

气候变化下基于经济损失量化的北京市内涝韧性评估

邹家祥¹, 段存存², 陈彬¹, 王昊³

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;
3. 北京工业大学城市建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 针对未来不同气候情景与降雨重现期, 基于 InfoWorks ICM 城市内涝模型, 耦合内涝经济损失核算, 刻画了北京市系统性能曲线。考虑内涝韧性的抵抗力、适应力和恢复力, 建立了北京市内涝韧性动态评估体系, 定量评估了未来气候变化对北京市内涝韧性的影响。结果表明: SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 3 种气候变化情景与降雨重现期分别为 5、20、50、100 a 的组合情景下, 北京市的内涝韧性水平较高; 不同土地利用类型中工业区韧性水平最高, 居住区韧性水平最低, 北京市内环内涝韧性水平明显低于外环。

关键词: 城市内涝韧性; 系统性能曲线; 经济损失量化; InfoWorks ICM 模型; 气候变化情景; 北京市
中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)06-0085-10

Assessment of waterlogging resilience in Beijing based on quantification of economic losses under climate change// ZOU Jiexiang¹, DUAN Cuncun², CHEN Bin¹, WANG Hao³ (1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Based on the InfoWorks ICM urban waterlogging model and coupled with the economic loss calculation of waterlogging, the system performance curve of Beijing was characterized under different climate scenarios in the future and rainfall recurrence periods. A dynamic assessment system for waterlogging resilience in Beijing was established, taking into account the resistance, adaptability, and resilience of waterlogging. The impact of future climate change on waterlogging resilience in Beijing was quantitatively evaluated. The results show that under the combination scenarios of SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5 climate change and rainfall recurrence periods of 5, 20, 50, and 100 a, respectively, Beijing has a higher level of waterlogging resilience. Among different land use types, industrial areas have the highest resilience level, while residential areas have the lowest resilience level. The waterlogging resilience level of Beijing inner ring area is significantly lower than that of the outer ring area.

Key words: urban waterlogging resilience; system performance curve; quantification of economic losses; InfoWorks ICM model; climate change scenario; Beijing City

气候变化加剧了极端暴雨事件的概率, 造成城市内涝灾害发生的频率和强度增加, 严重威胁城市居民生活, 并给社会经济发展带来巨大的损失^[1-2]。根据世界气象组织发布的《天气、气候和水极端事件造成的死亡人数和经济损失图集(1970—2019)》, 1970—2019 年灾害数量增加了 5 倍, 经济损失增加了 7 倍^[3]。我国作为世界上内涝灾害多发、频发的国家之一, 大约 2/3 城市都发生过不同类型和不同程度的内涝灾害^[4]。根据水利部和应急管理部国家减灾中心的数据, 1991—2020 年我国年

均因洪涝灾害造成直接经济损失约 1 604 亿元^[5]。城市作为一个复杂系统, 各类承灾体暴露度、集中度、脆弱性不断增加, 灾害链特征突出, 一旦内涝灾害破坏到临界点, 传统内涝治理中依赖工程的措施冗余性不足, 会导致城市在面对极端气候事件时脆弱性显著增加^[6-7]。近年来, 基于韧性的城市内涝管理从动态与发展的角度为城市适应气候变化提供了一种新的思路^[8-9]。联合国国际减灾战略署将韧性定义为城市面临灾害干扰时具有抵抗、吸收、适应灾害并从中恢复的一种能力^[10]。城市内涝韧性评估

基金项目: 北京市自然科学基金项目(9222017); 国家自然科学基金重大项目(72091511); 湖南省科技创新计划项目(2023RC4008)

作者简介: 邹家祥(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事气候变化与城市内涝韧性研究。E-mail: iwhrzjx@163.com

通信作者: 陈彬(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事韧性城市环境生态风险研究。E-mail: chenb@bnu.edu.cn

针对城市内涝灾害,考虑城市的抵抗能力、适应能力和恢复能力,区别于传统的城市内涝风险评估注重城市内涝发生概率和可能的损失,而是强调城市面对内涝事件时的应对能力和适应性,发现和强化城市内涝事件后的恢复力,从而提高城市在面对气候变化事件时的韧性^[11]。传统的城市内涝风险评估通常关注长期的内涝风险概率分析和短期的风险预警以及更高的空间精度,以确定内涝风险的空间分布和时间变化。城市内涝韧性评估倾向于关注中长期发展过程中城市适应性的演变和改善趋势,不一味追求过高的精度,而是与城市空间治理单元相结合,目标在于助力内涝管理政策与规划、健全应急响应和救援预案、加强资源调配与风险信息的传递通路^[12-13]。

当前城市内涝韧性评估主要采用指标描述法和综合度量法^[14]。指标描述法从韧性的多个维度出发,构建完整的评估指标体系,对城市内涝韧性进行量化评估^[15-17]。指标描述法主要用于城市或城市群尺度大时间跨度下的内涝韧性量化和对比^[13,18-20],但常因为数据的完整性以及因素的不全面性导致评估结果主观性较大^[21]。综合度量法通过多维度、多主体综合指标体系的构建,耦合水文水动力动态模型,对城市内涝事件的发生、演化和影响进行模拟和预测,从而评估城市在内涝事件中的应对能力和韧性^[22-24]。Mugume 等^[25]基于系统性能度量的方法,提出了一种评估城市排水系统由内涝灾害累积导致系统失效的方法,并量化了系统抵抗灾害过程的韧性水平。Chen 等^[26-27]基于水深单因素的系统性能曲线,通过增加流速、淹没时长以及人类感知等因素,对系统性能曲线进行了改进与综合刻画,基于性能度量法提出了全过程动态内涝韧性评估体系,但是该方法主要依据水力学指标,难以综合量化城市对于内涝韧性的响应。并且,目前的研究多以历史降雨数据为基础,难以衡量未来气候变化的不确定性。建立能够准确评估未来气候变化下城市内涝韧性水平的框架仍然是一个挑战。因此,本文以北京市主城区为研究区,模拟未来气候变化下城市内涝灾害,结合内涝经济损失量化与系统性能的理念,提出全过程的城市内涝韧性动态评估框架,探究未来气候下城市内涝韧性提升策略。

1 研究区概况

研究区位于北京市中心,包括北京市多个行政区,概况如图 1 所示。研究区总面积 765 km²,地势西北高、东南低,多年平均降水量约为 569 mm,降水主要集中于 6—9 月,占全年降水的 80%以上。研究

区内建筑物密集,绿地面积占比仅为 20%,属于城市内涝发生密集区。基于北京市各区域的排水特性与地理性质,将研究区分为 8 个分区。

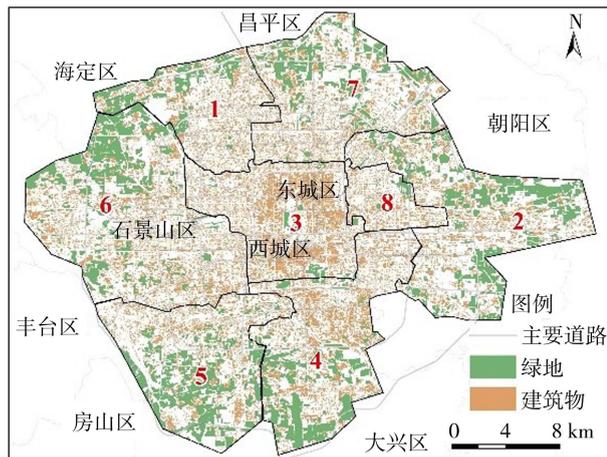


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

2 研究方法

2.1 未来气候变化情景

2.1.1 未来气候模式

采用第六次全球耦合模式比较计划 (the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project, CMIP6) 全球气候系统模式数据 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>), 选取 5 种气候模式 (表 1) 2025—2100 年的数据。由于各模式数据的分辨率不同,将各模式数据统一使用双线性插值法插值到 25 km×25 km 的格点上。为减少气候模式数据的不确定性,将上述 5 种气候模式数据进行了多模式集合平均,并与 1983—2012 年观测数据以及气候模式的历史数据进行了对比验证,验证结果显示逐日尺度下多模式集合平均与观测数据的相关系数为 0.67,标准差为 2.13,多模式集合平均数据具有可靠性。共享社会经济路径 (shared socioeconomic pathways, SSPs) 是 CMIP6 新一代气候变化情景的重要组成部分^[28],本文选取 SSP2-4.5, SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 3 种气候变化情景进行研究。

表 1 CMIP6 气候模式

Table 1 CMIP6 climate models

模式名称	所属国家	格点数
BCC-CSM2-MR	中国	160×320
CanESM5	加拿大	64×128
GFDL-ESM4	美国	180×288
IPSL-CM6A-LR	法国	143×144
MIROC6	日本	128×256

2.1.2 未来气候设计暴雨推求

根据 GB50014—2021《室外排水设计标准》,将

北京市 1983—2012 年降水量数据按照年最大值方法进行计算,每年分别选取 5、10、15、20、30、45、60、90、120 min 共计 9 个历时的最大降水量数据,按照从大到小的顺序排列,组成计算样本,推求暴雨强度公式^[29]。采用改变因子法计算不同气候变化情景对于历史观测数据的改变因子,从而生成未来气候变化情景。改变因子及未来降水的预估值计算公式为

$$C_F = \bar{P}_f - \bar{P}_b \quad (1)$$

$$\text{其中 } \bar{P}_b = \sum_{i=1}^{N_b} P_{bi}/N_b \quad \bar{P}_f = \sum_{i=1}^{N_f} P_{fi}/N_f$$

$$P_{fa} = P_o + C_F \quad (2)$$

式中: C_F 为改变因子; P_{bi} 、 P_{fi} 分别为全球气候模型(global climate model, GCM)基准情景和未来情景在逐日时间尺度下的气候变量值; \bar{P}_b 、 \bar{P}_f 分别为基准情景和未来情景气候变量的平均值; N_b 、 N_f 分别为基准情景和未来情景气候变量的总数; P_{fa} 为气候变量的预估值; P_o 为气候变量观测值。

气候模式数据可靠性验证采用日降水数据。根据不同气候模式下的逐日降水数据与北京市历史时期的年最大 1d 降水量,计算 SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下的改变因子,然后结合北京市 1983—2012 年的逐分钟历史观测降水数据,得到未来时期逐分钟降水量预估值。

采用水文频率计算中广泛采用的皮尔逊 III 型分布曲线进行水文频率的计算,得到重现期-雨强-历时表,采用 Levenberg-Marquardt (LM) 算法,对暴雨强度公式进行参数拟合^[30]。采用平均绝对方差(mean absolute deviation, MAD) 和变异系数 C_V 来

衡量数据偏离均值的程度,进行参数误差的检验。表 2 为历史情景(RF)与不同气候变化情景下的暴雨强度公式参数值与参数验证结果,MAD 范围为 0.059~0.065 mm/min, C_V 范围为 0.116%~0.130%,均不超过 5%,总体拟合精度较好。本文峰值系数取值 0.4,图 2 为根据芝加哥雨型生成的不同降雨重现期 P 下各气候情景 2 h 短历时降水过程。

表 2 暴雨强度公式参数值及误差检验结果

Table 2 Parameter values and error test results of rainstorm intensity formula

气候情景	暴雨强度公式参数				误差检验结果	
	A	C	b	n	MAD/(mm/min)	C_V /%
RF	22.43	0.64	19.50	0.82	0.065	0.126
SSP2-4.5	13.48	0.78	10.11	0.74	0.059	0.116
SSP3-7.0	7.93	0.87	4.26	0.64	0.059	0.124
SSP5-8.5	11.82	0.72	7.42	0.71	0.065	0.130

2.2 城市内涝模型构建

城市内涝模型中一维管网水动力模型采用由连续方程和能量方程联立的圣维南方程组,获得水流在管网中流动的水动力学要素,二维地表漫流过程采用二维浅水方程计算地表积水深度、流速以及流向等要素^[31-32]。一、二维模型的耦合主要通过耦合计算一维管网水动力和二维地表漫流之间的水量关系。城市内涝模型构建涉及管网数据、DEM 数据、土地利用数据、雨量站数据、检查井数据以及历史淹没数据等基础资料。采用霍顿模型进行地表产汇流的计算,针对不同的下垫面类型,选取了不同的地表产汇流参数(表 3)。模型基于北京市“7·21”实测降水数据与实测内涝点位开展率定与验证,详细过

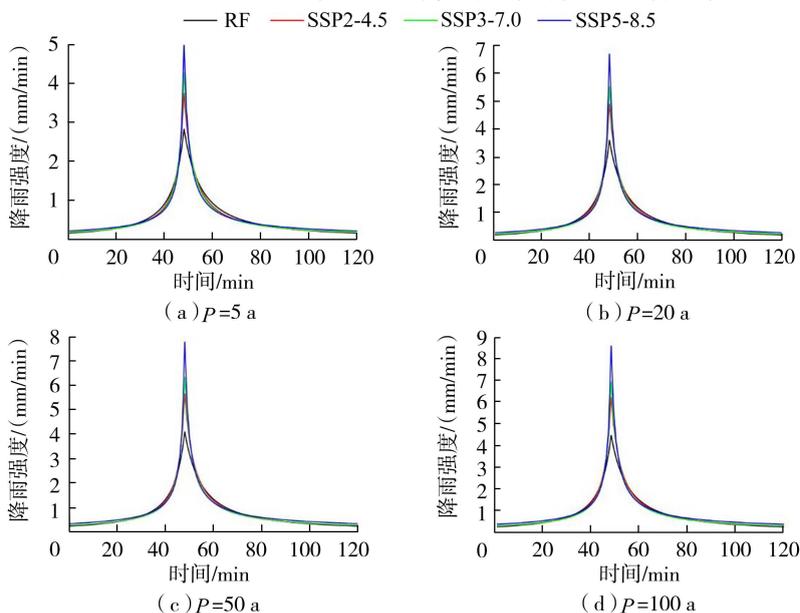


图 2 不同降雨重现期下各气候情景短历时降水过程

Fig. 2 Short duration precipitation processes in different climate scenarios under different rainfall recurrence periods

程见文献[33-34]。同时,选取2022年8月4日降水事件,对位于北京市西城区的排水口的实测水位数据与模型数据进行率定验证,结果见图3,得到模拟结果的纳什效率系数为0.890,表明模型可用于北京市内涝模拟。

表3 产汇流参数选取结果

Table 3 Selection results of parameters for runoff model

土地利用类型	透水性	曼宁系数	初始损失/mm	初始下渗率/(mm/h)	稳定下渗率/(mm/h)	衰减系数/h ⁻¹
建筑物	不透水	0.02	1.5			
道路	不透水	0.02	2.0			
绿地	透水	0.15	5.0	78.00	24.0	1.43
水面	透水	0.04	3.0	34.72	6.6	3.28

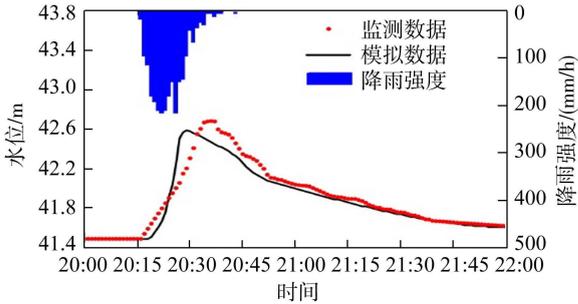


图3 模型率定验证结果

Fig. 3 Model calibration and verification results

2.3 城市韧性评估方法

2.3.1 系统性能曲线

系统性能曲线可以量化城市对内涝的抵抗、适应和恢复的过程,常用来定义工程韧性^[12]。图4为特定降雨情景下城市系统性能理论曲线,图中系统性能为1表示不受城市内涝影响的系统性能, P_{\max} 表示内涝事件导致系统的最大故障水平。 $t_0 \sim t_1$ 阶段城市受到降水事件影响,但是系统性能没有变化,体现了城市对于内涝事件的抵抗性; $t_1 \sim t_{\max}$ 阶段表示城市系统性能迅速下降,达到最小系统性能水平,体现了城市对于内涝事件的适应性; $t_{\max} \sim t_n$ 阶段为恢复性阶段,城市系统性能逐渐恢复到初始状态。图中阴影部分则代表内涝灾害对城市系统性能的影响:

$$S_i = \frac{1}{P_0} \int_{t_0}^{t_n} (P_0 - P_{it}) dt \quad (3)$$

式中: S_i 为过程*i*影响下的系统韧性; t_n 为内涝灾害发生的总时间; t_0 为初始时间; P_{it} 为过程*i*在*t*时刻的系统性能。

图4中过程1和过程2是同一降水事件下,不同的系统对于其性能的反应。过程1表示的系统性能曲线受到内涝灾害的影响较小,具有更大的抵抗力、更强的适应力、更快的恢复力和更大的内涝韧性。

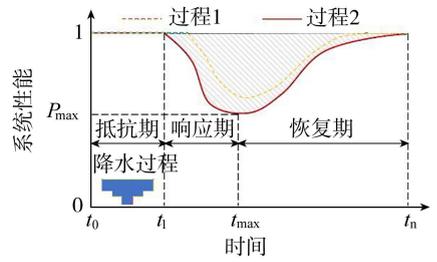


图4 特定降雨情景下理论系统性能曲线

Fig. 4 Theoretical system performance curve under specific rainfall scenarios

2.3.2 基于经济损失量化城市内涝韧性

传统的城市内涝韧性度量方法将系统性能值定义为0和1^[35]。基于设定的淹水阈值,将其分为淹水区和非淹水区,城市内涝韧性的计算公式为

$$R = \frac{1}{t_n} \int_{t=0}^{t_n} p(t) dt \quad (4)$$

$$\text{其中 } p(t) = 1 - N(t)/N \quad N(t) = \sum_{k=1}^N g_{kt}$$

$$g_{kt} = \begin{cases} 0 & d_{kt} \geq d_c \\ 1 & d_{kt} < d_c \end{cases}$$

式中: R 为城市内涝韧性; $p(t)$ 为系统性能函数; N 为研究区网格总数; $N(t)$ 为淹水网格数; d_{kt} 为网格*k*在*t*时刻的淹没水深; d_c 为不同土地利用类型的水深阈值。

为了提高内涝韧性评估结果的准确性和可信性,Chen等^[26]认为网格的性能是一个动态变化的过程,将系统性能的计算方法进行了改进:

$$p_{kt} = \begin{cases} 1 & h_{kt} \leq h_l \\ h_u - h_{kt}/h_u - h_l & h_l < h_{kt} \leq h_u \\ 0 & h_{kt} > h_u \end{cases} \quad (5)$$

式中: p_{kt} 为网格*k*在*t*时刻的系统性能; h_{kt} 为网格*k*在*t*时刻的水深; h_l 、 h_u 分别为淹没阈值的下限和上限。

基于单一的水力学指标量化城市内涝韧性,难以综合反映城市复杂系统对于内涝灾害的响应^[36]。因此,本文提出了一种基于网格尺度经济损失量化的城市内涝韧性评估方法,综合考虑了城市内涝风险、城市承灾体、易损性和社会经济发展水平,能更全面地反映城市内涝韧性能力。经济损失量化的计算公式为

$$E = \sum_{j,h} A_{jh} F_{jh} V_j \quad (6)$$

式中: E 为总的经济损失; A_{jh} 为第*j*种土地利用类型淹没水深*h*下的淹没面积; F_{jh} 为第*j*种土地利用类型淹没水深*h*下的损失率,不同土地利用类型下损失率与淹没水深的关系见图5; V_j 为第*j*种土地利用

类型单位资产的平均经济价值。

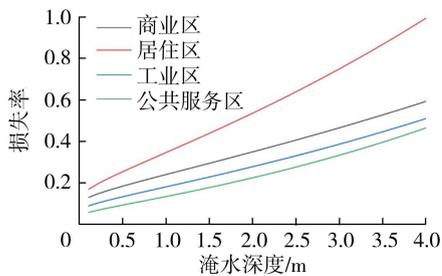


图5 损失率与淹没水深关系

Fig. 5 Relationship between loss rate and flooding depth

参考吕鸿等^[37]损失率函数构建方法,将上海、天津、广州、深圳作为引用城市^[38-41],针对不同土地利用类型建立损失率函数,选取人均地区生产总值(I_1)、人均可支配收入(I_2)、城市河网密度(I_3)、城市管网密度(I_4)和城市建成区绿地率(I_5)作为特征指标,双向扩充变异比拟因子,构建动态比拟的北京市内涝损失率移植样本,引用城市与北京市2023年的特征指标数据见表4。基于Beta分布确定函数拟合序列,获得北京市不同土地利用类型的内涝损失率。图6为北京市2023年土地利用类型的空间分布,对城市内涝模拟结果与北京市土地利用类型数据进行分析,求解城市内涝经济损失,进而计算基于网格尺度经济损失量化的城市内涝韧性,此时,系统性能的计算公式为

$$p_{kt} = 1 - E_{kth}/E_{\max} \quad (7)$$

式中: E_{kth} 为网格 k 在 t 时刻淹没水深为 h 时造成的经济损失; E_{\max} 为某一重现期下的最大经济损失值。

表4 引用城市与北京市2023年的特征指标数据

Table 4 Characteristic indicator data of quoting cities and Beijing in 2023

城市	I_1 /万元	I_2 /万元	I_3 /(km/km ²)	I_4 /(km/km ²)	I_5 /%
上海	17.3630	7.8026	4.79	19.08	36.10
天津	11.3732	4.7449	0.12	18.70	35.30
广州	15.0366	6.8908	0.74	14.56	45.52
深圳	17.3663	7.0847	0.73	16.38	43.88
北京	18.3980	7.5002	0.39	13.51	46.90

城市内涝韧性 R 的取值范围为 $0 \sim 1$ ^[42-43],按照 R 值将城市韧性进行划分: $R=1$ 为极高韧性, $0.9 \leq R < 1$ 为高韧性, $0.8 \leq R < 0.9$ 为中等韧性, $0.7 \leq R < 0.8$ 为低韧性, $R < 0.7$ 为极低韧性。

3 结果与分析

3.1 不同组合情景的城市内涝韧性

对不同气候情景与降雨重现期进行组合,SSP2-4.5-5 a代表SSP2-4.5气候情景下遭遇5年一遇降雨的情景,以此类推,针对不同组合情景进行研究。基于不同气候情景2 h短历时暴雨过程,以5 min为

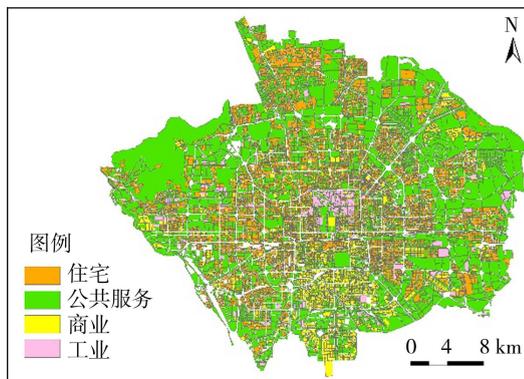


图6 北京市2023年土地利用类型空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of land use types in Beijing in 2023

时间步长,模拟北京市5 h内的内涝积水与经济损失,得到北京市不同组合情景下的系统性能曲线,结果见图7。由图7可见,整体上,北京市不同组合情景下的系统性能曲线表现出很强的相似性。北京市系统性能曲线的抵抗期为降水开始的50 min内,适应期为降水开始后的50~125 min,恢复期为降水开始的125 min之后。在抵抗期,系统性能值变化不显著,城市表现出较大的内涝抵抗力。北京市的内涝抵抗阈值为50 min,超过50 min时间节点后城市内涝积水徒增,城市系统性能值快速下降,体现为城市对内涝过程的适应阶段。125 min之后,城市系统性能值达到最小,系统性能开始回升,表现为恢复阶段。北京市城市系统性能恢复缓慢,经历2 h短历时降水过程,城市系统性能值在5 h内未能有明显恢复。北京市内涝韧性值变化范围为0.896~0.911,SSP2-4.5-5 a情景的内涝韧性值最大,SSP5-8.5-100 a情景的内涝韧性值最小。同一降雨重现期下,城市内涝韧性随着气候模式的社会经济共享路径与排放浓度的增加而降低,并且随着降雨重现期的增加,城市内涝韧性降低。

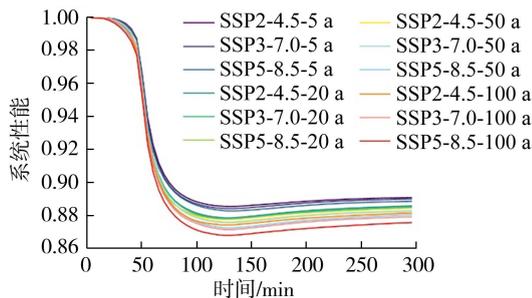


图7 北京市不同组合情景下的系统性能曲线

Fig. 7 System performance curves under different combination scenarios in Beijing

3.2 不同土地利用类型的城市内涝韧性

选取SSP2-4.5-5 a、SSP3-7.0-20 a、SSP5-8.5-50 a和SSP5-8.5-100 a 4种组合情景,对北京市不同

土地利用类型的城市系统性能进行研究,结果见图8。由图8可见,同一种土地利用类型在不同组合情景下的系统性能具有相似变化,而不同的土地利用类型的系统性能呈现明显差异。工业区的系统性能受到损害较小,表现为抵抗期长、适应期短,内涝韧性改变较小,整体曲线呈现水平状。商业区和公共服务区的系统性能曲线变化基本一致,商业区内涝损伤相对公共服务区较大,但恢复力更强,在225 min时两者的内涝系统性能表现相同。系统性能损伤最大的为住宅区,系统性能最低达到0.6,曲线整体呈现深沟状。不同土地利用类型中工业区的内涝韧性值最高,为0.985~0.989,住宅区的内涝韧性值最低,为0.660~0.690,其次为商业区(0.836~0.848)和公共服务区(0.841~0.854),公共服务区韧性值略高于商业区。内涝韧性评估结果最好的为工业区。

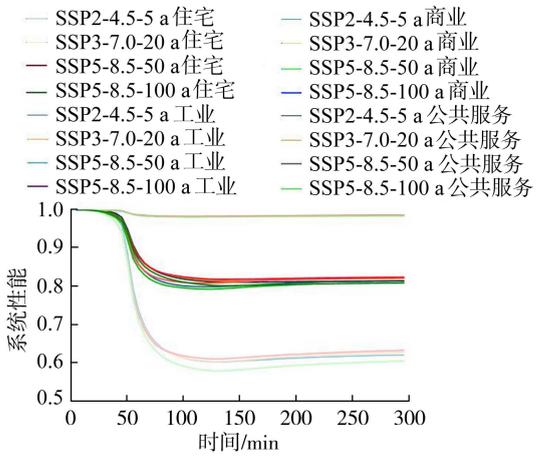


图8 北京市各组合情景下不同土地利用类型的系统性能曲线

Fig. 8 System performance curves of different land use types under different combination scenarios in Beijing

3.3 不同分区的城市内涝韧性

研究北京市不同分区的系统性能情况,结果见图9。由图9可见,北京市不同分区的系统性能具有异质性。由图9(a)可见,3区的系统性能表现最差,5区的系统性能表现最好。从系统性能曲线演变的不同阶段来看,3区、4区和8区相比其他区具有较低的城市内涝抵抗力,系统性能损伤时间较早。3区和4区在适应阶段表现较差,3区性能表现最低,但是3区相比4区具有更快的恢复能力。6区和7区在抵抗和适应阶段表现极高的相似性,2区受到内涝影响时系统性能变化不大,但其系统性能曲线一直表现为性能降低,表明2区受内涝影响的时间滞后性明显高于其他各区。由图9(b)可见,各分区在不同组合情景下的内涝韧性值差异较大,5区的内涝韧性值最高,其次为1区和2区,内涝韧

性值最差的是3区和4区。对各分区的空间位置及土地利用类型进行分析可知,5区位于城市中心的西南方向,区域内绿地面积较大,建筑物等不透水面积较小,同时5区的土地利用类型多为公共服务用地,从而导致5区具有较高的内涝韧性值。而3区位于城市中心,区域不透水率达到90%以上,区域内多为住宅与商业用地,城市内涝风险造成的经济损失较大,内涝韧性值偏低。

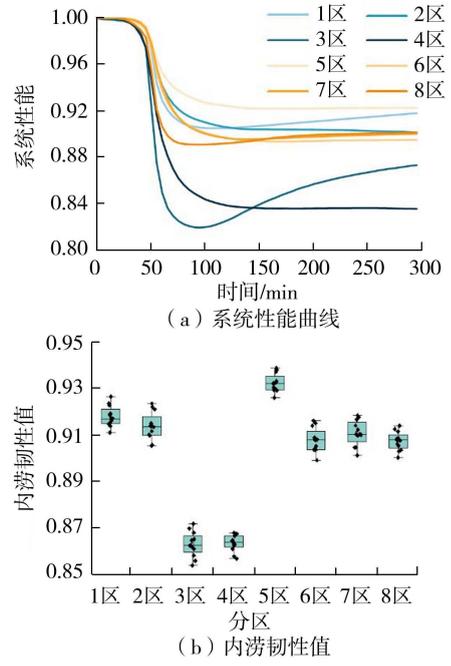


图9 北京市不同分区的系统性能情况

Fig. 9 System performance of different districts in Beijing

3.4 城市内涝韧性的空间分布

表5为不同组合情景下各内涝韧性等级的面积占比。由表5可见,极高韧性和高韧性水平的网格面积最大,两个等级之和占比达到94.46%~96.83%。表明北京市整体韧性水平较高,大部分区域能够抵御未来可能的强降雨影响。不同的组合情景下,被评估为极高韧性的区域面积随着降雨重现期的增加呈现减少趋势,高韧性、中等韧性、低韧性和极低韧性的区域呈现明显增加趋势,可见极高韧性区域更多地被转化为高韧性与中等韧性。

表5 不同组合情景各内涝韧性等级的面积占比

Table 5 Proportion of areas with different levels of waterlogging resilience in different combination scenarios

组合情景	面积占比/%				
	极高韧性	高韧性	中等韧性	低韧性	极低韧性
SSP2-4.5-5 a	87.58	9.25	2.70	0.40	0.07
SSP3-7.0-20 a	83.72	11.78	3.79	0.59	0.12
SSP5-8.5-50 a	81.49	13.49	4.22	0.67	0.13
SSP5-8.5-100 a	82.15	12.31	4.63	0.75	0.16

图10为不同组合情景下北京市各内涝韧性等级的空间分布。由图10可见,内涝韧性水平为中等

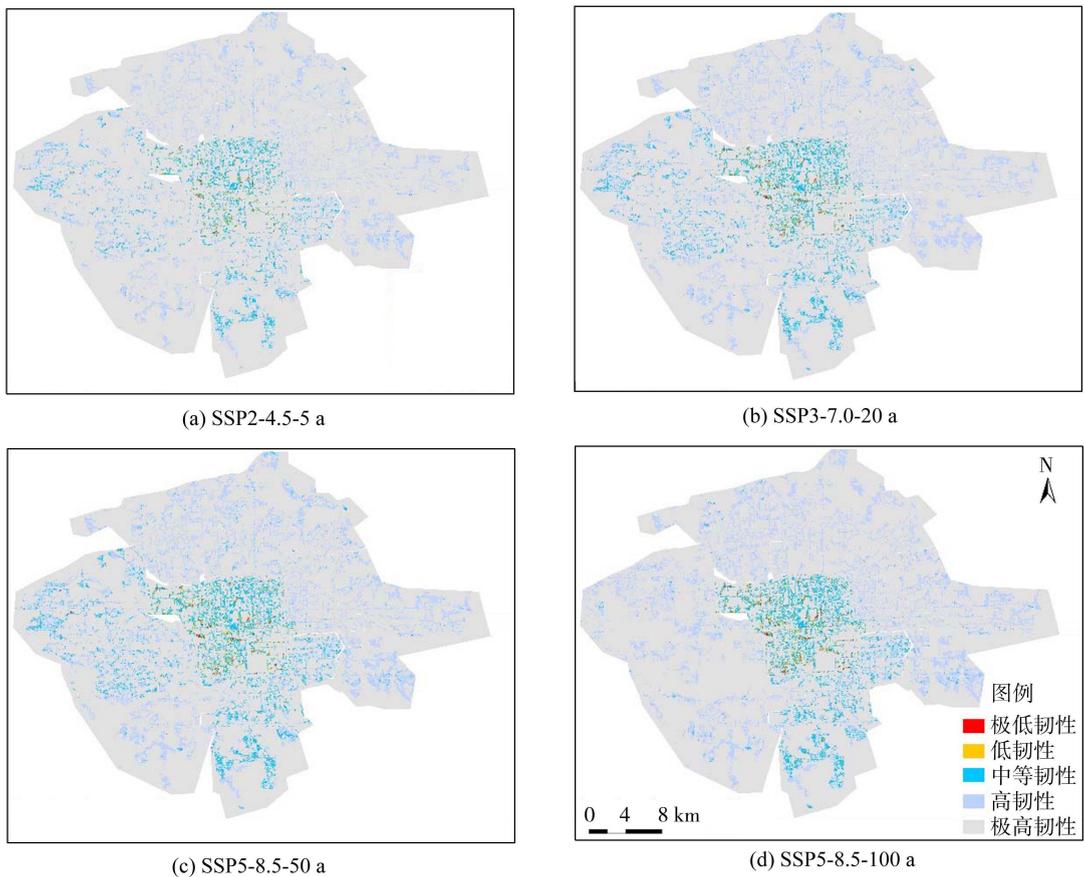


图 10 不同组合情景下北京市各内涝韧性等级的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of various waterlogging resilience levels in Beijing under different combination scenarios

韧性以下的区域面积较小,主要分布在西城区、东城区、石景山区的东侧以及大兴区的北侧。内涝韧性水平极低的区域主要分布在内环(二环以内)的金融街街道、牛街街道和天坛街道。从北京市内环到外环(二环到四环),城市内涝韧性水平逐渐增加,表明未来降雨强度的增加对城市内涝韧性具有不利影响。与 Chen 等^[26]的研究结果进行对比,发现不同降雨重现期下城市内涝韧性变化趋势具有一致性,而北京市由于其环状的城市建设与发展模式,城市内环与外环差异性较大。内环作为老城区,城市建设较早,管网密度相比外环较大,且存在管网老化、排水设施堵塞等现象,导致排水不畅;同时内环的城市化程度较高,不透水率很高,阻碍了降雨的渗透,增加了城市排水系统的负担。相比之下,外环由于城市用地规划与排水设施建设水平的提升,城市内涝韧性水平相对较高。

4 讨论

4.1 城市内涝韧性变化原因分析

本文通过对北京市内涝韧性的评估识别了不同分区及不同土地利用类型的内涝韧性空间差异。从不同分区来看,3区和4区的多为城市建设用地,区

域不透水率较高,城市排水系统压力较大;同时,3区和4区的住宅区和商业区较多,区域用地价值较高,相同内涝风险下韧性值表征较低。工业区相比于其他土地利用类型内涝韧性较高,一方面工业区位于城市外环,城市规划与排水建设水平较高,内涝积水轻微,内涝风险本身相比其他土地利用类型低;另一方面,工业区由于其用地属性价值相比住宅区偏低,具有较高的抵抗韧性的能力,而且工业区的管理水平与风险意识能够从社会角度对内涝风险发生起到缓解风险与减轻损失的效果。

城市内涝韧性作为一个综合的度量,其影响因素除了城市各区域排水系统等基础设施的完善程度、区域土地利用差异,也与城市管理和规划以及区域的社会经济发展水平相关。通过对综合性指标的动态评估,探究内涝发生前预防、内涝发生时的风险管控、内涝发生后的应急救援,从物理、社会多尺度开展动态的韧性评估与影响因素识别是未来的研究趋势。

4.2 城市内涝韧性提升策略

本文针对北京市的内涝韧性动态变化过程,评估了不同土地利用类型、不同分区的城市系统性能,为识别城市内涝韧性薄弱点提供了依据。同时基于

不同气候变化情景与降雨重现期的组合进行了研究,提出如下提升城市内涝韧性的策略:①从规划角度,将内涝韧性提升纳入城市气候变化适应规划中,合理规划城市用地开发,合理配置应急救援物资与设备,为适用未来气候变化的不确定性,形成系统的韧性提升方案;②从工程角度,针对城市内涝韧性较差的区域,要从产生内涝风险的源头入手,对区域排水管网等基础设施开展改造和防涝等级提升建设,提高区域的排水能力^[44-46];③从社会感知角度,城市内涝韧性空间变化对于公众感知城市内涝风险和变化,有助于加强社区内涝风险的防范意识与能力,建设社区-街道-区县-城市多层次、多尺度、网格化的内涝韧性应急响应与管理体系^[47-49],提高城市内涝韧性水平。

5 结 论

a. SSP2-4.5, SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 3 种气候变化情景下,北京市的内涝韧性水平较高。在 SSP3-7.0-100 a 和 SSP5-8.5-100 a 的组合情景下,北京市内涝韧性水平达到中等韧性,其他组合情景下北京市内涝韧性水平均为高韧性。北京市内涝系统性能以降水开始后的 50min 和 125min 为两个时间节点,分为抵抗、适应和恢复 3 个阶段。

b. 北京市不同土地利用类型的内涝韧性差异较大。不同土地利用类型的内涝韧性水平从高到低排序为:工业区、公共服务区、商业区、居住区。

c. 北京市内涝韧性具有空间异质性,城市外环(二环到四环)内涝韧性明显高于内环(二环以内)。城市内涝韧性水平极低的区域主要为北京市金融街街道、牛街街道和天坛街道。城市内涝韧性的提升要注重空间的差异水平和不同韧性阶段的特征差异。

参考文献:

[1] 夏军,贾海峰,张翔,等.长江中下游城市内涝与雨季污染协同治理对策[J].水资源保护,2024,40(1):1-5. (XIA Jun, JIA Haifeng, ZHANG Xiang, et al. Coordination strategies for urban waterlogging and rainy season pollution control in middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 1-5. (in Chinese))

[2] 嵇娟,陈军飞,周子月.江苏省城市洪涝韧性评价及影响因素研究[J].水利经济,2022,40(4):48-54. (JI Juan, CHEN Junfei, ZHOU Ziyue. Research on evaluation and influencing factors of urban flood resilience in Jiangsu Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(4): 48-54. (in Chinese))

[3] LIU Yating, CHEN Bin, DUAN Cuncun, et al. Economic loss of urban waterlogging based on an integrated drainage model and network environ analyses [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 192: 106923.

[4] 张伟,庄子孟,孙慧超,等.我国城市内涝风险图编制关键问题及研究展望[J].水资源保护,2023,39(5):58-68. (ZHANG Wei, ZHUANG Zimeng, SUN Huichao, et al. Key issues and study prospect of urban waterlogging risk map in China [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 58-68. (in Chinese))

[5] DING Xingchen, LIAO Weihong, LEI Xiaohui, et al. Assessment of the impact of climate change on urban flooding: a case study of Beijing, China [J]. Journal of Water and Climate Change, 2022, 13(10): 3692-3715.

[6] 姚蕊,杨群涛,张书亮.城市暴雨内涝灾害脆弱性研究综述[J].水资源保护,2023,39(1):93-100. (YAO Rui, YANG Quntao, ZHANG Shuliang. Review on vulnerability of urban rainstorm waterlogging disaster [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 93-100. (in Chinese))

[7] 刘永志,唐雯雯,张文婷,等.基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述[J].水资源保护,2021,37(1):20-27. (LIU Yongzhi, TANG Wenwen, ZHANG Wenting, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 20-27. (in Chinese))

[8] LIU Wei, SONG Zhaoyang. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 193: 106617.

[9] ZHENG Jiaxuan, HUANG Guoru. Integrating resilience into an urban flood risk assessment framework: a case study of the Minzhi region, Shenzhen City [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2023, 37(3): 1183-1197.

[10] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等.变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J].水利学报,2022,53(7):757-768. (CHENG Xiaotao, LIU Changjun, LI Changzhi, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 757-768. (in Chinese))

[11] 徐宗学,廖如婷,舒心怡.城市洪涝治理与韧性城市建设:变革、创新与启示[J].中国水利,2024(5):17-23. (XU Zongxue, LIAO Ruting, SHU Xinyi. Urban flood control and resilient city construction: transformation, innovation, and reflections [J]. China Water Resource, 2024(5): 17-23. (in Chinese))

[12] HOSSEINI S, BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J E. A review of definitions and measures of system resilience [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 145:

- [13] ZHANG Yuan, YUE Wencong, SU Meirong, et al. Assessment of urban flood resilience based on a systematic framework[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 150:110230.
- [14] 王凯丰, 力刚, 张诚, 等. 城市洪涝韧性的研究热点及趋势分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2024, 34(4): 66-71. (WANG Kaifeng, LI Gang, ZHANG Cheng, et al. Research hotspots and trend analysis of urban flood resilience[J]. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34(4): 66-71. (in Chinese))
- [15] YU Shuying, KONG Xuesong, WANG Qi, et al. A new approach of Robustness-Resistance-Recovery (3Rs) to assessing flood resilience; a case study in Dongting Lake Basin[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 230: 104605.
- [16] HUSSAIN M, TAYYAB M, ULLAH K, et al. Development of a new integrated flood resilience model using machine learning with GIS-based multi-criteria decision analysis [J]. *Urban Climate*, 2023, 50: 101589.
- [17] LEANDRO J, CHEN K F, WOOD R R, et al. A scalable flood-resilience-index for measuring climate change adaptation; Munich City [J]. *Water Research*, 2020, 173: 115502.
- [18] 高玉琴, 汪键, 高见, 等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(2): 22-29. (GAO Yuqin, WANG Jian, GAO Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(2): 22-29. (in Chinese))
- [19] LI Wen, JIANG Rengui, WU Hao, et al. A system dynamics model of urban rainstorm and flood resilience to achieve the sustainable development goals[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 96: 104631.
- [20] TU Yan, ZHAO Ying, LI Zongmin, et al. Regional flood resilience grading based on GEM-AHP Sort II method; an objective and managerial factors integrated perspective [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 93: 103766.
- [21] 刘明阳, 王群英, 徐向舟, 等. 考虑内涝周期的郑州市内涝韧性评估[J]. *水资源保护*, 2024, 40(4): 48-55. (LIU Mingyang, WANG Qunying, XU Xiangzhou, et al. Assessment of waterlogging resilience in Zhengzhou City considering waterlogging cycle [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(4): 48-55. (in Chinese))
- [22] YIN Dingkun, ZHANG Xiaoyue, CHENG Yihua, et al. Can flood resilience of green-grey-blue system cope with future uncertainty? [J]. *Water Research*, 2023, 242: 120315.
- [23] ZHANG Mingliang, XU Menghua, WANG Zhaoli, et al. Assessment of the vulnerability of road networks to urban waterlogging based on a coupled hydrodynamic model[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127105.
- [24] 黄国如, 李梅萍. 基于微观交通仿真的城市内涝对道路交通的影响评估研究进展[J]. *水资源保护*, 2023, 39(5): 69-78. (HUANG Guoru, LI Meiping. Research progress on impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on micro traffic simulation [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 69-78. (in Chinese))
- [25] MUGUME S N, GOMEZ D E, FU G T, et al. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems[J]. *Water Research*, 2015, 81: 15-26.
- [26] CHEN Jialei, CHEN Wenjie, HUANG Guoru. Assessing urban pluvial flood resilience based on a novel grid-based quantification method that considers human risk perceptions[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126601.
- [27] ZHENG Jiaxuan, HUANG Guoru. A novel grid cell - based urban flood resilience metric considering water velocity and duration of system performance being impacted[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128911.
- [28] 王洁, 蒿萌, 葛慧, 等. 基于 CMIP6 模式数据的京津冀山区未来极端降水频率的变化[J]. *灾害学*, 2024, 39(2): 92-98. (WANG Jie, HAO Meng, GE Hui, et al. Future changes in extreme precipitation frequency in the mountainous regions of Beijing-Tianjin-Hebei based on CMIP6 data [J]. *Journal of Catastrophology*, 2024, 39(2): 92-98. (in Chinese))
- [29] 张瀚, 邱静, 黄本胜, 等. 气候变化对珠三角地区典型城区流域排水系统的影响[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 56-63. (ZHANG Han, QIU Jing, HUANG Bensheng, et al. Impact of climate change on drainage system of typical urban watershed in Pearl River Delta [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6): 56-63. (in Chinese))
- [30] 胡彩虹, 姚依晨, 刘成帅, 等. 降雨雨型对城市内涝的影响[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 15-21. (HU Caihong, YAO Yichen, LIU Chengshuai, et al. Effects of rainfall patterns on urban waterlogging [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6): 15-21. (in Chinese))
- [31] 周紫蕊, 廖卫红, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市河网调控与分析: 以福州市仓山区龙津阳岐片区为例[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2023, 21(4): 770-779. (ZHOU Zirui, LIAO Weihong, LEI Xiaohui, et al. InfoWorks ICM-based urban river network regulation and analysis: a case study of Longjin Yangqi area in Cangshan District, Fuzhou City [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(4): 770-779. (in Chinese))
- [32] 廖如婷, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J]. *水资源保护*, 2023, 39(3): 109-117. (LIAO Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen Drainage Area based on SWMM and

- InfoWorks ICM models[J]. *Water Resources Protection*, 2023,39(3):109-117. (in Chinese))
- [33] YANG Junwen, DUAN Cuncun, WANG Hao, et al. Spatial supply-demand balance of green space in the context of urban waterlogging hazards and population agglomeration [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 188: 106662.
- [34] ZOU Jiaxiang, CHEN Bin, DUAN Cuncun, et al. Assessing economic loss from urban waterlogging in Beijing under climate change using a hydraulic model [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024, 12 (35): 13090-13105.
- [35] WANG Yuntao, MENG Fanlin, LIU Haixing, et al. Assessing catchment scale flood resilience of urban areas using a grid cell based metric[J]. *Water Research*, 2019, 163:114852.
- [36] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. *水资源保护*, 2024, 40(4):36-47. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agents models[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(4): 36-47. (in Chinese))
- [37] 吕鸿,吴泽宁,管新建,等. 缺资料城市洪灾损失率函数构建方法及应用[J]. *水科学进展*, 2021, 32(5): 707-716. (LYU Hong, WU Zening, GUAN Xinjian, et al. Construction methods and applications of flood loss rate functions for cities lacking data[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(5): 707-716. (in Chinese))
- [38] 许瀚卿. 沿海城市复合洪涝灾害评估与适应对策研究[D]. 上海:华东师范大学, 2022.
- [39] 冯平,崔广涛,钟响. 城市洪涝灾害直接经济损失的评估与预测[J]. *水利学报*, 2001, 32(8): 64-68. (FENG Ping, CUI Guangtao, ZHONG Yun. On the evaluation and prediction of urban flood economic loss [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 32(8): 64-68. (in Chinese))
- [40] 王艳艳. 不同尺度的洪涝灾害损失评估模式述评[J]. *水利发展研究*, 2002, 2(12): 66-69. (WANG Yanyan. Discussion on flood damage assessment modes at different scales[J]. *Water Resources Development Research*, 2002, 2(12): 66-69. (in Chinese))
- [41] 黄国如,李碧琦. 基于 InfoWorks ICM 的深圳市内涝灾害居民室内财产损失研究[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(2): 71-79. (HUANG Guoru, LI Biqu. Study on indoor property loss of Shenzhen residents caused by waterlogging disaster based on InfoWorks ICM [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(2): 71-79. (in Chinese))
- [42] XIAO Shuai, ZOU Lei, XIA Jun, et al. Assessment of the urban waterlogging resilience and identification of its driving factors: a case study of Wuhan City, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 866: 161321.
- [43] WANG Yutao, ZHANG Chi, CHEN Alberts, et al. Exploring the relationship between urban flood risk and resilience at a high-resolution grid cell scale[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 893: 164852.
- [44] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(3): 1-8. (in Chinese))
- [45] 涂善波,郭士明,耿青松,等. 郑州市极端暴雨灾后交通工程隐患应急检测分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 9-16. (TU Shanbo, GUO Shiming, GENG Qingsong, et al. Emergency detection analysis of traffic projects' problems after the extreme rainstorm disaster in Zhengzhou City[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(3): 9-16. (in Chinese))
- [46] 李曦亭,王磊之,王银堂,等. 基于安全裕度理论的太湖流域北部城市排涝与区域防洪标准衔接研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(2): 150-156. (LI Xiting, WANG Leizhi, WANG Yintang, et al. Standard syntaxis of urban drainage and sub-basin flood standards based on safety margin theory in the north of Taihu Lake Basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2): 150-156. (in Chinese))
- [47] 高玉琴,郑航,王子睿,等. 基于 DSR 模型的秦淮河流域防洪能力变化及成因分析[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(3): 1-8. (GAO Yuqin, ZHENG Hang, WANG Zirui, et al. Analysis of flood control capacity changes and causes of Qinhuai River Basin based on DSR model[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(3): 1-8. (in Chinese))
- [48] 乔贤玲,侯精明,张文晴,等. 社区尺度居民楼内涝淹没过程精细化模拟及室内财产损失评估[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(5): 73-81. (QIAO Xianling, HOU Jingming, ZHANG Wenqing, et al. Community scale refined simulation of inundation process of houses and indoor property loss assessment[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(5): 73-81. (in Chinese))
- [49] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街区洪涝模拟与分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 87-94. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 87-94. (in Chinese))

(收稿日期:2024-03-20 编辑:王芳)