

音频大地电磁测深反演南沙新区地下空间岩性构造特征

陈松¹, 陈长敬¹, 黄理善², 赵信文¹, 曾敏¹

CHEN Song¹, CHEN Chang-Jing¹, HUANG Li-Shan², ZHAO Xin-Wen¹, ZENG Min¹

(1.中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 武汉 430205; 2.中国有色桂林矿产地质研究院, 广西 桂林 541000)

(1. Wuhan Center of Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. China Nonferrous Metals (Guilin) Geology and Mining Company Limited, Guilin 541000, Guangxi, China)

摘要:查明区域地下空间岩性构造特征,可反映下伏岩性变化、断裂空间分布,对基础地质研究、地下空间开发建设均有较大意义。借助音频大地电磁测深(AMT)技术,采用点测观测方式,通过后期二维反演,可获取连续的研究区二维地电断面结果。通过对广州南沙新区实测的2条长剖面数据进行噪音剔除、静态效应校正,并利用SCS2D软件进一步精细处理反演,结果如下:(1)万顷沙下伏空间存在岩性从晚三叠世花岗岩($T_3\gamma$)过渡到莘庄村组(E_1x)砂砾岩,再出现晚三叠世花岗岩($T_3\gamma$)发育的过程,局部莘庄村组砂砾岩埋深超过500 m未见底,有较大范围砂砾岩红层覆盖在花岗岩顶部;(2)推断了2处隐伏断裂(F1、F2),均为东西走向,断裂位置与区域地质资料较为吻合;(3)利用SCS2D反演软件能较好地反应剖面整体电性特征、突出局部异常,对断裂构造、岩性变化有较准确的刻画;(4)采用AMT作为勘探万顷沙地区特殊地形地貌的地球物理手段,具备测点布置灵活、勘探深度大、反演分辨率高等优点,能快速查明该区地下空间岩性、构造特征。

关键词:地下空间;音频大地电磁;反演;岩性;构造;广州南沙新区

中图分类号:P631.3

文献标识码:A

文章编号:1007-3701(2020)03-0246-08

Chen S, Chen C J, Huang L S, Zhao X W and Zeng M. Study on Lithology-Structure Characteristics of Underground Space in Nansha New Area by Inversion of Audio Magnetotelluric Sounding. *South China Geology*, 2020, 36(3):246-253.

Abstract: Finding out the lithology-structure characteristics of regional underground space can reflect the underlying lithology changes and spatial distribution of faults, which is of great significance to the basic geological research and the development and construction of underground space. With the aid of the audio magnetotelluric sounding (AMT) technology, continuous two-dimensional geoelectric section results in Nansha New District, Guangzhou City can be obtained by using point observation method and two-dimensional inversion. Through the noise elimination and static effect correction of the two measured long profile data, and further fine processing inversion by using the SCS2D software, it is concluded that: (1) In the underlying space of Wanqingsha area, there is a process of lithology transition from granite of Late Triassic to sandstone conglomerate of Xinzhuangcun Formation, and then the occurrence of granite of Late Triassic. The burial depth of local sandstone conglomerate of Xinzhuangcun Formation is more than 500 m, and there is a large range of red sandstone conglomerate layer covering the top of granite; (2) It is inferred that the two buried faults (F1 and F2) are in E-W trend, and the lo-

收稿日期:2020-6-8;修回日期:2020-6-20;责任编辑:董好刚

基金项目:中国地质调查局“广州多要素城市地质调查”项目(DD20190291)资助

第一作者:陈松(1985—),男,工程师,硕士,主要从事地球物理勘查与研究工作, E-mail: anhuisonchen@163.com

cation of the faults is consistent with the regional geological data; (3) The SCS2D inversion software can better reflect the overall electrical characteristics of the profile, highlight local anomalies, and accurately describe the fault structure and lithology changes; (4) AMT, as a geophysical means to explore the special topography of Wangqingsha area, has the advantages of flexible layout of survey points, large exploration depth, high inversion resolution, and can quickly identify the lithology and structure characteristics of underground space.

Key words: underground space; audio magnetotelluric; inversion; lithology; structure

音频大地电磁测深 (Auto magnetotelluric sounding, 简称 AMT) 是一种较为成熟的地球物理勘探方法, 广泛应用在诸如地质构造、矿产、页岩气、天然气水合物、冻土、海水入侵、水资源等勘查领域。

谭红艳等利用音频大地电磁测深技术对鄂东南丰山隐伏矿体靶区进行了定位预测, 发现了隐伏金属矿体, 实现了危机矿山区深部找矿突破^[1]。朱自串等分析了老挝万象盆地呵叻钾盐矿 AMT 二维反演剖面, 指出高阻凸起反映了盐岩层隆起全貌、顶板埋深, AMT 资料可为找矿靶区优选、定孔位提供依据^[2]。渝东南锰矿靶区勘查深度加大, 需要借助音频大地电磁法认识区内地堑构造, 何帅等根据 AMT 电性特征, 划分了小茶园、楠木庄地堑构造, 提供了锰矿深部勘查的方向^[3]。刘祐等、吴翔等均分析了盆地页岩气调查中 AMT 的应用效果, AMT 反演资料可给出页岩层的埋藏深度、厚度、分布特征^[4-5], 为盆地页岩气评价、钻孔位置选址提供部署依据。方慧等在青藏高原永久冻土区开展了音频大地电磁测深探测天然气水合物的试验, 结果表明天然气水合物矿体呈现水平分布的高阻特征^[6]。何梅兴等根据 AMT 反映的电性结构特征, 圈定了祁连山哈拉湖地区凹陷区、凸起区与断裂构造, 进一步分析了冻土特征^[7]。严小丽等在鳌山卫地区布置了 AMT 方法, 得到了 2000 m 以浅的电性结构, 划定的断裂构造为钻孔布置提供了依据^[8]。武斌等阐述了 AMT 技术是一种有效的勘查地热资源的手段^[9]。红层基岩赋存多种形式的水体, 郭健强等开展了怀化地区红层找水的研究, 利用音频大地电磁测深可较好的划定异常特征, 达到与钻井验证一致的勘探结果^[10]。杨学明等利用音频大地电磁法监测莱州湾地区海水动态, 认识到该技术可划分咸淡水界面, 监测界面的运移规律^[11]。

音频大地电磁测深在上述领域应用中均是反

演地下空间二维电阻率分布特征, 进而推断岩性、构造变化, 本文依托城市地质调查需要了解地下空间岩性的变化、断裂构造的分布, 同样可借鉴该方法, 查明 500 m 以浅的地质构造特征。研究区域位于珠江入海口, 南沙中部地区, 目前开展过较多的常规电法工作, 电磁法手段应用的较少, 借助音频大地电磁法采集手段灵活、工作效率高, 对该区开展长剖面的试验研究, 取得了较好的勘探效果。

1 研究区位置与地形地貌

广州南沙新区地处粤港澳大湾区几何中心, 位于广东省广州市地理位置南端(图 1), 南处珠江入海口, 被沙湾水道、狮子洋、洪奇沥水道围绕, 与东莞市、中山市相对, 面向伶仃洋。该区为广东省珠江三角洲冲积平原的腹地, 城市化程度较高, 为海上丝绸之路的起点, 国内外著名的经济发展地区, 同时也是连接港澳的节点。

南沙新区地貌多表现为三角洲冲海积、人工堆积平原, 其中黄阁镇、南沙街等地分布隆起的丘陵或台地, 丘陵主要为分散分布的剥蚀残丘, 地台处于丘陵的边缘地带。珠江河口被大量泥沙淤积, 加上龙穴岛、新垦镇、万顷沙镇大面积的人工填海造地, 形成宽缓的平原区地貌。平原区地势整体呈现北高南低、地面平均标高较低特点。

2 地质地球物理特征

南沙新区地层隶属华南地层大区东南地层区中的东江地层分区。区内地层由老至新有元古宇、白垩系、古近系及第四系。其中, 第四系分布最广。从垂向上分析, 第四系从下至上可划分为礼乐组(Qpl)、桂洲组(Qhg)。地表只大面积出露桂洲组灯笼沙段(Qhg^d)砂质粘土、粉砂质淤泥等。莘庄村组

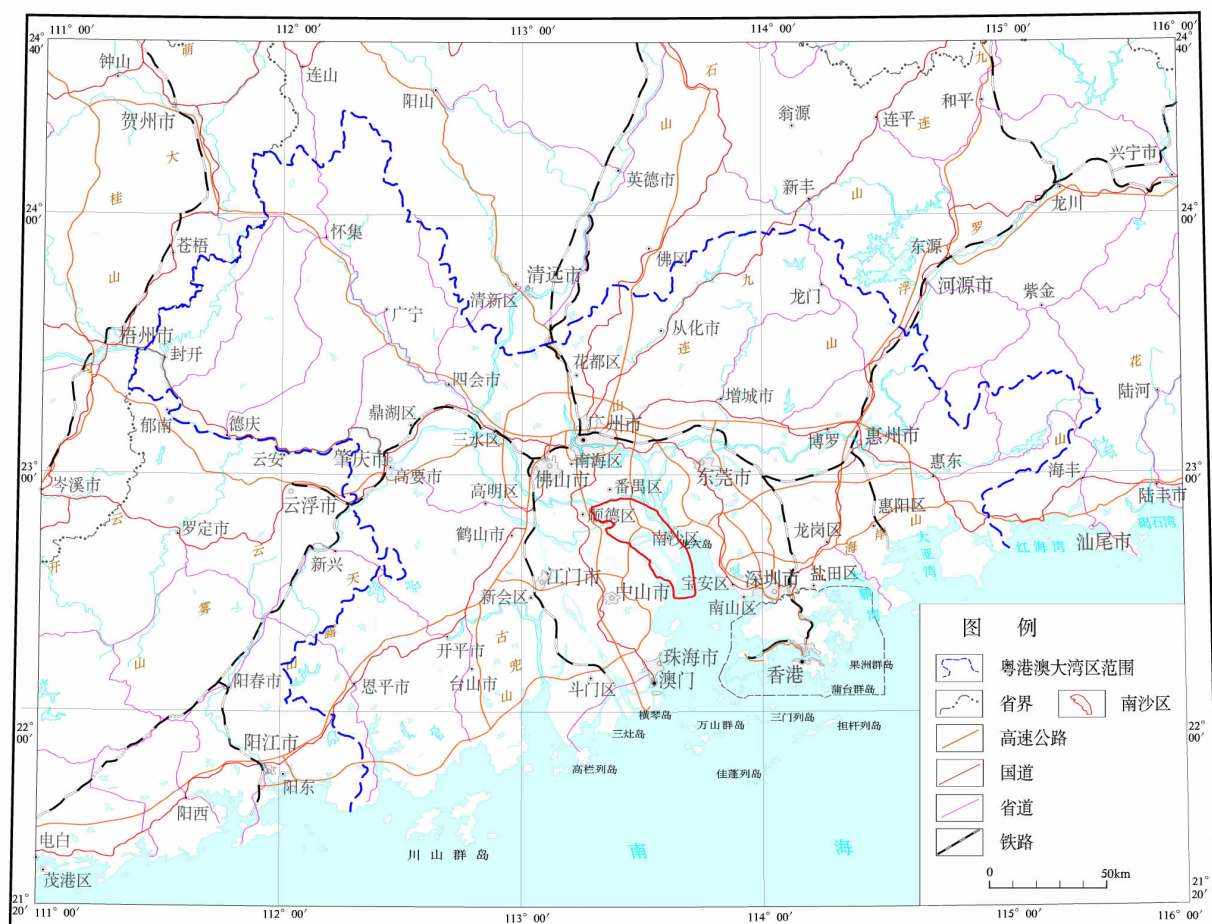


图1 研究区交通位置图

Fig. 1 Traffic location map of study area

(E_{1x})出露于万顷沙镇、东涌镇-黄阁镇一带,为冲洪积相砾砂沉积、湖泊相砾砂泥建造,岩性主要为砖红及紫红色砾岩、砂砾岩、砂岩、粉砂岩,局部含钙质。三叠纪岩体($T_3\gamma$)岩性为中细-细中粒斑状黑云母二长花岗岩,为酸性侵入岩。

南沙新区区域性东西向断裂、北西向断裂和北东向断裂相互切割,控制了南沙新区地貌形态、基底断块的形状,构成了断裂构造格架。东西向断裂以南沙-东莞断裂为主,北东向断裂以新会-市桥断裂带为主干断裂,北西向断裂发育有白坭-沙湾断裂带、狮子洋断裂组,具一定活动迹象。

通过收集常规电法及电磁法勘探剖面资料,揭示研究区覆盖层视电阻率值集中在 $2\sim 250\ \Omega\cdot m$,花岗岩视电阻率值在 $700\sim 2500\ \Omega\cdot m$,砂岩视电阻率值在 $300\sim 1200\ \Omega\cdot m$ 。研究区具有明显的电性差异,可为区分空间岩性分布特征提供依据。

3 工作方法与数据处理

3.1 工作方法

研究区地形地貌特点为人工填埋造地,每间隔 1 km 左右开挖 1 条宽 50~100 m 不等的涌沟,整个测区分布 1 涌至 19 涌共 19 条涌沟,常规电法勘探受制于野外采集方式制约,一般遇到障碍物尤其是万顷沙地区涌沟等阻隔,很难采集到连续的数据剖面,无法更全面的了解整个测区地下空间电性或者地质体的电性结构等重要信息。鉴于此,优先选择采集方式灵活、勘探深度大、横向分辨率高的音频大地电磁法,音频大地电磁测深采用点测模式,当遇到难以通过的障碍物,可以相对少量的丢点,最后数据成图时仍然能保持电阻率空间上的连续性,同时,音频大地电磁的测点采用 25 m 点距,点距比

较小,测点数量密,可以保障数据量支撑长剖面精度要求。

本文采用的是 EH4 连续电导率成像系统,其在地质矿产勘查、工程勘探等领域使用广泛,勘探效果较好。为从空间上控制整个研究区的岩性分布、构造展布形态,EH4 数据采集工作共布置 2 条长剖面(图 2),剖面长度分别为 3625 m、9625 m,其中 1 线横跨 3 涌-5 涌,2 线横跨 7 涌-14 涌。测点间距为 25 m,采集时长 20 分钟,垂直叠加 12 次。

3.2 数据预处理

音频大地电磁数据预处理主要包括压制强干扰,消除静态效应。音频大地电磁采集数据过程中或多或少会受到电磁噪声干扰,视电阻率-相位曲线发生畸变,影响数据质量,导致误判地下电性结构特征,采用一定手段压制干扰非常重要,压制强干扰方法主要有小波变换法、S 变换法、Hilbert-Huang 变换法、Robust 法、变分模态分解法、信号识别递归法、字典学习法等^[12-13],各种方法都有其压制干扰的特点。音频大地电磁实测环境中下伏地层通常发育不均匀地质体,局部不均匀体产生与外电场

强度正相关的附加电场,周围电流密度明显区别于其他测点,导致畸变视电阻率曲线,发生视电阻率曲线平移的静态效应。同时,地形、地貌的剧烈变化也会引起静态效应。静态效应主要表现为强度与深度呈负相关,主要影响电场数据,在垂向上密集陡立(挂面条现象),横向上影响范围小,会造成视电阻率曲线的整体移动但不改变曲线形态^[14]。

目前主要采用数字滤波技术来处理静态效应,包括小波分析、相位换算、曲线平移、空间滤波、首支重合等。较为常用的有曲线平移法,通过区分静态效应影响的曲线,整体平移达到恢复真实位置,该方法需要了解背景场、静态位移的程度。

本文采用首支重合法,消除不均匀地质体引起的局部假异常数据,提高实测数据质量。如图 3,本次实测的一段 AMT 数据在静校正之前,局部畸变非常明显,出现密集垂向陡立数据,经过静校正后压制了电阻率畸变现象,反演电阻率分布均匀连续,解译的电性结构信息更为真实,符合地质规律。在多次资料处理过程中,需要比较处理结果与原始数据的曲线形态,判别处理过程正确与否,同时应



图2 研究区AMT测线布置图

Fig. 2 Layout of survey line of audio magnetotelluric in study area

评估多次处理引进的误差,保留或改善原始数据中的固有真实信息。

3.3 二维反演

音频大地电磁采集到的是时间域数据,需要经过傅里叶变换转换到频率域、计算功率谱、估算张量阻抗。音频大地电磁反演按模式可分为 TM 模式、TE 模式、TM+TE 模式,较多实例应用表明 TM+TE 模式联合反演的效果优于单模式的反演^[15],本位采用 TE+TM 模式联合反演。AMT 按主流的反演方法可分为 Occam 反演、NLCG 非线性共轭梯度反演、RRI 快速松弛反演。RRI 快速松弛反演算法利用静态效应校正量、视电阻率、相位、视电阻率及相位误差多参数参与反演,算法稳定,缺点是侧重于计算速度,复杂地电断面的拟合效果较差^[16]。Occam 反演属于光滑模型反演,具有稳定收敛特点,唯一

性反演的主要方法,但是需要计算雅克比矩阵,反演耗时。NLCG 非线性共轭梯度则无需计算雅克比矩阵和其转置矩阵,节省计算时间,缺点是比较依赖初始模型^[17-18]。实际资料处理中根据一维 Occam 反演数据为初始模型,形成二维地电断面,采用 NLCG 非线性共轭梯度算法对二维地电断面进行二维反演,得到的结果更接近真实构造^[19-20]。

4 研究区岩性构造分析

4.1 视电阻率-相位曲线分析

本次音频大地电磁测深工作采集到的测点视电阻率曲线和相位曲线整体均较圆滑,畸变频点少,I 级质量(数据曲线连续性好,能严格确定曲线类型)测点占总测点 71%(图 4),II 级质量(数据曲

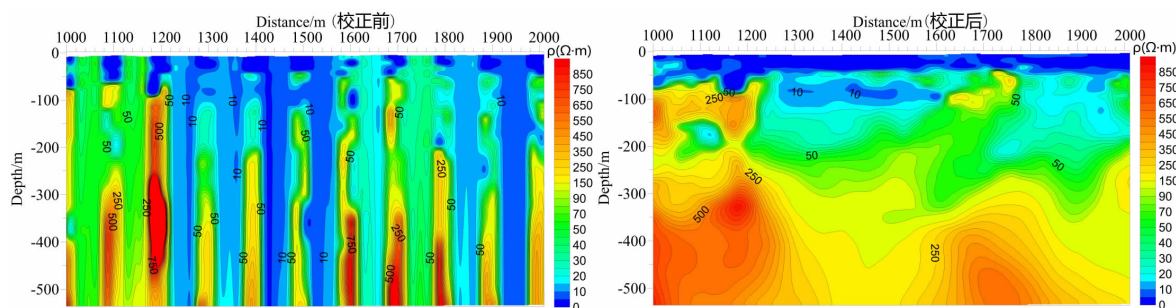


图3 静态校正前后电阻率反演断面图

Fig. 3 Resistivity inversion section before and after static correction

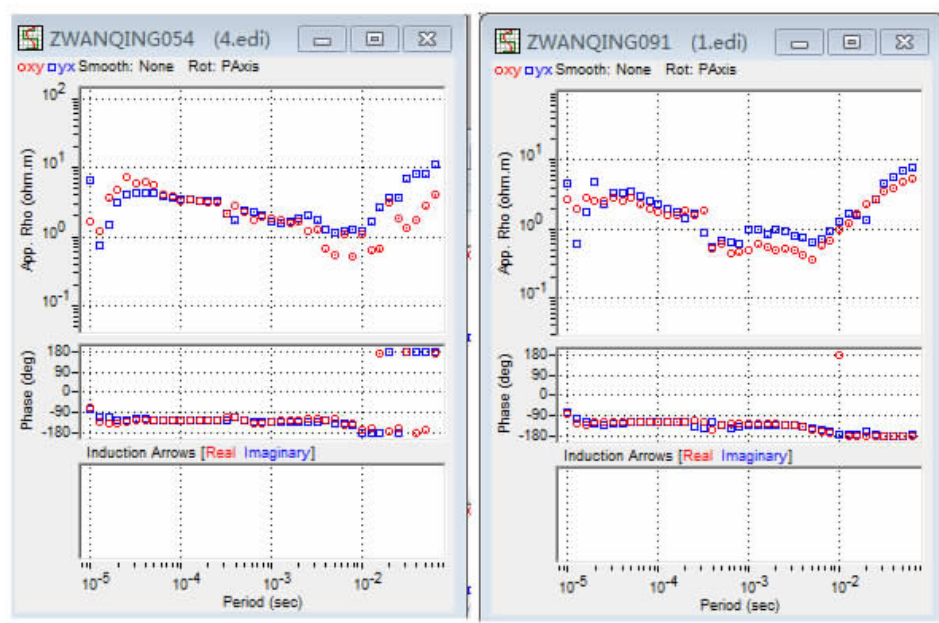


图4 I级质量测点视电阻率-频率、相位-频率曲线

Fig. 4 Apparent resistivity-frequency and phase-frequency curves of grade I quality measuring point

线无明显脱节现象,曲线形态明确)测点占总测点24%,因测区位于城市人口密集地段,区内存在大量干扰因素,如民房、高压输电线路、厂房、公路等,所以也存在部分III级质量(数据点分散,不能满足II级的要求)测点约占总量的5%,这部分数据点经过重复观测,仍无法提高数据采集质量,进行数据处理时需剔除这部分数据,总体分析,本次工作数据采集质量较高,满足后期进一步反演的精度要求。

4.2 二维长剖面地质构造分析

目前处理大地电磁的软件主要有美国 Zone 公司 SCS2D、加拿大凤凰公司 SSMT2000、意大利 Geosystem 公司 WinGlink 系统、成都理工大学开发的 MTSOFT2.0、吉林大学 GeoElectro 等,每款软件都有其特色模块。本文二维剖面数据处理采用 TE+TM 模式联合反演,准备点位信息文件(*.STN)、状态信息文件(*.MDE)、数据文件(*.AVG),根据 AVG 文件,进行选择是否采用静态校正,设置正反演参数,利用 SCS2D 软件进行数据反演。利用一维圆滑模型反演结果或者移动平均视电阻率生成背景电阻率,加上约束条件如钻孔资料或者已知地质信息,作为初始模型进行反演。调节模型单元的电阻率值,计算电阻率与阻抗相位拟合观测值的误差。圆滑模型反演将观测数据转换为目标体的电阻率断面模型,是反演电阻率模型断面的可靠方法。

对1线、2线音频大地电磁数据剔除噪音、静态校正,再进行精细二维反演,反演结果如图5-图7。

图5为1线音频大地电磁反演成果图,剖面长度达3625 m。结合测线地质背景,剖面表层蓝色区域反应的为灯笼沙段(Qh_2^{dl}),电阻率较低,下伏黄色-红色区域反应的为 $T_3\eta\gamma$ 花岗岩,岩体电阻率较高,从剖面横向上分析,里程600-900 m段,接

近3涌位置,有相对较为完整的块状高阻区,推断为 $T_3\eta\gamma$ 花岗岩岩体出露;里程1200-1400 m段,深度100-300 m区域,出现局部低阻区域,推断为地层局部凹陷现象,测线3230 m位置处,深度150-280 m区域出现较低电阻率区域,较大可能是储水构造带,测线的2500-2700 m段共200 m长范围下伏岩性整体为低电阻区,分析可能是早期的古河道。

总结1线的音频大地电磁结果,基本确定了2涌到6涌之间下伏100-500 m地层的电性结构,电阻率整体呈现第四纪地层低于 $250 \Omega \cdot m$,下伏隐伏 $T_3\eta\gamma$ 花岗岩电阻率大于 $300 \Omega \cdot m$,下伏基岩电阻率参数横向上并无明显渐变特征,说明2涌至6涌之间地下空间基岩岩性主要表现为晚三叠世花岗岩,无明显的断裂构造发育特征。

2线空间展布较长,分3段解释,如图6所示。

对比6涌-14涌 AMT 的电阻率反演结果,测线1200-4800 m(7涌、8涌、9涌、10涌)段的下伏岩体电阻率值明显低于6涌、11涌-14涌,结合8涌钻孔(位置见图6(a))资料,该钻孔进尺到500 m位置仍未打穿红层地层,以钻孔所在位置电性特征为标定依据,横向对比剖面电阻率空间分布规律,推断该区域岩性不同于其他几涌。因此,结合区域地质资料对2线地下空间岩性划定分区,可揭示7涌、8涌、9涌、10涌发育的是莘庄村组(E_{px})砂砾岩,其中9涌有小范围的花岗岩地层发育,其他几涌发育的是 $T_3\eta\gamma$ 侵入花岗岩。同时,分析反演断面图6(b),里程桩号5350-5600 m段、5800-6100 m段下伏空间也呈现出低于 $250 \Omega \cdot m$ 的电性特征,依据钻孔标定岩性,可解释为 $T_3\eta\gamma$ 侵入花岗岩上覆盖的莘庄村组(E_{px})砂砾岩。

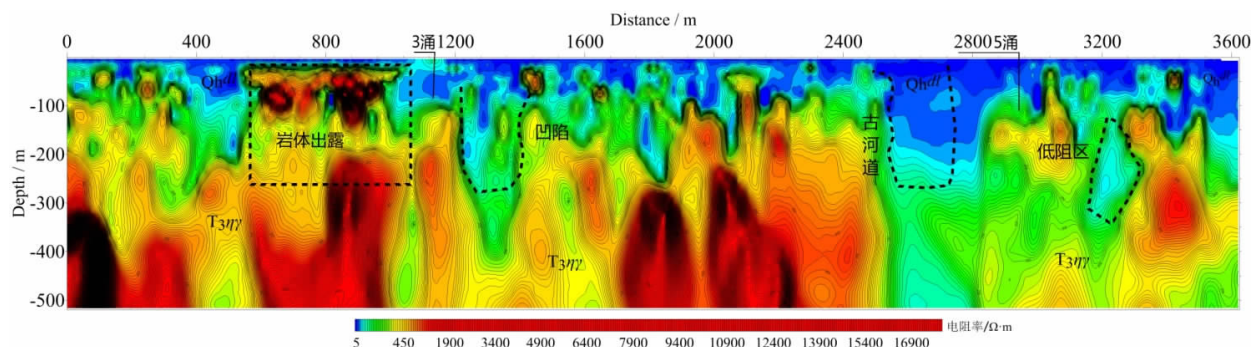


图5 1线音频大地电磁反演断面图

Fig. 5 Inversion section of line-1 audio magnetotelluric sounding

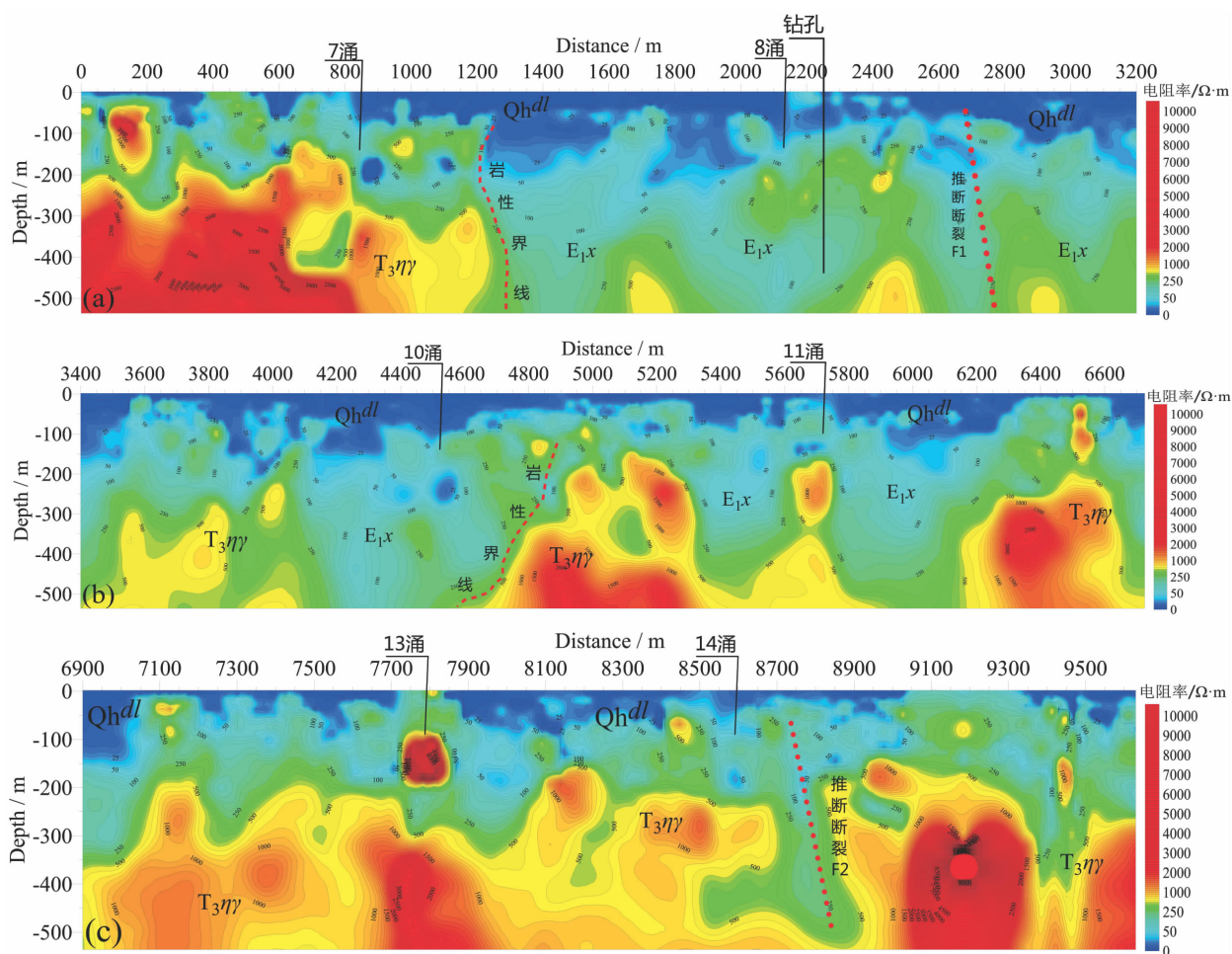


图6 2线音频大地电磁反演断面图(分3段显示)

Fig. 6 Inversion section of line-2 audio magnetotelluric sounding (display in 3 sections)

测线里程 8775 m 位置处, 下伏出现条带状低阻区域, 电阻率在 $50\text{--}200\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间, 两侧岩体的电阻率大于 $800\ \Omega\cdot\text{m}$, 综合整体电阻率分布形态, 推断此处为断裂构造带 F2, 测线里程 2700 m 位置处下伏空间电性特征分布, 也表现出了低阻条带现象, 可推断为断裂构造 F1, 两者位置与区域地质资料推断的断裂位置基本吻合。

因 2 线 AMT 反演结果电阻率变化范围大 (几

$\Omega\cdot\text{m}$ 到上万 $\Omega\cdot\text{m}$), 为断面上电阻率显示更为圆滑连续, 对反演电阻率取以 10 为底的对数值, 并成图 (图 7), 可见 2 线长剖面基本揭露了万顷沙地区 6–14 涌下伏地质体的岩石结构, 反应了岩性从晚三叠世($T_3\eta\gamma$)花岗岩到莘庄村组(E_1x)砂砾岩再到晚三叠世($T_3\eta\gamma$)花岗岩变化的过程, 局部莘庄村组砂砾岩埋深超过 500 m 未见底, 有较大范围砂砾岩覆盖在花岗岩顶部。

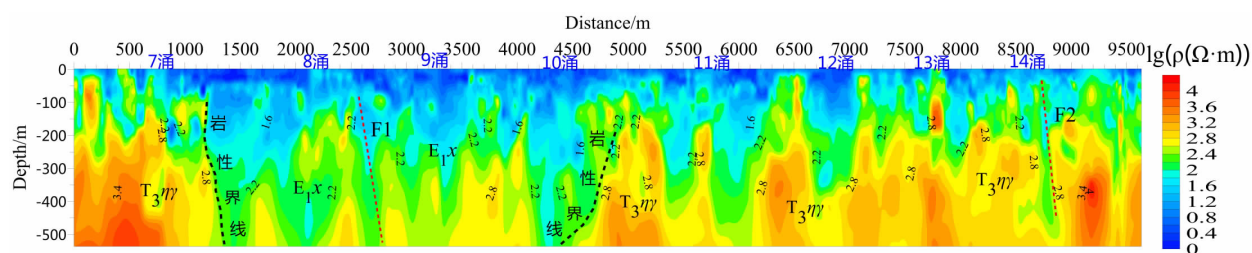


图7 电阻率取对数的反演断面

Fig. 7 Inversion section with logarithm of resistivity

5 结论

(1) AMT 采用点测观测方式,通过后期噪音压制、静态效应校正、二维反演等处理手段,可获得研究区特殊地貌(涌沟发育)下连续的二维地电断面结果。

(2) 利用 SCS2D 反演软件能较好反应剖面整体电性特征、突出局部异常,对断裂构造、岩性变化有较准确的刻画。

(3) 通过实测的 2 条 AMT 数据反演,结果表明万顷沙下伏空间存在岩性从晚三叠世($T_3\eta\gamma$)花岗岩过渡到莘庄村组($E_4\alpha$)砂砾岩,10 涌以后再出现晚三叠世($T_3\eta\gamma$)花岗岩发育的过程,局部莘庄村组砂砾岩埋深超过 500 m 未见底,有较大范围砂砾岩红层覆盖在花岗岩顶部;

(4) 推断了 2 处隐伏断裂(F1、F2),均为东西走向,断裂位置与区域地质资料较为吻合。

(5) 采用 AMT 作为勘探万顷沙地区特殊地形地貌的地球物理手段,具备测点布置灵活、勘探深度大、反演分辨率高等优点,能快速查明该区地下空间岩性变化与构造分布。

文章撰写过程中,中国地质调查局武汉地质调查中心罗士新教授级高工、董好刚教授级高工给予了宝贵的意见和建议,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 谭红艳,吕骏超,刘桂香,马诗敏,舒广龙,席振铎.EH4 音频大地电磁测深方法在鄂东南地区寻找隐伏矿体的应用[J].地质与勘探,2011,47(6):1133-1141.
- [2] 朱自串,周丹,李德文,余润龙.音频大地电磁测深法在老挝万象盆地钾镁矿产勘探中的运用效果[J].物探与化探,2019,43(6):1268-1276.
- [3] 何帅,杨炳南,李核良,潘文,凌云,李杰,张德实.音频大地电磁法对渝东南IV级地堑构造的识别与意义[J].地质科技情报,2019,38(1):270-276.
- [4] 刘祜,魏文博,程纪星,漆富成.音频大地电磁测深在江西修武盆地页岩气目标层研究中的应用[J].物探与化探,2015,39(5):904-908.
- [5] 吴翔,吴先文,周硕,刘金涛.音频大地电磁法在秭归盆地页岩气资源调查评价中的应用[J].工程地球物理学报,2017,14(4):392-400.
- [6] 方慧,裴发根,何梅兴,白大为,胡祥云,钟清,杜炳锐,

张小博,卢景奇.音频大地电磁测深法探测冻土区天然气水合物有效性实验[J].物探与化探,2017,41(6):1068-1074.

- [7] 何梅兴,裴发根,方慧,张鹏辉,刘畅往,杜炳锐,吕琴音,仇根根.音频大地电磁测深在祁连山哈拉湖凹陷天然气水合物调查中的应用[J].物探与化探,2017,41(6):1167-1174.
- [8] 严小丽,康慧敏,王光杰,何国丽,李红领.AMT方法在鳌山卫花岗岩地区深部地热构造勘探中的应用[J].地球物理学进展,2019,34(5):1945-1953.
- [9] 武斌,曹俊兴,邹俊.音频大地电磁测深法在康定小热水地热勘查研究中应用[J].物探化探计算技术,2011,33(5):507-510.
- [10] 郭健强,甘伏平,张伟,刘永亮,魏巍,朱超强.音频大地电磁法在怀化方石坪村红层找水中的应用研究[J].中国岩溶,2018,37(6):918-924.
- [11] 杨学明,苏永军,杜东,范剑,林星.音频大地电磁法在海水入侵动态监测中的应用[J].物探与化探,2013,37(2):301-305.
- [12] 李晋,张贤,蔡锦.利用变分模态分解(VMD)和匹配追踪(MP)联合压制音频大地电磁(AMT)强干扰[J].地球物理学报,2019,62(10):3866-3884.
- [13] 汤井田,李广,周聪,任政勇,肖晓,刘子杰.基于字典学习的音频大地电磁数据处理[J].地球物理学报,2018,61(9):3835-3850.
- [14] 彭乾云,周明平,张德全.静态校正技术在册亨县纳相金矿音频大地电磁法勘探中的应用[J].物探化探计算技术,2012,34(3):314-319.
- [15] 田占峰,毛星,罗旭,金胜,叶高峰.音频大地电磁测深法在电性结构研究中的应用—以庐断裂带宿迁段为例[J].物探与化探,2016,40(4):732-736.
- [16] 员智能.RRI方法在MT资料处理解释中的应用[J].石油地球物理勘探,2004,39(增刊):139-141.
- [17] 杨承志,邓居智,陈辉,洪思远,郭猛猛.背景电阻率对音频大地电磁法二维非线性共轭梯度反演结果的影响研究[J].工程地球物理学报,2013,10(2):138-143.
- [18] 周汝峰,王绪本,秦策,徐玉聪,张君涛,王瑞.大地电磁NLGG与OCCAM二维反演的综合利用[J].地球物理学进展,2016,31(5):2306-2312.
- [19] 杨炳南,周琦,杜远生,胡祥云,谢小峰,沈小庆,朱大伟,王家俊.音频大地电磁法对深部隐伏构造的识别与应用:以贵州省松涛县李家湾锰矿为例[J].地质科技情报,2015,34(6):26-32.
- [20] 张振宇,王绪本,方慧.龙门山构造带中段大地电磁测深研究[J].物探与化探,2012,36(3):377-381.