

陈秀旺,彭松,范云飞,等.黔西南雄武地区大梨树铀矿地质地球化学特征及其意义[J].世界核地质科学,2025,42(3):527-540. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.03.005

CHEN Xiuwang, PENG Song, FAN Yunfei, et al. The geological and geochemical characteristics of Dalishu uranium deposit and its significance in Xiongwu area, southwest Guizhou province[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(3): 527-540(in Chinese).

黔西南雄武地区大梨树铀矿地质地球化学特征及其意义

陈秀旺,彭松,范云飞,王琼,程俊义,卢平

贵州省有色金属和核工业地质勘查局核资源地质调查院, 贵州 贵阳 550005

摘要 大梨树铀矿位于雄武背斜南东翼鲁坎断层之上的碳酸盐岩型铀矿, 以往研究程度较低。在野外地质调查基础上采集槽探、钻孔中的样品, 开展矿物学、元素地球化学和矿床成因等方面研究。研究表明: 矿体受NE向断层及其旁侧的Si-Ca结构面控制, 与有机质关系密切; 铀矿石中的铀矿物主要有沥青铀矿、铀石, 铀矿物与黄铁矿及“黑色”的有机质紧密共生; 矿石及近矿围岩中微量元素V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn和Mo等元素富集, 稀土配分曲线呈“右倾型”, 具有富LREE、 δEu 负异常特征, 与寒武系黑色岩系地层具有一定亲缘性。认为区内成矿物质可能来源于寒武系牛蹄塘、老堡组, 同时围岩可能提供部分成矿物质。矿床是在喜山期造山背景下, 深部流体萃取寒武系基底成矿物质携带至成矿有利地段形成的热液型矿床。

关键词 碳酸盐岩型铀矿; 地球化学; 黑色岩系; 大梨树铀矿; 雄武; 黔西南

中图分类号 P619.14 文献标志码 A 文章编号 1672-0636 (2025) 03-0527-14

The geological and geochemical characteristics of Dalishu uranium deposit and its significance in Xiongwu area, southwest Guizhou province

CHEN Xiuwang, PENG Song, FAN Yunfei, WANG Qiong, CHENG Junyi, LU Ping

Geological Survey Institute for Nuclear Resources, Non-ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China

Abstract: Dalishu uranium deposit is a carbonate rock type uranium deposit located at the Lukan fault hanging wall in the southeast limb of Xiongwu anticline. Researches on this uranium deposits are still seldom reported. Based on the field geological survey and collection of uranium ore samples in trenches and boreholes, this paper conducted a study on mineralogy, geochemistry, and genesis of the deposit. The study show that the ore body is controlled by the northeast-trending faults and the secondary Si-Ca structural planes and closely related to organic matters. The main uranium minerals in the ore are pitchblende and uraninite, and

基金项目: 贵州省地质勘查专项基金(编号: 黔自然资函[2023]119号-26)

收稿日期: 2025-04-15 改回日期: 2025-05-27

第一作者: 陈秀旺, 男, 1996年生, 助理工程师, 从事地质矿产勘查工作。E-mail: 1143181502@qq.com

通信作者: 彭松, 男, 1990年生, 高级工程师, 从事地质矿产勘查工作。E-mail: gzyshdypsec@163.com

Supported by Guizhou Provincial Geological Exploration Special Fund (No. 黔自然资函[2023] No. 119-26)

Received date: 2025-04-15 revised date: 2025-05-27

First author: CHEN Xiuwang, male, born in 1996, assistant engineer, focusing on geological and mineral exploration work. E-mail: 1143181502@qq.com

Corresponding author: PENG Song, male, born in 1990, senior engineer, focusing on geological and mineral exploration work. E-mail: gzyshdypsec@163.com

the uraninite minerals, which are closely associated with pyrite and “black” organic matters. The trace elements such as V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, and Mo are enriched in the ore and the wall rocks. The rare earth element distribution pattern is “right-inclined” with the enrichment of LREE and negative δEu anomaly, indicating a certain genetic relationship with the Cambrian black rock series. It believed that the ore-forming materials maybe come from the Cambrian Niutitang and Laoba formation, the deposit was formed by deep hydrothermal action which extracted the uranium from the Cambrian basement ore-forming materials and carried to favorable areas under the orogenic background of Himalayan period.

Keywords: carbonate-type uranium deposit; geochemistry; black rock series; Dalishu uranium deposit; Xiongwu; southwest Guizhou

黔西南地区位于全球著名的特提斯成矿域与环太平洋构造域的结合部位,特殊的构造背景造就了区内金、锑、萤石和铀等矿产集中产出,是我国华南大面积低温成矿域的重要组成部分^[1],成为贵州省内重要的低温热液型矿床勘查区。雄武背斜位于右江盆地内,区内已发现张家湾、大际山、大梨树和下偏坡等众多铀矿(化)点,沿 NE 向断层呈带状分布。区内铀矿无论是找矿勘查还是研究程度整体较低,以往勘查、研究工作聚焦于大际山铀多金属矿床。早期学者认为大际山矿床为沉积-改造成因^[2];潘澄雨等对大际山矿物学研究,揭示了区内铀矿石普遍具有角砾状、浸染状和细脉状构造,并伴随有硫化物化、有机碳化、硅化和黏土化等,认为其为低温热液成因^[3];徐伟等通过大比例尺土壤地球化学测量发现区内铀矿化均沿构造带集中展布^[4],暗示其与构造相关;吴玉等对该矿床开展了详细的构造解析,认为其受多期次构造控制^[5];Qiu、邱林飞等的研究发现区内铀矿的富集受有机质制约,认为大际山铀-钼多金属矿床是在构造作用下,深部渗出含铀富有机质成矿流体形成的碳酸盐岩型铀矿床^[6-7]。

大梨树铀矿床是右江盆地雄武背斜中近年发现的一个小型铀矿床,距离大际山铀-钼多金属矿床约 10 km,近年来,贵州省有色金属和核工业地质勘查局核资源地质调查院和核工业二八〇研究所等单位对该地区进行了调查评价,经钻孔揭露在深度大于 200 m 处发现了较好的工业铀矿化,显示较好的找矿前景。该矿床铀矿体表现出构造控矿特征,前人还未有专门对该铀矿床的报道。本文以大梨树铀矿床为研究对象,在野外地质调查的基础上,系统总结铀成矿地质宏观特

征,针对典型样品开展岩相学与元素地球化学等方面的研究,探讨了成矿物质来源及主要控矿因素,总结了矿床成因类型,为区域成矿预测和找矿勘查工作提供一定参考。

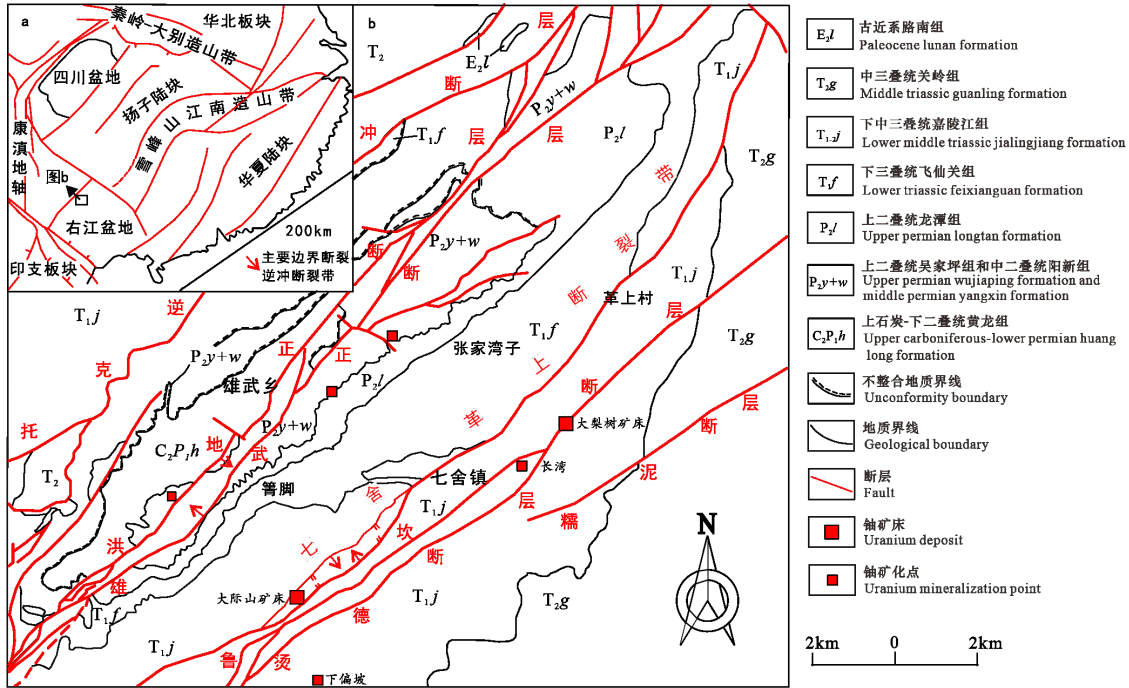
1 区域地质背景

研究区大地构造位置处于扬子板块与华南板块结合部,江南复合造山带西南缘南盘江—右江盆地北西侧(图 1a)。雄武背斜是区内主体构造,背斜轴呈 NE 向 $40^\circ \sim 50^\circ$ 展布,长约 15 km,宽介于 1~3 km 之间^[2]。背斜核部主要出露上石炭统一二叠统黄龙组($C_2 \sim P_1h$)中厚层块状生物碎屑灰岩;两翼从老到新依次为二叠系阳新统阳新组(P_2y)亮晶灰岩、生物碎屑灰岩夹少量海绵礁灰岩;上二叠统吴家坪组(P_3w)含燧石结核泥晶灰岩和生物碎屑灰岩;龙潭组(P_3l)薄-中厚层状细砂岩、粉砂岩和黏土岩夹少量生物碎屑灰岩和煤层的岩性组合,龙潭组与吴家坪组之间形成区域不整合面^[8-9],是黔西南地区最为重要的金矿产出部位^[10-11];下三叠统飞仙关组(T_1f)泥岩、粉砂岩和细砂岩夹少量鲕粒灰岩;下中三叠统嘉陵江组($T_{1-2}j$)中厚层灰岩、块状白云岩、白云质灰岩;中三叠统关岭组(T_2gl)厚层状白云岩与砂屑灰岩互层;局部地段上部有少量古近系路南组(E_2l)碎屑岩呈不整合覆盖,未见岩浆岩出露(图 1b)。其中龙潭组(P_3l)、嘉陵江组($T_{1-2}j$)是区内主要铀矿赋矿层位。

区域主要发育与雄武背斜轴近乎平行的 NE 向断裂构造,背斜西北翼的托克逆冲断层为一条区域性断裂,断裂倾向 SE;背斜核部还发育一系列 NE 向高角度正断层,如洪地正断层、雄武正断层等,倾角较陡或近直立;背斜东南翼分别为七

舍一革上断裂、鲁坎断裂和烫德断裂等, 构成NE向铁厂断裂带。区内铀矿化(点)主要沿背斜

核部的雄武断裂和南东翼铁厂断裂带分布, 其中大梨树铀矿位于鲁坎断裂北东端。



a—大地构造位置图; b—区域地质简图。

a—Geotectonic location; b—Geological sketch map.

图1 雄武地区大地构造位置图和区域地质简图(据参考文献[3]修改)

Fig. 1 Geotectonic location and geological sketch map of the Xiongwu area(modified after reference[3])

2 矿床地质特征

矿区位于鲁坎断层北东端, 夹持于七舍革上断裂与糯泥断裂之间(图2), 矿区内主要出露下三叠统飞仙关组1段(T_{1f}^1)粉砂岩、细砂岩夹少量鲕粒灰岩; 下中三叠统嘉陵江组1段(T_{1-2j}^1)下部为薄至中厚层灰岩, 顶部为厚层-块状白云岩; 嘉陵江组2段(T_{1-2j}^2)为中厚层白云岩与粉砂岩互层、细砂岩、薄层灰岩与粉砂岩互层; 嘉陵江组3段(T_{1-2j}^3)为薄-中厚层灰岩。

区内发育NE向和NW向断层, NE向断层发育有 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_5 和 F_6 等多条断层。断层 F_1 是区内主要控矿、容矿断层, 断层呈NE向 $40^\circ \sim 50^\circ$ 延伸, 倾向SE, 倾角介于 $68^\circ \sim 75^\circ$ 之间, 为鲁坎断层大石堡段, 断层破碎带宽度介于 $4 \sim 40$ m之间, 该断层具多期活动现象, 表现为早期高角度逆冲、晚期为张性兼走滑性质的正断层。断层 F_2 、 F_5 和 F_6 均呈北东走向, 倾向SE, 倾角介于 $65^\circ \sim 83^\circ$ 之间, 亦表现出多期活动特征, 局部地段见矿化现象; 此外在断层

F_5 旁侧发现铀矿化产于嘉陵江组2段底部的泥质粉砂岩中。断层 F_3 为 F_1 派生的次级断层, 走向NE, 倾向NW, 未见明显矿化迹象。此外区内发育有NW向断层 F_4 , 切穿断层 F_5 、 F_6 , 为一条右行走滑断层。

区内铀矿体主要产于断层 F_1 破碎带内, 容矿岩系为断层角砾岩, 角砾成分主要为灰岩、白云岩和砂岩。矿体呈透镜状产出, 具有“分支复合、歼灭再现”等特点, 整体表现出品位高、矿体规模小和变化大等特点。矿石构造表现为块状构造、角砾状构造, 局部见细脉状、网脉状构造, 结构主要为碎裂结构、破碎角砾结构。矿化蚀变主要为方解石化、黄铁矿化和有机质等蚀变。方解石多呈脉状、团块状, 充填于灰岩角砾之间, 或呈细脉状穿插于灰岩角砾中; 黄铁矿化蚀变较为发育, 多为团块状、浸染状与铀矿物共生于灰岩角砾微裂隙中或溶蚀孔中; 有机质呈细脉状与铀矿物共生, 呈脉状、团块状充填于灰岩角砾溶蚀孔洞或裂隙中, 与铀成矿关系最为密切。

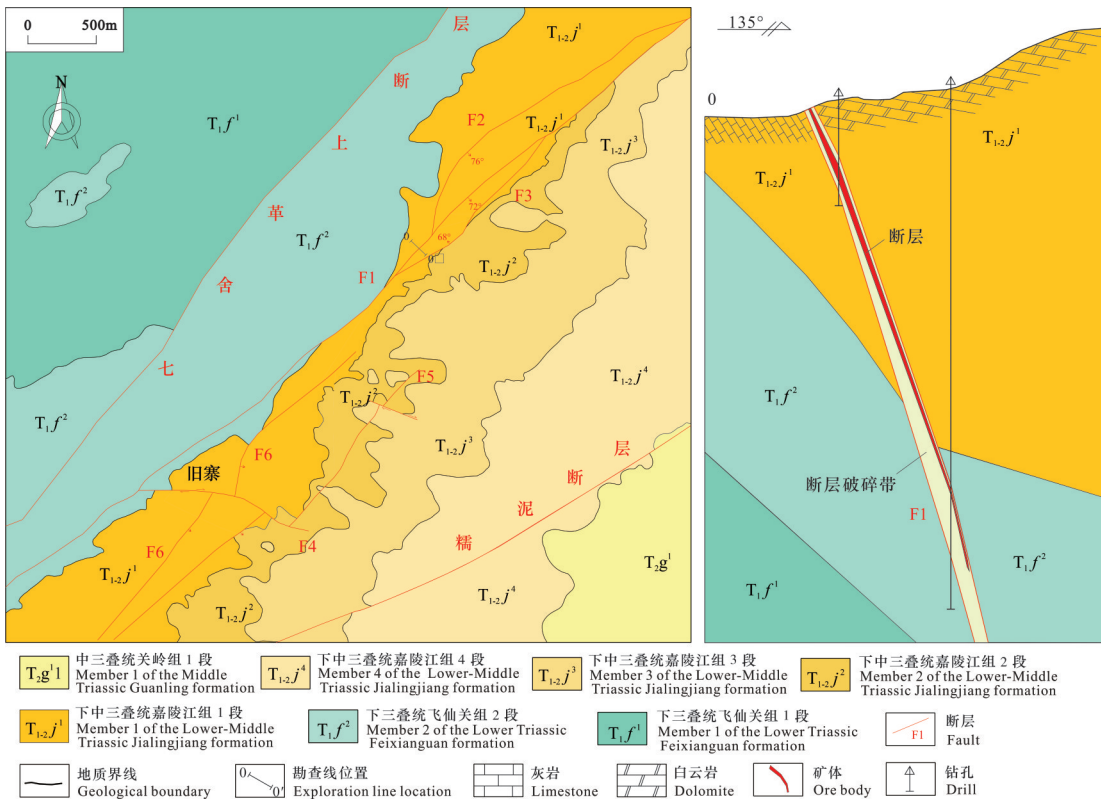


图 2 大梨树矿区地质简图及剖面简图

Fig. 2 Geological sketch and longitudinal section of the Dalishu uranium deposit

3 样品采集与分析方法

本次研究镜下鉴定样品采自地表探槽 TC01, 主量、微量元素和稀土元素分析实验样品采自大梨树矿区钻孔 ZK2401。ZK2401 揭穿区内主要含矿断层 F₁ 及主矿体, 断层破碎带宽约 10 m, 对矿石、近矿围岩和围岩进行系统采样, 其中 ZK2401-5~ZK2401-7 角砾成分主要为灰岩 (图 3a~b), ZK2401-8~ZK2401-17 角砾成分为灰岩、砂岩 (图 3b~c)。本次分析测试在核工业北京地质研究院完成, 岩相学观察在 Zeiss 荧光-透射研究级显微镜及 Leica 透反射研究级偏光显微镜上完成; 扫描电镜使用 TESCAN VEGA3 型进行分析, 分析条件为加速

电压 20 kV, 工作距离为 12 mm, 采用 EDAX 能谱仪进行能谱分析。主量元素分析使用 Axios-mAX 波长色散 X 射线荧光光谱仪, 将样品粉碎至 0.074 mm 以下, 采用熔片法制样进行测试, 测试过程执行标准: GB/T 3286.8—2014^[12] 石灰石及白云石化学分析方法: 第 8 部分 (灼烧减量的测定-重量法, YS/T 703—2014 石灰石化学分析方法元素含量的测定 (X 射线荧光光谱法), 仪器精度优于 0.1%; 微量和稀土元素测定使用 NexION300D 等离子体质谱仪, 将样品粉碎至 0.074 mm 以下, 称取 0.05 g 样品, 使用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸等混酸溶解样品后测定微量-稀土元素, 参照国标 GB/T 14506.30—2010^[13] 执行, 测试精度优于 1%。

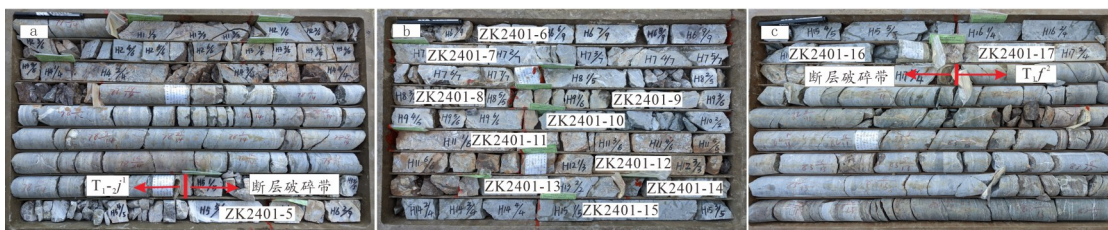


图 3 钻孔岩心及取样位置图 (a~c)

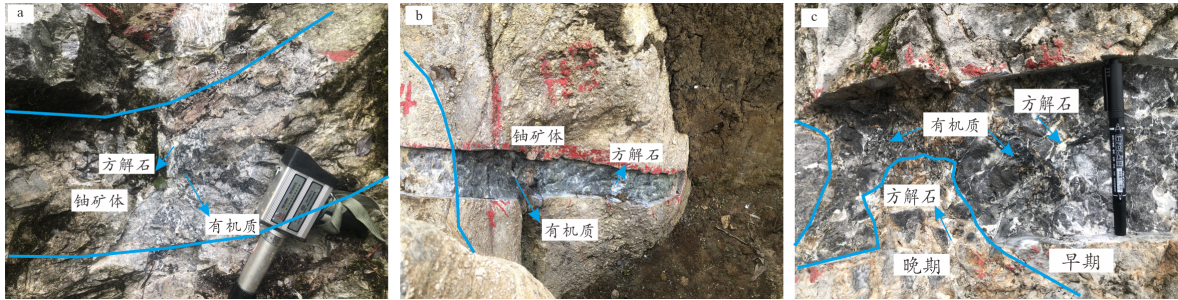
Fig. 3 Drilling core and sampling location (a~c)

4 地球化学特征

4.1 矿石矿物组成

宏观上, 矿体产于断层破碎带中, 铀矿体的中心部位因富含有机质而呈黑色, 方解石和

有机质分布于其中(图4a~b), 有机质呈细脉状、团块状和浸染状分布于断层破碎带内; 方解石呈网脉状和细脉状分布。晚期形成的方解石穿插到早期形成的铀矿体中, 晚期方解石呈镶嵌式分布, 边缘见铁质浸染(图4c)。



a~b—断层破碎带中的铀矿体、方解石、有机质分布其中; c—晚期方解石穿插到早期形成的铀矿体中。

a~b—Uranium ore bodies, calcite and organic matter are distributed in the fault fracture zone; c—Late calcite interspersed into early formed uranium ore bodies.

图4 大梨树铀矿床铀矿体(石)野外宏观特征

Fig. 4 Photo of rock outcrops and uranium ore in Dalishu uranium deposit

经镜下鉴定, 铀矿石中的金属矿物主要有沥青铀矿、铀石和次生铀矿物(如硅钙铀矿)、黄铁矿、闪锌矿等, 非金属矿物主要有方解石、有机质等。透射光下可见有机质、方解石及铀矿物充填于灰岩角砾之间、灰岩角砾的裂隙中(图5a~c)。

方解石颗粒较为细小, 呈粒状、细粒结构, 与黄铁矿、沥青铀矿和有机质等共生(图5a~c), 为成矿期碳酸盐矿物; 黄铁矿颗粒较为粗大, 晶型较为完整, 与方解石、沥青铀矿和有机质共生, 在反射光下成亮色。黄铁矿分布于灰岩角砾构造裂隙中或充填晶间微缝隙、溶蚀孔中, 为成矿期矿物(图5d~e)。

有机质在区内较为发育, 透射单偏光下, 有机质呈黑色, 方解石呈亮白色(图5a~c); 反射光下, 有机质呈黑色, 黄铁矿呈亮色, 铀矿物及钼矿物呈灰色。有机质通常与铀矿物、钼钙矿和黄铁矿等矿物充填在裂隙内或灰岩角砾溶蚀孔洞中(图5d~f)。

铀矿物主要有沥青铀矿、铀石和次生铀矿物。铀矿物主要有2种赋存形式, 一种呈细脉状、网脉状充填于岩石构造微裂隙中, 铀矿物主要为沥青铀矿(图5g); 另一种团块状充填于岩石的晶间微缝隙、溶蚀孔中, 铀矿物主要为铀石。常与黄铁矿、方解石、闪锌矿和有机质

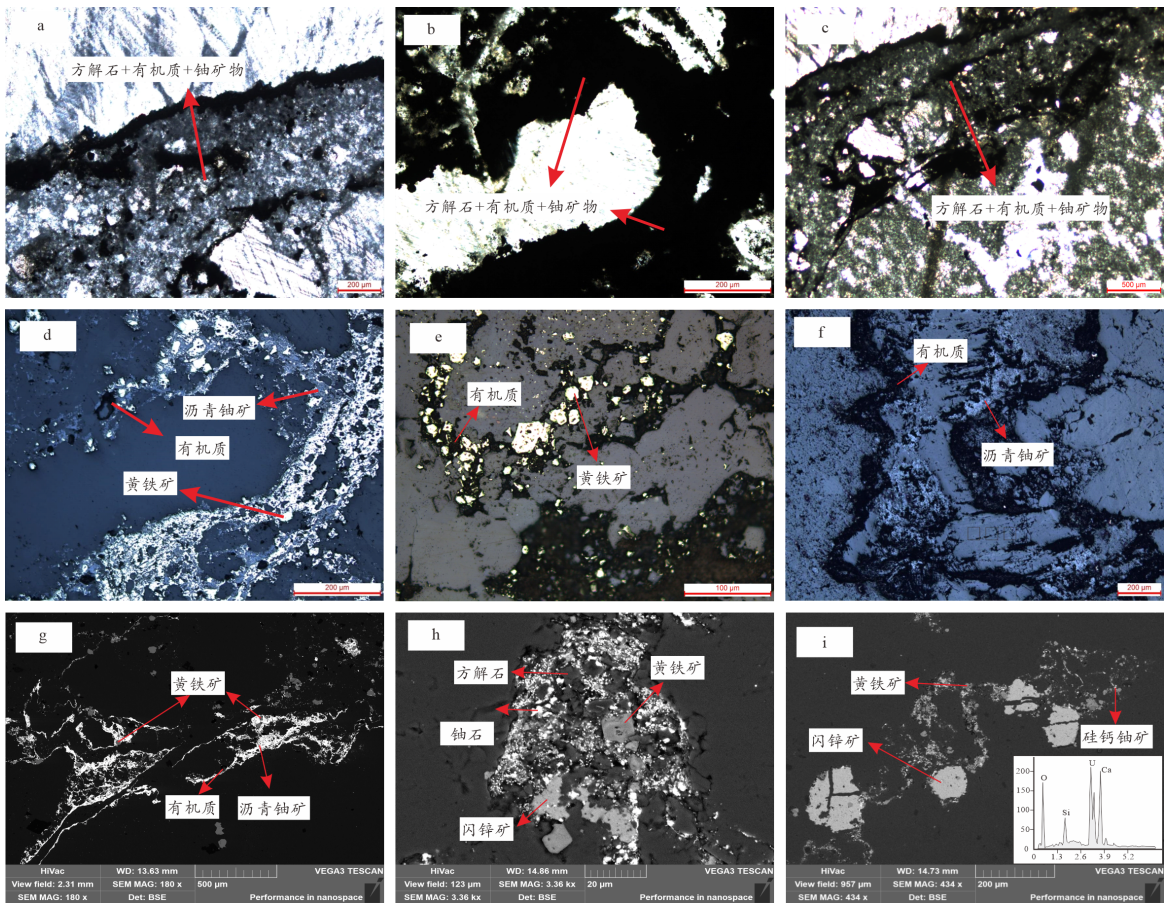
共生(图5h)。部分视域内见次生铀矿物, 主要为硅钙铀矿(图5i)。

闪锌矿在区内较为少见, 较自形, 部分他形, 粒径较大, 沿岩石微裂隙分布。闪锌矿与黄铁矿、硅钙铀矿等共生于裂隙中, 黄铁矿、铀矿物分布于闪锌矿边缘, 个别位置见黄铁矿分布于闪锌矿内部, 能谱显示闪锌矿较为纯净, 其粒径通常大于黄铁矿(图5h~i)。

4.2 主量元素特征

分析结果显示(表1): 矿石中主量元素组成以CaO、LOI(烧失量)、SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃为主, 五者之和介于92.74%~98.65%之间, 此外见少量TiO₂, 平均值为1.24%。围岩中主量元素组成主要为CaO、LOI(烧失量), 二者之和介于95.75%~96.63%之间; 顶板近矿围岩中主量元素组成主要为CaO、LOI(烧失量)和SiO₂, 三者之和与矿石基本一致, 底板近矿围岩以SiO₂、LOI(烧失量)、CaO、Al₂O₃和Fe₂O₃为主, 五者之和介于94.75%~98.03%之间。

整体而言, 随着钻孔深度的加深, SiO₂、Al₂O₃含量呈增长趋势, 反映出碎屑岩角砾增多的特征, 与钻孔岩性所表现出容矿构造角砾岩中角砾成分由灰岩变为灰岩、砂泥岩一致。



a~c—铀矿石中沿裂缝充填的方解石、铀矿物及有机质（透射光）；d~f—沥青铀矿、黄铁矿及有机质充填于灰岩角砾的裂隙中（反射光）；g~i—黄铁矿、有机质、方解石、铀矿物（沥青铀矿、铀石、次生铀矿物）、闪锌矿充填于灰岩角砾裂隙中（扫描电镜背散射图）。

a~c—Calcite, uranium minerals and organic matter (transmitted light) filled along fractures in uranium ores; d~f—Pitchblende, pyrite and organic matter filled in the fissures of limestone breccia (reflected light); g~i—Pyrite, organic matter, calcite, uranium minerals (pitchblende, uraninite, secondary uranium minerals), and sphalerite filled in limestone breccia cracks (scanning electron microscope backscatter map).

图 5 大梨树矿床铀矿石镜下显微特征及能谱图

Fig. 5 Microscopic characteristics and energy spectrum of uranium ore from Dalishu deposit under microscope

表 1 大梨树矿床围岩、近矿围岩及矿石主量元素分析结果表/%

Table 1 The analysis results of main elements/% in wall rock, clogging ore rock and ore of Dalishu deposit

样品编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	U/10 ⁻⁶	备注
ZK2401-5	1.42	0.73	0.31	0.54	53.70	0.07	0.09	0.02	0.10	0.03	42.93	7.56	围岩
ZK2401-6	1.68	0.90	0.73	0.55	53.20	0.05	0.13	0.02	0.14	0.03	42.54	5.22	
ZK2401-7	1.80	0.81	0.45	0.47	53.60	0.08	0.14	0.02	0.11	0.04	42.52	3.60	
ZK2401-8	10.20	4.42	2.25	0.80	44.50	0.08	0.46	0.03	0.80	0.16	36.21	28.50	近矿围岩
ZK2401-9	8.05	3.20	1.67	0.80	46.90	0.03	0.31	0.03	0.62	0.12	38.21	4.00	
ZK2401-10	16.30	5.93	3.98	0.92	39.10	0.08	0.75	0.03	1.04	0.17	31.46	321.00	矿石
ZK2401-11	3.17	1.54	5.16	0.70	49.30	0.05	0.23	0.02	0.24	0.06	39.48	116.40	
ZK2401-12	8.70	4.64	5.57	1.40	42.50	0.15	0.59	0.02	0.81	0.15	35.43	317.00	
ZK2401-13	15.50	9.51	5.83	1.24	34.40	0.10	0.92	0.03	1.72	0.27	29.26	517.00	
ZK2401-14	23.10	12.10	11.50	0.62	27.90	0.09	0.95	0.03	2.38	0.36	18.14	306.00	
ZK2401-15	41.80	13.20	10.10	0.71	14.30	0.09	1.07	0.02	2.42	0.35	15.42	28.20	近矿围岩
ZK2401-16	40.00	13.80	13.60	0.68	13.50	0.10	1.14	0.02	2.46	0.36	13.85	23.00	
ZK2401-17	8.29	5.28	3.24	1.31	43.80	0.00	0.39	0.04	0.96	0.16	36.54	7.25	

4.3 微量元素特征

对矿区钻孔 ZK2401 矿石、近矿围岩、围岩进行系统采样,进行了 30 种微量元素(Li、Be、Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Y、Mo、Cd、In、Sb、Cs、Ba、W、Re、Tl、Pb、Bi、Th、U、Nd、Ta、Zr 和 Hf)分析,挑选了其中的 15 个与矿化有关的特征元素(V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Sr、Nd、Zr、Y、Mo、Pb、Th 和 U)进行深入分析,分析结果如表 2 所示。

矿石和近矿围岩中微量元素 V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Sr、Nd、Zr、Y、Mo、Pb、Th 和 U 等元素明显富集,其中 V 含量介于 $59.2 \times 10^{-6} \sim 189 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 123.96×10^{-6} ,达上部围岩的 6.6 倍;Cr 含量介于 $28.2 \times 10^{-6} \sim 221 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 133.92×10^{-6} ,达上部围岩的 10 倍;Co 含量介于 $1.94 \times 10^{-6} \sim 36.8 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 15.04×10^{-6} ,达上部围岩的 11 倍;Cu、Zn、Rb、Zr、Y、Mo、Pb 和 Th 等元素含量均达上部围岩的 6~10 倍,个别样品中 Mo 则达到伴生矿产综合评价指标(138×10^{-6})。

V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Mo 和 U 等元素在矿石和近矿围岩中相对富集,以上元素在寒武系牛蹄组中背景值普遍偏高,是贵州省主要的 V、Ni 和 Mo 矿产出层位^[14]。对比分析研究区内矿石、近矿围岩与黔东寒武系牛蹄塘组黑色泥岩、黔东老堡组富铀炭质页岩微量元素^[14-15],可见区内矿石和近矿围岩与黔东寒武系牛蹄塘组炭质页岩具有相似的变化趋势(图 6),暗示区内成矿物质可能与寒武系底部“黑色岩系”相关。

Sr 元素在矿石和近矿围岩中明显出现亏损状态,在矿石和近矿围岩中含量介于 $109 \times 10^{-6} \sim 526 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 322.3×10^{-6} ;在围岩中含量则介于 $458 \times 10^{-6} \sim 796 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 600×10^{-6} ,接近矿石和近矿围岩中的 2 倍。指示在成矿作用过程中成矿流体与围岩发生水-岩反应,存在物质的交换。

4.4 稀土元素特征

分析结果显示(表 3):矿石与近矿围岩中 Σ REE 介于 $31.27 \times 10^{-6} \sim 214.85 \times 10^{-6}$ 之间,

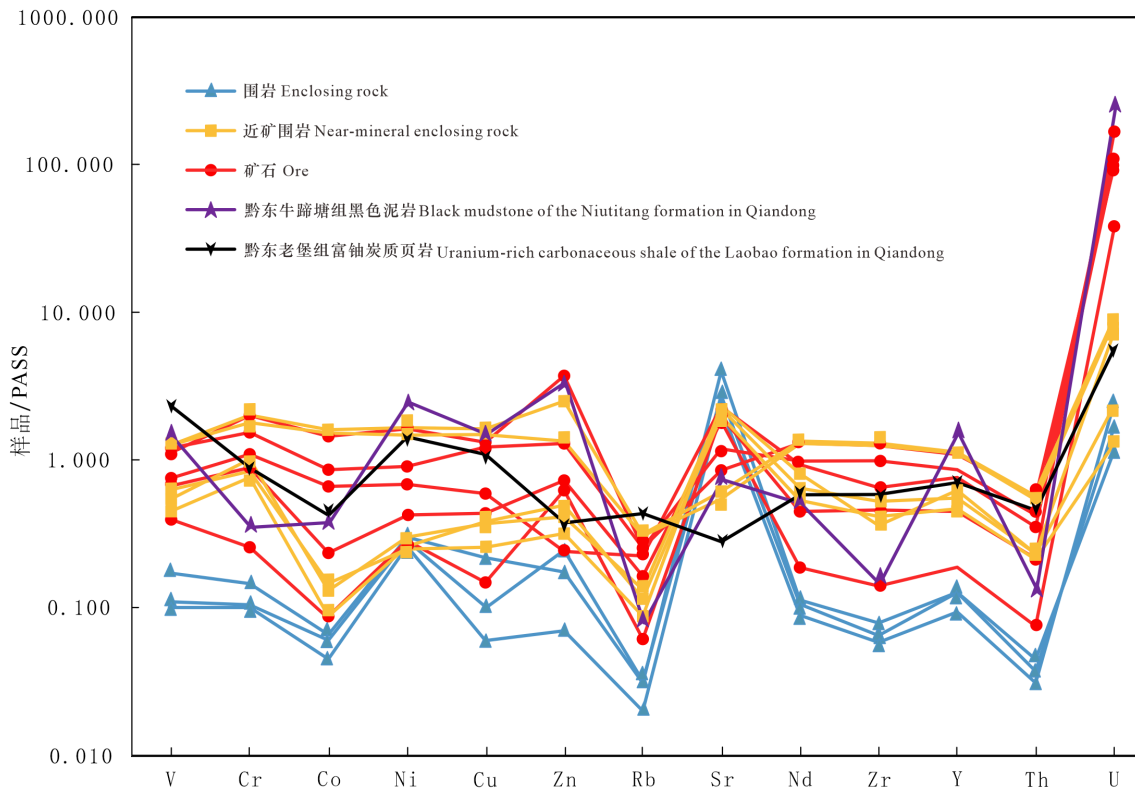


图 6 铀矿石、矿化围岩及黔东地区黑色岩系微量元素蜘蛛网图(标准化数据^[17])

Fig. 6 Spider-web diagram of trace elements in uranium ore, host rock and black shale series in east Guizhou (after reference[17])

表 2 大梨树矿床围岩、近矿围岩及矿石微量元素分析结果表/ 10^{-6}
 Table 2 The analysis results of trace elements/ 10^{-6} in host rock, closing ore wall rock and ore of Dalishu deposit

样品编号	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Nd	Zr	Y	Mo	Pb	Th	U	备注
ZK2401-5	14.60	11.00	1.03	14.90	2.99	5.91	3.19	546.00	2.84	12.20	2.52	5.64	1.13	0.45	7.56	围岩
ZK2401-6	25.60	16.00	1.51	16.30	4.93	20.80	4.93	458.00	3.60	16.50	3.42	5.81	1.86	0.65	5.22	
ZK2401-7	16.40	11.50	1.38	16.50	10.90	14.80	5.09	796.00	3.38	13.60	3.41	1.87	2.25	0.54	3.60	
ZK2401-8	81.60	111.00	3.00	16.00	18.50	35.00	21.20	442.00	17.00	86.80	12.60	6.28	5.19	3.07	28.50	近矿围岩
ZK2401-9	67.50	83.50	2.01	14.30	12.80	26.90	14.00	391.00	25.80	75.60	16.80	5.11	3.33	3.09	4.00	
ZK2401-10	113.00	120.00	15.20	37.60	29.60	20.40	35.80	466.00	29.70	136.00	20.50	21.70	15.90	5.13	321.00	矿石
ZK2401-11	59.20	28.20	1.94	15.60	7.40	52.80	9.80	394.00	5.97	29.40	5.07	14.20	8.40	1.09	116.40	
ZK2401-12	99.90	97.40	5.40	22.90	21.80	61.60	26.10	366.00	14.30	96.30	12.10	22.10	11.50	3.13	317.00	
ZK2401-13	181.00	169.00	19.70	49.70	61.10	110.00	42.20	237.00	31.40	207.00	23.20	50.70	15.90	6.17	517.00	
ZK2401-14	168.00	221.00	33.20	89.30	65.80	316.00	40.50	170.00	41.30	272.00	29.30	95.10	11.00	7.83	306.00	
ZK2401-15	189.00	220.00	35.00	81.00	74.20	114.00	48.90	122.00	42.80	271.00	30.40	21.50	10.00	8.20	28.20	近矿围岩
ZK2401-16	186.00	197.00	36.80	91.00	81.20	212.00	50.30	109.00	41.60	262.00	29.90	138.00	16.30	8.00	23.00	
ZK2401-17	94.40	92.100	3.35	13.70	19.10	41.90	18.40	526.00	20.60	110.00	14.90	7.01	9.23	3.38	7.25	
NTT-02	240.00	42.70	9.84	150.00	82.50	316.00	14.00	163.00	17.90	33.60	45.70	594.00	83.50	2.16	830.00	王琼 (2022)
21GB-II-33	351.00	98.40	9.58	79.60	55.20	32.30	70.30	56.60	18.80	124.00	19.20	45.40	23.10	6.74	18.00	彭松 (2022)

表3 大梨树矿床围岩、近矿围岩及矿石稀土元素分析结果表/ 10^{-6}
 Table 3 The analysis results of rare earth elements/ 10^{-6} in host rock, closing ore wall rock and ore of Dalishu deposit

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LREE/HREE	δ Eu	备注
ZK2401-5	2.70	5.48	0.67	2.84	0.55	0.13	0.51	0.09	0.45	0.08	0.23	0.03	0.22	0.03	14.01	7.51	0.73	围岩
ZK2401-6	3.49	7.11	0.84	3.60	0.72	0.17	0.68	0.12	0.61	0.11	0.33	0.05	0.33	0.04	18.19	7.05	0.76	
ZK2401-7	3.28	6.55	0.78	3.38	0.69	0.16	0.67	0.11	0.62	0.12	0.33	0.05	0.32	0.04	17.09	6.59	0.72	
ZK2401-8	15.80	33.10	3.89	17.00	3.30	0.81	3.14	0.52	2.77	0.52	1.46	0.22	1.39	0.18	84.09	7.25	0.77	近矿围岩
ZK2401-9	24.80	61.40	6.36	25.80	4.86	1.00	4.54	0.73	3.71	0.68	1.94	0.28	1.75	0.24	138.09	8.95	0.65	
ZK2401-10	27.00	62.00	7.05	29.70	5.61	1.20	5.14	0.90	4.75	0.89	2.55	0.37	2.36	0.31	149.83	7.67	0.68	矿石
ZK2401-11	6.19	12.30	1.41	5.97	1.25	0.32	1.19	0.19	1.04	0.19	0.55	0.08	0.52	0.07	31.26	7.18	0.79	
ZK2401-12	13.40	29.20	3.38	14.30	2.97	0.71	2.83	0.48	2.53	0.47	1.35	0.21	1.32	0.17	73.32	6.83	0.75	
ZK2401-13	28.40	60.80	7.51	31.40	6.15	1.36	5.55	0.93	4.99	0.93	2.63	0.40	2.55	0.34	153.94	7.40	0.71	
ZK2401-14	40.40	83.50	10.30	41.30	7.72	2.00	6.82	1.16	6.26	1.18	3.28	0.50	3.12	0.43	207.97	8.14	0.84	
ZK2401-15	41.60	86.90	10.80	42.80	7.98	1.96	6.75	1.18	6.30	1.18	3.34	0.50	3.14	0.42	214.85	8.42	0.82	近矿围岩
ZK2401-16	42.60	86.60	10.70	41.60	7.76	1.87	6.65	1.17	6.26	1.20	3.33	0.53	3.15	0.43	213.84	8.42	0.80	
ZK2401-17	20.60	44.10	5.35	20.60	3.91	0.85	3.27	0.57	3.01	0.55	1.55	0.24	1.50	0.20	106.31	8.76	0.73	
NNT-02	31.50	31.40	4.42	17.90	3.15	0.73	3.93	0.75	3.93	0.90	2.50	0.37	1.97	0.27	102.39	8.32	0.72	王琼(2022)
21GB-II-33	22.30	41.20	4.95	18.80	3.40	0.75	3.02	0.47	2.96	0.63	1.72	0.26	1.68	0.25	103.72	6.09	0.63	彭松(2022)
1	30.70	55.30	6.65	22.90	3.83	0.85	3.43	0.51	3.17	0.64	1.84	0.27	1.90	0.32	132.31	9.95	0.72	王鹏万(2021)
2	29.90	53.70	6.56	23.00	4.24	0.86	3.63	0.55	3.33	0.70	1.89	0.27	1.88	0.29	130.80	9.43	0.67	
J1-T1	37.99	73.67	8.56	32.25	6.41	1.82	5.86	0.95	5.29	1.03	3.13	0.49	3.08	0.47	181.00	7.92	0.91	曹婷婷(2018)
J-T2	32.92	64.92	7.77	29.75	6.31	1.73	5.75	0.93	5.12	1.01	2.85	0.45	2.82	0.44	162.77	7.40	0.88	

平均值为 137.35×10^{-6} ; LREE/HREE 介于 6.83~8.95 之间,平均值为 7.9; δEu 介于 0.65~0.84 之间,平均值为 0.75,表现出明显的 δEu 负异常特征。围岩中 ΣREE 介于 14.01×10^{-6} ~ 18.19×10^{-6} 之间,平均值为 16.43×10^{-6} ; LREE/HREE 介于 6.59~7.51 之间,平均值为 7.05; δEu 介于 0.72~0.76 之间,平均值为 0.74, δEu 负异常特征明显。总体显示:矿石和近矿围岩中 ΣREE 含量变化相对较大且远高于围岩, LREE 相对富集, δEu 变化范围较大,总体略高于围岩。

围岩的 ΣREE 虽远低于矿石和近矿围岩,

但与矿石和近矿围岩具有相似的变化趋势,体现了矿石和近矿围岩对围岩中 REE 继承或部分成矿物质来源于围岩。

对比黔东牛蹄塘组黑色岩系^[15]、老堡组富铀炭质页岩^[16]、滇东北筇竹寺组黑色炭质泥岩^[19]、川东筇竹寺组炭质页岩^[20],区内矿石和近矿围岩与黔东黑色岩系、滇东和川东筇竹寺组炭质页岩的稀土元素组成相似,在稀土元素配分曲线上表现出近乎一致的“右倾型”,具有相似的 LR/HR 比、La/Yb 比和 δEu 负异常特征(图 7)。表明铀矿石和矿化围岩的稀土元素与牛蹄塘组泥岩可能具有亲缘性。

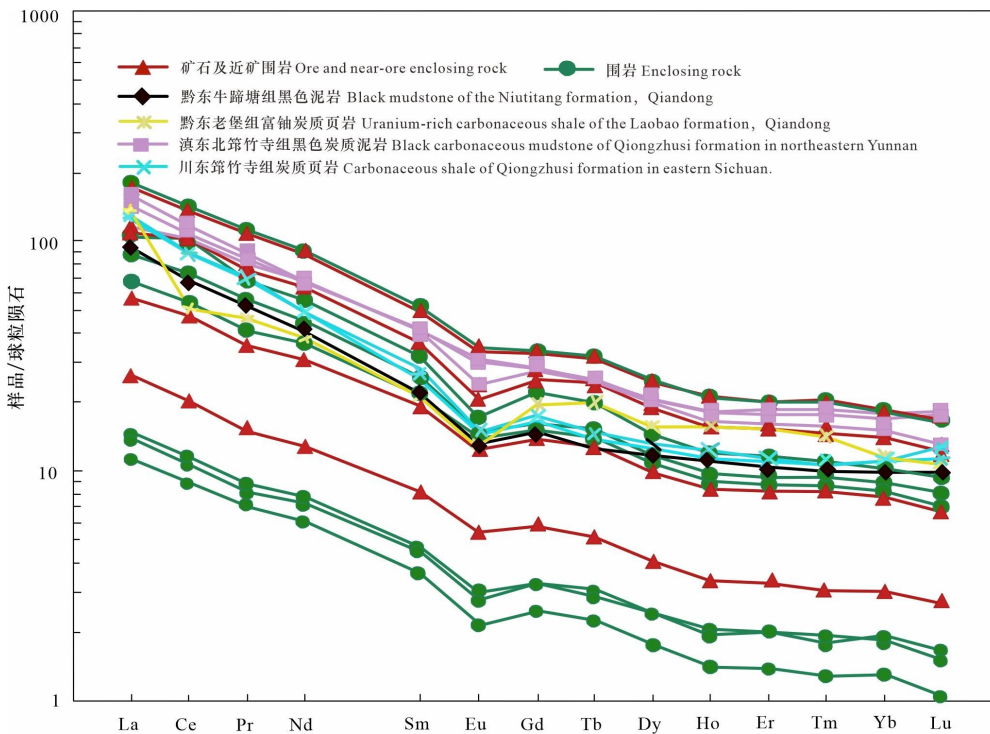


图 7 铀矿石、围岩及川滇黔地区黑色岩系稀土元素配分曲线(标准化数据[18])

Fig. 7 REE rare pattern of uranium ore and host and black shale series in Sichuan-Yunnan-Guizhou region(after reference [18])

5 讨论

5.1 成矿物质来源

对比研究发现,区内矿石和近矿围岩中 V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Mo 和 U 等元素相对富集,与寒武系牛蹄塘组(筇竹寺组)炭质泥岩、老堡组富铀炭质页岩地层相似,在微量元素蜘蛛网图、稀土元素配分曲线上显示出相同的变化趋势,暗示其成矿物质可能与寒武系黑色岩系

地层有关。

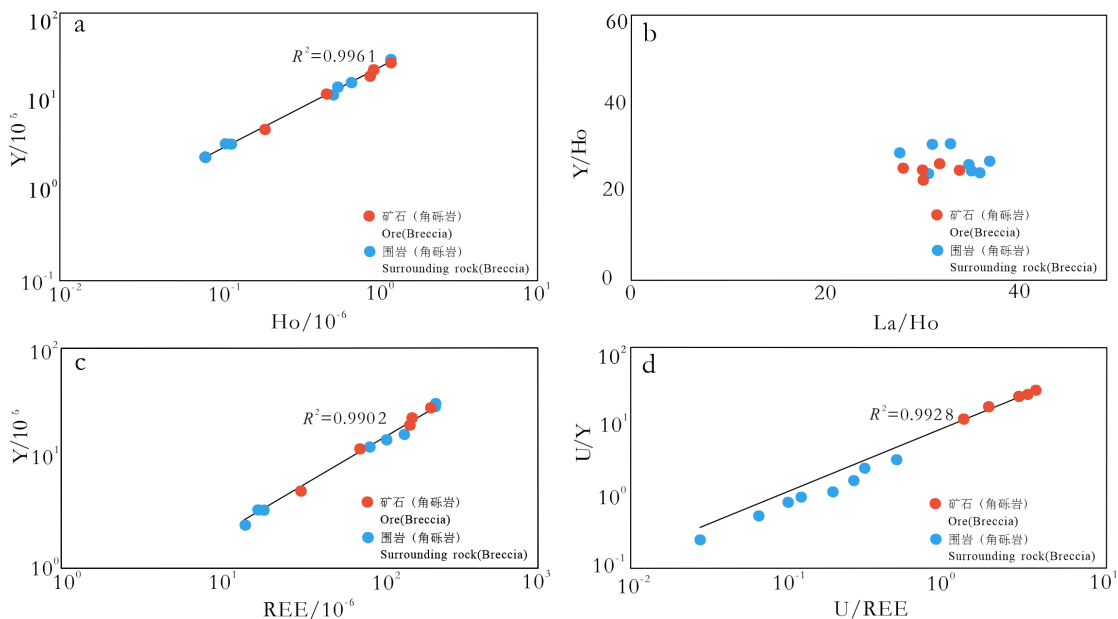
Eu 通常以 Eu^{3+} 形式存在,在还原条件下 Eu^{3+} 转换成 Eu^{2+} , Eu^{2+} 更容易进入矿物晶格,从而出现 Eu 不同程度的亏损或富集。根据 REE 地球化学演化的氧化-还原模式:还原条件下,水-岩反应过程中会出现 Eu 正异常现象^[21]。矿石及围岩均表现为 Eu 负异常,在一定程度上体现了矿石对围岩的继承性。此外, Eu 还与成矿流体的性质有关,可能继承了成矿流体的 Eu

负异常特征。也与寒武系黑色岩系地层呈现相同的Eu负异常特征,也暗示了成矿与寒武系黑色岩系相关。

Y与Ho具有相似的离子半径、价态和地球化学行为,其分异通常只受流体成分影响,矿石及围岩中Y-Ho组成具有较好的线性关系($R^2=0.9961$),在Y/Ho-La/Ho图解上大体呈水平分布,说明矿石与围岩之间存在同源性。Y和REE具有相似的地球化学性质,在热液活动成矿过程中通常以类质同像的形式进入矿石的特征矿物中。矿石与围岩中Y和REE具有良好的线性关系($R^2=0.9902$),表明它们在热

液传输和沉淀过程中具有类似的地球化学行为。在U/REE-U/Y图解上具有明显的正相关关系($R^2=0.9928$),表明U与Y和REE可能在源于成矿流体的同时继承了围岩。说明在成矿作用过程中,成矿流体与围岩发生水-岩反应,围岩为成矿提供了部分成矿物质(图8)。

前人研究表明:寒武系牛蹄塘组(C_{1-2n})中U含量普遍高,上震旦统一下寒武统含铀沉积建造的铀含量也集中在 $14 \times 10^{-6} \sim 41 \times 10^{-6}$ 之间^[22],明显高于上覆盖层中的铀含量,在整个川、滇和黔地区均发现该套地层,可以充分满足后期热液成矿过程中铀源的供给。



a—Ho-Y 图解; b—La/Ho-Y/Ho 图解; c—REE-Y 图解; d—U/REE-U/Y 图解。
a—Ho-Y diagram; b—La/Ho-Y / Ho diagram; c—REE-Y diagram; d—U/REE-U/Y diagram.

图8 大梨树矿区稀土元素二元图解

Fig. 8 Binary diagram of rare earth elements in Dalishu uranium deposit

5.2 主要控矿因素

5.2.1 构造控矿

前人的研究表明:区域经历3期构造演化:燕山早期挤压应力下形成的雄武背斜与同期的逆冲断层;燕山晚期由挤压转换为伸展应力背景下形成的NE向张性断层;以及喜山期构造应力下形成NW向构造的同时对燕山晚期NE向张性构造进行改造^[5]。矿区主要控矿断层 F_1 表现为多期构造活动,与前人研究相一致,多期构造活动形成的断层,既可以为深部成矿流体运移提供有利通道,同时也可以为区

内“断控型”铀矿体的容矿空间。

平面上,区内矿体产出于断层破碎带由宽变窄处;剖面上,矿体产于断层由陡变缓部位。平面上断层破碎带较宽部位形成相对开放的空间,使得成矿流体压力提前释放,在断层破碎带由宽变窄处形成相对封闭的空间,成为成矿有利部位;剖面上的由陡变缓部位有利于成矿流体压力的释放,使得矿质沉淀。

5.2.2 地层及岩性控矿

区内铀矿产于NE向断层破碎带内,容矿岩石为构造角砾岩,角砾岩性主要为碳酸盐

岩,碳酸盐岩具有岩石颗粒粗、孔隙度大、渗透性好和地球化学性质活泼等特性,利于成矿流体通过并与其发生水-岩反应,进行物质交换。其次碳酸盐岩还具有极强的脆性,在构造应力作用下易破碎形成具有一定规模的破碎带,为成矿提供有利容矿空间,同时碳酸盐岩中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 对铀酰具有较好的络合作用。

此外,在区内 NE 向断层旁侧的嘉陵江组 1 段、2 段界面发现铀矿化迹象,铀矿化发育于嘉陵江组 2 段底部泥质粉砂岩中。嘉陵江组 1 段、2 段间的岩性界面成为成矿有利结构面,嘉陵江组 2 段底部的泥质粉砂岩具有一定的空隙度和渗透性,使得成矿流体能够通过;其中黏土矿物、黄铁矿等成为良好的聚铀矿物^[23],利于对铀进行吸附。

5.2.3 有机质控矿

铀矿石宏观和微观研究均表明,大梨树矿床内铀矿的富集与有机质关系密切,矿体中心部位常呈黑色,两侧颜色较浅,表面矿化蚀变中心以黑色有机质化为主。手标本显示矿石越黑,铀含量越高,镜下常见有机质与铀矿物密切共生,说明了有机质与铀成矿关系十分密切。邱林飞等(2022)对大际山铀多金属矿床研究,认为有机质具有明显的异源特征,指示有机质来源于深部烃源岩的排烃作用,其成矿过程中可能是富铀富有机质流体发生分异-裂解后释放出成矿物质而发生沉淀,致使铀、黄铁矿等金属物质沉淀^[7]。从大梨树铀矿床的铀矿石中有机质的宏观与微观特征看,有机质在该区铀成矿过程中应该发挥了重要的作用。有机质具有较强还原作用,使得易于迁移的 U^{6+} 还原为 U^{4+} 而发生卸载、沉淀,同时也是良好的聚铀剂^[23]。因此,认为有机质在大梨树铀成矿过程中不仅使矿质沉淀,同时也对铀矿物具有吸收及吸附等作用使铀矿富集。

5.3 矿床成因

大梨树矿床沥青铀矿的激光微区 U-Pb 年代学结果指示其年龄介于 35.41~39.50 Ma 之间(吴玉未发表数据),指示成矿时代为喜山期。邱林飞(2024)对邻近的大际山铀矿床进行研究,表明:成矿流体性质为表生低盐度大气降水与深部含烃高盐度热卤水的混合,黄铁矿

硫同位素具有典型的含硫有机质裂解型(TDS)或细菌硫酸盐还原型(BSR)的同位素特征^[7]。大梨树铀矿受构造控制明显,元素地球化学研究表明:成矿物质可能主要来源于深部寒武系黑色岩系,其元素地球化学特征与前人在大际山铀矿中研究的地球化学特征具有相似特点,表明大梨树铀矿床的成因类型可能与大际山矿床具有一定的相似性,它们可能均属于热液成因。

初步研究认为:大梨树铀矿是在喜山期挤压造山背景下,深部流体往上运移萃取震旦系-寒武系基底地层中的铀等成矿物质形成有机成矿流体,成矿流体往上运移途中与地表降水混合,在断层宽窄变化、陡缓变换或碳酸盐岩与碎屑岩界面等有利成矿部位,温度、压力得到释放,成矿流体与围岩发生水-岩反应进行物质交换、矿质沉淀,形成矿体。

5.4 下一步找矿建议

上述研究表明:区内成矿物质可能主要来源于深部寒武系黑色岩系,矿床为热液成因,铀矿受 NE 向构造、岩性界面及有机质多重因素制约;多期活动的 NE 向断层是区内主要控矿构造,既为深部成矿流体运移提供有利通道,也为区内“断控型”铀矿体提供容矿空间;区域土壤地球化学异常沿 NE 向断层分布^[4],已发现的大际山、长湾和大梨树等矿床(点)均产于 NE 向的七舍革上、鲁坎断层等多期活动断层面上。此外 NE 向断层旁侧的碳酸盐岩与碎屑岩构成的岩性界面也是有利成矿结构面,为大际山式“似层状”矿体提供容矿空间。因此,下一步找矿应聚焦区域为 NE 向多起活动的断层及其旁侧的碳酸盐岩与碎屑岩的岩性界面,重点关注 NE 向断层旁侧的龙潭组与吴家坪组之间的岩性界面。

6 结 论

1)大梨树铀矿床矿体产于 NE 向断层破碎带内,容矿岩石为断层角砾岩;矿石矿物主要有沥青铀矿、铀石、黄铁矿和闪锌矿等,非金属矿物主要有方解石、有机质等;矿化蚀变较弱,主要见方解石化、黄铁矿化及有机碳化,其中有机质与成矿关系最为密切。

2)成矿物质来源可能与上震旦统一寒武统含铀黑色岩系有关,成矿过程中发生水-岩反应,围岩为成矿提供了部分成矿物质,矿床为热液成因。

3)矿体的产出受断层形态、岩性界面及有机质的多重制约。NE向多期活动断层和断层旁侧的碳酸盐岩与碎屑岩形成的岩性界面为成矿有利部位,下一步找矿应重点关注。

致谢:对审稿专家、编辑老师及指导本次论文的同事致以诚挚的感谢!

参考文献

- 胡瑞忠,付山岭,肖家飞.华南大规模低温成矿的主要科学问题[J].岩石学报,2016,32(11):3239-3251.
HU Ruizhong, FU Shanling, XIAO Jiafei. Major scientific problems on low-temperature metallogenesis in South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(11):3239-3251(in Chinese).
- 郑懋荣.贵州省兴义市雄武地区铀成矿特征及成矿条件[J].贵州地质,2005,22(2):112-116.
ZHENG Maorong. The uranium metallogenic feature and condition in Xiongwu area, Xingyi, Guizhou[J]. Guizhou Geology, 2005, 22(2):112-116(in Chinese).
- 潘澄雨,吴玉,刘畅,等.贵州兴义地区大际山铀多金属矿床成因:矿石特征与铀赋存状态[J].矿物学报,2021,41(1):23-32.
PAN Chengyu, WU Yu, LIU Chang, et al. Genesis of the Dajishan uranium polymetallic deposit in the Xingyi area, Guizhou province: Ore characteristics and occurrence of uranium [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2021, 41(1):23-32(in Chinese).
- 徐伟,蒋宏,朱剑,等.黔西南大际山铀多金属成矿远景区土壤地球化学特征[J].铀矿地质,2020,36(6):563-576.
XU Wei, JIANG Hong, ZHU Jian, et al. Characteristics of soil geochemistry in the uranium-polymetallic metallogenic prospect area at Dajishan, southwestern Guizhou [J]. Uranium Geology, 2020, 36(6):563-576(in Chinese).
- 吴玉,徐伟,解波,等.黔西南雄武地区大际山铀多金属矿床控矿构造解析与找矿预测[J].大地构造与成矿学,2023,47(6):1203-1219.
WU Yu, XU Wei, XIE Bo, et al. Analysis of ore-controlling structures and prospecting prediction of Dajishan uranium polymetallic deposit in Xiongwu area, southwest Guizhou [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2023, 47(6):1203-1219(in Chinese).
- Qiu L F, Wu Y, Wang Q, et al. Metallogenic mechanism of typical carbonate-hosted uranium deposits in Guizhou (China)[J]. Minerals, 2022, 12:585.
- 邱林飞,吴玉,李子颖,等.黔西南雄武地区铀矿化与有机流体的成因联系[J].大地构造与成矿学,2024,48(2):352-367.
QIU Linfei, WU Yu, LI Ziyang, et al. Genetic relationship between uranium mineralization and organic fluids in the Xiongwu area, southwestern Guizhou[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2024, 48(2):352-367(in Chinese).
- 胡世忠.论东吴运动构造事件与二叠系分统界线问题[J].地层学杂志,1994,18(4):309-315.
HU Shizhong. On the event of Dongwu movement and its relation with Permian subdivision [J]. Journal of Stratigraphy, 1994, 18(4):309-315(in Chinese).
- 何斌,徐义刚,王雅玫,等.东吴运动性质的厘定及其时空演变规律[J].地球科学,2005,30(1):89-96.
HE Bin, XU Yigang, WANG Yamei, et al. Nature of the Dongwu movement and its temporal and spatial evolution [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(1):89-96(in Chinese).
- 吴松洋,侯林,丁俊,等.黔西南卡林型金矿田控矿构造类型及成矿流体特征[J].岩石学报,2016,32(8):2407-2424.
WU Songyang, HOU Lin, DING Jun, et al. Ore-controlling structure types and characteristics of ore-forming fluid of the carlin-type gold orefield in southwestern Guizhou, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(8):2407-2424(in Chinese).
- 杨成富,刘建中,顾雪祥,等.南盘江-右江盆地构造演化与金锑成矿作用[J].地球学报,2020,41(2):280-292.
YANG Chengfu, LIU Jianzhong, GU Xuexiang, et al. The relationship of tectonic evolution and Au-Sb mineralization in Nanpanjiang-Youjiang basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(2):280-292(in Chinese).
- 中国钢铁工业协会.石灰石及白云石化学分析方法——第8部分:灼烧减量的测定 重量法:GB/T 3286.8—2014[S].北京:中国标准出版社,2014:1-6.

- China Iron and Steel Industry Association. Method for chemical analysis of limestone and dolomite—Part 8: The determination of loss on ignition—The gravimetric method [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014: 1–6 (in Chinese)
- 13 自然资源部. 硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分: 44 个元素量测定: GB/T 14506.30—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1–14.
Ministry of Natural Resources. Methods for chemical analysis of silicate rocks—Part 30: Determination of 44 elements [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 1–14 (in Chinese)
- 14 杨光龙, 崔登伟. 黔北牛蹄塘组黑色岩系中矿产特征及找矿远景分析 [J]. 贵州地质, 2010, 27(3): 208–212.
YANG Guanglong, CUI Dengwei. Analysis of mineral characteristics and prospecting prospect in black rock series of Niutitang formation in northern Guizhou [J]. Guizhou Geology, 2010, 27(3): 208–212 (in Chinese).
- 15 彭松, 王琼, 吴林锋, 等. 黔北凤冈地区碳酸盐岩型铀矿成矿物质来源探讨 [J]. 世界核地质科学, 2022, 39(3): 437–447.
PENG Song, WANG Qiong, WU Linfeng, et al. Discussion on the source of ore-forming materials of carbonate-hosted uranium deposit in Fenggang area, northern Guizhou province [J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(3): 437–447 (in Chinese).
- 16 王琼, 吴林锋, 刘开坤, 等. 黔北碳酸盐岩型铀矿床成因分析与指示意义 [J]. 世界核地质科学, 2022, 39(3): 426–436.
WANG Qiong, WU Linfeng, LIU Kaikun, et al. Genetic analysis and prospecting direction of carbonate-type uranium deposits in northern Guizhou [J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(3): 426–436 (in Chinese).
- 17 McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes [C]//Lipin B R, McKay G A (eds.), Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Reviews in Mineralogy, 1989, 21: 169–200.
- 18 Sun, McDonough. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 42: 313–345.
- 19 王鹏万, 邹辰, 李娴静, 等. 滇黔北地区筇竹寺组元素地球化学特征及古环境意义 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 57–68.
WANG Pengwan, ZOU Chen, LI Xianjing, et al. Geochemical characteristics of element Qiongzhusi Group in Dianqianbei area and paleoenvironmental significance [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2): 57–68 (in Chinese).
- 20 曹婷婷, 徐思煌, 王约. 川东北下寒武统筇竹寺组稀土元素特征及其地质意义——以南江杨坝剖面为例 [J]. 石油实验地质, 2018, 40(5): 116–123.
CAO Tingting, XU Sihuang, WANG Yue. Characteristics of rare earth elements in Lower Cambrian Qiongzhusi formation in northeastern Sichuan basin and its geological implications: A case study of Yangba section, Nanjiang [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(5): 116–123 (in Chinese).
- 21 CHRN Y J, FU S G. Variation of REE patterns in Early Precambrian sediments: Theoretical study and evidence from the southern margin of the northern China craton [J]. Chinese Science, Bulletin, 1991, 36(13): 1100–1104.
- 22 蔡煜琦, 宋继叶, 虞航, 等. 中国海相含铀沉积建造分布与铀成矿分析 [J]. 世界核地质科学, 2010, 27(4): 187–194.
CAI Yuqi, SONG Jiye, YU Hang, et al. Analysis on the distribution of marine uranium-bearing sedimentary formation and uranium metallogenesis in China [J]. World Nuclear Geoscience, 2010, 27(4): 187–194 (in Chinese).
- 23 金中国, 刘开坤, 郑明泓, 等. 贵州三穗铀矿床矿石矿物学特征及其对找矿的指示 [J]. 中国地质, 2022, 49(4): 1236–1249.
JIN Zhongguo, LIU Kaikun, ZHENG Minghong, et al. Ore mineralogical characteristics of Sansui uranium deposit in Guizhou province, China and indication for prospecting [J]. Geology in China, 2022, 49(4): 1236–1249 (in Chinese).