

粤北下庄花岗岩中晶质铀矿成分特征及其 铀成矿指示

朱京京^{1,2,3}, 张龙^{1,2,3}, 汪方跃^{1,2,3}, 陈振宇⁴

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥工业大学矿床成因与勘查技术研究中心, 安徽合肥 230009; 2. 安徽省矿产资源与矿山环境工程研究中心, 安徽合肥 230009; 3. 安徽省战略性矿产资源深部探测与评价利用重点实验室(合肥工业大学), 安徽合肥 230009; 4. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘要: 晶质铀矿是产铀花岗岩的标型矿物, 是形成花岗岩型铀矿床最重要的铀源矿物, 理解其成分特征与结晶年龄对揭示铀成矿过程具有重要意义。粤北下庄铀矿田是我国重要的花岗岩型铀矿床产地, 本文利用电子探针对该矿田的下庄花岗岩和石土岭铀矿床近矿蚀变花岗岩中的晶质铀矿开展了结构特征和化学年龄研究。结果表明, 下庄花岗岩中晶质铀矿(Urn-1)主要以矿物包体形式赋存于造岩矿物中; 而石土岭铀矿床近矿花岗岩中晶质铀矿(Urn-2)主要与黄铁矿共生, 位于造岩矿物之间。Urn-1和Urn-2的化学年龄分别为 233 ± 3 Ma与 156 ± 2 Ma。前者与下庄岩体的锆石U-Pb年龄一致, 指示Urn-1为岩浆结晶成因。近矿花岗岩发育白云母化和绿泥石化, 对应石土岭矿床的铀成矿早期阶段。这些蚀变花岗岩具有较高的U含量($55.5\times 10^{-6}\sim 118\times 10^{-6}$)和较低的Th/U值(0.15~0.35), 表明这些样品受到了富铀流体的影响, Urn-2从该流体中结晶, 为热液成因。Urn-2的化学年龄进一步约束石土岭铀矿床的铀成矿时代为晚侏罗世。下庄岩体中一些晶质铀矿颗粒发生了蚀变, 其蚀变区域的 UO_2 含量为33.83%~56.01%, 明显低于未蚀变区域($UO_2=86.21\%\sim 95.91\%$), 这可能指示了流体作用下的铀活化迁移与成矿作用。

关键词: 下庄花岗岩; 晶质铀矿; 粤北; 铀成矿作用; 化学年龄

中图分类号: P619.14; P588.12¹

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)01-0113-15

Composition characteristics of uraninite in Xiazhuang granite of northern Guangdong: Implications for uranium mineralization

ZHU Jing-jing^{1,2,3}, ZHANG Long^{1,2,3}, WANG Fang-yue^{1,2,3} and CHEN Zhen-yu⁴

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Ore Deposit and Exploration Centre, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Province Engineering Research Center for Mineral Resources and Mine Environments, Hefei 230009, China; 3. Anhui Provincial Key Laboratory for Deep Exploration, Evaluation and Utilization of Strategic Mineral Resources (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China; 4. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Uraninite is a typical mineral of uranium-bearing granite and the most important source mineral of uranium for the formation of granite-related uranium deposits. Understanding its compositional characteristics and crystallization age is significant for revealing the uranium mineralization process. The Xiazhuang uranium ore field in

收稿日期: 2023-07-10; 接受日期: 2024-04-15; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272074, 42002077); 中央高校基本科研业务费专项资金(PA2024GDSK0160, JZ2022HGTB0301)

作者简介: 朱京京(1997-), 女, 硕士研究生, 地质学专业, E-mail: 1635195436@qq.com; 通讯作者: 张龙(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿床学与成因矿物学研究, E-mail: huiwananlin@163.com。

网络首发时间: 2024-06-27; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240625.1010.002.html>

northern Guangdong is an important granite-related uranium deposit in China. In this study, textures and chemical ages of uraninite from the Xiazhuang granite and the altered granite at the Shituling uranium deposit were investigated using EPMA. The results indicate that uraninite in the Xiazhuang granite (Urn-1) is enclosed in rock-forming minerals, and the uraninite near the ore granite of the Shituling uranium deposit (Urn-2) is intergrown with pyrite and occurs between rock-forming minerals. EPMA data yielded the chemical ages of 233 ± 3 Ma and 156 ± 2 Ma for Urn-1 and Urn-2, respectively. The former is consistent with the zircon U-Pb age of the Xiazhuang granite, indicating that Urn-1 is of magmatic origin. Hydrothermal alteration of the altered granite mainly includes muscovitization and chloritization, corresponding to the early stage of uranium mineralization of the Shituling deposit. These altered samples have higher whole-rock U contents ($55.5\times 10^{-6}\sim 118\times 10^{-6}$) and lower Th/U ratios (0.15~0.35) relative to the fresh rocks, indicating that these samples were influenced by uranium-rich fluids, and Urn-2 crystallized from that fluid, suggesting a hydrothermal origin. The chemical age of Urn-2 further indicates that uranium mineralization of the Shituling uranium deposit took place at the Late Jurassic. Some uraninites have been altered, and UO_2 contents of the altered domains are 33.83%~56.01%, obviously lower than the unaltered domains ($UO_2=86.21\%\sim 95.91\%$), which may suggest the mobilization and mineralization of uranium related to hydrothermal activity.

Key words: Xiazhuang granite; uraninite; northern Guangdong; uranium mineralization; chemical ages

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42272074, 42002077); Fundamental Research Funds for the Central Universities (PA2024GDSK0160, JZ2022HGTD0301)

花岗岩型铀矿床是指与花岗岩体有密切空间和成因关系的热液铀矿床,它可产在岩体内部或其外围不远的一定范围内(杜乐天等,1982)。花岗岩型铀矿床一般是后生热液成因,其形成往往是热液流体从富铀岩石(包括花岗岩和地层)萃取出铀,然后迁移到合适位置沉淀成矿(Hu *et al.*, 2008; Bonnetti *et al.*, 2018; 张龙等, 2021)。富铀花岗岩往往被认为是形成花岗岩型铀矿床的主要铀源(陈培荣, 2004; 凌洪飞, 2011; Bonnetti *et al.*, 2018)。研究表明,产铀花岗岩中的铀主要赋存于晶质铀矿中(Pagel, 1982; Cuney and Friedrich, 1987; Zhang *et al.*, 2021)。由于晶质铀矿具有铀含量高且易被浸出的特点,被认为是形成花岗岩型铀矿床的重要物质来源(戎嘉树等, 1980; Cuney and Friedrich, 1987),因此查明花岗岩中晶质铀矿的结构特征和成分组成对理解花岗岩与铀成矿之间的关系具有重要意义。

花岗岩型铀矿床是我国最重要的铀矿床类型之一,主要分布在华南地区的诸广山、贵东、苗儿山、桃山、摩天岭等复式岩体中(张祖还等, 1991)。这些复式岩体通常由不同时期的花岗岩组成,例如诸广山岩体主要是由志留纪、三叠纪和侏罗纪花岗岩组成的复式岩体(Deng *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2018)。粤北下庄铀矿田是我国重要的花岗岩型铀矿床产地,位于贵东岩体的东部,该地区产有 18 个

铀矿床和多个铀矿点。前人对下庄铀矿田铀矿床的地质特征(吴继光, 2011; 张佳, 2014; 钟福军等, 2014)、花岗岩成因(Chen *et al.*, 2012)、成矿时代(徐达忠等, 1999; 胡宝群等, 2003; 吴烈勤等, 2003; 张佳, 2014; Bonnetti *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2022)、成矿流体(朱捌等, 2006; 何德宝等, 2015)和成矿机制(吴继光, 2011; Chen *et al.*, 2012; 钟福军等, 2014; Bonnetti *et al.*, 2018, 2023; 骆金诚等, 2019)开展了广泛研究。这些研究表明,下庄铀矿的铀矿床主要形成于侏罗纪(175~145 Ma)和白垩纪-古近纪(110~50 Ma)两个阶段(胡宝群等, 2003; 吴烈勤等, 2003; Luo *et al.*, 2015; Bonnetti *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2022)。侏罗纪(175~145 Ma)铀矿化的成矿物质被认为是来自侏罗纪花岗岩岩浆分异的岩浆流体,晶质铀矿形成于高温环境(徐达忠等, 1999; 胡宝群等, 2003; Bonnetti *et al.*, 2018, 2023)。白垩纪-古近纪(110~50 Ma)铀矿化的成矿物质主要由流体萃取自花岗岩,成矿流体以区域白垩系-古近系红层盆地的卤水(主要为大气降水)为主,部分来自于地幔流体(何德宝等, 2015; Zhang *et al.*, 2019; Chi *et al.*, 2020; 张龙等, 2021)。

下庄矿田的铀矿床主要赋存在下庄、帽峰和笋洞花岗岩中(图 1a)。戎嘉树等(1980)对下庄矿田的花岗岩中晶质铀矿成因进行了初步探讨,认为有

岩浆阶段结晶和岩浆结晶后的自变质作用下形成的两种观点。张成江(1990)对下庄矿田的产铀与不产铀花岗岩(下庄与鲁溪等岩体)中晶质铀矿的标型特征进行了对比研究,指出贫钍晶质铀矿的含量高是产铀花岗岩的一个重要特征,并且认为晶质铀矿主要在岩浆阶段形成,少数可能在岩浆期后阶段形成。此外,下庄矿田的竹山下、白水寨和石土岭等铀矿床存在高温铀成矿作用,以出现晶质铀矿、电气石、白钨矿、钾长石、白云母等矿物组合为特征,成矿物质来自侏罗纪花岗岩岩浆的岩浆热液(胡宝群等, 2003; Bonnetti *et al.*, 2023)。由于形成于高温环境的热液成因晶质铀矿常常与花岗岩中晶质铀矿副矿物的成分组成相似,即具有较高含量的 Th 和稀土元素(Σ REE 大于 1%), 较低的 Si、Ca、Fe 含量(Zhang *et al.*, 2021), 因此仅通过成分特征很难判断花岗岩中晶质铀矿的成因。石土岭铀矿床是下庄铀矿田中一个典型的形成于高温环境(290~350℃)的花岗岩型铀矿床(倪师军, 1987; 朱捌等, 2006)。朱捌等(2006)利用沥青铀矿(晶质铀矿的隐晶质变种) U-Pb 等时线年龄法获得石土岭矿床铀成矿时代为 135 ± 40 Ma, 而 Bonnetti 等(2018)利用 SIMS U-Pb 定年获得成矿年龄为 162 ± 27 Ma。可见石土岭矿床的铀成时代需要进一步约束。电子探针具有高空间分辨率等优点, 已经被广泛应用于晶质铀矿 U-Th-Pb 化学定年(Förster, 1999; Kempe, 2003; Alexandre and Kyser, 2005; Förster *et al.*, 2012; 张龙等, 2016, 2018; Zhang *et al.*, 2021)。本文在石土岭铀矿床近矿花岗岩中发现了与下庄花岗岩的晶质铀矿副矿物和该矿床的沥青铀矿有明显结构和成分差异的晶质铀矿, 这类晶质铀矿的成因尚不明确。本文利用电子探针对下庄花岗岩和石土岭矿床近矿花岗岩中的晶质铀矿开展结构特征和化学成分分析, 以探讨晶质铀矿成因以及对区域铀成矿的指示, 进一步约束石土岭铀矿床的成矿时代。研究结果对揭示华南产铀花岗岩中晶质铀矿成因以及铀富集成矿机制具有重要意义。

1 地质概况

华南地块位于欧亚大陆东南部, 由扬子地块及华夏地块组成, 其稀有、稀土及金属等矿产资源极其丰富, 是我国目前最重要的矿产资源集中产区(Zhang *et al.*, 2021; 吴德海, 2022)。黄净白等

(2005)将华南地块划分为 7 个主要铀成矿带, 其中桃山-诸广铀成矿带是华南地区最重要的花岗岩型铀矿床带。华南地区重要的铀矿田有诸广、鹿井、下庄、苗儿山、桃山、大湾等矿田(张祖还等, 1991; 邓平等, 2003; 张龙等, 2021; 谭双等, 2022)。粤北贵东岩体为三叠纪-侏罗纪花岗岩多期次岩浆侵入形成的复式岩体, 前人认为贵东岩体属于壳源花岗岩, 是由地壳减薄拉张形成的(李建红等, 2004; Chen *et al.*, 2012)。贵东复式花岗岩体主要由三叠纪的下庄岩体(235.9 ± 3.3 Ma)、鲁溪岩体(240.9 ± 2.4 Ma, 吴佳等, 2023)和帽峰岩体(235.6 ± 0.62 Ma, 张佳, 2014)以及侏罗纪的笋洞岩体(189.1 ± 0.7 Ma, 凌洪飞等, 2004)、岩庄岩体(161.33 ± 0.57 Ma)和陈洞岩体(159.81 ± 0.86 Ma, 张佳, 2014)等组成。下庄铀矿田位于贵东复式岩体东部, 南岭 EW 向构造岩浆带的中段, 是由强烈的构造运动和断裂导致的岩浆活动形成的(邓平等, 2003; 何德宝等, 2015; 吴德海, 2020), 是我国最重要的花岗岩型铀矿田之一。该矿田出露的花岗岩主要由下庄、笋洞、鲁溪、帽峰、陈洞、龟尾山等岩体等组成(图 1a)。基性岩脉常发育于产铀岩体中, 厚度一般为几米至几十米。下庄岩体内发育 NWW、NNE 和 NEE 向基性岩脉(骆金诚等, 2019), 岩性主要是辉绿岩与煌斑岩(李献华等, 1997), 该区主要发育 4 期基性岩脉: 200~190 Ma、约 180 Ma、145~140 Ma 和约 90 Ma(李献华等, 1997; Wang *et al.*, 2015; 骆金诚等, 2019)。

目前下庄矿田内已探明 18 个铀矿床, 铀矿化类型受构造控制, 下庄矿田的铀矿床分为 5 种矿化类型: 硅质脉型、“交点”型、花岗岩外带型、碱交代型、蚀变碎裂岩型(何德宝, 2018)。其中硅质脉型与“交点”型铀矿床具有铀资源储量大、矿石品位高、埋藏浅等特点(钟福军等, 2014), 因此分布广且数量多。“交点”型铀矿床是指铀矿化产于区域断裂构造与基性岩脉相交部位。下庄“交点”型铀矿床以下庄、仙石、寨下矿床为主, 矿体与辉绿岩脉关系密切(图 1a), 且多呈板柱状或透镜状, 沥青铀矿主要呈脉状、团块状, 矿石品位较富。硅质脉型铀矿床通过硅化带规模分为群脉亚型与大脉亚型。岩石中常见赤铁矿、黄铁矿、萤石、方解石等矿物。群脉亚型呈微细脉沿裂隙带密集分布, 代表矿床为希望矿床, 品位低; 大脉亚型矿体一般呈单脉状、透镜状, 代表矿床为大帽峰矿床, 其矿体平均品位 12.67%。花岗岩外带型铀矿床包括新桥东、坪田矿床, 岩石中含有强还

原性矿物如黄铁矿等,矿体较小,呈透镜状产出,品位低。碱交代型铀矿床以石土岭矿床为主,发育强烈的绢云母化。蚀变碎裂岩型铀矿床以竹筒尖矿床为主,伴生矿物包括沥青铀矿、萤石、微晶石英、黄铁矿等(何德宝,2018)。研究表明下庄铀矿田铀成矿时代主要有两期:① 175~145 Ma,如白水寨(175±16 Ma, Bonnetti *et al.*, 2018)、石土岭(162±27 Ma, Bonnetti *et al.*, 2018)和竹山下(146~165.5 Ma, 胡宝群等, 2003); ② 110~50 Ma,如希望(51.3±0.8 Ma, Zhang *et al.*, 2022)和仙石(89.9±2.1 Ma, Zhang *et al.*, 2022)。

石土岭铀矿床位于贵东复式岩体东部(图1a),属碱交代型矿床,成矿温度高(290~338℃,倪师军,1987)。矿床中出露的岩体主要有三叠纪下庄岩体(235.9±3.3 Ma, 吴佳等, 2023)和帽峰岩体(235.6±0.6 Ma, 张佳, 2014),燕山早期石土岭岩体(151 Ma)、辉绿岩(142.6 Ma, 李献华等, 1997)和

辉绿玢岩、细晶岩、伟晶岩、正长岩等晚期脉岩(图1b,朱捌等, 2006; 何德宝等, 2015)。矿体主要赋存于帽峰和下庄花岗岩的接触部位。矿体受近EW向构造控制,矿区内发育NWW向和NNE向基性岩脉,矿体呈脉状产出。沥青铀矿为主要矿石矿物,其他金属矿物有黄铁矿、黑钨矿、方铅矿、辉钼矿等,脉石矿物主要是石英和白云母,少量方解石、萤石和绿泥石,围岩蚀变主要有白云母化、绿泥石化、钾长石化和电气石化等类型(邓平等, 2005; 朱捌等, 2006; Bonnetti *et al.*, 2018, 2023)。

2 样品及分析方法

本文样品采自下庄花岗岩的地表露头相对新鲜花岗岩(样品号: XZ-1、XZ-2、XZ-3、XZ-3-1)和石土岭铀矿床的近矿蚀变花岗岩(样品号: XZ-4、XZ-5),该近矿花岗岩属于下庄花岗岩。

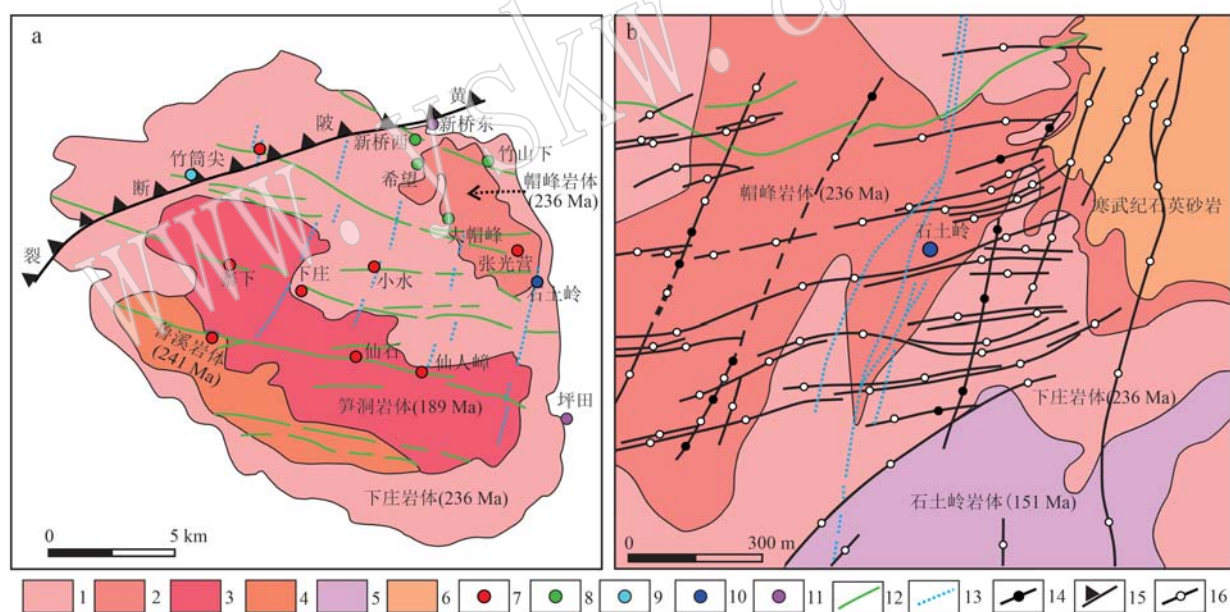


图1 粤北下庄铀矿田地质图(a, 据凌洪飞等, 2004; 朱捌等, 2006; 张佳, 2014; 骆金诚等, 2019; 吴佳等, 2023)和石土岭铀矿床地质图(b, 据朱捌等, 2006)

Fig. 1 Simplified geological map the Xiazhuang uranium ore field, northern Guangdong (a, after Ling Hongfei *et al.*, 2004; Zhu Ba *et al.*, 2006; Zhang Jia, 2014; Luo Jincheng *et al.*, 2019; Wu Jia *et al.*, 2023) and geological map of the Shituling uranium deposit (b, after Zhu Ba *et al.*, 2006)

1—下庄中粗粒二云母花岗岩; 2—帽峰细粒二云母花岗岩; 3—笋洞中粒二云母花岗岩; 4—鲁溪粗粒黑云母花岗岩; 5—石土岭中粒黑云母花岗岩; 6—寒武纪石英砂岩; 7—交点型铀矿床; 8—硅质脉型铀矿床; 9—蚀变碎裂岩型铀矿床; 10—碱交代型铀矿床; 11—花岗岩外接触带型铀矿床; 12—辉绿岩; 13—辉绿玢岩; 14—碎裂花岗岩; 15—断裂; 16—硅化带

1—Xiazhuang middle- to coarse-grained two-mica granite; 2—Maofeng fine-grained two-mica granite; 3—Sundong middle-grained two-mica granite; 4—Luxi coarse-grained biotite granite; 5—Shituling middle-grained biotite granite; 6—Cambrian quartz sandstone; 7—intersection-type uranium deposit; 8—silicified vein-type uranium deposit; 9—cataclastic alteration granite-type uranium deposit; 10—alkali metasomatic-type uranium deposit;

11—granite outer contact zone-type uranium deposit; 12—diabase dyke; 13—diabase-porphyrite dyke; 14—cataclastic granite; 15—fault;

16—silicified zone

电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,仪器为日本生产的JXA-8230电子探针,所用加速电压为20 kV,束流为50 nA,束斑大小为1~5 μm ;所用标准样品和分光晶体为硬玉(Na: TAP; Al: TAP; Si: PETJ)、镁橄榄石(Mg: TAP)、黄玉(F: TAP)、硅灰石(Ca: PETH)、赤铁矿(Fe: LIF)、磷灰石(P: PETJ)、 UO_2 (U: PETH)、 PbCO_4 (Pb: PETH)、 ThO_2 (Th: PETH);稀土元素标样为合成稀土五磷酸盐。元素面扫描分析加速电压为15 kV,束流100 nA,停留时间为50 ms。本文首先利用ChemAge软件(Geisler, 1999)计算出晶质铀矿的单点年龄,然后用Isoplot软件计算其加权平均年龄,单点年龄误差根据电子探针的分析误差计算所得。

岩石微量元素分析是在中国地质科学院国家测试中心完成。微量元素分析依据DZ/T0223-2001电感耦合等离子体质谱法通则,测试仪器为HR-ICP-MS(Element 1)。将50 mg全岩粉末溶于1 mL HF和0.5 mL HNO_3 的15 mL Saville Teflon 螺帽胶囊中,在190°C下保持1天干燥,用0.5 mL HNO_3 溶解,然后再次干燥。胶囊中的物质用0.5 mL HNO_3 溶解,再次干燥,以确保完全溶解。然后将样品溶蚀在5 mL HNO_3 ,并在130°C下在烤箱中密封3小时。冷却后,将溶液放入塑料瓶,并稀释至50 mL后进行分析。外标采用纯元素溶液,标准物质为BHVO-1和SY-4。对于大部分 $>10 \times 10^{-6}$ 的微量元素,ICP-MS分析的相对误差小于5%;对于 $<10 \times 10^{-6}$ 的微量元素,相对误差小于10%。

3 分析结果

3.1 岩相学特征

下庄花岗岩岩性主要为中粗粒二云母花岗岩,主要矿物为石英(30%~35%)、钾长石(35%~40%)、斜长石(15%~20%)、白云母(2%~3%)、黑云母(3%~5%)。含铀副矿物主要有晶质铀矿、锆石、独居石、钍石、磷灰石。大部分独居石与钍石颗粒包裹在主要矿物中,尤其是长石与云母,石英中较少。在薄片,钍石较少且粒径较小,零星分布,一般为10~50 μm ,独居石较多且颗粒较大,最大可达200 μm 。一些独居石发生部分蚀变,蚀变产物为磷灰石、氟碳铈矿和钍石(图2c、2d)。

样品XZ-1、XZ-2、XZ-3和XZ-3-1为相对新鲜的

下庄花岗岩(图2a),其中晶质铀矿(Urn-1)颗粒大小约为5~100 μm ,主要呈包体分布于白云母、黑云母、石英和钾长石等主要造岩矿物中(图3a~3e)。样品XZ-4和XZ-5为石土岭铀矿床的近矿蚀变花岗岩(图2b),呈黄绿色,蚀变类型主要有白云母化、绿泥石化。这两个样品中的晶质铀矿(Urn-2)主要赋存于造岩矿物颗粒之间,一般与黄铁矿共生(图3f~3h)。另外,在样品XZ-5中发现少量晶质铀矿不与黄铁矿共生(图3i),结合成分与化学年龄对比确定其属于Urn-1。背散射图像显示该晶质铀矿颗粒被富U硅酸盐部分替代,该区域的背散射强度明显降低(图3i)。

3.2 岩石微量元素特征

下庄花岗岩全岩微量元素数据列于表1。相对新鲜花岗岩(样品号XZ-1)的U含量为 29.3×10^{-6} , Th/U值为1.04。蚀变样品(样品号XZ-4、XZ-5)的全岩U含量为 $55.5 \times 10^{-6} \sim 118 \times 10^{-6}$, Th/U值为0.15~0.35(图4a)。在球粒陨石稀土元素配分模式图中,石土岭铀矿床近矿蚀变花岗岩与下庄新鲜花岗岩都表现出轻稀土元素相对富集且Eu负异常的特征(图4b)。

3.3 独居石元素面扫描特征

独居石的蚀变产物主要为磷灰石、氟碳铈矿和钍石(图5a)。磷灰石和氟碳铈矿主要位于独居石颗粒的边部,而钍石零星分布在独居石内部。元素面扫描图像显示在独居石、磷灰石、氟碳铈矿和钍石这4个矿物中,磷灰石含有较高的Ca、P、F等元素含量,独居石含有较高的La和Ce等稀土元素含量,Th和U主要在钍石中富集(图5b~5i)。

3.4 晶质铀矿化学成分与定年结果

本文对下庄花岗岩与石土岭铀矿床近矿蚀变花岗岩中的晶质铀矿进行了电子探针成分分析,分析结果见表2。下庄新鲜花岗岩中Urn-1的 UO_2 含量变化范围为89.64%~95.91%, ThO_2 含量变化范围为0.18%~0.97%,PbO含量变化范围为2.84%~3.12%; $\text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{FeO}$ 含量很低,低于0.03%。Urn-1的化学年龄范围为250~220 Ma。

近矿花岗岩中Urn-2的 UO_2 含量变化范围为86.21%~95.86%, ThO_2 含量变化范围为0.63%~1.57%,PbO含量变化范围为1.81%~2.02%, Y_2O_3 含量为0.29%~0.97%, $\text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{FeO}$ 含量为0.29%~1.23%。Urn-2的化学年龄范围为165~150 Ma。Urn-2的PbO含量明显低于Urn-1。

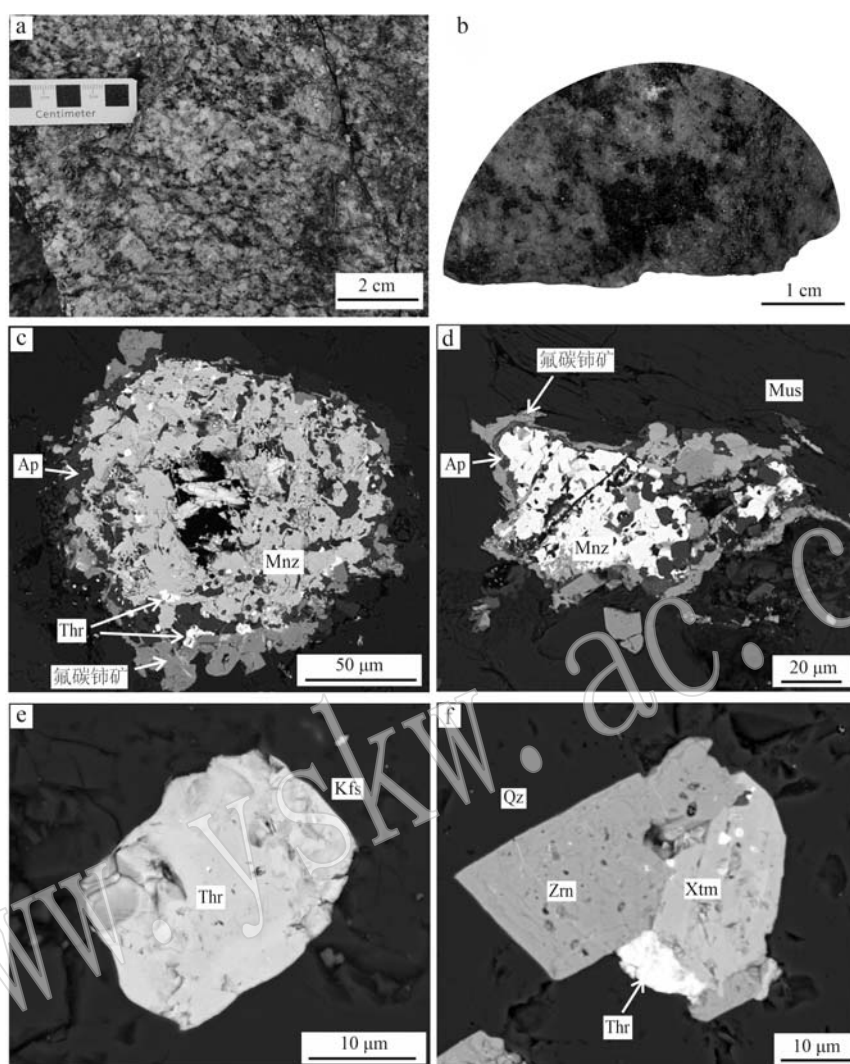


图2 下庄岩体野外照片(a)、典型手标本照片(b)与含铀副矿物背散射图像(c~f)

Fig. 2 Field photograph(a), hand specimen photograph(b), and BSE images of U-bearing accessory minerals(c~f)

in the Xiaozhuang granite

a—相对新鲜的下庄花岗岩野外照片；b—石土岭铀矿床黄绿色近矿蚀变花岗岩手标本照片；c~d—独居石被磷灰石、钍石和氟碳铀矿部分替代；e—钾长石中的钍石；f—锆石、钍石与磷铀矿；Ap—磷灰石；Mnz—独居石；Qz—石英；Thr—钍石；Zm—锆石；Kfs—钾长石；

Mus—白云母；Xtm—磷铀矿

a—relatively fresh field photographs of the Xiaozhuang granite; b—an altered sample with a characteristic yellow-green color from the Shituling uranium deposit; c~d—monazite was partly replaced by apatite, thorite, and xenotime; e—thorite in K-feldspar; f—zircon, thorite and xenotime;

Ap—apatite; Mnz—monazite; Qz—quartz; Thr—thorite; Zm—zircon; Kfs—K-feldspar; Mus—muscovite; Xtm—xenotime

样品 XZ-5 中晶质铀矿(图 3i)的未蚀变区域的 UO_2 含量为 90.48%~93.05%, ThO_2 含量为 0.51%~0.72%, PbO 含量变化范围为 3.02%~2.82%, $SiO_2 + CaO + FeO$ 含量小于 0.03%, 单点化学年龄为 229~239 Ma。结合结构特征,认为该晶质铀矿应属于 Urn-1。相比于未蚀变区域,蚀变区域的 UO_2 (33.83%~56.01%)、 PbO (0.04%~0.12%) 含量降低,而 $SiO_2 + CaO + FeO$ (8.69%~15.78%) 和 ThO_2

(1.30%~15.78%) 含量明显增加。蚀变区域的总量(低于 80%)偏低,这可能是由于蚀变区域含有更高的 U^{6+} 含量和空位,或者含有吸附水和羟基(Zhang *et al.*, 2021)。

用 Isoplot 软件将这两类晶质铀矿的单点化学年龄进行加权平均年龄计算, Urn-1 加权平均年龄为 233 ± 3 Ma ($n=19$, $MSWD=1.0$) (图 6a), Urn-2 加权平均年龄为 156 ± 2 Ma ($n=17$, $MSWD=0.8$) (图 6b)。

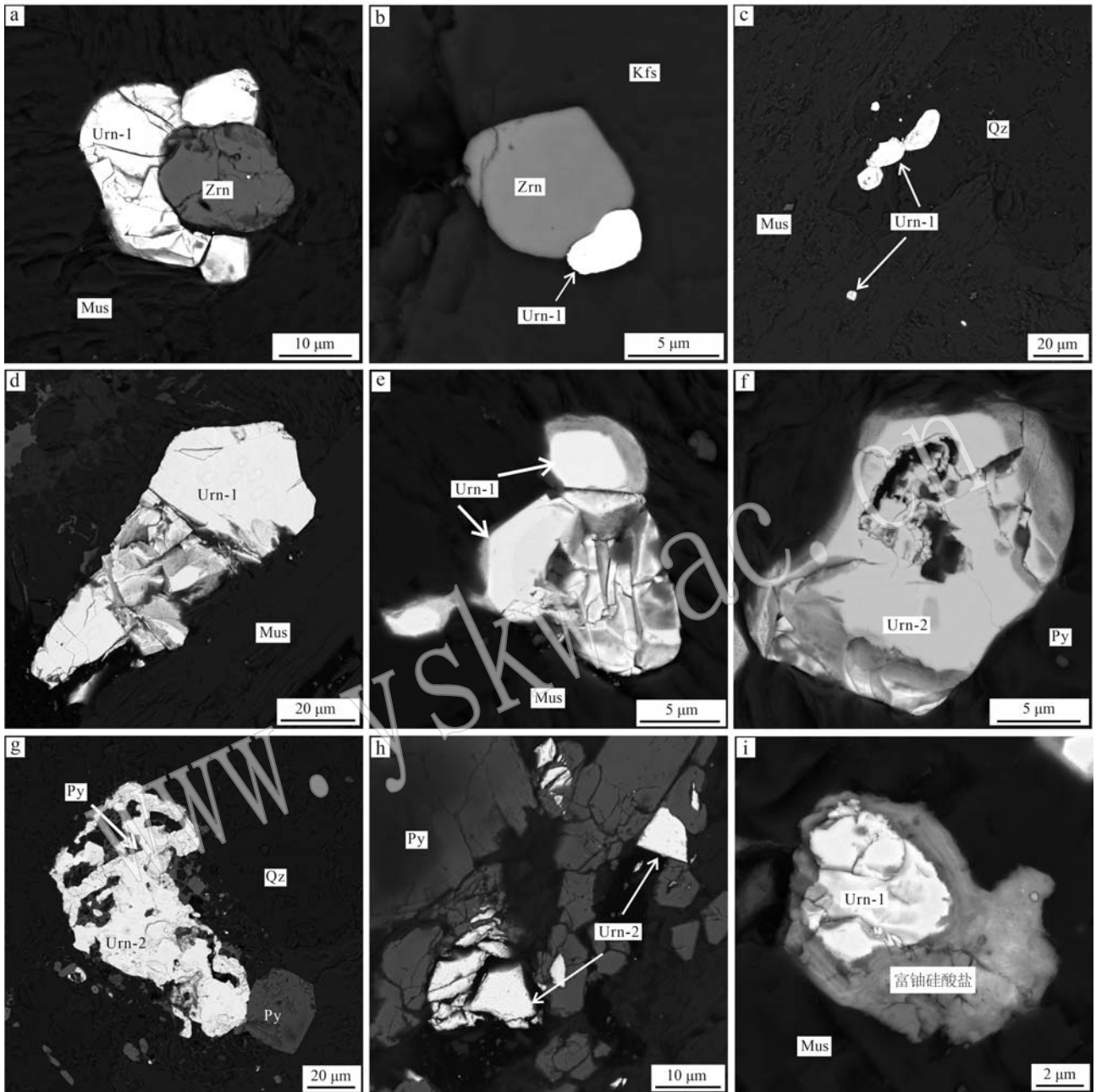


图 3 下庄花岗岩与石土岭矿床近矿蚀变花岗岩中晶质铀矿背散射图像

Fig. 3 BSE images of uraninite in the Xiaozhuang granite and altered granite at the Shituling uranium deposit

a~b—样品 XZ-1 和 XZ-2 中与锆石共生的晶质铀矿 (Urn-1), 分别赋存在白云母和钾长石中; c—分布在石英和白云母中的晶质铀矿 (Urn-1); d~e—样品 XZ-3 中包裹在白云母中的晶质铀矿 (Urn-1); f—样品 XZ-4 中的晶质铀矿 (Urn-2); g~h—样品 XZ-4 和 XZ-5 中与黄铁矿共生的晶质铀矿 (Urn-2); i—样品 XZ-5 中包裹在白云母中的晶质铀矿 (Urn-1), 被富铀硅酸盐部分替代; Urn—晶质铀矿; Mus—白云母; Py—黄铁矿; Qz—石英; Zrn—锆石; Kfs—钾长石

a~b—Urn-1 in samples XZ-1 and XZ-2 associated with zircon and occur in muscovite and K-feldspar, respectively; c—uraninites (Urn-1) occur in quartz and muscovite; d~e—uraninites (Urn-1) enclosed in muscovite in sample XZ-3; f—uraninite (Urn-2) in sample XZ-4; g~h—uraninites (Urn-2) surrounded by pyrites in samples XZ-4 and XZ-5; i—uraninite (Urn-1) enclosed in muscovite in sample XZ-5 and partly replaced by U-rich silicates; Urn—uraninite; Mus—muscovite; Py—pyrite; Qz—quartz; Zrn—zircon; Kfs—K-feldspar

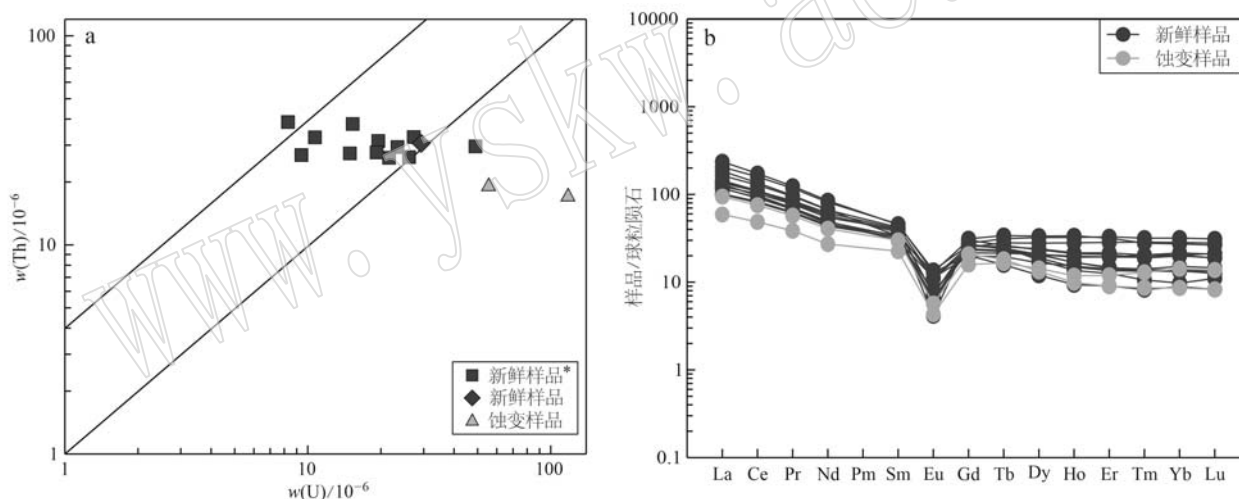
表1 下庄花岗岩和石土岭铀矿床近矿花岗岩的微量元素组成

 $w_B/10^{-6}$

Table 1 Whole-rock trace elements for the Xiazhuang granite and altered granite at the Shituling uranium deposit

样品	Y	Th	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
XZ-1	22.8	30.6	29.3	33.3	66.7	8.05	28.7	6.21	0.42	5.59	0.89	4.81	0.84	2.24	0.34	2.29	0.32
XZ-4	17.1	19.5	55.5	22.4	46.1	5.45	19.0	4.58	0.33	4.27	0.68	3.37	0.56	1.49	0.22	1.46	0.21
XZ-5	19.4	17.3	118	14.0	29.8	3.66	12.7	3.45	0.25	3.27	0.62	3.63	0.67	1.98	0.33	2.42	0.35
XZ-02*	35.7	29.4	23.4	34.1	67.7	7.84	27.2	5.67	0.64	4.93	0.86	5.26	1.09	3.21	0.52	3.45	0.48
XZ-03*	40.0	32.8	27.3	39.0	78.3	9.03	31.0	6.45	0.65	5.32	0.95	6.10	1.22	3.57	0.52	3.66	0.53
XZ-04*	37.8	37.9	15.3	48.8	97.4	11.2	38.0	7.03	0.75	6.20	0.98	5.93	1.20	3.41	0.48	3.39	0.48
XZ-05*	31.3	31.4	19.5	31.9	66.3	7.52	26.9	5.98	0.42	5.37	0.91	5.26	0.95	2.45	0.34	2.26	0.34
XZ-07*	61.0	32.7	10.7	29.2	62.4	7.35	25.4	6.10	0.24	6.42	1.27	8.50	1.91	5.26	0.71	4.65	0.67
XZ-11*	55.4	26.1	21.6	23.6	49.4	5.84	20.3	4.98	0.34	5.15	1.05	7.08	1.59	4.70	0.73	4.82	0.71
XZ-12*	18.0	26.3	26.1	43.7	83.1	9.24	31.4	5.12	0.75	4.13	0.59	3.05	0.53	1.50	0.21	1.51	0.21
XZ-14*	25.5	38.7	8.29	56.0	106	11.8	39.7	6.92	0.79	5.41	0.93	4.55	0.77	2.08	0.27	1.66	0.28
XZ-15*	31.0	27.7	19.2	27.6	56.8	6.51	22.7	5.11	0.38	4.81	0.84	5.21	0.95	2.41	0.36	2.57	0.37
XZ-16*	62.6	29.6	49.0	24.1	50.8	5.98	21.0	5.25	0.36	5.71	1.17	8.21	1.83	5.45	0.81	5.41	0.79
XZ-17*	38.0	26.9	9.41	28.0	55.7	6.43	21.8	4.66	0.46	4.44	0.80	5.26	1.12	3.21	0.49	3.44	0.54
XZ-18*	28.7	27.4	14.9	30.9	59.3	6.65	23.2	4.55	0.65	4.10	0.73	4.22	0.86	2.34	0.35	2.35	0.34

注:带*数据引自Chen等(2012)。

图4 下庄花岗岩与石土岭矿床近矿蚀变花岗岩的全岩Th-U图解(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(b)
(带*数据引自Chen *et al.*, 2012; 球粒陨石标准化数据源于Sun and McDonough, 1989)Fig. 4 Whole-rock Th-U plot (a) and chondrite-normalized REE diagram (b) for the Xiazhuang granite and altered granite at the Shituling uranium deposit (data with * are from Chen *et al.*, 2012; the normalization values of chondrite are from Sun and McDonough, 1989)

4 讨论

4.1 晶质铀矿化学年龄的地质意义

近40年以来,晶质铀矿电子探针化学定年被广泛应用于在众多科学研究,主要用于揭示晶质铀矿结晶年龄和铀成矿过程(Förster, 1999; Kempe, 2003; Alexandre and Kyser, 2005; Deditius *et al.*,

2007; Förster *et al.*, 2012; Ozha *et al.*, 2017; Martz *et al.*, 2019)。一般当满足以下两个条件时,通过电子探针化学定年所获得的晶质铀矿化学年龄才具有地质意义:①所测矿物自形成后,未发生U、Th、Pb的丢失,即没有经过后期改造,封闭性良好;②待测矿物中初始铅含量可忽略不计(葛祥坤, 2014)。下庄岩体中晶质铀矿蚀变区域的 $\text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{FeO}$ 含量为8.69%~15.78%,表明杂质Si、Ca、Fe进入晶质铀

矿晶体中破坏了其 U-Th-Pb 体系 (Montel *et al.*, 1996; Kempe, 2003), 即 U、Th、Pb 丢失被杂质替代, 因此计算的化学年龄可能不具有地质意义。晶质铀

矿未蚀变区域的 $\text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{FeO}$ 含量很低, 皆小于 1.23%, 表明其 U-Th-Pb 体系自结晶后并未受到后期改造, 计算所获得的化学年龄具有地质意义。

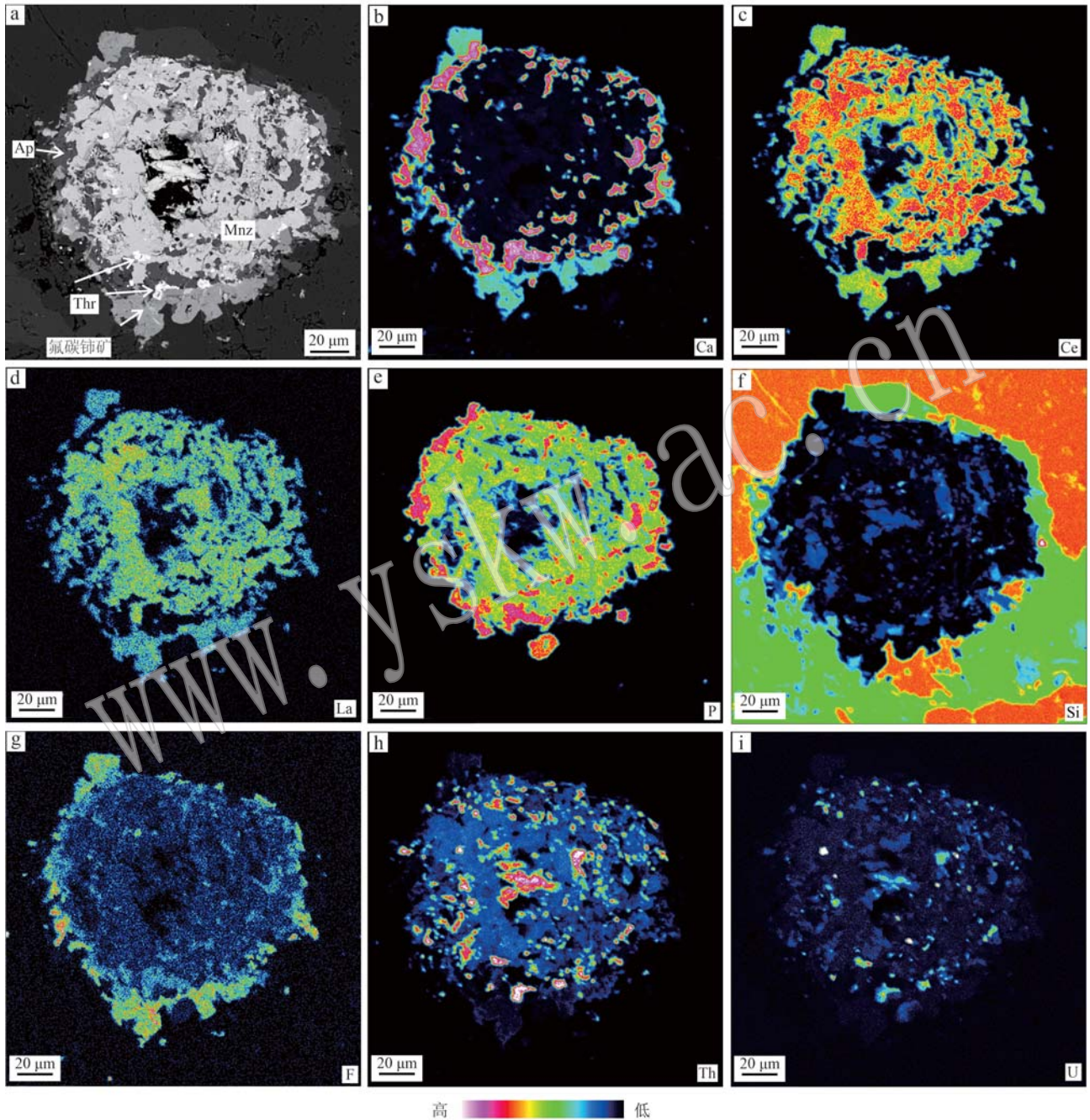


图 5 下庄花岗岩中蚀变独居石元素面扫描图像

Fig. 5 Elemental maps of altered monazite from the Xiaozhuang granite

电子探针化学定年获得下庄花岗岩中晶质铀矿 Urn-1 与石土岭铀矿床近矿花岗岩中晶质铀矿 Urn-2 的化学年龄分别为 233 ± 3 Ma 和 156 ± 2 Ma (图 6)。前者与下庄岩体中锆石 U-Pb 年龄 (235.9 ± 3.3 Ma,

吴佳等, 2023) 一致, 表明 Urn-1 是岩浆结晶成因。Urn-2 的化学年龄明显小于 Urn-1 的化学年龄。Urn-2 主要赋存于造岩矿物之间, 并且与黄铁矿共生, 这表明 Urn-2 可能为热液成因 (Zhang *et al.*, 2021)。在下

表2 下庄花岗岩与石土岭矿床近矿蚀变花岗岩中晶质铀矿电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 2 EPMA chemical compositions of uraninite from the Xiaozhuang granite and altered granite at the Shituling uranium deposit

样品号	UO ₂	ThO ₂	PbO	SiO ₂	CaO	FeO	Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	总量	年龄/Ma	误差/Ma
XZ-1	93.39	0.28	2.99	-	-	-	0.16	-	0.07	97.47	236	7
	92.86	0.33	2.94	-	-	-	0.16	-	0.22	96.55	233	7
	93.92	0.38	2.98	-	-	-	0.16	-	0.09	97.95	234	6
	94.45	0.31	2.84	-	-	-	0.12	-	0.19	98.09	222	6
	92.75	0.24	2.93	-	-	-	0.17	-	0.06	96.52	233	7
XZ-2	95.77	0.46	3.00	-	-	-	0.38	-	-	100.51	231	6
	95.64	0.22	2.94	-	-	-	0.28	-	-	99.17	227	6
	91.71	0.32	3.12	-	-	-	0.27	-	-	96.08	250	7
	90.41	0.55	2.86	-	0.03	-	0.18	-	0.11	94.38	233	7
	91.80	0.56	2.92	-	-	-	0.21	-	-	96.54	234	7
XZ-3	95.37	0.97	2.85	-	-	-	0.33	-	-	99.73	220	6
	89.64	0.53	2.92	-	-	-	0.34	0.17	-	94.16	240	7
	95.91	0.18	3.05	-	-	-	0.21	-	0.17	100.14	234	6
	90.67	0.45	2.90	-	-	-	0.20	-	0.10	95.17	236	7
	91.09	0.52	2.96	-	-	-	0.23	-	-	96.13	239	7
	90.29	0.67	2.90	-	0.02	-	0.45	-	-	95.36	236	7
	89.93	0.38	2.87	-	-	-	0.49	-	0.18	94.40	235	7
XZ-4	88.01	1.19	1.86	-	0.49	-	0.49	-	0.06	93.23	156	5
	88.98	0.63	1.87	-	0.49	-	0.49	-	0.38	93.71	156	4
	90.35	1.00	1.95	0.19	0.52	0.19	0.52	-	0.07	95.94	160	5
	89.05	1.09	1.94	0.10	0.78	0.10	0.78	-	0.10	94.94	161	5
	88.74	1.14	1.90	-	0.59	-	0.59	-	-	94.63	158	5
	88.20	1.43	1.86	-	0.65	-	0.65	-	-	93.66	156	4
	89.20	1.57	1.86	-	0.77	-	0.77	-	0.06	95.34	154	4
	91.02	1.45	1.87	-	0.48	-	0.48	-	0.19	96.33	152	4
	90.01	0.92	1.90	0.06	0.69	0.06	0.69	-	-	95.22	156	4
	90.60	0.78	1.85	-	0.44	-	0.44	-	-	95.11	151	4
	89.65	1.15	1.81	-	0.84	-	0.84	-	-	94.94	150	4
	95.86	1.37	2.01	-	-	-	-	-	-	100.22	156	4
	86.21	0.82	1.91	-	-	-	-	-	-	93.00	165	5
88.50	1.06	1.87	-	-	-	-	0.08	-	94.94	158	4	
XZ-5	89.49	0.80	1.89	-	0.29	-	0.29	-	0.08	94.34	155	4
	90.80	1.48	2.02	0.06	0.88	0.06	0.88	-	-	101.43	164	5
	90.45	1.48	1.93	0.13	0.97	0.13	0.97	-	-	94.38	156	4
	90.48	0.72	2.82	-	0.02	-	0.30	-	0.09	94.82	229	7
	93.05	0.51	3.02	0.03	-	-	0.19	-	0.21	97.30	239	7
	33.83	15.78	0.12	15.64	-	0.14	1.32	0.16	0.05	79.28		
	49.40	1.59	0.04	9.06	-	0.06	0.65	-	0.24	72.92	未计算年龄	
56.01	1.30	0.08	8.69	-	-	0.80	-	0.14	77.96			

注: -表示低于检出限。

庄铀矿田,铀成矿作用主要发生在 175~145 Ma 和 110~50 Ma 两个阶段(胡宝群等,2003;吴烈勤等,2003;Bonnetti *et al.*, 2018;Zhang *et al.*, 2022)。石土岭和竹山下铀矿床产于下庄和帽峰花岗岩中,它们的铀成矿年龄分别为 162 ± 27 Ma (Bonnetti *et al.*, 2018) 和 165.5~146 Ma(胡宝群等,2003)。

Urn-2 所在样品 XZ-4 和 XZ-5 具有较高 U 含量 ($55.5 \times 10^{-6} \sim 118 \times 10^{-6}$) 和较低的 Th/U 值(0.15~0.35),表明这些样品经历了富铀流体的改造,Urn-2 可能从该流体中结晶。综上,岩石主微量元素特征、晶质铀矿结构特征和化学定年结果表明,Urn-1 是岩浆成因,而 Urn-2 是热液成因。

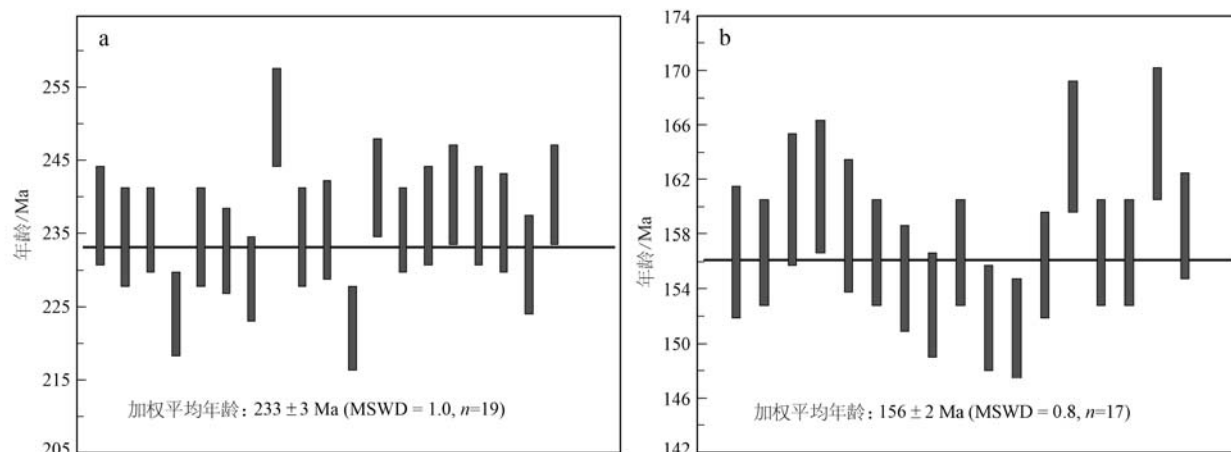


图 6 晶质铀矿 Urn-1(a) 和 Urn-2(b) 加权平均年龄图解

Fig. 6 The weighted mean ages of Urn-1 (a) and Urn-2 (b)

4.2 对下庄铀矿田铀成矿的指示

本文利用电子探针对下庄花岗岩和石土岭矿床近矿蚀变花岗岩中的晶质铀矿开展化学定年, 获得 Urn-1 和 Urn-2 的化学年龄分别为 233 ± 3 Ma 和 156 ± 2 Ma, 所获结果进一步约束了下庄花岗岩的成岩年龄以及石土岭铀矿床的铀成矿时代。下庄花岗岩是下庄铀矿田分布最广泛的一个花岗岩体, 是多个铀矿床的赋矿围岩。前人对该岩体的成岩年龄做了大量研究 (孙涛等, 2003; 凌洪飞等, 2004; Chen *et al.*, 2012; 张佳, 2014; 吴佳等, 2023)。例如, 孙涛等 (2003) 利用单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法测得锆石 U-Pb 年龄为 228.0 ± 0.5 Ma; 王军 (2013) 利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 245.4 ± 5.9 Ma; 吴佳等 (2023) 采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄法获得锆石 U-Pb 年龄为 236.5 ± 3.3 Ma。可以看出, 前人获得的下庄花岗岩的锆石 U-Pb 年龄差别较大, 可达 17 Ma。针对此现象, 吴佳等 (2023) 认为原因可能是下庄铀矿田普遍存在高 U 锆石, 从而降低了加权平均年龄的可靠程度, 当锆石的 U 含量 $> 2\,000 \times 10^{-6}$ 时, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄存在年龄偏大或偏小的问题, 在加权平均年龄数据处理中将其剔除后, 所获年龄更能代表寄主岩石的形成年龄, 由此最终获得下庄花岗岩的成岩年龄为 235.9 ± 3.3 Ma。

晶质铀矿是产铀花岗岩中的标型矿物, 是电子探针化学测年的理想对象, 其化学年龄往往与其寄主花岗岩中锆石 U-Pb 年龄一致, 可代表寄主岩石的成岩年龄 (张龙等, 2016; Zhang *et al.*, 2021)。本文利用电子探针获得的 Urn-1 化学年龄 (233 ± 3 Ma) 与

吴佳等 (2023) 利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄法剔除高铀锆石后获得的加权平均年龄 (235.9 ± 3.3 Ma) 一致, 这进一步约束了下庄花岗岩的成岩年龄为三叠纪。

朱捌等 (2006) 测得石土岭矿床沥青铀矿的 U-Pb 等时线年龄为 135 ± 40 Ma。但是, Bonnetti 等 (2018) 利用 SIMS U-Pb 定年对两件沥青铀矿样品 (XS1、XS2) 进行分析, 获得 $> 136 \pm 3$ Ma (XS1) 和 162 ± 27 Ma (XS2) 两个年龄, 所获结果的误差也较大 (± 27 Ma)。因此, 石土岭铀矿床的铀成矿时代需要进一步约束。Urn-2 位于石土岭矿床的近矿花岗岩中, 岩石发育白云母化和绿泥石化, 与石土岭矿床成矿早期的热液蚀变特征一致。此外, 将 Urn-2 与石土岭矿床的沥青铀矿 (Bonnetti *et al.*, 2018, 样品号: XS2) 进行成分对比发现, Urn-2 中 ThO_2 含量 (0.63% ~ 1.57%) 明显高于 XS2 中 ThO_2 含量 (均低于电子探针检出限 0.02%), 这表明 Urn-2 的结晶温度高于沥青铀矿的结晶温度 (Cuney and Kyser, 2009)。因此, 本文认为 Urn-2 的结晶应早于沥青铀矿, 是石土岭铀矿床成矿早期的产物。本文获得的 Urn-2 化学年龄 (156 ± 2 Ma) 与 Bonnetti 所获的沥青铀矿化学年龄 (162 ± 27 Ma, XS2) 在误差范围内一致。上述结果表明石土岭铀矿床铀成矿作用发生在晚侏罗世。研究表明, 下庄铀矿田的石土岭、竹山下和白水寨铀矿床的铀成矿作用主要发生在侏罗纪 (175 ~ 145 Ma) (胡宝群等, 2003; Bonnetti *et al.*, 2018)。胡宝群等 (2003) 认为竹山下矿床的成矿物质主要来源于下庄矿田存在的 (155 ~ 150 Ma) 花岗岩岩浆气液。最近研究表明, 石土岭、竹山下和白水

寨铀矿床的形成被认为是与燕山早期花岗岩结晶晚期分异的富铀岩浆热液有关(Bonnetti *et al.*, 2023)。下庄铀矿田一些花岗岩如岩庄、竹山下和陈洞等花岗岩形成于侏罗纪(165~155 Ma)(王联社等, 2010; 张佳, 2014)。因此,石土岭、竹山下和白水寨铀矿床的形成可能与区域内的侏罗纪花岗岩有关(Bonnetti *et al.*, 2023)。

在下庄铀矿田,希望、仙石、新桥西、寨下等铀矿床形成于白垩纪—古近纪(110~50 Ma),与花岗岩的成岩年龄相差至少40 Ma,这表明形成这些铀矿床的成矿物质不是来自花岗岩岩浆分异的岩浆热液,而是萃取自富铀岩石(Bonnetti *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2022)。花岗岩中晶质铀矿含量是评价花岗岩铀成矿潜力的有效工具(Friedrich and Cuney, 1989; 张成江, 1990; Förster, 1999)。通常,当花岗岩中铀含量满足其他含铀矿物替代能力之后晶质铀矿才会结晶(Friedrich and Cuney, 1989)。因此,岩石的其他元素或比值,例如Th/U值对于决定哪些含铀副矿物从岩浆中结晶起到重要作用(Friedrich and Cuney, 1989)。产铀花岗岩的U含量一般在 $10 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$, Th/U < 3; 而不产铀花岗岩的U含量一般小于 10×10^{-6} , Th/U > 3 (Zhang *et al.*, 2021)。下庄花岗岩具有U含量高与Th/U值低等特征,有利于晶质铀矿的结晶。下庄铀矿田的鲁溪花岗岩U含量较低(2.81~6.17), Th/U值较高(4.20~7.50),这些特征不利于晶质铀矿的结晶,铀主要赋存在褐帘石等含铀副矿物中(Chen *et al.*, 2012)。因此,下庄花岗岩是下庄铀矿田白垩纪—古近纪(110~50 Ma)铀矿床的有利铀源。样品XZ-5中晶质铀矿蚀变部分的ThO₂含量明显增高为1.30%~15.78%,这表明晶质铀矿蚀变可能发生在高温环境,而导致该矿物蚀变的流体可能主要来自区域内侏罗纪花岗岩岩浆分异的岩浆热液。蚀变部分的UO₂含量明显降低,为33.83%~56.01%,低于未蚀变晶质铀矿(UO₂ = 86.21%~95.91%),表明铀发生了活化迁移。此外,独居石蚀变也指示了LREE、U等元素发生了活化(图5)。可以看出,含铀矿物的蚀变特征与成分变化可能记录了流体作用下的铀活化迁移与成矿作用。

5 结论

本文利用电子探针对粤北下庄新鲜花岗岩与石

土岭铀矿床近矿蚀变花岗岩中的晶质铀矿开展结构特征与化学年龄研究,得到以下主要结论:

(1) 下庄花岗岩中晶质铀矿主要以包体形式赋存于造岩矿物中,化学年龄为 233 ± 3 Ma,为岩浆结晶成因,可以代表下庄花岗岩的成岩年龄。下庄花岗岩中的铀主要以晶质铀矿形式存在,是有利的铀源。

(2) 石土岭铀矿床近矿花岗岩主要发育白云母化和绿泥石化,全岩U含量($55.5 \times 10^{-6} \sim 118 \times 10^{-6}$)明显升高,表明样品受到了富铀流体的影响,可能对应于铀成矿的早期阶段。

(3) 近矿花岗岩中的晶质铀矿主要与黄铁矿共生,分布在造岩矿物之间,是热液成因,化学年龄 156 ± 2 Ma,这限定石土岭铀矿床的铀成矿时代为晚侏罗世。

References

- Alexandre P and Kyser T K. 2005. Effects of cationic substitutions and alteration in uraninite, and implications for the dating of uranium deposits[J]. *The Canadian Mineralogist*, 43(3): 1 005~1 017.
- Bonnetti C, Liu X D, Mercadier J, *et al.* 2018. The genesis of granite-related hydrothermal uranium deposits in the Xiaozhuang and Zhuguang ore fields, North Guangdong Province, SE China: Insights from mineralogical, trace elements and U-Pb isotopes signatures of the U mineralisation[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 588~612.
- Bonnetti C, Riegler T, Liu X D, *et al.* 2023. Granite-related high-temperature hydrothermal uranium mineralisation: Evidence from the alteration fingerprint associated with an early Yanshanian magmatic event in the Nanling belt, SE China[J]. *Mineralium Deposita*, 58(3): 427~460.
- Chen Peirong. 2004. Geodynamic setting of Mesozoic magmatism and its relationship to uranium metallogenesis in southeastern China[J]. *Uranium Geology*, 20(5): 266~270 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y W, Bi X W, Hu R Z, *et al.* 2012. Element geochemistry, mineralogy, geochronology and zircon Hf isotope of the Luxi and Xiaozhuang granites in Guangdong Province, China: Implications for U mineralization[J]. *Lithos*, 150: 119~134.
- Chi G X, Ashton K, Deng T, *et al.* 2020. Comparison of granite-related uranium deposits in the Beaverlodge district (Canada) and South China—A common control of mineralization by coupled shallow and deep-seated geologic processes in an extensional setting[J]. *Ore Geology*

- Reviews, 117: 103319.
- Cuney M and Friedrich M. 1987. Physicochemical and crystal-chemical controls on accessory mineral paragenesis in granitoids: Implications for uranium metallogenesis [J]. *Bulletin de Minéralogie*, 110(2): 235~247.
- Cuney M and Kyser K. 2009. Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration [J]. *Mineralogical Association of Canada, Short Course Series*, 39: 1~257.
- Deditius A P, Utsunomiya S and Ewing R C. 2007. Fate of trace elements during alteration of uraninite in a hydrothermal vein-type U-deposit from Marshall Pass, Colorado, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(20): 4 954~4 973.
- Deng Ping, Ling Hongfei, Shen Weizhou, *et al.* 2005. A discussion on alkali metasomatism in Shituling uranium deposit, northern Guangdong Province [J]. *Geological Review*, 51(5): 557~565 (in Chinese with English abstract).
- Deng P, Ren J S, Ling H F, *et al.* 2012. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications for Indosinian granitoids of southern Zhuguangshan granitic composite, South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(13): 1 542~1 552.
- Deng Ping, Shu Liangshu and Tan Zhengzhong. 2003. The geological setting for the formation of rich uranium ores in Zhuguang-Guidong large-scale uranium metallogenic area [J]. *Geological Review*, 49(5): 486~494 (in Chinese with English abstract).
- Du Letian. 1982. On the Granite-Type Uranium Deposits [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1~404 (in Chinese with English abstract).
- Förster H J. 1999. The chemical composition of uraninite in Variscan granites of the Erzgebirge, Germany [J]. *Mineralogical Magazine*, 63(2): 239~252.
- Förster H J, Rhede D, Stein H J, *et al.* 2012. Paired uraninite and molybdenite dating of the Königshain granite: Implications for the onset of late-Variscan magmatism in the Lausitz Block [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 101(1): 57~67.
- Friedrich M H and Cuney M. 1989. Uranium enrichment processes in peraluminous magmatism [C]// *Uranium Deposits in Magmatic and Metamorphic Rocks*. International Atomic Energy Agency, 11~35.
- Ge Xiangkun. 2014. Development and Research of Electron Probe Dating Technology in Uranium and Uranium-bearing Materials Dating [D]. Beijing: Beijing Geological Research Institute of Nuclear Industry (in Chinese with English abstract).
- Geisler T. 1999. ChemAge: A 32-bit Windows program for chemical age calculations and the graphical data presentation [J]. *Beihft zum European Journal of Mineralogy*, 11: 154.
- He Debao. 2018. Comparative Study on Metallogenic Mechanism of Different Types of Uranium Deposits in Xiazhuang Ore Field in Northern Guangdong Province [D]. Beijing: Beijing Geological Research Institute of Nuclear Industry (in Chinese with English abstract).
- He Debao, Fan Honghai, Meng Yanning, *et al.* 2015. Comparison of ore-forming fluids in the deposits of different types of the Xiazhuang uranium ore field in northern Guangdong Province [J]. *Geology and Exploration*, 51(2): 303~311 (in Chinese with English abstract).
- Hu Baoqun, Bai Lihong, Pan Tianyou, *et al.* 2003. The early high-temperature uranium mineralization in Zhusanxia deposit [J]. *Journal of East China Geological Institute*, 26(4): 311~320 (in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Bi X W, Zhou M F, *et al.* 2008. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to tertiary [J]. *Economic Geology*, 103(3): 583~598.
- Huang Jingbai and Huang Shijie. 2005. Regional metallogenic characteristics of China's uranium resources [J]. *Uranium Geology*, 21(3): 129~138 (in Chinese with English abstract).
- Kempe U. 2003. Precise electron microprobe age determination in altered uraninite: Consequences on the intrusion age and the metallogenic significance of the Kirchberg granite (Erzgebirge, Germany) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145(1): 107~118.
- Li Jianhong, Wei Sanyuan, Liang Liang, *et al.* 2004. Geologic-geochemical characteristics of Guidong granitic massif and recognition of geotectonic environment at the time of its emplacement [J]. *Uranium Geology*, 20(6): 321~329 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Hu Ruizhong and Rao Bing. 1997. Chronology and geochemistry of Cretaceous basic dikes in northern Guangdong [J]. *Geochimica*, 26(2): 201~210 (in Chinese).
- Ling Hongfei. 2011. Origin of hydrothermal fluids of granite-type uranium deposits: Constraints from redox conditions [J]. *Geological Review*, 57(2): 193~206 (in Chinese with English abstract).
- Ling Hongfei, Shen Weizhou, Deng Ping, *et al.* 2004. Age, geochemistry and petrogenesis of the Sundong granite, northern Guangdong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 413~424 (in Chinese with English abstract).
- Luo J C, Hu R Z, Fayek M, *et al.* 2015. In-situ SIMS uraninite U-Pb dating and genesis of the Xianshi granite-hosted uranium deposit, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 968~978.
- Luo Jincheng, Qi Youqiang, Wang Lianxun, *et al.* 2019. Ar-Ar dating of mafic dykes from the Xiazhuang uranium ore field in northern Guangdong, South China: A reevaluation of the role of mafic dyke in uranium mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2 660~2 678 (in Chinese with English abstract).
- Martz P, Mercadier J, Perret J, *et al.* 2019. Post-crystallization alteration of natural uraninites: Implications for dating, tracing, and nuclear forensics [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 249: 138~159.

- Montel J M, Foret S, Veschambre M, *et al.* 1996. Electron microprobe dating of monazite[J]. *Chemical Geology*, 131(1~4): 37~53.
- Ni Shijun. 1987. Characteristics of REE geochemistry and source material of the uranium deposit No. 337[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 14(4): 18~28 (in Chinese with English abstract).
- Ozha M K, Pal D C, Mishra B, *et al.* 2017. Geochemistry and chemical dating of uraninite in the Samarkiya area, central Rajasthan, north-western India—Implication for geochemical and temporal evolution of uranium mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 23~42.
- Pagel M. 1982. The mineralogy and geochemistry of uranium, thorium, and rare-earth elements in two radioactive granites of the Vosges, France[J]. *Mineralogical Magazine*, 46(339): 149~161.
- Rong Jiashu, Feng Mingyue, Ou Zhenwu, *et al.* 1980. Uraninite in granite and its significance of prospecting [J]. *Radioactive Geology*, (5): 403~412(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Sun Tao, Zhou Xinmin, Chen Peirong, *et al.* 2003. Genesis and tectonic significance of Mesozoic strong peraluminous granite in Eastern Nanling[J]. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1 209~1 218 (in Chinese with English abstract).
- Tan Shuang, Chen Qi, Wan Jianjun, *et al.* 2022. Characteristics of chlorite in Xiangyangping uranium ore deposit, middle segment of Miaoshan and its petrogenetic and metallogenic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1 097~1 108(in Chinese with English abstract).
- Wang Jun. 2013. Deformation Characteristics of the Granite Pluton in Xiazhuang Ore-Field and Its Influence on Uranium Mineralization[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Lianshe, Deng Ping, Zhu Ba, *et al.* 2010. U-Pb isotopic dating of zircon and geochemical characteristics of Zhushanxia pluton, northern Guangdong[J]. *Uranium Geology*, 26(5): 264~270 (in Chinese with English abstract).
- Wang L X, Ma C Q, Lai Z X, *et al.* 2015. Early Jurassic mafic dykes from the Xiazhuang ore district (South China): Implications for tectonic evolution and uranium metallogenesis[J]. *Lithos*, 239: 71~85.
- Wu Dehai. 2022. Geochemical Characteristics of Hydrothermal Alteration Minerals and Uranium Mineralization in Mianhuakeng Uranium Deposit, Northern Guangdong Province[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology (in Chinese with English abstract).
- Wu Jiguang. 2011. Discussion on the petrochemistry characteristics and uranium deposit of Xiazhuang pluton in northern Guangdong Province [J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 34(3): 209~214 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jia, Wu Jianhua, Liu Xiaodong, *et al.* 2023. “High-uranium effect” on zircon U-Pb dating of ore-related granites in the uranium ore district: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the Luxi and Xiazhuang granites [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 47(2): 449~460 (in Chinese with English abstract).
- Wu Lieqin, Tan Zhengzhong, Liu Ruzhou, *et al.* 2003. Discussion on uranium ore-formation age in Xiazhuang ore-field, northern Guangdong [J]. *Uranium Geology*, 19(1): 28~33(in Chinese with English abstract).
- Xu Dazhong, Liu Linqing and Hu Baoqun. 1999. Study on metallogenic characteristics and age of gas-thermal high-temperature uranium in Xiazhuang ore field[J]. *Uranium Geology*, 15(5): 266~270, 278(in Chinese).
- Zhang Chengjiang. 1990. The features of uraninite in Guidong granite complex and its significance to search for uranium deposit[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 17(3): 10~17, 131 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C, Cai Y Q, Dong Q, *et al.* 2019. Genesis of the South Zhuguang uranium ore field, South China: Fluid inclusion and H-C-O-S-Sr isotopic constraints[J]. *Applied Geochemistry*, 100: 104~120.
- Zhang Jia. 2014. Study on Diagenesis, Mineralization and Alteration Age Characteristics of Xiazhuang Uranium Ore Field[D]. Beijing: Beijing Geological Research Institute of Nuclear Industry (in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Chen Zhenyu, Li Shengrong, *et al.* 2018. Characteristics of uranium minerals in wall-rock alteration zones of the Mianhuakeng (No. 302) uranium deposit, northern Guangdong, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(9): 2 657~2 670(in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Chen Z Y, Li X F, *et al.* 2018. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of granites in the Zhuguangshan complex, South China: Implications for uranium mineralization[J]. *Lithos*, 308: 19~33.
- Zhang Long, Chen Zhenyu, Tian Zejin, *et al.* 2016. The application of electron microprobe dating method on uranium minerals in Changjiang granite, northern Guangdong[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 35(1): 98~107(in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Chen Zhenyu and Wang Fangyue. 2021. General characteristics and research progresses in metallogenesis of granite-related uranium deposits in South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2 657~2 676(in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Chen Z Y, Wang F Y, *et al.* 2021. Release of uranium from

- uraninite in granites through alteration: Implications for the source of granite-related uranium ores[J]. *Economic Geology*, 1115~1139.
- Zhang L, Wang F Y, Zhou T F, *et al.* 2022. Contrasting U-Pb geochronology and geochemistry of uraninite from the Xianshi and Xiwang uranium deposits, South China: Implications for ore genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 149: 105120.
- Zhang Zuhuan and Zhang Bangtong. 1991. Study on Uranium-Bearing Granites and Related Uranium Deposits in South China[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1~258 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Fujun, Pan Jiayong, Liu Guoqi, *et al.* 2014. Geological characteristics of mineralization of Xiazhuang "Intersection" type Uranium deposit and its significance for prospecting[J]. *Mineral Resources and Geology*, 28(5): 590~595 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Ba, Ling Hongfei, Shen Weizhou, *et al.* 2006. Isotopic geochemistry of Shituling uranium deposit, northern Guangdong Province, China [J]. *Mineral Deposits*, 25(1): 71~82 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈培荣. 2004. 华南东部中生代岩浆作用的动力学背景及其与铀成矿关系[J]. *铀矿地质*, 20(5): 266~270.
- 邓平, 凌洪飞, 沈渭洲, 等. 2005. 粤北石土岭铀矿床碱交代作用成因探讨[J]. *地质论评*, 51(5): 557~565.
- 邓平, 舒良村, 谭正中. 2003. 诸广—贵东大型铀矿聚集区富铀成矿地质条件[J]. *地质论评*, 49(5): 486~494.
- 杜乐天. 1982. 花岗岩型铀矿文集[M]. 北京: 原子能出版社, 1~404.
- 葛祥坤. 2014. 电子探针定年技术在铀及含铀矿物测年中的开发与研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 何德宝. 2018. 粤北下庄矿田不同类型铀矿床成矿机制对比研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 何德宝, 范洪海, 孟艳宁, 等. 2015. 粤北下庄铀矿田不同类型矿床成矿流体对比研究[J]. *地质与勘探*, 51(2): 303~311.
- 胡宝群, 白丽红, 潘天有, 等. 2003. 竹山下矿床中的早期高温铀成矿作用[J]. *华东地质学院学报*, 26(4): 311~320.
- 黄净白, 黄世杰. 2005. 中国铀资源区域成矿特征[J]. *铀矿地质*, 21(3): 129~138.
- 李建红, 卫三元, 梁良, 等. 2004. 贵东岩体地质地球化学特征及其形成的构造环境识别[J]. *铀矿地质*, 20(6): 321~329.
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. *地球化学*, 26(2): 14~31.
- 凌洪飞. 2011. 论花岗岩型铀矿床热液来源——来自氧逸度条件的制约[J]. *地质论评*, 57(2): 193~206.
- 凌洪飞, 沈渭洲, 邓平, 等. 2004. 粤北笋洞花岗岩的形成时代、地球化学特征与成因[J]. *岩石学报*, 20(3): 413~424.
- 骆金诚, 齐有强, 王连训, 等. 2019. 粤北下庄铀矿田基性岩脉 Ar-Ar 定年及其与铀成矿关系新认识[J]. *岩石学报*, 35(9): 2660~2678.
- 倪师军. 1987. 337 铀矿床 REE 地球化学特征与成矿物质来源[J]. *成都地质学院学报*, 14(4): 18~28.
- 戎嘉树, 冯明月, 欧振武, 等. 1980. 花岗岩中晶质铀矿及其找矿意义[J]. *放射性地质*, (5): 403~412.
- 孙涛, 周新民, 陈培荣, 等. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 33(12): 1209~1218.
- 谭双, 陈琪, 万建军, 等. 2022. 苗儿山中段向阳坪铀矿床绿帘石特征及其成岩成矿意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 41(6): 1097~1108.
- 王军. 2013. 粤北下庄矿田花岗岩体变形特征及其对铀成矿的影响[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 王联社, 邓平, 朱捌, 等. 2010. 粤北竹山下岩体锆石 U-Pb 同位素定年及其地球化学特征[J]. *铀矿地质*, 26(5): 264~270.
- 吴德海. 2022. 粤北棉花坑铀矿床热液蚀变矿物地球化学特征与铀成矿作用研究[D]. 抚州: 东华理工大学.
- 吴继光. 2011. 粤北下庄岩体岩石化学特征与铀成矿关系探讨[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 34(3): 209~214.
- 吴佳, 巫建华, 刘晓东, 等. 2023. 铀矿区花岗岩锆石定年的“高铀效应”: 来自鲁溪和下庄花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄的启示[J]. *大地构造与成矿学*, 47(2): 449~460.
- 吴烈勤, 谭正中, 刘汝洲, 等. 2003. 粤北下庄矿田铀成矿时代探讨[J]. *铀矿地质*, 19(1): 28~33.
- 徐达忠, 刘林清, 胡宝群. 1999. 下庄矿田气热高温铀成矿特征及年龄研究[J]. *铀矿地质*, 15(5): 266~270, 278.
- 张成江. 1990. 贵东岩体花岗岩中晶质铀矿的特征及其找矿意义[J]. *成都地质学院学报*, 17(3): 10~17, 131.
- 张佳. 2014. 下庄铀矿田成岩成矿及蚀变年代特征研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 张龙, 陈振宇, 李胜荣, 等. 2018. 粤北棉花坑(302)铀矿床围岩蚀变分带的铀矿物研究[J]. *岩石学报*, 34(9): 2657~2670.
- 张龙, 陈振宇, 田泽瑾, 等. 2016. 电子探针测年方法应用于粤北长江岩体的铀矿物年龄研究[J]. *岩矿测试*, 35(1): 98~107.
- 张龙, 陈振宇, 汪方跃. 2021. 华南花岗岩型铀矿床主要特征与成矿作用研究进展[J]. *岩石学报*, 37(9): 2657~2676.
- 张祖还, 章邦桐. 1991. 华南产铀花岗岩及有关铀矿床研究[M]. 北京: 原子能出版社, 1991, 1~258.
- 钟福军, 潘家永, 刘国奇, 等. 2014. 下庄“交点”型铀成矿地质特征及找矿意义[J]. *矿产与地质*, 28(5): 590~595.
- 朱捌, 凌洪飞, 沈渭洲, 等. 2006. 粤北石土岭铀矿床同位素地球化学研究[J]. *矿床地质*, 25(1): 71~82.