

周毅, 刘旭辉, 沈加子, 等. 城镇排水管道健康评估研究进展[J]. 净水技术, 2025, 44(5): 34-43.

ZHOU Y, LIU X H, SHEN J Z, et al. Research progress of health assessment for urban drainage pipelines [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(5): 34-43.

城镇排水管道健康评估研究进展

周毅¹, 刘旭辉², 沈加子¹, 李继¹, 张小磊^{1,*}

(1. 哈尔滨工业大学<深圳>土木与环境工程学院, 广东深圳 518055; 2. 深圳市龙岗排水有限公司, 广东深圳 518026)

摘要 【目的】 城镇排水管道是城市基础设施的关键部分,其健康状况关乎城市安全与运维。研究旨在剖析排水管道健康状况,为保障排水系统稳定运行提供依据。【方法】 文章综合国内外相关研究,从管道自身、外部环境及使用维护等方面分析健康影响因素,梳理各类风险事件及成因,介绍直观检查与设备检测手段,阐述评估流程及常见的评估方法,探讨人工神经网络等管道预测模型。【结果】 管道自身老化、外部环境复杂、运维不当等因素致使风险事件发生。检测技术各有利弊,评估流程多法并存,预测模型虽有进展,但因数据原因使应用受限。【结论】 城镇排水管道健康评估已从传统迈向综合评估,取得一定成果,但仍面临评估标准不统一、数据融合困难和成本效益待优化等挑战。未来还需推动多学科融合、智能机器人技术应用,强化管道健康管理,提升城市韧性与可持续发展能力。

关键词 排水管道 风险事件 检测手段 评估流程 预测模型 健康评估

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)05-0034-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.05.005

Research Progress of Health Assessment for Urban Drainage Pipelines

ZHOU Yi¹, LIU Xuhui², SHEN Jiazi¹, LI Ji¹, ZHANG Xiaolei^{1,*}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China;

2. Shenzhen Longgang Drainage Co., Ltd., Shenzhen 518026, China)

Abstract [Objective] Urban drainage pipelines are crucial parts of urban infrastructure, and their health conditions are related to urban safety and operation & maintenance. The health conditions of drainage pipelines are aimed to be analyzed by this study, so as to provide a basis for ensuring the stable operation of the drainage system. [Methods] Relevant studies at home and abroad are integrated. The health influencing factors are analyzed from aspects of the pipelines themselves, the external environment, usage and maintenance. Various risk events and their causes are sorted out. Intuitive inspection and equipment detection means are introduced. The evaluation process and common evaluation method are elaborated, and pipeline prediction models such as artificial neural networks are explored. [Results] Risk events are caused by factors such as the aging of pipelines, the complex external environment, improper operation and maintenance. Each detection technology has its own advantages and disadvantages. Multiple method coexist in the evaluation process. Although progress has been made in prediction models, their application is limited by data. [Conclusion] The health assessment of urban drainage pipelines has shifted from traditional to comprehensive assessment, and certain achievements have been made. However, challenges still remain, such as the lack of unified evaluation standards, difficulties in data fusion, and the need to optimize cost-effectiveness. In future, multi-disciplinary integration and the application of intelligent robot technology need to be promoted to strengthen pipeline health management and enhance urban resilience and sustainable development capabilities.

Keywords drainage pipeline risk event detection means evaluation process prediction model health assessment

[收稿日期] 2024-12-12

[基金项目] 深圳市科技创新委员会科技重大专项(KJZD20230923114800002)

[作者简介] 周毅(2000—),男,硕士研究生,研究方向为排水管网健康风险评估,E-mail:13423648098@163.com。

[通信作者] 张小磊,女,副教授,博士研究生,主要从事工业及生活有机废弃物资源化、城市污水厂污泥减量及资源化的工作,E-mail:xiaolei.zhang2016@foxmail.com。

城镇排水管道作为城市的“地下生命线”,承担着收集、输送污水和雨水的重任,对维持城市的正常运转起着不可或缺的作用。根据国家统计局数据,截至2023年12月,我国城市排水管道长度已达95.3万km,较10年前增长了105%,规模的迅速扩张凸显了其在城市基础设施中的重要地位。然而,随着城镇规模不断扩大以及排水管道使用年限增加,排水管道老化、损坏等问题日益凸显,严重影响城镇的运营管理。

在此背景下,开展排水管道健康评估研究意义重大。准确评估排水管道的健康状况,能够及时发现潜在隐患,为管道维护、修复和更新提供科学依据,有助于降低事故发生率,保障城市排水系统稳定运行。同时,合理的健康评估还能优化资源配置,提高城市运维管理效率,提升城市应对突发排水问题的能力。本文旨在综述城镇排水管道健康风险因素、类型,对各风险评估方法进行分类概括,以期为排水管道风险研究和实际工程应用提供有益参考。

1 排水管道健康风险

1.1 排水管道健康影响因素

城市排水管线大多深埋于地下,分布较广,所处环境不透明且影响因素复杂。国内外学者就探索排水管网健康运行方面已有较多研究^[1-2]。总体而言,影响排水管道健康风险的因素大致可概括为3种类型。

(1)管道自身因素:指排水管道由于自身的内在特性而对其健康状况产生影响的一系列因素。其中包括管长、管龄、管径、制造工艺以及接口材料等。许多城市的排水管网建设时间较早,管道材料随着时间的流逝自然老化。常用的管道材料可分为金属管材、塑料管材及复合管材。铁质管材有镀锌钢管、铝合金钢管和镀镍钢管,该类管道材料承重效果好,常运用于消防系统中,在排水施工中运用相对较少。塑料管材轻便且耐腐蚀性及可塑性强,在地下排水管道中有较多应用,常见的有硬聚氯乙烯(PVC-U)管材、聚乙烯(PE)管材和无规共聚聚丙烯(PPR)管材^[3]。除了上述提到的3种常用管道材料类型外,混凝土管道因其强度高、耐久性好、抗渗抗腐蚀抗冲刷能力强,且材料和维护成本低、安装简便等优点,在城镇排水管道中也有诸多应用^[4]。研究^[5]表明,

在影响管道健康的诸多自身因素中,管龄(管道老化)、管径、管材和管长对管道劣化过程影响较大。

(2)外部环境因素:指排水管道系统周围的自然条件、地质状况、自然灾害等均为影响排水管道健康运行的外部因素。Cai等^[6]将风险分析理论和方法引入城市内涝问题,研究发现,地形影响降水和汇流,城市化使硬化路面和建筑面积增加,改变下垫面,导致径流系数增大、汇流时间缩短,从而引发内涝。学者们^[7-8]研究表明,管道周围土壤性质、地下水位、埋土状况和地面交通会影响排水管道的结构稳定,是造成管道的变形和塌陷的主要因素。

(3)使用与维护因素:使用与维护因素对于排水管道的健康状况有着至关重要的影响。其中,过载使用问题日益凸显,随着城市人口的不断增加以及土地利用方式的改变,排水管道所承受的负荷也在持续增大。同时,定期的检查和维护对于排水管道的正常运行十分重要。排水管渠的运行维护包括:管渠巡视、管渠养护、管渠检查与评估、管渠修理等。事实上,维护排水管渠工作的细则已在《城镇排水管渠与泵站运行、维护及安全技术规程》(CJJ 68—2016)中进行了规定,但目前存在不能严格遵循规定进行运维的问题,导致出现风险。

综上所述,排水管道健康影响因素成分复杂,且因素之间会相互影响导致管道健康程度下降。Salihu等^[9]通过文献计量、科学计量和元分析方法指出影响排水管道劣化较大的因素包括运营缺陷、管道形状、管道材料、废水类型、结构缺陷和水力条件等,而树根穿透、管道埋深、管道长度和道路类型等对排水管道健康影响相对较小。王海蓝等^[10]对深圳河流域龙岗区段的排水管道检测发现,功能性缺陷以沉积及障碍物居多,原因是居民倾倒垃圾致流速缓、水位高、沉积重。结构性缺陷主要是腐蚀、错口、破裂及变形,腐蚀最多,主要受高水位、土质、管材影响。管道健康影响因素如图1所示,图中次要因素并不代表该因素不重要,只是关于该因素的影响机理目前还没有研究透彻,需要更多的数据支撑该因素对管道健康状况的影响。在排水管道长期运行过程中,每个管道所处的环境不尽相同,不同管道呈现出不一样的稳定性,因此对管道健康的判断需要结合多方面因素,从而更好地判别由排水管道引起的风险事故。

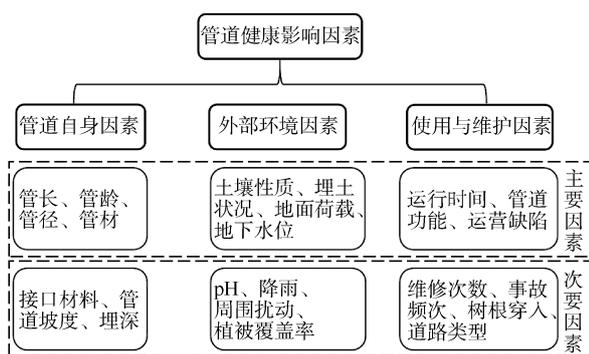


图1 管道健康影响因素

Fig. 1 Influencing Factors of Pipelines Health

1.2 排水管道风险事件

随着排水管道建设愈加庞大,由排水管道健康引起的风险事故也逐渐显露出来。污水管道投资巨大,其老化与损坏对环境和公共健康构成威胁,如有毒气体泄漏、污水渗入地下污染土壤和地下水等。但当前预算多用于系统扩张与处理厂升级,管道修复资金不足^[11]。根据《全国地下管线事故统计分析报告》,2023年由排水管道系统引发的事故为76起,其中,因排水管道本身结构性隐患导致的事故数量为40起,占全部的52.6%,其次是管理缺陷导致的事故,共18起,外力破坏与环境因素导致的事故数量为11起。不同的风险事件如表1所示。不仅如此,排水管网中的检查井盖、防坠网等设施若出现缺失、破损及维护不当的情况,还会造成工作人员和市民的跌落伤亡事件,给城市的安全带来严重隐患。由此可见,及时发现管道本身结构性隐患并进行针对性处理,可有效防止排水管道引起的相关事故。

表1 主要运行风险事件及相关影响因素
Tab. 1 Major Operational Risk Events and Related Influencing Factors

风险事件	影响因素	相关文献
内涝积水	降雨、管网排水能力、地形等	[12-13]
溢流污染	管网水位、管网破损、管网设计标准、调蓄能力等	[14-16]
地下水和土壤污染	管道破损、土壤孔隙率、渗透性等	[17]
路面塌陷	管道破损、外部荷载等	[18-19]
气体风险	H ₂ S、CH ₄ 气体含量	[20-21]
微生物气溶胶	细菌、病毒、寄生虫等	[22-23]

1.3 排水管道事故原因分析

(1) 管道本身隐患引发的事故

排水管道自身所潜藏的隐患往往会诱发一系列

常见事故,诸如管道堵塞、管道渗漏以及路面塌陷等。管道破裂、管道老化和管道变形是大部分管道事故发生的原因。其中,管道破裂属于极为严重的结构风险类别,其成因呈现出多样化的特征。管道老化是较为普遍的一个因素,伴随长期的使用过程,管道的性能会不可避免地出现下滑趋势。以混凝土管道为例,排水类型及污水组分都会影响其使用寿命。排水管道在长期运行过程中易受物理腐蚀、化学腐蚀和微生物腐蚀,其中微生物在管道中产酸加快了混凝土管道的腐蚀老化,致使管道强度逐步衰减^[24]。并且,倘若管道长时间承受过高的压力,不管这种压力是源于内部的水压,还是来自外部诸如交通荷载等方面的压力,均会提升管道破裂的风险概率。除此之外,材料质量不过关以及施工质量存在缺陷同样是不容忽视的。一旦管道发生破裂,污水将会出现外溢现象,这不但会对周边的土壤以及水体造成污染,而且还有可能引发地面塌陷,从而对行人与过往车辆的安全构成极为严峻的威胁^[19]。管道变形现象一般是由不均匀沉降、外部挤压等多种因素共同作用所导致的。此类变形状况会对水流的正常输送形成干扰,进而引发积水以及排水不畅等一系列问题。不仅如此,管道在发生变形之后,其受力分布状况也会相应改变,这会致使其他部位所承受的压力增大,从而进一步加剧管道破裂等风险的发生几率。

(2) 管理缺陷导致的事故

在排水管道内部,污水处于厌氧环境时,会生成CH₄、H₂S等具有危害性的气体^[21]。一旦出现管道破损或者检查井井盖被打开等情形,这些气体便有可能逸散至周边环境之中。倘若所处环境通风不畅,人员在接触高浓度有害气体时就极易发生中毒现象。其中,CH₄属于可燃气体,当其在空气中的浓度达到一定程度时,一旦遭遇火源便会引发爆炸,这会对周边的建筑物以及人员的安全产生极为严重的威胁。与此同时,污水里包含有数量众多的微生物,例如细菌、病毒、寄生虫等。在管道破裂或者进行管道维护的过程中,工作人员有可能会接触到这些微生物,从而面临感染各类疾病的风险。

地下排水管网错综复杂,运维管理时难以包含所有的管道,部分管道沉积物清理不及时,会导致排水系统无法正常运行,使雨污水难以被及时有效地

排出,进而致使城市出现雨污水从检查井、雨水篦子满溢以及内涝积水现象。内涝不仅会对城市的基础设施,诸如道路、建筑物地下室等造成损害,还会干扰城市的正常运转秩序,引发交通瘫痪、商业活动受阻等诸多问题,同时也会对居民的生命财产安全造成危害与威胁。

1.4 检测手段

(1) 直观检查法

我国城镇排水管网管线复杂,大多数城市内部的排水系统规划与设计存在一定的缺陷,阻碍了城市的进一步发展^[25]。定期安排工作人员对排水管道地面附属设施进行检查,如检查井、雨水篦子等。检查检查井的井盖是否有损坏、丢失的情况,检查雨水篦子是否被树叶、垃圾等堵塞,影响雨水的正常收集。工作人员通过检查井对管道内部进行初步观察,查看管道内壁是否有明显的裂缝、腐蚀、结垢或异物堆积等情况。不过这种方法只能观察到管道的局部情况,对于较深或较长的管道内部难以全面了解。在一些管径较大、水深较浅的排水管道中,安排专业潜水员进入管道进行检查。潜水员可以携带照明设备和摄像机,对管道的内壁、连接处等部位进行详细查看,能够发现一些如接口脱落、局部损坏等问题。但是这种方法存在一定的危险性,而且对于污水管道,由于水质恶劣、存在有毒有害气体等因素,潜水员检查会受到诸多限制^[26]。

(2) 设备检测法

目前城镇排水管道运维主要依赖人工作业,作业量大且风险性高。随着机械自动化的蓬勃发展,以机械代替人工作业能够有效地提高运维人员的安全以及效率^[27]。

管道闭路电视(closed circuit television for pipes, CCTV)检测机器人是目前最为常用的排水管道机器人。工作原理是通过在管道内放置带有摄像头的爬行器,摄像头可以360°旋转,对管道内部进行全方位拍摄。爬行器在管道内缓慢前行,将拍摄到的视频图像传输到地面的控制设备上。技术人员可以根据视频画面来判断管道的内壁状况,如是否有裂缝、变形、腐蚀、渗漏点等。这种方法可以检测较长距离的管道,并且能够记录下详细的管道内部情况,为后续的管道修复和维护提供准确的依据^[28]。当前在国内CCTV机器人发展迅速,深圳市

某公司发明了鸭嘴兽系列CCTV管道检测机器人,可以在管道内部水位过半时检测管道,为城镇排水系统的检测提供了便利。表3列举了一些管道检测技术。由于城市雨污管网系统管线复杂,位于地下以至于检测难度较大,单一的检测技术无法满足复杂的城市排水系统。近年来,越来越多的研究人员将各种技术加以融合,从而在增强检测成果的同时增加检测效率,并降低人工检测的危险,使检测方法朝着更全面、更可靠的方向发展^[29]。目前,人工智能因其高效且风险低,与各种检测技术的融合越来越成为当前国内外学者重点关注的对象。Bai等^[30]综述了探地雷达的传统和新型算法应用,包括支持向量机(support vector machine, SVM)、人工神经网络(artificial neural network, ANN)、深度学习(deep learning, DL)等,展现出机器学习与探地雷达融合的可行性。

在CCTV检测机器人中,有利用快速视频(quick view, QV)电子潜望镜及CCTV检测相结合的方法,当检测管径较小的管道时,QV可以配合CCTV进行检测^[31]。同时,CCTV检测录像数据资料不断增加,为机器学习提供了扎实的数据支撑。各类图像识别算法开始运用到排水管道缺陷识别中。基于各大神经网络、DL的检测算法在排水管道缺陷识别中得到了应用。常见的图像识别模型有LeNet-5、AlexNet、VGGNet、GoogLeNet、ResNet、YOLO等^[32]。韩崔燕等^[33]基于YOLOv5s模型识别CCTV排水管道缺陷,使排水管道缺陷识别模型的多类别平均精确度达到了85.42%。其中错口、异物穿入、渗漏和破裂4种缺陷的识别精确度可达到93.6%、91.7%、91.7%和91.3%。综上所述,把人工智能方法运用在城镇排水管道缺陷检测中,取得了较为满意的识别准确率,但仍在模型轻量化、主动学习能力和多模态信息的融合方面可以有进一步的研究^[34],以此能够更好地预测城镇排水管道的健康状况。主要排水管道检测技术如表2^[35-41]所示。

2 排水管道健康评估

2.1 排水管道健康评估流程

排水管道健康评估流程总体可分为3个阶段,包括资料收集阶段、建立评估指标体系阶段、健康等级评价阶段^[42],流程如图2所示。

表 2 排水管道检测技术
Tab. 2 Detection Techniques of Drainage Pipelines

检测技术	优点	缺点	参考文献
CCTV 检测机器人	可直接发现管道问题、成像清晰等	人工辨别图像、管内障碍物或水位较高时无法使用、对轻微裂缝和渗漏检测效率低	[35]
QV 潜望镜	空间要求低、检测速度快等	有拍摄盲区、无法检测水面下情况	[36]
探地雷达	探测效率高、速度快	无法精确异常类型	[37]
声纳检测	检测速率快、成本低	只适用于初步判断、无法准确判断类型	[38]
瞬变电磁感应	对地下富水区域敏感性、分辨管道类型、探测深度大	发射源布设工作量大、场地本身易干扰	[39-40]
微波无损检测	无损检测、功耗低	缺陷无法精确识别、场景局限	[41]

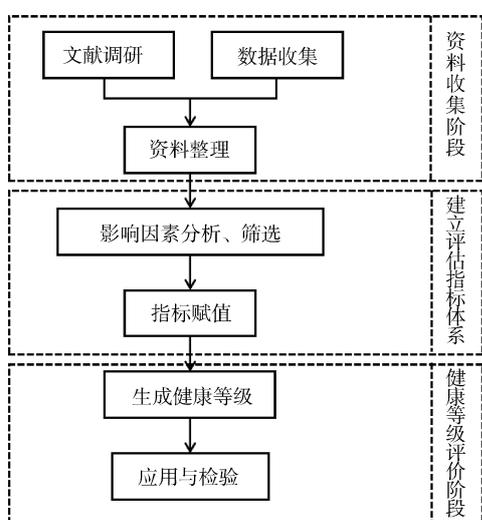


图 2 排水管道健康评估流程图

Fig. 2 Process Chart of Health Assessment for Drainage Pipelines

资料收集阶段,首先要对评价对象有充足了解,并在调研的过程中收集数据,以支撑后续构建评估指标体系。当前,各国都有各自的排水管道评估标准手册,其中北美遵循的标准是于 2001 年开发的《管道评估认证手册》,标准中将管道分为结构性缺陷和运行维护 2 类。英国遵循的是《污水管道修复手册》,它与《管道评估认证手册》在很多方面有相似之处且主要针对混凝土管道。澳大利亚主要遵循《澳大利亚管道状况评估手册》,它将管道缺陷分为结构性缺陷和水力缺陷。《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012)是国内在 2012 年推出的标准手册,虽然国内起步较晚,但充分吸收了前者的经验,对缺陷的分类更加细化^[43]。这些标准手册距今至少已过了 10 余年,随着检测技术不断迭代升级,数据不断完善,为更新现有的标准手册和理念

提供了新的技术基础,从而能够更好地跟上城市发展的步伐。

建立评估指标体系阶段主要是在认识评价对象后,对影响对象的一系列因素进行分析、筛选。其中最核心的问题是如何筛选评价指标,目前针对排水管道影响因素筛选评价指标的方法有很多。常见的筛选评价指标方法及参数如表 3 所示,大致可分为主观经验评估、客观数据评估、综合评估 3 种类型。

表 3 筛选评价指标方法及参数

Tab. 3 Screening Evaluation Index Method and Parameters

评估类型	具体方法	主要参数
主观经验评估	专家评分法	专家权威性、指标权重、一致性参数
	风险矩阵法	风险发生可能性、影响程度、风险等级
客观数据评估	因子分析法	因子载荷、特征值、方差贡献率
	理论模型法	回归系数、残差、决定系数
综合评估	主成分分析(PCA)	主成分载荷、特征值、贡献率
	层次分析法	判断矩阵、权重向量、一致性指标
	模糊综合评价法	因素集、评语集、模糊关系矩阵
	灰色关联分析法	参考数列、比较数列、关联系数

专家评分法是一种通过向相关领域专家咨询,依靠专家经验和主观判断来对风险事件及相关影响因素进行说明、解读和评估的方式。通常情况下,专家评分法一般作为综合筛选的一部分内容^[44]。风险矩阵法是依据风险评估主体的需求以及风险识别的结果而构建起来的,通过把风险概率的等级与风险危害程度的等级相互融合,以此来对风险大小进行描述的一种方法^[45]。

客观数据评估通过大量试验结果和统计数据建立数学模型^[46]。因子分析法将多种指标简化为几个因子项进行评价,对于排水管道影响因素的筛选提供了便利。国内已有通过因子分析法筛选一级指

标和二级指标构建评价体系的应用^[47]。理论模型法基于试验和经验进行风险评估。欧盟研发了基于生物化学机理的评估理论模型 WATS^[48]。

综合评价是主观经验和客观数据相结合的评估方法,评价的依据包括数据、模型和专家知识等。城市排水管网系统复杂,其规划、建设与运维涉及多种因素。当前,国内大多数排水管网健康评估倾向采用综合评价法。Ba 等^[49]基于模糊综合评价与网络分析法以苏州工业园区为例分析该地区排水管网运行风险,评估结果显示该园区主要为二级和三级风险,整体运营安全风险低、管理水平高。颜文涛等^[50]通过灰色关联综合评价法衡量污水管道健康状况的指标,得到污水管道的预报健康度排序,从而可以确定污水管道检测的优先顺序。刘威等^[51]基于层次分析法-熵权法组合对城市排水管段进行风险评级,评价结果表明,钢筋混凝土管线的风险情况远高于混凝土和塑料管线。评估方法有许多,每种方法都有其优势与不足,如何将各种评估模型有效融合,构建出科学合理的评估体系是实现城镇排水管道健康评估的关键。

2.2 管道预测模型

随着计算机硬件和数据库的升级,人工智能模型的运算速率和准确率大幅度增加,人工智能模型逐渐走进排水管道领域。区别于经典的评估方法,以数据驱动的人工智能模型能够有效改善评估体系主观性问题并预测管道健康状况。常见的人工智能模型有 ANN、模糊逻辑规则、模拟规则以及机器学习模型。机器学习模型大类中,随机森林、SVM 以及决策树 3 种模型在预测管道状况上应用较多。ANN 在排水管道状态评估应用中,通常采用反向传播和概率神经网络建立管道劣化预测模型。

Tran 等^[52]为澳大利亚雨水排水系统构建了有序概率劣化模型(ordered probit deterioration model, OPDM)和神经网络模型(neural network deterioration model, NNDM),模型评估结果表明,NNDM 较 OPDM 预测性能强;Mcbean 等^[53]使用 SVM 和决策树分类器(decision tree classifiers, DTC)对加拿大圭尔夫市的排水管道系统进行预测,通过模型对比发现,DTC 的受试者工作特征曲线下面积(area under the ROC curve, AUC)准确率及知识发现能力优于 SVM 模型;美国污水管道老化严重,混凝土污水管

腐蚀是主要的失效原因,Zamanian 等^[54]开发高精度模型分析管道性能影响因素,模型表明长度对管道应力应变有显著影响;Laakso 等^[55]建立二元逻辑回归与随机森林模型,在验证集中分类准确率分别为 62%、67%。同时通过精简模型变量发现仅用管坡、管龄、管长 3 个变量准确率可超 50%。

国内对预测模型的研究相较国外较晚,研究主要集中在排水管道特征与排水管道状况的关系,并运用各种研究方法尝试建立基于国内排水管道数据的状况预测模型。刘少非等^[56]利用基于遗传算法(genetic algorithm, GA)优化极限学习机(extreme learning machine, ELM)神经网络预测排水管道可能出现的结构缺陷;唐洋博等^[57]借助神经网络模型与逻辑回归算法预测排水管道破损尺寸及路面塌陷风险发生率。汪宙峰等^[58]基于堆叠算法模型,以四川省某市 2 275 段地下排水管道为研究对象构建排水管道预测模型,该模型预测精确值为 93.7%,并指出管道堆积、障碍物和管道变形是排水管网风险防控的重要因素。虽然,ANN 算法和逻辑回归模型基于管网基础信息预测管道破损尺寸及地陷发生率效果良好,但模型未纳入地质、水文条件,存在一定的局限性。表 4 中列举了目前常用于管道的人工智能预测模型优缺点及适用性。排水管道状况预测模型的研究在不断发展,但仍面临诸多挑战。未来需要通过跨学科合作、数据整合和技术创新等手段,进一步改进和完善预测模型,以提高排水管道的管理和维护水平,保障城市基础设施的安全和可持续发展。

3 发展趋势与展望

本文从排水管道影响因素、风险类型、检测技术、管道健康评估 4 个方面对城镇排水管道健康进行论述。

(1)影响因素方面。排水管道在地下环境复杂,状况受多种因素的影响,包括管道自身、外部环境以及使用与维护因素有关。需要结合多种工具、理论知识来掌握影响管道因素的运行规律。

(2)风险类型方面。排水管道面临结构缺陷、功能缺陷、腐蚀、外部破坏以及自然灾害引发的风险,这些风险威胁管道正常运行,可能导致污水溢流、路面塌陷等问题,影响城市环境、交通和居民生活。

表 4 主要管道人工智能预测模型优缺点及适用性
Tab. 4 Advantages, Disadvantages and Applicability of Major Pipeline Artificial Intelligence Prediction Models

预测模型	优缺点	适用性
随机森林	优点:精度高且泛化能力强,可处理高维数据 缺点:计算复杂度高且时间长、模型解释性差	适用于管道数据量大、特征多、关系复杂的状况评估
SVM	优点:擅长处理小样本、非线性问题 缺点:大规模数据处理效率低、核函数选择困难	适用于小样本管道数据的分类和预测,如评估新铺设管道初期状况
模糊逻辑规则	优点:可处理不确定性和模糊性、能应对数据稀缺和不精确问题 缺点:推理规则依赖专家意见、难以处理复杂非线性关系	适用于存在模糊、不确定信息和数据不完整的管道系统
决策树	优点:模型结构简单、对数据要求低、计算效率高 缺点:容易过拟合、依赖特征选择算法	适用于需快速初步评估管道状况的场景
神经网络	优点:自适应和自学习能力强、可处理非线性关系 缺点:依赖大量数据训练、模型解释性差	适用于处理复杂的管道数据和趋势预测
专家系统	优点:解决领域问题高效、知识与推理分离 缺点:依赖专家经验、仅适用于有经验积累领域	适用于解决特定类型管道故障

(3)检测技术方面。排水管道检测技术多样,包括 CCTV 检测、声纳检测和 QV 检测技术等。每种技术有其适用范围和优缺点,实际检测中常结合多种技术提高检测准确性和全面性。现阶段管道检测技术存在局限,在实际复杂管况下,如何实现自主作业是城镇排水管道必须要克服的难题,这都建立在更高效的传感、智能控制等技术的基础上。

(4)健康评估方面。主要通过资料收集阶段、建立评估指标体系阶段以及健康等级评价阶段 3 阶段全面评估管道健康状况,虽然已有很多研究开发了预测效率高的模型,但模型应用目前还依然停留在研究层面,较少投入到实际工程应用中。主要原因是大部分现存的排水管道数据信息难以满足研究中模型需求的数据精度和类别数量。因此,排水管道特征因子的筛选和降低模型复杂性的研究具有重要意义。

总体而言,城镇排水管道健康评估研究在过去几十年取得了显著进展,从传统的外观检查方法到基于多种技术手段的综合评估,为保障排水管道的正常运行发挥了重要作用。然而,目前仍然面临评估标准不统一、数据融合困难和成本效益问题等挑战。未来还需要朝着多学科融合、智能机器人应用和绿色可持续评估等方向发展,以进一步提高排水管道健康评估的水平,确保城镇排水系统的安全可靠运行。

参考文献

[1] 乔永祥,江源.智慧水务背景下德国排水系统研究进展[J].

中国给水排水,2024,40(6):39-45.

QIAO Y X, JIANG Y. Research progress of German drainage system in the context of smart water [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(6): 39-45.

[2] ZHANG H J, SHEN M L, HUO Z G, et al. Research on gas drainage pipeline leakage detection and localization based on the pressure gradient method[J]. Processes, 2024, 12(8): 1590-1590.

[3] 卢伟,袁辉洲,李展鹏,等.深圳市市政排水管材适用性研究[J].给水排水,2022,48(s2):423-430.

LU W, YUAN H Z, LI Z P, et al. Research on applicability of municipal drainage pipes in Shenzhen [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s2): 423-430.

[4] 张欣.市政排水管道造价的快速估算模型数值算法分析[J].给水排水,2023,49(s1):840-845.

ZHANG X. Numerical algorithm analysis of a rapid estimation model of municipal sewerage pipeline cost [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(s1): 840-845.

[5] 黄荣敏,杜预,张浩,等.基于风险指数法的排水管道健康状况影响因素研究[J].中国给水排水,2023,39(9):65-71.

HUANG R M, DU Y, ZHANG H, et al. Influencing factors of drainage pipeline health based on risk index method [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(9): 65 - 71.

[6] CAI Z M, LI D M, DENG L B. Risk evaluation of urban rainwater system waterlogging based on neural network and dynamic hydraulic model [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 39(4): 5661-5671.

[7] 刘艳海,李鸿,郭帅.南、北方 3 个城市排水管道缺陷统计分布特征比较研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(7): 930-935.

LIU Y H, LI H, GUO S. Comparative study on statistical distribution characteristics of drainage pipeline defects in three

- southern and northern cities[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2023, 46(7): 930-935.
- [8] 廖宝勇, 逯仲森, 马保松. 大口径埋地 HDPE 排水管道坍塌原因分析及非开挖修复措施介绍[J]. *给水排水*, 2015, 41(9): 75-77.
- LIAO B Y, TI Z S, MA B S. Analysis of collapse reasons of large-diameter buried HDPE drainage pipes and introduction of trenchless repair measures [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41(9): 75-77.
- [9] SALIHU C, HUSSEIN M, MOHANDS S R, et al. Towards a comprehensive review of the deterioration factors and modeling for sewer pipelines: A hybrid of bibliometric, scientometric, and meta-analysis approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 351: 131460. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131460.
- [10] 王海蓝, 陈威, 王万琼. 排水管道缺陷成因分析及修复方案选择[J]. *净水技术*, 2023, 42(3): 136-142.
- WANG H L, CHEN W, WANG W Q. Cause analysis and repair scheme selection of drainage pipeline defects [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(3): 136-142.
- [11] PEÑA L V D L, TAELMAN S E, PRÉAT N, et al. Towards a comprehensive sustainability methodology to assess anthropogenic impacts on ecosystems: Review of the integration of life cycle assessment, environmental risk assessment and ecosystem services assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 808: 152125. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152125.
- [12] 许绘香, 刘炜. 基于长短期记忆网络的城市积水内涝风险预警[J]. *计算机仿真*, 2024, 41(9): 505-509.
- XU H X, LIU W. Urban waterlogging risk warning based on long short-term memory network[J]. *Computer Simulation*, 2024, 41(9): 505-509.
- [13] 李芮, 潘兴瑶, 邸苏闯, 等. 北京城区典型内涝积水原因诊断研究——以上清桥区域为例[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(11): 1940-1952.
- LI R, PAN X Y, DI S C, et al. Diagnostic analysis of the waterlogging influence factors in Beijing City: A case study of Shangqingqiao catchment [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(11): 1940-1952.
- [14] 佃柳, 郑祥, 郁达伟, 等. 合流制管道溢流污染的特征与控制研究进展[J]. *水资源保护*, 2019, 35(3): 76-83, 94.
- DIAN L, ZHENG X, YU D W, et al. Research progress on characteristics and control of combined sewer overflow pollution [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(3): 76-83, 94.
- [15] 刘宇轩, 高雅弘, 王振北, 等. 城镇合流制排水系统溢流污染控制综述[J]. *环境工程*, 2023, 41(12): 32-47.
- LIU Y X, GAO Y H, WANG Z B, et al. Review of overflow pollution control of urban combined drainage systems [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(12): 32-47.
- [16] WU J, MA Y, SONG S S. Reducing particle accumulation in sewers for mitigation of combined sewer overflow impacts on urban rivers: A critical review of particles in sewer sediments [J]. *Water Science and Technology*, 2024, 89(1): 189-115.
- [17] ALPANDI A H, HUSIN H, SIDEK A. A critical review on the development of wax inhibiting agent in facilitating remediation process of contaminated groundwater[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 29(34): 51030-51040.
- [18] WANG X W, XU Y S. Investigation on the phenomena and influence factors of urban ground collapse in China[J]. *Natural Hazards*, 2022, 113(1): 1-33.
- [19] 王帅超. 城市地下管道渗漏引起的路面塌陷机理分析与研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- WANG S C. Analysis and study on subsidence mechanisms of road caused by leakage of urban underground pipeline [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [20] 马若涵, 李胄彦, 蔡腾, 等. 市政排水管网非二氧化碳温室气体排放与控制研究进展[J]. *环境工程*, 2024, 42(11): 1-12.
- MA R H, LI Z Y, CAI T, et al. Research progress on emission and control of non-CO₂ greenhouse gases in municipal drainage networks [J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(11): 1-12.
- [21] MAHMOODI E, MORTAZAVI B S, AHMADI O, et al. Analysis of liquid pipelines accidents causes, consequences and contributing factors: A review study [J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2021, 21(2): 1-15.
- [22] 刘曼丽, 熊红松, 马民, 等. 市政污水处理厂中生物气溶胶污染物的排放和微生物定量风险评估[J]. *给水排水*, 2020, 46(s1): 567-575.
- LIU M L, XIONG H S, MA M, et al. Emission and quantitative microbial risk assessment (QMRA) of bioaerosols in municipal wastewater treatment plants [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(s1): 567-575.
- [23] CHEN J, KARANTH S, PRADHAN K A. Quantitative microbial risk assessment for *Salmonella*: Inclusion of whole genome sequencing and genomic epidemiological studies, and advances in the bioinformatics pipeline[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2020, 2: 100045. DOI: 10.1016/j.jafr.2020.100045.
- [24] 李克亮, 杜建, 陈爱玖, 等. 污水管道混凝土微生物腐蚀机理、影响因素和模拟试验方法综述[J]. *材料导报*, 2025, 39(7): 104-114.
- LI K L, DU J, CHEN A J, et al. Review of mechanism, influencing factors and simulation test methods of microbiologically influenced corrosion of concrete in sewage pipelines [J]. *Materials Reports*, 2025, 39(7): 104-114.
- [25] 潘高峰. 新时期市政给排水设计理念综述[J]. *科学技术创新*, 2019(7): 88-89.
- PAN G F. Overview of municipal water supply and drainage

- design concepts in the new era [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2019(7): 88-89.
- [26] 周书弘,何福祥. 城镇排水管网检测及维护研究[C]. 成都: 2023年全国土木工程施工技术交流会论文集, 2023.
ZHOU S H, HE F X. Study on detection and maintenance of urban drainage network [C]. Chengdu: Proceedings of 2023 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference, 2023.
- [27] 刘峰华,李琛,刘文黎,等. 城市排水管道运维机器人研究进展[J]. *给水排水*, 2022, 48(3):147-154.
LIU F H, LI C, LIU W L, et al. Review on development of urban sewer maintenance robot [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(3): 147-154.
- [28] 智国铮,戴勇华,马艳. 排水管网检测技术与分析方法研究进展[J]. *净水技术*, 2021, 40(5):8-15.
ZHI G Z, DAI Y H, MA Y. Research progress on detection technologies and analysis methods of drainage pipe networks [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(5): 8-15.
- [29] 龚红君. 基于 CCTV 检测的排水管道病害及原因分析[J]. *重庆建筑*, 2024, 23(10): 72-74, 88.
GONG H J. Research on the diseases and causes of drainage pipelines based on closed CCTV inspection [J]. *Chongqing Architecture*, 2024, 23(10): 72-74, 88.
- [30] BAI X, YANG Y, WEI S, et al. A comprehensive review of conventional and deep learning approaches for ground-penetrating radar detection of raw data [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(13):7992. DOI: 10.3390/app13137992.
- [31] 刘沛. CCTV 及 QV 技术在城市雨污水管网摸排检测中的应用[J]. *水利科学与寒区工程*, 2023, 6(1): 142-144.
LIU P. Application of CCTV and QV technology in the detection of urban storm sewer network [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2023, 6(1): 142-144.
- [32] 廖嘉杰,黄胜,马保松,等. 排水管道缺陷图像的智能识别分类技术综述[J]. *给水排水*, 2023, 49(7):148-156.
LIAO J J, HUANG S, MA B S, et al. A review of intelligent recognition and classification techniques for drainage pipeline defect images [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(7): 148-156.
- [33] 韩崔燕,周扬,汪犁辉,等. 基于 YOLOv5s 的 CCTV 排水管道缺陷识别方法研究[J]. *市政技术*, 2024, 42(3): 230-236.
HAN C Y, ZHOU Y, WANG L H, et al. Research of CCTV drainage pipeline defect recognition method based on YOLOv5s [J]. *Journal of Municipal Technology*, 2024, 42(3): 230-236.
- [34] 国木源. 基于深度学习的排水管道缺陷检测与识别[D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
GUO M Y. Defect detection and recognition of sewer pipes based on deep learning [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [35] 刘雷斌,高守有,朱禹洲,等. 排水管道泄漏检测技术及发展趋势分析[J]. *市政技术*, 2024, 42(2): 197-206.
LIU L B, GAO S Y, ZHU Y Z, et al. Analysis of technologies and development trends of leakage detection for drainage pipes [J]. *Journal of Municipal Technology*, 2024, 42(2): 197-206.
- [36] 沈永炎. 管道闭路电视内窥检测及 QV 技术在城市雨污水管网摸排检测中运用分析[J]. *建材发展导向*, 2024, 22(8): 109-111.
SHEN Y Y. Analysis of the application of pipeline closed-circuit television endoscopic detection and QV technology in the detection of urban rain and sewage pipe networks [J]. *Development Guide to Building Materials*, 2024, 22(8): 109-111.
- [37] 李兵. 非金属材料排水管线的综合探测方法研究[J]. *城市勘测*, 2021(2): 184-188, 195.
LI B. Research on comprehensive detection method of nonmetal drainage pipeline [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2021(2): 184-188, 195.
- [38] HUANG R, TAO Z, LIN Y, et al. Current situation of drainage pipe network in china and its detection technology: A brief review [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2024, 33(1): 19-29.
- [39] 张莹莹. 电性源瞬变电磁法综述[J]. *物探与化探*, 2021, 45(4): 809-823.
ZHANG Y Y. Review on the study of grounded-source transient electromagnetic method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(4): 809-823.
- [40] 张继锋,孙乃泉,刘最亮,等. 电磁法在煤矿水害隐患探测方面的综述[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(2):301-316.
ZHANG J F, SUN N Q, LIU Z L, et al. Electromagnetic methods in the detection of water hazards in coal mines: A review [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(2): 301-316.
- [41] 李易阳,邓作炜,王瑜,等. 微波无损检测非金属材料缺陷原理及应用研究进展[J]. *无损探测*, 2024, 48(6):1-7, 11.
LI Y Y, DENG Z W, WANG Y, et al. Research progress on the principle and application of MNDT of defects in nonmetallic materials [J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2024, 48(6): 1-7, 11.
- [42] 闫明,王红武,刘志刚,等. 城镇排水系统运行效能评价指标体系的构建与研究[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(10): 3124-3136.
YAN M, WANG H W, LIU Z G, et al. Establishment and study on the evaluation index system for operational efficiency of urban drainage systems [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(10): 3124-3136.
- [43] ZENG X M, WANG Z N, WANG H, et al. Progress in drainage

- pipeline condition assessment and deterioration prediction models [J]. *Sustainability*, 2023, 15(4): 3849–3849.
- [44] 张莹. 城市排水管网运行风险评估研究进展[J]. 城市道桥与防洪, 2022(6): 104–109, 174.
ZHANG Y. Study on risk assessment in operation of urban drainage network [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2022(6): 104–109, 174.
- [45] 阮欣, 尹志逸, 陈艾荣. 风险矩阵评估方法研究与工程应用综述[J]. 同济大学学报, 2013, 41(3): 381–385.
RUAN X, YIN Z Y, CHEN A R. A review on risk matrix method and its engineering application [J]. *Journal of Tongji University*, 2013, 41(3): 381–385.
- [46] 巴振宁, 匡田, 梁建文, 等. 城市排水管网风险评估研究[J]. 市政技术, 2021, 39(1): 90–93.
BA Z N, KUANG T, LIANG J W, et al. Research on risk assessment of urban drainage network operation [J]. *Journal of Municipal Technology*, 2021, 39(1): 90–93.
- [47] 孙樱珊. 基于 Mike Urban 模型的北京市老城区合流制溢流污染控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
SUN Y S. Study on the pollution control of combined sewer overflow for the old urban in Beijing based on the Mike Urban model [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [48] HAWARI A, ALKADOUR F, ELMASRY M, et al. A state of the art review on condition assessment models developed for sewer pipelines[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 93: 103721. DOI: 10.1016/j.engappai.2020.103721.
- [49] BA Z N, FU J S, JIANWEN L, et al. Risk assessment method of drainage network operation based on fuzzy comprehensive evaluation combined with analytic network process[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2021, 12(2): 543. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000543.
- [50] 颜文涛, 陈朝晖, 何强, 等. 城市污水管道预报健康度评价模型及其应用研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(7): 97–101.
YAN W T, CHEN Z H, HE Q, et al. Study on assessment model for predictive health degree of municipal sewer systems and its application [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(7): 97–101.
- [51] 刘威, 董婉琪. 基于 AHP-熵权法组合赋权的排水管网风险评估方法研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 949–956.
LIU W, DONG W Q. Risk assessment on the drainage pipe network based on the AHP-entropy weight method [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(3): 949–956.
- [52] TRAN D H, PERERA B J C, NG A W M. Comparison of structural deterioration models for stormwater drainage pipes[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2009, 24(2): 145–156.
- [53] MCBEAN E A, HARVEY R R. Comparing the utility of decision trees and support vector machines when planning inspections of linear sewer infrastructure [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2014, 16(6): 1265–1279.
- [54] ZAMANIAN S, HUR J, SHAFIEEZADEH A. A high-fidelity computational investigation of buried concrete sewer pipes exposed to truckloads and corrosion deterioration [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111043. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111043.
- [55] LAAKSO T, KOKKONEN T, MELLIN I, et al. Sewer condition prediction and analysis of explanatory factors [J]. *Journal of Water*, 2018, 10(9): 1239. DOI: 10.3390/w10091239.
- [56] 刘少非. GA 优化 ELM 神经网络的排水管道缺陷诊断[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(5): 59–64.
LIU S F. Defect diagnosis of urban drainage pipelines based on GA optimized ELM neural network [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(5): 59–64.
- [57] 唐洋博, 黄标, 李玮, 等. 基于神经网络的排水管道破损诱发地陷风险评价[J]. 人民长江, 2024, 55(8): 133–138.
TANG Y B, HUANG B, LI W, et al. Risk assessment on ground collapse induced by sewer breakage based on artificial neural network models[J]. *Yangtze River*, 2024, 55(8): 133–138.
- [58] 汪宙峰, 李全喜, 谢凯宇, 等. 堆叠集成算法在城市地下排水管网风险评估中的应用[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(10): 3719–3728.
WANG Z F, LI Q X, XIE K Y, et al. Utilizing stacked integration algorithm for risk assessment of urban underground drainage networks [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(10): 3719–3728.