

新疆白杨河铀钍矿床成矿流体深部来源的锂同位素证据*

朱艺婷^{1,2,3}, 李晓峰^{1,2,3**}, 王果⁴, 杨文龙⁵

(1 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029; 2 中国科学院地球科学研究所, 北京 100029; 3 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 4 核工业 208 大队, 内蒙古 包头 014010; 5 核工业 216 大队, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要 新疆白杨河铀钍矿床是亚洲最大的铀钍矿床, 矿化主要产在晚石炭世花岗斑岩与泥盆系晶屑凝灰岩的接触带以及花岗斑岩体内部。已有研究表明该矿床是多期次热液流体叠加的结果, 但是关于成矿流体的来源及其成因还不清楚。文章在详细野外地质观察基础上, 对白杨河矿床中矿化的和未矿化的花岗斑岩、晶屑凝灰岩进行了锂同位素及其成矿元素组成分析。结果显示, 矿化的花岗斑岩和晶屑凝灰岩均富 Li、U、Be、B、F 等元素; 未矿化的花岗斑岩与矿化的花岗斑岩 $\delta^7\text{Li}$ 同位素组成相差不大(1.57‰~5.79‰), 而未矿化的晶屑凝灰岩 $\delta^7\text{Li}$ 同位素(22.77‰~23.96‰)与矿化晶屑凝灰岩 $\delta^7\text{Li}$ 同位素(-6.89‰~-3.92‰)组成差异明显, 显示贫 ^7Li 流体叠加。作者认为白杨河铀钍矿床的成矿流体是富含 Be、U 和 B 的流体, 与花岗斑岩矿化有关的成矿流体来自岩浆分异作用, 而与晶屑凝灰岩矿化有关的成矿流体可能来自深部岩浆房岩浆的分异作用。

关键词 地球化学; 锂同位素; 成矿流体; 铀钍矿床; 白杨河; 新疆

中图分类号: P619.14; P618.72; P597

文献标志码: A

Deep sources of ore-forming fluids involved in formation of Baiyanghe U-Be deposit, Xinjiang: Evidence from lithium isotope

ZHU YiTing^{1,2,3}, LI XiaoFeng^{1,2,3}, WANG Guo⁴ and YANG WenLong⁵

(1 Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2 Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3 College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 No. 208 Geological Survey, China National Nuclear Corporation, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 5 No. 216 Geological Survey, China National Nuclear Corporation, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract

The Baiyanghe U-Be deposit is the largest subvolcanic U-Be deposit in Asia. Orebodies in the Baiyanghe deposit occur as fracture fillings along contact zones between the Yangzhuang granite porphyry and the Devonian volcanic rocks and also within the granite porphyry. Previous studies have revealed that the Baiyanghe U-Be deposit has experienced multiple hydrothermal alteration and mineralization, but the origin of the fluids remains unclear. Based on the detailed field geological investigation, the authors analyzed the composition of lithium isotope and ore-forming elements in the mineralized and unmineralized granite porphyry and crystalline tuff in the Baiyanghe deposit. The results show that the $\delta^7\text{Li}$ isotopic composition of the unmineralized granite porphyry is similar to that of the mineralized granite porphyry (1.57‰~5.79‰), while the $\delta^7\text{Li}$ isotopic composition of the unmi-

* 本文得到国家自然科学基金面上项目(编号:41972087)和中国科学院地质与地球物理研究所重点部署项目(编号:IGGCAS-201902)资助
第一作者简介 朱艺婷,女,1997年生,博士研究生。Email: zhuyiting@mail.iggcas.ac.cn

** 通讯作者 李晓峰,男,1971年生,博士,研究员,主要从事矿床地质地球化学研究。Email: xiaofengli@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期 2020-11-24;改回日期 2021-03-08。张绮玲编辑。

neralized crystalline tuff (22.77‰~23.96‰) is significantly different from that of the mineralized crystalline tuff (-6.89‰~-3.92‰), which indicates that the ore-forming fluids of the Baiyanghe Be-U deposit were rich in Be, U, and B, with an obvious superposition of multi-stage ore-forming fluid activities. The lithium isotope results show that a part of ore-forming fluids came from the magma of the underlying deep magma chamber.

Keywords: geochemistry, lithium isotope, ore-forming fluid, U-Be deposit, Baiyanghe, Xinjiang

锂有 ^6Li 和 ^7Li 两个同位素,二者高达16.7%的相对质量差,意味着Li在地质过程中容易产生较大的同位素分馏(Tomascak et al., 2016),因此,锂及其同位素组成可用于示踪不同类型地质作用过程,如岩浆热液过程(Chan et al., 2003)、大陆风化过程(Rudnick et al., 2004)、岩浆脱气事件(Beck et al., 2004)、橄榄岩的蚀变交代作用(Wagner et al., 2007; Rudnick et al., 2007)。锂同位素示踪岩浆热液的演化过程及其水岩反应,已成为锂同位素地球化学研究的热点(Beck et al., 2006; Lu et al., 2020)。白杨河铀铍矿床是亚洲最大的铀矿床。铀、铍矿化主要发育在晚石炭世花岗斑岩与泥盆系晶屑凝灰岩的接触带以及花岗斑岩体内部,成因上属于中低温火山热液型矿床(李久庚等, 1991; 赵振华等, 2001)。前人对该矿床花岗斑岩的成因、热液蚀变以及成矿流体来源等方面进行了大量的研究(赵振华等, 2001; 王谋等, 2012; Zhang et al., 2014; Li et al., 2013; 2015),结果表明白杨河铀铍矿床是多期次热液流体叠加的结果(Li et al., 2013; 朱艺婷等, 2019; Zhang et al., 2020),但是这些流体是来自杨庄花岗斑岩岩浆分异,还是与下伏深部岩浆有关,或者二者皆有,目前尚缺乏证据。本文在详细野外地质观察的基础上,对白杨河矿床矿化的和未矿化的花岗斑岩和晶屑凝灰岩分别进行了成矿元素Li、Be、U成分分析及挥发分B和锂同位素($\delta^7\text{Li}$)分析,以探讨白杨河铀铍矿床的成矿流体来源。

1 区域地质背景

白杨河铀铍矿床位于新疆西准噶尔地区雪米斯坦火山岩带内,大地构造上处于哈萨克斯坦-准噶尔板块西北缘古生代陆缘活动带内晚古生代成熟岛弧之上(图1)。该地区自北向南依次发育有萨吾尔晚古生代岛弧、塔尔巴哈台组早古生代岛弧、雪米斯坦泥盆纪陆缘火山岩带以及达拉布特石炭纪残余洋盆。雪米斯坦火山岩带是新疆规模最大的铀-铍稀

有金属成矿带之一,是哈萨克斯坦Boshchekul-Chingiz火山岩带的一部分。该火山岩带主要发育一套中酸性火山岩和侵入岩,是晚志留世至早泥盆世准噶尔洋壳由北向南俯冲的产物,另外还有少量晚石炭世一中二叠世花岗岩、花岗斑岩及闪长岩侵入其中(韩宝福等, 1999; 董连慧等, 2010)。

区域上出露的地层主要为上泥盆统塔尔巴哈台组海陆交互相中酸性火山岩及火山碎屑岩建造,下石炭统和布克河组海相沉积碎屑岩夹安山玢岩,下石炭统黑山头组浅海相、海陆交互相中基性火山岩、中酸性火山岩及火山碎屑岩建造。该地区从东向西依次出露杨庄岩体、阿苏达岩体、小白杨河岩体,其中杨庄岩体与铀铍矿床关系最为密切。杨庄岩体呈东西向展布,在南部被杨庄断裂切穿,接触带向北倾,倾角为 $45^\circ\sim 75^\circ$;北部与泥盆纪火山岩呈断层接触,接触带向南倾,倾角为 32° 。此外,花岗斑岩中发育大量的辉绿岩和闪长岩脉,这些岩脉主要呈北西向展布(王谋等, 2012)(图2a、b)。

2 矿床地质

白杨河铀铍矿床主要产于杨庄岩体与北侧上泥盆统塔尔巴哈台组流纹质晶屑凝灰岩接触带的凹凸部位,以及杨庄花岗斑岩体的破碎带裂隙中。野外观察到杨庄岩体与上泥盆系塔尔巴哈台组晶屑凝灰岩呈断层接触关系(图3a),而与玄武岩呈侵入接触关系(图3b)。杨庄岩体东西长约10 km,南北宽度变化较大,最宽部位达1.8 km,最窄处约0.1 km。该岩体岩石类型主要为花岗斑岩(310 Ma, 锆石U-Pb年龄, 马汉峰等, 2010)。岩石呈斑状结构(图3c),斑晶含量为3%~8%,主要由石英和钾长石组成(图3d);基质由微晶石英、钾长石、斜长石和少量黑云母组成。副矿物主要有磁铁矿、锆石。流纹质晶屑凝灰岩呈晶屑凝灰结构(图3e),晶屑成分有石英、长石及少量的磷灰石(图3f),岩屑含量占25%~70%,晶屑含量10%~30%。基质为火山灰,含硅质、铁质及脱玻而成的绿泥石。

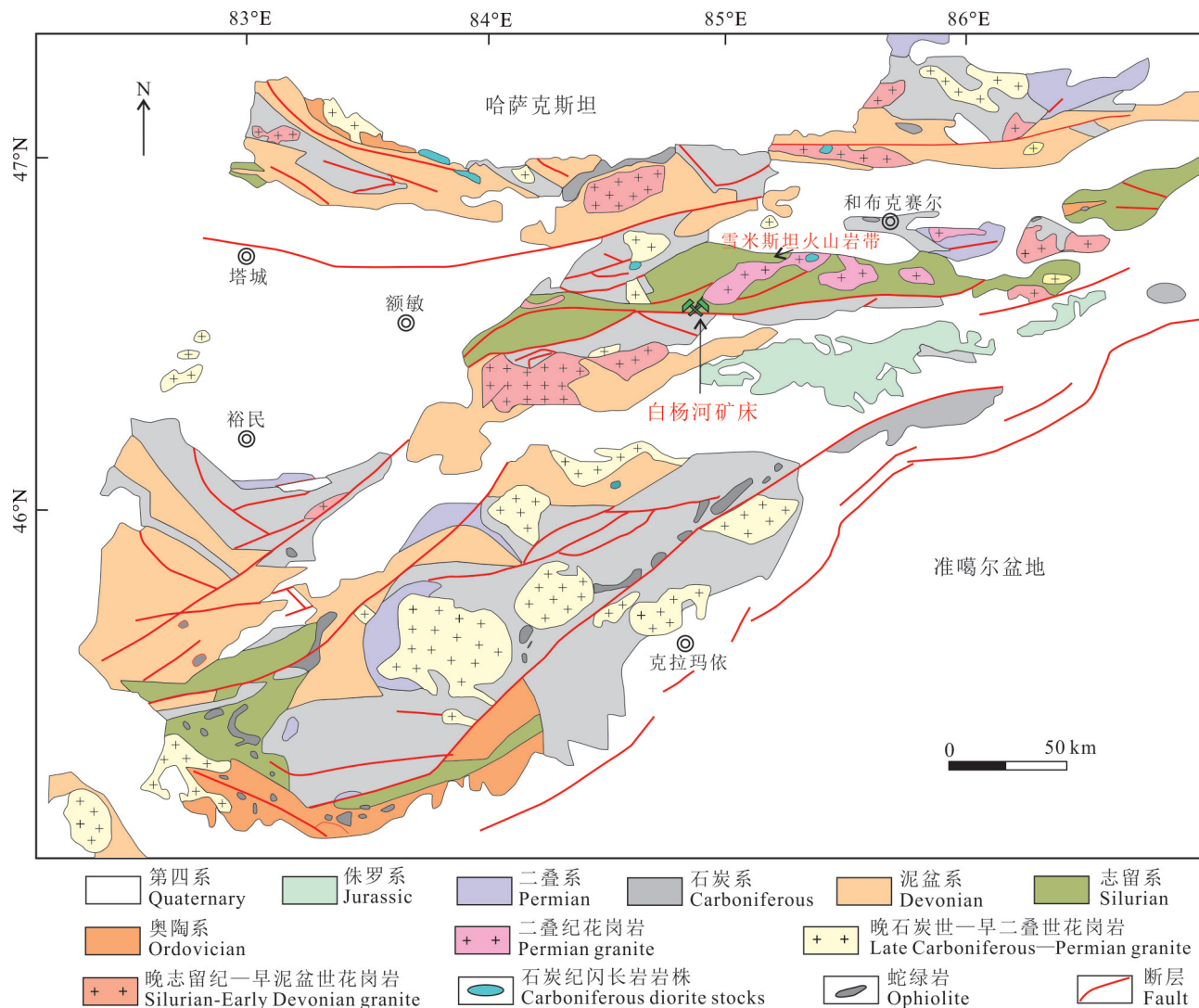


图1 新疆西准噶尔地区地质简图(据 Chen et al., 2010 修改)

Fig. 1 Regional geological map of Western Junggar region, Xinjiang (modified after Chen et al., 2010)

白杨河铀钼矿体90%以上都集中发育在杨庄花岗斑岩与北侧晶屑凝灰岩接触带部位。单个矿体规模较小,一般长约数十米,最长可达400 m。在接触带两侧20~50 m 范围内也零星分布有少量铀、钼矿体。平面上,铀矿体主要发育在杨庄岩体西段近南北向的辉绿岩脉和闪长岩脉十分发育的区域,而在岩体东段中基性岩脉不发育的地方,铀矿化也较弱。钼矿化范围较铀矿化广泛,在整个杨庄岩体与凝灰岩地层接触带附近均有分布。原生铀矿物主要为显微沥青铀矿;而钼矿物则以羟硅钼石为主。野外可以明显观察到次生铀矿物硅钙铀矿(图4a)和电气石-萤石-羟硅钼石组成的结核体(图4b)。热液蚀变主要有萤石化、电气石化、赤铁矿化、云母化、绿泥石化和碳酸盐化等(图4a~d),其中,铀、钼矿物与萤石、

电气石密切共生(图4e,f)。该矿床共发育4期萤石,不同期次的萤石分别与铀矿化、钼矿化或者铀钼矿化有关(Zhang et al., 2020)。花岗斑岩中与羟硅钼石共生的白云母 Ar-Ar 年龄表明钼矿化形成时代为303 Ma (Li et al., 2013)。杨庄花岗斑岩、晶屑凝灰岩和玄武岩中发育的电气石的结构和化学成分,表明白杨河铀钼矿床是多期次热液流体活动的结果(朱艺婷等,2019; Zhu et al., 2021)。

3 样品采集与分析测试

样品采集:为了准确示踪白杨河铀钼矿床成矿流体的来源,笔者分别采集了6个矿化和4个未矿化的花岗斑岩,以及2个矿化和2个未矿化的晶屑凝灰

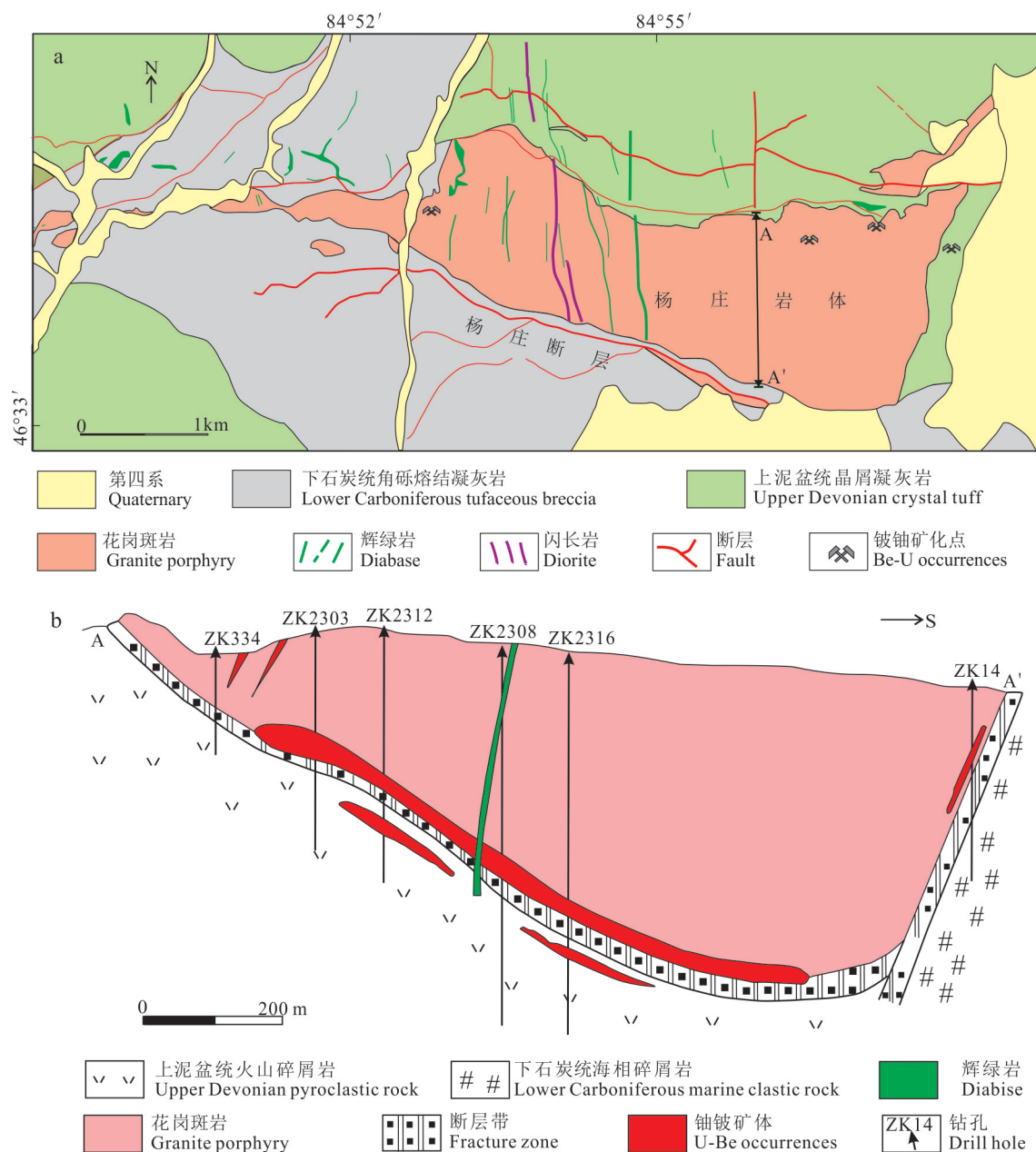


图2 新疆白杨河铀钍矿床地质简图(a, 据 Li et al., 2015 修改)及白杨河矿床 Be-U 矿体剖面图(b)

Fig. 2 Simplified geological map of the Baiyanghe U-BE deposit (a, modified after Li et al., 2015) and cross-section of the Baiyanghe deposit showing Be-U orebodies (b)

岩,对这些样品分别进行了成矿元素(Li、Be、U、Mo、Nb、Ta)、挥发分(B和F)和锂同位素组成的分析。

岩石微量元素和挥发分分析测试:样品成矿元素和挥发分组成分析是在加拿大 ActLab 实验室完成,其中成矿元素分析利用 ICP-MS 方法完成,粉末样用 HNO_3 溶解。外标采用纯元素溶液,标准物质为 BHVO-1 和 SY-4。ICP-MS 分析的相对误差对于大多数 $>10 \times 10^{-6}$ 的微量元素都优于 $\pm 5\%$,对于 $<10 \times 10^{-6}$

的微量元素,则优于 $\pm 10\%$ 。挥发分 F 用 FUS-ISE(聚焦超声-离子选择电极法)完成,最低检测限为 0.01%。挥发分 B 用 PGNA(瞬发 γ 中子活化分析)方法完成,最低检测限为 0.5×10^{-6} 。详细测试方法和流程见 www.actlabs.com。

锂同位素分析:锂同位素分析的化学前处理和 MC-ICP-MS 质谱分析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,锂同位素

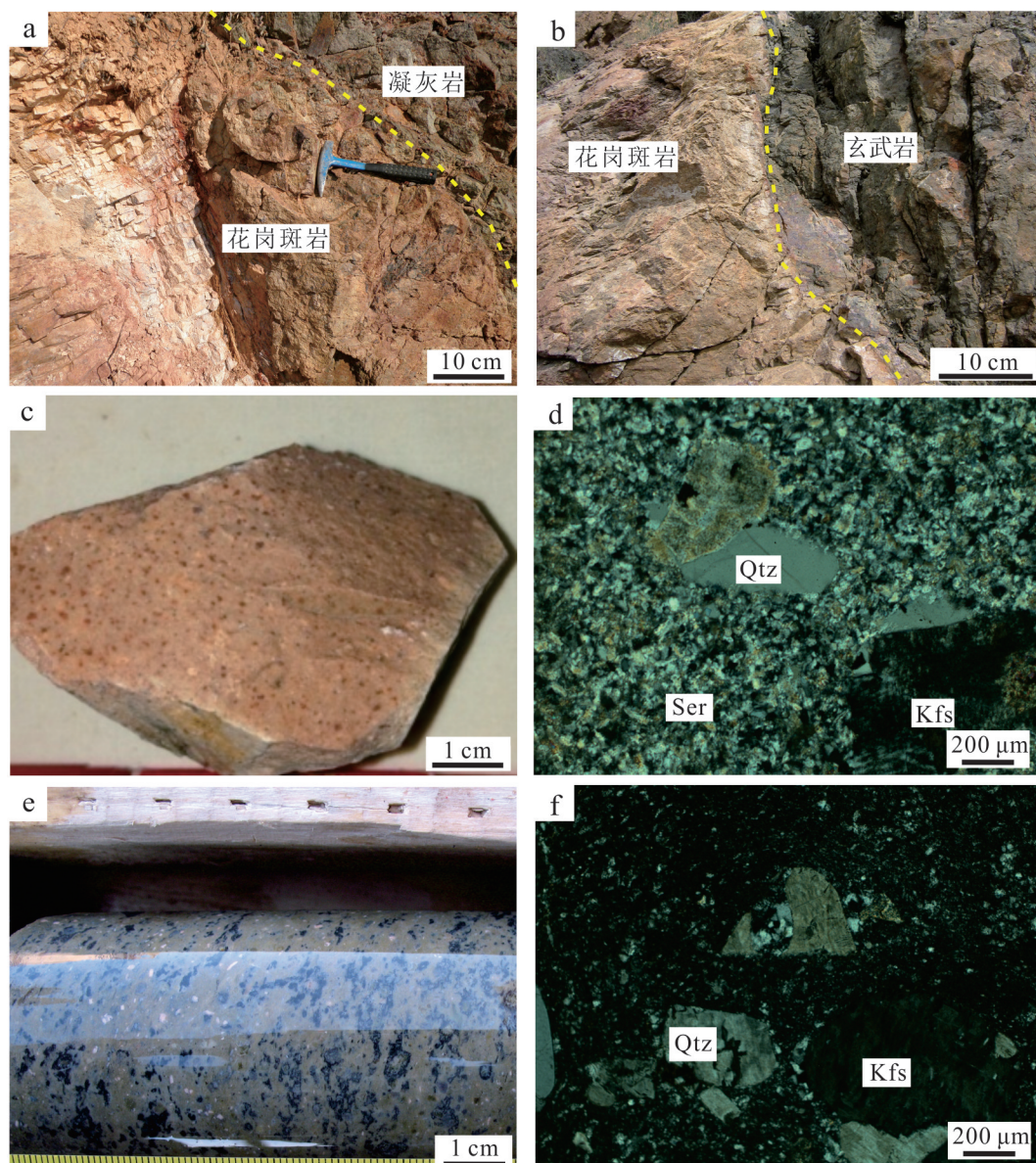


图3 白杨河矿床不同类型岩石野外和手标本及显微照片

- a. 花岗斑岩与晶屑凝灰岩侵入接触关系; b. 花岗斑岩与玄武岩侵入接触关系, 可见接触带的萤石脉(面状萤石化蚀变); c. 未矿化的花岗斑岩;
d. 花岗斑岩中的石英、长石和绢云母(正交偏光); e. 未矿化的晶屑凝灰岩; f. 晶屑凝灰岩中的长石晶屑和石英晶屑(正交偏光)

Qtz—石英; Kfs—钾长石; Ser—绢云母

Fig. 3 Field and hand specimens as well as photomicrographs of rock and ores from the Baiyanghe deposit

- a. The intrusion contact between granite porphyry and crystalline tuff; b. Fluorite veins occurring in the intrusion contact between granite porphyry and basalt; c. The unmineralized granite porphyry; d. Feldspar, sericite and quartz in granite porphyry (crossed nicols); e. The unmineralized crystalline tuff; f. Feldspar crystal debris and quartz crystal debris in crystalline tuff (crossed nicols)

Qtz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Ser—Sericite

分析详细实验流程和质谱测试参见 Rudnick 等 (2004) 和 Xu 等 (2020)。化学前处理的详细流程如下: 首先称取 50~100 mg 样品, 加入 2 mL 14.4 mol/L HNO_3 和 2 mL 24 mol/L HF 放入聚四氟乙烯溶样瓶中, 置于超声波中震荡后转移至加热板, 在 120°C 条

件下加热至干燥后, 再加入 1 mL 16 mol/L HNO_3 溶解, 再次转移至加热板重复此过程, 以确保去除氟化物。将蒸干后的样品加入 1 mL 12 mol/L HCl 溶解并再次加热蒸干, 再加入 2 mL 0.5 mol/L HCl 备用。经上述化学前处理的样品, 再用 3 根阳离子交换树脂

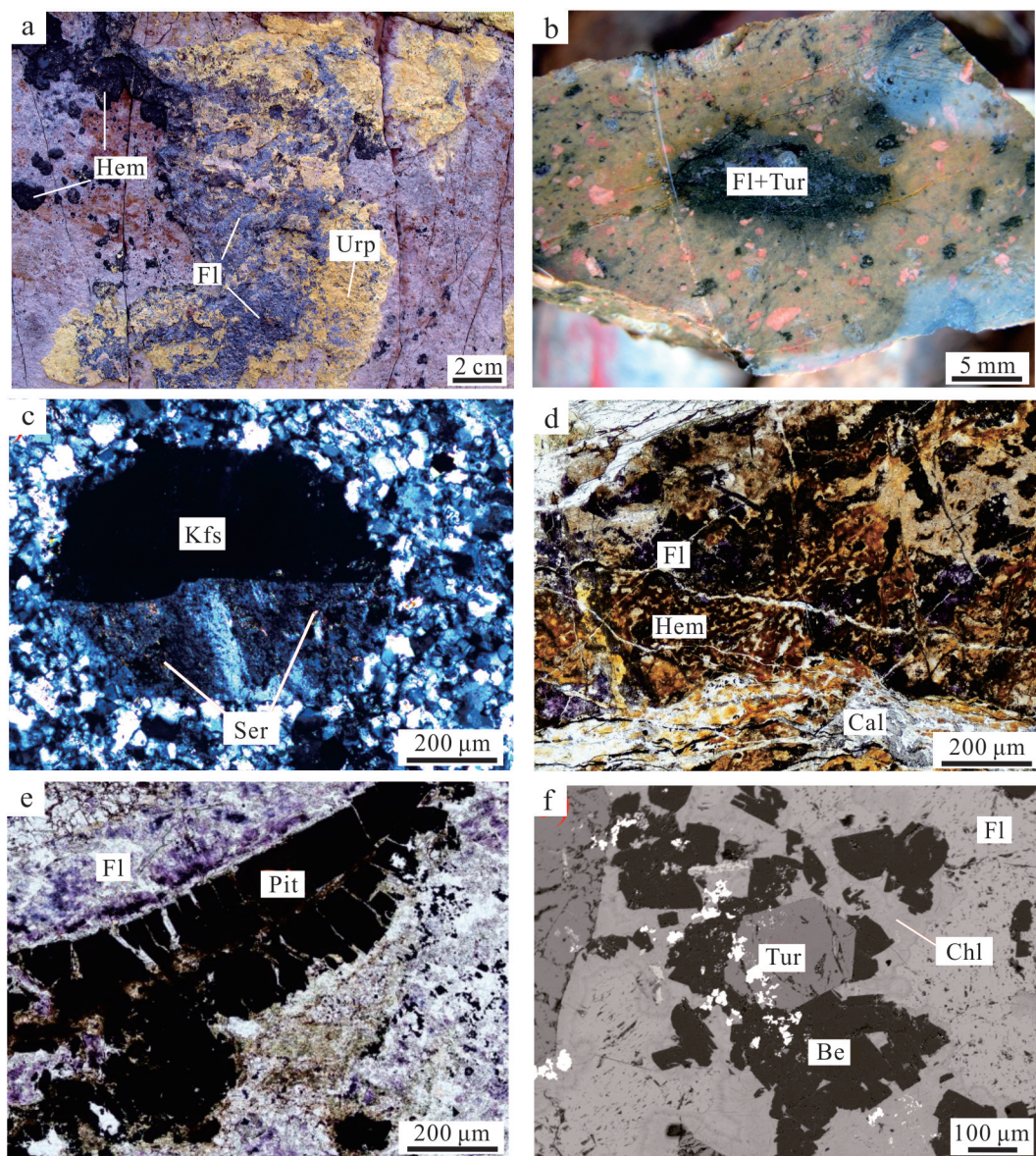


图4 白杨河矿床不同类型岩石和矿物手标本及显微照片

- a. 矿化花岗斑岩中发育硅钙铀矿及萤石、赤铁矿;b. 矿化晶屑凝灰岩中发育含铍的萤石-电气石结核体;c. 花岗斑岩中中长石的绢云母化(正交偏光);d. 花岗斑岩中赤铁矿化、碳酸盐化和萤石化蚀变(单偏光);e. 矿化花岗斑岩中沥青铀矿与紫色萤石共生(单偏光);f. 矿化晶屑凝灰岩中羟硅铍石与电气石、萤石、绿泥石共生(BSE照片)

Hem—赤铁矿;Urp—硅钙铀矿;Fl—萤石;Tur—电气石;Kfs—钾长石;Ser—绢云母;Cal—方解石;Pit—沥青铀矿;Be—羟硅铍石;Chl—绿泥石

Fig. 4 Hand specimen and photomicrographs of rock and ores from the Baiyanghe deposit

- a. The mineralized granite porphyry containing uranophane, fluoritization and hematitization; b. The mineralized crystal tuff which contains fluorite-tourmaline aggregates; c. Feldspar altered with sericitization in granite porphyry(crossed nicols); d. The mineralized crystal tuff which contains fluorite-tourmaline aggregates(plane polarized light); e. Pitchblende coexistent with purple fluorite in mineralized granite porphyry(plane polarized light); f. Euhedral bertrandite coexistent with fluorite, tourmaline, and chlorite in mineralized crystal tuff(BSE photograph)

Hem—Hemitite; Urp—Uranophane; Fl—Fluorite; Tur—Tourmaline; Kfs—K-feldspar; Ser—Sericite; Cal—Calcite;

Pit—Pitchblende; Be—Bertrandite; Chl—Chlorite

(AG 50WX8)进行化学分离和提纯。在干燥等离子体条件下,使用多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS, Neptune Thermo-Finnigan)进行测量。

仪器工作参数:RF 功率1300 W,冷却气约13 L/min,辅助气约0.58~0.7 L/min,载气约1.15 L/min,雾化器类型为Menhard雾化器(50 μL/min),分析器真空

度 $(4\sim 8)\times 10^{-9}$ Pa。在分析过程中,采用标准与样品交叉法(SSB)来校正仪器的质量分馏,标准样品和样品进样溶液的浓度相对偏差控制在10%以内。

4 分析结果

白杨河铀钍矿床不同类型岩石的Li同位素、成矿元素和挥发分组成见表1。由表1可知,不同类型岩石中成矿元素的含量差异明显。未矿化花岗斑岩中的 $w(\text{Li})$ 、 $w(\text{Be})$ 、 $w(\text{U})$ 分别为 $(5.25\sim 11.30)\times 10^{-6}$ (平均 8.28×10^{-6})、 $(5.26\sim 8.97)\times 10^{-6}$ (平均 6.32×10^{-6})、 $(3.17\sim 5.12)\times 10^{-6}$ (平均 3.87×10^{-6});未矿化晶屑凝灰岩中的 $w(\text{Li})$ 、 $w(\text{Be})$ 、 $w(\text{U})$ 分别为 $(3.02\sim 3.40)\times 10^{-6}$ (平均 3.21×10^{-6})、 $(2.31\sim 2.53)\times 10^{-6}$ (平均 2.42×10^{-6})、 $(2.21\sim 2.44)\times 10^{-6}$ (平均 2.33×10^{-6})。而在矿化的花岗斑岩中的 $w(\text{Li})$ 、 $w(\text{Be})$ 、 $w(\text{U})$ 分别为 $(12.20\sim 99.10)\times 10^{-6}$ (平均 40.17×10^{-6})、 $(5.44\sim 305.00)\times 10^{-6}$ (平均 103.28×10^{-6})、 $(7.33\sim 41.3)\times 10^{-6}$ (平均 16.27×10^{-6});矿化的晶屑凝灰岩中的 $w(\text{Li})$ 、 $w(\text{Be})$ 、 $w(\text{U})$ 分别为 $(11.80\sim 21.80)\times 10^{-6}$ (平均 16.80×10^{-6})、 $(12.30\sim 296.00)\times 10^{-6}$ (平均 154.15×10^{-6})、 $(10.20\sim 17.40)\times 10^{-6}$ (平均 13.80×10^{-6})。B(硼)在无矿化的岩石中含量较低($w(\text{B})$ 为 $3.06\times 10^{-6}\sim 8.74\times 10^{-6}$),而在矿化的岩

石中硼含量较高($w(\text{B})$ 为 $3.53\times 10^{-6}\sim 322\times 10^{-6}$)。

白杨河铀钍矿床不同类型岩石中锂同位素组成差异较为明显(表1),其中未矿化晶屑凝灰岩 $\delta^7\text{Li}$ 变化于22.77‰~23.96‰,未矿化花岗斑岩 $\delta^7\text{Li}$ 变化于4.31‰~4.77‰,而矿化的晶屑凝灰岩 $\delta^7\text{Li}$ 变化于-6.89‰~-3.92‰,矿化花岗斑岩 $\delta^7\text{Li}$ 变化于1.57‰~5.79‰。矿化与未矿化岩石Li同位素的差异可能反映了不同Li同位素组成的流体叠加的结果。

5 讨论

5.1 白杨河铀钍矿床成矿流体来源

在矿床成因研究中,成矿流体来源及其组成的研究是揭示矿床成因的重要手段。白杨河铀钍矿床成矿流体来源此前一直是学者们的关注重点。马汉峰等(2010)认为白杨河铀钍矿床成矿流体来自地层中的变质水或有一定深度的热液流体,并先后经历了岩浆期后热液成矿流体的叠加。张鑫等(2013)通过萤石包裹体和Sr-Nd同位素研究,认为成矿流体来源于杨庄岩体岩浆分异的岩浆热液和大气降水的混合。毛伟等(2013)和Li等(2015)研究表明至少在一期成矿作用中岩浆水和大气降水均参与了围岩蚀变和成矿。白杨河铀钍矿床萤石中包裹体较低的均一

表1 新疆白杨河U-Be矿床不同类型岩石Li同位素、成矿元素和挥发分组成

Table 1 The lithium isotope and ore-forming element compositions of the Baiyanghe volcanics-hosted large U-Be deposit, Xinjiang

样品	岩性	$\delta^7\text{Li}/\text{‰}$	$w(\text{B})/10^{-6}$							$w(\text{F})/\text{‰}$
			Li	Be	Mo	U	Nb	Ta	B	
BY18-3A	矿化晶屑凝灰岩	-6.89	21.80	12.3	1.80	10.2	30.90	2.36	26.80	0.04
BY18-3B	矿化晶屑凝灰岩	-3.92	11.80	296	21.60	17.4	31.80	2.38	44.60	0.04
BY18-18A	无矿化晶屑凝灰岩	23.96	3.40	2.53	0.85	2.44	27.10	1.77	7.71	0.03
BY18-18B	无矿化晶屑凝灰岩	22.77	3.02	2.31	1.03	2.21	24.40	1.6	7.51	0.03
ZK11324-2	矿化花岗斑岩	3.99	30.00	5.63	1.76	8.66	96.60	7.66	3.53	0.03
ZK11324-3	矿化花岗斑岩	4.32	31.30	12.20	3.91	41.3	103.00	7.89	3.90	0.03
ZK11324-4	矿化花岗斑岩	5.52	12.20	305.00	32.30	20.1	107.00	7.66	34.6	0.03
ZK8752-2	矿化花岗斑岩	1.57	51.20	5.44	0.40	7.33	99.50	7.57	30.00	0.03
ZK8752-3	矿化花岗斑岩	5.79	17.20	53.40	0.45	9.71	100.00	8.32	44.10	0.04
BYH18-2	矿化花岗斑岩	-	99.10	238.00	67.60	10.50	49.70	3.39	322.00	0.03
BYD1-20	无矿化花岗斑岩	-	-	8.97	1.54	5.12	93.60	7.77	-	0.22
ZK7702-1	无矿化花岗斑岩	-	-	5.78	2.89	3.46	84.4	8.32	-	0.25
XBYH-2	无矿化花岗斑岩	4.77	11.30	5.28	0.85	3.72	113.00	8.22	8.74	0.04
XBYH-3	无矿化花岗斑岩	4.31	5.25	5.26	0.75	3.17	26.20	2.85	3.06	0.02

注:“-”未检测。

温度(100~150°C)和中等的盐度($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 4.69%~19.72%) (Li et al., 2015; 杨文龙等, 2014; 毛伟等, 2013)表明该矿床为低温热液矿床。刘畅等(2020)认为白杨河铀钼矿床中富Be的矿物是由花岗斑岩深部岩浆房分异的富F岩浆热液直接沉淀形成,与后期流体(包括幔源流体和大气降水)的淋滤作用无关或关系很小。

叶发旺等(2019)利用CASI/SASI航空高光谱遥感技术、ASD便携式地面高光谱技术手段,从不同尺度对白杨河铀矿区及周围地表和深部的热液蚀变类型、热液活动规律等进行了立体识别与研究,认为白杨河铀矿深部热液流体活动至少存在“直流型”和“分流型”2种典型形式。蚀变矿物绢云母存在高铝白云母和低铝白云母,分别对应于不同的热液流体的高温偏酸性和低温偏碱性的环境,这说明白杨河铀钼矿床至少存在2期不同来源、不同性质的流体。张志新等(2019)使用可见光-短波红外地面非成像光谱仪对新疆白杨河铀钼矿床地表进行光谱测试与分析,发现主要蚀变矿物伊利石结晶度具有明显的变化规律。伊利石Al-OH吸收波长变化的规律指示白杨河铀钼矿床经历了多期次热液流体活动的叠加。因此,不论是对白杨河铀钼矿床流体包裹体,还是对热液蚀变矿物组成的研究,均揭示出白杨河铀钼矿床存在多期次热液流体活动,但目前还缺乏较为直接的证据。

5.2 锂同位素对成矿流体来源指示意义

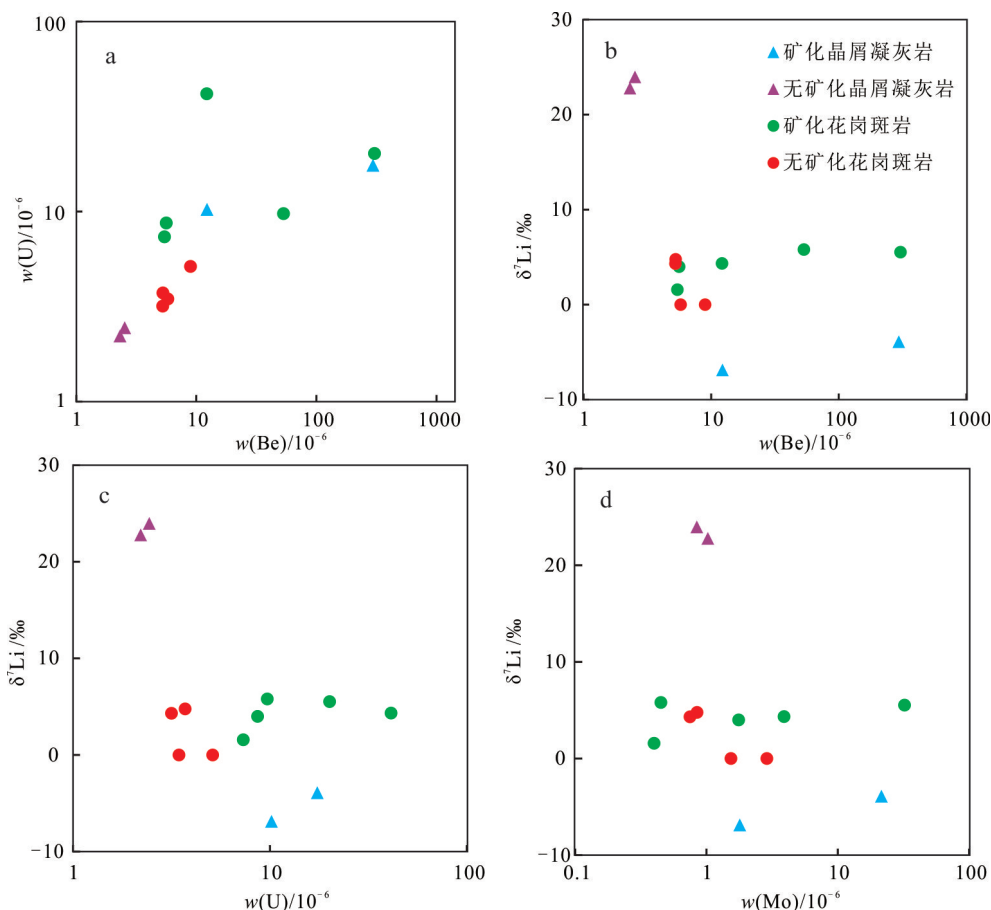
目前,利用锂同位素及其组成示踪成矿流体的来源及水-岩反应的研究尚处于起步阶段。在高温条件下,矿物和共存流体之间可能会发生锂同位素的扩散分馏,但锂同位素在高温岩浆作用(Halama et al., 2008)和地壳深熔作用(Teng et al., 2004)中的平衡分馏几乎可以忽略不计($\leq 1.0\%$)。由于 ^6Li 的扩散速率是 ^7Li 的1.034倍,因而在岩浆-围岩相互作用过程及花岗岩结晶分异和伟晶岩形成过程中均存在锂同位素分馏(Teng et al., 2006)。侯江龙等(2018)利用锂同位素对比了四川甲基卡含矿伟晶岩和不含矿伟晶岩的锂同位素,发现含矿伟晶岩的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 -1.3% ,不含矿伟晶岩的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 -1.3% ~ $+2.0\%$,围岩云母石英片岩的 $\delta^7\text{Li}$ 值为 -7.7% ,三者存在明显的差异,从而认为伟晶岩的成矿流体主要来源于二云母花岗岩,有效地解决了甲基卡矿床成矿流体的来源问题。

不同类型花岗岩的锂同位素组成存在一定差

异。如:I型花岗岩 $\delta^7\text{Li}$ 值变化介于 1.9% ~ 8.0% ,S型花岗岩 $\delta^7\text{Li}$ 值变化介于 -1.4% ~ 2.1% (Tomascak, 2004),但是对于A型花岗岩的 $\delta^7\text{Li}$ 值目前研究较少,白杨河矿床花岗斑岩 $\delta^7\text{Li}$ 值为 1.57% ~ 5.79% ,应属于A型花岗岩的锂同位素组成,与I型和S型花岗岩的锂同位素组成差异明显。然而无矿化晶屑凝灰岩具有异常高的 $\delta^7\text{Li}$ 值(22.77% ~ 23.96%)、低 $w(\text{Li})$ (3.02×10^{-6} ~ 3.40×10^{-6})的特点, $\delta^7\text{Li}$ 值远远大于已知储库锂同位素的组成。由于脱气作用,流纹质火山岩在形成过程中, $\delta^7\text{Li}$ 同位素值可能发生较大的分馏,致使Li同位素分馏高达 20% (Watson, 2017)。Neukampf等(2019)认为流纹质凝灰岩在形成过程中,由于脱气作用而损失了大量的Li元素,导致其中Li的含量较低,这可能是白杨河矿床无矿化晶屑凝灰岩具有异常高 $\delta^7\text{Li}$ 值、较低的Li含量的原因。

对比白杨河铀钼矿床未矿化与矿化的花岗斑岩和晶屑凝灰岩,可以发现矿化花岗斑岩和晶屑凝灰岩中的Li、Be、U含量明显高于未矿化花岗斑岩和晶屑凝灰岩中的Li、Be、U含量(图5,表1),说明在成矿过程中明显有元素Li、Be、U的加入。从图5a可以看出,在未矿化的花岗斑岩中U和Be具有明显的相关性,而矿化的花岗斑岩中U和Be的缺乏相关性,进一步说明U和Be矿化是热液流体叠加的结果,而U和Be的分离可能受不同期次成矿流体叠加的影响。

白杨河矿床中未矿化的花岗斑岩 $\delta^7\text{Li}$ 同位素值为 4.31% ~ 4.77% ,具有与矿化的花岗斑岩较一致的 $\delta^7\text{Li}$ 同位素组成(1.57% ~ 5.79%),不同类型岩石的 $\delta^7\text{Li}$ 值与U、Be、Mo等成矿元素没有明显的相关性(图5b~d),说明 $\delta^7\text{Li}$ 值会受岩浆热液流体作用过程中地球化学分馏作用的控制,可能反映了引起花岗斑岩矿化热液流体为岩浆热液流体,且 $\delta^7\text{Li}$ 值变化不大。而矿化晶屑凝灰岩的较低的 $\delta^7\text{Li}$ 同位素组成以及相对较高的Li含量则反映了引起晶屑凝灰岩矿化的热液流体具有极低的 $\delta^7\text{Li}$ 同位素组成,且富Li。引起晶屑凝灰岩矿化的成矿流体明显与围岩发生了较程度的水-岩反应,致使凝灰岩的 $\delta^7\text{Li}$ 同位素由正值变化为负值。由此可见,引起晶屑凝灰岩矿化的热液流体与引起花岗斑岩内铀钼矿化的热液流体组成不同,相对矿化花岗斑岩来说,引起晶屑凝灰岩矿化的流体具有更低的 $\delta^7\text{Li}$ 同位素值。Sarah等(2017)认为下地壳具有较低的

图5 白杨河矿床不同类型岩石 $\delta^7\text{Li}$ 与成矿元素关系图a. U 与 Be 二元图; b. $\delta^7\text{Li}$ 与 Be 二元图; c. $\delta^7\text{Li}$ 与 U 二元图; d. $\delta^7\text{Li}$ 与 Mo 二元图Fig. 5 The diagrams of $\delta^7\text{Li}$ and metallogenic elements in different types of rocks from the Baiyanghe deposita. U versus Be diagram; b. $\delta^7\text{Li}$ versus Be diagram; c. $\delta^7\text{Li}$ versus U diagram; d. $\delta^7\text{Li}$ versus Mo diagram

$\delta^7\text{Li}$ 值,最低可达 -18‰ 。因此,白杨河铀钼矿床中引起晶屑凝灰岩矿化的流体有可能来自于下地壳岩浆房岩浆的分异,且这种分异出的岩浆流体 $\delta^7\text{Li}$ 同位素值小于 -7‰ 。

此外,无论是花岗斑岩还是凝灰岩,挥发分 B (硼)在未矿化的岩石中含量较低($w(\text{B})$ 分别为 $2.85 \times 10^{-6} \sim 8.32 \times 10^{-6}$ 和 $1.60 \times 10^{-6} \sim 1.77 \times 10^{-6}$),而在矿化的岩石中却大幅增加($w(\text{B})$ 分别为 $3.53 \times 10^{-6} \sim 322 \times 10^{-6}$ 和 $26.80 \times 10^{-6} \sim 44.60 \times 10^{-6}$)。已有研究表明,区域内岩石所提供的硼不能满足矿化的需要,矿化岩石中挥发分 B 主要来自于成矿流体,而不是交代围岩的结果(Zhu et al., 2021)。因此,白杨河铀钼矿床的成矿流体是富含 Be、U 和 B 的流体,引起花岗斑岩矿化的流体主要来自花岗斑岩出溶的流体,而引起晶屑凝灰岩矿化的流体可能来自深部下地壳岩浆房岩浆分异。

6 结 论

(1) 白杨河铀钼矿床不同类型岩石的锂同位素组成差异明显。未矿化的花岗斑岩与矿化的花岗斑岩 $\delta^7\text{Li}$ 值差异不大($1.57\text{‰} \sim 5.79\text{‰}$),而未矿化的晶屑凝灰岩 $\delta^7\text{Li}$ 值($22.77\text{‰} \sim 23.96\text{‰}$)与矿化晶屑凝灰岩 $\delta^7\text{Li}$ ($-6.89\text{‰} \sim -3.92\text{‰}$)值相差较大。

(2) 白杨河铀钼矿床的成矿流体富含 Be、U 和 B,与花岗斑岩矿化有关的成矿流体来自杨庄花岗斑岩的岩浆分异作用,而与晶屑凝灰岩矿化有关的成矿流体可能来自深部岩浆房岩浆的分异作用。

致 谢 野外工作得到了核工业 216 大队张雷等地质同行的大力协助;锂同位素测试得到了中国

科学院地球化学研究所李芳芳工程师的帮助,在此对他们深表感谢。

References

- Beck P, Barrat J A, Chaussidon M, Gillet P and Bohn M. 2004. Li isotopic variations in single pyroxenes from the northwest Africa 480 shergottite (NWA 480): A record of degassing of Martian magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 2925-2933.
- Beck P, Chaussidon M, Barrat J A, Gillet P and Bohn M. 2006. Diffusion induced Li isotopic fractionation during the cooling of magmatic rocks: The case of pyroxene phenocrysts from nakhlite meteorites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 4813-4825.
- Chan L H and Frey F A. 2003. Lithium isotope geochemistry of the Hawaiian plume: Results from the Hawaii scientific drilling project and Koolau volcano[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4: 8707.
- Chen J F, Han B F, Ji J Q, Zhang L, Xu Z, He, G Q and Wang T. 2010. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northernwest Junggar, North Xinjiang, China[J]. *Lithos*, 115: 137-152.
- Dong L H, Feng J, Liu D Q, Tang T L, Qu X, Wang K Z and Yang Z F. 2010. Research for classification of metallogenic unit of Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 28(1): 1-15(in Chinese with English abstract).
- Halama R, McDonough W F, Rudnick R L and Bell K. 2008. Tracking the lithium isotopic evolution of the mantle using carbonatites[J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 265: 726-742.
- Han B F, He G Q and Wang S G. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar Basin[J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 42 (2): 113-119(in Chinese with English abstract).
- Hou J L, Li J K, Zhang Y J and Li C. 2018. Li isotopic composition and its constrains on rare metal mineralization of Jiajika two-mica granite, Sichuan Province[J]. *Earth Science*, 43(6): 2043-2051(in Chinese with English abstract).
- Li J G. 1991. The occurrence of beryllium and the relationship between uranium and beryllium at a U-Be ore field in Xinjiang[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, (2): 2-4(in Chinese).
- Li X F, Mao W, Wang G, Wang M, Li Y L, Ren M C, Feng Z H and Yang F. 2013. The geology and the ages of Baiyanghe Be-U deposit in Xinjiang Province, northwest China[A]. 12th SGA biennial meeting 2013 abstract[C]. 1605-1607.
- Li X F, Wang G, Mao W, Wang C Z, Xiao R and Wang M. 2015. Fluid inclusions, muscovite Ar-Ar age, and fluorite trace elements at the Baiyanghe volcanic Be-U-Mo deposit, Xinjiang, northwest China: Implication for its genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 64: 387-399.
- Liu C, Tian J J, Wang M, Yang W L, Zhang L, Zhao X B, Yi L S, Wu Y and Zou Y L. 2020. Relationship between the beryllium and uranium mineralization in the Baiyanghe Be-U deposit, western Junggar: Evidence from wall-rock alteration and contact relation of ores and minerals[J]. *Geology and Exploration*, 56: 465-477(in Chinese with English abstract).
- Lu X, Rolf L R, Johannes G, Robert B T and Wang R C. 2020. Li and B isotopic fractionation at the magmatic-hydrothermal transition of highly evolved granites[J]. *Lithos*, 376-377: 105753.
- Ma H F, Yi L S and Xiu X Q. 2010. Evaluation the potential uranium and beryllium resources in Xuemisitan area, Xinjiang[R]. Internal Report. 1-144 (in Chinese).
- Mao W, Wang G, Li X F, Wang M and Xiao R. 2013. A study of fluid inclusions in Baiyanghe U-Be deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 32(5): 1026-1034(in Chinese with English abstract).
- Neukampf J, Ellis B S, Magna T, Laurent O and Bachmann O. 2019. Partitioning and isotopic fractionation of lithium in mineral phases of hot, dry rhyolites: The case of the Mesa Falls Tuff, Yellowstone[J]. *Chemical Geology*, 506: 175-186.
- Rudnick R L, Tomascak P B, Njo H B and Gardner L R. 2004. Extreme lithium isotopic fractionation during continental weathering revealed in saprolites from South Carolina[J]. *Chemical Geology*, 212:45-57.
- Rudnick R L and Ionov D A. 2007. Lithium elemental and isotopic disequilibrium in minerals from peridotite xenoliths from Far-East Russia: Product of recent melt/fluid-rock reaction[J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 256: 278-293.
- Sarah P D, Liu X M and Roberta L R. 2017. Lithium isotope geochemistry[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 82: 165-217.
- Teng F Z, McDonough W F, Rudnick R L, Dalpe C, Tomascak P B, Chappell B W and Gao S. 2004. Lithium isotopic composition and concentration of the upper continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 4167-4178.
- Teng F Z, McDonough W F, Rudnick R L, Walker R J and Sirbescu M L C. 2006. Lithium isotopic systematics of granites and pegmatites from the Black Hills, South Dakota[J]. *American Mineralogist*, 91: 1488-1498.
- Tomascak P B. 2004. Developments in the understanding and application of lithium isotopes in the earth and planetary sciences[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 55: 153-195.
- Tomascak P B, Magna T S and Dohmen R. 2016. Advances in lithium isotope geochemistry[M]. Springer International Publishing. 195p.
- Wagner C and Deloule E. 2007. Behaviour of Li and its isotopes during metasomatism of French Massif Central lherzolites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 4279-4296.
- Wang M, Li X F, Wang G, Li Y L, Shi Z L and Lu K G. 2012. Geological characteristics of Baiyanghe beryllium-uranium deposits in Xuemisitan volcanic belt, Xinjiang[J]. *Mineral Exploration*, 3(1): 34-40(in Chinese with English abstract).
- Watson E B. 2017. Diffusive fractionation of volatiles and their iso-

- topes during bubble growth in magmas[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 172: 61.
- Xu L, Luo C G and Wen H J. 2020. A revisited purification of Li for 'Na Breakthrough' and its isotopic determination by MC-ICP-MS[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 44: 201-204.
- Yang W L, Mostafa Fayek, Li Y L, Wang M and Zhou J. 2014. Characteristics of fluid inclusions and fluorite of Baiyanghe beryllium deposit in western Junggar[J]. *Xinjiang Geology*, 32: 82-86(in Chinese with English abstract).
- Ye F W, Zhang C, Xu Q J, Meng S, Qiu J T and Wang J G. 2019. Demonstration analysis of hydrothermal fluid activity using hyperspectral remote sensing technology: A case study of Baiyanghe uranium deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 38(6): 1347-1364(in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Li X F, Wang G and Wang M. 2020. Direct evidence for the source of uranium in the Baiyanghe deposit from accessory mineral alteration in the Yangzhuang granite porphyry, Xinjiang Province, northwest China[J]. *American Mineralogist*, 105: 1556-1571.
- Zhang X and Zhang H. 2013. Geochemical characteristics of the ore-forming fluid and ore genesis of the Baiyanghe Be-U deposit, Xinjiang, China[J]. *Geochimica*, 42(2): 143-152(in Chinese with English abstract).
- Zhang X and Zhang H. 2014. Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic studies of the Baiyanghe A-type granite porphyry in the western Junggar: Implications for its petrogenesis and tectonic setting[J]. *Gondwana Research*, 25: 1554-1569.
- Zhang Z X, Xu Q J, Bai X H, Ye F W and Zhang C. 2019. Application of short-wavelength infrared illite crystallinity in exploration in the Baiyanghe uranium deposit, Xinjiang[J]. *Science Technology and Engineering*, 19(6): 32-37(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H, Shen Y C and Tu G C. 2001. Basic research on metal mineral resources in Xinjiang[M]. Beijing: Science Press. 67-72 (in Chinese).
- Zhu Y T, Li X F, Zhang L, Wang G and Zhang D. 2019. The characteristics of tourmaline in Baiyanghe U-Be deposit and its implications for mineralization, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35 (11): 3429-3442(in Chinese with English abstract).
- Zhu Y T, Li X F, Zhang L, Zhang D and Wang C Z. 2021. Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline at the Baiyanghe Besing bond U deposit, northwest China: Implications for Be-U mineralization[J]. *Chemical Geology*, 569: 120146.

附中文参考文献

- 董连慧, 冯京, 刘德权, 唐延龄, 屈迅, 王克卓, 杨在峰. 2010. 新疆成矿单元划分方案研究[J]. *新疆地质*, 28(1): 1-15.
- 韩宝福, 何国琦, 王式. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动-底垫作用及准噶尔盆地基底的性质[J]. *中国科学(D 辑)*, 29(1): 16-21.
- 侯江龙, 李建康, 张玉洁, 李超. 2018. 四川甲基卡锂矿床花岗岩体 Li 同位素组成及其对稀有金属成矿的制约[J]. *地球科学*, 43(6): 2042-2054.
- 李久庚. 1991. 新疆某铀铍矿田铍的赋存状态及铀铍关系[J]. *矿物岩石地球化学通报*, (2): 2-4.
- 刘畅, 田建吉, 王谋, 杨文龙, 张雷, 赵晓波, 衣龙升, 吴玉, 邹耀林. 2020. 西准噶尔白杨河铍铀矿床中铍与铀成生关系初探——来自围岩蚀变和矿石矿物接触关系的证据[J]. *地质与勘探*, 56(3): 465-477.
- 马汉峰, 衣龙升, 修晓茜. 2010. 雪米斯坦地区铀铍资源潜力评价研究[R]. 内部报告. 1-144.
- 毛伟, 王果, 李晓峰, 王谋, 肖荣. 2013. 新疆白杨河铍铀矿床流体包裹体研究[J]. *矿床地质*, 32(5): 1026-1034.
- 王谋, 李晓峰, 王果, 李彦龙, 师志龙, 鲁克改. 2012. 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*, 3(1): 34-40.
- 杨文龙, Mostafa F, 李彦龙, 王谋, 周剑. 2014. 西准白杨河铍矿床萤石及流体包裹体特征[J]. *新疆地质*, 32(1): 82-86.
- 叶发旺, 张川, 徐清俊, 孟树, 邱骏挺, 王建刚. 2019. 热液流体活动规律高光谱遥感分析示范研究——以新疆白杨河铀矿床为例[J]. *矿床地质*, 38(6): 1347-1364.
- 张鑫, 张辉. 2013. 新疆白杨河大型铀铍矿床成矿流体特征及矿床成因初探[J]. *地球化学*, 42(2): 143-152.
- 张志新, 徐清俊, 白小虎. 2019. 短波红外伊利石结晶度在新疆白杨河铀矿床勘查中的应用[J]. *科学技术与工程*, 19(6): 32-37.
- 赵振华, 沈远超, 涂光炽. 2001. 新疆金属矿产资源的基础研究[M]. 北京: 科学出版社. 67-72.
- 朱艺婷, 李晓峰, 张龙, 王果, 张迪. 2019. 新疆白杨河 U-Be 矿床中电气石的矿物学特征及其成矿指示[J]. *岩石学报*, 35(11): 3429-3442.