

# 鄂尔多斯盆地东胜砂岩型铀矿叠合成矿模式\*

李子颖<sup>1</sup>, 方锡珩<sup>1</sup>, 陈安平<sup>2</sup>, 欧光习<sup>1</sup>, 孙 晔<sup>1</sup>

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

鄂尔多斯盆地东胜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特大型铀矿床<sup>[1]</sup>。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, 矿石中铀矿物主要是铀石, 并在矿石中发现了大量的多期次油气包裹体。该区铀矿化的这些特征不同于一般的砂岩型铀矿床。东胜砂岩型铀矿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”偶合、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。据此, 提出东胜砂岩型铀矿的“叠合成矿模式”, 即成矿铀源、流体和作用均具有多元叠合特征。

## 1 铀源的叠合

### 1.1 铀源区铀源

鄂尔多斯盆地东北部沉积物源主要来自于盆地的北西部、北部铀源区, 盆地北西部、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-燕山早期各类岩体铀含量较高, 一般在  $4 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$  之间, 其中印支期花岗岩 ( $\gamma_5^1$ ) 铀含量高达  $12.0 \times 10^{-6}$ 。鄂尔多斯盆地东北部铀源区岩石具有较高的铀含量, 可为研究区提供较丰富的铀源。

### 1.2 中生代地层铀源

延安组和直罗组及华池-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, 铀含量均较高。直罗组灰色砂岩铀含量是比较高的, 19 个样品平均值达  $4.35 \times 10^{-6}$ , 而灰绿色砂岩仅为  $3.38 \times 10^{-6}$ , 说明在氧化过程中有铀的丢失。

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, 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 (铀含量达  $11 \times 10^{-6}$ , 正常为  $2-3 \times 10^{-6}$ ), 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。

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 ( $\Delta U$ ) 情况。鄂尔多斯盆地东北部直罗组砂体测铀含量为  $2.40 \times 10^{-6} \sim 9.61 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $4.35 \times 10^{-6}$ ; 原始铀含量  $U_0$  平均值高达  $21.95 \times 10^{-6}$ , 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, 进一步说明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, 石油、油层水较地表水具有数倍—数十倍的高铀含量<sup>[2]</sup>, 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可能做出了一定的贡献。

## 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。

### 2.1 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 ( $R_o$  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。

### 2.2 有机酸对岩石组分的溶解

近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。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

\*中国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。Email: zyli9818@126.com

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  $\text{SiO}_2$  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  $\text{SiO}_2$ ,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酸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 铀的富集沉淀

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,使铀产生卸载富集沉淀。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:

#### 3.1 有机质的吸附和还原作用

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。 $\text{UO}_2^{2+}$  离子的富集和铀有机络合物的凝聚程度决定吸附  $\text{UO}_2^{2+}$  的数量。在 pH=3.4 的酸性环境下,吸附铀达到最大值。

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。

#### 3.2 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 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发生改变,从碱性转化到酸性。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 成矿流体的叠合

鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿床的形成也经历了大气降水、油气流体和热流体等复杂的多种流体作用的叠合。它主体上是由氧化还原作用形成,即含氧含铀地下水沿含矿层渗入,铀被还原吸附沉淀。

正如前文所述,油气作用是多期次的,它们与铀成矿作用的关系主要表现在两个方面,一方面是在铀成矿作用时,油气形成地球化学还原原促使铀还原沉淀,另一方面是在主要铀成矿作用后,油气的强还原作用导致原氧化砂岩再次被还原,即二次还原,使氧化色砂岩变成还原色的灰绿色砂岩<sup>[9]</sup>。油气的强还原作用也为铀的形成创造了环境条件。

该矿床在主要铀矿化后,还经历了较强的热流体改造作用,直接的证据是包裹体测温获得 95℃ 和 145℃ 二个正态分布峰的温度曲线,流体含盐度平均达 10%,并且形成黄铁矿、方铅矿和闪锌矿等低温矿物组合,也正是由于热流体的改造作用,原先沉淀富集的铀重新组合形成铀石。这次热流体的改造应与新生代研究区区域玄武岩喷发有关。

### 5 成矿作用的叠合

综前所述,鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿床的形成经历了原生铀的预富集、潜水氧化与层间氧化成矿作用及油气-热流体的复合改造等地质成矿作用(图 1)。

(1) 预富集阶段(约 170 Ma) 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(约 160~135 Ma) 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(约 125~65 Ma) 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。主要发生在早白垩世早期至古新世,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时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,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铀矿具有保矿作用。

(5) 热改造作用 研究区矿床在形成之后,大约在 20~8Ma 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。

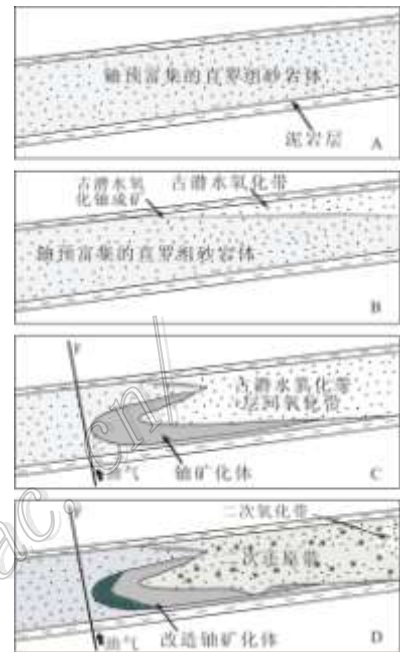


图 1 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿叠合成矿模式

A. 预富集阶段; B. 古潜水氧化作用阶段; C. 古层间氧化作用阶段; D. 油气还原加热改造作用