

多种电磁测深技术在深部控矿构造探测中的应用研究

——以泥河铁矿为例

匡海阳¹⁾, 吕庆田^{1,2)}, 张昆²⁾, 严加永²⁾, 陈向斌²⁾

1) 东华理工大学核工程学院, 江西抚州, 344000;

2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京, 100037

内容提要:长江中下游成矿带是我国东部重要的铁、铜多金属矿产资源基地, 使用现代地球物理探测技术对该成矿带典型矿床深部结构进行探测, 对认识深部矿床成因、总结找矿方法和深部找矿的实践具有重要意义。本文选取位于长江中下游成矿带庐枞矿集区内的泥河玢岩铁矿为实验区, 开展了音频大地电磁(AMT)、可控源音频大地电磁(CSAMT)和瞬变电磁(TEM)等电磁法探测实验; 通过对 AMT、CSAMT 和 TEM 数据的处理和反演, 发现 3 者相同测线反演结果反映的控矿地质体电性特征基本一致, 但细节上存在一定差异。综合 3 种电磁测深反演结果, 电性特征刻画了砖桥组火山岩地层分布, 分辨出闪长玢岩体的隆起部位和基本形态, 揭示了矿体的赋存位置。认为在合理的数据采集、处理和反演条件下, 电磁测深能有效地区分复杂地质构造条件下次火山岩与围岩的电性差异, 找到控矿构造界面, 从而推断出矿体的位置。

关键词: 玢岩铁矿; 泥河; 深部找矿; AMT; CSAMT; TEM

现代成矿理论和找矿实践均表明, 深部是未来资源勘查的重要方向, 勘查技术的进步使得发现深达 2000m 以内的资源成为可能(董树文等, 2010)。近年来, 国家实施了地质大调查和危机矿山接替资源找矿计划, 在长江中下游成矿带各大矿集区发现了一大批深部铜铁金多金属矿床(江永宏, 2010)。这些矿床的形成多与构造和岩浆活动有关, 查明成矿构造及岩浆活动轨迹对矿体的圈定和评价至关重要。

然而, 由于该区深部矿特有的复杂地质构造和埋深较大(一般大于 500m)等特点, 地质找矿方法很难直接获得地下地质体的详细信息, 常规的地球物理探测技术很难满足深度和分辨率要求, 找矿工作面临着巨大的难题。

近年来, 电磁理论的发展日趋成熟, 并广泛应用于地下地质体引起的电磁异常场分析; 2D、3D 反演方法使得对异常体的形态及位置有了更准确的认识。同时, 电磁探测硬件技术取得了飞跃性进展, 如美国 GEOMETRICS 和 EMI 公司联合研制的 EH4

连续电导率成像仪、美国 Zonge 公司研制的 GPD32 II 多功能电磁测量系统、加拿大 PHOENIX 公司研制的 V8 电磁测量系统等, 可以有效地穿透不同厚度的覆盖层, 高精度地反演地下 0~2000m 控矿构造和电性特征, 为寻找深部隐伏矿提供了有效的地球物理探测手段。本文以位于庐枞矿集区内的泥河玢岩铁矿为实验区, 开展了音频大地电磁法(AMT)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)和瞬变电磁法(TEM)综合探测实验。通过对实验结果进行对比分析, 并结合地质、钻孔和其他物探资料, 验证各方法探测深部矿体的能力, 为长江中下游地区深部找矿工作提供地球物理探测方法借鉴。

1 方法原理

1.1 音频大地电磁法(AMT)

音频大地电磁法(AMT)以天然电磁场信号为场源, 通过观测时间序列信号, 将时间序列数据转化为频率域数据, 进而计算出每个频点的电阻率值和相位阻抗。基于音频大地电磁测深原理的 EH4 连

注: 本文为国家科技专项“深部矿产资源立体探测技术与实验”(编号 SinoProbe-03)、国家自然科学基金重点基金项目“长江中下游成矿带深部动力学与成矿作用研究”(编号 40930418)、地质调查项目“长江中下游地区地壳精细结构与控矿研究”(编号 1212010981004)和科技支撑计划项目“玢岩型铁(硫)矿深部勘查技术与找矿示范研究”(编号 2009BAB43B02)联合资助的成果。

收稿日期: 2011-05-13; 改回日期: 2012-03-15; 责任编辑: 郝梓国, 黄敏。

作者简介: 匡海阳, 男, 1986 年生。硕士, 主要从事电磁法勘探研究。Email: kuangseasun@163.com。

续电导率成像系统是由美国 GEOMETRICS 和 EMI 公司联合生产的一套频率域与时间域相结合的电磁法测量系统,它采用了最新数字信号处理器的硬、软件装置,是目前国内外较为先进的电磁勘探系统之一。其观测的基本参数为正交的电场分量(E_x, E_y)和磁场分量(H_x, H_y)。若将地表天然电场与磁场分量的比值定义为波阻抗,那么,在均匀大地背景下,此阻抗与入射场极化无关,只与大地电阻率以及电磁场的频率有关(陈乐寿等,1990):

$$Z = \sqrt{\pi \rho \mu f} (1 - i) \quad (1)$$

式(1)中: f 为频率, ρ 为电阻率, μ 磁导率。由(1)式可确定大地电阻率为:

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E}{H} \right| \quad (2)$$

式(2)中: ρ 的单位是 $\Omega \cdot m$, E 的单位是 mv/km , H 的单位为 nT 。

对于水平分层的介质,上述表达式仍然适用。但用它计算得到的电阻率将随频率的改变而变化,因为电磁波的大地穿透深度(或趋肤深度)与频率有关,表达式为:

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3)$$

式(3)中: δ 为目标深度,单位为 m 。此时由(2)式计算得到的电阻率为视电阻率。

在一个宽频带上通过测量相互正交的电场分量和磁场分量,可确定介质的视电阻率值,通过反演可以确定地下介质的电性和构造特征。EH4 有效探测深度可达 1200m,具有分辨率高、成果反应直观、工作效率高、仪器轻便等特点,被广泛用于矿区深部立体填图、确定构造、圈定成矿有利部位等(樊战军等,2007;沈远超等,2008;孙燕等,2010),并且通过面积勘探能够较为精确地确定矿体的规模、产状、埋深等信息(詹少等,2009)。

1.2 可控源音频大地电磁法(CSAMT)

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是在大地电磁法(MT)与音频大地电磁法(AMT)的基础上,针对解决大地电磁法信号弱和场源的随机性强而发展起来的一种电磁测深方法,该方法主要基于电磁传播理论和麦克斯韦方程组(何继善,1998):

$$\text{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

$$\text{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (5)$$

$$\text{div} D = q \quad (6)$$

$$\text{div} B = 0 \quad (7)$$

式中: $D = \epsilon E$, $B = \mu H$, $J = \sigma E$; E 为电场强度矢量, D 为电磁感应强度矢量, ϵ 为介质的介电常数, H 为磁场强度矢量, B 为磁感应强度矢量, μ 为介质的导磁率, J 为电流密度矢量, σ 为介质的导电率。

由于供电电流为谐变电流,所以可以通过(4)~(7)式导出在均匀大地导电介质中的传播方程:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (8)$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0 \quad (9)$$

式中: $k^2 = \epsilon \mu \omega^2 + i \sigma \mu \omega$, 为波数的平方。

在直角坐标系下,我们可以得到(柳建新等,2008):

$$E_x = \frac{IL_{AB}}{2\pi\sigma r^3} (3\cos^2\theta - 2) \quad (10)$$

$$H_y = (j+1) \frac{IL_{AB}}{4\pi r^3} \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} (3\cos^2\theta - 2) \quad (11)$$

进而得到电场(E_x)、磁场(H_y)与电阻率(ρ_s)的关系式:

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (12)$$

式中: ρ_s 为电阻率,单位为 $\Omega \cdot m$; f 为频率,单位为 Hz ; E_x 为水平电场分量,单位为 V/m ; H_y 水平磁场分量,单位为 $A \cdot m$; ρ_s 称之为卡尼亚电阻率。

根据电磁波的趋肤效应理论,有效穿透深度可表达为(石昆法,1999):

$$h \approx 365 \sqrt{\rho/f} \quad (13)$$

式中: h 为深度,单位为 m 。

从(13)式可见,当介质的电阻率(ρ)固定时,电磁波的有效穿透深度 h 与频率 f 成反比。CSAMT 就是通过使用人工源,在改变发射频率的条件下测量卡尼亚视电阻率达到频率测深的目的。

可控源音频大地电磁测深法具有探测深度大(通常可达 1~2km)、分辨能力强、观测效率高、受高阻屏蔽作用影响小的特点,并同时具有测深和剖面研究的双重特点(刘红涛等,2004),是研究深部地质构造、寻找隐伏矿和地下水资源勘查的有效手段,在国内外水资源勘查、地热勘查和铝、铜、金、银、铅、锌、铀等隐伏矿勘查中已得到广泛应用(Basokur et al., 1997; Anderson et al., 2008; 于昌明,1998; 李茂等,2006; 杨瑞西等,2008; 刘国印等,2008)。

1.3 瞬变电磁法(TEM)

瞬变电磁法(TEM)是通过测量由一次电流脉冲场激励而产生的二次涡旋场随时间的衰减规律来了解异常体的空间分布。在均匀大地表面,由单匝线圈通以脉冲电流激发,回线中部场近于均匀的部

分,以接收线圈进行观测,可得磁场垂直分量的响应为(牛之琰,1992):

$$\epsilon_I=\frac{3IA_R}{\sigma a^3}[\Phi(\frac{1}{2\sqrt{\tau_0}})-e^{-1/(4\tau_0)}\frac{1+6\pi}{\sqrt{\pi\tau_0}}]$$

(14)

在远区(晚期) $\tau_0\geq 1$ 时,式(14)可以简化为

$$\epsilon_I=\frac{I\mu_0^{5/2}A_Rb^2}{20\sqrt{\pi}\rho_1^{3/2}t^{5/2}}$$

(15)

从而可得电阻率

$$\rho_r=6.32\times 10^{-3}A_R^{2/3}b^{4/3}(\frac{\epsilon_I}{I})^{-2/3}\times t^{-5/3}$$

(16)

式中: ρ_r 为电阻率,单位为 $\Omega\cdot m$; ϵ_I 为感应电动势,单位为 μV ; I 为电流,单位为 A ; t 为时间,单位为 ms ; A_R 为接收线圈有效面积,单位为 m^2 ; b 为发射线框边长,单位为 m 。

2 地质背景

2.1 区域地质背景

庐枞盆地(图1)位于长江中下游铁铜成矿带的中段,是我国著名的玢岩铁矿富集区之一(常印佛等,1991;唐永成等,1998)。该区由4组深大断裂控制,盆地基底东浅西深,属于继承式中生代陆相盆地(任启江等,1991),大致呈东北向延伸。盆地内铁矿具明显的环状分布规律^①,内部(内环带)主要以铁、硫、铜等矿产为主,矿体主要产于火山岩与次火山岩中,环形构造对玢岩型铁矿具有重要的控制作用。庐枞火山盆地内主要类型的铁、硫矿床均产于盆地基底隆起带上,岩浆上侵、基底褶皱等是造成盆地基底隆起的主要原因。基底主要由侏罗纪的碎屑岩和中晚三叠世碎屑岩、碳酸盐岩等组成,在岩浆侵位的过程中,基底地层周冲村组的膏溶角砾岩、赤铁矿层等物质被活化、迁移、富集,在成矿有利的部位富集成矿(周涛发等,2010)。因此,火山岩盆地基底隆起带是该区玢岩型铁矿的重要综合信息标志。另外,庐枞火山岩

盆地的形成与基底断裂有密切的成因联系。近南北向、近东西向派生断裂是造成基底隆起、岩体侵入和控矿的重要构造。东北向构造及其配套体系构造的交叉断裂所控制的断隆(导致岩侵型隆起或穹隆)是该区玢岩型铁矿最重要的控矿条件和找矿标志(吴礼彬等,2010)。

泥河铁矿紧靠郟庐断裂带东侧,处于庐枞火山岩盆地的西北边缘。铁矿形成于燕山晚期,其含矿岩体主要为辉石粗安玢岩,与玢岩型铁矿成矿相关的含矿岩浆岩侵位介于砖桥旋回与双庙旋回的间歇期(王德滋等,1996;刘洪等,2002;谢智等,2007),是砖桥火山喷发旋回后期潜火山作用的产物。矿区内出露的地层由老到新为下白垩系龙门院组、砖桥组、双庙组、浮山组、杨湾组和第四系下蜀组、芜湖组等。地表地层产状平缓,褶皱不发育,总体构成一个向北西倾斜的单斜构造。构造形迹以各种方向的浅层陡倾斜断裂、裂隙为主,往深部地层产状有起伏变化(常印佛等,1991;周涛发等,2008,2010)。

2.2 岩石物性特征及测线布置

岩石物性参数是研究地球物理场响应的基础。我们对收集到的矿区相关岩石、矿物进行了物性测量和统计分析(表1)。从表1中数据分析可知:磁铁矿、黄铁矿具有低电阻率、强磁性、高密度和高极化率的特征;矿体赋存的石英闪长玢岩和辉石岩具有中—高电阻率、强磁性、高密度和高极化率的特征;不含铁闪长玢岩虽然具有高电阻率、较高的密度和极化率,但磁性较弱;含铁或不含铁的砂砾岩、凝灰岩均与赋矿岩体有较大的物性差异,表现出中—低电阻率、低密度、无磁性的特征。

重磁探测技术只能显示矿体异常的范围,不能准确圈定异常的深度,本次实验为探明矿体的埋深与基本形态,在垂直矿体走向的方向布置了28条AMT测线(图2),测线间距100m。为了形成对比,

表 1 泥河矿区岩石物性参数统计
Table 1 Rock physical property parameters in Nihe deposit

岩石	电阻率 ρ ($\Omega\cdot m$)	密度 σ ($\times 10^6 kg\cdot m^{-3}$)	磁化率 K ($\times 10^{-5}$)	剩余磁化率 J_r ($\times 10^{-5} A\cdot m^{-1}$)	极化率 $\eta(\%)$
泥质粉砂岩	30~140	2.43	1~10	无磁性	—
铁矿化辉石岩	60~310	2.78~3.09	200~580	200~400	28
含铁石英闪长岩	110~300	2.89~3.13	100~660	200~400	25
黄铁矿	5~20	3.00~3.39	800~1100	600~780	47
磁铁矿	1~10	3.54~4.26	870~9800	980~8700	65
闪长玢岩	>500	2.62	无磁性	无磁性	10

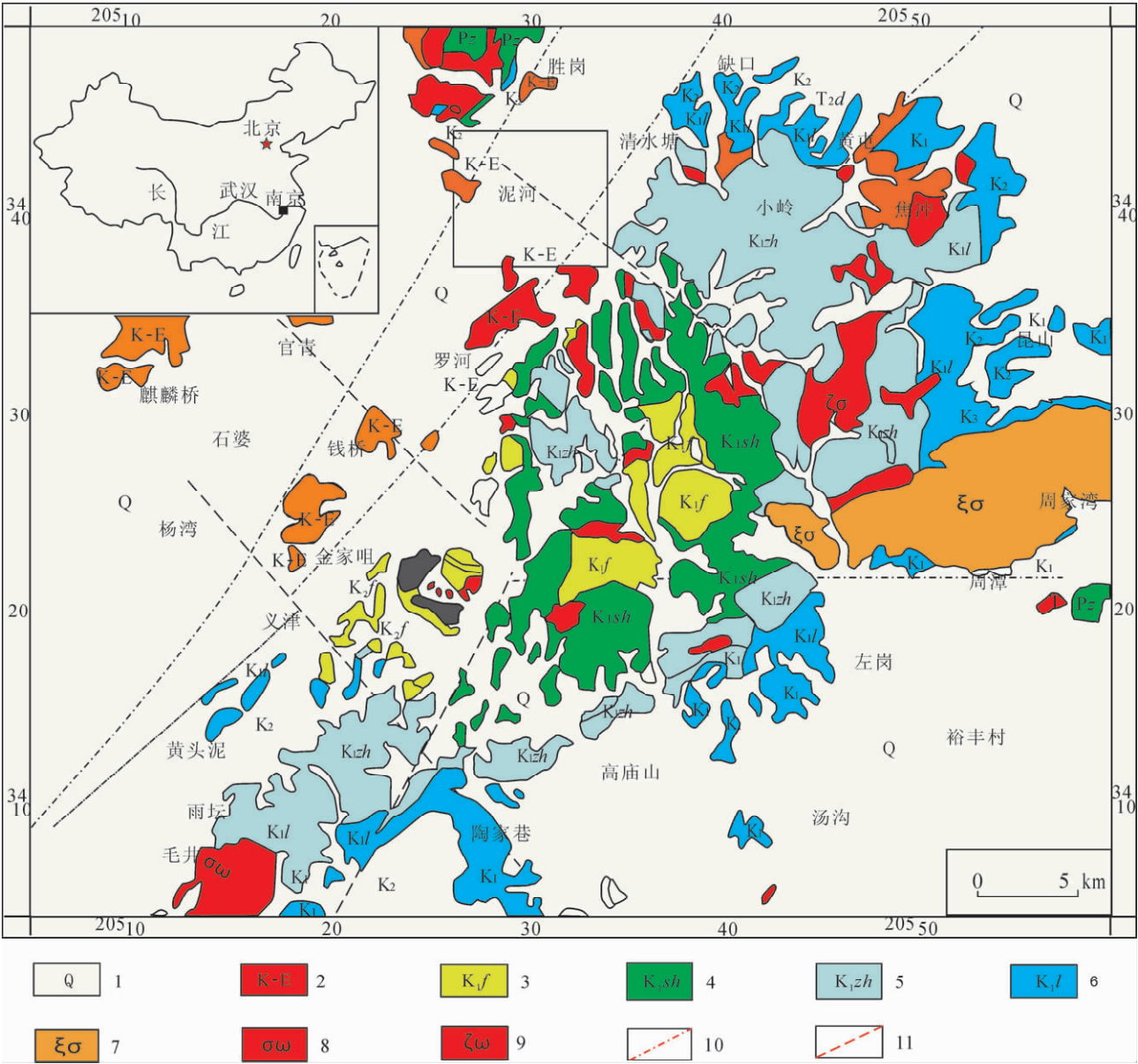


图 1 庐枞盆地区域地质简图(据周涛发等,2010 改绘)

Fig.1 Regional geological set of Nihe iron deposit(modified from Zhou Taofa et al. , 2010)

1—第四系;2—白垩系—第三系(红层);3—浮山组;4—白垩系双庙组;5—白垩系砖桥组;6—白垩系龙门院组;7—燕山期侵入岩正长岩,正长斑岩;8—燕山期早期侵入岩,石英闪长斑岩;9—一次火山岩粗安玢岩;10—推断的区域断裂;11—推断的次级断裂

1—Quaternary; 2—Cretaceous-Tertiary; 3—Fushan Formation; 4—Shuangmiao Formation of Cretaceous; 5—Zhuanqiao Formation of Cretaceous; 6—Longmenyuan Formation of Cretaceous; 7—syenite of Yanshanian, orthophyre; 8—Yanshanian intrusion, quartz diorite porphyry; 9—trachyandesite; 10—inferred fault; 11—inferred inferior fault

分别于 AMT 的 0 线、1 线和 3 线布置了 3 条 TEM 测线;于 AMT 的 1 线、2 线、5 线和 22 线布置了 4 条 CSAMT 测线。

AMT 测量采用 EH4 连续电导率成像仪以张量模式同时测量电场和磁场(图 3b),点距为 50m,电极距 50m。分 3 个频段采集天然场信号,为了保证数据量,每个频段叠加次数不少于 8 次,接收频率范围为 10~96000Hz。

CSAMT 法使用加拿大 PHOENIX 公司研制的 V8 多功能电磁测量系统,采用电偶源标量测量方式(图 3a)。场源极距为 1.7km,收发距 8km,接收点偶极距 40m,点距 40m,采集频率范围为 10~5120Hz。为了提高信噪比,获得高质量数据,本次采用 10A 的发射电流。

TEM 法同样使用加拿大 PHOENIX 公司研制的 V8 多功能电磁测量系统,采用大定源回线、移动

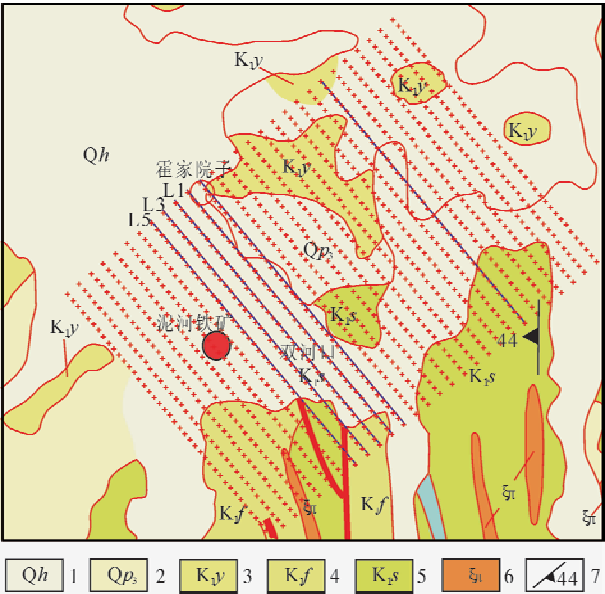


图 2 泥河矿区地质图及测线布置

Fig. 2 Geological map and measurement lines in Nihe deposit

1—全新统; 2—上更新统; 3—杨湾组; 4—浮山组;
5—双庙组; 6—斑岩; 7—断层

1—Holocene; 2—Upper Pleistocene; 3—Yangwan Formation;
4—Fushan Formation; 5—Shuangmiao Formation; 6—porphyry;
7—fault

接收线圈组合装置的测量方式(图 3c),每次布设在发射线框边长 1/3 范围内进行测量。发射线框边长 400m,发射电流 16A,接收线圈面积 1m²,点距 20m。

3 数据分析及处理

3.1 AMT 数据分析及处理

AMT 采集的是天然电磁场,大地电磁信号的微弱性和随机性决定了观测极易受到噪声的影响。测线位于泥河矿区内,人文活动频繁,工业噪声和人文噪声成为本次 AMT 数据采集主要的噪声来源。在用计算出来的阻抗相位进行二维反演前,必须先对数据进行预处理,包括时间域信号去噪处理与频率域相位平滑处理。

时间域信号去噪的方法,目前研究较多的最小递归二乘(RLS)自适应滤波和希尔伯特-黄变换(HHT)滤波方法只适合单点测深曲线,对反演后的拟二维断面的结果收效甚微,并且耗时过大(蔡剑华等,2010)。因此,本次数据处理仍然使用时间域信号删选的方法进行时域去噪。具体做法是对噪声进行重认识和分类,直接删除飞点(与前后频点数据相

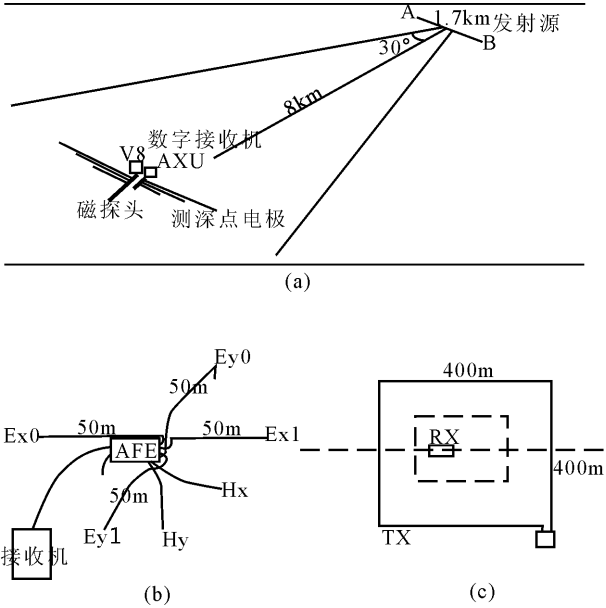


图 3 CSAMT(a)、AMT(b)和 TEM(c) 野外工作装置布置图

Fig. 3 CSAMT(a)、AMT(b) and TEM(c) equipments in field operation

差较大并且数据误差棒也很大)或明显的噪声干扰点,使其不参与功率谱的计算。

在时间域信号筛选后,对计算出来的阻抗相位进行必要的平滑处理。对于明显的飞点直接删除;高频端(曲线首支)应尽量平滑成一渐近线;一般认为地下电性异常体或地质构造引起的视电阻率沿测线的变化是平缓渐变的,且相位在一定的范围之内。对于双对数坐标系中视电阻率斜率过大或相位接近于 0 的点视情况删除。

3.2 CSAMT 数据分析及处理

对 CSAMT 的数据处理主要包括 3 个方面:干扰信号的剔除、静态效应校正、近场源效应校正。由于测线穿过村庄,人文干扰较为严重,因此对于干扰信号的剔除就显得尤为重要,具体做法是对视电阻率曲线进行编辑,结合野外记录和相位曲线直接删除个别跳动较大的频点。

静态效应的校正用得较多的是曲线平移法和空间滤波法(陈清礼等,1999;阎述等,1996;雷达等,2004)。本次数据处理采用曲线平移法作静校正,其基本出发点是认为地下电性异常体或地质构造引起的视电阻率沿测线的变化是平缓渐变的,而地表局部电性不均匀体或局部地形起伏则会引起视电阻率沿测线急剧变化。将相邻的几个测点的数据进行比较,判别各条曲线不连续是受静态效应影响还是地

下确有异常体所致,分析所受静态位移影响的原因和受影响的程度,通过对受静态效应影响的整条曲线进行平移归位的方法来进行校正。

近场源效应的校正目前没有较好的方法,一般进入近场的数据有两个明显的特征:一是视电阻率低频端有近 45°的拐点,低频数据呈渐近直线上升;二是相应的相位趋近于 0。通过观察这两个特征并结合 Bostick 初步反演深度来判断 CSAMT 资料中反演深度大于 2km 的数据是否进入了近区,从而删除进入近区的数据。

3.3 TEM 数据分析及处理

对 TEM 数据进行预处理用的较多的方法是对原始数据进行滤波处理,但是数字滤波会对信号造成影响,使得部分有效信号失真。因此,为了保证结果的可信度,本次通过在采集数据时多次叠加以获得较高质量的数据,未进行数字滤波处理。只是在一维反演建模过程中将视电阻率曲线尾支由于信号能量太弱、跳动太大的不可信点剔除。

4 反演方法及结果评价

为了处理场源效应和复杂的地质构造对结果造成的影响,AMT 和 CSAMT 在数据预处理完成后采用非线性共轭梯度(NLCG)进行二维反演。该方法是由 Rodi 等(2001)提出的,它是通过使用非线性共轭梯度原理来直接求解方程组的最优解。

在离散情况下,观测数据与模型之间的关系可写成泛函形式:

$$d = F(m) + e \quad (17)$$

式中: d 为观测数据向量, F 为正演函数, m 为模型向量, e 为观测数据与正演计算值的误差,对于简单的电性结构, $F(m)$ 可用有限元等数值计算方法获得。

然后通过正则化方法处理目标函数最小化问题,可得目标方程:

$$\phi(m) = (d - F(m))^T V^{-1} (d - F(m)) + \lambda m^T L^T L m \quad (18)$$

式中:给定 λ 、 V 和 L 的值;正则化因子 λ 是一个正数;正定矩阵 V 表示误差矢量 e 的变化; ϕ 定义一个模型空间上的稳定方程;选择矩阵 L 作为简单的二次差分算子,这样当模型网格唯一时, Lm 近似为 $\log \rho$ 的拉普拉斯算子。

引入 Polak-Ribiere 的不同的非线性共轭梯度方法来表达最小化式(18)的目标方程 ϕ , 给定 m_0

$$\phi(m_i + \alpha_i p_i) = \min_{\alpha} \phi(m_i + \alpha p_i) \quad (19)$$

式中,矢量 p 为模型空间的寻找方向,标量 α_i 是步长。

对于上式求 m 的极小,相应于 $i+1$ 次的迭代解为:

$$m_{i+1} = m_i + \alpha_i p_i, i = 1, 2, \dots \quad (20)$$

查找方向跟线性共轭梯度法一样重复变化:

$$P_0 = -C_0 g_0$$

$$p_i = -C_i g_i + \beta_i p_{i-1}, i = 1, 2, \dots \quad (21)$$

其中,

$$\beta_i = \frac{g_i^T C_i (g_i - g_{i-1})}{g_{i-1}^T C_{i-1} g_{i-1}} \quad (22)$$

式中: $-C_i g$ 项是另一个最速下降方向,即最小化 Ψ_i 在 m_i 上的方向导数。

采用仪器配套的商业软件 IX1D 对 TEM 数据进行反演。基本原理是基于 Constable 等(1987)提出的奥克姆(OCCAM)一维反演算法,直接从感应电动势入手,得出感应电动势是电阻率的非线性函数,通过迭代求取最优解。具体步骤是采用一维单点反演,即对每个测深点分别进行一维奥克姆(OCCAM)反演,然后形成拟二维视电阻率断面图。

为了评价各方法的反演效果,选取 1 线 3 种方法反演结果进行对比分析。对比 AMT、CSAMT 和 TEM 反演结果(图 4),3 种方法反演结果表现出的电性特征基本一致:①地表 1000 号点以西存在明显的低阻特征,低阻范围由地表向西逐渐变深至 200m;②地表 1000 号以东显示高阻特征;③深度在 700m 以下都表现为相对高阻特征,并且在 1000 号点附近呈隆起状;④中间层深度在 300~700m 间显示出明显的低阻。

反演结果的差异体现了各方法自身的特点(如反演方法及假设条件、仪器抗干扰能力等)、数据处理和反演过程中的人为因素等的综合影响。

(1)AMT 反演结果(图 4a)显示出明显的浅层电性变化,反演结果对低阻体反映较为灵敏,解析度与其他两种方法相比稍高。点号 500 以西的深部,视电阻率呈整体高阻,结合野外记录,该段测线穿过霍家院子村庄,人文活动频繁,输电线、通讯线交织,AMT 天然场信号弱的特点,原始数据噪声超过有效信号,特别是低频段信号出现大范围跳动甚至没有有效数据,使得反演结果出现假异常(图 4a)。结合 TEM 和 CSAMT 反演结果,我们划定图 4a 中紫色虚线框内反演结果不可信,不能作为最终解释的依据。

(2)TEM 反演采用一维单点反演,各点的模型

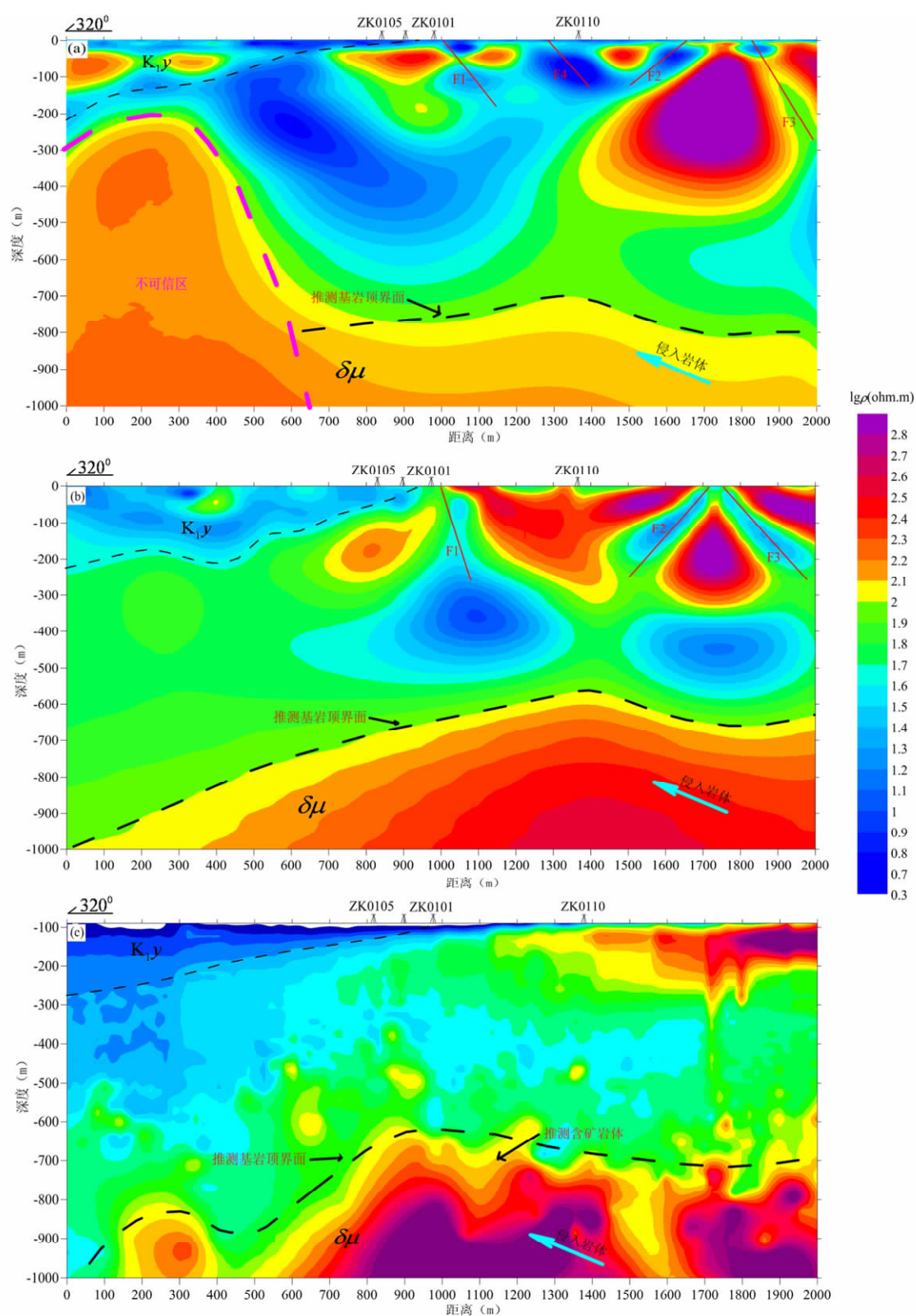


图 4 泥河矿区测线 1 反演结果

Fig. 4 Inversion results on line 1 in Nihe deposit

(a)—AMT 方法 NLGC 二维反演结果;(b)—CSAMT 方法 NLGC 二维反演结果;(c)—TEM 方法 OCCAM 一维反演结果

(a)—The result of AMT by 2D NLGC inversion;(b)—the result of CSAMT by 2D NLGC inversion;

(c)—the result of TEM by 1D OCCAM inversion

反演结果存在细小差异,反演结果(图4c)横向分辨率较差,对断层等反映不明显,出现异常边界不平滑等现象。并且由于TEM采集的是断电后的二次响应,在断电与仪器开始采集之间存在微小的时间延时,但是这足以使电磁波向地下传播几十米的距离,因此存在探测盲区,丢失了近地表几十米范围内的地电信息(图4c)。

通过对比,我们可以看出,3种电磁法反演结果均能较好地区分出高阻异常和低阻异常,采用二维反演的AMT和CSAMT对异常的形态和位置收敛能力较高,并且对断层等低阻异常反应灵敏。在深度700m处,3种方法的结果都出现明显的电阻率分界面,且电阻率值都在 $100\Omega\cdot\text{m}$ 左右,体现了这3种电磁法的测深能力和可靠性。

5 地质地球物理解释

5.1 测线1地质地球物理解释

已有的重磁资料显示,该区矿体范围存在高磁高阻异常,与围岩存在较大差异。火山杂岩地区的电阻率实测资料表明(Katsuble et al., 1994):致密岩石的电阻率一般在 $1\times 10^4\sim 7\times 10^4\Omega\cdot\text{m}$ 之间,电阻率通常与孔隙度成反比。但是,极低电阻率并不意味着必然的大孔隙度,也有可能是矿化、围岩蚀变等岩性和构造因素所致。

综合图4中3种方法反演结果,我们可以根据视电阻率将地下大致分为4个电性特征层:第①层为1000号点以西浅部极低电阻率层,电阻率值大约为 $30\Omega\cdot\text{m}$,由地表向西逐渐延伸至地下250m,呈北东向展布;第②层为位于第①层之下的高阻层,高阻不连续,被许多低阻带割断,层厚度大概为400m,东浅西深,向西倾斜;第③层为低阻层,该层电阻率在 $50\sim 100\Omega\cdot\text{m}$ 之间,层状特征明显,在1000点和1600点附近存在两个极低异常;第④层深度在700m处存在明显电阻率分界面,700m以下为中部隆起的相对高阻层,总体展布形态为东浅西深。

从图4a和图4b可以看出,浅部结构复杂,点号900以东存在4个明显的陡倾低阻带,将高阻切割开来。结合地质资料,推测是由于粗安岩、凝灰岩等高阻体受断层切割,在断层附近由于破碎造成岩石孔隙度大、含水量高等原因使得电阻率降低所致。根据反演结果,大致可以推断出4条断层:如图4中的F1、F3、F4的北西—南东向断层和F2的北东—南西向断层。点号900以西的低阻推断为杨湾组沉积砂岩,西端最深处约200m向东逐渐变浅于900

点号。

图4中AMT、CSAMT和TEM反演结果均显示,该剖面下伏高阻岩体。在深度700m处我们可以见到明显的电阻率分层界面,结合地质资料推测为次火山岩(安山玢岩)岩体顶界面。根据电阻率相对高阻起伏形态,大致可以推断1100点附近为岩体侵入隆起部位,且有东浅西深的趋势,推测岩体由东南侵入,向西北倾斜。一般致密岩石的电阻率大于 10^4 数量级,这里的相对高阻电阻率值仅在几百欧姆米左右,导致电阻率比正常值低的原因主要有大孔隙度和矿化蚀变等因素。电阻率剖面上显示出电阻率连续较好,结合该区已有资料,推测该异常还与穹窿部位有成矿物质富集有关。据后来的钻孔资料^②显示,在1000号点钻孔ZK0101中,于深度685m处见到达285m厚的超大磁铁矿体,含矿岩体主要为闪长玢岩和安山玢岩,验证了推断。

图4反演剖面均显示,在中间低阻层点号1000和点号1600附近,存在两个电阻率为几十欧姆米的极低阻异常。初步推断是由于浅部断裂带向深处延伸,并且受基底隆起挤压影响,在交汇中心处岩石极为破碎以及围岩受矿化蚀变的影响使得岩石孔隙度变大含水丰富共同作用所致,并且由中心向四周,破碎逐渐减少矿化逐渐增多,岩石密度增大。经钻孔资料验证,在钻孔ZK0101、ZK0103、ZK0105和ZK0110等深度400~500m处,岩石极为破碎,岩性复杂,主要为砖桥组次生石英岩、岩屑、凝灰质粉砂岩、黄铁矿化、硬石膏化等。在ZK0105和ZK0110深度500m到700m见到透镜状黄铁矿体并且黄铁矿化中间没有连通,与图4a和图4b中低阻异常没有连通相互吻合。

5.2 测线3地质地球物理解释

测线3位于测线1的西边100m处,进行AMT和TEM同线测量,反演结果如图5所示。根据电性特征可以将地下分为几个部分:900点号以西浅至深部800m电阻率普遍较低,电阻率值为几十欧姆米,结构简单;900点号以东电阻率变化较大, $100\Omega\cdot\text{m}$ 以上的高阻被陡倾低阻带隔开;整条剖面500m左右的深部出现低阻层,电阻率值在 $100\Omega\cdot\text{m}$ 以下,变化较小;700m以下出现高阻层,中间局部有凸起趋势。

结合钻孔地质资料^②,我们可以明显看出该线大部分地表被第四系覆盖,含水丰富,呈 $10\Omega\cdot\text{m}$ 左右的极低阻。点号900以西,存在一电阻率为 $30\Omega\cdot\text{m}$ 左右的低阻层,向西北倾斜,推断为杨湾组砂

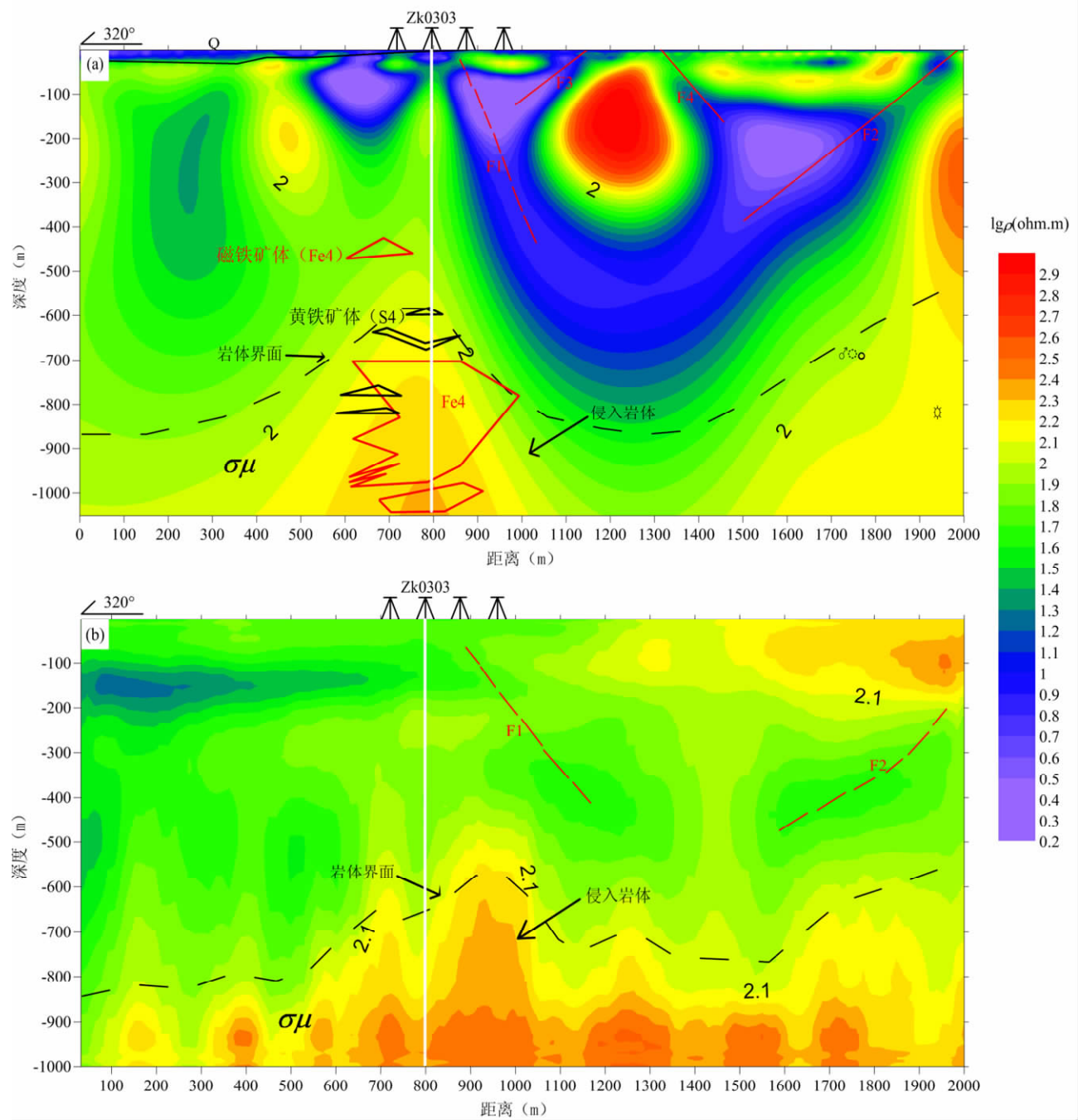


图 5 泥河矿区测线 3 反演结果

Fig. 5 Inversion results on line 3 in Nihe deposit

(a)—AMT 二维 NLCG 反演结果;(b)—TEM 一维 OCCAM 反演结果

(a)—AMT result by 2D NLCG inversion; (b)—TEM result by 1D OCCAM inversion

岩,且厚度为向西逐渐加深至 200m。点号 900 以东结构复杂,推测是由于双庙组粗安岩、凝灰岩等高阻体存在断层等构造使得电阻率呈高低阻相间的异常状态。900~1100 点存在一北西—南东向深断层,向深部延伸至 500m 处;1500~2000 点号存在一北东—南西向深断层,向深部延伸至 500m 处;在 1200 点号和 1400 点号存在两小断层。推测是由于拆沉

延伸等构造作用使得双庙组火山岩发生断裂形成深大破碎带和一些小断层。在深度 900m 下伏高阻,并在 900 点号附近向上隆起,电阻率值在 $300\Omega \cdot m$ 以上,推测为致密基岩。根据电性特征我们可以推断岩浆在 900 点号处侵入上部地层,成矿物质随热液上移,与砖桥组火山岩基底发生热液交代、围岩蚀变等作用,在隆起顶部富集成矿。

据安徽地调院提供的钻孔资料^⑨,推测的地层与地质剖面基本吻合,并在深度 500~650m 处出现大量次生石英岩,说明发生过热液交代作用。ZK0303 在外围深度为 560m 处开始发现透镜状黄铁矿,650m 处开始出现磁铁矿主矿体,含矿岩体主要为闪长玢岩和安山玢岩。

5.3 测线 5 地质地球物理解释

测线 5 位于测线 3 西边 100m 处,进行 AMT 和 CSAMT 同线测量,为了使对比更具说服力,我们采用相同的色标进行成图,反演结果如图 6 所示。从图中根据电阻率分布特征我们大致可以将该剖面分为高一低一高 3 个典型特征层。浅部高阻连续性较

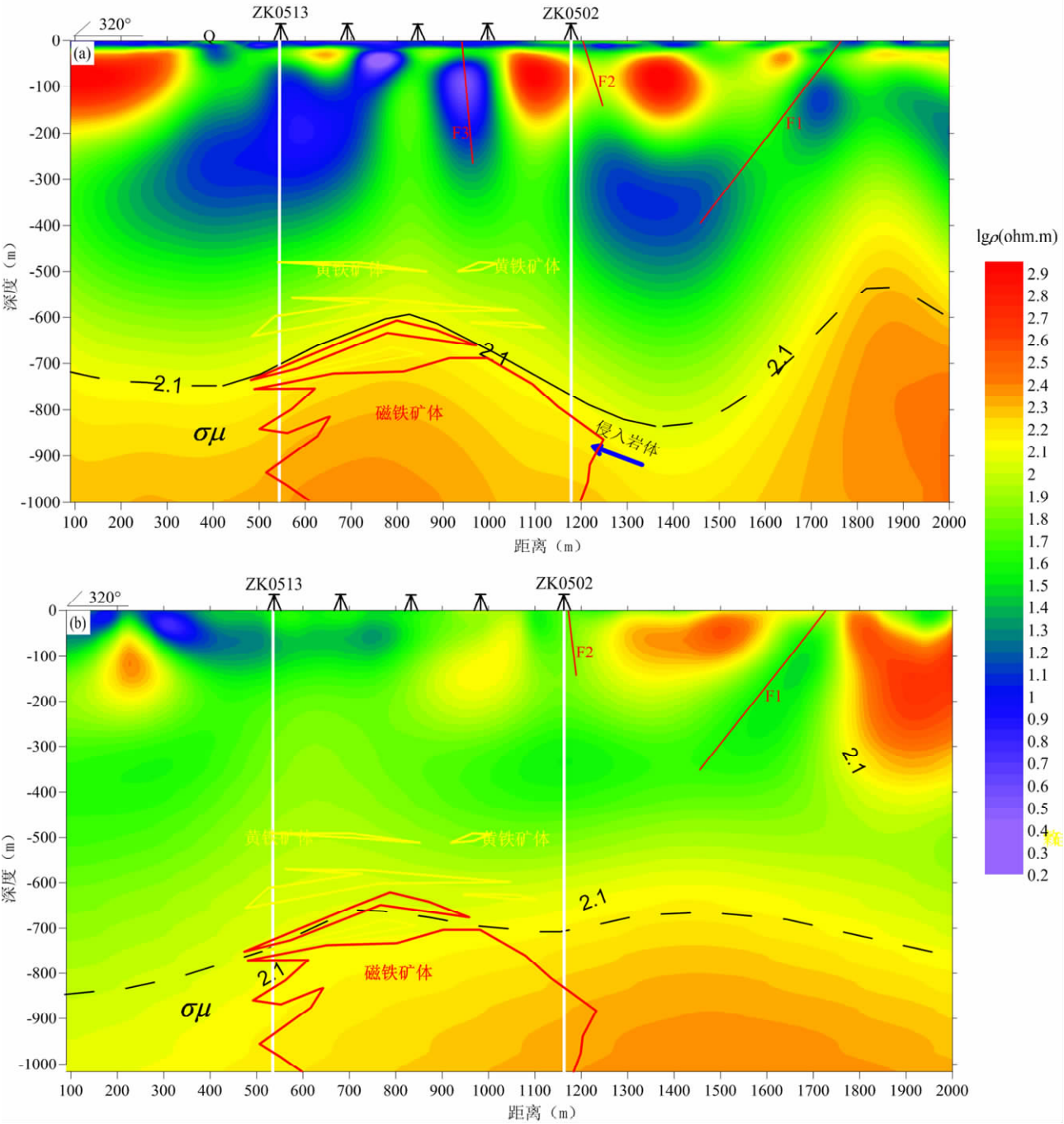


图 6 泥河矿区测线 5 反演结果

Fig. 6 Inversion results on line 5 in Nihe deposit

(a)—AMT 二维 NLCG 反演结果;(b)—CSAMT 二维 NLCG 反演结果

(a)—AMT result by 2D NLCG inversion; (b)—CSAMT result by 2D NLCG inversion

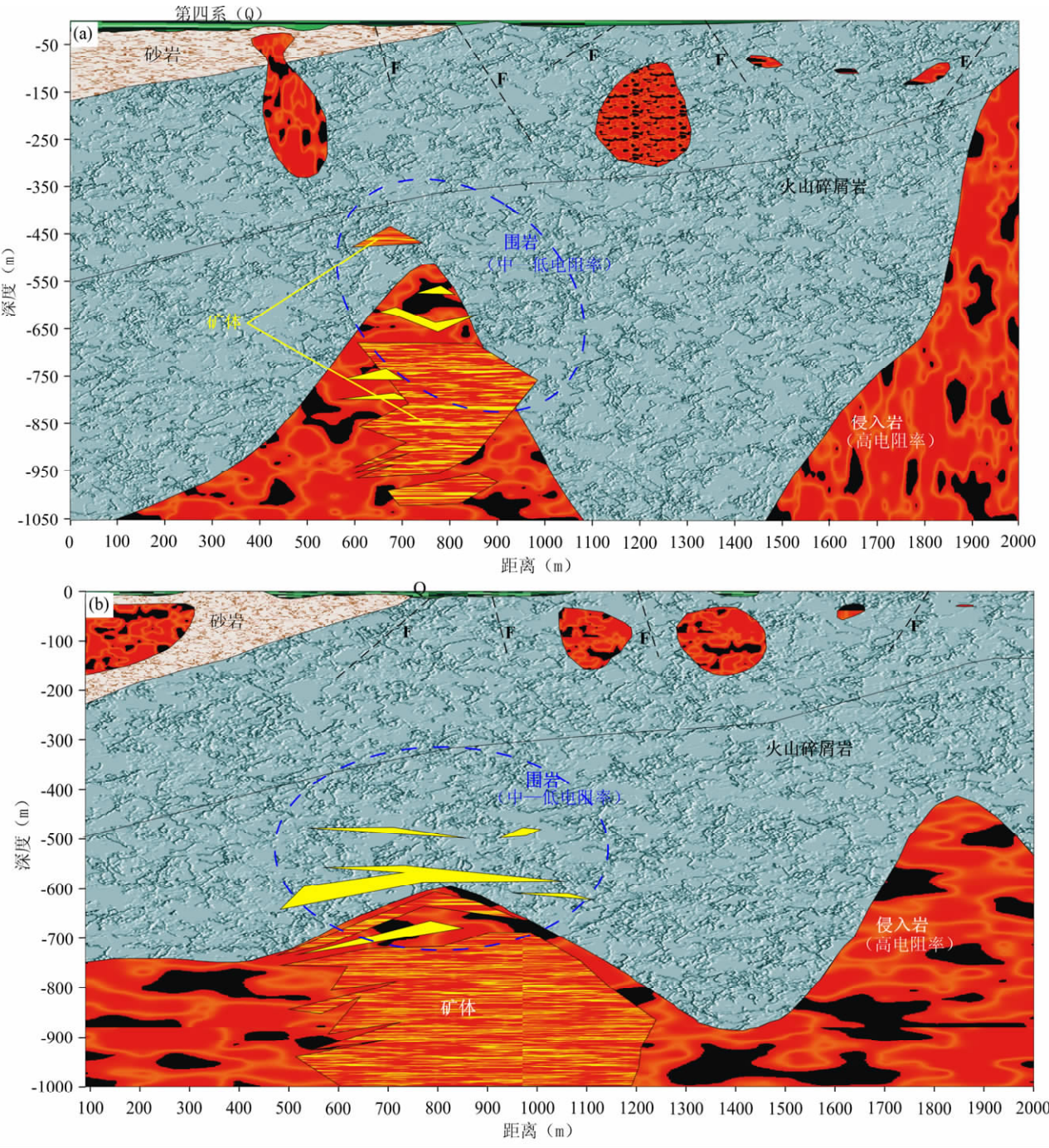


图 7 泥河铁矿地质-地球物理模型

Fig. 7 The geologic-geophysic model of Nihe iron deposit

(a)—3 线地质-地球物理模型; (b)—5 线地质-地球物理模型

(a)—The geologic-geophysic model of line 3; (b)—the geologic-geophysic model of line 5

差,高电阻率值在 $100\Omega\cdot\text{m}$ 左右,被近乎垂直的低阻带隔开;深部 700m 下伏高阻连续性较好,电阻率值在 $100\Omega\cdot\text{m}$ 以上,顶部形态起伏有变化,在 800m 处向上隆起;中部为几十欧姆米的低电阻率层,局部出现 $10\Omega\cdot\text{m}$ 左右的极低电阻异常区。

结合钻孔地质资料^⑨,我们可以看出电阻率的

分布反映了岩性和构造的综合影响。地表第四系覆盖层显示为电阻率 $10\Omega\cdot\text{m}$ 左右的极低阻,大致估计含水层厚度为 10m。在深度 700m 处大致以 $100\Omega\cdot\text{m}$ 等值线勾画出的岩体形态基本可以反映次火山岩(闪长玢岩)的侵入形态,我们可以看到在 900 点号处岩体向上侵入上地层。根据玢岩铁矿成

矿模式(宁芜研究项目编写小组,1978),如果此处确为岩体侵入,那么在隆起部位、岩体与上地层接触部位将会发生强烈的热液交代作用,是成矿物质富集的有利部位。另外,在中深部火山岩层,电阻率呈几十欧姆米的低阻,可能是由于火山岩自身孔隙度大和围岩蚀变等因素所致,对于局部地方出现的极低阻,我们推断为断裂向深部延伸使得破碎带含水率较高所致。根据图中大致可以推断出在800~1000点号存在一条北西—南东向深断裂,在1300~1700点号存在一条北东—南西向深断裂,与其他浅层断裂一起将浅部高阻分开。

5.4 地质-地球物理模型

综合以上分析,我们可以发现泥河矿区电阻率的分布反映了岩性和构造的综合影响。根据反演结果呈现的电性特征并结合钻孔资料,我们建立了泥河铁矿的地质-地球物理模型(图7)。根据该模型可以大致推断出测区西北部低电阻率杨湾组砂岩在浅表的延伸范围和厚度;确定东南部火山杂岩浅层断裂的位置和倾向;深部高电阻率值分界面也清晰地指示出砖桥组火山岩基底与次火山岩侵入的界面。矿体主要产生于次火山岩岩体侵入顶部,由于闪长玢岩、安山玢岩致密的特点使得深部含矿岩体呈相对高阻;在侵入周围区发生围岩蚀变及伴生矿物元素富集而呈中—低阻特征。

6 结论

本研究将AMT、CSAMT和TEM等电磁测深技术应用于同一矿区的深部控矿构造探测实验中,结果表明:

(1)在地质情况复杂和人文干扰较大的火山岩地区进行电磁法探测,高精度的野外数据采集、合理的数据处理和反演是获得正确解释结果的关键。

(2)AMT、CSAMT和TEM在探测深度上均达到1000m,各方法对宏观电性特征体反映基本一致,但在细节上存在一定差异,综合解释可以弥补单一方法的不足,提高解释可信度。

(3)深部矿产勘查中,在对AMT、CSAMT和TEM反演结果进行解释时,不仅要注意低阻的分布形态,还应根据侵入岩体、构造和围岩的空间关系,注意高阻的分布形态。本次试验验证了AMT、CSAMT和TEM可以成功分辨出火山岩地层、闪长玢岩体的空间形态,指示出其隆起部位是矿体赋存的有利位置,验证了电磁测深法在本区或类似地区可以用于寻找同类型的深部隐伏矿。

(4)本研究结果检验了前人提出的玢岩铁矿模式,认为大探测深度的多种物探方法联合、综合解释是寻找该类型隐伏矿有效的方法,对整个长江中下游火山岩地区的深部找矿具有一定的指导意义。

致谢:感谢安徽省地质调查院提供的钻孔及物性资料,感谢中南大学汤井田教授研究团队共同完成AMT数据采集工作。

注 释

- ① 汪洋云. 1997.《庐江地区环状、隆起构造的控矿作用及找矿方向》研究报告.
- ② 安徽省地质调查院. 2008.《安徽庐江盛桥-枞阳横埠地区铁铜矿勘查》成果报告.

参 考 文 献

- 蔡剑华,汤井田. 2010. 基于 Hilbert-Huang 变换的大地电磁信号谱估计方法. 石油地球物理勘探,45(5):767.
- 常印佛,刘湘增,吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京:地质出版社,1~379.
- 陈清礼,张翔,胡文宝. 1999. 南方碳酸盐岩区大地电磁测深曲线静态偏移校正. 江汉石油学报,21(3):30~32.
- 陈乐寿,王光镔. 1990. 大地电磁测深法. 北京:地质出版社,1~246.
- 董树文,李廷栋,高锐,吕庆田,吴珍汉,陈宣华,周琦,刘刚,刘志强,梅琳. 2010. 地球深部探测国际发展与我国现状综述. 地质学报,84(6):743~770.
- 樊战军,卿敏,于爱军,李文良,徐德利,陈孝强,吕喜旺. 2007. EH4 电磁成像系统在金矿勘查中的应用. 物探与化探,31(10):72~76.
- 何继善. 1998. 可控源音频大地电磁法. 长沙:中南工业大学出版社,1~198.
- 江永宏. 2010. 安徽庐枞地区铁—铜矿成矿规律与找矿. 世界地质,29(3):372~382.
- 雷达,孟小红,王书民,李汝传,方慧,赵富刚. 2004. 复杂地形条件下的可控源音频大地电磁测深数据二维反演技术及应用效果. 物探与化探,28(4):323~326.
- 李茂,杜建农,余水泉. 2006. CSAMT 法在松辽盆地四平地区铀矿勘查中的应用. 物探与化探,30(4):298~302.
- 刘国印,燕长海,赵健敏,王纪中,李中明. 2008. 微重力法与可控源音频大地电磁法组合在豫西寻找隐伏铝土矿中的应用. 地质通报,27(5):641~648.
- 刘洪,邱检生,罗清华,徐夕生,凌文黎,王德滋. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约. 地球化学,31(2):129~137.
- 刘红涛,杨秀瑛,于昌明,叶杰,刘建明,曾庆栋,石昆法. 2004. 用 VLF/EH4 和 CSAMT 方法寻找隐伏矿——以赤峰柴胡栏子金矿床为例. 地球物理学进展,19(2):276~285.
- 柳建新,王浩,程云涛,童孝忠. 2008. CSAMT 在青海锡铁山隐伏铅锌矿中的应用. 工程地球物理学报,5(3):274~278.
- 宁芜研究项目编写小组. 1978. 宁芜玢岩铁矿. 北京:地质出版社,1~196.
- 牛之琰. 1992. 时间域电磁法原理. 长沙:中南工业大学出版社,1~

241.

任启江,刘孝善,徐兆文. 1991. 安徽庐枞中生代火山构造洼地及其成矿作用. 北京:地质出版社,13~206.

沈远超,申萍,刘铁兵,李光明,曾庆栋. 2008. EH4 在危机矿山隐伏金矿体定位预测中的应用研究. 地球物理学进展,23(1):559~567.

石昆法. 1999. 可控源音频大地电磁理论与应用. 北京:科学出版社,1~82.

孙燕,刘建明,曾庆栋,张作伦,张松,汪在聪,褚少雄,叶杰,于昌明. 2010. 综合地球物理方法在某金多金属矿区找矿中的应用. 地球物理学进展,25(6):2096~2101.

唐永成,邢凤鸣,储国正. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京:地质出版社,66~107.

王德滋,任启江,邱检生,陈克容,徐兆文,曾家湖. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用. 地质学报,70:23~34.

吴礼彬,陈芳,杜建国,许卫,柳丙全,陈静静,杨道堃. 2010. 安徽庐枞地区铁矿成矿条件和综合信息标志. 地质通报,29(10):1572~1578.

谢智,李忠全,陈江峰,高天山. 2007. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义. 高校地质学报,13(2):235~249.

阎述,陈明生. 1996. 频率域电磁测深的静态偏移及校正方法. 石油地球物理勘探,3(2):238~247.

杨瑞西,马振波,司法桢,李志勋,许国丽. 2008. CSAMT 法在铝土矿勘查中的应用. 工程地球物理学报,5(4):400~407.

于昌明. 1998. CSAMT 方法在寻找隐伏金矿中的应用. 地球物理学报,41(1):133~138.

詹少,沈云发,杨正刚. 2009. EH4 成像技术在广西某危机矿山外围深部找矿中的应用. 工程地球物理学报,6(4):470~474.

周涛发,范裕,袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报,24(8):1666~1678.

周涛发,范裕,袁峰,宋传中,张乐骏,钱存超,陆三明, Cooke D R. 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架和对成矿制约. 岩石学报,26(9):2694~2714.

Anderson K E, Dickinson J E, Edge R D, Macy J P, Maraj S, Sternberg B K, Stokes P J, Thurner S M. 2008. Controlled source audio magnetotelluric (CSAMT) geophysical investigation in the upper San Pedro basin, southeastern Arizona. Abstracts with Programs Geological Society of America, 40(6):129~137.

Basokur A T, Rasmussen T M, Kaya C, Altun Y, Aktas K. 1997. Comparison of induced polarization and controlled source audio magnetotellurics methods for massive chalcopyrite exploration in a volcanic area. Geophysics, 62(4):1087~1096.

Katsuble T J, Williamson M A. 1994. Shale petrophysics and basin charge modeling; in Current Research, Part D. Geological Survey of Canada, 94~1D: 179~188.

Rodi W L, Mackie R L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion. Geophysics, 66(1):174~187.

Application of Comprehensive Magnetotelluric Sounding Technique in Prospecting Deep Structures: A Case Study of Nihe Porphyrite Iron Deposit

KUANG Haiyang¹⁾, LÜ Qingtian^{1,2)}, ZHANG Kun²⁾, YAN Jiayong²⁾, CHEN Xiangbin²⁾
1) College of Nuclear Engineering and Technology, East China Institute of Technology, Fuzhou, Jiangxi, 344000; 2) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract

Middle-Lower Yangtze Valley is an important base of poly-metallic mineral deposits in eastern China. Advanced geophysical survey was employed to prospect the deep structures in typical deposits, and this is of great significance in understanding the genesis of the deep deposits and summarizing exploration methods. In this paper, we chose the Nihe porphyrite iron ore in the Luzong district, Anhui province, as a trial site. Audio magnetotelluric (AMT) sounding, controlled source audio magnetotelluric (CSAMT) sounding and transient electromagnetic (TEM) sounding were carried out. Through the processing and inversion of AMT, CSAMT and TEM data, it is discovered that ore-controlling geological bodies are basically similar in electrical characters but different in some details. The results of three methods, and electrical characters determined distribution of the Zhuangqiao Formation volcanic rock, and identified positions and shape of diorite porphyrite, and inferred the position of ore bodies. Our study suggests that under the condition of processing and reversion of reasonable data, magnetotelluric sounding can distinguish the difference of electrical characters between subvolcanic rock and wall rock to effectively position the interface of ore-controlling structures and thus to infer the positions of ore-bodies.

Key words: porphyrite iron ore deposit; Nihe; deep ore-prospecting; AMT; CSAMT; TEM