

东胜砂岩型铀矿床中烃类流体与成矿关系研究

彭云彪^{1,2*}, 陈安平², 方锡珩³, 欧光习³, 解启来⁴

(1. 中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 核工业地质局 208 大队, 内蒙古 包头 014040; 3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 4. 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要: 东胜砂岩型铀矿床定位于灰绿色岩石与灰色岩石的接触部位, 主要受古层间氧化带控制。矿体以板状为主。铀主要以铀矿物和吸附铀形式存在。铀矿物主要为铀石, UO_2 含量为 46.72% ~ 74.60%。吸附铀及 U^{6+} 、 U^{4+} 在铀矿床的不同地段所占比例存在明显差别。该铀矿床与世界上其他砂岩型铀矿床在成因上具有明显的不同, 表现在矿床特征、岩石地球化学环境及控矿因素等方面具有很强的特殊性。晚侏罗世 - 早白垩世的构造热事件形成的含烃热流体参与了成矿作用, 不仅为铀的活化、迁移、富集提供了有利条件, 而且使铀矿床完全隐伏在还原环境中, 对矿床的保存起到了重要作用。由烃类流体产生的后生还原作用所形成的灰绿色砂岩可作为铀矿床的岩石地球化学勘查标志。

关键词: 砂岩型铀矿床; 岩石地球化学特征; 烃类流体; 东胜地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P595; P611

文献标识码: A

文章编号: 0379-1726(2007)03-0267-08

Relationship between hydrocarbon-containing fluid and metallogenesis in Dongsheng sandstone-type uranium deposit

PENG Yun-biao^{1,2*}, CHEN An-ping², FANG Xi-heng³, OU Guang-xi³ and XIE Qi-lai⁴

1. Faculty of Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. No. 208 Geologic Party, Bureau of Geology, CNNC, Baotou 014040, China;

3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC, Beijing 100029, China;

4. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: Dongsheng sandstone-type uranium deposit is located at the contact zone of grayish green sandstones and gray sandstones in north Ordos Basin, which is controlled basically by paleo-interlayer oxidation zone. The uranium deposit is generally platy and uranium mainly exists as uranium-bearing minerals (coffinite etc.) and adsorbed uranium, with UO_2 contents of 46.72% - 74.60%. Proportions of the adsorbed uranium, U^{6+} and U^{4+} vary from section to section in this deposit. Based on the characteristics of ore deposit, lithogeochemical environment and ore-controlling factor, the origin of the uranium deposit is different from that of other sandstone-type uranium deposit in the world. Hydrocarbons-containing heat fluid from Late Jurassic to Early Cretaceous tectono-thermal events participated in ore-forming processes. The heat fluid not only contributed to the activation, migration and enrichment of uranium, but also provided a reducing environment for this uranium deposit, and played an important role in the conservancy of the deposit. The gray and grayish green sandstones formed by hysterogenic reduction can be used as the lithogeochemical markers for exploration of uranium deposit.

Key words: sandstone-type uranium deposit; lithogeochemical characteristics; hydrocarbons-containing fluid; Dongsheng area; Ordos Basin

收稿日期(Received): 2006-10-31; 改回日期(Revised): 2007-01-29; 接受日期(Accepted): 2007-03-19

基金项目: 国家计划铀矿地质项目(内蒙古东胜地区 1: 25 万区域铀资源评价, No. 200108)。

作者简介: 彭云彪(1965-), 男, 教授级高级工程师、博士研究生, 地球化学专业。

* 通讯作者(Corresponding author): PENG Yun-biao, E-mail: 208y@bog.com.cn, Tel: +86-472-5306119

PENG Yun-biao et al.: Relationship between hydrocarbon-containing fluid and metallogenesis in Dongsheng uranium deposit

0 引言

前苏联和美国对砂岩型铀矿床的研究程度比较高,提出了“次造山带控矿理论”^[1]、“层间渗入成矿理论”^[2]和“水成铀矿理论”^[3],由于这些成矿理论的指导,我国在伊犁盆地和吐哈盆地取得了铀矿勘查的重大成果。但是,这些成矿理论是在一定地质背景上建立起来的,在对鄂尔多斯盆地铀成矿地质条件研究及勘查中并不适用。研究表明,鄂尔多斯盆地并不发育次造山带,现代也不具有层间渗入的特点,但由于该盆地蕴藏着丰富的石油、天然气和煤炭等能源矿产^[4],产生的含烃热流体为铀成矿提供了

特殊的地球化学环境,从而形成了古层间氧化带型砂岩铀矿床。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北板块西部,属华北地台的一部分,面积为 $23 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在晚三叠世鄂尔多斯盆地从华北地块分化出来,开始了中生代盆地的沉积序幕,发育形成大型内陆坳陷盆地。新生代盆地整体隆升,断陷特征明显。

东胜砂岩型铀矿床位于鄂尔多斯盆地北部东胜地区(图1),构造上属于伊陕单斜区的东胜-靖边单斜。该单斜占据了盆地北部的绝大部分地区,经过

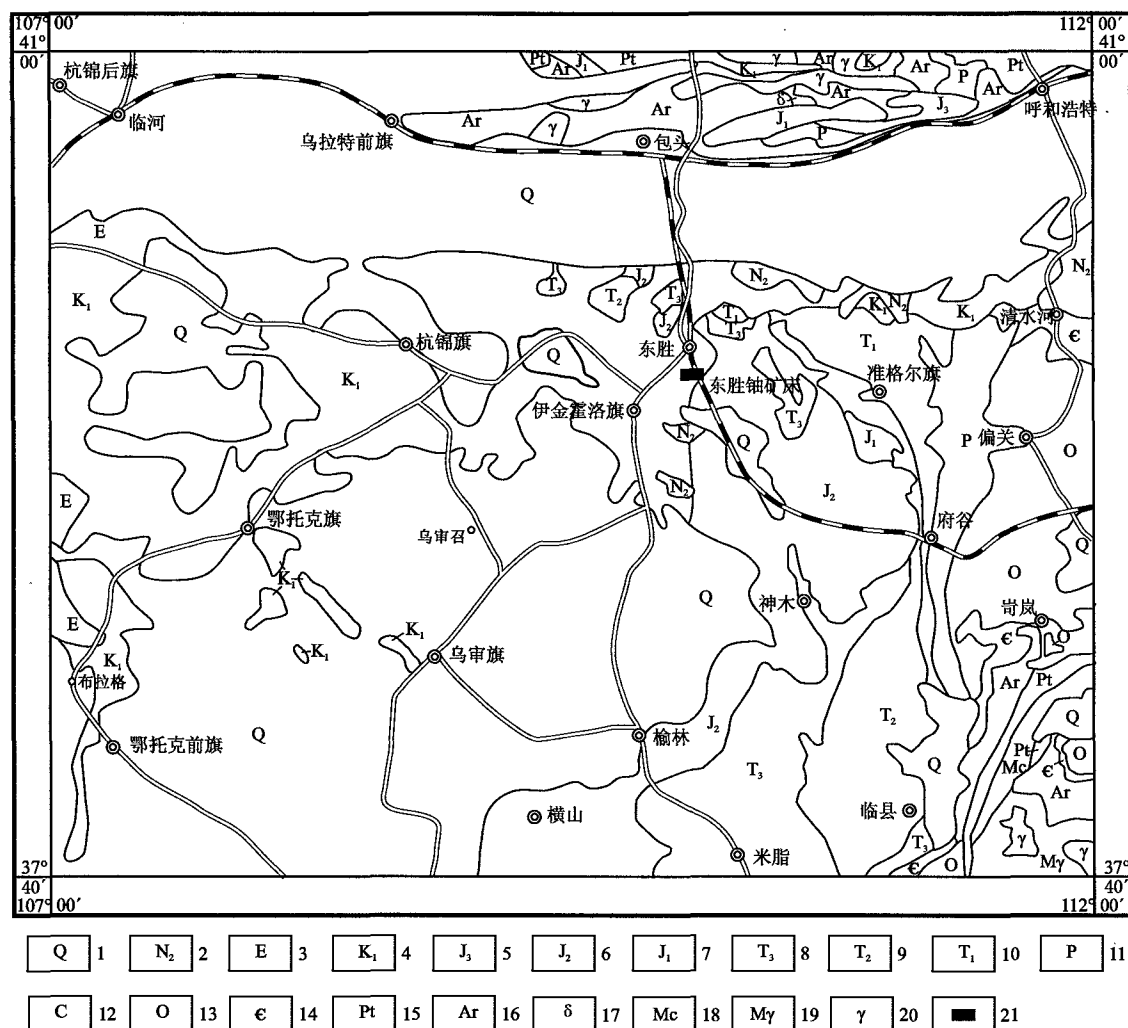


图1 东胜地区区域地质图

Fig. 1 Schematic regional geological map of Dongsheng area

1—第四系; 2—新近系; 3—古近系; 4—下白垩统; 5—上侏罗统; 6—中侏罗统; 7—下侏罗统; 8—上三叠统; 9—中三叠统; 10—下三叠统; 11—二叠系; 12—石炭系; 13—奥陶系; 14—寒武系; 15—元古宇; 16—太古宇; 17—闪长岩; 18—赤坚岭杂岩; 19—混合花岗岩; 20—花岗岩; 21—东胜铀矿床。

1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Paleogene; 4—Lower Cretaceous; 5—Upper Jurassic; 6—Middle Jurassic; 7—Lower Jurassic; 8—Upper Triassic; 9—Middle Triassic; 10—Lower Triassic; 11—Permian; 12—Carboniferous; 13—Ordovician; 14—Cambrian; 15—Proterozoic; 16—Archean; 17—diorite; 18—Chijianling complex; 19—migmatitic granite; 20—granite; 21—Dongsheng uranium deposit.

加里东和早海西运动成为隆起区,北部与西部最高,隆起高部位缺失下古生界,上古生界由东向西超覆。印支运动早期,主要表现为隆起背景上的北高南低,造成三叠系延长组北粗南细和北薄南厚的沉积特征。印支运动晚期,伊陕单斜区继续隆升,造成延长组顶部遭受剥蚀和侏罗系富县组沉积间断。从侏罗纪延安期开始进入稳定沉积(成煤)阶段^[5],并且总体上向 SW 倾斜,呈平缓斜坡。伊陕单斜区这种长期的稳定性为侏罗系延安组和直罗组河流相砂体发育和稳定展布创造了极为有利的构造条件,为含铀流体的运移和铀的富集提供了广阔的空间。

2 矿床特征

铀矿化产于中侏罗统直罗组(J_{2z})下部辫状河沉积砂体中,岩性主要为中-粗粒、中-细粒砂岩,以泥质胶结为主,固结程度低。砂体呈 NW-SE 向带状展布,在剖面上为单层,由多个从粗砂岩到细砂岩的正韵律层叠置而成,为相对稳定水动力环境下多期次河道的复合砂体。河道砂体厚度基本在 20~50 m 之间,隔水顶板为泥岩、泥质粉砂岩,隔水底板为延安组湖沼相泥岩及炭质泥岩,二者分布较稳定,构成了良好的泥-砂-泥结构,有利于层间氧化带的形成和稳定展布。

矿体平面形态基本呈 NW-SE 带状展布,与河道砂体的展布方向一致,个别地段为不规则饼状,连续性好;剖面形态以板状为主,少数为卷状和透镜状。

矿体下翼为平整的板状,连续性好,主要发育于含矿砂体的中下部,呈水平状,其尾部具有薄而长的特点。矿体上翼呈透镜状,靠近顶板产出,厚度小,连续性差。主矿体总体上呈现为由翼部向卷头部位逐渐收敛、变厚,最后合并为卷头矿体,呈楔形尖灭(图 2)。

3 样品与实验条件

铀矿石的成分鉴定主要在电子探针下进行,所用仪器为 JXA-8600 电子探针分析仪。矿石样品中 Fe³⁺和 Fe²⁺的测定方法参阅国家标准 GB/T 14506.5-93 和 GB/T 14506.14-93。对铀矿床不同部位的矿石进行选择性地溶浸实验,以研究铀的赋存形式。方解石胶结物中烃类包裹体的荧光观察使用 Leica 荧光显微镜,100 W 汞灯,激发波长为 420~490 nm。利用 Leica 显微镜在透射光和偏光下观测流体包裹体的形态与特征。

在研究铀矿化与烃类流体关系时,需将砂岩胶结物中的烃类释放出来,具体做法是:(1)将样品碎至 200 目,并用氯仿抽提 48 h,以除去吸附烃;(2)使用 6 mol/L 盐酸酸解已抽提的粉末样品,收集所释放的 C₁~C₅ 气态烃,进行定量;(3)利用氯仿抽提盐酸酸解后的残渣(48 h),将所得抽提物氯仿沥青“A”进行柱层析得到饱和烃,对饱和烃进行气相色谱分析。气相色谱条件:Varian-3700 气相色谱仪,DB-5 石英弹性毛细管色谱柱(30 m×0.24 mm),FID 检测

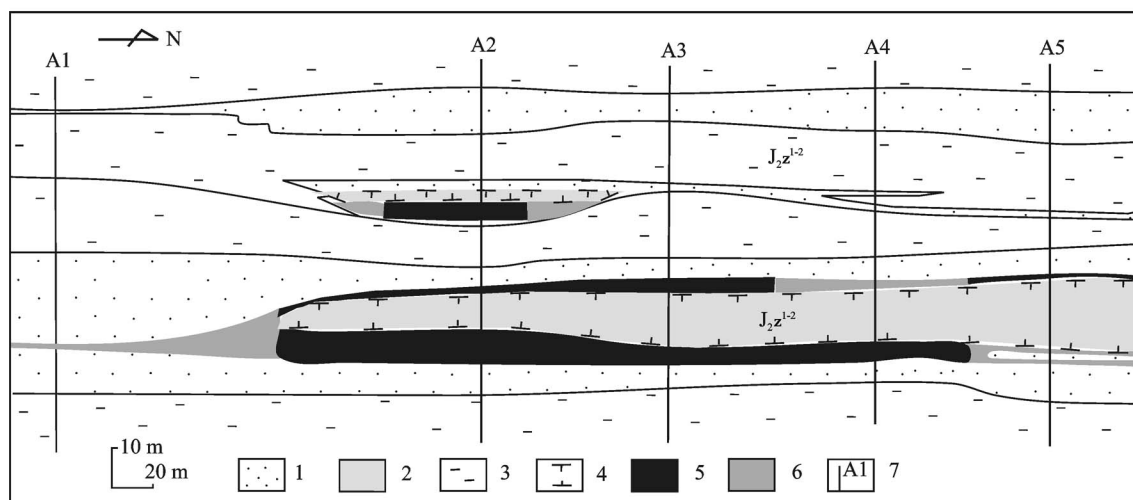


图 2 东胜铀矿床 147 号勘探线地质剖面示意图

Fig. 2 Schematic profile of No. 147 prospecting line in Dongsheng uranium deposit

1 - 灰色砂岩; 2 - 灰绿色砂岩; 3 - 泥岩; 4 - 层间氧化带前缘线; 5 - 工业矿体; 6 - 矿化体; 7 - 钻孔位置及编号。
1 - gray sandstone; 2 - grayish green sandstone; 3 - mudstone; 4 - front line of interlayer oxidation zone; 5 - industrial orebody; 6 - mineralized orebody; 7 - drill hole and its serial number.

器, N₂ 为载气。初始温度为 80 ℃, 恒温 2 min, 以 4 ℃/min 的速率程序升温至 280 ℃, 恒温 25 min。

4 矿石地球化学特征

铀矿化的分布与不同的岩石地球化学类型具有明显的空间关系(图 2)。矿体主要产出在与灰绿色岩石尖灭部位相邻的灰色岩石中, 在平面上沿灰绿色岩石尖灭线呈带状展布; 在剖面上主矿体位于灰绿色岩石下部的灰色岩石中(下翼矿体), 部分矿体位于灰绿色岩石前缘的灰色岩石中(卷头矿体), 少数呈透镜状矿体位于灰绿色岩石上部的灰色岩石中(上翼矿体), 个别位于灰绿色岩石中。

4.1 铀矿石主要成分

矿石主要为较疏松的浅-深灰色长石砂岩, 少数为岩屑长石砂岩和长石石英砂岩。矿石以接触式胶结为主, 少见孔隙式胶结。胶结物含量较低, 一般小于 10%。填隙物以水云母为主, 其次为方解石、黄铁矿、针铁矿和褐铁矿。

电子探针分析结果表明(表 1), 东胜铀矿床中的铀矿物主要为铀石, 并见少量钛铀矿。铀石中 UO₂ 含量为 53.75% ~ 74.60%, SiO₂ 约 10.71% ~ 17.33%, 此外还有极少量的 Na、Ca、Mg、K、Al、Fe、Ti、Pb、V、S、Se、Th, 故定名为铀石。铀矿物颗粒非常细小(多为 0. n ~ n μm), 镜下鉴定较为困难。表 1 中 D-4、D-51 等样品有几个测点的总量较低, 其原因可能是铀矿物的结构比较疏松和含水量较高, 电子探针测定的计数率低的缘故。矿石中大多数铀石呈胶状结构, 局部呈柱状或针状, 多与黄铁矿伴生, 围绕黄铁矿边缘产出, 可见部分铀石单独呈细脉状产于碎屑颗粒之间, 见图 3。

4.2 Fe 含量

东胜铀矿床中不同类型砂岩的含铁量见表 2。灰色砂岩中 Fe³⁺ 含量高于 Fe²⁺ 含量, Fe³⁺/Fe²⁺ 比值为 1.28, 表现为氧化

表 1 铀石电子探针分析结果 (%)

Table 1 Electron probe analytical results (%) of the uranium ores (coffinite)																				
样号	测点数	UO ₂	ThO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	TiO ₂	PbO	V ₂ O ₅	P ₂ O ₅	SO ₂	SeO ₂	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	总计
D-4	1	73.40		2.43	0.24			1.01	15.19	0.18			0.75	1.29		0.49				94.98
D-4	1	74.60		2.47	0.33			0.79	15.07	0.11			0.55	1.31	0.25	0.44				95.92
D-4	3	53.75		1.01		0.12		0.66	10.71	0.06		0.07	0.39	1.00	0.31					68.08
D-5	3	68.01	0.41	1.98	0.10	0.41		1.02	14.28	0.07			0.97	1.33	0.36	0.15				89.09
D-5	3	68.44	0.31	1.16	0.36			1.07	14.36	0.32	0.32	0.53	0.79	1.04	0.87	0.71				90.28
D-5	2	55.95		2.27	0.67	0.22		1.91	13.07	1.15	4.94		1.09	1.28	0.43	0.19				83.17
D-31	3	69.11	0.23	1.98	0.20	0.15	0.18	1.21	15.19				3.06	0.57	0.18	0.52				92.58
D-31	2	58.31	0.44	2.02	0.34		0.77	1.17	14.42		0.48	1.14	3.93	1.26	0.23	0.88				85.59
D-31	2	66.61	0.23	2.16	0.29			1.28	15.28	0.15		0.27	4.27	0.61	0.09	0.60				91.84
D-31	3	68.39	0.12	2.57	0.09	0.09	0.09	1.46	16.27	0.12		0.06	1.94	0.80	0.03	0.16				92.10
D-31	3	67.78		2.19	0.26			1.39	14.45	0.38	0.03		1.30	0.52	0.14					88.44
D-48	5	62.39	0.13	2.50	0.27			1.13	14.35	0.91	0.44	0.22		2.16	0.64	0.36			1.88	87.38
D-51	2	62.83		2.68	0.31			1.29	13.61	0.37	4.20		0.35	1.21		0.53				87.38
D-51	1	64.54		0.55				1.01	17.33	4.58	0.45	0.42		1.04	3.01	0.35				93.28
D-51	2	56.80	0.48	1.23	0.45	0.13		1.04	13.06		0.45		0.06	1.07	0.41	0.24				75.42
DW-005	3	70.63	0.48	1.73	0.29		0.25	1.19	15.34	0.70	0.05	0.18	0.13	1.02	0.30	0.43				92.72
DW-005	3	67.67	0.24	2.30	0.23		0.06	1.38	16.82	0.56	0.17	0.08	0.18	1.24	0.17					91.08
FW-008	3	65.86		0.87	0.10		0.08	1.19	15.01	0.11	2.40	0.15		0.48	0.03	0.24				86.46
FW-008	3	63.44		1.72	0.14			1.36	16.84	1.43	0.69	0.15		0.79	1.00	0.54				88.10
DW-009	2	72.51		1.99	0.08		0.09	1.22	16.60	0.47			0.19	0.62	0.60					94.20

注: 分析单位为核工业北京地质研究院测试中心。

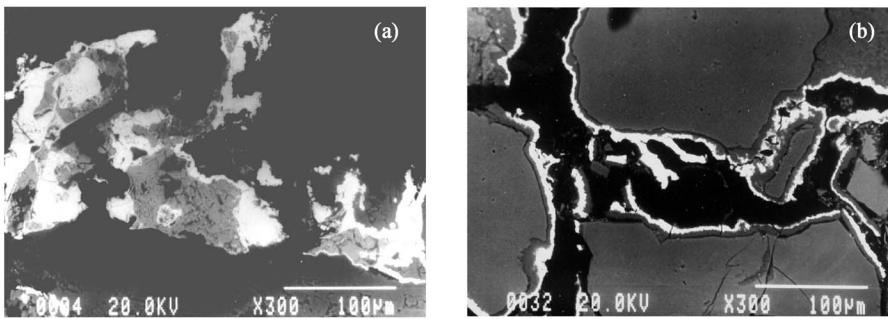


图 3 含铀矿物的电子探针背散射电子图像
Fig. 3 BSE images of the uranium-containing minerals in Dongsheng uranium deposit
(a) 铀石(灰白色)围绕细粒黄铁矿(浅灰色)边缘产出,并部分交代黄铁矿,×300;
(b) 围岩碎屑颗粒边缘产出的微脉状铀石(白色),×300, D-4。

性;灰绿色、灰色砂岩中 Fe^{3+} 含量较 Fe^{2+} 低, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值分别为 0.55、0.50, 表现为还原性(未进行黄铁矿中二价铁的修正)。钙质砂岩中 Fe^{3+} 含量与 Fe^{2+} 接近, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值为 1.07; 铀矿石中变价铁含量总体上与灰色砂岩相近, 其 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值最高达 1.43。通过扫描电子显微镜研究, 灰绿色砂岩与灰色砂岩的最大区别在于灰绿色砂岩碎屑颗粒表面均匀覆盖着极薄的一层针叶状绿泥石, 这可能是岩石呈绿色的主要原因。此外, 灰绿色砂岩中也含有一些片状绿泥石和蒙皂石、高岭石。

4.3 铀的赋存形式

不同地段矿石的选择性溶浸实验结果列于表 3。可以看出, 不同地段铀矿石中的吸附铀及 U^{6+} 、 U^{4+} 所占比例存在明显差别。

在矿体西南段的卷头部位吸附铀所占比例稍高, 平均为 17.91%; 上、下翼吸附铀所占的比例相对较低, 介于 6.16% ~ 10.90% 之间; 在矿体东北部则未测得吸附铀。

在矿体东北部, U^{6+} 和 U^{4+} 的含量大体相近; 在矿体西南部, U^{4+} 则占明显优势, 为 62.51% ~ 96.98%。造成这种差别的主要原因, 可能是铀矿床在后期受到 NE-SW 流向的地下水改造, 导致不同地段的地球化学环境发生了改变。

5 烃类流体参与成矿与后期改造

国内外砂岩型铀矿的研究表明, 某些沉积型铀矿与沉积盆地中的烃类流体

具有密切关系^[6-7]。岩石孔隙荧光分析和包裹体岩相学研究表明, 东胜铀矿床砂岩胶结物部分以方解石为主, 一般分为三期, 每一期均发育烃类包裹体(图 4), 其中第 1 期油气包裹体表现为褐色荧光, 第 2 期油气包裹体表现为蓝绿色荧光, 第 3 期油气包裹体为蓝色、蓝白色荧光。此外, 东胜地区地表存在大量的油气苗, 这些都表明该地区发生了高成熟轻质油气的运移与聚集。

为进一步研究铀富集成矿与烃类流体的关系, 我们在无矿段、矿化段和富矿段共采集了 76 件砂岩样品进行全岩 U、Th 分析, 并利用稀盐酸酸解其中 10 个样品, 使其烃类释放出来, $\text{C}_1 \sim \text{C}_5$ 烃类含量列于表 4。分析结果表明, 富矿段甲烷含量最高(介于 237.63 ~ 1467.1 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 之间), 矿化段次之(182.21 $\mu\text{L}/\text{kg}$), 无矿段则最低(介于 49.70 ~ 159.00 $\mu\text{L}/\text{kg}$ 之间)。重烃($> \text{C}_1$)含量也如此, 即富矿段重烃最高, 矿化段次之, 无矿段最低。全岩 U、Th 和烃类分析表明, 烃类含量与岩石 U 含量存在一定相关性(图 5), 相关系数 $r = 0.6919$, 而与 Th 含量的相关系数仅为 0.1776。这说明该铀矿床的形成与烃类关系

表 2 东胜铀矿床不同类型砂岩的含铁量
Table 2 Contents (%) of Fe^{3+} and Fe^{2+} in different kinds of sandstones in Dongsheng uranium deposit

岩石特征	灰色砂岩	灰绿色砂岩	绿色砂岩	矿石	钙质砂岩
$\text{Fe}^{3+}(\%)$	1.15(102)	0.75(98)	0.75(101)	1.24(60)	0.97(59)
$\text{Fe}^{2+}(\%)$	0.90(102)	1.36(72)	1.50(85)	0.87(61)	0.91(59)
$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	1.28	0.55	0.50	1.43	1.07

注: 分析单位为核工业地质分析测试研究中心; 括号内数值为样品个数。

表 3 吸附铀及 U^{6+} 、 U^{4+} 在不同矿段所占的比例
Table 3 Proportions of the adsorbed uranium, U^{6+} and U^{4+} in different ore sections

地段	矿体部位	总铀含量 (%)	吸附铀所占平均比例 (%)	U^{6+} 所占比例 (%)	U^{4+} 所占比例 (%)	样品数 (个)
西南部	卷头	0.3830	17.91	18.22	81.78	4
	下翼	0.0212	10.90	3.02	96.98	3
	上翼	0.0513	6.16	37.49	62.51	3
东北部	卷头	0.0159		54.60	45.40	1
	下翼	0.0835		48.15	51.85	8

注: 分析单位为核工业 203 研究所分析测试中心。

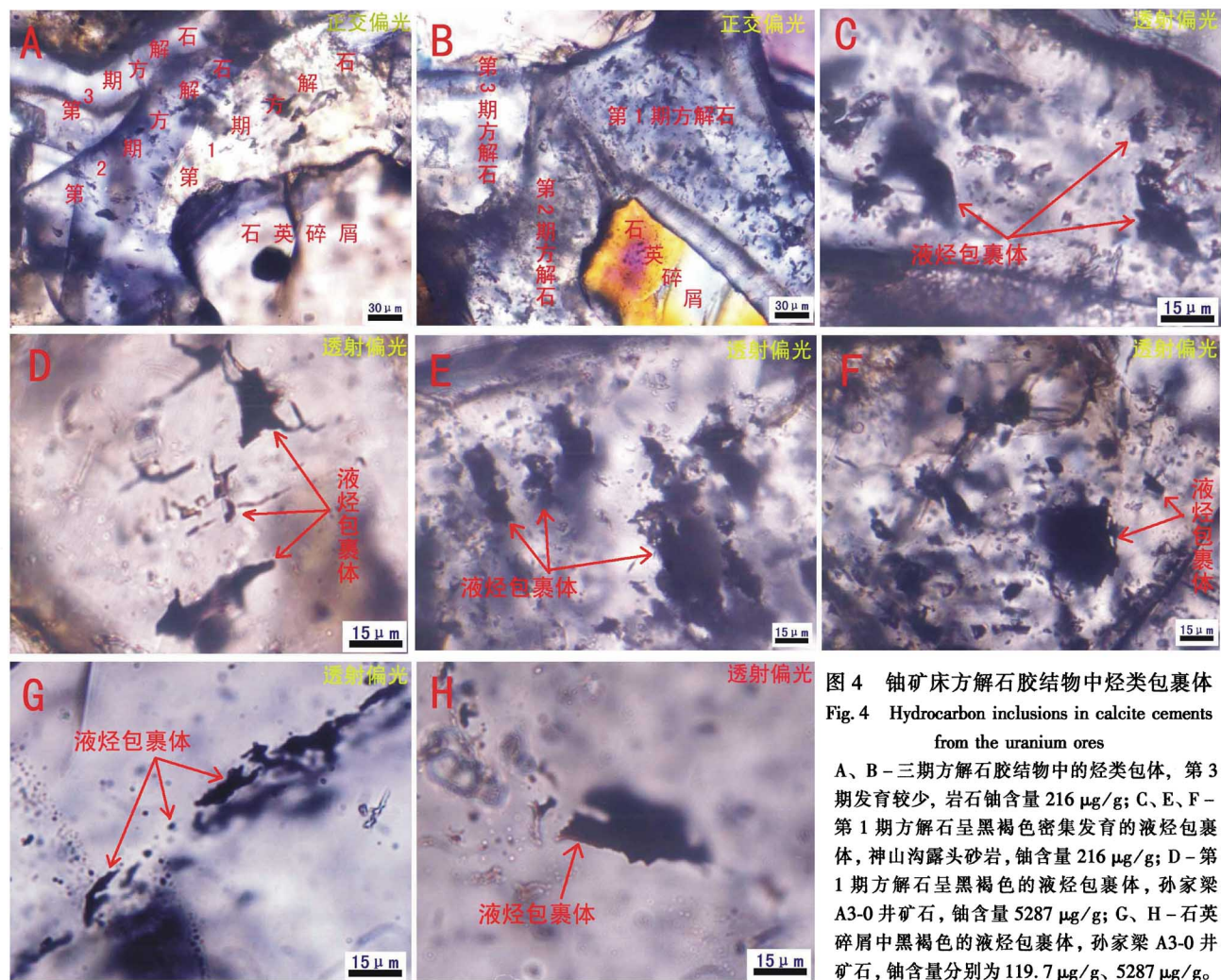


图 4 铀矿床方解石胶结物中烃类包裹体
Fig. 4 Hydrocarbon inclusions in calcite cements from the uranium ores
A、B—三期方解石胶结物中的烃类包裹体，第 3 期发育较少，岩石铀含量 216 μg/g；C、E、F—第 1 期方解石呈黑褐色密集发育的液烃包裹体，神山沟露头砂岩，铀含量 216 μg/g；D—第 1 期方解石呈黑褐色的液烃包裹体，孙家梁 A3-0 井矿石，铀含量 5287 μg/g；G、H—石英碎屑中黑褐色的液烃包裹体，孙家梁 A3-0 井矿石，铀含量分别为 119.7 μg/g、5287 μg/g。

表 4 铀矿床不同矿化带酸解烃含量

Table 4 Contents of hydrocarbons released by hydrochloric acid treatment in different mineralized belts from the uranium deposit

矿化类型	样品号	烃含量(μL/kg)						
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	nC ₅ H ₁₂
无矿段 (U < 0.005%)	1	159.00	33.17	22.16	4.21	3.46	1.80	2.46
	2	49.70	11.41	8.84	1.30	2.90	0.56	0.26
	3	75.03	17.93	2.21	0.66	0.03	0.00	0.00
矿化段 (U = 0.005% ~ 0.049%)	1	182.21	24.19	5.41	1.14	1.67	0.49	0.40
	1	237.63	56.5	40.48	1.95	8.52	3.14	3.83
	2	1467.10	261.88	134.20	6.10	20.19	3.75	1.30
富矿段 (U > 0.05%)	3	320.79	76.90	36.66	3.98	5.58	1.03	0.57
	4	349.19	63.61	28.89	1.53	0.93	0.65	0.45
	5	559.08	121.12	73.71	3.93	14.40	6.70	6.84
	6	911.90	175.09	100.40	11.72	17.64	9.24	10.46

注：分析单位为核工业北京地质分析测试研究中心。

密切。
进一步研究了方解石胶结物中油气包裹体的饱和和烃气相色谱特征,见表 5。主峰碳为 C₁₇~C₁₉,Pr/nC₁₇ 为 0.29~0.79, Ph/nC₁₈ 为 0.22~0.69, 呈现出较高成熟的特点。C₂₁⁻/C₂₂⁺ 比值达 1.66~12.18, 显示铀矿床赋存层位的烃类以低碳数烃类为主, 具较高成熟度。CPI、OEP 分别为 1.13~1.29、0.92~1.08, 也同样反映油气具较高成熟度。Pr/Ph 值较

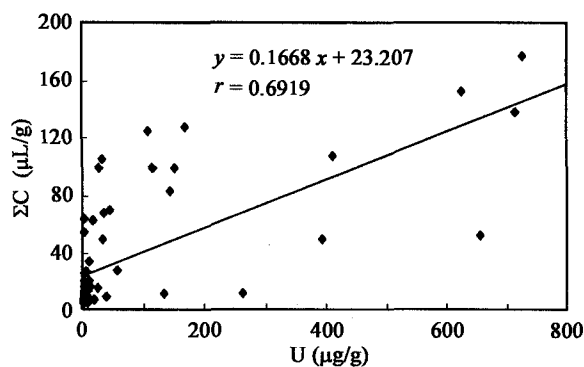


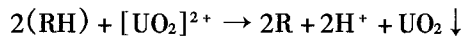
图 5 东胜铀矿床中烃类含量与铀含量关系
Fig. 5 Correlation between hydrocarbon and uranium contents in Dongsheng deposit

高，个别样品达 2.62，反映油气具有煤成烃的来源。东胜地区烃类流体参与铀矿床的形成，这与该地区地质情况和油气演化阶段是一致的。

前人对鄂尔多斯盆地的研究^[8-11]表明，在晚侏罗世 - 早白垩世，盆地曾发生广泛的构造热事件，并伴随有热液活动。任战利等^[9]计算出晚侏罗世 - 早白垩世古地温梯度为 3.3~4.3℃/100 m，表明有一次构造热事件。孙少华等^[10]采用裂变径迹与热释光方法，研究了鄂尔多斯盆地构造热事件，表明至少发生过三期明显的构造热事件，时间分别为 215 Ma、135 Ma 和 72 Ma，其中以 215 Ma 的强度最大，伊陕单斜区的古地温梯度曾达到 3.5~4.7℃/100 m。赵宏刚^[11]根据流体包裹体测温数据和剥蚀厚度，计算出鄂尔多斯盆地北部早白垩世古地温梯度达 3.3~4.5℃/100 m，明显发生了一次构造热事件。总之，在晚侏罗世 - 早白垩世鄂尔多斯盆地发生了构造热事件，加速了石炭 - 二叠系烃源岩向油气转化，产生烃类流体。

鄂尔多斯盆地北部发育多期区域性不整合面，晚侏罗世 - 早白垩世发生的构造热事件致使下部基底产生大量裂隙和破碎带^[10]，在东胜铀矿床南侧发

育一条东西向大断裂，这些均可作为烃类流体向上运移的通道。直罗组顶部泥岩作为区域性盖层，将下部运移上来的烃类流体遮挡在直罗组含矿砂体中，使其在砂岩层作横向运移，对红色和黄色的古层间氧化带产生二次还原作用，形成灰绿色砂岩。这与传统的由次造山作用控制、表生渗入流体形成的砂岩型铀矿床的岩石地球化学环境有着本质的不同。含烃热流体有利于矿源层中铀的活化、迁移和富集。烃类流体(RH)将 +6 价铀酰化合物还原成铀石^[12]，导致铀沉淀富集成矿。其作用机理为：



烃类流体还可以形成较强的还原地球化学障，这对铀矿床的后期保存具有重要作用。这是鄂尔多斯盆地北部很普遍的一种地球化学作用类型，即后生还原作用，它表现为潜育化作用（非 H₂S 还原作用），Fe³⁺被还原成 Fe²⁺，由于硫含量极低，灰绿色砂岩很少含黄铁矿。此外，在铀矿石中发育大量的沥青脉。这些反映烃类流体对古层间氧化带的后生还原改造作用。

6 结 论

(1)东胜铀矿床的矿体形态以板状为主，铀矿物主要为铀石。

(2)吸附铀及 U⁶⁺、U⁴⁺在铀矿床不同地段所占的比例存在较大差别。在西南段卷头部位吸附铀较高，而在东北部则未测得吸附铀。在矿体东北部，U⁴⁺与 U⁶⁺含量大体相近，而在西南部 U⁴⁺则占优势，介于 62.51%~96.98% 之间。造成这种差别的主要原因可能是由于铀矿床在后期受到 NE-SW 方向地下水的改造，致使矿体不同地段的地球化学环境发生了改变。

(3)烃类流体参与了东胜铀矿床的成矿作用，不仅为铀的沉淀富集提供了还原地球化学障，而且进行了广泛的后生还原作用，将红色和黄色古层间氧化带改造为灰绿色，使铀矿床完全隐伏于还原环境中，对矿床的保存起到了至关重要的作用。

(4)灰绿色岩石是矿床的主要控制因素，可作为含油气及煤盆地砂岩型铀矿勘查的新的岩石地球化学标志，这对我国北方中生代沉积盆地的铀矿勘查具有重要的指导意义。

表 5 铀矿床油气包裹体饱和烃气相色谱特征

Table 5 Gas chromatography feature of saturated hydrocarbons in oil-gas inclusions from the uranium deposit

岩 性	主峰碳	C ₂₁ ~/C ₂₂ +	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	CPI	OEP
浅灰色中砂岩	C ₁₈	1.77	1.25	0.29	0.22	1.29	0.96
灰色中砂岩	C ₁₈	9.08	1.15	0.79	0.58	/	0.92
灰色中细砂岩	C ₁₉	1.66	0.91	0.59	0.57	1.26	1.08
灰色中细砂岩	C ₁₈	1.93	1.11	0.70	0.63	1.20	1.05
浅灰色中粗砂岩	C ₁₇	12.18	1.04	0.69	0.69	1.13	0.99
浅灰色中砂岩	C ₁₇	1.80	2.62	0.76	0.31	1.18	1.04

本研究得到核工业北京地质研究院夏毓亮等专家的支持, 实验样品主要由核工业北京地质研究院测试中心和核工业 203 研究所分析测试中心分析, 参加此项工作的还有苗爱生、刘雄等同志, 在此谨致谢意。

参考文献(References):

- [1] 戈利得什金 Р И, 布洛文 К Г, 卡里莫夫 Х К. 中亚自流盆地的成矿作用 [M]. 狄永强, 赵致和, 熊福清, 译. 北京: 地震出版社, 1994: 120 - 191.
Гольцгейн Р И, Бровин К Г, Каримов Х К. Uranium Metalization of Artesian Basin in Central Asia [M]. Beijing: Seismological Press, 1994: 120 - 191 (in Chinese).
- [2] 别列里曼 А И. 水成铀矿床 [M]. 熊福清, 孙西田, 译. 北京: 原子能出版社, 1995: 53 - 69.
Перельман А И. Hydrogenic Uranium Deposit [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1995: 53 - 69 (in Chinese).
- [3] 余达淦, 吴仁贵, 陈培荣. 铀资源地质学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2003: 250 - 279.
Yu Da-gan, Wu Ren-gui, Chen Pei-rong. Geology of Uranium Resource [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2003: 250 - 279 (in Chinese).
- [4] 张抗. 鄂尔多斯断块构造和资源 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1989: 1 - 293.
Zhang Kang. Tectonics and Resources of Ordos Fault Block [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1989: 1 - 293 (in Chinese).
- [5] 王双明. 鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996: 1 - 437.
Wang Shuang-ming. Coal Accumulation and Coal Evaluation of Ordos Basin [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996: 1 - 437 (in Chinese).
- [6] Spirakis C S. The roles of organic matter in the formation of uranium deposits in sedimentary rocks [J]. Ore Geol Rev, 1996, 11(1-3): 53 - 69.
- [7] Min M Z, Meng Z W, Sheng G Y, Min Y S, Liu X. Organic geochemistry of paleokarst-hosted uranium deposits, South China [J]. J Geochem Explor, 2000, 68(3): 211 - 229.
- [8] 赵孟为, Ahrendt H, Wemmer K. 鄂尔多斯盆地伊利石 K-Ar 等时线图解与年龄 [J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 148 - 151.
Zhao Meng-wei, Ahrendt H, Wemmer K. The K-Ar isochron diagram and ages of illites from the Ordos basin [J]. Acta Sedimentol Sinica, 1997, 15(4): 148 - 151 (in Chinese with English abstract).
- [9] 任战利, 赵重远. 鄂尔多斯盆地与沁水盆地中生代晚期地温场对比研究 [J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 134 - 137.
Ren Zhan-li, Zhao Zhong-yuan. Late Mesozoic comparative research on the geothermal field of the Ordos basin and Qinshui Basin [J]. Acta Sedimentol Sinica, 1997, 15(2): 134 - 137 (in Chinese with English abstract).
- [10] 孙少华, 李小明, 龚革联, 刘顺生. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究 [J]. 科学通报, 1997, 42(3): 306 - 309.
Sun Shao-hua, Li Xiao-ming, Gong Ge-lian, Liu Shun-sheng. Study on the tectonic thermal events of Ordos basin [J]. Chinese Sci Bull, 1997, 42(3): 306 - 309 (in Chinese).
- [11] 赵宏刚. 鄂尔多斯盆地构造热演化与砂岩型铀成矿 [J]. 铀矿地质, 2005, 21(5): 275 - 282.
Zhao Hong-gang. The relationship between tectonic-thermal evolution and sandstone-type uranium ore-formation in Ordos basin [J]. Uranium Geol, 2005, 21(5): 275 - 282 (in Chinese with English abstract).
- [12] Nakashima S, Disnar J R, Perruchot A, Trichet J. Experimental study of mechanisms of fixation and reduction of uranium by sedimentary organic matter under diagenetic or hydrothermal conditions [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1984, 48(11): 2321 - 2329.