

doi: 10.11720/wtyht.2020.0256

王洪军,熊玉新.广域电磁法在胶西北金矿集中区深部探测中的应用研究[J].物探与化探,2020,44(5):1039-1047.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0256>

Wang H J, Xiong Y X. The application of wide field electromagnetic method to deep exploration in Jiaoxibei (northwest Shandong) gold concentration area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1039-1047. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0256>

广域电磁法在胶西北金矿集中区深部探测中的应用研究

王洪军^{1,2}, 熊玉新³

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 2. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 山东 济南 250013; 3. 山东省地质科学研究院, 山东 济南 250013)

摘 要: 胶西北矿集区内的焦家与三山岛断裂带是著名的金矿成矿带, 近年深部找矿成果显著, 目前钻孔已揭露至 4 006 m, 以往的物探方法深部探测效果不佳, 亟需有效的深部探测地球物理技术。将广域电磁法应用于焦家—三山岛断裂带已知剖面, 断面揭示两大断裂带形成的低阻带特征明显, 真实反映了地下电性分布, 视电阻率高阻、中低阻的分布反映了玲珑花岗岩体及变质岩体的展布; 同时断面清晰展示了两大断裂在深度 4 km 附近交汇, 剖面为研究焦家—三山岛断裂之间的断裂特征提供了依据。应用试验表明, 广域电磁法探测深度大, 抗干扰能力强, 在胶西北岩浆岩分布区探测低阻断裂带具有较好的效果, 是该区 5 000 m 深度范围内很好的非震地球物理方法。

关键词: 广域电磁法; 胶西北; 深部探测; 岩浆岩分布区; 焦家断裂带

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)05-1039-09

0 引言

胶西北地区发育的三山岛、焦家、招平 3 条区域性主干断裂构造分别控制着一系列超大型—大中型金矿, 形成了胶西北金矿富集区。近年来通过多种地球物理技术结合钻探验证, 又在这些断裂带 1 500 m 以深发现了纱岭、三山岛北部、西岭等多个超大型矿床, 最大孔深超过 4 000 m, 新发现金资源储量达 1 200 t, 资源潜力巨大。但受传统地球物理技术方法的限制, 覆盖区深部地质结构特征、三山岛和焦家断裂深部构造样式等一系列问题亟需有效的深部地球物理探测技术。胶西北地区经济较发达, 区内电力、矿山等引起的电磁噪声大, 遍布建筑物等人工设施, 人文干扰强且复杂, 而现有的大部分物探方法抗干扰能力有限, 探测效果不理想。

以往探测深度达到 5 km 的地球物理方法, 如地

震法, 在岩浆岩区反射波弱且成本高, 施工难度及对环境影响大; MT 法抗干扰能力弱、分辨力低。近年来, 我国在地球物理技术自主研发方面取得较大发展, 如中南大学何继善院士瞄准频率域电磁法研究的前沿, 服务国家“深地战略”需求, 研制了“大深度高精度广域电磁勘探技术与装备”^[1-7]。该方法严格地定义了视电阻率参数, 采用伪随机信号, 具有勘探深度大、抗干扰能力强、工作效率高优点, 对深部地质结构探测能力强、分辨力高^[8], 目前已在油气、地热和金属矿产勘查等多个领域得到广泛应用^[9-15], 具有绿色、高效、低成本特点。因此为验证该方法在胶西北深部探测的适用性, 同时为研究焦家—三山岛断裂之间深部岩体分布、构造形态、断裂特征等提供依据, 进一步完善深部探测地球物理方法技术组合, 笔者在焦家与三山岛金矿区之间优选一条测线开展了广域电磁法(WFEM)探测应用研究, 取得了较好的效果。

收稿日期: 2020-05-16; 修回日期: 2020-05-27

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)

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

1 地质、地球物理概况

1.1 地质概况

研究区位于胶西北成矿小区,是胶东金矿集区重要组成部分,称为“胶西北金矿集区”。著名的焦家破碎带蚀变岩型金矿、玲珑石英脉型金矿均根据区内典型矿床命名。成矿小区总体沿 NE 向展布(图 1)。

研究区内出露地层较为简单(图 2),以新生界第四系冲洪积层、残坡积层、海积层为主;而新太古代胶东岩群的区域变质岩多呈包体状残留于新太古代栖霞序列中^[9]。区内岩浆岩发育,新太古代侵入岩为变质变形花岗质岩石,主要有马连庄序列中细粒变辉长岩(斜长角闪岩)、栖霞序列英云闪长质片麻岩;中生代岩浆侵入活动强烈而频繁,与成矿关系密切,以侏罗纪玲珑序列黑云二长花岗岩为主,白垩纪郭家岭序列花岗闪长岩侵入玲珑序列花岗岩内。区内闪长玢岩、煌斑岩、辉绿玢岩等脉岩较发育。

研究区内断裂构造发育,以 NE 向断裂为主,是金矿的重要控(赋)矿构造,三山岛、焦家、招平断裂及分布于其间的次级控矿构造(如望儿山、灵北断裂等)对金矿矿床控制作用十分明显。

焦家断裂带平面上呈“S”型,总体走向 20°,倾向 NW,倾角 22°~40°。中部的新城地段沿新太古代马连庄序列与中生代玲珑序列接触带展布,其他

地段主要展布于玲珑花岗岩内。断裂沿走向及倾向均呈舒缓波状,膨胀夹缩、分支复合特征明显。主裂面沿断裂破碎带中部展布,绢英岩化发育,矿体主要赋存于主裂面下盘蚀变程度较高的蚀变岩中。

三山岛断裂陆地出露长 12 km,宽 50~200 m,平面上呈“S”型展布,总体走向 40°~50°,倾向 SE,倾角 30°~40°,局部可达 75°。断裂主要沿玲珑花岗岩与新太古代变质岩系的接触带展布,破碎蚀变强烈,主裂面呈舒缓波状,发育有连续稳定的断层泥。矿体均位于断裂带主裂面下盘,沿断裂带倾向延伸。

金矿体多沿断裂倾向的平缓部位和陡缓转折部位赋存^[10],深部找矿应由找“异常”转变为探测研究赋矿结构面的变化,根据赋矿规律进而圈定找矿靶区。

1.2 地球物理特征

据以往研究成果,胶西北岩矿石电阻率可分为高、中、低阻 3 类。玲珑、郭家岭花岗岩为高阻,其电阻率平均值一般在 2 800 Ω·m 以上,且电性不均匀,电阻率变化范围较大;其次为蚀变花岗岩及碎裂花岗岩,其电阻率平均值一般为 800~1 740 Ω·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,电阻率值较稳定,平均值在 300 Ω·m 左右(表 1)。当岩石经破碎蚀变后,其电阻率比原岩明显降低,反映在视电阻率曲线上会表现为明显的低阻特征。

根据区内深度为 3 266.06 m 的 ZK01 孔资料,浅部 28.7 m 以浅为低阻的第四系,28.70~1 321.84

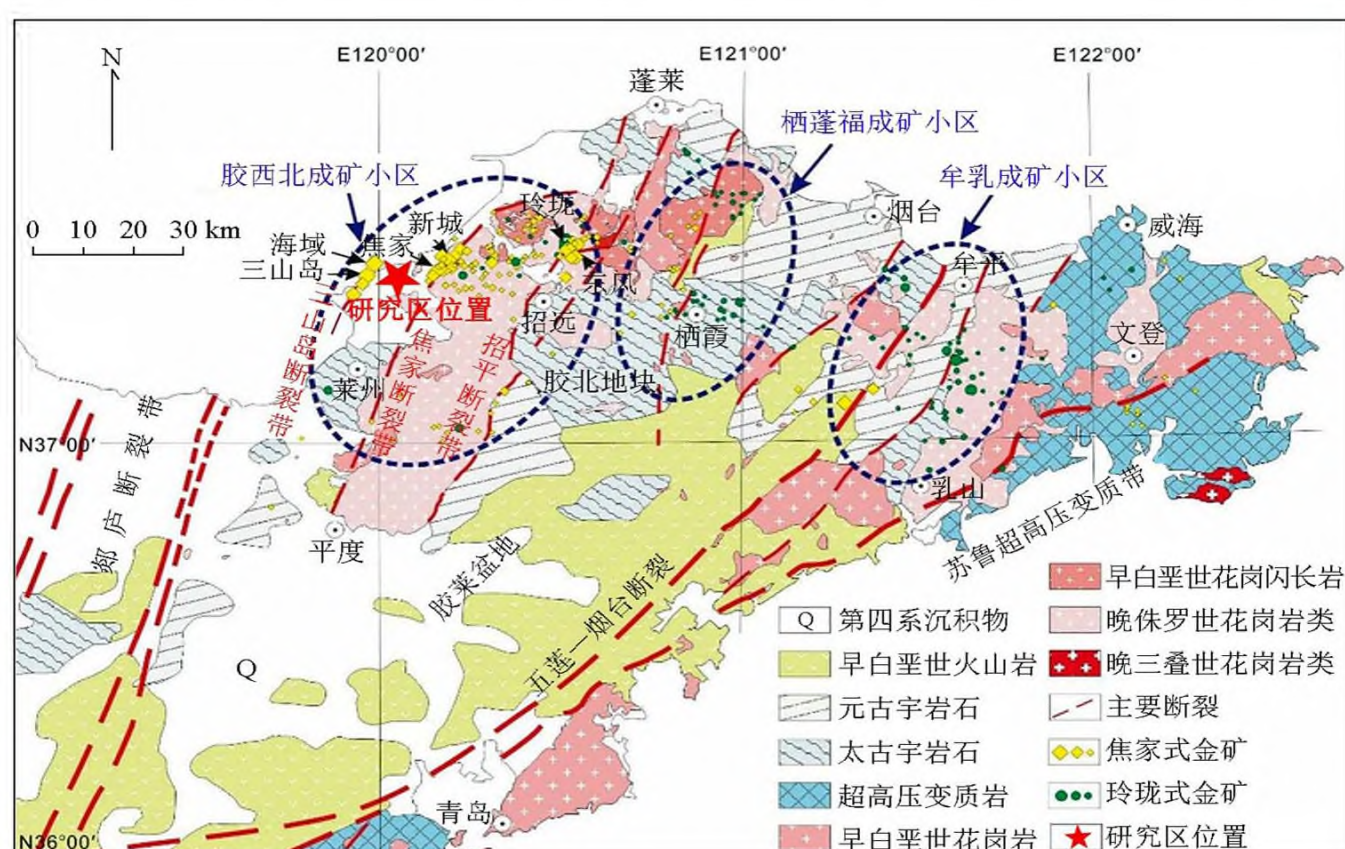
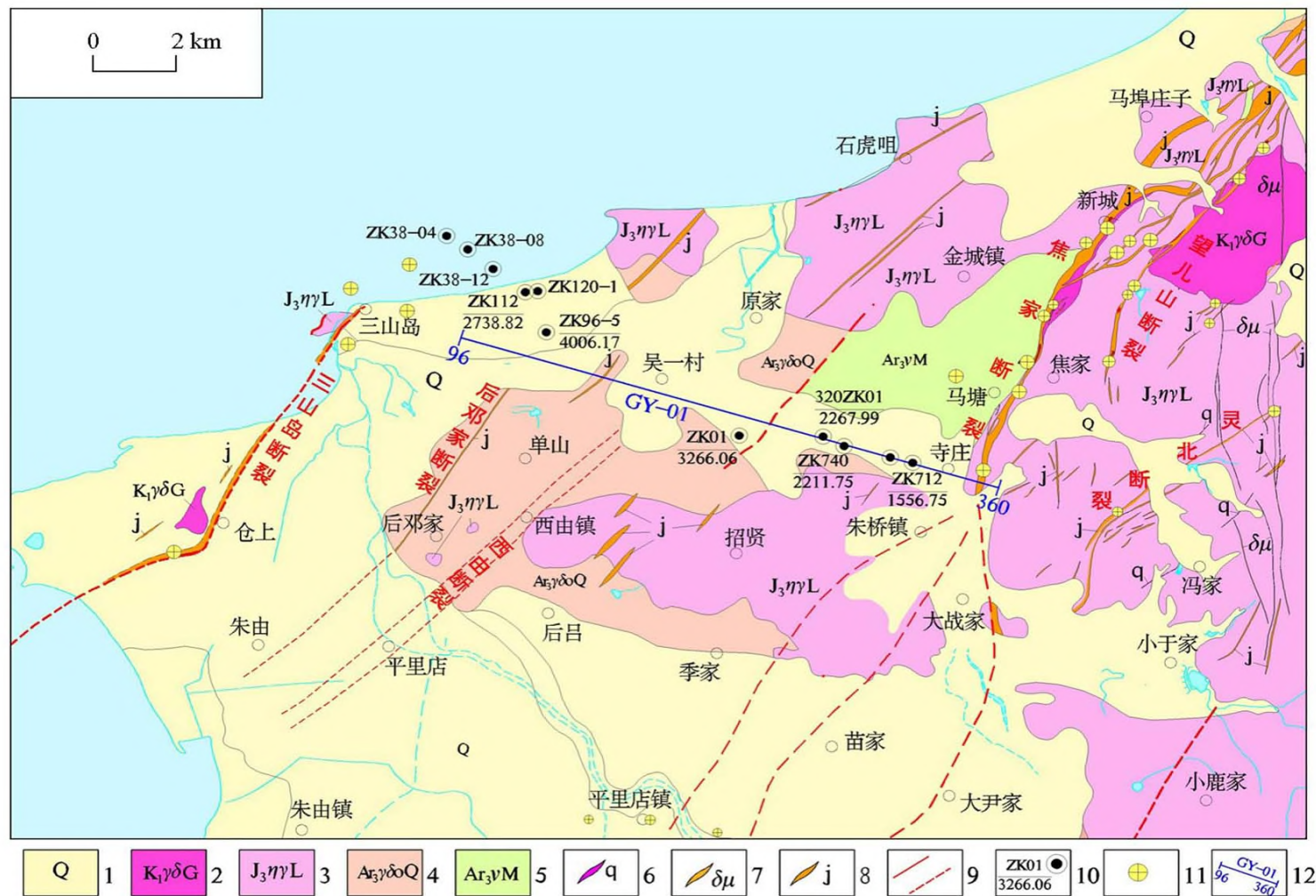


图 1 胶东矿集区地质和金矿分布

Fig.1 Geological and gold distribution of Jiaodong ore concentration area



1—第四系;2—白垩纪郭家岭序列花岗闪长岩;3—侏罗纪玲珑序列黑云二长花岗岩;4—新太古代栖霞序列含角闪黑云英云闪长质片麻岩;5—新太古代马连庄序列中细粒变辉长岩(斜长角闪岩);6—石英脉;7—闪长玢岩脉;8—蚀变带;9—实测及推断断裂;10—钻孔编号及孔深;11—金矿床;12—广域电磁剖面

1—Quaternary;2—Cretaceous granodiorite of Guojialing sequence;3—Jurassic biotite monzonitic granite of Linglong sequence;4—Neoproterozoic tonalitic gneiss of Qixia sequence;5—Neoproterozoic medium fine grained metagabbro of Malianzhuang sequence (plagioclase amphibolite);6—quartz vein;7—diorite porphyrite vein;8—alteration zone;9—measured and inferred faults;10—drilling number and depth;11—gold deposits;12—wide field electromagnetic profile

图2 研究区地质矿产简图

Fig.2 Geological and mineral map and section layout of the study area

表1 研究区主要岩(矿)石电性参数统计

Table 1 Statistical table of main rock (ore) electrical parameters in the study area

岩(矿)石分类	岩(矿)石名称	标本块数	$\rho/(\Omega \cdot m)$	
			平均值	变化范围
变质岩	混合岩化黑云斜长片麻岩	73	3693	533~7815
变质岩	黑云斜长角闪岩	20	2630	1240~4650
变质岩	斜长角闪岩	150	534	5690~50
变质岩	黑云斜长片麻岩	54	941	3060~116
变质岩	斜长角闪片麻岩	98	400	
变质岩	黑云片岩	30	559	1090~237
侵入岩	黑云母花岗岩	15	2970	203~8100
侵入岩	花岗闪长岩	108	4250	625~7470
蚀变岩	绢英岩化碎裂状花岗岩	42	829	580~2830
蚀变岩	绢英岩化花岗质碎裂岩	117	1450	218~9900
蚀变岩	斜长角闪岩(弱矿化)	188	319	50~606
蚀变岩	黄铁绢英岩化糜棱岩	30	86.9	41.5~209
蚀变岩	黄铁矿化蚀变岩	92	335	78.0~578
蚀变岩	黄铁绢英岩化碎裂状花岗岩	51	960	275~3310
矿石	金矿石(新城金矿)	56	1740	218~7420
矿石	金矿石(焦家金矿)	48	1220	176~5230
	第四系黄土	6	50	70~30

m 主要为栖霞序列英云闪长质片麻岩和马连庄序列斜长角闪岩(变辉长岩),表现为低阻特征,下部主要为高阻的玲珑序列黑云二长花岗岩,其中 2 466 m 以下为焦家断裂破碎带,矿化蚀发育。该孔测井资料显示,视电阻率曲线起伏波动比较大,变化范围主要在 $38 \sim 100\,000 \Omega \cdot \text{m}$,平均 $1318.5 \Omega \cdot \text{m}$ 。视电阻率的高值区一般为致密的岩石或具有不同程度的蚀变,如绢云母化、硅化、钾化及脉岩发育段,1 800 m 以下整体上电阻率表现出相对高阻夹低阻的强烈震荡特征,为底部花岗岩影响。较典型视电阻率的低值区处于断裂构造、岩石破碎、裂隙较为发育层段^[11]。因此,可以利用研究区各类岩(矿)石及构造带的电阻率差异,追索断裂破碎带,研究矿集区深部地质结构特征。

2 广域电磁法及工作布置

2.1 工作原理

以往该区深部探测非震方法主要采用 CSAMT 及 MT,CSAMT 电阻率采用近似公式,探测深度浅,1.5 km 以下可靠程度低,采用天然场的 MT 法分辨力低,抗干扰能力差。本次采用的广域电磁法是通过人工接地电偶极场源建立谐变电磁场,向地下发送不同频率的伪随机信号,在广大的、不局限于传统“远区”的区域内,观测一个或多个电磁场分量,采用不做简化的全区电阻率计算公式迭代计算电阻率,达到探测不同埋深地质目标体的一种频率域电磁测深方法。目前广域电磁法已经成为“深地”战略的关键支撑技术,广泛应用于深部金属矿产、油气资源、地热资源及采空区等探测领域,在江西朱溪世界级钨矿、胶东金矿、地调局油气及页岩气勘查中取得了较好的效果,具有绿色、高效、低成本特点。

广域电磁法主要采用电流源激励,观测水平电场分量。均匀大地表面水平电偶极源的电场分量表示为:

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

广域视电阻率定义为:

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

$$K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN}; \quad \Delta V_{MN} = E_x \cdot MN。$$

式中: K_{E-E_x} 为装置系数; φ 为方位角; $F_{E-E_x}(ikr)$ 为电磁响应函数, k 为波数, $k^2 = \omega^2\mu\varepsilon - i\omega\mu\sigma$; ε 为介电常数; μ 为磁导率; ω 为圆频率; ΔV_{MN} 为观测电位差;

MN 为点距; I 为发射电流; dL 为供电电极距; r 为收发距。

由式(2)可以看出:只需测量一个电场分量 E_x 、发送电流以及有关的极距参数,再通过迭代就能获得广域视电阻率。相比需测量电场和磁场分量的 CSAMT 法,广域电磁法装备简单轻便,勘探精度和效率也更高。

2.2 剖面布设

本次布设 1 条广域电磁法勘探试验线 GY-01,西起三山岛东部,经吴一村东至寺庄村东部(如图 1),方位 106° ,总长度 13.46 km,共 265 个测点,点距 50 m。剖面东部控制焦家主干断裂,西部控制三山岛断裂带的中深部,可全面控制两带之间的深部交汇部位的构造变化。

该剖面施工钻孔较多,其中深度为 3 266.06 m 的中国岩金“第一见矿深钻”ZK01 孔和“中国岩金勘探第一深钻”孔深 4 006.1 m 的西岭金矿区 ZK96-5 孔位于剖面附近。

3 数据采集及处理

3.1 数据采集

野外数据采集采用广域电磁法的 $E-E_x$ 装置,即采用一对接地电极形成的电流源作为场源,测量电场的水平分量中与供电电极方向平行的 E_x 分量。 $E-E_x$ 的观测范围位于场源 AB 中垂线两侧 30° 角扇形范围内。 AB 场源平行于测线方向布设,方位角误差小于 1° (图 3)。综合研究区实际情况,本次偶极电源的长度 $AB = 1.2 \text{ km}$,收发距 $r = 15 \text{ km}$,点距 $= MN = 50 \text{ m}$ 。

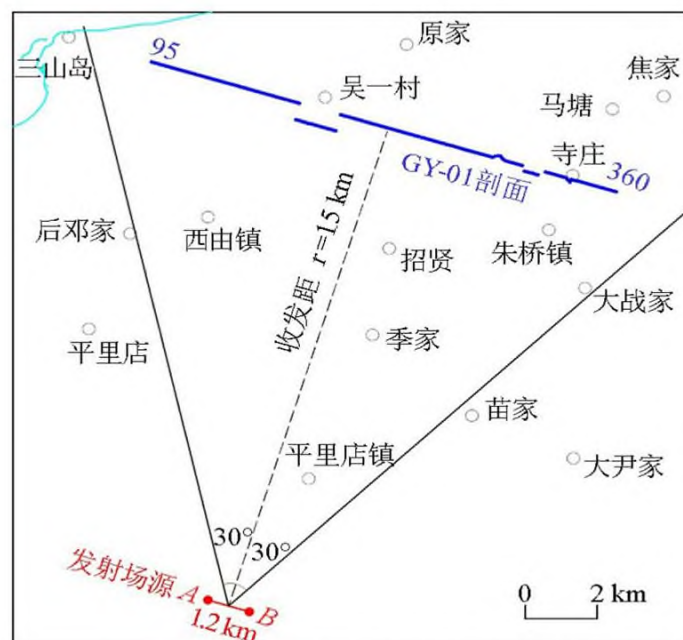


图 3 广域电磁场源布设示意

Fig.3 Schematic diagram of wide field electromagnetic work layout

数据采集采用 JSGY-2 广域电磁接收机(8 通道)及 180 kW 大功率发送系统。广域电磁仪器能够测量 12 个频组 80 个频率,频率范围 8 192 Hz~5/512 Hz。本次数据采集采用 11、9、7、5、3、1 频组,共 40 个频点,频率范围 8 192 Hz~3/256 Hz。高频采集周期为 8 s,低频采集周期为 256 s。采集次数根据数据质量决定采集时间和次数,高频采集次数 20 次左右,中频 15 次左右,低频 6~10 次左右。

3.2 数据处理解释

广域电磁法资料处理首先评价原始数据质量,进行去噪、静态校正、地形校正等预处理;然后对其进行定性分析,分析“频率—视电阻率”曲线类型,确定地下介质在曲线上的响应,分析视电阻率拟断面图,初步确定构造系统的划分,同时确定原始数据与构造区域的对应关系;遵循由已知到未知的原则,利用研究区的地质资料、物性资料,合理地对实测的电性断面进行地质解释,进行后期反演成像定量解释;针对研究区地质特征,采取连续介质反演,建立地球物理—地质模型,人机交互建模综合反演,使反演结果更符合客观地质。

资料处理和反演解释流程见图 4。

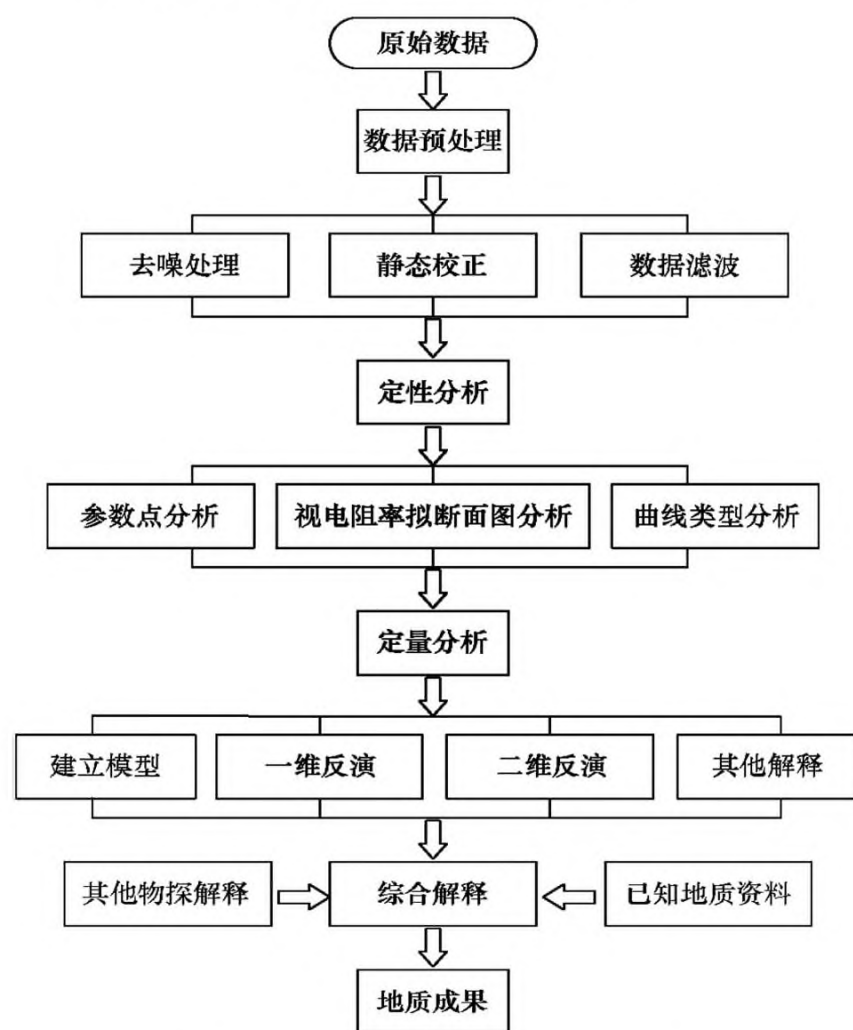


图 4 广域电磁法数据处理解释流程

Fig.4 Data processing and interpretation flow chart of wide field electromagnetic method

4 应用效果分析

4.1 定性分析

图 5 为该剖面的广域电磁法曲线类型图、拟地震图和频率—视电阻率拟断面图,主要反映测点上视电阻率随频率在纵向上的变化,同时可以比较不同测点曲线形态的差异,曲线凌乱性反映相应测点所在位置的构造特征。工作区曲线类型以 HKH 型为主,高频段(浅部)H 型中低阻主要对应着新太古代变质变形岩体,中频段(中部)K 型高阻对应玲珑花岗岩,低频段(深部)H 型低阻为厚度较大的蚀变带的反映,底部高阻为深部高阻的花岗岩引起。在拟地震图中出现多个电磁法同相轴,反映了界面电性特征的变化,同相轴变化不大的地段,说明地质体变化单一,构造简单;相反就是地层起伏大,构造复杂,往往就是断裂发育区。

频率—视电阻率拟断面图可以定性地了解测线上的电性分布、基底的起伏、断层的分布、电性层的划分等断面特征。在深部(低频段)视电阻率等值线的起伏形态与基底起伏相对应,而视电阻率等值线密集、扭曲和畸变的地方又往往与断层有关。在高频段明显存在一个低视电阻率电性层,东段局部高阻呈零状分布,推断受矿山开采等干扰有关;中频段视电阻率较低频段视电阻率低,反映了中高阻向高阻过渡变化,其中横向高阻电性连续性较差,说明该段构造发育。高视电阻率在断面中表现为中间深,两端浅,系两大断裂带相向而倾反映。

4.2 综合分析

图 6 为该剖面的反演剖面成果图和地质解释综合剖面。从 GY-01 测线的反演剖面成果图可以看出,剖面由西至东、由浅至深的电阻率异常特征明显,浅部呈低阻,中深部均高阻特征。断裂蚀变带引起的低阻带与围岩高阻体界线明显,视电阻率等值线密集。

4.2.1 断裂蚀变带

焦家断裂带:在剖面东端 350~360 点附近,广域视电阻率圈定一向西及深部延伸的低阻带,与两侧高阻形成的梯级带特征明显。低阻带延伸深度大于 4 km,且深部有变宽的趋势。焦家断裂在剖面东端出露,倾向 NW,以倾角 30°左右向深部延伸。据 ZK01 深钻资料,在孔深 2 428.00~3 234.16 m 发现焦家金蚀变带,蚀变带到深部倾角逐步变缓,破碎带厚度变大。广域视电阻率圈定的低阻带基本刻画了焦家断裂带的特征。

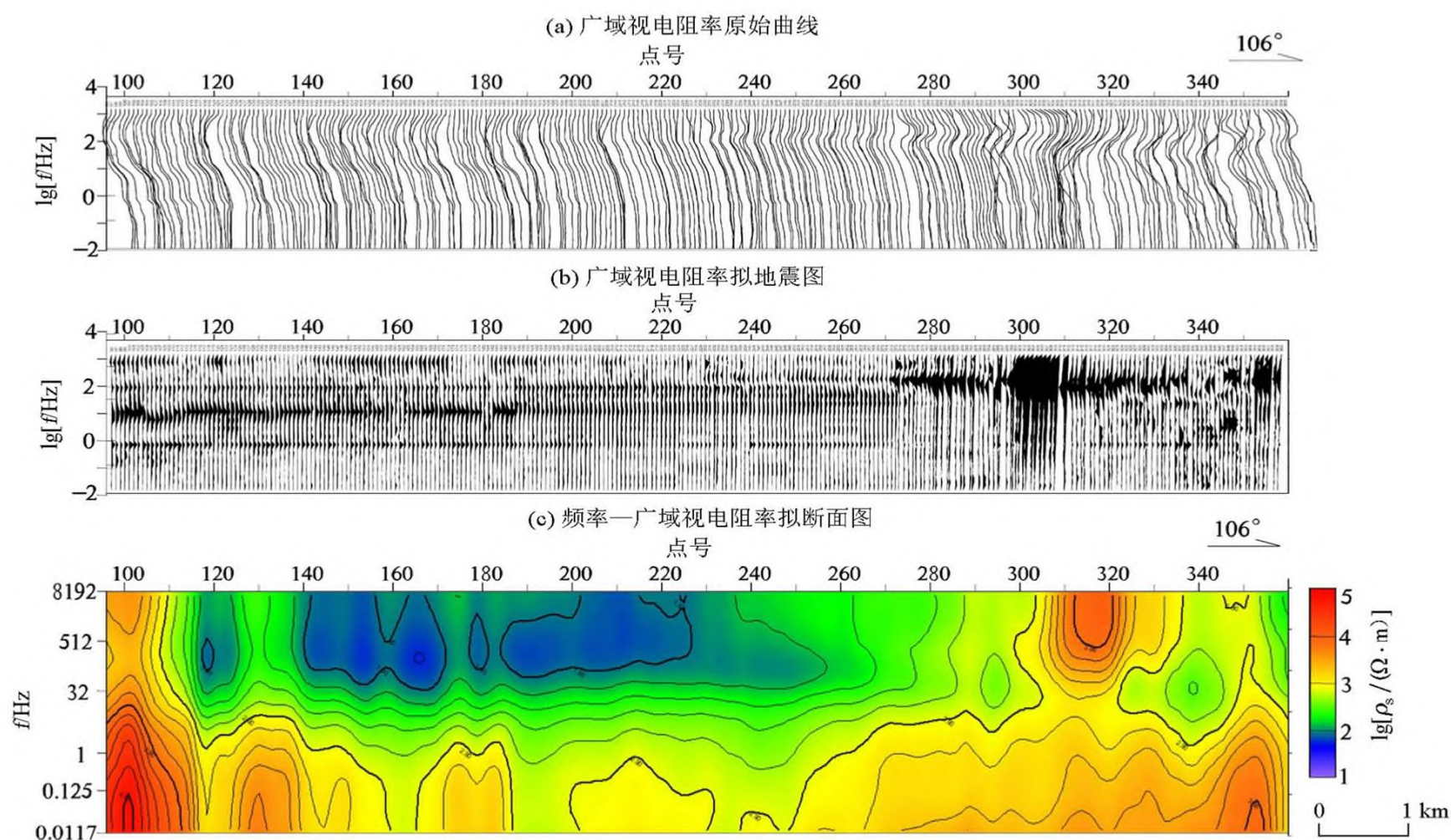


图 5 GY-01 线广域电磁法定性分析

Fig.5 Qualitative analysis diagram of wide field electromagnetic of GY-01 line

三山岛断裂蚀变带:在断面西端 95~140 点、深度 1 000~4 000 m 之间,广域反演断面显示一倾向东的低阻带,低阻带产状略陡,深部变缓变宽,且与东部焦家带引起的低阻带相交。该低阻带为三山岛断裂带引起,该断裂带倾向 SE,倾角 30°~40°,局部可达 75°,断裂带在测线范围内发育于玲珑花岗岩体内。

西由断裂:位于断面中部 190 点附近,深度 1 000~2 000 m 左右,等值线表现为近水平的梯级带向下弯曲转折,梯级带倾向 SE, ρ 西高东低,且在 195 点深度 1 500 m 左右出现一等值线同向弯曲的“U”字型低阻,推断为西由断裂带的反映。该断裂带倾向 SE、倾角 60°左右。浅部发育在栖霞序列中,深部进入玲珑花岗岩体,验证钻孔深约 1 500 m 见到了较厚的断裂蚀变带。

后邓家断裂:位于剖面西部 160 点附近,广域断面反演结果在浅部呈层状展布,致使断裂在浅部反应不明显,在 160 点深度 1 000 m 以下等值线为同向弯曲的“U”字型低阻。

F6 断裂:位于剖面中部,在 ZK01 孔 620 m 左右见破碎带、断层泥,该断裂浅部在 230~240 点等值线表现为缓慢的向下转折弯曲,1 000 m 以下在 240~250 点之间等值线同向弯曲。断裂发育在新太古

代变质变形体内。

在剖面东部 300 点以东,2 000 m 以下,圈定两条西倾的低阻带,由于该地段位于金矿采矿区,受干扰严重,可靠程度低,且位于岩体深部,暂未进行研究。

4.2.2 地层、岩浆岩展布

剖面范围内岩性比较简单,浅部除低阻第四系、局部中低阻的胶东群变质岩残留体外,主要为新太古代变质变形岩体,均为中低阻特征,与断面浅部的 800 $\Omega \cdot m$ 以下的中低阻分布区大体一致,除东部采矿干扰区出现高阻外,断面浅部的中低阻基本反映了变质变形岩体的展布。

该区深部主要为玲珑花岗岩体,表现为相对高阻特征,与断面中深度 1 000 m 以下,电阻率 1 000 $\Omega \cdot m$ 以上高阻的分布大体一致。高阻中的局部低阻带为岩体内或接触带附近发育的断裂蚀变带。

4.2.3 三山岛与焦家断裂带深部相互关系

焦家断裂带与三山岛断裂带是构成胶西北金矿控矿断裂构造体系的主要区域性控矿构造,两断裂倾向相反,表现出铲式断裂特征。广域电磁法试验在两大成矿带深部均表现为明显的相对低阻特征,是目前在该区 5 km 深度勘探深度,断裂蚀变带特征较明显的地面地球物理方法之一。据广域电磁深部

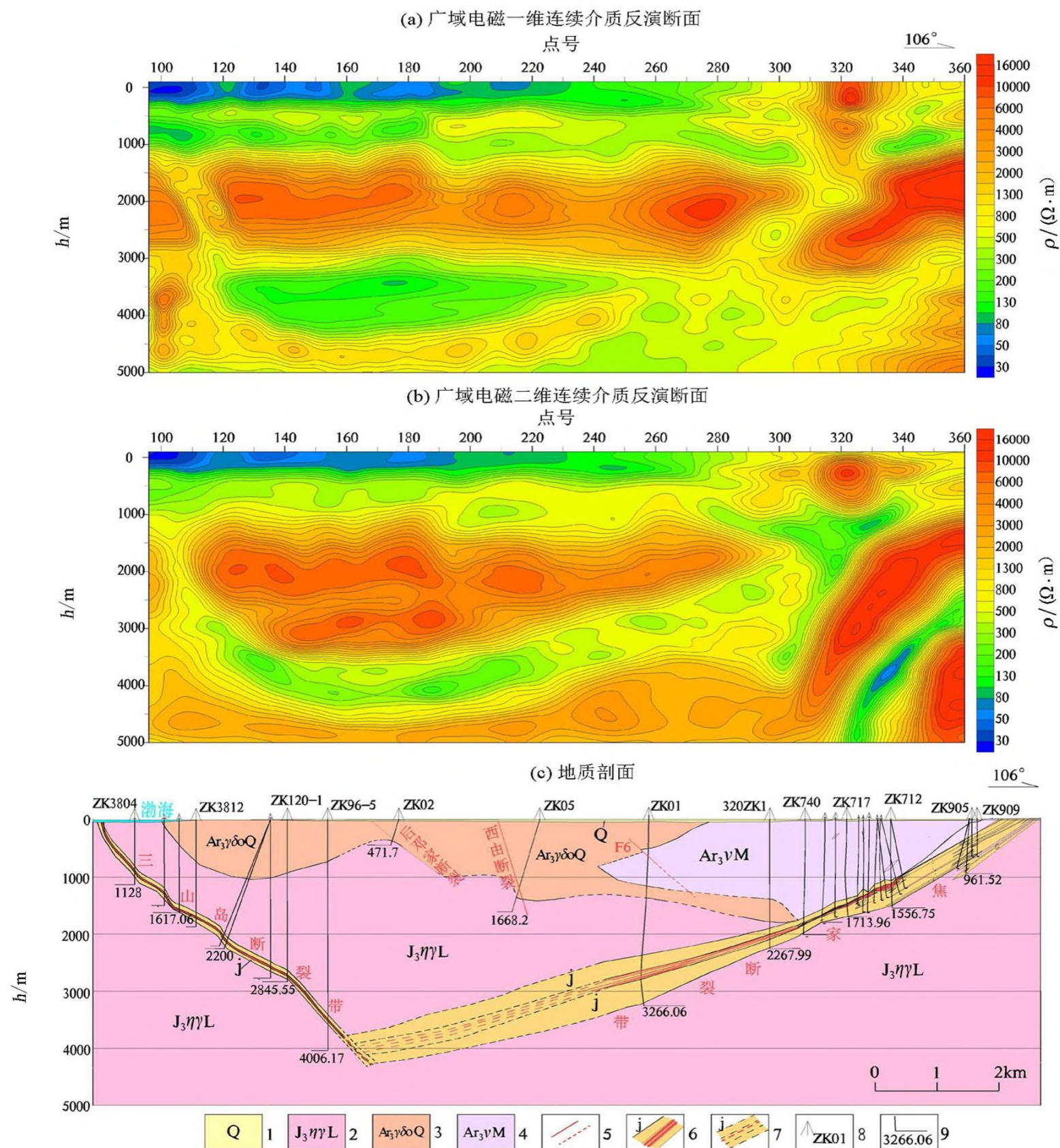


图6 GY-01线广域电磁法反演解释

Fig.6 Inversion and interpretation of wide field electromagnetic method of GY-01 line

探测结果,焦家断裂带与三山岛断裂带在位于西由—吴家庄子—原家一线附近深部相互交汇,交汇深度大致在地表以下4 000 m左右。根据一维反演断面深部低阻带变宽,推断交汇部位破碎带厚度较大。

5 结论及讨论

1) 广域电磁法在胶西北岩浆岩分布区探测低阻断裂带具有较好的效果,且探测深度大,是该区深部探测很好的非震地球物理方法,能够对地下5 000

m 以上的断裂构造的变化规律进行识别。以往探测玲珑岩体内的断裂带, MT、CSAMT 等方法的 ρ 等值线仅表现为由浅到深逐渐增大的过渡带特征, 而广域 ρ 等值线反映为高阻中的低阻带, 刻画低阻断裂带与高阻岩体特征明显。

2) 深部探测需要目标体具有一定的规模和明显的物性差异, ZK01 深钻揭示焦家断裂带深部厚度增大至 800 多 m, 能够在高阻中形成低阻带反映, 而像浅部一些规格较小的断裂只能引起 ρ 等值线的转折、弯曲等。

3) 广域电磁法采用伪随机多频信号发射, 仅需要观测电场信号便能达到相应的勘探效果, 在胶西北人文干扰大且复杂区能够取得较好的效果, 说明目前该方法抗干扰能力优于其他电(磁)法。

4) 随着探测深度的增加, 对“矿体”的分辨能力降低, 深部找矿应由找“异常”、找“矿体”模式, 转为探测成矿地质体、赋矿结构面, 再根据成矿规律圈定成矿有利地段。研究区金矿多赋存在断裂倾角的平缓部位和陡缓转折部位, 这就需要进一步提高广域电磁法野外采集精度, 改进反演处理技术, 结果能较准确地刻画断裂带的“赋矿台阶”。

5) 广域电磁法也随探测深度的增大, 分辨能力降低。本次研究中, 广域电磁法反映了成矿带在深部交汇, 但对交汇型式无法识别, 而以往深反射地震认为研究区以三山岛断裂为主, 该断裂继续向深部延伸, 有待今后进一步研究。

6) 部分地段反演深度与钻孔揭露深度存在偏差, 同时剖面部分地段尤其是浅部, 反演的电阻率呈层状展布, 不符合岩浆岩分布区电阻率断面特征, 需要以后在算法及反演方面进一步研究改进。

参考文献 (References):

- [1] 吕庆田, 张晓培, 汤井田, 等. 金属矿地球物理勘探技术与设备: 回顾与进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3629–3664.
Lyu Q T, Zhang X P, Tang J T, et al. Review on advancement in technology and equipment of geophysical exploration for metallic deposits in china [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(10): 3629–3664.
- [2] 何继善. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1809–1816.
He J S. Theory and technology of wide area electromagnetic exploration with large depth and high precision [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1809–1816.
- [3] 何继善, 李帝铨. 深地探测尖兵——广域电磁法[J]. 国土资源科普与文化, 2019(3): 4–9.
He J S, Li D Q. Deep exploration spear—Wide area electromagnetic method[J]. Science Popularization and Culture of Land and Re-

- sources, 2019(3): 4–9.
- [4] 李帝铨. $E-E_x$ 和 $E-E_\phi$ 广域电磁法测量范围[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(6): 1315–1323.
Li D Q. Measurement range of $E-E_x$ and $E-E_\phi$ wide field electromagnetic [J]. OGP, 2017, 52(6): 1315–1323.
- [5] 索光运, 李帝铨, 胡艳芳. 基于解析雅克比矩阵的 $E-E_x$ 广域电磁法一维并行约束反演[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(1): 55–61.
Suo G Y, Li D Q, Hu Y F. One-dimension parallel constrained inversion of $E-E_x$ wide field electromagnetic method based on analytical jacobian matrix [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 41(1): 55–61.
- [6] 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. Inversion scheme evaluation of wide-field electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(4): 492–500.
- [7] 吴桐, 李帝铨, 索光运, 等. 广义 S 变换时频分析在广域电磁法数据处理中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(3): 379–385.
Wu T, Li D Q, Suo G Y, et al. Application of time-frequency analysis of generalized S-transform in data processing of wide area electromagnetic method [J]. Calculation Technology of Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 41(3): 379–385.
- [8] 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. A comparison of wide field electromagnetic method with CSAMT method in strong interferential mining area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(5): 967–972.
- [9] 于学峰, 杨德平, 李大鹏, 等. 胶东焦家金矿带 3 000 m 深部成矿特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2019, 35(9): 2893–2910.
Yu X F, Yang D P, Li D P, et al. Mineralization characteristics and geological significance in 3 000 m depth of Jiaojia gold metallogenic belt, Jiaodong Peninsula [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(9): 2893–2910.
- [10] 宋明春, 伊丕厚, 崔书学, 等. 胶东金矿“热隆—伸展”成矿理论及其找矿意义[J]. 山东国土资源, 2013, 29(7): 1–12.
Song M C, Yi P H, Cui S X, et al. Metallogenic theory of “thermal uplift extension” in Jiaodong gold deposit and its prospecting significance [J]. Shandong Land and Resources, 2013, 29(7): 1–12.
- [11] 熊玉新, 于学峰, 迟乃杰, 等. 焦家金矿带 3000m 科研深钻地球物理测井及初步分析[J]. 山东国土资源, 2018, 34(5): 66–73.
Xiong Y X, Yu X F, Chi N J, et al. Geophysical logging and primary analysis of scientific research deep drilling at the depth of 3 000 m in Jiaojia gold belt [J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(5): 66–73.
- [12] 孙求实, 袁杰, 宗文明, 等. 广域电磁法在辽西地区牛营子凹陷油气资源潜力评价中的应用[J]. 物探与化探, 2019, 43(1): 64–69.
Sun Q S, Yuan J, Zong W M, et al. The application of wide field electromagnetic method to the oil and gas exploration of Niuyingzi

- sag in Liaoxi area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(1): 64–69.
- [13] 孙春岩,唐饶,赵浩,等.广域电磁法在洞庭盆地北部生物气勘探中应用及远景靶区预测[J]. *地学前缘*, 2018, 25(4): 210–225.
- Sun C Y, Tang R, Zhao H, et al. Application of wide area electromagnetic method in biogas exploration in the north of Dongting Basin and prediction of prospective target area[J]. *Earth Science Frontier*, 2018, 25(4): 210–225.
- [14] 孟凡洋,包书景,陈科,等.基于广域电磁法的页岩气有利区预测——以渝东北巫山地区为例[J]. *物探与化探*, 2018, 42(1): 68–74.
- Meng F Y, Bao S J, Chen K, et al. The prediction of shale gas favorable area based on wide area electromagnetic method: A case study of Wushan area in northeast Chongqing[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(1): 68–74.
- [15] 张乔勋,李帝铨,田茂军.广域电磁法在赣南某盆地油气勘探中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(5): 1085–1092.
- Zhang Q X, Li D Q, Tian M J. Application of wide area electromagnetic method in biogas exploration in the north of Dongting Basin and prediction of prospective target area [J]. *OGP*, 2017, 52(5): 1085–1092.
- [16] 曹彦荣,宋涛,韩红庆,等.用广域电磁法勘查深层地热资源[J]. *物探与化探*, 2017, 41(4): 678–683.
- Cao Y R, Song T, Han H Q, et al. Exploration of deep geothermal energy resources with wide field electromagnetic method[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(4): 678–683.
- [17] 胡艳芳,李帝铨.广域电磁法在安徽铜陵冬瓜山铜矿区的应用研究[C]//中国地球物理学会, 2015: 21–24.
- Hu Y F, Li D Q. Application of wide area electromagnetic method in Dongguashan Copper Mine, Tongling, Anhui Province [C]// *Proceedings of 2015 China Geoscience union annual meeting*, 2015: 21–24.
- [18] 何继善,李帝铨,戴世坤.广域电磁法在湘西北页岩气探测中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(5): 1006–1012.
- He J S, Li D Q, Dai S K. Application of wide area electromagnetic method in shale gas exploration in the north of West Hunan [J]. *OGP*, 2014, 49(5): 1006–1012.

The application of wide field electromagnetic method to deep exploration in Jiaoxibei (northwest Shandong) gold concentration area

WANG Hong-Jun^{1,2}, XIONG Yu-Xin³

(1. *Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Jinan 250013, China*; 2. *Shandong Geological Exploration Engineering Technology Research Center, Jinan 250013, China*; 3. *Shandong Geological Science Research Institute, Jinan 250013, China*)

Abstract: Jiaojia and Sanshandao fault zones are famous gold ore-forming zones in Jiaoxibei region. In recent years, the deep exploration results are remarkable. At present, the borehole has reached the depth of 4 006 m. The previous geophysical exploration methods have poor deep exploration effect, so effective deep exploration geophysical technology is urgently needed. The wide field electromagnetic method is applied to the known section of Jiaojia and Sanshandao fault zones. The section reveals that the characteristics of the low resistance zone formed by the two major fault zones are obvious, which truly reflects the distribution of underground electricity; the distribution of apparent resistivity high resistance and low resistance reflects the distribution of Linglong granite body and metamorphic rock mass; meanwhile, the section clearly shows the intersection of the two major faults at a depth of 4 km. The section provides the basis for the fault characteristics between Sanshandao and Jiaojia faults. The application test shows that the wide area electromagnetic method has a large detection depth and strong anti-interference capability, and hence it is a good non-seismic geophysical method for detecting the low resistance fault zone in the magmatic rock distribution area of Jiaoxibei region.

Key words: wide field electromagnetic method; Jiaoxibei region; deep exploration; magmatic rock distribution area; Jiaojia fault zone

(本文编辑:蒋实)