

川西长征穹窿高分异花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征:对区域稀有金属成矿背景的限定

周 玉¹, 周 雄¹, 张 贻¹, 秦志鹏², 贾志泉³

(1 中国地质科学院矿产综合利用研究所 中国地质调查局金属矿产资源综合利用技术研究中心, 四川 成都 610041;
2 成都理工大学, 四川 成都 610059; 3 四川省地质矿产勘查开发局一〇八地质队, 四川 崇州 611230)

摘 要 新近在川西松潘-甘孜造山带东南缘长征穹窿发现一处花岗岩伟晶岩型铷钽矿产地。为阐明与成矿花岗岩伟晶岩具密切成因关系的花岗岩的特征及其成矿背景,在详细野外地质调查的基础上,采集穹窿核部出露的花岗岩样品开展了镜下鉴定、元素地球化学及锆石 LA-(MC)-ICP-MS U-Pb 和 Lu-Hf 同位素测试工作。结果表明,长征穹窿核部出露的两处花岗岩岩枝分别由二长花岗岩和正长花岗岩组成,岩石高硅、富铝、高钾、富碱、低钙、低 Na/K 比值,为高钾钙碱性岩石系列, A/CNK 值均大于 1.1, 为过铝质花岗岩; 岩石相对富集大离子亲石元素 K、Rb 和放射性元素 U, 而亏损 Ba、Sr、Ti 等微量元素; 岩石稀土元素总量为 $30.9 \times 10^{-6} \sim 69.0 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 4.2~8.0, 轻稀土元素富集明显, δEu 为 0.12~0.57, 具明显的负铕异常; 锆石 U-Pb 定年结果分别为 $(202.2 \pm 1.3) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.42, n=15$) 和 $(202.2 \pm 1.5) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.18, n=9$), 长征穹窿核部花岗岩岩浆结晶时代为晚三叠世末期; 锆石 Lu-Hf 同位素 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 T_{DM2} 分别为 $-15.42 \sim -4.71$ 和 $2.22 \sim 1.54 \text{ Ga}$, 花岗岩可能起源于下地壳。综合分析认为, 长征穹窿核部花岗岩为典型的高分异花岗岩, 源于下地壳的初始岩浆在晚三叠世末期上升侵位过程中混染了较多围岩成分而形成; 区域伟晶岩至少存在 3 期成矿作用, 稀有金属矿化为多期或多次岩浆作用的产物, 预测区域可能存在一期 194 Ma 左右的伟晶岩稀有金属成矿事件; 区域与稀有金属成矿作用有关的花岗岩为多期或多次岩浆作用晚期的产物, 形成于同碰撞构造向碰撞后伸展构造转换的相对稳定环境。

关键词 地球化学; 花岗岩; LA-ICP MS 锆石 U-Pb 定年; Lu-Hf 同位素; 稀有金属; 长征穹窿; 松潘-甘孜造山带
中图分类号: P597 **文献标志码**: A

Geochemistry, zircon geochronology and Lu-Hf isotopic characteristics of highly fractionated granite from Changzheng dome in western Sichuan and their constraint on mineralization setting of rare metal deposit

ZHOU Yu¹, ZHOU Xiong¹, ZHANG Yi¹, QIN ZhiPeng² and JIA ZhiQuan³

(1 Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Research Center for Comprehensive Utilization of Metal Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3 No.108 Geological Party, BGEEMRSP, Chongzhou 611230, Sichuan, China)

Abstract

A granite-pegmatite-type rubidium-beryllium orefield has recently been discovered in the Changzheng dome on the southeastern margin of the Songpan- garzê orogenic belt in western Sichuan. In order to clarify the metallo-

* 本文得到中国地质调查局项目(编号:DD20160074、DD20190185)、国家青年自然科学基金(编号:41602072)、国土资源部公益性行业科研专项(编号:201211035)、西藏自治区重大科技项目(编号:XZ201801-GB-02、2015XZ01G50)、西藏自治区矿产资源勘查专项(编号:[2018]09号)联合资助

第一作者简介 周 玉,男,1984年生,博士,主要从事岩浆成矿作用的研究和生产工作。Email:zhouyu46@163.com

收稿日期 2019-06-28;改回日期 2019-07-12。张绮玲编辑。

genic geological background, the authors collected granite samples in the dome core which is closely related to the generation of mineralized granite pegmatite for microscopic identification, element geochemistry and zircon LA-(MC)-ICP-MS U-Pb and Lu-Hf isotope testing on the basis of detailed field geological survey. The results show that the two granites in the core of the Changzheng dome are syenogranite and monzonite, characterized by high silicon, aluminium, potassium, alkali, low calcium and low Na/K ratios. They belong to high potassium calc-alkaline rock series. the A/CNK ratios are all higher than 1.1, suggesting peraluminous granites. The rocks are relatively enriched in large ion lithophile elements K, Rb and radioactive elements U, but depleted in trace elements such as Ba, Sr and Ti. The ΣREE is $30.9 \times 10^{-6} \sim 69.0 \times 10^{-6}$, and LREE/HREE is 4.2~8.0, with obvious enrichment of light REE elements. The δEu is 0.12~0.57, with obvious negative Eu anomaly. The zircon U-Pb dating results are (202.2±1.3) Ma (MSWD=0.42, $n=15$) and (202.2±1.5) Ma (MSWD=1.18, $n=9$), suggesting that the magmatic crystallization of granite in the core of the Changzheng dome took place at the end of Late Triassic, and its zircon Lu-Hf isotope epsilon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ and T_{DM2} are -15.42~-4.71 and 2.22~1.54 Ga, respectively. Comprehensive analysis shows that the granite in the core of the Changzheng dome is a typical highly differentiated granite. The initial magma originated from the lower crust mixed with surrounding rock components in the process of ascending emplacement at the end of the Late Triassic period. There existed at least three stages of mineralization of pegmatite in the study area. The rare metals are the products of multiphase magmatism and the authors hold that there probably existed a pegmatite rare metal metallogenic event at ±194 Ma in the study area. The regional granites related to rare metal metallogenesis were formed in late-stage of multiphase magmatism and formed in relatively stable environments such as conversion process from syn-collisional to post-collisional extensional tectonic environment.

Key words: geochemistry, granite, LA-ICP MS zircon U-Pb dating, Lu-Hf isotope, rare metal, Changzheng dome, Songpan-Garze orogenic belt

川西长征穹窿花岗岩位于松潘-甘孜造山带东南缘。造山带内广泛发育呈面状的印支-燕山期花岗岩(赵永久等,2007;袁静等,2011)以及丹巴-木里花岗片麻岩穹窿群和雅江-马尔康片(麻)岩穹窿群(许志琴等,2015;2016;2018)。

上述穹窿核部一般有酸性岩浆岩出露,穹窿周边发育与花岗岩有密切成因关系的花岗伟晶岩脉。近年来,针对马尔康可尔因岩体和康定马颈子岩体、容须卡岩体及长征岩体周边发育的花岗伟晶岩脉的稀有金属找矿成果显著(古城会,2014;付小方等,2014;2015;饶魁元,2016;周玉等,2017a;2017b;Zhou et al.,2018),围绕马颈子岩体发育的X03伟晶岩脉新增氧化锂资源量为64.31万吨(付小方等,2014),初步估算可尔因岩体周边斯则木足伟晶岩型锂矿的资源量为51.54万吨(Yue et al.,2018),均达超大型规模。与甲基卡穹窿同属雅江穹窿群的长征穹窿研究程度相对较低,但近年来亦取得了稀有金属找矿的新进展(周玉等,2017a;2017b;Zhou et al.,2018),新发现一处大型的伟晶岩型铷铯矿产地。

花岗伟晶岩是岩浆和热液作用过渡阶段的产物,

与相关的花岗岩有密切的成因关系(Bakker et al.,2006;Thomas et al.,2011a;2011b;London et al.,2012;London,2014)。锂同位素(苏媛娜等,2011;刘丽君等,2017)、流体包裹体和C-H-O同位素(李健康等,2006)以及年代学(王登红等,2005)研究均表明,甲基卡成矿花岗伟晶岩由与之相关的马颈子二云母花岗岩演化而来,二者为同源演化的产物。因此,阐明与成矿伟晶岩密切相关的花岗岩特征显得尤为重要。本文在野外调查的基础上,选择长征穹窿核部出露的典型花岗岩开展系统的岩石学、岩石化学以及年代学和Hf同位素研究,探讨其侵位时代、岩石类型、岩浆源区和构造环境等特征,希望对阐明区域稀有金属成矿背景、松潘-甘孜造山带及青藏高原东缘构造演化等有所裨益。

1 地质概况

长征穹窿区域出露地层以上三叠统新都桥组(T_3xd)为主,在穹窿核部有少量侏倭组(T_{3zw})地层出露。印支-燕山期岩浆活动强烈,主要侵位于三叠系中、上统中,其中侵入岩主要发育中酸性的岩体、

岩株、岩枝和岩脉等,火山岩则主要以基性为主。区域处于鲜水河断裂带南西,区内构造多受其影响,主要形成一系列北西向延伸的断裂和褶皱构造。区域

较为显著的特点是在断裂交接复合部位,发育由自北向南的长征、容须卡、瓦多和甲基卡等4个构造岩

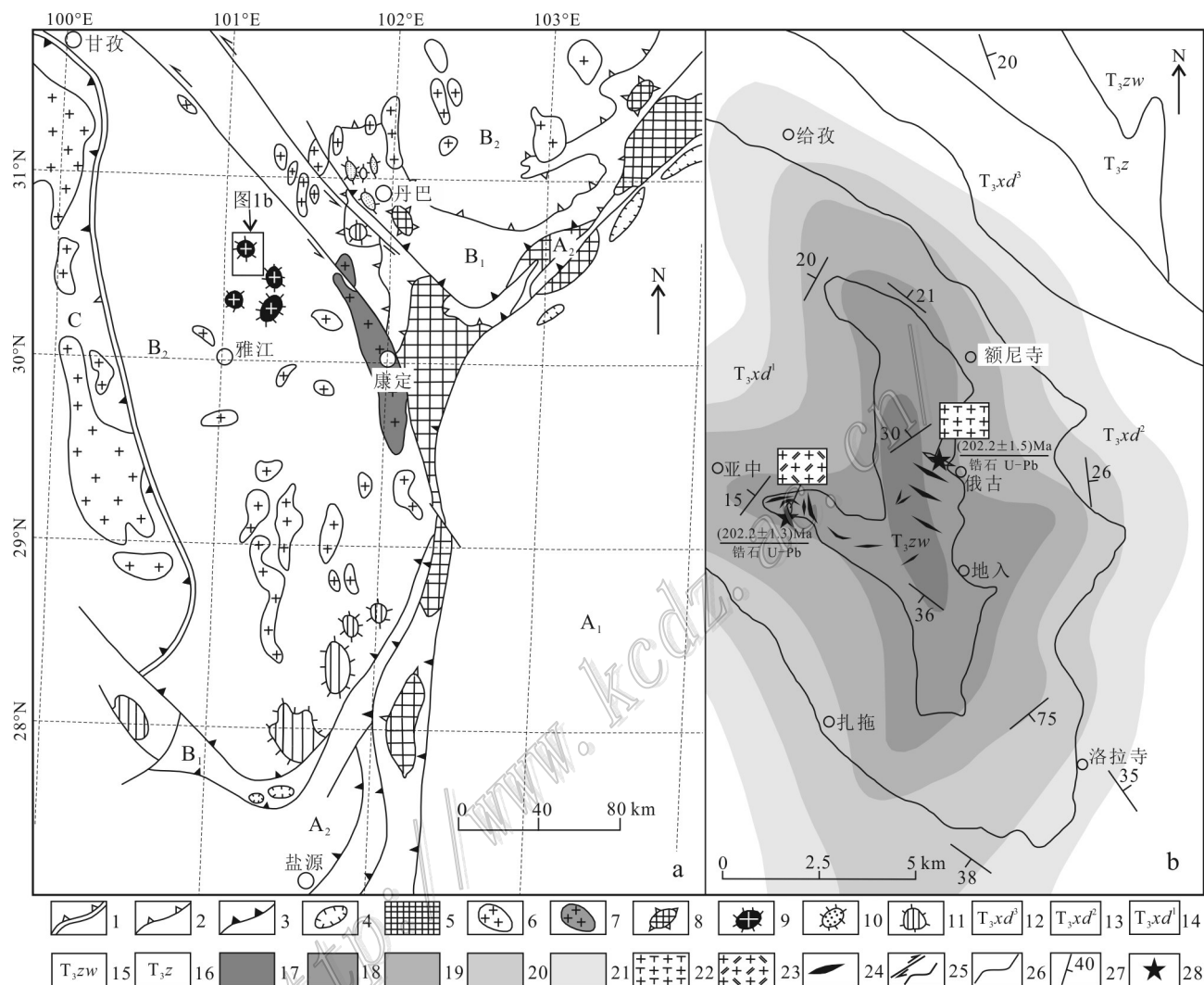


图1 研究区区域构造简图(a)及长征地区地质简图(b)(底图据侯立玮等, 2002 修改)

A₁—四川前陆盆地; A₂—龙门山-盐源前陆逆冲楔; B₁—龙门前山-锦屏山腹陆滑脱-推覆叠置岩片; B₂—松潘-甘孜造山带主体; C—义敦岛弧带; 1—甘孜-理塘碰撞结合带; 2—滑脱带; 3—逆冲推覆带; 4—飞来峰; 5—前震旦纪变质杂岩; 6—中生代花岗岩; 7—新生代花岗岩; 8—变质核杂岩; 9—岩浆核杂岩; 10—片麻岩穹窿; 11—构造穹窿; 12—新都桥组三段; 13—新都桥组二段; 14—新都桥组一段; 15—休倭组; 16—杂谷脑组; 17—夕线石片岩带; 18—十字石片岩带; 19—红柱石片岩带; 20—石榴子石片岩带; 21—黑云母片岩带; 22—正长花岗岩; 23—二长花岗岩; 24—花岗伟晶岩; 25—断层及平移断层; 26—地质界线; 27—地层产状; 28—锆石样品采样点

Fig. 1 Geological map of the southeast part of the Songpan-Ganzi Block (a) and the geological map of the Changzheng region (b) (base map modified after Hou et al., 2002)

A₁—Sichuan foreland basin; A₂—Longmenshan-Yanyuan foreland thrust wedge; B₁—Longmen Houshan-Jingpingshan ventral slip-nappe superposition sheet; B₂—The main part of Songpan-Ganze orogenic belt; C—Yidun island arc; 1—Garze-Litang collision suture zone; 2—Slippage zone; 3—Thrust-nappe belt; 4—Klippe; 5—Pre-Sinian metamorphic complex; 6—Mesozoic granite; 7—Cenozoic granite; 8—Metamorphic core complex; 9—Magmatic core complex; 10—Gneiss dome; 11—Tectonic dome; 12—3rd Member of Xinduqiao Formation; 13—2nd Member of Xinduqiao Formation; 14—1st Member of Xinduqiao Formation; 15—The Zhuwo Formation; 16—The Zagunao Formation; 17—Sillimanite schist zone; 18—Staurolite schist zone; 19—Andalusite schist zone; 20—Garnet schist zone; 21—Biotite schist zone; 22—Syenogranite; 23—Monzogranite; 24—Granite pegmatite; 25—Fault and displacement fault; 26—Geological boundary; 27—Attitude of strata; 28—Sampling points of zircon

围,发育黑云母带至夕线石带的递进变质带。变质带中大量伟晶岩脉侵位,深部的花岗岩体出露较少,常仅在穹窿核部局部以小岩体、岩株、岩枝或隐伏状(瓦多)产出。

长征穹窿南北长约20 km,东西宽约12 km,呈椭圆状(图1b)。核部出露上三叠统侏倭组,岩性为夕线石角岩、红柱石片岩,四周分布上三叠统新都桥组,岩性为灰黑色石榴子石片岩、黑云母片岩等。地层向四周倾斜,倾角 $15^{\circ}\sim 49^{\circ}$ 不等(图2)。长征穹窿花岗岩基未出露,为隐伏状产出(刘应冬等,2018),侵入岩总体不发育,目前调查发现仅在穹窿东部和西部以岩枝状出露(图1b),岩性为正长花岗岩和二长花岗岩。自穹窿核部向外依次发育有夕线石带、十字石带、红柱石带、石榴子石带、黑云母带等变质带(图2)。在变质带中发育细粒花岗岩脉及伟晶岩脉,在正长花岗岩中亦可见有伟晶岩脉发育。其构造变形特征为:外围三叠纪地层表现为直立或同斜的由圆滑褶皱和尖棱褶皱相间组成的“西康式褶皱”,接近核部,逐渐转化为平卧褶皱;热变质穹窿顶部发育平缓面理,四周向外穹形倾伏,根据矿物的旋转应变标志,长征穹窿的组构显示北侧向北、南侧向南剪切和顶部压扁的运动学机制(图2)(许志琴等,1992)。

2 岩体、岩石学特征

目前长征穹窿仅在核部东部和西部发现2处以

岩枝状产出的花岗岩(图1b)。东部岩枝规模相对较大,出露宽度约为340 m,长约450 m,总体呈近椭圆状,面积约 1.68 km^2 ,岩性为白云母正长花岗岩,侵位于上三叠统侏倭组变砂岩、板岩中;岩体与围岩接触界线呈港湾不规则状,呈侵入接触关系;西部岩枝规模较小,出露宽度仅约为5 m,长约10 m,总体呈近椭圆状,岩性为二云母二长花岗岩,侵位于上三叠统侏倭组变砂岩、板岩中;呈侵入接触关系。在东部白云母正长花岗岩中可见有伟晶岩脉发育,主要岩性为钠长石型花岗伟晶岩,局部呈网状脉或脉群产出,脉宽 $10\sim 50\text{ cm}$ 不等。野外及镜下观察表明,长征岩体无明显变形。

白云母正长花岗岩($\xi\gamma$)(图3a~d)呈灰白色,细粒半自形粒状结构,块状构造。岩石由碱性长石(45%)、石英(30%)、斜长石(15%)、白云母(6%)、黑云母(4%)及少量副矿物组成。矿物粒径主要集中在 $0.2\sim 2\text{ mm}$,偶见碱性长石粒径可达4 mm。斜长石和碱性长石由于轻微蚀变略显浑浊;碱性长石以格子双晶发育的微斜长石为主,其次为条纹构造发育的条纹长石;石英呈他形粒状产出;斜长石聚片双晶发育。二云母二长花岗岩($\eta\gamma$)(图3e~f)呈灰白色,细粒半自形粒状结构,块状构造。岩石由石英(30%~35%)、斜长石(27%~30%)、碱性长石(20%~35%)、白云母(8%~10%)、黑云母(0~5%)及极少量副矿物组成。矿物粒径主要集中在 $0.2\sim 2\text{ mm}$,少量

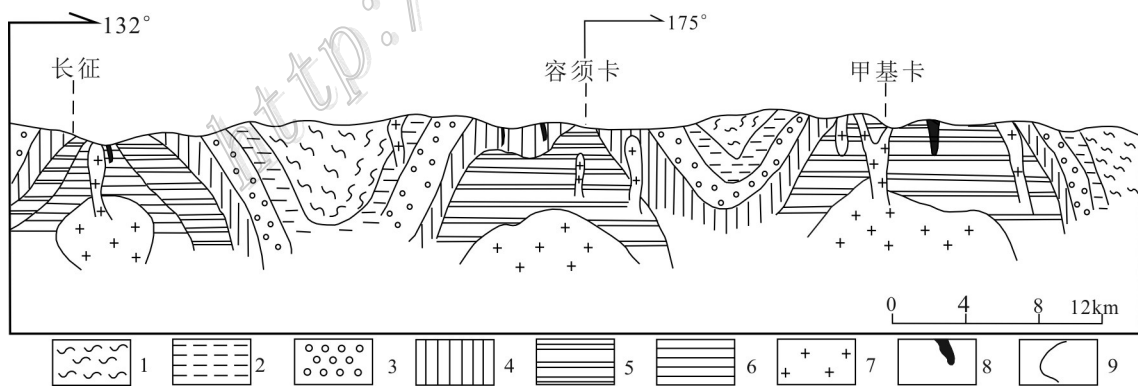


图2 长征-容须卡-甲基卡变质相带空间分布示意剖面图(据侯立玮等,2002修改)

1—绢云母-绿泥石千枚岩、板岩带;2—黑云母带;3—石榴子石带;4—红柱石带;5—十字石带;6—夕线石带;7—花岗岩;
8—花岗伟晶岩;9—地质界线

Fig. 2 The sketch profile of spatial distribution of Changzheng-Rongxuka-Jiajika metamorphic facies zone (modified after Hou et al., 2002)

1—Sericitic-chlorite phyllite and slate belt; 2—Biotite belt; 3—Garnet belt; 4—Andalusite belt; 5—Crossstone belt; 6—Sillimanite belt;
7—Granite; 8—Granite pegmatite; 9—Geological boundary

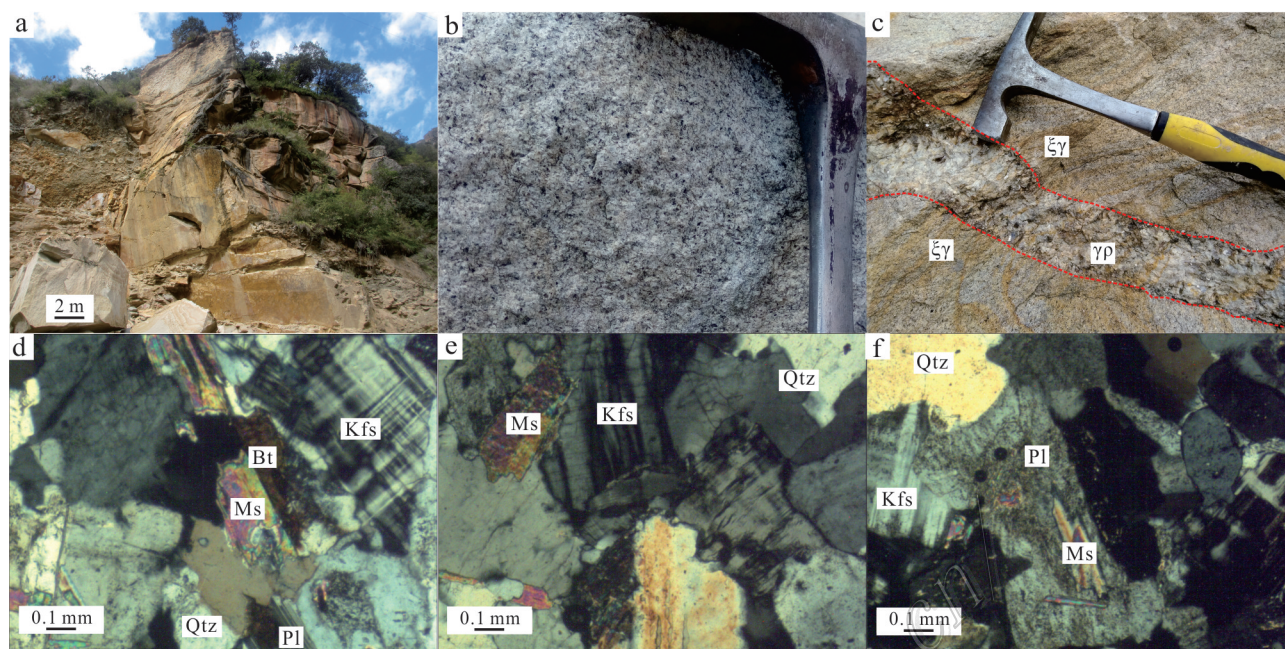


图3 长征穹窿花岗岩特征

- a. 长征穹窿东部出露岩枝特征; b. 正长花岗岩手标本特征(YD103-XT-18-5); c. 长征穹窿东部出露花岗岩与伟晶岩接触关系; d. 正长花岗岩中发育的白云母、碱性长石、斜长石、黑云母、石英特征(+)(YD103-XT-18-5); e. 二长花岗岩中发育的白云母、碱性长石、石英特征(+)(XT-YP01-18-2); f. 二长花岗岩中发育的白云母、斜长石、碱性长石、石英特征(XT-YP01-18-2);
 $\xi\gamma$ —正长花岗岩; $\eta\gamma$ —二长花岗岩; γp —花岗伟晶岩; kfs—碱性长石; Pl—斜长石; Qtz—石英; Ms—白云母; Bt—黑云母

Fig. 3 The characteristics of the syenogranite and monzonite from the Changzheng dome

- a. Characteristics of exposed apophyse in the eastern part of the Changzheng dome; b. Characteristics of hand specimens of syenogranite (YD103-XT-18-5); c. Contact relationship between granite and pegmatite in eastern Changzheng dome; d. Characteristics of muscovite, alkaline feldspar, plagioclase, biotite and quartz occurring in syenogranite (+) (YD103-XT-18-5); e. Characteristics of muscovite, alkaline feldspar and quartz occurring in monzonite (+) (XT-YP01-18-2); f. Characteristics of muscovite, plagioclase, alkaline feldspar and quartz occurring in monzonite (XT-YP01-18-2)
 $\xi\gamma$ —Syenogranite; $\eta\gamma$ —Monzonite; γp —Granite pegmatite; kfs—Alkaline feldspar; Pl—Plagioclase; Qtz—Quartz; Ms—Muscovite; Bt—Biotite

矿物粒径可达3 mm。斜长石和碱性长石由于轻微蚀变略显浑浊;斜长石聚片双晶发育;碱性长石可见条纹构造及格子状双晶发育,部分呈他形粒状结构;副矿物主要为磷灰石,呈半自形柱状产出,粒径0.05~0.15 mm。

3 样品采集及分析方法

在长征穹窿出露的两处岩枝处共采集22件样品进行常量、微量和稀土元素测试,并在两处各选取1件(YD103-1和YD01-18-1)样品进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素测试。YD103 编号样品采自穹窿东部, YD01-18、DCZ 和 CZ 编号样品采自长征穹窿西部(图1b)。样品新鲜,元素分析样品

质量约0.5 kg,测年样品质量约5 kg。样品常量、微量和稀土元素测试在中国地质科学院矿产综合利用研究所分析测试中心完成,常量元素测试采用X射线荧光光谱方法,分析精度优于2%;稀土元素和微量元素测试采用等离子质谱法(ICP-MS),误差小于5%。测年样品破碎及锆石挑选由廊坊市诚信地质服务有限公司实验室完成;制靶、阴极发光分析和锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石 U-Pb 定年采用 Varian 820-MS 四级杆等离子体质谱仪,激光剥蚀系统为 GeoLas2005; LA-ICP-MS 激光剥蚀采用单点剥蚀方式,普通铅校正采用 Andersen(2002)的方法,详细实验过程见袁洪林等(2003)文献。数据处理由 Glitter 软件完成,锆石协和图及均值图用 ISOPLOT

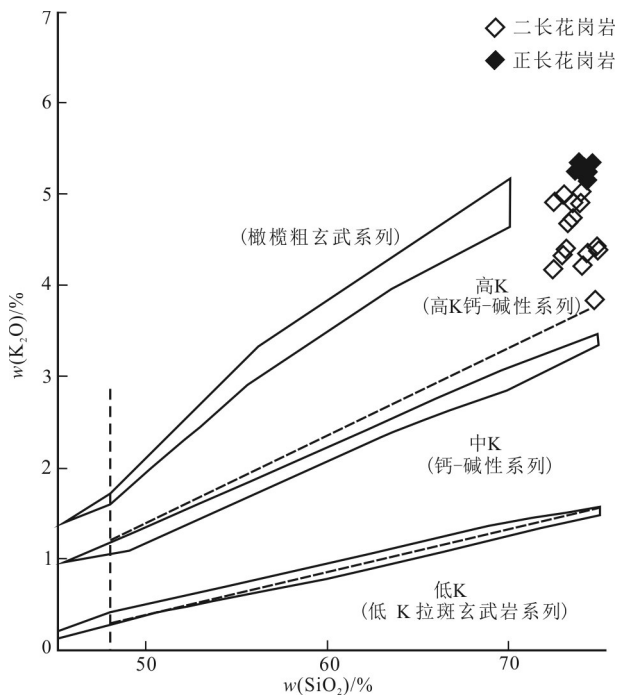


图4 $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O})$ 图解(底图据 Le Maitre, 1989)

Fig. 4 The diagram of $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O})$ (base map after Le Maitre, 1989)

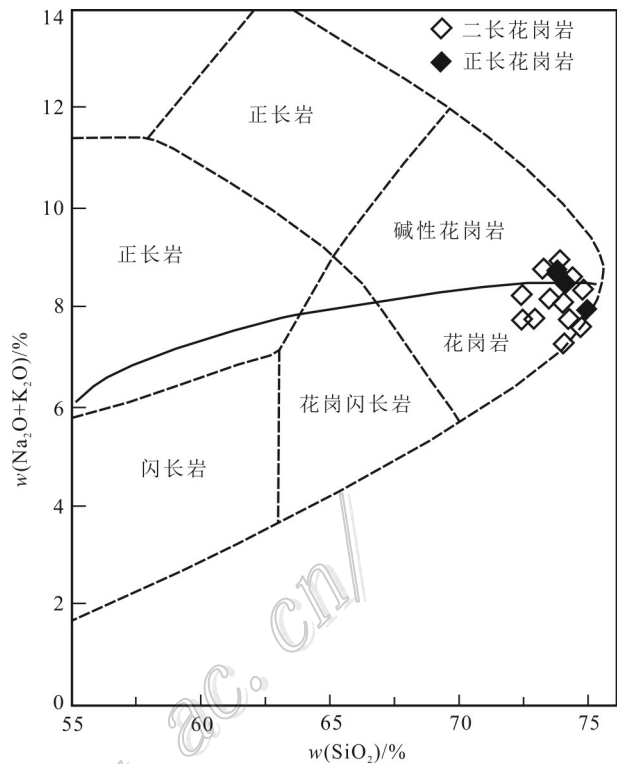


图5 侵入岩类 TAS 分类图(底图据 Wilson, 1989)

Fig. 5 The TAS classification map of the intrusive rock (base map after Wilson, 1989)

(V3.0)(Ludwig, 2003)程序计算获得。利用 Nu Plasma II 型 MC-ICPMS 对已测过年龄的锆石颗粒上选择同一震荡环带或邻近区域进行微区原位 Lu-Hf 同位素分析, 激光剥蚀系统为 193 nm 准分子激光剥蚀系统 (RESolution M-50, ASI), 激光能量密度为 $6 \text{ J}/\text{cm}^2$, 频率为 5 Hz, 斑束为 $43 \mu\text{m}$, 详细的分析方法和仪器参数见 Yuan 等 (2008) 文献。

4 分析结果

4.1 岩石化学特征

长征穹窿花岗岩常量元素分析结果见表 1, 正长花岗岩与二长花岗岩均具有高硅、富铝、高钾、富碱、低钙、低 Na/K 比值的特点, CIPW 标准矿物中出现刚玉 (表 1); 为高钾钙碱性岩石系列 (图 4), 正长花岗岩具有更高的 K_2O 含量; 在侵入岩类 TAS 分类图中, 样品点落入花岗岩区域, 并具有向碱性花岗岩演化的趋势 (图 5), 且正长花岗岩更偏碱性。花岗岩钾含量特征与岩矿鉴定结果一致 (图 3), 长征穹窿部分花岗岩矿物成分中含有较多的碱性长石, 个别样品的碱性长石成分比例可达 45% (YD103-XT-18-5)。在

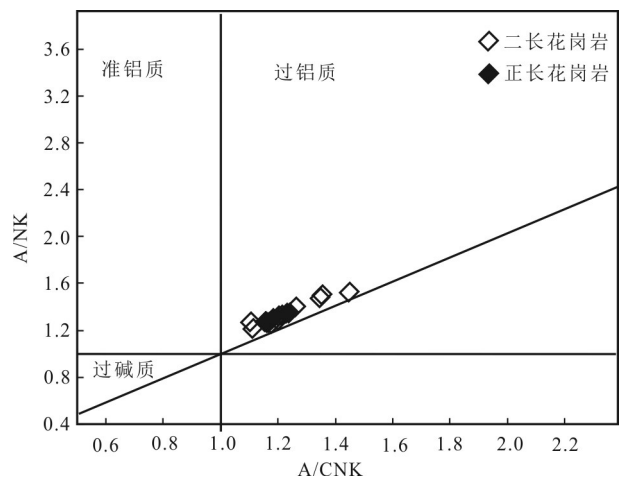


图6 花岗岩类 Shand 指数图解(底图据 Maniar et al., 1989)

Fig. 6 The diagram of Shand index for the granite (base map modified after Maniar et al., 1989)

Shand 指数图解 (图 6) 中, 样品数据点均位于过铝质区域, 显示过铝质特征, 且二长花岗岩具有更高的过铝指数, 表明二长花岗岩演化程度相对更高。

样品微量元素和稀土元素测试结果见表 1。根

表 1 长征穹窿花岗岩的主量元素、微量元素和稀土元素化学分析结果

Table 1 Major element, trace elemental and REE compositions of the syenogranite and monzonite from the Changzheng dome																								
组分	XT-YD01-18				CZ110							DCZ148							YD103XT					
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5		
	$w(B)/\%$																							
SiO ₂	74.87	74.81	73.26	72.42	73.53	72.43	73.99	74.11	73.49	73.23	74.69	73.1	73.9	74.03	72.94	74.29	74.88	74.18	74.48	73.81	73.63	74.29		
Al ₂ O ₃	14.58	14.24	14.92	15.66	14.10	13.81	14.18	13.93	14.00	13.93	14.01	14.96	14.55	14.77	15.39	14.41	14.41	14.64	14.28	14.56	14.69	14.29		
Fe ₂ O ₃	0.62	0.44	0.58	0.52	1.4	2.02	1.43	1.53	1.5	1.59	1.03	0.82	0.26	0.20	0.43	0.19	0.17	0.27	0.18	0.23	0.28	0.28		
FeO	0.53	0.56	0.56	1.21	0.98	1.3	0.56	0.65	0.9	0.99	0.66	0.59	0.7	0.81	0.97	0.9	0.72	0.72	0.72	0.74	0.69	0.7		
CaO	0.59	0.65	0.59	0.74	0.91	0.76	0.67	0.37	0.92	1.06	0.81	0.79	0.74	0.71	0.66	0.74	0.67	0.78	0.78	0.76	0.78	0.79		
MgO	0.12	0.13	0.14	0.25	0.22	0.14	0.15	0.11	0.2	0.2	0.073	0.18	0.14	0.14	0.2	0.17	0.13	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15		
K ₂ O	4.43	4.46	4.72	4.22	4.77	4.95	5.06	5.24	4.94	4.99	3.88	4.44	4.94	4.26	4.37	4.4	4.42	5.22	5.34	5.33	5.28	5.17		
Na ₂ O	3.82	3.77	3.95	3.45	3.35	3.22	3.03	2	3.13	3.24	3.63	3.76	3.88	3.72	3.34	3.24	3.43	3.13	3.18	3.29	3.24	3.26		
TiO ₂	0.069	0.064	0.076	0.11	0.078	0.08	0.084	0.086	0.088	0.072	0.076	0.088	0.067	0.061	0.092	0.09	0.07	0.083	0.077	0.086	0.085	0.083		
P ₂ O ₅	0.18	0.16	0.19	0.2	0.21	0.21	0.19	0.2	0.22	0.2	0.18	0.22	0.19	0.18	0.22	0.19	0.2	0.18	0.18	0.19	0.19	0.18		
MnO	0.031	0.039	0.037	0.069	0.038	0.033	0.033	0.055	0.037	0.035	0.01	0.054	0.049	0.059	0.054	0.038	0.029	0.034	0.029	0.031	0.032	0.031		
灼失	0.71	0.49	0.73	0.77	0.78	0.76	0.98	1.68	0.53	0.66	0.98	0.65	0.3	0.66	0.98	0.85	0.7	0.46	0.33	0.43	0.52	0.46		
H ₂ O ⁺	0.13	0.11	0.21	0.22	0.55	0.61	0.46	1.15	0.33	0.35	0.42	0.57	0.15	0.52	0.78	0.76	0.61	0.11	0.094	0.11	0.13	0.11		
H ₂ O ⁻	0	0.0095	0.0095	0	0.013	0.01	0.01	0.02	0.012	0.011	0.023	0.021	0.015	0.012	0.012	<0.01	<0.01	0.029	0.0095	0.0095	0.073	0.0095		
CO ₂	0.018	0.025	0.029	0.025	0.11	0.051	0.19	0.056	0.1	0.19	0.18	0.033	0.052	0.06	0.015	0.021	0.033	0.02	0.0088	0.027	0.011	0.014		
总和	100.55	99.81	99.75	99.62	100.37	99.71	100.36	99.96	99.96	100.20	100.03	99.66	99.72	99.60	99.65	99.51	99.83	99.86	99.73	99.62	99.58	99.68		
	$w(B)/10^{-6}$																							
Cu	9.64	5.76	13.6	7.7	9.72	8.73	19.5	7.97	6.99	5.36	5.47	4.76	4.08	2.85	3.85	3.05	5.71	4.44	4.24	3.35	6.7	3.29		
Pb	27.4	29.5	24.5	21.6	43.6	710	111	74.2	51.3	39	36.4	23.1	25.8	24.2	22.2	27.2	28.7	33.2	36.3	38	32.6	32		
Zn	53.7	45.3	42.4	108	65.5	241	612	137	57.6	51.9	23.9	76.9	54.1	56.8	83.1	65.9	45.4	45.3	43.8	48.6	43.5	46.7		
Cr	5.5	3.3	4.9	<2	7.5	11.1	7.5	5	7.3	7.9	7.8	5.1	6	6.2	5.3	5.7	6.3	2.9	<2	3.7	3.9	3.9		
Ni	1.62	0.92	2.68	2.18	1.78	3.34	1.65	1.33	1.63	1.94	1.68	3.54	2.2	1.82	2.66	1.33	6.64	1.07	1.32	1.14	0.79	1.34		
Co	0.48	0.4	1.92	0.68	1.05	1.57	0.95	1.2	1.19	1.08	0.88	0.48	0.37	0.32	0.44	0.37	0.32	0.45	0.43	0.52	0.44	0.48		
Li	160	128	114	200	156	86.1	71.4	212	109	98.8	69.4	143	92.6	121	171	132	141	92.3	91	118	83.2	86.4		
Rb	415	393	323	450	342	301	350	340	303	302	260	379	337	326	396	315	387	275	290	292	264	264		
Cs	16.2	17.2	14.5	28.9	27.2	14.5	9.15	15.5	11.8	13.9	13	19	12.4	13.9	19.2	7.26	12.7	8.75	7.43	8.87	9.71	8.37		

续表 1-1
Continued Table 1-1

组分	XT-YD01-18							CZ110							DCZ148							YD103XT					
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5					
											$w(\text{B})/10^{-6}$																
Bi	1.4	1.07	1.62	1.26	0.72	0.95	0.61	0.86	0.55	0.59	0.45	1.34	3	1.32	1.29	1.26	1.56	0.84	0.82	0.64	0.74	0.98					
Sr	40	39.4	37.7	35.4	65.2	63.6	63.3	79.8	68.8	70.4	78	23.5	48.3	30.8	22.2	39.8	39.9	62.1	64.6	67.2	62.2	66.9					
Ba	103	130	114	89	178	161	216	209	190	192	241	35	108	55.2	25.4	71.2	83.8	186	200	214	191	201					
V	2.4	5.4	3.1	5	4.2	3.36	3.5	4.64	6.06	4.08	5.1	4.04	3.22	1.92	5.98	5.1	2.21	3.2	2.55	<1	4.6	2.3					
Sc	2.54	2.16	2.95	4.76	2.93	2.52	3.06	2.83	2.63	2.54	2.18	3.39	2.42	2.45	4.02	3.1	2.62	1.98	2.12	2.33	1.98	1.94					
Nb	34.4	29.1	26	48.2	18.8	16.4	17.9	16.4	17	16.3	21.1	35.4	23.9	25.8	35.1	27.5	27.9	20.8	21.5	23	20.2	18.8					
Ta	8.09	4.42	5.95	4.16	1.48	1.77	1.39	1.42	1.45	1.48	2.75	3.63	2.92	3.64	3.98	3.43	2.95	2.27	2.32	2.62	2.5	2.09					
Zr	43.5	46	42.7	53	59.2	51.5	54.3	56.6	61.3	53.7	43.7	45.1	47.4	41.4	46.6	39.6	43	55.1	51.5	53.8	53.7	53.1					
Hf	3.11	3.31	3.26	4.48	5.01	3.31	4.29	4.19	4.1	3.57	2.48	3.4	2.36	2.9	3.31	3.02	3.27	3.65	3.6	3.74	3.6	3.35					
Be	12.6	8.24	10.1	7.68	5.84	7.43	4.28	4	4.66	5.95	7.59	9.24	6.05	8.43	11.3	5.19	7.89	4.2	4.18	7.29	4.66	4.96					
Ga	21.4	23.1	22.3	26.3	20.3	23.8	20.7	20.7	22.1	21	21.7	25.3	23.3	22.3	26.4	22.1	22.8	18.1	19	19.8	21.2	18.9					
Tl	2.66	2.74	2.07	2.82	2.25	2.14	2.76	2.09	1.92	1.87	1.64	2.32	2.06	2.13	2.18	1.84	2.43	1.71	1.86	1.83	1.59	1.64					
U	3.94	3.56	3.03	3.68	4.61	2.84	6.98	9.97	5.36	2.98	2.5	4.56	3.52	3.11	5.69	5.53	3.07	2.64	2.49	2.75	2.39	2.44					
Th	5.33	5.05	4.24	7.48	7.55	6	7.43	7.54	7.21	6.79	7.2	4.76	3.65	4.21	4.41	5.07	4.31	5.43	5.04	6.14	5.01	4.63					
La	8.94	8.95	8.94	12	13.7	10.6	13.3	13.3	13.3	12.5	14.4	7.82	5.97	6.84	6.98	8.77	7.34	9.87	9.48	11.7	9.79	8.48					
Ce	18.3	17	17.6	25.7	26.6	20.3	25.9	26.1	25.3	24	25	16.2	12.1	13.7	14.5	17.5	14.6	20.4	19	23.1	19.1	17.3					
Pr	2.03	1.93	1.99	2.97	3.17	2.49	3.14	3.17	3.09	2.94	2.81	1.9	1.4	1.7	1.7	2.0	1.7	2.29	2.13	2.66	2.07	1.98					
Nd	6.88	6.62	7.44	10.7	10.6	9.54	10.6	11.5	10.9	10.1	9.82	6.5	4.53	5.52	5.82	6.73	6.14	8.35	7.44	8.69	7.37	7.06					
Sm	2.1	2.01	1.91	3.33	3.16	2.51	2.93	3.12	3.01	2.79	2.12	2.14	1.51	1.82	2.08	2.07	1.92	2.55	2.26	2.67	2.19	2.14					
Eu	0.23	0.2	0.29	0.21	0.45	0.42	0.5	0.51	0.46	0.48	0.42	0.12	0.15	0.16	0.083	0.24	0.23	0.4	0.43	0.44	0.37	0.37					
Gd	2.21	2	1.99	3.49	3.44	2.57	3.21	3.26	3.2	2.99	2.28	2.3	1.59	1.87	2.12	2.12	2.08	2.5	2.52	2.81	2.43	2.23					
Tb	0.39	0.37	0.37	0.65	0.71	0.51	0.63	0.66	0.59	0.62	0.39	0.58	0.34	0.39	0.51	0.46	0.46	0.48	0.48	0.54	0.46	0.44					
Dy	2.27	2.1	2.08	3.68	3.86	2.89	3.3	3.47	3.17	3.48	2.17	2.42	1.68	1.91	2.64	2.32	2.22	2.67	2.71	2.91	2.56	2.33					
Ho	0.37	0.32	0.35	0.56	0.57	0.46	0.53	0.59	0.48	0.57	0.35	0.35	0.27	0.28	0.35	0.31	0.57	0.4	0.43	0.48	0.43	0.35					
Er	0.78	0.76	0.78	1.16	1.31	1.07	1.18	1.26	1.08	1.12	0.84	0.75	0.54	0.59	0.94	0.68	0.66	0.87	0.88	1.03	0.87	0.78					
Tm	0.1	0.096	0.11	0.16	0.18	0.16	0.16	0.19	0.14	0.15	0.11	0.11	0.095	0.094	0.12	0.1	0.11	0.11	0.12	0.13	0.11	0.093					

续表 1-2

Continued Table 1-2

组分	XT-YD01-18				CZ110				DCZ148							YD103XT						
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
	$w(B)/10^{-6}$																					
Yb	0.66	0.61	0.61	0.95	1.05	0.89	0.87	1.06	0.79	0.87	0.58	0.86	0.63	0.51	0.68	0.57	0.61	0.57	0.7	0.77	0.59	0.61
Lu	0.091	0.087	0.094	0.14	0.15	0.13	0.14	0.15	0.12	0.12	0.083	0.089	0.093	0.072	0.09	0.093	0.091	0.092	0.1	0.1	0.091	0.077
Y	10.7	9.83	9.41	17.3	17.2	13	15.1	16	14.5	14.5	10.1	11.8	9.29	9.23	13.1	10.2	11.5	12.1	13.2	14.1	12.3	11.4
A/CNK	1.20	1.17	1.18	1.35	1.14	1.15	1.21	1.45	1.15	1.10	1.20	1.20	1.11	1.23	1.35	1.26	1.24	1.20	1.15	1.16	1.18	1.15
ALK	8.25	8.23	8.67	7.67	8.12	8.17	8.09	7.24	8.07	8.23	7.51	8.2	8.82	7.98	7.71	7.64	7.85	8.35	8.52	8.62	8.52	8.43
Na ₂ O/K ₂ O	0.86	0.85	0.84	0.82	0.70	0.65	0.60	0.38	0.63	0.65	0.94	0.85	0.79	0.87	0.76	0.74	0.78	0.60	0.60	0.62	0.61	0.63
δEu	0.32	0.30	0.45	0.18	0.41	0.50	0.49	0.48	0.44	0.50	0.57	0.16	0.29	0.26	0.12	0.34	0.34	0.47	0.54	0.48	0.48	0.51
ΣREE	45.35	43.05	44.55	65.70	68.95	54.54	66.39	68.34	65.63	62.73	61.37	42.16	30.86	35.43	38.64	43.99	38.73	51.55	48.68	58.03	48.43	44.24
δCe	1.03	0.98	1.00	1.04	0.97	0.95	0.96	0.97	0.95	0.95	0.95	1.01	1.02	0.98	1.00	1.00	0.99	1.03	1.02	1.00	1.02	1.02
LREE/HREE	5.60	5.79	5.98	5.09	5.12	5.28	5.63	5.42	5.86	5.32	8.02	4.65	4.89	5.20	4.19	5.61	4.69	5.70	5.13	5.62	5.42	5.40
Rb/Sr	10.38	9.97	8.57	12.71	5.25	4.73	5.53	4.26	4.40	4.29	3.33	16.13	6.98	10.58	17.84	7.91	9.70	4.43	4.49	4.35	4.24	3.95
Zr/Hf	13.99	13.90	13.10	11.83	11.82	15.56	12.66	13.51	14.95	15.04	17.62	13.26	20.08	14.28	14.08	13.11	13.15	15.10	14.31	14.39	14.92	15.85
石英(Q)	34.51	34.6	31.29	34.39	33.58	32.95	35.57	42.1	34.27	32.73	37.26	32.84	30.84	34.61	35.53	37.14	36.74	34.3	33.83	32.68	33.05	33.92
钙长石(An)	1.79	2.23	1.74	2.42	3.21	2.48	2.16	0.61	3.21	4.03	2.94	2.52	2.48	2.39	1.87	2.49	2.06	2.77	2.77	2.61	2.71	2.83
钠长石(Ab)	32.38	32.12	33.75	29.53	28.47	27.55	25.81	17.23	26.65	27.55	31.02	32.14	33.02	31.81	28.64	27.79	29.28	26.64	27.07	28.06	27.67	27.8
正长石(Or)	26.22	26.54	28.17	25.23	28.31	29.58	30.1	31.52	29.37	29.64	23.15	26.51	29.36	25.44	26.17	26.35	26.35	31.03	31.75	31.75	31.5	30.79
刚玉(C)	2.85	2.41	2.71	4.59	2.26	2.28	2.95	4.84	2.35	1.74	2.8	3.08	1.93	3.21	4.55	3.46	3.26	2.85	2.27	2.45	2.69	2.32
紫苏辉石(Hy)	0.93	0.96	0.96	2.39	1.95	2.33	1.51	1.71	1.9	2.01	1.18	1.28	1.41	1.7	1.9	1.87	1.46	1.43	1.48	1.5	1.37	1.36
钛铁矿(Il)	0.13	0.12	0.15	0.21	0.15	0.15	0.16	0.17	0.17	0.14	0.15	0.17	0.13	0.12	0.18	0.17	0.13	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16
磁铁矿(Mt)	0.77	0.64	0.78	0.76	1.56	2.19	1.29	1.36	1.57	1.7	1.08	0.94	0.38	0.29	0.63	0.28	0.25	0.39	0.26	0.34	0.41	0.41
磷灰石(Ap)	0.42	0.37	0.44	0.47	0.49	0.49	0.44	0.47	0.51	0.47	0.42	0.51	0.44	0.42	0.52	0.45	0.47	0.42	0.42	0.44	0.44	0.42
锆石(Zr)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
合计	100	100	100	100	100	100.01	100	100.02	100	100.03	100.01	100	100	100.01	100.01	100.01	100.01	100	100.01	100.01	100.02	100.02
分异指数(DI)	93.11	93.26	93.21	89.15	90.36	90.08	91.48	90.85	90.29	89.92	91.43	91.49	93.22	91.86	90.34	91.28	92.37	91.97	92.65	92.49	92.22	92.51
SI	1.26	1.39	1.41	2.59	2.06	1.21	1.47	1.16	1.88	1.82	0.79	1.84	1.41	1.53	2.15	1.91	1.47	1.68	1.57	1.64	1.66	1.57
AR	3.03	3.05	3.08	2.45	2.61	2.58	2.38	3.05	2.45	2.52	2.92	2.83	3.06	2.85	2.43	2.49	2.67	2.37	2.46	2.51	2.44	2.52

注:比值单位为1。

据测试结果,采用Sun等(1989)的微量元素排列顺序和原始地幔值标准化后绘制的蛛网图如图7所示。由微量元素蛛网图可知,样品曲线型式总体一致,表现为右倾型,岩石相对富集大离子亲石元素K、Rb和放射性元素U,而亏损Ba、Sr、Ti等元素。比较而言,二长花岗岩的Ba、U、Sr异常更为明显(图7),表明长征穹窿核部二长花岗岩较正长花岗岩经历了更深程度的演化。

采用Boynton(1984)球粒陨石值标准化后绘制的稀土元素配分型式见图8。根据表1及图8可知:长征穹窿花岗岩样品稀土元素总量相对较为均一, ΣREE 为 $30.86 \times 10^{-6} \sim 68.95 \times 10^{-6}$, 平均值为

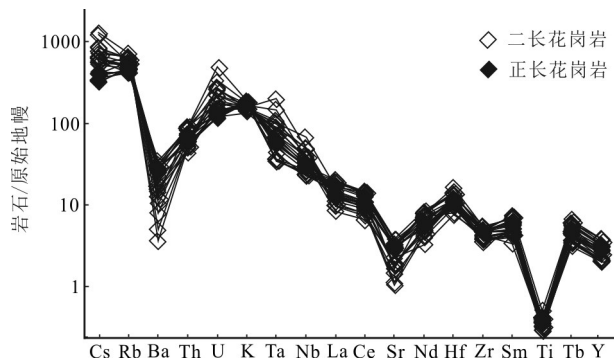


图7 长征穹窿花岗岩微量元素蛛网图
(原始地幔值标准化据Sun, 1989)

Fig. 7 The primitive-mantle normalized trace-elemental spidergram of the granite from the Changzheng dome (base map modified after Sun, 1989)

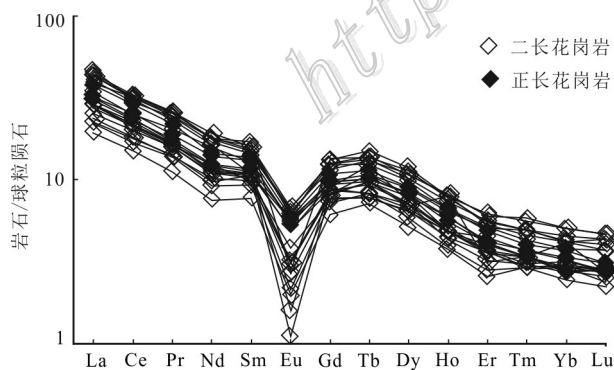


图8 长征穹窿花岗岩稀土元素配分型式图
(球粒陨石值标准化据Boynton, 1984)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of the granite from the Changzheng dome (base map modified after Boynton, 1984)

51.2×10^{-6} , 稀土元素配分曲线为右倾型, 样品LREE/HREE比值变化范围为4.2~8.0, 平均值为5.4, 轻稀土元素富集明显。 δEu 为0.12~0.57, 平均值为0.39, 具有明显的负铕异常, 说明岩石经历了明显的斜长石分离结晶作用。 δCe 为0.95~1.04, 平均值为0.99, 无明显铈异常。 Ce_N/Yb_N 比值在4.87~11.55范围内变化, 平均值为7.19, 显示花岗岩分离结晶程度较高。稀土元素配分型式显示花岗岩具有四分组效应。在稀土元素配分图解中(图8), 二长花岗岩稀土元素配分曲线总体位于正长花岗岩之下, 且具有更显著的Eu异常及低 ΣREE 含量(表1), 显示二长花岗岩具有更高的演化分异特征。

4.2 锆石阴极发光图像

长征穹窿花岗岩样品阴极发光图像见图9。

图像表明, 其锆石晶形较好, 显示长-短柱状、浑圆状的自形-半自形晶, 锆石长径为40~160 μm 之间, 大多为100 μm 左右, 长宽比为4:1~1:1, 多为2:1。多数锆石边部发育不透明状的蚀变边, 这可能是由于长征穹窿花岗岩分异程度较高, 锆石具有较高的U、Th含量, 后期遭受了热液蚀变造成的。锆石大多发育继承核, 具有清晰的核-边结构, 核-边接触带有熔蚀现象, 边部较核部更暗, 而核部发育清晰的振荡环带, 具有岩浆锆石的特征。选择具有韵律环带或残余环带且反射光均一的微区进行剥蚀, 从而提高数据的有效性。

4.3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

长征穹窿花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果见表2。YD01-18-1样品Th/U比值变化范围为0.04~1.22, 除极个别点外均大于0.1, 平均值为0.47, YD103样品Th/U比值变化范围为0.02~1.95, 除极个别点外均大于0.1, 平均值为0.44, 显示岩浆锆石特征。结合CL图像特征分析, 认为所选锆石为岩浆成因锆石, U-Pb定年结果可以代表岩浆的结晶年龄。

所有测点数据均进行普通铅校正。YD01-18-1和YD103样品分别有15个和9个数据点位于谐和线附近(图10a、b), 加权平均年龄分别为 $(202.2 \pm 1.3) \text{ Ma}$ (MSWD=0.42) (图10a) 和 $(202.2 \pm 1.5) \text{ Ma}$ (MSWD=1.18) (图10b), 表明长征穹窿花岗岩形成于晚三叠世末期。

4.4 LA-MC-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素

本次选择长征穹窿2件花岗岩U-Pb年龄谐和度

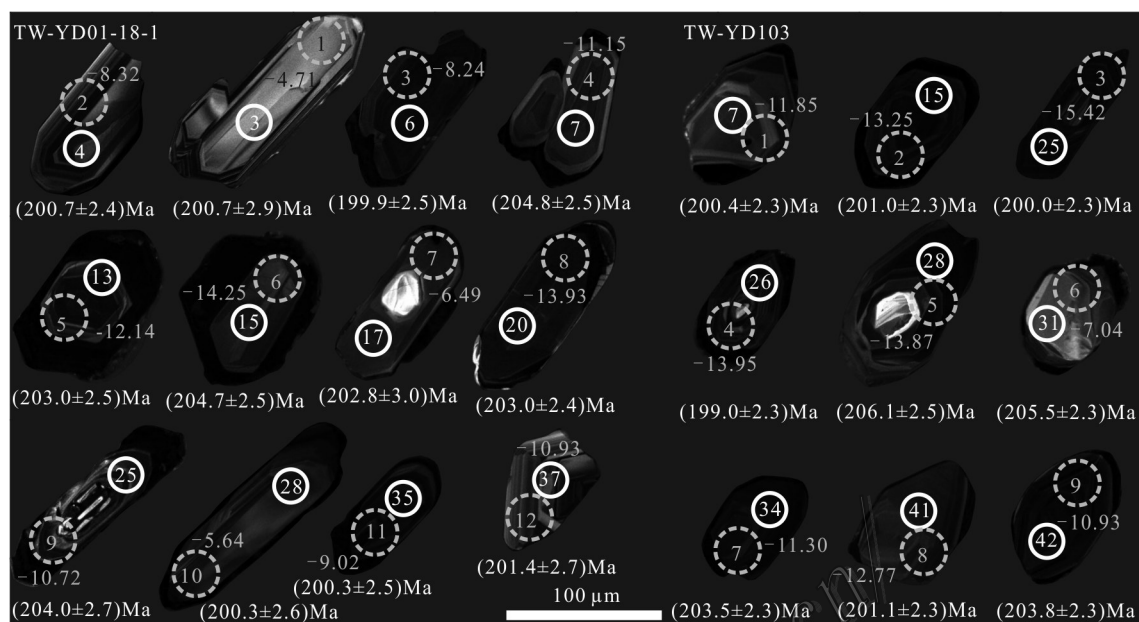


图 9 长征穹窿花岗岩锆石阴极发光图像

白色实线圆代表 U-Pb 测年点位;灰色虚线圆代表 Hf 同位素点位, 圈外数字代表 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

Fig. 9 Zircon cathodoluminescence image of the granite from the Changzheng dome

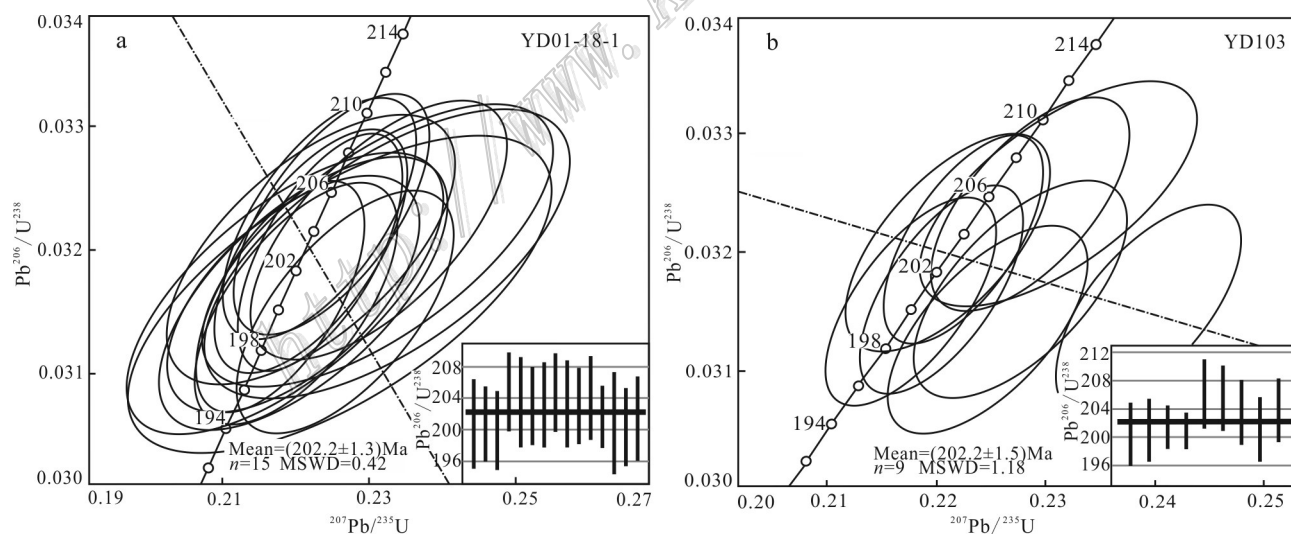
The white solid circle represents U-Pb dating point, gray dotted circle represents Hf isotope point and the number outside the circle represents the value of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 

图 10 长征穹窿花岗岩 YD01-18-1(a)和 YD103(b) 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄

Fig. 10 The U-Pb isotopic concordia plots of zircon for YD01-18-1 (a) and YD103 (b) from the Changzheng dome

较高的部分锆石进行 Lu-Hf 同位素测试, 测试结果及计算参数见表 3。

由表 3 可见, TW-YD103 样品 9 粒锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围分别为 0.023 181~0.050 884

和 0.000 742~0.001 648, 平均值分别为 0.035 784 和 0.001 151; TW-YD01-18-1 样品 12 粒锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围分别为 0.002 655~0.067 412 和 0.000 063~0.002 053, 平均值分别为 0.028 913 和

表2 长征穹窿花岗岩 YD01-18-1 和 TW-YD103 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年测试结果

Table 2 The result of zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for YD01-18-1 and TW-YD103 sample from the Changzheng dome

点号	$w(\text{B})/10^{-6}$		Th/U	同位素比值								年龄/Ma			
				$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	
	Th	U		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
TW-YD01-18-1															
01	104.3	234.4	0.45	0.1763	0.0041	11.4606	0.1876	0.4717	0.0063	2617.9	38.1	2561.4	15.3	2490.8	27.5
02	147.0	856.2	0.17	0.0506	0.0021	0.2475	0.0090	0.0355	0.0005	220.8	91.4	224.5	7.3	224.9	3.1
03	221.1	417.3	0.53	0.0502	0.0023	0.2188	0.0090	0.0316	0.0005	204.5	101.0	200.9	7.5	200.7	2.9
04	154.3	1041.8	0.15	0.0500	0.0014	0.2181	0.0047	0.0316	0.0004	196.7	62.5	200.3	3.9	200.7	2.4
05	534.8	559.5	0.96	0.0543	0.0015	0.3701	0.0082	0.0495	0.0006	382.0	61.7	319.7	6.1	311.2	3.7
06	106.6	1508.9	0.07	0.0522	0.0017	0.2268	0.0061	0.0315	0.0004	294.9	71.3	207.5	5.0	199.9	2.5
07	59.9	818.2	0.07	0.0506	0.0015	0.2249	0.0056	0.0323	0.0004	220.2	68.5	206.0	4.6	204.8	2.5
08	221.4	197.0	1.12	0.0643	0.0018	1.0943	0.0244	0.1236	0.0016	749.8	58.4	750.6	11.9	750.9	9.0
09	41.0	40.3	1.02	0.0667	0.0032	1.2356	0.0539	0.1344	0.0022	827.8	95.5	816.9	24.5	813.0	12.4
10	233.3	190.7	1.22	0.1075	0.0027	4.6380	0.0850	0.3129	0.0041	1757.7	44.7	1756.1	15.3	1755.1	20.0
11	145.2	462.7	0.31	0.0523	0.0024	0.2311	0.0098	0.0320	0.0005	299.6	102.5	211.1	8.1	203.3	3.0
12	421.3	355.8	1.18	0.0507	0.0023	0.2493	0.0104	0.0357	0.0005	226.2	102.3	226.0	8.5	226.0	3.3
13	219.6	1795.5	0.12	0.0503	0.0015	0.2220	0.0054	0.0320	0.0004	210.5	68.1	203.6	4.5	203.0	2.5
14	133.0	327.3	0.41	0.0504	0.0021	0.2222	0.0081	0.0320	0.0004	211.2	91.5	203.7	6.7	203.1	2.8
15	172.3	767.0	0.22	0.0502	0.0015	0.2232	0.0053	0.0323	0.0004	203.9	67.1	204.6	4.4	204.7	2.5
16	199.1	488.4	0.41	0.0566	0.0016	0.5784	0.0123	0.0742	0.0009	474.7	59.6	463.4	7.9	461.1	5.5
17	57.2	563.9	0.10	0.0528	0.0025	0.2327	0.0101	0.0320	0.0005	320.5	104.1	212.4	8.3	202.8	3.0
18	135.5	228.9	0.59	0.1800	0.0039	9.4742	0.1326	0.3818	0.0047	2652.9	35.8	2385.0	12.9	2084.7	21.8
19	460.9	547.2	0.84	0.0652	0.0019	0.8855	0.0206	0.0986	0.0013	779.2	60.0	643.9	11.1	606.1	7.4
20	458.9	1910.6	0.24	0.0506	0.0014	0.2232	0.0046	0.0320	0.0004	224.1	60.9	204.6	3.8	203.0	2.4
21	259.6	405.4	0.64	0.0668	0.0016	1.2387	0.0215	0.1345	0.0016	831.5	49.9	818.3	9.8	813.6	9.2
22	377.1	1411.8	0.27	0.0504	0.0014	0.2054	0.0043	0.0296	0.0004	213.8	61.5	189.7	3.6	187.8	2.2
23	135.8	188.9	0.72	0.0513	0.0049	0.2752	0.0255	0.0389	0.0009	252.6	206.0	246.8	20.3	246.2	5.8
24	188.3	220.2	0.86	0.0665	0.0018	1.2476	0.0254	0.1361	0.0017	822.4	54.6	822.3	11.5	822.5	9.6
25	196.1	1278.3	0.15	0.0522	0.0019	0.2314	0.0072	0.0322	0.0004	294.6	79.6	211.3	5.9	204.0	2.7
26	102.1	177.9	0.57	0.0983	0.0024	3.7976	0.0654	0.2802	0.0035	1592.3	44.5	1592.2	13.8	1592.5	17.7
27	230.1	436.1	0.53	0.0554	0.0015	0.5261	0.0113	0.0689	0.0009	427.7	59.9	429.2	7.5	429.5	5.1
28	127.1	657.2	0.19	0.0504	0.0019	0.2193	0.0072	0.0316	0.0004	213.0	84.4	201.3	6.0	200.3	2.6
29	161.6	1000.9	0.16	0.0497	0.0018	0.1917	0.0061	0.0280	0.0004	180.0	83.2	178.1	5.2	178.0	2.3
30	34.5	874.7	0.04	0.0518	0.0029	0.2261	0.0118	0.0316	0.0005	278.1	123.2	207.0	9.8	200.8	3.3
31	74.0	113.2	0.65	0.0517	0.0049	0.2921	0.0267	0.0410	0.0009	269.9	202.6	260.2	21.0	259.2	5.8
32	249.5	324.2	0.77	0.1684	0.0038	10.4124	0.1534	0.4485	0.0056	2542.1	37.1	2472.2	13.7	2388.4	24.9
33	82.7	124.1	0.67	0.0708	0.0035	1.3304	0.0600	0.1363	0.0024	951.6	96.9	859.1	26.2	823.8	13.7
34	98.3	885.6	0.11	0.0586	0.0020	0.2342	0.0066	0.0290	0.0004	550.7	71.6	213.7	5.5	184.4	2.4
35	86.8	952.7	0.09	0.0506	0.0016	0.2201	0.0057	0.0316	0.0004	221.6	70.9	202.0	4.7	200.3	2.5
36	152.6	293.3	0.52	0.1223	0.0031	5.8119	0.1075	0.3447	0.0046	1990.2	43.9	1948.2	16.0	1909.3	21.9
37	46.7	396.4	0.12	0.0506	0.0020	0.2213	0.0077	0.0317	0.0004	221.9	88.0	202.9	6.4	201.4	2.7
38	130.0	288.3	0.45	0.0521	0.0023	0.2888	0.0117	0.0402	0.0006	290.7	99.1	257.6	9.3	254.0	3.6

续表 2

Continued Table 2

点号	$w(\text{B})/10^{-6}$		Th/U	同位素比值								年龄/Ma			
				$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	
				比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ
TW-YD103															
01	201.6	258.7	0.78	0.0688	0.0016	1.3071	0.0190	0.1378	0.0016	893.0	45.7	848.9	8.4	832.0	9.0
02	72.9	96.9	0.75	0.0579	0.0017	0.6500	0.0159	0.0814	0.0010	526.3	64.9	508.5	9.8	504.4	6.1
03	108.3	103.9	1.04	0.0661	0.0021	1.1045	0.0292	0.1212	0.0016	809.7	65.2	755.5	14.1	737.3	9.2
04	83.3	289.7	0.29	0.0710	0.0018	0.9354	0.0167	0.0956	0.0011	957.1	50.0	670.5	8.8	588.3	6.7
05	70.8	565.6	0.13	0.0571	0.0015	0.3319	0.0066	0.0422	0.0005	492.8	57.8	291.0	5.0	266.4	3.1
06	49.4	90.4	0.55	0.0667	0.0020	1.1986	0.0282	0.1304	0.0017	827.2	59.9	799.9	13.0	790.1	9.5
07	50.0	862.6	0.06	0.0500	0.0011	0.2178	0.0032	0.0316	0.0004	195.5	51.4	200.0	2.6	200.4	2.3
08	185.6	525.7	0.35	0.1363	0.0029	3.1488	0.0389	0.1675	0.0019	2180.9	36.3	1444.7	9.5	998.4	10.5
09	160.4	294.4	0.54	0.0564	0.0016	0.4066	0.0087	0.0523	0.0006	466.9	60.4	346.4	6.3	328.5	3.9
10	625.9	1055.9	0.59	0.1083	0.0024	0.5868	0.0080	0.0393	0.0005	1770.6	39.7	468.8	5.1	248.5	2.8
11	56.9	140.1	0.41	0.0544	0.0019	0.4646	0.0141	0.0620	0.0008	387.1	76.6	387.5	9.8	387.5	5.0
12	96.7	435.5	0.22	0.0631	0.0014	0.8599	0.0124	0.0989	0.0011	710.3	46.9	630.1	6.8	607.9	6.7
13	12.7	340.3	0.04	0.1899	0.0040	12.4572	0.1517	0.4757	0.0055	2741.2	34.1	2639.5	11.5	2508.6	23.8
14	67.5	71.3	0.95	0.0605	0.0022	0.8390	0.0270	0.1005	0.0014	623.0	77.6	618.6	14.9	617.3	8.1
15	103.8	1312.8	0.08	0.0505	0.0011	0.2206	0.0031	0.0317	0.0004	218.7	50.3	202.4	2.6	201.0	2.3
16	141.9	314.8	0.45	0.1103	0.0025	1.9592	0.0275	0.1289	0.0015	1803.8	39.8	1101.6	9.4	781.3	8.6
17	73.1	134.1	0.55	0.0723	0.0019	1.4898	0.0303	0.1495	0.0019	993.7	53.5	926.2	12.4	898.0	10.4
18	136.2	279.0	0.49	0.1541	0.0033	4.4168	0.0582	0.2078	0.0024	2392.0	36.3	1715.5	10.9	1217.3	12.9
19	288.7	316.1	0.91	0.0696	0.0016	1.3372	0.0210	0.1394	0.0016	915.1	47.2	862.0	9.1	841.4	9.2
20	69.4	287.9	0.24	0.1442	0.0031	4.9140	0.0645	0.2472	0.0029	2277.9	36.7	1804.7	11.1	1423.9	14.8
21	389.7	199.4	1.95	0.0640	0.0015	1.0712	0.0157	0.1214	0.0014	740.7	47.1	739.3	7.7	738.8	8.0
22	206.3	214.8	0.96	0.0577	0.0014	0.6359	0.0109	0.0799	0.0009	519.1	52.8	499.8	6.8	495.4	5.6
23	229.1	506.4	0.45	0.0605	0.0014	0.8416	0.0127	0.1010	0.0012	620.0	48.7	620.0	7.0	619.9	6.8
24	24.2	606.9	0.04	0.0513	0.0013	0.2611	0.0045	0.0369	0.0004	253.5	55.0	235.5	3.6	233.7	2.7
25	60.3	1224.2	0.05	0.0551	0.0013	0.2393	0.0035	0.0315	0.0004	414.2	49.1	217.8	2.9	200.0	2.3
26	49.8	1318.7	0.04	0.0520	0.0013	0.2247	0.0038	0.0314	0.0004	284.0	54.1	205.8	3.1	199.0	2.3
27	145.5	245.0	0.59	0.0708	0.0017	1.3872	0.0223	0.1421	0.0017	950.9	47.6	883.5	9.5	856.7	9.4
28	26.5	703.0	0.04	0.0516	0.0015	0.2312	0.0052	0.0325	0.0004	267.7	64.5	211.2	4.3	206.1	2.5
29	64.8	171.1	0.38	0.0654	0.0015	1.1380	0.0168	0.1262	0.0015	786.3	46.9	771.6	8.0	766.3	8.3
30	84.3	309.5	0.27	0.0830	0.0018	2.1346	0.0292	0.1866	0.0022	1268.6	42.2	1160.1	9.5	1102.7	11.7
31	154.7	600.6	0.26	0.0512	0.0012	0.2287	0.0037	0.0324	0.0004	250.0	53.9	209.1	3.1	205.5	2.3
32	113.2	131.3	0.86	0.1629	0.0035	10.2330	0.1357	0.4557	0.0054	2485.4	36.0	2456.1	12.3	2420.4	23.8
33	542.2	1299.8	0.42	0.0800	0.0017	1.6772	0.0213	0.1520	0.0017	1196.9	41.6	999.9	8.1	912.4	9.7
34	25.9	777.0	0.03	0.0500	0.0012	0.2211	0.0038	0.0321	0.0004	194.2	55.9	202.8	3.2	203.5	2.3
35	424.9	925.1	0.46	0.0520	0.0013	0.2837	0.0049	0.0396	0.0005	284.6	54.8	253.6	3.8	250.2	2.9
36	229.4	246.7	0.93	0.0639	0.0015	1.0498	0.0162	0.1192	0.0014	737.1	48.2	728.8	8.0	726.0	8.0
37	941.8	1008.3	0.93	0.0855	0.0018	2.6470	0.0318	0.2244	0.0025	1327.5	40.2	1313.8	8.9	1305.2	13.3
38	18.1	773.1	0.02	0.0727	0.0017	0.3457	0.0052	0.0345	0.0004	1006.5	46.0	301.5	3.9	218.4	2.5
39	97.9	522.8	0.19	0.0547	0.0013	0.4465	0.0074	0.0592	0.0007	400.1	52.0	374.9	5.2	370.8	4.2
40	47.2	156.9	0.30	0.0752	0.0017	1.7659	0.0272	0.1702	0.0020	1075.0	45.8	1033.0	10.0	1013.1	11.0
41	36.1	895.1	0.04	0.0521	0.0013	0.2277	0.0040	0.0317	0.0004	290.5	55.3	208.3	3.3	201.1	2.3
42	57.7	1364.5	0.04	0.0503	0.0011	0.2226	0.0031	0.0321	0.0004	206.6	50.6	204.0	2.6	203.8	2.3

表3 长征穹窿花岗岩 YD01-18-1 和 TW-YD103 锆石 LA-MC-ICP-MS Lu-Hf 同位素组成
Table 3 Zircon LA-MC-ICP-MS Lu-Hf isotopic composition of YD01-18-1 and TW-YD103 sample from the Changzheng dome

点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	SE	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}/Ga	T_{DM2}/Ga	f_{LuHf}
TW-YD103											
01	200.4	0.023181	0.000742	0.000004	0.282315	0.000017	-16.15	-11.85	1.31	1.99	-0.98
02	201.0	0.044235	0.001365	0.000005	0.282278	0.000013	-17.47	-13.25	1.39	2.08	-0.96
03	200.0	0.038036	0.001304	0.000009	0.282217	0.000022	-19.63	-15.42	1.47	2.22	-0.96
04	199.0	0.050884	0.001648	0.000010	0.282260	0.000030	-18.10	-13.95	1.42	2.12	-0.95
05	206.1	0.044109	0.001291	0.000011	0.282257	0.000016	-18.21	-13.87	1.41	2.12	-0.96
06	205.5	0.041212	0.001429	0.000008	0.282451	0.000022	-11.35	-7.04	1.15	1.69	-0.96
07	203.5	0.028897	0.000921	0.000002	0.282330	0.000017	-15.65	-11.30	1.30	1.96	-0.97
08	201.1	0.024041	0.000785	0.000002	0.282289	0.000024	-17.08	-12.77	1.35	2.05	-0.98
09	203.8	0.027465	0.000877	0.000010	0.282340	0.000018	-15.28	-10.93	1.28	1.94	-0.97
TW-YD01-18-1											
01	200.7	0.019777	0.000573	0.000010	0.282516	0.000015	-9.04	-4.71	1.03	1.54	-0.98
02	200.7	0.018848	0.000559	0.000002	0.282414	0.000016	-12.65	-8.32	1.17	1.77	-0.98
03	199.9	0.043362	0.001235	0.000014	0.282420	0.000015	-12.47	-8.24	1.18	1.76	-0.96
04	204.8	0.007013	0.000183	0.000002	0.282330	0.000014	-15.62	-11.15	1.27	1.95	-0.99
05	203.0	0.008251	0.000186	0.000010	0.282304	0.000014	-16.57	-12.14	1.31	2.01	-0.99
06	204.7	0.024883	0.000737	0.000001	0.282245	0.000017	-18.64	-14.25	1.41	2.15	-0.98
07	202.8	0.035564	0.001093	0.000015	0.282467	0.000012	-10.79	-6.49	1.11	1.65	-0.97
08	203.0	0.002655	0.000063	0.000002	0.282253	0.000017	-18.37	-13.93	1.38	2.12	-1.00
09	204.0	0.045763	0.001559	0.000012	0.282348	0.000021	-14.98	-10.72	1.30	1.92	-0.95
10	200.3	0.057629	0.001677	0.000006	0.282494	0.000018	-9.82	-5.64	1.09	1.60	-0.95
11	200.3	0.067412	0.002053	0.000023	0.282400	0.000024	-13.14	-9.02	1.24	1.81	-0.94
12	201.4	0.015798	0.000537	0.000003	0.282340	0.000032	-15.28	-10.93	1.27	1.93	-0.98

0.000 871。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值除一个点外(TW-YD01-18-1-11, 0.002 053), 其他均小于 0.002, 表明这些锆石在形成以后, 没有明显的放射成因 Hf 积累, 所测得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值可以代表其形成锆石时体系的 Hf 同位素组成特征(吴福元等, 2007b)。由测试结果分析, 2 件样品具有相似的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 Hf 同位素地壳模式年龄 (T_{DM2}), 分别为 -7.04~-15.42 与 -4.71~-14.25 和 2.22~1.69 Ga 与 2.15~1.54 Ga。

5 讨 论

5.1 侵位时代及对区域成矿作用的限定

雅江穹窿群构造与变质作用叠加于区域收缩构造与动力变质作用的事实可以限定穹窿隆升事件应

晚于诺利-瑞替克期 (227~201.3 Ma) (许志琴等, 1992; Cohen et al., 2013)。松潘-甘孜造山带在早中生代的岩浆侵位可以分为早期和晚期: 早期侵位时限为 219~204 Ma, 晚期侵位时限为 199~185 Ma (胡健民等, 2005)。长征穹窿花岗岩的结晶年龄为 (202.2±1.2) Ma 和 (202.2±1.5) Ma, 正处于造山带内两次岩浆侵位的过渡时期。

长征穹窿邻区甲基卡马颈子二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (223±1) Ma (郝雪峰等, 2015), 全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 (214.65±1.66) Ma (唐国凡等, 1984); 容须卡石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 (214.4±1.2) Ma (周雄等, 2018), 而长征穹窿花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (202.2±1.2) Ma。由此可以看出, 雅江穹窿群内与穹窿相关的岩浆侵位事件发生于晚三叠世中-晚

期,这与上述讨论区域构造与动力变质作用的事实相符。在长征-甲基卡雅江穹隆群内,在中-晚三叠世(早侏罗世?)至少形成了3次岩浆-成矿幕(图11),依次为甲基卡穹窿岩浆-成矿幕、容须卡穹窿岩浆-成矿幕、长征穹窿岩浆-成矿幕和(或)瓦多穹窿岩浆-成矿幕(?) (瓦多还未得到有效岩浆活动年龄数据)。从早期到晚期,其岩浆和成矿作用强度也有减弱的趋势。由于长征穹窿与甲基卡、容须卡和瓦多穹窿同属雅江残余盆地,其间无大的构造运动差异,且之间最大距离不大于30 km,故在各穹窿主岩浆作用之后,它们经历了相似的剥蚀过程及强度。这从穹窿核部地层出露情况也可以得到佐证,4个穹窿核部出露地层均为下三叠统西康群侏倭组—新都桥组,无明显的地层缺失和实质性的差异,因此可以排除剥蚀作用对岩浆和成矿作用强度的影响,所以各穹窿核部出露的岩浆情况近似可以代表它们的岩浆和成矿作用强度。在岩浆作用方面,在甲基卡、容须卡穹窿形成规模不大的岩体、岩株(甲基卡岩体出露5.3 km²、容须卡岩体出露5.6 km²),在长征穹窿则仅以岩枝形式(1.68 km²)出露,而在瓦多穹窿则以隐伏状产出。在成矿作用方面,在甲基卡围绕马颈子岩体产出了多达498条伟晶岩脉,其中约23%为稀有金属工业矿体(唐国凡等,1984),产出有134号脉、X03脉、烧炭沟和措拉等大-超大型的稀有金属矿床;容须卡岩体周边产出有79条伟晶岩脉,其中有27条成矿(徐云峰等,2019),产出有容须卡南锂辉石矿床;在长征岩体周边产出有29条伟晶岩脉(不完全统计)(周玉等,2017b),矿化主要以铷为主,且矿化强度较甲基卡和容须卡弱,表现为铷矿(化)体矿石品位较低,多在边界品位与工业品位之间,仅少数达工

业品位;在瓦多穹窿目前还未发现有岩体出露,根据野外地质调查推测其呈隐伏状产出,其周边目前仅见4条伟晶岩脉发育,且只有1条有铷、铯矿化显示。

花岗伟晶岩是岩浆和热液作用过渡阶段的产物,与相关的花岗岩有密切的成因关系。王登红等(2005)、李健康等(2006)、苏媛娜等(2011)、刘丽君等(2017)研究表明,长征岩体邻区甲基卡成矿花岗伟晶岩由与之相关的二云母花岗岩演化而来,为同源演化的产物。与甲基卡矿床相关的马颈子花岗岩结晶年龄为(223±1)Ma(郝雪峰等,2015),甲基卡X03号伟晶岩脉中锆石和铌钽矿物的U-Pb年龄分别为(216±2)Ma和(214±2)Ma(郝雪峰等,2015)。由此可以看出,成矿伟晶岩与相关的花岗岩结晶年龄间隔约8 Ma。与其同属雅江穹隆群的长征穹窿花岗岩结晶年龄约202 Ma,由此可以推断,长征地区的伟晶岩可能形成于194 Ma,为燕山运动早期早侏罗世的产物。

由上述讨论可以看出,长征-甲基卡地区至少存在3期岩浆-成矿作用过程,稀有金属成矿为多期或多次岩浆作用的产物。

5.2 岩石类型及岩浆源区

从表1可以看出,长征穹窿花岗岩样品CIPW标准矿物中出现刚玉以及矿物组成中发育白云母、较高的分异指数(89.15~93.26,平均值91.62)和Rb/Sr比值(3.33~17.84,平均值为7.46,远高于上地壳平均值0.32(Taylor et al., 1985))、低Zr/Hf比值(11.82~20.08,平均14.39)(表1),远低于高分异花岗岩标准值(<26; Bau, 1996)、高 $w(\text{SiO}_2)$ (72.42%~74.88%,平均值为73.83%)以及明显的负钨异常(0.12~0.57)特征,表明其经历了强烈的结晶分异作用,属高分异花岗岩,这与样品在常量和微量元素判别图解中的表

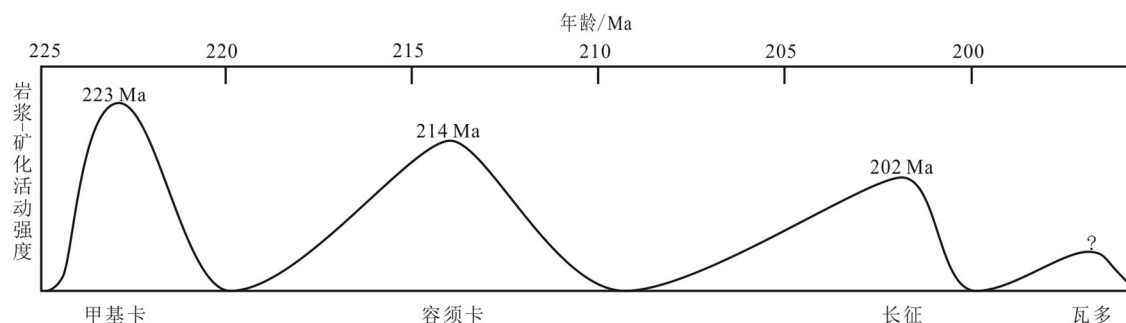


图11 长征-甲基卡地区岩浆-矿化活动示意图

Fig. 11 Diagram of magmatic and mineralization activity in the Changzheng-Jiajika area

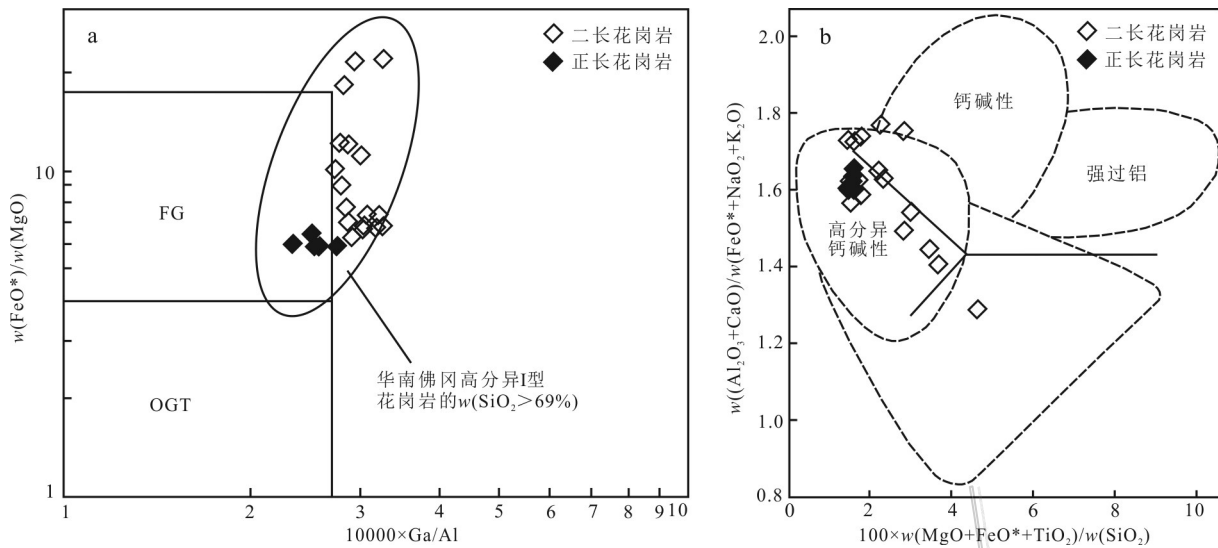


图12 高分异花岗岩判别图解(a底图据 Whalen et al., 1987; b底图据 Sylvester, 1989)

FG—分异的M、I、S型花岗岩, OGT—不分异的M、I、S型花岗岩, 华南佛冈高分异I型花岗岩范围据文献Li等(2007)

Fig. 12 The discrimination diagram of highly fractionated granites (base map of Fig. a modified after Whalen et al., 1987 and the base map of Fig. b modified after Sylvester, 1989)

FG—Fractionated I, S and M granites; OGT—Unfractionated I, S and M granites; The range of the Fogang highly fractionated I type granitoid after Li et al. (2007)

现一致(图12)。此结论也得到岩石学证据的支持: 围绕长征花岗岩产出有与其有密切成因联系的花岗伟晶岩(Dill, 2015; 吴福元等, 2017)。

此类高分异花岗岩由于为过铝质、富含过铝质矿物且暗色矿物含量少而被称之为淡色花岗岩(Le Fort, 1973; 吴福元等, 2015)。长征穹窿高分异花岗岩属较为典型的淡色花岗岩: 富含白云母, 具有与喜马拉雅淡色花岗岩(吴福元等, 2015)一致的化学成分特征: 高硅、铝、钾, 低钙、镁、铁、钛; 具有高铝指数, 为过铝质花岗岩; 微量元素表现为富集大离子亲石元素K、Rb和放射性元素U, 而亏损Ba、Th、Nb、Sr、Ti等元素的特征。

淡色花岗岩一般认为是变沉积岩经含水矿物脱水熔融形成(张宏飞等, 2005; 于俊杰等, 2011; 黄春梅等, 2013; 郭素淑等, 2007; 胡古月等, 2016; 高利娥等, 2013; 曾令森等, 2017), 原始岩浆来源于壳源(Barbarin, 1999), 其源岩主要是加厚地壳上盘变形变质阶段的泥质岩, 熔体一旦形成, 淡色花岗岩岩浆就会以岩脉的形式向上运移, 就位浅层沉积岩中(许志琴等, 2018)。长征穹窿花岗岩具有明显的Eu和Sr负异常, 表明源区可能有斜长石的残留, 说明其形成深度较浅(吴福元等, 2007a)。

长征穹窿花岗岩具有较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解(图13)中, 样品位于下地壳、地壳平均范围, 相对而言, 正长花岗岩具有更低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值。这表明长征穹窿正长花岗岩较二长花岗岩具有更深的源区, 二长花岗岩演化的更为彻底, 这与二者的矿物学成分特征相吻合, 二长花岗岩(8%~10%)较正长花岗岩(6%)具有更高的白云母含量。

长征穹窿花岗岩Hf同位素图解(图13)表明, 其

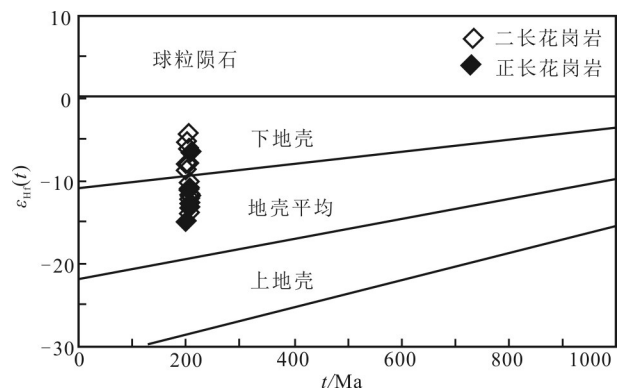


图13 长征穹窿花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解

Fig. 13 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t diagram of the granite from the changzheng dome

源区主要以下地壳成分为主,但其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为-15.4~-4.7(表3),变化范围大于10个单位,故认为其岩浆源区并非来源于均一源区。

诚然,如吴福元等(2017)提出的观点那样,高分异花岗岩明显受到了围岩同化混染作用,导致其可能难以反映其源区的物质组成特征,甚至其化学成分只是反映了所侵入围岩程度的情况,这也是高分异花岗岩判断其源区的难点所在。但测年锆石阴极发光图像和测年结果(表2)表明,80颗实验锆石中,其中19颗为继承或捕获锆石,其可以反演岩浆的物源特征。这些继承或捕获锆石形态多为不规则状,只有少数(5颗,26%)呈浑圆状、表面可见浅坑、浅沟槽等远距离搬运痕迹,可能为捕获围岩中的锆石。说明长征花岗岩源区物质可能以含有基底成分的下地壳成分为主,在上升过程中混染了部分围岩成分。

通过上面的讨论,笔者倾向认为长征穹窿花岗岩非均一源区,其可能的机制为源于下地壳的初始岩浆在上升侵位过程中混染了较多的变沉积岩(西康群)围岩成分。由于其属高分异花岗岩,演化较为彻底,所以在化学成分上较少保留原始源区化学成分特征,加之围岩混染,故在化学成分上显示了浅源特征。

5.3 构造环境

长征穹窿核部花岗岩形成于晚三叠世末期、形成于印支运动末期与燕山运动早期之间的构造转换相对宁静期,处于相对平静地连续演化阶段;伟晶岩型矿床的成矿作用发生在各造山运动之后相对稳定的时期(王登红等,2004),长征穹窿核部产出有伟晶岩型铷矿床(周玉等,2017b),表明与之相关的长征花岗岩可能形成于构造运动相对较弱的阶段,长征穹窿花岗岩可能形成于造山阶段相对稳定阶段。

在晚三叠世,南古特提斯洋盆关闭,松潘-甘孜造山带由于受到北部的华北板块、西部的昌都-羌塘微板块和东部的扬子板块之间俯冲、碰撞,使造山带发生双向收缩作用以及大规模的滑脱-推覆构造(许志琴等,1992),引发广泛的岩浆、变质事件,造山后期,大量印支晚期至燕山早期地壳重熔型花岗岩侵位,使冷地壳转变为热地壳,出现以上升的深熔花岗岩体为中心而上隆的热隆伸展构造(侯立玮等,2002;梁斌等,2016),其中长征穹窿即是其中之一,穹窿核部产出的花岗岩正是在这一构造动力学背景下上升侵位形成的。

上述陆-陆碰撞在松潘-甘孜造山带南部丹巴-木里地区新元古代基底和震旦纪—三叠纪盖层之间发育大规模具有向南剪切指向的印支滑脱剪切带(Patiño et al., 1998; 许志琴等, 2016),导致松潘-甘孜造山带地壳加厚和缩短,而由加厚地壳产生的局部熔融作用导致同碰撞花岗岩(225~190 Ma)(许志琴等, 1992; Roger et al., 1995; 2004; 2010; Xiao et al., 2007; Weislogel, 2008)和后碰撞花岗岩(200~150 Ma 和 153~105 Ma)(Roger et al., 2010)侵位。

从矿物学、岩石学角度来看,一般认为含白云母过铝质花岗岩形成于大陆碰撞环境(Barbarin, 1999),高分异浅色花岗岩为同碰撞构造环境的典型岩石;从岩体野外出露情况来看,长征-甲基卡地区出露的花岗岩主要以岩株、岩枝状产出,并主要在穹窿核部产出,显示出主动就位的动力学特征,为挤压环境下岩浆活动的产物。

陆-陆碰撞可以划分为高压型和高温型,对应形成两种类型的强过铝质花岗岩(Sylvester, 1998)。Al₂O₃/TiO₂比值可反映强过铝质花岗岩的温压信息,高的Al₂O₃/TiO₂比值(>60)反映了高压碰撞环境的强过铝质花岗岩形成温度较低(<875℃)且规模较小,而低Al₂O₃/TiO₂比值反映高温碰撞环境(≥875℃)形成的强过铝质花岗岩(Sylvester, 1998)。长征穹窿花岗岩的Al₂O₃/TiO₂比值为142~223,远大于60,说明其属于高压低温型强过铝质花岗岩。温压条件判断与岩体野外出露特征相一致。

在长征穹窿花岗岩常量元素 R_1 - R_2 图解(图14)和微量元素Rb-Hf-Ta三角图解(图15)及(Y+Nb)-Rb图解(图16a)、Y-Nb图解(图16b)中,样品点均位

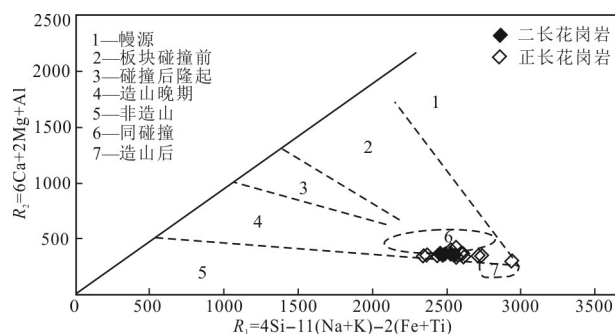


图14 花岗岩 R_1 - R_2 构造环境判别图解

(底图据Rollinson, 1993)

Fig. 14 The diagrams R_1 - R_2 of tectonic environment of granites (base map modified after Rollinson, 1993)

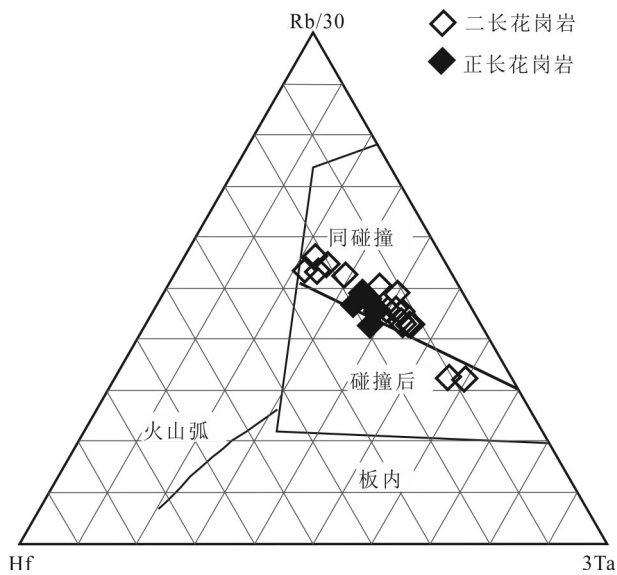


图15 花岗岩构造环境判别图解

(底图据 Harris et al., 1992)

Fig. 15 The Hf-Ta-Rb diagrams of tectonic environment of granites (base map modified after Harris et al., 1992)

于同碰撞花岗岩范围内,并具有向后碰撞花岗岩演化的趋势,显示长征花岗岩体可能形成于同碰撞晚期向碰撞后转换的阶段。

结合长征穹窿花岗岩结晶年龄及其源区特征,

综合分析认为,长征穹窿花岗岩形成于加厚地壳产生的局部熔融作用导致的同碰撞作用末期向碰撞后转换的构造环境。同属雅江穹窿群的甲基卡穹窿马颈子岩体二长花岗岩亦具同碰撞花岗岩的特征,也印证了上述结论(梁斌等,2016)。

6 结 论

(1) 长征穹窿与稀有金属成矿有关的花岗岩为典型的高分异花岗岩,其在晚三叠世末期形成于下地壳的初始岩浆在上升侵位过程中,混染了较多含泥质围岩;

(2) 区域伟晶岩至少存在3期成矿作用,稀有金属为多期或多次岩浆作用的产物,预测区域内可能存在一期194 Ma左右的伟晶岩稀有金属成矿事件;

(3) 根据长征穹窿花岗岩特征,结合区域岩浆岩成矿特征,认为与区域稀有金属成矿作用有关的花岗岩为多期或多次岩浆作用晚期的产物,形成于造山同碰撞向碰撞后伸展转换的相对稳定环境。

致 谢 样品锆石 LA-(MC)-ICP-MS U-Pb 和 Lu-Hf 同位素测试得到了西北大学大陆动力学国家

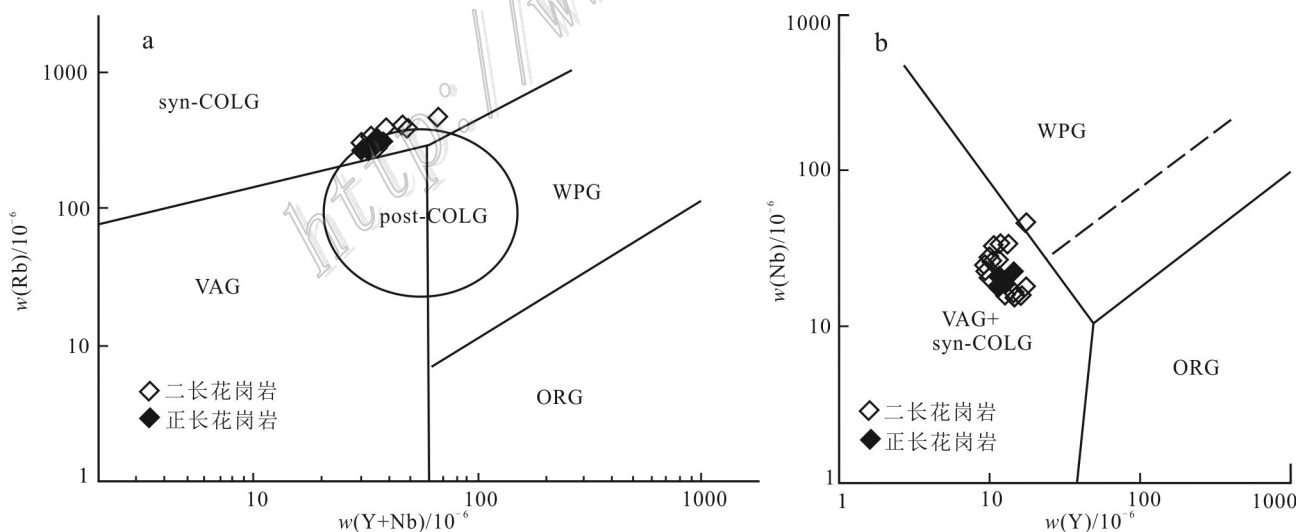


图16 花岗岩构造环境判别图解(底图据 Pearce et al., 1988; Pearce, 1996)

VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; WPG—板内花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; post-COLG—后碰撞花岗岩

Fig. 16 The diagrams of tectonic environment of granites (base map modified after Pearce et al., 1988 and Pearce, 1996)

VAG—Volcanic arc granite; ORG—Mid oceanic ridge granite;

WPG—Within-plate granites; syn-COLG—Syn-collisional granite; post-COLG—Post collision granite

重点实验室弓化栋老师大力支持,匿名审稿专家对本文修改提出了宝贵意见,在此一并表示感谢!

References

- Andersen T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1): 59-79.
- Bakker R J and Elburg M A. 2006. A magmatic-hydrothermal transition in Arkaroola (northern Flinders Ranges, South Australia): From diopside-titanite pegmatites to hematite-quartz growth[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(5): 541-569.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46(3): 605-626.
- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 323-333.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A]. In: Henderson P, ed. *Rare earth element geochemistry*[C]. Amsterdam: Elsevier. 63-114.
- Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L and Fan J X. 2013. The ICS international chronostratigraphic chart[J]. *Episodes*, 36(3): 199-204.
- Dill H G. 2015. Pegmatites and aplites: Their genetic and applied ore geology[J]. *Ore Geology Reviews*, 69: 417-561.
- Fu X F, Hou L W, Wang D H, Yuan L P, Liang B, Hao X F and Pan M. 2014. Achievements in the investigation and evaluation of Spodumene resources at Jiajika in Sichuan, China[J]. *Geological Survey of China*, 1(3): 37-43(in Chinese with English abstract).
- Fu X F, Yuan L P, Wang D H, Hou L W, Pan M, Hao X F, Liang B and Tang Y. 2015. Mineralization characteristics and prospecting model of newly discovered X03 rare metal vein in Jiajika orefield, Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 34(6): 1172-1186(in Chinese with English abstract).
- Gao L E, Zeng L S, Hou K J, Guo C L, Tang S H, Xie K J, Hu G Y and Wang L. 2013. Episodic crustal anatexis and the formation of Paiku composite leucogranitic pluton in the Malashan gneiss dome, southern Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(27): 2810-2822(in Chinese with English abstract).
- Guo S S and Li S G. 2007. Petrological and geochemical constraints on the origin of leucogranites[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(6): 290-298(in Chinese with English abstract).
- Gu C H. 2014. Metallogenic regularity of spodumene deposits in the closely spaced pegmatite area in the southeastern Keeryin pegmatite field, Sichuan Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(1): 59-65(in Chinese with English abstract).
- Hao X F, Fu X F, Liang B, Yuan L P, Pan M and Tang Y. 2015. Formation ages of granite and X03 pegmatite vein in Jiajika, western Sichuan, and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 34(6): 1199-1208(in Chinese with English abstract).
- Harris N B W and Inger S. 1992. Trace element modelling of pelite-derived granites: Contributions to mineralogy and petrology[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(1): 46-56.
- Hou L W and Fu X F. 2002. Dome-shaped metamorphic geological body on the eastern margin of Songpan-Ganzi orogenic belt[M]. Sichuan University Press (in Chinese).
- Hu G Y, Zeng L S, Chen H and Gao L E. 2016. Assembling mechanism for the Late-Miocene Mabja leucogranite pluton, Himalayan Orogen[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 1737-1754(in Chinese with English abstract).
- Huang C M, Zhao Z D, Zhu D C, Liu D, Huang Y, Dong M C, Hu Z C and Zheng J P. 2013. Geochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotope of Luozha leucogranite, southern Tibet: Implication for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3689-3702(in Chinese with English abstract).
- Hu J M, Meng Q R, Shi Y R and Qu H J. 2005. SHRIMP U-Pb dating of zircons from granitoid bodies in the Songpan-Ganzi terrane and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 867-880(in Chinese with English abstract).
- Le Fort P. 1973. Les leucogranites à tourmaline de l'Himalaya sur l'exemple du granite du Manaslu (Népal central)[J]. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 15(5-6): 555-561(in France).
- Le Maître R W. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms[M]. Oxford: Black Well.
- Li J K, Wang D H, Zhang D H and Fu X F. 2006. The source of ore-forming fluid in Jiajika pegmatite type lithium polymetallic deposit, Sichuan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 45-52(in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Li W X, Liu Y, Yuan C, Wei G J and Qi C S. 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): 186-204.
- Liang B, Fu X F, Tang Y, Pan M, Yuan L P and Hao X F. 2016. Granite geochemical characteristics in Jiajika rare metal deposit, western Sichuan[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 42-49(in Chinese with English abstract).
- Liu L J, Wang D H, Hou K J, Tian S H, Zhao Y, Fu X F, Yuan L P and Hao X F. 2017. Application of lithium isotope to Jiajika new No.3 pegmatite lithium polymetallic vein in Sichuan[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 167-171(in Chinese with English abstract).
- Liu Y D, Zhou Y, Guo R P, Zhou X and Zhang Y. 2018. Anomalies characteristics of ground high-precision magnetic survey and the prospecting prediction in Jiajika style spodumene deposits, Sichuan[J]. *Mineral Exploration*, 9(3): 428-437(in Chinese with English abstract).
- London D and Morgan G B. 2012. The pegmatite puzzle[J]. *Elements*, 8(4): 263-268.
- London D. 2014. A petrologic assessment of internal zonation in granitic

- pegmatites[J]. *Lithos*, 184-187(1): 74-104.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.0-A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley geochronology center[M]. Special Publication, (4): 1-70.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.
- Patiño Douce A E and Harris N. 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis[J]. *Journal of Petrology*, 39(4): 689-710.
- Pearce J A and Mei H. 1988. Volcanic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse: Lhasa to Golmud[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 327(1594): 169-201.
- Pearce J A. 1996. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19(4): 120-125.
- Rao K Y. 2016. The geological characteristics and ore exploration targeting of Dilaqiu Lithium deposit in Maerkang County, Sichuan Province[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 25(1): 54-57(in Chinese with English abstract).
- Roger F, Calassou S, Lancelot J, Malavieille J, Mattauer M, Xu Z Q, Hao Z W and Hou L W. 1995. Miocene emplacement and deformation of the Konga Shan granite (Xianshui He fault zone, West Sichuan, China): Geodynamic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 130(1-4): 201-216.
- Roger F, Malavieille J, Leloup P H, Calassou S and Xu Z. 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan-Garzê Fold Belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(5): 465-481.
- Roger F, Jolivet M and Malavieille J. 2010. The tectonic evolution of the Songpan-Garzê (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to Present: A synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 254-269.
- Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation and interpretation[M]. New York: Longman Group UK Ltd.
- Su A N, Tian S H, Hou Z Q, Li J K, Li Z Z, Hou K J, Li Y H, Hu W J and Yuan Z S. 2011. Lithium isotope and its application to Jiajika pegmatite type lithium polymetallic deposit in Sichuan[J]. *Geoscience*, 25(2): 236-242(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in Oceanic Basins*[C]. Special Publications. Geological Society London. 42: 313-345.
- Sylvester P J. 1989. Post-collisional alkaline granites[J]. *The Journal of Geology*, 97(3): 261-281.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1-4): 29-44.
- Tang G F and Wu S X. 1984. Geological research report of the Jiajika granite pegmatite lithium deposit in Kanding County, Sichuan Province[R]. Chengdu: Panxi Geological Brigade, Sichuan Geological and Mineral Bureau(in Chinese).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell.
- Thomas R, Davidson P and Beurlen H. 2011a. Tantalite-(Mn) from the Borborema Pegmatite Province, northeastern Brazil: Conditions of formation and melt- and fluid-inclusion constraints on experimental studies[J]. *Mineralium Deposita*, 46(7): 749-759.
- Thomas R, Davidson P and Schmidt C. 2011b. Extreme alkali bicarbonate- and carbonate-rich fluid inclusions in granite pegmatite from the Precambrian Rønne granite, Bornholm Island, Denmark[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(2): 315-329.
- 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.
- wang D H, Zou T R, Xu Z G, Yu J J and Fu X F. 2004. Advance in the study of using pegmatite deposits as the tracer of orogenic process[J]. *Advances in Earth Science*, 19(4): 614-620(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Li J K and Fu X F. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan and its significance[J]. *Geochimica*, 34(6): 541-547(in Chinese with English abstract).
- Weislogel A L. 2008. Tectonostratigraphic and geochronologic constraints on evolution of the northeast Paleotethys from the Songpan-Ganzi complex, central China[J]. *Tectonophysics*, 451(1): 331-345.
- Wilson M. 1989. Igneous petrogenesis[M]. London: Allen and Unwin.
- Wu F Y, Li X H, Yang J H and Zheng Y F. 2007a. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Li X H, Yang J H, Zheng Y F and Gao S. 2007b. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Liu Z C, Liu X C and Ji W Q. 2015. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 1-36(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, Wang J M and Yang L. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *Science China Earth Sciences*, 47(7): 745-765(in Chinese).
- Xiao L, Zhang H F, Clemens J D, Wang Q W, Kan Z Z, Wang K M, Ni P Z and Liu X M. 2007. Late Triassic granitoids of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Geochronology, petrogenesis and implications for tectonic evolution[J]. *Lithos*, 96(3): 436-452.
- Xu Y F, Qin Y L, Wang X F, Li M Z, Zhou X, Zhan H Y and Wu W H. 2019. Geochemical characteristics and metallogenic geological conditions of pegmatite type lithium polymetallic ore in Rongxuka, Sichuan Province[J]. *Geological Survey of China*, 6(1): 36-42(in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Hou L W, Wang Z X, Fu X F and Huang M H. 1992. Orogenic processes of the Songpan-Garzê Orogenic belt of China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Xu Z Q and Ma X X. 2015. The Chinese Phanerozoic gneiss domes: Subduction-related type, collision-related type and combination

- type of subduction-collision[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3509-3523(in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Fu X F, Ma X X, Qi X X, Wu C, Hou L W and Zhao Z B. 2016. The gneiss domes in Tibetan Plateau and their potential for prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 2971-2981(in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Wang R C, Zhao Z B and Fu X F. 2018. On the structural backgrounds of the large-scale "Hard-rock type" lithium ore belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1091-1106(in Chinese with English abstract).
- Yu J J, Zeng L S, Liu J, Gao L E and Xie K J. 2011. Early Miocene leucogranites in Dinggye area, southern Tibet: Formation mechanism and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1961-1972(in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Wu F Y, Gao S, Liu X M, Xu P and Sun D Y. 2003. Zircon laser probe U-Pb dating and REE analysis of Cenozoic intrusions in northeast China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511-1520 (in Chinese).
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, Zong C L, Detlef G, Fontaine G H, Liu X M and Diwu C R. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 247(1-2): 100-118.
- Yuan J, Xiao L, Wan C H and Gao R. 2011. Petrogenesis of Fangmaying-Sanyanlong granites in southern Songpan-Garzê fold belt and its tectonic implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 195-206 (in Chinese with English abstract).
- Yue X Y, Zhou X, Zhang Y, Gong D X, Zhou Y and Luo L P. 2018. Discovery of the pegmatite lithium veins with predicted super-large size resources in the Sizemuzu district of the Keeryin, China[J]. *China Geology*, 1(2): 310-311.
- Zeng L S and Gao L E. 2017. Cenozoic crustal anatexis and the leucogranites in the Himalayan collisional orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1420-1444(in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Nigel H, Randall P, Zhang L, Zhao Z D and Li D W. 2005. Geochemistry of North Himalayan leucogranites: Regional comparison, petrogenesis and tectonic implications[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 30(3): 275-288(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y J, Yuan C, Zhou M F, Yan D P, Long X P and Li J L. 2007. Geochemistry and petrogenesis of Laojungou and Mengtonggou granites in western Sichuan, China: Constraints on the nature of Songpan-Ganzi basement[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 995-1006(in Chinese with English abstract).
- Zhou X, Zhou Y, Luo L P, Zhang Y, Xu Y F and Ye Y K. 2018. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of quartz diorite of Rongxuka lithium deposit in western Sichuan and its tectonic implication[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 38(4): 88-97(in Chinese with English abstract).
- Zhou Y, Jia Z Q, Zhou X, Zhang Y, Liang B, Yue X Y and Gong D X. 2017a. Preliminary analysis of the prospecting law of the Long March Dome in Songpan Ganzi orogenic belt[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(S): 288(in Chinese).
- Zhou Y and Zhou X. 2017b. The discovery of a large-sized potential rubidium and beryllium deposit in Yazhong area, DaoFu County, Sichuan Province[J]. *News Letters of China Geological Survey*, 3(21): 35-38(in Chinese).
- Zhou Y, Zhou X and Zhang Y. 2018. Discovery rubidium and beryllium deposit in the Yazhong area of western Sichuan and characteristics of its inclusions, China[A]. In *Asian Current Research on fluid inclusions VII Abstract Volume*[C]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 165-166.

附中文参考文献

- 付小方, 侯立玮, 王登红, 袁茜平, 梁斌, 郝雪峰, 潘蒙. 2014. 四川甘孜甲基卡锂辉石矿产调查评价成果[J]. *中国地质调查*, 1(3): 37-43.
- 付小方, 袁茜平, 王登红, 侯立玮, 潘蒙, 郝雪峰, 梁斌, 唐屹. 2015. 四川甲基卡矿田新三号稀有金属矿脉的成矿特征与勘查模型[J]. *矿床地质*, 34(6): 1172-1186.
- 高利娥, 曾令森, 侯可军, 郭春丽, 唐索寒, 谢克家, 胡古月, 王莉. 2013. 藏南马礼山穹窿佩枯错复合淡色花岗岩体的多期深熔作用[J]. *科学通报*, 58(27): 2810-2822.
- 郭素淑, 李曙光. 2007. 淡色花岗岩的岩石学和地球化学特征及其成因[J]. *地学前缘*, 14(6): 290-298.
- 古城会. 2014. 四川省可尔因伟晶岩田东南密集区锂辉石矿床成矿规律[J]. *地质找矿论丛*, 29(1): 59-65.
- 郝雪峰, 付小方, 梁斌, 袁茜平, 潘蒙, 唐屹. 2015. 川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的形成时代及意义[J]. *矿床地质*, 34(6): 1199-1208.
- 侯立玮, 付小方. 2002. 松潘-甘孜造山带东缘穹隆状变质地质体[M]. 成都: 四川大学出版社.
- 胡古月, 曾令森, 陈翰, 高利娥. 2016. 喜马拉雅造山带晚中新世麻迦淡色花岗岩的构建机制[J]. *地质学报*, 90(8): 1737-1754.
- 黄春梅, 赵志丹, 朱弟成, 刘栋, 黄玉, 董铭淳, 胡兆初, 郑建平. 2013. 藏南洛扎地区淡色花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素、地球化学与岩石成因[J]. *岩石学报*, 29(11): 3689-3702.
- 胡健民, 孟庆任, 石玉若, 渠洪杰. 2005. 松潘-甘孜地体内花岗岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其构造意义[J]. *岩石学报*, 21(3): 867-880.
- 李建康, 王登红, 张德会, 付小方. 2006. 四川甲基卡伟晶岩型锂多金属矿床成矿流体来源研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 25(1): 45-52.
- 梁斌, 付小方, 唐屹, 潘蒙, 袁茜平, 郝雪峰. 2016. 川西甲基卡稀有金属矿田花岗岩岩石地球化学特征[J]. *桂林理工大学学报*, 36(1): 42-49.
- 刘丽君, 王登红, 侯可军, 田世洪, 赵悦, 付小方, 袁茜平, 郝雪峰. 2017. 锂同位素在四川甲基卡新三号矿脉研究中的应用[J]. *地学前缘*, 24(5): 167-171.
- 刘应冬, 周玉, 郭润平, 周雄, 张贻. 2018. 四川甲基卡锂辉石矿床西缘地面高精度磁测异常特征及找矿预测[J]. *矿产勘查*, 9(3):

- 428-437.
- 饶魁元. 2016. 四川马尔康地拉秋锂矿床地质特征及找矿方向[J]. 四川有色金属, 25(1): 54-57.
- 苏媛娜, 田世洪, 侯增谦, 李建康, 李真真, 侯可军, 李延河, 胡文洁, 杨竹森. 2011. 锂同位素及其在四川甲基卡伟晶岩型锂多金属矿床研究中的应用[J]. 现代地质, 25(2): 236-242.
- 唐国凡, 吴盛先. 1984. 四川省康定县甲基卡花岗伟晶岩锂矿床地质研究报告[R]. 成都: 四川地质矿产局攀西地质大队.
- 王登红, 邹天人, 徐志刚, 余金杰, 付小方. 2004. 伟晶岩矿床示踪造山过程的研究进展[J]. 地球科学进展, 19(4): 614-620.
- 王登红, 李建康, 付小方. 2005. 四川甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代及其意义[J]. 地球化学, 34(6): 541-547.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007b. Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185-220.
- 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 纪伟强. 2015. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. 岩石学报, 31(1): 1-36.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(7): 745-765.
- 徐云峰, 秦宇龙, 王显锋, 李明则, 周雄, 詹涵钰, 武文辉. 2019. 四川容须卡伟晶岩型锂多金属矿床地球化学特征及成矿地质条件[J]. 中国地质调查, 6(1): 36-42.
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 付小方, 黄明华. 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社.
- 许志琴, 马绪宣. 2015. 中国大陆显生宙俯冲型、碰撞型和复合型片麻岩穹窿(群)[J]. 岩石学报, 31(12): 3509-3523.
- 许志琴, 付小方, 马绪宣, 戚学祥, 吴婵, 侯立玮, 赵中宝. 2016. 青藏高原片麻岩穹窿与找矿前景[J]. 地质学报, 90(11): 2971-2981.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 付小方. 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. 地质学报, 92(6): 1091-1106.
- 于俊杰, 曾令森, 刘静, 高利娥, 谢克家. 2011. 藏南定结地区早中新世淡色花岗岩的形成机制及其构造动力学意义[J]. 岩石学报, 27(7): 1961-1972.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针U-Pb年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 48(14): 1511-1520.
- 袁静, 肖龙, 万传辉, 高睿. 2011. 松潘-甘孜南部放马坪-三岩花岗岩的成因及其构造意义[J]. 地质学报, 85(2): 195-206.
- 曾令森, 高利娥. 2017. 喜马拉雅碰撞造山带新生代地壳深熔作用与淡色花岗岩[J]. 岩石学报, 33(5): 1420-1444.
- 张宏飞, Nigel Harris, Randall Parrish, 张利, 赵志丹, 李德威. 2005. 北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学: 区域对比、岩石成因及其构造意义[J]. 地球科学, 30(3): 275-288.
- 赵永久, 袁超, 周美夫, 颜丹平, 龙晓平, 李继亮. 2007. 川西老君沟和孟通沟花岗岩的地球化学特征、成因机制及对松潘-甘孜地体基底性质的制约[J]. 岩石学报, 23(5): 995-1006.
- 周雄, 周玉, 罗丽萍, 张贻, 徐云峰, 叶亚康. 2018. 川西容须卡锂辉石矿床石英闪长岩锆石 LA-ICP MS 测年及构造意义[J]. 矿物岩石, 38(4): 88-97.
- 周玉, 贾志泉, 周雄, 张贻, 梁兵, 岳相元, 龚大兴. 2017a. 松潘甘孜造山带长征穹窿找矿规律初析[J]. 矿物学报, 37(S): 288.
- 周玉, 周雄. 2017b. 四川道孚县亚中地区发现具有大型规模潜力铷铍矿[J]. 中国地质调查成果快讯, 3(21): 35-38.