

基于PSR的城市雨水管网系统韧性评估模型

李锐¹, 杨晨乾², 左精力¹, 张同博¹

(1. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055; 2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 近些年来, 极端暴雨天气频发, 同时城市下垫面雨水吸收能力下降, 使得城市雨水管网系统面临着更大的挑战。为了对暴雨天气下城市雨水管网系统的韧性进行量化, 通过将PSR模型相结合与韧性理论, 建立适于暴雨天气下城市雨水管网系统韧性评估指标体系, 选取G1法与COWA算子分别确定指标权重, 通过博弈论的思想进行权重组合, 并与云模型评估模型相结合, 构建组合赋权—云模型的韧性评估模型, 以贵州省D市整体开发程度较高的某片区域雨水管网系统为例, 进行模型验证。结果表明: 该研究区的城市雨水管网系统韧性等级属于一般韧性等级, 该模型具有一定的科学性与可行性。

关键词: 雨水管网系统; 韧性评估; PSR模型; 云模型

中图分类号: TU992.24

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0160-09

Resilience Assessment Model of Urban Rainwater Pipeline Network System Based on PSR

LI Rui¹, YANG Chenqian², ZUO Jingli¹, ZHANG Tongbo¹

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610000, China)

Abstract: In recent years, the extreme rainstorm weather occurs frequently, and the rainwater absorption capacity of urban underlying surface decreases, which make the urban rainwater pipeline network system face the great challenges. In order to quantitatively study the resilience of urban rainwater pipeline network system under heavy rainfall conditions, a toughness evaluation index system suitable for urban rainwater pipeline network system under rainstorm weather is established by combining the PSR model with the toughness theory. The G1 method and COWA operator are used to determine the indices weights respectively. Through the thought of game theory, the weight combination is carried out. And combined with the cloud evaluation model, the resilience assessment model of composite empowerment - cloud model is established. Taking the rainwater pipeline network system in an area with higher overall development level in D City of Guizhou Province as an example, the model is verified. The results show that the resilience level of the urban rainwater pipeline network system in this studied area belongs to the general resilience level. This model has a certain level of scientificity and feasibility.

Keywords: rainwater pipeline network system; resilience assessment; PSR model; cloud model

0 引言

城市雨水管网系统作为重要的城市排水防洪设施,可以在较短的时间内将城市路面上的雨水收集起来,排入雨水管道,使城市洪涝灾害概率降低,为可持续发展提供强有力的保障。然而,全球气候变化导致暴雨天气频发,随着城市化进程的不断加快,每次暴雨都容易产生内涝,这使得城市雨水管网系统面临很大的压力。根据住房和城乡建设部的数

据,在2007—2015年期间,全国有360多个城市遭受内涝,其中六分之一的城市被淹超过12 h,水深超过半米^[1]。2021年7月,河南多地出现暴雨和特大暴雨,10个国家气象观测站雨量突破有气象记录以来的最高值,直接经济损失885.34亿元。我国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要(2016年3月12日)指出,城乡规划及基础设施建设活动应主动适应气候变化,逐步提升针对极端天气灾害的应灾、预灾水平^[2]。2021年3月12日,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中首次提出“建设宜居、创新、智慧、绿色、人文、韧性城市”,并提出“因地制宜建设海绵城市,全

收稿日期: 2024-03-04

作者简介: 李锐(1985—),女,博士,副教授,从事总图运输优化研究工作。

部消除城市严重易涝积水区段”。

目前,国内外关于城市雨水管网系统能力评价方面研究,主要表现在可持续性、脆弱性及韧性(也称弹性或复原力)等方面。国外学者 Mugume 等^[3]提出了一种新的评价城市排水系统韧性的分析方法,可实现系统地评估城市排水系统在各种结构下的性能。其中韧性指标包括各管段失效时溢流流量的上下限和平均溢流时间,并将失效程度和持续时间合并为单一指标,量化各管段失效时系统的剩余功能。Birgani 等^[4-5]基于对弹性和阻力分析,构建评估城市排水系统风险管理(Urban Drainage Risk Management, UDRM)的持久性框架并进行量化。而后,他们考虑了城市排水风险管理(UDRM)系统在不同雨量事件下的应对与恢复行为,主要集中在制度和社会方面,被定义为弹性。Dong 等^[6]考虑了 UDS 的功能多样性、拓扑复杂性和干扰随机性,并基于城市洪涝影响的社会严重性、下水道溢流引起的环境严重性以及考虑下游设施安全运行的技术严重性三个部分定义了弹性公式。Casal-Campos 等^[7]评估了城市合流制排水系统的可靠性、弹性和可持续性三方面能力,其中弹性的评估了洪水量和水质污染两方面。国内学者杨秋侠^[8]在原有脆弱性定义的基础上,结合城市雨水管网系统的特点,对现有城市雨水管网系统的脆弱性进行了界定,并将影响因素分为外因破坏、设计因素、水力因素和管理因素四大类。在此基础上,结合复杂网络拓扑模型,提出了一种利用节点重要度确定既有雨水管脆弱性的方法。综合考虑了节点对局部重要性的影响和对整个复杂网络的影响。杨秋侠等^[9]提出了城市雨水管网系统脆弱性的概念,建立了包含设计因素、外部破坏因素及管理因素三个方面的城市雨水管网系统脆弱性评价模型,并结合网络最大流理论,寻找城市雨水管网系统中的脆弱管段。方咸根^[10]从城市雨水管网系统的可靠度及鲁棒性两个维度,建立城市雨水管网系统的韧性评估指标。

综合上述文献研究,目前国外对于城市雨水管网系统评估方面研究,较为多样全面,而国内在城市雨水管网系统脆弱性评估方面的研究与成果方面较多,韧性方面的研究不多,特别是在评估框架、评估方法等方面的研究。另一方面,PSR 模型理论的“致因—效应—响应”逻辑思维与韧性理论相结合的较少,尤其是针对城市雨水管网系统面向暴雨天气灾害韧性表现进行评估方面^[11]。因此,本研究将 PSR

模型与韧性理论相结合,解析基于 PSR 模型语境下城市雨水管网系统韧性,建立适用于暴雨天气下城市雨水管网系统韧性评估指标体系,并构建其韧性评估模型。

1 城市雨水管网系统韧性

“韧性(resilience)”源于拉丁语“resilio”,随着时代的推进,在不同的领域中得到了不同的诠释和应用。Holling^[12]在 1973 年首次将“韧性”这一词引入到生态领域进行研究,并将其解释为生态系统在受到灾害或短期其他影响后,系统自身所具有的适应、维持、抵抗和恢复的能力。韧性理念延伸到社会学领域,将社会学与生态学相结合,称为“社会-生态韧性”,即为演进韧性^[13-14]。演进韧性具有动态的、混沌的特点,追求高于初始稳态的新稳态,更加关注学习及提升能力。

在此基础上,将韧性理论延深至城市基础设施层面,关注城市基础设施在风险灾害下抵抗、适应及灾后响应和恢复能力。根据城市雨水系统特点与韧性内涵,本文研究将城市雨水系统韧性定义为:城市遭遇暴雨天气的冲击,雨水管网系统能够凭借系统自身的能力以及人为协调能力抵御灾害,使得其仍能维持基本疏解城市雨水,保障系统平稳运行;同时在暴雨灾害后,对雨水管网系统及人为管理、支援的表现进行复盘并改进学习,提升雨水管网系统抵御未来类似强度暴雨天气的能力。

2 基于 PSR 理论的韧性评估指标体系构建

2.1 PSR 模型理论

PSR (Pressure-State-Response) 模型,即压力—状态—响应模型。它通过“致因—效应—响应”这一思维逻辑,对应回答了“发生原因—发生事件—如何改变”3 个可持续发展的基本问题,体现了人与环境的关系(见图 1)。

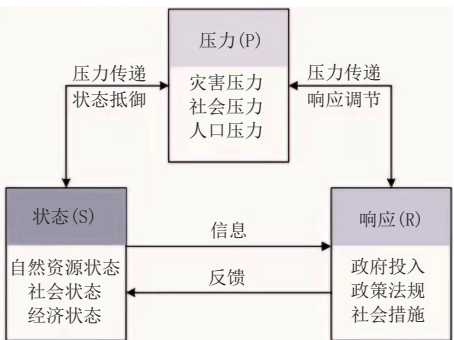


图 1 PSR 模型作用过程示意图

其中,“压力”是指自然灾害、人类经济和社会活动对环境或系统造成的破坏性影响;“状态”是指在这些破坏性冲击的作用下,环境或系统所呈现出的变化情况;而“响应”通常指系统自身以及社会和个人力量的参与,旨在减轻、阻止、恢复和预防压力所带来的负面影响^[15]。

2.2 韧性评估指标选取

本研究借鉴PSR模型“致因—效应—响应”这一思维逻辑,并分别从“压力”过程的“自然灾害风险”与“人为建设风险”,“状态”过程的“地面排水状态”与“地下排水状态”,“响应”过程的“预警能力”、“恢复能力”与“学习适应能力”,3个方面分别选取指标,如表1所列。

表1 城市雨水管网系统韧性指标		
过程	方面	指标
压力	自然灾害风险	年平均降雨量
		暴雨预警信号月均发布数
	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	地面排水“状态”	雨水口的设置
		雨水口泄水能力
	管网排水“状态”	雨水管网设计降雨重现期
		雨水管管径
响应	预警能力	管段超载率
		溢流节点率
		管理信息化程度
	恢复能力	管段超载恢复能力
		节点溢流恢复能力
		雨水管网维护周期
	学习适应能力	环卫工作水平
		应急管理制度优化

2.3 韧性指标评估标准

本研究基于城市雨水管网系统的组成和功能特点,参考有关雨水管网系统和城市基础设施建设的相关标准,将评价指标划分为5个评估等级。其中定量指标是查阅标准规范及相关文献中的划分标准进行区间划分。定性指标则是按照文字描述方式进行划分。各个指标划分为“弱”“较弱”“一般”“较强”“强”五个等级,如表2所列。

3 韧性评估模型建立

3.1 G1-COWA 确定组合赋权

3.1.1 G1法赋权

序关系分析法(G1法)是国内学者郭亚军提出的关于系统决策分析的方法,弥补了层次分析法存在的不足,使得计算结果更加直观简便。G1法的计算

步骤如下。

(1)确定各指标序关系

邀请专家对各指标按照影响程度由重到轻进行排序,确定评估指标的序关系为: $X_1^* > X_2^* > X_3^* > \cdots > X_n^*$ 。

(2)对相邻指标重要性程度进行赋值

设 X_{k-1}^* 和 X_k^* 是重要性排序后两个相邻的指标,其中, $1 \leq k \leq n$,专家对这相邻两指标的重要性程度之比 r_k 进行判断,并根据表3进行赋值。

$$r_k = \frac{X_k^*}{X_{k-1}^*}, k = n, n-1, n-2, \cdots, 3, 2, 1 \quad (1)$$

表3 评价赋值表	
r_k	评估标准
1.0	指标 X_{k-1}^* 和 X_k^* 同样重要
1.2	指标 X_{k-1}^* 比 X_k^* 重要一点
1.4	指标 X_{k-1}^* 比 X_k^* 明显重要
1.6	指标 X_{k-1}^* 比 X_k^* 强烈重要
1.8	指标 X_{k-1}^* 比 X_k^* 极端重要

(3)确定指标权重

第 n 个指标的权重公式

$$w_n^* = \left(1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i\right)^{-1} \quad (2)$$

依据 w_n^* 的权重值计算第 $k-1$ 、 k 个指标的权重

$$w_{k-1}^* = r_k w_k^*, k = n, n-1, \cdots, 3, 2 \quad (3)$$

(4)确定指标权重向量

$$W = (w_1, w_2, \cdots, w_n)^T = (w_1^*, w_2^*, \cdots, w_n^*)^T \quad (4)$$

3.1.2 COWA 算子法赋权

应用COWA算子对指标各评估数据进行降序排列,并结合指标位置进行加权处理,降低主观极值对指标权重的影响,是一种具有客观赋权特点的方法。计算步骤如下。

(1)确定评分数据集

首先,邀请 N 名专家对暴雨天气下城市雨水管网系统韧性评估指标($C_1, C_2, \cdots, C_n$)进行评分,每个指标得到相对应的评分数据集($L_1, L_2, \cdots, L_n$),并将这些决策数据从0开始进行降序排列,得到一组新的数据集($M_0, M_1, \cdots, M_{N-1}$),其中 $M_0 \geq M_1 \geq M_2 \geq \cdots \geq M_{N-1}$ 。

(2)加权向量确定

对降序排列的决策数据集进行加权计算。数据 M_j 的位置加权 w_{j+1} 计算公式为:

$$w_{j+1} = \frac{C_{n-1}^j}{2^{n-1}}, (j = 0, 1, \cdots, n-1) \quad (5)$$

表 2 指标等级划分

过程	指标层	指标等级				
		强	较强	一般	较弱	弱
压力	年平均降雨量 C_{11}/mm	<600	600~900	900~1 200	1 200~1 500	$>1 500$
	暴雨预警信号月均发布数 $C_{12}/\text{次}$	0	1 或 2	3、4 或 5	6 或 7	8 以上
	频繁遭受的降雨强度 C_{13}	小雨或中雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨
	综合径流系数 $C_{14}(\varphi)$	<0.20	0.20~0.45	0.45~0.60	0.60~0.70	>0.70
	政府财政投入建设百分比 $C_{15}/\%$	≥ 5.0	≥ 3.5	≥ 3.0	≥ 2.5	<2.5
状态	雨水口的设置 C_{21}	区域内雨水口的数量充足,位置全部设置的科学合理	区域内雨水口绝大多数设置的科学合理	区域内雨水口一半设置的科学合理	区域内雨水口少部分设置的科学合理	区域内雨水口的数量与位置设置的全部不科学合理
	雨水口泄水能力 $C_{22}/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	≥ 50	35~50	20~35	10~20	<10
	雨水管网设计降雨重现期 C_{23}/a	20~30	10~20	5~10	3~5	2~3
	雨水管管径 C_{24}/mm	$\geq 1 500$	$\geq 1 000$	≥ 800	≥ 600	<600
	管段超载率 $C_{25}/\%$	$[0, 20)$	$[20, 40)$	$[40, 60)$	$[60, 80)$	$[80, 100]$
响应	溢流节点率 $C_{26}/\%$	$[0, 20)$	$[20, 40)$	$[40, 60)$	$[60, 80)$	$[80, 100]$
	管理信息化程度 C_{31}	管网系统信息监控设备一直在运行	管网系统信息监控设备只在暴雨期间运行	管网系统信息监控设备很少运行	管网系统信息化不全面	管网系统没有信息监控设备
	管段超载恢复能力 C_{32}	$(2.8, 3.0]$	$(2.6, 2.8]$	$(2.4, 2.6]$	$(2.2, 2.4]$	$[0, 2.2]$
	节点溢流恢复能力 C_{33}	$(2.8, 3.0]$	$(2.6, 2.8]$	$(2.4, 2.6]$	$(2.2, 2.4]$	$[0, 2.2]$
	雨水管网维护周期 C_{34}/a	<3	<5	<10	<20	≥ 20
	环卫工作水平 C_{35}	雨水口处在降雨过程中,人为及时清理,无堵塞物	降雨结束后,及时清理雨水口处,无堵塞物	雨水口处每日进行处理,保证清理后无堵塞物	雨水口处不定期进行处理	雨水口处长期堵塞,并无按时清理
	应急管理制度优化 C_{36}	经常性进行	1 a 进行 1~2 次	2 a 进行 1 次	大于 2 a 进行 1 次	从未优化

(3) 指标绝对权重值的确定

$$\overline{w_i} = \sum_{j=1}^n w_j b_j, w_i \in [0, 1], j \in [1, n] \tag{6}$$

(4) 指标相对权重值的确定

$$w_i = \frac{\overline{w_i}}{\sum_{i=1}^m \overline{w_i}}, i = 1, 2, \dots, m \tag{7}$$

通过上述计算步骤,可以得到各指标的权重值。

3.1.3 改进博弈论确定组合权重

分别利用 G1 法与 COWA 算子确定各级指标权重后,利用博弈论思想确定两种方法的最优组合线性系数,通过加权组合得到最优组合权重^[16-17]。具

体计算步骤如下所示:

(1) 构造基础权重向量集

假设确定指标权重时,采用 L 种不同指标赋权的方式得到 L 种权重,那么每一个方法的基本权重向量集 W_k 。

$$W_k = (W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}), k = 1, 2, \dots, L \tag{8}$$

则这 L 种权重向量的任意线性组合为:

$$W = \sum_{k=1}^L a_k W_k^T, a_k > 0 \tag{9}$$

其中: a_k 为第 k 种权重集线性组合系数, W 为 L 种权重集的组合同权重集。

(2)实现离差极小化

优化的目标就是将 W 与各个 W_k 的离差极小化,即

$$\min \left\| \sum_{j=1}^n a_j w_j^T - w_i^T \right\|_2, (i=1, 2, \dots, L) \quad (10)$$

由矩阵的微分性质得,式(10)最优化的一阶导数条件为

$$\sum_j a_j w_j w_j^T = w_i w_i^T, (i=1, 2, \dots, L) \quad (11)$$

公式对应的线性方程组为:

$$\begin{pmatrix} w_1 w_1^T & w_1 w_2^T & \cdots & w_1 w_L^T \\ w_2 w_1^T & w_2 w_2^T & \cdots & w_2 w_L^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_L w_1^T & w_L w_2^T & \cdots & w_L w_L^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 w_1^T \\ w_2 w_2^T \\ \vdots \\ w_L w_L^T \end{pmatrix} \quad (12)$$

(3)改进博弈论确定组合系数

为了弥补传统博弈论中组合系数可能出现负数($a_k < 0$)的不足,加入式(13)这一公式来确定最终 a_k^* 组合系数^[18]。

$$a_k^* = \frac{|a_k|}{\sum_{k=1}^n |a_k|} \quad (13)$$

(4)计算综合权重

则最满意的综合权重为:

$$W = \sum_{k=1}^L a_k^* w_k^T, k=1, 2, \dots, L \quad (14)$$

本研究采用了两种指标赋权方式,因此在计算过程中,将上述中 L 取2,即可求解最优组合权重。

3.2 云模型

期望(Ex)、熵(En)和超熵(He)是云模型的3个数字特征。3个数字特征的体现如图2所示。

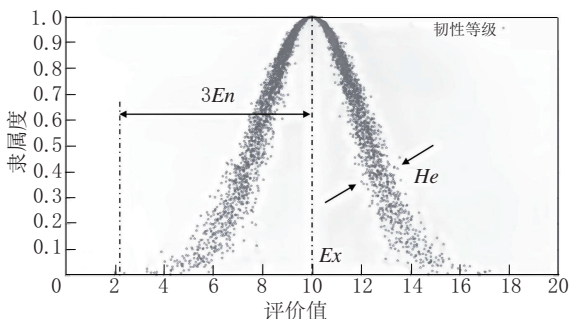


图2 云模型示意图($Ex=10, En=2, He=0.25, N=5000$)

云模型中正向云发生器和逆向云发生器可以实现定性概念与定量数值之间相互转换^[19-20]。

正向云发生器可以将数据从定性的过程转换为定量的过程,其计算步骤如下。

(1)分别产生一个期望值为 En 与 Ex ,方差为 He^2

与 y_i^2 的正态随机数 $y_i = R_N(En, He)$ 与 $x_i = R_N(Ex, y_i)$;

(2)代入计算确定度 $\mu(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - Ex)^2}{2y_i^2}\right)$;

(3) x_i 依据确定度 $\mu(x_i)$ 成为数域中的一个云滴;

(4)重复上述1至3步骤,产生 n 个云滴。

逆向云发生器可以将样本从定量的过程转换为定性的过程,其计算步骤为:

(1)这组数据根据 x_i 计算样本的均值 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$,

一阶绝对中心矩 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{X}|$,方差 $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$;

(2)计算期望 $Ex = \bar{X}$;

(3)计算熵 $En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - Ex|$;

(4)计算超熵 $He = \sqrt{S^2 - En^2}$ 。

3.3 基于组合赋权—云模型的韧性评估步骤

(1)各级指标确定组合权重

通过发放调查问卷的形式,对一级及二级评估指标进行打分,对结果分别采用G1法及COWA算子计算指标权重,并利用改进博弈论法确定最终一级及二级指标组合权重。

(2)确定韧性评估集 V

评估集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 是对城市雨水管网系统韧性评估结果的组成。本研究在论域 $U=[0, 100]$ 内将韧性评估等级划分为5级,即 $V=\{\text{“弱”、“较弱”、“一般”、“较强”、“强”}\}$ 。并采用“黄金分割率法”

$\left(\frac{\sqrt{5}-1}{2} \approx 0.618\right)$ 将各评估等级进行划分。各评估

等级分别对应的区间为 $[0, 12.73]$ 、 $[12.73, 33.33]$ 、 $[33.33, 66.67]$ 、 $[66.67, 87.27]$ 、 $[87.27, 100]$ 。计算过程如下:

$$\begin{cases} l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = 100 \\ 0.618l_3 = l_2 = l_4 \\ 0.618l_2 = l_1 = l_5 \end{cases} \quad (15)$$

式中: l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 分别为“弱”“较弱”“一般”“较强”与“强”等级的区间长度。

(3)确定评估标准云 C_v

评估标准云图是最终生成的指标云对比的基准,而评估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 个子区间为 $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$, $x_i^{\min}$ 与 $x_i^{\max}$ 分别表示区间范围的下限与上限, K 是指熵与超熵之间的线性关系,为常数,需

要根据具体的项目进行调整,本次研究设定为0.400。

评估标准云三个云数字特征值确定公式如下:

$$\begin{cases} Ex_i = \frac{x_i^{\min} + x_i^{\max}}{2} \\ En_i = \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{2.355} \\ He_i = K \end{cases} \quad (16)$$

本研究最终评估标准云的云数字特征值如表4所列,借助Matlab绘制的标准云图,如图3所示。

表4 标准云云数字特征

评估等级	云数字特征
弱	(6.400, 5.406, 0.400)
较弱	(23.000, 8.747, 0.400)
一般	(50.000, 14.157, 0.400)
较强	(76.970, 8.747, 0.400)
强	(93.600, 5.406, 0.400)

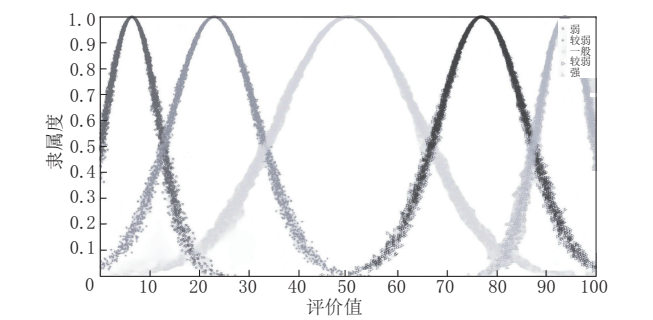


图3 评价标准云图

(4)确定评估指标云C

本研究采用先对各二级指标打出最低分与最高分,然后分别确定最低分和最高分的云数字特征值($Ex_c^{\min}, En_c^{\min}, He_c^{\min}$)与($Ex_c^{\max}, En_c^{\max}, He_c^{\max}$),最后通过式(19)确定各评估指标云的云数字特征值(Ex_c, En_c, He_c)。其中,各指标依据前文确定的韧性等级进行打分,依据表5赋值区间。

生成的每个指标的评估指标云,通过Matlab软件生成云图,依据云图形状,向专家反馈意见,多次调整打分数值,直至生成满意的云图。

评估指标云的云数字特征值计算公式如下:

$$\begin{cases} Ex_c = \frac{Ex_c^{\min} En_c^{\min} + Ex_c^{\max} En_c^{\max}}{En_c^{\min} + En_c^{\max}} \\ En_c = En_c^{\min} + En_c^{\max} \\ He_c = \frac{He_c^{\min} En_c^{\min} + He_c^{\max} En_c^{\max}}{En_c^{\min} + En_c^{\max}} \end{cases} \quad (17)$$

(5)确定综合评估云

一级指标云及系统整体指标云的云数字特征值确定方式是通过二级指标云的云数字特征值与组合

表5 雨水管网系统韧性等级赋值表

评估等级	赋值区间
弱	[0, 15)
较弱	[15, 35)
一般	[35, 65)
较强	[65, 85)
强	[85, 100]

权重加权计算确定,然后借助正向云发生器,利用Matlab生成综合评估云图。计算方法如下:

$$\begin{cases} Ex = \frac{\sum_{j=1}^n Ex_j w_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \\ En = \frac{\sum_{j=1}^n En_j w_j^2}{\sum_{j=1}^n w_j^2} \\ He = \frac{\sum_{j=1}^n He_j w_j^2}{\sum_{j=1}^n w_j^2} \end{cases} \quad (18)$$

(6)评估结果的确定方式

本研究根据式(19)、式(20)^[21]计算出指标云与标准云的相似度值,并进行分析比较:

$$\delta_i = \left[W_{Ex} (Ex - Ex_i)^2 + W_{En} (En - En_i)^2 + W_{He} (He - He_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$L_i = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i} \times 100\% \quad (20)$$

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

4 案例分析

贵州省D市辖区东西宽64 km,南北长63 km,总面积2 285 km²,耕地面积500 km²。2021年末,户籍总人口为51.08万人。

本文研究区范围为该市整体开发程度较高的一片区域,建筑物密集,面积为4.375 km²。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。研究区域地理位置及范围如图4所示。



图4 研究区域范围

4.1 研究区指标初始值及权重

本研究区定量指标采用查询资料与SWMM软件模拟结果相结合的方式获取,而定性指标采用收集调查问卷的形式进行获取。相关评级指标及组合赋权如表6所列。

表6 各指标初始值及权重

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
		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
状态(B ₂)	0.331	雨水管网设计降雨重现期(C ₂₃)	5 a	0.068
		雨水管管径(C ₂₄)	1 000~1 500 mm	0.072
		管段超载率(C ₂₅)	44.41%(5 a) 93.62%(100 a)	0.072
响应(B ₃)	0.389	溢流节点率(C ₂₆)	30.98%(5 a)/ 84.51%(100 a)	0.056
		管理信息化程度(C ₃₁)	较弱	0.048
		管段超载恢复能力(C ₃₂)	2.78(5 a)/2.21(100 a)	0.077
		节点溢流恢复能力(C ₃₃)	2.83(5 a)/2.40(100 a)	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
		应急管理制度的优化(C ₃₆)	较弱	0.059

4.2 研究区雨水管网系统韧性等级确定

邀请专家对案例中各指标实际数据,按照指标韧性评估标准(见表2、表3),进行韧性等级确定,并根据表6对各指标进行评分,为了确保评分结果相对科学可靠,需要进行多次考量。

根据逆向云发生器计算出二级指标的最低分云数字特征和最高分云数字特征,通过式(17)计算出每个二级指标的综合云数字特征,如表7所示。

表7 各二级指标综合云数字特征值

二级指标	5 a综合云数字特征值	100 a综合云数字特征值
C11	(10.809, 2.307, 0.360)	(10.809, 2.307, 0.360)
C12	(63.223, 4.487, 0.951)	(63.223, 4.487, 0.951)
C13	(52.788, 2.432, 0.706)	(52.788, 2.432, 0.706)
C14	(46.899, 6.492, 0.738)	(46.899, 6.492, 0.738)
C15	(36.107, 2.858, 0.287)	(36.107, 2.858, 0.287)
C21	(64.290, 5.790, 0.562)	(64.290, 5.790, 0.562)
C22	(22.813, 2.582, 0.248)	(22.813, 2.582, 0.248)
C23	(57.182, 4.562, 0.728)	(57.182, 4.562, 0.728)
C24	(44.926, 2.632, 0.472)	(44.926, 2.632, 0.472)
C25	(64.570, 3.434, 0.804)	(5.403, 2.782, 0.596)
C26	(75.708, 3.660, 0.780)	(9.293, 2.758, 0.765)
C31	(29.643, 3.209, 0.531)	(29.643, 3.209, 0.531)
C32	(82.200, 2.556, 0.613)	(17.060, 1.880, 0.487)
C33	(89.403, 2.782, 0.596)	(21.708, 3.660, 0.780)
C34	(25.661, 3.911, 0.456)	(25.661, 3.911, 0.456)
C35	(35.700, 3.083, 0.406)	(35.700, 3.083, 0.406)
C36	(47.899, 5.364, 1.037)	(47.899, 5.364, 1.037)

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(18)进行组合计算,分别得出一级指标云数字特征值和该研究区域雨水管网系统整体韧性的云数字特征值,如表8所列。然后利用正向云发生器,借助Matlab分别生成评估云图。

根据式(19)、(20)计算指标综合评估云与标准云的相似度,对比结果如表9、表10所列。

综上所述,降雨强度分别为5 a与100 a时雨水管网系统的韧性等级如表11所列。

5 结 语

(1)本研究借鉴生态领域PSR模型的“致因—效应—响应”思维逻辑,对应分析了暴雨天气下城市雨水管网系统的“压力—状态—响应”3个阶段的韧性特性,定义了面向暴雨灾害的城市雨水管网系统韧性,同时结合城市雨水管网系统组成、暴雨天气下雨水管网系统风险灾害因素及防灾过程分析,构建了3个过程、7个方面及具体17个指标的韧性评估指标体系,拓展了现有的研究维度。

表 8 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)	(63.586, 3.596, 0.919)	(62.067, 2.507, 0.592)	(59.177, 2.989, 0.699)
100 a	(49.950, 3.073, 0.597)	(43.397, 3.363, 0.876)	(36.433, 2.422, 0.579)	(42.523, 2.876, 0.679)

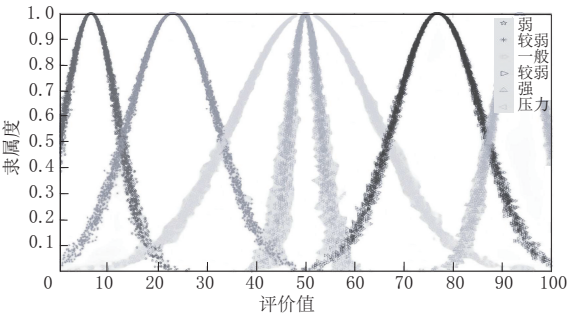


图 5 压力韧性等级云图

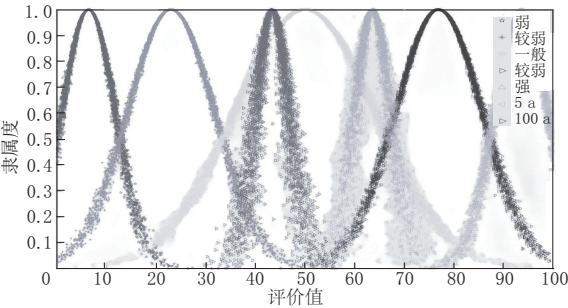


图 6 状态韧性等级云图

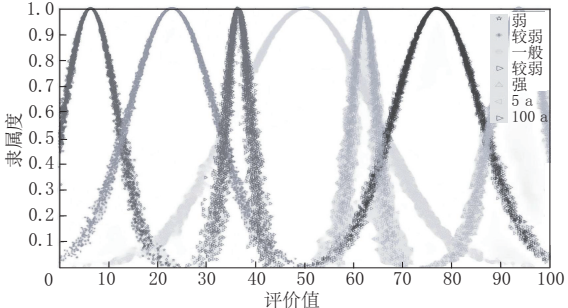


图 7 响应韧性等级云图

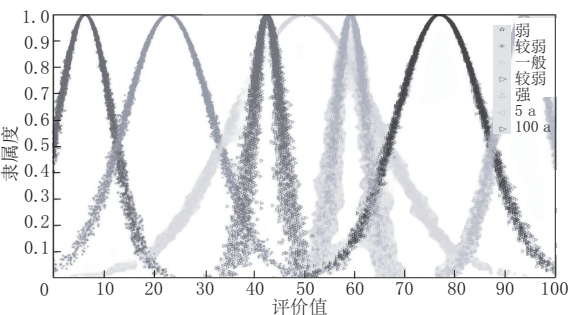


图 8 系统整体韧性等级云图

(2)本研究对建立的评估指标体系进行量化与等级划分,利用G1法解决层次分析法中一致性检验不易通过与COWA算子法可以避免极端值对赋权结果影响的特点,提出G1法与COWA算子法分别确定指标的主观及客观权重,引入博弈论思想(改进博弈论法)对各指标权重进行组合,确保权重组合结果科

表 9 P=5 a 时指标云与标准云的相似度比对表 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	4.75	7.87	8.04	8.00
较弱	7.66	11.08	11.45	11.67
一般	75.21	32.57	36.40	44.39
较强	7.64	33.48	29.92	23.67
强	4.74	14.99	14.19	12.27

表 10 P=100 a 时指标云与标准云的相似度比对表 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	4.75	10.26	15.04	10.99
较弱	7.66	18.56	33.40	20.28
一般	75.21	52.32	32.51	49.44
较强	7.64	11.30	11.14	11.52
强	4.74	7.56	7.90	7.77

表 11 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
5 a	一般	较强	一般	一般
100 a	一般	一般	较弱	一般

学有效。采用具有定性定量之间相互自由转化优点的云模型评估法,构建了组合赋权-云模型的韧性评估模型,使得暴雨天气下城市雨水管网系统韧性评估结果更加科学有效。

参考文献:

[1] 黄育华,杨文明,赵建辉.中国城市公共安全发展报告(2016—2017)[M].北京:社会科学文献出版社,2017.

[2] 耿煜周.基于韧性理念的城市承洪规划与管理策略研究[D].天津:天津大学,2020.

[3] Mugume Seith N, Gomez Diego E, Fu Guangtao, Farmani Raziye, Butler David. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems[J]. Water research, 2015(81): 15–26.

[4] Birgani Y T, Yazdandoost F. A framework for evaluating the persistence of urban drainage risk management systems[J]. Journal of Hydro-Environment Research, Elsevier B.V, 2014, 8(4): 330–342.

[5] Birgani Y T, Yazdandoost F. Resilience in urban drainage risk management systems[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 2016, 169(1): 3–16.

[6] Dong X, Guo H, Zeng S. Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure[J]. Water Research, Elsevier Ltd, 2017(124): 280–289.

[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 and Technology, 2018,36

- (16): 346-360.
- [8] 杨秋侠,晁昕逸.基于复杂网络方法的既有雨水管段脆弱性判定[J].水资源保护,2018,34(5):27-33.
- [9] 杨秋侠,赵瑞垠.基于网络最大流的城市雨水管网系统脆弱性评价[J].系统工程理论与实践,2018,38(11):2987-2992.
- [10] 方咸根.城市雨水管网多目标优化设计及韧性评估研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [11] 焦柳丹,邓佳丽,吴雅,等.基于PSR+云模型的城市韧性水平评价研究[J].生态经济,2022,38(5):114-120.
- [12] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [13] BERKES F, FOLKE C. Linking social and ecological systems for resilience and sustainability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 1-16.
- [14] CARPENTER S R, WESTLEY F, TURNER G. Surrogates for resilience of social-ecological systems[J]. Ecosystems, 2005, 8(8): 941-944.
- [15] 魏竞超,李自涵,董媛媛.基于压力-状态-响应(PSR)模型的黄河流域环境安全评价体系法治化研究[J].中国环境监测,2023,39(1):19-28.
- [16] 李杨,侯晓娜.基于G1-COWA组合赋权的装配式建筑施工风险评价[J].华北理工大学学报(自然科学版),2020,42(4):87-92,99.
- [17] 贾玉霞.基于博弈论组合赋权和模糊评价的我国跨境电商物流模式研究[D].杭州:浙江工商大学,2017.
- [18] 苏观南,付修庆,刘天祥.改进的博弈论综合权重在大坝安全综合评价中的应用[J].中国农村水利水电,2014(11):82-85.
- [19] 王国胤,李德毅.云模型与粒计算[M].北京:科学出版社,2012.
- [20] 李丹,董春游,刘忠艳.基于云模型的多属性评价方法研究[J].微计算机信息,2010,26(27):220-222.
- [21] 刘翠莲,庄海林,张群淑.基于熵权-云模型的环渤海邮轮港口竞争力评价[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(7):8-15.
- [22] 邢斐,李莎莎,崔铁军.基于PSR-可拓云模型的井工煤矿区生态安全评价[J].水土保持通报,202,43(2):341-349.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

