

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.193>



赣西大港花岗岩型锂矿床锂赋存状态及成岩成矿年代学

龚 敏^{1,2}, 吴俊华³, 季 浩⁴, 徐敏林^{1,2}, 况二龙^{1,2}, 姜宝亮^{1,2}, 李国猛^{1,2}, 李艳军^{4*}

1. 江西省找矿突破勘查技术中心,江西南昌 330052

2. 江西省地质局第一地质大队,江西南昌 330052

3. 江西省地质局,江西南昌 330036

4. 中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

摘要:大港锂矿床是赣西地区近年来新探明的超大型花岗岩型锂矿之一,成矿与白云母花岗岩密切相关。研究开展了云母矿物学特征及电子探针分析确定锂赋存状态,并利用锆石和锡石 LA-ICPMS U-Pb定年法对白云母花岗岩进行了系统的年代学研究,精确厘定成岩成矿时代。年代学结果显示I型热液锆石Tera-Wasserburg U-Pb下交点年龄为129±2 Ma,而颜色较暗的II型锆石下交点年龄为100±4 Ma。锡石核部和边部Tera-Wasserburg U-Pb下交点年龄分别为125±3 Ma和108±7 Ma,同期结果与锆石年龄在误差范围内一致。这些年龄数据显示大港锂矿呈多期次成矿特点。成矿作用均形成于早白垩世,与江南造山带中段燕山期大规模稀有金属成矿时限一致。大港锂矿床中云母主要为富锂白云母、铁锂云母和锂云母,且云母具有明显环带特征,边部较核部富Si、Li和F等元素。云母微观结构及矿物化学特征表明大港高演化花岗岩型锂矿床经历了早期岩浆分异和晚期热液交代两个阶段。晚期富氟富锂热液对白云母花岗岩进行了强烈的交代改造,使锂元素在云母边部高度富集,从而形成富锂矿物。九岭南缘高演化花岗岩型锂矿床的厘定指示了江南造山带中段具有良好的锂矿找矿前景。

关键词:花岗岩型锂矿床;副矿物U-Pb定年;赋存状态;岩浆—热液演化;大港;地球化学。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2023)12-4370-17

收稿日期: 2023-06-17

Occurrence of Lithium and Geochronology of Magmatism and Mineralization in Dagang Granite-Associated Lithium Deposit, West Jiangxi Province

Gong Min^{1,2}, Wu Junhua³, Ji Hao⁴, Xu Minlin^{1,2}, Kuang Erlong^{1,2}, Jiang Baoliang^{1,2}, Li Guomeng^{1,2}, Li Yanjun^{4*}

1. Jiangxi Exploration Breakthrough Technology Center, Nanchang 330052, China

2. The First Geological Brigade, Jiangxi Bureau of Geology, Nanchang 330052, China

3. Jiangxi Bureau of Geology, Nanchang 330036, China

4. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The Dagang lithium deposit is a giant granite-associated deposit in the West Jiangxi Province, central Jiangnan orogenic belt (JNOB). Lithium mineralization is closely associated with muscovite granites. However, the occurrence of lithium and geochronology of magmatism and mineralization are not well defined. In this study, it presents microtextural studies, electron

基金项目:江西省重点研发计划"揭榜挂帅"项目(No.20223BBG71015)。

作者简介:龚敏(1982—),男,高级工程师,主要从事矿产勘查开发与资源评价研究工作。E-mail: gongmin8254@163.com

* 通讯作者:李艳军,副教授,主要从事矿床地球化学、成矿规律与成矿预测教学和研究工作。E-mail: liyj@cug.edu.cn

引用格式:龚敏,吴俊华,季浩,徐敏林,况二龙,姜宝亮,李国猛,李艳军,2023.赣西大港花岗岩型锂矿床锂赋存状态及成岩成矿年代学.地球科学,48(12):4370—4386.

Citation:Gong Min, Wu Junhua, Ji Hao, Xu Minlin, Kuang Erlong, Jiang Baoliang, Li Guomeng, Li Yanjun, 2023. Occurrence of Lithium and Geochronology of Magmatism and Mineralization in Dagang Granite-Associated Lithium Deposit, West Jiangxi Province. *Earth Science*, 48 (12):4370—4386.

probe microanalysis (EPMA) of micas, as well as laser ablation inductively coupled plasma (LA-ICPMS) zircon and cassiterite U-Pb dating results to further constrain the occurrence state, metallogenetic mechanism, and geochronology. LA-ICPMS U-Pb dating of cassiterite core yielded a Tera-Wasserburg U-Pb lower intercept age of 125 ± 3 Ma and cassiterite rim yielded a lower intercept age of 108 ± 7 Ma. Type I zircon, which shows lower content of U, has an LA-ICPMS Tera-Wasserburg U-Pb lower intercept age of 129 ± 2 Ma, and Type II zircon grains with higher U content yielded a lower intercept age of 100 ± 4 Ma. Geochronological results reveal two episodic Li mineralization events during the Early Cretaceous in the Dagang deposit. In addition, the mineralization ages of the Dagang Li deposit are consistent with the large-scale magmatic and metallogenetic events for rare metal deposits in the central JNOB. Zoned micas which are revealed by BSE images from the Dagang Li deposit are composed of Li-muscovite, zinnwaldite, as well as lepidolite. The Li-bearing micas are the principal ore minerals in the muscovite granites. A gradual increase in Li, Si, and F in all micas from core to rim is exhibited by electron probe microanalysis (EPMA). The occurrence and geochemical features indicate that the Dagang Li deposit formed through an early-stage magma fractional crystallization and a late-stage hydrothermal process. The temporal relationship between Early Cretaceous S-type granitic magmatism and Li mineralization in the central JNOB can be used as a guideline for mineral exploration of granite rare metal deposits.

Key words: granite-associated Li deposit; U-Pb dating of zircon and cassiterite; occurrence state; magmatic-hydrothermal system; Dagang; geochemistry.

锂、铌、钽等稀有金属属于国内外重要的战略性矿产资源,其在新能源、信息技术及航天国防等产业中具有重要地位。我国锂矿资源丰富,储量仅次于南美洲“锂三角”地区和澳大利亚(李建康等,2014),同时也是全球最大锂消费国。2022年全球已探明锂资源量约为9 800万t,我国锂资源储量约占全球锂资源总储量8%(U.S. Geological Survey, 2022)。随着新能源产业不断发展,我国对锂需求日益增加,对锂矿床勘探开发也越来越重视。我国锂矿类型以卤水型、硬岩型和黏土型为主,其中卤水型锂矿Mg含量较高,导致锂提取技术复杂且开发成本较高,而花岗岩型和伟晶岩型开采较容易,矿石锂品位也较高(李建康等,2014)。因此,伟晶岩和花岗岩型矿床是我国锂找矿勘查与突破的重要对象(王汝成等,2021;吴福元等,2023)。

当前国外稀有金属矿化的高演化花岗岩较为稀少,代表性有法国 Beauvoir Li-Nb-Ta-Sn矿床(Cuney *et al.*, 1992)、埃及 Nubian Nb-Ta-Li矿床(Sami *et al.*, 2022)和捷克 Cínovec Sn-W-Li矿床(Breiter *et al.*, 2017)等。华南地区已成为我国乃至世界高演化花岗岩型锂矿的重要资源基地,从中元古界至晚中生界多期次岩浆构造活动形成了多期次稀有金属成矿事件(毛景文等,2008; Jiang *et al.*, 2020; 王汝成等,2021),已探明如宜春414(控制资源量Li₂O 76.5万t)、宜丰狮子岭(7.14万t)和茜坑(32.04万t)等众多中生代大型—超大型高演化花岗岩型锂矿床,是研究花岗岩演化与锂等稀有金属矿化关系的理想地区。最新研究表明花岗岩型锂矿通

常与W、Sn、Nb、Ta、Rb和Cs等元素共生,并且在华南云英岩型W-Sn矿以及岩体型Nb-Ta矿均发现有锂矿化迹象,表明华南可能存在一条大面积连续锂矿化带(吴福元等,2023)。华南中生代高演化花岗岩具有垂直分带特征,成矿与岩体顶部或外围钠长石化白(锂)云母花岗岩密切相关,Li主要赋存于云母族矿物(锂云母、铁锂云母和富锂白云母等)中,以江西宜春414 Nb-Ta-锂矿床(Shu *et al.*, 1998)和宜丰—奉新锂矿床(聂晓亮等,2022)为典型。部分矿床甚至发现有富锂长石族矿物,如磷锂铝石(王成辉等,2019)。吴福元等(2023)指出高分异花岗岩通常由早期主体花岗岩和晚期补体花岗岩组成,且晚期补体为成矿主岩体。主体和补体之间存在着岩石地球化学和年代学上的差异。然而高演化花岗岩通常具有较高U、Th和K元素,放射性生热率超过 $5 \mu\text{W m}^{-3}$ (Liu *et al.*, 2023),为高产热花岗岩,使得锆石和锡石等副矿物中含大量U,给定年工作造成了一定程度的干扰。因此高演化花岗岩精确的年代学研究是当前国内外该领域研究的热点。

甘坊复式花岗岩体位于江南造山带中段九岭岩体南缘,分布有白水洞、茜坑和狮子岭等花岗岩型稀有金属矿床(王成辉等,2019; Xie *et al.*, 2019; 聂晓亮等,2022),近两年该地区通过整装勘查新增控制锂资源量920万t,已成为世界级的花岗岩型锂矿资源基地(陈祥云等,2023)。目前九岭南缘地区锂矿床形成时代、赋存状态及成矿机制等研究薄弱,仅部分学者利用白云母Ar-Ar和铌钽铁矿U-Pb法对该地区少数组锂矿床进行成矿时代研究(Xie *et al.*,

2019; 聂晓亮, 2022). 大港锂矿床是九岭南缘近年来新探明的超大型花岗岩型矿床, 该矿床赋矿岩性主要为白云母花岗岩和白云母二长花岗岩, 发育一定程度的钠长石化等蚀变, 且蚀变与矿化强度成正比。但锂赋存状态和成矿时代仍未开展系统研究。本文在大港锂矿床地质特征详细调查基础上, 通过岩相学、锆石及锡石 U-Pb 年代学、云母电子探针等测试分析, 为精确厘定该矿床成矿年代学、锂赋存状态及成矿机制研究提供重要科学依据, 同时对该区域乃至华南地区同类型锂矿床成矿作用和找矿勘查工作提供参考。

1 区域地质背景

江南造山带中段的九岭隆起带为新元古界扬子板块和华夏板块于碰撞形成的(舒良树, 2012; Li *et al.*, 2016), 是我国重要的稀有金属成矿区域之一, 主要由新远古代和中生代花岗岩及变质沉积岩组成, 构造总体呈现 NEE 走向(Wang *et al.*, 2013; 周效华等, 2019)。区内出露地层较为简单, 主要为新元古代双桥山群浅变质岩与第四系, 其中双桥山群厚度巨大(>4 km), 自下而上可分为横涌组、计林

组、安乐林组和修水组, 相邻各组之间均为连续沉积。传统观点认为双桥山群形成年龄为中元古代(1 400~1 000 Ma)(黄修保等, 2003), Wang *et al.* (2013)利用碎屑锆石 U-Pb 定年获得双桥山群沉积年龄为 860~815 Ma。九岭花岗岩为华南板块出露面积最大的新远古代花岗岩, 侵入双桥山群安乐林组和修水组中(张志辉等, 2021), 岩性主要为黑云母花岗闪长岩, 常见暗色包体, 并可见典型的过铝质矿物堇青石和石榴子石。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果表明九岭岩体黑云母花岗闪长岩、英云闪长岩、黑云母二长花岗岩分别形成于 824~822 Ma、824~820 Ma 和 825~820 Ma(段政等, 2019)。中生代花岗岩分布广泛, 岩性复杂, 主要为晚侏罗世黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩和早白垩世二云母二长花岗岩以及白云母二长花岗岩和白云母花岗岩, 其中强钠化的白云母二长花岗岩和白云母花岗岩与锂矿密切相关。构造主要以 EW 向修水—德安—波阳断裂及 NNE 向宜丰—景德镇断裂为主(张志辉等, 2021)。区域内矿产资源丰富, 主要以内生型 W-Cu-Mo 和 Li-Nb-Ta 矿床为主(图 1)。前者以大湖塘斑岩型 W-Cu-Mo 多金属矿床为代表, 也已发现了锂云母和铁锂云母等富锂矿物(张勇

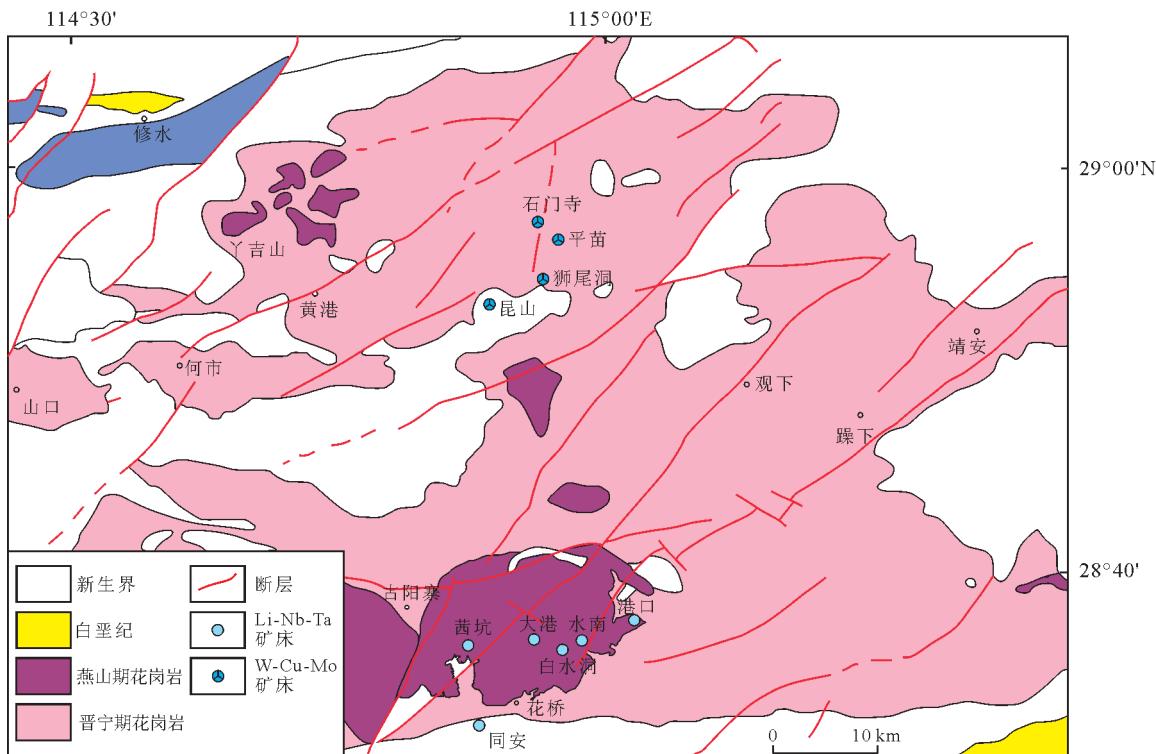


图 1 赣西九岭岩体地质简图及花岗岩型矿床分布图(修改自 Xie *et al.*, 2019)

Fig.1 Simplified geological map showing the distribution of granites and deposits in the West Jiangxi Province (modified from Xie *et al.*, 2019)

等,2020),最近经过勘查已确定其锂矿规模达到超大型.后者以宜丰—奉新地区大港、白水洞、茜坑和狮子岭等大型—超大型白云母花岗岩型Li-Nb-Ta矿床为代表.

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质特征

大港锂矿区内地层简单,仅在沟谷及低洼处见有第四系残坡积层和冲洪积层,主要为棕黄、黄、褐红、灰黑色腐植土、亚黏土、亚砂土和含砾砂土.构造也较为简单,主要以岩体接触带附近的脆性剪切断裂构造为主,受宜丰—景德镇NEE向深大断裂控制,代表性构造有矿区北侧NE向脆韧性断裂与矿区南侧NE-NEE向脆性断裂(王成辉等,2019;Xie *et al.*, 2019).基底褶皱主要为古阳寨复背斜,该复背斜轴向近东西向,出露长40 km左右,由轴部往外分别为安乐林组、宜丰岩组和修水组.核部被燕山早期甘坊岩体和古阳寨岩体侵入破坏.

岩浆岩广泛出露,具多期多阶段特征,属甘坊复式花岗岩体一部分.除发育少量晋宁期九岭花岗闪长岩,燕山期岩浆活动最为强烈,总体呈EW向分布.燕山期花岗岩主要岩性有钠长石化中细粒白云母花岗岩、中细粒白云母二长花岗岩、中细粒白云母碱长花岗岩、中细粒二云母二长花岗岩、似斑状

二云母二长花岗岩以及少量细晶岩脉,与同处江南造山带中段的雅山岩体岩性相似.区内花岗岩蚀变的显著特点是以岩浆晚期交代作用为主,表现为钠长石化、锂云母化和白云母化.岩石出露地表经风化后具强烈的高岭土化,局部见黄玉化、绿泥石化、硅化和伊利石化等(图2).

2.2 矿体特征

大港锂矿床矿体出露面积约0.35 km².矿区内以含锂陶瓷土矿体为主.含锂原生矿赋矿岩性主要为钠长石化中细粒白云母花岗岩和中细粒似斑状白云母二长花岗岩.部分矿段发现白云母花岗岩与新元古界九岭岩体、晚侏罗世似斑状二云母二长花岗岩等岩体呈侵入接触关系.另外发育有富锂细晶岩脉.钠长石化中细粒白云母花岗岩内为厚大富集矿段,Li₂O品位大多高于0.4%.中细粒似斑状白云母二长花岗岩呈岩枝状穿插于钠长石化白云母花岗岩中,在接触部位附近Li₂O品位多高于0.3%,而中间部位Li₂O品位多为0.2%~0.3%.矿体主要受白云母花岗岩体侵入产状和其自身自蚀变带控制,整体呈近EW走向.矿体厚度总体变化较为规则,形态较稳定,呈层状、似层状(图3).在空间上呈南东厚、北西薄特征.品位与矿体厚度呈正相关,南东侧品位高于北西侧.矿体边界与下盘岩石呈渐变过渡关系,无明显界线.

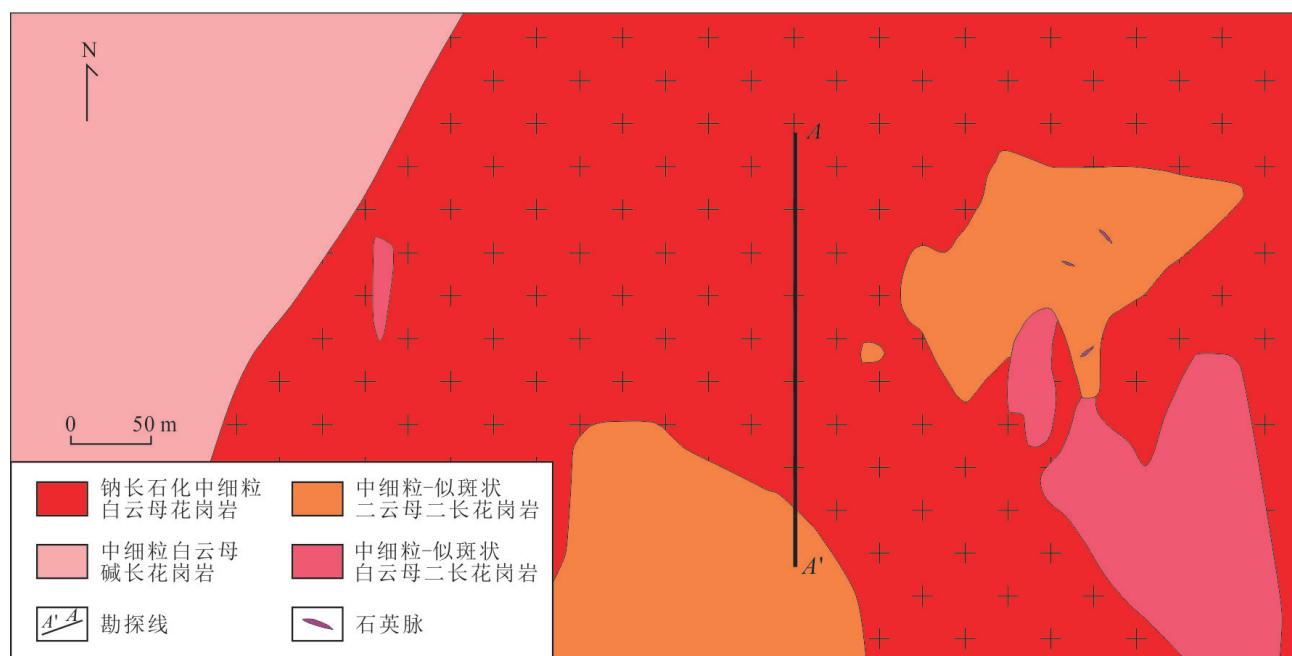


图2 大港锂矿床地质简图
Fig.2 Simplified geological map of the Dagang Li deposit

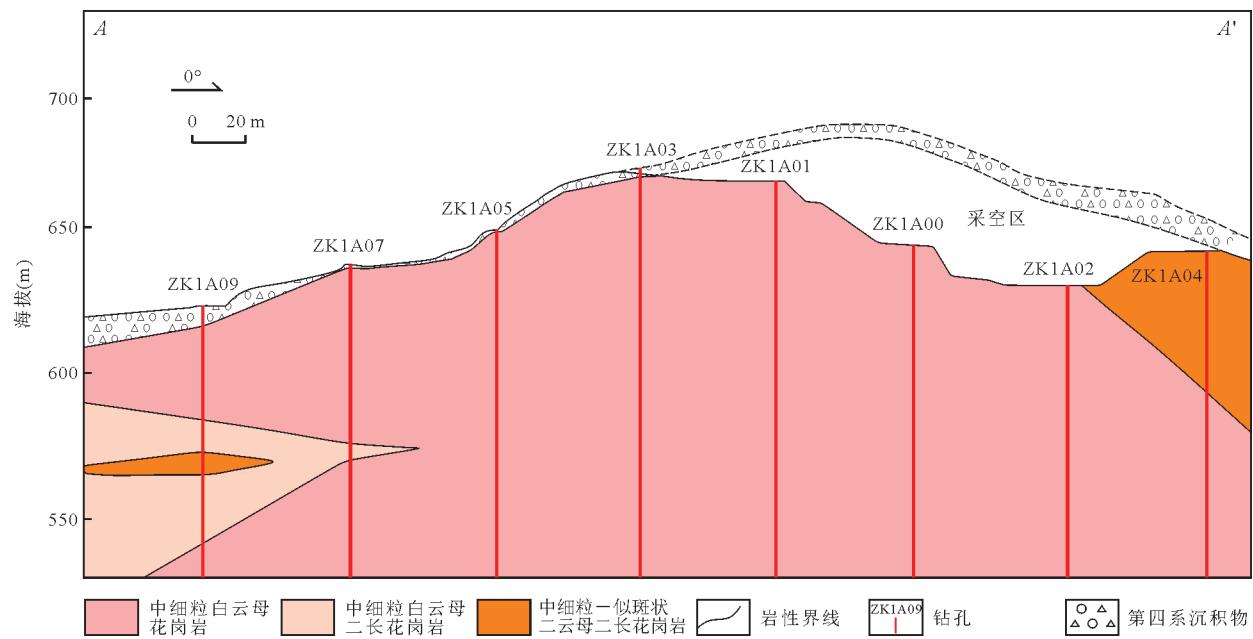


图3 大港锂矿床中部1A线地质剖面图
Fig.3 Geological cross-section of the line 1A in the Dagang Li deposit

2.3 矿石特征

白云母花岗岩具较强钠长石化,颜色为灰白—白色,花岗结构,块状构造(图4).主要矿物成分为钠长石、石英、斜长石、钾长石和(含锂)白云母.镜下钠长石多呈板状,长径0.2~1.2 mm,沿石英及其他矿物边部向内交代,具聚片双晶,受应力作用垂直长轴发育少量裂纹(图4),含量约30%;石英他形粒状,粒径0.5~3.5 mm,以细粒居多,次为中粒,受应力作用发育波状消光及少量平直状裂纹,切穿晶体,含量约为40%;斜长石呈半自形—自形板状,长径为0.2~2.5 mm,具卡式—钠长石双晶,受钠长石交代、白云母轻微交代蚀变(图4),含量约为10%;钾长石受钠长石交代,呈他形粒状残留,长径为0.2~3.0 mm,具卡式双晶,发育强黏土化,晶体内浑浊不清,含量约为10%;(含锂)白云母为片状,含量约10%,按产状可分为两类:(1) 较大片状,片径为0.5~2.5 mm,为原生及次生白云母,与钠长石共同交代原岩产出,交代顺序应稍早于钠长石;(2) 较小叶片状,片径为0.02~0.10 mm,呈鳞片状集合体产出,多与黏土化钾长石伴生,从光性上与白云母无异.副矿物主要为黄玉、锡石、钽铌铁矿和锆石,独居石和磷灰石少见.部分矿段发育有裂隙,沿裂隙发育溶蚀孔洞.

2.4 蚀变类型及特征

花岗岩型锂矿化有关的蚀变作用显著,以岩浆

晚期热液交代作用为主,主要表现为钠长石化、锂云母化、白云母化、硅化和氟化等蚀变(图5).岩石出露地表经风化后发生高岭土化,局部见黄玉化、绿泥石化、硅化等.根据矿物相互交代和生成顺序,蚀变可分为两期,第一期为钠长石化和含锂白云母化;第二期为硅化、氟化和锂云母化等.其中钠长石化和锂云母化普遍发育于白云母花岗岩和白云母二长花岗岩中,与矿化强度呈正相关关系,即蚀变越强矿化程度越高.强钠长石化在区内大面积出露,主要发育于白(锂)云母花岗岩体顶部或边部.镜下钠长石呈自形板条状,长径为0.4~2.0 mm,具聚片双晶,交代原岩矿物产出,沿边缘向内占位明显,少数交代产出于原岩矿物晶体内部.镜下云母具多色性,呈浅玫瑰色—浅绿色,浅玫瑰色云母一般为Li较高所致,据此可大致判别为锂云母,而浅绿色和黄棕色云母则为铁锂云母和富锂多硅白云母(图4).

3 测试方法

3.1 锆石和锡石 LA-ICPMS U-Pb 定年

样品送至河北省廊坊市区域地质矿产调查研究所实验室进行破碎、锆石和锡石挑选、制靶抛光及阴极发光(CL)和BSE显微照相.锆石阴极发光图像拍摄仪器为高真空扫描电子显微镜(JSM-IT100),配备有GATAN MINICL系统.锆石U-Pb

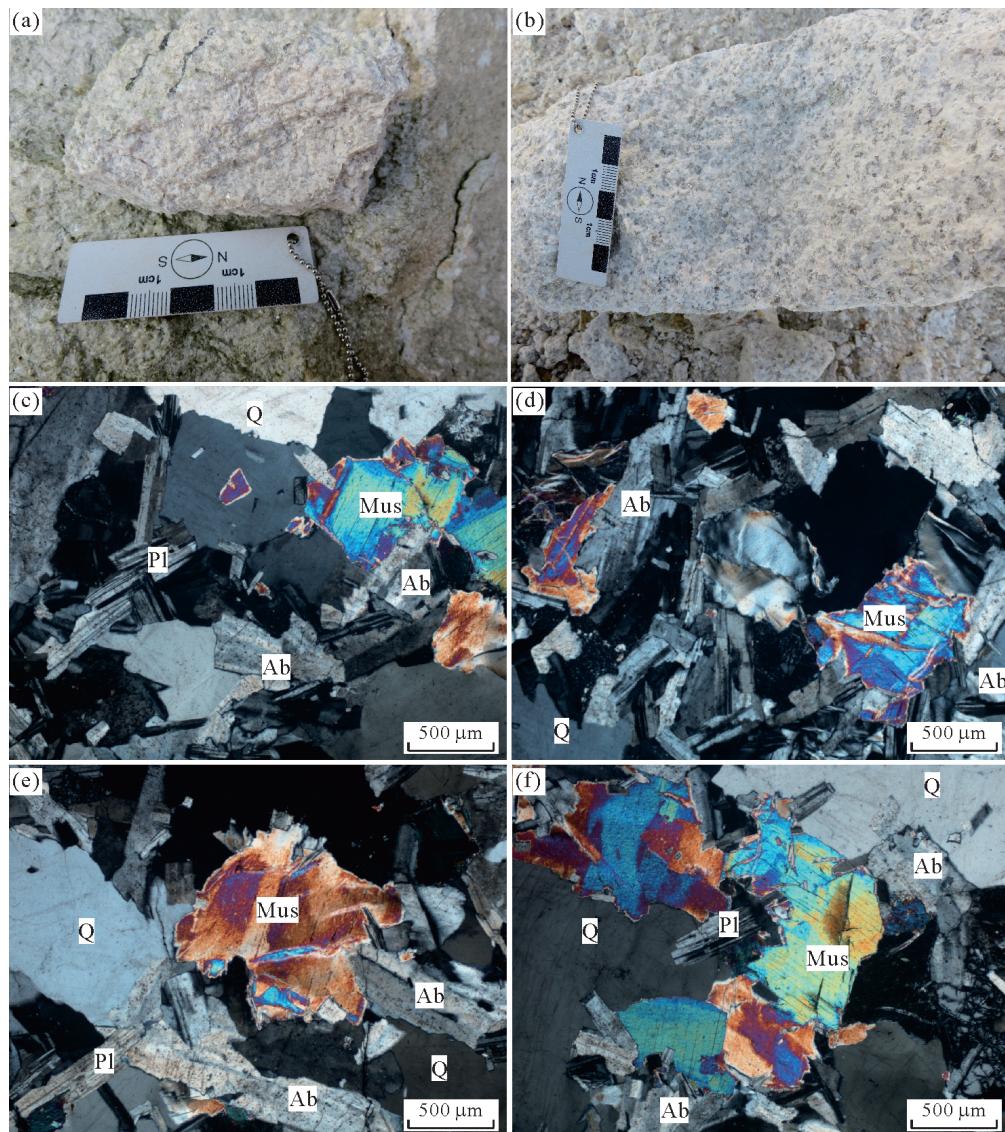


图4 大港锂矿床白云母花岗岩野外和镜下鉴定特征

Fig.4 Field photos and microscopic identification of the muscovite granite in the Dagang Li deposit
Ab. 钠长石; Mus. 白云母; Q. 石英; Pl. 斜长石

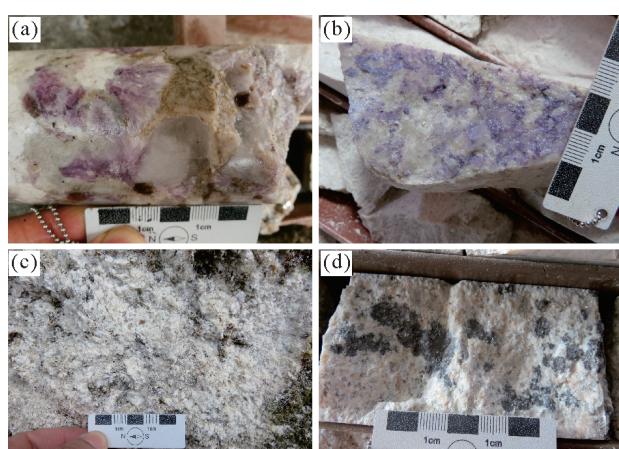


图5 大港锂矿床蚀变类型照片

Fig.5 Field photos of alteration in the Dagang Li deposit

同位素定年和微量元素含量测试在中国地质大学(武汉)紧缺战略矿产资源勘查协同中心利用LA-ICPMS同时分析完成.LA-ICPMS分析仪器为Agilent7500a等离子体质谱仪和GeoLas Pro激光剥蚀系统,激光光斑直径为24 μm.U-Pb同位素定年中采用锆石标准91500作外标($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 1065.4 ± 0.6 Ma; Wiedenbeck *et al.*, 1995),以标准锆石Qinghu($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 159.5 ± 0.2 Ma; Li *et al.*, 2013)作为盲样监控数据质量.NIST610作内标进行同位素分馏校正.采用软件ICPMSDataCal对分析数据进行离线处理(包括对样品和空白信号选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Pb同位素比值和年龄计算)完成(Liu *et al.*, 2010).利用

Isoplot4.15 完成锆石样品 U-Pb 年龄谐和图绘制和加权平均年龄计算。本次测试中获得的锆石 91500 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 1062.4 ± 9.7 Ma, 锆石 Qinghu 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 159.3 ± 1.4 Ma, 与标准锆石 TIMS 年龄在误差范围内一致。

锡石 U-Pb 同位素年代学分析工作在中国地质大学(武汉)紧缺战略矿产资源勘查协同中心利用 LA-ICPMS 分析完成。GeoLasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7700a, 烧蚀的光斑尺寸为 $50 \mu\text{m}$ 。NIST 610 作同位素分馏校正。标准锡石 SPGII 被用作外标。本测试获得锡石 SPGII $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 1540 ± 10 Ma, 与 SPGII 推荐参考 U-Pb 年龄 (1539 ± 5.4 Ma; Carr *et al.*, 2023) 一致。BB#7 作为盲样监控数据质量, 测试得到 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Tera-Wasserburg 下交点年龄为 255 ± 5 Ma, 与 TIMS 年龄结果相一致 (261.75 ± 1.5 Ma; Yang *et al.*, 2022)。利用 Iso-plot4.15 完成锡石样品 U-Pb 年龄谐和图绘制和加权平均年龄计算。

3.2 云母 BSE 照相和 EPMA 分析

云母电子探针定量分析与背散射电子图像在武汉微束检测科技有限公司显微学与显微分析实验室完成。仪器型号为 JEOLJXA-8230, 并配有 5 道波谱仪。测试条件为加速电压 15 kV、加速电流 20 nA、束斑直径 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。测试元素包括 Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe、Ti、Mn、F、Ba, 分析误差小于 0.01%。测试元素所用的标样为: 硬玉(Na)、透辉石(Ca)、橄榄石(Mg)、镁铝榴石(Si、Fe、Al)、透长石(K)、金红石(Ti)、蔷薇辉石(Mn)和氟化钡(F、Ba)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

本次研究选取 1 件白云母花岗岩样品(21DG-1)进行锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年测试, 测试结果见表 1。大港矿段白云母花岗岩锆石多为短柱状和圆球状, 颗粒长宽比为 $1.1 \sim 1.7$, 粒径为 $70 \sim 120 \mu\text{m}$, CL 图像显示锆石可以分为两类:(1)I 类锆石具有明暗杂乱呈海绵状结构, 原始岩浆锆石环带被热液交代, 发育不同程度溶蚀, 反映锆石主要为热液成因。II 类锆石颜色较黑, 部分具有较为明显的增生环带, 核部多为热液交代锆石。选择样品中韵律环带特征明显的 I 型和 II 型锆石进行 20 个点的

U-Pb 测年, 因包裹体、普通铅等因素影响去除 2 个不谐和测点, 11 个 I 型锆石测点 U 和 Th 含量范围分别为 $6963 \times 10^{-6} \sim 14801 \times 10^{-6}$ 和 $22.9 \times 10^{-6} \sim 84.3 \times 10^{-6}$, Th/U 比值普遍小于 0.1, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{205}\text{Pb}/^{237}\text{U}$ 比值范围为 $0.0204 \sim 0.0234$ 和 $0.1359 \sim 0.2692$ 。采取 Tera-Wasserburg 图法制作锆石 U-Pb 反等时线图, 获得 I 类型锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Tera-Wasserburg 下交点年龄为 129 ± 2 Ma (图 6), 表明形成时代为早白垩世。II 类锆石 U 含量变化较大 ($9328 \times 10^{-6} \sim 47893 \times 10^{-6}$), 且 U 含量与表观年龄呈正相关, Th 含量范围为 $50.3 \times 10^{-6} \sim 165.0 \times 10^{-6}$, Th/U 比值小于 0.01, 为典型的热液锆石。其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{205}\text{Pb}/^{237}\text{U}$ 比值分别为 $0.0163 \sim 0.0250$ 和 $0.1177 \sim 0.2101$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Tera-Wasserburg 下交点年龄为 100 ± 4 Ma。

4.2 锡石 U-Pb 年龄

选取 21DG-1 样品中表面无杂质无包体且裂隙较少的具有核边结构的锡石进行 LA-ICPMS U-Pb 定年, 共分析 25 个测点, 去除 4 个误差较大测点, 剩余 21 个有效测点测试结果见表 2。大港白云母花岗岩中锡石颗粒结晶程度较高, 多为自形粒状, 颗粒粗大, 为 $90 \sim 200 \mu\text{m}$ 。CL 照片显示锡石颜色多为黑色, 多发育有清晰的震荡环带和明暗的核边结构, 少数锡石发育有多孔结构。锡石 U 含量较高, 变化范围较大 ($195 \times 10^{-6} \sim 847 \times 10^{-6}$), 为典型的热液成因锡石, 其中核部较老锡石 U 含量较高, 边部 U 含量较低。Pb 含量较低 ($6 \times 10^{-6} \sim 169 \times 10^{-6}$), 部分锡石含有较高普通 Pb 使得分析点偏离谐和线。Th 含量普遍低于 0.1×10^{-6} , 仅 3 个测点大于 0.1×10^{-6} (21DG-1-11c、21DG-1-15c 和 21DG-1-22c)。 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 比值范围为 $0.05537 \sim 0.51089$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值范围为 $0.02015 \sim 0.07637$ 。通过 Tera-Wasserburg 图解法得到核部和边部锡石 LA-ICPMS U-Pb 年龄结果分别为 125 ± 3 Ma ($2\sigma, n=14$, MSWD=1.2) 和 108 ± 7 Ma ($2\sigma, n=7$, MSWD=1.6) (图 7)。

4.3 云母成分及矿物学特征

云母作为主要矿物相出现在大港锂矿床各阶段花岗岩中。BSE 微观图像显示大港白云母花岗岩中同一云母矿物不同部位普遍存在明显成分环带, 核部与边部具有明显明暗区别, 核部较亮而边部较暗, 最外围具有明显细窄亮边。BSE 图像光泽的差异表明这些云母具有明显成分差异。本文对核部和边部均进行了电子探针成分测试, 其结果见附表 1。

表1 大港锂矿床白云母花岗岩锆石U-Pb定年结果

Table 1 Results of zircon LA-ICPMS U-Pb dating for the muscovite granites in the Dagang Li deposit

样品编号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				Ratio	1σ	Ratio	1σ	Ratio	1σ	t(Ma)	1σ	t(Ma)	1σ	t(Ma)	1σ
21DG-1-01	84.3	14 524	0.006	0.0627	0.0014	0.1864	0.0046	0.0213	0.0003	698	48.1	174	3.92	136	1.91
21DG-1-02	46.5	6 963	0.007	0.0830	0.0030	0.2692	0.0085	0.0234	0.0004	1 270	69.9	242	6.83	149	2.49
21DG-1-03	66.6	14 660	0.005	0.0657	0.0015	0.1860	0.0041	0.0203	0.0002	798	52.8	173	3.49	130	1.15
21DG-1-04	81.3	13 084	0.006	0.0550	0.0012	0.1769	0.0042	0.0209	0.0002	413	48.1	157	3.06	139	1.46
21DG-1-05	165	46 319	0.004	0.0517	0.0013	0.1177	0.0032	0.0163	0.0002	272	55.5	113	2.91	104	1.52
21DG-1-06	68.8	10 167	0.007	0.0724	0.0016	0.2231	0.0054	0.0223	0.0005	998	46.3	204	4.48	142	2.95
21DG-1-07	50.2	11 357	0.004	0.0576	0.0014	0.1815	0.0042	0.0211	0.0002	522	53.7	163	4.28	138	1.89
21DG-1-08	118	19 657	0.006	0.0735	0.0018	0.2101	0.0063	0.0205	0.0003	1 028	50.5	194	5.32	131	1.84
21DG-1-09	63.0	14 801	0.004	0.0547	0.0012	0.1587	0.0037	0.0210	0.0002	398	52.8	155	3.19	138	1.37
21DG-1-10	39.5	9 665	0.004	0.0539	0.0013	0.1600	0.0041	0.0210	0.0003	365	55.6	153	3.33	138	1.24
21DG-1-11	22.9	9 808	0.002	0.0713	0.0018	0.2274	0.0058	0.0229	0.0002	969	51.5	208	4.83	146	1.56
21DG-1-12	36.8	9 328	0.004	0.0699	0.0017	0.1924	0.0047	0.0198	0.0002	928	48.9	179	4.04	126	1.52
21DG-1-13	53.1	10 584	0.005	0.0490	0.0012	0.1391	0.0034	0.0205	0.0005	150	54.6	132	3.05	131	2.96
21DG-1-14	65.5	13 761	0.005	0.0680	0.0016	0.1931	0.0057	0.0204	0.0004	878	48.1	179	4.84	130	2.43
21DG-1-15	63.3	9 640	0.007	0.1027	0.0021	0.3070	0.0061	0.0216	0.0002	1 673	37.5	272	4.75	138	1.33
21DG-1-16	50.3	13 068	0.004	0.0677	0.0014	0.1801	0.0043	0.0192	0.0002	857	44.4	168	3.70	122	1.50
21DG-1-17	36.1	8 771	0.004	0.0481	0.0012	0.1359	0.0040	0.0204	0.0004	102	62.0	129	3.57	130	2.72
21DG-1-18	98	11 758	0.008	0.0729	0.0016	0.2022	0.0048	0.0200	0.0003	1 011	42.6	187	4.09	128	1.80
21DG-1-19	55.7	10 989	0.005	0.0593	0.0014	0.1751	0.0043	0.0213	0.0002	589	51.8	164	3.76	136	1.35
21DG-1-20	48.2	9 192	0.005	0.0622	0.0015	0.1822	0.0047	0.0212	0.0002	680	51.8	170	4.08	135	1.54

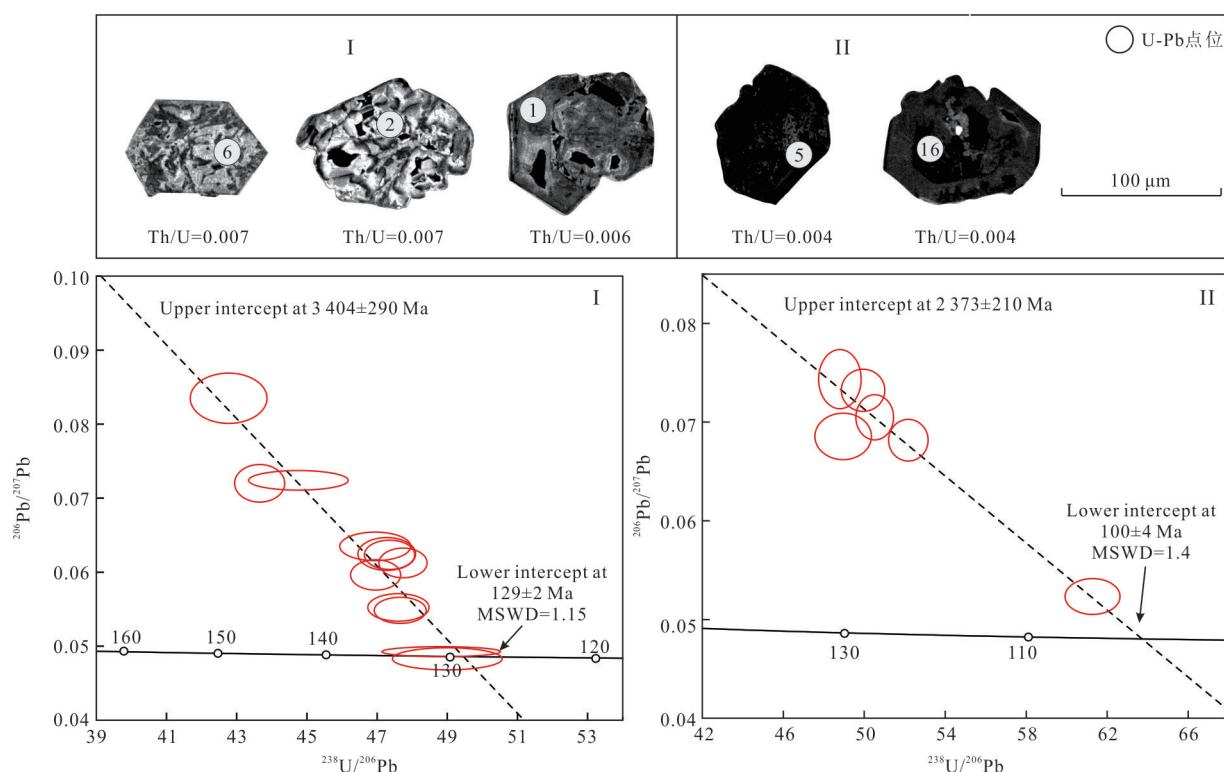


图6 大港白云母花岗岩锆石CL照片及U-Pb Tera-Wasserburg下交点年龄图

Fig.6 Representative zircon CL images and LA-ICPMS U-Pb diagrams for the Dagang muscovite granite

表 2 大港锂矿床白云母花岗岩锡石 U-Pb 定年结果

Table 2 Results of cassiterite LA-ICPMS U-Pb dating for the muscovite granite in the Dagang Li deposit

样品	Common Pb (10^{-6})	Pb (10^{-6})	Th (10^{-6})	U (10^{-6})	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		Age (Ma)	
					Ratios	1σ	Ratios	1σ	Ratios	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ (abs)
21DG-1(CST)-1c	6.14	10.3	0.06	341	0.157 6	11.9	0.496 2	10.8	0.025 3	4.2	161	13
21DG-1(CST)-2c	3.09	8.86	0.06	389	0.082 1	12.2	0.238 3	11.8	0.022 9	2.9	146	8
21DG-1(CST)-3c	82.2	36.3	0.05	592	0.276 8	4.2	1.336 1	5.4	0.036 3	2.6	226	9
21DG-1(CST)-4c	5.54	19.1	0.00	657	0.120 5	7.6	0.378 5	7.7	0.023 5	2.5	149	7
21DG-1(CST)-5c	6.52	10.3	0.04	487	0.067 0	11.5	0.194 3	11.7	0.020 6	3.2	131	8
21DG-1(CST)-6r	0.00	7.97	0.00	359	0.069 6	18.4	0.202 8	15.2	0.021 5	4.2	137	11
21DG-1(CST)-7r	40.4	10.6	0.00	383	0.137 6	18.5	0.359 6	12.3	0.023 1	3.2	147	9
21DG-1(CST)-8c	3.31	9.3	0.11	405	0.076 3	13.3	0.212 5	13.7	0.022 6	3.1	144	9
21DG-1(CST)-9r	0.00	8.3	0.32	351	0.174 3	17.3	0.329 2	12.8	0.021 4	3.7	136	10
21DG-1(CST)-10r	23.5	8.57	0.06	391	0.105 2	15.2	0.221 5	12.2	0.022 1	3.5	141	10
21DG-1(CST)-11c	0.00	8.52	0.01	382	0.055 4	15.1	0.165 6	13.8	0.022 7	3.4	144	10
21DG-1(CST)-12c	32.4	23.4	5.87	635	0.145 3	9.6	0.451 1	8.9	0.025 4	3.3	162	10
21DG-1(CST)-13r	13.5	9.48	0.02	431	0.074 8	12.2	0.191 6	11.3	0.020 7	3.0	132	8
21DG-1(CST)-14c	0.00	8.09	0.03	362	0.094 6	14.6	0.314 2	13.9	0.021 7	5.4	138	15
21DG-1(CST)-15c	36.7	169	3.05	848	0.456 2	4.2	4.628 7	5.0	0.076 4	4.3	476	38
21DG-1(CST)-16c	9.60	17.8	0.04	842	0.063 1	15.8	0.133 9	15.7	0.021 2	2.2	135	6
21DG-1(CST)-17c	0.00	5.92	0.02	268	0.080 6	20.3	0.386 2	27.0	0.023 2	4.6	148	13
21DG-1(CST)-18r	8.19	26.7	0.17	341	0.372 6	7.0	1.556 1	7.2	0.032 5	4.4	205	18
21DG-1(CST)-19c	54.1	7.06	0.05	250	0.107 7	14.0	0.314 2	12.3	0.023 0	3.8	147	11
21DG-1(CST)-20r	0.00	7.70	0.02	344	0.088 9	14.9	0.212 7	12.8	0.021 5	3.7	138	10
21DG-1(CST)-21r	0.00	8.56	0.00	415	0.067 4	13.9	0.154 0	13.4	0.020 2	3.6	128	9
21DG-1(CST)-22c	39.74	33.9	2.57	543	0.301 5	4.7	1.452 5	4.8	0.036 6	3.0	226	10
21DG-1(CST)-23r	49.61	58.3	0.07	455	0.510 9	4.8	3.169 8	4.7	0.050 1	2.8	316	17
21DG-1(CST)-24c	0.00	23.9	0.27	534	0.201 9	6.3	0.765 0	5.8	0.029 8	2.7	189	10
21DG-1(CST)-25r	0.00	6.19	0.02	196	0.2118	18.4	0.570 2	15.0	0.025 3	4.7	161	15

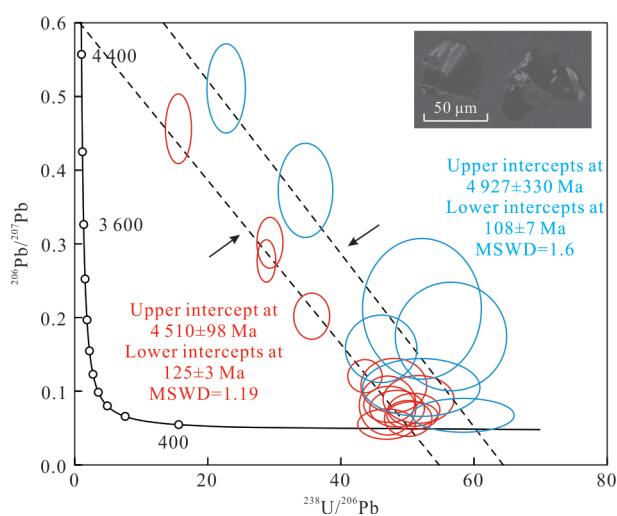


图 7 大港矿床锡石 Tera-Wasserburg U-Pb 年龄
Fig.7 Tera-Wasserburg U-Pb ages for cassiterite from the muscovite granite in the Dagang Li deposit

云母主量元素 SiO_2 质量百分含量变化范围为 $44.18\% \sim 48.80\%$, Al_2O_3 较高 ($23.48\% \sim 33.10\%$) , K_2O 质量百分含量较高 ($9.83\% \sim 11.06\%$) , Na_2O 质量百分含量为 $0.22\% \sim 0.58\%$. FeO 质量百分含量变化范围较大 ($1.72\% \sim 5.61\%$) , Rb_2O 质量百分含量为 $0.54\% \sim 1.63\%$, MnO 质量百分含量为 $0.52\% \sim 1.25\%$. TiO_2 、 MgO 和 CaO 质量百分含量低于 0.1% , Cs_2O 质量百分含量也较低 ($0.01\% \sim 0.41\%$) , 但 F 质量百分含量较高 , 变化范围为 $2.30\% \sim 5.94\%$. Tischendorf *et al.* (1997) 对云母进行分类并总结三面体云母中 Li_2O 与 SiO_2 、 MgO 、 F 和 Rb 之间的经验公式 . 大港锂成矿岩体云母 MgO 含量较低且与 SiO_2 含量表现出较低相关性 , 表明利用 MgO 计算 Li_2O 含量并不可靠 . 因此本文选取 Li_2O 与 SiO_2 之间的经验公式 :

$$\text{Li}_2\text{O} = (0.289 \times \text{SiO}_2) - 9. \quad (1)$$

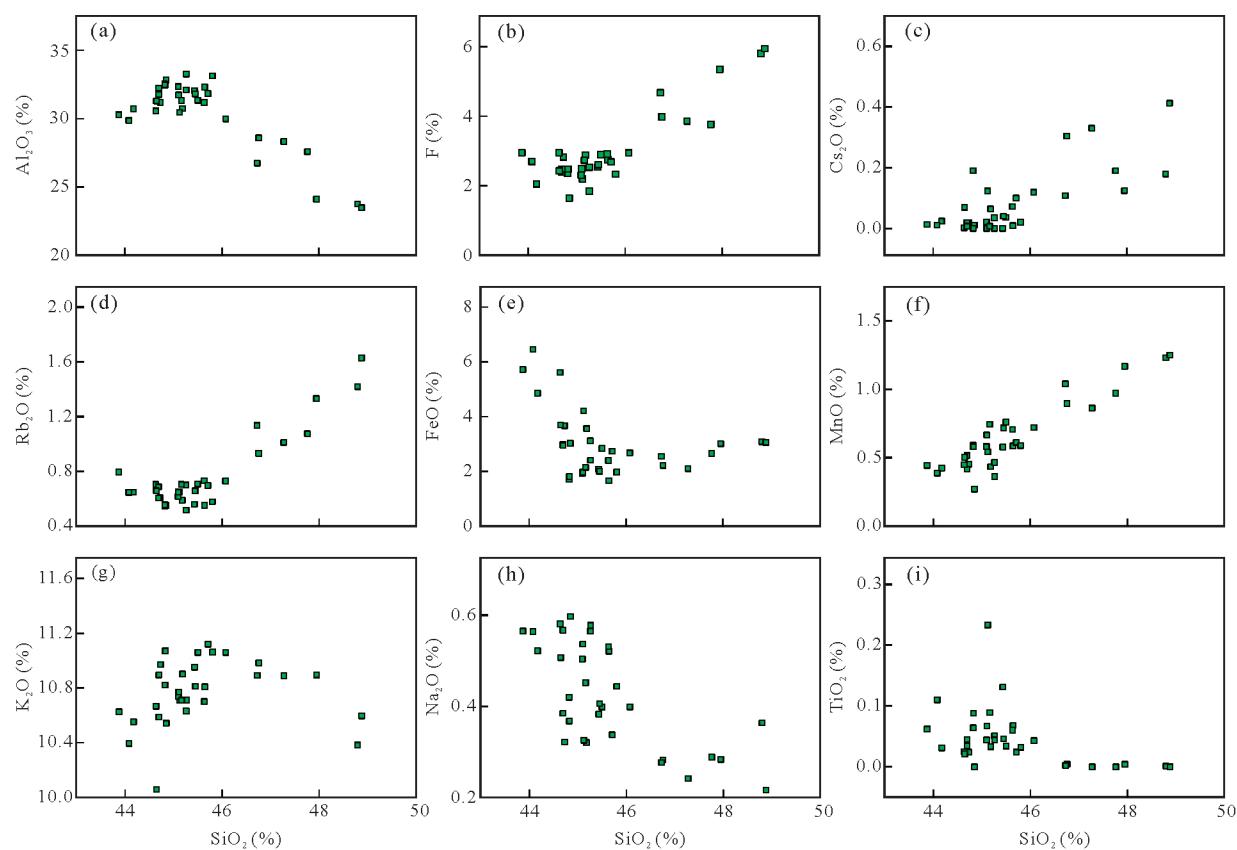
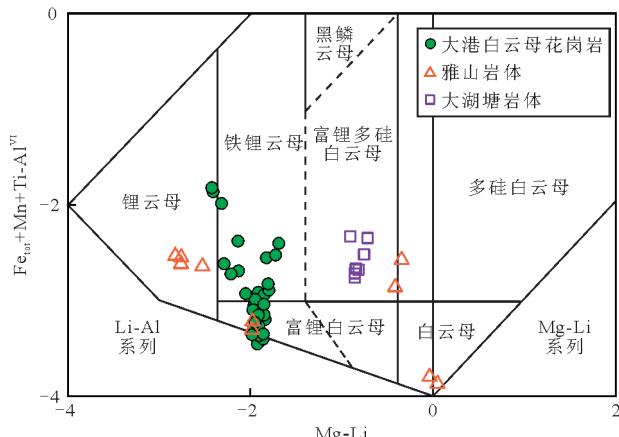


图8 大港白云母花岗岩云母主量成分Harker图解

Fig.8 Harker diagrams of SiO_2 vs. major elements for the mica of muscovite granite in the Dagang Li deposit图9 大港白云母花岗岩云母成分分类图解(底图据 Tischendorf *et al.*, 1997 修改)Fig.9 Positions of micas on the diagram of (Mg-Li) vs. $(\text{Fe}_{\text{tot}} + \text{Mn} + \text{Ti-Al}^{\text{VI}})$ in the Dagang muscovite granite (modified from Tischendorf *et al.*, 1997)

计算得到 Li_2O 质量百分含量范围为 3.26%~4.47% (附表 1). SiO_2 含量与 F 、 Rb_2O 、 Cs_2O 等含量呈正相关关系 (图 8), 表明岩浆演化过程中 Rb 、 Cs 、 F 等元素逐渐富集而成为重要的伴生生成矿元素. 而

SiO_2 含量与 Al_2O_3 、 FeO 呈负相关关系 (图 8), 这主要是阳离子配位的变化而导致云母类型发生变化, 其替换机制为 $\text{Li}^{\text{VI}} + \text{Si}^{\text{IV}} \rightarrow (\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}} + \text{Al}^{\text{IV}}$ (Harrison and Watson, 1984). 锂云母理想化学式为:

$$\text{K}\{\text{Li}_{2-x}\text{Al}_{1+x}[\text{Al}_{2x}\text{Si}_{4-2x}\text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2\} \quad (x=0-0.5), \quad (2)$$

式(2)中可知 Si 、 Li 和 Al 呈现出此消彼长的趋势, 表明白云母中较高 Al 含量不利于 Li 元素富集, 演化程度越高, 锂矿化程度越高. 在图 9 中, 大港锂矿床中云母属于 Li-Al 系列, 数据点主要投影于铁锂云母、锂云母和富锂白云母范围内. 与雅山岩体云母成分相比 (李洁等, 2015), 本次研究的大港矿床白云母变化范围更窄, 并且演化程度也较高.

5 讨论

5.1 成矿时代

锆石 U-Pb 同位素体系在绝大多数地质环境下保持其封闭状态, 不易受后期热液蚀变影响, 可以有效保存成岩成矿的地球化学特征, 其结晶年龄通常代表了岩体形成的年龄. 但高演化花岗岩和伟晶

岩中锆石多为高 U 含量的锆石,而高 U 锆石由于其放射性损伤较高,极易造成锆石中 U-Pb 不封闭,从而影响锆石 U-Pb 年龄结果(高铀效应)(Williams and Herdt, 2000; 蒋少涌等, 2021)。对于 U 含量影响 U-Pb 年龄的阈值目前仍存在较大争论, Williams and Herdt (2000) 认为 U 含量大于 2500×10^{-6} 的锆石表现年龄会略微偏高, Leech (2008) 则认为当锆石 U 含量高于 4000×10^{-6} 时, 才会出现“高铀效应”。然而 White and Ireland (2012) 认为“高铀效应”常发生于年龄较老的锆石, 对较为年轻的锆石影响较小, 并且可以利用其他副矿物(独居石、磷灰石、铌钽铁矿及锡石等)U-Pb 年龄进行对比, 从而采用合理的影响较小的高 U 锆石的表现年龄。本文 LA-ICPMS U-Pb 定年获得大港白云母花岗岩 I 类型锆石 Tera-Wasserburg 下交点年龄为 129 ± 2 Ma, 代表了大港花岗岩热液活动年龄, 而 II 类锆石获取到下交点年龄为 100 ± 4 Ma。

锡石由于其化学性质稳定且不易受到后期热液交代影响而成为 U-Pb 定年的理想研究对象(Gulson and Jones, 1992; Zhang *et al.*, 2017; 涂家润等, 2019; Li *et al.*, 2022)。锡石非放射成因初始普通铅含量较高, 并且非放射成因初始普通铅在矿物中含量差异大、分布不均一, Tera-Wasserburg 图解法能精确获得成岩成矿事件。锡石作为花岗岩型稀有金属矿床中常见的矿石矿物, 其 U-Pb 年龄通常可以指示稀有金属矿床岩浆期后锡石形成年龄(Zhang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2021)。本文利用锡石 LA-ICPMS U-Pb 定年得到核部 Tera-Wasserburg 下交点年龄为 125 ± 3 Ma, 而边部锡石下交点年龄为 108 ± 7 Ma。较老的锡石年龄(125 ± 3 Ma)与锆石 U-Pb 年龄(130 ± 2 Ma)在误差范围内基本一致, 代表着早白垩世早期大港锂矿床成岩及相关的热液期成矿年龄。这一成矿事件与同处江南造山带中段的松树岗和黄山花岗岩型稀有金属矿床($134 \sim 133$ Ma; Liu *et al.*, 2022)和幕阜山岩体周缘的仁里、传梓源和断峰山等伟晶岩型稀有金属矿床($133 \sim 125$ Ma; 李鹏等, 2019; Li *et al.*, 2020; 李艳军等, 2021)同期形成。这些年龄结果表明早白垩世中期是江南造山带中段一个重要的稀有金属成岩成矿时限。而晚期锡石年龄(108 ± 7 Ma)也与 II 类锆石年龄(100 ± 4 Ma)相近, 表明大港矿床可能存在有深部叠加的岩浆—热液活动, 但具体岩浆岩体需进一步确定。此外, 赣东北地区的德兴斑岩铜矿床石

英脉中也发现了 ~ 100 Ma 的成矿事件(Zhou *et al.*, 2012), 这些结果可能揭示江南造山带中可能还发育一期早—晚白垩世之交(~ 100 Ma)成矿事件。

杨泽黎等(2014)厘定赣西宜春富铌钽锂矿床成岩成矿时代为 ~ 150 Ma, 九岭南缘地区白水洞锂矿床中铌钽铁矿被 LA-ICPMS U-Pb 法厘定为 144 ± 5 Ma (Xie *et al.*, 2019), 茜坑锂矿床成矿时代被限定为 138 ± 1 Ma (锂云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法; 聂晓亮等, 2022)。甚至赣西大湖塘锂钨矿床成矿时代为 144 ± 1 Ma (黄兰椿和蒋少涌, 2012)。对于甘坊和古阳寨两个花岗岩体中二云母二长花岗岩相, Wang *et al.* (2017) 分别获得 $147 \sim 144$ Ma 和 $147 \sim 146$ Ma 的锆石 U-Pb 年龄。这些精确的年代学数据表明赣西地区锂矿成矿经历了多期次成矿作用, 可细分为 $150 \sim 138$ Ma、 $130 \sim 125$ Ma 和 ~ 100 Ma 3 期。

5.2 锂富集机制

高演化花岗岩型稀有金属矿床具有岩体即为矿体的特点, 因此研究花岗岩成岩对探讨稀有金属成矿具有重要意义。前人对该类型矿床的深入研究表明成矿机制主要有结晶分异和热液交代两种(Beus and Zalshkova, 1964; Vasyukova and Williams-Jones, 2020; Gahlan *et al.*, 2023; 吴福元等, 2023)。花岗岩岩石学存在空间差异的主要机制是部分熔融和结晶分异(Gao *et al.*, 2016), 而影响岩浆结晶分异最主要的因素为花岗质岩浆黏度。F 和 Li 等元素有助于黏度的降低, 延长岩浆演化过程, 从而促进岩浆结晶分异(Bartels *et al.*, 2011; Ding *et al.*, 2022)。因此高分异花岗岩通常富集有大量锂和氟元素。虽然大部分矿床蚀变程度越高的岩体稀有金属矿化程度更高, 但没有直接证据可以证明后期热液流体中富集稀有金属(Wu *et al.*, 2021)。然而最新研究表明部分稀有金属花岗岩是结晶分异和热液交代作用复合形成的, 在岩浆结晶分异阶段和热液期均有稀有金属矿物的形成, 受限于母岩浆 Li-F 浓度、水饱和度及温压等因素(Schmitt, 2002)。

甘坊复式花岗岩体为典型的经历了高程度分异演化的过铝质 S 型花岗岩, 并且于演化晚期白云母花岗岩中强烈富锂、铌和钽等稀有金属。云母化学成分变化及微观形态特征研究对花岗岩熔体演化程度具有重要指示意义(Tischendorf *et al.*, 1997)。在结晶分异过程中, Li 在云母族矿物中属于相容元素, 而在石英和长石中为不相容元素。Tischendorf *et al.* (1997) 研究表明岩浆演化过程中随着

岩浆演化程度的升高,云母会逐渐向铁锂云母甚至是锂云母方向演化。因此,云母成分变化可以很好体现岩浆演化过程。本次研究的大港矿床中云母主要由富锂白云母过渡到铁锂云母甚至形成高度富锂的锂云母(图9),显示出富锂的岩浆演化趋势,与雅山岩体云母(Yin *et al.*, 2022)变化趋势相似。

锂在白云母—熔体间的分配系数小于1($D_{Li}^{Ms/melt} \sim 0.8$; Neves, 1997),因此在岩浆结晶分异过程中锂优先进入熔体中而不是晶体中。锂作为碱金属在硅酸盐熔体中扩散速度最快的元素(Mungall, 2002),在云母等富锂矿物结晶过程中一旦发生不平衡作用或锂含量存在结构上的差异,就会产生扩散作用,形成锂含量均一的云母(李洁, 2015)。而本文所研究的大港白云母花岗岩中的云母具有极其明显的成分环带,残余熔体结晶形成环带的可能性较小,极有可能是流体交代与熔体间锂元素的不平衡扩散导致。熊小林等(1998)发现氟在流体—熔体间的分配系数小于1,暗示氟优先在熔体中强烈富集。而赵博等(2015)发现在长英质岩浆体系中F过饱和的条件下 D_F 远大于1,即使在F不饱和岩浆体系中,由于氟在残余熔体中强烈富集,岩浆晚期也极可能会出溶富氟富锂热液流体。钠长石化强烈的岩体形成的原因是高浓度F可以促使熔体的平衡共节点移向钠长石移动,在钠长石化蚀变期间释放出大量REE、Li、Nb和Ta等元素进入热液流体(Kigai, 2011)。因此高氟花岗质岩浆体系中出溶出富氟富锂热液是完全可能的。

为了获得岩浆演化过程中成矿主体白云母花岗岩云母类矿物成分的系统变化特征,本次研究选择多个具有环带结构云母颗粒进行了从核部向边部的点剖面成分分析(图10)。结果表明核部相对富铝而贫硅,且具有明显负相关关系,暗示云母边部演化程度相对较高。从核部到边部F、 FeO^+ 和Li含量逐渐上升,表明边部成矿元素更富集。云母EPMA结果也显示Li和F具有正相关关系,且钠长石化等蚀变与锂含量呈正相关关系,表明大港锂矿床受岩浆演化和热液交代影响。刘昌实等(2005)则认为云母矿物环带结构是因为晶体与界面液体的化学平衡受到干扰,岩浆稳定环境下形成的云母常常具有尖锐平直的规则边界,而流体成因的云母常具有不完整、断续的边部带。大港锂矿床大部分云母族矿物具有不完整且断续的边界(图4和图10),表明其受到了强烈流体交代作用。且不同云母的 Si_2O

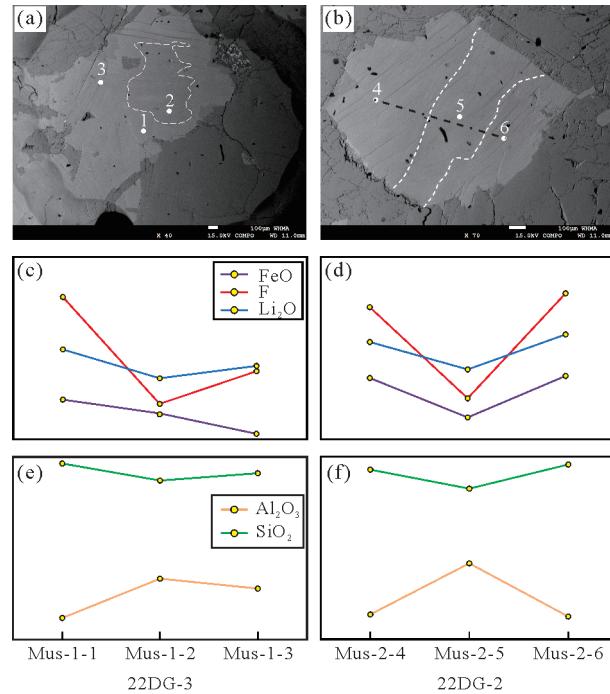


图10 大港锂矿床典型云母BSE照片及成分变化折线图

Fig.10 Representative BSE images and line chart of chemical compositions of micas from the Dagang Li deposit

和 Li_2O 与 K_2O 、 Na_2O 和F等元素呈明显正相关关系,表明岩浆演化晚期可能与富氟富碱热液的交代蚀变有关,并沉淀形成大量富锂云母。同类型矿床中,414矿床有关的雅山岩体云母也存在有明显核边结构,但其成分呈跳跃式升高或降低,且边部并不富集Li、Rb和F等元素,被认为是岩浆演化的结果,后期热液叠加作用并未对Li富集产生影响(李洁, 2015)。但大港云母成分变化趋势刚好与雅山岩体相反,这种差异可能与母岩浆及出溶热液流体中Li浓度变化有关。因此赣西地区高演化花岗岩型锂矿床形成于两种不同的成矿机制,即宜春414铌钽锂矿床主体形成于岩浆高程度结晶分异,而大港锂矿床则为岩浆结晶分异和热液交代两种机制结合的复合机制。

5.3 对花岗岩型锂矿床找矿勘查的启示

花岗岩型稀有金属矿床成矿作用主要与构造—岩浆活动及其后岩浆热液相关。燕山期华南地区发生有大量岩浆活动并形成了丰富的与花岗岩有关的稀有金属矿产资源,赣西地区更是形成了以含锂云母为特征的“锂都”。这些含锂或锂矿床均与高演化花岗岩具有密切的时空和成因关系,甚至与铌钽矿床(如松树岗锂铌钽矿床)(龙细友等, 2021)

和钨锡矿床(如大湖塘等矿床)(张勇等,2020;陈祥云等,2023)相伴生.这些成矿事件表明华南地区可能还发育有许多相似的与高演化花岗岩相关的富锂或含锂矿床,锂矿具有良好的找矿前景.

赣西地区已发现了大量和花岗岩相关的稀有金属矿床,如宜春 414 锑钽锂矿床、白水洞锂矿床、大港锂矿床和大湖塘锂钨矿床等.这些矿床均主要形成于晚侏罗世—早白垩世,且均发育相似岩性的成矿岩体(高演化的白云母花岗岩),表明它们可能具有相似的矿床成因.但富集机制存在差异,如宜春 414 锑钽锂矿床为岩浆演化产物,而以大港为代表的宜丰地区锂矿床为多期次岩浆演化和热液交代叠加机制.已探明宜丰地区锂矿床资源量已达世界级,较宜春 414 矿床具有更大的稀有金属资源潜力.目前该地区大港矿床已达超大型规模,白水洞、水南、茜坑、港口和狮子岭等锂矿床也达大型—超大型规模,甚至大湖塘钨矿床中发育大量的富锂云母而达到超大型锂矿规模,显示了赣西地区具有巨大的锂矿找矿前景.本次研究发现大港锂矿床发育多期次成矿特点,也进一步揭示了该类型矿床成矿岩体为多期岩浆作用形成的.因此需关注不同时代岩体,探讨不同期次岩体之间的关系及可能的锂矿化,为找矿勘查工作提供新方向.

6 结论

(1) 大港锂矿床成矿岩体为白云母花岗岩,锆石和锡石 U-Pb 厥定成岩成矿时代为 130~125 Ma 和~100 Ma,显示多期次成矿特征.

(2) 大港锂矿床锂元素主要赋存于富锂白云母、铁锂云母和锂云母中.这些云母通常具有明显环带特征,且边部异常富集锂,表明岩浆演化晚期受到富锂流体交代.

(3) 大港锂矿床多期次成矿作用及复合成矿机制的确定对于赣西乃至华南地区高演化花岗岩型锂矿床或含锂矿床找矿勘查工作有重要指示意义.

附表见官网(<http://www.earth-science.net>).

致谢:论文得到了编辑部及两位匿名审稿人的宝贵修改意见,室内处理数据得到了中国地质大学(武汉)苏慧敏副教授和李雯恬博士的帮助,在此一并表示诚挚的感谢.

References

Bartels, A., Vetere, F., Holtz, F., et al., 2011. Viscosity of

- Flux-Rich Pegmatic Melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(1): 51—60. <https://doi.org/10.1007/s00410-010-0582-3>
- Beus, A. A., Zalashkova, N. Y., 1964. Post-Magmatic High Temperature Metasomatic Processes in Granitic Rocks. *International Geology Review*, 6(4): 668—681. <https://doi.org/10.1080/00206816409473947>
- Breiter, K., Ďurišová, J., Hrstka, T., et al., 2017. Assessment of Magmatic vs. Metasomatic Processes in Rare-Metal Granites: A Case Study of the Cinovec/Zinnwald Sn-W-Li Deposit, Central Europe. *Lithos*, 292—293:198—217. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.08.015>
- Carr, P. A., Moreira, E., Neymark, L., et al., 2023. A LA-ICPMS Comparison of Reference Materials Used in Cassiterite U-Pb Geochronology. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 47(1):67—87. <https://doi.org/10.1111/ggr.12469>
- Chen, X.Y., Wu, J.H., Tang, W.X., et al., 2023. Newly Found Giant Granite-Associated Lithium Resources in the Western Jiangxi Province, South China. *Earth Science*, 48(10):3957—3960(in Chinese with English abstract).
- Cuney, M., Marignac, C., Weisbrod, A., 1992. The Beauvoir Topaz-Lepidolite Albite Granite (Massif Central, France); The Disseminated Magmatic Sn-Li-Ta-Nb-Be Mineralization. *Economic Geology*, 87(7): 1766—1794. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.7.1766>
- Ding, X., Su, K.L., Yan, H.B., et al., 2022. Effect of F-Rich Fluids on the A-Type Magmatism and Related Metal Mobilization: New Insights from the Fogang-Nankunshan-Yajishan Igneous Rocks in Southeast China. *Journal of Earth Science*, 33(3): 591—608. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1611-7>
- Duan, Z., Liao, S.B., Chu, P.L., et al., 2019. Zircon U-Pb Ages of the Neoproterozoic Jiuling Complex Granitoid in the Eastern Segment of the Jiangnan Orogen and Its Tectonic Significance. *Geology in China*, 46(3): 493—516(in Chinese with English abstract).
- Gahlan, H.A., Azer, M.K., Asimow, P.D., et al., 2023. Geochemistry, Petrogenesis and Alteration of Rare-Metal-Bearing Granitoids and Mineralized Silexite of the Al-Ghurayyah Stock, Arabian Shield, Saudi Arabia. *Journal of Earth Science*, 34(5): 1488—1510. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1708-z>
- Gao, P., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., 2016. Experimental Melts from Crustal Rocks: A Lithochemical Constraint on Granite Petrogenesis. *Lithos*, 266—267:133—157. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.10.005>

- Gulson, B. L., Jones, M. T., 1992. Cassiterite: Potential for Direct Dating of Mineral Deposits and a Precise Age for the Bushveld Complex Granites. *Geology*, 20(4): 355. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)0200355:cpfd-do>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)0200355:cpfd-do>2.3.co;2)
- Harrison, T. M., Watson, E. B., 1984. The Behavior of Apatite during Crustal Anatexis: Equilibrium and Kinetic Considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1467–1477. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90403-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90403-4)
- Huang, L.C., Jiang, S.Y., 2012. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Porphyric-Like Muscovite Granite in the Dahutang Tungsten Deposit, Jiangxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12):3887–3900(in Chinese with English abstract).
- Huang, X. B., Yu, Z. Z., Zou, G. Q., 2003. Sedimentary Features of the Mesoproterozoic Shuangqiaoshan Group in Northwestern Jiangxi. *Geological Bulletin of China*, 22(1):43–49(in Chinese with English abstract).
- Jiang, S.Y., Su, H.M., Xiong, Y.Q., et al., 2020. Spatial-Temporal Distribution, Geological Characteristics and Ore-Formation Controlling Factors of Major Types of Rare Metal Mineral Deposits in China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(6): 1757–1773. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14595>
- Jiang, S.Y., Wang, C.L., Zhang, L., et al., 2021. In Situ Trace Element Tracing and Isotopic Dating of Pegmatite Type Lithium Deposits: An Overview. *Acta Geologica Sinica*, 95(10):3017–3038(in Chinese with English abstract).
- Kigai, I. N., 2011. Redox Problems in the “Metallogenetic Specialization” of Magmatic Rocks and the Genesis of Hydrothermal Ore Mineralization. *Petrology*, 19(3): 303–321. <https://doi.org/10.1134/S0869591111030052>
- Leech, M. L., 2008. Does the Karakoram Fault Interrupt Mid-Crustal Channel Flow in the Western Himalaya? *Earth and Planetary Science Letters*, 276(3–4): 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.10.006>
- Li, J., 2015. Mineralogical Constraints on Magmatic and Hydrothermal Evolutions of the Mesozoic Rare-Metal Granites in South China (Dissertation). The University of Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Li, J.H., Dong, S.W., Zhang, Y.Q., et al., 2016. New Insights into Phanerozoic Tectonics of South China: Part 1, Polyphase Deformation in the Jiuling and Lianyunshan Domains of the Central Jiangnan Orogen. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(4): 3048–3080. <https://doi.org/10.1002/2015jb012778>
- Li, J. K., Liu, X. F., Wang, D. H., 2014. The Metallogenetic Regularity of Lithium Deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269–2283(in Chinese with English abstract).
- Li, P., Li, J. K., Liu, X., et al., 2020. Geochronology and Source of the Rare-Metal Pegmatite in the Mufushan Area of the Jiangnan Orogenic Belt: A Case Study of the Giant Renli Nb-Ta Deposit in Hunan, China. *Ore Geology Reviews*, 116:103237. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103237>
- Li, P., Liu, X., Li, J. K., et al., 2019. Petrographic and Geochemical Characteristics of Renli-Chuanziyuan No.5 Pegmatite, NE Hunan, and Its Metallogenetic Age. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1374–1391(in Chinese with English abstract).
- Li, X.H., Tang, G.Q., Gong, B., et al., 2013. Qinghu Zircon: A Working Reference for Microbeam Analysis of U-Pb Age and Hf and O Isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 58(36):4647–4654. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5932-x>
- Li, Y. J., Wei, J. H., Zhang, W. S., et al., 2021. Microplagioclase Pegmatite-Type Nb-Ta Mineralization Newly Discovered in the Northwestern Margin of Mufushan Complex Batholith. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(2): 208–210(in Chinese with English abstract).
- Li, Y. J., Zhang, R.Q., Ji, H., et al., 2022. Chemistry and U-Pb Geochronology of Cassiterite in the Xiasai Deposit, Central Yidun Terrane (SW China): Link between Sn and Ag-Pb-Zn Mineralisation. *Ore Geology Reviews*, 149: 105106. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105106>
- Liu, C.S., Chen, X.M., Wang, R.C., et al., 2005. Isotopic Dating and Origin of Complexly Zoned Micas for A-Type Nankunshan Aluminous Granite. *Geological Review*, 51(2):193–200, 227(in Chinese with English abstract).
- Liu, T., Jiang, S. Y., Su, H. M., et al., 2022. Petrogenesis of Ta-Nb Mineralization Related Early Cretaceous Lingshan Granite Complex, Jiangxi Province, Southeast China: Constraints from Geochronology, Whole-Rock and In-Situ Mineral Geochemistry, and Nd-Hf Isotopic Compositions. *Ore Geology Reviews*, 143: 104788. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104788>
- Liu, X. C., Zhang, D. H., Yang, J. W., et al., 2023. High Heat Producing Granites and Prolonged Extraction of Tungsten and Tin from Melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 348: 340–354. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.03.012>

- 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. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Long, X. Y., Chen, Z. Q., Liu, Z. J., et al., 2021. Contrasting Metallogenic Geological Characteristics of Yashan 414 and Lingshan Songshugang Ta-Nb Deposits in Jiangxi. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 44(3):239-248(in Chinese with English abstract).
- Mao, J.W., Xie, G.Q., Guo, C.L., et al., 2008. Spatial-Temporal Distribution of Mesozoic Ore Deposits in South China and Their Metallogenic Settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510-526(in Chinese with English abstract).
- Mungall, J.E., 2002. Empirical Models Relating Viscosity and Tracer Diffusion in Magmatic Silicate Melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(1):125-143. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(01\)00736-0](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(01)00736-0)
- Neves, L., 1997. Trace Element Content and Partitioning between Biotite and Muscovite of Granitic Rocks: A Study in the Viseu Region (Central Portugal). *European Journal of Mineralogy*, 9(4), 849-858. <https://doi.org/10.1127/ejm/9/4/0849>
- Nie, X. L., Wang, S. L., Liu, S., et al., 2022. Geological and Geochemical Characteristics of the Xikeng Lithium Deposit and the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Chronology of Lepidolite of the Deposit in Jiangxi Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 42(3): 285-294(in Chinese with English abstract).
- Sami, M., El Monsef, M.A., Abart, R., et al., 2022. Unraveling the Genesis of Highly Fractionated Rare-Metal Granites in the Nubian Shield via the Rare-Earth Elements Tetrad Effect, Sr-Nd Isotope Systematics, and Mineral Chemistry. *ACS Earth and Space Chemistry*, 6(10): 2368-2384. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.2c00125>
- Schmitt, A.K., Trumbull, R.B., Dulski, P., et al., 2002. Zr-Nb-REE Mineralization in Peralkaline Granites from the Amis Complex, Brandberg (Namibia): Evidence for Magmatic Pre-Enrichment from Melt Inclusions. *Economic Geology*, 97(2):399-413. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.2.399>
- Shu, L.S., 2012. An Analysis of Principal Features of Tectonic Evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035-1053(in Chinese with English abstract).
- Shu, L.S., Sun, Y., Wang, D.Z., et al., 1998. Mesozoic Domaining Extensional Tectonics of Wugongshan, South China. *Science in China (Series D)*, 41(6):601-608. <https://doi.org/10.1007/bf02878742>
- Tischendorf, G., Gottesmann, B., Förster, H.J., et al., 1997. On Li-Bearing Micas: Estimating Li from Electron Microprobe Analyses and an Improved Diagram for Graphical Representation. *Mineralogical Magazine*, 61(6): 809-834.
- Tu, J.R., Cui, Y.R., Zhou, H.Y., et al., 2019. Review of U-Pb Dating Methods for Cassiterite. *Geological Survey and Research*, 42(4): 241-249(in Chinese with English abstract).
- U.S. Geological Survey, 2022. Mineral Commodity Summaries 2022. U.S. Geological Survey, Virginia, U.S.A..
- Vasyukova, O., Williams-Jones, A., 2020. Partial Melting, Fractional Crystallisation, Liquid Immiscibility and Hydrothermal Mobilisation—A ‘Recipe’ for the Formation of Economic A-Type Granite-Hosted HFSE Deposits. *Lithos*, 356-357:105300. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105300>
- Wang, C.H., Wang, D.H., Chen, C., et al., 2019. Progress of Research on the Shiliing Rare Metals Mineralization from Jiuling-Type Rock and Its Significance for Prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1359-1373(in Chinese with English abstract).
- Wang, D., Wang, X. L., Cai, Y., et al., 2017. Heterogeneous Conservation of Zircon Xenocrysts in Late Jurassic Granitic Intrusions within the Neoproterozoic Jiuling Batholith, South China: A Magma Chamber Growth Model in Deep Crustal Hot Zones. *Journal of Petrology*, 58(9): 1781-1810. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx074>
- Wang, R. C., Wu, B., Xie, L., et al., 2021. Global Temporal-Spatial Distribution of Rare-Metal Mineralization and Continental Evolution. *Acta Geologica Sinica*, 95(1): 182-193(in Chinese with English abstract).
- Wang, X. L., Zhou, J. C., Wan, Y. S., et al., 2013. Magmatic Evolution and Crustal Recycling for Neoproterozoic Strongly Peraluminous Granitoids from Southern China: Hf and O Isotopes in Zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 366: 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.02.011>
- White, L. T., Ireland, T. R., 2012. High-Uranium Matrix Effect in Zircon and Its Implications for SHRIMP U-Pb Age Determinations. *Chemical Geology*, 306-307: 78-91. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.025>
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., et al., 1995. Three Natu-

- ral Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.1995.tb00147.x>
- Williams, I.S., Herget, J.M., 2000. U-Pb Dating of Tasmanian Dolerites: A Cautionary Tale of SHRIMP Analysis of High-U Zircon. In: Woodhead, J.D., Herget, J.M., Noble, W.P., eds., Beyond 2000: New Frontiers in Isotope Geoscience. Lorne, Abstract Proceedings, 185–188.
- Wu, F.Y., Guo, C.L., Hu, F.Y., et al., 2023. Petrogenesis of the Highly Fractionated Granites and Their Mineralizations in Nanling Range, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 39(1): 1–36 (in Chinese with English abstract).
- Wu, M.Q., Samson, I.M., Qiu, K.F., et al., 2021. Concentration Mechanisms of Rare Earth Element-Nb-Zr-Be Mineralization in the Baerzhe Deposit, Northeast China: Insights from Textural and Chemical Features of Amphibole and Rare Metal Minerals. *Economic Geology*, 116(3): 651–679. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4789>
- Xie, L., Liu, Y., Wang, R.C., et al., 2019. Li-Nb-Ta Mineralization in the Jurassic Yifeng Granite-Aplite Intrusion within the Neoproterozoic Jiuling Batholith, South China: A Fluid-Rich and Quenching Ore-Forming Process. *Journal of Asian Earth Sciences*, 185: 104047. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104047>
- Xiong, X.L., Zhao, Z.H., Zhu, J.C., et al., 1998. Experiment on the Fluid/Melt Partition of Fluorine in the System Albite Granite-H₂O-Hf. *Geochimica*, 27(1): 66–73 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M., Romer, R.L., Yang, Y.H., et al., 2022. U-Pb Isotopic Dating of Cassiterite: Development of Reference Materials and In Situ Applications by LA-SF-ICP-MS. *Chemical Geology*, 593: 120754. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120754>
- Yang, Z.L., Qiu, J.S., Xing, G.F., et al., 2014. Petrogenesis and Magmatic Evolution of the Yashan Granite Pluton in Yichun, Jiangxi Province, and Their Constraints on Mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 88(5): 850–868 (in Chinese with English abstract).
- Yin, R., Huang, X.L., Wang, R.C., et al., 2022. Rare-Metal Enrichment and Nb-Ta Fractionation during Magmatic-Hydrothermal Processes in Rare-Metal Granites: Evidence from Zoned Micas from the Yashan Pluton, South China. *Journal of Petrology*, 63(10): egac093. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac093>
- Zhang, L., Jiang, S.Y., 2021. Two Episodic Nb-Ta Mineralization Events and Genesis of the Zhaojinggou Rare-Metal Deposit, North Margin of the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 131: 103994. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.103994>
- Zhang, R.Q., Lehmann, B., Seltmann, R., et al., 2017. Cassiterite U-Pb Geochronology Constrains Magmatic-Hydrothermal Evolution in Complex Evolved Granite Systems: The Classic Erzgebirge Tin Province (Saxony and Bohemia). *Geology*, 45(12): 1095–1098. <https://doi.org/10.1130/g39634.1>
- Zhang, Y., Pan, J.Y., Ma, D.S., 2020. Lithium Element Enrichment and Inspiration for Prospecting for Rare-Metal Mineralization in the Dahutang Tungsten Deposit: Constraints from Mineralogy and Geochemistry of Hydrothermal Alteration. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3321–3342 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.H., Zhang, D., He, X.L., et al., 2021. Biotite Granodiorite Age of Jiuling Complex in Jiangxi Province and Its Limitation on the Collision and Splicing Time of the Yangtze and Cathay Plates. *Geology in China*, 48(5): 1562–1579 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, B., Zhang, D.H., Zhang, R.Z., et al., 2015. The Progress of Geochemical Properties and Metallogenetic Effect of F-Rich Silicate Melt-Solution Fluid System. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 50(1): 222–240 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q., Jiang, Y.H., Zhao, P., et al., 2012. SHRIMP U-Pb Dating on Hydrothermal Zircons; Evidence for an Early Cretaceous Epithermal Event in the Middle Jurassic Dexing Porphyry Copper Deposit, Southeast China. *Economic Geology*, 107(7): 1507–1514. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.7.1507>
- Zhou, X.H., Chen, R., Zhang, W., et al., 2019. Zircon SHRIMP Geochronology and Hf Isotopic Characteristics of Volcanic Rocks from the Yifeng Formation in the Southern Margin of the Jiuling Uplift in the Jiangnan Orogen. *Acta Geologica Sinica*, 93(5): 1069–1080 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈祥云, 吴俊华, 唐维新, 等, 2023. 赣西地区新探明巨量花岗岩型锂矿资源. *地球科学*, 48(10): 3957–3960.
- 段政, 廖圣兵, 褚平利, 等, 2019. 江南造山带东段新元古代九岭复式岩体锆石U-Pb年代学及构造意义. *中国地质*, 46(3): 493–516.
- 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. *岩石学报*, 28(12): 3887–3900.
- 黄修保, 余忠珍, 邹国庆, 2003. 赣西北地区中元古界双桥山群沉积学特征. *地质通报*, 22(1): 43–49.

- 蒋少涌,王春龙,张璐,等,2021.伟晶岩型锂矿中矿物原位微区元素和同位素示踪与定年研究进展.地质学报,95(10):3017—3038.
- 李建康,刘喜方,王登红,2014.中国锂矿成矿规律概要.地质学报,88(12):2269—2283.
- 李洁,2015.华南中生代稀有金属花岗岩岩浆演化与热液作用过程的矿物学约束(博士学位论文).广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所).
- 李鹏,刘翔,李建康,等,2019.湘东北仁里—传梓源矿床 5 号伟晶岩岩相学、地球化学特征及成矿时代.地质学报,93(6):1374—1391.
- 李艳军,魏俊浩,张文胜,等,2021.幕阜山复式岩基西北缘新发现微斜长石伟晶岩型铌钽矿化.地质科技通报,40(2):208—210.
- 刘昌实,陈小明,王汝成,等,2005.广东南昆山 A 型花岗岩定年和环带云母研究.地质论评,51(2): 193—200,227.
- 龙细友,陈正钱,刘志军,等,2021.江西雅山 414 和灵山松树岗钽铌矿成矿特征对比分析研究.东华理工大学学报(自然科学版),44(3):239—248.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等,2008.华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境.高校地质学报,14(4): 510—526.
- 聂晓亮,王水龙,刘爽,等,2022.江西茜坑锂矿床地质地球化学特征与锂云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究.矿物学报,42(3):285—294.
- 舒良树,2012.华南构造演化的基本特征.地质通报,31(7): 1035—1053.
- 涂家润,崔玉荣,周红英,等,2019.锡石 U-Pb 定年方法评述.地质调查与研究,42(4):241—249.
- 王成辉,王登红,陈晨,等,2019.九岭式狮子岭岩体型稀有金属成矿作用研究进展及其找矿意义.地质学报,93(6): 1359—1373.
- 王汝成,邬斌,谢磊,等,2021.稀有金属成矿全球时空分布与大陆演化.地质学报,95(1):182—193.
- 吴福元,郭春丽,胡方泱,等,2023.南岭高分异花岗岩成岩与成矿.岩石学报,39(1):1—36.
- 熊小林,赵振华,朱金初,等,1998.钠长花岗岩-H₂O-HF 体系中流体/熔体间氟的分配实验研究.地球化学,27(1): 66—73.
- 杨泽黎,邱检生,邢光福,等,2014.江西宜春雅山花岗岩体的成因与演化及其对成矿的制约.地质学报,88(5): 850—868.
- 张勇,潘家永,马东升,2020.赣西北大湖塘钨矿富锂—云母化岩锂元素富集机制及其对锂等稀有金属找矿的启示.地质学报,94(11):3321—3342.
- 张志辉,张达,贺晓龙,等,2021.江西九岭杂岩体中黑云母花岗闪长岩年龄及对扬子和华夏板块碰撞拼合时间限定.中国地质,48(5):1562—1579.
- 赵博,张德会,张荣臻,等,2015.富 F 熔体—溶液流体体系的地球化学性状及成矿效应研究进展.地质科学,50(1): 222—240.
- 周效华,陈荣,张炜,等,2019.江南造山带九岭南缘宜丰岩组火山岩锆石 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素特征.地质学报,93(5):1069—1080.