

引用格式: 党飞鹏, 吕川, 唐湘生, 等, 2023. 赣西北洞上铀矿床产铀花岗岩的时代、岩石地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质力学学报, 29 (6): 898–914. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023028](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023028)

Citation: DANG F P, LYU C, TANG X S, et al., 2023. Geochronology and petrogeochemical characteristics of U-bearing granites in the Dongshang deposit, northwestern Jiangxi, China and its geological significance [J]. Journal of Geomechanics, 29 (6): 898–914. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023028](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023028)

赣西北洞上铀矿床产铀花岗岩的时代、岩石地球化学特征及其地质意义

党飞鹏¹, 吕川¹, 唐湘生¹, 张勇^{2,3}, 肖志斌⁴, 李志鹏¹, 汤君阳¹,
张涛¹

DANG Feipeng¹, LYU Chuan¹, TANG Xiangsheng¹, ZHANG Yong^{2,3}, XIAO Zhibin⁴, LI Zhipeng¹,
TANG Junyang¹, ZHANG Tao¹

1. 核工业二七〇研究所, 江西 南昌 330200;
2. 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
3. 东华理工大学地质调查研究院, 江西 南昌 330013;
4. 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170

1. No.270 Research Institute, China National Nuclear Corporation, Nanchang 330200, Jiangxi, China;
2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, Nanchang 330013, Jiangxi, China;
3. Institute of Geological Survey of East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;
4. Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

Geochronology and petrogeochemical characteristics of U-bearing granites in the Dongshang deposit, northwestern Jiangxi, China and its geological significance

Abstract: The Dongshang Uranium Deposit is situated in the southern section of the Ganfang Pluton in the Jiuling Orogenic Belt of northwestern Jiangxi Province. The U-bearing granites consist mainly of medium- to coarse-grained, porphyritic biotite(binary) granite. Through zircon and monazite U-Pb geochronology, petrology, and rock geochemistry studies, the U-bearing granites' age, source characteristics, and rock genesis were determined, and their uranium metallogenic potential was also discussed. The LA-ICP-MS analysis showed that the zircon U-Pb intercept and weighted average ages are both 152 ± 1 Ma, and the monazite U-Pb intercept and weighted average ages are 151 ± 1 Ma and 151 ± 2 Ma, respectively, indicating the formation of the U-bearing granites during the early Yanshan period. The major elements exhibit the characteristic of high silica content (SiO_2 ranging from 72.1% to 75.6%), high alkalis content ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ranging from 7.26% to 8.43%), potassium-rich and sodium-poor ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.07$ to 1.42), high aluminum ($\text{A}/\text{CNK} = 1.12$ to 1.29), low titanium content (TiO_2 ranging from 0.07% to 0.17%), and iron-poor magnesium (FeO^T ranging from 0.75% to 1.28%, MgO ranging from 0.19% to 0.31%), classifying the U-bearing granites as high potassium calcalkaline peraluminous granites. Trace elements Ba, Sr, Nb, and Ti are depleted, while Rb, U, Pb, and Ta are enriched, representing a typical low Ba, Sr granite. The total rare earth elements (ΣREE) are relatively low ($\Sigma\text{REE} = 21.6 \times 10^{-6}$ to 50.7×10^{-6}), exhibiting a right-dipping light rare earth enrichment pattern with a prominent negative Eu anomaly, which belongs to S-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42062006, 42273028); 核资源与环境国家重点实验室开放基金项目 (2020NRE08); 中国核工业地质局项目 (202231, 202028-2)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants No. 42062006 and 42273028), the Open-access Fund of the State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (Grant No. 2020NRE08), and the Project of the China Nuclear Geology (Grants No. 202231 and 202028-2)

第一作者: 党飞鹏 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事铀矿地质找矿勘查与研究。E-mail: feipengdang@163.com

通讯作者: 张勇 (1983—), 男, 博士, 副教授, 从事铀矿地质教学与科研工作。E-mail: zhycy2004@163.com

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-09-26; 责任编辑: 王婧

type granites. Based on geochronology and rock geochemical features, it's suggested that the Dongshang U-bearing granites were formed during the syn-collision compressional setting, resulting from the partial melting of the muscovite-rich metapelites of the Anlelin Formation in the Neoproterozoic Shuangqiaoshan Group. High uranium content, high Rb/Sr ratios, Th/U ratios less than 3, and high zircon uranium contents indicate the potential for uranium ore-forming conditions within these granites.

Keywords: zircon U-Pb dating; monazite U-Pb dating; petrogenesis; uranium metallogenic potential; Ganfang Pluton; northwestern Jiangxi province

摘要: 洞上铀矿床位于赣西北九岭岩基南部甘坊岩体内,产铀花岗岩以中粗粒斑状黑(二)云母花岗岩为主。通过锆石及独居石 U-Pb 年代学、岩相学和岩石地球化学研究,确定产铀花岗岩的形成时代、源区属性与岩石成因,探讨其铀成矿潜力。LA-ICP-MS 分析结果显示,锆石 U-Pb 下交点年龄和加权平均年龄均为 152 ± 1 Ma,独居石 U-Pb 下交点年龄和加权平均年龄分别为 151 ± 1 Ma 和 151 ± 2 Ma,表明产铀花岗岩形成于燕山早期。主量元素具有高硅(SiO_2 含量为 $72.1\% \sim 75.6\%$)、高碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 $7.26\% \sim 8.43\%$)、富钾贫钠($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.07 \sim 1.42$)、高铝($A/\text{CNK} = 1.12 \sim 1.29$)、低钛(TiO_2 含量为 $0.07\% \sim 0.17\%$)、贫铁镁(FeO^T 含量为 $0.75\% \sim 1.28\%$ 、 MgO 含量为 $0.19\% \sim 0.31\%$)特征,属高钾钙碱性系列过铝质花岗岩;微量元素 Ba、Sr、Nb、Ti 亏损,Rb、U、Pb、Ta 富集,属典型的低 Ba、Sr 花岗岩;稀土总量较低($\sum \text{REE} = 21.6 \times 10^{-6} \sim 50.7 \times 10^{-6}$),配分曲线为右倾的轻稀土富集型,Eu 负异常明显,属 S 型花岗岩。结合年代学和岩石地球化学特征,认为洞上产铀花岗岩形成于燕山早期同碰撞造山的主挤压阶段,是新元古界双桥山群安乐林组富白云母的变泥质岩部分熔融的产物。富铀、Rb/Sr 比值高、Th/U 比值小于 3、锆石铀含量高特征指示该花岗岩为产铀花岗岩,具有提供铀源的条件与潜力。

关键词: 锆石 U-Pb 定年;独居石 U-Pb 定年;岩石成因;铀成矿潜力;甘坊岩体;赣西北

中图分类号: P58; P534.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 06-0898-17

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023028

0 引言

九岭地区位于九岭-鄱公山钨锡多金属成矿带的西段,是江西省重要的 W-Sn-Cu-Mo-Li-Nb-Ta-U 矿集区,已探明有色金属、稀有金属、贵金属和放射性矿产 200 余处。九岭地区的铀矿找矿工作成果丰硕,该区北部落实了修水铀矿化集中区,发现了董坑、保峰源、大椿、白土、洞下等铀矿床,矿化类型为碳硅泥岩型(赵凤民, 2011);南部宜丰-奉新一带开展了放射性伽玛测量和铀矿普查,仅发现了洞上铀矿床和茅坪、东槽铀矿化点,矿化类型为花岗岩型硅质脉亚型,均分布在燕山期甘坊岩体内。已有研究集中在洞上铀矿床地质特征、矿化特征、矿化富集规律及控矿因素等方面,认为铀矿体定位在北北东向甘坊-兰溪硅化断裂内及其上下盘,赋矿围岩为中粗粒斑状黑(二)云母花岗岩(窦小平, 2004; 窦小平等, 2015),但产铀花岗岩的形成时代及成因尚不清楚。为此,文章在野外地质调查的基础上,对洞上铀矿床产铀花岗岩进行岩相学、年代学及岩石地球化学系统分析,并结合区域

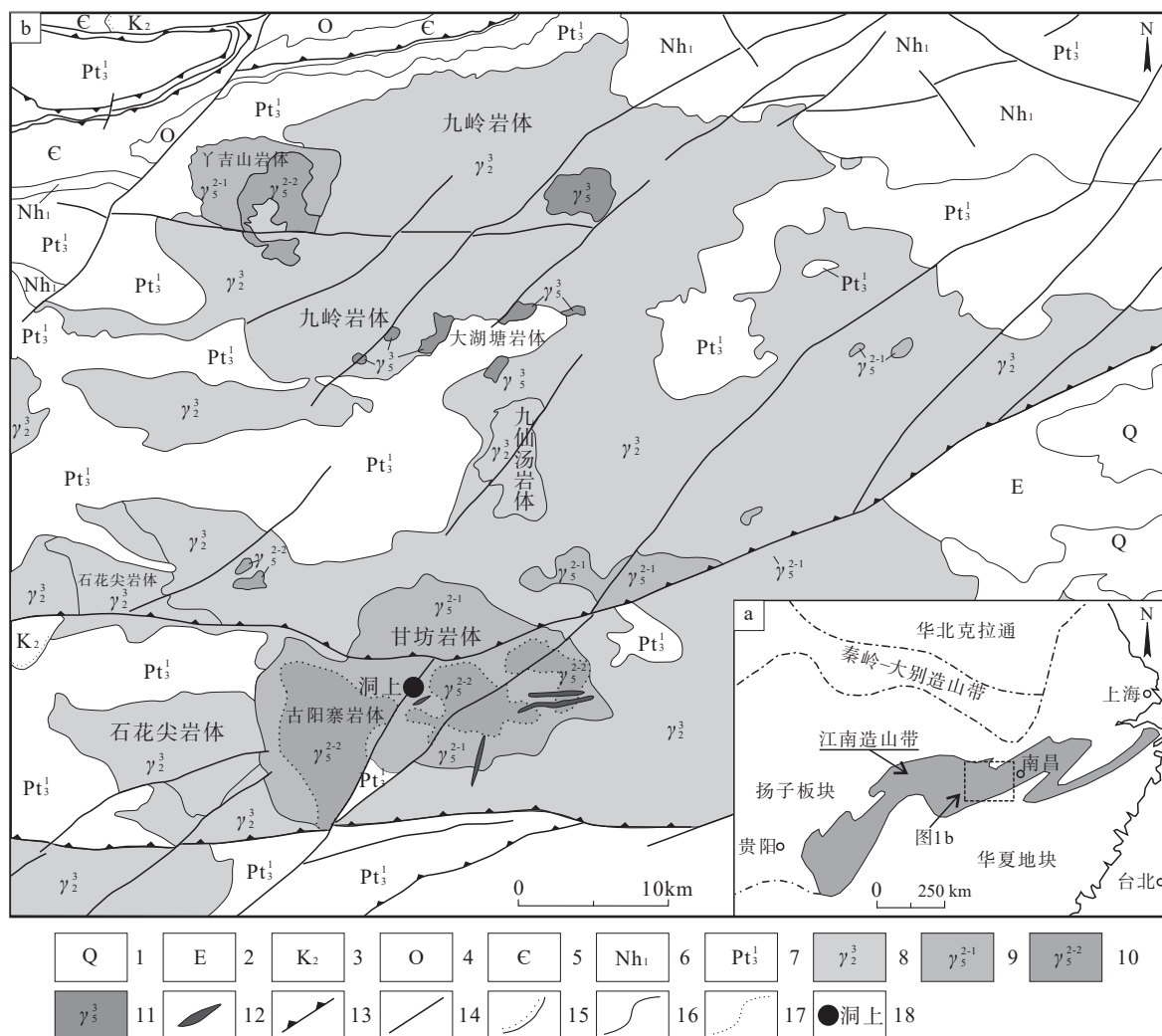
构造演化,探讨产铀花岗岩形成的构造背景与产铀潜力。

1 研究区地质特征

九岭地区位于扬子板块东南缘江南造山带中段,基底地层为新元古界双桥山群浅变质岩,盖层为南华纪和震旦纪一中三叠世的海相沉积地层、白垩纪-古近纪陆相地层(王迪, 2017; 段政等, 2019; 图 1)。其中,双桥山群(Pt_3^1)广泛出露于九岭地区北部、西部和南部,是断陷环境中形成的海相泥砂质碎屑岩-火山碎屑岩-喷发熔岩组合(蒋少涌等, 2015; 项新葵等, 2015a, 2015b)。南华系(Nh_1)—奥陶系(O)分布于北部(图 1b),为一套连续的碳酸盐岩-硅质岩沉积组合,是海相沉积盖层。上三叠统(T_3)为海陆交互的含煤建造,下中侏罗统($\text{J}_{1,2}$)为河湖相沉积,上白垩统(K_2)—新近系(N)为红色岩系,分布在西部和南部,是陆相沉积盖层。基底地层发生了褶皱作用,形成了九岭复式紧密线型褶皱,轴线呈近东西(北东东)向。断裂构造以近东西(北东东)向压扭性断裂和北东、北北东向走滑断裂

为主, 次为北西向、近南北向硅化断裂。岩浆岩以晋宁期中—酸性侵入岩和燕山期酸性侵入岩套、岩枝、岩脉为主, 前者侵位于双桥山群中, 形成了巨大的九岭岩基, 整体呈近东西向展布, 出露面积大于4000 km², 是华南最大的花岗质岩基之一, 也是钨多

金属矿化的赋矿围岩; 后者侵位于九岭岩基或双桥山群中, 规模大小不一, 与北部钨—锡—铜矿化及南部铀—钼—钽—锂等金属成矿作用关系密切(蒋少涌等, 2015; 张勇等, 2017, 2019, 2020; 张勇, 2018; 张达等, 2021)。



1—第四系; 2—古近系; 3—上白垩统; 4—奥陶系; 5—寒武系; 6—下南华统; 7—新元古界双桥山群; 8—晋宁期花岗岩; 9—燕山早期第一阶段花岗岩; 10—燕山早期第二阶段花岗岩; 11—燕山晚期花岗岩; 12—细晶岩脉、花岗斑岩脉; 13—推滑覆断层、剥离断层; 14—断裂构造; 15—不整合界线; 16—地质界线; 17—岩相界线; 18—铀矿床及名称

a—大地构造位置简图(张勇, 2018); b—铀矿地质简图

图1 九岭地区大地构造位置及铀矿地质简图

Fig. 1 Geotectonic location map and uranium geological map of Jiuling area

(a) Geotectonic location map (Zhang, 2018); (b) Uranium geological map

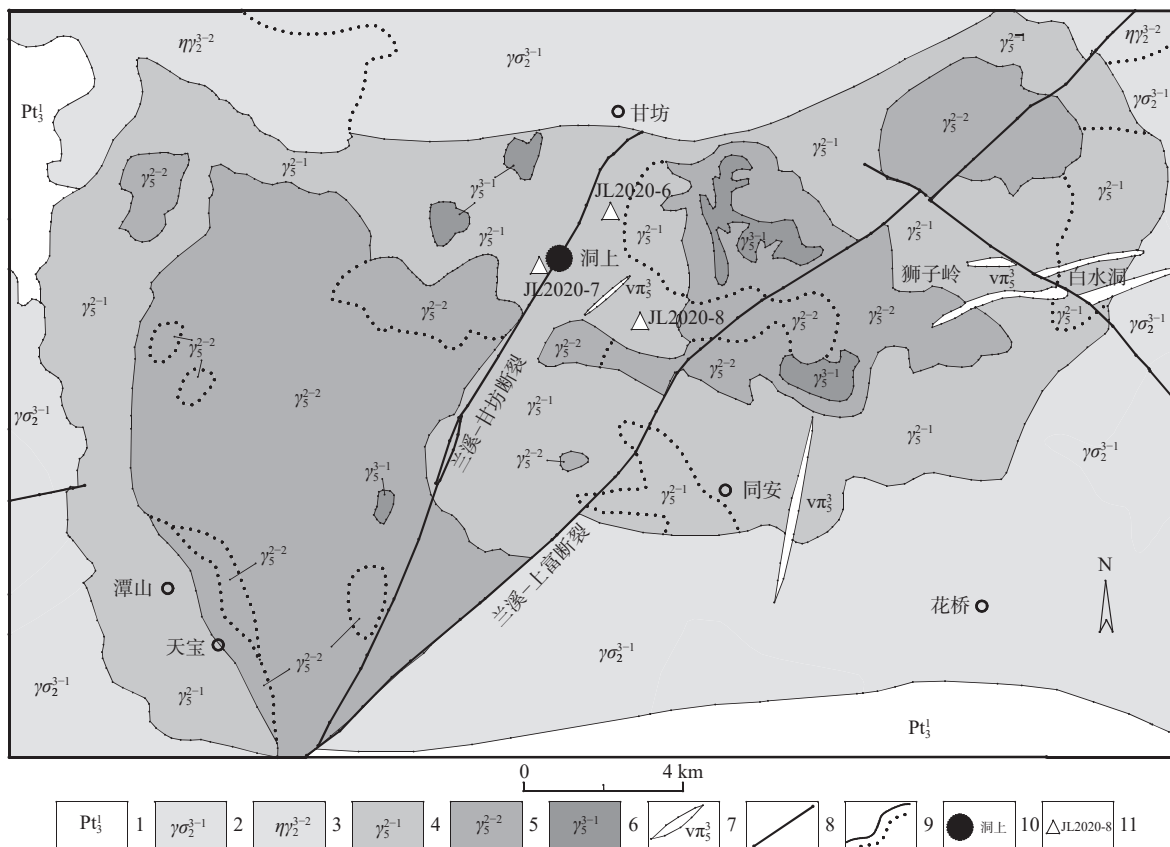
1—Quaternary; 2—Paleogene; 3—Upper Cretaceous; 4—Ordovician; 5—Cambrian; 6—Lower Nanhuan System; 7—Neoproterozoic Shuangqiaoshan Group; 8—Granite of Jinning Period; 9—Granite of first stage in Early Yanshanian; 10—Granite of second stage in Early Yanshanian; 11—Granite of Late Yanshanian; 12—fine-grain dike or granite-porphphyry vein; 13—nappe structure; 14—fault structure; 15—unconformity; 16—geological boundary; 17—lithologic interface; 18—uranium deposit

洞上铀矿床位于九岭地区南部燕山期甘坊岩体中部, 主要受北北东向兰溪—甘坊硅化断裂控制

(图1, 图2)。矿床内主要出露燕山早期中粗粒斑状黑云母花岗岩、中粗粒二云母花岗岩和燕山晚期细

晶岩、细粒白云母花岗岩。兰溪-甘坊断裂斜贯该区,带内常见灰色—红褐色硅质-玉髓脉、硅化角砾岩、硅化碎裂岩等,上下盘次一级硅化断裂(裂隙)发育,多呈带组状。北北东向断裂控制着铀矿体的产状、规模、形态等。铀矿化产于中粗粒斑状黑

(二)云母花岗岩中,硅化、赤铁矿化、黄铁矿化、萤石化等热液蚀变发育,地表常见钙铀云母、铜铀云母。铀矿石以沥青铀矿-硫化物型和沥青铀矿-萤石型为主。



1—新元古界双桥山群; 2—晋宁期花岗闪长岩; 3—晋宁期二长花岗岩; 4—燕山早期第一阶段花岗岩; 5—燕山早期第二阶段花岗岩; 6—燕山晚期第一阶段花岗岩; 7—细晶岩脉、花岗斑岩脉; 8—断裂构造; 9—地质界线、岩相界线; 10—铀矿床及名称; 11—取样位置及编号

图2 洞上地区铀矿地质简图(据周建廷等, 2011; 秦程, 2018 修编)

Fig. 2 Uranium geological map of Dongshang deposit(modified after Zhou et al., 2011; Qin, 2018)

1—Neoproterozoic Shuangqiaoshan Group; 2—granodiorite of Jinning Period; 3—monzonitic granite of Jinning Period; 4—granite of first stage in Early Yanshanian; 5—granite of second stage in Early Yanshanian; 6—granite of Late Yanshanian; 7—fine-grain dike or granite-porphry vein; 8—fault structure; 9—geological boundary or lithologic interface; 10—uranium deposit; 11—sampling point and number

2 样品和分析方法

洞上产铀花岗岩采样位置见图2。LA-ICP-MS 锆石和独居石 U-Pb 定年样品选自 JL2020-7 样品。在岩石学观察的基础上,选取新鲜样品(JL2020-6、JL2020-7、JL2020-8)进行全岩主微量元素及稀土元素分析。

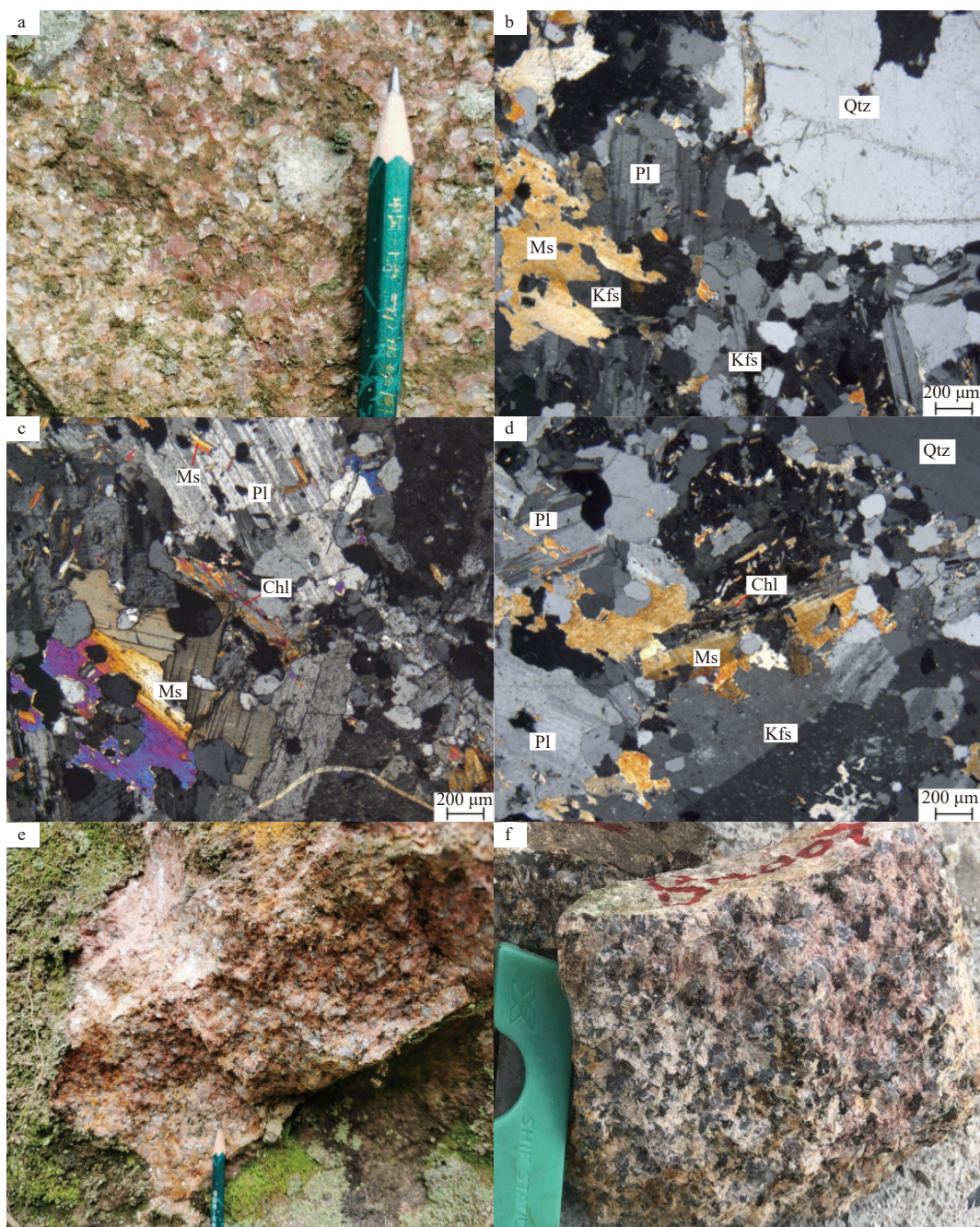
2.1 岩相学特征

中粗粒斑状黑(二)云母花岗岩,呈灰白色至浅

肉红色(图3a),似斑状结构,块状构造。矿物组成含量分别为石英(30%~35%)、钾长石(20%~35%)、斜长石(15%~30%)、黑云母(5%~15%)和白云母(0%~10%),副矿物有磷灰石、锆石、独居石等。镜下观察,具似斑状结构,斑晶为钾长石和石英。钾长石含量为10%~15%,呈宽板状,卡氏双晶及净边结构,大小(4~6)mm×(6~12)mm,以条纹长石、正长石为主;石英粒径为5mm,部分可见裂纹(图3b)。基质为斜长石、微斜长石、石英、黑云母及白云母。斜长石呈半自形—自形柱状,以更钠长石为主,

部分被白云母交代(图 3c)。石英呈他形粒状,具有波状消光。黑云母呈板状,弱绿泥石化;白云母分为板状和细小针状、蠕虫状两期,可见绿泥石和白

云母组成的黑云母假晶(图 3d)。铀矿化部位常见赤铁矿化、硅化、水云母化、萤石化等热液蚀变(图 3e、3f)。



Qtz—石英; Pl—斜长石; Ms—白云母; Chl—绿泥石; Kfs—钾长石

a—浅肉红色中粗粒斑状黑(二)云母花岗岩; b—似斑状结构, 图中石英斑晶超出视域(+); c—斜长石被白云母交代, 绿泥石呈黑云母假晶(+); d—绿泥石和白云母组成黑云母的假晶(+); e—野外露头, 发育钾长石化、褐铁矿化; f—岩石手标本, 见钾长石化、水云母化

图 3 洞上产铀花岗岩岩石学特征

Fig. 3 Petrological characteristics of the U-bearing granite in Dongshang deposit

(a) medium-coarse biotite granite; (b) orphyritic texture (+); (c) muscovitization (+); (d) chloritization and muscovitization (+); (e) K-alteration and ferritization of geological outcrop; (f) K-alteration and hydromicization of hand specimens

2.2 主微量元素及稀土元素分析

主量元素检测采用四硼酸锂-偏硼酸锂混合熔剂,与样品混匀后在1150~1250℃下熔融并铸成玻璃熔片,借助岛津X荧光光谱仪进行测定。X光管最大电压40 kV,最大电流95 mA,利用康普顿射线为内标校正基体效应。各元素含量测量范围介于0.002%~99%之间。微量及稀土元素采用电感耦合等离子体质谱法测定,样品前处理方式为封闭溶矿,用氢氟酸、高氯酸、硝酸、盐酸等处理,检测仪器为美国PerkinElmer公司NexION2000B型电感耦合等离子体质谱仪,选择不同质核比的离子检测某个离子的强度,计算某种元素的含量。仪器主要性能(Li(7)≤3% RSD, Y(89)≤3% RSD, Ti(204)≤3% RSD),雾化气流量0.98 L/min,等离子体气流1.2 L/min,射频功率1200 W,用内标法进行校正。

2.3 锆石 U-Pb 年龄分析

锆石制靶方法见宋彪等(2002)。锆石阴极发光图像拍摄和LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测定均在中国地质调查局铀矿地质重点实验室完成。借助New Wave 193 nm激光剥蚀系统和Thermo Fisher Neptune多接收等离子体质谱仪进行LA-ICP-MS分析,剥蚀孔径35 μm,剥蚀频率8 Hz,输出能量5 mJ,年龄外标为锆石GJ-1,元素含量外标为NIST610(肖志斌等,2017)。定年数据处理采

用ICPMSDataCal 11.0(Liu et al., 2008, 2010)进行。样品U-Pb年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算通过Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成。

2.4 独居石 U-Pb 年龄分析

独居石U-Pb年龄分析在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成,借助GeoLasHD 193 nm激光剥蚀系统和7900 ICP-MS电感耦合等离子体质谱仪进行LA-ICP-MS分析,剥蚀孔径16 μm,剥蚀频率3 Hz,输出能量3 mJ,年龄外标为国际独居石TS-Mnz,元素含量外标为玻璃标准物质NIST610。定年数据处理采用ICPMSDataCal 11.0(Liu et al., 2008, 2010)进行。样品U-Pb年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算通过Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

洞上产铀花岗岩样品(JL2020-7)中锆石呈无色透明或浅黄色,大部分晶型较好,短柱至长柱状,长90~285 μm,宽45~90 μm,长/宽比1:2~1:3,CL图像显示锆石韵律环带清晰(图4),具有核-边结构,为典型的岩浆结晶锆石(吴元保和郑永飞,2004)。

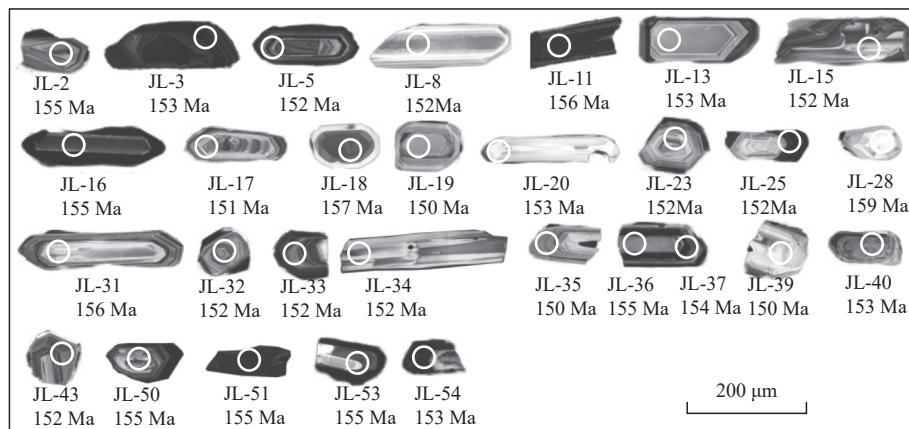


图4 洞上产铀花岗岩CL图像、测点位置及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 视年龄值

Fig. 4 CL images, analysis point and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ apparent ages of the U-bearing granite in Dongshang deposit

文章对样品(JL2020-7)中28颗锆石进行了29个测点分析,结果列于表1。锆石中U含量为 $135\times 10^{-6}\sim 5890\times 10^{-6}$, Th含量为 $102\times 10^{-6}\sim 1980\times 10^{-6}$, Th/U=0.05~1.49(平均值0.53>0.3),属岩浆结晶锆石(吴元保和郑永飞,2004)。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐

和图中,数据点大都落在谐和线上或靠近谐和线,下交点年龄为 152 ± 1 Ma(图5a)。其中19个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 视年龄值介于154~150 Ma之间的测点加权平均年龄为 152 ± 1 Ma(MSWD=1.3;图5b),表明洞上产铀花岗岩形成于燕山早期(晚侏罗世)。

表 1 洞上产铀花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果

Table 1 Data of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the U-bearing granite in Dongshang deposit

测点号	含量/($\times 10^{-6}$)			同位素比值						年龄/Ma					
	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	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
JL2020-7-02	16	237	691	0.0511	0.0010	0.1715	0.0035	0.0244	0.0002	244	40	161	3	155	1
JL2020-7-03	39	531	5890	0.0507	0.0003	0.1676	0.0013	0.0240	0.0001	227	16	157	1	153	1
JL2020-7-05	58	792	2140	0.0520	0.0005	0.1707	0.0025	0.0238	0.0003	287	22	160	2	152	2
JL2020-7-08	28	434	510	0.0499	0.0013	0.1642	0.0039	0.0239	0.0002	192	50	154	3	152	1
JL2020-7-11	127	1980	3700	0.0564	0.0009	0.1910	0.0040	0.0245	0.0002	470	33	177	3	156	2
JL2020-7-13	15	234	632	0.0484	0.0021	0.1600	0.0070	0.0240	0.0005	118	85	151	6	153	3
JL2020-7-15	14	192	725	0.0488	0.0008	0.1601	0.0026	0.0238	0.0002	139	33	151	2	152	1
JL2020-7-16	80	1022	3380	0.0531	0.0009	0.1776	0.0029	0.0243	0.0002	332	36	166	3	155	1
JL2020-7-17	22	295	607	0.0493	0.0009	0.1611	0.0031	0.0237	0.0002	163	38	152	3	151	1
JL2020-7-18	14	132	270	0.0660	0.0027	0.2240	0.0095	0.0246	0.0003	805	85	205	8	157	2
JL2020-7-19	12	179	225	0.0503	0.0016	0.1635	0.0049	0.0236	0.0003	207	60	154	5	150	2
JL2020-7-20	8	111	196	0.0514	0.0017	0.1700	0.0055	0.0240	0.0002	260	60	159	5	153	1
JL2020-7-23	26	384	523	0.0485	0.0014	0.1591	0.0046	0.0238	0.0002	123	60	150	4	152	1
JL2020-7-25	37	494	4680	0.0523	0.0007	0.1725	0.0025	0.0239	0.0003	298	31	162	2	152	2
JL2020-7-28	10	102	135	0.0696	0.0032	0.2390	0.0090	0.0249	0.0008	917	95	218	8	159	5
JL2020-7-31	23	310	361	0.0577	0.0015	0.1950	0.0050	0.0245	0.0003	520	55	181	4	156	2
JL2020-7-32	28	418	909	0.0496	0.0008	0.1629	0.0027	0.0238	0.0002	177	34	153	2	152	1
JL2020-7-33	24	308	720	0.0498	0.0010	0.1641	0.0034	0.0239	0.0002	187	42	154	3	152	1
JL2020-7-34	21	325	360	0.0508	0.0017	0.1670	0.0055	0.0239	0.0003	231	65	157	5	152	2
JL2020-7-35	11	125	333	0.0517	0.0029	0.1680	0.0095	0.0236	0.0003	273	120	158	9	150	2
JL2020-7-36	112	1560	3480	0.0562	0.0010	0.1883	0.0029	0.0243	0.0004	461	36	175	3	155	2
JL2020-7-37	43	458	3260	0.0536	0.0028	0.1780	0.0095	0.0241	0.0007	353	120	166	8	154	4
JL2020-7-39	13	167	168	0.0544	0.0032	0.1770	0.0100	0.0236	0.0005	386	120	165	9	150	3
JL2020-7-40	16	196	492	0.0510	0.0017	0.1690	0.0055	0.0240	0.0003	241	70	159	5	153	2
JL2020-7-43	18	276	761	0.0491	0.0008	0.1617	0.0026	0.0239	0.0002	151	33	152	2	152	1
JL2020-7-50	26	341	229	0.0520	0.0026	0.1740	0.0100	0.0243	0.0004	286	110	163	9	155	3
JL2020-7-51	40	504	1550	0.0590	0.0012	0.1981	0.0037	0.0244	0.0002	567	46	184	3	155	1
JL2020-7-53	28	285	247	0.0606	0.0037	0.2030	0.0120	0.0243	0.0006	625	125	188	10	155	3
JL2020-7-54	20	265	5050	0.0517	0.0007	0.1711	0.0031	0.0240	0.0003	272	31	160	3	153	2

3.2 独居石 U-Pb 年龄

洞上产铀花岗岩样品(JL2020-7)中独居石呈浅黄色、透明,为半自形—自形短柱状、粒状,粒径40~180 μm 。背散射(BSE)图像中独居石内部结构均匀,部分边部出现晶棱圆化、港湾状结构,无明显环带。独居石 U-Pb 同位素测定结果见表 2。对 19 颗独居石进行 U-Pb 同位素测年,共获得 19 个有效点, $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄值大多分布于谐和曲线上或附近(图 6a),下交点年龄 151 ± 1 Ma(MSWD=1.16);对其中 15 个谐和测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄进行加权平均,结果为 151 ± 2 Ma(MSWD=1.6;图 6b),表明洞上产铀花岗岩形成于燕山早期(晚侏罗世)。

3.3 地球化学特征

洞上产铀花岗岩的主微量元素和稀土元素检测结果详见表 3。JL2020-6、JL2020-7 和 JL2020-8 数

据为此次测得,GF8-1、GF9-1、GF10-1 和 GF11-1 数据引自王迪(2017)。

3.3.1 主量元素特征

洞上产铀花岗岩 SiO_2 含量为 72.1%~75.6%(平均值 73.9%),高硅; K_2O 含量为 3.75%~4.77%(平均值 4.33%), Na_2O 含量为 3.36%~3.82%(平均值 3.61%), $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量为 7.26%~8.43%(平均值 7.95%),富碱;在 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解上均投点于花岗岩区(图 7a),在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解上落入高钾钙碱性系列(图 7b)。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 1.07~1.42(平均值 1.20),富钾贫钠。 Al_2O_3 含量为 13.5%~15.2%(平均值 14.4%),富铝, $\text{A}/\text{CNK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=1.12\sim 1.29$ (平均值 1.22>1.1), $\text{A}/\text{NK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=1.26\sim 1.42$ (平均值 1.35),在 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图解上均落于过铝质岩区(图 7c)。 TiO_2 含量

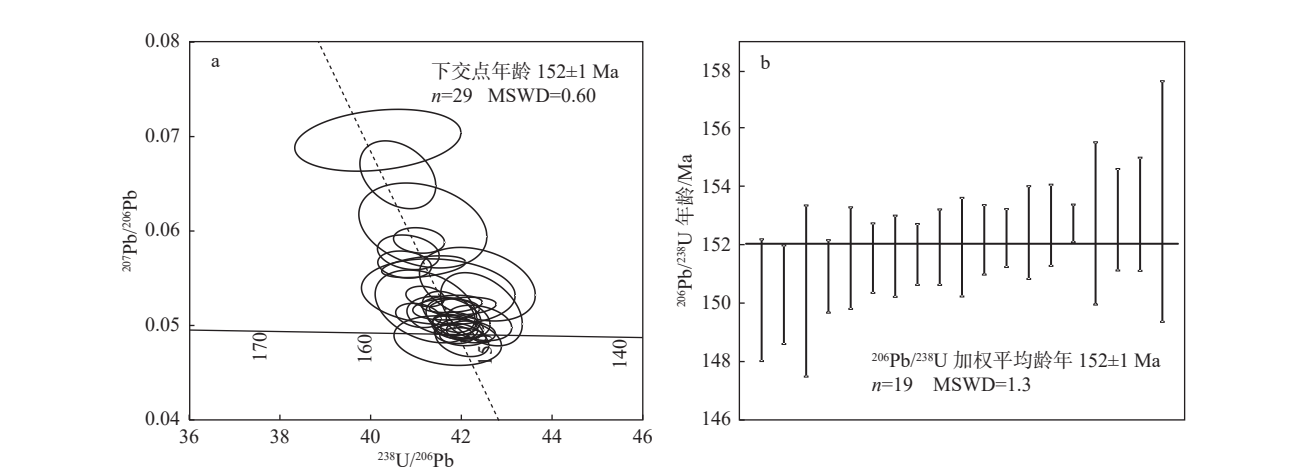


图 5 洞上产铀花岗岩锆石 U-Pb 谐和图和加权平均²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄图

Fig. 5 Concordia diagrams of the zircon U-Pb dating and weighted mean diagrams of ²⁰⁶Pb/²³⁸U apparent ages for the U-bearing granite in Dongshang deposit

表 2 洞上产铀花岗岩独居石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果

Table 2 Data of LA-ICP-MS monazite U-Pb dating of the U-bearing granite in Dongshang deposit

测点号	含量/(×10 ⁻⁶)		同位素比值				年龄/Ma			
	Th	U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ
JLD2020-7-01	191064	11305	0.1530	0.0095	0.0230	0.0007	145	8	147	5
JLD2020-7-03	176267	7805	0.1592	0.0096	0.0244	0.0007	150	8	156	5
JLD2020-7-04	179808	3833	0.1794	0.0176	0.0241	0.0008	168	15	153	5
JLD2020-7-05	179094	9668	0.1589	0.0095	0.0239	0.0007	150	8	152	5
JLD2020-7-07	217554	3884	0.1591	0.0132	0.0236	0.0007	150	12	151	5
JLD2020-7-09	185410	7891	0.1733	0.0103	0.0240	0.0008	162	9	153	5
JLD2020-7-10	185511	6457	0.1512	0.0086	0.0237	0.0007	143	8	151	5
JLD2020-7-13	187573	10423	0.1592	0.0088	0.0233	0.0006	150	8	148	4
JLD2020-7-15	161676	6801	0.1586	0.0123	0.0242	0.0007	149	11	154	5
JLD2020-7-16	181397	6335	0.1616	0.0096	0.0242	0.0007	152	8	154	5
JLD2020-7-17	88445	12300	0.1550	0.0089	0.0235	0.0007	146	8	150	4
JLD2020-7-18	182585	7128	0.1611	0.0104	0.0237	0.0006	152	9	151	4
JLD2020-7-19	180762	5964	0.1689	0.0132	0.0240	0.0007	158	11	153	5
JLD2020-7-21	187512	9102	0.1572	0.0096	0.0235	0.0006	148	8	150	4
JLD2020-7-24	131495	27231	0.1476	0.0069	0.0229	0.0007	140	6	146	4
JLD2020-7-02	104575	13748	0.4302	0.0349	0.0273	0.0009	363	25	174	6
JLD2020-7-11	231240	2392	0.8941	0.1181	0.0314	0.0013	649	63	199	8
JLD2020-7-20	177503	5259	0.7670	0.1135	0.0304	0.0014	578	65	193	9
JLD2020-7-22	176812	4865	0.2169	0.0160	0.0246	0.0008	199	13	156	5

为 0.07%~0.17%, 低钛, 与副矿物中少见钛铁矿、磷灰石的特征一致。FeO^T 含量为 0.75%~1.28%(平均值 1.07%), MgO 含量为 0.19%~0.31%(平均值 0.26%), Mg[#]=31.4~41.5(平均值 36.1), 贫铁镁。CaO 和 P₂O₅ 含量分别为 0.43%~0.76% 和 0.23%~0.28%, 在 SiO₂-P₂O₅ 图解上 SiO₂ 与 P₂O₅ 的含量呈明显的正相关(图 7d), 显示 S 型花岗岩特征(王文龙等, 2017)。这些主量元素特征表明, 洞上产铀花岗

岩属高钾钙碱性系列过铝质花岗岩, 与华南壳源重熔型(S 型)花岗岩主量元素特征一致(凌洪飞等, 2006)。

3.3.2 微量元素特征

洞上产铀花岗岩富集 Rb、U、Pb 和 Ta, 亏损 Ba、Sr 和 Nb、Ti, 属低 Ba、Sr 花岗岩, 是壳源物质低程度部分熔融的产物(Harris and Inger, 1992)。微量元素蛛网图左侧隆起、右侧平缓(图 8a), 与华南壳

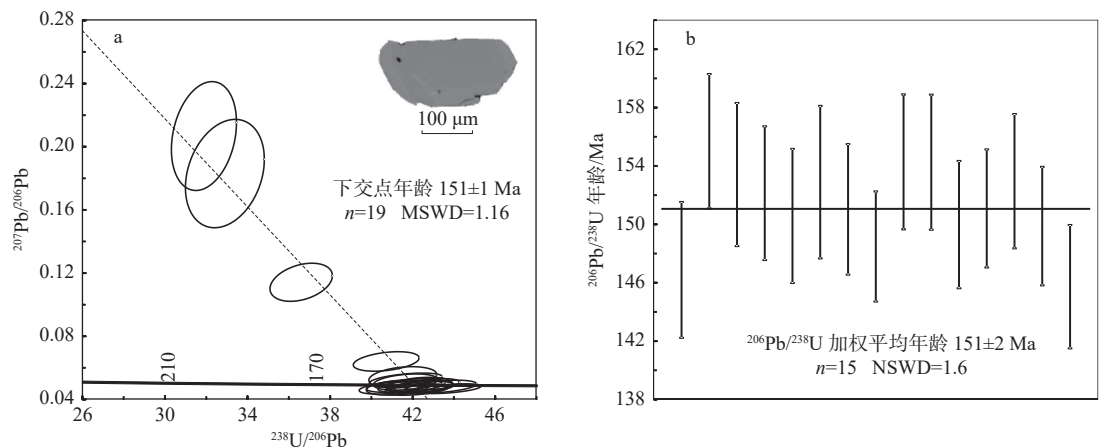


图 6 洞上产铀花岗岩独居石 U–Pb 谱和图和加权平均²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄图

Fig. 6 Concordia diagrams of the monazite U–Pb dating and weighted mean diagrams of ²⁰⁶Pb/²³⁸U apparent ages for the U-bearing granite in Dongshang deposit

表 3 洞上产铀花岗岩主量元素（%）、微量元素（×10⁻⁶）及稀土元素（×10⁻⁶）分析结果

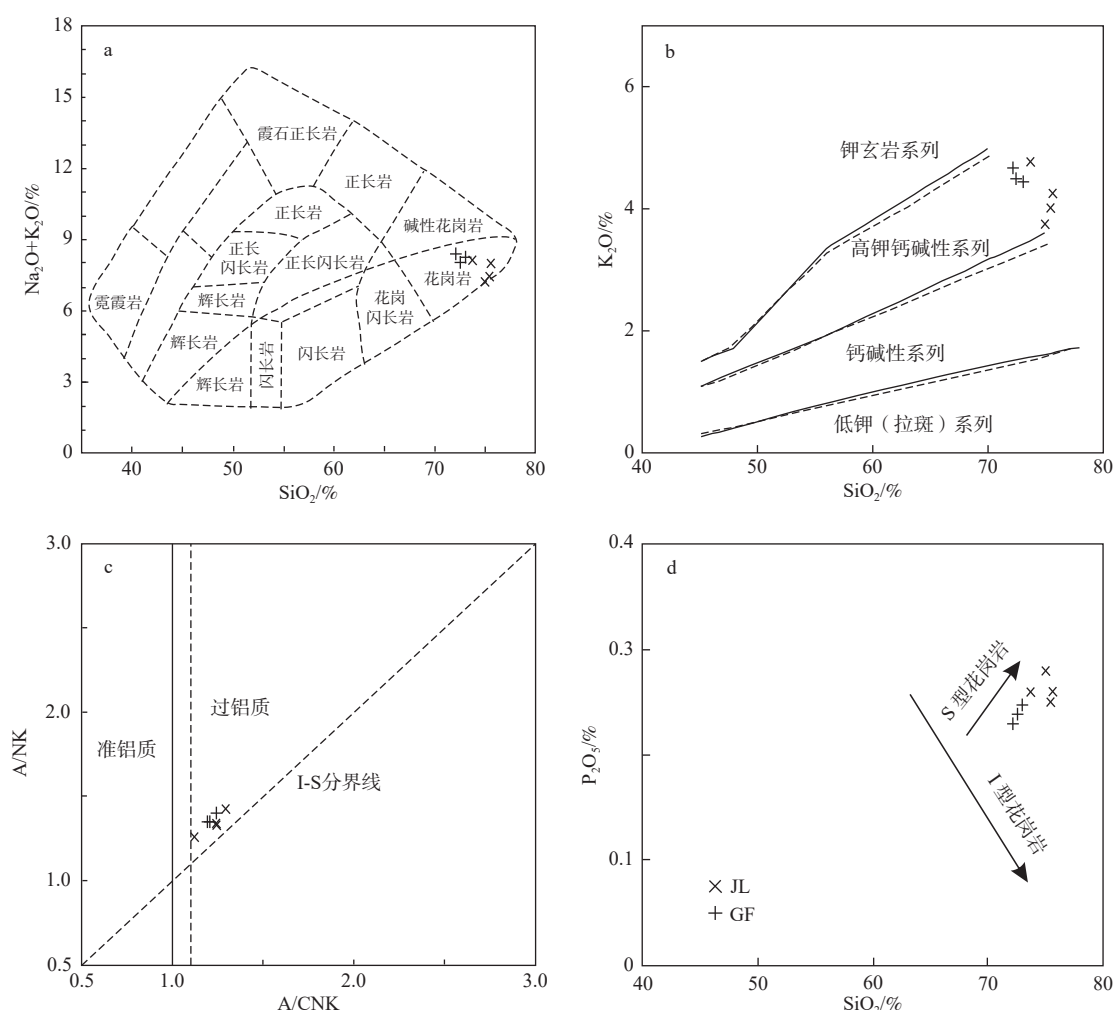
Table 3 The analytical results major elements (%), trace elements (×10⁻⁶) and REEs (×10⁻⁶) of the U-bearing granite in Dongshang deposit

样号	JL2020-6	JL2020-7	JL2020-8	GF8-1	GF9-1	GF10-1	GF11-1
元素	中粗粒斑状黑(二)云母花岗岩			粗粒白云母花岗岩			
SiO ₂	72.14	73.01	72.51	75.40	73.70	75.00	75.60
TiO ₂	0.15	0.16	0.16	0.13	0.16	0.17	0.07
Al ₂ O ₃	15.17	14.93	14.97	13.50	14.30	14.00	13.60
FeO ^T	1.28	1.13	1.27	0.85	1.02	1.20	0.75
MnO	0.07	0.06	0.08	0.04	0.03	0.08	0.50
MgO	0.27	0.23	0.25	0.25	0.31	0.30	0.19
CaO	0.72	0.76	0.72	0.47	0.43	0.54	0.74
Na ₂ O	3.78	3.82	3.55	3.47	3.36	3.51	3.78
K ₂ O	4.65	4.44	4.49	4.01	4.77	3.75	4.25
P ₂ O ₅	0.23	0.25	0.24	0.25	0.26	0.28	0.26
LOI	1.13	1.15	1.03	0.77	0.77	0.96	1.55
总量	99.60	99.96	99.30	99.10	99.60	99.76	100.76
K ₂ O+Na ₂ O	8.43	8.26	8.04	7.48	8.13	7.26	8.03
K ₂ O/Na ₂ O	1.23	1.16	1.26	1.16	1.42	1.07	1.12
CaO/Na ₂ O	0.19	0.20	0.20	0.14	0.13	0.15	0.20
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	101.13	93.31	93.56	103.85	89.38	82.35	194.29
A/CNK	1.21	1.20	1.25	1.24	1.25	1.29	1.12
A/NK	1.35	1.35	1.40	1.34	1.34	1.42	1.26
C/FM	0.47	0.56	0.47	0.43	0.32	0.36	0.79
A/FM	9.81	10.96	9.84	12.27	10.75	9.33	14.47
Rb	622.00	414.00	448.00	305.00	430.00	580.00	500.00
Sr	37.60	33.40	37.90	23.40	55.20	55.40	31.30
Y	8.50	8.58	8.37	4.30	9.63	11.40	4.73
Zr	90.00	90.00	90.00	35.60	59.90	72.80	29.30
Hf	2.01	2.12	2.21	1.07	1.69	2.08	1.11

续表 3

样号	JL2020-6	JL2020-7	JL2020-8	GF8-1	GF9-1	GF10-1	GF11-1
元素	中粗粒斑状黑(二)云母花岗岩			粗粒白云母花岗岩			
Nb	16.70	17.10	16.70	8.30	12.10	20.90	12.90
Ta	7.41	7.39	7.51	3.07	2.09	6.07	6.03
Ba	96.70	84.50	102.00	42.80	99.70	83.00	76.70
Th	7.62	7.49	8.11	2.71	4.79	5.96	3.94
U	30.80	35.90	27.20	9.20	13.90	18.00	8.44
Pb	23.20	23.00	23.90	12.30	24.50	22.70	24.40
Ti	930.00	940.00	940.00	779.00	959.00	1019.00	420.00
P	999.00	1077.00	1038.00	1090.00	1134.00	1221.00	1134.00
Rb/Sr	16.50	12.40	11.80	13.00	7.79	10.50	16.00
Rb/Ba	6.43	4.90	4.39	7.13	4.31	6.99	6.52
Rb/Nb	37.20	24.20	26.80	36.70	35.50	27.80	38.80
Zr/Hf	44.80	42.50	40.70	33.30	35.40	35.00	26.40
Th/U	0.25	0.21	0.30	0.29	0.34	0.33	0.47
La	8.68	9.42	10.10	3.79	7.41	9.56	5.54
Ce	18.30	19.92	21.24	9.79	17.20	22.50	10.14
Pr	2.16	2.28	2.50	0.91	1.60	1.94	1.19
Nd	7.78	8.34	8.94	3.42	6.03	7.31	4.14
Sm	1.79	2.01	2.09	0.88	1.62	1.88	0.99
Eu	0.23	0.21	0.23	0.10	0.21	0.22	0.15
Gd	1.63	1.70	1.83	0.82	1.50	1.77	0.89
Tb	0.28	0.28	0.29	0.15	0.30	0.34	0.15
Dy	1.59	1.62	1.56	0.84	1.65	1.83	0.80
Ho	0.26	0.26	0.26	0.13	0.25	0.28	0.12
Er	0.67	0.68	0.69	0.36	0.64	0.74	0.35
Tm	0.09	0.09	0.09	0.05	0.09	0.11	0.05
Yb	0.61	0.61	0.81	0.32	0.54	0.70	0.33
Lu	0.08	0.08	0.08	0.05	0.08	0.10	0.05
∑REE	44.16	47.49	50.69	21.61	39.12	49.28	24.85
LREE/HREE	7.47	7.92	8.01	6.94	6.75	7.40	8.07
δEu	0.41	0.34	0.35	0.35	0.40	0.36	0.48
(La/Yb) _N	10.21	11.13	8.90	8.50	9.84	9.80	12.04
(La/Sm) _N	3.13	3.03	3.12	2.78	2.95	3.28	3.61
(Gd/Yb) _N	2.21	2.32	1.86	2.12	2.30	2.09	2.23
Zr+Nb+Ce+Y	739.00	523.00	558.00	419.00	532.00	676.00	706.00

源重熔型(S型)花岗岩微量元素特征一致(凌洪飞等, 2006)。Zr、Nb、Ce和Y含量偏低,Zr+Nb+Ce+Y含量为 $57.0\times 10^{-6}\sim 136\times 10^{-6}$,远低于A型花岗岩中Zr+Nb+Ce+Y含量的下限(350×10^{-6} , Whalen et al., 1987)。Nb/Ta比值2.14~5.79(平均值2.98)远小于正常花岗岩值(Nb/Ta=11),Zr/Hf比值26.4~44.8,有3个样品Zr/Hf比值40.7~44.8高于正常花岗岩值(Zr/Hf=33~40),说明该类岩浆演化过程中存在熔体与富挥发分流体的相互作用,使得Ta、Zr趋向富集而Nb、Hf相对亏损。U含量为 $8.44\times 10^{-6}\sim 35.9\times$



JL 数据为文中分析结果, GF 数据引自王迪 (2017)

a— SiO_2 —($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) 图 (Middlemost, 1994); b— SiO_2 — K_2O 图 (Peccerillo and Taylor, 1976); c— A/CNK — ANK 图 (Maniar and Piccoli, 1989); d— SiO_2 — P_2O_5 图

图 7 洞上产铀花岗岩主量元素图解

Fig. 7 Main element diagrams of the U-bearing granite in Dongshang deposit

(a) SiO_2 —($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) diagram (Middlemost, 1994); (b) SiO_2 — K_2O diagram (Peccerillo and Taylor, 1976); (c) A/CNK — ANK diagram (Maniar and Piccoli, 1989); (d) SiO_2 — P_2O_5 diagram

The JL data was analyzed for this article; The GF data was quoted from Wang (2017).

10^{-6} , 整体大于 8×10^{-6} , 属富铀花岗岩, 与华南铀成矿省产铀花岗岩的特征一致。

3.3.3 稀土元素特征

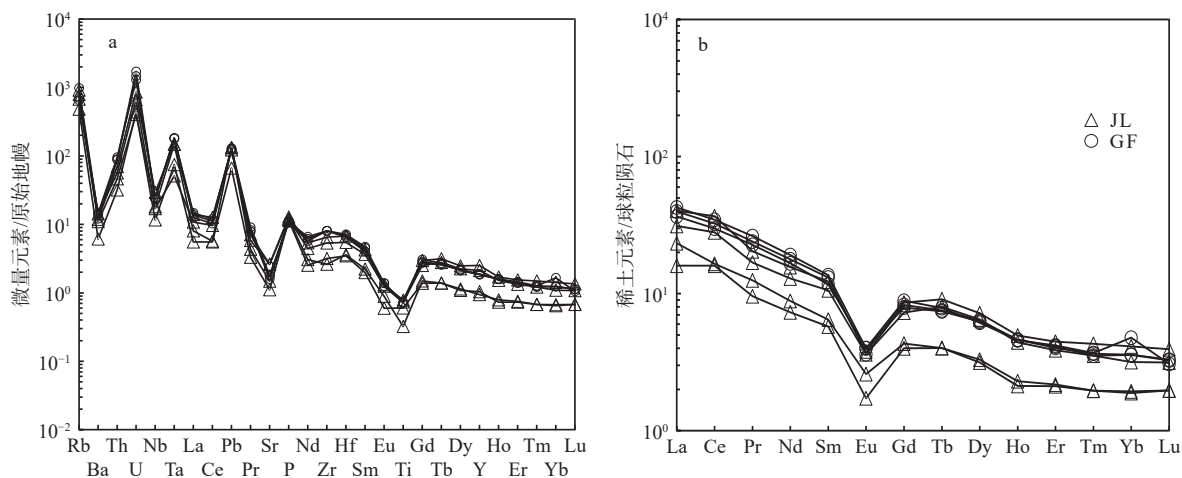
洞上产铀花岗岩 $\Sigma\text{REE}=21.6 \times 10^{-6} \sim 50.7 \times 10^{-6}$ (平均值 39.6×10^{-6}), $\text{LREE}/\text{HREE}=6.75 \sim 8.07$ (平均值 7.51), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=8.50 \sim 12.0$ (平均值 10.1), 明显富集轻稀土, 亏损重稀土。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=2.78 \sim 3.61$ (平均值 3.13), 轻稀土分馏明显; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.86 \sim 2.32$ (平均值 2.16), 重稀土分馏较弱。球粒陨石标准化配分曲线呈现轻稀土配分曲线相对较陡而重稀土配分曲线相对平坦的特征 (图 8b); $\delta\text{Eu}=0.34 \sim 0.48$ (平均值

0.39), Eu 亏损较明显, 与华南壳源重熔型 (S 型) 花岗岩稀土元素特征一致 (凌洪飞等, 2006)。

4 讨论

4.1 成岩时代

近些年, 部分学者对甘坊岩体内铌钽锂等稀有金属矿产的赋矿围岩开展了锆石 U—Pb 定年, 年龄介于 147~141 Ma 之间 (王迪, 2017; 秦程, 2018; 刘莹, 2019), 并对花岗岩中含铀的铌铁矿族矿物开展 U—Pb 定年, 年龄为 144 Ma (刘莹, 2019; Xie et al., 2019)。



JL 数据为此研究分析结果, GF 数据引自王迪(2017)

a—微量元素原始地幔标准化蛛网图; b—稀土元素球粒陨石标准化配分曲线

图8 洞上产铀花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图及稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(标准化数值引自 Sun and McDonough (1989))

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram and chondrite-normalized REE distribution pattern of the U-bearing granite in Dongshang deposit (normalized values after Sun and McDonough(1989))

(a) Primitive mantle-normalized trace element spider diagram; (b) Chondrite-normalized REE distribution pattern

The JL data was analyzed for this article; The GF data was quoted from Wang (2017).

但是产铀花岗岩的形成时代尚未精确厘定。文章对洞上铀矿床产铀花岗岩中含铀副矿物——锆石和独居石开展 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 获得年龄为 152~151 Ma(图 5, 图 6), 表明该花岗岩形成于晚侏罗世, 是燕山早期酸性岩浆上侵的产物。

4.2 源区性质与岩石成因

洞上产铀花岗岩室内定名为中粗粒斑状黑(二)云母花岗岩, 高硅 ($w(\text{SiO}_2) > 70\%$)、富铝 ($A/\text{CNK} > 1.1$), 属高钾钙碱性系列花岗岩; 在 $A/\text{CNK}-A/\text{NK}$ 、 $\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ 图解(图 7c、7d)以及 $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ 和 $(\text{Zr}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{Rb}/\text{Ba})$ 图解上(图 9a、9b)大都投点于或靠近 S 型花岗岩区。

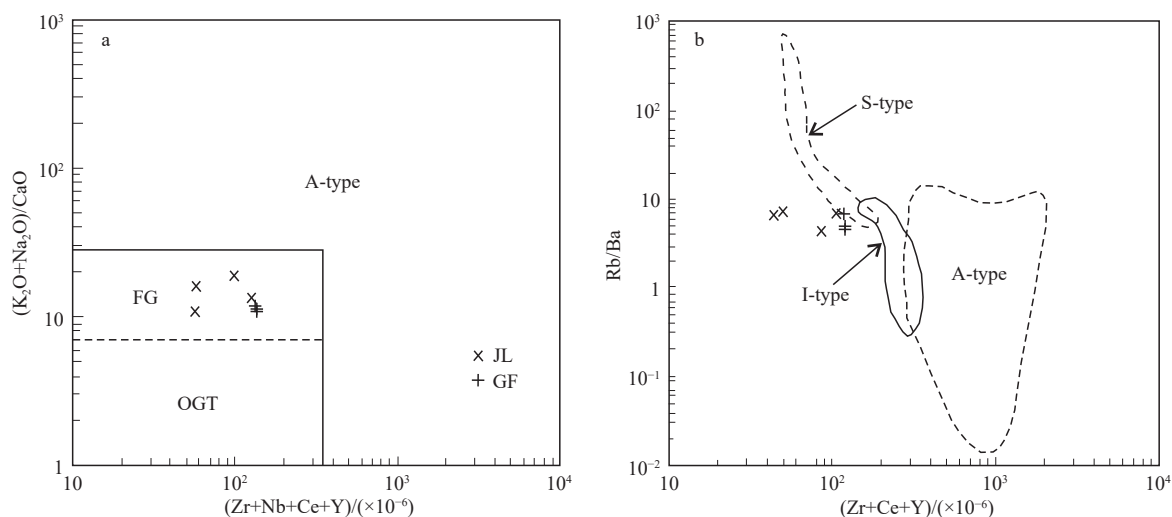
过铝质花岗岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} > 0.3$, 暗示源区物质富含斜长石; $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} < 0.3$, 暗示源区物质富黏土矿物(Sylvester, 1998; 兰鸿锋等, 2016)。洞上产铀花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} = 0.13 \sim 0.20 < 0.3$, 表明其源区物质主要是富黏土矿物的泥质岩石, 与 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 和 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/(\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}}+\text{TiO}_2)-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{MgO}+\text{FeO}^{\text{T}}+\text{TiO}_2)$ 图解中该类花岗岩投点于“富黏土源区-泥岩”区和“富白云母的变泥质岩”区的结果一致(图 10), 暗示其源区物质可能是在大陆稳定区经历强烈地壳化学风化和较弱物理剥蚀的贫斜长石的黏土泥质岩(兰鸿锋等, 2016)。

岩石和矿物的微量元素含量在岩浆演化过程中变化明显, 是推演构造-岩浆作用等地质过程的有效示踪剂(赵振华, 1992; Zhao and Zhou, 1997; 王涛等, 2019; 郭小飞等, 2022)。洞上产铀花岗岩具有较高的 Rb/Sr 和 Rb/Nb 比值, 平均值分别为 12.6 和 32.4, 暗示其源岩为成熟度较高的陆壳物质。 Rb/Sr 和 Rb/Ba 比值与 SiO_2 含量呈弱的正相关关系, 暗示该类花岗质岩浆经历了较强的结晶分异演化。重稀土元素弱分异, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.86 \sim 2.32$, 暗示岩浆源区较深。负 Eu 异常明显, $\delta\text{Eu} = 0.34 \sim 0.48$, 暗示岩浆演化过程中存在较强的斜长石分离结晶或者源区物质为贫斜长石的黏土泥质岩(陈迪等, 2022)。

结合洞上产铀花岗岩所在的甘坊岩体周缘出露新元古界双桥山群安乐林组, 岩石组合以变余粉砂岩、砂岩和板岩夹灰黑色炭质板岩为主, 分析认为该类花岗岩可能是上地壳富铝的浅变质岩系(双桥山群)在减压增温的条件下部分熔融的产物。

4.3 成岩构造背景

华南中生代花岗岩的成因主要是地壳物质的部分熔融, 地幔物质参与较少, 并且大规模印支-燕山期岩浆上侵的动力学背景是从挤压-伸展转向后碰撞阶段的拉张环境, 表现为多阶段多幕次脉动



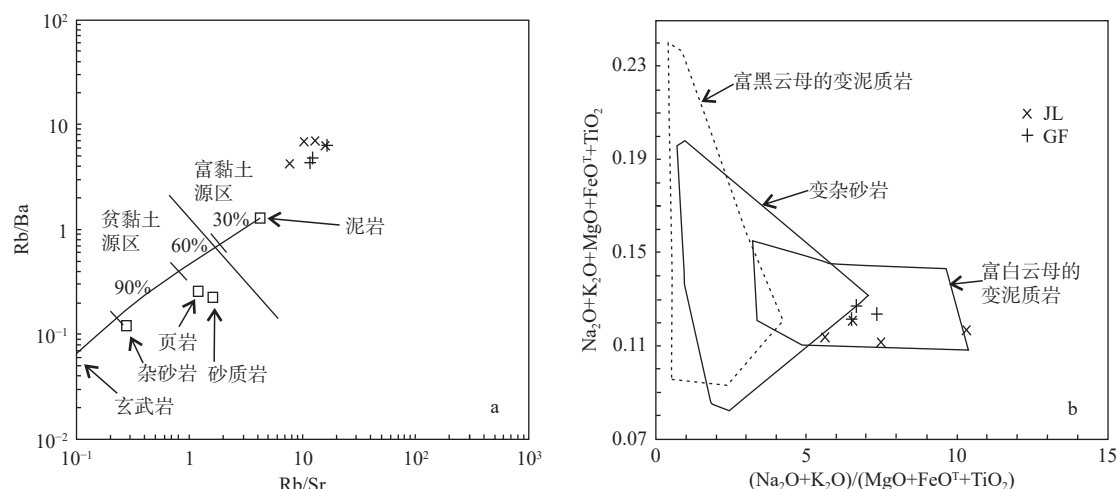
FG—酸性花岗岩; OGT—未发生分异花岗岩; JL 数据为文中分析结果, GF 数据引自王迪 (2017)

a— $(Zr+Nb+Ce+Y)-(K_2O+Na_2O)/Ca_2O$ 图解 (底图引自 Whalen et al.(1987)); b— $(Zr+Ce+Y)-(Rb/Ba)$ 图解 (底图引自 Whalen et al.(1987))

图 9 洞上产铀花岗岩岩石类型判别图解

Fig. 9 Discrimination diagrams for the rock-type of the U-bearing granite in Dongshang deposit

(a) $(Zr+Nb+Ce+Y)-(K_2O+Na_2O)/Ca_2O$ diagram (Schema from Whalen et al.(1987)); (b) $(Zr+Ce+Y)-(Rb/Ba)$ diagram (Schema from Whalen et al.(1987))



JL 数据为文中分析结果, GF 数据引自王迪 (2017)

a— $Rb/Sr-Rb/Ba$ 图解 (底图引自 Sylvester(1998)); b— $NK/MFT-NKMFT$ 图解 (底图引自 Lee et al.(2003))

图 10 洞上产铀花岗岩源区属性判别图解

Fig. 10 Discrimination diagrams for the source characteristics of the U-bearing granite in Dongshang deposit

(a) $Rb/Sr-Rb/Ba$ diagram (Schema from Sylvester (1998)); (b) $NK/MFT-NKMFT$ diagram (Schema from Lee et al. (2003))

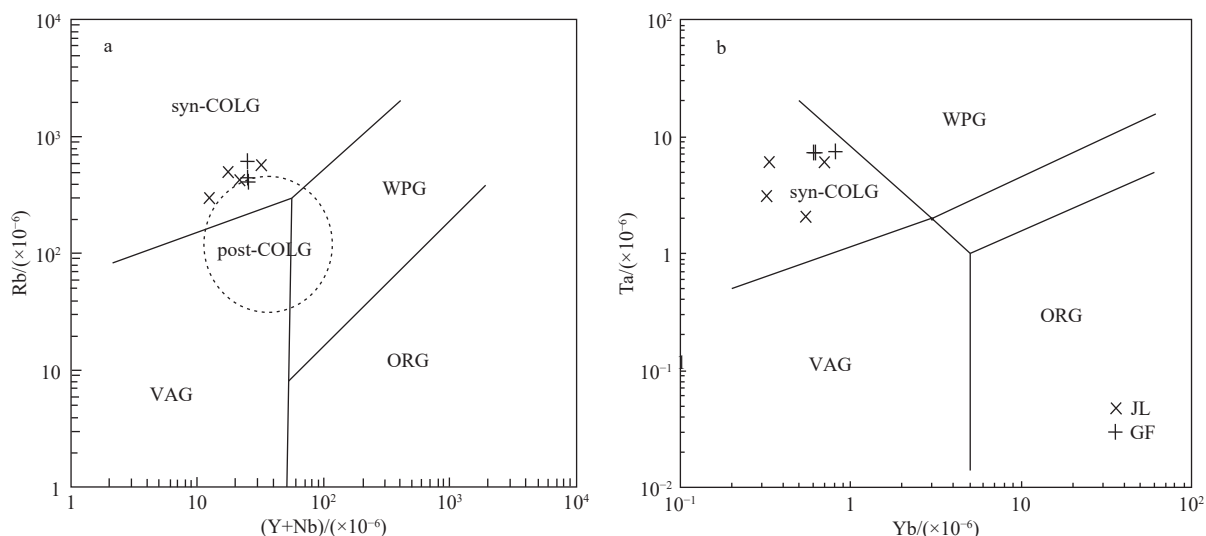
式活动的特点(谭俊等, 2007; 王莉娟等, 2013; 郭春丽等, 2014; 孙建东等, 2022)。燕山运动被划分出造山的主挤压(165~145 Ma)、过渡(145~130 Ma)、主伸展(130~110 Ma)、次挤压(110~90 Ma)和再伸展(90~80 Ma)等多个阶段(董树文等, 2007; 张岳桥等, 2007; 项新葵等, 2015a, 2015b)。燕山早期江南

造山带再次活化, 构造-岩浆活动背景由先挤压转向拉张-伸展(毛景文等, 2011), 构造应力场的转换利于幔源物质上涌, 进而诱发九岭地区壳源物质发生重熔, 形成过铝质中酸性、酸性岩浆。

洞上产铀花岗岩在 $Rb-(Y+Nb)$ 和 $Ta-Yb$ 图解上投点于同碰撞花岗岩区, 靠近后碰撞花岗岩区(图 11), 表明该花岗岩是燕山早期主挤压阶段

($165\pm 5\sim 145$ Ma)九岭地区新元古界双桥山群白云母的变泥质岩在碰撞造山的背景下经不同程度

部分熔融形成的酸性岩浆,沿东西向、北东向断裂上侵、冷凝的产物(毛景文等,2008)。



syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; post-COLG—后碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; JL 数据为文中分析结果, GF 数据引自王迪(2017)

a—Rb-(Y+Nb)图解(底图引自Pearce(1996)); b—Ta-Yb图解(底图引自Pearce(1996))

图 11 洞上产铀花岗岩构造环境判别图解

Fig. 11 Discrimination diagrams for the tectonic environment of the U-bearing granite in Dongshang deposit

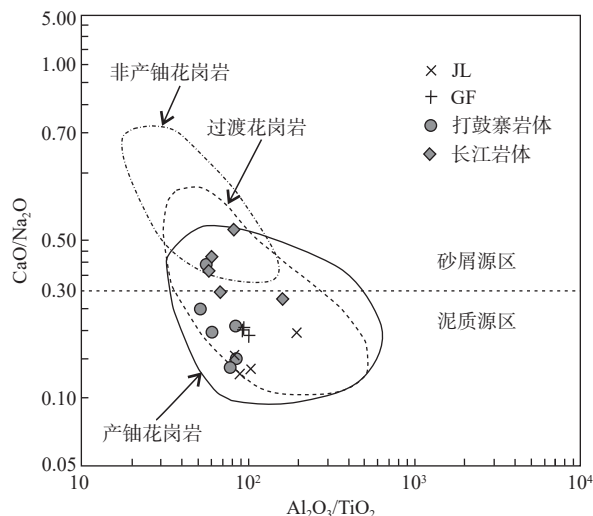
(a) Rb-(Y+Nb) diagram (Schema from Pearce (1996)); (b) Ta-Yb diagram (Schema from Pearce (1996))

4.4 铀成矿潜力分析

花岗岩中锆石的高 U 含量、低 Th/U 比值是判别产铀与非产铀花岗岩的有效依据之一(陈振宇和王登红, 2014)。洞上产铀花岗岩 JL2020-7 样品中 28 颗锆石的 U、Th 含量均变化较大, U 含量为 $135\times 10^{-6}\sim 5890\times 10^{-6}$ (平均值 $1456\times 10^{-6}>1000\times 10^{-6}$), Th 含量为 $102\times 10^{-6}\sim 1980\times 10^{-6}$, Th/U 比值平均为 0.53(接近 0.52; 表 3), 与产铀花岗岩的锆石特征一致。在 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图解中, 洞上产铀花岗岩与诸广花岗岩型铀矿集区产铀的长江岩体和桃山铀矿田产铀的打鼓寨岩体均投点于产铀花岗岩区(图 12)。

在《花岗岩型铀矿找矿指南(EJ/T976—96)》(中国核工业总公司, 1996)中, 产铀花岗岩是指产有铀矿床和具有潜在铀资源的花岗岩, 地质特征包括地壳成熟度高、基底岩石铀含量高、多阶段岩浆活动、酸性和中基性岩脉发育、断裂发育、白云母化和碱交代作用强烈、铀场和 γ 场不均匀、出现偏高场等, 属壳源重熔型(S 型)花岗岩; 副矿物以钛铁矿系列为主, 富硅(SiO_2 含量为 70%~75%), 富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量为 7%~9%), 铝过饱和($\text{A}/\text{CNK}>1.10$), 钾大于钠, 铷锶初始比大于 0.710, 富含 U(含

量 $>8\times 10^{-6}$)、Rb、Cs、Li、Be、W、Sn、Ta 和 F 等元素, Rb/Sr 比值高, Th/U 比值小于 3, 轻稀土富集, 钨



图中源区划分引自 Sylvester(1998); 产铀、非产铀和过渡型花岗岩区划分引自兰鸿锋等(2016); JL 数据为文中分析结果, GF 数据引自王迪(2017), 打鼓寨岩体数据引自徐勋胜等(2021), 长江岩体数据引自田泽瑾(2014)

图 12 花岗岩与源岩关系图

Fig. 12 Relation diagram of granite and source rock

负异常明显, 锆石铀含量高。

洞上产铀花岗岩 Rb/Sr 比值(平均值 12.6)和 Rb/Nb 比值(平均值 32.4)高, CaO/Na₂O(平均值 0.17) < 0.3, 暗示其源自成熟度较高的陆壳物质, 且源区物质以富黏土的泥质岩为主。该花岗岩所处的甘坊岩体是燕山期早晚 2 期共 3 阶段 7 次中酸性—酸性岩浆脉动式活动的产物。岩体内北东、北北东向硅化断裂发育, 自变质蚀变以白云母化为主, 沿断裂常见赤铁矿化、硅化、水云母化、萤石化等热液蚀变。并且, 该花岗岩是过铝质高钾钙碱性 S 型花岗岩, 显微镜下见磷灰石、锆石、独居石等副矿物, 富

硅(SiO₂ 平均含量 73.9%)、富碱(K₂O+Na₂O 平均含量 7.95%)、铝过饱和(A/CNK 平均值 1.22)、钾大于钠(K₂O/Na₂O 平均值 1.20), 富含 U(U 平均含量 20.5×10⁻⁶)、Rb、Cs、Li、Be、W、Sn、Ta 和 F 等元素, 钍铀比值(平均值 0.31)小于 3, 轻稀土富集(LREE/HREE 平均值 7.51)、铕负异常明显(δ Eu 平均值 0.39), 锆石 U(平均含量 1456×10⁻⁶)高。这些地球化学组分特征与诸广花岗岩型铀矿集区产铀的长江岩体和桃山铀矿田产铀的打鼓寨岩体的地球化学组分特征一致(表 4), 表明该花岗岩具有提供铀源的条件与潜力。

表 4 洞上产铀花岗岩、长江岩体、打鼓寨岩体岩石地球化学组分对比表

Table 4 Comparison table of petrogeochemical components of Dongshang U-bearing granite, Changjiang granite and Daguzhai granite

岩体	SiO ₂ /%	K ₂ O+Na ₂ O/%	K ₂ O/Na ₂ O	CaO/Na ₂ O	A/CNK	Σ REE/(×10 ⁻⁶)	LREE/HREE	δ Eu
长江	74.00	8.22	1.81	0.31	1.11	197.0	7.38	0.21
洞上	73.90	7.95	1.20	0.17	1.22	39.6	7.51	0.39
打鼓寨	73.20	8.39	1.69	0.22	1.22	205.0	4.43	0.33
岩体	(Zr+Nb+Ce+Y)/(×10 ⁻⁶)	Zr/Hf	Rb/Sr	U/(×10 ⁻⁶)	Th/U	锆石 U/(×10 ⁻⁶)	锆石 Th/(×10 ⁻⁶)	锆石 Th/U
长江	252.00	24.60	10.50	18.00	2.22	2453	1084	0.75
洞上	107.00	36.90	12.60	20.50	0.31	2592	660	0.49
打鼓寨	249.00	33.20	6.75	19.50	2.45	68348	33230	0.48

注: 打鼓寨岩体数据引自徐勋胜等(2021), 长江岩体数据引自田泽瑾(2014)

5 结论

(1)洞上产铀花岗岩为中粗粒斑状黑(二)云母花岗岩, 锆石和独居石 U-Pb 年龄分别为 152±1 Ma 和 151±2 Ma, 年龄在误差范围内一致, 表明该花岗岩是燕山早期酸性岩浆上侵的产物。

(2)洞上产铀花岗岩富硅、高碱、富钾贫钠、高铝、低钛、贫铁镁, 微量元素 Ba、Sr、Nb、Ti 亏损、Rb、U、Pb、Ta 富集, 轻稀土富集且分馏明显, 属高钾钙碱性过铝质 S 型花岗岩, 是燕山早期同碰撞造山的主挤压阶段九岭地区新元古界双桥山群安乐林组富白云母的变泥质岩部分熔融的产物。

(3)洞上产铀花岗岩与产铀的长江岩体、打鼓寨岩体具有相似的岩石地球化学特征, 富铀、Rb/Sr 比值高、Th/U 比值小于 3、锆石铀含量高等指示其为产铀花岗岩, 具有提供铀源的条件与潜力。

References

China National Nuclear Corporation, 1996. Prospecting guidebook on granite-related uranium deposits: EJ/T 996—1996 [S]. Beijing: Nuclear Industry Standardization Institute: 1-67. (in Chinese)

CHEN D, LUO P, ZENG Z F, et al., 2022. Petrogenesis and implications of the Dupangling compound granite in southern Hunan Province, China:

Constraints from mineralogical chemistry, zircon U-Pb age, geochemistry and Nd-Hf isotope[J]. Journal of Geomechanics, 28(4): 617-641. (in Chinese with English abstract)

CHEN Z Y, WANG D H, 2014. The significance of Th, U contents and Th/U ratios of zircons in distinguishing uranium-producing and non-uranium-producing granites[J]. Mineral Deposits, 33(S1):1159-1160.

DONG S W, ZHANG Y Q, LONG C X, et al., 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement[J]. Acta Geologica Sinica, 81(11): 1449-1461. (in Chinese with English abstract)(in Chinese)

DOU X P, 2004. Genetic types of granitoids in eastern China and their relationship to uranium metallogenesis[J]. Uranium Geology, 20(6): 330-336. (in Chinese with English abstract)

DOU X P, XIONG C, DU X S, et al., 2015. Study on uranium contents and the characteristics of migration enrichment in some granitic plutons of East China[J]. World Nuclear Geoscience, 32(3): 145-151. (in Chinese with English abstract)

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[J]. Geology in China, 46(3): 493-516. (in Chinese with English abstract)

GUO C L, CHEN Z Y, LOU F S, et al., 2014. Geochemical characteristics and genetic types of the W-Sn bearing Late Jurassic granites in the Nanling region[J]. Geotectonica et Metallogenia, 38(2): 301-311. (in Chinese with English abstract)

GUO X F, WANG Q L, JING Y H, et al., 2022. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotope Characteristics of the Xihuashan Granites in Southern Jiangxi Province and Their Geological Significance[J]. Geology and Exploration, 58(3): 585-597. (in Chinese with English abstract)

HARRIS N B W, INGER S, 1992. Trace element modelling of pelite-derived granites[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 110(1): 46-56.

- JIANG S Y, PENG N J, HUANG L C, 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)
- LAN H F, LING H F, SUN L Q, et al., 2016. Study on petrogenesis and uranium mineralization potential of Taojindong granite in southern Zhuguangshan composite pluton[J]. *Geological Journal of China Universities*, 22(1): 12-29. (in Chinese with English abstract)
- LEE S Y, BARNES C G, SNOKE A W, et al., 2003. Petrogenesis of Mesozoic, Peraluminous granites in the Lamoille Canyon area, Ruby Mountains, Nevada, USA[J]. *Journal of Petrology*, 44(4): 713-732.
- LING H F, SHEN W Z, SUN T, et al., 2006. Genesis and source characteristics of 22 Yanshanian granites in Guangdong province: study of element and Nd-Sr isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2687-2703. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y, 2019. The mineralogical characteristics of the rare-metal granites in Jiuling district, Jiangxi province and the implication for the various metallogenic mechanism[D]. Nanjing University. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al., 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43.
- 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(1-2): 537-571.
- LUDWIG K R, 2003. Isoplot/Ex, Version 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center.
- MANIAR P D, PICCOLI P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *GSA Bulletin*, 101(5): 635-643.
- 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[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510-526. (in Chinese with English abstract)
- MAO J W, CHEN M H, YUAN S D, et al., 2011. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636-658. (in Chinese with English abstract)
- MIDDLEMOST E A K, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215-224.
- PEARCE J, 1996. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19(4): 120-125.
- PECCERILLO A, TAYLOR S R, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81.
- QIN C, 2018. Preliminary study of mineralization potentiality of Shiziling muscovite granite, Jiangxi province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- SONG B, ZHANG Y H, WAN Y S, et al., 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 48(S1): 26-30. (in Chinese with English abstract)
- SUN J D, LI H L, LU F, et al., 2022. Geochemistry, Zircon U-Pb Ages, and Hf Isotopes of the Mengshan Rock Mass in Western Jiangxi Province and Their Geologic Implications[J]. *Geology and Exploration*, 58(1): 96-107. (in Chinese with English abstract)
- SUN S S, MCDONOUGH W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345.
- SYLVESTER P J, 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1-4): 29-44.
- TAN J, WEI J H, LI Y J, et al., 2007. Some reviews on diagenesis and metallogeny of the Mesozoic crustal remelting granitoids in the Nanling region[J]. *Geological Review*, 53(3): 349-362. (in Chinese with English abstract)
- TIAN Z J, 2014. Uranium-bearing and barren granites from the Zhuguang mountain: geochronology, Element geochemistry, mineralogy comparison[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- WANG D, 2017. Formation of huge granitic batholiths in Jiuling area of North Jiangxi province[D]. Nanjing: Nanjing University. (in Chinese with English abstract)
- WANG L J, WANG J B, WANG Y Z, et al., 2013. Geological characteristics of host granite intrusions of the W-Sn-Nb-Ta deposit, Nanling area, China[J]. *Mineral Exploration*, 4(6): 598-608. (in Chinese with English abstract)
- WANG T, GUO L, LI S, et al., 2019. Some important issues in the study of granite tectonics[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 899-919. (in Chinese with English abstract)
- WANG W L, TENG X J, LIU Y, et al., 2017. Zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of the Wuheertu granite mass in Langshan, Inner Mongolia[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(3): 382-396. (in Chinese with English abstract)
- WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W, 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419.
- WU Y B, ZHENG Y F, 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554-1569.
- XIANG X K, YIN Q Q, SUN K K, et al., 2015a. 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)
- XIANG X K, YIN Q Q, FENG C Y, et al., 2015b. Elements and fluids migration regularity of granodiorite alteration zones in the Shimensi tungsten polymetallic deposit in northern Jiangxi and their constrain on mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(7): 1273-1287. (in Chinese with English abstract)
- XIAO Z B, WANG H C, KANG J L, et al., 2017. U-Pb chronology, Hf isotope and geological implication of zircons from the Neoarchean quartzite in Changyi area, eastern Shandong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2925-2938. (in Chinese with English abstract)
- 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[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 185(17): 104047.
- XU X S, ZHANG H, WU Y, et al., 2021. Disintegration of Daguzhai composite pluton in South Jiangxi and its geological implication[J]. *Uranium Geology*, 37(3): 398-405. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG D, LI F, HE X L, et al., 2021. Mesozoic tectonic deformation and its rock / ore-control mechanism in the important metallogenic belts in South China[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(4): 497-528. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y, PAN J Y, MA D S, et al., 2017. Re-Os molybdenite age of Dawutang tungsten ore district of northwest Jiangxi and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 36(3): 749-769. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y, 2018. Ore-forming fluid evolution and Sb-Au-W metallogenesis in the Central Hunan-northwestern Jiangxi, South China[D]. Nanjing:

- Nanjing University. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y, LIU N Q, PAN J Y, et al., 2019. Multi-mineralization stages of the Shimengsi giant tungsten deposit of Northwest Jiangxi: the application of cumulative frequency distribution in tungsten ore genesis and ore prospecting[J]. *Journal of East China University of Technology*, 42(4): 334-341, 367. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y, PAN J Y, MA D S, et al., 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[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3321-3342. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Q, DONG S W, ZHAO Y, et al., 2007. Jurassic tectonics of North China: a synthetic view[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1462-1480. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO F M, 2011. Research and evaluation of uranium deposits in China (volume IV): carbonaceous-siliceous-pelitic rock type uranium deposit[M]. Beijing: China Nuclear Geology. (in Chinese)
- ZHAO Z H, 1992. Trace element geochemical[J]. *Advances in Earth Science*, 7(5): 65-66. (in Chinese)
- ZHAO Z H, ZHOU L D, 1997. REE geochemistry of some alkali-rich intrusive rocks in China[J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 40(2): 145-158.
- ZHOU J T, WANG G B, HE S F, et al., 2011. Diagenesis and mineralization of Ganfang rock in Yifeng, Jiangxi province[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 34(4): 345-351, 358. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈迪, 罗鹏, 曾志方, 等, 2022. 湘南都庞岭复式花岗岩成因及地质意义: 矿物化学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学与 Nd-Hf 同位素制约[J]. *地质力学学报*, 28(4): 617-641.
- 陈振宇, 王登红, 2014. 锆石 Th、U 含量和 Th/U 比值对产铀、不产铀花岗岩体的判别意义[J]. *矿床地质*, 33(S1): 1159-1160.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等, 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*, 81(11): 1449-1461.
- 窦小平, 2004. 华东地区花岗岩类成因类型及其与铀成矿的关系[J]. *铀矿地质*, 20(6): 330-336.
- 窦小平, 熊超, 杜兴胜, 等, 2015. 华东地区部分花岗岩体铀含量及迁移富集特征研究[J]. *世界核地质科学*, 32(3): 145-151.
- 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[J]. *中国地质*, 46(3): 493-516.
- 郭春丽, 陈振宇, 楼法生, 等, 2014. 南岭与钨锡矿床有关晚侏罗世花岗岩的成矿专属性研究[J]. *大地构造与成矿学*, 38(2): 301-311.
- 郭小飞, 王庆龙, 荆一洪, 等, 2022. 赣南西华山成矿花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 58(3): 585-597.
- 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.
- 兰鸿锋, 凌洪飞, 孙立强, 等, 2016. 诸广山南体桃金洞花岗岩成因和铀成矿潜力探讨[J]. *高校地质学报*, 22(1): 12-29.
- 凌洪飞, 沈渭洲, 孙涛, 等, 2006. 广东省 22 个燕山期花岗岩的源区特征及成因: 元素及 Nd-Sr 同位素研究[J]. *岩石学报*, 22(11): 2687-2703.
- 刘莹, 2019. 江西九岭地区稀有金属花岗岩矿物学特征与成矿机制差异性研究[D]. 南京大学.
- 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[J]. *高校地质学报*, 14(4): 510-526.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等, 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. *地质学报*, 85(5): 636-658.
- 秦程, 2018. 江西宜丰狮子岭白云母花岗岩成矿潜力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等, 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 48(S1): 26-30.
- 孙建东, 李海立, 陆凡, 等, 2022. 赣西蒙山岩体地球化学、锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J]. *地质与勘探*, 58(1): 96-107.
- 谭俊, 魏俊浩, 李艳军, 等, 2007. 南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩成矿的有关问题[J]. *地质论评*, 53(3): 349-362.
- 田泽瑾, 2014. 诸广山产铀与不产铀花岗岩的年代学、地球化学及矿物学特征对比研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王迪, 2017. 赣北九岭地区巨型复式花岗岩基的形成[D]. 南京: 南京大学.
- 王莉娟, 王京彬, 王玉往, 等, 2013. 我国南岭地区钨锡铋钼矿床成矿花岗岩主要地质特征[J]. *矿产勘查*, 4(6): 598-608.
- 王涛, 郭磊, 李舫, 等, 2019. 花岗岩大地构造研究的若干重要问题[J]. *地质力学学报*, 25(5): 899-919.
- 王文龙, 滕学建, 刘洋, 等, 2017. 内蒙古狼山乌和尔图花岗岩岩体锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J]. *地质力学学报*, 23(3): 382-396.
- 吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 49(16): 1589-1604.
- 项新葵, 尹青青, 孙克克, 等, 2015a. 江南造山带中段大湖塘同构造花岗岩斑岩的成因: 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.
- 项新葵, 尹青青, 丰成友, 等, 2015b. 赣北石门寺钨多金属矿床花岗岩闪长岩蚀变带元素、流体迁移规律及其对成矿作用的制约[J]. *地质学报*, 89(7): 1273-1287.
- 肖志斌, 王惠初, 康健丽, 等, 2017. 胶东昌邑地区新太古代石英岩的锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 33(9): 2925-2938.
- 徐勋胜, 张鸿, 吴勇, 等, 2021. 赣南打古寨复式花岗岩体的解体及其地质意义[J]. *铀矿地质*, 37(3): 398-405.
- 张达, 李芳, 贺晓龙, 等, 2021. 华南重要成矿区带中生代构造变形及其控岩控矿机理[J]. *地质力学学报*, 27(4): 497-528.
- 张勇, 潘家永, 马东升, 等, 2017. 赣西北大雾塘钨矿区地质特征及 Re-Os 同位素年代学研究[J]. *矿床地质*, 36(3): 749-769.
- 张勇, 2018. 湘中-赣西北成矿流体演化与 Sb-Au-W 成矿[D]. 南京: 南京大学.
- 张勇, 刘南庆, 潘家永, 等, 2019. 赣西北石门寺超大型钨矿床多期成矿作用: 累积概率格纸在钨矿成因及找矿中的应用[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 42(4): 334-341, 367.
- 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[J]. *地质学报*, 94(11): 3321-3342.
- 张岳桥, 董树文, 赵越, 等, 2007. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识[J]. *地质学报*, 81(11): 1462-1480.
- 赵凤民, 2011. 中国铀矿床研究评价(第四卷): 碳硅泥岩型铀矿床[M]. 北京: 中国核工业地质局.
- 赵振华, 1992. 微量元素地球化学[J]. *地球科学进展*, 7(5): 65-66.
- 中国核工业总公司, 1996. 花岗岩型铀矿找矿指南: EJ/T 976—1996[S]. 北京: 核工业标准化研究所: 1-67.
- 周建廷, 王国斌, 何淑芳, 等, 2011. 江西宜丰地区甘坊岩体成岩成矿作用分析[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 34(4): 345-351, 358.