山东农业大学学报(自然科学版),2026,57(4):583-597 VOL.57 NO.4 2026
Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition) doi:10.3969/j.issn.1000-2324.2026.04.001

考虑地下管网健康状态的城市内涝韧性评估模型研究

鹿 伟[1,2],孟凌霄[2],刘春雷[3],宋晓龙[4],胡晓旭[4],许英东[2],张艺文[2*]

1. 中国海洋大学工程学院，山东 青岛 266404
2. 中国建设基础设施有限公司，北京 100044
3. 山东农业大学基建处，山东 泰安 271018
4. 新汶矿业集团有限责任公司，山东 泰安 271200

摘 要：随着降雨持续加强与城市化快速发展，城市内涝已成为全球范围内广泛关注的城市治理难题。在此背景下，韧性城市已成为指导城市建设与设施运维的重要理念。本文针对城市地下排水管网健康状态与降雨-内涝演化过程的动态耦合关系，采用InfoWorks ICM模拟与熵权法相结合的方法，量化分析了排水管网病害对局部城市区域内涝韧性的影响规律。研究结果表明：(1)将管网病害作为重要因素纳入内涝韧性指标体系后，压力层权重由0.206 0大幅提升至0.402 1，成为主导性准则层，其中管网淤堵数、管网断裂数权重值分别为0.162 0、0.067 3，成为核心的消极指标，合计贡献总权重的22.93%。可见，排水管网病害是城市内涝积水的重要诱因；(2)内涝韧性指数与区域排水管网健康状态呈正相关，即区域排水管网病害程度越低，内涝韧性指数越高，该区域对内涝的消纳韧性水平越高。(3)针对不同韧性等级区域的内涝防控，提出差异化韧性提升策略，高韧性区域需以精细化常态运维为主；中韧性区域需聚焦管网病害修复与雨污分流改造；低韧性区域则应开展生态化改造，根本性地提升区域蓄洪能力。本研究所构建的评估方法可为类似区域的韧性评估奠定基础，为更科学的城市规划、管网改造与内涝应急响应决策提供依据。

关键词：内涝韧性；管网病害；InfoWorks ICM；熵权法；韧性指标

中图法分类号：TV877 **文献标识码：A** **文章编号：**1000-2324(2026)04-0583-15

Research on Urban Flooding Resilience Assessment Model Considering the Health Status of Underground Pipeline Network

LU Wei[1,2], MENG Ling-xiao[2], LIU Chun-lei[3], SONG Xiao-long[4], HU Xiao-xu[4], XU Ying-dong[2], ZHANG Yi-wen[2*]

1. *College of Engineering/Ocean University of China, Qingdao 266404, China*
2. *China Construction Infrastructure Corporation, Beijing 100044, China*
3. *Infrastructure Department of Shandong Agricultural University, Taian 271018, China*
4. *Xinwen Mining Group Co., LTD., Taian 271200, China*

Abstract: As rainfall continues to intensify and urbanization rapidly advances, urban flooding has become a widely concerned urban governance challenge globally. In this context, resilient cities have emerged as a crucial concept guiding urban construction and infrastructure maintenance. Focusing on the dynamic coupling between the health status of urban drainage networks and the evolution process of rainfall-induced waterlogging, this study quantitatively analyzes the impact of drainage network defects on the waterlogging resilience within local urban areas by combining InfoWorks ICM simulation with the entropy weight method. The research findings indicate that: (1) After incorporating network defects as an important factor into the waterlogging resilience index system, the weight of the pressure layer increases significantly from 0.206 0 to 0.402 1, making it the dominant criterion layer. Specifically, the weights of network blockage count and network fracture count are 0.162 0 and 0.067 3, respectively, serving as core negative indicators, contributing 22.93% to the overall weight. Evidently, drainage network defects are a significant cause of urban waterlogging; (2) The waterlogging resilience index is positively correlated with the health status of regional drainage networks, meaning that the lower the degree of network defects, the higher the waterlogging resilience index, indicating a higher level of resilience to waterlogging in the area. (3) For waterlogging prevention and control in areas with different resilience levels, differentiated resilience enhancement strategies are proposed. High-resilience areas should prioritize refined routine operation and maintenance; medium-resilience

收稿日期：2026-02-01 **修回日期：**2026-06-17

基金项目：中建股份科技研发计划资助(CSCEC-2024-Z-31)；国家自然科学基金(52309132)

第1作者简介：鹿 伟(1990-)，男，博士，副教授，研究方向：水利基础设施韧性提升与智慧运维。E-mail：lu.wei@ouc.edu.cn

***通讯作者：**Author for correspondence. E-mail：3170283653@qq.com

areas should focus on network defect repair and rainwater-sewage diversion renovation; low-resilience areas should undertake ecological renovation to fundamentally enhance regional flood storage capacity. The evaluation method established in this study can lay a foundation for resilience assessment in similar areas and provide a basis for more scientific urban planning, pipe network renovation, and emergency response decision-making for waterlogging.

Keywords: Urban flood resilience; pipeline defects; infoWorks ICM; entropy weight method; resilience indicators

当前，全球城市化进程持续加速，受气候急剧变化影响，城市极端降水事件频繁发生，城市内涝灾害的影响范围呈显著扩大趋势，成为世界各国城市治理中面临的共性挑战[1]。从城市自身发展维度看，硬化路面、建筑物等不透水地表取代了自然地表，不透水面积急剧扩张，直接造成了绿地等透水空间的大幅减少，使得雨水下渗能力显著下降，地表径流系数大幅提高，汇流速度与洪峰流量随之剧增[2]。而大多数城市缺乏应对此类问题的经验储备，现有排水设施设防标准偏低，且老化失修问题突出，其排水能力难以匹配现阶段的雨洪防治需求，进一步加剧了城市内涝风险[3]。在过去 30 年中，中国受内涝灾害影响产生的经济损失和人员数量约占世界洪灾总量的 10%[4,5]。应急管理部统计数据表明，2023 年中国约有 5 278.9 万人受到内涝灾害的影响，导致 309 人死亡或失踪，直接经济损失达 2 445.75 亿元人民币[6]。

当前，国内外学者开展城市韧性评估时，普遍采用指标体系对其进行综合评估。Jiménez 等[7]从经济、环境和制度等 6 个指标维度构建了城市韧性评价指标体系，实现了区域综合多维复原力指数的验证，进而对洪水易发区域的城市韧性特征进行分析。任捷等[8]基于 PSR 理论框架构建了黄河流域城市内涝韧性评价模型，并运用自然间断点法对城市内涝韧性体系三维度指标进行了时空演化分析。代鑫等[9]以占地约 4.2 km^2 的社区为研究对象，开展了降雨情景模拟、内涝韧性计算与压力测试，结果表明，受暴雨影响时，社区洪涝韧性与小时降雨强度呈正相关关系，且易涝点积水主要源于路面低洼、管网排水能力不足、上游检查井溢流等问题。Liu 等[10]通过分析 12 年间黄河流域 35 个城市的抗洪能力及其时空演化模式、空间相关性和决定因素，证明了城市排水效率、市政投资、韧性规划和城市化对抗洪能力有显著积极影响。Wang 等[11]构建了一个反映城市流动性、洪水淹没和下水道流体动力学过程的动态分析模型，从财产损失和城市流动性角度评估了城市排水系统在降雨事件下的韧性，研究了城市内涝韧性与基础设施状态之间的关联，开展了洪水淹没水动力过程的精细化动态模拟。Xu 等[12]量化了依托城市抵抗内涝灾害的韧性程度，结果表明研究区域洪涝韧性水平与易涝点数量呈正相关。上述研究在城市内涝过程模拟与评估方面开展了系列研究，取得了丰硕的研究成果。但是，受限于指标数据获取难度、空间精度等因素，现有研究多以宏观尺度的城市、流域或中等尺度的社区为研究对象，且大多基于统计数据，评估结果未能对灾害过程和内涝成因进行反演，尤其未能综合考虑排水管网病害的影响，对于排水设施诊断与运维尚缺乏理论指导。

近年来，部分城市排水管网的结构性缺陷与功能性退化问题十分显著，主要体现在以下两方面：其一，部分排水管道年久失修，管口脱节、管道破裂等问题普遍存在，显著破坏了排水系统的完整性，造成雨水在输送过程中的无效渗漏，严重削弱排水效率，甚至引发周边岩土体内孔隙水压增大，进而诱发地面沉降等次生灾害；其二，流速高、水量大的道路行洪雨水携带大量泥沙与固体垃圾进入地下管网，造成管网内部淤堵、连通性不足，直接阻碍了泄洪通道的过流能力，导致雨水在管网局部积聚，严重时造成雨水及污水冒溢，可能引发严重的交通风险与人员伤亡（图 1）。上述问题对城市洪涝韧性存在显著影响，而现有韧性评估模型未能对管网病害的影响进行准确量化。在排水管网与内涝韧性的耦合分析方面，部分学者将水动力模型计算的危险性指标纳入评价体系，提高了韧性评估的时空粒度[13,14]。徐宗学等[15]对研究区进行了 SWMM 暴雨-洪水模拟，得到了不同情景下城市内涝韧性的动态演化及影响因素，并将暴雨水动力过程与系统涌现特征纳入了城市内涝韧性评估框架，得到了城市排水系统与内涝韧性增量的关系。王银堂等[16]基于韧性“4R”理论构建了涵盖自然与社会维度的城市内涝灾害应对韧性评价指标体系，采用水文水动力模拟、内涝风险评估等技术，通过

XGBoost 算法证明了积水深度、积水持续时间、排水管网密度和降雨强度是韧性评价的主导因子,实现了水动力模拟与韧性评估的耦合,提出了排水管网密度对城市内涝韧性的关键作用。肖风林等[17]利用 GIS 空间分析技术对宜城街道进行韧性评估,并采用 G1 法和熵权法对评价指标进行了组合赋权,考虑道路积水点、排水管网密度,从内涝灾害暴露度、敏感性、适应力和恢复力 4 个维度,对街道内部四个主体区域内涝灾害韧性进行了评估。上述研究在刻画城市排水系统时均将其简化为均匀介质,未考虑管道病害对管网排水效率损失及冒溢点形成中的驱动作用。随着降雨强度的快速增大与城市更新的持续推进,内涝成因分析与韧性评估效能不足的问题日益凸显,亟需建立能充分考虑地下排水管网健康状态的韧性评估模型。

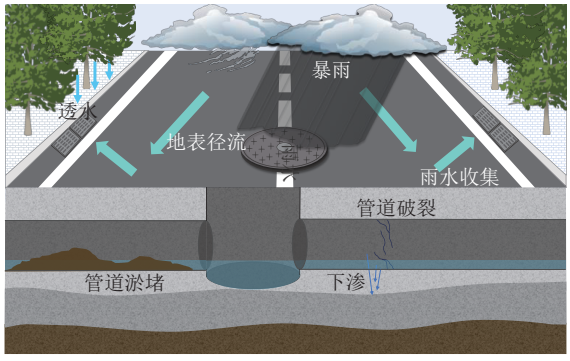


图 1 管网病害三维示意图

Fig. 1 Three-dimensional schematic diagram of pipe network disease

在此基础上,本研究针对当前城市内涝频发、现有模型无法量化排水管网健康状态的影响等问题,以街区为基本单元,利用 InfoWorks ICM 模拟研究区域在暴雨情景下的积淹情况,揭示管网性能对城市内涝积水的影响。引入排水管网病害作为重要指标因素,建立基于压力-状态-响应(PSR)模型的城市内涝韧性指标体系,通过熵权法计算并比较不同排水管网健康状态影响下的内涝韧性指标权重结果,构建管网健康、内涝风险与内涝韧性一体化评估框架,厘清管网健康状态与内涝韧性的内在关联,为城市内涝精准防控与排水系统韧性提升提供科学支撑。

1　依托工程概况与模型构建

1.1　依托工程概况

本文的依托工程位于山东省济南市市中区大涧沟片区,地处济南市中心城区范围内,该片区内涝问题突出,成因复杂,涉及工程建设缺陷以及自然地理条件等多方面因素。从自然条件来看,该片区每遇强降雨,南侧石房峪山和北侧青龙山山洪迅速向该区域汇集,而二环南路的排水系统承载能力有限,同时雨污分流项目施工改造期间部分雨水管网不通畅,导致雨水难以收集和及时排出。道路方面,由二环南路、济微路等构成交通骨架,积水点处于二环南路与济微路交汇的关键地带;山体上,青龙山、郎茂山、石房峪山、万灵山等形成北、东、南三面环山的格局,如图 2;河道与沟渠有大涧沟、文庄沟等河道,还有龙窝沟、九曲沟等山洪沟从南部山体向北直指积水点,雨水管沿道路分布。降雨时,南部山体的山洪沿九曲沟、龙窝沟等快速下泄,东北、西北山体汇水也向中间聚集,积水点处于多股汇水的咽喉地带。

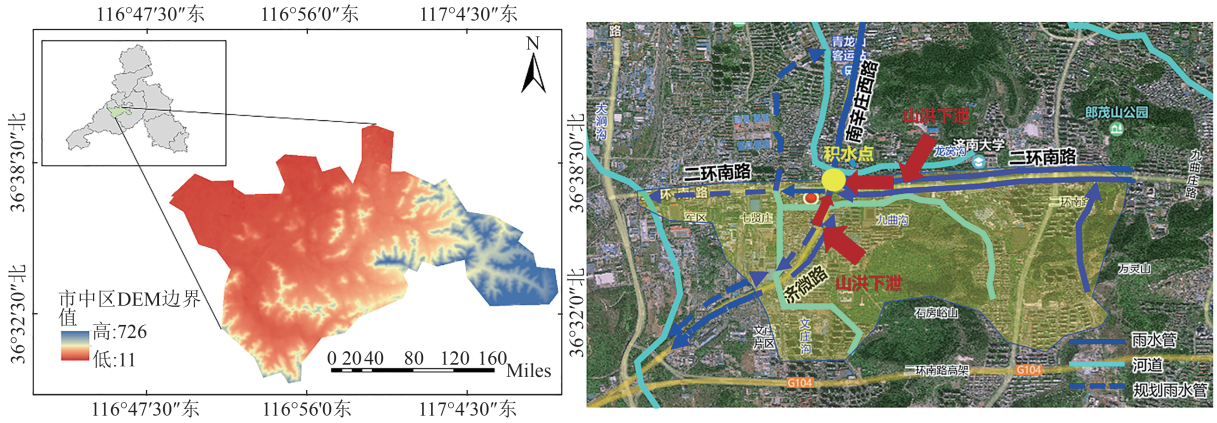


图 2 研究区域高程和研究点位地理位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the elevation of the study area and the geographical location of the research point

通过现场调研发现，片区排水管网设施年久失修，管道老化严重，存在结构性和功能性缺陷问题：首先，部分管道为上世纪建设的混凝土管和砖砌暗渠，其设计理念并未考虑到现代城市排水需求的变化，使用年限已超过设计寿命。其次，排水管道出现破裂、错口、塌陷等现象（图3），不仅导致排水能力大幅下降，还引发了管道堵塞和环境污染。同时，该片区正在进行雨污分流项目施工，施工完成前封闭了部分雨水管网，造成雨水排出路径不通畅，导致该区域内涝风险极高，积水点附近的交通干道和居民区出现交通瘫痪、居民出行困难等问题，更对房屋建筑、地下空间、电力设施等城市基础设施构成威胁。因此，亟需对该区域内涝风险进行全面评估和韧性提升。



图3 管道结构性缺陷

Fig. 3 Structural defects of pipelines

注：图（a）代表管道塌陷；图（b）代表管道淤堵；图（c）代表管道破裂。

Note:Figure (a) represents pipeline collapse; Figure (b) represents pipeline blockage; Figure (c) represents pipe rupture.

1.2 基于 Infoworks ICM 的依托工程水动力模型构建

基于研究区域排水管网系统、地面高程、下垫面类型等基础数据，本文采用 InfoWorks ICM 软件构建了一维管网水力模型与二维地表漫流模型相耦合的水动力学模型，用于模拟不同降雨情景下的城市内涝过程。研究区域总面积为 598.851 hm^2，土地利用类型中建筑占比 8.907%，道路占比 4.8%，草地占比 4.504%，其他用地占比 81.798%。借助 InfoWorks ICM 中的面积提取工具（Area Take Off，ATO）对各土地利用类型进行划分并分配模型参数，实现了对不同降雨重现期下内涝积水情况的动态模拟。在模型构建过程中，采用了分辨率为 1 m×1 m 的 DEM 数据，以准确反映区域地形起伏与汇流路径，模型下游排水出口均采用自由出流边界条件，水流可自由泄出，无下游水位顶托影响，能够真实还原管网在无外水顶托下的排水与溢流过程。

1.3 基于现场雨洪信息监测的模型修正

为了实时监测研究片区的雨洪信息，并结合监测结果对 InfoWorks ICM 水动力模型进行参数率定和校准修正，本文在研究片区选择了二环南路箱涵处、济微路和二环南路交叉口、七贤办事处北门、龙窝沟、济微路五处具有代表性的监测点位。其中，二环南路箱涵处、济微路和二环南路交叉口、七贤办事处北门、龙窝沟东西两侧箱涵均布设了多普勒流量计和电子水尺，用于监测流量和积水水位变化趋势；二环南路布置了翻斗式雨量计记录降雨事件序列。各监测设备将积水水位、关键流量及降雨强度等数据实时上传至云端监测平台，实现雨洪过程动态可视化，为后续洪涝模拟与韧性评估提供可靠数据支撑。

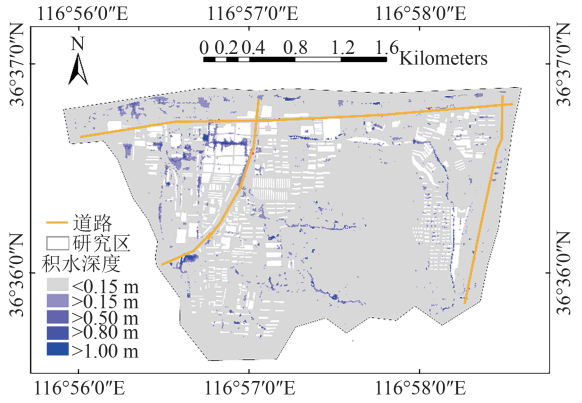


图4 易涝区数值模型图

Fig. 4 Numerical model diagram of waterlogging area

在 Infoworks ICM 模型中，需对所构建的产、汇流模型进行参数设置。本研究采用固定径流系数模型，需要确定模型中的径流系数、曼宁系数

和渗透系数等关键参数。其中,径流系数与曼宁系数可参考《室外排水设计标准》(GB50014-2021)[18]和 Infoworks ICM 模型手册中的规定要求;渗透系数根据研究区土壤质地、下垫面类型及压实程度综合取值,并结合研究区域的地形情况和下垫面分类情况进行综合确定,如表 1 所示。



图 5 监测设备安装图

Fig. 5 Installation diagram of monitoring equipment

表 1 渗透系数参考表

Table 1 Permeability coefficient reference table

下垫面类型 Type of underlying surface	渗透系数/(mm/min) Permeability coefficient
自然绿地 Natural green space	0.20-0.60
压实绿地 Compact the green area	0.05-0.20
透水混凝土/透水砖 Permeable concrete/Permeable bricks	0.50-2.00
黏土/压实裸地 Clay/Compacted bare land	0.01-0.05
屋面、沥青、混凝土 Roof, Asphalt, Concrete	0.00

本文对依托片区进行了大量降雨监测与数值模拟校准,以曼宁系数、渗透系数和径流系数作为核心校准指标,采用单变量分析法进行参数调整,每次仅调整一个核心参数,固定其他参数,观察模拟误差的变化趋势,确定参数的最优取值范围,避免多参数同时调整导致的误差叠加,确保参数调整的科学性和针对性。同时模型校准以模拟峰值流量与实测峰值流量误差严格控制在 15% 以内,如图 6(参数校正 WZG10.1 管道流量对比图)所示,该断面模拟流量与实测流量峰值误差满足控制要求。对于误差超标的情况,回溯校准步骤,重点检查数据预处理质量和参数取值合理性,重新调整参数直至误差达标,以实现模型对易涝区的精细化模拟。

2　考虑管网健康状态的城市内涝案例分析

建立管网健全的无病害模型作为基准模型,模拟正常降雨条件下的管网运行状态来评估雨水管网的排水能力,通过修正管网水力参数模拟现场观测到的管网病害类型,模拟管网性能对城市内涝积水的影响情况,如溢流点和相同降雨条件下管道流量的变化情况,进而证明管网健康状态对城市韧性评估的重要作用。

2.1　病害一:排水管道断裂

根据实际情况,选取研究区域七贤办事处路南侧管网因雨污水改造而产生断裂的管网作为本次研究“病害一”的研究对象。该区域

管网因2024年雨污分流改造工程施工扰动，局部管段出现结构性损伤，造成下游管道封堵。为量化该病害对区域积淹的影响，采用InfoWorks ICM排水系统模拟软件构建研究区域水力模型。模拟区域边界条件依据大涧沟城市排水工程专项规划设定：上游汇水面积为1.334 km^2（含居住用地0.562 km^2、道路用地0.268 km^2、绿地0.504 km^2），设计暴雨重现期取3年一遇（对应降雨强度q=45.2 L/(s·hm^2)），降雨历时按120 min采用芝加哥雨型分配。模拟过程中，重点对下游YSEHNL194号检查井（位于断裂管段末端，井底高程48.509 m）对应的管段进行病害设置，通过关闭该井下游连接管，模拟管网断裂后管内水流通道阻断的实际工况（如图7，七贤办事处积水和雨水井状态模拟结果图）。

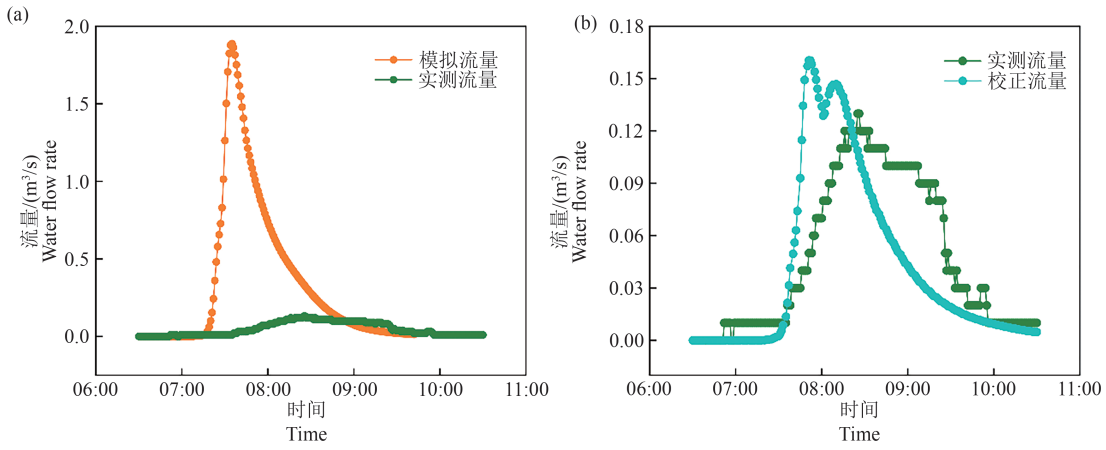


图6 模型精度校准对比

Fig. 6 Comparison chart of model accuracy calibration

注：图(a)代表校准前精度；图(b)代表校准后精度。

Note:Figure (a) represents pre-calibration accuracy; figure (b) represents calibrated accuracy.

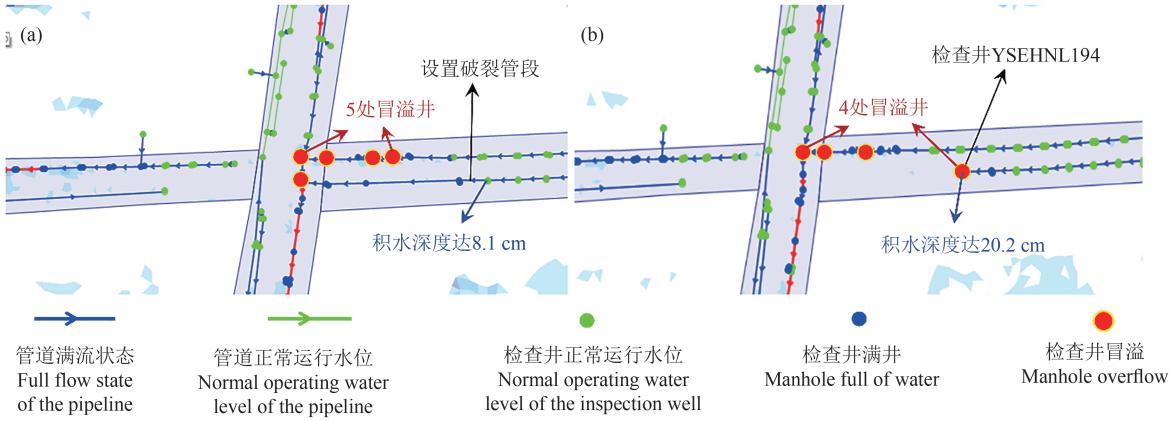


图7 管道断裂模拟结果图

Fig. 7 Simulation results of pipeline fracture

注：图(a)代表无病害模拟结果，图(b)代表管道破裂模拟结果，图中红色为冒溢井，浅蓝色范围为积淹范围。

Note:Figure (a) represents the simulation results without disease; figure (b) represents the simulation results of pipeline rupture; the red in the figure is the overflowing well, and the light blue range is the flooding range.

图7模拟结果显示在3年一遇降雨情境下，从研究区域积水深度、范围及冒溢点变化特征来看，下游YSEHNL194号检查井因管道断裂导致管内水流排泄阻力大幅增加，管内水位在降雨开始后52 min升至管顶高程50.23 m进而出现雨水冒溢现象，冒溢流量峰值达0.345 m^3/s，峰值时间为85 min，如图8(a,b)所示。与之形成对比的是，西侧济微路沿线管网，由于YSEHNL194号检查井下游管段断裂形成局部水力阻断，导致上游管网汇流路径发生改变，济微路沿线支管的汇流流

量较基准工况增加4.43%,井内水深由49.243 m降低至49.213 m,因西侧济微路管网汇流流量减少满管而未冒溢,因济微路和二环南交汇路口排水管网压力变小,导致七贤办事处路北侧和下游检查井冒溢点减少,但是七贤冒溢点处路面积水深度峰值由基准工况的0.081 m增至0.202 m,增幅达149.4%,如图8(c)所示。0.25 m的积水深度已超过《城镇内涝防治技术标准》(GB/T 51222-2017)中“对行人安全无显著影响”的0.15 m阈值,不仅导致行人通行困难,还会造成小型车辆涉水熄火风险增加,对二环南路区域交通通行效率与出行安全已构成严重威胁,如图8(d)所示。

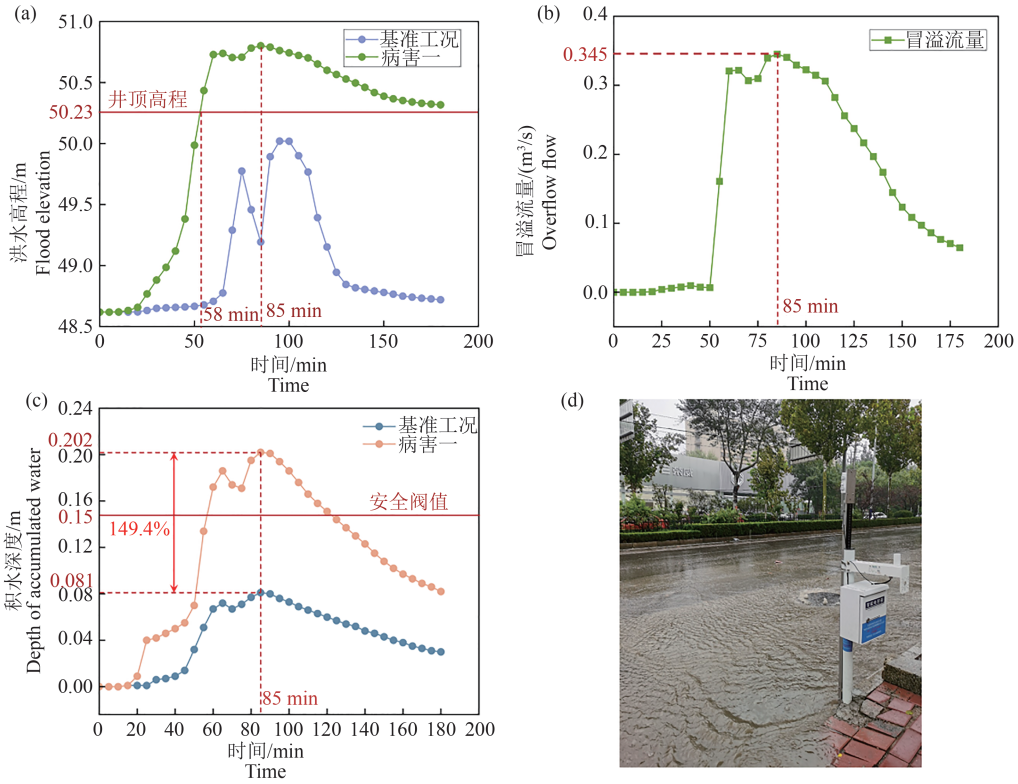


图8 七贤办事处管道病害模拟结果对比图

Fig. 8 Comparison of pipeline disease simulation results of the Qixian Office

注:图(a)代表洪水高程;图(b)代表冒溢流量;图(c)代表积水深度;图(d)代表该研究点管道断裂导致检查井冒溢2025年8月实拍图。

Note:Figure (a) represents flood elevation; Figure (b) represents overflow flow; Figure (c) represents the depth of water accumulation; Figure (d) representative of the pipeline rupture at the research site caused the inspection well to overflow, in August 2025.

2.2　病害二:管道淤堵

依托片区内郎茂山山体坡度约15°~20°,表层土壤以砂壤土为主,植被覆盖率约60%,在降雨天气下,雨水径流冲刷山体表层土壤,携带大量泥沙、枯枝落叶等固体颗粒物形成含沙径流;该径流通过山体周边4条自然排水沟渠汇入济微路市政雨水管网,其中2条主要沟渠直接汇入济微路接入YSJWGL386.1号与YSJWGL385.1号管道的上游进水口。长期运行过程中,含沙径流中的固体颗粒物在管道内逐渐沉积,管道因管径较大、流速相对较慢,淤泥主要堆积于管道底部,形成厚度约15~20 cm的淤积层,管道有效过流断面面积减少。针对上述问题,结合研究区域济微路沿线排水系统实际运行情况,选取济微路YSJWGL386.1号与YSJWGL385.1号雨水管道作为“病害二”管道淤堵的核心研究对象。管道呈南北走向,管径均为800 mm,两管道均为济微路沿线核心排水通道,其排水功能直接影响区域内涝防治效果。本文通过将上游管道YSJWGL387.1设置20 cm沉积厚度,模拟管网淤堵后管内过流断面面积减少的实际工况(如图9,济微路积水和雨水井状态模拟结果图)。

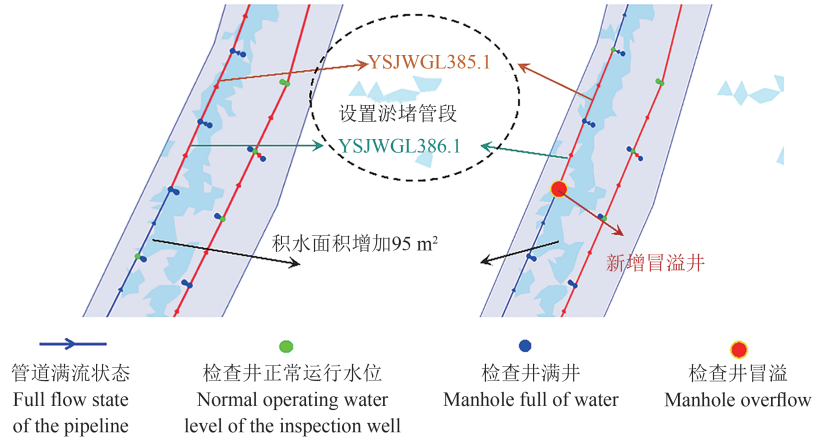


图 9 管道淤堵模拟结果图

Fig. 9 Simulation results of pipeline siltation

图 9 模拟结果显示：在 3 年一遇降雨情境下，下游 YSJWGL386.1 号与 YSJWGL385.1 号雨水管道因前期郎茂山雨水冲刷导致的淤泥堆积，形成显著淤堵病害，直接引发管内有效过流面积大幅缩减。过流面积的减小直接导致两管道排水能力显著下降，YSJWGL386.1 号管道实际过流流量峰值由 1.123 m^3/s 降至 0.307 m^3/s，YSJWGL385.1 号管道由设计值 1.204 m^3/s 降至 0.378 m^3/s，如图 10(b)所示。随着降雨持续发展，上游雨水经支管持续汇入，两管道内水位快速抬升，其中节点 YSJWGL386 在降雨开始后 52 min 水位达到井盖高程 48.98 m 发生冒溢，如图 10(a)所示，冒溢流量峰值达 0.405 m^3/s。持续的冒溢导致两检查井周边路面形成积水，其检查井周边积水深度峰值达 0.372 m，较基准模型积水深度峰值 0.314 m，增加了 18.4%，如图 10(c)所示，超过《城镇内涝防治技术标准》(GB/T51222-2017)中“对行人安全无影响”的 0.15 m 阈值，对济微路沿线交通通行效率与居民出行安全构成直接威胁，如图 10(d)所示。

3 规律分析与韧性评估

3.1 评价指标的选取

压力-状态-响应评估框架(Pressure-State-Response，简称 PSR 理论)，是生态环境评价、灾害风险评估等领域的经典分析模型。该理论以因果链式逻辑为核心，通过压力、状态、响应三个维度的动态关联，揭示系统演化规律：其中压力指自然扰动、人类活动等对研究系统造成的外部负荷与冲击；状态指系统在压力作用下呈现的结构、功能与健康水平；响应则指为改善系统不利状态、缓解外部压力所采取的工程、管理、政策等针对性措施。基于 PSR 理论，结合监测设备、地理信息公共服务平台和统计年鉴等可统计获取的数据，从压力强度、系统承载能力、社会响应能力三个维度筛选指标，最终选取 10 个城市内涝韧性评价指标，具体如表 2 所示。

综合以上，结合自然间断点法，划分各指标体系及其韧性等级如表 3 所示。

3.2 熵权法

在韧性评估中，各指标的重要性差异较大，熵权法能够有效地识别并突出这些差异，从而确保评估结果的客观性和准确性，能够整合多个指标的信息，全面反映灾害的复杂性和多维性，为制定科学合理的防洪减灾策略提供有力支撑。由于不同的指标不能直接计算，因此对不同的指标值进行维度归一化，以减少不同维度差异对评价结果的影响，对所选指标的数值进行标准化。即把每一项指标属性值转化到(0，1)之内。指标的处理公式为：

$$\text{正向指标：}X_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_j)}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{1}$$

$$\text{负向指标：}X_{ij}=\frac{\max(x_j)-x_{ij}}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{2}$$

其中，X_{ij}为指标要素数据标准化处理后的评价指标值，x_{ij}为指标要素的原始指标值；max(x_j)、min(x_j)分别为第 j 个指标在总研究区域中的最大值和最小值。

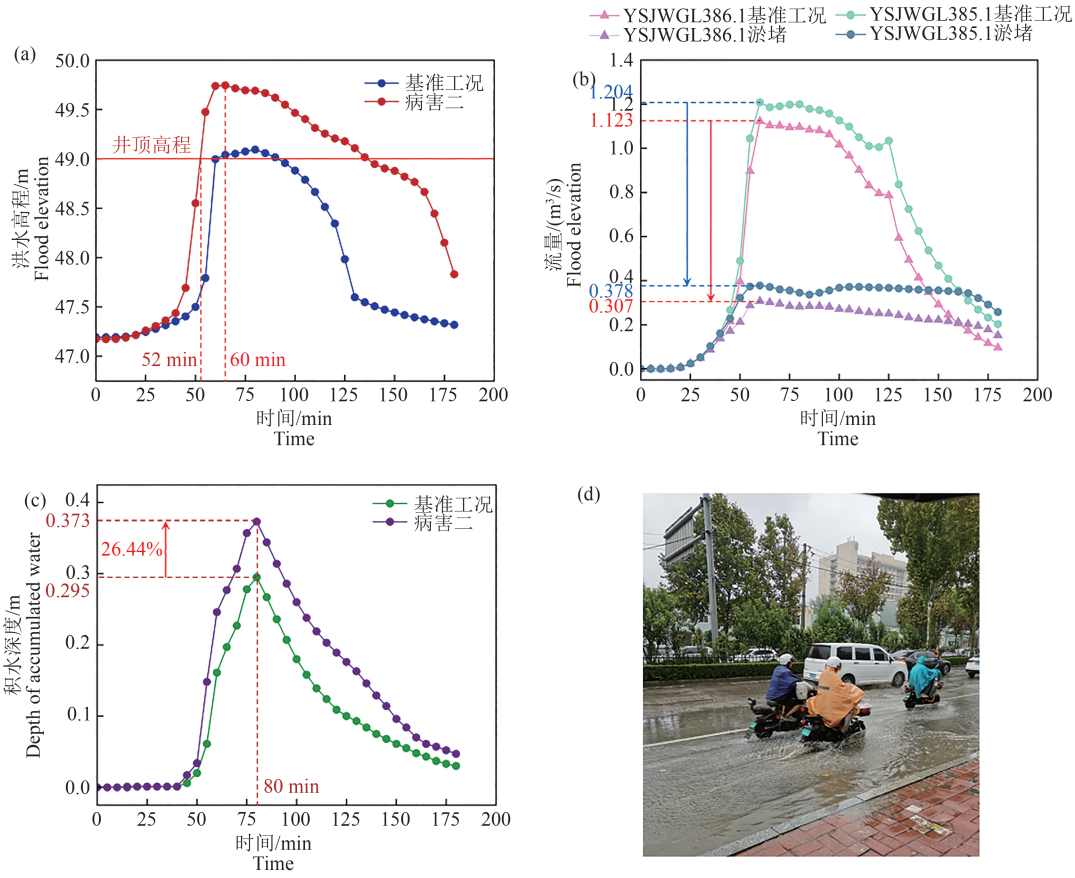


图 10 济微路管道病害模拟结果对比图

Fig. 10 Comparison of simulation results of pipeline defect on Jiwei Road

注：图(a)代表洪水高程；图(b)代表过流流量；图(c)代表积水深度；图(d)代表该研究点因管道淤堵导致道路积淹2025年8月实拍图。

Note:Figure (a) represents flood elevation; Figure (b) represents the overcurrent flow; Figure (c) represents the depth of water accumulation; Figure (d) represents an on-site photo of the road flooding caused by pipeline blockage at the research site in August 2025.

指标归一化处理，计算第t个研究分区中第j项指标的比重Y_{tj}：

$$Y_{tj}=\frac{X_{tj}}{\sum_{t=1}^{m}X_{tj}} \tag{3}$$

计算每个研究分区各个评价指标的比重，消除数据间的“量纲干扰”，直接影响熵值计算的准确性、权重分配的合理性和最终评价结果的可靠性。计算所述评价指标的信息熵，将“不确定性”转化为可计算的数值，信息熵E_j公式为：

$$E_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{t=1}^{m}Y_{tj}\ln Y_{tj},(0\leqslant E_j\leqslant 1) \tag{4}$$

计算关键评价指标的信息冗余度和指标权重，信息冗余度d_j和指标权重W_j计算公式为：

$$d_j=1-E_j、\ W_j=\frac{d_j}{\sum_{t=1}^{m}d_j} \tag{5}$$

3.3　依托工程区域评价指标权重计算结果

结合区域内地理地貌特征，以二环南路、济微路、九曲庄路三条主干道路及石房峪山这一关键山体为自然边界与划分依据，将整个研究片区科学划分为四个相对独立、各具排水地貌特色的研究分区（见图11，①七贤村片区、②文庄沟片区、③七贤办事处片区、④九曲沟片区），为后续针对性开展地形勘察、基础设施建设、资源调度等工作奠定基础。

分区①七贤村片区西临大涧沟、北接二环南路，无山体直接汇流影响，地形整体较为平缓，该分区以居住用地和少量商业用地为主，人均道路面积处于区域中等水平，且与市政主排水干管衔接顺畅；分区②文庄沟片区东接石房峪山体，地形呈缓坡状，排水管网部分管段存在轻微淤堵现象，但无明显结构性破损，山

洪汇流影响较小，排水压力相对较低；分区③七贤办事处片区南接石房峪山北麓，地形起伏大、山洪汇流集中，且二环南路与济微路交汇的核心积水点位于该分区；分区④九曲沟片区地势低洼且为山体多股汇水的咽喉节点，地面硬化率高，雨污分流改造尚未完成，存在管道混接、衔接不畅等问题，内涝易发且积水消退缓慢。

表2 城市内涝韧性评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of urban waterlogging resilience

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	指标含义及性质 Indicator definition and property	指标量化方法 Indicator quantification method	指标影响 Indicator influence	数据来源 Data source
城市韧性 Urban resilience	压力 Pressure	地理高程	反映各个分区的淹没风险程度	各分区的平均海拔高度	消极	城市测绘院提供
		管网淤积	反映了排水管网过水能力下降	排水管网内沉积物的占比	消极	监测识别
		管网破裂	反映管网结构破损导致排水效率降低	排水管网出现破损、渗漏或断裂的占比	消极	监测识别
		人口密度	反映内涝影响人群暴露风险与应急难度	单位面积土地上的常住人口数量	消极	人口热力图
	状态 Status	建成区面积	反映内涝影响的空间范围与应对复杂度	分区建成区总面积	消极	GIS统计
		人均道路面积	反映应急通道保障与灾后交通恢复能力	分区人均拥有道路面积	消极	GIS统计
		绿化覆盖率	反映天然雨洪调蓄能力	分区绿化面积占总面积的比例	积极	遥感影像分析
		人均固定资产投资	反映抗涝基础设施与灾后恢复能力	分区人均固定资产投资额	积极	统计年鉴
	响应 Response	人均互联网用户数	反映信息传播效率与公众响应能力	分区人均拥有互联网用户数量	积极	互联网统计数据
		防汛信息工程	反映应对内涝的智慧化能力	分区与防汛应急部署距离	积极	遥感影像分析

表3 指标风险等级划分与赋值

Table 3 Indicator risk leve classification and assignment

准则层 Criterion laye	指标层 Indicator layer	风险等级 Risk level			
		1	2	3	4
压力 Pressure	地理高程/m	(22,47)	(48,61)	(62,76)	(77,107)
	管网淤积	(0,0.3)	(0.3,0.5)	(0.5,0.8)	(0.8,1)
	管网破裂	<1%	>1%	>5%	>20%
	人口密度	蓝色、紫色	绿色、青色	橙色、黄色	红色
状态 Status	建成区面积/%	(25,35)	(35,40)	(40,45)	>45
	人均道路面积/%	(15,22)	(12,15)	<12	>22
	建成区绿化覆盖率/%	大于30	(25,30)	(20,25)	(15,20)
	人均固定资产投资/%	>80%	(65,80)	(50,65)	<50%
响应 Response	人均互联网用户数/户	4	3	2	1
	防汛信息工程/m	>50	(25,50)	(10,25)	(0,10)

注：指标层人口密度风险等级由人口热力图结果划分；防汛信息工程指标由分区距离应急管理部门距离划分。

Note：The risk level of population density at the indicator layer is classified based on the results of the population heat map; the flood prevention information engineering indicators are divided according to the distance from the emergency management department in each area.



图 11 研究区分区图

Fig. 11 Study area map

本文采用由管网流量监测、淤堵点实地勘察与水动力模型模拟结果组成的多源数据融合计算方法,所有评价指标均采用实测动态数据、现场勘察信息及模拟推演结果等客观统计数据,形成多维度管网状态评价指标体系。将收集的关键指标数据经熵权法加权计算,依托片区韧性评估指标权重计算结果如表4-5所示。从计算结果来看,对韧性强弱影响最大的两个指标是人均道路面积和管网淤堵数,其次是建成区绿化覆盖率,其他指标对韧性评估影响相对较小。分析其原因,该区域排水管道不能满足区域降雨排水要求,且存在淤泥堵塞而造成排水能力不足的问题;准则层权重较高,说明区域城市土地利用类型对城市积水有重要影响,因此城市发展导致的路面硬化和管道病害因素对城市韧性评估影响显著。熵权法结合管道缺陷病害的加权计算结果如表5所示。

表 4 评价指标权重计算结果表

Table 4 Calculation results of evaluation index weights

准则层 Criterion layer	权重 Weight	要素层 Element layer	指标层 Indicator layer	指标影响 Indicator impact	权重 Weight
压力 Pressure	0.206 0	地理压力	高程/m	消极	0.100 4
		人口压力	人口密度/(万人/km²)	消极	0.105 6
状态 Status	0.588 4	土地利用	建成区面积/km²	消极	0.089 3
			人均道路面积/km²	积极	0.226 4
			建成区绿化覆盖率/%	积极	0.167 5
		财产密度	人均固定资产投资/(万元/人)	积极	0.105 2
响应 Response	0.205 6	预警能力	人均互联网用户数/(户/人)	积极	0.100 5
			防汛信息工程	积极	0.105 1

表 5 熵权法结合管道缺陷病害的加权计算结果

Table 5 The weighted calculation results of pipeline defect and damage based on the entropy weight method

准则层 Criterion layer	权重 Weight	要素层 Element layer	指标层 Indicator layer	指标影响 Indicator impact	权重 Weight
压力 Pressure	0.402 1	地理压力	高程/m	消极	0.077 4
		基础设施	管网断裂数	消极	0.067 3
			管网淤堵数	消极	0.162 0
		人口压力	人口密度/(万人/km²)	消极	0.081 4
状态 Status	0.368 6	土地利用	建成区面积/km²	消极	0.068 9
			人均道路面积/km²	积极	0.174 4
			建成区绿化覆盖率/%	积极	0.129 1
		财产密度	人均固定资产投资/(万元/人)	积极	0.081
响应 Response	0.229 3	预警能力	人均互联网用户数/(户/人)	积极	0.077 5
			防汛信息工程	积极	0.081

为提升权重结果的客观性与可靠性，本研究采用熵权法进行指标赋权，并同步采用CRITIC法开展对比验证；通过两种赋权方法的交叉校验与结果分析，有效修正了单一熵权法易受数据离散程度与信息冗余影响的局限，进一步优化了权重分配结构，使最终评价结果更具稳定性与合理性。CRITIC赋权法结合管道缺陷病害的加权计算结果如表6所示。

表6 CRITIC赋权法结合管道缺陷病害的加权计算结果

Table 6 CRITIC weighting method combined with the weighted calculation results of pipeline defect conditions

准则层 Criterion layer	权重 Weight	要素层 Element layer	指标层 Indicator layer	指标影响 Indicator impact	权重 Weight
压力 Pressure	0.401 2	地理压力	高程/m	消极	0.090 3
		基础设施	管网断裂数	消极	0.105 4
			管网淤堵数	消极	0.094 2
		人口压力	人口密度/（万人/km^2）	消极	0.111 3
状态 Status	0.419 7	土地利用	建成区面积/km^2	消极	0.082 2
			人均道路面积/km^2	积极	0.115 6
			建成区绿化覆盖率/%	积极	0.106 3
		财产密度	人均固定资产投资/（万元/人）	积极	0.115 6
响应 Response	0.179 1	预警能力	人均互联网用户数/（户/人）	积极	0.096 8
			防汛信息工程	积极	0.082 3

通过熵权法和CRITIC法对各指标的重要性排序，比权重计算结果更能反映赋权逻辑的一致性，因此采用斯皮尔曼等级相关系数验证。

对熵权法权重W_{ej}和CRITIC赋权法权重W_{cj}分别按权重从大到小排序，得到各指标的等级排名$R_e(r_{e1},r_{e2},\cdots,r_{en})$和$R_c(r_{c1},r_{c2},\cdots,r_{cn})$。

计算等级差d_j：

$$d_j = r_{ej} - r_{cj} \tag{6}$$

计算斯皮尔曼相关系数r_s：

$$r_s = 1 - \frac{6 \times \sum_{j=1}^{n} d_j^2}{n(n^2 - 1)} \tag{7}$$

由表5、表6的权重计算结果计算得斯皮尔曼相关系数$r_s \approx 0.99$，权重计算结果高度一致，说明研究区的城市内涝韧性指标间关联度低，信息重叠少，熵权法仅基于变异性的赋权结果合理可靠，可直接采用熵权法权重。

结合管道病害加权计算结果，地理高程、人均互联网用户数、防汛信息工程等指标的权重较低，数据离散度小。相较于未考虑管网病害的传统评估体系，纳入管网病害后，压力层权重由0.206 0大幅提升至0.402 1，成为主导性准则层，其中管网淤堵数、管网断裂数分别以0.162 0、0.067 3的权重成为核心消极影响指标，合计贡献总权重的22.93%；状态层权重由0.588 4显著降至0.368 6，响应层权重则由0.205 6小幅提升至0.229 3。排水管网是城市雨洪排泄的核心载体，其结构完整性与过水效率直接决定内涝风险。管网淤堵、断裂等病害会导致过水断面收缩、排水能力衰减甚至功能失效，是诱发城市内涝积水的直接原因，也使压力层成为评估体系中的主导准则层。传统状态层指标虽能表征城市抗涝能力，但对排水系统实际运行状况的反映存在滞后性与局限性。相比之下，管网病害指标可直接体现系统动态健康状态，与内涝风险关联更紧密、时效性更强，能让评估结果更贴合工程实际。同时管网健康劣化也进一步凸显预警与应急响应的重要性，通过在线监测、病害预警及应急抢修，可遏制排水能力下降，阻断内涝风险传导。

3.4 依托工程内涝灾害韧性评估

本文采用城市内涝灾害恢复力指数来评价城市内涝灾害韧性，通过综合评价法计算研究区域的内涝灾害恢复力指数，将各指标的数值归一化后与该指标的组合权重进行数学相乘，然后进行累加。其公式如下：

$$FRI = \sum_{j=1}^{m} w_j X_{ij}, i = 1,2\cdots,m \tag{8}$$

其中，FRI为城市内涝恢复力指数。

表 7 韧性等级划分表
Table 7 Resilience level classification table

韧性等级 Resilience level	FRI区间 FRI interval	恢复能力特征 Recovery ability characteristics
高韧性 High toughness	(0.8,1)	管网初始病害极少,区域恢复资源充足、应急响应高效,管网可在短时间内恢复至设计排水能力;
中高韧性 Medium-high toughness	(0.6,0.8)	区域受内涝灾害影响较小,淹没深度低于安全阈值,灾后恢复速度较快,无显著经济损失;
中等韧性 Medium toughness	(0.4,0.6)	管网存在明显病害,核心区域出现明显积水,部分交通与基础设施受影响,灾后恢复需一定时间;
中低韧性 Medium-low toughness	(0.2,0.4)	灾后需大规模清淤和局部结构修复,区域恢复资源不足,管网恢复周期较长,排水能力恢复缓慢;
低韧性 Low toughness	(0,0.2)	区域出现大范围深度积水,交通瘫痪、基础设施严重受损,灾后恢复难度大、周期长。

FRI通过多指标的综合量化,将管网恢复能力转化为可比较、可评估的数值。FRI的数值大小与区域内涝韧性呈正相关,FRI越高,表明区域管网的初始病害少、恢复的资源支撑充足、应急响应效率高,灾后管网能更快恢复至设计排水能力,进而快速排出区域积水、缩短淹没时间,推动区域整体从内涝灾害中恢复;反之,FRI越低,管网灾后恢复的制约因素越多、效率越低,区域积水消退缓慢,内涝韧性显著下降。根据综合评价法计算研究区各分区内涝灾害恢复力指数如表8所示。

研究区内各分区内涝韧性呈现显著空间差异,分区①七贤村片区地形平缓开阔,无山体直接汇流影响,排水管网与市政主干管衔接顺畅、输送效率稳定,土地利用以居住用地与商业用地为主,开发强度适中、径流调控条件良好,综合排水基础条件最优,韧性水平最高;分区②文庄沟片区地形以缓坡为主,山洪汇流影响有限,管网仅局部管段存在轻微淤堵、无明显结构性破损,系统整体运行稳定,排水压力相对适中,韧性水平次之;分区③九曲沟片区地处东部低洼地带,为多股山体汇水的集中汇流节点,地面硬化率高、雨水产流快且集中,加之雨污分流改造尚未完成,存在管道混接、系统衔接不畅等问题,导致内涝风险突出且积水消退缓慢,韧性水平偏低;分区④七贤办事处片区位于研究区北部核心地带,地形起伏剧烈、山洪汇流高度集中,同时受雨污改造施工影响导致管网排水能力受限,且地处二环南路与济微路交汇的核心积水点区域,多重不利因素耦合叠加,使其成为研究区内涝风险最高、排水韧性最差的区域。

表 8 研究区分区韧性等级
Table 8 Resilience levels of different subareas in the study area

研究区分区 Study area	城市内涝韧性恢复力指数 Urban flood resilience index	韧性等级 Resilience level
①七贤村片区 Qixian Village Area	0.659 8	中高韧性
②文庄沟片区 Wenzhuanggou Area	0.579 8	中等韧性
③七贤办事处片区 The Qixian Office Area District	0.437 8	中等韧性
④九曲沟片区 Jiuchugou Area	0.506 2	中等韧性

4　工程建议

气候变化背景下,极端降雨条件已成为常态,大幅加剧了城市内涝灾害风险,直接冲击了城市防洪排涝体系,使城市内涝防控的响应逻辑、应急策略与治理模式发生转变,而当前学界针对城市内涝韧性的评价研究多聚焦流域级大尺度范畴,灾害防治过程中难以跨区域联动,而针对社区、街区等微观小尺度区域的精细化、靶向性评估研究较为缺乏,研究尺度与灾害防控的

实际落地需求之间存在鸿沟[19,20]。因此，本研究依托济南市大涧沟易涝区，构建了韧性评估的改进模型，突破了常规汇水分区的中观划分逻辑[21]，将评估单元细分至街区、管网病害重点区间尺度，实现了内涝风险与韧性短板的点位级定位。根据前文易涝区韧性评估计算结果，提出以下内涝韧性提升方案：

（1）高韧性区域应以风险预控为主，通过精细化监测与闭环管理维持系统优势，建立管网健康常态化监测机制，依托物联网监测设备，对管网淤堵、破损、塌陷等病害进行实时排查，建立病害台账，实现早发现、早处理，从源头降低管网功能性与结构性缺陷对排水能力的影响。中高韧性区域应侧重系统巩固与局部优化，靶向修复轻微病害并适度增设调蓄设施。

（2）中等韧性区域应以问题为导向实施系统升级，重点修复管网病害，实施管网分级养护与修复工程，针对不同淤堵程度、不同破损程度的管网，采取差异化养护策略，对轻度淤堵管网定期开展清疏作业，对破损、塌陷等病害严重管网，采用原位修复或更换改造，提升管网整体输水效率与抗灾能力。

（3）中低韧性区域应聚焦韧性重构与资源保障，通过中长期管网更新提升抗灾恢复能力，构建管网病害预警与应急处置体系，结合数值模拟与人工智能技术，预判管网病害发展趋势，制定针对性应急方案，在暴雨等极端天气前提前排查高风险病害管网，暴雨期间实时监测管网运行状态，快速处置突发病害，减少内涝灾害损失。

（4）低韧性区域需综合减灾与系统重构，通过空间风险规避、大型工程改造和多尺度治理体系构建，强化管网规划与城市布局协同，在城市新区规划及旧区更新中，优化管网铺设路径，提升管网设计标准，结合地形汇流特征与下垫面硬化情况，合理布局管网节点，避免管网超负荷运行，从源头降低灾害风险，实现从被动应对到主动适应的韧性提升路径。

5 结论与展望

本文采用基于PSR理论的指标体系内涝韧性评估方法，考虑了地形地貌、管网病害、社会经济及灾后响应等因素。以管网健康状态实时感知为核心切入点，融合水动力数值模拟、现场监测与熵权法融合的赋权方法，构建了管网健康与城市内涝韧性深度耦合的小尺度精细化评估体系。本文的主要结论如下：

（1）将管网病害因素纳入韧性指标体系后，压力层权重由0.206 0大幅提升至0.402 1，成为主导性准则层，其中管网淤堵数、管网断裂数权重值分别为0.162 0、0.067 3，成为核心消极影响指标，合计贡献总权重的22.93%，排水管网缺陷病害是城市内涝积水发生的重要诱因。相同降雨条件下排水管网的完整性对冒溢点数量、积水范围和管道流量具有重要影响。管网淤堵程度越高、地表硬化覆盖率越高，区域排水与蓄渗能力越弱，对应城市内涝韧性水平越低，证明了管网健康状态对城市韧性评估的重要作用。

（2）本文按排水系统状态划分评估分区，计算了分区恢复力指数，进行了韧性等级划分，从地形特征、管网布局和现状、土地利用类型等方面解释其韧性差异化原因，FRI计算结果表明：内涝韧性指数与区域排水管网健康状态呈正相关，即区域排水管网缺陷病害程度越低，内涝韧性指数越高，区域内涝韧性水平越高。

（3）本文对不同韧性等级区域的内涝防控与韧性提升实施差异化策略，根据恢复力指数划分的韧性等级，高韧性区域需以常态化精细化运维为主，维持管网健康状态与径流调控能力；中韧性区域需聚焦管网瓶颈修复，针对性解决管道淤堵、混接等问题，同时优化下垫面结构，提升雨水入渗能力；低韧性区域则需实施排水系统重构，结合地形特征优化管网布局，同步开展生态化改造提升区域蓄滞洪能力，从源头降低内涝风险。

参考文献

[1] Lin J Y, He P T, Yang L, et al. Predicting future urban waterlogging-prone areas by coupling the maximum entropy and flus model[J]. Sustainable Cities and Society,2022,80:103812.

[2] Güneralp B, Reba M, Hales B U, et al. Trends in urban land expansion, density, and land transitions from 2070 to 2010: A global synthesis[J]. Environmental Research Letters,2020, 15(4):044015.

[3] Chocat B, Ashley R, Marsalek J, et al. Toward the sustainable management of urban storm-water[J]. Indoor and Built Environment,2007,16(3):273-285.

[4] Kundzewicz Z W, Su B, Wang Y, et al. Flood risk and its reduction in China[J]. Advances in Water Resources,2019(AUG.),130:37-45.

[5] Jiang L, Yu J, Wen J H, et al. Risk assessment of extreme flood in the north bank of the hangzhou bay under land use change scenarios[J]. Progress In Geography,2021,8:1355-1370.

[6] 中华人民共和国水利部.中国水旱灾害防御公报[M].北京:中国水利水电出版社,2024:132.

[7] AJiménez E, Bodoque J M, García J A. An Integrated Multidimensional Resilience Index for urban areas prone to flash floods: Development and validation[J]. Science of The Total Environment, 2023,894:164935.

[8] 任 捷,王子航,梁学琴,等.基于PSR框架的黄河流域中心城市洪涝韧性研究[J].人民黄河,2025,47(03):62-68.

[9] 代 鑫,黄 弘,于富才,等.暴雨内涝灾害下社区韧性压力测试方法研究[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(09):1587-1596.

[10] Liu J, Wang X Y, Gao G J. Spatiotemporal evolution and determinants of urban flood resilience: A case study of Yellow River Basin[J]. Sustainability, 2025, 17 (4): 1433.

[11] 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 and Technol, 2024,90(1): 124-141.

[12] Xu T, Xie Z Q, Jiang F S, et al. Urban flooding resilience evaluation with coupled rainfall and flooding models: a small area in Kunming City, China as an example[J]. Water Sci Technol, 2023, 87(11): 2820–2839.

[13] Bertilsson L , Wiklund K , Tebaldi I D M , et al. Urban flood resilience – A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning[J]. Journal of Hydrology,2019,573:970-982.

[14] Yu S Y, Kong X S, Wang Q, et al. A new approach of Robustness-Resistance-Recovery (3Rs) to assessing flood resilience: A case study in Dongting Lake Basin [J]. Landscape and Urban Planning, 2023, 230: 104605.

[15] 徐宗学,舒心怡,叶陈雷.融合自然-社会属性的城市洪涝韧性评估[J].人民黄河,2025,47(09):55-61+69.

[16] 王银堂,苏 鑫,王磊之,等.城市洪涝灾害应对韧性精细化评估[J].水科学进展,2025,36(06):933-948.

[17] 肖凤林,卜王超,屠飞翔,等.城市街道尺度下洪涝灾害韧性评估——以江苏宜兴市宜城街道为例[J].中国防汛抗旱,2025,35(08):1-11.

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.室外排水设计标准:GB 50014-2021[S].北京:中国计划出版社,2021.

[19] Yang Y Y, Guo H X, Wang D Y, et al. Flood vulnerability and resilience assessment in China based on super-efficiency DEA and SBM-DEA methods[J]. Journal of Hydrology,2021,600:126470.

[20] Wu Y W, Yu G Y, Shao Q X. Resilience benefit assessment for multi-scale urban flood control programs[J]. Journal of Hydrology, 2022, 573(A): 128349.

[21] 况诗祥,王 渲,刘志鹏,等.规划场景下基于涝水特征的城市洪涝韧性评估研究[J].给水排水,2025,61(02):43-49.