

陈伟军,刘红涛.综合地球物理方法在隐伏矿床勘查中的应用——以内蒙赵家围子银铅锌多金属矿床为例.地球物理学进展, 2009,24(1):293~302

Chen W J, Liu H T. Integrated geophysical exploration for concealed ore beneath cover in the Zhaojiaweizi area, Inner Mongolia, northern China. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(1):293~302

综合地球物理方法在隐伏矿床勘查中的应用

——以内蒙赵家围子银铅锌多金属矿床为例

陈伟军^{1,2}, 刘红涛²

(1. 中国科学院研究生院,北京 100049; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

摘 要 甚低频测量(VLF)、连续电导率成像(EH4)和激发极化法(IP)等高精度的地球物理探测技术在寻找隐伏矿的过程中发挥了重要作用.本文介绍了这些技术方法的原理、特点等,并结合具体的地质背景,阐述了这些方法结合在赵家围子银铅锌多金属矿床勘查中的应用.实践结果表明,赵家围子矿区深部存在明显的地球物理异常,异常强大、清晰,各种方法相互映证,展示了该矿床深部具有良好的成矿前景.

关键词 地球物理探测,隐伏矿,赵家围子,内蒙

中图分类号 P631 **文献标识码** A **文章编号** 1004-2903(2009)01-0293-10

Integrated geophysical exploration for concealed ore beneath cover in the Zhaojiaweizi area, Inner Mongolia, northern China

CHEN Wei-jun^{1,2}, LIU Hong-tao²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract VLF, EH4 and IP geophysical systems belong to electromagnetic survey methods with playing very good roles in forecasting concealed ore body. This paper introduces the different principle and character of the different technology methods, and also combines the pertinence geology background to indicate the application of the methods in combination to the exploration of Ag, Pb and Zn deposit in Zhaojiaweizi region. Practice shows that there is a clear geophysical anomaly in depth of the Zhaojiaweizi deposit. The anomaly is strong and in evidence, and all methods corroborate and complement each other. It is indicated that the Zhaojiaweizi deposit has a good metallogenic prospects and might become a big type exploration target for Ag-Pb-Zn deposit.

Keywords geophysical survey, concealed deposit, Zhaojiaweizi, Inner Mongolian

0 引 言

近年来,甚低频测量(VLF)、连续电导率成像(EH4)和激发极化法(IP)等高精度的地球物理探测技术有了飞跃性的进展,这些地球物理新技术与矿田构造、矿床地质研究所获得的矿化地质模型相结合在隐伏矿预测中得到了广泛而成功的应用^[1]. 赵

家围子银铅锌多金属矿床的发现就是这些方法联合应用取得成功的又一范例.矿床位于内蒙古自治区阿鲁科尔沁旗双胜镇赵家围子村北 100 m,有关的地质资料仅限于 1:20 万区域地质图及其说明书(1971 年).邻区衙门庙一带曾做过 1:5 万地质测量.因此,本地区地质工作程度非常低,矿产调查方面更是如此,无人资料可以参考.本文介绍了上述

收稿日期 2008-04-10; 修回日期 2008-10-20.

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目《大兴安岭典型矿床建模、成矿规律研究及资源远景预测》(KZCX-03-SW138)资助.

作者简介 陈伟军,男,1981 年生,汉族,山东潍坊人,中国科学院地质与地球物理研究所在读博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业.
(E-mail:chenwj1981@126.com)

VLF、EH4 和 IP 方法相互结合在该矿床勘查中的应用.

1 VLF、EH4 和 IP 的原理和特点

1.1 甚低频电磁测量(VLF)^[1~7]

甚低频电磁测量(简称 VLF)作为一种浅层地球物理探测技术,主要应用在金属矿床找矿勘查、探测地下含水构造、喀斯特溶洞和地质填图中. 实践表明,该方法不但具有轻便、快速、经济、高效的优点,而且在隐伏-半隐伏矿体的空间定位预测中应用效果显著. VLF 属于一种被动源电磁勘探方法,它将军事导航的长波台发射的 15~25 kHz 的电磁波作场源进行远距离工作区的甚低频测量. 在远离发射台的区域工作,电磁波在有限区域内可视为稳定的均匀场. 电磁波在传播过程中,地下存在具有电性差异的界面或地质体在 VLF 电磁波(一次场)的感应下会产生二次场,由于二次场与一次场的强度、方向和相位均不相同,故二者叠加后的总场与一次场亦不相同,观测一次场、二次场与被探测对象(地质因素)相互作用的总和效应,可研究矿化带、构造带、蚀变破碎带、岩性分界面等地质构造,达到找矿勘查、地质填图之目的. 应用 VLF 测量一般无需建立场源,仅用轻便的手持接收机在地表测量,受地形条件限制小,可在矿体或构造带上轻易测得异常,在普查阶段其优势更为明显. 在实际工作中,测线布置与待测地质体走向近于垂直,观测点距一般为 10~15 m;选台的原则,以保证一次场的方向近垂直于待测地质体走向,使所选电台位于待测地质体走向方位上. 在我国广大地区,若待测地质体为 NE 向至近 EW 向,选择日本台(频率 17.4 kHz);若待测地质体为 NW 向至近 SN 向,则选择澳大利亚台(22.3 kHz). 根据待测剖面沿测线甚低频磁倾角值(D)-磁场极化椭圆倾角的大小变化特征,以及对实测资料进行相关的技术处理(如地形校正、Fraser 滤波、线性滤波等),来探测地下地质体电性差异,揭示构造/矿化低阻带的空间展布与变化,指导隐伏矿体的空间定位预测. 实践表明,VLF 是寻找脉状矿床行之有效的物探手段,相对其它物探方法,其最大的特点是轻便、快速和经济,尤其适合在覆盖区(风成黄土、残坡积物等)进行快速地球物理扫面,以初步圈定隐伏含矿系统的平面展布、基本规模和大致了解其产状,为后续的高精度地球物理测深提供设计依据,同时 VLF 分辨率较强,可探测到宽度为 1m 左右、走向有一定长度的矿(化)体或构造带. 但是,由于 VLF

属于被动源电磁感应方法,场源的特征以及电磁波在地下的迅速衰减,限制了该方法的有效探测深度(一般为 40~50 m).

1.2 连续电导率剖面成像(EH4)^[1,8~11]

EH4 连续电导率成像系统是由美国 GEOMETRICS 和 EMI 公司联合生产的采用了最新数字讯号处理器的硬、软件装置. 该系统属于部分可控源与天然场源相结合的一种大地电磁测量系统,为目前国际上最为先进的一种电磁勘探手段. 其观测的基本参数为:正交的电场分量(E_x, E_y)和磁场分量(H_x, H_y). 若将地表天然电场与磁场分量的比值定义为地表波阻抗,那么,在均匀大地背景下,此阻抗与入射场极化无关,只与大地电阻率以及电磁场的频率有关:

$$Z = \sqrt{\pi \rho \mu f (1 - i)}, \tag{1}$$

式(1)为频率, ρ 为电阻率, μ 磁导率. 由(1)式可确定大地电阻率:

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E}{H} \right|, \tag{2}$$

式(2)单位是 ohm·m, E 的单位是 mv/km, H 的单位为 nT.

对于水平分层的大地,上述表达式仍然适用. 但它计算得到的电阻率将随频率的改变而变化,因为电磁波的大地穿透深度或趋肤深度与频率有关:

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \tag{3}$$

式(3) δ 为趋肤深度,单位为 m. 此时由(2)式计算得到的电阻率为视电阻率,在一个宽频带上测量 E 和 H ,并由此计算出视电阻率和相位,可以确定地下岩层的电性结构和地质构造.

EH4 系统由于其测量深度大、测量精度高等优点,近年来在隐伏矿的定位预测工作中得到了很好的应用. 但其在野外数据采集阶段对环境要求较高,每次发射一般只能采集一个测点的测深数据(包括接受天然场低频部分),工作效率较低,因而属于较为昂贵的地球物理详查手段.

1.3 激发极化法(IP)

激发极化法(IP)是国内物探界十分熟悉的电法测量手段^[12~13],因而本文对其工作原理仅作简单介绍. 该方法是利用岩矿石电化学性质为物理前提的一种地球物理勘探方法,是研究岩石在外电场作用下的充、放电过程中产生随时间缓慢变化的附加电场现象,这在电法勘探中称为激发极化效应. 岩石的激发极化机理主要包括两方面的内容:(1)若为电子

导体的激发极化,一般认为大多数的金属矿和石墨矿及矿化岩石属于良导体,其产生的激发极化现象是电子导体与其周围溶液的界面上发生过电位的结果。(2)若为离子导体的激发极化机理,一般认为岩石的激发极化效应与岩石颗粒和周围溶液界面上的双电层有关,由于双电层的分散结构和扩散区内存在可以沿界面移动的正离子的原因。

野外岩石激发极化效应的观测方法有时间域方法(TDIP)和频率域激发极化(RPIP),本次工作中主要采用的时间域激发极化属于相位测量,通过发射机与接收机同步向大地供以不同频率的电流(如 0.0625、0.125、0.25~32Hz),测量信号通过选频放大及锁相之后,测量出 ϕ_0 和 ϕ ,即初相位和参考相位(供电电流的相位),其结果为:

$$\Delta\phi = \phi - \phi_0 (\text{单位:毫弧度})$$

频率与激电效应的关系为:不同频率产生的激电效应的幅值或相位不同,一般认为低频产生的激电效应明显,但也应综合考虑。

2 矿区地质与矿体基本特征

矿区的大地构造位置属于兴安地槽褶皱系的南段,东西向古亚洲洋构造域与北北东向滨太平洋构造域在此强烈叠加^[14],成矿条件优越。矿区主要出露的地层有二叠系下统大石寨组、侏罗系中统新民组 and 上统满克头鄂博组、玛尼吐组,以及第四系松散堆积^[8,15]。

大石寨组是赵家围子矿床的容矿围岩(图 1),分为上下两段,总厚度超过 2000 m,其中矿区出露的是其上部,岩性为灰黑色、灰绿色英安岩、安山岩、流纹质晶屑凝灰岩、深灰色斑点状砂板岩和灰色含生物碎屑的鲕状灰岩。含早二叠世早期的腕足类化石^[16]。

矿区主要的岩浆岩为呈岩株状海西晚期(早二叠世)侵入岩,岩性为辉绿岩和细粒辉长岩,岩石普遍发育绿泥石化,侵入于大石寨组。以及多呈岩株或岩脉状产出燕山晚期侵入岩,岩性为细粒闪长岩、中细粒花岗岩闪长岩、中细粒钾长花岗岩和细粒斑状钾长花岗岩等。

由于矿区紧邻赵家围子村,附近多被农田和第四系松散沉积物覆盖,因而矿区范围内基岩露头较少。根据目前探槽和浅井的初步揭露,矿区内仅发现一个规模较大的矿化带,其走向为 310~3200,TC5、TC6 和 TC7 控制的矿化带走向长度已达 100 m 以

上,宽 10~45 m;倾向 sw,倾角变化于 60~700。在矿化带的近地表风化带带内(0~20 m 深度),表层 0~1.5 m 的深度普遍发育一层坚硬的钙化壳,其下逐渐过渡为灰褐色蜂窝状强淋滤带,其厚度变化于 0.5~3 m,一般 1 m 左右。灰褐色蜂窝状强淋滤带之下,开始出现灰黑色、褐黑色、土黄色和杂色的褐铁矿化-硅化、赭石化、碳酸盐化、土化的碎裂岩构造-滑塌砾岩,胶结物为灰褐色和黑色岩粉及细小充填角砾。角砾的大小不一,直径 5~30cm,形态有棱角状-次棱角状-浑圆状-圆状。推测原岩为安山质-英安质火山凝灰岩或安山质角砾熔岩。

围岩蚀变类型主要有硅化、绢云母化、碳酸盐化(组成的矿物为菱铁矿、锰菱铁矿、铁白云石和方解石)、黄铁矿化、青盘岩化与褐铁矿化等。围岩蚀变分带总体上比较明显,自矿体向两侧依次表现为①硅化-黄铁矿化-碳酸盐化,②硅化-绢云母化-黄铁矿化-碳酸盐化,③青盘岩化-碳酸盐化。其中,①和②主要发育在矿体与紧邻矿体的部位;而③则发育在矿化带外侧,属于远矿围岩蚀变。

断裂控矿在矿区表现十分突出,本地区的一级断裂构造总体上成 NE 向和 EW 向:EW 向者可能主要受下构造层的基底构造控制,而 NE 向者则是继承基底断裂的基础上受到了燕山期 NE 向构造的进一步改造。本地区控矿断裂构造系统主要为 SEE 向和近 EW 向,它们可能属于低序次断裂矿化系统。区内早二叠世岩浆活动均受 NE 向断裂构造的控制,而侏罗系岩浆活动则受 NE 向和 NW 向断裂交叉部位控制。因而岩浆活动有关的多金属矿产的形成,可能与这些区域构造存在密切的时空关系。

上述矿床地质特征,尤其控矿构造、蚀变特征和矿区岩石类型及其空间分布,对于隐伏矿预测区的选择、物探测线部署、地球物理异常解释及工程验证方案的选择都十分重要^[1]。

3 VLF、EH4 和 IP 方法结合在赵家围子矿

3.1 甚低频(VLF-EM)测量与异常解释

3.1.1 测网部署

甚低频扫面的测线方位设定为 NS 向,线距设定为 50 m、点距为 10 m、测线长度为 400 m。测网的野外布置采用高精度实时卫星差分 GPS 进行测点的定位测量(含高程)。首先测定基线(方位 900,采用 84 坐标系),然后依次测定所有测网的结点。全矿区共部署甚低频测线 13 条,东西控制矿带长度为 600 m。

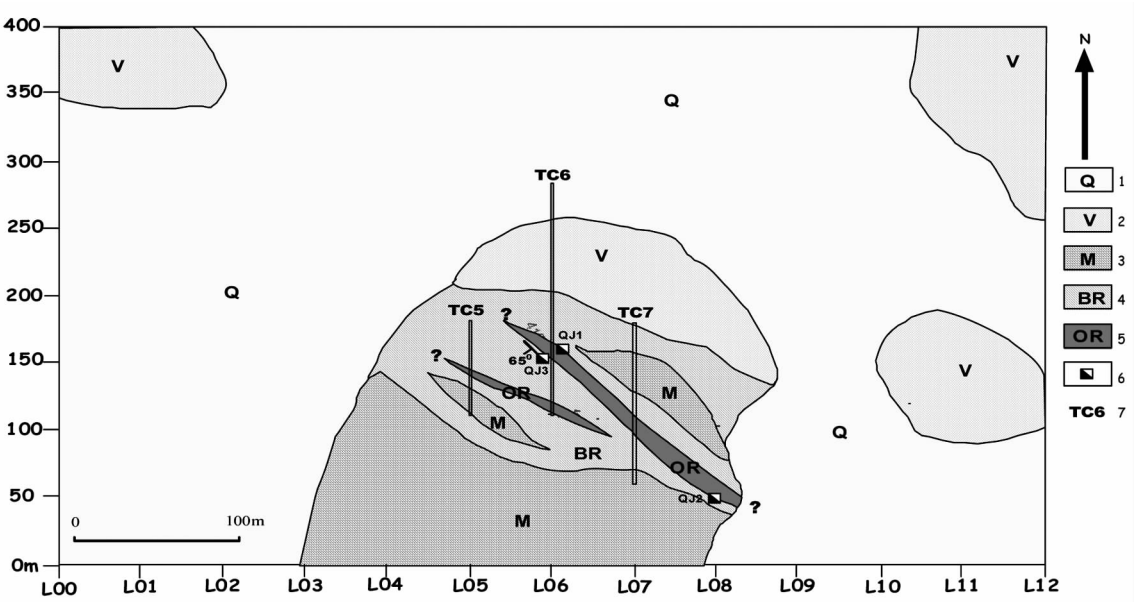


图 1 赵家围子矿区地质简图

1第四系土壤或松散堆积, 2. 火山碎屑岩, 3. 大理岩/结晶灰岩, 4. 矿化蚀变角砾岩, 5. 矿体/矿化体, 6. 浅井, 7. 探槽及编号

Fig.1 Sketch geological map of Zhaojiaweizi deposit

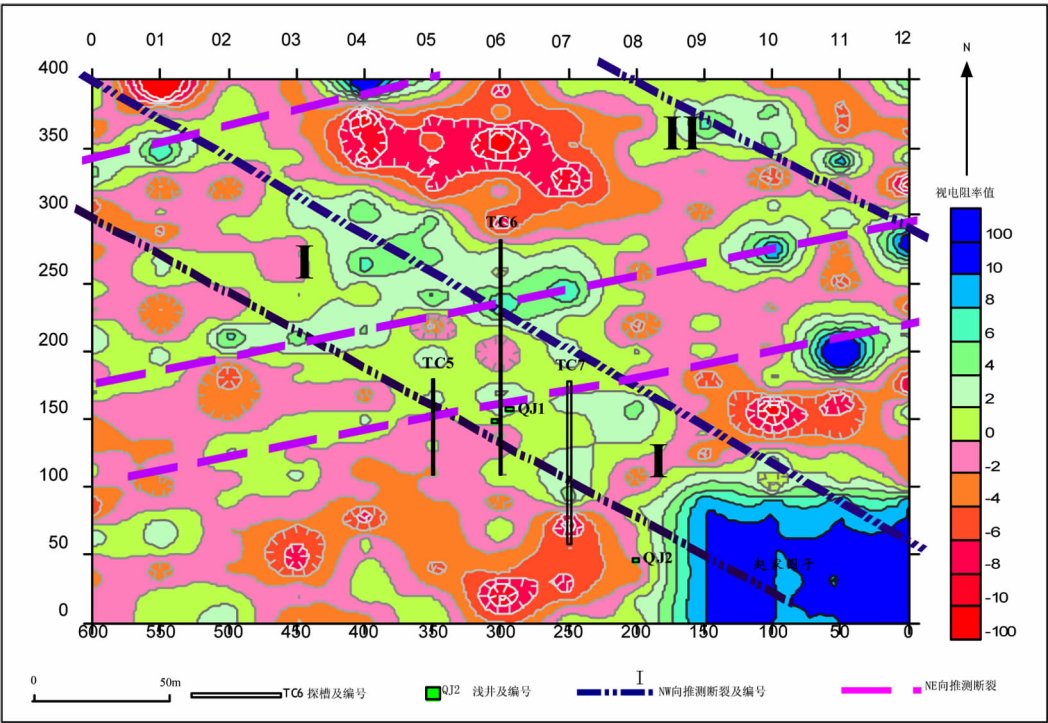


图 2 赵家围子矿区甚低频测量平面异常图

Fig.2 Plan map of the VLF reconnaissance survey with anomaly interpretation in Zhaojiaweizi deposit

3.1.2 甚低频测量的实施

本次测量时使用的是重庆地质仪器厂生产的 DDS-III 型甚低频测量仪。野外甚低频测量时, 主要采集一次场与二次场构成的极化椭圆倾角 (D) 数

据。每个工作组一般有三个人组成 (仪器操作、数据记录和前测手)。要求仪器的操作者至少完成一条测线方可更换, 以保证原始数据采集时不产生因更换操作者而引起的观测读数误差。野外数据记录包括矿

区名称、测线方向、测线号、点号、测量值(规定:磁倾角 S 、 W 为正, N 、 E 为负)以及工作组成员和测量日期等。

3.1.3 甚低频异常解释与成果

(1) 建立解释模型

作为一种轻便快捷的地球物理扫面手段,甚低频测量可以在覆盖较为严重的矿区,追索已知矿带(矿化带)走向延伸状态、发现潜在的矿化异常带并了解矿带(或矿化构造)在 50~60 m 深度以上的大致产状(倾向)。在实际测量时,首先需要建立特定矿区的模型(解释)剖面,确认该方法可以有效探测到待探地质体(矿带或矿化带)后,才能在矿区展开系统的数据采集。在赵家围子矿区,首先在矿带地表出露的 L06 线进行适应性试验,确认该方法可在矿带出露部位探测到极为明显的甚低频异常:一般在矿带的上、下盘附近(构造破碎较为强烈)形成相对低阻的异常带,而矿带内部则相对中高阻,形成“两低一高”的驼峰型甚低频异常组合。由于异常带宽度较大,根据地质对应情况,可将发现的主要中低水平的低阻异常带及其边部的过渡带作为矿带的诱发异常看待。

(2) 异常解释与主要成果

赵家围子矿区的甚低频扫面共完成 13 条测线。结果表明(图 2),在 VLF 测量覆盖的区域里,显示出 NW300~3200 和 NE70~800 两个方向的低阻带。NW 向低阻带(I 和 II)的宽度较大(约 100 m)且连续性较好(尤其在矿区的中部);而 NE 向的低阻带较窄,其连续性也较差。在 L06 线的 150 m 和 L08 线的 80 m 附近的地表可见到矿化角砾岩或本区矿化特有的钙结壳,从而基本认定 NW 向 I 号 VLF 异常为矿致异常。II 号 NW 向异常的地表相应位置被土壤和第四系沉积物覆盖较为严重,目前还没有对其进行揭露验证。至于 NE 向的 VLF 异常,根据 L06 线 210 m 附近的探槽揭露情况,见到了宽度大于 10 m 的断层破碎带。事实上,我们在后续的 EH4 测深剖面(L04、L06、L10)的相应位置附近都探测到已和相当规模、近于直立的低阻带。因而判断 NE 向的 VLF 异常为另外一组矿后断裂引起的。

3.2 连续电导率(EH4)测量与解释

3.2.1 典型解释剖面与测线部署

本次工作采用 20 m 的点距进行模型剖面和展开性 EH4 测量,以获得详细的深部地质构造和矿化信息。矿区 EH4 测线位置与 VLF 测线重合,共部署 EH4 测线 3 条:L02、L06 和 L10,其中 L10 线的南

段位于赵家围子村内无法布线,其南起点从 120 m 处开始。

选择 L06 线作为 EH4 典型解释剖面进行研究性测量。该剖面所在的位置发育有矿化带露头,可以用于分析和研究其测深影像与实际的矿带露头的对应关系,以确定矿带的 EH4 地球物理判别特征。

3.2.2 EH4 测深剖面解释与认识

(1) L06 线 EH4 测深剖面

L06 线是建立本矿区 EH4 测深解释模型的剖面(图 3)因此沿本勘探线的 TC6 所揭露的地质-矿化现象和构造特征是建立解释模型的基础。TC6 从约 110 m 开始向北延伸到 270 m 附近。该探槽从 120 m 附近就开始出现岩石破碎和角砾状矿化,在 140 m 处就出现了良好的角砾状矿化体,主矿化带主要位于 140~160 m,160~210 m 发育破碎带,210~250 m 为青灰色火山碎屑岩,岩石也较为破碎。根据上述剖面地质情况,可以认为 EH4 剖面的高阻与低阻之间的梯度带(140~160 m)为主矿化带,而 EH4 剖面中的近于直立的低阻带,应主要反映的是晚期含水断裂。EH4 剖面浅层近水平分布低阻带,主要反映的是地表松散沉积物或土壤(一般湿度较大)。值得注意的是,EH4 低阻和高阻异常带一般都有一定程度的放大,因而不能完全依据异常的宽度来机械地厘定待测地质体的确切尺度。

由于矿化系统与北侧相邻的晚期断层距离较近,因而后者的强烈低阻特征对矿化系统的中等低阻属性产生了较大的反演屏蔽效应,进而使矿化带的 EH4 影像特征减弱。但 TC6 的揭露情况使我们基本认定强烈低阻带南侧的梯度带为矿化带所在的位置。

总体而言,本测线探测到的巨大的近直立 EH4 低阻带,其核心部分应当反映了赵家围子矿区的主矿化系统-矿化角砾岩带(图 1);其强烈的低阻垂向延拓不仅有矿化系统本身的贡献,也有 NE 向晚期断裂的叠加效应。

(2) L02 线 EH4 测深剖面

L02 线 EH4 测深剖面所显示的图像结构(图 4)与 L06 线的十分相似,即表层的土壤低阻带和一个巨大的、近直立的强烈低阻异常。二者的主要差异在于后者的强烈低阻带有明显的南倾趋势。考虑主矿化系统-矿化角砾岩带(图 1)300~3200 方位的 NW 向自然延伸,本近直立的低阻异常带可能主要由矿化构造系统引起,而非 NE 向晚期构造的低阻叠加。因此,本勘探线所在位置虽然完全为土壤覆

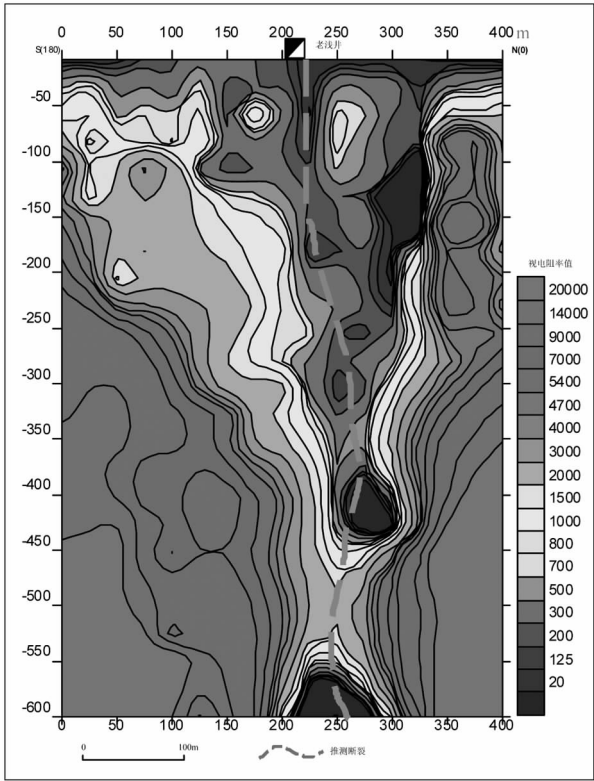


图3 赵家围子矿区 06 线 EH4 测深剖面图

Fig. 3 EH4 sounding image of line 06 in Zhaojiaweizi deposit

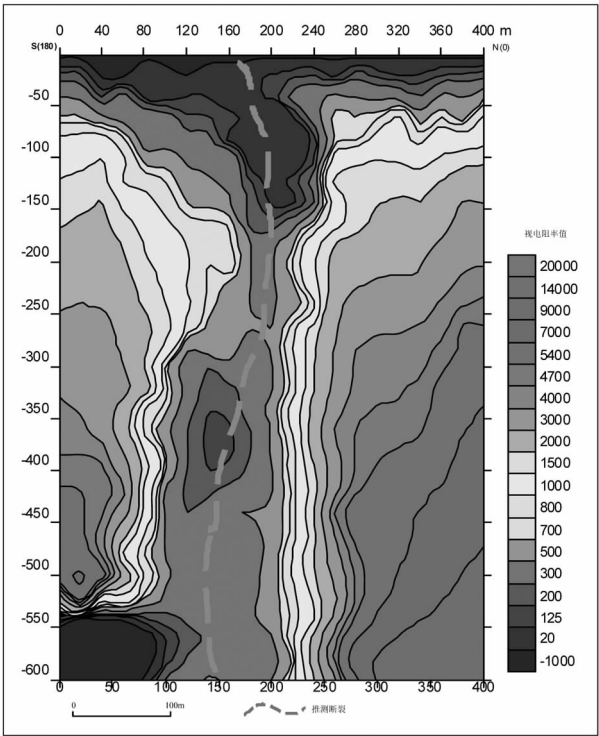


图4 赵家围子矿区 02 线 EH4 测深剖面图

Fig. 4 EH4 sounding image of line 02 in Zhaojiaweizi deposit

盖,EH4 测深仍然可以有效地发现矿化系统并定位其空间位置.

(3)L10 线 EH4 测深剖面

根据地质推测(图 1),主矿化带的北边界在 L10 勘探线应位于村北 120 m 测点附近,而矿化带的主体则刚好通过村子.因此,L10 线的 EH4 测线(120~400 m)的计划探测目标为:1)主矿带的北边界的大致位置;2)II 号 VLF 异常的深部性质;3)NE 向 VLF 异常(可能为晚期断层)深部特征.

L10 线 EH4 测深剖面(图 5)可以看出:A、本测线所在位置的近地表水平低阻层较厚,推测其松散覆盖层应厚于 L06 线一带.B、在 120 m 测点附近出现的低阻带,应为主矿化带的北边界,进而验证了前述地质推测的可靠性.C、在 240~280 m 区间,出现一个近直立的弱低阻异常带,该位置刚好相当于 NEE 向 VLF 低阻异常所在的地方(图 2).这种耦合性表明由 VLF 扫面发现的 NEE 向低阻异常可能是规模不大的矿后断层或成矿期次级断层,尽管它们有一定的平面延伸,但低阻强度不大,因而当其独立发育时(离主矿化断裂较远时)构造发育较弱.这也从另一个侧面说明,在 L06 线和 L02 线探测到

的近直立强烈低阻带主要是由主控矿断裂引起的.D、II 号 VLF 低阻异常在 EH4 剖面上,深部没有明显的反映,因而推测 II 号 VLF 异常可能不是矿致异常引起的.

3.3 激电测量与异常解释

3.3.1 测量方法与测网部署

本次工作投入的仪器设备为美国 Zonge 公司研制的 GGT-6 发射机和最新型 GDP-32 II 地球物理接收机系统.矿区激电测量主要开展了中梯扫面和对称四极测深工作.中间梯度装置网度为 50 m×20 m,AB=900 m,MN=20 m,共实施了 5 条测线 L04、L05、L06、L07 和 L08,测线布置与甚低频(VLF)测网重合.测线长度为 300 m(基线为中心两侧各 150 m),测量覆盖范围为 300 m×400 m.激电测深仅在 L06 线进行,测线长度为 300 m.

3.3.2 主要结果与认识

(1)激电中梯测量

本次激电中梯测量获得了视电阻率(图 6)、充电率(图 7)和金属因子(图 8)这三个表征金属矿体激电异常特征的重要参数.总体而言,矿区中部矿致的激电异常形态为 NEE~EW 走向的宽大异常体,

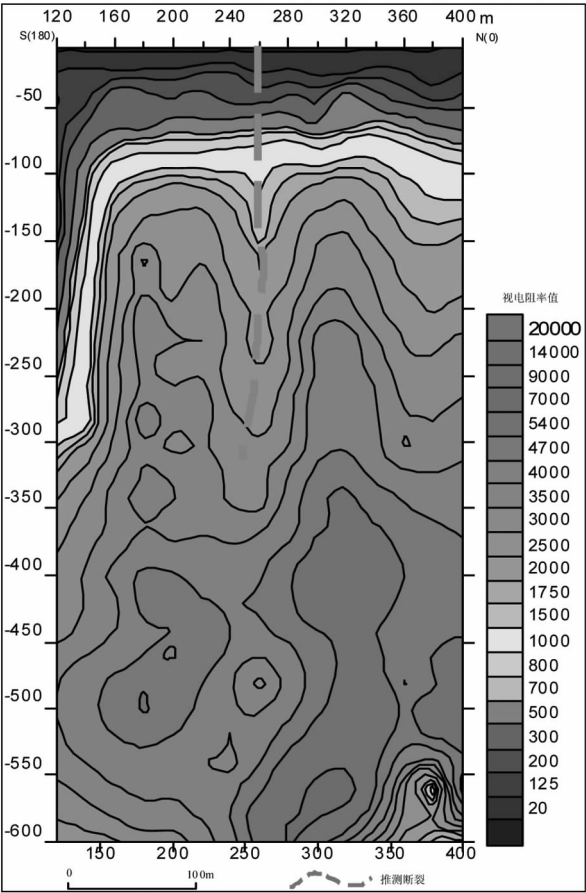


图5 赵家围子矿区10线EH4测深剖面图

Fig.5 EH4 sounding image of line 10 in Zhaojiaweizi deposit

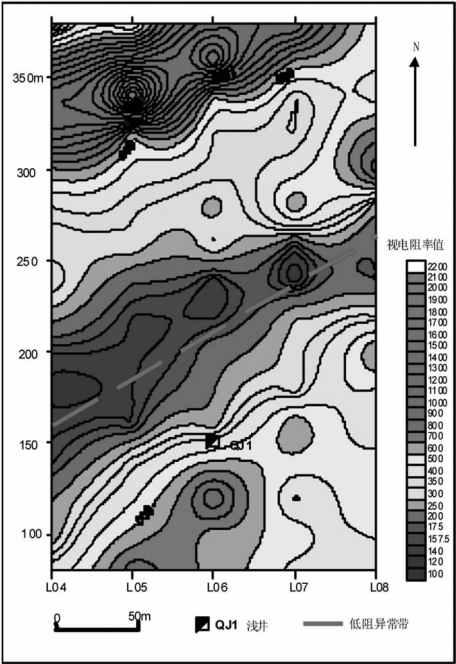


图6 赵家围子矿区激电中梯测量-视电阻率异常平面图

Fig.6 The ρ_s abnormality from the IP midgradient array survey in Zhaojiaweizi deposit

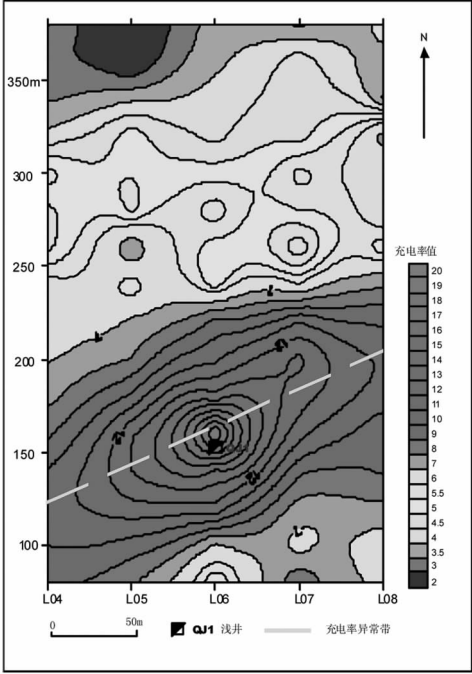


图7 赵家围子矿区激电中梯测量-充电率异常平面图

Fig.7 The η_s abnormality from the IP midgradient array survey in Zhaojiaweizi deposit

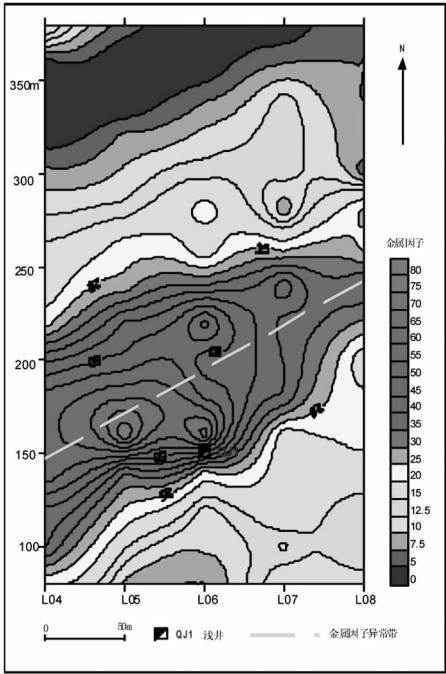


图8 赵家围子矿区激电中梯测量-金属因子异常平面图

Fig.8 The conductive abnormality from the IP mid-gradient array survey in Zhaojiaweizi deposit

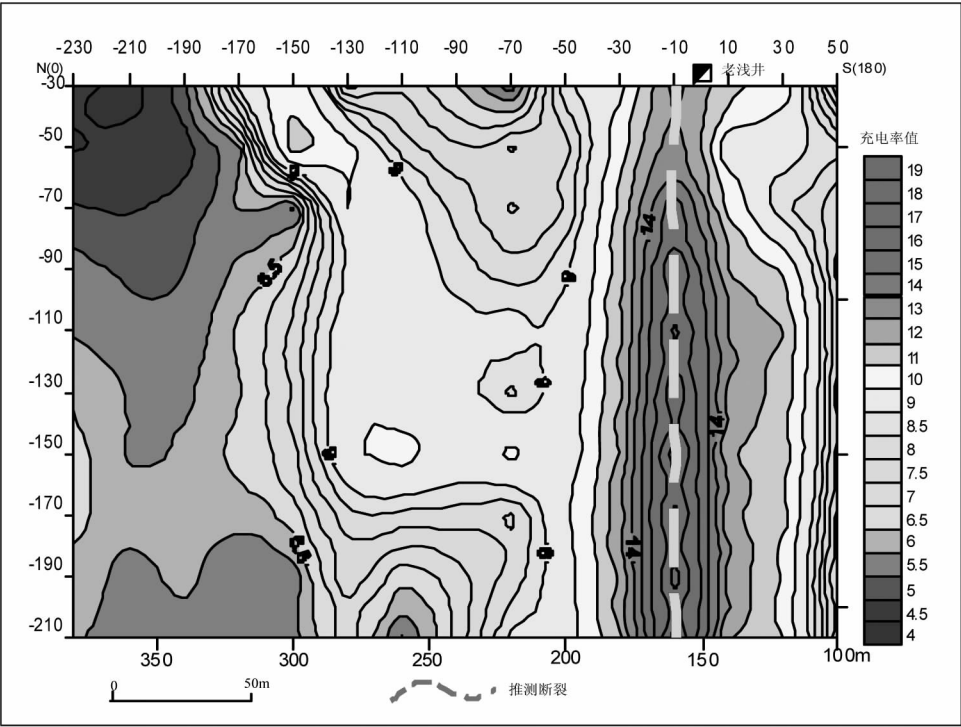


图 9 赵家围子矿区 L06 线的激电测深测量-充电率拟断面图
Fig. 9 The η_s anomaly from the IP survey of line 06 in Zhaojiaweizi deposit

该异常体与 VLF 异常图(图 2)中部的低阻异常体的形态基本一致. 这说明不同物探方法的扫面结果具有良好的耦合性. 根据激电中梯多参数异常图, 可以进一步得到如下认识:

① 三组参数所反映的地球物理异常平面特征非常相似, 视电阻率在 $250 \Omega \cdot \text{m}$ 以下的平面低阻异常、视充电率和金属因子平面高值异常呈带状, 长约 250 m, 宽约 50~100 m, 走向约 NE60°, 异常清晰、连续.

② 充电率异常的中心位于 L06 线 150 m 测点附近, 该处正是 QJ1 浅井所在的位置; 金属因子参数的异常中心位于 L05~L06 线的 150 m 测点一带, 但向西具有更好的延伸趋势. 据此推测, 在 L04~L08 勘探线之间, 矿区中部 0~200 m 的深度范围内的金属矿化, 应主要发育在 140~180 m 的测点区间.

③ 视电阻率低阻异常与金属因子异常具有良好的扣合性, 表明低阻异常应主要是由金属矿化而诱发的. 该金属矿化表现为低视电阻率值、高的充电率值和高的金属因子异常值. 视电阻率异常的中心相对于其他两个参数向北偏移, 原因可能是矿化带下(北)盘的晚期断裂对低阻带的北移有一定贡献.

(2) 激电测深

L06 线的激电(充电率)测深剖面(图 9)表明, 主矿化系统的中心位于 160 m 测点的正下方, 矿带浅部(0~50 m)的矿化强度较弱, 而在 50 m 以下逐渐增强(最高充电率可达 19), 在 210 m 的深度仍无减弱的趋势; 主矿化带系统在深部的宽度十分稳定(40~50 m), 推测工业矿体在深部的宽度(厚度)变化于 10~15 m(异常中心). 异常近直立, 反映控矿构造系统总体上在深部为陡倾斜产出.

4 结 论

4.1 赵家围子银铅锌多金属矿区的地质-地球物理勘查表明, 该矿床是一个矿化带宽度大于 40 m、走向长度大于 300 m 的多金属矿床, 矿床深部具有良好的成矿前景, 是一个具有重要商业价值、并值得进行深入勘查的有色-贵金属矿产勘探基地.

4.2 VLF 扫面不仅有效地探测到覆盖层之下巨大的 NNW 向矿化构造系统, 也发现了 NEE 向规模较小的次级(或成矿后)断裂系统. 其结果为后续的 EH4 和激电测量提供了良好的依据.

4.3 EH4 测深表明, 该矿床的深部存在明显的地球物理异常, 该异常为矿化异常, 同时清晰地反映出 0~600 m 深度范围内矿化构造系统的基本形态、规模和产状, 显示矿化系统应为规模可观的陡倾斜(总

体倾角 $>650^\circ$)低阻构造系统.

4.4 IP 测量表明,主矿化系统是具有低电阻率、高充电率和高金属因子特点的陡倾斜异常体,形态十分稳定;充电率在 50 m 深度以上较弱,在 50 m 以下充电率增强且十分稳定,指示深部的矿化要好于浅部.

4.5 VLF、EH4 和 IP 技术有不同的特点和适用范围,利用这三种物探方法组合勘查赵家围子矿区,不同的方法从不同的角度获取的地球物理参数所反映的地质信息基本一致,达到了相互补充、相互映证的目的.实践证明,这三种物探方法相互结合,在隐伏矿床快速评价预测工作中取得了很好的应用.

致 谢 作者感谢野外工作期间给予大力支持和热情帮助的内蒙古自治区阿鲁科尔沁旗人民政府和固体矿产资源室的相关技术人员;感谢编辑同志提出的宝贵修改意见!

参 考 文 献 (References):

- [1] 刘红涛,杨秀瑛,于昌明,等. 用 VLF/EH4 和 CSAMT 方法寻找隐伏矿——以赤峰柴胡栏子金矿床为例[J]. 地球物理学进展, 2004,19(2):276~285.
Liu H T, Yang X Y, Yu C M, *et al.* A case study in finding concealed ores by using geophysical exploration methods in combination of VLF-EM, EH4 and CSAMT [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(2):276~285.
- [2] 李永兵,陈绪松,刘建明,等. 利用 VBA 和 Excel 实现快速处理国产甚低频电磁仪 DDS-1 测量数据[J]. 地球物理学进展, 2005,20(1):225~230.
Li Y B, Chen X S, Liu J M, *et al.* Quickly processing VLF-EM data from DDS 1 instrument using VBA and Excel [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1):225~230.
- [3] 刘光鼎,郝天耀. 利用地球物理方法寻找隐伏矿床[J]. 地球物理学报,1995,38(6):850~854.
Liu G D, Hao T Y. Searching of hidden mineral deposits by geophysical methods[J]. Chinese Journal of Geophysics,1995, 38(6):850~854.
- [4] 史宝连,陈华玢,袁庆华,等. 低频电磁法[M]. 北京:地质出版社,1986.
Shi B L, Chen H B, Yu S H, *et al.* The very low frequency electromagnetic methods[M]. Beijing: Geological Publishing House,1986.
- [5] 张寿庭,徐旗章,郑明华. 甚低频电磁法在矿体空间预测中的应用[J]. 地质科技情报,1999,18(4):85~88.
Zhang S T, Xu Z Z, Zheng M H. Application of VLF-EM to the location forecasting of ore [J]. Geological Science and Technology Information,1999,18(4):85~88.
- [6] 白大明,聂风军,江思宏. 甚低频电磁法对脉状矿床勘查评价的意义——以金、铅锌(银)和萤石矿为例[J]. 矿床地质,2002,

21(4):408~413.

Bai D M, Nie F J, Jiang S H. Feasibility of applying VLF-EM methods to exploration and evaluation of vein deporation of gold, lead-zinc (silver) and fluorite deposits [J]. Mineral Deposits,2002,21(4):408~413.

- [7] 刘红涛,杨秀瑛,刘建明,等. 如何开展老矿山后备资源的寻找与定位预测——工作程序与实例分析[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3):573~582.
Liu H T, Yang X Y, Liu J M, *et al.* How to predict and localize potential concealed mineral resources in depths at an aged mining district ——working model and case study[J]. Progress In Geophysics, 2004, 19(3):573~582.
- [8] 伍 岳. EH4 电磁成像系统在砂岩地区勘查地下水的应用研究[J]. 物探与化探,1999,2(5):335~338.
Wu Y. The application of EH4-electromagnetic image system to ground water exploration in sandstone areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,1999,23(5):335~338.
- [9] 贾长顺,曾庆栋,徐九华,等. 综合物化探技术在黄土覆盖区隐伏金矿体预测中的应用[J]. 黄金,2005,26(7):8~11.
Jia C S, Zeng Q D, Xu J H, *et al.* A pplication of comprehensive geophysical and geochemical prospecting technology in forecasting concealed ore body overburden by loess[J]. Gold, 2005, 26(7):8~11.
- [10] 杜荣光,胡斌. EH4 电导率连续成像系统在银厂坡地质勘查中的应用[J]. 矿产与地质,2006,20(4):534~537.
Du R G, Hu B. A pplication of continuous imaging system of EH4 conductance in geological exploration in Yinchangpo[J]. Mineral Resources and Geology, 2006,20(4):534~537.
- [11] 申萍,沈远超,刘铁兵,等. EH4 连续电导率成像仪在隐伏矿体定位预测中的应用研究[J]. 矿床地质,2007,26(1):70~78.
Shen P, Shen Y C, Liu T B, *et al.* Application of stratagem EH4 system to prediction of hidden ore bodies[J]. Mineral Deposits, 2007,26(1):70~78.
- [12] 李帝铨,王光杰,底青云,等. 大功率激发极化法在额尔古纳成矿带中段找矿中的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5):1621~1626 .
Li D Q, Wang G J, Di Q Y, *et al.* The application of high-power induced polarization in the middle section of eerguna metallogenic belt[J]. Progress In Geophysics, 2007, 22(5):1621~1626 .
- [13] 雒志峰. 激发极化法在寻找斑岩型铜矿中的应用[J]. 地质找矿论丛,2003,18:149~151.
Luo Z F. Application of induced polarization technique to exploration of porphyric copper deposit[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2003, 18(zl):149~151.
- [14] 叶杰,刘建明,张安立,等. 沉积喷流型矿化的岩石学证据[J]. 岩石学报,2002,18(4):586~592.
Ye J, Liu J M, Zhang A L, *et al.* Petrological evidence for exhalative mineralization: Case studies of Huanggang and Dajing deposits in the the southern segment of the Da Hinggan Mountains, China [J]. Acta Petrologica Sinica,

2002,18(4):588~592.

[15] 李德亨,刘红涛,袁怀雨. 大兴安岭南东段龙头山银铅锌多金属矿床成矿地质特征与远景评价[J]. 地质找矿论丛,2005,20(4):269~275.

Li D T, Liu H T, Yuan H Y. The geological ore-forming feature and resource estimation of the silver polymetallic deposit in southeast part of Da Hinggan Ling area [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2005, 20(4):269~275.

[16] 王友勤,苏养正,刘尔义. 东北区区域地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997.

Wang Y Q, Su Y Z, Liu E Y. Stratigraphy of north-east area,China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press,1997.

查阅本刊网站获取详细信息
(<http://www.progeophys.cn>)

欢迎订阅《地球物理学进展》

2009 年《地球物理学进展》为双月刊,每年 6 期,每期定价 50 元,全年定价为 300 元。

订刊联系方式

- (1) 本刊编辑部(邮局汇款与单位电汇均可)

汇款地址 100029 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部

电话传真 010-82998113,010-82998105,010-62369620

联 系 人 刘少华

电子邮件 shliu@cgs.org.cn, geophys@163.com

网 站 <http://www.progeophys.cn>

开 户 行 中国农业银行北京健德支行 账 号 190901040000456

收款单位 中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上:购《地球物理学进展》款,同时写上您的姓名和联系地址)
- (2) 天津全国非邮发联合证订服务部

邮编地址 300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

电话传真 022-23973378,022-23962479

网 址 <http://www.LHZD.com>

E - mail LHZD@public.tpt.tj.cn