

文章编号: 0258-7106 (2002) 04-0408-06

# 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\*

白大明 聂凤军 江思宏

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘 要** 脉状矿床是重要的矿床类型之一,其矿体往往赋存于断裂构造之中。甚低频电磁法(VLF-EM)以其成本低廉、轻便高效,以及对脉状矿(化)体特有的灵敏性而具有特色。文章通过对以脉状形式产出的金、铅锌(银)及萤石矿的 VLF-EM 找矿勘查实例,探讨了 VLF-EM 对这类矿床勘查的有效性和优越性,结果表明该方法对脉状矿床勘查评价有重要意义。

**关键词** 固体地球物理学 甚低频电磁法(VLF-EM) 脉状矿床 金矿 铅锌(银)矿 萤石矿

**中图分类号**: P631.3<sup>+</sup>25

**文献标识码**: A

在国外,甚低频电磁法(VLF-EM)广泛应用于寻找地下水、含煤盆地及进行地质填图等(McCaffrey et al., 1995; Guerin et al., 1995)。20 世纪 80 年代我国引入了该方法并研制和生产了相应的仪器,且有该方法的专著发表(史保连, 1986),一些学者将甚低频电磁法广泛用于水文地质、工程地质、地质矿产勘查等领域,取得了良好的地质、找矿实效(史保连, 1982; 魏富有, 1991; 刘煜洲等, 1993; 白大明等, 1998)。在金属和非金属矿产勘查中,甚低频电磁法在追踪含矿构造、蚀变带、圈定矿化范围,研究异常源产状诸方面显示出独特的能力。

笔者在多年的矿产勘探评价中,大量使用了甚低频电磁法的技术,发现 VLF-EM 对脉状矿床的勘查作用明显,即使对宽度较小(1 m 左右)、有一定延伸的矿(化)体、构造蚀变带也是如此。本文就近年来应用甚低频电磁法取得了较好的地质找矿成效的工作实例作一介绍。

### 1 甚低频电磁法(VLF-EM)的工作原理及应用对象

甚低频电磁法(VLF-EM)属于一种被动源电磁

勘探方法,它利用军用 15 ~ 25 kHz 长波发射台发射的电磁波作场源,通常在远离发射台的区域工作,因此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,即可研究矿化带、构造带、蚀变破碎带、岩性分界面等地质现象,达到找矿勘查、地质填图之目的。

自然界脉状矿床的矿(化)体往往受断裂构造控制,容(含)矿构造的走向长度一般较大,有些矿体呈单个矿脉产出,有些由小细脉群组成,其矿脉或含矿构造带宽度往往远小于埋藏深度,这类矿体或赋矿构造常含有硫化物或伴有较强的蚀变,相对围岩电导率低,与围岩有一定的电性差异。因此,在一次电磁场激发下容易产生二次感应电流,形成二次场异常。对于这类矿床,在干旱地区或地形条件差的地区,尤其当矿体较窄时,某些物探方法(如激电、电阻率法等)由于受装置选择不当、供电困难、设备笨重、代价昂贵等因素的影响,往往较难测到有效异常。与之相比,VLF-EM 无需建立场源,仅用轻便的手持

\* 本文得到国家地质调查项目(编号:K1.3.32)的资助

第一作者简介 白大明,男,1955 年生,副研究员,从事综合物化探方法矿产勘查研究。

收稿日期 2001-11-27; 改回日期 2002-07-08。张绮玲编辑。

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。实践表明,VLF-EM分辨力较强,可探测到宽度为1 m左右、走向有一定长度的矿(化)体或构造带。

在对脉状矿床勘查评价时,通常利用VLF-EM电磁倾角法,即观测在电场极化(E极化)下形成的磁场水平分量 $N_H$ 、磁场垂直分量 $N_Z$ 和极化椭圆倾角 $D$ 。为了消除噪声干扰并划分区域场,对所测的倾角 $D$ 数据进行Fraser滤波计算。这种方法是利用一个差分算子将 $D$ 角异常曲线上的拐点或交零点转变成峰值,并用一个低通滤波器消除噪声,它可用下式描述。

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

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; $F$ 为倾角滤波结果。滤波结果将 $D$ 曲线典型的拐点或交零点转换为适于勾绘等值线的极值(史保连,1986)。

下文以脉状金、铅锌(银)及萤石矿床为例,说明VLF-EM在脉状矿床勘查中的应用效果。

## 2 VLF-EM对脉状矿床的勘查实例

### 2.1 脉状金矿床

老硐沟 Au-Ag-Pb-As 矿床位于内蒙古自治区额济纳旗,属脉状次生氧化淋滤矿床。矿区内出露地层主要有长城系白湖群上岩组和蓟县系平头山群下岩组,白湖群上岩组主要由变质长石石英粉砂岩、石英粉砂质泥质板岩组成;平头山群下岩组主要由结晶灰岩和钙质白云石大理岩组成,该组地层为 Au-Ag-Pb-As 矿脉的主要围岩。矿区内第四系砂砾石及残坡积覆盖普遍(厚度最大达5 m),矿区广泛发育近EW向和NNW向两组断裂构造,其中近东西向断裂为主要控矿断裂。矿区98号和1号两大金矿脉均产于平头山群内近东西向张性断裂破碎带中。

在矿区1号矿脉进行VLF-EM测量,其结果见图1,测区内有①、②、⑥号金矿脉分布,它们赋存于近EW向或NNW向断裂破碎带或闪长玢岩脉之中。从南到北,VLF-EM的 $F$ 值异常存在两条NNW向展布的正异常带,与①号矿脉平行,异常幅值为 $10^\circ \sim 20^\circ$ ,L6测线两个 $F$ 值正异常与①、②号矿脉破碎带相对应,清晰地反映了含矿破碎带和金矿脉的位置(图1)。①、②号矿脉之间向东延长方向,在L1、L2、L3测线上90~110号测点之间(覆盖

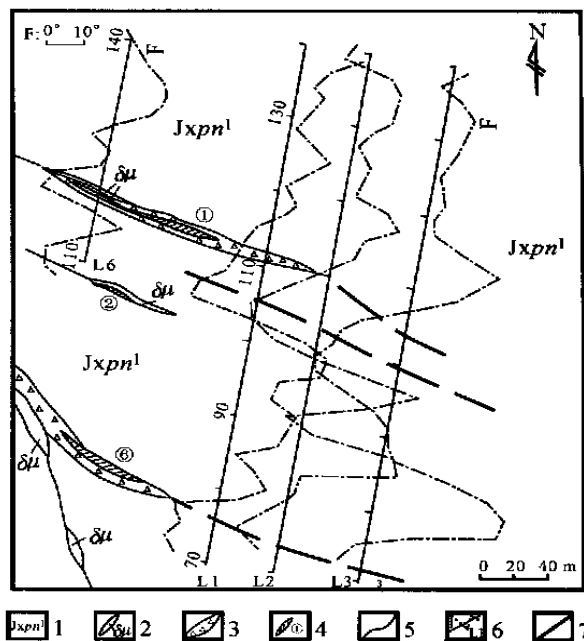


图1 老硐沟矿区1号矿脉地质-甚低频电磁法异常综合平面图

1—平头山群白云石大理岩( $Jxpn^1$ );2—蚀变闪长玢岩( $\delta\mu$ );3—断裂破碎带;4—金矿脉及编号;5—断裂;6—甚低频电磁法 $F$ 值曲线及测线编号;7—物探推断断裂带

Fig.1 Synthetic geological map showing VLF-EM anomalies of No.1 vein in the Laodonggou gold deposit  
1—Proterozoic Pingtoushan Group: dolomite-marble ( $Jxpn^1$ ); 2—Altered diorite porphyrite ( $\delta\mu$ ); 3—Shattered fault zone; 4—Gold veins and serial number; 5—Fault; 6— $F$  value anomalies of VLF-EM and serial number of measuring line; 7—Shattered fault zone inferred from VLF-EM

区),有一异常幅值 $20^\circ$ 、宽约60 m的 $F$ 值正异常带,且异常带的南东端并未封闭,推测为含金破碎带所致,其规模与①号矿脉破碎带相当,具有良好的找矿前景。后经矿山验证,在①号矿脉南东端见到金矿脉,并已经开采。

在矿区38-44勘探线南端,地表残坡积层厚约0.4~1.5 m。VLF-EM测量发现5条NNW向断裂,并证实44线南端是NNW向与近EW向断裂破碎带交汇部位,出现含金矿脉的可能性最大。现场工程揭露及随后施工的探槽,在强蚀变闪长玢岩脉的上盘与硅化粉砂质、泥质板岩的接触带上发现厚1.4~1.6 m的金矿脉体,最高金含量达 $19.4 \times 10^{-6}$ (图2)。

### 2.2 脉状铅-锌(银)矿床

大发铅锌(银)矿床位于云南省彝良县城南,其所处构造位置属昭通凹陷断裂褶皱束的北东边缘。

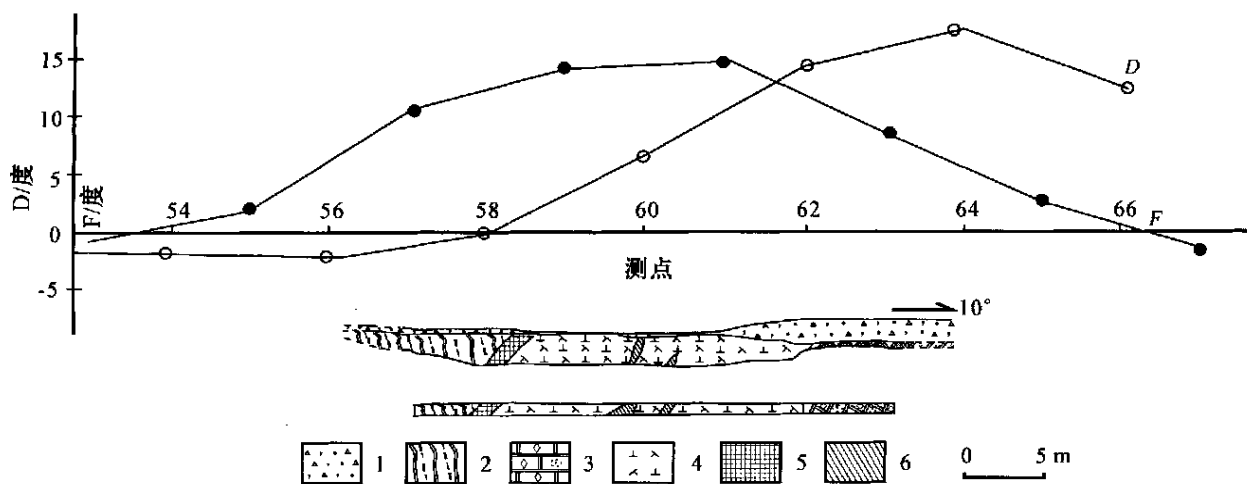


图 2 老硐沟矿区 44 勘探线南端地质-甚低频电磁法异常综合图

1—腐殖土及残坡积;2—硅质粉砂岩泥质板岩;3—硅化白云石大理岩;4—蚀变闪长玢岩;5—金矿脉;6—金矿化脉

Fig. 2 Synthetic geological map showing VLF-EM anomalies at the southern end of No. 44 prospecting line in Laodonggou gold deposit

1—Quaternary; 2—Siliceous siltstone with pelitic slate; 3—Silicized dolomite-marble; 4—Altered diorite porphyrite; 5—Gold veins; 6—Gold mineralized veins

上泥盆统一打得组白云岩为容矿围岩,矿体受北西向断裂控制,属于半隐伏-隐伏脉状矿床。矿区出露地层主要有中泥盆统曲靖组 and 上泥盆统一打得组灰岩、泥岩和白云岩。矿区构造较简单,中上泥盆统碳酸盐岩层呈南倾的单斜,断裂构造有北西向和北东向两组,其中以北西向 F1 断裂规模最大,常常被后期的北东向断裂错断。地质研究及工程揭露资料表明,F1 断裂是控制区内以一打得组白云岩为赋矿围岩的脉状铅锌矿体的控矿断裂,矿区 13 勘探线横穿 F1 断裂带,探槽内见氧化矿赋存于断裂中,F1 断裂上盘是一打得组白云岩,下盘为曲靖组灰岩(图 3)。高精度磁测结果显示,在 F1 上盘有宽度 80 m、幅值 50 nT 的正磁力高异常,与氧化矿体相对应。VLF-EM 测量结果,正磁异常与 VLF-EM 磁场水平分量  $N_H$  极大值、垂直分量  $N_Z$  极小值、F 曲线正极大值异常相吻合,这说明磁异常源同时具有良导体的特征。因此,电、磁异常极可能是地下原生铅锌矿体所致。据异常曲线特征点反演计算,推断铅锌矿体埋深约 70 m。此结论已被 ZK1301 钻孔所证实。

### 2.3 内蒙古海力敏脉状萤石矿床

海力敏热液脉状萤石矿床产在燕山早期沃狠呼都格中-细粒花岗岩中,受走向  $310^\circ \sim 325^\circ$ 、倾角  $50^\circ \sim 60^\circ$  的断裂破碎带控制,沿断裂发生硅化及萤石矿化。石英-萤石脉长约 1000 m,宽 1.5 ~ 5 m,以一条

大脉为主。控制萤石矿体的断裂带上,除已开采的探井、探槽和露头以外,尚有一些地段被第四系(草地)掩盖,为查明掩盖地段控矿断裂分布、规模,分析其含矿性,进而扩大矿区远景,笔者垂直控矿断裂走向,以 50 m 线距布设了 25 条 VLF-EM 测线(测点距 10 m)。图 4 所示为 VLF-EM 极化椭圆倾角 D 和 F 曲线异常,F 曲线正极大值异常带清晰地反映出含萤石矿(化)带的分布规律及其规模,且极化椭圆倾角 D 曲线的交零点与矿(化)体及采坑揭露的矿化体露头均有良好的对应关系。在掩盖地段也发现 VLF-EM 异常,表明极有可能存在萤石矿(化)体。

为扩大矿区远景,矿山根据笔者推断的掩盖区最佳 VLF-EM 异常位置(3 线—4 线间)打浅井探采,发现了走向  $297^\circ$ 、宽约 2 m、近于直立的矿化破碎带,破碎带内赋存脉状石英-萤石矿体,萤石品质好,并已经开采生产(图 5)。此次工作证实了 VLF-EM 寻找脉状萤石矿的有效性。

### 3 脉状矿床的 VLF-EM 找矿勘查模型

上文列举了不同矿种的脉状矿床,使用 VLF-EM 勘查评价的实例,据此,笔者总结了脉状矿床的 VLF-EM 找矿勘查模型,谨供从事该方面工作的研究者参考。

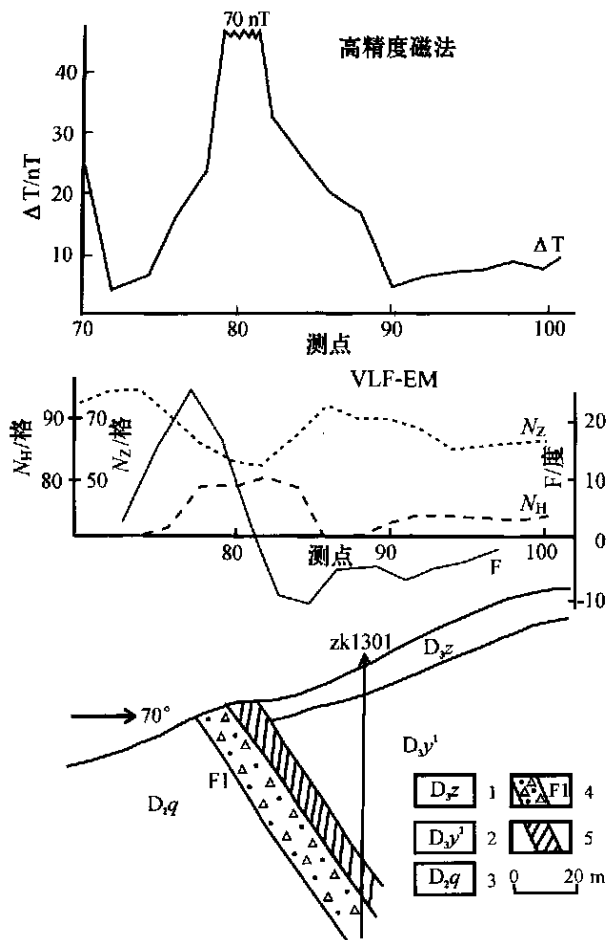


图3 大发矿区13勘探线地质-物探综合剖面  
1—上泥盆统率格组;2—上泥盆统一打得组一段;3—中泥盆统曲靖组;4—断裂破碎带;5—铅锌矿体

Fig. 3 Comprehensive geological profile showing geophysical anomalies along No.13 prospecting line in the Dafa lead-zinc deposit

1—Upper Devonian Zaige Formation; 2—First Member of Upper Devonian Yidade Formation; 3—Middle Devonian Qujing Formation; 4—Shattered fault zone; 5—Lead-zinc orebody

VLF-EM理论及勘查的实际效果均表明,脉状矿床的VLF-EM找矿勘查模型是:

(1) 当脉状矿体或含矿构造的电导率( $\rho_k$ )小于围岩的情况下,其(良导体)上方的VLF-EM参数异常呈二高一低特征,即磁场水平分量 $N_H$ 为极大值、 $F$ 曲线呈正极大值异常(二高);磁场垂直分量 $N_Z$ 为极小值异常(一低);

(2) 当脉状矿体或含矿构造的电导率( $\rho_k$ )大于围岩的情况下,其(高阻体)上方的VLF-EM参数异常呈二低一高特征,即磁场水平分量 $N_H$ 为极小值、 $F$ 曲线呈负极大值异常(二低);磁场垂直分量 $N_Z$ 为极大值异常(一高)。

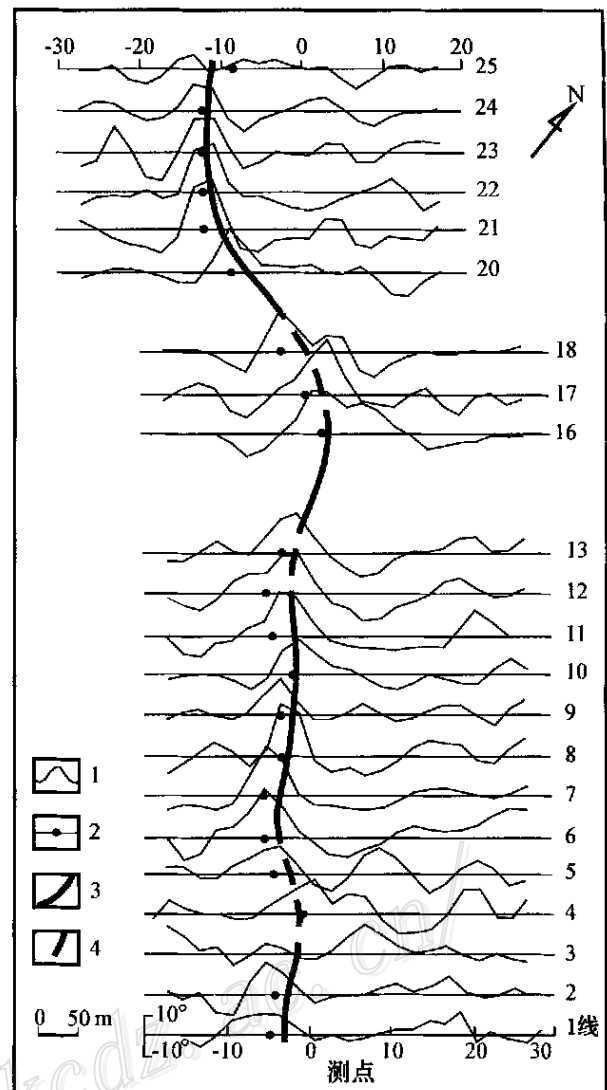


图4 海力敏萤石矿区甚低频电磁法剖面平面图  
1—VLF-EM的F值异常曲线;2—倾角D交零点;3—出露地表的萤石矿(化)脉;4—推断掩盖地段萤石矿(化)脉分布

Fig.4 Profile-plan of VLF-EM anomalies in the Hailimin fluorite deposit

1—Filtered F-value; 2—Inclination D-value; 3—Outcropped fluorite mineralized vein; 4—Fluorite mineralized vein inferred from VLF-EM

## 4 结 论

实践证明,VLF-EM是寻找脉状矿床行之有效的物探手段,相对其它物探方法,其最大的特点是投资少,见效迅速,对构造控制的隐伏脉状矿床更是如此。若辅以同样轻便高效的高精度磁法共同进行勘查,则找矿效果会更加明显。但在实际工作中应注意以下几点:①区分地下、空中有源电缆在一定范围

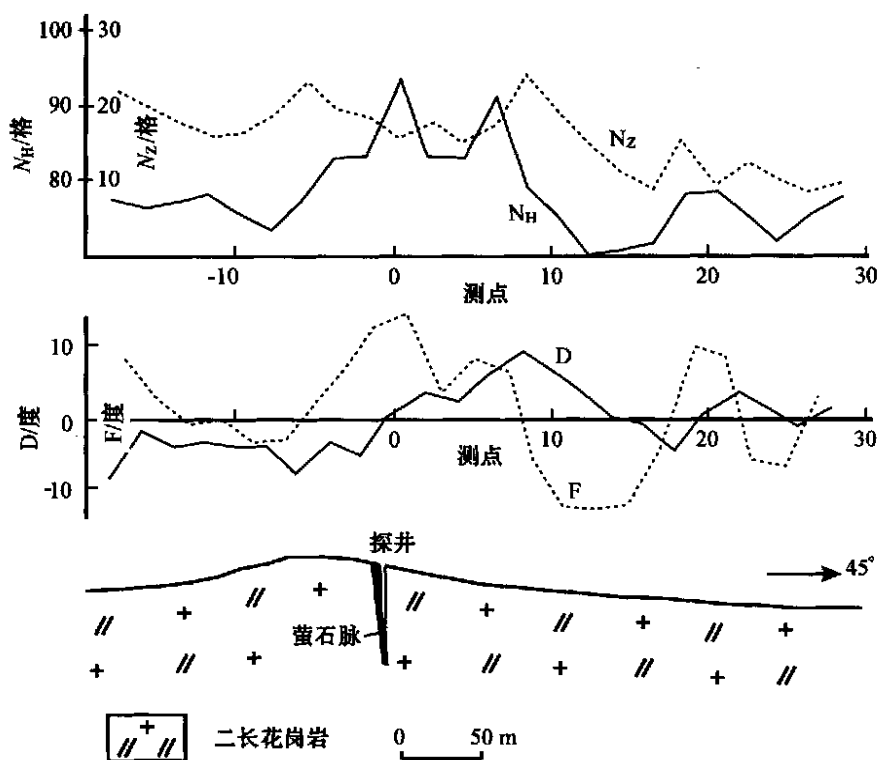


图 5 海力敏萤石矿区 4 线地质-甚低频电磁法综合剖面图

Fig. 5 Synthetic geological map showing VLF-EM anomalies along No. 4 prospecting line in the Hailimin fluorite deposit

内造成的假异常(较容易识别);②地形起伏(坡度、高差)对 VLF-EM 各种观测参数的影响,必要时进行地形改正,但当围岩的电阻率  $\rho_s$  大于几千  $\Omega m$ ,覆盖物较薄(数米厚)时,地形将引不起明显的异常(刘煜洲等,1993);③作为 VLF-EM 场源的长波台发射的电磁波在传播中受各种因素影响,一天中其强度会有所变化,因此测量前应进行日变观测,以选择一天中电磁波场强最稳定的时段进行观测。

## References

- Bai D M, Liu G H and Chang Z Y. 1998. Exploration of oxidizing-Leaching type gold deposit of Laodonggou by VLF-EM methods [J]. *Geology and Prospecting*, 34(2): 46 ~ 49 (in Chinese with English abstract).
- Guerin R and Benderitter Y. 1995. Shallow Karst exploration using MT-VLF and DC resistivity methods [J]. *Geophysical Prospecting*, 43: 635 ~ 653.
- Liu Y ZH, Chen F J, Dong B H, et al. 1993. The application of very low frequency electromagnetic methods to the prospecting for gold deposits [J]. *Bulletin of The Institute of Mineral deposits Chinese Academy of geological sciences*, 1: 172 ~ 179 (in Chinese with English abstract).
- McCaffrey R J, John McElroy W and Graham L A. 1995. Exploration of a lignite-bearing basin in Northern Ireland using ground magnetic and VLF-EM methods [J]. *Geophysics*, 60(2): 408 ~ 412.
- Shi B L. 1986. Very low frequency electromagnetic method [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 146 (in Chinese).
- Shi B L. 1982. The VLF EM method and it's application in karst terrain [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 6(4): 237 ~ 246 (in Chinese).
- Wei F Y. 1991. The effect of very low frequency electromagnetic method in tracing gold-bearing fractural shattered zones [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 15(4): 320 ~ 321 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 白大明,刘光海,常忠耀. 1998. 甚低频电磁法在老硐沟氧化淋滤型金矿勘查中的应用效果[J]. *地质与勘探*, 34(2): 46 ~ 49.
- 刘煜洲,陈福集,董保和,等. 1993. 甚低频电磁法在寻找金矿中的应用[J]. *中国地质科学院矿床地质研究所所刊*, 1: 172 ~ 179.
- 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. 甚低频电磁法[M]. 北京:地质出版社. 1 ~ 146.
- 魏富有. 1991. 甚低频电磁法对含金断裂破碎带的追踪效果[J]. *物探与化探*, 15(4): 320 ~ 321.

## Feasibility of Applying VLF-EM Methods to Exploration and Evaluation of Vein Deposits : Exemplified by Exploration of Gold , Lead-Zinc (Silver) and Fluorite Deposits

Bai Daming , Nie Fengjun and Jiang Sihong

( Institute of Mineral Resources , Chinese Academy of Geological Sciences , Beijing 100037 , China)

### Abstract

The deposit described in this paper is one of the most important types of ore deposit . In general , the spatial distribution of the ore veins in this deposit is controlled by fracture zones . Geophysical investigation indicates that the VLF-EM methods are suitable for exploration of this type of ore deposits in that they can be used precisely , conveniently and economically during the regional evaluation of the vein ore deposits , especially in the areas covered with overburden . The principles and application procedures of the VLF-EM methods have been described in detail in this paper . Meanwhile , Cases are given concerning the successful exploration of gold- and lead-zinc-silver-bearing veins as well as fluorite veins distributed in Inner Mongolia and Yunnan . In addition , all the geophysical anomalies delineated by the VLF-EM methods have been proved to be valuable . The exploration model derived from the VLF-EM methods is also advanced .

**Key words :** solid-earth physics , very low frequency electromagnetic methods ( VLF-EM ) , vein deposits , gold deposits , lead-zinc ( silver ) deposits , fluorite deposits .

<http://www.kcdz.ac.cn/>