

我国城市极端暴雨洪涝新特征与韧性提升建议

马昱斐^{1,2,3}, 张建云^{1,2,3,4}, 刘翠善^{1,2,3*}, 贺瑞敏^{1,2,3}, 金君良^{2,3,4}, 吴佳⁵, 舒章康^{1,2,3}

(1. 南京水利科学研究院, 南京 210029; 2. 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029; 3. 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029; 4. 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098; 5. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 在全球气候变化与快速城镇化叠加背景下, 中国城市极端暴雨洪涝事件趋于增强, 城市洪涝风险已演变为系统性城市公共安全威胁。本文基于文献资料、灾情数据、统计年鉴等, 系统总结了我国城市极端暴雨及灾害损失的历史演变特征, 揭示了极端暴雨洪涝事件呈现的四大新特征: 极端性持续增强且刷新历史极值; 突发局地性加剧, 夜发性特征凸显; 灾害空间向高脆弱性区域转移, 城市立体承灾体暴露度激增; 洪涝风险向风暴潮洪“四碰头”等复合性灾害演化, 多灾种叠加效应持续升级。基于城市安全“风险源-承灾体-减灾力”理论框架剖析了城市洪涝防御面临的核心问题与挑战, 并将韧性理念融入规划、建设与管理全周期, 最后提出了城市极端暴雨洪涝灾害的科学应对路径, 为构建气候适应型城市提供理论支撑。

关键词: 极端暴雨; 城市洪涝; 非稳态特征; 复合灾害; 韧性应对

中图分类号: P467 文献标识码: A

New Characteristics of Extreme Rainstorm and Flood in Chinese Cities and Suggestions for Enhancing Resilience

Ma Yufei^{1,2,3}, Zhang Jianyun^{1,2,3,4}, Liu Cuishan^{1,2,3*}, He Ruimin^{1,2,3},
Jin Junliang^{2,3,4}, Wu Jia⁵, Shu Zhangkang^{1,2,3}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China; 3. Research Centre for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 5. National Climate Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In the context of global climate change and rapid urbanization, floods caused by extreme rainstorms in Chinese cities have been on the rise. Consequently, urban flood risks evolve into a systematic threat to urban safety. Based on literature, disaster data, and statistical yearbooks, this study summarizes the evolution characteristics of urban extreme rainstorms and disaster losses in China. Four new characteristics are revealed: intensifying extremity with historical records broken; localized and nocturnal occurrences becoming more pronounced; disasters shifting to highly vulnerable areas with a surge in urban multi-dimensional exposure; and flood

收稿日期: 2025-08-22; 修回日期: 2025-10-26

通讯作者: *刘翠善, 南京水利科学研究院正高级工程师, 研究方向为水文水资源; E-mail: cslu@nhri.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“城市安全面临的挑战及对策”(2022-JB-02), “科技创新 保障山东水安全、生态安全, 促进经济可持续发展战略研究”(2025-DFZD-40), “土木、水利与建筑领域前瞻性储备性战略研究”(2023-JB-04); 中国工程咨询行业智库联盟课题“大中型城市洪涝灾害综合防灾减灾能力调研与提升策略研究”(2025-B06)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

risks evolving into compound hazards like fourfold convergence of typhoons, rainstorms, high tides, and floods, with escalating multi-hazard effects. This study analyzes the core challenges in urban flood prevention based on a theoretical framework of “risk source-risk exposure-mitigation force” in urban safety. By integrating the concept of resilience into the entire cycle of planning, construction, and management, we propose a scientific response path to extreme rainstorm and flood disasters in cities, aiming to provide theoretical support for constructing climate-adaptive cities.

Keywords: extreme rainstorm; urban flooding; non-stationary characteristics; compound disaster; resilient response

一、前言

极端暴雨洪涝作为威胁人类生存与发展的重大自然灾害，具有累计雨量大、致灾损失高、影响范围广的特征，对社会经济与生态环境造成的破坏不容小觑^[1,2]。近年来，随着全球气候变暖加剧，大气环流系统发生了显著改变；与此同时，快速的城镇化进程也显著改变了城市下垫面条件。两者深度交织塑造了当前复杂的气候环境，在这一环境背景下，城市暴雨洪涝灾害正经历深刻的非平稳性演变。全球范围内，印度孟买、美国纽约等湿润地区城市频发内涝，干旱沙漠区域亦频繁出现极端洪涝事件。2024年暴雨洪涝席卷全球，仅4月至5月，中国华南、阿联酋和阿曼、中亚、巴西南部、东非、亚洲西南部均经历了灾难性暴雨洪涝；同时极度干旱地区也发生暴雨洪涝灾害，如4月沙漠之城迪拜遭遇暴雨、8月塔克拉玛干沙漠发生洪水，由于应对经验不足，暴雨洪涝灾害给极端干旱地区的抗洪救灾带来更大挑战^[3]。

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告（AR6）指出，1979—2020年全球哈德莱环流（Hadley Cell）向两极扩张速率达 $0.1\sim 0.3^\circ/10a$ （纬度），导致西太平洋副热带高压（WPSH）显著北移，这种环流异常直接改变了东亚季风区的水汽输送路径^[4-6]。观测显示，自20世纪中叶以来，全球陆地极端降水事件的强度平均每10年增加约1.3%~2.5%，其中热带和副热带地区的增幅尤为显著^[7]。《中国气候变化蓝皮书（2025）》^[8]指出，1961—2024年，我国极端强降水事件呈增多趋势；2024年，我国气候风险指数为1961年以来最高，其中雨涝风险尤为突出。在全球变暖背景下，极端降水事件的非稳态特征显著增强。研究表明，在全球 1.5°C 温升背景下，我国华北地区、东南地区极端降水事件发生风险增幅最大，为1986—2005年基准期的1.88倍和1.85倍^[9]；21世纪末，相比基准期（1961—2014年），我国极端降水量（R95pTOT）增

加速率为13.7%，极端降水强度（SDII95）增加速率为9.3%^[10]。人类活动的干预进一步加剧了城市洪涝的复杂性。我国城镇化率从1949年的11%跃升至2024年的67%，城镇常住人口超9.4亿人。城镇化进程导致的下垫面硬化，显著改变了地表径流过程，使暴雨内涝风险增加^[11]。2021年郑州“7·20”特大暴雨事件中，1h降雨量达201.9mm，远超当地50年一遇排涝标准（24h降雨量达199.0mm），暴露出传统防洪工程体系在应对非稳态极端事件时的脆弱性^[12,13]。由此可见，传统基于历史序列平稳性假设的水文频率分析方法和防洪排涝工程体系正面临前所未有的挑战。

2025年，中央城市工作会议指出要“建设安全可靠的韧性城市”，强化城市自然灾害防治，统筹城市防洪体系和内涝治理。城市韧性作为应对不确定性风险的核心概念，其在水安全保障领域的构建与实践，亟需重新审视并适应这种非平稳性常态。因此，本文旨在系统综述复杂环境下中国城市极端暴雨洪涝演变以及近年来呈现的新特征，科学评估其对现有防灾减灾体系的冲击，并探索面向韧性的适应策略，为构建适应气候变化的城市水安全格局提供科学依据。

二、我国城市极端降水演变规律

1961年以来，青藏地区年降水量以 $6.8\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率增加，而西南地区则以 $10.7\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率减少。近60年的气象观测数据表明，我国平均年降水日数总体呈显著减少趋势，但年累计暴雨（日降水量 $\geq 50\text{ mm}$ ）站日数平均每10年增加4.5%；极端日降水量事件平均每10年增多20站日。

基于国家青藏高原科学数据中心发布的中国区域地面气象要素驱动数据集CMFD 2.0，分析我国城市极端降水的变化特征。该数据集的时间分辨率为3h，水平空间分辨率为 0.1° ，时间长度为74年（1951—2024年）。对地级市行政边界内的降水量栅

格进行平均处理,得到1951—2024年我国城市逐3 h降水量系列,并进一步统计各城市24 h累计降水量(北京时间0时—次日0时),较“区域平均化”处理(如华北区域整体统计)更能反映城市尺度的降水异质性。对各城市的年最大24 h降水量和最大3 h降水量进行了曼-肯德尔(MK)趋势分析,如图1所示。其中最大24 h降水量为地级市行政边界内的24 h降水量栅格平均值的年最大值,反映区域气候中“持续性强降水”的变化特征;最大3 h降水量为地级市行政边界内的3 h降水量栅格的最大格点值,反映局地气候中“短时极端降水”的强度特征。结果表明,我国城市暴雨时空格局呈现显著区域差异:最大24 h和最大3 h降水序列中约70.6%和67.1%的城市存在上升趋势,其中分别有9.2%和13.2%表现为显著上升。从空间分布来看,华东、东北和华中地区为最大24 h降水的主要上升区,这些地区中约有75%~85%城市的最大24 h降水呈上升趋势;而呈显著上升的城市主要集中在西北、西南和华东地区,占有最大24 h降水显著上升城市的67.7%。东北、西南和华东地区为最大3 h降水的主要上升区,这些地区中约有70%~75%城市的最大3 h降水呈上升趋势;其中显著上升区表现出显著的空间异质性,整体较为分散,但西南、西北和华东地区仍为最大3 h降水显著上升城市中最多的地区。

不同于气象部门常规的气候分区,依据城镇化

水平选取京津冀、长江三角洲(长三角)、粤港澳大湾区等12个典型城市群,分析1975—1999年(城镇化过渡阶段)、2000—2024年(城镇化高速与质量提升阶段)两个时期的年最大24 h和年最大3 h降水的概率密度曲线,如图2所示,以突出我国城镇化不同发展阶段下人口与经济要素高度集聚区域的极端降水特征。

可以看出2000—2024年相较于1975—1999年:①年最大24 h降水指标(平均值/最大值)在粤港澳大湾区、京津冀和北部湾城市群有不同程度下降,其余呈上升的城市群中长三角城市群的增幅最为显著,其次为关中平原、长江中游和哈长城市群,长三角城市群在1975—1999年的平均年最大24 h降水量为125.9 mm,极值为176.1 mm,而在2000—2024年分别增长为154.7 mm、311.2 mm;②年最大3 h降水指标在成渝、粤港澳大湾区、中原和京津冀城市群中有不同程度下降,其余城市群均有所上升,尤其是山东半岛城市群的增幅最为显著,其次为长江中游、哈长和关中平原城市群,山东半岛城市群在1975—1999年的平均年最大24 h降水量为54.1 mm,极值为81.5 mm,而在2000—2024年分别增长为58.0 mm、117.5 mm;③整体而言,大部分城市群的极端降水在21世纪后有所上升,除长三角、山东半岛等东部地区,关中平原、哈长等西北、东北地区也有明显提升,可能导致洪涝风险增加。

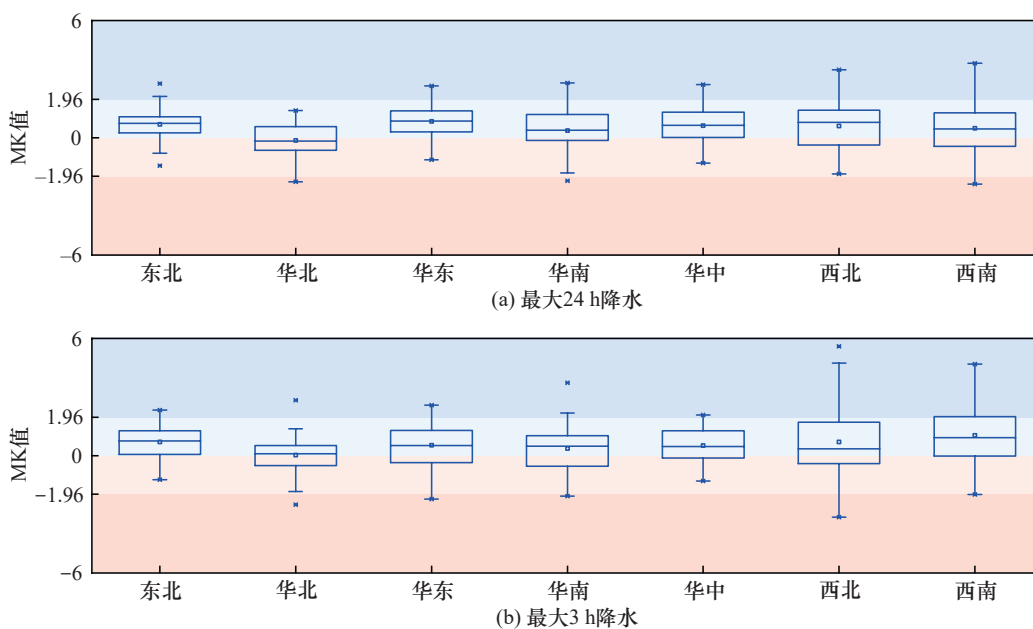


图1 中国城市最大24 h和最大3 h降水变化MK值(1951—2024年)

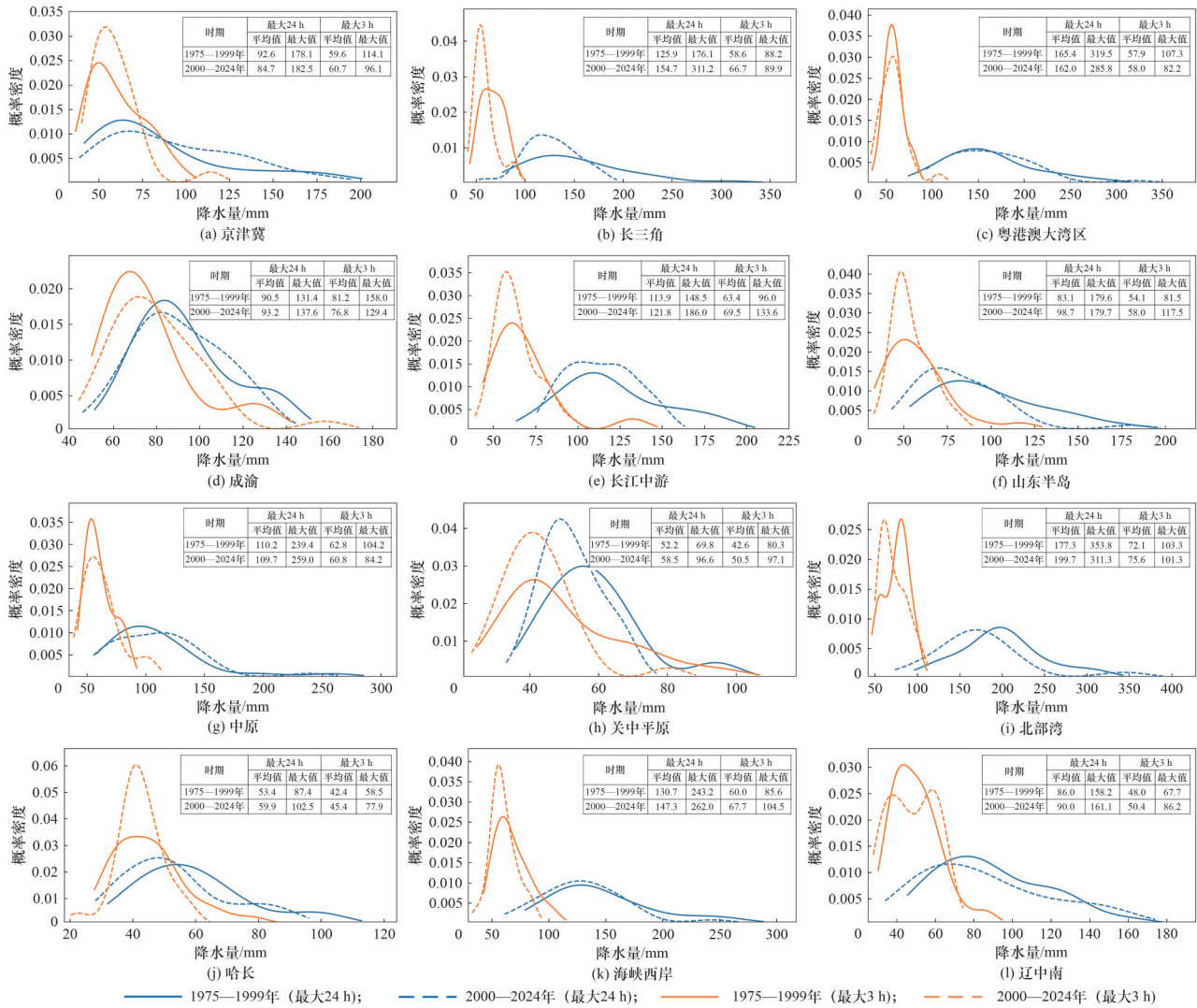


图2 我国典型城市群不同时期年最大24 h和3 h降水概率密度图 (1975—1999年与2000—2024年)

三、我国城市极端暴雨洪涝事件新特征

在全球气候系统深刻变化与我国城镇化进程加速推进的双重驱动下，我国城市极端暴雨洪涝灾害呈现显著的非稳态特征与复合致灾机制。这些新特征既体现了大气环流异常与下垫面条件改变的物理过程耦合，也映射出城市系统脆弱性在多维压力下的累积与暴露。

(一) 极端性增强，突破历史极值^①

近年来，我国多地接连遭遇突破历史极值的极端暴雨，其强度和频率均呈增加趋势^[4,14]。表1展示

了2020—2024年我国突破历史极值的典型极端暴雨事件。可以看出，近年来我国城市暴雨事件的极端性主要体现在以下三方面：一是短时雨强 / 过程雨量突破历史极值，如2021年郑州“7·20”特大暴雨，最大1 h降雨量达201.9 mm（郑州国家气象站数据），突破了我国气象观测记录历史极值^②[13]。2023年深圳“9·7”暴雨为超历史记录的特大暴雨，打破了当地1952年有气象记录以来7项历史极值（最大滑动雨量2 h、3 h、6 h、12 h、24 h、48 h、72 h），堪称世纪暴雨^[15]。二是过程雨量超过年均值，如2023年北京“7·31”暴雨中河北邢台（1003 mm）、北京昌平（744.8 mm）的最大过程雨量；2024年辽

① 本文中“历史极值”特指各站点有实测记录以来的最大值。

② 1 h降雨量历史极值为198.5 mm，发生在河南“75·8”特大暴雨；郑州“7·20”特大暴雨3 h至3天降雨量未超过河南“75·8”特大暴雨。

表1 2020—2024年中国突破历史极值的典型极端暴雨事件

时间	区域	关键降雨指标	破纪录情况
2020年5月22日	广东东莞	3 h: 351.0 mm	突破东莞市有实测纪录以来最大值 ^[16]
2020年6月24日— 2020年6月25日	广西南宁	24 h: 257.4 mm (武鸣)	日降水量突破建站以来历史极值 ^[17]
2021年7月17日— 2021年7月18日	内蒙古呼伦贝尔	24 h: 279.7 mm	突破呼伦贝尔市有实测记录以来日降雨量极值 ^[18]
2021年7月21日	河南郑州	1 h: 201.9 mm	突破中国大陆气象观测记录历史极值 ^[13]
2021年8月7日— 2021年8月8日	四川达州	1 h: 115.3 mm (渠县) 24 h: 334.0 mm (渠县)	突破川东北地区国家站有实测记录以来最大值 ^[19]
2022年6月17日— 2022年6月20日	江西上饶	24 h: 268 mm (玉山)	日降水量突破建站以来历史极值 ^[20]
2022年6月18日	广西柳州	6 h: 427.6 mm	最大6 h雨量打破广西有实测记录以来最大值 ^[21]
2023年6月7日— 2023年6月10日	广西北海	1 h: 119 mm 3 h: 272.3 mm 6 h: 440.5 mm 24 h: 614.7 mm	最大1 h、3 h、24小时雨量突破北海市历史极值; 最大6 h雨量突破广西历史极值 ^[22]
2023年7月29日— 2023年8月1日	河北邢台	过程: 1003.4 mm	河北、北京14个国家级气象观测站点日降水量突破历史极值; 26个国家级气象观测站点3天累计降水量突破历史极值 ^[15]
2023年8月2日	北京昌平 内蒙古呼伦贝尔 (鄂温克族自治旗)	过程: 744.8 mm 24 h: 87.3 mm	日降水量突破建站以来历史极值 ^[15]
	黑龙江牡丹江	24 h: 106.1 mm (海林)	
	吉林四平	24 h: 144.9 mm (孤家子)	
2023年9月7日— 2023年9月10日	香港 深圳	1 h: 158.1 mm 2 h: 195.8 mm 3 h: 246.8 mm 6 h: 355.2 mm 12 h: 465.5 mm 24 h: 559.6 mm 48 h: 615.4 mm 72 h: 616.4 mm	突破香港1884年有记录以来小时降水量极值 ^[23] 突破深圳市1952年有气象记录以来历史极值 ^[15]
2023年10月19日— 2023年10月22日	广西北海	24 h: 780.3 mm 过程: 914.6 mm	24 h雨量打破广西历史极值; 过程雨量破北海市记录 ^[24]
2024年5月17日— 2024年5月19日	广西钦州	1 h: 189.6 mm 6 h: 393.9 mm 12 h: 500.3 mm 24 h: 610.5 mm	均突破钦州市历史极值, 其中1 h降水量突破广西历史极值 ^[25]
2024年7月16日	陕西宝鸡	24 h: 214.3 mm (金台区)	日降雨量突破建站以来历史极值 ^[26]
2024年8月18日— 2024年8月22日	辽宁葫芦岛	24 h: 638.8 mm 过程: 648.3 mm	突破辽宁省有实测记录以来历史极值 ^[27]

宁葫芦岛“8·20”最大过程雨量(648.3 mm)均超过当地年均降水量(约600 mm),相当于仅2~3天便下了正常年份一年的雨量。三是北方极端暴雨增

多,如2020年内蒙古呼伦贝尔“7·18”、2021年郑州“7·20”、2023年北京“7·31”、2023年哈尔滨“8·2”、2024年葫芦岛“8·20”等,均刷新北方多

地历史极值。

(二) 突发局地性增强，夜发性特征凸显

城市扩张形成的“热岛效应”与“雨岛效应”，改变了局地环流与水汽条件，易诱发或增强城市及其下风向区域的强对流降水^[28,29]。观测与模拟研究均表明，我国东部，特别是华北、东南沿海等城镇化密集区域，降水过程对流性特征增强，局地短时“列车效应”导致小时级极端强降水事件频发^[30,31]，呈现出局地性增强、夜间频发等一系列变化特征。

1. 局地性极端降水的空间异质性显著增强

近年来，我国城市极端降水呈现显著的“小范围、高强度”特征，其空间异质性可通过单点极值与区域均值偏差度、局地暴雨事件占比两个维度剖析。在单点与区域差异维度，2025年成都“7·3”中心城区特大暴雨中，人民公园站单站累计降水量(323.7 mm)不仅刷新中心城区单站历史极值，更较同期周边金牛区驷马桥站(183.2 mm)、高新中和站(164.5 mm)高出75%以上，凸显“点状暴雨”特征。在局地暴雨事件占比维度，池艳珍等^[32]研究发现厦门市暴雨频次分布从沿海向内陆递增，且与地形(如山脉、海湾等)密切相关，局地暴雨过程占比高达64.6%(106场/164场)；谢仁波等^[33]研究指出铜仁市暴雨局地性突出，大暴雨以上天气过程单站率占70.4%，暴雨以上天气过程单站率为50%。

由此可见，城市暴雨局地集中性已成为气候变暖背景下的新常态。其物理本质在于，在大尺度环流背景提供充沛水汽的条件下，城市下垫面的热力与动力强迫作为“触发器”和“放大器”，与中尺度对流系统和复杂地形发生非线性相互作用^[34]。对2021年郑州“7·20”特大暴雨的中尺度分析显示^[35]，三个对流单体在郑州西南方的中尺度低压辐合带依次合并，叠加太行山北部的地形障碍急流和下山气流，加剧了降水的局地累积。进一步地，城市群扩张使热岛效应在局地极端降水的对流启动和加强中作用显著^[36]，形成区域热岛集群(RHIC)。对长三角地区研究表明，2003—2020年RHIC范围平均达 $3.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，相当于城市建成区的1.5~2.0倍，呈波动增长趋势^[37]。热岛集群的增强使降水空间分异性显著增强，城市群核心区极端降水重现期缩短。综上所述，城市极端降水的空间异质性的表现形式与驱动机制存在差

异：地形复杂地区多体现为大气环流与地形耦合下的局地集中；而城镇化密集区则更多呈现热岛效应主导的单点爆发。

2. 极端暴雨的夜发性特征凸显

我国极端暴雨的日内变化峰值时段呈现显著的区域分异特征。在全国范围内，极端小时降水频次占比呈现午后至夜间的谷峰主循环，后半夜到上午的次循环，且随着极端性增强，主循环振幅增大，次循环峰值减小。表2展示了华南沿海、华北平原等具有极端暴雨夜发性特征区域^[38]的日内变化峰值时段。

表2 我国典型区域极端暴雨的日内变化峰值时段

区域	日内变化峰值时段	主要参考文献
华南沿海	午后至夜间、半夜至凌晨	[39,40]
华北平原	傍晚至午夜	[41]
东北地区	午后至傍晚	[42,43]
四川盆地	午夜至凌晨	[44,45]
西北地区	傍晚至清晨	[46~48]

值得关注的是，夜间暴雨的致灾风险显著增加。如2020年广州“5·22”特大暴雨中，黄埔区录得全省最大1 h降水量167.8 mm(22日02—03时)，东莞东城录得全省最大3 h降水量为351.0 mm(22日00时30分—03时30分)，广州、东莞的降水集中在21日20时—22日08时^[18]；极端降水与夜间叠加，加剧灾害隐蔽性与应急难度，尽管气象部门提前发布预警，但仍触发城市内涝、河涌倒灌、山体滑坡及泥石流等连锁灾害。此类事件揭示了夜间暴雨在应急响应、人员疏散和基础设施防护中的特殊挑战。

极端暴雨的局地性、夜发性增强，增加了预报预警难度。强对流系统生消快、尺度小，精确落区预报仍存在技术瓶颈，导致有效预警时间窗短，公众应急避险响应时间不足。如2023年深圳“9·7”特大暴雨的雨带宽度不足20 km，逼近现有全球天气模式与人工智能模型的精度下限，极难被捕捉^[49]。

(三) 灾害空间转移，立体脆弱性暴露

全球气候变化与快速城镇化正深刻改变我国暴雨洪涝灾害的空间格局，叠加城市立体化发展带来的多维脆弱性暴露，形成复杂的灾害风险格局。这种空间转移不仅表现为雨带北抬导致的北方暴雨频

次增加,更体现在随着城市立体化开发进程的加速,城市内部洪涝风险从地表向地下、从单一系统向复合网络扩展。一方面,地下空间的大规模开发利用,使地铁、地下商业体、地下车库等新型承灾体大量暴露于洪水威胁之下^[50],这些空间一旦进水,不仅造成直接经济损失,更易引发重大人员伤亡和城市功能瘫痪;另一方面,地面以上的城市生命线系统节点,如变电站、通信枢纽、交通枢纽等,其分布密度随着城市发展而显著增加;这些关键基础设施以网络形式分布,各部分相互关联,一处遭受暴雨洪涝破坏,可能引发连锁反应,导致整个网络瘫痪。

据不完全统计,近10年(2016—2025年)我国有11个城市共发生15起地下空间(地铁、地下车库、地下商场等)雨水淹涝事件,其中10起发生在近5年(2021—2025年),统计数据如表3所示。

2021年郑州“7·20”特大暴雨灾害充分暴露了城市地下空间和城市生命线工程在极端暴雨洪涝面前的脆弱性。此次灾害事件中地铁5号线遭遇涝水灌入、失电迫停,导致14人死亡,众多乘客被困;郑州京广快速路北隧道发生淹水倒灌,导致6人死亡,给人民生命安全带来巨大威胁。城市大范围断电、停水、通信中断近一周,医院等医疗系统因洪涝受灾,正在进行的手术被迫停止,严重威胁人民生命安全。

这种承灾环境的演变直接导致了洪涝灾害的损失构成与风险属性的转变。洪涝灾害的损失已从传统的建筑、商品浸泡等直接经济损失,扩展至因交通中断、业务停滞等引发的间接经济损失,以及由此带来的社会秩序紊乱等非经济影响。同时,风险特征也从单一的水淹物理破坏,演变为复合功能中断、系统瘫痪与社会失序等复杂性系统风险。

(四) 洪涝灾害复合,多灾种叠加效应升级

大量研究表明城市洪涝风险正从单一灾害/事件向多灾种、复合性方向演化^[51],如“外洪内涝”、风暴潮洪“四碰头”、旱涝急转、融雪-暴雨混合、高温-暴雨等复合性事件(见表4)。以风暴潮洪“四碰头”型为例,全球气候变化背景下海平面持续上升、极端天气事件频发,滨海城市面临台风、暴雨、高潮、洪水多重灾害叠加的严峻挑战。2021年的台风“烟花”期间,上海市出现大到暴雨,局部大暴雨,平均降雨量达286.1 mm;恰逢天文大潮,上海市沿江沿海及黄浦江上游支流水位代表站全部超警戒,杭州湾代表站出现历史第2高潮位,7月26日凌晨黄埔公园站最高潮位达5.49 m;与此同时,太湖出现2021年第1号洪水,黄浦江上游米市渡站最高潮位达4.79 m,形成风暴潮洪“四碰头”^[52]。

此类复合灾害不仅表现在多种致灾因子的时空

表3 2016—2025年我国部分城市地下空间内涝情况

时间	城市	地下空间类型	事件影响
2016年5月	广州	地铁	长湴站C出口封闭,1条线路被淹,8人死亡
2016年7月	武汉	地铁	地铁4号线中南路站和梅苑小区站停运
2017年6月	深圳	地铁	地铁1号线车公庙站站厅积水,临时关停
2018年9月	广州	地下车库	台风“山竹”引发持续性特大暴雨,54个地下车库被淹
2020年5月	广州	地铁	官湖站、新沙站严重浸水导致地铁13号线停运
2021年7月	广州	地铁	21号线黄村站至苏元站共6个站暂停营运7 h,直接经济损失91.15万元
2021年7月	郑州	地铁、隧道	地铁5号线400余名乘客被困,14人死亡;郑州京广快速路北隧道发生淹水倒灌,247辆汽车被淹,6人死亡
2021年8月	北京	下沉立交桥	旱河铁路桥下短时严重积水,2人死亡
2022年7月	安阳	涵洞	2人在被积水淹没的涵洞中遇难
2023年7月	南京	涵洞	1人在西善桥街道一涵洞内避雨时,被冲入水中失联
2023年9月	深圳	地下车库	全市有120余处地下车库受淹,大量车辆受损
2024年6月	长沙	地铁、地下商场	地铁2、3号线全线(含西环线)停运,雨水灌入地下商场
2025年6月	龙山	地下车库	地下车库被淹没,1人被困22 h获救,另有3人遇难
2025年6月	榕江	地下商场	当地最大商场被淹,商户损失数十万至数百万元
2025年7月	成都	地下车库	暴雨导致地下车库积水,20余辆车被浸泡

表4 我国主要复合洪涝灾害类型

复合洪涝灾害类型	主要致灾因子组合	易发城市类型	典型城市 / 区域
外洪内涝型 ^[53,54]	本地暴雨、上游河流洪水、外河顶托	山地河谷型、河湖交错型	重庆、武汉
风暴潮洪“四碰头”型 ^[55,56]	台风、暴雨、风暴潮、上游洪水	滨海河口型	上海、深圳
旱涝急转型 ^[57]	长期干旱、短时暴雨	季风气候区的河流中下游平原型	长江中下游城市群
融雪-暴雨混合型 ^[58]	融雪洪水、局地强降雨	高山盆地绿洲型	喀什、阿克苏
高温-暴雨复合型 ^[59,60]	高温热浪、极端降水	高度城镇化型	粤港澳大湾区

耦合，更关键的是，在日益复杂且高度互联的现代城市系统中，其承灾体的脆弱性呈现出放大效应。一方面，物理脆弱性的叠加体现在城市基础设施的系统关联性。例如，当极端暴雨与风暴潮或上游洪水遭遇时，外部防洪体系与内部排水系统同时承受极限压力，任何一环的失效都可能通过系统耦合关联引发崩溃性连锁反应。另一方面，社会脆弱性体现在因风险感知混淆与避险资源挤兑而导致的敏感性倍增。当暴雨、内涝乃至次生地质灾害等多重威胁并存时，信息环境的复杂性与矛盾性升级，弱势群体因信息甄别能力薄弱，更易陷入无所适从或决策延迟的困境；且在多重灾害冲击下，有限的应急疏散资源与救助通道面临竞争性需求，进一步加剧了弱势群体在避险与逃生过程中的边缘化态势。

四、城市洪涝灾害防御面临的问题和挑战

从城市安全“风险源-承灾体-减灾力”理论框架审视^[61]，变化环境下我国城市极端暴雨洪涝防御面临核心问题与挑战。

（一）风险源层面：极端气候变异与人类活动扰动的双重驱动

全球气候变化与区域人类活动的交互作用，正显著改变极端暴雨事件的特性与水文循环过程，对城市洪涝防御体系构成挑战。极端气候变异与人类活动扰动并非简单叠加，而是通过反馈与协同形成耦合放大效应，这是极端降水事件强度突破历史、频次持续递增的核心成因。气候变异引发的大气环流异常，为人类活动的局地扰动提供了放大载体。例如，城镇化区域的热岛效应在高水汽背景下，可进一步强化对流上升运动，从而易形成超标准极端降水。极端降水引发的城市内涝会改变局地热力与水汽条件，可能触发二次对流；而降水导致的植被

破坏与土壤侵蚀，又会加剧人类活动对下垫面的扰动，同时削弱生态系统的碳汇能力，间接增加温室气体浓度以强化气候变异。

城市下垫面变化对极端降水的影响主要体现在以下三方面：其一，城市冠层阻碍效应改变了风场、风场辐合，甚至改变了天气系统本身，进而改变了湿度平流，最终影响城市降水的落区、强度。其二，城市大气污染物上升，空气中污染物粒子浓度增加，产生凝结核增强效应，起到了水汽凝结催化剂的作用，增加城区的降雨几率和强度。Andreae等^[62]认为气溶胶增加了云滴在空中滞留时间，促进云滴凝结增长，并在上升气流作用下转化为冰晶，使云体变得深厚，导致闪电和对流性强降水。其三，城市地表对太阳辐射的反射、吸收、存储和释放等性质的变化，对地表能量平衡产生了影响。Souma等^[63]证实了日本东京城市下垫面热量传输变化对降雨存在影响。同时城市扩张导致地表不透水面积比例大量增加，使得局地蒸发减少、感热通量增加、边界层水汽混合更加均匀，影响天气系统发生、发展，从而对局地降水产生影响^[64]。

我国极端暴雨洪涝事件呈现出突发性、局地性、持续性等特征，这种变化增加了城市洪涝防御的预判与应对难度。传统防御体系以历史降水数据为基础，通过统计规律推导极端降水的重现期与致灾阈值，进而制定监测、预警与应对方案；但极端降水的不确定性使历史数据的参考价值弱化。当极端降水事件的变异程度超出历史样本的覆盖范围时，基于传统统计方法的预判模型易出现阈值偏差，导致监测环节难以精准捕捉中小尺度极端降水系统的生成与移动轨迹，预警环节无法准确界定致灾风险的时空边界，最终使防御决策陷入预判滞后于实际降水过程的被动局面。这种由极端降水不确定性引发的预判偏差，从而导致的被动防御，凸显了极端降水作为风险源对防御体系的根本性挑战。

（二）承灾体层面：暴露度与脆弱性攀升下的系统性风险放大

随着城镇化进程推进，承灾体自身的规模扩张、暴露性提升与内在脆弱性凸显，放大了城市洪涝的整体风险。其一，承灾体规模扩张与局部暴露性增加引发风险累积效应。近几十年来我国城市建成区面积的快速拓展，使更多人口、资产与功能空间纳入潜在涝区范围，形成规模越大、风险载体越多的累积效应；而在城市高密度开发模式下，核心商业区、交通枢纽、人口密集社区等关键区域集中于地势低洼地带或排水薄弱区域，导致局部暴露性的增加。这种规模扩张与暴露性增加对防御资源的均衡配置构成了挑战：一方面，防御资源（如应急物资、救援力量）的总量增长滞后于承灾体规模扩张速度，导致单位面积承灾体可分配的防御资源密度下降，出现资源覆盖盲区；另一方面，局部高暴露区域对防御资源的差异化需求与现有配置模式存在矛盾，例如核心商业区需要更精细化的排水与应急保障，而现有配置难以满足这种针对性需求，最终导致防御体系在面对极端降水时，既存在全域资源不足的困境，又面临局部资源错配的问题，进一步放大灾害损失。

其二，人群应急避险能力不足，削弱了非工程防御措施的实际效能。人群作为承灾体的核心构成，其应急避险能力是连接预警信息与实际防御行动的关键纽带，而当前城市人群在面对城市洪涝时在风险认知、避险意识和社会参与等方面较为薄弱。首先是风险认知偏差，大众对极端降水致涝风险的低估倾向普遍存在，即对极端性的认知仍停留在常规暴雨经验中，难以准确判断极端降水下内涝的扩散速度与危害程度，对内涝引发的交通中断、电力故障、次生伤害等潜在风险认知不足，进而延误避险决策。其次是应急响应滞后，即使接收到预警信息，人群的行动转化效率较低，常因犹豫、信息核验或准备不足，导致实际避险行动晚于内涝发生时间，失去最佳防御窗口。而有效的避险行为需要快速判断、科学选择、规范执行的能力，当前城市人群普遍缺乏系统的洪涝避险知识，在灾害发生时易出现盲目转移、扎堆避险等无序行为，增加踩踏、溺水等次生风险。最后是协同参与缺失，洪涝避险的高效性需要公众、政府、社会组织的协同联动，而当

前人群在避险过程中多处于被动接收指令状态，缺乏主动反馈风险信息、配合应急救援的意识与能力，导致应急系统难以精准掌握现场情况，进而影响避险方案的动态调整。

（三）减灾力层面：防御体系结构性短板与治理能力局限

当前城市洪涝防御体系仍存在标准偏低、韧性不足的结构性短板，难以适应动态风险。其一，城市排水防涝基础设施能力的适配性不足，制约了灾害的主动防控能力^[65]。首先是标准适配性偏差，我国城市排水防涝基础设施建设历史欠账多、标准普遍偏低，是城镇内涝频发的主要原因。《住房和城乡建设部关于印发城市排水（雨水）防涝综合规划编制大纲的通知》提出，特大城市能够有效应对50年一遇24 h降雨，大城市能够有效应对30年一遇24 h降雨。虽然近年来城市治涝进程明显加快，但历史欠账尚在补齐过程中，实际防涝能力与规划标准仍相差甚远。如郑州主城区有38个排涝分区，但“7·20”暴雨时仅1个达到了50年一遇规划标准，部分分区甚至不足5年一遇。其次是系统协同性缺失，排水防涝设施涵盖“源头减排—管网输送—末端行洪”三个环节，而当前多数城市的设施系统呈现分段割裂状态，例如源头减排设施（如透水铺装、绿色屋顶）与管网输送能力不匹配，导致减排后的雨水仍超出管网承载，或末端行洪河道与管网出口的水位衔接不当，形成倒灌风险，这种协同性不足使得设施系统难以形成整体防御合力。最后是区域均衡性缺陷，从城市空间结构来看，新旧城区的排水设施能力存在显著差异，老城区因管网老化、管径不足导致能力短板，新城区虽设施标准较高但缺乏与周边区域的统筹衔接，这种不均衡使城市排水防涝系统存在局部瓶颈，在极端降水下易因某一区域设施失效而引发全域内涝扩散。

其二，暴雨内涝精细化预报能力不足，无法满足防御措施的精准性与前瞻性需求。首先是时空分辨率不足，当前暴雨内涝预报多停留在城市级或区域级层面，难以实现街道级、社区级的精细化空间划分，而城市内涝具有显著的局地性特征，这种预报精度不足易导致防御资源（如抽排设备、应急队伍）的错配；其次是风险转化不足，精细化预报的核心不仅是降水强度预报，更是内涝风险等级预报，

而现有预报多停留在气象要素层面，未能有效结合城市承灾体特征将降水数据转化为积水深度、影响范围、风险等级等可直接用于决策的信息，导致预报与防御行动之间存在衔接断层；最后是时效衔接不足，从应急决策时间来看，精细化预报需要为防御措施预留足够的准备窗口，而当前极端降水下的内涝预报提前量普遍较短，且预报结果的更新频率难以匹配降水过程的动态变化，导致防御措施多处于事后响应状态，难以在灾害发生前形成有效防御。

其三，防灾减灾治理理念作为减灾力的顶层逻辑，其滞后性是导致各类能力短板的根源，这种滞后体现为“重应急、轻预防”“重工程、轻系统”的治理倾向。首先是被动应对多于主动防御。当前城市减灾多以灾害发生后抢险救灾为主，对灾前风险防控（如风险普查、隐患排查、韧性规划）的重视不足，城市规划中未充分预留调蓄空间、生态缓冲带，导致源头控灾能力薄弱。其次是局部治理多于系统治理。当前减灾多针对局部内涝点进行改造，缺乏对城市水文系统、生态系统、空间系统的整体考量，例如仅扩建管网而不修复城市绿地、仅疏通河道而不控制城市开发强度。这种局部治理无法解决洪涝形成的根本矛盾，导致旧涝点消除、新涝点出现。最后是短期效益多于长期韧性。灾后重建多以恢复原貌为目标，缺乏韧性提升的长期规划，例如受损的管网仅修复破损段而不提升标准、被淹的社区仅清理积水而不优化排水系统。这种短期导向使城市在面对下一次极端降水时仍处于高风险状态，无法从根本上提升减灾的长期效能。

五、城市洪涝灾害防御韧性提升建议

面对日益频发的极端暴雨事件，城市洪涝灾害防御需将韧性理念融入规划、建设与管理全周期，构建系统性、前瞻性的综合防御体系，以提升城市应对不确定风险的韧性和恢复力^[66]。

（一）国土空间规划的先导性调控

科学规划是构建洪涝韧性的第一道防线，其核心在于突破传统“被动应对、末端处置”的治理局限，将洪涝风险防控融入国土空间开发保护的全流程。在国土空间规划层面，充分考虑极端暴雨可能产生的影响，科学划定洪涝风险区与禁止建设区，

同时衔接生态保护红线、城镇开发边界，通过保留河流、湖泊、湿地等自然调蓄空间，系统性恢复城市“海绵体”功能，维系自然水文过程的连续性。

结合我国《国家适应气候变化战略2035》“将适应气候变化全面融入经济社会发展大局”“构建适应气候变化区域格局”的指导思想，规划调控需重点强化两方面内容：一是底线衔接的空间管控，将洪水风险评估结果刚性嵌入“三区三线”划定，如德国为应对洪水，制定了专门的防洪建筑设计标准，对洪泛区内建筑的防水层、地下室设计等制定强制性规范，从源头降低承灾体脆弱性^[67]；二是分类引导的资源配置，通过差异化规划实现资源的精准投放与效能最大化。Qin等^[68]基于洪水易发性与建筑功能脆弱性的分区方法，将广州市划分为高风险核心区、中风险过渡区与低风险外围区，针对不同区域制定差异化规划指标：核心区侧重生态空间留白与防洪标准提升，过渡区强化雨洪管理设施与城市设计融合，外围区严格控制开发强度与不透水面比例。

在资金导向机制方面，基于全生命周期管理理念，将资金保障覆盖规划设计、建设施工、运营维护各环节，建立动态调整机制，确保资金链的稳定性与可持续性。《纽约金融区和海港片区气候韧性总体规划》的经验显示，在规划阶段完成建设与运维成本测算，通过“成本共担、收益共享、风险共防”的机制，将公共资金的引导作用与社会资本的效率优势有机结合，可为项目实施奠定基础。我国当前各类规划普遍缺乏洪涝治理资金测算，洪水保险等市场化工具尚未实质落地，应在国土空间规划中明确韧性建设资金占比，衔接专项债券支持领域目录，将海绵城市、蓄滞洪区建设等纳入优先支持范围，并预留市场化融资空间^[69]。

（二）存量基础设施的系统性诊断与精准治理

城市存量基础设施因建设年代早、标准偏低、维护不足等问题，已成为洪涝防御体系中的突出薄弱环节，亟需开展全域系统性防洪能力复核与风险“扫盲”。在系统性诊断层面，针对排水管网等工程设施，需结合老化程度、排水能力与气候适应性缺口进行综合评级；针对海绵城市设施，则需重点评估其与存量管网的协同效能，避免“重建设、轻衔接”导致的功能折损。系统性诊断机制的构建需突

破部门数据壁垒与技术孤岛，在评估维度上，整合住建、水务、气象等多部门数据进行综合评估；在技术支撑上，借助机器学习技术分析历史数据，识别管网负荷热点区域。如青岛市城市安全风险综合监测预警平台，整合燃气、供水、排水等9大生命线工程场景，接入应急、城管等多部门数据经验，构建“综合+专项”功能体系，实现多领域风险智能监测与精准预警。

城市空间具有显著的异质性特征，不同区域在用地性质、基础设施现状、水文环境等方面存在巨大差异，这就决定了城市洪涝韧性建设不能采用“一刀切”的治理模式，而精准治理策略需要基于科学的分区分类理念开展。在东部高密度建成区，地下空间资源紧张，需侧重地下管廊智能化升级，利用智能监测设备实时掌握管廊运行状态并优化排水调度，如深圳市为消除地下空间浸水隐患，建成9大领域排水防涝模型，印发实施《城市地下空间防涝技术导则》，为地下空间防涝提供技术指引；在西部生态敏感带，则应强化雨水滞留设施建设，通过打造生态湿地、雨水花园等海绵设施，在实现雨水净化的同时，增强区域生态调蓄能力。而老城区普遍存在管网服役年限超限、雨污合流制系统占比高等矛盾，在极端降水冲击下，传统排水系统常出现溢流超载，进而引发区域性内涝灾害。针对老城区管网滞后问题，采用雨污分流改造与生态缓冲带建设的协同治理方案，通过雨污分流管网改造，重构独立的雨水与污水收集排放体系，以提升系统排水能力；同步建设生态透水铺装，通过增强雨水下渗效能，有效削减地表径流峰值。

（三）全链条预防性风险管理架构

构建以预防为导向的全链条风险管理体系架构，是实现城市极端暴雨洪涝韧性应对的核心所在。应对极端暴雨，“防”远重于“救”，需构建“监测—预报—预警—响应”全链条预防性管理架构。一是强化精准监测与智能预报：加密布设地面雨量站、雷达、遥感及物联网传感设备，构建“空天地”一体化监测网；研发融合数值预报、机器学习与实时校正技术的高分辨率、长预见期暴雨洪涝预报模型，提升小尺度强降雨的捕捉能力与预见期^[70]。二是完善分区分级预警与风险靶向发布：基于精细化洪涝风险模型与实时预报，动态发布具有

明确行动指引的分区域、分等级暴雨洪涝预警；通过多媒介实现预警信息对高风险区域人群、重点设施管理单位的秒级精准靶向推送。三是深化情景模拟与预案联动：开展基于历史极端暴雨与设计暴雨情景的洪涝淹没动态模拟推演，精确识别淹没范围、水深及影响对象，优化应急疏散路线、避难场所布局及部门联动预案。四是建设智慧决策支持平台：整合监测数据、预报成果、风险模型、预案库等构建城市洪涝“一张图”决策支持系统，实现灾前风险预判、灾中实时调度指挥与灾后评估优化的智能化闭环管理。

人民生命安全和城市发展的生命线，也是城市极端暴雨洪涝韧性应对的根本目标。2025年7月，中央城市工作会议指出，要“转变城市发展理念，更加注重以人为本”，结合近年城市暴雨洪涝亡人事件的教训，需从预警传达、避难保障、应急能力进行全链条防御。在预警方面，除上述提及的分区分级预警与风险靶向发布外，更要针对老弱病残、独居老人等高危群体，通过网格员上门通知、物业点对点提醒等方式确保预警信息全覆盖；在避难保障方面，应结合城市人口分布与积水风险地图，补充布局临时避难场所，固定避难场所需强化排水、应急供电等功能。在应急避险技能方面，推动社区定期开展暴雨避险演练，重点培训溺水急救、创伤处理等自救互救技能，提升居民在预警响应、初期处置等环节的自救能力。

有效的全链条预防性风险管理架构不仅依赖于技术体系和硬件设施的优化，更关键的是打破传统管理中的碎片化困境，建立保障信息畅通、责任明晰与行动协同的制度化运作机制。在信息感知与决策层面，通过立法或高级别行政协调，推动水利、气象、自然资源、住建、交通、应急等部门的监测数据、模型成果以及风险区划在一个安全的政务云平台上实现标准化集成与共享，为跨部门的协同规划与精准应急提供唯一、可信的决策底图。在法律法规与标准体系层面，推动制定城市极端天气应对条例，明确各相关部门在灾害预警、应急响应、灾后恢复等环节的权责边界，确立基于风险等级的强制性应急措施启动标准。同时，应加快建立城市韧性评估标准体系，将内涝防治标准与气候变化情景衔接，修订城镇排水管网设计规范，提升重要基础设施的设防标准。在区域协同与流域治理层面，建

立跨行政区划的流域协调机制，设立具有实质协调权的流域管理机构，统一制定上下游、左右岸的防洪排涝标准。同时，应加强区域间的应急联动协作，建立应急资源共建共享机制，实现抢险物资、救援力量的区域统筹和协调调度。

六、结语

本文系统揭示了我国城市极端暴雨洪涝灾害的演变规律与极端事件新特征，剖析了气候变化与城镇化进程双重驱动下城市极端暴雨洪涝灾害的脆弱性与复合性。研究表明，极端暴雨事件在强度、频次与空间格局上呈现显著的变异特性：突破历史极值，局地突发性强降雨伴随显著夜发特性与空间异质性；灾害重心向人口密集区迁移，城市地下空间、生命线工程等立体脆弱性放大，且复合灾害叠加效应日益凸显。这些新特征对传统以工程措施为核心的防洪体系构成严峻挑战，暴露出监测预报精度不足、基础设施韧性缺失、跨尺度协同机制薄弱等缺陷。亟需将韧性理念融入规划、建设与管理全周期，在空间规划前端筑牢防线，对存量设施全面“扫盲”消险，并依托精准预测预警构建主动预防管理体系，推动从灾害应对到风险适应的范式转变，为应对气候变化下的极端灾害提供科学路径。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: August 22, 2025; **Revised date:** October 26, 2025

Corresponding author: Liu Cuishan is a professor-level senior engineer from Nanjing Hydraulic Research Institute. Her major research fields include hydrology and water resources. E-mail: cslu@nhri.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Challenges and Countermeasures Faced by Urban Safety” (2022-JB-02), “Research on the Strategy of Technological Innovation to Ensure Water and Ecological Security in Shandong and Promote Sustainable Economic Development” (2025-DFZD-40), “Forward Looking Reserve Strategic Research in the Fields of Civil Engineering, Water Conservancy, and Construction” (2023-JB-04); Research Topics of the Chinese Engineering Consulting Industry Think Tank Alliance: “Research on the Comprehensive Disaster Prevention and Reduction Capacity of Large and Medium sized Cities for Floods and Floods, and Strategies for Improvement” (2025-B06)

参考文献

[1] 黄晶, 吴星妍, 李梦晗. 不同主体视角下极端暴雨灾害事件网络

舆情演化研究 [J]. 水利经济, 2023, 41(4): 94–101, 106.

Huang J, Wu X Y, Li M H. Research on the evolution of network public opinion of extreme rainstorm disaster events from the perspective of different subjects [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(4): 94–101, 106.

[2] 徐宗学, 卢兴超, 施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1–9, 46.

Xu Z X, Lu X C, Shi Q M. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1–9, 46.

[3] Zhang W X, Zhou T J, Ye W H, et al. A year marked by extreme precipitation and floods: Weather and climate extremes in 2024 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2025, 42(6): 1045–1063.

[4] IPCC. AR6 climate change 2021: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[5] 苏同华, 薛峰, 陈敏艳, 等. 季节内振荡影响西太平洋副热带高压两次北跳的机制 [J]. 大气科学, 2017, 41(3): 437–460.

Su T H, Xue F, Chen M Y, et al. A mechanism study for the intra-seasonal oscillation impact on the two northward jumps of the western Pacific subtropical high [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(3): 437–460.

[6] Sheng C, Wu G X, Liu Y M, et al. Roles of thermal forced and eddy-driven effects in the northward shifting of the subtropical westerly jet under recent climate change [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2024, 129(5): e2023JD039937.

[7] 杨曩. 全球变暖背景下极端降水事件的变化特征及归因分析 [J]. 自然科学, 2025, 13(3): 414–419.

Yang Z. Characteristics and attribution analysis of extreme precipitation events in the context of global warming [J]. Open Journal of Natural Science, 2025, 13(3): 414–419.

[8] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书: 2025 [M]. 北京: 科学出版社, 2025.

China Meteorological Administration Climate Change Center. China's blue book on climate change: 2025 [M]. Beijing: Science Press, 2025.

[9] 李东欢, 邹立维, 周天军. 全球 1.5 °C 温升背景下中国极端事件变化的区域模式预估 [J]. 地球科学进展, 2017, 32(4): 446–457.

Li D H, Zou L W, Zhou T J. Changes of extreme indices over China in response to 1.5 °C global warming projected by a regional climate model [J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(4): 446–457.

[10] Yan Y L, Wang H, Li G P, et al. Projection of future extreme precipitation in China based on the CMIP6 from a machine learning perspective [J]. Remote Sensing, 2022, 14(16): 4033.

[11] 刘佳明. 城市雨洪放大效应及分布式城市雨洪模型研究 [D]. 武汉: 武汉大学(博士学位论文), 2016.

Liu J M. Research on urban rainwater amplification effect and distributed urban rainwater model [D]. Wuhan: Wuhan University (Doctoral dissertation), 2016.

[12] 张建云, 舒章康, 王鸿杰, 等. 郑州“7·20”暴雨洪涝几个水文问题的讨论 [J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1618–1626.

Zhang J Y, Shu Z K, Wang H J, et al. A discussion on several hydrological issues of “7·20” rainstorm and flood in Zhengzhou [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1618–1626.

- [13] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告 [EB/OL]. (2022-01-21)[2025-07-15]. <https://www.henan.gov.cn/2022/01-21/2386629.html> 2022.
- The State Council Disaster Investigation Team. Investigation report on “July 20” extremely heavy rainstorm disaster in Zhengzhou, Henan province [EB/OL]. (2022-01-21)[2025-07-15]. <https://www.henan.gov.cn/2022/01-21/2386629.html> 2022.
- [14] 舒章康, 李文鑫, 张建云, 等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 116–125.
- Shu Z K, Li W X, Zhang J Y, et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 116–125.
- [15] 杨浩, 吴翠红, 彭涛, 等. 2023 年中国十大暴雨事件评选及过程简介 [J]. 暴雨灾害, 2025, 44(1): 123–132.
- Yang H, Wu C H, Peng T, et al. Selection of top ten heavy rainstorm events over China in 2023 and process introduction [J]. Torrential Rain and Disasters, 2025, 44(1): 123–132.
- [16] 姜晓岑, 冼星河, 张劲梅, 等. 2020 年“5·22”广州和东莞特大暴雨成因分析 [J]. 广东气象, 2024, 46(6): 17–22.
- Jiang X C, Xian X H, Zhang J M, et al. Analysis of the causes for a torrential rain in Guangzhou and Dongguan on may 22, 2020 [J]. Guangdong Meteorology, 2024, 46(6): 17–22.
- [17] 张丁丁, 黄莉, 周琰. 2020 年广西南宁一次极端暴雨特征及预报偏差分析 [J]. 气象研究与应用, 2022, 43(3): 72–76.
- Zhang D D, Huang L, Zhou Y. Analysis on the characteristics and forecast deviation of an extreme rainstorm in Nanning city in 2020 [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2022, 43(3): 72–76.
- [18] 王颖, 王洪丽, 孔凡超, 等. 内蒙古东北部“21·7”罕见极端暴雨特征及成因分析 [J]. 暴雨灾害, 2025, 44(2): 177–185.
- Wang Y, Wang H L, Kong F C, et al. Analysis of the characteristics and causes of the July 2021 rare extreme rainstorm in north-eastern Inner Mongolia [J]. Torrential Rain and Disasters, 2025, 44(2): 177–185.
- [19] 李梦, 竹利, 张悦含. 四川盆地一次极端暴雨过程的演变及成因分析 [J]. 干旱气象, 2025, 43(2): 242–253.
- Li M, Zhu L, Zhang Y H. Evolution and cause analysis of an extreme rainstorm process in the Sichuan Basin [J]. Journal of Arid Meteorology, 2025, 43(2): 242–253.
- [20] 洪俊, 朱海燕, 周安平, 等. 2022 年 6 月上饶市极端暴雨天气过程成因分析 [J]. 农业灾害研究, 2023, 13(12): 166–169.
- Hong J, Zhu H Y, Zhou A P, et al. Cause analysis of extreme rainstorm weather process in Shangrao in June 2022 [J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2023, 13(12): 166–169.
- [21] 黄雪松, 李妍君, 何洁琳, 等. 广西 2022 年“龙舟水”期间极端暴雨特征及强度分析 [J]. 气象研究与应用, 2023, 44(1): 76–80.
- Huang X S, Li Y J, He J L, et al. Characteristics and intensity analysis of the extreme dragon-boat precipitation in Guangxi in 2022 [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(1): 76–80.
- [22] 何慧, 赖晟, 郑凤琴, 等. 2023 年 6 月一次北部湾低压极端暴雨过程天气气候特征 [J]. 气象研究与应用, 2024, 45(2): 102–108.
- He H, Lai S, Zheng F Q, et al. Weather and climate characteristics of an extreme rainstorm process caused by a tropical depression in the Beibu Gulf in June, 2023 [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(2): 102–108.
- [23] 陈训来, 徐婷, 王蕊, 等. 珠江三角洲“9·7”极端暴雨精细观测特征及成因 [J]. 应用气象学报, 2024, 35(1): 1–16.
- Chen X L, Xu T, Wang R, et al. Fine observation characteristics and causes of “9·7” extreme heavy rainstorm over Pearl River Delta, China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2024, 35(1): 1–16.
- [24] 刘国忠, 覃卫坚, 董良淼, 等. 2023 年广西暴雨强度极端性分析 [J]. 气象研究与应用, 2023, 44(4): 1–6.
- Liu G Z, Qin W J, Dong L M, et al. Analysis on the intensity of extreme rainstorm in Guangxi in 2023 [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(4): 1–6.
- [25] 包文雯, 韦美闹, 何小娟, 等. 2024 年钦州“5·19”极端暖区暴雨成因分析 [J]. 气象研究与应用, 2024, 45(4): 28–33.
- Bao W W, Wei M N, He X J, et al. Analysis of the causes of the extreme warm-sector rainstorm in Qinzhou on May 19, 2024 [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(4): 28–33.
- [26] 谢妮, 师乐乐, 韩洁, 等. 宝鸡市 2024 年“7·16”暴雨形成机制及其致灾分析 [J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2024, 44(4): 77–82.
- Xie Y, Shi L L, Han J, et al. Analysis on the formation mechanism of “7·16” rainstorm in Baoji on July 16, 2024 [J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2024, 44(4): 77–82.
- [27] 缪丹, 闫永奎, 郝林南. 2024 年辽宁葫芦岛市特强暴雨灾害防御对策与启示 [J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(6): 89–93.
- Miao D, Yan Y L, Hao L N. Countermeasures and enlightenment of local extremely heavy rainstorm disaster in Huludao city, Liaoning province in 2024 [J]. China Flood & Drought Management, 2025, 35(6): 89–93.
- [28] 何萍, 江艳萍, 李矜霄, 等. 城市化对云南高原楚雄市近年来雨岛效应的影响研究 [J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 933–941.
- He P, Jiang Y P, Li J X, et al. Influence of urbanization on urban rain island effect of Chuxiong city on Yunnan Plateau in recent years [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 933–941.
- [29] Zhao Y J, Xia J, Xu Z X, et al. Impact of urban expansion on rain island effect in Jinan city, North China [J]. Remote Sensing, 2021, 13(15): 2989.
- [30] Tang J P, Lu Y, Wang S G, et al. Projection of hourly extreme precipitation using the WRF model over Eastern China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023, 128(1): e2022JD036448.
- [31] 黄国如, 陈易德. 高度城镇化背景下珠三角地区降雨结构时空演变特征分析 [J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 82–90.
- Huang G R, Chen Y S. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of rainfall structure in the Pearl River Delta area under background of high urbanization [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 82–90.
- [32] 池艳珍, 吴伟杰, 王彦明, 等. 基于区域自动站降水数据的厦门暴雨过程空间划分及强度评估研究 [J]. 大气科学, 2025, 49(1): 123–137.
- Chi Y Z, Wu W J, Wang Y M, et al. Spatial classification and intensity assessment of heavy rainfalls based on precipitation data

- of automatic weather stations in Xiamen [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2025, 49(1): 123–137.
- [33] 谢仁波, 张李娟, 李金星, 等. 铜仁市暴雨局地性、同步性和相关性研究 [J]. *中低纬山地气象*, 2023, 47(2): 59–63.
Xie R B, Zhang L J, Li J X, et al. A study on locality, synchronicity and correlation of heavy rain in Tongren city [J]. *Mid-Low Latitude Mountain Meteorology*, 2023, 47(2): 59–63.
- [34] Yang L, Smith J, Niyogi D. Urban impacts on extreme monsoon rainfall and flooding in complex terrain [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(11): 5918–5927.
- [35] Sun J Z, Li R M, Zhang Q H, et al. Mesoscale factors contributing to the extreme rainstorm on 20 July 2021 in Zhengzhou, China, as revealed by rapid update 4DVar analysis [J]. *Monthly Weather Review*, 2023, 151(8): 2153–2176.
- [36] Fu Y Y, Jiang S J, Mao Y N, et al. Urbanization reshapes extreme precipitation metrics in typical urban agglomerations of Eastern China [J]. *Atmospheric Research*, 2024, 300: 107253.
- [37] Xie Z Q, Du Y, Miao Q, et al. An approach to characterizing the spatial pattern and scale of regional heat islands over urban agglomerations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(22): e2022GL099117.
- [38] 汪小康, 崔春光, 刘柯, 等. 中国主雨季极端小时降水时空分布和日变化特征 [J]. *气象*, 2024, 50(4): 393–406.
Wang X K, Cui C G, Liu K, et al. Spatio-temporal distribution and diurnal variation of extreme hourly precipitation in China during the main rainy season [J]. *Meteorological Monthly*, 2024, 50(4): 393–406.
- [39] Wang C L, Chen X C, Zhao K, et al. Synoptic control on the initiation and rainfall characteristics of warm-season MCSs over the South China coast [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, 129(8): e2023JD039232.
- [40] Du Y, Chen G X. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. part II: Convection initiation [J]. *Monthly Weather Review*, 2019, 147(2): 543–565.
- [41] 丁乙, 窦晶晶, 王迎春, 等. 华北平原及沿山和沿海五个城市夏季短历时降水过程的日变化分析 [J]. *气象学报*, 2024, 82(4): 490–509.
Ding Y, Dou J J, Wang Y C, et al. Analysis of diurnal variation of summer short-duration rainfall events in the North China plain and five main cities based on hourly rainfall data over 1980–2022 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2024, 82(4): 490–509.
- [42] 牛元甫, 陈昊明, 李娟. 东北地区暖季小时降水特征分析 [J]. *暴雨灾害*, 2025, 44(1): 71–81.
Niu Y F, Chen H M, Li J. Analysis of hourly precipitation characteristics during the warm season in Northeast China [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2025, 44(1): 71–81.
- [43] 李冬楠, 高倩楠, 孙国芝, 等. 1991—2021年黑龙江省降水时空分布特征 [J]. *气象与环境学报*, 2024, 40(2): 17–25.
Li D N, Gao Q N, Sun G Z, et al. Spatiotemporal distribution of precipitation in Heilongjiang Province from 1991 to 2021 [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2024, 40(2): 17–25.
- [44] Xia F, Huang X G, Fei J F, et al. Influence of synoptic pattern on the spatiotemporal features and diurnal variation of extremely persistent heavy rainfall over the Sichuan Basin, China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2025, 42(3): 527–550.
- [45] Xia R D, Luo Y L, Zhang D L, et al. On the diurnal cycle of heavy rainfall over the Sichuan Basin during 10–18 August 2020 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(12): 2183–2200.
- [46] 蔡新玲, 蔡依晒, 叶殿秀, 等. 1981—2020年陕西省暖季不同历时强降雨时空变化特征 [J]. *干旱区地理*, 2025, 48(1): 1–10.
Cai X L, Cai Y X, Ye D X, et al. Spatial and temporal variations of heavy precipitation with different durations during warm season in Shaanxi province from 1981 to 2020 [J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(1): 1–10.
- [47] 王紫文, 赵海涵, 余迪, 等. 西宁市短历时暴雨雨型及重现期极值降水特征研究 [J]. *干旱气象*, 2025, 43(1): 153–161.
Wang Z W, Zhao H H, Yu D, et al. Study on the temporal patterns and extreme precipitation characteristics of short-duration torrential rain in Xining city [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2025, 43(1): 153–161.
- [48] 苏洋, 陈豫英, 杨侃, 等. 低空急流与贺兰山东麓暴雨过程的相关性研究 [J]. *气象*, 2023, 49(10): 1171–1186.
Su Y, Chen Y Y, Yang K, et al. Correlations between low-level jet and rainstorm process in the eastern foot of Helan Mountains [J]. *Meteorological Monthly*, 2023, 49(10): 1171–1186.
- [49] 冷玉波, 刘舒, 郑敬伟, 等. 深圳河流域城市洪涝模型研究与应用 [J]. *人民珠江*, 2024, 45(5): 75–87.
Leng Y B, Liu S, Zheng J W, et al. Research and application of urban flood model in Shenzhen River and bay basin [J]. *Pearl River*, 2024, 45(5): 75–87.
- [50] 赵银娇. 基于灰色理论的城市生命线工程抗洪防灾能力评价 [D]. 郑州: 郑州大学(硕士学位论文), 2022.
Zhao Y J. Evaluation of flood control and disaster prevention capability of urban lifeline engineering based on grey theory [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University (Master's thesis), 2022.
- [51] 宋晓猛, 徐楠涛, 张建云, 等. 中国城市洪涝问题: 现状、成因与挑战 [J]. *水科学进展*, 2024, 35(3): 357–373.
Song X M, Xu N T, Zhang J Y, et al. Urban flooding in China: Current status, causes and challenges [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(3): 357–373.
- [52] 万晖. 上海市防御风暴潮洪“四碰头”极端灾害对策思考 [J]. *中国防汛抗旱*, 2024, 34(1): 78–82.
Wan H. Reflection on the prevention countermeasures for the extreme disasters caused by winds, storms, tides, and floods in Shanghai [J]. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34(1): 78–82.
- [53] 赵军伟, 孙健, 黄鹏程, 等. 山地城市复合洪水灾害风险数值模拟研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2023 (4): 97–104, 113.
Zhao J W, Sun J, Huang P C, et al. Numerical simulation research on the compound flood risks in mountainous cities [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023 (4): 97–104, 113.
- [54] 王小杰, 夏军强, 周美蓉, 等. 降雨和外江水位变化对城市洪涝的联合影响分析——以武汉市为例 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(5): 1061–1074.
Wang X J, Xia J Q, Zhou M R, et al. Joint impact of rainfall and river water level on urban flooding: A case study of Wuhan city [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(5): 1061–1074.
- [55] 贺芳芳, 梁卓然, 董广涛. 上海地区洪涝致灾因子复合概率及未来变化分析 [J]. *灾害学*, 2021, 36(2): 9–13, 18.

- He F F, Liang Z R, Dong G T. Analysis on the compound probability and future change of flood and waterlogging disaster factors in Shanghai [J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(2): 9–13, 18.
- [56] 黄晶, 钱雅如, 刘珍珍, 等. 不同遭遇情景下沿海城市复合洪涝灾害耦合风险分析——以深圳市为例 [J]. *灾害学*, 2025, 40(2): 7–15.
- Huang J, Qian Y R, Liu Z Z, et al. Coupling risk analysis of compound flooding in coastal cities under different encounter scenarios: A case study in Shenzhen city, China [J]. *Journal of Catastrophology*, 2025, 40(2): 7–15.
- [57] 刘爽, 尹义星, 焦阳, 等. 中国夏季长短周期旱涝急转的频次、强度和转换时间特征及变化研究 [J/OL]. *中国农村水利水电*, 1–21[2025-07-25]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1419.tv.20250616.1455.022>.
- Liu S, Yin Y X, Jiao Y, et al. Study of the characteristics and changes of the frequency, intensity, and alternation timing of long-cycle and short-cycle drought-flood abrupt alternation in summer in China [J/OL]. *China Rural Water and Hydropower*, 1–21[2025-07-25]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1419.tv.20250616.1455.022>.
- [58] 孙桂丽, 王立, 陆海燕, 等. 阿克苏地区洪水灾害危险性及其易损性分析 [J]. *江西农业学报*, 2018, 30(9): 112–116.
- Sun G L, Wang L, Lu H Y, et al. Dangerousness and vulnerability analysis of flood disaster in Aksu of Xinjiang [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(9): 112–116.
- [60] Qi Z X, Sun L, Cai Y P, et al. Spatial-temporal dynamics of population exposure to compound extreme heat-precipitation events under multiple scenarios for Pearl River Basin, China [J]. *Climate Services*, 2024, 34: 100477.
- [61] 岳清瑞, 陆新征, 许镇, 等. 城市安全“风险源–承灾体–减灾力”理论框架 [J]. *工程力学*, 2025, 42(7): 19–27.
- Yue Q R, Lu X Z, Xu Z, et al. The “risk source–risk exposure–mitigation force” theoretical framework for urban safety [J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(7): 19–27.
- [62] Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al. Smoking rain clouds over the Amazon [J]. *Science*, 2004, 303(5662): 1337–1342.
- [63] Souma K, Tanaka K, Suetsugi T, et al. A comparison between the effects of artificial land cover and anthropogenic heat on a localized heavy rain event in 2008 in Zoshigaya, Tokyo, Japan [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(20): 11600–11610.
- [64] 任梅芳, 宋利祥, 庞博, 等. 基于物理机制的城市汇水单元降雨径流特性研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(9): 37–47.
- Ren M F, Song L X, Pang B, et al. Physical mechanism-based study on rainfall and runoff characteristics of urban catchment unit [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(9): 37–47.
- [65] 张建云, 王银堂, 刘翠善, 等. 中国城市洪涝及防治标准讨论 [J]. *水力发电学报*, 2017, 36(1): 1–6.
- Zhang J Y, Wang Y T, Liu C S, et al. Discussion on the standards of urban flood and waterlogging prevention in China [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(1): 1–6.
- [66] 胡庆芳, 张建云, 金君良, 等. 城镇化水平衡效应与城市水安全韧性提升研究 [J]. *中国工程科学*, 2024, 26(6): 131–139.
- Hu Q F, Zhang J Y, Jin J L, et al. Water balance effect of urbanization and countermeasures for enhancing urban water security resilience [J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(6): 131–139.
- [67] 秦静. 应对气候变化的国土空间规划洪涝适应性策略研究 [J]. *规划师*, 2023, 39(2): 30–37.
- Qin J. Study on flood adaptation strategy of territorial space planning in response to climate change [J]. *Planners*, 2023, 39(2): 30–37.
- [68] Qin X L, Wang S F, Meng M, et al. Enhancing urban resilience through machine learning-supported flood risk assessment: Integrating flood susceptibility with building function vulnerability [J]. *npj Urban Sustainability*, 2025, 5: 19.
- [69] 房玉东, 王文, 张志, 等. 安全韧性城市防灾减灾发展策略研究 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(1): 1–9.
- Fang Y D, Wang W, Zhang Z, et al. Strategies for disaster prevention and mitigation in safety and resilient cities [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(1): 1–9.
- [70] 苑希民, 兰卓青, 王丽娜, 等. 极端天气城市特大暴雨洪涝灾害特征再分析及应对策略 [J]. *水利学报*, 2024, 55(11): 1298–1308.
- Yuan X M, Lan Z Q, Wang L N, et al. Reanalysis of the characteristics of extreme rainstorm and flood disaster in urban areas and coping countermeasures [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(11): 1298–1308.