

基于DPSIR的城市雨水管网韧性评估

李锐, 张同博, 耿娟, 李婷, 左精力

(西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

摘要: 随着全球气候变化, 城市面临着越来越多的极端降雨事件和洪水灾害。作为城市基础设施的关键组成部分, 城市雨水管网对于雨水的分流和处理具有重要意义。以城市雨水管网为基础, 结合韧性理论, 利用DPSIR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, 最后利用实例进行验证, 对韧性指标进行量化、将评价结果可视化呈现, 以更好地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: 雨水管网系统; 韧性评价; DPSIR模型; 可拓云模型

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0124-06

Assessment on Toughness of Urban Rainwater Pipeline Network Based on DPSIR

LI Rui, ZHANG Tongbo, GENG Juan, LI Ting, ZUO Jingli

(Xian University of Architecture and Technology, Xian 710055, China)

Abstract: With the global climate change, cities are confronted with an escalating number of extreme rainfall and flood disasters. As a significant component of urban infrastructure, the urban rainwater pipeline networks is of great significance for rainwater diversion and treatment. Based on the urban rainwater pipeline networks and in combination with the toughness theory, the DPSIR model is used to build a toughness evaluation index of urban rainwater pipeline network. And an "integrated weighting - extension cloud" evaluation model is established. Finally, the verification is carried out through practical examples, the toughness indicators are quantified and the evaluation results are presented visually in order to better assist the decision-makers and urban planners in understanding and addressing the challenges and risks of urban rainwater pipeline networks.

Keywords: rainwater pipeline system; toughness assessment; DPSIR model; extension cloud model

0 引言

城市化的快速推进对城市雨水管网系统提出了严峻而复杂的挑战。随着城市人口的急剧增长和土地利用模式的持续变化, 现有的雨水管网系统逐步出现无法满足当前城市化需求的问题。同时, 全球气候变化引发了更频繁的极端天气, 进一步加剧了雨水管网系统的负担。城市雨水管网系统被视为城市防洪、排涝的“生命线”, 只有通过全面的体系化改革, 增强城市雨水管网系统的韧性, 才能更好地满足城市化发展的需求, 确保城市在面对极端天气时能够更为稳健地应对, 为可持续城市发展和居民安居

乐业提供可靠的基础设施支持。

韧性理论最早应用在工程学领域, 20世纪70年代Holling^[1]将“韧性”的概念引入生态学领域, 描述了生态系统在受到扰动后自我修复并恢复稳定均衡的能力, 随后韧性理论在不同领域被赋予不同的解释和应用。在外国学者的研究中, Galderisi^[2]认为“城市韧性”是一个往复性过程, 涵盖了环境、社会、经济、功能和空间方面的韧性, 从进化导向来看, “城市韧性”可以定义为积极主动思考规划、决策和战略指导的能力; Medaniels^[3]认为有效评估城市基础设施的韧性的目的在于准确了解设施的抗灾能力, 并采用合理有效的防灾减灾技术来增强城市基础设施的韧性。在我国学者的研究中, 臧鑫宇等^[4]以城市本体为研究对象, 结合我国城市的现状, 提出城市韧性研究应在理论、方法和实践层面进一步拓展, 并从系统性、实效性、制度性3个层面提出我国城市韧性

收稿日期: 2024-11-07

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划(2021JM354); 西安建筑科技大学2022年度新型城镇化专项研究基金项目(2022SCHZ14)

作者简介: 李锐(1975—), 女, 博士, 副教授, 从事总图运输优化研究工作。

研究的特征和未来的发展趋势;赵瑞东等^[5]认为城市韧性作为一种城市风险治理的新思路,应继续加强学科融合,并探索城市韧性的应用模式;曾坚等^[6]运用韧性城市理论,构建了契合国土空间规划“五级三类”体系的韧性规划理论框架,提出了应对气候变化的“减缓与适应”的韧性规划原则;魏瑛侠等^[7]通过构建 SWMM(Storm Water Management Model)模型,结合图论和拓扑结构分析方法来定量表述雨水管网特征,确定关键节点的位置和系统网格度,以进行管网韧性影响分析并进一步探究优化管网拓扑结构的方法。韧性理论强调了系统的适应性、灵活性、可塑性以及系统内外的相互关系,能够帮助我们更好地理解 and 应对系统面临的挑战和变化。

结合韧性研究现状,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,利用 DPSIR(Drivers—Pressure—State—Impact—Response)模型,构建多维度、整体性的韧性评价指标体系,并通过评价模型进行评价,帮助城市雨水管网系统更好地面对挑战,提高城市的整体韧性和可持续发展能力。

1 基于 DPSIR 的城市雨水管网韧性评估指标体系构建

1.1 DPSIR 模型理论

DPSIR 模型 1993 年由欧洲环境署提出,如图 1 所示,此模型有助于描述起源与结果之间的关系,并在后续政策制定与研究中得到推广^[8],随后李玉照^[9]等对一般性 DPSIR 概念模型进行了一定改进,DPSIR 模型能有效地反映系统的因果关系,能够根据需要进行灵活的调整和应用,适用于不同类型的系统和问题,目前广泛应用于生态安全^[10-12]、土地资源^[13-16]、城市韧性^[17-20]等方面。

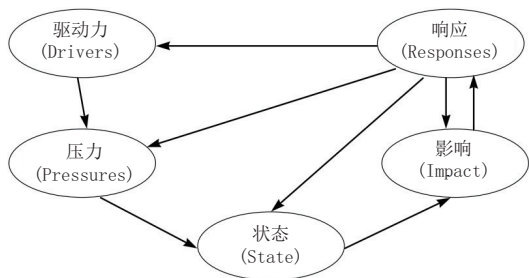


图 1 DPSIR 模型^[8]

在 DPSIR 模型中,“驱动力”(Drivers)代表了社会、经济和政治等因素推动着人类活动和经济发展,对环境产生直接或间接的影响;“压力”(Pressure)是指对当前环境所施加的压力和影响,由气候和社会活动所决定;“状态”(State)反映了环境系统的当前状况,通过对环境状态的评估,可以了解环境问题的严重程度和趋势;“影响”(Impact)是指环境问题对人类健康、生态系统和社会经济等方面的影响,对人类社会和生态系统都具有重要的意义;“响应”(Response)涵盖了社会、经济和政治等各方面对环境问题的回应和解决措施,旨在减少环境压力 and 影响,实现可持续的环境管理和发展。本研究中将借鉴 DPSIR 模型,并将其应用于城市雨水管网的韧性评估。从“驱动力”“压力”“状态”“影响”和“响应”5 个方面来综合评价城市雨水管网系统韧性,为改进城市雨水管网系统的韧性提供技术支持。

1.2 评价指标的选取及等级划分

借鉴 DPSIR 模型确定评价指标时,应考虑到人类活动、自然环境和社会经济因素之间的相互关系,以确保韧性评价的全面性,在城市雨水管网评价研究中“驱动力”主要可以分为“社会经济因素”、“政策与管理因素”和“环境因素”;“压力”主要可以分为“气候变化”、“人类活动”和“基础设施建设”;“状态”主要可以分为“管网现状”和“环境现状”;“影响”主要可以分为“环境影响”、“社会影响”和“经济影响”;“响应”主要可以分为“应急管理”、“政策与法规”和“技术措施”。

针对研究区域现状,本研究从“驱动力”层的“地区财政”与“城市生态”两方面、“压力”层的“生态压力”与“社会建设压力”两方面、“状态”层的“地面排水状态”与“管网状态”两方面、“影响”层的“经济影响”与“社会影响”两方面以及“响应”层的“响应速度”、“管理能力”与“恢复速度”三个方面分别选取指标。

根据城市雨水管网系统的特点以及相关雨水管网系统和城市基础设施建设标准,本研究将评价指标分为五个评估等级。定量指标是基于相关规范和相关文献中的分级标准进行区间划分,定性指标则是根据实际情况根据文字描述进行划分。所有指标均被划分为“弱”、“较弱”、“一般”、“较强”和“强”五个评估等级,各指标的选取及等级划分如表 1 所示。

表 1 韧性指标等级划分

目标层	分类	指标层	指标等级				
			强	较强	一般	较弱	弱
驱动力	地区财政	地区人均GDP/万元	[9,11)	[7,9)	[5,7)	[3,5)	[0,3)
	城市生态	建成区绿化率/%	(45,60]	(35,45]	(25,35]	(15,25]	(5,15]
		雨水管理的关注程度	关注程度非常高	关注程度比较高	关注程度一般	关注程度较低	关注程度非常低
压力	生态压力	地区年总降水量	[0,400]	[400,800)	[800,1200)	[1200,1600)	[1600,2000)
		地区24h最大降水量	[0,30]	[30,60)	[60,90)	[90,120)	[120,150)
	社会建设压力	综合径流系数	<0.20	0.20~0.45	0.45~0.60	0.60~0.70	>0.70
		人口密度/(万人·km ²)	[0,3]	[3,4)	[4,5)	[5,8)	[8,10)
状态	地面排水状态	雨水口泄水能力	≥50	35~50	20~35	10~20	<10
	管网状态	溢流节点率	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
		管段超载率	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
		雨水管网密度	[3.17,10]	[2.78,3.17)	[2.39,2.78)	[2,2.39)	[0,2)
影响	经济影响	经济损失/千万元	[3,5)	[5,7)	[7,9)	[9,11)	[11,13)
	社会影响	社会秩序受影响程度	几乎未受到影响	影响程度较小	影响程度一般	影响程度较大	影响程度非常严重
响应	响应速度	应急响应及时性	应急响应及时,快速有效	应急响应及时,有效性较高	应急响应及时,但存在一定改进空间	应急响应略显滞后,效果有限	应急响应严重滞后,效果明显不足
	管理能力	雨水管网维护周期	<3	<5	<10	<20	≥20
		专职管理人员配备及处置经验	人员充足,经验丰富	人员较为充足,有一定处置经验	人员数量有限,专业水平有限	人员数量不足,专业水平较低	人员数量极少,专业水平低下
	恢复速度	社会秩序恢复速度	恢复速度迅速	恢复速度较快	恢复速度一般	恢复速度较慢	恢复速度极为缓慢

2 城市雨水管网韧性评价模型建立

2.1 基于“BWM-CRITIC”组合赋权

最优最劣法(Best-Worst Method, BWM)是由荷兰学者 Rezaei 提出的一种确定指标主观权重的方法,其通过从一系列指标中选出最优和最劣两种指标,分别与其余指标进行比较,能够简化烦琐过程,减少数据量,降低由于数据过多而导致的失误,更易通过一致性检验,提高可靠性。故研究选用BWM法作为主观权重确定的方法。

CRITIC (criteria importance through intercriteria correlation)法的基本原理是通过标准差和相关性的计算,最终得到指标权重。标准差是用来计算对比强度的,标准差值越大,表明指标间的差异性越大。相关性是用来计算冲突性的,如果相关性的值越大,表明指标间独立性越低,关联性越强; w_j 是对比强度和冲突性的乘积结果,它表示指标的信息量,值越大对于指标体系越重要,权重越高。故本研究选用CRITIC法作为客观权重确定的方法。

根据主客观的权重,引入博弈论理论确定组合权重,得到最优组合权重。

2.2 物元理论及云理论

2.2.1 物元理论基础

我国学者蔡文于1983年首次提出了“物元分析”理论,随后这一理论逐渐演变为可拓学。物元分析是一种研究物元(事物的基本组成元素)及其变化,以解决不相容问题的方法,广泛适用于自然科学和社会科学领域。通常用 N 、 C 、 V 三个基本单元来表示事物(其中字母 N 表示事物,字母 C 表示事物 N 的特征,字母 V 表示特征 C 的量值),并分析其变化规律,即 $R=(N,C,V)$ 。若评价对象 R 有 n 个特征($c_1, c_2, \dots, c_n$),与其对应的特征值为($v_1, v_2, \dots, v_n$),数学表达形式如式(1)所示。

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2.2 云模型理论

云模型是一种将定性概念的语言描述与其数值表示之间的不确定性进行转换的模型,语言值的数学性质通过云模型的数字特征——期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 来表示。云模型将模糊性和随机性完全整合

在一起,可形成定性和定量间的映射关系,从而构建出信息表示的基础。

以评价值 x 为横坐标,隶属度 $\mu(x)$ 为纵坐标绘制一维正态云图,如图 2 所示。从直角坐标系中可直观地反映云模型的三个数字特征。

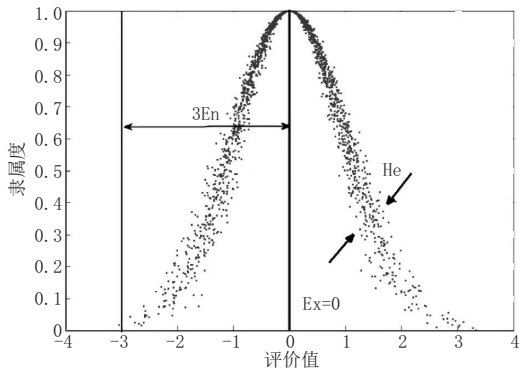


图 2 一维正态云图

2.3 建立“组合赋权-可拓云”评价模型

(1) 确定指标权重

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。得到的结果分别用 BWM 法和 CRITIC 法分别计算主观权重及客观权重,最后利用博弈论思想确定组合权重。

(2) 区间数值转换为可拓元参数

可持续性评价等级是一个有上下限的区间,即双约束指标 $[C_{\min}, C_{\max}]$ 。在转换为可拓元参数时,具体公式如式(2)、式(3)所示。

$$E_x = \frac{C_{\min} + C_{\max}}{2} \quad (2)$$

$$E_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \quad (3)$$

H_e 的值可以根据各可持续性评价指标的模糊性和实际情况进行合理调整。本文 H_e 取 0.1 倍的 E_n ,得到式(4)。

$$H_e = 0.1 \times E_n \quad (4)$$

(3) 可拓元模型应用的关联函数

a. 通过定义各指标可拓元,结合上文 E_x 、 E_n 、 H_e 的计算公式,得出各指标各等级的云数字特征 $(E_{x_i}, E_{n_i}, H_{e_i})$;

b. 产生一个正态随机数 E'_n ,其服从期望值为 E_n 、标准差为 H_e 的分布;

c. 令该确定数值 x 为云滴,计算云滴 x 对应其等级云的关联度 $\mu(x)$,如式(5)所示。

重复 k 次上述 a~b 步骤,计算出 k 个 $\mu(x)$ 后,取平均值作为该指标值 x 与该等级的云相似度。

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_n')^2}} \quad (5)$$

(4) 待评价对象综合风险等级确定

a. 计算云关联度矩阵 K_{nr} ,其中 n 为评价指标个数, r 为风险等级个数。再根据上文中的云关联度计算公式,分别计算待评价对象各指标与各等级的云关联度,形成云关联度矩阵 K_{nr} ,如式(6)所示。

$$K_{nr} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1r} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

b. 计算待评价对象综合云关联度 K 如式(7)所示,根据各评价指标权重 w 对 K_{nr} 进行加权计算得出。

$$K = w \times K_{nr} \quad (7)$$

c. 确定评价对象的综合风险等级,计算出综合云关联度 K 后,根据隶属度最大的原则,确定该评价对象最终的风险等级,如式(8)所示。

$$G = \max_j K_j \quad (8)$$

3 案例分析

以陕西省某经济开发区为研究区域,研究区域面积约为 27.09 km²,居住人口约为 32.7 万人,其距离咸阳市中心约 10 km,距西安市中心约 13 km,是西安市新中心新轴线的重要组成部分,如图 3 所示。



图 3 研究区域用地规划图

3.1 研究区域各指标权重

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,利用 BWM 法及 CRITIC 法分别进行主客观权重计算,最后利用博弈论进行组合权重计算,计算结果如表 2 所列。

3.2 研究区域韧性评价

定量指标等级由实际数据及 SWMM 模型模拟确

表 2 指标权重

一级指标	组合权重	二级指标	组合权重
驱动力 (A1)	0.158 3	地区人均GDP(B1)	0.078 2
		建成区绿化率(B2)	0.028 9
		雨水管理的关注程度(B3)	0.051 3
压力 (A2)	0.229 7	地区年总降水量(B4)	0.058 1
		地区24 h最大降水量(B5)	0.091 8
		综合径流系数(B6)	0.044 6
		人口密度(B7)	0.035 2
状态 (A3)	0.383 2	雨水口数泄水能力(B8)	0.041 0
		溢流节点率(B9)	0.160 7
		管段超载率(B10)	0.104 5
		雨水管网密度(B11)	0.077 0
影响 (A4)	0.116 2	经济损失(B12)	0.073 2
		社会秩序受影响程度(B13)	0.043 0
响应 (A5)	0.112 6	应急响应及时性(B14)	0.040 3
		雨水管网维护周期(B15)	0.018 5
		专职管理人员配备及处置经验(B16)	0.021 2
		社会秩序恢复速度(B17)	0.032 5

定,定性指标等级由问卷调查确定,以下计算过程以5 a重现期为例。

通过定义各指标的可拓元,利用式(2)~式(4),得出各指标各等级的云数字特征关联度,计算得到云的数字特征,将各指标的五个等级分别转化为标准云的三个参数。以B1、B4、B8、B12、B14为例,转换结果如表3所列。

计算出各指标的可拓元模型参数后,按照正态云发生器可画出各指标五个等级的正态云图,以B1、B12为例,正态云图如图4、图5所示。

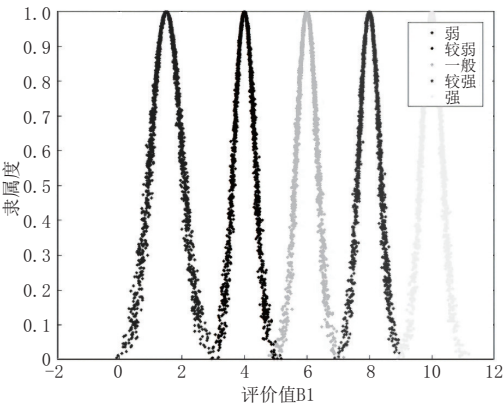


图 4 B1 指标正态云图

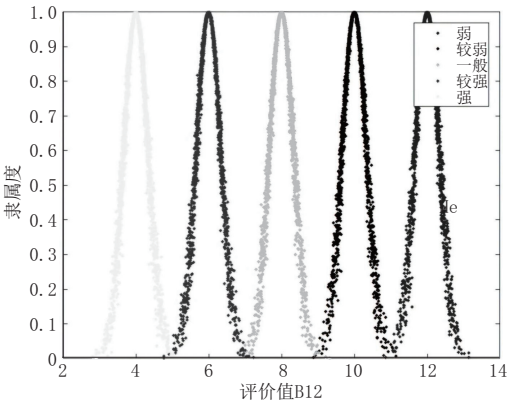


图 5 B12 指标正态云图

根据各指标的可拓云模型及其参数的期望值、熵值、超熵,按照基于物元可拓云模型的综合评估方法将各评价指标得分输入,利用式(5)多次计算排除随机偶然性,计算出各明细指标的云关联度。以B1、B4、B8、B12、B14为例,结果如表4所示。

指标	弱	较弱	一般	较强	强
B1	0.000 0	0.000 0	0.030 8	0.005 9	0.000 0
B4	0.000 0	0.000 0	0.005 6	0.032 6	0.000 0
B8	0.000 0	0.000 0	0.870 8	0.000 0	0.000 0
B12	0.000 0	0.427 7	0.000 1	0.000 0	0.000 0
B14	0.000 0	0.014 0	0.013 8	0.000 0	0.000 0

根据各明细指标与五个等级的关联度,结合各指标层级内权重的加权计算结果得出5个一级指标的云关联度,并根据最大隶属度原则,可确定各一级指标所属的等级,进一步可结合各一级指标权重集及其云关联度,计算整体云关联度及等级,可得5 a重现期的一级指标韧性结果,结果如表5所示。

表 5 5 a 一级指标评价结果

指标	弱	较弱	一般	较强	强	等级
A1	0.131 0	0.004 6	0.0197	0.002 9	0.000 0	弱
A2	0.000 0	0.000 0	0.1176	0.382 0	0.128 5	较强
A3	0.000 9	0.039 3	0.4608	0.000 0	0.000 4	一般
A4	0.000 0	0.269 4	0.0052	0.005 1	0.000 0	较弱
A5	0.000 0	0.005 1	0.1443	0.006 7	0.004 0	一般

以上述计算过程再计算10 a重现期及50 a重现期下的各指标韧性,得出5 a重现期、10 a重现期及50 a重现期的对比结果,如表6所示。

表 3 指标准云参数

指标	弱	较弱	一般	较强	强
B1	(1.5, 0.5, 0.05)	(4, 0.333 3, 0.033 3)	(6, 0.333 3, 0.033 3)	(8, 0.333 3, 0.033 3)	(10, 0.333 3, 0.033 3)
B4	(1 800, 66.666 7, 6.666 7)	(1 400, 66.666 7, 6.666 7)	(1 000, 66.666 7, 6.666 7)	(600, 66.666 7, 6.666 7)	(200, 66.666 7, 6.666 7)
B8	(5, 1.666 7, 0.166 7)	(15, 1.666 7, 0.166 7)	(27.5, 2.5, 0.25)	(42.5, 2.5, 0.25)	(75, 8.333 3, 0.833 3)
B12	(12, 0.333 3, 0.033 3)	(10, 0.333 3, 0.033 3)	(8, 0.333 3, 0.033 3)	(6, 0.333 3, 0.033 3)	(4, 0.333 3, 0.033 3)
B14	(0.5, 0.166 7, 0.016 7)	(1.5, 0.166 7, 0.016 7)	(2.5, 0.166 7, 0.016 7)	(3.5, 0.166 7, 0.016 7)	(4.5, 0.166 7, 0.016 7)

表 6 5 a、10 a 与 50 a 韧性等级

重现期	弱	较弱	一般	较强	强	等级
5 a	0.021 1	0.047 7	0.223 7	0.089 6	0.030 1	一般
10 a	0.115 1	0.130 7	0.082 8	0.089 6	0.030 1	较弱
50 a	0.164 5	0.042 0	0.082 8	0.089 6	0.030 1	弱

3.3 结果分析

研究区域 2020 年 7 月内相继遭遇重现期为 50 a 一遇的大暴雨,故本研究分别评估了 5 a、10 a 及 50 a 重现期下研究区域的雨水管网韧性,结果依次为“一般”、“较弱”及“弱”,根据各指标的评价结果,研究发现:建成区绿化率、雨水管理的关注程度、管段超载率、雨水管网密度、经济损失和应急响应及时性等指标评价结果偏弱。

参照上述结果,结合研究区域现状,在新建和改建项目中应鼓励使用生态设计原则,对公共绿地进行保护和合理开发,提高建成区绿化率,并在后续规划中在现有管网中根据实际需要增设支管和建立雨水管网运行监测系统,提高整个系统的分流能力,减少主干管道的负荷,改善管段超载率。同时政府应明确雨水管理的重要性,出台相关政策和法规,建立健全雨水管理的应急响应机制,明确责任、流程和人员培训,确保对突发事件的快速反应,并开展针对居民的宣传教育活动,提高公众对雨水管理的认知和参与度。

4 结 语

(1)本研究对城市雨水管网韧性进行了深入探讨,借助 DPSIR 模型,结合城市雨水管网特性,从“驱动力—压力—状态—影响—响应”五个方面定义了城市雨水管网韧性,同时结合雨水管网组成、城市生态建设、系统政策制定等方面,从 5 个过程、11 个方面以及 17 个指标构建了城市雨水管网韧性评价指标体系。基于该指标体系,可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,为改善城市雨水系统韧性和可持续性提供了科学依据。

(2)本研究利用 BWM 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,提高了可靠性;利用 CRITIC 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;最后采用可拓云模型,构建“组合赋权—可拓云”城市雨水管网韧性评价模型,更加精准地量化了城市雨水管网韧性,使得评价结果更具科学性、有效性。

参考文献:

[1] Holling C S. Resilience and Stability of Ecological Systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973: 1–23.

[2] Galderisi A. Urban Resilience: A Framework for Empowering cities in Face of Heterogeneous Risk Factors[J]. Z Magazine, 2014, 11 (1): 36–58.

[3] Medaniels T, Chang S, Cole D, *et al.* Fostering Resilience to Extreme Events within Infrastructure Systems: Characterizing Decision Contexts for Mitigation and Adaptation[J]. Global Environmental Change, 2008, 18(2): 310–318.

[4] 臧鑫宇,王峤.城市韧性的概念演进、研究内容与发展趋势[J].科技导报,2019(22):94–104.

[5] 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.

[6] 曾坚,田健,王倩雯,等.国土空间规划体系中的气候韧性及适灾承洪理论——以闽三角地区为例[J].中国科学:技术科学,2023(10):1713–1727.

[7] 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.

[8] Smeets E, Weterings R. Environmental Indicators: Typology and Overview [M]. Technical Report No.25, European Environmental Agency, Copenhagen, 1999.

[9] 李玉照,刘永,颜小品.基于 DPSIR 模型的流域生态安全评价指标体系研究[J].北京大学学报(自然科学版),2012(6):971–981.

[10] 陆保一,明庆忠,史鹏飞,刘安乐,郭向阳.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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Schjonning P, van den Akker, JJH, Keller T, *et al.* Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction—A European Perspective[J]. Advances in Agronomy, 2015(133): 183–237.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] Zhao Ruidong, Fang Chuanglin, Liu Haimeng, Liu Xiaoxiao. Evaluating Urban Ecosystem Resilience Using the DPSIR Framework and the ENA Model: A Case Study of 35 Cities in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 72.

[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.