

综合地球物理方法在找矿靶区快速评价中的应用

张作伦^{1,2}, 曾庆栋¹, 于昌明¹, 叶杰¹, 刘红涛¹, 孙玥³, 任东方⁴

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中铁资源集团 中铁资源地质勘查有限公司, 北京 100039;
3. 西安科技大学 人文与外国语学院, 西安 710600; 4. 中央民族大学 经济学院, 北京 100081

摘要: 为对工作程度较低的找矿靶区开展快速评价, 针对中国新一轮“攻深探盲”找矿的需求以及矿床“三复杂”的现实, 本文介绍了一套以电磁扫面-测深技术为主, 磁法、化探等技术为辅的综合地球物理探测组合方法, 及其在 40 余个矿床(点)的应用研究成果。以受岩体控制的小沟铁矿, 受构造控制的白音他拉铅锌银矿点、云山金矿为例, 详细介绍了应用该方法来识别一些在形态、产状上符合岩体或构造控矿特征的物探异常。同时结合地质研究, 指出这些异常对岩体侵入通道、高磁异常体、含矿构造的指示作用。

关键词: 地球物理勘探; 成矿预测; 多金属矿床; 隐伏矿体

中图分类号: P631.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-2802(2014)05-0747-06 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2014.05.021

Application of the Comprehensive Geophysical Method in Rapid Evaluation of Ore Prospecting Target Areas

ZHANG Zuo-lun^{1,2}, ZENG Qing-dong¹, YU Chang-ming¹, YE Jie¹, LIU Hong-tao¹,
SUN Yue³, REN Dong-fang⁴

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. China Railway Resources Exploration Co., LTD, China Railway Resources Group, Beijing 100039, China;
3. College of Humanities and Foreign Languages, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710600, China;
4. School of Economics, Minzu University of China, Beijing 100081, China

Abstract: Mineral exploration work in China has already stepped into a stage of attacking deep layer to find hidden ore bodies. And the ore-forming geological conditions, the geological features of ore deposits, and the terrain of deposit locations are complex and varied. A set of geophysical exploration methods has been integrated on the basis of electromagnetic plane measurement, sounding technologies, supplementing by magnetic and geochemical exploration technologies to rapidly evaluate the prospecting target areas with limited exploration history, and then it is possible to provided useful information on further exploration scheme designing. We have used a comprehensive geophysical exploration method in more than 40 deposits (occurrences). In this paper, three cases, Xiaogou iron deposit that controlled by intrusion, the Baiyingtala lead-zinc-silver ore occurrence and the Yunshan gold deposit that controlled by fracture zones, have been described as examples. It has been revealed by the geophysical methods that the unique morphology, the occurrence and the scale of the anomalies are consistent with the intrusion and fracture zones. Combined with geological studies, it is suggested that these anomalies could indicate intruded channels, high magnetic bodies and ore structures. Although ore prospecting is difficult, the set of regional applicable mineralization prediction theory and forecasting technology discussed in the paper have an important promoting role in regional prospecting.

Key words: geophysical exploration; mineralization prospect; polymetallic deposit; hidden ore bodies

收稿日期: 2014-04-26 收到, 06-01 改回

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB429804)

第一作者简介: 张作伦(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 矿产勘查评价和矿床成因及成矿预测。E-mail: zhangzuolun@163.com.

在金属矿产勘查发展过程中,地球物理方法一直发挥着重要作用。尤其是在当前以“攻深探盲”为特征的矿产找寻中(刘光鼎和郝天珧,1995;刘光鼎等,2013),以及我国矿床“三复杂”(成矿地质条件复杂多变、矿床地质特征复杂多变、所处地形地貌复杂多变)特征现实下,新一轮的找矿突破面临着诸多挑战,综合地球物理方法是实现当前找矿突破的重要手段。

近十年,笔者在内蒙、河北、安徽、甘肃、河南、广西等多个省区 40 余个矿床(点)开展了以地质研究为基础的综合地球物理找矿应用研究。实践中主要采用激发极化法(IP)、甚低频电磁法(VLF)、磁法等开展地表浅部的面上探测;深部则以天然场音频大地电磁测深(AMT)、可控源音频大地电磁测深(CSAMT)、瞬变电磁测量(TEM)、激电测深等技术手段开展垂向剖面探测(李永兵等,2005;Liu *et al.*,2006;张作伦等,2007,2008,2009,2010;张伟庆等,2009;Chen *et al.*,2010;孙燕等,2010;孙兴国等,2011)。通过集成的这套以电磁扫面-测深技术为主,磁法、土壤化探、XRF 快速分析为辅的浅层地球物理成矿预测快速评价技术的联合应用和交叉检验,可以有效地定位矿化异常体,探测不同深度矿化异常体的规模和产状,取得了较好的效果,达到了找矿靶区快速评价目的,包括对靶区的进一步勘查价值做出初步评价并对勘查工作方案设计提供有益的信息。

本文选取河北承德小沟铁矿、内蒙赤峰白音塔拉铅锌银矿点、安徽云山金矿为实例,对这套综合地球物理方法组合在找矿靶区快速评价中的应用效果予以展示。

1 小沟铁矿

小沟铁矿位于华北地台北缘著名的承德大庙基性杂岩体中。大庙杂岩体东西长约 40 km,南北宽 2~9 km。杂岩体的岩石类型齐全,由 85% 的斜长岩、11% 的苏长岩、以及少量的二长岩、橄长岩组成(赵太平等,2004),苏长岩主要呈小岩体或岩脉分布,与斜长岩间呈侵入接触关系,岩体内赋存有丰富的钕钛磁铁矿矿床(周久龙等,2012)。小沟铁矿出露岩石类型主要为斜长岩和苏长岩,苏长岩主要矿物成分为单斜辉石、斜长石,以及少量斜方辉石、角闪石、黑云母、钕钛磁铁矿。矿体主要呈似层状产于苏长岩中,矿体与围岩主要呈渐变过渡关系,偶见贯入式矿体。野外采用 NITON 便携式矿石分析仪(XRF)测得的 77 件矿石样品的 TFeO 6.2%~56.0%

(平均 26.4%),Ti 0.1%~5.8%,V 最高 0.24%。

小沟铁矿地形陡峻、植被发育,矿区 7.1 km² 范围内有露天小采场近 20 处,面临已有资料粗糙、矿体数量、规模、远景资源量不清等系列问题。为了摸清上述问题,达到快速评价并指导生产的目的,笔者在小沟铁矿的地球物理勘查过程中,采用磁法扫面与 AMT 测深技术相结合的综合地球物理评价。

磁法无疑是磁铁矿床最有效的物探方法。小沟铁矿磁法测量网度 100 m×20 m,测线方向 0°,测得的最大磁场值 64767 nT、最小磁场值 51470 nT。测量时结合 XRF 现场快速分析确定矿体边界,对应磁场值大致为 58000 nT。取 58000 nT 为相对磁异常的下限值,可圈定出规模较大的磁异常 3 个(图 1)。其中,V1 号异常长 1600 m、宽 150 m,北西走向;V2 号异常长 1700 m、宽 180 m,北东走向;V3 号异常长 700 m、宽 100 m,东西走向。上述异常地表大多对应露天采场。此外,矿区尚存在一些延长在 100~200 m 的小异常。

用 EH4 电法仪对小沟铁矿实施了 AMT 测线 3 条(图 1)。作者选择 V1 号异常上的 E3 线作为典型解译剖面(图 2)。E3 断面长 460 m,测量方向 22°,垂直于 V1 号异常走向。E3 线电磁测量断面图上显示了较为简单、清晰的视电阻率结构特点。断面浅部以中低阻为主,含有 3 个低阻异常,从南往北编号为 M1、M2、M3,其中 M1 与地表的磁铁矿体和磁异常相吻合,被解释为磁铁矿体。在标高 560 m 以上 3 个低阻异常稳定,标高 560 m 以下开始收敛。断面深部则在中高阻背景上出现一个颈状中低阻连接浅部的中低阻,在形状上似乎显示岩浆上侵通道的特征。根据本区岩体侵入关系,赋矿特点,将断面上中高阻解译为斜长岩体,中低阻解译为苏长岩脉,部分苏长岩即为矿体。苏长岩体内存在 3 个低阻异常,M1、M2 异常可从地表向深部延伸至标高 550 m、600 m,与地表 0~200 m 的宽大磁异常对应;M3 异常位于地表 100 m 之下,可从标高 750 m 断续延伸至标高 200 m。结合地表矿体出露位置、磁法测量结果,初步将 AMT 电磁测量断面上的 3 个低阻异常解译为矿体。

通过磁法与 AMT 电磁测量为主的综合地球物理探测,我们在不足 20 天时间内,快速的定位出小沟铁矿主矿带位置及高磁异常体向深部延伸的产状和深度。野外工作期间还采用便携式 XRF 大致确定了矿体地表边界,为磁法、AMT 资料解译提供指导,达到了快速预测资源潜力的目的。

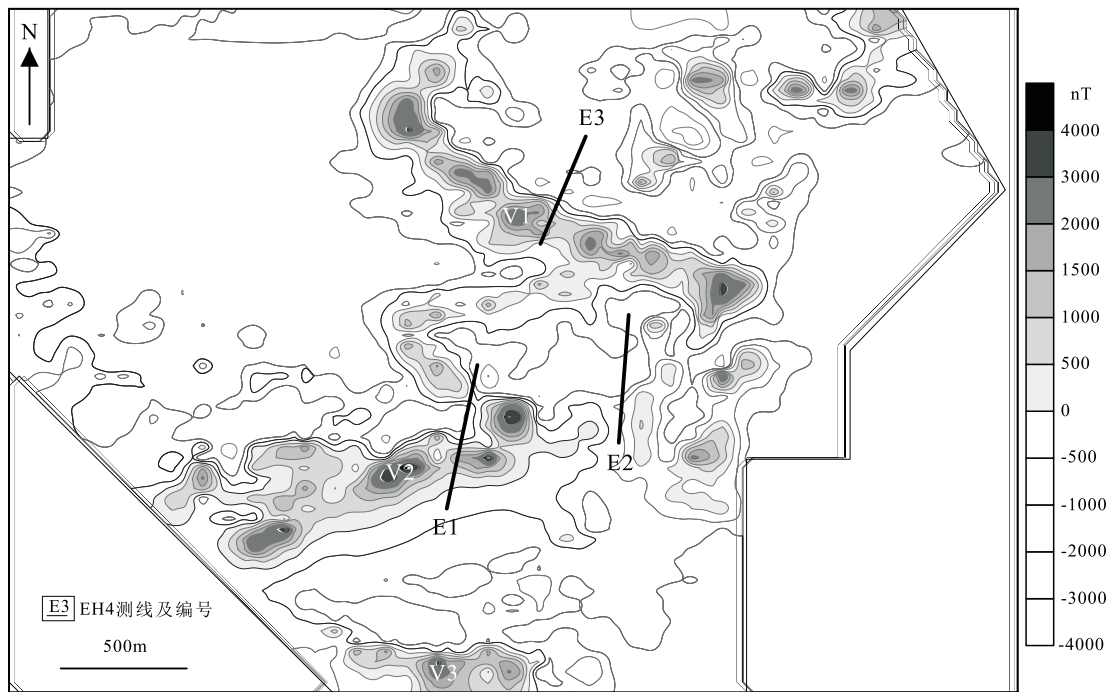


图 1 小沟铁矿磁异常图
Fig. 1 Map of the magnetic anomaly in the Xiaogou iron deposit

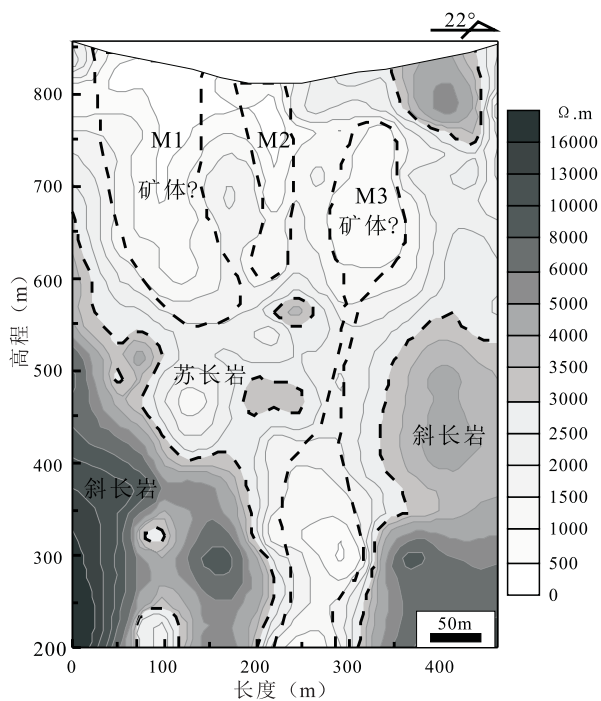


图 2 小沟铁矿 E3 线 AMT 电磁测量断面图
Fig. 2 Cross-section view of AMT electromagnetic sounding along the No. E3 line in the Xiaogou iron deposit

2 内蒙古赤峰市白音塔拉铅锌银矿点

白音塔拉铅锌银多金属矿点位于大兴安岭南段东坡的赤峰市阿鲁科尔沁旗境内。矿点地表覆盖严重,露头较少,零星出露有二叠系林西组灰绿色凝灰

质粉砂岩夹板岩、细砂岩,岩层走向呈北东东-近东西向,倾向南、倾角 $60^{\circ}\sim 88^{\circ}$ 。矿区褶皱构造、断裂构造发育。地表所见的含矿断裂构造,其产状与地层产状大体一致。矿区中部出露有花岗斑岩脉。矿区地表见矿化蚀变带两条,其中 V1 号矿化带为主矿化带,地表断续延长大于 1100 m,宽 0.3~3 m,多在 1 m。V2 号矿化带位于 V1 号矿化带西端北侧,侧列平行于 V1 号矿化带展布,地表追索长约 100 m。地表探槽中,矿化带表现为黑色锰染,并具绢云母化、褐铁矿化、绿泥石化。地表刻槽样 Pb+Zn 品位 0.5%~1.8%,Ag 品位 41.3~90.5 g/t。

白音塔拉铅锌银矿点为一半隐伏矿,在地球物理勘查过程中,笔者先后利用 GDP-32II、EH4 开展了激电中梯扫面测量、激电测深、AMT 剖面测深。

激发极化无疑是硫化物有色金属矿床最有效的浅部扫面方法。本次激电中梯测量网度 50 m×40 m,供电极距 1000 m,测量参数为视电阻率和视充电率。视电阻率图像(图 3a)显示矿区中部存在 1 条长达 2000 m、圈闭良好的低阻异常带,已知的地表 V1 矿脉位于这一低阻异常与其北侧高阻的过渡带上。与 V2 脉对应也有一延伸约 400 m 的低阻带,推断为另一含矿构造,向西继续延伸没有圈闭。相应地,在视充电率图像(图 3b)上以 10 ms 为边界可以圈定出一东西向展布、长约 2200 m、宽 200~450 m、圈闭良好的的异常带。已知矿脉 V1 与异常

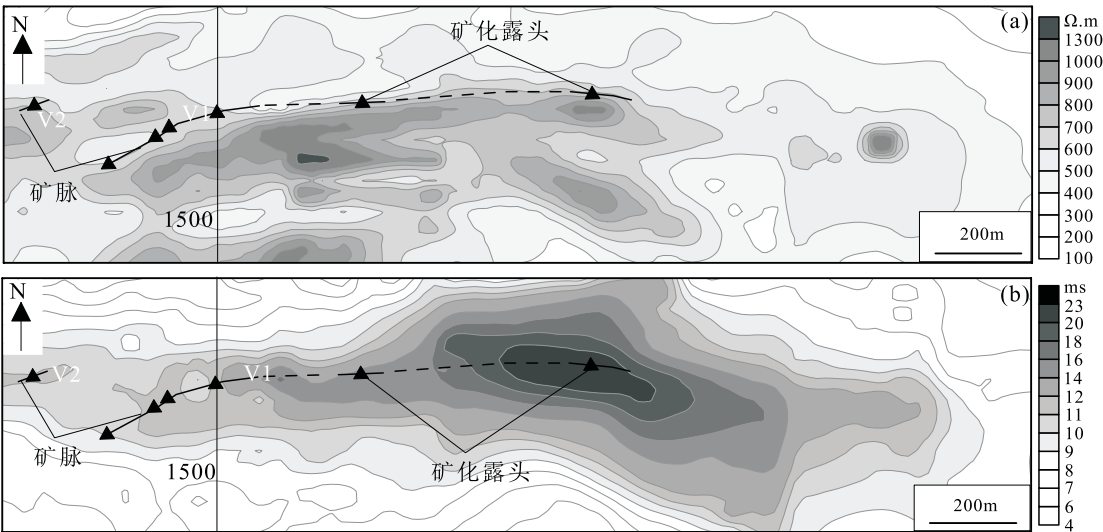


图3 白音塔拉铅锌银矿点视电阻率(a)、视充电率(b)异常图

Fig. 3 Map of apparent resistivity map (a) and apparent charging rate (b) in the Baiyintala Pb-Zn-Ag ore occurrence

中心及异常展布方向整体吻合,反映了充电率异常为矿化引起,充电率异常宽度较大,暗示白音塔拉矿区可能存在一个主矿脉(V1脉)和多个次级矿脉。

白音塔拉激电异常与已知矿带相吻合,且异常规整、强度大,反映了目前确定的矿化带深部可能存在较强的金属矿化。为了解析深部成矿潜力,进一步在地表对应已有已知矿化的1500线、1850线实施了激电测深、AMT测深工作,选取1500线成果做进一步找矿潜力分析。

1500线激电测深结果表明(图4),断面深部(100 m以下)存在视充电率异常,异常从地表向深部强度增大、宽度加大。异常出现位置与已知矿带向深部延深的地质产状相吻合,认为深部存在矿致异常,矿脉向南陡倾。

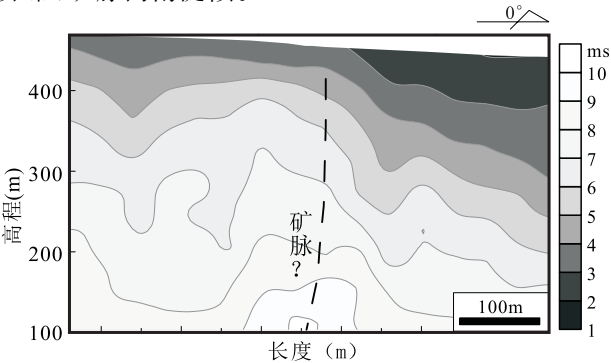


图4 白音塔拉铅锌银矿点1500线激电测深断面图

Fig. 4 Cross section view of induced electrical sounding along the No. 1500 line in the Baiyintala Pb-Zn-Ag ore occurrence

1500线AMT测量结果表明(图5),断面上存在4个明显的低阻异常,异常产状近直立,初步将其解译为断裂构造。剖面线250 m、500 m处的2个低阻异常向上延伸至地表,异常强度及延深均较大。

而剖面线360 m、680 m处的2个低阻异常强度小、延深也较小。F₁断裂不仅与激电中梯、激电测深所圈定的异常带相对应,而且也与实际矿带出露位置相当,推测F₁断裂为一含矿构造,应为下一步钻探验证的重点。其他3个构造没有激电异常的匹配,推断仅为普通含水断裂。

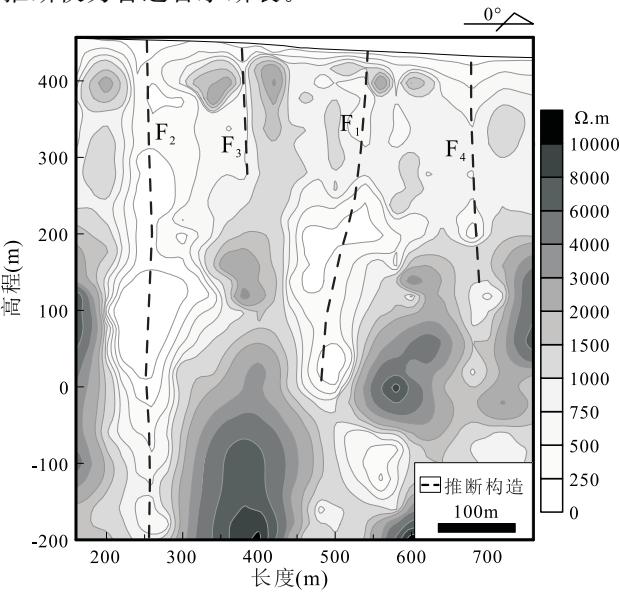


图5 白音塔拉铅锌银矿点1500线AMT电磁测深断面图

Fig. 5 Cross section view of AMT electromagnetic sounding along the No. 1500 line in the Baiyintala Pb-Zn-Ag ore occurrence

白音塔拉铅锌银矿点综合地质地球物理快速评价工作表明,矿区地表已发现具有一定长度和品位的矿化蚀变带,相应的物探异常强度高、长度大、连续性好、与地表矿化带非常吻合,向人们传递了一个具备相当规模和强度的断裂含矿系统的信息,推测其资源前景良好,具有开展进一步普查工作的价值。

3 云山金矿

云山金矿位于下扬子拗陷与江南古陆之间的长江中下游安徽池州境内(宋国学等,2010),矿区出露地层有下奥陶统红花园组(O_1h)微晶灰岩、白云岩,灰岩和白云岩内普遍存在大理岩化、透闪石化;下志留统高家边组(S_1g)砂质、泥质板岩。两套地层间为断层接触。矿区侵入岩为石英二长闪长岩,岩体内存在少量黄铁矿,捡块样分析不含矿化。矿区构造发育,除红花园组与高家边组地层接触带的断裂构造外,尚存在一些控制着区内石英脉体产出的北东向、北西向构造。我们在开展物化探工作的同时,在矿区地表圈定出大小石英脉体近30条,石英脉体普遍具褐铁矿化,部分石英脉体内还可见黄铁矿、方铅矿、孔雀石、蓝铜矿。野外捡快样化验结果显示

18条石英脉体内存在金、银矿化,金品位最高可达6.65 g/t、银品位最高456.4 g/t。

在云山金矿地物化多元信息相结合的快速评价工作中,土壤化探效果明显,化探数据初步处理结果显示Au异常分布范围较广。为了突出重点Au异常,采用数理统计法公式 $T=C_0+KS$ (杨小峰等,2007)(T -异常下限, C_0 -异常背景值, S -均方差, K 系数一般取1~3)计算 T 值时, K 系数取3,计算的 T 值为 30×10^{-9} 。研究区以 30×10^{-9} 为异常下限,可以圈定出两个金异常带(图6),Au1异常带长约1150 m,宽100~200 m,走向从近东西向变为NE向。Au2异常带长约1400 m,主体宽约500 m,走向从北东向变为北东东向。在Au元素异常-地质叠合图中,两个Au异常均主要位于地层中,对应有大量石英脉体,应为Au矿化引起。

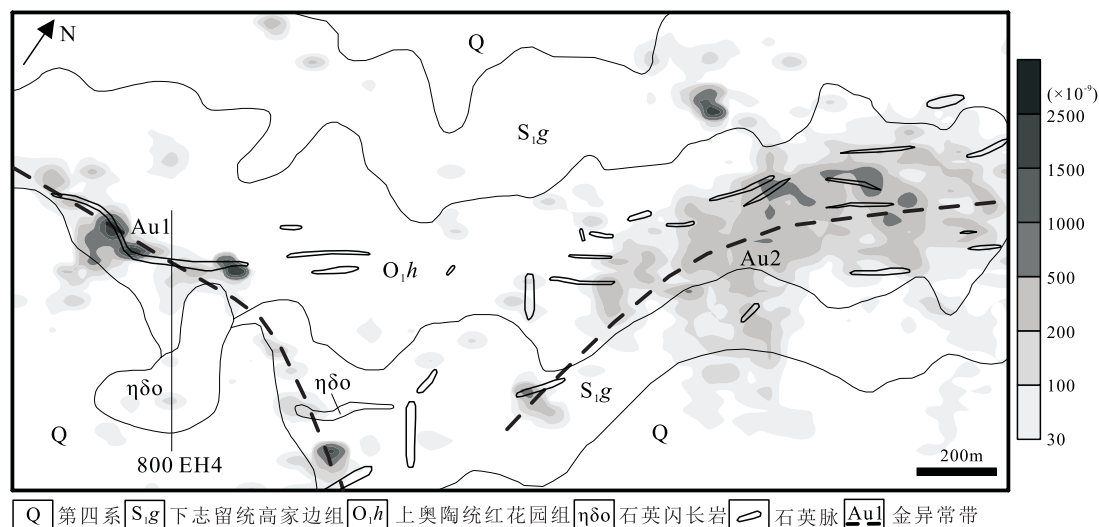


图6 云山金矿金异常-地质叠合图

Fig. 6 Synthetic map of gold anomaly and geology in the Yunshan gold deposit

云山金矿地形陡、植被发育,不适合大型物探设备开展探测工作,采用国产DWJ-3B微型激电仪、EH4双源电导率成像系统开展的激电扫面(装置对称四极)、电磁测深工作也取得了较好的找矿效果。研究区共布设有AMT测线4条,选取800线(图7)进行说明。800线AMT测深主要针对Au1金异常带和激电扫面高极化率异常开展,该测深断面长600 m,深部为中高电阻率,浅部在中高电阻率背景下叠加了中低电阻率异常。AMT测深断面500~680 m、960 m、1045 m处存在有3处明显低阻异常。500~680 m处低阻异常较宽大,可延伸至标高-300 m,异常所在地表位置为含黄铁矿石英二长闪长岩,相应的极化率剖面上也存在一宽大异常,AMT低阻异常、激电高极化率异常应为岩体引起。

960 m为中心低阻异常近直立,宽10~60 m,可延伸至标高-300 m,地表存在有一含金石英脉,对应的极化率剖面上存在一高值峰,暗示本区含矿构造具有低阻、高极化特征,低阻带两侧高阻带推测为受构造影响较弱地层。1045 m为中心低阻异常较陡立,略向南东倾,宽40~80 m,可延伸至标高-200 m,地表发现有宽约2 cm石英细脉,对应极化率异常不显著,可能因含矿构造埋藏较深,采用的对称四极装置测量深度有限,导致极化率异常不显著,也可能因该构造仅为一含水断裂。

云山金矿综合地质-地球化学-地球物理多元信息相结合的快速评价工作显示,该区地表矿体数量多、分布广,面上与化探异常、激电异常相对应,深部对应的AMT低阻异常具有一定延伸,成矿前景较

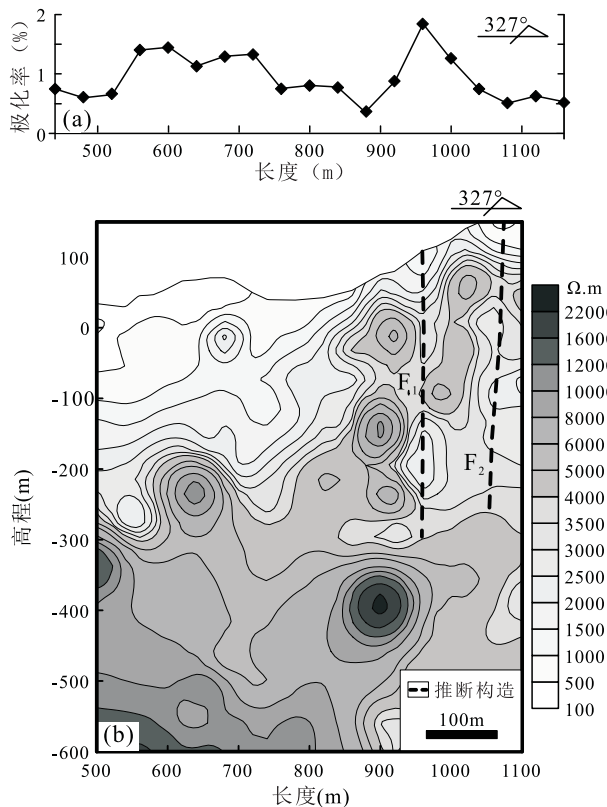


图7 云山金矿 800 线激电剖面(a)、AMT 电磁测深断面(b)对照图

Fig. 7 Synthetic map of AMT electromagnetic sounding (a) and induced polarization (b) along the No. 800 line in the Yunshan gold deposit

好,初步判断具有找寻中型金矿潜力。

4 结 语

小沟铁矿、白音塔拉铅锌银矿点、云山金矿 3 个代表性矿床(点)综合地球物理研究有效的识别出了磁性地质体、岩体侵入通道、含矿构造。作者研究的 3 个矿床野外地球物理勘探工作时间多在 1 个月,通过采用激发极化法、磁法、土壤化探等面上评价方法或方法组合的联合应用,达到了快速了解矿化地质体(异常)在地表浅部平面上的数量、形态产状和延伸规模的目的。进一步选用的激电测深、AMT 电磁测深技术不仅可以帮助交叉检验面上异常的可靠性,同时可以帮助地质人员透视可能的矿化地质体在垂向上的数量、形态产状、延深规模。

与地质、地球化学、甚至遥感等信息密切结合的综合地球物理研究不仅可以指导下一步的工程验证,更重要的是降低了探矿风险、提高了探矿效率、缩短了探矿周期。地球物理勘探方法,在未知或半未知勘探区,寻找隐伏盲矿体、追索矿体延伸方向、辨别矿体物理属性、了解矿化体规模和产状、构建矿

化体找矿模型、指导探矿工程部署等方面越来越发挥着重要作用。许多情况下,结合少量验证工程还可快速预测工作区的远景资源量。

参考文献 (References):

- Chen W J, Liu H T, Liu J M, Sun X G, Zeng Q D. 2010. Integrated geophysical exploration for the Longtoushan Ag-Pb-Zn deposit in the southeast of the Da Xing'an Ling mountains, Inner Mongolia, northern China[J]. *Exploration Geophysics*, 41(4): 279—288.
- Liu H T, Liu J M, Yu C M, Ye J, Zeng Q D. 2006. Integrated geological and geophysical exploration for concealed ores beneath cover in the Chaihulanzi goldfield, northern China[J]. *Geophysical Prospecting*, 54(5): 605—621.
- 李永兵, 陈绪松, 刘建明, 张寿庭. 2005. 利用 VBA 和 Excel 实现快速处理国产甚低频电磁仪 DDS-1 型测量数据[J]. *地球物理学进展*, 20(1): 225—230.
- 刘光鼎, 郝天姚. 1995. 应用地球物理方法寻找隐伏矿床[J]. *地球物理学报*, 38(6): 850—854.
- 刘光鼎, 刘秉光, 刘建明, 秦克章. 2013. 中国金属矿的地质与地球物理勘查[M]. 北京: 科学出版社.
- 宋国学, 秦克章, 李光明. 2010. 长江中下游池州地区矽卡岩: 斑岩型 W-Mo 矿床流体包裹体与 H、O、S 同位素研究[J]. *岩石学报*, 26(9): 2768—2782.
- 孙兴国, 李永兵, 刘红涛. 2011. 综合找矿模型在内蒙古龙头山 Ag-Pb-Zn 多金属矿找矿中的应用[J]. *地球物理学进展*, 26(4): 1326—1333.
- 孙燕, 刘建明, 曾庆栋, 张作伦, 张松, 汪在聪, 褚少雄, 叶杰, 于昌明. 2010. 综合地球物理方法在某金多金属矿区找矿中的应用[J]. *地球物理学进展*, 25(6): 2096—2101.
- 杨小峰, 刘长垠, 张泰然, 郑毅. 2007. 地球化学找矿方法[M]. 北京: 地质出版社.
- 张作伦, 曾庆栋, 叶杰, 贾长顺, 李文涛. 2007. 草原覆盖区隐伏金属矿体定位预测: 以大兴安岭中南段某铅锌矿点为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 37(1): 38—40.
- 张作伦, 曾庆栋, 叶杰, 贾长顺, 李文涛. 2008. 甚低频电磁法在矿体勘查中的应用[J]. *地质与勘探*, 44(1): 67—69.
- 张作伦, 曾庆栋, 于昌明, 叶杰, 刘建明, 刘红涛, 孙兴国, 张瑞斌, 覃峰, 陈伟军. 2009. 利用 EH4、GDP-32II 预测内蒙新民煤田煤系地层空间特征[J]. *地球物理学进展*, 24(1): 303—308.
- 张作伦, 曾庆栋, 刘建明, 于昌明, 叶杰, 贾长顺. 2010. GDP-32II、EH4 在深部成矿预测中的应用[J]. *地质与勘探*, 40(3): 470—475.
- 张伟庆, 张作伦, 张鲁新, 王永彬, 曾庆栋, 叶杰, 于昌明, 刘红涛, 陈伟军. 2009. 高精度磁法在某铅锌矿体勘查中的应用[J]. *金属矿山*, (4): 394—396.
- 赵太平, 陈福坤, 翟明国, 夏斌. 2004. 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 20(3): 685—690.
- 周久龙, 罗照华, 贺怀宇, 孙静. 2012. 河北大庙铁矿床黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. *地学前缘*, 19(4): 110—117.