

城市住宅开发中隐伏岩溶的 高密度电阻率法探测

陈钰轩¹, 杨天春¹, 张叶鹏^{2*}, 徐昊天¹

(1. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南省国土空间调查监测所 湖南 长沙 410129)

摘要: 城市住宅开发建设中经常会遇到隐伏灾害地质体, 如岩溶、空洞、软弱层等, 危害施工安全。文章以湘潭某在建小区为例, 利用高密度电阻率法进行基础探测工作, 探测结果为工程建设的灾害处理提供科学依据。工作区布置 8 条测线, 以典型测线 L7 和 L8 为例, 对其探测结果进行重点解释分析; 根据测线的探测成果, 最终圈定高阻和低阻异常体共 13 处, 推测出勘探区域内溶洞的分布情况, 并经后期钻孔资料进行验证, 得到了预期较好结果。结果分析表明, 高密度电阻率法在城市住宅开发建设勘探中具有良好探测效果, 值得进一步推广使用。

关键词: 地球物理勘探; 隐伏岩溶; 高密度电阻率法; 反演

中图分类号: P631.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)04-0058-06

High-Density Resistivity Detection of Hidden Karst in Urban Residential Development

CHEN Yuxuan¹, YANG Tianchun¹, ZHANG Yepeng², XU Haotian¹

(1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Land Space Survey and Monitoring Institute of Hunan Province, Changsha 410129, China)

Abstract: In the development and construction of urban housing, hidden disaster geological bodies, such as karst, cavities, weak layers, etc, are often encountered, which endanger construction safety. Taking a residential area under construction in Xiangtan as an example, this paper uses the high-density resistivity method to carry out basic detection work, which provides a scientific basis for the disaster treatment of engineering construction. In this paper, 8 survey lines are arranged in the work area, and the typical survey lines L 7 and L 8 are taken as examples to focus on their detection results interpretive analysis. According to the detection results of the survey line, a total of 13 high-resistance and low-resistance anomalies are finally delineated, and the distribution of karst caves in the exploration area is speculated, and the later drilling data are verified, and the expected good results are obtained. The results analysis show that the high-density resistivity method has a good detection effect in urban residential development and construction, which is worthy of further promotion and use, and provides certain references for related detection work in the future.

Keywords: geophysical exploration; hidden karst; high-density resistivity method; inversion

我国地域辽阔, 隐伏岩溶是十分常见的地质灾害之一, 近年来随着国内城镇化建设的迅猛发展, 城市地下隐伏灾害体的探测问题为地球物理提供了更广阔的舞台^[1-2]。在城市建设中地球物理勘探方法已得到广泛应用, 其主要用于对城市地下地质结构、地下建筑设施分布以及地下污染、建筑材料的放射性等情

况进行深入调查,为建筑地基的调查与选定、废物污染的控制、建筑材料的选用、地下设施的规划布局等提供科学依据,从而便于城市地区的规划和管理,以更好地服务于城市的建设和发展。

针对城市建设中物探场地相对狭小、地面障碍物较多、不能以炸药为激振源、浅部存在各种管线等特点,需对物探方法的选择做一些合理的研究^[3]。城市建设中常用的物探方法有地质雷达、等值反磁通瞬变电磁法(Opposing Coils Transient Electromagnetics Method, OCTEM)、可控源音频大地电磁法(Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics, CSAMT)和高密度电阻率法(Multi-electrode Resistivity Method, MRM)。早在1986年,李正文^[4]利用浅层地震法探测城市地下建筑地基基底的几何形状、地层结构,结果证明其有效;吴奇等^[5]为查明九江市某综合楼地基溶洞,使用探地雷达和五极纵轴测深法进行探测,获得较好的效果;杨天春等^[6-8]利用高密度电阻率法对建筑地基下岩溶进行勘察,确定岩溶分布;国外学者TASSY等^[9]利用高密度电阻率法确定法国东南米欧港口沿岸地下岩溶含水系统的分布特征。文章通过高密度电阻率法勘探来查明在建场地的地下岩溶分布范围,为后期相关的基础施工提供科学依据。

1 地质概况及物性特征

工作区经纬度为112°52′25.44″E,27°50′52.99″N。位于湘潭市涟水大道西面,羊湾路以南、原长城乡渔场位置,四周交通便利。根据前期岩土工程勘察资料,工作区内地层自上而下依次为

- 1) 杂填土:呈灰褐色,含较多碎石、砖渣及混凝土块,结构松散,潮湿;
- 2) 粉质黏土:黄色、红褐色、褐黄色,含较多灰白色高岭土,可塑-硬塑,较湿;
- 3) 含砾粉质黏土:红色,以黏性土为主,主含石英质颗粒,胶结较好,可塑-硬塑,稍湿;
- 4) 灰质砾岩:褐红色,碎屑结构,块状构造,砾石以石灰岩为主,钙质胶结,岩石裂隙发育较少,岩芯较完整,多呈短-长柱状,岩芯表面较光滑,坚硬,致密。

勘探区范围内水文地质条件复杂,地下水主要有上层滞水、潜水和岩溶裂隙水等,上层滞水主要赋存于粉质黏土顶部裂隙中,地下水主要补给来源为大气降水,在地表顺坡向发生径流,汇入地下,存储于岩石裂隙和土层孔隙中,季节性变化明显。地表水主要为施工建设开挖的坑、低洼地带的积水。

在下伏岩土层中,上部地层相对低阻与下部地层相对高阻的差异异常指示为基岩岩层与上覆覆盖层,而在基岩层中局部高阻异常和低阻异常的出现,与隐伏构造的存在有关。异常体整体呈圈闭状及高阻特征,推测可能存在岩溶空洞,若呈低阻特征,则推测溶洞内部可能被地下水或泥质等杂质填充。局部异常若呈条带状展布,且两侧延伸较远,则推测存在有断层裂隙带。岩溶空洞和断层裂隙带是常见的地下隐伏构造,相较于基岩,具有相差甚远的电性差异。根据地质资料可知,工作区地层上覆土层主要为杂填土、粉质黏土层,呈较低阻特征,且土层整体厚度较小,与下伏基岩(灰岩)的相对高阻存在较大的电性差异,而基岩内部存在充水岩溶,呈极低阻特征,三者电性差异为地球物理勘探方法提供有利条件,综合考虑使用高密度电阻率法进行探测。

2 方法原理及工作布置

高密度电阻率法是一种特殊的电阻率法。与一般的电阻率法相比,其不同之处在于高密度电阻率法采用了一种组合式剖面装置,这属于一种地层层析成像技术(Geo-chromatography,简称GT技术)。和常规电阻率法一样,高密度电阻率法通过供电电极A和B向地下供电流I,测量电极M和N间的电位差 ΔV ,记录点一般是M和N的中间点,求得该记录点的视电阻率值 $\rho_s = K\Delta V/I$ (K为装置系数,与电极距L有关, $K = 2\pi/(\frac{1}{L_{AM}} - \frac{1}{L_{BM}} - \frac{1}{L_{AN}} + \frac{1}{L_{BN}})$)。高密度电阻率法集电剖面法和电测深法为一体,并含有多种工作装置,通过高密度的采样方式来提高采样率和“多次覆盖”的方法提高信噪比。采集的数据清晰、直观,且能提供丰富的地下信息^[9]。图1为高密度电阻率法一般观测系统的测量及跑极方式。

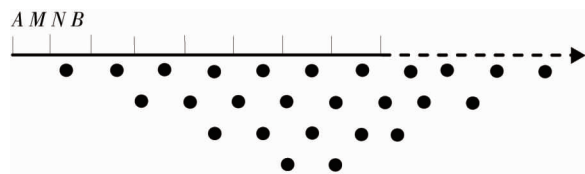


图1 高密度电阻率法观测系统

本次工作共布置8条测线,长度共计约980 m。由于勘探工作区正处于建筑施工期,场地内建筑材料较

多,测线只能根据现场情况灵活铺设,测线布置见图2,由东向西剖面依次为测线L1~L8,整体剖面方向为近南北向.本次高密度电阻率法勘探采用温纳(Wenner)和对称四极(Schlumberger)2种装置进行探测,电极距为2 m,主机为长春科技大学工程技术研究所生产的E60M型高密度电法仪,100 V恒压供电,供电时间1 s,电子自动补偿.随后使用GeoPen-EMS处理系统对数据预处理,再采用二维高密度电法反演程序Res2d.inv中的圆滑约束最小二乘法进行二维反演.

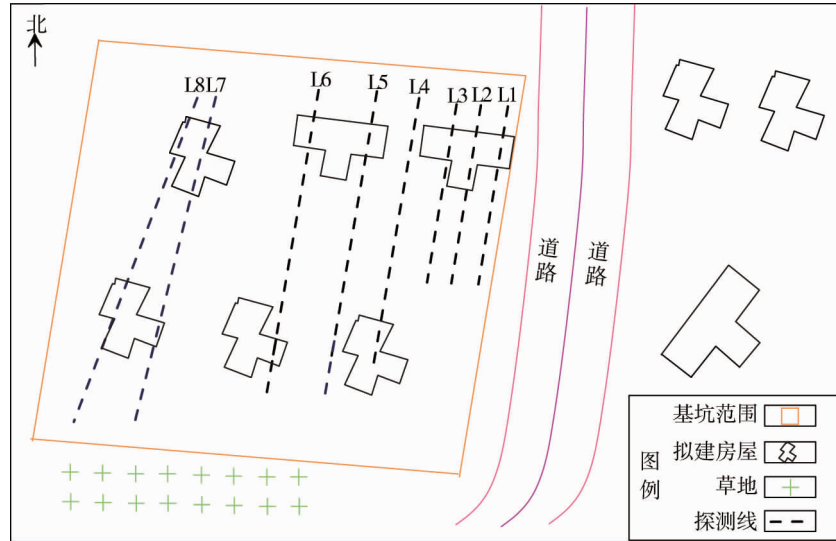


图2 物探测线布置

3 探测成果解释

选取典型测线L7和L8进行综合解释,其成果解释见图3~图6.其中图3a、图4a分别为L7测线Wenner装置和Schlumberger装置的实测断面图,图3b、图4b分别为L7测线Wenner装置和Schlumberger装置的反演断面图;图5a、图6a分别为L8测线Wenner装置和Schlumberger装置的实测断面图,图5b、图6b分别为L8测线Wenner装置和Schlumberger装置的反演断面图.实测L7长度为164 m,L8长度为166 m.通过对2种装置的实测数据和反演数据进行综合分析,以获取较为可靠的地下地质信息.

图3和图4为L7测线上高密度电阻率探测成果及二维有限差分反演成果图,其中反演成果以对数函数展示.根据探测数据可知,其有效探测深度为33.5 m.综合比对图3和图4可知:地电剖面图可分为2层,上部相对低电阻层和下部相对高阻层.低电阻层主要集中在近地表附近,电阻率为 $40\sim 80\ \Omega\cdot\text{m}$,等值线较为平缓,推测为第四系覆盖层,该层平均厚度为8 m左右,最大厚度为8.7 m,出现较多极低阻异常圈闭,推测由岩溶发育,且富含地下水.在深度8.7 m以下,视电阻率变化梯度增大,视电阻率超过 $114\ \Omega\cdot\text{m}$,推测为基岩层,其介质分布非常不均匀,局部存在明显的高阻异常,推测可能为局部风化不全的孤石或局部空洞.L7测线0~10 m出现大片低阻异常,形态变化较大且分布不均匀,结合现场,推测是开挖深基坑被泥土质充填所致,后经钻孔验证,证明确实未存在明显岩溶;L7测线34~40 m,埋深10~14 m处出现高阻异常圈闭,视电阻率变化较大,推测存在岩溶空洞;L7测线56~60 m,埋深19~21 m处也出现高阻异常,推测为岩溶空洞;在L7测线133~138 m,埋深21~26 m处出现低阻异常,视电阻率等值线变化较大,推测发育岩溶被地下水、泥土等物质所填充.综合分析探测成果,在如下位置均出现高阻异常圈闭,视电阻率等值线变化较大,推测为岩溶空洞:(1)L7测线76~84 m,埋深23~25 m;(2)L7测线86~90 m,埋深13~15 m;(3)L7测线88~94 m,埋深23~25 m;(4)L7测线104~110 m,埋深12~15 m.

图5和图6为L8测线上高密度电阻率探测成果及二维有限差分反演成果图,反演成果以对数函数展示.由成果图可以看出地电剖面图可分为2层,上部相对低电阻层和下部相对高阻层.上部低电阻层主要集中在近地表附近,推测为第四系覆盖层,这层厚度约为8.8 m,最大厚度约为11.5 m,出现较多极低阻异常圈闭,异常体积较小且呈连续分布,结合地质资料,推测发育有溶沟、溶槽,且被地下水或泥质所充填.8.8 m以下的下部介质整体呈相对高阻特征,考虑为灰岩基岩层.L8测线26~30 m,埋深6~8 m处出现高

阻异常,等值线变化较小,推测为空洞;在测线 58~60 m,埋深 21~23 m 处也出现高阻异常,结合探测成果,推测为岩溶溶洞;此外在 L8 测线 65~94 m、埋深 18~25 m,L8 测线 88~94 m、埋深 23~25 m,L8 测线 134~138 m、埋深 8~12 m 处均出现高阻异常,视电阻率等值线变化较大,推测为岩溶空洞.该段下部未出现明显低阻异常,因此推测未存在地下水发育.

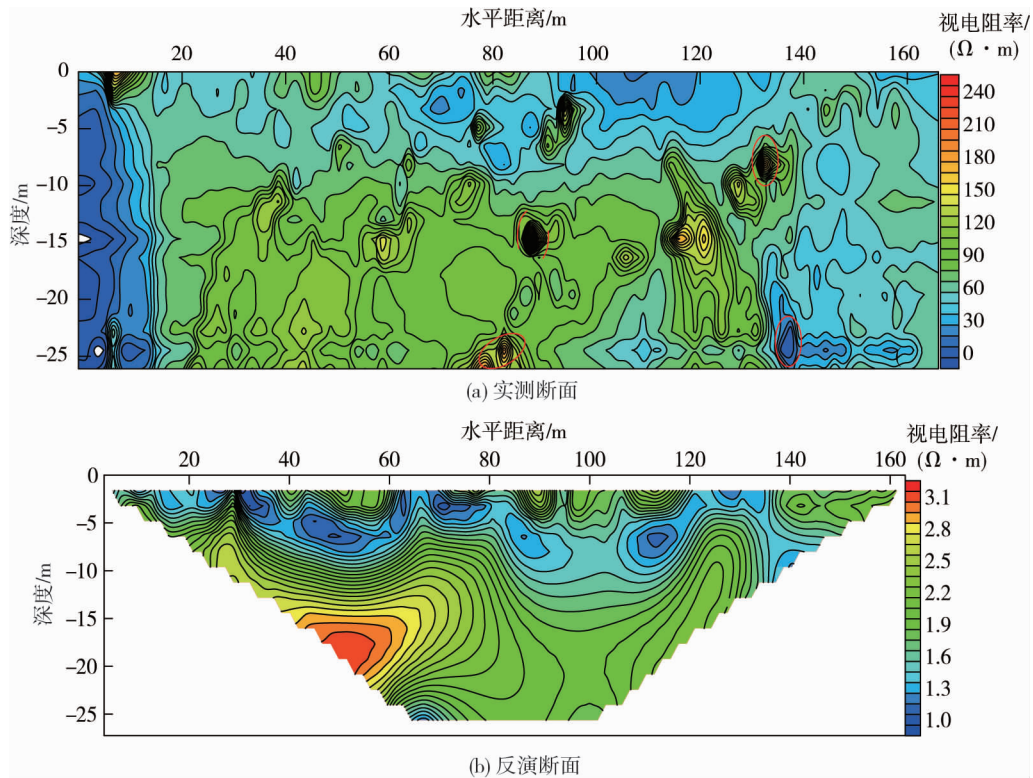


图 3 L7 测线 Wenner 装置探测成果

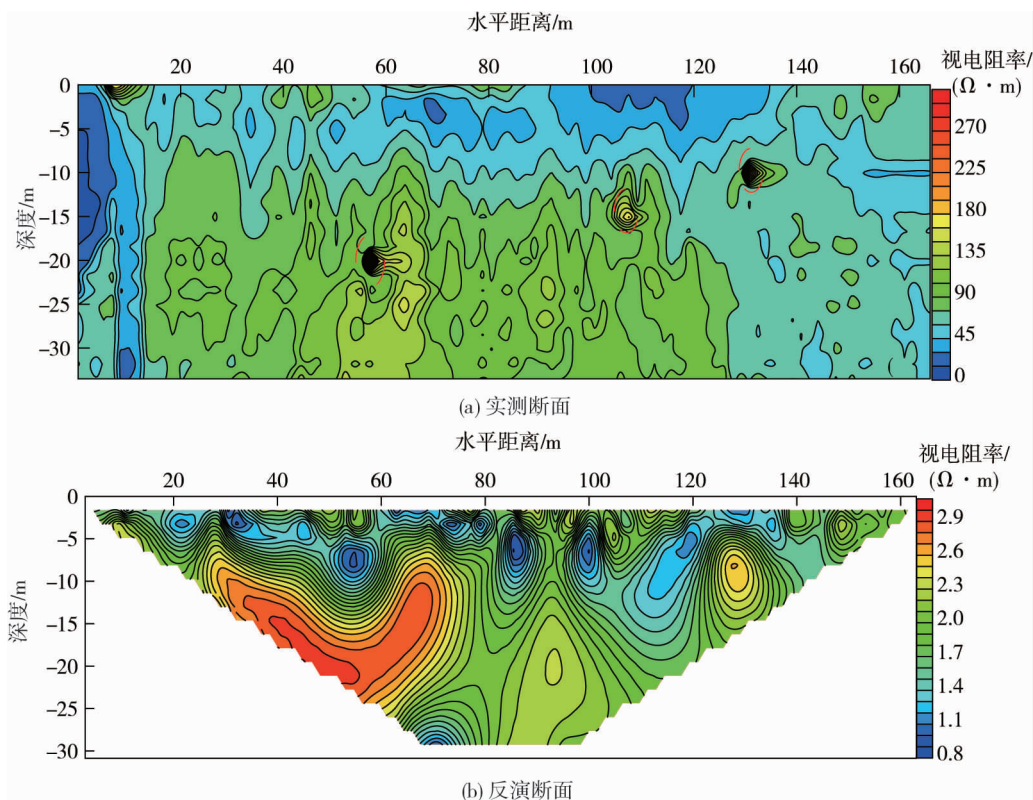


图 4 L7 测线 Schlumberger 装置探测成果

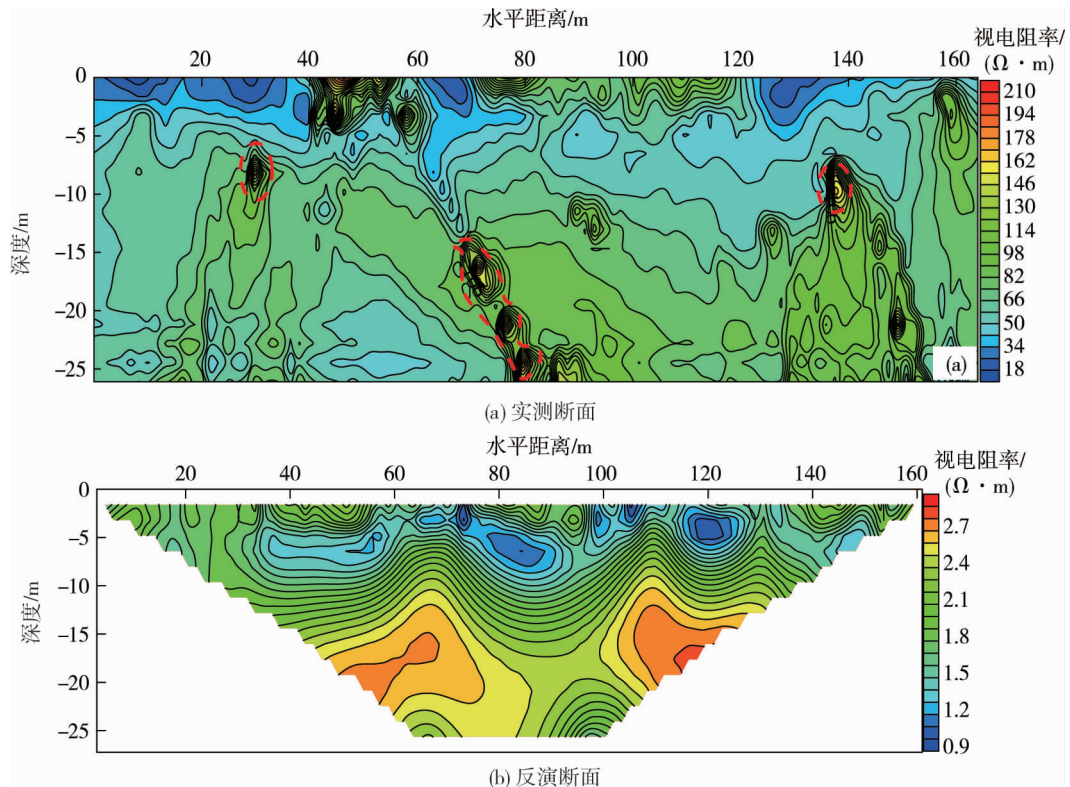


图 5 L8 测线 Wenner 装置探测成果

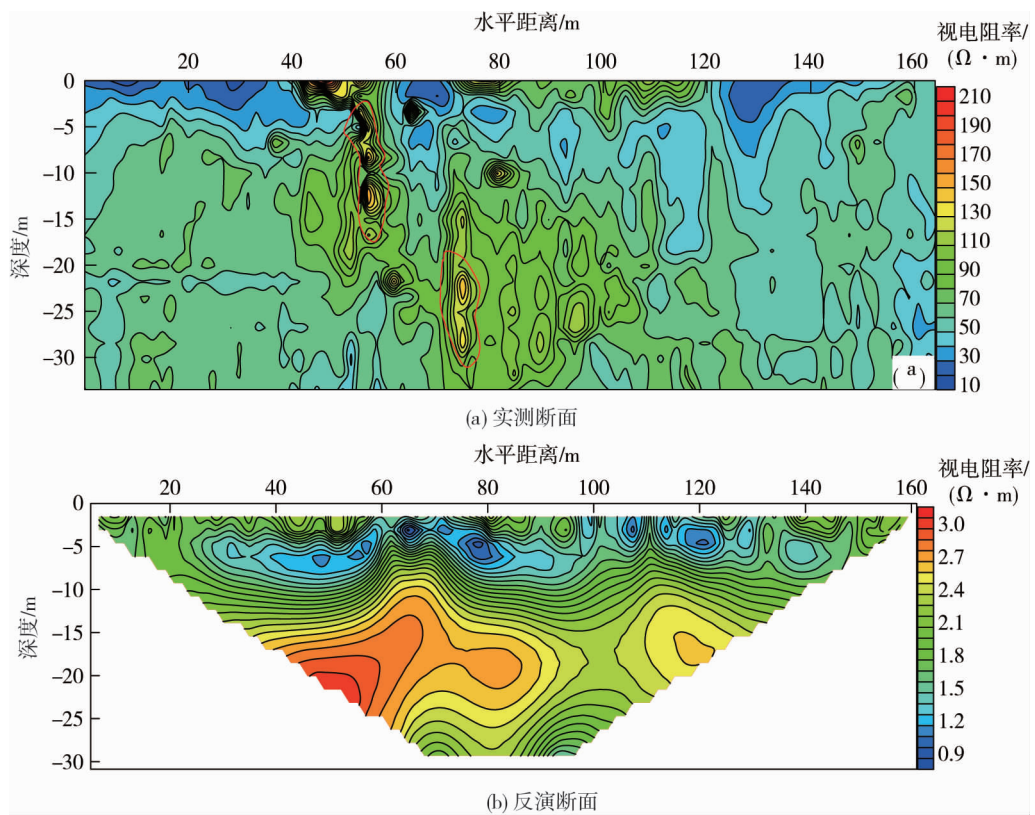


图 6 L8 测线 Schlumberger 装置探测成果

为验证物探成果,后期对 L8 测线进行钻孔验证,L8 测线物探成果与钻孔结果对比见表 1.由表 1 可知:钻孔结果与物探成果较吻合,证明高密度电阻率法勘探是可靠的.此外,在上部覆盖层中,经后期钻孔验证发现有岩溶发育,但在此表中只展示高阻异常钻孔结果.

表1 L8测线钻孔结果与物探成果对比

钻孔序号	钻孔岩溶埋深/m	物探解释埋深/m	物探测线距离/m
ZK41	5.5	6~8	26~30
ZK42	21.3	18~25	65~94
ZK44	23.2	23~25	88~94
ZK45	9.8	8~12	134~138

4 结论

1) 该地区地下岩溶较发育,其中浅表部因开挖深基坑被泥土质充填而导致呈低阻异常特征,中、深部主要以发育高阻岩溶空洞为主。

2) Wenner 装置和 Schlumberger 装置均具有良好探测效果.相较于单一装置,联立这 2 种装置的探测效果更佳.因此在今后相关浅层勘探中,可联立 2 种装置,进行综合分析,能较好地增强实际应用效果。

参考文献:

- [1] 杨文采,田钢,夏江海,等.华南丘陵地区城市地下空间开发利用前景[J].中国地质,2019,46(3):447-454.
- [2] 李学军.我国城市物探的应用与发展[J].地球物理学进展,2011,26(6):2221-2231.
- [3] 林君.现代地球物理仪器的开发与应用[J].地质装备,2004,5(2):3-7.
- [4] 李正文.浅层地震法在城市物探工作中的应用[J].中国地质,1986(11):16-19.
- [5] 吴奇,汤井田,黄文清,等.物探在城市地下溶洞探测中的应用[J].中国农村水利水电,2008(4):92-94.
- [6] 杨天春,许德根,张启,等.高密度电法在隐伏溶洞勘探中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):145-148.
- [7] 齐朝华,李世峰,李锦鑫,等.高密度电法在建筑地基溶洞勘察中的应用[J].矿业工程研究,2010,25(4):69-71.
- [8] 蔡勤波,罗振丽,穆建强,等.高密度电法在城市勘察中的应用[J].勘察科学技术,2021(3):56-60.
- [9] TASSY A, MAXWELL M, BORGOMANO J, et al. Electrical resistivity tomography (ERT) of a coastal carbonate aquifer (Port-Miou, SE France)[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(2): 601-608.
- [10] 王志鹏,刘江平,王鸣谦,等.高密度电法对带破碎状溶壳溶洞探测数值模拟[J].工程地球物理学报,2019,16(2):193-202.