

doi: 10.11720/wtyht.2019.0018

吴燕清,王世成,丁园,等.氦气及 CSAMT 联合探测在内蒙古五十家子盆地铀矿勘查中的应用研究[J].物探与化探,2019,43(4):726-733.
http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0018

Wu Y Q, Wang S C, Din Y, et al. Application study of radon gas and CSAMT joint detection in the uranium exploration in the Wushijiazzi Basin of Inner Mongolia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(4): 726-733. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0018

氦气及 CSAMT 联合探测在内蒙古五十家子盆地铀矿勘查中的应用研究

吴燕清,王世成,丁园,王青,王文正
(核工业二四三大队,内蒙古 赤峰 024006)

摘 要: 五十家子火山盆地铀成矿地质条件优越,地表已发现大量蚀变裂隙带型铀矿化及异常点,为查明控矿断裂走向、倾向延伸变化情况及深部铀矿体有利富集部位,便于开展深部勘查工作。因此在研究区铀矿化密集部位开展了氦气及可控源大地电磁测深联合探测工作方法,大致查明了研究区主控矿断裂构造特征,并预测 6 处铀成矿有利部位,其中 2 处铀成矿有利部位经钻探查证,发现较好的工业铀矿体。表明氦气与可控源大地电磁测深联合探测寻找隐伏断裂和盲矿体效果显著,适用于控矿因素以断裂构造为主的铀矿勘查找矿工作,为今后铀矿找矿工作提供思路及方向,以期扩大铀矿找矿成果。

关键词: 氦气测量;CSAMT 测量;五十家子;铀矿勘查

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2019)04-0726-08



0 引言

自 1955 年地质部第三局(中国核工业地质局前身)成立至今,我国铀矿勘查取得了巨大成就,发现和探明了 350 多个铀矿床^[1],但 21 世纪以来铀矿勘查收效甚微,勘查方向转变为“攻深找盲、扩大老矿体”^[2],勘查方法从单一的地质勘查发展为遥感、物探、化探、钻探等多方法的综合找矿方法,其中氦气测量和可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)在寻找隐伏断裂及盲矿体有着显著效果^[2-8]。五十家子火山盆地开展了铀矿资源调查评价,发现了众多铀矿化异常点及伽马异常场,总体呈 NE 向带状展布,受构造破碎带控制明显,但地表浮土较厚、植被发育、基岩风化破碎强烈使地表断裂构造信息难以捕捉。氦气及 CSAMT 联合测量对断裂构造及隐伏矿体的位置、产状、埋深等信息具有省时、准确、经济效益的优势,研究区断裂构造深部延伸及产状变化特征不明,开展氦气及 CSAMT 联合测量势在必行。

1 区域地质概况

1.1 区域地质特征

五十家子火山盆地位于中朝板块与西伯利亚板块结合部位^[9],同时也是大兴安岭成矿带与扎兰屯火山岩型铀成矿远景区南段叠合部位^[10],受 NE 向大兴安岭主脊深大断裂次级断裂同兴—朝阳断裂及 NE 向林西—乌兰浩特深大断裂次级断裂九连庄—古石庙断裂夹持,为一断陷盆地,盆地展布受 NE 向区域断裂控制(图 1)。基底由华力西期晚古生代变质岩、花岗岩组成;盖层由中侏罗统新民组(J₂x)凝灰质砂砾岩、上侏罗统满克头鄂博组、玛尼吐组中酸性火山碎屑岩组成。受区域深大断裂作用发育 EW、NE 和 NW 向 3 组次级断裂构造,盆地 NW 侧与华力西期五十家子花岗闪长岩岩体呈不整合接触,区内潜火山岩较为发育,以酸性为主,多呈 NE 向侵入;沿断裂,侵入岩发育硅化、赤铁矿化、黏土化等中低温热液蚀变。

收稿日期: 2019-01-12; 修回日期: 2019-03-15

基金项目: 中国核工业地质局铀矿调查评价项目“内蒙古林西县—巴林右旗铀矿资源调查评价”(201824)

作者简介: 吴燕清(1988-),男,工程师,主要从事铀矿资源调查评价及铀成矿理论研究工作。Email:15847616797@163.com

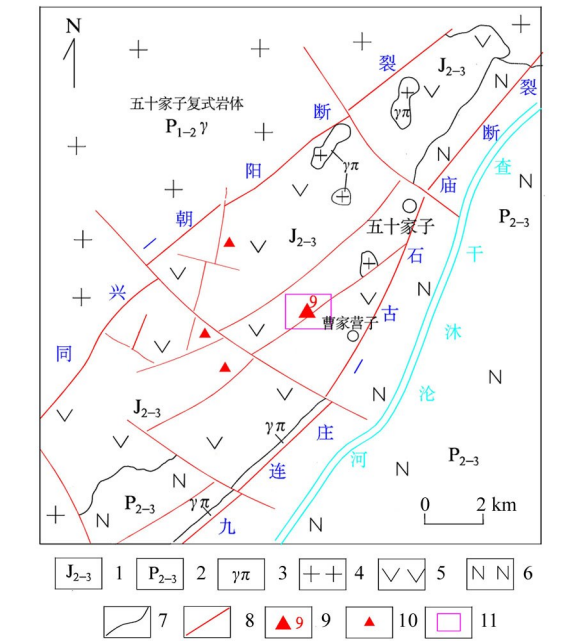


图 1 五十家子盆地地质略图

Fig.1 Geological sketch of Wushijiazui basin

1.2 铀矿化特征

盆地内已发现铀矿点 1 处、矿化点 3 处、异常点 40 余处,多密集成群呈显带状展布,按铀矿化就位构造环境划分,区内铀矿化属蚀变裂隙带型^[11],代表性的为 9 号铀矿点。9 号矿点产于宽 0.2 km、长 0.6 km NE 向蚀变带内,经槽探揭露,控制矿化体长 15~45 m,厚 0.5~3 m,最厚可达 9.4 m;铀矿体 2 条,呈 NE 向透镜状产出,Ⅰ号矿体长 3.1 m,厚 0.81 m,品位 0.053%;Ⅱ号矿体长 3.2 m,厚 0.74 m,品位 0.058%。铀矿化主要赋存于 NE 向破碎蚀变带内,赋矿围岩为凝灰质砂砾岩,近矿围岩蚀变以硅化、赤铁矿化为主。

1.3 地球物理特征

区域上研究区处于重力梯度带走向由 NE 向过渡到 EW 向的扭曲部位,表明工作区一带既有莫霍面起伏的变化,又有沿走向的扭曲变化;磁场特征表现为场值变化大、跳跃明显,线形特征明显,根据场值变化特征,将磁场大致划分为负磁场和正磁场。

负磁场场值一般-75~0 nT 变化,由第四系、二叠系地层和侵入岩引起,正磁场场值一般 0~100 nT 变化,由侏罗系火山岩引起;另外研究区处于大兴安岭南段航空伽马五十家子高场区,放射性强度大于 3.6 nC/(kg·h)。

笔者对研究区地表及钻孔深部岩石样品进行了电阻率测量,从图 2 可知凝灰质砂砾岩电阻率跨度较大,范围在 200~10 000 Ω·m,显示为中高阻电性特征,电阻率与测量样品埋深成正相关,埋深越大电阻率随之越大;晶屑凝灰岩电阻率范围大致在 200~4 000 Ω·m,显示为中低阻电性特征,电阻率未超过 4 000 Ω·m 可能与取样位置在近地表,深部未取到样品有关。虽然凝灰质砂砾岩与晶屑凝灰岩电阻率部分重叠,但按地层时代和钻探查证,表明晶屑凝灰岩上覆与凝灰质砂砾岩,仅在地表出露,不影响岩性解释。破碎、蚀变凝灰质砂砾岩电阻率范围在 150~700 Ω·m,与样品埋深无关,所取破碎、蚀变样品多分布在断裂构造附近,对断裂构造指示明显,利于开展 CSAMT 测量寻找、查明断裂构造。

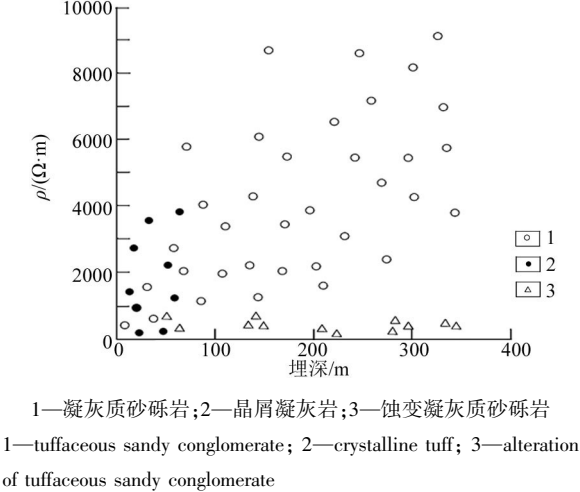


图 2 岩石电阻率特征

Fig.2 Electrical resistivity characteristic of rocks

2 物探方法及数据处理

2.1 方法选取

为进一步评价研究区成矿潜力、扩大找矿成果,需要进行深部工程勘查,寻找盲矿体。研究表明区域内铀矿化主要受断裂构造控制^[12],查明研究区断裂构造深部延伸及产状变化特征势在必行,但因地表浮土较厚、凝灰质砂砾岩风化强烈,地表断裂构造信息难以判断,这就需要开展穿透性强、准确、行之有效的物探测量方法来解决上述问题。

氦气测量在寻找隐伏断裂方面具有用时短、易

于操作、直接且经济效益的优势,但无法判断断层宽度、下延深度及产状变化特征,且易受外界干扰的缺点;CSAMT 测量具有高效率、深度大、横向分辨率高及外界干扰因素较小的特点^[13],因此氡气与 CSAMT 联合测量优势互补,相互佐证,能够很好地解释断裂构造深部延伸及产状变化特征。

2.2 氡气测量

2.2.1 测量原理

氡有 3 个同位素,分别是 ^{220}Rn 、 ^{219}Rn 、 ^{222}Rn ,其中 ^{219}Rn 、 ^{220}Rn 半衰期为 3.96 s 和 54.5 s,而 ^{222}Rn 半衰期为 3.825 天,因此野外氡气测量对象是 ^{222}Rn ,它是天然放射性铀系的唯一气态元素^[14],是镭(^{226}Ra)的子体,而镭(^{226}Ra)又是 ^{238}U 的子体,所以岩石、土壤中氡浓度的高低取决于 ^{238}U 含量。 ^{222}Rn 经团簇迁移^[15]、接力传递^[16]、抽吸、扩散、对流、地气等作用由深部迁移至地表土壤中,另一方面介质的孔隙度、密度、渗透性等因素影响 ^{222}Rn 迁移速度,断裂构造的存在增加了岩石的孔隙度、透气性、渗透性等,使 ^{222}Rn 能够更迅速的由深部迁移至地表,所以在铀、镭异常地段或断裂构造的上方 ^{222}Rn 浓度增大,形成异常。

2.2.2 测量方法及优势

野外铀矿勘查中土壤氡气浓度测量方法主要有累积和瞬时测量两种^[17],累积测量方法周期一般为数小时~一个月,但具有数据稳定,重见性较好的优点^[18];瞬时测量周期在数分钟~数十分钟,且现场取得数据^[19],对氡气异常的发现与检查更加直白,但数据稳定性不如累计测量法,胜在简单、快速、经济。

本次野外氡气浓度测量选取瞬时测量,仪器为上海申核制造的 FD-3017A 型 RaA 测氡仪,排除探测器污染、氦射气干扰的问题,且灵敏度高、操作简单。

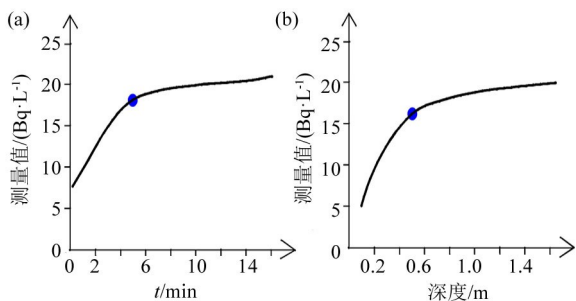
RaA 法测氡剖面布设遵循垂直断裂构造或地表铀矿化异常体的原则,测线长度保证异常的完整性及足够的异常背景,测线点距和线距保证不丢异常、能有效追踪异常走向。经野外实地踏勘,在研究区内布设 5 条测线,方位 145° ,点距 20 m,异常部位加密到 10 m。

开工前对测量时间及测量深度、仪器稳定性进行了实验测试工作,在同一点按不同时间进行多次测量,发现测量时间在 5 min 之后基本达到了峰值(图 3a),为了节约工作时间将本次测量时间定为 5 min;在同一点不同深度进行多次测量,发现在 0.5~0.6 m 处出现拐点,0.6 m 之后测量值基本达到峰值

(图 3b),为保证测量数据准确、提高工作效率,本次测量将抽气孔深定为 0.7~0.8 m;在同点同深度连续测量 n 次(n 大于 25 次),所测数据相对误差在 $\pm 15\%$ 以内,符合测量要求。正常测量时各点均测 3 次,单次测量时间为 5 min,孔深为 0.7~0.8 m,3 次测量平均值作为土壤氡浓度测量结果。

2.2.3 数据处理

在计算异常下限的方法中,传统方法是最为常用的一种^[20],使用前提条件是所测数据必须满足正态分布或对数正态分布,如果所测数据不符合正态分布时采用 $X \pm 3S$ 进行迭代剔除离群数值,使数据服从正态分布或对数正态分布,并计算均值和标准离差,以 $X + 3S$ 作为所测数据的异常下限^[21]。



a—测量时间实验曲线;b—抽气深度实验曲线

a—experimental curve of measuring time;b—air-bleed depth experiment curve

图 3 氡气测量时间及测量深度实验曲线

Fig.3 The curve of radon gas measurement time and depth test

2.3 CSAMT 测量

2.3.1 测量原理

CSAMT 测量实质上就是人工源卡尼亚电阻率测深法^[22-23],由于不同种类的岩石具有不同的电导率,从而会产生不同的磁场电位和磁法强度,CSAMT 测量就是以有限长(1~3 km)的电偶极子为场源,由高频到低频向地下发送电磁波,在距偶极中心一定距离处同时观测电场、磁场参数的一种电磁测深法。利用不同电导率界面反演地层,另外岩石破碎蚀变后电阻率相对原岩明显降低,其视电阻率曲线表现为低电阻率特征,这一特征为电阻率法推断解释断裂提供电性依据。

2.3.2 测量方法及优势

CSAMT 测量具有工作效率高、勘探深度范围大(探测深度可达 2~3 km)、垂向分辨能力好、水平方向分辨率高、地形影响小等优点。CSAMT 测量采用的人工源有磁性源和电性源(也称电偶极)两种^[24],区别在于通电导线是否接地供电。通常野外 CSAMT 测量采用电性源^[25-26]旁侧观测装置。

本次 CSAMT 测量使用的是加拿大生产的 V8 多功能电法仪,勘探点距 40 m,测线方位 145°,工作频率为 10 000~1 Hz,供电电极距 1 780 m,收发距 11~13 km。为保证测量数据真实可靠,需做到确保不极化电极的极差小于 5 mV;磁棒水平,方位角偏差小于 3°;电极位置选择地表土质均匀处,避开陡坎、深沟等复杂地形;对电极浇水以降低接地电阻,尽量减少外在、人为干扰因素。

2.3.3 数据处理

CSAMT 数据处理分为数据预处理和数据反演两个过程。使用 V8 配套软件 (CTM Pro Version) 对数据进行数据预处理,预处理流程包括:首先对数据进行筛选,剔除飞点坏点、截断坏段频段;然后进行电极点位坐标偏差校正、静态校正、近区校正,曲线圆滑处理,最后进行地形改正。二维模型反演使用美国 Zonge 公司研发的 SCS2D.exe 软件,使用预处理后的数据给出背景模型断面,然后根据研究区各类岩石的电阻率推测出不同深度的电阻率断面模型,最后将生产的模型转换成 surfer 网格化文件,绘制成反演视电阻率断面图^[27]。

3 典型剖面及断裂综合解释

3.1 L2 线综合解释成果

L2 线长 0.78 km,方位 145°,地表浮土厚、植被发育、基岩出露较差,地表出露岩性为凝灰质砂砾岩,测线中部穿过 9 号铀矿点及 F₅ 断裂构造。据 CSAMT 电阻率断面图 (图 4b) 可知,垂向上标高 980~900 m 表现为低阻,原因可能是地表岩石风化较强,致使岩石电阻率降低;标高 900 m 以下为中高阻特征,反应地下岩性稳定、简单。在横向上 60~180 m、240~430 m、480~660 m 表现为低阻,深部延伸 200 至 300 m,呈漏斗状,推测由断裂构造在深部交汇引起。

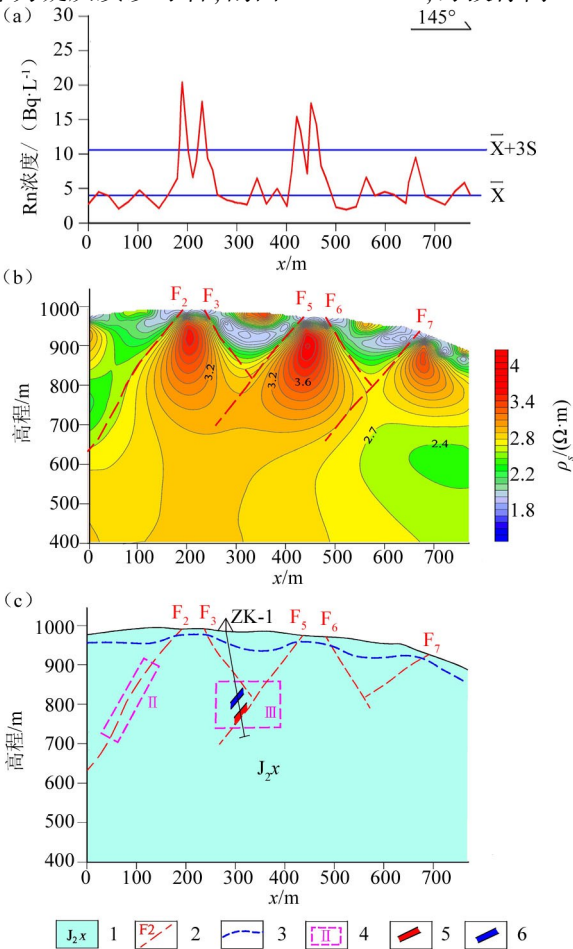
依据电阻率等值线变化特征、低阻特征及氦浓度异常特征推测断裂 5 条,同时解释了断裂构造深部延伸及产状变化特征。其中 F₅ 为已知断裂,其余均为隐伏断裂。

F₂、F₅、F₇ 这 3 条断裂构造分别位于剖面 190、435、670 m 处,倾向均为 NW,倾角 48°~50°,呈近等间距平行向下延伸,延深 280~320 m;F₃、F₆ 位于剖面 230、480 m 处,倾向均为 SE,倾角 55°~59°,延深 160~175 m;F₃ 与 F₅、F₆ 与 F₇ 在深部交汇,形成漏斗状低电阻。

据图 4a 可知研究区氦浓度值较低,经统计氦浓

度平均值为 4.82 Bq/L,标准偏差 S 为 1.92 Bq/L,异常下限为 10.58 Bq/L。共发现异常 4 处,集中分布在 180~240 m、410~470 m 两段。第一段宽 60 m,出现 2 次异常,分别为 20.3 Bq/L、17.6 Bq/L,呈 M 型双峰式;第二段宽 60 m,出现 2 次异常,分别为 15.1 Bq/L、17.4 Bq/L,呈 M 型双峰式。异常高值区与解释断裂构造位置较吻合,推测深部沿断裂存在铀的富集作用。

根据地层时代、区域地质资料以及凝灰质砂砾岩电阻率特征,L2 剖面地表低阻带为岩石风化壳,下部表现为中高阻地球物理特征,因此推断该高阻体为凝灰质砂砾岩,剖面 600~780 m,海拔标高 400



a—氦浓度曲线;b—电阻率断面;c—地质推断成果;1—中侏罗统新民组;2—解释断裂构造;3—推测岩石风化面;4—预测成矿有利区;5—工业铀矿体;6—铀矿化体
a—radon concentration curve;b—resistivity profile;c—map of geological inference results;1—Middle Jurassic Xinmin formation;2—interpretation of fault structures;3—that the weathering of rock surface;4—prediction of favourable metallogenic areas;5—economic uranium orebody;6—uranium mineralized body

图 4 L2 线地质—物探成果
Fig.4 L2 Line geological-geophysical exploration results

~700 m 处出现的低阻带可能是邻近查干沐伦河深部含水层引起。

3.2 L3 线综合解释成果

L3 线长 1.28 km,方位 145°,测线北部局部基岩出露,岩性为凝灰质砂砾岩和晶屑凝灰岩,南部地表浮土厚、植被发育。从电阻率断面图(图 5b)可知垂向上标高 950~850 m 沿地形表现为低阻带,原因可能是地表岩石风化较强,致使岩石电阻率降低;标高 900 m 以下为中高阻特征,电阻率变化不大,总体反应地下岩性稳定、简单,推认岩性为凝灰质砂砾岩;在横向上高阻与低阻交替出现,且延伸均大于 500 m,根据电阻率的梯度变化推断出 3 条断裂,其中 F₂ 为已知断裂。

F₂ 断裂构造位于剖面 300 m 处,倾向 NW,倾角 52°~63°,延倾向倾角由陡变缓,延伸超过 500 m,在电阻率断面图上呈宽 80~120 m 向下发育的带状低阻。F₃ 断裂构造位于剖面 350 m 处,倾向 SE,倾角 58°~63°,延伸超过 500 m。F₇ 断裂构造位于剖面

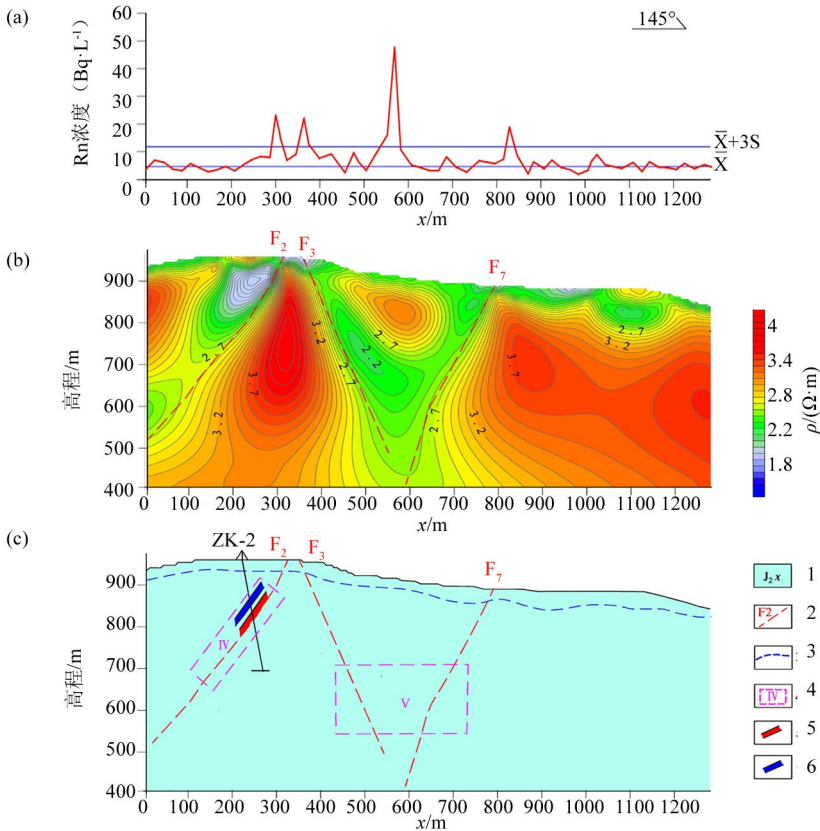
790 m 处,倾向 NW,倾角 62°~73°,在海拔标高 600 m 处倾角由缓变陡。F₃ 和 F₇ 断裂构造夹持区低阻范围较大,呈顶板宽 470 m、底板宽 70 m 的漏斗状向下延伸超过 500 m。

本测线共发现氡浓度异常三段(图 5a),第一段位于剖面 280~360 m 处,呈 M 型双峰式,高值为 24.2 Bq/L 和 22.3 Bq/L;第二段位于剖面 530~580 m 处,最高值为 48.3 Bq/L;第三段位于剖面 810~840 m 处,最高值为 18.6 Bq/L。第一段和第三段异常高值区与解释断裂构造位置较吻合,而第二段异常处于 F₃ 和 F₇ 的夹持部位,推测深部存在铀的富集作用。

根据地层时代、区域地质资料以及凝灰质砂砾岩电阻率特征,L3 剖面地表低阻带为岩石风化壳,下部表现为高阻地球物理特征,因此推断该高阻体为凝灰质砂砾岩。

3.3 推测断裂构造综合特征

依据电阻率等值线变化特征、低阻特征及氡浓

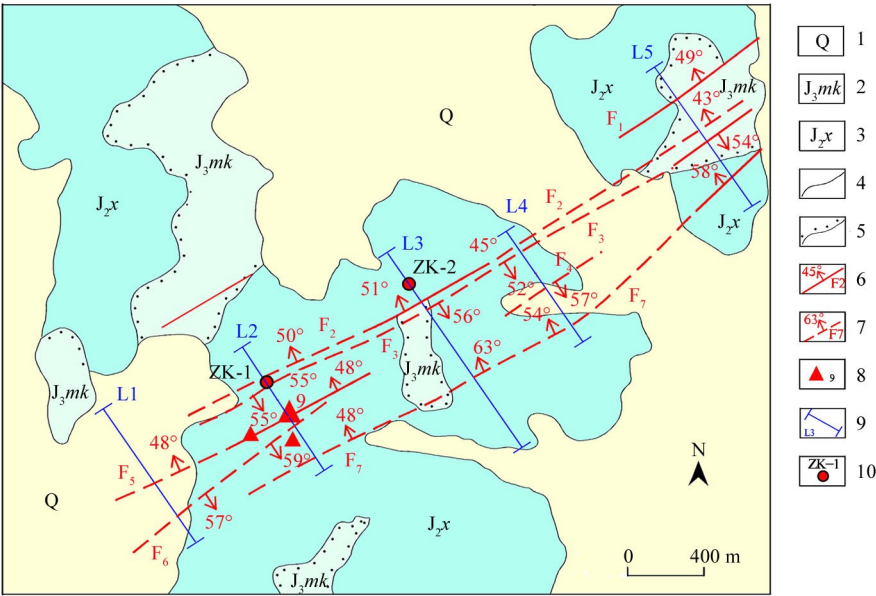


a—氡浓度曲线;b—反演电阻率;c—地质推断成果;1—中侏罗统新民组;2—解释断裂构造;3—推测岩石风化面;4—预测成矿有利区;5—工业铀矿体;6—铀矿化体
a—radon concentration curve;b—resistivity profile;c—map of geological inference results;1—middle Jurassic Xinmin formation;2—interpretation of fault structures;3—the weathering of rock surface;4—prediction of favourable metallogenic areas;5—economic uranium orebody;6—uranium mineralized body

图 5 L3 线地质—物探成果
Fig.5 L3 Line geological-geophysical exploration results

度异常特征在研究区推测断裂构造 7 条(图 6),依据地表实测断裂产状推认研究区断裂构造总体走向为 55°。按断裂倾向可将区内构造划分为早期和晚期两类,早期倾向为 NW 向,晚期倾向为 SE 向,推测及实测断裂走向均与研究区 SE 侧查干沐伦河深断裂一致,推认研究区内断裂构造是查干沐伦河深断裂派生次级断裂构造,早期断裂为 F₁、F₂、F₅、F₇

断裂构造;晚期断裂为 F₃、F₄、F₆ 断裂构造。早期断裂构造向深部延伸较大,可能为切盆断裂,与深部含矿热液流体沟通,起切壳导源作用,另外地表及深部铀矿化异常均与早期断裂构造关系密切,推认研究区内控矿断裂主要为 F₁、F₂、F₅、F₇ 断裂,今后勘查工作主要针对早期断裂构造开展。



1—第四系;2—上侏罗统满克头鄂博组;3—中侏罗统新民组;4—地质界线;5—不整合接触界线;6—实测断裂构造;7—解释断裂构造;8—铀矿点及编号;9—氦气、CSAMT 综合剖面测量位置及编号;10—铀工业孔及编号
1—Quaternary;2—upper Jurassic Manketou Obo Formation middle Jurassic Xinmin formation;3—middle Jurassic Xinmin formation;4—geological boundary;5—unconformity contact boundary;6—measured fracture structure;7—interpretation of fault structures;8—uranium mine points and numbers;9—location and number of radon and CSAMT comprehensive profiles;10—location and number of boreholes in uranium industry

图 6 五十家子盆地重点工作区综合成果
Fig.6 Comprehensive results of the key working areas of the Wushijiazui basin

4 铀成矿预测

依据现有成矿理论认为断裂构造交汇、产状变化部位、低阻带形态膨胀、收缩部位利于含矿热液的运移与沉淀^[28],并结合氦浓度异常来预测深部铀成矿有利部位,本次共预测 6 处铀成矿有利部位,其中以 L2、L3 剖面最为典型。
L2 剖面 20~150 m、海拔 700~900 m 的Ⅱ号异常区和 250~380 m、海拔 740~860 m 的Ⅲ号异常区(图 4c);L3 剖面 100~300 m、海拔 650~900 m 的Ⅳ号异常区和 430~730 m、海拔 540~700 m 的Ⅴ号异常区(图 5c)为预测铀成矿有利部位。

5 钻孔验证

Ⅱ号铀成矿有利区施工 ZK-1 孔,在海拔标高

750~820 m 范围内揭露到一段工业铀矿体和两段铀矿化(图 4c),赋矿围岩为凝灰质砂砾岩,其中工业铀矿体厚 2.30 m,品位 0.057%;铀矿化厚度和品位分别为 4.90 m、0.033%和 2.75 m 受 F₅ 断裂构造控制明显,铀矿化异常均在Ⅱ号铀成矿有利区内。
Ⅳ号有利区施工 ZK-2 孔,在海拔标高 800~860 m 范围内揭露到工业铀矿体和铀矿化各一段(图 5c),赋矿围岩均为凝灰质砂砾岩,工业铀矿体厚 0.9 m,品位 0.301%;铀矿化厚度 2.90 m,品位 0.043%,铀矿化受 F₂、F₅ 断裂构造控制明显,铀矿化异常均在Ⅳ号铀成矿有利区内。

6 结论

1) 氦气测量能直接、有效反应出断裂构造在地表位置及深部是否存在铀富集作用,但无法确定断裂构造深部延伸及产状变化特征;而 CSAMT 测量

能够较好地推测断裂构造深部延伸及产状变化特征,氦气与 CSAMT 联合探测互相佐证,在寻找隐伏铀矿体及断裂具有较高的精度。

2) 结合断裂构造深部变化特征及氦浓度异常特征,推测出 6 片铀成矿有利区,其中 II、IV 铀成矿有利区进行了钻探查证并揭露到较好的工业铀矿体及矿化体,为今后开展铀矿勘查工作提供重要依据及勘查方向。

3) 氦气与 CSAMT 联合探测寻找隐伏断裂和盲矿体,尤其是推测断裂构造深部延伸及产状变化特征效果显著,为“21 世纪以来铀矿勘查收效甚微”现状取得突破性进展,该联合探测方法适用于各种类型铀矿勘查找矿工作,以期扩大铀矿找矿成果。

致谢:核工业二四三大队王殿学、高井明正高级工程师在项目成果解释及文章撰写过程中提供帮助,在此一并致谢。

参考文献 (References):

- [1] 张金带.进入新时代以来我国铀矿勘查的重大进展和突破[J].铀矿地质,2015,31(s1):129-140.
Zhang J D. Great progress and breakthrough of China's Uranium exploration in new Century [J]. Uranium Geology, 2015, 31(s1): 129-140.
- [2] 杨亚新,吴亚梅,吴信民,等.应用氦气测量和土壤天然热释光测量推断花岗岩型铀矿含矿部位——以下庄花岗岩型铀矿田为例[J].铀矿地质,2007,23(3):178-192.
Yang Y X, Wu Y M, Wu X M, et al. Identifying the site of granite uranium deposit with agdon survey and soil-natural themoluminescence surveg[J]. Uranium Geology, 2007, 23(3): 178-192.
- [3] 李洪艺,张澄博,陈国能,等.土氦测量在广从断裂探测中的初步应用[J].华南地震,2011,31(2):61-70.
Li H Y, Zhang C B, Chen G N, et al. Preliminary application of soil radon measurement in guang zhou-conghua fracture detection [J]. South China Journal of Seismology, 2011, 31(2): 61-70.
- [4] King C Y, King B S, Evans W C, et al. Spatial radon anomalies on active faults in California[J]. Applied Geochemistry, 1996, 11(?): 497-510.
- [5] Aitamimi M H, Abumurad K M. Radon anomalies along faults in North of Jordan [J]. Radiation Measurements, 2001, 34(?): 397-400.
- [6] Anderson K E, Dickinson J E, Edge R D, et al. Controlled source audio-magnetotelluric (CSAMT) geophysical investigation in the upper San Pedro basin, southeastern Arizona[J]. Abstracts with Programs Geological Society of America, 2008, 10(6): 137-142.
- [7] 吴信民,刘庆成,邓居智,等.综合物探方法寻找深部隐伏铀矿床的研究[J].矿物学报,2004,24(2):181-184.
Wu X M, Liu Q C, Deng J Z, et al. Exploration of deep uranium deposits with combined geophysical methods[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24(2): 181-184.
- [8] 赵丹,王南萍,周觅,等.活性炭测氦及分量化探在河北沽源县大官厂研究区铀矿勘查中的应用研究[J].铀矿地质,2018,34(1):39-45.
Zhao D, Wang N P, Zhou M, et al. Application of radon survey by activated carbon and partial extraction geochemical prospecting methods for uranium exploration prospecting methods for uranium exploration in Daguanchang of Guyuan, Hebei[J]. Uranium Geology, 2018, 34(1): 39-45.
- [9] 翟大兴,张永生,田树刚,等.内蒙古林西地区上二叠统林西组沉积环境与演变[J].古地理学报,2015,17(3):359-370.
Zhai D X, Zhang Y S, Tian S G, et al. Sedimentary environment and evolution of the upper permian Linxi formation in Linxi area, Inner Mongolia[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(3): 359-370.
- [10] 吴燕清,张春雨,王青,等.内蒙古新城子火山盆地铀成矿条件分析[J].铀矿地质,2018,34(1):28-32.
Wu Y Q, Zhang C Y, Wang Q, et al. Uranium metallogenic conditions evaluation of Xingchengzi volcanic basin in Inner Mongolia [J]. Uranium Geology, 2018, 34(1): 28-32.
- [11] 黄净白,方锡珩,谢佑新.中国铀矿床研究评价第二卷:火山岩型铀矿床.中国核工业地质局、核工业北京地质研究院,2011.
Huang J B, Fang X H, Xie Y X. Research and evaluation of uranium deposits in China volume II: volcanic-type uranium deposits. China Nuclear Geology, Beijing Institute of Geology, Nuclear Industry, 2011.
- [12] 李长华,吴燕清,王世成,等.大兴安岭中南段火山岩型铀矿成矿条件及远景预测[J].铀矿地质,2018,34(6):329-336.
Li C H, Wu Y Q, Wang S C, et al. Ore-forming condition and uranium prospective prediction of volcanic-type uranium deposits in the middle-southern Great Xing, an range [J]. Uranium Geology, 2018, 34(6): 329-336.
- [13] 甘伏平,吕勇,喻立平,等.氦气测量与 CSAMT 联合探测地下地质构造——以滇西路西地区帕连、法帕剖面探测为例[J].地质通报,2012,31(2-3):389-395.
Gan F P, Lv Y, Yu L P, et al. The utilization of combined radon and CSAMT methods to detect underground geological structures: a case study of detection in palian and Fapa profiles, Luxi area western Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(2-3): 389-395.
- [14] 杨亚新,刘庆成,龙期华,等.氦气测量在下庄铀矿田扩大矿床范围中的应用[J].物探与化探,2003,27(3):184-186.
Yang Y X, Liu Q C, Long Q H, et al. The application of radon gas survey to the expansion of the Xia Zhuang uranium ore field [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2003, 27(3): 184-186.
- [15] 贾文懿,方方,周蓉生,等.氦及其子体运移规律与机理研究[J].核技术,2000,23(3):169-175.
Jia W Y, Fang F, Zhou R S, et al. Studies on the migration rule and mechanism of radon and its daughters [J]. Nuclear Techniques, 2000, 23(3): 169-175.
- [16] 吴慧山,白云生,林云飞,等.氦迁移的接力传递作用[J].地球物理学报,1997,40(1):136-142.
Wu H S, Bai Y S, Lin Y F, et al. The action of relay transmission

of the radon migration [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40 (1): 136 - 142.

[17] 柯丹, 宋亮, 王勇, 等. 土壤瞬时测氡在相山火山岩型铀矿勘查中的应用 [J]. *铀矿地质*, 2015, 31(s1): 315 - 321.

Ke D, Song L, Wang Y, et al. Application of soil radon survey in the exploration for volcanic-type uranium deposits in Xiangshan [J]. *Uranium Geology*, 2015, 31(s1): 315 - 321.

[18] 常桂兰. 氡与氡的危害 [J]. *铀矿地质*, 2002, 18(2): 122 - 128.

Chang G L. Radon and its hazards [J]. *Uranium Geology*, 2002, 18(2): 122 - 128.

[19] Patastefanou C. An overview of instrumentation for measuring radon in soil gas and groundwaters [J]. *Journal of Environment Radioactivity*, 2002, 63: 271 - 283.

[20] 李长江, 麻士华, 朱兴盛, 等. 矿产勘查中的分形、混沌与 ANN [M]. 北京: 地质出版社, 1999.

Li C J, Ma S H, Zhu X S, et al. Fractal, chaos and ANN in mineral exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.

[21] 戴慧敏, 宫传东, 鲍庆中, 等. 区域化探数据处理中几种异常下限确定方法的对比——以内蒙古查巴奇地区水系沉积物为例 [J]. *物探与化探*, 2010, 34(3): 782 - 786.

Dai H M, Gong C D, Bao Q Z, et al. A comparison of several threshold determination methods in geochemical data processing: a case study of stream sediments in Chabagqi area of inner Mongolia [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2010, 34(3): 782 - 786.

[22] 刘国兴. 电法勘探原理与方法 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.

Liu G X. Principles and methods of electrical prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.

[23] 李金铭. 地电场与电法勘探 [M]. 北京: 地质出版社, 2007.

Li J M. Geoelectric field and electrical exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.

[24] 李茂, 王利民, 许第桥. 可控源音频大地电磁测量法在砂岩型铀矿地质环境研究中的应用 [J]. *铀矿地质*, 2005, 26(6): 353 - 359.

Li M, Wang L M, Xu D Q. Application of controlled-source audio-magnetotelluric method to metallogenic geologic environment of sandstone-type uranium [J]. *Uranium Geology*, 2005, 26(6): 353 - 359.

[25] 黄力军, 陆桂福, 刘瑞德. 可控源音频大地电磁测深法应用实例 [J]. *物探化探计算技术*, 2006, 28(4): 337 - 341.

Huang L J, Lv G F, Liu R D. Application of controlled source audio magnetotelluric sounding method [J]. *Computing Techniques for Geophysical Geochemical Exploration*, 2006, 28(4): 337 - 341.

[26] 周明海, 唐国益, 杨青. 可控源音频大地电磁测深法 (简称 CSAMT) 在铀金地质中的应用 [J]. *铀矿地质*, 1994, 10(2): 106 - 112.

Zhou M H, Tang G Y, Yang Q. The application of the controlled source audio frequency magnetotelluric method (CSAMT) in the geological work of uranium and gold [J]. *Uranium Geology*, 1994, 10(2): 106 - 112.

[27] 王峰, 吴志春, 陈凯, 等. CSAMT 法在深部地质结构探测中的应用——以相山铀矿田邹家山地区为例 [J]. *物探与化探*, 2016, 40(1): 17 - 20.

Wang F, Wu Z C, Chen K, et al. The application of CSAMT to detecting deep geological structures in the Zoujiashan area of the Xiangshan uranium orefield [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2016, 40(1): 17 - 20.

[28] 刘祜, 段书新, 尹征平, 等. 综合物探方法在长江铀矿田勘查中的应用 [J]. *铀矿地质*, 2015, 31(s1): 336 - 343.

Liu H, Duan S X, Yin Z P, et al. Application of integrated geophysical methods in the exploration of Changjiang uranium ore field [J]. *Uranium Geology*, 2015, 31(s1): 336 - 343.

Application study of radon gas and CSAMT joint detection in the uranium exploration in the Wushijiazui Basin of Inner Mongolia

WU Yan-Qing, WANG Shi-Chen, DIN Yuan, WANG Qing, WANG Wen-Zheng
(No. 243 Geological Party, CNNC, Chifeng 024006, China)

Abstract: The uranium mineralization in the Wushijiazui volcanic basin enjoys a superior geological conditions. The uranium mineralization anomalies have been found on the surface, and they are of altered and fractured zone type. To identify the extension changes of ore-controlling fracture along the strike and dip as well as the favorable enrichment of uranium orebody, the authors carried out deep exploration. The joint detection of radon gas and CSAMT (Controlled Source Audiofrequency Magnetotelluric) was adopted in the study area where uranium mineralization is densely concentrated. The major structure and characteristics of ore-controlling fracture were identified, and six uranium mineralization favorable places were predicted, among which two places were drilled to verify, and industrial uranium orebodies were found in these two places. It is shown that the joint detection of radon gas and CSAMT is significantly effective in the search for concealed faults and fractures and blind orebodies; it can be adopted in the prospecting work of the uranium deposit with a major ore-controlling factor of fault structure, and can provide the future uranium deposit prospecting work with some ideas and directions, so as to accelerate uranium deposit prospecting work.

Key words: radon gas measurement; CSAMT measurement; Wushijiazui; uranium exploration (本文编辑: 王萌)