

doi: 10.11720/wtyht.2020.0200

王洪军,田红军,贺春艳,等.多种物探方法在胶西北金矿集中区深部勘探的效果分析[J].物探与化探,2020,44(5):1053-1058.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0200

Wang H J, Tian H J, He C Y, et al. An analysis of the effect of multiple geophysical prospecting methods in the deep exploration of the Jiaoxibei (northwest Shandong) gold ore concentration area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1053-1058. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0200

多种物探方法在胶西北金矿集中区深部勘探的效果分析

王洪军¹, 田红军², 贺春艳¹, 刘光迪³

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250109; 2. 四川中成煤田物探工程院有限公司, 四川 成都 610072; 3. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为了建立适合于山东胶西北深部金矿集中区地质—地球物理找矿模型, 在已知地质剖面开展多种电磁勘探技术实验, 同时优选出适用于胶西北强干扰区金矿集中区深部地球物理勘探方法。对比分析广域电磁法(WFEM)、大地电磁法(MT)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)与频谱激电法(SIP)的勘探成果发现: 相对于MT而言, 广域电磁法具有分辨率高、数据精度高、抗干扰能力强和施工效率高等优势; 相对于CSAMT和SIP而言, 广域电磁法具有勘探深度大、抗干扰能力强、数据精度高等技术优点。多种方法揭示了剖面线2km内地层和岩体及断裂蚀变带空间分布特征, 却未能提供深部内物性参数; 反观广域电磁法成果, 不仅展示了浅中部电阻率变化规律和特征, 同时有效地反映了深部断裂蚀变带的变化特征。结果表明广域电磁法是本次综合物探研究工作中的有效勘探方法, 同时为深部成矿预测和模型建立提供了准确的地球物理参数。

关键词: 广域电磁法; 金矿; 深部勘探; 胶西北

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)05-1053-06

集中区深部少有金矿勘查突破^[4]。

0 引言

山东省胶西北地区是我国金矿床分布最密集地区, 区内金矿资源潜力及分布备受关注。矿集区金矿床主要受三山岛断裂、龙莱断裂和招平断裂3条主干断裂及其次级断裂控制, 构成胶西北3条金矿带和一系列金矿田^[1-3]。以往勘探在这些断裂带1000m以内发现了纱岭、三山岛北部、西岭等多个超大型矿床。区内除了特殊的成矿特征, 电磁、人文干扰强且复杂, 如电力线、民房、管线横跨, 部分地面被建筑所覆盖, 生产车间的运行产生很大的电磁场噪声, 近年来应用过多种传统的物探方法, 但勘探效果不佳, 在主干断裂构造之间的广大覆盖区的金矿

1 原理简介

MT/CSAMT卡尼亚视电阻率计算公式:

$$\rho_s = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2, \quad (1)$$

$$Z = \frac{E_x}{H_y}, \quad (2)$$

式中: ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$; μ 为磁导率; Z 为波阻抗。

频谱激电法的计算公式:

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\}, \quad (3)$$

收稿日期: 2020-04-22; 修回日期: 2020-07-15

基金项目: 山东省重大科技创新工程“深部探测综合地球物理技术”(2018CXGC1601)、“深部金矿资源评价理论、方法与预测”(2017CXGC1604)

作者简介: 王洪军(1972-), 男, 山东省齐河县人, 高级工程师, 主要从事地球物理勘探工作。Email: hongjun@126.com

通讯作者: 田红军(1988-), 男, 2015年毕业于中南大学, 主要研究方向为电磁法理论与数据处理。Email: 821327420@qq.com

式中： ρ_0 为零频时的电阻率(包含 IP 信息)， ρ 为电阻率(不包含 IP 信息)；角频率 $\omega = 2\pi f$ ； m 为极化率因子； τ 为时间常数； c 为频率相关系数。

中南大学何继善院士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。广域电磁的核心内容是,采用了一种全新的计算大地视电阻率的方法,依据的是均匀大地表面水平电偶极源 E_x 的严格、精确的表达式^[5-6]：

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)] \quad (4)$$

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)} \quad (5)$$

其中

$$K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN} \quad (6)$$

$$\Delta V_{MN} = E_x \cdot MN \quad (7)$$

式中： E_x 为 x 方向的电场水平分量； ρ 为电阻率,单位为 $\Omega \cdot m$ ； I 为供电电流,单位为 A； dL 为供电点 AB 的直线长度,单位为 m； φ 为测点与供电点 AB 中点的连线与供电点 AB 连线之间的夹角； r 为测点到供电点 AB 中点的距离,单位为 m； i 为虚数单位； k

为波数； MN 为电极之间的距离,单位为 m。

该方法扩展了观测范围,提高数据精度,保留了计算公式中的高次项,提高了求得电阻率值精确解。目前,野外常用观测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、精度和工作效率,加大了勘探深度^[7-12]。

2 实验区地质—地球物理特征

区内构造以断裂为主,按走向分为 NE 向、NNE 向与近 EW(见图 1)。NE 向断裂是在中生代近 EW 向挤压应力作用下形成的压扭性断裂,NNE 向断裂是燕山晚期发育起来的压扭性断裂,为成矿前的构造,矿体系充填断裂构造或充填交代断裂破碎带而成,并且两组或多组不同方向断层交汇处,往往是矿体的富集处。

区内地层由老至新为古元古界荆山群至第四系(图 1)。古元古界荆山群为一套中高级变质岩系,出露于矿区的东部及南部。第四系主要由黏土类和砂类组成,厚约 28 m。岩浆岩包括变质变形花岗质岩石和中生代斑状二长花岗岩、花岗闪长岩体和辉

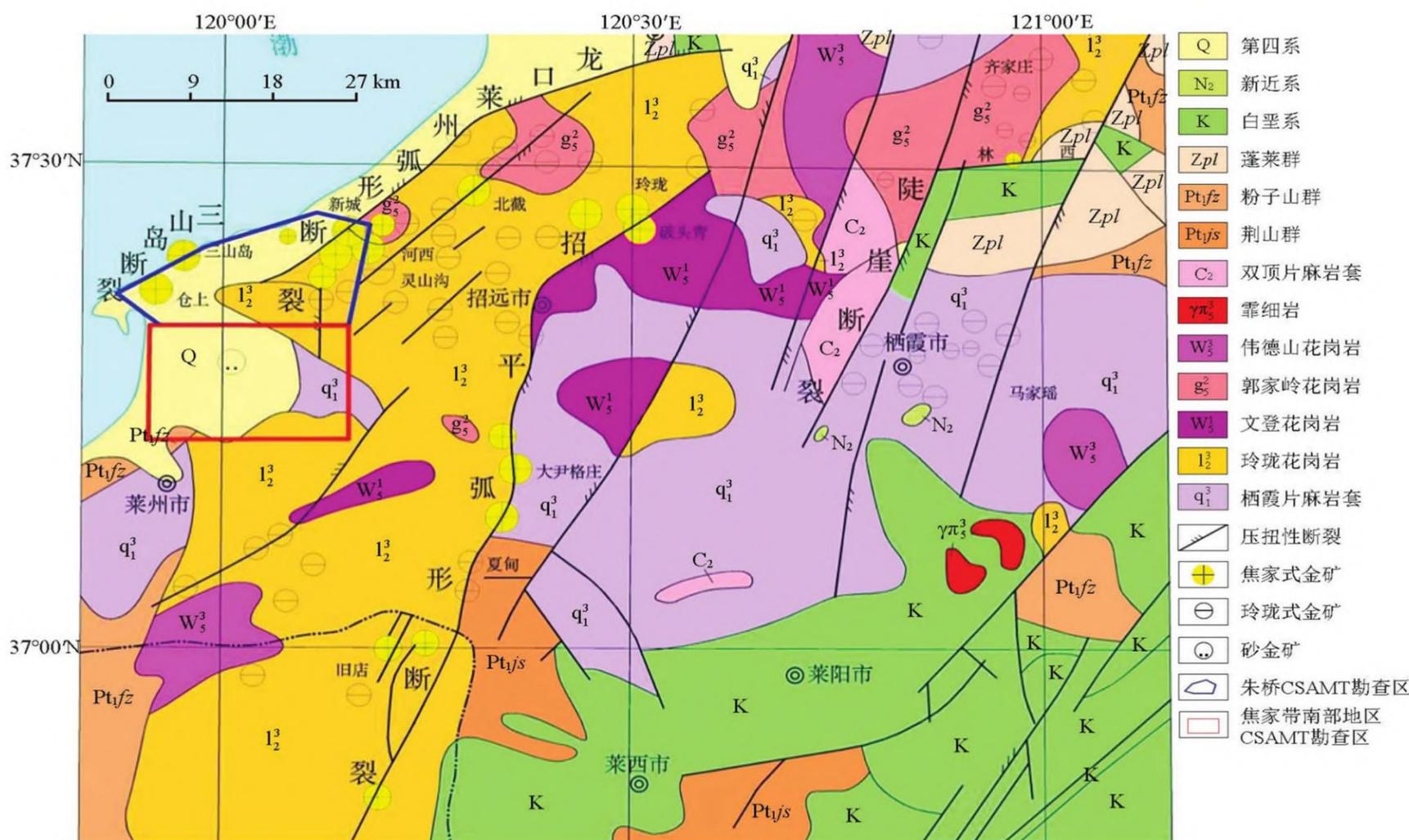


图 1 实验区地质图

Fig.1 Geological map of the experimental area

绿玢岩、煌斑岩、闪长玢岩等脉岩,其中与成矿关系最为密切的是中生代岩体,对成矿有重要的促进作用。

据以往研究成果,研究区岩矿石电阻率可分为高、中、低阻三类:高电阻率岩性主要有玲珑花岗岩、郭家岭花岗岩等,其电阻率平均值一般在 $2\ 800\ \Omega \cdot m$ 以上,最高可达 $8\ 810\ \Omega \cdot m$;其次为蚀变花岗岩及碎裂花岗岩,其电阻率平均值一般为 $800 \sim 1\ 740\ \Omega \cdot m$;低阻介质包括斜长角闪岩、黑云母片岩、变粒岩等和第四系松散沉积物,电阻率平均值在 $300\ \Omega \cdot m$ 左右。花岗岩及花岗闪长岩的极化率低而稳定,一般在 5% 以下,变质岩则更低,一般在 4% 以下。而岩石经矿化蚀变后,极化率明显升高,一般在 7% 以上,蚀变矿化强烈的富矿石则更高,极化率达 20% 以上,是各类正常岩石极化率的 4~5 倍。

胶东西部地区密度特征:前寒武纪结晶基底的密度值为 $(2.78 \sim 2.81) \times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3$,新元古代玲珑二长花岗岩和中生代郭家岭花岗闪长岩的密度为 $(2.$

$62 \sim 2.63) \times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3$,局部出露的中生界白垩系密度值为 $2.62 \times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3$;很显然,在岩体分布区形成明显的重力低异常,前寒武纪结晶基底分布区则形成重力高异常。利用重力异常可以圈定出前寒武纪结晶基底和岩体的分布范围。局部出露的中生界白垩系密度值为 $2.62 \times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3$,与前寒武纪结晶基底接触时也能形成一个密度界面。

3 实验剖面施工参数

本区已开展过 MT、CSAMT 和重磁的实验剖面探测,本次广域电磁法勘探线与已有剖面线重合,与频谱激电法(SIP)剖面测线相邻(图 2)。其中,MT 点距为 200 m;CSAMT 点距为 50 m,收发距为 9 km,发射电流为 9 A。广域电磁法野外施工参数:工作频率范围 $0.0117 \sim 8192\ \text{Hz}$,共 40 个频点;点距 MN 为 40 m;发射电流 140 A;发—收距 $r \approx 20\ \text{km}$;广域物理点 265 个。

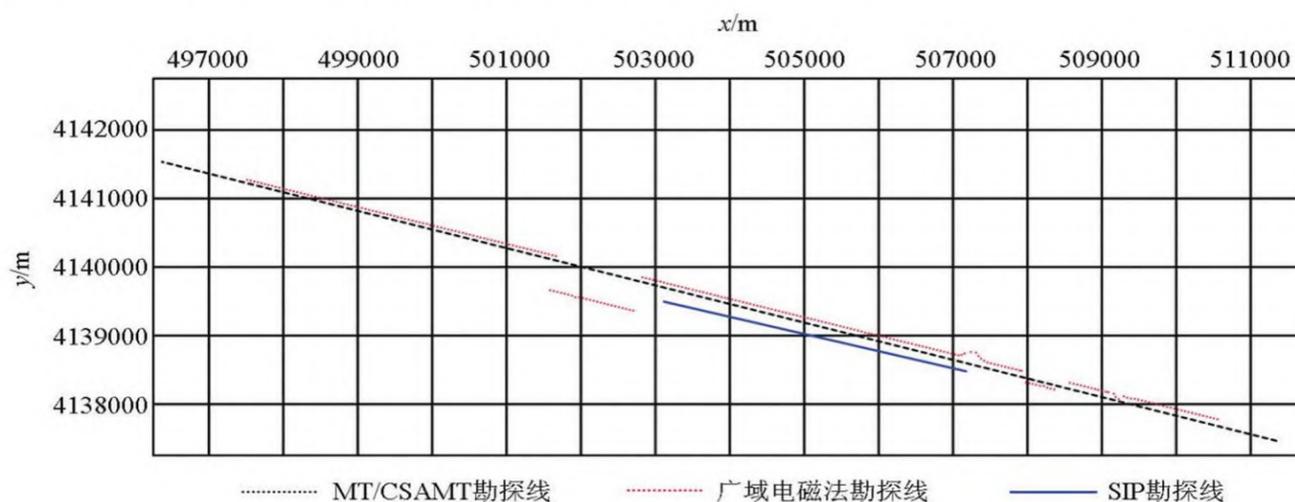


图 2 综合勘探方法剖面线

Fig.2 Comprehensive exploration method profile

4 实验结果对比

对比分析 CSAMT、MT、重磁、SIP 与广域电磁法的勘探成果(图 3):由剖面的 SIP 法综合参数断面可以看出,焦家断裂带在视电阻率断面图上显示为不对称的“八”字形低阻异常特征,低阻异常带主轴倾向 SE,根据频谱激电法推断解释原则,推断焦家断裂带倾向 NW,与异常主轴倾向相反,断裂带位置上显示明显的条带串珠状低阻带。由于 SIP 测深为几何装置测深,勘探深度为视深度,反映地质体深度一般较真实深度偏深,使得焦家断裂带异常特征在视电阻率断面图垂向上被拉伸。

CSAMT、MT 深度—视电阻率断面图有很大相

似性,其纵向电性层可以视为两层,上部为明显的低阻层,视电阻率值变化范围为 $500 \sim 3\ 500\ \Omega \cdot m$,底部为高阻基底层,视电阻率值 $> 3\ 500\ \Omega \cdot m$,上、底之间呈典型的梯级带,梯级带呈舒缓波状向下倾伏延深。上部的低阻异常等值线稀疏变化平缓;梯级带等值线自上而下呈渐变关系且局部变化较大,对应两种不同岩性的接触带,即已知断裂蚀变带。布格重力异常剖面曲线 1200 号测点以东逐渐降低,以西呈逐步升高的变化特征,通过前面密度特征分析,重磁主要反映了东部为花岗岩体,西部变质岩系厚度逐步增厚的地质体征。在剖面两侧的 100 号测点和 1500 号测点附近,电阻率等值线均呈明显的波状低阻梯级带构造异常,与焦家断裂和三山岛断裂带的位置相吻合,但 CSAMT 与 MT 均没有识别出变质岩

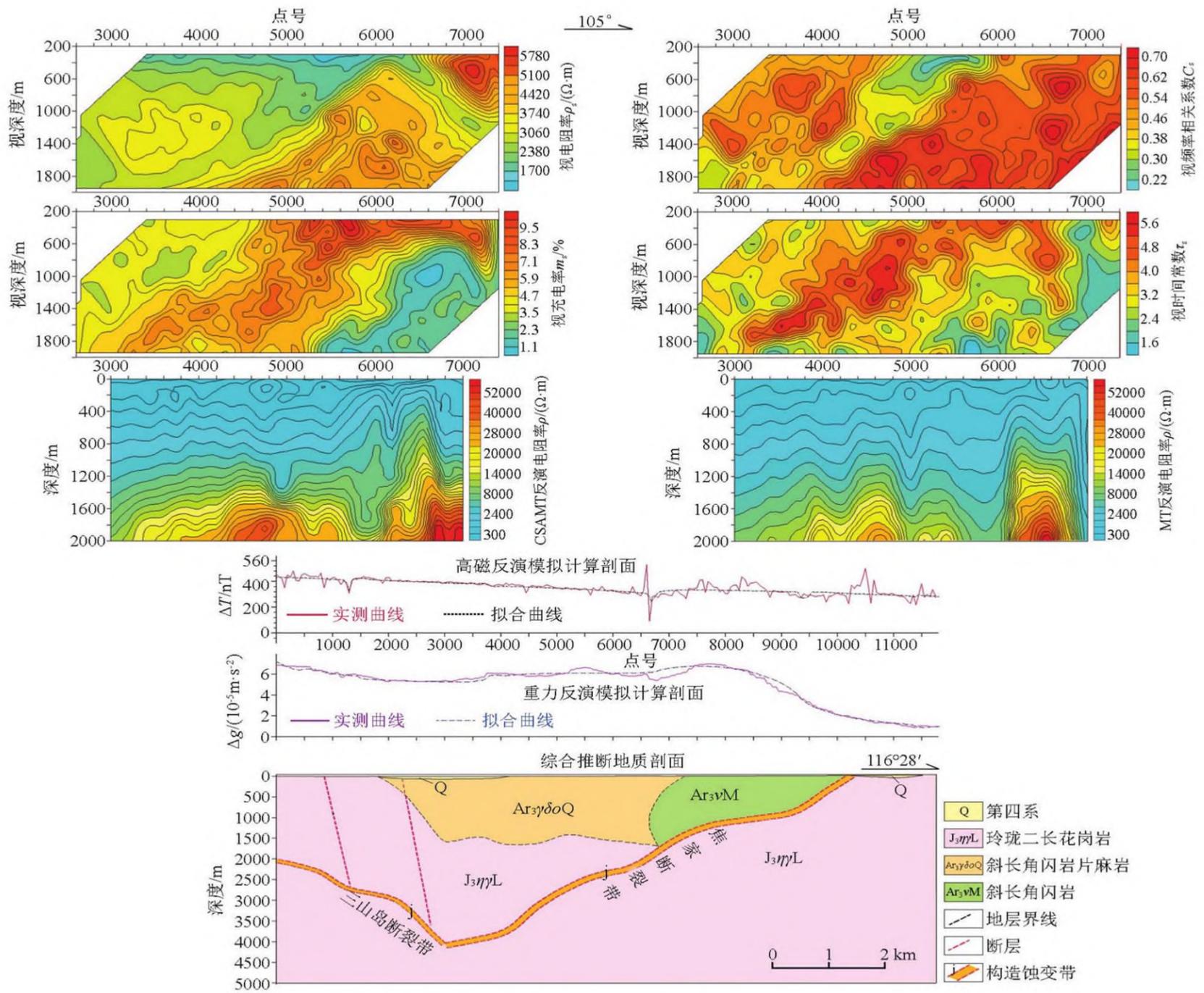


图3 SIP、重磁、CSAMT、MT法地质综合剖面

Fig.3 SIP, gravity magnetic, CSAMT and MT geological comprehensive profiles

与花岗岩的电性特征。

广域电磁法反演电阻率断面图(图4)揭示了区内地层、岩体、断裂构造蚀变带电阻率在空间分布特征和规律。结合野外物性资料及相关的地质资料,推断区内地层主要有3个主要电性层,即燕山期的玲珑二长花岗岩($J_3\eta\gamma L$)为高阻层,电阻率 $>5000\ \Omega\cdot m$;胶东群变质岩地层为中低阻层,电阻率变化范围 $500\sim 1000\ \Omega\cdot m$;第四系为低阻层,电阻率值 $<500\ \Omega\cdot m$;其中广域电磁法揭示了区内5条断裂,分别为后邓家断裂带、西由断裂、 F_6 断裂、焦家断裂带及三山岛断裂带,电阻率值变化范围 $<100\ \Omega\cdot m$ 。以焦家断裂带、三山岛断裂带和后邓家断裂三条大的控矿构造带为代表。焦家断裂带(点号160~360)在平面和剖面上均呈舒缓波状延伸,断裂在1000 m以上沿胶东群变质岩与玲珑二长花岗岩的接触带展布,1000 m以下则发育于玲珑二长花岗岩岩

体内,上盘为变质岩,下盘为花岗岩,深部发育在花岗岩中。三山岛断裂带(点号96~160)倾向ES,走向 $30^\circ\sim 35^\circ$,倾角由浅而深,断裂倾角呈由陡变缓的变化趋势,3000 m以下地段较缓,倾角在 $20^\circ\sim 50^\circ$ 之间变化。其中焦家断裂带与三山岛断裂带交汇深度大致在地表以下4000 m左右,构造上盘(三山岛断裂与焦家断裂带之间)主体为新太古代变质岩,两带上部位于变质岩与花岗岩的接触带上,深部发育于玲珑二长花岗岩内,两带下盘均为玲珑二长花岗岩。后邓家断裂(点号131)电性显示为等值线往ES向下拉,总体倾向ES,走向约 32° ,倾角约 60° ,向上延伸约1000 m,该断裂地表有出露。三山岛断裂的上盘,为一条含金矿蚀变构造带,测线经过位置被第四系覆盖,由已知钻孔资料知,与焦家断裂带上盘新太古代变质岩相对应;高阻基底等值线密集变化稳定,与焦家断裂带下盘的玲珑二长花岗岩相对应。

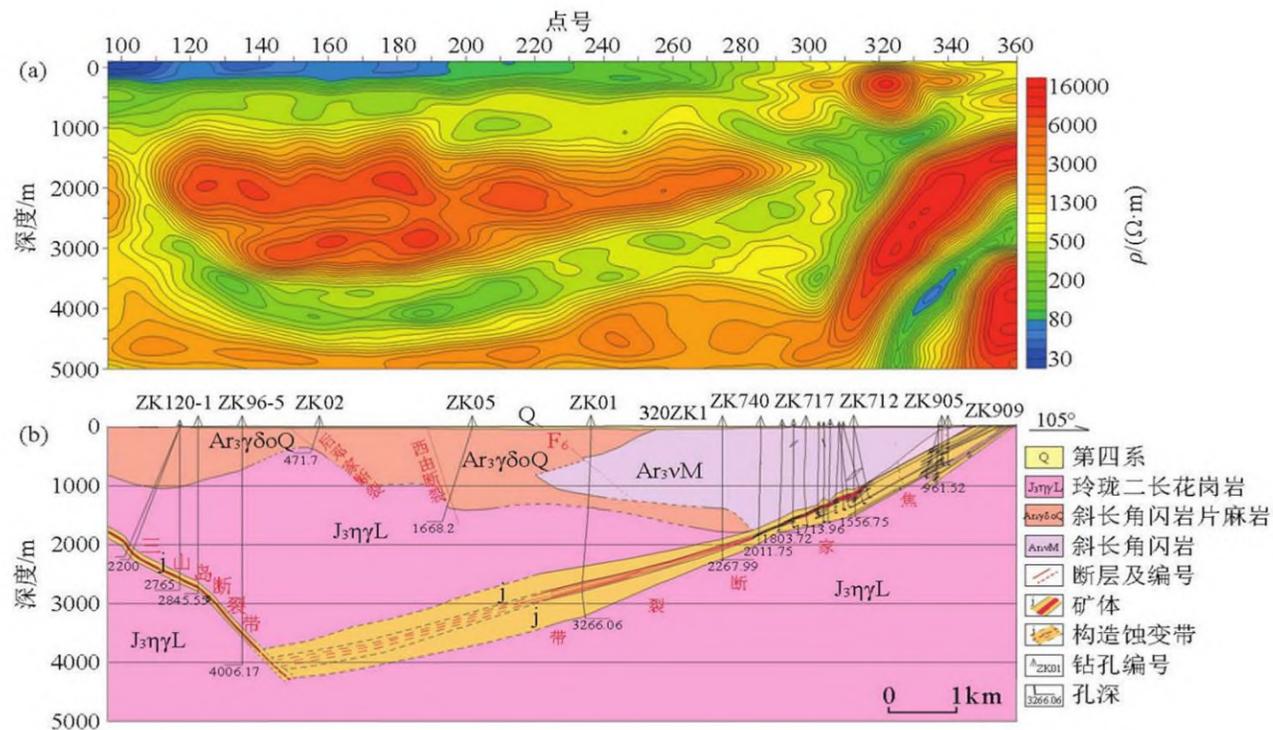


图4 山东胶西北 GY-01 线广域电磁法反演断面 (a) 及综合解释剖面 (b)

Fig.4 Wide field electromagnetic inversion (a) and comprehensive interpretation section (b) of GY-01 line

5 结论与讨论

1) 单一物探方法具有局限性,对具体勘探目标的解释存在“多解性”,难以对地下信息做出全面、合理的解释。采用重磁电资料与地质资料联合解释,综合研究地质体,对解释结果相互验证、补充,能够有效克服单一方法的片面性,使解释结果接近实际地质情况

2) 相对于 MT、CSAMT、SIP 而言,广域电磁法由于采用伪随机 7 频波信号源,故具有抗干扰能力强、分辨能力高、工作效率高、勘探深度大等优点。

3) 常规勘探方法 (CSAMT、SIP) 揭示了地下 2 km 内地层、岩体及断裂物性参数空间分布,但未能解决深部构造蚀变带的变化趋势和深部地层物性特征;MT 结果显示了其勘探深度大的优势,但也凸显了分辨率低的缺陷。而广域电磁法反演成果揭示了地下 5km 地层、岩体、构造蚀变带的空间分布特征,同时也为该区深部勘探提供了地球物性参数。

4) 通过广域电磁法勘探试验推断了三山岛和焦家断裂带及其之间隐伏的 3 条断裂,分别是后邓家断裂、西由断裂、F₆ 断裂地质特征,推测三山岛和焦家断裂带深部构造样式,最新钻探验证结果证明广域电磁法在胶西北金矿集中区强干扰环境下具有优异的应用效果。其解释成果为胶西北金矿集中区三山岛和焦家主干断裂之间的隐伏区深部探测提供了坚实的基础,同时也凸显了广域电磁法在胶西北金矿集中区深部是有效勘探方法。

致谢:感谢继善高科项目组人员对野外工作的支持,感谢中南大学李帝铨教授对修改论文提出宝贵的意见,感谢张贤对论文修改提供帮助。

参考文献 (References):

- [1] 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 S L, Yang B, Xi Z Z. Research on deep ore body location prediction in Zhaoping fault zone [R]. Changsha: Central South University, 2010: 15-23.
- [2] 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 C G, Wang Q L, Li X Y. Research report on deep prospecting prediction of comprehensive geophysical exploration in Zhaoping fault zone [R]. Shandong Institute of Geophysical and Chemical Exploration, 2009: 35-42.
- [3] 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 C G, He C Y, Yu Y W. Research report on ore prospecting and prediction in a deep gold mine [R]. Shandong Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, 2007: 32-41.
- [4] 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 X C. Bulletin of three-dimensional modeling and metallogenic prediction of Zhaoping fault zone [R]. Central South University, 2013: 5-9.
- [5] 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 J S. Wide-area electromagnetic method and pseudo-random signal electricity method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 1-5.
- [6] 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 J S. Controlled source audio magnetotelluric method [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1990: 1-6.
- [7] 佟铁钢. E-Hz 广域电磁方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 10-22.
- Tong T G. Research on E-Hz wide-area electromagnetic method [D]. Changsha: Central South University, 2010: 10-22.
- [8] 尚通晓. 双极源 CSAMT 一维全区反演[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 5-12.
- Shang T X. One dimensional whole-region inversion of bipolar source CSAMT[D]. Changchun: Jilin University, 2008: 5-12.
- [9] 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 M S, Yan S, Tao D Q. E_x component in electromagnetic sounding with frequency of electric couple source [J]. Coal Field Geology and Exploration, 1998, 26(6): 60-66.
- [10] 刘嘉文, 裴婧, 李帝铨. 广域电磁法反演方案评估[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(4): 492-500.
- Liu J W, Pei J, Li D Q. Evaluation of wide-area electromagnetic inversion scheme [J]. Journal of Engineering Geophysics, 2008, 15(4): 492-500.
- [11] 李帝铨, 胡艳芳. 强干扰矿区中广域电磁法与 CSAMT 探测效果对比[J]. 物探与化探, 2015, 39(5): 967-972.
- Li D Q, Hu Y F. Comparison of CSAMT detection effect and wide-area electromagnetic method in strong interference mining area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(5): 967-972.
- [12] 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 M S, Yan S. Analytical study on field area, recording rule, shadow and photocopying effect of field source in CSAMT exploration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(4): 951-958.
- [13] 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 W. Field source effects of terrestrial electromagnetic induction [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1991, 34(2): 211-216.
- [14] 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 M S, Yan S. Some problems in the application of frequency sounding [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 25-32.
- [15] 林昌洪, 谭捍东, 舒晴, 等. 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 C H, Tan H D, Shu Q, et al. 3-d conjugate gradient inversion of controlled source audio magnetotelluric [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3829-3838.
- [16] 刘春明, 佟铁钢, 何继善. 多种电磁法在某金矿的野外勘探应用[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2422-2429.
- Liu C M, Tong T G, He J S. Application of various electromagnetic methods in field exploration of a gold mine [J]. China Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2422-2429.

An analysis of the effect of multiple geophysical prospecting methods in the deep exploration of the Jiaoxibei (northwest Shandong) gold ore concentration area

WANG Hong-Jun¹, TIAN Hong-Jun², HE Chun-Yan¹, LIU Guang-Di³

(1. Shandong Institute of Geophysical and Chemical Exploration and Exploration, Jinan 250109, China; 2. Sichuan Zhongcheng Coal Field Geophysical Engineering Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610072, China; 3. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to establish a geological-geophysical prospecting model suitable for the deep gold deposits in Jiaoxibei region of Shandong, the authors performed a variety of electromagnetic exploration technologies on known geological sections, and selected a deep geophysical exploration method suitable for the concentrated gold deposits in the strong interference zone of Jiaoxibei region. The contrasting and analyzing of the exploration results of wide field electromagnetic method, magnetotelluric method (MT), controlled source audio-frequency magnetotelluric method (CSAMT) and spectrum IP method (SIP) show that, compared with MT, the wide area electromagnetic method has the advantages of high resolution, high data accuracy, strong anti-interference capability and high construction efficiency, and compared with CSAMT and SIP, the wide area electromagnetic method has large exploration depth and strong anti-interference capability, high data accuracy and other technical advantages. Various methods can reveal the spatial distribution characteristics of strata, rock masses and fault alteration zones within 2km of the profile line, but fail to provide deep physical parameters. In contrast, the results of the wide field electromagnetic method not only show the changing rules and characteristics of the shallow central resistivity, but also effectively reflect the changing characteristics of the deep fault alteration zone. The results show that the wide-area electromagnetic method is an effective exploration method in this comprehensive geophysical research, and it also provides accurate geophysical parameters for deep mineralization prediction and model establishment.

Key words: wide field electromagnetic method; gold ore; deep exploration; Jiaoxibei (northwest Shandong)

(本文编辑: 叶佩)