

doi: 10.12029/gc20180612

鲁超, 焦养泉, 彭云彪, 吴立群, 苗爱生, 荣辉, 谢惠丽. 2018. 大营地区古层间氧化带识别与空间定位预测[J]. 中国地质, 45(6): 1228–1240.  
Lu Chao, Jiao Yangquan, Peng Yunbiao, Wu Liqun, Miao Aisheng, Rong Hui, Xie Huili. 2018. Paleo-interlayer oxidation zone identification and spatial localization prediction in Daying area[J]. Geology in China, 45(6): 1228–1240(in Chinese with English abstract).

## 大营地区古层间氧化带识别与空间定位预测

鲁超<sup>1,2</sup> 焦养泉<sup>1</sup> 彭云彪<sup>1,2</sup> 吴立群<sup>1</sup> 苗爱生<sup>2</sup> 荣辉<sup>1</sup> 谢惠丽<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 核工业二〇八大队, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:**潜在铀储层内部的层间氧化作用与铀成矿作用同时进行而且密不可分,(古)层间氧化带被认为是砂岩型铀矿的重要找矿标志。运用岩芯和钻孔资料以及各分带的岩石矿物学以及地球化学特征等信息识别古层间氧化带,结合铀储层中具有古氧化性质和还原性质的岩石地球化学标志,定量地给予古层间氧化带以空间定位,并据此可以划分出古完全氧化带、过渡带和还原带。在此基础上,探讨了铀储层规模、隔挡层、暗色泥岩及煤层等因素对于古层间氧化带分布的影响。

**关键词:**鄂尔多斯盆地;古层间氧化带;二次还原;空间定位;识别标志

中图分类号:P619.14;P588.2 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2018)06-1228-13

### Paleo - interlayer oxidation zone identification and spatial localization prediction in Daying area

LU Chao<sup>1,2</sup>, JIAO Yangquan<sup>1</sup>, PENG Yunbiao<sup>1,2</sup>, WU Liqun<sup>1</sup>,  
MIAO Aisheng<sup>2</sup>, RONG Hui<sup>1</sup>, XIE Huili<sup>1</sup>

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. No. 208 Geological Party, CNNC, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Interlayer oxidation in potential uranium reservoir is closely related to uranium mineralization. Paleo-interlayer oxidation zone is considered to be an important symbol in search for sandstone type uranium deposits. In this paper, core drilling data and mineralogy and geochemical characteristics of each sub-band of interlayer oxidation were used to identify the paleo-interlayer oxidation. Combined with paleo-oxidic and reductive properties of uranium geochemical markers in uranium reservoirs, paleo-interlayer oxidation was spatially positioned quantitatively. Accordingly, paleo-completely-oxidized zone and transitional zone and reduction zone were divided and identified. On such a basis, the distribution of paleo-interlayer oxidation zone controlled by the scale of the uranium reservoir, barrier layers, the dark mudstone and coal seam and other factors was discussed.

收稿日期:2016-10-31; 改回日期:2017-01-25

基金项目: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”(2015CB453000)、鄂尔多斯盆地北缘含铀岩系三维地质编图项目(12120115013701)和鄂尔多斯盆地北部古层间氧化带特征分析及远景预测评价项目(核工业地质局)资助成果。

作者简介:鲁超,男,1984年生,博士生,从事砂岩型铀矿科研和生产工作;E-mail:56709507@qq.com。

**Key words:** Ordos basin; paleo-interlayer oxidation zone; second reduction; spatial orientation; identification mark

**About the first author:** LU Chao, male, born in 1984, master candidate, engages in the study of uranium geology; E-mail: 56709507@qq.com.

**Fund support:** supported by National basic research program of China "973" Project, Sedimentary environment and large scale mineralization of continental basins in giant sandstone uranium metallogenic belt in North China (No. 2015CB453000), and three-dimensional geological mapping of uranium bearing rocks on the northern margin of Ordos Basin project (No. 12120115013701).

## 1 引言

20世纪50年代以来,苏联、美国等在层间氧化带砂岩型铀矿勘查取得了巨大的成功,有关研究也各具特色,形成了“层间氧化带”和“卷状”砂岩型铀矿成矿理论两大流派。苏联铀矿地质学家建立了经典的“层间氧化带砂岩型铀矿”系统理论,提出了层间氧化带砂岩型铀矿大地构造背景著名的“次造山带”概念,在层间氧化带砂岩型铀矿成矿条件、成矿规律、找矿判据、地球化学分带、勘探技术、地浸工艺等方面的研究深入且应用广泛,找矿成果显著。由于“区域层间氧化带型”、“次造山带”、“渗入型盆地”、“黄色或红色与灰色岩石过渡部位—过渡带”等传统水成铀矿理论和找矿标志是在盆地一定的铀成矿构造背景和岩石地球化学环境等条件下建立起来的,而鄂尔多斯盆地周边黄河等断陷的形成和下伏油、煤和天然气二次还原作用的广泛发育,具有很强的特殊性,所以,传统水成铀矿理论并不能完全有效指导鄂尔多斯盆地的预测评价研究与勘查工作(彭云彪等,2006,2007)。

研究发现,鄂尔多斯盆地北部直罗组绿色与灰色砂岩的蚀变接触界面是鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿的岩石地球化学找矿标志(彭云彪等,2002,2006,2007),对鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿古层间氧化带的识别已较为成熟,绿色和灰绿色砂岩作为古氧化作用经过二次还原的产物已得到广泛共识(焦养泉等,2005,2006,2012;张金带等,2005,2013;吴柏林等,2006;向伟东等,2006;彭云彪等,2006,2007;黄净白等,2007;李子颖等,2007,2010;苗爱生等,2010)。

大营铀矿床与皂火壕铀矿床、纳岭沟铀矿床以及巴音青格力铀矿床同属古层间氧化带型铀矿床(图1),是阴山—古河套物源—体系成矿系统的一部分(彭云彪等,2007;焦养泉等,2012),整体上属

于一个大型的产铀沉积朵体(焦养泉等,2005,2006,2012)和一个大型的铀成矿系统。因此,对于大营铀矿典型矿床古层间氧化带研究具有指导整个盆地北部找矿和研究的意义。对古层间氧化带的识别需要在绿色“二次还原”的基础之上进行,研究古层间氧化带特征和空间定位预测都需要考虑古层间氧化带的“二次还原”。对于这种二次还原绿色氧化带的研究,进行(古)层间氧化带的识别、分带性研究、岩石地球化学特征研究、方向性研究、定量描述及定位预测的研究,有助于恢复古层间氧化的过程,并且是砂岩型铀矿的定位及预测的重点内容之一。特别是古层间氧化带的控制因素分析,将有助于了解成矿时期氧化还原面貌,利于分析这种大型克拉通盆地层间氧化带的发育及铀成矿系统的重要控制因素,并且能有效地指导鄂尔多斯盆地北部铀矿找矿工作和铀矿床成因认识,促进中国北方中生代沉积盆地铀矿勘查工作,对世界铀矿勘查也具有很好的借鉴作用。

## 2 区域地质背景

鄂尔多斯盆地所处大地构造位置位于华北板块的西部,是中生代发育起来的大型内陆拗陷盆地,大营铀矿床位于盆地的北东部(图1),属于盆地伊陕斜坡构造单元。鄂尔多斯盆地发育的盖层包括中生界的三叠系(T)、侏罗系(J)、下白垩统(K<sub>1</sub>)和新生界的古近系(E)、新近系(N)、第四系(Q)。侏罗系在盆地东部鄂尔多斯市—榆林市一带呈南北向带状大面积出露,向西倾伏于白垩系之下,为盆地重要的含煤地层之一,同时也是铀矿找矿的主要层位,其中中侏罗统直罗组为主要找矿目的层,根据直罗组沉积时期古气候的变化和岩性发育特点,将其分为上段(J<sub>2</sub><sup>2</sup>)和下段(J<sub>2</sub><sup>1</sup>),根据直罗组下段在沉积过程中不同阶段的沉积特点及其岩性—岩相特征,又可分为上亚段(J<sub>2</sub><sup>1-2</sup>)和下亚段(J<sub>2</sub><sup>1-1</sup>),在大营地区,直罗组下段上

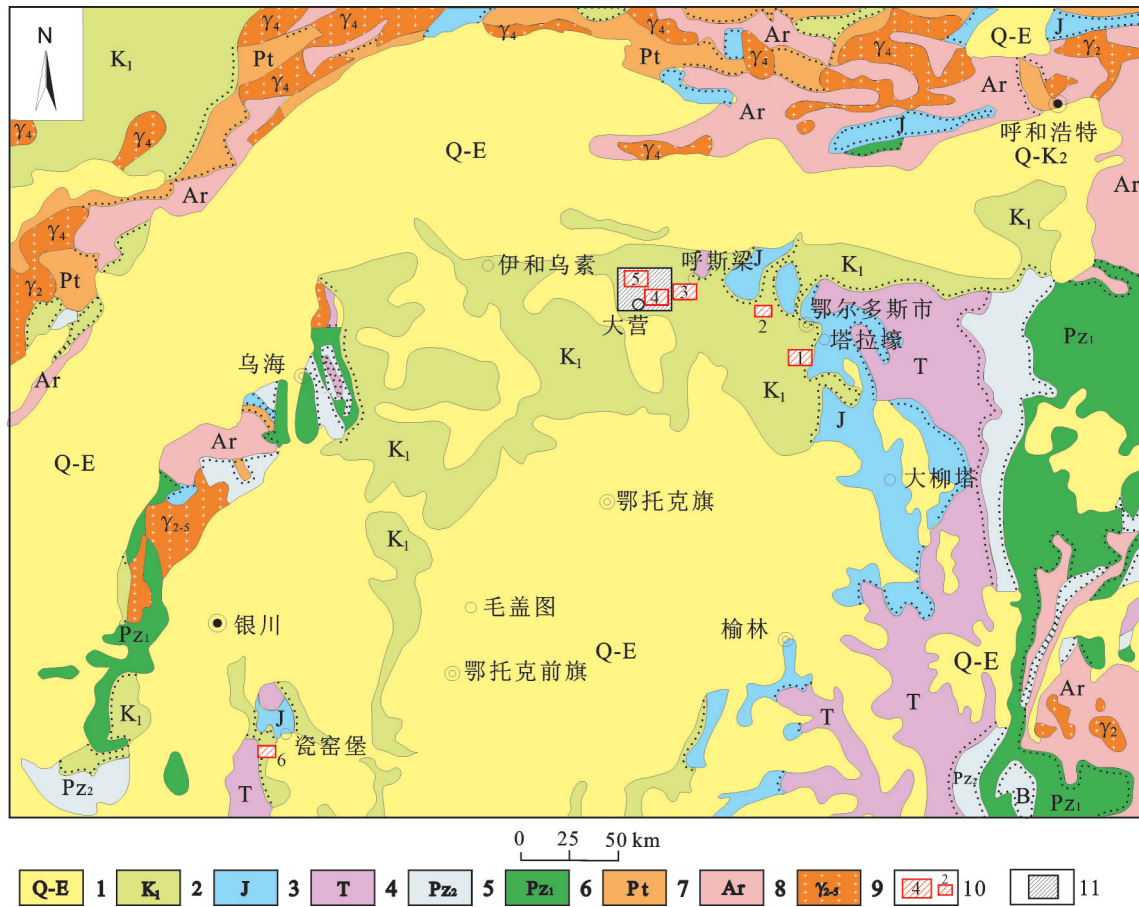


图1 鄂尔多斯盆地东北部铀矿地质图(附大营地区位置)

1—第四系-新生界;2—下白垩统;3—侏罗系;4—三叠系;5—上古生界;6—下古生界;  
7—元古界;8—太古界;9—侵入岩及编号;10—矿床/矿点;11—大营地区范围

Fig. 1 Uranium geological map of Northeast Ordos Basin (with the location of Daying area)

1—Quaternary- Cenozoic; 2—Lower Cretaceous; 3—Jurassic; 4—Triassic; 5—Upper Paleozoic; 6—Lower Paleozoic; 7— Proterozoic; 8—Archaean;  
9—Intrusive rock and its serial number; 10—Deposit/ore spot; 11—Daying area

亚段和下亚段都是主要产铀层位。

鄂尔多斯盆地北部直罗组砂岩型矿床形成的绿色“氧化带”被认为是古氧化作用经过“二次还原”的产物。砂岩中的“绿色”主要为叶片状绿泥石呈薄膜状包裹岩石碎屑矿物引起(李子颖等, 2002)。岩石呈绿色的原因是由绿泥石-蒙脱石显微条带造成(向伟东等, 2006; 吴柏林等, 2007)。盆地北部直罗组发现矿石样品中碳酸盐方解石中发现了较多的油气包裹体(向伟东等, 2006; 李子颖等, 2007), 油气具有煤成烃来源的特点(彭云彪等, 2007), 油气向上逸散对砂岩型铀矿有改造(陈全红等, 2010; 权建平等, 2007)。目标层中黑色有机质碳同位素  $\delta^{13}C$  值为  $-26.1\text{‰} \sim -23.9\text{‰}$ , 介于下部延长组地层原油 ( $-32.7\text{‰} \sim -29.9\text{‰}$ )、油页岩、泥岩 ( $-28\text{‰}$

$\sim 30\text{‰}$ )与延安组煤样 ( $-22.4\text{‰} \sim -24.5\text{‰}$ )之间, 说明砂岩层中的黑色有机质脉体具有煤成气及油气混合来源(李子颖等, 2007)。对铀矿床赋矿砂体及不同程度矿化矿石酸解烃类分析, 发现了含量较高的煤型气(张复新等, 2006)。煤层在深埋藏变质演化过程中所形成的  $CH_4$  和  $H_2S$  可能是直罗组古层间氧化带发生大规模二次还原改造的主要地质营力(焦养泉, 2010)。

造成区域还原作用的驱动力是晚中生代—新生代区域构造体制的重大转换(张岳桥等, 2006), 和喜山期 55 Ma、25 Ma 和 5 Ma 等 3 个幕次构造隆升(陈刚等, 2007; 徐芹芹等, 2015; 丁超等, 2016)和多期次的构造热事件(赵孟为等, 1997; 任战利等, 1997; 孙少华等, 1997; 赵宏刚等, 2005), 加速了石



炭—二叠系烃源岩向油气转化,产生烃类流体,且由于剥蚀作用导致煤系地层载荷锐减,石炭—二叠系以及延安组的煤层气便大量析出逸散。特别是到古近纪河套断陷发育时,源于阴山山脉的含铀富氧流体被切断,这时铀储层砂体内部氧化与还原的地球化学场将发生重大变革,源于含煤岩系的还原能量将逐渐占主导地位,古层间氧化带便发生区域性的二次还原改造作用,这一过程使铀矿体得以完好保存。因此,该地区的古层间氧化带的“二次还原”的还原剂来源可能既有深部“油气的二次还原”,也有紧邻目的层直罗组下部的延安组含煤岩系的“煤成气”的贡献。

### 3 古层间氧化带的识别标志

宏观岩石学特征的研究有助于提高钻孔岩芯编录的准确性,微观的岩石矿物学以及地球化学特征可以为层间氧化带的判别提供更为精确的信息。

#### 3.1 岩石矿物学特征

##### 3.1.1 宏观岩石学识别标志

鄂尔多斯盆地大营铀矿床中直罗组目的层中识别出了完全氧化带、过渡带和还原带,经二次还原的绿色、灰绿色砂岩和古老残留的钙质胶结红色砂岩都属于氧化砂体范畴。

##### (1) 古完全氧化带

古完全氧化带内的主要岩石类型是红色、绿色以及灰绿色砂岩。其中红色砂岩在研究区分布较少,基本都是呈透镜状存在于绿色砂岩中,以中粒、粗粒为主。还可见红色中间见绿色斑点或红色局部呈灰绿色的砂岩(图2a)。早期氧化作用形成的红色或黄色氧化岩石被改造为现在的绿色或浅绿色岩石,其内仍见红色、黄色古氧化残留体,且绿色岩石的空间展布保留了早期层间氧化带的形态,故称之为“古氧化”带。

绿色、灰绿色砂岩(图2b、c)在该地区较为普遍存

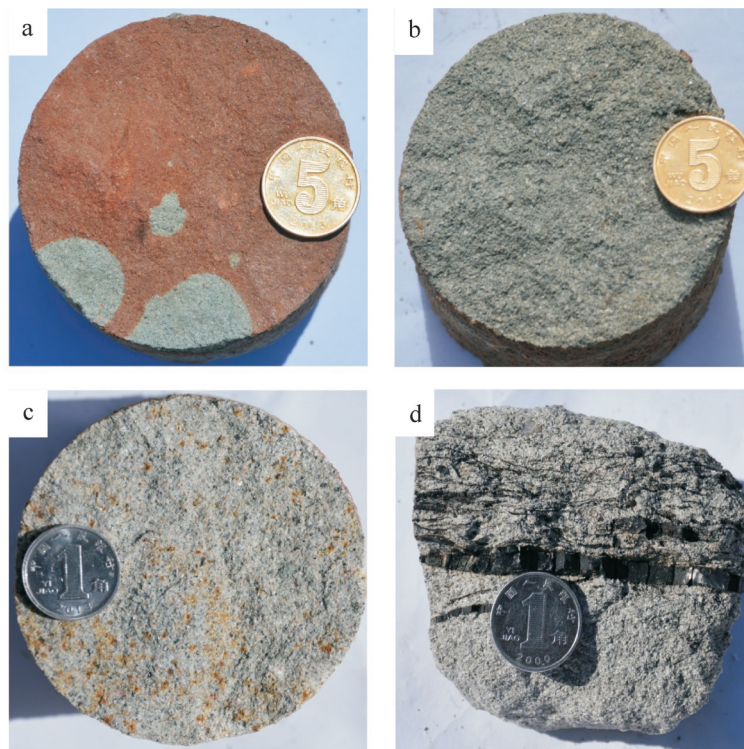


图2 大营地区典型古氧化-还原带砂岩宏观岩石学特征照片

a—古完全氧化带红色砂岩:褐红色极细砂岩,局部呈灰绿色;b—绿色中砂岩;c—古完全氧化带绿色砂岩:浅灰绿色中砂岩,见褐色氧化斑点;d—灰色中砂岩,含大量镜煤条带

Fig.2 Typical macroscopic petrologic characteristics of ancient oxidation-reduction zone in Daying area

a—Old completely oxidized zone red sandstone, fine sandstone, partial grayish green; b—Green medium sandstone;

c—Old completely oxidized zone green sandstone, shallow grayish green medium sandstone, containing brown oxidation spots; d—Gray medium sandstone, containing a lot of vitrain stripe



在,可以看到二次还原过程中保留的古氧化残留,即红色砂岩向绿色砂岩过渡,表现为红绿混杂的砂岩,即绿色砂岩中有零星的、形态各异的红色斑点,是原始氧化带中褐铁矿化或赤铁矿化的记录(图2c)。该区绿色、灰绿色砂岩应属于古层间氧化带。

### (2)过渡带

铀矿化通常发生于绿色砂岩与灰色砂岩过渡部位的灰色砂体中,且以中、粗砂岩为主,一般较为疏松,颜色往往较暗。灰色含矿砂岩上部或下部往往可见到大量的镜煤条带和黄铁矿。

### (3)还原带

与鄂尔多斯盆地南部一样(邢秀娟等,2006),该区主要含铀层位富含植物炭屑、分散有机质及黄铁矿,夹有透镜状、条带状煤线,具备丰富的还原物质,有利于铀元素的还原富集,常见镜煤条带(图2d),炭屑轮廓清楚,并无被氧化迹象,黄铁矿呈浸染状或结核状分布于砂体中,在此类砂岩中可见到保存较为完整的植物叶片。

#### 3.1.2 微观岩石矿物学识别标志

##### (1)陆源碎屑及填隙物组分

从绿色砂岩、红色砂岩至含矿岩石再到原生灰色砂岩,石英、长石、岩屑和云母溶蚀程度是较为有规律的,植物碎屑及钙质胶结物的含量依次变化(表1)。

##### (2)矿物含量特征

不同分带的砂岩常见矿物组成基本一致,均以石英、长石为主。古完全氧化带红色砂岩中黏土矿物含量较高,石英、长石含量相对变低;过渡带灰色含矿砂岩中含较低的绿泥石。砂岩中均含较高的蒙脱石。

### (3)矿物蚀变类型

大营地区主要存在褐铁矿化、黏土化、黄铁矿化、碳酸盐化和铀矿化等。褐铁矿实际上是隐晶质的针铁矿,其常将颗粒整体浸染呈褐色,或分布于颗粒之间。褐铁矿化(图3a)主要见于古完全氧化带红色砂岩中,在灰绿色(带褐红色斑点)砂岩也可见到。黏土化作用主要为蒙脱石化、绿泥石化(图3b)、水云母化、高岭石化等,其中绿泥石化主要见于古完全氧化带绿色、灰绿色砂岩中。黄铁矿化主要见于过渡带灰色含矿砂岩和还原带原生灰色砂岩中,可分为两期。

第一期为成岩期黄铁矿,主要表现为分布于填隙物之中的粒状黄铁矿(图3c、d);第二期为成矿期黄铁矿,常表现为与铀矿物伴生(图3e、f)。碳酸盐化主要见于红色砂岩、灰色砂岩中,绿色砂岩较少见且多为零星分布。大多以胶结物形式存在于颗粒之间(图3g),且交代颗粒边缘,有的充填于颗粒裂隙之中,也可见期次性明显的碳酸盐胶结物,反映出后生蚀变作用的多期次性(图3h)。

## 3.2 岩石地球化学特征

### 3.2.1 常量元素特征

还原带原生灰色砂岩中SiO<sub>2</sub>含量最高,古完全氧化带的氧化砂岩中较低,可能是后生氧化蚀变容易使部分石英发生溶蚀作用,导致SiO<sub>2</sub>亏损。从红色砂岩(古完全氧化带)→绿色砂岩(古完全氧化带)→灰色含矿砂岩→原生灰色砂岩,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和K<sub>2</sub>O含量依次递增;K、Al含量的变化可能是受钾长石蚀变形成黏土矿物,导致其在溶液中顺层迁移的影响。

古完全氧化带红色砂岩的CaO含量普遍高于其他类型砂岩,其次是过渡带含矿砂岩较高,还原

表1 大营地区陆源碎屑及填隙物组分在不同氧化分带中的特征

Table 1 Terrigenous clastic and interstitial materials component characteristics in different oxidation zones in Daying area

碎屑及填隙物组分	氧化带	过渡带	还原带
石英	边缘凹凸不平,有的呈锯齿状,与周围碳酸盐胶结物接触	介于中间	多数石英颗粒轮廓较为清晰,溶蚀不明显
长石	溶蚀较为强烈,尤其边缘溶蚀更强烈	边部可见到部分的溶蚀现象	低于其他类型岩石,边缘轮廓较为清晰
岩屑	强烈溶蚀	溶蚀现象较为明显	弱溶蚀
云母	绿色砂岩云母溶蚀较为严重、红色砂岩次之;	云母蚀变较弱	云母蚀变弱或无蚀变
植物碎屑	较少	灰色含矿砂岩中较多	较多
钙质含量	古完全氧化带红色砂岩中钙质含量最高	灰色含矿砂岩中钙质胶结物存在较为普遍	较少

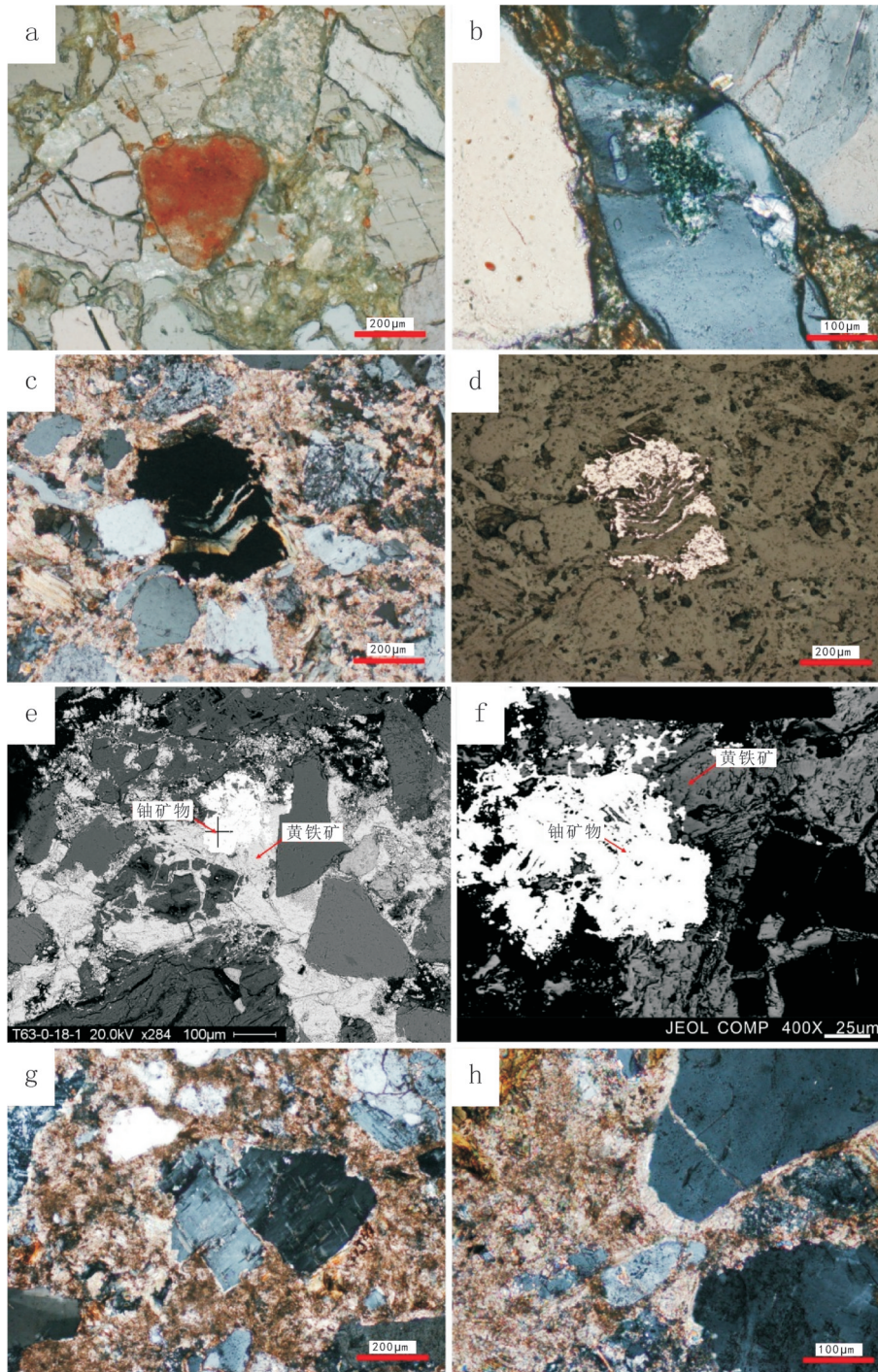


图3 大营地区典型古氧化-还原带微观岩石学特征照片

a—褐铁矿浸染颗粒整体或分布于颗粒之间,反射光;b—绿泥石化,正交偏光;c—被钙质胶结物包裹的粒状黄铁矿,正交偏光;d—粒状黄铁矿,反射光;e—铀矿物与黄铁矿共生,扫描电镜;f—铀矿物与黄铁矿共生,扫描电镜;g—方解石充填于颗粒之间,部分交代颗粒边缘,正交偏光;h—碳酸盐多期次性,正交偏光

Fig.3 Typical microscopic petrologic characteristics photos of ancient oxidation-reduction zone in Daying area  
 a-Limonite disseminated wholly or particles distributed between the particles, reflected light; b-Chloritization, crossed nicols; c-Granular pyrite wrapped by calcareous cement, crossed nicols; d-Granular pyrite, reflected light; e-Coexistence of uranium minerals and pyrite, scanning electron microscope; f-Coexistence of uranium minerals and pyrite, scanning electron microscope; g-Calcite filled in between the particles, and some metasomatic particles' s edge, crossed nicols; h-Multiperiodic carbonate, crossed nicols



带原生灰色砂岩最低,说明古完全氧化带红色砂岩被钙质胶结,较致密,没有被二次还原为绿色,过渡带含矿砂岩钙的含量较高印证了在铀成矿过程中伴随着钙离子的沉淀。在铀成矿部位或者在其附近钙质胶结明显增多的现象较为普遍,这就说明后期碳酸盐物质的沉淀与铀成矿可能具有一定的成因联系。

### 3.2.2 环境敏感参数特征

大营地区对氧化-还原环境反映较为敏感的环境参数特征也呈现明显的分带性(表2)。

从红色砂岩→绿色砂岩→灰色含矿砂岩→原生灰色砂岩,  $S^{2-}$ 、 $S_{全}$ 的含量均呈现先增加后减小的趋势,并且都在灰色含矿砂岩中达到最高; $\Delta Eh$ 值绿色砂岩中也比较高,灰色含矿砂岩和原生灰色砂岩最高,红色砂岩中最低,绿色砂岩中较高的 $\Delta Eh$ 值可能是“二次还原”作用所致。

红色钙质砂岩(残留古氧化带)中 $w(Fe_2O_3)/w(FeO)$ 比值最高,达1.91,这是由于氧化作用使 $Fe^{2+}$ 变为 $Fe^{3+}$ ,导致 $Fe_2O_3$ 含量升高(表2)。绿色砂岩(氧化带)中 $w(Fe_2O_3)/w(FeO)$ 比值最低,直罗组下亚段、上亚段中 $w(Fe_2O_3)/w(FeO)$ 比值分别为0.67、0.68(表2),反映古氧化岩石经“二次还原”改造后的还原能力更强;灰色砂岩(过渡带) $w(Fe_2O_3)/w(FeO)$ 比值高于绿色砂岩(氧化带)和灰色砂岩(还原带),低于红色砂岩(残留古氧化带),说明铀成矿作用发生在氧化还原过渡带。而绿色氧化带砂岩型的二价铁含量高,当岩石中二价铁的含量较高时,则呈不同深浅的绿色,如浅绿、暗绿、灰绿色等,这可能也是该类型砂岩呈灰绿色或绿色的一个原因。

低价硫含量在直罗组下亚段、上亚段段氧化带绿色中含量较低,分别为0.07%和0.04%,在氧化残留红色钙质砂岩中含量最低,为0.03%,表明氧化残留红色钙质砂岩未经过“二次还原”过程。还原带的灰色砂岩与过渡带带的矿石中低价硫含量均在0.24%以上,是前者含量的2倍以上(表2),尤以矿石中含量最高,表明氧化带内砂岩中的黄铁矿经古氧化作用几乎全部消失,而矿石中低价硫含量最高是后期还原作用形成蚀变黄铁矿的结果。

有机碳含量在各分带中虽变化不大,但仍具规律性。还原带灰色砂岩中较高,氧化带绿色砂岩中含量降低(表2),矿石中有机碳含量最高。反映了氧化带绿色砂岩曾经遭受氧化,有机质碎屑被大量氧化的特点;过渡带内矿石中有机碳含量高主要与赋矿砂岩的碎屑颗粒粒度有关。铀矿化与细小的分散状有机质碎屑吸附作用有关,而这样的有机质碎屑多存在于中细砂岩中。

岩石比电位( $\Delta Eh$ 值)在各分带中变化明显。直罗组下亚段、上亚段氧化带的绿色砂岩中 $\Delta Eh$ 值分别为30.92 mV、29.53 mV,过渡带灰色矿石中分别为38.08 mV、37 mV,还原带灰色砂岩中分别为42.15 mV、41.66 mV。其变化规律与有机质C含量的变化趋势相同,呈递增趋势。

## 4 古层间氧化带的空间分布规律

大营地区层间氧化带呈现绿色和灰绿色,局部保留钙质胶结的红色砂岩,与皂火壕和纳岭沟地区具有相似的特征。直罗组上、下两个层位的古层间氧化带具有明显的分带性,古完全氧化带位于北

表2 大营地区不同类型砂岩的环境敏感参数对比

Table 2 Comparison of environmentally sensitive parameters of different types of sandstone in Daying area

所在层位	宏观分带	样品个数	FeO/%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	C <sub>有</sub> /%	S <sup>2-</sup> /%	S <sub>全</sub> /%	ΔEh/mV	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO
J <sub>2</sub> <sup>z1</sup>	残留红色古氧化砂体	5	1.45	2.78	0.16	0.03	0.01	21.2	1.91
	绿色(氧化带)	56	1.75	1.07	0.15	0.07	0.09	29.53	0.68
J <sub>2</sub> <sup>z1-2</sup>	灰色(过渡带)	28	1.59	1.82	0.17	0.24	0.30	37.00	1.15
	灰色(还原带)	97	1.67	1.66	0.18	0.91	0.29	42.15	1.04
	绿色(氧化带)	25	1.87	1.03	0.12	0.04	0.05	30.92	0.67
J <sub>2</sub> <sup>z1-1</sup>	灰色(过渡带)	53	1.60	1.67	0.15	0.32	0.44	38.08	1.08
	灰色(还原带)	66	1.66	1.39	0.16	0.13	0.22	41.66	0.91

注: J<sub>2</sub><sup>z1-1</sup> - 直罗组下段下亚段, J<sub>2</sub><sup>z1-2</sup> - 直罗组下段上亚段, J<sub>2</sub><sup>z1</sup> - 直罗组下段, C<sub>有</sub> - 有机碳含量, S<sub>全</sub> - 全硫含量。



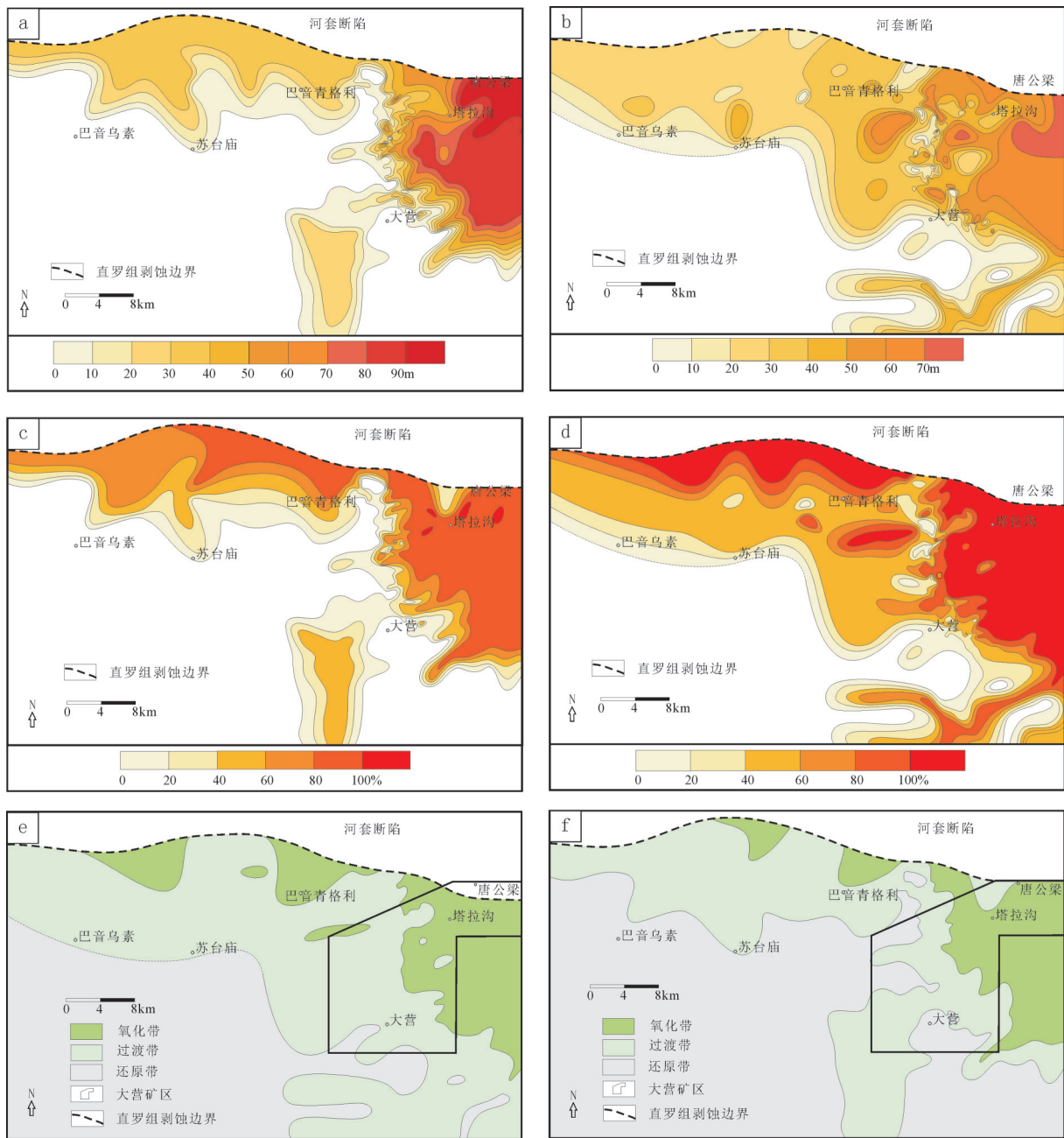


图4 大营地区直罗组下段下亚段和下段上亚段氧化带空间分布图

a—直罗组下段下亚段氧化砂体厚度图;b—直罗组下段上亚段氧化砂体厚度图;c—直罗组下段下亚段氧化砂体百分比等值线图;d—直罗组下段上亚段氧化砂体百分比等值线图;e—直罗组下段下亚段氧化带平面分布图;f—直罗组下段上亚段氧化带平面分布图

Fig. 4 Spatial distribution of ancient oxidation-reduction zone of upper sub-member and lower sub-member of lower Zhiluo Formation in Daying area

a—Oxidized sandbody thickness map of lower sub-member of lower Zhiluo Formation; b—Oxidized sandbody thickness map of upper sub-member of lower Zhiluo Formation; c—Oxidized sandbody percentage contour map of lower sub-member of lower Zhiluo Formation; d—Oxidized sandbody percentage contour map of upper sub-member of lower Zhiluo Formation; e—Oxidation zone plane distribution map of lower sub-member of lower Zhiluo Formation; f—Oxidation zone plane distribution map of upper sub-member of lower Zhiluo Formation

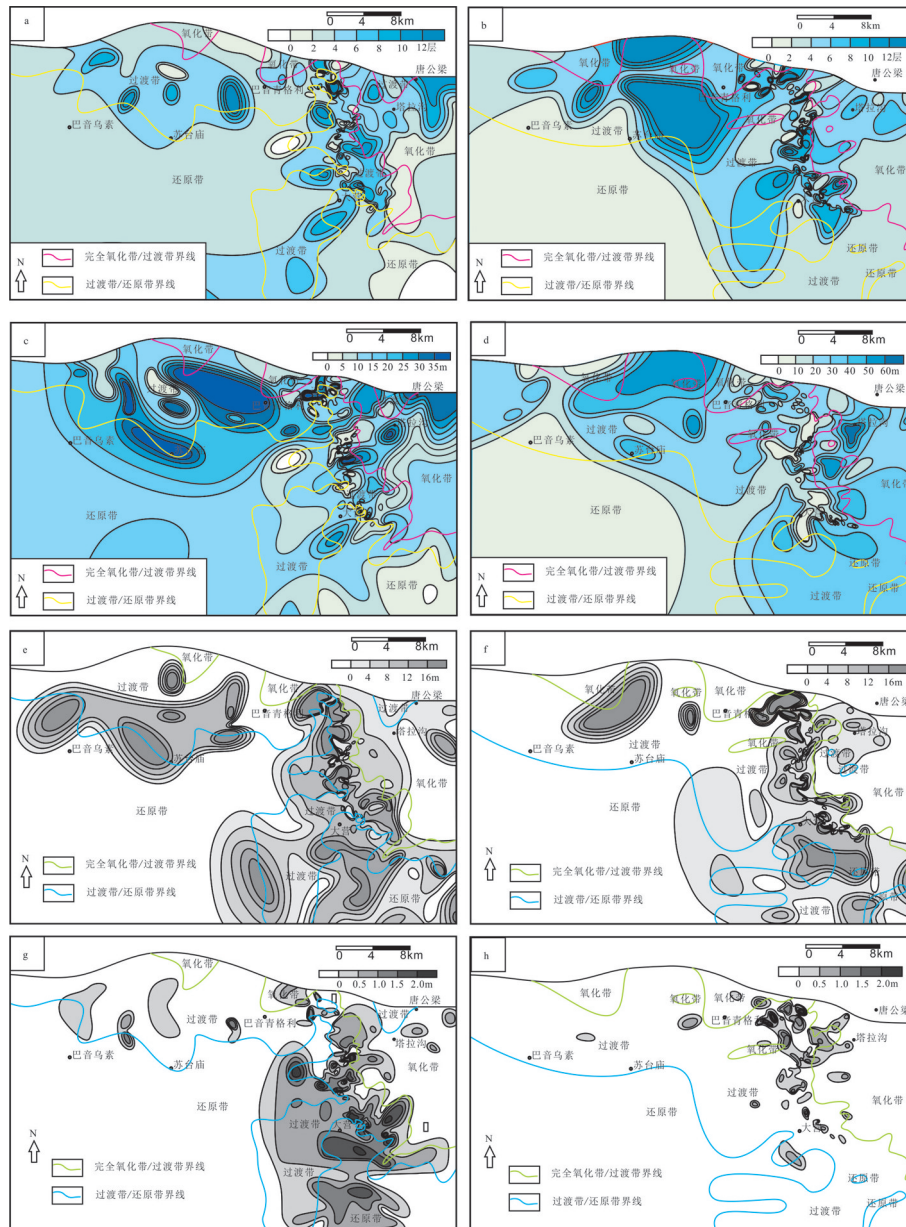


图5 大营地区直罗组下段下亚段和下段上亚段古层间氧化带的控制因素

a—直罗组下段下亚段隔挡层数量与层间氧化带空间配置;b—直罗组下段上亚段隔挡层数量与层间氧化带空间配置;c—直罗组下段下亚段累积厚度与层间氧化带空间配置;d—直罗组下段上亚段累积厚度与层间氧化带空间配置;e—直罗组下段下亚段暗色泥岩累积厚度与层间氧化带空间配置;f—直罗组下段上亚段暗色泥岩累积厚度与层间氧化带空间配置;g—直罗组下段下亚段煤层累积厚度与层间氧化带空间配置;h—直罗组下段上亚段煤层累积厚度与层间氧化带空间配置图

Fig.5 Controlling factors of ancient oxidation - reduction zone of upper sub - member and lower sub - member of lower Zhiluo Formation in Daying area

a—Number of block layers and interlayer oxidation zone spatial distribution of lower sub-member of lower Zhiluo Formation; b—Number of block layers and interlayer oxidation zone spatial distribution of upper sub-member of lower Zhiluo Formation; c—Thickness and interlayer oxidation zone spatial distribution of lower sub-member of lower Zhiluo Formation; d—Thickness and interlayer oxidation zone spatial distribution of upper sub-member of lower Zhiluo Formation; e—Cumulative thickness of dark mudstone and interlayer oxidation zone spatial distribution of lower sub-member of lower Zhiluo Formation; f—Cumulative thickness of dark mudstone and interlayer oxidation zone spatial distribution of upper sub-member of lower Zhiluo Formation; g—Cumulative thickness of coal seam and interlayer oxidation zone spatial distribution of lower sub-member of lower Zhiluo Formation; h—Cumulative thickness of coal seam and interlayer oxidation zone spatial distribution of lower sub-member of lower Zhiluo Formation

部,而还原带位于南部(图4)。

## 5 古层间氧化带的控制因素

研究发现铀储层规模、铀储层非均质性以及暗色泥岩和煤层等对古层间氧化带的空间分布具有一定的控制作用。

### 5.1 铀储层规模对层间氧化带的控制

古完全氧化带主要发育于铀储层厚度相对较大的部位(图4),而还原带发育于铀储层厚度相对较小的部位,层间氧化带前锋线位于铀储层厚度变薄、含砂率减低的区带(图4)。

### 5.2 铀储层内部沉积非均质性对层间氧化带的控制

直罗组下段下亚段和上亚段铀储层内部隔挡层数量主要为2~4层,局部地区可以达到12层;过渡带铀储层内部隔挡层数量主要为6层以上(图5a、b)。隔挡层数量增多的位置可以阻挡古完全氧化带的继续发育,为其提供了良好的氧化-还原障,有利于地下水中铀的沉淀,是有利的成矿场所。

氧化带主要分布在隔挡层厚度15 m以下的地区,过渡带主要位于隔挡层厚度10 m以下的区域中(图5c、d)。隔挡层厚度较薄的地区有利于层间氧

化作用的进行;过渡带中隔挡层厚度较古完全氧化带较大,有利于地下水中铀的沉淀。

### 5.3 暗色泥岩、煤层对层间氧化带的控制

古完全氧化带内部基本没有暗色泥岩的分布或仅有部分低值分布,而过渡带中暗色泥岩累积厚度相对较厚(图5e、f)。

古完全氧化带发育在煤层累积厚度小于0.5 m或者没有煤层的区域,过渡带中的煤层较为发育,平均厚度为1~1.5 m,局部地区可达2 m(图5g、h)。煤层同暗色泥岩相似,可以代表一种还原环境,同时,煤中的有机质对含氧含铀水中的铀等离子有较强的吸附作用。在过渡带中,受煤层以及含煤岩系的影响,含氧含铀水的氧化能力降低,是较好的氧化-还原障,有利于层间氧化带的发育,有利于铀的富集沉淀。

综上所述,铀储层的规模制约着层间氧化带的规模,铀储层的非均质性制约着古层间氧化带发育的轨迹,而还原剂丰度则控制着古层间氧化带推进的里程及前锋线的具体位置(图6)。含铀岩系中的薄煤层(线)、镜煤化碎屑、暗色泥岩和黄铁矿等是最主要的还原介质。

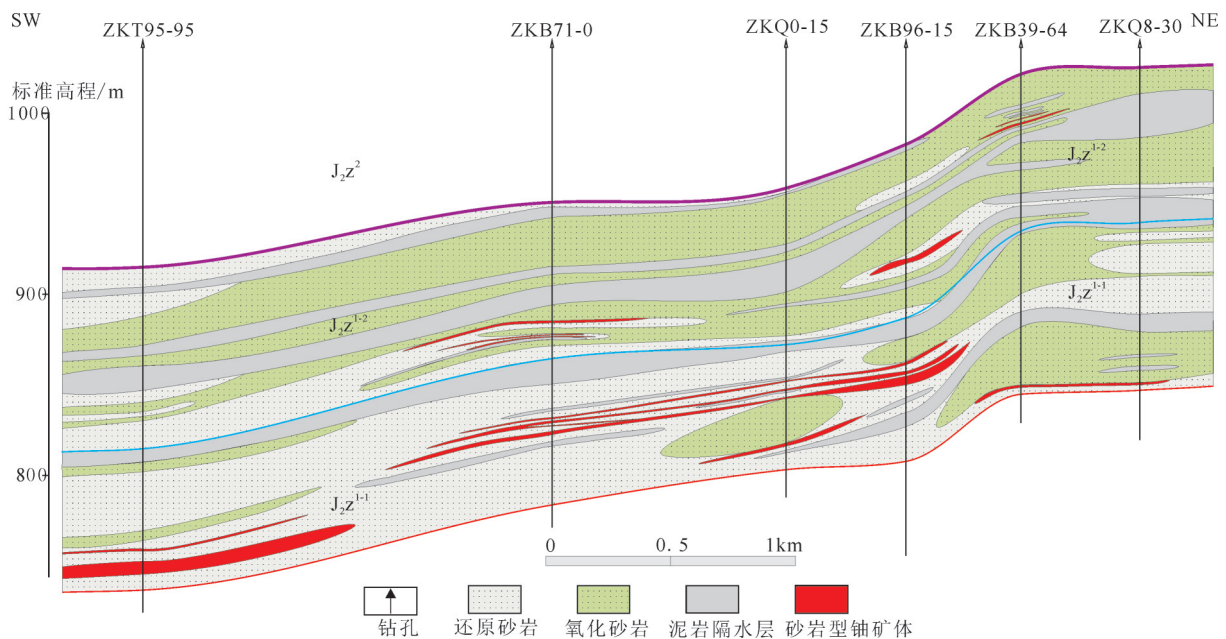


图6 大营西地区直罗组下段古层间氧化带与铀矿化分布规律走向剖面图

Fig. 6 Trend sectional view of ancient oxidation-reduction zone and uranium mineralization of lower Zhiluo Formation in Daying area



## 6 讨 论

鄂尔多斯盆地北部古层间氧化带的形成和铀矿床形成受构造背景、古层间渗入水动力条件、后生还原改造作用及新构造运动控制,预富集、古层间氧化和后生还原3个阶段控制了古层间氧化带和铀矿床的发育。

直罗组辫状河含铀灰色砂体是铀成矿的物质基础,为后期间氧化成矿作用创造了铀源基础。直罗组早期是在温暖潮湿气候条件下接受沉积,富含大量的腐殖质、炭质和黄铁矿等还原介质可吸附铀,使地层本身在沉积过程中富集了大量的铀。通过研究直罗组辫状河砂体的U-Tb同位素演化特征,计算样品中原始铀含量( $U_0$ )和铀的得、失( $\Delta U$ )情况,测得铀含量为 $2.40 \times 10^{-6} \sim 9.61 \times 10^{-6}$ ,平均为 $4.35 \times 10^{-6}$ ;原始铀含量 $U_0$ 为 $6.94 \times 10^{-6} \sim 101.01 \times 10^{-6}$ ,平均为 $21.95 \times 10^{-6}$ 。

古层间氧化作用阶段是铀的沉淀富集阶段,是形成大营地区铀矿床的主要成矿阶段。晚侏罗世—早白垩世早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,古气候由潮湿转变为干旱半干旱,来自蚀源区的含氧含铀水沿地层中砂体向下渗透,形成顺沿河道砂体由NW向SE运移的含氧含铀层间水,长期保持了一个与辫状河砂体的展布方向一致的地下水补、径、排系统,含铀层间水在砂岩层运移过程中将其预富集的铀不断淋出,铀随着含氧水不断向前运移和富集。

在成矿作用后直到现在,由于构造活动和抬升减压等作用伴随多期次的烃类流体活动。烃类流体沿断裂构造上升扩散到粒度较粗、松散的辫状河砂体中,同时受到顶部泥岩的屏蔽作用,使得烃类流体聚集于砂体上部,并在砂岩层中横向运移和扩散,造成对红色和黄色古层间氧化带的二次还原作用,形成灰绿色砂岩。

## 7 结 论

(1)古完全氧化带主要为红色砂岩和绿色砂岩,其中绿色砂岩经过了“二次还原”过程,“二次还原”的还原剂来源于深部油气和煤成气,含矿岩石产于过渡带灰色砂岩,还原带则主要为原生灰色不

含矿砂岩还原剂。

(2)不同类型砂岩的石英颗粒、长石颗粒、岩屑颗粒以及云母的溶蚀程度依次减弱;古完全氧化带红色砂岩以褐铁矿化、水云母化、高岭石化和方解石化为主;古完全氧化带绿色砂岩以绿泥石化、高岭石化、水云母化、黄铁矿化为主;过渡带含矿砂岩以铀矿化、黄铁矿化、碳酸盐化为主。

(3)有机碳、 $S^{2-}$ 、 $S_{全}$ 等的含量均在过渡带灰色含矿砂岩中的最高。 $FeO$ 在古完全氧化带绿色砂岩中最高,古完全氧化带红色砂岩中含量最低。 $\Delta Eh$ 值在古完全氧化带绿色砂岩中最高。 $CaO$ 在过渡带灰色含矿砂岩中较高。次要氧化物为 $Al_2O_3$ 和 $K_2O$ ,其含量自古完全氧化带红色砂岩→古完全氧化带绿色砂岩→过渡带灰色含矿砂岩→还原带原生灰色砂岩逐步增加。

(4)直罗组下段上、下亚段两个层位的古层间氧化带具有明显的分带性,古完全氧化带位于北部而还原带位于南部。

(5)影响研究区古层间氧化作用的关键制约因素是铀储层的规模、非均质性以及铀储层内部和周边还原介质的丰度。含铀岩系中的薄煤层(线)、镜煤化碎屑、暗色泥岩和黄铁矿等是最主要的还原介质。

**致谢:** 本文得到中国地质大学和核工业二〇八大队从事铀矿地质团队的全体老师、同学和同事的大力支持和帮助,在此一并致谢!

## References

- Chen Gang, Wang Zhiwei, Bai Guojuan, Sun Jianbo, Zhang Huiruo, Li Xiangdong. 2007. Meso-Cenozoic peak-age events and their tectono-sedimentary response in the Ordos basin[J]. *Geology in China*, 34(3): 375-383 (in Chinese with English abstract).
- Chen Quanhong, Li Keyong, Zhang Daofeng, Jin Shuanlian, Guo Yanqin, Pang Jungang, Yuan Zhen. 2010. The relationship between fan delta and hydrocarbon accumulation in Benxi-Taiyuan Formation, Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 37(2): 421-429 (in Chinese with English abstract).
- Ding Chao, Chen Gang, Guo Lan, Zhang Wenlong, Shi Xiaolin, Xu Xiaogang, Liu Teng. 2016. Differential uplift on the northeast margin of Ordos Basin: Evidence from apatite fission track analysis[J]. *Geology in China*, 43(4): 1238-1247 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jingbai, Li Shengxiang. 2007. Metallogenic characteristics, model and exploration prospect for the paleo-interlayer-oxidation type sandstone-hosted uranium deposits in China[J]. *Uranium*

- Geology, 23(1): 7–16 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Chen Anping, Wang Minfang, Wu Liqun, Yuan Haitao, Yang Qin, Zhang Chengze, Xu Zhicheng. et al. 2005. Genetic Analysis of the Bottom Sandstone of Zhiluo Formation, Northeastern Ordos Basin: Predictive base of spatial orientation of sandstone–type uranium deposit[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 23(3): 371–379 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Chen Anping, Yang Qin, Peng Yunbiao, Wu Liqun, Miao Aisheng, Wang Minfang, Xu Zhicheng. 2005. Sand body heterogeneity: one of the key factors of uranium metallogenesis in Ordos basin[J]. Uranium Geology, 21(1): 8–15 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Rong Hui, Peng Yunbiao, Wan Junwei, Miao Aisheng. Uranium reservoir architecture and ore–forming flow field study: A key of revealing Dongsheng sandstone–type uranium deposit mineralization mechanism[J]. Geological Science and Technology Information, 31(5): 94–104 (in Chinese with English abstract).
- Jiao YQ, Wu LQ, Wang MF, Xu ZC. 2005. Forecasting the occurrence of sandstone–type uranium deposits by spatial analysis: An example from the northeastern Ordos Basin, China[C]//Mao Bierlein (eds.). Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Berlin Heidelberg: Springer–Verlag. 273–275 (in English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Yang Qin. 2007. Uranium reservoir: A new concept of sandstone–type uranium deposits geology[J]. Geological Science and Technology Information, 26(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Yang Shengke, Lv Xinbiao, Yang Qin, Wang Zhenghai, Wang Minfang. 2006. Uranium Reservoir sedimentology—Basis of Sandstone–type Uranium Exploration and Development[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Fang Xiheng, Chen Anping, Ou Guangxi, Xiao Xinjian, Sunye, Liu Chiyang, Wang Yi. 2006. Causes of gray–green sandstone in Sandstone hosted uranium target layer in North Ordos Basin[J]. Science in China(Series D: Earth Science), (Supp.1): 139–146 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Jiao Yangquan, Chen Anping, Fang Xiheng, Xia Yuliang, Zhang Ke, Sun Ye. 2010. A special kind of sandstone–type uranium deposit related to Jurassic palaeochannel systems in the northeastern Ordos Basin, China[J]. World Nuclear Geoscience, 2004, 27(1)(in Chinese with English abstract).
- Miao Aisheng, Jiao Yangquan, Chang Baocheng, Wu Liqun, Rong Hui, Liu Zhengbang. 2010. Detailed investigation of the paleo–interlayer–oxidation zone of Dongsheng Uranium Deposit in Northeastern Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information. 2004, 29(3): 55–61 (in Chinese with English abstract).
- Miao Aisheng, Lu Qi, Liu Huifang, Xiao Ping. 2010. Electronic microscopy study on the uranium minerals of Dongsheng Sandstone–type uranium deposit in Ordos Basin[J]. Geoscience, 24(4): 785–792 (in Chinese with English abstract).
- Peng Yunbiao, Lu Qi, Liu Huifang, Xiao Ping. 2007. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution and massive sandstone–type uranium mineralization of North Ordos Basin[J]. Acta Mineralogica Sinica, 27(Supp.): 110–111 (in Chinese with English abstract).
- Peng Yunbiao, Chen Anping, Li Ziyang, Fang Xiheng, Ou Guangxi. 2006. Discussion of particularity of Dongsheng sandstone–type uranium deposit[J]. Mineral Deposits, 25(Supp.): 259–252 (in Chinese with English abstract).
- Peng Yunbiao, Chen Anping. 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).
- Quan Jianping, Fan Tailiang, Xu Gaozhong, Li Weihong, Chen Hongbin. 2007. Effects of hydrocarbon migration on sandstone–type uranium mineralization in basins of northern China[J]. Geology in China, 34(3), 470–476 (in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli, Zhan Zhongyuan. Late Mesozoic comparative research on the geothermal field of the Ordos basin and Qinshui Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 134–137 (in Chinese with English abstract).
- Sun Shaohua, Li Xiaoming, Gong Gelian, Liu Shunsheng. 1997. Study on the tectonic thermal events of ordos basin[J]. Chinese Sci. Bull., 42(3): 306–309(in Chinese).
- Wu bolin, Liu Chiyang, Zhang Fuxin, Fang Xiheng, Liu Xiong. 2006. 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, Qiu Xinwei. 2007. Geological and geochemical characteristics of escaped hydrocarbon epigenetic alteration in the Dongsheng mineral deposit and its significance[J]. Geology in China, 34(3): 455–462 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Weidong, Fang Xiheng, Li Tiangang, Chen Xiaolin, Gong Yaqing, Chen Huahan. 2006. Metallogenic characteristics and model of Dongsheng uranium deposit in Ordos basin, North China, North China[J]. Uranium Geology, 22(5): 257–266 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Weidong, Chen Xiaolin, Pang Yaqing, Fang Xiheng, Li Tiangang. 2006. Mineralogical and geochemical characteristics and genetic mechanism of gray–greenish alteration sandstone of the Dongsheng uranium deposit in the Ordos basin, North China[J]. Mineral Deposits, 25(Supp.): 261–264.
- Xing Xiujuan, Liu Yiqun, Fan Aiping. 2006. Genesis of sandstone–type uranium deposits: A case study in the Diantou area of the Ordos basin[J]. Geology in China, 33(3): 591–597 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qinqin, Ji Jianqing, Tu Jiayao, Hou Jianjun. 2015. Cenozoic continental deformation in northern China and its geodynamic Mechanism[J]. Geology in China, 42(6): 1633–1673(in Chinese with English abstract).

- Zhang Jindai, Xu Gaozhong, Chen Anping, Wang Cheng. 2005. Preliminary discussion on uranium metallogenic models of China's leachable sandstone-type uranium deposits[J]. Uranium Geology, 21(3): 139-145 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai, Xu Gaozhong, Lin Jingrong. 2006. The implication of six kinds of new sandstone-type uranium deposits to uranium resources potential in North China[J]. Geology in China, 33(5): 1434-1449 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai, Jian Xiaofei, Guo Qingyin. 2013. Uranium Resources Investigation and Evaluation in Mesozoic and Cenozoic Sedimentary Basins in Northern China (2000-2010) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen. 2006. Transition of the Late Mesozoic-Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos basin[J]. Geology in China, 33(1). 28-39 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Honggang. 2005. The relationship between tectonic-thermal evolution and sandstone-type uranium ore-formation in ordos basin[J]. Uranium Geology, 21(5): 275-282 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Mengwei, Ahrondt H, Wemmer K. 1997. The K-Ar isochron diagram and ages of illites from the Ordos basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 15(4): 148-151 (in Chinese with English abstract).
- 参考文献**
- 陈刚, 王志维, 白国娟, 孙建博, 章辉若, 李向东. 2007. 鄂尔多斯盆地中新世峰值年龄事件及其沉积-构造响应[J]. 中国地质, (3): 375-383.
- 陈全红, 李可永, 张道锋, 金栓联, 郭艳琴, 庞军刚, 袁珍. 2015. 鄂尔多斯盆地本溪组——太原组扇三角洲沉积与油气聚集的关系[J]. 中国地质, 42(2): 421-429.
- 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.
- 黄净白, 李胜祥. 2007. 试论我国古层间氧化带砂岩型铀矿床成矿特点、成矿模式及找矿前景[J]. 铀矿地质, 23(1): 7-16.
- 焦养泉, 陈安平, 王敏芳, 吴立群, 原海涛, 杨琴, 张承泽, 徐志诚. 2005. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组底部砂体成因分析——砂岩型铀矿床预测的空间定位基础[J]. 沉积学报, 23(3): 371-379.
- 焦养泉, 陈安平, 杨琴, 彭云彪, 吴立群, 苗爱生, 王敏芳, 徐志诚. 2005. 砂体非均质性是铀成矿的关键因素之一——鄂尔多斯盆地东北部铀成矿规律探讨[J]. 铀矿地质, 21(1): 8-15.
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 彭云彪, 万军伟, 苗爱生. 2012. 铀储层结构与成矿流场研究: 揭示东胜砂岩型铀矿床成矿机理的一把钥匙[J]. 地质科技情报, 31(5): 94-104.
- 焦养泉, 吴立群, 杨琴. 2007. 铀储层——砂岩型铀矿地质学的新概念[J]. 地质科技情报, 26(4): 1-7.
- 焦养泉, 吴立群, 杨生科, 吕新彪, 杨琴, 王正海, 王敏芳. 2006. 铀储层沉积学——砂岩型铀矿勘查与开发的基础[M]. 北京: 地质出版社.
- 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:地球科学), (S1): 139-146.
- 李子颖, 焦养泉, 陈安平, 方锡珩, 夏毓亮, 张珂, 孙晔. 2010. 鄂尔多斯盆地东北部侏罗系古河道中一种特殊的砂岩型铀矿床[J]. 世界核地质科学, 27(1).
- 苗爱生, 焦养泉, 常宝成, 吴立群, 荣辉, 刘正邦. 2010. 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, 29(3): 55-61.
- 苗爱生, 陆琦, 刘惠芳, 肖平. 2010. 鄂尔多斯盆地东胜砂岩型铀矿中铀矿物的电子显微镜研究[J]. 现代地质, 24(4): 785-792.
- 彭云彪, 陈安平, 焦养泉. 2007. 鄂尔多斯盆地北部中、新生代构造演化与大规模砂岩型铀成矿作用[J]. 矿物学报, 27(增刊), 110-111.
- 彭云彪, 陈安平, 李子颖, 方锡珩, 欧光习. 2006. 东胜砂岩型铀矿床特殊性讨论[J]. 矿床地质, 25(增刊): 259-252.
- 彭云彪, 陈安平. 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.
- 权建平, 樊太亮, 徐高中, 李卫红, 陈宏斌. 2007. 中国北方盆地中油气运移对砂岩型铀成矿作用讨论[J]. 中国地质, 34(3): 470-476.
- 任战利, 赵重远. 1997. 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, 15(2): 134-137.
- 孙少华, 李小明, 龚革联, 刘顺生. 1997. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究[J]. 科学通报, 42(3): 306-309.
- 吴柏林, 刘池阳, 张复新, 方锡珩, 刘雄. 2006. 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, 邱欣卫. 2007. 论东胜矿床油气逸散蚀变的地质地球化学特点及其意义[J]. 中国地质, 34(3): 455-462.
- 向伟东, 陈晓林, 庞雅庆, 方锡珩, 李田港. 2006. 东胜铀矿床灰绿色蚀变砂岩矿物地球化学特征及其成因探讨[J]. 矿床地质, 25(增刊): 261-264.
- 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): 257-266.
- 刑秀娟, 柳益群, 樊爱萍. 2006. 鄂尔多斯盆地店头地区砂岩型铀矿成因初步探讨[J]. 中国地质, 33(3): 591-597.
- 徐芹芹, 季建清, 涂继耀, 侯建军. 2015. 中国北方新生代大陆变形及其动力学机制分析[J]. 中国地质, 42(6): 1633-1673.
- 张金带, 徐高中, 陈安平, 王成. 2005. 我国可地浸砂岩型铀矿成矿模式初步探讨[J]. 铀矿地质, 21(3): 139-145.
- 张金带, 徐高中, 林锦荣, 彭云彪, 王果. 2006. 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, 33(5): 1434-1449.
- 张金带, 简晓飞, 郭庆银. 2013. 中国北方中生代沉积盆地铀矿资源调查评价(2000-2010)[M]. 北京: 地质出版社.
- 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): 28-39.
- 赵宏刚. 2005. 鄂尔多斯盆地构造热演化与砂岩型铀成矿[J]. 铀矿地质, 21(5): 275-282.
- 赵孟为, Ahrendt H, Wemmer K. 1997. 鄂尔多斯盆地伊利石K-Ar等时线图解与年龄[J]. 沉积学报, 15(4): 148-151.