

# EH-4 电磁成像系统在隐伏构造探测中的应用

李 富 王永华 吴文贤

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

**摘要:**EH-4 电磁成像系统具有勘探深度大、反映成果直观、轻便高效等优点。本文介绍了 EH-4 电磁成像系统的基本原理、数据采集和数据处理方法,及其在云南西部探测构造深部延伸情况的应用。实践证明, EH-4 技术在探测构造深部延伸的应用方面是有效的。

**关键词:**EH-4 电磁成像系统;电阻率;构造

**中图分类号:**P631.3<sup>+</sup>23 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)06-1375-07

已出露的地质构造产状很容易判断,但由于地质构造复杂多变,对隐伏构造延伸情况很难判断,地球物理方法在这方面取得了较好的效果<sup>[1-3]</sup>。EH-4 电磁成像系统(简称 EH-4)是目前国内外较为先进的电磁勘探系统之一,它是 CSAMT 和 MT 的结合体,实现了天然信号源与人工信号源的采集和处理,深部构造通过天然背景场源成像(MT),其信息源为 0.1~10 kHz;浅部构造则通过一种新型的便携式低功率发射器发射 10~100 kHz 人工电磁信号,补偿天然讯号的不足,从而获得高分辨率的成像。EH-4 具有探测深度大、设备轻、速度快、费用低、精度较高等特点,在地质勘探工程中能起到很好的效果。EH-4 电磁成像系统小巧和便于携带,广泛应用在地形比较复杂或环境比较恶劣的地区。

## 1 EH-4 电磁成像系统方法原理

EH-4 电磁成像系统(StrataGem 电磁系统)由美国 EMI 公司和 Geometrics 公司在 20 世纪 90 年代联合研制,又称电导率成像系统。EH-4 电磁成像系统是以天然场作为主要场源,辅以人工磁偶极子产生的高频电磁场来观测正交的两个电场分量( $E_x, E_y$ )和两个磁场分量( $H_x, H_y$ )。采用天然场源与人工场源的目的是加强高频信号,天然场源采用磁偶极子发

射天线为 X, Y 方向的垂直线圈,垂直磁偶极子发射的场以 TE 型波为主,补偿高频天然讯号的不足,增加采集数据的可靠性和提高分辨率。

EH-4 电磁成像系统包括两部分:接收机系统和发射机系统。接收机系统包括主机、前置转换器、磁探头、传输电缆、不锈钢电极(用于高频探头)、不极化电极(用于低频探头)、接地电缆、12V 蓄电池;发射机系统包括发射天线、发射机、控制器、12V 蓄电池。鉴于效率和磁电传感器频谱范围的限制,接收探头分为两种:低频探头和高频探头。低频探头分两个频组:1 频组 50~1 kHz, 3 频组 0.1~75 Hz, 探测深度约 2000 m;高频探头分 3 个频组:1 频组 10~1 kHz, 4 频组 500~3 kHz, 7 频组 750~92 kHz, 其探测深度为 10~1000 m。数据采集中使用的探头和频组,可根据探测的目标体深度来选择。EH-4 电磁成像系统包括高、低频两种探头,实现了深浅探测兼顾的效果。发射机系统采用标准功率的发射器(400 Am<sup>2</sup>),发射频率为 800 Hz~64 kHz,目的是加强高频讯号,增加浅部采集数据的可靠性和提高分辨率。

通过测量相互正交的电场和磁场分量,可确定介质的电阻率值。其计算公式为:

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (1)$$

收稿日期:2009-04-10;改回日期:2009-07-27

基金项目:云南 1:5 万梁河县、江东、帕底幅区调项目(1212010784007)资助。

作者简介:李富,男,1980 年生,硕士,助理工程师,从事地球物勘查工作;E-mail:lifu2007chengdu@126.com。

式中： $f$ 为频率，单位 Hz； $\rho$  为电阻率，单位  $\Omega \cdot m$ 。

由于地下介质是不均匀的，因而计算的值称为视电阻率值。探测深度理论上为一个趋肤深度公式和经验公式：

$$\delta \approx 502\sqrt{\rho / f}, D = \delta / 2 \approx 356\sqrt{\rho / f} \quad (2)$$

式中  $\delta$  为趋肤深度， $D$  为经验深度。上式表明，电磁波的探测深度随电阻率的增高和频率的降低而增大。

EH-4 的优点主要归结为如下几个方面 [4-5]：①应用大地电磁法的原理，但使用人工电磁场和天然电磁场两种场源；②既具有有源电探法的稳定性，又具有无源电磁法的节能和轻便；③能同时接收和分析 X、Y 两个方向的电场和磁场，反演 X-Y 电导率张量剖面，对判断构造产状特别有利；④EH-4 仪器设备轻，观测时间短，完成一个近 2000 m 深度的测深点，只需 15~20 min，这使它可以轻而易举实现密点连续测量（首尾相连），进行 EMAP 连续观察；⑤在 EH-4 的采集控制主机中插入两块附加的地震

采集板，就可使一台 EH-4 兼作地震仪和电导率测量，为一机实现综合勘探首创先例；⑥实时数据处理和显示，资料解释简捷，图像直观。

## 2 EH-4 野外工作方法 with 数据处理

### 2.1 野外工作方法

EH-4 电磁成像系统野外工作方式有两种：单点测深和连续剖面测深。连续剖面测深 (EMAP) 是工作的电极距等于数据采集的点距，可以有效压制静态效应，但工作量比较大；选用何种工作方式由工作任务确定。在开展工作的前一天，要做平行试验，检测仪器是否工作正常，要求 2 个磁棒相隔 2~3 m，平行放在地面，两个电偶极子也要平行，观测两个电场和两个磁场通道的时间序列信号，再设增益的窗口观测  $H_y, E_x, H_x, E_y$  的值的大小；同时，观测两个对应的通道的波形形态和强度均基本一致，说明仪器工作状态正常。EH-4 工作布置示意图见图 1。

(1) 电极的布置技术：采用高频探头工作时共用

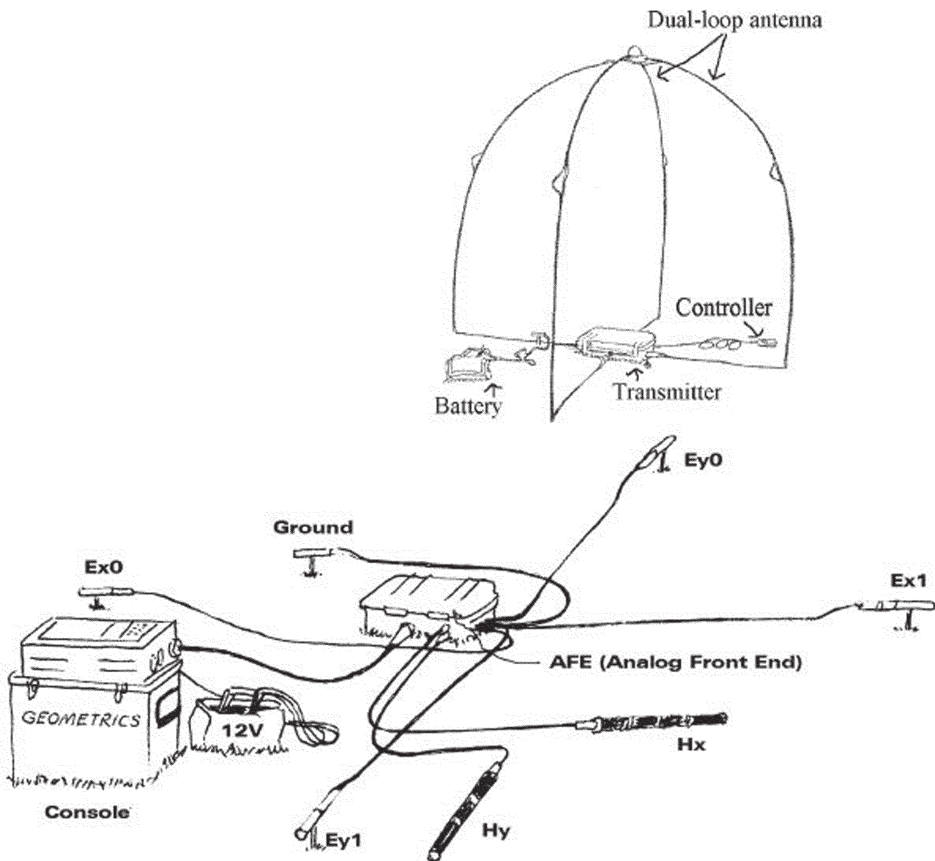


图 1 EH-4 工作布置示意图

Fig.1 Schematic map showing the arrangement of EH-4 work

4 个不锈钢电极, 低频探头工作时也共用 4 个不极化电极, 每 2 个电极组成 1 个电偶极子, 电偶极距为 20 m。与测线方向一致的电偶极子叫做 X-Dipole, 与测线方向垂直的电偶极子叫做 Y-Dipole。如在风大时, 应将电缆埋到土里, 以减少其影响。

(2)磁棒布置技术:磁棒与前置放大器距离应大于 5 m, 为了消除人为干扰, 2 个磁棒要埋在地下, 其深度至少为 5 cm, 并使其相互垂直, 且水平, 方向误差夹角应在 $\pm 2^\circ$ 以内, 同时两磁棒距离大于 2 m, 罗盘离探头距离大于 0.5 m。工作人员要距磁棒距离大于 10 m, 尽量选择远离房屋、电缆、大树的地方布置磁棒。

(3)前置放大器(AFE) 布置技术: AFE 放在测量点上, 即 2 个电偶极子的中心, 为了保护电、磁道, 应将 AFE 接地, 并远离磁棒, 与其相距至少 5 m。

(4)主机布置技术:主机要放置在远离前置放大器和磁棒至少 10 m 的一个平台上, 并且操作员最好能看到前置放大器和磁棒的位置。

(5)发射机布置技术:EH-4 电磁成像系统计算的是测量点处介质的平面波阻抗值, 为了使这个计算正确, 发射点必须离测量点足够远, 位于发射源的远场区域。从电磁场的分布来看, 远场区开始于场源的 3 倍趋肤深度远。由工区的平均趋肤深度的 3 倍来确定发射机与测量主机的距离。发射天线必须十字交叉, 四个角固定稳定, 先接接地电阻, 然后接发射电源。操作发射机时, 要远离天线至少 3 m。尽可能保持发射与接收同步进行, 误差不大于 3 s。

## 2.2 资料数据处理方法

在野外能实时获得  $H_y, E_x, H_x, E_y$  振幅, 是时间域数据, 每 20 ms 采样, 共 4096 样点, 2 进制码, 存为 X 文件; 然后经过傅立叶变换和复杂的函数计

算可得到频率域电磁法的响应——随频率变化的视电阻率和相位值, 得为频率域数据存入 Y 文件, 文本文件格式。

EH-4 系统的资料处理可分为实时处理和后续处理。实时处理是根据每个测点的视电阻率、相位、相关度及振幅曲线进行数据质量的实时分析处理, 把那些不可靠的数据从曲线中剔除, 然后继续下一点测量。若整条曲线的数据质量都较差, 则要采取技术措施, 进行重复测量。在完成整条测线的连续观测后, 可在现场用连续剖面测深(EMAP 法, 该方法可以有效地压制或消除静态效应的影响) 绘出拟二维反演的灰度图。后续处理是野外工作结束后在室内完成的一项工作, 包括两方面: ①对实测数据采用的 Born 近似反演, 联合共轭梯度最小二乘法 CGLS 和快速系数反演 RRI, 通过应用平滑约束优化高斯-牛顿方法, 以多次迭代逼近理想的解释成像, 既保证了反演解释的稳定性, 又具有快速成像的优点, 数据存为 Z 文件。进一步对实测数据进行相关系数、滤波系数的调整或对时序资料进行逐一挑选或剔除等重新处理, 尽量降低干扰因素, 突出有用异常。②在上述工作的基础上, 将处理结果进一步做定量解释, 进行彩色成图等<sup>[6-7]</sup>。

## 3 应用实例

### 3.1 工作区地质概况及地球物理特征

工作区位于云南省潞西市, 地处横断山脉南段、高黎贡山西南延伸地段, 测区上覆地层有元古界高黎贡山岩群(Pt<sub>1</sub>GL)、侏罗系中统勐戛组(J<sub>2m</sub>)、侏罗系柳湾组(J<sub>2l</sub>)、下白垩统弄坎组(K<sub>1l</sub>)、上新统芒棒组(N<sub>2m</sub>)和第四系(Qh<sup>d</sup>)(图 2), 部分地段出现超基性岩, 主要为纯橄榄岩、斜方辉橄岩, 两者呈条带状相

表 1 工作区地层单元与岩性

Table 1 Stratigraphic units and lithologic characters of the working area

	地层代号	岩性
第四系	Qh <sup>d</sup>	角砾、砂、粘土
新近系	芒棒组 N <sub>2m</sub>	砂泥岩、玄武岩砂、砂泥岩夹煤
白垩系	弄坎组 K <sub>1l</sub>	岩屑砂岩、砂砾岩、钙质粉砂岩和泥岩
侏罗系	柳湾组 J <sub>2l</sub>	灰岩、石英砂岩, 钙质页岩或泥岩
	勐戛组 J <sub>2m</sub>	
古元古界	高黎贡山群 Pt <sub>1</sub> GL	片麻岩、变粒岩、黑云角闪片岩
超基性岩	Σ	镁橄榄石及少量辉石、铬铁矿、岩石蛇纹石化、绿泥石化; 橄榄石及少量顽火辉石、微量铬铁矿

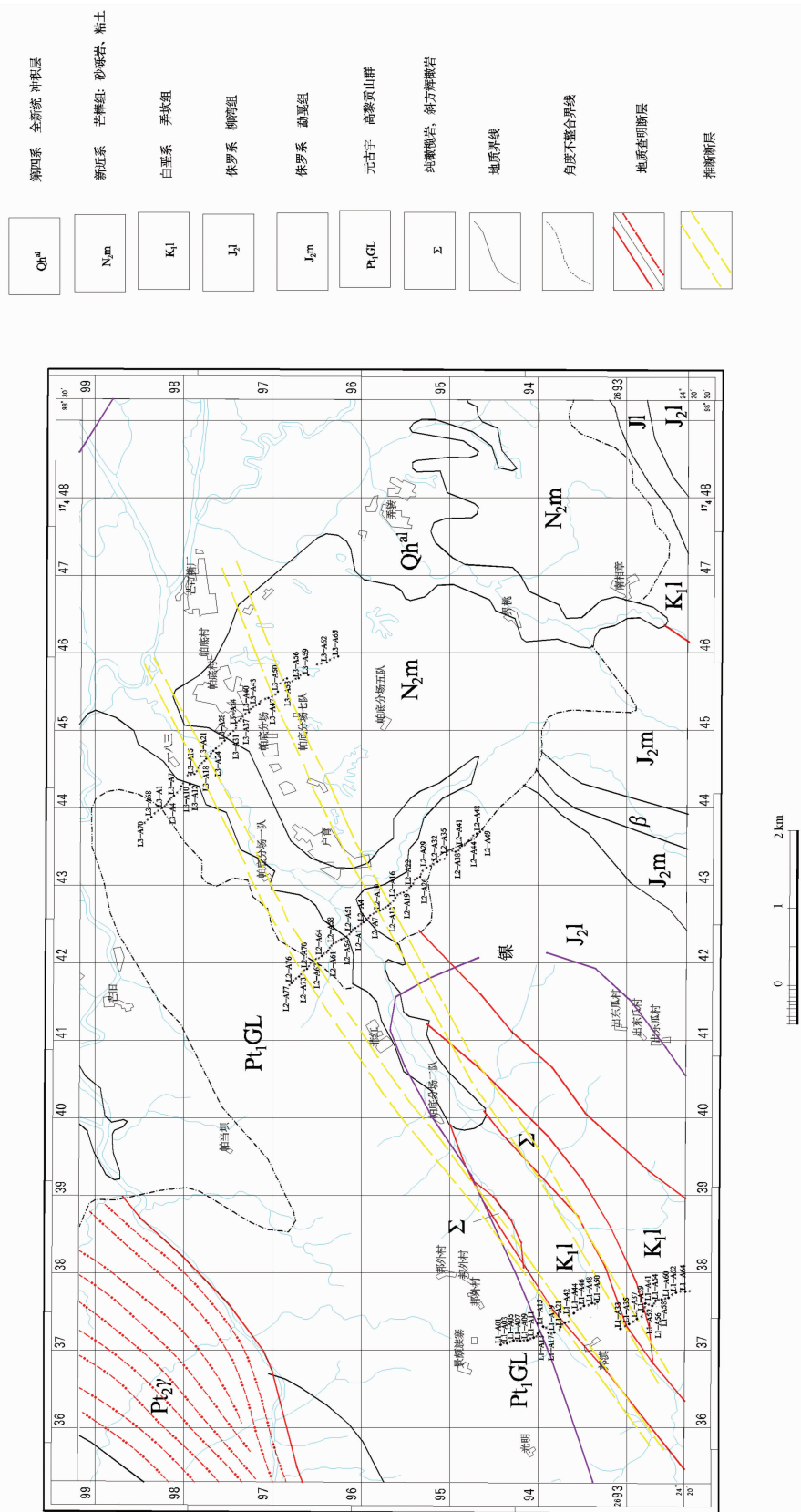


图 2 EH-4 探测推断地质构造图  
Fig.2 Geological - structural map based on EH-4 detection

间分布,为变余火成堆积层理。岩石蚀变强烈。纯橄橄榄岩主要由镁橄橄榄石及少量辉石、铬铁矿组成,已蛇纹石化、绿泥石化。斜方辉橄岩主要由橄橄榄石及少量顽火辉石、微量铬铁矿组成,已蛇纹石化、绿泥石化、石棉化。不同地层对应的岩性见表 1。一般而言,较完整的灰岩、片麻岩表现为高阻特征,大于  $2000\ \Omega\cdot\text{m}$ ;而板岩、岩屑砂岩、粉砂岩表现为中低阻特征,  $800\sim 1500\ \Omega\cdot\text{m}$ ;第四系的粉砂质粘土岩、有机质粉土表现为低阻特征,小于  $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

### 3.2 EH-4 电磁成像系统探测成果分析

为了探测断层的延伸情况,本次 EH-4 探测布置共 3 条测线,测点距均为 40 m,线距为 3 km,各测点布置见图 2。对 L1 线数据进行处理后得到 L1 剖面(图 3)。从图中可以看出,浅部 100 m 以上视电阻率普遍较低,约  $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ,推测主要为表土层与第四系的反映。异常区主要分布在水平坐标 720~1520 m 处,为一低阻异常,视电阻率低于  $200\ \Omega\cdot\text{m}$ ,形状为“丫”字形,深度约 1400 m,各边的宽度约 200 m,推测为断裂带;地质资料显示为超基性岩,岩石蛇纹石化,以纯橄橄榄岩、斜方辉橄岩为主,伴有铬铁矿,具有强磁性和高导电性,并与低阻异常断裂带位置相吻合;综合解释该断裂带为超基性岩引起。推测水平

坐标 0~720 m,深度在 50~1100 m,为高黎贡山群的中深变质岩和片麻岩,视电阻率大于  $800$ ;深度在 1100~2000 m,为高黎贡山群下方的基底层。推测在“丫”字形断裂中间夹的为弄坎组的岩屑砂岩,视电阻率中等。推测水平坐标 1560~2120 m,深度在 300~500 m 为弄坎组的岩屑砂岩、砂砾岩和钙质粉砂岩等,视电阻率约  $1000\ \Omega\cdot\text{m}$ ;深度在 500~1000 m,为勐戛组灰岩,视电阻率大于  $1500\ \Omega\cdot\text{m}$ ;深度在 1000~2000 m,为深部的基底层。从整条测线来看,水平坐标 920 m 处有一近似直立断裂带 (F1 断裂),水平坐标 960~1400 m 处有一向右倾斜的隐伏断裂(F2 断裂)。

经数据处理后得到 L2 线剖面处理图形 (图 4),从视电阻率的分布规律来看,浅部 150 m 以上电阻率较低,视电阻率低于  $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ,推测为表土层或第四系粘土层。水平坐标 -1120~-840 m 处,深度 400~1300 m,视电阻率大于  $600\ \Omega\cdot\text{m}$ ,推测该段为高黎贡山群的板岩、片麻岩和变粒岩等;深度 1300~2000 m,视电阻率大于  $1200\ \Omega\cdot\text{m}$ ,推测为基底层。水平坐标 -880~-720 m 处,深度 200~1800 m,出现视电阻率小于  $400\ \Omega\cdot\text{m}$  的直立条带状低阻异常,推测该段为断层所处的位置,为高黎贡山群与弄坎组的断层界线。水平坐标 280~440 m,表现为一相对低阻异常,视电

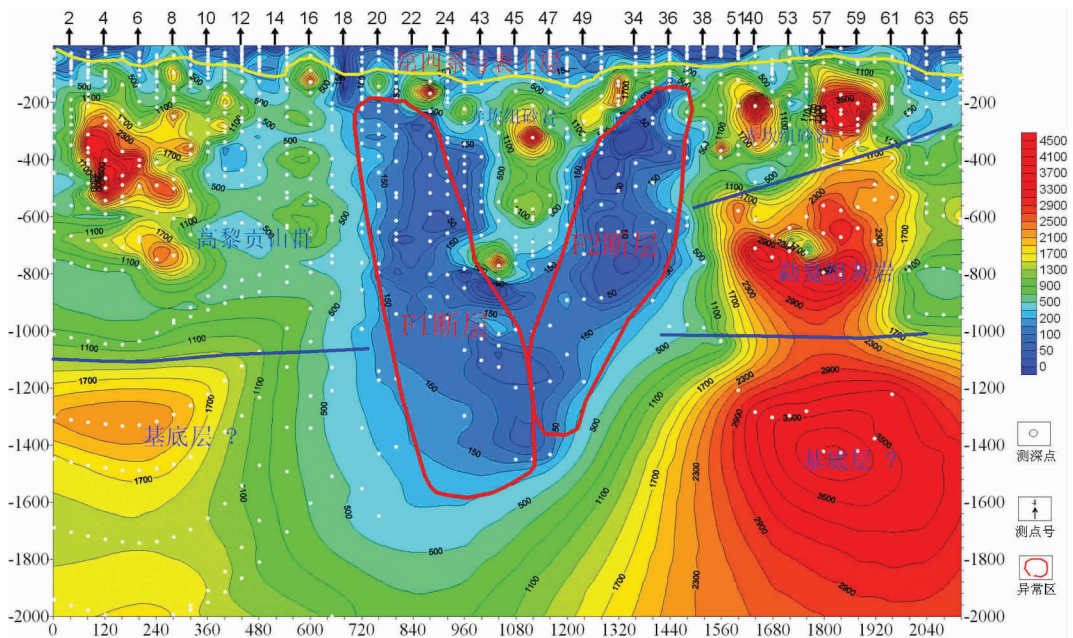


图 3 L1 线 EH-4 探测视电阻率剖面

Fig.3 Apparent resistivity section based on EH-4 survey along L1 line

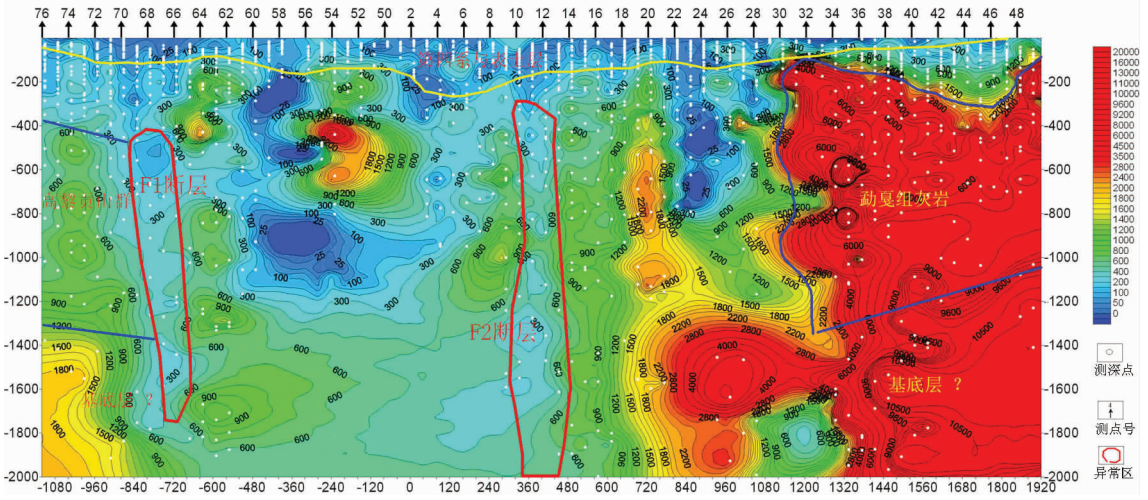


图4 L2线EH-4探测视电阻率剖面

Fig.4 Apparent resistivity section based on EH-4 survey along L2 line

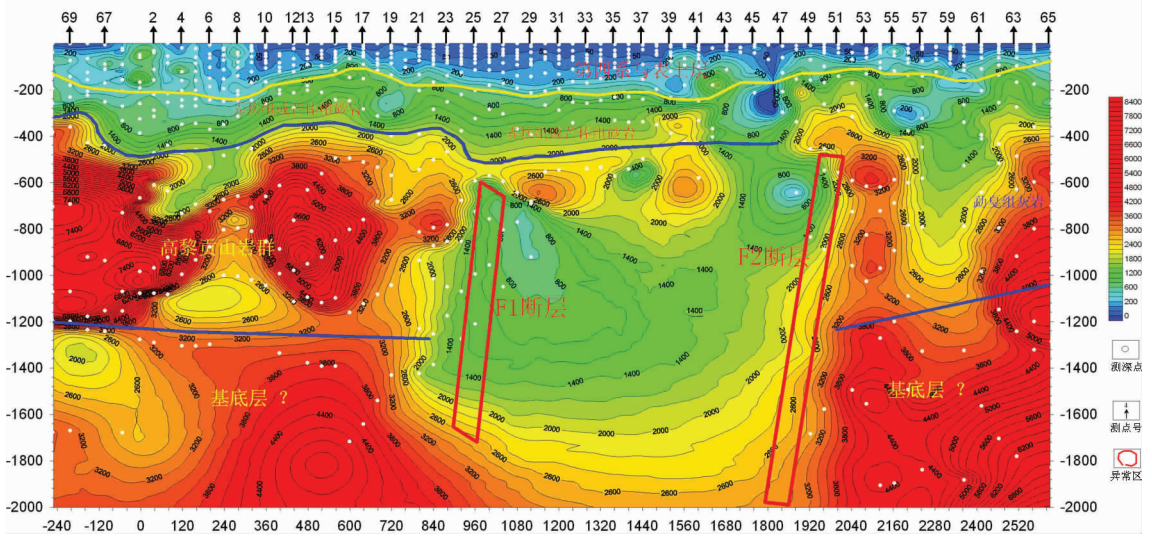


图5 L3线EH-4探测视电阻率剖面

Fig.5 Apparent resistivity section based on EH-4 survey along L3 line

阻率小于 $400\ \Omega\cdot m$ ,推测为断裂所处位置。水平坐标1200~1920 m,深度300~1200 m,表现为一高阻异常,视电阻率大于 $2000\ \Omega\cdot m$ ,推测为勐嘎组的泥晶灰岩;深度1200~2000 m,同时也为高阻异常,推测为基底层。综合整条测线来看,推测水平坐标-800 m(F1断裂)和320 m(F2断裂)处为隐伏断层所通过位置。

经数据处理后得到L3线剖面处理图形(图5)。从视电阻率的分布情况来看,浅部200 m以上电阻率较低,视电阻率低于 $200\ \Omega\cdot m$ ,推测为表土覆盖层或第四系。水平坐标-240~840 m处,深度400~1200

m,出现视电阻率大于 $2000\ \Omega\cdot m$ 的高阻异常,异常特征为左高右低,推测该段为高黎贡山群的板岩、片麻岩和变粒岩等;深度在1200~2000 m处,表现为相对高阻区,推测为基底层。水平坐标840~920 m处,视电阻率产生突变,推测为断裂,断裂宽度约100 m,深度约600~1600 m。水平坐标920~1680 m处,深度约700 m,出现视电阻率约 $2000\ \Omega\cdot m$ 的中阻异常,异常基本呈水平形状,推测该段为弄坎组的砂岩。水平坐标1960~2610 m处,深度400~1100 m,出现视电率高于 $2500\ \Omega\cdot m$ 的高阻异常,推断该段为

勐嘎组的泥晶灰岩;深度在 1100~2000m,为基底层。水平坐标 1880~1960 m 处,视电阻率产生突变,推测为断裂,断裂宽度约 100 m,断裂深度为 400~2000 m。综合来整条测线来看,水平坐标 920 m(F1 断裂)和 1920 m(F2 断裂)处为隐伏断层所处位置。

## 4 结论及建议

本文针对工作区的隐伏断裂构造延伸情况进行探测,通过应用 EH-4 电导率成像系统在工作区进行深部构造的探测,圈出了隐伏断裂的位置,探明了断层的走向,为以后的地质工作奠定了坚实的基础,并证明了 EH-4 电导率成像系统在探测深部构造中是有效的。与其他电磁法相比较,EH-4 电磁成像系统无论在经济上,还是在工作效率上都有非常明显的优势,既可以提高工作效率,又可以降低勘探成本,值得广泛应用推广。

### 参考文献(References):

- [1] 沈远超,申萍,刘铁兵,等. EH-4 在危机矿山隐伏金矿体定位预测中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1):559-567.  
Shen Yuanchao, Shen Ping, Liu Tiebing, et al. Prediction of hidden gold orebodies in depleted mines by the stratagem EH4 system[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23 (1):559-567 (in Chinese with English abstract).
- [2] 申萍,沈远超,刘铁兵,等. EH-4 连续电导率成像仪在隐伏矿体定

- 位预测中的应用研究[J]. 矿产与地质, 2007, 26(1):70-78.  
Shen Ping, Shen Yuanchao, Liu Tiebing, et al. Application of stratagem EH4 system to prediction of hidden ore bodies [J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 26(1):70-78(in Chinese with English abstract).
- [3] 傅文杰,刘伟,史永东. EH-4 电导率成像系统在探测构造深部延伸中的应用[J]. 甘肃冶金, 2008, 30(1):22-24.  
Fu Wenjie, Liu Wei, Shi Yongdong. EH-4 conductivity imaging system in the exploration of deep structure of the extended application [J]. Gansu Metallurgy, 2008, 30 (1):22-24 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王志强,朱向泰,李瑞. EH-4 电导率成像系统在矿产勘查中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2007, 22(4):306-309.  
Wang Zhiqiang, Zhu Xiangtai, Li Rui. Application of EH-4 electromagnetic image system to mineral resource exploration [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2007, 22(4):306-309(in Chinese with English abstract).
- [5] 陈乐寿. 大地电磁测深方法[M]. 北京:地质出版社, 1990.  
Chen Leshou. Magnetotelluric Sounding Method [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990(in Chinese).
- [6] 莫撼. EH-4 电磁系统的近源效应及其校正方法 [J]. 物探与化探, 2000, 24(4):314-320.  
Mo Han. Source effect of EH-4 electromagnetic system and technique for its correction [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 24(4):314-320(in Chinese with English abstract).
- [7] 张莹,张胜业. EH-4 资料处理解释系统的研究[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(4):311-315.  
Zhang Ying, Zhang Shengye. A study of the EH-4 processing and interpretation system[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(4):311-315(in Chinese with English abstract).

## The application of the EH-4 electromagnetic imaging system to the detection of concealed structure

LI Fu, WANG Yong-hua, WU Wen-xian

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China)

**Abstract:** The EH-4 electromagnetic imaging system has the advantages of great exploration depth, direct perceivability of the result, portability and high efficiency. This paper describes the basic principle of the EH-4 electromagnetic imaging system as well as the technology for data acquisition and data processing. The application of this system to the detection of the extension of the structure at depth in western Yunnan is also reported. Practice shows that the application of the EH-4 electromagnetic imaging system to the detection of the extension of the structure at depth is effective.

**Key words:** EH-4 electromagnetic imaging system; resistivity; structure

**About the first author:** LI Fu, male, born in 1980, assistant engineer, engages in geophysical exploration; E-mail: lifu2007chengdu@126.com.