



岩及花岗岩等富铀建造占的比例较少,目的层原生砂体有机质含量偏低,砂体后期开启后地表水系不发育,地下水补给较缺乏,断裂构造又破坏了拗陷内目的层后期统一的地下水的补—径—排系统,造成层间氧化带前锋线的含矿率总体偏低,这些不利因素可能制约着该区形成大型砂岩型铀矿床的能力。

## 661 铀矿床成矿物质来源:微量元素和稀土元素证据

Source of ore-forming material of the No. 661 uranium deposit: evidence from minor elements and rare earth elements

田建吉<sup>1</sup>, 胡瑞忠<sup>2</sup>, 苏文超<sup>2</sup>, 张国全<sup>3</sup>, 齐有强<sup>2</sup>, 商朋强<sup>4</sup>

1. 核工业北京地质研究院, 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京, 100029;
2. 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, 贵阳, 550002;
3. 浙江省有色金属地质勘查局, 绍兴, 312000;
4. 中化地质矿山总局地质研究院, 涿州, 072750

**关键词:** 赣杭构造带 微量元素 火山岩型铀矿床 成矿物质 661 铀矿床

成矿物质来源是研究矿床成因的关键问题之一,微量元素和稀土元素组成特征是研究成矿物质来源的重要手段。661 矿床位于该带东段大洲铀矿田内,是产于流纹岩中的典型火山岩型铀矿床之一。前人对该矿床的微量元素系统研究相对较少,仅限于矿区火山岩和绿色层部分(秦社彩,1987)。本章系统分析了围岩、蚀变围岩和矿石的微量元素组成,并以此来探讨成矿物质来源。

### 1 矿床地质特征

661 矿床位于江山—绍兴断裂带南东侧,赣杭构造火山岩带东段大洲火山断陷盆地北缘。盆地基底为前震旦系陈蔡群变质岩,火山岩地层为下白垩统磨石山群西山头组和九里坪组火山碎屑岩及熔岩。矿体明显受层位和岩性控制,含矿层为九里坪组第一、二、三层流纹岩,主要矿体集中在第三层流纹岩的顶部距上覆绿色层底板 0~12m 范围内。

矿石呈浸染状、细脉浸染状、网脉状和角砾状构造,铀以单矿物及吸附分散状态存在。铀矿物有沥青铀矿、铀黑、水铀矾矿和水硫铀矿。围岩蚀变在区域上以水云母化为其特征,形成可作为找矿标志的绿色层。近矿围岩蚀变有赤铁矿化、硅化、黄铁矿化、萤石化、迪开石化、水云母化及碳酸盐化,其中赤铁矿化、硅化与矿化关系最密切。

### 2 样品采集与分析

样品采自井下各个中段的坑道或采场中,部分未矿化流纹岩样品采自地表未矿化区。选择具有代表性的新鲜未蚀变或弱蚀变的赋矿流纹岩,硅化、红化蚀变流纹岩和绿色层样品以及块状红化浸染型红化矿石进行研究。

### 3 结果分析

#### 3.1 微量元素特征

结果显示, 本区流纹岩、蚀变岩石和矿石微量元素具有以下特征:

(1) 与中国东部上地壳值和中国流纹岩值相比(鄢明才等, 1997), 矿区流纹岩富集 Zn、Rb、Y、Zr、Nb、Mo、Sb、Hf、W、Pb、Th、U 等元素, 尤其是 Zn、Mo、W、Sb 等; 亏损 Sc、Sr、Ba 等元素, 明显亏损 Sr 和 Ba。与南岭地区产铀低 Ba-Sr 花岗岩类似(商朋强, 2007)。Cr、Ni 值低于中国东部上地壳值, 高于中国流纹岩值, 可能与本区流纹岩的形成与壳幔相互作用有关。

(2) 与未蚀变流纹岩相比, 蚀变岩石和矿石中富集 Sc、Cu、Zn、Sr、Y、Nb、Mo、Sb、Ba、Pb、Th、U 等元素, 尤其是 Sr、Zn、Mo 等元素含量明显增加, 且与铀含量呈明显的正相关关系, 除 Sr、Ba 外, 蚀变岩石和矿石中富集元素与矿区流纹岩富集元素组合类似, 显示这些元素与铀可能具有同一来源, 即都来自于流纹岩。

(3) 矿区流纹岩 Th/U 比值为 2.2~7.6, 与 Wenrich 报道的美国典型的硅质火山岩的比值(1~6.5)一致。蚀变岩石和矿石的比值分别为 3.2~6.4 和 0.0012~0.11, 在 U/Th-U 图解中表现出明显的线性关系, 显示了水-岩作用过程中 U、Th 活动性能的差异, 暗示矿化过程中 U 与 Th 发生分离, 热液从流纹岩中只带走铀而钍基本不发生转移。

#### 3.2 稀土元素特征

矿区远矿流纹岩  $\Sigma$ LREE 为  $176.17 \times 10^{-6} \sim 391.32 \times 10^{-6}$ , 平均  $296.13 \times 10^{-6}$ , 与浙东南其它地区九里坪组流纹岩相近(杨晓春, 1998), 明显高于地壳平均值(黎彤, 1976);  $\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE 在 9.26~11.17 之间, 平均 10.10, 轻稀土明显富集, 稀土配分模式为右倾型, 其中轻稀土部分陡倾斜, 重稀土部分相对比较平直, 反映轻稀土比重稀土具有更强的分馏;  $\delta$ Eu 为 0.038~0.052, 铕强烈亏损, 呈明显的 V 字型。矿区流纹岩与赣杭带其它火山岩型铀矿区火山岩具有类似的稀土组成特征(王剑锋等, 1987), 也与华南产铀花岗岩具有相似的稀土组成, 在  $\Sigma$ La- $\Sigma$ Sm- $\Sigma$ Yb 三角图解中, 本区流纹岩落入华南产铀花岗岩区域(章邦桐, 1990)。

661 矿床赋矿流纹岩在蚀变和矿化的过程中, 稀土元素具有以下变化特征:

(1) 近矿流纹岩、蚀变岩石(含绿色层)和矿石  $\Sigma$ REE 明显增加, 蚀变岩石  $\Sigma$ REE 最高, 矿石的稀土总量也高于远矿流纹岩, 但矿石随 U 含量增大, 其稀土总量却减少。

(2) 近矿流纹岩和蚀变岩石的  $\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE 和  $(La/Yb)_n$  均增大, 在矿石中其比值随 U 含量的增大而减小, 表明围岩经蚀变后有稀土元素富集, 尤其是轻稀土, 重稀土则更多的进入矿石中。稀土三角图解显示, 蚀变过程中稀土向轻稀土富集方向演化, 而矿石向中稀土和重稀土方向演化。

(3) 矿石和蚀变岩石相对围岩富集系数大都在 1.5~2 之间, 矿石中部分重稀土元素达到 3 以上, 与赣杭带内其它火山岩型铀矿床的稀土特征一致的(王剑峰等, 1989)。蚀变岩石和矿石均较流纹岩富集稀土元素, 但蚀变岩石相对更富集轻稀土元素, 而矿石更富集重稀土元素, 尤其是品位最高的两个样品, 明显表现出富中稀土和重稀土元素。

(4) 各类岩石和矿石均具有强烈的 Eu 亏损, 表明蚀变岩石和矿石均继承了原岩(流纹岩)的稀土特征, 同时其  $\delta$ Eu 特征还具有从远矿流纹岩、近矿流纹岩、蚀变岩石至矿石逐渐增大的特点。



#### 4 成矿物质来源讨论

在矿床研究中,一般认为金属来源有:(1)岩浆的分异作用;(2)热液与岩石的相互作用,由蚀变作用而从岩石中获取金属;(3)金属来源于深部,有的甚至可能来自于地幔。研究区的岩浆活动活跃,但成矿时代与火山岩的成岩时代具有一定的时差(11-14Ma左右),流纹岩包裹体中铀含量与全岩的铀含量一致(高必娥,1990),表明岩浆活动晚期未直接分异出富铀的流体。矿区内具有大面积面状分布的水云母化(绿色层),矿体主要产出于绿色层之下的层状破碎带内,矿化与硅化、赤铁矿化等关系密切,显示蚀变作用对本区铀矿床的形成起重要作用。661 矿区内火山岩铀含量较高,铀主要赋存在基质中(秦社彩,1988),脱玻化、蚀变交代作用可使其中的一部分铀活化转移。因此形成铀矿床的成矿物质最有可能来自于这些流纹岩围岩,不排除少量铀来自深部或者地幔流体。

高温高压试验结果表明,过去许多被认为是岩浆热液所特有的组分,如 F、B、Li、Rb、Cs、Cu、Pb、Zn 等,都可以通过水-岩相互作用而获得,且可达到较高的含量(孙占学,2004)。闵茂中等(1993)研究指出富铀层中常富含 P、Mo、Ni、Zn、Cu、Pb、Ag 等元素,它们常成为铀矿中可供综合利用的有益组分。浙江中生代火山岩的 Cu、Pb、Zn 等元素含量较高(徐晓春等,1997),发育大量在时空间和成因上与火山活动有密切联系的铅锌银矿床(点)(陈克荣等,1987)。福建白垩纪火山岩同样具有较高 Mo、Zn、Pb、Cu 等元素丰度,该区 U、Mo、Zn、Pb 和 Cu 等金属矿化作用与南园组火山岩有密切关系(黄玉生,1987)。浙江治岭头金矿蚀变带元素地球化学异常显示 Au 与 Ag、Cu、Pb、Zn、Sn、Mo 异常有较好的相关性,与火山岩(磨石山群)有成因联系(张亚雄,1994)。661 铀矿床矿化过程中具有类似的微量元素组合,暗示这些元素与铀可能均来自于火山岩,成为铀矿的重要铀源。

热液中稀土元素的浓度和配分主要受围岩中稀土的浓度和配分特征、岩石与溶液之间稀土元素的分离习性和发生的蚀变类型等因素的控制(Graf et al., 1977; 赵振华, 1997)。稀土元素在流体体系中易与  $F^-$ 、 $CO_3^{2-}$  和  $HCO_3^-$  等离子形成配合物,配合物的稳定性从 La-Lu 逐渐增加,热液流体中重稀土的碳酸络合物较轻稀土的更容易溶解(Bau et al., 1995; 赵振华, 1997)。在富  $CO_2$  的流体中铀和稀土元素可以碳酸络合物形式共同迁移,且重稀土较轻稀土元素更容易溶解迁移,导致矿石的配分模式主要表现出重稀土较轻稀土更为富集的特征(Wendlant and Harrison, 1979; Michard et al., 1987)。本区火山岩具有较高的铀含量和稀土含量,铀成矿前和成矿期广泛发育的水云母化、硅化和赤铁矿化等热液蚀变作用有力的促进了稀土元素向富含矿化剂热液的转移。流纹岩、蚀变流纹岩、矿石以及早期脉石矿物具有稀土配分模式和 Eu 强烈负异常的一致性说明成矿流体中铀和稀土元素可能主要来自于矿区火山岩。这也可以从 Pb、S、Sr、Nd 同位素地球化学结果得到论证(作者未发表数据)。由于在热液中 HREE 比 LREE 具有更强的络合能力,更容易迁移,在早期热液作用下,围岩在蚀变过程中带入更多的 LREE,表现出蚀变岩石向轻稀土富集方向演化,矿石向中稀土和重稀土方向演化的趋势。早期脉石矿物与围岩、蚀变岩石和矿石相比,则表现出相对亏损轻稀土元素。

#### 5 结论

(1) 蚀变岩石和矿石中明显富集 Zn、Mo 等元素,且与铀呈正相关关系,与本区中生代火山岩微量元素组合类似,表明这些元素与铀可能均来自于火山岩。

(2) 成矿流体中的稀土来自于矿区流纹岩。蚀变岩石向轻稀土增加方向演化, 而矿石则向中稀土和重稀土(尤其是中稀土)增加方向演化。

### 参考文献:

1. Bau M, Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviors in fluorine-rich hydrothermal fluids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1995, 119 (2): 213-223.
2. Michard A, Beaucaire C, Michard G. Uranium and rare earth elements in CO<sub>2</sub>-rich waters from Vals-les-Bains (France). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51 (4): 901-909.
3. 高必娥, 王兴无. 裂变径迹法测量熔融包裹体中的铀含量及其意义. *地质地球化学*, 1991, (4): 67-68.
4. 黎彤. 化学元素的地球丰度. *地球化学*, 1976, (3): 167-174.
5. 秦社彩. 661矿床控矿“绿色层”物质组分及成因研究. 南京大学硕士学位论文, 1988.
6. 商朋强. 岩石圈伸展对粤北下庄矿田铀成矿的制约机制研究. 中国科学院地球化学研究所博士学位论文, 2007.
7. 王剑锋. 浙赣部分火山岩的稀土元素地球化学特征及其地质意义. *铀矿地质*, 1989, 5(5): 268-276.
8. 王剑锋, 刘峰. 浙西北中生代火山岩型铀矿床成矿机理研究. *矿物岩石*, 1989, 9(4): 73-81.
9. 赵振华. 微量元素地球化学原理. 北京: 科学出版社, 1997.

## 地浸砂岩型铀矿勘查中物探参数孔的实施成果

The achievements of boreholes for geophysical coefficient in in-situ leaching sandstone - type uranium deposit

黄笑<sup>1</sup>, 王殿学<sup>1</sup>, 蔡建芳<sup>1</sup>, 周文博<sup>1</sup>, 刘庆<sup>1</sup>

核工业二四三大队, 内蒙赤峰, 024000

地浸砂岩型铀矿;  $\gamma$  测井; 压氦现象; 镭—氡平衡系数;  $\gamma$  测井解释结果修正

本次“镭—氡放射性平衡系数”研究在内蒙古通辽宝龙山地区进行, 工作区位于松辽盆地西南部(蔡建芳, 2012)。上白垩统姚家组为铀矿化的主要层位, 铀矿化主要发育在姚家组下段的上、下氧化带之间的灰色砂体中(蔡建芳, 2014)。

在铀矿勘查过程中,  $\gamma$  测井是铀矿勘查的重要手段, 通过  $\gamma$  测井, 确定铀矿体空间位置、品位及厚度, 为铀矿资源储量的估算提供重要的物性参数。影响  $\gamma$  测井解释结果的因素较多。宝龙山地区在普查过程中也陆续进行了矿石体重、湿度、“铀—镭放射性平衡系数”以及钍、钾干扰元素含量等物性参数的测量及分析。“镭—氡放射性平衡系数”是地浸砂岩型铀矿勘查中的重要参数, 因此在宝龙山地区铀矿普查中开展该参数的研究对指导铀矿勘查评价、储量估算等具有重要意义(EJ/T 1214-2006, 2007)。

可地浸砂岩型铀矿有较高的孔隙度和水饱和度, 其镭氡处于动态平衡状态。在铀矿钻探勘查过程中, 由于钻井井液循环产生对井壁的压力, 在围岩和含矿层均沁入了井液, 井液的沁入和气体扩散作用使得铀矿化层的含铀含矿水出现了局部的镭—氡不平衡现象。导致终孔后  $\gamma$  测井照射量率数值比正常处于镭氡平衡状态