

桂北苗儿山中段向阳坪铀矿床热液脉体地球化学特征及指示意义

陈琪, 高翔, 谭双, 黄剑

(核工业二三〇研究所, 湖南长沙 410007)

摘要: 对向阳坪矿床硅质脉和方解石两种重要的脉石矿物进行了系统的稀土元素和碳氧同位素分析。结果表明, 硅质脉、方解石与角砾岩矿石具有大体类似的轻稀土元素富集、负 Eu 异常明显的右倾海鸥型稀土元素配分模式, 总体继承了豆乍山花岗岩地球化学特征, 暗示了向阳坪矿床铀源主要来自赋矿围岩, 硅质脉和硅质角砾在铀矿化过程伴随 Σ REE 富集和 HREE 增加。方解石碳氧同位素组成指示成矿流体以地幔来源为主导, 成矿期方解石具有明显低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 暗示减压沸腾发生的 CO_2 去气作用是导致晚期铀沉淀的主要因素。从成矿期到矿后期, 方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高, $\delta^{18}\text{O}$ 值呈降低趋势, 同时硅质角砾具有弱的负 Ce 异常, 均指示铀矿化晚期有大气降水参与, 且受其淋滤改造, 据此认为苗儿山中段花岗岩型铀矿多期成矿叠加和后期大气降水淋集改造是形成大矿体的主要成矿模式。

关键词: 硅质脉; 方解石; 稀土元素; 碳氧同位素; 向阳坪; 苗儿山

中图分类号: P619.14; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)06-0795-13

Geochemical characteristics and indicative significance of hydrothermal vein in the Xiangyangping uranium ore deposit, middle segment of Miao'er Mountain, northern Guangxi

CHEN Qi, GAO Xiang, TAN Shuang and HUANG Jian

(Changsha Uranium Geology Research Institute, CNNC, Changsha 410007, China)

Abstract: In this paper, the authors studied quartz veins and calcite veins in the Xiangyangping uranium ore deposit located in the middle segment of Miao'er Mountain pluton. The research samples include quartz veins, calcite veins and breccia ores. They have similar REE patterns showing LREE-enrichment and strong negative Eu anomalies. This characteristic is the same as that of Douzhashan granite, suggesting that most of the uranium came from surrounding rocks. Σ REE and HREE from calcite veins and breccia ores grew with uranium-enrichment process. Carbon oxygen isotope analysis from calcite shows that most of the ore-forming fluid came from the mantle. The uranium-enrichment calcite shows lower $\delta^{13}\text{C}$ value and high $\delta^{18}\text{O}$ value, which indicates that CO_2 degassing seems to have been the main factor in uranium mineral precipitation processing. From mineralization period to post-mineralization period, $\delta^{13}\text{C}$ value of calcite grew and $\delta^{18}\text{O}$ value was reduced; besides, breccia ores had weak negative Ce anomalies. All of these data indicate that meteoric water took part in the process of post-mineralization. The authors built the uranium mineralization model for the middle segment of Miao'er Mountain pluton, and emphasized that multiple phases of mineralization and meteoric water seems to have been the critical factor of forming large

收稿日期: 2020-06-05; 接受日期: 2020-09-30; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国核工业地质局地勘费项目(201917, 202035-6)

作者简介: 陈琪(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 地质学专业, 主要从事铀矿地质勘查与研究工作, E-mail: chenqi616@163.com。

orebody in this area.

Key words: siliceous vein; calcite; rare element; carbon and oxygen isotope; Xiangyangping; Miao'er Mountain

Fund support: Geological Exploration Project Foundation of China Nuclear Industry Geological Bureau(201917, 202035-6)

苗儿山中段是中国南方重要的花岗岩型铀矿富集区,同时是南方硬岩型铀矿找矿重点工作地区,向阳坪铀矿床为近年来在苗儿山中段新落实的中型矿床,新一轮扩大勘查取得突破性进展,在 F_7 号带深部新发现大矿体(李妩巍等, 2011; 吴昆明等, 2016)。近年来关于该区赋矿岩体和矿床的年代学及地球化学(徐伟昌等, 1994; 李文杰等, 2006; 谢晓华等, 2008; 石少华等, 2010; 李妩巍等, 2010a; 柏道远等, 2014; 张涛等, 2020)、构造与成矿(黄宏业等, 2008; 李妩巍等, 2010b, 2011; 石少华等, 2011a, 2011b; 刘鑫扬等, 2011; 陈琪等, 2013; 吴昆明等, 2016)等方面进行了大量的研究,肯定了构造运动及热液活动等对铀成矿所起的决定性作用。硅质脉和方解石作为向阳坪铀矿床主要的脉石矿物,也是与成矿关系最为密切的脉石矿物,其内保留了重要的成矿信息有待挖掘。前人多年的研究成果表明,对方解石、石英等矿物的稀土元素及稳定同位素地球化学的研究,对于探讨铀成矿物质来源以及成矿流体示踪具有重要作用(商朋强等, 2006; 杨晓勇等, 2007; 张国玉等, 2007; 沈渭洲等, 2010; 石少华等, 2011c; 邵飞等, 2012; 陈友良等, 2012; 赵聪等, 2012; 严冰等, 2013; 陈云杰等, 2014; 姜涛等, 2018)。本文针对向阳坪铀矿床各期次、各类型的硅质脉和方解石稀土元素和碳氧同位素地球化学开展了系统研究,以期获取成矿物质来源、迁移、沉淀机制及成矿流体的演化信息。

1 地质背景

向阳坪铀矿床位于苗儿山花岗岩穹窿中段的豆乍山岩体西南角,大地构造位置处于华南加里东陆块江南地块南缘。矿区主要出露香草坪岩体和豆乍山岩体,岩性分别为中粗粒似斑状黑云母花岗岩和中细粒二云母花岗岩,岩体接触界线明显,两个岩体均为富铀岩体。近年来年代学研究显示香草坪花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 211 ± 2 Ma(李妩巍等, 2010a),豆乍山花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 228 ± 11 Ma(谢晓华等, 2008; 柏道远等, 2014),白

云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法年龄为 206 ± 1 Ma(李妩巍等, 2010a)。

区域构造以 NNE 向断裂为主,在苗儿山中段豆乍山岩体周边形成 $F_1 \sim F_{13}$ 等一系列的 NNE 向次级断裂带,控制了该区域花岗岩型铀矿床的产出(如向阳坪、沙子江、双滑江、白毛冲、孟公界等矿床,图 1),其中 F_7 、 F_8 、 F_9 、 F_{10} 断裂带为向阳坪铀矿床的主要控(含)矿断裂。铀矿化与硅化、方解石化、赤铁矿化及黄铁矿化密切相关,矿石类型主要有构造角砾岩、碎裂蚀变岩及硅质脉 3 种。近年勘查工作在 F_7 断裂带深部取得突破性找矿成果,在主要成矿次级断裂 F_{710} 深部发现大矿体,沿走向和倾向具较好的连续性,铀矿化与断裂中心发育的构造角砾岩脉密切相关,矿体主要赋存在构造角砾岩脉中及两侧碎裂岩中,具膨大收缩、分支复合的特征。

2 样品采集和分析方法

硅质脉和方解石脉是向阳坪铀矿床常见的脉石矿物,与铀矿化关系密切,具有多期性。本次采取的硅质脉和方解石样品均来自近年施工的钻孔岩心,根据与铀矿化关系和形成期次主要分为以下 4 种类型。

(1) 含矿硅质脉、硅质角砾:为成矿期热液作用的产物,早期主要呈红褐色、杂色玉髓脉或微晶石英脉产出,常与沥青铀矿脉、黄铁矿脉共生(图 2a),晚期呈硅质角砾、胶结物与方解石组成角砾岩,常见次生铀矿,局部见少量沥青铀矿(图 2b)。

(2) 无矿的硅质脉、硅质角砾:为矿前期或矿化后期热液作用的产物,呈白色、烟灰色、红褐色玉髓脉或石英脉(图 2d)。

(3) 含矿方解石:为成矿期热液作用的产物,早期主要呈方解石脉产出,常与沥青铀矿脉、硅质脉共生(图 2a),晚期呈网脉、胶结物与硅质角砾胶结(图 2b、图 2c),常见次生铀矿,局部见少量沥青铀矿。

(4) 无矿方解石:主要为成矿晚阶段和矿后期热液作用的产物,成矿晚阶段主要形成白色方解石胶结物(图 2e),矿后期主要呈白色、浅肉红色方解

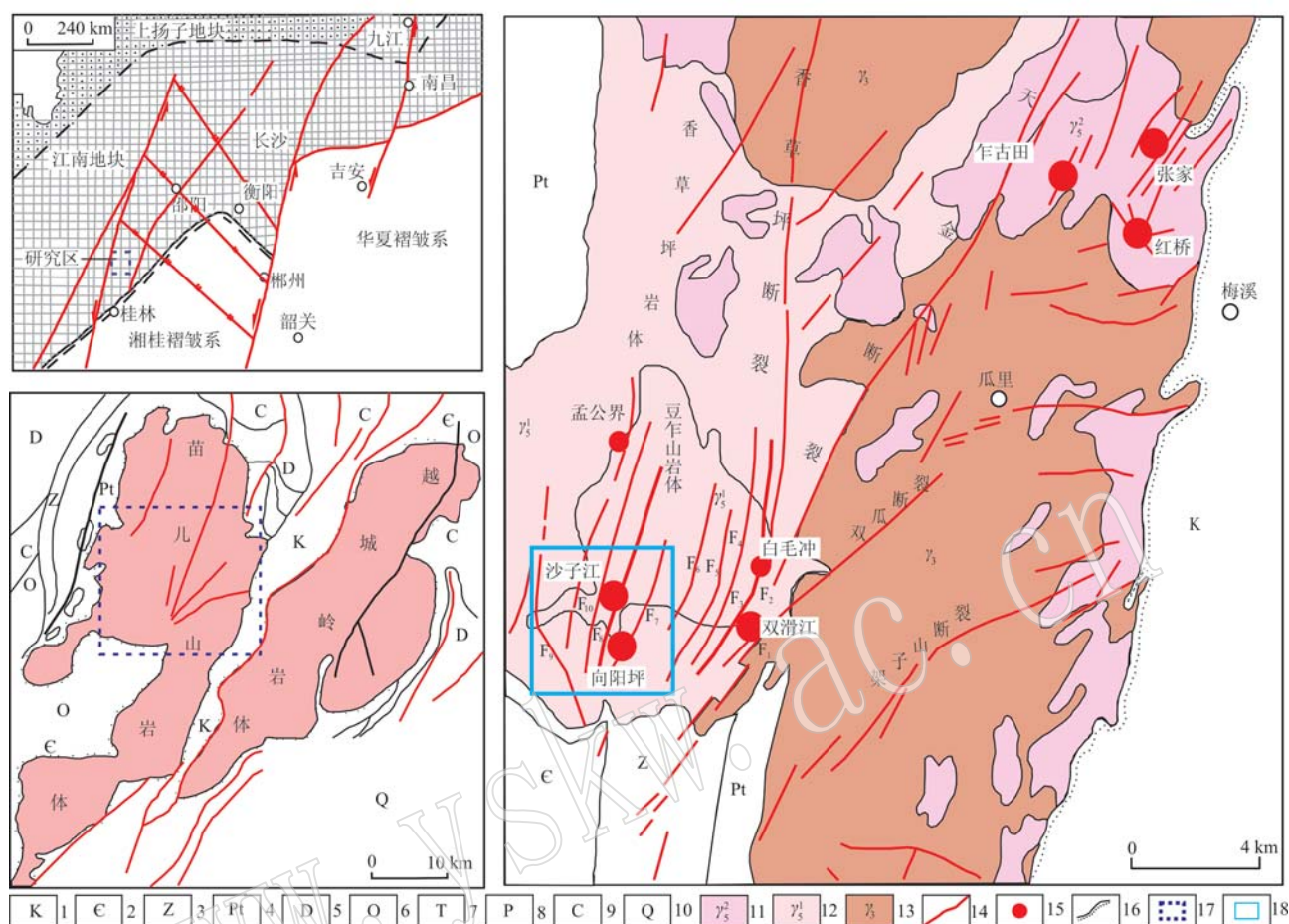


图1 苗儿山中段铀成矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the middle part of the Miao'er Mountain uranium orefield

- 1—白垩系; 2—寒武系; 3—震旦系; 4—板溪群; 5—泥盆系; 6—奥陶系; 7—三叠系; 8—二叠系; 9—石炭系; 10—第四系; 11—加里东期花岗岩; 12—印支期花岗岩; 13—燕山期花岗岩; 14—断裂; 15—铀矿床; 16—地质界线; 17—苗儿山中段; 18—研究区
- 1—Cretaceous; 2—Cambrian; 3—Sinian; 4—Banxi Group; 5—Devonian; 6—Ordovician; 7—Triassic; 8—Permian; 9—Carboniferous; 10—Quaternary; 11—Caledonian granite; 12—Indosinian granite; 13—Yanshanian granite; 14—fault; 15—uranium deposit; 16—geological boundary; 17—middle part of Miao'er Mountain; 18—study area

石脉体(图2f)。

分析测试过程中,将野外采集的不同类型的典型钻孔岩心进行碎样,然后挑选本次研究的目标单矿物纯净的方解石和石英,再将挑选出的单矿物放在玛瑙研钵中反复研磨至200目粉末。稀土元素测试在核工业二三〇研究所分析测试中心完成,使用Finnigan-MAT Elment型高精度电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),检测限优于 0.5×10^{-9} ,相对标准偏差小于5%。方解石的碳、氧同位素测试工作在核工业北京地质研究院分析测试中心完成,采用DZ/T 0184.17-1997碳酸盐矿物或岩石中碳、氧同位素组成的磷酸法,将反应释放出来的 CO_2 在MAT-253型气体同位素质谱仪上进行碳氧同位素组成测定,测

试精度为0.2‰。

3 稀土元素特征及成因

3.1 稀土元素特征

稀土元素分析结果列于表1,各类型样品稀土元素组成具如下特征:

含矿硅质脉、硅质角砾 ΣREE 为 $13.99 \times 10^{-6} \sim 90.84 \times 10^{-6}$,平均 57.30×10^{-6} ,负Eu异常明显, δEu 值为0.19~0.26,平均0.22,LREE/HREE值为2.74~5.48,平均3.81,轻重稀土元素之间分异较弱, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为1.96~5.14,平均3.35;轻稀土元素分异较弱, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为1.01~3.56,平均2.64;



图2 向阳坪铀矿床硅质脉和方解石样品特征

Fig.2 Sample characteristics of siliceous veins and calcite in the Xiangyangping uranium deposit

a—含矿方解石、硅质脉，早期成矿，与沥青铀矿共生；b—含矿方解石胶结物、硅质角砾，见次生硅钙铀矿；c—含矿方解石胶结物，孔洞内见大量次生硅钙铀矿；d—无矿硅质脉，强赤铁矿化蚀变；e—无矿方解石胶结物、硅质角砾；f—无矿方解石脉；Cal—方解石；Si—硅质脉/硅质角砾；Ptc—沥青铀矿；Urp—硅钙铀矿；Py—黄铁矿

a—mineralized calcite and siliceous veins associated with pitchblende, early metallogenesis; b—mineralized calcite cement and siliceous breccia; c—mineralized calcite cement, a large amount of uranophane in the holes; d—barren siliceous vein, strong hematite mineralization; e—barren calcite cement and siliceous breccia; f—barren calcite vein; Cal—calcite; Si—siliceous vein or siliceous breccia; Ptc—pitchblende; Urp—uranophane; Py—pyrite

表1 向阳坪铀矿床各类型硅质脉和方解石稀土元素分析数据

$w_B/10^{-6}$

Table 1 Analytical data of rare earth elements in various types of siliceous veins and calcite in the Xiangyangping uranium deposit

序号	样品名	样品描述	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
1	ZK7-4-2GP-1	含矿红褐色硅质角砾，见次生铀矿	9.76	16.50	2.52	9.18	1.96	0.12	1.77	0.34	1.92	0.39	1.23	0.19
2	ZK7-4-2GP-2	含矿红褐色硅质角砾，见次生铀矿	2.81	3.68	0.70	2.43	0.57	0.06	0.74	0.16	1.00	0.22	0.68	0.11
3	ZK7-16-4GP-1	碎裂岩中深灰色硅质脉	9.17	23.20	4.68	20.80	5.71	0.42	6.28	1.14	6.34	1.33	3.79	0.54
4	ZK7-16-4GP-3	红褐色硅质角砾，见次生铀矿	16.00	29.90	4.11	16.00	4.23	0.31	4.44	0.86	5.22	1.13	3.59	0.59
5	ZK7-16-4GP-2	含矿红色硅质脉	9.68	18.70	1.73	6.73	1.71	0.12	1.81	0.37	2.26	0.48	1.50	0.24
6	平均值	含矿硅质角砾、硅质脉	9.48	18.40	2.75	11.03	2.84	0.21	3.01	0.57	3.35	0.71	2.16	0.33
7	ZK7-4-6GP-1	无矿杂色硅质角砾	1.38	2.43	0.27	1.03	0.32	0.04	0.39	0.09	0.57	0.12	0.33	0.05
8	ZK7-8-7GP-1	无矿深灰色硅质角砾	6.89	14.20	1.80	6.71	1.67	0.12	1.80	0.38	2.34	0.51	1.54	0.24
9	ZK7-4-3YP1	无矿红色硅质角砾	8.70	19.32	2.29	8.69	2.16	0.15	2.51	0.42	2.70	0.54	1.63	0.27
10	ZK7-0-4YP1	无矿红色硅质角砾	6.30	12.73	1.51	5.33	1.18	0.09	1.39	0.22	1.40	0.27	0.80	0.12
11	ZK7-12-1YP6	无矿红色硅质脉	10.95	24.10	2.82	10.15	2.26	0.15	2.48	0.41	2.61	0.51	1.47	0.24
12	ZK7-12-3YP1	无矿红色硅质脉	10.48	28.09	2.55	9.26	2.00	0.14	2.17	0.32	1.89	0.37	1.07	0.17
13	ZK7-4-2YP1	无矿红褐色矿硅质脉	8.89	18.93	2.29	8.54	1.89	0.13	1.97	0.32	1.97	0.39	1.18	0.19
14	平均值	无矿硅质角砾、硅质脉	7.66	17.11	1.93	7.10	1.64	0.12	1.82	0.31	1.93	0.39	1.14	0.18
15	ZK7-8-3FP-1	白色方解石胶结物，见沥青铀矿	5.82	6.80	1.18	4.56	1.05	0.08	1.15	0.21	1.27	0.27	0.85	0.13
16	ZKD56-8FP-1	与沥青铀矿脉共生的方解石脉	2.60	3.60	0.37	1.30	0.21	0.03	0.41	0.07	0.44	0.09	0.27	0.03
17	ZK7-16-4FP-1	方解石角砾，见大量次生铀矿	3.11	8.04	1.10	4.60	1.26	0.09	1.24	0.25	1.50	0.33	1.09	0.20
18	ZKD52-5FP-1	角砾岩中挑选的方解石胶结物	6.60	9.21	1.05	3.67	0.71	0.05	0.70	0.12	0.65	0.14	0.41	0.06
19	ZK7-16-4FP-2	肉红色方解石脉，见次生铀矿	11.40	15.80	1.82	6.49	1.33	0.11	1.35	0.26	1.50	0.34	1.09	0.19
20	ZK7-4-2FP-1	肉红色方解石胶结物，见次生铀矿	4.69	6.34	0.61	1.99	0.34	0.03	0.33	0.06	0.35	0.08	0.24	0.04
21	平均值	含矿方解石	6.45	9.85	1.15	4.19	0.91	0.07	0.91	0.17	1.00	0.22	0.71	0.12

续表 1

Continued Table 1

序号	样品名	样品描述	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
22	ZK7-0-6FP-1	无矿白色方解石脉及胶结物	3.34	7.98	1.11	4.79	1.80	0.16	2.49	0.51	2.56	0.46	1.29	0.21
23	ZK7-8-7FP-1	无矿白色方解石胶结物	4.93	9.31	1.22	4.98	1.59	0.18	2.16	0.60	4.23	1.00	3.22	0.53
24	ZK7-4-6FP-1	无矿白色方解石胶结物	3.26	3.77	0.34	1.11	0.18	0.01	0.21	0.04	0.25	0.06	0.18	0.03
25	ZK7-4-5FP-1	无矿白色方解石脉	3.14	6.09	0.72	2.73	0.90	0.06	1.00	0.19	1.04	0.21	0.64	0.10
26	ZK7-16-4FP-3	无矿肉红色方解石脉	9.30	16.00	1.82	6.35	1.53	0.18	1.80	0.42	2.73	0.62	2.06	0.35
27	ZK7-16-7FP-1	无矿白色方解石脉	7.78	11.60	1.22	4.32	0.97	0.07	0.94	0.14	0.66	0.14	0.41	0.05
28	ZK7-16-4FP-5	无矿灰白-浅红色方解石脉	4.78	8.23	0.98	3.78	1.06	0.16	1.49	0.38	2.60	0.58	1.86	0.31
29	ZK7-4-2FP-5	无矿浅红色方解石脉	8.34	13.00	1.38	4.64	0.86	0.06	0.82	0.16	0.82	0.18	0.55	0.10
30	ZK7-4-2FP-3	无矿浅红色方解石脉	9.09	13.70	1.37	4.68	0.90	0.07	1.02	0.21	1.24	0.27	0.88	0.16
31	ZK7-4-2FP-4	无矿白色方解石胶结物	5.04	6.21	0.56	1.83	0.26	0.02	0.27	0.04	0.23	0.05	0.17	0.03
32	ZK7-8-3FP-2	无矿白色方解石脉	4.50	5.46	0.52	1.89	0.36	0.03	0.38	0.07	0.44	0.11	0.36	0.06
33	平均值	无矿方解石	5.77	9.21	1.02	3.74	0.95	0.09	1.14	0.25	1.53	0.33	1.06	0.18
34	平均值	豆乍山岩体(二云母花岗岩)	27.45	59.94	7.11	25.49	5.96	0.35	5.72	1.27	5.69	1.13	3.36	0.64
35	平均值	香草坪岩体(黑云母花岗岩)	31.87	70.91	8.28	30.80	5.97	0.52	5.45	0.73	3.68	0.64	1.81	0.25
36	平均值	角砾岩矿石(全岩)	21.11	42.08	5.79	19.34	4.75	0.42	4.13	0.87	4.51	0.91	3.48	0.59
序号	样品名	样品描述	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	δEu	δCe	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N
1	ZK7-4-2GP-1	含矿红褐色硅质角砾,见次生铀矿	1.28	0.19	12.10	47.35	40.04	7.31	5.48	0.19	0.78	5.14	3.13	1.12
2	ZK7-4-2GP-2	含矿红褐色硅质角砾,见次生铀矿	0.72	0.11	7.23	13.99	10.25	3.74	2.74	0.26	0.62	2.63	3.10	0.83
3	ZK7-16-4GP-1	碎裂岩中深灰色硅质脉	3.16	0.45	55.40	87.01	63.98	23.03	2.78	0.21	0.85	1.96	1.01	1.60
4	ZK7-16-4GP-3	红褐色硅质角砾,见次生铀矿	3.89	0.57	41.50	90.84	70.55	20.29	3.48	0.22	0.87	2.77	2.38	0.92
5	ZK7-16-4GP-2	含矿红色硅质脉	1.54	0.23	16.30	47.10	38.67	8.43	4.59	0.21	1.02	4.24	3.56	0.95
6	平均值	含矿硅质角砾、硅质脉	2.12	0.31	26.51	57.26	44.70	12.56	3.81	0.22	0.83	3.35	2.64	1.08
7	ZK7-4-6GP-1	无矿杂色硅质角砾	0.36	0.06	3.57	7.43	5.47	1.97	2.78	0.30	0.90	2.58	2.71	0.87
8	ZK7-8-7GP-1	无矿深灰色硅质角砾	1.65	0.23	15.20	40.08	31.39	8.69	3.61	0.21	0.95	2.82	2.60	0.88
9	ZK7-4-3YP1	无矿红色硅质角砾	1.69	0.25	16.72	51.30	41.30	10.00	4.13	0.20	1.04	3.69	2.53	1.20
10	ZK7-0-4YP1	无矿红色硅质角砾	0.84	0.14	8.33	32.32	27.13	5.18	5.23	0.20	0.98	5.35	3.36	1.33
11	ZK7-12-1YP6	无矿红色硅质脉	1.67	0.24	15.12	60.06	50.44	9.62	5.24	0.19	1.04	4.72	3.04	1.20
12	ZK7-12-3YP1	无矿红色硅质脉	1.20	0.18	10.74	69.87	62.51	7.36	8.49	0.20	1.75	6.28	3.30	1.46
13	ZK7-4-2YP1	无矿红褐色矿硅质脉	1.13	0.17	11.74	47.99	40.68	7.31	5.56	0.21	1.00	5.63	2.96	1.40
14	平均值	无矿硅质角砾、硅质脉	1.22	0.18	11.63	44.15	36.99	7.16	5.01	0.22	1.09	4.44	2.94	1.20
15	ZK7-8-3FP-1	白色方解石胶结物,见沥青铀矿	0.89	0.14	10.20	24.40	19.49	4.91	3.97	0.21	0.59	4.41	3.49	1.04
16	ZKD56-8FP-1	与沥青铀矿脉共生的方解石脉	0.29	0.03	6.00	9.75	8.11	1.64	4.93	0.29	0.78	6.04	7.79	1.14
17	ZK7-16-4FP-1	方解石角砾,见大量次生铀矿	1.70	0.31	13.30	24.82	18.20	6.62	2.75	0.22	1.04	1.23	1.55	0.59
18	ZKD52-5FP-1	角砾岩中挑选的方解石胶结物	0.46	0.07	6.13	23.90	21.29	2.61	8.15	0.22	0.76	9.67	5.85	1.23
19	ZK7-16-4FP-2	肉红色方解石脉,见次生铀矿	1.32	0.21	11.90	43.21	36.95	6.26	5.90	0.25	0.76	5.82	5.39	0.83
20	ZK7-4-2FP-1	肉红色方解石胶结物,见次生铀矿	0.26	0.04	2.68	15.40	14.00	1.40	10.00	0.23	0.78	12.16	8.68	1.02
21	平均值	含矿方解石	0.94	0.16	8.50	26.83	22.61	4.22	6.70	0.23	0.84	7.22	5.37	0.92
22	ZK7-0-6FP-1	无矿白色方解石脉及胶结物	1.54	0.23	15.80	28.47	19.18	9.29	2.06	0.23	0.99	1.46	1.17	1.30
23	ZK7-8-7FP-1	无矿白色方解石胶结物	3.74	0.54	34.80	38.23	22.21	16.02	1.39	0.30	0.89	0.89	1.95	0.47
24	ZK7-4-6FP-1	无矿白色方解石胶结物	0.24	0.04	2.49	9.73	8.67	1.06	8.21	0.22	0.70	9.16	11.39	0.71
25	ZK7-4-5FP-1	无矿白色方解石脉	0.70	0.11	7.51	17.63	13.64	3.99	3.42	0.19	0.94	3.02	2.19	1.15
26	ZK7-16-4FP-3	无矿肉红色方解石脉	2.46	0.36	21.50	45.98	35.18	10.80	3.26	0.33	0.88	2.55	3.82	0.59
27	ZK7-16-7FP-1	无矿白色方解石脉	0.35	0.06	7.16	28.71	25.96	2.75	9.45	0.22	0.82	14.99	5.05	2.17
28	ZK7-16-4FP-5	无矿灰白-浅红色方解石脉	2.12	0.31	21.90	28.64	18.99	9.65	1.97	0.39	0.87	1.52	2.84	0.57
29	ZK7-4-2FP-5	无矿浅红色方解石脉	0.72	0.12	5.65	31.75	28.28	3.47	8.15	0.20	0.84	7.81	6.10	0.92
30	ZK7-4-2FP-3	无矿浅红色方解石脉	1.20	0.21	9.27	35.00	29.81	5.19	5.74	0.22	0.84	5.11	6.35	0.69
31	ZK7-4-2FP-4	无矿白色方解石胶结物	0.21	0.03	2.07	14.95	13.92	1.03	13.49	0.22	0.74	16.18	12.19	1.04
32	ZK7-8-3FP-2	无矿白色方解石脉	0.41	0.07	4.45	14.65	12.76	1.90	6.73	0.21	0.72	7.40	7.86	0.75
33	平均值	无矿方解石	1.24	0.19	12.05	26.70	20.78	5.92	5.81	0.25	0.84	6.37	5.54	0.94
34	平均值	豆乍山岩体(二云母花岗岩)	3.85	0.58	33.83	148.52	126.29	22.23	5.68	0.18	1.03	5.11	2.89	4.75
35	平均值	香草坪岩体(黑云母花岗岩)	1.60	0.22	18.81	162.75	148.35	14.40	10.30	0.27	1.05	14.30	3.36	5.53
36	平均值	角砾岩矿石(全岩)	3.25	0.50	34.00	111.73	93.49	18.24	5.13	0.28	0.92	4.66	2.80	1.03

注: 岩体及矿石数据为全岩分析数据,来源于陈琪等(2016)^①; 球粒陨石标准化数据据 Boynton 等(1984)。

① 陈 琪, 等. 2016. 广西资源县向阳坪铀矿详查地质报告.

重稀土元素分异相对不明显, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 0.83 ~ 1.12, 平均 1.08。

无矿的硅质脉、硅质角砾 ΣREE 为 7.43×10^{-6} ~ 69.87×10^{-6} , 平均 44.15×10^{-6} , 负 Eu 异常明显, δEu 值为 0.19 ~ 0.30, 平均 0.22, δCe 值平均 1.09, LREE/HREE 值为 2.78 ~ 8.49, 平均 5.01, 轻重稀土元素之间有一定程度的分异, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.58 ~ 6.28, 平均 4.44, 轻稀土元素分异相对不明显, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 2.53 ~ 3.36, 平均 2.93, 重稀土元素分异相对不明显, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 0.87 ~ 1.46, 平均 1.19。

含矿方解石 ΣREE 为 9.75×10^{-6} ~ 43.21×10^{-6} , 平均 23.58×10^{-6} , 负 Eu 异常明显, δEu 值为 0.21 ~ 0.29, 平均 0.24, LREE/HREE 值为 2.75 ~ 10.00, 平均 5.95, 轻重稀土元素之间分异非常明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 1.23 ~ 12.16, 平均 6.56; 轻稀土元素分异较相对显著, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 1.55 ~ 8.68, 平均 5.46; 重稀土元素分异相对较弱, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 0.59 ~ 1.14, 平均 0.97。

无矿方解石 ΣREE 为 9.73×10^{-6} ~ 45.98×10^{-6} , 平均 26.70×10^{-6} , 负 Eu 异常明显, δEu 值为 0.19 ~ 0.39, 平均 0.25, LREE/HREE 值为 1.39 ~ 13.49, 平均 5.81, 轻重稀土元素之间分异相对明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 0.89 ~ 16.18, 平均 6.37; 轻稀土元素分异较相对显著, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 1.17 ~ 12.19, 平均 5.54; 重稀土元素分异较弱, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 0.47 ~ 1.30, 平均 0.94。

3.2 稀土元素成因意义

通过球粒陨石 (Boynton, 1984) 标准化后, 硅质脉和方解石样品均具有大体类似的轻稀土元素富集、负 Eu 异常明显的右倾海鸥型稀土元素配分模式 (图 3), 总体与花岗岩岩体和角砾岩矿石的稀土元素配分模式一致, 反映各类型样品稀土元素具有继承性, 总体继承了花岗岩特征。研究表明, 矿区两个岩体显示高成熟度地壳的特征, 具备为区内铀矿化提供充足铀源的能力, 其中豆乍山花岗岩经历了更为彻底的岩浆演化过程, 铀源潜力更大 (陈琪等, 2013)。矿石、含矿硅质脉和角砾、方解石样品稀土元素配分与豆乍山花岗岩的一致性暗示了铀源主要为就近的豆乍山花岗岩 (图 3a、3b)。

相对于无矿硅质脉和硅质角砾, 含矿的硅质脉和硅质角砾具有 ΣREE 明显增加、轻重稀土元素之间分异较弱、HREE 增加的特点, 显示略微右倾的海

鸥型配分模式 (图 3c、3d), 与矿石全岩稀土元素配分模式一致, 这一特征在众多花岗岩型矿床中都有体现 (刘成东等, 2010; 石少华等, 2011b; 邵飞等, 2012)。研究认为稀土元素与铀经历活化、迁移及富集的过程非常相似, 此种情况可能是导致铀矿石和含矿的硅质脉、硅质角砾 ΣREE 较高的原因 (McLennan and Taylor, 1979)。HREE 相对增加可能是由于铀与 HREE 的离子半径更为接近, 导致类质同像置换时 HREE 较 LREE 在铀矿石中具有更大的分配系数。

含矿的硅质脉和硅质角砾总体显示一致的稀土元素配分模式, 暗示硅质脉和硅质角砾可能形成于同一热液流体, 硅质角砾的前身就是硅质脉, 因后期构造活动, 一部分硅质脉破碎形成硅质角砾。硅质角砾具有弱的负 Ce 异常 (图 3c), 可能是因为角砾岩后期受富氧化性大气降水流体改造有关。

含矿方解石与无矿方解石稀土元素组成一致性较高, 说明不同期次的热液流体具有相同的来源, 相对于成矿期方解石, 成矿晚阶段和矿后期方解石 ΣREE 略微增加, HREE 明显增加 (图 3e、3f)。后期沉淀的方解石样品中 HREE 相对增加, 是由于在富 CO_2 的流体中, 稀土元素与碳酸络离子形成稳定络合物迁移, 且重稀土元素较轻稀土元素更容易迁移。

4 碳氧同位素特征及指示意义

4.1 碳同位素特征及来源分析

有关热液矿床成矿流体中的碳的来源目前已取得较多的共识, 主要有 3 种可能来源: 岩浆或地幔来源 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 -9‰ ~ -3‰)、沉积碳酸盐来源 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 -3‰ ~ 3‰) 和有机碳来源 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 -30‰ ~ -20‰) (Ohmoto, 1972)。从方解石样品碳氧同位素组成分析结果 (表 2) 可知, 向阳坪矿床方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值处于 -10.0‰ ~ -7.6‰ 之间, 均值为 -8.5‰ , 不同期次的流体均明显表现为岩浆或地幔来源 (图 4)。成矿期方解石具有更低 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值, 处于 -10‰ ~ -8.7‰ 之间, 均值为 -9.3‰ , 与邻区沙子江矿床成矿期方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值 (-9‰ ~ -5‰) 较一致 (石少华等, 2011c), 指示成矿流体以岩浆或地幔来源为主导, 可能混有少量的有机碳来源, 这是由于地层有机碳在花岗岩浆重熔改造和侵位过程中以沉积变质岩的捕掳体为载体进入岩体, 成矿流体可能混染了变质岩地层来源的碳。

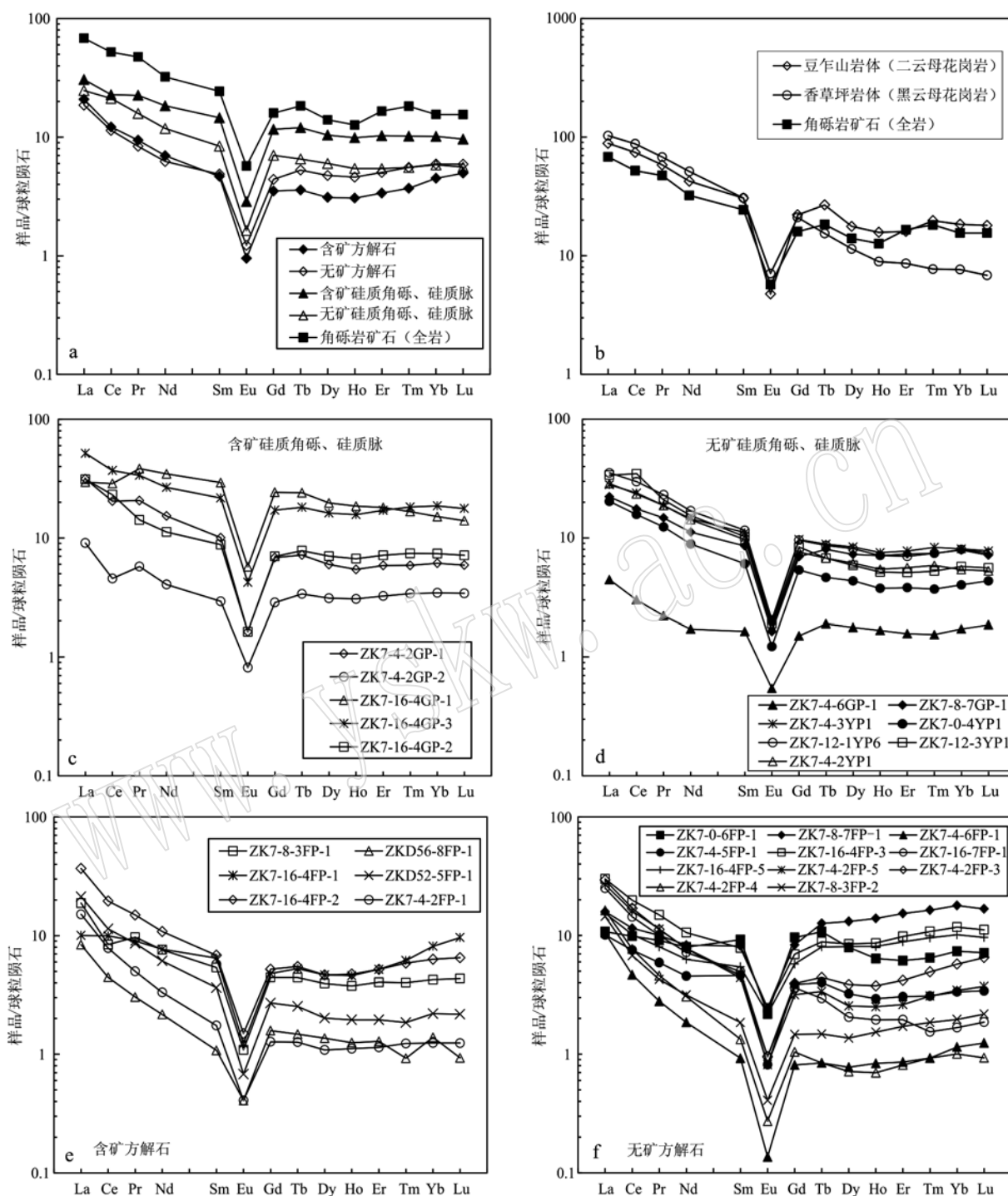


图3 向阳坪铀矿床各类型硅质脉和方解石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of siliceous veins and calcite in the Xiangyangping uranium deposit

a—各类方解石、硅质脉及矿石样品(均值); b—矿石及花岗岩围岩样品; c—含矿硅质脉、硅质角砾样品; d—无矿硅质脉、硅质角砾样品; e—含矿方解石样品; f—无矿方解石样品; 球粒陨石数值据 Boynton(1984)

a—calcite, siliceous veins and ore samples (average value); b—ore and granite wall rock samples; c—mineralized siliceous vein and breccia samples; d—barren siliceous vein and breccia samples; e—mineralized calcite; f—barren calcite; chondrite data from Boynton (1984)

苗儿山中段铀矿床成矿年龄主要在 104 ~ 53 Ma (石少华等, 2010), 普遍存在较大的矿岩时差(100

Ma 以上), 远超过岩浆活动所能影响的时限, 基本可以排除岩浆来源碳的可能, 从而确定成矿流体以

表 2 向阳坪铀矿床方解石碳同位素分析数据

Table 2 Carbon isotope analysis data of calcite in the Xiangyangping uranium deposit

%o

序号	样品编号	样品描述	期次	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}$
1	ZK7-8-3FP-1	角砾岩中白色方解石胶结物, 裂隙见沥青铀矿	早期成矿	-9.2	16.7	8.15
2	ZKD56-8FP-1	与沥青铀矿脉共生的方解石脉	早期成矿	-9.0	17.6	9.05
3	ZK7-16-4FP-1	硅质角砾岩中方解石胶结物, 见大量次生铀矿	晚期成矿	-10.0	16.6	8.05
4	ZKD52-5FP-1	硅质角砾岩中挑选的方解石胶结物,	晚期成矿	-9.5	18.1	9.55
5	ZK7-16-4FP-2	角砾岩中肉红色方解石脉, 见次生铀矿	晚期成矿	-8.7	14.8	6.25
6	ZK7-4-2FP-1	角砾岩中肉红色方解石胶结物, 见次生铀矿	晚期成矿	-7.9	16.2	7.65
7	ZK7-0-6FP-1	无矿角砾岩中白色方解石脉及胶结物	成矿晚阶段	-9.3	16.3	7.75
8	ZK7-8-7FP-1	无矿角砾岩中白色方解石胶结物	成矿晚阶段	-8.7	13.2	4.65
9	ZK7-4-6FP-1	无矿角砾岩中白色方解石胶结物	成矿晚阶段	-8.5	14.7	6.15
10	ZK7-16-4FP-4	碎裂花岗岩中挑选的浅肉红色方解石脉	矿后期	-8.5	13.2	4.65
11	ZK7-16-4FP-3	碎裂岩中肉红色方解石脉	矿后期	-7.8	12.2	3.65
12	ZK7-16-7FP-1	碎裂岩中白色方解石脉	矿后期	-8.8	14.9	6.35
13	ZK7-16-4FP-5	二云母花岗岩中灰白-浅红色方解石脉	矿后期	-8.2	15.2	6.65
14	ZK7-4-2FP-5	碎裂岩中浅红色方解石脉	矿后期	-7.9	16.7	8.15
15	ZK7-4-2FP-3	碎裂岩中浅红色方解石脉	矿后期	-7.7	15.3	6.75
16	ZK7-4-2FP-4	碎裂岩中白色方解石胶结物	矿后期	-7.6	16.5	7.95
17	ZK7-8-3FP-2	碎裂岩中白色方解石脉	矿后期	-7.6	16.5	7.95

注: $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 1.03086 \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 30.86$ (Friedman and O'Neil, 1977), $\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - (-3.39 + 2.78 \times 10^6/t^2)$ (O'Neil *et al.*, 1969), 温度 t 取石少华等(2011a)据流体包裹体测得的成矿阶段温度 209.40℃。

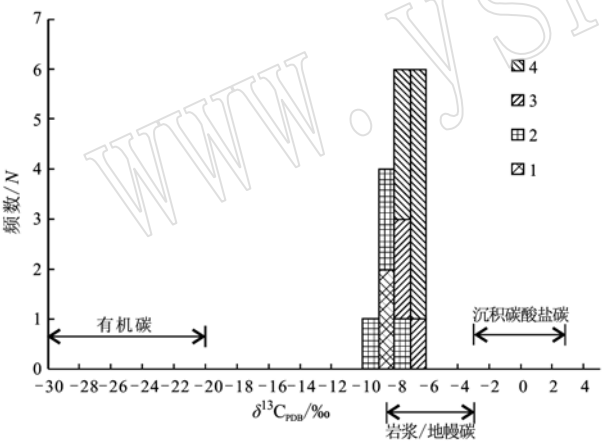


图 4 向阳坪铀矿床方解石碳同位素组成统计直方图

Fig. 4 Histogram of carbon isotope composition of calcite in the Xiangyangping uranium deposit

1—早期成矿方解石; 2—晚期成矿方解石; 3—成矿晚阶段方解石; 4—矿后期方解石

1—early mineralization calcite; 2—late mineralization calcite; 3—late metallogenic stage calcite; 4—post-ore stage calcite

深部来源为主导, 具有地幔来源特征, 地幔来源 CO_2 加入成矿流体可能是通过岩石圈伸展致使地幔去气作用而实现的。

4.2 碳氧同位素指示意义

根据方解石样品 $\delta^{13}\text{C} - \delta^{18}\text{O}$ 相关性图解(图 5),

方解石样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值显示弱的负相关性, 成矿期方解石具有明显低的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值 ($10\text{‰} \sim -8.7\text{‰}$) 和高的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值 ($14.8\text{‰} \sim 18.1\text{‰}$), 暗示具地幔来源的成矿流体在沿断裂构造上升过程中, 在物理化学条件变异的部位, 发生了减压沸腾作用, CO_2 逸出, 碳酸铀酰络离子解体, 发生铀和方解石的沉淀。因为流体中 CO_2 相对富集 ^{13}C , 成矿流体发生去气 (CO_2) 作用后导致沉淀的方解石更为亏损 ^{13}C 。

从早期成矿→晚期成矿→晚期成矿晚阶段→成矿后期, 方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈升高趋势, 而 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈降低趋势, 早期成矿的方解石脉 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值比较稳定, 晚期成矿的方解石胶结物 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对离散, 特别是成矿晚阶段的方解石胶结物及矿后期方解石脉 $\delta^{18}\text{O}$ 值普遍较低, 且变化较大 ($12.2\text{‰} \sim 16.7\text{‰}$), 这说明成矿晚阶段→成矿后期, 热液流体与沿断裂下渗的地表大气降水流体进行了不同程度混合, 从而导致沉淀的方解石具有相对离散的低 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 同时, 由于大气降水流体富含沉积碳酸盐来源, $\delta^{13}\text{C}$ 值也一定程度增大。因大气降水流体的参与, 对已形成的铀矿化具有淋滤改造作用, 这与前述角砾岩矿石中硅质角砾出现弱的负 Ce 异常解释吻合。

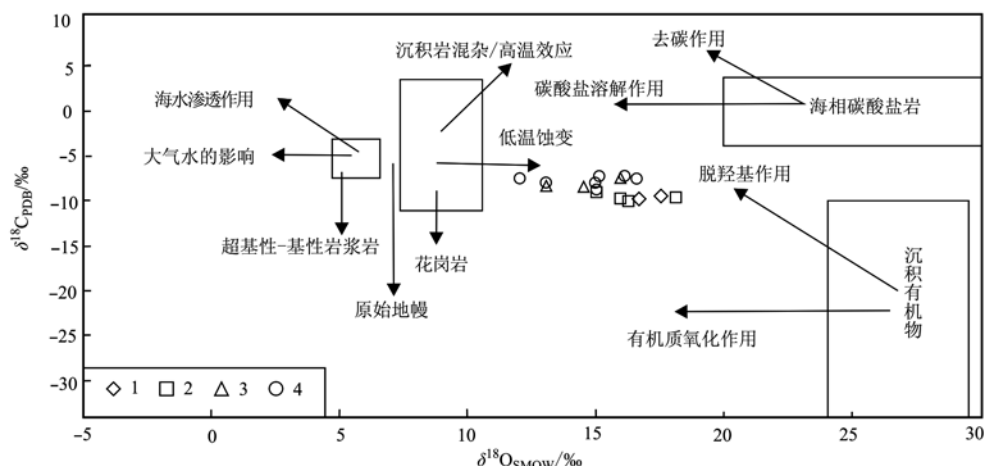


图5 向阳坪铀矿床方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图解[底图据刘家军等(2004)修改]

Fig. 5 The $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ diagram of calcite in the Xiangyangping uranium deposit (base diagram modified from Liu Jiajun *et al.*, 2004)

1—早期成矿方解石; 2—晚期成矿方解石; 3—成矿晚阶段方解石; 4—矿后期方解石

1—early mineralization calcite; 2—late mineralization calcite; 3—late metallogenic stage calcite; 4—post-ore stage calcite

5 讨论

矿岩时差大是几乎大部分花岗岩型铀矿床普遍存在的一个特点,有关花岗岩的成因研究基本也在围绕解释这一特征的基础上开展,目前主要有热水浸出说、深源矿化剂说、碱性岩浆岩成矿说等,近年来,有关矿化剂 ΣCO_2 在热液铀成矿中的作用近来越来越成为众多学者关注的热点(张彦春, 2002; 邓平等, 2003; 姜耀辉等, 2004; 巫建华等, 2005; 王正其等, 2007; 杜乐天等, 2009; 方适宜等, 2009)。

本次研究表明,向阳坪铀矿床矿石和成矿期的方解石和硅质脉与富有花岗岩体的稀土元素配分模式均显示明显继承性,暗示成矿物质来源于产铀岩体;方解石的碳氧同位素特征暗示成矿流体以深部来源为主导,具有明显地幔来源特征;从成矿期—矿化期的方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高、 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低趋势特点和硅质角砾出现弱的负 Ce 异常均表明,铀成矿在后期明显受大气降水流体作用影响。根据近年来在苗儿山中段铀矿的勘查和研究,结合本文分析数据及前人理论成果,笔者建立了苗儿山中段铀矿成矿模式(图6)。

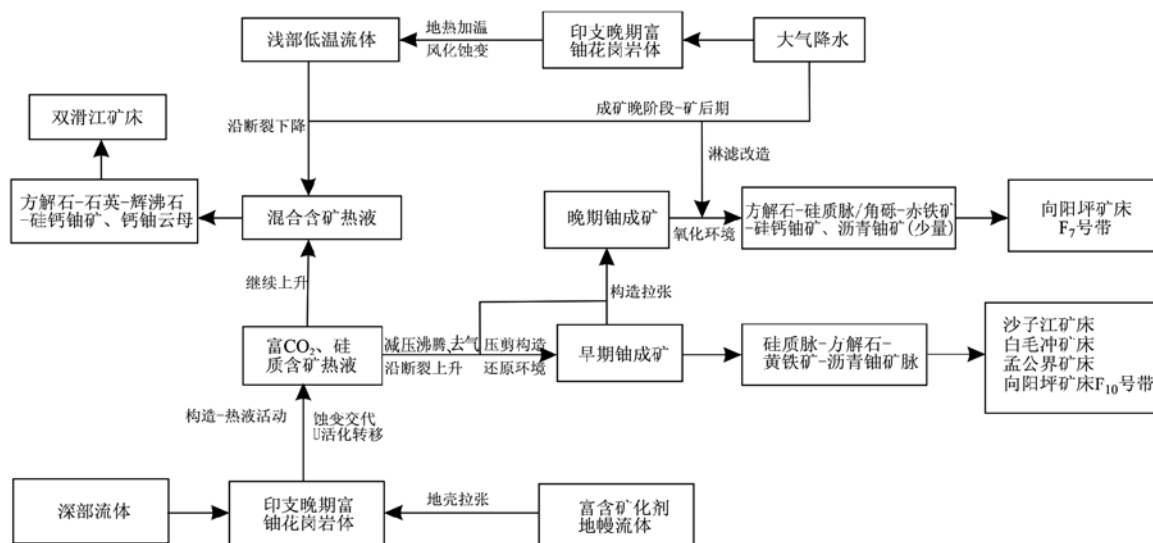


图6 苗儿山中段花岗岩型铀矿床成矿模式图

Fig. 6 Metallogenic model of granite-type uranium deposit in the middle segment of Miao'er Mountain

印支晚期-燕山早期构造研究活动形成了苗儿山中段的产铀岩体(香草坪岩体和豆乍山岩体),中生代晚期地壳拉张沟通了地壳与地幔,大量富含矿化剂 ΣCO_2 和氧化剂的地幔流体与深部流体混合,多期次的构造-热液活动使岩体发生自变质、热液蚀变作用,增加了铀源体中铀的活性,深部流体在上升过程中,萃取富铀花岗岩体中铀形成富硅、富 CO_2 含矿热液,铀主要以碳酸铀酰络合物形式运移,成矿热液沿断裂上升。一方面,在相对还原的环境下,伴随 CO_2 去气作用,络合物分解,铀在次级剪切断裂、裂隙、节理中沉淀下来,富集成矿,在保存条件较好的情况下,以硅质脉-方解石脉-黄铁矿-沥青铀矿脉组合形成沙子江、向阳坪 F_{10} 号带、孟公界、白毛冲矿床。另一方面,成矿热液沿断裂持续上升,在浅部与以大气降水为主的低温流体混合, CO_2 逸出,铀主要以氢氧铀酰络合物运移,在高氧逸度体系中,随灰沸石的沉淀,铀先后以硅钙铀矿、钙铀云母沉淀下来,形成以双滑江矿床为代表的方解石-石英-灰沸石-硅钙铀矿、钙铀云母组合(McLennan and Taylor, 1979; Fryer and Taylor, 1987; Fayek and Kyser, 1997)。

后期随剧烈的构造活动,早期形成的硅质脉经构造破碎形成大小不等的硅质角砾,在断裂伸展扩容带拉张膨大部位,富 CO_2 含矿热液由于减压沸腾,产生强烈的 CO_2 去气作用,络合物分解导致铀和方解石的叠加沉淀,以胶结物或网脉的形式与硅质角砾胶结形成构造角砾岩矿石。由于构造角砾具良好的连通性,在成矿晚阶段-矿后期,富氧化性的大气降水流体下渗,对已形成的铀矿体进行淋滤改造,大部分铀就地氧化,一部分铀随流体迁移在断裂底部碎裂岩地段再次富集,经过改造,大部分矿石品位降低,但厚度增大,形成以向阳坪 F_7 号带为代表的厚大矿体,矿物组合类型为方解石脉-硅质角砾-赤铁矿-硅钙铀矿、沥青铀矿(少量)。

6 结论

(1) 苗儿山中段向阳坪铀矿床硅质脉、方解石样品与角砾岩矿石具有总体类似的稀土元素配分模式,均为轻稀土元素富集、负Eu异常明显的右倾海鸥型稀土元素配分模式,总体继承了豆乍山花岗岩特征,暗示了铀源主要来自赋矿围岩,硅质脉和和硅质角砾在铀矿化过程伴随 ΣREE 富集和HREE

增加。

(2) 方解石碳氧同位素组成表明成矿流体以地幔来源为主导,成矿期方解石具有明显低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,暗示减压沸腾发生的 CO_2 去气作用是导致晚期铀沉淀的主要因素。从成矿期→矿后期,方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高, $\delta^{18}\text{O}$ 值呈降低趋势,同时硅质角砾具有弱的负Ce异常,均指示铀矿化晚期有大气降水流体参与并且后期受到淋滤改造。

(3) 建立了苗儿山中段铀矿成矿模式,以赋矿花岗岩为主要的成矿物质来源,地幔和深部来源流体形成富 CO_2 和硅质的成矿热液, CO_2 的去气作用和氧化还原条件的变化是热液铀成矿主要因素,指出了多期成矿叠加和后期大气降水淋滤改造是形成大矿体的主要模式,确定构造角砾岩型铀矿化是下一步寻找富、大矿体的一个重要找矿方向。

References

- Bai Daoyuan, Zhong Xiang, Jia Pengyuan, *et al.* 2014. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemistry Caledonian Miao'ershan pluton in the western part of the Nanling Mountains and their tectonic significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(3): 407 ~ 423 (in Chinese with English abstract).
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [A]. Henderson P. *Rare Earth Elements Geochemistry* [C]. Amsterdam: Elsevier, 63 ~ 144.
- 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): 153 ~ 161 (in Chinese with English abstract).
- Chen Youliang, Wei Jia, Ye Yongqin, *et al.* 2012. Significance and geochemical characteristics of REE and carbon-oxygen isotopes of calcites in the Zoige uranium orefield in Sichuan Province, China [J]. *Advances in Earth Science*, 27(10): 1 061 ~ 1 067 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yunjie, Fu Chengming, Wang Gang, *et al.* 2014. Carbon and oxygen isotopes in granite-type hydrothermal uranium deposits: A case of the Jiling uranium ore field in Longshou Mountain, Gansu Province [J]. *Geology and Exploration*, 50(4): 641 ~ 648 (in Chinese with English abstract).
- Deng Ping, Shen Weizhou, Ling Hongfei, *et al.* 2003. Uranium mineralization related to mantle fluid: A case study of the Xianshi deposit in

- the Xiazhuang uranium orefield[J]. *Geochimica*, 32(6): 520 ~ 528 (in Chinese with English abstract).
- Du Letian and Wang Wenguang. 2009. Alkaline mantle fluids and alkali-rich hydrothermal metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 599 ~ 610(in Chinese with English abstract).
- Fayek M and Kyser T K. 1997. Characterization of multiple fluid flow events and rare earth element mobility associated with formation of unconformity type uranium deposits in the Athabasca basin, Saskatchewan[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 627 ~ 658.
- Fang Shiyi, Chen Weifeng, Liang Yongdong, *et al.* 2009. Mineralization enrichment of uranyl mineral in mid-low temperature hydrothermal of Shuanghuajiang uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, 25(5): 270 ~ 276(in Chinese with English abstract).
- Friedman I and O'Neil J R. 1977. Complication of stable isotope fractionation factors of geochemical interest in data of geochemical interest [A]. Fleischer M. *Data of Geochemistry*[C]. Washington D C: United States Government Printing Office, 117.
- Fryer B J and Taylor R P. 1987. Rare earth element distributions in uraninites: Implications for ore genesis[J]. *Chemical Geology*, 63(1 ~ 2): 101 ~ 108.
- Huang Hongye, Xiao Jianjun, Ouyang Pingning, *et al.* 2008. Geochemical characteristics statistical analysis: An example from the altered tectonite type uranium deposit in Xiangyangping, Guangxi Province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 24(3): 211 ~ 216(in Chinese with English abstract).
- Jiang Tao, Liu Guo'an, Wu Jianyong, *et al.* 2018. Analysis of prospecting potential of deep uranium deposits in an uranium exploration area of north Guangdong Province[J]. *Geology and Exploration*, 52(1): 52 ~ 58(in Chinese with English abstract).
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong and Ling Hongfei. 2004. Mantle-derived fluid and uranium mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 491 ~ 499(in Chinese with English abstract).
- Li Wenjie, Liang Jincheng, Feng Zuohai, *et al.* 2006. Judging for characteristics of geochemical and structural environment of several caledonian granitoids in northeast Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 20(3): 353 ~ 360(in Chinese with English abstract).
- Li Wuwei, Wang Gan, Chen Weifeng, *et al.* 2010a. Geochemical and chronological characteristics of Xiangcaoping granite pluton in Miaoershan area[J]. *Uranium Geology*, 26(4): 215 ~ 227(in Chinese with English abstract).
- Li Wuwei, Wang Gan, Xu Laisheng, *et al.* 2010b. Analysis on uranium metallogenic condition of Dapingli-Xiangyangping area[J]. *World Nuclear Geoscience*, 27(2): 72 ~ 77 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuwei, Wang Gan, Xu Laisheng, *et al.* 2011a. Ore-controlling pattern and mechanism of strike-slip fault in Shazijiang uranium deposit [J]. *Uranium Geology*, 27(3): 146 ~ 151(in Chinese with English abstract).
- Liu Chengdong, Zhang Ai, Zhong Pengcheng, *et al.* 2010. The rock and mineral chemical characteristics of alkaline rocks in Zhuguang mining area of northern Guangdong and its relationship with uranium mineralization[J]. *Geology and Exploration*, 46(1): 33 ~ 40 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, He Mingqin, Li Zhiming, *et al.* 2010. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver-copper polymetallic ore concentration area in Lanping Basin of Yunnan Province and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 23(1): 1 ~ 10(in Chinese with English abstract).
- Liu Xinyang, Ouyang Pingning, Xiao Jianjun, *et al.* 2011b. Research on Xiangyangping area of Miaoershan fields uranium metallogenic conditions and key exploration area[J]. *Uranium Geology*, 554 ~ 561 (in Chinese with English abstract).
- McLennan S M and Taylor S R. 1979. Rare earth element mobility associated with uranium mineralisation[J]. *Nature*, 282(5736): 247 ~ 250.
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67: 551 ~ 578.
- O'Neil J R, Clayton R N and Mayeda T K. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 51(12): 5547 ~ 5558.
- Shao Fei, Xu Jianjun, He Xiaomei, *et al.* 2012. REE characteristics of Shannan deposit district in Xiangshan uranium orefield and its geological significance[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 53(3): 223 ~ 229(in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Ling Hongfei, Deng Ping, *et al.* 2010. Study on isotope geochemistry of uranium deposit 302 in northern Guangdong Province [J]. *Uranium Geology*, 26(2): 80 ~ 87 (in Chinese with English abstract).
- Shang Pengqiang, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, *et al.* 2006. Study on carbon and oxygen isotopes in granite-type hydrothermal uranium deposits a case of Xiazhuang uranium ore field in northern Guangdong[J]. *J. Mineral Petrol.*, 26(3): 71 ~ 76(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*

- ica Sinica, 84(8): 1 175 ~ 1 182 (in Chinese with English abstract).
- Shi Shaohua, Hu Ruizhong, Wen Hanjie, *et al.* 2011a. A 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.* 2011b. Isotope compositions of carbon, oxygen and sulfur in the Shazijiang granite-hosted uranium ore deposit, Northern Guangxi, China and their genetic significance[J]. J. Mineral Petrol., 31(1): 36 ~ 42 (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]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 30(1): 88 ~ 96 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengqi and Li Ziyang. 2007. Discussion on mantle-derived uranium mineralization[J]. Geological Review, 53(5): 599 ~ 610 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jianhua, Liu Shuai, Yu Dagan, *et al.* 2005. Mantle geofluid and uranium ore-formation model[J]. Uranium Geology, 21(4): 196 ~ 203 (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).
- Xie Xiaohua, Chen Weifeng, Zhao Kuidong, *et al.* 2008. Geochronology and geochemistry of dzouzhashan granite in northeast Guangxi[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1 302 ~ 1 312 (in Chinese with English abstract).
- Xu Weichang, Zhang Yunhong and Liu Yuebao. 1994. Progression in geochronological study and schemem of chronoclassification on Miaoershan granite batholith[J]. Acta Petrologica Sinica, 10(3): 330 ~ 337 (in Chinese with English abstract).
- Yan Bing, Yan Han, Zhou Li, *et al.* 2013. Isotopic characteristics of C, O, H and S in Xiangshan uranium orefield, Jiangxi province[J]. J. Mineral Petrol., 33(3): 36 ~ 42 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoyong, Luo Xiandong and Ling Mingxing. 2007. C-O stable isotopes of carbonate from cements of U-bearing sandstones in the Ordos Basin and their geological significance[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 37(8): 979 ~ 985 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guoyu, Wang Shengzhong, Wang Zhengqi, *et al.* 2007. Research on the REE characteristics and tracing in Xiangshan and Xiaozhuang uranium ore fields[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition), 30(1): 9 ~ 14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tao, Huang Hongye, Li Jie, *et al.* 2020. Geochemical characteristics and indicative significance of hydrothermal vein in the Xiangyangping uranium ore deposit, middle segment of Miaoershan, North of Guangxi[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 39(4): 423 ~ 440 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanchun. 2002. Alkaline mantle fluids and uranium ore-formation in Zhuguang and Guidong granitic massifs[J]. Uranium Geology, 18(4): 210 ~ 219 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Cong, Chen Youliang, Zhu Xiyang, *et al.* 2012. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values for carbonate from the Zoigê Uranium ore field and their genetic significance[J]. Sichuan Journal of Geology, 32(3): 272 ~ 275 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柏道远, 钟 响, 贾朋远, 等. 2014. 南岭西段加里东期苗儿山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(3): 407 ~ 423.
- 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): 153 ~ 161.
- 陈友良, 魏 佳, 叶永钦, 等. 2012. 若尔盖盖田方解石稀土元素与碳氧同位素地球化学特征及其意义[J]. 地球科学进展, 27(10): 1 061 ~ 1 067.
- 陈云杰, 傅成铭, 王 刚, 等. 2014. 花岗岩型热液铀矿床 C、O 同位素研究——以甘肃省龙首山菱岭矿区为例[J]. 地质与勘探, 50(4): 641 ~ 648.
- 邓 平, 沈渭洲, 凌洪飞, 等. 2003. 地幔流体与铀成矿作用: 以下庄矿田仙石铀矿床为例[J]. 地球化学, 32(6): 520 ~ 528.
- 杜乐天, 王文广. 2009. 碱性地幔流体与富碱热液成矿[J]. 矿床地质, 28(5): 599 ~ 610.
- 方适宜, 陈卫峰, 梁永东, 等. 2009. 双滑江铀矿床低温热液铀酰矿物富集成矿作用[J]. 铀矿地质, 25(5): 270 ~ 276.
- 黄宏业, 肖建军, 欧阳平宁, 等. 2008. 基于多元统计分析的微量元素地球化学特征分析——以广西资源县向阳坪地区构造蚀变岩型铀矿为例[J]. 地质找矿论丛, 24(3): 211 ~ 216.
- 姜 涛, 刘国安, 吴建勇, 等. 2018. 粤北某铀矿勘查区深部铀矿找矿潜力分析[J]. 地质与勘探, 54(1): 52 ~ 58.
- 姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞. 2004. 地幔流体与铀成矿作用[J]. 地学前缘, 11(2): 491 ~ 499.
- 李文杰, 梁金城, 冯佐海, 等. 2006. 桂东北地区几个加里东期花岗岩体的地球化学特征及其构造环境判别[J]. 矿产与地质, 20

- (3): 353~360.
- 李妮巍, 王 敢, 陈卫峰, 等. 2010a. 香草坪花岗岩体年代学和地球化学特征[J]. 铀矿地质, 26(4): 215~227.
- 李妮巍, 王 敢, 许来生, 等. 2010b. 大坪里-向阳坪地区铀成矿条件分析[J]. 世界核地质科学, 27(2): 72~77.
- 李妮巍, 王 敢, 许来生, 等. 2011. 沙子江铀矿床走滑构造控矿规律及控矿机制[J]. 铀矿地质, 27(3): 146~151.
- 刘成东, 张 爱, 钟鹏程, 等. 2010. 粤北诸广矿区碱交代岩岩石化学和矿物化学特征及其与铀成矿关系[J]. 地质与勘探, 46(1): 33~40.
- 刘家军, 何明勤, 李志明, 等. 2004. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质, 23(1): 1~10.
- 刘鑫扬, 欧阳平宁, 肖建军, 等. 2011. 苗儿山矿田向阳坪地区铀成矿条件及重点勘查地段研究[J]. 铀矿地质, 27(6): 554~561.
- 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.
- 沈渭洲, 凌洪飞, 邓 平, 等. 2010. 粤北302铀矿床同位素地球化学研究[J]. 铀矿地质, 26(2): 80~87.
- 商朋强, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 2006. 花岗岩型热液铀矿床C、O同位素研究——以粤北下庄铀矿田为例[J]. 矿物岩石, 26(3): 71~76.
- 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. 2011b. 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.
- 石少华, 胡瑞忠, 温汉捷, 等. 2011c. 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报, 30(1): 88~96.
- 巫建华, 刘 帅, 余达淦, 等. 2005. 地幔流体与铀成矿模式[J]. 铀矿地质, 21(4): 196~203.
- 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.
- 王正其, 李子颖. 2007. 幔源铀成矿作用探讨[J]. 地质论评, 53(5): 608~615.
- 徐伟昌, 张运洪, 刘跃宝. 1994. 苗儿山岗岩复式岩基年代学研究的进展及时代划分方案[J]. 岩石学报, 10(3): 330~337.
- 谢晓华, 陈卫峰, 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.
- 杨晓勇, 罗贤冬, 凌明星. 2007. 鄂尔多斯盆地含铀砂岩碳酸盐胶结物 C-O 同位素研究及地质意义[J]. 中国科学技术大学学报, 37(8): 979~985.
- 严 冰, 严 寒, 周 莉, 等. 2013. 江西相山火山岩型铀矿 C、O、H、S 同位素特征及意义[J]. 矿物岩石, 33(3): 47~53.
- 张国玉, 王生忠, 王正其, 等. 2007. 相山、下庄铀矿田稀土元素特征及示踪研究[J]. 东华理工学院学报, 30(1): 9~14.
- 张 涛, 黄宏业, 李 杰, 等. 2020. 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, 39(4): 423~440.
- 张彦春. 2002. 诸广、贵东花岗岩中碱性幔流体与铀成矿[J]. 铀矿地质, 18(4): 210~219.
- 赵 聪, 陈友良, 朱西养, 等. 2012. 若尔盖铀矿田碳氧同位素特征及其成因[J]. 四川地质学报, 32(3): 272~275.