

# 初步探讨鄂尔多斯盆地东胜铀矿田 成矿作用研究若干问题

冯晓曦<sup>1,2</sup>, 滕雪明<sup>1,2</sup>, 何友宇<sup>3</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心  
非化石能源矿产实验室, 天津 300170; 3. 湖南核工业地质局三〇六大队, 湖南 衡阳 421008)

**摘要:**随着973项目和北方砂岩型铀矿调查工程的深入开展,笔者从中侏罗统直罗组成岩过程对铀成矿影响的程度,初步探讨了鄂尔多斯盆地东胜铀矿田成矿作用的若干问题,主要表现在以下几个方面:(1)鄂尔多斯盆地北部的古元古代孔兹岩带为东胜铀矿田中主要含铀地层—中侏罗统直罗组碎屑物、预富集铀的主要蚀源区;(2)直罗组在同生沉积过程中预富集的大量铀,为铀成矿提供了主要铀源;(3)早成岩作用下,直罗组沉积建造水将分散的、预富集的铀迁移至灰色砂岩中富集成矿,为成矿流体;(4)基于铀矿体产状及铀矿物与载铀介质的空间关系,成矿时期应为早白垩世末期,受直罗组早成岩作用制约。

**关键词:**蚀源区;铀源;成矿流体;成矿期;东胜铀矿田

**中图分类号:** P619.14

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4135(2019)02-0096-08

砂岩型铀矿以其规模大、可地浸、开采环保等特点,已经成为当今世界上经济价值排在第一位的铀矿类型,也是我国铀矿地质储量持续增长的主要矿种类型<sup>[1]</sup>,成矿作用研究对于铀矿床勘查和成矿理论研究均具有重要的科学理论指导意义。

成矿物质来源是各类矿床研究的关键内容之一,砂岩型铀矿也不例外。广义上讲,铀源即是含铀岩系中各种存在形式铀的来源;狭义上讲,铀源即是成矿过程中铀的直接供给者。对于砂岩型铀矿,铀源一般有3种途径:(1)铀矿层同生沉积预富集的铀源,就地取材成矿;(2)大气降水从蚀源区携带、迁移、渗入的铀源,属外生后成铀源;(3)盆地深部含铀流体(油气、热液)上侵、叠加、改造含矿层的铀,属深铀浅成铀源。

铀来自于蚀源区是目前砂岩型铀矿研究的主流认识,无论是同生沉积过程中预富集铀的来源,还是后生和表生成岩阶段含氧含铀流体中铀的供应,富铀蚀源区均承担了主要角色,无论美国的“卷状”铀成矿理论,还是前苏联的“水成铀矿理论”均强调了

含矿层成岩期后蚀源区的外生后成铀源对成矿的关键作用。

近年来,随着973项目“中国北方巨型砂岩铀成矿带陆相盆地沉积环境与大规模成矿作用(2015CB453000)”深入开展<sup>[2-3]</sup>,对于东胜铀矿田的铀源、成矿流体、成矿时代等重要问题研究取得了若干新认识:(1)华北克拉通鄂尔多斯地块北部的古元古代孔兹岩带为东胜铀矿田直罗组主要蚀源区;(2)东胜铀矿田铀成矿的主要铀源来自直罗组地层同生沉积的铀;(3)直罗组同生沉积建造水承担了铀成矿的主要流体,未发现后生—表生成岩期层间渗入的含铀含氧水,盆地深部上侵的有机—无机热流体大规模改造铀矿体现象;(4)直罗组成岩作用制约了铀成矿过程,成矿时代应置于晚侏罗世至早白垩世,属成岩期成矿,非晚白垩世至新生代成矿。

笔者结合近年来973项目(2015CB453006)研究的若干进展,以纳岭沟铀矿床为例,初步探讨东胜铀矿田蚀源区、铀源、成矿流体和成矿期等若干成矿作用问题。

**收稿日期:** 2019-04-14

**资助项目:** 国家重点基础研究发展计划“973”项目“中国北方巨型砂岩铀成矿带陆相盆地沉积环境与大规模成矿作用”(2015CB453006);国际地球科学对比计划(IGCP675)和中国地质调查局项目“硬岩型铀钍等矿产资源远景调查与勘查示范(DD20160129)”

**作者简介:** 冯晓曦(1972-),男,博士,教授级高级工程师,毕业于中国地质大学(武汉),现从事砂岩型铀矿调查研究, E-mail: tjfengxiaoxi@163.com。

# 1 蚀源区

目前,许多学者基于外生后成、水成铀矿、层间氧化带和潜水氧化带成矿理论,以及直罗组含矿层碎屑锆石U-Pb年龄和重矿物组合<sup>[4-5]</sup>和盆地北缘和西北缘富铀地质体<sup>[6]</sup>,乌拉山岩群中片麻岩组背景值(2.54×10<sup>-6</sup>)较高<sup>[1]</sup>,以及包头地区富铀(5×10<sup>-6</sup>)大桦背岩体<sup>[3]</sup>,西北缘狼山地区乌和尔楚鲁花岗岩体铀含量5.9×10<sup>-6</sup>,认为东胜铀矿田的物(铀)来源于盆地北部乌拉山、大青山、狼山地区的前寒武纪变质岩和古生代富铀岩体。

上述结论多是基于碎屑锆石年龄、重砂矿物组合和地质背景提出的,只是说明直罗组与蚀源区的充分性,而未说明必要性。笔者认为如确定直罗组的蚀源区必须考虑中侏罗世古地貌、蚀源区空间分布、规模、含铀性,即是蚀源区向直罗组提供沉积物的必然性。

直罗组近源沉积明显,岩石疏松,含矿含水层渗透系数一般小于0.6 m/d,导水系数17.34~72.55 m/d。渗透率0.5~4 m/d<sup>[7]</sup>,属弱胶结。中粗粒碎屑占比达70%,填隙物一般不超过30%;碎屑颗粒的总体磨圆度较低,棱角一次棱角状碎屑占比达70%,次棱角状一次圆状占比达25%,磨圆状占比少于25%,成岩程度低;具绿帘石-辉石、方铅矿-绿帘石-褐铁矿的重砂组合,近源沉积明显,属近源河流相沉积。

笔者在野外调查中,发现了矿田北缘出露面积小于0.5 km<sup>2</sup>的古元古代美岱召岩群(Pt,m)(图1),其中硅质岩铀含量6.7×10<sup>-6</sup>U,长石石英岩16×10<sup>-6</sup>U,含石墨片岩53×10<sup>-6</sup>U,属于富铀地质体。

对于盆地北部的美岱召岩群(Pt,m),前人多认为其属华北克拉通西部古元古代孔兹岩系一部分<sup>[8-11]</sup>。华北克拉通西部沿宁夏贺兰山—内蒙古千里山、大青山以及集宁黄土窑等地大面积分

布古元古代孔兹岩系<sup>[8]</sup>(图2)。集宁黄土窑代孔兹岩系碎屑锆石年龄为2 310 Ma<sup>[9]</sup>,贺兰山中段赵池沟岩组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(2 154~1 991) Ma<sup>[10]</sup>,乌拉山—大青山孔兹岩系继承性碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄主要集中在(2 502~2 033) Ma<sup>[11]</sup>。笔者认为东胜铀矿田北部现存的古元古代美岱召岩群(Pt,m)属华北克拉通西部孔兹岩带。

为了进一步示踪东胜铀矿田直罗组物源,笔者在直罗组铀矿层顶底板砂岩中,获得5组 LA-ICP-MS U-Pb 测年碎屑锆石年龄:(2 479±11) Ma~(2 460±19) Ma、(2 300~1 950) Ma、(1 896±21) Ma~(1 820±32) Ma、(316~266) Ma 及 165 Ma<sup>[4]</sup>,其中大部分锆石年龄数据与分布于华北克拉通西部古元古代孔兹岩带(2 502~2 310 Ma)相对应<sup>[8-10]</sup>。

基于美岱召岩群(Pt,m)与东胜铀矿田相依的空间关系,推测是直罗组的重要物源区。

根据目前孔兹岩带的分布范围,直罗组碎屑锆石U-Pb年龄,结合华北克拉通古元古代孔兹岩系研究<sup>[8-11]</sup>和中生代以来鄂尔多斯盆地地质构造演化<sup>[12]</sup>,笔者认为中侏罗统直罗组沉积建造形成时,华北克拉通西部孔兹岩带大规模出露于东胜铀矿田北缘,横亘于阴山地块和东胜铀矿田之间,成为直罗组碎

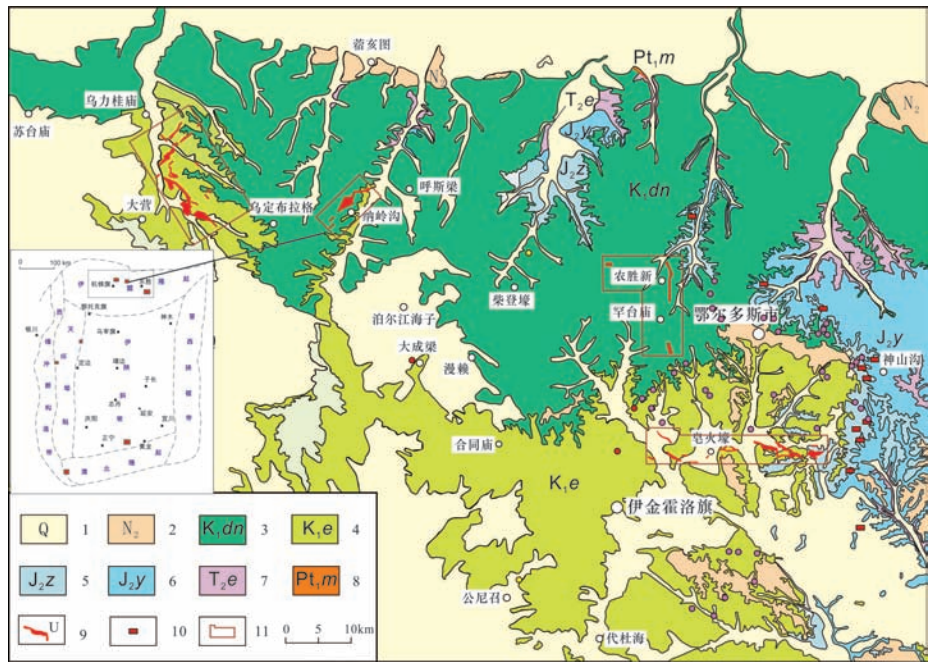


图1 鄂尔多斯盆地东胜铀矿田地质简图(据参考文献[3])

Fig.1 Simplified geological map of the Dongsheng uranium orefield

1. 第四系;2. 新近系;3. 下白垩统东胜组;4. 下白垩统伊金霍洛组;5. 中侏罗统直罗组;6. 中侏罗延安组;7. 中三叠统二马营组;8. 古元古代美岱召岩群;9. 铀矿体地表投影范围;10. 地表放射性异常点;11. 矿区范围

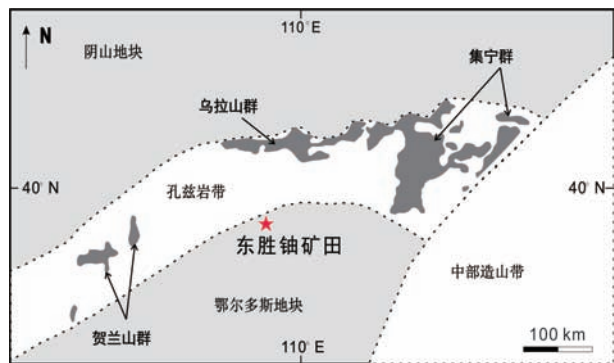


图2 鄂尔多斯盆地前寒武纪孔兹岩带大致分布位置  
(据参考文献[8])

Fig. 2 The approximate distribution of Precambrian  
Khondalite Belt in the Ordos Basin

屑物和预富集铀的最重要蚀源区之一。

## 2 成矿流体

砂岩型铀矿又称水生铀矿,成矿流体是砂岩型铀矿研究的主要内容。传统理论认为砂岩型铀矿中流体可分为四类:同生沉积期大气降水,成岩期地层封存的建造水、成岩期后渗入的地下水、盆地深部上侵热流体(油气和热卤水),成岩期后的层间渗入水在铀成矿承担了主要作用。无论美国“卷型”铀矿理论,还是前苏联“水成铀矿”理论<sup>[13]</sup>,以及中国“古层间氧化带”理论<sup>[14-15]</sup>,均认为成岩期后渗入的含氧含铀流体是主要成矿流体。

对于东胜铀矿田的成矿流体,近年来,学者多认为经历了同生沉积期含氧含铀大气降水,表生成岩期层间渗入的含铀含氧水,以及深部有机和无机热流体等多源流体的叠加改造成矿过程<sup>[16-21]</sup>,均强调层间渗入水为主要成矿流体。

蚀变矿物、稳定同位素和油气包裹体表明东胜铀矿田受到大气降水,地下水、油气等流体叠加改造。何种流体主导了成矿作用?笔者认为必须根据铀成矿作用而定。

### 2.1 同生沉积含氧含铀水

对于同生沉积水,几乎所有学者肯定了中侏罗世干旱-半干旱古气候条件下大气降水在铀预富集中的重要作用。来自蚀源区的铀在大气降水中,以 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 、 $UO_2(OH)_3$ 和 $U^{6+}$ 离子<sup>[18-19]</sup>,或被黏土等悬浮微粒吸附<sup>[20]</sup>,甚至少量的原生铀矿物<sup>[1]</sup>等形式迁移至盆地,而且数量巨大。

前人利用U-Pb同位素体系示踪了直罗组预富

集巨量铀,皂火壕铀矿床直罗组原始砂体原始( $U_0$ )含量达 $21.95 \times 10^{-6}$ ,属典型富铀砂体<sup>[21-22]</sup>,纳岭沟铀矿直罗组非矿段原始铀含量达 $41.15 \times 10^{-6}$ <sup>[3]</sup>。同生沉积过程,大气降水在东胜铀矿田直罗组预富集了巨量铀。世界上许多砂岩型矿床均具有铀预富集特征,据前人估算,楚·萨雷苏盆地英凯地区蒙库杜克层( $K_2t_1$ )和英库杜克层( $K_2t_2$ )自身预富集的巨量铀足以形成英凯超大型铀矿床,即使没有后期铀的供给<sup>[23]</sup>。

由此,笔者认为中侏罗世-早白垩世,干旱半干旱气候条件下,陆源碎屑物、铀在大气降水作用下,搬运、迁移至盆地,同生沉积水担当了蚀源区铀向盆地迁移的重要载体,但铀在直罗组未固结碎屑物中是相对分散的,尚未达到工业规模和富集成矿的丰度,而同生沉积水承担了铀从蚀源到达直罗组沉积物中的搬运工角色。

### 2.2 盆地深部含铀热流体

目前,学者们发现砂岩型铀矿床及众多铀矿点、放射性异常带常常赋存在某油气藏远景区内,与油气田、油气构造时空关系密切,铀矿化往往与油气或烃类物质伴生。鄂尔多斯盆地中部大规模天然气耗散形成了直罗组东胜铀矿区广泛发育的绿泥石、碳酸盐化及黄铁矿化和油气包裹体等<sup>[13]</sup>。一些学者还认为鄂尔多斯盆地中生代煤层和含煤岩系为铀成矿提供了包括还原性气体在内的多种还原性介质<sup>[24]</sup>。学者们普遍认为,含烃流体参与了东胜铀矿田成矿作用,不仅为铀的活化、迁移、富集创造了有利物化条件,而且为铀矿床创造了还原性保护环境<sup>[25]</sup>。

笔者也在铀矿层中发现了油气包裹体,但目前还没有发现油气包裹体共伴生铀矿物的直接证据,可以肯定的是油气充注地层,叠加改造铀矿层,形成了大范围还原环境,起到了已经形成的铀矿体免受成矿后期表生氧化水破坏。

对于盆地深部上侵的热卤水是否参与成矿问题?一些学者在东胜铀矿田铀矿层中识别出方解石、白云石、黄铁矿、黄铜矿等矿物组合,以及富矿石中的硒铅矿、硒铁矿等矿物<sup>[6,16,26]</sup>,认为盆地热流体叠加改造了铀矿层。这种观点在世界其他重要铀矿床也得到了印证,非洲尼日尔特吉达地区铀矿床存在沥青铀矿、铀石共生方解石、自然铜矿物组合<sup>[27]</sup>。

对于上述蚀变矿物组合,笔者认为如果发现脉状矿物集合体穿插含铀岩系,可证明盆地深部热流

体改造了铀矿层,但并不能确定参与了铀成矿过程。对于东胜铀矿田直罗组含矿层中的各类蚀变矿物组合,笔者认为上述矿物均是电子探针识别的分散于碎屑孔隙间的独立产出的矿物,地层建造水中的Cu、Pb、Zn、Se等元素在成岩作用下均可富集形成上述微细粒纳米级矿物,仅依电子探针和几个微量元素值,还不足以确定深部热流体改造了铀矿层,甚至为成矿贡献了铀。

据此,笔者认为盆地深部油气为铀矿层创造了巨大的还原罩,热卤水只是侵扰了铀矿层,未发现贫化和富集铀的现象,不属于主要成矿流体。

### 2.3 地层含铀建造水

从直罗组成岩过程分析,直罗组碎屑物在同生沉积完成后,即转入埋藏成岩过程,先期的同生沉积水也转变为地层封存建造水,实质上是盆地自生流体。直罗组早期沉积物在自身和上覆早白垩世沉积物压力下,逐步进入埋藏成岩过程,沉积物压实、胶结,沉积水外泄,植物碎屑炭化,微生物发酵等复杂地质作用,其中封存沉积水外溢是这个阶段的重要特征。一般认为,松散沉积物在上覆水体和沉积物的负荷作用下,自身50%~80%水分排出,巨大、持续的排水携带预富集的铀迁移。

前已述及,直罗组在同生沉积过程中预富集了巨量铀,皂火壕铀矿床直罗组原始砂体原始( $U_0$ )含量 $24.64 \times 10^{-6}$ ,现测( $U$ )含量 $4.44 \times 10^{-6}$ ,铀迁移率( $\Delta U$ )—70.12%<sup>[28]</sup>,纳岭沟铀矿直罗组非矿段原始铀含量 $41.15 \times 10^{-6}$ ,现测( $U$ )含量 $5.07 \times 10^{-6}$ ,铀迁出率—87%,铀迁入主要发生于铀矿层及其毗邻围岩,粗略估算,东胜铀矿田铀迁出量超过100万t,迁出量巨大<sup>[3]</sup>,说明东胜铀矿田直罗组同生沉积过程预富集的铀迁出量巨大。

对于大气降水在东胜铀矿田成矿过程中的作用,笔者认为其有两个途径进入直罗组,一是直罗组同生沉积过程中,大气降水与沉积物同生沉积于盆地;二是,早白垩世末,直罗组在伊盟隆起作用下整体抬升,表生成岩期开始,地层压应力减小,大气降水沿层间薄弱带、断裂及不整合面渗入。

对于前者,同生沉积水已改造成直罗组地层建造水,在铀预富集过程中起了重要作用。对于后者,大气降水是否渗入铀矿层?“(古)层间氧化带”铀成矿理论认为晚白垩世鄂尔多斯盆地北部整体抬升和地层掀斜,含氧含铀的大气降水渗入含矿层成

矿。笔者在野外地质调查中,发现直罗组含铀灰色砂岩中往往见红色、褐黄色氧化膜,说明大气降水渗入,叠加,改造了铀矿层。

大气降水是否参与铀成矿?笔者认为需要解决两个问题,一是大气降水渗入的驱动因素;二是大气降水中的铀是否到达含矿层。

大气降水渗入的驱动因素是什么?一般认为,引起盆地流体迁移的因素有重力、压力(压实)、浮力、构造应力和地震、热对流等因素。“(古)层间氧化带”认为重力因素是流体渗入的主要因素,虽然伊盟隆起、黄河断陷、泊江海子深大断裂持续活动等区域重大地质事件均可引起盆地流体的区域性迁移,致使大气降水渗入含矿层。笔者认为晚白垩世,伊盟隆起,直罗组整体抬升,地层压应力减小,可为流体渗入提供了“窗口期”。

笔者认为早白垩世末,表生成岩作用导致直罗组的地层压应力减小,为大气降水渗入含矿层提供了条件,但大气降水在重力作用下无法到达含矿层。直罗组在自身沉积物及上覆下白垩统东胜组( $K_1ds$ )压应力作用下,在逐步增大的地层压应力作用下,蚀源区来的含铀含氧水无法克服阻力渗入直罗组地层。

为此,笔者粗略计算了直罗组底部的地层压应力。通常情况下,已知1个标准大气压下水银柱高度为76 cm,据此,不难推算出1个标准大气压下水柱高度。

根据公式 $P_{\text{压力}} = \rho_{\text{密度}} \times G_{\text{重力}} \times h_{\text{深度}}$ ,在 $P$ 相等条件下,依公式 $h_{\text{水}} : h_{\text{水银}} = \rho_{\text{水银}} : \rho_{\text{水}}$ ,以及水银密度为 $13.6 \text{ g/cm}^3$ ,水的密度为 $1 \text{ g/cm}^3$ 。

水柱高度 $h_{\text{水}} = \rho_{\text{水银}} \times h_{\text{水银}} \div \rho_{\text{水}} = 13.6 \text{ g/cm}^3 \times 76 \text{ cm} \div 1 \text{ g/cm}^3 \approx 10.336 \text{ m}$ ,即1个标准大气压下水柱高度为10.336 m。

如地层厚度按300 m计算,岩石密度按 $2 \text{ g/cm}^3$ 计,直罗组底部压力可大致相当于6 079 500 Pa,如此大的压力,笔者认为,含氧含铀流体单凭重力因素,是无法渗入至直罗组内部成矿的。表生成岩期,蚀源区的含铀含氧大气降水要渗入隐伏几百米深的灰色砂岩层中,由于驱动力不足,单凭重力作用,含氧含铀流体无法渗入直罗组内部成矿。

大气降水中铀是否参与了铀成矿?笔者认为直罗组铀矿层顶板广泛发育,厚达50~150 m的灰绿色砂岩层有效屏蔽了大气降水中铀的渗入(图3)。973

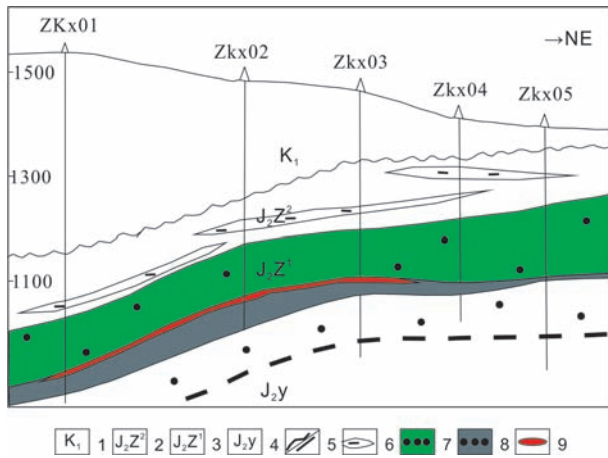


图3 东胜铀矿田纳岭沟铀矿床纵剖面示意图  
(据核工业二〇八大队<sup>①</sup>)

Fig.3 The longitudinal profile of Nalinggou uranium deposit in Dongsheng orefield (after CNNC No.208 Geological Party)

1. 下白垩统; 2. 直罗组上段; 3. 直罗组下段; 4. 延安组; 5. 地层界线; 6. 泥岩; 7. 绿色砂岩; 8. 灰色砂岩; 9. 铀矿体

团队模拟实验了东胜铀矿田灰绿色砂岩的还原能力<sup>[29]</sup>。实验采用示波极谱仪(JP-2C型)、紫外可见分光光度计(Evolution300型),采用示波极谱法对U<sup>+6</sup>测定,分光光度法对U<sup>+4</sup>验证。

样品采集纳岭沟铀矿床北部塔然高勒地段,粉碎至1 mm,过60目筛,绿色细砂岩(20 g)、灰绿色中砂岩(20 g, 45×10<sup>-6</sup> U)、灰色中粗砂岩(20 g)自上而下分层装入模拟柱,自上加入含有1%亚铁离子的水溶液(pH=3),过滤24 h,滤液中铀含量由81.88 ng/ml减少为3.61 ng/ml。

在灰绿色砂岩的浸取液中测得亚铁离子从有n×10<sup>-6</sup>到10 n×10<sup>-6</sup>,含量不等;在模拟柱实验中,U<sup>+6</sup>流经此种砂岩层后,U<sup>+6</sup>含量明显降低。实验同时发现,在酸性条件下,黄铁矿、钛铁矿对U<sup>+6</sup>的还原性与灰绿色砂岩层对U<sup>+6</sup>的还原性相比,也是很微弱的,说明灰绿色砂岩具有有效屏蔽大气降水中的铀成矿的作用。

关于东胜铀矿田直罗组绿色砂岩成因,学者或认为是由于鄂尔多斯盆地中部逸散的油气“二次还原”所致<sup>[6,15,20]</sup>,或认为是盆地深部上侵的热流体还原作用的结果<sup>[30]</sup>。

近年来,笔者研究发现,包括东胜铀矿田在内的鄂尔多斯盆地北部,从盆地西缘宁夏至东缘的神山沟地区,中侏罗统直罗组中下部广泛分布一套绿色

砂(泥)岩,厚度n m~n×10<sup>2</sup> m不等,层位稳定且连续。绿色砂(泥)岩与围岩红色砂岩、灰色砂岩整合接触(图3),绿色砂岩碎屑表面覆盖有一层厚度极薄,成分复杂的黏土膜,扫描电镜显示黏土薄膜成分有蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石,以蒙脱石居多。纳岭沟矿床东部钻孔(WTN7)的绿色砂岩、绿色泥岩、红色砂岩稀土元素配分曲线吻合较好(图4),略右倾,轻重稀土分馏不明显,具同生沉积-成岩作用特征。

同生沉积期大气降水预富集直罗组巨量的铀;限于地层压应力和油气还原作用,成岩期后渗入地下水的铀难于到达含矿层,同生沉积成岩的绿色砂岩屏蔽了表生铀的渗入改造;盆地深部上侵的油气和卤水参与成矿证据不足;成岩作用下,沉积建造水将预富集的铀迁移、渗透邻近渗透性较好,具有还原能力的灰色砂岩中富集成矿<sup>[31]</sup>。如果预富集铀量足够大,流体渗透时间足够长,完全可以形成富大铀矿体。笔者认为直罗组沉积建造水是主要成矿流体角色。

### 3 成矿时期

成矿定年一直是砂岩型铀矿成矿作用研究的重要内容和难点之一。关于东胜铀矿田成矿定年,前人采用铀矿石样品 U-Ra 平衡系数修正样品的铀含量,再进行 U-Pb 等时线拟合方法,东胜皂火壕地段铀成矿年龄为:(177±16) Ma、(120±11) Ma、(85±2) Ma、(77±6) Ma、(20±2) Ma、(8±1) Ma,将铀成矿时代置于早白垩世—晚白垩世、新近纪中新世—上新世<sup>[32,33]</sup>,以及 HJQ 地区 106.4 Ma、66.8 Ma、64.7 Ma、50.8 Ma、35.1 Ma、24.8 Ma、16.3 Ma<sup>[34]</sup>,此后,一些学者仍沿用此方法,获得大营铀矿床(128.2±4.2) Ma、(54.6±1.8) Ma,纳岭沟铀矿床(84±1) Ma、(61.7±1.8) Ma、(38.1±3.9) Ma 等一批与之接近的测年数据<sup>[35]</sup>。

从理论上讲,上述测年方法采用矿石全岩 U-Ra 平衡修正和 U-Pb 同位素测年,但 U-Pb 同位素测年方法要求有两个重要前提:

- (1) 铀矿石 U-Pb 同位素体系封闭;
- (2) 铀矿体中同位素实现均一化。

由于含矿砂体中流体的持续活动性,成矿过程属开放—半开放体系,不能保证成矿过程中 U-Pb 同位

<sup>①</sup>苗爱生,王贵,戴明建,等,内蒙古达拉特旗纳岭沟铀矿 N12-N28 线详查报告,2014,核工业二〇八大队。

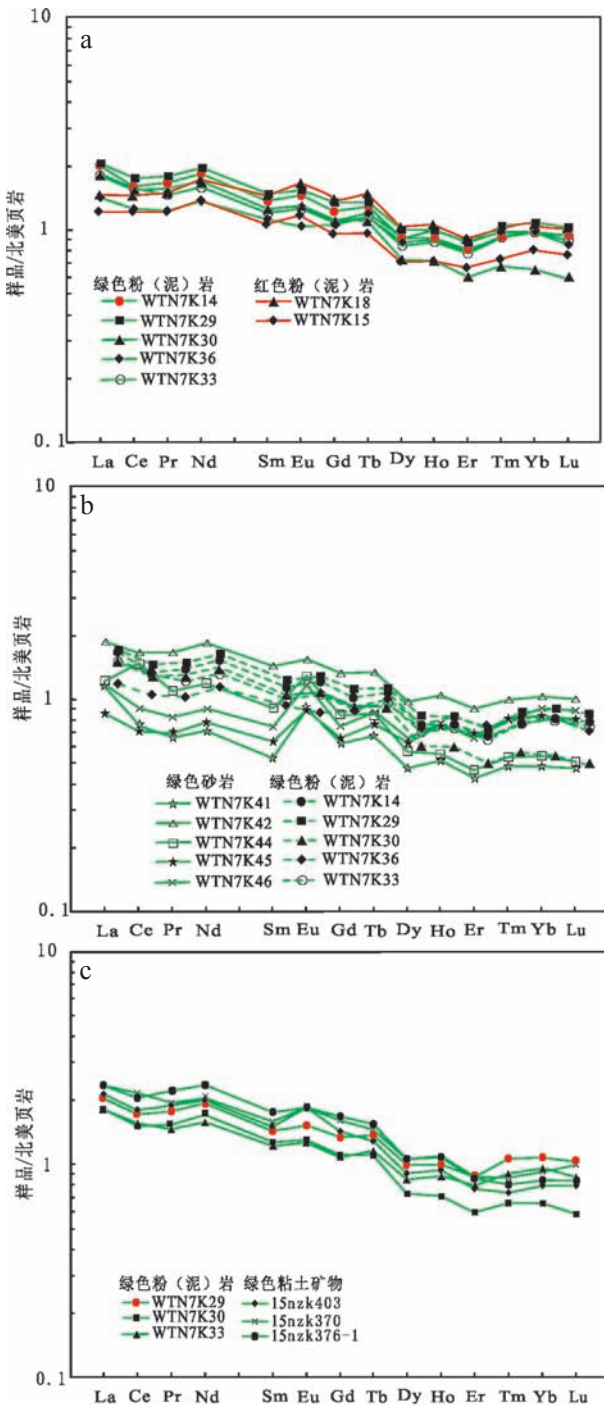


图4 钻孔(WTN7)直罗组红色-绿色粉(泥)岩(a)、绿色砂岩-泥岩(b)、绿色黏土矿物-岩(c)稀土元素配分曲线特征  
Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns for (a) green and red siltstone/mudstone, (b) green sandstone/mudstone, and (c) green clay minerals/mudstone of drill(WTN7) from Zhiluo Formation

素体系封闭,同一砂体中同位素也难以实现均一化。直罗组含铀岩石疏松,成岩程度低,成矿环境的开放程度难以满足U-Pb同位素测年技术条件。Pb含量偏低,变化幅度大,前人测年工作中发现Pb含量

3.27%~21.68%<sup>[30]</sup>,PbO含量0.08%~0.34%<sup>[32]</sup>。沥青铀矿、铀石等铀矿物结晶差,粒度细小,一般 $n\ \mu\text{m} \sim 10 \times n\ \mu\text{m}$ ,难以挑选,无法实现直接精确定年。同时,含铀岩系流体易受盆地多期构造事件影响,铀的主要价态 $\text{U}^{4+}$ 和 $\text{U}^{6+}$ 对所处流体环境的物理化学条件敏感,可相互转化。

由于目前测试技术和U-Pb同位素测年条件,上述数据不能科学反映铀成矿时代。如何确定砂岩型铀矿成矿时代?笔者认为以直罗组含铀岩系所经历的地质事件为背景,结合成岩过程和铀矿物共生关系、生成顺序,可大致确定砂岩型铀矿成矿过程,采用“成矿期”更能反映砂岩型铀“水成矿”、“易聚易散”的特点。

简单认为,砂岩型铀成矿期就是在某一含铀岩系长期、持续的受同一成岩动力作用和相似物理化学条件影响下,铀逐步富集成矿的过程。含铀岩系地质演化过程中某些重大地质事件是约束成矿期的主要因素。

### 3.1 主要地质事件

对于直罗组沉积成岩期确定,前人据直罗组含中侏罗世双壳类*Ferganoconcha sp.*将其归属为中侏罗世<sup>[12]</sup>。对比邻区宁武盆地中侏罗统云岗组(相当直罗组)顶部凝灰质碳酸盐岩年龄( $160.6 \pm 0.55\ \text{Ma}$ ),底部砾岩沉积时间 $168\ \text{Ma}$ <sup>[36]</sup>,笔者将直罗组同生沉积期定为 $168 \sim 160.6\ \text{Ma}$ ,埋藏成岩期为自中侏罗世中期( $160.6\ \text{Ma}$ )至早白垩世东胜组( $K_1ds$ )沉积结束期(约 $100\ \text{Ma}$ )。

早白垩世末期,受区域构造运动影响,鄂尔多斯盆地整体抬升,北部伊盟隆起,直罗组进入后生和表生成岩期。由于直罗组地层压应力的减小和泊江海子深大断裂的活化,晚白垩世初(约 $100\ \text{Ma}$ ),盆地中部油气大规模向北逸散,充注直罗组,在直罗组地层中下部形成大量油气包裹体,营造了大范围的弱还原环境<sup>[37]</sup>。同时,直罗组压应力的减小也为盆地北部玄武岩( $126.2\ \text{Ma}$ )侵入东胜组( $K_1ds$ )<sup>[38]</sup>,盆地深部热卤水上侵创造了条件,形成了系列方解石脉和胶状黄铁矿。

### 3.2 铀矿物共生关系

东胜铀矿田铀存在形式主要为还原态(铀矿物)和吸附态(铀离子),其中铀矿物赋存状态及其与载体的共生关系、生成顺序可在一定程度上反映铀矿物形成时代。铀石呈不规则状围绕炭屑、微粒状黄

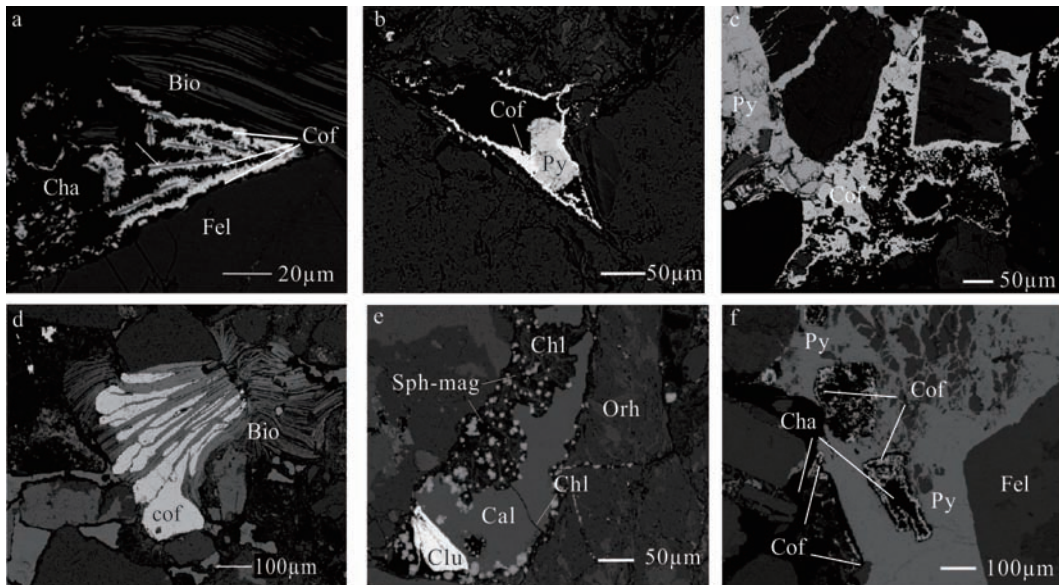


图5 纳岭沟铀矿床铀石共生矿物组合

Fig.5 Paragenetic mineral assemblage in the Nalinggou uranium deposit

Bio-biotite: 黑云母; Cal-calcite: 方解石; Cha-charcoal: 炭屑; Chl-chlorite: 绿泥石; Clu-clausthalite: 硒铅矿?; Cof-coffinite: 铀石; Fel-feldspar: 长石; Orh-Orthoclase: 正长石; Py-pyrite: 胶状黄铁矿; Spherical magnetite: 球状磁铁矿; 图5a:铀石呈放射状、羽状产于黑云母和长石碎屑间炭屑中;图5b:铀石不规则状环黄铁矿产出;图5c:铀石呈星点状分散于炭屑中,黄铁矿周边未见铀矿物;图5d:铀石不规则状产于绿泥石化黑云母解理缝间;图5e:球状磁铁矿弥散于孔隙间绿泥石中,被方解石细脉、硒铅矿侵入;图5f:胶状黄铁矿肢解含铀炭屑

铁矿分布(图5a~5c),说明铀石形成于炭屑和黄铁矿之后;铀石呈微透镜状产于黑云母解理缝中(图5d),说明铀石形成于黑云母绿泥石化之后(图5d)。

细脉状绿泥石、方解石侵入孔隙(图5e),说明铀矿层受到热流体改造,但未发现共生铀矿物;脉状黄铁矿肢解了含铀炭屑(图5f),说明铀石形成早于胶状黄铁矿化。总之,东胜铀矿田成矿时期应晚于炭屑煤化期、微粒状黄铁矿结晶期和黑云母绿泥石化期,早于胶状黄铁矿结晶期。

纳岭沟矿床下部炭屑(褐煤)镜质体反射率( $R_o$ ) 0.309%~0.514%,属早成岩B期,局部达中成岩A期。以假定地层埋深最大对应 $R_o$ 最大值的原理,认为直罗组最大埋深为早白垩世末东胜组( $K_1ds$ )沉积结束,区域开始抬升时,直罗组开始进入表生成岩期,也是炭屑煤化最大期的结束。

对于胶状黄铁矿,笔者认为可能是表生成岩期盆地深部热卤水作用的产物,时代应为晚白垩世。

据此,笔者认为东胜铀矿田成矿期应早于大规模油气充注时间(晚白垩世,约100 Ma),晚于直罗组底部沉积时间(168 Ma),属同生沉积-早成岩B期,即中侏罗世中期(160.6 Ma)至早白垩世末期(约100 Ma),这一时期正是直罗组沉积物埋藏成岩阶段。

结合前述地质事件,笔者认为东胜铀矿田成矿期应为早白垩世末期。

## 4 结论

(1) 古元古代孔兹岩带为东胜铀矿田直罗组蚀源区。中侏罗世鄂尔多斯地块北部出露的古元古代孔兹岩带具有为东胜铀矿田中侏罗统直罗组提供沉积建造的充分必要条件,属直罗组最重要蚀源区之一。

(2) 直罗组预富集铀为东胜铀矿田主要铀源。直罗组在中侏罗统同生沉积过程中预富集了大量离子、络合离子状态的铀,为铀成矿提供了直接和主要铀源。

(3) 直罗组同生沉积建造水为东胜铀矿田主要成矿流体。埋藏成岩作用下,沉积建造水受压沿层间疏松岩层外溢,将预富集的迁移至含炭屑、黄铁矿等还原介质的灰色砂岩中,成为铀成矿的主要流体。

(4) 成矿期处于晚侏罗世至早白垩世末。晚侏罗世-早白垩世末,早成岩过程中,直罗组预富集的铀随自身建造水迁移、外溢完成了铀超常富集成矿过程。晚白垩世充注的大规模油气屏蔽了大气降水的改造。

## 参考文献:

- [1] 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 等. 中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积-构造背景综合分析[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 189-205.
- [2] 金若时, 程银行, 李建国, 等. 中国北方晚中生代陆相盆地红-黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. 中国地质, 2017, 44(2): 205-223.
- [3] 冯晓曦, 金若时, 司马献章, 等. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿田示踪及其地质意义. 中国地质, 2017, 44(5): 608-612.
- [4] 陈印, 冯晓曦, 陈路路, 等. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组内碎屑锆石和铀矿物赋存形式简析及其对铀源的指示[J]. 中国地质, 2017, 44(4): 279-295.
- [5] 王盟, 罗静兰, 李杪, 等. 鄂尔多斯盆地东胜地区砂岩型铀矿源区及其构造背景分析-来自碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素的证据[J]. 岩石学报, 2012, 29(8): 2746-2758.
- [6] 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 等. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿叠合成矿模式[J]. 铀矿地质, 2009, 25(2): 65-71.
- [7] 赵海军, 杨敬, 王如意, 等. 内蒙古纳岭沟铀矿床地浸采铀试验监测井设置支行及下步设想[J]. 铀矿冶, 2017, 36(增): 66-74.
- [8] 钟焱, 陈雅丽, 翟明国, 等. 华北克拉通西部古元古代孔兹岩系的地层对比、岩相古地理特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2016, 32(3): 713-726.
- [9] 吴昌华, 李惠民, 钟长汀, 等. 内蒙古黄土窑孔兹岩系的锆石与金红石年龄研究[J]. 地质论评, 1998, 44(6): 618-626.
- [10] 李黎明, 曾佐勋, 陆彦俊, 等. 孔兹岩系一贺兰山中段赵池沟岩组碎屑锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 科学通报, 2014, 59(7): 593-604.
- [11] 蔡佳, 刘福来, 刘平华, 等. 内蒙古孔兹岩带乌拉山-大青山地区古元古代孔兹岩系年代学研究[J]. 岩石学报, 2015, 31(10): 3081-3106.
- [12] 孙立新, 张云, 张天福, 等. 鄂尔多斯北部侏罗纪延安组、直罗组孢粉化石及其古气候意义[J]. 地学前缘, 2017, 24(1): 32-51.
- [13] 吴柏林. 中国西北地区中生代盆地砂岩型铀矿地质与成矿作用[D]. 西安: 西北大学地质学系, 2005.
- [14] 张金带. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展[J]. 铀矿地质, 2016, 32(6): 321-331.
- [15] 彭云彪, 陈安平, 杨建新. 砂岩型铀矿理论创新与找矿新突破[J]. 中国核工业, 2017, 40-41.
- [16] 张复新, 乔海明, 贾恒. 内蒙古东胜砂岩型铀矿床形成条件与成矿作用[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 733-739.
- [17] 柳益群, 冯杓, 杨仁超, 等. 2006. 鄂尔多斯盆地东胜地区砂岩型铀矿成因探讨[J]. 地质学报, 80(5): 761-767.
- [18] 向伟东, 方锡珩, 李田港, 等. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿床成矿特征与成矿模式[J]. 铀矿地质, 2006, 22(5): 257-265.
- [19] 樊爱萍. 鄂尔多斯东胜铀矿区侏罗系成岩作用的成矿约束[D]. 西安: 西北大学博士学位论文, 2007, 1-175.
- [20] 苗爱生, 焦养泉, 常宝成, 等. 鄂尔多斯盆地东北部东胜铀矿床古层间氧化带精细解剖[J]. 地质科技情报, 2010, 29(3): 57-61.
- [21] 李西得, 易超, 高贺伟, 等. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组古层间氧化带形成机制探讨[J]. 现代地质, 2016, 30(4): 739-747.
- [22] Kathy T, Rojer B. Uranium depositional controls at the Prairie at Flats surficial uranium deposit, Summerland, British Columbia[J]. Environmental Geology, 2002, 40: 1242-1251.
- [23] Bonales LJ, Menor C, Cobos J. Study of the alteration products of a natural uraninite by Raman Spectroscopy[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 462: 296-303.
- [24] 侯惠群, 李言瑞, 刘洪军, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组有机质特征及与铀成矿关系[J]. 地质学报, 2016, 90(12): 3367-3374.
- [25] 彭云彪, 陈安平, 方锡珩, 等. 东胜砂岩型铀矿床中烃类流体与成矿关系研究[J]. 地球化学, 2007, 36(3): 267-274.
- [26] 陈超, 刘洪军, 侯惠群, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组黄铁矿与砂岩型铀矿化关系研究[J]. 地质学报, 2016, (90) 12: 3375-3380.
- [27] 聂逢君, 严兆彬, 林双幸. 尼日尔特吉达地区铀成矿作用与预测[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-145.
- [28] 夏毓亮. 鄂尔多斯盆地东胜地区直罗组砂体铀的预富集与成矿[J]. 世界核地质科学, 2005, 22(4): 187-191.
- [29] 张莉娟, 安树清, 徐铁民, 等. 鄂尔多斯砂岩型铀矿床中灰绿色砂岩还原能力影响因素研究[J]. 岩矿测试, 2018, 37(4): 396-403.
- [30] 夏菲, 孟华, 聂逢君, 等. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床绿泥石特征及地质意义[J]. 地质学报, 90(12): 3473-3482.
- [31] 李胜祥, 欧光习, 蔡煌琦, 等. 盆地流体与铀成矿作用[J]. 铀矿地质, 2005, 22(1): 24-30.
- [32] 夏毓亮, 刘汉彬, 林锦荣, 等. 中国北方主要产铀盆地砂岩铀矿成矿年代学及成矿铀源研究[J]. 中国核科技报, 2004, (2): 77-87.
- [33] 夏毓亮. U-Pb 同位素示踪砂岩型铀矿的成矿作用[J]. 铀矿地质, 2015, 31(5): 497-501.
- [34] 宋子升, 章志明, 梁秋明. 鄂尔多斯盆地北部 HJQ 砂岩型铀矿电子探针测定成矿时代的探讨[J]. 地下水, 2013, 35(3): 185-188.
- [35] 郭虎科, 程铁红, 王小龙, 等. 鄂尔多斯盆地东北部东胜铀矿田砂岩型铀矿成矿年龄及分期性研究[J]. 西部资源, 2017, (5): 049-050.
- [36] 李振宏, 董树文, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地中-晚侏罗世构造事件的沉积响应[J]. 地球学报, 2015, 36(1): 22-30.
- [37] 吴柏林, 魏安军, 胡亮, 等. 油气耗散作用及其成岩成矿效应: 进展、认识与展望[J]. 地质论评, 2014, 60(6): 1199-1211.
- [38] 邹和平, 张珂, 李刚. 鄂尔多斯地块早白垩世构造-热事件: 杭锦旗玄武岩的 Ar-Ar 年代学证据[J]. 大地质构造与成矿学, 2008, 32(3): 360-364.