

多种电磁法在某金矿的野外勘探应用

刘春明^{1,2,3}, 佟铁钢^{1,2,3}, 何继善^{1,2,3}

- (1. 中南大学 有色资源与地质灾害探测湖南省重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
3. 中南大学 地质调查研究院, 长沙 410083)

摘要: 为了对比分析广域电磁法、音频大地电磁法(AMT)与可控源音频大地电磁法(CSAMT)的勘探效果, 在山东某金矿的已知地质剖面开展了多种电磁法实验勘探, 通过对比分析在相同剖面上的实验结果发现, 相对于 AMT 而言, 广域电磁法具有浅层分辨能力高、抗干扰能力强、工作效率高等优点; 相对于 CSAMT 而言, 则具有勘探深度大、抗干扰能力强、工作效率高等优点。关于广域电磁法的高频段广域电阻率与卡尼亚电阻率不重合现象、场源效应和阴影效应、电磁场多分量综合利用等问题上还值得探讨和研究。

关键词: 广域电磁法; 音频大地电磁法; 可控源音频大地电磁法; 勘探深度; 抗干扰能力

中图分类号: P319.3

文献标志码: A

Exploration of various electromagnetic method in some gold mine

LIU Chun-ming^{1,2,3}, TONG Tie-gang^{1,2,3}, HE Ji-shan^{1,2,3}

- (1. Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Institute of Geological Survey, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A variety of electromagnetic exploration methods, involving the wide field electromagnetic method, the audio magnetotelluric method (AMT) and the controlled source audio frequency magnetotelluric method (CSAMT), were carried out on a known geologic profile of a gold mine in Shandong Province, with the purpose of comparison in the real exploration effects. Through the comparison of the exploration results, from the same section, it is found that the wide field electromagnetic method has advantages of shallow high resolution capability, strong anti-interference ability and high survey efficiency compared with AMT, and it is better than CSAMT in the exploration depth, anti-interference ability and working efficiency. However, the study and research should be moved further including the inconsistency phenomenon between the wide field electromagnetic resistivity and the Cagniard resistivity at high frequency, source effect and static effect, and the utilization of electromagnetic multi-components.

Key words: wide field electromagnetic method; AMT; CSAMT; exploration depth; anti-interference ability

何继善^[1]基于传统的可控源音频大地电磁法(CSAMT)和磁偶源频率测深法(MELOS)提出了广域电磁法。该方法在吸收 CSAMT 方法^[2]和 MELOS 方法的基础上, 针对 CSAMT 远区信号微弱的劣势, 扩

展了观测范围; 针对 MELOS 方法的校正办法, 保留了计算公式中的高次项^[3-6]。目前, 广域电阻率的计算是仅需电场数据, 从而避免磁场信号的干扰, 拓展了人工源频域电磁法的观测范围, 提高了观测速度、精

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41227803, 41374119); 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ3011)

收稿日期: 2013-05-16; 修订日期: 2013-06-30

通信作者: 刘春明, 讲师, 博士; 电话: 13755190421; E-mail: lifuming001@163.com

度和工作效率、加大了勘探深度。

广域电磁的核心内容是采用了一种新的计算大地视电阻率的方法。依据均匀大地表面水平电偶极源的 E_x 的严格、精确的表达式如下:

$$E_x = \frac{I\rho dL \cos \varphi}{2\pi r^3} [1 + \exp(-ikr)(1 + ikr)] \tag{1}$$

可以定义广域意义上视电阻率(ρ_a)^[1]为

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)} \tag{2}$$

式中:

$$K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dLx_{MN}} \tag{3}$$

$$\Delta V_{MN} = E_x x_{MN} \tag{4}$$

$$F_{E-E_x}(ikr) = 1 - 3\sin^2 \varphi + \exp(-ikr)(1 + ikr) \tag{5}$$

式中: E_x 为 X 方向的电场水平分量; ρ 为电阻率; I 为供电电流, A; dL 为供电点 AB 的直线长度, m; φ 为测点与供电点 AB 中点的连线与供电点 AB 连线的夹角; r 为测点到供电点 AB 中点的距离, m; i 为虚数单位; k 为波数; x_{MN} 为 MN 电极之间的距离, m。

基于广域电磁法具有抗干扰能力强、测量精度高和勘探深度大等优势, 在山东某金矿的已知剖面上采用广域电磁法进行实验性勘探, 一方面验证该方法的有效性, 另一方面分析该方法可能存在的一些问题, 进而开展该矿区内的深部资源勘探。并将勘探结果与该区采用其他地球物理勘探方法的结果进行对比分析^[7]。

1 实验区地质特点

选择的实验区位于胶东半岛某金矿区, 位于某隆起区的东南缘、某断裂的东侧、玲珑花岗岩体东南缘、F1 断裂带的中段。区内胶东群变质岩及玲珑花岗岩广泛出露, 各类脉岩及断裂构造发育, 第四系广泛分布。

太古宇胶东岩群分布于矿区的东部、F1 断裂的上盘, 主要岩性为混合岩化黑云斜长变粒岩, 灰白色, 鳞片变晶结构, 条纹、条带状构造^[7]。

新生界第四系主要为残坡积物, 沿沟谷及低缓丘陵分布, 由腐植土、亚沙土等组成, 厚度为 2~8 m。

矿区内断裂主要有 F1 断裂、F2 断裂、F3 断裂和 F4 断裂^[8-9]。

目前发现的有关金矿体主要位于离 F1 断裂及其次级断裂平距 300 m 以内^[10], 即金矿体与 F1 断裂及

其次级断裂关系密切, 若能对有关断裂进行圈定, 则能进一步缩小寻找金矿的靶区。

图 1 所示为本次开展广域电磁法实验的某金矿区地质简图。

2 实验区地球物理特征

本次实验区有关标本物性参数测定结果如表 1 所列。

表 1 某金矿岩(矿)石标本物性参数表
Table 1 Geophysical parameters of gold mine of rock (ore)

序号	岩性	平均电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	平均幅 频率/%
1	富矿石	19	22.3
2	黄铁绢英岩	1 072	12.4
3	断裂带断层泥	56	3.6
4	闪长玢岩	427	2.1
5	煌斑岩	5 625	1.4
6	钾化花岗岩	2 014	2.2
7	新鲜花岗岩	5 049	1.6
8	胶东群变质岩	1 493	1.6

从表 1 可以看出: 1) 在所有测试样品中富矿石的平均电阻率最低, 平均幅频率最高, 即单纯从物性参数看, 勘探目标体将呈现低电阻高极化现象。2) 黄铁绢英岩的平均电阻率较高, 为中等电阻率, 平均幅频率也比较高, 为中等极化率, 如果该类岩石规模较大时, 可能产生较高的激电异常现象。3) 断裂带断层泥的平均电阻率略比富矿体的高, 但平均幅频率明显比富矿石的低, 由于在该实验区内断层泥与矿体往往相距不远, 从本次选择的实验方法而言, 基本上呈现为一个异常体的反应, 由于异常规模的扩大, 反而有利于矿体的发现。4) 闪长玢岩普遍发育绢英岩化或黄铁矿化、碳酸盐化蚀变, 其平均电阻率显著低于花岗岩、胶东群变质岩及煌斑岩的平均电阻率等。5) 在本次测试结果中煌斑岩平均电阻率的最高值, 高于新鲜花岗岩的。6) 花岗岩分为两种类型, 一种是钾化花岗岩, 另一种是新鲜花岗岩, 前者电阻率比后者的低一倍左右, 属于该实验区内高阻异常的主要来源。7) 胶东群变质岩的电阻率略比黄铁绢英岩的高, 但幅频率明显偏低。

通过标对本物性参数测试结果分析, 可发现与实

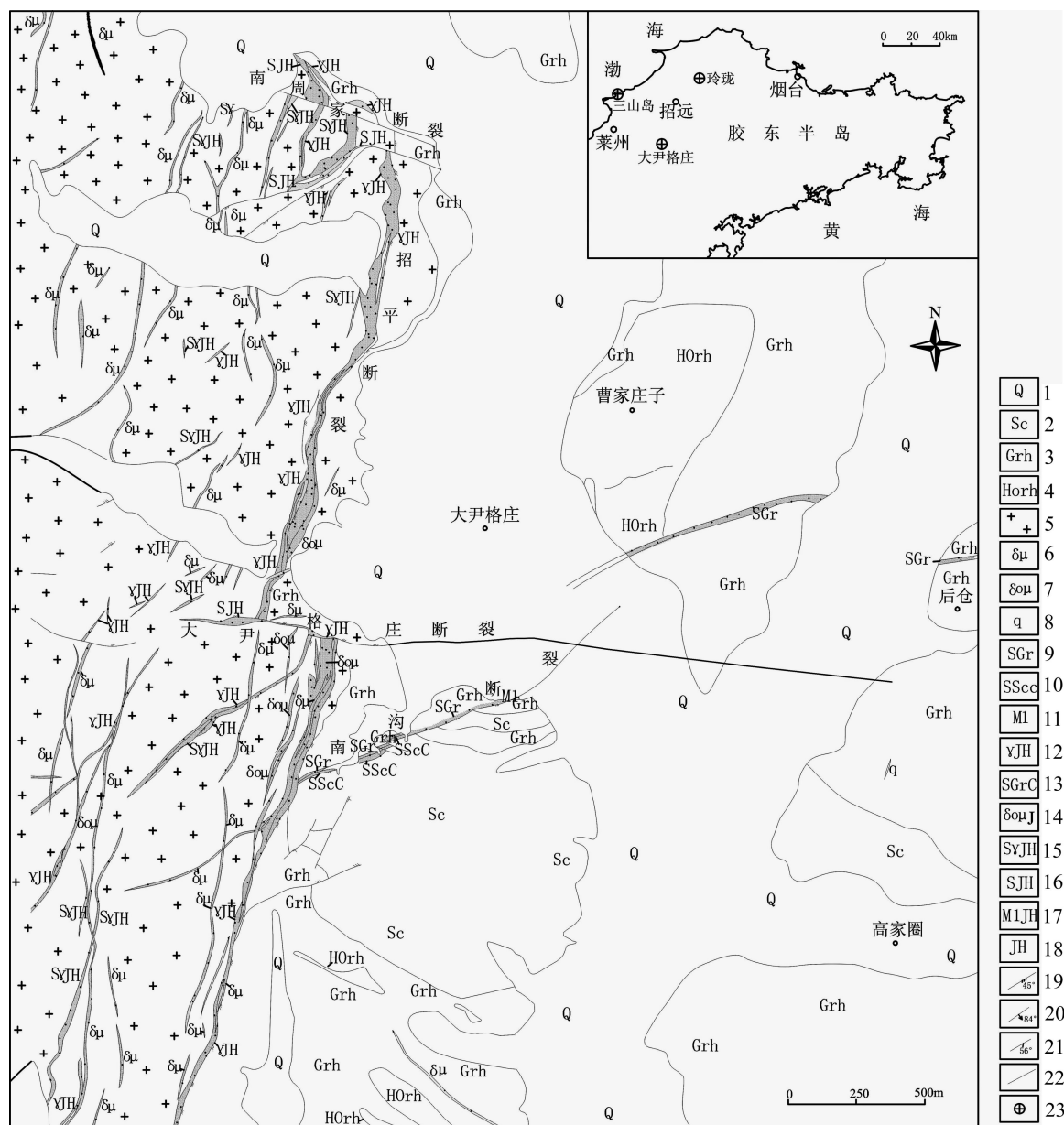


图1 某金矿矿区地质简图: 1—腐殖土与砂质粘土; 2—黑云片岩、石榴黑云片岩; 3—混合岩化黑云斜长变粒岩; 4—混合岩化斜长角闪岩; 5—玲珑花岗岩; 6—闪长玢岩; 7—石英闪长玢岩; 8—石英脉; 9—变粒岩质碎裂岩; 10—碳酸盐化片岩质碎裂岩; 11—糜棱岩; 12—黄铁绢英岩化花岗岩; 13—碳酸盐化变粒岩质碎裂岩; 14—蚀变石英闪长玢岩; 15—黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩; 16—黄铁绢英岩化碎裂岩; 17—黄铁绢英岩化糜棱岩; 18—黄铁绢英岩; 19—实测压扭性断裂; 20—实测扭性断裂; 21—实测张扭性断裂; 22—性质不明断裂; 23—金矿床

Fig. 1 Geological sketch of gold mine: 1—Humus soil and sandy clay; 2—Biotite schist, garnet biotite schist; 3—Migmatization biotite plagioclase Bianliyan; 4—Migmatitic amphibolites; 5—Linglong granite; 6—Diorite-porphyrity; 7—Quartz diorite-porphyrity; 8—Quartz reef; 9—Granulite matter cataclastic rock; 10—Carbonate schist rock; 11—Mylonite; 12—Pyrite phyllic granite; 13—Carbonation granulite matter cataclastic rock; 14—Alternating quartz diorite-porphyrity; 15—Pyrite phyllic granitic cataclastic rock; 16—Pyrite phyllic cataclastic rock; 17—Pyrite phyllic mylonite; 18—Pyrite phyllic rock; 19—Measured compresso-shear faults; 20—Measured shear faults; 21—Measured tensile faults; 22—Unknown nature of faults; 23—Gold deposit

验区 F1 断裂带有直接空间关系的富矿石、断层泥表现为显著的低阻体, 与上、下盘的胶东群变质岩和花

岗岩电阻率值差异明显, 故本实验区具备开展广域电磁法等方法实验的地球物理基础。

3 实验剖面与实验参数选择

为对比分析广域电磁法在该金矿的实验效果, 选择了曾开展过 AMT 勘探的 1 号实验剖面, 该剖面施工过 8 个钻孔, 有 6 个钻孔见矿情况较好, 其中 2 个钻孔控制浅部 1 号矿体, 另 4 个钻孔控制中层 2 号矿体, 其他 2 个钻孔见矿条件较差, 未发现工业矿体^[11]。基本上可认为该剖面为已知剖面, 具备开展对比实验的前提。

根据当年开展的 AMT 勘探的具体坐标, 在本实验中, 采用点距 50 m 进行广域电磁法实验。选用野外实验设备为 GDP32 多功能电法仪, 为了与可控源音频大地电磁法测量结果进行对比, 采用 6 个通道进行 E_x 电信号测量, 1 个通道进行 H_y 磁信号测量。工作频率

为 1~8 192 Hz, 供电电流为 4~20 A, 发收距为 9 km, 采用赤道偶极装置进行测量, 并采集每个测点和供电点的实地坐标。根据广域电阻率的计算方式对获取的实验数据进行处理^[12-14], 同时也获取每个测点上的卡尼亚电阻率。

4 实验结果对比

图 2 所示为 1 号实验剖面采用 AMT 勘探获得的电阻率二维反演及地质解译图^[7]。

图中虚线为推断 F1 断层, 实线框为推断矿体, 垂直虚线为设计钻孔。从图 2 可以看出, F1 断层反应较明显, 且在已知矿体位置呈现低阻异常反应, 后期布设的 92ZK1 验证钻孔发现 30 m 左右厚的含金金属硫化物矿体, 取得较好的勘探效果。

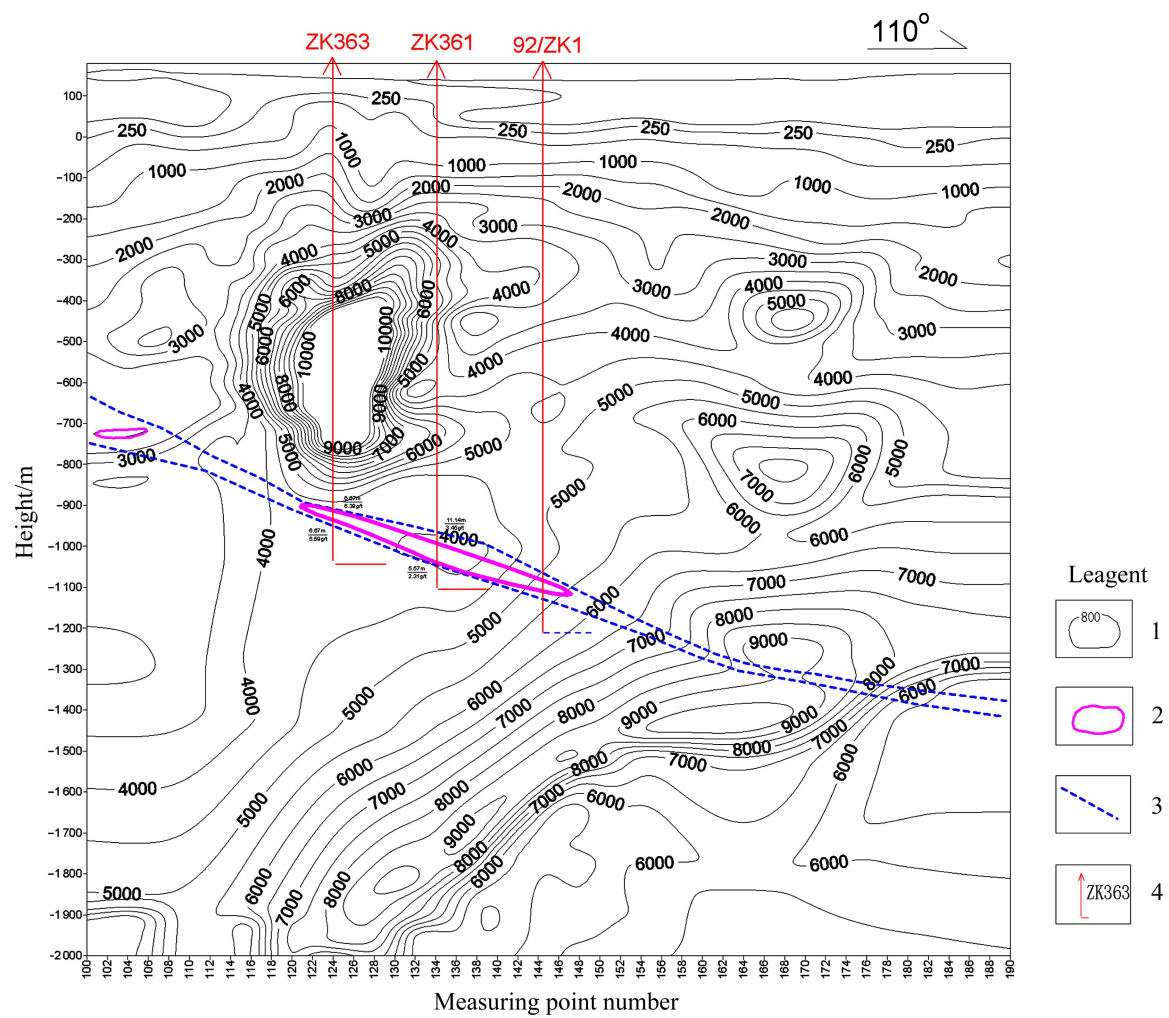


图 2 1 号实验剖面的 AMT 电阻率二维反演及地质解译图^[7]: 1—电阻率等值线; 2—金矿体; 3—已知断层; 4—已完工钻孔
Fig. 2 2D inversion of AMT resistivity and geology interpretation map in No. 1 profile^[7]: 1—Resistivity contour; 2—Gold ore bodies; 3—Known fault; 4—Completion of drilling

为实验广域电磁法在该区的勘探效果,在该勘探线上布设了广域电磁法剖面,测点距为 50 m,测线完全重合当年开展 AMT 的勘探线。图 3~6 所示为各实

验测点广域电阻率与卡尼亚电阻率对比曲线。
从图 3~5 可以看出,广域电阻率曲线相对于卡尼亚电阻率曲线要相对平滑,前者基本上没有畸变点,

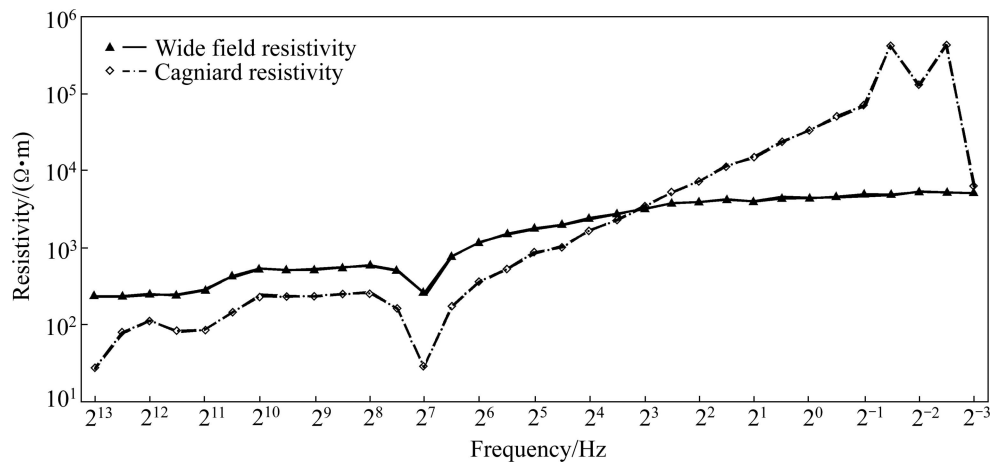


图 3 1 号实验剖面 2000 号测点广域电阻率与卡尼亚电阻率对比曲线
Fig. 3 Comparison of wide field curve with Cagniard resistivity curves for No. 2000 measuring point in No. 1 profile

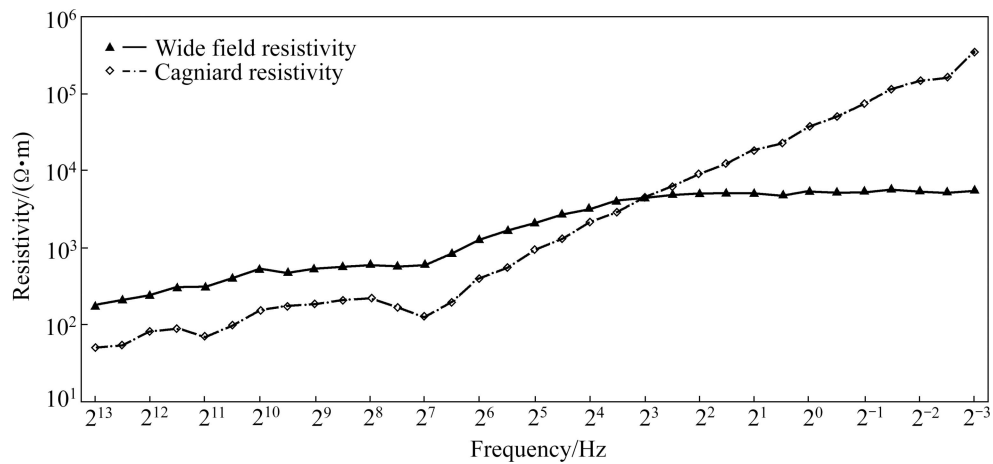


图 4 1 号实验剖面 3000 号测点广域电阻率与卡尼亚电阻率对比曲线
Fig. 4 Comparison of wide field curve with Cagniard resistivity curves for No. 3000 measuring point in No. 1 profile

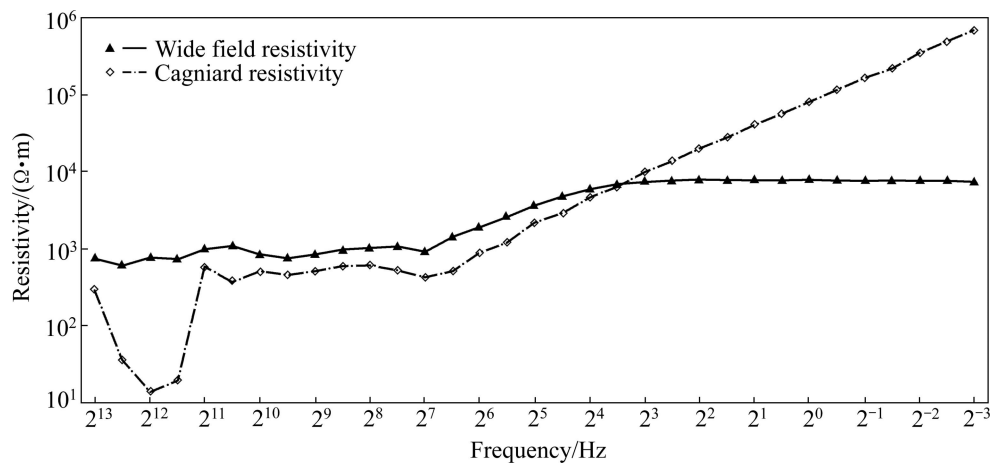


图 5 1 号实验剖面 4000 号测点广域电阻率与卡尼亚电阻率对比曲线
Fig. 5 Comparison of wide field curve with Cagniard resistivity curves for No. 4000 measuring point in No. 1 profile

而后者由于磁场干扰, 导致存在畸变点, 畸变现象主要存在高频与低频段。其他测点基本也存在类似现象, 故广域电磁法在该处的测量精度更高, 对浅部地质情况反映更真实, 其勘探深度有可能比后者的更深。广域电阻率在 8 Hz 以后的低频段呈现水平渐近线。

图 6 所示为 1 号实验勘探剖面的广域电磁法电阻率二维反演图。

图 6 中, 粗虚线为推断 F1 断层, 椭圆框为已知矿体示意图, 直线为已施工的见矿钻孔。

对比图 2 和图 6 可以看出, 在已知矿体位置广域电磁法呈现低阻异常反应, 与实际地质情况吻合较好,

也与前人所开展的 AMT 勘探成果基本吻合, 这说明广域电磁法能较好地反映该剖面的主要矿体, 也说明本方法在该区勘探是可行的。对比两种方法的勘探成果可发现, 相对于 AMT 而言, 广域电磁法对于浅部地质情况反映更清晰, 这可能与广域电磁法频率较高、采用人工源抗干扰能力强等有关, 说明广域电磁法在该区能获得比 AMT 更可靠的数据和勘探效果。

实验发现, F1 断层往大号测点的深部产状开始变陡, 结合地质上关于该区矿体存在往大号测点侧伏的现象和深部存在第三个成矿空间的推测, 建议延长勘探剖面, 寻找 F1 断层深部产状变缓的位置, 探求深

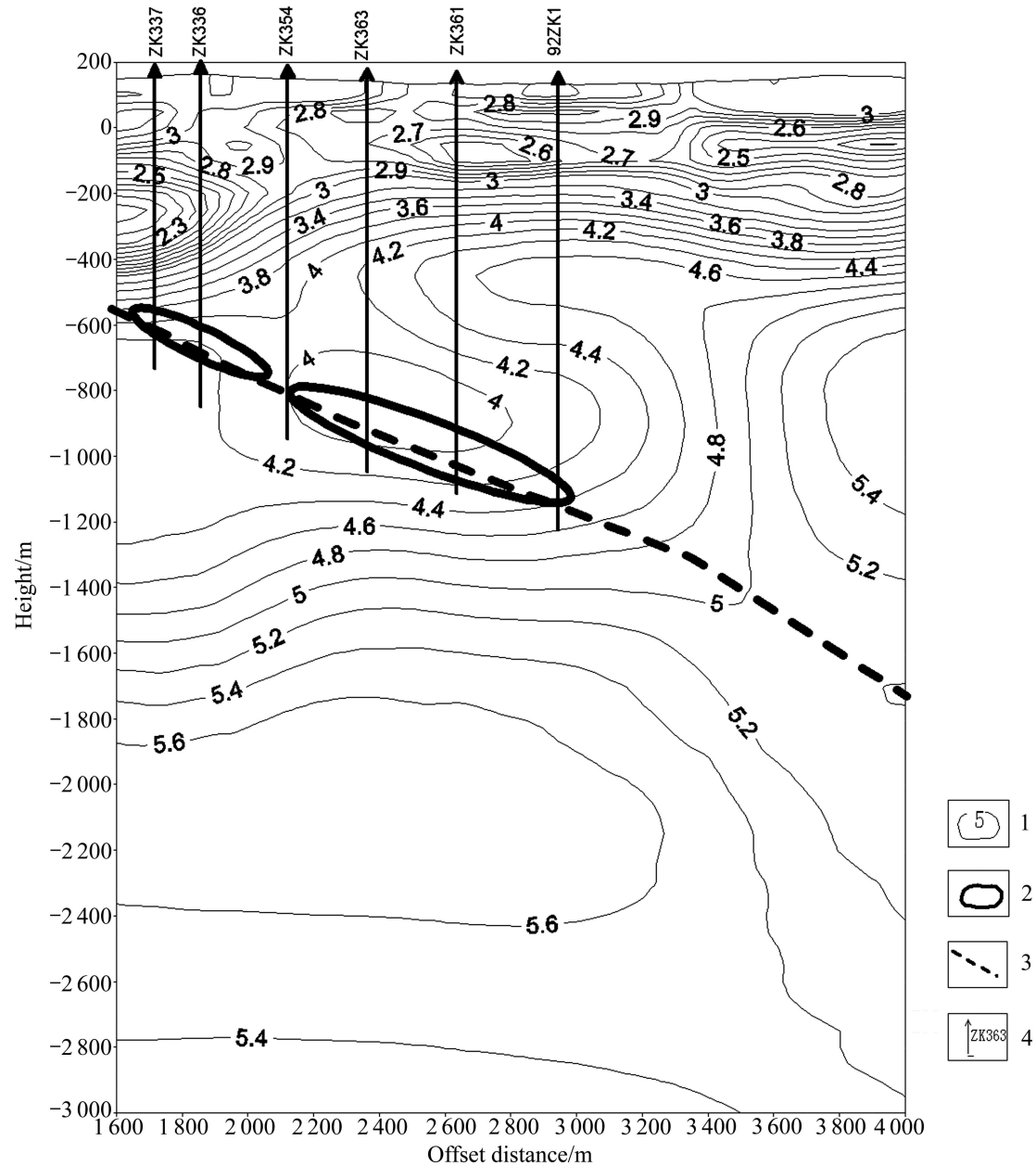


图 6 1 号实验剖面广域电阻率二维反演图: 1—电阻率对数等值线; 2—金矿体; 3—已知断层; 4—已完工钻孔

Fig. 6 2D inversion map wide field resistivity in No.1 profile: 1—Resistivity contour; 2—Gold ore bodies; 3—Known fault; 4—Completion of drilling

部的成矿情况。

由上述实验可发现,广域电磁法具有抗干扰能力强、勘探深度大、工作效率高等优点,为更好发挥该方法的勘探效果,也有一些问题值得探讨与研究;根据一维正演结果,广域电阻率与卡尼亚电阻率在高频段是完全重合的,但从上述广域电阻率与卡尼亚电阻率对比曲线看,虽然曲线形态类似,但两者是分离的。广域电磁法同样存在场源效应和阴影效应,但是否与可控源音频大地电磁法场源效应类似或相同,怎样校正场源效应和阴影效应,能否借鉴他人对于相关问题的研究成果^[15-18];能否根据电场、磁场共同计算广域电阻率^[19],充分发挥电磁场每个分量的不同优势^[20-21],以便更好地解决地质勘探问题^[22]。

5 结论与建议

1) 相对于 AMT 而言,广域电磁法由于采用人工源,故具有抗干扰能力强、分辨能力高、工作效率高等优点。

2) 相对于可控源音频大地电磁法(CSAMT)而言,由于广域电磁法无需测量磁场,故广域电磁法测量精度更高。

3) 广域电磁法在低频时出现的渐进线为水平渐进线,而可控源音频大地电磁法为 45°升高的渐进线,故相对于可控源音频大地电磁法而言,广域电磁法具有勘探深度大、工作效率高等优点。

4) 相对于目前其他频域电磁法,广域电磁法具有许多优点,能更好发挥该方法的勘探效果。对于场源效应、阴影效应和电磁场多分量综合等问题需要开展进一步探讨。

REFERENCES

- [1] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 1-5.
HE Ji-shan. Wide field electromagnetic method and pseudo random signal method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 1-5.
- [2] 何继善. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1990: 1-6.
HE Ji-shan. Controlled source audio-frequency magnetotellurics [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1990: 1-6.
- [3] 佟铁钢. E-Hz 广域电磁方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 10-22.
TONG Tie-gang. Study on E-Hz wide-field electromagnetic method [D]. Changsha: Central South University, 2010: 10-22.
- [4] 尚通晓. 双极源 CSAMT 一维全区反演[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 5-12.
SHANG Tong-xiao. 1-D full-region inversion of CASMT of bipolar source [D]. Changchun: Jilin University, 2008: 5-12.
- [5] 陈明生, 闫述, 陶冬琴. 电偶源频率电磁测深中的 E_x 分量[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(6): 60-66.
CHEN Ming-sheng, YAN Shu, TAO Dong-qin. E_x component in the frequency electromagnetic sounding of double source [J]. Coal Geology & Exploration, 1998, 26(6): 60-66.
- [6] 蔡少峰. CSAMT 双发射工作模式的建立及应用效果[J]. 山西建筑, 2008, 34(21): 291-292.
CAI shao-feng. The build and application effect of CSAMT dual-emitter work mode [J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(21): 291-292.
- [7] 彭省临, 杨斌, 席振铎. 招平断裂带深部矿体定位预测研究[R]. 长沙: 中南大学, 2010: 15-23.
PENG Sheng-lin, YANG Bin, XI Zhen-zhu. Prediction of the deep orebody location in Zhaoping fault [R]. Changsha: Central South University, 2010: 15-23.
- [8] 曹春国, 王启梁, 李效英. 招平断裂带综合物探深部找矿预测研究报告[R]. 山东省物化探勘查院, 2009: 35-42.
CAO Chun-guo, WANG Qi-liang, LI Xiao-ying. The research report about forecast prospecting in deep of Zhaoping fault with geophysical method [R]. Shandong Province Institute Of Geophysical and Geochemical Exploration, 2009: 35-42.
- [9] 曹春国, 贺春艳, 于义文. 某矿区深部金矿找矿预测研究成果报告[R]. 山东省物化探勘查院, 2007: 32-41.
CAO Chun-guo, HE Chun-yan, YU Yi-wen. The research report about porecast prospecting in deep of some gold mine [R]. Shandong Province Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, 2007: 32-41.
- [10] 毛先成. 招平断裂带三维模拟成矿预测简报[R]. 中南大学, 2013: 5-9.
MAO Xian-cheng. The brief report about forecast prospecting in Zhaoping fault by three-dimensional simulation[R]. Central South University, 2013: 5-9.
- [11] 某矿山地测科. 2012 年某矿山地地质勘探剖面图[R]. 2012: 1-2.
A Mine Geological Survey Department. 2012 the geological exploration profile in some mine [R]. 2012: 1-2.
- [12] 佟铁钢, 刘春明, 何继善. CSAMT 全区电阻率法数值模拟及应用探讨[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(5): 1855-1860.
TONG Tie-gang, LIU Chun-ming, HE Ji-shan. Numerical simulation and application discussion of the CSAMT full-zone resistivity method [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(5): 1855-1860.
- [13] 佟铁钢, 柳建新. 一种新型 CSAMT 观测参数的计算方法[J]. 物探化探计算技术, 2009, 31(3): 210-213.
[TONG Tie-gang, LIU Jian-xin. A new calculation method of

- csamt observation parameter [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, 31(3): 210–213.
- [14] 汤井田, 何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005: 77–87.
- TANG Jin-tian, HE Ji-shan. Controlled source audio-frequency magnetotellurics and application [M]. Changsha: Central South University Press, 2005: 77–87.
- [15] 闫述, 陈明生. CSAMT 测深中的阴影和场源复印效应问题[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(增刊): 8–10.
- YAN Shu, CHEN Ming-sheng. Shadow and source overprint effects in CSAMT sounding [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2004, 39(Supple): 8–10.
- [16] 陈明生, 闫述. CSAMT 勘探中场区、记录规则、阴影及场源复印效应的解析研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 951–958.
- CHEN Ming-sheng, YAN Shu. Analytical study on field zones, record rules, shadow and source overprint effects in CSAMT exploration [J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 48(4): 951–958.
- [17] 汤井田, 葛伟男. 三维 CSAMT 中的阴影和场源附加效应[J]. 物探化探计算技术, 2012, 34(1): 19–27.
- TANG Jing-tian, GE Wei-nan. Shadow and source overprint effects in 3D CSAMT [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 34(1): 19–27.
- [18] 高文. 大地电磁感应的场源效应[J]. 地球物理学报, 1991, 34(2): 211–216.
- GAO Wen. Line source effects on magnetotelluric responses [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1991, 34(2): 211–216.
- [19] 陈明生, 闫述. 论频率测深应用中的几个问题[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 25–32.
- CHEN Ming-sheng, YAN Shu. Some questions about the application of frequency electromagnetic sounding [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 25–32.
- [20] 林昌洪, 谭捍东, 舒晴, 佟拓, 谭嘉言. 可控源音频大地电磁三维共轭梯度反演研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3829–3838.
- LIN Chang-hong, TAN Han-dong, SHU Qing, TONG Tuo, TAN Jia-yan. Three-dimensional conjugate gradient inversion of CSAMT data [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 55(11): 3829–3838.
- [21] 汤井田, 周聪, 张林成. CSAMT 电场 y 方向视电阻率的定义及研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(2): 552–558.
- TANG Jing-tian, ZHOU Cong, ZHANG Lin-cheng. A new apparent resistivity of CSAMT defined by electric field y -direction[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(2): 552–558.
- [22] 许建荣, 柳建新, 李爱勇, 杨生, 刘海飞, 瓮晶波. 水域大地电磁测深中水体对电磁场的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(3): 567–573.
- XU Jian-rong, LIU Jian-xing, LI Ai-yong, YANG Sheng, LIU Hai-fei, WENG Jing-bo. Liquid effect upon electromagnetic fields in water area MT exploration [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2007, 38(3): 567–573.

(编辑 龙怀中)