

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.225>



粤北书楼丘铀矿床沥青铀矿原位U-Pb年龄和元素特征及其地质意义

郑国栋¹, 罗强^{1*}, 刘文泉¹, 江卫兵¹, 刘斌¹, 钟福军²

1. 核工业二九〇研究所, 广东韶关 512026

2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013

摘要:为深入研究华南长江铀矿田内“交点型”铀矿化类型,对书楼丘矿床中位于基性岩脉与硅化碎裂岩交切部位的沥青铀矿开展原位微区U-Pb定年及元素成分研究.激光剥蚀电感耦合等离子体质谱分析结果显示,书楼丘沥青铀矿的U-Pb加权平均年龄为 71.3 ± 1.1 Ma;微量元素以富集W、Bi、Mo等亲硫元素,亏损Nb、Ta、Zr、Hf、Th等高场强元素为特征;稀土元素配分模式表现为轻稀土微富集,轻重稀土分异不明显,总量较低,Eu呈现明显的负异常,与富铀围岩长江岩体的稀土元素配分模式基本一致,暗示其铀源可能主要与长江岩体关系密切,与脉型铀矿床稀土元素配分模式的对比及 Σ REE-(U/Th)、 Σ REE-(LREE/HREE)_N图解指示其为低温、中低盐度热液成因,δCe值指示沥青铀矿的成矿环境为还原环境.矿床内“交点型”铀成矿作用主要受南雄断裂80~60 Ma期间拉张活动、产铀长江花岗岩体和基性岩脉的共同控制,进而在交切的构造部位形成了铀矿化信息.

关键词:“交点型”铀矿化;LA-ICP-MS原位分析;U-Pb定年;元素分析;书楼丘矿床.

中图分类号: P597; P612; P629

文章编号: 1000-2383(2021)06-2172-16

收稿日期: 2020-05-03

In-Situ U-Pb Age and Elemental Characteristics of Pitchblende in Shulouqiu Uranium Deposit and Its Geological Significance

Zheng Guodong¹, Luo Qiang^{1*}, Liu Wenquan¹, Jiang Weibing¹, Liu Bin¹, Zhong Fujun²

1. No. 290 Research Institute, China National Nuclear Corporation, Shaoguan 512026, China

2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: In order to penetrate into discussion the “intersection type” uranium mineralization in the Changjiang uranium ore field, South China. Here, it collected representative samples from geological structure that formed during the process of mafic dike penetrating silicified surrounding rock and then carried out a study applying in-situ U-Pb dating and elementary analysis via LA-ICP-MS system. Results show that the weighting average age of pitchblende in this region is 71.3 ± 1.1 Ma. Besides, trace elements are characterized by the enrichment of sulfophilic elements (such as W, Bi, and Mo) and by the depletion of high field strength elements (like Nb, Ta, Zr, Hf, and Th). The signature of rare earth element (REE) curve shows low total amount with negative Eu anomalies, slight enrichment in light REE, and indistinct fractionation between light and heavy REEs. The uranium source of pitchblende probably relates to the Changjiang granite, as indicated by a REE pattern comparison between them. In addition, the pitchblende was formed under low-temperature and low-middle salinity condition. This is validated through a

基金项目:中国核工业地质局铀矿地质项目(Nos.202035-2, 201926-2, 202035-1, 201926-1).

作者简介:郑国栋(1993-),男,助理工程师,硕士研究生,主要从事铀矿评价、勘查与科研工作. ORCID:0000-0003-3562-6057. E-mail: 1055787463@qq.com

* 通讯作者:罗强,ORCID:0000-0001-7061-1593. E-mail:328086462@qq.com

引用格式:郑国栋,罗强,刘文泉,等,2021.粤北书楼丘铀矿床沥青铀矿原位U-Pb年龄和元素特征及其地质意义.地球科学,46(6):2172-2187.

combination of Σ REE—(U/Th) plot, Σ REE—(LREE/HREE)_N plot, and comparison against REE distribution pattern in vein-type uranium deposits. Moreover, δ Ce value indicates reducing environment. In this region, the pitchblende was controlled by the interplay among Nanxiong fault (during 80—60 Ma), uranium-rich Changjiang granite, and mafic dyke, therefore forming the “intersection type” uranium mineralization in the active region.

Key words: “intersection type” uranium mineralization; LA-ICP-MS in-situ analysis; U-Pb dating; elemental analysis; Shulouqiu uranium deposit.

0 引言

晶质铀矿和沥青铀矿是铀矿床中的主要矿石矿物,也是自然界最常见的铀矿物(Cuney, 2009; 钟福军等, 2019b),被广泛用于厘定铀矿床的成矿时代(黄国龙等, 2010; 陈佑纬等, 2019; 骆金诚等, 2019a)。然而,由于铀矿物颗粒一般较小,常以环带胶状结构集合体形式产出,并伴随着多期性或经过后期热液改造叠加作用产出,传统的定年方法往往难以获取到精确的成矿年龄(骆金诚等, 2019a)。与传统定年技术相比,原位微区分析技术具有选样方便、测试效率高、空间分辨率高、无需稀释剂等优势,可以有效避免铀单矿物分选混染、矿物共生组合破坏等问题,显示出其无法比拟的优越性(宗克清等, 2015; 骆金诚等, 2019a, 钟福军等, 2019b),因此最初被广泛运用于成矿年代学的研究。近年来,随着原位微区分析技术在元素分析等方面不断发展和成功应用,其也被广泛运用于成矿流体特征、矿物化学等方面研究(陈佑纬等, 2019; 郭春影等, 2020; 武勇等, 2020),从而在地学研究中占据着越来越重要的位置(宗克清等, 2015; 陈佑纬等, 2019; 钟福军等, 2019b; 郭春影等, 2020; 武勇等, 2020)。如武勇等(2020)利用原位微区分析技术测定了康滇地轴中南段牟定1101铀矿区3件沥青铀矿的形成年龄、主微量元素成分特征,认为牟定1101铀矿区的沥青铀矿形成于高温环境,LA-ICP-MS成矿年龄介于954~950 Ma,与岩浆作用成因相关;陈佑纬等(2019)则利用原位微区分析技术测定了桂北沙子江铀矿床沥青铀矿的SIMS U-Pb加权平均年龄为 101.3 ± 4.5 Ma,并进行元素分析来探讨蚀变作用对沥青铀矿成分及其表面年龄或化学年龄的影响。

诸广山岩体南部长江铀矿田一直是华南地区花岗岩型铀矿的重要产地与研究重点,矿田内铀成矿地质条件优越,矿化类型以发育“碎裂蚀变岩型”、“硅质脉型”、“交点型”3类铀矿化为主。前人多聚焦于对长江铀矿田内“碎裂蚀变岩型”、“硅质脉

型”铀矿化的成矿年龄、地球化学特征进行详细研究,积累了一批重要成果,但对于矿田内“交点型”铀矿化的研究非常薄弱。“交点型”铀矿化系指受基性岩脉和硅化碎裂构造带双重控制,在硅化碎裂构造带交切基性岩脉的交点部位而形成的铀矿、矿化(刘汝洲, 2003),具有铀浸出率高、矿体集中、资源量大等特点(冯志军等, 2016)。书楼丘矿床(305)位于诸广山岩体南部,长江铀矿田北部,与棉花坑、长排和水石等矿床同为区内著名的花岗岩型热液铀矿床(图1)。多年来,核工业二九〇研究所对书楼丘铀矿床进行了多个周期的铀矿普查工作,该矿床现已推测资源量累计可达大型铀矿床级别,具有广阔的开采前景(罗强, 许幼, 郭新文, 等, 2020. 广东省仁化县高山径—黄竹坪地区铀矿普查地质报告. 核工业二九〇研究所, 广东, 内部资料.),并陆续在深部揭露到了规模较好的“交点型”铀矿化信息,逐渐成为矿田内重要的矿化类型之一(钟福军等, 2019a),为深入研究矿田内此类型铀矿化提供了新的契机。因此,本文拟采用激光剥蚀电感耦合技术(LA-ICP-MS)对书楼丘矿床中位于基性岩脉与硅化碎裂带交切部位的沥青铀矿年龄和元素特征进行测定,综合分析书楼丘铀矿床成矿年龄、源区、沉淀环境特征及其对“交点型”铀成矿的启示等,从而为理解长江铀矿田内花岗岩、基性岩与铀矿化之间的内在相互联系提供重要素材,也为探讨该矿田铀成矿的整体性规律提供高质量的基础数据。

1 矿床地质概况

书楼丘矿床(305)位于长江铀矿集区北部,毗邻棉花坑矿床(302)(图1),大地构造位置位于湘桂粤北海西—印支坳陷与闽赣后加里东隆起的刚柔地块结合部;是北东向(万长山)、东西向(九峰—大余)和南北向(万详—诸广)构造岩浆活动带的交汇部位。区域上,书楼丘矿床定位于诸广山岩体北东向棉花坑断裂、里周断裂所夹持的区域内(图1),是集岩浆、构造和多金属成矿作用频繁活动的地区

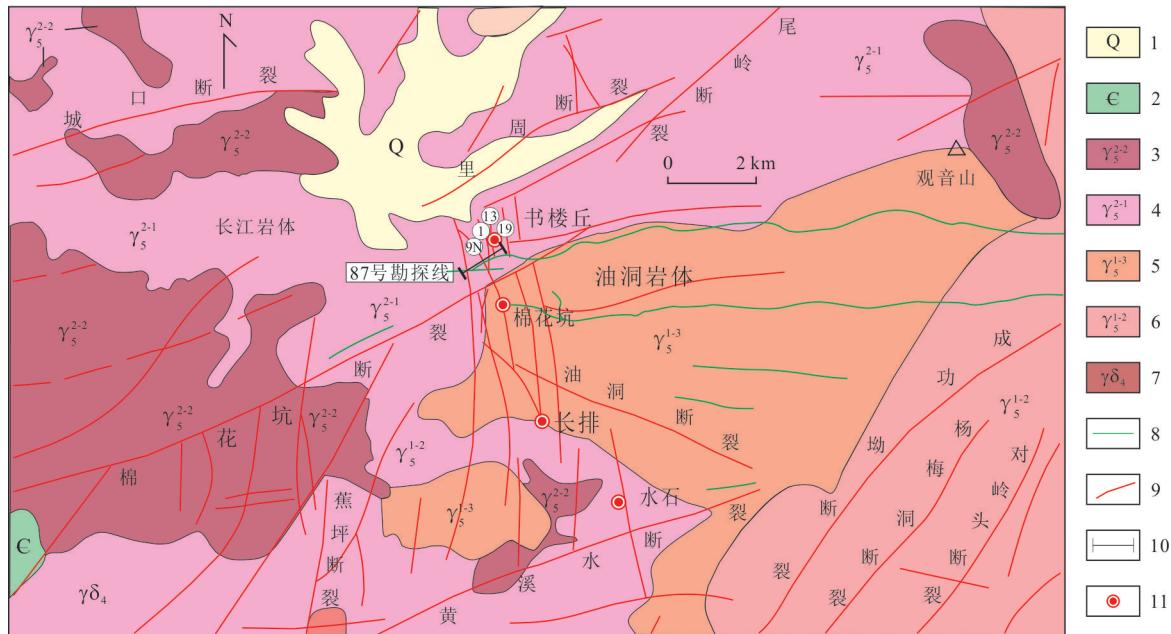


图 1 长江铀矿田地质构造简图

Fig.1 Geological sketch map of Changjiang uranium ore field

1.第四系;2.寒武系;3.燕山早期第二阶段花岗岩;4.燕山早期第一阶段花岗岩;5.印支期第三阶段花岗岩;6.印支期第二阶段花岗岩;7.海西期第二阶段花岗闪长岩;8.燕山晚期基性岩脉;9.断裂;10.剖面位置;11.铀矿床

表 1 书楼丘地区矿石矿物类型和矿物组合

Table 1 Ore mineral types and mineral combinations in Shulouqiu area

热液矿物						矿物组合								
主要	次要	铀矿物		金属矿物		脉石矿物		成矿前	成矿阶段			成矿后		
		钛铀矿	沥青	黄铁矿	氧化沥青铀矿	方铅矿	赤铁矿	石英	I	II	III			
沥青铀矿	钛铀矿	黄铁矿	沥青	方铅矿	赤铁矿	石英	黄铜矿	水云母	萤石	紫黑色萤石—	粉红色方解石	赤红色微晶石	灰白色方解石、梳	
	氧化沥青铀矿	氧化沥青铀矿	氧化沥青	黄铜矿	黄铜矿	水云母	水云母	水云母	方解石	白色石英	黄铁矿—沥青	石—黄铁矿—	英—黄铁矿—	妆石英、灰白色石
	铀钍矿	闪锌矿	闪锌矿	绿泥石	绿泥石	绿泥石	绿泥石	绿泥石	为主	为主	铀矿	沥青铀矿	沥青铀矿	英为主

(黄国龙等,2006).

书楼丘矿床赋矿围岩主要为燕山期长江岩体和印支期油洞岩体.长江岩体LA-ICP-MS 锆石U-Pb 年龄为 161.6 Ma, 在矿床内广泛分布, 岩性以燕山早期中粒黑云母花岗岩为主(黄国龙等,2014);油洞岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 232 Ma, 主要在矿床南部分布, 岩性主要为印支期第三阶段中粒斑状二云母花岗岩(黄国龙等,2012).此外,亦广泛发育中基性岩脉及燕山晚期细粒花岗岩脉. 矿床内构造发育, 方向各异, 主要有近东西向、北北西向、北西向、北北东向、北东向等多组断裂, 铀矿体主要赋存在北北西向和近南北向张扭性断裂构造带内. 铀矿体常赋存在“硅质骨架”内, 厚度较大, 连续性较好, 与构造带的产状保持一致, 表现为不规则的单脉状或扁豆状, 矿化深度则受控于构造带延伸性.

矿带多呈平行分布, 密集发育, 具有垂直分带和水平分带的特征(张善果,2019); 主要含矿带为 1、9N、13、19 号带, 这些含矿带含矿较好且规模较大, 岩性主要由蚀变碎裂花岗岩、硅化碎裂岩组成.

矿床内热液活动具有多期、多阶段的特点, 蚀变发育, 主要为岩浆晚期的自变质作用和岩浆期后的低、中、高温蚀变作用. 中低温热液蚀变为硅化、萤石化、绿泥石化、水云母化、赤铁矿化、黄铁矿化等, 高温热液蚀变为云英岩化、白云母化. 矿石矿物成分简单: 铀矿物主要为沥青铀矿, 呈细脉状、团块状产出, 其次为钛铀矿、氧化沥青铀矿和铀钍矿等; 金属矿物主要有黄铁矿、赤铁矿及少量的黄铜矿、方铅矿等; 脉石矿物主要为石英和水云母, 其次有绿泥石、萤石和方解石等(徐文雄等,2017)(表 1). 成矿期矿物共生组合主要有 3 种类型, 分别为第一

个阶段的紫黑色萤石—黄铁矿—沥青铀矿;第二个阶段的粉红色方解石—黄铁矿沥青铀矿;第三个阶段的赤红色微晶石英—黄铁矿—沥青铀矿组合(表1)。

2 样品描述和分析方法

手标本样品采自书楼丘矿床87号勘探线的钻孔ZK87-1(图2),采样标高112.30 m,采样位置为煌斑岩与硅化碎裂岩的交切部位,赋矿岩性为硅化碎裂煌斑岩。书楼丘矿床铀矿石主要表现为杂色和猪肝色,其存在形式为透镜状、脉状、碎块状、不规则团块状(钟福军等,2019b)。本次揭露的含矿手标本可见浅红色微晶石英,局部穿插白色方解石细脉及成矿晚期白色石英脉,发育石英晶洞和绿泥石化,矿物主要为赋存在浅红色微晶石英上的团块状灰黑色沥青铀矿并伴生少量星点状、胶状黄铁矿(图3a)。在采集的手标本样品中圈出沥青铀矿的范围,交由室内实验人员在圈定位置沿沥青铀矿磨制成

镜下薄片。在反光镜下观察其中的金属矿物,并圈定其中的沥青铀矿。在镜下,可见沥青铀矿呈暗灰色,千裂纹发育,黄铁矿呈浅黄色,与沥青铀矿胶结发育(图3b),在进行铀矿U-Pb定年测点的时候应该注意回避有裂纹和其他矿物赋存的部位。同时,背散射(BSE)下见沥青铀矿呈规则、不规则圆状、团块状或碎裂状产出(图3c、3d),分布于微晶石英脉内,可见千裂纹,部分沥青铀矿见明显后期热液改造作用,黄铁矿发育,局部可见沥青铀矿赋存于黄铁矿上。背散射图像的明暗程度可以反映蚀变强弱程度,蚀变较强的裂隙周边常表现为暗色的背散射图像,而背散射图像下亮度均匀,远离蚀变区域,无明显的分带和裂隙的区域是进行LA-ICP-MS测试分析的可靠部位(陈佑纬等,2019)。在薄片下进行沥青铀矿背散射观察后,对所选薄片中合适的沥青铀矿区域进行LA-ICP-MS U-Pb同位素以及主微量元素分析。U-Pb同位素定年与主微量元素含量分析采用独立分析的测试方法。

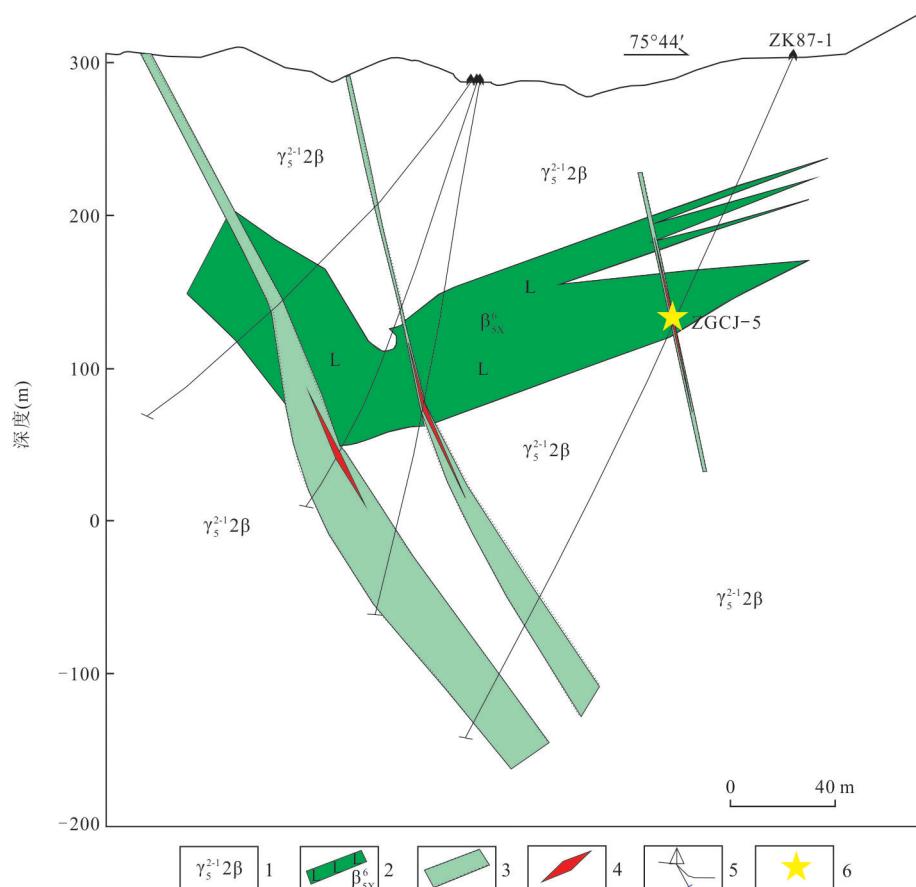


图2 书楼丘矿床87勘探线剖面示意

Fig.2 The geological cross section section of 87 lines in Shulouqiu deposit

1.燕山早期中粒黑云母花岗岩;2.燕山晚期煌斑岩脉;3.构造带;4.铀矿体;5.钻孔;6.采样位置及编号

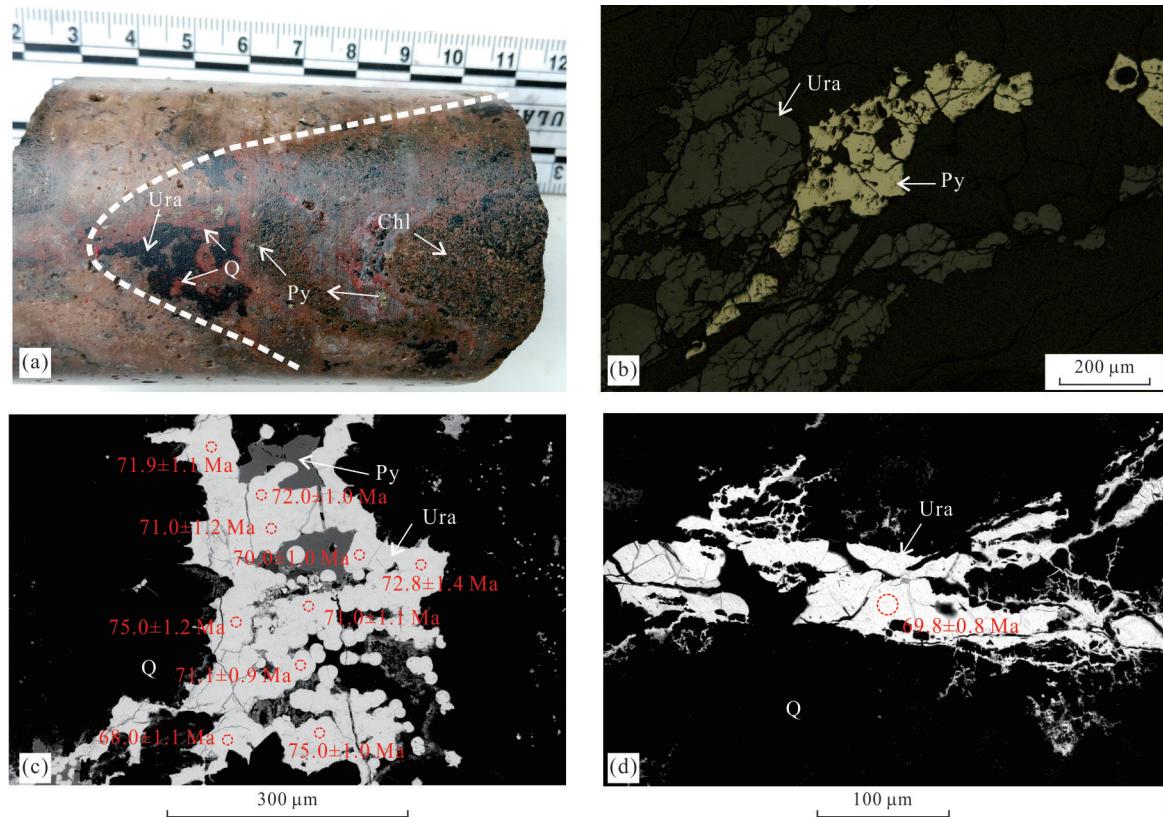


图3 书楼丘铀矿床矿石样品照片

Fig.3 Photography of the ore from the Shulouqiu uranium deposit

a. 手标本照片可见明显的团块状沥青铀矿; b. 矿石样品的光学显微照片, 可见沥青铀矿与黄铁矿共生; c、d. 沥青铀矿的背散射照片, 沥青铀矿旁可见黄铁矿; 红圈代表 U-Pb 定年测点; Q. 石英; Py. 黄铁矿; Ura. 沥青铀矿; Chl. 绿泥石化

沥青铀矿原位微区 U-Pb 同位素测年和主微量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪器上先后进行, 分析选用的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪型号均为 Agilent 7900, 激光剥蚀系统为美国 Coherent(相干)公司生产的 Geolas Pro HD(193nm 准分子激光剥蚀系统). 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-MS 之前通过一个 T 型接头混合, SSD 置于 T 型接头之前, 激光剥蚀系统配置有信号平滑装置. 本次实验, U-Pb 同位素分析的剥蚀频率为 1 Hz, 束斑直径为 16 μm, 激光能量为 80 mJ; 主微量元素分析的剥蚀频率为 5 Hz, 束斑直径为 32 μm, 激光能量为 80 mJ. 本次 U-Pb 同位素分馏校正外标采用的是核工业北京地质研究院研制的国家铀矿标准物质 GBW04420, 推荐值引自核工业北京地质研究所; 主微量元素分析采用多外标、无内标分析方法, 即国际标准玻璃物质 NIST 610、BHVO-2G、BIR-1G、BCR-2G 做外标校正, 推荐值引自 GeoRem (<http://geomrem.mpch-mainz.gwdg.de/>).

每个时间分辨分析数据包括大约 50 s 样品信号和 20~30 s 空白信号接收区间. 对分析数据的离线处理(仪器灵敏度漂移校正、空白信号选择、元素含量计算、样品选择等)在 ICP-MS DataCal (Liu *et al.*, 2008) 软件上完成. 具体 U-Pb 同位素的实验流程、数据处理和校正方法等详见 Zong *et al.* (2015). 沥青铀矿主微量元素具体分析条件及流程详见文献 Liu *et al.* (2008). 沥青铀矿原位 U-Pb 年龄加权平均计算和年龄谐和图绘制由 Isoplot/Ex_ver3 软件 (Ludwig, 2003) 完成.

3 分析结果

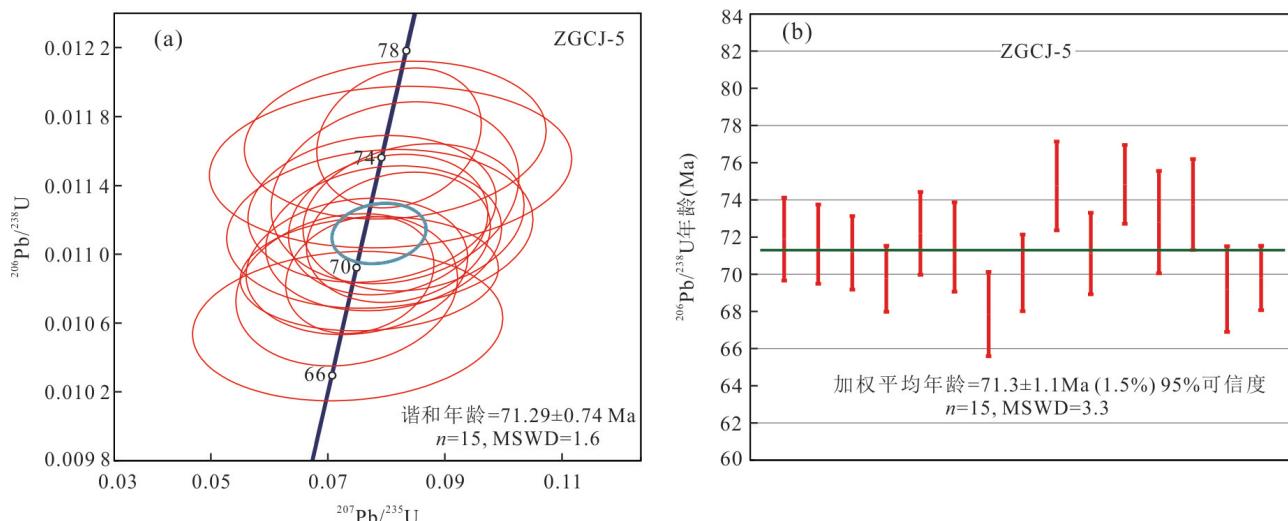
3.1 沥青铀矿的 U-Pb 同位素组成

对书楼丘铀矿床的沥青铀矿开展 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析, 通过扫描电镜分析, 选择背散射图像中无裂纹、无蚀变、不含方铅矿和黄铁矿等矿物、呈均匀亮白色的沥青铀矿作为测试对象(图 3d). 本次试验分析共获得了 15 个可靠测点数据. 15 个测点数据分析结果如表 2, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据为

表2 书楼丘铀矿床沥青铀矿LA-ICP-MS U-Pb同位素分析结果

Table 2 U-Pb isotope compositions of uraninite in the Shulouqiu uranium deposits by LA-ICP-MS.

测点 编号	207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U		207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U	
	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ
ZGCJ-5												
01	0.049 6	0.004 6	0.081 2	0.007 7	0.011 2	0.000 2	176.0	200.0	79.0	7.2	71.9	1.1
02	0.050 8	0.004 7	0.076 8	0.007 0	0.011 2	0.000 2	232.0	15.7	75.0	6.5	72.0	1.0
03	0.052 0	0.004 2	0.078 6	0.006 4	0.011 1	0.000 2	287.0	180.5	77.0	6.0	71.1	0.9
04	0.048 3	0.003 4	0.072 0	0.005 2	0.010 9	0.000 1	122.0	150.0	71.0	4.9	69.8	0.8
05	0.047 9	0.005 7	0.074 1	0.008 7	0.011 3	0.000 2	100.0	250.0	73.0	8.1	72.0	1.1
06	0.049 9	0.006 8	0.075 4	0.010 7	0.011 1	0.000 2	187.0	292.5	74.0	10.0	71.0	1.2
07	0.046 6	0.008 0	0.069 9	0.010 8	0.010 6	0.000 2	28.0	370.3	69.0	10.2	68.0	1.1
08	0.047 9	0.005 1	0.071 5	0.007 7	0.010 9	0.000 2	100.0	227.7	70.0	7.3	70.0	1.0
09	0.049 1	0.006 7	0.078 0	0.010 5	0.011 7	0.000 2	150.0	292.5	76.0	9.9	75.0	1.2
10	0.047 6	0.005 7	0.076 1	0.008 2	0.011 1	0.000 2	80.0	259.2	74.0	7.7	71.0	1.1
11	0.050 0	0.003 7	0.078 7	0.005 7	0.011 7	0.000 2	195.0	174.0	77.0	5.4	75.0	1.0
12	0.046 9	0.005 0	0.078 0	0.008 7	0.011 4	0.000 2	56.0	224.0	76.0	8.1	72.8	1.4
13	0.047 6	0.008 1	0.077 2	0.012 6	0.011 5	0.000 2	80.0	359.2	76.0	11.9	74.0	1.2
14	0.046 9	0.005 5	0.069 7	0.007 7	0.010 8	0.000 2	43.0	259.2	68.0	7.3	69.2	1.1
15	0.047 7	0.005 9	0.073 6	0.009 0	0.010 9	0.000 1	83.0	270.3	72.0	8.5	69.8	0.8

图4 沥青铀矿U-Pb年龄谐和图(a)与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均图(b)Fig.4 Concordia diagram of U-Pb age (a) and the weighted mean age of $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ for uraninite (b)

68.0~75.0 Ma,在U-Pb谐和图上15个测点均落在谐和曲线上,呈现出较好的谐和度,与谐和线的交点年龄为71.29±0.74 Ma,加权平均年龄为71.3±1.1 Ma(MSWD=3.3,n=15)(图4).

3.2 沥青铀矿的主要元素成分

对书楼丘铀矿床沥青铀矿10个测试点进行LA-ICP-MS主要元素分析(表3).从表3中可以看出,沥青铀矿含量较高的元素主要为U、Ca、Si,其中

UO_2 为84.45%~86.77%, CaO 为9.29%~10.92%, SiO_2 为1.28%~2.75%,而 Th 含量过低. Na_2O 、 MgO 、 MnO 、 FeO 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 和 K_2O 的含量均较低,其中 Na_2O 、 FeO 、 Al_2O_3 和 MnO 含量均小于0.3%, MgO 、 P_2O_5 和 K_2O 含量均小于0.1%.分析总量相对很高,为97.40%~99.21%.

在沥青铀矿的化学成分与 UO_2 图解上(图5), SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Na_2O 和 MnO 与 UO_2 呈一定的负

表 3 书楼丘矿床沥青铀矿 LA-ICP-MS 主量元素(%)、微量元素(10^{-6})分析结果

Table 3 Major and Trace element composition of pitchblende from the Shulouqiu ore deposit by LA-ICP-MS

样品号	ZGCJ-5-16	ZGCJ-5-17	ZGCJ-5-18	ZGCJ-5-19	ZGCJ-5-20	ZGCJ-5-21	ZGCJ-5-22	ZGCJ-5-23	ZGCJ-5-24	ZGCJ-5-25
Na ₂ O	0.20	0.12	0.17	0.22	0.17	0.13	0.13	0.17	0.13	0.18
SiO ₂	2.75	1.35	1.43	1.91	1.28	1.89	1.76	2.26	1.75	2.15
FeO	0.19	0.06	0.08	0.17	0.06	0.18	0.19	0.24	0.18	0.29
UO ₂	84.45	86.77	86.38	85.58	86.39	85.55	85.6	84.96	85.58	85.21
CaO	10.57	10.56	10.78	10.79	10.92	9.29	9.29	9.57	9.45	9.37
MgO	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	0.26	0.15	0.15	0.18	0.13	0.16	0.15	0.19	0.16	0.18
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
K ₂ O	0.03	—	0.01	0.02	0.01	—	—	0.02	—	0.02
MnO	0.17	0.15	0.16	0.21	0.13	0.21	0.22	0.21	0.22	0.23
Total	98.70	99.20	99.21	99.12	99.15	97.47	97.40	97.67	97.50	97.69
Sr	168.57	118.12	131.05	170.84	114.66	118.58	117.78	150.35	118.29	160.03
Cs	8.66	1.59	2.97	3.5	1.62	2.04	1.89	4.76	1.93	4.49
Rb	5.32	0.86	1.78	2.64	1.22	0.93	0.77	2.81	0.84	2.61
Ba	27.38	18.17	19.34	26.46	16.70	16.07	16.19	21.23	16.37	23.75
Nb	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	—	0.01	0.01	0.01	0.01
Zr	0.02	0.06	0.04	0.02	0.03	0.06	0.06	0.04	0.05	0.05
Be	40.28	34.64	36.73	42.74	31.41	42.69	44.61	46.42	43.7	45.97
Sc	0.30	0.27	0.32	0.62	0.73	0.09	0.09	0.11	0.08	0.19
V	64.89	60.70	61.43	68.83	54.26	229.76	259.79	221.37	242.89	226.63
Cr	4.92	6.67	3.06	2.99	4.50	3.50	2.14	3.83	2.00	10.85
W	1 285.55	1 089.78	1 157.28	1 547.82	1 143.94	2 591.28	2 730.1	2 583.02	2 657.55	2 658.69
Mo	79.62	81.34	79.25	71.85	71.24	148.77	142.96	146.14	141.94	139.87
Bi	197.22	276.44	277.19	476.65	848.35	423.10	442.13	386.17	475.45	494.55
Tl	0.83	0.15	0.19	0.55	0.21	0.11	0.14	0.34	0.12	0.30
Ag	0.61	0.37	0.27	0.77	0.48	0.03	0.04	0.08	0.03	0.21
Pb	8 804.02	4 854.02	4 668.46	4 574.95	4 471.41	17 416.70	17 748.97	15 730.92	16 968.03	15 236.69
Th	0.001 3	0.000 4	—	—	—	0.000 5	—	0.000 5	—	—
Zn	3.32	3.32	3.32	3.32	3.32	3.32	3.32	3.32	3.32	3.32
Cu	0.37	0.11	0.17	0.32	0.19	0.73	0.91	1.13	0.88	0.89
Co	0.04	0.04	0.04	0.02	0.05	0.09	0.10	0.09	0.12	0.11
Ni	0.08	0.08	0.03	0.05	0.07	—	0.09	0.03	—	0.06
La	23.86	18.74	19.99	30.74	28.43	42.00	53.10	37.44	48.34	49.86
Ce	19.07	19.05	20.67	49.57	68.50	22.27	29.06	21.58	27.55	32.32
Pr	2.15	1.91	2.15	5.54	6.90	2.15	2.88	2.23	2.72	3.63
Nd	8.60	8.42	9.25	23.1	29.3	8.37	11.65	8.71	10.64	14.28
Sm	2.37	2.65	2.61	6.95	9.84	1.90	2.63	1.84	2.46	3.14
Eu	0.41	0.46	0.50	1.29	1.71	0.36	0.48	0.33	0.43	0.64
Gd	2.98	3.48	3.49	7.84	10.6	5.30	7.16	4.54	6.54	6.56
Tb	0.56	0.71	0.69	1.66	2.26	0.82	1.14	0.71	1.01	1.10
Dy	4.01	4.97	4.96	11.40	15.90	6.10	8.65	5.41	7.66	8.24
Ho	0.90	1.08	1.11	2.46	3.34	1.51	2.20	1.33	2.03	2.06
Er	2.73	3.45	3.31	7.21	9.80	4.41	6.43	3.76	5.63	5.97
Tm	0.42	0.55	0.53	1.11	1.57	0.53	0.77	0.47	0.70	0.75
Yb	2.93	3.93	3.69	8.06	10.9	2.80	3.98	2.49	3.48	3.94
Lu	0.44	0.55	0.53	1.10	1.42	0.39	0.57	0.39	0.48	0.53

续表3

样品号	ZGCJ-5-16	ZGCJ-5-17	ZGCJ-5-18	ZGCJ-5-19	ZGCJ-5-20	ZGCJ-5-21	ZGCJ-5-22	ZGCJ-5-23	ZGCJ-5-24	ZGCJ-5-25
Σ REE	71.42	69.94	73.46	157.97	200.46	98.92	130.69	91.24	119.68	133.00
LREE	56.45	51.23	55.17	117.15	144.65	77.05	99.79	72.13	92.13	103.86
HREE	14.79	18.71	18.29	40.82	55.81	21.87	30.90	19.11	27.54	29.14
$(\text{LREE}/\text{HREE})_N$	1.52	1.07	1.18	1.11	0.97	1.53	1.39	1.61	1.43	1.52
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	5.84	3.42	3.88	2.74	1.87	10.77	9.57	10.80	9.96	9.08
$(\text{La}/\text{Sm})_N$	6.49	4.56	4.94	2.86	1.87	14.29	13.04	13.16	12.71	10.25
$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	0.84	0.73	0.78	0.81	0.80	1.57	1.49	1.51	1.55	1.38
δEu	0.47	0.47	0.51	0.53	0.51	0.33	0.32	0.33	0.31	0.42
δCe	0.51	0.63	0.63	0.86	1.16	0.36	0.37	0.39	0.39	0.42

注:“—”表示元素含量低于仪器检测限。

相关(图5a~5d、5g),而MgO、CaO和 P_2O_5 与 UO_2 无明显的相关性(图5e、5f、5h)。

3.3 沥青铀矿的微量元素成分

对书楼丘铀矿床沥青铀矿10个测试点进行LA-ICP-MS微量元素分析结果见表3。沥青铀矿微量元素特征如下:富集W、Bi、Y、V、Sr、Mo等元素,以亲硫元素含量最高,W含量为 $1.089.78 \times 10^{-6}$ ~ $2.730.10 \times 10^{-6}$ (平均值为 $1.944.50 \times 10^{-6}$),Bi含量为 197.22×10^{-6} ~ 848.35×10^{-6} (平均值为 429.73×10^{-6}),Y含量为 53.83×10^{-6} ~ 207.02×10^{-6} (平均值为 120.89×10^{-6}),V含量为 64.89×10^{-6} ~ 259.79×10^{-6} (平均值为 149.06×10^{-6}),Sr含量为 114.66×10^{-6} ~ 170.84×10^{-6} (平均值为 136.83×10^{-6}),Mo含量为 71.24×10^{-6} ~ 148.77×10^{-6} (平均值为 110.30×10^{-6}),Ba含量为 16.07×10^{-6} ~ 27.38×10^{-6} (平均值为 20.17×10^{-6})、Li含量变化范围大,为 0.36×10^{-6} ~ 25.64×10^{-6} (平均值为 4.74×10^{-6})、Rb含量为 0.77×10^{-6} ~ 5.32×10^{-6} (平均值为 1.98×10^{-6})、Cr含量为 2.00×10^{-6} ~ 10.85×10^{-6} (平均值为 4.45×10^{-6})等。明显亏损Nb、Ta、Zr、Hf、Th等高场强元素(HFSE),其中Ta、Hf、Th含量小于 0.01×10^{-6} ;Nb、Zr含量小于 0.1×10^{-6} 。以上差异说明沥青铀矿尤其以W、Bi、Mo等亲硫元素富集为主。

3.4 沥青铀矿的稀土元素成分

书楼丘铀矿床沥青铀矿10个测试点的LA-ICP-MS稀土元素分析结果见表3。将本次10个测试点的稀土元素值进行球粒陨石标准化,可以看出,在稀土元素配分模式图上表现为轻稀土元素微富集,呈明显的Eu负异常($\delta\text{Eu}=0.31 \sim 0.53$)。沥青铀矿的稀土元素总量较低, ΣREE 为 69.94×10^{-6} ~ 200.46×10^{-6} , $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为1.87~10.80, $(\text{La}/\text{Sm})_N$

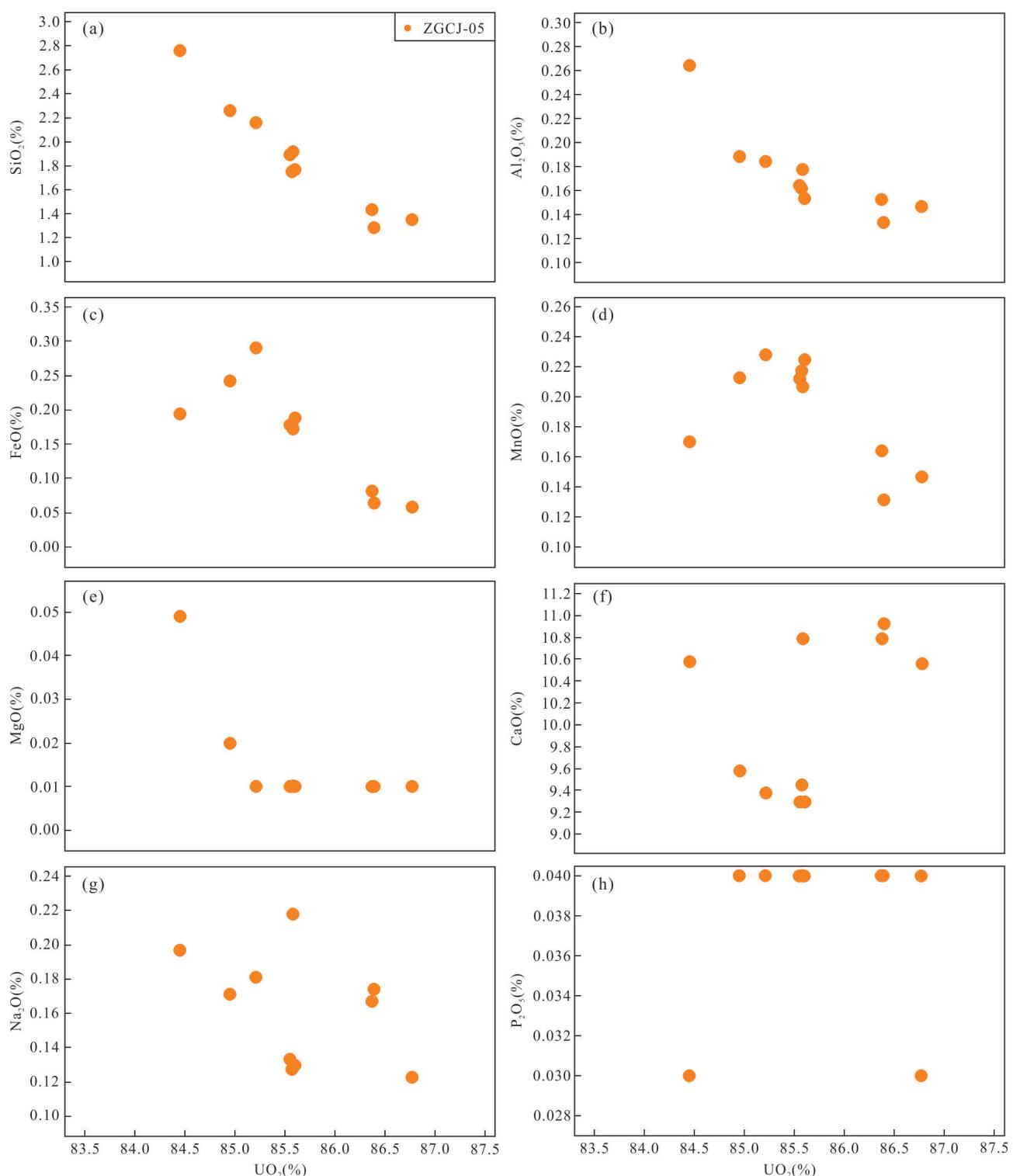
为1.87~14.29, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为0.80~1.57。轻重稀土分异并不明显, $(\text{LREE}/\text{HREE})_N$ 为0.97~1.61。

4 讨论

4.1 沥青铀矿原位LA-ICP-MS U-Pb年龄

有学者在应用沥青铀矿原位微区方法测试化学年龄时,多聚焦于该方法与传统测试方法的比较,而忽视了所测试沥青铀矿的化学成分特征对年龄准确性判定的重要性(陈佑纬等,2019;武勇等,2020)。沥青铀矿通常具有非常高的铀含量,在衰变过程中伴随着后期流体作用而发生蚀变,进行元素的进入和迁出,表现为U和Pb丢失;而Ca、Si等杂质阳离子元素进入矿物晶格,从而导致得到偏于年轻的化学年龄(Suzuki and Kato, 2008)。有学者在进行SIMS分析铀矿物形成年龄时认识到,CaO、 SiO_2 、 Na_2O 和 K_2O 等元素经常受后期风化、热液作用改造,当这些容易改造的元素含量小于3%时,说明铀矿物的U-Pb处于封闭体系,样品未受过明显的后期改造作用(Cuney, 2010)。如此看来,较高的Ca似乎暗示当时书楼丘的U-Pb体系的封闭性已被破坏,处于开放体系,且主要表现为Ca、Si的进入以及U、Pb的丢失。

但是,通过对沙子江铀矿床蚀变和未蚀变的沥青铀矿对比分析认为,未蚀变和蚀变的沥青铀矿均具有较高的CaO,可能是因为沥青铀矿形成时Ca作为杂质进入矿物晶格,而 SiO_2 含量变化可作为判断沥青铀矿蚀变强度的标准(陈佑纬等,2019)。书楼丘矿床沥青铀矿中CaO与 UO_2 的相关图解上没有看出两者呈明显的相关性(图5f)。在不考虑Ca带来的影响后, SiO_2 、 K_2O 和 Na_2O 平均含量之和<3%,为

图 5 书楼丘铀矿床沥青铀矿主量元素成分与 UO_2 相关图Fig.5 The correlation diagram of pitchblende major elements and UO_2 of Shulouqiu uranium ore

2.03%，最主要的成分变化是 Si 替代 U， SiO_2 含量为 1.28%~2.75%，波动范围较小。从长江铀矿田(长排矿床、棉花坑矿床、书楼丘矿床)沥青铀矿电子探针化学成分来看，3 个矿床的沥青铀矿主量元素组成相似，均呈现出较高含量的 UO_2 、 CaO ，较低含量

的 SiO_2 、 TiO_2 (<0.49%，平均值为 0.10%)、 MnO (平均值为 0.49%)、 PbO (平均值为 0.92%)、 ThO_2 (绝大部分低于检测限)(钟福军等, 2019b)。总体来说，3 个矿床的电子探针主量元素成分与 UO_2 相关性不明显(图 6a~6h)，其中长排 CP1601、棉花坑

MHK1504样品 Na_2O 与 UO_2 呈一定的负相关性,但长排CP1603样品 Na_2O 与 UO_2 呈一定的正相关性(图6a);书楼丘SLQ1602、长排CP1603样品 SiO_2 与 UO_2 呈一定的负相关性(图6b);书楼丘SLQ1602样品 Al_2O_3 与 UO_2 呈一定的负相关性(图6c),而3个矿床样品的 CaO 与 UO_2 均无明显相关性(图6g)。与本文的沥青铀矿LA-ICP-MS主量元素成分进行对比,指示整个长江铀矿田沥青铀矿化学成分都表现为 Si 、 Na 、 Al 等含量较低, U 、 Ca 含量普遍较高;而

书楼丘矿床沥青铀矿化学成分变化主要体现在 Si 和 Al 与 U 替换进入沥青铀矿晶格,最主要的变化是 Si 替代 U ,但 Si 含量波动幅度较小。与此同时,书楼丘“硅质脉型”沥青铀矿LA-ICP-MS U-Pb年龄为 71.4 ± 1.3 Ma和 74.4 ± 1.7 Ma(钟福军等,2019b)。其中, 71.4 ± 1.3 Ma该期年龄与本文测定的“交点型”沥青铀矿LA-ICP-MS U-Pb年龄 71.3 ± 1.1 Ma基本一致,应该为同期铀成矿事件。

综合本文主量元素、已有电子探针主量元素资

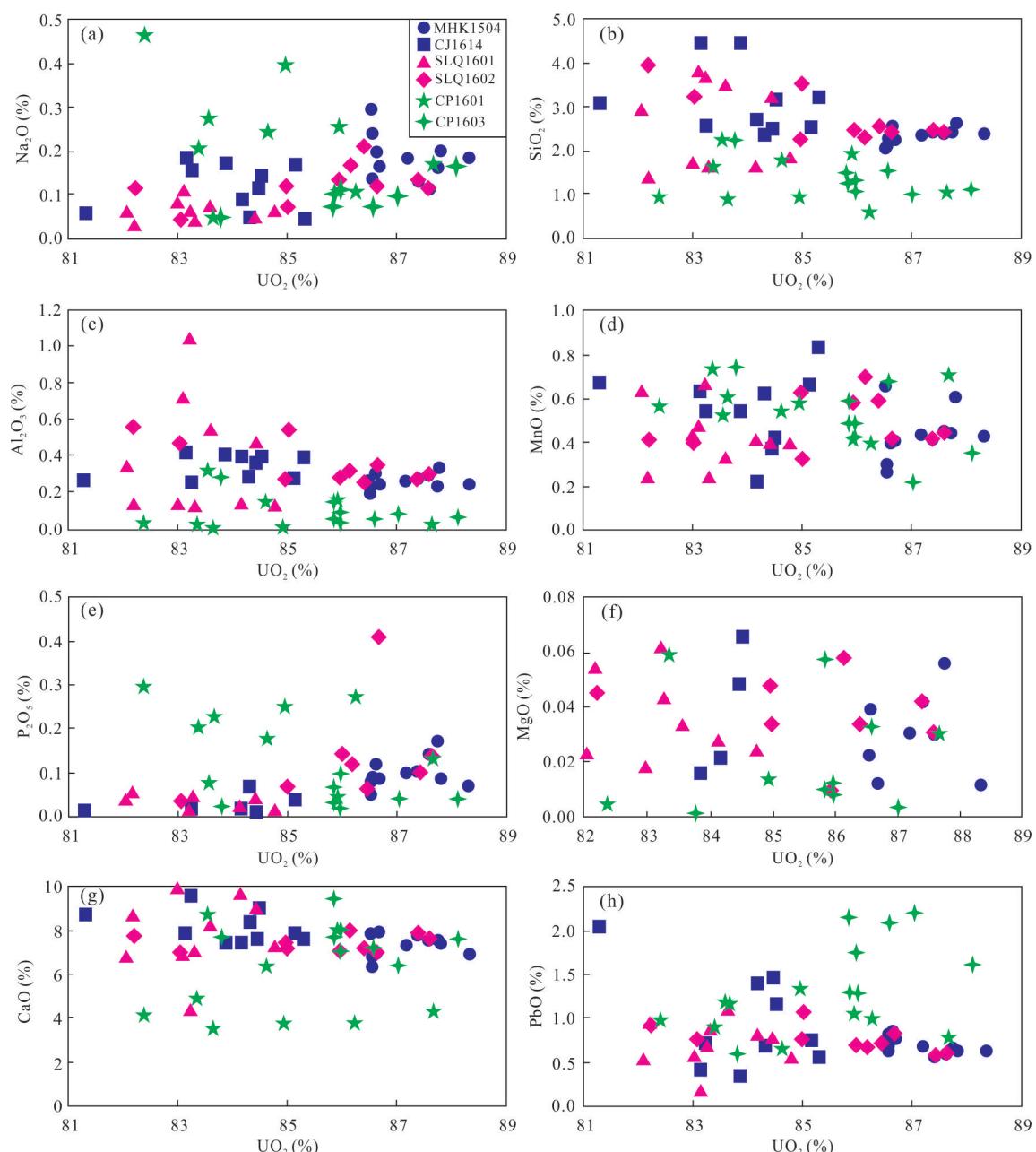


图6 长江铀矿田沥青铀矿电子探针主量元素成分与 UO_2 相关图

Fig.6 The correlation diagram of pitchblende major elements and UO_2 of Changjiang uranium ore field by EPMA
红色投影点为棉花坑矿床样品,蓝色投影点为书楼丘矿床样品,绿色投影点为长排矿床样品;数据来源据钟福军等(2019b)

料和书楼丘矿床铀成矿年龄,笔者认为本文样品未受过明显的后期改造作用,分析的沥青铀矿同位素年龄(71.3 ± 1.1 Ma)可以用来代表书楼丘矿床的“交点型”铀成矿年龄。

4.2 沥青铀矿形成的温度、盐度和成矿环境

有学者在研究沥青铀矿过程中发现, U/Th 比值是判别铀矿物结晶温度的重要指标, 当 $U/Th < 100$ 时, 认为是在岩浆作用高温环境中形成, U/Th 比值 < 1000 时, 认为该铀矿物结晶时温度较高($T > 450 \pm 50$ °C), 当 U/Th 比值 > 1000 时, 认为铀矿物结晶时温度较低($T < 350$ °C) (Frimmel *et al.*, 2014; 武勇等, 2020)。同时, 晶质铀矿中的稀土元素对结晶温度变化反应敏感, 会由于结晶温度的上升而含量升高(Eglinger *et al.*, 2013)。沥青铀矿与晶质铀矿成分特征一致, 是晶质铀矿的隐晶质变种(陈佑纬等, 2019), 在同一环境下可以对比讨论。本次研究的沥青铀矿中稀土元素 ΣREE 总量 ($69.94 \times 10^{-6} \sim 200.46 \times 10^{-6}$) 和 Th 含量 (0.000 5%~0.001 3%) 均低, $(LREE/HREE)_N$ 为 0.97~1.61(平均值为 1.33)。根据以上特点, 在图 7a 中可以看出, 书楼丘铀矿床的沥青铀矿部分有效投影点落在了低温热液型范围内, 这表明沥青铀矿为低温热液成因。在图 7b 中所有投影点落在了高盐度和中低盐度流体区域外。造成这种现象的原因是, 由于稀土元素配分模式表现为轻重稀土分馏不明显($(LREE/HREE)_N$ 为 0.97~1.61, 平均为 1.33), 稀土总量较低($69.94 \times 10^{-6} \sim 200.46 \times 10^{-6}$), 从而导致无法落入目的区域。将书楼丘矿床沥青铀矿的稀土元素配分模式图与不同类型的铀矿床稀土元素配分模式进行对比(图 8a), 可以看出其与脉状型铀矿的对比程度最高, 而脉状型铀矿床具有低温中低盐度的特征(Mercadier *et al.*, 2011; 陈佑纬等, 2019)。

δCe 特征是区别氧化还原环境的指示标志(Brugger *et al.*, 2006)。Ce 为变价元素, 还原环境下, 常以 Ce^{3+} 形式与其他 3 价稀土元素共存在热液流体中; 在热液氧化环境下表现为 Ce^{4+} , Ce^{4+} 具有惰性强、不易被热液迁移等特点, 若从中析出沥青铀矿, Ce^{4+} 不容易保留在热液中而以类质同像形式在沥青铀矿中富集, 呈现出 Ce 正异常($\delta Ce > 1$) (黄国龙等, 2010)。本次分析表明沥青铀矿的 δCe 范围为 0.36~1.16, 仅一个点的值大于 1, 平均值为 0.57 (< 1), 说明其形成于还原环境中。

综上所述, 书楼丘铀矿床应该与低温中低盐度

的脉状型(热液型)铀矿具有相似的特征, 即低温中低盐度的特性, 且形成于还原成矿环境。

4.3 稀土元素对沥青铀矿源区的启示

据大量的统计资料表明, 晶质铀矿(沥青铀矿)的稀土元素组成常被用于判断铀矿床的成因类型(Mercadier *et al.*, 2011; Frimmel *et al.*, 2014; 陈佑纬等, 2019)。书楼丘铀矿床沥青铀矿的稀土元素配分模式表现为轻重稀土分馏不明显, 轻稀土微富集, 具有明显的负 Eu 异常。通过与赋矿围岩油洞、长江岩体及穿插的基性岩脉的稀土元素配分模式(朱捌, 2010)进行对比(图 8a~8d), 可以看出其稀土元素配分模式与长江岩体的稀土配分模式具有很好的对应性。前人研究表明, 花岗岩的铀活性及含铀量明显更高(Chen *et al.*, 2012), 赋存在花岗岩中的固定铀更容易迁移活化运移(程华汉和杜乐天, 1998), 而华南基性岩脉中的铀含量较低且较为稳定(王学成等, 1991)。

同时, 将本次研究的书楼丘铀矿床与世界上不同类型的铀矿床(Mercadier *et al.*, 2011)进行对比, 结果显示与脉状型铀矿床稀土元素配分模式匹配度最好(图 8a)。由此说明, 书楼丘铀矿床应该与国外低温中低盐度的脉状型铀矿具有相似的特征, 即其稀土元素配分模式主要受源区稀土元素配分模式的控制, 与源区具有相似的稀土配分模式。长江岩体比油洞岩体和基底变质岩具有更高的铀含量(黄国龙等, 2010)。因此, 从铀含量和稀土配分模式对比程度来看, 书楼丘铀矿床的稀土元素配分模式主要受长江岩体控制, 其主铀源区应该是长江岩体。

4.4 对长江铀矿田“交点型”铀成矿过程的启示

“交点型”铀矿化最初发现于下庄铀矿田, 是矿田内最主要的铀矿化类型。对于该矿化类型的深入讨论, 重点在于对岩石圈伸展运动、富铀花岗岩、基性岩与铀成矿之间的内在联系进行深入综合探讨。Wang *et al.*(2015)利用锆石 U-Pb 定年、全岩地球化学和 Sr-Nd 同位素技术对下庄地区的基性岩脉进行分析, 获得了苦竹坑辉长岩和 WNW 向辉绿岩脉的年龄分别为 198 ± 1 Ma、 193 ± 4 Ma, 与下庄铀成矿年龄(85~135 Ma)存在巨大时差, 并认为 NNE 向煌斑岩脉形成对应于古太平洋板块向西俯冲的弧后延伸阶段, 辉长岩脉和辉绿岩脉则受印支造山后造山阶段控制。在综合分析下庄地区苦竹坑辉长岩和 WNW 向辉绿岩脉、NNE 向煌斑岩脉与构造事件、铀成矿之间的相互联系时, 认为辉绿岩在铀矿化过

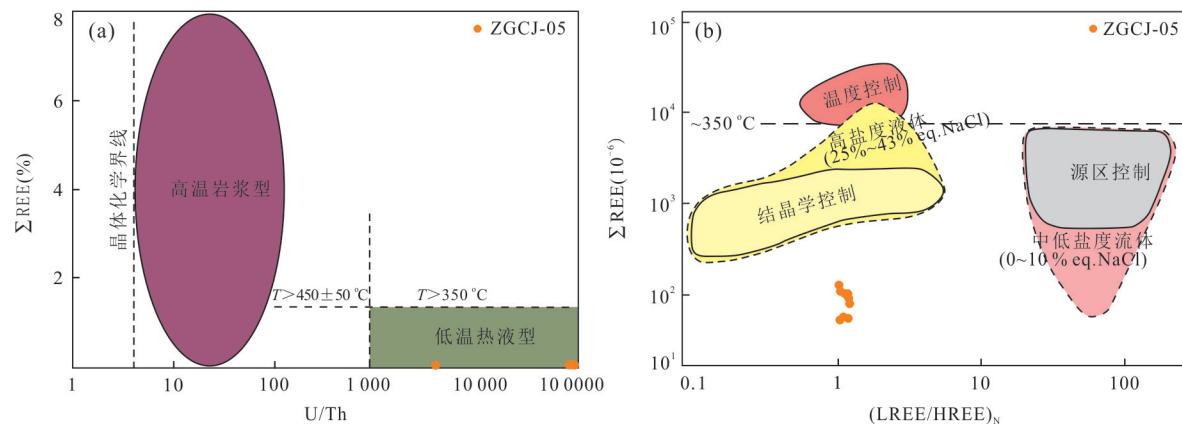
图7 书楼丘铀矿区沥青铀矿 Σ REE-(U/Th)(a)和 Σ REE-(LREE/HREE)_N图解(b)

Fig.7 The Σ REE vs. U/Th (a) and Σ REE vs. (LREE/HREE)_N (b) discrimination diagrams of the pitchblende
a. 底图据 Frimmel *et al.* (2014); b. 底图据 Mercadier *et al.* (2011)

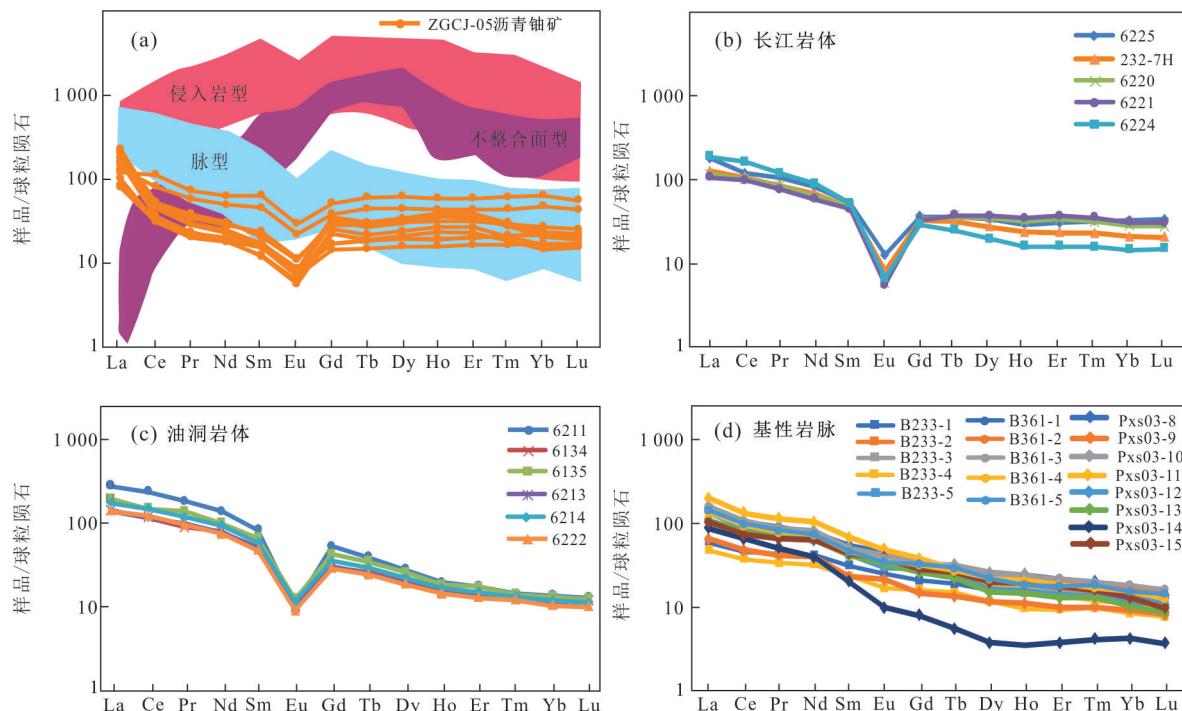


图8 沥青铀矿的球粒陨石标准化稀土元素配分图

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns diagrams for the pitchblende

稀土元素的数据来源:长江、油洞岩体和基性岩脉引自朱捌(2010),不同类型铀矿床引自 Mercadier *et al.* (2011);标准化值据 Sun and McDonough(1989)

程中所起的作用更有可能是提供一个有利的物理化学环境,促进氧化流体中U的沉淀。这些流体本身可能与NNE向断裂系统及其相关的煌斑岩脉有关,而不是与辉绿岩有关。骆金诚等(2019b)在研究下庄矿田基性岩脉Ar-Ar年龄与铀成矿关系的基础上,综合前人对成岩成矿时差以及基性岩脉与铀矿床时空关系研究的最新成果,提出以下观点:(1)探讨基性岩脉与铀成矿作用关系的重点为基性岩脉

的年龄是早于还是接近或对应于铀成矿年龄,即当基性岩脉年龄接近或对应于铀成矿年龄时,基性岩脉可为铀成矿作用提供幔源矿化剂CO₂以及提供理想场所供铀沉淀富集;而当基性岩脉年龄明显早于铀矿化作用时,则其可提供运移通道使幔源流体参与铀成矿作用并提供后期铀沉淀富集的条件;(2)当铀矿体与基性岩脉密切接触时,无论是否存在成矿成岩时差,基性岩脉均会为后期铀沉积富集提供

场所,从而促进铀的成矿作用.因此,对于基性岩脉侵位年龄的精确厘定及其与铀矿体的接触关系对于讨论基性岩脉与铀成矿作用的联系显得尤为重要.长江铀矿田基性岩脉年龄已有陆续报道,整个诸广地区辉绿岩脉的年龄为 145~90 Ma(李献华等,1997);油洞断裂带中充填的辉绿岩脉 Ar-Ar 年龄为 110.6 ± 2.0 Ma,为燕山晚期岩浆活动产物(曹豪杰等,2013);陀背岭、倒角垅、黄沙塘和红腾坑地区岩体内的基性岩脉 Ar-Ar 年龄分别为 ~ 110 Ma、 ~ 113 Ma、 ~ 120 Ma 和 ~ 115 Ma(庞雅庆,高飞,夏宗强,等,2015. 诸广南部基地铀资源扩大与评价技术研究成果报告.核工业北京地质研究所,北京,内部资料);书楼丘铀矿床的辉长闪长岩 LA-ICP-MS 铀石 U-Pb 年龄为 150 Ma,指示其形成于晚侏罗世(钟福军等,2019a),而书楼丘铀成矿年龄在 75~70 Ma.由此可以看出,如此巨大的成岩成矿时差可能表明书楼丘矿床基性岩脉的成岩时间应该早于铀成矿时间.如前文所述,本次沥青铀矿赋存在煌斑岩脉与硅化碎裂岩交切部位,关系密切,虽本文未对该煌斑岩脉进行精确定年,但结合前文讨论,我们认为该煌斑岩脉至少应该可以为后期铀沉淀提供理想场所.

随着原位微区等分析技术的不断发展和应用,近年来报道了越来越多的精确成矿年龄,对于华南花岗岩铀矿床的成矿时代和成矿作用取得了一些新的认识和进展,进而对于铀成矿与华南地区的成矿动力学背景之间的关系有了更清晰的认识.自早白垩世以来,华南地区历经了 6 次岩石圈伸展作用,分别为 145~135 Ma、125~115 Ma、110~100 Ma、95~85 Ma、75~70 Ma 和 55~45 Ma(Luo *et al.*, 2017).诸广地区的成矿年龄集中在 6 个峰期,分别为 ~ 120 Ma、 ~ 100 Ma、 ~ 90 Ma、 ~ 70 Ma、 ~ 60 Ma 和 ~ 50 Ma,呈现出多期性和同步性(钟福军等,2019b).可以看出,诸广地区铀成矿与岩石圈伸展作用具有密切的关系,这种对应关系也得到了许多学者的一致认可.综合长江铀矿田已有沥青铀矿成矿年龄来看,指示长江铀矿田存在 ~ 60 Ma、 ~ 70 Ma 和 ~ 75 Ma 三期热液铀成矿事件,形成于晚白垩世—古新世的岩石圈伸展构造背景(钟福军等,2019b).本次研究获得书楼丘沥青铀矿的成矿年龄与已有的书楼丘铀矿床沥青铀矿年龄皆指示书楼丘铀矿床的成矿年龄与华南花岗岩型铀矿的成矿期吻合,说明当时华南地区正处于白垩纪晚期(75~

70 Ma)岩石圈伸展作用的大地构造背景.

华南地区自中生代以来,NW-SE 向陆内伸展运动形成的系列 NE 向深大断裂活动以 95 Ma 左右 NE 向南雄断陷盆地的形成,伴随华南铀成矿大爆发为标志(赖静等,2020).而南雄断裂先后经历了拉张—挤压—拉张的多旋回构造演化,其中以 80~60 Ma 期间拉张活动最为强烈,由此复活了诸广山岩体内的北西向和北东向断裂带,控制了区域上主干断裂带的形成,形成一系列 NE 向地堑式断陷带,进而导通了岩石圈地幔(Zhang *et al.*, 2018; 钟福军等,2019b).基于区域上基性岩脉与铀成矿年龄的较大时差,矿化剂 CO_2 直接来自区域上基性岩浆活动的可能性较小.诸广地区富含幔源 CO_2 气体的温泉和铀矿床或矿田的空间定位皆受控于 NE 向断陷带和断裂带(Zhang *et al.*, 2018).从长江铀矿田成矿时间、诸广地区矿田和铀矿床的空间定位来看,矿化剂 CO_2 及其上升通道由区域上 NE 向断裂带 80~60 Ma 的强烈拉张活动提供(钟福军等,2019b).由于区域上 NE 向断裂带拉张活动导通了岩石圈地幔,矿化剂 CO_2 得以沿 NE 向断裂带上升,与地壳深部上涌的热液以及沿岩体下渗循环的地下水(大气降水)结合形成高萃取性、高氧逸度的临界流体,并主要与富铀花岗岩体相互作用,岩体内预活化的 U^{4+} 被氧化成 U^{6+} ,铀元素被提取出来而形成成矿流体,并以铀酰络离子 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_n^{2(1-n)}$ 形式迁移(石少华等,2010).成矿流体在压力降低下不断上升,在经过基性岩脉(含大量还原性介质,如辉石、角闪石和黑云母等)与硅化碎裂岩的交切部位时,以基性岩脉为热液流体参与铀成矿作用提供后期铀沉淀的理想还原条件和场所,进而促成后期铀的成矿作用.据下庄“交点型”铀矿床成矿特征研究可知,寻找富铀花岗岩和切割富铀花岗岩的蚀变基性岩脉是进一步缩小勘探靶区范围的关键(骆金诚等,2019b).因此,接下来的普查工作中,在书楼丘矿床乃至整个长江铀矿田注意寻找切割富铀长江岩体且与硅化、绿泥石化和黄铁矿化等密切相关的蚀变基性岩脉,特别是煌斑岩脉,将会有利于进一步在长江矿田发现“交点型”铀矿化信息.

综上所述,我们认为书楼丘矿床“交点型”铀矿化应该主要受南雄断裂在 80~60 Ma 期间的强烈拉张活动(控制并复活区域上的北东向断裂带,本文即硅化碎裂岩带)、富铀长江岩体及基性岩脉的三重要素共同控制,进而在交切部位促进铀成矿.

5 结论

(1) 本文通过LA-ICP-MS原位微区技术获得的U-Pb年龄为 71.3 ± 1.1 Ma,指示书楼丘“交点型”铀成矿存在 ~ 70 Ma的一次成矿期。

(2) 书楼丘铀矿床沥青铀矿微量元素富集W、Bi、Mo等亲硫元素;亏损Nb、Ta、Zr、Hf、Th等高场强元素;稀土元素总量较低,轻重稀土分异不明显,其配分模式呈轻稀土微富集,Eu具有明显的负异常。

(3) Σ REE—(U/Th)图解、 Σ REE—(LREE/HREE)_n图解及其稀土配分模式与脉型铀矿床稀土元素配分模式的较好对比指示其应该为低温中低盐度热液型铀矿床;δCe值指示沥青铀矿的成矿环境为还原环境。通过与赋矿围岩、基性岩脉的稀土配分模式对比,指示成矿物质主要来源应该为赋矿围岩长江岩体。

(4) 书楼丘矿床定位于北东向棉花坑断裂和里周断裂构成的断陷带内,主要受区域上南雄断裂80~60 Ma期间的强烈拉张活动、产铀长江花岗岩体和基性岩脉的三要素共同控制而促进“交点型”的铀成矿作用。在接下来的普查工作中,寻找切割富铀长江岩体且与硅化、绿泥石化和黄铁矿化等密切相关的蚀变基性岩脉,特别是煌斑岩脉,将会有利于进一步在长江矿田内发现“交点型”铀矿化信息。

References

- Bugger, J., Etschmann, B., Chu, Y.S., et al., 2006. The Oxidation State of Europium in Hydrothermal Scheelite: In Situ Measurement by Xanes Spectroscopy. *The Canadian Mineralogist*, 44(5): 1079—1087. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.44.5.1079>
- Cao, H.J., Huang, G.L., Xu, L.L., et al., 2013. The Ar-Ar Age and Geochemical Characteristics of Diabase Dykes of the Youdong Fault Zone in South of Zhuguang Granite Pluton. *Acta Geologica Sinica*, 87(7): 957—966(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. *Lithos*, 150:119—134. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.025>
- Chen, Y.W., Hu, R.Z., Luo, J.C., et al., 2019. In-Situ Mineral Chemistry and Chronology Analyses of the Pitchblende in the Shazijiang Uranium Deposit and Their Implications for Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2679—2694(in Chinese with English abstract).
- Cheng, H.H., Du, L.T., 1998. Study on Heavy Minerals of Some Uranium Deposits. *Uranium Geology*, 14(1): 26—31(in Chinese with English abstract).
- Cuney, M., 2009. The Extreme Diversity of Uranium Deposits. *Mineralium Deposita*, 44(1): 3—9. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0223-1>
- Cuney, M., 2010. Evolution of Uranium Fractionation Processes through Time: Driving the Secular Variation of Uranium Deposit Types. *Economic Geology*, 105(3):553—569. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.553>
- Eglinger, A., André-Mayer, A.S., Vanderhaeghe, O., et al., 2013. Geochemical Signatures of Uranium Oxides in the Lufilian Belt: From Unconformity-Related to Syn-Metamorphic Uranium Deposits during the Pan-African Orogenic Cycle. *Ore Geology Reviews*, 54: 197—213. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.04.003>
- Feng, Z.J., Lai, Z.X., Mo, J.H., et al., 2016. A Study of Metallogenetic Mechanism of “Intersection” Type Uranium Deposit and Exploration Thinking of Xiaozhuang Orefield. *Mineral Deposits*, 35(5): 1047—1061(in Chinese with English abstract).
- Frimmel, H.E., Schedel, S., Brätz, H., 2014. Uraninite Chemistry as Forensic Tool for Provenance Analysis. *Applied Geochemistry*, 48: 104—121. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.07.013>
- Guo, C.Y., Qin, M.K., Xu, H., et al., 2020. Age of Zhangjia Uranium Deposit in the Miaoershan Ore Field, Guangxi Autonomous Region, China: In Situ Micro-Determination on Pitchblende. *Earth Science*, 45(1):72—89(in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.227>
- Huang, G.L., Cao, H.J., Ling, H.F., et al., 2012. Zircon SHRIMP U-Pb Age, Geochemistry and Genesis of the Youdong Granite in Northern Guangdong. *Acta Geologica Sinica*, 86(4): 577—586(in Chinese with English abstract).
- Huang, G.L., Liu, X.Y., Sun, L.Q., et al., 2014. Zircon U-Pb Dating, Geochemical Characteristic and Genesis of the Changjiang Granite in Northern Guangdong. *Acta Geologica Sinica*, 88(5): 836—849(in Chinese with English abstract).
- Huang, G.L., Wu, L.Q., Deng, P., et al., 2006. Prospecting Potential and Direction for Granite Uranium Deposit in North Guangdong, China. *Uranium Geology*, 22(5):

- 267—275(in Chinese with English abstract).
- Huang, G. L., Yin, Z. P., Ling, H. F., et al., 2010. Formation Age, Geochemical Characteristics and Genesis of Pitchblende from No. 302 Uranium Deposit in Northern Guangdong. *Mineral Deposits*, 29(2): 352—360(in Chinese with English abstract).
- Lai, J., Qi, J. M., Chen, J. J., et al., 2020. Uranium Micromineralogy and Geochronology of the Jiangtou Uranium Ore Field in the Qingzhangshan Granite Pluton, North Guangdong: Constraints on the Genetic Relationship with Metallogenic Dynamic Background. *Acta Geologica Sinica*, 94(4):1128—1142(in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Hu, R. Z., Rao, B., 1997. Geochronology and Geochemistry of Cretaceous Mafic Dikes from Northern Guangdong, SE China. *Geochimica*, 26(2):14—31(in Chinese with English abstract).
- Liu, R. Z., 2003. Several Questions Discussion of Intersection-type Uranium Deposit. *Uranium Geology of South China*, 20(1):41—48(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. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center*, 4:72.
- Luo, J. C., Hu, R. Z., Fayek, M., et al., 2017. Newly Discovered Uranium Mineralization at \sim 2.0 Ma in the Menggongjie Granite-Hosted Uranium Deposit, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137:241—249. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.01.021>
- Luo, J. C., Qi, Y. Q., Wang, L. X., et al., 2019b. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2660—2678(in Chinese with English abstract).
- Luo, J. C., Shi, S. H., Chen, Y. W., et al., 2019a. Review on Dating of Uranium Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 35(2):589—605(in Chinese with English abstract).
- Mercadier, J., Cuney, M., Lach, P., et al., 2011. Origin of Uranium Deposits Revealed by Their Rare Earth Element Signature. *Terra Nova*, 23(4):264—269. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2011.01008.x>
- Shi, S. H., Hu, R. Z., Wen, H. J., et al., 2010. Geochronology of the Shazijiang Uranium Ore Deposit, Northern Guangxi, China: U-Pb Ages of Pitchblende and Their Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1175—1182 (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. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Suzuki, K., Kato, T., 2008. CHIME Dating of Monazite, Xenotime, Zircon and Polycrase: Protocol Pitfalls, and Chemical Criterion of Possibly Discordant Age Data. *Gondwana Research*, 14(4):569—586. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.005>
- 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. *Lithos*, 239: 71—85. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.10.008>
- Wang, X. C., Zhang, B. T., Zhang, Z. H., 1991. A Study of the Relationship between the Dark Dyke and the Uranium Mineralization. *Mineral Deposits*, 10(4):359—370(in Chinese with English abstract).
- Wu, Y., Qin, M. K., Guo, D. F., et al., 2020. Metallogenic Chronology of the Pitchblende of 1101 Uranium Ore Area in Mouding, Middle-South Part of the Kangdian Axis and Its Geological Significance. *Earth Science*, 45(2): 419—433(in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.058>
- Xu, W. X., Fu, S. C., Xu, Y., et al., 2017. Analysis of Prospecting Potential in the Depth of Shulouqiu Uranium Deposit in Southern Zhuguangshan Pluton. *Mineral Exploration*, 8(5):782—788(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. *Lithos*, 308—309:19—33. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.02.029>
- Zhang, S. G., 2019. Geological Characteristics, Deposit Genesis and Prospecting Potential of Shulouqiu Uranium Deposit. *Uranium Mining and Metallurgy*, 38(2):157—164 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, F. J., Pan, J. Y., Wu, J. H., et al., 2019a. Petrogenesis and Its Relationship with Uranium Mineralization of Gabro-Diorite in Changjiang Uranium Ore-Field, Northern Guangdong Province, China. *Earth Science*, 44(9):3042—3059(in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.592>
- Zhong, F. J., Yan, J., Xia, F., et al., 2019b. In-Situ U-Pb Isotope Geochronology of Uraninite for Changjiang Granite-

- Type Uranium Ore Field in Northern Guangdong, China: Implications for Uranium Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9):2727—2744(in Chinese with English abstract).
- Zhu, B., 2010. The Study of Mantle Liquid and Uranium Metallogenesis—Take Uranium Ore Field of South Zhu-guang Mountain as an Example (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Zong, K.Q., Chen, J.Y., Hu, Z.C., et al., 2015. In-Situ U-Pb Dating of Uraninite by Fs-LA-ICP-MS. *Science in China: Earth Sciences*, 45(9):1304—1319(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 曹豪杰,黄国龙,许丽丽,等,2013.诸广花岗岩体南部油洞断裂带辉绿岩脉的Ar-Ar年龄及其地球化学特征.地质学报,87(7):957—966.
- 陈佑纬,胡瑞忠,骆金诚,等,2019.桂北沙子江铀矿床沥青铀矿原位微区年代学和元素分析:对铀成矿作用的启示.岩石学报,35(9):2679—2694.
- 程华汉,杜乐天,1998.几个铀矿床碱交代作用中重砂矿物变化的研究.铀矿地质,14(1):26—31.
- 冯志军,赖中信,莫济海,等,2016.下庄矿田“交点型”铀矿床成矿机理研究及勘查思路探讨.矿床地质,35(5):1047—1061.
- 郭春影,秦明宽,徐浩,等,2020.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.地球科学,45(1):72—89.
- 黄国龙,曹豪杰,凌洪飞,等,2012.粤北油洞岩体SHRIMP锆石U-Pb年龄、地球化学特征及其成因研究.地质学报,86(4):557—586.
- 黄国龙,刘鑫扬,孙立强,等,2014.粤北长江岩体的锆石U-Pb定年、地球化学特征及其成因研究.地质学报,88(5):836—849.
- 黄国龙,吴烈勤,邓平,等,2006.粤北花岗岩型铀矿找矿潜力及找矿方向.铀矿地质,22(5):267—275.
- 黄国龙,尹征平,凌洪飞,等,2010.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.矿床地质,29(2):352—360.
- 赖静,祁家明,陈军军,等,2020.粤北青嶂山岩体江头矿区铀矿微区矿物学、年代学特征及其成矿动力背景制约.地质学报,94(4):1128—1142.
- 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.地球化学,26(2):14—31.
- 刘汝洲,2003.浅谈交点型铀矿中的几个问题.华南铀矿地质,20(1):41—48.
- 骆金诚,齐有强,王连训,等,2019b.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.岩石学报,35(9):2660—2678.
- 骆金诚,石少华,陈佑纬,等,2019a.铀矿床定年研究进展评述.岩石学报,35(2):589—605.
- 石少华,胡瑞忠,温汉捷,等,2010.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.地质学报,84(8):1175—1182.
- 王学成,章邦桐,张祖还,1991.暗色岩脉与铀成矿关系研究.矿床地质,10(4):359—370.
- 武勇,秦明宽,郭冬发,等,2020.康滇地轴中南段牟定1101铀矿区沥青铀矿成矿时代及成因.地球科学,45(2):419—433.
- 徐文雄,伏顺成,许幼,等,2017.诸广山岩体南部书楼丘铀矿床深部找矿潜力分析.矿产勘查,8(5):782—788.
- 张善果,2019.书楼丘铀矿床地质特征、矿床成因及找矿潜力分析.铀矿冶,38(2):157—164.
- 钟福军,潘家永,巫建华,等,2019a.粤北长江铀矿田辉长闪长岩的岩石成因及其与铀成矿的关系.地球科学,2019(9):3043—3059.
- 钟福军,严杰,夏菲,等,2019b.粤北长江花岗岩型铀矿田沥青铀矿原位U-Pb年代学研究及其地质意义.岩石学报,35(9):2727—2744.
- 朱捌,2010.地幔流体与铀成矿作用研究——以诸广山南部铀矿田为例(博士学位论文).成都:成都理工大学.
- 宗克清,陈金勇,胡兆初,等,2015.铀矿Fs-LA-ICP-MS原位微区U-Pb定年.中国科学:地球科学,45(9):1304—1319.