

doi: 10.12029/gc20170511

冯晓曦, 金若时, 司马献章, 李建国, 赵华雷, 陈印, 陈路路, 汤超, 奥琮, 王心华. 2017. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿田铀源示踪及其地质意义[J]. 中国地质, 44(5): 993–1005.

Feng Xiaoxi, Jin Ruoshi, Sima Xianzhang, Li Jianguo, Zhao Hualei, Chen Yin, Chen Lulu, Tang Chao, Ao Cong, Wang Xinhua. 2017. Uranium source analysis and its geological significance to Uranium metallogenic evolution in Dongsheng Uranium Ore Field[J]. Geology in China, 44(5):993–1005(in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地东胜铀矿田铀源示踪及其地质意义

冯晓曦 金若时 司马献章 李建国 赵华雷

陈印 陈路路 汤超 奥琮 王心华

(中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

摘要:笔者以鄂尔多斯盆地东胜铀矿田的典型矿床——纳岭沟铀矿床为主要研究对象,通过铀矿体及围岩岩石地球化学、电子探针及稳定同位素测试等方法,综合分析了东胜砂岩型铀矿田的铀源及其地质意义。结果表明:主要含矿目标层中侏罗统直罗组在同生沉积过程中,铀预富集达 212.45×10^{-6} ,围岩达 41.34×10^{-6} ;预富集铀主要来自于盆地北缘蚀源区;铀矿体及围岩REE配分曲线总体具一致性,右倾,个别 δEu 正异常,富集重稀土,两者铀源具一致性;含铀砂岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}=-9.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}=18.9\text{‰}$,黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{-CDT}}=-27.46\text{‰}$,经历了强烈的有机地质作用;铀石围绕炭屑、星散状黄铁矿产出,被胶状黄铁矿肢解,铀富集于成岩作用后期。由此认为,直罗组同生沉积过程中预富集的铀为主要成矿铀源,东胜铀矿田属直罗组预富铀重新分配的产物。

关键词:铀源;直罗组;预富集;成岩成矿;东胜铀矿田

中图分类号:P619.14 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2017)05-0993-13

Uranium source analysis and its geological significance to Uranium metallogenic evolution in Dongsheng Uranium Ore Field

FENG Xiaoxi, JIN Ruoshi, SIMA Xianzhang, LI Jianguo, ZHAO Hualei,
CHEN Yin, CHEN Lulu, TANG Chao, AO Cong, WANG Xinhua

(Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170)

Abstract: In order to study the uranium source and its geological significance of the Dongsheng uranium orefield, the geochemistry, electron probe and stable isotopes of ore body and country rock from the Nalingou uranium deposit are selected. The results indicate that the original uranium content of orebody and mudstone is separately 212.45×10^{-6} and 41.34×10^{-6} , showing strong pre-enrichment in the process of syngenetic sedimentation. The debris mainly comes from the adjacent Yinshan Precambrian basement, a few from late Paleozoic acid magmatic rocks, and the uranium in the process of pre-enrichment are mainly from the erosion source

收稿日期:2016-09-14; 改回日期:2017-10-15

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB453006)和中国地质调查局项目“煤田勘查区砂岩型铀矿调查与勘查示范”(DD20160127)和联合资助。

作者简介:冯晓曦,男,1972年生,博士,教授级高级工程师,主要从事砂岩型铀矿调查研究;E-mail: tjfengxiaoxi@163.com。

area of the northern basin. The REE distribution patterns of the uranium ore body and country rock is generally the same, with individual δEu positive anomaly, enrichment of LREE, and the same source of uranium. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ values of the ore bodies are -9.7‰ and 18.9‰ respectively, and the $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ value of pyrite is -27.46‰ , indicating that they experienced a strong organic geological process. Coffinite occur around the charcoal and scattered pyrite, and were cut through by colloidal pyrite. Uranium is enriched after diagenesis. It is believed that the pre-enrichment of uranium in the process of syngenetic sedimentation is the direct and important source of uranium mineralization, and Dongsheng uranium ore field is the product of diagenesis of Zhiluo Formation.

Key words: uranium source; Zhiluo Formation; pre-enrichment; diagenesis and mineralization; Dongsheng uranium orefield

About the first author: Fen Xiaoxi, male, born in 1972, doctor, professor, mainly engages in the study of sandstone-type uranium deposit; E-mail: tjfengxiaoxi@163.com.

Fund support: Ministry of Science and Technology of China (973 Project) (No. 2015CB453000) and Supported by China Geological Survey Program (No. DD20160127).

1 引 言

2012年,大营超大型砂岩型铀矿勘查取得了重大突破,以其为代表的东胜铀矿田逐渐成为中国最重要的砂岩型铀矿集区之一。巨大的成矿潜力遂使该区成为砂岩型铀成矿理论研究的热点地区。铀矿田虽受盆地构造样式、红黑岩系、古气候和岩相岩性控制(Jin et al., 2016; 金若时等, 2017; 孙立新等, 2017),但铀源问题仍是该区砂岩型铀矿成矿作用研究的重要课题。

目前,大多学者已认识到富铀砂体对砂岩型铀成矿的重要作用,富铀砂体与盆地砂岩型铀矿床的产出能力息息相关(夏毓亮等, 2003)。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(陈祖伊等, 2010)。东胜铀矿田皂火壕铀矿床直罗组砂体铀(U)含量 4.44×10^{-6} ,原始(U_0)含量 24.64×10^{-6} ,属典型富铀砂体,铀迁移率(ΔU) -70.12% ,巨大的迁出量可为铀矿田成矿提供重要铀源(夏毓亮等, 2003; 刘汉彬等, 2007; 张金带等, 2010)。众多从事成矿模式研究的学者认为,东胜铀矿田成矿属于沉积预富集-后期流体叠加改造进一步富集成矿的水成后生改造成因(肖新建, 2004; 张复新等, 2006; 吴柏林, 2006a, 2006b; 向伟东等, 2006; 柳益群等, 2006; 彭云彪等, 2006, 2007; 李子颖等, 2007; 樊爱萍等, 2007),他们全都强调了富铀砂体在铀成矿过程中扮演了重要角色,虽然经历了后生流体的叠加改造。东胜铀矿田铀成矿的铀源主要来自哪里? 地层预富集的,铀源区表生流体渗入带来的? 还是盆

地深部热流体所致? 均未予以深入探讨。

进一步确定东胜铀矿田铀源,对于深入研究这种类型砂岩铀矿的成矿作用至关重要。为解决这一问题,笔者们总结了近两年来纳岭沟铀矿床直罗组含铀岩系岩石学、重矿物学、地球化学、铀矿物学、黄铁矿S同位素及含铀砂岩C-O同位素特征等成果,经综合分析,初步认为东胜铀矿田成矿铀源主要来自直罗组同生沉积期本身预富集的铀(铀源层),铀矿体即是成岩作用期直罗组的富铀砂体(铀源层)内,先期分散的铀随地层水迁移,重新分配,富集的结果。

2 地质背景

鄂尔多斯盆地是晚三叠世华北克拉通西部前陆盆地演化而成的侏罗纪大型拗陷盆地,南北缘受秦岭和兴蒙造山带控制,东西囿于吕梁及贺兰山控制。东胜铀矿田处于鄂尔多斯盆地东北部,沿伊盟隆起近东西向展布,与陕北斜坡相邻,北邻河套地堑,南依东西向泊江海子深大断裂,东西长130 km,南北宽40 km。自西向东分布有大营、纳岭沟、柴登壕及皂火壕等大中型铀矿床(图1)。主要含铀层位为中侏罗世直罗组干旱-半干旱河流相碎屑岩建造,厚度一般在100~200 m,以厚度不等的砾岩层不整合覆盖于中侏罗统延安组含煤系地层之上。直罗组埋深差异较大,纳岭沟地段直罗组埋深为400~500 m,大营地埋深达500~700 m。

直罗组主要发育河流相沉积体系及河流-三角洲沉积体系,分为下段(J_2z^1)和上段(J_2z^2),下段又划分为下亚段(J_2z^{1-1})和上亚段(J_2z^{1-2})。上段(J_2z^2)发育高弯度曲流河沉积体系,为干旱气候条件下的杂色沉积,岩性以紫红色泥岩、泥质粉砂岩与粉砂质泥

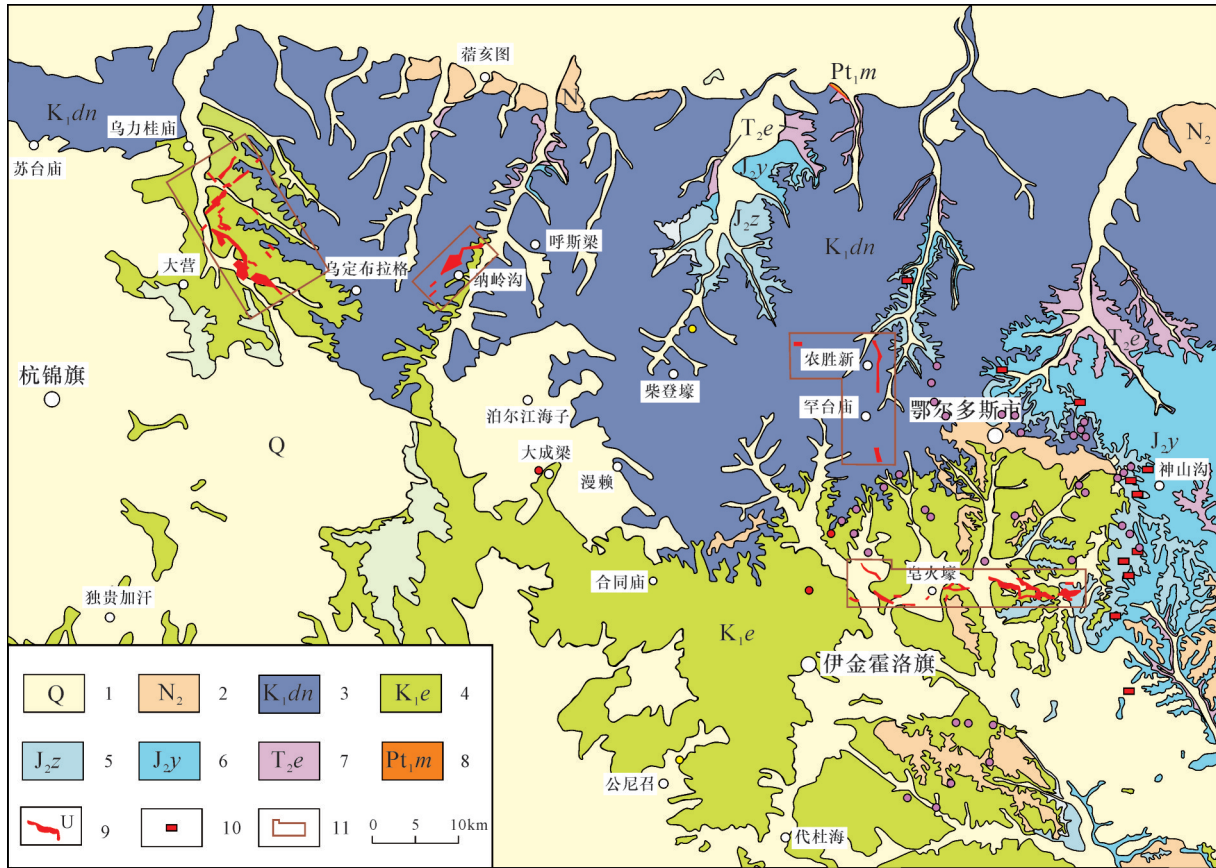


图1 东胜铀矿田地质简图

1—第四系;2—新近系;3—东胜组;4—伊金霍洛组;5—直罗组;6—延安组;7—三叠系;8—美岱召群;
9—铀矿体地表投影;10—地表放射性异常点;11—矿区范围

Fig. 1 Geological map of Dongsheng uranium ore field

1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Dongaheng Formation; 4—Yijinhuoluo Formation; 5—Zhiluo Formation; 6—Yanan Formation;
7—Triassic; 8—Group of Meidaizhao; 9—Dot of radioactivity abnormal of surface; 10—Dot of radioactivity abnormal of surface; 11—Deposit range

岩为主,厚度30~40 m。下段主要发育砂质辫状河沉积体系,属温暖潮湿向干旱转变古气候环境下的粗碎屑岩建造(张天福等,2016)。下段上亚段(J_2z^{1-1})以灰绿色中粒和中细粒砂岩为主,厚10~30 m,下亚段(J_2z^{1-2})为灰色、灰白色中细粒—中粗粒砂岩与灰色、灰绿色粉砂质泥岩,富含煤屑,厚30~60 m。铀矿体主要呈层状、似层状,赋存于直罗组下段灰色砂岩中,少部分为灰绿色砂岩。纳岭沟地段矿体多呈板状,而大营地段矿体除板状外,也可见卷状矿体。铀矿物主要以铀石产出。

3 研究方法

笔者们选择纳岭沟铀矿床为主要研究目标,对不同地段钻孔岩□铀矿层及邻近围岩分别采样。研

究了含铀砂岩岩石学、碎屑锆石年龄特征,示踪直罗组物源和预富集铀源;以U-Pb同位素方法估算了直罗组同生沉积过程中原始铀量及后期铀迁移率;分析了铀矿体及围岩稀土元素特征,近距离示踪铀源;分析含铀砂岩C-O同位素及黄铁矿S同位素特征,示踪含铀流体来源;利用电子探针观察、分析了铀矿物种类、微观形貌,确定铀矿物与炭屑、粘土、黄铁矿等共生组合关系,在此基础上,初步认为直罗组预富集的铀为东胜铀矿田主要成矿铀源。

样品前处理工作由廊坊诚信地质公司、廊坊宇能有限公司完成。薄片鉴定、碎屑锆石U-Pb定年、电子探针、扫描电镜由天津地质矿产研究所完成。S-C-O同位素及稀土元素样品分析在核工业北京地质研究院完成。

4 研究结果

4.1 东胜铀矿田直罗组物源来自于盆地北部阴山造山带

4.1.1 岩石学特征显示直罗组属近源沉积

纳岭沟铀矿床直罗组含矿层主要为长石砂岩,其次为长石石英砂岩、石英砂岩和杂砂岩。砂岩以碎屑物为主,占总量82.0%~90.0%。碎屑成份主要以石英为主,次为长石,含少量岩屑、云母及重矿物。岩屑占总量0.86%,主要为变质岩碎屑,以石英岩、云母石英片岩为主,其次为花岗岩岩屑、火山岩岩屑。填隙物含量10.0%~18.0%,主要由杂基和胶结物组成。杂基成分以高岭石、水云母为主。胶结物主要为绿泥石、少量碳酸盐、极少量的黄铁矿和褐铁矿。砂岩多为接触-孔隙式胶结,少量呈基底式胶结。直罗组底部普遍发育炭屑,多以透镜状、细脉状沿层理分布。近源沉积特征明显。

4.1.2 直罗组物源主要来自于盆地北缘前寒武纪基底

物源示踪一直是直罗组碎屑建造的重要内容(张龙等,2016)。2016年选取4件钻孔样品,各选取100颗锆石随机、均匀地对锆石进行了LA-ICP-MS U-Pb测年,存在4组主要年龄:164 Ma、300~250 Ma、2000~1800 Ma、2500~2300 Ma,与阴山造山带前寒武纪片岩、片麻岩和基性麻粒岩(2500~2300 Ma),孔兹岩(2000~1800 Ma),古生代中酸性岩浆岩(300~250 Ma)以及中生代火山岩(164 Ma)相吻合。毋庸置疑,岩石学、碎屑锆石年龄图谱均表明东胜地区直罗组沉积物源来自于盆地北缘阴山造山带前寒武纪高级变质岩、古生代花岗岩及中生代火山岩等。

1:20万化探在盆地北缘圈定了古生代大桦背岩体、乌梁素海两处规模较大U异常。2014年笔者们利用伽玛能谱测量解剖了大桦背岩体1:20万铀异常,发现岩体平均铀含量超过 5×10^{-6} ,自岩体中部至南缘剖面测量显示,Th/U > 4.2点达到93%,大量铀迁出。同时发现,岩体南缘第四系堆积物灰色黏土层铀含量高达 170×10^{-6} ,围岩砂砾堆积物铀含量 30.8×10^{-6} 。基于物源对铀源的制约,蚀源区向盆地提供物源的同时,也向盆地迁移了大量的铀。

4.2 直罗组同生沉积期预富集了大量铀

为了深入分析直罗组原始沉积过程中铀预富

集程度,笔者们选择纳岭沟矿床东部4个钻孔,西部2个钻孔,35件样品。依据U-Pb体系两阶段模式演化方程(夏毓亮,2004,2005,2015):

成岩时的铀含量演化至今 $\mu(^{238}\text{U})/(^{204}\text{Pb})$;

$$\mu \frac{(^{238}\text{U})}{(^{204}\text{Pb})} = \left[\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right) - \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_0 - \mu_0 (e^{\lambda_{810}t} - e^{\lambda_{81}t}) \right] / (e^{\lambda_{81}t} - 1) \quad (1)$$

岩石的预富集铀:

$$U_0 = \left[\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right) - \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_0 \right] / (e^{\lambda_{81}t} - 1) \times (\text{Pb} \times ^{204}\text{Pb}\% \times M_U) / (99.274\% \times M_{\text{Pb}}) \quad (2)$$

样品中铀的近代(现代)变化:

$$U_p = [(U - U_0) / U_0 \times 100\%] \quad (3)$$

式中: ^{238}U 的衰变系数 $\lambda_8 = 0.155125 \times 10^{-9} \text{年}^{-1}$;原始铅同位素组成: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 9.307$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 10.294$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 29.476$;地球形成年龄:4570 Ma;成岩前体系中 $\mu_0(^{238}\text{U})/(^{204}\text{Pb}) = 9.58$; M_{Pb} :样品铅的原子量207.2; M_U :样品铀的原子量238.028; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:现测样品的铅同位素比值; $^{204}\text{Pb}\%$:现测样品铅同位素组成中 ^{204}Pb 的百分含量; U :样品现测铀含量; U_p :样品近代铀变化;岩石的形成年龄推测为168 Ma(李振宏等,2015)。

笔者选择该区同类岩石Pb/U比值最大,放射性成因铅(^{204}Pb)最低的15ZKN8-46-K2的铅同位素组成作为直罗组岩石的初始铅, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0 = 16.723$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0 = 15.297$ 。

初步估算了东胜铀矿直罗组含铀层及围岩原始铀含量、铀迁移率(表1)。直罗组上下段原始铀预集量较丰大,下段下亚段 $13.9 \times 10^{-6} \sim 204.48 \times 10^{-6}$,平均 53.79×10^{-6} ,下段上亚段 $9.63 \times 10^{-6} \sim 34.69 \times 10^{-6}$,平均 24.62×10^{-6} ,上段 $11.5 \times 10^{-6} \sim 50.67 \times 10^{-6}$,平均 31.46×10^{-6} ;而现测铀含量,下段下亚段 $1.18 \times 10^{-6} \sim 9.56 \times 10^{-6}$,平均 3.58×10^{-6} ,下段上亚段 $1.84 \times 10^{-6} \sim 13.7 \times 10^{-6}$,平均 6.11×10^{-6} ,上段 $1.09 \times 10^{-6} \sim 19.9 \times 10^{-6}$,平均 7.51×10^{-6} ;除特高品位15N44-131-K41外,含铀层原始预富集 141.92×10^{-6} ,现测铀含量 68.01×10^{-6} ,可以说,除部分矿段外,直罗组各段原始铀富集量远大于现有铀含量,铀矿层的预富集量也远远大于非矿层、围岩,甚至达到铀矿体工业品位要求,说明沉积预富集过程中,局部铀矿体已初步形成,但预富集的铀对砂岩、泥岩选择性不明显,可能是干旱、氧化环境所致。同时,直罗组含铀岩石还发现

表1 纳岭沟铀矿床含矿层及围岩铀含量及铀迁移率

Table 1 Uranium content and mobility of uranium ore and country rock from Nalinggou deposit

样号	深度/m	岩性	现测铀含量 U/10 ⁻⁶	估算原始铀 含量 U ₀ /10 ⁻⁶	铀迁移率ΔU/%	时代
15WN5-K4	149~156	灰绿色细砂岩-含砾中粗砂岩	1.06	33.56	-96.84	J ₂ ²
15WTN7-K19	136~138	灰色+红色相间粗砂岩	2.88	21.36	-86.51	
15WTN7-K17	247~249.8	红色砂岩	19.90	40.54	-50.92	
15WTN7-K40	222.5~223.5	绿色砂岩	7.29	11.15	-34.60	
15WTN7-K43	241~241.5	灰绿色细砂岩, 夹灰白色中砂岩	6.44	50.67	-87.29	
平均			7.51	31.46	-71.23	
15ZKN16-72-K3	306~309	灰白色中细砂岩	5.39	34.69	-84.46	J ₂ ¹⁻² 围岩
15ZKN16-72-K5	310.5~312.5	灰色砂岩夹红斑	9.73	19.72	-50.65	
15ZKN16-72-K6	315~317	灰白色细砂岩	1.84	31.99	-94.25	
15ZKN16-72-K7	332.5	绿色砂岩	2.58	26.02	-90.08	
15ZKN28-36-K11	312	绿色砂岩	6.72	9.63	-30.20	
15WN5-K21	286.64	灰白色砂岩	2.80	23.12	-87.89	
15WN5-K9	309	绿色中粗砂岩	13.70	27.19	-49.62	
平均			6.11	24.62	-69.59	
15WN5-K14	359.5	灰白色砂岩	2.86	32.80	-91.28	J ₂ ¹⁻¹ 围岩
15WN5-K16	369.4~369.9	灰白色砂岩	1.18	62.05	-98.10	
15WN5-K20	366~369	灰白色砂岩	3.66	71.44	-94.88	
15WN5-K25	391.5	灰白色砂岩	3.89	23.12	-87.89	
15WTN7-K39	264.6	灰色泥质粉砂岩	2.43	21.37	-88.63	
15WTN7-K49	391~393	灰白色长石中砂岩	1.80	44.99	-96.00	
15WTN7-K50	399	灰白色中砂岩	2.35	28.21	-91.67	
15ZKN16-72-K11	378	灰白色砂岩	1.99	25.89	-92.31	
15ZKN8-46-K1	435.3	绿色砂岩	3.27	27.42	-88.07	
15ZKN8-46-K2	444	灰色砂岩	4.08	43.25	-90.57	
15N28-67-K1	333	灰白色砂岩	9.56	13.90	-31.24	
15N28-67-K5	354.5	含炭屑黄铁矿灰白色砂岩	2.01	100.32	-98.00	
15N44-131-K40	354	含炭屑、黄铁矿灰白色砂岩	7.46	204.48	-96.35	
平均			3.58	53.79	-88.08	
15WN5-K12	334	灰白色砂岩	13.40	1.41	850.35	
15WN5-K17	369.9~370.9	含炭屑黄铁矿灰绿色砂岩(矿)	22.50	216.21	-89.59	
15WN5-K18	370.9~372	灰白色砂岩(矿)	79.70	268.58	-70.32	
15WN5-K19	374~375	灰白色砂岩(矿)	30.70	122.88	-75.02	
15WTN7-K51	343.5~344.5	含炭屑灰绿色砂岩(矿)	10.60	113.39	-90.65	
15WTN7-K52	344.5~345.5	含炭屑黄铁矿灰白色砂岩(矿)	395.00	468.01	-15.60	
15WTN7-K53	345.5~346.5	灰白色砂岩(矿)	38.20	85.62	-55.39	
15WTN7-K55	343	灰白色中砂岩	4.45	0.12	3553.85	
15WTN7-K54	352.5	灰白色中砂岩	17.50	1.08	1522.40	
平均			68.01	141.92		
15N44-131-K41	353	含炭屑灰白色砂岩(矿)	4110.00	167.36	2355.83	

磨圆状原生钛铀矿+锐钛矿、石英+铀石岩屑,也说明同生沉积过程中预富集了铀(焦养泉等,2015)。

铀迁移率也是以迁出为主(表1),下段下亚段-31.24%~-98.1%,平均-88.08%;下段上亚段-30.2%~-94.25%,平均-69.59%;上段-34.6%~-96.84%,平均-71.23%。含铀层10件样品中有6件样品存在铀迁出状态,铀迁出率-15.60%~-90.65%,平均-66.1%,5件铀迁入状态,迁入率15.20%~36.08%。除特高品位样品15N44-131-

K41和铀预富集低含量外,大多含矿层铀亦然迁出,铀迁出率-15.60%~-90.65%,平均-66.10%。铀迁入仅发生于铀矿层及其毗邻围岩的局部。可以说,除部分矿段外,直罗组总体处于铀迁出状态。无论矿段、还是非矿段。粗略估算,东胜铀矿田直罗组以东西长130 km,南北40 km,厚150 m计,铀迁量超过100万t,迁出量巨大。

照此计算,无需其他铀源,单计铀迁出足可形成东胜大规模铀矿田。直罗组同生沉积过程中铀

富集量巨大,奠定了成矿的物质基础,初步认为直罗组同生沉积过程中预富集的铀在成岩及期后过程中发生了大规模铀迁出。

4.3 成岩作用下,直罗组预富集的铀迁移、富集成矿

4.3.1 S-C-O 同位素特征表明直罗组有机地质作用明显

黄铁矿是东胜铀矿田铀矿重要赋存介质之一。笔者采取纳岭沟铀矿床铀矿层及其围岩 12 件含黄铁矿砂岩、黄铁矿结核,挑选黄铁矿单矿物进行 ^{34}S 分析,样品涵盖矿床各个地段。黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}=-21\text{‰}\sim-34.1\text{‰}$,平均值 -27.46‰ ,除样品 15ZKN8-67-K7 的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}=-7.3\text{‰}$ 外,其余样品 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}=-29.3\text{‰}$,变化范围较小,表明整个矿床可选出的黄铁矿成因相似,形成环境还原性较强。黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值较低,远低于已知有机硫同位素的下限 -17‰ ,略低于皂火壕铀矿床黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}=-11.2\text{‰}\sim-19.8\text{‰}$ (李宏涛等,2007)。

一般来说,直罗组黄铁矿可能有蚀源来的黄铁矿碎屑,早成岩期结核状、微粒分散状和草莓球状黄铁矿;表生成岩期胶状黄铁矿、热液黄铁矿、白铁矿,以及油气充注形成的黄铁矿等,但从总体分析,结核状黄铁矿约占 90%,其他较少。表 2 中黄铁矿 $^{34}\text{S}(\text{‰})$ 同位素值表明结核状黄铁矿、微粒分散状黄铁矿具有成因上的相似性。

据此判断,纳岭沟铀矿床矿体及邻近围岩黄铁

矿属生物成因黄铁矿,可能是细菌还原形成的 H_2S 与铁离子结合形成的黄铁矿。细菌还原成因黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-44.7\text{‰}\rightarrow-42.4\text{‰}$,而其他碳酸盐岩中细菌还原成因黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-40\text{‰}\rightarrow-28\text{‰}$ (姜尧发等,2006),这表明直罗组成岩过程经历复杂了细菌作用,局部可形成铀石化的“微化石”(蔡春芳等,2008)。

为了进一步成岩成矿过程中是否受到外来流体改造,选取钻孔 ZKW2 铀矿层及围岩分析 C-O 同位素特征,由于难分出足够纯度的胶结物,采用含矿细砂岩,大致了解 C-O 同位素特征。灰绿色细砂岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}=-9.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}=-11.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}=18.9\text{‰}$,在碳、氧同位素组成判别图(图 2)中,样品基本落在沉积有机物脱羧基作用范围内,这与细菌还原形成黄铁矿有部分吻合。与皂火壕铀矿床 $^{13}\text{C}=-10.194\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}=-12.369\text{‰}$ 比较吻合(吴柏林等,2006b)。样品 H5-20130720-ZKW2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}=-12.5\text{‰}$,充注的油气可能提供了部分碳源(李宏涛等,2007)。沉积有机物脱羧基作用陆生植物泥炭—褐煤化过程中产生的有机地化作用,伴有大量的细菌作用(闵茂中等,2003),该过程必然形成对铀运移沉淀具有重要意义的腐殖酸,因为泥炭—褐煤化的主要产物即是腐殖质有机物(杨殿忠等,2002),低 $\delta^{34}\text{S}$ 值细菌还原成因黄铁矿可能也是这一阶段形成的。

表 2 铀矿体及围岩黄铁矿 ^{34}S 同位素特征

Table 2 S isotope characteristics of pyrite from uranium orebody and country rock

样号	黄铁矿围岩	深度/m	$^{34}\text{S}/\text{‰}$
15ZKN28-36-K13	黄铁矿(结核状)	329	-24.7
N72-111-K16	灰色中粗砂岩	374	-25.4
15N44-131-K14	灰色中粗粒杂砂岩	373	-31.4
15WNS-K11	灰白色砂岩	330	-33.8
15WTN7-K52	铀矿化灰白色砂岩	345	-34.1
15ZKN31-44-K24	黄铁矿(结核状)	549	-33
15ZKN31-12-K4	含泥砾粗砂岩	486	-31.4
15ZKN16-72-14	灰绿色粉砂岩	410	-32.9
15ZKN8-46-k3	灰色砂岩	439	-30.4
15ZKN8-67-k7	铀矿化灰白色砂岩	360	-7.3
15nZKN028	铀矿化灰色粗砂岩	431	-24.1
15nZKN049	铀矿化灰绿色中粒长石砂岩	476	-21

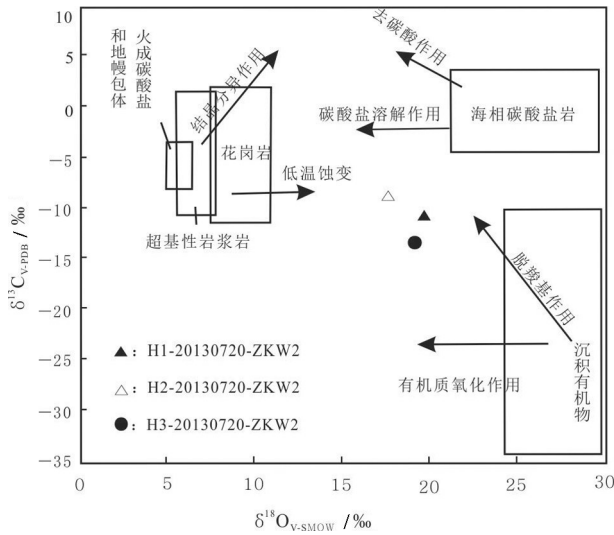


图2 纳岭沟铀矿床铀矿体及围岩碳、氧同位素组成判别图
Fig.2 C-O isotopic compositions map of uranium orebodies and country rocks from Nalinggou uranium deposit

4.3.2 铀矿物伴生组合表明铀成矿可能是直罗组早成岩作用产物

电子探针分析发现纳岭沟铀矿床铀矿物为铀石(图3),主要呈不规则集合体状、不规则状围绕炭屑、星散状黄铁矿产出,少量呈透镜状沿绿泥石化黑云母解理缝中,粒度微细,颗粒一般为3~5 μm,偶见200 μm。据此,笔者认为铀矿物形成晚于炭屑、星散状黄铁矿化。纳岭沟矿床围岩镜质体反射率(Ro)0.361%~0.447%,属早成岩阶段,局部达中成岩A期。电子探针也发现胶状黄铁矿肢解、包裹含铀炭屑,球状磁铁矿、硒铁矿、硒铅矿、闪锌矿等矿物充填于碎屑之间,表明局部受到后期热流体改造。笔者认为铀矿化形成于早成岩阶段A期,或略后,被后期热流体侵入,但未见新铀矿物产出。

矿层及围岩地球化学特征也似乎表明了这一点。以北美页岩为标准,笔者分析了纳岭沟矿区东部WTN8、西部N19-22钻孔的铀矿层及围岩12件样品的稀土元素特征(表4,图4,图5),δEu正常,局部重稀土富集,说明铀矿层经历了热流体叠加改造作用。钻孔WTN8除一件样品曲线尾部扬起,重稀土富集外,其他稀土配分曲线形态一致,与非矿化泥岩也具相似性。钻孔N19-22除一件样品外,其他稀土配分曲线基本一致,反映矿化与非矿化段,砂岩与泥岩成岩作用相似,无明显改造作用。

5 讨论

5.1 富铀地质体是铀成矿的物质基础

富铀蚀源区是铀成矿的重要条件。据研究,华北板块是一富铀古老地质体,连山关钾质混合岩(2350 Ma)锆石铀含量 $400 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$ (胡绍康,1988),鄂尔多斯北部黄土窑孔兹岩碎屑锆石铀含量也高达 2527×10^{-6} (吴昌华等,1998)。阴山造山带华力西中期—燕山早期各类岩体铀含量 $4 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$,印支期花岗岩(γ_s^1)铀含量 12.0×10^{-6} (焦养泉等,2015;吴柏林,2006a;李子颖等,2007;夏毓亮,2015),以及盆地北部大桦背岩体,乌梁素海中元古代蓟县系变质岩区两处规模较大的1:20万U、Th异常,大桦背岩体铀含量 5.52×10^{-6} ,局部铀含量高达 26×10^{-6} ,均说明了阴山造山带富铀特点。

目前盆地北缘大桦背岩体一带,第四系层状泥砂质堆积物中铀含量达 52.48×10^{-6} ,进一步证明直罗组沉积过程中可预富集大量铀。富铀砂体、泥岩等地质体是铀成矿的直接而关键因素。具近源沉积的直罗组含铀岩系非矿段原始铀平均含量高达 36.84×10^{-6} ,远高于现测铀含量(5.79×10^{-6}),巨大的铀迁出量保障了特富矿段(4100×10^{-6})铀迁入需要。夏毓亮等(2005)对东胜铀矿田皂火壕铀矿ZKAO-3孔直罗组砂体取样进行U-Pb同位素分析,获得等时线年龄为(177±16) Ma,年龄值与直罗组的同生沉积期(中侏罗世)基本吻合。

成岩作用过程中,除特富矿段(4100×10^{-6})外,直罗组绝大部分均发生铀迁出。以此推断,如果没有大量的铀预富集,东胜铀矿田的规模将大大减小。

5.2 东胜铀矿田是直罗组成岩作用自身演化的结果

基于铀源的认识,笔者初步认为东胜铀成矿是直罗组自身成岩作用的产物。中侏罗世,受鄂尔多斯盆地区域构造动力影响,伊盟隆起新生代多次差异性升降(张岳桥等,2006;丁超等,2016),古气候由温暖、潮湿向干旱半干旱过渡(孙立新等,2017),阴山造山带出露的变质岩、岩浆岩在风化作用下,随表生流体形成了干旱半干旱环境下的黄色、红色直罗组碎屑建造。表生流体携带铀或以简单 U^{6+} 离子及 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 、 $UO_2(OH)_2^{2-}$ 等络合离子,或以原生铀矿物碎屑迁移、沉积于盆地(柳益群等,2006;刘汉彬等,

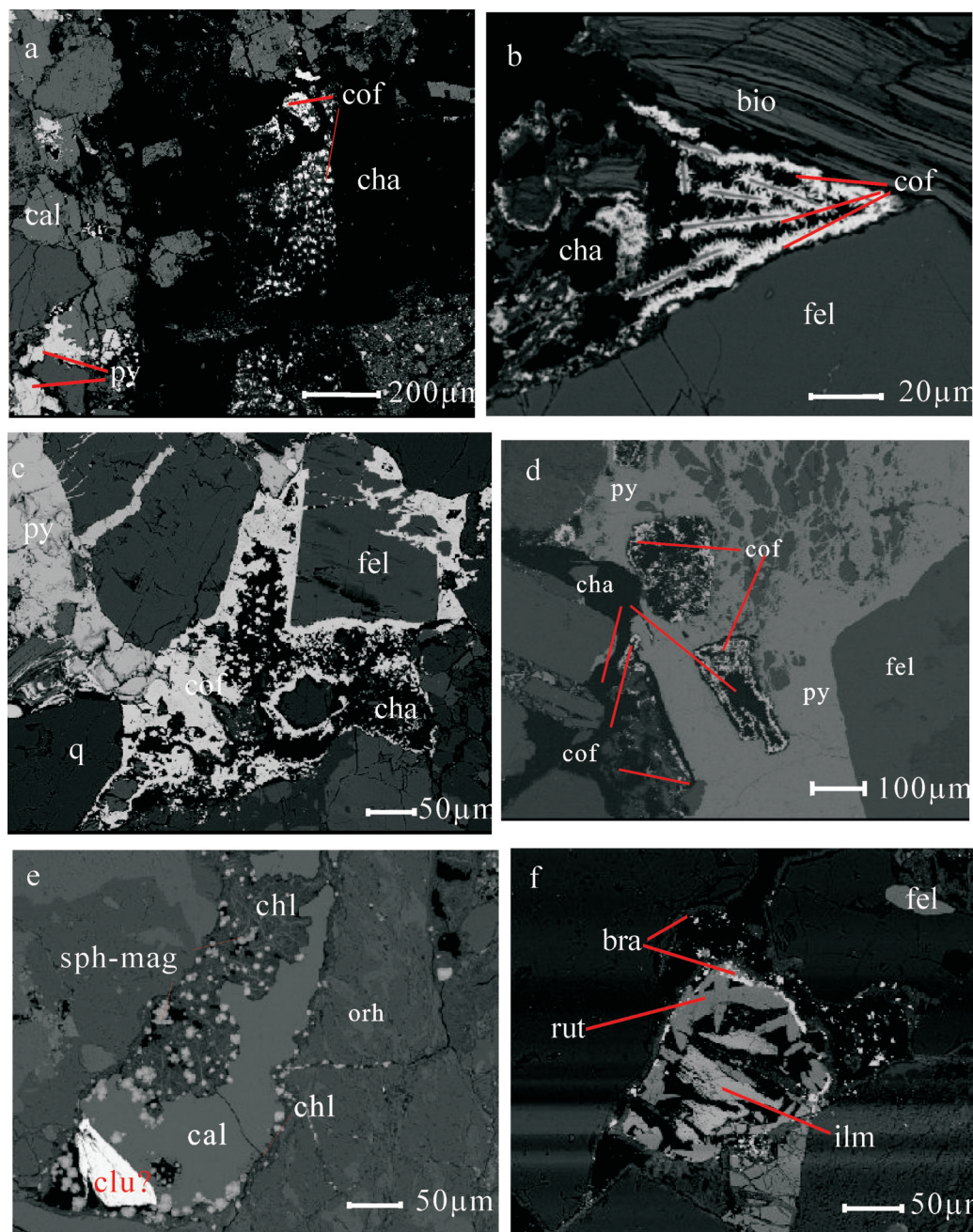


图3 纳岭沟铀矿床铀矿物共生组合

bio—黑云母; bra—(含)钛铀矿物; cal—方解石; cha—炭屑; chl—绿泥石; clu—硒铅矿; cof—铀石; fel—长石; ilm—钛铁矿; orh—正长石; py—胶状黄铁矿; rut—金红石; sph-mag—球状磁铁矿

图3a—铀矿呈星点分散于炭屑中,黄铁矿周边未见铀矿物,见方解石产出;图3b—铀石集合体呈树枝状生长于夹持于黑云母和长石颗粒间炭屑中,放射状、羽状垂直炭化物;图3c—铀石产于炭屑与贯入长石碎屑裂隙的黄铁矿之间;图3d—充填于长石碎屑间黄铁矿肢解含铀的炭屑;图3e—球状磁铁矿弥散于侵入碎屑孔隙的绿泥石中,且被方解石脉侵入,见有硒铅矿产出;图3f—钛铁矿周围缘见有金红石和(含)钛铀矿物产出

Fig.3 The uranium mineral paragenesis of Nalinggou uranium deposit

bio—biotite; bra—titanium uranium minerals; cal—calcite; cha—charcoal; chl—chlorite; clu—clausthalite; cof—coffinite; fel—feldspar; ilm—ilmenite; orh—orthophite; py—colloidal pyrite; rut—rutile; sph-mag—spherical magnetite

Fig.3a—uranium dispersed in charcoal, with the output of calcite; Fig.3b - dendritic coffinite in the charcoal between biotite and feldspar particles, radial and plumose charcoal; Fig.3c—coffinite between charcoal and the pyrite filled in the fissure of feldspar; Fig.3d—uraniferous charcoal dismantled by the pyrite filled in the fissure of feldspar; Fig.3e—Spherical magnetite dispersed in chlorite and invaded by calcite veins, with the output of clausthalite; Fig.3f—the output of rutile and titanium uranium mineral around the ilmenite

表3 含矿砂岩及围岩C-O同位素特征
Table 3 C-O isotope characteristic of ore-bearing sandstone and country rock

样号	岩性	$\delta^{13}C/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-PDB}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\text{‰}$
H1-20130720-ZKW2	灰绿色细砂岩	-9.3	-10.6	20
H3-201307120-ZKW2	灰绿色细砂岩(含矿)	-7.3	-13.4	17
H5-20130720-ZKW2	灰绿色细砂岩	-12.5	-11	19.6

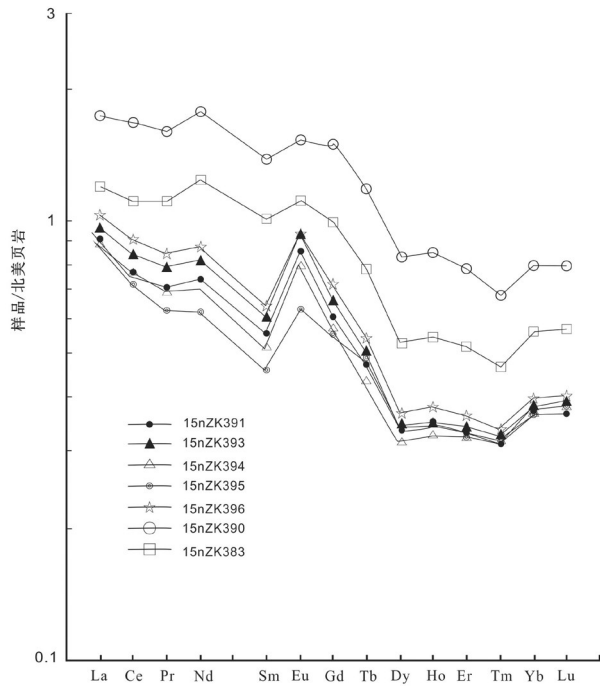


图4 钻孔WTN8稀土元素北美页岩标准化型式图
Fig.4 North America shale normalized REE patterns of samples from WTN8 drill

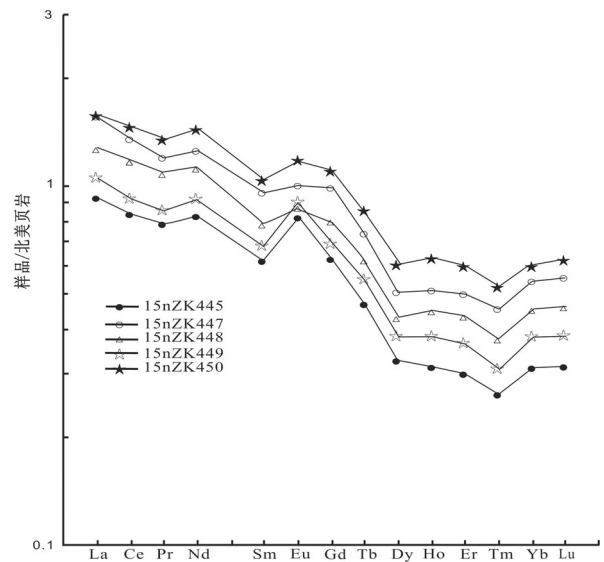


图5 钻孔N19-22稀土元素北美页岩标准化型式图
Fig.5 North America shale normalized REE patterns of samples from N19-22 drilling

2007;焦养泉等,2015,Boekhout et al., 2015),与加拿大帕莉莱盆地相似(王正其等,2004),预富集大量铀,奠定了成矿的基础。

早白垩世初,直罗组沉积建造进入埋藏成岩期。沉积物经历复杂的压实、胶结、微生物地质作用,同生沉积水大量排出。沉积建造水萃取、解吸胶结物、粘土中的离子铀,携铀沿直罗组底部不整合面排泄,迁移。在流体排泄过程中,植物碎屑炭化、褐煤化,细菌发酵,沉积有机物脱羧基作用($\delta^{13}C_{V-PDB}=-9.7\text{‰}$, $\delta^{18}O_{SMOW}=18.9\text{‰}$),形成炭屑、黄铁矿($\delta^{34}S_{V-CDT}=-27.46\text{‰}$),绿色砂(泥)岩,营造了利于铀沉淀、富集的物理化学条件。随pH-Eh的变化,铀主要以铀石围绕炭屑、黄铁矿产出,其次以吸附

态富集于绿泥石、蒙脱石等黏土矿物中,主要形成砂岩型铀矿石,少见粉砂石。

许多学者采用铀矿石全岩U-Pb等时线方法测试成矿年龄,矿床的不同部位得出多组年龄值,从8 Ma~100 Ma不等(刘汉彬等,2007),属晚白垩世新,甚至新近纪。由于铀成矿于开放过程,U-Pb不封闭,全岩U-Pb等时线精确度还需要进一步探讨。东胜铀矿田铀矿体多呈板状(层状、似层状)展布,与直罗组底部界面似等距产出。跨度大的年龄值解释具有一定规律性铀矿体产状的能力显得不足。

东胜铀矿田铀矿层上部普遍发育一套绿色砂(泥)岩,成分为含Fe²⁺的绿蒙混层、绿泥石、绿色高岭石等粘土矿物。基于Fe²⁺对铀(IV)的还原作用,笔者推断,在Fe²⁺作用下,成岩期后含铀流体渗入直罗组形成的铀矿体空间分布可能不是上述产状。

表 4 含矿砂岩及围岩REE含量(10^6)特征
Table 4 REE characteristic of ore-bearing sandstone and country rock

样号	岩性	深度/m	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LREE	HREE	LREE/HREE	δ Eu
15nZK391	灰白色粗砂岩	332	28.3	50.7	5.57	19.9	3.27	1.01	3.14	0.381	1.95	0.363	1.11	0.156	1.1	0.162	117.11	108.75	8.36	13.01	1.48
15nZK393	浅灰绿色中砂岩	339	30.7	56	6.21	22.1	3.56	1.12	3.44	0.399	1.99	0.364	1.16	0.161	1.12	0.173	128.50	119.69	8.81	13.59	1.50
15nZK394	灰绿色中粗砂岩	347	28.4	50.7	5.49	19.2	3.07	0.943	2.99	0.338	1.83	0.338	1.1	0.158	1.09	0.168	115.82	107.80	8.01	13.46	1.46
15nZK395	灰绿色中粗砂岩	354	28	47.8	4.94	16.9	2.73	0.751	2.89	0.345	1.82	0.338	1.1	0.163	1.08	0.161	109.02	101.12	7.90	12.80	1.26
15nZK396	浅灰绿色中粗砂岩	357	32.2	60.5	6.63	23.7	3.81	1.1	3.74	0.428	2.11	0.396	1.23	0.166	1.17	0.178	137.36	127.94	9.42	13.58	1.37
15nZK390	深绿色泥岩	330	55.2	112	12.7	48.4	8.22	1.81	7.88	0.934	4.83	0.879	2.66	0.34	2.36	0.347	258.56	238.33	20.23	11.78	1.06
15nZK383	绿色泥岩	246	37.9	73.8	8.8	33.9	6.00	1.33	5.23	0.618	3.06	0.566	1.76	0.232	1.67	0.251	175.12	161.73	13.39	12.08	1.11
15nZK445	灰绿色中粗砂岩	430	29.4	55.6	6.21	22.5	3.66	0.979	3.24	0.371	1.9	0.327	1.02	0.132	0.935	0.139	126.41	118.35	8.06	14.68	1.33
15nZK447	浅灰绿色中砂岩	433	40.1	77.6	8.52	30.2	4.6	1.02	4.16	0.487	2.5	0.47	1.48	0.187	1.34	0.204	172.87	162.04	10.83	14.96	1.09
15nZK448	灰色泥岩-矿	437	49.4	90.2	9.47	34.1	5.65	1.18	5.14	0.582	2.94	0.534	1.7	0.228	1.62	0.241	202.99	190.00	12.99	14.63	1.03
15nZK449	灰黑色中砂岩-矿	439	33.2	61.2	6.79	24.8	4	1.06	3.62	0.436	2.23	0.399	1.23	0.156	1.14	0.17	140.43	131.05	9.38	13.97	1.31
15nZK451	浅灰绿色中粗砂岩	441	48.8	97.3	10.6	38.8	6.18	1.4	5.74	0.667	3.53	0.655	2.05	0.263	1.92	0.276	218.18	203.08	15.10	13.45	1.10
北美页岩			31.5	66.5	7.9	27.0	5.9	1.18	5.2	0.79	5.8	1.04	3.4	0.5	2.97	0.44					

6 结 论

(1)富铀地质体是东胜矿田铀成矿的重要保障。富铀蚀源区是东胜矿田砂岩型铀矿床成矿的重要条件之一。同生沉积形成的直罗组富铀碎屑建造奠定了东胜铀矿田铀矿床形成的铀源物质基础,也成为了成矿的直接铀源。

(2)东胜铀矿田成矿的直接动力来自直罗组自身成岩作用。直罗组早期成岩过程中,含铀地层水-碎屑(炭屑、黄铁矿、绿泥石等)复杂的水岩反应致使铀沉淀、富集成矿,属预富的铀自组织、重新分配的结果,局部虽受到油气、热流体改造,但未发现其他铀源供应。

致谢:感谢中国核工业地质局原总工程师郑大瑜教授级高级工程师、蔡根庆研究员,核工业二〇八大队苗爱生教授级高级工程师、王贵高级工程师在野外地质研究和论文编写中给予的指导和帮助,感谢审稿专家及编辑部老师提出的建设性意见和建议。

References

- Boekhout F, Gerard M, Michel A, Déjeant A, Galois L, Calas G. 2015. Uranium migration and retention during weathering of a granitic waste rock pile[J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 1-28.
- Cai Chunfang, Li Hongtao, Li Kaikai, Jiang Lei. 2008. Anaerobic oxidation of petroleum coupled with reduction of uranium mineralization—cases from Dongsheng and Qianjiadian uranium deposits[J]. *petroleum Geology Experiment*, 30(5): 518-521(in Chinese with English abstract).
- Chen Yin, Feng Xiaoxi, Chen Lulu, Jin Ruoshi, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Miao Aisheng, Tang Chao, Wang Gui, Liu Zhongren. 2017. An analysis of U-Pb dating of detrital zircons and modes of occurrence of uranium minerals in the Zhiluo Formation of northeastern Ordos Basin and their indication to uranium sources[J]. *Geology in China*, 44(4): 623-639.
- Chen Zuyi, Chen Haisheng, Gu Kangheng. 2010. Research and Evaluation of China Uranium Deposit, The third Volume of Sandstone-type Uranium Deposits[M]. Beijing: China Nuclear Industry Geology Bureau, 1-360 (in Chinese).
- Ding Chao, Chen Gang, Guo Lan, Zhang Wenlong, Shi Xiaolin, Xu Xiaogang, Liu teng. Differential uplift on the northeast margin of Ordos Basin: Evidence from apatite fission track analysis[J]. *Geology in China*, 2016, 43(4):1238-1247 (in Chinese with English abstract).
- Fan Aiping, Liu Yiqun, Yang Renchao, Zhang Fuxing. 2006. Diagenesis and Palaeo-fluid Migration Events in the Zhiluo Formation in Dongsheng Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 694-700 (in Chinese with English abstract).
- Fan Aiping, Liu Yiqun, Yang Renchao, Fen Qiao, Zhang Fuxin, Han Zuozhen. 2007. Studies on diagenesis of sandstone-type uranium deposits in Dongsheng area of Ordos basin[J]. *Science in China (Series D)*, 37(supp.): 166-172 (in Chinese).
- Hu Shaokang. 1988. Analysis of uranium ore-forming conditions and exploration prospect in the North China Platform[J]. *Uranium Geology*, 4(3): 129-138 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yaofa, Tang Yuegang, Dai Shifeng, Zou Xing, Qian Handong, Zhou Guoqing. 2006. Pyrites and Sulfur Isotopic Composition near the Permian-Triassic Boundary in Meishan, Zhejiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(8): 1202-1206.
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Peng Yunbiao, Rong Hui, Ji Dongmin, Miao Aisheng, Li Hongliang. 2015. Sedimentary-tectonic setting of the deposition-type uranium deposits forming in the Paleo-Asian tectonic domain, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 189-205 (in Chinese with English abstract).
- Jin Ruoshi, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Li Jianguo, Zhao Hualei, Zhao Fengqing, Fen Xiaoxi, Chen Yin, Chen Lulu, Zhao Lijun, Zhu Qiang. 2016. Structure Styles of Mesozoic-Cenozoic U-bearing Rock Series in Northern China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(6): 2104-2116
- Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Miao Peisen, Wang Shaoyi, Ao Cong, Li Hongliang, Li Yangfeng, Zhang Tianfu. 2017. Late Mesozoic continental basin "Red and Black beds" coupling formation constraints on the sandstone uranium mineralization in northern China[J]. *Geology in China*, 44(2): 205-223
- Li Zhenhong, Dong Shuwen, Feng Shengbin, Qu Hongjie. 2015. Sedimentary Response to Middle-Late Jurassic Tectonic Events in the Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(1):22-30
- Li Hongtao, Cai Chunfang, Li Kaikai, Luo Xiaorong. 2007. Origin of Spherical Magnetite from Host Sandstone of the Dongsheng Uranium Deposit, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*. 53(4): 564-560 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Fang Xiheng, Chen Anping, Ou Guangxi, Sun Ye, Zhang Ke, Xia Yuliang, Zhou Wenbin, Chen Fazheng, Li Mangen, Liu Zhonghou, Jiao Yangquan. 2009. Superposition metallogenic model of sandstone-type uranium deposit in the Northeastern Ordos basin[J]. *Uranium Geology*, 25(2): 65-71 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Fang Xixin, Chen Anping, Ou Guangxi, Xiao Xinjian, Sun Ye, Liu Chiyang, Wang Yi. 2007. Genesis of target gray-green sandstone of sandstone-type uranium deposits in the northern Ordos Basin [J]. *Science in China (Series D)*, 37 (supp.): 139-146

- (in Chinese).
- Liu Hanbin, Xia Yuliang, Tian Shifeng. 2007. Study on geochronology and uranium source of sandstone-type uranium deposit in Dongsheng area[J]. Uranium Geology, 23(1): 23–29(in Chinese with English abstract).
- Liu Yiqun, Feng Qiao, Yang Renchao, Fan Aiping, Xing Xiujuan. 2006. Discussion on Genesis of Sandstone-Type Uranium Deposits in Dongsheng Area, Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 80(5): 761–769 (in Chinese with English abstract).
- Min Maozhong, Peng Xingjian, Wang Jinping, Yin Lin, Zhang Guanghui, Xu Huifang, Li Pengfu. 2003. Progress in study on microbe-metallogenesis of uranium[J]. Uranium Geology, 19(5): 257–263 (in Chinese with English abstract).
- Peng Yunbiao, Chen Anping, Fang Xiheng, Ou Guangxi, Xie Qilai. 2007. Relationship between hydrocarbon-containing fluid and metallogenesis in Dongsheng sandstone-type uranium deposit[J]. Geochimica, 36(3): 267–274 (in Chinese with English abstract).
- Peng Yunbiao, Li Ziyang, Fang xiheng, Xie Qilai. 2006. Metallogenic characteristics of No.2081 uranium deposit in the north of Ordos Basin[J]. Acta Mineralogica Sinica, 26(3): 349–355(in Chinese with English abstract).
- Sun Lixin, Zhang Yun, Zhang Tianfu, Cheng Yinhang, Li Yangfeng, Ma Hailin, Yang Cai, Guo Jiacheng, Lu Chao, Zhou Xiaoguang. 2016. Jurassic sporopollen of Yanan formation and Zhiluo formation in the north-eastern Ordos Basin, Inner Mongolia ,and its paleoclimatic significance[J]. Earth Science Frontiers, 24(1): 32–51.
- Wang Zhengqi, Cao Shuanglin, Hu Baoqun, Guan Taiyang. 2004. Recent surficial uranium metallogeny of Prairie Flats deposit and its significance to the exploration of sandstone-type uranium deposits[J]. World Nuclear Geoscience, 21(1): 9–14 (in Chinese with English abstract).
- Wu Bolin, Liu Chiyang, Zhang Fuxin, Fang Xiheng, Liu Xiong. 2006a. Geochemical characteristics of epigenetic alteration in dongsheng sandstone-type uranium deposit and its metallogenic signification[J]. Acta Geologica Sinica, 80(5): 740–747 (in Chinese with English abstract).
- Wu Bolin, Wang Jianqiang, Liu Chiyang, Wang Feiyu. 2006b. Geochemical behavior of geologic process of natural gas during mineralization of Dongsheng sandstone-type uranium deposit[J]. Oil & Gas Geology, 27(2): 225–232 (in Chinese with English abstract).
- Wu Changhua, Li Huimin, Zhong Changting, Chen Qiang'an. 1998. The ages of zircon and rutile (Cooling) from Khondalite in Huangtuyao, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 44(6): 618–626 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yuliang, Lin Jingrong, Liu Hanbin, Fan Guang, Hou Yanxian. 2003. Research on geochronology of sandstone-hosted uranium ore-formation in major uranium-productive basins, northern China[J]. Uranium Geology, 19(3): 129–137 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yuliang. 2004. Calculation of U_0 and ΔU for rock samples[J]. Uranium Geology, 20(1): 35–38 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Weidong, Fang Xiheng, Li Tiangang, Chen Xiaolin, Pang Yaqing, Cheng Huahan. 2006. Metallogenic characteristics and model of Dongsheng uranium deposit in Ordos basin, North China[J]. Uranium Geology, 22(5): 257–265 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Xinjian. 2004. The mineralization geochemistry of the low temperature fluid on the Dongsheng sandstone type uranium deposit[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 1–104 (in Chinese with English abstract).
- Yang Dianzhong, Yu Man. 2002. The Uranium-organic geochemistry development[J]. World Geology, 21(1): 18–23 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fuxin, Qiao Haiming, Jia Heng. 2006. The metallogenic condition and epigenetic alteration mineralization of Dongsheng Uranium Deposit in the Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 733–739 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinda, Xu Gaozhong, Lin Jinrong, Peng Yunbiao, Wang Guo. 2010. The implication of six kinds of new sandstone-type uranium deposits to uranium resources potential in North China[J]. Geology in China, 37(5):1434–1449.
- Zhang Long, Wu Bolin, Liu Chiyang, Lei Kaikai, Hou Huiqun, SunLi, Cui Xiaoni, Wang Jiangqiang. 2016. Provenance analysis of the Zhiluo Formation in the sandstone hosted uranium deposits of the Northern Ordos Basin and implications for uranium mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 90(12):3441–3453
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen. Transition of the Late Mesozoic-Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos basin[J]. Geology in China, 33(1):28–40

附中文参考文献

- 蔡春芳, 李宏涛, 李开开, 姜磊. 2008. 油气厌氧氧化与铀还原的耦合关系——以东胜和钱家店铀矿床为例[J]. 石油实验地质, 30(5): 518–521.
- 陈印, 冯晓曦, 陈路路, 金若时, 苗培森, 司马献章, 苗爱生, 汤超, 王贵, 刘忠仁. 2017. 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, 44(4): 623–639.
- 陈祖伊, 陈戴生, 古抗衡. 2010. 中国铀矿床研究评价第三卷砂岩型铀矿[M]. 北京: 中国核工业地质局, 1–360.
- 丁超, 陈刚, 郭兰, 张文龙, 师晓林, 徐小刚, 刘腾. 2016. 鄂尔多斯盆地东北部差异隆升过程裂变径迹分析[J]. 中国地质, 43(4): 1238–1247.
- 樊爱萍, 柳益群, 杨仁超, 冯乔, 张复新, 韩作振. 2007. 鄂尔多斯盆地东胜地区砂岩型铀矿成岩作用研究[J]. 中国科学(D辑), 37(增刊): 166–172.

- 樊爱萍, 柳益群, 杨仁超, 张复新. 2006. 东胜直罗组砂岩成岩作用过程与古流体运移事件分析[J]. 地质学报, 80(5): 694-700.
- 胡绍康. 1988. 华北板块铀成矿条件及成矿远景分析[J]. 铀矿地质, 4(3): 129-138.
- 姜尧发, 唐跃刚, 代世峰, 邹星, 钱汉东, 周国庆. 2006. 浙江煤山二叠系—三叠系界线附近黄铁矿及其硫同位素组成研究[J]. 地质学报, 88(8): 1202-1207.
- 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 荣辉, 季东民, 苗爱生, 里宏亮. 2015. 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, 22(1): 189-205.
- 金若时, 程银行, 李建国, 司马献章, 苗培森, 王少轶, 奥琮, 里宏亮, 李艳峰, 张天福. 2017. 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成矿环境的制约[J]. 中国地质, 44(2): 205-223.
- 李振宏, 董树文, 冯胜斌, 渠洪杰. 2015. 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, 36(1): 22-30.
- 李宏涛, 蔡春芳, 李开开, 罗晓容. 2007. 内蒙古东胜铀矿床成矿主岩中球状磁铁矿的成因[J]. 地质论评, 53(4): 564-560.
- 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 欧光习, 孙晔, 张珂, 夏毓亮, 周文斌, 陈法正, 李满根, 刘忠厚, 焦养泉. 2009. 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, 25(2): 65-71.
- 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 欧光习, 肖新建, 孙晔, 刘池洋, 王毅. 2007. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿目标层灰绿色砂岩成因[J]. 中国科学(D辑), 37(增刊): 139-146.
- 刘汉彬, 夏毓亮, 田时丰. 2007. 东胜地区砂岩型铀矿成矿年代学及成矿铀源研究[J]. 铀矿地质, 23(1): 23-29.
- 柳益群, 冯乔, 杨仁超, 樊爱萍, 邢秀娟. 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): 761-769.
- 闵茂中, 彭新建, 王金平, 尹琳, 张光辉, 徐惠芳, 李朋富. 2003. 铀的微生物成矿作用研究进展[J]. 铀矿地质, 19(5): 257-263.
- 彭云彪, 陈安平, 方锡珩, 欧光习, 解启来. 2007. 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, 36(3): 267-274.
- 彭云彪, 李子颖, 方锡珩, 解启来. 2006. 鄂尔多斯盆地北部2081铀矿成矿特征[J]. 矿物学报, 26(3): 349-355.
- 孙立新, 张云, 张天福, 程银行, 李艳峰, 马海林, 杨才, 郭佳成, 鲁超, 周晓光. 2017. 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, 24(1): 32-51.
- 王正其, 曹双林, 胡宝群, 管太阳. 2004. 帕莉莱矿床现代生铀成矿作用及其对砂岩铀矿找矿工作的启示[J]. 世界核地质科学, 21(1): 9-14.
- 吴柏林, 刘池阳, 张复新, 方锡珩, 刘雄. 2006a. 东胜砂岩型铀矿后生蚀变地球化学性质及其成矿意义[J]. 地质学报, 80(5): 740-747.
- 吴柏林, 王建强, 刘池阳, 王飞宇. 2006b. 东胜砂岩型铀矿形成中天然气地质作用的地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 27(2): 225-232.
- 吴昌华, 李惠民, 钟长汀, 陈强安. 1998. 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, 44(6): 618-626.
- 夏毓亮, 林锦荣, 刘汉彬, 范光, 侯艳先. 2003. 中国北方主要产铀盆地砂岩型铀矿成矿年代学研究[J]. 铀矿地质, 19(3): 129-137.
- 夏毓亮. 2004. 岩石样品 U_o 和 ΔU 的计算[J]. 铀矿地质, 20(1): 35-38.
- 夏毓亮. 2005. 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, 22(4): 187-191.
- 向伟东, 方锡珩, 李田港, 陈晓林, 庞雅庆, 程华汉. 2006. 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, 22(5): 257-265.
- 肖新建. 2004. 东胜地区砂岩铀矿低温流体成矿作用地球化学研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院博士研究生学位论文, 1-104.
- 杨殿忠, 于漫. 2002. 铀有机地球化学研究进展[J]. 世界地质, 21(1): 18-23.
- 张复新, 乔海明, 贾恒. 2006. 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, 80(5): 733-739.
- 张金带, 徐高中, 林锦荣, 彭云彪, 王果. 2010. 中国北方6种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J]. 中国地质, 37(5): 1434-1449.
- 张龙, 吴柏林, 刘池洋, 雷开宇, 侯惠群, 孙莉, 寸小妮, 王建强. 2016. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿直罗组物源分析及其铀成矿意义[J]. 地质学报, 90(12): 3441-3453.
- 张岳桥, 廖昌珍. 2006. 晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造[J]. 中国地质, 33(1): 28-40.