

基于 PSR 和改进 CRITIC 赋权的北京市洪涝韧性度研究

刘雅娴 王启飞*

北京建筑大学机电与车辆工程学院 北京 100044

【摘要】：在全球气候变暖和快速城镇化的背景下，增强城市洪涝韧性是实现城市可持续发展的必然要求。本研究基于 PSR 模型，结合生态、经济、社会、工程四大子系统，构建了包括 31 个指标的城市洪涝韧性评价体系，结合改进的 CRITIC 赋权法求出指标客观权重，采用综合指数法计算北京市洪涝韧性指数。研究结果表明，2013—2023 年，北京市洪涝韧性指数整体呈上升态势，提升城市的洪涝韧性水平需重点关注经济、社会、工程方面的响应能力。

【关键词】：PSR 模型；改进 CRITIC 赋权法；城市洪涝韧性度；洪涝韧性评价指标体系

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.059

近年来，在全球气候变化背景下，极端天气事件频发导致的自然灾害事件呈增长趋势^[1]，尤其是洪涝灾害。与此同时，城镇化进程的加速推进使得城市基础设施建设规模扩大，不透水面增加，导致雨水的自然渗透与蓄积能力退化，致使城市在遭遇暴雨时，排水系统的压力骤增，从而引发内涝，增加城市洪涝风险^[2]，对城市公共安全构成严重威胁。在此背景下，学者们开始关注城市系统在面对不确定性和复杂性时的适应能力，“城市洪涝韧性”概念应运而生^[3]，如何科学提升城市洪涝韧性已成为目前城市发展领域亟待深入研究的关键课题之一。

1 城市洪涝韧性

韧性（resilience）概念起源于生态学。20 世纪 90 年代以来，韧性概念的研究范畴逐渐从自然生态学领域向人类生态学领域延展^[4]。总体上，历经“工程韧性、生态韧性、社会-生态系统韧性”^[5]。21 世纪后，韧性概念在灾害学领域受到高度重视和广泛应用，成为公共安全与应急管理研究领域的新概念。2013 年，IPCC 第五次评估报告首次将“洪涝韧性”作为独立议题，强调其“抵抗、吸收、恢复”三重属性。此后，众多学者在此基础上开展实证研究。

城市洪涝韧性是一个多维度、动态的系统属性，目前学术界普遍从能力维度和过程维度构建其内涵。能力维度通常涵盖生态、经济、社会、基础设施建设、制度与技术等子系统^[6]。具体表现为抵抗能力、适应能力、恢复能力、转型能力。其中，抵抗能力即系统在承受洪涝冲击而不失效的能力，如金溪等^[7]、唐少虎等^[8]提及的排水能力，WenpingX 等^[9]指出的路网密

度。其次，适应能力是系统在灾害发生时调整自身结构功能以维持基本服务的能力，如李亚敏和张楠^[10]研究中提到的人均粮食产量、弱势人口比重等，周铭毅等^[11]提及的主城区道路易积水点数量指标。此外，恢复能力是指灾后快速修复受损功能并学习改进的能力。YaohuiL 等^[12]使用的夜间灯光强度，张慧等^[13]研究中提到的各城市生产总值 GDP、医院卫生院床位数。最后，转型能力在部分研究中强调系统发生根本性变革来应对未来风险的能力，代表性指标为 R&D 经费占 GDP 的比重^[14]。从过程维度上来看，城市洪涝韧性体现于灾前一灾时一灾后的全过程。蒋硕亮等^[15]通过对致灾因子、孕灾环境以及承灾体韧性进行分类评估。闫绪娴等^[16]构建事故树-贝叶斯网络模型从灾前预防、灾中抵御、灾后恢复三个维度对地铁洪涝灾害提出针对性的对策建议。在评价模型上，学者们普遍采用层次分析法、CRITIC 法、熵权法等；在决策分析上多用云模型、综合指数法、地理探测器模型等^[17]。

目前，相关对城市洪涝韧性的影响因素和测算方面已有大量研究，但在某区域内的研究相对较少。基于此，本文以北京市为例，基于压力—状态—响应（PSR）模型，并结合经济、社会、生态、工程四个维度构建城市洪涝韧性指标体系，使用改进的 CRITIC 法计算指标权重，利用综合指数法计算北京市洪涝韧性度，分析 2013—2023 年的变化趋势，以期为城市洪涝韧性建设提供依据。

2 城市洪涝韧性度评价方法

2.1 PSR 模型理论

作者简介：刘雅娴（2000-），性别：女，安徽淮南人，硕士在读，研究方向：能源与环境管理。

通讯作者：王启飞（1990-），性别：男，河南信阳人，博士，讲师，主要从事安全生产大数据、城市运行风险管理、韧性城市、建筑与矿山安全管理等方面的研究。

压力（Pressure）—状态（State）—响应（Response）模型，起初用以描述“人类活动对环境的压力—环境状态的变化—社会应对措施”之间的因果关系，后被拓展至生态、资源、灾害等多个领域。本文在构建城市洪涝韧性评价指标体系时，将考虑导致系统状态发生变化的洪涝灾害与人类活动，以及在遭受洪涝灾害压力下城市当前的特征、功能或状况，城市子系统在缓解压力、改善状态或适应变化而采取的措施，与 PSR 模型相结合，具体作用过程如图 1 所示，进而选取三个方面的具体指标。

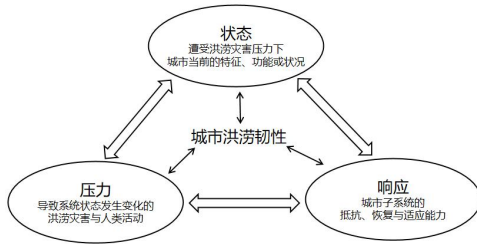


图 1 PSR 模型的作用过程示意图

2.2 基于 PSR 模型的指标体系构建

本文借鉴国内外城市洪涝韧性相关研究，参考 GB/T 40947—2021《安全韧性城市评价指南》以及 DB11/T 2280-2024《城市韧性评价导则》，构建城市洪涝韧性评价指标体系，基于 PSR 模型，从生态、经济、社会、工程四个维度选取 31 项相关指标，如图 2 所示。同时兼顾指标选取的系统性、典型性、科学性和可获取性。

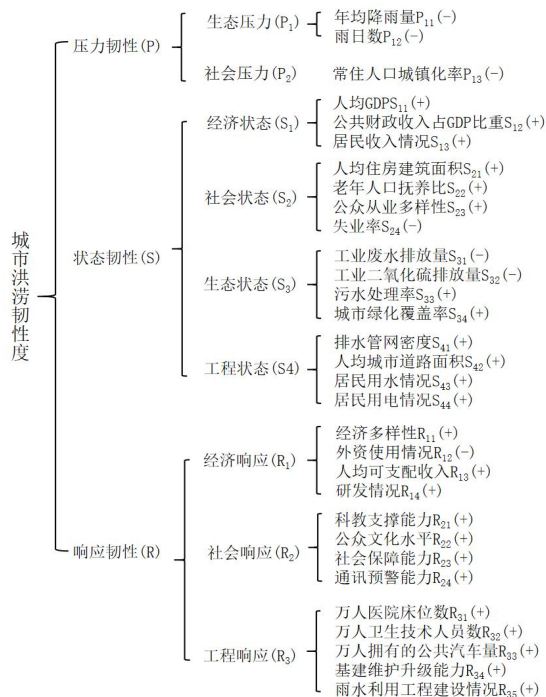


图 2 城市洪涝韧性指标体系

2.3 数据来源与预处理

选取北京市作为研究区域，样本年份为 2013—2023 年，数据主要来源于历年《北京统计年鉴》、《中国城市建设统计年鉴》、《北京市水务统计年鉴》。对于人口承载能力 S_{21} 、公众承受能力 R_{13} 缺失的 2013-2014 年数据、排水管网情况 S_{41} 缺失的 2020-2023 年数据已采用线性插值法进行补充。

采用极差归一化对原始数据进行预处理。

对于正向指标，公式如下：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

对于负向指标，公式如下：

$$y_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中： x_{ij} 为指标原始值， y_{ij} 为归一化后的指标值， $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 分别为研究期内指标的最小值和最大值。

2.4 权重确定及综合评价

选用结合熵权法的改进 CRITIC 法确定指标权重。传统的 CRITIC 法在实际应用中未能将各指标间的离散程度纳入考量范围，而熵权法能够很好地反映指标离散程度对总体的影响。因此，本研究采用熵权法对 CRITIC 方法进行改进，步骤如下：

(1) 建立城市洪涝韧性评价矩阵。使用归一化后的指标值 y_{ij} 构建评价矩阵，若有 n 个待评价对象，选用评价指数为 p ，本文中 $p=31$ ：

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{pn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

(2) 计算评价指标间的相关系数。通常使用相关系数来反向呈现指标的冲突情况，当相关系数偏大，则指标与其他指标的冲突性偏小，评价效力偏弱，应分配相对较少的权重系数。式中， $\bar{y}_j$ 表示第 j 个指标的平均值， S_j 表示第 j 个指标的标准差。

$$\begin{cases} \bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \\ S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{n-1}} \end{cases} \quad (4)$$

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (5)$$

式中， R_j 表示评价指标 i 和 j 之间的相关系数。

(3) 计算评价指标的信息熵。使用熵权法的计算公式去求出各个指标的熵值。其计算公式如下：

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \ln \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \quad (6)$$

式中, e_j 表示第 j 个指标的信息熵。

(4) 计算城市洪涝韧性评价指标的组合权重值。第 j 个评价指标的权重值为:

$$w_j = \frac{(S_j + e_j) \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij})}{\sum_{j=1}^n (S_j + e_j) \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij})} \quad (7)$$

计算城市洪涝韧性指数。计算公式为:

$$\Omega_i = \sum_{j=1}^n w_j y_{ij} \quad (8)$$

3 北京市洪涝韧性评价

3.1 区域概况

北京市地处华北平原北部, 东经 $115^{\circ} 20' - 117^{\circ} 30'$ 、北纬 $39^{\circ} 28' - 41^{\circ} 05'$ 之间, 总面积 16410.54 平方千米。地势呈现西北高、东南低, 由于城中心位于永定河洪积扇脊部, 易致降雨时山洪向平原汇聚。北京市属暖温带季风气候, 夏季降水集中且强度大, 且受燕山、太行山地形影响, 降雨空间分布不均, 山前迎风坡多雨, 背风坡少雨, 强降雨成为洪涝灾害的主要诱因。境内有沟河、永定河、潮白河、北运河、拒马河 5 条主要河流, 密云水库、官厅水库等水利设施, 在洪水调节中发挥关键作用, 但极端降雨下调蓄压力显著增加。作为超大城市, 中心城区人口密集, 城市化导致不透水地面增加, 郊区防洪设施较为落后, 使得北京市内涝风险加剧。

3.2 指标权重结果分析

由归一化后的指标值代入式 (3) 一式 (7) 计算得到各项指标的综合权重, 再计算出各指标权重在组内占比, 得到组内权重。如表 1 所示。

表 1 权重结果表

序号	综合权重	序号	综合权重	序号	综合权重
P ₁₁	0.0575	S ₃₂	0.0298	R ₂₁	0.0575
P ₁₂	0.0686	S ₃₃	0.0215	R ₂₂	0.0464
P ₁₃	0.0199	S ₃₄	0.0231	R ₂₃	0.0235
S ₁₁	0.0201	S ₄₁	0.0436	R ₂₄	0.0318
S ₁₂	0.0283	S ₄₂	0.0333	R ₃₁	0.0199
S ₁₃	0.0198	S ₄₃	0.0326	R ₃₂	0.0203
S ₂₁	0.0273	S ₄₄	0.0201	R ₃₃	0.0546
S ₂₂	0.0203	R ₁₁	0.0284	R ₃₄	0.0399
S ₂₃	0.0201	R ₁₂	0.0473	R ₃₅	0.0358
S ₂₄	0.0285	R ₁₃	0.0198		
S ₃₁	0.0339	R ₁₄	0.0266		

从指标权重来看, 综合权重排列前五位的指标为“雨日数”

“年均降雨量”“科教支撑能力”“万人拥有的公共汽车量”“外资使用情况”, 权重系数分别为: 0.0686、0.0575、0.0575、0.0546、0.0473, 说明相较于其他指标, 上述五个指标对城市洪涝韧性的影响程度更大。综合权重系数低于 0.0200 的四位指标为“常住人口城镇化率”“居民收入情况”“均可支配收入”“万人医院床位数”, 说明这些指标对于城市洪涝韧性评价的影响较小。

从准则层权重来看, 城市的压力韧性、状态韧性和相应韧性的综合权重系数分别为 0.1459、0.4023 和 0.4517, 这表明城市洪涝韧性水平与城市在遭受洪涝灾害时各子系统的状态变化以及灾后各子系统适应变化而采取的措施密切相关, 提升城市的洪涝韧性水平重点需要关注经济、社会、工程方面的响应能力。经济方面的实际使用外资情况, 在洪涝灾害发生后, 外资参与度高的经济体往往具备更强的资本调度能力以及产业修复动能, 能够快速重启生产、恢复供应链。社会方面, 科教支撑能力直接决定城市应对灾害的技术储备与人才储备, 而公众文化水平则影响社会系统的抗灾协同能力, 文化素养较高的群体对灾害认知更深、自救互救能力更强, 能够积极配合应急救援实施。工程方面, 充足的公共交通资源能快速转移受困群众; 基建维护升级能力更是保障城市“硬件”抗灾韧性的关键; 雨水利用工程建设情况则体现主动防洪的系统思维, 通过海绵城市建设、雨水调蓄设施等, 可在降雨初期削减洪峰流量、减少地表径流, 缓解排水系统压力, 从源头降低内涝发生频率和强度。

3.3 城市洪涝韧性结果分析

图 3 为研究期内北京市洪涝韧性指数随时间变化的趋势。由图 3 可知, 北京市洪涝韧性指数整体呈现上升趋势, 城市洪涝韧性指数从 2013 年的 0.4033 上升至 2023 年的 0.6829。从变化趋势看, 北京市洪涝韧性指数有以下五个变化阶段: 2013—2014 年, 洪涝韧性指数有所上升, 从初始水平上升到相对较高位置, 压力、状态、响应韧性指数均呈上升; 2014 年到 2015 年, 洪涝韧性指数下降, 该研究期内, 全年雨日数增多, 使得压力韧性指数下降, 在科教、交通保障以及基础设施上支出下降, 公众文化水平与预警能力较差, 使得响应韧性指数下降; 2015—2020 年, 指数呈稳步上升的态势, 并在 2020 年达到阶段性高点; 在 2020—2021 年研究期内, 雨日数以及年均降雨量为最大值, 压力韧性指数极低, 由于此时城市正遭受新冠疫情的冲击, 致使响应韧性指数回落, 拉低洪涝韧性指数; 2021 年到 2023 年指数再次回升, 且在 2023 年达到研究期内的最高值, 北京市经济复苏, 城市规划以及防洪设施的投资与维护方面取得一定成效。总体而言, 在本次研究所选取的时间范围内, 北京市洪涝综合韧性所呈现的状态, 展现了城市

具备良好的发展态势和可持续建设的潜力。

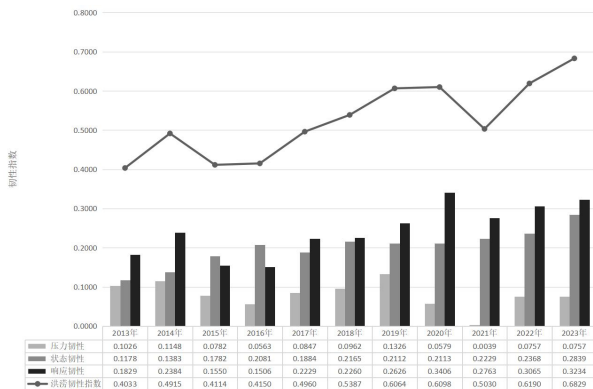


图3 北京市 2013—2023 年城市洪涝韧性指数

4 结论

(1) 基于 PSR 模型, 结合相应标准体系与国内外文献资料, 构建了较为全面的城市洪涝韧性度评价指标体系。使用熵

参考文献:

- [1] IPCC.Contribution of Working Groups I,II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change:Climate Change 2023:Synthesis Report[R].Geneva:IPCC,2023:35-115.
- [2] Kaisheng L,Xuejun Z.Increasing urban flood risk in China over recent 40 years induced by LUCC[J].Landscape and Urban Planning,2022,219.
- [3] Holling CS.Resilience and stability of ecological systems.Annual Review of Ecology&Systematics,1973,4:1-23.
- [4] 杨江,李琴,陈金明.基于韧性城市理论的城市水灾害防御对策研究——以成都东部新城为例[J].四川水利,2020,41(03):5-8+13.
- [5] 李翊,马鑫雨,夏晴.国内外韧性城市的研究对黄河滩区空间规划的启示[J].城市发展研究,2020,27(02):54-61.
- [6] 孔锋,龚靖愉.城市社区洪涝灾害韧性研究进展与展望[J].灾害学,2025,40(02):111-118+132.
- [7] 金溪,穆延.暴雨内涝下城市路网抗涝韧性评估[J].交通运输系统工程与信息,2024,24(05):226-236.
- [8] 唐少虎,朱伟,程光,等.暴雨内涝下城市道路交通系统安全韧性评估[J].中国安全科学学报,2022,32(07):143-150.
- [9] Wenping X,Yuan Z,David.P,et al.Enhancing the resilience of road networks to flooding[J].International Journal of Building Pathology and Adaptation,2024,42(2):213-236.
- [10] 李亚敏,张楠.基于有序加权平均算子和后悔理论的城市洪涝灾害韧性评价[J].人民黄河,2024,46(11):56-62.
- [11] 周铭毅,尚志海,蔡灼芬,等.基于 VIKOR 方法的广东省城市洪涝灾害韧性评估[J].灾害学,2023,38(01):206-212.
- [12] Yaohui L,Wenyi L,Yu L,et al.Urban waterlogging resilience assessment and postdisaster recovery monitoring using NPP-VIIRS nighttime light data:A case study of the ‘July 20,2021’ heavy rainstorm in Zhengzhou City,China[J].International Journal of Disaster Risk Reduction,2023,90.
- [13] 张慧,刘耀龙,冯洁瑶.城市化质量、城市韧性对洪涝灾害风险的影响——基于山西 11 个地级市面板数据[J].经济问题,2020,(04):114-120.
- [14] 何伟军,曹东杰,袁亮,等.基于组合赋权—云模型的海绵城市韧性水平研究[J].生态经济,2025,41(05):81-89+126.
- [15] 蒋硕亮,陈贤胜.洪涝情景下城市韧性评估及障碍因素分析[J].统计与决策,2022,38(24):63-67.
- [16] 闫绪娴,王俊丽,范玲,等.韧性城市视角下地铁洪涝灾害风险分析——基于 Bow-Tie—贝叶斯网络模型[J].灾害学,2022,37(02):36-43.
- [17] 王启飞,赵逸涵,张慧,等.基于 PSR 和信息敏感性的城市韧性度评价:以北京市为例[J].中国安全科学学报,2023,33(08):198-204.

权法的改进 CRITIC 法确定指标的客观权重, 并使用综合指数法构建评价模型, 为城市洪涝韧性评价提供了新的方法和思路。

(2) 基于北京市的案例结果分析表明, 在研究期内北京市洪涝韧性水平整体呈上升的趋势, 利用构建的指标体系能够清晰的找出城市在应对洪涝灾害时需要重点关注的指标, 如实际使用外资情况、科教支撑能力等, 便于相关部门采取有效的措施。