

黔北凤冈地区碳酸盐型铀矿成矿物质来源研究

吴林锋¹, 徐进鸿^{3,4}, 王琼^{1,2}, 彭松¹, 范云飞¹, 卢平¹

(1. 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; 2. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 铜仁学院 资源与环境研究所, 贵州 铜仁 554300; 4. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

[摘要] 为了探究黔北凤冈地区碳酸盐型铀矿化的物质来源, 文章对黔北凤冈地区的沙坪铀矿点高品位矿石中的方解石开展 LA-ICP-MS 微量元素研究。研究表明: 沙坪铀矿点受近南北向杨家堡断裂控制, 赋存于娄山关组和桐梓组白云岩中, 成矿过程分为方解石 (Cal-1)-石英-沥青铀矿-黄铁矿 (Py-1) 阶段和方解石 (Cal-2)-石英-萤石-有机质-黄铁矿 (Py-2) 阶段; LA-ICP-MS 分析结果显示两阶段方解石中稀土元素在球粒陨石标准化配分模式图上具有明显的左倾特征, Y/Ho 值集中于 23.37~45.79 和 31.47~45.87。这些地球化学特征与围岩和下伏牛蹄塘组富铀泥岩相似, 因此推测围岩娄山关组白云岩和桐梓组白云岩以及下伏牛蹄塘组富铀泥岩共同为沙坪铀矿点提供了成矿物质。

[关键词] 碳酸盐岩型铀矿; 微量元素; 方解石; 黔北

[文章编号] 1672-0636(2023)03-0715-14 **[中图分类号]** P619.14 **[文献标志码]** A

Study on the Sources of Carbonate-Type Uranium Mineralization in Fenggang Area, Northern Guizhou

WU Linfeng¹, XU Jinhong^{2,3}, WANG Qiong¹, PENG Song¹, FAN Yunfei¹, LU Ping¹

(1. Geological Survey Institute for Nuclear Resources, Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang, Guizhou 550005, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. Institute of Resources and Environment, Tongren University, Tongren, Guizhou 554300, China; 4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: In order to explore the source of carbonate-type uranium mineralization, this paper studied the trace elements of calcite by La-ICP-MS in the Shaping high-grade uranium ore occurrence in Fenggang area of northern Guizhou. The results showed that the Shaping U-ore occurrence was endowed in dolomite of the Tongzi Formation and the Loushanguan Formation and controlled by the Yangjiabao fault in the north-south direction, the mineralization process was divided into calcite (Cal-1)-quartz-pitchblende-pyrite (Py-1) phase and calcite (Cal-2)-quartz-fluorite-organic matter-pyrite (Py-2) phase. The results of La-ICP-MS analysis showed that the chondrite normalized REE pattern of Cal-

[基金项目] 贵州省重要类型铀矿成矿规律与找矿预测研究项目 (编号: MCHC-ZG20212206-2) 和贵州省教育厅高等学校科学研究青年项目 (编号: 黔教技[2022]349号) 联合资助。

[收稿日期] 2023-06-01 **[改回日期]** 2023-08-03

[作者简介] 吴林锋 (1982—), 男, 贵州贵阳人, 高级工程师, 学士, 主要从事地质矿产勘查研究。E-mail: wulinfeng2022@126.com

[通信作者] 徐进鸿 (1989—), 男, 贵州遵义人, 副教授, 博士, 主要从事矿床地球化学研究。E-mail: jgyxjh@gztrc.edu.cn

1 and Cal-2 had obvious left-leaning characteristics, and the Y/Ho ratios were concentrated in 23.37~45.79 and 31.47~45.87, respectively. These geochemical features are similar to the surrounding rocks and the uranium-rich mud of the Niutitang Formation, so it is speculated that the dolomite of the Tongzi Formation and the Loushanguan Formation, and the uranium-rich mud of the Niutitang Formation together provided the uranium source for the Shaping occurrence.

Keywords: carbonate-type uranium deposit; trace element; calcite; northern Guizhou

碳硅泥岩型铀矿床作为我国四大铀矿工业类型之一,广泛分布于我国华南板块(图1a)^[1],其亚类包括黑色岩系型、磷块岩型和碳酸盐岩型铀矿^[2]。贵州具有丰富的碳硅泥岩型铀矿资源,已发现代表性矿床包括龙湾大型铀矿床(黑色岩系型)^[3-4]、金沙岩孔中型铀矿床(磷块岩型)^[5]和白马洞中型铀矿床(碳酸盐岩型)^[6-7],其中白马洞铀矿床也是贵州唯一进行过工业开采的铀矿床。

除位于黔中的白马洞铀矿床外,在黔北和黔西南等地亦广泛发育碳酸盐型铀矿床(点),

如黔北凤冈地区大鱼塘小型铀矿床和黔西南兴义大际山小型铀矿床(图1b)^[8-11]。凤冈地区处于贵州碳酸盐型铀矿有利成矿区带上,已发现大鱼塘铀矿床和沙坪等8处铀矿点(图2)^[11-12]。前人以往对凤冈地区铀矿床(点)进行了一定程度的勘查工作^[9,13-14],近期开展了部分成矿流体特征和成矿物质来源的研究^[11-12,15]。张小强等^[15]通过矿石全岩粉末微量元素分析认为凤冈大鱼塘(安家沟)矿床成矿物质来源具有多元性,深部岩浆热液流体参与铀成矿作用。王琼等^[12]通过显微岩相学、扫描电镜-能谱分析、激

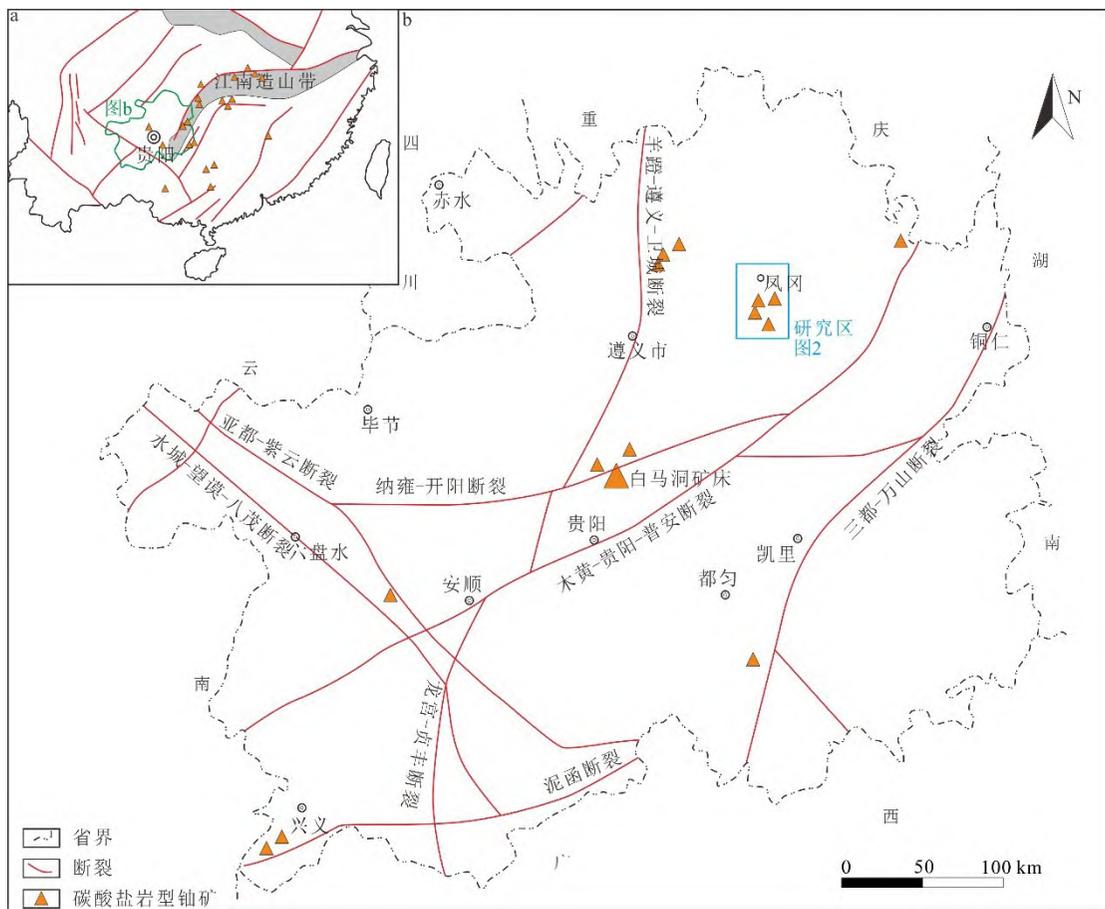


图1 贵州省大地构造位置(a)及碳酸盐岩型铀矿分布(b)(据文献[1,11-12]修改)

Fig. 1 Geotectonic location (a) and distribution of carbonate-type uranium deposits (b) in Guizhou Province (modified after references[1,11-12])

光拉曼、C-O 同位素等研究认为凤冈地区铀矿床(点)成矿物质可能主要来源于深部牛蹄塘组富铀泥岩,其形成与深部侵位的古油藏有关^[12]。全岩微量、稀土元素和 C-O 同位素分析表明这些铀矿床(点)中的方解石脉来源于围岩海相碳酸盐岩的溶解,而黄铁矿 S 同位素分析表明其 S 来源于下部沉积岩和变质岩基底,推测可能有生物成因硫的参与^[11]。

前人的研究成果为进一步揭示黔北凤冈地区铀矿床(点)成因奠定了良好基础,但是其分析结果多基于全岩粉末,有关成矿物质来源还存在一定争议。沙坪铀矿点伽马照射量率最高达 2 000 nC/(kg·h),具有良好的找矿前景^[11-12,15]。本文在详细野外地质考察的基础上,采用原位分析手段对沙坪铀矿点开展系统的矿物学和方解石原位微量元素研究,探讨沙坪铀矿点成矿物质来源,进而为揭示黔北凤冈

地区铀矿床(点)成因提供新的证据。

1 区域地质背景

黔北凤冈地区大地构造位置属江南造山带西缘,位于羊蹬-遵义-卫城-纳雍-开阳和木黄-贵阳-普安三条区域性深大断裂围限区域(图 1)^[1]。区内出露地层由老至新主要有寒武系、奥陶系、志留系、二叠系和三叠系,白垩系仅局部出露,缺失泥盆系、石炭系、侏罗系(图 2)^[11-12],岩性以海相碳酸盐岩为主,其次是碎屑岩。凤冈地区矿床(点)主要赋存于寒武系白云岩、奥陶系白云岩和二叠系灰岩中(图 2)^[11-12]。研究区主要经历雪峰-加里东期洋陆转换和印支-燕山期碰撞造山运动,褶皱变形和断层构造普遍发育(图 2)。区内矿床(点)主要分布于凤冈-进化倒转向斜的东翼和艾坝背斜内,受近南北向鸭蛋沟和杨家堡断层控制,呈带状分布(图 2)。

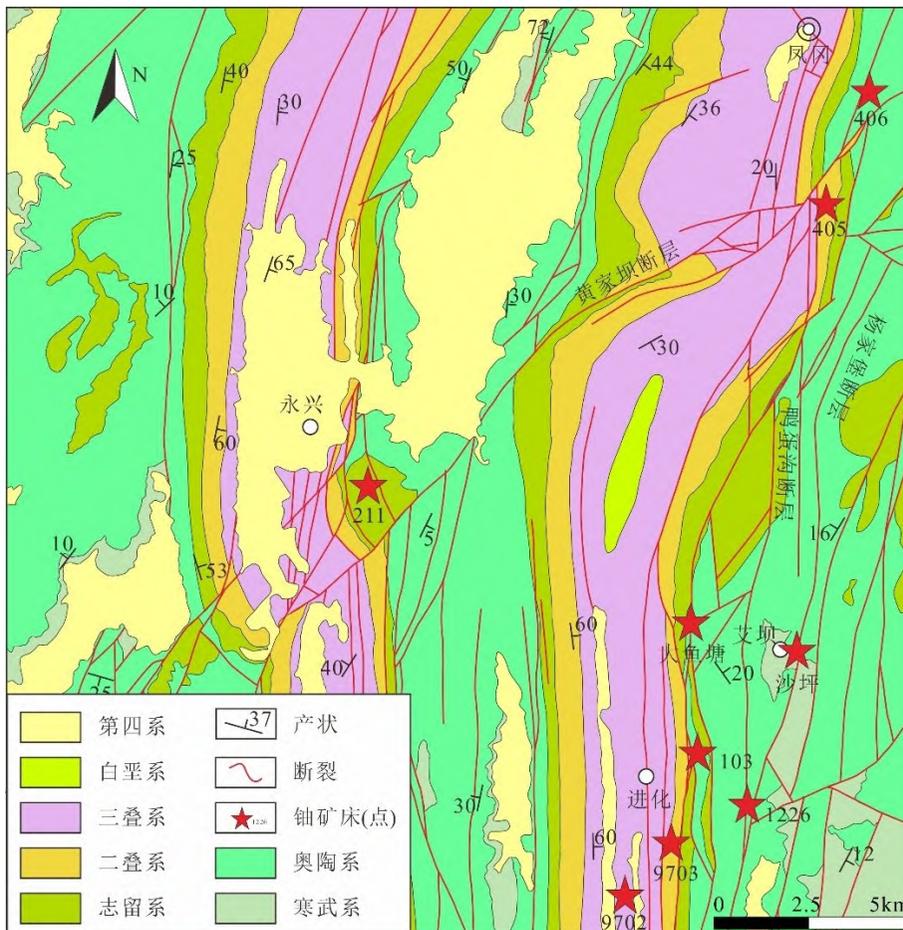


图 2 黔北凤冈地区地质简图及铀矿床(点)分布(据文献[11-12]修改)

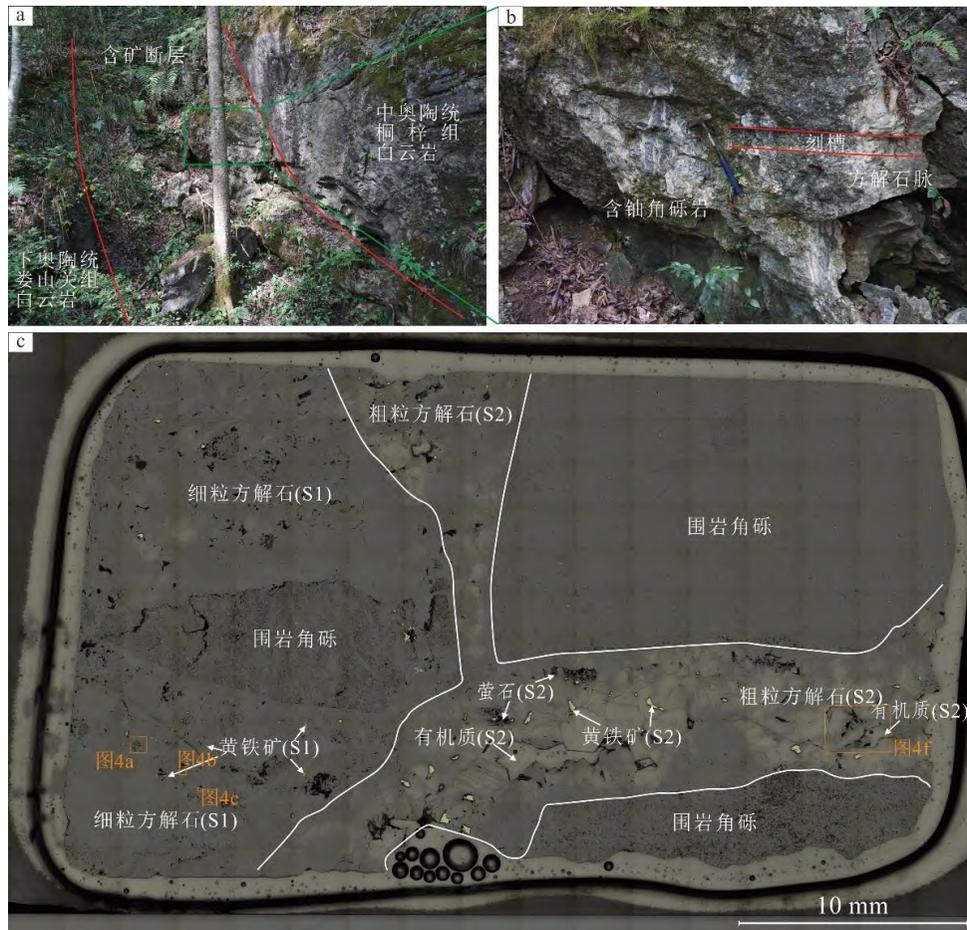
Fig. 2 Geological sketch and distribution of uranium deposits (occurrences) in Fenggang area, northern Guizhou (modified after references[11-12])

2 矿点地质特征

沙坪铀矿点位于大鱼塘铀矿床南东侧的艾坝背斜中(图2),是黔北凤冈地区碳酸盐型铀矿的典型代表之一。艾坝背斜轴向为近南北向,轴面呈直立的宽缓褶皱。背斜发育近南北向的高角度正断层,不仅导致褶皱一翼或者两翼缺失部分地层,还控制褶皱内铀矿化的分布。沙坪铀矿点产于艾坝背斜东翼的杨家堡断层中,矿化呈透镜状,上下两盘地层分别为中奥陶统桐梓组白云岩和下奥陶统娄山关组白云岩(图3a)。矿石构造以角砾状构造为主,少量为脉状构造(图3b)。角砾通常为棱角-次棱角状和不规则状的围岩碳酸盐岩,胶结物主要为方解石脉(图3b),少量为含黄铁矿、黑色有机质的细脉。矿石结构主要为自形-半自形结构、胶状结构和充填结构等(图3c)。矿石矿物以沥青铀矿和黄铁矿为主(图3c、图4),脉石矿物主要包括

方解石、有机质、萤石和石英等(图3c、图4)。

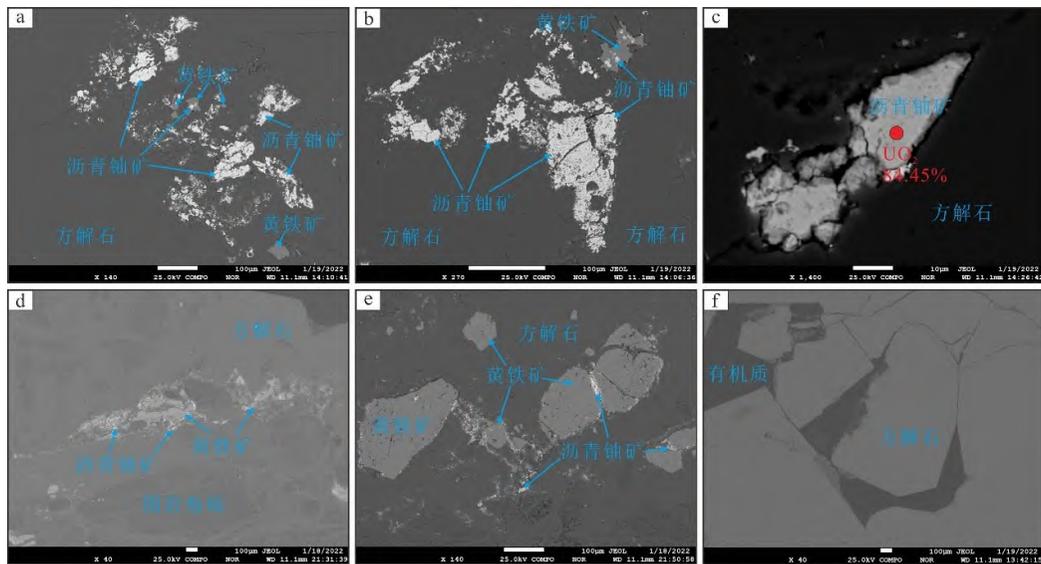
野外矿脉穿插关系、手标本和镜下矿物共生组合表明沙坪铀矿点成矿过程由两个阶段构成(图3c)。第I阶段(S1):方解石(Cal-1)-石英-沥青铀矿-黄铁矿(Py-1)阶段,通常出现于矿脉的边部,含有围岩角砾,被晚阶段矿脉穿插交代。该阶段方解石和黄铁矿以他型细粒为主(图3c),黄铁矿中含有细粒沥青铀矿,又与沥青铀矿、方解石等共生(图4a、b)。沥青铀矿主要与细粒方解石共生(图4a~e),或被黄铁矿包裹(图4a、b),或产于黄铁矿裂隙中(图4d、e)。第II阶段(S2):方解石(Cal-2)-石英-萤石-有机质-黄铁矿(Py-2)阶段,主要出现于矿脉中部。黄铁矿为主要金属矿物,颗粒粗大,呈半自形,通常产于自形方解石的粒间(图3c)。方解石颗粒较大,呈自形-半自形(图3c、图4f)。萤石颗粒较小,以短的细脉状产出(图3c)。有机质颗粒较大,产于粗粒方解石的粒间(图3c、图4f)。



S1—成矿第I阶段; S2—成矿第II阶段。

图3 沙坪铀矿点野外照片(a,b)和典型样品反射光照片(c)

Fig. 3 Photographs showing the outcrops (a,b) and reflection photo (c) of typical sample from Shaping uranium ore occurrence



a—与方解石、黄铁矿共生的沥青铀矿；b—方解石中沥青铀矿和黄铁矿，注意黄铁矿中含有沥青铀矿；c—与方解石共生的沥青铀矿；d—方解石、沥青铀矿和黄铁矿交代围岩角砾；e—方解石中沥青铀矿和黄铁矿，沥青铀矿主要分布于黄铁矿裂隙间；f—与方解石共生的有机质。

图4 沙坪铀矿点显微特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of Shaping uranium ore occurrence

3 分析方法

先对采自沙坪铀矿点的4件样品进行边部和氧化的部分去除,然后磨制成探针片进行电子探针和方解石原位微量元素分析,所有实验均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。

黄铁矿、沥青铀矿和方解石的成分分析使用JEOL JXA-8230型电子探针完成。实验条件:电压为25 kV、电流为10 nA、束斑为1~10 μm(根据矿物颗粒进行选择)。黄铁矿元素分析时使用的标样和检测限分别为:Fe(黄铁矿, 112×10^{-6})、Ni(镍黄铁矿, 114×10^{-6})、Co(镍黄铁矿, 109×10^{-6})、S(黄铁矿, 72×10^{-6})、U(金属铀, 184×10^{-6})、V(金属钒, 101×10^{-6})。铀矿物元素分析时使用的标样和检测限分别为:UO₂(金属铀, 359×10^{-6})、CaO(辉石, 106×10^{-6})、SiO₂(辉石, 190×10^{-6})、ThO₂(独居石, 396×10^{-6})、PbO(铬铅矿, 471×10^{-6})。方解石分析使用的标样和对应氧化物的检测限分别为:FeO(辉石, 114×10^{-6})、MnO(辉石, 104×10^{-6})、SrO(铍铝石, 287×10^{-6})、MgO(辉石, 126×10^{-6})、UO₂(金属铀, 196×10^{-6})、CaO(方解石, 62×10^{-6})。分析数据使用ZAF方法进行校正。

方解石原位微量元素测试实验在LA-ICP-

MS上完成。激光剥蚀系统为GeoLasPro,质谱为Agilent 7900,He作为载气和增敏气体,速率分别为450 mL/min和3 mL/min。实验条件:激光能量为4 J/cm²,频率为5 Hz,束斑为44 μm。采用NIST 610作为分析外标,NIST 612和方解石标样MACS-3作为质控。单个点位测试过程由20 s前背景信号收集、40 s剥蚀过程和30 s后背景信号收集组成。原始测试数据使用ICPMS Data Cal软件进行离线处理^[16],采用多外标、无内标法进行数据校正,采用电子探针获得的方解石平均Ca含量作为归一化元素消除激光剥蚀量变化对灵敏度漂移的影响^[17]。

4 分析结果

4.1 矿物成分

电子探针分析表明沙坪铀矿点Py-1中w(Fe)和w(S)值分别为44.26%~46.69%(平均值为45.74%)和51.21%~54.50%(平均值为53.21%),w(Ni)值变化很大,最高为1.45%,w(Co)、w(U)和w(V)值全部低于检出限(表1)。Py-2中w(Fe)和w(S)值分别为46.35%~46.85%(平均值为46.57%)和53.38%~54.20%(平均值为53.79%)。w(Ni)值大部分低于检出限,最高为0.25%,w(Co)、w(U)和w(V)值全部低于检出限(表1)。

表1 沙坪铀矿点黄铁矿电子探针分析结果 $w(B)/\%$ Table 1 EPMA results of pyrite from Shaping uranium ore occurrence $w(B)/\%$

阶段	分析编号	Fe	Ni	Co	S	U	V	总量
S1	21SP-II-2-A3-PY1	45.61	0.11	b.l.d	51.21	b.l.d	b.l.d	96.97
	21SP-II-2-A3-PY1	45.80	0.12	b.l.d	51.39	b.l.d	b.l.d	97.34
	21SP-II-3-1-py1	44.26	1.45	b.l.d	53.21	b.l.d	b.l.d	98.92
	21SP-II-3-1-py2	44.78	0.68	b.l.d	52.54	b.l.d	b.l.d	98.02
	21SP-7-PY-2	46.50	b.l.d	b.l.d	54.05	b.l.d	b.l.d	100.60
	21SP-7-PY-3	46.69	b.l.d	b.l.d	54.14	b.l.d	b.l.d	100.89
	21SP-7-PY4	46.42	b.l.d	b.l.d	54.24	b.l.d	b.l.d	100.70
	21SP-7-PY5	46.03	b.l.d	b.l.d	54.31	b.l.d	b.l.d	100.38
	21SP-7-PY6	46.07	b.l.d	b.l.d	54.50	b.l.d	b.l.d	100.64
S2	21SP-5-2-Py1	46.80	b.l.d	b.l.d	53.69	b.l.d	b.l.d	100.57
	21SP-5-2-Py2	46.43	0.25	b.l.d	53.84	b.l.d	b.l.d	100.53
	21SP-5-2-Py3	46.85	b.l.d	b.l.d	53.80	b.l.d	b.l.d	100.73
	21SP-5-2-Py4	46.42	0.20	b.l.d	53.80	b.l.d	b.l.d	100.46
	21SP-5-2-Py5	46.53	b.l.d	b.l.d	54.20	b.l.d	b.l.d	100.74
	21SP-5-2-Py6	46.42	0.21	b.l.d	53.55	b.l.d	b.l.d	100.25
	21SP-5-2-Py7	46.35	b.l.d	b.l.d	53.38	b.l.d	b.l.d	99.83
	21SP-5-2-Py8	46.71	0.12	b.l.d	54.09	b.l.d	b.l.d	100.96

注: b.l.d表示低于检出限。

电子探针分析表明沙坪铀矿点沥青铀矿中 $w(\text{UO}_2)$ 值变化较大,为 68.2%~85.32%(平均值为 78.83%);含有大量 CaO 和 SiO_2 ,其质量分数分别为 4.76%~7.87%(平均值为 6.05%)

和 1.14%~10.07%(平均值为 4.81%),可能与沥青铀矿与方解石和石英共生有关; $w(\text{PbO})$ 值大部分低于检出限,最高含量为 0.31%, $w(\text{ThO}_2)$ 值全部低于检出限(表2)。

表2 沙坪矿点沥青铀矿电子探针分析结果 $w(B)/\%$ Table 2 EPMA results of pitchblende from Shaping uranium ore occurrence $w(B)/\%$

测试编号	UO_2	CaO	SiO_2	ThO_2	PbO	总量
21SP-II-3-1-U1	70.84	5.13	9.81	b.l.d	0.03	85.81
21SP-II-3-1-U2	68.20	7.87	10.07	b.l.d	0.31	86.45
21SP-5-2-U1	85.32	5.74	1.14	b.l.d	b.l.d	92.19
21SP-5-2-U2	84.49	6.71	1.63	b.l.d	0.18	93.01
21SP-5-2-U3	83.82	5.60	1.97	b.l.d	0.09	91.47
21SP-5-2-U4	84.45	5.99	2.24	b.l.d	b.l.d	92.71
21SP-5-2-U5	78.81	4.76	5.22	b.l.d	0.04	88.88

注: b.l.d表示低于检出限。

电子探针分析表明沙坪铀矿点 Cal-1 以 CaO 和 MgO 为主,质量分数分别为 55.98%~56.82%(平均值为 56.47%) 和 0.14%~0.62%(平均值为 0.31%); $w(\text{FeO})$ 和 $w(\text{SrO})$ 值大部分低于检出限,最高分别为 0.06% 和 0.10%; $w(\text{MnO})$ 和 $w(\text{UO}_2)$

全部低于检出限(表3)。Cal-2 成分较单一,以 CaO 和 MgO 为主,质量分数分别为 55.21%~56.97%(平均值为 56.41%) 和 0.07%~0.43%(平均值为 0.20%); $w(\text{FeO})$ 、 $w(\text{SrO})$ 、 $w(\text{MnO})$ 和 $w(\text{UO}_2)$ 值全部低于检出限(表3)。

表3 沙坪铀矿点方解石电子探针分析结果 $w(B)/\%$ Table 3 EPMA results of calcite from Shaping uranium ore occurrence $w(B)/\%$

阶段	测试编号	FeO	MnO	SrO	MgO	UO ₂	CaO	总量
S1	21SP-5-2-Cc06	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.15	b.l.d	56.66	56.83
	21SP-5-2-Cc07	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.16	b.l.d	56.66	56.94
	21SP-5-2-Cc08	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.18	b.l.d	56.81	57.02
	21SP-5-2-Cc09	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.14	b.l.d	56.82	57.01
	21SP-5-2-Cc10	b.l.d	b.l.d	0.09	0.19	b.l.d	56.03	56.34
	21SP-II-2-Cc-02	0.04	b.l.d	b.l.d	0.41	b.l.d	55.98	56.43
	21SP-II-2-Cc-03	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.62	b.l.d	56.14	56.80
	21SP-II-2-Cc-04	0.06	b.l.d	b.l.d	0.55	b.l.d	56.43	57.05
	21SP-II-2-Cc-05	b.l.d	b.l.d	0.10	0.31	b.l.d	56.81	57.25
	S2	21SP-7-Cc-1	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.13	b.l.d	56.71
21SP-7-Cc-2		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.20	b.l.d	55.21	55.46
21SP-7-Cc-3		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.17	b.l.d	56.73	56.95
21SP-7-Cc-4		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.24	b.l.d	56.88	57.21
21SP-7-Cc-5		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.41	b.l.d	56.54	56.97
21SP-7-Cc-6		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.19	b.l.d	56.10	56.30
21SP-7-Cc-7		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.19	b.l.d	56.77	57.04
21SP-7-Cc-8		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.12	b.l.d	56.70	56.93
21SP-7-Cc-9		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.16	b.l.d	56.52	56.68
21SP-7-Cc-10		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.43	b.l.d	56.18	56.67
21SP-5-2-Cc01		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.12	b.l.d	56.39	56.54
21SP-5-2-Cc02		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.07	b.l.d	56.77	56.90
21SP-5-2-Cc03		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.18	b.l.d	56.49	56.71
21SP-5-2-Cc04		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.12	b.l.d	55.84	56.06
21SP-5-2-Cc05		b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.10	b.l.d	56.97	57.12

注: b.l.d表示低于检出限。

4.2 方解石微量元素

原位分析表明沙坪铀矿点 Cal-1 中微量元素含量很低(表 4),在多元素上地壳标准化图解上(图 5a),仅 Sr 和 U 发生部分富集,质量分数分别为 $294 \times 10^{-6} \sim 567 \times 10^{-6}$ (平均值为 413×10^{-6})和 $1.15 \times 10^{-6} \sim 60.2 \times 10^{-6}$ (平均值为 14.7×10^{-6})。Cal-2 与 Cal-1 相似,微量元素含量很低,仅 Sr 和 U 发生部分富集(图 5b),质量分数分别为 $167 \times 10^{-6} \sim 986 \times 10^{-6}$ (平均值为 446×10^{-6})和 $0.033 \times 10^{-6} \sim 28.7 \times 10^{-6}$ (平均值为 5.97×10^{-6})。

沙坪铀矿点 Cal-1 中稀土含量相对较高(表

4),总量(ΣREE)为 $3.41 \times 10^{-6} \sim 35.54 \times 10^{-6}$ (平均值为 14.92×10^{-6})。轻稀土元素与重稀土元素比值为 $5.94 \sim 17.35$ (平均值为 8.90), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $4.52 \sim 74.47$ (平均值为 23.90),富集轻稀土元素。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 $2.15 \sim 7.08$ (平均值为 4.64), $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $1.38 \sim 8.07$ (平均值为 3.41),说明轻稀土(LREE)和重稀土(HREE)分异都不明显。 δEu 值为 $0.43 \sim 0.71$ (平均值为 0.60), δCe 值为 $0.87 \sim 1.21$ (平均值为 0.99),在球粒陨石标准化配分模式图上具有明显的 Eu 负异常(图 5c)。

Cal-2 中稀土元素含量很低(表 4),总量

表4 沙坪矿点方解石LA-ICP-MS分析结果 w(B)/%
Table 4 LA-ICP-MS results of calcite from Shaping uranium ore occurrence w(B)/10⁻⁶

成矿阶段	测试编号	Na	Mg	Si	P	K	Sc	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Sr	Y	Mo	Cd	In	Sn		
S1	2ISP-5-2-Ce6	7.29	1 857	427	41.5	2.94	b.l.d	1.45	b.l.d	35.2	103	0.030 1	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.07	b.l.d	b.l.d	b.l.d	567	1.87	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	
	2ISP-5-2-Ce7	b.l.d	1 111	b.l.d	44.7	b.l.d	b.l.d	0.192	b.l.d	29.3	92.5	0.041 3	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.022 4	b.l.d	b.l.d	b.l.d	495	1.66	0.011 4	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	
	2ISP-5-2-Ce8	6.21	1 503	444	64.7	23.1	0.442	110	b.l.d	78.8	146	b.l.d	0.681	b.l.d	2.00	0.209	b.l.d	2.89	0.041 8	343	1.94	9.52	b.l.d	b.l.d	0.007 93	1.62	
	2ISP-5-2-Ce9	6.10	1 951	b.l.d	49.7	22.9	0.063 4	1.11	1.31	52.7	87.2	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.197	0.016 7	b.l.d	b.l.d	b.l.d	330	1.01	0.044 8	0.111	0.003 28	b.l.d	b.l.d	
	2ISP-5-2-Ce10	5.23	2 031	666	47.4	62.9	b.l.d	0.366	b.l.d	38.0	90.7	0.017 3	0.251	b.l.d	0.453	0.027 0	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.068 9	346	1.55	0.084 8	b.l.d	0.001 55	0.183	b.l.d
	2ISP-7-Ce17	2.08	2 434	b.l.d	69.3	6.48	b.l.d	1.14	1.07	60.3	108	0.029 4	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.026 2	294	1.02	0.011 1	b.l.d	0.001 62	0.151	b.l.d
	2ISP-7-Ce18	b.l.d	820	315	54.2	b.l.d	1.72	1.06	b.l.d	42.1	95.6	0.033 4	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.074 2	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	468	5.54	0.022 4	b.l.d	b.l.d	0.229	b.l.d
	2ISP-7-Ce20	1.42	951	519	68.6	13.2	3.20	1.10	1.00	43.6	155	0.057 0	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.160	b.l.d	0.512	0.045 3	429	6.43	0.043 3	b.l.d	b.l.d	0.003 17	0.168	b.l.d
	2ISP-7-1	2.26	1 186	616	64.0	b.l.d	b.l.d	0.585	b.l.d	28.7	110	0.053 0	0.207	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	414	2.09	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.352	b.l.d
	2ISP-7-2	b.l.d	1 246	646	62.0	b.l.d	b.l.d	0.789	1.80	29.0	130	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.047 2	b.l.d	0.670	b.l.d	448	3.24	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.006 24	0.290	b.l.d
2ISP-7-3	b.l.d	1 246	607	58.1	b.l.d	b.l.d	0.415	b.l.d	34.0	119	0.035 4	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.023 0	b.l.d	0.822	b.l.d	389	2.13	0.009 51	b.l.d	b.l.d	0.005 83	0.305	b.l.d	
2ISP-7-4	1.49	969	614	61.4	7.88	b.l.d	2.67	b.l.d	35.0	173	b.l.d	1.59	b.l.d	b.l.d	0.031 3	b.l.d	b.l.d	b.l.d	284	1.65	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	
2ISP-7-5	2.29	1 951	439	67.5	23.5	0.219	0.585	b.l.d	30.1	119	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.019 6	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.11	289	2.65	0.010 9	b.l.d	0.005 03	b.l.d	b.l.d	
2ISP-7-7	b.l.d	903	553	73.8	b.l.d	b.l.d	11.1	b.l.d	102	114	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.004 77	b.l.d	b.l.d	b.l.d	700	0.365	0.187	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	
2ISP-7-9	b.l.d	749	469	50.3	b.l.d	b.l.d	9.94	b.l.d	87.7	110	0.044 0	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.409	b.l.d	986	0.179	0.027 4	b.l.d	0.001 40	b.l.d	b.l.d		
2ISP-7-Ce12	1.79	2 066	560	56.1	b.l.d	b.l.d	0.769	1.36	26.2	266	b.l.d	b.l.d	0.386	b.l.d	0.241	0.017 1	b.l.d	0.260	0.013 7	241	0.334	b.l.d	b.l.d	0.001 67	0.149	b.l.d	
2ISP-7-Ce13	1.21	1 731	473	53.7	3.62	b.l.d	3.10	b.l.d	30.4	439	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.023 2	b.l.d	0.382	b.l.d	326	0.574	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.260	b.l.d	
2ISP-7-Ce14	3.32	2 566	611	46.4	b.l.d	b.l.d	0.199	b.l.d	96.4	206	0.034 0	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.012 3	167	0.235	0.010 3	b.l.d	0.001 51	b.l.d	b.l.d	
2ISP-7-Ce15	1.70	1 223	277	52.7	b.l.d	b.l.d	2.66	b.l.d	22.0	222	0.036 7	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.345	b.l.d	396	1.53	b.l.d	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.151	b.l.d	

表 4 (续)

成矿阶段	测试编号	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Pb	Th	U
S1	21SP-5-2-Cc6	b.l.d	0.00344	0.511	6.31	8.75	0.883	2.93	0.561	0.111	0.571	0.0592	0.273	0.0428	0.101	0.0150	0.0571	0.00709	0.0394	0.0113	3.33
	21SP-5-2-Cc7	b.l.d	b.l.d	0.682	1.42	2.09	0.197	0.75	0.182	0.0472	0.225	0.0423	0.188	0.0456	0.119	0.00951	0.0652	0.00488	0.0415	0.00898	1.15
	21SP-5-2-Cc8	0.394	b.l.d	3.15	1.77	2.72	0.322	1.33	0.218	0.0571	0.289	0.0395	0.201	0.0604	0.127	0.0200	0.116	0.0208	0.0622	0.0136	60.2
	21SP-5-2-Cc9	b.l.d	b.l.d	0.342	0.902	1.25	0.126	0.523	0.0980	0.0161	0.133	0.0178	0.155	0.0220	0.0736	0.00734	0.0773	0.00549	0.0450	0.00695	3.31
	21SP-5-2-Cc10	b.l.d	b.l.d	0.961	2.31	2.98	0.283	1.10	0.273	0.0524	0.330	0.0421	0.191	0.0395	0.0969	0.0114	0.0488	0.00655	0.0464	0.0350	10.5
	21SP-7-Cc17	b.l.d	0.0116	0.298	0.968	1.32	0.118	0.578	0.131	0.0248	0.148	0.0184	0.128	0.0321	0.0754	0.00928	0.0554	0.00481	0.0192	0.00800	1.51
	21SP-7-Cc18	b.l.d	b.l.d	0.485	4.15	11.2	1.28	4.78	1.19	0.237	1.06	0.150	1.06	0.202	0.470	0.0769	0.619	0.112	0.0237	0.756	3.03
	21SP-7-Cc20	b.l.d	b.l.d	0.494	5.33	15.2	1.72	6.65	1.56	0.326	1.38	0.196	1.27	0.275	0.659	0.103	0.790	0.0986	0.170	2.18	2.86
	21SP-7-1	0.0563	b.l.d	0.0923	2.00	3.52	0.385	1.61	0.387	0.0811	0.382	0.0522	0.240	0.0560	0.134	0.0137	0.124	0.0164	0.00263	b.l.d	0.976
	21SP-7-2	b.l.d	0.0144	0.238	5.29	8.03	0.891	3.82	0.656	0.167	0.681	0.0888	0.431	0.0988	0.213	0.0274	0.191	0.0217	0.00733	0.0449	0.198
S2	21SP-7-3	b.l.d	0.00765	0.157	2.11	3.59	0.402	1.53	0.320	0.0643	0.374	0.0548	0.283	0.0545	0.143	0.0161	0.104	0.0223	b.l.d	0.0136	0.216
	21SP-7-4	0.0374	0.0149	0.157	0.954	1.45	0.159	0.721	0.129	0.0518	0.227	0.0298	0.158	0.0524	0.112	0.0160	0.104	0.00713	b.l.d	0.00645	0.187
	21SP-7-5	b.l.d	0.00634	0.220	5.55	6.28	0.591	2.68	0.399	0.0799	0.538	0.0538	0.291	0.0578	0.149	0.0217	0.0901	0.0121	0.00790	0.0734	0.252
	21SP-7-7	b.l.d	b.l.d	b.l.d	0.377	0.669	0.0658	0.255	0.0675	0.0105	0.0657	0.00346	0.0667	0.00981	0.0213	0.00109	0.0451	0.0116	0.00476	0.00237	28.7
	21SP-7-9	b.l.d	0.00529	b.l.d	0.13	0.273	0.0305	0.125	0.0208	0.00652	0.0102	0.00492	0.0281	0.0056	0.0178	0.00129	0.00654	0.00105	0.00125	0.00110	17.9
	21SP-7-Cc12	b.l.d	b.l.d	0.080	1.05	1.91	0.198	0.803	0.148	0.0274	0.102	0.0114	0.0873	0.0219	0.0252	0.00412	0.0176	0.00285	0.0198	0.0176	0.299
	21SP-7-Cc13	b.l.d	b.l.d	0.119	1.43	2.12	0.198	0.758	0.176	0.0415	0.118	0.0113	0.0865	0.0127	0.0523	0.0109	0.0393	0.00565	0.0790	0.0308	0.0336
	21SP-7-Cc14	b.l.d	b.l.d	0.0362	0.821	1.04	0.105	0.389	0.0321	0.0132	0.0201	0.00824	0.0271	0.00545	0.0114	0.00124	0.0159	0.00252	0.0278	0.0233	0.114
	21SP-7-Cc15	b.l.d	b.l.d	0.181	1.49	2.14	0.204	0.855	0.133	0.0427	0.133	0.0148	0.108	0.0169	0.0349	0.00467	0.0429	0.00554	0.0818	0.0252	0.0633

注: b.l.d 表示低于检出限。

(ΣREE) 为 $0.66 \times 10^{-6} \sim 20.6 \times 10^{-6}$ (平均值为 7.62×10^{-6})。LREE/HREE 值为 4.91~26.16 (平均值为 12.52), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 5.63~41.55 (平均值为 22.45), 富集轻稀土元素。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 3.51~16.11 (平均值为 6.87), $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值

为 1.02~4.82 (平均值为 2.60), 说明轻稀土和重稀土分异都不明显。 δEu 值为 0.48~1.59 (平均值为 0.90), δCe 值为 0.83~1.04 (平均值为 0.94), 在球粒陨石标准化配分模式图上具有轻微的 Eu 负异常 (图 5d)。

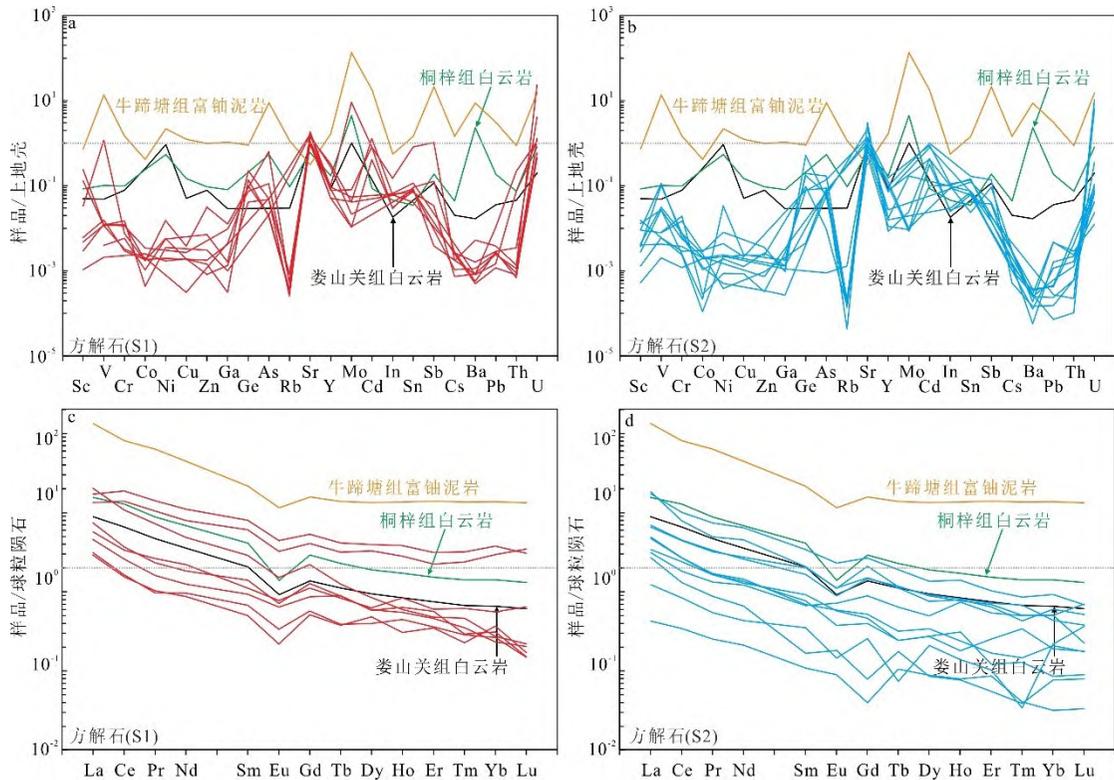


图5 沙坪铀矿点方解石多元素上地壳标准化图解(a,b)和稀土元素球粒陨石均一化配分曲线(c,d)(上地壳、球粒陨石、桐梓组和娄山关组白云岩以及牛蹄塘组富铀泥岩数据分别引自文献[18]、[19]、[11]和[20])

Fig. 5 Upper crust-normalized multi-element (a, b) and chondrites-normalized REE patterns (c, d) for Shaping uranium ore occurrence (data of upper crust, chondrites, dolomite of Tongzi Formation and Loushanguan Formation, as well as uranium-rich mud of Niutitang Formation are cited from references [18], [19], [11] and [20], respectively)

5 成矿物质来源

前人研究表明沙坪铀矿点成矿物质来源存在多元性,涉及牛蹄塘组富铀泥岩、岩浆和围岩海相碳酸盐岩^[11-12,15]。方解石是碳酸盐型铀矿的主要脉石矿物^[6-7,11],与黄铁矿和沥青铀矿密切共生(图3、4)。Sc、V、Cr、Pb、Sb、Mo、Pb等元素的离子态与 Ca^{2+} 在化学键性质、离子半径和价电荷等方面相差较大,因此它们主要以显微包裹体或晶格缺陷等方式存在于方解石中^[21-22]。Mg、Fe、Mn、REE、Y、Sr、Ba和U等与Ca具有相似的离子半径,可以通过类质同象替代或者表面吸附作用优先富集在方解石中^[23-24],因此方解石的微量元素和稀土元素

组成能够指示成矿流体元素的来源。

沙坪铀矿点产于艾坝背斜东翼的杨家堡断层中,上下两盘地层分别为中奥陶统桐梓组白云岩和下奥陶统娄山关组白云岩(图3a)。原位微量元素分析表明沙坪铀矿点成矿两阶段方解石中微量元素含量很低(表4),但是在多元素上地壳标准化图解上,Sc、V、Cr、Co、As和Sn与牛蹄塘组富铀泥岩具有相同的变化趋势,Sr、Y和Sb与围岩海相碳酸盐岩具有相同的变化趋势,Ni、Cu、Zn、Rb、In、Cs、Th和U与牛蹄塘组富铀泥岩和围岩海相碳酸盐岩的变化趋势相同,Mo和Cd的变化趋势与上述地层都不相同,表明沙坪铀矿点成矿物质来源具有多元性(图5a、b)。

REE主要以氯络合物、碳氢络合物等形式在成矿流体中运移,并且通过类质同像替代Ca进入方解石晶格中,因此方解石是热液矿床中REE的主要载体矿物之一,其REE含量远高于硫化物中REE含量^[23,25]。研究表明方解石中REE与流体物理化学环境以及成矿物质来源密切相关^[23]。Eu和Ce属于变价稀土元素,其异常可以很好的指示成矿流体的氧化还原条件^[22-23,26]。在相对氧化的流体中,Ce以Ce⁴⁺存在,溶解度相对REE³⁺很低,不易进入成矿流体中,因此方解石具有Ce负异常;同样条件下,Eu²⁺被氧化成Eu³⁺,导致离子半径增大,不易替代Ca²⁺,导致方解石呈Eu负异常^[27-28]。

黄铁矿是沙坪铀矿点的主要硫化物(图4a~e),有机质出现在成矿第II阶段(图3c、图4f),表明铀成矿发生在还原的流体中。在相对还原的环境下,Cal-1和Cal-2都应具有Eu和Ce正异常,这与本次研究的结果不符(图5c、d)。原位微量元素分析结果显示成矿两阶段方解石在球粒陨石标准化配分模式图上具有不同程度的Eu和Ce负异常(图5c、d)。

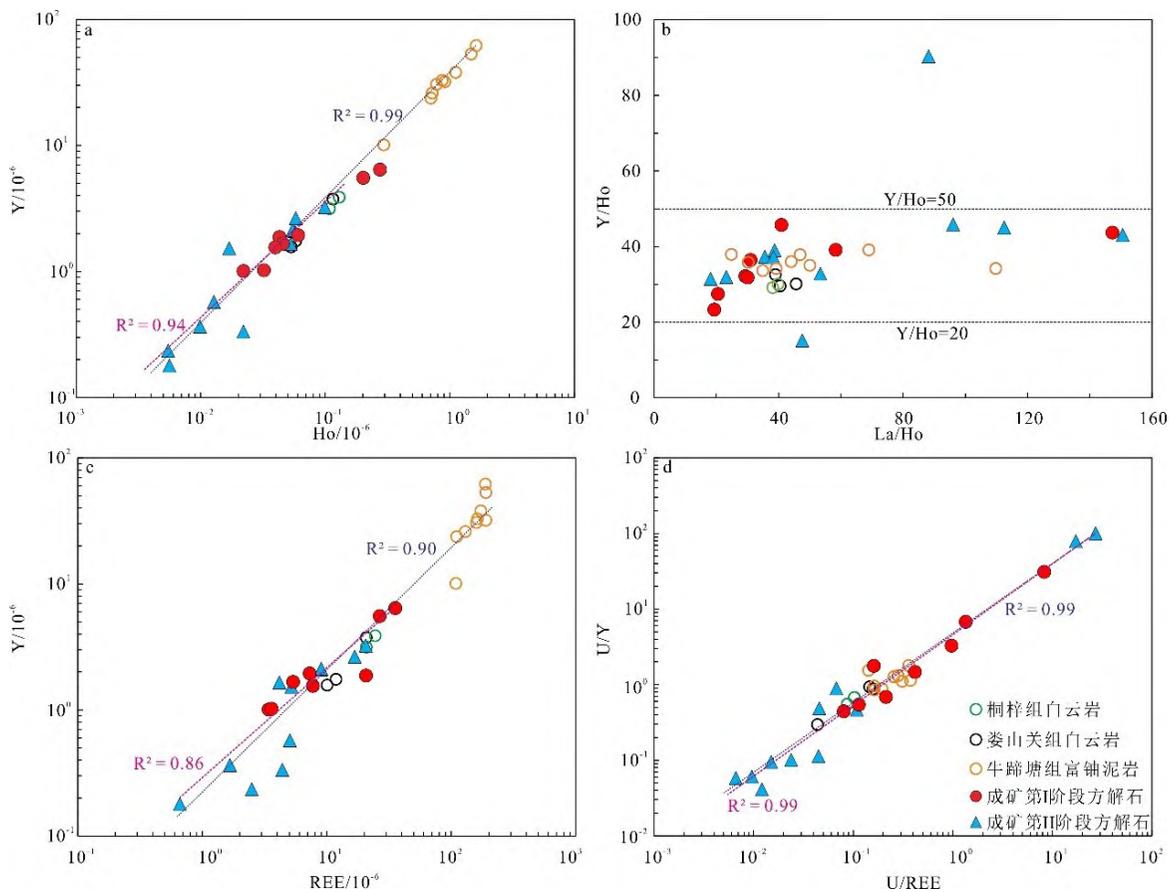
沙坪铀矿点Cal-1和Cal-2的REE含量很低,平均值分别为 $3.41 \times 10^{-6} \sim 35.54 \times 10^{-6}$ 和 $0.66 \times 10^{-6} \sim 20.6 \times 10^{-6}$,与娄山关组白云岩($10.1 \times 10^{-6} \sim 20.8 \times 10^{-6}$)和桐梓组白云岩($20.8 \times 10^{-6} \sim 24.5 \times 10^{-6}$)相似^[11],它们还具有相似的REE球粒陨石标准化配分模式图(图5c、d),表明沙坪铀矿点方解石中REE可能来源于围岩海相碳酸盐岩的溶解。这一观点也得到前人C-O同位素分析结果的支持^[11]。牛蹄塘组富铀泥岩具有相对较高的REE($109 \times 10^{-6} \sim 190 \times 10^{-6}$)组成^[20],但其球粒陨石标准化配分模式图与沙坪铀矿点成矿两阶段方解石相似(图5c、d),因此不排除牛蹄塘组富铀泥岩也提供部分REE。

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,因此相同来源方解石的Y-Ho组成具有较好的线性关系,在Y/Ho-La/Ho图解上大体呈水平分布^[23,29]。原位微量元素分析结果表明,Cal-1的w(Y)和w(Ho)值分别为 $1.01 \times 10^{-6} \sim 6.43 \times 10^{-6}$ 和 $0.022 \times 10^{-6} \sim 0.275 \times 10^{-6}$,Cal-2的w(Y)和

w(Ho)值分别为 $0.180 \times 10^{-6} \sim 3.24 \times 10^{-6}$ 和 $0.005 \times 10^{-6} \sim 0.10 \times 10^{-6}$ (表4)。成矿两阶段方解石的Ho-Y组成呈较好的线性分布(图6a, $R^2 = 0.94$),表明它们可能形成于同一成矿流体体系;Cal-1和Cal-2与围岩娄山关组白云岩和桐梓组白云岩以及下伏牛蹄塘组富铀泥岩的Ho-Y组成呈很好的线性分布(图6a, $R^2 = 0.99$),表明这些地层与沙坪铀矿点成矿具有密切联系。Cal-1的Y/Ho值集中于23.37~45.79之间;Cal-2的Y/Ho值较为分散,介于15.22~90.37之间,主要集中于31.47~45.87。扣除Cal-2中Y/Ho值的两个异常点(15.22和90.37)后,成矿两阶段方解石在Y/Ho-La/Ho图解上大体呈水平分布(图6b),与娄山关组白云岩(Y/Ho值:29.62~32.61)、桐梓组白云岩(Y/Ho值:29.17~30.08)和牛蹄塘组富铀泥岩(Y/Ho值:33.66~39.18)相似^[11,20],表明围岩娄山关组白云岩和桐梓组白云岩以及下伏牛蹄塘组富铀泥岩共同提供了沙坪矿点的成矿物质。

成矿两阶段方解石与围岩娄山关组白云岩和桐梓组白云岩以及下伏牛蹄塘组富铀泥岩中Y和REE具有良好的线性关系(图6c, $R^2 = 0.90$),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^[24,28],也支持沙坪铀矿点成矿物质来源于围岩娄山关组白云岩和桐梓组白云岩以及下伏牛蹄塘组富铀泥岩混合的结论。

成矿元素U与Ca具有相似的离子半径,与Y和REE一样以类质同像替代的形式进入方解石晶格中,表明U在方解石中与Y和REE具有密切关系^[24,26,30]。原位微量元素分析结果表明Cal-1和Cal-2中w(U)值分别为 $1.15 \times 10^{-6} \sim 60.2 \times 10^{-6}$ 和 $0.033 \times 10^{-6} \sim 28.7 \times 10^{-6}$ (表4),在U/REE-U/Y图解上具有明显的正相关关系(图6d, $R^2 = 0.99$),表明U与Y和REE可能形成于相同的成矿流体体系;成矿两阶段方解石与围岩娄山关组白云岩和桐梓组白云岩以及下伏牛蹄塘组富铀泥岩在U/REE-U/Y图解也具有很好的线性分布(图6d, $R^2 = 0.99$),表明围岩娄山关组白云岩和桐梓组白云岩以及下伏牛蹄塘组富铀泥岩共同提供了沙坪矿点的成矿物质。



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

图6 沙坪矿点相关元素二元图解(桐梓组和娄山关组白云岩以及牛蹄塘组富铀泥页数据分别引自文献[11]和[20])

Fig. 6 Binary diagrams for Shaping uranium ore occurrence (data of dolomite of the Tongzi Formation and Loushanguan Formation, as well as uranium-rich mud of Niutitang Formation are cited from references [11] and [20], respectively)

注：梅红色的虚线代表成矿两阶段方解石的相关性，蓝色的虚线代表成矿两阶段方解石、桐梓组和娄山关组白云岩以及牛蹄塘组富铀泥页的相关性。

6 结论

通过对黔北凤冈地区沙坪矿点开展原位方解石微量和稀土元素分析,获得主要结论如下:

1)沙坪矿点成矿过程由方解石-沥青铀矿-黄铁矿阶段和方解石-萤石-有机质-黄铁矿阶段构成;

2)LA-ICP-M分析结果显示两阶段方解石具有相似的微量元素和稀土元素组成,表明它们来源于相同的成矿流体;

3)两阶段方解石的稀土元素配分模式、Y/Ho值、U/Y值、U/REE值表明桐梓组和娄山关海相碳酸盐岩以及牛蹄塘组富铀泥岩共同提供了成矿物质来源。

致谢:实验处理过程中得到中国科学院地

球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室唐燕文、郑文勤和李响高级工程师的帮助,在此一并感谢。

参考文献/References:

- [1] HU R, FU S, HUANG Y, et al. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: Reviews and a new geodynamic model[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 137: 9-34.
- [2] 刘兴忠,张待时,罗长本.中国铀矿找矿指南[R].北京:中国核工业地质局,1997.
- [3] 金中国,刘开坤,罗开,等.贵州三穗龙湾铀矿床地质地球化学特征及成因[J].岩石学报,2019,35(9): 2830-2844.
JIN Zhongguo, LIU Kaikun, LUO Kai, et al. Geological, geochemical and genesis of Longwan uranium deposit, Sansui, Guizhou Province[J]. Acta Petrologica Sinica,

- 2019, 35(9): 2830-2844 (in Chinese).
- [4] 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. Mineralogy characteristics of uranium deposits in Sansuilongwan, Guizhou [J]. China Geology, 2022, 49(4): 1236-1249 (in Chinese).
- [5] 张维乾, 左华平. 贵州省金沙县岩孔含铀磷块岩矿床地质特征及成因探讨[J]. 矿产与地质, 2018, 32(1): 86-89.
- ZHANG Weiqian, ZUO Huaping. Geological characteristics and genesis of uranium-bearing phosphoric rock holes in Yankong, Guizhou [J]. Mineral Resources and Geology, 2018, 32(1): 86-89 (in Chinese).
- [6] LI Y, ZHANG C, CHI G, et al. Black and red alterations associated with the Baimadong uranium deposit (Guizhou, China): Geological and geochemical characteristics and genetic relationship with uranium mineralization [J]. Ore Geology Reviews, 2019, 111: 102981.
- [7] 李燕燕. 贵州白马洞铀矿床黑色-红色蚀变形成机理及其与铀成矿关系[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 1-117.
- LI Yanyan. Formation mechanism of black-red alteration of uranium deposit in Baimadong, Guizhou and its relationship with uranium mineralization [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 1-117 (in Chinese).
- [8] 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).
- [9] 王国坤, 金中国, 刘开坤, 等. 黔中碳酸盐岩型铀矿找矿前景分析[J]. 矿产与地质, 2017, 31(1): 63-68.
- WANG Guokun, JIN Zhongguo, LIU Kaikun, et al. Analysis of prospecting potential of carbonate-type uranium deposit in central Guizhou [J]. Mineral Resources and Geology, 2017, 31(1): 63-68 (in Chinese).
- [10] 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 Xingyia area, Guizhou Province: Ore characteristics and occurrence of uranium [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2021, 41(1): 23-32 (in Chinese).
- [11] 彭松, 王琼, 吴林锋, 等. 黔北凤冈地区碳酸盐型铀矿成矿物质来源探讨[J]. 世界核地质科学, 2023, 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, China [J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 39(3): 437-447 (in Chinese).
- [12] 王琼, 吴林锋, 刘开坤, 等. 黔北碳酸盐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 indicative significance of carbonaceous uranium mineralization in northern Guizhou [J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(3): 426-436 (in Chinese).
- [13] 王国坤, 刘开坤, 杨胜发. 贵州省湄潭永兴-凤冈永和地区铀矿整装勘查报告[R]. 贵阳: 贵州省有色金属和核工业地质勘查局核资源地质调查院, 2015: 1-97.
- WANG Guokun, LIU Kaikun, YANG Shengfa. Uranium ore assembly exploration report in Meitan Yongxing-Fenggang Yonghe area, Guizhou Province [R]. Guiyang: Institute of Nuclear Resources Geology, Bureau of Nonferrous Metals and Nuclear Industry Geology, Guizhou Province, 2015: 1-97 (in Chinese).
- [14] 郑懋荣, 张功圣. 一九七八年贵州省铀矿地质工作总结报告[R]. 福泉: 中南二〇九队第六队, 1979: 1-86.
- ZHENG Maorong, ZHANG Gongsheng. Summary report of uranium geology work in Guizhou Province in 1978 [R]. Fuquan: Zhongnan 209 Team 6, 1979: 1-86 (in Chinese).
- [15] 张小强, 朱西养, 郑懋荣, 等. 贵州安家沟铀矿床成因及找矿扩大方向[J]. 铀矿地质, 2018, 34(3): 138-146.
- ZHANG Xiaoqiang, ZHU Xiyang, ZHENG Maorong, et al. Genesis and the next exploration orientation of Anjiagou uranium deposit in Guizhou Province [J]. Uranium Geology, 2018, 34(3): 138-146 (in Chinese).
- [16] LIU Y, HU Z, GAO S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. Chemical Geology, 2008, 257(1-2): 34-43.

- [17] LAN T G, HU R Z, BI X W, et al. Metasomatized asthenospheric mantle contributing to the generation of Cu-Mo deposits within an intracontinental setting: A case study of the ~128 Ma Wangjiazhuang Cu-Mo deposit, eastern North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 160:460-489.
- [18] RUDNICK R L, GAO S. The upper continental crust [M]. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003: 1-64.
- [19] SUN S S, MC DONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [20] 王琼, 徐进鸿, 吴林锋, 等. 黔东铜仁地区磷块岩型铀矿床岩石地球化学特征[J]. *铀矿地质*, 2022, 38(6): 1137-1151.
WANG Qiong, XU Jinhong, WU Linfeng, et al. Geochemical characteristics of phosphorite-type uranium deposits in Tongren area, eastern Guizhou [J]. *Uranium Geology*, 2022, 38(6): 1137-1151 (in Chinese).
- [21] 唐永永, 毕献武, 和利平, 等. 兰坪金顶铅锌矿方解石微量元素, 流体包裹体和碳-氧同位素地球化学特征研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(9): 2635-2645.
TANG Yongyong, BI Xianwu, HE Liping, et al. Geochemical characteristics of trace elements, fluid inclusions and carbon-oxygen isotopes of calcites in the Jinding Zn-Pb deposit, Lanping, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(9): 2635-2645 (in Chinese).
- [22] 杨庆坤, 孟祥金, 郭福生, 等. 江西相山矿田脉石矿物微量元素特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(4): 457-465.
YANG Qingkun, MENG Xiangjin, GUO Fusheng, et al. Characteristics of trace elements in gangue minerals of the Xiangshan uranium polymetallic deposit, Jiangxi, and its geological significance [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2014, 33(4): 457-465 (in Chinese).
- [23] BAU M, MÖLLER P. Rare earth element fractionation in metamorphogenic hydrothermal calcite, magnesite and siderite [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1992, 45(3): 231-246.
- [24] MÖLLER P, MORTEANI G. On the geochemical fractionation of rare earth elements during the formation of Ca-minerals and its application to problem of the genesis of ore deposits [M]// AUGUSTITHIS S S. The significance of trace elements in solving petrogenetic problem and controversies. Athens: Theophrastus Publication, 1983: 747-791.
- [25] 黄智龙, 陈进, 韩润生, 等. 云南会泽铅锌矿床脉石矿物方解石 REE 地球化学 [J]. *矿物学报*, 2001, 21(4): 659-666.
HUANG Zhilong, CHEN Jin, HAN Runsheng, et al. REE geochemistry of calcite: A gangue mineral in the Huize ore deposit in Yunnan [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2001, 21(4): 659-666 (in Chinese).
- [26] DOUVILLE E, BIENVENU P, CHARLOU J L, et al. Yttrium and rare earth elements in fluids from various deep sea hydrothermal systems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(5): 627-643.
- [27] RIMSTIDT J D, BALOG A, WEBB J. Distribution of trace elements between carbonate minerals and aqueous solutions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(5): 1851-1863.
- [28] ZHONG S J, MUCCI A. Partitioning of rare earth elements (REEs) between calcite and seawater solutions at 25°C and 1 atm, and high dissolved REE concentrations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(3): 443-453.
- [29] 李松涛, 刘建中, 夏勇, 等. 黔西南泥堡-包谷地卡林型金矿田热液矿物地球化学特征及其地质意义 [J]. *地质论评*, 2022, 68(2): 521-570.
LI Songtao, LIU Jianzhong, XIA Yong, et al. Geological and geochemical significance of hydrothermal minerals from Nibao-Baogudi carlin-type gold orefield in Southwestern Guizhou [J]. *Geological Review*, 2022, 68(2): 521-570 (in Chinese).
- [30] KUSTURICA A, VAN LAATEN N, DRAKE H, et al. LA-ICP-MS analysis of trace and rare-earth element distribution in calcite fracture fillings from Forsmark, Simpevarp and Laxemar (Sweden) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(14): 371-400.