广东省潼湖生态智慧区浅层地球物理探测 与地层物性分析

张晓波^{1,2)},王成善¹⁾,王志辉²⁾,李海龙²⁾,李伟荣³⁾,王强茂²⁾
1)中国地质大学(北京),北京,100083; 2)中国地质科学院,北京,100037;
3)广东省地质局第七地质大队,广东惠州,516008

内容提要:地质灾害、活动断裂、特殊岩土体和古河道等是影响城市浅层地下空间开发安全的主要地质问题, 对于这些地质问题的探测主要采用地球物理无损检测方法。 潼湖生态智慧区是国家生态文明建设示范区和惠州 智慧城市地下空间开发中的重要区域,浅层地球物理探测与地层物性分析为潼湖生态智慧区城市发展及地下空间 开发利用提供详细的地质、岩土和地球物理数据,是构建该地区地下空间模型的必备要素。虽然目前已经开展了 针对本区域的基础地质探测研究工作,然而服务于精细地质结构与地层划分的综合地球物理研究还处于空白。针 对浅层地下空间探测精细程度低和传统探测方法分辨率有限的问题,本文综合利用浅层反射波地震方法、混合源 面波 S 波速度成像方法、三分量谐振波阻抗比值方法以及综合测井方法对该地区浅层地下空间(200m)进行了高精 度地层划分和断层展布精细解释。在浅层地震反射波方法划分厚层和大尺度断层的基础上,利用主动源和被动源 微脉动阵列法获得更加精细的浅层地层和构造特征,采用三分量地震频率谐振方法识别浅层土壤层分层,弥补了 单一方法在不同深度范围上的探测信号低精度缺点,探讨了潼湖地区地层与地球物理的响应特征,构建了详实的 地层物性和地球物理参数关系,为后续的建模提供基础数据。

关键词:地下空间,地球物理探测,面波,速度,物性

潼湖生态智慧区内有着广东省内最大的内陆淡 水湿地(Zheng Zhouxiang et al., 2006; Chen Yimeng et al., 2018),拟打造成为国家生态文明建 设示范区和惠州智慧城市引领区。在此背景下,查 清区内影响城市发展及地下空间利用的地质灾害、 活动断裂、特殊岩土体和古河道等地质目标和地质 问题可以为该地区的城市规划及地下空间开发提供 数据支撑(Zhang Ke et al., 2009)。针对不同的地 质任务和目的,从上世纪 80年代起,部分科研单位 已经开展了针对本区域的地质探测与研究工作。基 本阐明了地下水的赋存条件和分布规律,开展了珠 江三角洲经济区1:25万生态环境地质调查,编制 涉及本区的矿产资源规划编制(He Shanru et al., 2007; Zhang Fulin, 2007)。综合前人的研究目标 和成果,主要存在以下几点问题:①已经开展的地质 探测与调查工作主要涉及区域地质和水文环境方面,针对潼湖生态智慧区的局部范围精细地质探测 还未开展;②缺少高精度的地球物理探测技术支撑; ③影响城市地下空间的开发和利用主要深度范围(0 ~200m)精细地质结构尚不清楚。

随着城市地下空间开发的不断深化,地下空间 土体结构精细探测技术需求问题日益突出。传统的 工程地球物理方法在过去几十年城市地质调查工作 领域发挥了重要的作用(Zeng Zhaofa et al., 2004; Li Xuejun et al., 2008; Zhang Jianqing, 2016),但 是随着探测深度和探测精度的提高,传统的方法应 用效果表现出一定的局限性(Li Xuejun, 2011; L Wanlong et al., 2018)。对于电磁法探测技术,由 于城市建筑和电场环境的影响,瞬变电磁信号在城 市地球物理探测中受到干扰,方法局限性较强

注:本文为中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20169611 和 DD20190287)和中国地质科学院基本科研业务费项目(编号:YWF201906)联合资助的成果。

收稿日期:2019-05-08;改回日期:2019-07-02;网络发表日期:2019-10-22;责任编委:张永双;责任编辑:黄敏。

作者简介:张晓波,男,高级工程师,主要从事城市地质与资源环境承载力评价研究与管理工作。Email:zhangxiaobo@cags.ac.cn

引用本文:张晓波,王成善,王志辉,李海龙,李伟荣,王强茂. 2019. 广东省潼湖生态智慧区浅层地球物理探测与地层物性分析. 地质学报,93(11):2935~2946, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019264.
 Zhang Xiaobo, Wang Chengshan, Wang Zhihui, Li Hailong, Li Weirong, Wang Qiangmao. 2019. Shallow geophysical exploration and stratigraphic properties analysis of the Tonghu ecological smart zone, Guangdong Province. Acta Geologica Sinica, 93(11):2935~2946.

(Zhao Pu et al., 2017; Liu Yongsheng et al., 2019)。高密度电法主要用于城市交通和建筑物建 设中的空洞、岩溶和断裂探测,但由于其低效率、施 工难度大、电流传导困难和城市管线干扰等不利因 素限制,在城市地下空间无损高效探测中未能发挥 主导作用(Alfouzanet et al., 2016)。探地雷达采 用脉冲电磁波发射接收模式,数据采集和处理类似 于地震零偏移距自激自收方式,具备高分辨率和高 效率特征,但是由于脉冲电磁波在地下介质中的强 衰减特征,探地雷达的探测深度受到较大的影响 (Liu et al., 2015)。在弹性波探测方面,浅层地震 勘探方法无损高效、精度高,适合于城市地质调查 (Colombo et al., 2016; Han Jianguang et al., 2016),不仅可以提供地下二维或三维图像,还能获 得工程上需要的具体参数信息(S波速度和弹性模 量等),因此在城市浅层地下空间探测中的应用广泛 (Craig et al., 2016)。然而, 地震反射波浅层勘探 方法受城市环境影响较大,城市噪音污染严重。此 外,由于其纵向分辨率较低,针对城市浅层 200m 深 度的精细地层划分也存在一定的局限性。为了充分 利用城市环境产生的声源,面波勘探被用于浅层地 下空间探测中(Xu et al., 2013; Du Yanan et al., 2018)。相较于主波,面波从另外一个不同的角度, 为描述浅层地下特征提供了更多有用的信息(Park et al., 1998; Xia et al., 1999; Liu Qinghua et al., 2015)。综上所述,由于环境的限制,瞬变电磁法和 高密度电法在城市地下空间探测中利用率较低;由 于探测深度的要求,探地雷达方法不能用于 50m 深 度以下的地下空间成像与探测。反射地震方法可以 用于地层的划分和断层的识别,但是由于其分辨率 较低,在城市浅层地下空间精细探测上,还需要配合 其他方法进行分析。面波方法在城市浅层地下空间 探测上具备环境和数据源的优势,通过不同矢量方 向面波数据联合反演和属性分析,可以更好的对浅 层城市地下空间进行精确成像和描述。

在潼湖生态智慧区浅层地下空间探测中,需要 对浅层地下空间进行精细成像和地层参数建模,构 建岩土体岩性、质量、分层结构与地球物理勘探之 间,测井和地震勘探之间的响应关系或模型。为了 解决这些问题,更加精细的完成该地区的地下空间 成像与参数建模工作,本文通过开展浅层综合地球 物理探测,包括反射波地震方法、混合源面波方法和 综合测井方法,对研究区浅层地质进行精细探测与 描述,分析地层物性特征,构建地层结构、地质及其 地球物理响应特征,为本地区地下空间三维地质建 模提供详实的地质和地球物理数据奠定基础。

1 区域地质背景

惠州市位于广东省中南部东江之滨,珠江三角 洲东北端。潼湖生态智慧区位于深莞惠都市区核心 腹地的惠州市西部,所涉及的行政区包括潼湖、潼 侨、沥林三镇和陈江街道的部分区域,区内分布广东 省最大的内陆淡水湿地一潼湖湿地。潼湖生态智慧 区在区域上位于莲花山深断裂以西、高要-惠来深断 裂以北、博罗-紫金大断裂以南,潭下-七星嶂-黄巢山 复式褶皱以北所挟持的东江断块内,与珠江口地堑、 深圳-香港断块相连,为东莞盆地、惠州盆地、惠阳盆 地 相 交 接 地 段,断 块 内 次 级 断 块 发 育 (Yang Minggui et al., 2019)。

工作区及周边出露地层年代有三叠系、侏罗系、 白垩系和第四系(图1)。三叠系小坪组(T_x):分布 于工作区北部的观洞水库东侧,岩性为砂砾岩、砂 岩,紫红色,倾向南~南东,倾角 20°~25°。侏罗系 (J)有侏罗系金鸡组 (J_j) 、桥源组 (J_{qy}) 、塘厦组 (J_t) 、 漳平组(Jzh)、吉岭湾组(Jil_2)和南山村组(Jkn)。其 中金鸡组、桥源组、塘厦组和漳平组为河湖相紫色为 主的碎屑岩,零星地段见沉火山碎屑岩。吉岭湾组 和南山村组则为火山喷出岩或次火山岩。工作区以 潼湖湿地为界线,以北地区分布有桥源组、漳平组和 金鸡组地层,以南主要为零星出露的塘厦组和吉岭 湾组地层。工作区的白垩系地层为三水组(Kss),仅 在工作区东江北岸博罗县零星出露。岩性为砂质中 粗砾岩、砾质粉砂质泥岩、中细砾岩韵律层发育,紫 红色,厚度502m。与南山村组呈不整合接触。第四 系(Q)主要有大湾镇组(Qdw)、睦岗组(Qm)和桂洲 群(QG),为河~湖相沉积物,由黏土或粉质黏土、含 有机质粉质黏土、砂性土、含卵石或角砾粉质黏土等 组成,广泛分布于潼湖湿地及入湿地河流两岸。

2 浅层地震探测方法与解释

无损探测方法具有高效、控制面积大的优点,是 城市地质调查的重要组成部分。潼湖生态智慧区具 有典型的南方水网特征,也有新型开发区建设的强 干扰代表性。因此,开展包括反射地震、混合源面波 及三分量谐振等三种浅层地震勘探方法,探测剖面 及钻孔位置如图2所示。本次探测工作在数据采集 技术、处理技术、方法理论进行创新。数据采集方 面,采用电火花和机械震动震源进行数据采集,创造



图 1 潼湖盆地及邻区区域地质简图

Fig. 1 Regional geological map of Tonghu Wetland and its adjacent areas

1-第四系沉积物;2-白垩系-第三系沉积;3-晚侏罗-早白垩纪南山村组;4-漳平组;5-塘厦组;6-桥源组;7-三叠系地层;

8一泥盆系;9一白垩纪侵位的花岗岩;10一侏罗纪侵位花岗岩;11一逆冲断裂/正断裂;12一浅层地震勘探剖面;13一钻孔位置

1—Quaternary sediment; 2—Cretaceous- tertiary deposits; 3—Nanshancun Formation; 4—Zhangping Formation; 5—Tangxia Formation; 6—Qianyuan Formation; 7—Triassic strata; 8—Devonian System; 9—granite emplaced in the Cretaceous; 10—granite emplaced in the Jurassic; 11—thrust/normal fault; 12—shallow seismic exploration section; 13—hole location

性地解决了水陆交替地区震源激发、水网(湖泊、池 塘、河流)地区的数据采集难题;数据处理方面,采用 "地震频率谐振技术"、"混合源面波勘探技术"和"浅 层反射地震勘探"三者联合处理解释技术,增强了地 下透明度,提高了成果的成像品质,为岩性识别、物 性反演打下坚实的基础;同时利用"地震频率谐振技 术"对物探成果综合解译,在惠州潼湖生态智慧区大 量的建筑工地及伴随的载重卡车干扰噪音情况下, 地震频率谐振技术能够清晰分辨出第四系内部和风 化壳层精细结构,有效识别高陡断层。通过创新试 验,初步形成勘探深度大、高精度、效率高、抗干扰能 力强的典型南方水网地区精细化地质结构探测的浅 层地震勘探技术。

2.1 浅层地震反射波方法

反射地震勘探是基于介质弹性差异进行探测的 一种物探方法,由于地震勘探子波长度与地层厚度 之间的分辨率存在调谐现象,浅层高分辨率地震勘 探主要用于划分厚层结构和中大尺度断层,而针对 表层细层的划分和精细构造成像还需要借助其他方 法进行综合分析。图 3(a)、(b)和(c)分别为 L1 线、 L2 线和 L3 线的浅层反射地震解释剖面,从图中可 以看到第四系底埋深较浅,地震资料信噪比差,不宜 用反射进行解释。此外,漳平组基岩风化带埋深约 50m,在反射地震剖面有不连续的反射,反射波形为 一套强波峰;漳平组砂砾岩底界两套强波谷夹一条 强波峰,局部出露地表,剖面上连续可追踪;漳平组 底界两套强波谷夹一套中强波峰,与上覆地层在地 震波形上呈整合接触,埋深超过 200m,全区可连续 追踪。

研究区的断层主要表现为反射波形出现同相轴 错断、扭曲,同相轴突然增多或者突然减少。L1反 射地震剖面主要垂直于地层走向分布,波形上反映 出连续的宽缓褶皱,区域地质资料及1:1万工程地 质测量均表明,潼湖为宽缓的向斜盆地,潼湖为界, 以南地层倾北为主、以北倾南为主,同时在两翼发育 次一级的褶皱。L1以西4.6km的宝塔山~松头信





Fig. 2 Location schematic diagram of seismic exploration section of Tonghu ecological smart zone, Guangdong Province

手剖面,反映出在潼湖向斜北翼发育次一级的连续 褶皱。L2、L3 剖面大致平行或小角度相交地层走 向,波形上反映出为较平缓的地层结构线。

2.2 混合源面波方法

对于面波勘探方法,在浅部低频区,主动源面波 方法可获得相对更准确的速度信息,而在深部高频 区,被动源微脉动阵列法可获得相对更精确的速度 信息,而混合源面波方法反演出的S波速度参数在 工程领域具有特殊的重要性(Bensen et al., 2007; Luo et al., 2009; Kim et al.,2012; Domingues et al.,2016)。图4(a)、(b)和(c)分别为L1、L2和L3 线面波勘探反演得到的S波速度结构剖面。其中 100m以浅地层S波速度分层较明显,第四系S波 速度在400m/s左右,淤泥质土的S波速度略微降 低,速度约为240m/s;强度增大时,土层S波速度略 升高,可达 450m/s。地表基岩风化严重,其 S 波速 度一般 500~800m/s,随着深度增加,风化程度降 低,S 波速度略有升高,但一般小于 900m/s。微、未 风化基岩埋深一般在 45m 以深,S 波速度一般在 1200~1700m/s。断层在 S 波速度结构剖面上特征 明显,在断层发育位置,S 波速度呈断崖下降;本区 断层基本未洞穿第四系,只发育在基岩地层。

2.3 三分量地震频率谐振探测方法

三分量地震频率谐振勘探技术将地震勘探的多 次叠加技术、微动技术的频率分析技术、主动源勘探 场源和观测场源匹配技术相结合,应用大能量信号 源和多次叠加技术压制大量的无用信号噪声提高有 用信号的信噪比,从而增强深层勘探能力和浅层分 辨能力。其方法主要是建立在地震波的相互干扰和 干涉基础上,利用不同物性和构造体对纵横波和面



图 3 广东省潼湖生态智慧区浅层反射地震解释剖面 Fig. 3 Shallow reflection seismic interpretation profile of Tonghu ecological smart zone, Guangdong Province (a)—L1线解释剖面;(b)—L2线解释剖面;(c)—L3线解释剖面

(a)-L1 line interpretation profile; (b)-L2 line interpretation profile; (c)-L3 line interpretation profile

波的谐振特性即"共振效应",提高信号对目标体的 探测能力和精度(Huang Hongguan et al., 2012; Li Xutao et al., 2014)。

三分量地震频率谐振勘探对浅层层位识别更加 精细,可识别浅层素填土、淤泥质土层,黏土层。图 5(a)、(b)和(c)分别为L1、L2和L3线三分量谐振 波阻抗比值解释剖面。素填土相对波阻抗比值较 低,一般为0~0.0014,淤泥质黏土相对波阻抗比值 约0.0014~0.0887。黏土层相对波阻抗比值约为 0.0887~0.3006,基岩顶界面与第四系分界清晰,其 相对波阻抗比值范围在0.3~0.5间。根据剖面特 征,可知素填土埋深0~2.5m,淤泥质黏土与鱼塘、 河流、水渠相关;第四系埋深0~19m。在三分量谐 振相对波阻抗比值剖面上断层表现为剖面突变,振 幅降低,基岩在剖面的特征为全线连续,断层两侧基 岩地层倾向不一致。

综合分析浅层地震反射波方法、面波 S 波速度 结构反演方法和三分量地震频率谐振波阻抗比值方 法对探测区域进行地层划分和断层精细解释,L1、 L2 和 L3 线地震地质综合解译成果如图 6(a)、(b) 和(c)所示。浅层反射地震勘探法对 100m 以深地 层响应特征明显,反射剖面同相轴特征总体上反映 了地层地下结构特征,在对 100m 以深地层结构进 行解译时,以反射地震剖面资料为主,参考S波速度 结构剖面、三分量谐振拟波阻抗剖面资料。混合源 面波地震勘探对第四系结构特征、基岩风化壳、直立 断层敏感,在对第四系地层、浅层直立断层、基岩风 化壳解译时,以S波速度结构为主,其结果与三分量 谐振拟波阻抗剖面解译结果相互印证,浅层反射地 震勘探由于方法限制,对超浅层(0~50m)无法有效 勘探,在超浅层地层解译时,浅层反射地震剖面仅作 参考。三分量谐振地震勘探对超近地表地层(0~ 10m)、断层、采空区、离层、火山岩、侵入岩、岩性边 界敏感,在对这些地质体解译时,以三分量谐振拟波 阻抗剖面为主,其结果S波速度结构剖面解译结果 相互印证;浅层反射地震成果剖面为辅。



图 4 广东省潼湖生态智慧区面波勘探反演的 S 波速度结构剖面 Fig. 4 S-wave velocity structure profile of surface wave inversion of Tonghu ecological smart zone, Guangdong Province (a)—L1 线面波反演成果;(b)—L2 线面波反演成果;(c)—L3 线面波反演成果

(a)-L1 line surface wave inversion result; (b)-L2 line surface wave inversion result; (c)-L3 line surface wave inversion result

3 钻孔综合测井分析

为了研究潼湖生态智慧区地层物性与地球物理 响应之间的定量关系,建立区域地层结构及其地球 物理响应特征,本文对潼湖盆地7个孔深100~ 200m的测井钻孔进行分析(测井钻孔分布如图7所 示),初步构建了地质-地球物理响应关系,如表1 所示。

通过分析测井数据特征,侏罗系下统樟平组、塘 厦组地层岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩、石英砂岩为 主,并且两者地球物理特征相似。岩土层的岩性特 征与波速具有一定的对应关系,但同一岩土层响应 值的变化幅度较大,显示由于物质组成、裂隙发育程 度、充填介质等方面的不同,地层测井弹性波也存在 一定的差异。潼湖生态智慧区是浅覆盖地区,覆盖 层厚度一般小于 30m,在覆盖松散层,地层的 S 波速 响应值与其地基强度对应关系明显,具有一定的分 层特征。在岩石地层中,S 波响应值主要与岩石的 风化程度有关,而 P 波除与风化程度有关外,也与 岩性有关,一般情况下,含砾砂岩或砂砾岩的波速较 大,石英砂岩次之,泥质粉砂岩、粉砂岩较小。此外, 对于地层电阻率响应特征,同一地层岩性范围内,电 阻率变化幅度较小,相对稳定,但不同的分层、风化 程度,电阻率在层面呈明显突变现象,垂向分层特征 较明显。不同岩石的电阻率有差异,砂砾岩的电阻 率较粉砂岩、泥质粉砂岩、第四系地层高。同一种岩 石,风化程度低的电阻率较风化程度高的大,且变化 幅度小。强、中风化岩,风化裂隙较发育,岩石完整 性较差,裂隙充水、充填物含量不同,岩石的电阻率 变化幅度大;进入到微风化岩,岩石相对较完整,电 阻率变化幅度相对较小。

图 8 是 K1306 的钻孔柱状、三分量谐振与测井 资料综合分析图。从图上可以看出,测井弹性波和 电阻率等特征曲线在层面或结构面突变,拐点明显, 岩层内部曲线变化相对稳定,同样三分谐振的波阻 抗比色斑在层面上也有色差,不同的岩性间色差对

		Table 1 G	Jeological-geophysical	response relationship	of Tonghu ecolog	jical smart zone, Gu	angdong Province	
長長	时代、 成因	岩性	S 波(m/s)	P 波 (m/s)	波阻抗比	自然伽玛(pa/kg)	电阻率(Ω・m)	自然电位(mv)
Θ	\mathbf{Q}^{ml}	# 土、素填土	$141 \sim 182/163$	$1359 \sim 1545/1419$	$0 \sim 0.0014$	I	I	
\bigcirc		粉质黏土(硬塑)	$166 \sim 279/242.75$	$1416 \sim 1737/1615.25$	0.0887.0.3006	0.34	16	-69.66
\bigcirc		粉质黏土(可塑)	$152\!\sim\!231/187$	$1567\!\sim\!1667/1620$	0.000.20.000	I	I	I
\mathbb{O}_4	\mathbf{Q}^{al}	淤泥质粉质黏土、淤泥	$130\!\sim\!169/147.33$	$1404 \sim 1663/1528.67$	$0.0014 \sim 0.0887$	I	I	I
\mathbb{C}_{4-1}		粉质黏土(可塑)	$191\!\sim\!214/194$	$1634\!\sim\!1700/1611$	$0.0887 \sim 0.3006$	I		
3		稍密粉砂、粉细砂、中砂	$146 \sim 256/208.1$	$1430\!\sim\!1741/1540$		$0.5 \sim 0.7/0.6$	$18\!\sim\!19/18.5$	$-71 \sim -27.88/-49.44$
01	\mathbf{Q}^{el}	粉质黏土(硬塑)	$230 \sim 287/246.34$	$1420\!\sim\!1805/1552$	0.0887~0.3006	$0.43 \sim 0.54/0.49$	$15.02 \sim 21.2/18.11$	$-80.06 \sim -16.57 / -48.315$
01		全风化泥质粉砂岩	$210 \sim 285/256.5$	$1450\!\sim\!1911/1594$		1.13	18.12	-20.37
Ð		全风化粉砂岩	240	1440	$0.0887 \sim 0.3006$	0.63	21.31	-75.11
Ð		全风化砂岩、石英砂岩	293	1710		I	I	I
92	Jzh	强风化泥质粉砂岩	$370 \sim 485/395.8$	$1891\!\sim\!2858/2407$		0.95	33.34	-25.83
92		强风化粉砂岩	470	2650		0.66	95.23	-71.12
92		强风化角砾岩	430	2160		0.96	129.7	-44.36
92		强风化石英砂岩	$311 \sim 545/439.5$	$1732\!\sim\!2598/2172$		I		I
02	Jt	强风化泥质粉砂岩	$332 \sim 476/410.67$	$1729 \sim 2368/2009.33$		I	I	
Ð.		中风化粉砂岩	$700 \sim 750/725$	$2820\!\sim\!2920/2870$		$0.93 \sim 1.33/1.13$	66. $23 \sim 135. 3/100.765$	$-72.11 \sim -40.38 / -56.245$
ë.		中风化泥质粉砂岩	$568 \sim 940/827.5$	$2565\!\sim\!4138/3121$		1.41	50.88	-41.35
ð.	$\int zh$	中风化砂砾岩、含砾粉砂岩	$594 \sim 658/678.5$	$2553 \sim 3214/2964.5$		1.35	92	-40.38
93		中风化石英砂岩	$633 \sim 762/706$	$2417 \sim 4225/3217.33$		I		I
Ð		中风化断层角砾岩	$636 \sim 756/691$	$2627 \sim 3122/2853$	ц с с	I		I
03		中风化粉砂岩	$641 \sim 806/734$	$2567 \sim 3156/2899$	 	1		
03	Jt	中风化泥质粉砂岩	$649 \sim 893/750.25$	$2580 \sim 3690/2814.25$		I	I	I
03		中风化凝灰质泥质粉砂岩	$735\!\sim\!911/788$	$2580 \sim 3734/2952.5$		I		I
54		微风化粉砂岩	810	3850		1.44	137.77	-65.17
54	7-1	微风化泥质粉砂岩	$758 \sim 1140/946.67$	$3272\!\sim\!4931/3908$		1. $35 \sim 1$. $61/1$. 48	$111.2 \sim 135.3/123.25$	$-65.35 \sim -32.43 / -48.89$
54	uzſ	微风化砂砾岩、含砾砂岩	$781 \sim 924/838.5$	$3580 \sim 4615/3895$		$1.12 \sim 1.41/1.27$	$103.3 \sim 299.1/201.2$	$-64.2 \sim -32.43 / -51.975$
54		微风化石英砂岩	$806 \sim 1028/910.2$	$3214 \sim 4693/4244.2$		Ι		
64		微风化粉砂岩	$781 \sim 893/837$	$3308 \sim 3978/3604$	I	I		
64	$\mathbf{J}t$	微风化泥质粉砂岩	$758 \sim 1176/878.25$	$2782\!\sim\!4081/3550$		I	I	I
64		微风化凝灰质泥质粉砂岩	$774 \sim 881/856.67$	$3438 \sim 3850/3691.67$		Ι	Ι	

表 1 广东省潼湖生态智慧区地质-地球物理响应关系 hvsical resonce relationshin of Tonohu ecological smart z 2941



图 5 广东省潼湖生态智慧区三分量谐振波阻抗比值解释剖面

Fig. 5 Three-component resonance impedance ratio interpretation result of Tonghu ecological smart zone, Guangdong Province (a)—L1 线解释成果;(b)—L2 线解释成果;(c)—L3 线解释成果

(a)-L1 line interpretation result; (b)-L2 line interpretation result; (c)-L3 line interpretation result



图 6 广东省潼湖生态智慧区地震地质综合解译成果图

Fig. 6 Seismic geological comprehensive interpretation result of Tonghu ecological smart zone, Guangdong Province (a)—L1 线综合解译成果图;(b)—L2 线综合解译成果图;(c)—L3 线综合解释成果图

(a)-L1 line comprehensive interpretation result; (b)-L2 line comprehensive interpretation result;

(c)—L3 line comprehensive interpretation result





Fig. 7 Logging borehole map of Tonghu ecological smart zone, Guangdong Province



图 8 K1306 孔地层柱状、三分量谐振、测井曲线综合分析图

Fig. 8 Comprehensive analysis of stratigraphic column, three-component resonance and logging curve for K1306 hole

比较明显,但地层柱状分层与波阻抗比、测井曲线间 有一定的误差,三分量谐振的解译成果认为波阻抗 比与钻孔揭露深度误差总体小于1.5m,因此地球物 理勘探成果与地层岩性具有较好的对应关系。三分 量谐振勘探处理得到的波阻抗比值,可以探测埋深 极浅地层,且勘探精度较高,对浅层地质体有良好的 反映,能够有效揭示地下地质体结构和属性,尤其是 在孔深 59.60~79.10m处,波阻抗比值突然变化, 该孔段的测井特征曲线也有相应的变化,具有明显 的断层特征,与钻探揭露该孔段为断层角砾岩是相 一致的。因此,在精细探测方面,可以建立钻探揭 露、综合测井、地面地球物理勘探相结合的模式,为 城市地质调查服务。

4 结论

(1)城市浅层地下空间(200m内)的精细构造 成像和地层参数建模是城市地下空间开发的重要地 质工程任务。浅层地震反射波方法可以被用来划分 厚层结构和中大尺度断层。混合源面波方法在浅部 低频区和深部高频区,分别利用主动源和被动源微 脉动阵列法可获得更精确的横波速度信息,对浅层 地层和构造进行成像和划分,此外横波速度信息对 地质工程力学分析等具有重要意义。采用三分量地 震频率谐振方法可识别浅层素填土、淤泥质土层和 黏土层,弥补了浅层地震反射波方法的浅层探测精 度的不足。

(2) 潼湖生态智慧区属于浅覆盖地区,在纵横波 探测的基础上地层物性与地球物理响应之间的定量 关系和响应特征是地质建模和工程建模的关键步 骤。通过综合分析钻孔柱状、三分量地震频率谐振 与测井数据,建立了基本的地层物性、声学和电阻率 特征关系,为后续的反演建模提供数据基础。本次 开展的综合方法研究,在我国南方浅覆盖地区城市 地下空间开发中具备一定的应用参考性。

References

- Alfouzan F, Zhou B, Bakkour K, Alyousif M. 2016. Detecting near-surfaceburied targets by a geophysical cluster of electromagnetic, magneticand resistivity scanners. Journal of Applied Geophysics, 134(11): 55~63.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, Levshin A L, Lin F, Moschetti M P, Shapiro N M, Yang Y. 2007. Processing seismic ambient noise data toobtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. Geophysical Journal International, 169(3): 1239~1260.
- Chen Y M, Yu Z X, Xu E Q. 2018. Landscape Patterns and Habitat Quality of Tonghu Wetlands in Guangdong Province for 6 periods since 1965. Wetland Science, 16(4): $486 \sim 492$ (in

Chinese with English abstract).

- Colombo D, McNeice G, Rovetta D, et al. 2016. High-resolution velocity modeling by seismic-airborne TEM joint inversion: A new perspective for near-surface characterization. The Leading Edge, 35(11): 977~985.
- Craig M, Hayashi K. 2016. Surface wave surveying for near-surface site characterization in the East San Francisco Bay Area, California. Interpretation, 4(4): SQ59~SQ69.
- Domingues A, Silveira G, Ferreira A M G, Chang S, Custodio S, Fonseca JFBD. 2016. Ambient noise tomography of the East African Rift in Mozambique. Geophysical Journal International, 204(3):1565~1578.
- DuY N, Xu P F, Ling S Q. 2018. Microtremor survey of soil-rock mixture landsides: An example of Baidian township, Hengyang City. Chinese Journal of Geophysics, $61(4):1596 \sim 1604$ (in Chinese with English abstract).
- Han J G, Yu C Q, Zhang X B, Gu B L, Wang Y, Chen P. 2016. Multiwave Seismic Numerical Simulation Study on Terrestrial Gas Hydrate in Permafrost Area. Acta Geologica Sinica, 90(9): 2502~2512 (in Chinese with English abstract).
- He S R, Li W R, Liu X W, Zhai Y X. 2007. Brief introduction to Tonghu wetland bio-hydrogeloy-gy characteristics. Journal of Engineering Geology, 15: 519~525 (in Chinese with English abstract).
- Huang H G, Xu S F. 2012. The Application of Resonance Method of hydrocarbon Detection in Volcanical Reservoir Prediction. Journal of Oil and Gas Technology, 34(10): $47 \sim 50 + 168$ (in Chinese with English abstract).
- Kim S, Nyblade A A, Rhie J, Baag C, Kang T. 2012. Crustal Swave velocity structure of the Main Ethiopian Rift from ambient noise tomography. Geophysical Journal International, 191(2): 865~878.
- Luo Y, Xia J, Miller R D, Xu Y, Liu J, Liu Q. 2009. Rayleighwave mode separation by high-resolution linear Radon transform. Geophysical Journal International, 179 (1): 254 \sim 264.
- Liu L B, Qian R Y. 2015. Ground Penetrating Radar: A Critical Tool in Near-Surface Geophysics. Chinese Journal of Geophysics, 58(8), 2606~2617.
- Liu Y S, Long T C, Liu R Y. 2019. Discussion on Relevant Problems in Application of TEM in Urban Geological Survey. Geotechnical Engineering Technique, $33(3): 173 \sim 177$ (in Chinese with English abstract).
- Li Q H, Lu L Y, Wang K M. 2015. Review on the active and passive surface wave exploration method for the near surface structure. Progress in Geophysics (in Chinese), 30(6) : 2906 ~2922 (in Chinese with English abstract).
- Li W L, Liu S F, Tian Q N, Lv P, Jiang C X, Jia L X. 2018. Reviews in urban geophysics. Progress in Geophysics (in Chinese), 33(5): $2134 \sim 2140$ (in Chinese with English abstract).
- Li X J. 2011. Applications and development of city geophysical prospecting in China. Progress in Geophysics (in Chinese), 26(
 6): 2221~2231 (in Chinese with English abstract).
- Li X J, Dou S E, Qu H T. 2008. A View on Application and Development of Engineering Geophysical Prospecting and Testing in City. Progress in Geophysics (in Chinese), 5(5); 564~573 (in Chinese with English abstract).
- Li X T, Wu H L, Wu C D. 2014. The application of resonance method hydrocarbon detection in oil and gas exploration. Natural Gas Geoscience, 25(S1): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Park C B, Miller R D, Xia J. 1998. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. SEG Expanded Abstracts, (1): 1377.
- Xia J, Miller R D, Park C B. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. Geophysics, 64(3): 691~700.
- Xu P, Ling S, Ran w, Liu Q, Liu J. 2013, Estimating cenozoic

thickness in the Beijing plain area using array microtremor data, Seismological Research Letters, 84 (6): 1039~1047.

- Yang M G, Wang G H. 2019. Formation and evolution of the plate activity and the structural system in the South China continental region. Acta Geologica Sinica, 30(6): 2906~2922 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Z F, Liu S X, Liu S H. 2004. The new progress of environmental and engineering geophysics. Progress in Geophysics (in Chinese), 19(3): 486~491 (in Chinese with English abstract).
- Zhang F L. 2007. Tonghu wetland soil and water environmental pollution characters. Journal of Engineering Geology, 15: 539 ~542 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J Q. 2016. Engineering geophysical detection methods technology application and prospects. Progress in Geophysics (in Chinese), 31(4): 1867 ~ 1878 (in Chinese with English abstract).
- Zhang K, Chen G N, Zhuang W M, Peng Z L, Hou W S, Yang X Q, Zhang C B, Qiu Y, Liu Y Y, Zhang X H, Qiu S S, Hu W H, Tang L K, Ma Z W, Zhang D Z. 2009. New Evidences for Late Quaternary Tectonic Movement in the North Pearl River Delta. South China Journal of Seismology, 29(s1): 22~26 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P, Jiang J, Wang X R. 2017. Urban Underground Space Exploration Key Technologies and Development Trend. Coal Geology of China, 29(9): $61 \sim 66$ (in Chinese with English abstract).
- Zheng Z X, Zhou J G, Peng Y S. 2006. Wetland Studies on Resources and Vegetation in Tonghu of Huizhou City. Journal of huizhou university, 26(3):18~20 (in Chinese with English abstract).

参考文献

- 陈一萌,于竹筱,许尔琪. 2018. 1965年以来 6 个时期广东潼湖湿地 的景观格局和生境质量.湿地科学,16(4):486~492.
- 杜亚楠,徐佩芬,凌甦群.2018. 土石混合滑坡体微动探测:以衡阳拜 殿乡滑坡体为例.地球物理学报,61(4):1596~1604.

- 韩建光,于常青,张晓波,谷丙洛,王赟,陈鹏.2016.陆域冻土区天然 气水合物多波地震数值模拟研究.地质学报,90(9):2502 ~2512.
- 何珊儒,李伟荣,刘旭文,翟运雄. 2007. 潼湖湿地生态水文地质特 征简述. 工程地质学报,15:519~525.
- 黄洪冠,徐胜峰.2012.谐振法油气检测技术在火山岩储层预测中的 应用.石油天然气学报,34(10):47~50+168.
- 李万伦,刘素芳,田黔宁,吕鹏,姜重昕,贾凌霄.2018.城市地球物理 学综述.地球物理学进展,33(5):2134~2140.
- 李学军.2011.我国城市物探的应用与发展.地球物理学进展,26(6) : 2221~2231.
- 李学军, 实硕娥, 曲海涛. 2008. 城市工程地球物理探测技术应用与 发展趋势. 地球物理学进展, 5(5): 564~573.
- 李绪涛,吴会良,吴朝东. 2014. 谐振法油气检测技术在油气勘探中 的应用.天然气地球科学,25(S1):1~5.
- 刘庆华,鲁来玉,王凯明.2015. 主动源和被动源面波浅勘方法综述. 地球物理学进展,30(6):2906~2922.
- 刘永生,龙桃城,刘仁义. 2019. 瞬变电磁法在城市地质调查应用中 有关问题的探讨. 岩土工程技术,33(3):173~177.
- 杨明桂,王光辉.2019.华南陆区板块活动与构造体系的形成演化. 地质学报,93(03):528~544.
- 曾昭发,刘四新,刘少华.2004.环境与工程地球物理的新进展.地球 物理学进展,19(3):486~491.
- 张福林. 2007. 潼湖湿地水土环境污染特征. 工程地质学报,15:539 ~542.
- 张建清.2016. 工程物探检测方法技术应用及展望. 地球物理学进展,31(4):1867~1878.
- 张珂,陈国能,庄文明,彭卓伦,侯卫生,杨小强,张承博,邱燕,刘延 勇,张献河,邱善森,胡文烨,唐煜昆,马占武,张冬仔.2009.珠 江三角洲北部晚第四纪构造运动的新证据.华南地震,29(s1): 22~26.
- 赵锴,姜杰,王秀荣.2017. 城市地下空间探测关键技术及发展趋势. 中国煤炭地质,29(9):61~66.
- 郑洲翔,周纪刚,彭逸生. 2006. 惠州潼湖湿地植被及其植物资源的 研究. 惠州学院学报, 26(3):18~20.

Shallow geophysical exploration and stratigraphic properties analysis of the Tonghu ecological smart zone, Guangdong Province

ZHANG Xiaobo^{*1,2)}, WANG Chengshan¹⁾, WANG Zhihui²⁾, LI Hailong²⁾,

LI Weirong³⁾, WANG Qiangmao²⁾

1) China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083;

2) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

3) Seventh Geological Brigade of Guangdong Geological Bureau, Huizhou, Guangdong, 516000

* Corresponding author: zhangxiaobo@cags.ac.cn

Abstract

Geological disasters, active faults, special geotechnical bodies and ancient rivers are the main geological problems affecting the development of shallow underground space in cities, and non-destructive geophysical testing methods can be used for the detection of these geological problems. Tonghu ecological smart zone is an important area in the development of national ecological civilization construction demonstration zone and Huizhou smart city underground space. Shallow geophysical exploration and stratigraphic properties analysis provide detailed geological, geotechnical and geophysical data for the urban development and underground space utilization of the Tonghu ecological smart zone, which is an essential element for constructing the underground space model of the area. Although basic geological exploration research has been carried out for the region, comprehensive geophysical research on fine geological structures and stratigraphic divisions is still in the blank. In order to solve the problem of low level of fine detection in shallow underground space and limited resolution of traditional detection methods, the shallow reflection wave seismic method, S wave velocity structure imaging method of mixed source surface wave, three component resonance wave impedance ratio method and comprehensive logging method are used to perform high-precision stratigraphic division and fine interpretation of fault distribution for shallow underground space (200 m) in the area. Based on the shallow reflection wave seismic method to divide thick and large-scale faults, the active source and passive source surface wave method are used to obtain more detailed shallow stratum and structural features, and the three-component seismic frequency resonance method is used to identify the shallow soil layer, which compensates for the low accuracy of the detection signal of a single method over different depth ranges. The response characteristics of stratigraphy and geophysics in the Tonghu area are discussed, and the detailed relationship between stratigraphic properties and geophysical parameters are constructed, which provides basic data for subsequent modeling.

Key words: underground space; geophysical exploration; surface wave; velocity; physical properties