

## 综合地球物理勘探在龙头山 银铅锌多金属矿床中的应用

张锐<sup>1</sup>, 刘洪涛<sup>2</sup>, 刘建明<sup>2</sup>, 林建华<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**[摘要]** 为了避免地球物理方法的局限性和结果解释的多解性, 充分发挥了各个方法的优势, 使之取得地质上和经济上的最佳勘查效果, 在龙头山地区矿床地质勘查中, 综合运用了甚低频(VLF-EM)、电导率成像系统(EH4)、可控源音频电磁法(CSAMT)和激电中梯测量(TDIP)等地球物理勘探方法, 取得了较好的勘查效果。通过异常的验证, 将原来一个“银锰矿点”, 升级为潜在资源规模为大型以上的银-铅-锌多金属矿床。综合物理勘探的方法的运用, 在该区的矿产勘查中具有指导意义。

**[关键词]** 综合地球物理方法 隐伏矿体 龙头山 Ag-Pb-Zn 矿床

**[中图分类号]** P631 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2008)02-0067-06

就地质勘探而言, 地球物理方法是多种多样的, 但各个方法又都有的它一定的适应性和局限性, 同时也存在多解性, 如何将这些方法有效的组合在一起<sup>[1]</sup>, 减少其多解性, 充分发挥各个方法的优势, 在地质上和经济上获得最佳效果<sup>[2]</sup>, 逐步缩小勘探靶区, 最终达到勘探矿体的目的, 一直是勘探地球物理工作者追求的目标。

龙头山银铅锌多金属矿床的勘探为地球物理的综合应用提供了一个典型的事例。

### 1 龙头山银铅锌多金属矿床地质概况

龙头山矿区位于内蒙古自治区阿鲁克沁旗双胜镇下双井村(东经119°44', 北纬43°40'), 区内出露的地层有二叠系下统大石寨组和上统满克头鄂博组、玛尼吐组, 以及第四系松散堆积。矿床的容矿岩为下二叠统大石寨组的安山质火山岩或火山碎屑岩。控矿断裂构造系统主要为南东向和近东西向。

根据目前探槽、坑道和民采坑揭露的情况, 区内发育两个规模较大的主矿带和若干个规模较小的矿化带, 这些矿(化)带总体上近于平行(走向290~300°)。I号矿带位于矿区中东部, II号矿带位于矿

区西部, 其余的小型矿带位于矿区东部(图1)。

矿石矿物主要为方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、褐铁矿、赤铁矿、软锰矿等。脉石矿物主要为石英、方解石、绢云母和粘土矿物。矿石构造主要由蜂窝状构造、致密块状构造和浸染状构造。矿石结构有自形-半自形晶粒结构包含结构、交代熔蚀结构和固溶体出溶结构等。

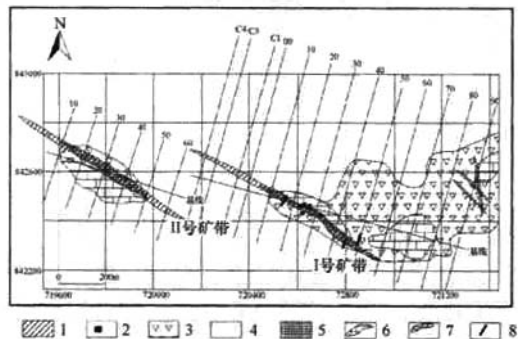


图1 龙头山矿区地质简图与地球物理测线部署

1—推测矿体; 2—民采小浅井; 3—二叠系砂板岩、火山碎屑岩; 4—第四系; 5—露头矿体; 6—燕山中期酸性脉岩; 7—二叠系结晶灰岩、大理岩; 8—探槽

**[收稿日期]** 2006-12-28; **[修订日期]** 2007-03-19。

**[基金项目]** 中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX3-SW-138)和重大项目(编号: KZCX1-07)的资助项目。

**[第一作者简介]** 张锐(1973年—), 男, 2005年毕业于北京科技大学, 获硕士学位, 在读博士生, 工程师, 现主要从事矿山地质和矿床学研究工作。

## 2 综合地球物理方法的选择与实施

龙头山银多金属矿床除 I 号矿带东部和 II 号矿带中部出露地表外(图 1),其余被厚度不等的第四系松散堆积所覆盖,为半隐伏矿床,因而需要地球物理探测手段来确定其深部变化与平面展布。在此矿区的地球物理勘查过程中,首先采用甚低频(VLF-EM)测量方法确定矿化带的走向和延伸,然后进行 EH4 电磁测深(可控源与天然场相结合)、可控源音频电磁法(CSAMT)等测深技术以剖面法确定矿带的深部变化。另外在矿区西部还进行了激电中梯测量(TDIP),对电磁法扫面进行了交叉检验。采用的仪器主要为美国 GEOMETRICS 和 EMI 公司联合研制的 EH4 电磁测深系统、美国 Zonge 公司研制的 GDP-32 II 多功能电磁测量系统、加拿大 GEONICS 公司和瑞典 ABEM 公司联合研制 WADI 甚低频测量仪和我国重庆地质仪器厂生产的 DDS-3 型甚低频测量仪等,这些技术方法的联合应用和交叉检验,可以有效地反演地下 0~2000m 的控矿构造系统的电性结构和地质构造,进而对矿床内主要矿脉的地质规模做出具有深部依据的评估。

### 2.1 甚低频(VLF-EM)的应用及异常解释

甚低频电磁测量(以下简称 VLF)作为一种浅层地球物理探测技术,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<sup>[3]</sup>。但由于 VLF 属于被动源电磁感应方法<sup>[4-7]</sup>,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 40~50m)。因此,甚低频通常用来地质扫面,以控制矿体的延伸和走向。

在这次测量中,根据龙头山矿床的矿带规模与分布(图 1),考虑矿区内大面积第四系覆盖区下可能存在隐伏矿化带,我们在矿区东部(I号矿带)以线距 50m、点距 10m、测线长度 800m 部署地球物理测网;矿区西部(II号矿带)的部署在线距和点距与东部相同,但测线长度改为 400m。全矿区共部署甚低频测线 36 条,近东西控制矿带长度约 1800m。

需要说明的是,矿区东、西部的测网不是同时布置的,二者没有使用同一条基线,而且各自的测线编号自成体系。(图 1、图 2)。在甚低频适应性试验、fraster 滤波校正和建立甚低频矿区模型解释剖面的基础上,得到甚低频扫面的具体结果见图 2(农电输电线路是矿区甚低频测量的主要环境干扰因素,它们表现较高的电流密度值,为强烈的低阻带)

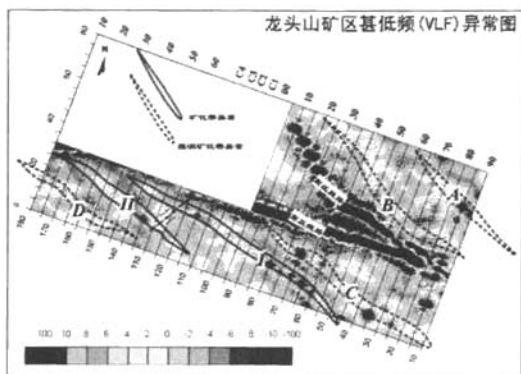


图 2 龙头山矿区甚低频电磁测量 Fraster 滤波等值线平面图

根据矿区甚低频异常测量结果(图 2)可知,在龙头山矿区清晰地分辨出 6 条规模宏大的潜在矿化甚低频异常(I、II、A、B、C、D),其中 I、II 号甚低频异常与已知的 I、II 矿带相对应,是无可争议的矿致异常。A 异常带在地表可见到两条 1~1.5m 宽的 Ag—Pb—Zn 矿脉,二者相距不到 10m,因此也是矿致异常显示。B 异常位于龙头山北侧与庄稼地结合部,我们检查异常时在该异常带所处位置的梯田埂上,发现了强褐铁矿化-赤铁矿化的岩石碎屑,取样显示出 Au 矿化( $Au = 0.87g/t, n = 1$ ),因此这个异常也可能是矿致异常。C 和 D 两个甚低频异常分别位于 I 号矿带北侧和 II 号矿带南侧,它们在地表没见到任何矿化显示或被第四系覆盖,因而没有直接的地质证据说明其是否为矿致异常;但根据它们的平面分布形态及其与 I、II 号矿致异常之间的协和、等距、侧列关系,我们推测这两条 VLF 异常极有可能是矿致异常。

### 2.2 EH4 电磁测深结果与解释

EH4 电磁测深技术,可以有效地探测矿带-矿化带甚至矿体在地下 600~1000m 深度范围内的产状、规模及其变化趋势<sup>[8,9]</sup>。该方法是较为昂贵的地球物理详查手段,不可能像 VLF 测量那样长剖面大量使用。

矿区的 EH4 测线位置与 VLF 测线重合,采用 10m 的点距,但其长度短于后者,这主要归功于 VLF 测量对主矿带(I 和 II)的确定,以跨越主矿带的 VLF 异常宽度为准。矿区共部署 EH4 测线 6 条:矿区东部 3 条(10、35 和 45 线)控制 I 号矿带,矿区西部 3 条(20、35 和 60 线)控制 II 号矿带。

由东区的 35 线(图 3)和西区的 20 线(图 4)典型视电阻率解释剖面研究表明,I 和 II 号矿带在

EH4 视电导率成像剖面上表现为中、高阻影像特征,矿带一般位于低阻带与高阻带之间的过渡地带(或梯度带);极低阻带和极高阻带均不是矿化带的 EH4 影像显示。

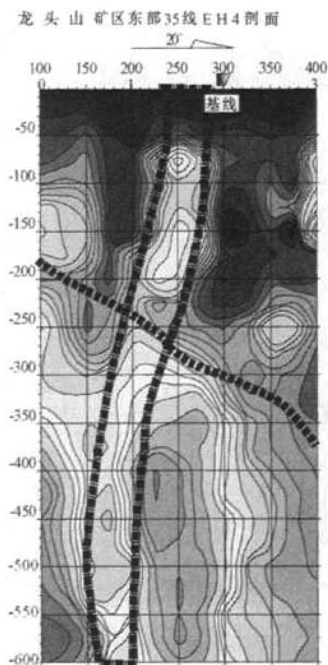


图3 龙头山东区 35 线 EH4 测深影像  
矿体露头:基线南 36m 为北界,矿带厚度 18m

根据矿区内 6 条 EH4 连续视电导率剖面测量与解析,取得如下主要认识与成果。

1) EH4 测量结果不仅与 VLF 扫面所圈定甚低频异常带基本一致,而且也与实际的矿带出露位置一致。

2) 矿区的东、西部在卡尼亚电阻率方面存在轻微的差异:东部整体上背景场电阻率偏高,而西区的背景场电阻率偏低。这可能由于矿区东、西部在围岩性质和岩石破裂程度上的差异所引起的(图 3、图 4)。

3) EH4 影像表明,I 和 II 号矿带至少在地下 600m 的深度范围内仍然清晰存在。矿带两侧的电性结构 300m 以上较为复杂,不排除存在另外新的隐伏矿带。

4) I 号矿带在 0 ~ 250m 的深度内总体上近于直立,但 250m 以下产状发生变化,在不同矿段倾向可能有所不同,在倾向上总体表现为舒缓波状(图 3);东部 10、35 和 45 线 EH4 剖面在电性结构上十

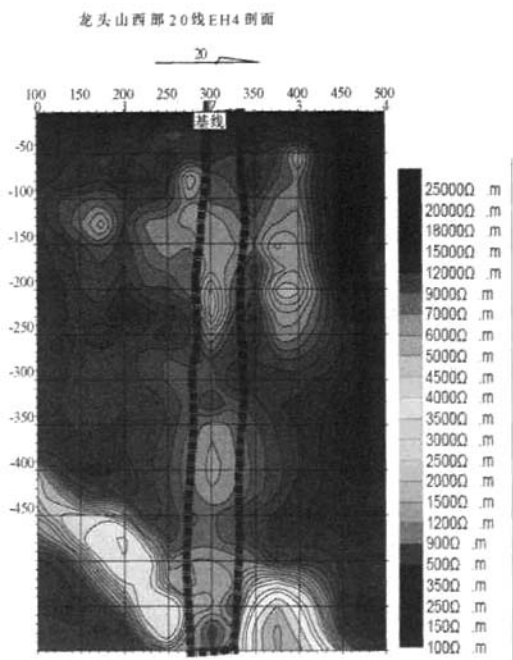


图4 龙头山西区 20 线 EH4 测深影像

分相似,尤其值得注意的是,在地下 250m 的深度附近可能存在一条倾角(40 ~ 45°)的北倾低阻带,将 I 矿带的 EH4 异常切穿并有小规模位移,因而推测这条低阻带可能是一条成矿后中等角度的正断层所致。

5) II 号矿带在垂向上总体表现为近直立状,电性结构清晰稳定,不同测线的 EH4 测深影像具有良好的可比性:矿带南侧为明显的低阻带,而矿带北侧则为明显的高阻带,矿带位于过渡带之中(图 4)。这种剖面结构特点暗示矿化带可能发育在岩性对比强烈的过渡部位。

### 2.3 可控源音频大地电磁法(CSAMT)测深结果与解释

此次可控源音频大地电磁法(CSAMT)测深工作主要在龙头山西部进行。由于测量实施时矿区周围农田的庄稼已经长大,因而不能完全按照原 VLF 测线进行。为了后续将不同探测方法获得的结果进行交叉对比,我们尽可能使 CSAMT 测线在矿体露头部位与原测线重合或接近重合。因此,35 和 45 CSAMT 测线与原 VLF 测线之间交角为 10°,但在矿带露头一带二者的位置则十分接近。

我们使用 CSAMT 测深的主要目的是为了查明矿带的宏观深部延伸趋势。这主要基于 CSAMT 测量具有勘探深度大的特点<sup>[10]</sup>,同时,该方法的弱点是

其分辨率较 EH4 测量低。从图 5 可以看出,II 号矿带表现为中低阻带,这与 EH4 测量结果相似。矿带包含在一个宽大的低阻带之中,在垂向上可以一直

延续到地下 800m 以下,十分稳定。“45”线剖面中,发育一条北倾的低角度甚低阻异常带,推测是低角度断层所致。

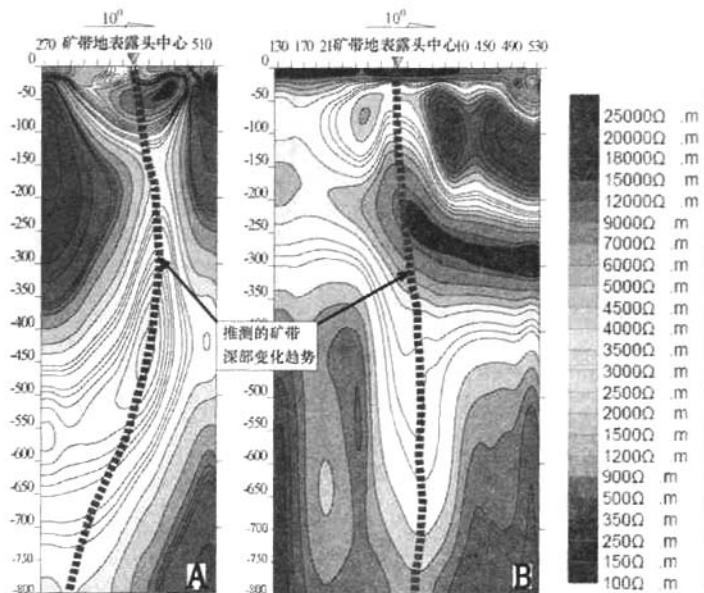


图 5 龙头山矿区西部可控源音频大地电测(CSAMT)测深剖面

A: II 矿带“35”线; B: II 矿带“45”线剖面

#### 2.4 激电测量与异常解释

此次采用激电中梯测量方法,采用的装置参数为  $AB=900\text{m}$ ,  $MN=20\text{m}$ 。测网的布置与矿区西部甚低频(VLF)测网重合。测线包括 20、25、30、35、40、45、50、55、60,测线长度为 300m(基线为中心两侧各 150m),测量覆盖范围为  $300\text{m} \times 400\text{m}$ 。

此次激电中梯测量获得了充电率、电阻率以及金属因子三个重要参数。高充电率、低电阻率和高金属因子是金属矿的激电异常特征。

从图 6、7 和图 8 可以看出,已知的 II 号矿带具有十分清晰的高充电率、低电阻率和高金属因子异常显示。尤其是电阻率和金属因子异常与已知矿带的走向分布几乎完全一致,强有力地证明了该方法的有效性。

值得高度重视的是,在 II 号矿带南侧农田覆盖区,激电测量发现了一个强度和规模均大于 II 号矿带的高充电率、低阻和高金属因子异常带(图 6 至图 8)。该异常带在甚低频测量(D 异常)(图 2)和 EH4 测深(图 3 和图 4)中都有清晰的显示。因而我们认为,这个激电异常极有可能是矿致异常,值得今后勘探中进行工程验证。

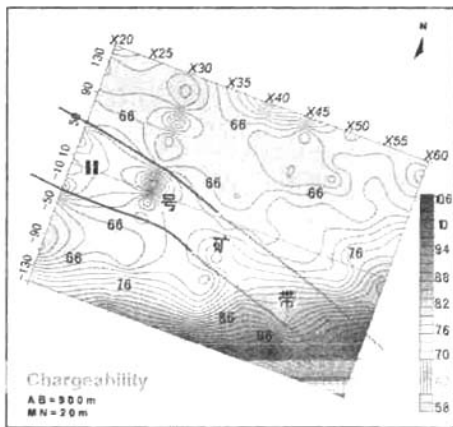


图 6 龙头山矿区西部激电测量充电率异常图

### 3 地球物理异常的工程验证

地球物理异常是地下地质构造和地质体因物性差异而引起的,但毕竟是一种间接的、非实物性的探测结果。因而需要实物性的检验或异常验证。在龙头山矿区,工程验证的依据主要来自:民采矿坑、探槽和浅井工程。

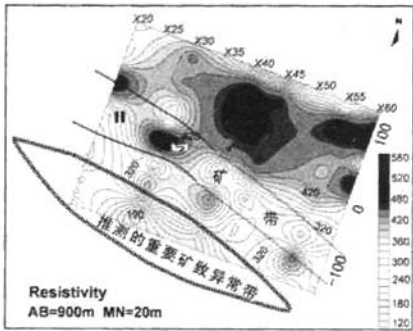


图7 龙头山矿区西部激电测量电阻率异常图

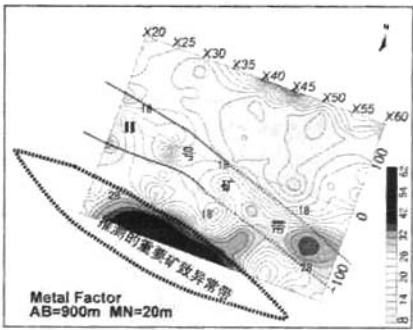


图8 龙头山矿区西部激电测量金属因子异常图

3.1 龙头山矿区东部

龙头山矿区东部是 I 号矿带和 A、B、C 等 VLF 异常的发育地段(图 1)。

1) I 号矿带异常的工程验证

在 I 含矿带中部约 250m 的走向长度内,已有几乎连续分布的前人近地表(深度 3 ~ 15m)的民采矿坑(7 个)和深达 30 ~ 80m 的探矿小井(4 个);我们又在该矿带 VLF 异常的南北延长部之 10 线、15 线、45 线和 50 线开挖了 4 条探槽。所有前人采矿坑和探井均见到矿带(宽 17 ~ 28m)和工业矿体(7 ~ 18m);新挖的 4 条探槽中,除 50 线探槽因道路原因未达探矿目的外(近见到下盘蚀变带),其余 3 条探槽均见到矿带(12 ~ 26m)和矿体(8 ~ 14m)。因而可以确认,I 号矿带的 VLF 和 EH4 异常与实际矿带在空间上(走向与延深)具有良好的对应性。

2) A、B、C 异常-实地地质调查

矿区东部 A、B、C (图 1)3 个 VLF 异常现阶段还没有进行新的工程验证,但进行了野外实地地质调查。观察表明,A 异常所在地表可见到两条相距 10m、宽 1 ~ 1.5m 的 Ag - Pb - Zn 陡倾斜矿体,走向与异常方位一致。B 异常与 C 异常的地表状态相

似,全部被坡积物或农田覆盖。但据实地观察和取样,以及附近的小竖井(80m 深)工程,确认 B、C 皆是矿化异常。

3.2 龙头山矿区西部

龙头山矿区东部是 II 号矿带和 D 等 VLF 异常的发育地段(图 1)。

1) II 号矿带异常的工程验证

在 20、25、30 和 35 线开挖长探槽进行矿带的近地表揭露。在这 4 条探槽中均见到宽大的矿化蚀变带(17 ~ 25m)和工业矿体。为了了解 II 号矿带的浅深部变化,又在 25 线西侧 2m 打了一个深 16m 的浅井,并在该浅井底部施工了长度约 46m 的穿脉。在穿脉中见到宽 40m 的原生铅矿石 (Pb + Zn > 4.7%, Ag > 110 × 10<sup>-6</sup>)。

2) D 异常地质属性推测

对于龙头山矿区 II 号矿带南侧的 D 甚低频异常(图 1),EH4 连续电导率测量(图 3 - 图 4)和激电测量(图 6 ~ 图 8)都分别证实了该异常的存在。如同前文所分析的那样,我们推断该异常应为矿致异常,而且其矿化强度可能甚至高于已得到工程验证的 I 和 II 号矿带,这主要因为它具更高的激化率和金属因子等地球物理特征。该异常目前还没有进行工程验证。

表 1 勘探方法、矿化异常以及异常解释对应表

勘查方法	对应的矿脉	异常特征	实际对应的矿脉	查证
VLF	A、B、C、D、I、II	中低阻异常	A、B、C、I、II	I、II 有矿体露头,民采矿坑(7 个)以及探槽验证,均见矿;A、B 通过地表查证和取样为矿化异常;C 附近有矿。D 为推测矿体未验证
EH4	I、II	中低阻(与 VLF 异常相对应)	I、II	
CSA MT	II	中低阻(与 VLF 异常相对应)	II	
TDIP	II	中高充电率、中低电阻率、中高金属因子(与 VLF 异常相对应)	II	
	D	低电阻率、高金属因子(与 VLF 异常相对应)	D	

综 2、3 所述,VLF、CSAMT、EH4 以及 TDIP 等地球物理方法在该地区的综合应用中,具有一定的勘探效果,与实际工程揭露的矿体具有一定的吻合性,具体见表 1。综合地球物理找矿工作在地区具有一定的指导意义。

#### 4 结论

1) VLF、CSAMT、EH4 以及 TDIP 等地球物理方法综合应用,在该地区探矿中是比较有效的方法。通过工程的验证和实践观察,这些用不同方法获得的异常,总体上具有良好的可比性、交互印证性和地质可解读性,具体可见勘探方法、矿化异常以及异常解释对应表。这为该地区以后的地质勘查提供了一个方法或途径。

2) 通过对龙头山银铅锌多金属矿区的地质-地球物理勘查,确认它是一个以银为主、辅以铅锌的多金属矿床。矿区内共发现 6 个规模不等的平行带状综合地球物理异常,并对其中的两个异常带(I 和 II)进行了综合地球物理测深与工程验证。通过验证,将原来一个“银锰矿点”,升级为矿带走向长度愈 1800m、宽度 15~27m,其潜在资源规模为大型以上的银-铅-锌多金属矿床(银金属量 3106.76t,铅金属量 222 768t,锌金属量 308 448t)。

3) 矿区内未进行工程验证的其余 4 个异常带,也具有相当大的几何规模,并初步显示出 Ag、Pb、Zn、Cu、Au 等矿化,因而是矿区内极具找矿潜力矿致异常,值得今后进一步勘查与评价。

#### [参考文献]

- [1] 于昌明. 黑岚沟金矿的综合地球物理研究[J]. 地球物理学进展, 1999, 14(2): 114-122.
- [2] 张献民. 论地质-地球物理模型的某些问题[J]. 河北地质学院学报, 1995, 18(1): 33.
- [3] 张寿庭, 徐旃章, 郑明华. 甚低频电磁法在矿体空间定位预测中的应用[J]. 地质科技情报, 1999, 1(4): 85-88.
- [4] Mathieson C C, Crossley D J. Interpretation data[J]. Geological Survey of Canada, 1981, of single frequency VLF(4): 49-65, 81-85.
- [5] McCaffrey R J, McElroy W J, Leslie G A. Exploration of a lignite-bearing basin in Northern Ireland using ground magnetic and VLF-EM methods[J]. Geophysics, 1995, 60(2): 408-412.
- [6] 史保连. 甚低频电磁法及其在岩溶地区的应用[J]. 物探与化探, 1982, 6(4): 237-246.
- [7] 张文居, 赵其华, 沈军辉, 等. 甚低频电磁法确定覆盖层厚度的理及应用[J]. 西北水电, 2004, (1): 9-11.
- [8] 于爱军, 黄 辉, 徐德利, 等. 综合电法在新疆哈西金矿区寻找隐伏矿的应用[J]. 地质与勘探, 2006, (42), 6: 57.
- [9] 姜永兰, 付占荣, 孙家枢, 等. 甚低频电磁法在柴胡栏子金矿间接找矿中的应用[J]. 地质与勘探, 2005, 41(1): 77-79.
- [10] 底青云, 伍法权, 王光杰, 等. 地球物理综合勘探技术在南水北调西线工程深埋长隧洞勘察中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3632.

### APPLICATION OF COMPREHENSIVE GEOPHYSICAL METHODS IN THE LONGTOUSHAN Ag-Pb-Zn DEPOSIT

ZHANG Rui<sup>1</sup>, LIU Hong-tao<sup>2</sup>, LIU Jian-ming<sup>2</sup>, LIN Jian-hua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of High-Efficiency Mining and Safety of the Metal Mines, Ministry of Education, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029)

**Abstract:** In order to avoid limitations and data multi-interpretation of geophysical methods, make full use of the advantages of various geophysical methods, and acquire the best prospecting results on geology and economy, comprehensively geophysical methods such as VLF-EM, EH4, CSAMT and TDIP are used in the Longtoushan mine. Better prospecting results are obtained. After qualification testing of anomaly, Longtoushan mine has become large Ag-Pb-Zn poly-metallic deposit from an Ag-Mn occurrence. Utilization of comprehensive geophysical methods in the Longtoushan mine provides guidance signification for ore exploration.

**Key words:** comprehensive geophysical method, buried ore, Longtoushan Ag-Pb-Zn deposit.