

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.01.014

广州南沙厚覆盖区近地表地层结构分析:基于二维地球物理多方法探测结果

陈松¹, 陈长敬¹, 罗士新¹, 刘圣博¹, 赵信文¹, 曾敏¹, 西永在²

CHEN Song¹, CHEN Changjing¹, LUO Shixin¹, LIU Shengbo¹, ZHAO Xinwen¹, ZENG Min¹, XI Yongzai²

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), 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000

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

2. Ministry of Natural Resources, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China

摘要:广州南沙地区的第四系覆盖层埋深、隐伏构造分布、下伏岩性特征直接影响该区重大基础工程建设。因地层结构成像地球物理方法适用性各不相同,基于该区域已有的工作基础,优选了高密度电法、微动、音频大地电磁测深(AMT)3种方法,辨识地层分布特征。基于各方法的采集参数试验、数据处理原理及处理步骤,以及探测南沙新区重点开发地区下的地下空间试验,总结了适合于探测该区域地下空间的3种物探手段。①高密度电法可较准确地分辨覆盖层与基岩分界面,反演的覆盖层深度与多处钻孔资料较吻合,可用多条剖面控制研究区的覆盖层厚度空间分布特征;②AMT探测深度大,在试验中有效探测深度达500 m,横向分辨率高,反演的电阻率断面可确定深部断裂和隐伏岩体分布;③微动探测抗干扰能力强,对特殊场地背景可进行无损探测,解译的视S波速度分层结构,剖面反映的分层效果好。结合剖面内的钻孔资料,采用高密度电法、微动、AMT探测,可从电阻率、横波速度多参数准确地辨识地下空间地层结构特征,为城市地下空间开发提供基础资料。

关键词:高密度电法;音频大地电磁;微动;城市地下空间结构;成像;地质调查工程

中图分类号:P631 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)01-0168-12

Chen S, Chen C J, Luo S X, Liu S B, Zhao X W, Zeng M, Xi Y Z. Near surface stratigraphic structure analysis in Nansha of Guangzhou thick overburden area: based on multi method results of 2D geophysics exploration. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(1): 168-179

Abstract: The buried depth of Quaternary overburden, the distribution of concealed structures and the underlying rock characteristics directly affect the major infrastructure construction in Nansha, Guangzhou. Compared with the previous work methods mainly relying on drilling to find out the near surface stratum structure, this paper uses nondestructive geophysical methods to detect the near surface stratum distribution characteristics, which is more environmentally friendly, green and convenient. The applicability of geophysical methods for stratigraphic structure imaging is different, based on the existing work foundation in this area, in this paper, three methods of high density resistivity method, microtremor and audio magnetotelluric sounding(AMT) are optimized to identify the characteristics of stratigraphic distribution. Based on the acquisition parameter test, data processing principle and processing steps of each method, as well as the underground space test in the key development area of Nansha new area, the experience of three geophysical exploration methods suitable for detecting the underground space in this area is summarized. ①High density resistivity method can accurately distinguish the

收稿日期:2021-02-20;修订日期:2021-12-20

资助项目:国家重点研发计划项目《地下水源智能可靠勘测关键技术及装备研发》(编号:2020YFC1512401)、国家自然科学基金项目《基于钻孔的地下水环境垂直结构分层探测与地层信息快速提取技术》(批准号:42107485)和中国地质调查局项目《广州多要素城市地质调查》(编号:DD20190291)

作者简介:陈松(1985-),男,硕士,高级工程师,从事地球物理勘查与研究。E-mail:anhuisongchen@163.com

interface between overburden and bedrock, and the inversion overburden depth is consistent with the data of many boreholes. Multiple profiles can be used to control the spatial distribution characteristics of the thickness of overburden in the whole survey area. ②AMT has a large detection depth, in this paper, the effective detection depth is up to 500 meters and the lateral resolution is high. Inversion of resistivity section can determine the distribution of deep faults and concealed rock mass. ③Microtremor detection has strong anti-interference ability, it can be used for nondestructive detection of special site background. The interpreted apparent S-wave velocity layered structure has good layered effect of profile response. Combined with the borehole data in the profile, using high density electrical method, microtremor and AMT detection, the stratigraphic structure characteristics of underground space can be accurately identified from multiple parameters of resistivity and shear wave velocity, so as to provide basic data for the development of urban underground space.

Key words: high density resistivity method; audio magnetotellurics sounding (AMT); microtremor; urban underground space structure; imaging; geological survey engineering

市政工程建设过程中需要开展近地表地质调查工作,对区域地下空间地质条件、开发利用适宜性等进行评价,指导地下空间开发和利用。因此,开展地下空间探测对城市总体规划建设具有重要的生产和研究意义。调查近地表地下地质结构的方法总体可归纳为地面调查,以及地球物理勘探、钻探、建模等,主要探测地层结构、地质体,查明第四系覆盖层厚度及隐伏断层的空间位置与分布(彭建兵等,2019)。目前,重要经济区和城市群的地质调查工作正在推进中,上海、杭州、天津、成都等城市已初步查明城市近地表地下空间三维地质结构、地质资源、地质环境等问题(林良俊等,2017)。

城市地质调查获取近地表地下地质信息的手段较少,主要是通过钻探方式获取岩心资料,对城镇化程度高的南方地区,钻探成本高、环境污染大,能开展工作的场地条件非常受限制。而借助无损的地球物理勘探手段,可高效、快捷地采集地下岩土体地质信息,是解决地下空间探测的重要技术手段。在城市近地表地下空间调查中,较成熟的地球物理方法主要有浅层地震反射波法(二维与三维)、高密度电法(二维与三维)、地质雷达、被动源面波(微动)、音频大地电磁等。高密度电法被广泛应用于圈定地下水源(陈松等,2017;潘剑伟等,2018)、查找隐伏断裂(董浩斌等,2003)。音频大地电磁识别深部隐伏构造、盆地断陷(地堑)有较高的分辨率,通过正演模拟断层在不同倾角、倾向与电性情况下的视电阻率和阻抗相位拟断面,可为音频大地电磁实测资料处理提供借鉴(杨炳南等,2015;何帅等,2019)。微动勘探通过布置台阵观测天然场提取面波频散曲线,进而反演地下地层横波速度结构,具有无损、观测设备简单、背景噪音成像、勘探

效果明显的特点,是探测隐伏断裂、覆盖层厚度及地层分层的新方法(孙勇军等,2009;徐佩芬等,2013;李巧灵等,2019)。微动勘探可利用 H/V 谱比法曲线峰值频率,估算土石界面深度,即松散沉积层与坚硬基岩的界面深度(Sant et al., 2018;张若晗等,2020)。常规地震勘探分辨率高,探测深度大,是城市活断层探测、重大工程选址的主要方法之一(何正勤等,2010;顾勤平等,2013)。

广州南沙地区位于珠三角盆地珠江出海口,区位优势明显,未来区域近地表地下空间将进行重点开发和建设。南沙地区具有独特的地质条件和场地背景,受珠江水系切割,河网密布,属海侵海退多期回旋沉积,第四系覆盖层厚度大,广泛分布有软土层(高磊等,2020),发育多条北东向、北西向断裂(董好刚等,2016)等。在城市近地表地下空间建设过程中,轨道交通、地下管廊建设重点关注第四系覆盖层厚度、活动断裂分布、岩性变化情况,地下隧洞开挖过程需了解前方岩体分布等,因此,开展南沙近地表地下地层结构探测具有重要的意义。针对研究区的上述特点,地震勘探无论采用爆破震源还是可控震源车都会对周边环境产生较大影响,扰民问题一直未能得到较好地解决,在城市地质结构探测中使用受限。地质雷达技术探测深度有限,研究区覆盖层厚度超过 40 m,软土层厚度达 20 m(陈小月,2018),电磁波吸收衰减作用明显,对划分第四系厚度比较困难。而高密度电阻率法工作手段灵活,测线布置方便,音频大地电磁采用点测方式,可舍去采集不方便的少量点,微动勘探属于无损探测,非常适用于南沙区城市环境,可替代常规电法、电磁法在难以开展工作的干扰区域使用。

前人在研究区进行了较多的环境地质工作,但

未开展较大规模的高精度地球物理多方法探测及厚覆盖区近地表地层结构成像研究。本文采用近地表分层效果明显的高密度电法,结合微动探测研究区第四系覆盖层厚度,利用音频大地电磁测深查明隐伏断裂、隐伏岩体分布。为减少地球物理资料的多解性和加强多技术手段的综合利用,结合广州南沙场地背景和不同地球物理方法的特点,在分析剖面电阻率分布、横波速度分布特征的基础上,总结南沙近地表的地球物理物性结构特征,为后期地质工作及城市近地表开发提供资料。

1 地质与地球物理场背景

南沙地处珠江三角洲冲积平原前缘地带,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。其中,分布最广的地层为第四系沉积,历经3次海侵海退沉积旋回,形成了多套地层(乔纪纲等,2002)。地层以河流相沉积为主,局部为填海造陆,表层为人工填土层(Q_4^{ml}),下伏地层为全新统海相沉积土层(Q_4^{pl})、第四系冲洪积土层(Q_4^{al})、风化残积土层(Q^{cl}),因河流及海湖的复杂交替作用,软土层与薄层砂交错沉积。第四系覆盖层平均厚度25 m,最大厚度63 m,属厚覆盖地区,基岩发育三叠纪花岗岩、古近系砂岩等(表1)。

研究区发育的断裂主要有大涌断裂(F7)、沙湾断裂(F9)、陈村断裂(F11)、横沥断裂(F12)、紫坭断裂(F13)、洪奇沥断裂(F14)、南沙-东莞断裂(F15)等,几组断裂带相互切割,控制了研究区的地貌形态和基底断块的形状(董好刚等,2012)。

本次以广州南沙新区万顷沙镇为主要研究对象,重点分析该区万顷沙-新垦之间地下覆盖层厚度分布和地下岩性分布特征,地球物理测线分布见图1。根据地球物理各方法的特点,高密度电法测线布置时分段采集,音频大地电磁与微动探测均属

点测方式,可灵活布置测线。其中高密度电法采用10 m点距测量,微动探测与音频大地电磁均采用25 m点距测量。综合考虑研究区的空间形态,同时物探测线需要垂直南沙-东莞断裂走向,高密度电法与音频大地电磁测线总体呈北西-南东向,且2种物探方法测线空间位置基本重合,方便资料解译对比。

开展地球物理电性结构探测前,需要进行接地电阻率测试,了解表层介质的接地条件,较高的接地电阻会屏蔽电信号,降低信噪比,影响数据的采集质量。通过测试分析,测线位置的接地电阻率值基本低于 $400 \Omega \cdot m$,具有较好的接地条件,可为开展后期的地球物理信息采集工作提供条件。同时,经过试验线分析,采集到的高密度电法原始数据显示,研究区覆盖层视电阻率值低于 $10 \Omega \cdot m$,而基岩的相对视电阻率值在 $30 \Omega \cdot m$ 以上。收集到的波速物性资料(表1)显示,研究区周边人工填土、淤泥层、砂层的横波速度范围为 $120 \sim 240 \text{ m/s}$,砂砾岩、花岗岩的波速值大于 300 m/s ,因此该区近地表各地层均具有物性差异基础。由此可见,研究区具有开展高密度电阻率法、音频大地电磁测深、微动勘探的前提条件。

2 采集参数试验

合理的观测系统是获取高质量原始资料的前提和保障。高密度电法的纵向分辨率受电极距影响较大,同时,勘探深度受测线长度制约,可信的探测深度一般是排列长度的 $1/5$ 。因此,在实际工作中要结合探测目标深度、纵向分辨率等因素选择参数。

本次采用的AGI高密度电法设备可选择偶极装置、斯伦贝谢(以下简称斯贝)装置、偶极装置等。图2为偶极装置、温纳装置、斯贝装置测量示意图,每种装置的测量方式均不相同。

表1 研究区地层物性参数

Table 1 Physical property parameters of strata in the survey area

界	系	组	岩土名称	横波波速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	纵波波速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
新生界	第四系	万顷沙组	杂填土	120~150	500~1200	1.5~1.7
			淤泥	100	1400	1.6
		石牌组	细砂、中粗砂	150~240	1600~2000	1.7~1.8
	古近系	莘庄村组	砂砾岩	300~500	1800	1.8
中生界	三叠系		花岗岩	300~1000	1800~3500	1.9~2.4

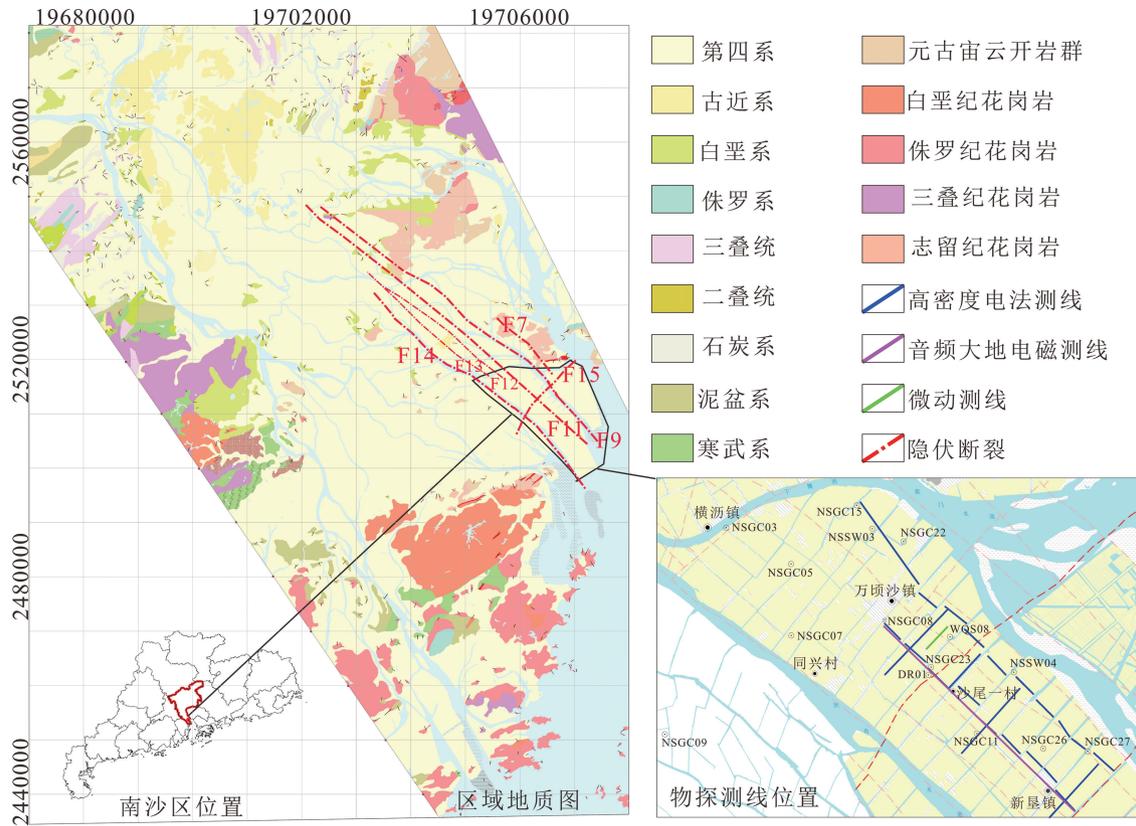


图 1 研究区地质及测线布置图

Fig. 1 Geological and survey line layout of the survey area

F7—大涌断裂;F9—沙湾断裂;F11—陈村断裂;F12—横沥断裂;F13—紫坭断裂;F14—洪奇沥断裂;F15—南沙-东莞断裂

采用偶极装置、温纳装置、斯贝装置测量时,视电阻率公式可分别表述为:

$$\rho_a = \begin{cases} \pi n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I}, AB=MN=a \\ 2\pi a \frac{\Delta V}{I}, AM=MN=NB=a \\ \pi \left(\frac{s^2-a^2}{4} \right) \frac{\Delta V}{aI}, AM=BN=s \end{cases} \quad (1)$$

式中:偶极装置的几何特征为 $AB = MN = a$, $AM = na$,温纳装置的几何特征为 $AM = MN = NB = a$,而斯贝装置的几何特征为 $AM = BN = s$ 。高密度电法在装置类型上需要考虑抗噪能力、纵向和横向分辨率,温纳装置在纵向分辨率和地层分层上效果较好,偶极装置横向分辨率效果较好,但是抗干扰能力较差。如果需要探测断裂等构造属性,可以选择偶极装置,斯伦贝谢装置的抗噪能力与分辨率介于两者之间(郑冰等,2015;方易小锁等,2019)。实际

数据采集过程中要灵活应用,一种装置类型探测的过程中数据质量不理想,可以选用其他 2 种装置测试。

图 3 是同一条测线采用温纳装置、斯伦贝谢装置、偶极装置采集数据的反演电阻率断面。对比可知,温纳装置数据的反演结果信噪比最高,迭代均方根误差 RMS 为 15.35%,圆滑度最高,分层效果最明显,结合研究区已知钻孔资料,测线地层从上向下,依次为表层杂填土、淤泥层与粘土层、基岩。偶极装置数据反演结果两端的数据信噪比较低,中间

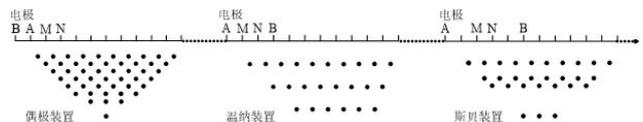


图 2 高密度电法不同装置测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different devices of high density electrical method

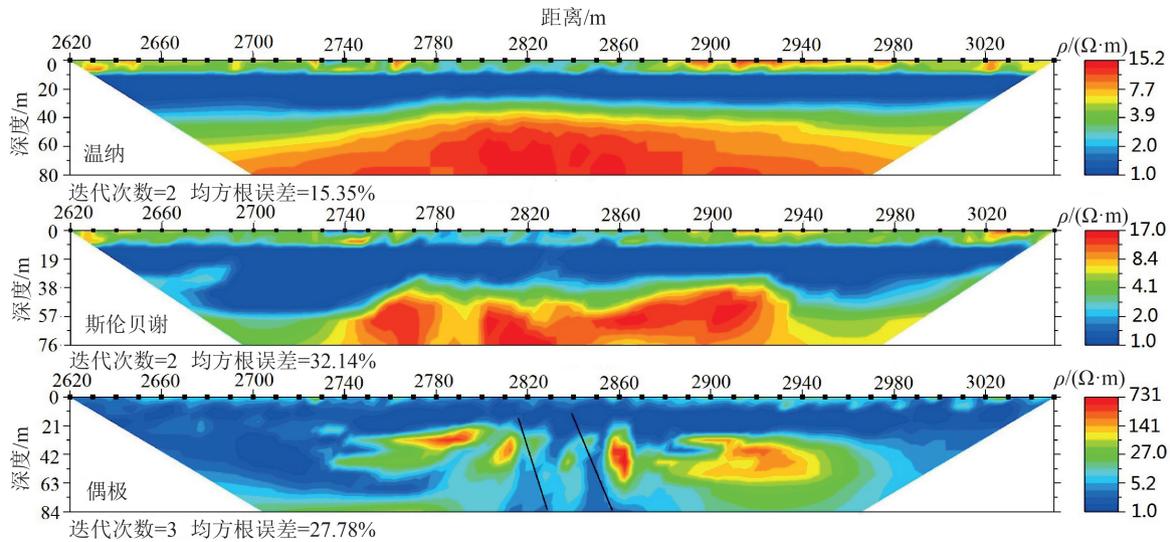


图3 不同装置类型(温纳、斯伦贝谢、偶极)反演断面对比图

Fig. 3 Comparison of inversion sections of different device types(wenner, schlumb, dipole)

的信噪比较高,迭代均方根误差 RMS 为 27.78%,横向反映温纳和斯伦贝谢装置断面上均没有显示的低阻异常区域,但偶极的分层效果一般。斯伦贝谢装置数据的反演分层效果与温纳装置大体相当,可以勾画出表层的杂填土、中部粘土层与淤泥层及下伏基岩面起伏形态,但是横向分辨率上不如偶极装置。高密度电法主要采用温纳装置进行数据采集,可满足纵向分辨厚覆盖层埋深的需求。

微动勘探对各台站的一致性要求较高,在开展工作之前应把全部台阵进行一致性试验对比,检查波形的相关性。本文开展的一致性试验使用 10 个台站,全部布置在相同位置,采集 30 min 时长。分析波形形态,采集时间内各时段的波形吻合度较好,10 个台站的一致性较高(图 4)。

微动的观测方式有圆形台阵、T 形台阵、L 形台阵,但是 L 形与 T 形台阵具有方位指向性,抗不规则干扰能力差,观测数据提取的频谱能量集中度不理想,实际工作中多选用圆形台阵(李井冈等,2020)。微动的探测深度一般是观测半径的 3~5 倍,本文需要了解的目标层埋深不超过 150 m,按照最小倍数关系,最大观测圆半径 50 m 即可满足要求,通过三重圆 12.5 m、25 m、50 m 半径的观测方法,试验得到的频散曲线如图 5 所示,频散能量分布集中,空间假频干扰较小,有效频带 1~8 Hz。

3 数据处理

3.1 高密度电法数据处理

高密度电法数据处理较成熟,主要采用 EarthImager2D 软件进行预处理和正反演。预处理主要有剔除个别跳点数据,设置数据阈值范围,对过大或过小的数据进行压制。高密度电法的数据反演,根据使用的装置类型确定初始模型,其中温纳装置、斯伦贝谢装置采集的地面数据初始模型默认为视电阻率拟断面,其他装置初始模型均采用均匀地下半空间。反演处理要求迭代均方根误差小

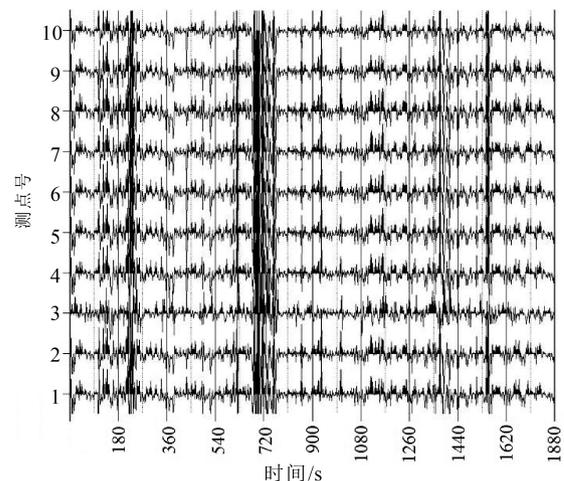


图4 多台阵一致性试验波形图

Fig. 4 Waveform diagram of multiple arrays consistency test

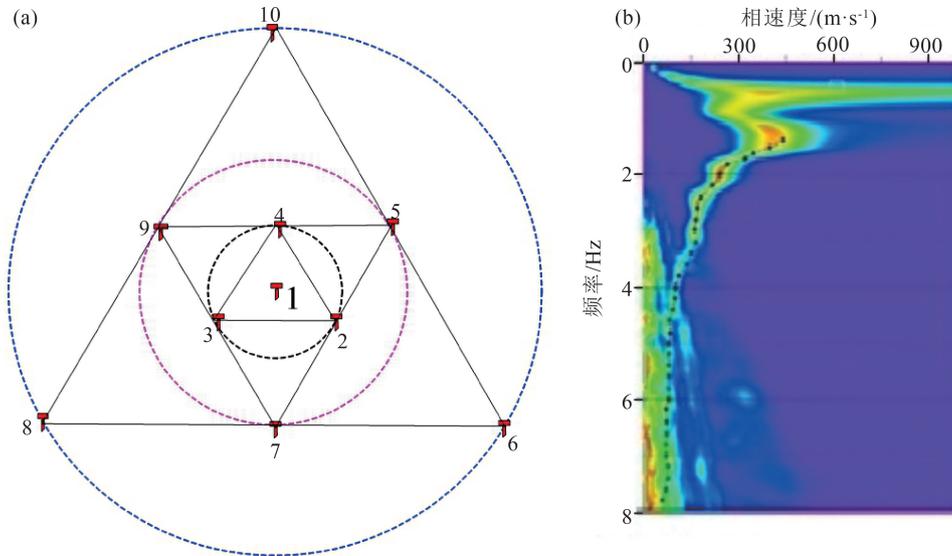


图 5 半径为 12.5 m、25 m、50 m 的台阵观测装置(a)和提取频散图(b)

Fig. 5 Extracting dispersion curve and phase velocity depth map from 12.5 m, 25 m, 50 m array

于 10%,根据迭代误差分布直方图(图 6),判断反演的质量。通过接地电阻、重复观测误差、反演迭代误差等参数的分布指标,控制高密度电法数据的处理。本文高密度电法测量取得了质量较好的原始视电阻率数据,反演的迭代均方误差均低于 10%,满足进一步的解译需求。

$$S(\mathbf{m}) = (\mathbf{d}_{obs} - g(\mathbf{m}))^T \mathbf{W}_d (\mathbf{d}_{obs} - g(\mathbf{m})) + \alpha \cdot \mathbf{m}^T \mathbf{R} \mathbf{m} \quad (2)$$

式中: $S(\mathbf{m})$ 为目标函数; \mathbf{d}_{obs} 为采集到的实测视电阻率; $g(\mathbf{m})$ 为正演模拟的电阻率值; \mathbf{W}_d 为数据权重。数据反演即为求目标函数的极小值。

3.2 微动数据处理

微动勘探采集到的数据呈现无规律、长时间、未知震源点、无法识别有效信号和噪声信号的特

征。单点微动采集到的数据主要通过空间自相关法提取瑞雷波频散曲线,再利用遗传算法对频散曲线进行反演得到横波速度结构,才能进行地质解释。微动数据的处理主要包括截取共时间段数据、加载观测系统到数据头文件、空间自相关、提取频散曲线、数据反演共计 5 个步骤。其中空间自相关处理是微动数据处理的核心步骤,自相关算法是提取频散曲线的决定因素。微动数据自相关目前主要采用空间自相关算法 (SPAC)。

空间自相关算法中圆形观测台阵与中心点台阵标准化自相关函数方位平均值为:

$$\begin{aligned} \rho(f, r) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{S(f, r, \theta)}{S_0(f, 0) S_r(f, r)} d\theta \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{2\pi f r}{c(f)}\right) \cos(\theta - \varphi) d\theta = J_0(x_0) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\rho(f, r)$ 表示空间自相关系数; $S(f, r, \theta)$ 为圆心处观测点、圆周上观测点信号的交叉谱; $S_0(f, 0)$ 、 $S_r(f, r)$ 表示为圆心处、圆周上观测点信号的功率谱; J_0 为第 I 类零阶 Bessel 函数; θ 为面波的入射角。空间自相关算法是把数据段中心频率不同的窄带滤波器,提取为各个频率成分,再计算圆周上各测点与中心测点的自相关系数,并进行方向平均,根据公式计算出相速度,最终拟合出相速度频散曲线 (Okada, 2006)。

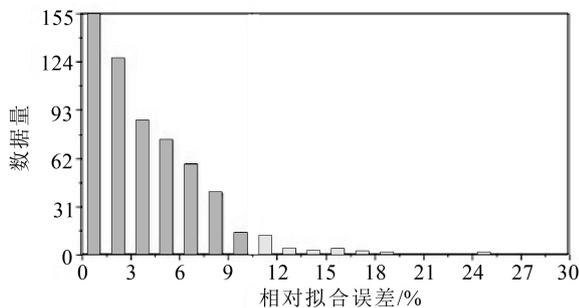


图 6 拟合误差分布直方图

Fig. 6 The distribution histogram of fitting error

半波长解释法:瑞雷波能量主要集中在半个波长范围内,相速度值基本等同于半个波长内各地层S波速度的加权平均值。

从单点实测微动数据中提取瑞雷波频散曲线,通过经验公式(4)(徐佩芬,2009),将相速度转换为视横波速度,探测深度为半波长,从而将相速度频散曲线转换为视横波速度与深度的变换曲线,最后再通过插值生成深度-视横波速度剖面图。

$$V_{x,i} = \left(\frac{t_i \cdot v_{r,i}^4 - t_{i-1} \cdot v_{r,i-1}^4}{t_i - t_{i-1}} \right)^{1/4} \quad (4)$$

式中: $V_{x,i}$ 为视横波速度; v_r 为瑞雷波速度; t_i 为周期值。

本次对微动原始数据进行预处理和频散曲线提取,获得相速度和深度图,并根据公式(4)转换为视横波速度和深度图进行地层解释。

3.3 音频大地电磁(AMT)数据处理

音频大地电磁数据处理主要包括数据预处理、二维反演2个步骤,其中数据预处理包括消除静态效应、压制强干扰等,二维反演方法包括Occam反演、NLGCG非线性共轭梯度反演、RRI快速松弛反演等,反演模式有TM模式、TE模式、TM+TE模式。目前,音频大地电磁数据处理软件主要有MTsoft2D、WinGLink、SCS2D等。

静态效应指地形起伏、近地表电性横向不均匀、旁侧电性差异大的岩层、断层破碎带等引起的视电阻率曲线畸变现象,如果不对AMT实测资料进行静态校正,视电阻率断面或反演断面上等值线畸变现象会造成解释上的误差(强建科等,2003;朱庆俊等,2009)。目前,静态校正的主要方法有首枝重合法、曲线平移法、相位换算法、数值分析法、直接二维及多维反演法等(段波,1994;黄兆辉等,2006)。本次数据预处理采用首枝重合法进行静态校正,可以消除数据中的局部假异常。图7为测区某段0~625 m静态校正前后电阻率反演断面图。从图7可以看出,未作静态校正时,在75 m、200 m、275 m和575 m处,受静态效应的影响曲线形态发生了畸变,即出现“条带状”干扰现象。而采用首枝重合法校正后的电阻率断面各处的畸变现象基本消除,断面整体等值线过渡更均匀,能够更准确清晰地反映地下电性结构,得到较好的勘探效果。

本次数据反演主要采用SCS2D软件进行TM+TE模式联合反演,联合反演模式的效果优于单模

式反演效果,更能突出局部异常。

4 近地表地层结构探测

南沙区地下空间地质问题比较突出,主要表现为测区内第四系覆盖层厚,北西向、北东向隐伏断裂较发育,简单依靠地表地质调查难以查明上述问题。南沙区地下工程建设、地下轨道交通、地下市政管线铺设等均需要了解整个测区的第四系厚度及隐伏断裂发育。

4.1 覆盖层厚度空间分布特征

第四纪地层是研究全球古气候变化的关键层位(刘嘉麟等,2000)。本研究区由于河流长期冲积和海潮进退作用,沉积了较厚的海陆交互的软土(杨利柯,2016)。因此,探明研究区的第四系空间分布及其厚度变化,对进一步了解软土层的分布情况有非常重要的意义。该区钻孔资料显示,覆盖层厚度发育较厚,一般在40~50 m之间。本文为了从整个测区掌握覆盖层厚度的分布规律,主要使用工作效率高、纵向分层效果明显的高密度电法。全区共布置了22条高密度电法测线,总体呈现3横2纵交叉分布(图1测线布置),可基本控制研究区覆盖层。

图8-b显示的是1条较典型的高密度电法地层分层结果剖面,覆盖层厚度在40~50 m范围起伏变化,在剖面中呈现蓝色低阻分布,电阻率值低于 $10 \Omega \cdot \text{m}$,下伏黄色-红色高阻反映的是花岗岩岩体,电阻率值高于 $30 \Omega \cdot \text{m}$,纵向上分层效果较明显。在附近收集到钻孔资料NSGC08,揭示的覆盖层厚度为46 m(图8-c),钻孔揭露覆盖层埋深与高密度电法反演数据之间的平均误差在10%左右,因钻孔不完全在测线位置上,存在误差也表明基岩面有起伏变化,满足50 m深度范围内岩土体界线识别。可见,高密度电法能够较准确地识别岩土体分界线。

根据各条高密度电法测线反演的覆盖层分布特征,采取每间隔10 m拾取覆盖层深度值方法,通过拾取的数据汇总进行网格化插值计算,即可制作全测区内覆盖层分布平面图、立体图(图9)。

通过分析研究区2D覆盖层厚度分布图,下伏空间中覆盖层厚度变化不规律,基本呈现四周低、中部高,伴随局部较高、局部较低的埋深现象。统计研究区2751个测点数据,计算出该区覆盖层整体埋深平均为44.8 m。收集到的万顷沙钻孔数据(图1)揭示,覆盖层厚度基本在40~50 m范围内,两者

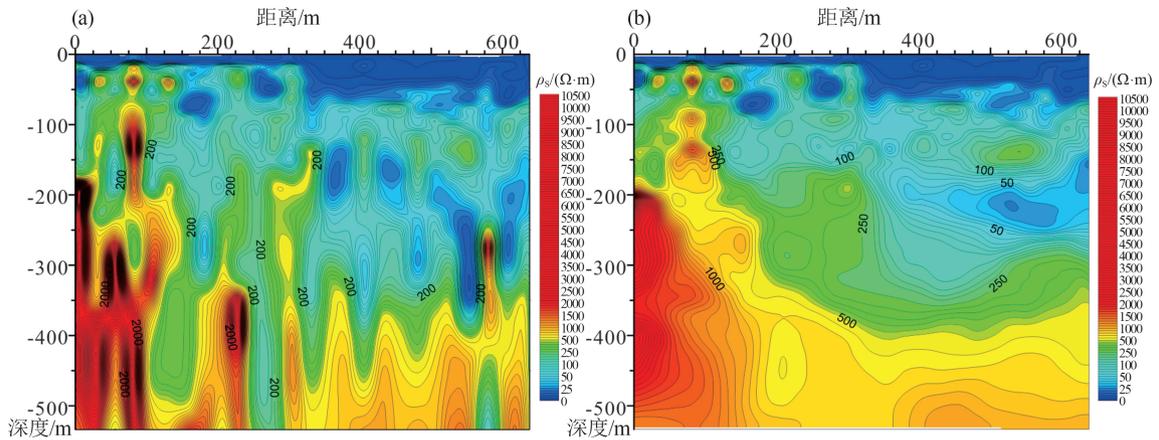


图 7 静态校正前(a)和校正后(b)电阻率反演断面图

Fig. 7 Resistivity inversion section for before(a) and after(b) static correction

基本吻合。同时,制作覆盖层厚度空间 3D 表面图,对了解测区的覆盖层空间特征更直观、形象。可见,研究区沙尾一村附近、新垦镇第四系覆盖层厚度较厚,万顷沙镇第四系覆盖层较薄,空间上呈现中间低、两端高的现象。

4.2 岩性分布特征

研究区第四系分布广泛,无地质露头,地下隐伏岩性较多依靠钻探资料获取。根据收集到的钻孔资料,揭露研究区主要分布有三叠纪花岗岩、古近系红层砂砾岩,其中万顷沙镇、新垦镇主要发育隐伏花岗岩,沙尾一村周边发育红层砂砾岩。为了解万顷沙镇-新垦镇地下隐伏岩性具体分布特征及岩性分界面位置,采用音频大地电磁方法开展长剖面测量,对地下电性结构进行成像分析。

音频大地电磁反演研究区地下电性特征揭露,横向有较明显的电性分区现象,其中沙尾一村前后 2 km 范围内呈现较低电阻率,电阻率值在 $250 \Omega \cdot m$ 左右,万顷沙镇至剖面 1.0 km 段、剖面 5.0 km 至新垦镇段地下地层电性呈现高电阻率特征,电阻率值大于 $800 \Omega \cdot m$ 。因剖面 2.2 km 处地热钻孔 DR01 揭示岩性为红层砂砾岩(图 10),通过此处钻孔作为标定,同时对比 NSGC08 孔、NSGC11 孔、NSGC23 孔、NSGC26 孔下伏岩性信息,结合长剖面电阻率分布特征,划分整个研究区地下空间的岩性分布。因此认为,剖面 1.0~5.0 km 段下伏地层为古近系红层砂砾岩,万顷沙镇剖面 1.0 km 段为三

面测量,对地下电性结构进行成像分析。

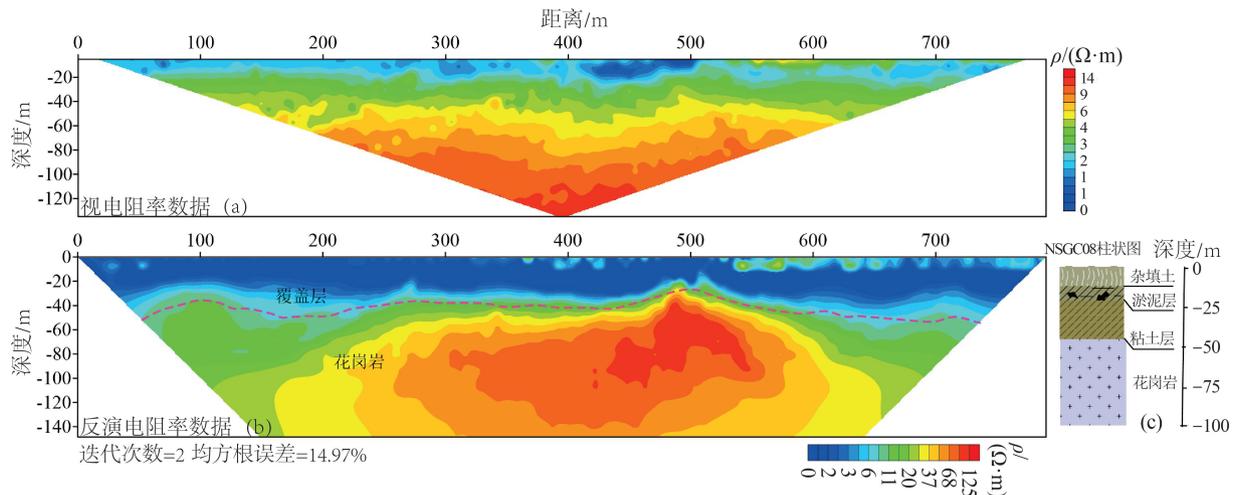


图 8 高密度电法反演的典型覆盖层厚度分层

Fig. 8 Thickness stratification of typical overburden inversion by high density resistivity method

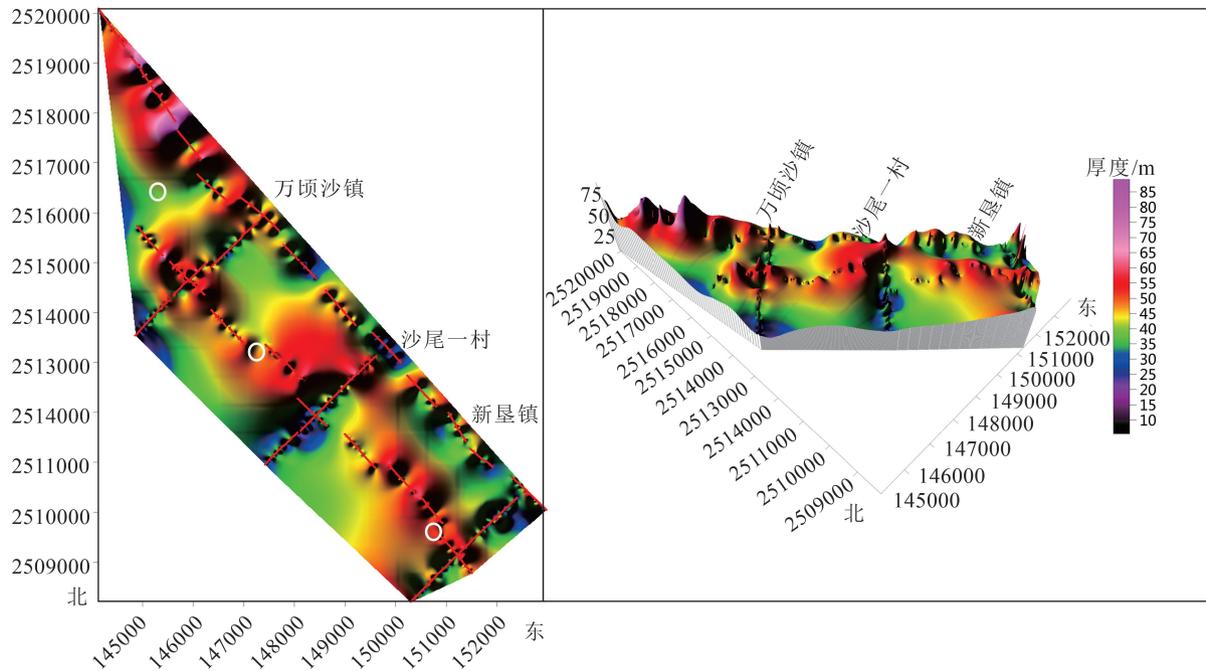


图9 研究区覆盖层厚度2D/3D分布图

Fig. 9 2D / 3D distribution of overburden thickness in the survey area

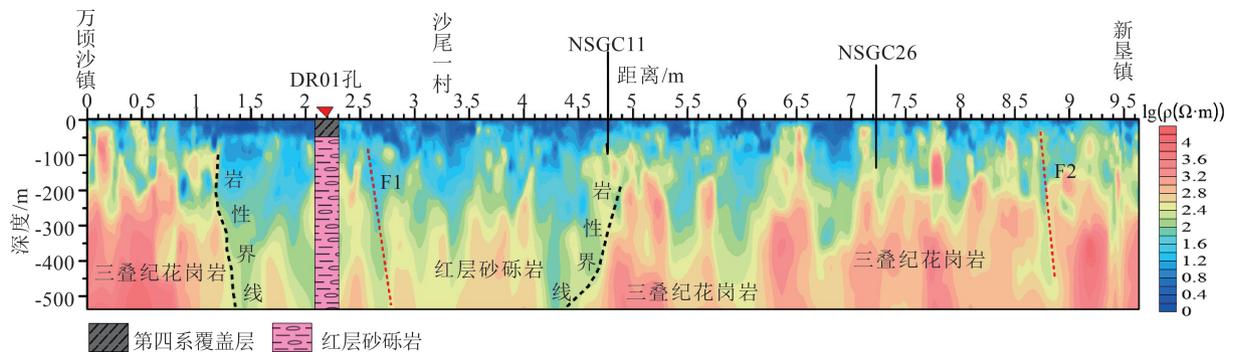


图10 研究区音频大地电磁反演断面图

Fig. 10 Section map of audio magnetotelluric inversion in the survey area

叠纪花岗岩,剖面 5.0 km 至新垦镇段为三叠纪花岗岩,岩性渐变段为剖面 1.0 km 处及剖面 5.0 km 处。剖面 2.7 km 位置处下伏空间表现出低阻条带现象,可推断为断裂构造 F1,剖面 8.8 km 位置处下伏条带状低阻区域电阻率在 $50 \sim 200 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,两侧岩体的电阻率大于 $800 \Omega \cdot \text{m}$,根据整体电阻率分布形态,判断此处为断裂构造带 F2。其中,F1 断裂位置与研究区南沙-东莞断裂分布位置吻合(图 1),音频大地电磁探测效果较明显,横向分辨率较高。

4.3 地层横波速度结构

微动探测基于被动源面波理论,通过提取单点频散曲线(图 11)反演横波速度结构,进而划分地下地层结构(图 12)。本文微动探测采用半径为 12.5 m、25 m、50 m 的三重圆形台阵观测系统,单台阵观测时长 30 min。因测区属河流相沉积,沉积环境相对稳定,地层结构可认为是水平层状结构,微动数据采用半波长法解释法。

测线长 1 km,共采集 41 个测点数据,对各单点数据进行空间自相关处理后,计算的单点频散谱如

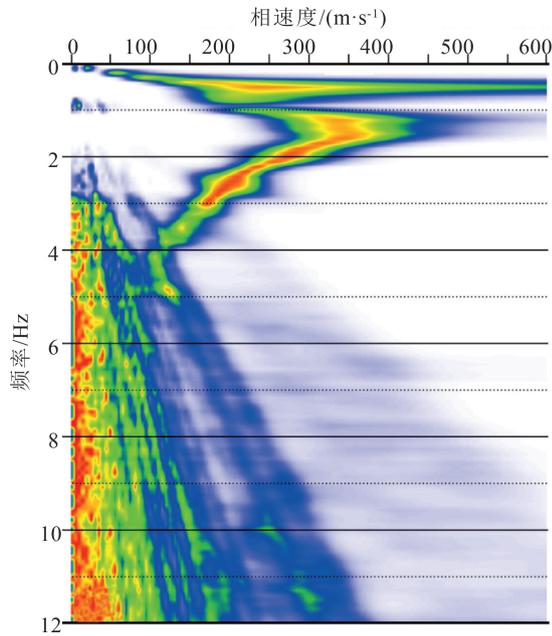


图 11 微动单点频散曲线

Fig. 11 Single point dispersion curve of microtremor detection

图 11 所示,频散谱能量聚焦、圆滑、干扰少,频散曲线易于提取。根据半波长法获得的面波相速度-深度关系,通过公式(4)转换为视横波速度-深度剖面,采用视横波速度更能突出地层异常特征。图 12 反映,各地层视横波速度变化在 100~800 m/s 之间。为确定下伏空间岩性特征,本次收集了测线附近的 2 口钻孔(NSGC23、WQS08)资料,1 号 NSGC23 钻孔位于距测线起端 600 m 位置,揭露下伏岩性为红层砂砾岩,埋深 44.5 m;2 号钻孔 WQS08 位于距测线 2700 m 桩号 371 m 位置处,揭露下伏岩性为花岗岩,埋深 37.3 m。

因 2 号钻孔距离剖面较近,将钻孔柱状图投影到剖面(图 12)后显示,以地层视横波速度值为 300 m/s 划分岩土体界面,投影点对应的剖面基岩埋

深为 39 m,微动探测的埋深值与钻孔数据误差为 4.5%,误差精度小,埋深吻合度高。因此,以 300 m/s 的速度值作为划分岩土体界面的数值依据,100~300 m/s 为覆盖层,剖面显示为蓝色低速度区域,300~800 m/s 对应基岩地层,显示为绿色-黄色-红色高速度区域。可见,基于横波速度值分布划分下伏地层效果较明显,可精细刻画岩土体界面的起伏形态。根据 1 号、2 号钻孔揭露岩性分布,结合视横波速度结构横向分布规律,可将 1750~2150 m 段解释为红层砂砾岩,下伏视横波速度不高于 500 m/s;而 2150~2750 m 段下伏岩性可解释为花岗岩,视横波速度高于 500 m/s,红层砂砾岩和花岗岩地层的岩性界线较清晰,如图 12 中曲线所示。

横波属于剪切波,横波速度信息携带了下伏地层丰富的岩石物理信息(剪切模量等)。因此,构建地下空间的横波速度数据库,对了解研究区岩石物理和力学性质有一定意义。

5 讨论

高密度电法探测第四系覆盖层厚度较准确,剖面显示研究区平均埋深大于 40 m。因收集钻孔位置与高密度电法测线在空间上存在一定距离,实测值与钻孔数据存在较小的误差,符合地层变化规律。多条高密度电法剖面插值计算出的覆盖层空间分布,并不是真实的三维数据体,靠近实际测线的区域反映的数据真实度高,远离测线区域数据可信度降低,可加密测线数量或通过三维测量增加数据密度。覆盖层是地下空间开发、人类工程建设的关键层位,覆盖层引发的地质灾害直接影响人类活动。本文通过高密度电法,基本查清了万顷沙地区近地表覆盖层厚度空间分布,对该区开展后期总体规划有较重要的作用。

音频大地电磁探测深度大,可较好地弥补高密

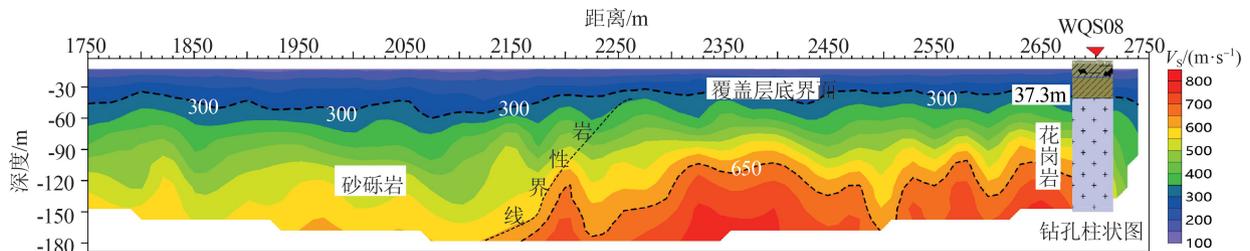


图 12 微动视 S 速度剖面

Fig. 12 Apparent S-wave velocity profile of microtremor detection

度电法 100 m 深度以外的探测盲区,尤其是对深部钻孔定位能起到重要作用。如本次音频大地电磁解译剖面与 650 m 深孔岩性资料吻合度高,终孔之前并未打穿红层砂砾岩地层,横向上也揭露了研究区隐伏岩性的分布情况及隐伏构造的发育。但是,音频大地电磁在 50 m 深度内分辨率较差,对浅部地层分层探测需借助高密度电法、微动手段等。对于较深的地层三维结构探测,可借助三维大地电磁技术,利用区域大地电磁构建近地表三维结构电磁参数模型,为认识地下深大断裂空间展布、三维结构提供更丰富的地电信息(仇根根等,2019),也是下一步研究的目标。

微动勘探是近年兴起的一门新技术,利用环境背景噪音进行成像,是真正的绿色、无损的探测方法。本文采用三重圆的观测方式,解译的地层视横波速度剖面与研究区钻孔基本对应,尤其是能准确识别第四系覆盖层底界面,视横波速度横向变化吻合地层岩性分布。因此,通过微动与高密度电法互相补充探测,可在高密度电法受干扰强、难以开展的区域工作,获取较连续准确的近地表覆盖层埋深特征。同时,微动勘探可作为南方强风化区地质填图的一种有力手段。

高密度电法、微动、音频大地电磁探测结果表明,广州南沙近地表地层结构总体表现为较厚的第四系覆盖层、隐伏花岗岩及砂砾岩,隐伏岩体有较明显的空间分布范围,圈定的隐伏断裂呈现北东向展布。

6 结 论

(1) 高密度电法温纳装置具有较高的纵向分层能力,通过多条电性结构剖面控制了广州南沙地区二维覆盖层厚度平面、空间分布特征,全区覆盖层平均厚度达 44.8 m。

(2) 微动方法属无损探测,提取频散曲线可进行横波速度分层,视横波速度划分地层结构效果明显,根据视横波速度结构可较好地划分地层结构和砂砾岩与花岗岩岩性分界面。

(3) AMT 探测深度大,有效探测深度达 500 m,反演的电性断面圈定了花岗岩、红层砂砾岩的出露范围,划分了不同岩性分界面的空间位置,识别出了南沙-东莞断裂。

(4) 采用高密度电法、微动、AMT 探测,能够获

取研究区地层的横波速度结构、电阻率电性结构,进而基本掌握了研究区近地表的地质结构特征。

致谢:审稿专家给出许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- Okada H. Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method [J]. *Exploration Geophysics*, 2006, 37(1): 73-85.
- Sant D A, Parvez I A, Rangarajan G, et al. Subsurface imaging of brown coal bearing tertiary sedimentaries - deccan trap interface using microtremor method [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 159: 362-373.
- 陈松, 余绍文, 刘怀庆, 等. 高密度电法在水文地质调查中的应用研究——以江平圩幅为例[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(2): 849-855.
- 陈小月. 广州市南沙区软土地面沉降特征及城市防灾减灾的建议[J]. *地质灾害与环境保护*, 2018, 29(2): 17-22.
- 董浩斌, 王传雷, 曾佐勋, 等. 高密度电法在信阳市燃气混气站场地隐伏断裂探测中的应用[J]. *地质科技情报*, 2003, 22(1): 101-104.
- 董好刚, 路韬, 何万双, 等. 珠江三角洲沙湾断裂带第四纪活动性研究[J]. *中国地质*, 2016, 43(5): 1803-1813.
- 董好刚, 黄长生, 陈雯, 等. 珠江三角洲环境地质控制性因素及问题分析[J]. *中国地质*, 2012, 39(2): 539-549.
- 段波. 校正大地电磁测深中静态效应的首枝重合法[J]. *长春地质学院学报*, 1994, 24(4): 444-449.
- 方易小锁, 孟永东, 田斌, 等. 高密度电阻率法对不同电极排列的分辨率响应研究[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(6): 2421-2428.
- 高磊, 陈运坤, 屈尚侠, 等. 广州南沙区软土地面沉降特征及监测预警分析[J]. *人民长江*, 2020, 51(增刊): 094-097.
- 顾勤平, 康清清, 许汉刚, 等. 薄覆盖层地区隐伏断层及其上断点探测的地震方法技术——以废黄河断层为例[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1609-1618.
- 何帅, 杨炳南, 李核良, 等. 音频大地电磁法对渝东南 IV 级地堑构造的识别及意义[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(1): 270-276.
- 何正勤, 潘华, 胡刚, 等. 核电厂址隐伏断裂探测中的地震勘探方法研究[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(2): 326-334.
- 黄兆辉, 底青云, 侯胜利. CSAMT 的静态效应校正及应用[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(4): 1290-1295.
- 李井冈, 谢朋, 王秋良, 等. 不同台阵形式对微动探测结果的影响[J]. *大地测量与地球动力学*, 2020, 40(1): 98-103.
- 刘嘉麒, 刘强. 中国第四纪地层[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(2): 129-141.
- 林良俊, 李亚民, 葛伟亚, 等. 中国城市地质调查总体构想与关键理论技术[J]. *中国地质*, 2017, 44(6): 1086-1101.
- 李巧灵, 雷晓东, 李晨, 等. 微动测深法探测厚覆盖层结构——以北京城市副中心为例[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(4): 1635-1643.
- 潘剑伟, 占嘉诚, 洪涛, 等. 地面核磁共振方法和高密度电阻率法联合找水[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(3): 253-262.
- 彭建兵, 黄伟亮, 王飞永, 等. 中国城市地下空间地质结构分类与地质调查方法[J]. *地学前缘*, 2019, 26(3): 9-21.

- 乔纪纲,黄镇国,黄光庆.珠江三角洲第四系软土层 DTM 初步研究[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2002,20(4): 47-52.
- 强建科,阮百尧.不同电阻率测深方法对旁侧不均匀体的反映[J].物探与化探,2003,27(5): 379-382.
- 仇根根,方慧,吕琴音,等.武夷山北段及相邻区深部电性构造与成矿分析:基于三维大地电磁探测结果[J].中国地质,2019,46(4): 775-785.
- 孙勇军,徐佩芬,凌甦群,等.微动勘查方法及其研究进展[J].地球物理学进展,2009,24(1): 326-334.
- 徐佩芬,李传金,凌甦群,等.利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱[J].地球物理学报,2009,52(7): 1923-1930.
- 徐佩芬,李世豪,杜建国,等.微动探测:地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J].岩石学报,2013,29(5): 1841-1845.
- 杨炳南,周琦,杜远生,等.音频大地电磁法对深部隐伏构造的识别与应用:以贵州省松桃县李家湾锰矿为例[J].地质科技情报,2015,34(6): 26-32.
- 杨利柯.广州市南沙区软土分布特征及软基处理对策研究[D].华南理工大学硕士学位论文,2016.
- 张若晗,徐佩芬,凌甦群,等.基于微动 H/V 谱比法的土石分界面探测研究——以济南中心城区为例[J].地球物理学报,2020,63(1): 339-350.
- 郑冰,李柳德.高密度电法不同装置的探测效果对比[J].工程地球物理学报,2015,12(1): 33-39.
- 朱庆俊,李凤哲,王璇.AMT 静态效应对导电薄层分辨能力的正演模拟[J].物探与化探,2009,33(2): 207-211.