

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.02.014

海拉尔盆地贝尔凹陷伊敏组上段骨架砂体 特征及其铀成矿潜力

黄少华^{1,2}, 周文博³, 东艳^{1,2}, 秦明宽^{1,2,*}

(1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2. 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029;
3. 核工业二四三大队, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要:在海拉尔盆地贝尔凹陷中部,发育一套规模较大的稳定骨架砂体。研究表明该砂体属于下白垩统伊敏组上段纵向辫状河流相,埋深一般为200~500 m,总厚度为50~150 m,单层厚度在5 m以上,横向上连通性好。砂岩岩性主要为砂砾岩、中粗砂岩,其次为细砂岩,结构疏松,透水性良好,岩屑含量高,成分和结构成熟度偏低,为岩屑砂岩;其ZTR指数为25%~52%,含较多不稳定重矿物,均反映出近物源沉积的特点。砂岩的黏土矿物以蒙脱石含量高、高岭石含量很少为典型特征,碳屑和黄铁矿较少,指示偏碱性水体环境;原生砂岩U含量、有机碳、全硫及△Eh的平均值分别为 4.91×10^{-6} 、0.08%、0.03%和16.25mV,表明砂体内部铀源较好,但自身还原容量偏低,聚铀能力相对不足。目前,已发现铀矿化主要产于黄色层间氧化带两侧的灰色砂体中,平米铀量为0.03~0.38 kg/m²,具有厚度薄、品位低、规模小的特征。通过综合分析,认为该骨架砂体具备较好的层间氧化铀成矿潜力。

关键词:骨架砂体;伊敏组上段;成矿特征;砂岩型铀矿;贝尔凹陷

中图分类号:P612

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2021)02-0166-13

Characteristics of Host Sandbody and Its Uranium Metallogenic Potential of the Upper Member of Yimin Formation in Bei' er Depression, Hailar Basin

HUANG Shaohua^{1,2}, ZHOU Wenbo³, DONG Yan^{1,2}, QIN Mingkuan^{1,2,*}

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Technology, Beijing 100029, China;
3. Geologic Party No. 243, CNNC, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China)

Abstract: large-scale stable host sandbodies were discovered in the central Bei'er depression of Hailar Basin. The sandstone belonged to the longitudinal braided fluvial facies of the upper Yimin Formation in Low Cretaceous. It was at 200~500 m deep, and the whole thickness ranged from 50 m to 150m with a single being 5m. The lithology was composed mainly of glutenite and

收稿日期:2020-05-12;修回日期:2020-12-01

基金项目:核工业地质局地勘科研项目(地 D1804),核工业地质局地勘生产项目(201911),国家自然科学基金项目(41902084)。

作者简介:黄少华(1989-),男,江西临川人,高级工程师,工学博士,从事砂岩型铀矿成矿规律与成矿预测研究。E-mail: huangshaohua20@126.com。

* 通讯作者:秦明宽(1968-),男,四川巴中人,研究员级高级工程师,工学博士,从事盆地砂岩型铀矿研究。E-mail: qinmk9818@163.com。

mediumcoarse sands followed of fine sandstone. The sandstone shows loose structure, excellent permeability, high debris content and low maturity of composition and structure. The ZTR index of 25%~52% and the unstable heavy minerals indicated that the sandstone deposit was adjacent to the provenance area. The clay minerals were characterized by abundant montmorillonite and little kaolinite. Rare content of carbon chips and pyrite indicated the alkaline groundwater condition. The average values of uranium, organic carbon, total sulfur and ΔE_h in primary sandstone were 4.91×10^{-6} , 0.08%, 0.03% and 16.25m vres pectively, suggesting that the reduction capacity of the internal uranium was low. Uranium mineralization mainly occurred in the gray sand bodies in both sides of the interlayer oxidation zone, with an average uranium content of 0.03~0.38kg/m² and the characteristics of low thickness, low grade and small scale. Through comprehensive analysis it is held that the host sandbody has a favorable metallogenic potential in interlayer oxidation uranium deposit.

Keywords: host sandbody; upper member of Yimin formation; metallogenic characteristics; sandstone type uranium deposit; Bei'er depression

沉积盆地内具有一定规模的有利砂体既是砂岩型铀矿勘查的首要目标,也是岩性-岩相控矿作用分析的主要解剖对象(Rose A. W. et al., 1980; Houb. H. et al., 2017; 秦明宽等,2017; 聂逢君等,2018)。研究表明,厚度适中、自身还原容量高且透水性良好的主砂体是地下水渗流和矿体赋存的有利场所(刘波等,2018; 郭强等,2018; 焦养泉等,2018),也是决定铀矿体是否具有可地浸开采的先决条件之一;而砂体厚度过大或过小均不太有利于铀的沉淀富集和后期地浸采铀(马汉峰等,2011; Akhtar B. T. et al., 2017)。系统深入剖析盆地找矿新区,在其中已发现目的层骨架砂体的岩性-岩相、岩石学、矿物学及环境地球化学等特征(Dai S. F. et al., 2015; Kochkin B. T. et al., 2017; 丁波等,2018; 易超等,2019; Zhang F. et al., 2019),对准确查明砂体成因,客观评价铀成矿前景具有十分重要的作用和意义。

内蒙古海拉尔盆地自20世纪90年代以来进行了较多的砂岩型铀矿找矿和科学研究,但一直未取得大的找矿突破。近年来,核工业243大队在盆地先后实施了多口钻孔以便重新查明区内铀成矿环境。目前,已在贝尔凹陷中南部揭露到一套良好的骨架砂体(周文博等,2020),其结构疏松,总厚度在100 m以上,埋深一般大于200 m,泥-砂-泥地层结构稳定,空间展布面积较大。同时,自2015年以来相继在其中还发现了5个矿化孔和多个异常孔,显示出较好的铀成矿潜力和找矿前景(周文博等,2020)。然而,目前对该套砂体所属地层时代仍不是

十分清楚,对其主要成矿地质特征还未开展详细分析,研究程度比较低,这对区内目的层沉积体系、砂体成矿有利度分析及骨架砂体展布范围圈定造成了一定的影响,制约了进一步找矿部署。笔者通过对该区大量砂岩岩心野外宏观观察和照相,室内光薄片镜下鉴定,全岩和黏土矿物X衍射分析,有机碳、全硫、氧化还原电位等环境地球化学指标分析,首次详细研究了新发现骨架砂体的成矿地质特征;并结合典型砂岩铀矿化特征,初步探讨了砂体的成矿有利和不利因素,进而客观分析了砂体的成矿潜力,以为海拉尔盆地铀矿勘查突破提供一些参考。

1 地质背景

海拉尔盆地位于内蒙古自治区呼伦贝尔市境内,呈北东向展布(图1a),在中国境内的面积为 $4.421 \times 10^4 \text{ km}^2$ (郭彪,2015)。该盆地是一典型的中新生代断-坳转换型裂谷盆地群,构造位置上处于西伯利亚板块和华北板块碰撞缝合线的东段,具有与邻区二连产铀盆地十分相似的大地构造背景和成矿环境(刘波等,2018)。盆地平面上具有典型“东西分带、南北分块”和“两隆三坳”的构造格局(徐美娥,2005)。“三坳”分别为扎赉诺尔坳陷、贝尔湖坳陷、呼和湖坳陷;“两隆”为嵯岗隆起、巴彦山隆起。进一步又可划分出16个次级凹陷和4个凸起(图1a)。

研究区贝尔凹陷位于贝尔湖坳陷南部(图1a),面积约3010 km²,呈近南北向展布,最大盖层沉积厚度达4600 m(李春柏等,2007)。该凹陷具有与

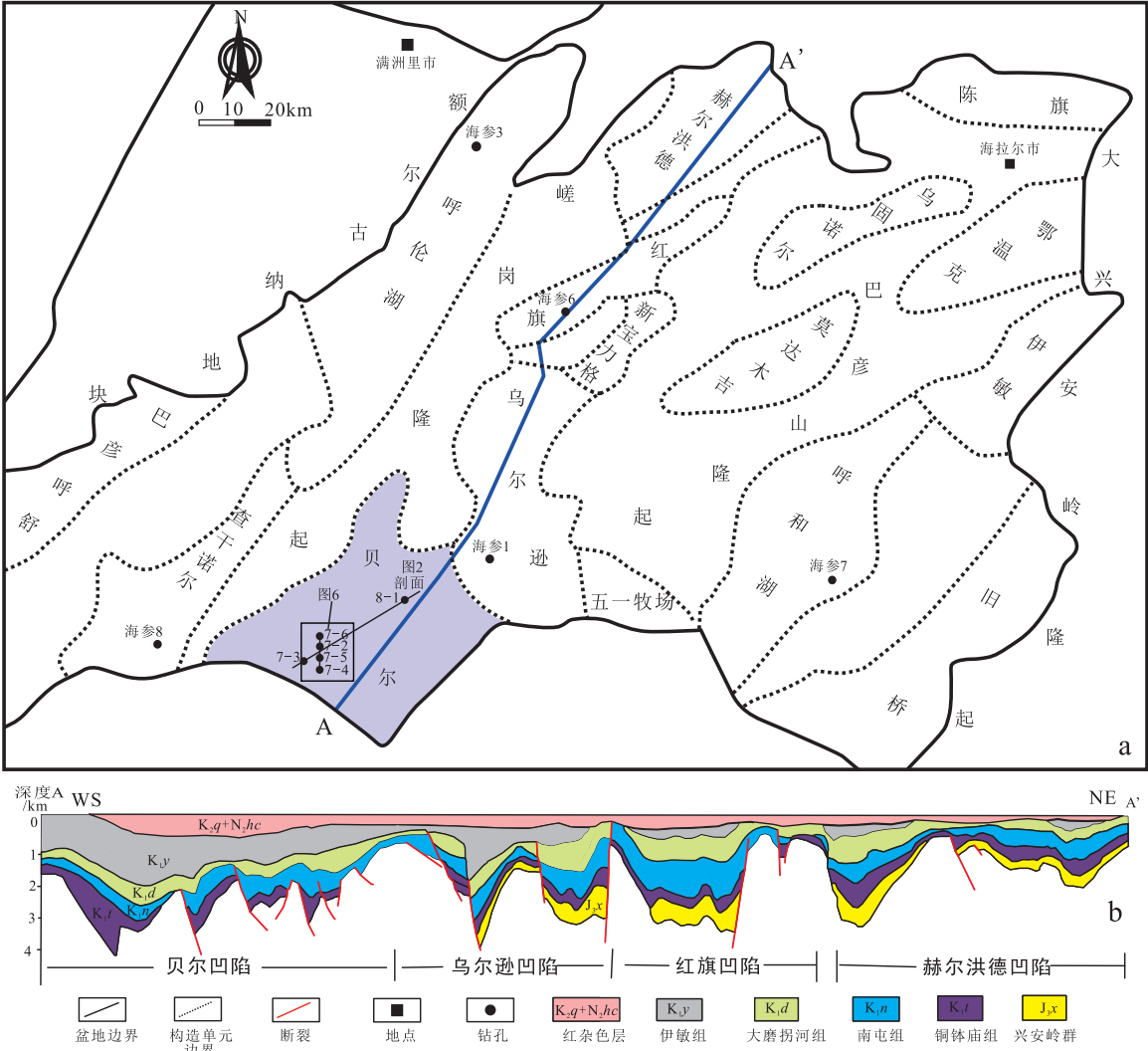


图 1 海拉尔盆地区域构造单元及地层剖面简图(图 a 据陈均亮等,2013;图 b 据郭彪,2015)

Fig. 1 Regional structural units and stratigraphic profile of Hailar Basin

盆地相似的中新生代构造-沉积演化过程,自晚侏罗世形成以来依次经历了断陷初始孕育、强烈拉张、快速沉降、稳定扩张、断拗转换、拗陷发育及萎缩 7 个主要的演化阶段(郭彪,2015);构造环境发生了由早白垩世伸展拉张向晚白垩世以来构造反转挤压的转变(陈均亮等,2013);自下而上依次沉积了上侏罗统兴安岭群(J_3x)火山碎屑岩和沉积岩组合、下白垩统铜钵庙组(K_1t)山麓洪积、冲积扇相杂色类磨拉石建造,南屯组(K_1n)扇三角洲相灰色砂泥岩互层沉积、大磨拐河组(K_1d)半深-深湖相深灰色泥岩夹薄层砂岩沉积、伊敏组(K_1y)河湖沼相(浅)灰色含煤碎屑岩建造,以及上白垩统青元岗组(K_2q)和新近系呼查山组(N_2hc)红杂色河流相沉积(图 1b);上覆薄

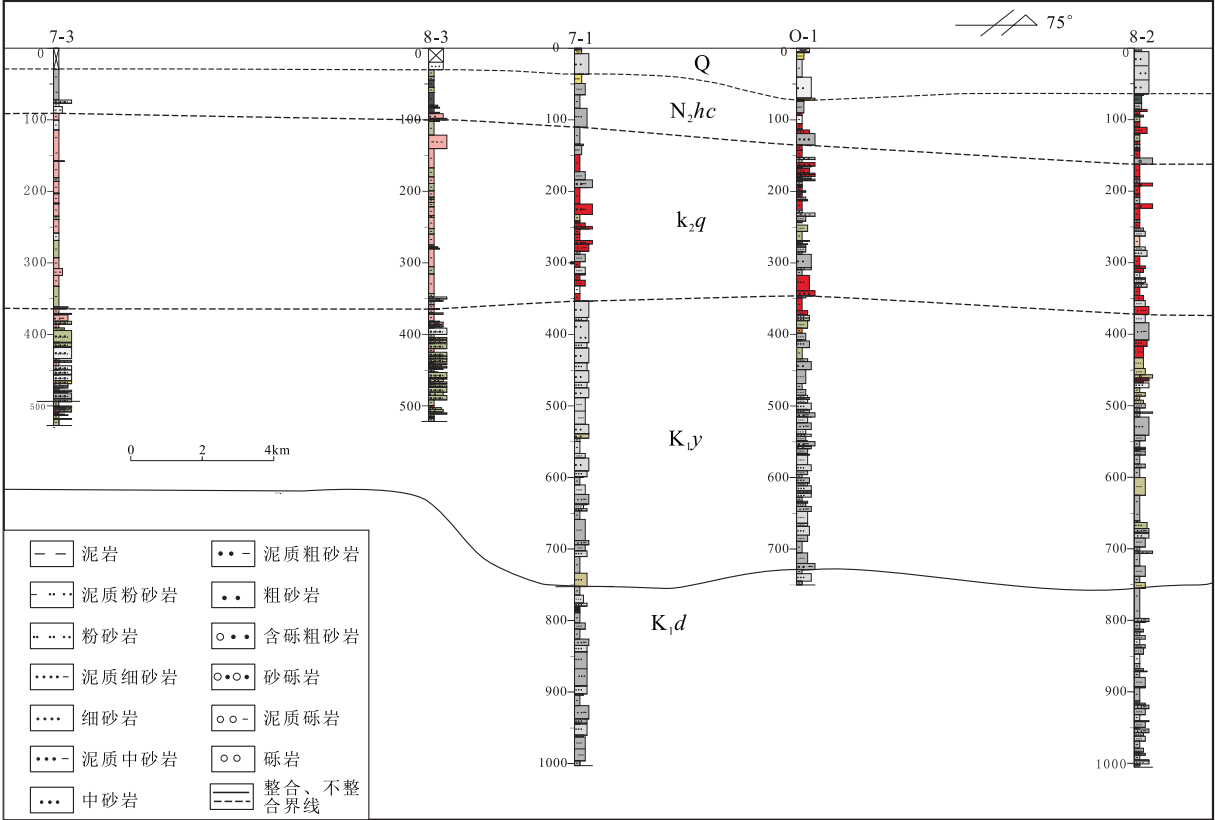
层第四系(Q)(徐美娥,2005;薛云飞等,2010;孙艳等,2013)具有下灰上红的有利铀成矿沉积组合(彭云彪等,2018),沉积粒度总体逐渐变细再变粗,显示出一套水进-水退的沉积体系,反映了一个凹陷由断陷形成、扩张、萎缩转变到拗陷沉积,直至消亡的整个演化过程(郭彪,2015)。下白垩统伊敏组沉积时期,温暖潮湿古气候环境有利于含碳屑、黄铁矿等还原剂的砂体形成,成为砂岩型铀矿成矿的有利层位(周文博等,2020);晚白垩世以来发生了古气候变迁,转变为内陆温带干旱、半干旱炎热古气候环境(马汉峰等,2011),地表水发育较少,有利于富铀含氧水和层间氧化带的形成,是形成砂岩型铀矿的有利时期。

2 目的层时代厘定

北东向地层连井剖面显示,贝尔凹陷自上而下依次发育了第四系(Q)、新近系呼查山组(N₂hc)、上白垩统青元岗组(K₂q)、下白垩统伊敏组(K₁y)和大磨拐河组(K₂d),总体具有下灰上红的二元结构(图 1、图 2)。其中,青元岗组及其以上地层为一套稳定分布的红杂色岩系,属曲流河沉积;伊敏组主要是一套河流-三角洲相灰色、浅灰色含砾粗砂岩、中砂岩夹薄层灰色、浅红色、浅灰绿色泥岩,埋深约 200~500 m,厚度在 150~230 m,泥砂泥地层结构稳定,产状平缓,是区内主要的找矿目标层(图 2)。大磨拐河组的粒度则明显变细,为一套滨浅湖相沉积,砂体不发育,以一套厚层泥岩与上覆地层分界。

目前,对于红层下部的灰色地层是属于早白垩世之后构造反转形成的上白垩统青元岗组下部底砾岩还是属于伊敏组上部发育的河流相灰色碎屑岩还

存在一定的分歧(周文博等,2020)。笔者分别采集了区内 5 个钻孔中的 5 件灰色泥岩,送至河北省任丘市邦达新技术有限公司进行孢粉化石鉴定,以确定地层时代。样品依次进行碎样,称取,酸处理、水洗、一次离心、重液浮选、二次离心、制片等处理,最后在生物显微镜(莱卡)下进行孢粉鉴定观察。由于泥岩中的碳屑和植物碎屑含量极少,植物化石保存条件差,故仅一件样品发现了少量的孢粉化石(图 3),其组合特征是:①以裸子类花粉为主,藻类零星,蕨类及被子类未发现。②裸子类花粉以无缝双囊粉类 *Dissacciatrileti* 为主体,古老松柏类(拟云杉粉属 *Piceites*、假云杉粉属 *Pseudopicea*、假松粉属 *Pseudopinus*、原始云杉粉属 *Protopicea* 等)与松科组分(云杉粉属 *Piceapollenites*、单束松粉属 *Abietinaepollenites*、双束松粉属 *Pinuspollenites*、雪松粉属 *Cedripites*)的数量近相等;另外,各发现一枚罗汉松粉属 *Podocarpidites*、皱球粉属 *Psophosphaera*。③藻类仅见一枚对裂藻 *Schizosporis*。



N₂hc. 新近系呼查山组;K₂q. 上白垩统青元岗组;K₁y. 下白垩统伊敏组;K₁d. 下白垩统大磨拐组

图 2 贝尔凹陷北东向地层连井剖面对比图

Fig. 2 Stratigraphic correlation of NE-trending well sections in Bei'er depression

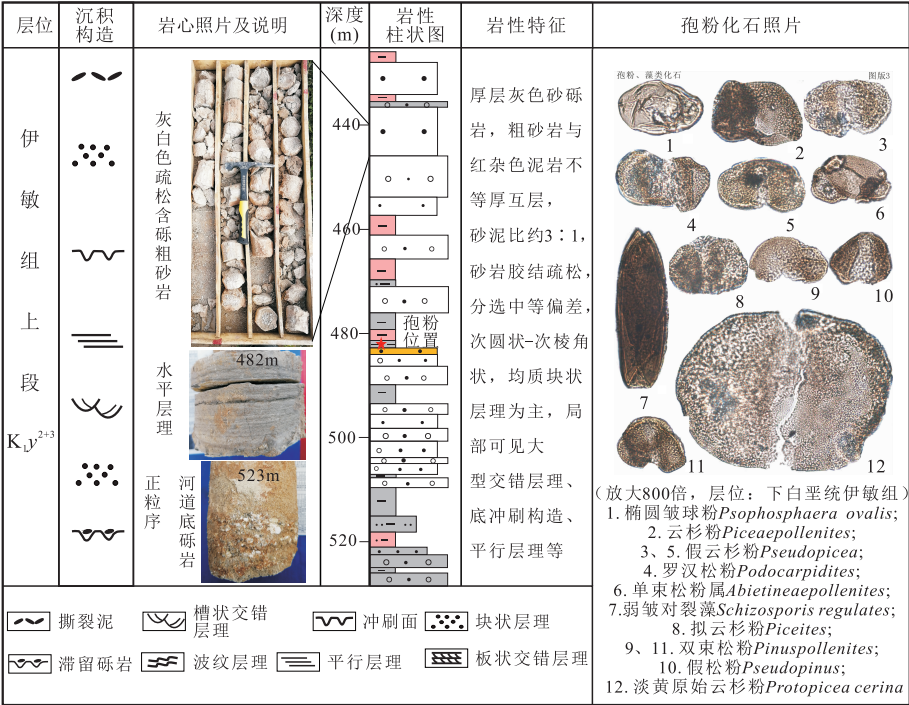


图3 贝尔凹陷钻孔7-6伊敏组上段单井岩性组合及孢粉化石图

Fig. 3 Lithologic histogram and sporopollen fossil of the upper member of the Yimin formation of 7-6 well in Bei'er depression

总体上,样品的孢粉化石组合以裸子类的无缝双囊粉类 *Dissacciatrileti* 发育为特点,这与人得出的伊敏组二、三段的孢粉组合带“有突肋纹孢 *Appendicisporites* sp. -杪栲孢 *Cyathidites* sp. -星粉 *Astropollis* sp. 组合”较为相似(李春柏等,2007;薛云飞,2010),不应该为晚白垩世以来的孢粉化石组合。由于化石数量少,难于进一步分层,故初步将目的层时代定为伊敏组上段,相当于油田部门的伊敏组二、三段,地质时代大致对应于巴列姆期一早阿尔必期(Barremian—Albian)。

3 骨架砂体基本特征

3.1 沉积特征

20 余口钻孔单井及连井资料显示,贝尔凹陷中部发育一套有利的纵向辫状河古河道砂体,呈北东向展布,可进一步识别出河道、心滩亚相砂砾岩、不同粒级砂岩及河道间湾亚相泥岩、粉砂质泥岩夹薄层粉细砂岩(图 2、图 3、图 4)。河道砂体的埋深通常在 200~500 m,总厚度一般在 50~150 m,单层厚度一般为 5~25 m,水平延伸长度在 3~15 km,

总体上具有凹陷中间厚,往两侧逐渐减薄的空间展布特点(中间产砂,边部产泥),受控于纵向古河道的展布(刘波等,2018);同时,砂体内部常夹一定厚度的杂色泥岩隔水层,两者组成了较好的泥-砂-泥地层结构,有利于层间水的形成及其铀矿体的发育(秦明宽等,2017)。垂向上,岩性组合表现出多套“砂砾岩→粗砂岩→中细砂岩→泥岩”的正向韵律变化(图 2、图 4),具河流二元结构特征(郭强等,2018;焦养泉等,2018),整体上砂多泥少,砂泥比在 5~1,砂体连通性好。砂体中主要发育均质块状层理,局部见槽状交错层理、板状交错层理、河道底冲刷,偶见平行层理(图 4),反映了动荡的牵引流沉积特点。

同时,采集了 5 件砂岩样品送至河北省廊坊市尚艺岩矿检测技术服务有限公司进行重矿物分析,岩性包括灰色细砂岩和含砾粗砂岩,以便确定砂体成熟度及物源。结果表明,样品的陆源重矿物主要为锆石(12%~50%)、钛铁矿(15%~43%),其次为金红石(0.5%~5.5%);自生重矿物主要为黄铁矿(4%~28%)和重晶石(0.3%~19%),其次为褐铁矿、赤铁矿和锐钛矿(表 1),以上指示了沉积物的物源应该主要来自于中酸性火山岩(Bonnetti C. et

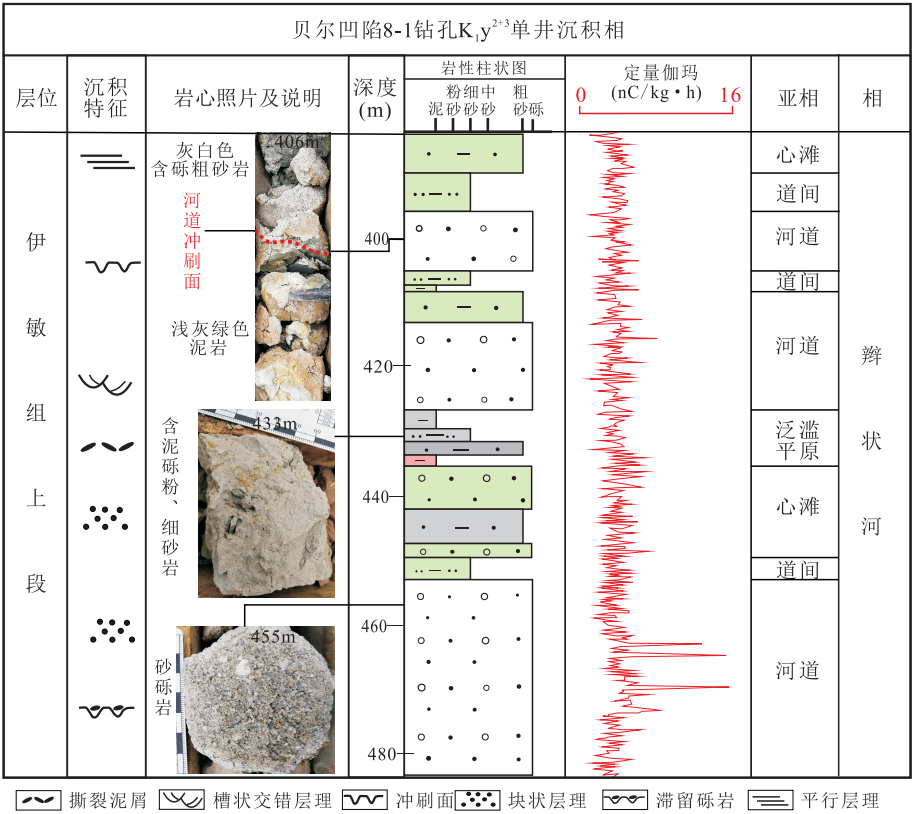


图 4 贝尔凹陷伊敏组上段辫状河流相图

Fig. 4 Braided fluvial facies of the upper member of the Yimin formation in Bei'er depression

表 1 贝尔凹陷伊敏组上段砂岩重矿物分析结果表(%)

Tab. 1 Heavy mineral content of sandstones from the upper member of the Yimin formation in Beier depression(%)

样号	H18-02	H18-70	H19-03	H19-04	H19-05
岩性	灰色细砂岩	灰色细砂岩	灰色含砾粗砂岩	浅灰色粗砂岩	浅灰色粗砂岩
锆石	26.00	12	17.50	25.00	50.0
金红石	5.50	0.5	0.70	0.50	1.50
电气石	1.50	/	1.50	0.50	0.5
磷灰石	/	0.2	0.30	0.50	/
锐钛矿	1.50	1.00	1.00	1.00	3.50
白钛石	2.00	1.50	1.00	2.50	4.50
黄铁矿	/	28.00	23.00	4.00	6.00
榍石	0.50	2.50	0.50	1.00	0.50
重晶石	19.00	0.30	9.50	9.00	1.50
独居石	2.50	/	/	/	/
石榴石	1.00	/	2.00	1.00	3.50
绿帘石	/	1.0	1.50	0.50	0.50

续表 1

样号	H18-02	H18-70	H19-03	H19-04	H19-05
岩性	灰色细砂岩	灰色细砂岩	灰色含砾粗砂岩	浅灰色粗砂岩	浅灰色粗砂岩
钛铁矿	27.00	30.00	28.00	43.00	15.00
赤、褐铁矿	5.00	1.00	6.00	7.00	4.00
磁铁矿	6.00	16.00	/	/	/
其他	2.5	6	7.50	4.50	6.00
ZTR 指数	33	12.5	19.7	26	52

al. , 2017),可能少部分为沉积岩。样品的 ZTR 指数(锆石+电气石+金红石)为 12.5%~52%(表 1),除了 H19-05 样品外,其他样品的 ZTR 指数比较低,为 12.5%~33%;锆石重矿物多具有 2~3 种类型,但均磨圆度差,呈棱角-次棱角柱状,搬运痕迹不显,经短距离搬运而来;同时,样品中还含较多重晶石、磷灰石和绿帘石等不稳定重矿物。以上均说明目的层沉积物具有近物源的特点(孙艳等,2013)。受样品数量较少及钻孔空间上分布不均的约束,目前对古水流方向的判别较为困难。

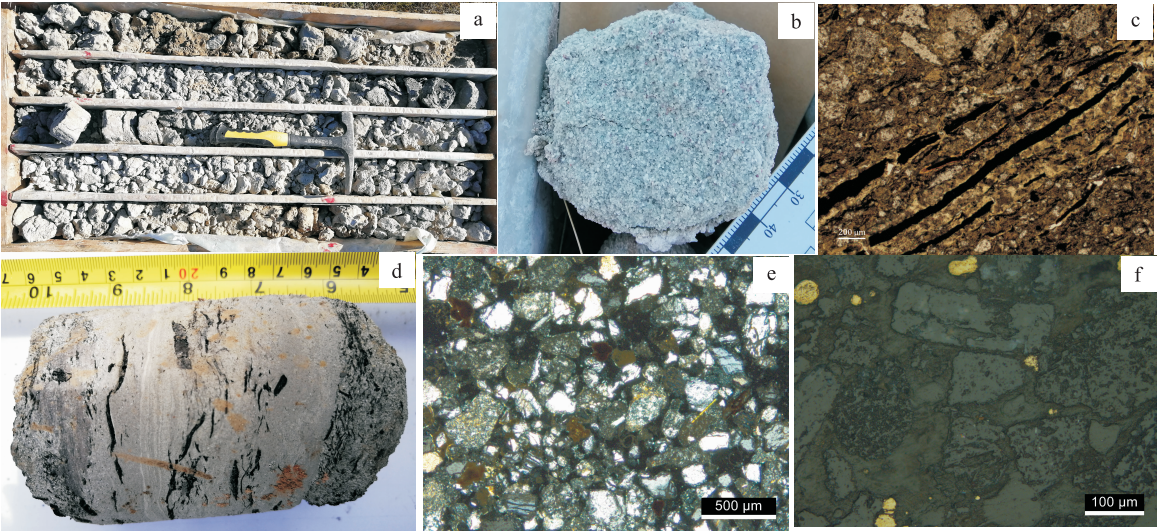
3.2 岩性及岩石学特征

通过野外岩心观察,发现目的层原生还原和后生化砂岩的岩石学及矿物学特征基本相同,岩性整体以灰、浅灰绿、浅灰色夹薄层浅黄色砂砾岩、含砾粗砂岩为主,其次为中砂岩,少量细砂岩,砾石粒径大小一般为 0.2~0.8 cm,含量较少(一般<15%);砂岩泥质胶结疏松-较松散(图 5a、图 5b),透水性好,成岩度低,岩心均不太完整(图 5a),局部泥质含量有时较高(图 5d),透水性变差。同时,砂岩中均肉眼未见明显的碳屑和黄铁矿颗粒,原生还原容量可能偏低(Akhtar S. et al. , 2017; 易超等, 2019)。岩石多为基底式胶结、点接触(图 5e、图 5f),分选性一般到较好,磨圆度一般,以次圆状-次棱角状为主,结构成熟度中等偏低;碎屑成分以石英为主(约 50%),其次为安山岩、粗面岩、凝灰岩、流纹岩、花岗岩等中酸性火山岩屑(约 40%)(图 5e),长石含量较少(约 15%),属于长石岩屑砂岩或岩屑砂岩;成分成熟度较低,指示物源较近(Bonnetti C. et al. , 2017; 聂逢君等,2018),这与重矿物分析结果相符。而边部目的层砂岩仅粒度明显变细,以灰色中、细砂岩为主,单层砂体薄,分选性和磨圆度均更好;砂岩中普遍富含碳屑、植物茎干和细分散状黄铁矿(图 5c、图 5d、图 5f),原生还原容量较高,聚铀

能力一般到较好(焦养泉等,2018;Zhang F. et al. , 2019),这是与河道边部沼泽微相大量植被发育有关(郭强等,2018)。其中,黑色碳屑多呈条带状(图 5c)、团块状产出,半碳化-碳化程度;镜下可见原生草莓状黄铁矿(图 5f),多产于胶结物中,少量分布于岩屑边缘,极少存在矿物溶蚀孔中。

3.3 黏土矿物

区域上,在不同钻孔采集了 10 件不同粒度的砂岩送至核工业北京地质研究院分析测试中心进行全岩和黏土矿物 X 衍射分析。全岩 X 衍射结果表明(表 2),伊敏组砂岩的石英相对含量高,为 36.2%~72.7%,均值为 55.3%;其次为长石,斜长石相对含量为 7.2%~35.2%,平均含量为 18.29%;钾长石相对含量为 4.8%~15%,均值为 9.24%,含量最少;黏土矿物相对含量较高,为 5.9~32.9%,平均含量为 18.09%(表 2),有利于后期铀的吸附聚集(丁波等,2018)。进一步的黏土 X 定量衍射结果表明,不同类型砂岩黏土矿物组成均主要为蒙脱石,相对含量为 66%~93%,平均为 82.9%;混层比为 50%~90%,平均为 66.8%;其次为伊利石,相对含量为 5%~34%,平均值为 12.6%;高岭石相对含量低,为 1%~13%,平均为 4.71%;绿泥石相对含量最低,为 1%~9%(表 2)。整体上,砂岩中岩屑矿物含量高,以长石岩屑砂岩为主,具有成分成熟度偏低,近物源的特征(孙艳等,2013);黏土矿物以偏碱性的蒙脱石为主,且主要为碎屑成因的蒙脱石,受物源母岩成分控制;自生蒙脱石可能较少,而指示水体酸性的高岭石矿物含量少,蒙脱石并没有发生高岭石化,却开始大量向碱性伊利石转变,形成了大量难于区分的伊蒙混层。因此,目的层砂岩中的地下水总体偏碱性(丁波等,2018;易超等,2019),埋深相对较浅,长石或蒙脱石没有发生酸性蚀变,这与岩石中肉眼也未常见明显的碳屑、有机质含量低的特点基本吻合。



a. 浅灰色松散砂体,岩心不完整;b. 浅灰色疏松粗砂岩;c. 黑色有机质,碳屑,偏光;d. 灰色富含碳屑细砂岩;e. 岩屑细砂岩,杂基充填,点-线接触,正交;f. 草莓状原生黄铁矿,反射光

图 5 贝尔凹陷伊敏组上段砂岩宏观及微观特征图

Fig. 5 Macro-micro photos of sandstones from the upper member of the Yimin formation in Bei'er depression

表 2 贝尔凹陷伊敏组上段砂岩全岩和黏土矿物 X 衍射定量分析结果表

Tab. 2 X-ray diffraction quantitative analysis results of sandstones and clay minerals from the upper member of the Yimin formation in Bei'er depression

样品	检测结果(<i>wt</i> %)								混层比(%S)
	石英	钾长石	斜长石	黏土矿物	S	It	Kao	C	I/S
H18-01	66.5	7.3	11.4	14.8	88	10	1	1	56
H18-02	72.7	9.2	10.2	7.9	81	13	3	3	54
H18-19	42.1	/	25.0	32.9	90	10	/	/	50
H18-21	43.5	10.8	18.0	27.7	85	10	/	5	51
H18-49	63.9	4.8	7.2	24.1	93	5	1	1	50
H18-04	40.2	5.8	17.7	36.3	94	5	1	/	81
H18-20	22.9	3.5	14.3	59.3	86	4	4	6	78
H18-25	37.0	3.7	12.9	46.4	64	18	9	9	52
H18-26	57.0	15.0	17.2	10.8	84	12	2	2	85
H18-27	53.6	6.3	16.3	23.8	77	10	13	/	87
H18-29	44.8	6.0	16.0	33.2	78	3	11	8	51
H18-44	37.0	4.5	15.3	43.2	84	5	7	4	82
H18-48	41.5	6.3	17.1	35.1	88	7	3	2	86
H18-68	36.2	9.6	31.7	22.5	75	16	9	/	90
H18-69	45.0	9.3	35.2	10.5	66	34		/	57
H18-72	72.5	10.9	10.7	5.9	90	6	4	/	88
H18-73	43.2	5.7	15.4	35.7	90	6	4	/	88
H18-81	32.3	5.7	23.1	38.9	78	17	3	2	49
平均值	47.33	7.32	17.48	28.28	82.83	10.61	5.00	3.91	68.61

注:S. 蒙脱石;It. 伊利石;Kao. 高岭石;C. 绿泥石;I/S. 伊蒙混层;/. 无。

3.4 聚铀能力

对其中 8 件原生灰色砂岩和 2 件后生氧化砂岩样品进行了环境地球化学参数测试。结果表明(表 3),原生砂岩 U 含量为 $0.863\times10^{-6}\sim10.1\times10^{-6}$, 平均含量为 4.91×10^{-6} , 指示了区内目的层铀本底值较高,内部铀源较丰富,主要与蚀源区母岩岩性(中酸性火山岩)有关(Bonnetti C. et al., 2017)。砂岩有机碳含量为 $0.033\%\sim0.177\%$,平均值为 0.08% ;全硫含量为 $0.008\%\sim0.072\%$,平均值为 0.03% ;△Eh 为 $-1\sim36$ mV,平均为 16.25 mv(表 3)。其中,H18-68 样品的△Eh 为 -1 mV,可能说

明了局部灰色砂岩本身的氧化性很强,是否为古氧化砂岩遭受次生改造成因目前还无法确定。此外,后生氧化砂岩 U 含量很低,仅为 $0.852\times10^{-6}\sim1.65\times10^{-6}$;还原容量也很低,有机碳含量为 $0.026\%\sim0.052\%$,全硫含量为 $0.007\%\sim0.008\%$,△Eh 为 $1\sim4$ mV。从本次有限的样品分析结果来看,伊敏组上段砂体自身还原容量偏低,卸铀能力有限(Rose A. W. et al., 1980; 黄少华等, 2019),对铀成矿可能有一定的制约,后续还需要进一步加大区域上的样品采集和测试,以便全面客观发映原生砂体的还原能力。

表 3 贝尔凹陷伊敏组上段砂岩铀、有机碳、全硫及△Eh 测试结果表

Tab. 3 Contents of uranium, organic carbon, total sulfur and △Eh of sandstones from the upper member of the Yimin formation in Bei'er depression

样号	岩性	U(10^{-6})	C _有 (10^{-2})	全 S(10^{-2})	△Eh(mV)
H18-01	浅灰色含砾粗砂岩	0.863	0.033	0.051	15
H18-02	灰色细砂岩	12.4	0.042	0.009	3
H18-19	灰色中砂岩	2.97	0.066	0.072	36
H18-21	灰色砂砾岩	3.08	0.111	0.053	31
H18-27	灰色砂砾岩	3.79	0.177	0.011	7
H18-68	灰色中砂岩	3.56	0.055	0.008	-1
H18-69	灰色中砂岩	2.5	0.057	0.021	14
H18-72	灰色粗砂岩	10.1	0.07	0.026	25
平均值		4.91	0.08	0.03	16.25
H18-26	浅黄色含砾粗砂岩	1.65	0.052	0.008	1
H18-49	浅黄色含砾粗砂岩	0.852	0.026	0.007	4
平均值		1.25	0.039	0.0075	2.5

4 铀矿化基本特征

贝尔凹陷伊敏组上覆盖层厚度较大,地表未发现明显的铀矿化现象。本次钻孔资料揭示,伊敏组上段深部铀矿化主要产于贝尔凹陷中南部 7 号和 8 号勘探线的钻孔中(图 6),表现出较明显的层间氧化带型铀矿化特征。矿体埋深一般在 460.05~509.10 m(图 6),厚 0.10~0.90 m,平均厚 0.50 m, U 品位为 $0.0104\%\sim0.0211\%$,平均 0.0155% ,平米铀量为 $0.03\sim0.38$ kg/m²,赋矿岩性均为下白垩统伊敏组上段的辫状河相灰色含砾粗砂岩、砾质粗砂岩(表 4)(周文博等,2020)。由图 6 钻孔剖面可

见,新发现的 4 段铀矿化/异常垂向上均位于黄色层间氧化带上下两侧(图 6a),平面上位于氧化带前锋线附近,说明其受后生氧化带控制明显(秦明宽等, 2017;彭云彪等,2018)。

宏观上,后生氧化砂岩总体呈(浅)黄色、灰黄色(图 6b—图 6d),局部保留了原生灰色(图 6c),强度偏弱,规模较小,目前对于氧化带的方向仍不是十分清楚,有待于进一步的勘探和研究。另一方面,在矿化段附近均伴随有块状碳化植物碎屑,但含量偏少,进而导致铀矿化段表现出厚度较薄,品位较低,规模较小的特点(周文博等,2020)。因此,下一步应该重点寻找还原容量高(富碳屑和黄铁矿)的河道转弯部位,其是成矿的有利地段。

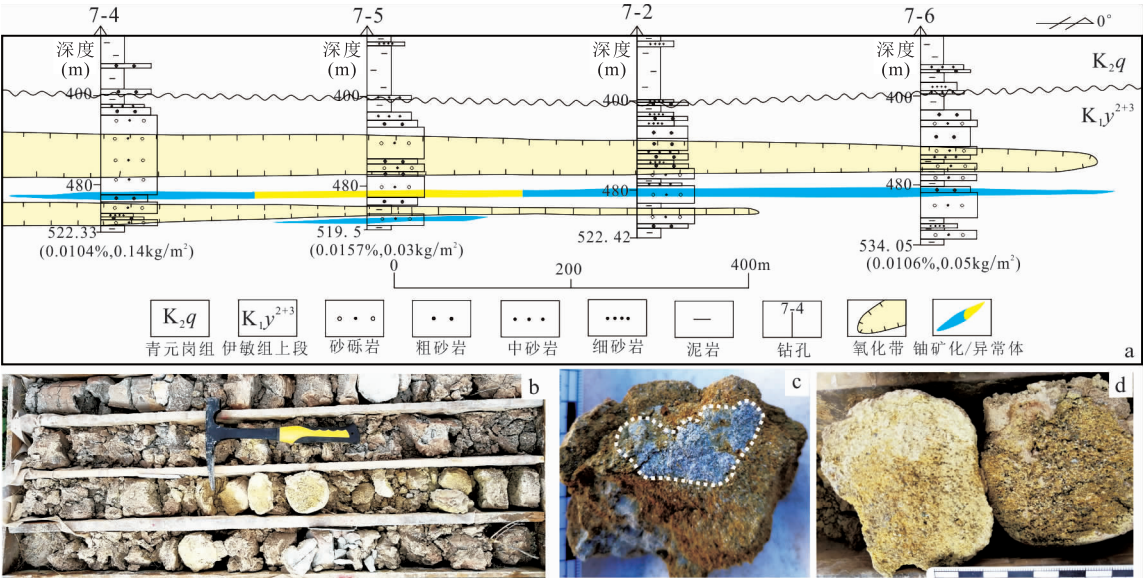


图 6 贝尔凹陷伊敏组上段骨架砂体后生氧化及铀矿化展布特征图
(引自核工业 243 大队,2018,剖面位置见图 1)

Fig. 6 Distribution feature of epigenetic oxidation belt and uranium mineralization within the upper member of the Yimin formation of Bei'er depression

表 4 贝尔凹陷伊敏组上段砂岩铀矿化信息(引自核工业 243 大队,2018)

Tab. 4 Sandstone uranium mineralization in the upper member of the Yimin formation of Bei'er depression

序号	孔号	埋深(m)	品位(%)	平米铀量(kg/m ²)	岩性
1	7-6	488.30~488.60	0.0106	0.05	灰色含砾粗砂岩
2	7-5	509.00~509.10	0.0157	0.03	
3	7-4	488.95~489.65	0.0104	0.14	
4	8-3	460.05~460.95	0.0211	0.38	
5	8-1	465.25~465.35	0.006 9	0.01	

5 砂体成矿有利度分析

有利的容矿砂体是控制中国中新生代沉积盆地砂岩型铀矿形成的一个非常关键的成矿条件(聂逢君等,2018;焦养泉等,2018),也是目前各地勘单位在开展铀矿勘查早期最为重要的目标和任务(彭云彪等,2018),即要找矿先找砂。而对于骨架砂体的详细解剖是合理评价铀成矿前景必须开展的研究课题(马汉峰等,2011;Zhang F. et al. , 2019),可以为下一步的成矿部署提供重要的参考。综合本次对贝尔凹陷中部伊敏组上段骨架砂体的基本特征分析,基于砂体的埋深、规模、稳定性、透水性、还原容量、氧化蚀变及铀矿化等准则,从有利和不利两大因素

综合客观评价了砂体的成矿有利度。

成矿有利条件主要表现:首先,骨架砂体属于下白垩统伊敏组,与二连盆地地下白垩统赛汉组含矿层对应,均形成于盆地断-拗转换阶段及温湿古气候环境,河流-三角洲相有利沉积相发育;砂体的渗透性极好,泥质胶结松散-疏松(图 5a、图 5b),以中、粗砂岩为主(图 2、图 3),透水性良好,各期河道砂体间具有很好的连通性,平面上展布面积较大。目前,揭露的宽度为 3~15 km,长约 40 km,与二连的赛罕高毕(宽 5~10 km,长 60 km)、齐哈日格图(宽 10~20 km,长 40 km)、巴彦乌拉(宽 20~50 km,长 120 km)等古河谷规模相似(刘波等,2017),具备较大的勘探空间;其次,砂体总厚度及单层厚度均适中,总厚一般在 50~150 m,地层倾角较缓,埋深多小于

500 m,处于可勘探范围,且具有较稳定的泥-砂-泥地层结构,有利于层间氧化水的形成;同时,砂体本身U含量多在 $3\times 10^{-6}\sim 6\times 10^{-6}$ (表3),能为后期铀成矿提供一定的内部铀源(Akhtar S. et al., 2017; 郭强等,2018);此外,已揭露到部分砂体发生了一定程度的后生氧化作用,发育中等偏弱的铀矿化信息(图6、表4),总体上具备较好的成矿潜力和找矿前景。

另一方面,该套砂体还存在一些不利因素。例如,中部砂体均很难发现肉眼可见的碳屑和黄铁矿颗粒,自身还原容量明显较二连赛汉组原生砂体($C_{\text{有}}$ 为0.01%~0.65%, $S_{\text{全}}$ 为0.01%~13.01%, ΔE_h 为7~78 mV)低(刘波等,2017),进而无法在短距离内形成强衬度的氧化还原地球化学障(Rose A. W. et al., 1980; 黄少华等,2019),大规模卸载铀沉淀富集成矿作用受到较大的限制;同时,砂体的铀含量本底值也较二连赛汉组原生砂岩($12.7\times 10^{-6}\sim 14.7\times 10^{-6}$,局部达 30×10^{-6})偏低(张金带,2016)。以上两点因素可能是区内铀矿化品位偏低的主要原因。同时,该区砂体上覆白垩统拗陷层(红色泥岩为主)厚度较大,构造挤压掀斜剥蚀小,后生氧化强度也很弱,与二连盆地两侧的赛汉组发生了强烈后生潜水-层间氧化作用明显不同,这对于形成大型铀矿床不利(马汉峰等,2011; 郭强等,2018)。

综合研究表明,该区纵向古河道砂体可以作为一套比较好的找矿目的层,尤其是在具有弱水动力条件及河漫滩大量植被发育的河道边部或转弯部位会形成还原能力较好的灰色砂体,完全具备形成一定规模层间氧化带型铀矿的前景。值得说明的是,贝尔凹陷内部油气资源比较丰富,已发现了较多油气田,是大庆油田重要的外围产油区块(孙艳等,2013; 陈均亮等,2013)。因此,当有深部油气等外来还原性流体沿贯穿性断裂渗出至目的层时,这些地段砂体的还原容量会显著增高(黄少华等,2019),从而成为非常有利的赋矿层位。

6 结论

通过对贝尔凹陷目的层骨架砂体基本特征分

析,得出了以下几点认识。

(1)研究区找矿主砂体属于下白垩统伊敏组上段,为纵向古河道沉积;岩性主要为浅灰色含砾粗砂岩,其次为中、细砂岩,结构疏松,透水性好,厚度50~150 m,埋深在200~500 m,属岩屑砂岩;其成分和结构成熟度均偏低,ZTR指数为25%~52%,含有较多重晶石、磷灰石和绿帘石等不稳定重矿物,均反映出近物源沉积的特点。

(2)原生砂岩中黏土矿物主要为蒙脱石(66%~93%),其次为伊利石(5%~34%),高岭石和绿泥石含量极少;其平均U含量为 4.91×10^{-6} ,内部铀源较好,但有机碳、全硫和 ΔE_h 的平均值分别仅为0.08%、0.03%和16.25 mV,说明砂体聚铀能力中等偏弱,制约铀大规模沉淀卸载富集。

(3)目前,发现的铀矿化主要产于伊敏组上段黄色氧化带两侧的灰色砂体中,具有厚度薄、品位低、规模小的特征,平米铀量为 $0.03\sim 0.38\text{ kg/m}^2$,表现出一定的层间氧化铀成矿特征。该套砂体既具有规模较大、透水性良好、埋深不大以及发育一定强度的后生氧化和矿化等有利条件,也存在还原容量偏低、内部铀源相对不足等不利因素。综合分析,认为该骨架砂体具有较有利的层间氧化带型铀矿成矿潜力。

参考文献(References):

- 周文博,刘彤. 内蒙古海拉尔盆地贝尔湖拗陷铀矿资源调查评价[R]. 核工业 243 大队报告,内蒙古赤峰市,2018, 5-48.
- ZHOU Wenbo, LIU Tong. Investigation and evaluation of uranium resources in Beierhu depression, Hailar Basin, Inner Monolia [R]. Geologic Party No. 243, CNNC, Chifeng, Inner Mongolia, 2018, 5-48.
- 周文博,张荣,刘彤,等. 贝尔-乌尔逊凹陷砂岩型铀矿成矿地质特征及远景预测[J]. 西北地质,2020,53(3): 201-208.
- ZHOU Wenbo, ZHANG Rong, LIU Tong, et al. Metallogenic geological features and prospective study for sandstone-type uranium deposit in Bel-Ulson depression[J]. Northwestern Geology, 2020,53(3):201-208.

- 刘波,彭云彪,康世虎,等.二连盆地巴赛齐赛汉组含铀古河谷沉积特征及铀成矿流体动力学[J].矿物岩石地球化学通报,2018,37(2):316-325.
- LIU Bo, PENG Yunbiao, KANG Shihu, et al. Depositional Characteristics and Uranium Metallogenic Fluid Dynamics of Uranium Bearing Paleo-valley of the Saihan Formation in Basaiqi, Erlian Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, 37(2): 316-325.
- 郭彪.海拉尔盆地早白垩世层序地层格架内聚煤模式研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2015.
- GUO Biao. Pattern of coal-accumulation in the sequence stratigraphic framework of the Early Cretaceous in the HailaerBasin[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2015.
- 陈均亮,曲红艳,林春华,等.海拉尔盆地构造反转期的界定[J].大庆石油地质与开发,2013,32(1):1-6.
- CHEN Junliang, QU Hongyan, LIN Chunhua, et al. Determination of the Structural Reverse Periods of Halaer Basin[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2013, 32(1): 1-6.
- 马汉峰,罗毅,李子颖.砂体特征对地浸砂岩型铀矿成矿的制约-以扎赉诺尔坳陷带为例[J].铀矿地质,2011,27(1):30-35.
- MA Hanfeng, LUO Yi, LI Ziyang. Characteristics of Sandbodies in Zalailuoer Depression and Analysis of Uranium Exploration Direction[J]. Uranium Geology, 2011, 27(1): 30-35.
- 薛云飞,王丽岩.海拉尔盆地查干诺尔凹陷扎赉诺尔群孢粉组合[J].中国煤炭地质,2010,22(1):6-13.
- XUE Yunfei, WANG Liyan. JalaiNur Group Sporopollen Assemblages in QaganNur Depression, HailarBasin[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(1): 6-13.
- 李春柏,万传彪,乔秀云,等.海拉尔盆地海参1井伊敏组孢粉组合的地层意义[J].地层学杂志,2007,31(1):23-34.
- LI Chunbai, WAN Chuanbiao, QIAO Xiuyun, et al. Pollen and spore assemblages of the Yimin Formation of Haican-1 Well, Hailaer Basin and their stratigraphic significance[J]. Journal of Stratigraphy, 2007, 31(1): 23-34.
- 徐美娥.海拉尔盆地贝尔凹陷下白垩统沉积特征研究[D].北京:中国地质大学(北京),2005.
- XU Meie. Study on Lower Cretaceous Sedimentary Facies in Beier Depression, HailarBasin[D]. Beijing: Master's thesis of China University of Geosciences (Beijing), 2005.
- 孙艳,申家年,赵方强,等.海拉尔盆地贝尔凹陷大磨拐河组二段物源分析[J].甘肃科学学报,2013,25(1):32-35.
- SUN Yan, SHEN Jianian, ZHAO Fangqiang, et al. Provenance of Sediments from Member II of Damoguaihe Formation in Beier Depression in Hailaer Basin[J]. Journal of Gansu Sciences, 2013, 25(1): 32-35.
- 聂逢君,张成勇,姜美珠,等.吐哈盆地西南缘地区砂岩型铀矿含矿目的层沉积相与铀矿化[J].地球科学,2018,43(10):3584-3602.
- NIE Fengjun, ZHANG Chengyong, JIANG Meizhu, et al. Relationship of Depositional Facies and Microfacies to Uranium Mineralization in Sandstone along the Southern Margin of Turpan-HamiBasin[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3584-3602.
- 丁波,刘红旭,李平,等.伊犁盆地蒙其古尔铀矿床含矿砂岩成岩蚀变特征及其有机-无机流体成岩成矿效应[J].地质论评,2018,64(1):149-163.
- DING Bo, LIU Hongxu, LI Ping, et al. The Feature of Diagenetic Alteration of Ore-bearing Sandstone in Mengqiguer Uranium Deposits, Ili Basin, and the Effect of Diagenetic and Mineralization of Its Organic-Inorganic Fluid[J]. Geological Review, 2018, 64(1): 149-163.
- 易超,王贵,李平,等.鄂尔多斯盆地北部纳岭沟铀矿床铁物相特征及其成矿意义[J].地质学报,2019,93(2):470-486.
- YI Chao, WANG Gui, LI Ping, et al. Characteristics of the ferrum phase in the Nalinggou uranium deposit, northern Ordos basin, and its metallogenic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(2): 470-486.
- 焦养泉,吴立群,荣辉,等.铀储层地质建模:揭示成矿机理及应对“剩余油”的地质基础[J].地球科学,2018,43(10):3568-3583.
- JIAO Yangquan, WU Liqun, RONG Hui, et al. Geological Modeling of Uranium Reservoir: The Geological Foundation of Revealing the Metallogenic Mechanism and

- Solving “Remaining Uranium” [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3568-3583.
- 秦明宽,何中波,刘章月,等. 准噶尔盆地砂岩型铀矿成矿环境与找矿方向研究[J]. *地质论评*, 2017, 63(5): 1255-1269.
- QIN Mingkuan, HE Zhongbo, LIU Zhangyue, et al. Study on Metallogenic Environments and Prospective Direction of Sandstone Type Uranium Deposits in Junggar Basin [J]. *Geological Review*, 2017, 63(5): 1255-1269.
- 黄少华,秦明宽,许强,等. 准噶尔盆地西北缘西山窑组烃类流体作用特征及其铀成矿意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(9): 3060-3073.
- HUANG Shaohua, QIN Mingkuan, XU Qiang et al. Hydrocarbon Fluid Geological Characteristics of the Xishanyao Formation and Its Uranium Metallogenic Significance, Northwest JunggarBasin [J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 3060-3073.
- 郭强,秦明宽,何中波,等. 准噶尔盆地中新世代砂岩型铀矿地层沉积特征与产铀远景预测[J]. *世界地质*, 2018, 37(2): 447-456.
- GUO Qiang, QIN Mingkuan, HE Zhongbo, et al. Sedimentary features and metallogenetic prospect prediction of Meso—Cenozoic sandstone-type uranium deposit in JunggarBasin [J]. *Global Geology*, 2018, 37(2): 447-456.
- 彭云彪,刘波,秦彦伟,等. 二连盆地川井坳陷构造演化对砂岩型铀矿成矿作用的约束[J]. *地质与勘探*, 2019, 54(5): 0917-0928.
- PENG Yunbiao, LIU Bo, QIN Yanwei, et al. Constrints of tectonic evolution on sandstone-type uranium metallogenesis in the Chuanjing depression, Erlianbasin [J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(5): 0917-0928.
- 刘波,杨建新,彭云彪,等. 二连盆地中东部含铀古河谷构造建造及典型矿床成矿模式研究[J]. *矿床地质*, 2017, 36(1): 126-142.
- LIU Bo, YANG Jianxin, PENG Yunbiao, et al. Study of structure and formation in uranium-bearing paleo-valley and typical metallogenic models in eastern part of Erlian Basin [J]. *Mineral Deposits*, 2017, 36(1): 126-142.
- 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.
- ZHANG Jindai. Innovation and development of metallogenic theory for sandstone type uranium deposit in China [J]. *Uranium Geology*, 2016, 32(6): 321-331.
- Rose. AW and Wright, RJ. Geochemical exploration models for sedimentary uranium deposits. In: R. H. Carpenter (Editor), *Geochemical Exploration for Uranium* [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1980, 13: 153-179.
- Dai Shifeng, Yang Jianye, Ward C R., et al. Geochemical and mineralogical evidence for a coal-hosted uranium deposit in the Yili Basin, Xinjiang, northwestern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 70: 1-30.
- Hou Baohong, Keeling J, Li Ziyang. Paleovalley-related uranium deposits in Australia and China: A review of geological and exploration models and methods [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88: 201-234.
- Bonnetti C, Cuney M, Bourlange S, et al. Primary uranium sources for sedimentary-hosted uranium deposits in NE China: insight from basement igneous rocks of the ErlianBasin [J]. *Miner Deposita*, 2017, 52: 297-315.
- Akhtar S, Yang Xiaoyong, Pirajno F. Sandstone type uranium deposits in the Ordos Basin, Northwest China: A case study and an overview [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 146: 367-382.
- Kochkin BT, Solodov I N, Ganina N I, et al. Geochemical Features of the Ore-Bearing Medium in Uranium Deposits in the Khiagda Ore Field [J]. *Geology of Ore Deposits*, 2017, 59(5): 341-353.
- Zhang Fan, Jiao Yangquan, Wu Liqun, et al. Relations of uranium enrichment and carbonaceous debris within the Daying Uranium deposit, Northern Ordos Basin [J]. *Journal of Earth Science*, 2019, 30(1): 142-157.