

张伟盟, 严杰, 钟福军, 等. 粤北石角围花岗岩型铀矿床沥青铀矿 LA - ICP - MS 原位 U - Pb 定年研究[J]. 岩矿测试, 2019, 38(4): 449 - 460.

ZHANG Wei - meng, YAN Jie, ZHONG Fu - jun, et al. *In situ* LA - ICP - MS U - Pb Dating of Uraninite from the Shijiaowei Granite - type Uranium Deposit, Northern Guangdong Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(4): 449 - 460.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201901160007】

粤北石角围花岗岩型铀矿床沥青铀矿 LA - ICP - MS 原位 U - Pb 定年研究

张伟盟¹, 严杰¹, 钟福军¹, 潘家永^{1*}, 刘文泉^{1,2}, 赖静², 周堂波²

(1. 核资源与环境国家重点实验室, 东华理工大学, 江西 南昌 330013;
2. 核工业二九〇研究所, 广东 韶关 512026)

摘要: 石角围花岗岩型铀矿床位于粤北下庄铀矿田东部, 沥青铀矿是矿床的主要矿石矿物, 也是厘定成矿年龄的理想对象。前人采用同位素稀释法 (ID - TIMS) 和电子探针 U - Th - ^{total}Pb 化学定年法获得的成矿年龄为 38 ~ 138 Ma, 但前人年龄变化范围大, 可靠性有待考究, 难以有效约束矿床的成矿时代。本文利用 LA - ICP - MS 原位微区分析技术, 对石角围矿床矿石中沥青铀矿开展了原位 U - Pb 定年。研究表明: 沥青铀矿的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 52.46 ~ 56.89 Ma, 加权平均年龄为 54.68 ± 0.53 Ma (MSWD = 1.19, n = 18)。本次沥青铀矿原位 U - Pb 定年与前人相比更好地避免了矿物包裹体、后期次生变化、显微裂隙等因素的影响, 获得的沥青铀矿原位 U - Pb 同位素年龄代表矿床的成矿年龄。本研究获得的石角围矿床成矿年龄 (~55 Ma) 与华南花岗岩型铀矿床主成矿期 (~50 Ma) 相一致, 指示石角围矿床铀成矿作用与华南岩石圈局部伸展作用下的断裂构造活动密切相关。

关键词: 原位 U - Pb 定年; LA - ICP - MS; 沥青铀矿; 成矿年龄

要点:

- (1) 利用 LA - ICP - MS 原位微区分析技术获得石角围矿床沥青铀矿 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄 54.68 ± 0.53 Ma。
- (2) 花岗岩型铀矿沥青铀矿 LA - ICP - MS 原位 U - Pb 定年比传统定年方法可靠程度更高。
- (3) 揭示了石角围矿床形成于古近纪华南岩石圈伸展构造背景。

中图分类号: P597.3; O657.63; P619.14 **文献标识码:** A

沥青铀矿是一种常见的天然铀简单氧化物, 晶体结构属萤石型 (等轴晶系), 广泛分布于各类中低温热液铀矿床和表生铀矿床中, 是各类铀矿床的主要矿石矿物^[1-3]。沥青铀矿的理想化学式为 UO₂^[4], 包含有一定量的天数放射性核素 ²³²Th、²³⁵U 和 ²³⁸U, 它们经过一系列衰变最终形成稳定的 Pb 同位素。因此, 沥青铀矿已成为铀矿床 U - Pb 同位素年代学研究的理想对象, 获得的 U - Pb 同位素年龄

可直接代表铀矿床的成矿时代^[5-7]。

成矿年代学是矿床研究的基础^[7-8], 热液铀矿床的沥青铀矿 U - Pb 同位素定年可极大程度地降低铀矿床通常通过测定脉石矿物、蚀变矿物及含铀副矿物的形成时代来限定成矿年龄所带来的不确定性^[7-9]。因此, 沥青铀矿被广泛应用于各类铀矿床的年代学研究, 我国绝大部分的铀矿床研究也采用了沥青铀矿 U - Pb 定年^[6,10]。前人沥青铀矿定年

收稿日期: 2019 - 01 - 16; 修回日期: 2019 - 03 - 18; 接受日期: 2019 - 04 - 09

基金项目: 科技部重点研发计划项目 (2017YFC0602600); 国家自然科学基金项目 (41772066, 41702076); 核资源与环境国家重点实验室开放基金项目 (NRE1807); 江西省教育厅科技项目 (GJJ180394)

作者简介: 张伟盟, 硕士研究生, 地质学专业。E - mail: 523289879@qq.com。

通信作者: 潘家永, 博士, 教授, 主要从事矿床地球化学研究。E - mail: jypan@ecit.cn。

工作多采用同位素稀释法 (ID-TIMS)^[11-12], 近年来, 原位微区定年技术的快速发展极大地促进了沥青铀矿原位 U-Pb 年代学的研究, 并取得了显著的成果。如 Zhong 等^[13] 采用 LA-ICP-MS 原位分析技术测定了棉花坑铀矿床沥青铀矿的原位 U-Pb 年龄为 ~60Ma; 郭春影等^[14] 采用 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 同位素定年技术获得张家铀矿床沥青铀矿的形成年龄为 69.4 ± 4.9 Ma。

粤北下庄铀矿田位于南岭中段贵东岩体东部, 是我国最大的花岗岩型铀矿田。石角围花岗岩型铀矿床是下庄矿田内铀矿石品位最高、质量较好的富铀矿床, 其成矿作用被广泛关注^[1,15]。前人利用沥青铀矿单颗粒 U-Pb 同位素稀释法 (ID-TIMS 法) 或电子探针 U-Th-total Pb 化学定年对石角围矿床开展了成矿年代学研究。如前人采用同位素稀释法测定石角围矿床沥青铀矿同位素年龄为 38 ~ 125Ma^[16]; 葛祥坤^[17] 采用电子探针技术获得石角围矿床沥青铀矿的 U-Th-total Pb 化学年龄为 97 ~ 138Ma。然而, 由于该矿床成因复杂, 沥青铀矿颗粒内常包含有细小的黄铁矿、方铅矿等含 U 或含 Pb 的矿物, 在氧化条件下易发生蚀变, 形成次生铀矿物, 目前矿物分选技术难以将它们彻底分离, 因而 ID-TIMS 法所给出的数据多为混合结果; 当测试样品混入了次生铀矿物时, 所给出的年龄往往偏小; 当混入了围岩中含铀副矿物的放射性母体或子体时, 年龄结果往往偏大, 以致于同一个铀矿床测得的成矿年龄不同, 获得的数据没有明确的地质意义^[7-8]。电子探针化学定年虽然是原位定年, 但由于电子探针检出限较高, 无法评估 U-Pb 同位素体系和判定初始 Pb 含量, 而化学年龄计算又依赖于铀矿物中所测定的 U-Th-total Pb 或其相对应的氧化物化学组分, 给出的年龄往往误差较大^[7,18]。可见, 前人获得的石角围矿床成矿年龄 (38 ~ 138Ma) 变化范围较大, 对矿床精确成矿时代的约束并不理想, 因此, 有必要对石角围矿床的成矿年龄重新厘定。本文以沥青铀矿为对象, 采用 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 定年技术准确测定了该矿床的成矿时代, 为深入探讨石角围花岗岩型铀矿床的地质意义和动力学背景提供了依据。

1 成矿地质背景

下庄矿田位于贵东岩体东部, 区域上处于闽赣后加里东隆起西南缘与湘桂粤北海西—印支凹陷带的交汇部位 (图 1)。矿田内主体花岗岩主要为印支

期黑云母花岗岩, 铀含量为 $11.4 \times 10^{-6} \sim 26.72 \times 10^{-6}$, 矿物组合为斜长石、钾长石、石英、白云母、黑云母^[19], 副矿物有晶质铀矿、黄铁矿、锆石、磷灰石、磁铁矿等。此外, 区内中基性岩脉和断裂构造较为发育, 不同方向的辉绿岩脉和断裂构造相互交叉, 控制了矿田内主要铀矿床的空间分布^[20-21]。铀矿床多定位于辉绿岩脉与断裂构造交汇部位, 形成“交点”型铀矿化, 铀矿体受断裂构造与辉绿岩脉的交汇轨迹控制。石角围矿床 (339 矿床) 位于下庄矿田南部, 矿石平均品位 0.52%, 是下庄矿田品位最高、质量较好的富铀矿床。矿区内有 NWW 向和 NNE 向两组断裂构造发育: NWW 向断裂是矿床内形成较早的一组张性构造, 成分以辉绿岩为主, 规模较大, 与 NNE 向、NE 向构造交接复合时形成较好的矿化, 是矿床主干构造; NNE 向断裂是矿区最发育的一组构造, 也是矿区控矿、含矿构造, 构造带充填有白色石英、硅化花岗岩、硅化辉绿岩、碎裂岩等, 断裂构造与辉绿岩相交形成“交点”型矿化^[21-22]。铀矿化严格受 NNE 向硅化断裂带及其上、下盘的次级硅化带与 NWW 向辉绿岩相交接复合的轨迹控制。铀矿体呈脉状、透镜状、囊状、柱状、板柱状等, 脉宽 (1 ~ 6m), 延伸长 (50 ~ 400m)。铀矿化与硅化、赤铁矿化、绿泥石化、紫黑色萤石化、碳酸盐化、黄铁矿化等热液蚀变关系密切。石角围矿床铀矿石发育脉状、网脉状、透镜状结构, 块状、碎裂状构造, 赤铁矿化较为发育, 呈暗红色、暗灰色。铀矿石中矿石矿物为沥青铀矿, 脉石矿物有微晶石英、方解石、萤石、绿泥石、水云母、赤铁矿等, 金属矿物有黄铁矿、方铅矿、黄铜矿等。

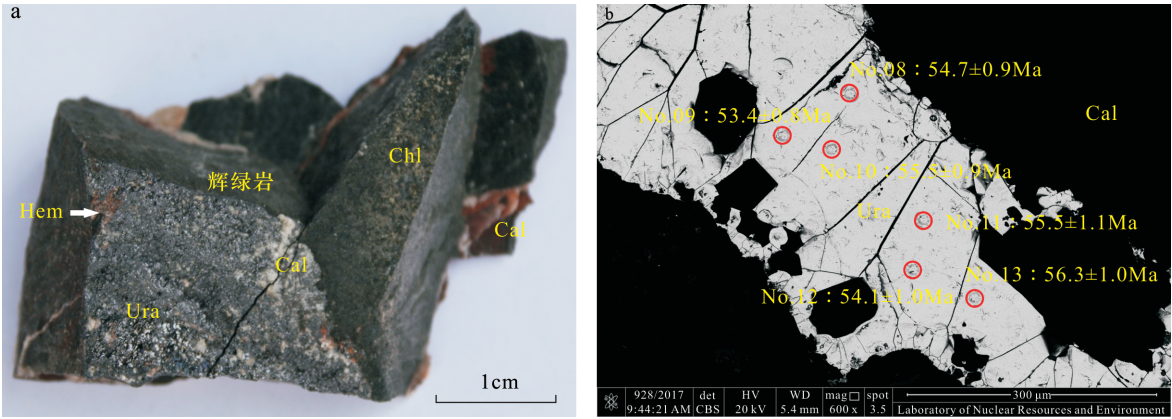
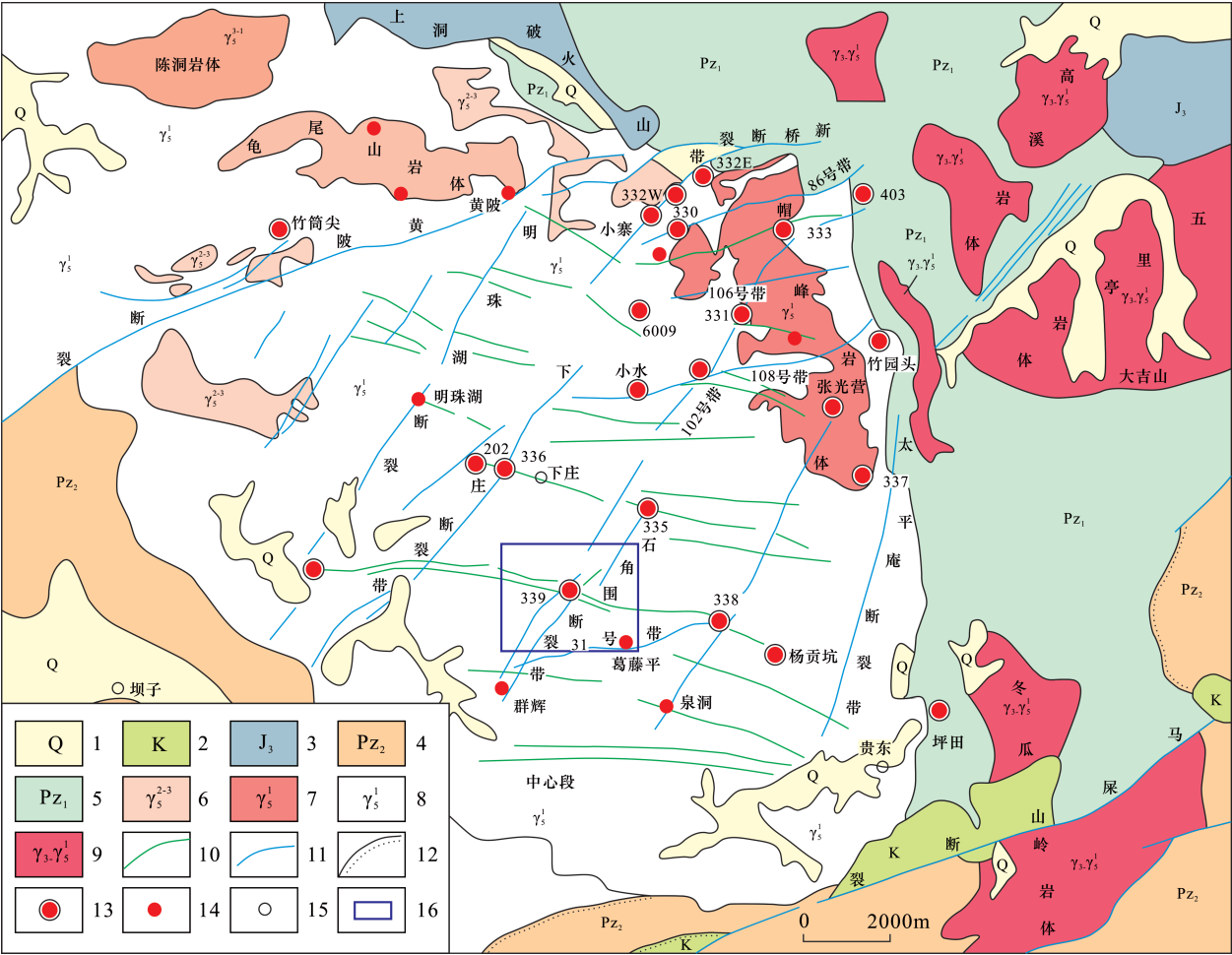
2 实验部分

2.1 样品采集

铀矿石样品 (编号 SJW1601) 采自石角围矿床开采坑道的辉绿岩脉与硅化带交汇部位 (图 2a), 属“交点型”铀矿石。铀矿石为块状构造, 矿石矿物为沥青铀矿, 呈葡萄状、细脉状, 脉宽为 0.2 ~ 3.0mm。手标本可见碳酸盐化、赤铁矿化、绿泥石化以及少量的高岭土化, 沥青铀矿呈沥青黑色, 条痕为黑色, 具有半金属光泽, 发育脉状、葡萄状结构, 常常呈肾状、球粒状集合体形成存在, 与黄铁矿和方铅矿共存。

2.2 样品分析方法

将样品磨制成探针片, 通过偏光显微镜进行观察, 圈定沥青铀矿集中分布区域后做喷碳处理, 在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室的电子探



(a) Ura—沥青铀矿; Hem—赤铁矿; Cal—方解石; Chl—绿泥石; (b) 中红圈为部分测点位置。

图2 铀矿石照片(a)和沥青铀矿的背散射电子图像(b)

Fig. 2 (a) Photo of uranium ore and (b) backscattered electron image of uraninite

针室开展电子探针分析。所用仪器为 JXA-8100 型电子探针和配套的 Inca Energy 型能谱仪,加速电压 15.0kV,探针电流 20.0nA,束斑直径为 1 μ m。测试过程严格按照国家标准 GB/T 15617—2002 进行,数据经 ZAF 程序校正。采用的主要标样及测试时间为:U-UO₂ (20s)、Y-钇铝榴石 (30s)、Th-方钍石 (30s)、Pb-PbCr₂O₄ (60s)、Ce-合成稀土五磷酸盐 (20s)、Nd-合成稀土五磷酸盐 (20s)、Ca-钙蔷薇辉石 (10s)、Fe-Fe₂O₃ (10s)、Si-钠长石 (10s) 等。测试元素中 U、Th、Pb 分析线系为 M α , Y、Ce、Nd 分析线系为 L α , Ca、Fe、Si 分析线系为 K α ^[23]。检出限在 100 μ g/g 以上,误差基本在 1% 以内。

通过偏光显微镜、电子探针和 SEM 分析,圈出未遭受蚀变、不含矿物包裹体、裂隙发育少、化学成分均一、内部不含黄铁矿和方铅矿等矿物的沥青铀矿作为测试对象。沥青铀矿原位 U-Pb 同位素定年在武汉上谱分析科技有限责任公司 LA-ICP-MS 仪器上完成,激光器由美国 Coherent(相干)激光公司生产,电感耦合等离子体质谱仪型号为 Agilent 7700e(美国 Agilent 公司)。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 形接头混合,激光剥蚀系统配置有信号平滑装置。本次分析的激光束斑为 16 μ m,频率 1Hz。U-Pb 同位素定年处理中采用沥青铀矿标准物质 GBW04420 作外标进行同位素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30s 空白信号和 50s 样品信号。详细的实验流程、数据处理和校正方法见文献[24]。对分析数据的离线处理采用软件 ICP-MSDataCal 8.30 完成^[25]。铀矿样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 完成^[26]。LA-ICP-MS U-Pb 微区定年误差在 5% 左右。

3 石角围矿床沥青铀矿岩相学及化学成分特征

3.1 沥青铀矿岩相学特征

在反射光下,沥青铀矿呈灰白色,发育葡萄状、碎裂状、团块状、细脉状结构,沥青铀矿颗粒的粒径 30~60 μ m,与黄铁矿、方解石等矿物共存。部分沥青铀矿因脱水、收缩发育放射状或不规则状的干裂纹(图 2b)。常以胶体粒状、云雾状、浸染状形成矿物细脉赋存于含矿构造带或黄铁矿等矿物的空隙

中,或与方解石、微晶石英等脉石矿物呈交替沉淀形成韵律性交互生长结构的环带,也常见沥青铀矿在黄铁矿边缘,或呈不规则状穿插或包裹黄铁矿现象。少量沥青铀矿围绕黄铁矿形成沥青铀矿环带,葡萄状沥青铀矿可见成分韵律环带结构,在背散射图像上,每个环带之间呈现出不同的灰度。局部在后期热液的改造下发生蚀变,形成铀酰磷酸盐矿物与方解石、赤铁矿共生。在背散射图像中,新鲜的沥青铀矿呈现均匀的亮白色,发生次生变化的沥青铀矿则呈现亮白色与灰白色交杂的杂色,表明其化学成分发生了较显著的变化,U-Pb 同位素体系遭受了破坏。沥青铀矿常包裹有颗粒细小的黄铁矿和方铅矿,黄铁矿和方铅矿粒径 <30 μ m。

3.2 沥青铀矿化学成分特征

对样品 SJW1601 中的沥青铀矿进行电子探针成分分析,共测试 14 个点,测试结果见表 1。沥青铀矿的 UO₂ 含量(83.70%~85.86%)较高,平均值为 84.67%;PbO 含量为 0.62%~1.11%,平均值为 0.79%;SiO₂ 含量在 1.17%~1.69% 之间,平均值为 1.36%;CaO 含量较高(7.56%~8.87%),平均值为 8.13%;ThO₂ 含量低于仪器检出限。矿床中沥青铀矿的 Th 含量很低,可能是因为 Th 的溶解度受温度影响较大,温度 <300℃ 时 Th 的溶解度较低,稳定性较好^[6,27],且前人研究表明华南地区的花岗岩型铀矿床成矿温度集中在 150~250℃^[1,28-29]。石角围矿床沥青铀矿的 CaO 含量普遍高于一般沥青铀矿(CaO 含量 0.95%~5.38%),然而矿床中高 Ca 的沥青铀矿并不是因为存在含 Ca 的矿物包裹体,而可能是部分 Ca²⁺ 补偿了沥青铀矿中不同价态的 U 导致的电荷差异,Ca²⁺ 进入沥青铀矿晶体结构。石角围矿床沥青铀矿的 CaO 和 SiO₂ 含量变化范围较小,表明沥青铀矿未遭受到明显的后期热液改造,沥青铀矿的 U-Th-Pb 体系的封闭性较好,适宜 LA-ICP-MS U-Pb 微区定年^[27,30]。

4 石角围矿床沥青铀矿 U-Pb 年龄及其地质意义

4.1 沥青铀矿 U-Pb 年龄

通过电子探针分析,选择背散射图像上呈均匀亮白色、内部不含黄铁矿和方铅矿等矿物、未遭受后期热液蚀变、不发育裂纹的沥青铀矿作为测试对象,这类沥青铀矿在铀矿石中较为普遍,是主成矿期的产物,其形成年龄可以代表矿床主成矿期的形成时代。本次通过 LA-ICP-MS 沥青铀矿原位 U-Pb

表 1 SJW1601 样品沥青铀矿主量元素含量分析结果
Table 1 Major element compositions of uraninite in the sample SJW1601

测点 编号	元素含量(%)																		总计
	La ₂ O ₃	UO ₂	Na ₂ O	Ce ₂ O ₃	ThO ₂	Al ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	PbO	SiO ₂	Y ₂ O ₃	MgO	BaO	P ₂ O ₅	FeO	TiO ₂	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	CaO	
01	-	85.86	0.07	0.01	-	0.15	-	0.86	1.26	0.02	0.03	0.01	0.02	0.60	0.03	-	-	7.56	97.12
02	-	85.39	0.03	0.07	-	0.11	-	0.91	1.25	-	0.03	0.01	0.03	0.74	0.01	-	-	7.92	97.36
03	-	84.69	0.04	0.18	-	0.11	-	1.11	1.17	0.02	0.01	0.03	0.02	0.66	0.24	-	-	8.06	96.85
04	0.02	83.72	0.08	0.07	-	0.16	-	0.78	1.51	0.01	0.04	-	0.01	0.80	0.03	-	-	8.20	96.07
05	0.00	84.26	0.04	0.08	-	0.17	0.03	0.62	1.51	0.01	0.02	-	0.03	0.76	0.07	0.06	-	8.24	96.62
07	-	84.52	0.07	0.05	-	0.15	-	0.77	1.30	0.00	0.03	0.14	0.04	0.79	0.02	0.00	-	8.39	97.01
08	-	84.05	0.11	0.10	-	0.20	-	0.74	1.69	0.03	0.01	0.06	0.02	0.74	0.01	-	0.01	8.25	96.82
09	-	85.07	0.06	0.08	-	0.12	-	0.86	1.31	0.02	0.05	0.01	0.05	0.72	-	-	-	7.97	96.95
10	-	85.57	0.06	0.13	-	0.14	-	0.82	1.26	-	0.02	0.02	0.03	0.58	-	-	-	7.89	96.98
11	0.02	83.94	0.04	0.10	-	0.14	-	0.74	1.32	0.01	0.02	-	-	0.70	0.10	0.02	-	8.15	95.79
12	0.00	85.31	0.11	0.10	-	0.16	-	0.68	1.36	-	0.02	0.13	0.05	0.71	-	-	-	8.17	97.55
13	-	83.96	0.05	0.07	-	0.11	-	0.73	1.20	0.01	0.04	0.15	0.01	0.78	-	-	0.08	7.90	95.75
14	-	85.36	0.12	0.04	-	0.16	-	0.77	1.37	-	0.02	0.08	0.05	0.76	-	-	-	8.32	97.72
15	-	83.70	0.05	0.03	-	0.17	-	0.66	1.60	0.01	0.02	0.01	0.02	0.66	-	-	0.05	8.87	96.46

注：“-”表示低于电子探针的检出限。

定年获得 19 个测点数据,测定结果见表 2。SJW1601-10 测点的“error”为计算年龄误差较大,予以剔除。其余获得的 18 个²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄数据为 52.46~56.89Ma,数据相对集中,在 U-Pb 谐和图上呈现出较高的谐和度,并显示出较为明显的一个区间段(图 3),表明该组数据可靠性较高,加权平均年龄为 54.68±0.53Ma(MSWD=1.19,n=18),置信度为 95%。因此,认为石角围矿床主矿期沥青铀矿的形成年龄为~55Ma。

4.2 U-Pb 年龄有效性判别

近年来 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 定年技术广泛应用于锆石、独居石、黑钨矿、锡石、铌钽

铁矿、褐帘石等各类含铀矿物的 U-Pb 定年工作^[9,31-33],为成岩成矿作用研究提供了有力的年代学证据。沥青铀矿 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 定年是铀矿床年代学研究的主要手段,为提高本次沥青铀矿 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 定年的准确性,在样品准备方面采取了一系列措施,以期将外界因素的影响降至最低。将铀矿石样品切制成探针片,选择内部结构均一、反射色均匀、不包含矿物包裹体、未发育裂隙的沥青铀矿;再通过电子探针分析,根据沥青铀矿 CaO、SiO₂等成分的含量变化,选择未遭受后期蚀变的沥青铀矿作为测试对象。

表 2 SJW1601 样品沥青铀矿 U-Pb 同位素分析结果
Table 2 U-Pb isotopic compositions of uraninite in the sample SJW1601

测点 编号	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ
01	0.0526	0.0018	0.0613	0.0020	0.0085	0.0002	309.32	75.9	60.44	1.9	54.62	1.0
02	0.0517	0.0014	0.0609	0.0019	0.0086	0.0002	272.29	69.4	60.00	1.8	54.89	1.1
03	0.0532	0.0016	0.0628	0.0018	0.0086	0.0001	338.95	97.2	61.84	1.7	55.05	0.9
05	0.0463	0.0017	0.0537	0.0020	0.0084	0.0001	13.06	88.9	53.11	1.9	54.15	0.9
06	0.0476	0.0018	0.0563	0.0020	0.0087	0.0002	79.72	88.9	55.65	1.9	55.71	1.1
07	0.0483	0.0015	0.0575	0.0019	0.0086	0.0002	122.31	72.2	56.75	1.8	55.30	1.0
08	0.0516	0.0015	0.0602	0.0017	0.0085	0.0001	333.39	73.1	59.33	1.6	54.69	0.9
09	0.0463	0.0015	0.0536	0.0018	0.0083	0.0001	13.06	87.0	52.98	1.7	53.41	0.8
10	0.0420	0.0039	0.0520	0.0044	0.0086	0.0001	error	error	51.45	4.2	55.45	0.9
11	0.0498	0.0020	0.0621	0.0035	0.0086	0.0002	187.12	89.8	61.17	3.4	55.47	1.1
12	0.0472	0.0016	0.0543	0.0017	0.0084	0.0001	57.50	142.6	53.65	1.6	54.09	1.0
13	0.0535	0.0018	0.0649	0.0022	0.0088	0.0002	350.06	78.7	63.83	2.1	56.28	1.0
14	0.0573	0.0016	0.0671	0.0020	0.0085	0.0002	501.89	63.0	65.93	1.9	54.37	1.0
16	0.0486	0.0018	0.0597	0.0023	0.0089	0.0002	131.57	85.2	58.85	2.2	56.89	1.2
17	0.0492	0.0019	0.0572	0.0020	0.0086	0.0002	166.75	95.4	56.50	2.0	55.30	1.0
18	0.0524	0.0019	0.0610	0.0022	0.0085	0.0002	301.91	86.1	60.12	2.1	54.71	1.1
19	0.0513	0.0018	0.0574	0.0021	0.0082	0.0001	253.77	81.5	56.71	2.0	52.46	1.0
21	0.0489	0.0018	0.0570	0.0021	0.0085	0.0002	138.98	89.8	56.26	2.1	54.53	1.0
23	0.0530	0.0018	0.0597	0.0020	0.0083	0.0001	327.84	75.0	58.91	1.9	53.26	0.9

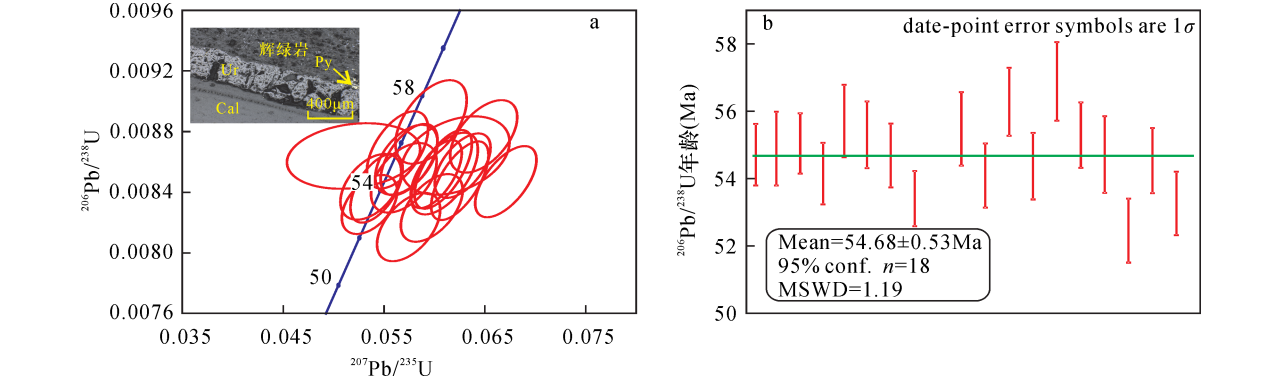


图 3 (a) 沥青铀矿 U-Pb 年龄谐和图与 (b) ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均图
Fig. 3 (a) Concordia diagram of U-Pb age and (b) the weighted mean ages of ²⁰⁶Pb/²³⁸U for uraninite

在测试技术方法方面,为提高 LA-ICP-MS 对铀矿物的测试精度、避免 LA-ICP-MS 分析过程中的基体效应对测试结果的影响,依据宗克清等^[24]所采用的测试方法,采取了一系列措施^[24,33]:①减小激光束斑直径大小和减低剥蚀频率,采用 16 μm 束斑和 1Hz 频率的激光对铀矿物进行剥蚀,以降低铀矿物包裹的硫化物对分析结果的影响;②采用了信号均化装置(SSD),提高信号的稳定性。并且以氦气作为载气、氩气作为补偿气调节灵敏度;③采用基体匹配的华南花岗岩型沥青铀矿标准物质 GBW04420 为外标,对分析过程中 U-Pb 同位素分馏进行校正,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 推荐年龄为 $70.3 \pm 0.4\text{Ma}$ (1σ)^[34]。宗克清等^[24]利用 fs-LA-ICP-MS 和 ns-LA-ICP-MS 技术对铀矿物标样 GBW04420 的研究认为,该标样可作为铀矿物原位微区 U-Pb 同位素定年的标准物质;且以该标样为外标,获得了纳米比亚白岗岩型铀矿床的精确成矿年龄。因此,本次测试也采用 GBW04420 作为外标,以校正分析过程中的 U-Pb 同位素分馏。

为控制分析过程中的测试精度,本次 U-Pb 同位素测试过程中每分析 6 次待测样品,分析 2 次标样 GBW04420。每个时间分辨分析数据包括 20~30s 空白信号和 50s 样品信号。获得标样 GBW04420 的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 比值为 0.05048 ± 0.00050 (1σ),²⁰⁷Pb/²³⁵U 比值为 0.07600 ± 0.00078 (1σ),²⁰⁶Pb/²³⁸U 比值为 0.01092 ± 0.00010 (1σ),²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 $70.0 \pm 0.6\text{Ma}$ ($n=36$, MWSD=0.097, 95% 置信度),均与各认定值 (0.05060 ± 0.00036 , 1σ)、(0.07612 ± 0.00065 , 1σ)、(0.01091 ± 0.00006 , 1σ)、($70.3 \pm 0.39\text{Ma}$, 1σ)^[13,33] 相一致。本次获得的石角围矿床沥青铀矿²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 52.5~56.9Ma,加权平均年龄为 $54.7 \pm 0.5\text{Ma}$ (MSWD=1.19),所有测点在 U-Pb 谐和图上均落于谐和线附近,谐和度较高,表明本次沥青铀矿 U-Pb 定年的可靠性较高。

4.3 石角围矿床成矿时代厘定

前人应用沥青铀矿单颗粒 ID-TIMS 法获得了石角围矿床沥青铀矿 U-Pb 同位素表观年龄为 38~125Ma^[16],而该矿床沥青铀矿的电子探针 U-Th-total Pb 化学年龄范围为 97~138Ma^[17],变化范围较大,难以有效约束矿床的准确成矿时代。ID-TIMS 法虽然测试精度高,但对测试样品的纯度要求极高。石角围矿床沥青铀矿颗粒较小,沥青铀矿与赤铁矿、微晶石英等矿物紧密共生,相互交织,且常

包含有黄铁矿、方铅矿、铀石等含 U 或含 Pb 的矿物包裹体^[9,30,35-36],这类矿物颗粒较小,目前的矿物分选技术难以完全分离。此外,铀矿石多为碎裂结构,含大量花岗岩和辉绿岩角砾,沥青铀矿往往呈细脉状产于角砾边缘,背散射图像中沥青铀矿也常包裹石英、长石等来自花岗岩和辉绿岩中的矿物(图 2b)。沥青铀矿形成于还原环境,在氧化环境中容易发生氧化,形成铀石或次生铀矿物,沥青铀矿边缘或裂隙面更容易发生氧化。当分选出来的沥青铀矿样品包含有花岗岩或辉绿岩的放射性母体或子体时,ID-TIMS 法所给出的年龄可能偏大;当样品包含有氧化的沥青铀矿时,ID-TIMS 法所获得的年龄可能偏小^[8,30,36]。此外,在样品分选、淘洗、粉碎过程中,沥青铀矿的结构、化学成分等会发生变化,破坏 U-Pb 同位素体系的封闭性。

通过 ID-TIMS 法所获得的年龄可能是测试的沥青铀矿样品包含了花岗岩或辉绿岩中含铀副矿物的放射性母体或子体,造成给出的表观年龄偏大。因此,传统的沥青铀矿单颗粒 ID-TIMS 法受上述多种因素干扰,所给出的年龄往往是一个混合值,并不能代表铀矿床的真实成矿年龄,无明确的地质意义^[31-32]。

沥青铀矿电子探针 U-Th-total Pb 化学年龄法虽然是原位微区定年,但是受电子探针性能的影响,无法判别沥青铀矿 U-Pb 同位素体系的封闭性和初始 Pb 含量,对 U、Th 和 Pb 元素的检出限较高,因此,开展沥青铀矿化学定年时具有较大的误差^[7],并且对年龄小于 100Ma 的沥青铀矿样品测试其结果可靠性更低^[28]。电子探针的 U-Th-Pb 化学年龄本身就是依据经验公式和迭代法多次计算获得的,且电子探针检出限较高、无法扣除初始的 Pb 含量和评估 U-Pb 同位素的组成,致使该方法获得的沥青铀矿成矿年龄可靠性受到质疑^[36-37]。葛祥坤^[17]对石角围矿床沥青铀矿的开展电子探针化学定年,获得其化学年龄为 97~138Ma,且分布于 106Ma、119Ma 和 129Ma 三个年龄域,认为可能是由于沥青铀矿存在较高的初始铅造成的。本次获得的沥青铀矿化学成分显示,沥青铀矿 Th 含量极低,均低于电子探针的检出限,无法获得沥青铀矿 Th 的真实含量,进而影响了 U-Th-total Pb 化学年龄的计算。因此,石角围矿床沥青铀矿的电子探针 U-Th-total Pb 化学年龄不能代表矿床的真实成矿年龄。

本次在沥青铀矿岩相学分析的基础上,对沥青铀矿开展了系统的矿物形貌学和矿物化学成分分

析,认为石角围矿床发育的沥青铀矿为主成矿期成矿作用的产物,选取的未遭受后生变化、不含矿物包裹体、未发育裂隙、矿物结构均一的沥青铀矿代表了主成矿期的沥青铀矿。对筛选出来的沥青铀矿采用 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 定年技术,以华南花岗岩型铀矿床中沥青铀矿标准物质 GBW04420 为标样,对分析过程中 U-Pb 同位素分馏进行校正,给出了相对一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,19 个测点的加权平均年龄为 $54.7 \pm 0.5\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.19$)。因此,认为本次获得的 LA-ICP-MS 沥青铀矿原位 U-Pb 年龄($\sim 55\text{Ma}$)可以代表石角围矿床主成矿期的形成时代,表明该矿床形成于古新世。

4.4 对铀成矿作用的地质意义

石角围矿床赋矿花岗岩为印支期下庄岩体,锆石 U-Pb 年龄为 $\sim 234\text{Ma}$,相对富集 Rb、U、Th、K、Pb 等大离子亲石元素,相对亏损 Nb、Ta、Sr、Ti 等高场强元素, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-12 \sim -9$,锆石二阶段 Hf 模式年龄为 $1.8 \sim 2.0\text{Ga}$,指示赋矿花岗岩属于 S 型花岗岩,源于古元古代地壳物质的部分熔融^[38]。区内广泛出露的花岗岩显示异常高的铀含量 $26.10 \times 10^{-6} \sim 37.86 \times 10^{-6}$,且岩体中晶质铀矿含量为 7.09×10^{-6} ,说明该区具有良好的铀源^[38-40]。但花岗岩的成岩时代与本次获得矿床年龄 $\sim 55\text{Ma}$ 存在着巨大的岩矿时差,与成矿相关的基性岩脉的形成时间($\sim 193\text{Ma}$)^[41]之间也存在几十个百万年的差距。因此,铀矿化由岩浆作用形成的可能性较小。石角围矿床铀矿体受区域上 NE 向断裂带与 NW 向辉绿岩交汇部位控制,矿体产于 NE 向断裂带内。NE 向断裂带主要由硅化碎裂岩、碎裂花岗岩、花岗闪长岩组成,其活动时期为 $55.0 \sim 65.5\text{Ma}$ ^[42],与本次获得的铀矿化时代($\sim 55\text{Ma}$)相一致。因此,本文认为石角围矿床的铀矿化可能受区域上 NE 向构造破碎带的构造活动控制。

华南地区中生代以来的岩浆、构造与成矿事件主要受制于太平洋构造域的演化^[14]。白垩纪以来,古太平洋板块向欧亚板块的俯冲角度由西北方向逐渐转变为沿大陆边缘近南北向,华南陆块由挤压构造背景转变为伸展拉张构造背景^[28,43]。华南陆块的伸展拉张构造运动主要分为 6 期,分别为 $135 \sim 140\text{Ma}$ 、 $115 \sim 120\text{Ma}$ 、 105Ma 、 $85 \sim 95\text{Ma}$ 、 $70 \sim 75\text{Ma}$ 和 $45 \sim 55\text{Ma}$ ^[43]。相应地,华南地区的铀矿床成矿年代大致为: $\sim 140\text{Ma}$ 、 $\sim 120\text{Ma}$ 、 $\sim 100\text{Ma}$ 、 $\sim 90\text{Ma}$ 、 $\sim 70\text{Ma}$ 、 $\sim 50\text{Ma}$ ^[1,6,30],本次通过 LA-ICP-MS 沥青铀矿原位 U-Pb 定年获得石角围矿床成矿年龄

($\sim 55\text{Ma}$)与华南地区 $45 \sim 55\text{Ma}$ 的岩石圈伸展拉张构造时间相近,指示下庄铀矿田石角围矿床形成于白垩纪—古近纪的岩石圈伸展减薄的地球动力学背景之下,属于华南晚期铀成矿事件产物。

5 结论

沥青铀矿是铀矿床定年的理想矿物,但由于同位素稀释法(ID-TIMS)和电子探针 U-Th-Pb 化学年龄法在样品前处理和年龄计算方面存在局限性,前人获得的石角围矿床成矿年龄($38 \sim 138\text{Ma}$)变化范围较大,难以有效约束矿床的精确成矿时代。而沥青铀矿 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 定年方法相比传统铀矿物定年方法具有显著的优势,能给出更准确的成矿年龄,适用于铀成矿的成矿年代学研究工作。

本文利用 LA-ICP-MS 沥青铀矿原位 U-Pb 定年技术得出石角围花岗岩型铀矿床精确的成矿年龄。该铀矿床沥青铀矿原位 LA-ICP-MS $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $52.5 \sim 56.9\text{Ma}$,加权平均年龄为 $54.7 \pm 0.5\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.19$,置信度 95%)。成矿年代与区域上 NE 向断裂构造的活动时代($55.0 \sim 65.5\text{Ma}$)相一致,指示矿床形成于华南白垩纪—古近纪的岩石圈伸展减薄的背景之下,与区域上 NE 向断裂构造活动关系密切。

6 参考文献

- [1] Hu R Z, Bi X W, Zhou M F, et al. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary [J]. *Economic Geology*, 2008, 103: 583–598.
- [2] Cuney M. The extreme diversity of uranium deposits [J]. *Mineralium Deposita*, 2009, 44(1): 3.
- [3] Pinti D. Uraninite [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [4] Dahlkamp F J. Principal Aspects of the Genesis of Uranium Deposits [M]//Uranium Ore Deposits. Heidelberg: Springer, 1993.
- [5] Chipley D, Polito P A, Kyser T K. Measurement of U-Pb ages of uraninite and davidite by laser ablation-HR-ICP-MS [J]. *American Mineralogist*, 2007, 92(11–12): 1925–1935.
- [6] Luo J C, Hu R Z, Shi S H. Timing of uranium mineralization and geological implications of Shazijiang granite-hosted uranium deposit in Guangxi, South China: New constraint from chemical U-Pb age [J]. *Journal of Earth Science*, 2015, 26(6): 911–919.

- [7] 骆金诚,石少华,陈佑纬,等. 铀矿床定年研究进展评述[J]. 岩石学报,2019,35(2):589-605.
Luo J C, Shi S H, Chen Y W, et al. Review on dating of uranium mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(2): 589-605.
- [8] 石少华,胡瑞忠,温汉捷,等. 桂北沙子江铀矿床成矿年代学研究:沥青铀矿 U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报,2010,84(8):1175-1182.
Shi S H, Hu R Z, Wen H J, et al. Geochronology of the Shazijiang uranium ore deposit, Northern Guangxi, China: U-Pb ages of pitchblende and their geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(8): 1175-1182.
- [9] 崔玉荣,周红英,耿建珍,等. 氧化物型含铀矿物 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定中的基体效应及其校正方法[J]. 地质通报,2015,34(12):2325-2333.
Cui Y R, Zhou H Y, Geng J Z, et al. The matrix effects in oxide-type U-bearing mineral LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating and their correction methods [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(12): 2325-2333.
- [10] 吴烈勤,谭正中,刘汝洲,等. 粤北下庄矿田铀矿成矿时代探讨[J]. 铀矿地质,2003,19(1):28-33.
Wu L Q, Tan Z Z, Liu R Z, et al. Discussion on uranium ore-formation age in Xiazhuang ore-field, Northern Guangdong [J]. Uranium Geology, 2003, 19(1): 28-33.
- [11] 黄国龙,尹征平,凌洪飞,等. 粤北地区 302 矿床沥青铀矿的形成时代、地球化学特征及其成因研究[J]. 矿床地质,2010,29(2):352-360.
Huang G L, Yin Z P, Ling H F, et al. Formation age, geochemical characteristics and genesis of pitchblende from No. 302 uranium deposit in Northern Guangdong [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(2): 352-360.
- [12] Qiu L, Yan D P, Tang S L, et al. Cooling and exhumation of the oldest Sanqiliu uranium ore system in Motianling district, South China Block [J]. Terra Nova, 2015, 27(6):449-457.
- [13] Zhong F J, Pan J Y, Qi J M, et al. New *in-situ* LA-ICP-MS U-Pb ages of uraninite from the Mianhuakeng uranium deposit, Northern Guangdong Province, China: Constraint on the Metallogenic Mechanism [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2018, 92(2):852-854.
- [14] 郭春影,秦明宽,徐浩,等. 广西苗儿山铀矿田张家铀矿床成矿时代:沥青铀矿微区原位测定[J/OL]. 地球科学:1-22 [2019-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180711.1151.010.html>.
Guo C Y, Qin M K, Xu H, et al. Age of Zhangjia uranium deposit in the Miaoshan ore field, Guangxi autonomous region, China: *In situ* micro-determination on pitchblende [J/OL]. Earth Science, 1-22 [2019-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20180711.1151.010.html>.
- [15] Bonnetti C, Liu X, Mercadier J, et al. The genesis of granite-related hydrothermal uranium deposits in the Xiazhuang 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, 2018, 92: 588-612.
- [16] 徐达忠,刘林清,胡宝群. 下庄矿田气热高温铀成矿特征及年龄研究[J]. 铀矿地质, 1999, 15(5): 266-270.
Xu D Z, Liu L Q, Hu B Q. Study of pneumato-hydrothermal high temperature uranium metallogenic characteristics and uranium metallogenic ages in Xiazhuang uranium ore-field [J]. Uranium Geology, 1999, 15(5): 266-270.
- [17] 葛祥坤. 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, 2013.
Ge X K. Application and Research of Dating Technique on the Electron-probe Microanalysis on Uranium and U-bearing Minerals [D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2013.
- [18] 郭国林,潘家永,刘成东,等. 电子探针化学测年技术及其在地学中的应用[J]. 东华理工学院学报,2005, 28(1):39-42.
Guo G L, Pan J Y, Liu C D, et al. Chemical dating technique on the electron-probe microanalysis and its application on earth science [J]. Journal of East China Institute of Technology, 2005, 28(1): 39-42.
- [19] 凌洪飞,沈渭洲,邓平,等. 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,2004, 20(3):413-423.
Ling H F, Shen W Z, Deng P, et al. Age, geochemistry and petrogenesis of the Sundong granite, Northern Guangdong Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 413-423.
- [20] 邹东风,李方林,张爽,等. 粤北下庄 335 矿床成矿时代的厘定——来自 LA-ICP-MS 沥青铀矿 U-Pb 年龄的制约[J]. 矿床地质,2011,30(5):912-922.
Zou D F, Li F L, Zhang S, et al. Timing of No. 335 ore deposit in Xiazhuang uranium orefield, Northern Guangdong Province: Evidence from LA-ICP-MS U-Pb dating of pitchblende [J]. Mineral Deposits, 2011, 30

- (5):912-922.
- [21] 钟福军,潘家永,刘国奇,等. 下庄“交点”型铀矿成矿地质特征及找矿意义[J]. 矿产与地质,2014,28(5):590-595.
- Zhong F J, Pan J Y, Liu G Q, et al. Geological characteristics of mineralization of Xiazhuang ‘intersection’ type uranium deposit and its significance for prospecting [J]. Mineral Resources and Geology, 2014,28(5):590-595.
- [22] 张珂,闫亚鹏,赖中信,等. 下庄铀矿田构造特征及与热液铀矿化的关系[J]. 地学前缘,2011,18(1):118-125.
- Zhang K, Yan Y P, Lai Z X, et al. Tectonic characteristics of the Xiazhuang uranium orefield and its hydrothermal uranium mineralization [J]. Earth Science Frontiers, 2011,18(1):118-125.
- [23] 黄广文,潘家永,张占峰,等. 应用电子探针研究蒙古古尔铀矿床含矿砂岩岩石学特征及铀矿物分布规律[J]. 岩矿测试,2017,36(2):196-207.
- Huang G W, Pan J Y, Zhang Z F, et al. Study on petrological characteristics and distribution of uranium minerals of sandstones in the Mengqiuer uranium deposit by electron microprobe, Xinjiang [J]. Rock and Mineral Analysis, 2017,36(2):196-207.
- [24] 宗克清,陈金勇,胡兆初,等. 铀矿 fs-LA-ICP-MS 原位微区 U-Pb 定年[J]. 中国科学(地球科学),2015,45(9):1304-1319.
- Zong K Q, Chen J Y, Hu Z C, et al. *In-situ* U-Pb dating of uraninite by fs-LA-ICP-MS [J]. Science China (Earth Sciences), 2015,45(9):1304-1319.
- [25] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. Chinese Science Bulletin, 2010,55(15):1535-1546.
- [26] Ludwig K R. ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [27] Cuney M. Evolution of uranium fractionation processes through time: Driving the secular variation of uranium deposit types [J]. Economic Geology, 2010, 105: 553-569.
- [28] 胡瑞忠,毕献武,苏文超,等. 华南白垩—第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J]. 地学前缘,2004,11(1):153-160.
- Hu R Z, Bi X W, Su W C, et al. The relationship between uranium metallogensis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in South China [J]. Earth Science Frontiers, 2004,11(1):153-160.
- [29] 张国全,胡瑞忠,商朋强,等. 华南花岗岩型铀矿床成矿机理研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报,2007,26(4):399-404.
- Zhang G Q, Hu R Z, Shang P Q, et al. An overview on the ore-forming mechanism of the granite-type uranium deposit in South China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(4): 399-404.
- [30] Luo J C, Hu R Z, Fayek M, et al. Newly discovered uranium mineralization at ~2.0 Ma in the Menggongjie granite-hosted uranium deposit, South China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017,137:241-249.
- [31] 陈文,万渝生,李华芹,等. 同位素地质年龄测定技术及应用[J]. 地质学报,2011,85(11):1917-1947.
- Chen W, Wan Y S, Li H Q, et al. Isotope geochronology: Technique and application [J]. Acta Geologica Sinica, 2011,85(11):1917-1947.
- [32] 黄新鹏. 福建霞浦大湾钨铋矿区碱长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年研究[J]. 岩矿测试,2018,37(5):572-579.
- Huang X P. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of alkali-feldspar granites from the Dawan Mo-Be deposit, Xiapu, Fujian Province [J]. Rock and Mineral Analysis, 2018,37(5):572-579.
- [33] 刘勇胜,胡兆初,李明,等. LA-ICP-MS 在地质样品元素分析中的应用[J]. 科学通报,2013,58(36):3753-3769.
- Liu Y S, Hu Z C, Li M, et al. Applications of LA-ICP-MS in the elemental analyses of geological samples [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(36): 3863-3878.
- [34] 赵溥云,李喜斌,营俊龙,等. 沥青铀矿铀铅同位素年龄标准物质[R]. 北京:核工业北京地质研究所,1995.
- Zhao B Y, Li X B, Ying J L, et al. Certified Reference Material for U-Pb Isotopic Dating (Pitchblende) [R]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 1995.
- [35] 徐浩,蔡煜琦,张闯,等. 华南花岗岩型铀矿成矿地质特征及找矿预测模型[J]. 铀矿地质,2018,34(2):65-72.
- Xu H, Cai Y Q, Zhang C, et al. Metallogenic geological feature and the prediction model for prospecting granite type uranium deposit in South China [J]. Uranium Geology, 2018,34(2):65-72.
- [36] 葛祥坤,秦明宽,范光. 电子探针化学测年法在晶质铀矿/沥青铀矿定年研究中的应用现状[J]. 世界核地质科学,2011,28(1):55-62.

Ge X K, Qin M K, Fan G. Review on the application of electron microprobe chemical dating method in the age research of uraninite/pitchblende [J]. World Nuclear Geoscience, 2011, 28 (1) : 55 – 62.

[37] 张龙, 陈振宇, 田泽瑾, 等. 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, 2016, 35 (1) : 98 – 107.

Zhang L, Chen Z Y, Tian Z J, et al. The application of electron microprobe dating method on uranium minerals in Changjiang Granite, Northern Guangdong [J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35 (1) : 98 – 107.

[38] Chen Y W, Bi X W, Hu R Z, et al. Element geochemistry, mineralogy, geochronology and zircon Hf isotope of the Luxi and Xiazhuang granites in Guangdong Province, China: Implications for U mineralization [J]. Lithos, 2012, 150 : 119 – 134.

[39] 许丽丽, 李钟枢, 谭正中. 华南花岗岩型富铀矿体形成条件分析及成矿模式研究 [J]. 矿产勘查, 2017, 8 (2) : 239 – 247.

Xu L L, Li Z S, Tan Z Z. Analysis of the metallogenic conditions and model of the granite type uranium – rich orebody in Southern China [J]. Mineral Exploration, 2017, 8 (2) : 239 – 247.

[40] 夏宗强, 王丙华, 谢小占, 等. 粤北花岗岩型铀矿成矿地质体的初步厘定及其找矿意义 [J]. 东华理工大学学报 (自然科学版), 2016, 39 (2) : 132 – 138.

Xia Z Q, Wang B H, Xie X Z, et al. Preliminary ascertainment of the ore – forming geological bodies of granite – type uranium deposits and its prospecting significance, Northern Guangdong Province [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2016, 39 (2) : 132 – 138.

[41] Wang L X, Ma C Q, Lai Z X, et al. Early Jurassic mafic dykes from the Xiazhuang ore district (South China) : Implications for tectonic evolution and uranium metallogenesis [J]. Lithos, 2015, 239 : 71 – 85.

[42] 王军, 赖中信, 张辉仁, 等. 粤北下庄铀矿田岩体地球化学特征及其构造环境 [J]. 铀矿地质, 2011, 27 (3) : 136 – 145.

Wang J, Lai Z X, Zhang H R, et al. The characteristics of pluton and its tectonic environment in Xiazhuang ore – field, North Guangdong [J]. Uranium Geology, 2011, 27 (3) : 136 – 145.

[43] 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 等. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题 [J]. 矿床地质, 2007, 26 (2) : 139 – 152.

Hu R Z, Bi X W, Peng J T, et al. Some problems concerning relationship between Mesozoic – Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China [J]. Mineral Deposits, 2007, 26 (2) : 139 – 152.

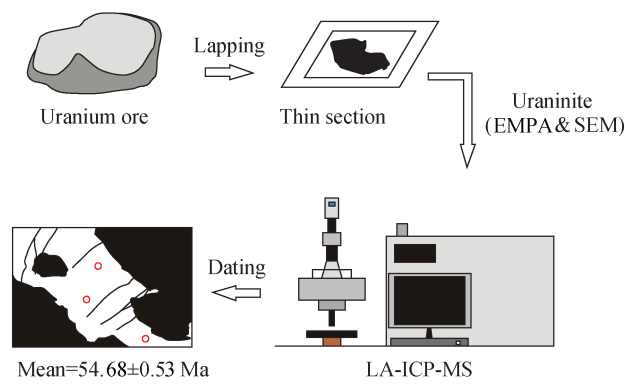
In situ LA – ICP – MS U – Pb Dating of Uraninite from the Shijiaowei Granite – type Uranium Deposit, Northern Guangdong Province

ZHANG Wei – meng¹, YAN Jie¹, ZHONG Fu – jun¹, PAN Jia – yong^{1*}, LIU Wen – quan^{1,2}, LAI Jing², ZHOU Tang – bo²

- (1. State Key Laboratory of Nuclear Resource and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. No. 290 Research Institute, China National Nuclear Corporation, Shaoguan 512026, China)

HIGHLIGHTS

- (1) *In situ* LA – ICP – MS U – Pb dating of uraninite from the Shijiaowei granite – type uranium deposit yielded an age of 54.68 ± 0.53 Ma.
- (2) Compared with the traditional dating methods, *in situ* LA – ICP – MS U – Pb dating of uraninite was more reliable for the granite – type uranium deposits.
- (3) The uranium mineralization of Shijiaowei deposit occurred at the Paleogene lithospheric extension of South China.



ABSTRACT

BACKGROUND: The Shijiaowei uranium deposit (No. 339 deposit) in the Eastern Guidong granite complex of Nanling region, is one of the large type deposits in the Xiazhuang uranium ore field. Uraninite, the main ore mineral of the Shijiaowei deposit, is the ideal mineral for geochronology. Previous studies show that the uranium mineralize ages of Shijiaowei deposit is 38 – 138Ma acquired by ID – TIMS and EMPA.

OBJECTIVES: To provide new insight for uranium metallogenic mechanism and background of the Shijiaowei deposit by a new reliable uranium mineralization age determination method.

METHODS: *In situ* LA – ICP – MS U – Pb dating method was used to constrain the formation age of uraninite from the Shijiaowei deposit.

RESULTS: The ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of uraninite was 52.46 – 56.89Ma with the weighted average age of 54.68 ± 0.53 Ma (MSWD = 1.19, n = 18). The *in situ* U – Pb dating of the uraninite avoids the influence of mineral inclusions, secondary changes and micro – cracks on dating.

CONCLUSIONS: Therefore, the *in situ* U – Pb isotopic age of the uraninite determined by LA – ICP – MS represents the ore – forming age of the deposit. The ore – forming age (about 55Ma) is consistent with the main metallogenic period (about 50Ma) of the South China granite – type uranium deposit, indicating that the uranium mineralization of the Shijiao ore deposit is closely related to fault tectonic activity induced by the local extension of the lithosphere in South China.

KEY WORDS: *in situ* U – Pb dating; LA – ICP – MS; uraninite; mineralization age