第 37 卷　第 1 期
2022 年 3 月：103 - 110

地　质　找　矿　论　丛
Contributions to Geology and Mineral Resources Research

Vol. 37　No. 1
Mar. 2022：103 - 110

doi：10.6053/j.issn.1001 - 1412.2022.01.014

综合地球物理勘探在夏日哈木矿区的应用研究

王仔章[1]，刘铭[2,3]

（1.河南中核五院研究设计有限公司，郑州 450052；
2.山东省鲁南地质工程勘察院，山东 济宁 272008；
3.山东省地勘局第二地质大队，山东 济宁 272008）

摘要： 文章通过选用高精度磁测剖面测量、激电中梯剖面测量、高精度重力剖面测量、可控源音频大地电磁测深等方法对青海省夏日哈木铜镍矿床开展地球物理方面的研究，探讨各种物探手段对该区矿床勘查的有效性及适用性，丰富区内物探资料，为区内同类型矿床勘查提供借鉴。研究表明，高精度磁测剖面测量在大范围寻找矿体较为有效，但难以表达矿体的形态特征；激电中梯剖面测量中极化率曲线能准确定位矿体的位置、显示矿体的规模，在一定程度上反映矿体的展布特征；高精度重力剖面测量中布格重力曲线与剩余异常曲线均能表现相对高异常，异常曲线在一定程度上反映矿体的位置及大致规模；可控源音频大地电磁测深方法对铜镍矿床进行勘查时，能较为准确地反映矿体的深部特征，尤其是反射系数图，能准确对深部盲矿体进行表达。

关键词： 地球物理勘探；铜镍矿床；夏日哈木矿区；青海省

中图分类号： P631　**文献标识码：** A

0　引言

青海地区是我国重要的有色金属产地之一，矿产资源十分丰富，仅在昆仑造山带就发现大量金属矿产，该区有良好的找矿前景[1]。随着地质工作的不断深入，昆仑造山地区的找矿有了许多发现，2013 年首次在昆仑造山带中发现超大型岩浆熔离型铜镍矿床；2017 年夏日哈木铜镍矿床被发现，先后圈出 10 余条矿体，镍资源量预计达到 10.7×10^4 t，伴生有铅、钴等，矿产资源潜力巨大[2]。

夏日哈木铜镍矿床成矿条件好、规模大，备受国内外学者的关注，但研究主要集中在对矿区成矿时代、矿床成因、成矿地质特征及矿石地质特征等方面；已有研究认为，矿床形成于早-中泥盆世板块碰撞伸展环境，具有岩浆熔离型成矿特点，矿石类型主要有块状、星点状及海绵陨铁状等[3-7]。

地球物理勘探在金属矿床勘查中发挥的作用越来越重要，其主要手段包括：重、磁、电、震。不同的物探手段由于原理不同，所解译出的物探信息各不相同，对矿体的反映可能会存在差异。由于地球物理勘探投入较大，勘查手段的误用不仅会浪费大量的资金，甚至误导找矿方向。前人对夏日哈木铜镍矿区地球物理方面的研究相对较少，极大地制约了区域找矿工作。笔者通过对夏日哈木铜镍矿床开展综合地球物理勘探研究，探讨不同物探手段对矿体勘查的有效性，为区内同类型矿床及周边矿床勘探提供借鉴。

1　成矿地质背景

研究区位于华北地层大区，东昆仑—中秦岭造山带分区，柴达木南缘地层小区（图 1）。

东昆仑造山带自古生代以来，经历多阶段的构

收稿日期： 2021 - 02 - 25；　**责任编辑：** 沈名星

基金项目： 青海省地矿局项目（编号：2014 - 56）资助。

作者简介： 王仔章（1986—），女，硕士，地质工程师，毕业于中国地质大学（武汉），从事矿产勘查与地质工程方面工作。通信地址：河南省郑州市二七区中原东路 96 号，河南中核五院研究设计有限公司；邮政编码：450000；E-mail：1797988039@qq.com

造演化，形成了一系列的地质单元(体)，如：东昆仑北带弧后盆地、东昆仑南带古洋盆及东昆仑中带岛弧带，夏日哈木铜镍矿区产于东昆仑中带岛弧带[6]内；该区地层较为简单，但区域差异大：东昆仑北带主要以稳定的金水口群为基底，东昆仑南带以活动性的苦海群为基底，东昆仑中带为北带与南带的过渡区。

东昆仑地区构造较为发育，以近 EW 向的构造断裂为主，形成一系列近于平行的深大断裂，组成该区基本的构造格局。东昆仑地区岩浆作用强烈，岩浆岩大面积出露，从前寒武纪至新生代期间持续侵入，且岩浆岩类型较为复杂，从镁铁质-超镁铁质至中性岩浆岩、酸性岩浆岩都有出露；由于受到断裂构造的影响，岩浆岩呈 NWW-SEE 向展布。

夏日哈木铜镍矿区地处东昆仑中隆起带的中部，大地构造位置处于昆中基底隆起的花岗岩带。该区地层出露较为简单，主要由古元古代金水口群及第四系组成。金水口群为一套中深变质大理岩和片麻岩组成，与上部第四系呈角度不整合接触。该区构造较为发育，以断裂为主，具有多期次相互叠加特点；断裂按展布方向可分为 EW 向、NWW 向、NE 向及 NNE 向多组，其中 EW 向与 NEE 向断裂为研究区的主要断裂，控制着区内岩体及矿体的分布。区内岩浆活动频繁且剧烈，主要有晚志留世的镁铁质-超镁铁质杂岩、晚三叠世中酸性岩体等。夏日哈木矿区构造发育，岩浆活动频繁，具有良好的成矿背景。

2　矿体地质特征

夏日哈木矿区 HS26 异常区有矿体多达数百条，其中 M1 为区内主要矿体。矿体多赋存在花岗片麻岩及大理岩中，以层状、似层状、透镜状产出，局部膨大、分枝复合现象明显。矿体的顶板为片麻岩、辉石岩等，底板为大理岩、片麻岩、石英岩。含矿岩石主要为辉石岩和橄榄岩。矿石主要矿物有磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿等硫化物矿物，脉石矿物主要有透闪石、蛇纹石、辉石等。

M1 主矿体长约 1690 m，宽 930 m，最大控制深度 600 m，矿体厚度 1.84～298.76 m，平均厚度为 84.31 m，矿石品位 w(Ni)平均 0.68%、w(Cu)平均 0.16%、w(Co)平均 0.026%。

3　矿体地球物理勘查

3.1　高精度磁法勘探

磁法勘探是通过测试不同岩(矿)石等地质体磁性及磁场差异所引起的磁场变化，分析异常特征、建立异常与地质体之间的内在联系，得出地质体的构造形态或矿产分布规律等相关结论的一种地球物理勘探方法[8]，在金属矿山找矿工作中得到广泛应用。如果磁测总误差≤5 nT，称为高精度磁测[9]。

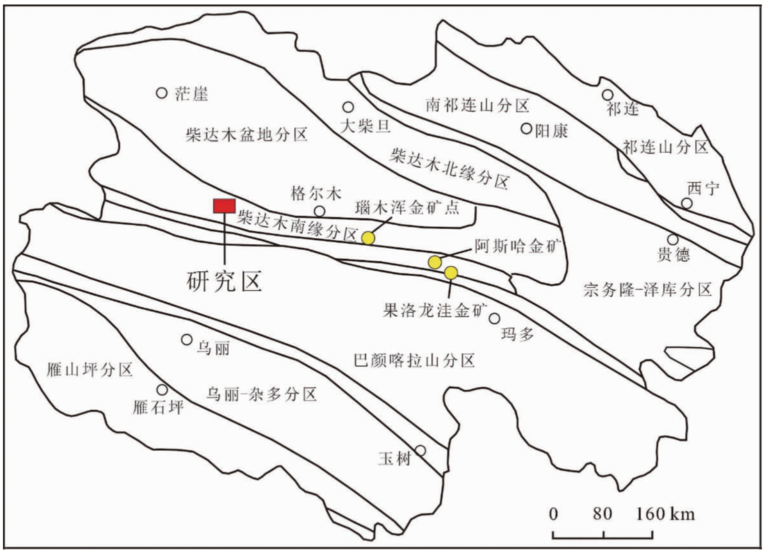

图 1　夏日哈木矿区地质简图

Fig. 1　Geological sketch of Xiarihamu mining area

高精度磁测是岩(矿)石磁性差异的综合体现,包含一系列浅源与深源信息[10]。笔者通过对青海省夏日哈木铜镍矿区第 7 勘探线进行高精度磁测研究,对出现的异常做化极、延拓、求导处理,用以识别矿体的展布特征,确定不同深度产状变化特征等信息。

图 2 为夏日哈木铜镍矿区第 7 勘探线高精度磁测剖面测量结果。通过对异常进行化极、延拓、求导处理,基本消除磁偏角对磁场的影响,能较为准确地反映矿体的实际展布。根据高磁数据处理结果,绘制了第 7 勘探线高精度磁测剖面图。从图 2 可以看出,磁异常剖面大致出现 2 个异常区,分别在 1290 和 1870 处,异常位置较为一致,而磁测梯度异常只出现在 1230 点处。通过磁异常与矿体实际情况对比,磁异常只在含矿岩体埋深较浅或岩性变化较大的部位有明显反映,在矿体埋深较大的部位磁异常特征与围岩的差异不大。这是由于磁场衰减较快,磁异常主要反映的是浅部异常的特性有很大关系。另外,磁梯度异常曲线异常显示较弱,在出现磁异常区域可能有矿体的存在,但是矿体的规模与展布特征无法通过异常曲线进行解释、反演,显然高磁异常对该区岩(矿)体的勘探研究还需进一步讨论。

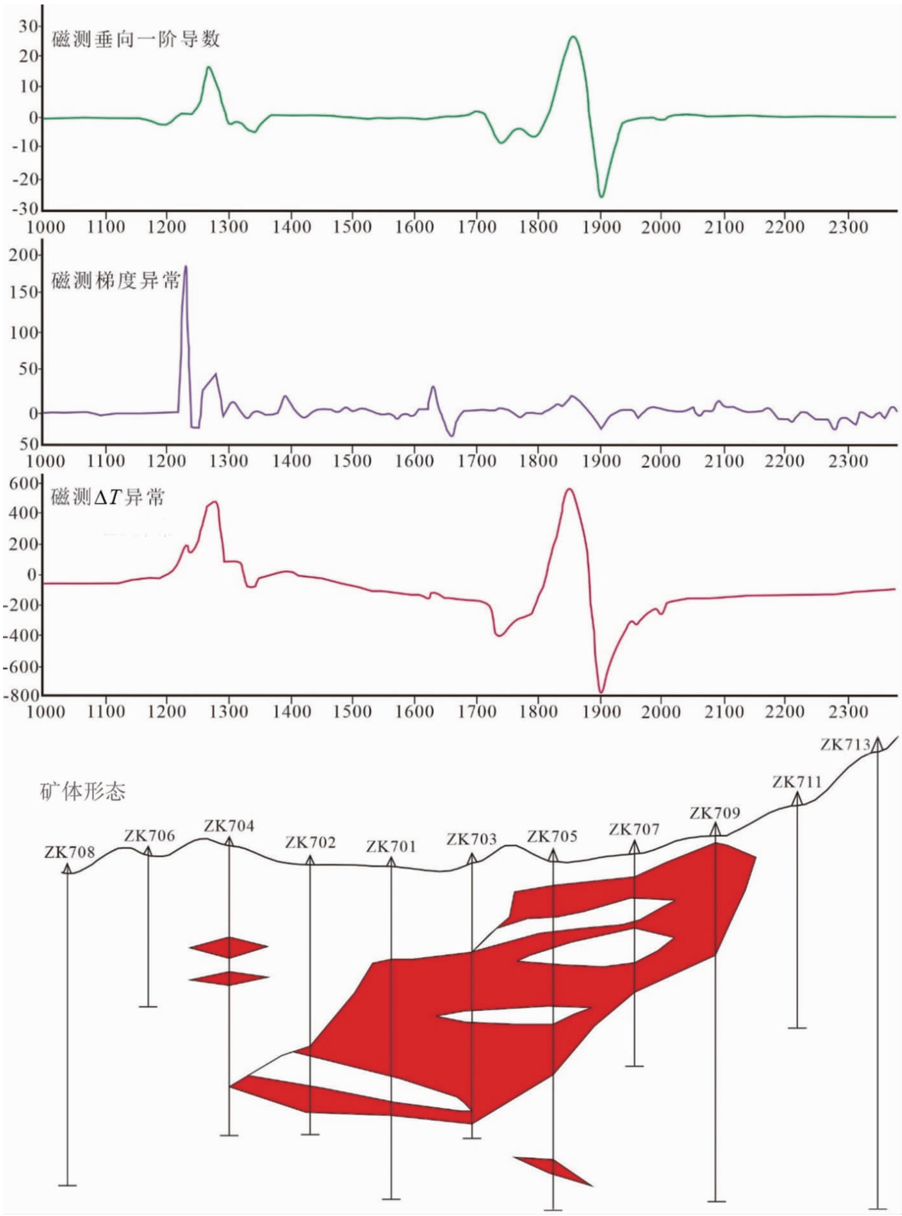

图 2　第 7 勘探线高精度磁测剖面图

Fig. 2　High precision magnetic survey profile measurement section along line 7

综合以往高精度磁测工作成果认为，高精度磁测在大范围内寻找岩体是非常有效的，但由于受到地形、剩磁方向等多种因素作用的影响，地面高精度磁测所获得的地磁场形态相当复杂，如果不对磁测成果进行深入的处理、分析和研究，仅凭 ΔT 磁异常结果就开展深部找矿、探矿工作，其依据较为牵强。因此，高精度磁测工作在该区仅能反映有矿与无矿的区别，对于矿体的规模与展布难以表达。

3.2 激电中梯法勘探

激电中梯法作为电法勘探的一种，由于操作简单且成本低，被广泛应用于金属矿床勘查。激电中梯法以岩(矿)石或水等物质的激发极化效应存在差异为前提，以人工地下直流电为激发条件，研究地质体的激发极化效应，最终识别地下岩(矿)石的分布特征[11-12]。多用于金属硫化物矿床及构造蚀变带型金属矿床的找寻工作[13]。

在向地下供应持续均衡的直流电时，地面 2 个接收(测量)电极间的电位差随时间发生变化，在较短时间内逐步衰减为零。在不断充电与放电过程中，产生一个随时间发生变化的电场称为“激发激化电场”，该效应称为“激发激化效应”。在发射电流的瞬间，由于岩石的电阻率、供电电流等的差异，在 2 个接收电极间会出现电位差，这种由外界产生的人工电位差称为“一次场电位差”。随着电流的持续发射，除一次场电位差外，出现二次电位差，统称为“激化场电位差”。极化率则是二次场电位差/一次场电位差[14-15]。

图 3 为夏日哈木铜镍矿区第 7 勘探线激电中梯剖面测量结果。激电中梯工作使用仪器为 V8 网络化多功能电法仪，发射机为 TXU－30，接收系统为 DJS－8A 型接收机，点距 10 m，电极距 AB＝1800 m，接收极距 MN＝40 m，供电周期为 32 s，断电延

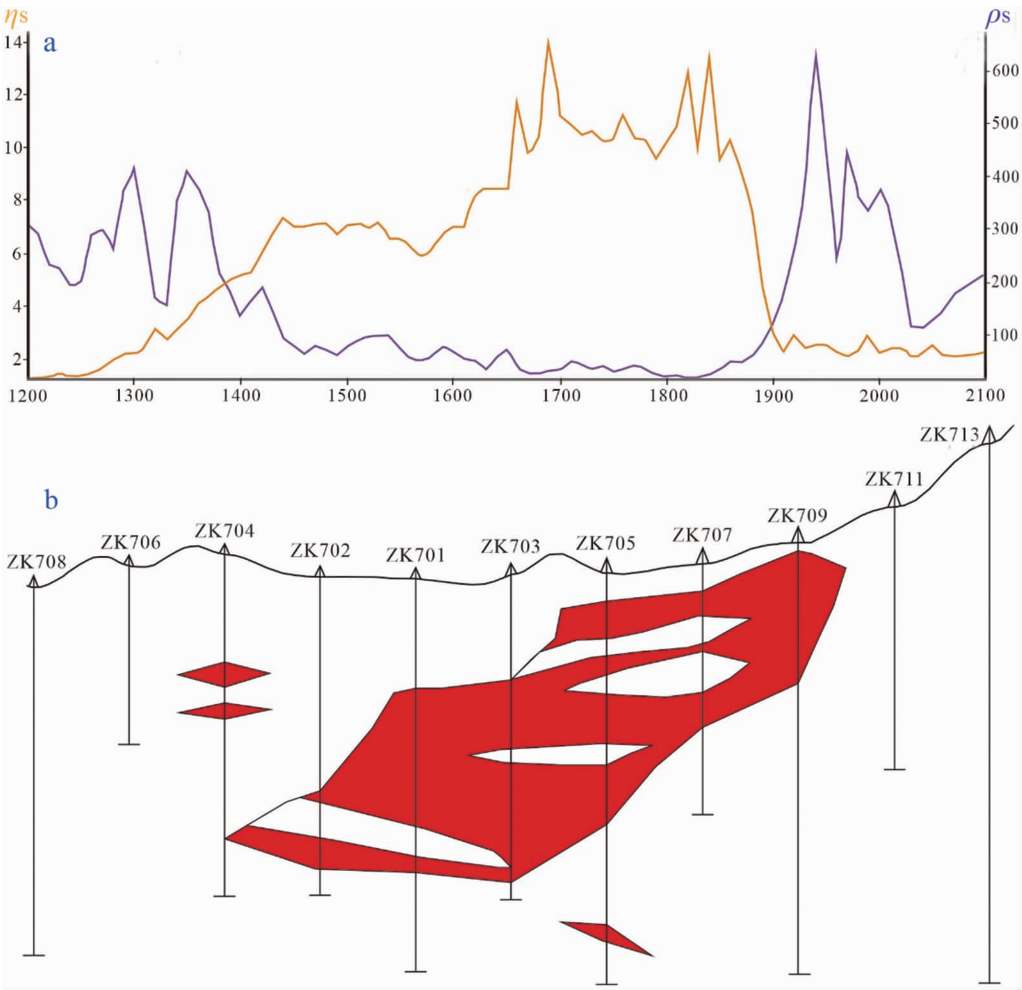

图 3 第 7 勘探线激电中梯剖面图

Fig. 3 IP intermediate gradient profile measurement section along line 7

a. 极化率(ηs)与电阻率(ρs)成果；b. 矿体形态

时为200 ms;经数据处理、绘制得到第 7 勘探线激电中梯剖面图(图 3)。从图 3 可以看出,电阻率(ρs)出现 2 个峰值,呈谷状;在 1400 点至 1900 点的主矿体部位之间,表现出较为平缓的低电阻率曲线,极化率(ηs)出现 2 个峰值;在 1400 点至 1900 点主矿体部位之间,极化率较高。从 1470 点至 1200 点,极化率逐渐减小,暗示矿体的埋深逐渐增大,同时也能反映矿体的倾向等展布特征等。极化率高的部位,电阻率明显降低,成明显的反比关系。同时极化率和电阻率的变化与含矿岩体部位吻合较好,含矿部位表现出低阻高极化的特征。

综上,激电中梯工作能准确定位矿体、显示矿体规模、反映矿体的展布特征。因此,激电中梯方法在矿区勘查中具有良好的适用性,同时低阻高极化特征可作为勘查工作中一个有效的找矿标志。

3.3　高精度重力勘探

重力勘探是以地质体或地质构造与围岩存在着密度上的差异为前提,观测由矿产或构造等密度差异所产生的重力异常,以确定该地质体的空间位置、展布特征及构造形态等信息,从而达到地质勘探的一种地球物理勘探方法。该方法应用范围较广,如矿体勘查、油气勘查以及构造分区、采空区的研究等[16-17]。当目标地质体的密度高于围岩密度时,重力异常通常表现为高重力异常,在剩余异常中多表现为重力的相对正异常[18]。

图 4 为夏日哈木铜镍矿区第 7 勘探线高精度重力剖面测量结果。根据矿区内岩(矿)石的物性特征,铜镍矿石的密度远高于围岩大理岩及片麻岩的密度,当一定规模的矿体埋深较浅时,矿体的重力异常曲线可表现为局部重力高异常,剩余异常曲线也应表现为相对重力正异常;通过重力测试工作,得出了第 7 勘探线重力异常剖面图(图 4)。从图 4 可以看出,布格重力异常曲线与剩余异常曲线较为一致,均能反映矿体的大致部位,但前者能够反映出矿体

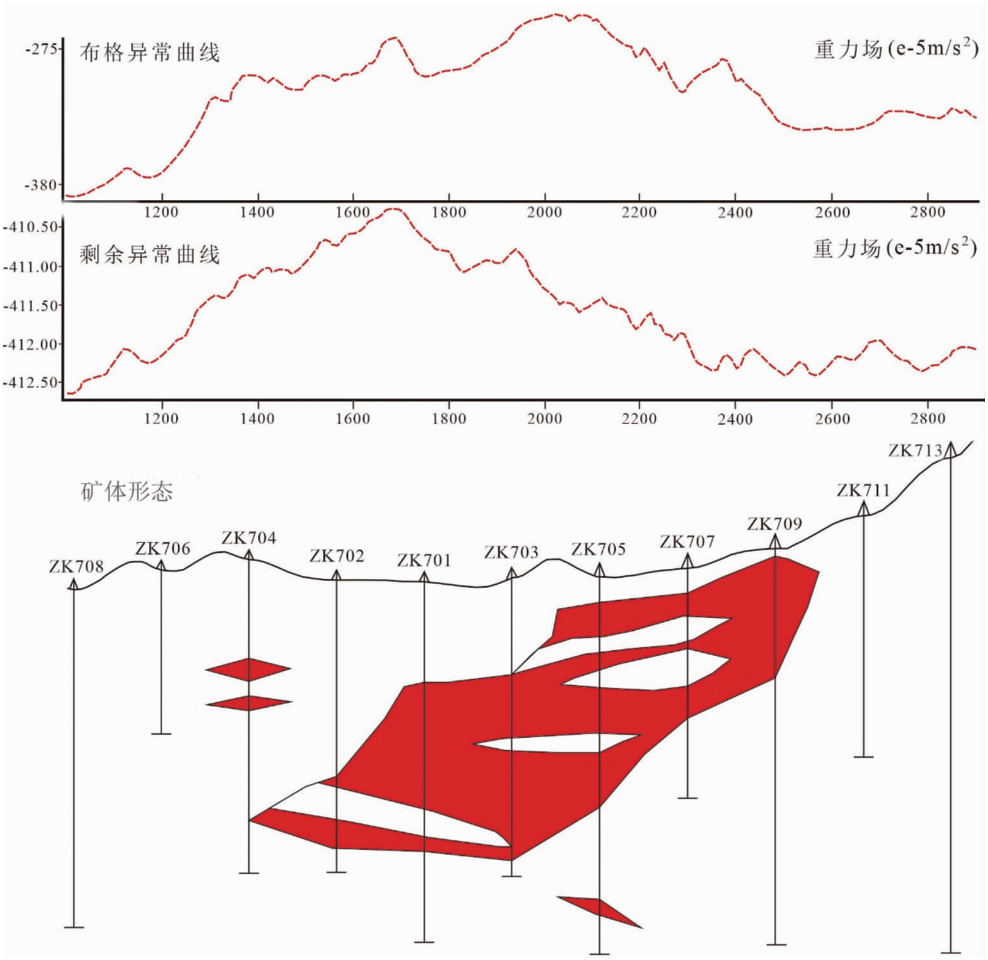

图 4　第 7 勘探线高精度重力异常剖面图

Fig. 4　High precision gravity profile measurement section along line 7

规模等信息。

布格重力表现出 3 个层次的异常，一是平直的异常曲线，表现为 ZK709 至 ZK713 之间的无矿空白区；二是高异常区，表现为 ZK704 至 ZK709 之间的主成矿区；三是异常的下降区，表现为 ZK708 至 ZK704 之间的隐伏矿体或矿体的尖灭部位。剩余异常曲线较为简单，表现为“山峰型”特征，异常的顶峰出现在 ZK702 至 ZK701 之间，该处矿体厚度中等、品位高，局部出现异常的高品位矿石。

综上认为，布格重力曲线与剩余异常曲线都表现出较为一致的高异常，表明在该区矿体的存在能引起明显的重力高异常。从异常曲线可以看出，高精度重力勘探在该区较为适用，异常曲线在一定程度上反映了矿体的成矿部位及规模等信息。

3.4 可控源音频大地电磁测深勘探

可控源音频大地电磁测深(CSAMT)是一种向

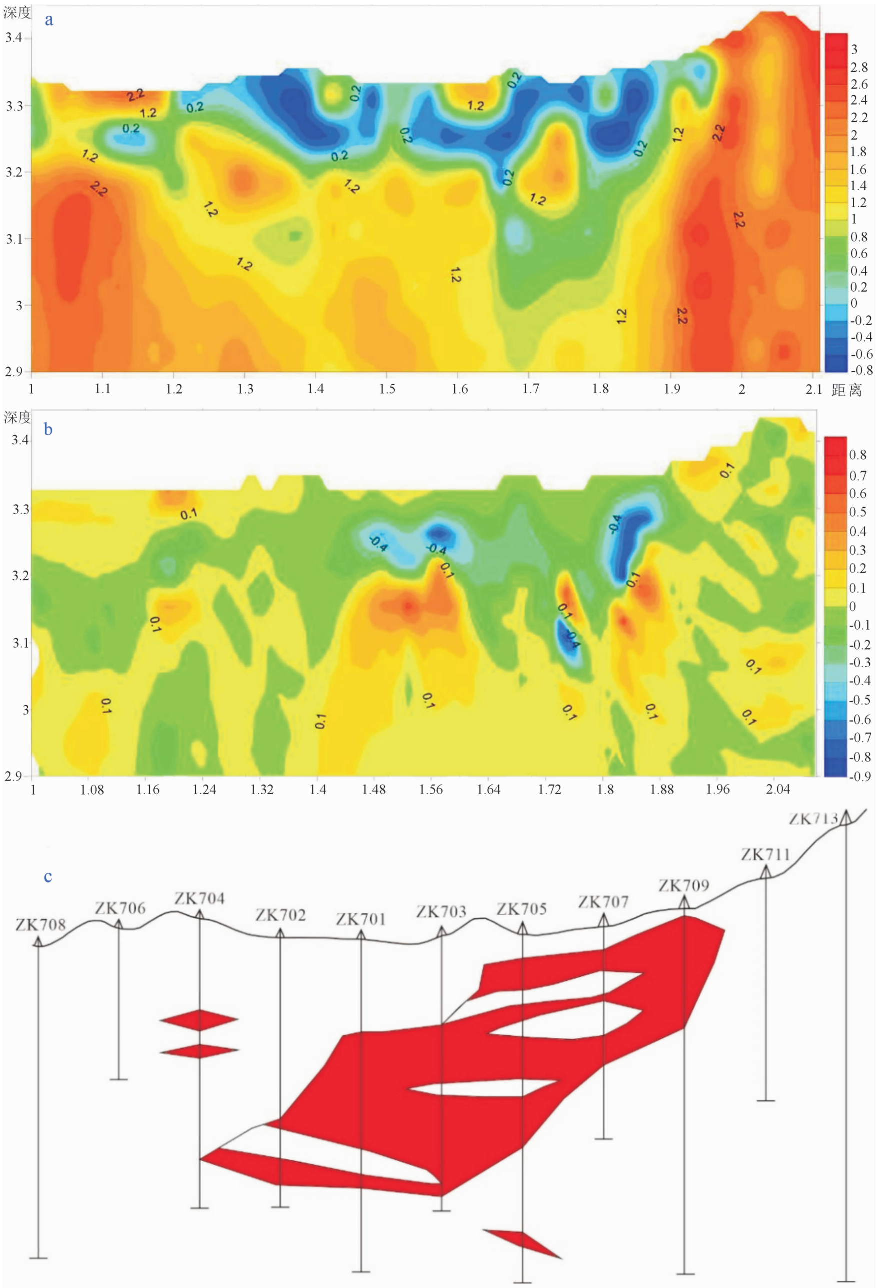

图 5 可控源音频大地电磁测深成果图

Fig. 5 Map showing results of controllable source audio magneto telluric sounding survey along line 7

a. 电阻率反演成果图；b. 反射系数反演成果图；c. 矿体形态

地下深部发射电磁波,电磁波在穿过不同地质体时会产生点位与磁场强度的变化,通过接收器接收这种差异的信息,以此获取不同地质体的赋存特征[19]。可控源音频大地电磁法勘探具有深度大、精度高、分辨率强等优点,被广泛应用于深部矿体的勘查、深部构造位置及产状的推断等,并取得良好的效果[20-21]。

图 5 为夏日哈木铜镍矿区可控源音频大地电磁测深剖面测量结果。此次可控源音频大地电磁测深工作布置在矿区第 7 勘探线上,根据地质特征对其进行解译,得出第 7 勘探线电阻率反演成果图及反射系数反演成果图。从图 5 可以看出,可控源音频大地电磁测深的电阻率及反射系数与含矿岩体有明显的对应关系。电阻率及反射系数在地表都出现低值,反映上部覆盖层的特征,在 1.64 点位至 1.88 点位之间的深处出现电阻率及反射系数低值区,反映矿体出现了无矿天窗。相较于电阻率反演成果图,反射系数反演成果图更能准确地表达出矿体的基本特征,在反射系数反演成果图中的点位 1.24 至 1.96 之间,矿体形态与反射系数形态套合较好。值得注意的是,在反射系数反演成果图中点位 1.16 至 1.24 之间出现一个相对高值区域,较为准确地反映了 ZK704 深部盲矿体的存在。

综上认为,在该区开展可控源音频大地电磁测深工作,所解译出的电阻率反演成果图及反射系数反演成果图能较为准确地反映深部矿体的基本特征,尤其是反射系数反演成果图,对于找寻深部盲矿体效果明显。因此,可控源音频大地电磁测深,是一种可供选择的勘探方法。

4　结论

(1)高精度磁测方法在大范围寻找矿体较为有效,但难以表达矿体的形态特征,仅能反映有矿与无矿的区别。

(2)激电中梯方法对铜镍矿床进行勘查时,极化率曲线能准确地定位矿体位置、显示矿体规模,在一定程度上反映矿体的展布特征。此方法对该类型矿床勘查效果明显。

(3)高精度重力方法对铜镍矿床进行勘查时,布格重力曲线与剩余异常曲线均能表现出相对高异常,异常曲线在一定程度上反映矿体的位置及大致规模。

(4)可控源音频大地电磁测深方法对铜镍矿床进行勘查时,能较为准确地反映矿体的深部特征,尤其是反射系数图,能准确对深部盲矿体进行表达。

参考文献:

[1] 李文渊. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现[J]. 中国地质,2015,42(3):365-380.

[2] 潘彤,李善平,赵呈祥,等. 东昆仑地区夏日哈木铜镍矿床成矿模式及找矿方向[J]. 地质通报,2017,36(7):1276-1287.

[3] 张照伟,钱兵,王亚磊. 东昆仑夏日哈木铜镍矿床 Re-Os 同位素和 PGE 地球化学特征及对成矿作用的指示[J]. 矿床地质,2014,33(S1):651-652.

[4] 易俊年,宋谢炎,陈列锰,等. 东昆仑夏日哈木超大型铜镍钴硫化物矿床地质特征[J]. 矿物学报,2015,35(S1):450.

[5] 杜玮,汤中立,杜玉良,等. 青海夏日哈木铜镍矿床成矿特征及找矿研究[J]. 西北地质,2017,50(3):180-186.

[6] 杜玮,姜常义,凌锦兰,等. 东昆仑夏日哈木铜镍矿床Ⅱ号岩体年代学、地球化学及其意义[J]. 矿床地质,2017,36(5):1185-1196.

[7] 段雪鹏. 东昆仑夏日哈木含铜镍矿镁铁-超镁铁岩成因矿物学研究[D]. 北京:中国地质科学院,2019.

[8] 王龙昌. 高精度磁法测量在深部隐伏矿体勘查中的应用研究[J]. 世界有色金属,2019(18):83-84.

[9] 李富,刘鑫明,廖国忠,等. 地面高精度磁测和电磁测深在矿产调查中的应用[J]. 地球物理学进展,2013,28(1):427-433.

[10] 张晓周,高梓豪,许宗宪. 高精度磁测在第四系覆盖地区寻找金矿靶区的应用:以内蒙古查嘎尔崩金矿为例[J]. 地质找矿论丛,2020,35(4):462-467.

[11] 杨德传,汪磊,李再勇. 激电中梯测量在晴隆丁头山铅锌矿找矿中的应用[J]. 中国地质调查,2017,4(6):89-98.

[12] 张绍栋,吕志斌,雷延祥,等. 高频大地电磁测深与激电中梯在金矿勘查中的应用研究[J]. 矿产勘查,2020,11(4):746-750.

[13] 靳月文,赵明宣. 山西繁峙县后所铅锌矿激电测量应用效果[J]. 中国锰业,2020,38(2):60-66,77.

[14] 汪玉琼. 激电中梯和激电测深在织金新麦铅锌矿区的综合应用[J]. 工程地球物理学报,2008,5(5):551-553.

[15] 钟明峰. 综合物探方法在青海省都兰县哈日扎多金属矿勘查中的应用研究[D]. 长春:吉林大学,2018.

[16] 张虹. 高精度重力资料在老挝甘蒙地区的应用研究[D]. 长春:吉林大学,2013.

[17] 张国利,赵更新,滕菲,等. 高精度重力测量在冀东铁矿整装勘查区查找隐伏铁矿中的应用[J]. 地质调查与研究,2014,37(1):46-51.

[18] 杨春成,韩革命,杨亚斌,等. 高精度重、磁测量在大兴安岭找矿工作中的应用[J]. 地球物理学进展,2013,28(3):1472-1482.

[19] 喻汶. 可控源音频大地电磁法在金属矿产勘探中的研究及其应用[D]. 成都:成都理工大学,2014.

[20] 秦明,陈吉文,英亚歌,等. 电磁综合方法在芦家坪银矿区找

矿中的应用[J]. 矿产勘查,2019,10(4):922-928.
[21] 屈利军,王庆,李波,等. 综合物探方法在湖南香花岭矿田三合圩矿区深部成矿规律研究中的应用[J]. 物探与化探,2020,44(6):1313-1321.

Application research on integrated geophysical exploration in Xiarihamu mining area

WANG Zizhang[1], LIU Ming[2,3]

(1. *The Henan 5th Research & Design Corporation of CNNC*, *Zhengzhou* 450000, *China*;
2. *Shandong Lunan Institute of Geo-engineering Exploration*, *Jining* 272000, *Shandong*, *China*;
3. *No. 2 Geological Team*, *Shandong Geological Prospecting Bureau of Geology and Mineral Resources*, *Jining* 272000, *Shandong*, *China*)

Abstract: High precision magnetic survey profile measurement, IP intermediate gradient profile measurement, high precision gravity profile measurement and controllable source audio magneto telluric sounding survey are integratedly operated in Xiharihamu Cu-Ni deposit in Qinghai province to research on effectiveness and applicability of the above each geophysical techniques and provide data and references for prospecting similar ore deposits in the area. The results show that the high precision magnetic survey profile measurement is relatively effective for prospecting ore bodies in large area but can not display morphological feature of ore bodies. The Polarisability curve of IP intermediate profile measurement can be prepared to locate position of ore body and display it's size and the distribution feature to a certain extent. Both Bouguer gravity curve and residual anomaly curve of high precision gravity profile measurement show relatively high anomaly and the anomaly curve shows ore body position and it's size to a certain degree. For prospecting Cu-Ni deposit the controllable source audio magnetotelluric sounding technique can be prepared to reflect characteristics of deep ore body, especially the deep blind ore body can be accurately presented on the reflection coefficient map.

Key Words: geophysical exploration; Cu-Ni deposit; Xiarihamu mining area; Qinghai province