

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2024.03.03

俞初安, 司庆红, 彭胜龙. 2024. 砂岩型铀矿综合探测技术和实践—以二连盆地BYH铀矿为例[J]. 华北地质, 47(3): 23-35.

Yu Reng'an, Si Qinghong, Peng Shenglong. 2024. Comprehensive exploration techniques and Practices for Sandstone type uranium deposit: a case study of BYH uranium deposit in Erlian Basin[J]. North China Geology, 47(3):23-35.

砂岩型铀矿综合探测技术和实践 —以二连盆地BYH铀矿为例

俞初安¹, 司庆红¹, 彭胜龙²

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170;

2. 内蒙古煤炭建设工程(集团)总公司, 呼和浩特 010090)

摘要:【研究目的】砂岩型铀矿作为全球最重要的铀矿类型和我国最主要的经济可采类型。多种探测技术方法的综合运用是查明盆地内砂岩型铀矿储层结构、构造、含铀砂体空间分布以及预测铀矿体延伸展布的有效手段。二连盆地砂岩型铀矿总体具有埋藏浅, 古河谷近源成矿, 带状集中分布特征, 因地制宜建立该类型盆地的砂岩型铀矿综合探测技术方法对找矿勘查具有重要借鉴意义。【研究方法】以二连盆地川井坳陷BYH铀矿为研究对象, 对重力、航磁、电法、地震、钻井、氦气和伽马总量等多种信息进行提取和地质解释, 建立综合探测技术方法组合。【研究结果】提出了“重磁寻隆凹、电井震找断砂、氦伽圈异常”分层次综合探测组合模式; 以航磁、重力信息来探寻隐伏、半隐伏岩体和基底的隆凹展布形态, 确定区域成矿有利构造; 然后利用高密度电阻或音频大地电磁开展铀储层高阻中的相对低阻异常特征分析, 结合二维地震剖面精细刻画铀储层结构和断裂构造特征, 分析含矿砂体空间展布; 利用氦气和伽马总量或能谱测量圈定异常晕, 分析其与深部铀矿体的空间位置关系, 判断铀矿体的延伸展布。【结论】建立二连盆地砂岩型铀矿综合探测技术组合, 结合成矿地质条件, 能够指导区域砂岩型铀矿找矿勘查和部署。

关键词: 砂岩型铀矿; 综合探测技术; BYH铀矿; 二连盆地

创新点: 基于重力、航磁、电法、地震、钻井、氦气和伽马总量等多种资料的信息提取和解释, 提出了“重磁寻隆凹、电井震找断砂、氦伽圈异常”分层次综合探测组合模式, 为二连盆地砂岩型铀矿找矿勘查提供技术借鉴。

中图分类号: P624

文献标志码: A

文章编号: 2097-0188(2024)03-0023-13

Comprehensive exploration techniques and Practices for Sandstone type uranium deposit: a case study of BYH uranium deposit in Erlian Basin

YU Reng'an¹, SI Qinghong¹, PENG Shenglong²

(1. Tianjin Center, China Geological Survey(North China Center for Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China;

2. Coal Construction Engineering (Group) Corporation of Inner Mongolia, Hohhot 010090, China)

收稿日期: 2024-08-17

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目“中国北方中、新生代盆地砂岩铀矿成矿预测与增储示范”(No.2023YFC2906704); 国家自然科学基金委重点支持项目“风成沉积体系砂岩型铀矿成矿作用”(No.92162212); 中国地质调查局地质调查项目“全国X矿重点调查战略性矿产调查评价”(DD20230045)”

作者简介: 俞初安(1980-), 男, 博士, 正高级工程师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 现从事铀等能源矿产勘查等相关工作, E-mail: 121181748@qq.com。

<http://hbdz.org.cn> 华北地质, 2024, 47(3)

Abstract: This paper is the research of uranium deposits.

[Objective] Sandstone-type uranium deposits are the most important type of uranium deposits globally and the most economically recoverable type in China. The comprehensive application of various exploration techniques is an effective means of identifying the structure and composition of sandstone uranium deposits in the basin, the spatial distribution of uranium-bearing sands, and predicting the extension of uranium ore bodies. Sandstone-type uranium deposits in the Erlian Basin are generally characterised by shallow burial, paleovalley type mineralization with near-source and concentrated distribution in zones, and the establishment of comprehensive sandstone-type uranium mine detection technology methods in this type of basin according to local conditions is an important reference for prospecting and exploration. **[Methods]** Taking the BYH uranium deposit in the Chuanjing depression of the Erlian Basin as the research object, we extracted and geologically interpreted a variety of information such as gravity, aeromagnetism, electrical prospecting, seismicity, drilling, radon gas and gamma measurement, and established a combination of integrated detection technology. **[Results]** The combined model of "heavy magnetic search for rumbles, electric well seismic search for fractured sands, and radon and gamma circle anomalies" is proposed, aeromagnetic and gravity information will be used to explore the rumble and concave spreading patterns of concealed and semi-concealed rock bodies and basement, and to determine the favourable structures for regional mineralisation; then high-density electric resistance or audio geomagnetic sounding will be used to carry out the analysis of anomalous features of high resistance and low resistance uranium reservoirs. Then, high-density electrical resistance or audio geomagnetic analysis is used to analyse the characteristics of the anomaly, combined with 2D seismic profiles to finely delineate the structure of uranium reservoirs and fracture tectonic features, and to analyse the spatial distribution of ore-bearing sands; and radon gas and gamma total or spectral measurements are used to define the anomaly halo, analyse its spatial location in relation to the deep uranium ore bodies, and assess the extension of the uranium ore bodies. **[Conclusions]** Establishment of a comprehensive exploration technology combination for sandstone-type uranium deposits in the Erlian Basin, combined with the geological conditions of mineralization, is capable of guiding the exploration of regional sandstone-type uranium mines.

Key words: sandstone-type uranium deposit; integrated detection technology; BYH uranium deposit; Erlian Basin

Highlights: Based on the information extraction and interpretation of gravity, aeromagnetic, electric method, seismic, borehole, radon gas and total gamma data, a hierarchical integrated detection combination model of "heavy magnetic search for rumble and concavity, electric well seismic search for sand fracture and radon gamma anomalies" has been proposed, which will provide a technical reference for prospecting and exploration of sandstone-type uranium deposits in the Erlian Basin.

About the first author: Yu Reng'an (1980-), male, PhD, senior engineer, major in mineralogy, petrology and mineral deposit, currently engaged in geological mineral exploration, E-mail: 121181748@qq.com.

Fund support: Supported by the Geological Survey Project of China Geological Survey(DD20230045).

铀是国家核能可持续发展和国防建设的重要战略资源。近年来,砂岩型铀矿由于具有矿床规模大、地浸开采成本低、开采过程简易环保等优点,成为世界最重要的铀矿类型,也是我国最主要的经济可采类型。砂岩型铀矿成矿作用是一个长期而复杂的地质过程(俞初安等,2023),成矿机理复杂,找矿标志多样,且铀矿床普遍埋深较大,想要认识这个过程需要有一套行之有效的具体找矿技术方法。经过多年的实践证明,不同找矿技术方法在盆地构造划分、地层对比及砂体圈定、沉积环境认识、氧化还原界线及矿化信息识别等方面具有不同程度的应用效果(赵希刚等,2010;封志兵等,2014,2021)。运用好各类

找矿技术方法是开展区域找矿预测,或者在已发现矿(化)体的基础上拓展外围找矿空间的关键所在。

国际上,加拿大、美国、澳大利亚和纳米比亚等一些铀矿大国的矿业公司和研究机构走在了世界勘查技术领域前沿,研发了高精度航空和地面多维探测装备和技术(Michael J et al.,2019; LEBEL D et al.,2020; GRAY T et al.,2021),如以无人机为平台,搭载高光谱测量系统、航放和航磁等探测设备,实现对目标区铀成矿环境及放射性异常信息快速探测;利用研发的重磁数据三维反演和地震数据处理等智能化处理解释技术,提高了对地质目标体的解译精度和找矿效率,并都已商业化推广应用。德国 Genitro

公司研发的Alpha GUARD高精度脉冲电离室测氦仪,可用于特殊高异常环境下的土壤、大气和水中的氦气含量测量工作(秦明宽等,2024a)。Hou等利用遥感、数字地形、地球物理和计算机建模技术构建了澳大利亚和中国与古河谷有关的铀矿床地质模型,认为是划定古河谷的有用和重要工具(Hou et al.2017)。国内铀矿勘查技术近些年快速发展,形成了新一代航磁、航放、航电技术方法,建立了地浸砂岩型铀矿快速评价技术系统(秦明宽等,2024b),利用机器学习对地球物理信号(重力场异常、磁场异常、时频电磁场、伽马射线光谱、地震波形的变化和地热梯度场等信号)特征进行有效识别,能够较好的提高地物信号的自动化处理效率(韩世礼等,2024)。另外煤田、油田钻孔的自然伽马测井数据作为铀矿评价的直接找矿线索,得到大规模利用和开发(Jin et al., 2018, 俞初安等,2018),在前人煤铀兼探、油铀兼探找矿实践基础上,中国地质调查局2012年以来利用煤田、油田资料“二次开发”找铀技术思路,取得显著的找矿效果(金若时等,2022;俞初安等,2022;程银行等,2024),现已逐渐形成了一套新的砂岩型铀矿调查方法,该方法能根据煤田、油田钻孔测井资料快速缩小找矿目标,且具有较高的见矿率;除了对筛选的放射性异常钻孔进行原位钻探验证,铀矿团队通过对研究区的地质、物探(航放、航磁、重力、地震)、化探、遥感及煤田、油田勘查资料进行综合分析并编制系列编图,分析含矿目的层地层结构、构造和砂体发育特征;同时在缺少煤田、油田钻孔资料的成矿远景区部署氦气、地面伽马测量等方法圈定放射性异常区,综合约束调查区铀矿(化)体空间分布特征,最终精确定位找矿靶区。

二连盆地作为北方重要的含铀盆地之一,因其是山间盆地,各个凹陷区的河道狭窄,铀矿(化)体带状产出集中于河道,且铀矿层埋藏相对较浅,前人利用重力、航磁、电法、化探、地震、氦气、遥感等方法开展了大量研究工作(胡航等,2018;王浩锋等,2019;张必敏等,2020;吴曲波等,2020;叶发旺等,2021),并取得较好的运用效果;由于二连盆地独特的成矿地质条件,这些方法相对其它盆地更有优越性和勘查效果。不足的是,前人更侧重于单个探测方法的应用或者是开展综述性的总结(韩绍阳

等,2004;封志兵等,2021),对典型铀矿床多种勘查数据的综合解释和评价总体偏少。基于此,本文在系统总结前人铀矿找矿技术方法的基础上,通过梳理分析二连盆地BYH砂岩型铀矿的地质、重磁、地震、氦气和钻井等综合资料,集成和提取铀成矿信息,结合该区的成矿地质条件,建立一套行之有效的砂岩型铀矿勘查方法组合,评价各类勘查信息在盆地砂岩型铀矿勘查应用效果,力求为砂岩型铀矿找矿勘查和预测评价提供技术借鉴。

1 地质概况

1.1 区域地质构造特征

二连盆地是在内蒙古-大兴安岭海西褶皱带基底上发育起来的中新生代断陷沉积盆地。川井坳陷是二连盆地最西部的一个中新生代残留坳陷(李西得等,2022;田宇等,2022),经历了从早期的裂陷到晚期的裂后坳陷阶段的演化,不同演化阶段发育不同的物源体系特征(鲁超等,2016;彭云彪等,2018),在断陷转换期发育了重要的含铀岩系-赛汉组(聂逢君等,2015; Nie Fengjun, et al.,2020; 俞初安等,2020)。

BYH铀矿位于二连盆地西部川井坳陷的中部(图1)。研究区内发育的盖层主要为下白垩统白彦花群 K_1bt (可划分为阿尔善组(K_1a)、腾格尔组(K_1t)、赛汉组(K_1s))和上白垩统二连组(K_2e)及新生界(李彤等,2022)。上白垩统二连组主要为一套冲洪积扇及扇前洪泛平原沉积,岩性为红色、砖红色砂质砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩。赛汉组为断坳盆地振荡上升阶段发育的一套灰色碎屑岩、泥质岩沉积,岩性为黄色、杂色、灰色砂质砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩及褐煤等,上部为黄色、杂色,下部以灰色为主。其中赛汉组可分为赛汉组上段(J_2z^1)和赛汉组下段(J_2z^2),赛汉组上段岩石中富含有机质、炭化植物碎屑、黄铁矿等还原介质,为研究区的主要找矿目的层,发育辫状河-辫状河三角洲-湖沼沉积。盆地基底地层以元古代-古生代变质岩、火山碎屑岩等为主。该矿区初步揭露的铀矿(化)体长度近6 km,呈北西-南东向分布于白彦花凸起的北部边缘。

1.2 铀储层沉积特征

研究区的赛汉组沉积体系是以冲积扇-辫状

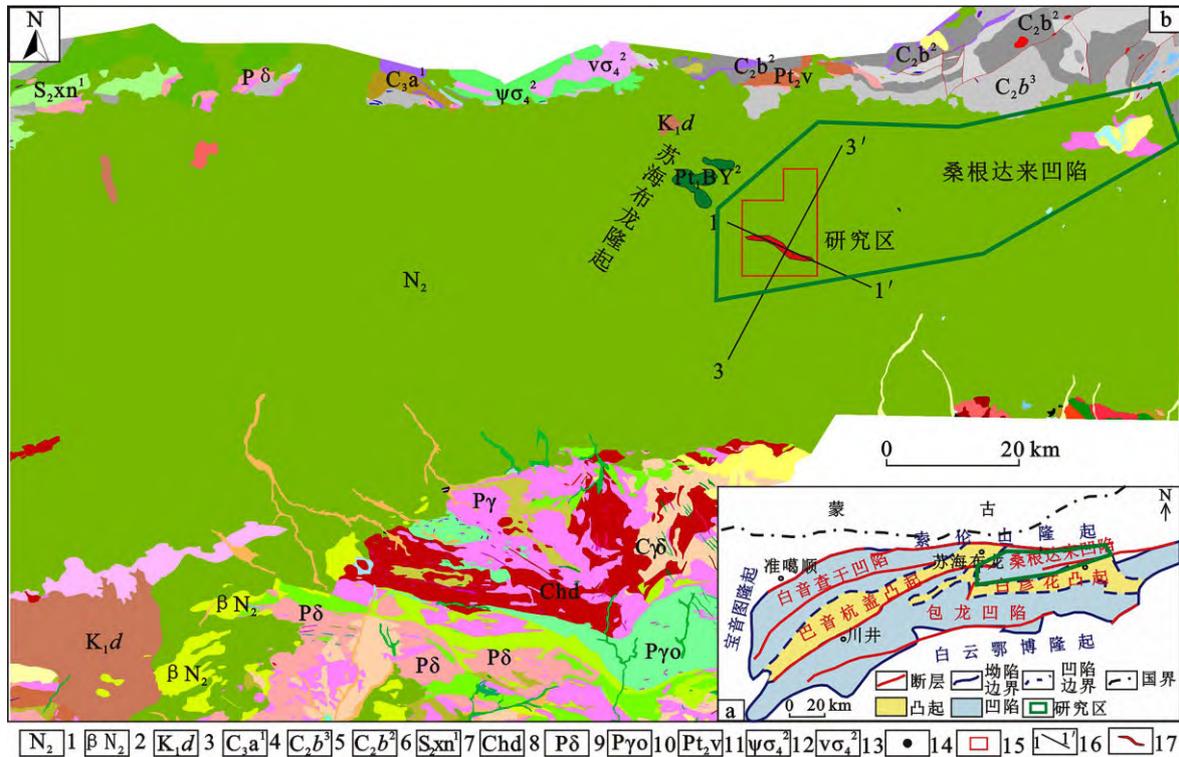


图1 二连盆地川井坳陷BYH铀矿地质简图

Fig.1 Geological map of BYH uranium deposit in Chuanjing Depression, Erlian Basin

(a.川井坳陷构造分区图;b.川井坳陷地质和矿体分布简图)

1. 上新统泥岩; 2. 上新统泥岩与玄武岩互层; 3. 下白垩统大磨拐河组; 4. 上石炭统阿木山组; 5. 中石炭统本巴图组三岩段;
6. 中石炭统本巴图组二岩段; 7. 中志留统徐尼乌苏组; 8. 中元古界都拉哈拉岩组; 9. 二叠系闪长岩; 10. 二叠系石英闪长岩;
11. 元古界辉长岩; 12. 元古界辉橄岩; 13. 元古界斜辉橄岩; 14. 地名; 15. BYH研究区; 16. 地震剖面位置; 17. 铀矿(化)体

河-湖相为主,赛汉组上段发育辫状主河道砂体,规模大,渗透性能良好,具有较宽、较深、动能较强的特点,易于形成优质储层。其岩性主要为砂岩、砂砾岩夹炭质泥岩和粉砂岩,砂体厚 35~50 m,自西南向东北向呈蛇曲状分布,厚度逐渐减薄,直至尖灭(图2)。铀矿体主要富集于粒度偏细的深灰色、灰黑色中-细粒砂岩或者含泥砂质砾岩中,有机质和炭屑等还原介质发育。

2 研究方法

BYH铀矿的发现是基于利用煤田钻孔放射性异常资料和多种物化遥等综合找矿技术方法相结合而实现的。在煤田钻孔放射性异常验证发现工业孔的基础上,利用重力、航磁、遥感等综合手段解译工作区的隆起构造和断裂构造特征,从而寻找构造有利部位;利用二维地震、高密度电法和钻孔资料分析目的层地层结构、构造特征;编制的目的层

砂体厚度图和底板标高等值线图寻找古河道砂体和局部微隆起。在此基础上总结分析工作区成矿地质条件,拓展找矿思路 and 空间。

2.1 重、磁资料解释与应用

2.1.1 重、磁资料解释原理

在砂岩型铀矿的勘探过程中,重力勘探技术的有效应用是基于密度差异这一关键因素。碎屑沉积物的密度通常介于 1.8~2.0 g/cm³,并且随着深度的增加而逐渐增大。砂岩与泥岩之间的密度差异大约在 2%~3% 之间。前人研究表明,已发现的砂岩型铀矿床、矿点大都分布于局部重力高的边缘部位(封志兵等,2021),即位于重力高异常的边坡上,已发现的铀矿床(点)区域构造上都分布在盆地边缘地带的隆起区或者是盆地内构造单元的分界线附近。另外,一般而言重力梯级带变化较大的、等值线两边差异比较大的是深断裂的体现,在剩余重力异常中的次级重力异常分界线是次一级断裂反

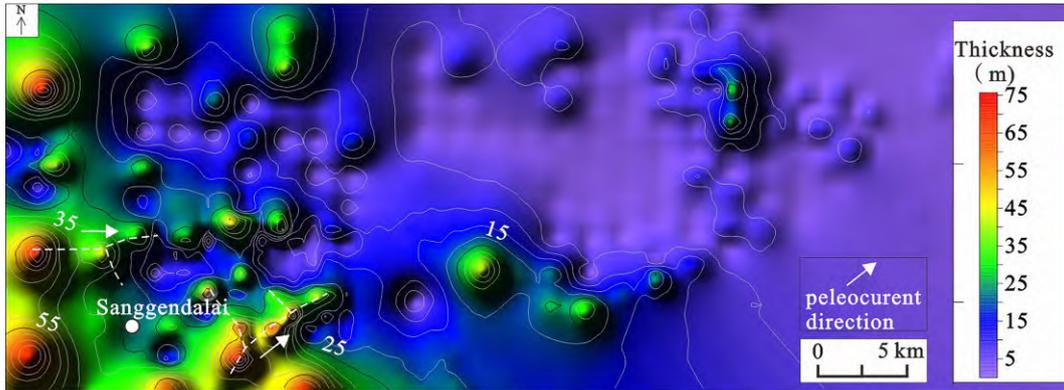


图2 川井坳陷东部BYH地区赛汉组上段砂体厚度等值线图

Fig.2 Contour map of sand body thickness in the upper section of the Saihan Formation in the BYH area of the eastern Chuanjing Depression

映,而已发现的砂岩型铀矿床点主要分布在次一级断裂的交汇处。剩余重力异常既是沉积盆地的重要指示标志,也是断层存在的重要标志。因此也是寻找铀矿床的重要标志。前人在二连盆地齐哈日格图地区开展高精度重力剖面测量工作,初步分析了区内沉积建造与基底起伏,断裂构造和热流体叠加成矿的关系(王彦国等,2017)。因此,砂岩型铀矿床和盆地局部隆起之间有密不可分的关系。

磁法勘探能否有效应用取决于地质体的磁性差异,磁性体的空间分布主要与岩浆活动、基底隆起以及构造作用等关系密切。沉积盖层通常表现出较弱的磁性,而砂岩和泥岩的磁性差异仅为几个单位。铀储层中的砂岩基本上是无磁性的,所以在以往的铀矿勘查中,磁法往往是间接的方法,主要是用来研究铀成矿相关的地质背景,用于控矿构造的识别和基底结构的划分,很少用于直接定位铀矿体。前人研究表明,在一定地质条件下磁化率和铀含量间成反比关系,理由是由于砂体中大量碎屑铁钛氧化物(包括磁铁矿)转换为铁的硫化物,致使磁

化强度降低(付锦等,2017)。找矿目的层中磁化强度减弱的微变地段,可作为区域预测的重要依据。但是,有效磁测数据容易被基底、沉积地层等引起的磁异常干扰,实际应用效果有待进一步探讨。

因此,对于盆地沉积盖层的分层,并不是重力和磁力勘探的强项。然而,当涉及到沉积盖层与盆地基底之间的磁性和密度差异时,情况则大不相同。这两种差异显著,这使得重力和磁法在界定研究区域的基底起伏面和识别断裂构造方面发挥了关键作用。重磁资料综合解释是研究铀矿形成规律和找矿规律的重要一环。利用航磁、重力资料可圈定隐伏、半隐伏岩体和老基底的形态、展布,分析确定有利于铀成矿的地质构造。

2.1.2 重磁异常特征及解释

(1) 重力异常特征及解释

BYH工作区位于桑根达来凹陷西侧,剩余重力异常图(图3a)显示BYH地区存在三处明显局部重力高异常,推测区内发育局部凸起。其中,BYH矿区位于剩余重力值0~14 mGal范围,处于白彦花

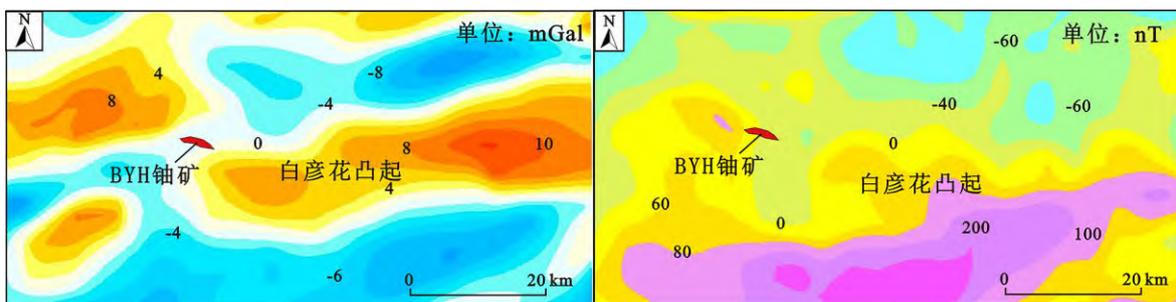


图3 研究区剩余重力异常图(a)和航磁化极ΔT异常图(b)

Fig.3 Residual gravity anomaly map (a) and aeromagnetic polarity ΔT anomaly map (b) in the study area

<http://hbdz.org.cn> 华北地质, 2024, 47(3)

凸起和西北方向苏海布龙凸起夹持的鞍部。同时,重力梯级带变化较大或等值线两侧的差异较大一般认为是深大断裂的反映,而剩余重力场中的不同性质的重力异常分界线一般认为是次级断裂特征。研究区白彦花凸起区为的重力场值由高向低变化的梯度带,且等值线发生了扭曲或错断,显示了构造斜坡带和局部断裂分布,推断区内存在明显的一组北北东、北北西向线性构造。北东东向线性构造控制了隆起带的走势,北北西向线性构造控制了区内主要的隆凹错断格局。因此,BYH铀矿的分布与盆内局部的隆起具有一定的空间分布关系。

(2) 磁力异常特征及解释

川井坳陷整体处于相对高磁异常背景中。桑根达来凹陷区内总体航磁异常幅值较高,研究区航磁化极 ΔT 异常呈北东向展布,特别是南部延伸形成了一条区内东西向幅值较高的高磁异常条带,间接指示了磁性地质体-隆起带老地层或基底的分布;而该区北部表现为较大区域低平磁异常特征。其中,BYH矿区位于航磁化极 ΔT 异常值平均为0~20 nT范围,主体表现为相对低缓的正磁异常区(图3b)。可以看出,区内重力高磁异常值较低,说明区内基底岩性不均匀,局部磁异常为异源异常,为不同岩石引起。

从航磁化极 ΔT 异常与铀矿体的空间分布关系可以看出,BYH矿区的分布与航磁异常的特征不是很明显,但铀矿体总体分布于航磁高值区向航磁低值区过渡的区域,并且偏向于高值区。推测铀矿体南侧有磁性体分布,由于大的磁性体大部分是深大断裂所引起的侵入岩充填于其中,从而形成比较明显的航磁异常,这些侵入岩可能为后来的砂岩型铀成矿提供铀源。同时白彦花隆起带边缘分布了断裂,为该地区下部油气等还原性气体的上移提供了重要通道。

前人研究认为,铀成矿过程中,磁铁矿和磁黄铁矿等磁性物质作为强还原性物质,被含氧含铀流体氧化为赤铁矿(Ellit, 1968; 马小雷等, 2016),在航磁图上这种去磁作用表现出较为明显负磁异常。在负磁异常边部,磁性矿物得到补充,使流体继续达到还原状态,形成铀富集沉淀(封志兵等, 2014)。因此,铀矿床(点)大部分位于高磁向低磁异常过渡部位。但实际应用过程中,磁测数据容易被基底、

沉积地层等引起的磁异常干扰,具有多解性,需要结合重力等信息综合推断解释。

2.2 高密度电阻率资料解释与应用

2.2.1 高密度电阻率资料解释原理

高密度电法是将直流电通过接地电极供入地下,建立稳定的人工电场,取得地表某点垂直方向(电测深)或某剖面的水平方向的电阻率变化,从而了解地层的分布或地质结构特点,反映了地层界面以及含矿砂体的展布特征(辛思华等, 2008; 杨玉蕊等, 2012)。

前人开展高密度电法在砂岩型铀矿的应用主要是结合其他地球物理方法,集中在提高地震数据采集的质量和效率,以及在复杂砂岩铀资源开发中的技术创新和应用。高密度电法是通过测量地下介质的电性差异来探测地下目标的性质和分布。在砂岩型铀矿的勘探中,高密度电法与其他技术如“少震动台次,宽频扫描”可控震源激发方法、“点式组合,宽频带接收”检波器接收技术等相结合,形成了一套综合的地震数据采集技术(吴曲波等, 2020)。这套技术特别适用于浅层资料的采集,浅层资料覆盖次数较低,易受表层采集噪声干扰,信噪比低,成像质量差,但通过高密度电法等技术的应用,能够提高数据采集的质量和效率。此外,高密度电法在砂岩型铀矿的应用还包括了在复杂砂岩铀资源开发中的技术创新。例如在新疆伊犁盆地复杂砂岩型铀矿的开发。

因此,高密度测量主要用于圈定与砂岩型铀矿密切相关的砂岩空间展布形态以及古河道的范围,但其测量的深度有限,对盆地基底的起伏和埋深往往难以探测到,一般采用剖面法进行测量,在重点区域可采用面积部署,得到三维电阻率数据体,以精细地反映地层结构特征。因此,高密度测量对于寻找埋深小于200 m的古河谷型砂岩型铀矿具有较好的应用效果。

2.2.2 高密度电阻率测量的运用

通过在研究区开展8条高密度测量剖面工作,成果资料显示地层视电阻率呈明显分带性特征(图4a)。以L2线剖面为例,浅部视电阻率值较高,电性为50~350 ΩM ,视电阻率值横向局部不均匀,可能为第四系岩土体沉积物质不均匀所致,因此初步推断浅部为第四系岩土层。下部地层视电阻率较低,

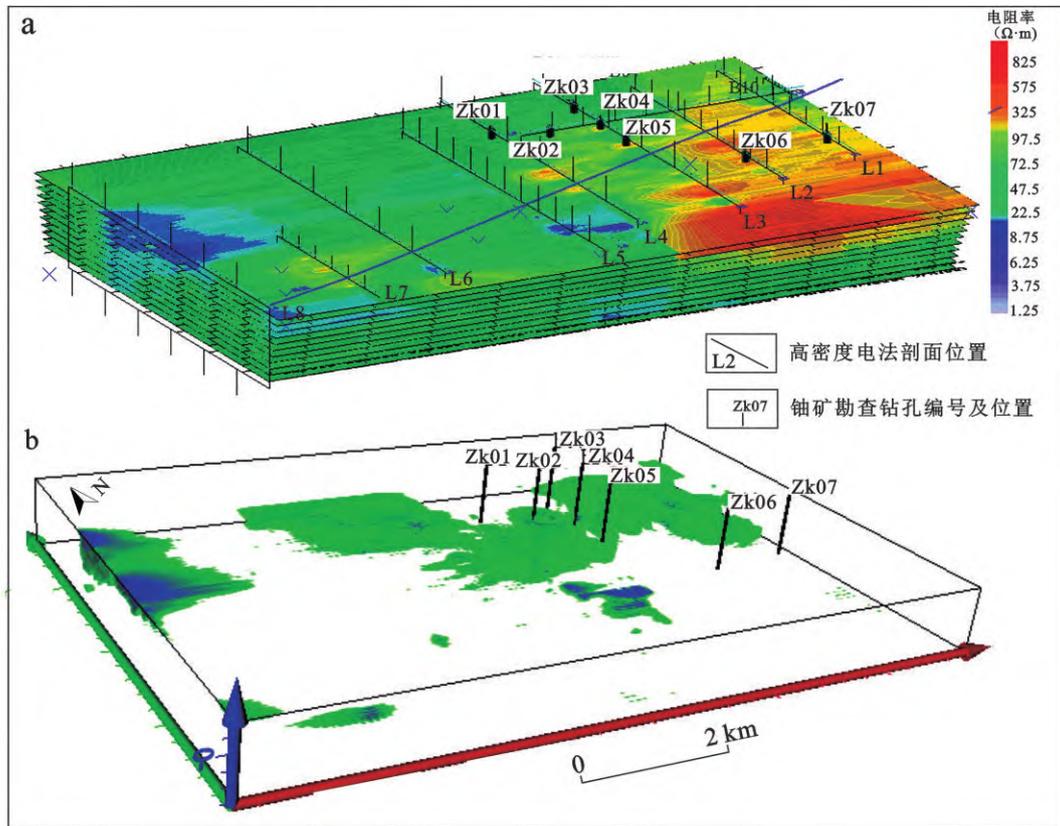


图4 BYH地区高密度电法水平切片三维展示(a)和目的层低阻体展布(b)

Fig.4 Three dimensional map of high-density electrical horizontal slice in BYH area (a) and distribution of low resistance bodies in the target layer (b)

电性为 $20 \Omega\text{m}$ 以下,界面总体呈自南向北逐渐抬升的变化趋势,深部视电阻率值局部呈近水平条带状低阻。结合测线已有钻孔 ZK06 揭露信息,初步推断深部地层为白垩系上统二连组和白垩系下统赛汉组(图5)。鉴于白垩系上下统地层泥质成分与含水率之间的差异,测线中深部电阻率相对较高的区域初步推断为白垩系上统二连组,较低的区域推断为白垩系下统赛汉组。

为了准确分析铀储层结构,本次基于物探测井、钻孔揭露地层和地形等多种信息建立了高密度电法三维可视化模型,提高解释的直观性和可靠性。从图4a可知,第四系岩土体主要分布于工区的东南角,其厚度自西向东和自北向南逐渐变厚;低阻体主要分布于工区的东北角区域,深度越深,低阻区域分布范围逐渐变大。在转换的三维测线电阻率剖面基础之上进行三维克里金插值处理,构建了电阻率三维数据体(图4b),提取了铀储层赛汉组砂岩中的低阻体。从中可以发现,低阻体主要分布

于工区西北部与测线L8北侧。

由上述可知,研究区北西延伸方向仍然发育含矿目的层的低阻体,间接显示了矿体可能往北西方向延伸,可作为后续钻探部署的方向。

2.3 地震资料解释与应用

2.3.1 地震资料解释原理

浅层地震勘探方法在解决研究区地层、岩性岩相划分、古河道及砂体识别以及断裂构造精细解释等铀成矿环境问题方面效果明显,对后期钻探工程布置具有较好的指导作用(李英宾等,2019)。在煤-油-铀钻孔数据库和地震数据基础上,聚焦铀储层和异常信息,反演铀储层地震参数,精细刻画铀储层结构,识别并提取深部铀成(控)矿关键要素信息(梁建刚等,2020)。

通过采用垂直地震剖面走廊叠加或声波测井地震合成记录,在地震剖面上对含铀目的层进行精细标定,利用优选后的地震波属性,定性预测目的层内砂岩的平面分布。在此基础上,利用已钻井的

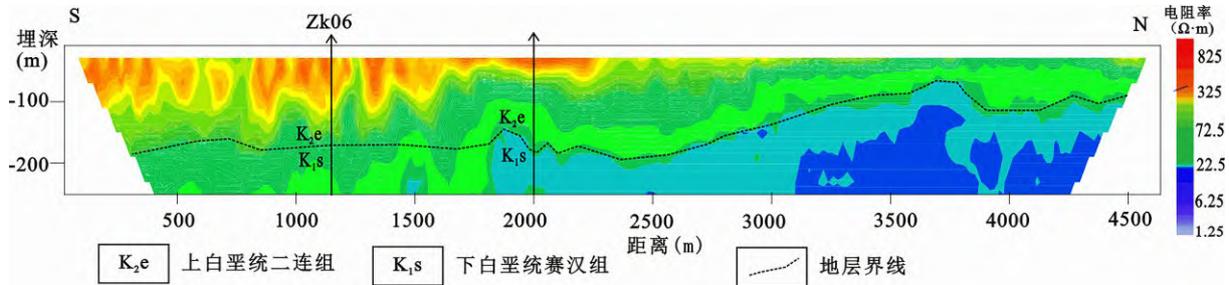


图5 BYH地区高密度电阻率测量L2线剖面图

Fig.5 L2 line section map of high-density resistivity measurement in BYH area

岩性测井资料,开展岩石物理分析,优选反映砂体的敏感地震弹性参数,用井约束的叠前叠后反演,获得反演数据体,用表征砂岩特征的参数,在反演数据体中提取单砂体数据,进而得到单砂体的空间展布,可定量预测砂体厚度和物性参数,尤其是利用最大波峰振幅属性能够识别含铀目的层主河道砂体发育区,有效地进行含铀储层预测,针对空间展布规模大的单砂体目标实施钻探。

2.3.2 地震资料的运用

为了有效识别下白垩统地层精细结构,在研究区开展了多条二维地震剖面测量工作,本次优选了研究区穿过铀矿体的2条十字剖面(图1a),通过二维地震数据精细处理与解释,并利用地震属性,研究地层结构及构造特征。

(1)地震剖面反射特征

二维地震3-3'剖面测线呈北东-南西方向穿过白彦花凸起延伸至桑根达来凹陷的中部,根据煤田钻孔资料所见基底深度和地层垂向变化特征,显示有2个反射界面呈现较为稳定的连续反射同相轴(图6),主要反射界面特征较为清楚。其中,T2为

二连组底部界面;Tm为煤层界面;Tg为基岩顶界面。Tg界面由于基岩与上覆白垩系碎屑岩层波阻抗差异大,反射强烈,连续性、稳定性较好。而下白垩统地层的内部界面由于波阻抗差异较小,从而“内幕”反射识别困难,剖面的中东部煤层界面相对清晰,断层发育特征较为明显。

(2)地震地质解译

3-3'地震剖面可以清晰地看出白彦花凸起带的北侧整体为单斜构造,局部发育微复式向斜构造,在基底的基础上广泛接受中生代白垩系地层的沉积,其形成早期地层逐渐填平补齐,在上部形成了含煤岩层和白垩系上统盖层。白彦花凸起和桑根达来凹陷苏海布龙地区,沉积物大量供给,原有盆地被改造逐渐形成古河谷地貌,由此发育冲积扇-辫状河沉积体系。在盆地拗陷时期形成斜坡带、冲积扇-辫状河-三角洲相沉积,地层内“泥-砂-泥”体系为盆地内铀成矿提供了良好的储存空间。

沿着矿体走向布置的二维地震1-1'线剖面(图7),明显显示了矿体分布于两个隆起带之间的凹陷部位,表现出古河道在地震剖面上为河谷位置下凹,

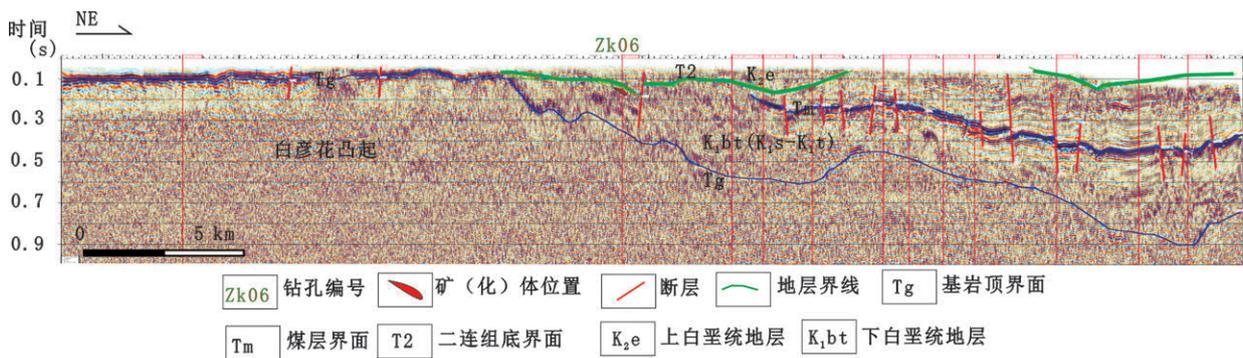


图6 BYH地区3-3'地震剖面(据李彤等,2022修改)

Fig.6 3-3' Seismic Profile of BYH Region (Modified by Li Tong et al., 2022)

T2.二连组底部界面;Tm.煤层界面;Tg.基岩顶界面;K2e.上白垩统地层;K1bt.下白垩统地层

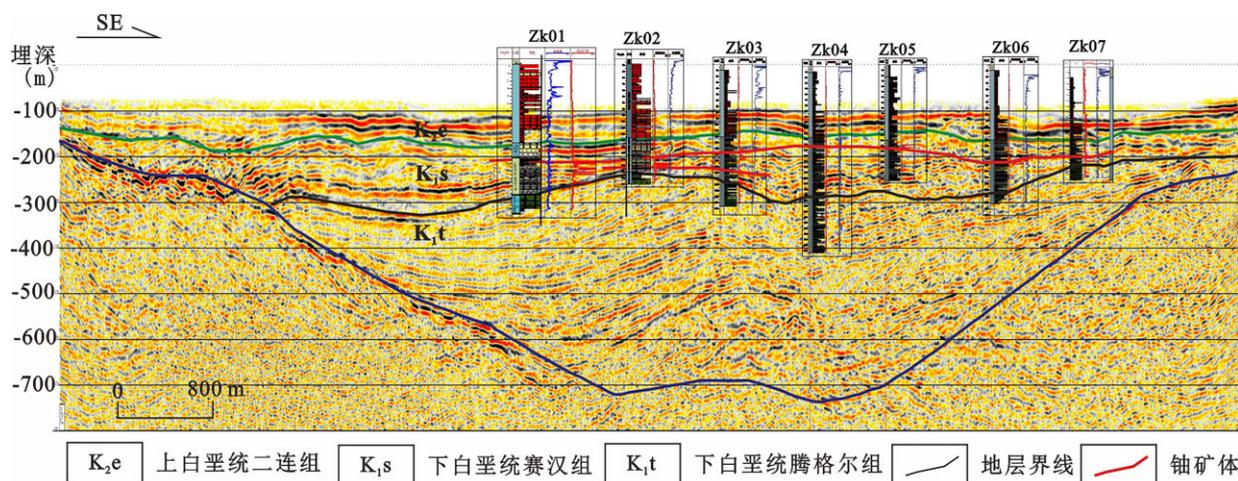


图7 BYH地区1-1'二维地震剖面

Fig.7 1-1' 2D Seismic section map of BYH area

两侧振幅增强。同时结合钻孔地质和测井资料,初步预测BYH矿区矿层主要位于二连组与赛汉组界面的赛汉组上部,受不整合面控制明显。

2.4 氦气和伽玛测量资料解释与应用

2.4.1 氦气和伽玛测量资料解释原理

氦气测量与 γ 射线测量技术以其快速、便携、高灵敏度和低成本的优势,成为放射性测量的有效手段。但是使用氦气测量法来探寻砂岩型铀矿的地质解释过程相对复杂。在砂岩型铀矿上方,氦及其衰变产物产生的微弱异常信号常常被复杂的背景噪声所掩盖。目前,识别和提取这些微弱异常信号成为研究的关键。通过对比氦气测量与 γ 射线总剂量测量的结果,并结合现场的地质和地形条件,可以综合分析异常信号的成因。这种方法有助于筛选出与深层砂岩型铀矿相关的异常信号,进而指导钻探部署和预测铀矿远景区。探索这种方法,对于有效提取砂岩型铀矿上方的氦及其衰变产物的微弱异常信号,提供了一种值得参考的途径。

尽管氦异常主要受地表镭含量的影响,但从理论上讲,氦浓度除了地表镭元素衰变形成的部分外,还有一部分是地下迁移上来的,这部分氦气并不是从深达几百米的矿体直接迁移上来,而是深部上升的镭元素在迁移至近地表时衰变形成的,如果能准确地获得这部分氦浓度数据,对确定深部矿体的位置将会很有利(赵宁博等,2017)。部分学者以伽玛能谱测量的铀当量数据代表地表的镭含量,以氦浓度数据指示地表和地下迁移的镭元素总量,将

两类数据进行数学计算后获取深部上升的镭含量,取得较好的应用效果。

另外需要说明的是,尽管地表氦浓度与地表镭含量的相关性很高,但氦气作为气体形态,具备特有的扩散机制,尤其是砂岩型铀矿产于沉积盆地内,通常伴有煤矿的产出,煤矿采空区上方的氦浓度会发生一定的改变,在异常解释时需要留意。

2.4.2 氦气和伽玛测量资料应用

二连盆地西缘BYH地区为草原景观区,地形起伏小,部分隆起带与低洼处高程差在30 m左右。矿区含矿层位为下白垩统赛汉组,矿体埋深为122~190 m,岩性为灰黑色砂岩、砂砾岩。从氦等值线图(图8a)可以看出,铀矿(化)体紧邻南部氦气高值异常和弱异常区,氦气异常总体呈近东西向展布特征。从研究区数字高程模型(DEM)(图8d)并与铀矿体叠加后可以发现,氦浓度高异常的南部为近东西向的隆起带,地势表现为西高东低,南高北低,氦气异常总体位于隆起缓坡地带。

地形对砂岩型铀矿氦气测量结果的干扰是客观存在的,尽管二连盆地的地形起伏并不剧烈,但氦异常部分仍然会受地形影响。此种情况下在地形相对较低区域,氦浓度的背景值可能呈整体降低的趋势,造成了全区的氦浓度背景值不均衡,低背景值区域的氦异常很容易被掩盖,会对全区的氦异常宏观形态产生一定影响。因此,可以利用中位数滤波的数学运算法来削弱地形的干扰,能较好地降低地形对氦气测量的影响程度(史长义等,1999;

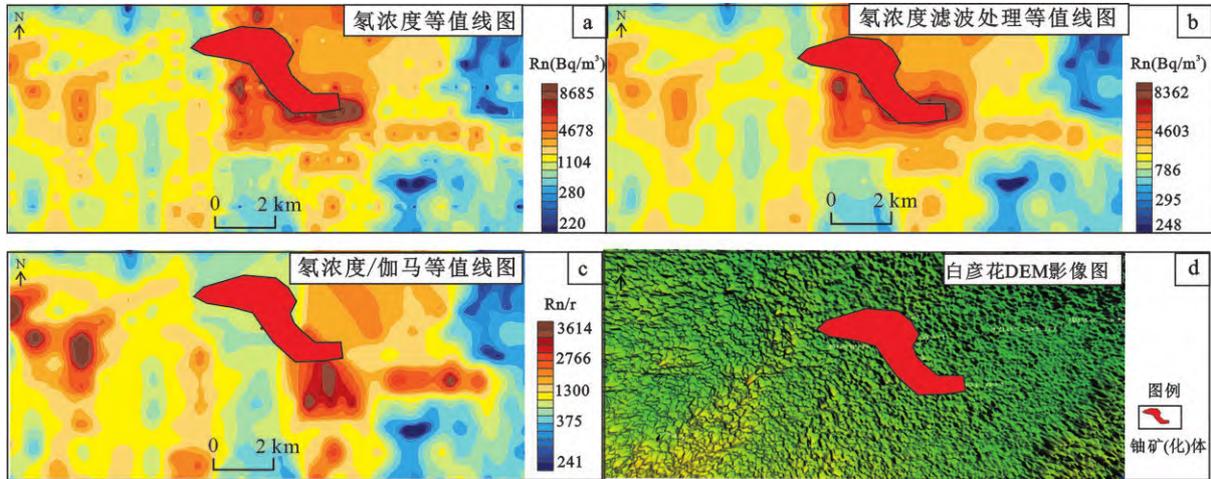


图8 BYH地区氡气、伽马解译相关图件

Fig.8 Radon and gamma interpretation maps of BYH area

a. 氡浓度等值线图; b. 经过中位数滤波法处理后的氡浓度等值线图; c. 氡浓度/伽玛比值等值线图; d. DEM影像图

赵宁博等, 2017)。通过应用Geochem Studio 一体化系统中的中位数衬值滤波法对氡气数据进行处理, 可以看出图8a与图8b对比可以发现异常晕变得圆滑、连续, 规律性更清楚, 对成矿有利的高异常区仍然得到保留。从测区氡浓度与伽马测量铀含量比值平面等值图(图8c)可以看出, 测区中部的矿体所对应的氡异常晕减弱, 显示了中部铀矿体的异常晕是由深部铀矿化产生氡气和地表的镭释放的氡气累积而成, 所以, 氡浓度与伽马测量铀含量比值降低。

综合分析认为, BYH地区甚至是整个二连盆地的地势都相对平坦, 地形因素对改变地表镭元素的作用相对较弱, 但建议利用中位数滤波方法先行对氡气异常数据进行处理, 降低地形对氡气异常的干扰。另外通过测量氡气和地面伽马总量, 获取氡浓度与伽马测量铀含量比值, 能够初步判断来自深部的氡气, 指导找矿部署。

3 技术方法组合构建

3.1 多要素信息综合解译有效性分析

通过系统收集整理研究区地质、重磁、地震及测井等资料, 进行分析及处理解释, 编绘研究区各种基础图件, 确定研究区地球物理场特征、断裂隆起构造与砂岩型铀矿之间的关系, 分析总结研究区成矿地质背景, 并预测了铀矿远景区, 经后续的钻探工程验证, 发现了铀矿(化)体, 显示了利用重磁

震氡井等信息综合找铀技术的有效性。

(1)重磁信息反映了基底起伏构造形态。BYH矿区剩余重力异常反映了隆凹相间的构造格局, 呈近东西向展布。其中西北侧的重力异常带对应了苏海布龙隆起带, 东南侧的隆起带为白彦花隆起带; 隆起带在剩余重力异常图上表现为正负相间东西向近平行展布的重力异常条带, 同时隆起带内还存在多处一定规模的相对凸起区和相对凹陷区。航磁异常信息显示研究区南部存在一条规模较大的东西向高磁异常带, 位置偏向于剩余重力异常的南侧, 结合前人资料初步推断为古生界的花岗岩。研究区的中西部分布南北向的弱磁异常, 而此处对应的是重力低异常。因此, 综合可以推断, 该地段存在盖层的隆起带, 但基底显示为相对凹陷区。研究区的铀矿体位于白彦花隆起带西侧和苏海布龙隆起带的南侧交汇部位, 即两个隆起带之间的鞍部, 矿体的空间分布与近东西向的隆起构造格局关系密切。

(2)氡气和伽马测量综合指示了矿体延伸方向。理论上分析, 伽马总量测量反映近地表铀矿化信息, 而氡气测量是深部和近地表的铀矿化信息的综合反映, 因此氡气测量氡浓度与伽马测量铀含量比值可以有效地消除近地表铀矿化的影响。同时应用中位数衬值滤波法, 能较好地降低地形对氡气测量的影响, 在保留高异常区的基础上, 能够对弱异常进行增强或在低背景区发现新异常。研究区氡气异常信息显示, 南部的近东西向氡气异常带反

映了隆起带边部的形态,在西侧发现了一片氦气异常,指示了隆起带北侧的铀矿体向西延伸的趋势,经其他单位的铀矿勘查证实该片异常为矿致异常,有效指导了该区后续找矿勘查。

(3)井震信息综合反演了古河道空间分布和铀储层结构。二维地震测量和钻孔测井资料综合解译认为下白垩统地层凹陷与现代地表的河道和低洼处空间位置较为一致,矿体的富集部位与隆起带的边缘控矿作用相关,通过地表的地形起伏特征能大致判断出目的层的构造特征,从而为分析矿体的延伸和富集部位提供了重要依据。

3.2 砂岩型探测技术方法构建

国际原子能机构(IAEA)将砂岩型铀矿类型分为古河谷型、板状/准整合型、卷状型、构造-岩性型。不同含铀盆地类型划分是铀矿勘查工作的重要基础,金若时等(2022)据北方陆相盆地调查成果和成矿理论,结合不同的含铀盆地构造位置,将我国含铀盆地划分为两种类型,分别为构造岩浆岩带之间的开阔盆地和构造岩浆岩带内部的山间盆地,后者

主要是寻找古河谷型铀矿。古河谷砂岩型铀矿系指产于古河道沉积物内、以潜水氧化成因为主(或部分叠加层间氧化)的铀矿床,容矿主岩建造形成于弱挤压构造动力学体制,成矿作用紧随主成岩作用之后,伴随弱的伸展构造作用期。目前具有重要工业意义的古河谷砂岩型铀矿多产于下切底部河道中,尤其是河谷切入盖层之下的褶皱或结晶基底,一般具有近源成矿的特点,容矿砂岩建造都属灰色(或灰黑色)地球化学类型,具有高有机质含量,主要形成于半潮湿-潮湿的古气候环境,主岩成岩和成矿几乎没有时差或时差较小,成矿作用持续时间较短;矿体形态面上呈条带状,与河道走向一致(陈肇博等,2003)。古河谷型铀矿作为二连盆地砂岩型铀矿的重要成矿类型,本次以二连盆地川井坳陷BYH铀矿为研究对象,对重力、航磁、电法、地震、钻井、氦气和伽马总量等多种信息进行提取和地质解释,并提出了“重磁寻隆凹、电井震找断砂、氦伽圈异常”分层次综合探测组合模式(图9)。具体可分为以下几个阶段:

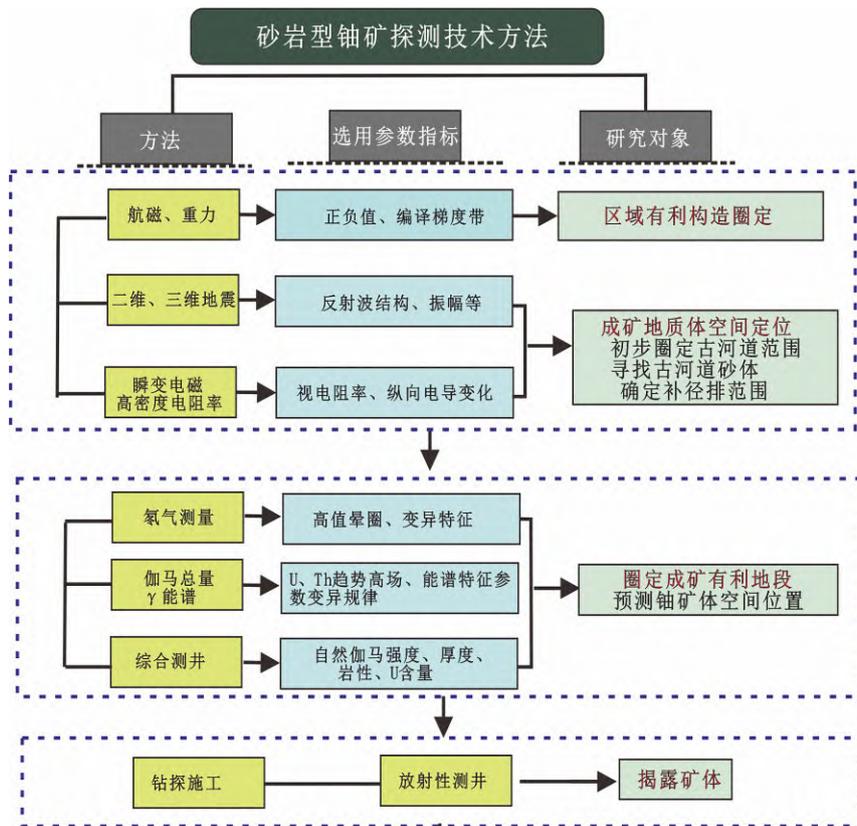


图9 砂岩型铀矿探测技术方法组合

Fig.9 Combination map of prospecting techniques for sandstone-type uranium deposits

(1)区域有利构造圈定:通过重力、航磁资料确定盆地基底埋深与构造分区,探寻隐伏、半隐伏岩体和基底的隆凹展布形态,优选有利于古河谷发育的“地堑式”凹陷,且沿凹陷长轴发育有“双断型”断裂构造特征的地区,确定区域成矿有利构造。

(2)成矿地质体空间定位:开展可控源音频大地电磁测量、高密度测量、地震测量或者利用二维、三维地震资料进行解译,结合已有钻孔资料,厘定地层结构构造特征;根据电性的差异定位古河谷砂体,提取目的层砂体信息,了解古河谷空间展布特征,本文是利用高密度电阻或音频大地电磁开展铀储层高阻中的相对低阻异常特征分析;结合二维地震剖面精细刻画铀储层结构和断裂构造特征,分析含矿砂体空间展布。

(3)成矿有利地段圈定:利用氦气和伽马总量或能谱测量圈定异常晕,分析其与深部铀矿体的空间位置关系,预测断铀矿体的延伸展布。

(4)铀矿体产出揭露:根据成矿预测的部位开展钻探揭露工作,圈定铀矿体。

4 结论

综合分析二连盆地BYH砂岩型铀矿综合探测技术方法的适用性,有如下几点认识:

(1)在区域铀矿找矿预测时,可利用重力、磁法信息研究成矿有利区及基岩起伏特征;在有利区内开展高密度电阻率测量工作,可进一步查明铀储层基本构造、地层界面起伏形态和埋藏深度,并结合钻井和测井资料对铀矿体的空间展布进行预测;开展地震勘探工作,查明研究区内铀储层起伏形态、埋藏深度及断裂构造特征。

(2)将成矿理论与“重、磁、电、震、井”等综合信息解译技术相结合,建立了有效的找矿信息提取技术,实现多信息有机集成和找矿定位;总结了二连盆地综合找矿技术的应用经验、有效性和适宜性,提出了“重磁寻隆凹、电井震找断砂、氦伽圈异常”分层次综合探测组合模式。

(3)不同勘查技术方法具有各自优势和缺点,北方盆地大部分为煤、油、铀多能源盆地,相应钻孔的自然伽玛测井数据提供最直接的铀矿找矿线索,可以快速圈定找矿靶区,其它的技术方法可以在发

现的矿化体或放射性异常基础上,根据成矿地质条件和控矿因素,选择合适的地球物理方法(组合)。

中文参考文献

- 陈肇博,陈祖伊,李胜祥. 2003. 层间氧化带砂岩型与古河谷砂岩型铀矿成矿地质特征对比[J]. 世界核地质科学, 20(1): 1-10.
- 程银行,金若时, Michel CUNEY, 等. 2024. 中国北方盆地大规模成矿作用: 地层篇[J]. 地质学报, 98(07): 1953-1976.
- 楚泽涵,高杰,黄隆基,等. 2007. 地球物理测井方法与原理: 下册[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 封志兵,聂冰峰,聂逢君,等. 2021. 地球物理方法在砂岩型铀矿勘查中的应用进展[J]. 物探与化探, 45(5): 1179-1188.
- 封志兵,聂逢君,江丽,等. 2014. 重力场特征与砂岩型铀矿的关系及地质意义[J]. 现代地质, 28(4): 841-849.
- 付锦,赵宇博,刘涛. 2017. 高精度磁测预测砂岩铀矿氧化带前锋线[J]. 物探与化探, 41(1): 45-51.
- 韩世礼,肖健,柳位. 2024. 机器学习在地球物理勘探中铀矿资源勘查的应用研究进展[J]. 铀矿地质, 40(3): 555-565.
- 韩绍阳,侯惠群,腰善丛,等. 2004. 我国可地浸砂岩型铀矿勘查方法技术研究[J]. 铀矿地质, 20(5): 306-315.
- 胡航,蒋磊,李世龙,等. 2018. 土壤氦气测量在二连盆地马尼特拗陷南缘EG地区的应用[J]. 中国煤炭地质, 30(12): 67-70.
- 金若时,滕雪明. 2022. 中国北方砂岩型铀矿大规模成矿作用[J]. 华北地质, 45(1): 42-57.
- 李彤,俞初安,杨桐旭,等. 2022. 二连盆地西部BYH地区砂岩型铀矿地质特征及控矿因素分析[J]. 华北地质, 45(4): 38-47.
- 李西得,孙祥,邱林飞,等. 2022. 川井拗陷赛汉组沉积物源分析及其对砂岩型铀成矿的控制作用[J]. 南华大学学报(自然科学版), 36(1): 66-71.
- 李英宾,李毅,魏滨,等. 2019. CSAMT和浅层地震在松辽盆地西南部铀矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 55(6): 1442-1451.
- 梁建刚,杨为民,孙大鹏,等. 2020. 二维地震勘探在大庆长垣南端砂岩型铀矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 44(6): 1322-1328.
- 鲁超,焦养泉,彭云彪,等. 2016. 二连盆地马尼特拗陷西部幕式裂陷作用对铀成矿的影响[J]. 地质学报, 90(12): 3483-3491.
- 马小雷,袁炳强,许文强,等. 2016. 鄂尔多斯盆地南缘重磁场特征及其与砂岩型铀矿关系[J]. 地质与勘探, 52(4): 647-657.
- 聂逢君,李满根,严兆彬,等. 2015. 内蒙古二连盆地砂岩型铀矿目的层赛汉组分段与铀矿化[J]. 地质通报, 34(10): 1952-1963.
- 彭云彪,刘波,秦彦伟,等. 2018. 二连盆地川井拗陷构造演化对砂岩型铀矿成矿作用的约束[J]. 地质与勘探, 54(5): 916-928.
- 秦明宽,刘祜,叶发旺,等. 2024a. 铀资源勘查技术国际科技前沿动态[J]. 世界核地质科学, 41(1): 1-11.
- 秦明宽,李子颖,刘章月,等. 2024b. 新世纪以来我国铀矿地质科技创新重要进展及展望[J]. 铀矿地质, 40(2): 189-204.
- 史长义,张金华,黄笑梅. 1999. 子区中位数衬滤波法及弱小异常识别[J]. 物探与化探, 23(4): 251-256.
- 田宇,陈江源,刘丹,等. 2022. 川井拗陷砂岩型铀矿多元地质特征及远景预测[J]. 铀矿地质, 38(5): 970-978.
- 王浩锋,刘波,陈霜,等. 2019. 综合物探测量在二连盆地沉积岩型铀矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 55(1): 127-134.
- 王彦国,刘鹏,聂逢君,等. 2017. 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, 40(1):42-46.

吴曲波, 黄伟传, 乔宝平, 等. 2020. 砂岩型铀矿三维地震勘探采集关键技术及效果[J]. 地球物理学进展, 35(6):2239-2249.

辛思华, 宋仁成, 杨建军. 2008. 高密度电法在煤矿采空区勘查中的应用[J]. 中国煤炭地质, 20(1):59-61.

杨玉蕊, 张义平, 缪玉松, 等. 2012. 高密度电法中勘探线长度与测深关系浅析[J]. 中国煤炭地质, 24(6):63-68.

叶发旺, 张川, 李瀚波, 等. 2021. “空天”高分辨率遥感技术及其在铀资源勘查中的应用进展与发展建议[J]. 铀矿地质, 37(3):313-329.

俞初安, 金若时, 李彤, 等. 2023. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿地质条件和关键控矿要素分析[J]. 地球学报, 44(4):689-706.

俞初安, 司马献章, 李建国, 等. 2018. 鄂尔多斯盆地直罗组地层岩性测井响应特征[J]. 煤田地质与勘探, 46(6):33-41.

俞初安, 孙大鹏, 周小希, 等. 2022. 基于自然伽马测井数据的铀资源评价方法研究—以鄂尔多斯盆地彭阳铀矿区为例[J]. 煤田地质与勘探, 50(5):144-153.

俞初安, 吴兆剑, 司马献章, 等. 2020. 二连盆地马尼特拗陷南缘赛汉组砂岩碎屑锆石年龄及其地质意义[J]. 地球科学, 45(5):1609-1621.

张必敏, 王学求, 徐善法, 等. 2020. 穿透性地球化学勘查技术在隐伏砂岩型铀矿调查中的应用研究[J]. 地球学报, 41(6):770-784.

赵宁博, 付锦, 刘涛, 等. 2017. 地形对砂岩型铀矿氡气测量的干扰作用及其修正方法[J]. 物探与化探, 41(4):667-671.

赵希刚, 张云宜, 赵翠萍, 等. 2010. 砂岩型铀矿找矿中物化探测量方法应用评述及建议[J]. 世界核地质科学, 27(1):31-37.

References

Ellit J R. 1968. Magnetic susceptibility and geochemical relationships

as uranium prospecting guides[J]. USAEC.AEC-RI, 53-56.

Gray T, Kinnaird J, Laberge J, et al. 2021. Uraniferous leucogranites in the Rössing area, Namibia: New insights from geologic mapping and airborne hyperspectral imagery[J]. Economic Geology, 116(6): 1409-1434.

Hou Baohong, Keeling John, Li Ziyang. 2017. Paleovalley-related uranium deposits in Australia and China: A review of geological and exploration models and methods[J]. Ore Geology Reviews, 88: 201-234.

LEBEL D. 2020. Geological Survey of Canada 8.0: Mapping the journey towards predictive geoscience [J]. Geological Society, London, Special Publications, 499(1):49-68.

Michael J, Michael Z. 2019. Imaging Yellowstone magmatic system by the joint Gramian inversion of gravity and magnetotelluric data[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 292: 12-20.

Nie Fengjun, Yan Zhaobin, Feng Zhibing, et al. 2020. Genetic models and exploration implication of the paleochannel sandstone-type uranium deposits in the Erlan Basin, North China-A review and comparative study[J]. Ore Geology Reviews, 127,1-36.

Jin Ruoshi, Miao Peisen, Sima Xian-zhang, et al. 2018. New prospecting progress using information and big data of coal and oil exploration holes on sandstone-type uranium deposit in North China[J]. China Geology, 167-168.

R. Penney, C. Ames, D. Quinn and A. Ross. 2017. Determining uranium concentration in boreholes using wireline logging techniques: comparison of gamma logging with prompt fission neutron technology (PFN) [J]. Applied Earth Science, 121:2, 89-95.

(上接本期第22页)

Leger C, Barth A, Falk D, et al. 2015. Explanatory notes for the minerogenic map of Tanzania [M]. Dodoma: Geological Survey of Tanzania. 1-376.

Lenoir J L, Liegeois J P, Theunissen K et al. 1994. The Palaeoproterozoic Ubendian shear Belt in Tanzania: geochronology and structure [J]. Journal of African Earth Sciences, 19: 169-184.

Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. Chinese Science Bulletin, 55(15): 1535-1546.

Ludwig K R. 2000. User's Manual for Isoplot/Ex Version 2.2: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center [J]. Special Publication, 1: 1-50.

Manya S. 2012. SHRIMP zircon U-Pb dating of the mafic and felsic intrusive rocks of the Saza area in the Lupa goldfields, southwestern Tanzania: Implication for gold mineralization [J]. Natural Science, 04(09): 724-730.

Manya S. 2014. Geochemistry of the Palaeoproterozoic gabbros and granodiorites of the Saza area in the Lupa Goldfield, southwestern Tanzania [J]. Journal of African Earth Sciences, 100: 401-408.

Manya S. 2011. Nd-isotopic mapping of the Archaean - Proterozoic boundary in southwestern Tanzania: Implication for the size of the

Archaean Tanzania Craton [J]. Gondwana Research, 20(2-3), 325-334.

Möller, A., Appel, P., Mezger, K., Schenk, V., 1995. Evidence for a 2 Ga subduction zone: eclogites in the Usagaran Belt of Tanzania [J]. Geology 23 (12), 1067-1070.

Pearce J A, Harris N B, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 25: 956-983.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, ed. Magmatism in Ocean Basins [C]. Spec Publ Geol Soc Lond, 42: 313-345.

Tulibonywa T, Manya S, Maboko M A H. 2015. Palaeoproterozoic volcanism and granitic magmatism in the Ngualla area of the Ubendian Belt, SW Tanzania: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, and Sm-Nd isotope systematics [J]. Precambrian Research, 256: 120-130.

Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and petrology, 95(4): 407 - 419.

Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis [M]. Chapman and hall, London, 1-466.