

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.005

基于多源数据的长春市洪涝灾害应对能力评估与提升

段亭亭^{1,2}, 李鹏峰², 邱顺添¹, 黄 鹏², 田腾飞², 刘 茜²

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 为提升长春市洪涝灾害应对能力, 构建了基于压力-状态-响应概念模型的洪涝灾害应对能力综合评估指标体系, 该体系将城市洪涝系统解构为压力(P)、状态(S)和响应(R)3个子系统, 对应灾害成因、损失现状与应对措施, 分别精选了4、6、4个核心评估指标, 运用熵权法计算了长春市2002—2021年各子系统的时序权重, 并利用耦合协调度模型分析了S子系统分别与P、R子系统的动态协调关系。结果表明:P子系统、R子系统呈显著线性增长趋势, 表明城市面临的致灾压力与应对能力均在增强, 而S子系统未表现出明显趋势; 2010年、2013年、2017年S子系统与P、R子系统之间出现了不同程度的失调或耦合协调度下降现象, 这与同期强降水量呈现相对高值高度吻合; 城市洪涝灾害应对能力受强降雨显著影响, 需协同工程与非工程技术策略, 并优化城市规划、建设与管理策略, 以提升系统协调性与灾害应对效能。

关键词: 城市内涝治理; 洪涝灾害应对; 压力-状态-响应; 熵权法; 耦合协调度; 长春市

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)06-0041-08

Assessment and enhancement of flood disaster response capability in Changchun City based on multi-source data

DUAN Tingting^{1,2}, LI Pengfeng², KHU S T¹, HUANG Peng², TIAN Tengfei², LIU Qian²

(1. School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: To enhance the flood disaster response capability of Changchun City, a comprehensive evaluation indicator system for flood disaster response capability was constructed based on the pressure-state-response conceptual model. This system deconstructed the urban flood disaster system into three subsystems: pressure (P), state (S), and response (R), corresponding to disaster causes, loss status, and response measures, respectively. A total of 4, 6, and 4 core evaluation indicators were carefully selected for each subsystem. The entropy weight method was applied to calculate the temporal weights of each subsystem in Changchun City from 2002 to 2021, and the coupling coordination degree (CCD) model was used to analyze the dynamic coordination relationship between the S subsystem and the P and R subsystems. The results indicate that the P and R subsystems exhibit significant linear growth trends, reflecting increasing disaster-inducing pressures and enhanced response capabilities in the city, while the S subsystem does not show a clear trend. During 2010, 2013, and 2017, varying degrees of imbalance or declines in CCD have been observed between the S subsystem and the P and R subsystems, which closely coincide with relatively high precipitation levels during those years. The urban flood disaster response capability is significantly influenced by heavy rainfall, necessitating the synergistic integration of engineering and non-engineering technical strategies, as well as the optimization of urban planning, construction, and management strategies, so as to improve system coordination and disaster response effectiveness.

Key words: urban inundation management; flood disaster response; pressure-state-response; entropy weight method; coupling coordination degree; Changchun City

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3800500); 中国博士后科学基金会与天津市联合资助项目(特别资助)(2023T006TJ); 中国建设科技集团股份有限公司创新基金-青年基金项目(Z2024Q02); 中国市政工程华北设计研究总院有限公司课题(2024-61-HJY)

作者简介: 段亭亭(1992—), 女, 工程师, 博士, 主要从事城市排水系统仿真模拟、城市内涝灾害评估研究。E-mail: tingyeh666@163.com

通信作者: 李鹏峰(1981—), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事城市极端暴雨洪涝灾害风险评估研究。E-mail: lipengfengtj@163.com

引用本文: 段亭亭, 李鹏峰, 邱顺添, 等. 基于多源数据的长春市洪涝灾害应对能力评估与提升[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 41-48.

DUAN Tingting, LI Pengfeng, KHU S T, et al. Assessment and enhancement of flood disaster response capability in Changchun City based on multi-source data[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 41-48.

极端降雨引发的城市洪涝灾害已成为制约城市安全可持续发展的重大威胁。国家气候中心联合中国气象科学研究院的研究表明,至 21 世纪末,我国大陆极端降雨与 1986—2005 年相比,发生频率和强度仍会有持续且明显的增加趋势^[1]。极端降雨导致地表径流超过洪涝灾害应对能力,会导致城市洪涝灾害事件^[2],如郑州“7·20”极端降雨^[3]和北京市“23·7”极端降雨事件^[4]。城市区域易受极端降雨事件影响的根本原因是城市排水系统的蓄排能力不足,主要体现在雨水管网设计标准偏低、调蓄设施不足、泵站排水能力不够、多蓄排设施间衔接效率不高等方面^[5]。如何提高城市地区的雨洪灾害应对能力,成为当前亟待解决的重大课题之一^[6]。研究城市洪涝灾害成因、造成的损失及应对措施之间的关系对于控制灾害风险、减缓洪涝影响、进一步提高城市洪涝灾害应对能力、促进人口高度集中的城市区域可持续发展具有重要意义。

长春市深受暴雨内涝问题困扰,严重积水事件时有发生,对城市交通和居民生活造成显著影响^[7]。因此,研究长春市近 20 年来降雨、人口、社会经济活动的动态变化与城市洪涝灾害应对能力,对城市区域排水科学规划和有效管理具有重要的参考作用和现实意义。

本文以长春市串湖小流域为研究区域,基于“压力-状态-响应”(pressure-state-response,PSR)概念模型,从系统角度出发,综合考虑城市洪涝灾害的成因、损失和相关应对措施等多维度,构建城市洪涝灾害应对能力综合评估指标体系,量化分析城市洪涝灾害管理中各维度指标的时序演进趋势及相互之间的耦合协调水平,以期制定科学合理的城市洪涝灾害应对工程、非工程技术策略提供理论依据。

1 研究区概况

串湖小流域位于长春市南部,总汇水面积约 81.6 km²,整体地势为南部高北部低,水系构成为“一干流、两支流”,即串湖干流、宋家明沟支流、翟家明沟支流^[8]。串湖干流为长春市三大排水体系之一伊通河的一级支流,以长春公园南部为起点,自南向北流经多个公园水体,最终汇入伊通河。串湖小流域属欧亚大陆东部中温带大陆性半湿润半干旱季风气候,年内降雨分配不均,汛期(6—9 月)降水量一般超过全年降水量的 70%。近年来,受全球气候变化影响,串湖小流域极端降雨事件增加趋势明显。同时,随着城市化进程的快速推进,城市建设导致的地表硬化面积增加加快了区域汇水径流速度和流量,给雨水管网、泵站等设施造成了较大压力。另外,由于城市土地资源减少,立体交通等建设工程日益增多,给竖向标高、管道负荷等方面带来较大冲击,人为造成的局部低洼区不利于雨水的收集与排放。在上述城市化和气候变化的叠加影响下,串湖小流域内涝风险加剧。

2 研究方法

PSR 概念模型的压力 P 子系统包含 4 个指标($x_1 \sim x_4$),状态 S 子系统包含 6 个指标($x_5 \sim x_{10}$),响应 R 子系统包含 4 个指标($x_{11} \sim x_{14}$),最终形成包含 14 个指标的综合评估指标体系。收集各指标在 2002—2021 年的年度数据,由此形成 20×14 的二维数据矩阵。首先,由于各指标的量纲和取值范围不同,为消除各指标在数量级上的差异以进行更公平、有效的分析,采用数据归一化法对各指标数据进行预处理。然后,采用熵权法计算各指标权重 w_{p_j} 、 w_{s_j} 、 w_{r_j} 和各子系统在 2002—2021 年的综合得分 U_P 、 U_S 、 U_R 。最后,利用各子系统综合得分,采用耦合协调度模型计算 P 子系统与 S 子系统、R 子系统与 S 子系统之间的耦合协调度 D ,通过量化两对子系统之间的耦合协调水平,进一步分析城市洪涝灾害成因和损失、应对措施和损失之间的动态关联关系。

2.1 基于 PSR 概念模型的指标体系构建

1993 年,国际经济合作与发展组织和联合国环境规划署共同推荐 PSR 概念模型作为生态环境系统评估的研究框架之一,并通过一组选定的核心指标对世界环境状况进行了评价^[9-10]。PSR 概念模型通过 P、S、R 子系统分别回答环境系统中“发生了什么”“怎么样”和“如何做”3 个问题,已在全球多个地区及不同环境系统中得到应用,展现出了良好的跨区域适用性。例如,在降雨不均匀地区的水安全评价^[11]、极端暴雨下的城市交通系统韧性评价^[12]、城市内涝韧性评估^[13]、考虑防洪减灾目标的城市水网建设^[14]、城市水系连通性^[15]等与城市洪涝灾害防控相关的研究中进行了成功应用。

鉴于此,本文构建基于 PSR 概念模型的城市洪涝灾害应对能力综合评估指标体系,探究影响城市洪涝灾害应对能力的各要素之间的相互作用关系。该体系中,城市洪涝系统的 P、S、R 子系统分别对应灾害成

因、损失现状与应对措施,并分别精选了 4、6、4 个核心评估指标(图 1)。PSR 概念模型的压力 P 子系统最初是描述人类活动的方式和强度对生态环境造成的压力,然而由于城市洪涝灾害是人类社会和自然系统内部多种因素如人口增长、经济发展和气候变化等共同作用的结果,这些因素之间的相互作用形成的原始驱动力会通过多种途径(如强降水事件)反馈给自然和社会系统,形成城市面临的多重压力,因此本文将强降水量作为 P 子系统的—个指标。

PSR 概念模型在实际应用中存在一定局限性:①PSR 概念模型是客观世界环境系统的简化抽象过程,而客观世界系统内部各要素之间存在复杂多变的因果关系和相关关系,由此导致 PSR 概念模型在应用中会不可避免地出现指标内生性问题。因此,将 PSR 概念模型及其扩展和修正模型应用于具体环境系统时,需结合实际环境系统内部变量指标之间的相互作用逻辑关系筛选变量,尽可能避免所选指标的随意性和无效性,从而缓解由变量缺失、因果不清等导致的内生现象^[9]。②模型隐含的线性因果假设难以完全反映现实系统中多要素间的非线性反馈与动态交互,可能忽略子系统间的协同或拮抗效应。为了更全面地揭示和分析影响复杂环境系统状态变化的不同因素之间的因果关系以及每个因素的定量影响程度,可结合结构方程模型^[16-17]、面板数据模型^[17]、耦合协调度模型^[17-18]、Tapio 脱钩模型^[19]、贝叶斯决策网络^[20]、方差分解分析^[21]、系统动力学^[22]等方法,增强对变量间内在机制与动态演变的刻画,进一步提升模型在复杂城市洪涝系统中的解释力与预测能力。

2.2 指标筛选原则及其数据

关键指标筛选是综合评价的核心,旨在从众多潜在指标中优选出兼具代表性、独立性和可测量性的指标,以避免信息重叠,确保评价结果的准确有效^[23]。本文参考 Li 等^[24]提出的城市内涝风险评估指标体系中与城市洪涝灾害形成、发展、影响及应对对策相关的指标,结合研究区的数据情况,选择串湖小流域 2002—2021 年的多源数据,包括强降雨、人均地区生产总值、人口密度、城市建成区面积、径流深、洪涝灾害数据(包括受灾人口、农作物受灾面积、停产工矿企业、铁路和公路中断条次、直接经济损失)、排水管道长度、水库蓄水、水土流失治理面积和除涝面积、城市绿地面积等数据,构建基于 PSR 概念模型的城市洪涝灾害应对能力综合评估指标体系。

由于各指标数据的时空分辨率不同,为保持各指标数据时空尺度的一致性和减小数据异质性的影响,部分指标数据采用时空聚合的方式将分辨率相对较高的时空数据聚合到分辨率相对较低的时空尺度中。表 1 中 x_2 和 x_3 指标数据是利用 ArcGIS 的空间分析工具 Zonal Statistics 将空间分辨率相对较高的公里网格 GDP 数据和 100 m×100 m 网格人口密度数据的平均值提取至研究区尺度(即串湖小流域矢量范围)。 $x_6 \sim x_{10}$ 、 $x_{11} \sim x_{14}$ 指标数据来源于公报或统计年鉴。由于公报或统计年鉴的数据是行政区尺度(省、市或区),串湖小流域位于长春市宽城区,因此 $x_6 \sim x_{10}$ 和 $x_{11} \sim x_{14}$ 指标数据由串湖小流域在长春市或宽城区面积占比与相应的长春市或宽城区数据相乘计算得到。 x_1 指标为极端降水强度指数 R95p,由 RClimDex 软件以日降水量数据为主要输入计算得到^[25]。R95p 是指超过多年日降水量(通常为 30 a 或更长时间)第 95 百分位数的总降水量,主要关注的是单日极端降水。通常,极端降水量具有较大的年际变化^[26]。 x_5 指标采用 SCS-CN 方法计算得到,计算公式中的降水量由强降水量 R95p 代替^[26]。

2.3 指标权重计算方法

熵是信息论中的概念,是对不确定性的一种度量。信息量越大,不确定性越大,熵就越大;反之,则熵越小。根据信息熵的定义,信息熵越小,表示指标的取值分布越集中、稳定,其对应的权重在综合评价中越大;反之,信息熵越大则对应的权重越小。本文采用熵权法^[27-28]计算 P、S、R 子系统各指标的权重和各子系统的综合

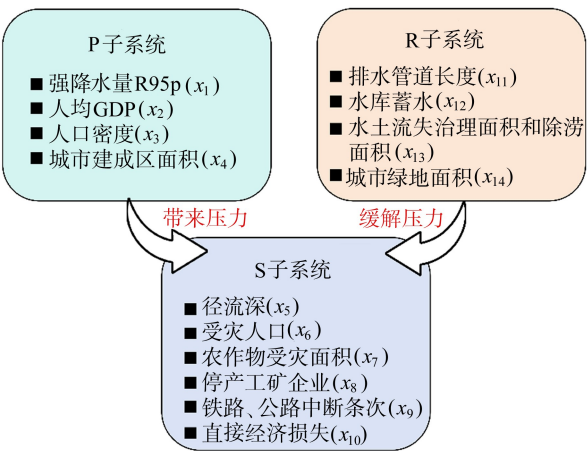


图 1 基于 PSR 概念模型的城市洪涝灾害应对能力综合评估指标体系

Fig. 1 Assessment indicator system for urban flood disaster response capability based on PSR conceptual model

表 1 城市洪涝灾害应对能力综合评估指标体系指标详情
Table 1 Comprehensive assessment indicator system for urban flood disaster response capability

指标	单位	表征	数据来源	权重
x_1	mm	负向指标	中国逐日降水数据集(1961—2022 年, 0. 1°/0. 25°/0. 5°), 使用 RClimDex 软件进行计算	0. 27
x_2	万元	正向指标	中国 GDP 空间分布公里格网数据集(https://www. resdc. cn/)	0. 32
x_3	人/km ²	正向指标	全国分省份 100 m×100 m 人口栅格数据(2000—2020 年) WorldPop (https://www. worldpop. org/)	0. 16
x_4	km ²	正向指标	《城市建设统计年鉴》	0. 25
x_5	mm	负向指标	SCS-CN 值法计算	0. 18
x_6	万人	负向指标	《中国水旱灾害公报》	0. 17
x_7	10 ³ hm ²	负向指标	《中国水旱灾害公报》	0. 25
x_8	个	负向指标	《中国水旱灾害公报》	0. 10
x_9	条次	负向指标	《中国水旱灾害公报》	0. 16
x_{10}	亿元	负向指标	《中国水旱灾害公报》	0. 14
x_{11}	km	正向指标	《城市建设统计年鉴》	0. 25
x_{12}	亿 m ³	正向指标	《水资源公报》	0. 14
x_{13}	10 ³ hm ²	正向指标	《中国环境统计年鉴》	0. 25
x_{14}	hm ²	正向指标	《城市建设统计年鉴》	0. 36

得分。使用熵权法进行计算之前,需先对各指标进行归一化处理,本文采用最大最小值法进行归一化处理。

2.4 耦合协调度计算方法

耦合协调度模型是一种用于衡量两个或多个系统之间相互作用程度的方法,能评估系统的整体运行状态和发展趋势,常用于生态环境系统的分析中^[28-29]。耦合协调度模型通常包含 3 个部分,耦合度、协调度和耦合协调度,其计算公式分别为

$$C_N = N \left[\frac{\prod_{n=1}^N U_n}{(\sum_{n=1}^N U_n)^N} \right]^{1/2}$$

(1)

$$T_N = \sum_{n=1}^N \beta_n U_n$$

(2)

$$D_N = \sqrt{C_N T_N}$$

(3)

其中

$$U_n = \sum_{j=1}^m z_{nj} w_{nj} \quad \sum_{j=1}^m w_{ij} = 1 \quad \sum_{n=1}^N \beta_n = 1$$

式中: C_N 为 N 元系统的耦合度,在 $[0, 1]$ 内取值, $C_N = 0$ 代表系统处于无序状态, $C_N = 1$ 表示系统间耦合良好; U_n 为系统 n 的综合得分; T_N 为 N 元系统的协调度; β_n 为系统 n 的贡献权重(本文计算 2 个系统之间的耦合协调度,2 个系统贡献权重赋值分别为 0. 5 和 0. 5); D_N 为 N 元系统的耦合协调度; z_{nj} 为系统 n 中指标 j 的归一化值; w_{nj} 为系统 n 中指标 j 的权重。

实际应用中,耦合协调度可划分为 3 个等级,0≤ D <0. 4 为不可接受区间,0. 4≤ D <0. 6 为过渡区间,0. 6≤ D ≤1. 0 为可接受区间。当 D 处于不可接受区间时,表示子系统之间的耦合协调度严重失调,系统运行出现问题,亟须干预;当 D 处于过渡区间时,表示耦合协调度处于临界状态,系统可能开始出现轻微失调或不稳定,需要关注可能的风险因素;当 D 处于可接受区间时,表示耦合协调度处于良好或理想状态,系统运行稳定。

3 模拟结果与分析

3.1 各子系统时序演进趋势

运用熵权法计算各指标权重,结果见表 1,各子系统的综合得分如图 2 所示。2002—2021 年 P 子系统呈线性增长趋势,决定系数为 0. 914 5,表明气候变化和城市化对城市洪涝灾害形成、发展的压力在不断增强。R 子系统呈线性增长趋势,决定系数为 0. 814 7。本文选用排水管道长度、水库蓄水、水土流失治理面积和除涝面积、城市绿地面积 4 个指标代表城市洪涝灾害应对策略。由此反映出,2002—2021 年研究区在雨水排水设施更新、水体调蓄、径流源头滞蓄等多方面开展了城市内涝治理工作。状态 S 子系统无明显变化趋

势(决定系数为 0.086 7),2010 年、2013 年和 2017 年低值分布(图 2 中黑色圆圈处)表明这 3 年城市受到洪涝灾害的影响和灾害损失较严重。

3.2 子系统之间耦合协调关系

运用耦合协调度模型分别计算得到 2002—2021 年 S 子系统与 P 子系统、S 子系统与 R 子系统之间的耦合协调度,如图 3 所示。整体来看,S 子系统与 P 子系统、S 子系统与 R 子系统之间的 D 多数处于可接受区间,且总体呈现稳步提升趋势,反映出城市排水系统基本保持稳定运行。2010 年、2013 年和 2017 年,S 子系统与 P 子系统、S 子系统与 R 子系统之间的 D 均出现明显下降,由可接受区间跌落至不可接受区间或接近过渡区间,表明这 3 年 S 子系统与 P 子系统、R 子系统之间出现不同程度失调或耦合协调度下降现象。为进一步识别引起耦合协调度下降的原因,通过逐步回归($F=5.35, P=0.016^{**}$)分析 P 子系统指标、R 子系统指标对 S 子系统的影响,结果显示强降水量 $R95_p$ 和人口密度对 S 子系统影响显著,其中强降水量 $R95_p$ 的影响尤为突出。由此推断,强降水是导致系统耦合协调度下降的关键因素。因此,建议加强城市排水系统应对强降水的韧性建设,并在城市规划中充分考虑人口密度增长对排水系统造成的叠加压力。

本文中 R 子系统包含的 4 个指标所代表的应对策略缺乏对强降水导致的洪涝灾害的应对能力。响应指标 x_{11} (排水管道长度)虽可反映雨水管网排水能力,但研究区在排水管网建设方面存在完善度低与设计标准偏低的问题。部分区域排水管网还未形成,或因道路建设时序不协调导致排水无出路;同时,约 70%的主城区排水管网设计重现期仅为 0.5~1 a,雨水泵站多为 1~3 a,雨水算子数量不足或堵塞进一步削弱了收水能力。虽然长春市重点从雨水排水设施更新提升角度开展了一些具体治理工作,取得了一定的效果,但是由于老城区地下空间紧张,管网复杂,一般很难全面进行管网新建提升工作^[8]。响应指标 x_{12} (水库蓄水)虽能在一定程度上反映水库对强降水下超量径流的应对能力,但是由于研究区目前尚未建立起完善的水库运行调度管理策略,仅利用水库年末蓄水量不足以反映水库对强降水下超量径流的调节作用。城市内河湖水体的调蓄功能在削减洪峰、降低洪涝灾害方面具有重要作用,在城市区域应对复杂气候变化环境的挑战中具有巨大潜力^[30],未来还需加强城市水网与雨水管网之间防洪排涝工程布局 and 调度应用。响应指标 x_{13} (水土流失治理面积和除涝面积)更侧重于林地和耕地治理,而针对城市建设中形成的局部低洼地(如立体交通工程影响区域)以及道路、广场等重要区域的应急排水和防护措施尚显不足。响应指标 x_{14} (绿地面积)在城市洪涝风险管理中具有重要意义,城市绿地虽具备蓄滞雨水、缓解排水压力的潜力,但研究区在利用公共绿地、公园和洼地等空间蓄滞雨水方面的功能尚未充分挖掘与应用。

4 讨 论

4.1 城市应对强降雨所致洪涝灾害的工程与非工程技术策略

长期以来,城市洪涝灾害治理主要侧重于通过工程建设等手段来预防和减少灾害发生时的损失。然而,这种方法一方面仅仅依靠固有设施进行雨水径流的控制,缺乏对多变环境的适应性,另一方面往往忽视了灾害发生后城市的快速恢复能力和社会秩序的重建。目前,虽然长春市从解决易涝点积水问题的角度出发,重点从雨水排水设施更新提升、雨水调蓄工程建设以及设施维护等角度开展了治理工作,并取得了一定的效果,但是由于城区地表地下空间紧张,全面进行管网新建提升、调蓄设施新建等工作不具经济可行性和时间有效性。挖掘利用城市区域现有空间如地表下沉空间、地下空间和道路行泄通道等^[31-32],使其发挥临时应

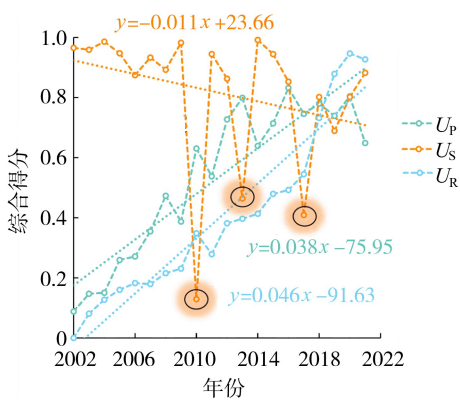


图 2 2002—2021 年 P、S、R 子系统综合得分变化趋势

Fig. 2 Change trends of comprehensive score of P, S, and R subsystems from 2002 to 2021

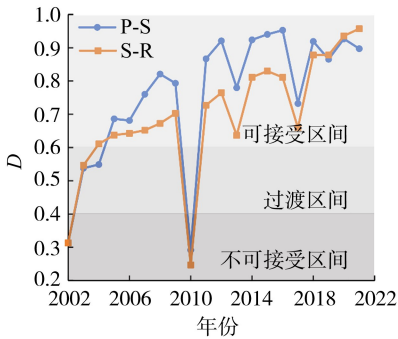


图 3 子系统间的耦合协调度

Fig. 3 D between subsystems

急蓄排功能,并充分利用城市内河湖水体的末端调蓄功能,是对强降水下城市径流安全管控的有效途径。如何充分利用现有的地下雨水管网、调蓄设施,并通过优化调度实现对地表地下应急蓄排空间、河湖水体调蓄空间的有效利用,构建更加灵活、高效的城市洪涝多系统调度模式,是包括长春市在内的大多数集约发展型城市探索新的内涝治理模式的一个重要方向^[7,33]。

城市洪涝多系统调度模式的建立需要气象预警预报、风险评估、联合调度、跨部门协作等多种非工程策略的协同实施。图4显示了城市应对强降水所致洪涝灾害的工程和非工程相协同策略。通过对串湖小流域排水系统现状调查,串湖小流域水系包括串湖干流、宋家明沟支流和翟家明沟支流以及多个公园、水库。现状总水系面积约171.6 hm²,按照0.5 m的水位上升核算,水系调蓄量约86万 m³。另外,通过对串湖小流域雨水管网排水能力模拟评估,在100年一遇的2 h降水下,串湖小流域雨水管网总溢流量约为59万 m³。由此可见,水系调蓄量约为系统总溢流量的1.5倍,串湖流域水体调蓄能力较为充足。此外,通过合理调度、利用行泄道路排水、下沉绿地临时调蓄,还可进一步提高串湖小流域应对强降水的能力。未来,串湖小流域应加强对多种蓄排设施联合优化调度的技术研发,通过引入人工智能和物联网等智慧技术,形成城市排水系统应对强降雨的事前挖潜-事中调控-事后恢复的系统应对技术与工程实施方案。

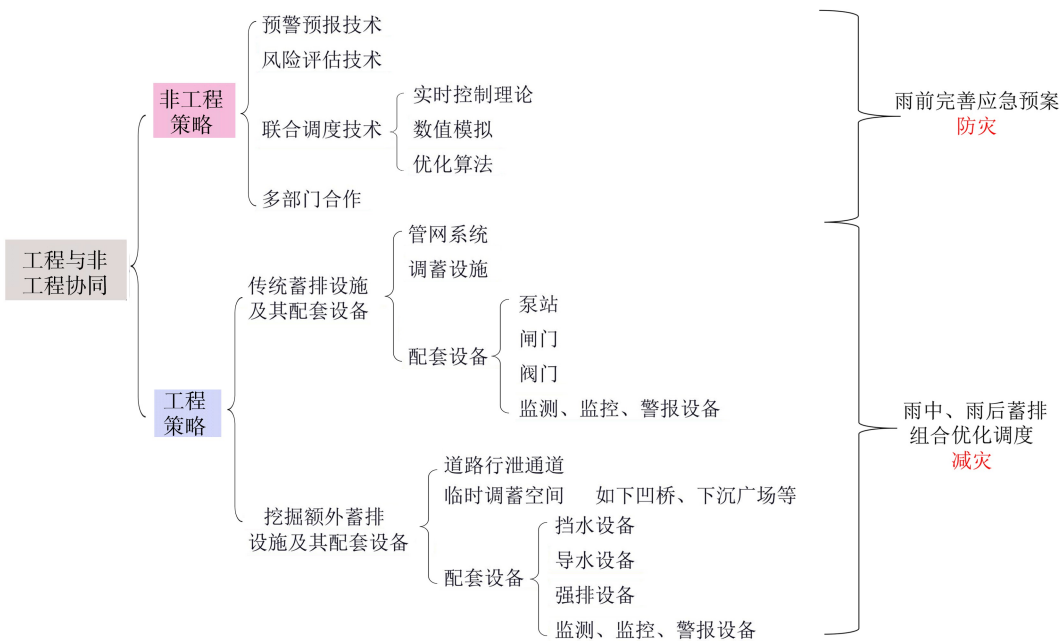


图4 城市洪涝灾害应对策略架构

Fig.4 Architecture of response strategies for urban flood disaster

4.2 城市规划、建设与管理策略建议

为有效应对强降水引发的城市洪涝灾害,需在城市规划、设计建设与运维管理的全过程中,系统融入适应强降水的工程与非工程策略。在规划层面,应推动从单一排水防涝功能向多目标协同的规划理念转变,将防洪排涝设施布局与城市社会经济、生态景观等发展目标深度融合^[34-35]。尤其应注重城市蓄排系统的“系统性”构建,加强城市内部排水防涝设施与区域流域防洪工程在布局与调度层面的有效衔接,确保排涝标准与防洪标准相匹配,形成层级分明、功能互补的防灾体系^[36]。同时,建议建立跨部门、跨层级的协同工作机制,整合水利、气象、住建、交通、应急等多部门数据与资源,依托信息化平台实现雨情、水情、工情与灾情信息的实时共享,为多系统联合调度与应急响应提供决策支持。

在设计建设与运维阶段,应着力推进城市蓄排设施的“多功能化”与“智慧化”升级。设施的“多功能化”强调通过优化设计标准,使道路、广场、绿地、停车场等城市空间在平时发挥原有功能,在强降雨时能快速转换为行泄通道或临时调蓄空间,提升系统应对超标准降雨的弹性。实现这一目标需要配套研发相应的快速转换技术与装置,并制定明确的功能转换触发条件与操作流程。设施的“智慧化”则侧重于运用物联网、大数据、云计算及数值模拟等先进技术,构建集监测、预报、调度、预警于一体的智慧排水防涝系统,实现对管网运行状态、河湖水位、易涝点积水情况的实时监控与模拟预测,从而提升蓄排设施运行效率与应急调

控的精准性。在日常与灾后维护方面,应制定详细的设施维护标准与灾后快速恢复预案,明确各类调蓄空间、行泄通道及应急设备的检查频次、清淤维护要求和责任主体,并配备专业化队伍与装备,以保障设施功能正常并在灾后迅速恢复城市运行秩序。

5 结 论

a. 采用 PSR 概念模型建立了长春市串湖小流域洪涝灾害应对能力综合评估指标体系,其中,P、S、R 子系统分别包含 4、6、4 个指标,分别反映了城市洪涝灾害的成因、灾害损失和相关的应对措施。

b. P 子系统和 R 子系统均呈线性增长趋势,S 子系统无明显趋势,并在 2010 年、2013 年和 2017 年出现相对低值,表明 2002—2021 年串湖小流域的洪涝灾害的形成和发展面临的压力在不断增大,同时相应的应对措施也在不断加强。

c. 在 2010 年、2013 年和 2017 年,S 子系统与 P 子系统、S 子系统与 R 子系统之间的 D 均出现低值,进一步分析发现其主要与这 3 年强降水均呈现相对高值相关。

d. 研究区水系调蓄量约为 100 年一遇 2 h 降雨下系统总溢流量的 1.5 倍,表明研究区水体调蓄能力非常充足。未来通过研发智能蓄排技术,实现雨水管网、调蓄设施、行泄道路、临时应急调蓄空间、河湖水体等多蓄排系统的联合优化调度,可进一步提高研究区应对强降水所致洪涝灾害的能力。

参考文献:

[1] XU Ying,WU Jie,SHI Ying,et al. Change in extreme climate events over China based on CMIP5[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters,2015,8(4):185-192.

[2] 王浅宁,彭勇,吴剑,等. 基于 MIKE 耦合模型的城市超标准洪涝灾害影响分析[J]. 水电能源科学,2021,39(8):94-98. (WANG Qianning,PENG Yong,WU Jian,et al. Impact analysis of urban over-standard flood based on MIKE coupling model [J]. Water Resources and Power,2021,39(8):94-98. (in Chinese))

[3] 王振亚,姚成,董俊玲,等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):17-22. (WANG Zhenya,YAO Cheng,DONG Junling,et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):17-22. (in Chinese))

[4] 李瑞栋,倪广恒,陆科成,等. 北京“23·7”特大暴雨影响下城市交通应急响应时间动态分析:以北京市通州区为例[J]. 应用基础与工程科学学报,2024,32(2):365-377. (LI Ruidong,NI Guangheng,LU Kecheng,et al. Dynamics of urban traffic emergency response times during the extraordinary “23·7” rainstorm event in Beijing:a case study of Tongzhou District,Beijing [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2024,32(2):365-377. (in Chinese))

[5] LEE E H,KIM J H. Convertible operation techniques for pump stations sharing centralized reservoirs for improving resilience in urban drainage systems[J]. Water,2017,9(11):843.

[6] 刘智勇,陈晓宏,林凯荣,等. 极端降水影响下粤港澳大湾区城市洪涝人口暴露度预估[J]. 中国水利,2024(13):34-38. (LIU Zhiyong,CHEN Xiaohong,LIN Kairong,et al. Estimation of population exposure to urban flooding in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under extreme rainfall[J]. China Water Resources,2024(13):34-38. (in Chinese))

[7] 杨小天. 关于长春市充分利用湖库调蓄能力降低城市内涝风险的建议[J]. 吉林人大,2021(12):24-25. (YANG Xiaotian. Suggestions on fully utilizing the capacity of lake and reservoir regulation to reduce urban flood risk in Changchun City[J]. Jilinrenda,2021(12):24-25. (in Chinese))

[8] 王经超. 长春市伊通河水系串湖流域底泥清淤处理处置技术研究[D]. 长春:吉林大学,2020.

[9] 马小宾,章锦河,郭丽佳,等. 生态环境研究中压力-状态-响应模型应用的陷阱与改善[J]. 生态学报,2024,44(12):4923-4932. (MA Xiaobin,ZHANG Jinhe,GUO Lijia,et al. Traps and improvements of PSR model:an eco-environmental perspective [J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(12):4923-4932. (in Chinese))

[10] OECD. OECD Core Set of indicators for environmental performance reviews:a synthesis report by the group on the state of the environment[R]. Paris:Organization for Economic Co-Operation and Development,1993.

[11] ZHENG Yanting,HE Jing,ZHANG Wenxiang,et al. Assessing water security and coupling coordination in the Lancang-Mekong River Basin for sustainable development[J]. Sustainability,2023,15(24):16880.

[12] FANG Xinyi,LU Linjun,LI Yan,et al. A driver-pressure-state-impact-response study for urban transport resilience under extreme rainfall-flood conditions[J]. Transportation Research Part D:Transport and Environment,2023,121:103819.

- [13] 庞奕文. 不同空间尺度下海口市城市暴雨内涝韧性评估研究[D]. 北京:北京建筑大学,2023.
- [14] LI Feng,ZHANG Pengchao,HUANG Xin,et al. Evaluation of water network construction effect based on game-weighting matter-element cloud model[J]. *Water*,2023,15(14):2507.
- [15] ZHANG Xiaohui,QIAO Wenbao,HUANG Jiafeng,et al. Impact and analysis of urban water system connectivity project on regional water environment based on storm water management model (SWMM)[J]. *Journal of Cleaner Production*,2023,423:138840.
- [16] JIN Huifang,SHI Dongmei,ZHONG Yijun,et al. Quantitative evaluation and path analysis of factors influencing the cultivated-layer quality of red soil sloping farmland based on the DPSIR framework[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*,2021,30(1):509-521.
- [17] CHEN Hezhou,XU Jingfan,ZHANG Ke,et al. New insights into the DPSIR model:revealing the dynamic feedback mechanism and efficiency of ecological civilization construction in China[J]. *Journal of Cleaner Production*,2022,348:131377.
- [18] 卞宇航,屈博,江恩慧,等. 黄河流域水资源-生态-社会系统耦合协调分析[J]. *人民黄河*,2024,46(10):49-54. (BIAN Yuhang,QU Bo,JIANG Enhui,et al. Coupling coordination analysis of water resources-ecology-society system in the Yellow River Basin[J]. *Yellow River*,2024,46(10):49-54. (in Chinese))
- [19] QIN Xuemin,HU Xiaoxuan,XIA Wei. Investigating the dynamic decoupling relationship between regional social economy and lake water environment:the application of DPSIR-extended Tapio decoupling model[J]. *Journal of Environmental Management*,2023,345:118926.
- [20] LIU Jing,LIU Renzhi,YANG Zhifeng,et al. Prioritizing risk mitigation measures for binary heavy metal contamination emergencies at the watershed scale using Bayesian decision networks[J]. *Journal of Environmental Management*,2021,299:113640.
- [21] DUAN Tingting,FENG Jiashen,CHANG Xuan,et al. Watershed health assessment using the coupled integrated multistatistic analyses and PSIR framework[J]. *Science of the Total Environment*,2022,847:157523.
- [22] WANG Zhiyuan,FU Xingtao. Scheme simulation and predictive analysis of water environment carrying capacity in Shanxi Province based on system dynamics and DPSIR model[J]. *Ecological Indicators*,2023,154:110862.
- [23] BRINT A,GENOVESE A,PICCOLO C,et al. Reducing data requirements when selecting key performance indicators for supply chain management:the case of a multinational automotive component manufacturer[J]. *International Journal of Production Economics*,2021,233:107967.
- [24] LI Junqi,ZHANG Haohan,ZHANG Xiaoran,et al. Establishment and application of a specialized physical examination indicator system for urban waterlogging risk in China[J]. *Sustainability*,2023,15(6):4998.
- [25] XU Fei,ZHAO Lingling,ZHOU Yuyan,et al. Impacts of extreme precipitation on water conservation in Beiji River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*,2024,637:131299.
- [26] TANG Ziyi,WANG Pin,LI Yao,et al. Contributions of climate change and urbanization to urban flood hazard changes in China's 293 major cities since 1980[J]. *Journal of Environmental Management*,2024,353:120113.
- [27] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. *Bell System Technical Journal*,1948,27(4):623-656.
- [28] HU Lei,ZHANG Qiang,WANG Gang,et al. Flood disaster risk and socioeconomy in the Yellow River Basin,China[J]. *Journal of Hydrology:Regional Studies*,2022,44:101272.
- [29] HAN Shan,WANG Bo,AO Yibin,et al. The coupling and coordination degree of urban resilience system:a case study of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. *Environmental Impact Assessment Review*,2023,101:107145.
- [30] WANG Jia,LIU Jiahong,MEI Chao,et al. A multi-objective optimization model for synergistic effect analysis of integrated green-gray-blue drainage system in urban inundation control[J]. *Journal of Hydrology*,2022,609:127725.
- [31] 孟德娟,王强,宋万祯,等. 基于平急功能复合的城市防涝系统韧性提升规划策略[J]. *给水排水*,2024,50(10):52-57. (MENG Dejuan,WANG Qiang,SONG Wanzhen,et al. The planning strategy to improve the resilience of urban waterlogging prevention system based on normal-emergency functional composite utilization of space[J]. *Water & Wastewater Engineering*,2024,50(10):52-57. (in Chinese))
- [32] 张鑫男,李俊奇,李小静,等. 国内外城市平急两用排水防涝系统综述[J]. *给水排水*,2024,50(10):43-51. (ZHANG Xinnan,LI Junqi,LI Xiaojing,et al. Review for urban drainage and waterlogging prevention system with dual use of normal and emergency situations at home and abroad[J]. *Water & Wastewater Engineering*,2024,50(10):43-51. (in Chinese))

[10] 赖成光,廖耀星,王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):101-108. (LAI Chengguang,LIAO Yaoxing,WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):101-108. (in Chinese))

[11] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng,ZHENG Yulei,et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):41-47. (in Chinese))

[12] YANG Weichao,ZHENG Chuanxing,JIANG Xuelian,et al. Study on urban flood simulation based on a novel model of SWTM coupling D8 flow direction and backflow effect[J]. Journal of Hydrology,2023,621:129608.

[13] 徐宗学,李鹏,程涛. 基于海绵城市理念的 LID 措施优化布局:以济南市黄台桥流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):552-562. (XU Zongxue,LI Peng,CHENG Tao. LID optimization layout facilities in sponge city:a case study of Huangtaiqiao catchment in Jinan city[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(3):552-562. (in Chinese))

[14] YIN Dingkun,EVANS B,WANG Qi,et al. Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact development facilities on community scale[J]. Science of the Total Environment,2020,720:137630.

[15] TANSAR H, DUAN Huanfeng, MARK O. A multi-objective decision-making framework for implementing green-grey infrastructures to enhance urban drainage system resilience[J]. Journal of Hydrology,2023,620:129381.

[16] AHIABLAME L M, ENGEL B A, CHAUBEY I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research[J]. Water Air Soil Pollution,2012,223(7):4253-4273.

[17] 李雪峰,谭琼,钱真. 上海市城市内涝风险分析与评估[J]. 中国防汛抗旱,2024,34(6):26-32. (LI Xuefeng,TAN Qiong,QIAN Zhen. Risk Analysis and assessment of urban flooding in Shanghai[J]. China Flood & Drought Management,2024,34(6):26-32. (in Chinese))

[18] ZOU Lanjun,WANG Zhi,LU Qinjing,et al. The rain-induced urban waterlogging risk and its evaluation:a case study in the central city of Shanghai[J]. Water,2022,14(22):3780.

[19] LIU Junbing,ZHENG Maohui,GAO Jinwei,et al. A generalization of the drainage capacity in data-scarce urban areas: an improved equivalent infiltration method[J]. Water,2024,16(4):589.

[20] ZHENG Maohui,LIU Junbing,GAO Jinwei,et al. Navigating urban challenges:quantifying emergency service accessibility and robustness amid meteorological disasters[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2024,100:104655.

[21] 贺芳芳,胡恒智,董广涛,等. 上海中心城区复合洪涝淹没模拟及未来重现预估[J]. 灾害学,2020,35(4):93-98. (HE Fangfang,HU Hengzhi,DONG Guangtao,et al. Compound flooding simulation and prediction of future recurrence in Shanghai downtown area[J]. Journal of Catastrophology,2020,35(4):93-98. (in Chinese))

[22] 梅超,陈宇枫,刘家宏,等. 基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估[J]. 水资源保护,2022,38(6):31-38. (MEI Chao,CHEN Yufeng,LIU Jiahong,et al. Impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on scenario simulation [J]. Water Resources Protection,2022,38(6):31-38. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-29 编辑:刘晓艳)

+++++

(上接第 48 页)

[33] 梅超,刘家宏,王浩,等. 以事件为中心的城市洪涝调度模式研究[J]. 水资源保护,2022,38(5):46-50. (MEI Chao,LIU Jiahong,WANG Hao,et al. Study on an event-centered urban flood regulation mode[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):46-50. (in Chinese))

[34] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(1):6-15. (ZHANG Jinliang,LUO Qiushi,WANG Bingjie,et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters[J]. Water Resources Protection,2024,40(1):6-15. (in Chinese))

[35] CHEN Juan,ZHANG Lu,LI Guozhi,et al. Perspectives on risk analysis and control for real-time operation of flood control systems [J]. Water Science and Engineering,2024,17(4):319-322.

[36] 李曦亭,王磊之,商守卫,等. 流域、区域和城镇防洪工程工况与调度变化的洪涝互馈效应研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):12-18. (LI Xiting,WANG Leizhi,SHANG Shouwei,et al. Research on mute feed effect of flood and waterlogging under change of working condition and dispatching of flood control project in basin,sub-basin and urban[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(2):12-18. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-18 编辑:刘晓艳)