

龙岩, 曲佳, 左向阳, 等. 基于耦合机理模型与数据模型的城市管网运行风险预测[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(4): 12-24. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.002

LONG Yan, QU Jia, ZUO Xiangyang, et al. Operational risk prediction of urban pipe network based on coupling mechanism model and data model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 12-24. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.002

# 基于耦合机理模型与数据模型的城市 管网运行风险预测

龙 岩<sup>1,2</sup>, 曲 佳<sup>1,2</sup>, 左向阳<sup>1,2</sup>, 李韞昱<sup>3</sup>, 刘子维<sup>1,2</sup>, 陆寅飞<sup>4</sup>

(1. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038; 3. 北京工业大学 信息学部, 北京 100124; 4. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083)

**摘要:**【目的】全球极端气候事件频发、城市化进程加快, 致使城市内涝问题日益严峻, 城市管网排水压力显著增大, 及时判断管网运行状况显得尤为重要。【方法】以广州市黄埔区文涌排涝片为研究对象, 基于SWMM模型构建洪涝过程分析机理模型, 研判不同降雨情景管段充满度情况; 然后, 基于单井、多井计算模式构建数据模型, 对城市管段充满度进行预测, 并选最适合的数据模型; 最后, 基于改进的层次分析法和综合风险指数法, 对城市管网运行风险进行评价。【结果】结果表明: (1)基于多井计算模式的决策树模型精度最优,  $RMSE$  为 0.077,  $MAE$  为 0.030, 单次工况运行时间较SWMM模型提升60万倍。(2)在敏感点聚集区社会因素对管网运行风险影响最大, 所占权重为0.72; 在敏感点非聚集区经济因素对管网运行风险影响最大, 所占权重为0.68。【结论】基于多井计算模式的决策树模型可满足城市内涝应急响应的精度和时效性要求; 城市不同区域对管网运行风险的约束因素不同, 需要因地制宜提出改进措施。

**关键词:** 机理模型; 数据模型; 耦合; 管网运行风险; 管段充满度; 气候变化; 城市内涝; 降雨

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)04-0012-13



## Operational risk prediction of urban pipe network based on coupling mechanism model and data model

LONG Yan<sup>1,2</sup>, QU Jia<sup>1,2</sup>, ZUO Xiangyang<sup>1,2</sup>, LI Yunyu<sup>3</sup>, LIU Ziwei<sup>1,2</sup>, LU Yinfei<sup>4</sup>

(1. School of Water Resources and Electric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China; 2. School of Water Resources and Electric Power, Hebei Key Laboratory of Smart Water Conservancy, Handan 056038, Hebei, China; 3. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 4. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] The frequent occurrence of global extreme climate events and the rapid pace of urbanization have resulted

收稿日期: 2024-05-29; 修回日期: 2024-08-23; 录用日期: 2024-08-27; 网络出版日期: 2024-10-21

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3006503); 河北省自然科学基金资助(E2024402142)

作者简介: 龙 岩(1989—), 女, 副教授, 博士, 主要从事城市内涝防治研究。E-mail: hebeilongyan@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

in increasingly severe urban waterlogging issues, leading to a significant rise in drainage pressure within urban pipe networks. It is of utmost importance to promptly assess the operational status of these pipe networks. [Methods] The flood process analysis mechanism model of the Wenchong drainage system in Huangpu District, Guangzhou, was established based on the SWMM model to determine the hydraulic capacity of pipeline sections under different rainfall scenarios. Subsequently, a data model incorporating both single-well and multi-well computing models was developed to predict the hydraulic capacity of urban pipe sections, with careful selection of the most suitable data model. Finally, an evaluation of operational risk for the urban pipe network was conducted using an improved analytic hierarchy process and comprehensive risk index method. [Results] The results show that: (1) The decision tree model based on the multi-well calculation mode has the highest accuracy, with an *RMSE* of 0.077 and a *MAE* of 0.030, and the single-well calculation time is 600,000 times faster than the SWMM model. (2) In the area where sensitive points are concentrated, social factors exert the most significant influence on the operational risk of the pipe network, with a weightage of 0.72. In contrast, in the area where sensitive points are not concentrated, economic factors play a dominant role in determining the operational risk of the pipe network, carrying a weightage of 0.68. [Conclusion] The decision tree model based on the multi-well calculation mode can meet the precision and timeliness requirements for urban flood emergency response. The risk of pipe network operation varies across different areas of the city, necessitating the proposal of improvement measures tailored to local conditions.

**Keywords:** mechanism model; data model; coupling; network running risk; pipe filling; climate change; urban waterlogging; rainfall

## 0 引言

近年来,随着人类活动对气候影响以及植被破坏的不断加剧<sup>[1-2]</sup>,极端气候事件的发生频率呈现逐渐升高的态势<sup>[3-4]</sup>。同时,城市化进程的快速发展明显改变了水循环过程及其要素的时空分布特征,对水文环境产生了深远影响,更加速了这一恶劣态势<sup>[5-7]</sup>。例如2021年郑州“7·20”极端暴雨事件刷新了多个国家级气象观测站的日降雨记录,近1500万居民受到影响;2022年全国29省(自治区、直辖市)发生不同程度洪涝灾害,共3385.26万人次受灾,直接经济损失1288.99亿元<sup>[8]</sup>。内涝灾害问题已逐渐升级为国家战略安全问题<sup>[9-10]</sup>。城市管网作为城市洪涝的主要泄流通道,对其运行状态的监测与运行风险的动态评价是十分重要的。在城市管网运行过程中,充满度是研判管网排水能力的重要指标,因此,城市管网充满状态的快速预测对城市排水安全也是十分重要的。

近年来,许多专家学者围绕管段的充满度展开多方面研究。赵廷红等<sup>[11]</sup>在不同充满度下模拟了对称Y形管内水气二相流状况和管壁形变状况;范鹏辉等<sup>[12]</sup>提出了一种基于液位监测数据及CNN-SVM的排水管网缺陷诊断方法;丁法龙等<sup>[13]</sup>在底坡和充满度不同组合条件下探究了边壁双曲率对管段水动力特性的影响;王琦等<sup>[14]</sup>以充满度为1作为管道失效的临界条件,提出了一种基于排水能力-失效概率相关关系的高风险管道判别方法;张顺平<sup>[15]</sup>分析了主干管

道的充满度状况和积水内涝规律,为管网运行风险判断提供支撑;陈静如等<sup>[16]</sup>以不同的管段充满度、温差、外来水占比作为变量,识别了排水管道中外来水的情况。但以上研究全部集中于利用已有的充满度数据进行多角度、多方面的分析,缺少对管段充满度状况的实时快速预测。此外,SWMM模型通过求解圣维南方程组得到管段充满度结果,其运行时间随着管网系统的复杂程度呈指数级增长<sup>[17]</sup>,而洪涝过程中管段充满度预测模型需要在满足精度要求的基础上同时满足时效性要求,因此本文利用智能算法构建管段充满度预测模型,在符合工程精度要求的前提下大幅提升模型的计算效率。

对管网的运行风险而言,除管网本身的充满状态还有其他影响因素,如SALMAN等<sup>[18]</sup>首先基于风险矩阵法和加权评分法确定排水管段的临界状态,并以此分析管网的运行风险;陈信霖等<sup>[19]</sup>基于在线监测、采样分析等方法对某老旧小区排水管网运行效能进行了定量评估研究;冷雪<sup>[20]</sup>从基础设施建设、服务水平和驱动发展力等3个方面入手,引入三标度法建立了城镇排水管网运行效能评价模型进行综合研究;巴振宁等<sup>[21]</sup>提出了基于改进模糊网络分析方法的排水管网运行安全风险评估方法,实现了大量管道数据的多层次递阶风险评估;李晓峰<sup>[22]</sup>以排水管网中的污水管网为研究对象,构建了管网健康状况风险综合评价模型;汪宙峰等<sup>[23]</sup>基于管长、坡度等14个特征变量,提出了基于堆叠模型的城市地下排水管网风险评估方法;LEE等<sup>[24]</sup>以总

管道长度与汇水面积的比值定义排水密度, 并基于排水密度、降雨量与径流间关系识别了排水系统的结构风险并评估了不同排水系统结构的性能。但是这些管网风险的研究主要基于现有数据以传统静态分析评估为主, 缺少对管段充满度的动态分析; 但对管网运行风险来说, 对不同时段管网风险动态变化的预测是非常重要的。

针对管段充满度的预测以及管网运行风险动态评价等问题, 本文以 SWMM 模型及管网监测数据为基础, 构建了基于单井、多井计算模式的管段充满度预测模型, 并筛选出预测精度和计算效率最优的模型, 实现对管段充满状态的快速预测。同时, 考虑经济、社会、环境、物理特性 4 个方面, 结合管段充满度预测模型, 构建了城市管网运行风险动态评价指标体系, 并基于综合风险指数法对管网风险进行评估。最后, 选取两块具有不同特性的典型区域作为研究案例, 对管网运行风险进行评估, 为复杂排水系统管网运行风险及洪涝灾害应急决策提供理论依据, 并支撑排水防涝相关部门对管网日常维护及风险处置。

## 1 研究区域概况及方法

### 1.1 研究区域概况

以广州市黄埔区文涌排涝片为研究区域(见

图 1), 该区域总面积 11.58 km<sup>2</sup>, 地势呈现北高南低的特点, 区域内河道总长约 6.38 km, 多年平均降水约 1 650 mm, 年内降雨分配不均, 80.3%的降雨量集中在 4—9 月, 受雨季影响内涝灾害频发且灾害损失严重<sup>[25]</sup>。

### 1.2 基于 SWMM 的城市管网机理模型构建及率定

#### 1.2.1 DEM 数据预处理

首先, 在房屋面图层中赋予一个略超过节点检查井地表高程最大值的字段, 标记此处不会发生内涝; 其次, 利用节点检查井图层中地表高程字段形成道路栅格数据; 最后, 将校正过的道路和房屋数据镶嵌到原 DEM 内, 建立基于 SWMM 的排水管网模型。

#### 1.2.2 单元概化

管网系统概化过程中, 利用 DEM 高程数据判断整体走向, 依托节点检查井创建泰森多边形, 按照就近原则将每一个子汇水区的水量通过最近的检查井实现管网水力传送, 并确保概化后的管网系统准确反映该地块的降雨实际汇流情况; 概化后的管网系统有 36 个排水口, 748 个节点检查井, 751 条管线。建模区概化结果如图 2 所示。

#### 1.2.3 SWMM 模型参数率定

基于广州市水务局提供的 2021 年 8 月 17 日至 2023 年 7 月 27 日的实测降雨和检查井液位数据, 以

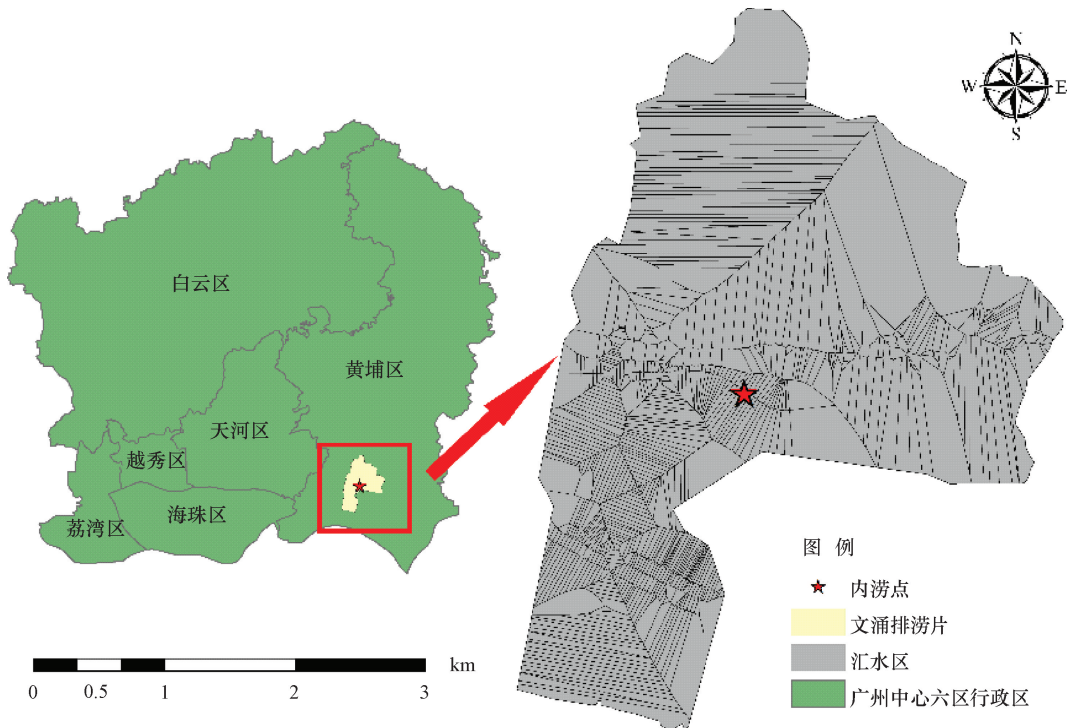


图 1 研究区域位置示意

Fig. 1 Study area location diagram

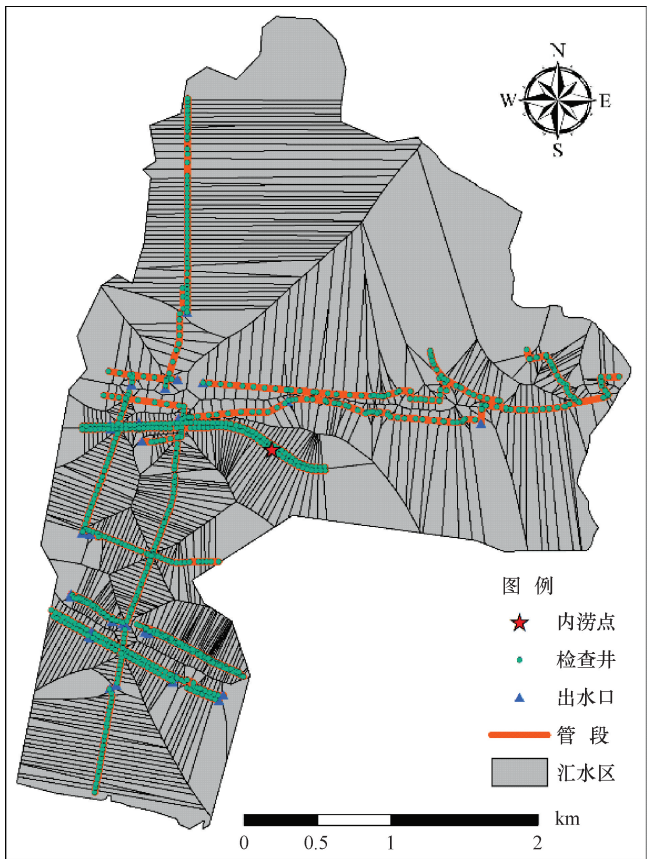


图2 概化结果

Fig. 2 Generalize the result graph

检查井 0020610025 为研究对象, 将实测检查井液位数据与 SWMM 模型结果进行对比, 以纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)<sup>[26]</sup>、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)<sup>[27]</sup>、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)<sup>[28]</sup> 为评价参数, 对 SWMM 模型进行率定<sup>[29]</sup>。

### 1.3 基于单井、多井计算模式的管段充满度预测模型构建

#### 1.3.1 单井、多井计算模式提出

##### 1.3.1.1 计算模式构建

城市排水管道的上游来水主要是市政排水和区域汇集的径流量, 因此降雨过程对管段充满度有直接影响; 排水管网的下游为排水口, 河道水位过

高会产生顶托效应从而影响管段的充满度<sup>[30]</sup>, 因此河道水位与管段充满度也是直接相关的; 排水管段连接上下游两个检查井, 因此上下游检查井的上沿标高、下沿标高及井深等都与管段充满度直接相关; 因此本文通过机器学习建立降雨-河道水位的时间序列以及管段的水文参数与管段充满度的关系, 实现对城市排水管段充满度的快速预测。

本文提出了两种不同的计算模式, 具体如下。

(1) 单井模式。单井模式是建立降雨-河道水位时间序列、管段的水文参数与单一管段的充满度的关系。其输入为第  $i$  天的实测降雨-河道水位对应过程序列, 以及第  $j$  个节点检查井的水文参数; 输出为第  $i$  天第  $j$  个管段的充满度。单井计算模式构建方式及概念如图 3(a)(c) 所示。

(2) 多井模式。多井模式是建立降雨-河道水位序列与整个管网系统中不同管段的充满度之间的关系。其中, 管段的水文参数已包含在管网系统整体之中, 因此不再将管段水文参数单独提出与管段充满度之间建立关系。

多井模式的输入为第  $i$  天的实测降雨-河道水位对应的过程序列; 输出为第  $i$  天所有管段的充满度。多井计算模式的构建方式示意图及概念图如图 3(b)(d) 所示。

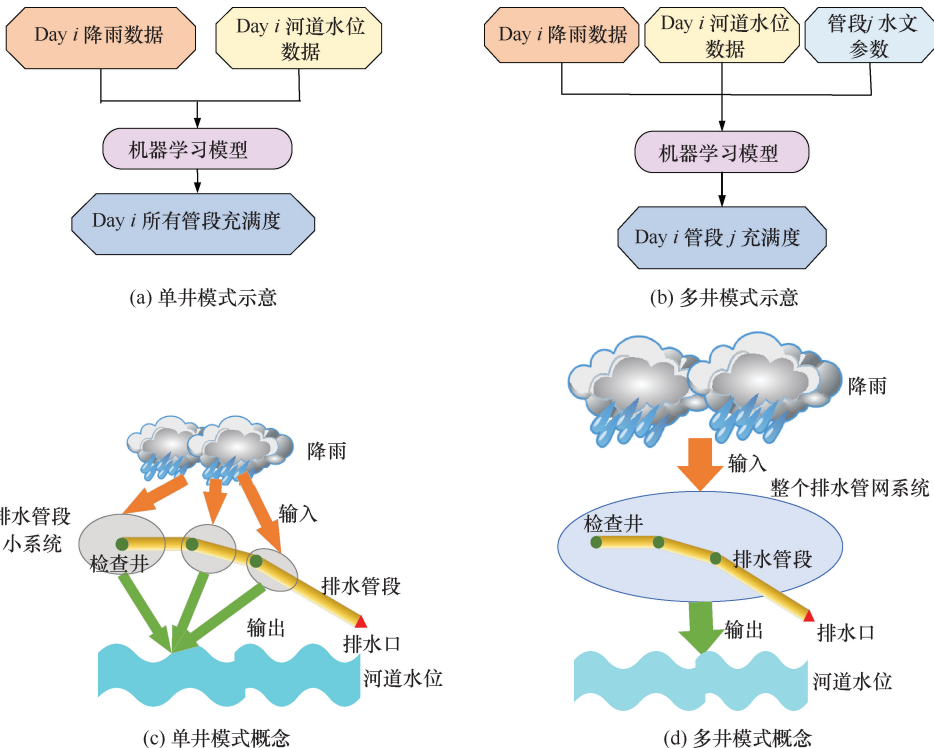


图3 不同计算模式及概念

Fig. 3 Different calculation model diagram and concept map

单井模式由于只考虑单一管段的充满度, 因而模型输出的变量少; 但是多井模式可以同时得到整个排水系统中所有管段的充满度。因此本文建立了上述两种计算模式, 从预测精度和计算效率上综合比较并筛选出最优模型。

(3) 数据集划分。将实测降雨-河道水位数据和 SWMM 计算的管段充满度结果, 以 64 : 16 : 20 的比例分为训练集、验证集和测试集。其中测试集包含 137 场工况的 751 个管段充满度数据, 多井模式需要预测 137 个数据点, 单井模式需要预测  $137 \times 751 = 102\ 887$  个数据点。

### 1.3.1.2 输入输出设置

模型输入的动态变量为文涌片区 2021—2023 年的 687 场实测降雨及对应河道水位数据; 输入的静态变量为管段上游节点检查井的上沿标高、下沿标高和井深, 以及以该检查井为出口的子汇水区的面积、宽度、坡度、不透水区百分比、不透水曼宁系数和透水曼宁系数。模型的输出为实测降雨-河道水位对应过程序列在 SWMM 模型中得到的管段充满度结果。

### 1.3.2 耦合智能算法的管段充满度预测模型构建

#### 1.3.2.1 多层感知机模型

多层感知机 (Multilayer Perceptron, MLP) 采用 *ReLU* (Rectified Linear Unit) 作为激活函数, 学习率设置为 0.001。

基于单井计算模式的多层感知机模型结构如图 4(a) 所示。模型输入层包括每场降雨数据和对应的河道水位数据以及每根管段的水文参数, 共有  $144 \times 2 + 1 = 289$  个特征值; 三个隐藏层的神经元个数都为 64, 输出层神经元为管段的充满度数据。

基于多井计算模式的多层感知机模型结构如图 4(b) 所示。模型输入层是每一场过程的降雨数据和对应的河道水位数据, 共有  $144 \times 2 = 288$  个特征值, 3 个隐藏层的神经元个数分别为 64、256、512, 输出层神经元为模拟的管段数 751。

#### 1.3.2.2 线性回归模型

线性回归模型旨在通过对输入变量的线性组合进行建模, 从而预测连续型目标变量的值, 完成回归任务<sup>[31]</sup>。线性回归模型的网络结构只包含一个输入层和

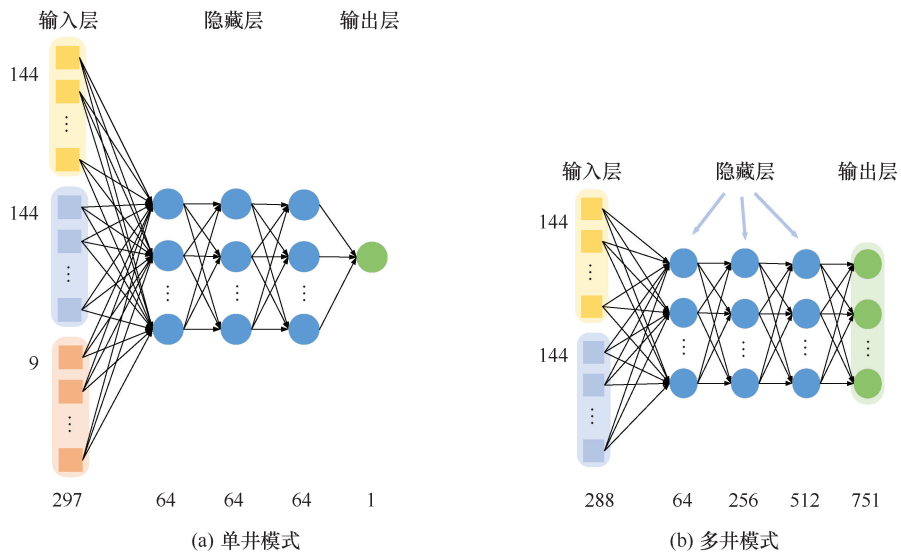


图 4 基于不同计算模式的多层感知机模型结构

Fig. 4 Structure diagram of multi-layer perceptron model based on different computing modes

一个输出层, 在输入层中, 每个节点对应数据的一个特征, 而输出层只有单个节点对应预测的目标变量。对于多井计算模式, 模型输入层的节点个数为 288, 输出层的节点个数为 751; 对于单井计算模式, 模型输入层的节点个数为 289, 输出层的节点个数为 1。

#### 1.3.2.3 决策树模型

决策树模型根据训练数据中特征之间的条件关系, 通过递归的方式将特征空间划分为若干区域, 每个区域对应一个决策树的叶节点, 最终根据所属叶节点的类别或值对新样本进行预测。

### 1.4 城市管网运行风险动态评价指标体系构建

#### 1.4.1 指标选取

依据相关的规范、标准, 遵循针对性、科学性、系统性、代表性、独立性、客观性以及易获取性的原则<sup>[32]</sup>, 从经济因素、社会因素、环境因素和物理特性 4 个方面构建城市管网运行风险动态评价指标体系。经济因素是驱动城市管网建设发展的一个重要方面; 社会因素反映了管网风险对城市的危害; 环境因素既反映了城市发展的动态变化, 又为不同情景下城市管网运行风险的评价提供依据; 物理特性同时反映了管网固有特性及自身动因对运行风险的影响。

经济因素 *B1*: 城市排水管段常用的材质有钢筋混凝土、混凝土、HDPE (高密度聚乙烯) 和 PVC (聚氯乙烯), 管段自身的造价和铺设时的人工成本不同, 将管材成本 *C1*、人工建设成本 *C2* 纳入 *B1*; 修复工艺的差别导致修复成本不同, 将修复成本 *C3* 纳入 *B1*。

社会因素 *B2*: 将人口聚集度高的商场和地铁站、

机关学校以及内涝点标记为敏感点, 道路类型为城市常见的干道、支路和快速路, 这些区域的管段出现风险将会对社会产生严重威胁, 因此将敏感点类型 C4、道路类型 C5 纳入 B2。

环境因素 B3: 下垫面类型和降雨强度直接影响径流过程, 而管道埋深影响管道的安全, 因此将下垫面类型 C6、埋深 C7、雨强 C8 纳入 B3。

物理特性 B4: 将管段的重要参数管径 C9、基于管段充满度预测模型计算出的管段充满度 C10 纳入 B4, 而管段的缺陷是产生运行风险的直接原因, 因此将管段缺陷 C11 也纳入 B4。

城市管网运行风险评估指标体系如图 5 所示。

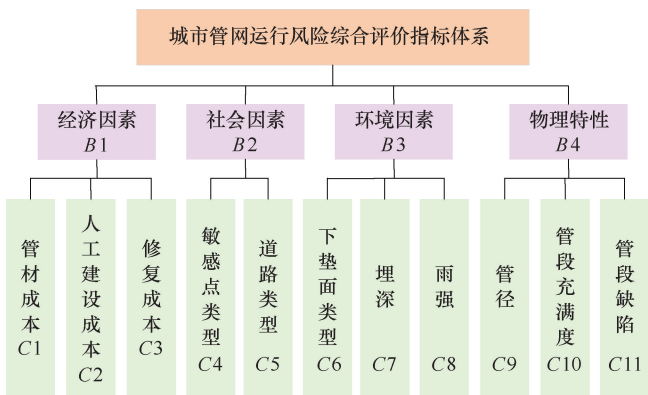


图 5 城市管网运行风险评估指标体系

Fig. 5 Risk assessment index system of urban pipe network operation

### 1.4.2 指标赋分标准

根据每一类指标的特性以及相关规范设置指标评分范围 0~1, 0 表示无风险, 1 表示极高风险。结果如表 1 所列。

### 1.4.3 指标权重的确定及风险等级划分

#### 1.4.3.1 指标权重的确定

秩序分析法是由层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 改良而来, 也被称为 G1 法<sup>[33]</sup>, 因不再需要构造判断矩阵和一致性检验从而大幅度提升了实用性。假设指标集为  $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots\}$ , 专家打分得到指标间的重要性排序  $u_1 > u_2 > \dots > u_n$ , 利用式(1)、式(2)和式(3)联合计算得到全部指标的权重  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k)$ <sup>[34]</sup>

$$r_k = \frac{u_{k-1}}{u_k}, \quad k = n, n-1, \dots, 3, 2 \quad (1)$$

$$\omega_k = \left(1 + \sum_2^n \prod_{j=k}^n r_j\right)^{-1}, \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$\omega_{k-1} = r_k \omega_k, \quad k = n, n-1, \dots, 3, 2 \quad (3)$$

表 1 指标风险赋值

Table 1 Index risk assignment

准则层	指标层	指标细化	风险值赋分
经济因素 B1	管材成本 C1	钢筋混凝土	0.2
		混凝土	0.3
		HDPE	0.4
		PVC	0.5
	人工建设成本 C2	钢筋混凝土	0.2
		混凝土	0.3
		HDPE	0.4
		PVC	0.5
	修复成本 C3	开挖修复	0.8
		局部树脂固化	0.3
		翻转式原位固化	0.4
短管焊接内衬		0.5	
裂缝嵌补-聚氨酯环缝堵漏		0.3	
不锈钢双胀环		0.3	
地基加固-土体注浆		0.2	
社会因素 B2	敏感点类型 C4	商场	0.6
		地铁站	0.5
		机关学校	1.0
		内涝点	0.9
	道路类型 C5	主干道	0.6
		次干道 支路 快速路	0.4 0.2 0.8
环境因素 B3	下垫面类型 C6	植被	0.1
		建筑物	0.7
		道路和交通基础设施	0.5
		水体	0.8
		裸土和开放地面	0.2
		人造表面	0.4
	城市绿地	0.3	
埋深 C7	$h \leq 2.5 \text{ m}$ 或 $5.5 \text{ m} \leq h$	0.6	
$2.5 \text{ m} < h < 3.5 \text{ m}$ 或 $5 \text{ m} < h < 5.5 \text{ m}$	0.4		
$3.5 \text{ m} \leq h \leq 5 \text{ m}$	0.2		
雨强 C8	$0 \leq p \leq 5 \text{ mm/h}$	0.3	
	$5 \text{ mm/h} < p \leq 10 \text{ mm/h}$	0.4	
	$10 \text{ mm/h} < p \leq 20 \text{ mm/h}$	0.5	
	$20 \text{ mm/h} < p \leq 30 \text{ mm/h}$	0.6	
	$30 \text{ mm/h} < p \leq 50 \text{ mm/h}$	0.7	
	$50 \text{ mm/h} < p \leq 100 \text{ mm/h}$	0.8	
	$100 \text{ mm/h} < p \leq 250 \text{ mm/h}$	0.9	
$p > 250 \text{ mm/h}$	1.0		
物理特性 B4	管径 C9	$d \leq 400 \text{ mm}$	0.8
		$400 \text{ mm} < d < 600 \text{ mm}$	0.6
		$600 \text{ mm} < d \leq 1000 \text{ mm}$	0.4
		$1000 \text{ mm} < d$	0.2
	管段充满度 C10	$0 \leq \alpha \leq 0.2$	0.2
		$0.2 < \alpha \leq 0.4$ $0.4 < \alpha \leq 0.6$ $0.6 < \alpha \leq 0.8$ $0.8 < \alpha \leq 1$	0.4 0.6 0.8 1.0
管段缺陷 C11	破裂 变形 腐蚀	1.0 0.9 0.5	

表 1 (续)

准则层	指标层	指标细化	风险值赋分
物理特性 B4	管道缺陷 C11	错口	0.8
		起伏	0.7
		脱节	1.0
		接口材料脱落	0.3
		支管暗接	0.2
		异物穿入	0.3
		渗漏	0.6
		沉积	0.9
		结垢	0.8
		障碍物	1.0
		残墙坝根	1.0
		树根	0.9
浮渣	0.7		

式中,  $r_k$  为相邻指标的相对重要程度之比;  $\omega_k$  为指标  $u_k$  的权重。

### 1.4.3.2 基于综合风险指数法的风险等级划分

将每个指标的风险分值乘以其权重再求和即得到城市管网运行风险综合风险指数  $CRI$

$$CRI = \sum_{k=1}^n \omega_k X_k \quad (4)$$

式中,  $X_k$  为指标的风险分值;  $\omega_k$  为指标的权重。

计算所得到的最终综合风险指数结果在 0~1 之间, 风险指数等级如表 2 所列。

表 2 城市管网运行综合风险指数等级

Table 2 Grade of comprehensive risk index of urban pipe network operation risk

$CRI$	风险等级
$0 \leq CRI \leq 0.2$	低
$0.2 < CRI \leq 0.5$	中
$0.5 < CRI \leq 0.8$	高
$0.8 < CRI \leq 1$	极高

表 4 不确定性参数参考值与率定值

Table 4 Reference values and calibration values of uncertainty parameters

组成部分	名称	单位	经验值	初始值	率定值
子汇水区	不渗透表面粗糙系数(NImperv)		0.01~0.05	0.03	0.011 6
	渗透表面粗糙系数(Nperv)		0.05~0.8	0.08	0.05
	不渗透洼地蓄水(DImperv)	mm	0~3	2	2
	渗透洼地蓄水(Dperv)	mm	2~10	3	3.11
	衰减系数(Decay)	d <sup>-1</sup>	0~7	4	3
	最大入渗率(MaxRate)	mm/h	10~100	75	70
	最小入渗率(MinRate)	mm/h	0~10	5	4.68
雨水管网	管段的粗糙系数(Manning)		0.011~0.024	0.015	0.013

表 5 不同模型预测结果

Table 5 Accuracy results of different models of single-day multi-well method

参数	多层感知机模型		线性回归模型		决策树模型	
	单井计算模式	多井计算模式	单井计算模式	多井计算模式	单井计算模式	多井计算模式
RMSE	0.192	0.117	0.276	0.276	0.096	0.077
MAE	0.082	0.034	0.172	0.142	0.031	0.030

## 2 结果分析

### 2.1 机理模型参数率定结果

本文选取 2021 年 6 月 21 日、2021 年 9 月 16 日、2022 年 6 月 7 日、2022 年 8 月 10 日、2023 年 4 月 1 日和 2023 年 4 月 19 日六场实测降雨和检查井液位数据进行 SWMM 模型率定。检查井液位模拟过程线与实测对比结果如图 6 所示;  $NSE$ 、 $RMSE$  和  $MAE$  精度指标结果如表 3 所列。

表 3 六场降雨过程模拟精度指标结果

Table 3 Results of simulation precision indexes of six rainfall processes

场次	$NSE$	$RMSE$	$MAE$
2021-06-21	0.826	0.076	0.045
2021-09-16	0.868	0.074	0.057
2022-06-07	0.793	0.024	0.017
2022-08-10	0.819	0.048	0.037
2023-04-01	0.894	0.036	0.031
2023-04-19	0.762	0.015	0.011

由图 6 和表 3 可知, 六场降雨过程模拟结果与实际结果基本一致, 通过计算得到  $NSE$  均大于 0.75,  $RMSE$ 、 $MAE$  均小于 0.15, 符合工程精度要求; 最终各参数率定结果如表 4 所列。

### 2.2 管段充满度预测结果分析

#### 2.2.1 预测精度分析

选择  $RMSE$  和  $MAE$  两个参数验证管段充满度预测模型的精度。将所有模型的预测结果与 SWMM 模拟结果进行对比, 结果如图 7 所示。不同模型模拟预测的误差如表 5 所列。

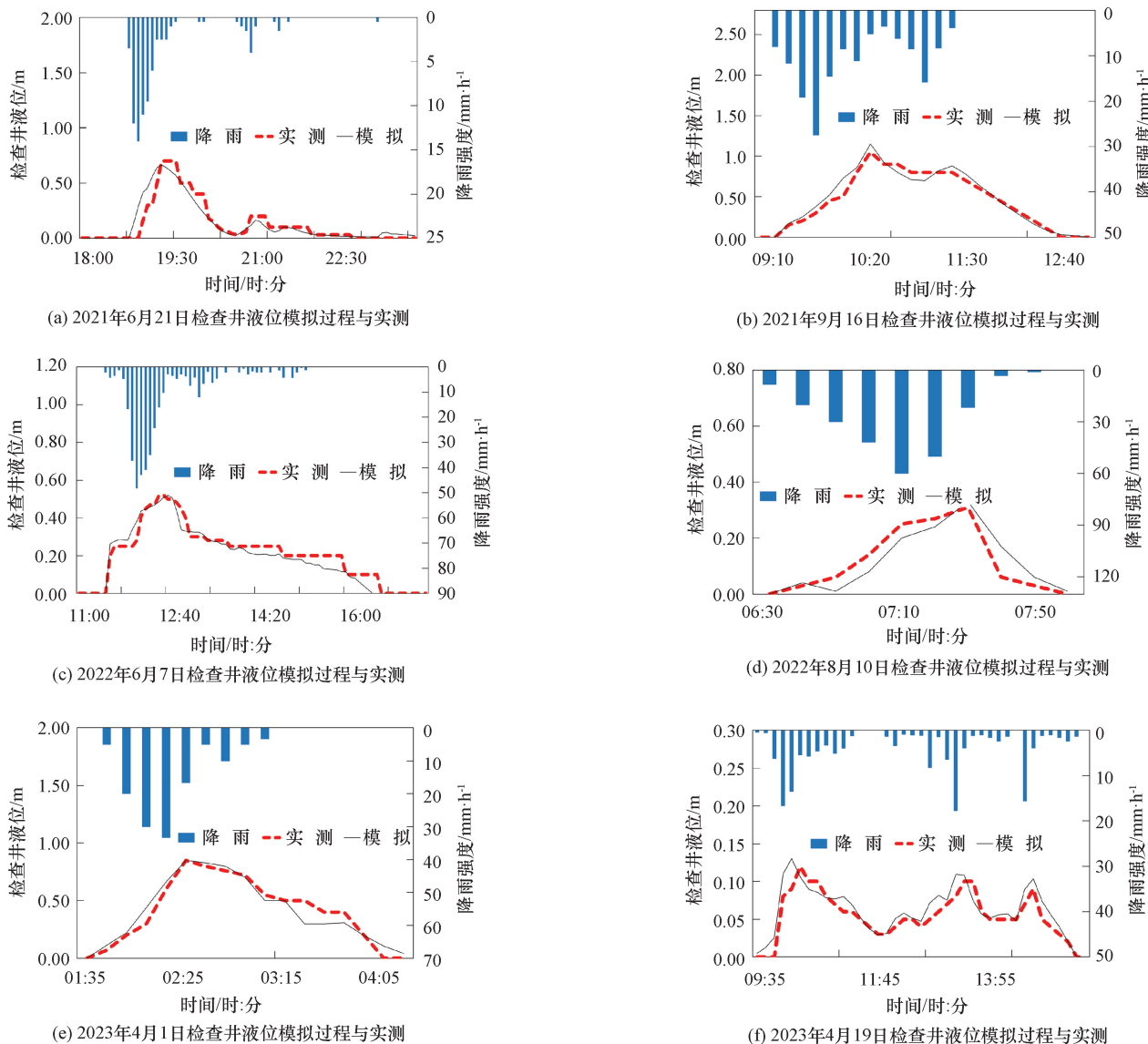


图 6 检查井液位模拟过程线与实测对比结果

Fig. 6 Check the comparison between the simulated process line and the measured results

由图 7 和表 5 可知, (1) 决策树模型的预测值曲线和 SWMM 值曲线基本吻合; (2) 137 场情景预测中, 只有基于多井计算模式的决策树模型的 *RMSE* 和 *MAE* 均在 0.15 误差线以内, 满足工程误差要求。而线性回归模型的表现是所有模型中效果最差的, 主要原因在于, 无论是单井计算模式还是多井计算模式, 均无法通过简单线性组合找到规律, 特别是动态的降雨强度与河道水位特征, 与静态水文参数的物理含义存在显著差异。

### 2.2.2 计算效率分析

在城市内涝灾害的应急处置中, 快速准确掌握管段充满度状态对排涝工作的部署是十分重要的; 因此, 对管段充满度预测模型计算效率提出了较高的要求。基于此, 为进一步说明本文构建的管段充满度预

测模型能满足城市内涝灾害应急处置的时效性要求, 采用不同模型对 687 场实测工况进行模拟, 模拟时长如表 6 所列。

由表 6 可知, 智能算法的引入可以大幅提升管段充满度计算的效率, 其中预测效果最好的多井-决策树模型单次工况运行时间为 0.000 4 s, 这表明该模型在满足工程精度要求的基础上, 实现了城市内涝过程中管段充满度的快速计算。

### 2.3 城市管网运行风险动态评价

研究区呈现出敏感点聚集的特点, 所以以广州市 2022 年 3 月 26 日实测降雨过程(见图 8)为例, 基于城区敏感点分布情况选取了两个典型片区(见图 9)进行管网运行风险动态评价, 来探求城市不同区域对管网运行风险的约束。

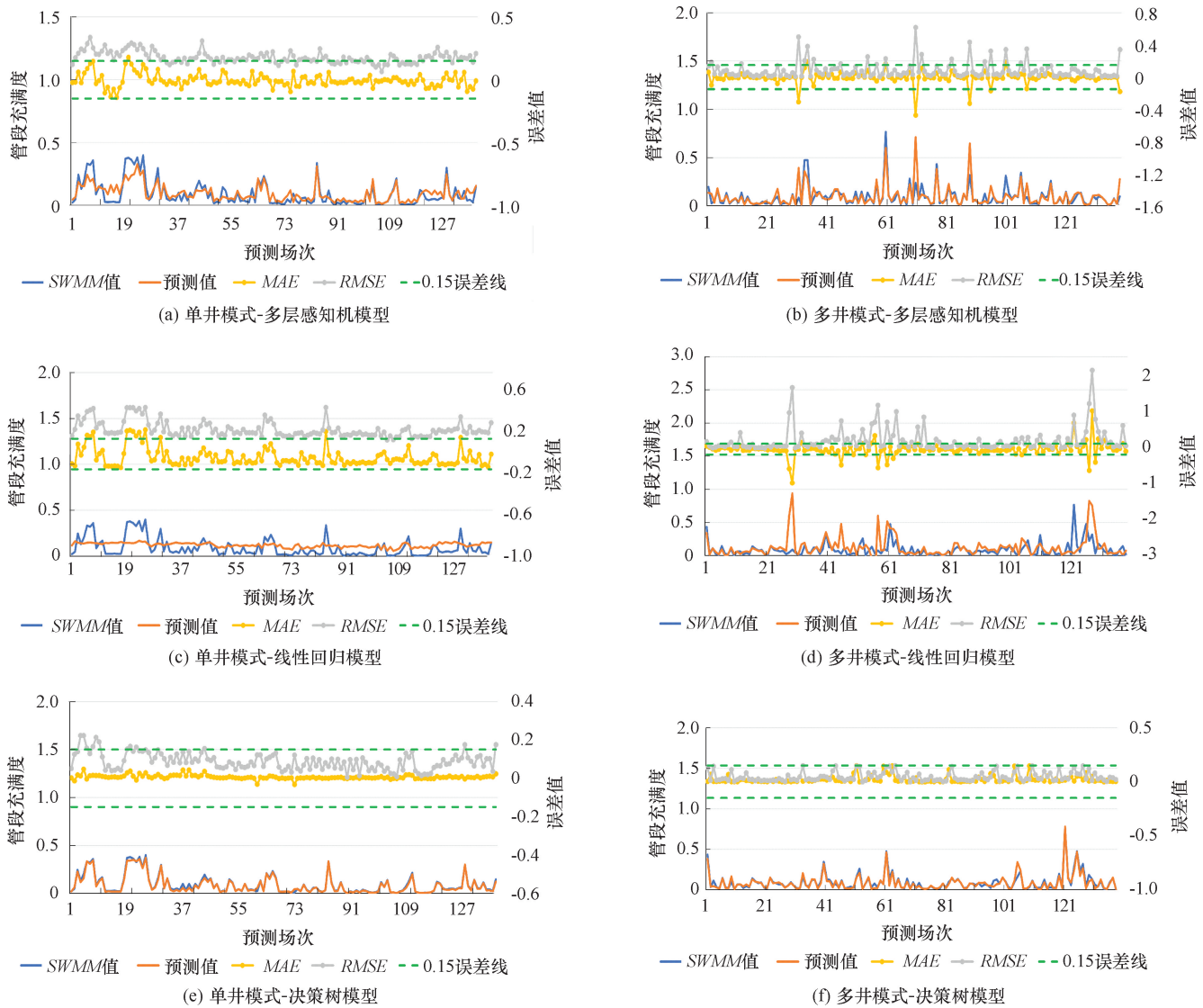


图 7 各模型在全部测试集上的预测场次精确度

Fig. Fig. 7 Prediction field accuracy plots for each model on all test sets

表 6 不同模型运行用时对比结果

Table 6 The runtime of different models is compared

模型方法		总用时/s	单位工况数据用时/s	提升速度/倍
SWMM 模型		164 880	240	—
多层感知机模型	多井计算模式	0.040 53	0.000 058 993	4 000 000
	单井计算模式	3.547 81	0.005 164 203	48 000
线性回归模型	多井计算模式	0.988 93	0.001 439 493	171 429
	单井计算模式	0.319 77	0.000 465 464	515 614
决策树模型	多井计算模式	0.244 98	0.000 356 594	600 000
	单井计算模式	0.006 63	0.000 009 652	24 000 000

首先利用多井模式-决策树模型计算两个区域内管段充满度(C10), 结果如表 7、表 8 所列; 然后结合评价指标体系对管网运行风险进行综合评价。

通过对所有评价指标进行相关计算, 得到两个区域内全部指标的权重结果(见图 10)。

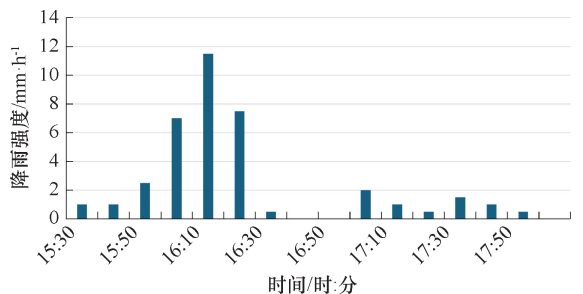


图 8 2022 年 3 月 26 日降雨过程

Fig. 8 Rainfall process on March 26, 2022

由图 10 可知, 对敏感点聚集区, 占比最重的指标为敏感点类型 C4, 即一级指标最重要的为社会因素 B2; 对敏感点非聚集区, 占比最重的指标为修复成本 C3, 即一级指标最重要的为经济因素 B1。

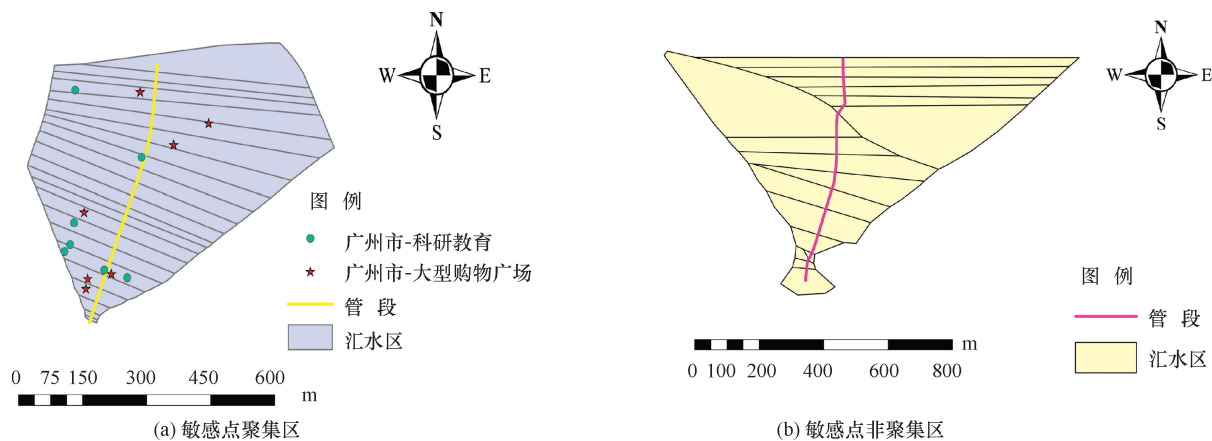


图9 两个典型片区位置

Fig. 9 Two typical area location maps

表7 敏感点聚集区管段 C10 指标结果

Table 7 C10 index results of pipe segment in sensitive points gathering area

名称	10	11	C221	C242	C384	C442	C449	C453	C461	C462	C463	C464	C465	C467	C469	C471	C473	C476	C507	C597	C598	C599
C10	0.72	0.86	0.92	0.89	0.13	0.55	0.58	0.67	0.58	0.47	0.47	0.43	0.41	0.28	0.33	0.17	0.39	0.42	0.65	0.65	0.67	0.68

表8 敏感点非聚集区管段 C10 指标结果

Table 8 C10 index results of pipe segment in non-gathering area of sensitive points

名称	C0	CC1	C10	C11	C111	C116	C122	C18	C27	C28	C29	C30	C31	C316	C99
C10	0.85	0.83	0.77	0.75	0.75	0.71	0.63	0.69	0.71	0.62	0.66	0.59	0.67	0.13	0.17

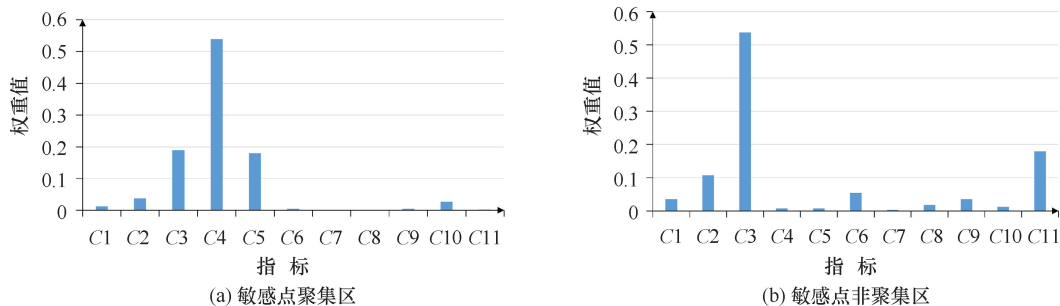


图10 指标权重结果

Fig. 10 Indicator weight result graph

通过对所有指标进行内容收集及相关计算,得到两个区域内管段各指标详情及得分。基于公式(4)计算得到两个区域的管段风险结果,如图11所示。

由图11可知,在敏感点聚集区,低风险管段、中等风险管段和高风险管段分别占比17.4%、47.8%、34.8%。中等风险与高风险管段占比超过50%。分析得到,在该区域内社会因素类指标占比最大,且该片区内管段集中分布在主干道周边,管段周边多为不透水面,所以该片区内管段的综合风险指数偏高,中高风险管段较多。

在敏感点非聚集区,低风险管段、中等风险管段和高风险管段分别占比40%、33.3%、26.7%。低风

险和中等风险的管段占比超过50%。分析得到,在该区域内经济因素类指标占比最大但风险分值较低,敏感点分布不密集,并且该区域管段铺设远离主干道,管段周围下垫面类型多为植被,所以该片区内管段的综合风险指数偏低,中低风险管段较多。

### 3 结果讨论

本文针对城市管网充满状态不明、问题排查效率低、运行风险缺乏动态评价等困境开展研究。首先基于实测数据构建了城市管网机理模型,其NSE均大于0.75, RMSE、MAE均小于0.15,符合工程精度要求;其次利用实测数据以及水文模型和水力模型相

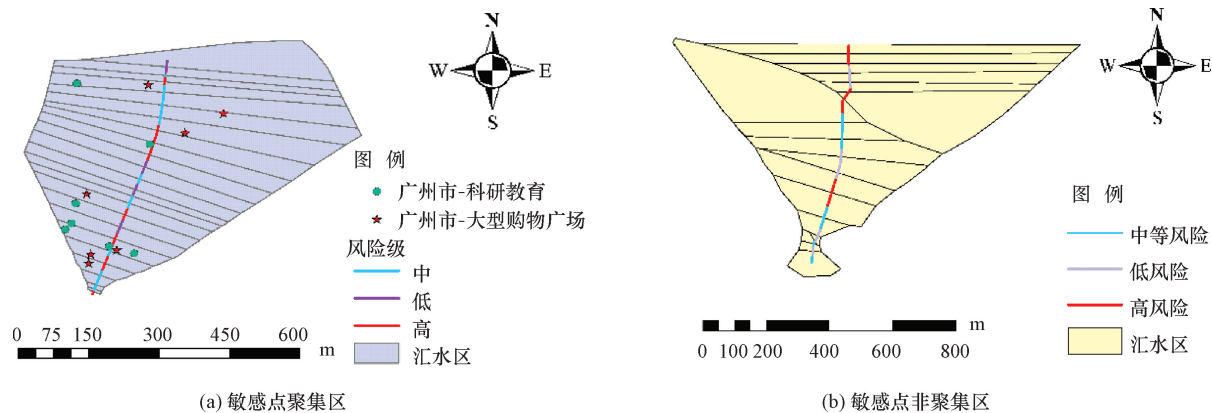


图 11 管段风险结果图

Fig. 11 Pipe section risk result diagram

关的 9 种参数, 基于单井和多井两种计算模式, 结合多种智能算法构建了管段充满度预测模型, 将所有模型的预测结果与机理模型结果进行对比, 综合考量工程精度和时间效率两方面需求, 得到表现最优的基于多井计算模式的决策树模型, 其  $RMSE$  和  $MAE$  均在 0.15 误差线以内, 单次工况运行时间为 0.000 4 s, 相较于 SWMM 模型计算效率提升了约 60 万倍。

通过研究得到: (1) 利用智能模型耦合性好、适应性强、计算快的优势, 构建了基于多种智能算法的管段充满度预测模型, 突破了传统水文模型对数据质量要求高的限制, 兼顾了工程精度要求和时效性要求。(2) 将管段充满度纳入评价指标体系, 从经济因素、社会因素、环境因素、物理特性 4 个角度构建了城市管网运行风险动态评价指标体系, 考虑了降雨过程中管段充满度的变化, 反映了城市管网运行风险动态发展的特性。

同时, 本文的研究仍有可改进优化之处, 由于缺乏研究区域关于蒸发、地下水、土壤类型和分布的水文地质信息, 对 SWMM 模型精度有一定影响, 在下一步的研究中, 可基于水文地质数据, 对 SWMM 模型进一步校准; 目前针对 DEM 精度提升时只用到了节点检查井的地表高程数据, 未来可以引入更多精准的实测数据弥补地表高程数据测量误差的干扰, 提升建模区 DEM 精度。

## 4 结 论

本文得到的主要结论如下。

(1) 提出了单井和多井两种计算模式, 并分别与多层感知机模型、线性回归模型和决策树模型结合, 构建了城市管段充满度预测模型。结果表明基于多井计算模式的决策树模型精度最优,  $RMSE$  为 0.077,

$MAE$  为 0.030, 满足工程精度要求。

(2) 耦合智能算法的管段充满度预测模型运行时间较 SWMM 模型整体有大幅提升, 精度最优的多井模式-决策树模型的单次工况运行时间较 SWMM 模型提升 60 万倍, 表明了该模型可以在不牺牲精度的条件下实现对管段充满度的快速预测, 满足了城市内涝灾害应急处置的时效性要求。

(3) 从经济因素、社会因素、环境因素、物理特性 4 个角度, 结合管段充满度预测模型, 构建了城市管网运行风险动态评价指标体系; 并在两块具有不同特性的区域进行应用得到, 在敏感点聚集区内, 社会因素类指标所占权重最大, 中等风险与高风险管段占比超过 50%。在敏感点非聚集区内, 经济因素类指标所占权重最大。

## 参考文献 (References):

- [1] XU X. Frequent occurrence of extreme weather and out-of-balance climate systems [J]. The Innovation Geoscience, 2024, 2(1): 100049-1-100049-2.
- [2] 贾朝阳, 郭亮, 崔嵩, 等. 松花江流域 NPP 时空演变及其对极端气候的响应机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 131-147.
- JIA Z Y, GUO L, CUI S, et al. Spatial-temporal evolution of NPP and its response to extreme climate in Songhua River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 131-147.
- [3] YE K, WOOLLINGS T, SPARROW S N, et al. Response of winter climate and extreme weather to projected Arctic sea-ice loss in very large-ensemble climate model simulations [J]. Climate and Atmospheric Science, 2024, 7(1): 20.
- [4] 郑芳, 李芳然, 甘义群, 等. 极端气候事件对洞庭湖水文连通性变化的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22

- (1): 67-79.
- ZHENG F, LI F R, GAN Y Q, et al. The impact of extreme climatic events on hydrological connectivity of Dongting Lake [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(1): 67-79.
- [5] DE ANDRADE C D, BAYISSA Y, VILLAS-BOAS M D, et al. Water availability and extreme events under climate change scenarios in an experimental watershed of the Brazilian Atlantic Forest [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 946: 174417.
- [6] REN Z, ZHAO H, Mu X, et al. Spatiotemporal variations of extreme weather events and climate drivers in the Three Gorges Reservoir Area and its surrounding regions from 1960 to 2020 [J]. *Atmospheric Research*, 2024, 304: 107379.
- [7] 宋晓猛, 徐楠涛, 董子然. 变化环境下城市洪涝风险评估与调控策略[J]. *水利发展研究*, 2025, 25(1): 56-64, 85.
- SONG Xiaomeng, XU Nantao, DONG Ziran. Risk assessment and control strategies of urban flooding under changing environments [J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(1): 56-64, 85.
- [8] 国家防汛抗旱总指挥部. 中国水旱灾害公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.
- The State Council of the People's Republic of China. *Bulletin of Flood and Drought Disasters in China* [M]. Beijing: China Water&Power Press, 2022.
- [9] LAURI A, SUVI S, ANTTI B, et al. Water governance for water security: analyzing institutional strengths and challenges in Finland [J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2024, 40(2): 153-173.
- [10] KHODADAD M, BARAJAS A I, BARRÓN C E L, et al. Addressing Local Water Security through Green Infrastructure Implementation: A Review of Urban Plans in Monterrey, Mexico, and Brussels, Belgium [J]. *Water*, 2024, 16(5): 727.
- [11] 赵廷红, 施宇轩. 对称 Y 型管管内充满度对管壁影响的数值模拟实验研究 [J]. *甘肃科学学报*, 2020, 32(4): 125-130.
- ZHAO T H, SHI Y X. Numerical Simulation Experiment on the Effect of In-tube Fullness of Symmetrical Y-tube on Tube Wall [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2020, 32(4): 125-130.
- [12] 范鹏辉, 姜涛, 牛超群, 等. 基于液位监测及 CNN-SVM 的排水管网缺陷诊断 [J]. *中国给水排水*, 2023, 39(23): 30-39.
- FAN P H, JIANG T, NIU C Q, et al. Fault Diagnosis Method of Drainage Network Based on Liquid Level Monitoring Data and CNN-SVM [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(23): 30-39.
- [13] 丁法龙, 茅泽育. 圆形断面管道非满流水动力特性 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(4): 547-555.
- DING F L, MAO Z Y. Hydraulic Characteristics of Partially-Filled Flow in Circular Pipe [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(4): 547-555.
- [14] 王琦, 陈俊儒, 王昊. 基于失效概率的雨水管网高风险管道识别与改造 [J]. *人民长江*, 2024, 55(8): 15-22.
- WANG Q, CHEN J R, WANG H. Identification and Rehabilitation of High-Risk Pipes in Stormwater Networks Based on Failure Probability [J]. *Yangtze River*, 2024, 55(8): 15-22.
- [15] 张顺平. 基于改进 NSGA-II 算法的管网优化与低影响开发模拟研究 [D]. 昆明: 云南农业大学, 2023.
- ZHANG S P. Research on Network Optimization and Low Impact Development Simulation Based on Improved NSGA-II Algorithm [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023.
- [16] 陈静如, 郭帅, 申屠华斌, 等. 基于分布式光纤温度传感器的排水管网外来水监测试验研究 [J]. *水电能源科学*, 2024, 42(6): 134-138.
- CHEN J R, GUO S, SHENTU H B, et al. Tests on extraneous water monitoring in drainage networks based on distributed optical fiber temperature sensor [J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(6): 134-138.
- [17] FERREIRA J P, FERRAS D, COVAS D I C, et al. Improved SWMM modeling for rapid pipe filling incorporating air behavior in intermittent water supply systems [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 149(4): 04023004.
- [18] SALMAN B, SALEM O. Risk assessment of wastewater collection lines using failure models and criticality ratings [J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2012, 3(3): 68-76.
- [19] 陈信霖, 张树林, 毛立娟等. 老旧小区排水管网运行效能定量评估研究 [J]. *给水排水*, 2023, 59(6): 134-140.
- CHEN X L, ZHANG S L, MAO L J, et al. Performance evaluation of sewer network in old residential area [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 59(6): 134-140.
- [20] 冷雪. 城镇排水管网系统运行效能评价体系研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- LENG X. Study on the Evaluation System of Urban Drainage Pipe Network System Operation Efficiency [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [21] 巴振宁, 王鸣铄, 梁建文. 基于改进 F-ANP 方法的市政排水管网运行安全风险评估 [J]. *安全与环境工程*, 2020, 27(6): 208-216.
- BA Z N, WANG M S, LIANG J W. Risk assessment of municipal drainage network operation safety based on improved F-ANP method [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(6): 208-216.
- [22] 李晓峰. 城镇污水管网健康状况评价与修复技术优选研究 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019.
- LI X F. Study on the Evaluation of the Health Status and Optimization of Repair Technology of Urban Sewage Pipe Network [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2019.
- [23] 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.
- [24] LEE J, CHUNG G, PARK H, et al. Evaluation of the structure of urban stormwater pipe network using drainage density [J]. *Water*, 2018, 10(10): 1444.
- [25] 徐千惠, 熊林, 朱天琳, 等. 适应我国不同自然条件类型城市的内涝治理模式研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(1): 11-27.  
XU Qianhui, XIONG Lin, ZHU Tianlin, et al. Study on urban waterlogging control modes adapted to cities of different nature condition types in China [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(1): 11-27.
- [26] 韩媛雯. 基于SWMM的铁路车站片区LID雨洪模拟及综合效益研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.  
HAN Y W. Research on LID Rainfall Simulation and Comprehensive Benefits of Railway Station Area Based on SWMM. [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [27] 陈立海, 谭奥, 贺永辉, 等. 基于SCSSA-VMD-MCKD的轴承早期微弱故障异常检测方法[J]. *机电工程*, 2024, 41(12): 2129-2141.  
CHEN L H, TAN A, HE Y H, et al. Early weak fault anomaly detection of bearing based on SCSSA-VMD-MCKD [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2024, 41(12): 2129-2141.
- [28] 曹缘, 王振华, 张继红, 等. 基于WOA-XGBoost的膜下滴灌棉花蒸散量预测模型[J]. *排灌机械工程学报*, 2024, 42(12): 1280-1286.  
CAO Yuan, WANG Zhenhua, ZHANG Jihong, et al. Evapotranspiration prediction model of cotton under film drip irrigation based on WOA-XGBoost [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2024, 42(12): 1280-1286.
- [29] TAN Y, CHENG Q, LYU F, et al. Hydrological reduction and control effect evaluation of sponge city construction based on one-way coupling model of SWMM-FVCOM: A case in university campus [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119599.
- [30] 朱悦茹. 顶托作用下雨水管道与河道的水动力相互作用机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.  
ZHU Y R. Research on Mechanism of Hydrodynamic Interaction Between Stormwater Pipes and River Under the Effect of Backwater. [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [31] YAO W, LI L. A new regression model: modal linear regression [J]. *Scandinavian Journal of Statistics*, 2014, 41(3): 656-671.
- [32] YANG Z, HUANG X, FANG G, et al. Benefit evaluation of East Route Project of South to North Water Transfer based on trapezoid cloud model [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 254: 106960.
- [33] 袁婉玲, 崔子轩, 禹洪波等. 基于粗糙集-G1法组合赋权的变压器健康状态评估[J]. *电力建设*, 2022, 43(3): 50-57.  
YUAN W L, CUI Z X, YU H B, et al. Transformer health status evaluation based on rough set G1 combined weighting [J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(3): 50-57.
- [34] 冯孟娟. 基于SWMM模型的海绵城市内涝模拟及评价[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.  
FENG M J. Simulation and Evaluation of Waterlogging in Sponge City Based on SWMM Model-A Case Study of Guangzhou Miaotouchong [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2023.

(责任编辑 王海锋)