

DOI: 10.12401/j.nwg.2022048

北秦岭华阳川地区复杂地形条件下隐伏硬岩型铀矿的地球物理勘查方法

耿涛^{1,2}, 郭培虹^{1,2,*}, 冯治汉^{1,2}, 赵廷严³, 杜辉^{1,2}, 刘生荣^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054;
3. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 铀资源是十分重要的战略性能源矿产资源。秦岭地区是中国重要的铀矿成矿区, 华阳川地区发现的华阳川铀多金属矿位于北秦岭铀成矿带的东段。目前, 在华阳川及周边已发现多处铀矿及铀矿化点, 铀矿找矿潜力巨大。为解决华阳川地区复杂地形条件下隐伏硬岩型铀矿资源勘探及外围实现找矿突破对地球物理勘查方法技术的需求, 在华阳川铀矿区进行了航空伽玛能谱/磁法、航空瞬变电磁/磁法、航空重力/磁法等综合航空地球物理勘查系统不同高度和不同尺度的航空地球物理测量, 同时在地面开展了相应的重、磁、放射性测量、不同装置的激电测深及多种电磁测深等地球物理勘查, 对这些方法在复杂地形条件下铀矿资源勘查中的有效性和适用性进行了验证, 并在外围找矿有利区段开展了示范性勘查工作, 在此基础上筛选出了复杂地形条件下隐伏硬岩型铀矿不同勘查阶段的地球物理勘查方法技术组合, 为华阳川地区铀矿的找矿突破提供了地球物理勘查方法技术支撑, 对其他复杂条件区的隐伏铀矿勘查及其他隐伏金属矿的勘查工作也具有参考价值。

关键词: 复杂地形; 隐伏; 硬岩型铀矿; 地球物理; 勘查方法; 组合

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0225-20

Geophysical Exploration Eethod of Concealed Hard Rock Type Uranium Deposit with Complex Topographic Conditions in Huayangchuan Area, North Qinling Mountains

GENG Tao^{1,2}, GUO Peihong^{1,2,*}, FENG Zhihan^{1,2}, ZHAO Tingyan³, DU Hui^{1,2}, LIU Shengrong^{1,2}

(1. Xi'an Center of Geological Survey of CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Northwest Geological Science and Technology Innovation Center, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Uranium resources are very important strategic energy mineral resources. Qinling area is an important uranium ore forming area in China. The Huayangchuan uranium polymetallic deposit found in Huayangchuan area is located in the eastern part of the North Qinling uranium metallogenic belt. At present,

收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2023-01-03; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目“典型覆盖区航空地球物理技术示范与处理解释软件平台开发”(2017YFC0602200)第五课题“北秦岭华阳川地区隐伏铀矿空-地-井协同勘查技术示范研究”(2017YFC0602205)资助。

作者简介: 耿涛(1969-), 男, 正高级工程师, 主要从事区域地球物理调查和矿产地球物理勘查以及地球物理应用技术研究工作。

E-mail: gengtao926@163.com。

* 通讯作者: 郭培虹(1984-), 女, 高级工程师, 主要从事重磁数据处理、解释与反演等工作。E-mail: gph_1984@126.com。

many uranium deposits and uranium mineralization points have been found in and around Huayangchuan, and the uranium prospecting potential is huge. In order to meet the requirements of geophysical exploration methods and technologies for the exploration of concealed hard rock type uranium resources under complex terrain conditions in Huayang Chuan area and the realization of ore prospecting in the periphery, aerial geophysical surveys at different heights and scales have been carried out in Huayang Chuan uranium mining area with integrated airborne geophysical exploration systems such as airborne gamma ray spectrometry/magnetic method, airborne transient electromagnetic/magnetic method, airborne gravity/magnetic method, etc. At the same time, corresponding gravity, magnetic The effectiveness and applicability of these methods in the exploration of uranium resources under complex terrain conditions have been verified by geophysical exploration such as radioactive survey, IP sounding of different devices and multiple electromagnetic sounding, and demonstration exploration work has been carried out in the favorable areas for prospecting in the periphery. On this basis, the combination of geophysical exploration methods and technologies in different exploration stages of concealed hard rock type uranium deposits under complex terrain conditions has been screened out. It provides the geophysical exploration method and technology support for the breakthrough of uranium ore prospecting in Huayangchuan area, and also has reference value for the exploration of hidden uranium deposits and other hidden metal deposits in other complex conditions.

Keywords: complex topographic; concealed; hard rock type uranium deposit; geophysical; exploration methods; combination

铀资源是十分重要的战略性能矿产资源,不断发现和探明更多的铀资源是核能产业可持续发展的重要前提和根本保障。随着铀矿勘查工作的不断深入,近地表和浅部发现铀矿床的难度越来越大,与其他金属矿产一样,寻找深部富大铀矿已成为当前及今后铀矿勘查的主要方向(秦明宽等, 2017)。

近十余年来,中国铀矿深部找矿理论和技术均取得了长足进步。针对南方热液型铀矿的成矿特点,建立了由地质评价、铀矿田遥感评价与预测、地球物理攻深找盲、地球化学攻深找盲四大技术方法组成的热液型铀矿攻深找盲技术体系,拓展了花岗岩型铀矿床的深部找矿空间,物化探勘查综合探测深度首次突破2 000 m 大关,为后续扩大深部资源和实现深部找矿突破奠定了坚实基础(蔡煜琦, 2015; 秦明宽等, 2017)。

在中国,已厘定出准噶尔-天山、阴山-辽河、祁连-秦岭、华南和滇西等5个主要铀矿省(刘兴忠等, 1990; 张金带等, 2012),每个成矿省中铀矿类型、成矿特点、控矿地质构造、地形地貌条件都不相同,中国南方热液型铀矿的成矿特点实现的深部找矿理论突破和技术创新并不一定适用于其他地区的铀矿勘查。因此,针对不同地区、不同类型、不同控矿地质构造及地形地貌条件的铀矿勘查,需建立不同的勘查技术体系。

秦岭地区是中国重要的铀矿成矿区。在北秦岭华阳川地区已发现多处铀矿及铀矿化点,铀矿找矿潜力巨大(彭大明, 1999; 王军礼, 2018; 仲星, 2019)。其中的华阳川铀多金属矿具有规模大,品位低的特点(高成等, 2015, 2017)。前人在华阳川铀多金属矿勘查工作中并未总结出太好的地球物理勘探方法,主要以地面放射性测量和激电测量为主,但因受地形复杂导致地面地球物理工作开展困难、以及放射性场衰减快的特性影响,上述两种方法对深部隐伏铀矿勘查作用有限。

针对北秦岭地区复杂条件下隐伏铀矿勘查对地球物理勘查方法技术的需求,笔者提出了以航空地球物理工作为主,空中、地面、井中地球物理方法协同的快速勘查技术设想,并在华阳川铀矿区及周边开展了多种航空和地面地球物理勘查技术的适用性和有效性试验论证工作,进行了地球物理协同快速勘查方法技术研究,并提出了复杂条件下隐伏铀矿不同勘查阶段的地球物理方法组合。

本研究重点介绍航空和地面地球物理方法在华阳川铀多金属矿区的方法有效性试验结果和在外围示范应用的效果,以及在此基础上筛选的复杂条件区隐伏铀矿不同勘查阶段的地球物理协同勘查技术组合。

1 华阳川铀矿区及周边地质特征和物性特征

1.1 地质构造特征

华阳川铀多金属矿地处秦岭造山带与华北板块交接部位的小秦岭地区,隶属华北板块南缘的太华断隆,为秦岭造山带北缘的组成部分。区内地层为太古界太华群(ArT)深变质岩系,主要由TTG片麻岩套和表壳岩系组成,变质作用达高角闪岩相和麻粒岩相(高成等,2015,2017)。

华阳川铀多金属矿体赋存于华山岩体和老牛山岩体夹持的太华岩群中,主要岩性有花岗片麻岩、黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩以及含辉石角闪斜长片麻岩等,并包含有石英岩、石英片岩及大理岩透镜体;含矿脉体充填于华阳川脆-韧性剪切带内,总体呈北西-北北西向展布(李娟等,2018;冯伟华等,2021)。矿区位于太要背斜的倒转南翼,总体呈一走向北西、倾向北东的单斜构造。主要断裂构造为华阳川断裂带,表现为宽大的脆-韧性断裂带,该断裂在矿区内宽度可达500~1000m,东西两端延伸出矿区,总体走向南东东向,倾向北东,具有多期活动性和力学性质多次转换的特点。

矿区广泛出露一套太古代TTG片麻岩套,总体与区域构造线一致,呈北西向在区内展布,倾向北东。矿区周边区域岩浆岩分布广泛,多呈面积较大的中酸性侵入岩基产出。主要有元古代的二长花岗岩和花岗闪长岩,侏罗纪、白垩纪的二长花岗岩。矿区北部的华山岩体和南部的老牛山岩体均为白垩纪-侏罗纪复式花岗岩体。华山岩体总体呈近东西向展布,侵位于小秦岭山前断裂-太要断裂西段,其晚期侵入体以中粗粒含斑黑云二长花岗岩为主,分布于岩体中心部位;早期为细粒含斑黑云二长花岗岩,位于岩体外侧东南边部。该岩体侵入太古界太华群(ArT)深变质岩系,与太古代片麻岩呈侵入接触,外接触带具绢英岩化。老牛山岩体总体呈北东东方向展布,其侵位受到秦岭山前断裂和青岗坪-金堆城断裂的控制,多期侵入体分布于两大断裂之间,其早期侵入体以中细粒角闪二长花岗岩为主,分布岩体外侧西北边部;中期侵入体以中细粒黑云二长花岗岩为主,位于岩体西部中心部位;晚期侵入体以中细粒含斑黑云二长花岗岩为

主,位于岩体东部中心部位(张熊猫等,2023)。该岩体分别侵入太古界太华群(ArT)深变质岩系、元古界铁洞沟组(Pt₁t)和熊耳群(ChX),与太古代片麻岩呈侵入接触。

华阳川铀多金属矿体主要受断裂构造和各类岩脉(特别是伟晶岩脉、石英方解石脉和碳酸岩脉)控制,产状与脉岩群总体一致。脉体分布密度愈大,范围愈广,则矿体规模愈大,反之,脉体分布稀疏,范围小,则矿体规模小。铀矿体形态主要呈似层状、不规则大透镜状、大脉状和厚大网脉状。主要铀矿石类型有混合伟晶岩型和碳酸岩型两种。混合伟晶岩型铀矿主要分布于矿区的西部,最显著的特征是混合岩化强烈,脉状产出,与围岩呈过渡状接触。碳酸岩型铀矿主要分布于矿区中东部。各类脉体相互穿插,显示多期叠加成矿的特征,早期含矿伟晶岩脉在后期断裂构造下发生碎裂。混合伟晶岩型铀矿与碳酸岩型铀矿的矿石类型完全不同。

1.2 物性特征

研究区及外围岩矿石物性的差异是开展地球物理勘查的前提条件,物性参数收集与统计分析是地球物理资料解释的基础。通过对华阳川铀多金属矿区及外围的物性资料进行了收集整理,并补充采集测定物性数据,经全面分析,得出华阳川铀多金属矿区及外围的物性有如下特征。

1.2.1 地层密度、磁性特征

太华群平均密度 $2.63 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,磁化率均值 $573 \times 10^{-5} \text{ SI}$ 。长城系下部洛源组(ChI)为基性火山岩建造,密度均值为 $2.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,磁化率均值为 $5467 \times 10^{-5} \text{ SI}$,具有高密度、中等磁性的特性;上部憋盖子组(Chb)为沉积变质岩系,密度均值为 $2.59 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,磁化率均值为 $4 \times 10^{-5} \text{ SI}$,具有低密度、无磁的特性。蓟县系为浅变质岩,密度均值为 $2.83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,磁化率均值为 $3 \times 10^{-5} \text{ SI}$,具有高密度、无磁的特性。太华群中的片麻岩及混合岩,密度均值为 $2.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,磁化率均值为 $1460 \times 10^{-5} \text{ SI}$,具有中等密度、有磁特征。另外,长城系东坪组部分标本含矿,因此密度值变化范围比较大,密度为 $2.59 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \sim 2.94 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

太古代片麻岩套的密度和磁化率呈负相关性。大月坪片麻岩的岩性为花岗片麻岩,其岩性单一,主要矿物磁性不大;随着变质程度加深,变质为黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩和黑云斜长角闪斜长片麻

岩等,岩石中的磁性矿物(黑云母、绿泥石、绿帘石等)含量逐渐增加,致使其岩石磁化率逐渐增加,而岩石的致密性也因多种矿物的充填和变质加深而产生了微小的空隙,使得密度值减小(郭培虹等, 2021),这些微观的变化影响了太古代片麻岩总体的物性特征,如密度和磁化率呈现负相关性。

1.2.2 岩浆岩密度、磁性特征

老牛山岩体和华山岩体的岩性较接近,均为中粗粒黑云二长花岗岩,密度值变化范围为 $2.50 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \sim 2.71 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,均值为 $2.60 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。两岩体在磁性方面都具有弱磁性,老牛山岩体磁化率均值为 $900 \times 10^{-5} \text{ SI}$,华山岩体磁化率均值为 $800 \times 10^{-5} \text{ SI}$,但在老牛山中心部位的KD、KS含斑黑云二长花岗岩磁性均值为 $1779 \times 10^{-5} \text{ SI}$,其磁化率比华山岩体明显偏强,反映两大岩体的磁性存在一定差异。元古代侵入岩体分布在矿区东部源头—后沟一带,岩性为细粒二长花岗岩,密度值为 $2.60 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,磁化率均值为 $1115 \times 10^{-5} \text{ SI}$,表明具有弱磁特性。

综上,总体来看,华山岩体和老牛山岩体具有低密度、较高磁性的特征;长城系老地层为低密度、无磁或弱磁性,熊耳群洛源组的细碧岩、细碧玢岩为高密度、高磁特征;太华群片麻岩岩套为中等密度、中等磁性特征,其中翁岔铺片麻岩套的密度低于大月坪片麻岩,磁性比大月坪片麻岩略强。花岗斑岩表现为低密度、较强磁性,闪长岩、角砾斑岩及辉长岩脉为高密度、较强磁性;燕山期侵入岩体其密度和磁化率呈正相关性,岩性均为含斑黑云二长花岗岩,水池沟单元为细粒含斑黑云二长花岗岩,而其他为中粒或中细粒含斑黑云二长花岗岩,说明岩性粒度影响岩体总体物性特征,粒度越小,岩石越致密,密度相对较大,磁化率相对较高。

1.2.3 岩(矿)石电性特征

统计结果表明:华阳川矿区太古代片麻岩或含矿片麻岩和在断裂破碎带附近发育的侵入岩体(花岗岩伟晶岩)电阻率偏低,电阻率变化一般介于 $182 \sim 869 \Omega \cdot \text{m}$;太古代混合岩电阻率比较高,其电阻率均值高达 $3095 \Omega \cdot \text{m}$;其次为燕山期侵入岩体(二长花岗岩),电阻率均值为 $1476 \Omega \cdot \text{m}$,不同的电性变化特征为利用大地电磁测深法查明地层、岩体分布与埋深提供依据。

含矿岩石标本平均极化率为 7.96%,围岩标本平均极化率为 2.11%,两者之比为 3.77。可见,矿化岩石

极化率与围岩极化率之间存在明显的极化效应差异(3~5倍),为华阳川铀多金属矿区前期通过极化效应差异找矿提供了前提条件。

通过对华阳川大沟岩一带8种岩性的岩石标本电性测量统计可见,电阻率由高到低依次为:花岗岩体、矿化伟晶岩、含矿石英脉及矿化石英脉、花岗岩脉、长英质花岗片麻岩及围岩、石英方解石脉、深色角闪片麻岩和磁铁矿化角闪片麻岩。极化率由高到低依次为:磁铁矿化角闪片麻岩、石英方解石脉、深色角闪片麻岩、矿化伟晶岩、花岗岩体、长英质花岗片麻岩及围岩、花岗岩脉、含矿石英脉及矿化石英脉。

测定的岩(矿)石标本电性各项数值相对差异较大,其中太古代片麻岩或含矿片麻岩和石英方解石脉电阻率相对较低,电阻率均值一般为 $3816 \sim 8156 \Omega \cdot \text{m}$,电阻率较高的岩体如燕山期花岗岩、矿化伟晶岩、含矿石英脉及矿化石英脉、花岗岩脉,电阻率均值都在上万欧姆·米。极化率最高为含金属硫化物矿石标本,其次为矿化伟晶岩等,虽然片麻岩等一些古老变质岩也有较高的极化率,但仍小于含金属硫化物矿石标本的极化率。断裂带中贯入的花岗伟晶岩脉体、石英方解石脉属于相对中高电阻高极化的特征,为推测构造带、圈定高极化异常以至找矿提供前提基础条件。

1.2.4 深部物性特征

在华阳川矿区采集了13个钻孔6000余个岩芯标本,测定了密度、磁化率和电阻率数据,主要岩性为太华群黑云斜长片麻岩、混合岩化黑云斜长片麻岩、花岗片麻岩,其次为花岗伟晶岩脉、方解石石英脉(含霓辉石,黄铁矿,方铅矿)、长石石英岩。统计发现物性值随深度变化的规律性不强,物性之间也没有较明显的变化规律,说明在钻孔深度范围内从深到浅物性特征基本一致。

1.2.5 矿区物性特征

通过对华阳川铀多金属矿区内地表及钻孔内物性测定整理可见,矿区内铀矿石具有低密度、弱磁性、低电阻率、高极化率、高放射性的特征;碳酸盐岩脉和伟晶岩细脉具有低密度、弱磁性、高电阻率、低极化率、低放射性的特征;而作为围岩的混合岩化片麻岩则具有较低密度、弱磁性、中高电阻率、低极化率、低放射性的特征。

由上述物性特征可以看出,区内地层(岩体)的密度、磁性、电性差异可为通过重、磁、电测量研究地质

构造和岩体的分布及形态提供物性前提。

2 地球物理勘查工作的难点及工作设想

2.1 复杂地形条件对地球物理勘查工作的影响

华阳川地区位于秦岭中山亚区,但在矿区东北部有华山、北部有赛华山、西北部有少华山,中部有老牛山等高山,为典型的高山地貌景观,地形起伏剧烈,山高坡陡,沟深谷狭,平均坡度 37.6° ,最大达 84° 。根据土地调查资料,该地区全部为有林地和灌木林地,森林覆盖率100%。通行极为困难。

地形条件是一个地区选择地球物理工作方法以及决定方法有效性及适用性的重要制约因素,因此,地形情况对地球物理工作会产生什么影响的研究分析很有必要。

(1)对航空地球物理工作的影响相对较小,主要有以下几方面:

在复杂地形区进行航空地球物理工作时,为了保证飞行安全,飞行高度不能过低,这将影响对弱小异常的识别。对航空磁法测量、航空瞬变电磁测量、航空伽玛能谱测量来说,由于需要沿地形起伏飞行,如果地形条件比较复杂,则难以保证整个飞行过程中始终保持等无线电高度飞行;测量过程中飞机频繁地升高、降低飞行高度会使异常产生畸变,增加后期处理解释的难度。

对航空重力来说,采用缓起伏飞行,则后期要增加垂向的重力加速度的改正。另外,复杂的地形条件会增加航空重力测量后期地形改正的难度。

(2)对地面地区物理工作来说,地形的影响主要有以下几方面:

首先,复杂地形地貌区一般地形起伏剧烈、通行困难,或植被覆盖严重,往往是人员无法进入,设备无法到达,导致工作无法开展。这是最大的影响,尤其是要完成面积性测量工作的时候,影响更大。

其次,对于一些地球物理方法来说,由于地形地貌的影响,装置无法按要求部署,会影响这些方法的实施。比如大极距的激发极化法、大回线的瞬变电磁法以及地震勘探等。

再者,会影响到测网的布设,使点线距难以达到均匀分布,或者影响到测线(或剖面)不能按需要的方位或长度布置。

另外,后期改正时地形的影响难以完全消除,降

低了数据的总精度,也会增加数据处理以及解释的难度。

2.2 对地球物理勘查方法的需求及难点

华阳川地区铀矿勘查工作需要复杂条件下能大范围快速勘查和深部大深度勘查的铀矿地球物理勘查技术。难点在于,具备物性前提的地球物理方法理论上是有效的,但复杂地形条件限制了绝大部分地面地球物理方法进行大范围快速勘查;矿区深部勘查要求深度大,但矿致异常弱,外部人文干扰严重,信息提取困难。

对于铀矿勘查来说,由于铀矿具有含量低、规模小的特点,除浅表放射性异常外,很难引起可直接探测的重、磁、电异常(尤其是深部更难),因此,铀矿地球物理勘探除浅层矿可用放射性测量直接找矿外,其他的地球物理方法都是间接找矿的方法。

华阳川地区位于秦岭主山脊南麓,地形陡峭,沟谷纵横,植被林密,只有少量沟谷地区的狭窄范围内有一些地形相对平坦区域可以开展少量地面地球物理工作,而这些区域往往又有厂房、高压线等的干扰,实际地形条件限制了许多地面地球物理方法的实际应用。

2.3 地球物理勘查工作设想

华阳川地区铀矿快速勘查的需求和实际地形的限制,促使在实际的找矿工作中必须探索航空地球物理方法的应用。我们设想,首先通过航空地球物理方法获得的资料,快速展开区域构造研究,圈定找矿有利区,然后利用地面放射性测量等方法进行异常查证,进一步缩小找矿靶区,在此基础上,通过地面重磁、电及电磁等方法进行“攻深找盲”,实现铀矿找矿突破。

为了实现以上目的,必须首先通过试验验证拟选择的地球物理方法在华阳川地区铀矿找矿工作中的实际效果。因此,遵循“由已知到未知”的原则,笔者首先选择航空重力测量、航空磁法测量、航空伽玛能谱测量、航空瞬变电磁测量以及相应的地面重力、磁法、激电及电磁法、放射性测量及活性炭氡气测量等方法在华阳川矿区进行有效性及适用性研究,然后根据试验结果选择适当的方法在矿区外围选择有利区段开展示范性勘探工作,在此基础上,筛选了不同勘查阶段的地球物理方法技术组合。

3 方法有效性和适用性试验及评价

由于华阳川地区地形的复杂性,一些正常情况下

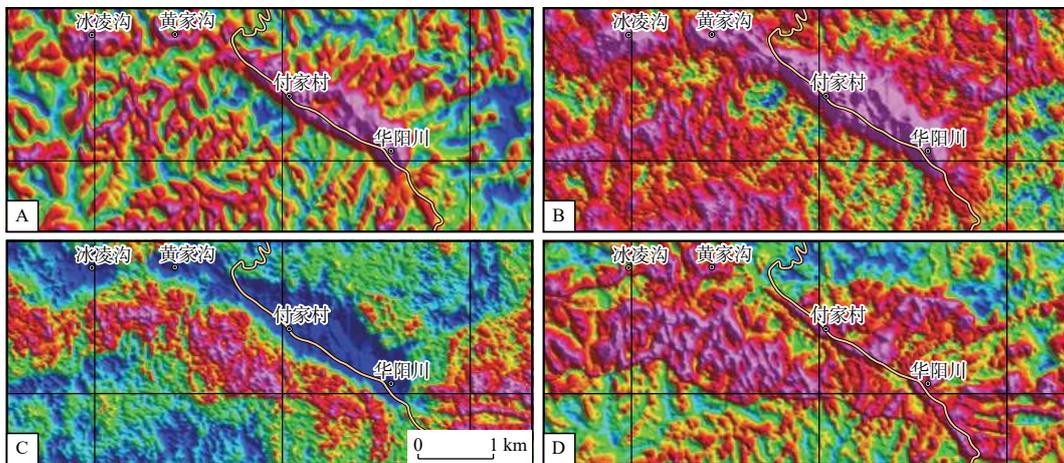
可能具有较好效果的地面地球物理方法由于不具备工作条件,因此未进行试验。投入试验的方法相对较多,通过试验发现,有一些方法没有效果、效果不佳,或者适用性很差,笔者对于这些方法不作介绍,只简要介绍一下具有一定有效性的方法的效果及存在的问题。总的来说,所有的地面地球物理工作方法在华阳川地区的复杂地形条件下工作都是困难的,都会受到地形条件的干扰和制约,对其进行的适用性评价,只是相对于那些不能开展工作的方法而言的,并不是说工作中不存在问题,其有效性也是相对而言的,并

非某一种方法就能解决问题,而是通过多种方法提供的信息综合研究才能取得突破,这也是提出方法技术组合的原因。

3.1 航空地球物理方法

3.1.1 航空伽玛能谱测量

2016年中国自然资源航空物探遥感中心和中国地质调查局西安地质调查中心联合在华阳川地区开展了1:1万高精度航空伽玛能谱/磁法综合测量(赵廷严等, 2020)。通过对测量获取的航空伽玛能谱数据进行处理,获得了华阳川地区航空放射性异常(图1)。



A.放射性总量特征; B.铀含量特征; C.活性铀含量特征; D.古铀含量特征

图1 华阳川矿区航空放射性特征

Fig. 1 Characteristics of airborne radioactivity in Huayangchuan mining area

航空伽玛能谱测量获取的放射性异常特征明显。通过综合分析解释,全区共圈出不同级别、不同矿种的找矿远景区10片,其中铀矿找矿远景区7片,包括I级3片、II级4片(图2)。这些航放异常及依此圈出的找矿远景区为该区域寻找铀多金属矿产提供了重要信息,对该区域开展铀等金属矿产勘查具有重要的参考及指导意义。

华阳川铀多金属矿的矿体主要赋存于太古代TTG片麻岩套(武家坪黑云斜长片麻岩和大月坪花岗岩片麻岩)中(王江波等, 2013; 高成等, 2017)。以往的研究将该片麻岩套的分布范围作为主要的找矿方向,故以往华阳川地区的铀矿勘查方向为东西向沿太古代片麻岩套分布范围,航空伽玛能谱测量工作区的分布范围亦可表明原来的勘查方向。

在开展了1:1万高精度航空伽玛能谱/磁法综合测量,获取了高精度航空放射性资料后,发现华阳川以东片麻岩套中无成规模的铀异常出现,而西部有大

规模的铀异常。以华阳川铀多金属矿为中心,铀异常围绕老牛山岩体呈弧形向西、向东南延伸(赵廷严等, 2020)。由此,铀矿勘查方向变为围绕老牛山岩体,在岩体与太古代片麻岩接触的破碎带中寻找铀矿(图3)。同时,利用航空放射性测量结果指导的地面异常踏勘和钻探工作,发现了地表异常和深部工业矿体。

航空放射性测量的另一个的重要成果是展示了华阳川地区U元素的迁移方向。活性铀计算结果显示,华山岩体翁峪花岗岩为成矿提供了大量的铀源,华阳川断裂带为铀矿床的形成提供了导矿构造和容矿空间。由于翁峪花岗岩丰富的铀源和华阳川韧破碎带良好的迁移通道,华阳川地区寻找富矿仍具有较大的可能性。

由以上成果可见,航空伽玛能谱测量可快速大面积地获得区内放射性异常,可明确区内铀矿找矿方向并指导地面铀矿勘探工作,是有效的铀矿勘查航空地球物理方法,对该区域开展铀等金属矿产勘查具有重

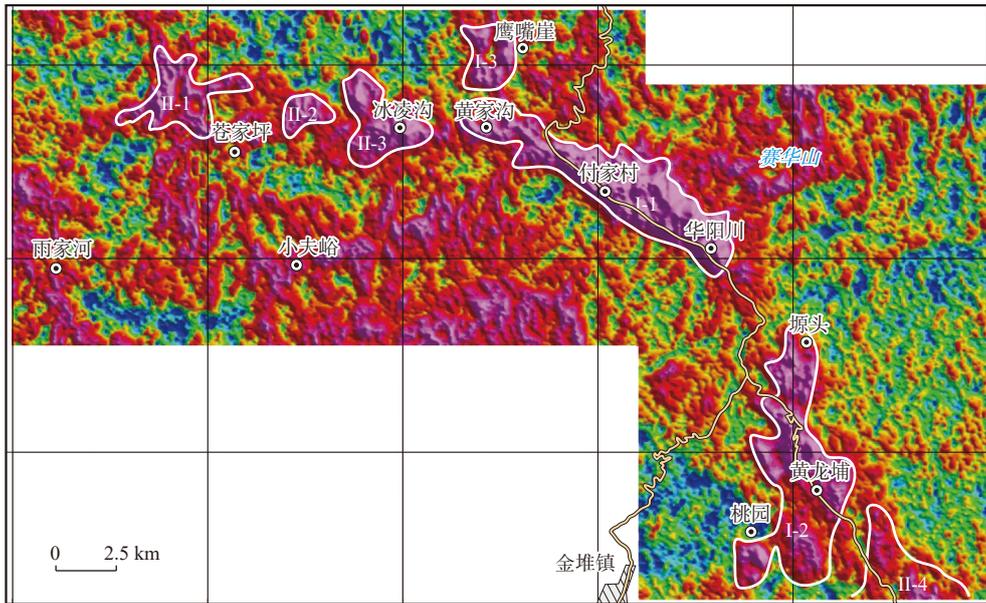


图 2 华阳川地区航空伽玛能谱测量圈定的铀矿找矿远景区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of uranium prospecting prospect delineated by airborne gamma ray spectrometry in Huayangchuan area

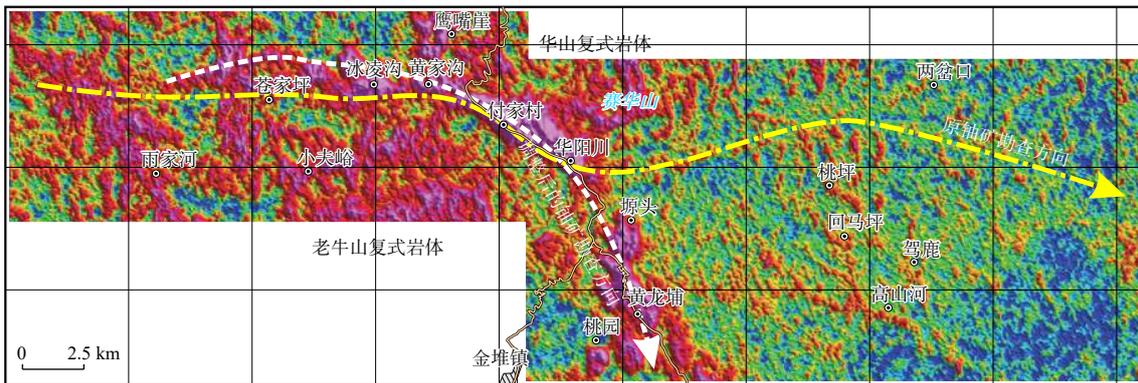


图 3 华阳川地区航空伽玛能谱测量结果改变了铀矿的勘查方向

Fig. 3 The results of airborne gamma ray spectrometry in Huayangchuan area have changed the exploration direction of uranium deposits

要的参考及指导意义(吴慧山等, 1994)。航空放射性测量是隐伏铀矿资源勘查最有效的方法之一。

航空伽玛能谱测量不足之处: 一是由于测量结果是一定范围内放射性总量的综合反映, 因此, 不能对脉状矿体进行精确定位; 二是穿透深度浅, 对覆盖层较厚的地区效果不佳(万骏等, 2004; 范正国等, 2005; 万建华等, 2012; 谷懿等, 2014; 李怀渊等, 2018)。

3.1.2 航空重力测量

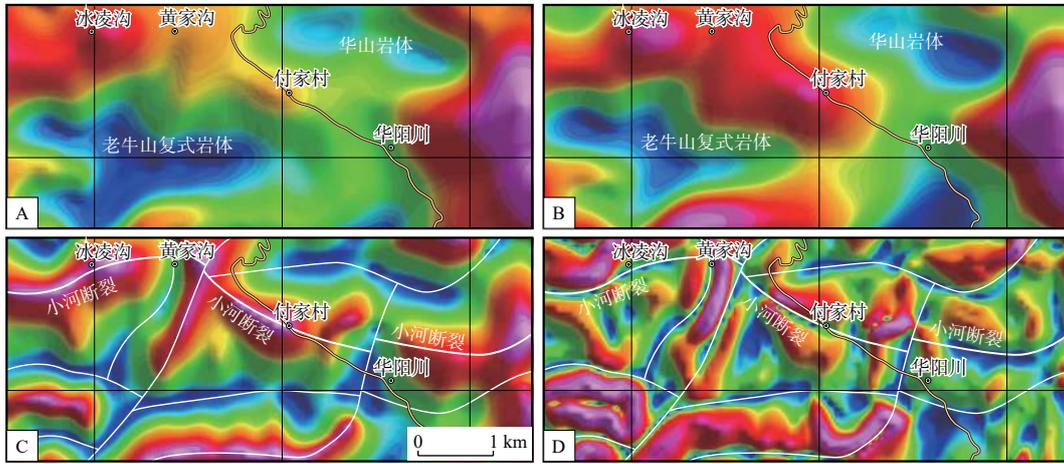
中国自然资源航空物探遥感中心承担的“秦岭及天山等重点成矿区带航空物探调查”地质调查项目 2017 年在华阳川地区部署了 1 : 5 万航空重力/磁法综合测量。这是国内首次在山区复杂地形条件区开展航空重力测量。

利用航空重力测量寻找隐伏铀矿资源属于间接找矿。华阳川地区铀矿赋存在穿插于太古代片麻岩地层中的碳酸岩脉中, 呈网脉状, 且分布不均, 脉体大小不等。由于铀的含量非常低, 所以含铀片麻岩与不含铀的片麻岩物性无明显差异, 故该地区利用开展航空重力/磁法综合测量寻找隐伏铀矿效果并不明显。但是华阳川铀多金属矿赋存在老牛山岩体和华山岩体挟持的太古代片麻岩地层中, 利用大比例尺的航空重力/磁法综合测量结果开展该区域的地质构造研究, 可对铀矿找矿工作起到支撑作用。

从测量效果看, 航空重力测量结果清晰地反映了华阳川铀矿区的重力场特征(图 4)。布格重力异常图(图 4A)和剩余重力异常图(图 4B)清晰地反映了华山

岩体、老牛山复式岩体的特征和地层的分布,垂向一阶导数图(图4C)和水平导数模量图(图4D)也清晰地

反映了区内的断裂构造特征,可以为本地区的地质构造研究和岩体分布及形态研究提供重力依据。



A.布格重力异常; B.剩余重力异常; C.重力垂向一阶导数; D.重力水平导数模量

图4 华阳川矿区航空重力异常特征

Fig. 4 Characteristics of airborne gravity anomaly in Huayangchuan mining area

利用航空重力资料寻找隐伏铀矿资源目前尚无直接有效的应用实例,但在华阳川地区利用大比例尺航重、航磁资料进行地质构造研究及岩体分布和形态研究,开展“就矿找矿”工作,却支撑了华阳川铀矿外围和深部的找矿工作,取得了一定的效果。

航空重力测量在山区面临的主要问题是,在测量过程中受航空重力仪运载平台运动的干扰,获得的原始重力测量数据需经滤波处理(李文勇等,2010)。在滤波处理的过程中损失掉了许多细节信息,失去了数据密度大的优势,降低了航空重力测量的分辨率,同时,还导致后期的地形改正难以精确进行,从而降低了航空重力测量的实际精度(肖云等,2003;王静波等,2009)。

3.1.3 航空瞬变电磁测量

由于华阳川有铀矿含矿岩脉的太古代片麻岩具有低阻、中高极化的特点,具备开展航空瞬变电磁测量的物性前提。中国自然资源航空物探遥感中心在华阳川地区进行了1:1万航空瞬变电磁/磁法测量,同时,开展有关的飞行测试试验。这是国内首次在山区复杂地形条件区开展航空瞬变电磁测量。

从测量效果看,航空瞬变电磁测量结果基本反映了该地区的电性特征。抽取航空瞬变电磁测量17道数据中的0、5、9三道数据显示,华阳川铀多金属矿区整体存在低电阻率航电异常(图5)。表明在复杂地形区,采用沿地形起伏飞行方法进行航空瞬变电磁/磁法

测量能够获取有效的航空电磁数据,方法可行。

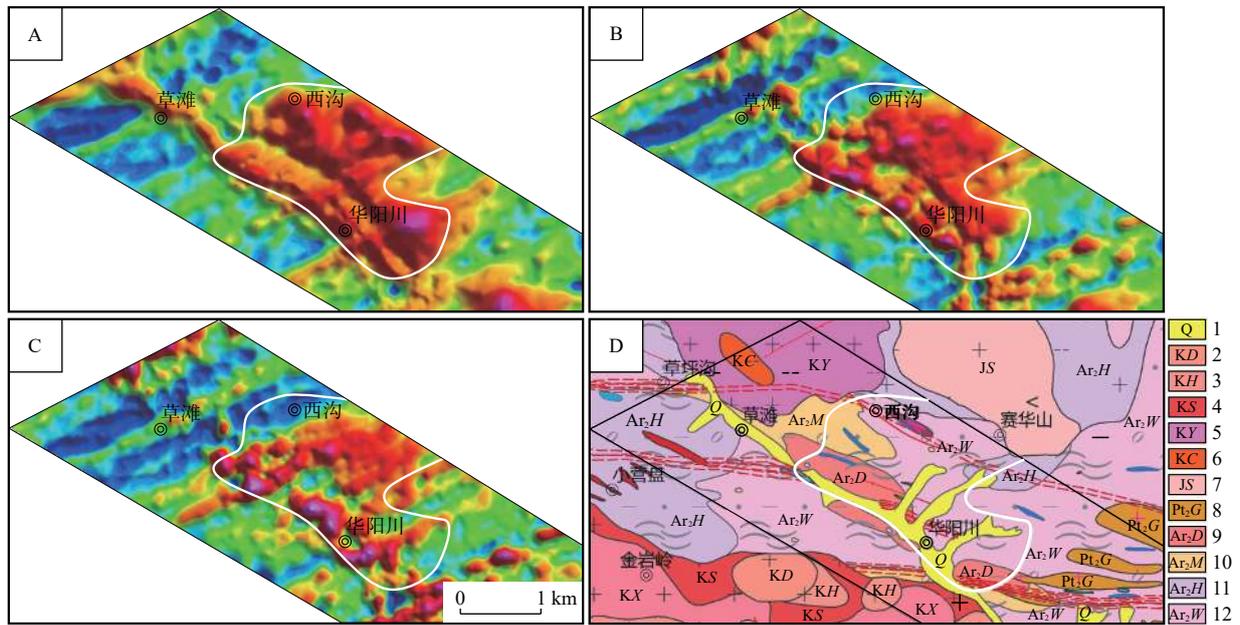
但是,由于在航空瞬变电磁测量的测区内有两条高压输电线,其本身对航空瞬变电磁测量是很大的干扰;另外,在飞行过程中,遇到高压输电线时需要垂直爬升越过,再降低飞行高度,在这个过程中,由于测量高度的变化,会引起测量的电磁异常畸变。以上两点会造成后续处理解释时有很多数据不能使用,且在目前也没有好的办法在后期进行改正,只能舍弃。从反演结果看,航空瞬变电磁测量可以应用于华阳川铀多金属矿外围中浅部的间接找矿工作,而目前直升机载航空瞬变电磁系统的有效探测深度尚不能达到深部找矿的要求。可见,需具备一定的外部条件后,才能应用航空瞬变电磁测量开展铀矿勘查工作。

3.1.4 航空磁法测量

由于华阳川铀多金属矿中的铀矿石具有弱磁性的特征且含量很少,因此,铀矿本身不足以引起可直接识别的磁异常,利用磁测资料更多地是寻找含矿岩体、控矿构造或伴生的磁性矿物,所以利用航空磁法测量寻找隐伏铀矿资源也属于间接找矿。

在华阳川铀多金属矿区及外围,配合航空伽玛能谱测量、航空重力测量、航空瞬变电磁测量,累计开展了三次航空磁法测量工作,获取了不同飞行测量方式、不同比例尺的4种航磁数据资料。

从航磁测量结果可见,较强的正磁异常主要分布在太古代片麻岩和岩体的接触部位,以及太古代片麻



A.电磁 zoff0 道响应图; B.电磁 zoff5 道响应图; C.电磁 zoff9 道响应图; D.地质图; 1.第四系; 2.东洞峪单元; 3.黄狗峪单元; 4.水池沟单元; 5.雨家河单元; 6.葱峪单元; 7.赛华山单元; 8.甘沟单元; 9.大月坪片麻岩; 10.马驹峪片麻岩; 11.侯家村片麻岩; 12.武家坪片麻岩

图 5 华阳川矿区及外围高值响应区航空瞬变电磁、地质综合图

Fig. 5 Comprehensive map of Aeronautical transient electromagnetic and geology of Huayangchuan mining area and peripheral high-value response area

岩套内部,应主要为太古代片麻岩套中磁性较强的黑云角闪斜长片麻岩反映;负磁异常主要位于华山岩体和老牛山复式岩体中,为岩体的反映(图 6)。

经对比分析可知,在类似华阳川地区的复杂地形区开展航磁测量,宜采用沿地形起伏的测量飞行方法,平均飞行高度应 ≤ 200 m,对于以找矿为目的,或者开展区域构造(构造破碎带)的航空磁法测量来说,比例尺较大时(1:1万或者 1:2万)可以取得更加丰富的磁场信息,对于以开展大范围的区域地质构造研究为目的的航空磁法测量来说相对较小的测量比例尺(1:5万,甚至 1:10万),飞行高度相对较高(800 m 以下),缓起伏飞行(或者平飞),即可取得满足研究需要的磁场信息。

通过上述分析可以得出,在复杂地形区开展航空磁法测量,在兼顾其他测量参数的同时,航磁均可以取得较好的测量效果。但采用更大比例尺(1:1万)、沿地形起伏飞行的方法获取的航磁资料细节更为丰富。航磁异常可清晰地反映出区内岩体及火山岩沉积地层的分布情况,为磁性体的圈定提供依据。

航空磁法测量是成熟的航空地球物理方法,同时,由于航空磁测工作可以和其他航空地球物理方法同

时进行,因此,适用性是非常好的。

航空磁法测量在山区工作不足之处是在磁性较强的山区易受地形起伏的干扰,异常形态与地形具有密切的正相关性,如 1:1万航磁 ΔT 异常图(图 6A)中在华阳川附近出现的与地形相关的北北东向磁异常,在向上延拓 200 m 的 1:1万航磁 ΔT 异常图(图 6C)和飞行高度更高的 1:5万航磁 ΔT 异常图(图 6D)上已基本消失,可见其是由于地形相关的浅源磁性体引起的,这种异常对构造研究是一种干扰因素,因此,在开展航空磁法测量时需对最佳飞行高度、地形改正方法及异常提取方法进行深入研究。

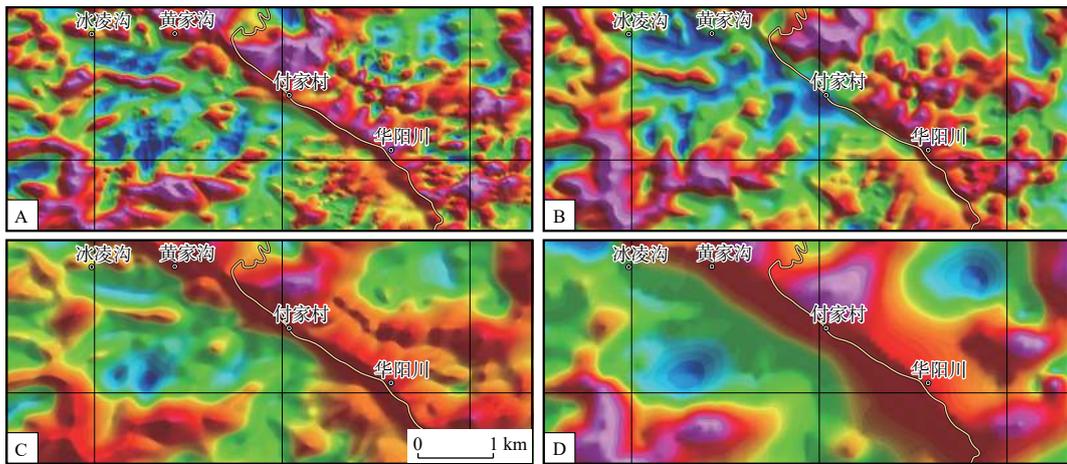
3.2 地面地球物理方法

地面地球物理方法开展的内容及部署的区域均较多。在此,仅对通过矿体的主要试验剖面(Z2 综合剖面)上各种方法的有效性试验结果作以简单介绍。

3.2.1 地面重磁测量

地面重力测量异常清晰,细节丰富,主试验剖面上的剩余重力异常与剖面的地质特征有明显的对应关系(图 7),对研究地质构造及圈定岩体等的有效性是不用质疑的。

地面磁法测量可用于小范围大比例尺的查证工



A.1: 1万航磁 ΔT 异常; B.1: 1万航磁 ΔT 化极异常; C.1: 1万航磁 ΔT 向上延拓 200 m 异常; D.1: 5万航磁 ΔT 异常

图 6 华阳川矿区航磁异常特征

Fig. 6 Characteristics of aeromagnetic anomalies in Huayangchuan mining area

作,作为航磁的补充;但在干扰严重的矿区等地方,作用不大,通过矿区的主试验剖面测量结果(图 7)就可见,在干扰严重地区,地面磁测结果并不能反映地质构造信息。

受地形条件影响,本地区地面重、磁工作较难实施,许多地区人员和设备根本无法到达,不适合开展大范围面积工作;但对小范围大比例尺的查证工作,考虑到精度、经济性及技术可行性,目前航空重力尚无法取代地面重力工作;但航空磁测完全可替代同比例尺的地面高精度磁测,且数据密度及精度更好。

3.2.2 地面放射性测量和活性炭氦气测量

地面放射性测量是寻找浅表铀矿的直接找矿方法,在铀矿找矿方面具有其他物探方法不具备的优势。但是,在本区由于地形条件影响,难以开展面积性测量工作,适用性不好。因此,该地区的地面放射性测量应是在航放工作的基础上,通过少量查证工作进一步缩小铀矿找矿靶区,不宜开展大面积工作。

但放射性测量在第四系覆盖区效果欠佳,需采用土壤氦气测量进行补充。

本次选择了活性炭氦气剖面测量的方法,在矿区第四系覆盖的沟谷内进行了试验。从获取的活性炭氦浓度异常图(图 8)可见,异常晕圈特征明显,规律性强,展现出的氦浓度异常形态、轴(走)向等方面具有不同的特点,总体沿北西—北北西向,与华阳川矿区内含矿脉岩密集带套合一致。

可见,活性炭氦气测量能有效解决第四系覆盖区放射性测量不能穿透的问题,是地面伽玛能谱测量方法的有效补充。

3.2.3 二维直流激发极化法

从在主试验剖面进行的二维直流激发极化法(DCIP-2D)测深结果(图 9)可见,低电阻率和高极化率位置基本与已控制的矿体位置相对应。根据已知剖面钻孔资料,结合反演剖面可以看出,矿致异常的深度范围与钻孔资料基本吻合,异常位置、规模基本与钻孔资料相对应。

大功率激电测深反演结果与已知地质资料吻合较好,相对激电异常区域与已知见矿钻孔情况基本吻合,所反映的地下岩性构造破碎带与已探知的矿体位置重合,证明了大功率激电测深方法的有效性和准确性。前人工作及本次测深试验证明,大功率激电在华阳川铀矿找矿中是有效的方法。但是,激电测量由于其探测深度受到供电极距的制约,而在研究区内工作时受地形条件限制,很难布设大的供电极距,只能在一些沟谷地形相对较缓的地方开展小极距的工作,解决浅部($<200\text{ m}$)的问题。对深度 $>200\text{ m}$ 的找矿工作作用不大,适用性不好。从图 9 可以看出,深部异常形态与矿体的对应关系明显变差,反映出测深的深度没有达到图中反映的深度,反演的深部信息是不可靠的。

3.2.4 频谱激电测深

从频谱激电测深(SIP)在主试验剖面得到的电阻率和极化率异常断面图(图 10)中可见,异常基本反映出了矿区的情况,低阻高极化区与矿体有明显的对应关系。

频谱激电测量探测深度较大($>800\text{ m}$),能取得

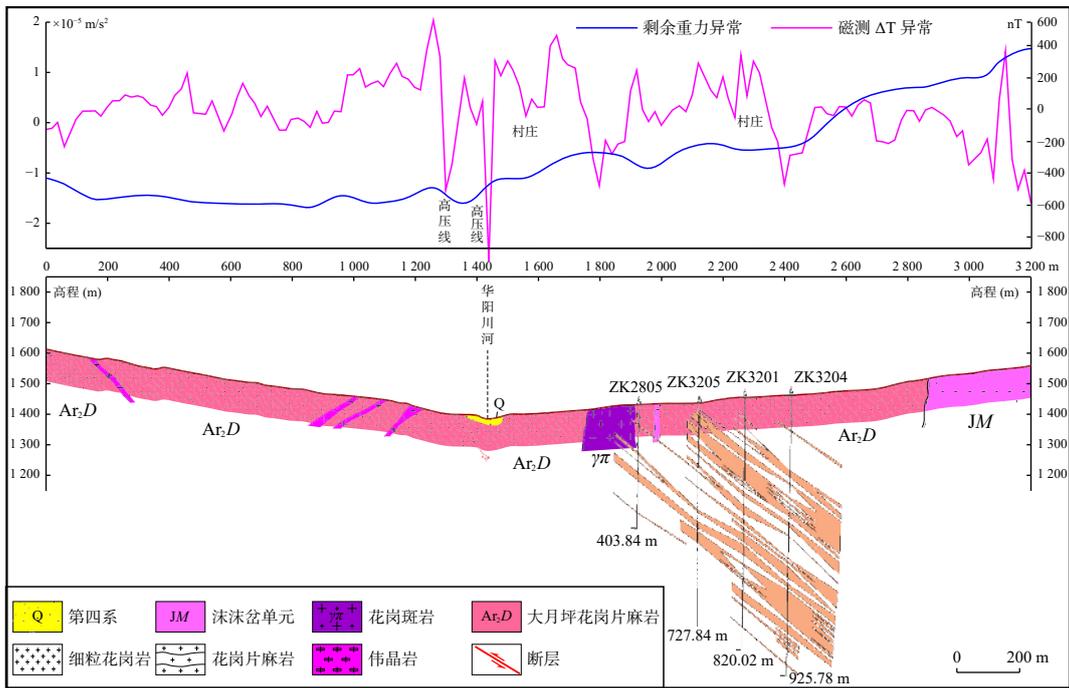


图 7 主试验剖面的重、磁异常特征

Fig. 7 Gravity and magnetic anomaly characteristics of main test section

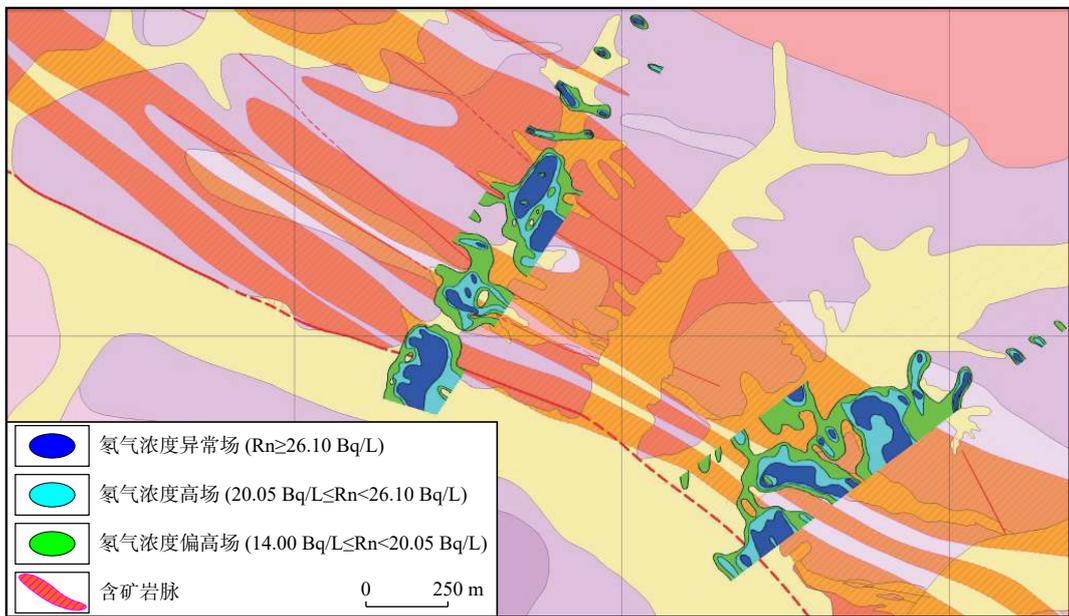


图 8 华阳川矿区氡气异常晕圈与含矿脉岩套合示意图

Fig. 8 Schematic diagram of coincidence between radon abnormal halo and ore bearing vein rock in Huayangchuan mining area

极化率和电阻率 2 个参数, 有效性较好, 但施工受地形影响较大, 不便于开展面积性工作, 适用性及经济性较差。因此, 在中深部铀矿勘探中频谱激电法是一种备选选择。

3.2.5 音频大地电磁测深

从图 11 可见, 音频大地电磁测深 (AMT) 得到的

主试验剖面二维电性结构模型, 基本反映了矿区 1000 m 以浅的结构, 低阻异常区和已知矿体有明显的对应关系, 效果较好。

音频大地电磁测深 (AMT) 由于采用天然场源, 不需要建立人工场源, 因此在研究区能较方便地施工, 且无近场效应、过渡带效应影响, 使用电磁波频率丰

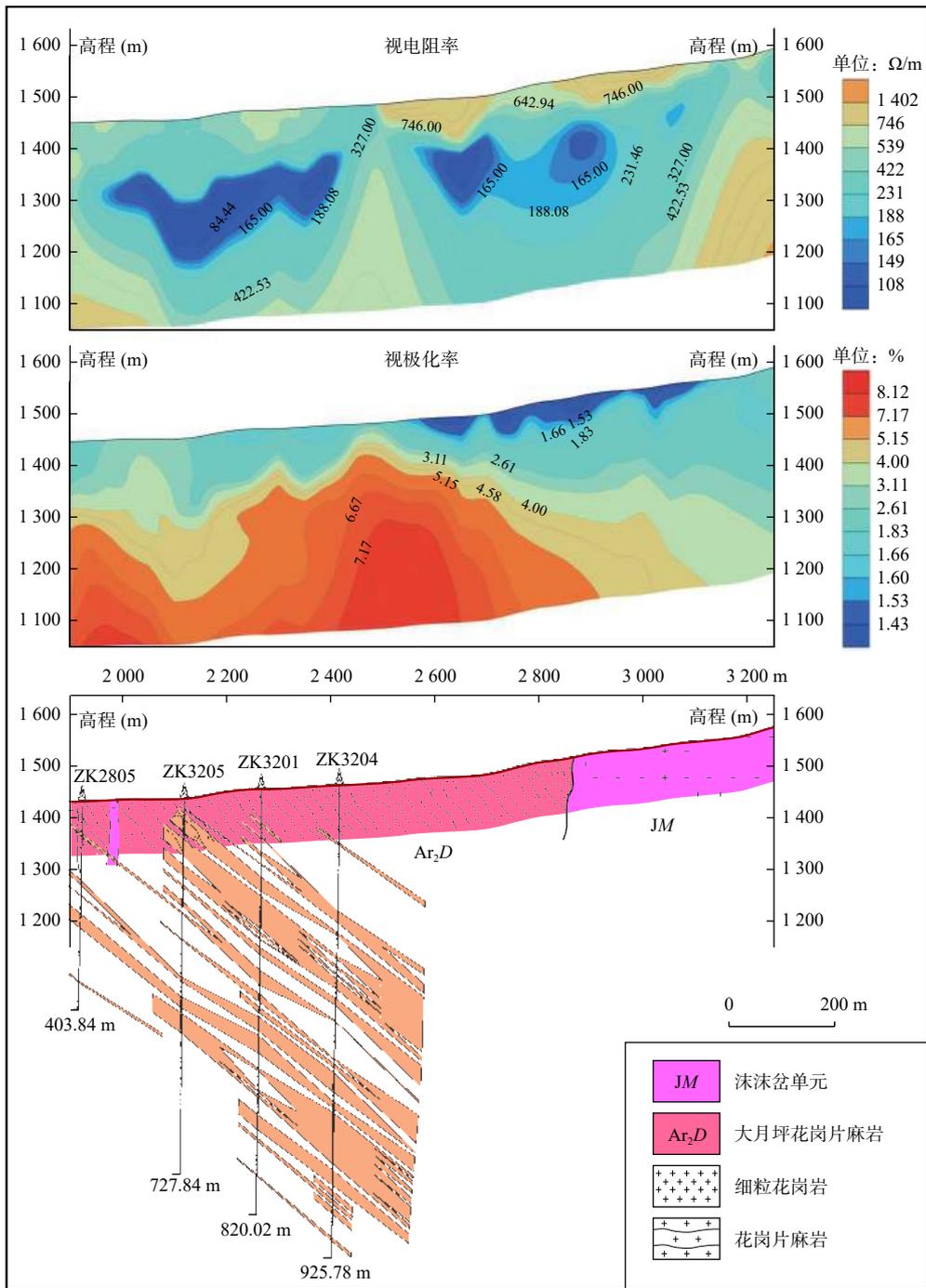


图9 主试验剖面二维直流激电测深综合反演断面图

Fig. 9 Comprehensive inversion section of two-dimensional DCIP deep structural exploration of the main experiment section

富, 没有高阻屏蔽, 对低阻分辨率高, 能较真实有效地获得 1 000~1 500 m 以浅的电阻率异常, 是一种较有效的方法。

不足之处, 一是只能获取电阻率一个参数; 二是天然电磁场信号强度微弱, 极化不稳定, 受各种噪声影响强烈, 需要多周期的叠加才能获得有效的功率谱, 因此野外记录时间长; 三是抗电磁干扰能力差。

3.2.6 广域电磁法

主试验剖面的广域大地电磁法(WFEM)二维视电阻率反演结果较清晰地反映出了华阳川铀矿区深部 4 km 以浅的构造特征及华山岩体与老牛山岩体的关系, 而且, 与重力资料进行密度反演得到的结果吻合的很好(图 12)。

广域电磁法突破了可控源音频大地电磁法

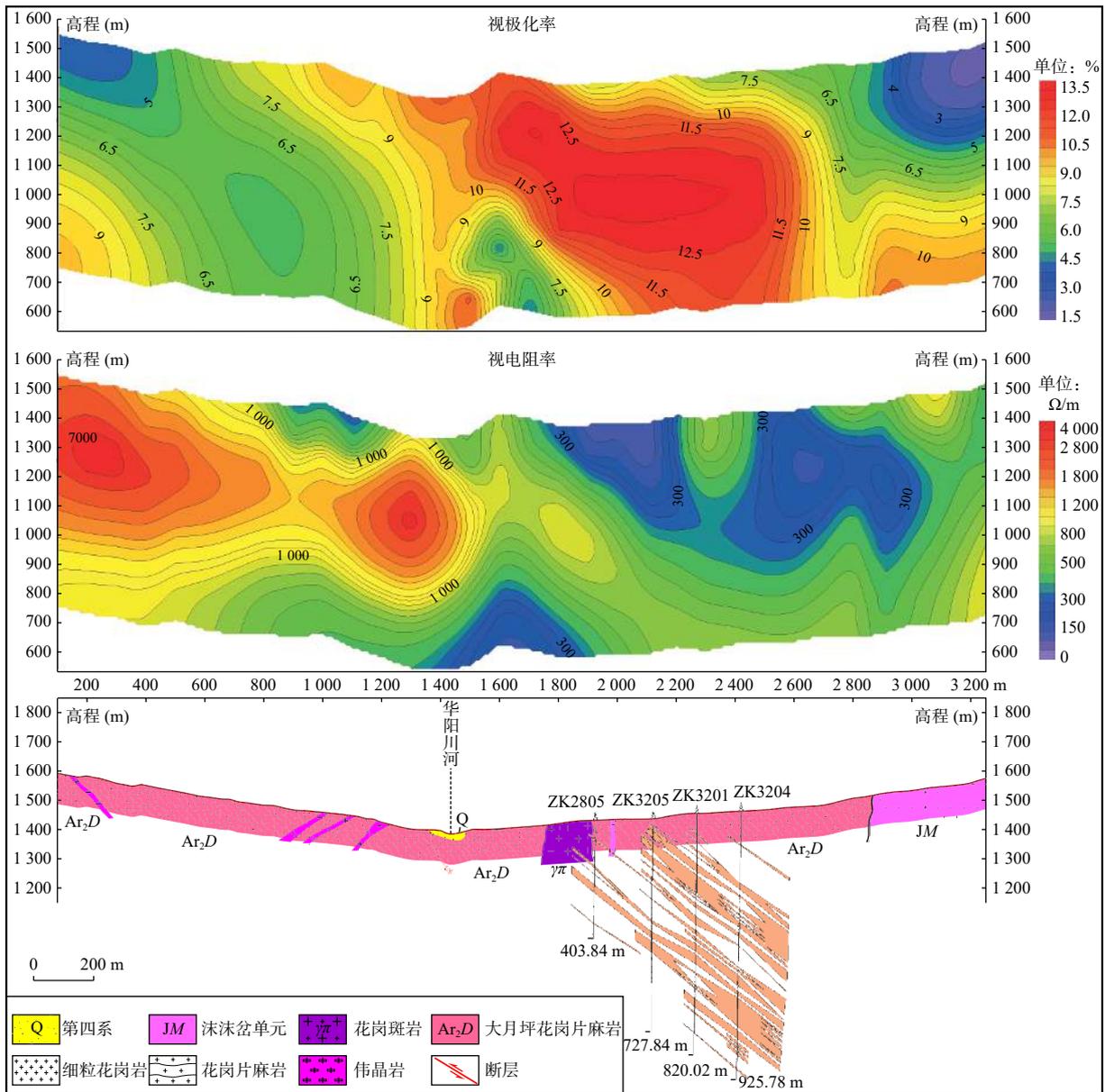


图 10 主试验剖面 SIP 法视极化率、视电阻率反演断面图

Fig. 10 SIP apparent polarization and apparent resistivity inversion section of the main experiment section

(CSAMT)远区测量的限制,把提取视电阻率的观测范围拓展到更大的区域,且具有抗干扰能力强、探测深度大、电性参数较为真实客观等优势,是近几年应用发展较快的一种电磁测深方法。在试验中较精细地反映了深度在 3 000 m 以浅的地质结构,为华阳川矿区深部找矿提供了重要支撑,方法有效性好。同时,由于广域电磁法的人工场源功率大,发射距离远(可 > 15 km),这就使场源布设具有一定的灵活性,受地形影响相对较小,适用性较好。

3.2.7 小结

对地面地球物理方法的有效性及其适用性进行概

括总结如下:

地面伽玛能谱测量对浅表基岩出露区的铀矿找矿工作具有直接的指导作用,是一种直接的铀矿找矿方法,而活性炭氡气测量可辅助用于浅覆盖区的浅层铀矿找矿工作。这两种方法在华阳川地区的铀矿找矿工作中均具有很好的效果,也具有较好的适用性。

地面重力测量和磁法测量工作对圈定岩体,划分控矿构造等具有明显的作用,在华阳川地区铀矿间接找矿方面有较好的应用效果,也具备一定的适用性。

直流激发极化法中的激电中梯测量、激电测深、三维激电测深和频谱激电测深根据装置参数的不同,

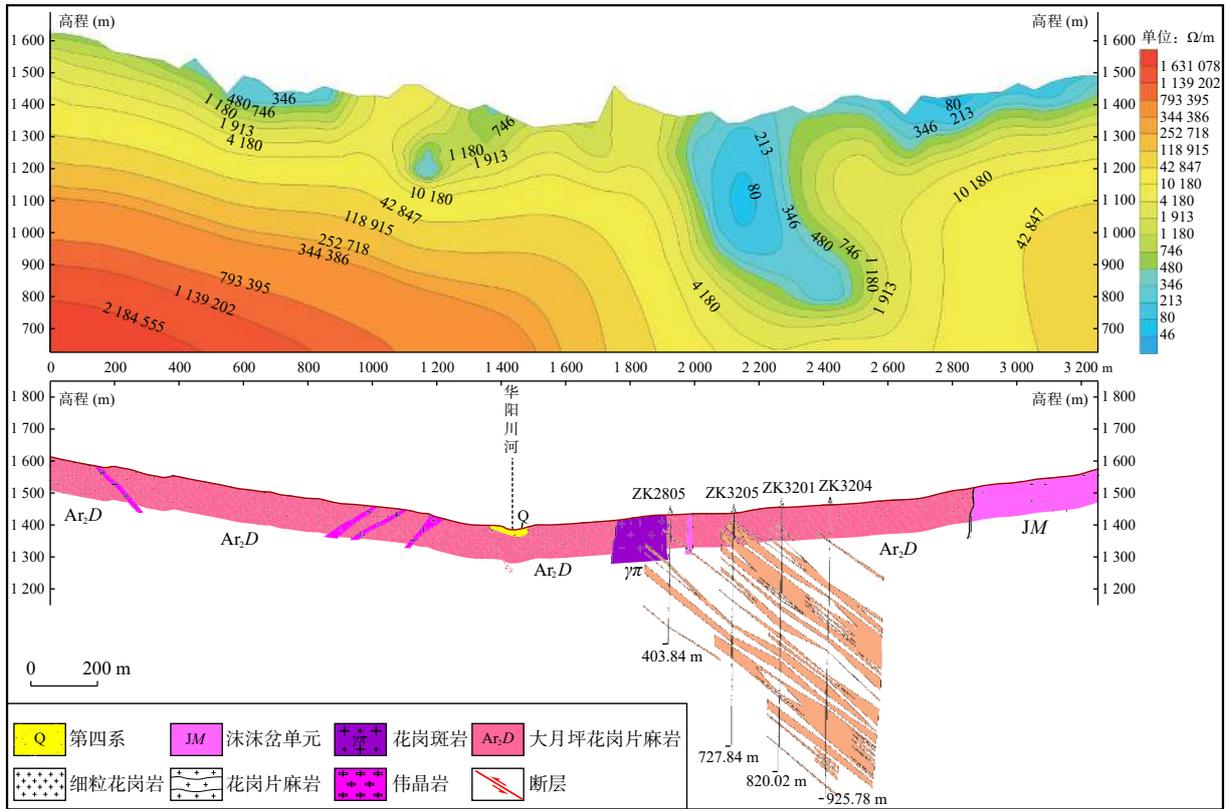


图 11 主试验剖面 AMT 测深二维视电阻率反演结果

Fig. 11 Two dimensional apparent resistivity inversion results of AMT deep structural exploration of the main experiment section

在华阳川地区浅、中部铀矿找矿工作中都具有明显的效果,但受复杂地形条件影响,只有三维激电测深方法的适用性相对较好。

电磁法中的音频大地电磁测深法对华阳川地区中深部铀矿找矿工作具有一定的辅助作用,而且相对来说在该地区较容易实施,适用性较好。

广域电磁测深法和大地电磁测深法重点应用于对深部构造的研究方面,可间接地为华阳川地区铀矿找矿工作提供帮助。

4 外围找矿应用效果

为了进一步验证方法的有效性,并希望在华阳川地区铀矿找矿方面有所突破,笔者在对航空地球物理测量成果充分分析研究的基础上,选择了华阳川铀矿西部的黄家沟和东南部的塬头两地进行了示范性勘查工作,下面对这两处的找矿应用效果作以简要介绍。

4.1 黄家沟地区找矿应用效果

黄家沟地区出露的变质岩主要为武家坪片麻岩,经多期构造变形变质作用叠加改造与再造,形成了黑

云斜长片麻岩、含角闪黑云斜长片麻岩、花岗片麻岩、条带状、眼球状黑云斜长片麻岩等多相片麻岩组合,且不同程度发育混合岩化。断裂构造发育,主要断裂构造有上厂断层、苍家坪韧性剪切带,断裂构造控制脉岩展布范围。该地区航空放射性异常较明显,总体呈近东西向展布(图 2)。

黄家沟地区植被较密,沟内第四系覆盖较厚,因此,在地面放射性剖面检查的基础上,首先进行了活性炭氡气测量,结果见图 13。从活性炭氡气测量结果看,该地区有多个氡浓度异常晕,有进一步工作的价值。

该地区地形较复杂,为了克服复杂地形条件下二维激电测量供电电极难以布设的不足,在此开展三维激电测深(DCIP-3D)工作。

三维激电测深与二维激电测深的原理是相同的,前人的工作经验以及本次在主试验剖面上进行的激电测深工作已经证明了激发极化法的有效性。相对于二维激电测深,三维激电测深具有一点供电,多台接收机同时采集数据的优势,大大提高了工作效率,减小了野外工作强度;供电点多,数据量巨大,大大提高了纵向分辨率;不同方位供电提高了横向上的分辨

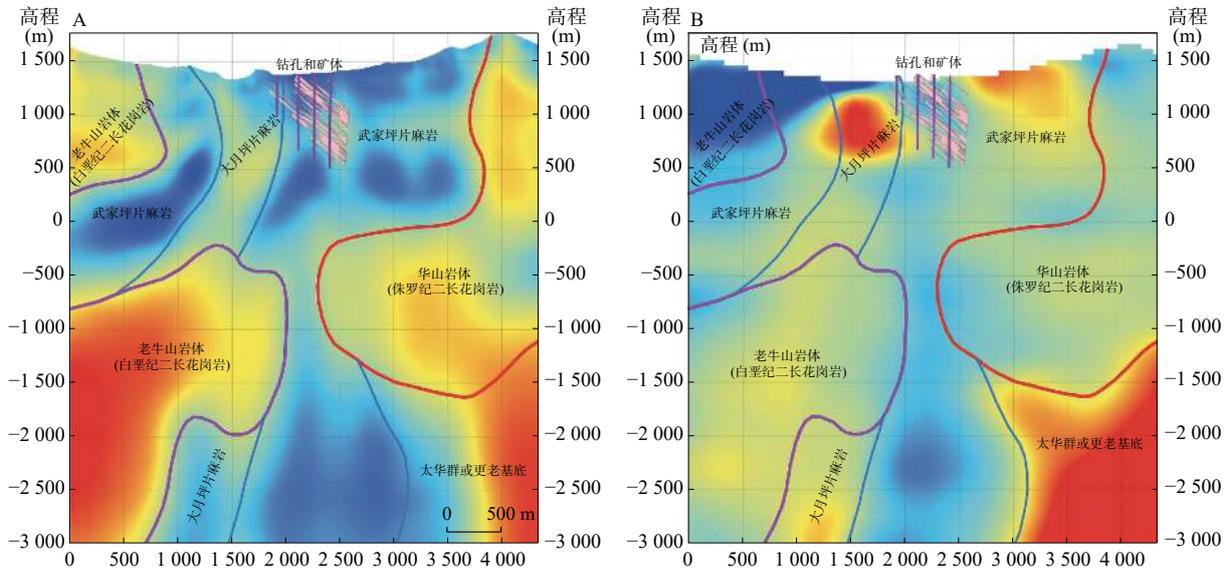


图 12 主试验剖面广域大地电磁视电阻率反演(A)和密度反演(B)结果对比图

Fig. 12 (A) WFEM apparent resistivity inversion and (B) density inversion results comparison of the main experiment section

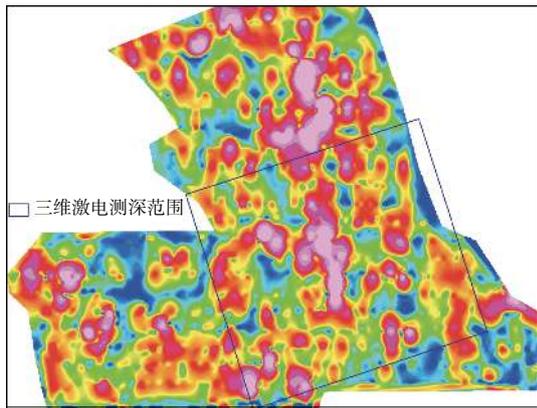


图 13 黄家沟地区氡浓度异常示意图

Fig. 13 Schematic diagram of radon concentration anomaly in huangjiagou area

率;通过带地形的三维反演,对异常地质体的产状、规模、埋深、定位更为准确、直观,是近年来新发展起来的激电测深技术。

黄家沟三维激电测量带地形三维反演结果显示(图 14),黄家沟活性炭氡异常带的深部明显存在一个中阻极高化率的异常区。虽然铀矿石的物性表现为低阻极高化率,但由于其含量很少,电阻率测量结果更多反映的是含矿岩脉及围岩整体的电性特征。结合放射性异常等信息综合分析,推断该激电异常是由铀矿引起的。后经钻探验证,在激电异常区发现累计厚度为 3.4 m、铀品位为 0.035~0.092% 的矿体,铀矿化受碳酸岩网脉控制。

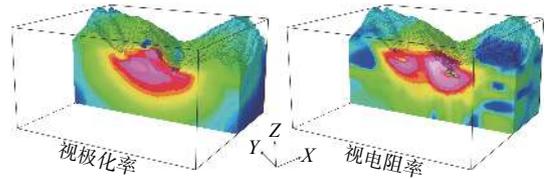


图 14 黄家沟地区三维激电成果示意图

Fig. 14 Schematic diagram of DCIP-3D results in huangjiagou area

4.2 塬头地区找矿应用效果

塬头位于华阳川铀矿区东南、塬头—黄龙铺航空放射性异常区的北端(图 2),该异常区总体呈近北西—南东向展布。

塬头地区出露的变质岩主要为武家坪黑云斜长片麻岩、含角闪黑云斜长片麻岩、花岗片麻岩、条带状、眼球状黑云斜长片麻岩等多相片麻岩组合,不同程度发育混合岩化。断裂构造发育,主要断裂构造有华阳川断裂、小河断裂及秦岭沟推覆断裂,断裂构造控制脉岩展布范围。

该地区航空放射性异常并不是很强,分析认为,该异常区应和华阳川相连,可能是因为第四系覆盖较厚造成航空放射性异常减弱。因此,在该地区首先进行了活性炭氡气测量(图 15)。

从活性炭氡气测量结果看,该地区有多个氡浓度异常晕,主要集中在测量区南北两端,中间具有一定的连通性,有进一步工作的价值。

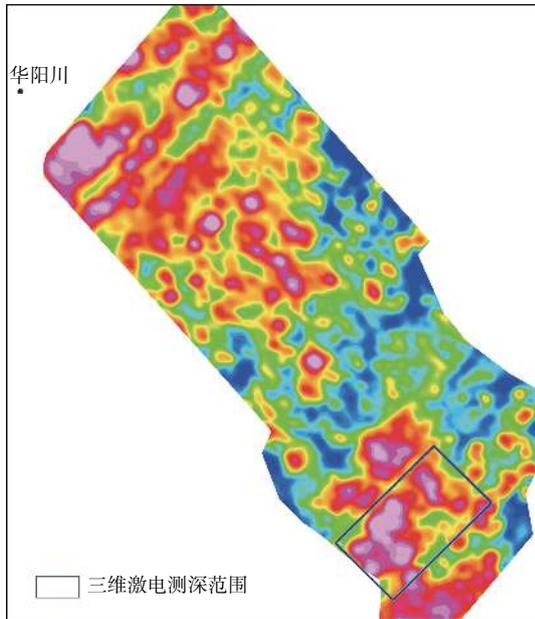


图 15 塬头地区氡浓度异常示意图

Fig. 15 Schematic diagram of radon concentration anomaly in yuantou area

由于受工作量限制,因此只在南部氡浓度异常区选择了异常相对较强的区域开展了三维激电测深工作。

塬头三维激电测量带地形三维反演结果显示(图 16),南部氡异常带的深部明显存在低阻高极化率的异常区,低阻区与高极化区具有较强的对应关系,推断有金属硫化物矿物存在。

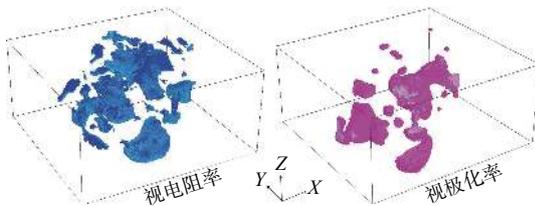


图 16 塬头地区三维激电成果示意图

Fig. 16 Schematic diagram of DCIP-3D results in yuantou area

通过与黄家沟地区的三维激电测量结果对比可见,黄家沟地区的激电异常为中高阻高极化特征,钻探验证可见铀矿体外围伴生有大量黄铁矿,但含量并不高,只是在局部相对富集(视电阻率异常图中部带状红色相对低阻异常区域)(图 14),而塬头地区电阻率相对较低,预示该地区金属硫化物含量可能更高,矿物联通性更好。

由于受环保政策调整影响,塬头地区激电异常未能进行钻探验证,但结合构造特征、放射性异常特征及激电异常特征综合分析,笔者认为该地区应具有较

好的铀矿找矿前景,因此将此地圈定为一处铀矿找矿靶区,以期进一步工作验证。

5 地球物理协同勘查方法技术组合

由于铀矿勘查的特殊性,采用单一的地球物理勘探方法,对隐伏硬岩型铀矿的找矿工作,尤其是困难地区的隐伏铀矿找矿工作是很难起到效果的,必须采用多方法协同勘查才有可能达成勘探目的。因此,笔者在对航空、地面、井中多种地球物理勘查方法的有效性及应用性试验的基础上,通过筛选有效的地球物理勘查技术方法,提出了复杂条件下隐伏硬岩型铀矿不同找矿勘查阶段的地球物理勘查技术组合。

隐伏硬岩型铀矿找矿的地球物理勘查过程大致划分为铀矿找矿有利区阶段、找矿靶区优选阶段、钻探验证及深部找矿阶段等 3 个阶段。

5.1 铀找矿有利区阶段

这一阶段的工作目标是对勘查区(尤其是新区)的地质构造背景进行研究,利用航空重、磁资料及已有地质资料构建区内三维地球物理-地质模型,结合航空放射性信息以及成矿规律和成矿类型研究结果,划分勘查区内具有找矿前景的区段,为下一步工作提供依据。

该方法技术组合为航空重力/磁法综合测量、航空伽玛能谱/磁法综合测量及少量的地面重力测量、少量的广域电磁测深或音频大地电磁测深剖面。

该阶段工作流程见图 17,具体说明如下:

对于新的研究区来说,铀矿找矿工作是一个由面到点的过程,因此,该阶段的工作以航空重力/磁法综合测量和航空伽玛能谱/磁法综合测量为主,目的是利用航空地球物理测量适用性好、工作效率高、效费比高的优势,快速获取地质构造研究所需的重、磁数据以及对寻找铀矿有重要作用的放射性数据,配合先进的数据处理方法技术,以达到快速勘查,快速圈定靶区的目的。

可视研究区具体情况开展少量广域电磁测深或音频大地电磁测深剖面工作,目的是对关键位置的深部构造特征进行控制,为重、磁联合反演解释和建立三维地球物理-地质模型提供约束条件。

由于目前在复杂地形条件下的航空重力测量受高强度干扰下信噪分离技术及相应的地形改正技术尚不完善的影响,其分辨率尚不能完全满足以找矿为

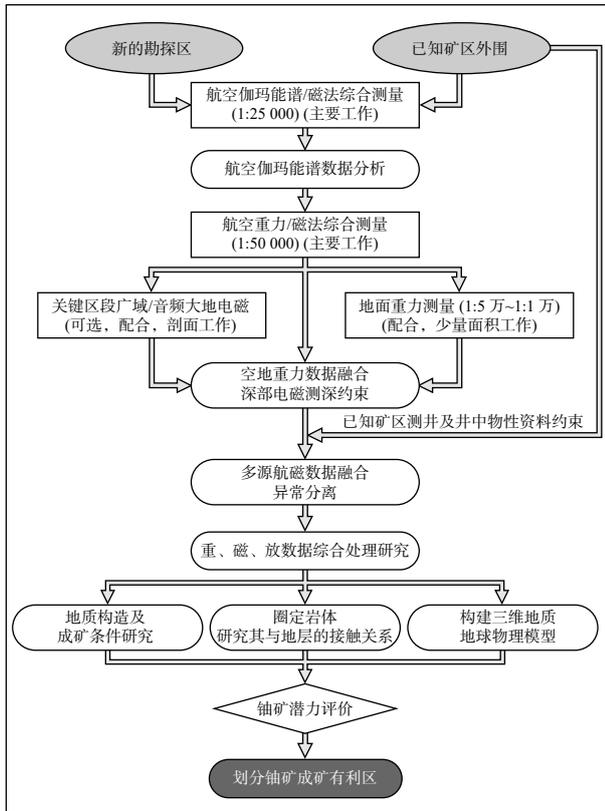


图 17 划分铀矿找矿有利区阶段地球物理协同勘查工作流程

Fig. 17 Geophysical collaborative exploration work flow for dividing the stage of uranium ore forming favorable areas

目的的地质构造背景研究需要, 因此, 需在一些关键区域开展少量的地面重力测量工作, 通过空-地数据融合技术提高关键区域重力数据的分辨率。

在前期基础地质资料研究和野外实地踏勘的基础上, 该阶段工作应统一部署, 同步完成, 以提高工作效率, 达到快速勘查的目的。

对于已知矿区的外围找矿工作来说, 如果前期工作程度高, 外围地质构造情况清楚, 可跳过利用航空重磁资料研究地质构造的阶段, 直接开展航空伽玛能谱/磁法综合测量工作, 以节约成本, 提高找矿速度。

5.2 找矿靶区优选阶段

该阶段的目标是对第一阶段划分的成矿有利区进一步进行研究, 通过航空地球物理和地面地球物理相结合的方法圈定找矿靶区。

该阶段针对不同成矿类型及不同地貌特征有不同的方法技术组合。总体的方法技术组合为地面放射性测量(针对基岩裸露区)或土壤氡气测量(针对第四系覆盖区)、三维激电测量(针对混合伟晶岩脉型矿)

或三维激电测量加地面重磁剖面测量(针对断裂破碎带控制碳酸岩脉型矿)。

该阶段工作流程见图 18, 具体说明如下:

对第一阶段划分出的铀矿成矿有利区段, 视地表情况(基岩裸露区或第四系覆盖区)选择地面放射性测量或活性炭氡气测量方法进一步聚焦含矿岩脉的具体位置。

通过三维激电测量或三维激电测量加地面重磁剖面测量工作进一步研究含矿岩脉深部分布情况, 圈定铀矿找矿靶区。

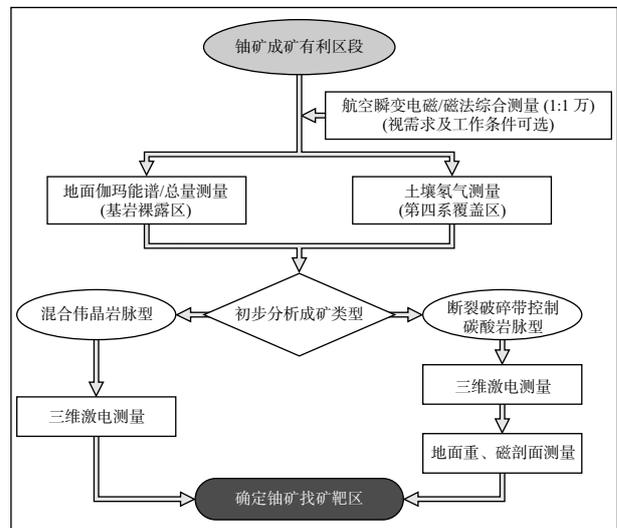


图 18 找矿靶区优选阶段地球物理协同勘查工作流程

Fig. 18 Work flow of geophysical cooperative exploration in the optimization stage of prospecting target area

5.3 钻探验证及深部找矿阶段

该阶段的主要目标是对圈定的找矿靶区进行钻探验证, 在验证的基础上通过测井及井中地球物理工作, 结合深部探测方法, 进一步了解井旁及深部赋矿的前景, 必要时进一步进行钻探验证。

该阶段的方法技术组合为地球物理测井(含放射性、磁化率、极化率、电阻率)、井中激电(包括井中方式、地-井方式、井-地方式, 视孔内情况可选)、激电或电磁测深(包括频谱激电测深、音频大地电磁测深或广域电磁测深, 视勘探目标深度选择)。

该阶段工作流程见图 19, 具体说明如下:

在钻探验证的基础上, 以地球物理测井为主, 视孔内情况可选井中激电测量, 也可选择地-井方式或井-地方式进行激电测量。

在见矿的基础上, 可进一步开展深部找矿工作, 选择的方法主要是激电测深或电磁测深(视目标深度

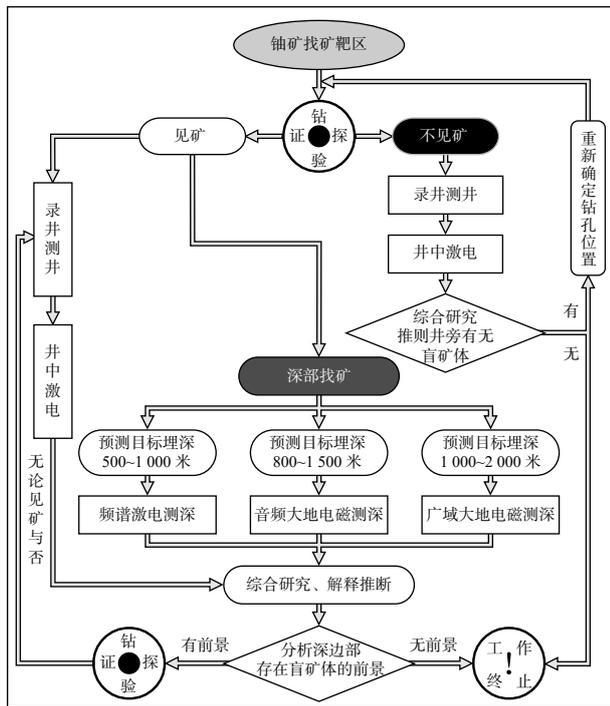


图 19 钻探验证及深部找矿阶段地球物理协同勘查工作流程

Fig. 19 Work flow of geophysical cooperative exploration in the stage of drilling verification and deep prospecting

确定方法)。

需要说明的是,由于华阳川矿区位于韧性剪切带上,岩石破碎,受孔内条件制约,笔者只进行了井中物性测量和部分伽玛能谱测井,没有能完成其他井中地球物理方法试验,可见其他井中地球物理方法在该地区适用性不好。但是,由物性条件及地面地球物理方法试验结果可知,井中三分量磁测和井中激电测量等方法应是有效的,因此,仍然把测井和井中激电列为可选择的工作手段之一,并认为该阶段一定要重视地球物理测井和井中地球物理工作,条件允许时务必实施,可提供井旁及井底的找矿信息,避免钻孔一孔之见的不足。

6 结语

现阶段,中国经济和社会持续快速发展,对能源和矿产资源的需求十分巨大。随着国内地表矿产的逐渐枯竭,寻找隐伏矿产资源已成为国家重大的战略需求。目前,矿产勘查工作重点已向占国土面积一半以上的各种覆盖区及复杂条件区转移。在复杂地形区,地质、构造环境复杂,往往是成矿的有利区域,然

而,受地形地貌条件限制,地面地球物理工作难度越来越大,且效率低下,成本高昂,越来越难以满足复杂地形区矿产勘查工作需要。任务的需求使得开展复杂条件下航空地球物理探测方法的适用性和有效性研究,解决在复杂条件区开展航空地球物理调查工作的技术难题成为迫切需要。

笔者在华阳川铀矿区进行了航空、地面地球物理勘查方法的试验与示范,并结合地质剖面调查,钻探、地球物理测井工作,验证了上述方法在复杂地形条件下铀矿资源勘查中的有效性和适用性。经过试验证明,在复杂地区铀矿找矿工作中,航空地球物理方法在工作效率、适应性、数据密度等方面都远远优于地面相应的地球物理方法。虽然,航空地球物理方法中的一些方法目前还不能达到地面地球物理方法的探测深度及分辨率,但这是以目前国内航空地球物理的技术水平为前提得到的结论,并不代表将来还是这样。随着各种航空器物理探测仪器的小型化、精密化,以及无人机技术的成熟,高分辨率、超高分辨率航空物探技术得到快速发展,航空地球物理的应用将会越来越广泛(熊盛青, 2007, 2009, 2020; 熊盛青等, 2018; 高维等, 2016)。

随着矿产勘查工作的难度越来越大,多方法组合进行矿产勘查是必然的发展方向(吕庆田等, 2019)。在上述各种航空、地面地球物理方法有效性及适用性试验的基础上,筛选出了隐伏硬岩型铀矿不同勘查阶段的地球物理勘查方法技术组合,为华阳川复杂地形条件区隐伏硬岩性铀矿的找矿突破提供了勘查方法技术支持,可作为秦岭华阳川地区隐伏硬岩型铀矿地球物理勘查工作的指导,对其他复杂条件区的隐伏铀矿勘查工作及其他隐伏金属矿的勘查工作也具有参考价值。

笔者重点介绍了经筛选认为对华阳川地区隐伏硬岩型铀矿找矿工作具有一定效果的地球物理方法,以及在此基础上构建的不同勘查阶段的地球物理方法技术组合和工作流程,对于经筛选认为效果不佳或适用性不好而被淘汰的方法则没有介绍。

前文提出的每一种方法,在华阳川地区这种复杂地形条件下,都涉及到复杂的施工技术、外部改正技术和数据处理技术,由于篇幅关系,本研究中未一一展开介绍。同时,地球物理方法技术是在不断快速发展的,部分被淘汰的方法是因为在目前的水平下受其后续的数据处理方法制约导致没有达到预期的

目标,但随着处理技术的进步,现在被淘汰的方法也许未来更有效。而且,数据处理方法本身并无一定之规,因此,笔者介绍的方法及技术组合对复杂地形条件下的隐伏硬岩型铀矿及类似条件下其他金属矿产勘查虽具有一定的指导意义和参考价值,但希望读者不拘泥于此。

参考文献(References):

- 蔡煜琦,张金带,李子颜,等.中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J].*地质学报*,2015,89(6):1051-1069.
- CAI Yuqi, ZHANG Jindai, LI Ziyang, et al. Outline of Uranium Resources Characteristics and Metallogenetic Regularity in China[J].*Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 1051-1069.
- 范正国,于长春.航空伽马能谱地形改正新方法及应用[J].*物探与化探*,2005,29(1):28-30.
- FAN Zhengguo, YU Changchun. A New Terrain Correction Technique In Air-Borne Gamma-Ray Spectrometer Survey And Its Application[J].*Geophysical & Geochemical Exploration*, 2005, 29(1): 28-30.
- 冯伟华,余鹏涛,彭海练,等.陕西小秦岭金矿成矿流体特征及成矿过程研究[J].*西北地质*,2021,54(2):149-156.
- FENG Weihua, SHE Pengtao, PENG Hailian, et al. Study on the Ore-forming Fluid Characteristics and Process in Xiaoqinling Gold Deposit, Shaanxi Province[J].*Northwestern Geology*, 2021, 54(2): 149-156.
- 高成,康清清,江宏君,等.秦岭造山带发现新型铀多金属矿:华阳川与伟晶岩脉和碳酸岩脉有关的超大型铀-铋-铅-稀土矿床[J].*地球化学*,2017,46(5):446-455.
- GAO Cheng, KANG Qingqing, JIANG Hongjun, et al. A Unique Uranium Polymetallic Deposit Discovered In The Qinling Orogenic Belt: The Huayangchuan Super-Large U-Nb-Pb-REE Deposit Associated With Pegmatites And Carbonatites[J].*Geochimica*, 2017, 46(5): 446-455.
- 高成,康清清,张熊猫,等.华阳川碳酸岩的岩石学特征及铀矿赋存状态[J].*陕西地质*,2015,33(2):10-13.
- GAO Cheng, KANG Qingqing, ZHANG Xiongmao, et al. Uranium Occurrences And Carbonatite Petrology In Huayangchuan[J].*Geology Of Shaanxi*, 2015, 33(2): 10-13.
- 高维,舒晴,屈进红,等.国外航空物探测量系统近年来若干进展[J].*物探与化探*,2016,40(6):1116-1124.
- GAO Wei, SHU Qing, QU Jinhong, et al. New Progress Of Aerogeophysical Techniques Abroad[J].*Geophysical & Geochemical Exploration*, 2016, 40(6): 1116-1124.
- 谷懿,葛良全,熊盛青,等.基于康普顿散射本底扣除的航空 γ 能谱测量谱线比大气氦校正方法[J].*原子能科学技术*, 2014, 48(1): 147-151.
- GU Yi, GE Liangquan, XIONG Shengqing, et al. Spectral-Ratio Radon Background Correction Method In Airborne γ -Ray Spectrometry Based On Compton Scattering Deduction[J].*Atomic Energy Science And Technology*, 2014, 48(1): 147-151.
- 郭培虹,冯治汉,王万银,等.北秦岭华阳川地区重磁三维反演及岩浆岩特征研究[J].*物探与化探*,2021,45(5):1217-1225.
- GUO Peihong, FENG Zhihan, WANG Wanyin, et al. Three-dimensional gravity and magnetic inversion of magmatic rocks in the Huayangchuan, North Qinling area[J].*Geophysical & Geochemical Exploration*, 2021, 45(5): 1217-1225.
- 李怀渊,江民忠,陈国胜,等.我国航空放射性测量进展及发展方向[J].*物探与化探*,2018,42(4):645-652.
- LI Huaiyuan, JIANG Minzhong, CHEN Guosheng, et al. The Brilliant Achievements And Technological Innovation Of Airborne Radioactivity Survey In China[J].*Geophysical & Geochemical Exploration*, 2018, 42(4): 645-652.
- 李娟,仲星,高云.陕西省铀矿矿床类型及成矿模式研究[J].*矿产勘查*,2018,9(6):1094-1098.
- LI Juan, ZHONG Xing, GAO Yun. Mineralization Styles And Deposit Types Of Uranium In Shaanxi Province[J].*Mineral Exploration*, 2018, 9(6): 1094-1098.
- 李文勇,周坚鑫,周锡华,等.航空重力局部异常地质成因分类及找矿意义[J].*地球科学进展*,2010,25(10):1061-1069.
- LI Wenyong, ZHOU Jianxin, ZHOU Xihua, et al. Geological-Genetic Classification And Prospecting Significance On Local Anomaly Of Airborne Gravimetry[J].*Advances In Earth Science*, 2010, 25(10): 1061-1069.
- 刘兴忠,周维勋.中国铀矿省及其分布格局[J].*铀矿地质*,1990,6(6):326-337.
- LIU Xingzhong, ZHOU Weixun. Uranium Provinces in China And Their Distribution Patterns[J].*Uranium Geology*, 1990, 6(6): 326-337.
- 吕庆田,张晓培,汤井田,等.金属矿地球物理勘探技术与设备:回顾与进展[J].*地球物理学报*,2019,62(10):3629-3664.
- LV Qingtian, ZHANG Xiaopei, TANG Jingtian, et al. Review On Advancement In Technology And Equipment Of Geophysical Exploration For Metallic Deposits In China[J].*Chinese Journal Of Geophysics*, 2019, 62(10): 3629-3664.
- 彭大明.秦岭铀资源研究[J].*铀矿地质*,1999,15(3):149-160.
- PENG Daming. Investigation On Uranium Resources Of Qinling Region[J].*Uranium Geology*, 1999, 15(3): 149-160.
- 秦明宽,李子颖,刘章月.铀资源勘查技术新深度[J].*中国核工业*,2017,(11):32-34.
- 万建华,熊盛青,范正国.航空伽马能谱测量方法技术现状与展望[J].*物探与化探*,2012,36(3):386-391.

- WAN Jianhua, XIONG Shengqing, FAN Zhengguo. The Status And Prospects Of Airborne Gamma-Ray Spectrometry Technology And Its Application[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2012, 36(3): 386-391.
- 万骏, 刘庆成, 于长春, 等. 复杂地形条件下航空伽马能谱地形改正方法探讨[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(2): 344-348.
- WAN Jun, LIU Qingcheng, YU Changchun, et al. A Study On The Method Of Terrain Correction For Airborne Gamma-Ray Spectrometry Under Complex Conditions[J]. *Chinese Journal Of Geophysics*, 2004, 47(2): 344-348.
- 王江波, 李卫红, 惠争卜, 等. 陕西华阳川铀钍铅矿床地质特征[J]. *矿物学报*, 2013, 33(S2): 248-249.
- 王静波, 熊盛青, 周锡华, 等. 航空重力测量系统研究进展[J]. *物探与化探*, 2009, 33(4): 368-373.
- WANG Jingbo, XIONG Shengqing, ZHOU Xihua, et al. The Advances In The Study Of The Airborne Gravimetry System[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2009, 33(4): 368-373.
- 王军礼. 陕西省铀矿床类型、矿化特征及找矿方向[J]. *陕西地质*, 2018, 36(1): 9-13.
- WANG JunLi. Deposit Types, Mineralization And Ore Prospecting Of Uranium In Shaanxi Province[J]. *Geology Of Shaanxi*, 2018, 36(1): 9-13.
- 吴慧山, 谈成龙. 放射性(核)地球物理勘查的进展[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(Z1): 429-436.
- WU Huishan, TAN Chenglong. Advance In Radioactive (Nuclear)Geophysical Exploration[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1994, 37(Z1): 429-436.
- 肖云, 夏哲仁. 航空重力测量中载体运动加速度的确定[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(1): 62-67.
- XIAO Yun XIA Zheren. Determination Of Moving-Base Acceleration In Airborne Gravimetry[J]. *Chinese Journal Of Geophysics*, 2003, 46(1): 62-67.
- 熊盛青, 周锡华, 薛典军. 航空地球物理综合探测理论技术方法装备应用[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- 熊盛青. “十五”以来我国航空物探进展与展望[J]. *物探与化探*, 2007, 31(6): 479-484.
- XIONG Shengqing. The Advances Of Aerogeophysical Survey In China Since The Tenth Five Year Plan And Its Development Trend[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2007, 31(6): 479-484.
- 熊盛青. 发展中国航空物探技术有关问题的思考[J]. *中国地质*, 2009, 36(6): 1366-1374.
- XIONG Shengqing. The Strategic Consideration Of The Development Of China's Airborne Geophysical Technology[J]. *Geology in China*, 2009, 36(6): 1366-1374.
- 熊盛青. 航空地球物理勘查科技创新与应用[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(5): 791-818.
- XIONG Shengqing. Innovation And Application Of Airborne Geophysical Exploration Technology[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(5): 791-818.
- 张金带, 李子颖, 蔡煜琦, 等. 全国铀矿资源潜力评价工作进展与主要成果[J]. *铀矿地质*, 2012, 28(6): 321-326.
- ZHANG Jindai, LI Ziyang, CAI Yuqi, et al. The Main Advance And Achievements In The Potential Evaluation Of Uranium Resource In China[J]. *Uranium Geology*, 2012, 28(6): 321-326.
- 张熊猫, 陈冰, 陈军等. 北秦岭华阳川地区铀矿物质来源[J]. *地质通报*, 2023, 42(3): 1671-1684.
- ZHANG Xiongmao, CHEN Bing, CHEN Jun, et al. Source of uraniumminerals in Huayangchuan area of North Qinling[J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(3): 1671-1684.
- 赵廷严, 杨海, 贾志业, 等. 航空物探指导华阳川地区铀矿找矿工作取得突破[J]. *地质论评*, 2020, 66(1): 132-134.
- ZHAO Tingyan, YANG Hai, JIA Zhiye, et al. A breakthrough in Uranium prospecting achieved by an airborne geophysical survey in Huayangchuan[J]. *Geological Review*, 2020, 66(1): 132-134.
- 仲星, 高云, 李娟, 等. 陕西省铀资源勘查现状——问题、思路与对策[J]. *矿产勘查*, 2019, 10(4): 898-900.
- ZHONG Xing, GAO Yun, LI Juan, et al. Current Situation Of Uranium Resources Exploration In ShaanxiProvince: Problems, Thought And Countermeasure[J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(4): 898-900.