

文章编号: 0258-7106(2008)01-0049-08

# 甚低频电磁法在草原覆盖区矿产勘查中的应用\*

董英君<sup>1</sup>, 王戈<sup>2</sup>, 宋玉坤<sup>3</sup>, 李进文<sup>1</sup>, 张德全<sup>1</sup>, 余宏全<sup>1</sup>,  
李大新<sup>1</sup>, 丰成友<sup>1</sup>

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 内蒙古自治区地质矿产勘查开发局, 内蒙古 呼和浩特 010020;  
3 内蒙古地质勘查有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要** 在草原覆盖地区进行矿产资源勘查时, 甚低频电磁法在一定的地质条件下是间接找矿的有效方法。众所周知, 与矿有关的主要地质因素有断裂、破碎带、蚀变、矿化等, 它们与围岩在导电性上往往有很大差异, 因此, 在覆盖厚度不大、人工干扰因素较少等情况下, 采用甚低频法可经济、快速地发现并查明这些控矿因素, 以达到间接找矿的目的。文章是近些年来笔者在草原覆盖地区进行矿产资源勘查时, 使用甚低频电磁法取得的一些间接找矿效果。

**关键词** 地球物理学; 甚低频电磁法(VLF-EM); Fraser滤波; 线性滤波; 矿化蚀变带; 草原覆盖区  
**中图分类号**: P613.3+25 **文献标识码**: A

## Application of very low frequency electromagnetic method to exploration work in grassland-capped areas

DONG YingJun<sup>1</sup>, WANG Ge<sup>2</sup>, SONG YuKun<sup>3</sup>, LI JinWen<sup>1</sup>, ZHANG DeQuan<sup>1</sup>, SHE HongQuan<sup>1</sup>,  
LI DaXin<sup>1</sup> and FENG ChengYou<sup>1</sup>

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Inner Mongolia Bureau of Geology  
for Mineral Exploration and Exploitation, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China;  
3 Geological Exploration Co. Ltd., Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

### Abstract

The very low frequency electromagnetic (VLF-EM) method, adopted as the means of indirect exploration under certain geological settings, has been proved to be effective in grassland-capped areas. As is well known, the major geological factors for ore formation include tectonic structures, faults, fracture zones, alteration, mineralization etc., which are usually quite different in conductance from those in surrounding rocks. Therefore, when constraining these mineralization-controlling factors under such geoelectric circumstances as capping areas with limited thickness or areas with insignificant human disturbance, we can adopt VLF-EM as a rapid and economical indirect means for mineral exploration. This paper has summed up some indirect ore-prospecting results obtained by the authors in recent years in applying VLF-EM to mineral exploration work in grassland-capped areas.

**Key words:** geophysics, VLF-EM, Fraser filtering, linear filtering, mineralization-alteration belt, grassland-capped area

\* 本文得到国家科技支撑计划“内蒙古大兴安岭中北段铜、铅锌、金、银多金属矿成矿预测与评价技术开发”项目(2006BAB01A10)的资助  
第一作者简介: 董英君, 女, 1951年生, 副研究员, 主要从事勘探地球物理、综合找矿方法研究。  
收稿日期: 2007-09-12; 改回日期: 2007-12-15。许德焕编辑。

内蒙古得尔布干地区多年来一直是中国东北部矿产资源战略性找矿评价的重要区带,具有很好的找矿前景。工作区位于该成矿带西南部的满洲里—新巴尔虎右旗干旱草原丘陵区。由于该区草原覆盖严重,因而,在找矿勘查中,欲快速查明并圈定控矿要素(含矿构造、与成矿有关的岩浆岩、蚀变矿化带等)尽快发现地表矿化线索或矿化体,具有一定的难度。对此,笔者的经验是,可先进行甚低频电磁法测量,结合大比例尺地质测量结果,识别并初步圈定蚀变破碎矿化带,为部署进一步的勘查工作提供依据,往往能取得较为理想的勘查效果。

## 1 甚低频电磁法简介

甚低频电磁法(VLF-EM)是一种被动源电磁勘探方法(以下简称VLF),主要用于找矿勘查、探测地下含水构造、喀斯特溶洞和地质填图等。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以长波台发射的15~25 kHz的电磁波作场源。在远离发射台的区域工作时,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,地下存在的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,故两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,可探测与围岩存在明显电性差异的矿化带、构造带、蚀变破碎带以及电性不同的岩性分界面等地质体和地质构造,达到找矿勘查、地质填图之目的(史保连,1982;1986)。

野外测量使用的是重庆地质仪器厂生产的DDS-1甚低频电磁仪。测量方式是倾角法,测量的是磁场水平分量( $N_H$ )、磁场垂直分量( $N_Z$ )和极化椭圆倾角( $D$ )。在倾角法所测参数中,属倾角 $D$ 值最灵敏,地质效果较好,但由于该方法所用工作频率高,易产生较大的地质噪声而使倾角曲线杂乱。为了消除干扰、减小地形影响、突出异常,通常采用一维数字滤波的方法对所测倾角值进行Fraser滤波处理,其滤波算符为:

$$F_{2,3} = (D_{n+3} + D_{n+2}) - (D_{n+1} + D_n)$$

式中, $n$ 表示测点顺序( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), $D$ 为测点上极化椭圆倾角读数; $F$ 为滤波结果。滤波处理后

的曲线交零点或拐点(即异常点)被转变成极大值,便于勾绘等值线平面图。

对隐伏或覆盖区段矿带(体)的形态、产状及埋深等特征的判析,是找矿预测和制定探矿工程部署方案的关键。为进一步揭示待测低阻异常体在三维空间的展布规律,可采用对实测倾角资料的线性滤波处理的方法。该方法是基于甚低频倾角资料的不连续性,通过线性滤波处理,将其结果用特定深度的等效电流密度来表示,所测量的磁场即由其产生。因此,通过对同一组实测资料进行的不同深度的反滤波,可揭示电流密度随深度变化的特征。电流密度大的区域即为低阻体的位置,并据其异常体发育特征来揭示地下待测体的空间展布规律。在进行不连续滤波计算时,采用如下经验公式(Karous et al., 1977):

$$\Delta Z / 2\pi \cdot I_a(\Delta X / 2) = -0.205H_{-2} + 0.323H_{-1} - 1.446H_0 + 1.446H_1 - 0.323H_2 + 0.205H_3$$

式中, $I_a$ 为电流密度; $H_i = N_z(i \cdot \Delta X)$ 即某测点的垂直磁场值; $i = -2, -1, 0, 1, 2, 3$ ,为测点编号,系指求取某一电流密度值(其点位于0—1测点的中间)则需利用其右、右两侧相邻6个测点(点距 $\Delta X$ )的垂直磁场值; $\Delta X$ 为测点距( $\Delta Z / 2\pi$ )为一常数。为了得到电流密度相应的实分量,把上式的滤波系数用于相对异常的实分量 $Re(N_z / N_H)$ ,并由公式 $Re(N_z / N_H) = \tan D$ 建立与极化椭圆倾角 $D$ 的关系。需要说明的是,由此求得的电流密度值只能反映地下各测点电流密度大小的相对变化规律。实践表明,通过线性滤波处理和等效电流密度等值线剖面图的编制,并结合对其所揭示的地下低阻异常体的地质解释,定性—定量判断待测矿体的形态、产状和埋深情况,是行之有效的(张寿庭等,1999;陈迎宾等,2000)。

下面以3个勘查区为例说明VLF与地质勘查紧密结合能取得较好的勘查效果。

## 2 VLF 勘查实例

### 2.1 鼎足矿区区分不同岩性界线

鼎足矿区位于满洲里—扎赉诺尔隆起区西部长岭—新百路克一带。区内地层主要为震旦系额尔古纳河组变质基底,海西期、燕山期岩浆侵入活动及中生代强烈的火山作用,为成矿提供了良好的地质构造条件。该靶区为1:20万及1:5万区域化探异常所发现,异常处于NE、NW向断裂交汇部位,与断裂

关系密切。该异常的形态呈茄子状,面积  $45 \text{ km}^2$ , NW 向延伸。矿区内出露的地层主要为额尔古纳组白云岩、大理岩、石英砂岩和石英砂砾岩等,以及下白垩统梅勒图组基性火山岩、大磨拐河组砂岩、粉砂岩等。地质研究认为,鼎足矿区的矿体和矿化蚀变带均受大理岩和石英砂岩接触界面构造以及叠加于上的断裂构造的控制,且均产于碳酸盐岩中。因此,找矿勘查的重点应放在不同岩性接触界面及其附近的碳酸盐岩一侧,并重视叠加于接触界面、对成矿具有重要控制作用的断裂构造。

经地质填图,在鼎足矿区 2 乙<sub>2</sub> 化探异常的中部见有大理岩与两侧变质石英砂岩间的接触带,但由于草原覆盖,故该接触带界线不清晰。物性资料显示测区内的大理岩、白云质大理岩为相对高阻体,而石英砂砾岩为相对低阻体,因此,在此异常范围内进行了 VLF 测量,目的是查明大理岩与其两侧变质石英砂岩间的接触界线。

VLF 测量结果见图 1a。图中,极化椭圆倾角滤波 F 等值线正负相间,其中正异常值显示了一组 NW 向异常和一组 NE 向异常。这一结果给出了不同导电性能的地质体的平面分布状态,为下一步使

用其它地球物理方法进行精测和地质勘查提供了重要信息。随后,进行了 EH4 测量,取 EH4 地下 40 m 电阻率平面图(图 1b)与 F 平面图进行对比,可见其异常分布特征非常相似。

在上述测量结果及地质研究的基础上施工了探槽。在 500 线综合异常剖面图(图 2d)中,500 点电流密度等值线显示为一低阻细脉,槽探在此发现了 1 号矿体。在 470 点处, F 为极大值(图 2c),此处的等效电流密度等值线(图 2d)显示为一西倾且有一定延伸的低阻地质体,推测应该是由与已发现的矿化带(500 点处)平行的蚀变破碎带引起的,这一推测已为进一步的槽探工程揭露所证实。同时, VLF 结果与 EH4 测量结果也十分吻合(图 2),由图 2 可以看出,甚低频等效电流密度图(2d)与 EH4 断面图(2e)50 m 以上所显示的高阻与低阻异常体有非常好的对应关系,而且等效电流密度曲线亦显示出向下延伸的趋势。

笔者采用地质填图及 VLF 测量控制了含矿构造带的方向,经探槽揭露发现了厚大的银铅锌矿体,验证了 VLF 是在草原覆盖区进行找矿勘查的有效手段,与其他地球物理方法相比,更加快速和经济。

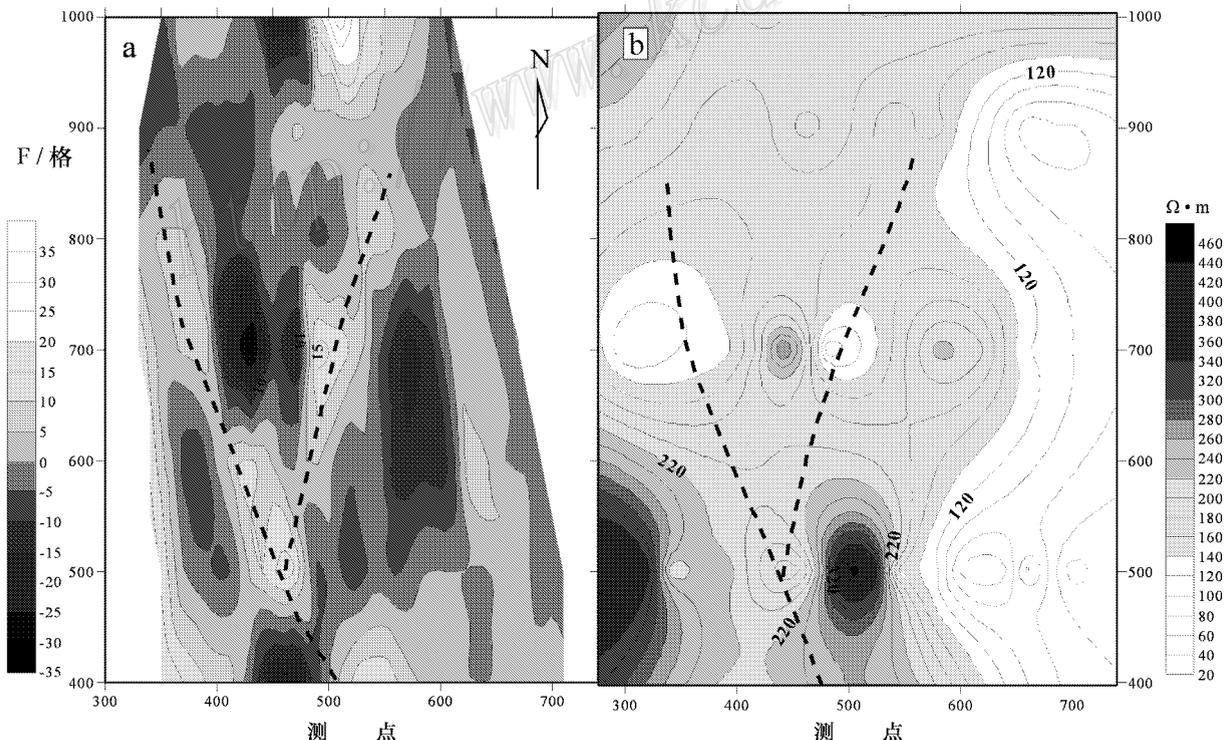


图 1 鼎足矿区 VLF 与 EH4 测量异常图

a. 极化椭圆倾角滤波 F 等值线图; b. EH4 地下 40 m 电阻率分布图

Fig. 1 VLF versus EH4 anomalies of Dingzu ore district

a. Polarization ellipse obliquity filter F contour line; b. Resistivity pattern of EH4 at depth of -40 m

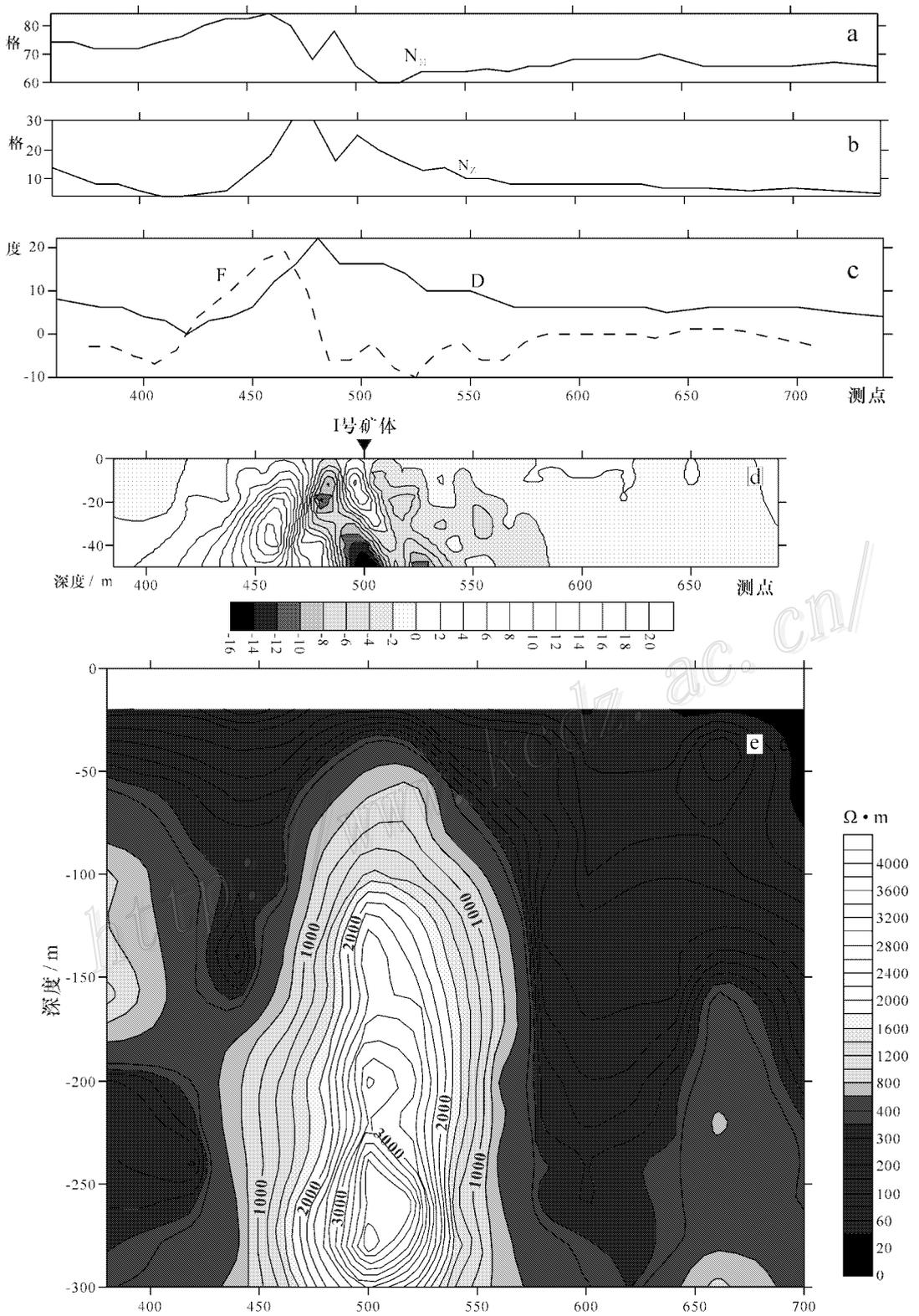


图 2 鼎足 500 勘探线物探测量综合剖面图

a.  $N_H$  为水平磁场值; b.  $N_V$  为垂直磁场值; c. F 为 Fraser 滤波, D 为极化椭圆倾角 D 值; d. 等值线-等效电流密度; e. EH4 剖面成像图

Fig. 2 Comprehensive geophysical cross section along No. 500 exploration line of Dingzu ore district

a.  $N_H$ —horizontal magnetic field; b.  $N_V$ —vertical magnetic field; c. F—Fraser filtering, D—D value in polarization ellipse obliquity; d. Contour line—equivalent current density; e. EH4 section imaging

### 2.2 海力敏呼都格脉状异常

海力敏找矿靶区位于得尔布干成矿带西南段、NW 向克尔伦断裂带附近的中生代火山断陷盆地。该区 NE 和 NW 向构造发育，隆、陷构造块体相间分布。区内主要分布大面积的侏罗纪钾长花岗岩和中侏罗统塔木兰沟组玄武安山岩(图3)。由于覆盖严重，地质填图过程中只能依靠对地表断续出露的岩脉的观察来判断构造的展布。该区内发育 3 种不同方向的岩脉：近 EW 向的斑岩脉，近 NS 向平直的石英脉和 NEE 向与侵入接触带平行的石英脉。岩脉附近的围岩普遍具有不同程度的硅化、绢云母化等蚀变。NW 向断裂破碎带较为发育。

针对海力敏矿区覆盖广且厚的情况，笔者在选

定的 1:25 000 土壤异常区和 1:5 000 地质草测范围内，开展了 VLF 扫面，目的是发现并查明隐伏控矿构造的位置，为槽探工程的部署提供依据。

VLF 测量显示，其倾角滤波 F 值异常呈 NE 向、NW 向和近 EW 向带状展布(图 4)。北面 NE 向异常显示了钾长花岗岩和塔木兰沟组玄武安山岩的接触界线以及断续出露的石英脉；近 EW 向带状展布的异常与地表断续出露的斑岩脉完全吻合；而 NW 向带状展布的异常除在地表见有较多的硬锰矿碎石外，几乎被浮土覆盖，但与 Pb 地球化学异常有较好的对应关系。因此，推测 NW 向的 F 值异常很可能是由较强的蚀变或含硫化物的赋矿构造引起的。

根据 VLF 异常和 Pb 地球化学异常的特征，初步

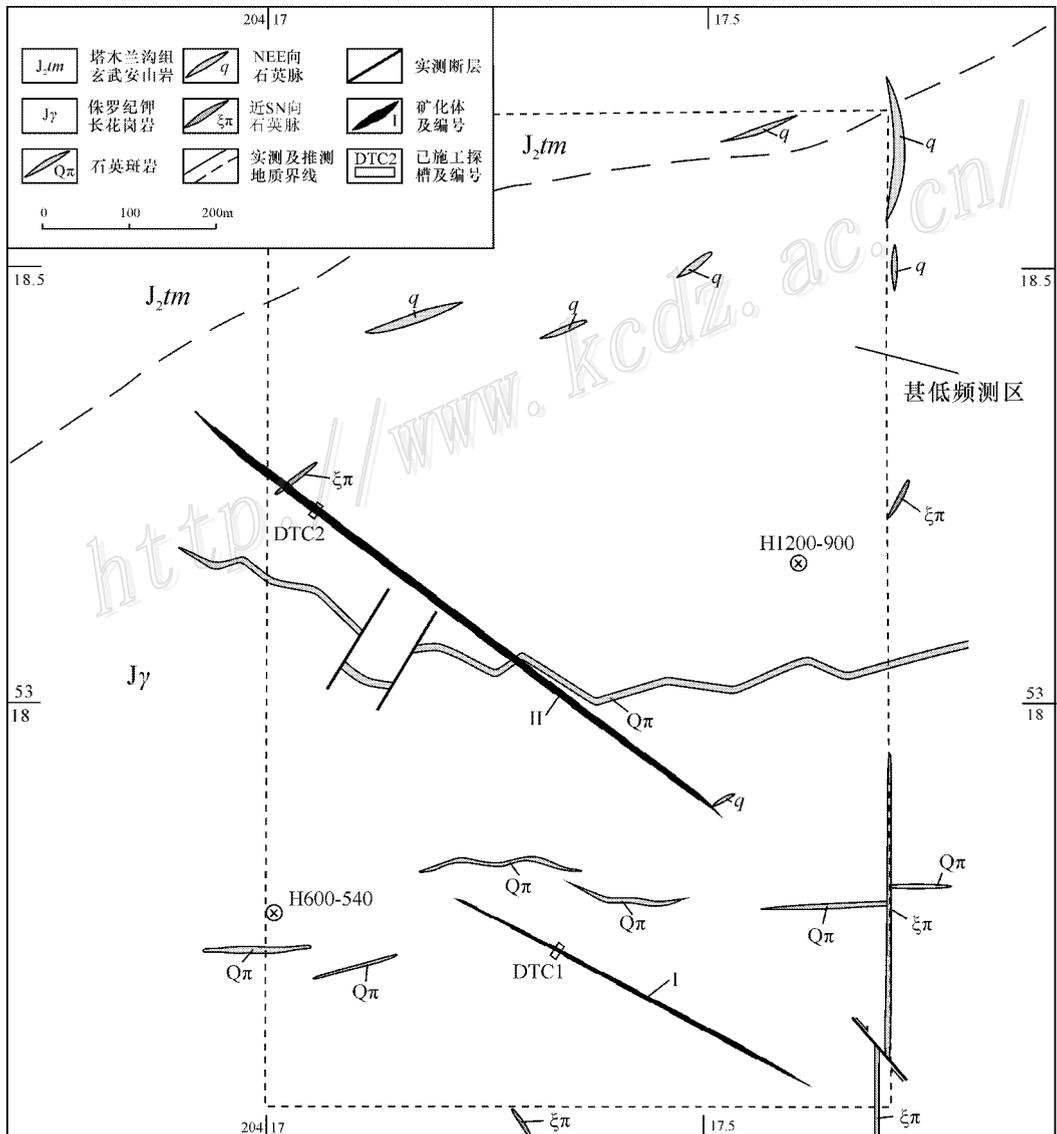


图 3 海力敏异常区地质略图

Fig. 3 Geological sketch map of Hailimin anomaly area

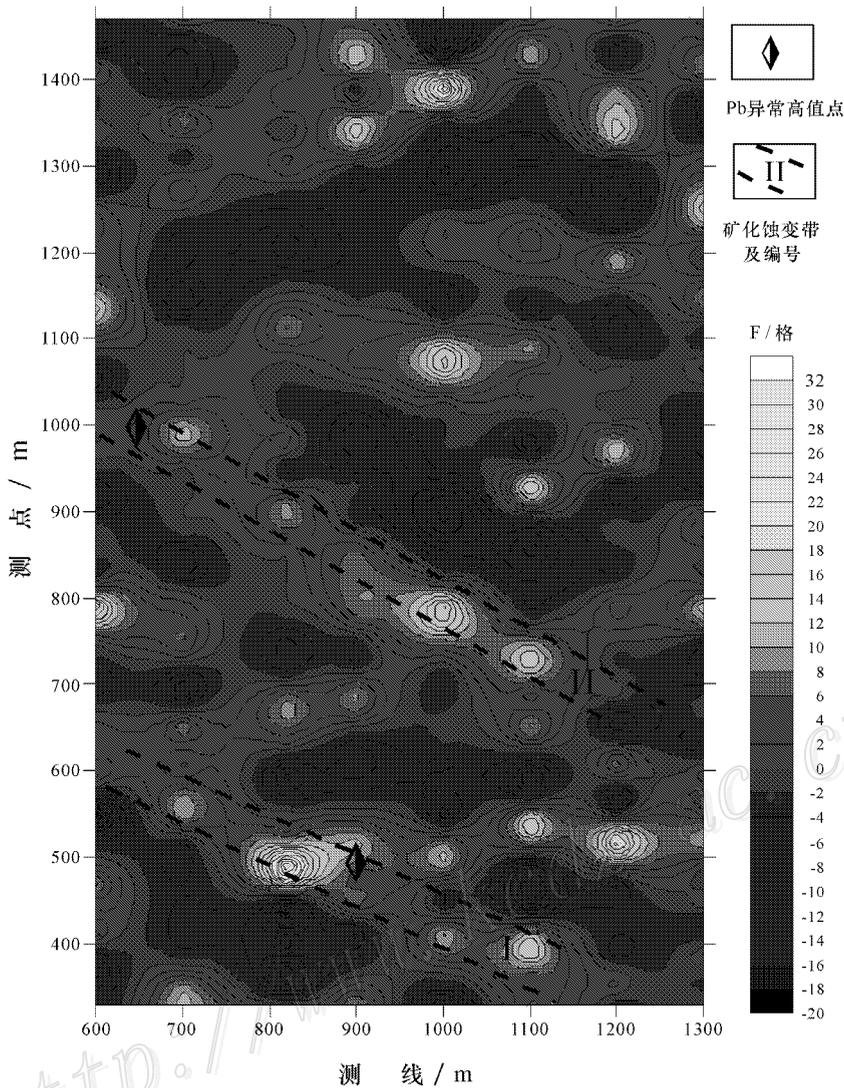


图4 海力敏异常区 VLF 极化椭圆倾角 F 值异常-矿化蚀变带分布图

Fig. 4 VLF polarization ellipse obliquity F value anomaly contour lines and distribution of mineralization and alteration belts in Hailimin anomaly area

圈出 2 条矿化蚀变带(编号为 I 和 II)(图 4)经点槽揭露证实,在 I 号矿化蚀变带内的钾长花岗岩中,见有宽 0.4 m 的锰土带,走向 320°,其刻槽样品的 Pb 含量为 0.78%,Zn 含量为 0.10%;其围岩具有硅化、绢云母化和褐铁矿化蚀变,近锰土带的岩石蚀变较强。在 II 号矿化蚀变带的北西部,探槽中的钾长花岗岩普遍绢云母化和硅化,局部岩石具有强绢云母化蚀变,其刻槽样品的分析结果表明,强绢云母化钾长花岗岩的 Pb 含量为 0.33%,Zn 含量为 0.12%。

海力敏靶区的 VLF 测量结果显示,该方法的分辨力高,可探测到宽度 1 m 左右、具一定走向长度的(矿化)体或构造带。当构造破碎带与其两侧围岩(弱变形地质体)的物化性质差异明显,尤其当构造

破碎带中充填了多金属矿脉、断层泥和裂隙水或蚀变发育时,均可产生明显的甚低频低阻异常(白大明等 2002)。对于草原覆盖区,开展甚低频电磁法测量,并与大比例尺地质测量互相配合,可快速查明和圈定蚀变破碎带,为槽探和浅井工程的布置提供依据。

### 2.3 头道井铜金矿勘查靶区的浅部构造和矿化体特征

头道井铜金矿勘查靶区地处满洲里市南约 15 km,乌奴格吐山斑岩铜矿东北约 10 km。该区位于满洲里-新百路克隆起带的东南部,处在区域内重要的控矿断裂——得尔布干断裂的西侧。该区的西侧是乌奴格吐山斑岩铜钼矿床,区域成矿条件良好。

该勘查区内出露有震旦系额尔古纳河组碳酸盐岩,有 NW 向及 NE 向多个方向的断裂和构造破碎带,燕山期花岗岩小岩体、基性-中酸性脉岩发育,是寻找斑岩-矽卡岩型矿床的理想靶区。研究区有良好的 1:2 万和 1:5 万金属地球化学异常。区内已发现头道井南、北 2 个铜矿化点,发育有矽卡岩化、绢云母化、硅化等蚀变,成矿热液活动强烈。其中,头道井北铜矿点大面积分布额尔古纳河组大理岩及变质碎屑岩,其东部和北部被侏罗纪火山岩覆盖,NE 向、NW 向构造发育,见有小型花岗斑岩脉和石英脉分布。

在头道井靶区进行了激电扫面工作,共发现 3 个激电异常,其中的 DHJ1 异常与头道井北铜矿点及 1:50 000 土壤地球化学异常(API)相吻合。DHJ1 异常区的激电视极化率异常呈不规则状展布,总体走向为 NW—SE 向,长 500 m,宽 250 m,最高值为 3.2%;其视电阻率异常呈高低阻相间分布,根据 1:2 000 地质草测结果推断,高电阻率异常主要由硅化大理岩引起,极化率异常系金属硫化物(黄铜矿)所致;矽卡岩和矿化体对应于相对的中阻、高极化或低阻、高极化带状异常。测区的地质及激电异常特征见图 5a。在此基础上进行了 VLF 测量。

图 5b 为 VLF 极化椭圆倾角滤波 F 异常等值线图,图 6 为 500 勘探线 VLF 异常剖面图。由图可见,VLF 异常明显呈 NW 向延伸,与工作区内主要含矿岩石——矽卡岩化大理岩和主要构造方向以及激电综合异常延伸方向相一致,ZK1 钻孔所处的被揭露的矽卡岩化大理岩与 F 异常相吻合。这些均表明,VLF 对具不同电阻率的地质体有较好的分辨力,能反映覆盖区地质和矿化体的特征。

### 3 结 论

实践证明,在草原覆盖区进行地质勘查,VLF 是轻便、高效的地球物理方法,可进行地质填图及初步确定隐伏含矿构造的展布,主要用于划分不同岩性界面、寻找隐伏脉状矿体和矿化蚀变带。该方法尤其适合在预查-普查阶段进行快速面积测量,能获取多种参数,其中的 F 异常易于解释,效果显著,而线性滤波则能给出异常体的空间形态,为后续地质工作的部署提供一定的依据。当然,地球物理勘查要与地质勘查紧密结合,并以地质为基础,才能取得较好的效果。

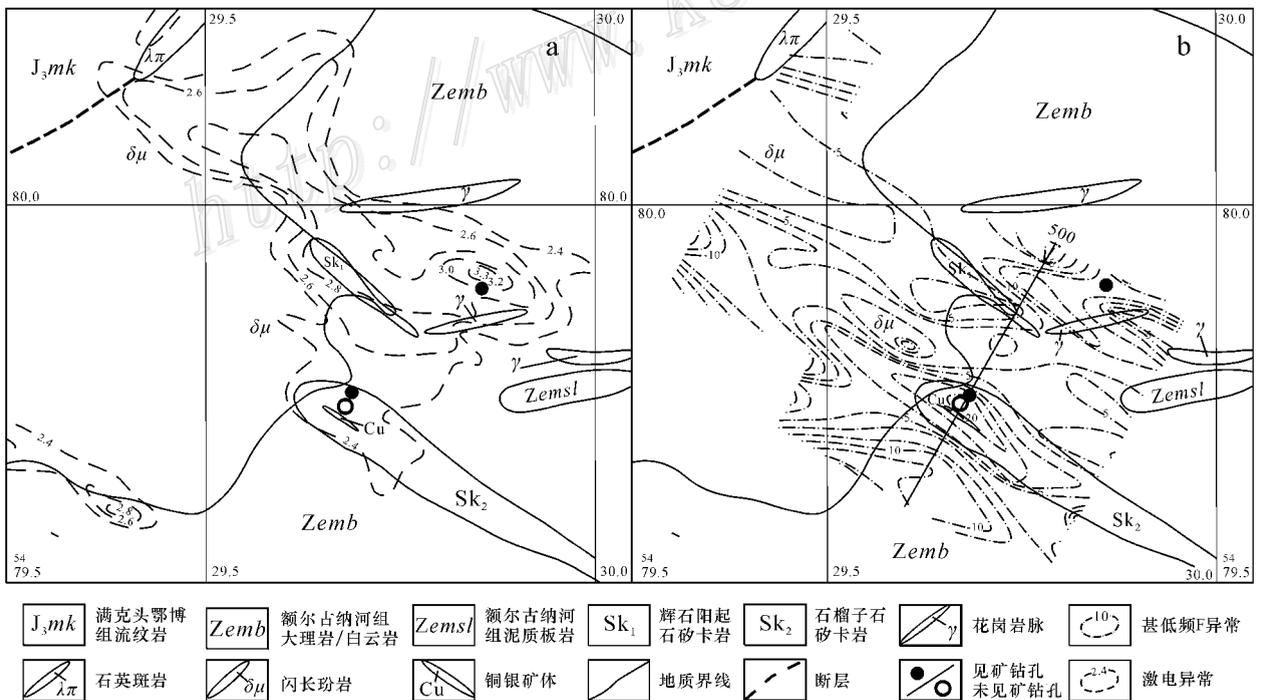


图 5 头道井靶区内 DHJ1 异常区地质图及物探异常图

a. 激电异常图; b. VLF-F 异常图

Fig. 5 Maps of geology and geophysical anomalies of DHJ1 anomaly in Toudaojing area

a. Induced polarization anomaly; b. VLF-F anomaly

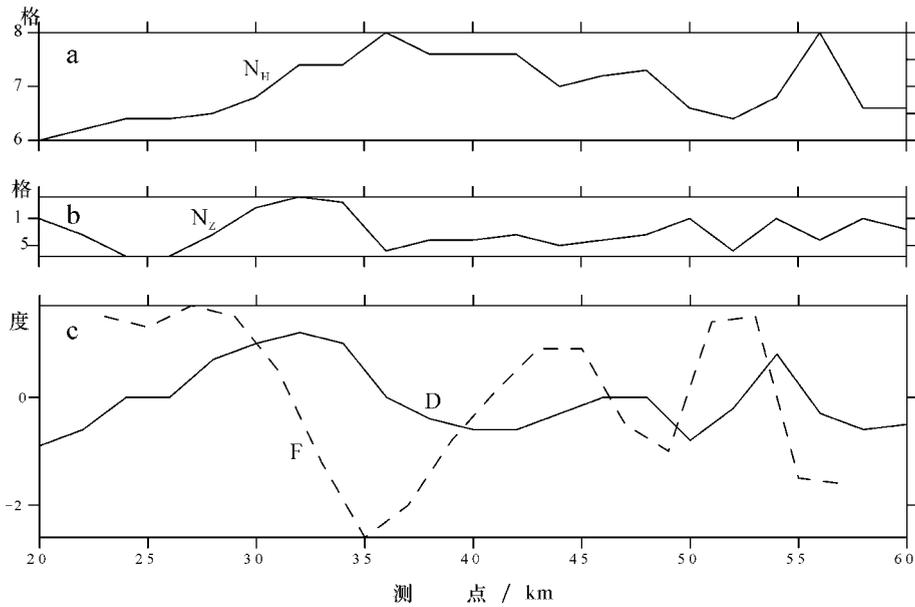


图6 头道井靶区内500勘探线VLF测量剖面图

a.  $N_H$ —水平磁场 b.  $N_z$ —垂直磁场 c. D—极化椭圆倾角 F—Fraser滤波;

Fig. 6 Cross section of VLF measurement along No. 500 exploration line in Toudaojing area  
a.  $N_H$ —horizontal magnetic field ; b.  $N_z$ —vertical magnetic field ; c. D—polarization ellipse obliquity , F—Fraser filtering

在草原覆盖区进行VLF测量,地形平坦、无高压线干扰,工作环境极为理想,但要注意的是草原网围栏,最好与之保持20 m以上的距离,以避免其对测量数据的干扰。

总之,VLF无需建立场源,简单易行,仪器轻便,快速经济,找矿效果明显,在矿产普查中值得大力推广。

## References

- Bai D M, Nie F J and Jiang S H. 2002. Feasibility of applying VLF EM methods to exploration and evaluation of vein deposits: Exemplified by exploration of gold, lead-zinc( silver) and fluorite deposits [ J ]. Mineral Deposits, 21(4): 408~413 ( in Chinese with English abstract ).
- Chen Y B, Zhang S T and Hu X Q. 2000. The application of VLF-EM technique to a stibnite ore district in Tibet [ J ]. Geophysical and Geochemical Exploration, 24(5): 383~386 ( in Chinese with English abstract ).
- Karous M and Hjelt S E. 1983. Linear filtering of VLF dip-angle mea-

surements [ J ]. Geophysical Prospecting, 31: 782~794.

Shi B L. 1982. The VLF EM method and its application in karst terrain [ J ]. Geophysical and Geochemical Exploration, 6(4): 237~246 ( in Chinese ).

Shi B L. 1986. Very low frequency electromagnetic method [ M ]. Beijing: Geol. Pub. House. 1~146 ( in Chinese ).

Zhang S T, Xu X Z and Zheng M H. 1999. Application of VLF EM to the location forecasting [ J ]. Geological Science and Technology Information, 18(4): 85~88 ( in Chinese with English abstract ).

## 附中文参考文献

- 白大明, 聂凤军, 江思宏. 2002. 甚低频电磁法对脉状矿床勘查评价的意义 [ J ]. 矿床地质, 21(4): 408~413.
- 陈迎宾, 张寿庭, 胡晓强. 2000. 甚低频电磁法在西藏某锑矿区的应用效果 [ J ]. 物探与化探, 24(5): 383~386.
- 史保连. 1982. 甚低频电磁法及其在岩溶地区的应用 [ J ]. 物探与化探, 6(4): 237~246.
- 史保连. 1986. 低频电磁法 [ M ]. 北京: 地质出版社. 1~146.
- 张寿庭, 徐旋章, 郑明华. 1999. 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, 18(4): 85~88.