

鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿成矿机理和 叠合成矿模式*

Metallogenic mechanism and superposition metallogenic model of the sandstone type uranium deposits in northeastern Ordos Basin

李子颖¹, 陈安平², 方锡珩¹, 欧光习¹, 张珂³, 焦养泉⁴, 夏毓亮¹,
陈法正², 周文斌⁵, 刘忠厚², 吴仁贵⁵, 肖新建¹, 孙晔¹

(1 核工业北京地质研究院, 北京 9818 信箱, 北京 100029; 2 核工业 208 大队, 内蒙古 包头 014010;

3 中山大学, 广东 广州 510275; 4 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 5 东华理工学院, 江西 抚州 34400)

LI ZiYing¹, CHEN AnPing², FANG XiHeng¹, OU GuangXi¹, ZHANG Ke³, JIAO YangQuan⁴, XIA YuLiang¹,
CHEN FaZheng², ZHOU WenBin⁵, LIU ZhongHou², WU RenGui⁵, XIAO XinJian¹ and SUN Ye¹

(1 Beijing Research Institute of Geology for Nuclear Industry, Beijing 100029, China; 2 No. 208 Party of Nuclear Industry, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 3 Zhongshan University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 4 China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 5 Donghua College of Technology, Fuzhou 344000, Jiangxi, China)

摘 要 文章从铀的来源、迁移和沉淀富集等方面论述了鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿成矿机理, 提出了该铀矿氧化还原-油气还原-热改造多重作用叠加的“叠合铀成矿模式”。

关键词 鄂尔多斯盆地; 砂岩型铀矿; 叠合成矿模式

鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿床是近年铀矿勘查工作在鄂尔多斯盆地北部直罗组中发现的较大规模的铀矿床(李子颖等, 2002; Li et al., 2005)。它的发现使鄂尔多斯盆地作为重要能源资源盆地又增加了一种重要的核能源矿产。铀矿化产于侏罗纪直罗组灰绿色砂岩与灰色砂岩之间的过渡带中, 矿化目标层砂岩颜色均呈还原色调。该区铀矿化的这一独特特征不同于一般的砂岩型铀矿床(李子颖等, 2002; Li et al., 2005)。因此, 阐明该砂岩型铀矿的成矿机理和模式, 不仅对拓宽找矿思路、指导砂岩型铀矿勘查工作具有重要的实际意义, 而且对丰富砂岩型铀矿的成矿理论具有重要的理论意义。

1 铀源研究

鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿化铀源具有来自于蚀源区岩石、中生代地层及部分油气水带入的多源特征。

1.1 蚀源区铀源

鄂尔多斯盆地东北部沉积物源主要来自于盆地的西北部、北部蚀源区, 盆地西北部、北部大面积分布的太古代、早元古代结晶岩系和不同时代的花岗岩类岩体铀含量一般较高, 不仅是研究区侏罗系直罗组和延安组的物源和铀初始富集的铀源, 同时也为后期成矿提供一定的铀源。华力西中期的各类岩体铀含量相对较低, 一般在 $3 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ 之间; 华力西中期-燕山早期各类岩体铀含量较高, 一般在 $4 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$ 之

*核工业地质局科研项目(批准号: HDKY20020501)和科技部 973 项目(批准号: 2003CB2146)共同资助

第一作者简介 李子颖, 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事成矿规律和矿床地球化学研究。E-mail: zyli9818@126.com

间,其中印支期花岗岩(γ_5^1)铀含量高达 12.0×10^{-6} 。鄂尔多斯盆地东北部蚀源区岩石总体具有较高的铀含量,可为研究区砂岩型铀矿的形成提供较丰富的铀源。

1.2 中生代地层铀源

延安组 and 直罗组及华池—环河组形成于温暖潮湿气候条件,富含大量的腐殖质、炭质和煤层,具有较强的铀吸附还原能力,使地层本身在沉积过程中富集了大量的铀,延安组、直罗组 and 华池—环河组砂岩的铀含量均较高。

根据航放资料的分析,鄂尔多斯盆地东北部存在大面积的铀高场区(李子颖等,2002),这些高场区的分布与三叠系、侏罗系地表露头区相吻合,且在研究区的侏罗系延安组露头附近见大量的航放异常点(w_U 达 11×10^{-6} ,正常为 $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$),说明侏罗系、三叠系铀丰度值高,作为成矿目标层位及直接基底可为铀成矿提供丰富的铀源;而西部铀含量低,可能为其上覆厚层白垩系沉积物的缘故。

通过研究目标层直罗组沉积砂体的 U-Pb 同位素演化特征,计算样品中原始铀含量(U_0)和铀的近代得、失(ΔU)情况。鄂尔多斯盆地东北部直罗组砂体现测铀含量为 $2.40 \times 10^{-6} \sim 9.61 \times 10^{-6}$,平均值为 4.35×10^{-6} ;原始铀含量 U_0 平均值高达 21.95×10^{-6} ,说明直罗组沉积时富铀,但不均一,具有典型的富铀砂体特点。U-Pb 同位素研究还表明,直罗组氧化带岩石丢失了大量铀,也应是铀矿化重要铀来源之一。

1.3 油气流体的铀源贡献

分析数据表明(欧光习等,2004),石油、油层水较地表水具有数倍—数十倍的高铀含量,油气及油层水中的铀和其它金属元素聚集,是由于在有机酸的酸溶、萃取和金属-有机络合作用下,源自深部不同时期形成的富铀砂体、盆地内含铀火山岩、火山碎屑岩、盆地基底岩石以及存在铀预富集的生油母岩。鄂尔多斯盆地东北部油气的作用是一种普遍的现象,铀成矿带较原生带和古氧化带含有较高的油气流体包体及油气流体包体中较高的铀含量均说明油气流体对成矿铀源作出了一定的贡献。

2 铀的迁移

通常认为,在典型砂岩型铀矿形成过程中,铀的迁移是以碳酸铀酰络合物的形式进行搬运,有关这方面的论述和文献很多,在此不在赘述。本文着重讨论有机酸对铀迁移的影响。

(1) 有机酸的形成

干酪根和煤通过热裂解可产生大量的有机酸,干酪根的含氧基团在岩石中矿物氧化剂(粘土矿物中的 Fe^{3+} 和聚硫化物)的氧化作用下也可形成有机酸,有机酸对铀有较大的迁移能力,这就为什么可以解释,在砂岩型铀成矿的氧化带,由于有机酸和铀共迁移,导致有机质含量降低,而在过度带富集的现象。此外,有机酸还可以在深埋藏的晚成岩阶段(Ro 大于 1.3%),由烃类与硫酸盐矿物之间的热化学氧化还原反应生成。在有机酸形成的不同阶段,还伴随有大量有机成因的 CO_2 形成,成矿流体中 CO_2 含量的增加也有利于铀以碳酸铀酰络合物的形式进行迁移,但同时使碳酸盐化增强。因此,矿层中的有机质不仅可作为铀成矿的还原剂,而且在氧化条件下还可作为促使铀迁移的有利介质。

(2) 有机酸对岩石组分的溶解

近几年来的实验研究表明,油气和油层水中有机酸特别是双官能团羧酸的存在能使铝硅酸盐矿物中铝离子的活动性大大增强,可使钾长石这样的铝硅酸盐矿物溶解度增加(欧光习等,2004)。在有机酸存在的情况下,铝硅酸盐矿物将失去稳定,铝被络合形成络合物而易于迁移形成次生溶孔。但是,络合物的稳定性与 pH 值有关,如果携带络合物的流体的 pH 值发生明显变化,那么络合物可能发生去稳定作用,沉淀像高岭石这样的矿物,并充填部分孔隙,产生高岭石化蚀变的现象。干酪根在大于 $80^\circ C$ 时还可产生酚类酸性有机物,这种化合物与金属络合,使矿物溶解,产生次生孔隙。

有机酸还可络合二氧化硅。原油的生物降解产物(有机酸等)可以和溶解的 SiO_2 络合,从而加速石英和铝硅酸盐矿物在中性 pH 值条件下的溶解过程。实验表明;草酸可以络合 SiO_2 ,在天然的和被污染的地

下水系统中,硅酸易于和苯二甲酸、其它二元酸、腐殖酸、灰黄霉酸发生络合作用。这种作用被认为是在构造热事件背景下,成矿流体中硅质组分增加的原因。

综上所述,有机酸的分布十分广泛。鄂尔多斯盆地北部油气作用很强,由于油气和油层水中有机的溶解和强烈的络合作用,使得主要的造岩矿物长石、石英等发生不同程度的溶蚀、蚀变而产生大量的次生孔隙,同时伴随大量的铀有机络合物形成,促使铀的迁移。

3 铀的富集

铀的富集是载铀成矿流体在流到特定场所时,由于其物理化学条件的改变,原来稳定的化合物或络合物变得不稳定,使铀产生卸载沉淀。影响含铀成矿流体条件改变的重要介质是有机质,它对铀沉淀的作用主要有还原和吸附作用:

(1) 有机质的吸附作用

在还原条件下,有机质对铀有明显的吸附作用,特别是与有机质中的腐殖酸和富里酸有关。腐殖酸分子结构中存在桥键、碳网而具有疏松的海绵状结构,大量分子可以分布在其孔隙中。 UO_2^{2+} 离子的富集和铀有机络合物的凝聚程度决定吸附 UO_2^{2+} 的数量。在 $\text{pH}=3.4$ 的酸性环境下,吸附铀达到最大值。泥炭及褐煤吸附铀的能力最强,随着变质程度增高,有机质吸附铀的能力降低。

(2) 有机质的还原作用

几乎所有固体的沥青和许多种煤(主要是其中的腐殖酸)均具备了使铀还原和沉淀的条件。能还原铀的物质可以是沉积时带入盆地的植物残骸,也可以是成岩之后带入的沥青、油气等。还原反应速度取决于有机质性质及反应温度。

(3) 酸化强还原作用

研究区铀矿在形成的晚期经历了特殊的构造热事件,由于热的双重作用产生具有很强迁移能力的成矿流体,使成矿流体富集 U、Mo、Re、V、Se 及 Si、Ti、P、REE(稀土)等。这种成矿流体的性质往往呈碱性。因此,导致成矿流体物质沉淀的主要因素是溶液的性质产生改变,从碱性转化到酸性(酸化)。在强烈油气的还原作用下,这种流体由碱性向酸性转化造成矿化物质沉淀。

4 成矿模式

根据鄂尔多斯东北部铀矿床形成的条件、控制因素和成矿机理分析,该矿床形成具有非常复杂的成矿过程,经历了构造的多期次的“动-静”耦合、潜水氧化与层间氧化成矿作用的叠加、油气-热流体的复合改造等地质成矿作用。

鄂尔多斯东北部铀矿的成矿模式可以总结为“叠合成矿模式”(Metallogenic Superposition Model):

(1) 预富集阶段

直罗组辫状河含铀灰色砂体是铀成矿的物质基础,它是在潮湿气候条件接受沉积的,还原介质的发育有利于铀的预富集,形成富铀地层,为后期氧化还原成矿作用奠定了铀源基础。

(2) 古潜水氧化作用阶段

古潜水氧化作用阶段主要发生在中、晚侏罗世。在直罗组沉积后,由于盆地抬升和掀斜运动,加上古气候由潮湿已转变为干旱半干旱,含氧含铀水沿地层中砂体垂向向下渗透,形成古潜水氧化作用,并在含矿层中形成一定量的铀富集和矿化。

(3) 古层间氧化作用阶段

古层间氧化作用是形成鄂尔多斯盆地北部铀矿化的主成矿作用。主要发生在晚侏罗世—早白垩世早

期,在这一时期,盆地抬升和掀斜运动,使盆地北部蚀源区及直罗组长期暴露地表并遭受长期的风化剥蚀,古气候为干旱半干旱,含氧含铀水沿地层中砂体向下渗透,在砂岩层运移过程中将其中的铀不断淋出,铀随着含氧水不断向前运移和富集,形成“古层间氧化带砂岩型铀矿床”。

(4) 油气还原作用

研究区油气的还原作用是多期次的,成矿富集带较多的油气包体的存在表明在成矿作用时期,油气参与了成矿作用;在成矿作用后期直到现在,由于构造活动和抬升减压等作用伴随多期次的油气还原作用(何自新等, 2003),其中最重要的就是对含矿层的二次还原作用,导致古氧化带砂岩变为灰绿色砂岩,二次还原作用对早期形成的古矿具有保矿作用。

(5) 热改造作用

研究区矿床在形成之后,大约在 20~8 Ma 时期发生了较强烈的热改造作用,形成铀石、硒化物、硫化物和一些高温矿物,以及 P、Se、Si、Ti、REE 等元素的叠加富集,使该铀矿床具有自己独特的特征。

参 考 文 献

何自新,等. 2003. 鄂尔多斯盆地演化与油气. 北京: 石油工业出版社.

李子颖, 陈安平, 方锡珩, 等. 2002. 鄂尔多斯盆地北部可地浸砂岩型铀矿成矿条件及矿化特征研究. 核工业北京地质研究院成果报告. 1~126.

欧光习, 杜乐天, 等. 2004. 北方砂岩型铀矿中的油气渗漏及其与铀成矿的关系. 见: 第二届中国地球物理年会论文集. 西安: 西安地图出版社. 21~26.

Li Z Y, Chen A P, Fang X H, et al. 2005. Metallogenetic conditions and Exploration Criteria of Dongsheng Sandstone type uranium deposit in Inner Mongolia, China. In: Mao J W and Bierlein F B, ed. Mineral Deposit Research. Springer. 291~294.

<http://www.kcdz.ac.cn/>