

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.10.006

滨海城市塑料排水管道病害预防性评估

余漩¹, 覃海铭¹, 江璟航², 韩悦², 黄胜^{1,3}, 郭源^{1,3}

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 珠海供排水管网有限公司, 广东 珠海 519000; 3. 中山大学 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 市政管网是现代滨海城市的生命线,其安全可靠的建设与运维对城市更新及新型城镇化建设具有重要意义。然而,现行《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012)在塑料管道的修复和养护方面未能提供预防性指导。采用专家问卷调查与管养数据分析相结合的方法,对珠海市排水管网现状进行评估,探究影响塑料排水管道健康的主要因素,如管材质量、施工质量、管龄及土质等。为进行管道预防性评估,采用多元逻辑回归方法,并结合管养数据分析管道病害等级与管道属性之间的关系,建立了管道健康度预测模型,其预测准确率可达72.0%。

关键词: 排水管道; 病害评估; 多元逻辑回归; 预防性修复

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0039-07

Preventive Assessment of Plastic Drainage Pipeline Defects in Coastal Cities

YU Xuan¹, QIN Haiming¹, JIANG Jinghang², HAN Yue², HUANG Sheng^{1,3},
GUO Yuan^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Zhuhai Water Supply and Drainage Network Company Limited, Zhuhai 519000, China; 3. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Municipal pipeline networks are regarded as the lifeline of modern coastal cities, and their reliable construction and maintenance play a vital role in urban renewal and new urbanization initiatives. However, the current *Technical Specification for Inspection and Evaluation of Urban Sewer* (CJJ 181-2012) fails to provide proactive guidance for the rehabilitation and maintenance of plastic pipelines. By combining expert questionnaire surveys and maintenance data analysis, this study evaluated the current condition of the drainage pipeline network in Zhuhai and identified the main factors affecting the health of plastic drainage pipelines, such as pipe material quality, construction quality, service age, and soil conditions. In order to conduct the pipeline preventive assessment, a multiple logistic regression method was adopted to analyze the relationship between pipeline defect grades and pipeline attributes based on maintenance data. A pipeline health prediction model was subsequently established, and it could achieve a prediction accuracy of 72.0%.

Keywords: drainage pipeline; defect assessment; multiple logistic regression; preventive

基金项目: 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2021ZT09G087); 广东省基础与应用基础研究基金资助面上项目(2023A1515240003)

通信作者: 郭源 E-mail: guoy229@mail.sysu.edu.cn

rehabilitation

近年来,我国城镇化率已超过65%,城市规模的持续扩大对市政管网系统的建设与运维提出了更高要求。排水管网作为城市基础设施的重要组成部分^[1],在保障滨海城市排水安全及水资源管理方面发挥着关键作用。城镇排水工程中涉及多种管道材质,目前市场上常见的排水管道包括钢筋混凝土管、金属管和塑料管等。其中,塑料管因其自身材料特性,相较于传统铸铁管和混凝土管,表现出较好的弹塑性力学特征^[2]。然而,受限于材料性质,塑料管道病害发展迅速,半年甚至一个月内即可产生重大缺陷,且更容易受材料老化、土层变形、海水潮位及地下咸水入侵等因素影响。尽管如此,塑料管道在珠海横琴等新区的排水管网中依然占据相当高的比例,这主要归因于其轻质、耐腐蚀、施工便捷、成本较低等优点,在快速城镇化背景下能够显著缩短施工周期;同时,在新建城区大规模开发初期,塑料管被广泛选作排水主材。

目前,市政排水管道的修复评估主要依据《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012)中的修复指数(RI)和养护指数(MI)进行^[3]。实践中往往采取“先坏先修”的模式,缺乏系统性的预防性评估与维护机制。这种传统修复方式通常是在管道出现明显故障或结构性问题后,才进行检测和维修,未能充分考虑管道的长期安全性与运行稳定性,导致问题逐步积累,增加了修复和更换成本。此外,CJJ 181—2012侧重于对排水管道结构性和功能性缺陷的分类评估,对早期病害预判及预防性维护措施的指导相对薄弱,使得管理更多依赖经验而非科学的预测模型,难以精确评估管道的健康状况及剩余使用寿命,也无法有效防范潜在事故。

在市政排水管道的修复评估方面,滨海城市如珠海常受潮汐、暴雨等强水动力作用影响,地下水位变化幅度较大,对排水管网建设运维的要求更高。同时,横琴区域地质条件复杂,塑料排水管道占比更高。因此,以横琴区域为研究对象,开展滨海城市塑料排水管道病害的预防性修复研究。采用专家问卷调查与管养数据分析相结合的方法,评估管道运维现状,探究管材质量等因素与病害之间的关系,并建立基于多元逻辑回归的管道健康度预

测模型。通过横琴地区的实测数据与预测模型,提出病害劣化规律及运维分级体系,可为相关部门城市管网预防性养护和资金优先配置提供参考。

1 珠海市排水管道概述及总体方案

1.1 珠海市排水管道概述

珠海市排水管道总长约5 398.36 km(不含排水渠),其中塑料管道约1 760.01 km,占比约32.60%。在新建城区,塑料管道的应用更为广泛。珠海市常年受台风等强对流天气影响,如2017年“天鸽”台风登陆期间,风暴潮与强降雨导致部分区域管网排水不畅,叠加管道淤塞等结构性损坏,引发了城区内涝、房屋损毁等问题,对后续市政管网设施的建设与运维提出了新的挑战。

近年来,珠海市致力于完善市政排水系统,加强排水管道、泵站及污水处理厂的统筹管理与建设工作,以提高城市排水能力,降低内涝潜在风险^[4]。珠海市下辖香洲区、斗门区、金湾区3个行政区,各区因地理特征及城市发展需求的不同,在排水系统设计与管理要求上存在差异。其中,香洲区作为中心城区,人口密集、建筑众多,排水系统相对复杂,对设计与管理的精细化要求更高。

1.2 总体方案

从市政排水管网运维角度出发,优化现有塑料排水管道的检测与评估方法,提升管道病害的预防性识别精度。采用专家问卷形式对珠海市排水管道运维现状进行调查分析,明确管道病害的影响因素及重要性,以运维区划为单位对各影响因素进行调查,并对预设管养条件下的管道病害进行专家打分。同时,结合横琴地区管道检测报告数据,分析管径、管龄、管长、土质、地下水位等参数对管道病害等级的影响,提出基于排水设施管养需求的管道检测评估原则。在此基础上,基于逻辑回归方法提出管道病害评估与修复参数的优化策略,依据管道养护基本情况建立塑料排水管道4级养护模型(1级为正常管养,2级为增加管养及检测频次,3级为列入年度预防性修复计划,4级为立即组织紧急修复),可为排水管道的预防性修复提供参考。

此外,通过收集整理横琴区域内塑料排水管道的测绘资料、检测报告及工程图纸等数据,建立涵

盖位置信息、基本信息、状况信息与修复等级等内容的塑料排水管道档案数据库。该数据库不仅能够为市政管理部门提供翔实的管道信息支持,还可为后续管道的修复与养护工作提供决策依据,助力实现排水管网的智能化管理和高效运维。

2 排水管道运维现状专家问卷调查及分析

2.1 专家问卷调查

为获取珠海地区排水管道治理经验,面向珠海水务管养领域的专家,于2024年7月29日制作并发放问卷50份。内容涉及管径、管龄、埋深、地下水位、土质等13项影响管道病害的因素,要求专家进行0~4分评分。同时,问卷附有珠海市8个区域的划分图,要求专家提供地下水位、土质、管道服役年限和地区重要性等信息。此外,问卷还要求专家基于管径、管龄等信息,预测8个不同区域管道的平均健康等级和最差健康等级,旨在评估珠海市不同区域管道的健康状况。

截至2024年9月5日,共收回有效问卷40份,其中完整问卷32份,部分完整问卷8份。需要指出的是,专家预测具有一定的主观性,因此问卷结果仅作为辅助验证与参数校正手段,最终评估仍以闭路电视(CCTV)检测数据与逻辑回归模型为依据。

2.2 排水管道运维现状分析

问卷调查结果显示,管养人员普遍认为管材质量、管道施工质量、管龄、土质及植被情况等是影响排水管道运维质量的决定性因素。相比之下,道路等级、地下水位、管道类型和水力坡度等因素的影响相对较小,具体见图1。其中,重要性分值越高,表示相关性越强。

此外,对珠海市域的地下水位、土质分布、管道服役年限与区域重要性等信息进行收集,结果表明,各区域的地下水位大多呈季节性淹没特征,土质主要为一般土层和淤泥软土。此类不良地质条件可能导致管道基础发生不均匀沉降、局部承压能力不足,进而诱发管道变形或接口错位。管道服役年限多集中在20年以上,随着使用时间增长,材料老化、结构疲劳等问题日益凸显,进一步增加了结构失效的风险。区域重要性由各区域的商业、交通及居住情况决定,其中高密度区域因人流车流频繁,对管道结构稳定性与排水能力的要求更高,若维护不及时,易引发渗漏、塌陷等次生灾害。

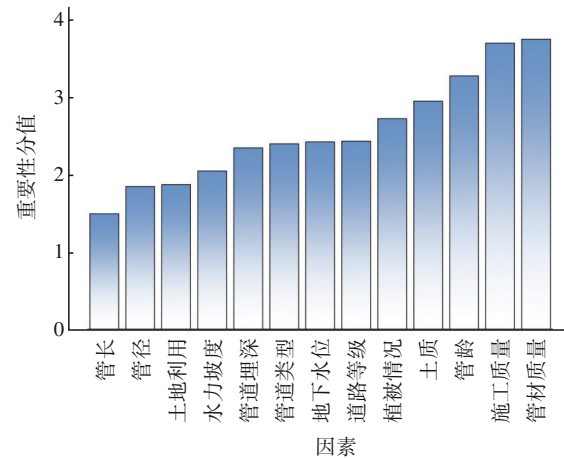


图1 排水管道病害致灾因素打分

Fig.1 Scoring of factors contributing to drainage pipeline defects

3 塑料排水管道管养病害分析

3.1 区域概况与管道检测范围

新建城区以横琴为例,作为重点开发区域,其塑料排水管的应用更为广泛。区内合计排水管道总长464.32 km,其中塑料排水管占比达40.16%,明显高于全市平均值(32.60%)。此外,横琴区域具有相对完善的管养数据,管道敷设年代集中在2012年—2014年及2019年—2021年,管径涵盖DN400、DN600、DN800、DN1 000等常见规格。

横琴区域地质条件复杂,对市政相关工程(包括排水管道建设和维护)具有直接影响。例如,该区域的粉砂互层结构(包括黏土、砂土及淤泥质土等)^[5]会影响排水管线的稳定性和承载能力。同时,横琴区域靠近海岸,地下水位较高,对排水管道的设计、施工及运维构成一定挑战,尤其在管道防水与腐蚀控制方面。

采用现场调研方法,对横琴区域重点路段排水管道对应的路面进行实地调查,以获取道路等级、车流量、周边植被与建筑情况等信息。共收集17条道路的管道数据,其中7条主干路、2条支路及8条次干路,涉及管段总长82 007.96 m,共2 446段,敷设年代与检测时间均精确到月份。

3.2 排水管道病害运维数据获取与处理

通过对横琴区域管道检测与运维数据进行分析处理,手工提取各路段管道基础数据,并尽可能全面记录管道病害情况,包括管道位置、管段编号、管径、管段长度、管段材质、埋深(起点/终点)及结构性缺陷等。

为提取管道运维数据库所需信息,对横琴地区排水管道的定期/不定期 CCTV 检测报告进行分析。数据筛选过程包括:剔除高密度聚乙烯(HDPE)双壁波纹管及塑料管以外的管段数据;剔除埋深存在问题或不详的数据;剔除管段编号重复的数据;剔除管径为 DN6 000 或管道为方形的数据。经筛选后,最终保留的有效数据集涵盖 13 条道路,管段总长 50 785.54 m(约 50.8 km),共 1 505 段。除基础数据外,部分关键数据无法直接从管道检测报告中获取,因此需结合专家问卷和现场调查予以补充。

3.3 数据基本分析

针对不同因素对管道健康等级的影响,采用类比分析法,从管龄、管径、埋深及管长等方面对管道健康等级的分布情况进行分析,结果见图 2。其中,等级越高表示管道质量越差,需尽快修复(0 级即为无需修复)。

由图 2(a)可知,随着管龄增加,严重破坏的管道占比逐渐上升,而无破坏的管道占比下降,即管道整体病害等级随管龄增长而升高。由图 2(b)可知, DN400 与 DN1 000 管道在相同服役时间内,无缺陷或存在轻微缺陷的管段占比较高; DN800 管道的缺陷状况相对更为严重; DN500 管道则多表现为中等程度缺陷。总体而言,不同管径塑料管道的病害等级未呈现明显的分布规律,推测其与管材生产质量、施工质量等因素的关联性更强。

由图 2(c)中管道 3~4 级缺陷的占比可知,埋深越大,管段发生严重结构性破坏的概率越低。由图 2(d)可知, DN400 管道的 3~4 级病害随管道长度增加略有降低,而 DN600 管道的 3~4 级病害则呈增加趋势。总体来看,管道长度变化对管道病害等级无明显影响规律。

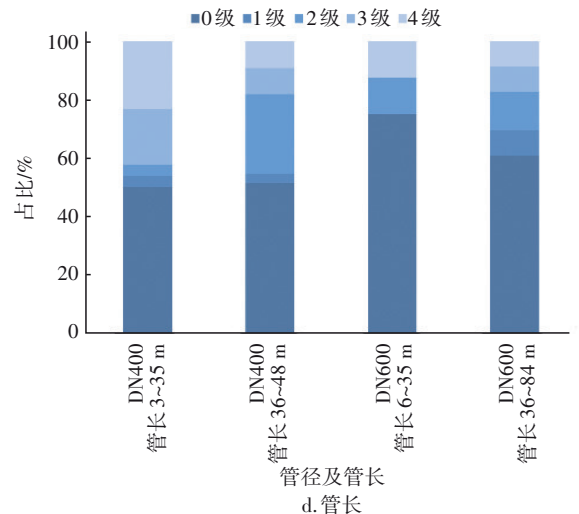
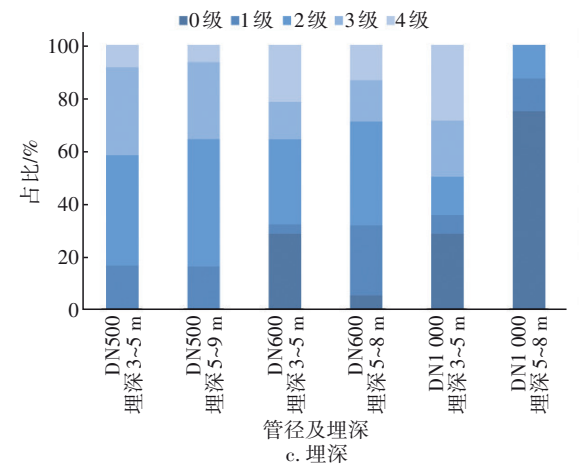
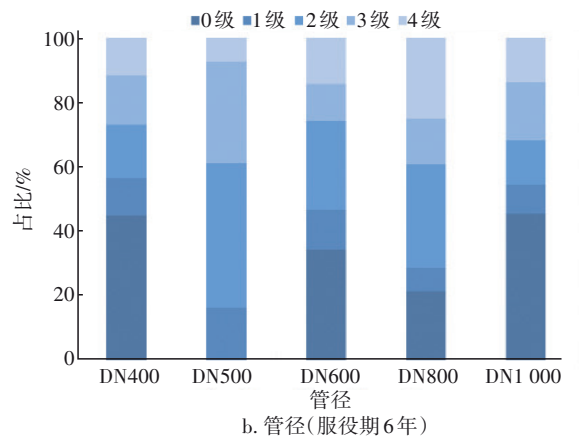
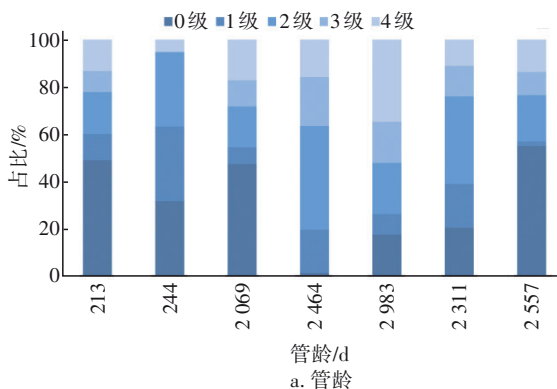


图 2 不同因素对管道健康等级的影响

Fig.2 Effects of various factors on the health level of pipelines

4 新型塑料排水管道预防性评估方法

4.1 排水管道病害评估概述

目前,塑料排水管道管养等级的评估依据为 CJJ 181—2012,主要基于管内图像数据的人工判

读,同时结合管道基础信息(包括管径、管长、埋深、管龄等)综合评价。管段损坏状况参数基于缺陷分值进行计算,具体为:

$$S = \frac{1}{n} \left(\sum_{i_1=1}^{n_1} P_{i_1} + a \sum_{i_2=1}^{n_2} P_{i_2} \right) \quad (1)$$

$$S_{\max} = \max P_i \quad (2)$$

式中: S 与 S_{\max} 均为管段损坏状况参数,前者取按缺陷点数计算的平均分,后者取管段结构性缺陷中损害最严重处的分值; n 为管段结构性缺陷数量, $n=n_1+n_2$; n_1 为纵向净距大于1.5 m的结构性缺陷数量; n_2 为纵向净距大于1.0 m且不大于1.5 m的结构性缺陷数量; P_{i_1} 为纵向净距大于1.5 m的结构性缺陷分值; P_{i_2} 为纵向净距大于1.0 m且不大于1.5 m的结构性缺陷分值; a 为结构性缺陷影响系数,与缺陷间距有关; P_i 为结构性缺陷分值。

依据“一处受阻,全线不通”的排水管道缺陷开关效应,管段的损坏状况等级取决于该管段中最严重的缺陷,故管段结构性缺陷参数 F 取管段损坏状况参数中的最大值,其计算公式为:

$$F = \begin{cases} S_{\max} & S_{\max} \geq S \\ S & S_{\max} < S \end{cases} \quad (3)$$

管段结构性缺陷密度 S_M 是基于管段缺陷平均分 S ,对应的缺陷总长度占管段长度的比值。其中缺陷总长度为计算值,而非管段的实际缺陷长度。缺陷密度值越大,表示该管段的缺陷数量越多。 S_M 应按下式计算:

$$S_M = \frac{1}{SL} \left(\sum_{i_1=1}^{n_1} P_{i_1} L_{i_1} + a \sum_{i_2=1}^{n_2} P_{i_2} L_{i_2} \right) \quad (4)$$

式中: L 为管段长度; L_{i_1} 为纵向净距大于1.5 m的结构性缺陷长度; L_{i_2} 为纵向净距大于1.0 m且不大于1.5 m的结构性缺陷长度。

管段修复指数 RI 及养护指数 MI 的计算公式为:

$$RI = 0.7F + 0.1K + 0.05E + 0.15T \quad (5)$$

$$MI = 0.8G + 0.15K + 0.05E \quad (6)$$

式中: K 为地区重要性参数; E 为管道重要性参数; T 为土质影响参数; G 为功能性缺陷参数。

当前评估标准中结构性缺陷参数 F 和功能性缺陷参数 G 的权重较高,而这两项参数多基于井下检测获得。当缺乏管内图像信息时,该标准难以为管段的状态评估和提前养护提供有效指导^[6]。

4.2 塑料排水管道管养等级划分理论

逻辑回归允许使用数值型和分类型自变量对

有序分类因变量进行建模^[7],并能够提供与因变量不同等级对应的预测概率,因此,采用逻辑回归方法构建管道病害预测模型^[8]。多元逻辑回归模型包含 $k-1$ 个logit方程,其中, k 为因变量的类别数, α 为各logit方程的截距项, β 为自变量对应的回归系数。模型参数通过最大似然估计法确定,并使用Wald检验对各自变量的显著性进行判断。

在多元逻辑回归中,logit方程将每个类别等级的概率与参考类别进行比较。由于回归系数取值因类别等级而异,自变量的增减对因变量的影响也会因其所属类别而有所不同。通过对比不同等级对应的预测概率,可以确定管段最有可能所属的健康等级。

在二元逻辑回归中,通常使用 2×2 分类表展示事件发生和非发生的预测及实测数量。根据概率值是否超过判定值,将观察结果分配给事件组或参考组。多元逻辑回归涉及2个以上的组别,因此需将实测值分配给计算所得概率最高的类别。

4.3 数据驱动管养等级模型与分类体系

结合排水管道运维检测数据集的特征,采用逻辑回归方法对管网运维健康度进行拟合分析。值得注意的是,专家问卷调查与数据分析所得结论,并不与多元逻辑回归分析结果完全一致,原因在于后者综合考虑了多变量的共同作用及统计的显著性。本研究中,管道健康度可视为管段修复指数 RI 的预测值。对排水管道病害运维数据库进行分析可知,不同管径管道的力学性能存在显著差异,其缺陷随管龄增长的分布不呈线性关系,故将管径视作名义变量。其中,管径100与200 mm管道无不同管龄下数据,其影响显著性极低,因此在模型拟合时不予考虑。同理,土质类别、道路等级及管道类别也作为名义变量处理。

采用SPSS 25对数据进行多元逻辑回归分析。根据模型参数显著性的检验条件(显著性 <0.05),可知管长、埋深及地区重要性参数 K 的显著性较低,对管道健康等级的预测解释力不足,故将这3个变量从最终的自变量集合中剔除。模型的整体显著性基于完整模型与仅截距模型的似然比进行评估。最终模型和仅截距模型相比,其 -2 对数似然值之差为1 411.738,表明所构建模型显著改进。评估模型各参数的显著性与整体模型评估方式类似,即计算完整模型的 -2 对数似然值与剔除某一参数后简化

模型的-2对数似然值之间的差异。

通过使用多元逻辑回归方程计算与各健康等级相关的概率^[9],并比较所得概率值,可预测管道处于特定等级的概率。具体步骤如下:首先,将自变量及参数估计值代入多元逻辑回归方程,得到线性

$$\ln \frac{P(\text{CR} = j)}{P(\text{CR} = 4)} = \alpha_j + \beta_{j1} A + \beta_{j2} Z_{\text{size} = 300 \text{ mm}} + \beta_{j3} Z_{\text{size} = 400 \text{ mm}} + \beta_{j4} Z_{\text{size} = 500 \text{ mm}} + \beta_{j5} Z_{\text{size} = 600 \text{ mm}} + \beta_{j6} Z_{\text{size} = 700 \text{ mm}} + \beta_{j7} Z_{\text{size} = 800 \text{ mm}} + \beta_{j8} Z_{\text{size} = 900 \text{ mm}} + \beta_{j9} Z_{\text{size} = 1000 \text{ mm}} + \beta_{j10} Z_{\text{sewer type} = \text{sanitary}} + \beta_{j11} Z_{\text{road class} = 1} + \beta_{j12} Z_{\text{road class} = 2} + \beta_{j13} Z_{\text{soil type} = 0} + \beta_{j14} Z_{\text{soil type} = 8} = G_j \quad (7)$$

式中:CR=j为管道健康等级,j=1,2,3,4;P(CR=j)为管道处于j类健康等级的概率;A为管道服役年限;G_j为第j类相对于基准类别(CR=4)的线性预测值;α_j为等级j的截距项;β_{j1},β_{j2},⋯,β_{j14}为管道健康等级j采用最大似然法估计的回归系数;Z为名义变量,其中Z_{size}为管径变量,Z_{sewer type}为管道类型变量,Z_{road class}为道路等级变量,Z_{soil type}为土质参数变量,根据类别取0或1,本模型中均取1。

式(7)中的拟合参数见表1。

表1 多元逻辑回归方程参数

Tab.1 Multiple logistic regression equation parameters

管道健康等级	1级	2级	3级	
截距α _j	22.967	32.522	39.095	
管龄β _{j1}	-5.597	-4.984	-6.295	
管道类型(污水)β _{j10}	-1.609	-0.652	-1.855	
道路等级				
β _{j11} ~β _{j12}	1级	1.770	-0.183	4.396
	2级	-1.129	-2.956	0.159
土质参数				
β _{j13} ~β _{j14}	0(一般土层)	17.665	3.848	1.719
	8(淤泥软土)	-6.874	-18.845	-8.478
管径				
β _{j2} ~β _{j9}	300 mm	-0.652	-0.395	-2.790
	400 mm	0.551	0.844	0.830
	500 mm	-0.635	0.930	0.244
	600 mm	-0.160	0.754	0.056
	700 mm	-22.070	-21.533	-21.006
	800 mm	-3.478	-1.906	-3.365
	900 mm	-0.996	-0.262	-2.676
	1 000 mm	-0.816	0.231	-1.172

最终,管段处于各健康等级的概率如式(8)所示,其中等级4对应的概率可根据4个等级概率之和为100%确定。

$$P(\text{CR} = j) = \exp(G_j) / [1 + \exp(G_1) + \exp(G_2) + \exp(G_3)] \quad (8)$$

根据上述分级体系,将每段单独管段的健康度分配至概率最高的类别。模型在模拟数据集上的

预测值,并可进一步计算各变量的比值比(OR),用于分析其对管道健康等级的影响程度;然后,通过Logistic函数计算各管段处于不同健康等级的概率。将各等级的多元逻辑回归变量参数代入方程,推导得到下式:

总体准确率较高,平均可达72.0%,具体见表2。

表2 多元逻辑回归模型准确率

Tab.2 Multinomial logistic regression accuracy

实测健康等级	样本数量				准确率/%
	预测1级	预测2级	预测3级	预测4级	
1级	627	32	0	0	95.1
2级	257	87	0	24	23.6
3级	57	16	122	27	55.0
4级	4	2	0	242	97.6

该模型对健康等级1级和4级塑料管道的健康度预测准确率较高(>95%),但对健康等级2级和3级管道的预测准确率较低(<60%)。究其原因,主要与塑料管道病害发展较快有关;同时,中间等级样本数量不足导致数据不均衡,部分新建管段因施工质量问题在早期即出现缺陷,影响了模型的区分能力。今后,应结合塑料排水管道运维实践,提高数据库的数据量与质量,加强长期管网运维数据的积累,特别是中等级别的缺陷数据。此外,可尝试引入机器学习集成模型,提升对中等级别缺陷的识别能力,从而有效提高预测模型的准确性。

5 结论

采用专家问卷调查与管养数据分析相结合的方法,以珠海市为例,分析了影响滨海城市塑料排水管道病害的多种因素,包括管径、管龄、管长、管材质量及土质条件等。专家问卷分析表明,管材质量、施工质量、管龄、土质和植被情况是影响管道运维的主要因素。珠海地区塑料排水管道的服役年限多集中在20年以上,各区域的地下水位与土质条件对管道健康度具有显著影响。在此基础上,基于横琴地区排水管道运维数据库,建立了考虑管径、管龄、土质等因素的塑料排水管道健康度预测模型。采用多元逻辑回归方法,实现了对管道不同健康等级的有效预测,预测准确率达72.0%。该模型

能够为城市管网的健康等级划分提供参考,有助于运维部门识别高风险区域,制定预防性修复计划及资金优先配置策略,从而避免单纯依赖“先坏先修”的被动模式,实现“有限资金下优先修复高风险区域”的目标。

受限于管网运维数据的数量及有效性,该管养判定模型仍存在改进空间。未来需通过管道长期运维数据的持续积累来进一步完善模型,为塑料排水管道的评估与维护提供更准确的依据。

参考文献:

- [1] 郭小雪. 老城区市政排水管网改造规划与设计[J]. 工程技术研究, 2025, 10(17): 183-185.
GUO X X. Planning and design of municipal drainage pipe network renovation in old urban areas [J]. Engineering and Technological Research, 2025, 10(17): 183-185(in Chinese).
- [2] 闻炯明, 孙磊, 李兆璞, 等. 热熔焊接工艺参数对聚乙烯燃气管道焊接残余应力的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(8): 81-89.
WEN J M, SUN L, LI Z P, et al. Effect of hot-melt welding process parameters on welding residual stress of polyethylene gas pipeline [J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(8): 81-89(in Chinese).
- [3] 谷俊鹏, 曹玉梅, 潘铁津. 城市排水管网运维效能提升策略研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(16): 29-36.
GU J P, CAO Y M, PAN T J. Research on strategy of improving the operation and maintenance efficiency of urban drainage pipeline network [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(16): 29-36(in Chinese).
- [4] 张崧源. 基于深度学习的排水管道评估方法研究[D]. 荆州:长江大学, 2024.
ZHANG S Y. Research on Pipeline Evaluation Method Based on Deep Learning [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2024(in Chinese).
- [5] 阳峰, 陆野, 李诗颖, 等. 横琴粤澳深度合作区海域表层沉积物微量元素地球化学特征[J]. 中国地质调查, 2024, 11(6): 76-85.
YANG F, LU Y, LI S Y, et al. Geochemical characteristics of trace elements in marine surface sediments of Guangdong-Macao In-depth Cooperation Zone in Hengqin [J]. Geological Survey of China, 2024, 11(6): 76-85(in Chinese).
- [6] 黄彦, 徐聪, 司振江. 基于DPSIR-TOPSIS模型的寒地黑土区水土资源可持续利用评价研究[J]. 节水灌溉, 2024(12): 26-31, 40.
HUANG Y, XU C, SI Z J. Evaluation of sustainable use of soil and water resources in cold black soil region based on DPSIR-TOPSIS model [J]. Water Saving Irrigation, 2024(12): 26-31, 40(in Chinese).
- [7] RAHMANI S R, LIBOHOVA Z, ACKERSON J P, et al. Estimating natural soil drainage classes in the Wisconsin till plain of the Midwestern U. S. A. based on lidar derived terrain indices: evaluating prediction accuracy of multinomial logistic regression and machine learning algorithms[J]. Geoderma Regional, 2023, 35: e00728.
- [8] HWAN J P, JUNGGOO K, JAEMO K, et al. Machine-learning-based ground sink susceptibility evaluation using underground pipeline data in Korean urban area [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 20911.
- [9] 赵立洁. 排水管网缺陷因素分析及预测模型研究[D]. 西安:西安理工大学, 2022.
ZHAO L J. Study on Defect Factors Analysis and Prediction Model of Drainage Network[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022(in Chinese).

作者简介:余漩(2002—),女,四川南充人,硕士研究生,研究方向为排水管道病害智能诊断评级。

E-mail:yuxuan26@mail2.sysu.edu.cn

收稿日期:2025-08-01

修回日期:2025-10-30

(编辑:沈靖怡)