

文章编号: 1001-1749(2023)01-0100-08

基于物探测量对砂岩型铀矿定位技术研究与分析

——以二连盆地为例

张俊伟^{1,2}, 张伟盟^{1,2}

(1. 核工业航测遥感中心, 石家庄 050002;

2. 中核集团 铀资源地球物理勘查技术中心(重点实验室), 石家庄 050002)

摘要: 砂岩型铀矿是我国目前铀矿勘查中重要的类型之一, 二连盆地作为砂岩型铀矿重点勘查地区, 已发现大量中大型铀矿床及铀矿化点, 铀矿化受下白垩统赛汉组砂体与氧化-还原过渡带控制, 因此大致查明目标层砂体的空间展布特征与氧化-还原过渡带的分布范围是研究区铀矿找矿工作的重点。这里通过对研究区可控源音频大地电磁测量与高精度地面磁测资料的研究与分析, 推断了目标层砂体的空间展布形态、划分了氧化-还原过渡带分布范围, 而且在后期的钻探工作中发现了良好的工业铀矿化信息, 为铀矿产地的地质勘探工作提供了依据。同时此项工作的开展, 对在我国北方砂岩型铀矿勘查中选择有效的地球物理勘探方法具有一定的借鉴意义。

关键词: 砂岩型铀矿; 可控源音频大地电磁测量; 地面高精度磁测; 目标层砂体; 氧化-还原过渡带

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.01.13

0 前言

铀矿是国防建设的战略性资源, 是“军工基石”和“核电粮仓”, 对国民经济发展和国防工业建设具有非常重要的意义。二连盆地找矿成果表明, 铀矿化受赛汉晚期古河道砂体、后生蚀变、控矿构造、氧化-还原过渡带等要素控制, 含矿砂体具有一定的埋深。辅以电磁法测量快速查明了地层结构和找矿目标层砂体的大致埋深、厚度和分布范围, 通过勘查相继发现和落实了巴彦乌拉、赛汉高毕等一批铀矿床^[1-3]。2010年-2011年, 核工业二〇八大队在研究区开展的钻探工作中, 在下白垩统赛汉组砂体中发现了良好的铀矿化信息, 但砂体空间展布特征与

氧化-还原过渡带的分布范围不甚清楚^[4], 因此亟需开展可控源音频大地电磁和高精度地面磁测综合测量, 利用可控源音频大地电磁测量抗干扰能力强、分辨率高、勘探深度大的特点推断找矿目标层下白垩统赛汉组及其砂体的空间展布特征, 采用高精度地面磁测圈定氧化-还原过渡带分布范围, 为铀矿勘查部署提供借鉴。

1 地质概况及物性特征

1.1 地质概况

二连盆地是在天山-内蒙-兴安华力西褶皱系上发育的中新生代内陆盆地。乌兰察布坳陷位于二连盆地的中西部, 为北西部的巴音宝力格隆起和南

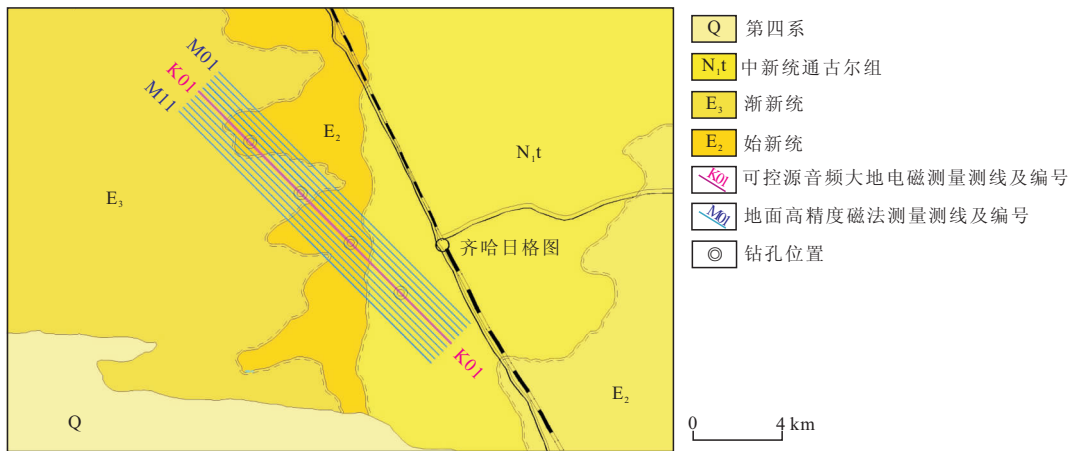


图1 研究区地质与测线布置简图

Fig. 1 Geological map and line layout

表1 地层及岩石电阻率参数统计表

Tab. 1 Statistical table for resistivity of cap and rock mass

地层	代号	主要岩性	视电阻率/ $\Omega \cdot m$
第四系	Q	黄土、粘土	3.0~30.0
		盐碱土、淤泥	0.2~5.0
		干沙、砾石	100.0~300.0
		湿沙	30.0~60.0
新近系+古近系	N+E	泥岩、砂质泥岩	6.0~15.0
		松散含砾粗砂岩、粗砂岩	20.0~150.0
下白垩统赛汉组	K1s	砂砾岩、砾石	20.0~70.0.0
		红色泥岩、粉砂岩,其间夹中细砂岩	2.0~12
		含砾粗砂岩、粗砂岩、泥质中砂岩、泥质细砂岩	10.0~20.0
		炭质泥岩,局部见煤层,夹中细砂岩	5.0~45.0
		泥-砂-砾混杂堆积	5.0~45.0
变质岩类		灰白色花岗质砾岩夹泥质中细砂岩	16.0~44.0
		板岩、千枚岩	50.0~200.0
		变质砂岩	200.0~500.0
火成岩类		安山岩、凝灰岩	150.0~700.0
		花岗岩	300.0~500.0
		玄武岩	200~1500
		超基性岩	300~1000

部、南东部的温都尔庙隆起、苏尼特隆起所夹持。基底主要由元古宇、古生界变质岩系及华力西—燕山期基性—中酸性侵入岩构成,盖层主要由侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系构成,其中白垩系主要由下白垩统阿尔善组(K_{1a})、腾格尔组(K_{1t})、赛汉组(K_{1s})和上白垩统二连组(K_{2e})构成。研究区

地表主要出露中新统通古尔组、渐新统、始新统,部分地段为第四系覆盖(图1)。

下白垩统赛汉组上段砂体构成了研究区主要铀矿富集层位,在纵向上由赛汉组上段上部泥岩与其下段泥岩共同构成铀矿目标层砂体的隔水顶、底板,空间上具有泥-砂-泥互结构,同时河道边滩沉积

表 2 岩石磁化率测量统计表
Tab.2 Survey table for rock susceptibility

地层	主要岩性	变化范围/ $\times 10^{-5}$ SI	平均值/ $\times 10^{-5}$ SI	测点数
Q	砂砾岩	14~27	17	29
	砂砾层	29~47	32	32
	风成砂	20~25	23	30
N ₂ b	砂岩夹玄武岩	40~125	84	30
	砂岩	44~97	64	30
	薄层状砂岩、砂砾岩、泥岩	12~32	19	30
N ₁ t	砂泥岩(含铁、锰质)	26~77	47	37
	粗砂岩	16~64	55	40
	砂砾岩、顶部为黄色砂砾岩	8~23	13	31
	黄色粉砂岩	16~33	24	46
K ₁ s	灰色砂岩	8~27	16	39
	黄色砂岩、砾岩	45~143	77	39
	灰白色粉砂质	6~32	19	39
	砂砾岩	50~60	55	40
	灰白色砂质泥岩、泥岩	3~13	8	75
	灰绿色砂质泥岩,见有铁质氧化物	14~17	15	32
J ₃ dt	流纹岩、凝灰岩	200~560	367	32
	安山质凝灰岩	65~215	105	89
J ₃ s	流纹岩	16~51	28	80
	晶屑玻屑凝灰岩	42~485	129	39

的砂岩中多富含炭屑、黄铁矿等还原介质,铀矿化主要产在扇三角洲、辫状河三角洲平原亚相河道间微相中和曲流河道砂体中^[1-5]。

为了查明研究区砂体的空间展布特征及氧化—还原过渡带的分布范围,在区内布设可控源音频大地电磁测量剖面 1 条,测线长度为 16 km,测点距为 100 m,测点总数为 161 个;布设地面高精度磁测剖面 11 条,线距为 250 m,点距为 10 m,测线总长为 176 km,控制面积 44 km²。

1.2 物性特征

1.2.1 电阻率特征

根据收集的测井电阻率资料^[6-7]统计结果分析(表 1):

1)古近系、新近系泥岩、砂质泥岩电阻率值为 $10 \Omega \cdot \text{m} \sim 15 \Omega \cdot \text{m}$;松散含砾粗砂岩、粗砂岩电阻率为 $20 \Omega \cdot \text{m} \sim 150 \Omega \cdot \text{m}$;砂砾岩、砾石电阻率值为 $20 \Omega \cdot \text{m} \sim 70 \Omega \cdot \text{m}$ 。

2)下白垩统赛汉组泥岩、粉砂岩电阻率值为 2

$\Omega \cdot \text{m} \sim 12 \Omega \cdot \text{m}$,砂质泥岩、泥质砂岩或泥岩砂岩互层电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m} \sim 20 \Omega \cdot \text{m}$,砂砾岩、砾岩、中粗砂岩电阻率为 $18 \Omega \cdot \text{m} \sim 45 \Omega \cdot \text{m}$ 。

3)前白垩纪岩性电阻率最高且变化较大,其中变质岩类电阻率为 $50 \Omega \cdot \text{m} \sim 200 \Omega \cdot \text{m}$,侵入岩电阻率为 $300 \Omega \cdot \text{m} \sim 1500 \Omega \cdot \text{m}$ 。

由此可知,盆地盖层与基底之间、盖层不同岩性之间电阻率差异明显,具有三个明显的电性界面:①基底与盖层间的电性界面;②中生界与新生界之间的电性界面;③找矿目的层下白垩统赛汉组不同岩性之间也存在明显的电阻率差异。

1.2.2 磁性特征

表 2 为乌兰察布坳陷及周边地区主要岩石的磁化率统计结果^[8],通过分析,可以看出区内岩石具有以下磁性特征:

1)陆源碎屑沉积岩的磁化率一般为 3×10^{-5} SI $\sim 97 \times 10^{-5}$ SI,少数达 45×10^{-5} SI $\sim 143 \times 10^{-5}$ SI,属无磁性或弱磁性。侏罗系火山岩、火山碎屑岩的

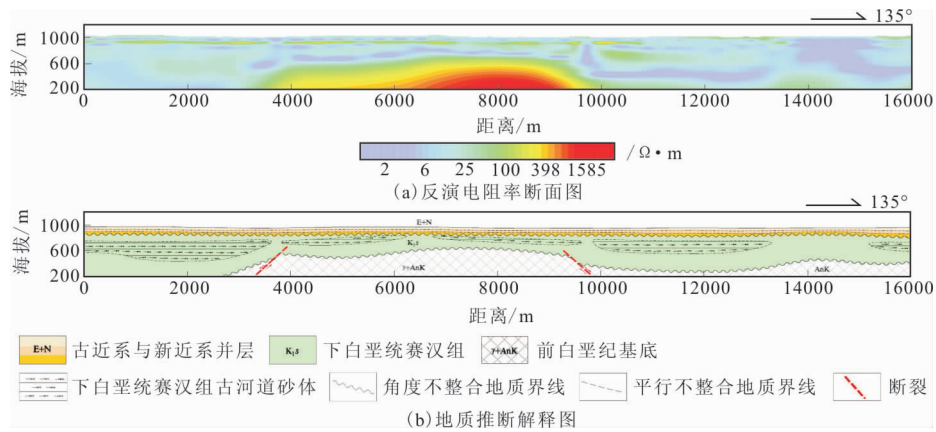


图 2 反演电阻率断面及地质推断解释图

Fig. 2 The map of inversion resistivity section and geological interpretation

磁化率变化大,凝灰岩的磁化率为 $42 \times 10^{-5} \text{ SI} \sim 560 \times 10^{-5} \text{ SI}$,流纹岩的磁化率为 $16 \times 10^{-5} \text{ SI} \sim 560 \times 10^{-5} \text{ SI}$,玄武岩的磁化率为 $450 \times 10^{-5} \text{ SI} \sim 720 \times 10^{-5} \text{ SI}$ 。表明浅部第四系、新近系、古近系、白垩系与下伏地层(体)存在有较为明显的磁性差异。

2)下白垩统赛汉组岩石磁化率随着泥岩—砂岩—砾岩的成分变化而增高;黄色砂岩与灰、灰白色砂岩之间磁化率也存在微弱差异。这些磁性特征为氧化—还原带的划分提供了依据。

2 物探资料的推断解释

2.1 可控源音频大地电磁测量

通过可控源音频大地电磁测量基本解决了研究区盖层结构、隐伏断裂构造、目标层顶底板埋深以及砂体空间展布特征等地质问题,具有较好的有效性和实用性^[6-7,9]。

从反演电阻率断面图(图 2)可以看出,研究区电性层纵向可以分为 5 个电性层,呈中阻—低阻—中高阻—低阻(夹中阻)—中高(高)阻分布,找矿目标层赛汉组上段砂体主要位于第四电性层。

1)第一电性层:位于断面图顶部,平均厚度约 40 m,等值线呈近似水平层状分布,反演电阻率值为 $10 \Omega \cdot m \sim 16 \Omega \cdot m$,表现为相对中阻特征。推断为新近系、古近系,岩性以砂岩、粗砂岩、含砾粗砂岩、砂质砾岩为主。

2)第二电性层:平均厚度 50 m 左右,等值线呈水平层状分布。反演电阻率值小于 $10 \Omega \cdot m$,相对低阻特征。结合地质资料,推断为新近系、古近系泥岩。

3)第三电性层:平均厚度 50 m 左右,等值线呈

水平层状分布。反演电阻率表现为相对中高阻特征,反演电阻率值为 $10 \Omega \cdot m \sim 100 \Omega \cdot m$,个别地段反演电阻率达 $150 \Omega \cdot m$,等值线呈水平层状分布。推断为古近系、新近系含砾粗砂岩、中粗粒砂岩。

4)第四电性层:顶界面呈近似水平分布,底界面呈波状起伏,最大厚度达 800 m。总体表现为低阻特征,推断为下白垩统赛汉组。其中在 0 m~350 m、380 m~600 m、680 m~950 m、980 m~1 350 m、13 500 m~16 000 m 段分布有呈透镜状、似层状分布的中阻体,并为上、下低阻带所夹持,推断为下白垩统赛汉组河道相砂岩、砂质砾岩和含砾中粗砂岩,也是铀矿找矿的重要层位。

5)第五电性层:顶界面呈波状起伏。反演电阻率大于 $16 \Omega \cdot m$,深部反演电阻率高达 $1 500 \Omega \cdot m$,表现为中高(高阻)特征。结合地质资料推断前白垩纪基底,为变质岩与华力西期—燕山期花岗岩综合反映。

2.2 氧化—还原过渡带的推断解释

2.2.1 铀矿化和铁磁性矿物存在密切关系

以往研究成果表明^[8-9],铀矿体与氧化—还原过渡带有着密切关系(图 3),氧化带、氧化—还原过渡带、还原带铁磁性矿物含量关系如下^[10-12]:

1)氧化带:赤铁矿、褐铁矿含量相对最高,而磁铁矿、菱铁矿和黄铁矿含量偏低。

2)氧化—还原过渡带:钛磁铁矿含量居各地球化学分带之首,其次为菱铁矿,磁铁矿含量也是各分带中最高的,而赤铁矿、褐铁矿相对最低,也是铀矿床主要分布地段。

3)还原带:钛磁铁矿含量偏高,其次为硅酸铁,而磁铁矿、菱铁矿含量最低。

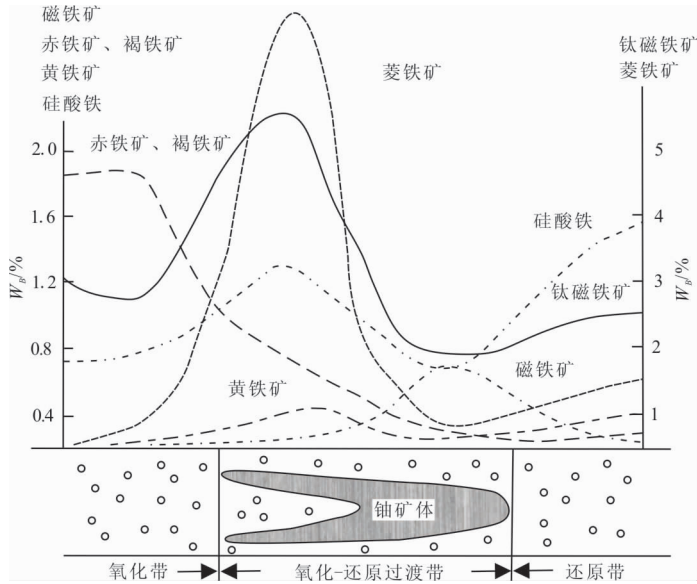


图 3 铀矿体与氧化-还原过渡带的分布关系^[10]

Fig. 3 Distribution relationship of the uranium ore body and redox transition belt

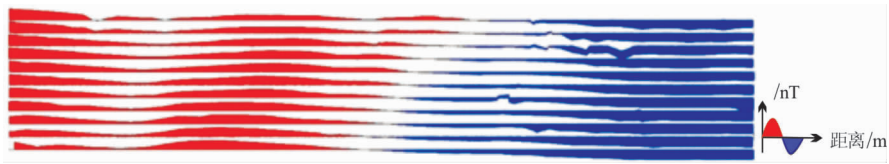


图 4 地面高精度磁测 ΔT 剖面平面图

Fig. 4 High-accuracy ground magnetic survey ΔT sectional plan

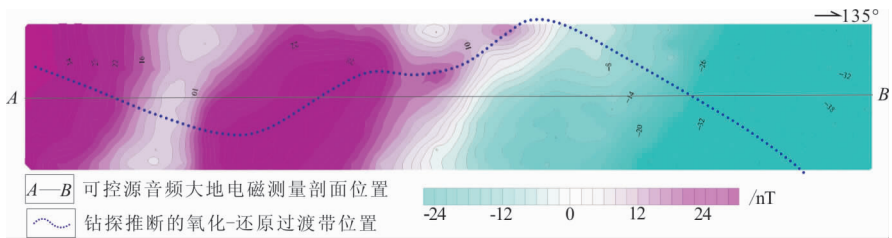


图 5 地面高精度磁测 ΔT 等值线平面图

Fig. 5 High-accuracy ground magnetic survey ΔT contour plan

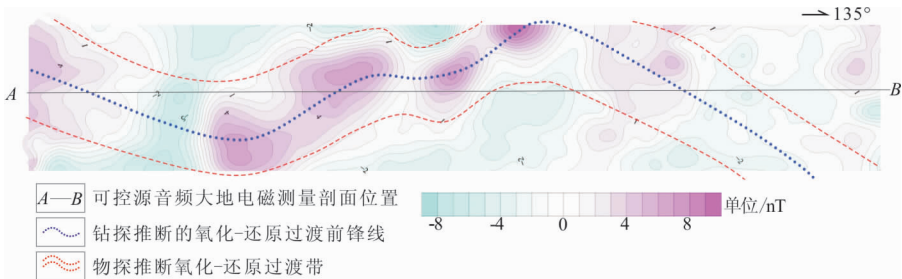


图 6 地面高精度磁测剩余磁异常等值线平面图

Fig. 6 High-accuracy ground magnetic survey residual magnetic anomaly contour plan

因此氧化—还原过渡带可以引起一定强度的磁异常,笔者主要利用地面高精度磁测资料进行分析。

2.2.2 氧化—还原过渡带弱磁信息提取

研究区内前白垩纪基底变质岩及华力西期—燕山期花岗岩组成,磁场相对较强;而由下白垩统赛汉组、古近系、新近系等沉积岩系磁场表现为弱磁性特征。

从地质资料及以上磁场特征分析,由于氧化—还原过渡带从纵向上具一定埋深,磁场特征反映并不明显(图4、图5),为了突出与氧化—还原过渡带有关的弱磁异常,对地面高精度磁测资料进行了弱磁信息提取。

在研究工作中,结合已有资料氧化—还原前锋线位置,对氧化—还原过渡带磁场特征进行了分析,氧化—还原前锋线附近磁场存在弱磁异常分布。在此基础上利用求取剩磁异常的方法来突出有关信息,其方法为首先利用 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ 窗口对磁测网格化数据进行平滑滤波,最终采用原始磁测网格化数据减去平滑后网格化数据求取剩磁异常^[12-13]。从剩余磁异常图(图6)中可以看出:①在北部正磁场区南东侧边缘部位存在有呈串珠状分布的磁异常带,该异常带剩余磁异常强度较高,最高达 10 nT ,异常中心走向与钻探圈定的氧化—还原前锋线位置相吻合;②南部负磁场区分布有较弱的磁异常,磁异常呈零星团块状分布,氧化—还原过渡带埋深较深,磁异常强度较弱,最高只有 5 nT 。钻探圈定的氧化—还原前锋线由异常中心部位穿过。

根据磁异常分布特征及地质资料的综合分析,划分了氧化—还原过渡带的分布范围,该带呈蛇曲状分布,宽约 4 km ,控制长度 16 km 。结合地质及钻探资料,推测的氧化—还原过渡带主要分布于赛汉组上段砂体中(图7)。

3 钻探验证

根据物探推断的氧化—还原带范围布设了钻孔,钻孔分别位于断面平距 2.8 km 、 6 km 、 9.2 km 、 12.6 km 处,均为见矿孔。以 EZK1506—1093 孔为例,从图8可以看出,反演电阻率值与测井电阻率值略有差异,但变化趋势相同,不同特征的电性层与古近系、下白垩统赛汉组不同岩性段相对应,且埋深与厚度基本吻合^[6]。

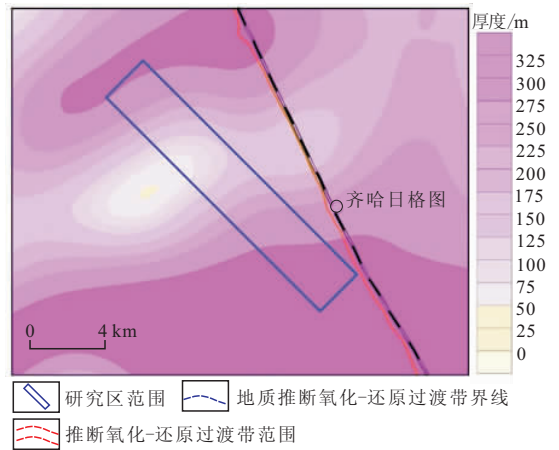


图7 研究区目标层砂体厚度及氧化—还原过渡带分布图

Fig.7 The distribution map of sandstone thickness and redox transition belt

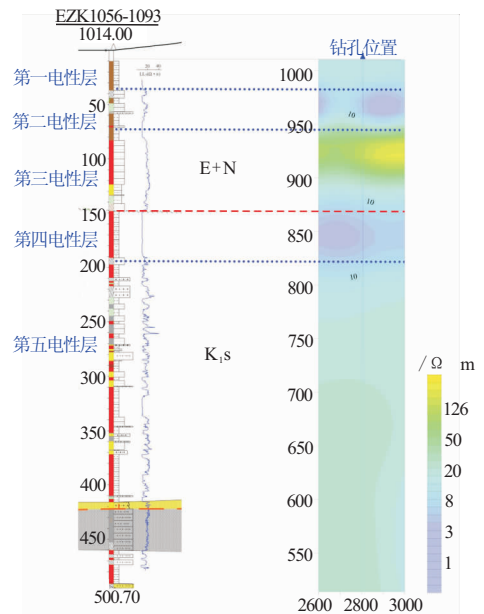


图8 推断结果钻探验证情况对比图

Fig.8 The comparison diagram of geological interpretation and exploratory boring

1)第一电性层至第三电性层与古近系、新近系各岩性段相对应,其埋深、厚度与可控源音频大地电磁测量推断结果基本吻合。

2)第四电性层可细分为四段,为找矿目标层下白垩统赛汉组的反映。其中第四电性层第一段位于孔深 $150\text{ m} \sim 200\text{ m}$ 段,呈低阻特征,对应于赛汉组上段泥岩,也为划分下白垩统与古近系的标志层;第四电性层二至四段位于孔深 200 m 以深,与下白垩统赛汉组泥岩、砂岩、砂质砾岩和含砾中粗砂岩相对应,也为铀矿化主要赋存层位。

4 结论

通过地面高精度磁法与可控源音频大地电磁测量,结合物性参数,对研究区含矿砂体的平面投影位置、埋深、厚度及进行了推断解释,通过钻探验证,取得了较好的找矿效果,主要结论如下:

1)通过可控源音频大地电磁测量,结合地质、钻探资料,对区内的地层、岩性及找矿目的层下白垩统赛汉组古河道砂体进行了推断解释,通过钻探验证取得了较好的地质效果。

2)通过地面高精度磁测,利用弱信息提取技术,对区内氧化—还原过渡带进行了划分。从收集的钻探资料分析,见矿孔均位于推断的氧化—还原过渡带内,表明推断解释结果基本可靠,同时对铀矿床的定位也具备一定的指示作用。

综合以上分析表明,通过可控源音频大地电磁测量,推断找矿目的层下白垩统赛汉组古河道的砂体的空间展布特征,结合地面高精度磁测划分氧化—还原过渡带分布范围,对铀矿找矿具有重要的指导意义。

参考文献:

[1] 李洪军,申科峰,聂逢君,等.二连盆地中新生代沉积演化与铀成矿[J].东华理工大学学报(自然科学版),2012,35(4):301—307.
LI H J, SHEN K F, NIE F J, et al. Sedimentary evolution in meso—cenozoic and uranium mineralization of Erlian basin[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2012, 35(4): 301—308. (In Chinese)

[2] 刘波,杨建新,秦彦伟,等.二连盆地中东部赛汉组古河谷砂岩型铀矿床控矿成因相研究[J].地质与勘探,2016,52(6):49—52.
LIU B, YANG J X, QIN Y W, et al. Research on the ore—controlling genetic facies of the sandstone type uranium deposits in the paleovalley of Saihan Formation of the Erlian Basin[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(6): 1037—1047. (In Chinese)

[3] 康世虎.二连盆地乌兰察布坳陷东部古河道型氧化带发育特征及铀成矿模式[J].河南理工大学学报(自然科学版),2010,28(增刊):107.
KANG S H. Development characteristics and uranium metallogenic model of palaeochannel—type oxidation zone in eastern Wulanchabu Depression, Erlian basin[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natu-

ral Science), 2010, 28(Z): 107. (In Chinese)

[4] 旷文战,康世虎.内蒙古二连盆地乌兰察布坳陷及周边铀资源区域评价[R].内蒙古包头市:核工业二〇八大队,2012.
KUANG W Z, KANG S H. Regional evaluation of Uranium resources in Wulanchabu Depression and surrounding area of Erlian basin, Inner Mongolia[R]. Baotou City, Inner Mongolia: Geological Party No. 208, 2012. (In Chinese)

[5] 旷文战,李洪军.内蒙古二连盆地地浸砂岩型铀资源调查评价[R].内蒙古包头市:核工业二〇八大队,2005.
KUANG W Z, LI H J. Investigation and evaluation of in—situ leached sandstone uranium resources in Erlian Basin, Inner Mongolia[R]. Baotou City, Inner Mongolia: Geological Party No. 208, 2005. (In Chinese)

[6] 张俊伟.内蒙古二连盆地乌兰察布坳陷赛乌苏地区物探测量报告[R].石家庄:核工业航测遥感中心,2012.
ZHANG J W. Geophysical survey report of Saiwusu area, Wulanchabu Depression, Erlian basin, Inner Mongolia[R]. Shijiazhuang: Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, 2012. (In Chinese)

[7] 张俊伟.内蒙古乌兰察布坳陷伊和图地区可控源音频大地电磁测量报告[R].石家庄:核工业航测遥感中心,2013.
ZHANG J W. Report of controlled—source audio magnetotelluric survey in Yihetu area of Wulanchabu Depression, Inner Mongolia[R]. Shijiazhuang: Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, 2013. (In Chinese)

[8] 张俊伟,汪远志.二连盆地成矿区航磁成果解释报告[R].石家庄:核工业航测遥感中心,2010.
ZHANG J W, WANG Y Z. Interpretation report of aeromagnetic results in Erlian basin[R]. Shijiazhuang: Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, 2010. (In Chinese)

[9] 汤井田,何继善.可控源音频大地电磁法及其应用[M].长沙:中南大学出版社,2005.
TANG J T, HE J S. Controlled—source audio—frequency magnetotelluric method and its application[M]. Changsha: Central South University Press, 2005. (In Chinese)

[10] 李和哲.伊犁盆地南缘铀成矿远景评价[R].核工业二一六大队,1995.
LI H Z. Prospective evaluation of uranium mineralization in southern margin of Yili Basin[R]. Urumqi: Geological Party No. 216, 1995. (In Chinese)

[11] 江民忠,李名松.可地浸砂岩型铀矿微磁异常研究及其

- 找矿意义[J]. 地质科技情报, 2003, 9(3): 49—52.
- JIANG M Z, LI M S, XIE Y C, et al. Study on micro-aeromagnetic anomaly over in-situ leachable sandstone type uranium deposit and its prospecting significance[J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(3): 49—54. (In Chinese)
- [12] 倪卫冲, 徐国苍. 可地浸砂岩型铀矿普查中航放航磁弱信息提取的研究[R]. 石家庄: 核工业航测遥感中心, 1998.
- NI W C, XU G C. Study on extraction of aeromagnetic weak information of in-situ leachable sandstone uranium deposit[R]. Shijiazhuang: Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, 1998. (In Chinese)
- [13] 郭志旭, 张青杉, 陈超, 等. 航磁异常深部弱信号提取技术研究[J]. 地质与勘探, 2015, 51(6), 1007—1015
- GUO Z K, ZHANG Q S, CHEN C, et al. Extracting weak magnetic signals at depth from aeromagnetic anomaly data[J]. Geology and Exploration, 2015, 51(6): 1007—1015. (In Chinese)
- [14] 王彦国, 刘鹏, 聂逢君, 等. 重磁勘探方法在砂岩型铀矿中的应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(7): 42—46
- WANG Y G, LIU P, NIE F J, et al. Applications of gravity and magnetic methods in sandstone type uranium deposits[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2017, 40(1): 42—46. (In Chinese)

The research and analysis of location technology for uranium deposit of sandstone — type in Erlian basin based on geophysical survey

ZHANG Junwei^{1,2}, ZHANG Weimeng^{1,2}

(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China;

2. Key Laboratory of Uranium Resources Geophysical Exploration Technology,
China Nuclear Industry Group Company, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: Sandstone-type uranium deposit is one of the essential types in uranium exploration in China. Many large and middle-sized uranium deposits and ore occurrences have been found in the Ulanqab depression of Erlian basin. What is a crucial uranium exploration area with good prospects for uranium mineralization? The lower cretaceous Saihan formation sand body and the REDOX transition zone control uranium mineralization. Therefore, it is crucial to find out the spatial distribution characteristics of the target sand body and the REDOX transition zone. In the application and analysis of the geophysical survey, space distributing character in sandstone body in the paleo-channel of Saihan group of lower cretaceous and the distribution scope of redox transition belt are inferred by controlled source audio magnetotelluric measurement and high-accuracy ground magnetic survey. It provides abundant geophysical data for uranium ore prospecting and achieves a good application effect through drilling verification. The development of this work also has a particular reference and directive significance for the geophysical work of sandstone-type uranium deposit exploration in north China.

Keywords: sandstone-type uranium deposit; controlled source audio magnetotelluric; high-accuracy ground magnetic survey; sandstone body in paleo-channel; redox transition belt