

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

张 涛, 黄宏业, 李 杰, 刘子杰, 陈 琪, 邹明亮

(核工业二三〇研究所, 湖南 长沙 410011)

摘 要: 向阳坪铀矿床是桂北苗儿山地区最具代表性的花岗岩型铀矿床, 对该矿床矿石矿物 REE 开展了微区原位研究并结合前人研究成果进行了综合分析, 表明铀黑 ΣREE 介于 $689.12 \times 10^{-6} \sim 869.31 \times 10^{-6}$ 之间, LREE 相对富集, HREE 相对亏损, 具强 Eu 负异常及 Ce 正异常, $\text{TE}_{1,3}$ 值介于 1.26 ~ 1.33 之间, 具典型 M 型四分组效应; 沥青铀矿 ΣREE 介于 $569.73 \times 10^{-6} \sim 3373.83 \times 10^{-6}$ 之间, 表现出两种特征: ① LREE 富集, HREE 亏损, 轻重稀土元素分馏程度较大, 具强 Eu 负异常和弱 Ce 正异常, 配分曲线呈右倾型; ② 轻重稀土元素分馏程度较小, Eu 负异常明显, 弱 Ce 负异常, 配分曲线呈海鸥型。围岩稀土元素配分模式相似, Y/Ho 值范围狭窄, 指示具有相同物源; 矿石矿物稀土元素与围岩存在较大差异, 亲缘性不明显。成矿作用伴随围岩发生蚀变及围岩高铀背景; 成矿流体具多阶段、富 U-Y-REE 特征, 铀主要来自深部热液, 围岩贡献不显著; 矿床定位受构造-岩体联合控制, 矿体规模、形态受构造规模、产状控制。

关键词: 稀土元素; LA-ICP-MS 原位分析; 沥青铀矿; 铀黑; 成矿流体; 向阳坪铀矿床

中图分类号: P588.14; P619.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)04-0423-18

In situ micro-determination on ore-bearing minerals, geochemical characteristics of REE and their constraints on ore-forming fluids in the Xiangyangping uranium deposit, northern Guangxi

ZHANG Tao, HUANG Hong-ye, LI Jie, LIU Zi-jie, CHEN Qi and ZOU Ming-liang

(Changsha Uranium Geology Research Institute, CNNC, Changsha 410011, China)

Abstract: The Xiangyangping uranium deposit is the most representative granite-type uranium deposit in the Miao'ershan area of northern Guangxi. Based on the detailed field investigation, the main uranium mineral in the deposit is pitchblende. LA-ICP-MS REE research dissects the source of ore-forming fluids. The results show that oxidized pitchblende ΣREE is $689.12 \times 10^{-6} \sim 869.31 \times 10^{-6}$, LREE is relatively enriched, HREE is relatively deficient, strong Eu is negative and Ce is positive, $\text{TE}_{1,3}$ values range from 1.26 to 1.33, with a typical M type REE tetrad effect; the ΣREE of the pitchblende is $569.73 \times 10^{-6} \sim 3373.83 \times 10^{-6}$, showing two characteristics: ① LREE enrichment, HREE loss and LREE and HREE fractionation degree are large, Eu exhibits strong negative anomaly but weak Ce positive anomaly, and chondrite-normalized REE patterns are right-included; ② LREE and HREE fractionation degrees are small, Eu negative anomaly is obvious, Ce negative anomaly is weak, and the

收稿日期: 2019-12-11; 接受日期: 2020-05-27; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702102); 中国核工业集团有限公司项目(3210402); 中国核工业集团有限公司菁英项目; 中国核工业地质局项目(201917, 201918)

作者简介: 张 涛(1992-), 男, 助理工程师, 主要从事矿田构造解析及矿床成因研究, E-mail: 759886021@qq.com; 通讯作者: 邹明亮(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事铀矿地质勘查与科研工作, E-mail: zoumingliang2001@163.com。

chondrite-normalized patterns of REE are in seagull type form. The fresh rock has similar chondrite-normalized REE patterns, and the Y/Ho ratio range is narrow, indicating that it has the same material source. REE of ore minerals are quite different from the values of the fresh rocks, and the kindship is not obvious. The alteration and high uranium background is a product of the mineralization. The ore-forming fluid is multi-stage rich in U-Y-REE. The uranium mainly came from deep hydrothermal fluid, and the contribution of fresh rock is not significant. The location of the deposit is controlled by the combination of tectonic and rock mass. The size and shape of the orebody are determined by the tectonic scale and modes of occurrence.

Key words: REE; LA-ICP-MS in situ analysis; pitchblende; oxidized pitchblende; ore-forming fluid; Xiangyangping uranium deposit

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41702102); China Nuclear Industry Group Co., Ltd., Project (3210402); China Nuclear Industry Group Co., Ltd., Elite Project; China Nuclear Geology Project (201917, 201918)

稀土元素具有相似的地球化学性质,在热液交代蚀变作用和表生地质作用过程中可作为一个整体活化迁移,其迁移程度受水岩反应时间、反应速率、流体中能与 REE 配位的络合物数量等因素制约 (Eglinger *et al.*, 2013)。因此,稀土元素包含并保存着地质体成因、演化及热液流体等多方面信息,可以反映成矿物质和流体来源,示踪成矿流体的活动轨迹和成岩成矿作用,是研究成矿、成岩的重要手段 (包志伟等, 1998; 毕献武等, 1998; 倪师军等, 1998, 1999; Fan *et al.*, 2006)。

花岗岩型铀矿床是我国重要的铀矿床类型之一,几乎均为后生热液型铀矿床 (Cuney, 2009; 张金带等, 2012)。我国花岗岩型热液铀矿床集中分布在华南,例如广西桂林苗儿山地区,其内分布有我国规模最大的碳硅泥岩型钨子坪铀矿床以及向阳坪、沙子江、双滑江、白毛冲、孟公界等诸多花岗岩型铀矿床。前人 (谢晓华等, 2008; 李妩巍等, 2010; 石少华等, 2010, 2011a, 2011b, 2011c; 胡欢等, 2012, 2013; Luo *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2016; 王正庆, 2018; 王正庆等, 2018) 对苗儿山香草坪、豆乍山岩体进行过系统的成岩年代学、地球化学、岩石成因、铀成矿动力学研究,对沙子江矿床成矿年代学、元素地球化学、C-H-O 同位素、流体包裹体等方面也开展了系统研究。

向阳坪铀矿床发现时间较新,规模较大,是苗儿山地区最具代表性的花岗岩型热液铀矿床,目前核工业二三〇研究所在矿床外围及深部进行勘探。李妩巍等 (2011) 提出向阳坪矿床铀成矿受脆性剪切变形主导,欧阳平宁 (2012)、欧阳平宁等 (2012) 构建了该区地球化学勘查模式,陈琪等 (2013)、吴昆明等

(2016)、秦蕾胜 (2018) 认为豆乍山岩体为产铀岩体,但总体上科研工作深入不够,严重制约了对矿床的成因认识及下一步勘探方向。邵飞等 (2012)、吴德海等 (2018, 2019)、陈佑纬等 (2019)、王鲲等 (2020)、赵如意等 (2020) 研究认为华南主要的热液型铀矿成矿物质来自高铀背景的围岩,而吴仁贵等 (2018) 提出热液型铀矿床铀源并非来自低热场的成矿周边围岩。可见,热液型铀矿床中铀的来源尚存在不同观点。研究区成矿物质来源的专题研究,尚未见报道。微区分析技术已成为地球科学研究中的重要技术手段,具有微米尺度的高空分辨率,对揭示成矿物质来源具有十分重要作用。本文试图以向阳坪铀矿床中矿石矿物为研究对象,采用 LA-ICP-MS 技术对样品进行微区稀土元素测试,结合前人对围岩、蚀变岩及矿石稀土元素的研究成果,进一步约束成矿物质来源与围岩的关系,深入理解成矿过程,完善矿床基础研究,并为下一步勘探找矿提供依据。

1 区域地质背景

向阳坪铀矿床位于扬子板块江南被动陆缘隆起带的南缘,苗儿山-越城岭花岗岩穹窿构造西翼的苗儿山岩体中段。苗儿山-越城岭花岗岩穹窿构造区是我国南岭铀-多金属成矿带中的重要成矿区。区内主要赋铀地层为震旦系陡山沱组、寒武系清溪组黑色岩系、中上泥盆统信都组的含碳质石英粉砂岩和泥质岩、中泥盆统唐家湾组的含碳深灰色厚-巨厚细晶白云岩。

新资断裂为区域内最大的断裂构造,整体呈 NNE 向展布。其西侧发育一系列近似等距平行的

NNE 向次级断裂, 断裂从东往西依次编为 $F_1 \sim F_{10}$, 是铀矿床定位的重要部位。苗儿山-越城岭岩体为多期多阶段复式花岗岩体, 主要为加里东期岩体、印支期苗儿山岩体及少量燕山期岩体。其中加里东期

S 型花岗岩成岩年龄为 440 ~ 390 Ma (舒良树, 2012)。苗儿山岩体为复式岩体, 包括香草坪岩体和豆乍山岩体。向阳坪矿床产于豆乍山与香草坪岩体接触部位附近的 NNE 向走滑断裂带中。

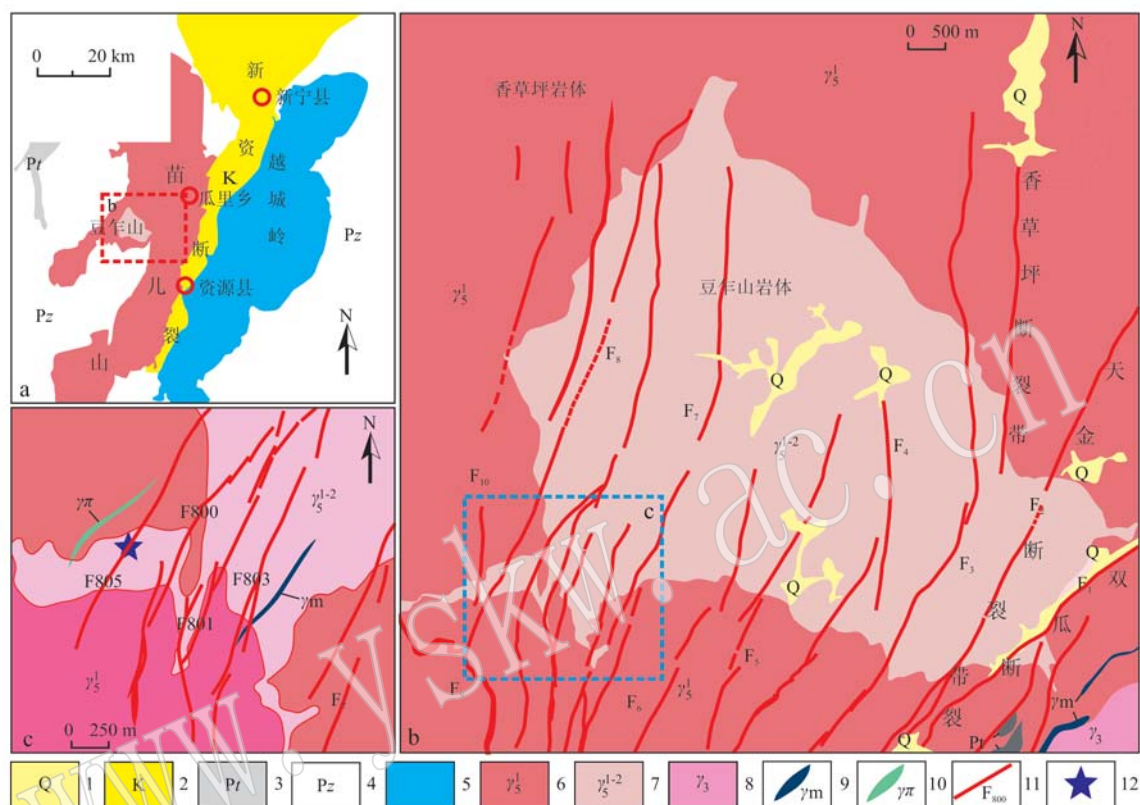


图 1 向阳坪铀矿床大地构造位置(a, 据 Zhao *et al.*, 2013; 王正庆, 2018)及苗儿山(b)、向阳坪(c)铀矿床地质略图
Fig. 1 Simplified geotectonic location of Xiangyangping (a, after Zhao *et al.*, 2013; Wang Zhengqing, 2018) and geological map of the Miao'er shan (b) and Xiangyangping (c) uranium deposits

- 1—第四系; 2—白垩系; 3—元古宇; 4—太古宇; 5—越城岭岩体; 6—香草坪岩体; 7—豆乍山岩体; 8—加里东期粗粒斑状黑云母花岗岩;
9—细粒花岗岩; 10—花岗岩斑岩脉; 11—断裂及编号; 12—采样位置
1—Quaternary; 2—Cretaceous; 3—Proterozoic; 4—Archean; 5—Yuechengling granite; 6—Xiangcaoping granite; 7—Douzhashan granite;
8—coarse-grained porphyritic biotite granite in the Caledonian period; 9—fine-grained granite; 10—granitic porphyry veins;
11—fault and its serial number; 12—sampling location

2 矿床地质特征

向阳坪矿床产于印支期香草坪岩体与豆乍山岩体接触部位的 NNE-SN 向走滑断裂带中(F_7 、 F_8 、 F_9 、 F_{10})。豆乍山岩体为中细粒黑(二)云母二长花岗岩, 香草坪岩体为中粗粒黑云母花岗岩。铀矿体主要赋存于主断裂带内及其配套的近平行展布的次级断裂带中, 发育硅化、赤铁矿化、水云母化、黄铁矿化, 部分铀矿脉充填于构造裂隙中的红色或黑色微晶石英脉中。断裂带的产状、规模、发育程度和相互间的组合形式直接控制了矿体的空间定位。在构造

变异部位较富, 成群出现, 垂向上断续分布。矿体倾向延深一般大于走向延长, 多呈扁豆状、透镜状、脉状、扁平状、楔状(图 2a)。

矿床内蚀变作用发育, 分为成矿前、成矿期和成矿后蚀变。① 成矿前白色块状、灰白色玉髓脉阶段: 硅化 + 白云母化、绢云母化 + 高岭土化 ± 浅色萤石、黄铁矿、赤铁矿, 含微量铀; ② 成矿期红色玉髓-黄铁矿-沥青铀矿阶段: 硅化 + 萤石 + 方解石 + 黄铁矿化 + 赤铁矿化 ± 绢云母化、高岭土化; ③ 成矿后期白色梳状石英阶段: 硅化 + 白云母化 + 高岭土化 ± 玉髓、黄铁矿、赤铁矿、浅色萤石、方解石、绢云母, 含微量铀。

矿石类型分为显微、超显微矿石, 赤铁矿化-硅化、黄铁矿化-硅化碎裂花岗岩矿石, 角砾状矿石和脉状矿石(图2b、2c、2d)。矿物组合主要为铀-赤铁矿、铀-黄铁矿、铀-玉髓、铀-萤石、铀-方解石型, 其中前两者最为重要。矿石矿物主要为沥青铀矿、铀

黑、硅钙铀矿、钙铀云母及铜铀云母等。伴生的金属矿物简单, 主要有赤铁矿、黄铁矿、褐铁矿和少量辉锑矿。脉石矿物主要为石英、微晶石英(玉髓)、长石、水云母、绢云母、绿泥石、少量方解石、萤石。



图2 向阳坪铀矿床典型勘探线剖面示意图(a)及典型矿石标本(b~d)

Fig. 2 Geological section along typical exploration line (a) and ore specimens (b~d) of the Xiangyangping uranium deposit

3 样品采集与分析方法

2号样品采自ZK7-8, 为含方解石铀矿石; 3号样品采自ZKD48-13, 为黄铁矿化碎裂岩型方解石铀矿脉。样品中主要矿石矿物为沥青铀矿。

矿石矿物原位稀土元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用LA-ICP-MS分析完成。实验操

作流程、数据处理和校正方法见宗克清等(2015)。Geolaspro激光剥蚀系统由COMPexPro 102 ArF 193 nm准分子激光器和MicroLas光学系统组成, ICP-MS型号为Agilent 7700e。沥青铀矿单矿物微量元素含量采用玻璃标准物质BHVO-2G、BCR-2G和BIR-1G进行多外标无内标校正(Liu *et al.*, 2008)。实验过程及数据处理见文献(Liu *et al.*, 2008)。测试数据见表1, 引用数据及稀土元素特征值见表2、表3。

表1 沥青铀矿 LA-ICP-MS 稀土元素分析结果
Table 1 Rare earth element compositions of ore minerals detected by LA-ICP-MS

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
2 号样品(含方解石铀矿石)															
2-01	487.87	1 820.31	236.63	927.36	212.36	12.19	399.38	54.71	317.58	96.02	281.15	42.58	273.48	42.48	7 734.10
2-02	576.50	1 753.61	176.99	504.15	47.43	2.42	96.19	10.81	57.85	22.44	64.31	8.83	44.86	8.15	2 466.39
2-03	927.84	1509.75	121.10	309.27	20.58	1.79	48.74	5.35	24.03	8.77	24.35	3.97	21.82	3.88	1 425.23
2-04	608.36	792.75	68.93	170.46	18.64	1.16	46.08	4.08	19.61	6.43	16.68	3.05	17.22	2.37	1 168.81
2-05	308.62	389.82	34.90	94.80	6.25	0.69	22.94	2.11	14.48	5.28	16.95	1.75	9.09	2.32	715.59
2-06	77.62	21.91	1.36	2.74	0.00	0.16	0.00	0.00	0.26	0.20	0.00	0.00	0.00	0.07	8.49
2-07	80.87	22.47	1.51	1.46	0.00	0.00	0.00	0.15	0.27	0.07	0.00	0.08	0.00	0.08	6.94
2-08	146.23	81.59	6.44	22.17	3.88	0.40	10.44	0.62	2.54	0.75	2.79	0.78	1.47	0.28	98.00
2-09	120.36	38.37	2.64	7.16	0.00	0.00	0.00	0.07	0.72	0.26	0.98	0.15	1.12	0.21	13.09
2-10	47.22	23.99	2.32	4.10	0.46	0.11	1.71	0.19	1.69	0.00	1.83	0.00	1.57	0.39	37.88
2-11	98.87	88.89	11.95	45.73	11.21	0.61	22.41	1.85	14.22	4.06	10.66	2.31	12.97	2.48	423.28
2-12	55.44	95.30	11.23	42.88	7.87	0.34	13.18	1.60	10.93	1.96	5.75	1.34	5.69	1.26	237.57
2-13	1 188.24	1 613.66	100.34	366.53	101.01	3.71	128.66	10.29	45.22	11.84	22.70	3.94	19.07	2.71	1 283.27
2-14	944.84	742.21	27.44	73.41	4.05	0.00	9.52	0.45	0.80	0.43	0.96	0.16	0.93	0.08	47.83
2-15	748.19	931.92	53.21	162.17	14.46	0.45	15.15	0.72	2.38	0.89	3.07	0.29	0.82	0.27	145.50
2-16	1 034.67	3 114.26	244.46	885.26	158.23	5.33	155.32	8.26	32.43	7.24	15.62	2.25	7.68	1.71	1191.29
2-17	782.79	4 267.06	535.71	2 499.62	432.68	10.72	522.88	39.04	147.85	40.63	94.87	11.79	68.71	11.33	4 803.89
2-18	1 963.05	7 344.96	460.35	1322.83	112.08	4.27	98.78	3.41	13.68	3.04	6.84	0.63	2.67	0.30	711.75
2-19	2 216.04	7 261.10	371.15	952.94	40.50	0.98	34.87	1.57	4.42	1.54	3.27	0.29	3.09	0.22	330.30
2-20	2 174.82	3 017.43	122.15	249.90	9.76	0.59	15.09	1.27	7.19	1.43	4.05	0.19	2.59	1.11	192.30
2-21	1 242.26	1 815.70	99.70	244.59	10.45	0.66	20.35	1.16	2.05	1.93	4.54	0.16	2.35	0.37	194.83
2-22	1 828.16	2 306.60	121.46	293.37	16.24	0.78	22.31	1.95	7.70	2.39	4.41	0.86	6.95	0.86	242.09
2-23	326.20	107.38	2.86	4.11	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32
2-24	1 326.99	2 599.48	182.08	498.82	42.47	0.75	43.23	3.96	19.91	4.19	13.07	1.73	9.18	2.06	855.59
2-25	2 217.25	2 641.38	102.96	162.54	3.49	0.00	5.42	0.25	1.23	0.28	1.08	0.05	0.80	0.05	56.93
平均	861.17	1 776.08	124.00	393.93	50.96	1.93	69.31	6.15	29.96	8.88	24.00	3.49	20.57	3.40	975.69
3 号样品(黄铁矿化碎裂岩型方解石铀矿脉)															
3-01	147.00	352.53	36.35	165.04	60.19	2.29	85.58	13.29	77.97	14.34	41.16	6.05	63.71	7.08	673.15
3-02	155.54	280.87	35.73	152.65	45.97	1.76	68.06	13.49	67.24	13.47	38.76	6.44	46.31	6.80	525.14
3-03	153.74	297.24	32.81	141.22	43.72	2.57	79.24	12.09	59.85	17.56	39.40	6.26	50.37	5.27	589.59
3-04	155.10	276.68	34.35	146.69	33.29	2.17	67.02	10.01	74.20	18.91	34.40	5.79	51.92	5.83	527.36
3-05	29.31	62.30	8.48	45.42	18.64	0.82	74.50	7.48	34.57	13.36	20.14	2.14	33.63	4.12	436.54
3-06	36.62	104.94	12.08	51.12	17.36	0.76	49.04	6.66	35.30	11.13	26.13	4.31	29.46	2.78	425.43
3-07	26.99	75.57	8.61	39.19	15.16	0.83	43.45	4.37	26.48	6.89	18.17	2.37	17.55	2.87	320.31
3-08	41.37	130.17	14.42	79.91	31.38	1.73	68.99	11.55	61.85	13.35	36.22	6.08	40.54	4.91	549.58
3-09	59.18	170.10	19.52	110.77	42.96	2.26	80.90	11.03	62.47	13.89	39.16	5.51	34.95	4.71	554.65
3-10	40.15	121.33	13.30	63.83	27.87	1.48	69.19	10.75	53.69	10.89	33.52	5.35	36.95	4.15	544.31
3-11	113.26	235.89	29.22	133.17	52.29	2.86	95.16	15.23	76.38	15.94	43.43	6.89	48.15	5.83	622.00
3-12	73.71	157.41	18.83	78.16	33.43	1.97	67.30	10.98	56.19	12.31	33.84	4.36	32.58	4.36	513.05
3-13	71.94	135.77	16.12	73.83	25.51	1.41	44.38	8.70	44.06	11.27	26.96	3.97	26.98	3.73	418.48
3-14	94.10	145.57	16.00	71.75	31.11	1.36	44.42	8.43	38.56	9.23	22.33	3.14	30.42	3.93	374.52
3-15	76.29	135.10	15.02	81.12	30.93	1.80	55.38	7.53	43.05	9.90	25.73	4.47	25.14	4.34	439.17
3-16	134.43	118.00	11.04	50.67	18.30	1.01	47.46	7.38	38.14	9.49	25.40	3.00	25.29	3.25	442.17
3-17	43.60	93.90	10.51	50.56	14.17	1.11	47.41	7.42	36.21	7.47	23.93	3.09	23.40	3.50	432.89
3-18	95.51	80.20	9.92	34.82	11.11	0.67	37.50	4.75	23.96	6.91	17.18	2.42	12.21	2.96	348.80
3-19	151.80	120.70	10.99	45.21	12.84	0.69	38.69	4.88	25.20	5.94	15.42	2.17	15.51	2.13	321.64
3-20	97.25	98.35	9.21	50.88	15.09	0.96	27.63	5.95	25.37	8.09	18.26	3.23	20.26	2.86	382.50
3-21	239.92	236.29	27.71	137.32	54.29	3.46	84.17	13.69	77.52	15.51	41.34	6.70	40.57	5.42	460.42
3-22	363.69	306.04	34.98	156.28	65.23	4.04	128.90	22.32	94.35	21.62	51.92	8.76	52.47	5.85	570.80
3-23	293.69	257.57	26.94	130.32	55.46	2.79	99.65	14.18	64.47	16.25	36.58	7.24	38.42	5.28	450.73
3-24	52.12	65.70	6.84	36.69	10.94	0.70	29.08	3.08	19.85	6.41	10.64	1.08	16.32	1.39	233.33
3-25	179.33	223.88	23.45	94.43	25.77	1.58	51.85	8.19	38.78	10.29	28.40	4.59	30.11	4.24	414.03
3-26	207.45	285.09	28.16	118.38	28.55	1.42	51.86	7.00	42.26	10.50	28.05	4.00	32.67	2.53	389.95
3-27	133.94	152.98	15.75	69.27	20.68	1.51	47.32	7.22	34.38	9.57	26.99	3.79	25.96	3.93	365.88
3-28	229.30	186.57	17.31	79.31	24.41	1.17	47.48	6.49	37.01	9.68	28.54	4.34	23.68	4.48	324.59
3-29	55.06	165.81	19.41	98.34	39.32	2.13	86.73	14.14	66.23	16.65	40.23	5.78	41.81	7.81	565.37
3-30	718.60	685.89	70.82	227.46	87.77	4.58	95.97	16.49	83.91	18.52	42.12	7.64	46.70	5.35	355.78
3-31	472.55	454.56	52.15	208.29	101.40	5.44	119.21	21.88	109.84	25.24	56.49	8.02	64.54	6.55	499.28
平均	152.99	200.42	22.13	97.48	35.33	1.91	65.60	10.21	52.56	12.60	31.32	4.81	34.79	4.46	453.92

表 2 向阳坪矿床各类样品稀土元素值

Table 2 Analytical result of rare earth elements in different kinds of samples of the Xiangyangping uranium deposit

样品信息		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	资料来源
寒武纪板岩	WJ-1	42.40	83.90	9.28	32.50	6.49	1.49	5.78	0.96	5.54	1.20	3.41	0.48	3.22	0.46	31.80	石少华等,2011c
	WJ-2	24.40	44.10	5.47	19.50	3.59	0.76	3.20	0.58	3.37	0.77	2.30	0.36	2.53	0.37	20.40	石少华等,2011c
香草坪岩体	ZY14-22	22.20	48.10	6.07	22.07	5.18	0.34	4.27	0.82	4.77	0.92	2.52	0.47	3.24	0.41	26.70	王正庆,2018
	ZY14-27	27.20	56.90	7.11	26.70	6.06	0.38	5.59	1.05	6.11	1.16	3.16	0.60	3.93	0.54	33.80	王正庆,2018
	ZY14-53	31.10	64.40	7.74	29.40	5.77	0.51	4.21	0.71	3.91	0.62	1.51	0.26	1.54	0.20	17.20	王正庆,2018
	ZY14-58	27.70	67.90	7.29	27.30	5.48	0.47	4.02	0.60	3.82	0.71	1.68	0.24	1.61	0.25	18.10	王正庆,2018
	香草坪岩体	36.88	75.81	9.35	33.93	6.82	0.68	5.31	0.73	3.92	0.70	1.89	0.26	1.64	0.23	18.47	欧阳平宁,2012
豆牟山岩体	ZY14-28	25.80	53.80	6.82	25.80	5.91	0.33	4.91	1.00	5.91	1.29	3.49	0.59	4.17	0.56	38.30	王正庆,2018
	ZY14-29	39.80	86.10	10.80	40.50	8.49	0.39	6.54	1.23	7.32	1.39	3.86	0.69	4.34	0.63	39.80	王正庆,2018
	ZY14-44	21.80	48.00	6.17	23.00	5.42	0.15	4.56	0.89	5.70	1.03	2.86	0.55	3.73	0.49	30.60	王正庆,2018
	ZY14-45	8.78	19.30	2.52	9.13	2.55	0.07	1.98	0.52	3.51	0.73	2.05	0.41	3.17	0.39	20.70	王正庆,2018
	豆牟山岩体	16.24	33.06	4.24	15.24	3.70	0.23	3.33	0.58	3.71	0.72	2.12	0.33	2.31	0.33	20.28	欧阳平宁,2012
加里东期 岩体	ZY14-34	55.80	116.00	14.30	52.80	9.33	0.95	7.32	1.24	6.41	1.30	3.31	0.61	3.75	0.49	35.70	王正庆,2018
	ZY14-35	63.90	133.00	15.70	54.70	9.47	0.75	7.32	1.22	6.54	1.20	3.10	0.47	3.12	0.40	30.10	王正庆,2018
	ZY14-36	41.80	99.10	13.20	49.30	8.82	0.45	5.28	0.88	4.16	0.73	1.93	0.29	1.70	0.21	19.30	王正庆,2018
	ZY14-37	62.50	131.00	15.70	58.30	10.90	0.45	8.17	1.67	9.11	1.83	4.82	0.78	4.60	0.61	50.20	王正庆,2018
	ZY14-8	24.20	48.80	6.55	24.30	5.65	0.36	4.80	1.03	6.47	1.29	3.60	0.64	4.68	0.57	36.00	王正庆,2018
	ZY14-10	25.40	53.30	7.01	25.90	5.88	0.34	4.84	1.02	6.06	1.14	3.15	0.60	3.96	0.56	31.00	王正庆,2018
	ZY14-11	26.70	51.60	6.94	26.70	6.18	0.39	5.21	1.24	7.56	1.44	4.24	0.74	5.26	0.68	49.90	王正庆,2018
蚀变岩	ZY14-12	25.60	54.30	6.93	25.20	5.64	0.28	4.58	1.00	5.46	1.03	2.87	0.55	3.59	0.46	31.90	王正庆,2018
	ZY14-18	13.00	23.90	3.34	12.40	2.92	0.20	3.04	0.65	3.95	0.82	2.52	0.50	3.23	0.46	34.10	王正庆,2018
	SZJ-2	22.50	47.90	5.97	20.90	5.26	0.28	4.58	0.93	5.35	1.14	3.11	0.52	3.68	0.47	31.60	石少华等,2011c
	SZJ-3	16.10	27.20	3.81	12.90	3.04	0.22	2.57	0.54	3.16	0.71	2.02	0.35	2.39	0.34	19.50	石少华等,2011c
	B	22.48	49.16	6.21	23.26	5.41	0.33	4.61	0.97	5.51	1.07	3.03	0.54	3.74	0.47	31.68	王正庆等,2018c
	HEG1	27.72	57.40	6.80	25.18	5.12	0.46	4.32	0.74	4.03	0.71	2.02	0.32	2.11	0.32	22.06	陈琪等,2013
	HEG2	20.70	43.98	5.20	18.88	4.30	0.29	3.94	0.80	4.92	0.91	2.84	0.48	3.24	0.49	29.70	陈琪等,2013
	ZY14-19	17.80	36.00	4.53	17.10	4.29	0.33	4.62	1.02	7.35	1.59	4.57	0.85	6.35	0.78	61.70	王正庆,2018
	C	20.80	41.10	5.60	20.90	4.44	0.27	3.71	0.80	5.60	1.05	2.92	0.59	4.02	0.55	32.85	王正庆等,2018
	D	25.00	51.35	6.80	25.15	5.71	0.33	5.28	1.02	5.99	1.17	3.13	0.59	4.04	0.53	33.30	王正庆等,2018
	E	20.68	41.47	5.43	20.52	4.77	0.30	4.30	0.95	5.86	1.16	3.36	0.62	4.33	0.56	40.78	王正庆等,2018
	HEUO	23.62	52.16	5.95	21.32	4.77	0.32	4.45	0.86	5.09	0.94	2.86	0.48	3.25	0.50	30.44	陈琪等,2013
	矿石	26.78	53.81	6.58	24.05	5.19	0.45	4.51	0.70	3.93	0.75	2.17	0.32	2.17	0.30	-	欧阳平宁,2012
矿石矿物	P-1	110.65	193.92	25.54	108.43	26.78	1.63	26.53	5.43	30.71	6.28	16.09	2.17	13.86	1.71	81.65	石少华等,2011c
	P-2	85.72	348.01	35.57	160.25	49.14	3.42	48.17	10.18	56.92	10.70	27.74	3.97	26.08	3.44	167.45	石少华等,2011c
	P-3	67.88	278.58	28.03	121.44	40.15	2.88	35.24	8.36	47.33	8.38	23.11	3.45	21.48	2.81	142.26	石少华等,2011c
	2	861.17	1776.08	124.00	393.93	50.96	1.93	69.31	6.15	29.96	8.88	24.00	3.49	20.57	3.40	975.69	本文
	3	152.99	200.42	22.13	97.48	35.33	1.91	65.60	10.21	52.56	12.60	31.32	4.81	34.79	4.46	453.92	本文

注:引用数据均采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测试。

表3 向阳坪矿床各类样品稀土元素特征参数
Table 3 REE geochemical characteristics of different kinds of samples from the Xiangyangping uranium deposit

样品信息		ΣREE	LREE	HREE	L/H	(La/Yb) _N	(La/Lu) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	(Sm/Nd) _N	δCe	Y/Ho	tl	t3	TE _{1,3}
寒武纪 板岩	WJ-1	197.11	176.06	21.05	8.36	9.12	9.54	4.09	1.48	0.61	0.74	1.01	26.50	1.06	1.02
	WJ-2	111.30	97.82	13.48	7.26	6.68	6.83	4.26	1.05	0.57	0.68	0.92	26.49	1.00	1.00
香草坪 岩体	ZY14-22	121.38	103.96	17.42	5.97	4.74	5.61	2.69	1.09	0.72	0.22	0.99	29.02	1.09	1.10
	ZY14-27	146.49	124.35	22.14	5.62	4.79	5.22	2.81	1.18	0.70	0.20	0.98	29.14	1.05	1.08
	ZY14-53	151.88	138.92	12.96	10.72	13.98	16.10	3.38	2.26	0.60	0.31	1.00	27.74	1.04	1.09
	ZY14-58	149.07	136.14	12.93	10.53	11.91	11.47	3.17	2.06	0.62	0.30	1.15	25.49	1.14	1.07
香草坪岩体		178.15	163.47	14.68	11.14	15.57	16.60	3.39	2.68	0.62	0.34	0.98	26.39	1.06	1.02
	ZY14-28	140.38	118.46	21.92	5.40	4.28	4.77	2.74	0.97	0.70	0.19	0.97	29.69	1.04	1.06
豆乍山 岩体	ZY14-29	212.08	186.08	26.00	7.16	6.35	6.54	2.94	1.25	0.64	0.16	1.00	28.63	1.07	1.09
	ZY14-44	124.35	104.54	19.81	5.28	4.05	4.61	2.52	1.01	0.72	0.09	0.99	29.71	1.08	1.12
	ZY14-45	55.11	42.35	12.76	3.32	1.92	2.33	2.16	0.52	0.86	0.09	0.98	28.36	1.09	1.17
	豆乍山岩体	86.14	72.71	13.43	5.41	4.87	5.10	2.75	1.19	0.75	0.20	0.96	28.17	1.06	1.06
加里东期 岩体	ZY14-34	273.61	249.18	24.43	10.20	10.30	11.79	3.75	1.61	0.54	0.35	0.98	27.46	1.05	1.04
	ZY14-35	300.89	277.52	23.37	11.88	14.18	16.54	4.23	1.94	0.53	0.27	1.01	25.08	1.09	1.07
	ZY14-36	227.85	212.67	15.18	14.01	17.02	20.61	2.97	2.57	0.55	0.20	1.01	26.44	1.12	1.09
	ZY14-37	310.44	278.85	31.59	8.83	9.41	10.61	3.59	1.47	0.58	0.14	1.00	27.43	1.06	1.09
	ZY14-8	132.95	109.86	23.08	4.76	3.58	4.40	2.68	0.85	0.72	0.21	0.93	27.91	1.04	1.09
	ZY14-10	139.16	117.83	21.33	5.52	4.44	4.70	2.71	1.01	0.70	0.19	0.96	27.19	1.06	1.12
蚀变岩	ZY14-11	144.88	118.51	26.37	4.49	3.51	4.07	2.71	0.82	0.71	0.21	0.91	34.65	1.00	1.11
	ZY14-12	137.48	117.95	19.54	6.04	4.94	5.76	2.84	1.05	0.69	0.16	0.98	30.97	1.07	1.13
	ZY14-18	70.93	55.76	15.17	3.68	2.79	2.93	2.79	0.78	0.72	0.20	0.87	41.43	0.99	1.06
	SZ1-2	122.59	102.81	19.78	5.20	4.23	4.96	2.68	1.03	0.77	0.17	0.99	27.72	1.10	1.09
	SZ1-3	75.35	63.27	12.08	5.24	4.66	4.90	3.32	0.89	0.72	0.24	0.83	27.46	0.99	1.03
	B	126.79	106.85	19.94	5.36	4.16	4.95	2.60	1.02	0.72	0.20	1.00	29.61	1.07	1.12
	HEG1	137.24	122.67	14.56	8.42	9.09	9.03	3.39	1.69	0.63	0.29	1.00	31.25	1.05	1.08
	HEG2	110.97	93.35	17.62	5.30	4.43	4.34	3.02	1.01	0.70	0.21	1.02	32.64	1.07	1.12
	ZY14-19	107.19	80.05	27.13	2.95	1.94	2.36	2.60	0.60	0.77	0.23	0.96	38.81	1.03	1.08
	C	112.35	93.11	19.24	4.84	3.58	3.92	2.94	0.76	0.65	0.20	0.91	31.29	1.02	1.11
矿石矿物	D	136.09	114.34	21.75	5.26	4.28	4.88	2.74	1.08	0.70	0.18	0.94	28.46	1.05	1.08
	E	114.31	93.17	21.14	4.41	3.31	3.82	2.72	0.82	0.71	0.20	0.94	35.16	1.02	1.10
	HEUO	126.58	108.14	18.44	5.86	5.03	4.89	3.11	1.13	0.69	0.21	1.05	32.31	1.10	1.12
	矿石	131.71	116.86	14.85	7.87	8.54	9.24	3.23	1.72	0.66	0.28	0.97	—	1.04	1.00
	P-1	569.73	466.95	102.78	4.54	5.53	6.70	2.59	1.58	0.76	0.19	0.87	13.00	0.90	1.18
	P-2	869.31	682.11	187.20	3.64	2.28	2.58	1.09	1.53	0.94	0.21	1.51	15.65	1.33	1.26
矿石矿物	P-3	689.12	538.96	150.16	3.59	2.19	2.50	1.06	1.36	1.02	0.23	1.53	16.98	1.37	1.33
	2	3 373.83	3 208.07	165.76	19.35	28.99	26.21	10.59	2.79	0.40	0.10	1.30	109.84	1.13	0.61
	3	726.60	510.26	216.34	2.36	3.04	3.55	2.71	1.56	1.11	0.12	0.83	36.03	0.77	0.90

注: $\delta\text{Eu} = (\text{Eu})_{\text{N}} / (\text{Sm}_{\text{N}} \times \text{Gd}_{\text{N}})^{1/2}$; $\delta\text{Ce} = (\text{Ce})_{\text{N}} / (\text{La}_{\text{N}} \times \text{Pr}_{\text{N}})^{1/2}$ (Taylor and Mclellan, 1985); $\text{Ce}^* = \text{La}_{\text{N}}^{2/3} \times \text{Nd}_{\text{N}}^{1/3}$, $\text{Pr}^* = \text{La}_{\text{N}}^{1/3} \times \text{Nd}_{\text{N}}^{2/3}$, $\text{Tb}^* = \text{Gd}_{\text{N}}^{2/3} \times \text{Ho}_{\text{N}}^{1/3}$, $\text{Dy}^* = \text{Gd}_{\text{N}}^{1/3} \times \text{Ho}_{\text{N}}^{2/3}$, $\text{tl} = (\text{Ce}^* \times \text{Pr}^*)^{1/2}$, $\text{t3} = (\text{Tb}^* \times \text{Dy}^*)^{1/2}$, $\text{TE}_{1,3} = (\text{tl} \times \text{t3})^{1/2}$ (据 Inber, 1999)。

4 稀土元素组成特征

向阳坪铀矿床不同类型围岩、蚀变岩及矿石矿物的稀土元素含量见表2,稀土元素特征参数见表3,球粒陨石数据据 Anders 等(1989)。

寒武纪板岩稀土元素总量为 $111.30 \times 10^{-6} \sim 197.11 \times 10^{-6}$, 平均 154.21×10^{-6} ; 轻重稀土元素比值为 $7.26 \sim 8.36$, 平均 7.81 , LREE 相对富集, HREE 相对亏损; δEu 为 $0.68 \sim 0.74$, 平均 0.71 , 弱 Eu 异常; δCe 为 $0.92 \sim 1.01$, 平均 0.97 ; $\text{TE}_{1,3}$ 值为 $1.00 \sim 1.02$, 平均 1.01 。配分曲线呈右倾型(图3a)。

加里东期岩体稀土元素总量为 $227.85 \times 10^{-6} \sim 310.44 \times 10^{-6}$, 平均 278.20×10^{-6} ; 轻重稀土元素比值为 $8.83 \sim 14.01$, 平均 11.23 , 表明轻重稀土元素发生了明显分馏; $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 $2.97 \sim 4.23$, 平均 3.64 , 表明轻稀土元素分馏明显; $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值为 $1.47 \sim 2.57$, 平均 1.90 , 表明重稀土元素分馏弱; δEu 为 $0.14 \sim 0.35$, 平均 0.24 ; δCe 为 $0.98 \sim 1.01$, 平均 1.00 ; $\text{TE}_{1,3}$ 值为 $1.04 \sim 1.10$, 平均 1.08 , 配分曲线呈右倾型(图3b)。

香草坪岩体稀土元素总量为 $121.38 \times 10^{-6} \sim 178.15 \times 10^{-6}$, 平均 149.39×10^{-6} ; 轻重稀土元素比值为 $5.62 \sim 11.14$, 平均 8.79 , $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 $4.74 \sim 15.57$, 平均 10.20 , 表明轻重稀土元素发生了明显分馏; $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 $2.69 \sim 3.39$, 平均 3.09 , 表明轻稀土元素分馏明显; $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值为 $1.09 \sim 2.68$, 平均 1.85 , 表明重稀土元素分馏弱; δEu 为 $0.22 \sim 0.34$, 平均 0.27 ; δCe 为 $0.98 \sim 1.15$, 平均 1.02 ; $\text{TE}_{1,3}$ 值为 $1.02 \sim 1.10$, 平均 1.07 , 配分曲线呈右倾型(图3c)。

豆乍山岩体稀土元素总量为 $55.11 \times 10^{-6} \sim 212.08 \times 10^{-6}$, 平均 123.61×10^{-6} ; 轻重稀土元素比值为 $3.32 \sim 7.16$, 平均 5.31 , 表明轻重稀土元素发生了明显分馏; $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 $2.16 \sim 2.94$, 平均 2.62 , 表明轻稀土元素分馏明显; $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值为 $0.52 \sim 1.25$, 平均 0.99 , 表明重稀土元素分馏弱; δEu 为 $0.09 \sim 0.20$, 平均 0.15 ; δCe 为 $0.96 \sim 1.00$, 平均 0.98 ; $\text{TE}_{1,3}$ 值为 $1.06 \sim 1.17$, 平均 1.10 , 配分曲线呈右倾型(图3d)。存在加里东期岩体→香草坪岩体→豆乍山岩体 ΣREE 、 LREE/HREE 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Lu})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 5个特征值逐渐变小特征, 表明随着岩浆分异演化, 轻重稀土、轻稀土及重稀土元素

分馏程度逐渐减弱。

蚀变岩稀土元素总量为 $70.93 \times 10^{-6} \sim 144.88 \times 10^{-6}$, 平均 120.05×10^{-6} ; 轻重稀土元素比值为 $2.95 \sim 8.42$, 平均 5.38 ; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 $1.94 \sim 9.09$, 平均 4.6 ; $(\text{La}/\text{Lu})_N$ 值为 $2.36 \sim 9.24$, 平均 5.04 ; $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 $2.60 \sim 3.39$, 平均 2.88 ; $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值为 $0.60 \sim 1.72$, 平均 1.03 ; $(\text{Sm}/\text{Nd})_N$ 值为 $0.63 \sim 0.77$, 平均 0.71 ; δEu 为 $0.16 \sim 0.29$, 平均 0.21 ; δCe 为 $0.83 \sim 1.05$, 平均 0.96 ; $\text{TE}_{1,3}$ 值为 $1.00 \sim 1.13$, 平均 1.09 。

花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式(图3b、3c、3d)显示, 加里东期岩体与香草坪岩体、豆乍山岩体具有类似的配分模式, 为轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损及 Eu 负异常明显的右倾型, 显示轻重稀土元素分馏明显, 轻稀土元素之间分馏明显, 重稀土元素之间分馏较弱, 具有较强的 Eu 负异常, 反映造岩过程中母岩浆母体经历过分异作用, 花岗岩熔体存在斜长石的结晶分异, 也可能是继承原岩的特征。可见, 3种岩体具有类似或者相近的源区。

蚀变岩的稀土元素球粒陨石标准化配分模式(图3e、3f)与香草坪、豆乍山岩体类似, 具有轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损及 Eu 负异常明显的右倾型特征, 热液蚀变作用基本未改变原岩稀土元素配分特征。整体上, 存在加里东期岩体→香草坪岩体→豆乍山岩体→蚀变岩 ΣREE 、 LREE/HREE 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Lu})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 5个特征值逐渐变小特征, 表明热液蚀变作用伴随着新鲜岩石中稀土元素的活化转移, 造成稀土元素各特征值呈规律性变化。根据蚀变岩稀土元素配分曲线差异特征, 可将蚀变岩分为4类: 图3e为第1类, 图3f中样品 ZY14-18 和 SZJ-3 为第2类, HEG1 和矿石为第3类, ZY14-19 为第4类。第3类→第1类→第4类→第2类表现出 ΣREE 由 $134.47 \times 10^{-6} \rightarrow 126.53 \times 10^{-6} \rightarrow 107.19 \times 10^{-6} \rightarrow 70.13 \times 10^{-6}$ 逐渐减少, LREE/HREE 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Lu})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值由第3类→第1类→第2类→第4类逐渐减少。可见热液蚀变存在多期作用, 从而导致蚀变岩稀土元素特征存在一定差异。

沥青铀矿(P-1、2、3号样品)稀土元素总量为 $569.73 \times 10^{-6} \sim 3373.83 \times 10^{-6}$, 平均 1556.72×10^{-6} ; 轻重稀土元素比值为 $2.36 \sim 19.35$, 平均 8.75 ; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 $3.04 \sim 28.99$, 平均 12.52 ; $(\text{La}/\text{Lu})_N$ 值为 $3.55 \sim 26.21$, 平均 12.15 ; $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 $2.59 \sim 10.59$, 平均 5.30 ; $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值为 $1.56 \sim$

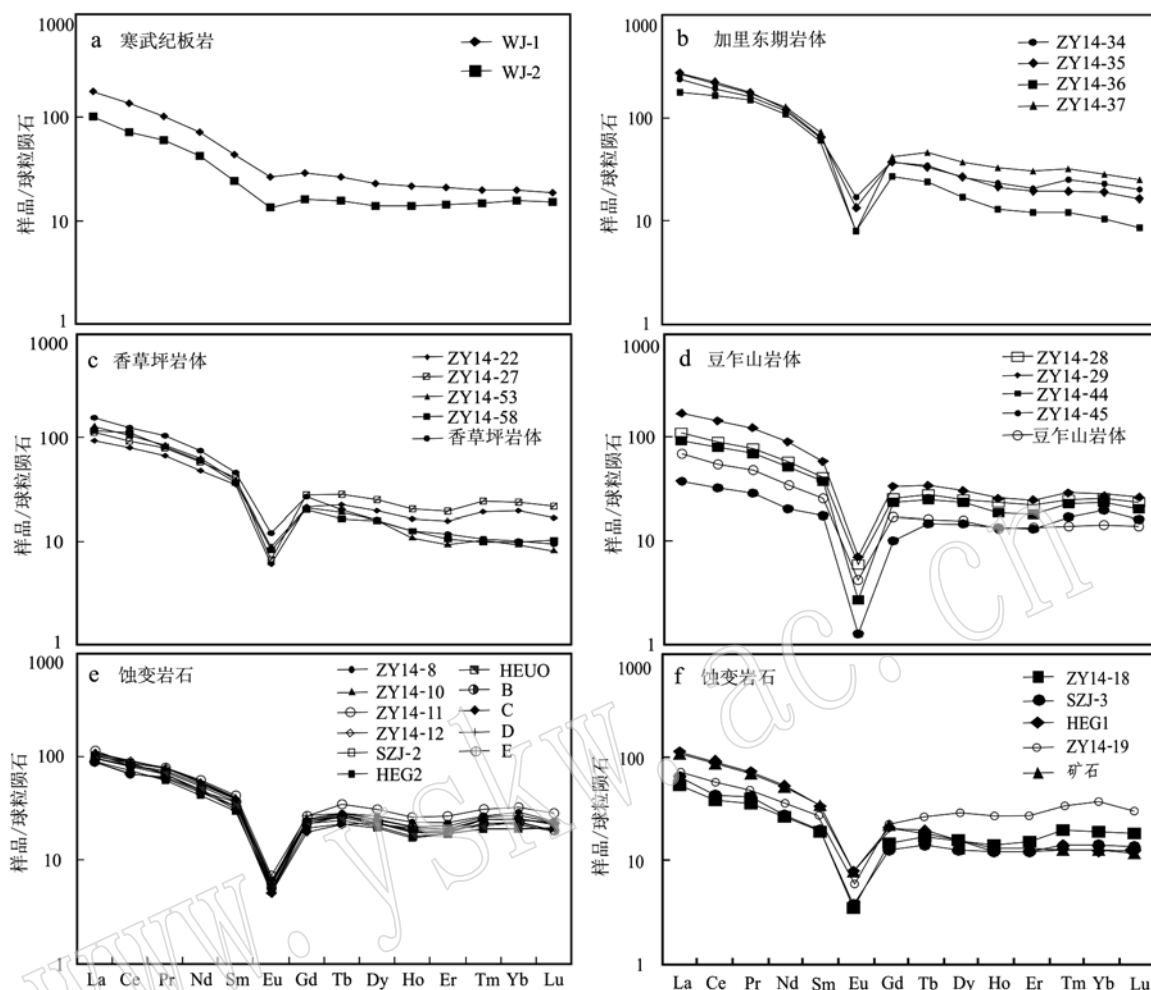


图3 寒武纪地层、新鲜花岗岩及蚀变岩石稀土元素球粒陨石配分曲线

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of Cambrian strata, fresh granite and altered rock

2.79, 平均1.98; $(\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{N}}$ 值为 0.40 ~ 1.11, 平均 0.76; δEu 为 0.10 ~ 0.19, 平均 0.14; δCe 为 0.83 ~ 1.30, 平均 1.00; $\text{TE}_{1,3}$ 值为 0.83 ~ 1.00, 平均 0.89。沥青铀矿稀土元素表现出两种特征: ① 2 号样品 LREE 富集, HREE 亏损, LREE 与 HREE 之间分馏程度较大, Eu 负异常显著, Ce 弱的正异常, 配分曲线呈右倾型; ② 3 号和 P-1 号样品稀土元素特征相似, LREE 相对富集, HREE 相对亏损, 两者分馏程度较小, Eu 负异常明显, Ce 负异常弱, 配分曲线近似呈海鸥型(图 4a)。矿石矿物 ΣREE 是地层、岩体 ΣREE 几倍以上, 沥青铀矿中 ΣREE 最高达 $3\,373.83 \times 10^{-6}$ 。

铀黑(P-2、P-3 号样品)稀土元素总量为 $689.12 \times 10^{-6} \sim 869.31 \times 10^{-6}$, 平均 779.22×10^{-6} ; 轻重稀土元素比值为 3.59 ~ 3.64, 平均 3.62; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.19 ~ 2.28, 平均 2.24; $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}}$ 值为 2.50 ~

2.58, 平均 2.54; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 1.06 ~ 1.09, 平均 1.08; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 1.36 ~ 1.53, 平均 1.45; $(\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{N}}$ 值为 0.94 ~ 1.02, 平均 0.98; δEu 为 0.21 ~ 0.23, 平均 0.22; δCe 为 1.51 ~ 1.53, 平均 1.52。 t_1 为 1.33 ~ 1.37, 平均 1.35; t_3 为 1.18 ~ 1.29, 平均 1.24; $\text{TE}_{1,3}$ 值为 1.26 ~ 1.33, 平均 1.30。铀黑稀土元素中 LREE 相对富集, HREE 相对亏损, 两者之间分馏程度较弱, Eu 负异常明显, Ce 正异常明显, $\text{TE}_{1,3} > 1.10$ 显示样品具典型 M 型(图 4b)四分组效应。暗示铀黑在形成时或形成后经历了比围岩及沥青铀矿更为强烈的水-岩相互作用过程(张展适等, 2005a)。

沥青铀矿和铀黑稀土元素配分曲线各不相同, 表现出各自特性。与研究区出露的寒武纪地层、加里东期岩体、香草坪岩体及豆乍山岩体稀土元素特

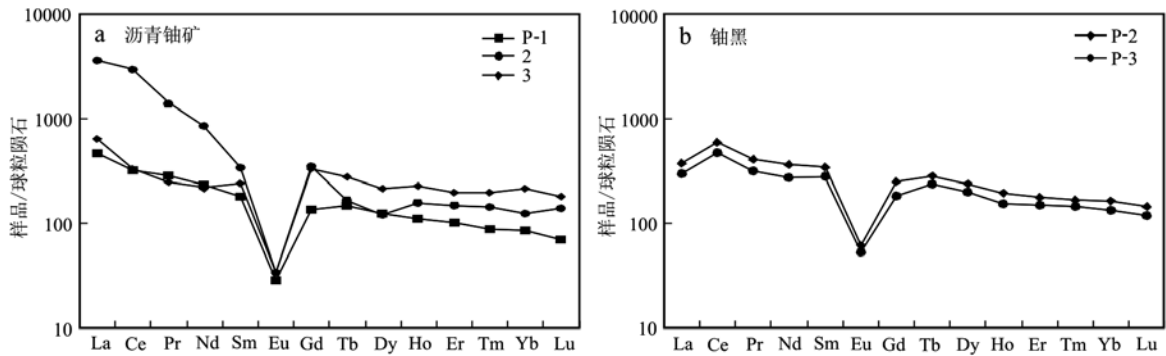


图 4 矿石矿物稀土元素球粒陨石配分曲线图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of ore minerals

征值及配分曲线存在较大差异,沥青铀矿和铀黑稀土元素总量是地层、岩体及蚀变岩稀土总量的 1.8 倍至几十倍。根据矿石矿物稀土元素特征来表征成矿热液性质最为恰当,可见,成矿热液与围岩可能只是空间上耦合,亲缘关系不明显。这与向阳坪铀矿床矿体产出与构造关系更为密切、对岩体选择性不明显的地质事实相符。

5 讨论

5.1 围岩稀土元素特征

稀土元素难溶,相对稳定,只随陆源碎屑沉积物搬运,可以指示物源区的地球化学性质,是分析沉积

物源区的可靠指标(刘宁等, 2009)。研究区寒武纪浅变质岩 δEu 值(0.71)介于地壳(0.60)和上地幔(0.79)之间,显示轻度亏损; δCe 值(0.97)高于大陆地壳(0.79),呈弱负异常。 δCe 平均值 0.97,高于大陆地壳(0.79),具微弱异常(吴春林等,1993)。上地壳的稀土元素具有轻稀土元素富集、重稀土元素含量变化较小和明显的负 Eu 等特征,且陆壳 LREE/HREE 平均值为 9.53,这些特征与研究区浅变质岩稀土元素特征相似,说明浅变质岩物源可能来自上地壳。且稀土元素总量高、轻稀土元素富集、Eu 中等负异常及轻重稀土元素比值等与 Bhatia(1985)总结的不同构造背景下稀土元素特征值中大陆岛弧基本相同,推测浅变质岩形成于大陆岛弧的构造环境(表 4)。

表 4 不同构造背景下稀土元素含量 ($w_B/10^{-6}$) 及比值特征
Table 4 The content ($w_B/10^{-6}$) and ratio of REE in different tectonic settings

大地构造背景	物源区类型	La	Ce	ΣREE	La/Yb	LREE/HREE	Eu/Eu *
大洋岛弧	未切割的岩浆弧	8 ± 1.7	19 ± 3.7	58 ± 10	4.2 ± 1.3	3.8 ± 0.9	1.04 ± 0.11
大陆岛弧	切割的岩浆弧	27 ± 4.5	59 ± 8.8	146 ± 20	11 ± 3.6	7.7 ± 1.7	0.79 ± 0.13
活动陆缘	抬升基地	37	78	186	12.6	9.1	0.60
被动陆缘	克拉通内部高地	39	85	210	15.9	8.5	0.56
研究区		24.4 ~ 42.4	44.1 ~ 83.9	111.3 ~ 197.1	6.7 ~ 9.1	7.3 ~ 8.4	0.68 ~ 0.74

注:数据来自 Bhatia(1985)。

加里东期岩体与香草坪岩体、豆乍山岩体具有类似的配分模式,指示 3 种岩体具有类似或者相近的源区,均为典型 S 型花岗岩,其中豆乍山、香草坪岩体具有高($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i、低 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 特征,为富含粘土的泥质沉积岩、贫粘土的砂质沉积岩部分熔融形成(舒良树, 2012; Zhao *et al.*, 2013, 2016)。岩体与寒武纪浅变质岩具有相似的稀土元素特征参数及配分模式,均表现出 Eu 负异常特征,且寒武纪浅变

质岩、加里东期岩体、香草坪岩体、豆乍山岩体稀土元素 Y/Ho 平均值依次为 26.50→26.60→27.56→28.91,比值范围狭窄,指示不同时代岩体具有相同物质来源(Bau and Dulski, 1995)。

5.2 成矿流体特征及迁移方式

花岗岩中 U 主要赋存于晶质铀矿、铀石等矿物中,其中晶质铀矿占花岗岩全岩铀的 85% 以上(杜乐天, 2001)。研究区寒武系清溪组基底地层,铀含

量为 8.8×10^{-6} , 是各类沉积岩平均铀含量的 2~5 倍(张金带等, 2014)^①; 豆乍山岩体铀平均含量为 16.24×10^{-6} ($n=11$)(石少华等, 2011a); 香草坪岩体铀平均含量为 6.97×10^{-6} ($n=5$)(石少华等, 2011a), 远高于中国东部上地壳铀的平均值(1.55×10^{-6})(Gao *et al.*, 1999)。矿区围岩高铀背景值是围岩提供铀源的重要指标之一, 但是围岩高铀背景值是否因为铀矿床存在而引起还是高铀背景值导致铀矿床形成, 目前似乎并无确切的答案。

蚀变岩的稀土元素分布模式受水/岩值、蚀变程度和所形成的次生矿物种类控制, 且当蚀变强度低和次生矿物种类较少时, 即流体/岩石比值较低时, 产生与新鲜岩石近平行的稀土元素分布模式(Hopf, 1993)。其中低温蚀变水云母化基本不改变原岩稀土元素的含量和配分特征, 但叠加赤铁矿化时, 伴随稀土元素的活化转移, REE 总量有所降低(吴德海等, 2018)。张展适等(2005b)提出只有经历蚀变作用才能活化花岗岩中赋存的铀, 未经蚀变作用不能成矿。包志伟等(1998)研究表明, 蚀变围岩的稀土元素分布模式受原岩的制约, 但均显示出明显的稀土元素丢失和轻重稀土元素的分异。

研究区蚀变岩稀土元素总量及各特征值均比新鲜围岩有所降低, 指示蚀变过程中存在不同程度的水-岩反应和热液地球化学性质的变化, 导致了蚀变岩 REE 的差异。香草坪和豆乍山岩体经热液交代蚀变后, 三者具有相似的稀土元素配分模式, 但存在香草坪岩体 → 豆乍山岩体 → 蚀变岩 Σ REE、

LREE/HREE、 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Lu)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 、 $(Gd/Yb)_N$ 、 δCe 等特征值逐渐变小, δEu 变化特征不明显。热液蚀变作用引起原岩稀土元素活化转移, 导致蚀变岩稀土元素特征值变化, 但稀土元素配分模式严格受原岩制约, 蚀变岩继承了原岩稀土元素配分模式。引起稀土元素这一变化特征的原因, 可能存在两种假设(图5): 假设①, 从热液蚀变作用开始, 岩体中稀土元素被热液流体活化-迁出, 并在岩体-构造有利部位大规模聚集, 沿两侧往中心水平迁移, 围岩中活化-迁移出的稀土元素是成矿作用过程中主要的稀土元素提供者; 假设②, 成矿过程中, 成矿热液本身富含稀土元素, 与此同时, 热液引起围岩蚀变, 蚀变围岩中稀土元素被活化-迁出, 带入至成矿热液, 构造作为热液流动通道, 表现出深部往浅部垂向迁移为主的特征, 稀土元素含量主要受控于成矿热液本身携带的稀土元素含量, 围岩提供的稀土元素为辅。可见, 假设①将引起稀土元素在蚀变岩中聚集, 使蚀变岩富集稀土元素, 而实验数据却与此相悖, 蚀变岩中稀土元素总量相比新鲜岩石有所降低。再者, 成矿流体一般从高热场往低热场迁移, 构造破碎带中心热场明显高于外围围岩, 即在构造和流体的共同作用下, 成矿流体只能从构造破碎带中心向两侧发生迁移(吴仁贵等, 2018)。可见假设②比较符合蚀变岩中稀土元素总量降低及矿石矿物中稀土元素总量较高的特征, 蚀变及高铀背景值围岩是伴随成矿作用形成的产物, 铀来自深部而非围岩。

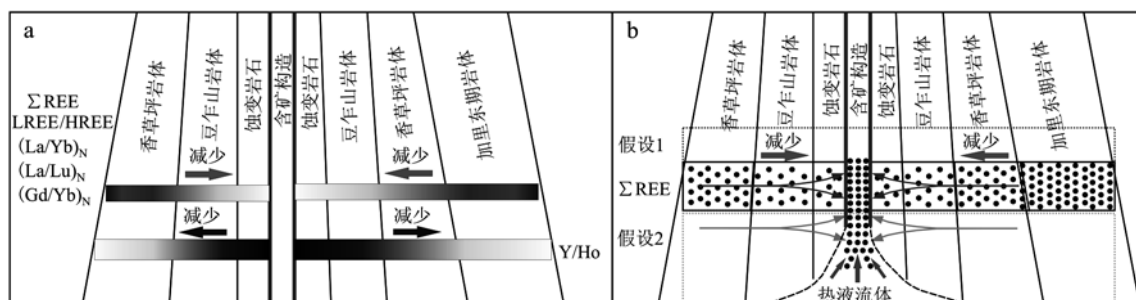


图5 蚀变岩石中稀土元素迁移模式图

Fig. 5 Migration pattern of rare earth elements in altered rocks

a—水平迁移模式; b—垂向迁移模式

a—horizontal migration type; b—vertical migration type

矿石矿物稀土元素原位分析是研究成矿溶液最直接、有效的方法, 沥青铀矿和铀黑是重要的矿石矿

物, 其稀土元素特征可以代表成矿流体特征。Ce、Eu 在氧化还原条件下呈现不同的价态, 导致在不同地

① 张金带, 李子颖, 蔡煜琦. 2014. 中国区域成矿带划分和铀资源的区位优势. 北京: 中国核工业地质局, 158~160.

球化学环境中产生不同程度的分馏,从而形成 Ce、Eu 的异常(涂光炽, 1998; 马英军等, 2004)。Eu 是稀土元素中具有重要意义的变价元素,在成矿流体中通常呈 Eu^{3+} ,在相对还原条件下部分转变为 Eu^{2+} ,与其他稀土元素分离;同时在相对封闭的热液系统向开放系统转换后, Eu^{2+} 比其他稀土元素更容易被含水溶液带走(聂爱国, 1998)。矿石矿物中 Eu 呈明显负异常,铈成矿作用形成相对还原环境,成矿流体中 3 价 Eu 在还原环境还原成 2 价 Eu,从而 Eu 与其他稀土元素分离,造成矿石矿物明显的负 Eu 异常。这与热液型铈矿床中铈以 +6 价酰类形式迁移、经还原作用铈以 +4 价沉淀成矿认识一致,也与石少华等(2011a, 2011b)对苗儿山沙子江矿床研究提出的大量还原剂 S^{2-} 是主导铈沉淀因素之一的成果认识相同,与沥青铈矿 δEu 为 0.10 ~ 0.19、铈黑 δEu 为 0.21 ~ 0.23 特征一致。其中豆乍山岩体($\delta\text{Eu} = 0.09 \sim 0.20$)Eu 负异常较加里东期($\delta\text{Eu} = 0.14 \sim 0.35$)、香草坪($\delta\text{Eu} = 0.20 \sim 0.34$)岩体更为明显,向阳坪铈矿床中豆乍山岩体相比香草坪岩体作为富矿空间更为明显,可能铈矿化对 Eu 负异常程度较大的岩体选择性更强。

铈黑中稀土元素配分曲线具明显的 M 型四分组效应,与新鲜围岩、蚀变岩稀土元素配分模式截然不同,成矿流体与围岩没有明显亲缘关系。赵振华等(1992, 1999)、Irber(1999)提出花岗质熔体与富挥发分(F、Cl、 CO_2)流体的相互作用是造成稀土元素四分组效应的重要控制因素,富 F 体系中四分组效应最强(张德会等, 2004),Takahashi 等(2002)研究表明水-岩作用是造成 M 型四分组效应共轭分布的原因。 δCe 主要受控于体系的氧化还原环境,在还原环境中,Ce 主要以 Ce^{3+} 形式存在, $\delta\text{Ce} > 1$;在氧化环境中,Ce 以 Ce^{4+} 形式存在, $\delta\text{Ce} < 1$ (王中刚等, 1989; 余关美等, 2015)。研究区矿岩时差较大(100 ~ 150 Ma),岩浆热液存在的可能性较小,大气降水与地下热液混合更为符合研究区地质事实,断裂构造形成相对开放的系统使混合后的热液氧分压升高,热液系统由相对还原的环境向氧化环境转换,使热液中部分低价态的 Ce^{3+} 氧化成高价态的 Ce^{4+} 。 Ce^{4+} 半径比 Ce^{3+} 小,具有惰性强、不易被热液迁移等特点,以高价铈氧化物形式在新生(次生)矿物结构中或其表面与其他稀土元素发生分离,在新生(次生)矿物中形成 Ce 正异常(Nesbitt and Wayne, 1979; 包志伟等, 1998; 聂爱国, 1998; 黄成敏等,

2002; 石少华等, 2010),这与铈黑是沥青铈矿经过氧化而来相互佐证。沥青铈矿在氧化环境中,3 价 Ce 氧化成 4 价 Ce,Ce 进而与其他稀土元素发生分离,造成氧化沥青铈矿(铈黑)Ce 正异常,故铈黑稀土元素配分曲线呈 M 型四分组效应是水-岩作用造成,与华仁民(1993)提出的热液成矿作用的实质是水-岩相互作用观点一致。

沥青铈矿和铈黑中 $\sum\text{REE}$ 、LREE、HREE 均比新鲜围岩、蚀变岩高。可能是 U 与稀土元素发育广泛类质同像替换,+4 价铈与 REE^{3+} 的离子半径、离子类型及键性相似,在成矿热液中 U 与 REE 以可溶性碳酸根络合物 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 、 $[\text{REE}(\text{CO}_3)_3]^{3-}$ 和氟酸铈酰络合物 UO_2F_2 、 $[\text{UO}_2\text{F}_3]^-$ 、 $\text{UO}_2\text{F}_4^{2-}$ 、 REEF_3 、 $[\text{REEF}_4]^-$ 和 REEF_5^{2-} 的形式迁移(倪师军等, 1987; 胡欢等, 2013)。矿床成矿期矿物组合表现为硅化+萤石+方解石+黄铁矿化+赤铁矿化共生现象可以支持这一观点。可见,成矿热液富铈、富稀土元素,与倪师军等(1987)对贵东 337 铈矿床稀土元素研究提出的含铈热液流体中 REE 同 U 一起呈 CO_3^{2-} 、 F^- 络合物形式迁移、分异和沉淀的观点相符。

5.3 对成矿物质来源的约束

在地质过程中,Sm-Nd 具有较强的抗干扰能力,体系保持相对独立的封闭状态,研究对象中 Sm/Nd 值可作为指示成矿物源和成矿作用特征的重要指标(杨占兴等, 1991)。研究区地层、岩体、蚀变岩及矿石矿物中 Sm-Nd 双对数图解上(图 6a),相关系数 $R^2 = 0.9433$,指示 Sm-Nd 之间相关性明显。其中地层、岩体及蚀变岩石集中位于趋势线左下方;沥青铈矿和铈黑分布在趋势线右上方。在 $\sum\text{REE}$ 与 LREE/HREE 对比分析图(图 6b)中(Mercadier *et al.*, 2011),非常清晰地可以分为两类:第 1 类(矿石矿物),具有较高稀土元素含量($569.73 \times 10^{-6} \sim 3373.83 \times 10^{-6}$),各点较为分散,指示成矿流体可能存在多期;第 2 类(新鲜围岩和蚀变岩),稀土元素含量较低($55.11 \times 10^{-6} \sim 310.44 \times 10^{-6}$)。以上分析说明,地层、岩体、蚀变岩作为成矿物源的可能性较小。

在图 7a 中,围岩与蚀变岩中 $\sum\text{REE} - \text{Y}$ 较为离散(图 7a1),Y 和 $\sum\text{REE}$ 含量较低,但相对矿石矿物较集中;矿石矿物 Y 和 $\sum\text{REE}$ 富集,与围岩、蚀变岩存在明显差异,亲缘性不明显。在图 7b、7c、7d 中,矿石矿物同样与围岩、蚀变岩投点表现出较大差异,且矿石矿物投点较为分散,成矿流体(矿石矿物)与

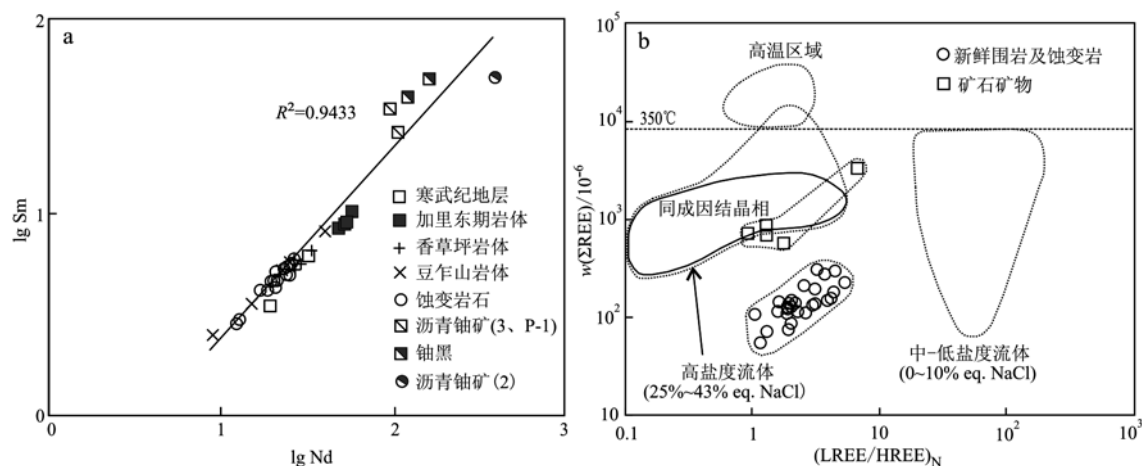
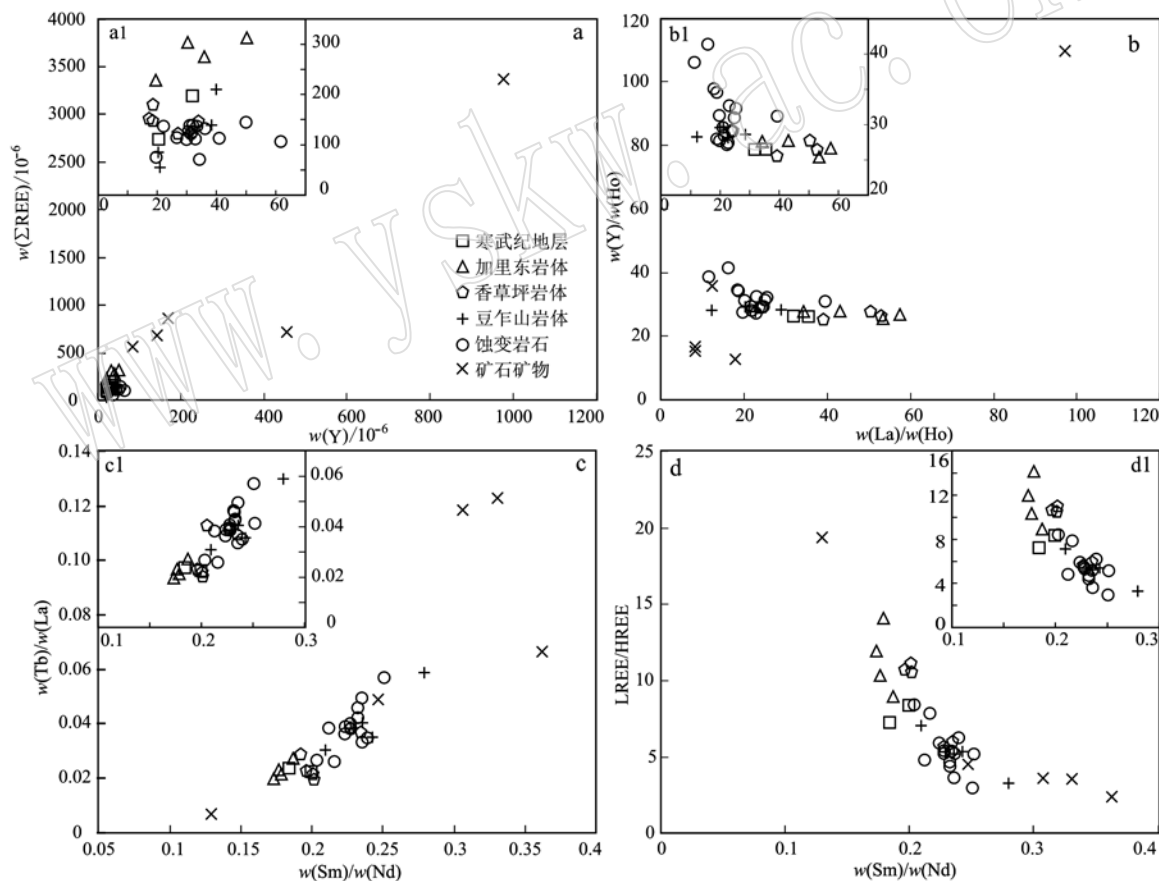
图6 各样品 Sm-Nd 双对数图解(a)和 $\Sigma \text{REE}-(\text{LREE}/\text{HREE})_N$ (b) 图解Fig. 6 Sm-Nd double logarithmic (a) and $\Sigma \text{REE}-(\text{LREE}/\text{HREE})_N$ diagram (b) of all involved samples

图7 各样品相关图解

Fig. 7 Related diagrams of each sample

围岩亲缘性不显著;在图 7b1、7c1、7d1 中围岩、蚀变岩投点表现出较好的相关性,表明围岩可能具有相同来源(Bau and Dulski, 1995),热液蚀变未改变岩石稀土元素配分模式,蚀变岩基本保留围岩稀土元

素特征。

总体上,矿石矿物在图 6、图 7 中较为分散,表明成矿热液存在多阶段,与研究区铀矿床存在 104 ~ 97 Ma、75 ~ 70 Ma 及 53 Ma 等多期成矿作用相符(石少

华等, 2010; Luo *et al.*, 2015)。矿石矿物富集 Y 和 REE, 可见成矿作用过程中伴随 Y 元素的急剧增加和 REE 的富集(Vinokurov *et al.*, 2017)。矿石矿物与围岩、蚀变岩在图 6、图 7 中差异明显, 亲缘性不显著, 且研究区花岗岩型铀矿床存在较大矿岩时差, 成矿作用发生在香草坪和豆乍山岩体中可能只是空间上的耦合关系, 成矿物质与围岩关联不大。陈正乐等(2013)研究相山铀矿控矿因素提出断裂构造通过控制岩石的变形行为控制了矿体产出, 进而解释了所谓的“岩性控矿”现象; 巫建华等(2017)提出的热液型铀矿对岩浆岩的岩性岩相没有选择性, 铀矿床明显受断裂构造(断层、破裂带和裂隙群)控制, 成矿作用发生在断裂构造流动的水溶液中, 本文与上述认识一致。

6 结论

(1) 向阳坪铀矿床围岩和蚀变岩的稀土元素配分模式相似, Y/Ho 值范围狭窄, 显示明显继承性, 指示其具有相同物源; 成矿流体引起围岩稀土元素整体性统一变化, 蚀变作用弱。

(2) 矿石矿物稀土元素富集显著, 稀土元素配分模式与围岩、蚀变岩存在较大差异, 两者亲缘性不明显; 蚀变及高铀背景是伴随成矿作用留下的产物; 矿石矿物稀土元素特征多样, 铀黑稀土元素显示明显的 M 型四分组效应。

(3) 成矿流体具多阶段、富 U-Y-REE 特征, 铀主要来自深部热液, 围岩贡献不显著; 矿床定位受构造-岩体联合控制, 矿体规模、形态取决于构造规模、产状。

致谢 野外工作得到了核工业二三〇研究所所长范立亭、科技质量办主任欧阳平宁及苗儿山项目组人员的帮助, 论文撰写得到中国地质科学院地质力学研究所陈正乐研究员的指导, 在此表示感谢。同时, 十分感谢两名审稿人和编辑老师专业、细致的审稿, 使笔者受益匪浅!

References

- Anders E and Grevesse N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1): 197 ~ 214.
- Bao Zhiwei and Zhao Zhenhua. 1998. Rare-earth element mobility during ore-forming process of Dongping gold deposit[J]. *Geochimica*, 27(1): 81 ~ 90(in Chinese with English abstract).
- Bau M and Dulski P. 1995. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviours in fluorine-rich hydrother malfluids[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 119(2): 213 ~ 223.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mud rocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45(1 ~ 2): 97 ~ 113.
- Bi Xianwu and Hu Ruizhong. 1998. REE geochemistry of ore-forming fluids of the Ailaoshan gold metallogenic belt[J]. *Geological Review*, 44(3): 264 ~ 269(in Chinese with English abstract).
- Chen Qi, Xiao Jianjun, Fan Liting, *et al.* 2013. Geochemical characteristics of trace and rare earth elements in Xiangyangping Uranium Deposit of Guangxi[J]. *Uranium Geology*, 29(3): 152 ~ 161(in Chinese with English abstract).
- Chen Youwei, Hu Ruizhong, Luo Jincheng, *et al.* 2019. In-situ mineral chemistry and chronology analyses of the pitchblende in the Shazijiang uranium deposit and their implications for mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2 679 ~ 2 694 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengle, Wang Ping'an, Wang Yong, *et al.* 2013. Ore-controlling tectonic analysis and ore-prospecting in Shannan mining area of Xiangshan Uranium Ore-field, Jiangxi[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 35(2): 8 ~ 18(in Chinese with English abstract).
- Cuney M. 2009. The extrem ediversity of uranium deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 44(1): 3 ~ 9.
- Du Letian. 2001. Chinese Hydrothermal Uranium Mineralization Basic Regularity and General Hydrothermal Metallogeny [M]. Beijing: Atomic Energy Press(in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 54(4): 197 ~ 213.
- Fan H R, Hu F F, Yang K F, *et al.* 2006. Fluid unmixing/immiscibility as an ore-forming process in the giant REE-Nb-Fe deposit, Inner-Mongolian, China: Evidence from fluid in clusions[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 89(1 ~ 3): 104 ~ 107.
- Gao S, Ling W L, Qiu Y M, *et al.* 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archeanmet as ediments from the Kongling high-gradeter rain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic volution and redistribution of REE during crustal anatexis[J].

- Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(13~14): 2 071 ~ 2 088.
- Hopf S. 1993. Behaviour of rare earth elements in geothermal systems of New Zealand[J]. Journal of Geochemical Exploration, 47(1~3): 333 ~ 357.
- Hu Huan, Wang Rucheng, Chen Weifeng, *et al.* 2012. Study on uranium resource minerals of Douzhashan uranium-bearing Granite, Northeastern Guangxi[J]. Geological Review, 58(6): 1 056 ~ 1 068 (in Chinese with English abstract).
- Hu Huan, Wang Rucheng, Chen Weifeng, *et al.* 2013. Timing of hydrothermal activity as associated with the Douzhashan uranium-bearing granite and its significance for uranium mineralization in northeastern Guangxi, China[J]. China Sci. Bull., 58(36): 4 319 ~ 4 328 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin. 1993. Studies on the role and significance of fluids in the forming processes of ore deposits[J]. Journal of Nanjing University (Earth Sci.), 5(3): 351 ~ 360 (in Chinese with English abstract).
- Huang Chengmin and Gong Zitong. 2002. REE geochemistry of hypergenesis in basalt—the take distributing region of northern Hainan is land as the example[J]. Journal of Mountain Science, 20(1): 70 ~ 74 (in Chinese with English abstract).
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(3~4): 489 ~ 508.
- Li Wuwei, Wang Gan, Chen Weifeng, *et al.* 2010. Geochemical and chronological characteristics of Xiangcaoping granite pluton in Miao'ershan area[J]. Uranium Geology, 26(4): 215 ~ 221 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuwei, Wang Gan, Chen Weifeng, *et al.* 2011. Discussion on shear zones and uranium metallogenesis in Xiangyangping area of Guangxi Province[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 36(5): 1 ~ 7 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ning, Fan Dehua, Hao Yunqing, *et al.* 2009. REE analysis method and application-taking source rocks in Yong'an region of the Dongying sag, the Bohai bay basin as example[J]. Petroleum Geology Experiment, 31(4): 427 ~ 432 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. Insitu analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257(1): 34 ~ 43.
- Luo J C, Hu R Z and Shi S H. 2015. Timing of uranium mineralization and geological implications of Shazijiang granite-hosted uranium deposit in Guangxi, South China: New constraint from chemical U-Pb age[J]. Journal of Earth Science, 26(6): 911 ~ 919.
- Ma Yingjun, Huo Runke, Xu Zhifang, *et al.* 2004. REE behavior and influence factors during chemical weathering[J]. Advance in Earth Science, 19(1): 87 ~ 94 (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[J]. Terra Nova, 23(4): 264 ~ 269.
- Nesbitt and Wayne H. 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite[J]. Nature, 279(5 710): 206 ~ 210.
- Ni Shijun, Cao Zhimin, Zhang Chengjiang, *et al.* 1998. Three indicators for tracing the ore forming fluid[J]. Acta Geoscientia Sinica, 19(2): 166 ~ 169 (in Chinese with English abstract).
- Ni Shijun, Teng Yanguo, Zhang Chengjiang, *et al.* 1999. Review on the geochemical tracing of mineralizing fluid[J]. Advance in Earth Sciences, 14(4): 346 ~ 352 (in Chinese with English abstract).
- Nie Aiguo. 1998. REE geochemistry and origin of fluorites from Chashan antimony deposit, Guangxi[J]. Acta Mineralogica Sinica, 18(2): 250 ~ 253 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang Pingning. 2012. Research on Tectonic Geochemistry and Prediction of Ore Enrichment Center in Miao'ershan Uranium Ore Field, Xiangyangping Area[D]. Changsha: Central South University (in Chinese with English abstract).
- Ouyang Pingning, Huang Manxiang, Liu Xinyang, *et al.* 2012. The characteristics of original geochemical halo in fault zone and its prospecting significance in Xiangyangping uranium deposit[J]. Uranium Geology, 28(2): 78 ~ 83 (in Chinese with English abstract).
- Qin Leisheng. 2018. Research on Alteration Rocks and Mineralogical Characteristics of Xiangyangping Uranium Deposits in Miao'ershan, Northern Guangxi[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Shao Fei, Xu Jianjun, He Xiaomei, *et al.* 2012. REE characteristics of Shannan deposit district in Xiangshan uranium ore field and its geological significance[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 35(3): 223 ~ 229 (in Chinese with English abstract).
- Shi Shaohua, Hu Ruizhong, Wen Hanjie, *et al.* 2010. Geochronology of the Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi, China: U-Pb ages of pitchblende and their geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 84(8): 1 175 ~ 1 182 (in Chinese with English abstract).
- Shi Shaohua, Hu Ruizhong, Wen Hanjie, *et al.* 2011a. Isotope compositions of carbon, oxygen and sulfur in Shazijiang granite-hosted uranium

- um ore deposit, northern Guangxi, China and their genetic significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 30(1): 88~96(in Chinese with English abstract).
- Shi Shaohua, Hu Ruizhong, Wen Hanjie, *et al.* 2011b. Tentative discussion on fluid inclusions in quartz veins of Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi[J]. Mineral Deposits, 30(1): 33~44(in Chinese with English abstract).
- Shi Shaohua, Hu Ruizhong, Wen Hanjie, *et al.* 2011c. REE geochemical characteristics of the Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi, China[J]. Mineral Petrol., 31(1): 36~42(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu. 2012. Analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 31(7): 1035~1053(in Chinese with English abstract).
- Takahashi Y, Yoshida H, Sato N, *et al.* 2002. W- and M-type tetrad effects in REE patterns for water-rock systems in the Tono uranium deposit, central Japan[J]. Chemical Geology, 184(3): 311~335.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Tu Guangchi. 1998. Low-Temperature Geochemistry[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Vinokurov S F, Magazina L O and Strelkova E A. 2017. Rare earth and other rare elements in uranium ores of paleovalley deposits in the Vitim district: Distribution, occurrence, and applied implications[J]. Geology of Ore Deposits, 59(2): 156~175.
- Wang Kun, Deng Jianghong and Hao Xiluo. 2020. The geochemical behavior of uranium and mineralization: South China uranium province as an example[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(1): 35~43(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengqing. 2018. Study on Metallogenic Mechanism of the Miaoershan Granite-type Uranium Deposit, Guangxi[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengqing, Fan Honghai, Chen Donghuan, *et al.* 2018. Geochemistry, element migration and mechanism of uranium mineralization in the periphery of the Shazijiang uranium ore deposit[J]. Geological Journal of China Universities, 24(2): 185~199(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan and Zhao Zhenhua. 1989. Geochemistry of Rare Earth Elements[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Wu Jianhua, Guo Guolin, Guo Jialei, *et al.* 2017. Spatial-temporal distribution of Mesozoic igneous rock and their relationship with hydrothermal uranium deposits in eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1591~1614(in Chinese with English abstract).
- Wu Chunlin and Sun Houjiang. 1993. REE geochemical characteristics of metamorphic rocks from Liaohe group[J]. Liaoning Geology, 3: 222~229(in Chinese with English abstract).
- Wu Dehai, Pan Jiayong, Xia Fei, *et al.* 2018. Trace elements geochemical characteristics and metallogenic model of the Shangjiao uranium deposit in southern Jiangxi[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 37(4): 590~604(in Chinese with English abstract).
- Wu Dehai, Xia Fei, Pan Jiayong, *et al.* 2019. Characteristics of hydrothermal alteration and material migration of Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(9): 2745~2764(in Chinese with English abstract).
- Wu Kunming, Li Dayan, Chen Qi, *et al.* 2016. Geological features of Xiangyangping Uranium Deposit in Guangxi[J]. Uranium Geology, 32(4): 224~229(in Chinese with English abstract).
- Wu Rengui, Hu Zhiqiang, Wu Jianhua, *et al.* 2018. Relationship between rich uranium geological body and source of uranium mineralization[J]. Journal of East China University of Technology, 41(4): 358~363(in Chinese with English abstract).
- Xie Xiaohua, Chen Weifeng, Zhao Kuidong, *et al.* 2008. Geochemical characteristics and geochronology of the Douzhashan granite, northeastern Guangxi Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1302~1312(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhanxing, Shi Yixue and Liu Suying. 1991. The REE characteristics and origin of metallogenic substance in Bajiazhi polymetallic deposit[J]. Liaoning Geology, 4: 328~335(in Chinese with English abstract).
- Yu Guanmei and Shi Guo. 2015. Characteristics of rare earth elements and the geological significance of the basement metamorphic rocks in Xiangshan uranium ore field in central Jiangxi Province[J]. Journal of East China Institute of Technology(Natural Science), 38(4): 350~357(in Chinese with English abstract).
- Zhang Dehui, Zhang Wenhui and Xu Guojian. 2004. The ore fluid geochemistry of F-rich silicate melt-hydrofluid system and its metallogeny: the current status and problems[J]. Earth Science Frontiers, 11(2): 479~490(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai, Li Ziyang, Cai Yuqi, *et al.* 2012. The main advance and achievements in the potential evaluation of uranium resource in China[J]. Uranium Geology, 28(6): 321~326(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhanshi, Hua Renmin, Deng Ping, *et al.* 2005a. Geological and geochemical characteristics of water-rock interaction in the prepro-

- cess of uranium mineralization in Zhuguang-Xiazhuang uranium ore-concentrated district[J]. *Geochimica*, 34(5): 483 ~ 494 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhanshi, Hua Renmin, Liu Xiaodong, *et al.* 2005b. Geochemical characteristics of rare earth elements of Guidong granitic complex and their relationship with uranium mineralization[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 23(6): 749 ~ 756 (in Chinese with English abstract).
- Zhao K D, Jiang S Y, Ling H F, *et al.* 2016. Late Triassic U-bearing and barren granites in the Miao'ershan batholith, South China: Petrogenetic discrimination and exploration significance[J]. *Ore Geology Reviews*, 77: 260 ~ 278.
- Zhao K D, Jiang S Y, Sun T, *et al.* 2013. Zircon U-Pb dating, trace element and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of Paleozoic granites in the Miao'ershan-Yuechengling batholith, South China: Implication for petrogenesis and tectonic magmatic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74(Complete): 244 ~ 264.
- Zhao Ruyi, Wang Denghong, Chen Yuchuan, *et al.* 2020. Geological characteristics, metallogeny and geospatial mineralization model of uranium in the Nanling metallogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(1): 149 ~ 160 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Akimasa Masuda and Shabani M B. 1992. Tetrad effects of rare-earth elements in rare-metal granites[J]. *Geochimica*, 3: 221 ~ 233 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin and Han Xiaodong. 1999. REE tetrad effect granite formation mechanism: A case study of Qianlishan and Baerzhe granite[J]. *Science in China (Series D)*, 29(4): 331 ~ 338 (in Chinese with English abstract).
- Zong Keqing, Chen Jinyong, Hu Zhaochu, *et al.* 2015. In-situ U-Pb dating of uraninite by fs-LA-ICP-MS[J]. *Science China: Earth Science*, 58: 1 731 ~ 1 740.
- 包志伟, 赵振华. 1998. 东坪金矿床成矿过程中稀土元素活动性[J]. *地球化学*, 27(1): 81 ~ 90.
- 毕献武, 胡瑞忠. 1998. 哀牢山金矿带成矿流体稀土元素地球化学[J]. *地质论评*, 44(3): 264 ~ 269.
- 陈琪, 肖建军, 范立亭, 等. 2013. 广西向阳坪铀矿床微量元素和稀土元素地球化学特征[J]. *铀矿地质*, 29(3): 152 ~ 161.
- 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[J]. *岩石学报*, 35(9): 2 679 ~ 2 694.
- 陈正乐, 王平安, 王永, 等. 2013. 江西相山铀矿田山南矿区控矿构造解析与找矿预测[J]. *地球科学与环境学报*, 35(2): 8 ~ 18.
- 杜乐天. 2001. 中国热液铀矿床基本成矿规律和一般热液成矿学[M]. 北京: 原子能出版社.
- 胡欢, 王汝成, 陈卫锋, 等. 2012. 桂东北豆乍山产铀花岗岩的铀源矿物研究[J]. *地质论评*, 58(6): 1 056 ~ 1 068.
- 胡欢, 王汝成, 陈卫锋, 等. 2013. 桂东北豆乍山产铀花岗岩热液活动时限的确定与铀成矿意义[J]. *科学通报*, 58(36): 3 849 ~ 3 858.
- 华仁民. 1993. 流体在金属矿床形成过程中的作用和意义[J]. *南京大学学报(地球科学)*, 5(3): 351 ~ 360.
- 黄成敏, 龚子同. 2002. 表生作用下稀土元素地球化学特征——以海南岛北部玄武岩分布区为例[J]. *山地学报*, 20(1): 70 ~ 74.
- 李妮巍, 王敢, 陈卫锋, 等. 2010. 香草坪花岗岩体年代学和地球化学特征[J]. *铀矿地质*, 26(4): 215 ~ 221.
- 李妮巍, 王敢, 陈卫锋, 等. 2011. 广西向阳坪地区剪切带与铀成矿作用[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 36(5): 1 ~ 7.
- 刘宁, 樊德华, 郝运轻, 等. 2009. 稀土元素分析方法研究及应用——以渤海湾盆地东营凹陷永安地区物源分析为例[J]. *石油实验地质*, 31(4): 427 ~ 432.
- 马英军, 霍润科, 徐志方, 等. 2004. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素[J]. *地球科学进展*, 19(1): 87 ~ 94.
- 倪师军, 曹志敏, 张成江, 等. 1998. 成矿流体活动信息的三个示踪标志研究[J]. *地球学报*, 19(2): 166 ~ 169.
- 倪师军, 腾彦国, 张成江, 等. 1999. 成矿流体活动的地球化学示踪研究[J]. *地球科学进展*, 14(4): 346 ~ 352.
- 聂爱国. 1998. 广西茶山铀矿床萤石成因的稀土元素地球化学研究[J]. *矿物学报*, 18(2): 250 ~ 253.
- 欧阳平宁. 2012. 苗儿山铀矿田向阳坪地区构造地球化学研究与成矿富集中心预测[D]. 长沙: 中南大学.
- 欧阳平宁, 黄满湘, 刘鑫扬, 等. 2012. 向阳坪铀矿床断裂构造原生晕特征及找矿意义[J]. *铀矿地质*, 28(2): 78 ~ 83.
- 秦蕾胜. 2018. 桂北苗儿山向阳坪铀矿床蚀变岩及矿物学特征研究[D]. 上海: 东华理工大学.
- 邵飞, 许健俊, 何晓梅, 等. 2012. 相山铀矿田山南矿区稀土元素特征及其地质意义[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 35(3): 223 ~ 229.
- 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[J]. *地质学报*, 84(8): 1 175 ~ 1 182.
- 石少华, 胡瑞忠, 温汉捷, 等. 2011a. 桂北沙子江花岗岩型铀矿床碳、氧、硫同位素特征及其成因意义[J]. *矿物岩石地球化学通*

附中文参考文献

- 报, 30(1): 88~96.
- 石少华, 胡瑞忠, 温汉捷, 等. 2011b. 桂北沙子江铀矿床流体包裹体初步研究[J]. 矿床地质, 30(1): 33~44.
- 石少华, 胡瑞忠, 温汉捷, 等. 2011c. 桂北沙子江铀矿床稀土元素地球化学特征[J]. 矿物岩石, 31(1): 36~42.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1 035~1 053.
- 涂光炽. 1998. 低温地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 王 鲲, 邓江洪, 郝锡萃. 2020. 铀的地球化学性质与成矿——以华南铀成矿省为例[J]. 岩石学报, 36(1): 35~43.
- 王正庆. 2018. 广西苗儿山花岗岩型铀矿床成矿机制研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 王正庆, 范洪海, 陈东欢, 等. 2018. 沙子江铀矿外围地化特征、元素迁移及铀成矿机理[J]. 高校地质学报, 24(2): 41~55.
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学[J]. 北京: 科学出版社.
- 巫建华, 郭国林, 郭佳磊, 等. 2017. 中国东部中生代岩浆岩的时空分布及其与热液型铀矿的关系[J]. 岩石学报, 33(5): 1 591~1 614.
- 吴春林, 孙厚江. 1993. 辽河群变质岩稀土元素地球化学[J]. 国土资源, 3: 222~229.
- 吴德海, 潘家永, 夏 菲, 等. 2018. 赣南上寮铀矿床微量元素地球化学特征与成矿模型[J]. 岩石矿物学杂志, 37(4): 590~604.
- 吴德海, 夏 菲, 潘家永, 等. 2019. 粤北棉花坑铀矿床热液蚀变与物质迁移研究[J]. 岩石学报, 35(9): 2 745~2 764.
- 吴昆明, 李大雁, 陈 琪, 等. 2016. 广西向阳坪铀矿床成矿地质特征[J]. 铀矿地质, 32(4): 224~229.
- 吴仁贵, 胡志强, 巫建华, 等. 2018. 富铀地质体与成矿铀源关系探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 41(4): 358~363.
- 谢晓华, 陈卫锋, 赵葵东, 等. 2008. 桂东北豆仵山花岗岩年代学与地球化学特征[J]. 岩石学报, 24(6): 1 302~1 312.
- 杨占兴, 史益学, 刘素英. 1991. 八家子多金属矿床岩石和矿石稀土元素特征及成矿物质来源[J]. 辽宁地质, 4: 328~335.
- 余关美, 时 国. 2015. 赣中相山铀矿田基底变质岩稀土元素特征及其地质意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 38(4): 350~357.
- 张德会, 张文淮, 许国建. 2004. 富F熔体-溶液体系流体地球化学及其成矿效应——研究现状及存在问题[J]. 地学前缘, 11(2): 479~490.
- 张金带, 李子颖, 蔡煜琦, 等. 2012. 全国铀资源潜力评价工作进展与主要成果[J]. 铀矿地质, 28(6): 321~326.
- 张展适, 华仁民, 邓 平, 等. 2005a. 诸广-下庄铀矿集区成矿过程中水-岩作用的地质地球化学特征[J]. 地球化学, 34(5): 483~494.
- 张展适, 华仁民, 刘晓东, 等. 2005b. 贵东花岗岩杂岩体的稀土元素特征及与铀成矿关系[J]. 中国稀土学报, 23(6): 749~756.
- 赵如意, 王登红, 陈毓川, 等. 2020. 南岭成矿带铀矿地质特征、成矿规律与全位成矿模式[J]. 地质学报, 94(1): 149~160.
- 赵振华, 熊小林, 韩小东. 1999. 花岗岩稀土元素四分组效应形成机理探讨——以千里山和巴尔哲花岗岩为例[J]. 中国科学: 地球科学, 29(4): 331~338.
- 赵振华, 增田彰正, 夏巴尼 M B. 1992. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应[J]. 地球化学, 3: 221~233.
- 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[J]. 中国科学: 地球科学, 45: 1 304~1 315.