



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403038

引用格式:范鹏飞,廖志权,李满根,等. 稀土元素地球化学对湘东大富岭矿床铀成矿的指示意义[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(5): 1792-1802.

Fan Pengfei, Liao Zhiquan, Li Mangen, et al. Geochemical characteristics of REE as indicators for uranium metallogenesis in the Dafuling deposit in eastern Hunan Province[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(5): 1792-1802.

# 稀土元素地球化学对湘东大富岭矿床 铀成矿的指示意义

范鹏飞<sup>1,2,3</sup>, 廖志权<sup>4</sup>, 李满根<sup>1\*</sup>, 陈念楠<sup>1</sup>, 欧阳平宁<sup>2,3</sup>, 张鑫<sup>2,3</sup>

(1. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013; 2. 核工业二三〇研究所, 长沙 410007; 3. 湖南省伴生放射性矿产资源评价与综合利用工程技术研究中心, 长沙 410007; 4. 江西省地质局第七地质大队, 赣州 341000)

**摘要** 大富岭矿床隶属于湘东明月峰矿田,是近年来新发现的花岗岩外带型铀矿床。该矿床的矿石矿物特征和稀土元素特征尚未有报道,为进一步理清矿石矿物特征和稀土元素的特征,探讨稀土元素对铀成矿的指示意义,采用扫描电镜、电子探针、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry, LA-ICP-MS)等技术研究了该矿床的主要矿石矿物——沥青铀矿,并首次利用 LA-ICP-MS 测试了沥青铀矿的稀土元素。实验结果表明,大富岭铀矿床沥青铀矿主要由  $UO_2$ 、CaO 和 PbO 组成,  $ThO_2$  含量极低,  $\Sigma REE$  含量偏低,轻重稀土分异明显,  $(La/Yb)_N$  远大于 1,轻稀土明显富集, Eu 负异常,沥青铀矿的主量元素和稀土元素均表明其形成于温度低于 350 °C 的中低温热液环境,指示大富岭矿床为典型的中低温热液脉型铀矿床。稀土元素指示成矿作用过程中成矿热液从高盐度向低盐度转变,热液环境由还原环境逐渐过渡到弱氧化环境,暗示了来源于地壳深部或岩石圈地幔的成矿热液沿着大富岭地区区域性深断裂上升,在经历一系列物理化学条件变化后,最终大富岭矿床适宜位置富集成矿。

**关键词** 沥青铀矿; LA-ICP-MS; 稀土元素; 热液脉型铀矿床; 大富岭矿床; 明月峰矿田

中图法分类号 P595 P611; 文献标志码 A

## Geochemical Characteristics of REE as Indicators for Uranium Metallogenesis in the Dafuling Deposit in Eastern Hunan Province

FAN Peng-fei<sup>1,2,3</sup>, LIAO Zhi-quan<sup>4</sup>, LI Man-gen<sup>1\*</sup>, CHEN Nian-nan<sup>1</sup>,  
OUYANG Ping-ning<sup>2,3</sup>, ZHANG Xin<sup>2,3</sup>

(1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Changsha Uranium Geology Institute, Changsha 410007, China; 3. Hunan Engineering Technology Research Center for Evaluation and Comprehensive Utilization of Associated Radioactive Mineral Resources, Changsha 410007, China; 4. The Seventh Geological Brigade of Jiangxi Bureau of Geology, Ganzhou 341000, China)

**[Abstract]** Dafuling (DFL) deposit is a part of the Mingyuefeng ore field in eastern Hunan Province, China, is a typical perigranitic uranium deposit discovered recently. The characteristics of the ore minerals and the features of rare earth elements in this deposit have not been previously documented. In order to further elucidate the characteristics of ore minerals and rare earth elements (REE), as well as explore their indicative significance for uranium metallogenesis. Herein, uraninite, the primary ore mineral in the deposit, was investigated *via* scanning electron microscopy and electron probe microanalysis. Additionally, laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) was used for the first time to determine the in situ the REE characteristics of uraninite. Uraninite exhibits a distinct fractionation between light rare earth elements (LREE) and heavy rare earth elements (HREE), while displaying a negative Eu anomaly. The  $(La/Yb)_N$  ratio exceeds 1, indicating a significant enrichment of LREE. Both major elements and REE in uraninite suggest its formation within a hydrothermal environment at temperatures ranging from moderate to low, below 350 °C. Consequently, DFL deposit can be classified as a typical hydrothermal vein-type uranium deposit. The REE serve as indicators of the transition of ore-bearing hydrothermal fluids from high salinity to low salinity, and the hydrothermal environment gradually shifts from a reducing state to a weakly oxidizing state. These observations suggest that the ore-bearing hydrothermal fluid responsible for metal-

收稿日期: 2024-04-25 修订日期: 2024-11-19

基金项目: 中国核工业地质局基金(2023-24-1, 2023-24-3, 地 LCEQ01)

第一作者: 范鹏飞(1989—),男,汉族,山西翼城人,博士,高级工程师。研究方向:铀矿地质与岩矿测试。E-mail: FanPF188@126.com。

\* 通信作者: 李满根(1969—),男,汉族,江西吉安人,博士,教授。研究方向:矿产勘查与成矿预测。E-mail: 75363159@qq.com。

logogenesis originating from the deep crust or lithospheric mantle, ascended along regional deep faults, and subsequently underwent a series of physical and chemical transformations, eventually accumulated mineralization in suitable locations within DFL deposit.

[**Keywords**] uraninite; LA-ICP-MS; REE; hydrothermal vein-type uranium deposit; Dafuling deposit; Mingyuefeng ore field

稀土元素(rare earth elements, REE)是一组地球化学性质极为相似的元素,经常以不同浓度一起出现在各类岩石和矿物中<sup>[1]</sup>,稀土元素保存着地质体成因、演化等多方面的信息,可以反映成矿物质和流体的来源,示踪成矿流体的活动轨迹,是研究成岩、成矿的重要手段<sup>[2]</sup>。沥青铀矿是各类中低温热液铀矿床和表生铀矿床的主要矿石矿物,常含少量稀土元素<sup>[3-4]</sup>,其所含稀土元素对铀成矿具有重要指示意义<sup>[5-8]</sup>,近年来,随着激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱(laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry, LA-ICP-MS)原位微区分析技术的快速发展,极大地促进了沥青铀矿中稀土元素分析和研究工作,并取得了一系列重要成果。如张涛等<sup>[9]</sup>通过 LA-ICP-MS 原位技术分析了向阳坪矿床沥青铀矿的稀土元素,得出成矿流体具有多阶段、深源等特点;郑国栋等<sup>[10]</sup>通过 LA-ICP-MS 原位技术分析了书楼丘矿床沥青铀矿的稀土元素,证明了形成矿床的热液具有低温、中低盐度的特征;黄广文等<sup>[11]</sup>通过 LA-ICP-MS 原位技术分析了大石沟矿床晶质铀矿的稀土元素,通过稀土元素指示了晶质铀矿形成具有高温、高盐度、岩浆来源的特点;李海东等<sup>[12]</sup>通过 LA-ICP-MS 原位技术分析了琶江矿床沥青铀矿的稀土元素,得出成矿流体具有富 F 的特点。

大富岭铀矿床位于湖南省醴陵市贺家桥乡一攸县大桥乡境内,隶属湘东明月峰矿田,近两年中国核工业地质局对大富岭矿床外带地层进行钻探施工,在丫江桥岩体外接触带地层中连续揭露到高品位铀矿体,证实大富岭矿床为花岗岩外带型铀矿床。花岗岩外带型铀矿床在国内发现较少,研究程度相对于国外略显不足,如著名的捷克 Příbram 铀矿床,为典型花岗岩外带单铀金属脉型矿床,赋矿围岩主要为上元古界和寒武系的碎屑岩系,成矿时代为 270 Ma<sup>[13-15]</sup>,其 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 开采量已超过 68 000 t<sup>[16]</sup>;德国的 Niederchem-Alberode 铀矿床,其铀资源量约为 84 466 t,矿脉主要赋存在 Erzgebirge 花岗岩体外接触带的轻微热变质晕范围内,赋矿围岩为黑色页岩和炭质千枚岩,成矿年龄为 318 ~ 325 Ma<sup>[17]</sup>。

20 世纪 90 年代,前人对大富岭铀矿床有过勘查和研究工作,总体而言工作程度较低<sup>[18-19]</sup>,截至目前,该矿床沥青铀矿的主要化学成分、微量及稀土元素特征还未被报道过,而铀矿物化学成分、稀

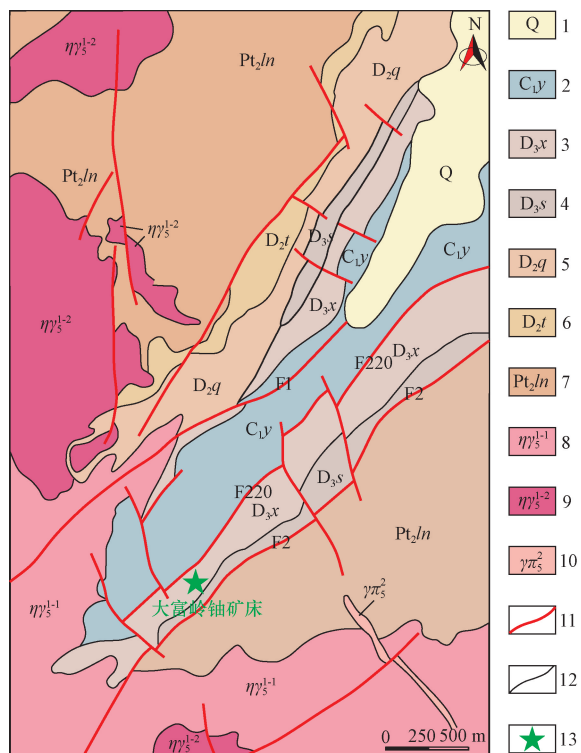
土元素等对研究矿床地质条件、成矿机理、成矿模式等方面具有重要意义<sup>[20-24]</sup>。因此,对大富岭矿床沥青铀矿的矿物化学特征和稀土元素特征进行深入研究势在必行。现通过详细的野外地质调查,在室内岩矿鉴定的基础上,利用扫描电镜、电子探针、LA-ICP-MS 等分析手段,对大富岭矿床的铀矿石开展矿物化学、稀土元素研究,重点厘定大富岭铀矿床铀矿化特征和成矿环境,旨在进一步完善大富岭铀矿床成矿理论研究,以期对区内铀矿勘查和铀资源综合利用提供必要的理论依据。

## 1 矿床地质背景

扬子板块与华夏板块的构造拼合带是一条多期次、多类型造山作用下由多种构造型式复合而成的复杂构造带<sup>[25-28]</sup>。大富岭铀矿床位于该构造拼合带中西段扬子陆块南缘醴陵褶皱带<sup>[29]</sup>,区域构造位置属华南板块东部板内 NNE 向走滑造山带的西枝,郟庐断裂和修水—茶陵—郴县 NNE 向走滑断裂配套的雁行走滑断裂系<sup>[30-31]</sup>。

矿床出露地层从老到新依次为中-上元古界冷家溪群(Pt<sub>2</sub>ln)、上古生界泥盆系跳马涧组(D<sub>2</sub>t)、棋梓桥组(D<sub>2</sub>q)、余田桥组(D<sub>3</sub>s)、锡矿山组(D<sub>3</sub>x)、石炭系岩关阶(C<sub>1</sub>y)和新生界第四系(Q)(图 1)<sup>[32]</sup>。其中,冷家溪群为区内基底地层,岩性主要为浅灰色、青灰色绿泥石绢云母板岩、粉砂质板岩;跳马涧组以黄绿色变质石英砂岩、变质粉砂岩为主;棋梓桥组主要分布于丫江桥岩体东北部的狭长地带,出露岩性为黑色含碳泥灰岩、夹泥岩、砂岩等薄层,局部地段下部可见黄灰色泥灰岩;余田桥组出露岩性为白色、褐白色巨厚的结晶白云岩、灰岩;锡矿山组上部岩性主要为灰色石英砂岩、下部主要为灰褐色条带状泥灰岩;岩关阶岩性主要为黑色含碳泥灰岩、含碳泥岩<sup>[33]</sup>。矿区出露岩体主要为丫江桥岩体,呈岩基状侵入于冷家溪群和板溪群,为多期次的复式花岗岩体,成岩年龄主要为 244 ~ 251 Ma 和 212 ~ 213 Ma 两个阶段<sup>[34]</sup>。矿区内主要构造为大障—贺家桥向斜、两条较深的断裂 F1、F2,控矿断裂 F220 以及大量的隐伏层间及层内破碎带,其构造线方向均为 NE-NNE,另见少量晚期的 NW 向断层, NW 向断层往往切割 NE 向构造。

大富岭矿床位于丫江桥岩体东北外接触带,大障—贺家桥向斜东侧,主要矿体位于丫江桥岩体外



1 为第四系;2 为石炭系岩关阶;3 为泥盆系上统锡矿山组;4 为泥盆系上统余田桥组;5 为泥盆系中统棋梓桥组;6 为泥盆系中统姚马涧组;7 为中元古界冷家溪;8 为丫江桥岩体主体花岗岩;9 为丫江桥岩体补体花岗岩;10 为燕山早期花岗岩斑岩;11 为构造;12 为地层界限;13 为大富岭铀矿床

图1 大富岭铀矿床大地构造位置示意图及其地质简图  
Fig. 1 Schematic diagram of the tectonic location of the Dafuling uranium deposit and its geological sketch

接触的地质中,成矿有利地层主要为棋梓桥组( $D_2q$ )及岩关阶( $C_1y$ ),矿体主要受地层的接触面、层间破碎带及F220控制,主要的矿石类型为肉红色方解石-沥青铀矿型,该类型矿石品位较高。

## 2 样品采集及分析方法

### 2.1 样品采集与处理

大富岭铀矿床赋矿地层和岩性主要为棋梓桥组、岩关阶含碳泥灰岩、泥灰岩。经多次筛选不同的铀矿石样品,最终选择大富岭矿床岩关阶地层中的富矿体样品作为测试对象[图2(a)],编号为ZKD66-1。样品对应薄片及探针片磨制在核工业二三〇研究所分析测试中心完成。随后利用偏光显微镜开展岩矿鉴定,初步圈定出感兴趣的矿物和区域,然后做扫描电镜观察和电子探针定量分析,挑选出化学成分变化小、内部不含其他矿物包体、未遭受蚀变、不发育裂纹的沥青铀矿作为LA-ICP-MS原位微区稀土元素的测试对象。

### 2.2 测试方法

扫描电镜分析在东华理工大学核资源与环境国

家重点实验室完成,仪器型号为FEI Nova Nano SEM450,分辨率1.0 nm(15 kV)和1.4 nm(1 kV),加速电压为15.0 kV,配备牛津X-Max20能谱仪,可进行定性点分析,扫描电镜主要用来观察铀矿物的形貌特征,并寻找合适的微区原位稀土元素分析点。

电子探针定量成分分析在武汉微束检测科技有限公司完成,仪器型号为Jeol-8230。测试加速电压15 kV,加速电流20 nA,束斑直径1  $\mu\text{m}$ 。测试元素所用的标样为橄榄石(Si),刚玉(Al),硬玉(Na),钾长石(K),透辉石(Ca, Mg),磷灰石(P),金红石(Ti),镁铝榴石(Fe)、钍单质(Th),晶质铀矿(U),方铅矿(Pb),含REE玻璃(REE),定量数据用ZAF法校正。元素检测限为 $200 \times 10^{-6}$ ,主量元素误差1.5%,微量元素误差5.0%,电子探针用来分析铀矿物的主要化学成分。

沥青铀矿原位微区原位稀土元素含量实验在武汉上谱分析科技有限责任公司利用LA-ICP-MS分析完成。详细的实验流程、数据处理和校正策略见文献[35]。GeolasPro激光剥蚀系统由COM-PexPro 102 ArF 193 nm准分子激光器和MicroLas光学系统组成,ICP-MS型号为Agilent 7900。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[36]。激光束斑和频率分别为16  $\mu\text{m}$ 和1 Hz。稀土元素含量处理中采用玻璃标准物质NIST610进行校正,每个时间分辨分析数据包括20~30 s空白信号和50 s样品信号,分析数据离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、稀土元素含量计算)采用软件ICPMSDataCal[37]完成。

## 3 结果

### 3.1 岩相学特征

铀矿石新鲜面呈黑色-黑褐色,发育多条粉色方解石脉[图2(a)],显微镜下观察矿石薄片样品,主要赋矿岩性为含碳泥灰岩[图2(b)],发育微晶粒状结构,层状构造。矿石中出露大量微晶粒状方解石、隐晶-显微鳞片状黏土矿物、绢云母及不透明碳质组成,其中微晶方解石颗粒多被压扁拉长显定向排列。含矿段含碳泥灰岩破碎强烈,发育多条肉红色方解石脉体。铀矿物主要与肉红色方解石关系密切[图2(a)、图2(b)],以沥青铀矿为主,沥青铀矿反射色钢灰色,呈球粒状、葡萄状,集合体呈细脉状[图2(c)],部分沥青铀矿见干裂纹,沥青铀矿集合体分布在含碳泥灰岩角砾的边缘和延伸进角砾内

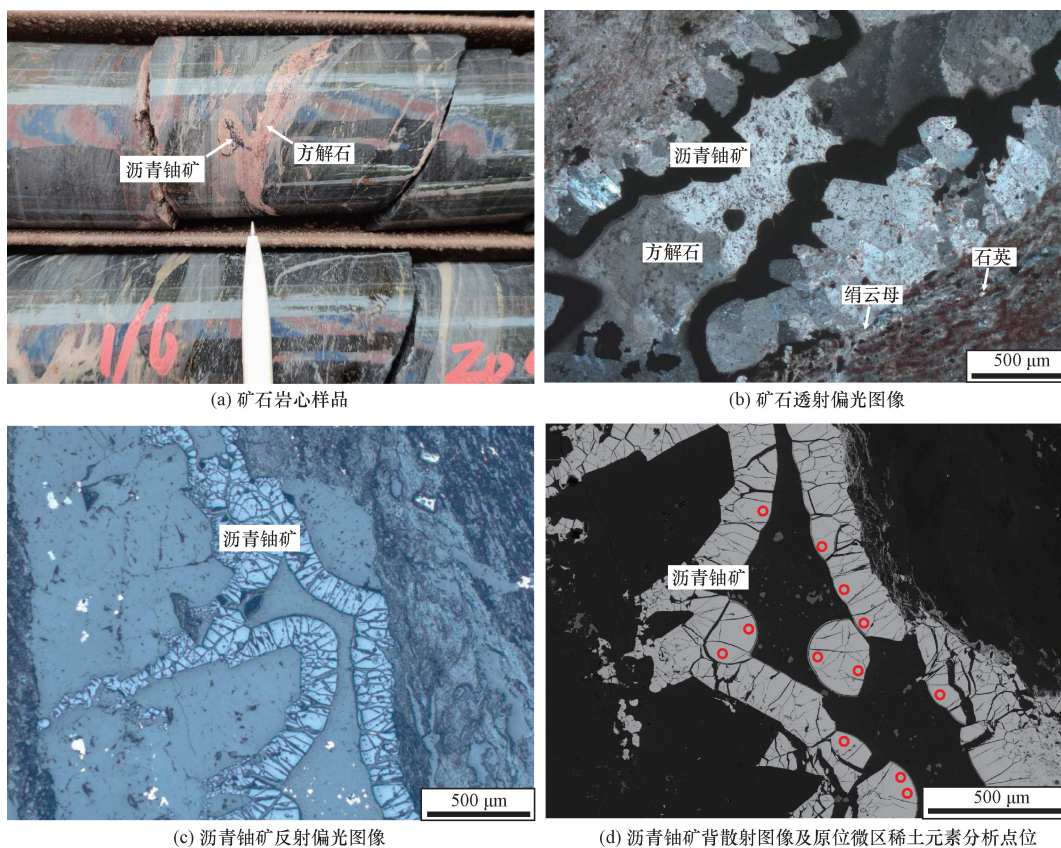


图2 大富岭矿床铀矿石样品及其显微图像特征

Fig. 2 Uranium ore sample from Dafuling deposit and microscope images

部。背散射图像下沥青铀矿呈现均匀的亮白色,部分球粒状沥青铀矿显环带结构[图 2(d)],环带外部灰度值略高,环带内部灰度值略低,少量向纤维状次生铀矿物转变。经过详细的偏光显微镜和扫描电镜观察后可大致确定,含碳泥灰岩碎裂后,被晚期的方解石胶结,方解石形成时沥青铀矿也同时

从热液中沉淀出来,在原地层岩石的角砾周边形成脉状集合体状沥青铀矿,基本确认不存在其他期次的铀矿化。

### 3.2 沥青铀矿电子探针定量分析

对沥青铀矿做电子探针定量点分析,共测试 8 个点,分析结果见表 1。沥青铀矿主要组成元素为 U、

表 1 沥青铀矿电子探针定量分析结果

Table 1 EPMA quantitative point analysis data of uraninite

编号	含量/%							
	1	2	3	4	5	6	7	8
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.02	—	—	—	—	—	—
CaO	4.85	4.98	5.25	5.08	5.09	4.92	4.90	4.91
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	0.03	0.15	0.25	—	0.08
ThO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	—	0.01	0.05	—	—	—	0.05
SiO <sub>2</sub>	0.26	0.20	0.19	0.11	0.31	0.20	0.18	0.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	0.02	0.08	0.04	—	—
UO <sub>2</sub>	87.93	87.89	87.63	87.97	87.58	87.92	87.97	87.81
PbO	1.09	1.40	1.19	1.44	1.12	1.38	1.42	1.40
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0.05	0.16	0.12	0.12	—	0.11	0.04
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	0.05	—	—	—	—	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.21	0.16	0.23	0.15	0.16	0.21	0.18
Na <sub>2</sub> O	0.16	0.18	0.12	0.19	0.12	0.15	0.17	0.14
MgO	—	—	—	—	0.04	—	—	0.01
K <sub>2</sub> O	—	0.01	0.01	—	—	—	—	0.01
合计	94.51	94.94	94.75	95.24	94.76	95.01	94.95	94.97

注:“—”表示低于检测限。

Ca、Pb,其次含微量的 Si、Na、P、Ce 等元素。其中,沥青铀矿  $\text{UO}_2$  含量为 87.58% ~ 87.97%,平均值为 87.44%;CaO 含量为 4.85% ~ 5.25%,平均值为 5.00%,沥青铀矿的 CaO 含量略高;PbO 含量为 1.09% ~ 1.44%,平均值为 1.30%; $\text{SiO}_2$  含量为 0.11% ~ 0.31%,平均值为 0.21%; $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 0.12% ~ 0.19%,平均值为 0.15%; $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{REE}_2\text{O}_3$  等含量较低,Th 未检出。

### 3.3 沥青铀矿原位微区稀土元素分析

对大富岭矿床高品位矿体中沥青铀矿开展了 LA-ICP-MS 原位稀土元素分析,通过利用偏光显微镜、扫描电镜仔细观察沥青铀矿,选择无裂纹、晶面平整、反射色及背散射图像颜色均一的沥青铀矿颗粒进行 LA-ICP-MS 原位稀土元素分析,分析点位见图 2(d),分析结果见表 2。沥青铀矿的  $\Sigma\text{REE}$  含量为  $1\ 768.25 \times 10^{-6}$  ~  $3\ 471.04 \times 10^{-6}$ ,总体含量偏低,平均值为  $2\ 504.3 \times 10^{-6}$ ;LREE 含量范围为  $1\ 647.34 \times 10^{-6}$  ~  $3\ 219.34 \times 10^{-6}$ ,平均值为  $2\ 328.06 \times 10^{-6}$ ,HREE 含量范围在  $120.91 \times 10^{-6}$  ~  $251.70 \times 10^{-6}$ ,平均值为  $175.96 \times 10^{-6}$ ,LREE/HREE 为 9.37 ~ 15.73,平均值为 13.35,轻重稀土分异明显;  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  为 16.22 ~ 41.97,平均值为 28.95,远大于 1,为明显的轻稀土富集型; $\delta\text{Ce}$  为 0.74 ~ 1.01,平均值为 0.86,略小于 1,显示弱负异常; $\delta\text{Eu}$  为 0.52 ~ 0.82,平均值为 0.71,小于 1,显示负异常。

## 4 讨论

### 4.1 沥青铀矿主量元素对铀矿成指示意义

沥青铀矿的化学成分受其形成时的物理化学条件影响,容易发生元素的迁移、替换,其实际化学计量式要比理想化学计量式  $\text{UO}_2$  更为复杂,也因此沥青铀矿中的 Si、Ca、Al、Th 等能反映沥青铀矿的形成时的环境条件,这对解释矿床形成具有指示意义<sup>[4,38]</sup>。大富岭铀矿床富大矿体中沥青铀矿的  $\text{UO}_2$  (87.58% ~ 87.97%)、CaO 含量 (4.85% ~ 5.25%) 明显较高,而  $\text{ThO}_2$  含量明显低于检测限。CaO 含量普遍高于一般沥青铀矿,并不是因为存在含 Ca 的矿物包裹体,而是因为  $\text{U}^{4+}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  的离子半径相似,极为接近, $\text{U}^{4+}$  容易被  $\text{Ca}^{2+}$  代替从而进入沥青铀矿晶格<sup>[39-40]</sup>,岩相学结果表明沥青铀矿主要的共生矿物就是方解石脉体,说明含铀热液中含大量的钙,存在  $\text{U}^{4+}$  被  $\text{Ca}^{2+}$  置换的热液条件。由于  $\text{Th}^{4+}$  (0.105 nm) 和  $\text{U}^{4+}$  (0.1 nm) 具有相似的离子半径和地球化学性质,因此沥青铀矿在热液结晶过程中, $\text{U}^{4+}$  与  $\text{Th}^{4+}$  常发生置换,U 在不同的氧化状态下溶解度也不同,具有氧化性质的低温热液流体有

助于 U 的迁移。相比之下,由于 Th 在中低温环境中比较稳定,在热液流体中溶解度较低,不易被氧化流体迁移,故在高温环境中 ( $>350\text{ }^\circ\text{C}$ ) Th 的溶解度高,更容易进入铀的氧化物晶格中,而在低于  $350\text{ }^\circ\text{C}$  环境中形成的铀氧化物 Th 含量极低。有研究表明,铀矿物的 U/Th 可作为判断热液铀矿床结晶温度的重要指标,若 U/Th 小于 100,则表明铀矿物结晶温度较高或为岩浆作用下形成,若 U/Th 大于 1 000,表明铀矿物结晶温度较低<sup>[41-43]</sup>。研究中电子探针测试的沥青铀矿  $\text{UO}_2$  含量均高于 85%,而  $\text{ThO}_2$  均低于检测限,故可合理推断测试沥青铀矿的 U/Th 远大于 1 000。

LA-ICP-MS 原位微区测试显示,沥青铀矿中 U 含量均高于  $700\ 000.0 \times 10^{-6}$ ,Th 含量均低于  $1 \times 10^{-6}$ ,U/Th 均大于  $1 \times 10^6$  (表 2),远大于 1 000;电子探针和 LA-ICP-MS 测试 U/Th 值均表明大富岭矿床沥青铀矿成矿温度低于  $350\text{ }^\circ\text{C}$ 。在 U-Th 相关性图解中 [图 3(a)],U、Th 之间存在负相关性,说明在沥青铀矿结晶过程中,U、Th 之间存在微弱的置换,当温度降低到  $350\text{ }^\circ\text{C}$  以下,热液中 Th 含量越来越低,与 U 之间的置换作用越来越弱,暗示了含 U 热液迁移过程中温度、Eh 的降低变化。

### 4.2 沥青铀矿稀土元素对铀矿成指示意义

沥青铀矿中所含的稀土元素可用来判别其形成环境和温度, $\text{REE}^{3+}$  离子半径 (0.097 7 ~ 0.116 nm) 与  $\text{U}^{4+}$  离子半径接近 (0.1 nm),在热液结晶过程中  $\text{REE}^{3+}$  可以与  $\text{U}^{4+}$  离子可发生八面体配位置换,温度是这种置换反应的主要影响因素之一。形成于高温岩浆或变质作用环境中的铀的氧化物  $\Sigma\text{REE}$  含量较高,通常大于 1%,由于在该温度条件下沥青铀矿的膨胀性质导致大量的稀土元素进入沥青铀矿,并且轻重稀土分异不明显,即  $\text{LREE}/\text{HREE} \approx 1$ ,从而形成一个“较平的”稀土元素配分模式图;形成于中低温 ( $<350\text{ }^\circ\text{C}$ ) 热液环境中的沥青铀矿  $\Sigma\text{REE}$  含量通常较低,一般小于 1%,稀土元素受来源和沥青铀矿的结晶相共同控制,导致稀土元素之间发生分异,并可能形成 Eu 异常,其配分模式图整体有一定“斜率”,因此在无明显稀土矿物形成的条件下,稀土元素配分模式图能一定程度上反映铀矿成因类型<sup>[5-6,42,44]</sup>。与全球其他类型铀矿床进行对比,大富岭矿床沥青铀矿的稀土元素配分模式显示出与热液脉型铀矿床最为相似(图 4),指示大富岭铀矿床属于热液脉型铀矿床。研究中沥青铀矿样品中的稀土元素, $\Sigma\text{REE}$  均小于 1%, $\text{LREE}/\text{HREE}$  大于 1,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  远大于 1,轻重稀土分异明显;(U/Th)- $\Sigma\text{REE}$  图解 [图 5(a)] 中,测试

表 2 沥青铀矿 LA-ICP-MS 原位微区稀土元素分析结果  
Table 2 In-situ REE results of uraninite by LA-ICP-MS micro-area analysis

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
La	723.06	676.69	639.95	905.12	814.08	1 027.77	944.96	889.83	674.87	721.50	962.12	733.94
Ce	767.33	791.60	670.15	1 310.64	1 051.17	1 102.85	1 277.99	1 333.58	795.26	747.42	1 452.99	729.77
Pr	69.72	85.41	65.22	111.33	94.34	93.92	133.70	127.05	102.47	71.09	150.40	73.13
Nd	277.75	303.19	236.50	376.16	360.76	334.25	418.30	506.22	292.21	284.71	552.47	270.23
Sm	40.72	45.98	28.86	51.58	73.76	47.02	77.23	72.36	46.95	49.75	80.81	37.58
Eu	10.43	10.70	6.66	12.27	11.57	11.81	16.31	17.28	7.59	13.02	20.54	10.80
Gd	36.81	55.84	28.46	56.06	42.99	53.94	62.37	68.26	42.50	53.52	85.80	45.79
Tb	6.71	8.07	5.62	8.00	5.71	8.14	7.14	8.66	6.43	9.75	13.16	6.34
Dy	32.81	56.56	39.53	51.90	49.35	46.76	46.50	62.01	51.45	45.80	65.02	47.20
Ho	8.67	10.49	6.44	10.06	11.79	12.81	9.05	10.54	10.27	11.67	16.16	8.44
Er	20.16	34.05	22.78	31.67	22.04	24.34	23.45	28.02	20.72	37.94	40.03	28.65
Tm	2.52	5.04	2.67	4.73	4.10	3.08	3.35	3.18	3.44	4.10	4.42	3.55
Yb	17.60	29.92	13.71	19.90	13.91	21.94	30.42	20.70	14.96	27.55	22.72	20.70
Lu	1.72	4.15	1.71	2.58	3.08	3.23	2.14	2.72	2.21	2.37	4.38	1.87
Th	0.064 1	0.051 5	0.026 9	0.057 9	0.209 5	0.099 4	0.108 7	0.013 5	0.698 7	0.123 3	0.019 8	0.080 1
U	756 903.4	783 076.8	800 712.0	750 182.0	790 729.6	762 798.4	793 445.1	732 895.5	701 590.5	716 796.4	792 493.1	795 941.3
ΣREE/10 <sup>-6</sup>	2 016.02	2 117.68	1 768.25	2 951.99	2 558.65	2 791.84	3 052.91	3 150.42	2 071.33	2 080.18	3 471.04	2 018.00
LREE/10 <sup>-6</sup>	1 889.02	1 913.56	1 647.34	2 767.10	2 405.69	2 617.61	2 868.48	2 946.33	1 919.35	1 887.48	3 219.34	1 855.45
HREE/10 <sup>-6</sup>	127.01	204.11	120.91	184.89	152.96	174.24	184.43	204.09	151.98	192.70	251.70	162.54
LREE/HREE	14.87	9.37	13.62	14.97	15.73	15.02	15.55	14.44	12.63	9.79	12.79	11.42
(La/Yb) <sub>N</sub>	29.48	16.22	33.49	32.63	41.97	33.60	22.28	30.84	32.36	18.78	30.37	25.44
δEu	0.82	0.65	0.71	0.70	0.63	0.72	0.72	0.75	0.52	0.77	0.75	0.80
δCe	0.84	0.81	0.80	1.01	0.93	0.87	0.88	0.97	0.74	0.81	0.94	0.77
U/Th	11 806 222	15 214 560	29 789 523	12 957 295	3 773 673	7 676 092	7 296 308	54 419 473	1 004 085	5 812 123	40 018 021	9 931 991

注: δEu = (Eu)<sub>N</sub> / [(Sm)<sub>N</sub> (Gd)<sub>N</sub>]<sup>1/2</sup>; δCe = (Ce)<sub>N</sub> / [(La)<sub>N</sub> (Pr)<sub>N</sub>]<sup>1/2</sup>。

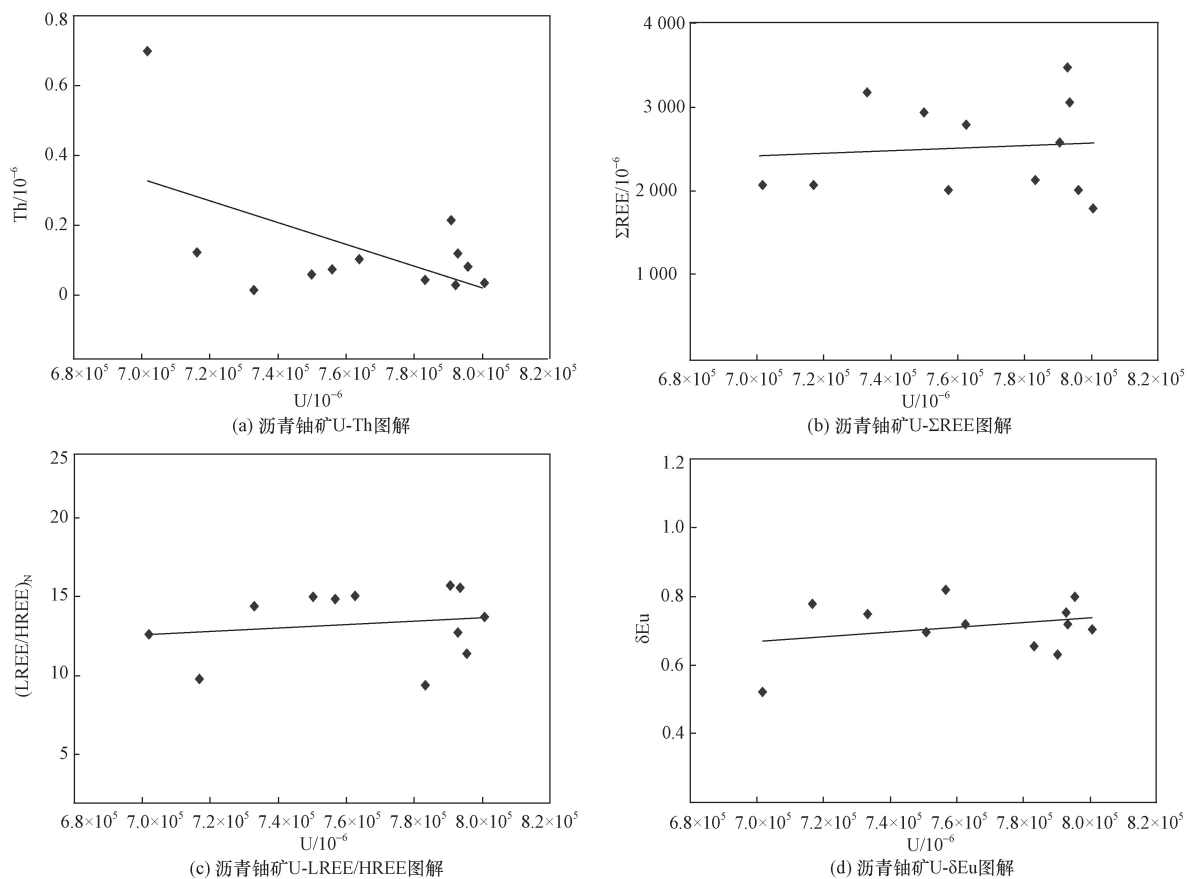


图3 沥青铀矿的U-Th、U-ΣREE、U-(LREE/HREE)<sub>N</sub>、U-δEu相关性图解

Fig. 3 Graphical representation of the correlation between U-Th, U-ΣREE, U-(LREE/HREE)<sub>N</sub>, and U-δEu in uraninite

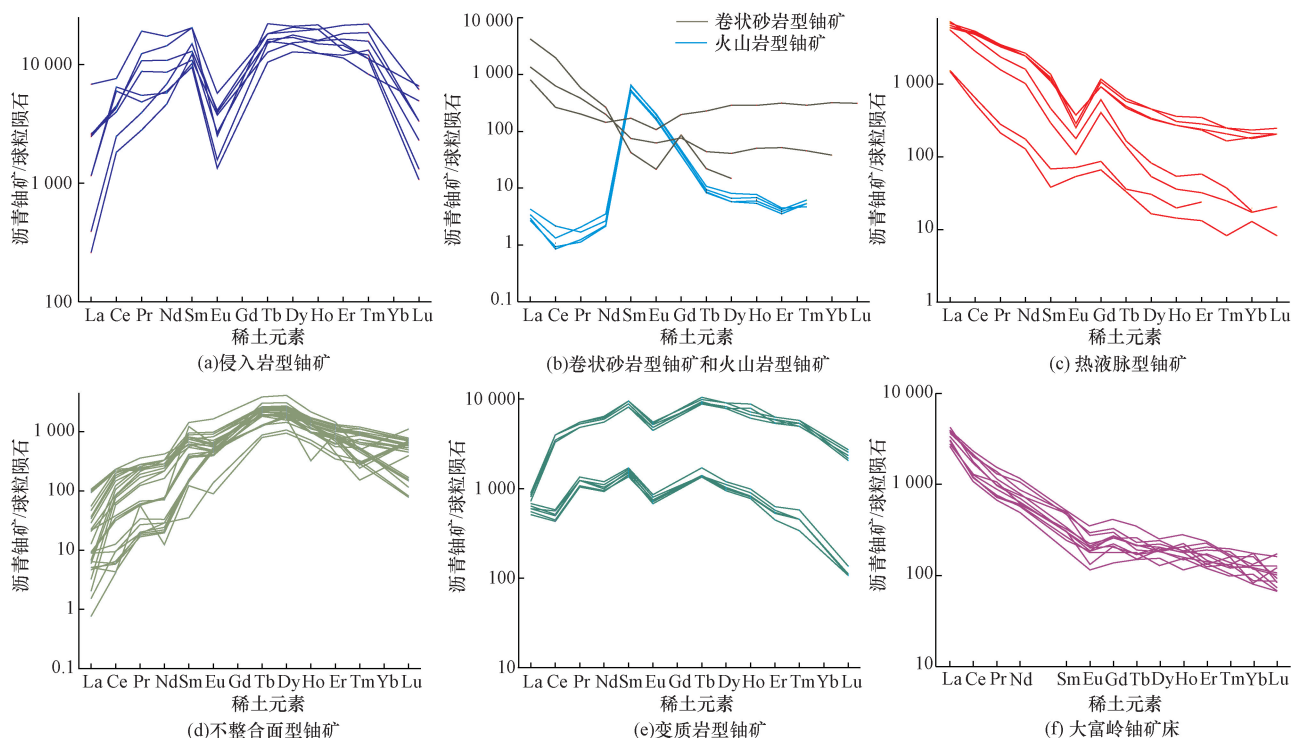


图4 大富岭矿床和全球6种类型铀矿床中沥青铀矿的球粒陨石标准化配分模式图

Fig. 4 Chondrite-normalised rare earth element patterns for uranium oxides from six different types of uranium occurrences and from Dafuling deposit

样品点均落在温度  $T < 350$  °C 低温热液成矿作用区域内,  $(LREE/HREE)_N - \Sigma REE$  图解 [图 5(b)] 中, 测试样品点均分布在低温区域内, 呈现集中分布的特征, 并处于温度低于 350 °C、高盐度和中低盐度流体区域之间, 表明大富岭矿床属于中低温热液脉型铀矿床, 其中含铀热液在成矿过程中呈现从高盐度向低盐度过渡的趋势;  $U - \Sigma REE$ 、 $U - (LREE/HREE)_N$ 、 $U - \delta Eu$  相关性图解中 [图 3(b) ~ 图 3(d)],  $U$  与  $\Sigma REE$ 、 $(LREE/HREE)_N$ 、 $\delta Eu$  无明显的相关性或相关性较弱, 表明在温度低于 350 °C 的中低温热液环境中, 稀土元素含量极低, 在沥青铀矿结晶过程中, 稀土元素与  $U$  之间的置换反应极弱。

$Ce$  和  $Eu$  在不同的氧化还原环境下表现出不同价态, 与其他稀土元素之间产生分馏, 导致元素的异常<sup>[45]</sup>,  $\delta Eu$  能反映成矿流体的氧化还原环境,  $Eu$  属于变价元素, 在成矿流体中一般呈  $Eu^{3+}$ , 还原条件下部分  $Eu^{3+}$  还原成  $Eu^{2+}$ , 导致其与其他稀土元素分离<sup>[46]</sup>。测试样品显示了明显的  $Eu$  负异常 ( $\delta Eu < 1$ ), 大富岭沥青铀矿形成于中低温热液环境, 其中  $Eu$  显示负异常, 指示热液成矿作用处于还原环

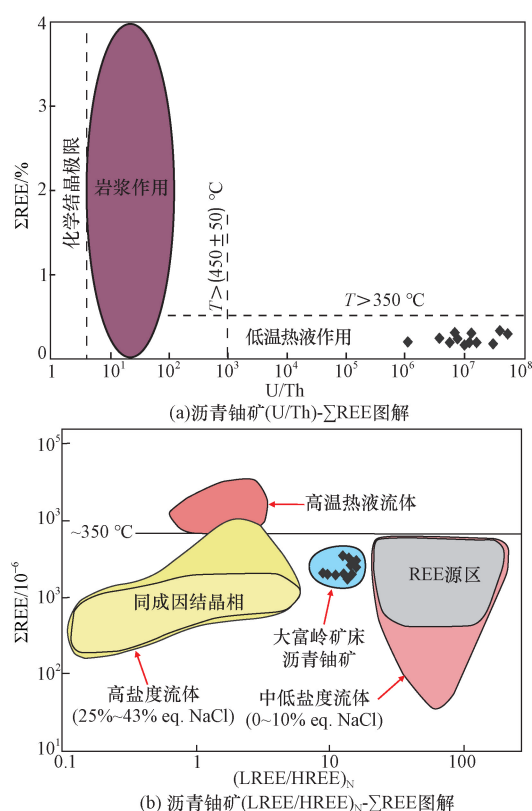
境; 在还原性成矿流体中,  $Ce$  主要呈  $Ce^{3+}$  形式与其他稀土元素同时存在, 相互之间分异不明显, 在氧化环境中  $Ce^{3+}$  被氧化成  $Ce^{4+}$ , 与其他 3 价稀土元素之间产生分异, 本次测试样品显示微弱的  $Ce$  负异常,  $\delta Ce$  略小于 1, 指示成矿作用过程中, 热液环境从还原环境向弱氧化环境过渡。

大富岭矿床沥青铀矿的稀土元素指示该矿床为典型的中低温热液脉型铀矿床, 成矿作用过程中, 成矿流体从高盐度向低盐度过渡, 在沥青铀矿结晶过程中, 成矿热液环境从还原环境向弱氧化环境过渡。由于大富岭铀矿床主要的矿体都赋存在丫江桥岩体外带的地层中, 部分观点认为需按照“碳硅泥岩”型铀矿成矿规律来指导找矿, 本次研究中沥青铀矿的主量元素和稀土元素都指示大富岭铀矿床为中低温热液脉型铀矿床, 在实际找矿过程中应主要考虑热液脉型铀成矿规律来指导找矿。

#### 4.3 稀土元素对成矿模式的启示

华南地区中生代以来发育的断陷(走滑)盆地、基性岩脉、双峰式火山岩、A 型花岗岩、高钾 I 型花岗岩等大量证据表明华南自中生代以来存在明显的岩石圈伸展减薄作用<sup>[47-48]</sup>, 明月峰地区铀成矿作用具有一致性且统一受华南陆块伸展减薄作用控制<sup>[49-51]</sup>, 岩石圈伸展作用促使大富岭矿床 NNE 向断裂(F2)从会聚走滑构造向离散走滑构造转换, 离散走滑期间断裂构造开启度在 90 ~ 100 Ma 达到最大, 明月峰地区金管冲矿床铀成矿年龄约为 93 Ma<sup>[52]</sup>, 大富岭铀成矿年龄目前虽无数据支撑, 但大富岭矿床与金管冲矿床相距不足 5 km, 且二者在赋矿层位上具有相似性, 据明月峰地区铀成矿作用具有一致性可合理推断大富岭矿床主要铀成矿作用发生于白垩世的华南陆块伸展期, 在此期间, 区域性深断裂构造(F2)使地表和深部得以良好贯通, 为大富岭地区铀成矿提供了热液迁移的构造条件。

华南热液铀矿床的矿化剂多为具有幔源特征的  $\Sigma CO_2$ , 且统一受地壳伸展作用控制<sup>[53-54]</sup>, 岩相学研究表明方解石是沥青铀矿的主要共生矿物, 证实大富岭地区成矿热液的矿化剂主要为  $\Sigma CO_2$ , 这为该地区铀成矿提供了必要的热液矿化剂条件。大富岭矿床沥青铀矿稀土元素指示, 沥青铀矿析出于中低温热液环境, 成矿热液经历了从高盐度向低盐度过渡、从还原环境向弱氧化环境过渡。可得出, 大富岭地区区域性断裂(F2)沟通岩石圈地幔, 使得地幔脱气成因的矿化剂  $\Sigma CO_2$  能够沿深断裂上升, 上升过程中含铀热液温度、压力、盐度、 $Eh$  等物理化学条件发生变化, 导致热液中的铀最终在大富岭地区 F220 和层间破碎带附近富集成矿(图 6)。

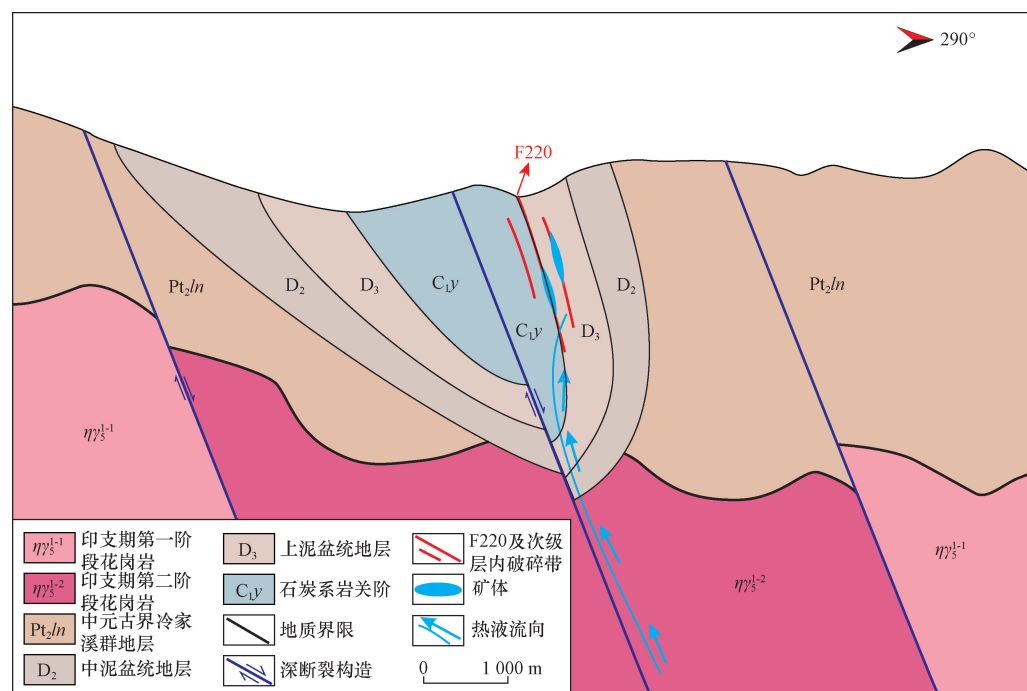


eq. NaCl 表示等摩尔浓度的氯化钠溶液; (a) 根据文献<sup>[42]</sup>修改;

(b) 根据文献<sup>[6]</sup>修改

图 5 沥青铀矿的  $(U/Th) - \Sigma REE$  和  $(LREE/HREE)_N - \Sigma REE$  图解

Fig. 5 The  $(U/Th) - \Sigma REE$  and  $(LREE/HREE)_N - \Sigma REE$  diagrams of uraninite

图6 大富岭铀矿成矿模式图<sup>[52]</sup>Fig. 6 Metallogenic model diagram of the Dafuling deposit<sup>[52]</sup>

## 5 结论

(1) 大富岭铀矿床为典型的花岗岩外带型铀矿床, 主要矿石矿物为沥青铀矿, 主要脉石矿物为方解石, 沥青铀矿的主量元素和稀土元素都指示大富岭铀矿床为中低温热液脉型铀矿床。

(2) 大富岭铀矿床沥青铀矿的稀土元素指示在成矿作用过程中, 成矿流体经历了从高盐度向低盐度的转变, 在沥青铀矿结晶过程中, 热液环境由还原环境逐渐过渡到弱氧化环境, 暗示了成矿热液起源于地壳深部或具有幔源特征; 华南陆块岩石圈伸展减薄过程中, 深部热液沿着大富岭地区区域性深断裂上升, 在经历一系列物理化学条件变化后, 最终在大富岭矿床适宜位置富集成矿。

### 参 考 文 献

- [1] Eglinger A, André-mayer A, Vanderhaeghe O, et al. Geochemical signatures of uranium oxides in the Lufilian belt: from unconformity-related to synmetamorphic uranium deposits during the Pan-African orogenic cycle[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 54: 197-213.
- [2] Fan H, Hu F, Yang K, et al. Fluid unmixing/immiscibility as an ore-forming process in the giant REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolian, China: evidence from fluid inclusions[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 89(1): 104-107.
- [3] Finch R, Murakami T. Systematics and paragenesis of uranium minerals[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1999, 38(1): 91-179.
- [4] Alexandre P, Kyser K, Layton-matthews D, et al. Chemical compositions of natural uraninite [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2016, 53(4): 595-622.
- [5] Fryer B J, Taylor R P. Rare-earth element distributions in uraninites: implications for ore genesis[J]. *Chemical Geology*, 1987, 63(1): 101-108.
- [6] Mercadier J, Cuney M, Lach P, et al. Origin of uranium deposits revealed by their rare earth element signature[J]. *Terra Nova*, 2011, 23(4): 264-269.
- [7] Rosa D S, Sarkis J E S. Rare earths in uranium compounds and important evidences for nuclear forensic purposes[J]. *Physics, Chemistry*, 2014, 10: 55415555.
- [8] Madzunya D, Uushona V, Mathuthu M, et al. Rare earth elements in uranium ore deposits from Namibia: a nuclear forensics tool[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, 237: 106668.
- [9] 张涛, 黄宏业, 李杰, 等. 桂北向阳坪铀矿床矿石矿物 LA-ICP-MS 原位稀土元素地球化学特征及其对成矿流体的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 2020, 39(4): 423-440.  
Zhang Tao, Huang Hongye, Li Jie, et al. Geochemical characteristics of rare-earth elements *in situ* of LA-ICP-MS ore from Yangping Uranium Deposit in North Guangxi Province and its constraints on ore-forming fluids [J]. *Journal of Petrology and Mineralogy*, 2020, 39(4): 423-440.
- [10] 郑国栋, 罗强, 刘文泉, 等. 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[J]. *地球科学*, 2021, 46(6): 2172-2187.  
Zheng Guodong, Luo Qiang, Liu Wenquan, et al. *In-situ* U-Pb age and elemental characteristics of pitchblende in the Shulouqiu uranium deposit in northern Guangdong Province and its geological significance [J]. *Journal of Earth Sciences*, 2018, 46(6): 2172-2187.
- [11] 黄广文, 潘春蓉, 潘家永, 等. 东秦岭大石沟钼矿床中晶质铀矿年代学研究及其地质意义[J]. *地质学报*, 2023, 97(6):

- 1917-1937.  
Huang Guangwen, Pan Chunrong, Pan Jiayong, et al. The geochronology research on uraninite in the Dashigou carbonate-type molybdenum deposit of east Qinling area and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 96(6): 1917-1937.
- [12] 李海东, 刘斌, 田世洪, 等. 粤北地区琶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[J]. *地学前缘*, 2024, 31(2): 270-283.  
Li Haidong, Liu Bin, Tian Shihong, et al. Microchronology and elemental analysis of pitchblende *in situ* in Pajiang uranium deposit, Northern Guangdong: implications for uranium mineralization [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(2): 270-283.
- [13] Bolonin A V, Gradovsky I F. Supergene processes and uranium ore formation in the Ronneburg ore field, Germany[J]. *Geology of Ore Deposits*, 2012, 54(2): 122-131.
- [14] Škúča P, Sejkora J, Plášil J. Selenide Mineralization in the Příbram uranium and base-metal district (Czech Republic) [J]. *Minerals (Basel)*, 2017, 7(6): 91.
- [15] René M, Dolníček Z, Sejkora J, et al. Uraninite, coffinite and ningyoite from vein-type uranium deposits of the Bohemian Massif (Central European Variscan Belt) [J]. *Minerals*, 2019, 9(2): 123.
- [16] Kribek B, Zak K, Spangenberg J E, et al. Bitumens in the Late Variscan hydrothermal vein-type uranium deposit of Příbram, Czech Republic: sources, radiation-induced alteration, and relation to mineralization [J]. *Economic Geology*, 1999, 94(7): 1093-1114.
- [17] IAEA. Geological classification of uranium deposits and description of selected examples[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2018.
- [18] 李振球. 720 富铀矿床热液蚀变及地球化学特征[J]. *铀矿地质*, 1995(2): 88.  
Li Zhenqiu. Hydrothermal alteration and geochemical characteristics of 720 uranium rich deposit [J]. *Uranium Geology*, 1995(2): 88.
- [19] 林锦荣, 蔡根庆, 刘建桥. 明月峰地区碎裂蚀变花岗岩型铀矿研究[J]. *铀矿地质*, 1998(5): 265-273.  
Lin Jinrong, Cai Genqing, Liu Jianqiao. Study on cataclastic altered granite-type uranium deposits in Mingmingfeng area [J]. *Uranium Geology*, 1998(5): 265-273.
- [20] Wu Y, Qin M K, Guo D, et al. The latest *in-situ* uraninite U-Pb age of the Guangshigou uranium deposit, northern Qinling Orogen, China: constraint on the metallogenic mechanism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(6): 2445-2447.
- [21] Romer R L, Cuney M. Phanerozoic uranium mineralization in Variscan Europe: more than 400 Ma of tectonic, supergene, and climate-controlled uranium redistribution [J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 102: 474-504.
- [22] 胡鹏飞, 蔡明海, 何光武, 等. 广西大厂铜坑矿床中闪锌矿微量、稀土元素及氢氧同位素特征[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(25): 10857-10866.  
Hu Pengfei, Cai Minghai, He Guangwu, et al. Characteristics of trace, rare earth elements and hydrogen and oxygen isotopes of Sphalerite in Dachang Tongkeng deposit, Guangxi [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(25): 10857-10866.
- [23] Xia Y, Mou C, Wu H. Uranium occurrence state and its implication for sandstone-type uranium mineralization within the Hanbazi area of the Longchuanjiang Basin, China [J]. *Minerals*, 2023, 13(8): 1037.
- [24] 张鑫, 周云云, 孟繁敏. 辽西万家沟地区钾长花岗岩年代学、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(12): 4965-4972.  
Zhang Xin, Zhou Yunyun, Meng Fanmin. The chronology, petrogeochemical characteristics and geological significance of kalistite in Wanjiagou Area, western Liaoning [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(12): 4965-4972.
- [25] Li W, Li X, Li Z, et al. Obduction-type granites within the NE Jiangxi Ophiolite: implications for the final amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks [J]. *Gondwana Research*, 2008, 13(3): 288-301.
- [26] Zhang C, Li H, Santosh M. Revisiting the tectonic evolution of South China: interaction between the Rodinia superplume and plate subduction? [J]. *Terra Nova*, 2013, 25(3): 212-220.
- [27] He C, Dong S, Santosh M, et al. Seismic evidence for a geosuture between the Yangtze and Cathaysia Blocks, South China [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 2200.
- [28] Zhang L. Lower devonian tempestites in western Yangtze, South China: insight from Zoophycos ichnofabrics [J]. *Geological Journal*, 2014, 49(2): 177-187.
- [29] 李彬, 邓新, 李银敏, 等. 湘东丫江桥体同位素年代学、地球化学及其构造意义[J]. *华南地质与矿产*, 2019, 35(4): 410-422.  
Li Bin, Deng Xin, Li Yinmin, et al. Isotopic chronology, geochemistry and tectonic significance of the Ya Jiangqiao pluton in Dongdong, Hunan [J]. *South China Geology and Mineral Resources*, 2019, 35(4): 410-422.
- [30] 傅昭仁, 李紫金, 郑大瑜. 湘赣边区 NNE 向走滑造山带构造发展样式[J]. *地学前缘*, 1999, 6(4): 263-272.  
Fu Zhaoren, Li Zijin, Zheng Dayu. Tectonic development pattern of the NNE strike-slip orogenic belt in the Hunan-Jiangxi border area [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(4): 263-272.
- [31] 柏道远, 邹宾微, 赵龙辉, 等. 湘东太湖逆冲推覆构造基本特征研究[J]. *中国地质*, 2009, 36(1): 53-64.  
Bai Daoyuan, Zou Binwei, Zhao Longhui, et al. Study on basic characteristics of thrust nappe structure in Taihu Lake, eastern Hunan [J]. *Geology in China*, 2009, 36(1): 53-64.
- [32] 贾宝华, 黄建中, 刘耀荣, 等. 中华人民共和国湖南省区域地质志[M]. 北京: 全国地质资料馆, 2011.  
Jia Baohua, Huang Jianzhong, Liu Yaorong, et al. Regional geology of Hunan Province, People's Republic of China [M]. Beijing: National Geological Archive, 2011.
- [33] 谢永坚. 金管冲铀矿床综合找矿方法模式[J]. *世界核地质科学*, 2006, 23(1): 38-43.  
Xie Yongjian. Comprehensive prospecting method model of Jinguanchong uranium deposit [J]. *World Nuclear Geology*, 2006, 23(1): 38-43.
- [34] Yu Y, Dai P, Zhou Y, et al. Petrogenesis and geodynamic implications of the Late Triassic bojites in Yajiangqiao area, Hunan Province, South China [J]. *Island Arc*, 2020, 29(1): 1-22.
- [35] Zong K, Klemd R, Yuan Y, et al. The assembly of Rodinia: the correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. *Pre-*

- cambrian Research, 2017, 290: 32-48.
- [36] Hu Z, Zhang W, Liu Y, et al. "Wave" signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis; application to lead isotope analysis[J]. Analytical Chemistry, 2015, 87(2): 1152-1157.
- [37] Liu Y, Hu Z, Gao S, et al. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1): 34-43.
- [38] Kotzer T G, Kyser T K. Petrogenesis of the Proterozoic Athabasca Basin, northern Saskatchewan, Canada, and its relation to diagenesis, hydrothermal uranium mineralization and paleohydrogeology [J]. Chemical Geology, 1995, 120(1): 45-89.
- [39] Alexandre P, Kyser T K. Effects of cationic substitutions and alteration in uraninite, and implications for the dating of uranium deposits [J]. The Canadian Mineralogist, 2005, 43(3): 1005-1017.
- [40] Luo J, Hu R, 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.
- [41] Grandstaff D E. A kinetic study of the dissolution of uraninite[J]. Economic Geology, 1976, 71(8): 1493-1506.
- [42] Frimmel H, Schedel S, Brätz H. Uraninite chemistry as forensic tool for provenance analysis[J]. Applied Geochemistry, 2014, 48: 104-121.
- [43] Mukhopadhyay J, Mishra B, Chakrabarti K, et al. Uraniferous paleoplacers of the Mesoproterozoic Mahagiri quartzite, Singhbhum craton, India; depositional controls, nature and source of >3.0 Ga detrital uraninites[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 1290-1306.
- [44] 黄卉, 潘家永, 钟福军, 等. 陕西华阳川铀-多金属矿床早白垩世晶质铀矿 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 年龄与成因[J]. 矿物学报, 2020, 40(5): 569-583.  
Huang Hui, Pan Jiayong, Zhong Fujun, et al. *In situ* U-Pb age and genesis of LA-ICP-MS in Early Cretaceous crystalline uranium deposit, Huayangchuan uranium-polymetallic Deposit, Shaanxi Province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2019, 40(5): 569-583.
- [45] 黄广文, 潘春蓉, 潘家永, 等. 东秦岭大石沟钨矿床中晶质铀矿年代学研究及其地质意义[J]. 地质学报, 2023, 97(6): 1917-1937.  
Huang Guangwen, Pan Chunrong, Pan Jiayong, et al. Study on the chronology of crystalline uranium deposits in Dashigou molybdenum deposit, East Qinling and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(6): 1917-1937.
- [46] Brugger J, Etschmann B, Chu Y S, et al. The oxidation state of europium in hydrothermal scheelite: *in situ* measurement by XANES spectroscopy[J]. The Canadian Mineralogist, 2006, 44(5): 1079-1087.
- [47] Mao J, Pirajno F, Cook N. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings: an introduction to the special issue[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 1-7.
- [48] Wu L, Mei L, Paton D A, et al. Late Cretaceous-Cenozoic intraplate extension and tectonic transitions in eastern China: implications for intraplate geodynamic origin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 117: 104379.
- [49] 陈跃辉, 陈肇博, 陈祖伊, 等. 华东南热液铀矿化的区域伸展构造控矿作用[C]//“九五”全国地质科技重要成果学术交流会论文集. 北京: 中国地质学会, 2000: 450-454.  
Chen Yuehui, Chen Zhaobo, Chen Zuyi, et al. Regional extensional tectonic mineralization of hydrothermal uranium mineralization in southern East China [C]//“Ninth Five-Year Plan” National Geological Science and Technology Important Achievements Academic Exchange Conference. Beijing: Geological Society of China, 2000: 450-454.
- [50] 胡瑞忠, 骆金诚, 陈佑纬, 等. 华南铀矿床研究若干进展[J]. 岩石学报, 2019, 35(9): 2625-2636.  
Hu Ruizhong, Luo Jincheng, Chen Youwei, et al. Advances in studies on uranium deposits in South China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(9): 2625-2636.
- [51] 胡瑞忠. 华南大规模低温成矿作用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
Hu Ruizhong. Large-scale low temperature mineralization in South China [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [52] Fan P, Li M, Huang H, et al. Mineral chemistry and chronology investigation of uraninite in the jinguanhong uranium deposit in eastern Hunan Province and the implications for geological significance[J]. ACS Omega, 2024, 9(9): 10782-10792.
- [53] Hu R Z, Bi X W, Zhou M, 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.
- [54] Hu R, Burnard P G, Bi X, et al. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: evidence from He, Ar and C isotopes [J]. Chemical Geology, 2009, 266(1): 86-95.