



引文格式: 李昊, 杜文强, 张超, 等. 藏北卡易错地区晚侏罗世花岗闪长岩形成时代、地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 81–92. DOI: 10.12401/j.nwg.2023020

Citation: LI Hao, DU Wenqiang, ZHANG Chao, et al. Formation Age, Petrogenesis and Geological Significance of Late Jurassic Granodiorites in Kayico Area, Northern Tibet[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 81–92. DOI: 10.12401/j.nwg.2023020

## 藏北卡易错地区晚侏罗世花岗闪长岩形成时代、 地球化学特征及其地质意义

李昊<sup>1</sup>, 杜文强<sup>1</sup>, 张超<sup>2</sup>, 李智楠<sup>1</sup>, 韦代硬<sup>1</sup>, 吴浩<sup>1,\*</sup>

(1. 有色金属矿产勘查与资源高效利用省部共建协同创新中心&广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 桂林理工大学, 广西 桂林 541004; 2. 华北地质勘查局第四地质大队, 河北 秦皇岛 066000)

**摘要:** 南羌塘地块南缘在中—晚侏罗世爆发了大规模、多样性的岩浆作用, 是认识班公湖—怒江缝合带构造演化过程的理想研究对象。笔者对卡易错地区出露的花岗闪长岩进行了锆石 U-Pb 定年、全岩地球化学以及锆石 Lu-Hf 同位素测试分析和研究工作。测年结果表明, 卡易错花岗闪长岩形成于 158 Ma, 与区域上中—晚侏罗世岩浆活动时代相一致, 其地球化学组成显示高 SiO<sub>2</sub> 和全碱含量 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)、低 MgO 和 TiO<sub>2</sub> 的含量, 并显示 Eu、Sr、Ba 的负异常, 具有钙碱性 I 型花岗岩的特征。结合区域现有研究资料, 研究认为卡易错花岗闪长岩是古老变火成岩下地壳部分熔融、并经历结晶分异作用的产物, 是班公湖—怒江特提斯洋洋壳北向俯冲在南羌塘地块南缘引发的弧型岩浆活动。结合区域研究资料, 卡易错地区同时发育钙碱性 I 型和高分异型两类花岗岩, 分别代表着熔体在浅层岩浆房内经历矿物结晶作用后不同端元冷凝的产物。

**关键词:** 青藏高原; 晚侏罗世; 班公湖—怒江缝合带; 岩石成因; 洋壳俯冲

中图分类号: P597.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)01-0081-12

### Formation Age, Petrogenesis and Geological Significance of Late Jurassic Granodiorites in Kayico Area, Northern Tibet

LI Hao<sup>1</sup>, DU Wenqiang<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>2</sup>, LI Zhinan<sup>1</sup>, WEI Daiying<sup>1</sup>, WU Hao<sup>1,\*</sup>

(1. Collaborative Innovation Center for Exploration of Nonferrous Metal Deposits and Efficient Utilization of Resources in Guangxi & Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallia Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;  
2. North Geological Survey Fourth Geological Brigade, Qinhuangdao 066000, Hebei, China)

**Abstract:** The widely distributed Middle-Late Jurassic magmatic rocks in south margin of Southern Qiangtang block display complex geochemical compositions, providing an ideal research object for the tectonic evolution

收稿日期: 2022-04-10; 修回日期: 2022-12-15; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 广西中青年骨干教师基础能力提升项目“藏北多龙矿集区成矿期高硅流纹岩成因及其构造意义”(2021KY0249), 桂林理工大学人才引进科研启动项目(RD2000002384), 中国地质调查项目“藏西北铜多金属资源基地综合调查评价”(DD20190167)联合资助。

作者简介: 李昊(2003-), 男, 地质工程专业。E-mail: 3235686086@qq.com。

\* 通讯作者: 吴浩(1989-), 男, 副教授, 博士, 从事岩石大地构造研究。E-mail: wuhaojlu@126.com。

of Bangong-Nujiang Suture Zone. In this paper, zircon U-Pb dating, whole rock geochemistry and zircon Lu-Hf isotopes of Kayico granodiorites were analyzed. The investigated granodiorites yielded zircon ages of 158 Ma, coeval with the regional Middle-Late Jurassic magmatic rocks. Geochemically, the granodiorites were characterized by high  $\text{SiO}_2$  and total alkalis ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) contents, but low  $\text{MgO}$  and  $\text{TiO}_2$  contents, with depletion in Eu, Sr, Ba, suggesting a geochemical affinity with calc alkaline I-type granites. Combined with the regional research data, it is thus concluded that these granodiorites were derived by partial melting of the ancient metaigneous lower crust, followed by vary degree of crystallization differentiation. Our research favor that the Middle-Late Jurassic magmatic rocks in Southern Qiangtang block were generated in an arc setting during the northward subduction of Bangong-Nujiang oceanic lithosphere. Furthermore, considering the preexisting geochemical data, the granitic rocks of Kayico area can be divided into two groups of calc-alkaline I-type granites and highly fractionated granites, which were derived by the different end-members of the crystal mush process within the shallow crust.

**Keywords:** Tibetan Plateau; Late Jurassic; Bangong-Nujiang Suture Zone; petrogenesis; oceanic subduction

青藏高原的形成与演化经历了多个洋盆的闭合以及陆陆碰撞过程,由此形成了高原上多个近 EW 向延伸的构造缝合带,将青藏高原划分为多个次级地块(Zhu et al., 2011; Kapp et al., 2019)。其中,班公湖-怒江缝合带(以下简称班-怒带)横亘于青藏高原中部,是中生代班公湖-怒江特提斯洋(以下简称班-怒洋)构造演化的残迹,其 EW 向延伸达 2 000 km 以上,构成了拉萨地块与羌塘地块之间的地质界线(图 1a)。

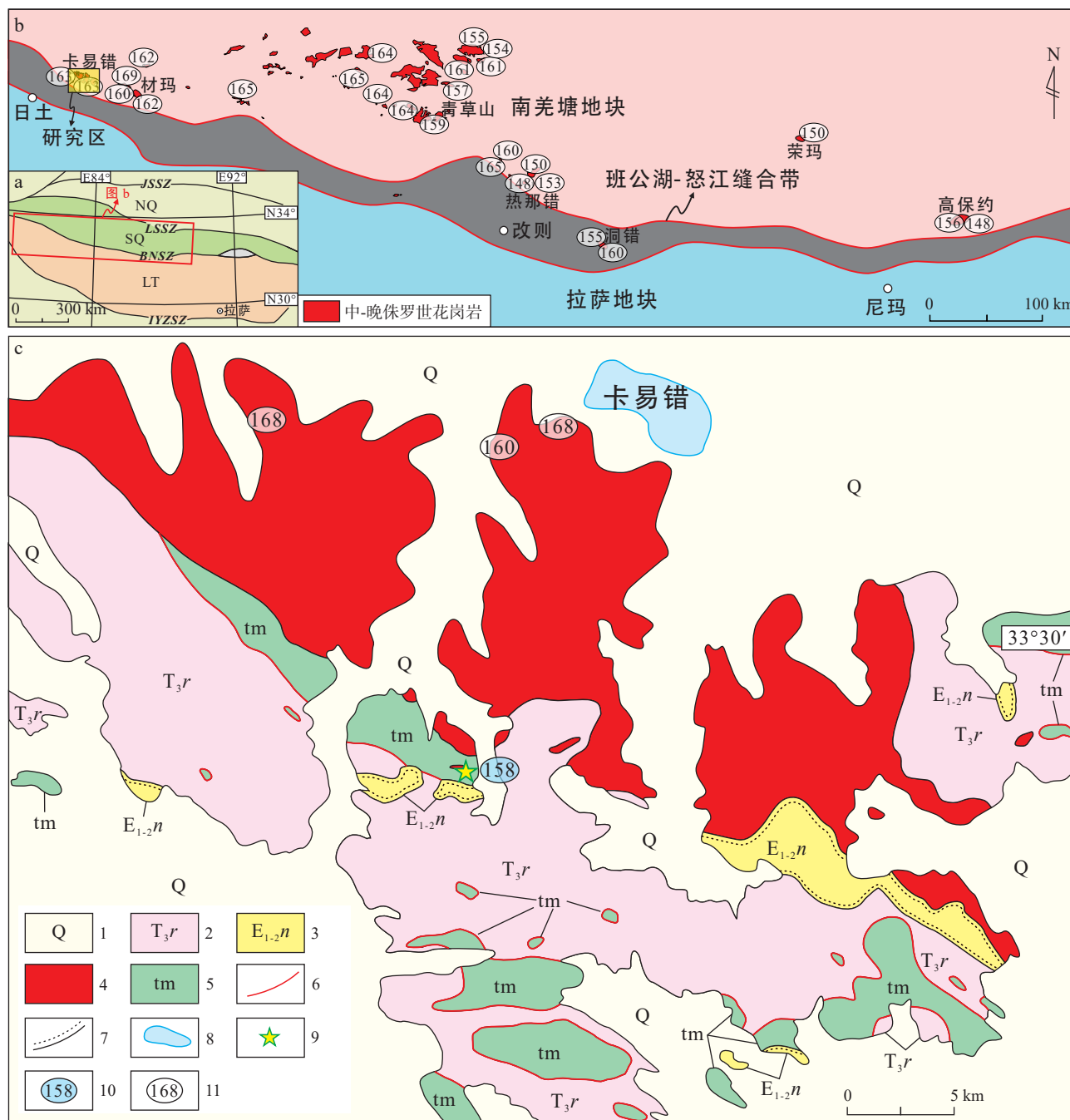
中生代以来,受班-怒洋俯冲闭合过程的影响,在班-怒带上及其两侧发育了大规模的火山岩浆活动,这些多期次岩浆岩记录了洋盆开合过程的信息,是反演区域构造-岩浆演化的关键,为揭示班-怒洋俯冲闭合过程提供了重要约束(李永飞等, 2005; Zhu et al., 2011, 2016; Pan et al., 2012; Wu et al., 2016, 2019a, 2019b; 刘海永等, 2019; 吴浩等, 2020)。然而,尽管国内外学者先后在青藏高原中部开展了大量的地质研究工作,但是关于区域上中生代多期次、多样性岩浆活动的成因与深部动力学过程尚存有较大的争议,是众多学者关注的热点(Kapp et al., 2007; Pan et al., 2012; Zhu et al., 2016; Fan et al., 2017)。近年来,越来越多的岩浆岩研究资料表明羌塘地块的南缘出露着大规模的中-晚侏罗世岩浆岩(图 1b),并显示复杂的地球化学组成,仅在中酸性侵入岩中就先后识别了普通钙碱性 I 型花岗岩、高分异型花岗岩、富 Na 埃达克岩与富 K 埃达克岩等岩石类型(Li et al., 2014; Wu et al., 2018)。然而,羌塘地块南缘中-晚侏罗世多样性岩石类型之间究竟有何成因联系、形成于何种构造环境、

反映了怎样的深部动力学过程尚不明确,亟待进一步研究。不仅如此,尽管关于班-怒洋的闭合时限仍存有争议(Kapp et al., 2007; Wu et al., 2019b; Fan et al., 2021),但是当前的研究普遍认为青藏高原中部中-晚侏罗世岩浆岩形成于洋壳俯冲背景,是班-怒洋洋壳俯冲消减引发的弧型岩浆活动(Li et al., 2014; Wu et al., 2016, 2018)。因此,查明羌塘地块南缘中-晚侏罗世岩浆作用过程,不仅对认识班-怒洋构造演化史具有重要的指示意义,同时对探讨俯冲带弧型岩浆起源与演化、壳幔物质循环与交换过程同样具有重要的约束。

藏北卡易错地区发育着大规模的晚侏罗世酸性侵入岩,为揭示班-怒洋俯冲过程、探讨俯冲带复杂的构造-岩浆活动提供了理想的研究对象(图 1b)。本次在详细野外地质调查工作的基础上,对藏北卡易错地区出露的花岗闪长岩体进行了系统的岩石学、地质年代学、地球化学和同位素的研究工作,以此确定花岗闪长岩的形成时代与岩石成因,进一步对比区域岩浆岩研究资料,共同约束区域构造-岩浆过程,为揭示班-怒洋俯冲过程、探讨青藏高原早期形成与演化史提供新的约束。

## 1 地质背景与岩石学特征

研究表明青藏高原自中生代以来经历了多个地块的闭合、碰撞过程,由此形成了青藏高原上近 EW 向延伸的多个构造缝合带,并将青藏高原从北至南划分为可可西里-松潘-甘孜地块、北羌塘地块、南羌塘



1.第四系; 2.上三叠统日干配组; 3.古新统一始新统牛堡组; 4.中—晚侏罗世花岗岩; 5.构造岩快; 6.断层; 7.角度不整合; 8.湖泊; 9.采样点; 10.锆石 U-Pb 年龄(本文); 11.锆石 U-Pb 年龄(引用); JSSZ.金沙江缝合带; LSSZ.龙木措—双湖缝合带; BNSZ.班公湖—怒江缝合带; IYZSZ.印度—雅鲁藏布缝合带; LT.拉萨地块; SQ.南羌塘地块; NQ.北羌塘地块; 年龄数据引自 Li 等(2014)、Liu 等(2014)、Wu 等(2016)、Sun 等(2020)、Yang 等(2021)

图1 青藏高原构造单元划分图(a)、南羌塘地块中—晚侏罗世侵入岩展布图(b)、卡易错地区地质简图(c)

Fig. 1 (a) Tectonic subdivision of the Tibetan Plateau, (b) distribution of Middle-Late Jurassic intrusive rocks within Southern Qiangtang block and (c) simplified geological map of the Kayico area, Tibet

地块、拉萨地块和喜马拉雅地块等多个次级地块(Zhu et al., 2011; Kapp et al., 2019)(图 1a)。其中,班-怒带夹持于南羌塘地块和拉萨地块之间,大量的岩浆岩在南羌塘地块的南缘出露着大规模的中—晚侏罗世岩浆

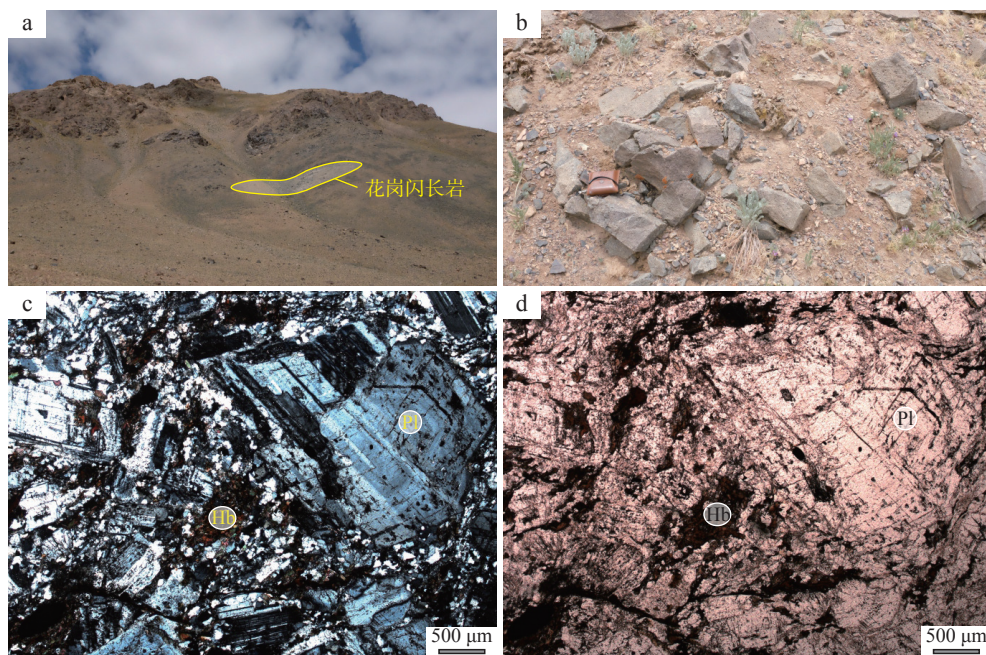
岩,该期岩浆岩以中酸性侵入岩为主,具有持续时间较长、地球化学组分多样的特征,为探讨青藏高原早期形成与演化过程提供了理想的研究对象。

本次研究区卡易错地区位于日土县 NE 方向约

45 km, 大地构造位置处于班-怒带以北、南羌塘地块的南缘。区内构造-地层格架近 NW-SE 向展布, 其研究区西南部主要以上三叠统日干配组( $T_3r$ )灰岩夹砂岩和古新统一始新统牛堡组( $E_{1-2}n$ )砂、砾岩为主; 而研究区东北部主要以酸性侵入岩为主。此外, 受构造作用的影响, 区内出露着大量的灰岩和砾岩的构造岩块(图 1c)。前人已经对区内花岗岩体进行了初步的年代学和地球化学的研究工作, 研究认为卡易错岩体形成于中—晚侏罗世(168~160 Ma), 其地球化学

组成指示岩石类型以高分异型花岗岩为主, 是古老的变火成岩地壳部分熔融并经历广泛结晶分异作用的产物(Li et al., 2014; Liu et al., 2014)。

本次研究的花岗闪长岩( $E 80^{\circ}6'25''; N 33^{\circ}28'20''$ )呈岩株状侵入于构造岩块之中(图 2a), 出露规模长约为 10 m、宽约为 3 m, 岩石整体呈灰黑色, 块状构造, 中粗粒花岗结构(图 2b), 矿物组成以长石、角闪石、石英为主, 粒度在 0.5~2 mm 之间, 副矿物有锆石、磷灰石等(图 2c、图 2d)。



Hb.角闪石; Pl.斜长石

图2 卡易错花岗闪长岩野外(a、b)与室内镜下照片(c、d)

Fig. 2 (a, b) Field and (c, d) petrographic photographs of Kayico granodiorite

## 2 分析方法

本次锆石 U-Pb、全岩主微量地球化学与锆石 Lu-Hf 同位素测试分析工作均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。锆石 U-Pb 同位素定年和微量元素含量利用 LA-ICP-MS 同时分析完成, 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, 详细的仪器参数和分析流程见 Zong 等(2017)和李艳广等(2023)。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(Liu et al., 2008, 2010)完成。锆

石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex\_ver3(Ludwig, 2003)完成。全岩主微量元素含量利用日本理学 Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成, 微量元素含量利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成。原位微区锆石 Lu-Hf 同位素比值测试利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成。激光剥蚀系统为 Geolas HD(Coherent, 德国), MC-ICP-MS 为 Neptune Plus(Thermo Fisher Scientific, 德国)。

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 定年与 Lu-Hf 同位素

花岗闪长岩锆石整体呈无色透明的长柱状, 晶形

完好, 粒径为 200~300  $\mu\text{m}$ , 长宽比为 2:1~3:1 (图 3)。本次共对 20 颗锆石进行测试分析工作(表 1), 20 颗锆石测点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄均集中在 162~154 Ma 之间。在谐和图上(图 3), 所有测点都落在谐和线上或附近区域, 获得锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为

(158.4 $\pm$ 1.8)Ma(MSWD=0.15), 这与前人在卡易错花岗岩体中获得的 168~160 Ma 的年龄信息基本一致, 代表了花岗闪长岩的形成时代。

此外, 对 8 颗获得谐和年龄的锆石进行原位 Lu-Hf 同位素测试(表 2), 8 颗锆石测点的  $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$  在

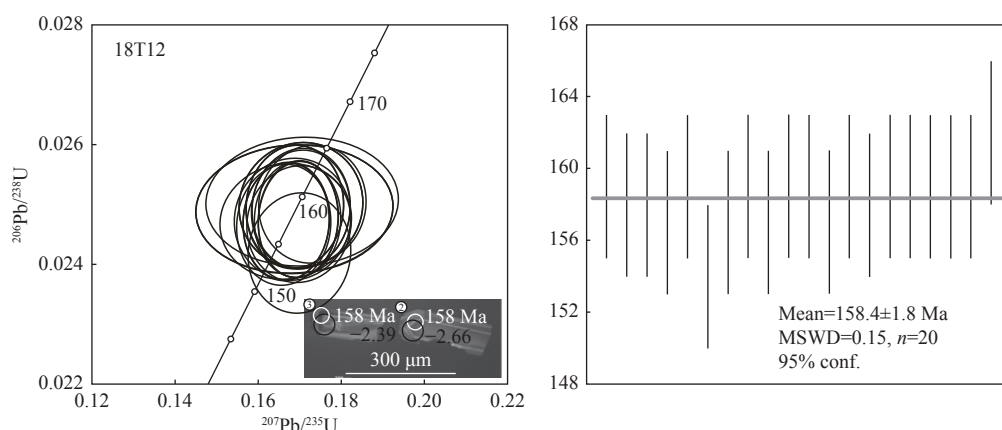


图3 锆石 CL 图像、锆石 U-Pb 谐和图和年龄分布图

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images, U-Pb concordia plots and age distribution for zircons

表 1 卡易错花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析结果

Tab. 1 LA-ICP-MS U-Pb dating results for zircons of Kayico granodiorites

| 点号       | 同位素比值(1 $\sigma$ )                |            |                                  |            |                                  |            | 年龄比值(Ma)                          |            |                                  |            |                                  |            |
|----------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
|          | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 $\sigma$ |
| 18T12-01 | 0.049 54                          | 0.002 19   | 0.170 17                         | 0.007 81   | 0.024 91                         | 0.000 66   | 173                               | 59         | 160                              | 7          | 159                              | 4          |
| 18T12-02 | 0.049 29                          | 0.002 66   | 0.168 24                         | 0.009 27   | 0.024 75                         | 0.000 67   | 162                               | 78         | 158                              | 8          | 158                              | 4          |
| 18T12-03 | 0.049 65                          | 0.001 91   | 0.169 44                         | 0.006 90   | 0.024 75                         | 0.000 64   | 179                               | 50         | 159                              | 6          | 158                              | 4          |
| 18T12-04 | 0.049 89                          | 0.002 33   | 0.169 74                         | 0.008 24   | 0.024 67                         | 0.000 64   | 190                               | 66         | 159                              | 7          | 157                              | 4          |
| 18T12-05 | 0.049 39                          | 0.004 38   | 0.170 64                         | 0.015 19   | 0.025 05                         | 0.000 71   | 166                               | 147        | 160                              | 13         | 159                              | 4          |
| 18T12-06 | 0.050 92                          | 0.002 37   | 0.169 85                         | 0.008 10   | 0.024 19                         | 0.000 66   | 237                               | 61         | 159                              | 7          | 154                              | 4          |
| 18T12-07 | 0.048 85                          | 0.002 11   | 0.166 23                         | 0.007 40   | 0.024 67                         | 0.000 67   | 141                               | 56         | 156                              | 6          | 157                              | 4          |
| 18T12-08 | 0.049 55                          | 0.002 18   | 0.170 37                         | 0.007 77   | 0.024 93                         | 0.000 66   | 174                               | 59         | 160                              | 7          | 159                              | 4          |
| 18T12-09 | 0.048 88                          | 0.002 99   | 0.166 55                         | 0.010 42   | 0.024 71                         | 0.000 64   | 142                               | 95         | 156                              | 9          | 157                              | 4          |
| 18T12-10 | 0.050 12                          | 0.002 38   | 0.172 89                         | 0.008 52   | 0.025 01                         | 0.000 65   | 201                               | 67         | 162                              | 7          | 159                              | 4          |
| 18T12-11 | 0.049 08                          | 0.004 53   | 0.168 67                         | 0.015 61   | 0.024 92                         | 0.000 71   | 152                               | 154        | 158                              | 14         | 159                              | 4          |
| 18T12-12 | 0.048 89                          | 0.001 90   | 0.166 71                         | 0.006 81   | 0.024 72                         | 0.000 65   | 143                               | 50         | 157                              | 6          | 157                              | 4          |
| 18T12-13 | 0.049 40                          | 0.002 80   | 0.170 26                         | 0.009 80   | 0.024 99                         | 0.000 69   | 167                               | 83         | 160                              | 9          | 159                              | 4          |
| 18T12-14 | 0.049 70                          | 0.001 73   | 0.169 64                         | 0.006 37   | 0.024 75                         | 0.000 64   | 181                               | 43         | 159                              | 6          | 158                              | 4          |
| 18T12-15 | 0.049 05                          | 0.002 19   | 0.168 88                         | 0.007 75   | 0.024 96                         | 0.000 68   | 150                               | 59         | 158                              | 7          | 159                              | 4          |
| 18T12-16 | 0.049 50                          | 0.002 33   | 0.170 51                         | 0.008 31   | 0.024 98                         | 0.000 66   | 172                               | 66         | 160                              | 7          | 159                              | 4          |
| 18T12-17 | 0.050 17                          | 0.001 76   | 0.172 46                         | 0.006 51   | 0.024 92                         | 0.000 64   | 203                               | 44         | 162                              | 6          | 159                              | 4          |
| 18T12-18 | 0.048 92                          | 0.004 63   | 0.168 03                         | 0.015 94   | 0.024 90                         | 0.000 71   | 144                               | 159        | 158                              | 14         | 159                              | 4          |
| 18T12-19 | 0.050 00                          | 0.002 26   | 0.172 12                         | 0.008 08   | 0.024 96                         | 0.000 66   | 195                               | 62         | 161                              | 7          | 159                              | 4          |
| 18T12-20 | 0.048 62                          | 0.002 07   | 0.170 18                         | 0.007 51   | 0.025 38                         | 0.000 68   | 130                               | 56         | 160                              | 7          | 162                              | 4          |

表 2 卡易错花岗闪长岩锆石 Lu-Hf 同位素组成

Tab. 2 Lu-Hf isotopes of zircons from the Kayico granodiorites.

| 点号       | 年龄 (Ma) | <sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf | 1σ        | <sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf | 1σ        | <sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf | 1σ        | ε <sub>Hf</sub> (0) | 1σ   | ε <sub>Hf</sub> (t) | 1σ   | T <sub>DM1</sub> | T <sub>DMC</sub> | f <sub>Lu/Hf</sub> |
|----------|---------|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|---------------------|------|---------------------|------|------------------|------------------|--------------------|
| 18T12-01 | 159     | 0.282 608                            | 0.000 008 | 0.000 562                            | 0.000 003 | 0.017 391                            | 0.000 117 | -5.81               | 0.59 | -2.38               | 0.60 | 901              | 1 207            | -0.98              |
| 18T12-02 | 158     | 0.282 602                            | 0.000 009 | 0.000 996                            | 0.000 005 | 0.031 211                            | 0.000 271 | -6.03               | 0.61 | -2.66               | 0.62 | 921              | 1 222            | -0.97              |
| 18T12-03 | 158     | 0.282 609                            | 0.000 010 | 0.000 842                            | 0.000 026 | 0.026 596                            | 0.000 831 | -5.77               | 0.61 | -2.39               | 0.62 | 907              | 1 207            | -0.97              |
| 18T12-04 | 154     | 0.282 618                            | 0.000 010 | 0.000 867                            | 0.000 013 | 0.027 469                            | 0.000 376 | -5.46               | 0.62 | -2.17               | 0.63 | 895              | 1 191            | -0.97              |
| 18T12-05 | 159     | 0.282 641                            | 0.000 009 | 0.000 427                            | 0.000 002 | 0.012 865                            | 0.000 067 | -4.65               | 0.61 | -1.20               | 0.62 | 853              | 1 142            | -0.99              |
| 18T12-06 | 157     | 0.282 643                            | 0.000 009 | 0.000 608                            | 0.000 005 | 0.019 402                            | 0.000 131 | -4.57               | 0.60 | -1.18               | 0.61 | 854              | 1 139            | -0.98              |
| 18T12-07 | 159     | 0.282 631                            | 0.000 008 | 0.000 532                            | 0.000 001 | 0.016 431                            | 0.000 077 | -4.98               | 0.59 | -1.55               | 0.60 | 868              | 1 161            | -0.98              |
| 18T12-08 | 159     | 0.282 669                            | 0.000 009 | 0.001 145                            | 0.000 043 | 0.037 412                            | 0.001 346 | -3.64               | 0.60 | -0.27               | 0.61 | 829              | 1 090            | -0.97              |

0.012 865~0.037 412 之 间 , <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 在 0.000 427~0.001 145 之 间 , 表 明 所 测 锆 石 放 射 成 因 Hf 的 积 累 很 少 (吴 福 元 等 , 2007) , 测 定 的 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf (0.282 602~0.282 669) 值 可 以 用 来 代 替 锆 石 的 初 始 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值 。 8 个 测 点 Hf 同 位 素 地 壳 模 式 年 龄 T<sub>DMC</sub> 为 1 090~1 222 Ma ,

对 应 的 ε<sub>Hf</sub>(t) 值 变 化 范 围 在 -2.66~-0.27 之 间 。

### 3.2 地球化学

本 次 共 采 集 4 件 花 岗 闪 长 岩 样 品 进 行 全 岩 主 微 量 元 素 地 球 化 学 分 析 工 作 , 分 析 结 果 见 表 3 。 4 件 样 品 的 地 球 化 学 组 成 相 对 均 一 , 其 SiO<sub>2</sub> 含 量 为 62.6%~

表 3 卡易错花岗闪长岩全岩主量(%)和微量(10<sup>-6</sup>)元素分析结果

Tab. 3 Whole-rock major (%) and trace (10<sup>-6</sup>) element contents of Kayico granodiorites

| 元素                              | T12h1 | T12h2 | T12h3 | T12h4 | 元素 | T12h1 | T12h2 | T12h3 | T12h4 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>                | 63.6  | 65.2  | 64.5  | 62.6  | Zr | 248   | 230   | 244   | 245   |
| TiO <sub>2</sub>                | 0.78  | 0.68  | 0.71  | 0.81  | Nb | 13.8  | 13.1  | 13.7  | 14.1  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 16.1  | 15.9  | 16.2  | 16.6  | Sn | 3.58  | 5.26  | 4.55  | 4.30  |
| TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.37  | 4.53  | 4.82  | 5.12  | Cs | 17.5  | 21.1  | 14.6  | 20.0  |
| MnO                             | 0.08  | 0.06  | 0.07  | 0.07  | Ba | 457   | 383   | 401   | 428   |
| MgO                             | 2.34  | 2.06  | 2.07  | 2.33  | La | 29.8  | 32.7  | 32.1  | 30.2  |
| CaO                             | 4.48  | 4.44  | 4.38  | 4.83  | Ce | 66.7  | 68.5  | 63.0  | 61.6  |
| Na <sub>2</sub> O               | 2.70  | 2.74  | 2.83  | 2.74  | Pr | 6.97  | 7.45  | 7.02  | 6.90  |
| K <sub>2</sub> O                | 2.86  | 2.78  | 2.57  | 2.77  | Nd | 26.37 | 28.1  | 27.3  | 25.4  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | 0.15  | 0.13  | 0.14  | 0.15  | Sm | 5.26  | 5.68  | 5.75  | 5.24  |
| LOI                             | 0.99  | 1.11  | 1.30  | 1.30  | Eu | 1.11  | 1.05  | 1.14  | 1.16  |
| SUM                             | 99.5  | 99.7  | 99.5  | 99.3  | Gd | 5.08  | 4.65  | 4.55  | 4.66  |
| Li                              | 56.7  | 49.2  | 63.6  | 54.6  | Tb | 0.83  | 0.83  | 0.78  | 0.74  |
| Be                              | 1.97  | 2.31  | 2.18  | 2.07  | Dy | 4.95  | 5.01  | 4.54  | 4.49  |
| Sc                              | 14.9  | 12.7  | 13.8  | 14.8  | Ho | 1.00  | 1.01  | 0.91  | 0.92  |
| V                               | 74.0  | 61.3  | 67.1  | 74.1  | Er | 2.83  | 2.87  | 2.72  | 2.60  |
| Cr                              | 40.0  | 32.8  | 37.6  | 37.7  | Tm | 0.45  | 0.43  | 0.40  | 0.41  |
| Co                              | 15.4  | 11.5  | 12.9  | 12.8  | Yb | 2.70  | 2.78  | 2.46  | 2.42  |
| Ni                              | 16.6  | 14.3  | 15.2  | 15.5  | Lu | 0.41  | 0.44  | 0.37  | 0.37  |
| Cu                              | 104   | 45.7  | 44.1  | 45.7  | Hf | 6.64  | 6.24  | 6.79  | 6.29  |
| Zn                              | 56.6  | 43.1  | 45.7  | 51.6  | Ta | 1.02  | 1.10  | 1.05  | 0.98  |
| Ga                              | 19.2  | 18.8  | 19.1  | 19.5  | Tl | 1.33  | 1.40  | 1.13  | 1.34  |
| Rb                              | 170   | 185   | 169   | 178   | Pb | 8.40  | 9.57  | 7.76  | 10.2  |
| Sr                              | 188   | 181   | 194   | 203   | Th | 14.4  | 16.9  | 15.5  | 12.4  |
| Y                               | 28.2  | 28.0  | 26.8  | 24.8  | U  | 2.18  | 2.88  | 2.52  | 2.23  |

65.2%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 15.9%~16.6%,  $\text{TiO}_2$  含量为 0.68%~0.81%,  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  含量为 4.53%~5.37%,  $\text{MgO}$  含量为 2.06%~2.34%, 全碱 ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) 含量为 5.40%~5.56%,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值为 0.94~1.10,  $\text{Mg}^\#$  为 50~52。在岩石类型判别图解中(图 4a), 样品均在花岗闪长岩区

域; 在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解中(图 4b), 样品显示中钾-高钾钙碱性的特征; 在  $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$  图解中(图 3c), 样品整体显示弱过铝质的特征( $\text{A/CNK}=1.02\sim1.05$ )。以上主量元素地球化学组成表明样品整体显示弱过铝质中钾-高钾钙碱性花岗闪长岩的特征。

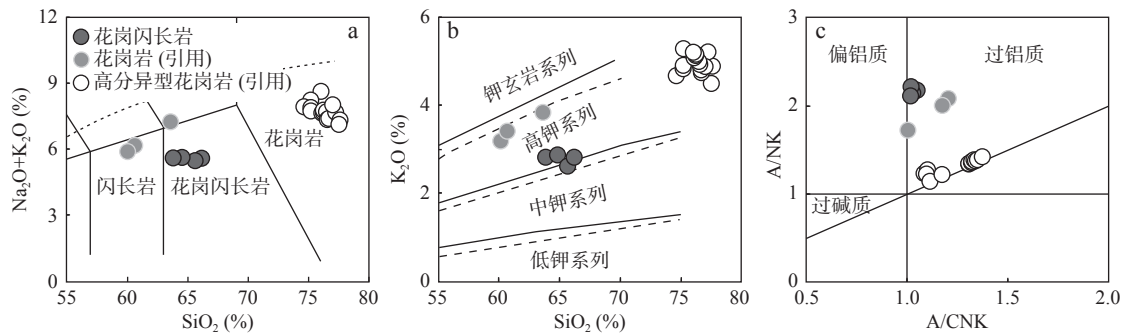


图4 卡易错花岗岩 TAS 图解(Middlemost, 1994)(a)、 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解(Le Maitre et al., 1989; Rickwood, 1989)(b)和  $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$  图解(c)(Shand, 1943)

Fig. 4 (a) TAS classification diagram, (b)  $\text{K}_2\text{O}$  vs.  $\text{SiO}_2$  diagram and (c)  $\text{A/NK}$  vs.  $\text{A/CNK}$  diagram of Kayico granitic rocks

在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线中, 样品呈轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾模式( $[\text{La}/\text{Yb}]_N=7.90\sim9.34$ ), 同时具有不同程度的 Eu 负异

常( $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.62\sim0.72$ )(图 5a)。在原始地幔标准化蛛网图中, 样品具有明显 Nb、Ta 等高场强元素以及 Ba、Sr、Eu 等大离子亲石元素的亏损(图 5b)。

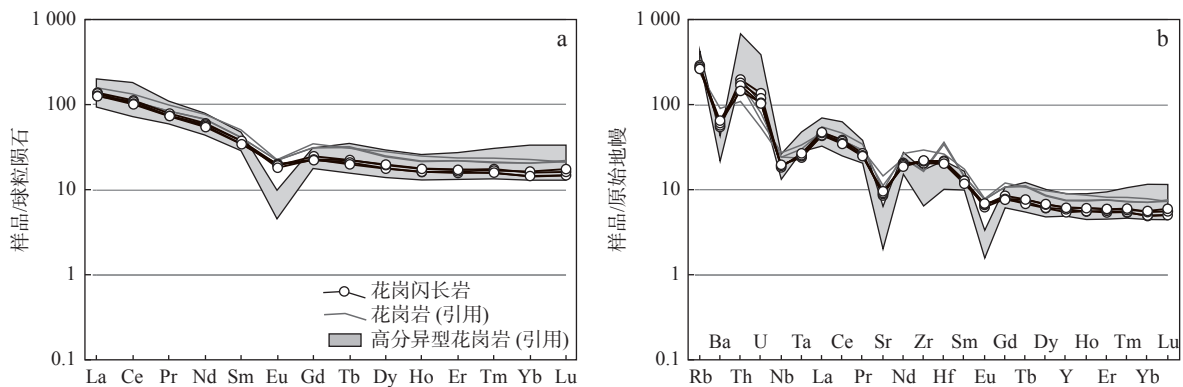


图5 岩石球粒陨石标准化稀土元素模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值引自 Sun 等 1989)

Fig. 5 (a) Chondrite-normalized rare earth element and (b) primitive-mantle-normalized multi-element patterns

## 4 讨论

### 4.1 中—晚侏罗世岩浆活动

近年来, 国内外学者已经对青藏高原中部出露的岩浆岩开展了系统的研究工作, 报道了大量的年代学和地球化学数据(Li et al., 2014; Liu et al., 2014; Wu et al., 2016; 刘海永等, 2022)。越来越多的研究表明在南羌塘地块南缘的卡易错、材玛、青草山、改则、荣玛、

高保约一带存在一期大规模的中—晚侏罗世岩浆活动(约 165~150 Ma), 这些岩浆岩整体呈带状近平行于班—怒带出露, EW 向延伸近上千千米, 岩石类型整体以中酸性侵入岩为主, 具有持续时间长、分布范围广的特征(图 1b)。前人的研究在卡易错花岗岩体中获得了 168~160 Ma 的锆石 U-Pb 年龄信息(Liu et al., 2014; Li et al., 2014), 本次锆石 U-Pb 定年工作卡易错花岗闪长岩中获得了 158 Ma 的年龄, 表明区内花岗岩形成于中—晚侏罗世之交, 与南羌塘地块上大规

模发育的中酸性侵入岩形成时代相近,应该是区域上同一期构造-岩浆活动的产物。

此外, Wu 等(2018)对南羌塘地块上发育的中—晚侏罗世侵入岩进行了系统的地球化学对比研究,研究发现该期侵入岩整体显示复杂的地球化学特征,根据岩石的主、微量元素含量和同位素地球化学特征,可以划分为普通钙碱性 I 型花岗岩、高分异花岗岩、富 Na 埃达克岩与富 K 埃达克岩等不同的岩石类型,反应了区域上花岗质岩石复杂的岩浆源区与成岩过程。而根据现有地球化学资料,卡易错花岗岩可以划分为普通钙碱性 I 型花岗岩和高分异型花岗岩两类(Li et al., 2014; Liu et al., 2014),然而二者之间有何成因联系尚不明确。

#### 4.2 构造背景

大量的岩浆岩研究资料表明青藏高原中部中生代岩浆作用整体沿班-怒带展布,主要发育在混杂带上及其两侧的南羌塘地块南缘和拉萨地块北缘,显示与班-怒洋密切的时空联系,系统的研究工作已经初步建立中生代多期次岩浆作用与班-怒洋俯冲闭合过程之间的成因联系(Zhu et al., 2011, 2016; Kapp et al., 2019; Wu et al., 2019a, 2019b)。尽管对于班-怒洋的闭合时限一直存在争论,然而现有的争议均认为班-怒洋闭合与拉萨-羌塘地块陆陆碰撞应不早于白垩纪,而青藏高原中部侏罗纪构造演化主要受班-怒洋俯冲消减作用的影响(Liu et al., 2022)。此外,班-怒带上蛇绿混杂岩系统的年代学和地球化学的研究同样表明班-怒洋洋盆在中—晚侏罗世仍存有一定的规模(范建军等, 2019; 李志军等, 2019; 唐跃等, 2021)。

卡易错花岗闪长岩显著的 Nb、Ta 等元素亏损(图 5),显示与俯冲成因的弧型岩浆岩相似的地球化学特征。近年来,不同学者对南羌塘地块上发育的中—晚侏罗世岩浆岩开展了大量的研究工作,陆续取得了众多的研究进展(Liu et al., 2014; Li et al., 2016; Wu et al., 2016)。其中,中酸性侵入岩整体显示陆缘弧的地球化学特征,而洋壳熔融成因的埃达克质花岗岩的识别则为深部俯冲洋壳的存在提供了最直接的岩石学证据(Li et al., 2016)。此外,区域上还陆续报道了中—晚侏罗世俯冲成因的钙碱性弧型安山岩与 OIB 型辉绿岩(李小波等, 2015; 董宇超等, 2016; Li et al., 2016),如此复杂多样的岩石组合反映了俯冲带上复杂的源区物质组成与循环过

程。不仅如此,最近的研究提出班-怒洋的初始俯冲起始于晚三叠世末—早侏罗世(Qian et al., 2020; Liu et al., 2022),进一步表明班-怒洋中—晚侏罗世应处于洋壳俯冲背景。综上所述,南羌塘地块南缘出露的中—晚侏罗世岩浆岩应该形成于洋壳俯冲背景,是班-怒洋北向俯冲至南羌塘地块之下引发的弧型岩浆活动。

#### 4.3 岩石类型与成因

花岗岩的类型划分与岩石成因长期以来一直是众多地质学家关注的热点研究问题,其中 Chappell 等(1974, 1992)根据花岗岩的岩浆源区物质组成和成岩构造环境的差异将花岗岩划分为 I、S、M、A 型 4 类,该分类方式已经被广泛运用于花岗岩成因与演化的研究工作(王亮等, 2022; 孙巍等, 2022)。Li 等(2014)和 Liu 等(2014)对区内花岗岩岩石开展了年代学和地球化学的研究工作,识别了普通钙碱性 I 型和高分异型两类花岗岩。笔者在新获得的卡易错花岗闪长岩研究资料的基础上,进一步收集整理了前人已报道的卡易错花岗岩体的数据资料,以此准确约束卡易错地区花岗质岩石的岩石类型与成因。

卡易错花岗岩整体具有低的  $Zr+Ce+Nb+Y$  含量,然而根据其  $(Na_2O+K_2O)/CaO$  和  $FeO^*/MgO$  值的不同,区内岩石可以划分为高分异与未分异两组(图 6a、图 6b)。不同于前人报道的高分异型花岗岩,本次采集的花岗闪长岩样品显示低的  $(Na_2O+K_2O)/CaO$  和  $FeO^*/MgO$  值,具有未分异花岗岩的特征。在  $P_2O_5-SiO_2$  和 Th-Rb 图解中,花岗闪长岩样品均显示出 I 型花岗岩的演化趋势(图 6c、图 6d)。结合花岗闪长岩弱过铝质的特征(图 4c),卡易错花岗闪长岩应该属于普通钙碱性 I 型花岗岩。I 型花岗岩一般认为起源于变火成岩下地壳部分熔融或者幔源物质对变沉积岩下地壳的改造(Petford et al., 1996; Chappell et al., 2001; Li et al., 2007),研究区内乃至整个南羌塘地块南缘均未发现大规模幔源岩浆活动成因的基性岩,结合花岗闪长岩相对均一的锆石原位 Hf 同位素组成( $\epsilon_{Hf}(t)=-2.66\sim-0.27$ ),卡易错花岗闪长岩难以解释为幔源物质与变沉积岩下地壳熔体混合的产物。同时,花岗闪长岩具有高的  $CaO/Na_2O$  以及低的  $Al_2O_3/TiO_2$  和  $Rb/Ba$ 、 $Rb/Sr$  值,进一步指示着其起源于玄武质火成岩下地壳的部分熔融(图 7a、图 7b)。此外,花岗闪长岩中不同程度的 Eu、Sr、Ba 等元素的负异常一般认为是成岩过

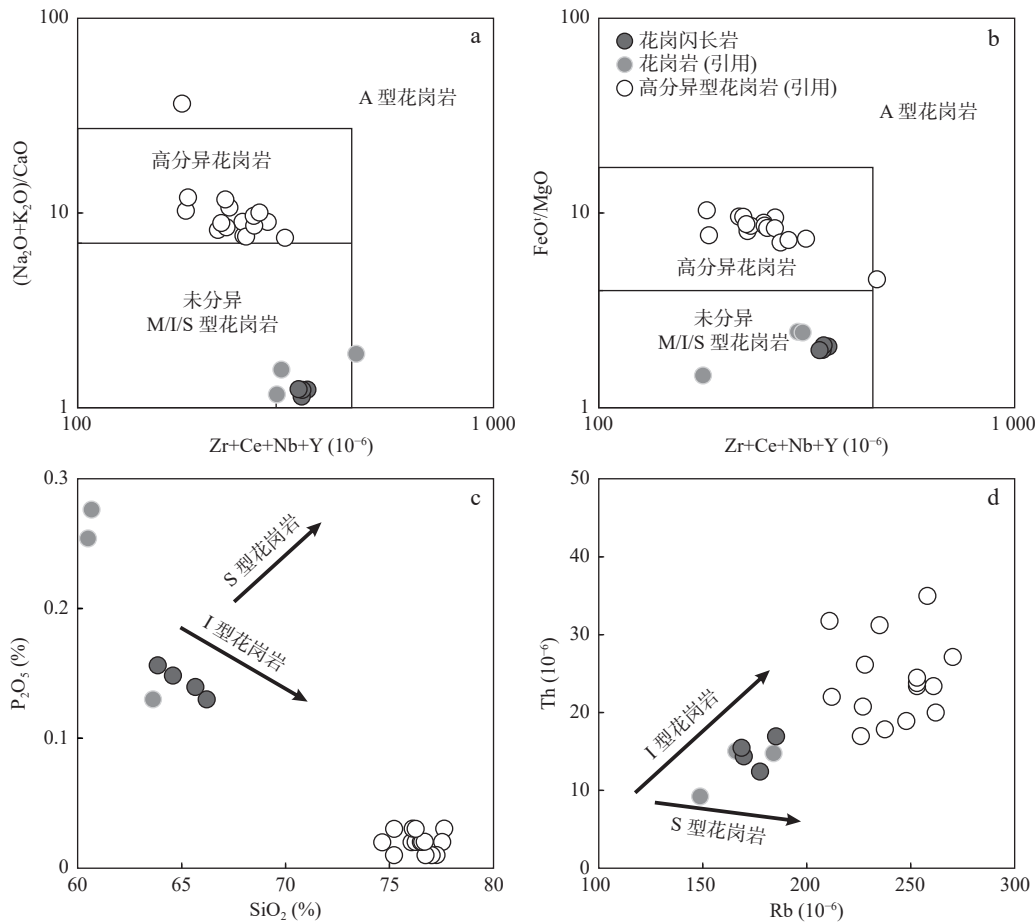


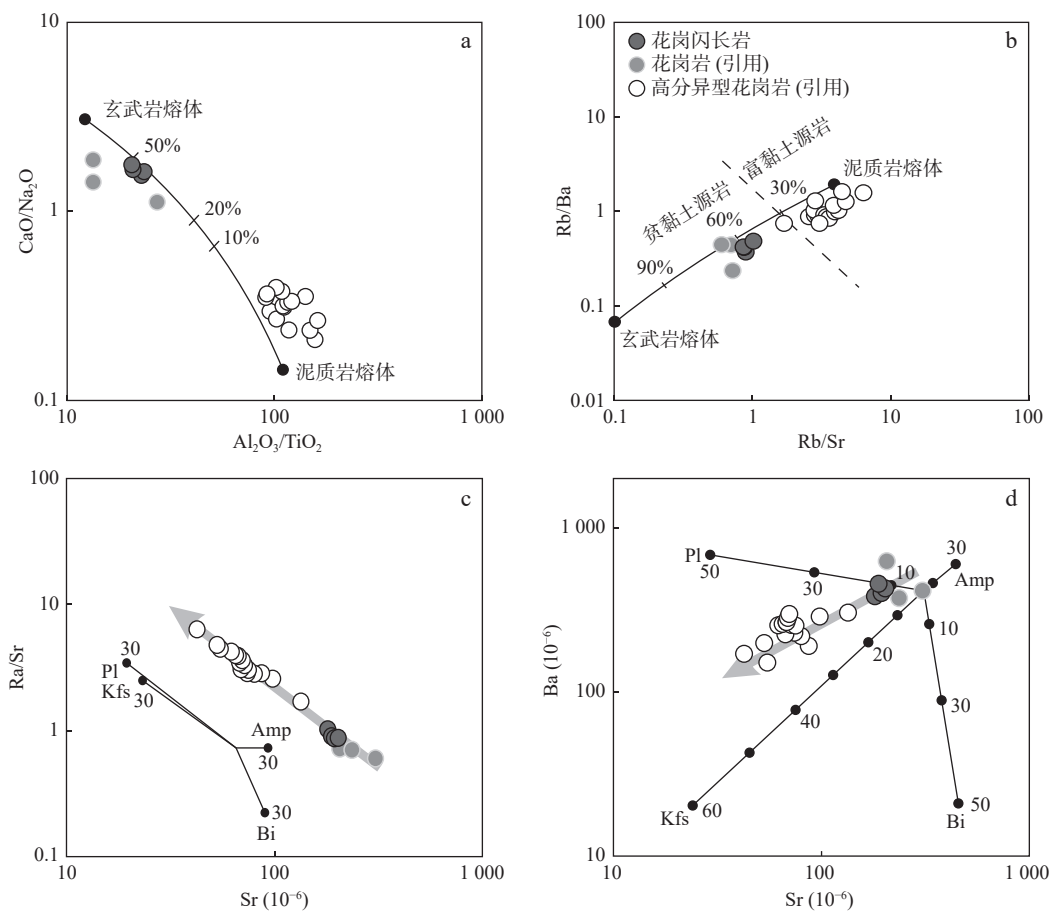
图6 卡易错花岗岩 $(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ - $\text{Zr}+\text{Ce}+\text{Nb}+\text{Y}$ 图解(a)、 $\text{FeO}^\text{t}/\text{MgO}$ - $\text{Zr}+\text{Ce}+\text{Nb}+\text{Y}$ 图解(b)(Whalen et al., 1987)、 $\text{P}_2\text{O}_5$ - $\text{SiO}_2$ 图解(c)和Th-Rb图解(d)(Li et al., 2007)

Fig. 6 Geochemical classification diagrams of Kayico granitic rocks: (a)  $(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$  vs.  $\text{Zr}+\text{Ce}+\text{Nb}+\text{Y}$  diagram, (b)  $\text{FeO}^\text{t}/\text{MgO}$  vs.  $\text{Zr}+\text{Ce}+\text{Nb}+\text{Y}$  diagram, (c)  $\text{P}_2\text{O}_5$  vs.  $\text{SiO}_2$  diagram, (d) Th vs. Rb diagram of Kayico granitic rocks

程中存在着长石类矿物的结晶分异,而Nb、Ta等元素的亏损则和金红石/榍石的结晶分离相关。综上所述,卡易错花岗闪长岩应该是南羌塘地块之下古老的变火成岩下地壳熔体经历一定结晶分异作用的产物。

卡易错高分异型花岗岩具有与钙碱性I型花岗岩形成时代一致,在空间上密切共生,并相似的锆石Hf同位素特征,表明二者具有相似的岩浆源区物质组成(Li et al., 2014; Liu et al., 2014)。然而,高分异型花岗岩显示强烈的亏损Eu、Sr、Ba等元素(图5),指示着岩浆在侵位过程中经历了强烈的结晶分异作用。在Rb/Sr-Sr和Ba-Sr图解中,卡易错两类花岗岩之间显示出明显的长石类矿物分离结晶趋势(图7c、图7d),进一步表明卡易错不同类型花岗岩地球化学的差异是后期岩浆侵位过程中经历不同演化过程的产物。近年来,晶粥体模型(MUSH)被广泛应

用于解释同期共生花岗闪长岩与高分异型花岗岩之间的成因联系(Bachmann et al., 2004; Hildreth, 2004),该模型提出花岗质岩浆在浅层岩浆房中发生矿物结晶时,形成一种晶体与液体共存的晶粥体,其外围的物质结晶形成富含斑晶的花岗质岩石,而中心的残余岩浆则形成高分异的高硅花岗岩(Wu et al., 2017)。晶粥体模型无疑为卡易错地区空间上相伴生、时代上相一致的普通钙碱性I型花岗岩和高分异型花岗岩提供了合理的成因解释。因此,研究认为,在中—晚侏罗世班—怒洋持续北向俯冲过程中,底侵的幔源玄武质岩浆诱发南羌塘地块之下古老的变火成岩下地壳物质发生重熔,形成的熔体上升侵位、并在浅层岩浆房内发生显著低压结晶分异作用,其外围的晶粥体与内部的熔体分别冷凝形成了卡易错地区普通钙碱性I型和高分异型两类花岗质岩石(图8)。



Amp. 闪石; Bi. 黑云母; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石

图7 卡易错花岗岩  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  图解(a)、 $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$  图解(b) (Sylvester, 1998)、 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Sr}$  图解(c)、 $\text{Ba}-\text{Sr}$  图解(d) (Rollinson, 1993)

Fig. 7 (a)  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  vs.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  diagram, (b)  $\text{Rb}/\text{Ba}$  vs.  $\text{Rb}/\text{Sr}$  diagram, (c)  $\text{Rb}/\text{Sr}$  vs.  $\text{Sr}$  diagram, (d)  $\text{Ba}$  vs.  $\text{Sr}$  diagram of Kayico granitic rocks

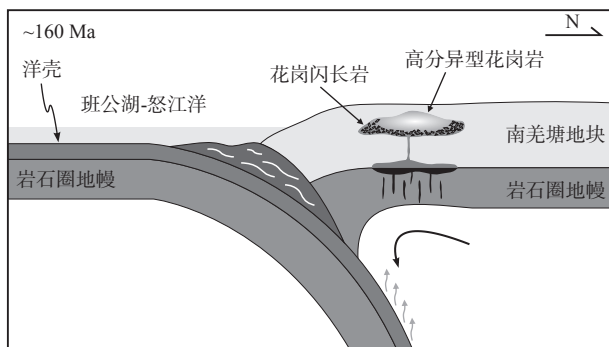


图8 藏北卡易错地区中—晚侏罗世构造-岩浆演化模式

Fig. 8 Middle-Late Jurassic tectonomagmatic evolution process of Kayico area, Northern Tibet

## 5 结论

(1) 锆石 U-Pb 年龄表明, 卡易错花岗闪长岩形成

于 158 Ma, 与前人在卡易错岩体中获得的 168~160 Ma 的年龄相一致, 是南羌塘地块南缘中—晚侏罗世构造-岩浆活动的产物。

(2) 卡易错花岗闪长岩具有钙碱性 I 型花岗岩的地球化学特征, 以及相对富集的锆石 Hf 同位素组成, 是班-怒洋中—晚侏罗世北向俯冲背景下南羌塘地块古老的变火成岩下地壳熔融的产物。

(3) 结合现有研究资料, 晶粥体模式为卡易错地区钙碱性 I 型与高分异型两类花岗岩提供了合理的成因解释, 二者是壳源熔体在浅层岩浆房内经历结晶分异后不同端元冷凝的产物。

致谢: 野外工作得到西藏自治区地质调查院刘海永博士和吉林大学罗安波博士等人的帮助, 审稿专家对稿件提出的宝贵意见对论文质量提高至关重要, 在此一并致以衷心的感谢。

## 参考文献(References):

- 董宇超, 李才, 王明, 等. 西藏改则县多不扎地区上侏罗统对望山组的建立及意义[J]. *地质通报*, 2016, 35(8): 1263–1270.
- DONG Yuchao, LI Cai, WANG Ming, et al. Establishment of Upper Jurassic Duiwangshan Formation in Duobuza area, Gerze County, Tibet, and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(8): 1263–1270.
- 范建军, 张博川, 刘海永, 等. 班公湖-怒江洋早-中侏罗世洋内俯冲: 来自洞错蛇绿岩的证据[J]. *岩石学报*, 2019, 35(10): 3048–3064.
- FAN Jianjun, ZHANG Bochuan, LIU Haiyong, et al. Early-Middle Jurassic intra-oceanic subduction of the Bangong-Nujiang oceanic lithosphere: Evidence of the Dong Co ophiolite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(10): 3048–3064.
- 李小波, 王保弟, 刘函, 等. 西藏达如错地区晚侏罗世高镁安山岩——班公湖-怒江洋壳俯冲消减的证据[J]. *地质通报*, 2015, 34(Z1): 251–261.
- LI Xiaobo, WANG Baodi, LIU Han, et al. The Late Jurassic high-Mg andesites in the Daru Tso area, Tibet: Evidence for the subduction of the Bangong Co-Nujiang River oceanic lithosphere[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(Z1): 251–261.
- 李艳广, 靳梦琪, 汪双双, 等. 2023: LA-ICP-MS U-Pb 定年技术相关问题探讨[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 274–282.
- LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 274–282.
- 李永飞, 王娟. 羌塘地块南界班公湖-丁青断裂构造带火山岩地球化学及其形成构造环境[J]. *西北地质*, 2005, 38(1): 15–25.
- LI Yongfei, WANG Juan. Geochemistry of the volcanic rock association from Bangong lake-Dingqing suture zone of the south boundary in Qiangtang block and its tectonic setting[J]. *Northwestern Geology*, 2005, 38(1): 15–25.
- 李志军, 李晨伟, 高一鸣, 等. 西藏狮泉河蛇绿岩中侏罗世晚期 (ca. 163 Ma) OIB 型辉绿岩及高镁闪长岩年代学及地球化学特征: 早期洋壳俯冲产物?[J]. *岩石学报*, 2019, 35(03): 816–832.
- LI Zhijun, LI Chenwei, GAO Yiming, et al. Geochronology and geochemistry characteristics of the late Mid-Jurassic (ca. 163 Ma) OIB-type diabase and high-Mg diorites in Shiquanhe ophiolite: Products of early stage oceanic crust subduction?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(03): 816–832.
- 刘海永, 唐菊兴, 王雨, 等. 西藏安多纳茸矿区石英闪长玢岩成因及地质意义[J]. *地球科学*, 2022, 47(03): 1059–1077.
- LIU Haiyong, TANG Juxing, WANG Yu, et al. Petrogenesis and Geological Significance of Quartz diorite porphyry in Narong mining area, Tibet[J]. *Earth Science*, 2022, 47(03): 1059–1077.
- 刘海永, 岳黎璋, 顿珠旺堆, 等. 青藏高原中部麻米地区晚侏罗世火山岩岩石成因及其地质意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(7): 2368–2378.
- LIU Haiyong, YUE Yunzhang, DUNZHU Wangdui, et al. Petrogenesis and Geological Significance of Late Jurassic Volcanic Rocks in Mami Area, Central Tibetan Plateau[J]. *Earth Science*, 2019, 44(7): 2368–2378.
- 孙巍, 许逢明, 吴大天, 等. 大兴安岭中部扎赉特旗晚三叠世 A 型花岗岩的发现及其地质意义[J]. *西北地质*, 2022, 56(2): 80–91.
- SUN Wei, XU Fengming, WU Datian, et al. Discovery and Geological Significance of Late Triassic A-Type Granite in Jalaid Banner, Middle of Great Xing'an Range[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 56(2): 80–91.
- 唐跃, 翟庆国, 胡培远, 等. 班公湖-怒江缝合带西段拉果错蛇绿岩中斜长岩成因及其对中特提斯洋演化的制约[J]. *地质通报*, 2021, 40(08): 1265–1278.
- TAN Yue, ZHAI Qingguo, HU Peiyuan, et al. Petrogenesis of anorthosite in the Laguoco ophiolite, western part of the BangongNujiang suture zone and its constraint to the evolution of the Meso-Tethys Ocean[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(08): 1265–1278.
- 王亮, 王凯, 张翔, 等. 南祁连山扎子沟埃达克岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *西北地质*, 2022, 55(1): 39–49.
- WANG Liang, WANG Kai, ZHANG Xiang, et al. Geochronological and Geochemical Characteristics of the Zhazigou Adakite in South Qilian and the Geological Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(1): 39–49.
- 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): 185–220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185–220.
- 吴浩, 徐祖阳, 严维兵, 等. 西藏中部聂尔错地区辉绿岩锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征: 对新特提斯洋板片断离的指示[J/OL]. *中国地质*, 2020.
- WU Hao, XU Zuyang, YAN Weibing, et al. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of diabase in Nie'erco area, central Tibet: Implication for Neo-Tethyan slab breakoff [J/OL]. *China Geology*, 2020.
- Bachmann O, Bergantz G W. On the origin of crystal-poor rhyolites: Extracted from batholithic crystal mushes[J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45: 1565–1582.
- Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, 1974, 8: 173–174.
- Chappell B W, White A J R. I- and S- type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1992, 83: 1–26.
- Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types: 25 years later[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2001, 48(4): 489–499.
- Fan Jianjun, Li Cai, Wang Ming. Remnants of a Late Triassic ocean island in the Gufeng area, northern Tibet: Implications for the opening and early evolution of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 135: 35–50.
- Fan J J, Niu Y, Liu Y M, et al. Timing of closure of the Meso-Tethys Ocean: Constraints from remnants of a 141–135 Ma ocean island within the Bangong-Nujiang Suture Zone, Tibetan Plateau [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2021, 133(9–10): 1875–1889.
- Hildreth W. Volcanological perspectives on Long Valley, Mammoth Mountain, and Mono Craters: Several contiguous but discrete systems[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2004, 136: 169–198.
- Kapp P, Decelles P G, Gehrels G E, et al. Geological records of the

- Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, 119(7-8): 917-933.
- Kapp P, Decelles P G. Mesozoic-Cenozoic geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen and working tectonic hypotheses[J]. *American Journal of Science*, 2019, 319(3): 159-254.
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A classification of igneous rocks and a glossary of terms [M]. Oxford, Blackwell, 1989.
- Li X H, Li Z X, Li W X, et al. 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*, 2007, 96(s1-2): 186-204.
- Li Shimin, Zhu Dicheng, Wang Qing, et al. Northward subduction of Bangong-Nujiang Tethys: Insight from Late Jurassic intrusive rocks from Bangong Tso in western Tibet[J]. *Lithos*, 2014, 205(9): 284-297.
- Li Shimin, Zhu Dicheng, Wang Qing, et al. Slab-derived adakites and subslab asthenosphere-derived OIB-type rocks at  $156 \pm 2$  Ma from the north of Gerze, central Tibet: Records of the Bangong-Nujiang oceanic ridge subduction during the Late Jurassic[J]. *Lithos*, 2016, 262: 456-469.
- Liu Y, Zhai Q, Hu P, et al. Subduction initiation of the Bangong-Nujiang Tethys Ocean, Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 238: 105394.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257: 34-43.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, 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 from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1-2): 537-571.
- Liu Deliang, Huang Qishuai, Fan Shuaiquan, et al. Subduction of the Bangong-Nujiang Ocean: constraints from granites in the Bangong Co area, Tibet[J]. *Geological Journal*, 2014, 49: 188-206.
- Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication, 2003.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Review*, 1994, 74: 193-227.
- Pan Guitang, Wang Liquan, Li Rongshe, et al. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53(2): 3-14.
- Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37: 1491-1521.
- Qian Q, Hermann J, Dong F, et al. Episodic formation of Neotethyan ophiolites (Tibetan plateau): Snapshots of abrupt global plate reorganizations during major episodes of supercontinent breakup? [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 203: 103144.
- Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247-263.
- Rollinson H R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation [M]. Longman Scientific Technical, London, 1993.
- Shand S J. Eruptive Rocks: Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-deposits with a Chapter on Meteorite [M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins* [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 528-548.
- Sun Peng, Dan Wei, Wang Qiang, et al. Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf-O isotope geochemistry of Late Jurassic granodiorites in the southern Qiangtang block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 192: 104235.
- Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 1998, 45(s1-4): 29-44.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407-419.
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, et al. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(7): 1201-1219.
- Wu Hao, Xie Chaoming, Li Cai, et al. Tectonic shortening and crustal thickening in subduction zones: Evidence from Middle-Late Jurassic magmatism in Southern Qiangtang, China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 39: 1-13.
- Wu Hao, Li Cai, Yu Yunpeng, et al. Age, origin, and geodynamic significance of high-Al plagiogranites in the Labuco area of central Tibet[J]. *Lithosphere*, 2018, 10(2): 351-363.
- Wu Hao, Chen Jingwen, Wang Qiang, et al. Spatial and temporal variations in the geochemistry of Cretaceous high-Sr/Y rocks in central Tibet[J]. *American Journal of Science*, 2019a, 319(2): 105-121.
- Wu Hao, Sun Shulin, Liu Haiyong, et al. An Early Cretaceous slab window beneath central Tibet, SW China: evidence from OIB-like alkaline gabbro in the Duolong area[J]. *Terra Nova*, 2019b, 31(1): 67-75.
- Yang Zongyong, Wang Qiang, Hao Lulu, et al. Subduction erosion and crustal material recycling indicated by adakites in central Tibet[J]. *Geology*, 2021, 49(6): 708-712.
- Zhu Dicheng, Li Shilin, Cawood P A, et al. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in central Tibet by divergent double subduction[J]. *Lithos*, 2016, 245: 7-17.
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, et al. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, 301(1): 241-255.
- Zong Keqing, 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.