doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.04.13
引用格式: 谢小国,张伟,罗兵,等. 成都市城市道路塌陷成因及快速探测方法[J]. 中国地质调查,2022,9(4): 112-120. (Xie X G,Zhang W,Luo B,et al. Causes and rapid detection methods of urban road collapse in Chengdu City[J]. Geological Survey of China,2022,9(4): 112-120.)

成都市城市道路塌陷成因及快速探测方法

谢小国[1,2,3], 张 伟[1,2,3], 罗 兵[1,2,3], 孙 东[1,2,3],
王 强[1,2,3], 刘伟祖[1,2,3], 杨 涛[1,2,3]

(1. 四川省华地建设工程有限责任公司,四川 成都 610081; 2. 四川省地质矿产勘查开发局成都水文地质工程地质中心,四川 成都 610081; 3. 四川省地质灾害防治工程技术研究中心,四川 成都 610081)

摘要: 城市道路塌陷严重危害城市公共安全,对城市道路塌陷隐患进行快速、准确、绿色的探测,有助于减少城市地下病害发育,提升城市安全运营能力。通过调查分析,成都市城市道路塌陷的主要成因包括地质结构复杂、地下水丰富、人类工程活动频繁等。采用车载三维探地雷达对城市道路进行快速探测,建立了以探测、解译、验证、评估、成果及信息化管理为系统的探测体系。实践表明,车载三维探地雷达是快速探测城市道路塌陷隐患的有效方法。

关键词: 城市道路; 塌陷成因; 车载三维探地雷达; 地下病害体探测
中图分类号: TP79; U416 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-8706(2022)04-0112-09

0 引言

随着城市建设与发展进程的不断加快,城市地面塌陷逐渐呈现高发、频发趋势,给人民群众的生命财产安全及公共基础设施带来了重大损失,严重影响城市的运维安全与城市形象。2021年"7·20"河南郑州特大暴雨后,城市主干道、人行道等均出现了大小不一的塌陷,市内路面发现塌陷2 057处,最大面积达60 m^2,深11 m; 2020年"1.13"西宁路面塌陷事故造成10人死亡、17人受伤; 2018年"2·7"佛山路面塌陷事故造成11人死亡、8人受伤、1人失联,直接经济损失达5 000万元以上。据《全国地下管线事故统计分析报告(2019年10月—2020年9月)》[1],该期内全国报告的路面塌陷事故共229起,伤亡人数达98人,相较于上一期(2018年10月—2019年9月)发生的114起增长了100.88%,相较于2014—2018年报告的506起,路面塌陷事故呈现明显的增长趋势[1-2]。2019年10月—2020年9月四川省境内多个城市发生了路面塌陷事故,如2020年宜宾路面塌陷有21辆车掉落坑洞; 2018年"10.7"达州路面塌陷事故造成4人死亡、1人受伤。

城市道路地面塌陷往往具有长期性、复杂性、隐蔽性、突发性和危害性的特点[3],因此建立城市道路地面塌陷防治机制的需求越发迫切。城市道路地面塌陷的防治离不开快速判识地下病害体的类型与特征,地球物理勘探方法在城市复杂地质环境勘探中具有绿色、快速、经济等优势,并且随着理论方法与仪器设备的不断进步,探测精度也取得了长足的发展。《JGJ/T 437—2018 城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准》[4]提出了通用性广、适用性强的地下病害体探测方法,包括探地雷达、高密度电阻率法、瞬态面波法、微动勘探法、地震映像法、瞬变电磁法等。

不同探测方法有着不同的应用条件,胡晓娟[5]和王洁[6]利用高密度电法对开挖地铁导致的地面塌陷和城市地下岩溶塌陷区分别进行了

收稿日期: 2022-05-20; **修订日期**: 2022-07-19。
第一作者简介: 谢小国(1992—),男,高级工程师,主要从事物探与地质工程工作。Email: 874462465@qq.com。
通信作者简介: 张伟(1979—),男,高级工程师,主要从事水工环地质技术与管理工作。Email: 578639089@qq.com。

探测,确定了地下空洞的分布位置及范围;张伟等[7]采用多道瞬态面波与微动法对柳城县岩溶塌陷区进行观测,获取了覆盖层结构与厚度的分布特征;张银松等[8]采用高密度电法对重庆市中梁山地区隐伏塌陷区进行了较好的圈定。探地雷达被广泛应用于城市道路塌陷探测,对地下 5 m 以浅的地层探测具有精度高、效率快的优势[9-11]。结合引起道路塌陷的地下病害体类型、发育特征、埋深等特点,相对于其它探测方法,车载三维探地雷达具有快速、直观、绿色、无损、分辨率高、探测范围宽等优点,可实现定量解释[12-13]。

为更好地提升城市道路塌陷处治能力,响应《成都市中心城区路面塌陷应急处置管理办法》,本文针对成都市的特定地层结构与人类工程活动,提出了城市道路塌陷隐患快速探测方法。

1　研究区概况

成都市位于岷江冲积扇中前部,浅表地层主要为第四系冲积层,岩土体包括填土、粉质黏土和砂砾卵石层,地下水位一般在地下 2 ~ 3 m。受目前成都市的城市基础设施建设、地下空间快速开发以及强烈的人类活动影响,结合成都市浅表第四系冲积层填土、粉质黏土和砂砾卵石层等岩土体性质以及较浅的地下水位条件,地下稳定的空间结构受到严重扰动,城市道路病害隐患增加,市区及周边区县均出现了多起道路塌陷等事故,给城市运营安全带来挑战,如 2021 年 9 月 1 日成都西三环附近道路出现明显塌陷,初步分析为降雨等综合因素导致地下水冲刷带走地下细粒物质造成地下空洞,再受重型货车碾压破坏形成塌陷(图 1)。

(a) 地面塌陷　　(b) 地层结构

图 1　2021 年 9 月 1 日成都某地地面塌陷照片

Fig. 1　Photos of ground collapsed in Chengdu City on September 1st, 2021

2　道路塌陷成因分析

地面塌陷主要分为自然塌陷和人为塌陷,又可以分为岩溶塌陷、采空塌陷、黄土湿陷以及工程塌陷[14]。根据新闻报道及文献资料分析,成都市城市道路塌陷事故大多与特殊的地层结构、多雨的气候以及复杂的工程建设活动有关[15-18]。

2.1　地质结构

成都复杂的地质结构是诱发地面塌陷的先决条件。成都市区位于川西平原岷江流域,地下水丰富且埋深浅,第四系砂卵砾石分布广泛,厚度、粒径、含砂量及抗压强度变化大,离散性强,岩土体空隙率大。具体表现为卵石含量一般大于 50%,分选性较差,大多充填细砂、中砂,且存在透镜体砂层,地层渗透系数高、透水性极强[19-20]。工程地质条件总体表现为地层简单、结构复杂。受到降雨、工程活动、管线事故等影响,砂卵石土体发生剥离,形成空隙并逐步发展成为空洞。

2.2　地下水

丰富、活跃的地下水是造成地面塌陷的重要因素。根据从国家气象科学数据中心收集的成都市 2011 年 1 月—2021 年 7 月气象数据,下雨天数达到 1 266 d,占统计时长的 36.5%,年降雨量约 1 000 mm,其中每年的 6—9 月为雨季[21]。由于成都市位于岷江水系流域,降雨和水源补给量大,导致砂卵石层含水量高,多呈饱和土体,因此受水流和

工程活动等影响，粉砂、细砂等细粒物质随地下水流动而被带走，潜蚀作用破坏土体结构，导致地下疏松、空洞等病害体发生。特别是每年 7—8 月暴雨时期，土体饱和度提高，非饱和土层抗剪强度明显降低，岩土体结构更易受到破坏，加速塌陷病害的发育[22]。如 2021 年 5 月 27 日大邑、崇州两地发生地面塌陷，原因是当地大量抽取地下水，致使细粒物质被带走，砂卵石被排挤，从而引发地面塌陷。

2.3 工程活动

复杂的工程活动增大了地面塌陷的隐患。随着成都市城市化建设进程的不断加快，城市道路、市政管线、建（构）筑等的不断发展，越来越频繁且剧烈的人类活动与工程建设增大了道路塌陷隐患。

地下管线破损引起的渗流是造成道路塌陷的最主要因素之一。地下管线及附属设施，特别是排水管道老化、破裂，进而受到雨污水、地表水、地下水的影响，冲刷掏空砂土层，引发地面塌陷[23]。如 2014 年武侯区水涟袅铜小区由于污水管破裂，外泄污水冲刷基坑护壁桩间土，导致小区停车点发生垮塌。

地下工程施工破坏地下结构是加快道路塌陷的主要因素之一，基坑开挖、轨道隧道盾构施工、管道顶进等工程在极大利用地下空间的同时破坏了地层结构，导致地下砂土层变形或位移，地下疏松体不断发育，降低了路面抗压能力，从而发生沉降或垮塌[24-25]。如 2020 年地铁六号线星民站施工现场发生的地面塌陷。

道路荷载过大会导致路面结构被破坏。机动车辆，特别是大型货运汽车行驶以及大型、重型堆填物增大了道路的荷载，针对早期道路情况设计的荷载已远远不能满足现在道路使用的需要，造成路面承载力不足，从而导致路面沉降和塌陷[26]。基坑开挖降低了道路侧向承载力，也是造成地面开裂下沉和塌陷的原因之一。如 2020 年双安东巷路面塌陷的原因是路基填土不密实，货车载重过大而压塌路面。

3 探测方法与体系

3.1 探测方法选择

《JGJ/T 437—2018 城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准》[4]中提出了多种适用的地球物理探测方法，不同方法具有不同的适用性（表 1）。

表 1 不同探测方法适用性分析

Tab.1 Applicability analysis of different detection methods

工作方法	物性依据	优点	缺点	适用性
探地雷达	电磁差异	抗干扰、快速、无损、绿色	探测深度低，一般小于 7 m	普遍适用
高密度电法 瞬变电磁法	电性差异	对富水体敏感、勘探深度较大	精度较低	对道路有损坏、干扰交通、效率低，适用条件受限
瞬态面波法 微动勘探法 地震映像法	波阻抗差异	勘探深度较大		

研究表明，98% 以上的地面塌陷事故发生在地面 5 m 以浅的范围内，85% 以上发生在市政道路、住宅小区和商业街区，60% 以上发生在市政道路上[27]。地面塌陷隐患探测要体现出时效性和紧迫性，特定的探测条件对选择合适的探测方法具有重要的指导作用。探地雷达法与其他探测方法相比，受城市人类活动的干扰较小，探测效率高，对浅部的分辨率较高，操作简单，适用于浅表层地下病害的探测，尤其是三维车载探地雷达具有检测速度快、探测范围广、定位准确等优点，在城市道路塌陷中应用广泛[28-30]。

3.2 探测体系建立

基于城市道路塌陷产生的公共危害、社会影响及财产损失等的特殊性，需要对道路进行“快速、准确、绿色”的探测，因此建立该类病害探测系统显得尤为重要。结合研究区地层结构、人文活动、探测方法等特点，建立了城市道路塌陷“探测 - 解译 - 验证 - 评估 - 成果”5 步探测体系，具体分析如图 2 所示。

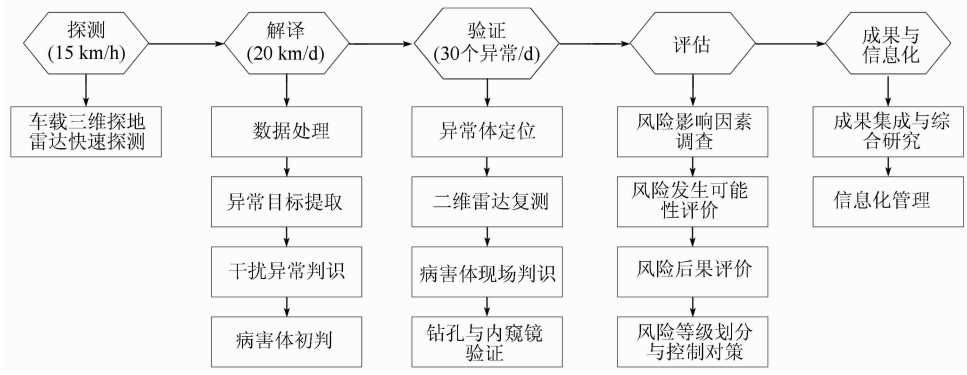


图 2　城市道路塌陷隐患快速探测体系

Fig. 2　Rapid detection system of hidden danger of urban road collapse

3.2.1　探测

以问题为导向,以快速、绿色为原则。根据仪器性能及采样分辨率需求,一般单台设备采集效率可达到 15 km/h,可实现对道路的快速探测。同时由于是车载式探测,不涉及临时占道、交通影响和人类活动等限制条件,具有低噪的特点,是一种绿色环保的探测方法(图 3(a))。

对城市道路塌陷隐患普查的工作方法以车载三维探地雷达为主,该方法可快速实现疑似地下病害体的定位与检测,采用二维探地雷达精确定位地下病害体,排除地下管线、地下构筑物、地质结构异常等非地下病害的异常,利用钻探、钎探或挖探等方式直观、准确地获取地下病害体的埋深、净空等空间信息。

工作内容为利用车载三维探地雷达快捷高效的特点开展普查工作,探测对象为城市道路,发现异常后进行异常筛查。首先利用收集的各类资料,排除因其他管线、过街通道、老旧人防工程等产生的假异常,然后采用二维探地雷达确定异常,根据现场条件选择钻探、钎探或者挖探进行验证工作,同时采用内窥镜等对地下病害体的空间展布、形态等进行评估,应用相关规范对地下病害进行风险评估。

工作手段包括资料收集(已有地下管线资料、水文地质、工程地质资料和历史病害信息等)、二维和三维探地雷达探测,在有条件的区域实施钻探验证。

探测的成果主要为地下病害的坐标、体积、垂直车道长度与平行车道长度、面积、净空(空洞和脱空)、与地下管线关系、周边环境条件、病害风险等级、病害成因及处置建议等。

(a) 三维探地雷达探测　(b) 数据处理与解译

(c) 异常体复测与验证　(d) 调查与评估

图 3　城市道路塌陷隐患快速探测现场工作

Fig. 3　On – site work of rapid detection of hidden dangers of urban road collapse

3.2.2　解译

解译工作的最大难点在于"去伪存真、减少多解性"。一般步骤包括数据处理、异常目标体提取、干扰异常判识及病害体初判等 4 步,单台软件解译效率超过 20 km/d(图 3(b))。其中数据处理包括图像显示、预处理、处理、解释处理等过程;异常目标的提取是对异于地层信号的判读与拾取,获得异常体的分布情况;干扰异常判识是对非病害体进行剔除,对疑似病害体进行分析,减少验证工作量,提高工作效率;病害体初判是根据雷达的不同形态、振幅、相位与频谱的差异,识别出空洞、脱空、疏松、富水体等病害体,提高验证的准确性。

3.2.3　验证

验证工作一般包括异常体定位、二维探地雷达复测、病害体现场判识、钻孔及内窥镜验证等过程。异常体定位采用 RTK 对解译的疑似病害体坐标进行现场放点,为二维探地雷达复测指定位置;二维探地雷达复测一般采用高于三维探地雷达探测频率的天线对异常体进行多方位探测;分析图谱特

征,剔除管线(涵)、地下构(建)筑物等非病害影响,精确定位病害体分布特征;采用便携钻机钻孔,参考内窥镜影像验证病害体(图 3(c))。

3.2.4 评估

评估工作的难点在于准确定级。以单个病害体为评价对象,调查病害体影响范围内的病害体规模、邻近设施、环境因素等情况,建立风险发生可能性评价指标及划分等级,并结合地下病害体范围、建(构)筑分布、人员密集程度、财产密度、社会影响等指标确定风险后果评价指标及划分等级,综合风险发生可能性与风险后果划分风险等级,并制订相应的风险控制对策(图 3(d))。

3.2.5 成果与信息化

成果集成与综合研究要突出机理分析,信息化管理要注重维护与更新。以道路为单元,编制道路病害探测成果报告;以测区为区域,编制区域病害探测成果报告,系统分析病害的成因、类型及分布规律,为信息化管理与防治提供支撑;以 GIS 平台为基础,建立病害体空间信息和属性信息,实现数据录入、编辑、查询、统计、分析、动态更新等功能[31]。

3.2.6 成果应用

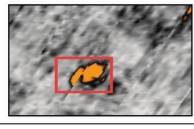
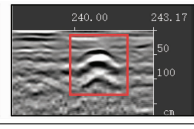
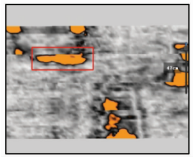
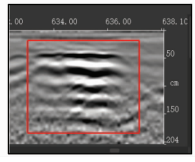
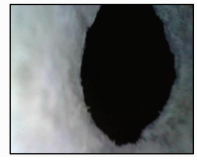
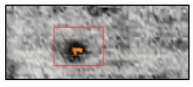
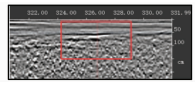
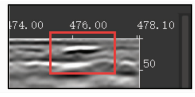
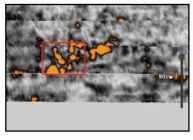
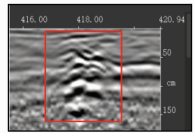
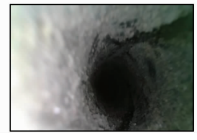
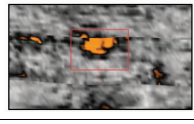
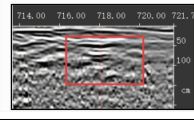
成都市城市道路塌陷隐患检测成果主要为工程治理提供依据,消除隐患,建立隐患数据库,对道路塌陷隐患进行动态管理和监测,服务于城市道路的防灾减灾,为市政设施安全运行与道路安全提供保障。

3.3 典型异常体特征

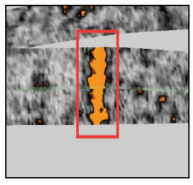
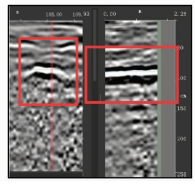
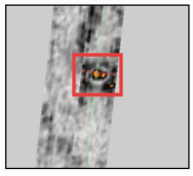
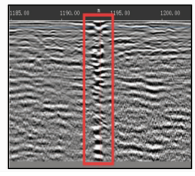
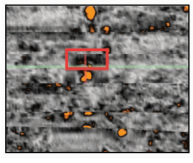
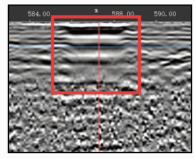
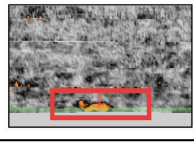
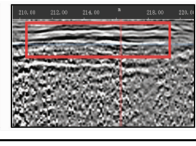
根据《JGJ/T 437—2018 城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准》[4]及实际探测结果进行分析,典型异常体包括病害体和非病害体,其中病害体包括空洞、脱空、疏松和富水体,非病害体包括管线、井盖、井室和层位等,非病害体异常往往影响病害体的判识[32]。常见异常体的典型三维探地雷达图谱特征见表 2。

表 2 常见异常体典型三维雷达图谱特征

Tab. 2 Typical three – dimensional radar atlas characteristics of common abnormal bodies

异常体名称		三维探地雷达水平切片图谱	三维探地雷达垂直剖面图谱	内窥镜照片	波组形态	振幅	相位与频率
病害体	空洞 似球形				似球形空洞反射波组表现为倒悬双曲线形态,似方形空洞反射波表现为正向连续平板状形态,绕射波明显,多次波明显	整体振幅强	顶部反射波与入射波同向,底部反射波与入射波反向,频率高于背景场
	空洞 似方形						
	脱空				顶部形成连续的同向性反射波组,表现为似平板状形态,多次波明显	整体振幅强	顶部反射波与入射波同向,底部反射波与入射波反向,频率高于背景场
	疏松 严重疏松				顶部形成连续的同向性反射波组,多次波较明显,绕射波较明显	整体振幅强	顶部反射波与入射波同向,底部反射波与入射波反向,频率高于背景场
	疏松 一般疏松				顶部形成连续的同向性反射波组,多次波不明显,绕射波不明显,内部波形结构较杂乱	整体振幅强	顶部反射波与入射波同向,底部反射波与入射波反向,频率高于背景场
	富水体				顶部形成连续的反向性反射波组,绕射波不明显,底部反射波不明显	顶部反射波振幅强;衰减快	顶部反射波与入射波反向,底部反射波与入射波同向,频率低于背景场

（续表）

异常体名称		三维探地雷达水平切片图谱	三维探地雷达垂直剖面图谱	内窥镜照片	波组形态	振幅	相位与频率
非病害体	管线			—	与管线垂直时反射波组表现为倒悬双曲线形态,绕射波明显,多次波较为明显	整体振幅强	顶部反射波与入射波同向,底部反射波与入射波反向,频率高于背景场
	井盖			—	反射波组表现为连续的平板状形态,多次波明显,反射波组在深部反应明显	整体振幅极强	顶部反射波与入射波同向,底部反射波与入射波反向,频率高于背景场
非病害体	井室			—	反射波组表现为连续的平板状形态,多次波明显,反射波组在深部消失	整体振幅强	顶部反射波与入射波同向,底部反射波与入射波反向,频率高于背景场
	地层层位			—	分界面反射强,反射波组较为连续,可追踪	分界面振幅强;土体中振幅弱,衰减快	顶部反射波与入射波同向,底部反射波与入射波反向,频率高于背景场

4　应用效果分析

以成都市青羊区某道路为例,该道路周围分布了大型商场、居民小区、商业街道、火车站以及重点企事业单位等,道路经多次翻新维护,地下管线复杂,浅部主要为道路路面、填土、砂卵砾石,地下水位较浅,且地铁运营多年,浅层扰动较大。为更好地排查道路塌陷隐患,采用 IDS 生产的 Stream－X 三维探地雷达(中心频率 200 MHz,15 通道,扫描宽度 1.8 m,GPS 定位,512 个采样点,采样时窗 120 ns,道间距 0.099 m),对城市道路 5 m 以浅地层进行探测,经解译、复测、验证,共发现 22 处病害异常,其中空洞 14 处,脱空 2 处,严重疏松 3 处,一般疏松 3 处(表 3)。

根据《JGJ/T 437—2018 城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准》[4] 开展风险发生可能性与风险后果评价,采用指标体系法,划分了地下病害体风险等级。由表 3 可以看出,该道路具有明显的风险隐患,其中 V 级风险 7 处,净空 0.65 ~ 1.37 m,面积 4.56 m^2(2.4 m × 1.9 m) ~ 34.65 m^2(6.3 m × 5.5 m),体积 4.4 ~ 31 m^3,风险极高,需禁止使用,工程处理; IV 级风险 7 处,最大面积 3.8 m × 3.5 m,风险较高,需限制使用,工程处理,处理前进行定期巡视和探测; III 级风险 2 处,风险一般,需限制使用,工程处理,处理前进行定期巡视和探测; II 级风险 3 处,风险较低,需定期巡视和探测; I 级风险 3 处,风险很低,需定期巡视和探测。探测道路典型空洞特征见表 4。

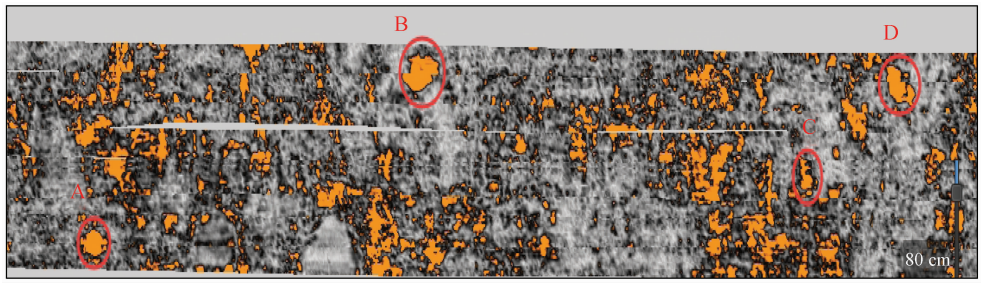
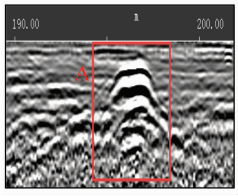
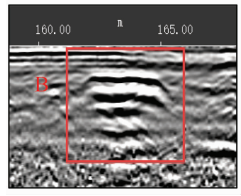
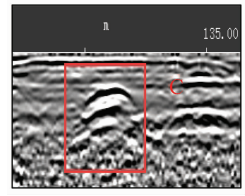
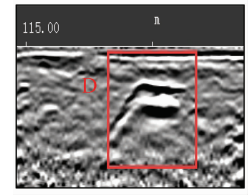
表 3　探测道路地下病害体风险等级划分

Tab. 3　Risk classification of underground disease body in detection road

风险等级	病害体数量/处			
	空洞	脱空	严重疏松	一般疏松
V	7	—	—	—
IV	7	—	—	—
III	—	2	—	—
II	—	—	3	—
I	—	—	—	3
合计	14	2	3	3

表 4 探测道路典型空洞特征分析

Tab. 4 Characteristics analysis of typical cavities in detection roads

三维探地雷达水平切片图谱					
三维探地雷达垂直剖面图谱					
风险隐患空间特征	面积	11.56 m^2 =2.95 m×3.92 m	24.12 m^2 =4.71 m×5.12 m	6.75 m^2 =2.68 m×2.52 m	7.37 m^2 =2.70 m×2.73 m
	净空	1.37 m	1.28 m	0.65 m	0.69 m
	体积	15.84 m^3	30.87 m^3	4.39 m^3	5.09 m^3
风险等级		V	V	IV	IV
处理建议		禁止使用,工程处理	禁止使用,工程处理	限制使用,工程处理	限制使用,工程处理

5 结论

(1)成都市具有复杂的地质结构、自然地理环境以及频繁的人类工程活动,城市道路病害现象日益加重,通过建立“探测 - 解译 - 验证 - 评估 - 成果与信息化”的城市道路塌陷隐患快速探测体系,有助于提升城市安全运营能力。

(2)应用结果表明,车载三维探地雷达适用于城市道路塌陷应急抢险、汛期道路隐患排查、重大工程施工地面沉降监测、重大社会活动前期道路安全检查等工作。

参考文献(References):

[1] 规协地下管线专业委员会. 全国地下管线事故统计分析报告(2019 年 10 月—2020 年 9 月)[R]. 北京:北京地下管线综合管理研究中心,2021.
Professional Committee of Underground Pipeline Planning Association. National Statistical Analysis Report on Underground Pipeline Accidents(October,2019 - September,2020)[R]. Beijing: Beijing Underground Pipeline Comprehensive Management Research Center,2021.

[2] 陈雨昂,唐荣,方建,等. 2014—2018 年中国城市路面塌陷时空规律与原因分析[J]. 水利水电技术,2020,51(7):108 - 116.
Chen Y A,Tang R,Fang J,et al. Analysis on spatio - temporal law and causation of urban road collapse in China from 2014 to 2018[J]. Water Resour Hydropower Eng,2020,51(7):108 - 116.

[3] 郭林飞,柴仕琦,董静怡,等. 我国城市路面塌陷事故统计分析[J]. 工程管理学报,2020,34(2):49 - 54.
Guo L F,Cai S Q,Dong J Y,et al. A statistical analysis of urban road collapse accidents in China[J]. J Eng Manage,2020,34(2):49 - 54.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 437—2018 城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
Ministry of Housing and Urban - Rural Development of the People's Republic of China. JGJ/T 437—2018 Standard for Comprehensive Detection and Risk Evaluation of Underground Disasters in Urban Area[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2018.

[5] 胡晓娟. 高密度电法 3D 解译于道路塌陷的应用研究[J]. 公路,2021,66(3):19 - 22.
Hu X J. 3D interpretation of applying high - density electrical method in road collapse[J]. Highway,2021,66(3):19 - 22.

[6] 王洁. 三维高密度电法在城市地下岩溶塌陷区探测中的应用[J]. 工程地球物理学报,2021,18(1):107 - 112.
Wang J. Application of three - dimensional high - density electrical method in urban underground karst collapse area detection[J]. Chin J Eng Geophys,2021,18(1):107 - 112.

[7] 张伟,甘伏平,梁东辉,等. 多道瞬态面波法与微动法联合推

断岩溶塌陷区覆盖层的结构和厚度分布[J]. 中国岩溶,2018,37(2):272 - 279.
Zhang W, Gan F P, Liang D H, et al. Joint inference of multi - channel transient surface wave method and microtremor method to investigate the structure and thickness of the overburden layer in the typical area of karst collapse[J]. Carsol Sin, 2018, 37(2): 272 - 279.

[8] 张银松,曹聪,康世海,等. 重庆市中梁山地区隐伏塌陷特征及物探勘测的思路[J]. 中国岩溶,2020,39(6):918 - 927.
Zhang Y S, Cao C, Kang S H, et al. Characteristics of hidden karst collapse in the Zhongliangshan area of Chongqing and an approach of geophysical surveys[J]. Carsol Sin, 2020, 39(6): 918 - 927.

[9] 赵明堂. 地质雷达技术在城市地面塌陷隐患调查中的应用[J]. 工程地球物理学报,2019,16(6):904 - 909.
Zhao M T. Application of ground penetrating radar to investigation of hidden danger of urban ground collapse[J]. Chin J Eng Geophys, 2019, 16(6): 904 - 909.

[10] 郭士礼,段建先,许磊. GPS 在探地雷达探测城市道路塌陷隐患中的应用研究[J]. 地球物理学进展,2020,35(3):1135 - 1140.
Guo S L, Duan J X, Xu L. Application research of GPS in urban road collapse detection by GPR[J]. Prog Geophys, 2020, 35(3): 1135 - 1140.

[11] 王鹏. 探地雷达在人行道地下病害体检测中的应用[J]. 测绘通报,2019(S1):199 - 203.
Wang P. Application of ground penetrating radar in detection of underground diseases of sidewalk[J]. Bull Surv Mapp, 2019(S1): 199 - 203.

[12] 王洪华,龚俊波,王敏玲,等. 三维探地雷达技术在道路塌陷空洞探测中的应用[J]. CT 理论与应用研究,2018,27(5):609 - 616.
Wang H H, Gong J B, Wang M L, et al. The application of three dimensional ground penetrating radar for detecting road collapse[J]. CT Theory Appl, 2018, 27(5): 609 - 616.

[13] 王海宁. 三维探地雷达在道路地下病害体探测中的应用[J]. 中国煤炭地质,2018,30(8):70 - 74.
Wang H N. Application of 3D ground penetrating radar in road subsurface hazard detection[J]. Coal Geol China, 2018, 30(8): 70 - 74.

[14] 贾小斌. 深圳市地面坍塌灾害成因分析[J]. 灾害学,2016,31(3):114 - 118.
Jia X B. Analyzing the reason of ground collapse disaster in Shenzhen[J]. J Catastrophol, 2016, 31(3): 114 - 118.

[15] 罗永康,李书明. 汶川地震后成都平原地面塌陷特征及对策[J]. 地质灾害与环境保护,2012,23(2):7 - 10.
Luo Y K, Li S M. Characteristics of ground collapses in Chengdu Plain and their countermeasures[J]. J Geol Hazards Environ Preserv, 2012, 23(2): 7 - 10.

[16] 罗松,张浩然. 成都富水砂卵石地层盾构施工滞后沉降防控措施探讨[J]. 隧道建设,2010,30(3):317 - 319,335.
Luo S, Zhang H R. Discussion on prevention and control of delayed settlement induced by shield tunneling in water - rich sandy cobble stratum in Chengdu[J]. Tunn Constr, 2010, 30(3): 317 - 319, 335.

[17] 张哲宁,刘玉勇. 盾构施工引起的砂卵石地层分层沉降变形规律[J]. 施工技术,2018,47(S1):787 - 790.
Zhang Z N, Liu Y Y. The deformation rule of stratified settlement caused by shield tunnel construction in sandy cobble stratum[J]. Constr Technol, 2018, 47(S1): 787 - 790.

[18] 白永学. 富水砂卵石地层盾构施工诱发地层塌陷机理及对策研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
Bai Y X. Research on Ground Collapse Mechanism of Shield Tunnelling in Saturated Sandy Pebble Stratum and Corresponding Measures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[19] 牟迪. 成都地铁四号线砂卵石层分布规律及工程特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
Mou D. Research on Distribution Law and Engineering Properties in Sand and Gravel Strata of Chengdu Metro Line 4[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[20] 陈中. 富水砂卵石地层盾构施工引起地面塌陷的原因及建议[J]. 都市快轨交通,2014,27(6):87 - 91.
Chen Z. Causes and countermeasures: Typical cases of ground collapse in shield tunneling in water - rich sandy cobble stratum[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(6): 87 - 91.

[21] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等. 我国西南山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J]. 地球科学进展,2012,27(5):499 - 509.
Liu B T, Tao H P, Song C F, et al. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in Southwest China from 1960 to 2009[J]. Adv Earth Sci, 2012, 27(5): 499 - 509.

[22] 胡聿涵,白玉川,徐海珏. 近 10 年中国城市道路塌陷原因及防治对策分析[J]. 公路,2016,61(9):130 - 135.
Hu Y H, Bai Y C, Xu H J. Analysis of reasons for urban road collapse and prevention and control countermeasures in recent decade of China[J]. Highway, 2016, 61(9): 130 - 135.

[23] 宋谷长,叶远春,刘庆仁. 北京市城市道路塌陷成因及对策分析[J]. 城市道桥与防洪,2011(8):250 - 252.
Song G C, Ye Y C, Liu Q R. Subsidence causation and countermeasure analysis of urban roads in Beijing[J]. Urban Roads Bridges Flood Control, 2011(8): 250 - 252.

[24] 冯剑. 富水砂卵石地层盾构施工引起空洞的机理及对策研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
Feng J. Research on Ground Cavity Mechanism of Shield Tunnelling in Saturated Sandy Pebble Stratum and Corresponding Measures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[25] 马龙. 成都地铁某盾构始发掘进引起地面塌陷情况分析[J]. 山西建筑,2014,40(20):222 - 224.
Ma L. Analysis on ground subsidence situation of a shield starting tunnelling of Chengdu metro[J]. Shanxi Archit, 2014, 40(20): 222 - 224.

[26] 高程鹏. 循环动荷载下下伏空洞路面塌陷的模型试验研

究[J]. 水文地质工程地质,2021,48(1):70 – 77.
Gao C P. Model tests of road subsidence progress with underground cavities caused by cyclic dynamic load[J]. Hydrogeol Eng Geol,2021,48(1):70 – 77.

[27] 贾小斌. 深圳市地面坍塌灾害分布特征分析[J]. 灾害学,2016,31(4):116 – 121.
Jia X B. Analyzing the distribution characteristics of the ground collapse hazard in Shenzhen[J]. J Catastrophol,2016,31(4):116 – 121.

[28] 赵镨. 三维探地雷达在城市地下管线及周边土体病害探测中的应用[J]. 测绘通报,2016(S1):73 – 76.
Zhao P. 3D GPR Application in urban underground pipeline & surrounding soil problem detection[J]. Bull Surv Mapp,2016(S1):73 – 76.

[29] 陈昌彦,肖敏,贾辉,等. 城市道路地下病害成因及基于综合探测的工程分类探讨[J]. 测绘通报,2013(S2):5 – 9.
Chen C Y,Xiao M,Jia H,et al. The genesis of urban underground roads diseases and classification of engineer[J]. Bull Surv Mapp,2013(S2):5 – 9.

[30] 郭士礼,段建先,许磊. GPS 在探地雷达探测城市道路塌陷隐患中的应用研究[J]. 地球物理学进展,2020,35(3):1135 – 1140.
Guo S L,Duan J X,Xu L. Application research of GPS in urban road collapse detection by GPR[J]. Prog Geophys,2020,35(3):1135 – 1140.

[31] 李法滨,何文勇,廖斌,等. 公路路基病害信息管理系统的研究与开发[J]. 公路交通科技:应用技术版,2019,15(3):293 – 295.
Li F B,He W Y,Liao B,et al. Research and development of highway subgrade disease information management system[J]. Highway Transp Technol:Appl Technol Ver,2019,15(3):293 – 295.

[32] 王广涛,郑文青,韩晓鸣,等. 三维探地雷达在道路地下病害体检测中的应用研究[J]. 城市勘测,2019(S1):188 – 193.
Wang G T,Zheng W Q,Han X M,et al. Application research of 3D ground penetrating radar in road underground disease detection[J]. Urban Geotech Invest Surv,2019(S1):188 – 193.

Causes and rapid detection methods of urban road collapse in Chengdu City

XIE Xiaoguo[1,2,3], ZHANG Wei[1,2,3], LUO Bing[1,2,3], SUN Dong[1,2,3],
WANG Qiang[1,2,3], LIU Weizu[1,2,3], YANG Tao[1,2,3]

(1. *Sichuan Hua Di Building Engineering Co. Ltd*, *Sichuan Chengdu* 610081, *China*; 2. *Chengdu Center of Hydrogeology and Engineering Geology*, *Sichuan Geology and Mineral Resources Bureau*, *Sichuan Chengdu* 610081, *China*; 3. *Sichuan Geological Disaster Prevention Engineering Technology Research Center*, *Sichuan Chengdu* 610081, *China*)

Abstract: The urban public safety is seriously endangered by urban road collapse. The rapid, accurate and green detection of hidden dangers of urban road collapse will help reduce the development of urban underground diseases and improve the ability of urban safe operation. The main causes of urban road collapse in Chengdu City include complex geological structure, abundant groundwater and frequent humanistic engineering activities through investigation and analysis. The vehicle mounted three – dimensional geological radar is used to conduct a quick detection on urban roads, and a detection system is established based on detection, interpretation, verification, evaluation, results and information management. The results show that vehicle mounted 3D geological radar is an effective method for rapid detection of hidden dangers of urban road collapse.

Keywords: urban road; collapse cause; vehicle mounted 3D ground penetrating radar; underground disease detection

(责任编辑: 魏昊明)