

中文引用格式:杨文家,吴良洪,林卫东,等. 基于模糊贝叶斯网络的城市排水管网风险评估[J]. 中国安全科学学报,2025,35(10): 174-180.

英文引用格式:YANG Wenjia, WU Lianghong, LIN Weidong, et al. Risk assessment of urban drainage networks based on fuzzy Bayesian networks[J]. China Safety Science Journal,2025,35(10):174-180.

基于模糊贝叶斯网络的城市排水管网风险评估^{*}

杨文家¹, 吴良洪²高级工程师, 林卫东³教授级高级工程师, 阳富强^{**1}教授

(1 福州大学 环境与安全工程学院, 福建 福州 350108; 2 福州市城市排水有限公司, 福建 福州 350008; 3 福建省建筑设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1302

基金项目:国家自然科学基金资助(52274181);福建省科技计划项目(2023Y3001)。

【摘要】 为提升城市排水管网的事事故预防与风险管控水平,首先,梳理“人-机-管-环”4个方面的指标,得到19项评估指标,构建城市排水管网风险评估指标体系;其次,融合模糊理论与贝叶斯网络(BN)构建城市排水管网风险评估模型,引入三角模糊数量化处理专家评分,基于职称与工龄差异赋予专家权重,并采用 α 加权估值法将模糊评价转化为清晰概率,开展BN的正反向推理,计算关键节点的后验概率;最后,以某城区排水管网为例,评估该区域排水管网的风险等级,完成现场验证。结果表明:城市排水管网风险评估模型能有效处理风险评估过程中的不确定性与主观性,概率化表征排水管网风险,显著提升评估结果的可靠性;管道的外加保护是影响排水管网安全性的关键因素,防腐措施和接口方式次之;该城市排水管网整体安全性良好,风险处于可控范围;通过与历史监测数据和故障记录的对比分析,验证了该模型具有一定的实用性和可靠性。

【关键词】 贝叶斯网络(BN); 排水管网; 风险评估; 后验概率; 风险等级

Risk assessment of urban drainage networks based on fuzzy Bayesian networks

YANG Wenjia¹, WU Lianghong², LIN Weidong³, YANG Fuqiang¹

(1 College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350108, China;

2 Fuzhou City Drainage Co., Ltd., Fuzhou Fujian 350008, China; 3 Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Fuzhou Fujian 350001, China)

Abstract: In order to improve the ability of accident prevention and risk control of urban drainage networks, first of all, based on the indicators from the four aspects of "human-material-management-environment", 19 assessment indicators were obtained to construct the risk assessment index system of urban drainage pipe networks, and a risk evaluation index system for urban drainage networks was established accordingly. Subsequently, a model of urban drainage networks was constructed by integrating fuzzy theory and BN. Triangular fuzzy numbers were introduced to quantify the scores of experts. Weights were assigned according to differences in professional titles and working years, and α -weighted valuation

* 文章编号:1003-3033(2025)10-0174-07; 收稿日期:2025-05-07; 修稿日期:2025-07-16

** 通信作者:阳富强(1982—),男,湖南耒阳人,博士,教授,主要从事公共安全与应急管理方面的研究。E-mail:yangfuqiang@fzu.edu.cn。

method was adopted to transform fuzzy evaluations into clear probabilities. Thus, a risk evaluation model for urban drainage networks was obtained, and forward and reverse reasoning of BN was conducted to calculate the posterior probabilities of key nodes. Finally, taking the drainage network of a certain urban area as an example, the risk level of the drainage network in a specific area of the city was evaluated, and investigations were conducted for verification. The results indicate that the model effectively handles uncertainties and subjectivity in the risk assessment process, achieves probabilistic characterization of drainage network risks, and improves the accuracy of evaluation outcomes. External pipe protection is identified as the most critical factor affecting drainage network safety, followed by anti-corrosion measures and joint methods. The overall safety performance of the urban drainage network is found to be satisfactory, with risks remaining within controllable limits. Comparative analysis with historical monitoring data and fault records confirms the practicality and reliability of the model.

Keywords: Bayesian network (BN); drainage network; risk assessment; posterior probability; risk level

0 引言

城市排水管网系统是现代城市稳定运行的关键基础设施,其效能直接影响公共安全与生态环境。然而,长期以来,排水管网运维投入不足、材料老化及信息化管理薄弱等问题,导致水体污染、路面塌陷、内涝灾害等问题日益突出^[1-2],制约了城市的可持续发展。因此,构建科学化的排水管网风险评估体系,通过动态监测精准识别潜在风险,对提升城市基础设施的韧性和优化城市治理体系具有重要意义。

城市排水管网系统的风险是材料性能、施工质量、环境变化^[3]等多要素共同作用的结果。目前,国内外学者从不同角度针对城市排水系统开展了研究。HUANG Fan 等^[4]结合建筑信息模型和三维点云,提出一种排水管道三维缺陷信息管理平台,实现了管道缺陷的可视化和信息化。李杉杉^[5]运用逻辑回归^[6]和随机森林算法^[7]等建立管网运维风险评估模型,为城市地下管网的地理信息系统构建提供了参考。MASHFORD 等^[8]结合向量机建立排水管道状态预测系统。刘威等^[9]结合层次分析法和熵权法构建组合赋权法,构建排水管网的评估模型,并将模型运用到实例中。然而,城市排水管网所处的环境十分复杂,常常涉及到破裂、腐蚀、泄漏、错口、错位、沉积、障碍等各种缺陷^[10],上述研究只考虑了单独的风险因素,忽视了不同风险因素间的相互影响。

鉴于此,笔者拟参考城乡排水工程项目规范^[11],构建多层次指标评估体系,进而融合模糊理论与贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)构建城市排水管网风险评估模型,并结合实例开展正反向推理,识别关键风险因素与潜在薄弱环节,旨在提高风

险评估的准确性,以期为城市排水管网事故预防与风险管控提供理论支撑。

1 城市排水管网风险评估指标体系

1.1 风险评估指标

风险评估模型的有效性取决于指标体系对系统风险的表征能力,需要通过系统性的分析来揭示各指标之间的因果联系和演化规律^[12]。排水管网的管道破裂、接口错位等典型结构性缺陷,会极大程度影响排水管网的寿命,导致管网结构失稳与功能退化。同时,运维人员受教育水平低、工作年限少等影响,可能出现不安全行为,影响排水管网整体的安全性。基于上述实际风险特性,并参照文献^[5-6],筛选出 19 项核心风险评价指标。结合系统工程理论中“人-机-管-环”分类风险指标,构建城市排水管网风险评估体系,并将其映射于 BN。

1.2 风险评估等级

明确 5 级风险评估等级及对应的模糊语言描述,见表 1。

表 1 风险评估等级

Table 1 Risk assessment levels	
风险评估等级	评估标准描述
高 (Very Good, VG)	符合规范的设计要求,不存在危险源
良好 (Good, G)	符合规范的设计要求,暂时不需改善
较好 (Above Good, AG)	符合规范的设计要求,但需改善
一般 (Fair, FR)	符合规范的设计要求,但需马上改善
差 (Poor, PR)	不符合规范的设计要求,需马上整改

2 城市排水管网模糊 BN 风险评估模型构建

2.1 确定节点状态

在 BN 的传统应用中,节点状态通常被简化为“发生”与“不发生”的二元状态,而在城市排水管网风险评估的实际场景中,节点状态往往呈现出模糊性与过渡性特征^[13]。同时,风险评估过程中所采集的数据存在信息模糊、准确性不足等问题,尤其基于自然语言描述的事故概率与影响程度,难以通过精确数值来量化表征^[14]。因此,引入模糊数学理论,利用三角模糊数将评估指标统一量化为 0 到 1 的模糊集合,并将量化后的模糊指标映射为节点的模糊状态,从而在不增加节点维度的前提下,实现系统失效概率区间估计与风险等级平滑过渡的精细化表征。

2.2 确定节点风险概率

基于某市水务公司的排水管网地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 数据,邀请城市排水领域的资深专家综合评估管网的安全性。考虑到专家在知识储备、实践经验及专业技能等方面存在的差异,可能导致对同一评估指标产生较大分歧,依据专家的工作年限、专业职称、学术成就等因素,构建差异化的专家权重分配体系,专家权重等级见表 2。

表 2 专家权重等级

Table 2 Expert weighting hierarchy

职称	工龄/a	权重赋予
正高级	(15,+∞)	0.40
高级	(10,15]	0.35
中级	(15,+∞)	0.35
高级	[5,10]	0.30
中级	(10,15]	0.30
中级	[5,10]	0.25

采用三角模糊函数计算节点先验概率 $P(\theta)$,其隶属函数如下:

$$P(\theta)=f(x)=\begin{cases} 0, & \theta < a \\ \frac{\theta-a}{b-a}, & a \leq \theta < b \\ 1, & \theta = b \\ \frac{c-\theta}{c-b}, & b < \theta \leq c \\ 0, & \theta > c \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 为该节点状态的最小概率估计值; b 为该节点最可能发生的概率; c 为该节点状态的最大概率。

标准化预处理专家的原始评分,分别计算单个

评估级别的集体概率 P_{ij}^* 与标准概率 P_{ij} :

$$P_{ij}^* = \sum_1^n P(\theta) \quad (2)$$

$$P_{ij} = \frac{P_{ij}^*}{\sum_1^c \theta_2} \quad (3)$$

式中: P_{ij}^* 为评估级别 i 的集体概率; C 为风险评估等级的总数; i 为风险等级序号, $i=1,2,\cdots,C$; j 为对应第 j 位专家的评分或权重; n 为专家数量; P_{ij} 为评估级别 i 的标准概率; θ_2 为 $P(\theta)$ 的最可能概率,即三角模糊数中的 b 。

将专家权重纳入考量,经归一化处理后,得到用于风险评估的基础数据。采用 α 加权估值法^[14] 将模糊值转换为清晰值,三角模糊数 $P(\theta)$ 以清晰值 $\text{Val}(\theta)$ 表示,计算如下:

$$\text{Val}(\theta) = \frac{a + 2b + c}{4} \quad (4)$$

2.3 BN 模型构建

BN 的核心理论依据是贝叶斯定理,揭示了先验概率与后验概率间的转换关系,其数学表达式为:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \times P(A)}{P(B)} \quad (5)$$

式中: $P(A|B)$ 为事件 B 发生时,事件 A 的后验概率; $P(B|A)$ 为事件 A 发生时,事件 B 的后验概率; $P(A)$ 和 $P(B)$ 分别为事件 A 与事件 B 的先验概率。

在 BN 中,节点间的条件概率计算通常基于全概率公式推导的联合概率公式^[15]:

$$P(x_1,x_2,\cdots,x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i/P_a(x_i)) \quad (6)$$

式中 $P_a(x_i)$ 为父节点集合。

首先,根据指标的附属关系,利用 GeNIe3.0 软件构建 BN。其次,基于专家评估结果,按式 (5)、式 (6) 计算得出先验概率,并将其代入 GeNIe 软件,得到具有评价等级概率分布的二级评估指标^[14]。然后,将结果代入一级指标和结果节点,得出不同区域排水管网的风险等级。最后,对模型开展逆推理,确定城市排水管网运行风险的关键风险因子。

3 模糊 BN 模型应用

3.1 案例背景

某市地处中国东南沿海、位于闽江下游的河口盆地,城区三面被群山环绕,作为国内水网密度最高的城市之一,闽江与乌龙江穿城入海,对其开展城市排水管网的安全性风险评估十分必要。

3.2 城市排水管网风险评估等级划分准则

以城市排水管网管道及设备因素为例,划分排水管网风险评估指标的风险等级(表 3),具体划分准则如下:

- 1) 管径。管道直径越小,需承受的内部压力越大,失效的概率越高。在相同流量条件下,直径越大的管道所受压力越小,弯矩抗性越强,使用寿命越长。
- 2) 管长。管道长度是影响管道使用寿命的关键因素之一。管道越长,涉及的区域越大,运行环境越复杂,管道的失效概率越高。
- 3) 管龄。管道材料会长期承受温度、压力以及化学腐蚀等作用会逐渐老化,表现为性能逐渐下降与失效风险的同步增加。

- 4) 管道埋深。地质变化、自然灾害或人为活动(如挖掘损伤、地面车辆载荷)等产生的外部作用力,可能通过挤压、拉伸或扭曲作用导致管道断裂或破损。
- 5) 防腐措施。管道内外壁均易受化学或电化学腐蚀,尤其在排水管道输送污水时,腐蚀性介质或长期暴露的腐蚀性环境会加快腐蚀速率,严重威胁管道安全性并缩短使用寿命。
- 6) 管材。管道材质的不同对其失效概率有显著影响。
- 7) 接口类型。排水管道不同的接口类型影响管道的封闭性。

表 3 城市排水管网设备及管道因素风险等级划分

风险等级	管径/mm	管长/m	管龄	埋深/m	防腐措施	管道材质	接口类型
高	>900	<10	<10	>2.5	完全完整	聚乙烯塑料管	刚承口管
良好	(700,900]	[10,20)	[10,20)	(2.0,2.5]	基本符合	聚乙烯树脂管	承口管
较好	(500,700]	[20,50)	[20,30)	(1.5,2.0]	存在缺陷	铸铁管	企口管
一般	[300,500]	[50,100]	[30,40]	[1.0,1.5]	不符合要求	钢筋混凝土管	平口管
差	<300	>100	>40	<1.0	无	混凝土管	—

3.3 BN 结构

根据等级划分准则,将各评估指标及其与风险评估结果的关联,转化为 BN 中的节点关系。排水管网风险评估 BN 结构如图 1 所示。

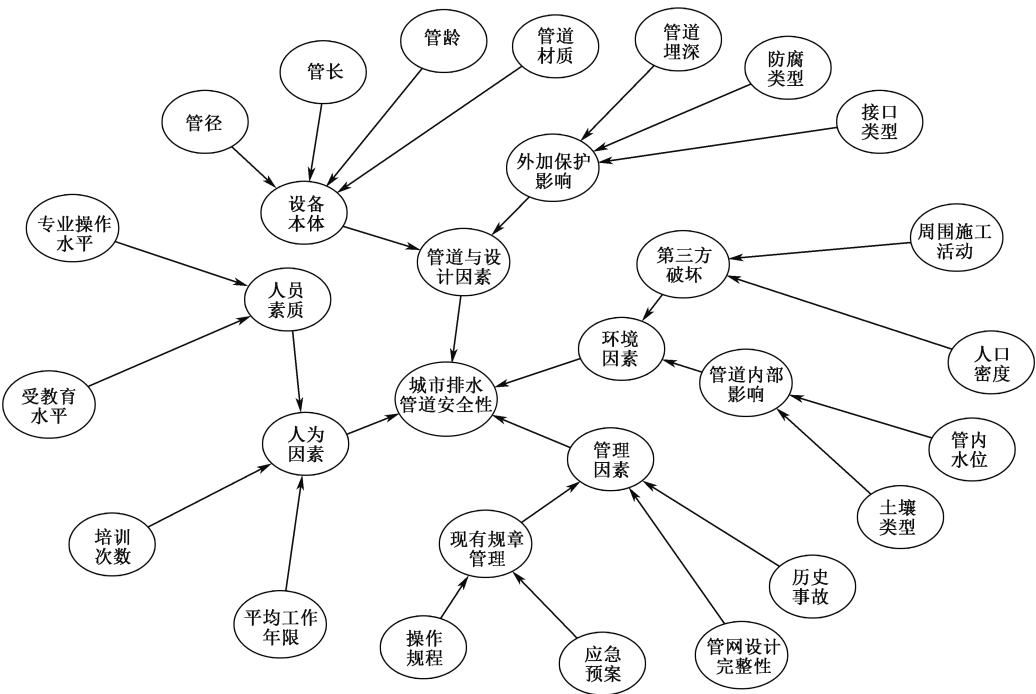


图 1 排水管网风险评估 BN 结构

Fig. 1 BN structure for risk assessment of drainage network

3.4 节点概率计算

依据 BN 的概率推理机制,子节点状态具有随父节点状态改变的响应特性^[16]。模型先验概率由

某市城市排水有限公司提供的资料结合专家打分确定。以节点“管道防腐措施”为例,专家评分与处理结果见表 4。

表 4 管道防腐措施的专家分数与处理

专家与分数处理	高	良好	较好	一般	差
专家 1	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0.5,0.6,0.7)	(0,0,0.1)
专家 2	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0.5,0.6,0.7)	(0,0,0.1)
专家 3	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0.7,0.8,0.9)	(0,0,0.1)
专家 4	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0.5,0.6,0.7)	(0,0,0.1)
专家 5	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0.5,0.6,0.7)	(0.1,0.2,0.3)
P_{ij}	(0,0,0.150)	(0,0,0.150)	(0,0,0.150)	(0.808,0.957,1.107)	(0.021,0.043,0.192)
Val	0.038	0.038	0.038	0.957	0.075
归一化 Val	0.033	0.033	0.033	0.835	0.066

3.5 城市排水管网运行风险评估结果

将所有指标评分的处理结果输入 GeNIe 3.0 软件,并利用式(5)、式(6)计算节点概率,得出排水管网风险评估结果(图 2)。

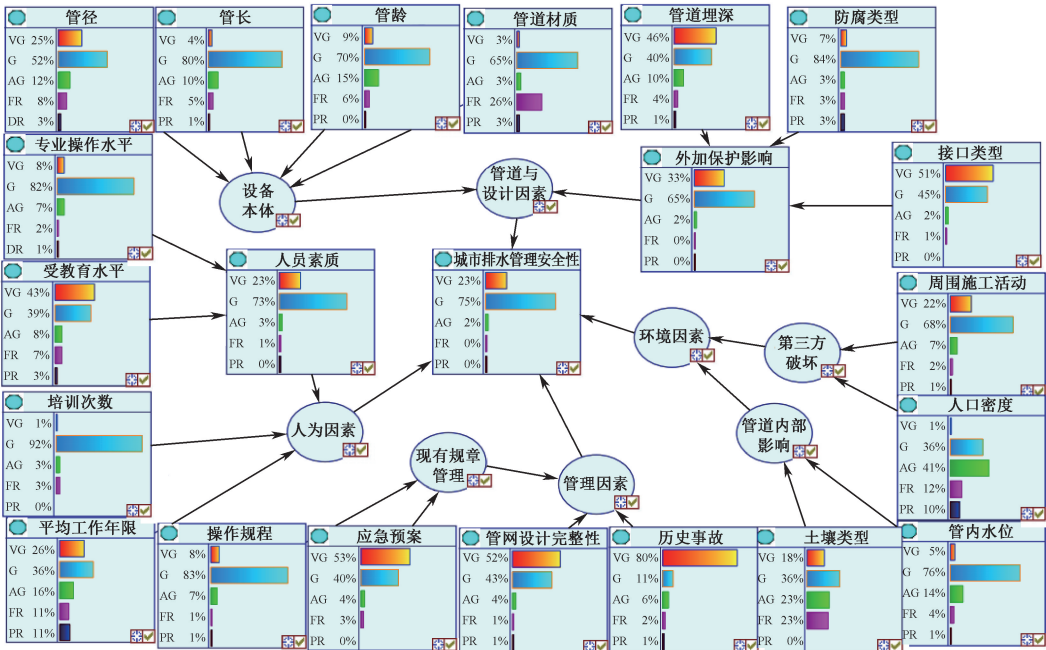


图 2 排水管道风险评估结果

Fig. 2 Results of risk assessment for drain

由图 2 可知:目标管段的安全性能综合评估为 G 级风险,属于较低风险等级,安全状态判定为良好。结合实际运维数据对比分析,其输出结果能够准确反映管道的实际安全状态,验证了该模型评估结果的准确性和可靠性。此外,管道使用年限、管道材质、土壤类型、人口密度和工作人员平均工作年限这 5 个指标中,风险等级为 AG 和 FR 的概率总和均超过 25%,其中管道材质指标的 FR 概率达 25%,后

续需要重点改进。

正向评估后,设定该段管网的 VG 状态概率为 100%,开展 BN 后验概率推理,结果如图 3 所示。基于此推理结果,进一步识别出风险传导路径和关键干预节点。

对比图 2 和图 3 可知:该段排水管网中“外加保护影响”的评价变化最为显著,幅度达 6%。结合正向推理结果,该段管网外加保护设计的完整性存在

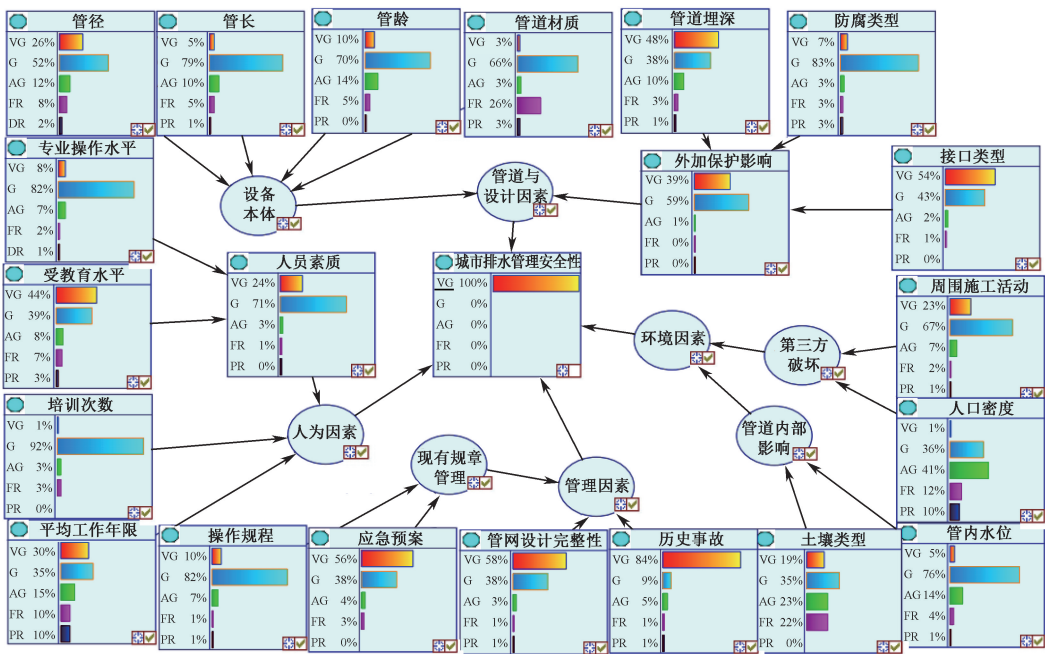


图 3 排水管网后验概率推理结果

Fig. 3 Results of posteriori probabilistic reasoning for drainage network

较大提升空间,建议优先检查其防腐类型、接口类型和管道埋深,通过增设防腐蚀措施或优化接口类型,以提高整体安全性。正向推理中,工作人员平均工作年限和管网设计完整性因改善难度较高,其优先级低于外加保护影响,但仍属于重点改善对象。此外,其余节点的正反向推理结果变化幅度均小于 3%,表明这些因素当前安全性较高,可暂不纳入优先改进范围。

同理可计算其他区域的风险等级,并明确可改善风险点。模型结果显示,该市排水管网风险等级主要集中于安全性良好与安全性较好区间,表明城市排水系统整体运行风险可控,现行管理体系有效性较高,短期内无需调整管理制度和运维模式。针对风险等级为 AG 级的管网管段,考虑到其存在潜在失效风险,建议开展专项隐患排查与检测。

4 结 论

1) 构建的模糊 BN 城市排水管网风险评估模型,

有效解决了排水管网风险评估中数据模糊和专家意见不一致等问题,实现了对排水管网系统的风险概率化与动态化评估。同时,该模型结合排水管网风险特性与既有研究成果,构建了合理的风险评估指标体系,具备较强的实用性与适应性,可为城市排水管网事故预防与风险控制实践提供参考。

2) 目标区域管网的安全性评估结果显示,高、良好、较好等级的概率分别为 23%、75%和 2%。通过与历史监测数据和故障记录的对比,验证了模型具备一定的可靠性和有效性。

3) BN 的正反向推理结果表明:管道的外加保护是影响排水管网安全性的关键因素。通过强化防腐措施、采用更安全的接口形式、提升工作人员的安全知识和专业操作水平、完善作业规程和管网设计完整性等措施,可显著提高排水管网的整体安全性。

4) 该市管网的安全性风险等级以良好与较好为主,表明系统整体安全状态稳定。

参 考 文 献

[1] 唐少虎,朱伟,程光,等. 暴雨内涝下城市道路交通系统安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 143-150.
TANG Shaohu, ZHU Wei, CHENG Guang, et al. Safety resilience assessment of urban road traffic system under rainstorm waterlogging[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(7): 143-150.

- [2] 陆露, 高峰, 郭娟, 等. 排水管网运维管理问题分析与对策研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(2): 8-13.
LU Lu, GAO Feng, GUO Juan, et al. Problem analysis and countermeasure research for sewer operation and maintenance management[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(2): 8-13.
- [3] ZENG Xuming, WANG Zinan, WANG Hao, et al. Progress in drainage pipeline condition assessment and deterioration prediction models[J]. Sustainability, 2023, 15(4): DOI: 10.3390/su15043849.
- [4] HUANG Fan, WANG Na, FANG Hongyuan, et al. Research on 3D defect information management of drainage pipeline based on BIM[J]. Buildings, 2022, 12(2): DOI: 10.3390/buildings12020228.
- [5] 李杉杉. 基于机器学习的市政管网运维风险评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LI Shanshan. Risk assessment of municipal pipeline network operation and maintenance based on machine learning[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [6] LUBINI A T, FUAMBA M. Modeling of the deterioration timeline of sewer systems[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 38(12): 1381-1390.
- [7] LAAKSO T, KOKKONEN T, MELLIN I, et al. Sewer condition prediction and analysis of explanatory factors[J]. Journal of Water, 2018, 10(9): DOI: 10.3390/w10091239.
- [8] MASHFORD J, LIPKIN F, OLIE C, et al. Automatic interpretation of remotely sensed images for urban form assessment[C]. Lecture Notes in Computer Science, 2014: 441-449.
- [9] 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 Wei, DONG Wanqi. 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.
- [10] XU Zuxin, QU Yang, WANG Siyu, et al. Diagnosis of pipe illicit connections and damaged points in urban stormwater system using an inversed optimization model[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126011.
- [11] GB55027—2022, 城乡排水工程项目规范[S].
GB55027-2022, Project code for urban and rural sewerage[S].
- [12] PAN Yue, OU Shenwei, ZHANG Limao, et al. Modeling risks in dependent systems: a Copula-Bayesian approach[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 188: 416-431.
- [13] MAMDOUH M, TRAN D Q. Risk-based inspection for concrete pavement construction using fuzzy sets and Bayesian networks[J]. Automation in Construction, 2021, 128: DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103761.
- [14] 陈星霖, 林卫东, 黄晓冬, 等. 基于模糊贝叶斯网络的超高层建筑火灾风险评估[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(6): 40-47.
CHEN Xinglin, LIN Weidong, HUANG Xiaodong, et al. Fire risk assessment of super high-rise buildings based on fuzzy Bayesian network[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(6): 40-47.
- [15] 林其彪, 李鑫, 葛樊亮, 等. 基于数据驱动贝叶斯网络的化工事故风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(4): 180-185.
LIN Qibiao, LI Xin, GE Fanliang, et al. Risk analysis of chemical accidents based on data-driven Bayesian network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(4): 180-185.
- [16] 秦荣水, 石晨晨, 陈超, 等. 基于模糊贝叶斯网络的城市商业综合体火灾风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 176-182.
QIN Rongshui, SHI Chenchen, CHEN Chao, et al. Fire risk analysis of urban commercial complexes based on fuzzy Bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 176-182.



作者简介: 杨文家 (1999—), 男, 河南漯河人, 硕士研究生, 研究方向为安全科学与工程。E-mail: fzyangwenjia@163.com。