

文章编号: 1009-3850(2012)02-0102-06

## EH4 电导率成像系统在通安小牛场控矿构造勘探中的应用

吴文贤, 王永华, 焦彦杰, 吾守艾力·肉孜, 艾斯卡尔·吐尔逊, 李 华

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

**摘要:** EH4 电导率成像系统是一种混场源频率域电磁观测系统, 其能穿透低阻覆盖层并清晰反映深部地质体空间展布特征, 具有轻便高效、勘探深度大、分辨率高的特点。在对四川通安-小牛场地区控矿构造勘探中, 利用 EH4 电导率成像系统剖面处理与解释结果, 查明了区内隐伏构造及地层界线, 证明 EH4 电导率成像系统在寻找隐伏构造与地质界线过程中的有效性。

**关键词:** EH4 电导率成像系统; 控矿构造; 通安; 小牛场

中图分类号: P622+.2

文献标识码: A

随着国民经济的快速发展, 矿产资源需求量越来越大, 由此也对勘探方法和手段提出了更高的要求。当前, 由于露天矿和地表矿已基本查明, 找矿难度越来越大, 金属矿产勘查已进入寻找隐伏矿、盲矿与难辨矿的阶段<sup>[1]</sup>。构造与地质界线是重要的控矿因素<sup>[2-4]</sup>。因此, 有效查明控矿构造是提高矿产勘探质量的前提。

EH4 电导率成像系统是利用人工电磁场(1~100kHz)和天然电磁场(10Hz~1kHz)测量大地电阻率的一种频率域观测系统。通过观测两个正交电场分量和磁场分量的变化, 了解视电阻率, 并根据测区内视电阻率的变化情况勘探地下异常体, 且通过改变频率可实现对不同深度目标层的探测。由于其接收频点丰富(约60个), EH4 电导率成像系统可获得高分辨率的视电阻率-深度图像, 并通过实时数据处理与显示, 得到连续剖面的拟二维反演结果, 数据处理及地质解释均比其它同类方法简单、明确, 且能测量地下1000m深度范围内地质体的连续视电导率值, 勘探深度较大。此外, 该仪器重量轻(15kg), 便于野外实际操作。因此, 该系统在矿产勘探中得到了广泛的应用, 尤其在对地形条件较差的地区进行勘探时, EH4 电导率成像系统发

挥着重要的作用<sup>[5-7]</sup>。

四川通安小牛场位于扬子准地台西缘康滇地轴中段, 跨东川断拱、江舟-米市断陷。区内地形起伏较大, 地质构造复杂, 褶皱、断裂极为发育。岩浆活动对矿产的形成起着显著的控制作用, 且不同岩体电性差异较大。因此, 我们采用 EH4 电导率成像系统对区内构造进行推断与解释。

### 1 EH4 电导率成像系统方法原理

EH4 电导率成像系统又称 Stratagem MT, 即可控源音频大地电磁测量, 简称 EH4(E 电场强度, H 磁场强度), 其最早于 1996 年由美国 EMI 公司和 Geometrics 公司联合研制, 并于本世纪初引入我国, 是当前国际上最先进的电测测量仪器之一<sup>[8,9]</sup>, 该系统主要用于地下水调查、工程地质调查、找矿、基岩起伏调查、地质构造填图及岩层空隙度调查等方面。

与大地电磁法相似, EH4 电导率成像系统利用宇宙中的太阳风、雷电等入射到地球上的天然电磁场信号作为激发场源, 即一次场, 其平面电磁波垂直入射到大地介质中, 由此产生与一次场同频率的感应电磁场。在大地介质均匀时, 波阻抗是电场与磁场的水平分量的比值, 即

收稿日期: 2011-04-19; 改回日期: 2011-09-20

作者简介: 吴文贤(1982-), 男, 硕士, 助理工程师, 从事地球物理勘查工作。E-mail: 51019789@qq.com

资助项目: 四川通安-小牛场地区矿产远景调查(编号: 1212010813066)

$$Z = \left| \frac{E}{H} \right| e^{i(\varphi_e - \varphi_H)} \quad (1)$$

式中  $E$  为电场强度,单位为  $mv/km$ ;  $H$  为磁场强度,单位为  $nT$ ;  $\varphi_e$ 、 $\varphi_H$  分别为电场和磁场相位,单位均为  $m \text{ rad}$ 。

通过测量相互正交的电磁场分量  $E_x$ 、 $E_y$  和  $H_x$ 、 $H_y$ ,可确定介质的电阻率值,其中

$$E_x = \frac{I \cdot AB \cdot \rho}{2\pi r^3} \cdot (3 \cos^2 \theta - 2) \quad (2)$$

$$E_y = \frac{3 \cdot I \cdot AB \cdot \rho}{4\pi r^3} \cdot \sin 2\theta \quad (3)$$

$$H_x = -(i+1) \frac{3I \cdot AB}{4\pi r^3} \cdot \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \omega}} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$$H_y = -(i+1) \frac{I \cdot AB}{4\pi r^3} \cdot \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \omega}} \cdot (3 \cos^2 \theta - 2) \quad (5)$$

式中  $\rho$  为电阻率,单位为  $\Omega \cdot m$ ;  $\theta$  为水平点偶极子  $AB$  和均匀半空间任意点  $M$  的夹角,单位为  $^\circ$ ;  $r$  为偶极子  $AB$  的中点到  $M$  的距离,单位为  $m$ ;  $\mu_0$  为磁导率;  $\omega$  为角频率。

将式(2)与式(5)相除,并简化可得:

$$\rho_s = \frac{1}{\mu_0 \omega} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (6)$$

$\rho_s$  为视电阻率,式(6)可简写为

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (7)$$

电磁场( $E$ 、 $H$ )在大地传播过程中,定义振幅衰减到初始值的  $1/e$  时的深度为穿透深度或趋肤深度  $\delta$ ,即:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (8)$$

可见,趋肤深度  $\delta$  随电阻率  $\rho$  和频率  $f$  的变化而变化,且测量在对应的研究深度频带上进行。通常,电磁波的探测深度随电阻率的增高或频率的降低而增大;其中,频率越高,其反映的地层特征深度越浅;而频率越低,反映的深度越大。因此,在一个宽频带上观测电场与磁场信息,并由此计算电阻率和相位,即可确定地下地电断面电性特征与构造。

由于地下介质并不均匀,通常称由计算所得的电阻率为视电阻率,实际勘探深度( $D$ )常取为趋肤深度的一半,即:

$$D = \delta/2 \approx 356 \sqrt{\rho/f} \quad (9)$$

## 2 野外工作方法 with 数据处理

### 2.1 野外工作方法

StrataGem 电磁系统的磁探头分为两种,一种是低频探头,一种高频探头,其采集的频段宽度分别为  $10 \sim 92\text{KHz}$  和  $0.1 \sim 1000\text{Hz}$ 。其中,低频探头主要探测深部构造,但抗干扰能力弱;而高频探头探测深度相对要浅一些,且抗干扰能力也较强。本次探测过程中,尽量避开高压线、河流、公路等干扰,首先采用高频探头进行测深,若外界干扰严重造成数据无法处理解释时,则采用低频探头进行补测。

本次任务要求点距为  $100\text{m}$ ,由于地形及电线的影 响,为了采集合格的点信息,部分点距在  $80 \sim 150\text{m}$  之间变化,野外数据采集采用单点测深的方法。为了检测仪器是否工作正常,我们在剖面点上做了平行试验,使两个磁棒至少相隔  $5\text{m}$  远,平行放在地面,两个电偶极子也相互平行。观测电场、磁场通道的时间序列信号。图 1a、b 分别为低、高频带磁场、电场信号波形图,从图中可以看出,两个方向通道的波形形态和强度均基本一致,说明仪器工作正常。

#### 1. 极距参数确定

如图 2 所示,本次工作共用 4 个电极,每两个电极组成一个电偶极子,在测区内对不同电极距进行实验测量,分别进行  $5\text{m}$ 、 $10\text{m}$ 、 $20\text{m}$ 、 $30\text{m}$  电极距观测,从测试的结果看来,  $10\text{m}$  的极距观测数据质量较好。同时,为了对比监视电场信号,测区内电极距都为  $10\text{m}$ 。规定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。为了保证 Y-Dipole 电偶极子的方向与 X-Dipole 的相互垂直,要用罗盘仪定向,误差;电偶极子的长度用测绳测量,误差  $\text{m}$ 。野外数据采集过程中,受地形和建筑物等障碍物的影响,个别点适当改变了极距大小,但采集参数中按实际极距长度进行输入,对测量结果基本没有影响。

#### 2. 磁棒布置技术

磁棒离前置放大器大于  $5\text{m}$ ,为了消除各种干扰因素,两个磁棒要埋在地下  $5\text{cm}$ ,以减少外界的干扰,用罗盘仪定向使两磁棒相互垂直,误差控制在,且保持水平。所有的工作人员离开磁棒至少  $10\text{m}$ 。

#### 3. 前置放大器(AFE)布置技术

接电道和磁道的前置放大器应放在测量点上,即两个电偶极子的中心,为了保护电道和磁道,前置放大器应首先接地,远离磁棒至少  $5\text{m}$ 。

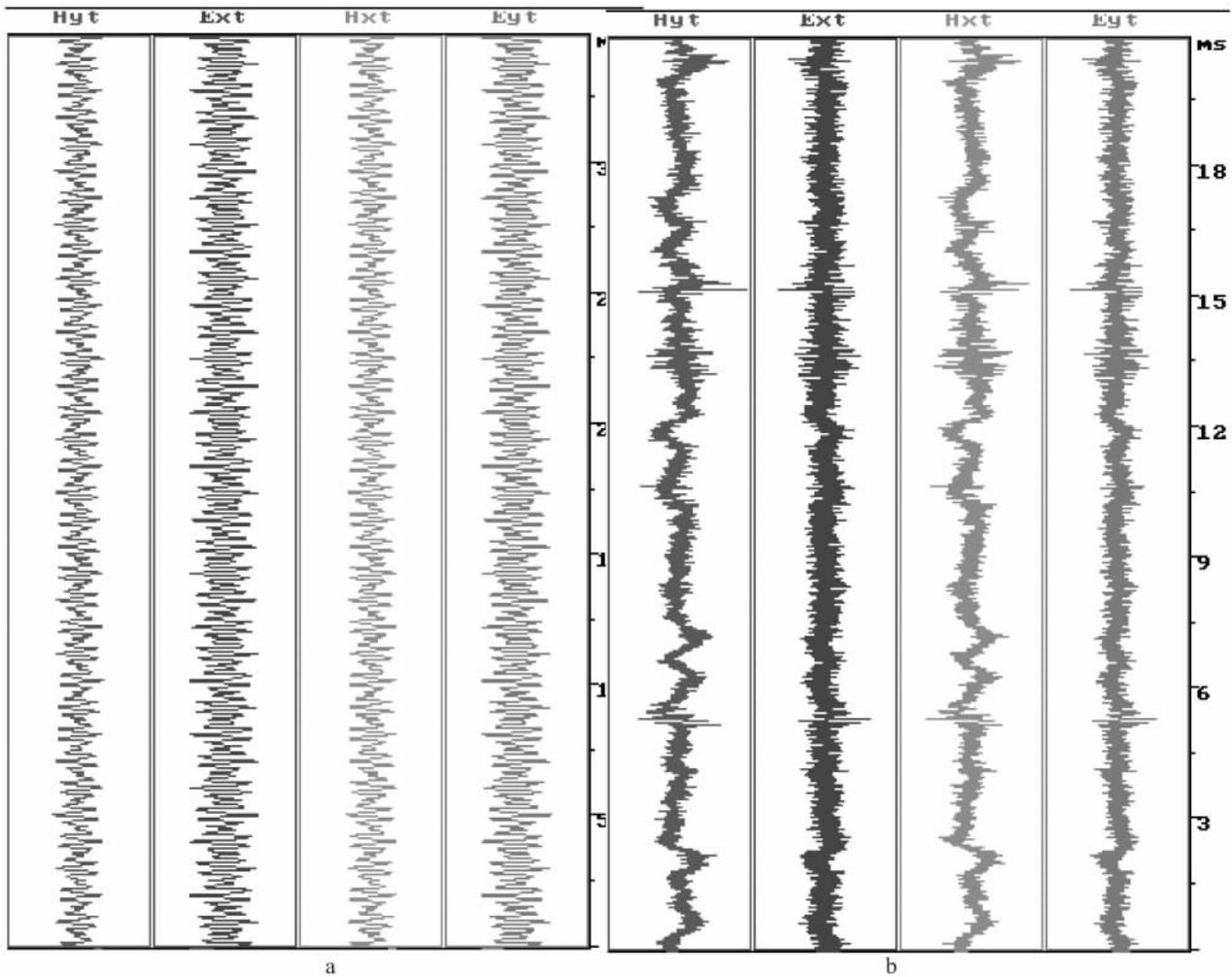


图 1 平行试验检查仪器通道相关性波形图

a. 低频段; b. 高频段

Fig. 1 Oscillograph traces for the low-frequency and high-frequency magnetic fields and electrical field signals based on the parallel tests in the measured section

a. Low-frequency band; b. High-frequency band

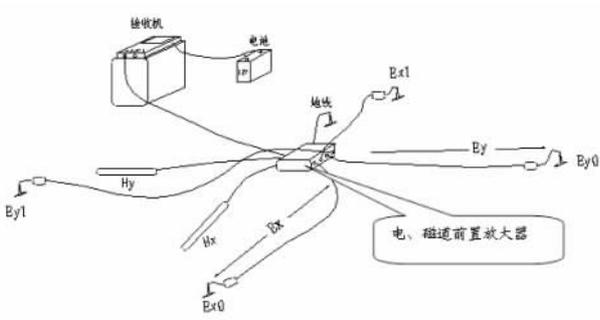


图 2 EH4 系统工作示意图

Fig. 2 Schematic diagram for the EH4 electrical conductivity imaging system

#### 4. 主机布置技术

主机要放置在远离前置放大器( AFE) 至少 20m 的一个平台上, 而且操作员最好能看到 AFE 和磁棒

的布置。

#### 2.2 数据处理与解释

本次处理软件为仪器自带的 DOS 版本 IMAGEM 软件。首先, 对 EH4 电导率成像系统野外采集的时间序列的数据进行预处理, 然后对资料做快速傅立叶变换, 获得电场和磁场虚实分量和相位数据。由于勘探地形起伏较大, 处理时要做地形改正, 在地形比较陡的地段取平滑因子为 0.1, 地形比较平缓的地段平滑因子为 0.5, 然后进行一维 BOSTICK 反演, 对每一个测点进行编辑, 删除畸变的频点, 保留高质量的频点数据。在一维反演的基础上, 再进行二维反演成像, 生成二维剖面数据文件。在此基础上进行异常区图件绘制与分析。由于该地区无钻孔资料标定深度, 本文中的深度仅为相对深度。具体处理流程如图 3 所示。

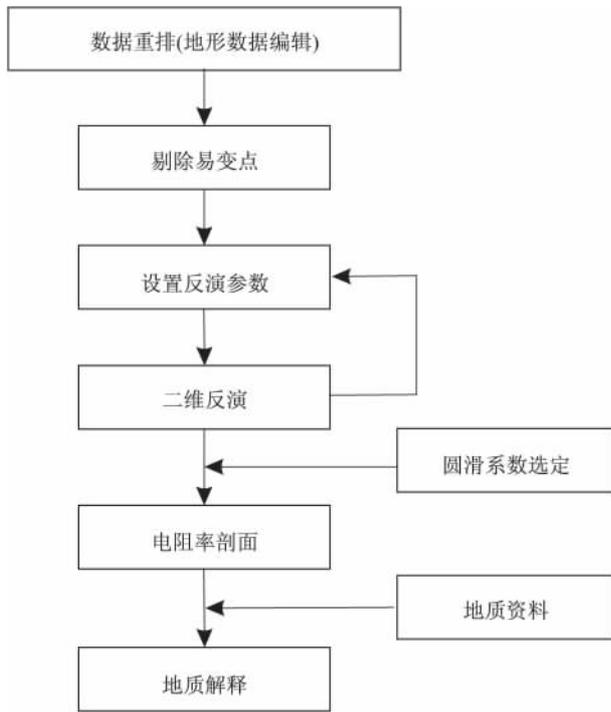


图3 资料处理流程图

Fig.3 Flow chart for data processing

### 3 通安小牛场矿区应用实例

#### 3.1 工区地质概况

通安小牛场矿区位于云南省北部东川地区,地处青藏高原东延之川西南山地南缘和云贵高原北部,属高中山地形,金沙江水系,主要河流为金沙江及其次级支流。山脉走向南北,海拔在 2000m 左右。L4 剖面位于落雪以南,毛角海子一带,剖面由西向东展布,出露岩体以黑山组( $Pt_2hs$ )钙质、碳质、粉砂质板岩,落雪组( $Pt_2l$ )结晶白云岩及因民组( $Pt_2y$ )紫红色白云质板岩、白云岩为主(图4),部分地段出现基性岩,主要为辉长辉绿岩、辉绿岩,次为流纹质火山岩,呈岩株或岩脉侵入前震旦纪变质地层中。剖面东端由于高压线的干扰,勘探深度只有 250m,给该段深部解释带来困难。

区内岩石电阻率值差异较大。其中,地表以下 50m 范围内表现为低阻,主要为粘土岩、砂岩及石英砂岩,电阻率  $< 200\Omega \cdot m$ ; 广泛分布的中等电阻率( $800 \sim 3000\Omega \cdot m$ )电性体为本区主要岩体,以白云质砂岩、白云岩为主;深部完整的灰岩和白云岩的电阻率较高,达  $4000\Omega \cdot m$ ; 结晶白云岩、灰岩的电阻率值近  $6400\Omega \cdot m$ 。

#### 3.2 应用效果分析

图5为L4剖面EH4成像反演剖面及对应的地质解释结果。

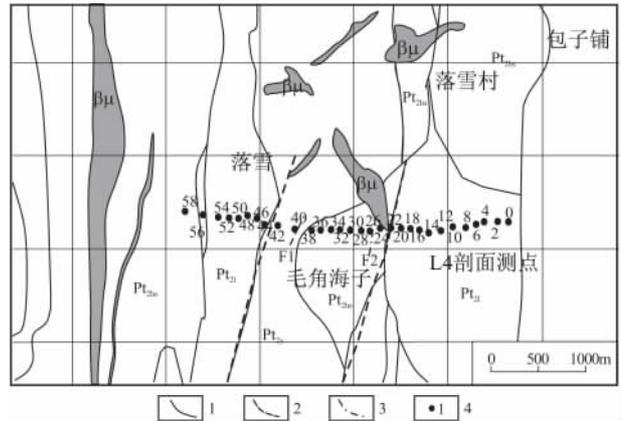


图4 区内出露岩体、地层概况及L4剖面位置示意图

$Pt_2hs$ . 黑山组: 钙质、碳质、粉砂质板岩;  $Pt_2l$ . 落雪组: 结晶白云岩、含藻结晶白云岩;  $Pt_2y$ . 因民组: 紫红色白云质板岩、白云岩;  $\beta\mu$ . 辉绿岩脉; 1. 地层界线; 2. 地质推测断层; 3. 物探推测断层; 4. EH4 大地电磁测深点位

Fig.4 Schematic diagram showing the outcropped rocks, strata and L4 section in the study area

$Pt_2hs$  = Heishan Formation: calcareous, carbonaceous and silty slate;  $Pt_2l$  = Luoxue Formation: crystalline dolostone and algal crystalline dolostone;  $Pt_2y$  = Yinmin Formation: purplish red dolomitic slate and dolostone;  $\beta\mu$  = diabase vein. 1 = stratigraphic boundary; 2 = geologically inferred fault; 3 = geophysically inferred fault; 4 = EH4 measurement spot

由图5可知,剖面上36~34号点位置近于直立的低阻异常带把整个剖面分为两段,且东西两段高阻异常位置表现为明显的错断和滑移,由此推断其间存在一个较大的深断层F1(见图5中虚线)。断层倾向向南,倾角 $75^\circ$ ,宽约300m,垂直延深1000m;其中,F1断层西部出露地层从西向东依次为因民组( $Pt_2y$ )紫红色白云质砂板岩和落雪组( $Pt_2l$ )白云岩、结晶白云岩,异常以大规模的高阻异常为主,且越往深部电阻率越高,规模也越大,且在F1断层及其附近突然中断。因民组和落雪两组地层间存在一明显的地层界线,根据电阻率等值线走向分布情况,推断该界线D1倾角较陡,浅部500m内向西倾,深部700m处发生扭曲向东突起,该界线和地质划分界线位置基本吻合。F1断层西侧深部约700m处存在一明显的地层界线D2,见图中5黑色粗线D2,其下伏地层电阻率大于4500,推测由完整的结晶白云岩引起,界线D2西低东高,埋深650~1100m,东端止于F1断层附近。由其异常的完整性可知,地层界线D1延深较小;相对于西部异常而言,F1断层东部出露岩体以黑山组( $Pt_2hs$ )钙质、碳质、粉砂质板岩、落雪组( $Pt_2l$ )白云岩、结晶白云岩为主,异常

强度和规模均有所减小,但异常走向与西部高阻异常一致,推测其反映的地层或岩性与西部对应高阻异常具有对应性;相对于6~24号点对应的高阻异常位置来说,24~32号点对应的高阻异常位置往深部有所滑移并有低阻带。因此,推测24~26号点处有一断层F2(见图5中标示位置),其倾向向东,倾角约73°,宽约120m。另外,东段深部近乎水平的大规模低阻异常可能是矿化蚀变岩体的反映,由其异常的完整性可知,断层F2对深部低阻无破坏作

用,其延深较小。

经对比发现,沿断层F1发育的浅部低电阻异常区与地表铁、铜矿(化)体出露位置相吻合,地下100 m以下的低电阻率异常与浅部已知矿体的低电阻率异常相同,且二者延伸的趋势一致;推测延构造发育的深部低电阻率异常为矿化异常的反映,另根据剖面异常呈向上收敛、向下发散的喇叭状的特征推测,其垂向延深大于水平长度(见图5中地质解译图中深灰色表示),建议打钻验证。

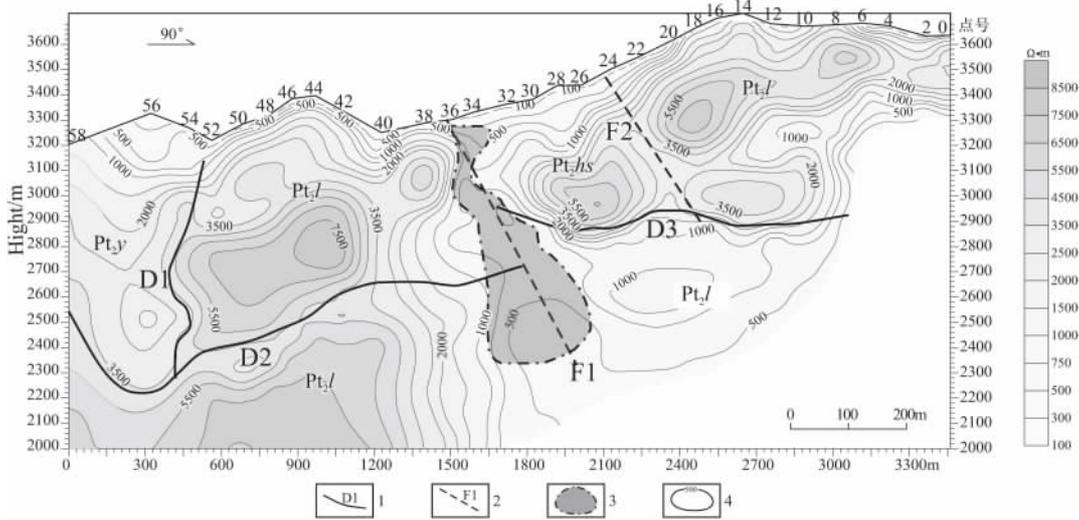


图5 L4线EH4探测视电阻率剖面图及地质解译结果

1. 推断地层界线; 2. 推断断层; 3. 推断矿化体; 4. 视电阻率等值线; Pt<sub>2</sub>/hs 黑山组: 碳质绢云千枚岩、粉砂质板岩; 下部夹碳酸盐岩; Pt<sub>2</sub>/l 落雪组: 白云岩 夹硅质白云岩和泥砂白云岩, 下部有硅质团块; 底部粉砂泥质白云岩夹钙泥质板岩薄层; Pt<sub>2</sub>/y 因民组: 下部岩性为灰绿色砾岩夹紫色白云质粉砂岩及板岩; 中部为紫红色铁质板岩及泥砂质白云岩; 底部为紫红、灰紫色砂质白云岩夹板岩

Fig. 5 EH4 apparent electrical resistivity and geological interpretation of the L4 section

1 = inferred stratigraphic boundary; 2 = inferred fault; 3 = inferred mineralized body; 4 = isoline of apparent electrical resistivity. Pt<sub>2</sub>/hs = Heishan Formation: carbonaceous sericite phyllite and silty slate intercalated with carbonate rocks in the lower part; Pt<sub>2</sub>/l = Luoxue Formation: dolostone intercalated with siliceous dolostone and silty dolostone with siliceous lumps in the lower part; silty and muddy dolostone intercalated with calcareous and muddy slate at the base; Pt<sub>2</sub>/y = Yinmin Formation: grayish green conglomerate intercalated with purple dolomitic siltstone and slate in the lower part; purplish red ferruginous slate and silty dolostone in the middle part, and purple red and grayish purple sandy dolostone intercalated with slate at the base

### 4 结论

EH4 电导率成像系统能探测不同地质体的精细电阻率结构,清晰地判断隐伏构造、地质界线及矿化异常体在空间上的展布规律,并能直观地提供地质体在剖面上的形态、规模和矿化强度等信息,保证了隐伏地质体预测的准确性。通过对通安-小牛场地区 L4 剖面深部地质构造特征的探测与解释,发现 2 条隐伏断裂及 3 条地层界线,并推测了控矿异常在空间上的展布,为寻找深部隐伏矿体及

后期的地质工作提供依据,由此表明了 EH4 电导率成像系统在探测深部隐伏构造的有效性及其在矿产远景调查中的应用潜力。

### 参考文献:

[1] 刘杰,段炜,曾国. EH4 电导率成像系统在隐伏金属矿勘探中的应用[J]. 西部探矿工程 2008 2: 127 - 132.  
 [2] 李富,王永华,吴文贤. EH-4 电磁成像系统在隐伏构造探测中的应用[J]. 中国地质 2009 36(6): 1375 - 1381.  
 [3] WU X H, IAN J F, ALAN G J. Magnetotelluric response and

- geoelectric structure of the Great Slave Lake zone [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2002, 196: 35 – 50.
- [4] 伍岳. EH-4 电磁成像系统在砂岩地区勘查地下水的应用研究 [J]. *物探与化探*, 1999, 23(5): 335 – 346.
- [5] 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.
- [6] 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]. *矿产地质*, 2007, 26(1): 70 – 78.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 易清平, 杨庆华, 狄家亮. EH4 电导率成像系统在桃山铀矿田中的应用研究 [J]. *上海地质*, 2010, 31: 271 – 274.

## An application of EH4 electric conductivity imaging system to the exploration of the ore-controlling structures in the Xiaoniuchang area in Tong'an, southwestern Sichuan

WU Wen-xian, WANG Yong-hua, JIAO Yan-jie, Wushouaili • Rouzi, Aisikaer • Tuerxun, LI Hua  
(*Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China*)

**Abstract:** The EH4 electrical conductivity imaging system which is characterized by portability, high-efficiency and high-resolution, and can penetrate large exploration depths and low-resistivity covers to show the spatial distribution of the deep-seated geological bodies, is an electromagnetic observation system of hybrid field sources in the frequency domain. In the exploration of deep-seated ore-controlling structures in the Xiaoniuchang area in Tong'an, southwestern Sichuan, the EH4 electrical conductivity imaging system was employed for the profile processing and interpretation. The findings of the concealed structures and stratigraphic boundaries in the study area reflect the effectiveness of the EH4 electric conductivity imaging system for the exploration of the deep-seated concealed structures and stratigraphic boundaries.

**Key words:** EH4 electrical conductivity imaging system; ore-controlling structure; Tong'an; Xiaoniuchang