

不同勘探方法在丰水期和枯水期岩溶塌陷探测效果分析研究

金爱芳, 刘磊, 殷秀兰

Studies on effect analysis of different exploration methods for karst collapse detection in the periods of rainy and dry seasons

JIN Aifang, LIU Lei, and YIN Xiulan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究——以武汉市为例

Techniques for detecting underground space in hidden karst region: Taking Wuhan as an example

何军, 刘磊, 黎清华, 刘道涵, 陈标典, 张傲, 赵永波 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 47-56

广昆铁路复线秀宁隧道大皮坡—中村段岩溶塌陷成因

An analysis of the cause of karst collapses near the Dapipo-Zhongcun section of the Xiuning tunnel of the Guangzhou-Kunming railway

周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 谢浩, 申豪勇, 王佳 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 146-146

基于层次聚类算法的孔压静力触探土体分类方法及试验研究

Soil classification method and experimental research on CPTU based on the hierarchical clustering algorithm

邱敏, 宋友建, 丛璐, 梅年峰, 王闫超 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 117-117

平原区深层隐伏岩溶塌陷主控因子地球物理调查方法适用性分析

$\{\text{suggestArticle.titleEn}\}$

房浩, 李巧灵, 雷晓东, 王海刚, 李晨, 关伟, 何 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 153-160

西南岩溶山区复合水动力场滑坡影响模式——以关岭县大寨滑坡为例

Impact model of landslide with complex hydrodynamic field in karst mountain areas of southwest China: a case study of the Dazhai landslide in Guanling County

易连兴 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 43-50

南方小型岩溶流域与非岩溶流域的释水过程及径流组分差异

Variations in discharge processes and runoff components between small karst watersheds and non-karst watersheds in Southern China

王泽君, 周宏, 罗明明, 郭绪磊, 蔡志强 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 27-27



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108028

金爱芳, 刘磊, 殷秀兰. 不同勘探方法在丰水期和枯水期岩溶塌陷探测效果分析研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 171-178.

JIN Aifang, LIU Lei, YIN Xiulan. Studies on effect analysis of different exploration methods for karst collapse detection in the periods of rainy and dry seasons[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 171-178.

不同勘探方法在丰水期和枯水期岩溶塌陷 探测效果分析研究

金爱芳¹, 刘磊^{2,3}, 殷秀兰¹

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 湖北省地质局地球物理勘探大队, 湖北武汉 430056;
3. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室(湖北省地质局), 湖北武汉 430056)

摘要: 岩溶塌陷的发生具有突发性和隐蔽性, 采取有效方法准确识别潜在致塌位置对科学合理防治岩溶塌陷具有重要意义。以武汉市典型地区为实例, 对比分析了丰水期和枯水期地质雷达、高密度电阻率法、静力触探 3 种勘探方法对岩溶塌陷的探测效果。结果表明: 在该类地质条件下, 地质雷达在工作频率 ≤ 100 MHz 时, 对 4 m 以内的扰动土有明显的响应, 40 MHz 工作频率的探测深度枯水期大于丰水期, 100 MHz 工作频率的扰动土响应特征枯水期比丰水期明显。高密度电阻率法在丰水期对地层结构的刻画更为精细准确, 适用于浅中层岩土体结构探测。静力触探在丰水期和枯水期无显著差异, 适用于 10 m 以内土体探测, 尤其适用于圈定塌陷区边界范围。研究结果可为水动力条件季节性变化大的地区其岩溶塌陷探测方法的选择提供参考, 为潜在塌陷点的准确识别提供技术支撑。

关键词: 岩溶塌陷; 地质雷达; 高密度电阻率法; 静力触探; 水动力条件; 地层结构

中图分类号: P642.26; P631

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)06-0171-08

Studies on effect analysis of different exploration methods for karst collapse detection in the periods of rainy and dry seasons

JIN Aifang¹, LIU Lei^{2,3}, YIN Xiulan¹

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 2. Geophysical Exploration Brigade of Hubei Geological Bureau, Wuhan, Hubei 430056, China; 3. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-environment Geology (Hubei Geological Bureau), Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract: Karst collapse geological disaster seriously restricts the social development. Due to its sudden and concealment, it is of great significance to take effective methods to accurately identify the potential collapse location for the scientific and reasonable prevention and control of karst collapse. In this study, a typical area in Wuhan was taken as an example to compare the karst collapse detection effects of three exploration methods, namely ground-penetrating radar (GPR), high-density resistivity method, and cone penetration, in rainy and dry seasons, providing reference for the selection of karst collapse exploration methods under hydrodynamic condition

收稿日期: 2021-08-13; 修订日期: 2021-10-02

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家行政事业类项目(121201014000150003)

第一作者: 金爱芳(1982-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事地质环境监测工作。E-mail: jinaifang0813@163.com

通讯作者: 殷秀兰(1967-), 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事地质环境监测和调查研究。E-mail: lili877966661@qq.com

changes. The results show that the GPR has a good response to the disturbed soil within 4 m at the frequency of ≤ 100 MHz. The detection depth of 40 MHz GPR is deeper, and the abnormal response of the disturbed soil detected by 100 MHz GPR is clearer in dry seasons than that in rainy seasons. The high-density resistivity method describes the stratigraphic structure more accurately in rainy seasons than in dry seasons, and is adaptable for the detection of shallow and middle rock and soil structure. There is no significant difference between cone penetration in the period of rainy and dry seasons, while that is suitable for soil detection within 10 m, especially for delineating the boundary range of the subsidence area.

Keywords: karst collapse; ground penetrating radar (GPR); high-density resistivity method; cone penetration; hydrodynamic condition; stratigraphic structure

岩溶塌陷具有突发性和隐蔽性,准确识别出潜在的岩溶塌陷点,从而采取科学的、合理的方法手段进行预防和治理具有重要意义。岩溶塌陷等不良地质体的形成与发育主要与地层岩性、断裂构造、地下水的活动有关,其在电阻率、介电常数、密度等物理性质上与周围围岩存在差异,而地球物理方法可以利用地下介质的物性差异查明岩溶塌陷的分布情况,为预防和减轻岩溶塌陷灾害提供地球物理依据^[1]。

目前国内外探测岩溶塌陷常用的地球物理方法有各类电法、地震勘探法、重力测量等^[2]。由于岩溶塌陷发育具有不确定性,依靠单一的物探方法来推断地下介质空间位置不够精确和严谨,因此必须组合多种方法来联合探测以提高其解释准确度。目前综合地球物理方法在岩溶塌陷地质调查中的应用越来越广泛,El-qady 等^[3]运用偶极子-偶极子阵列的地电阻率层析成像和地质雷达对埃及开罗的东南部浅层岩溶洞穴进行了探测;Kaufmann 等^[4]运用重力测量和电阻率成像对德国哈尔茨山脉南部的洞穴进行了探测;Anbazhagan 等^[5]运用地质雷达和多道表面波分析(MASWs)技术对印度喀拉拉邦一个大型建筑工地的空洞进行了识别。有学者运用高密度电阻率法^[6-16]、浅层地震反射波法^[6-11]、地质雷达^[7-8,11-12]、跨孔地震CT^[8]、波速测试^[8]、土壤氦浓度^[8]、主动源面波法^[13]、微动法^[11,13-14]、钻孔电磁波CT^[15]、瞬变电磁法^[11-12]、音频大地电磁法^[10,14]、重力测量法^[14]、混合源面波^[11]、孔间层析成像^[11]、地面核磁共振法^[11]和弹性波CT法^[17]中的一种或几种组合方法对不同地区的岩溶塌陷进行了调查和探测。众多方法中,由于地质雷达和高密度电阻率法的经济适用性高,数据采集迅速,抗干扰能力强,已经成为岩溶塌陷探测中不可缺少的技术手段。静力触探技术由于其快速性、持续性,且定位精确度较高的特点,在岩土工程测量中应用广泛,它能够有效地界定岩土体结构,对土壤进行有效分层,确

定土层的强度及变形程度。前人利用这些方法在岩溶探测方面已经取得了很大的进展,为这些方法的运用和发展提供了非常重要的指导意义。如熊志涛等^[18]运用高密度电阻率法、地质雷达等方法对武汉市毛坦港岩溶塌陷区进行物探勘查,总结认为高密度电阻率法对浅层—中层土层和基岩及其岩溶发育状况可做出较精确的刻画,地质雷达主要反映浅层第四系土层变化情况,对于土层的扰动情况可做出较精准的判断,可信性较高。赵杨杉等^[19]对比不同发射频率的地质雷达对异常的解释效果发现,100, 40, 25 MHz对异常的分辨能力及探测精度依次降低。王庆学^[20]研究发现 80 MHz 和 40 MHz 两种天线系统在水泥地面段无明显干扰情况下,探测深度及精度基本一致,但 80 MHz 天线的分辨率和抗干扰能力较 40 MHz 天线强。以上研究大都集中在探测方法对岩溶塌陷的空间条件和物质条件的有效性和适用性上,而对诱发岩溶塌陷的主导因素——水动力条件变化,对其探测效果影响研究甚少,丰水期和枯水期季节性水动力条件的变化就是一种典型案例。

基于此,本研究选取武汉市典型地区开展丰水期和枯水期地质雷达、高密度电阻率法和静力触探 3 种方法开展岩溶塌陷探测,对不同时期不同方法的探测效果进行了对比与分析,总结了不同勘探方法在岩溶探测中的适用性及探测深度,以期对季节性变化大的地区开展岩溶塌陷探测方法的选择提供参考,为潜在塌陷点的准确识别提供技术支持。

1 工作区概况

工作区位于武汉市南部江夏区覆盖型岩溶发育区——老桂子山岩溶条带内,位于长江东岸,到长江的直线距离约 5 km,处于武汉长江一级阶地,基岩以上覆盖层为典型的上土下砂的二元结构。表层为第四系全新统冲积黏性土,强度较低,下部为粉细砂

层。全新统冲湖积层上部为软塑-可塑状粉质黏土及粉土,局部分布流塑-软塑状淤泥、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土,厚度约 5.3 m,下部为松散-中密状粉细砂或粉土粉砂互层,底部偶见砾砂,厚度为 18.35 m,砂层往下为可溶灰岩,且岩溶较发育,存在砂土颗粒向下漏失至下覆溶洞、溶隙之中的基本地质环境条件。

该工作区西南边紧邻金水河,南边为法泗镇中心街道,交通线路相对简单,其西北边有武深高速通过,2014年9月5日该高速路的建设引发了大型岩溶塌陷。区内潜水面水位受长江水量影响显著,一般在10、11月份至次年4月份为枯水期,其他时间为丰水期。

2 野外工作方法

2.1 工作区物性特征

收集整理分析前人在工作区开展过的大量地球物理勘查工作成果,区内不同介质间存在较明显的电性差异:第四系覆盖层、新近系、古近系均为相对低阻,视电阻率一般在 $10 \sim 40 \Omega \cdot m$;志留系砂页岩、页岩视电阻率为 $70 \sim 170 \Omega \cdot m$,常见值约为 $70 \Omega \cdot m$,为相对中阻;三叠系、二叠系、石炭系灰岩、泥盆系石英砂岩视电阻率均在 $100 \Omega \cdot m$ 以上,为相对高阻,但当其中存在溶洞时,表现出明显的低阻变异。

工作区的岩石、土体之间皆存在有较大的介电常数差异,其中干砂的相对介电常数为 $4 \sim 6$,湿黏土的为 15 ,干土壤的为 $3 \sim 5$,而含水量为 20% 的土壤为 10 。不同土体比贯入阻力值往往存在较大的差异,一般黏土小于 1 MPa ,粉质黏土介于 $1 \sim 5 \text{ MPa}$,粉砂介于 $1 \sim 30 \text{ MPa}$,同一土体密实程度不同,阻力值差异也较大,在发生岩溶塌陷时,塌陷坑上方及其周边一定区域,由于土体发生扰动改变了原有的力学性质,其比贯入阻力值会发生急剧的下降。以上条件为本区进行岩溶塌陷不同勘探方法的合理选择提供了良好前提条件。

2.2 工作方法

2.2.1 地质雷达法

根据测区地形地质条件,采用高精度探地雷达(美国 GSSI 公司生产, SIR-4 000),在条件允许时分别采用 100 MHz 、 40 MHz 的天线各测一次,如地形地物受限时,据实际情况采用其中一种频率测量。扫描速率为 23 扫/秒 ,采样点数为 1024 ,时窗分别为 400 和 800 ns ,叠加次数分别为 5 和 28 次。丰水期和枯水期各布设 2 条测线,数据处理软件采用 RADAN 软件。

2.2.2 高密度电阻率法

高密度电阻率法数据采集采用多功能电法仪(国

产 WGMD-4),由多功能数字直流激电仪、多路电极转换器和供电电池箱组成。该系统具有操作方便,采集数据量大,采集数据重现性和稳定性好。本次采用温纳测量装置,滚动测量方式进行,供电电源为 480 V ,供电测量时间为 3 s ,极距 5 m ,电极排列长度 $220 \sim 445 \text{ m}$ 。数据处理及反演采用 RES2DINN 软件进行,反演拟合误差要求 $\text{RMS} \leq 20\%$,三维成图软件采用 voxler4 等。

2.2.3 静力触探

静力触探选用静力触探仪(J-3型),主要由触探主机、反力装置、探头、探杆及测量系统构成,以及其它设备及配套工具等。在岩溶塌陷区可以将静力触探点均匀分布于全测区范围里,通过统计规律确定正常土体和扰动土体的应力响应。当记录深度与实际深度有出入时,应按深度线性修正深度误差。主要修正以下内容:①触探的同时量测探杆的偏角,应进行深度修正;②当有零点漂移时,一般在回零段内以线性内插法进行校正,校正值等于读数值减零读数内插值。

试验资料按下列公式计算比贯入阻力,对比探测参数确定扰动土层的变化范围边界。

$$P_s = K_p \varepsilon_p$$

式中: P_s ——比贯入阻力/MPa;

K_p ——对应的率定系数;

ε_p ——单桥探头的应变值/MPa。

工作区共布设 7 个探测点,丰水期、枯水期均布设了 5 个测点,其中测点 $1, 3, 4$ 在两期是重复的,测点 $1, 2, 4$ 为塌陷部位测点,测点 $3, 5, 6, 7$ 为未塌陷部位测点。

2.3 工作部署

基于卫星影像分析可以判断出工作区岩溶塌陷坑的准确位置,并在原塌陷坑上及其周边有针对性的开展地质雷达、高密度电阻率法和静力触探综合勘探(图1),分析水动力条件变化下不同勘探方法对岩溶塌陷探测效果的影响。地质雷达测线主要布设于岩溶塌陷发育区及覆盖层厚度小于 30 m 的区域,并沿着岩溶条带分布方向和垂直构造方向分别布设,同时兼顾考虑避开构筑物、管网密集等干扰因素太多的区域。高密度电阻率法测线沿垂直构造方向布设,且与地质雷达测线 2 存在邻近关系,以便各探测成果互相验证。静力触探点主要布设于岩溶塌陷坑内外,以便探测效果对比分析。

3 种方法分丰水期和枯水期两个阶段探测,丰水期的工作为初步探测,以获得岩溶发育区岩土体的基

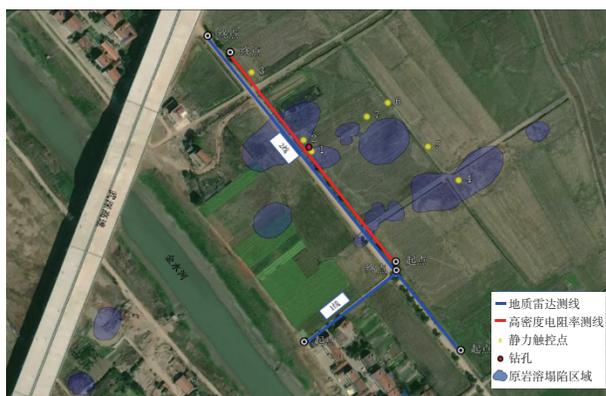


图 1 工作区测线布设图

Fig. 1 Survey lines of study area

注: 蓝线为地质雷达 1 线, 红线为高密度电阻率法测线, 黄点为静力触探测点。

本情况; 枯水期的工作主要是按照丰水期的测线进行重复性的第二轮探测, 用于和丰水期数据对比分析。各方法探测工作丰水期于 2019 年 8 月份完成, 枯水期工作于 2019 年 10 月份完成。

3 结果

3.1 地质雷达勘察结果解释

由地质雷达 1 线和 2 线探测效果图可以看出(图 2), 与 100 MHz 工作频率地质雷达相比, 40 MHz 工作频率地质雷达在丰水期和枯水期的异常响应差异较为微小, 这是因为低工作频率雷达的自生波长较大对异常体的分辨率本身较低所致, 同时由于武汉市常年降雨较多的气候特点, 无论是丰水期还是枯水期深部土壤的保水性差异较小, 故探测的地质目标本身也不存在显著差异。

通过丰、枯期数据纵向对比分析, 同一工作频率的地质雷达在枯水期探测效果均好于丰水期。在探测深度上, 40 MHz 工作频率时, 丰水期有效探测深度为 7 m, 而枯水期的有效探测深度为 14 m, 差异显著; 100 MHz 工作频率时, 无论丰水期, 还是枯水期, 有效探测深度均在 4 m 左右, 差异不显著。可见采用低工作频率(小于 100 MHz)枯水期的探测深度要远大于丰水期。在探测精度上, 100 MHz 工作频率地质雷达在 1 线枯水期 20~35 m 处的雷达剖面存在大范围异常响应, 推测该位置存在扰动土, 而同工作频率丰水期及 40 MHz 工作频率丰、枯水期均未见异常响应。2 线雷达剖面在 40 MHz 和 100 MHz 工作频率的丰、枯期均无明显的异常响应, 虽然经过原塌陷区位置, 但是现已作了人工回填处理, 回填土与其本身土质介

电常数差异较小, 因而导致异常响应不显著。可见 100 MHz 地质雷达在枯水期比丰水期探测到的浅部扰动土异常响应显著且更加清晰。

3.2 高密度电阻率法勘察结果解释

由丰、枯水期的高密度电阻率法反演剖面(图 3)可看出, 两个剖面的测线整体视电阻率均存在明显的梯度异常, 变化范围为 10~770 $\Omega \cdot m$ 。据电阻率特征分成三层, 上中部为低阻层(10~65 $\Omega \cdot m$), 下部为高阻层(>70 $\Omega \cdot m$)。上部低阻层厚度约 5 m, 其电阻率特征范围处于 10~30 $\Omega \cdot m$, 推测为第四系土层, 低阻异常范围由小号端至大号端逐渐加厚, 水平距离 110~130 m 处有一低电阻率凹异常区, 其地表位置与原塌陷坑一致。中部低阻层厚度约 15 m, 其电阻率特征范围处于 30~65 $\Omega \cdot m$, 推测为砂层, 下部高阻层为灰岩(电阻率大于 70 $\Omega \cdot m$)。这表明高密度电阻率法在本工区对岩溶探测效果非常显著。可见高密度电阻率法对于覆盖层厚度小于 30 m、覆盖层具有“上黏下砂”二元结构、原始塌陷位置和基岩面均有良好的响应。

3.3 静力触探勘察结果解释

由丰水期不同测点的静力触探成果(图 4)可看出, 塌陷部位测点 1, 2, 4 比贯入阻力值随深度变化曲线基本一致, 在比贯入阻力达到 5 MPa 以上时, 在土层中的贯入深度均超过 10 m, 其后比贯入阻力快速增加, 这是由于上部原有塌陷使土体发生扰动, 改变了原有岩土体的力学性质, 比贯入阻力较低, 当贯入深度达到 10 m 的粉砂层之后, 比贯入阻力升高; 相对而言, 未塌陷的测点 3 和 5, 在土层中的贯入深度超过 7 m 后, 比贯入阻力则会快速增加。同时, 测点 3 和 5 在 I 区(1~3 m 处粉质黏土层)出现第一个峰值, 在 II 区(7~10 m 处粉砂层)处出现第二个峰值, 曲线特征存在明显的一致性。

4 讨论

通过对同一工作频率不同时期的地质雷达探测效果(图 2)对比分析, 100 MHz 地质雷达在枯水期比丰水期探测到的浅部扰动土异常响应显著且更加清晰。这与地质雷达受含水层含水率影响, 含水率过大效果不明显研究结果相一致^[21]。40 MHz 工作频率探测深度的显著差异可能是由于丰水期土壤湿度大, 雷达波在土壤层衰减速度快, 传播深度相对较浅, 接收到的反射信号弱; 而 100 MHz 工作频率本身探测深度较浅, 丰、枯期浅地表土壤含水率受到地下水影响较小, 因此 100 MHz 工作频率的探测深度受到的影响较

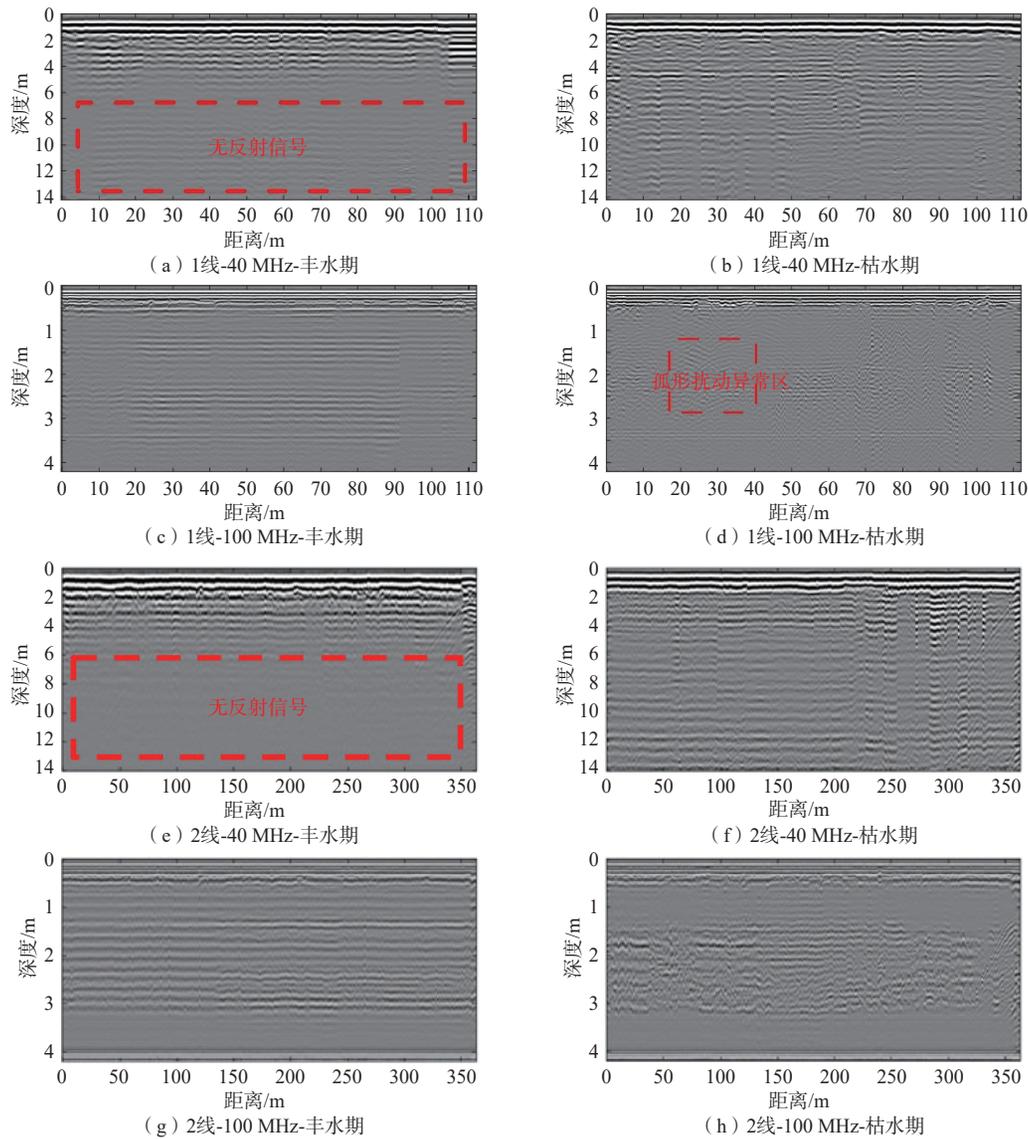


图 2 地质雷达 1 线和 2 线丰、枯水期探测效果图

Fig. 2 Detection effect diagram of geological radar line 1 and 2 in the period of rainy and dry seasons

小。这进一步验证了当地下介质有高黏土含量或者高含水率特性时, 电磁波信号会产生急剧的衰减, 使得该方法穿透深度大大降低^[22]。通过对比可得出该工作区扰动土体坍塌和边界扩大主要受渗流作用影响。丰水期长江水位上涨, 地下水渗流方向向上, 土壤层和土洞逐渐饱水, 土壤颗粒受到向上的渗流压力作用, 上下应力差减小, 发生岩溶地面塌陷的几率低; 在枯水期当地下水位快速下降时, 水的渗流方向向下, 会向下带走土壤颗粒, 使得扰动土范围扩大, 以及土层下方存在岩溶空隙或岩溶空洞, 使得土壤层应力失衡, 土壤向下泄漏或垮塌, 造成土洞扩大, 严重时土体发生剧烈的破坏使地面塌陷。

对比分析高密度电阻率法 1 线丰、枯水期剖面

(图 3), 枯水期浅表电阻率由低逐步升高随后逐渐降低, 其等值线疏密程度与丰水期相比, 较为稀疏。而丰水期电阻率等值线较为密集, 电法剖面对中间砂层的电性特征反应更为精细(丰水期砂层的电性特征明显表现为两层特征, 上部粉砂电阻率较高, 下部细砂电阻率较低), 可以对较小的异常进行确定。结合工作区已有钻孔资料来看, 第四系分为黏土层、粉砂层、细砂层, 总体表现为低阻, 可见丰水期探测效果与钻孔资料更加吻合。这表明高密度电阻率法在高含水率、低电阻率地层具有较大的探测深度和良好的电阻率层析成像能力。这是由于丰水期砂层含水率高, 电阻率低(从统计数据可以得出, 该处丰水期砂层的电阻率较枯水期砂层的电阻率值约下降 30%, 处于

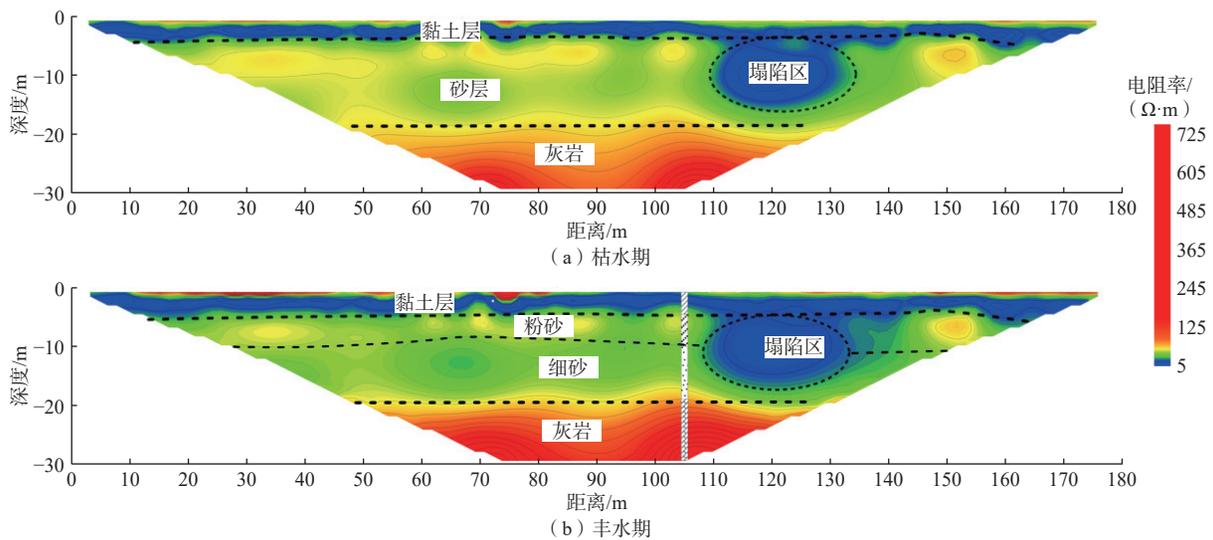


图 3 高密度电阻率法 1 线丰、枯水期剖面图

Fig. 3 Section of high density resistivity line 1 in the period of rainy and dry seasons

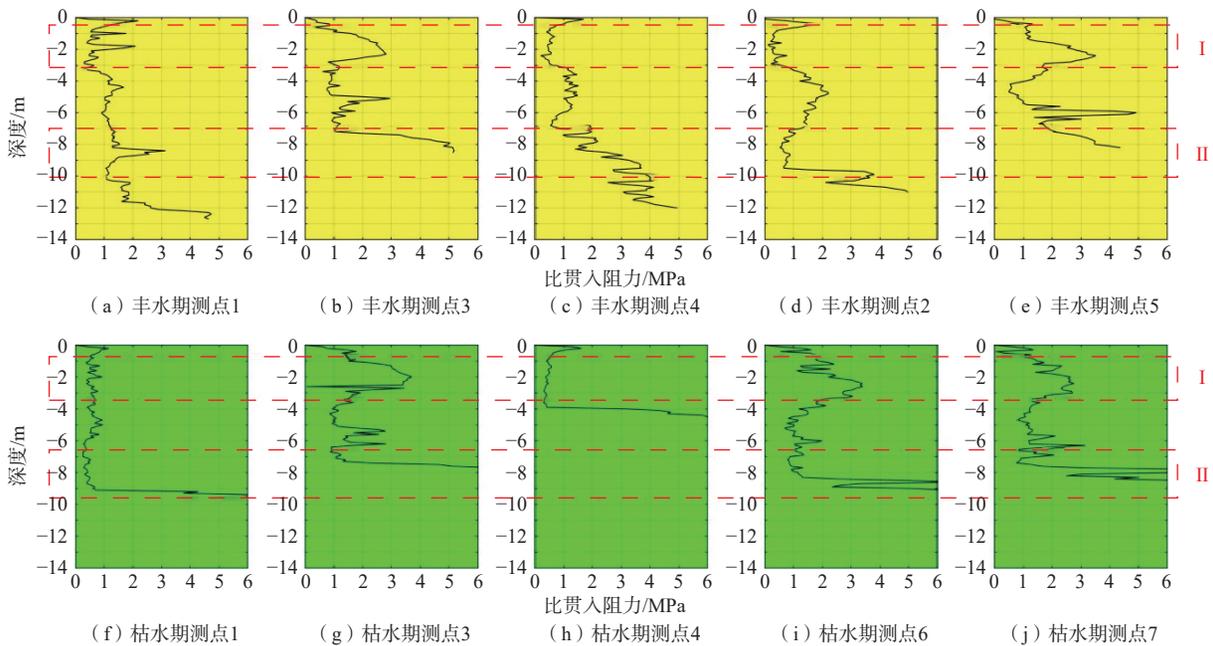


图 4 静力触探丰、枯水期成果图

Fig. 4 The cone penetration results in the period of rainy and dry seasons

25 ~ 50 Ω·m), 而枯水期时砂层中水分流失, 整体电阻率升高, 层间异常特征以及基岩接触面都变的相对模糊, 因此通过对丰、枯水期监测数据对比, 可以大致推测地下砂层中含水情况及水位变化幅度, 如加密观测时间, 可对岩溶塌陷的预测起到一定参考作用。

静力触探枯水期测点 1, 3, 4 与丰水期的测点点位相同, 测点 6, 7 为新测点位(均在未塌陷部位), 未塌陷测点 3, 6, 7 静力触探曲线特征与丰水期所测曲线形态一致, 在 I 和 II 区均有较高响应值, 同一点位的比贯入阻力在枯水期略高于丰水期。塌陷部位测点

1 静力触探曲线与丰水期曲线特征略有差异, 但不显著。塌陷部位测点 4 两次探测在深部约 4 m 处存在较大差异, 推测为塌陷部位回填局部坑存在石块等引起, 仅为个例, 不作为参考对象。可见地下水位变动对工作区的静力触探效果影响较小。基于静力触探在塌陷点与非塌陷点曲线特征对比分析可得出以下认识: (1) 未塌陷点在表层 I 区位置存在明显的高值异常区, 塌陷点则不存在此特征; (2) 静力触探值在深部同一深度 (II 区) 未塌陷点的探测值要高于塌陷点探测值, 根据上述特征, 推测均为塌陷引起的土体松

动原因造成; (3) 静力触探值在丰水期和枯水期的探测效果大致相同, 因此, 丰水期和枯水期对静力触探的影响较小。由此可见, 静力触探在圈定塌陷区边界范围有非常好的效果, 且丰枯水期无显著差异。

5 结论

(1) 在工作频率 ≤ 100 MHz 时, 地质雷达对 4 m 以内的扰动土有良好的响应。40 MHz 工作频率时地质雷达在枯水期的探测深度要大于丰水期, 但二者异常响应差异较为微小; 100 MHz 工作频率时地质雷达探测深度在丰水期和枯水期无显著差异, 但枯水期比丰水期对浅部扰动土异常响应显著且更加清晰。

(2) 高密度电阻率法对浅中层岩土体探测有良好的响应。在丰水期对地层结构的刻画比枯水期更为精细准确, 尤其适用于覆盖层厚度小于 30 m 且具有“上黏下砂”二元结构的地质条件。

(3) 静力触探对 10 m 以内土体探测展现出良好的响应, 丰水期和枯水期的探测效果无显著差异, 在圈定塌陷区边界范围有较好的效果。

参考文献 (References) :

- [1] 陈玉玲, 韩凯, 陈贻祥, 等. 可控源音频大地电磁法在岩溶塌陷勘察中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(6): 2616 - 2622. [CHEN Yuling, HAN Kai, CHEN Yixiang, et al. The application of CSAMT in karst collapse investigation[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(6): 2616 - 2622. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 杨进, 武伟, 刘兆平. 城市地质灾害勘察中地球物理方法的应用效果[J]. *物探化探计算技术*, 2005, 27(3): 233 - 236. [YANG Jin, WU Wei, LIU Zhaoping. Applications of geophysical method to detect urban geologic hazards[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2005, 27(3): 233 - 236. (in Chinese with English abstract)]
- [3] EL-QADY G, HAFEZ M, ABDALLA M, et al. Imaging subsurface cavities using geoelectric tomography and ground-penetrating radar[J]. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2005, 67(3): 174 - 181.
- [4] KAUFMANN G, ROMANOV D, NIELBOCK R. Cave detection using multiple geophysical methods: Unicorn cave, Harz Mountains, Germany[J]. *GEOPHYSICS*, 2011, 76(3): B71 - B77.
- [5] ANBAZHAGAN P, ROHIT D, PRABHAKARAN A, et al. Identification of karstic features in lateritic soil by an integrated geophysical approach[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2018, 175(12): 4515 - 4536.
- [6] 邓凯, 沈云发, 张玉池. 综合物探方法在高速公路岩溶塌陷探测中的应用分析[J]. *工程地球物理学报*, 2012, 9(1): 54 - 57. [DENG Kai, SHEN Yunfa, ZHANG Yuchi. Application of integrated geophysical exploration method to detecting karst collapse of the highway[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2012, 9(1): 54 - 57. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 陈贻祥, 潘科. 综合物探方法在岩溶塌陷探测中的应用分析[J]. *人民长江*, 2012, 43(增刊 2): 9 - 11. [CHEN Yixiang, PAN Ke. Application of integrated geophysical exploration method to detecting karst collapse[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(Sup 2): 9 - 11. (in Chinese)]
- [8] 胡让全, 黄健民. 综合物探方法在广州市金沙洲岩溶地面塌陷、地面沉降地质灾害调查中的应用[J]. *物探与化探*, 2014, 38(3): 610 - 615. [HU Rangquan, HUANG Jianmin. The application of integrated geophysical techniques to the investigation of karst ground collapse and ground subsidence in Jingshazhou area, Guangzhou City[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(3): 610 - 615. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 彭超. 地震映象法与高密度电法在岩溶塌陷勘察中的联合应用[J]. *工程地球物理学报*, 2016, 13(1): 60 - 63. [PENG Chao. The combined application of seismic imaging method and high-density electric method to the survey of karst collapse areas[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2016, 13(1): 60 - 63. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张伟, 甘伏平, 魏巍, 等. 综合物探方法在淮河滨河浅滩岩溶塌陷调查中的应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(2): 832 - 839. [ZHANG Wei, GAN Fuping, WEI Wei, et al. Applied research of comprehensive geophysical method to the investigation of karst collapse in the riverside shoal of Huaihe River[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(2): 832 - 839. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 何军, 刘磊, 黎清华, 等. 隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究——以武汉市为例[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 47 - 56. [HE Jun, LIU Lei, LI Qinghua, et al. Techniques for detecting underground space in hidden karst region: Taking Wuhan as an example[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 47 - 56. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王长风. 综合物探方法技术在岩溶塌陷防治工程

- 中的应用[J]. *安徽地质*, 2019, 29(4): 286 – 289. [WANG Changfeng. Application of comprehensive geophysical exploration method and technology in karst collapse prevention and control project[J]. *Geology of Anhui*, 2019, 29(4): 286 – 289. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 郑智杰, 敖文龙, 曾洁, 等. 综合物探法在柳州泗角村岩溶塌陷区调查中的应用[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(5): 143 – 149. [ZHENG Zhijie, AO Wenlong, ZENG Jie, et al. Application of integrated geophysical methods to karst collapse investigation in the Sijiao Village near Liuzhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(5): 143 – 149. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 房浩, 李巧灵, 雷晓东, 等. 平原区深层隐伏岩溶塌陷主控因子地球物理调查方法适用性分析[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 153 – 160. [FANG Hao, LI Qiaoling, LEI Xiaodong, et al. Applicability of geophysical survey methods for the main controlling factors of deep covered karst collapse in plain areas[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 153 – 160. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 赵玉宝, 付敏. 综合物探方法在岩溶塌陷地质灾害调查中的应用研究[J]. *湖南交通科技*, 2018, 44(4): 47 – 51. [ZHAO Yubao, FU Min. Application of integrated geophysical method in geological disaster investigation of karst collapse[J]. *Hunan Communication Science and Technology*, 2018, 44(4): 47 – 51. (in Chinese)]
- [16] 朱紫祥, 胡俊杰. 高密度电法在岩溶地区溶洞勘察中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2017, 14(3): 290 – 293. [ZHU Zixiang, HU Junjie. Application of high-density electrical method to exploration of karst caves[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2017, 14(3): 290 – 293. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 牛建军, 杜立志, 谷成, 等. 岩溶探测中的弹性波CT方法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2004, 34(4): 630 – 633. [NIU Jianjun, DU Lizhi, GU Cheng. The application of elastic CT method in karst prospecting[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2004, 34(4): 630 – 633. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 熊志涛, 赵德君, 文美霞. 综合物探方法在武汉市毛坦港塌陷勘查中的应用[J]. *资源环境*, 2014, 28(2): 188 – 192. [XIONG Zhitao, ZHAO Dejun, WEN Meixia, et al. The application of comprehensive geophysical prospecting in karst collapse investigation, Wuhan City[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2014, 28(2): 188 – 192. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 赵杨杉, 王洁, 张威. 地质雷达方法在武汉岩溶探测中的应用分析[J]. *中国煤炭地质*, 2019, 31(增刊 1): 108 – 112. [ZHAO Yangshan, WANG Jie, ZHANG Wei. Applied analysis of ground penetrating radar in Wuhan karst prospecting[J]. *Coal Geology of China*, 2019, 31(Sup 1): 108 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王庆学. 地质雷达在城市地下岩溶探测中的应用[J]. *中国煤炭地质*, 2018, 30(12): 102 – 105. [WANG Qingxue. Application of ground penetrating radar in urban underground karst prospecting[J]. *Coal Geology of China*, 2018, 30(12): 102 – 105. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 吕富雪. 地质雷达在高速公路路基勘察与处理中的应用[J]. *施工技术*, 2008, 37(增刊 1): 249 – 251. [LYU Fuxue. Application of geological radar in investigation and treatment of highway subgrade[J]. *Construction Technology*, 2008, 37(Sup 1): 249 – 251. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李嘉, 郭成超, 王复明, 等. 探地雷达应用概述[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 629 – 637. [LI Jia, GUO Chengchao, WANG Fuming, et al. The summary of the surface ground penetrating radar applied in subsurface investigation[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 629 – 637. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 宗 爽