

赣北大湖塘超大型钨矿多期似斑状花岗岩 岩浆作用、成因及意义

吴显愿¹, 张智宇², 郑远川¹, 戴佳良¹, 樊献科², 盛俞策¹

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 赣北大湖塘钨矿位于江南造山带九岭多金属矿集区东部, 是目前世界上最大的钨矿之一。该区燕山期花岗岩的岩性繁多, 岩浆序列及源区特征等研究仍存在争议和不足。就似斑状花岗岩而言, 前人已查明该区存在两期岩浆作用, 分别是石门寺(北区)似斑状黑云母花岗岩(150.0 Ma)和狮尾洞(南区)似斑状白云母花岗岩(144.2 Ma)。本文识别出南区似斑状二云母花岗岩, 并对其进行了精细的独居石和锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学及锆石 Hf 同位素研究。锆石和独居石给出的岩浆结晶年龄分别为 130.0~128.6 Ma 和 128.3 Ma, 表明南区似斑状二云母花岗岩形成于早白垩世, 代表了区域上第 3 期似斑状花岗岩岩浆作用的产物。岩石地球化学研究表明, 3 期似斑状花岗岩均为高钾钙碱性的 S 型花岗岩, 南区两期似斑状花岗岩具有相似的地球化学特征。与北区相比, 南区似斑状花岗岩过铝质程度($A/CNK = 1.16 \sim 1.24$)更高; 南、北区岩石的稀土元素总量均较低, 均具有明显的 Eu 负异常; 北区岩石轻、重稀土元素分馏 [$(La/Yb)_N = 11.17 \sim 26.67$] 较南区 [$(La/Yb)_N = 7.72 \sim 19.0$] 更显著。南、北区岩石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值分别为 $-7.31 \sim 0.58$ 和 $-8.6 \sim -3.1$, 指示似斑状花岗岩主要来源于古老下地壳的重熔, 南区岩石有少量新生物质的参与。南区似斑状花岗岩较北区有更低的 CaO/Na_2O 值, 指示南区似斑状花岗岩的源岩比北区更富泥质。综合研究表明, 大湖塘南、北区似斑状花岗岩至少是 3 期岩浆作用的产物, 是新元古代双桥山群地层中的富泥质、或泥质夹杂砂岩在后造山伸展构造环境下经部分熔融后分异演化而成。该研究丰富并完善了大湖塘区域似斑状花岗岩的岩浆序列和成因意义。

关键词: 独居石; 锆石 U-Pb 定年; 岩石地球化学; 锆石 Hf 同位素; 多期似斑状花岗岩; 大湖塘钨矿

中图分类号: P588.12⁺1; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)03-0318-21

Magmatism, genesis and significance of multi-stage porphyry-like granite in the giant Dahutang tungsten deposit, northern Jiangxi Province

WU Xian-yuan¹, ZHANG Zhi-yu², ZHENG Yuan-chuan¹, DAI Jia-liang¹, FAN Xian-ke² and SHENG Yu-ce¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Dahutang tungsten-copper deposit, located in the east of the Jiuling polymetallic ore concentration area of Jiangnan orogenic belt, is one of the largest tungsten deposits in the world. The Yanshanian granites in this area have various lithologies, and there are still disputes and deficiencies in the study of magmatic succession and source characteristics. Two phases of porphyritic granitic magmatism have been found in this area, which are por-

收稿日期: 2018-08-13; 接受日期: 2019-03-01; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(J1630); 中国地质调查局项目(DD20190001, DD20160123); 国家重点研发计划项目(2016YFC0600203); 国家自然科学基金项目(41503050)

作者简介: 吴显愿(1992-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 1225679956@qq.com; 通讯作者: 张智宇(1983-), 男, 副研究员, 主要从事岩浆热液成矿作用及深部过程研究工作, E-mail: zhangzhiyu@cags.ac.cn.

phyry biotite-like granite (150.0 Ma) in Shimensi (northern area) and porphyry muscovite-like granite (144.2 Ma) in Shiweidong (southern area). The authors discovered porphyritic two-mica granite in the southern area and carried out detailed U-Pb dating of monazite and zircon as well as petrogeochemical and Hf isotopic study of zircon. The crystallization ages of zircons and monazites are 130.0 ~ 128.6 Ma and 128.3 Ma, respectively, indicating that the porphyritic two-mica granite in the southern area was formed in the early Cretaceous and resulted from the third stage porphyritic magmatism in this area. Petrogeochemical characteristics show that the third stage porphyry-like granites are S-type granites with high potassium as well as calc-alkaline content and the second stage porphyry-like granites in the southern area have similar geochemical characteristics. The peraluminous degree of porphyritic granite in southern area ($A/CNK = 1.16 \sim 1.24$) is higher than that of the northern area. The total REE content of rocks in the south and north areas are low, and there are obvious negative Eu anomalies. The fractionation of light and heavy rare earth elements in the north area [$(La/Yb)_N = 11.17 \sim 26.67$] is more significant than that in the south area [$(La/Yb)_N = 7.72 \sim 19.0$]. The values of $\epsilon_{Hf}(t)$ in the southern and northern sections are $-7.31 \sim 0.58$ and $-8.6 \sim -3.1$ respectively, indicating that porphyry granites were mainly derived from the remelting of the ancient lower crust, with the addition of a small amount of new materials. The lower CaO/Na_2O ratio indicates that the source rock of the Shiweidong porphyry granite is more muddy than that of the Shimensi. Comprehensive research shows that the porphyritic granite in the south and north of Dahutang is the product of at least three stages of magmatism, which was formed by evolution after the partial melting of the muddy or argillaceous sandstones in the Shuangqiaoshan Group in the post-orogenic extension environment. This study enriches and improves the magmatic sequence and genetic significance of porphyritic granites in the Dahutang area.

Key words: U-Pb dating of monazite and zircon; petrogeochemistry; zircon Hf isotopes; multi-stage porphyry-like granite; Dahutang tungsten deposit

Fund support: Project of Basic Scientific Research Business Fee of Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (J1630); Project of China Geological Survey (DD20190001, DD20160123); National Key Research and Development Project (2016YFC0600203); Project of National Natural Science Foundation (41503050)

大湖塘地区是近年查明的一个世界级超大型钨矿产地。该区燕山期花岗岩的岩性多样,且与成矿关系密切,主要由似斑状花岗岩、细粒黑云母花岗岩、中细粒白云母花岗岩、中粗粒二云母花岗岩以及花岗岩斑岩等组成。其中,似斑状花岗岩与巨量钨的富集密切相关(彭花明等, 2016; Wei *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019)。多年来,前人对大湖塘花岗岩做了系统性研究(黄兰椿等, 2013; 左全狮等, 2014; 张志辉等, 2014; 项新葵等, 2015; 叶泽宇等, 2016; Mao *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2018),但对多种花岗岩形成的精确年龄、岩浆序列、成因等问题依然存在争议和不足。

就似斑状花岗岩而言,前人已查明有两期岩浆作用,分别是北区石门寺似斑状黑云母花岗岩和南区狮尾洞似斑状白云母花岗岩,认为北区似斑状黑云母花岗岩形成于 150.0 ~ 147.3 Ma(毛志昊, 2016; 叶海敏等, 2016; 潘大鹏等, 2017),是上地壳

岩石在陆内拼贴挤压环境下熔融演化而成的 S 型花岗岩(项新葵等, 2012)。而南区似斑状白云母花岗岩的成岩年龄为 144.2 ± 1.3 Ma,是富泥质岩石在拉张构造环境下通过部分熔融形成的强过铝质 S 型花岗岩(黄兰椿等, 2012)。笔者在地质调研中,识别出南区似斑状二云母花岗岩,其岩浆结晶年龄明显晚于上述两期岩浆作用。南、北区似斑状花岗岩是否属于同一岩石单元? 岩浆源区及构造环境有何异同? 这些问题还没有一个定论,限制了对大湖塘地区燕山期岩浆序列及其成因的认识。

本文在前人研究的基础上,对大湖塘南区似斑状二云母花岗岩进行了精细的独居石和锆石 U-Pb 同位素年龄测定,开展了岩相学、岩石地球化学及锆石 Hf 同位素研究,并对比研究了南、北区似斑状花岗岩的岩石成因、物质来源、构造背景及意义。该研究对深化理解大湖塘钨矿岩浆序列及矿床成因有重要意义。

1 地质背景与岩石学

大湖塘钨铜矿集区位于江西省九岭山脉中段北部三县(武宁、修水、靖安)交界区域。研究区地处扬子地块东南缘,属于江南造山带中段,北邻长江中下游成矿带九瑞铜多金属矿集区(图 1a)(蒋少涌等, 2015),区域构造位于赣北北东向构造带的九岭-官帽山复式背斜与武宁-宜丰北北东向走滑冲断-伸展构造的复合部位,属九岭北北东向钨铜钼多金属成矿带(林黎等, 2006a, 2006b)。

区域地层为新元古代双桥山群浅变质岩(Wang

et al., 2008; 高林志等, 2008, 2012),为一套断陷环境下形成的深海火山-碎屑岩沉积建造(徐国辉等, 2013)。岩性以变余云母细砂岩为主,其次为板岩、千枚状页岩,是成矿的主要围岩(徐国辉等, 2013)。

区域构造十分发育,褶皱构造为九岭复式褶皱中的靖林-操兵场次级背斜东延部分,断裂构造按走向可分为近东西向(或北东东向)、北东-北北东向、近南北向、北西向 4 组,其中,近东西向和北东-北北东向两组断裂最为重要,为区内主要的控岩控矿断裂构造(徐国辉等, 2013)。

区域内侵入岩主要为晋宁期黑云母花岗闪长岩和燕山期岩浆岩。晋宁期黑云母花岗闪长岩呈岩基

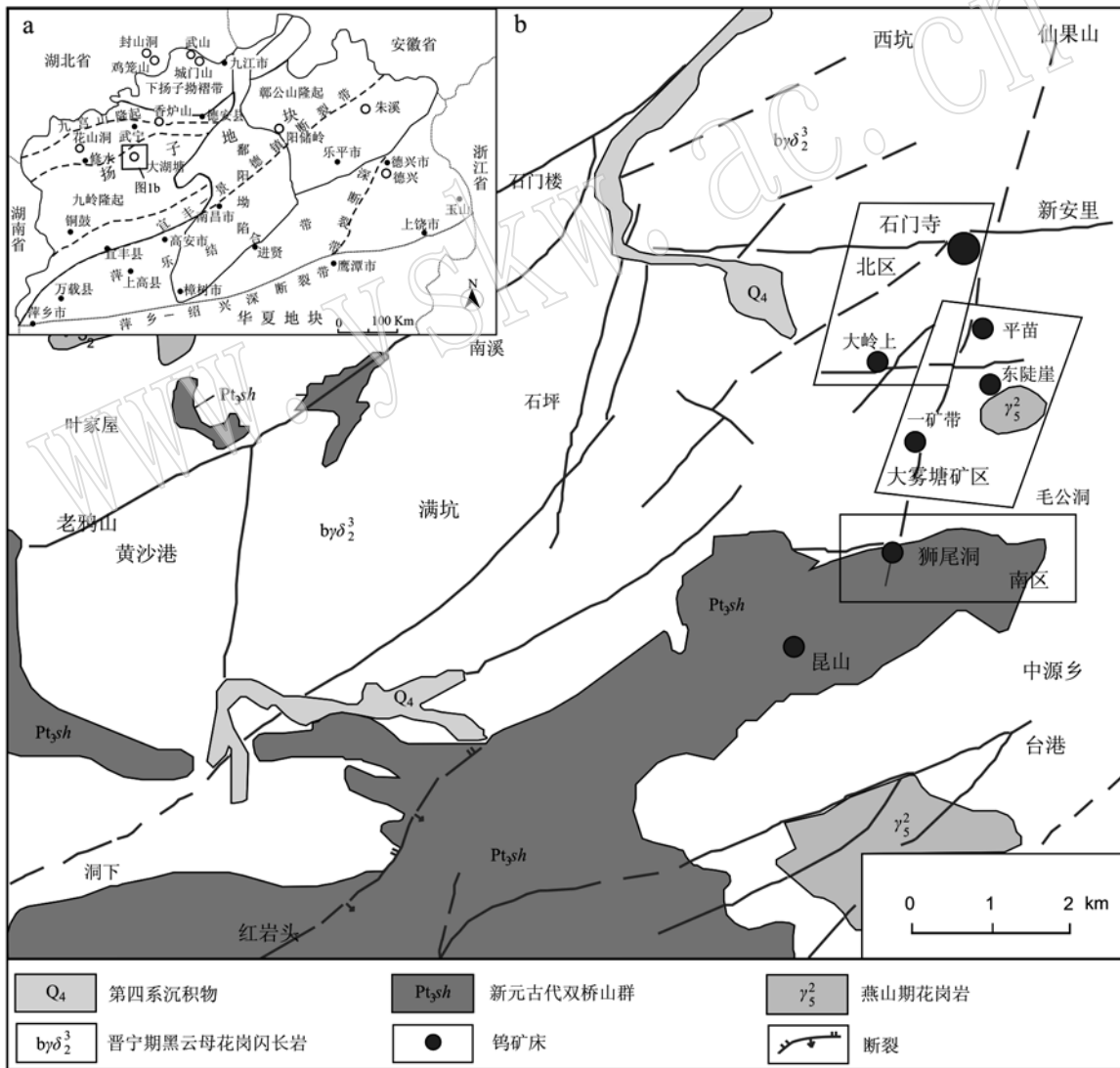


图 1 大湖塘地区区域大地构造位置[a, 据杨明桂等(2004)改编]及地质简图[b, 据项新葵等(2012a)、左全狮等(2014)改编]

Fig. 1 Location and tectonic setting (a, modified after Yang Minggui *et al.*, 2004) and geological sketch map (b, modified after Xiang Xinkui *et al.*, 2012a; Zuo Quanshi *et al.*, 2014) of the Dahutang area

产出,是九岭岩基的重要组成部分,侵入于双桥山群中(彭花明等, 2016)。燕山期花岗岩体主要呈岩株、岩瘤及岩枝状产出,大部分侵入黑云母花岗闪长岩基中,少数侵入于双桥山群中,是主要的成矿母岩(彭花明等, 2016)。岩性主要为似斑状花岗岩、细粒黑云母花岗岩、中细粒白云母花岗岩、中粗粒二云母花岗岩以及花岗斑岩。

根据目前勘探和开采现状,可将大湖塘矿集区划分为3个区,即北区石门寺矿区、大雾塘矿区和南

区狮尾洞矿区(图1b),本次研究工作主要集中在狮尾洞矿区(图2)。狮尾洞矿区出露地层为新元古代双桥山群浅变质岩,以粉砂质板岩和变余粉砂岩为主。出露的岩浆岩主要为晋宁期黑云母花岗闪长岩。钻孔及坑道工程揭露的燕山期岩浆岩有中细粒黑云母花岗岩、细粒白云母花岗岩、似斑状二云母花岗岩以及花岗斑岩等,呈岩瘤、岩株或岩枝产出。矿区构造十分发育,主要的控岩控矿构造为3条规模较大的断裂 F_4 、 F_5 、 F_6 (蒋少涌等, 2015)。

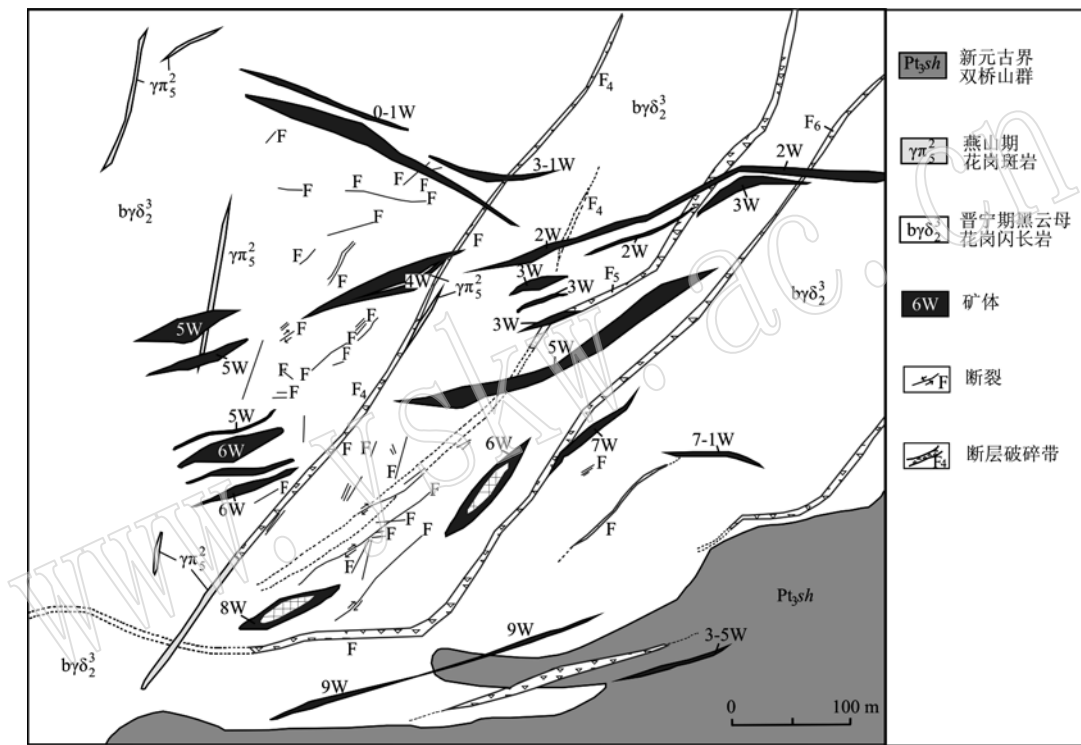


图2 狮尾洞矿床地质简图[据蒋少涌等(2015)改编]

Fig.2 Geological map of the Shiweidong ore deposit (modified after Jiang Shaoyong et al., 2015)

本次研究样品采自狮尾洞矿区的3个钻孔: ZK0-15、ZK1-13、ZK5-8,岩性均为似斑状二云母花岗岩(图3),岩石呈灰白色,似斑状结构,块状构造,由斑晶(~55%)和基质(~45%)组成。斑晶主要为石英(40%~45%)、斜长石(30%~35%)和钾长石(20%~25%)。其中,石英呈烟灰色,它形粒状,粒径3~8 mm;斜长石呈灰白色,板状或粒状,粒径2~4 mm;钾长石呈浅肉红色,它形粒状为主,次为半自形板柱状,粒径1~2 mm。基质具有花岗结构,主要由石英(30%~35%)、斜长石(20%~25%)、钾长石(15%~20%)、白云母(15%~20%)及黑云母(~15%)组成。石英与斑晶中的石英类似,粒径1

mm左右;斜长石呈灰白色,它形粒状,粒径0.5~1 mm;钾长石呈浅肉红色,它形粒状,粒径0.5~1 mm;白云母呈白色,鳞片状,大小0.5~1 mm;黑云母呈黑色,片状,大小0.5~1 mm。副矿物(<2%)主要为钛铁矿、磷灰石、锆石、独居石等。岩石较新鲜,蚀变很弱,仅见斑晶中钾长石局部被白云母交代。

2 分析方法

用于锆石和独居石 U-Pb 同位素年代学测定的似斑状二云母花岗岩(锆石样品 16K₄-G₁、16K₁₂-G、独居石样品16K₄-G1)经过破碎、浮选和电磁选等方

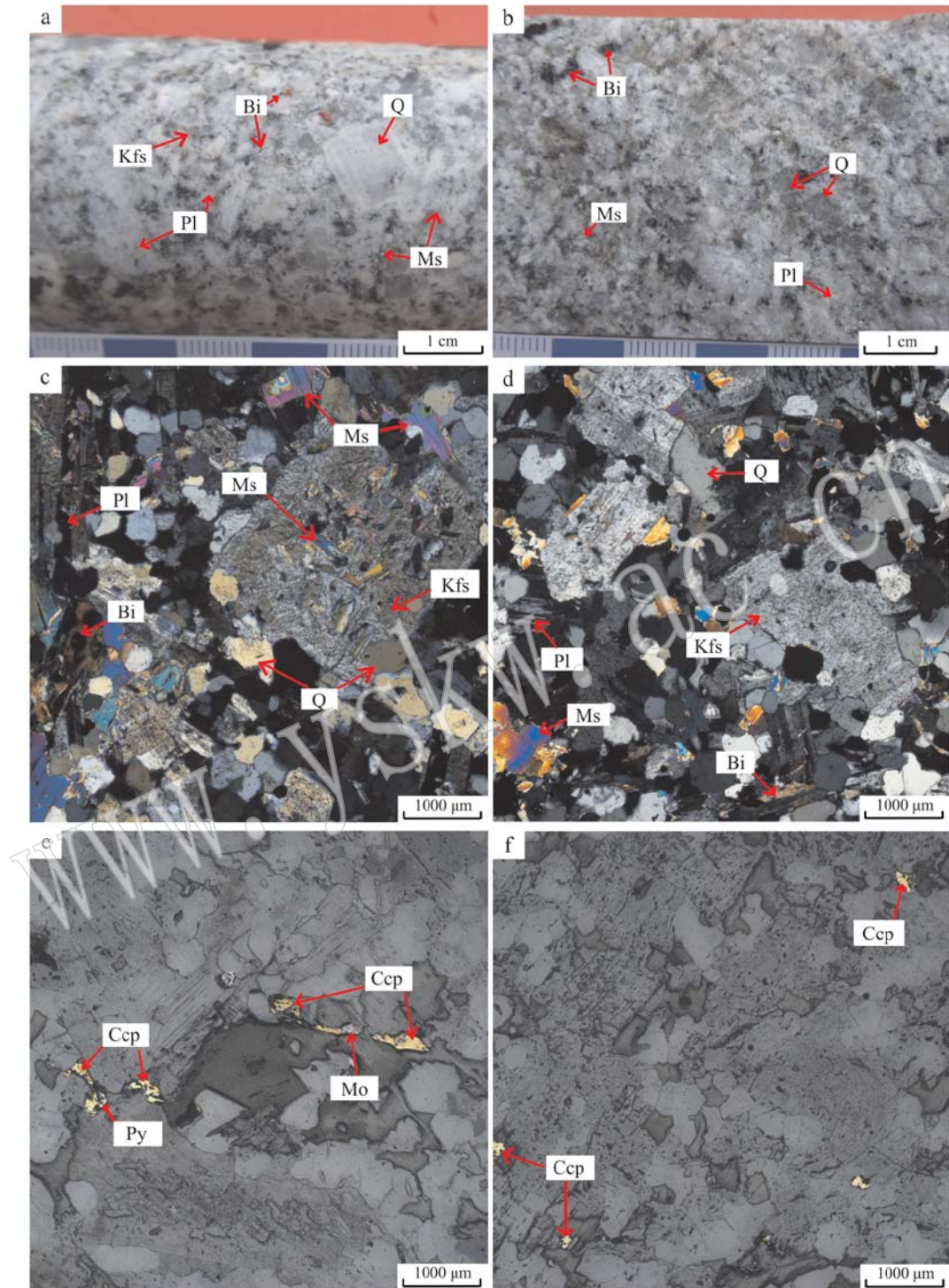


图3 狮尾洞似斑状二云母花岗岩手标本及显微照片

Fig. 3 Photos and microphotographs of the Shiweidong porphyritic two-mica granite

a, b—似斑状二云母花岗岩手标本照片, 似斑状结构明显, 斑晶主要为石英、斜长石、钾长石, 基质为石英、黑云母、白云母等; c, d—似斑状二云母花岗岩显微照片(正交偏光), 基质充填于斑晶间隙, 钾长石局部被白云母交代; e, f—似斑状二云母花岗岩显微照片(反射光), 黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿大多数充填于造岩矿物颗粒间隙, 少量交代造岩矿物; Pl—斜长石; Bi—黑云母; Ms—白云母; Q—石英; Kfs—钾长石; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Mo—辉钼矿

a, b—photos of the Shiweidong porphyritic two-mica granite, the porphyritic structure of rocks is obvious, the main phenocrysts are quartz, plagioclase and potassium feldspar, the matrix is quartz, biotite, muscovite, etc; c, d—microphotographs of the Shiweidong porphyritic two-mica granite (crossed nicols), matrix filling phenocryst gap, and potassium feldspar partially metasomatized by muscovite; e, f—microphotographs of the Shiweidong porphyritic two-mica granite (reflected light), chalcopyrite, molybdenite and pyrite mostly filling the interstitial space of mineral particles, with a small amount of metasomatic minerals; Pl—plagioclase; Bi—biotite; Ms—muscovite; Q—quartz; Kfs—potassium feldspar; Ccp—chalcopyrite; Py—pyrite; Mo—molybdenite

法后制作成靶,进行镜下透射光、反射光照相及阴极发光(CL)分析,根据阴极发光分析结果选择合适的测定区域进行测年分析。锆石 U-Pb 定年及其微量元素分析在北京科荟测试技术有限公司完成,采用的激光剥蚀系统为 ESI NWR 193 nm,电感耦合等离子体质谱仪是 AnalytikJena PlasmaQuant MS Elite ICP-MS。激光束斑的剥蚀孔径为 25 μm ,剥蚀时间 60 s,激光脉冲重复频率 6 Hz,能量密度约为 2.5 J/cm²,详细实验测试过程可参见侯可军等(2009)。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2010)完成,锆石年龄谱和图用 Isoplot 程序获得。锆石微量元素含量利用 SRM610 作为外标、Si 作内标的方法定量计算(Liu *et al.*, 2010)。独居石 U-Pb 同位素年代学测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)完成。分析过程中激光束斑直径为 16 μm ,并采用标准独居石 91500 作标样进行校正,实验原理和详细的测试方法见文献(Jackson *et al.*, 2004),同位素比值、年龄和误差采用软件 ICPMSDataCal 计算获得,普通铅校正采用 Andersen(2002)的方法进行,年龄计算和谐和图的绘制用 Isoplot 程序完成(Ludwig, 2003)。

岩石的主量、微量及稀土元素测试在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。主量元素分析采用 X 射线荧光光谱法(XRF),所用仪器为飞利浦 PW2404 X 射线荧光光谱仪,元素的测定精度可达 0.01%,分析误差 < 5%。微量元素分析采用 HR-ICPMS(Element 1)仪器,测试方法参照 DZ/T0223-2001[电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)]方法,微量元素含量大于 10 $\mu\text{g/g}$ 时相对误差小于 5%,小于 10 $\mu\text{g/g}$ 的相对误差小于 10%。利用 Geokit 软件对分析数据进行岩石地球化学数据处理(路远发, 2004)。

锆石 Hf 同位素测试在北京科荟测试技术有限公司采用 LA-MC-ICP-MS 微区原位分析方法完成,测试仪器为 193 nm 激光多接收等离子质谱仪(MC-ICP-MS)。实验过程中,采用氦气作为剥蚀样品物质载气,剥蚀直径为 50 μm ,采用锆石国际标样 GJ-1 作为参考标准,测试点与锆石 U-Pb 测年分析点位于同一颗锆石的相同或相邻位置。相关仪器运行条件及实验分析流程见文献(侯可军等, 2007)。计算时¹⁷⁶Lu 的衰变常数采用 $1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ (吴福元等, 2007); 球粒陨石的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Lu = 0.033 2,

¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282 772 (Bouvier *et al.*, 2008), 亏损地幔的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.283 25 和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Lu = 0.038 4 (Vervoort *et al.*, 1999), 平均地壳的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.015 (Griffin *et al.*, 2002)。

3 分析结果

3.1 锆石特征、稀土元素特征及 U-Pb 定年

两件似斑状二云母花岗岩样品中,16K₄-G₁(图 4a)的锆石透明,呈浅黄色,大部分锆石结晶较好,为长柱状自形晶体,长 50 ~ 120 μm ,长宽比大多为 2:1 ~ 5:1。锆石在阴极发光(CL)图像中呈黑色,环带不明显,这可能是受该锆石中高 U、Th 含量的影响。样品 16K₁₂-G(图 4b)的锆石为无色透明或浅黄色,自形程度较好,长 40 ~ 100 μm ,长宽比大多在 1:1 ~ 4:1。样品中有部分锆石在 CL 图像中呈黑色,环带不明显,也有部分锆石具有明显的内部结构及典型的岩浆振荡环带,符合岩浆锆石特点。

两件似斑状二云母花岗岩样品的锆石原位稀土元素分析结果见表 1。由表 1 可知,锆石稀土元素总量 ΣREE 为 $1.236 \times 10^{-6} \sim 39.387 \times 10^{-6}$,平均 5.824×10^{-6} ,LREE/HREE 值变化于 0 ~ 4.4 之间,(La/Yb)_N 均值为 0.15。如图 5 所示,锆石稀土元素配分曲线总体较陡,呈左倾型,表现为轻稀土元素亏损、重稀土元素富集的特征, Eu/Eu* 值为 0.02 ~ 0.11, Ce/Ce* 值为 0.84 ~ 10.78,具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常,属典型的岩浆成因锆石。

两件似斑状二云母花岗岩样品(16K₄-G₁、16K₁₂-G)的锆石 U-Pb 同位素测试结果列于表 2。样品 16K₄-G₁ 和 16K₁₂-G 各测试了 25 个点,分别有 11 和 13 个测试点由于信号积分区间太窄或谐和度较低不可用。样品 16K₄-G₁ 谐和度 > 90% 的样品点有 14 个,该样品的 14 个测点的 Th 含量变化于 $128 \times 10^{-6} \sim 3.827 \times 10^{-6}$ 之间, U 含量变化于 $2.841 \times 10^{-6} \sim 34.704 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 值为 0.01 ~ 0.16,在谐和图上年龄点较为集中, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 130.0 ± 2.2 Ma(图 6a); 样品 16K₁₂-G 谐和度 > 90% 的样品点有 12 个,该样品的 12 个测点的 Th 含量变化于 $50.2 \times 10^{-6} \sim 1.184 \times 10^{-6}$ 之间, U 含量变化于 $238 \times 10^{-6} \sim 25.886 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 值为 0.01 ~ 0.30,在谐和图上年龄点较为集中, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 128.6 ± 2.3 Ma(图 6b)。

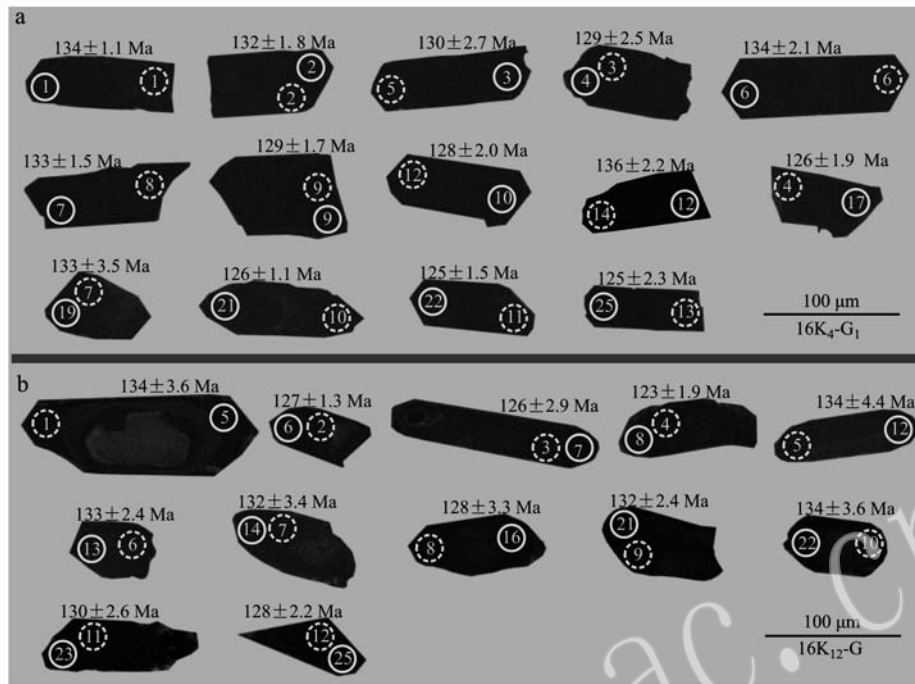


图4 狮尾洞似斑状二云母花岗岩中锆石阴极发光图像(实线圈代表 U-Pb 年龄测试点,虚线圈代表 Lu-Hf 同位素测试点)

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from porphyritic two-mica granite in Shiweidong (The solid circle represents the U-Pb age test point, and the dotted circle represents the Lu-Hf isotope test point)

表1 狮尾洞似斑状二云母花岗岩锆石原位微区 LA-ICP-MS 稀土元素数据

$w_B/10^{-6}$

Table 1 Trace element in-situ LA-ICP-MS data of zircon in the Shiweidong porphyritic two-mica granite

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δEu	δCe	(La/Yb) _N	LREE/HREE	ΣREE
16K ₄ -G ₁ 似斑状二云母花岗岩																			
1	8.63	21.00	2.04	9.50	13.30	0.69	70.4	56.9	830	294	1 295	296	2 652	371	0.06	1.17	0.00	0.01	5 920.52
2	2.32	8.35	0.97	6.18	6.84	0.34	30.6	28.9	424	151	713	191	1 972	301	0.06	1.34	0.00	0.01	3 837.26
3	0.84	5.74	1.00	8.84	15.60	0.71	62.0	49.1	746	271	1 223	283	2 610	367	0.06	1.30	0.00	0.01	5 644.42
4	10.60	27.50	3.03	16.70	18.70	0.87	77.3	59.0	893	312	1 324	306	2 779	392	0.06	1.15	0.00	0.01	6 219.39
6	4.11	18.20	2.54	13.40	9.23	0.54	41.2	26.4	368	138	650	180	1 746	261	0.07	1.32	0.00	0.01	3 458.28
7	939.00	1 712.00	203.00	793.00	176.00	2.86	234.0	84.1	1 006	359	1 511	370	3 212	467	0.04	0.90	0.20	0.53	11 067.35
9	0.19	1.26	0.20	3.23	13.30	0.53	85.5	60.0	843	307	1 319	314	2 753	381	0.04	1.37	0.00	0.00	6 081.51
10	8 063.00	14 589.00	1 597.00	6 471.00	1 360.00	13.90	1 091.0	167.0	1 193	339	1 318	286	2 555	345	0.03	0.92	2.13	4.40	39 386.77
12	1.00	5.94	1.26	9.08	17.50	0.67	101.00	64.1	910	336	1 467	354	3 194	458	0.04	1.08	0.00	0.01	6 918.06
17	0.58	2.74	0.74	8.78	18.8	0.73	124	78.9	1 127	415	1 834	442	3 986	572	0.03	0.85	0.00	0.00	8 611.49
19	0.00	1.08	0.05	1.76	7.36	0.16	52.0	25.8	313	112	482	113	1 056	160	0.02	7.05	0.00	0.00	2 324.40
21	992.00	1 869.00	225.00	969.00	211.00	2.19	198.00	45.1	418	136	558	128	1 142	168	0.03	0.92	0.59	1.53	7 062.39
22	5.76	23.40	4.12	23.30	21.40	0.88	53.90	27.5	338	116	526	145	1 539	233	0.08	1.11	0.00	0.03	3 057.62
25	3.10	19.30	3.04	18.50	24.40	0.97	104.00	59.3	820	288	1 228	296	2 617	356	0.05	1.37	0.00	0.01	5 837.18
16K ₁₂ -G 似斑状二云母花岗岩																			
5	0.45	3.91	0.56	4.03	4.51	0.46	23.8	16.7	212	79.0	324	81	755	105	0.11	1.61	0.00	0.01	1 611.09
6	1 114.00	1 985.00	231.00	958.00	174.00	3.08	165.0	36.4	340	109	433	91	870	116	0.05	0.90	0.86	2.07	6 625.67
7	52.30	103.00	9.73	40.20	17.30	0.75	63.7	31.5	387	142	592	162	1 424	213	0.06	1.03	0.02	0.07	3 239.30
8	0.02	0.91	0.06	1.44	7.51	0.30	55.0	28.0	352	125	523	122	1 139	168	0.03	4.25	0.00	0.00	2 522.31
12	0.08	5.29	0.46	3.84	8.84	0.54	44.7	17.6	192	60	248	56	523	76	0.07	3.26	0.00	0.02	1 235.74
13	0.00	1.05	0.07	1.99	8.61	0.27	54.9	23.1	259	90	384	90	825	123	0.03	4.54	0.00	0.01	1 862.11
14	0.58	3.43	0.19	1.62	6.73	0.39	64.2	40.2	506	174	715	170	1 583	226	0.04	2.48	0.00	0.00	3 490.72
16	0.04	0.64	0.07	1.45	6.10	0.42	46.6	26.4	318	110	473	114	1 009	150	0.05	2.26	0.00	0.00	2 255.30
21	0.04	4.10	0.10	1.99	7.32	0.58	49.9	21.7	258	89	359	80	723	114	0.07	10.78	0.00	0.01	1 709.13
22	0.30	2.97	0.15	1.74	4.40	0.31	33.7	17.5	233	84	354	83	788	112	0.06	3.40	0.00	0.01	1 714.77
23	193.00	321.00	39.80	174.00	55.80	1.00	139.0	68.0	884	303	1 310	302	2 721	359	0.03	0.84	0.05	0.13	6 870.51
25	0.01	0.41	0.02	0.74	4.13	0.12	37.6	25.1	343	130	566	142	1 413	193	0.02	4.38	0.00	0.00	2 853.56

注:表中点号与锆石 U-Pb 定年点号一一对应。

表2 狮尾洞似斑状二云母花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the Shiweidong porphyritic two-mica granite

点号	^{232}Th		^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	年龄/Ma					
	Th/U	1 σ	1 σ	1 σ			1 σ	1 σ				1 σ	1 σ				
16K ₄ -G ₁ 似斑状二云母花岗岩																	
1	395	25 621	592	0.02	0.049 4	0.142 5	0.002 8	0.020 9	0.000 2	0.008 4	0.000 7	165	40.7	135	2.5	134	1.1
2	155	17 497	381	0.01	0.048 9	0.000 8	0.140 2	0.003 2	0.000 3	0.007 3	0.000 6	146	38.9	133	2.8	132	1.8
3	371	25 981	568	0.01	0.048 6	0.000 7	0.136 4	0.003 7	0.000 4	0.007 3	0.000 5	128	32.4	130	3.3	130	2.7
4	360	26 737	577	0.01	0.049 4	0.000 9	0.138 3	0.003 8	0.000 4	0.007 2	0.000 5	169	38.9	132	3.4	129	2.5
6	128	15 390	336	0.01	0.049 7	0.000 7	0.144 3	0.003 0	0.002 1	0.000 3	0.010 5	189	33.3	137	2.6	134	2.1
7	2 903	21 016	769	0.14	0.049 5	0.000 8	0.142 7	0.002 9	0.002 9	0.006 7	0.000 4	172	38.9	135	2.6	133	1.5
9	492	34 704	733	0.01	0.049 2	0.000 9	0.136 9	0.002 5	0.002 2	0.007 2	0.000 4	167	38.0	130	2.2	129	1.7
10	3 827	28 009	1 266	0.14	0.052 4	0.001 0	0.145 2	0.002 6	0.002 1	0.000 3	0.000 0	302	42.6	138	2.3	128	2.0
12	290	23 188	511	0.01	0.048 7	0.001 0	0.143 6	0.003 8	0.002 4	0.008 4	0.000 6	132	52.8	136	3.4	136	2.2
17	340	24 780	509	0.01	0.048 4	0.001 0	0.132 0	0.003 1	0.019 8	0.006 9	0.000 4	120	46.3	126	2.8	126	1.9
19	139	2 841	74	0.05	0.050 6	0.001 1	0.145 9	0.004 7	0.020 9	0.000 5	0.007 2	233	80.5	138	4.2	133	3.5
21	965	5 958	214	0.16	0.048 1	0.000 9	0.131 0	0.002 7	0.019 7	0.000 2	0.007 2	106	44.4	125	2.4	126	1.1
22	422	9 443	218	0.04	0.051 1	0.000 9	0.138 3	0.003 0	0.019 6	0.000 2	0.005 3	256	40.7	131	2.7	125	1.5
25	615	30 190	699	0.02	0.049 9	0.001 0	0.135 2	0.003 1	0.019 7	0.000 4	0.011 8	191	46.3	129	2.8	125	2.3
16K ₁₂ -G 似斑状二云母花岗岩																	
5	50.2	5 407	121	0.01	0.047 9	0.001 2	0.138 1	0.003 3	0.020 9	0.000 6	0.013 1	100	57.4	131	2.9	134	3.6
6	1 184	3 915	239	0.30	0.050 9	0.001 5	0.139 3	0.003 2	0.019 8	0.000 2	0.007 8	235	68.5	132	2.9	127	1.3
7	491	4 591	160	0.11	0.048 6	0.001 8	0.132 1	0.007 2	0.019 7	0.000 5	0.008 4	128	88.9	126	6.5	126	2.9
8	142	5 823	128	0.02	0.048 6	0.000 9	0.129 5	0.003 2	0.019 3	0.000 3	0.008 5	132	42.6	124	2.9	123	1.9
12	462	2 378	112	0.19	0.052 1	0.001 9	0.150 7	0.006 5	0.021 0	0.000 7	0.008 4	300	80.5	143	5.7	134	4.4
13	191	2 721	80	0.07	0.049 1	0.002 5	0.141 6	0.007 6	0.020 9	0.000 4	0.007 9	154	119.0	134	6.8	133	2.4
14	191	10 725	248	0.02	0.048 5	0.001 1	0.137 9	0.004 1	0.020 6	0.000 5	0.010 1	124	49.1	131	3.7	132	3.4
16	138	4 063	101	0.03	0.047 2	0.001 7	0.131 0	0.006 0	0.020 1	0.000 5	0.010 3	61	81.5	125	5.4	128	3.3
21	759	4 700	196	0.16	0.049 3	0.001 0	0.141 1	0.003 9	0.020 7	0.000 4	0.008 8	165	45.4	134	3.4	132	2.4
22	220	4 509	137	0.05	0.051 2	0.001 4	0.148 2	0.005 3	0.021 0	0.000 6	0.013 5	256	63.0	140	4.7	134	3.6
23	444	25 886	577	0.02	0.049 7	0.000 8	0.138 9	0.003 3	0.020 3	0.000 4	0.010 8	189	38.9	132	3.0	130	2.6
25	82	7 397	161	0.01	0.051 6	0.001 2	0.143 1	0.004 2	0.020 1	0.000 3	0.012 0	333	55.5	136	3.7	128	2.2

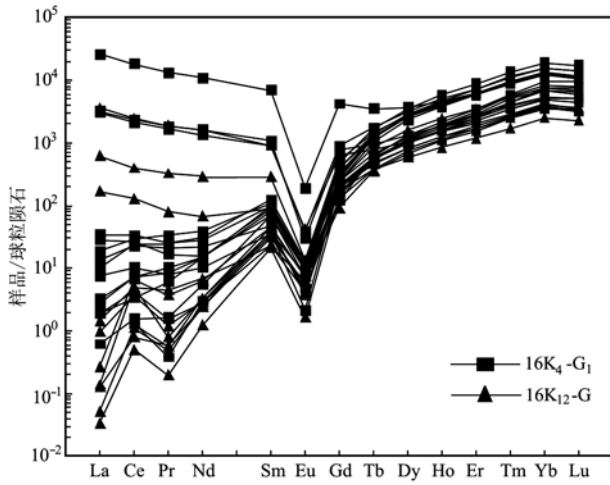


图5 狮尾洞似斑状二云母花岗岩锆石稀土元素标准化配分曲线(球粒陨石标准值引 Boynton, 1984)

Fig. 5 Standardized partition curve of zircon REE from porphyritic two-mica granite in Shiweidong (after Boynton, 1984)

3.2 独居石特征及 U-Pb 定年

锆石因其矿物稳定性高,富含 U、Th,低普通 Pb,是 U-Pb 同位素定年的首选对象。然而,研究表明,与钨锡矿有关的高分异花岗岩,其锆石 U 含量普遍较高($U > 2000 \mu\text{g/g}$),容易发生锆石蜕晶化,使得锆石原位 U-Pb 年龄散乱、误差较大(Li *et al.*, 2013)。大湖塘地区与钨矿有关的花岗岩多属于此类高 U 锆石(黄兰椿等, 2012, 2013),且锆石颗粒较小,长宽比大,这可能是导致锆石 U-Pb 年龄测试中有较多测点信号积分区间太窄或谐和度低的主要原因。独居石作为一种常见于高分异酸性岩中的副矿物,富含 Th、U,初始普通 Pb 含量较低,且不易发生蜕晶化,是 Th-Pb 和 U-Pb 同位素定年的理想对象(Harrison *et al.*, 2002; Seydoux-Guillaume *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2013)。因此,本文又对似斑状二云母花岗岩进行了独居石 U-Pb 定年,对成岩年龄进行约束,提高其可靠性,同时,还能了解“高 U 效应”对

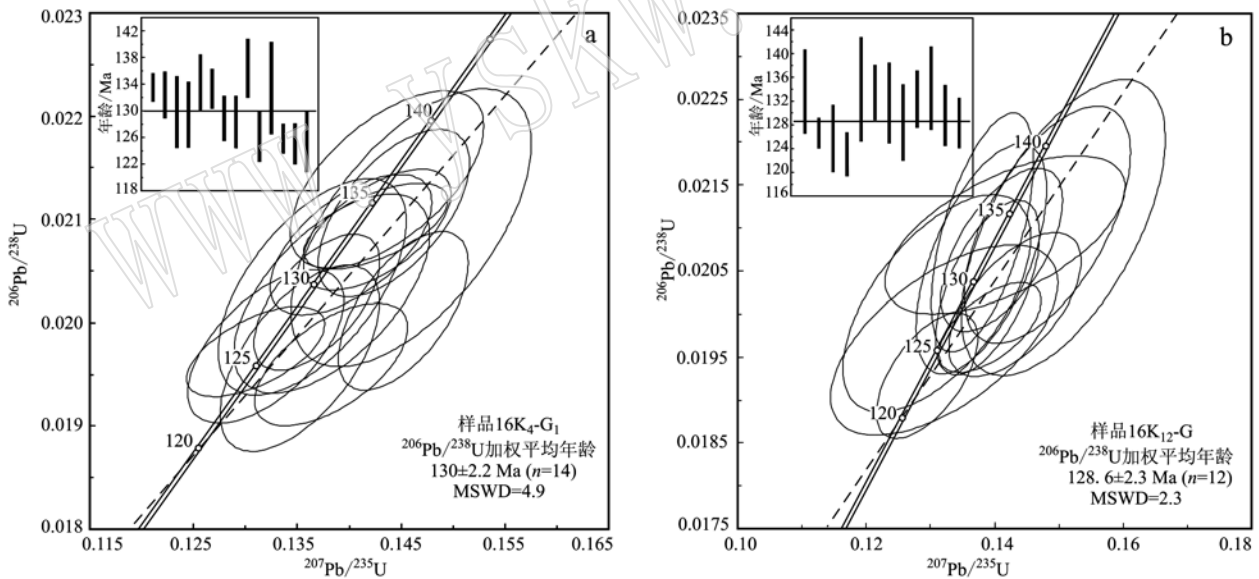


图6 狮尾洞似斑状二云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Concordia diagrams showing zircon U-Pb data of the Shiweidong porphyritic two-mica granite

锆石 U-Pb 同位素测年结果的影响。

样品 16K₄-G₁(图 7)的独居石呈浅黄色,透明,半自形到自形,为短柱状、近等轴状,自形状,粒度较锆石大,在 80 ~ 120 μm 之间,在 CL 图像中呈灰黑色,具有明显的岩浆环带。

1 件似斑状二云母花岗岩样品(16K₄-G₁)的独居石 U-Pb 同位素测试结果列于表 3。测试结果中,

样品 16K₄-G₁ 谐和度 > 90% 的样品点有 16 个,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $128.3 \pm 1.7 \text{ Ma}$ (图 8)。

3.3 岩石地球化学特征

狮尾洞似斑状二云母花岗岩代表性样品的主、微量元素测试结果列于表 4。

由表 4 可知,狮尾洞似斑状二云母花岗岩 SiO_2 含量为 72.83% ~ 74.59%, 平均为 73.86%; $\text{K}_2\text{O}/$

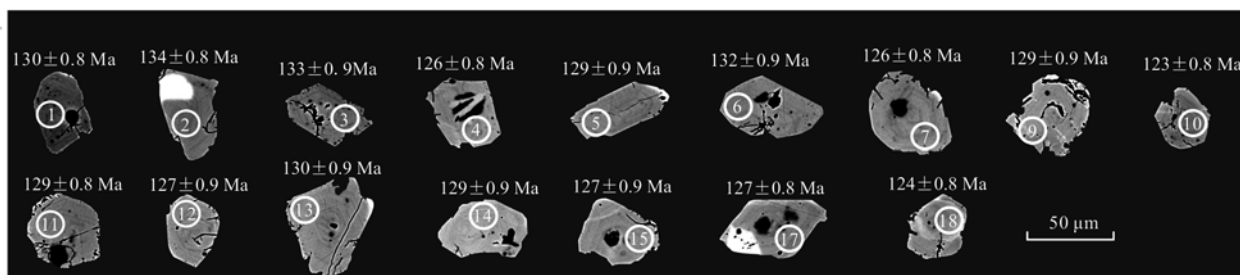
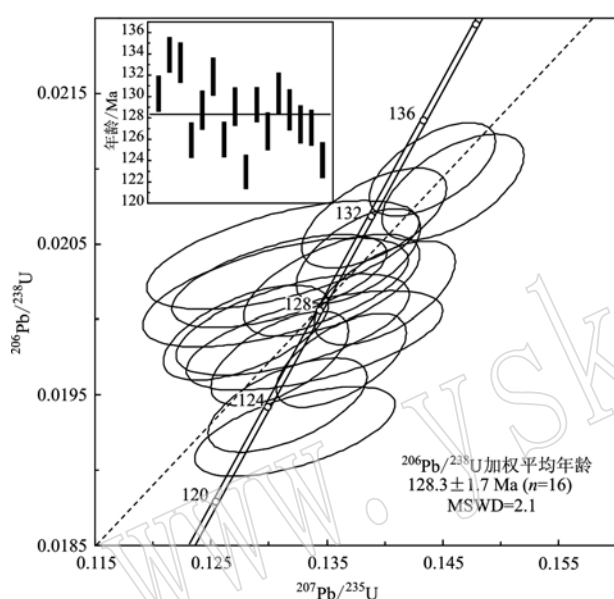


图7 狮尾洞似斑状二云母花岗岩中独居石阴极发光图像

Fig. 7 Cathodoluminescence (CL) images of monazites from porphyritic two-mica granite in Shiweidong

图8 狮尾洞似斑状二云母花岗岩独居石 U-Pb 年龄谱和图
Fig. 8 Concordia diagrams showing monazite U-Pb data of the porphyritic two-mica granite in Shiweidong

Na_2O 值变化于 1.16 ~ 1.32 之间, 平均为 1.24; ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量在 7.67% ~ 8.7%, 平均为 8.13%; Al_2O_3 含量为 14.10% ~ 15.03%, 平均为 14.51%; CaO 含量极低, 为 0.67% ~ 0.80%, 平均为 0.73%; MgO 含量也低, 在 0.23% ~ 0.29%, 平均为 0.27%。岩石表现为富硅、富碱, 贫钙、贫镁的特征。在硅碱图(图 9a)上, 岩石样品均落在亚碱性系列; 在岩石系列 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解(图 9b)中, 绝大多数点均投影于高钾钙碱性系列, 而北区个别点落于钾玄岩系列; 在 $\text{A/NK} - \text{A/CNK}$ 图中投点均落在过铝质区域(图 9c)。南区似斑状二云母花岗岩和似斑状白云母花岗岩 A/CNK 值基本上相同, 分别为 1.17 ~ 1.23 和 1.16 ~ 1.24(黄兰椿等, 2012), 整体上高于北区似斑状黑云母花岗岩 ($\text{A/CNK} = 1.09 \sim 1.16$)

(项新葵等, 2012; 彭花明等, 2016), 表明南区较北区似斑状花岗岩的过铝质程度更高。

狮尾洞似斑状二云母花岗岩的稀土元素组成特征总体表现为稀土元素总量较低, ΣREE 变化于 $51.02 \times 10^{-6} \sim 58.67 \times 10^{-6}$ 之间, 这可能是由于锆石和磷灰石结晶分离和(或)在岩浆演化阶段的晚期 REE 随着 F-REE、Cl-REE 的络合物进入流体引起的 (Taylor *et al.*, 1981; Irber, 1999)。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 10a)上, 稀土元素表现出右倾斜的配分特征。南区似斑状二云母花岗岩 LREE/HREE 为 6.32 ~ 7.36, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 7.72 ~ 9.29, Eu/Eu^* 在 0.33 ~ 0.46, 而似斑状白云母花岗岩 LREE/HREE 为 9.88 ~ 11.7, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 15.1 ~ 19.0, Eu/Eu^* 在 0.13 ~ 0.24(黄兰椿等, 2012); 北区似斑状黑云母花岗岩 LREE/HREE 为 8.84 ~ 14.81, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 11.9 ~ 28.4, Eu/Eu^* 在 0.13 ~ 0.63(项新葵等, 2012; 彭花明等, 2016)。总体上, 南北区样品均富集轻稀土元素, 轻重稀土元素分馏明显, 但北区似斑状花岗岩的轻重稀土元素分馏较南区更显著, 南区似斑状白云母花岗岩较似斑状二云母花岗岩分馏更显著, 这可能是由于锆石和磷灰石的结晶分离分别引起 MREE 和 HREE 含量的降低。均具有强烈的 Eu 负异常, 可能由于源区部分熔融时残留斜长石导致了 Eu 的强烈负异常。

在微量元素的原始地幔标准化图解(图 10b)中, 大湖塘似斑状花岗岩的微量元素配分曲线均呈右倾趋势, 且表现出富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素(LILE), 贫 Ba、Nb、Sr、Ti 等元素的特征。其中, 南区似斑状二云母花岗岩 Nb 含量为 $5.56 \times 10^{-6} \sim 18.6 \times 10^{-6}$, Rb/Sr 值为 7.6 ~ 15.9, 似斑状白云母花岗岩 Nb 含量为 $16.6 \times 10^{-6} \sim 19.6 \times 10^{-6}$, Rb/Sr 值为 19.3 ~ 26.3(黄兰椿等, 2012); 北区似斑状黑云

表3 狮尾洞似斑状二云母花岗岩 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年结果
Table 3 LA-ICP-MS monazite U-Pb dating results of the Shiweidong porphyritic two-mica granite

样号	$w_B/10^{-6}$		同位素比值												年龄/Ma						
	^{232}Th	^{238}U	Pb	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	
1	115 442	32 370	1 271	3.6	0.048 8	0.000 8	0.137 7	0.002 2	0.020 4	0.000 4	0.000 1	0.006 8	0.000 1	139	43.5	131	2.0	130	0.8	137	1.1
2	124 889	29 183	1 281	4.3	0.049 6	0.000 8	0.144 1	0.002 2	0.021 0	0.000 1	0.000 1	0.006 9	0.000 1	176	37.0	137	2.0	134	0.8	138	1.0
3	121 920	31 602	1 313	3.9	0.050 5	0.000 9	0.145 9	0.002 5	0.020 9	0.000 1	0.000 1	0.006 9	0.000 1	217	40.7	138	2.2	133	0.9	139	1.2
4	138 543	29 142	1 264	4.8	0.049 9	0.000 9	0.136 2	0.002 3	0.019 7	0.000 1	0.000 1	0.006 4	0.000 1	191	38.9	130	2.0	126	0.8	129	1.0
5	115 990	28 349	1 185	4.1	0.050 1	0.000 9	0.140 0	0.002 5	0.020 2	0.000 1	0.000 1	0.006 8	0.000 1	211	38.0	133	2.2	129	0.9	137	1.1
6	130 780	31 666	1 336	4.1	0.048 6	0.000 9	0.139 1	0.002 6	0.020 7	0.000 1	0.000 1	0.006 8	0.000 1	128	42.6	132	2.3	132	0.9	136	1.1
7	121 428	34 268	1 286	3.5	0.047 9	0.000 9	0.130 9	0.002 4	0.019 7	0.000 1	0.000 1	0.006 5	0.000 1	94.5	41.7	125	2.2	126	0.8	132	1.0
9	128 083	29 968	1 267	4.3	0.048 4	0.001 1	0.135 4	0.003 1	0.020 2	0.000 1	0.000 1	0.006 7	0.000 0	117	55.6	129	2.8	129	0.9	135	1.0
10	126 949	32 849	1 260	3.9	0.049 7	0.001 4	0.132 2	0.003 5	0.019 3	0.000 1	0.000 1	0.006 4	0.000 0	189	60.2	126	3.2	123	0.8	129	1.0
11	126 347	37 020	1 398	3.4	0.046 7	0.001 4	0.130 9	0.003 8	0.020 3	0.000 1	0.000 1	0.006 7	0.000 1	35.3	70.4	125	3.4	129	0.8	135	1.0
12	120 971	29 416	1 186	4.1	0.048 7	0.001 6	0.133 9	0.004 5	0.019 9	0.000 1	0.000 1	0.006 5	0.000 1	132	79.6	128	4.0	127	0.9	131	1.0
13	131 384	30 935	1 311	4.2	0.046 5	0.001 7	0.131 2	0.004 8	0.020 4	0.000 1	0.000 1	0.006 7	0.000 1	20.5	88.9	125	4.3	130	0.9	135	1.1
14	122 175	30 479	1 230	4.0	0.046 8	0.001 7	0.130 6	0.004 7	0.020 2	0.000 1	0.000 1	0.006 6	0.000 1	35.3	85.2	125	4.2	129	0.9	133	1.1
15	128 722	28 804	1 213	4.5	0.047 8	0.001 5	0.132 1	0.004 1	0.020 0	0.000 1	0.000 1	0.006 5	0.000 1	100	74.1	126	3.7	127	0.9	131	1.1
17	118 267	33 404	1 254	3.5	0.046 4	0.001 1	0.128 0	0.002 9	0.019 9	0.000 1	0.000 1	0.006 6	0.000 1	20.5	51.8	122	2.6	127	0.8	132	1.0
18	111 286	33 412	1 188	3.3	0.048 9	0.001 0	0.131 6	0.002 8	0.019 4	0.000 1	0.000 1	0.006 4	0.000 1	143	47.2	126	2.5	124	0.8	128	1.1

表4 狮尾洞似斑状二云母花岗岩主量($w_B/\%$)、微量和稀土元素($w_B/10^{-6}$)组成及相关参数Table 4 Major ($w_B/\%$), trace and rare earth element ($w_B/10^{-6}$) content and related geochemical parameters of the Shiweidong porphyritic two-mica granite

样品编号	16K ₄ -H ₁	16K ₄ -H ₂	16K ₄ -H ₃	16K ₁₁ -H ₁	16K ₁₁ -H ₂	16K ₁₁ -H ₃	16K ₁₁ -H ₄	16K ₁₁ -H ₅	16K ₁₂ -H ₁	16K ₁₂ -H ₂
SiO ₂	72.94	73.58	72.83	74.39	73.98	73.65	74.59	74.51	74.24	73.84
TiO ₂	0.11	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.12
Al ₂ O ₃	14.98	14.67	15.03	14.17	14.51	14.62	14.12	14.10	14.47	14.40
Fe ₂ O ₃ ^T	1.06	1.08	1.12	1.03	1.00	1.00	1.02	1.05	0.97	1.16
MgO	0.28	0.29	0.29	0.26	0.25	0.28	0.25	0.25	0.23	0.27
MnO	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08
CaO	0.67	0.71	0.72	0.74	0.71	0.69	0.72	0.75	0.80	0.79
Na ₂ O	3.90	3.61	3.71	3.57	3.63	3.63	3.66	3.46	3.54	3.57
K ₂ O	4.80	4.51	4.78	4.48	4.56	4.80	4.24	4.41	4.13	4.28
P ₂ O ₅	0.25	0.26	0.26	0.23	0.23	0.23	0.22	0.23	0.30	0.31
烧失量	0.87	1.04	1.02	0.88	0.89	0.91	0.91	1.00	1.10	1.10
Total	99.90	99.91	99.92	99.92	99.93	99.96	99.91	99.92	99.94	99.92
A/CNK	1.17	1.21	1.19	1.17	1.19	1.18	1.18	1.19	1.23	1.20
La	11.00	10.60	11.80	11.50	10.70	10.70	11.40	10.80	10.50	11.10
Ce	22.80	20.50	23.80	23.20	20.80	21.10	22.40	21.40	20.10	22.10
Pr	2.58	2.61	2.96	2.74	2.61	2.57	2.78	2.55	2.56	2.71
Nd	10.10	9.17	10.30	9.79	9.41	9.11	10.10	9.20	9.03	9.61
Sm	2.25	2.13	2.49	2.32	2.16	2.24	2.53	2.11	2.14	2.16
Eu	0.32	0.28	0.30	0.26	0.28	0.30	0.26	0.26	0.24	0.24
Gd	1.91	1.80	2.05	2.06	1.88	1.91	2.13	1.85	1.81	1.95
Tb	0.40	0.38	0.42	0.44	0.40	0.41	0.47	0.40	0.39	0.41
Dy	2.10	1.94	2.17	2.23	2.06	2.08	2.46	2.01	1.99	2.05
Ho	0.35	0.33	0.35	0.38	0.36	0.35	0.41	0.34	0.34	0.35
Er	0.91	0.84	0.92	0.98	0.93	0.93	1.05	0.92	0.85	0.94
Tm	0.15	0.14	0.15	0.16	0.16	0.15	0.18	0.15	0.15	0.15
Yb	0.89	0.85	0.86	0.97	0.94	0.86	1.00	0.88	0.82	0.94
Lu	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.13	0.11	0.11	0.12
Y	11.70	11.10	11.80	12.20	11.80	11.30	13.60	11.60	11.50	12.10
ΣREE	55.86	51.69	58.67	57.15	52.79	52.83	57.30	52.98	51.02	54.83
LREE	49.05	45.29	51.65	49.81	45.96	46.02	49.47	46.32	44.57	47.92
HREE	6.82	6.40	7.02	7.34	6.83	6.81	7.83	6.66	6.45	6.90
LREE/HREE	7.20	7.08	7.36	6.79	6.73	6.76	6.32	6.96	6.91	6.94
(La/Yb) _N	8.32	8.44	9.29	8.00	7.72	8.40	7.72	8.26	8.69	7.94
Eu/Eu*	0.46	0.43	0.39	0.36	0.41	0.43	0.33	0.40	0.36	0.36
Li	204.00	250.00	260.00	155.00	142.00	143.00	170.00	181.00	434.00	403.00
Be	23.00	26.20	44.90	19.50	18.30	18.20	16.70	21.20	19.60	22.70
Sc	3.06	3.61	3.07	3.01	2.69	2.73	3.41	2.99	3.22	3.23
V	6.95	6.07	6.06	6.74	5.64	6.70	6.66	6.26	5.81	6.53
Cr	3.51	5.15	6.66	8.07	4.60	7.80	7.97	4.46	5.47	4.81
Co	1.21	1.13	1.38	1.13	1.04	1.00	1.15	1.16	0.97	1.25
Ni	3.09	3.27	4.57	3.56	2.79	6.79	5.37	3.45	3.94	3.57
Cu	3.54	3.52	8.41	2.27	2.09	5.45	3.16	6.59	350.00	395.00
Zn	52.70	58.80	66.70	46.20	47.80	46.00	60.80	45.90	74.10	84.70
Ga	21.70	22.40	23.50	21.00	20.20	19.90	21.60	21.40	21.90	23.10
Rb	460.00	484.00	543.00	372.00	368.00	384.00	377.00	405.00	488.00	536.00
Sr	45.70	40.60	46.00	45.00	48.40	45.40	45.50	42.00	30.70	39.20
Zr	62.10	53.20	54.50	57.60	58.60	52.60	63.40	58.20	53.40	61.10
Nb	14.90	18.10	18.60	13.70	12.10	12.70	15.20	13.40	16.60	17.40
Mo	0.15	0.14	0.27	0.27	0.19	0.41	0.43	0.29	2.73	4.68
Cd	0.06	0.07	0.09	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.14	0.13
In	0.18	0.27	0.27	0.12	0.14	0.15	0.16	0.17	0.27	0.28

续表 4

Continued Table 4

样品编号	16K ₄ -H ₁	16K ₄ -H ₂	16K ₄ -H ₃	16K ₁₁ -H ₁	16K ₁₁ -H ₂	16K ₁₁ -H ₃	16K ₁₁ -H ₄	16K ₁₁ -H ₅	16K ₁₂ -H ₁	16K ₁₂ -H ₂
Cs	183.00	225.00	190.00	135.00	148.00	140.00	147.00	197.00	437.00	481.00
Ba	141.00	120.00	140.00	99.40	108.00	130.00	84.30	99.50	82.20	94.40
Hf	2.31	2.14	2.13	2.18	2.22	2.02	2.30	2.18	2.06	2.30
Ta	6.36	8.87	7.90	5.12	4.22	4.24	3.70	4.25	5.99	6.22
W	6.42	28.60	7.84	17.10	5.40	4.98	2.66	9.31	17.30	52.50
Tl	2.56	2.60	2.86	1.88	1.87	1.91	2.03	1.98	2.63	3.02
Pb	32.00	28.50	35.20	31.90	31.60	31.40	28.30	29.70	23.70	26.60
Bi	5.44	3.99	4.16	8.94	5.01	7.17	4.36	10.70	7.99	8.71
Th	8.25	7.70	8.59	8.00	7.69	7.36	8.04	7.58	7.60	8.56
U	20.20	21.30	23.30	24.60	27.60	22.00	23.60	21.00	27.40	19.90
Sb	0.04	0.05	0.10	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.07	0.06
Rb/Sr	18.25	19.51	23.95	22.11	18.70	19.60	23.14	20.64	23.99	22.35
Rb/Ba	0.39	0.36	0.31	0.31	0.36	0.34	0.27	0.34	0.29	0.31

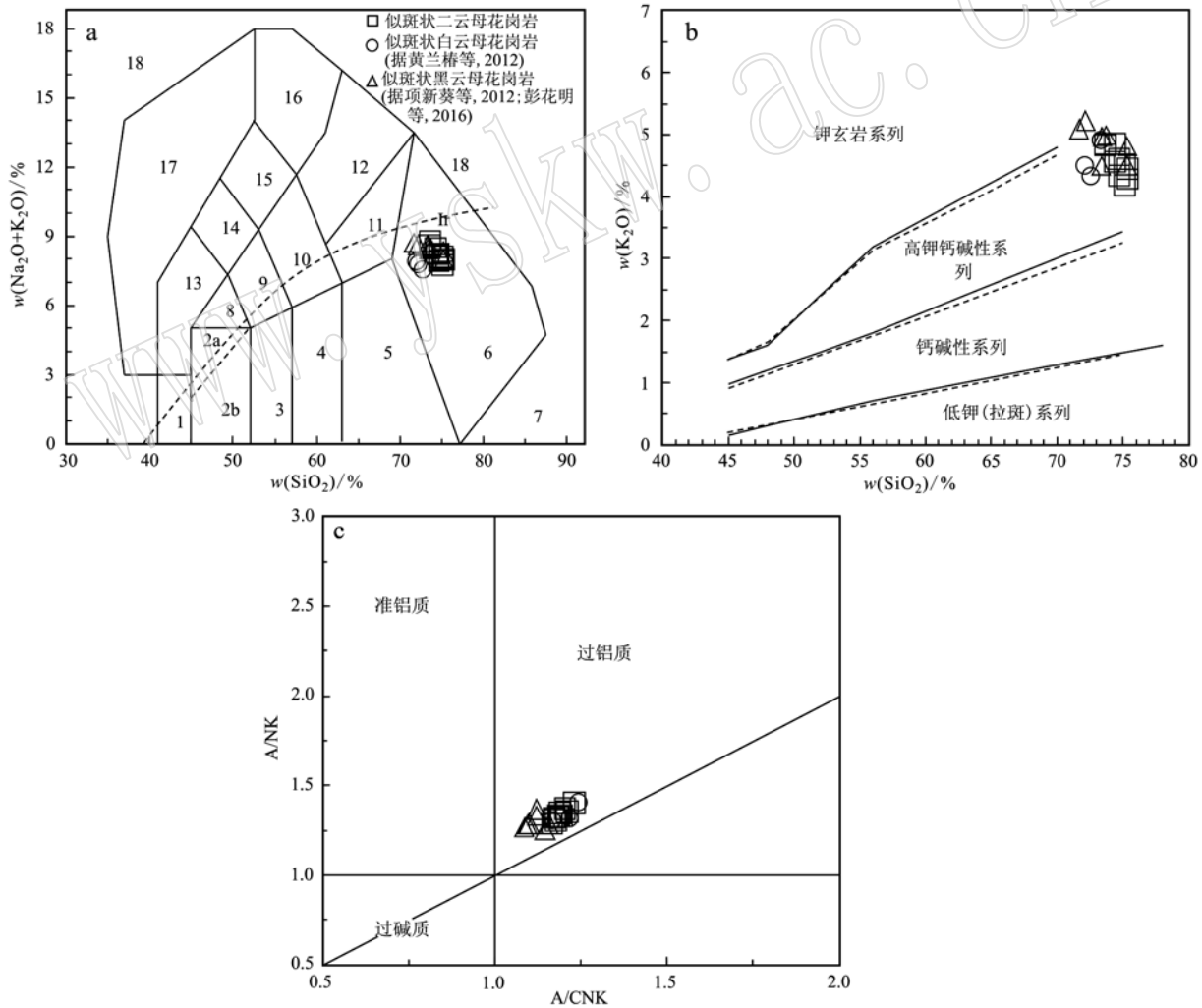


图9 大湖塘似斑状花岗岩的 TAS 图解(a, 据 Middlemost, 1994)、K₂O - SiO₂ 岩石系列判别图(b, 据 Le Maitre 等, 1989) 和岩石铝饱和指数判别图解(c, 据 Rollinson, 1993)

Fig.9 TAS diagram (a, after Middlemost, 1994), K₂O - SiO₂ diagram (b, after Le Maitre *et al.*, 1989) and A/NK - A/CNK diagram (c, after Rollinson, 1993) for the porphyritic granite in Dahutang

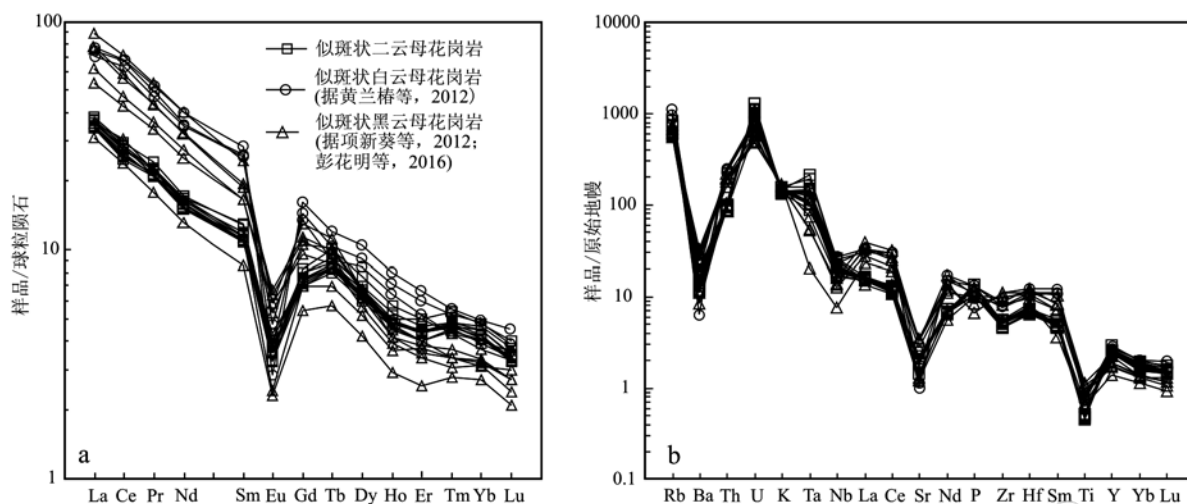


图 10 大湖塘似斑状花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)及微量元素原始地幔标准化蜘蛛网图(b)

Fig. 10 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b) for the Dahutang porphyritic granite

球粒陨石标准化值据 Boynton(1984), 原始地幔标准化值据 McDonough 和 Sun(1995)
normalized values for chondrite after Boynton (1984); primitive mantle after McDonough and Sun(1995)

母花岗岩 Nb 含量为 $5.6 \times 10^{-6} \sim 16 \times 10^{-6}$, Rb/Sr 值为 5.1 ~ 17.2 (项新葵等, 2012; 彭花明等, 2016)。整体来说, 南北区岩石均表现出 Nb 负异常和高 Rb/Sr 特征, 且南区似斑状白云母花岗岩和北区似斑状黑云母花岗岩较南区似斑状二云母花岗岩 Nb 负异常更显著, Rb/Sr 值更高。

3.4 锆石 Hf 同位素特征

狮尾洞似斑状二云母花岗岩样品的锆石 Lu-Hf 同位素分析结果见表 5。由表可知, 两件狮尾洞似斑状二云母花岗岩样品 (16K₄-G₁、16K₁₂-G) 的锆石初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较一致, 介于 0.282 488 ~ 0.282 730 之间, 均值为 0.282 570; 以相对应的锆石分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值计算, 得出 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 -7.31 ~ -0.58, 绝大多数小于 -2.24, 均值为 -4.56; Hf 同位素二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}$) 变化于 1 652.65 ~ 1 147.41 Ma 之间, 均值为 1 475.88 Ma。

4 讨论

4.1 成岩年龄及其区域意义

大湖塘地区燕山期花岗岩岩性繁多, 区域上产出有似斑状花岗岩、白云母花岗岩、黑云母花岗岩及花岗斑岩, 不同种类的花岗岩按矿物含量或粒度又可分为多种岩性, 岩浆期次极其复杂。前人对该地

区燕山期岩浆岩的成岩年龄做过一系列研究, 林黎等(2006a, 2006b)通过黑云母 K-Ar 同位素测年得出大湖塘燕山期岩浆岩年龄为 150 ~ 134 Ma, 并将燕山早期的岩浆活动粗略地划分成燕山早期 3 个侵入期次; Song 等(2018)认为大湖塘燕山期岩浆作用与成矿作用主要发生在两个时期, 即晚侏罗世(约 153 ~ 147 Ma)和晚侏罗世至早白垩世(约 146 ~ 130 Ma)。对于与成矿密切相关的似斑状花岗岩, 在北区石门寺和南区狮尾洞都有产出, 叶海敏等(2016)利用独居石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法测得北区似斑状黑云母花岗岩的成岩年龄为 150.0 ± 0.7 Ma, 这一年龄是比较可信的, 是晚侏罗世时代岩浆作用的产物; 黄兰椿等(2012)通过锆石 U-Pb 定年获得南区似斑状白云母花岗岩的成岩年龄为 144.2 ± 1.3 Ma。而本文对南区似斑状二云母花岗岩分别开展了锆石和独居石 LA-ICP-MS U-Pb 定年工作, 两件似斑状二云母花岗岩锆石的岩浆结晶年龄分别为 130.0 ± 2.2 Ma 和 128.6 ± 2.3 Ma, 与独居石 U-Pb 定年给出的结果(128.3 ± 1.7 Ma)基本吻合, 均在 128 Ma 左右, 这一年龄代表了似斑状二云母花岗岩的成岩年龄, 形成于早白垩世, 明显晚于似斑状黑云母花岗岩及似斑状白云母花岗岩岩浆作用的时间。这一结果表明, 大湖塘地区似斑状花岗岩在燕山期至少有 3 期, 从早到晚依次为石门寺似斑状黑云母花岗岩、狮尾

表5 狮尾洞似斑状二云母花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 5 Lu-Hf isotopic data of the Shiweidong porphyritic two-mica granite

分析点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	2σ	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
16K ₄ -G ₁ -1	134	0.158 994	0.000 740	0.004 716	0.000 051	0.282 618	0.000 035	-5.44	-2.91	1.22	995.22	1 373.70	-0.86
16K ₄ -G ₁ -2	132	0.088 419	0.000 637	0.002 626	0.000 027	0.282 536	0.000 018	-8.34	-5.67	0.63	1 058.09	1 547.81	-0.92
16K ₄ -G ₁ -3	129	0.160 776	0.001 075	0.004 681	0.000 051	0.282 595	0.000 028	-6.25	-3.82	0.97	1 030.11	1 427.49	-0.86
16K ₄ -G ₁ -4	126	0.187 964	0.001 326	0.005 840	0.000 042	0.282 527	0.000 032	-8.65	-6.37	1.14	1 175.65	1 586.52	-0.82
16K ₄ -G ₁ -5	130	0.132 690	0.000 544	0.003 856	0.000 034	0.282 627	0.000 024	-5.13	-2.61	0.83	957.60	1 351.73	-0.88
16K ₄ -G ₁ -6	134	0.077 715	0.000 217	0.002 294	0.000 006	0.282 551	0.000 017	-7.82	-5.09	0.60	1 027.30	1 512.34	-0.93
16K ₄ -G ₁ -7	133	0.050 390	0.000 562	0.001 623	0.000 027	0.282 592	0.000 025	-6.38	-3.60	0.90	950.21	1 417.40	-0.95
16K ₄ -G ₁ -8	133	0.157 849	0.000 261	0.004 306	0.000 003	0.282 595	0.000 023	-6.27	-3.73	0.80	1 019.63	1 424.81	-0.87
16K ₄ -G ₁ -9	129	0.135 003	0.000 834	0.003 649	0.000 004	0.282 573	0.000 026	-7.05	-4.53	0.91	1 033.82	1 472.72	-0.89
16K ₄ -G ₁ -10	126	0.067 203	0.000 215	0.002 004	0.000 009	0.282 553	0.000 026	-7.74	-5.15	0.90	1 015.97	1 510.26	-0.94
16K ₄ -G ₁ -11	125	0.132 079	0.000 781	0.004 090	0.000 032	0.282 517	0.000 027	-9.03	-6.63	0.94	1 132.88	1 602.80	-0.88
16K ₄ -G ₁ -12	128	0.136 171	0.000 474	0.003 719	0.000 030	0.282 638	0.000 026	-4.74	-2.24	0.94	936.84	1 326.78	-0.89
16K ₄ -G ₁ -13	125	0.177 106	0.001 354	0.005 209	0.000 073	0.282 561	0.000 026	-7.46	-5.15	0.92	1 100.39	1 508.53	-0.84
16K ₄ -G ₁ -14	136	0.166 795	0.001 216	0.004 853	0.000 062	0.282 554	0.000 031	-7.70	-5.15	1.09	1 099.26	1 516.96	-0.85
16K ₁₂ -G-1	134	0.041 079	0.002 081	0.001 235	0.000 053	0.282 559	0.000 025	-7.55	-4.72	0.87	987.27	1 489.21	-0.96
16K ₁₂ -G-2	127	0.021 863	0.000 393	0.000 754	0.000 013	0.282 543	0.000 025	-8.10	-5.38	0.88	996.76	1 526.27	-0.98
16K ₁₂ -G-3	126	0.057 581	0.000 572	0.001 989	0.000 019	0.282 600	0.000 019	-6.08	-3.48	0.68	947.59	1 404.44	-0.94
16K ₁₂ -G-4	123	0.036 347	0.000 855	0.001 126	0.000 024	0.282 506	0.000 020	-9.41	-6.81	0.72	1 058.80	1 613.65	-0.97
16K ₁₂ -G-5	134	0.037 748	0.000 776	0.001 236	0.000 019	0.282 581	0.000 019	-6.75	-3.91	0.68	955.24	1 438.29	-0.96
16K ₁₂ -G-6	133	0.065 568	0.000 355	0.002 129	0.000 009	0.282 488	0.000 024	-10.04	-7.31	0.84	1 113.40	1 652.65	-0.94
16K ₁₂ -G-7	132	0.030 809	0.000 307	0.001 041	0.000 012	0.282 491	0.000 020	-9.93	-7.12	0.70	1 076.81	1 640.42	-0.97
16K ₁₂ -G-8	128	0.061 210	0.000 650	0.002 062	0.000 030	0.282 582	0.000 024	-6.73	-4.09	0.85	975.95	1 444.80	-0.94
16K ₁₂ -G-9	132	0.049 176	0.000 786	0.001 602	0.000 025	0.282 574	0.000 021	-7.00	-4.25	0.73	975.10	1 457.84	-0.95
16K ₁₂ -G-10	134	0.025 025	0.000 441	0.000 806	0.000 014	0.282 567	0.000 022	-7.23	-4.36	0.79	963.70	1 466.99	-0.98
16K ₁₂ -G-11	130	0.383 865	0.023 040	0.009 235	0.000 367	0.282 730	0.000 059	-1.48	0.58	2.09	946.31	1 147.41	-0.72
16K ₁₂ -G-12	128	0.059 233	0.000 539	0.001 864	0.000 014	0.282 552	0.000 021	-7.78	-5.13	0.73	1 013.77	1 511.01	-0.94

洞似斑状白云母花岗岩和似斑状二云母花岗岩。

4.2 区域似斑状花岗岩成因对比及成矿意义

前人研究表明,大湖塘南区似斑状白云母花岗岩在岩石成因上属于强过铝质的S型花岗岩,其源岩很可能是来自于双桥山群中的富泥质岩石(黄兰椿等,2012)。北区似斑状黑云母花岗岩是内陆拼贴环境下形成的S型花岗岩,由上地壳岩石熔融、同源演化而成(项新葵等,2012;彭花明等,2016)。南区似斑状二云母花岗岩具有高的SiO₂、Al₂O₃、K₂O,低TiO₂、MnO和CaO的特征,K₂O+Na₂O变化范围为7.67%~8.7%,K₂O/Na₂O=1.16~1.32;CaO/Na₂O=0.17~0.23,铝饱和指数A/CNK=1.17~1.23,属高钾钙碱性花岗岩(图9a、9b)。

岩石的铝饱和指数A/CNK均大于1,显示其为强过铝质花岗岩(图9c)。稀土元素配分模式图(图10a)显示,岩石富集轻稀土元素,轻重稀土元素分馏明显,北区似斑状花岗岩的轻重稀土元素分馏较南区更显著;岩石呈现出明显的Eu负异常特征,是典型的过铝质花岗岩的稀土元素特征。Miller(1985)

研究表明,强过铝质花岗岩的矿物学标志是比黑云母更富铝的矿物(如白云母、石榴石等)的出现。大湖塘似斑状花岗岩富含白云母,南区白云母含量明显多于北区,这也表明大湖塘似斑状花岗岩均属过铝质花岗岩,且南区岩石过铝质程度高于北区。

前人通过Sr-Nd同位素研究推测狮尾洞似斑状白云母花岗岩的源区很可能来源于双桥山群的富泥质岩石(黄兰椿等,2012)。锆石Hf同位素作为有力的地球化学示踪技术已广泛应用于揭示地壳演化和岩浆源区判别(吴福元等,2007)。狮尾洞似斑状二云母花岗岩和石门寺似斑状黑云母花岗岩的锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值分别介于0.282 488~0.282 730和0.282 435~0.282 590(Wei *et al.*, 2018)之间, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值分别介于-7.31~0.58和-8.60~-3.10(Wei *et al.*, 2018)之间,二阶段模式年龄(t_{DM2})均值分别为1 475.88 Ma和1 579.88 Ma,均与双桥山群地层的年龄值(<1.8 Ga)相符(周效华等,2012;Wei *et al.*, 2018),指示似斑状花岗岩的源区可能来源于古老下地壳物质的重熔(图11),显

示出 S 型花岗岩的源区特征 (Allègre and Ben Othman, 1980; Chappell, 1999; Peter and Roland, 2003)。狮尾洞似斑状二云母花岗岩有 1 个测点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相对较高, 为 0.58, 暗示岩石在形成过程中可能有少量新生物质的参与 (侯可军等, 2007; 吴福元, 2007)。此外, 狮尾洞似斑状二云母花岗岩内锆石微量元素具有较高的 ΣREE ($1.236 \times 10^{-6} \sim 39.387 \times 10^{-6}$, 平均为 5.824×10^{-6}) 和明显的 Ce 正异常 ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0.84 \sim 10.78$) 及强烈的 Eu 负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.02 \sim 0.11$), 显示出壳源岩浆锆石的稀土元素特征 (Li *et al.*, 2000)。

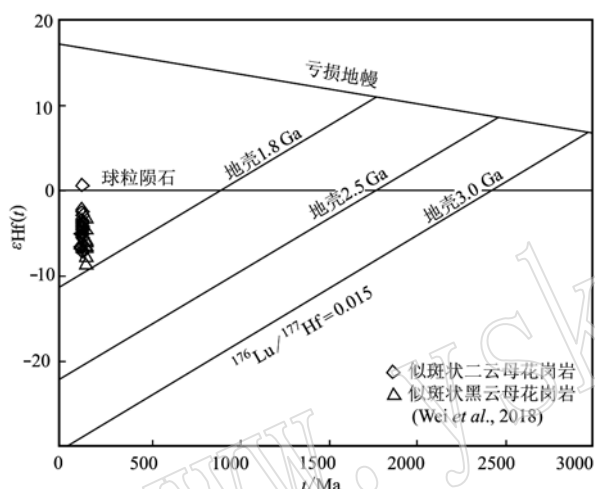


图 11 大湖塘似斑状花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 年龄图
Fig. 11 The plots of the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ versus t age diagram for the zircon of the Dahutang porphyritic granite

野外地质调查发现, 大湖塘地区区域地层主要为新元古代双桥山群浅变质岩, 在南北区均有双桥山群地层出露, 但南区出露面积较北区更大, 更富泥质, 这为大湖塘燕山期花岗岩岩浆的形成提供了物质基础。实验表明, 不同沉积岩 (如泥质岩和杂砂岩) 通过部分熔融产生的熔体差别较大 (Sylvester, 1998; Douce, 1999)。因此, 可以通过研究岩石的某些特征参数来反推源区特征, 岩石 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值已被广泛应用于识别过铝质 S 型花岗岩的源区特征。一般地, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} < 0.3$ 时为泥质岩石的部分熔融, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} > 0.3$ 时为杂砂岩的部分熔融 (Patino-Douce and Johnston, 1991; Skjerlie and Johnston, 1996)。大湖塘南区狮尾洞似斑状二云母花岗岩和似斑状白云母花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值相差不大, 分别为 $0.17 \sim 0.26$ 和 $0.16 \sim 0.25$, 均小于 0.3, 显示出相同的物质来源, 均为富泥质岩石部分熔融而成; 而北区石门寺似斑状黑云母花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} = 0.15 \sim$

0.4, 平均为 0.28, 显示出泥质岩和杂砂岩共同参与部分熔融的结果。总体上南区似斑状花岗岩较北区有更低的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值, 指示狮尾洞似斑状花岗岩的源岩比石门寺更富泥质, 这与我们野外观察到的南区双桥山群地层较北区更富泥质相吻合。

在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上 (图 10b), 所有样品均表现出富集 Rb、Th 和 U 等大离子亲石元素 (LILE), 贫 Ba、Nb、Ta、Sr、Ti 等元素的特征。所有样品的 $\text{Rb} = 360 \times 10^{-6} \sim 707 \times 10^{-6}$, 均高于花岗岩的平均值 (200×10^{-6}); $\text{Sr} (21.7 \times 10^{-6} \sim 74.2 \times 10^{-6})$ 和 $\text{Ba} (45.2 \times 10^{-6} \sim 234 \times 10^{-6})$ 均明显低于花岗岩的平均值 ($\text{Sr} = 300 \times 10^{-6}$, $\text{Ba} = 830 \times 10^{-6}$)。Ba 和 Sr 亏损反映岩浆经历了较高度度的岩浆演化, 较低的 Nb/Ta ($2.04 \sim 6.54$) 和 Zr/Hf ($24.58 \sim 35.56$) 值反映岩石发生了明显的分异, 可能与云母和锆石的分离结晶有关; 而 Rb、Th 和 U 等大离子亲石元素富集, Nd 和 Ta 亏损反映岩浆的源岩为陆壳物质 (李正辉等, 2013)。此外, 前人在大湖塘似斑状黑云母花岗岩顶部发现了似伟晶岩壳 (张智宇等, 2015)。似伟晶岩壳的出现, 指示岩浆经历了高度分异作用, 这表明大湖塘似斑状花岗岩是高分异花岗岩。综合以上信息可知, 大湖塘似斑状花岗岩是双桥山群富泥质岩石部分熔融形成的强过铝质 S 型花岗岩, 母岩浆在演化过程中经历了高度分异作用。

高分异花岗岩具有成矿专属性, 与 W、Sn 等金属矿化密切相关 (吴福元等, 2017)。华南古老基底双桥山群的 W 含量高达 9.16×10^{-6} , 相对平均地壳 (W 平均含量为 1.0×10^{-6}) 富集 9 倍 (Ertel *et al.*, 1996; Rudnick and Gao, 2004; Arevalo and McDonough, 2008; 彭花明等, 2016)。在早燕山期, 大湖塘地区区域地壳增厚, 处于地壳深处的双桥山群发生脱水, 并在随后的热松弛作用下进一步发生深熔作用而产生岩浆, 且在部分熔融过程中, 源岩中的 W 趋于进入岩浆 (Ertel *et al.*, 1996; 彭花明等, 2016)。这为地壳部分熔融后成矿流体的演化提供了物质基础。大湖塘似斑状花岗岩样品中 W 的平均含量为 119×10^{-6} , 大约是源岩双桥山群富泥质岩石的 13 倍, 反映了成矿元素 W 在源岩部分熔融时, 大量地转移到似斑状花岗岩岩浆中。岩浆的高度分异作用, 可以使残余岩浆中的 W 得到进一步富集 (Fogliata *et al.*, 2012), 而大湖塘南区似伟晶岩壳代表了高分异花岗质岩浆系统早期出溶的富水流体, 反映了早期高温、高 $\delta^{18}\text{O}$ 、富碱金属元素、低氧逸度

的酸性流体(Zhang *et al.*, 2019),这种特殊性质的流体可以携带W向围岩迁移,进而在围岩有利的容矿部位中富集成矿。

4.3 岩浆构造环境

S型花岗岩或强过铝质花岗岩曾被认为是同碰撞或同构造的产物(Pearce *et al.*, 1984),然而伸展构造对于花岗岩形成的重要性同样得到了广泛的认识(Pearce, 1996; Healy *et al.*, 2004),甚至部分学者认为所有花岗岩均为伸展(拉张)构造环境下形成(Sylvester, 1998),但是仍有学者将花岗岩母岩浆的产生和侵位归因于碰撞挤压环境(Liégeois, 1998; Chen *et al.*, 2000; Atherton and Ghani, 2002; Sheppard *et al.*, 2003)。

九岭花岗岩体北临长江中下游成矿带,南为十杭成矿带(黄兰椿等, 2012)。构造研究表明,进入燕山期后,华南板块内部在中侏罗世发生强烈的岩浆活动,形成大面积火成岩且集中产于十万大山-杭州裂谷带(Gilder *et al.*, 1996; 侯增谦等, 2007)。十杭带南西段南岭地区含钨花岗岩的成岩年龄主要为160~150 Ma(Zhu *et al.*, 2008, 2009; Feng *et al.*, 2012),北东段(赣杭带)燕山晚期火山侵入杂岩的成岩年龄主要集中在135~125 Ma,且十杭带整个燕山期花岗岩都被认为是在减压伸展的构造环境下形成的(Wong *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012)。长江中下游成矿带于燕山期演变为造山带内部的火山-沉积盆地,在经历后造山伸展和碎屑岩建造沉积后,于晚侏罗世至早白垩世发育强烈的岩浆活动,在地壳大规模伸展的构造环境下形成长江中下游中酸性花岗岩侵入岩带(侯增谦等, 2007)。由此可知,位于长江中下游成矿带和十杭成矿带之间的九岭燕山期岩浆岩也应该形成于伸展的构造环境。

此外,研究表明,高分异花岗岩主要与后造山事件及其伴随的大型伸展构造伴生(吴福元等, 2017)。大湖塘似斑状花岗岩含铝指数 $A/CNK > 1$,且分异程度高,属典型的高分异过铝质S型花岗岩,其成岩年龄分布在150~128 Ma之间,正处于区域伸展构造环境时期。因此,我们认为大湖塘3期似斑状花岗岩处于相同的构造背景,是在后造山期陆内伸展构造环境下形成的。在常量元素综合指数 $R_2 - R_1$ 图解(图12)中,大湖塘似斑状花岗岩绝大多数投点落在造山晚期区域,这也证实了大湖塘似斑状花岗岩主要形成于伸展构造环境。

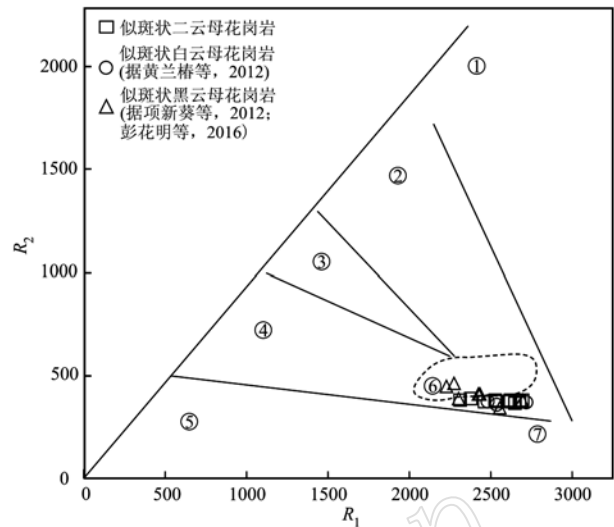


图12 大湖塘似斑状花岗岩形成构造环境的主要元素 $R_2 - R_1$ 因子判别图(据Batchelor and Bowden, 1985)

Fig. 12 $R_2 - R_1$ diagram of major elements for tectonic discrimination of the Dahutang porphyritic granite (after Batchelor and Bowden, 1985)

①—地幔分异产物; ②—板块碰撞前; ③—板块碰撞后隆起期; ④—造山晚期; ⑤—非造山环境; ⑥—同碰撞; ⑦—造山期后
①—mantle fractionates; ②—pre-plate collision; ③—post-collision uplift; ④—late-orogenic; ⑤—anorogenic; ⑥—syn-collision; ⑦—post-orogenic

5 结论

(1) 两件狮尾洞似斑状二云母花岗岩的锆石给出的岩浆结晶年龄分别为 130.0 ± 2.2 Ma和 128.6 ± 2.3 Ma,与独居石U-Pb定年结果(128.3 ± 1.7 Ma)基本吻合,表明狮尾洞似斑状二云母花岗岩形成于早白垩世,明显晚于似斑状白云母花岗岩和似斑状黑云母花岗岩的成岩年龄(分别为144.2 Ma和150.0 Ma),表明大湖塘地区在燕山期至少有3次似斑状花岗质岩浆侵入活动。

(2) 大湖塘3期似斑状花岗岩均为高钾钙碱性的S型花岗岩,南区两期似斑状花岗岩具有相似的地球化学特征。南、北区似斑状花岗岩主要来源于古老下地壳的重熔,南区岩石有少量新生物质的参与。较低的 CaO/Na_2O 值指示大湖塘似斑状花岗岩的源岩主要为富泥质岩石,南区似斑状花岗岩较北区有更低的 CaO/Na_2O 值,推测南北区似斑状花岗岩的源岩分别为富泥质岩石和富泥质夹杂砂岩岩石。

(3) 大湖塘3期似斑状花岗岩是双桥山群中的富泥质或泥质夹杂砂岩岩石在后造山伸展构造环境下经部分熔融后分异演化而成。

致谢 野外工作得到江西省赣西北地质大队占岗乐、但小华等工程师的帮助与支持, 锆石和独居石定年测试分别得到北京锆年领航科技有限公司和中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室胡兆初教授和罗涛博士的帮助, 岩石主微量元素测试得到核工业北京地质研究院袁建、张彦辉工程师的帮助, 审稿人和主编认真审阅了本文, 并提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示感谢!

References

- Allègre C J and Ben Othman D. 1980. Nd-Sr isotopic relationship in granitoid rocks and continental crust development: A chemical approach to orogenesis[J]. *Nature*, 286 (5 771): 335 ~ 342.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1 ~ 2): 59 ~ 79.
- Arevalo J R and McDonough W F. 2008. Tungsten geochemistry and implications for understanding the Earth's interior[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 272(3 ~ 4): 656 ~ 665.
- Atherton M P and Ghani A A. 2002. Slab breakoff: A model for Galeonian, Late Granite syn-collisional magmatism in the orthotectonic (metamorphic) zone of Scotland and Donegal, Ireland[J]. *Lithos*, 62(3): 65 ~ 85.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multication[J]. *Chemical Geology*, 48(1): 43 ~ 55.
- Bouvier A, Vervoort J D and Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constrains from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1 ~ 2): 49 ~ 57.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth element: meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry*[C]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 63 ~ 114.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535 ~ 551.
- Chen Bin, Jahn Borming, Wilde S, *et al.* 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 328(1): 157 ~ 182.
- Douce A E P. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas[J]? *Geological Society of London Special Publications*, 168(1): 55 ~ 75.
- Ertel W H, O'Neil S C, Dingwell D B, *et al.* 1996. Solubility of tungsten in a haplobasaltic melt as a function of temperature and oxygen fugacity[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(7): 1 171 ~ 1 180.
- Feng Zuohai, Wang Chunzeng, Zhang Minghua, *et al.* 2012. Unusually dumbbell-shaped Guposhan-Huashan twin granite plutons in Nanling Range of south China: Discussion on their incremental emplacement and growth mechanism[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 48(2): 9 ~ 23.
- Fogliata A S, Baez M A, Hagemann S G, *et al.* 2012. Post-orogenic carboniferous granite-hosted Sn-W mineralization in the Sierras Pampeanas Orogen, Northwestern Argentina[J]. *Ore Geology Reviews*, 45: 16 ~ 32.
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Zhang Chuanheng, *et al.* 2012. A revised chronostratigraphic dating of metamorphosed basement strata of Jiangnan old land and its implication for Wuling tectonic movement[J]. *Resources Survey and Environment*, 33(2): 71 ~ 76 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Yang Mingguai, Ding Xiaozhong, *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of tuff in the Shuangqiaoshan and Heshangzhen groups in South China-constraints on the evolution of the Jiangnan Neoproterozoic orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 10: 1 744 ~ 1 751 (in Chinese with English abstract).
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, *et al.* 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China[J]. *Jour. Geophys. Res.*, 101: 16 137 ~ 16 154.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3 ~ 4): 237 ~ 269.
- Harrison T M, Catlos E J and Montel J M. 2002. U-Th-Pb dating of phosphate minerals[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48: 523 ~ 558.
- Healy B, Collins W J and Richards S W. 2004. A hybrid origin for Lachlan S-type granites: The Murrumbidgee Batholith example[J]. *Lithos*, 78(1): 197 ~ 216.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595 ~ 2 604 (in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481 ~ 492 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Pan Xiaofei, Yang Zhiming, *et al.* 2007. Porphyry Cu-(Mo-Au) deposits no related to oceanic-slab subduction: Examples from Chinese porphyry deposits in continental settings[J]. *Geoscience*, 2: 332 ~ 351 (in Chinese with English abstract).

- Huang Lanchun and Jiang Shaoyong. 2012. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the porphyric-like muscovite granite in the Dahutang tungsten deposit, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3 887 ~ 3 900(in Chinese with English abstract).
- Huang Lanchun and Jiang Shaoyong. 2013. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the tungsten-bearing porphyritic granite in the Dahutang tungsten deposit, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4 323 ~ 4 335(in Chinese with English abstract).
- Rber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3~4): 489 ~ 508.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, *et al.* 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1~2): 47 ~ 69.
- Jiang Shaoyong, Peng Ningjun, Huang Lanchun, *et al.* 2015. Geological characteristic and ore genesis of the giant tungsten deposits from the Dahutang ore-concentrated district in northern Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(3): 639 ~ 655(in Chinese with English abstract).
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, *et al.* 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*[M]. Oxford: Blackwell, 1 ~ 189.
- Liegeois J P. 1998. Some words on the post-collisional magmatism[J]. *Lithos*, 45: 15 ~ 18.
- Lin Li, Yu Zhongzhen, Luo Xiaohong, *et al.* 2006a. The Metallogenic Prognosis of Dahutang Tungsten Ore Field in Jiangxi[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, S1: 139 ~ 142(in Chinese with English abstract).
- Lin Li, Zhan Gangle and Yu Xiaoping. 2006b. Geological characteristics and ore-search prospect of Dahutang tungsten (tin) orefield in Jiangxi [J]. *Resources Survey and Environment*, 1: 25 ~ 32(in Chinese with English abstract).
- Li Q L, Li X H, Lan Z W, *et al.* 2013. Monazite and xenotime U-Th-Pb geochronology by ion microprobe: Dating highly fractionated granites at Xihuashan tungsten mine, SE China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66: 64 ~ 80.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. 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*, 51: 537 ~ 571.
- Li Xianhua, Liang Xirong, Sun Min, *et al.* 2000. Geochronology and geochemistry of single-grain zircons: Simultaneous in-situ analysis of U-Pb age and trace elements by LAM-ICP-MS[J]. *European Journal of Mineralogy*, 12(5): 1 015 ~ 1 024.
- Li Zhenghui, Liu Xiaoming, Dong Yunpeng, *et al.* 2013. Geochemistry and zircon U-Pb age of the Paleoproterozoic syn-collisional granites in Helanshan region and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2 405 ~ 2 415(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. *Isoplot 3. 00 User's Manual: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*[J]. Berkeley Geochronological Center, Special Publication, 4a: 1 ~ 70.
- Lu Yuanfa. 2004. GeoKit—A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. *Geochimica*, 5: 459 ~ 464(in Chinese with English abstract).
- Mao Zhihao. 2016. *Geodynamic Setting and Mineralization of the Giant Veinlets-Disseminated Tungsten Ore Field in Jiangxi Province, China* (Doctor Dissertation)[D]. China University of Geosciences(Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Mao Zhihao, Liu Jiajun, Mai Jingwen, *et al.* 2015. Geochronology and geochemistry of granitoids related to the giant Dahutang tungsten deposit, middle Yangtze River region, China: Implications for petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization [J]. *Gondwana Research*, 28: 816 ~ 836.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120(3~4): 223 ~ 254.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215 ~ 244.
- Münker C, Pfänder J A, Weyer S, *et al.* 2003. Evolution of planetary cores and the earth-moon system from Nb/Ta systematics[J]. *Science*, 301(5 629): 84 ~ 87.
- Pan Dapeng, Wang Di and Wang Xiaolei. 2017. Petrogenesis of granites in Shimensi in northwestern Jiangxi Province and its implications for tungsten deposits[J]. *Geology in China*, 44(1): 118 ~ 135(in Chinese with English abstract).
- Patino-Douce A E and Johnston A D. 1991. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: Implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 107(2): 202 ~ 218.
- Pearce J A. 1996. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19(4): 120 ~ 125.
- Pearce J A, Harris N B and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of petrology*, 25(4): 956 ~ 983.
- Peng Huaming, Yuan Qi, Li Qiuyun, *et al.* 2016. Ore-controlling role of porphyraceous biotite granite in Shimensi tungsten deposit and its prospecting significance [J]. *Science Technology and Engineering*, 16(3): 135 ~ 142(in Chinese with English abstract).
- Peter D K and Roland M. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 327 ~ 341.
- Rollinson H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, In-*

- terpretation[M]. New York: Longman Group U. K. Ltd. , 1~352.
- Rudnick R L and Gao S. 2004. Composition of the continental crust[A]. Holland H D and Turekian K K. Treatise on Geochemistry[C]. Amsterdam: Elsevier, 3: 1~64.
- Seydoux-Guillaume A M, Paquette J L, Wiedenbeck M, *et al.* 2002. Experimental resetting of the U-Th-Pb systems in monazite[J]. Chemical Geology, 191: 165~181.
- Sheppard S, Occhipinti S A and Tyler I M. 2003. The relationship between tectonism and composition of granitoid magmas, Yarlalweeler Gneiss Complex, Western Australia[J]. Lithos, 66(1): 133~154.
- Skjerlie K P and Johnston A D. 1996. Vapour-absent melting from 10 to 20 kbar of crustal that contain multiple hydrous phase: Implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins[J]. Journal of Petrology, 37(3): 661~691.
- Song Weile, Yao Junming, Chen Huayong, *et al.* 2018. A 20 m. y. long-lived successive mineralization in the giant Dahutang W-Cu-Mo deposit, South China[J]. Ore Geology Reviews, 95: 401~407.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. Lithos, 45(1~4): 29~44.
- Taylor R P, Strong D F and Fryer B J. 1981. Volatile control of contrasting trace element distributions in peralkaline granitic and volcanic rocks[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 77(3): 267~271.
- Vervoort J D, Patchett P J, Blichert-Toft J, *et al.* 1999. Relationships between Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systems in the global sedimentary system [J]. Earth and Planetary Science Letters, 168(1~2): 79~99.
- Wang Fengyue, Ling Mingxing, Ding Xing, *et al.* 2011. Mesozoic large magmatic events and mineralization in SE China: Oblique subduction of the Pacific plate[J]. International Geology Review, 53(5~6): 704~726.
- Wang Xiaolei, Zhao Guochun, Zhou Jincheng, *et al.* 2008. Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the eastern Jiangnan orogen[J]. Gondwana Research, 14(3): 355~367.
- Wei W F, Shen N P, Yan B, *et al.* 2018. Petrogenesis of ore-forming granites with implications for W-mineralization in the super-large Shimensi tungsten-dominated polymetallic deposit in northern Jiangxi Province, South China[J]. Ore Geology Reviews, 95: 1123~1139.
- Wong J, Sun Min, Xing Guangfu, *et al.* 2009. Geochemical and zircon U-Pb and Hf isotopic study of the Baijuhujian metaluminous A-type granite: Extension at 125~100 Ma and its tectonic significance for South China[J]. Lithos, 112(3~4): 289~305.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, *et al.* 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. Science China Earth Sciences, 60: 1201~1219(in Chinese with English abstract).
- Xiang Xinkui, Chen Maosong, Zhang Guonian, *et al.* 2012. Metallogenic geological conditions of Shimensi tungsten-polymetallic deposit in north Jiangxi province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 27(2): 143~155(in Chinese with English abstract).
- Xiang Xinkui, Yin Qingqing, Sun Keke, *et al.* 2015. Origin of the Dahutang syn-collisional granite-porphyry in the middle segment of the Jiangnan orogen: Zircon U-Pb geochronologic, geochemical and Nd-Hf isotopic constraints[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 34(5): 581~600(in Chinese with English abstract).
- Xu Guohui and Jiang Yanyan. 2013. Metallogenic geological characteristics and genesis of the lion tail tungsten polymetallic deposit in northern Jiangxi Province[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 3: 8, 19(in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui, Wang Faning and Zeng Yong. 2004. Geology of Metallic Ore Deposits in Northern Jiangxi Province[M]. Beijing: China Land Publishing House, 1~129(in Chinese with English abstract).
- Yang Shuiyuan, Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, *et al.* 2012. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of two Early Cretaceous A-type granites in the Gan-Hang Belt, Southeast China[J]. Lithos, 150: 155~170.
- Ye Haimin, Zhang Xiang and Zhu Yunhe. 2016. In-situ monazite U-Pb geochronology of granites in Shimensi tungsten polymetallic deposit, Jiangxi Province and its geological significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 40(1): 58~70(in Chinese with English abstract).
- Ye Zeyu, Zhang Zhiyu, Pan Xiaofei, *et al.* 2016. A study of the relationship of W-Cu-Mo mineralization features of the Shimensi ore district in northern Dahutang, Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 35(3): 457~468(in Chinese with English abstract).
- Yuan Qi. 2016. The Study of Mineralogy and Geochronology of the Late Jurassic Epoch Ore-bearing Granites in Dahutang Shimensi Tungsten[D]. East China University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhihui, Geng Lin, Jia Wenbin, *et al.* 2014. Regional geological characteristics study of tungsten-polymetallic ore field in Datanghu tungsten polymetallic deposit in north of Jiangxi[J]. China Mining Magazine, 23(S2): 133~136, 148(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiyu, Hou Zengqian, Peng Huaming, *et al.* 2015. Exsolution of primary fluids from magma in the superlarge Dahutang tungsten deposit of Jiangxi Province: Records from the pegmatoid shell[J]. Geological Bulletin of China, 34(2/3): 487~500(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiyu, Hou Zengqian, Peng Huaming, *et al.* 2019. In situ oxygen

- isotope, trace element, and fluid inclusion evidence for a primary magmatic fluid origin for the shell-shaped pegmatoid zone within the giant Dahutang tungsten deposit, Jiangxi Province, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 104: 540~560.
- Zhou Xiaohua, Zhang Yanjie, Liao Shengbing, *et al.* 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of volcanic rocks in the Shuangqiaoshan group at Anhui-Jiangxi boundary region and its geological implication [J]. *Geological Journal of China Universities*, 18(4): 609~622(in Chinese with English abstract).
- Zhu J C, Chen J, Wang R C, *et al.* 2008. Early Yanshanian NE trending Sn/W-bearing A-type granites in the western-middle part of the Nanling Mts Region[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 14(4): 474~484.
- Zhu J C, Wang R C, Xie C F, *et al.* 2009. Zircon U-Pb geochronological framework of Qitianling granite batholith, middle part of Nanling Range, South China[J]. *Science in China(Series D)*, 52(9): 1279~1294.
- Zuo Quanshi, Zhang Ping and Zhou Caijian. 2014. Basic characteristics of Yanshanian magmatic rocks and its implication for mineralization in Dahutang ore-concentrated area of Jiangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 28(5): 519~526(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 高林志, 丁孝忠, 张传恒, 等. 2012. 江南古陆变质基底地层年代的修正和武陵运动构造意义[J]. *资源调查与环境*, 33(2): 71~76.
- 高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 等. 2008. 华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——对江南新元古代造山带演化的制约[J]. *地质通报*, (10): 1744~1751.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 28(4): 481~492.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 23(10): 2595~2604.
- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 等. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿[J]. *现代地质*, (2): 332~351.
- 黄兰椿, 蒋少涌. 2012. 江西大湖塘钨矿床似斑状白云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因研究[J]. *岩石学报*, 28(12): 3887~3900.
- 黄兰椿, 蒋少涌. 2013. 江西大湖塘富钨花岗岩斑岩年代学、地球化学特征及成因研究[J]. *岩石学报*, 29(12): 4323~4335.
- 蒋少涌, 彭宁俊, 黄兰椿, 等. 2015. 赣北大湖塘矿集区超大型钨矿地质特征及成因探讨[J]. *岩石学报*, 31(3): 639~655.
- 林黎, 余忠珍, 罗小洪, 等. 2006a. 江西大湖塘钨矿田成矿预测[J]. *东华理工学院学报*, (S1): 139~142.
- 林黎, 占岗乐, 喻晓平. 2006b. 江西大湖塘钨(锡)矿田地质特征及远景分析[J]. *资源调查与环境*, (1): 25~32.
- 李正辉, 柳小明, 董云鹏, 等. 2013. 贺兰山古元古代同碰撞花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(7): 2405~2415.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, (05): 459~464.
- 毛志昊. 2016. 江西大湖塘超大型斑岩钨矿床成矿动力学背景与成矿作用(博士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京).
- 潘大鹏, 王迪, 王孝磊. 2017. 赣西北大湖塘石门寺钨矿区花岗岩的成因及其对钨矿的指示意义[J]. *中国地质*, 44(1): 118~135.
- 彭花明, 袁琪, 李秋耘, 等. 2016. 赣西北石门寺钨矿似斑状黑云母花岗岩的控矿作用及找矿意义[J]. *科学技术与工程*, 16(3): 135~142.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. 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, 刘小驰, 纪伟强, 等. 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.
- 项新葵, 陈茂松, 詹国年, 等. 2012. 赣北石门寺矿区钨多金属矿床成矿地质条件[J]. *地质找矿论丛*, 27(2): 143~155.
- 项新葵, 尹青青, 孙克克, 等. 2015. 江南造山带中段大湖塘同构造花岗斑岩的成因——锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 34(5): 581~600.
- 徐国辉, 姜妍妍. 2013. 赣北狮尾洞钨多金属矿床成矿地质特征及成因探讨[J]. *黑龙江科技信息*, (3): 8, 19.
- 杨明桂, 王发宁, 曾勇. 2004. 江西北部金属成矿地质[M]. 北京: 中国大地出版社, 1~129.
- 叶海敏, 张翔, 朱云鹤. 2016. 江西石门寺钨多金属矿床花岗岩独居石 U-Pb 精确定年及地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 40(1): 58~70.
- 叶泽宇, 张智宇, 潘小菲, 等. 2016. 江西大湖塘北段石门寺钨铜钼矿化关系研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 35(3): 457~468.
- 袁琪. 2016. 江西大湖塘石门寺钨矿晚侏罗世含矿花岗岩矿物学及年代学研究[D]. 东华理工大学.
- 张志辉, 耿林, 贾文彬, 等. 2014. 赣北大湖塘钨多金属矿田区域地质特征研究[J]. *中国矿业*, 23(S2): 133~136+148.
- 张智宇, 侯增谦, 彭花明, 等. 2015. 江西大湖塘超大型钨矿初始岩浆流体出溶——来自似伟晶岩壳的记录[J]. *地质通报*, 34(2/3): 487~500.
- 周效华, 张彦杰, 廖圣兵, 等. 2012. 皖赣相邻地区双桥山群火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *高校地质学报*, 18(4): 609~622.
- 左全狮, 章平, 周才坚. 2014. 江西大湖塘矿集区燕山期岩浆岩基本特征及其与成矿的关系[J]. *矿产与地质*, 28(5): 519~526.