

# 新疆白杨河大型铍铀矿床成矿流体特征及 矿床成因初探

张 鑫<sup>1,2</sup>, 张 辉<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 新疆和布克赛尔县白杨河大型铍铀矿床是亚洲最大的铍矿床, 其矿体产出晚石炭世微晶花岗岩与上泥盆统塔尔巴哈台组(D<sub>3</sub>t)中酸性火山岩的接触带上, 该矿床为典型的热液矿床。萤石作为白杨河铍铀矿床中与成矿作用密切相关的脉石矿物, 发育大量气液包裹体。通过对萤石中流体包裹体的显微测温, 获得了其主成矿期包裹体的均一温度, 为 237~372 °C ( $n = 40$ ), 平均为 308.5 °C, 反映该矿床为中高温热液矿床。萤石以相对富集中稀土(MREE) ( $(La/Yb)_N = 3.18\sim 3.55$ ), 强烈亏损 Eu ( $\delta Eu = 0.01$ ), REE 分布模式呈“V”字型为特征。萤石铍同位素数据显示出较高的铍同位素初始比值(0.7106), 以及正  $\epsilon_{Nd}(t)$  值(3.50~2.95), 类似于微晶花岗岩斑岩的铍同位素组成( $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7143\sim 0.7466$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = 4.06\sim 5.29$ ), 由此提出成矿流体主要来自微晶花岗岩斑岩岩浆分异的晚期热液。主成矿期的萤石包裹体显示高温、低盐度的特征, 推断成矿流体源于微晶花岗岩斑岩晚期岩浆热液与大气降水的混合。

**关键词:** 流体包裹体; 铍同位素; 萤石; 白杨河铍铀矿床; 西准噶尔

中图分类号: P59; P611.11 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2013)02-0143-10

## Geochemical characteristics of the ore-forming fluid and ore genesis of the Baiyanghe Be-U deposit, Xinjiang, China

ZHANG Xin<sup>1,2</sup> and ZHANG Hui<sup>1\*</sup>

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Xinjiang Baiyanghe Be-U deposit is the largest Be deposit in Asia. The deposit is typical hydrothermal in origin, characterized by veinlet disseminated and mainly developed on the contact zone between a Late Carboniferous granite porphyry and Late Devonian intermediate-acidic volcanic rocks. Fluorite, as the main gangue mineral of the deposit, is rich fluid inclusions. The homogenization temperature of the primary inclusions ranged from 237 to 372 °C ( $n = 40$ ), with an average of 308.5 °C, suggesting that the Baiyanghe Be-U deposit is a kind of intermediate-high temperature hydrothermal deposit. The chondrite-normalized REE diagram of the fluorite is characterized by enrichment of MREE ( $(La/Gd)_N = 0.60\sim 0.66$ ), with strong negative Eu anomalies and V-shaped pattern. Similar to isotopic compositions of the granite porphyry ( $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7143\sim 0.7466$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = 4.06\sim 5.29$ ), fluorite shows high initial Sr isotope ratio (0.7106) and positive  $\epsilon_{Nd}(t)$  values (2.95~3.50), indicating the ore-forming fluid was possibly late magmatic-hydrothermal differentiated from the granite porphyry. As characterized by high temperature and low salinity of the primary fluid inclusions in fluorite, it is deduced that the ore-forming fluid was probably originated from mixing of magmatic hydrothermal and meteoric water.

收稿日期(Received): 2012-03-16; 改回日期(Revised): 2012-07-07; 接受日期(Accepted): 2012-08-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB411303); 国家科技部支撑计划“305”项目(2007BAB25B01)

作者简介: 张鑫(1986-), 男, 硕士研究生, 岩石地球化学、矿床地球化学研究方向。E-mail: zhangxin869@hotmail.com

\* 通讯作者(Corresponding author): ZHANG Hui, E-mail: zhanghui@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5891494

Key words: fluid inclusions; Sr-Nd isotope; fluorite; Baiyanghe Be-U deposit; Western Junggar

### 0 引言

新疆和布克赛尔县白杨河大型铍铀矿床是 U、Be、Mo 共生, 且 Be 储量有望达到超大型规模的铀-多金属矿床<sup>[1]</sup>。目前国内对该矿床的研究还非常薄弱, 有关该矿床类型、形成时代、成矿物质来源以及矿床形成的大地构造背景尚未做过深入研究。

萤石是许多金属(如 Pb、Zn、Au、Ag、W、Sb、REE 等)和非金属(如重晶石)热液矿床的重要脉石矿物之一, 由于其形成往往与成矿过程关系密切, 因此热液矿床中的脉石矿物——萤石记录了大量的成矿流体地球化学信息<sup>[2]</sup>。前人大量的研究表明<sup>[3-7]</sup>, 与矿石矿物密切共生的萤石的锶钡同位素组成是示踪成矿物质和成矿流体来源的重要手段之一, 萤石中流体包裹体是获得成矿条件以及成矿流体物理化学性质的直接证据。因此, 本文拟开展对新疆白杨河铍铀矿床中脉体萤石的流体包裹体、稀土元素以及锶钡同位素地球化学的研究, 旨在揭示矿床形成条件、成矿流体的来源等矿床学基本问题。

### 1 区域地质概况

新疆白杨河铍铀矿床位于西准噶尔造山带的中部, 晚古生代成熟的岛弧内<sup>[8-11]</sup>。该地区经多期构造活动影响并且大量分布着晚石炭世到早二叠世的 I 型和 A 型花岗岩, 这些岩浆作用对区域内成矿作用起到

了至关重要的作用, 如金、铜、铀和铍矿等<sup>[12-13]</sup>。

区域内断裂构造发育, 主要是华力西期所形成的褶皱和断裂构造, 燕山期和喜山期伴随地壳升降运动, 中生代地层褶皱, 早期断裂构造复活。断裂以近 EW 向和 NE 向为主, 其中近 NE 向的巴音布拉克断裂为区域内多期次活动继承性断裂, 并为白杨河铍铀矿床的控矿岩断裂<sup>[1]</sup>(图 1)。研究区域内的岩浆作用主要发生在晚古生代, 大量分布中酸性、中基性火山岩, 并且发育酸性和基性的侵入岩, 如碱长花岗岩、二长花岗岩、辉长岩及闪长岩等。

区域内出露的地层主要包括: 上泥盆统塔尔巴哈台组(D<sub>3</sub>t), 为陆相-海陆交替相中酸性火山岩及火山碎屑岩建造, 在白杨河一带地层厚度为 613~1165 m; 下石炭统和布克河组(C<sub>1</sub>hb), 呈狭长带状, 主要有生物灰岩、砾岩、硅质页岩及碳质泥岩等海相沉积碎屑岩夹安山玢岩; 下石炭统黑山头组(C<sub>1</sub>h), 为浅海相、海陆交互相中基性火山碎屑岩建造, 厚 445~3110 m, 分布在白杨河西端与和什托洛盖附近; 新近系塔西河组(N<sub>1</sub>t), 为泥岩和砂质泥岩; 冲击层(Q<sub>3</sub>pl), 为碎石和沙土(图 1)。

### 2 矿床地质

白杨河铍铀矿床位于和布克赛尔县白杨河镇 NE 方向 16.5 km。该矿床产出于晚石炭世微晶花岗岩与上泥盆统塔尔巴哈台组(D<sub>3</sub>t)中酸性火山岩的接触带上, 受构造控制明显, 属典型的热液矿床(图

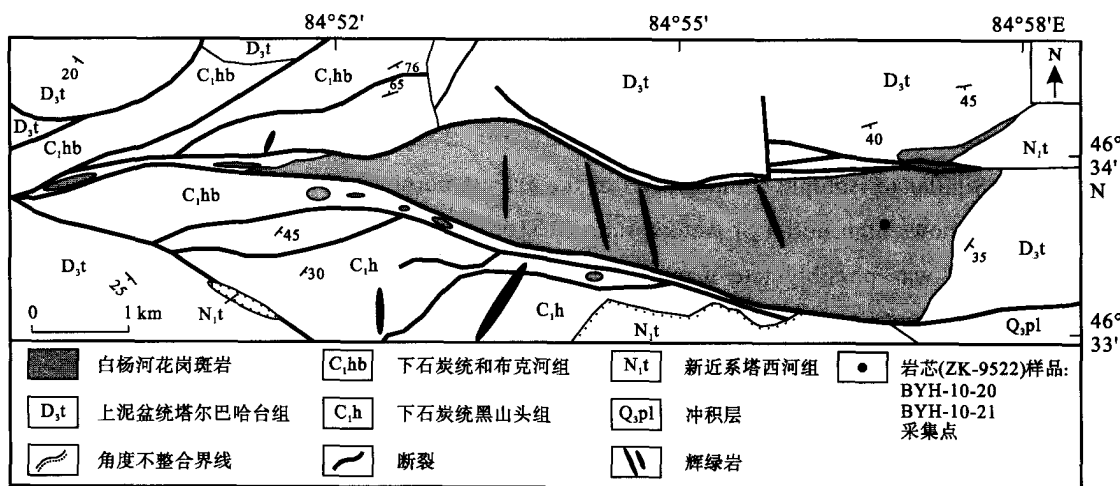


图 1 白杨河铍铀矿床地质图(据文献[1]改编)

Fig.1 Geological sketch map of the Baiyanghe Be-U deposit in Xinjiang (modified after Reference [1])

1)。铍矿体成层状, 在空间上可以分为 3 类: I 矿层位于接触带处为主矿体, 占资源总量的 90%以上; II 矿层为位于接触带之下中酸性火山岩(D<sub>3</sub>t)中的矿体; III 矿层则为位于接触带之上花岗斑岩中的矿体<sup>[14]</sup>。杨庄岩体的新西工地中矿体垂向上存在 2 个分支矿层, 主矿体倾向南, 平均倾角为 32°, 沿倾向延伸长达 600 m, 平均宽度约 300 m, 厚度约 5.13 m, 平均品位 0.31%(图 2b); 中心工地中矿体垂向上存在 6 个分支矿层, 主矿层沿接触带分布, 倾向南, 倾角 30°~50°, 沿倾向延伸长达 800 m, 平均宽度约 100 m, 厚度约 6.16 m, 平均品位 0.14%<sup>[14]</sup> (图 2c)。

矿石的矿物共生组合主要有铍-萤石-羟硅铍石和铍-赤铁矿两类, 伴生矿物主要有辉钼矿、毒砂、方铅矿和闪锌矿, 脉石矿物主要有萤石、绿帘石、方解石和水云母等<sup>[1]</sup>。萤石为该矿床最重要的脉石矿物之一, 颜色由白色向紫黑色变化, 其中紫黑色和紫色萤石与矿化关系密切(图 3)。在野外, 萤石被看作是评价矿石中 Be、U 含量高低的指标, 一般认为 Be、U 含量高则萤石颜色较深。矿床围岩蚀变发育, 并且种类多样, 但蚀变分带性不明显。主要有水云母化、萤石化、赤铁矿化(红化)和树枝状锰矿化等。

晚石炭世微晶花岗斑岩体由杨庄岩体、阿苏达岩体和小白杨河岩体构成(图 2a)<sup>[14]</sup>。花岗斑岩呈肉

红色, 斑状结构, 斑晶主要为石英和钾长石, 其粒度约 0.5~3.0 mm, 基质为长英质微晶矿物, 钾长石斑晶多因后期蚀变, 晶体在显微镜下粗糙, 而石英斑晶则很干净(图 3)。岩体呈东宽西窄, 东厚西薄, 板状侵入岩产状, 整个岩体受控于巴音布拉克断裂的一个 EW 向分支断裂。上泥盆统塔尔巴哈台组(D<sub>3</sub>t)中酸性火山岩则分布较广, 岩体呈墨绿色, 有大量肉红色钾长石斑晶, 镜下可见流纹结构, 为典型的火山岩及火山碎屑岩建造, 在接触带附近, 岩体中萤石脉体大量发育。

### 3 样品及分析方法

本次研究采集了微晶花岗斑岩和上泥盆统塔尔巴哈台组(D<sub>3</sub>t)中酸性火山岩岩芯样品, 对其中接触带处的脉状紫色萤石进行分选。由于萤石脉体细小, 单个细脉中萤石颜色多样, 样品粉碎后萤石颗粒颜色不均一, 且粒径均小于 180 μm, 因此很难将不同颜色萤石完全分离。进行萤石中微量元素和铍钼同位素分析测试的样品, 在双目镜下挑选了与成矿密切相关的紫色萤石(2 件), 其纯度均大于 99%; 而流体包裹体显微测温则是对接触带处的岩芯样品中与成矿密切相关的紫色萤石脉体部分进行原位包

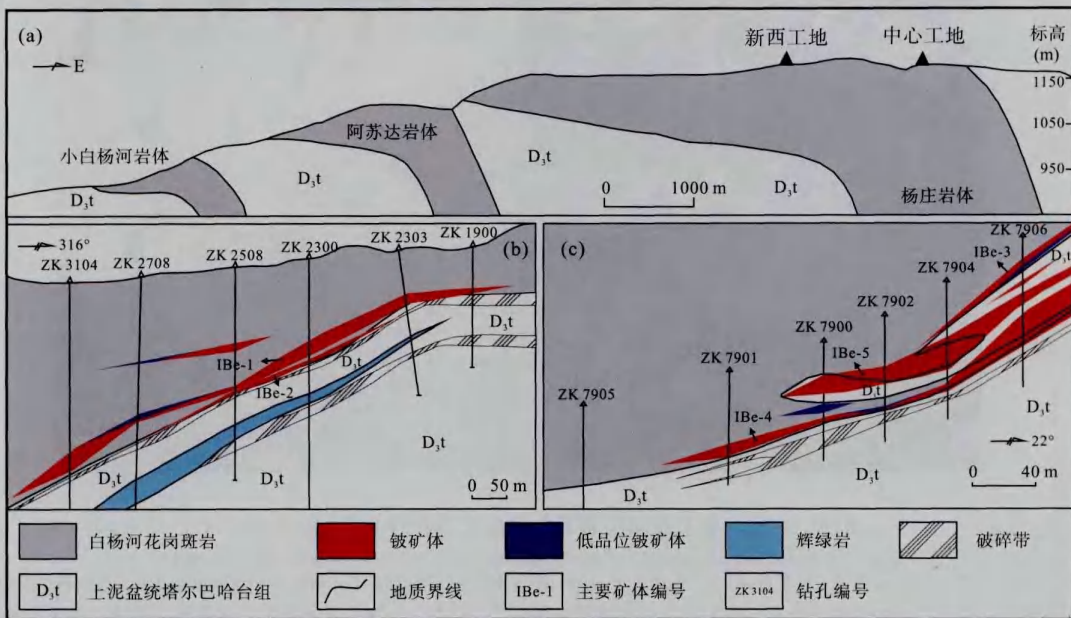


图 2 白杨河铍钼矿区剖面图

Fig.2 Profile diagrams of the Baiyanghe Be-U deposit

(a) 白杨河花岗斑岩剖面示意图; (b) 新西工地剖面示意图; (c) 中心工地剖面示意图(据文献[14]改编)。

(a) Profile diagram of the Baiyanghe granite porphyry; (b) profile diagram of Xinxi field work site; (c) profile diagram of Zhongxin field work site (modified after Reference [14]).



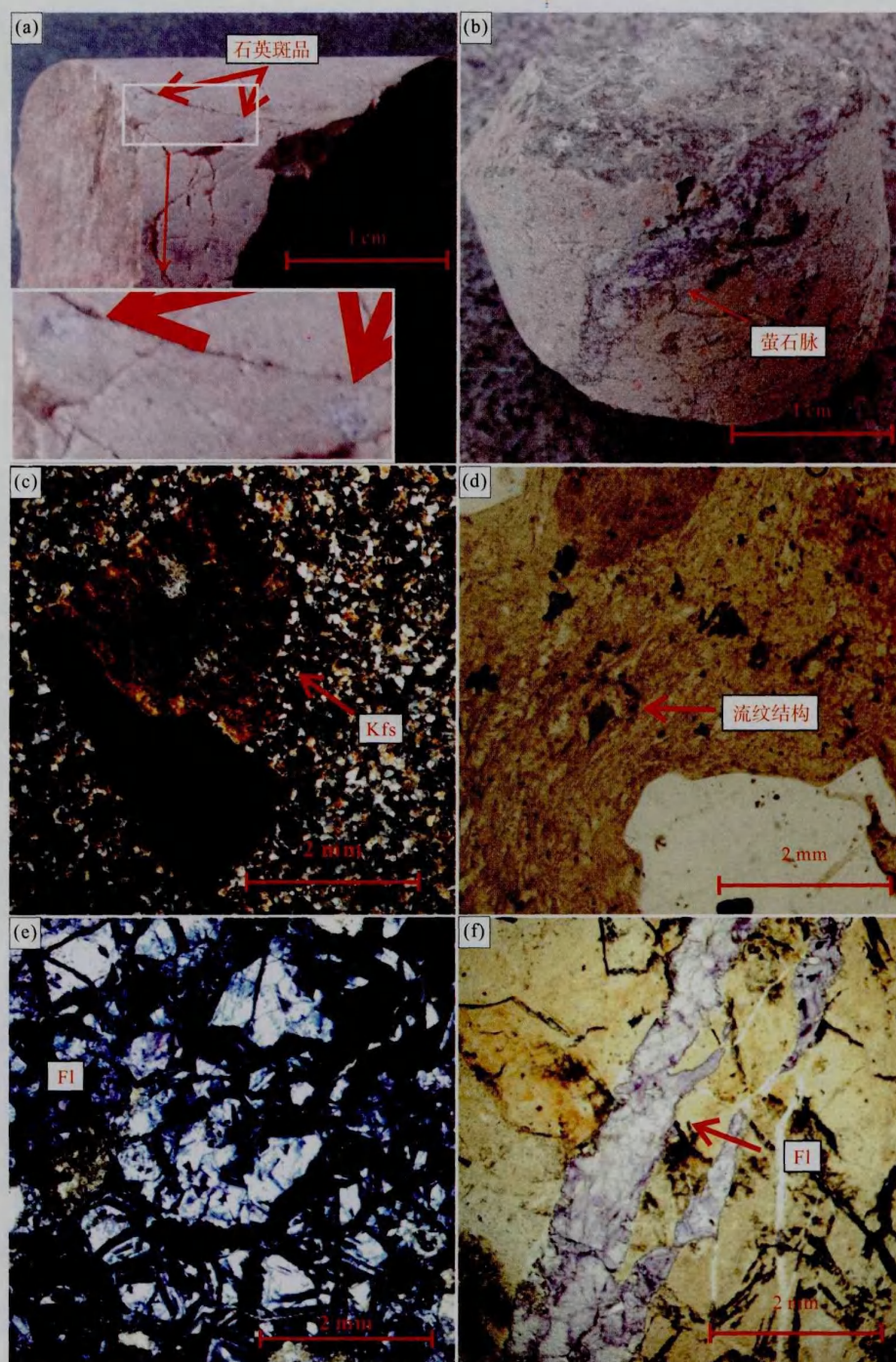


图3 白杨河微晶花岗斑岩和中酸性火山岩的手标本及显微照片

Fig.3 Pictures and micrographs of the Baiyanghe granite porphyry and the volcanic rocks

(a) 微晶花岗斑岩手标本照片, 石英斑晶; (b) 中酸性火山岩的手标本照片, 萤石脉; (c) 微晶花岗斑岩显微照片, 蚀变钾长石斑晶(正交偏光, 10×5); (d) 中酸性火山岩显微照片, 显示流纹结构(透射光, 10×5); (e) 萤石显微照片(正交偏光, 10×5); (f) 萤石脉(透射光, 10×5)。Kfs—钾长石; Fl—萤石。

(a) Quartz phenocrysts shown in the hand specimen of the Baiyanghe granite porphyry; (b) vein-type fluorite shown in the hand specimen of the volcanic rocks; (c) altered K-feldspar phenocryst in the Baiyanghe granite porphyry shown under microscope (cross-polarized, 10×5); (d) rhyotaxitic microtexture shown in the volcanic rocks under microscope (transmitted, 10×5); (e) fluorite shown under microscope (cross-polarized, 10×5); (f) vein-type fluorite shown under microscope (transmitted, 10×5). Kfs – K-feldspar; Fl – fluorite.



裹体薄片磨制。

流体包裹体显微测温工作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流体包裹体实验室完成。测试仪器为英国 Linkam THMSG 600 型冷热台, 测温范围为 $-196\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在冰点温度测定过程中, 降温速度由开始的 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 逐渐降低为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 在临近相变点时速度降至 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 测试精准度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。均一温度测定时初期以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温, 临近均一相变点时将该速度降为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 其精确度为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。包裹体盐度是根据石盐融化温度和盐度经验公式计算获得<sup>[15]</sup>。萤石矿物中微量元素的测定在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室 ICP-MS 实验室完成, 测试仪器为 Finnigan MAT 公司 ELEMENT 型高分辨等离子体质谱仪, 其分析方法详见文献[16]。萤石样品中铍同位素的测定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, 实验仪器型号为 MAT-262 TIMS, 数据以 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 内校正作为分馏修正, 国际标样 NBS987 的实测值为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710258 \pm 7(2\sigma)$ 。

## 4 结果

### 4.1 流体包裹体显微测温

在光学显微镜下对 20 余片包裹体片进行反复观察发现, 萤石矿物中发育大量流体包裹体, 主要分为 2 类: I 型和 II 型, 均为气液两相流体包裹体, 其中 I 型流体包裹体独立存在, 为原生流体包裹体, 大小变化于 $5\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 之间, 气泡体积较大, 颜色较深; 而 II 型流体包裹体多成串出现, 为次生流体包裹体, 大小变化于 $5\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 之间, 气泡体积小, 颜色相对较浅(图 4)。

与白杨河铍铀矿床成矿作用密切相关的萤石中 55 个具代表性的流体包裹体显微测温结果列于表 1 和表 2。I 型流体包裹体的均一温度分布于 $237\sim 372\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $n = 40$ )范围, 平均为 $308.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 冰点范围 $-0.2\sim -0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 平均值为 $-0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 相对应的平均盐度为 $0.76\%$ , 反映主成矿流体的温度约为 $310\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 因此白杨河铍铀矿床属中高温热液矿床(图 5)。II 型流体包裹体的均一温度分布于 $125\sim 161\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $n = 15$ )之间, 平均为 $139.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 冰点温度范围 $-0.1\sim -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 平

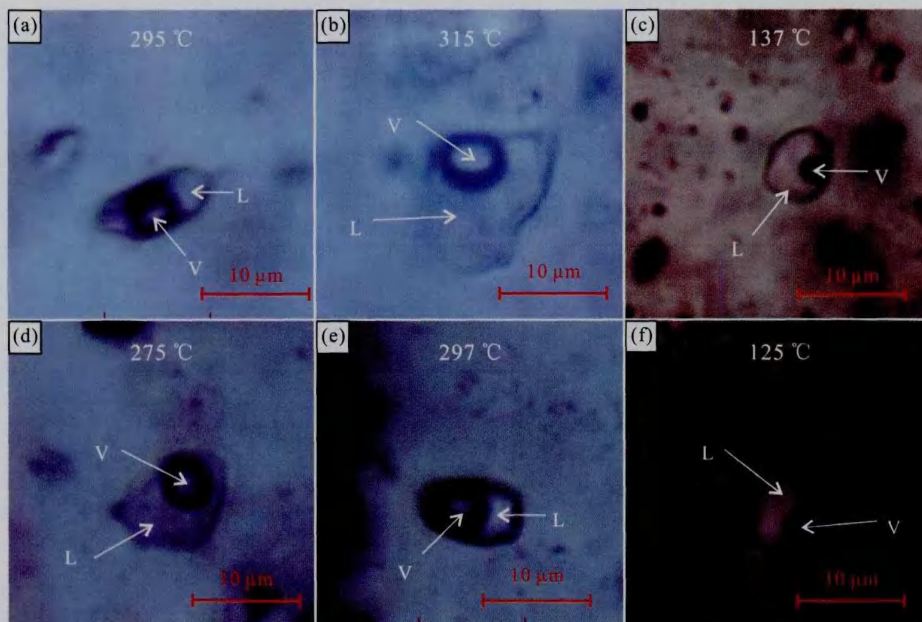


图 4 萤石中流体包裹体显微照片(图中温度为该流体包裹体均一温度)

Fig. 4 The micrography of fluid inclusions in fluorites (showing the homogenization temperature of fluid inclusions)

(a), (b), (d)和(e)为 I 型包裹体, (c)和(f)为 II 型包裹体。“V”代表气相; “L”代表液相。

I-type fluid inclusions are shown in (a), (b), (d) and (e), and II-type fluid inclusions are shown in (c) and (f). “V” and “L” represent vapor and liquid, respectively.

表1 白杨河铍铀矿床萤石中流体包裹体显微测温数据  
Table 1 Microthermal data of fluid inclusions in fluorites from the Baiyanghe Be-U deposit

样品号	完全凝固温度(°C)	冰点温度 $T_m$ (°C)	均一温度 $T_h$ (°C)	样品号	完全凝固温度(°C)	冰点温度 $T_m$ (°C)	均一温度 $T_h$ (°C)
<b>I型包裹体</b>							
BYH-20-1-01	-41.2	-0.3	295	BYH-21-1-01	-42.8	-0.8	331
BYH-20-1-02	-43.7	-0.3	297	BYH-21-1-02	-42.7	-0.6	319
BYH-20-1-03	-41.8	-0.3	275	BYH-21-1-03	-43.1	-0.4	295
BYH-20-1-04	-45.9	-0.2	259	BYH-21-1-04	-41.8	-0.4	314
BYH-20-1-05	-42.7	-0.5	316	BYH-21-1-05	-43.8	-0.5	364
BYH-20-1-06	-41.5	-0.2	270	BYH-21-1-06	-35.7	-0.7	293
BYH-20-1-07	-40.2	-0.3	275	BYH-21-1-07	-40.2	-0.8	314
BYH-20-1-08	-42.7	-0.3	259	BYH-21-1-08	-39.2	-0.5	337
BYH-20-1-09	-43.8	-0.4	317	BYH-21-1-09	-42.7	-0.3	336
BYH-20-1-10	-40.7	-0.5	293	BYH-21-1-10	-40.2	-0.3	341
BYH-20-1-11	-39.2	-0.3	297	BYH-21-1-11	-44.3	-0.4	315
BYH-20-1-12	-43.3	-0.6	324	BYH-21-2-01	-41.7	-0.5	241
BYH-20-2-01	-42.2	-0.9	315	BYH-21-2-02	-40.5	-0.3	299
BYH-20-2-02	-40.7	-0.4	237	BYH-21-2-03	-40.8	-0.3	297
BYH-20-2-03	-40.7	-0.8	313	BYH-21-2-04	-41.7	-0.5	332
BYH-20-2-04	-41.3	-0.5	348	BYH-21-2-05	-44.8	-0.6	301
BYH-20-2-05	-40.7	-0.4	352	BYH-21-2-06	-40.7	-0.2	310
BYH-20-2-06	-43.3	-0.3	308	BYH-21-2-07	-44.7	-0.3	372
BYH-20-2-07	-40.7	-0.5	337	BYH-21-2-08	-40.5	-0.3	309
BYH-20-2-08	-40.3	-0.2	323	BYH-21-2-09	-42.3	-0.2	312
<b>II型包裹体</b>							
BYH-20-1-01	-44.0	-0.5	138	BYH-21-1-01	-40.4	-0.1	147
BYH-20-1-02	-45.1	-0.1	125	BYH-21-1-02	-39.5	-0.5	129
BYH-20-1-03	-45.7	-0.3	129	BYH-21-1-03	-41.2	-0.2	131
BYH-20-1-04	-45.5	-0.4	135	BYH-21-1-04	-39.7	-0.2	134
BYH-20-2-01	-37.0	-0.1	138	BYH-21-1-05	-42.0	-0.1	145
BYH-20-2-02	-42.0	-0.2	144	BYH-21-2-01	-42.1	-0.3	140
BYH-20-2-03	-42.5	-0.5	152	BYH-21-2-02	-42.0	-0.2	146
BYH-20-2-04	-40.2	-0.4	161				

表2 流体包裹体测试结果统计  
Table 2 Statistical table of the fluid inclusions in fluorite

种类	样品数	冰点温度 $T_m$ (°C)		均一温度 $T_h$ (°C)		平均盐度 $w(\text{NaCl})$ (%)
		范围	均值	范围	均值	
I型包裹体	40	-0.2~ -0.8	-0.43	237~372	308.6	0.76
II型包裹体	15	-0.1~ -0.5	-0.27	125~161	139.7	0.48

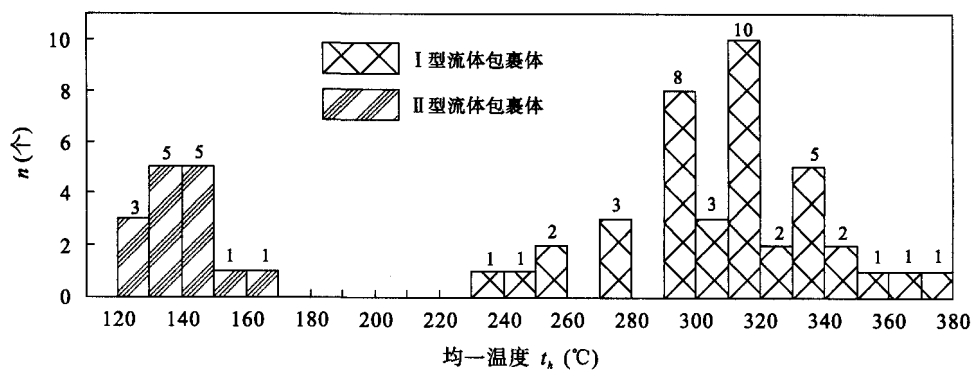


图5 萤石中流体包裹体均一温度直方图

Fig.5 Histogram of homogenization temperature of fluid inclusions in fluorite

均为-0.27 ℃, 其相对应的平均盐度为 0.48%。

### 4.2 萤石中 REE 含量特征

脉石矿物萤石中稀土元素测试结果列于表 3。2 个萤石样品中 REE 含量及相关地球化学参数极其相似,  $\Sigma$ REE (14 个 REE + Y) 分布于 187.34~192.44  $\mu\text{g/g}$  范围, 其中 LREE 为 49.85~53.50  $\mu\text{g/g}$ , MREE 为 33.26~33.83  $\mu\text{g/g}$ , HREE 为 6.59~6.76  $\mu\text{g/g}$  之间, 其 LREE/MREE 比值变化于 1.47~1.61 范围, LREE/HREE 比值变化于 7.38~8.12 范围。(La/Sm)<sub>N</sub>、(La/Yb)<sub>N</sub>、(Gd/Yb)<sub>N</sub> 比值分别变化于 1.10~1.16、3.18~3.55、5.34~5.41 之间, 表明轻稀土之间无明显分异, 而轻、重稀土以及重稀土之间存在较大的分异; (La/Gd)<sub>N</sub> 变化于 0.60~0.66 之间, 表明轻、中稀土之间存在较大的分异, 且以富集 MREE 为特征, 说明样品 BYH-10-20 和 BYH-10-21 中紫色萤石为成

表 3 萤石 REE 以及 Rb、Sr 含量 ICP-MS 分析结果( $\mu\text{g/g}$ )  
Table 3 REE and Rb, Sr contents of fluorites, determined by ICP-MS ( $\mu\text{g/g}$ )

样品编号	BYH-10-20	BYH-10-21
La	9.19	10.00
Ce	19.40	20.90
Pr	2.81	3.03
Nd	12.80	13.70
Sm	5.39	5.58
Eu	0.26	0.29
Gd	13.36	13.22
Tb	2.90	2.84
Dy	15.20	14.90
Ho	2.37	2.30
Er	4.05	3.92
Tm	0.39	0.39
Yb	2.07	2.02
Lu	0.25	0.26
Y	102.00	94.00
$\Sigma$ REE	192.44	187.34
Rb	0.63	0.59
Sr	448.00	397.00
LREE/MREE	1.47	1.61
LREE/HREE	7.38	8.12
$\delta\text{Eu}$	0.01	0.01
(La/Sm) <sub>N</sub>	1.10	1.16
(La/Gd) <sub>N</sub>	0.60	0.66
(La/Yb) <sub>N</sub>	3.18	3.55
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	5.34	5.41
Y/Ho	43.04	40.87

矿早-中期热液作用产物<sup>[17]</sup>。Y/Ho 比值变化于 40.87~43.04 之间, 明显大于球粒陨石中 Y/Ho 比值 (28), 指示 Y-Ho 之间存在强烈分异。在球粒陨石标准化稀土元素分布模式图中, 萤石中 REE 分布模式呈“V”字型, 以中稀土(MREE)富集, 强烈亏损 Eu ( $\delta\text{Eu} = 0.01$ )为特征(图 6)。

### 4.3 萤石中铷钍同位素特征

萤石铷钍同位素分析结果列于表 4。2 件萤石样品  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值分别为 0.71057 和 0.71061, 而  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  为 6.20 和 5.31, 利用花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄 313 Ma 计算, 获得萤石的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 3.50 和 2.95<sup>[19]</sup>。较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值、正的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值反映了成矿流体源于壳幔两端元物质的混合。

## 5 讨 论

### 5.1 成矿流体的性质、演化及其来源

由于萤石是富 Sr 贫 Rb 的矿物, 因此在成矿过程中萤石的铷同位素组成不会受到  $^{87}\text{Rb}$  衰变的影响, 即萤石  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  同位素的实测值可以代表其同位素初始比值<sup>[21]</sup>。白杨河铍铀矿床中脉石矿物萤石的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值为 0.7106, 反映了成矿流体的壳源性质; 而正的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  (2.95~3.50) 值则反映了成矿流体具有

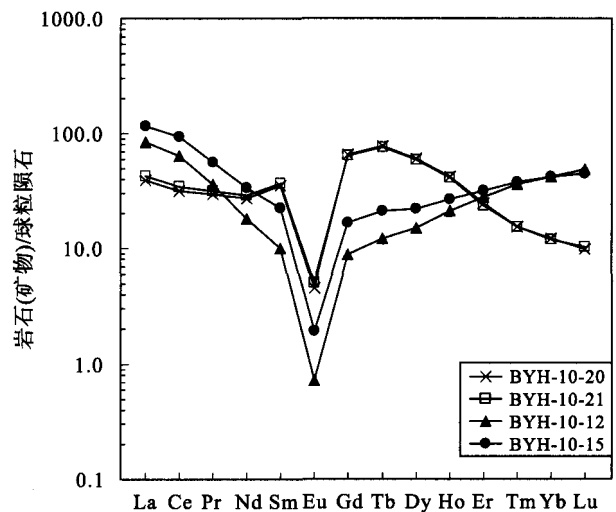


图 6 脉石矿物萤石及白杨河花岗斑岩球粒陨石标准化 REE 分布模式(球粒陨石 REE 数据来自文献[18])  
Fig. 6 The chondrite-normalized REE pattern of fluorites and granite porphyry from the Baiyanghe Be-U ore deposit  
BYH-10-12 和 BYH-10-15 为白杨河花岗斑岩; BYH-10-20 和 BYH-10-21 为脉石矿物萤石样品。  
BYH10-12, BYH10-15 represent granite porphyry, and BYH10-20, BYH10-21 represent fluorite (REE contents of chondrite was from Sun *et al.*<sup>[18]</sup>).

表4 白杨河铍铀矿床中脉体紫色萤石锶钕同位素组成  
Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of fluorites from the Baiyanghe Be-U ore deposit

样品	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
BYH-10-20	0.71057	6	0.51296	4	0.71057	6.20	0.34	3.50
BYH-10-21	0.71061	6	0.51291	6	0.71061	5.31	0.30	2.95

幔源性质。对白杨河花岗斑岩岩石地球化学研究表明,岩石为A型碱长花岗斑岩,岩浆源于富集地幔物质和地幔再循环沉积物的混合<sup>[19-20]</sup>。岩体具有相对较高的F含量(1670~2290  $\mu\text{g}/\text{g}$ ),其岩浆晚期的热液作用可以充分提供富F流体<sup>[19]</sup>。白杨河微晶花岗斑岩的锶钕同位素数据显示,具有高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(0.7143~0.7466)、正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (4.06~5.29)的特征,与萤石的锶钕同位素组成相似(图7)。考虑到矿体和微晶花岗斑岩体的产状及空间位置,因此可以认为白杨河铍铀矿床的成矿流体来主要源于花岗斑岩岩浆分异晚期的热液作用(花岗斑岩锶钕同位素数据源自文献[19])。

与成矿作用密切相关的萤石,以显著的Eu负异常, MREE富集为特征,反映了成矿流体具还原性质的地球化学特征<sup>[21]</sup>。萤石球粒陨石标准化REE分布模式明显不同于花岗斑岩,后者以LREE和HREE相对富集, Eu强烈亏损的“V”型为特征(图6)。在含F体系中,  $\text{REE}^{3+}$ 与F络合能力随原子序数增大而增大已被实验所证实<sup>[22]</sup>,这很可能是本文萤石中MREE富集( $(\text{La}/\text{Gd})_{\text{N}} = 0.60\sim 0.66$ )的机理所在,而HREE显著亏损很可能是某些富HREE的矿物(如锆石、石榴子石等)从成矿流体中结晶所致。此外,本文所研究的萤石存在Y-Ho的显著分异,与已发现的热水成因的Fe-Mn壳、热液脉萤石等在强烈的Y-Ho、Zr-Hf

分异是一致的,已有的研究揭示 $\text{Y}/\text{Ho} > 28$ ,  $\text{Zr}/\text{Hf} < 38$ 是与氟络合的结果<sup>[23-24]</sup>。

由微晶花岗斑岩分异的成矿流体,其流体包裹体应具高温、高盐度的特点<sup>[25]</sup>,但是所研究萤石中I型流体包裹体却显示高温、低盐度的性质。如果是由成矿流体的沸腾形成了高密度(高盐度)与低密度(低盐度)两种不混溶的流体,除了能观察到低盐度I型流体包裹体外,应该存在与之共存的高温、高盐度的流体包裹体,但实际上,与成矿密切相关的萤石矿物中只发育低盐度的流体包裹体。由于存在大量的低温、低盐度的II型次生流体包裹体,而且微晶花岗斑岩为次火山岩相的浅层侵入体,客观上为大气降水的加入提供了有利条件,因此,成矿流体表现低盐度的特征很可能是微晶花岗斑岩分异的晚期岩浆流体与大气降水混合所致。

## 5.2 成矿时代的限定

白杨河铍铀矿床产出于晚石炭世的微晶花岗斑岩和上泥盆统塔尔巴哈台组(D<sub>3</sub>t)中酸性火山岩的接触带上,脉石矿物萤石中流体包裹体和Sr-Nd同位素特征指示成矿流体主要由微晶花岗斑岩岩浆晚期热液提供,鉴于微晶花岗斑岩与矿体具有如此紧密的空间和成因联系,因此认为该矿床的成矿时代应不早于花岗斑岩的侵入时代。锆石U-Pb的LA-ICP-MS测定结果表明,花岗斑岩锆石U-Pb年龄为(313.4±2.3) Ma ( $n = 15$ , MSWD = 0.90),因此,基本可以确定白杨河铍铀矿床形成于晚石炭世<sup>[18]</sup>。

## 6 主要结论

(1) 白杨河铍铀矿床主成矿期流体包裹体的均一温度变化于237~372  $^{\circ}\text{C}$ 范围,指示矿床为中高温热液矿床;

(2) 白杨河铍铀矿床中脉石矿物萤石的锶钕同位素组成指示成矿流体主要源于微晶花岗斑岩分异演化晚期的岩浆流体,低盐度的成矿流体很可能是岩浆流体与大气降水混合的结果;

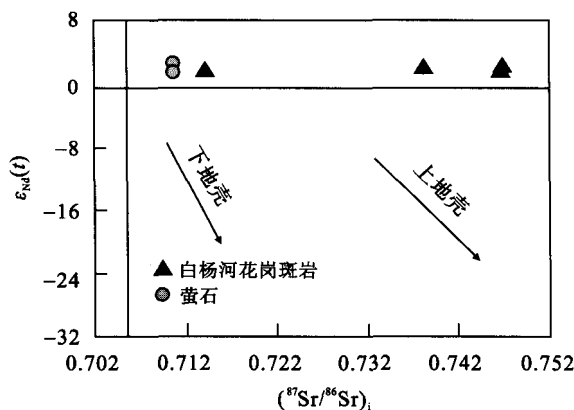


图7 萤石 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(白杨河花岗斑岩数据引自文献[19])

Fig.7 Diagram of  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs.  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  in fluorite (Sr and Nd isotopic data after Reference [19])



(3) 白杨河铍铀矿床成矿时代不早于微晶花岗岩侵入时代, 其上限值为(313.4±2.3) Ma。

本次研究野外工作由新疆核工业 216 地质队的王谋工程师协助完成; 铍钽同位素的测定得到了中国科学院地球化学研究所李小彪博士的大力帮助; 论文写作后期南京大学的朱金初教授对文章提供了许多建设性的意见和建议, 在此一并感谢。

#### 参考文献(References):

- [1] 修晓茜, 范洪海, 马汉峰, 衣龙升. 新疆白杨河铍铀矿床围岩蚀变及其地球化学特征[J]. 铀矿地质, 2011, 27(4): 215-220, 256.  
Xiu Xiao-qian, Fan Hong-hai, Ma Han-feng, Yi Long-sheng. The wall rock alteration and its geochemical characteristics of Baiyanghe uranium and beryllium deposit, Xinjiang [J]. Uran Geol, 2011, 27(4): 215-220, 256 (in Chinese with English abstract).
- [2] 许成, 黄智龙, 漆亮, 李文博. 萤石 Sr、Nd 同位素地球化学评述[J]. 地质地球化学, 2001, 29(4): 27-34.  
Xu Cheng, Huang Zhi-long, Qi Liang, Li Wen-bo. Sr-Nd isotope geochemistry of fluorites — A review [J]. Geology-Geochemistry, 2001, 29(4): 27-34 (in Chinese with English abstract).
- [3] Kesler S E. Geochemistry of Manto fluorite deposits, northern Coahuila, Mexico [J]. Econ Geol, 1977, 72(2): 204-218.
- [4] Stong D F, Fryer B J. Genesis of the St. Lawrence fluorite deposits as indicated by fluid inclusion, REE and isotopic data [J]. Econ Geol, 1984, 79(5): 1142-1158.
- [5] Ekambaram V, Brookins D G. REE geochemistry of fluorite-carbonate deposits in western Montana, USA [J]. Chem Geol, 1986, 54(3/4): 319-331.
- [6] Akande O, Mucke A. Mineralogical textural and paragenetic studies of the Pb-Zn-Cu mineralization in the lower Benue Trough (Nigeria) and their genetic implication [J]. J Afr Earth Sci, 1989, 9(1): 23-29.
- [7] Galindo C, Tornos F. The age and origin of barite-fluorite (Pb-Zn) veins of the Sierra Del Guadarrama (Spanish Central, Spain): A radiogenic (Nd-Sr) and stable isotope study [J]. Chem Geol, 1994, 112(3/4): 351-364.
- [8] 何国琦, 朱永峰. 中国新疆及邻区地质矿产对比研究[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 452-460.  
He Guo-qi, Zhu Yong-feng. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang, China, and its adjacent regions [J]. Geol China, 2006, 33(3): 452-460 (in Chinese with English abstract).
- [9] 董连慧, 冯京, 刘德权, 唐延龄, 屈迅, 王克卓, 杨在峰. 新疆成矿单元划分方案研究[J]. 新疆地质, 2010, 28(1): 1-15.  
Dong Lian-hui, Feng Jing, Liu De-quan, Tang Yan-ling, Qu Xun, Wang Ke-zhuo, Yang Zai-feng. Research for classification of metallogenic unit of Xinjiang [J]. Xinjiang Geol, 2010, 28(1): 1-15 (in Chinese with English abstract).
- [10] 唐红松, 王正云. 新疆准北地区晚古生代板块构造及铜矿的关系[J]. 矿产与地质, 1998, 64(2): 91-95.  
Tang Hong-song, Wang Zheng-yun. Late Palaeozoic plate-tectonics and its relationship with copper deposit in Northern Junggar, Xinjiang [J]. Mineral Resour Geol, 1998, 64(2): 91-95 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王正云, 唐红松. 新疆准北地区铜矿床主要类型控矿条件及找矿前景分析[J]. 矿产与地质, 1997, 61(11): 319-324.  
Wang Zheng-yun, Tang Hong-song. Major types, ore controlling conditions and ore prospecting perspective of copper deposits in Northern Zhungeer, Xinjiang [J]. Mineral Resour Geol, 1997, 61(11): 319-324 (in Chinese with English abstract).
- [12] Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. Episodes, 2000, 23(2): 82-92.
- [13] Chen B, Jahn B M. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence [J]. Asian Earth Sci, 2004, 23(5): 691-703.
- [14] 王谋, 李晓峰, 王果, 李彦龙, 师志龙, 鲁克改. 新疆雪米斯坦火山岩带白杨河铍铀矿床地质特征[J]. 矿产勘查, 2012, 3(1): 34-40.  
Wang Mo, Li Xiao-feng, Wang Guo, Li Yan-long, Shi Zhi-long, Lu Ke-gai. Geological characteristics of Baiyanghe beryllium-uranium deposits in Xuemisitan volcanic belt, Xinjiang [J]. Mineral Explor, 2012, 3(1): 34-40 (in Chinese with English abstract).
- [15] Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O solutions [J]. Rev Mineral Geochem, 1988, 65(1): 363-387.
- [16] Qi L, Grégoire D C. Determination of trace elements in twenty-six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Geostand News, 2000, 24(1): 51-63.
- [17] 许成, 黄智龙, 漆亮, 李文博, 刘丛强. 四川牦牛坪稀土矿

- 床萤石 REE 配分模式的影响因素[J]. 矿物学报, 2011, 21(3): 557-559.
- Xu Cheng, Huang Zhi-long, Qi Liang, Li Wen-bo, Liu Cong-qiang. Factors affecting the REE patterns of fluorites in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2011, 21(3): 557-559 (in Chinese with English abstract).
- [18] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geol Soc London Spec Publ*, 1989, 42: 313-345.
- [19] 张鑫. 新疆白杨河 Be-U 矿床地球化学及其与成矿相关的花岗斑岩成因及演化研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2012.
- Zhang Xin. Ore-forming fluid sources, petrogenetic and tectonic setting studies of the Baiyanghe Be-U deposit, Xinjiang, China [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- [20] Burt D M, Sheridan M F, Bikun J V, Christiansen E H. Topaz rhyolites: Distribution, origin, and significance for exploration [J]. *Econ Geol*, 1982, 77(8): 1818-1836.
- [21] 王忠刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 133-212.
- Wang Zhong-gang, Yu Xue-yuan, Zhao Zhen-hua. *Rare Earth Element Geochemistry* [M]. Beijing: Sciences Press, 1989: 133-212.
- [22] Byrne R H, Li B Q. Comparative complexation behavior of the rare earths [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59(22): 4575-4589.
- [23] Bau M, Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1995, 119(2/3): 213-223.
- [24] Gramaccioli C M, Diella V, Demartin F. The role of fluoride complexes in REE geochemistry and the importance of 4f electrons: Some examples in minerals [J]. *Eur J Mineral*, 1999, 11(6): 983-992.
- [25] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2085-2108.
- Chen Yan-jing, Ni Pei, Fan Hong-rui, Pirajno F, Lai Yong, Su Wen-chao, Zhang Hui. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(9): 2085-2108 (in Chinese with English abstract).