

暴雨灾害情境下城市雨水管网韧性评估

李 婷¹, 房礼鹏¹, 李 锐¹, 聂 盼¹, 杨晨乾²

(1. 西安建筑科技大学 城市学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国能源建设集团陕西省电力设计院有限公司, 陕西 西安 710000)

摘 要: 随着我国城市化进程的不断推进和全球气候的变化, 极端天气带来的暴雨、洪涝等自然灾害频发, 严重威胁城市的安全与发展。雨水管网作为城市基础设施生命线工程的重要组成部分, 对于雨水分流和处理具有重要作用。以城市雨水管网系统为基础, 结合韧性理论, 借鉴 PSR 模型, 构建了城市雨水管网韧性评价指标。并建立“组合赋权-可拓云”评估模型, 最后利用贵州省某市区实例进行验证, 对韧性指标进行量化, 得到了不同强度下雨水管网系统的韧性等级, 并将评价结果可视化呈现, 以更好的帮助决策者和城市规划者理解和应对城市雨水管网的挑战和风险。

关键词: 韧性城市; 城市雨水管网; PSR 模型; 云模型

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0147-06

Assessment on Resilience of Urban Rainwater Pipe Network under Rainstorm Disaster Scenarios

LI Ting¹, FANG Lipeng¹, LI Rui¹, NIE Pan¹, YANG Chenqian²

(1. Xi'an University of Architecture and Technology City College, Xi'an 710055, China; 2. China Energy Engineering Group Shaanxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: With the continuous acceleration of urbanization in China and the change of the global climate, the natural disasters such as rainstorms, waterlogging and floods caused by extreme weather occur frequently, seriously threatening the safety and development of cities. As a key component of urban infrastructure lifeline project, the rainwater pipe network plays a significant role in rainwater separation and treatment. Taking an urban rainwater pipe network system as the basis, and combined with the resilience theory, by using the PSR mode, the resilience evaluation indicators of urban rainwater pipe network are built, and a “combined weighting - extension cloud” assessment model is established. Finally, an example of an urban area in Guizhou Province is used for verification, and the resilience indicators are quantified to obtain the resilience grades of the rainwater pipe network system under different rainfall intensities. The evaluation results can be visualized to better assist decision-makers and urban planners in understanding and responding to the challenges and risks of urban rainwater pipe networks.

Keywords: resilient city; urban rainwater pipe network; PSR-model; cloud model

0 引 言

随着我国城市化进程的不断推进、城市人口的急剧增长以及土地利用模式的持续变化, 现有的雨水管网系统面临着严峻而复杂的挑战。同时, 全球气候变化引发的极端天气所带来暴雨、洪涝等自然灾

害频发, 进一步加剧了雨水管网系统的负担, 使其逐渐难以满足当前城市发展的需求。根据国家应急管理部减灾中心的数据显示, 仅 2022 年, 全国共发生 38 次区域性暴雨, 29 省(自治区、直辖市)发生不同程度洪涝灾害, 共造成 3 385.26 万人次受灾, 171 人死亡失踪, 直接经济损失高达 1 288.99 亿元, 占当年 GDP 的 0.11%^[1]。因此, 如何提升城市韧性水平以应对扰动已经成为国内外学术界密切关注的热点问题^[2-6]。而作为城市重要的防洪、排涝的“生命线”工程, 准确评估城市雨水管网系统在暴雨天气下的韧性, 成为提升城市防灾减灾能力的关键前提。

韧性是指某一系统在面对外部冲击时能够有效

收稿日期: 2025-03-18

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2021JM-354); 西安建筑科技大学 2024 年新型城镇化研究基金项目(2024SCZH31); 西安建筑科技大学大学生创新创业训练计划项目(202210703046)

作者简介: 李婷(1986—), 女, 硕士, 讲师, 从事交通运输规划与管理、市政设施规划工作。

化解危机,并在保持其基本功能仍正常运转的能力。随着韧性理论的发展,针对暴雨灾害情景下的韧性城市评价也有了一定深入地研究,例如:Orencio^[7]从物理基础设施韧性、社区组织与治理能力等7个方面入手,分析了影响沿海社区洪水灾害韧性的因素,并建立了洪水灾害韧性评价指标体系,最后采用层次分析法计算了城市韧性指数;Qasim^[8]则从城市经济、社会、制度以及物理4个维度构建了社区洪水灾害韧性评价指标体系,并对开伯尔普赫图赫瓦省3个地区的社区韧性指数采用专家打分法进行了量化;胡雨晨^[9]等基于工程韧性理论模型,构建了城市多灾害情境下的城市韧性评价指标体系,并通过专家打分法对广东省21个地级市的韧性进行了评估与分析。

通过对上述文献进行梳理总结可知,目前的研究大多偏重于城市的整体韧性,而对雨水管网系统的韧性评估有限,尤其是针对多维度的雨水管网韧性评估研究方面。本研究将城市雨水管网系统与韧性理论相结合,基于PSR(压力—状态—响应)模型,构建了多维度、综合性的韧性评价指标体系,并通过“组合赋权—可拓云”评估模型,以期定量评估城市雨水管网的韧性水平,识别城市雨水系统应对暴雨灾害时的薄弱环节,从而为政府部门及相关机构提供科学依据和决策参考。

1 基于PSR模型的城市雨水管网韧性评价指标体系构建

1.1 PSR模型理论

PSR(Pressure-State-Response, PSR)模型是由加拿大统计学家David J.Rapport和Tony Friend首次提出^[10],用于分析人类活动与生态系统健康之间的相互作用关系。后被联合国经合组织和环境规划署改进并推广应用于生态环境问题方面的评价,用以描述当生态系统遭受外界威胁时能够维持正常运作,或破坏后恢复平衡状态的能力。PSR模型可直观地揭示系统与外部影响因素之间的互动机制及持续发展关系,因而目前被广泛应用于生态安全^[11-13]、土地资源^[14-17]、城市韧性^[18-21]等方面。

基于此,面向暴雨天气的城市雨水管网韧性可归纳为:当城市遭遇暴雨天气灾害冲击时,雨水管网系统依靠自身设施的稳定程度、组织管理方面的响应措施和外部支援体系等协调抵御灾害,使得其仍能维持基本疏解城市雨水,保障系统正常平稳运行

的能力和基本结构遭受破坏后及能时恢复正常秩序,并通过改进系统结构,以为了更好应对暴雨灾害的能力,如图1所示。

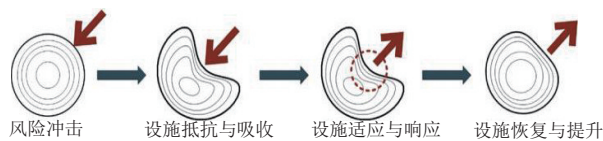


图1 城市雨水管网系统韧性分析过程

1.2 构建韧性评估指标框架

借鉴了PSR模型,将其应用于城市雨水管网的韧性评估,从压力、状态、和响应三方面来构建暴雨灾害情境下城市雨水管网韧性评价指标。如图2所示。

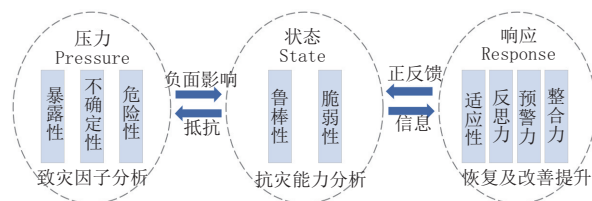


图2 暴雨灾害情境下城市雨水管网韧性评估指标框架

“压力”是指对当前系统所施加的压力和影响,暴雨天气下城市雨水管网系统的压力,主要来源于自然灾害和人为建设风险。其中,自然灾害压力主要源自短时强降雨的影响,是暴雨天气对城市雨水管网系统设施建设的冲击,人为建设风险压力指的是由于城市雨水管网系统建设方面不足所带来的压力,间接的影响到了系统在灾害压力冲击下的稳健性。

“状态”反映了系统的当前状况,通过对系统状态的评估,可以了解环境问题的严重程度和趋势。城市疏解雨水的过程是先由地表汇集雨水,然后通过雨水口排入地下敷设的雨水管道内。因此雨水口的设置状况与雨水口泄水能力是衡量城市遭受暴雨灾害时地面上集水与排水设施的能力重要指标。而地下管网排水能力的则受雨水管网设计降雨重现期、雨水管网密度、管段超载率与溢流节点率等因素影响。

“响应”涵盖了社会、经济和政治等方面对系统问题的回应和解决措施,旨在减少系统压力和影响,实现可持续的系统管理和发展。暴雨天气下城市雨水管网系统“响应”可从城市雨水管网系统自身主体的恢复能力、人为参与方辅助雨水管网系统恢复的能力、暴雨灾害后应急救援相关体系的学习适应能力等方面进行评价。

1.3 评价指标的选取

参考国内外相关文章,并根据我国城市雨水系统的特征,暴雨灾害情境下的城市雨水管系统韧性评估指标分可为三级:一级指标基于灾害全周期动态演变视角来解析灾害发生前至发生后对城市雨水管网系统扰动的作用机制,即压力—状态—响应的过程;二级指标聚焦一级指标可影响的方面;三级指标为二级指标的具象化表征因子。共计 17 项,具体见表 1。

表 1 暴雨灾害情境下的城市雨水管网韧性评价指标体系

过程	影响方面	指标
压力	自然灾害风险	年平均降雨量
		暴雨预警信号月发布数
		频繁遭受的降雨强度
	人为建设风险	综合径流系数 政府财政投入建设百分比
状态	地面状态	雨水口的设置 雨水口泄水能力
		雨水管网设计降雨重现期
	管网状态	雨水管网密度
		管段超载率
		溢流节点率
		信息管理化程度
响应	恢复能力	管段超载恢复能力
		节点溢流恢复能力
		雨水管网恢复周期
		专职管理人员工作水平
	适应能力	应急管理制度优化

2 城市雨水管网韧性评价模型建立

雨水管网系统的韧性是指其抵御外界不确定性冲击或扰动时的适应与恢复能力,其韧性评价是一个多因素、多层次、多目标的复杂综合评价问题。影响因素具有不确定性和相对性,决策过程也具有随机性与人为性,因此,需要一种能通过计算进行对比分析的科学评估方法。为了能够较好地处理评价过程中的模糊性,保证评估结果客观合理,为此,本文选取能够对定量、定性指标进行转换的云模型来分析计算。

2.1 云模型

云模型是一种用来处理定性概念与定量描述之间不确定转换的模型,其基于模糊集合理论,通过隶属度表示元素与模糊集合之间的关系。该模型由期望(E_x)、熵(E_n)、超熵(H_e)三个数字特征来表征语言值的数学性质,其中 E_x 表示云的中心位置, E_n 表示定性指标的模糊程度; H_e 表示定性指标中不确定性的

凝聚度。

2.2 基于组合赋权—云模型

(1)确定韧性指标的评语集 V

城市雨水管网系统韧性评估结果由评价集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 的组成。本文在论域 $U = [0, 100]$ 内按照黄精分割率法将韧性评估等级划分为 5 级,即 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{弱、较弱、一般、较强、强}\}$,各评价等级分别对应的区间为 $[0, 12.73]$ 、 $[12.73, 33.33]$ 、 $[33.33, 66.67]$ 、 $[66.67, 87.27]$ 、 $[87.27, 100]$ 。

(2)确定评价指标综合权重

本研究通过专家问卷的形式确定各指标的重要性,并对各二级指标对韧性的重要性进行打分,重要性从 1~5 分依次增加。对得到的结果分别采用 COWA 算子和 G1 法计算主观权重及客观权重,最后利用博弈论确定组合权重^[10-11]。

(3)确定评价标准云 C_v

评价标准云图是最终生成的指标云对比的基准,而评价标准云的三个云数字特征值计算方式是通过已划分的各个区间进行确定。设第 i 个指标区间为 $[X_i^{\min}, X_i^{\max}]$,则云特征值的计算公式如下^[12-14],标准评价云图如 3 所示。

$$Ex_i = \frac{x_i^{\min} + x_i^{\max}}{2} \tag{1}$$

$$En_i = \frac{x_i^{\min} + x_i^{\max}}{2.355} \tag{2}$$

$$He = k$$

k 可为经验值或试验值,本文 k 选取经验值 0.4。

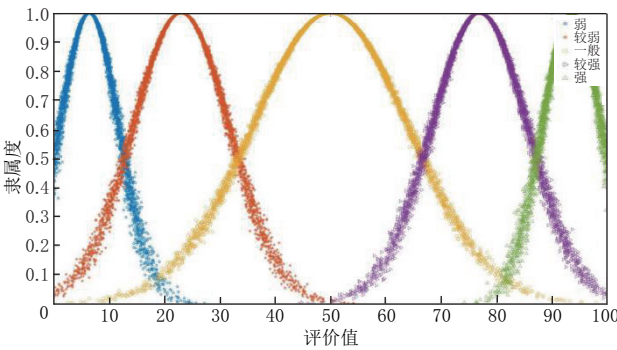


图 3 评价标准云图

(4)确定评价指标云 C

确定各二级指标的最低分与最高分的云数字特征值($Ex_c^{\min}, En_c^{\min}, He_c^{\min}$)与($Ex_c^{\max}, En_c^{\max}, He_c^{\max}$),最后确定各二级评价指标云的数字特征值,具体计算公式如下:

$$Ex_c = \frac{Ex_c^{\min} En_c^{\min} + Ex_c^{\max} En_c^{\max}}{En_c^{\min} + En_c^{\max}} \tag{3}$$

$$En_c = En_c^{\min} + En_c^{\max} \tag{4}$$

$$He_c = \frac{He_c^{\min} En_c^{\min} + He_c^{\max} En_c^{\max}}{En_c^{\min} + En_c^{\max}} \tag{5}$$

(5)确定综合评价云

通过各二级指标的组合同权重 W_j 和云数字特征值加权求得系统一级指标的各云数字特征值,计算公式如下:

$$Ex = \frac{\sum_{j=1}^n Ex_j w_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \tag{6}$$

$$En = \frac{\sum_{j=1}^n En_j w_j^2}{\sum_{j=1}^n w_j^2} \tag{7}$$

$$He = \frac{\sum_{j=1}^n He_j w_j^2}{\sum_{j=1}^n w_j^2} \tag{8}$$

(6)评价结果确定

通过计算综合评价云与评价标准云的相似度,进行评价等级确定,相似度数值越大则表明与标准云越接近。具体计算公式如下:

$$\delta_i = \left[\frac{W_{Ex}(Ex - Ex_i)^2 + W_{En}(En - En_i)^2}{W_{He}(He - He_i)^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \tag{9}$$

$$L_i = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i} \times 100\% \tag{10}$$

式中: δ_i 为第*i*个标准云与指标云的相似程度; L_i 为第*i*个标准云与指标云的相似程度占全部标准云相似程度的比重。 W_{Ex} , W_{En} , W_{He} 分别为指标云的云模型特征参数的权重。

3 实例验证

本次研究区范围为贵州省D市整体开发程度较高的一片区域,建筑物密集,面积为437.5 hm²。采用雨水管网与污水管网分流的排水体制,雨水管网的出口大多连接贯穿区域的剑江河。根据该片区的雨水管网及相关设施的布置,通过SWMM概化后的雨水管网图4所示。

3.1 建立评价指标体系并确定指标权重

本研究在指标赋权阶段,一级、二级指标重要性排序及评分利用专家问卷得出,根据重要性排序及打分结果,然后利用COWA算子和G1法计算主观权重及客观权重,最后利用博弈论确定组合权重,计算

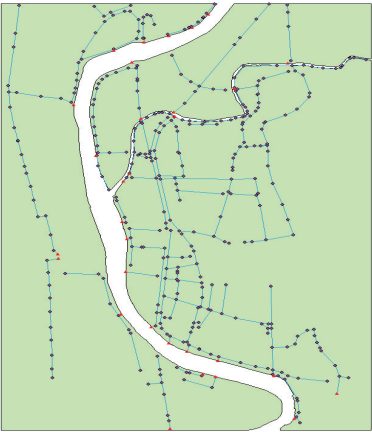


图4 研究区域雨水管网概化图

结果见表2。

表2 D市某区雨水管网评价指标体系与权重

一级指标	指标权重	二级指标	实际值	指标权重
压力 (B ₁)	0.208	年平均降雨量(C ₁₁)	1 431.1 mm	0.038
		暴雨预警信号月均发布数(C ₁₂)	2~4次	0.052
		频繁遭受的降雨强度(C ₁₃)	小雨及中雨出现的频次最多	0.045
		综合径流系数(C ₁₄)	综合径流系数为0.6~0.7	0.072
		政府财政投入建设百分比(C ₁₅)	一般	0.063
状态 (B ₂)	0.331	雨水口的设置(C ₂₁)	较强	0.072
		雨水口泄水能力(C ₂₂)	一般	0.058
		设计降雨重现期(C ₂₃)	1 a	0.068
		雨水管管径(C ₂₄)	1 000~1 500 mm	0.072
		管段超载率(C ₂₅)	12.23%	0.072
		溢流节点率(C ₂₆)	7.90%	0.056
响应 (B ₃)	0.389	管理信息化程度(C ₃₁)	较弱	0.048
		管段超载恢复能力(C ₃₂)	3.0	0.077
		节点溢流恢复能力(C ₃₃)	3.0	0.052
		雨水管网维护周期(C ₃₄)	普查周期最长10 a一次	0.055
		环卫工作水平(C ₃₅)	较强	0.042
		应急管理制度优化(C ₃₆)	较弱	0.059

3.2 确定二级指标云数字特征值

邀请10位专家对各个指标初始数值按照韧性等级赋值表进行打分。以降雨重现期为5 a,降雨历时120 min的降雨强度为例,结合并结合式(3)、式(4)、式(5)确定各二级指标综合云数字特征值,如表3所示。

3.3 确定一级指标及系统整体评价云

根据前文确定的二级指标云数字特征值与组合权重,按照式(6)、(7)、(8)进行组合计算,即可得出降雨强度为5 a时的一级指标云数字特征值和该研

表 3 二级指标综合云数字特征值

二级指标	最低分云数字特征值	最高分云数字特征值	综合云数字特征值
C11	(16.800,0.652,0.368)	(22.000,1.504,0.372)	(20.427,2.156,0.317)
C2	(44.800,0.902,0.588)	(74.700,1.287,0.613)	(62.329,2.180,0.630)
C13	(82.900,1.679,0.519)	(89.100,1.178,0.319)	(85.456,2.857,0.437)
C14	(36.000,1.504,0.581)	(54.900,2.156,0.918)	(47.133,3.660,0.780)
C15	(32.900,1.679,0.519)	(37.900,1.679,0.519)	(35.400,3.358,0.519)
C21	(67.100,1.128,0.133)	(78.800,1.855,1.149)	(74.376,2.983,0.765)
C22	(40.100,1.228,1.335)	(60.500,3.384,0.894)	(55.068,4.612,1.011)
C23	(33.000,1.003,0.771)	(38.400,3.058,2.300)	(37.066,4.061,1.922)
C24	(67.700,1.454,0.310)	(78.200,1.805,0.321)	(73.515,3.259,0.316)
C25	(92.900,2.156,0.918)	(93.000,1.504,0.581)	(94.490,3.600,0.793)
C26	(93.000,1.504,0.581)	(95.900,2.156,0.918)	(96.287,3.600,0.793)
C31	(22.100,1.153,0.401)	(29.600,1.554,1.107)	(26.406,2.707,0.806)
C32	(95.800,0.652,0.368)	(96.700,0.602,0.219)	(96.232,1.254,0.296)
C33	(94.700,0.602,0.219)	(95.800,0.652,0.368)	(95.272,1.254,0.296)
C34	(65.200,0.451,0.396)	(69.800,0.451,0.396)	(67.500,0.902,0.396)
C35	(69.70,1.028,0.392)	(83.000,1.504,0.372)	(77.600,2.532,0.380)
C36	(15.500,1.003,0.211)	(28.300,2.456,0.881)	(24.588,3.459,0.687)

究区域雨水管网系统整体韧性的云数字特征值,如表 4 所示,然后利用正向云发生器,借助 Matlab 分别生成评价云图,如图 5 至图 7 所示。

表 4 P=5a 时一级指标及系统整体云数字特征值

降雨强度	压力韧性云数字特征值	状态韧性云数字特征值	响应韧性云数字特征值	系统整体韧性云数字特征值
5 a	(49.503,3.073,0.597)	(71.754,3.621,0.918)	(66.228,1.890,0.452)	(63.499,2.722,0.636)

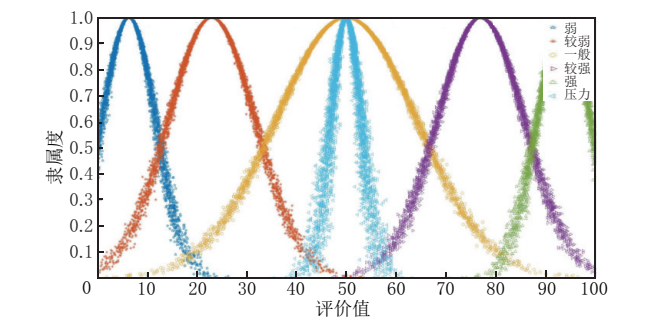


图 5 P=5 a 时压力韧性等级云图

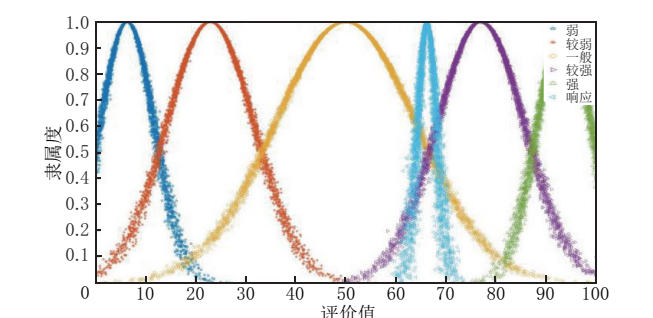


图 6 P=5 a 时状态韧性等级云图

3.4 评估结果分析

根据式(9)、(10)计算指标综合评价云与标准云

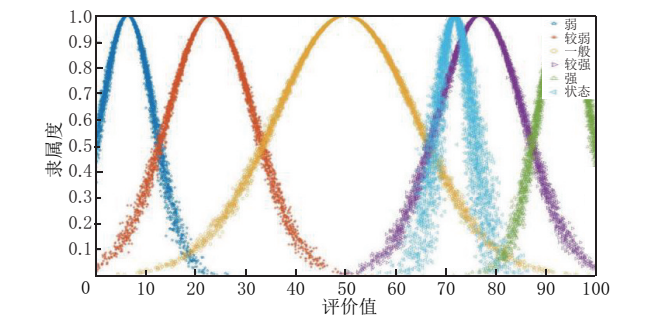


图 7 P=5 a 时响应韧性等级云图

的相似度,对比结果如表 5 所示。

表 5 P=5 a 时指标云与标准云的相似度对比表 单位: %

基准级别	压力韧性相似度 s/%	状态韧性相似度 s/%	响应韧性相似度 s/%	系统整体韧性相似度 s/%
弱	7.06	7.04	7.27	7.12
较弱	19.88	11.45	10.05	13.77
一般	42.56	31.64	26.57	33.59
较强	22.43	39.48	40.23	34.04
强	8.17	14.19	15.88	14.94

综上所述,降雨强度为 5 a 时雨水管网的韧性等级如表 6 所示。

表 6 降雨强度 p=5 a 时韧性等级表

降雨强度	压力韧性等级	状态韧性等级	响应韧性等级	系统韧性等级
5a	一般	较强	较强	较强

为了探究不同降雨强度下,该研究区域城市雨水管网系统韧性的变化规律,可利用同样的方法对降雨重现期分别为 10 a、20 a 与 100 a,降雨历时为 120 min 的降雨强度下的雨水管网“系统整体韧性”进行分析验证,结果如表 7 所示。

表 7 表 不同降雨强度下韧性等级表

降雨强度	压力韧性等级	状态韧性等级	响应韧性等级	系统韧性等级
10 a	一般	较强	一般	一般
20 a	一般	一般	一般	一般
100 a	一般	一般	较弱	一般

根据贵州省的历年降雨统计数据及雨水管网设计标准可知,该区域雨水管网系统在降雨重现期为 5 a 和 10 a 的情况下,“状态韧性”等级都为“较强”,在 20 a 和 100 a 降雨重现期下,“状态韧性”等级都为“一般”;而“响应韧性”等级在 5 a 时为“较强”,在 10 a 及 20 a 的情况下为“一般”,在 100 a 的情况下为“较弱”。故可知降雨重现期小于 5 a 时,该地区雨水管网系统韧性较强,可满足城市雨水排除要求;当降雨重现期大于 5 a 时,该地区雨水管网系统韧性一般,还需进一步采取措施提高雨水系统的处理能力。

4 总 结

(1)借鉴 PSR 模型,结合城市雨水管网的组成和特性,从“压力—状态—响应”整个作用过程出发,构建了暴雨灾害情境下的城市雨水管网韧性评价指标,具体包括 7 个二级指标和 17 个三级指标。基于该指标体系,可以对城市雨水管网的韧性进行综合评估,为城市雨水管网韧性评估提供了新的视角和方法,为政策决策提供参考依据。

(2)本利用 G1 法确定主观权重,简化了过程,减少数据量,更易通过一致性检验,提高可靠性,利用 COWA 算子法确定客观权重,减少指标间的冗余信息,更有助于获得可靠的评估结果,并基于此构建“组合赋权—可拓云”城市雨水管网韧性评价模型,更加精准的量化城市雨水管网韧性,使评价结果更具科学、有效性。

(3)城市雨水管网是一个复杂的系统,受到雨水系统的组成、城市生态等多方面影响,在存量更新时代的起步阶段,在国土空间规划的转型期,还应结合我国国情与大多数城市的建设现状,从系统政策等方面进一步挖掘城市雨洪韧性工程的价值,从而提升城市的安全性与治理水平。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部.中国水旱灾害防御公报[R].北京:中华人民共和国水利部,2022.
[2] 李若男,高精度城市暴雨内涝灾害危险性模拟与韧性优化策略研

究[D].上海:华东师范大学,2019.
[3] 赵瑞东,方创琳,刘海猛.城市韧性研究进展与展望[J].地理科学进展,2020(10):1717-1731.
[4] M otesharrei S, Rivas J, Kalnay E, et al. Modeling sustainability: Population, inequality, consumption, and bidirectional coupling of the earth and human systems[J]. National Science Review, 2016 (4): 470-494.
[5] 郑艳,林陈贞.韧性城市的理论基础与评估方法[J].城市,2017(6): 22-28.
[6] 廖英泽,王国盛,李喆,等.城市地下基础设施韧性发展现状及策略[J].防灾减灾工程学报,2022,42(6):1183-1190.
[7] Orencio P M, Fujii M. A localized disaster-resilience index to assess coastal communities based on an analytic hierarchy process (AHP)[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2013, 3(1): 62-75.
[8] Qasim S, Qasim M, Shrestha R P, et al. Community resilience to floodhazards in Khyber Pukhthunkhwa province of Pakistan[J]. International Journal of Disaste Risk Reduction, 2016(18): 100-106.
[9] 胡雨晨,张梦琳,毛义华,等.基于多灾害的城市韧性评估及应用研究[J].韧性安全,2024,31(2):35-43.
[10] Rapport D, Friend A. Towards a Comprehensive Framework for Environmental Statistics:A Stress-Response Approach[EB/OL]. (1979-05) [2019-07-20]. https://projects.eionet.europa.eu/leac/library/background-papers-and-publications/rapport-friend_stress-response_statcanada_11-5101979.pdf/download/en/1/Rapport-Friend-Stress-Response-StatCanada_11-5101979.pdf?action=view.
[11] 陆保一,明庆忠,史鹏飞,等.基于 DPSIR-SBM 框架的旅游生态安全时空动态及影响路径——以云南省为例[J].地理与地理信息科学,2023(6):134-142.
[12] 李阳力,陈天,臧鑫宇.围水定策——中国 31 个省份水生态韧性评价与优化战略思考[J].中国软科学,2022(6):96-110.
[13] Mariana N. Miranda, Adrián M. T. Silva, M. Fernando R. Pereira. Microplastics in the environment: A DPSIR analysis with focus on the responses[J]. Science of The Total Environment, 2020(718): 1-14.
[14] Schjonning P, Van Den Akker, JJH, Keller, T, Greve MH, Lamandé M, Simojoki A, Stettler M, Arvidsson J, Breuning-Madsen H.Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction—A European Perspective[J].Advances in Agronomy, 2015(133): 183-237.
[15] 王娅,周立华,魏轩.基于社会-生态系统的沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系[J].生态学报,2018(3):829-840.
[16] 回彦霖,崔力航,姜冰.基于 DPSIR 模型的中国粮食主产区土地资源承载力评价研究[J].沈阳农业大学学报,2024(3):373-384.
[17] 包广静,姬超,刘仪,等.红河流域(云南段)土地生态安全的时空演变及驱动因素分析[J].环境科学学报,2024(4):463-473.
[18] Michael Elliott.The role of the DPSIR approach and conceptual models in marine environmental management: an example for offshore wind power[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(6): 3-7.
[19] 黄志烨,李桂君,李玉龙,等.基于 DPSIR 模型的北京市可持续发展评价[J].城市发展研究,2016,23(9):20-24.
[20] 苏佳,武茜,黄光球.基于 DPSIR 模型的城市韧性评价——以关中城市群为例[J].经营与管理,2024(5):200-208.