

鲁佳慧, 刘家宏, 刘创, 等. 考虑结构因素影响的的城市排水系统韧性评估方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 1-12. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.001

LU Jiahui, LIU Jiahong, LIU Chuang, et al. A resilience assessment methodology for urban drainage systems considering the influence of structural factors[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 1-12. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.001

考虑结构因素影响的的城市排水系统韧性评估方法

鲁佳慧¹, 刘家宏^{2,3}, 刘创⁴, 赵梓同⁵, 宁占金¹, 林金良¹

(1. 中国消防救援学院, 北京 102202; 2. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100038; 3. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 4. 水利部发展研究中心, 北京 100038; 5. 福建森林消防救援总队三明支队, 福建 三明 353000)

摘要:【目的】全球洪涝灾害频发导致城市排水系统面临着越来越多的挑战, 不仅包括极端降雨(外部荷载), 还有管道老化和破裂等潜在的结构失效(内部荷载)所带来的不确定威胁。为研究外部极端降雨和内部结构失效下城市排水系统韧性水平, 【方法】考虑管龄和流速的影响, 提出结构失效概率计算方法, 构建不考虑结构因素的超标荷载情景和考虑结构因素的复合情景。在综合考虑城市排水系统对极端荷载的响应过程预备阶段、响应阶段和恢复阶段的基础上, 选取评估指标, 建立基于云模型的韧性评估模型, 并将提出的方法应用于研究区进行案例分析。【结果】结果显示: 城市排水系统在复合情景下的节点积水总量与超标荷载情景相比增加了60%以上, 节点平均积水时长增加了1.0 h以上; 拓扑结构优化之后, 城市排水系统在超标荷载情景和复合情景下的节点积水总量分别下降了24.7%~30.1%和20.5%~48.4%。【结论】结构失效对城市排水系统的韧性有一定影响, 导致排水能力下降; 拓扑结构优化在一定程度上可以提升系统韧性。所提方法能够有效评估极端荷载下城市排水系统的韧性, 并为极端荷载下城市排水系统的安全运行提供参考。

关键词: 城市排水系统; 结构因素; 极端荷载; 韧性评估; 气候变化; 洪水; 降雨; 极端天气

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.001

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)06-0001-12



与作者互动
听语音 | 聊科研

A resilience assessment methodology for urban drainage systems considering the influence of structural factors

LU Jiahui¹, LIU Jiahong^{2,3}, LIU Chuang⁴, ZHAO Zitong⁵, NING Zhanjin¹, LIN Jinliang¹

(1. China Fire and Rescue Institute, Beijing 102202, China; 2. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Development Research Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 5. Sanming Branch of Fujian

收稿日期: 2024-08-07; 修回日期: 2024-10-16; 录用日期: 2024-10-17; 网络出版日期: 2024-10-24

基金项目: 水利部数字孪生流域重点实验室开放研究基金项目(Z0202042022); 国家重点研发计划揭榜挂帅项目“特大城市外洪内涝灾害链联防联控应急技术与示范”(2022YFC3090600)

作者简介: 鲁佳慧(1994—), 女, 讲师, 博士, 主要从事城市洪涝模拟、灾害风险管理研究。E-mail: alujiahui@163.com

通信作者: 刘家宏(1977—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: liujh@iwhr.com

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

Abstract: [Objective] Frequent global flooding has led to increasing challenges for urban drainage systems, including not only extreme rainfall, but also the uncertain threats posed by potential structural failures such as pipe deterioration and bursting. In order to study the level of resilience of urban drainage systems under extreme external rainfall and internal structural failure, [Methods] considering the influence of pipe age and flow velocity, the structural failure probability calculation method is proposed, and the overloading scenario without considering structural factors and the composite scenario with considering structural factors are constructed. Based on the comprehensive consideration of the preparatory stage, response stage and recovery stage of the response process of urban drainage system to extreme loads, the resilience assessment indexes are selected and a resilience assessment model based on cloud model is established. The proposed method is applied to the study area for case study analysis. [Results] The result show that the total flood volume in the urban drainage system under the composite scenario increased by more than 60% compared with the exceeding load scenario, and the average flood duration increased by more than 1.0 h. After topology optimization, the total flood volume in the urban drainage system under the exceeding load scenario and the composite scenario decreased by 24.7%~30.1% and 20.5%~48.4%, respectively. [Conclusion] Structural failure has a certain impact on the resilience of urban drainage systems, leading to a decrease in drainage capacity; topology optimization can improve the system resilience to a certain extent. The result show that the proposed method can effectively assess the resilience of urban drainage systems under extreme loads and provide a reference for the safe operation of urban drainage systems under extreme loads.

Keywords: urban drainage systems; structural factors; extreme loads; resilience assessment; climate change; flood; rainfall; extreme weather

0 引言

在城市快速发展和气候变化的影响下,城市洪涝灾害日益增多,洪水范围的扩大和频率的增加使得洪水风险管理更具挑战性^[1-2]。城市排水系统在应对城市地区的洪水风险方面发挥着关键作用,然而现有城市排水系统的性能受到多重不确定的威胁,如极端降雨、快速城市化和基础设施故障,这些威胁会导致灾难性的影响和后果。城市排水系统不仅要应对正常降雨,还要适应极端天气条件和未来不可预见的干扰。为了应对不确定风险和多种可能性,将韧性纳入城市排水系统设计与管理至关重要。评估城市排水系统的韧性是韧性城市发展的重要组成部分,也是提高排水系统可持续性的关键步骤。

一般条件下,韧性可以理解为适应不断变化的条件且不会因灾难性事件造成系统形式或功能损失的能力。因此,有些研究中指出工程系统的韧性可看作是应对事件的紧急属性,而不是系统具有的静态属性^[3]。韧性作为排水系统的关键性能指标,引入韧性城市排水系统已成为洪涝管理的一个重点,在开发韧性评估方法和框架方面做了大量工作和尝试^[4-5]。但是目前的城市排水系统韧性评估多集中于气候变化、极端降雨导致水力过载的外部荷载。有一些研究人员使用不同降雨事件下的积水与径流体积比、淹没持续时间评估城市排水系统韧性^[6-9]。GUPTHA

等^[10]使用积水总量、系统总入流量、最大节点积水时长和平均节点积水时长来评估系统韧性。JAFARI等^[11]利用当前和未来的各种降雨事件评估了伊朗德黑兰部分城市排水系统在缓解洪水淹没方面的性能。WANG等^[12]从财产损失和城市移动性角度,评估了不同降雨重现期下城市排水系统的恢复能力。虽然这种方法考虑了由于极端降雨的影响,导致积水情况和交通中断的严重程度不同,进而导致城市排水系统韧性不同,但对城市排水系统的评估是不够全面的,研究未考虑在极端事件期间管道结构因素的影响。有研究表明城市排水系统的结构对韧性有显著影响,且结构韧性可在极端事件期间对系统性能发挥重要作用^[13]。XU等^[14]基于对大规模虚拟排水系统的模拟,得到各措施增强韧性的成本效益性:改善拓扑结构>扩大管道容量>低影响开发。空间结构分布作为管道网络的系统属性对防洪性能具有显著影响^[15-16]。虽然有部分研究关注了结构因素,但是其外部荷载等于设计降雨,并未考虑内外两种荷载同时作用时对城市排水系统的影响^[17]。一些研究提出了全局韧性分析方法(GRA),该方法通过改变系统的内部结构,枚举所有可能的系统故障情景,根据这些故障情景的功能表现评估城市排水系统韧性^[18-19]。但是考虑到管道实际运行情况受到管龄和管道流速等因素的综合影响,并不是所有的故障情景都会出现。总而言之,现有研究简化了结构因素对城市排水系统韧性的影响分

析。缺乏完整的系统失效情景是未能对城市排水系统韧性进行全面评估的重要原因之一。

本研究聚焦韧性综合评估, 考虑城市排水系统未来面临的不确定性, 分析内外部影响因素, 构建完整失效情景。解析多情景下城市排水系统韧性对不同极端荷载的响应规律, 探讨城市排水系统在未来的适应性和扩展性。结合云模型对城市排水系统韧性进行综合评估, 对保护城市排水系统功能和组件, 提高系统对意外情况的响应能力具有重要的作用。

1 城市排水系统对极端荷载的响应机理

1.1 极端荷载

本研究将城市排水系统可能遭遇的一系列意想不到的极端荷载划分为两大类: 外部极端荷载和内部极端荷载(见表1)。外部极端荷载指因气候变化、极端降雨导致的城市排水系统入流量增多; 内部极端荷载指管道破裂、坍塌、堵塞等导致的排水系统结构发生故障。

表1 城市排水系统面临的极端荷载的分类

Table 1 Classification of extreme loads faced by urban drainage systems

极端荷载类别	描述	表现
外部极端荷载	排水系统入流量激增(导致原因可能为气候变化、极端降雨事件)	功能失效 ^[20-21]
内部极端荷载	管道破裂、坍塌、堵塞等	结构失效 ^{[7],[22]}

1.2 响应过程

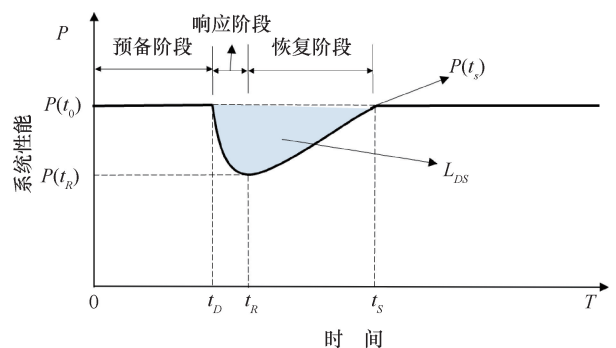
城市排水系统对极端荷载的响应过程可以划分为三个阶段, 第一个阶段是预备阶段, 是从正常运行到初始故障开始的预备阶段(本研究是基于SWMM模型进行研究的, 判断初始故障发生的依据是管网开始出现节点溢流, 因为当发生溢流之后, 会对交通产生影响, 进而造成一定的损失); 第二个阶段是响应阶段, 是系统初始故障后的损伤传播过程; 第三个阶段是恢复阶段, 是系统损失后的恢复过程。这三个阶段共同构成了系统应对灾害的循环。

预备阶段主要关注的是灾害对局部级别造成的影响, 以及如何将这些影响转化为组件级障碍。它主要反映了城市排水系统的吸收能力, 也就是抵抗可能发生的灾害的能力, 吸收不利影响, 并在灾害发生时抵抗初始水平降低, 使后果最小化的能力(见图1)。吸收能力强调了系统的静态方面^[23]。

响应阶段强调系统级效应, 将初始的局部组件障碍转化为系统级后果。它主要反映了城市排水系统的适应能力, 从时间的角度看, 无论是外部压力还是内

部压力, 它都是在压力源、稳定受扰状态下继续运行的能力, 也反映了失效事件后系统开始恢复过程的准备情况^[24]。

恢复阶段是恢复反应, 将外部努力转化为系统复原。它主要反映了城市排水系统的恢复能力, 是系统快速地恢复到正常性能或者新稳态的能力, 这涉及系统在受到突然的严重干扰后恢复到正常状态的速率、方式和程度。城市排水系统恢复措施可以使系统能够响应中断并恢复损失的功能, 一些恢复操作甚至可以提高系统相对于正常运行条件下的能力, 如果投入资源(消耗性资源如资金等, 非消耗性资源如救援队伍等), 为系统提供一定程度的抗脆弱性, 则系统灾后恢复的性能有可能超过灾前系统的性能^[25]。恢复措施包括修复损坏的系统和调整/重新配置现有排水系统结构。



t_R —系统开始恢复的时刻; t_S —系统恢复到稳定状态的时刻;
 t_D —灾害事件发生的时刻; $P(t_R)$ —系统遭遇灾害后的性能最低值;
 $P(t_S)$ —灾害发生后系统恢复的性能值; $P(t_0)$ —初始性能值

图1 城市排水系统遭遇极端荷载时的变化过程

Fig. 1 The change process of urban drainage system when it encounters extreme loads

2 考虑结构因素的城市排水系统韧性评估模型

2.1 结构失效概率分析

MUGUME 等^[26]提出了一种基于全局韧性分析方法(Global Resilience Analysis, GRA), 评估随机累积连接失效导致的各种结构失效场景时的性能。GRA的主要特点是可以评估管道结构失效程度对性能的影响, 显示每个失效模式导致的功能损失的上限和下限。然而考虑到城市排水系统在遭遇暴雨时的实际情况, 并不是所有的失效模式都会发生, 影响排水系统中管道状况的因素有很多, 包括物理因素如管龄、管径、坡度、材质、长度等, 环境因素如土壤类型、土壤 pH 值、地下水位等, 运行因素如水流速度等^[27]。

其中管龄和满管流流速是影响管道状况的重要因素。管龄与失效概率、管道满管流流速与失效概率的关系如表 2 所列^[28]。管龄较大导致管道老化严重, 造成结构性缺陷的可能性也随之增加。满管时流速过大造成管道稳定性急剧下降, 结构失效的概率也会进一步增加^[29-30]。因此本文考虑这两个结构因素进一步确定管道结构失效的模式, 从而更加准确的评估城市排水系统在完整失效情景下的性能。

城市排水系统管道结构失效概率可通过下式计算

$$p = \sum_{i=1}^n p_j \times l_i + \sum_{i=1}^n p_k \times l_i \quad (1)$$

式中, p 为结构失效概率; n 为管段总数; l_i 为第 i 个管段; p_j 为因管龄导致的失效概率; p_k 为因流速导致的失效概率。

表 2 管道结构失效概率

Table 2 Probability of structural failure

结构失效因素	范围	失效概率
管龄 a /年	$0 < a \leq 5$	0.05
	$5 < a \leq 10$	0.05
	$10 < a \leq 15$	0.06
	$15 < a \leq 20$	0.07
	$20 < a \leq 25$	0.08
满管流流速 v /m · s ⁻¹	$0 < v \leq 2$	0.01
	$2 < v \leq 4$	0.05
	$4 < v \leq 6$	0.10

表 3 基于全过程的韧性评价指标体系

Table 3 Indicator system for resilience evaluation based on the whole process

目标层	准则层	指标层	指标含义	计算方法
城市排水系统韧性评估	预备阶段	排水管网密度 (D_d)	管道总长度与集水区面积的比值, 代表流域内管网分布密度的程度。	$D_d = \frac{L_T}{A}$
	响应阶段	积水总量 (V_f) 积水时长 (T_f)	如果产生的雨水径流超过了排水设施的容量, 就会产生溢流积水现象。积水总量反映了城市排水系统的鲁棒性, 积水总量越小, 说明城市排水系统的鲁棒性越高。 积水时长反映了城市排水系统韧性中的快速性。积水时间越短, 说明城市排水系统能更快地把水排净, 反之积水时间越长, 造成的影响越恶劣。	基于水文模型 SWMM 可对排水系统进行积水分析, 获得积水总量节点平均积水时长。
	恢复阶段	恢复费用 (C_o)	恢复被洪水破坏的管道所需要支付的相关费用。恢复费用越大, 说明城市排水系统恢复能力越差; 恢复费用越小, 城市排水系统恢复能力越强。	$C_o = \sum_{i=1}^n C_i(D_i, H_i) \cdot L_i$

注: D_d 为排水管网密度 (km/km²); L_T 为区域排水管道总长度 (km); A 为集水区域面积 (km²); C_o 为恢复费用 (万元); n 为需要恢复的管道总数量; C_i 为第 i 段管道造价 (万元); D_i 为管段 i 直径 (mm); H_i 为管道 i 埋深 (m); L_i 为管道 i 长度 (m), 管道每米费用计算公式可参考文献^[32]。

表 4 排水系统韧性等级划分标准

Table 4 Criteria for classifying the resilience of drainage systems

等级	排水管网密度/km · km ⁻²	积水总量/10 ³ m ³	积水时长/h	恢复费用/万元
低韧性	$0 < D_d \leq 2$	$V_f > 400$	$1.0 < T_f \leq 3.0$	$C_o > 20$
中韧性	$2 < D_d \leq 4$	$200 < V_f \leq 400$	$0.5 < T_f \leq 1.0$	$10 < C_o \leq 20$
高韧性	$4 < D_d \leq 6$	$0 < V_f \leq 200$	$0 < T_f \leq 0.5$	$0 < C_o \leq 10$

2.2 韧性评估指标体系

排水系统的韧性可以使其在面对极端荷载时做出动态性的响应和变化, 对城市排水系统的韧性进行全过程的评价, 包括预备阶段、响应阶段和恢复阶段三个方面, 考虑抗冲击能力、适应能力和恢复能力对韧性的影响。为了减低指标信息间的交叉和重叠, 同时保证指标体系能最大限度地全面并且综合代表评价对象的状况, 在韧性评估过程中不仅要考虑技术的因素, 还要注重社会和经济的影响^[31], 从而实现多维度评估。最终确定城市排水系统韧性评价指标为: 排水管网密度、积水总量、积水时长和恢复费用。建立的城市排水系统韧性评估指标体系如表 3 所列。

2.3 韧性评估模型

根据参考文献和专家咨询结果, 通过调查分析, 为展现城市排水系统不同层面的韧性表现, 将排水系统韧性综合评价等级划分为低韧性、中韧性和高韧性三个评估等级。在分析相关文献^[33-35]、专家意见的基础上, 参照相关韧性界定标准, 各评价指标的评估等级划分标准如表 4 所列。

韧性评估过程中影响因素众多, 评估过程存在不确定性和模糊性, 为了避免上述问题, 云模型可视为韧性评估中一种可靠性较高的方法, 它已经被应用到城市安全韧性评估^[33]、供电系统韧性能力评估^[36]等

研究中。本研究所采用的云模型主要是基于正向云发生器, 它可以从定性描述中获取定量数据的分布范围和分布规律, 从定性映射到定量^[37]。正向云发生器是通过云的数字特征产生相应云滴, 云滴数量足够多时汇聚成云。

建立隶属度矩阵 $R = (r_{jk})_{m \times n}$, 其中 r_{jk} 代表因素论域 U 中第 j 个指标对评语论域 V 中第 k 个等级的隶属度。与传统模糊数学中的隶属度矩阵不同, 云模型得出的隶属度是正向云发生器运行了 N 次的平均值, 这样大大提高了评估的可信度。评价指标等级云模型和云隶属度计算公式为

$$Ex_{jk} = \frac{x_a + x_b}{2} \quad (2)$$

$$En_{jk} = \frac{x_b - x_a}{2.355} \quad (3)$$

$$He = c \quad (4)$$

$$r_{jk}^i = \exp\left\{-\frac{(x_j - Ex_{jk})^2}{2(En_{jk}^i)^2}\right\} \quad (5)$$

$$r_{jk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{jk}^i \quad (6)$$

$$b_j = \sum_{j=1}^m w_j r_{jk} \quad (7)$$

式中, Ex_{jk} 为期望; En_{jk} 为熵; He 为超熵; x_a 为评价指标等级 k 的下限; x_b 为评价指标等级 k 的上限; c 为云滴雾化程度控制常数; r_{jk} 为评价指标的云隶属度; b_j 代表评价对象在第 j 等级的隶属度。

根据最大隶属度原则, 评价对象最终综合评估的等级为隶属度最大值所在的等级。

3 案例分析

3.1 研究区概况及数据来源

研究区位于山东省东营市中心城区(位置见图2)。东营属于暖温带大陆性季风气候, 全市年平均气温 13.0℃。从 1968—2020 年间, 东营市年均降雨量为 567.9 mm^[38], 降雨量年际差异较大, 降雨多集中在夏季。东营市中心城地面高程 4.0~6.5 m, 中心城区的雨水排放主要依靠流经该市的东营河、广利河等 26 条河流。研究区位于中心城区东部, 是东城北居住片区。研究区面积为 891 hm², 地面不透水率达 90.9%, 地形分布为南高北低。研究区内布设有排水管网, 管道全长 30 371 m, 管道直径范围为 300~2 000 mm。研究区内建设有积水点监测设备。

研究区各类型数据主要分为降雨数据、排水管网现状数据和空间数据三大类, 来源如表 5 所列。其中

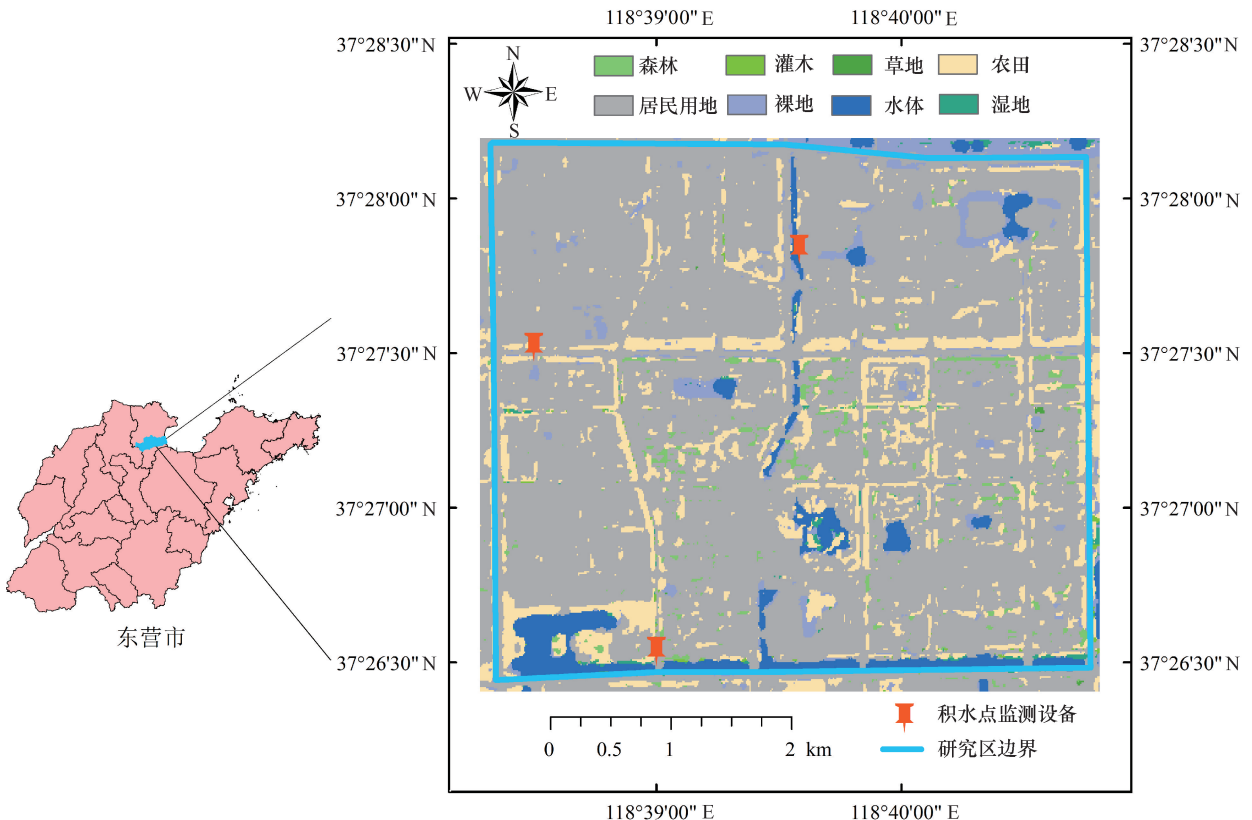


图2 研究区位置

Fig. 2 Location of the study area

管道管龄的空间分布情况如图 3 所示, 不同降雨情景下 2 h 降雨过程如图 4 所示。

表 5 各类型数据来源

Table 5 Sources of data by type

数据类型	数据来源
降雨数据	东营市水务局
排水管网数据	东营市水务局
卫星图	http://www.tuxingis.com/locaspace.html
高程数据	https://easygeodata.cn/
土地利用数据	https://easygeodata.cn/
管道管龄	《东营市城市总体规划(2001—2010)》《东营市中心城区城市排水(雨水)防涝综合规划(2015—2020)》《东营市中心海绵城市专项规划(2016—2030)》



图 3 管道管龄分布

Fig. 3 Pipeline age distribution

3.2 SWMM 模型构建

根据收集到的资料, 建立的排水系统 SWMM 模型如图 5 所示。采用动态波模型对排水系统进行水流计算。模型考虑了渗透损失和蒸发损失。研究区的入渗过程采用 Horton 模型。雨量站记录的 2018 年 8 月 18—19 日的降雨(见图 6)以及对应场次降雨的三个积水点的积水深度用于校准参数。基于 GIS 和函数拟合技术, 结合真实地表和 SWMM 模型节点溢流量计算得到积水深度变化过程。采用纳什效率系数 (NSE) 和均方根误差 ($RMSE$) 评估模型模拟结果, 计算公式为

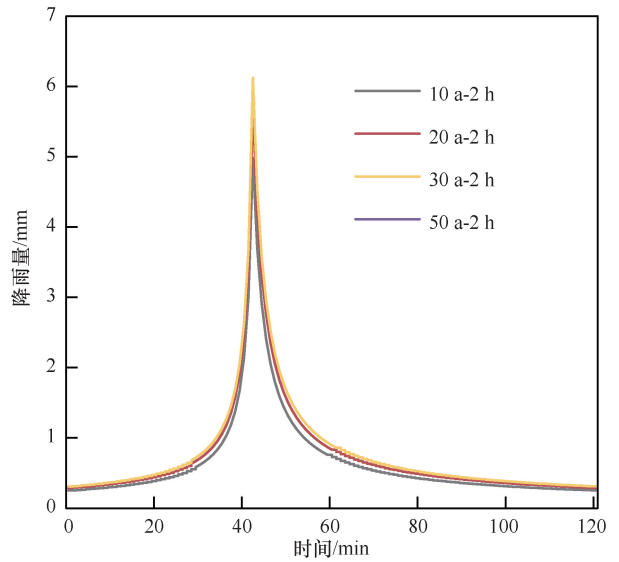


图 4 不同降雨情景下的降雨过程

Fig. 4 Rainfall processes for different rainfall scenarios

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (v_{obs}^i - v_{sim}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (v_{obs}^i - \bar{v})^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{obs}^i - v_{sim}^i)^2} \quad (9)$$

式中, v_{obs}^i 为 i 时刻的观测积水深度 (m); v_{sim}^i 为 i 时刻的模拟积水深度 (m); \bar{v} 为观测积水深度平均值 (m)。

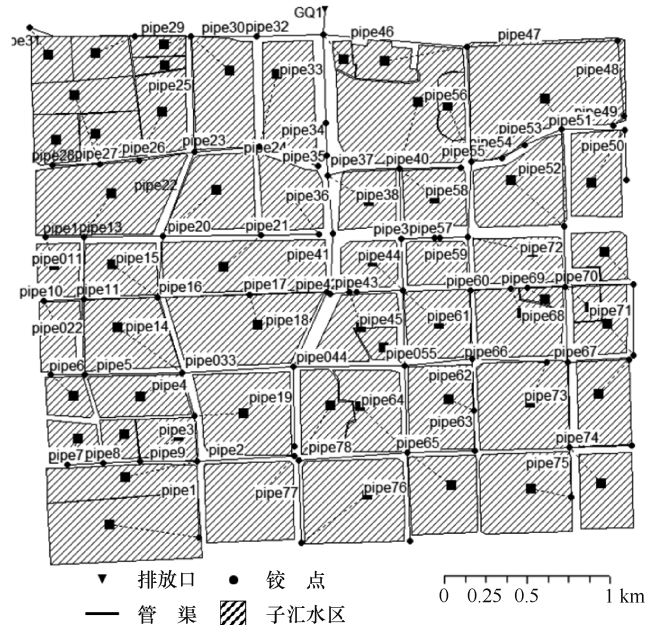


图 5 排水系统 SWMM 模型

Fig. 5 Drainage system SWMM model

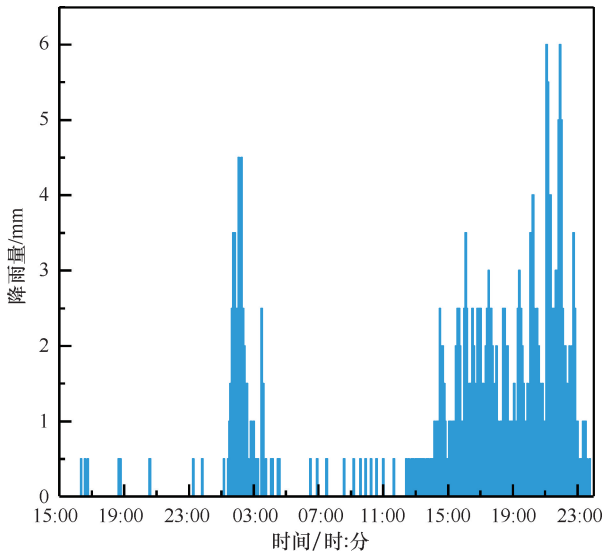


图6 降雨事件: 2018年8月18—19日
Fig. 6 Rainfall event: 18-19 August 2018

由表6结果可以看出模型纳什效率系数(*NSE*)为0.75以上, 积水点深度模拟值与观测值的均方根误差(*RMSE*)在0.040~0.049 m之间变化, 均低于0.050 m, 表明SWMM可较准确模拟水文过程, 模型是可以接受的。

表6 积水点积水深度的观测值和模拟值

Table 6 Observed and simulated values of water depths at waterlogged points

积水点编号	观测最大值 <i>V_{obs}</i> /m	模拟最大值 <i>V_{sim}</i> /m	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i> /m
积水点1	0.255	0.261	0.78	0.047
积水点2	0.238	0.217	0.81	0.040
积水点3	0.200	0.219	0.76	0.049

SWMM模型各参数率定值如表7所列, 参数值均在合理范围内。

表7 SWMM模型参数率定值

Table 7 SWMM model parameter values

参数	描述	单位	取值参考范围	率定值
<i>N</i> -Imperv	不透水区的曼宁系数	—	0.01~0.02	0.015
<i>N</i> -Perv	透水区的曼宁系数	—	0.1~0.3	0.24
<i>D</i> store-Imperv	不透水区洼地蓄水深度	mm	1~3	1
<i>D</i> store-Perv	透水区洼地蓄水深度	mm	2.5~10	6
MaxRate	最大下渗率	mm/h	30~200	40
MinRate	最小下渗率	mm/h	0.1~20	3.3
Conduit Roughness	管道糙率	—	0.001~0.1	0.012

3.3 城市排水系统韧性评估

3.3.1 失效情景选取

在失效情景构建中主要考虑两种极端荷载, 分别是超标荷载和结构失效。超标荷载主要是影响城市排水系统韧性变化的外部荷载, 结构失效主要是影响城市排水系统韧性变化的内部荷载(见图7)。

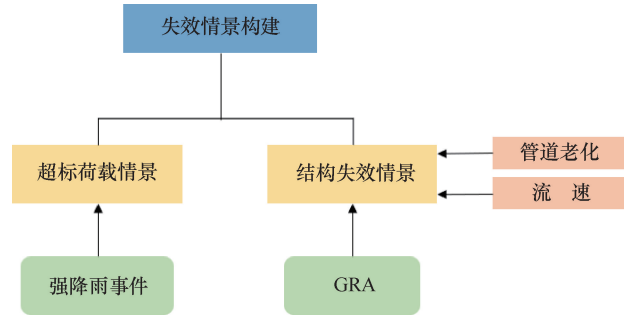


图7 失效情景构建模式

Fig. 7 Failure scenario building model

城市排水系统的韧性研究需要考虑造成城市雨洪的各种威胁, 排水系统可能会同时遭遇超标荷载与管道结构失效, 因此构建了考虑结构因素的复合情景。各失效情景组合及说明如表8所列。超标荷载情景采用极端降雨进行构建, 根据东营市暴雨强度公式, 设计10 a一遇、20 a一遇、30 a一遇和50 a一遇的降雨情景(见图4)。

表8 失效情景组合及说明

Table 8 Failure scenario combinations and descriptions

失效情景	组合	说明
超标荷载情景	10 a一遇降雨	不考虑结构因素
	20 a一遇降雨	
	30 a一遇降雨	
	50 a一遇降雨	
复合情景	10 a一遇降雨+管龄+流速	考虑结构因素
	20 a一遇降雨+管龄+流速	
	30 a一遇降雨+管龄+流速	
	50 a一遇降雨+管龄+流速	

3.3.2 不同失效情景的城市排水系统韧性分析

为了全面考虑排水系统在面临极端荷载(外部荷载+内部荷载)时的韧性, 模拟了系统在超标荷载情景和复合情景下的性能, 模拟结果(见表9)表明, 当置信度为95%时, 节点积水总量在10 a一遇的复合情景下, 节点积水总量平均值的置信区间为 $524.4 \pm 1.8(10^3 \text{ m}^3)$, 节点积水时长平均值的置信区间为 $1.01 \pm 0.03(\text{h})$ 。在10 a一遇、20 a一遇、30 a一遇和50 a一遇复合情景下的节点积水总量比相应的超标荷载情景下的节点积水总量分别多了159.5%、109.6%、87.9%和69.6%。

表 9 复合情景下的城市排水系统表现

Table 9 Performance of urban drainage systems under composite scenarios

降雨情景	节点积水总量/ 10^3 m^3		节点平均积水时长/h		恢复费用/万元 (置信度 95%时的 置信区间)
	超标荷载情景	复合情景	超标荷载情景	复合情景	
		置信度 95%时的置信区间		置信度 95%时的置信区间	
10 a 一遇	202.5	525.4 ± 1.8	0.80	1.01 ± 0.03	12.2 ± 0.4
20 a 一遇	301.8	632.6 ± 2.2	0.93	1.08 ± 0.02	18.0 ± 0.5
30 a 一遇	366.9	689.3 ± 1.9	1.03	1.19 ± 0.02	24.1 ± 0.6
50 a 一遇	456.0	773.3 ± 2.6	1.15	1.25 ± 0.01	30.7 ± 0.6

按照最大隶属度原则, 各情景下的城市排水系统韧性评价等级如表 10 所列。城市排水系统在 10 a 一遇、20 a 一遇、30 a 一遇和 50 a 一遇的超标荷载情景下, 韧性等级均为中韧性。在 10 a 一遇的复合情景下, 排水系统韧性等级为中韧性; 而在 20 a 一遇、30 a 一遇和 50 a 一遇的复合情景下, 排水系统的韧性等级降低为低韧性。

表 10 城市排水系统韧性评估结果

Table 10 Results of resilience assessment of urban drainage systems

超标荷载情景 (不考虑结构因素)	韧性等级	复合情景 (考虑结构因素)	韧性等级
10 a 一遇	中韧性	10 a 一遇	中韧性
20 a 一遇	中韧性	20 a 一遇	低韧性
30 a 一遇	中韧性	30 a 一遇	低韧性
50 a 一遇	中韧性	50 a 一遇	低韧性

3.3.3 拓扑结构优化措施的效果分析

城市排水系统的空间拓扑结构作为管道网络的系统属性对防洪性能具有显著影响, 根据文献[39]对拓扑结构进行优化。拓扑结构优化原则为: 从系统的

角度对城市排水系统进行复杂网络分析, 综合考虑排水系统网络的全局和局部属性, 检验结构稳定性。具体操作如下: 构建排水网络, 识别特征参数, 进行双层复杂网络分析, 量化评估复杂网络节点的重要性, 利用全局网络分析识别排水管网中的关键节点; 利用局部网络分析准确定位增加附加管道的位置, 结合节点实际情况, 最终确定拓扑结构优化位置引入环路。对拓扑结构优化后的城市排水系统 (Urban drainage system, UDS) 进行模拟, 模拟结果如下。由图 8(a) 可以看出, 系统 S_1 在超标荷载情景下节点积水总量均低于原有系统 S_0 , 节点积水总量在 10 a 一遇、20 a 一遇、30 a 一遇和 50 a 一遇降雨情景下分别降低了 30.1%、27.7%、26.2% 和 24.7%。从图 8(b) 中可以看出, 超标荷载情景下 S_1 的平均节点时长均低于 S_0 , S_1 在 10 a 一遇情景下的平均节点积水时长减小幅度最大, 减少了 0.14 h。

城市排水系统拓扑结构优化后, 在置信度为 95% 时, 10 a 一遇、20 a 一遇、30 a 一遇和 50 a 一遇复合情景下: 节点积水总量平均值的置信区间分别为 $395.7 \pm 1.2 (10^3 \text{ m}^3)$, $502.0 \pm 1.5 (10^3 \text{ m}^3)$,

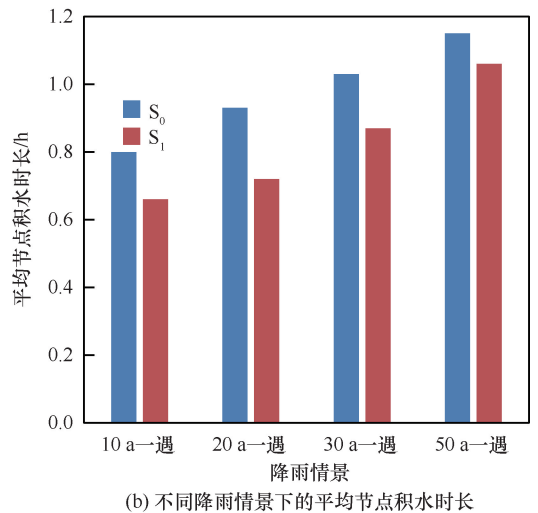
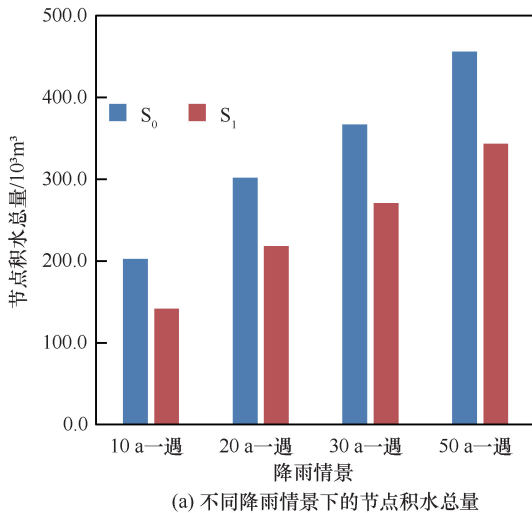


图 8 拓扑结构优化后的城市排水系统 (UDS) 在超标荷载情景下的表现 (S_0 为原有 UDS; S_1 为拓扑结构优化后的 UDS)

Fig. 8 Performance of the topology-optimized urban drainage system (UDS) under the exceeding load scenario (S_0 is the original UDS; S_1 is the topology-optimized UDS)

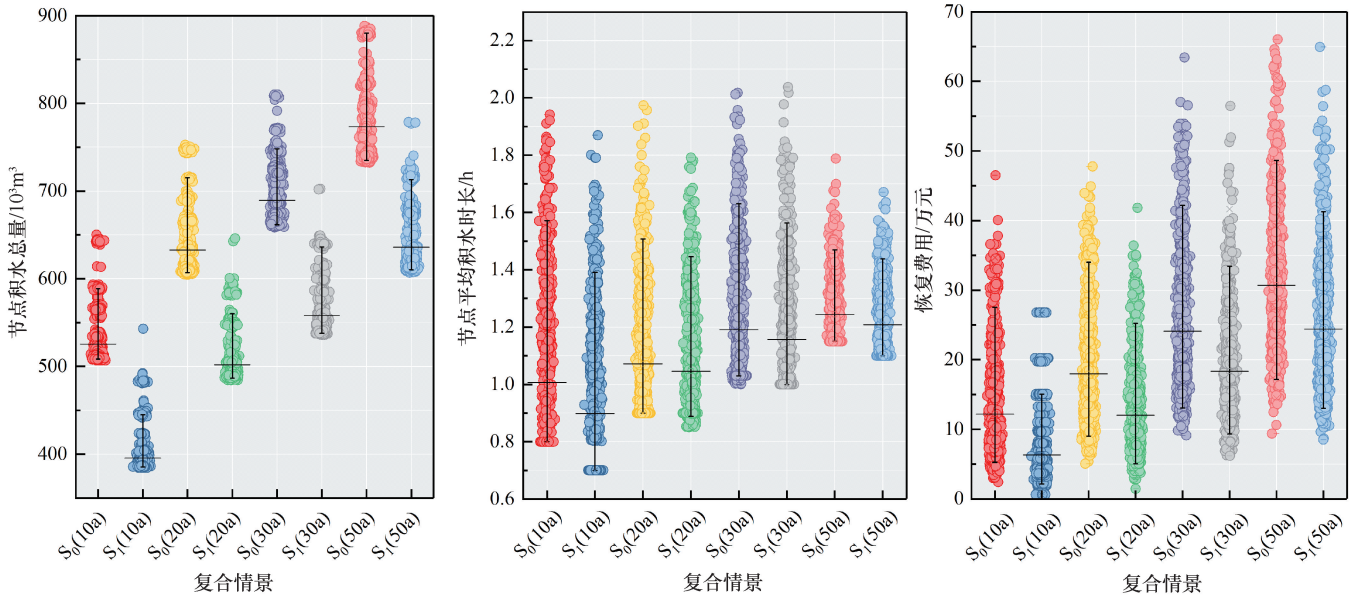


图9 拓扑结构优化后的城市排水系统(UDS)在复合情景下的表现(S_0 为原有UDS; S_1 为拓扑结构优化后的UDS)

Fig. 9 Performance of topology-optimized urban drainage system (UDS) under composite scenarios (S_0 is the original UDS; S_1 is the topology-optimized UDS)

558.4±1.7(10³ m³), 636±1.9(10³ m³), 城市排水系统节点积水总量平均值比拓扑结构优化前分别减少了24.7%、20.6%、19.0%和17.8%;节点平均积水时长平均值的置信区间分别为0.90±0.02(h)、1.05±0.02(h)、1.16±0.02(h)和1.21±0.01(h);恢复费用平均值的置信区间分别为6.3±0.4(万元)、12.0±0.4(万元)、18.3±0.5(万元)和24.4±0.5(万元),城市排水系统恢复费用平均值比拓扑结构优化前的分别减少了48.4%、33.3%、24.1%和20.5%(见图9)。

根据最大隶属度原则,在10a一遇复合情景(考虑结构因素)下,排水系统在拓扑结构优化前后的韧性综合评估等级都属于中韧性,随着降雨重现期的增加,未进行拓扑结构优化的城市排水系统韧性在20a一遇的复合情景下等级降低为低韧性,30a一遇和50a一遇复合情景下均为低韧性;而拓扑结构优化后的城市排水系统在20a一遇和30a一遇复合情景下的韧性等级仍为中韧性,在50a一遇复合情景下韧性等级降低为低韧性(见图10)。

4 结果讨论

本研究在分析结构失效概率的基础上,构建了考虑极端降雨事件的超标荷载情景和考虑结构因素的复合情景,共计8种失效情景组合,开展了多情景下城市排水系统韧性对不同

极端荷载的响应规律解析。结果表明,复合情景(考虑结构因素)下的节点积水总量和节点平均积水时长均大于相应超标荷载情景(不考虑结构因素)下的值,而且复合情景下的韧性等级有所下降。这是由于结构

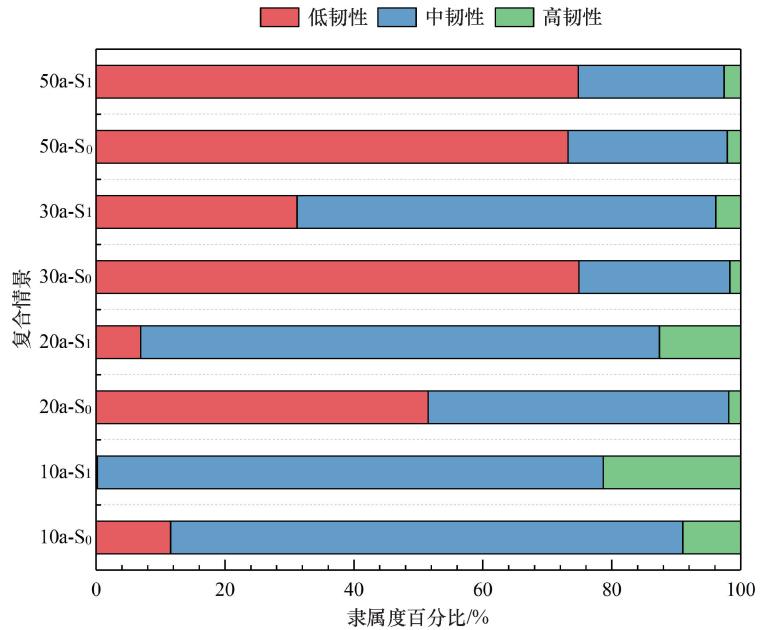


图10 复合情景(考虑结构因素)下城市排水系统拓扑结构优化前后韧性评估结果(S_0 为原有UDS; S_1 为拓扑结构优化后的UDS)

Fig. 10 Results of resilience assessment of urban drainage system before and after topology optimization under composite scenario (considering structural factors) (S_0 is the original UDS; S_1 is the UDS after topology optimization)

失效会降低系统的输送能力, 最终使系统更容易受到洪水的影响。对拓扑优化前后的排水性能表现进行模拟分析, 通过引入管道(增加环路)增加冗余, 可提高城市排水系统的韧性, 在极端事件期间发挥重要作用, 上述结论与以往研究结果是一致的^[17,19]。

气候变化导致城市可能会面临越来越多的极端天气, 然而对于城市排水系统来说, 面临的不仅是极端降雨, 还可能在运行中受到结构破坏。尤其是随着运行年限的增加, 一个管道结构失效可能会导致多个节点出现被淹的情况, 从而导致城市排水系统整体恢复能力的下降, 从管理的角度分析, 对于系统结构失效必须加以重视^[40]。因此, 在研究中提出了考虑管龄和流速的结构失效概率计算方法。充分考虑排水系统内部和外部的不确定性, 当异常荷载出现时, 可以最小化系统功能的损失, 使其具有更好的性能和韧性, 减少意外荷载对城市排水服务的影响。

城市排水系统在面临异常荷载作用前中后期可以调配的资源, 包括消耗性资源(资金)和非消耗性资源(救援队伍等)在本研究中未进行深入的探讨。本研究重点关注了结构因素和拓扑结构优化措施对于城市排水系统韧性及其提升的影响。虽然已有研究表明排水系统拓扑结构优化是提高城市排水系统韧性成本效益更高的方法^[41], 但是上述资源对城市洪涝灾害预防、抵御和恢复都会造成影响。因此在未来的研究中应充分考虑这些可以整合利用的外部资源, 从而提高城市排水系统应对可能出现的极端荷载下的反应能力和反应速度。

5 结论

针对城市排水系统在极端荷载下的韧性评估问题, 提出了结合响应过程的韧性评估指标, 构建了考虑结构失效的城市排水系统韧性评估模型, 并利用该模型对研究区排水系统在不同失效情景下的韧性表现进行了模拟和评估。

(1) 结合城市排水系统对极端荷载响应过程的预备阶段、响应阶段和恢复阶段, 提出相应的韧性评估指标, 对城市排水系统韧性进行了全过程评价, 进一步完善了城市排水系统韧性评估理论。

(2) 本文所提方法能够有效分析管道结构失效概率, 相较于传统方法考虑了管龄和流速的影响, 贴近城市排水系统在遭遇极端荷载时的实际情况, 从而能够得到更加准确和全面的韧性评估结果。

(3) 管道结构失效会增加城市排水系统在极端荷载下的积水总量和平均积水时长, 同时造成恢复费用

的产生, 降低了系统韧性。拓扑结构优化措施可提高城市排水系统的性能表现, 在一定程度上提升系统韧性。

参考文献(References):

- [1] WU Y W, YU G Y, SHAO Q X. Resilience benefit assessment for multi-scale urban flood control programs[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613 (3): 128349.
- [2] 刘波, 戎贵文, 陈情情, 等. 基于 SWMM 的 LID 设施分区布局及减排效益[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21 (5): 930-939.
LIU B, RONG G W, CHEN Q Q, et al. Regional distribution and mitigation benefit of LID facility based on SWMM[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21 (5): 930-939.
- [3] PARK J, SEAGER T, RAO P, et al. Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems[J]. *Risk Analysis*, 2012, 33(3): 356-367.
- [4] 王凯丰, 张洪斌, 力刚, 等. 城市洪涝韧性的研究进展及关键支撑技术综述[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(11): 77-88.
WANG Kaifeng, ZHANG Hongbin, LI Gang, et al. Advances in urban flood resilience study and its key supporting technologies review [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(11): 77-88.
- [5] 鲁佳慧, 刘家宏, 刘创, 等. 城市排水系统韧性评估研究进展[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(1): 1-10.
LU Jiahui, LIU Jiahong, LIU Chuang, et al. Research progress on urban drainage system resilience evaluation [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(1): 1-10.
- [6] LEE E H, LEE Y S, JOO J G, et al. Investigating the impact of proactive pump operation and capacity expansion on urban drainage system resilience[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(7): 04017024.
- [7] CASAL-CAMPOS A, SADR S, FU G, et al. Reliable, resilient and sustainable urban drainage systems: An analysis of robustness under deep uncertainty[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(1): 9008-9021.
- [8] MCCLYMONT K, FERNANDES C, MAIDMENT C, et al. Towards urban resilience through sustainable drainage systems: A multi-objective optimization problem[J]. *Journal of Environment Management*, 2020, 275(3): 111173.
- [9] MOHAMMADIUN S, YAZDI J, HAGER J, et al. Effects of bottleneck blockage on the resilience of an urban stormwater drainage system[J]. *Hydrological Science Journal*. 2020, 65 (2): 281-295.

- [10] GUPTHA G C, SWAIN S, AL-ANSARI N, et al. Evaluation of an urban drainage system and its resilience using remote sensing and GIS [J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, 23(1): 100601.
- [11] JAFARI F, MOUSAVI S J, KIM J H. Investigation of rainfall forecast system characteristics in real-time optimal operation of urban drainage systems[J]. *Water Resources Management*, 2020. 34 (5): 1773-1787.
- [12] WANG L Y, LI R Y, DONG X. Integrated modeling of urban mobility, flood inundation, and sewer hydrodynamics processes to support resilience assessment of urban drainage systems[J]. *Water Science & Technology*, 2024, 90 (1): 124-141.
- [13] BAKHSHIPOUR A, HESPEN J, HAGHIGHI A, et al. Integrating structural resilience in the design of urban drainage networks in flat areas using a simplified multi-objective optimization framework [J]. *Water*, 2021, 13(3): 269.
- [14] XU Z, DONG X, ZHAO Y, et al. Enhancing resilience of urban stormwater systems: Cost-effectiveness analysis of structural characteristics[J]. *Urban Water Journal*, 2021, 18(10): 1-10.
- [15] FARAHMAND H, DONG S, MOSTAFAVI A. Network analysis and characterization of vulnerability in flood control infrastructure for system-level risk reduction [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 89(Suppl C): 101663.
- [16] 魏瑛侠, 邱顺添, 刘洋, 等. 不同拓扑结构雨水管网对系统承涝韧性的影响[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(11): 129-136.
WEI Yingxia, KHU Soonthiam, LIU Yang. Impact of topological structure on waterlogging resilience of storm sewer network[J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(11): 129-136.
- [17] YAZDI J. Improving urban drainage systems resiliency against unexpected blockages: a probabilistic approach [J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(11): 4561-4573.
- [18] DIAO K, SWEETAPPLE C, FARMANI R, et al. Global resilience analysis of water distribution systems[J]. *Water Research*, 2016, 106(0): 383-393.
- [19] XU K, ZHANG X F, BIN L L, et al. An improved global resilience assessment method for urban drainage systems: A case study of Haidian Island, south China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 360: 121135.
- [20] VELDHUIS J. Quantitative risk analysis of urban flooding in lowland areas[M]. The Netherlands: Water Management Press, 2010.
- [21] 王君娴. 应对内涝灾害的城市韧性指标体系与评估模型[D]. 南京: 东南大学, 2020.
WANG Junxian. Urban Resilience Index System and Evaluation Model in Response to Waterlogging Disasters [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [22] MUGUME S N, GOMEZ D E, FU G, et al. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems [J]. *Water Research*, 2015, 81: 15-26.
- [23] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 1-13.
- [24] TRAN H, BALCHANOS M, DOMERÇANT J, et al. A framework for the quantitative assessment of performance-based system resilience [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 158: 73-84.
- [25] TALEB R, DOUADY. Mathematical definition, mapping, and detection of (anti) fragility [J]. *Quantitative Finance*, 2013, 13(11): 1677-1689.
- [26] MUGUME S N, BUTLER D. Evaluation of functional resilience in urban drainage and flood management systems using a global analysis approach[J]. *Urban Water Journal*, 2016, 14(7): 727-736.
- [27] MALEK M M, NAJAFI M, SALEHABADI N, et al. Predicting condition of sanitary sewer pipes with gradient boosting tree[C]// FELIPE J. Pipelines 2020: Condition Assessment, Construction, Rehabilitation, and Trenchless Technologies. San Antonio, Texas: ASCE Press, 2020: 80-89.
- [28] SALMAN B, SALEM O. Modeling failure of wastewater collection lines using various section-level regression models [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2012, 18(2): 146-154.
- [29] 夏金华, 夏伯海. PVC-U 排水管道在满管流状态下的工况分析及安装特点[J]. *工程设计与建设*, 2004, 36(5): 32-34.
XIA Jinhua, XIA Bohai. Analysis of working condition and installation features of PVC-U drainage pipe under full pipe flow state [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2004, 36(5): 32-34.
- [30] HAWARI A, ALKADOUR F, ELMASRY M, et al. Condition assessment model for sewer pipelines using fuzzy-based evidential reasoning [J]. *Australian Journal of Civil Engineering*, 2018, 16(1): 23-37.
- [31] CAO F, XU X, ZHANG C, KONG W. Evaluation of urban flood resilience and its space-time evolution: A case study of Zhejiang Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110643.
- [32] 刘金宁, 王伟, 邵志国. 水旱灾害下青岛市供水系统韧性能力评估及提升[J]. *防灾科技学院学报*, 2020, 22(4): 9-19.
LIU Jinning, WANG Wei, SHAO Zhiguo. Resilience capacity assessment and promotion strategy of water supply system in qingdao under flood and drought disasters [J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 2020, 22(4): 9-19.
- [33] 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.
- [34] PEI J, LIU W, HAN L. Research on evaluation index system of chi-

- nese city safety resilience based on delphi method and cloud model [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(20): 3802-3837.
- [35] DOYLE A, HYNES W, PURCELL S M, et al. Exploring the role of planning in urban resilience enhancement—an Irish perspective[J]. *Urban Disaster Resilience and Security*, 2018, 1(3): 27-39.
- [36] 于松源, 张峻松, 元志伟, 等. 计及热惯性的热电联产虚拟电厂韧性提升策略[J]. *发电技术*, 2023, 44(6): 758-768.
- YU S Y, ZHANG J S, YUAN Z W, et al. Resilience enhancement strategy of combined heat and power-virtual power plant considering thermal inertia[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(6): 758-768.
- [37] 李巍. 基于云模型及改进可变模糊集合的中国溃坝风险后果评价[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- LI Wei. Study on risk consequence evaluation of dam break in China model and improved variable fuzzy sets[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [38] 刘玉斌, 韩美, 倪娟. 东营市近 46 年降水变化特征分析[J]. *科技通报*, 2017, 33(2): 18-23.
- LIU Yubin, HAN Mei, NI Juan. Analysis of change characteristics of precipitation in recent 46 years in Dongying[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2017, 33(2): 18-23.
- [39] LU J H, LIU J H, YU Y D, et al. Network structure optimization method for urban drainage systems considering pipeline redundancies [J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2022, 13(5): 793-809.
- [40] OSHEEN, KANSAL M L, Bisht D S. Evaluation of an urban drainage system using functional and structural resilience approach[J]. *Urban Water Journal*, 2022, 20(10): 1794-1812.
- [41] HESARKAZAZI S, HAJIBABAEI M, REYES-SILVA J D, et al. Assessing redundancy in stormwater structures under hydraulic design [J]. *Water*, 2020, 12(4): 1003.

(责任编辑 王海锋)