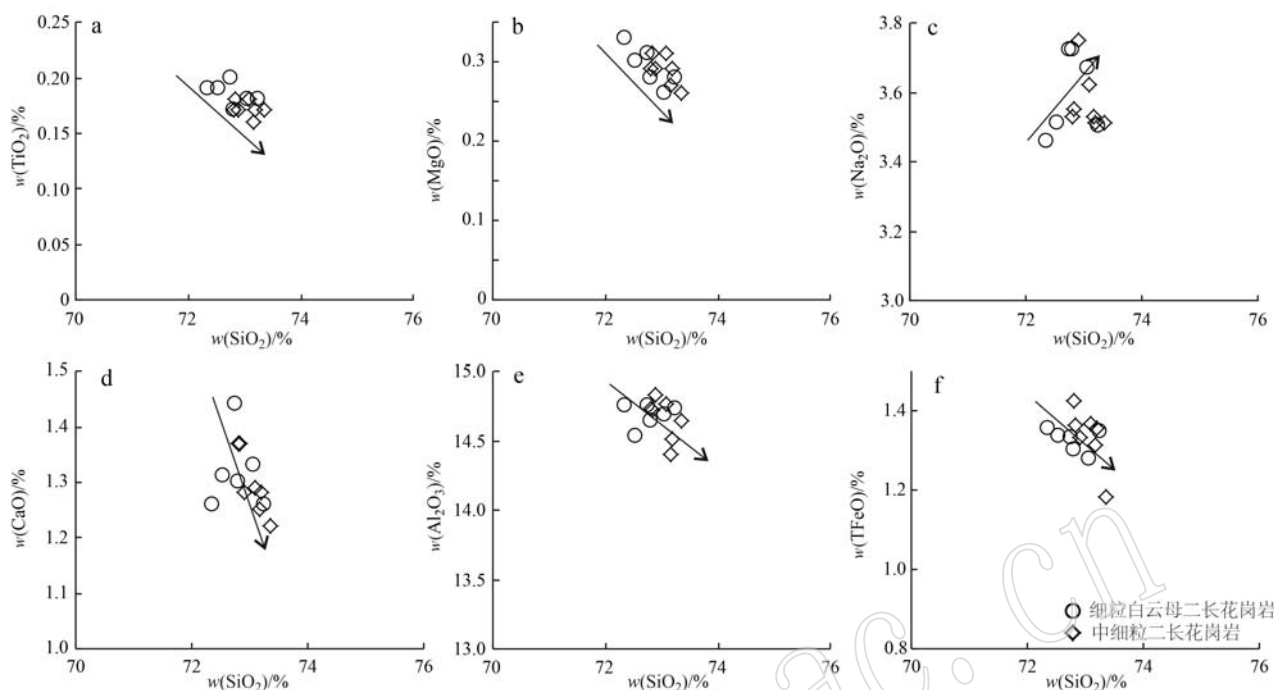


图9 昂龙岗日地区花岗岩主要元素哈克图解

Fig. 9 Harker diagram of major elements of granite in Anglonggangri area

了 $(58 \sim 50) \pm 10$ km, 在约 40~10 Ma (尤其是 20~10 Ma 达到) 则通过构造作用使得地壳厚度达到了 68 ± 12 km。侯增谦等 (2018) 利用锆石 Hf 同位素填图以及地球物理探测综合研究, 认为中拉萨地体地壳厚度约 70 km, 而研究区所在的北拉萨地体地壳厚度厚 65 km, 主体为新生的下地壳, 其形成与 76 Ma 前班公湖-怒江缝合带双向俯冲和弧岩浆大规模垂向注入有关 (Hou *et al.*, 2015)。进入后碰撞期 (约 40 Ma) 以后, 拉萨地块在经历了 40~26 Ma 的岩浆活动间歇期后发育了分布广泛的钾质-超钾质火山岩 (25~8 Ma)、埃达克质岩石 (25~12 Ma) 以及过铝质含白云母花岗岩 (24~18 Ma) (莫宣学, 2020) 等有地幔物质参与的岩浆作用产物。岩石学和地球化学数据研究结果表明, 印度板块北缘在 25~8 Ma 之前就已经低角度俯冲到研究区所在的北拉萨西部的岩石圈之下的班公湖-怒江缝合带附近 (莫宣学等, 2006; 侯增谦等, 2006a), 并发生撕裂导致深部的高热软流圈物质透过板片断离窗上涌。地球物理探测结果表明, 印度板块低角度俯冲从深部带来了大量深部幔源岩浆以及在中地壳和中下地壳大量分布的塑性低速高导体 (李汉傲, 2020)。在 18~8 Ma, 北

向俯冲的印度板片发生撕裂使得软流圈上涌, 促进了中下地壳物质流动 (陈建林等, 2010; Hao *et al.*, 2018; Guo and Wilson, 2019), 同时带来了大量的热和熔体在下地壳底部聚集, 当岩浆和热量积累到足够程度时诱发下地壳发生部分熔融 (侯增谦等, 2006b), 形成了覆盖研究区在内的北拉萨东西向带状分布的中新世钾质-超钾质-中酸性火山岩浆作用 (图 10), 如研究区西侧的狮泉河左左乡中新世钾质-超钾质石英二长岩 (22.38 ± 0.46 Ma, 张博川等, 2022)、钾玄质流纹岩 (22.3 ± 0.2 Ma) 以及石英二长斑岩 (22.4 ± 0.46 Ma) (张耀玲, 2018)、角西地区中新世含钨花岗斑岩 ($13.4 \pm 0.1 \sim 14 \pm 1$ Ma, Wang *et al.*, 2020)、研究区东部革吉-雄巴地区的渐新世末至中新世初粗安岩 ($24.9 \pm 0.3 \sim 22.9 \pm 0.6$ Ma, 张耀玲, 2018) 等。同时板片撕裂作用在青藏高原地表形成了大量的南北向正断层, 但在班公湖-怒江缝合带附近形成了以班-怒缝合带深大断裂为共轭轴的东西向或北西向展布的走滑断层带 (Yin and Taylor, 2011), 也为深部岩浆上升提供了通道。研究区中新世 S 型二长花岗岩也是此后碰撞构造背景下加厚下地壳部分熔融的深部岩石圈岩浆作用的产物。

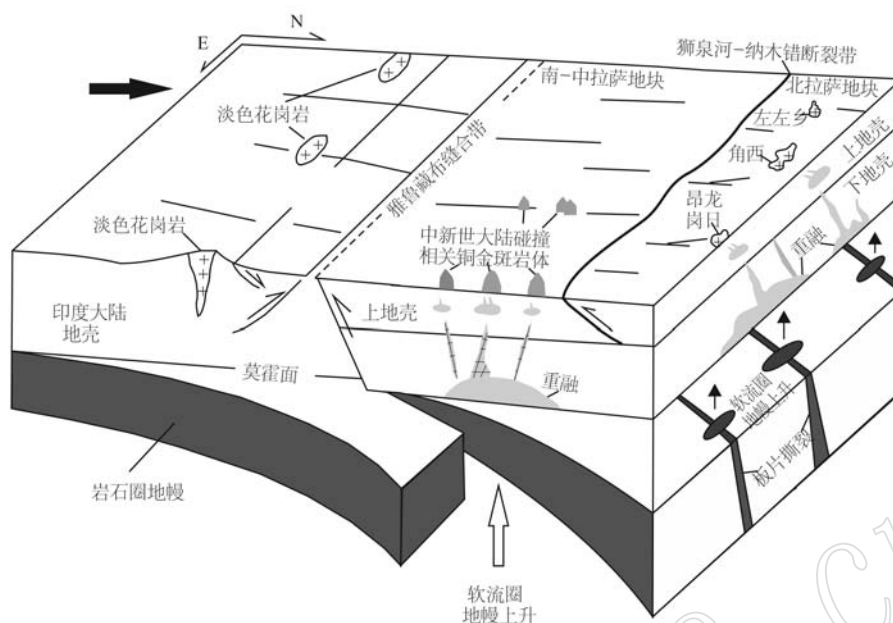


图 10 昂龙岗日地区中新世岩浆作用构造模型图 (据 Hou *et al.*, 2015b; Wang *et al.*, 2018, 2020; 侯增谦等, 2020; 张博川等, 2022 等综合修改)

Fig. 10 The structural model of Miocene magmatism in Anglongangri area (modified from Hou *et al.*, 2015b; Wang *et al.*, 2018, 2020; Hou Zengqian *et al.*, 2020; Zhang Bochuan *et al.*, 2022)

6 结论

(1) 昂龙岗日地区细粒白云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 9.95 ± 0.14 Ma, 中细粒二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 10.68 ± 0.2 Ma, 分别代表了岩体的结晶年龄, 均为中新世。

(2) 昂龙岗日地区中新世细粒白云母二长花岗岩和中细粒二长花岗岩具有高硅 ($\text{SiO}_2 = 72.35\% \sim 73.24\%$)、富钾 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.15 \sim 1.45$, 均大于 1)、高铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.53\% \sim 14.75\%$) 和弱过铝质-过铝质 ($\text{A}/\text{CNK} = 1.08 \sim 1.14$) 的特征, CIPW 刚玉分子数均大于 1%, 其轻重稀土元素分异十分明显, 具中等负 Eu 异常, 富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb 高场强元素, 相对富集 Hf、Zr 等高场强元素, Sr、Ba、P、Ti 等则表现出明显的负异常, 为高钾钙碱性系列的过铝质 S 型花岗岩。

(3) 昂龙岗日地区中新世二长花岗岩具有相对低 Sr、高 Sr/Y、La/Yb 值, 极低的 Y、Yb 特征, 可能起源于加厚下地壳环境下, 发生了一定的岩浆混合作用, 其形成与印度板块北向俯冲有关。

宝贵的意见和建议, 使文章得到了进一步提升和完善!

References

- Amri I, Benoit M and Ceuleneer G. 1996. Tectonic setting for the genesis of oceanic plagiogranites: Evidence from a paleo-spreading structure in the Oman ophiolite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 139 (1~2): 177~194.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46 (3): 535~551.
- Chapman J B, Ducea M N, DeCelles P G, *et al.* 2015. Tracking changes in crustal thickness during orogenic evolution with Sr/Y: An example from the North American Cordillera[J]. *Geology*, 43(10): 919~922.
- Chen Jianlin, Xu Jifeng, Wang Baodi, *et al.* 2010. The relationship between the NS-trending grabens and the ultrapotassic volcanic rocks in Lhasa block, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(4): 341~354 (in Chinese with English abstract).
- Coleman R G and Peterman Z E. 1975. Oceanic plagiogranite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 80(8): 1 099~1 108.
- Frost C D and Frost B R. 2011. On ferroan (A-type) granitoids: Their

致谢 衷心感谢审稿专家和编辑部老师提出的

- compositional variability and modes of origin[J]. *Journal of Petrology*, 52(1): 39~53.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 120(3~4): 347~359.
- Guo Z F and Wilson M. 2019. Late Oligocene-early Miocene transformation of postcollisional magmatism in Tibet[J]. *Geology*, 47(8): 776~780.
- Hao L L, Wang Q, Wyman D A, *et al.* 2018. First identification of mafic igneous enclaves in Miocene lavas of southern Tibet with implications for Indian continental subduction[J]. *Geophysical Research Letters*, 45(16): 8 205~8 213.
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423~439.
- Hou Z Q, Duan L F, Lu Y J, *et al.* 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Economic Geology*, 110(6): 1 541~1 575.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Gao Yongfeng, *et al.* 2006a. Early Processes and Tectonic Model for the Indian-Asian Continental Collision: Evidence from the Cenozoic Gangdese Igneous Rocks in Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1 233~1 248 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian and Wang Tao. 2018. Isotopic mapping and deep material probing (II): Imaging crustal architecture and its control on mineral systems[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 20~41 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z, Yang Z, Lu Y, *et al.* 2015. A genetic linkage between subduction- and collision-related porphyry Cu deposits in continental collision zones[J]. *Geology*, 43(3): 247~250.
- Hou Zengqian, Zhao Zhidan, Gao Yongfeng, *et al.* 2006b. Tearing and dischronal subduction of the Indian continental slab: Evidence from Cenozoic Gangdese volcano-magmatic rocks in south Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 761~774 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Lu Zhanwu, *et al.* 2020. Growth, thickening and evolution of the thickened crust of the Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(10): 2 797~2 815 (in Chinese with English abstract).
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Li Han'ao. 2018. The Initial Timing, Extension Rates of the N-S Trends Normal Faults in Tibetan Plateau and its Deep Process and Dynamics[D]. China University of Geoscience (Beijing), 1~157 (in Chinese with English abstract).
- Li Hualiang, Gao Chen, Li Zhenghan, *et al.* 2016. Age and Tectonic Significance of Jingzhushan Formation in Bangong Lake Area, Tibet[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4): 663~673 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Li W X, *et al.* 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? [J]. *Lithos*, 96(1~2): 186~204.
- Liu Chang, Yang Zhusen, Xu Peiyan, *et al.* 2022. Petrogenesis and geological significance of the Mamu Early Cretaceous magmatic rocks in the western part of Gangdese[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(3): 537~554 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Ma Guolin and Yue Yahui. 2010. Cretaceous volcanic rocks in northern Lhasa Block: Constraints on the tectonic evolution of the Gangdise Arc[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(5): 525~538 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 31(6): 529.
- Mo Xuanxue. 2011. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Geological Journal of China University*, 17(3): 351~367 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue. 2020. Growth and evolution of crust of Tibetan Plateau from perspective of magmatic rocks[J]. *Earth Science*, 45(7): 2 245~2 257 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Depaolo Don J, *et al.* 2006. Three types of collisional and post-collisional magmatism in the Lhasa block, Tibet and implications for India intra-continental subduction and mineralization: Evidence from Sr-Nd isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 795~803 (in Chinese with English abstract).
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- Sisson T W. 1994. Hornblende-melt trace-element partitioning measured by ion microprobe[J]. *Chemical Geology*, 117(1~4): 331~344.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes

- [J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. Earth and Planetary Science Letters, 64(2): 295~304.
- Wang L Q, Cheng W B, Gao T, *et al.* 2022. A model involving amphibolite lower crust melting and subsequent melt extraction for leucogranite generation[J]. Geological Society of America Bulletin, 134(5~6): 1 160~1 179.
- Wang Liqiang, Wang Yong, Danzhen Wangxiu, *et al.* 2017. A tentative discussion on metallogeny of the main magmatic-hydrothermal ore deposits in the western Bangong Co-Nujiang metallogenic belt, Tibet [J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(5): 615~626 (in Chinese with English abstract).
- Wang L Q, Wang Y, Fan Y, *et al.* 2018. A Miocene tungsten mineralization and its implications in the western Bangong-Nujiang metallogenic belt: Constraints from U-Pb, Ar-Ar, and Re-Os geochronology of the Jiaoxi tungsten deposit, Tibet, China [J]. Ore Geology Reviews, 97: 74~87.
- Wang Y, Tang J X, Wang L Q, *et al.* 2020. Geology, geochronology and geochemistry of the Miocene Jiaoxi quartz vein-type W deposit in the western part of the Lhasa Terrane, Tibet: Implications for ore genesis [J]. Ore Geology Reviews, 120: 103433.
- Wang Yong, Wang Liqiang, Fan Yuan, *et al.* 2019. Geological and geochemical characteristics of the Jiaoxi deposit in the western Bangong-Nujiang metallogenic belt, Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 35(3): 724~736 (in Chinese with English abstract).
- Xiao B and Chen H Y. 2020. Elemental behavior during chlorite alteration: New insights from a combined EMPA and LA-ICPMS study in porphyry Cu systems [J]. Chemical Geology, 543: 119604.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407~419.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1 217~1 238 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jianliang, Liu Wen, Yin Xianke, *et al.* 2021. Geochronology, zircon Hf isotope and geochemistry of volcanic rocks from Shamuluo Formation in western Bangongco-Nujiang suture zone, North Tibet [J]. Earth Science(2): 444~459 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jianliang, Yin Xianke, Liu Wen, *et al.* 2019a. The discovery of Nb-rich volcanic rock of the Qushenla Formation in Yema area of the western segment of Bangong Co-Nujiang suture in Tibet and its implications [J]. Geological Bulletin of China, 38(4): 471~483 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jianliang, Yin Xianke, Wang Bo, *et al.* 2019. Geochemistry and geochronology of intermediate-basic dikes in Awengcuo area of North Tibet and intraplate extensional structures [J]. Geology in China, 46(6): 1 356~1 371 (in Chinese with English abstract).
- Yin A and Taylor M H. 2011. Mechanics of V-shaped conjugate strike-slip faults and the corresponding continuum mode of continental deformation [J]. Geological Society of America Bulletin, 123(9~10): 1 798~1 821.
- Zhang Bochuan, Fan Jianjun, Luo Anbo, *et al.* 2022. Zircon U-Pb age petrogenesis and tectonic model of Miocene quartz monzonite in Zuo-zuoxiang area, Western Lhasa Terrane [J]. Geological Bulletin of China, 41(8): 1 358~1 368 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Wu Xinwei, Liu Yongjiang, *et al.* 2020. Genesis of Early Permian A-type granites in the middle of the Great Xing'an Range and constraints on tectonic evolution of the Zhalantun area [J]. Acta Petrologica Sinica, 36(4): 1 091~1 106 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2010. On the classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb concentrations III: Practice [J]. Acta Petrologica Sinica, 26(12): 3 431~3 455 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2014. Magma-thermal field: Its basic characteristics, and differences with geothermal field [J]. Acta Petrologica Sinica, 30(2): 341~349 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, *et al.* 2007. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing: New viewpoints on granitic magma mixing process: Some crucial questions on granite study (1) [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(5): 1 141~1 152 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, *et al.* 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(9): 2 249~2 269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yaoling. 2018. Geological Characteristics of Cenozoic Volcanic Rocks and its Geodynamic Implication in Shiquanhe-Geze area on Qinghai-Tibet Plateau [D]. China University of Geoscience (Beijing), 1~81 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zeming, Ding Xiaoxia, Dong Xin, *et al.* 2019. Formation and evolution of the Gangdese magmatic, southern Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 35(2): 275~294 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Nomade Sebastien, *et al.* 2006. Post-collisional ultrapotassic rocks in Lhasa Block, Tibetan Plateau: Spatial

- and temporal distribution and its' implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 787~794 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhidan, Tang Yan, Zhu Dicheng, *et al.* 2021. Distribution and its significance of dikes in southern Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3 399~3 412 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Mo Xuanxue, *et al.* 2006. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdese: New Insights from Volcanic Rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 543~546(in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Wang Q, Cawood P A, *et al.* 2017. Raising the gangdese mountains in southern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(1): 214~223.
- ### 附中文参考文献
- 陈建林, 许继峰, 王保弟, 等. 2010. 青藏高原拉萨地块新生代超钾质岩与南北向地堑成因关系[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(4): 341~354.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 等. 2006a. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型——来自西藏冈底斯新生代火成岩证据[J]. *地质学报*, 80(9): 1 233~1 248.
- 侯增谦, 赵志丹, 高永丰, 等. 2006b. 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲: 来自冈底斯新生代火山-岩浆作用证据[J]. *岩石学报*, 22(4): 761~774.
- 侯增谦, 王 涛. 2018. 同位素填图与深部物质探测(II): 揭示地壳三维架构与区域成矿规律[J]. *地学前缘*, 25(6): 20~41.
- 侯增谦, 郑远川, 卢占武, 等. 2020. 青藏高原巨厚地壳: 生长、加厚与演化[J]. *地质学报*, 94(10): 2 797~2 815.
- 李汉傲. 2020. 青藏高原南北向正断层活动时限与伸展速率变化的深部过程及动力学机制探讨[D]. 中国地质大学(北京), 1~157.
- 李华亮, 高 成, 李正汉, 等. 2016. 西藏班公湖地区竟柱山组时代及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 40(4): 663~673.
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. *科学通报*, 52(9): 981~991.
- 莫宣学. 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. *高校地质学报*, 17(3): 351~367.
- 莫宣学. 2020. 从岩浆岩看青藏高原地壳的生长演化[J]. *地球科学*, 45(7): 2 245~2 257.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. *岩石学报*, 22(3): 521~533.
- 王立强, 王 勇, 旦真王修, 等. 2017. 班公湖-怒江成矿带西段主要岩浆热液型矿床成矿特征初探[J]. *地球学报*, 38(5): 615~626.
- 王 勇, 王立强, 范 源, 等. 2019. 班公湖-怒江缝合带西段角闪石英脉型钨矿床地质特征及黑钨矿地球化学特征[J]. *岩石学报*, 35(3): 724~736.
- 吴建亮, 刘 文, 尹显科, 等. 2021. 藏北班公湖-怒江缝合带西段沙木罗组火山岩年代学、Hf 同位素及地球化学特征[J]. *地球科学*, (2): 444~459.
- 吴建亮, 尹显科, 刘 文, 等. 2019. 西藏班公湖-怒江缝合带西段野马去申拉组富 Nb 火山岩的发现及其指示意义[J]. *地质通报*, 38(4): 471~483.
- 吴建亮, 尹显科, 王 波, 等. 2019. 藏北阿翁错地区中基性脉岩年代学、地球化学特征及其板内伸展构造作用[J]. *中国地质*, 46(6): 1 356~1 371.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6): 1 217~1 238.
- 张博川, 范建军, 罗安波, 等. 2022. 拉萨地体西部左左乡地区中新世石英二长岩锆石 U-Pb 年龄和岩石成因及构造模式[J]. *地质通报*, 41(8): 1 358~1 368.
- 张 超, 吴新伟, 刘永江, 等. 2020. 大兴安岭中段早二叠世 A 型花岗岩成因及对扎兰屯地区构造演化的制约[J]. *岩石学报*, 36(4): 1 091~1 106.
- 张 旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2010. 三论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 应用[J]. *岩石学报*, 26(12): 3 431~3 455.
- 张 旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2014. 岩浆热场: 它的基本特征及其与地热场的区别[J]. *岩石学报*, 30(2): 341~349.
- 张 旗, 潘国强, 李承东, 等. 2007. 花岗岩混合问题: 与玄武岩对比的启示——关于花岗岩研究的思考之一[J]. *岩石学报*, 23(5): 1 141~1 152.
- 张 旗, 王 焰, 李承东, 等. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 22(9): 2 249~2 269.
- 张耀玲. 2018. 青藏高原狮泉河-改则一带新生代火山岩地质特征及其动力学意义[D]. 中国地质大学(北京), 1~86.
- 张泽明, 丁慧霞, 董 昕, 等. 2019. 冈底斯岩浆弧的形成和演化[J]. *岩石学报*, 35(2): 275~294.
- 赵志丹, 莫宣学, Nomade Sebastien, 等. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及其意义[J]. *岩石学报*, 22(4): 787~794.
- 赵志丹, 唐 演, 朱弟成, 等. 2021. 青藏高原南部岩脉分布及其研究意义[J]. *岩石学报*, 37(11): 3 399~3 412.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 2006. 冈底斯中北部晚侏罗世-早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束[J]. *岩石学报*, 22(3): 534~546.