# 西准噶尔白杨河铀矿床沥青铀矿 矿物特征及形成环境

陈光旭<sup>1,2)</sup>,李光来<sup>1)</sup>,刘晓东<sup>1)</sup>,李成祥<sup>1)</sup>,刘朕语<sup>1)</sup>,王果<sup>3)</sup>,韩振<sup>3)</sup>,刘小波<sup>1)</sup>

1) 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,南昌,330013;

2) 安徽省核工业勘查技术总院,安徽芜湖,241000;3) 核工业二一六大队,乌鲁木齐,830011

内容提要:白杨河铀矿是我国新疆地区典型的铀一多金属矿床,为查明该矿原生铀矿物特征,进一步探究沥青 铀矿的形成与保存环境,本文利用偏光显微镜、扫描电镜、电子探针等多种研究手段对该矿床中的沥青铀矿开展了 矿物学研究工作,并利用激光拉曼和碳硫仪对与原生矿体空间关系极为密切的黑色断层泥开展了研究。结果表 明,本矿床形成的原生沥青铀矿主要赋存在热液脉中,矿石组构包括:碎裂结构、花岗状压碎结构、斑状压碎结构、 交代反应边结构;黑色断层泥含有一定量的有机碳(TOC 为 0.24%~1.07%),拉曼测试结果显示出较强烈的碳质 峰。沥青铀矿不同程度地遭受流体改造作用,使得矿物化学成分极其复杂。随着流体改造程度的增加,UO2、PbO 呈现降低的趋势,Nb2O5 及 ZrO2 含量则表现出升高的趋势,显示在后期的流体改造作用过程中,铀被活化迁移的 同时,流体还带来了丰富的 Nb 和 Zr 等元素。进一步分析认为富有机碳的断层泥在成矿过程中可能为 U<sup>6+</sup>的易溶 络合物还原为沥青铀矿沉淀提供了有利条件,并且在沥青铀矿形成后起到了一定程度的保护作用。

关键词:白杨河铀矿;沥青铀矿;后生改造作用;含碳断层泥;西准噶尔

西准噶尔地区白杨河矿床是亚洲最大的铀一铍 矿床,前人对该矿开展了大量的研究工作,取得了丰 硕的成果。主要铀矿体赋存于杨庄岩体与围岩的接 触带附近,多以层状产出,杨庄岩体岩性主要为花岗 斑岩,碱质较高且富集 Nb 和 Ta, Y/Nb 比值小于 1.2(Eby,1992),为典型的 A<sub>1</sub> 型花岗岩(Mao Wei et al., 2013; Zhang Xin et al., 2014), 锆石原位 LA-ICP-MS U-Pb 年龄在 309~313.4Ma 之间<sup>●</sup>(Zhang Xin et al., 2014)。另有少部分矿体在空间上一定 程度受控于侵入到岩体中的辉绿岩墙(Chen Fenxiong et al., 2017), 具体表现在辉绿岩墙的叠 加使得接触带上铀矿体品位更富。Yi Longsheng et al. (2016)对矿脉中不同阶段的萤石开展了 Sm-Nd 同位素测试,获得三组萤石 Sm-Nd 等时线年龄 为 291 ± 16Ma、265 ± 33Ma 和 207 ± 37Ma。 Li Xiaofeng et al. (2015)对紫黑色萤石脉中发育的黑

云母开展了 Ar-Ar 年代学研究,获得的 Ar-Ar 坪年 龄为  $303\pm1.6$ Ma,认为该年龄可以作为该矿床成 矿年龄上限。前人对流体包裹体进行研究后,认为 白杨河成矿流体具有高温(Zhang Xin et al., 2013)、低盐度(Mao Wei et al.,2013; Zhang Xin et al.,2013; Yang Wenlong et al.,2014)的特征,成矿 流体可能来源于岩浆水与大气降水的混合(Mao Wei et al.,2013; Zhang Xin et al.,2014);除此之 外,成矿流体还富集 Nb、Co、Li、Zn、Rb、U、Be、Mo 和 REE 等元素(Li Xiaofeng et al.,2015)。

尽管取得了以上认识,但是由于该矿床形成后 遭受了强烈的后生改造,多数矿石都已遭受强烈氧 化,承载大量成矿信息的原生铀矿物的研究工作非 常零星和欠缺,这一定程度上影响了该矿的成因解释 和本区同类型矿床的进一步寻找。本文在前人工作 的基础上,利用偏光显微镜,扫描电镜,电子探针等研

收稿日期:2018-04-11;改回日期:2018-08-31;网络发表日期:2019-01-03;责任编辑:黄敏。

 引用本文:陈光旭,李光来,刘晓东,李成祥,刘朕语,王果,韩振,刘小波. 2019. 西准噶尔白杨河铀矿床沥青铀矿矿物特征及形成环境. 地质学报,93(4):865~878,doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019121.
 Chen Guangxu, Li Guanglai, Liu Xiaodong, Li Chengxiang, Liu Zhenyu, Wang Guo, Han Zhen, Liu Xiaobo. 2019. Mineralogical characteristics and formation environment of pitchblende in the Baiyanghe uranium deposit in west Junggar. Acta Geologica Sinica, 93(4):865~878.

注:本文为国防科工委项目"西北古生代铀成矿作用"(No. 2110400024)、国家自然科学基金项目(No. 41302053; No. 41272101)、江西省研 究生创新项目(No. YC2016-S291)联合资助的成果。

作者简介:陈光旭,男,1990年生。硕士,地质工程专业。Email:1979933217@qq.com。通讯作者:李光来,男,1983年生。副教授,硕士 生导师,主要从事花岗岩与成矿作用研究。Email:liguanglai@ecit.cn。

究手段,针对该矿床中的铀矿物开展了详细研究,并 试图探讨后生改造作用对该矿床产生的影响。本文 还利用激光拉曼和碳硫仪对主矿体附近发育的黑色 断层泥开展了研究,在此基础上,进一步探讨沥青铀 矿的形成与保存环境。

# 1 地质概况

白杨河矿床位于中亚造山带的南部,西准噶尔 雪米斯坦火山岩带中部(图1)。矿区出露泥盆系、 石炭系的中基性、中酸性火山岩及火山碎屑岩。断 裂构造发育,以近东西向和北东向为主,区域内多期 次活动的查干陶勒盖-巴音布拉克断裂经过本矿区, 该断裂的次级断层 F<sub>3</sub>为杨庄岩体和白杨河铍铀矿 床的主要控岩控矿断裂(图2)。矿区经历了多次构 造活动,伴之以频繁的岩浆活动。矿区岩浆岩主要 有:花岗斑岩、辉绿岩、闪长玢岩和白岗岩,其中花岗 斑岩分布最广,构成杨庄岩体的主体部分,辉绿岩、 闪长玢岩和白岗岩主要以岩脉、岩墙形式出现。

铀矿体南倾,呈脉状透镜状(图 2),主要分布于 杨庄岩体北部,产出于晚石炭世微晶花岗斑岩与上 泥盆统塔尔巴哈台组(D<sub>3</sub>t)的灰黑色凝灰质砂岩接 触带的 F<sub>3</sub>断层上,F<sub>3</sub>断层主要发育着黑色断层泥。 与铀矿化密切相关的围岩蚀变主要有:以团块状分 布于岩石或矿物裂隙中,并将近矿围岩染成褐红色 的赤铁矿化;以细脉状相互穿插并呈现紫黑色、紫 色、绿色到无色的多期次萤石化,以及多与萤石紧密 共生呈现细脉状的碳酸盐化等。

# 2 样品及分析方法

## 2.1 样品特征

测试样品采自于白杨河铀矿床 3 号工地钻孔岩 心,矿石手标本整体呈肉红色,局部灰黑色,裂隙中 因发育次生的含铀矿物,不同程度的呈现土黄色(图 3a、b、e、f);含矿段附近发育的构造断层泥,呈黑色



图 1 西准噶尔白杨河铀矿床区域地质图(据 Li Xiaofeng et al., 2015 改)

Fig. 1 Regional geological map of Baiyanghe uranium deposit in west Junggar(modified after Li Xiaofeng et al.,2015)
1-奧陶系地层;2-志留系地层;3-泥盆系地层;4-石炭系地层;5-二叠系地层;6-A-型花岗岩;7-I-型花岗岩;8-花岗闪长岩;
9-紫苏花岗岩;10-蛇绿岩;11-断层;12-湖泊;13-国界;14-城市

1—Ordovician Formation; 2—Silurian Formation; 3—Devonian Formation; 4—Carboniferous Strata; 5—Permian Formation; 6—A-type granitic; 7—I-type granitic; 8—granodiorite; 9—charnockite; 10—ophiolite; 11—fault; 12—lake; 13—national boundary; 14—city





1—上泥盆统塔尔巴哈台组( $D_{3}t$ )灰黑色凝灰质粉砂岩夹浅灰色凝灰质细砂岩;2—下石炭统黑山头组( $C_{1}h$ )海相碎屑火山岩;3—花岗斑岩; 4—辉绿岩脉;5—闪长岩脉;6—白岗岩;7—矿体;8—断裂;9—破碎带黑色断层泥;10—钻孔位置;11—矿(化)点;12—采样钻孔位置

1—Upper Devonian Tarbhakta (D<sub>3</sub> t) gray-black tuff siltstone with light grey tuff fine sandstone; 2—Lower Carboniferous Montenegrin Formation (C<sub>1</sub>h) marine detrital volcanic rocks; 3—granite porphyry; 4—diabasic dike; 5—diorite-porphyrite dike; 6—alaskite; 7—ore body; 8—fault; 9—black fault gouge in broken zone; 10—drilling position; 11—mineralization point; 12—sample the location of drilling

到黑灰色;矿物成分主要有石英、长石、黏土矿物,少 量黄铁矿、萤石及方解石呈细脉状穿插其中;黑色断 层泥空间上与含矿段关系极为紧密(图 3),所采断 层泥样品距离主矿体仅 0.26~3.03m。

#### 2.2 分析方法

除了黑色断层泥样品的有机碳分析(TOC)测 试在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点 实验室完成外,其他测试工作均在东华理工大学核 资源与环境国家重点实验室完成。将矿石样品磨成 光片和光薄片,首先在偏光显微镜下进行详细观察、 对特征现象进行拍照并标记后(图 3),将光片和光 薄片喷碳,而后利用扫描电镜对样品进行拍照以及 能谱(EDS)测试,测试仪器为 SEM450 型场发射扫 描电镜,工作电压为 20kV,工作电流为 2.0×10<sup>-8</sup> A。最后利用背散射照片和能谱数据,选取不同类 型的沥青铀矿,避开裂隙和矿物包裹体布置电子探 针测试点,所用电子探针型号为 JXA-8100,测试条 件:加速电压为 15kV,电流 2.0×10<sup>-8</sup> A,所有测试 数据均采用 ZAF 电子计算机程序修正。标样的选 择上,U、Th 和 Pb 采用沥青铀矿为标样,REE 采用 稀土磷酸盐为标样,Mn 采用红钛锰矿为标样,Ba 和 Nb 采用铌酸锶钡为标样,Al 采用托帕石为标



图 3 西准噶尔白杨河铀矿床钻孔柱状图以及采样位置图

Fig. 3 Drilling histogram and sampling location map of Baiyanghe uranium deposit in west Junggar 1一破碎带的黑色断层泥;2一灰黑色凝灰质粉砂岩夹浅灰色凝灰质细砂岩;3一花岗斑岩;4一破碎花岗斑岩;5一碎裂花岗斑岩;6一铀矿段; 7一铀矿化段;8一辉绿岩脉;9一闪长岩脉;(a)一钻孔岩心照片;(b)一铀矿石样品;(c)一铀矿石的光片;(d)一沥青铀矿偏光显微镜反射光照 片;(e)一钻孔岩心照片;(f)一铀矿石样品;(g)一沥青铀矿反射光照片;Pit一沥青铀矿;Gn一方铅矿;Fl一萤石

1—black fault gouge in broken zone; 2—gray-black tuffaceous siltstone with light grey tuffaceous fine sandstone; 3—granite porphyry; 4 broken granite porphyry; 5—cataclastic granite porphyry; 6—uranium ore section; 7—uranium mineralization section; 8—diabase dike; 9 diorite dikes; (a)—borehole core photograph; (b)—uranium ore samples; (c)—optical disc of uranium ore; (d)—diatomite polarizing microscope reflectogram; (e)—borehole core photograph; (f)—uranium ore samples; (g)—reflected light photographs of pitchblende; Pit pitchblende; Gn—galena; Fl—fluorite

样,Na和Ca采用斜长石为标样,P采用独居石为标样,Zr和Y采用氧化锆为标样,Fe、Mg和Si采用镁铝石榴子石为标样。

本次断层泥样品显微激光拉曼测试条件:温度 20℃,Si标准样品拉曼位移值为520cm<sup>-1</sup>,选用的激 光波长为532nm,激光器为风冷式Ar离子激光器, 扫描时间30s,扫描次数1~2次,扫描范围500~ 3000cm<sup>-1</sup>,精度1cm<sup>-1</sup>。显微镜物镜放大倍数为50 倍,仪器分辨率为0.15 $\mu$ m。

利用美国 Leco C-S 仪进行黑色断层泥样品的 总有机碳含量(TOC)测试,共分析样品6件,测试 过程严格按照 GB/T19145-2003(有机碳)执行。首 先称取 50~70mg 粉末样品放入透水坩埚,然后加 入5%的稀 HCl 以溶解样品中主要以碳酸盐形式赋 存的无机碳,再用蒸馏水水洗,水洗至中性后将样品 转入 50℃恒温箱干燥,最后将干燥后样品送入 Leco C-S 仪中进行高温灼烧,检测生成的 CO<sub>2</sub> 气体,并 自动计算总有机碳(TOC)含量。

# 3 沥青铀矿特征

#### 3.1 沥青铀矿的结构特征及分类

铀矿物主要赋存于花岗斑岩的裂隙脉中。铀矿 石中,矿石矿物主要为硅钙铀矿、脂铅铀矿、沥青铀 矿、铀石、方铅矿、黄铁矿等(图 3b、d、f、g;图 4a),脉 石矿物分为两类,一类为花岗斑岩的主要造岩矿物, 包括:石英、钾长石、斜长石以及极少量黑云母;另一 类为热液成因脉石矿物,包括:萤石、方解石、重晶石 等。沥青铀矿结构主要包括:碎裂结构(图 4b),花 岗状压碎结构(图 4c)、斑状压碎结构(图 4d)、交代 反应边结构(图 4e)等,这一类组构与后期改造密不 可分,沥青铀矿在构造作用下产生裂隙甚至破碎,晚 期流体借助构造空隙渗入并发生流体交代作用。另



图 4 西准噶尔白杨河铀矿床铀矿物结构特征背散射照片

Fig. 4 Backscattered photographs of structural features from uranium minerals in Baiyanghe uranium deposit in west Junggar (a) 一矿石矿物伴生关系;(b) 一裂隙发育的沥青铀矿;(c) 一具花岗状压碎结构的沥青铀矿;(d) 一斑状压碎结构的沥青铀矿;(e) 一铀石沿边 缘交代沥青铀矿,呈交代反应边结构;(f) 一具有干裂纹的沥青铀矿;Pit 一沥青铀矿;Cof 一铀石;Gum 一脂铅铀矿;Gn 一方铅矿;Bar 一重晶石; Py 一黄铁矿;Fl 一萤石

(a)—ore mineral association; (b)—pitchblende with fissure development; (c)—pitchblende with granitic crushing structure; (d) pitchblende with porphyroclastic crushing structure; (e)—coffinite is metasomatic bituminous pitchblende along the edge, presenting an metasomatic reaction rim textures; (f)—pitchblende with dry cracks; Pit—pitchblende; Cof—coffinite; Gum—gummite; Gn—galena; Bar barite; Py—pyrite; Fl—fluorite

外,沥青铀矿还发育有大量干裂纹(图 4f)。

前已述及,矿石矿物沥青铀矿因受构造以及流体改造作用的影响,使得结构极其复杂。根据沥青铀矿镜下结构特征、裂隙穿插分布情况,按照改造程度不同,将沥青铀矿划分成三种类型,分别标记为 I 类、II 类和III类,每类沥青铀矿的特征简述如下:

(1) I 类沥青铀矿,空间上离构造裂隙相对较远,经常位于多组裂隙围限的中心部位,内部无明显裂隙或破碎,背散射图像最为明亮,含有最高的铀含量;显示无明显的铀活化迁移,基本保留了沥青铀矿的原始特征。

(2)Ⅱ类沥青铀矿,空间上沿构造微裂隙分布, 并将Ⅰ类沥青铀矿与构造微裂隙有效隔开,背散射 图像上Ⅱ类沥青铀矿较Ⅰ类沥青铀矿稍暗,铀含量 降低,为Ⅰ类沥青铀矿初步改造后的产物,在图5中 表现较为明显。

(3)Ⅲ类沥青铀矿,空间上远离Ⅰ类沥青铀矿, 离矿石中主要裂隙较近,背散射图像比Ⅱ类沥青铀 矿更暗,受后期流体改造程度较Ⅱ类更为明显,显示 由于离主要裂隙较近,在后期改造过程中,遭受了更

#### 大程度的铀的活化迁移。

### 3.2 沥青铀矿的矿物化学成分

利用电子探针对三类沥青铀矿的化学成分进行 定量分析,测点位置如图 5 所示,分析测试结果及相 关参数见表 1。

I 类沥青铀矿化学组成上表现为:高铀(UO<sub>2</sub>: 84.4%~85.7%)、低钙(CaO:1.09%~1.91%)、富 铅(PbO:7.15%~7.8%)、低硅(SiO<sub>2</sub>:0.11%~ 0.25%),相对较富铌(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:2.41%~2.76%)、钛 (TiO<sub>2</sub>:0.66~0.98%)和锆(ZrO<sub>2</sub>:0.44~0.75%) 元素,且各主要元素含量变化范围非常小;高于检测 限的稀土氧化物总量( $\Sigma$  REE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)在 0.18%~ 0.70%之间,相对于轻稀土氧化物总量( $\Sigma$  LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.01%~0.26%)而言,重稀土氧化物总量 ( $\Sigma$  HREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.03%~0.53%)稍微富集一些。

与Ⅲ类相比,Ⅱ类沥青铀矿化学组成上表现为: 相对较高的铀(UO<sub>2</sub>:80.5%~83.8%)、铅(PbO:  $6.91 \sim 7.72\%$ ),相对较低硅(SiO<sub>2</sub>:0.11%~ 1.10%)、钙(CaO:1.54%~3.45%),富铌(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:  $2.13\% \sim 3.39\%$ )、钛(TiO<sub>2</sub>:0~1.22%)和锆  $(ZrO_2:0.50\%\sim 0.70\%)$ 元素;检测限上的稀土氧 化物总量( $\Sigma$ REE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)在 0.26%~0.59%之间,轻 稀土氧化物总量( $\Sigma$ LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.01%~0.24%)相 对重稀土氧化物总量( $\Sigma$ LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.05%~ 0.35%)较低一些。

Ш类沥青铀矿化学组成上表现为:低铀(UO<sub>2</sub>: 69.5%~76.2%)、铅(PbO:4.47%~6.64%),高硅 (SiO<sub>2</sub>:2.12%~4.49%)、钙(CaO:4.18%~ 5.01%),特富铌(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:5.11%~7.12%)、钛 (TiO<sub>2</sub>:1.43%~1.79%)和锆(ZrO<sub>2</sub>:0.85%~ 1.14%)元素;检测限上的稀土氧化物总量 ( $\Sigma$ REE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)在0.20%~0.70%之间,相对于轻稀 土氧化物( $\Sigma$ LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.05%~0.38%)含量,重 稀土氧化物( $\Sigma$ HREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:0.08%~0.46%)富集程 度较小。

总的来说, II 类沥青铀矿相较于 I 类沥青铀矿 化学成分主要区别在于 UO<sub>2</sub>含量的降低和 CaO 含量的升高,其余元素含量没有明显差异; II 与 II 类沥 青铀矿化学成分进行对比,主要表现在 UO<sub>2</sub>、PbO、 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、WO<sub>3</sub>含量的降低和 CaO、SiO<sub>2</sub>、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub>、 ZrO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ThO<sub>2</sub>、MgO 含量的升高;另外,三类 沥青铀矿的 Na<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、BaO、MnO 和 FeO 元素含量较低且差别不大。三类沥青铀矿的稀土氧 化物总含量较高,轻、重稀土总量散点图(图 6)表现 为"你中有我,我中有你",佐证了三类沥青铀矿的亲 缘关系。

表 1 西准噶尔白杨河铀矿床沥青铀矿电子探针分析结果(%) Table 1 Analysis results of the electron probe of pitchblende in Baiyanghe uranium deposit in west Junggar (%)

元素/点号			Ⅱ类沥青铀矿									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Na_2O$	0.30	0.28	0.26	0.16	0.31	0.29	0.4	0.35	0.33	0.51	0.47	0.41
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	_	_	_	_	0.00	-	_	_	_	-	0.00	-
$SiO_2$	0.16	0.21	0.13	0.14	0.13	0.16	0.11	0.14	0.25	0.30	0.29	0.35
$P_2O_5$	0.03	0.03	0.06	0.02	0.06	-	0.07	0.08	0.06	0	0.02	0.06
CaO	1.26	1.91	1.14	1.09	1.14	1.59	1.56	1.75	1.43	2.79	2.80	2.82
${\rm TiO}_2$	0.75	0.73	0.83	0.66	0.70	0.77	0.98	0.75	0.82	-	0.68	0.86
MnO	0.15	0.21	0.16	0.08	0.18	0.14	0.18	0.17	0.23	0.16	0.26	0.29
FeO	0.33	0.26	0.23	0.19	0.19	0.18	0.26	0.25	0.30	0.25	0.21	0.31
$Y_2O_3$	0.36	0.41	0.33	0.50	0.47	0.34	0.37	0.46	0.37	0.42	0.46	0.43
$\mathrm{ZrO}_2$	0.65	0.75	0.52	0.60	0.44	0.60	0.59	0.48	0.51	0.50	0.63	0.50
$Nb_2O_5$	2.76	2.71	2.41	2.49	2.74	2.55	2.71	2.59	2.63	3.16	2.54	2.98
BaO	—	0.16	—	0.14	0.03	0.04	—	0.25	—	0.11	—	—
$Ta_2O_5$	0.76	0.01	—	0.35	—	0.30	0.19	_	0.30	-	—	0.02
$WO_3$	0.45	_	0.70	0.37	—	0.35	0.50	0.72	0.69	-	0.95	0.47
PbO	7.76	7.39	7.24	7.27	7.47	7.15	7.80	7.63	7.22	7.60	7.13	7.13
$\mathrm{ThO}_2$	—	—	—	—	—	_	—	—	—	-	—	0.00
$UO_2$	84.62	84.58	85.67	85.18	84.42	84.73	85.06	85.55	84.43	82.70	83.79	82.60
$La_2O_3$	—	—	—	—	—	_	0.01	—	—	-	—	—
$Ce_2O_3$	0.07	0.10	0.14	0.08	0.10	0.11	0.00	0.06	—	-	0.04	0.04
$\Pr_2 O_3$	0.04	0.05	0.03	0.01	0.04	_	—	_	0.02	-	—	0.05
$Nd_2O_3$	—	_	—	0.03	—	_	—	_	—	-	—	—
$\mathrm{Sm}_2\mathrm{O}_3$	—	—	—	—	0.00	_	—	—	—	-	0.01	—
$Eu_2O_3$	—	0.04	0.09	0.03	—	0.06	—	0.05	0.08	0.01	0.01	0.08
$\mathrm{Gd}_2\mathrm{O}_3$	—	_	—	_	—	_	0.02	_	—	-	0.07	0.09
$\mathrm{Tb}_2\mathrm{O}_3$	0.04	_	0.02	_	_	-	—	0.04	—	0.16	—	-
$\mathrm{Dy}_2\mathrm{O}_3$	_	_	-	_	_	-	_	-	—	-	_	-
$Ho_2O_3$	0.03	0.14	0.05	_	0.01	0.11	0.05	0.13	0.18	-	0.02	-
$\mathrm{Er}_2\mathrm{O}_3$	0.12	0.13	0.12	_	0.11	0.18	-	-	0.18	-	-	0.05
$Tm_2O_3$	0.14	0.13	0.24	_	0.15	_	0.04	_	0.09	-	_	_
$Yb_2O_3$	0.01	0.08	0.01	0.03	_	0.22	0.09	0.10	0.08	0.14	0.11	0.04
$Lu_2O_3$	_	_	-	_	0.17	-	_	-	—	-	0.04	-
总量	100.77	100.29	100.36	99.40	98.86	99.87	100.97	101.54	100.17	98.80	100.54	99.56
$\Sigma LREE_2O_3$	0.11	0.19	0.26	0.15	0.14	0.17	0.01	0.11	0.10	0.01	0.06	0.17
$\Sigma$ HREE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.34	0.48	0.44	0.03	0.44	0.51	0.20	0.27	0.53	0.30	0.24	0.18
$\sum \text{REE}_2 O_3$	0.45	0.67	0.70	0.18	0.58	0.68	0.21	0.38	0.63	0.31	0.30	0.35

	Ⅱ类沥青铀矿				Ⅲ类沥青铀矿								
兀素/点号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Na <sub>2</sub> O	0.26	0.48	0.45	0.55	0.56	0.33	0.32	0.46	0.47	0.31	0.22	0.22	0.49
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	_	—	_	0.00	0.07	0.12	0.02	0.14	0.08	0.1	0.13	0.24	0.37
$SiO_2$	0.11	0.47	0.50	1.10	2.12	2.92	2.42	2.29	2.45	2.99	2.82	4.49	4.36
$P_2 O_5$	0.03	0.05	0.04	0.02	_	0.03	0.08	0.06	0.01	0.00	0.04	0.01	0.05
CaO	1.54	2.83	3.21	3.45	4.70	4.62	4.36	4.18	4.52	4.42	4.39	5.01	4.93
${\rm TiO}_2$	0.71	0.71	0.92	1.22	1.43	1.79	1.63	1.48	1.55	1.64	1.70	1.79	1.75
MnO	0.20	0.27	0.20	0.08	0.15	0.13	0.13	0.17	0.09	0.09	0.17	0.05	0.08
FeO	0.25	0.27	0.24	0.34	0.34	0.20	0.22	0.24	0.27	0.34	0.31	0.28	0.19
$Y_2O_3$	0.38	0.42	0.42	0.22	0.07	0.12	0.04	0.18	0.15	0.16	0.19	0.03	0.18
$\mathrm{ZrO}_2$	0.61	0.54	0.65	0.70	0.92	0.94	0.91	0.91	0.91	1.03	0.85	0.91	1.14
$Nb_2O_5$	2.13	2.67	2.50	3.39	5.21	6.65	6.17	5.11	5.17	6.04	5.38	7.12	5.72
BaO	0.09	0.03	0.14	0.20	0.09	0.02	0.21	0.05	0.18	0.06	0.24	0.14	0.19
$\mathrm{Ta}_2\mathrm{O}_5$	0.17	0.08	0.36	_	0.37	0.48	_	0.24	_	—	0.14	0.24	0.20
$WO_3$	0.50	0.23	0.71	0.44	0.21	—	0.09	0.13	0.48	—	0.25	0.56	_
PbO	7.08	6.91	7.72	6.96	6.13	5.44	6.44	6.64	6.23	5.91	5.71	4.47	4.87
$\mathrm{ThO}_2$	—	—	_	—	0.12	0.28	0.34	0.03	0.23	0.21	0.24	0.18	0.32
$UO_2$	83.05	83.52	81.52	80.54	75.24	73.26	73.73	76.15	74.54	72.93	73.76	69.49	71.64
$La_2O_3$	0.03	—	_	0.02	—	0.00	0.03	_	_	—	0.01	0.05	0.04
$Ce_2O_3$	0.11	0.10	0.03	0.19	0.10	0.19	0.08	0.04	0.08	0.13	0.18	0.18	0.20
$\Pr_2 O_3$	_	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	_	-	0.00	0.04	0.03	0.02	0.03
$Nd_2O_3$	_	0.03	0.06	_	_	0.01	_	-	-	_	_	_	-
$\mathrm{Sm}_2\mathrm{O}_3$	0.02	—	_	_	_	_	0.06	0.01	-	_	0.02	0.03	0.02
$\mathrm{Eu}_2\mathrm{O}_3$	0.08	0.00	_	_	0.01	0.07	0.05	-	0.02	0.08	0.03	_	0.09
$\mathrm{Gd}_2\mathrm{O}_3$	0.08	0.05	0.02	_	-	0.05	_	-	0.05	_	0.01	_	-
$\mathrm{Tb}_2\mathrm{O}_3$	0.01	—	0.05	_	0.03	—	0.06	-	0.10	0.02	0.01	0.11	0.04
$\mathrm{Dy}_2\mathrm{O}_3$	_	—	_	_	-	—	_	-	-	_	—	_	-
$\mathrm{Ho}_2\mathrm{O}_3$	0.14	0.11	_	_	0.04	_	0.22	-	0.04	0.08	0.08	_	-
$\mathrm{Er}_2\mathrm{O}_3$	0.10	0.02	0.07	_	_	—	_	0.18	0.12	0.08	—	_	0.09
$Tm_2O_3$	_	_	0.02	_	-	_	0.07	-	0.13	_	0.06	0.09	0.10
$Yb_2O_3$	0.02	0.08	_	0.05	0.01	0.04	_	-	-	0.13	0.09	0.06	0.08
$Lu_2O_3$	_	0.09	0.11	_	-	_	_	-	0.02	0.03	_	_	0.01
总量	97.69	99.97	99.93	99.47	97.92	97.68	97.67	98.67	97.87	96.83	97.08	95.71	97.17
$\Sigma LREE_2O_3$	0.24	0.13	0.10	0.21	0.12	0.27	0.22	0.05	0.10	0.25	0.27	0.28	0.38
$\Sigma$ HREE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.35	0.35	0.27	0.05	0.08	0.09	0.35	0.18	0.46	0.34	0.25	0.26	0.32
$\Sigma REF.O$	0 50	0.19	0.27	0.96	0.20	0.26	0 57	0.92	0 56	0 50	0 52	0 54	0 70

注:"一"低于检测限,测试单位:东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,测试人:邬斌。

# 4 黑色断层泥特征

### 4.1 激光拉曼光谱特征

在拉曼光谱 500~3200 cm<sup>-1</sup>范围内,黑色断层 泥五个测试点 D峰吸收谱带的拉曼位移值分别为 1344 cm<sup>-1</sup>、1338 cm<sup>-1</sup>、1343 cm<sup>-1</sup>、1330 cm<sup>-1</sup>和 1343 cm<sup>-1</sup>,均值为 1339.6 cm<sup>-1</sup>,G峰吸收谱带的拉 曼位移值分别为 1605 cm<sup>-1</sup>、1604 cm<sup>-1</sup>、1604 cm<sup>-1</sup>、 1605 cm<sup>-1</sup>和 1603 cm<sup>-1</sup>,均值为 1604.2 cm<sup>-1</sup>;符合碳 质物 D峰(1350 cm<sup>-1</sup>)和 G峰(1580 cm<sup>-1</sup>)的特征 峰值(Beyssac et. al, 2002; Rahl et al., 2005),据此 可以认为矿段附近的黑色断层泥中含有一定量的 碳质物。本次实验样品的拉曼位移与 rruff 数据库 中 Graphite R050503 样品的拉曼位移(图 7)差异 明显,说明该黑色断层泥中的有机碳尚未转变为 石墨。

### 4.2 总有机碳(TOC)含量特征

对铀矿段附近的三个黑色断层泥的钻孔样品预 处理后,进行两两分组、分别测试,测试结果见表 2, 同一样品两次测试结果相差极小,认为测试结果可 靠。破碎带与岩体接触部位的黑色断层泥 TOC 含 量相对较低,为 0.24%~0.65%;而破碎带中间位 置的 TOC 含量相对较高,可达 1.07%. 据此可以认 为:黑色断层泥为含碳断层泥,含有机碳可能为其致 黑原因,这一结果与上述拉曼测试结果吻合。

续表1



图 5 西准噶尔白杨河铀矿床沥青铀矿分类及电子探针点布置

Fig. 5 The classification and electron probe layout point of Pitchblende in Baiyanghe uranium deposit in west Junggar I、II、II为沥青铀矿类型; 为探针点号;Pit-沥青铀矿;Gn-方铅矿

I, II and III are types of pitchblende; is the number of probe points; Pit—pitchblende; Gn—galena



872



### 表 2 西准噶尔白杨河铀矿床黑色断层泥 总有机碳(TOC)测试结果

 Table 2
 Black fault mud total organic carbon (TOC) test

 results of Baiyanghe uranium deposit in west Junggar

钻孔编号	采样位置(m)	样品号	样品描述	TOC(%)
ZK5434	260 51	16-1	样品采白破碎带与岩休	0.26
	300.31	16-2	的分界线位置,手标本 呈灰黑色到黑色	0.24
ZK5828	200 68	16-3		0.61
	290.00	16-4		0.65
ZK6230	221 71	16-5	样品采于破碎带中间位	1.04
	331.71	16-6	置,颜色最黑	1.07

测试单位:中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 测试人:朱雷。

# 5 讨论

### 5.1 沥青铀矿后生改造作用

杨庄岩体花岗斑岩较为破碎并发育有大量的裂隙(Yang Wenlong et al.,2014; Zhang Xin et al., 2014; Mao Wei et al.,2014),裂隙中多充填一些黏 土矿物,花岗斑岩中的石英斑晶呈浑圆状或破碎状。



图 7 西准噶尔白杨河铀矿床黑色断层泥的拉曼光谱

Fig. 7 Laser raman spectra of black gouge in Baiyanghe uranium deposit in west Junggar

岩体中主要含铀副矿物锆石、钍石、铌锰矿和氟碳铈  $\vec{u}$  UO2 含量较高,分别可达 0.45%、2.09%、 0.76%和0.3%(未发表数据),周围多有蚀变边并 与萤石共存,其中锆石蜕晶化较明显。上述均表明 岩体遭受过强烈的构造破碎和流体改造。无独有 偶,赋存于花岗斑岩的早期形成的沥青铀矿发育有 碎裂结构、斑状压碎结构、花岗压碎结构和交代反应 边结构等,这些特征均指示着成矿后,赋矿岩体及铀 矿石不同程度地经历了构造破碎和流体改造。在沥 青铀矿的矿物化学成分上,I型沥青铀矿各元素含 量均一、稳定,结合背散射照片特征,认为 [ 类沥青 铀矿具有接近原生铀矿物的化学成分特征。相较于 Ⅰ类沥青铀矿,Ⅱ和Ⅲ类沥青铀矿铀元素(UO2)呈 现依次降低的变化趋势,前人研究认为 UO2极易与 富氧的流体发生氧化反应,从而导致铀被活化一溶 解一迁移(Finch et al., 1992; Janeczek et al., 1992; Chen Fanrong et al., 1999; Lu Long et al., 2005), Ⅱ和Ⅲ类沥青铀矿铀元素(UO<sub>2</sub>)含量降低正反映了 这一后生改造过程。不仅是铀元素,Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ类沥 青铀矿 SiO<sub>2</sub>、CaO 等"杂质元素"含量同样表现出明 显升高的趋势(图 8a、b),这一结果与 Fayek et al. (2000)的研究结果非常一致。Ca<sup>2+</sup>和 U<sup>4+</sup>离子半 径相近,后期的 Ca<sup>2+</sup> 很有可能以类质同象的形式进 入沥青铀矿的晶格,使得Ⅱ、Ⅲ类沥青铀矿钙含量明 显增加。

在 UO<sub>2</sub>-PbO 散点图中(图 8c),三类沥青铀矿 中的 PbO 随着 UO<sub>2</sub>含量的减少而减少,且 PbO 含 量的变化范围极大。通过简单的计算不难发现,初 始 U 的含量不同远不足以引起 PbO 含量如此大的 变化,唯一的解释是后期氧化性流体在带走 U 的同 时,也带走了 Pb。

在 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>与 UO<sub>2</sub>的协变图解上(图 8d、e、f),随着 UO<sub>2</sub>含量的降低,Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub>和 ZrO<sub>2</sub>呈现升高的趋势,这一现象表明,后期热液流 体带来了丰富的 Nb、Ti 和 Zr。事实上与成矿密切 相关的花岗斑岩也同样富集 Nb 元素(81.9×10<sup>-6</sup> ~100×10<sup>-6</sup>)和 Zr 元素(190.2×10<sup>-6</sup>~215.1× 10<sup>-6</sup>)(Mao Wei et al.,2014),矿区的辉绿岩脉也表 现出富集 Ti 元素(15850×10<sup>-6</sup>~17580×10<sup>-6</sup>)的 特征(Chen Fenxiong,2017),这些研究成果指示研 究区具有丰富的 Nb、Ti 和 Zr 的物质基础。后期流 体与这些破碎的岩浆岩进行水岩反应时,使得流体 富集 Nb、Ti 和 Zr 等元素是完全可能的。

三类沥青油矿的变化趋势,表明沥青铀矿不同 程度地遭受流体改造作用,使得矿物成分极其复杂, 随着流体改造程度的增加,铀被活化迁移的同时,流 体还带来了丰富的 Si、Ca、Nb、Ti 和 Zr。

#### 5.2 含碳断层泥与沥青铀矿的潜在联系

在矿质运移过程中,有机酸是良好的"助溶剂", 可以通过与金属阳离子( $Pb^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 等)络合, 提高成矿元素的溶解度(Ilchik et al.,1986; Hu Mingan,1989; Wood, 1996; Bao Zhiwei et al., 2000;Zeng Jiangping et al.,2016);同时有机质还 是重要的还原障,对于成矿过程主要受氧化还原电



图 8 西准噶尔白杨河铀矿床沥青铀矿热液改造增强趋势图 Fig. 8 Map of pitchblende activation migration trend in Baiyanghe uranium deposit in west Junggar

位控制的矿种而言,有机质具有"卸矿"功能,典型矿 种的如:铅、锌、铜、金、钼、锰等金属元素矿床 (Kuehn et al. ,1995; Chen Yuanrong et al. ,2002; Peters et al. ,2003; Yang Jian et al. ,2005; Qin Yan et al., 2009; Han Fengbin et al., 2013; Zhang Banglu et al., 2018)。Eh 值是控制热液型铀矿成 矿的主要因素(He Mingyou et al., 1997), 事实证明 许多铀矿床的矿体定位受控于还原障,典型的如卷 状砂岩型铀矿(Zhang Jindai, 2016)。前人对有机质 和铀成矿的关系也做过很多研究,认为有机质在铀 的成矿过程中起到至关重要的作用(Koglin et al., 1978; Idiz et al., 1986; Meunier et al., 1989; Min Maozhong et al., 1996; Yang Dianzhong et al., 2001), Li Yanhe et al. (2016)认为富含有机质的地 层是热液铀矿的一种重要还原障。断层带中经常发 育有含碳断层泥(Zulauf et al., 1990; Manatschal, 1999; Oohashi et al., 2011), 白杨河铀矿 F<sub>3</sub> 断层中 同样发育有含碳断层泥,空间上含碳断层泥与铀矿 段十分接近,时间上含碳断层泥早于铀成矿期。塔 尔哈巴台组存在 Phycosiphon、Chondrites、 Zoophycos 等遗迹化石的共生组合(Zong Ruiwen et al., 2014; Gong Yiming et al., 2015), 指示该地 层在沉积时存在海生动物。具备为含碳断层泥提供 有机质来源的能力,其富含蛋白质的软体组织可以 分解出一系列氨基酸、富里酸和腐殖酸等有机酸,这 些有机酸对 U<sup>6+</sup>具有很强的络合能力,另外有机酸 还具有很强的还原能力,能够使 U<sup>6+</sup> 还原成 U<sup>4+</sup> 产 生铀元素的富集(Chen Yuanrong et al., 2002)。地 层中有机质的热分解可以形成 CH4 等烃类物质 (Ren Shunli et al., 2018),这些烃类物质同样具有 很强的还原能力,在西准噶尔的一些造山型金矿(Li Jing et al., 2016)、斑岩型铜矿(Li Changhao et al., 2017a)、斑岩型钼矿(Yan Yuhong et al., 2015; Zhong Shihua et al., 2015)的成矿流体中普遍发现 存在 CH<sub>4</sub> 气体, Li Changhao et al. (2017b)认为这 类有机还原性气体主要来自于有机质的热分解。白 杨河铍铀钼多金属矿床,与上述金属矿床毗邻,具有 相似的成矿环境。根据 Liu Dehan et al. (2013)的 激光拉曼计算公式,计算出的含碳断层泥的镜质体 反射率在 3.9% 左右,显示有机质处于过成熟阶段, 断层泥中的有机质热裂解程度已经达到很高水平。 有机质的裂解产生的 CH4和 C2H6可以进入成矿流 体,为U<sup>6+</sup>的易溶络合物还原和沥青铀矿沉淀提供 了有利条件。

含碳断层泥局部还穿插发育有后期的黄铁矿等 硫化物,指示含碳断层泥具有较强的还原能力。铀 矿体附近的强还原性的含碳断层泥可以一定程度上 阻滞后期氧化性流体对沥青铀矿的氧化,降低后期 流体对沥青铀矿的改造程度,从而对沥青铀矿起到 一定的保护作用。笔者认为,含碳断层泥附近是白 杨河铀矿进一步寻找原生铀矿体的有利位置。

# 6 结论

(1) 白杨河铀矿的原生铀矿物经历过强烈的后 生改造作用,使得沥青铀矿的铀元素发生迁移、变 化,同时热液流体还带来了丰富的 Si、Ca、Nb、Ti 和 Zr 等元素,此外沥青铀矿还相对富集 Pb 元素。

(2)矿体附近发育的富有机碳的断层泥在成矿 过程中可能为U<sup>6+</sup>的易溶络合物还原为沥青铀矿而 沉淀提供了有利条件,并且在沥青铀矿形成后起到 了一定程度的保护作用。

**致谢**:在野外调查过程中,得到核工业二一六大 队王谋、康永和杨文龙等地质同行的大力协助与支 持;东华理工大学张展适教授和邬斌博士参与了成 文过程的讨论,Christophe Bonnetti博士参与了野 外工作与部分讨论,三位匿名审稿专家提出很多中 肯宝贵的修改意见,在此向以上单位或个人表示诚 挚谢意!

#### 注 释

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.内部报告,1~144.

#### References

- Bao Zhiwei, Zhao Zhenhua. 2000. Role of Organic Matter in the Carlin-type Gold Mineralization. Geological Science and Technology Information. 19 (2): 45 ~ 50 (in Chinese with English abstract).
- Beyssac O, Goffé B, Chopin C, Rouzaud J N. 2002. Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer. Journal of Metamorphic Geology, 20(9): 859 ~871.
- Chen Fanrong, Ewing R C, Clark S B. 1999. The Gibbs Free Energies and Enthalpies of Formation of  $U^{6+}$  Phases: an Empirical Method of Prediction. American Mineralogist, 84 (4):  $650{\sim}664$ .
- Chen Fenxiong, Zhang Xiaojun, Nu Lijiang. 2017. Petrogeochemical Features and Tectonic Setting Significances of Diabase Dyke in the Baiyanghe District, West Junggar Xinjiang. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 40(2): 101 ~108(in Chinese with English abstract).
- Chen Yuanrong, Jia Guoxiang, Dai Tagen. 2002. The Role of Organic Material in Metallic Mineralization and Its Application in Metal Exploration. Geology in China, 29(3): 257~262(in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1992. Chemical Subdivision of the A-type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. Geology, 20: 641  $\sim$  644.
- Fayek M, Burns P, Guo Y X, Ewing R C. 2000. Micro-structures Associated with Uraninite Alteration. Journal of Nuclear Materials, 277(2~3): 204~210.
- Finch R J, Ewing R C. 1992. The Corrosion of Uraninite under Oxidizing Conditions. Journal of Nuclear Materials, 190(2):

133~156.

- Gong Yiming, Zong Ruiwen. 2015. Paleozoic Stratigraphic Regionalization and Paleogeographic Evolution in Western Junggar, Northwestern China. Earth Science, 40(3): 461~484 (in Chinese with English abstract).
- He Mingyou, Jin Jingfu. 1997. The Rmodynamic Studies on the Characteristics of U-bearing Hydrothermal Solutions Responsible for Uranium Deposits at Ruergai. Acta Mineralogica Sinica, 17(1): 30~37(in Chinese with English abstract).
- Hu Mingan. 1989. Hydrothermal Maturation of Indigenous Organic Matters and Their Significance in the Metallogenic Processes of the Jinding Lead-zinc Deposit, Yunnan Province. Earth Science, (5): 503~512(in Chinese with English abstract).
- Idiz E F, Carlisle D, Kaplan I R. 1986. Interaction between Organic Matter and Trace Metals in A Uranium Rich Bog, Kern County, California, U. S. A. Applied Geochemistry, 1986, 1 (5): 573~590.
- Ilchik R P, Brimhall G H, Schull H W. 1986. Hydrothermal Maturation of Indigenous Organic Matter at the Alligator Ridge Gold Deposits, Nevada. Economic Geology, 81: 113~130.
- Janeczek J, Ewing R C. 1992. Dissolution and Alteration of Uraninite under Reducing Conditions. Journal of Nuclear Materials, 190(190): 157~173.
- Koglin E, Schenk H J, Schwochau K. 1978. Spectroscopic Studies on the Binding of Uranium by Brown Coal. Applied Spectroscopy, 32(5): 486~489.
- Kuehn C A, Rose A W. 1995. Carlin gold deposits, Nevada: Origin in a deep zone of mixing between normally pressured and overpressured fluids. Economic Geology, 90(1): 17~36.
- Li Changhao, Shen Ping, Pan Hongdi. 2017a. Geology, Oreforming Fluids and Potential of Shiwu Porphyry Cu-Au Spot in West Junggar, Xinjiang. Mineral Deposits, 36(4): 816~836(in Chinese with English abstract).
- Li Changhao, Shen Ping, Pan Hongdi. 2017b. Forming Mechanism of the Reducing Gas from Mineralization Fluid in West Junggar of Xinjiang, China. Journal of Earth Sciences and Environment, 39(3): 386~396(in Chinese with English abstract).
- Li Jing, Xu Yingxia, Shen Ping. 2016. Significance and Characteristics of Fluid Inclusions in Main Gold Deposits of Hatu Metallogenic Belt in Western Junggar. Mineral deposits, 35(4): 775~794(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Wang Guo, Mao Wei, Wang Chunzeng, Xiao Rong, Wang Mou. 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. Ore Geology Reviews, 64: 387~399.
- Li Yanhe, Duan Chao, Zhao Yue, Pei Haoxiang, Ren Shunli. 2016. The Role of Oxidizing Reducing Barrier in Mineralization of Hydrothermal Uranium Ore. Acta Geologica Sinica, 90(2): 201 ~218(in Chinese with English abstract).
- Liu Dehan, Xiao Xianming, Tian Hui, Min Yushun, Zhou Tai, Cheng Peng, Shen Jiagui. 2013. Sample Maturation Calculated Using Raman Spectroscopic Parameters for Solid Organics: Methodology and Geological Applications. Chinese Science Bulletin, 58 (13): 1228 ~ 1241 (in Chinese with English abstract).
- Lu Long, Chen Fanrong, Zhao Lianzhong. 2005. Natural Analogy of UO<sub>2</sub> Corrosion a Review. Advances in Earth Science, 20 (07): 746~750(in Chinese with English abstract).
- Manatschal G. 1999. Fluid and Reaction Assisted Low Angle Normal Faulting: Evidence from Rift Related Brittle Fault Rocks in the Alps (Err Nappe, Eastern Switzerland). Journal of Structural Geology, 21(7), 777~793.
- Mao Wei, Wang Guo, Li Xiaofeng, Wang Mou, Xiao Rong. 2013. A Study of Fluid Inclusions in Baiyanghe U-Be Deposit Xinjinag. Mineral Deposits, 32(5): 1026 ~ 1034 (in Chinese with English abstract).
- Mao Wei, Li Xiaofeng, Wang Guo, Xiao Rong, Wang Mou, Li

Yanlong, Ren Manchuan, Bai Yanping, Yang Feng. 2014. Petrogenesis of the Yangzhuang Nb- and Ta-rich A-type Granite Porphyry in West Junggar, Xinjiang, China. Lithos, 198~199: 172~183.

- Meunier J D, Trouiller A, Brulhet J, Pagel M. 1989. Uranium and Organic Matter in a Paleodeltaic Environment: The Coutras Deposit (Gironde, France). Economic Geology, 84: 1541  $\sim$ 1556.
- Min Maozhong, Zhang Zuhuan, Liu Lanzhong. 1996. Thermal Maturation Anomalies of Organic Materials in A Uranium Deposit of South China and Its Significance in Metallogeny. Mineral Deposits, 15(1): 64 ~ 70(in Chinese with English abstract).
- Oohashi K, Hirose T, Shimamoto T. 2011. Shear-induced Graphitization of Carbonaceous Materials During Seismic Fault Motion: Experiments and Possible Implications for Fault Mechanics. Journal of Structural Geology, 33(6): 1122~1134.
- Peters S G, Armstrong A K, Harris A G, Oscarson R L, Noble P J. 2003. Biostratigraphy and Structure of Paleozoic Host Rocks and Their Relationshipto Carlin-Type Gold Deposits in the Jerritt Canyon Mining District, Nevada. Economic Geology, 98 (2): 317~337.
- Qin Yan, Zhou Zhenju. 2009. Organic Geochemistry Characteristics of Yangshan Super-large Gold Deposit, Gansu Province. Acta petrologica Sinica, 25(11): 109~118(in Chinese with English abstract).
- Rahl J M, Anderson K M, Brandon M T, Fassoulas C. 2005. Raman Spectroscopic Carbonaceous Material Thermometry of Low-grade Metamorphic Rocks: Calibration and Application to Tectonic Exhumation in Crete, Greece. Earth & Planetary Science Letters, 240(2): 339~354.
- Ren Shunli, Li Yanhe, Zeng Pusheng, Qiu Wenlong, Fan Changfu, Hu Guyue. 2018. Effect of Sulfate Evaporate Salt Layer in Mineralization of the Huize and Maoping Lead-Zinc Deposits in Yunnan: Evidence from Sulfur Isotope. Acta petrologica Sinica, 92(5): 1041~1055(in Chinese with English abstract).
- Wood S A. 1996. The role of humic substances in the transport and fixation of metals of economic interest (Au, Pt, Pd, U, V). Ore Geology Reviews, 11(95): 1~31.
- Yan Yuhong, Wang Junnian, Shen Ping. 2015. Geological Characteristics and Mineralization Fluid of Hongyuan Mo Deposit in the West Junggar, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 31(2): 491~504(in Chinese with English abstract).
- Yang Dianzhong, Yu Man. 2001. The Development of Uraniumorganic Geochemistry. Geoligy and Resources, 10(4): 239 ~ 243(in Chinese with English abstract).
- Yang Wenlong, Fayek M, Li Yanlong, Wang Mou, Zhou Jian. 2014. Characteristics of Fluid Inclusions and Fluorite of Baiyanghe Beryllium Deposit in Western Junggar. Xinjiang Geology, 32(1): 82~86 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jian, Yi Facheng. 2005. Genesis and Organic Carbon/Sulphur Characteristics of the Lower Canbrian Blank Shale Series in Guizhou-Hunan. Chinese journal of geology, 40(4): 457~463 (in Chinese with English abstract).
- Yi Longsheng, Fan Hongrui, Zhai Mingguo, Li Yuexiang, Ma Hanfeng, Tian Jianji, Xiu Xiaoqian. 2016. Fluorite Sm-Nd Isochron and Pitchblende U-Pb Dating in the Baiyanghe Be-U Deposit, Xinjiang and Their Geological Significances. Acta Petrologica Sinica, 32(7): 2099~2110 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Jiangping, An Shuqing, Xu Tiemin. 2016. On Adsorption Performance of Humic Acid on Uranium. Acta Geologica Sinica, 90(12): 3563~3569(in Chinese with English abstract).
- Zhang Banglu, Zhang Lianchang, Feng Jing, Xu Shiqi, Feng Changrong, Hao Yanhai, Zheng Mengtian, Peng Zidong, Dong Zhiguo. 2018. Genesis of the Large-scale Orto Karnash Manganese Carbonate Deposit in the Malkansu District, Wester Kunlun: Evidence from Geological Features. Geological Review, 64(2): 361~377 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Jindai. 2016. Innovation and Development of Metallogenic Theory for Sandstone Type Uranium Deposit in China. Uranium Geology, 32(6): 321~332(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xin, Zhang Hui. 2013. Geochemical Characteristics of the Ore-forming Fluid and Ore Genesis of the Baiyanghe Be-U Deposit, Xinjiang, China. Geochimica, 42(2): 143~152 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xin, Zhang Hui. 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. Gondwana Reserch, 25(4): 1554~1569.
- Zhong Shihua, Shen Ping, Pan Hongdi. 2015. The Ore-forming Fluid and Geochronology of the Suyunhe Mo Deposit, West Junggar, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 31(2): 449~464 (in Chinese with English abstract).
- Zong Ruiwen, Fan Ruoying, Zhao Long, Gong Yiming, Wang Guocan. 2014. Discovery of Early Carboniferous Plant and Trace Fossils from the Ta'erbahatai Formation in Northwestern Junggar and Its Palaeogeographical Significance. Journal of Palaeogeography, 16(3): 319~334 (in Chinese with English abstract).
- Zulauf G, Kleinschmidt G, OnckenO. 1990. Brittle Deformation and Graphitic Cataclasites in the Pilot Research Well KTB-VB (Oberpfalz, FRG). Geological Society London Special Publications, 54(1): 97~103.

#### 参考文献

- 包志伟,赵振华.2000.有机质在卡林型金矿成矿过程中的作用. 地质科技情报,19(2):45~50.
- 陈奋雄,张晓军,努力江.2017.新疆白杨河地区辉绿岩岩石地球 化学特征及其构造意义.东华理工大学学报(自然科学版),40 (2):101~108.
- 陈远荣, 贾国相, 戴塔根. 2002. 论有机质与金属成矿和勘查. 中国 地质, 29(3):257~262.
- 龚一鸣,纵瑞文. 2015. 西准噶尔古生代地层区划及古地理演化. 地球科学,40(3):461~484.
- 韩凤彬,陈正乐,刘增仁,陈柏林,崔玲玲,丁文君,蒋荣宝,李丽. 2013.西南天山乌拉根铅锌矿床有机地球化学特征及其地质意 义.矿床地质,32(3):591~602.
- 何明友,金景福. 1997. 若尔盖铀矿床含矿热液性质的热力学研究. 矿物学报,17(1):30~37.
- 胡明安. 1989. 有机质的热液成熟作用在云南金项铅锌矿床形成过 程中的意义. 地球科学,(5): 503~512.
- 李昌昊,申萍,潘鸿迪.2017a.新疆西淮噶尔石屋斑岩型 Cu-Au 矿 点地质特征、成矿流体及成矿潜力.矿床地质,36(4):816 ~836.

- 李昌昊,申萍,潘鸿迪. 2017b. 新疆西准噶尔成矿流体中还原性气体形成机理. 地球科学与环境学报,39(3):386~396.
- 李晶,许英霞,申萍. 2016. 西准噶尔哈图成矿带主要金矿床流体 包裹体特征及其意义. 矿床地质, 35(4):775~794.
- 李延河,段超,赵悦,裴浩翔,任顺利.2016.氧化还原障在热液铀 矿成矿中的作用.地质学报,90(2):201~218.
- 刘德汉,肖贤明,田辉,闵育顺,周秦,程鹏,申家贵. 2013. 固体 有机质拉曼光谱参数计算样品热演化程度的方法与地质应用. 科学通报,58(13):1228~1241.
- 卢龙,陈繁荣,赵炼忠. 2005. UO<sub>2</sub> 氧化的天然类比研究:现状与展望. 地球科学进展,20(07):746~750.
- 毛伟, 王果, 李晓峰, 王谋, 肖荣. 2013. 新疆白杨河铀铍矿床流体 包裹体研究. 矿床地质, 32(5): 1026~1034.
- 闵茂中,张祖还,刘兰忠.1996.华南一古岩溶型铀矿床中有机质的 热成熟异常及其矿床成因意义.矿床地质,15(1):64~70.
- 秦艳,周振菊. 2009. 甘肃省阳山超大型金矿床的有机地球化学特征研究. 岩石学报,25(11):109~118.
- 任顺利,李延河,曾普胜,邱文龙,范昌福,胡古月.2018. 膏盐层 在云南会泽和毛坪铅锌矿成矿中的作用:硫同位素证据.地质 学报,92(5),1041~1055.
- 鄢瑜宏,王军年,申萍. 2015.新疆西准噶尔宏远钼矿地质特征与成矿流体.岩石学报,31(2):491~504.
- 杨殿忠,于漫. 2001. 铀有机地球化学研究进展. 地质与资源, 10 (4): 239~243.
- 杨文龙, Fayek M, 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. 新疆地质, 32(1): 82~86.
- 杨剑,易发成. 2005.贵州一湖南黑色岩系的有机碳和有机硫特征 及成因意义.地质科学,40(4):457~463.
- 衣龙升,范宏瑞,翟明国,李月湘,马汉峰,田建吉,修晓茜. 2016. 新疆白杨河铍铀矿床萤石 Sm-Nd 和沥青铀矿 U-Pb 年代学及 其地质意义.岩石学报,32(7):2099~2110.
- 曾江萍, 安树清, 徐铁民. 2016. 腐殖酸对 U(11)的吸附性能研究. 地质学报, 90(12): 3563~3569.
- 张帮禄,张连昌,冯京,徐仕琪,冯昌荣,郝延海,郑梦天,彭自栋, 董志国. 2018.西昆仑玛尔坎苏地区奥尔托喀讷什大型碳酸锰 矿床地质特征及成因探讨.地质论评,64(2):361~377.
- 张金带. 2016. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展. 铀矿地质, 32(6): 321~332.
- 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. 地球化学,42(2):143~152.
- 钟世华,申萍,潘鸿迪. 2015. 新疆西准噶尔苏云河钼矿床成矿流 体和成矿时代. 岩石学报, 31(2):449~464.
- 纵瑞文,范若颖,赵龙,龚一鸣,王国灿.2014.准噶尔西北部塔尔 巴哈台组早石炭世植物和遗迹化石的发现及其古地理意义.古 地理学报,16(3):319~334.

# Mineralogical characteristics and formation environment of pitchblende in the Baiyanghe uranium deposit in west Junggar

CHEN Guangxu<sup>1,2)</sup>, LI Guanglai<sup>\*1)</sup>, LIU Xiaodong<sup>1)</sup>, LI Chengxiang<sup>1)</sup>, LIU Zhenyu<sup>1)</sup>, WANG Guo<sup>3)</sup>, HAN Zhen<sup>3)</sup>, LIU Xiaobo<sup>1)</sup>

State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment East China University of Technology, Nanchang, 330013;
 Anhui Nuclear Exploration Technology Central Institute, Wuhu, 241000;

3) No. 216 Geological Survey, China National Nuclear Corporation, Urumqi, 830011

 $*\ Corresponding\ author:\ liguanglai@ecit.\ cn$ 

#### Abstract

Baiyanghe uranium deposit is a typical uranium-polymetallic deposit in Xinjiang. In order to find out the mineralogical characteristics of primary uranium minerals and to investigate the forming environment and preservation of pitchblende in detail, this paper carried out mineralogical analysis on pitchblende by utilizing polarizing microscope, scanning electron microscope (SEM), electron probe (EPMA) and other methods, and study of the black fault gouge spatially related to the primary uranium orebodies using Laser Raman spectrometer and carbon-sulphur detector. The results show that the primary pitchblende mainly occurs in the hydrothermal veins with main ore fabrics of cataclastic, granitic crushing, porphyroclastic, and metasomatic reaction rim textures. The chemical compositions of pitchblende are very complicated as pitchblende underwent varying degrees of transformation by fluids. With fluid transformation increasing, the contents of  $UO_2$  and PbO decrease and  $Nb_2O_5$  and  $ZrO_2$  increase, indicating that the uranium was mobilized and migrated during the transformation processes and Nb and Zr elements were brought in by fluids. Further investigation shows that the carbon-bearing fault gouge may provide favorable conditions for the precipitation of pitchblende from reduction of soluble  $U^{6+}$  complex, and also play a protective role in the preservation of pitchblende.

Key words: Baiyanghe uranium deposit; Pitchblende; Retroactive transformation; Carbon-bearing fault gouge; Western Junggar