

基于多源数据的成渝城市群洪涝脆弱性时空特征分析

李海潮^{1,2}, 景佩婷¹, 朱振铎², 魏妍琪³, 周黄莉¹, 黎云云¹, 胡靖瑶¹, 杨大文²

(1. 绵阳师范学院 地理与环境学院, 四川 绵阳 621000; 2. 清华大学 水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084; 3. 西华大学 能源与动力工程学院, 成都 610039)

摘 要:成渝城市群作为长江上游重要的国家级城市群, 地形差异显著、城市扩张迅速且极端降雨事件频发, 洪涝影响呈现出复杂化、多源化特征。融合被动微波遥感降水数据、多源降雨资料、土地利用数据、夜间灯光及人口数据, 构建“降雨-积水-不透水率-发展水平”的综合指标体系, 从致灾因子、暴雨触发机制、地表水积聚过程和城市扩张模式等方面分析 1995—2020 年成渝城市群洪涝脆弱性的时空演变特征。结果表明: ①1995—2020 年成渝城市群洪涝脆弱性整体呈阶段性增强趋势, 2000 年和 2020 年为显著高值年份; ②近 30 a 城市建设用地快速扩张 (新增 4 232 km²), 以耕地转化为主, 显著改变下垫面特性并加剧径流汇集; ③极端降雨与地表积水强度在 2000 年和 2020 年明显增强, 空间上形成“西南山地强触发-东部低洼易积涝”的分异格局; ④洪涝脆弱性与城市发展水平呈非线性关系, 重庆受益于地形条件及防洪工程建设, 洪涝脆弱性有所降低, 而成都及周边平原城市因快速扩张与不透水面增加脆弱性上升; ⑤2020 年新增城市建设区中约 42% 区域发生不同程度积水, 部分平原城市新区受影响比例超过 80%, 表明快速扩张区域洪涝韧性不足。研究结果可为成渝城市群洪涝灾害防控及韧性城市建设提供科学依据。

关键词:成渝城市群; 洪涝脆弱性; 遥感监测; 城市扩张; 时空特征

中图分类号: TU998.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2026)06-0041-10

Spatiotemporal Characteristics of Flood Vulnerability in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration Based on Multi-source Data

LI Hai-chao^{1,2}, JING Pei-ting¹, ZHU Zhen-duo², WEI Yan-qi³, ZHOU Huang-li¹,

LI Yun-yun¹, HU Jing-yao¹, YANG Da-wen²

(1. School of Geography and Environment, Mianyang Teachers' College, Mianyang 621000, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: [Objective] As a key national urban agglomeration in the upper Yangtze River Basin, the Chengdu-Chongqing urban agglomeration features pronounced topographic contrasts, rapid urban expansion, and increasingly frequent extreme rainfall events, resulting in highly complex and multi-source flood impacts. [Methods] This study integrates passive microwave remote sensing precipitation data, multi-source rainfall datasets, land-use data, night-time light imagery, and population data to construct a comprehensive indicator system comprising precipitation, waterlogging, impervious surface ratio, and development level. From the perspectives of hazard factors, rainfall triggering mechanisms, surface water accumulation processes, and urban expansion patterns, the spatiotemporal evolution of flood vulnerability in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration from 1995 to 2020 is systematically analyzed. [Results] (1) Flood vulnerability exhibited a staged increasing trend during 1995–2020, with significant peak years in 2000 and 2020; (2) urban construction land expanded rapidly over the past three decades (an increase of 4,232 km²), mainly through the conversion of cropland, which significantly altered surface characteristics and intensified runoff concentration; (3) extreme rainfall and surface waterlogging intensity increased markedly in 2000

收稿日期: 2026-01-26; 修回日期: 2026-03-24; 接受日期: 2026-04-03

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8254057); 国家自然科学基金项目(52409017); 四川省自然科学基金项目(2025ZNSFSC1369); 安徽省实景地理环境重点实验室 2024 年度开放基金项目(2024PGE012)

作者简介: 李海潮(1993-), 男, 四川绵阳人, 副教授, 博士, 主要研究方向为城市水文学。E-mail: 409932820@qq.com

通信作者: 魏妍琪(1992-), 女, 安徽淮北人, 副教授, 博士, 主要研究方向为水旱灾害风险评估。E-mail: weiyanyi@mail.xhu.edu.cn

and 2020, forming a spatial pattern of “strong triggering in southwestern mountainous areas and easy waterlogging in eastern lowlands”; (4) flood vulnerability shows a non-linear relationship with urban development level—vulnerability decreased in Chongqing due to favorable terrain and enhanced flood control infrastructure, whereas it increased in Chengdu and surrounding plain cities due to rapid expansion and increased impervious surfaces; (5) approximately 42% of newly developed urban construction areas experienced waterlogging in 2020, with some plain cities exceeding 80%, indicating insufficient resilience in rapidly expanding areas. [**Conclusions**] Urban flood vulnerability is not solely determined by the level of development; rather, it is jointly influenced by topographical conditions, patterns of urban expansion, and engineering regulation capabilities. The Chengdu-Chongqing urban agglomeration faces compound flood processes involving both basin-wide floods and urban waterlogging. Therefore, measures should be taken to improve flood control and drainage standards, optimize urban spatial structures, strengthen sponge city initiatives, and enhance coordinated regulation between upstream and downstream areas within the urban agglomeration. These findings provide scientific support for flood disaster mitigation, vulnerability reduction, and resilient urban development in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration.

Key words: Chengdu-Chongqing urban agglomeration; flood vulnerability; remote sensing monitoring; urban expansion; spatiotemporal characteristics

0 引言

近年来,在气候变化与快速城镇化的双重影响下,水循环过程发生明显变化,极端降雨事件日趋频发^[1-2]。城市快速扩张使自然下垫面减少、地表径流增加且排水系统负荷加重,导致雨洪调蓄能力下降、城市洪涝风险上升^[3]。据统计,2020 年我国发生 33 次大范围强降雨事件,造成 1.38 亿人受灾、直接经济损失 3 701.5 亿元^[4-5]。郑州“7·20”(2021 年)和京津冀“23·7”(2023 年)特大暴雨引发严重洪涝灾害,暴露出城市规划与洪涝风险管控衔接不足、流域防洪与城市排涝不同步等短板^[6]。因此,开展城市洪涝过程变化与脆弱性分析研究对保障城市安全和可持续发展至关重要。

洪涝灾害风险指洪涝发生的可能性及其潜在损失,既包含自然事件发生的概率,又取决于社会暴露和脆弱性因素。该概念尚无统一定义,主要有 3 种观点:致灾因子视角将洪涝风险等同于洪涝事件发生概率^[7];损失后果视角将其定义为未来可能遭受的灾害损失及发生概率^[8];灾害系统视角认为风险由致灾因子、承灾体和环境脆弱性共同作用^[9]。总体而言,城市洪涝风险可概括为洪涝脆弱性与易损性的统一表征。

城市洪涝风险评估是城市防灾减灾工作的重要组成。常用的方法包括基于历史灾情数据的统计分析^[10]、基于多要素指标的综合评价^[11]、基于遥感与 GIS 技术的风险制图^[12]以及依托水文模型的情景模拟^[13]。

近年来,遥感技术在洪涝风险评估中的应用不断深化。国内外学者利用多源高分辨率遥感影像对洪涝

灾害进行监测和评估,例如 Tellman 等^[14]利用全球尺度遥感影像构建洪涝数据库,揭示了全球洪涝暴露人口的时空变化特征;Shen 等^[15]利用 SAR 遥感数据开展洪涝淹没范围快速识别,提高了复杂天气条件下洪涝监测精度。近年来遥感技术已广泛应用于洪涝风险评估,如利用微波遥感获取地表湿度频度信息来识别易涝区域。有研究融合合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像淹没频率与传统暴露指标,改进了城市洪涝灾害精细评估模型^[16]。这些研究表明,通过光学与雷达遥感技术可以快速获取洪水淹没范围,再结合土地利用、人口等传统暴露指标,可显著提高城市洪涝灾害评估的精度和时效性^[17-18]。综合多要素的洪涝风险评估方法也在不断成熟,如基于历史灾情统计的分析、多因素指标体系评价和水文模型情景模拟等,为城市洪涝风险地图绘制和预警提供了丰富的技术手段^[19]。

长江流域近年来洪涝灾害频发,极端降雨事件呈现出显著增加趋势。在气候变化背景下,基于 CMIP6 情景的多模式研究表明,未来中国区域极端降雨强度和频率均可能增加,尤其在西南地区表现出增强趋势,从而进一步加剧洪涝灾害风险。已有研究表明,在气候变化与人类活动共同作用下,洪涝灾害的发生机制与风险特征正发生深刻变化,传统防灾模式亟需向系统性与综合性转变^[20]。

以 2020 年为例,长江流域发生流域性特大洪水,上游与中下游地区先后遭遇持续强降雨过程,造成大范围人员受灾和巨额经济损失^[21-22]。因此,在气候变化驱动下,降雨极端性增强已成为洪涝影响及其驱动机制的重要外部因素。成渝城市群作为长

江上游典型的内陆城市群,受复杂地形与快速城镇化的双重影响,呈现出“流域性洪水-城市内涝”耦合的双重洪涝风险特征。一方面,上游山区强降雨易形成高强度径流过程,通过河网系统向下游传导,引发流域性洪水^[23-24];另一方面,平原及河谷城市在快速扩张过程中不透水面比例显著增加,排水能力相对滞后,导致地表径流难以及时排出,易形成城市内涝。在变化环境下,极端降雨增强与城市化扩张的叠加效应是城市洪涝风险上升的重要驱动机制^[25]。两者在时间与空间上相互叠加,使区域洪涝风险表现出“上游触发-下游积聚”的复合机制。尽管已有研究从气候变化或城市扩张单一视角对洪涝风险进行了探讨,但针对成渝城市群这一典型山地-平原复合区域,缺乏同时考虑降雨变化、地表积水响应与城市扩张过程的综合分析框架。尤其是在多源遥感数据支持下,对洪涝脆弱性时空演变及其与城市发展耦合关系的系统研究仍有不足。因此,有必要构建融合降雨、积水、不透水面及发展水平的综合指标体系,对成渝城市群 1995—2020 年洪涝脆弱性进行定量分析,以期为区域洪涝防控与韧性城市建设提供科学支撑。

1 研究区域概况

成渝城市群位于中国西南部(经纬度范围为 101°56'E—109°00'E, 27°39'N—32°19'N),包括重庆、成都、绵阳等 16 座城市(图 1),总面积约 18 万 km²。该区域常住人口>9 500 万人,GDP 约 7.39 万亿元,是中国西部最发达的区域之一。成渝城市群属中亚热带湿润季风气候区,降雨丰沛,多年平均降雨量约为 1 106 mm。根据 CHIRPS 降雨数据统计,1995—2020 年区域年降雨量整体呈波动变化特征,在年际尺度上具有显著变率,其中 2000 年前后及 2020 年为相对偏湿年份,年降雨量明显高于多年平均水平,表明区域降雨在部分年份呈现增强趋势。地形地貌上,区域西部毗邻青藏高原东缘,地势起伏剧烈,山地丘陵广布,局部高差悬殊;这使得西部山区在强降雨时易发生滑坡等地质灾害,威胁下游城市安全。相反,区域的东部和北部多为低山和河谷盆地,江河密布(长江及嘉陵江、岷江等),地势低洼平坦,容易积水成涝,沿江城镇亦时常发生洪水和内涝。与沿海城市群不同,成渝城市群属于典型内陆城市密集区,受特殊地形与发展模式影响,存在既面临流域性洪水又遭遇城市内涝的双重威胁。这种“双重”洪涝风险特征意味着研究成渝城市群的

洪涝脆弱性具有重要示范意义,可为其他类似内陆城市集群的洪灾防治提供参考。

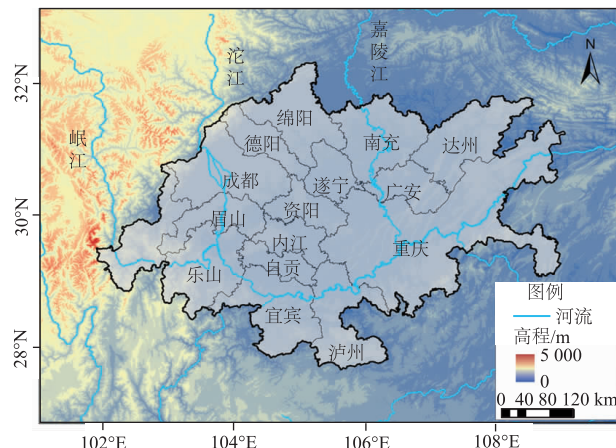


图 1 成渝城市群地理位置

Fig.1 Geographical location of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究结合多源遥感和 GIS 数据分析城市扩张、发展水平与洪涝影响范围的关系。主要数据包括:

(1) 土地利用数据,来自国家冰川冻土数据中心提供的年度土地覆被数据(基于 Landsat 影像, 30 m 分辨率),将土地分为耕地、森林、灌丛、草地、水域、冰雪、裸地、不透水地表和湿地 9 类,本研究根据地区特点将原有 9 种土地类型再分类为城市用地、农田用地、植被、水体、裸露地表 5 类。

(2) 人口数据,采用全球人类居住区栅格数据 (GHSL),提供 1995—2020 年逐 5 a 的人口密度栅格(约 90 m 分辨率)。

(3) 夜间灯光数据,来自 Harvard Dataverse 整合的 DMSP/OLS 和 VIIRS 夜间灯光影像,提供 1995—2020 年逐年的校正后夜间灯光强度(1 km 分辨率)。

(4) 地表水数据,来自美国 NSIDC 的被动微波卫星 SSM/I 逐日亮温数据,SSM/I 被动微波数据具有全天候观测能力,对云层不敏感,能够有效识别大范围地表水体变化,适用于长时间序列洪涝监测,用于构建归一化差分频率指数(Normalized Difference Frequency Index, NDFI)、归一化差分极化指数(Normalized Difference Polarization Index, NDPI)以探测地表洪水。

(5) 降雨数据,采用加州大学圣塔芭芭拉分校气候危机中心的 CHIRPS 逐日降雨栅格(0.25°分辨率),融合了卫星反演与地面站点观测,在复杂地形区域具有较好的降雨估计能力。已有研究表明,其

在长江流域具有较高的适用性,能够较好地反映降雨时空变化特征,用于辅助洪涝验证和分析^[18]。

(6)经济数据,包括各城市 1995—2020 年人均 GDP(国家统计局年鉴)。这些数据集为评估城市群洪涝脆弱性提供了全面支撑,有助于深入理解城市扩张、社会经济发展与洪涝暴露之间的相互作用。

考虑到 SSM/I 被动微波数据空间分辨率较低,本文以 15' (约 27.5 km) 网格作为统一分析尺度,对多源数据进行重采样处理,以保证数据之间的空间一致性与可比性,其主要用于刻画城市群尺度洪涝影响的宏观空间格局与演变特征,而非用于精细刻画单个城市内部的下垫面差异。为弥补尺度较粗带来的空间信息损失,本文在城市发展水平与土地利用分析中引入较高分辨率数据(如 30 m 土地利用数据与 1 km 夜间灯光数据),并通过统计汇总方式保留城市内部差异信息,从而在宏观一致尺度下兼顾局部特征表达。

2.2 洪涝指数提取

利用 SSM/I 微波遥感数据计算 NDFI 和 NDPI 来识别区域洪涝水体范围,洪涝指数基于被动微波亮温差异构建,相关方法已在洪水遥感识别研究中得到广泛应用^[18]。NDFI 和 NDPI 定义为:

$$\text{NDFI} = \frac{\text{TB}_{22.2\text{V}} - \text{TB}_{19.35\text{V}}}{\text{TB}_{22.2\text{V}} + \text{TB}_{19.35\text{V}}}, \quad (1)$$

$$\text{NDPI} = \frac{\text{TB}_{36.5\text{V}} - \text{TB}_{36.5\text{H}}}{\text{TB}_{36.5\text{V}} + \text{TB}_{36.5\text{H}}}. \quad (2)$$

式中: $\text{TB}_{36.5\text{V}}$ 、 $\text{TB}_{22.2\text{V}}$ 、 $\text{TB}_{19.35\text{V}}$ 和 $\text{TB}_{36.5\text{H}}$ 分别表示在 36.5、22.2、19.35 GHz 垂直极化和 36.5 GHz 水平极化条件下的亮温。NDFI 主要用于表征地表水体及洪涝积水状况,通过不同频率亮温差异增强对开放水体的响应能力;NDPI 则侧重反映地表湿润程度及降雨影响下的积水变化。两者均基于微波亮温对地表水体与土壤湿度的敏感性差异而构建,但 NDFI 更强调对洪涝水体的识别能力,而 NDPI 更反映降雨过程及湿度变化特征。当地表产生积水或土壤湿度增加时,微波辐射特征发生变化,不同通道亮温差异增大,从而导致 NDFI 和 NDPI 升高。因此,该指数能够有效反映地表湿润程度及洪涝积水范围变化。

计算 1991—2020 年逐日 NDFI 和 NDPI 后,取每年各像元的最大 NDFI 和 NDPI 的平均值 (NDFI_m 和 NDPI_m) 代表该像元当年的最大洪水程度。其中, NDFI_m 和 NDPI_m 分别表示在时间尺度上对每个像元年最大洪涝指数和湿润指数的平均值。为验证 NDFI 及 NDPI 识别洪水的有效性,提取 CHIRPS 中区域年最大日降雨量 (P_m) 进行相关性分析。其中,

皮尔逊相关系数 (Pearson) 用于衡量变量间线性相关性,斯皮尔曼相关系数 (Spearman) 用于反映变量间单调关系;距离相关系数 (Distance Correlation, DC) 用于评价模型或变量之间的拟合程度;互信息指数 (Mutual Information, MI) 用于刻画变量间的非线性相关性。结果显示 NDFI_m 和 NDPI_m 与 P_m 在时间和空间上均高度相关(表 1),表明 NDFI 和 NDPI 能够可靠指示地表洪涝程度(图 2)。

表 1 NDFI_m 、 NDPI_m 与 P_m 的多种相关性

Table 1 Multiple correlation indices between NDFI_m and NDPI_m with P_m

指数	Pearson	Spearman	DC	MI
NDFI_m	0.81	0.52	0.89	0.67
NDPI_m	0.72	0.46	0.83	0.58

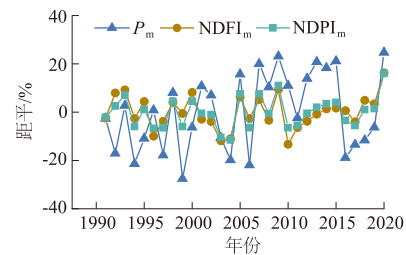


图 2 NDFI_m 和 NDPI_m 与 P_m 距平百分比逐年变化趋势

Fig.2 Annual variation of percentage anomalies of NDFI_m and NDPI_m relative to P_m

考虑到城市群尺度洪涝分析更关注区域范围内多次洪涝过程的综合影响,中等强度洪涝事件在空间覆盖范围和发生频率上更具代表性,而传统以均值加 3 倍标准差 ($\mu + 3\sigma$) 为阈值的方法偏重极端洪水,在本研究中对比了 NDFI_m 和 NDPI_m 的 $\mu + \sigma$ 、 $\mu + 2\sigma$ 、 $\mu + 3\sigma$ 三种阈值筛选洪涝像元。较高阈值 ($\mu + 2\sigma$ 和 $\mu + 3\sigma$) 仅能识别极端洪涝区域,容易遗漏中等强度但影响范围较广的洪涝过程。如图 3 所示,在典型洪涝年份中, $\mu + \sigma$ 阈值能够较完整地识别洪涝影响范围,而 $\mu + 2\sigma$ 及以上阈值仅识别局部高强度区域,存在明显漏判现象,且历史洪灾记录(表 2)验证表明一些记录明确的重大洪灾年份(如 2000 年和 2020 年)仅在 $\mu + \sigma$ 阈值下才能被有效识别。因此,本研究采用 $\mu + \sigma$ 作为判定洪涝像元的阈值,以更灵敏地捕捉城市群范围内的洪涝事件。判定出当年洪涝影响的像元后,将人口栅格与之空间叠加,以估算各城市受洪水影响的人口数量和受淹没的建成区面积。

2.3 城市发展水平指数

为量化各城市的综合发展水平,采用夜间灯光强度和人口密度构建城市发展指数 (DI)。该指数通过夜间灯光强度与人口的耦合关系表征城市发展水平,其中夜间灯光反映经济活动强度与基础设施

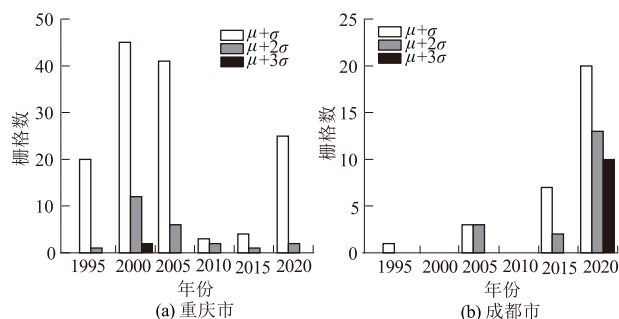


图3 不同阈值条件下洪涝识别结果对比

Fig.3 Comparison of flood identification results under different thresholds

表2 成渝城市群历史洪涝灾害记录

Table 2 Historical flood disaster records of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration

年份	水情	灾情	来源
2000	广安地区发生超警戒水位洪水,为1989年以来最大的一次洪水	全年内四川省129个县(市区)受到影响,作物受灾面积51.34万hm ² ,经济损失29.96亿元	《2000年四川省水资源公报》
2005	达州地区出现百年一遇特大洪水,超过保证水位3.91 m	四川省21个市(州)174个县(市、区)1 877.18万人受灾,直接经济损失97.22亿元	《2005年四川省水资源公报》
2015	8月中旬成都、德阳、绵阳、南充等6市出现大暴雨,达州境内州河流量较多年平均值偏大70%	四川省711.68万人受洪涝灾害影响,直接经济损失113.35亿元;重庆市受灾人口158.84万人	《2015年中国水旱灾害公报》,《2015年四川省水资源公报》
2020	长江发生流域性大洪水,上游发生特大洪水,嘉陵江流域出现复式洪水过程	四川省受灾人口851.1万人,直接经济损失420.01亿元;重庆市受灾人口367万人,直接经济损失161.13亿元	《2020年中国水旱灾害防御公报》

水平,人口数据体现城市规模与社会暴露程度。采用“灯光强度与人口乘积/人口总和”的形式,可在一定程度上削弱人口规模差异的影响,更突出单位人口对应的经济活动水平。相比传统基于统计数据的人均GDP指标,该方法具有空间连续性强、跨区域可比性好等优势。首先将夜间灯光和人口数据都重采样至15'(约27.5 km)网格以统一分辨率,该尺度主要用于城市群尺度发展水平的整体表征。随后计算各城市发展指数,并采用极差标准化方法(Min-Max normalization)将其归一化至0%~100%区间,以增强不同城市之间的可比性。在每个城市内,计算所有网格夜间灯光强度与人口的乘积并求和,将其与人口总和的比值记为初始发展指数。然后将每个城市的初始发展指数归一化至0%~100%区间,得到最终的DI。这一指数综合反映了城市的人口和经济活动密集程度,与传统经济指标有良好相关性(与人均GDP的 R^2 达0.81)。相较单一指标,DI可以更直观地比较城市间发展水平差异,其计算式为

$$DI_j = \frac{\sum_{i=1}^{k_j} L_i}{\sum_{i=1}^{k_j} P_i} \quad (3)$$

式中:DI_j为j市发展指数;L_i为j市第i个网格内的夜间灯光强度;P_i为第i个网格内的人口数量;k_j为j市总网格数。

2.4 洪涝脆弱性等级划分

城市洪涝脆弱性取决于多个因素,传统的单变量分位数或标准差分类难以刻画其复杂性。本研究构建多因素框架,采用K-Means聚类算法,将各城市在1995—2020年间的DI和受洪水影响人口这2个变量结合,进行聚类分析,将城市洪涝脆弱性划分为不同等级。K-Means通过迭代最小化类内平方误差(Within-Cluster Sum of Squares, WCSS)实现最佳分组,WCSS计算公式为

$$WCSS = \sum_{j=1}^k \sum_{i \in C_j} \|x_i - u_j\|^2 \quad (4)$$

式中: x_i 为序列样本; u_j 为第j类的中心点; C_j 为第j类中的所有样本;k为聚类数目。

在聚类数目选择方面,对k=2~5进行对比分析。结果表明,当k由2增加至3时,类内误差显著下降,而当k继续增加时,误差下降幅度趋于平缓;同时,k=3时轮廓系数达到相对较优水平,说明该分类能够较好地区分不同城市的洪涝脆弱性特征。因此,选取k=3作为脆弱性等级划分依据。分类标准如表3所示:1级代表发展水平高且受洪水影响的人口比例低(抗灾能力强),2级为发展水平和受影响人口等为中等,3级为发展水平低且受洪水影响严重。这种分类综合考虑了暴露程度和发展能力两方面,能够更全面地反映城市抵御洪灾的脆弱程度。

表3 城市洪涝脆弱性等级

Table 3 Classification of flood vulnerability

等级	城市洪涝脆弱性等级定义
1	发展水平高、受影响人口少(高发展-低暴露)
2	发展水平中等、受影响人口中等(中发展-中暴露)
3	发展水平低、受影响人口多(低发展-高暴露)

3 结果与讨论

3.1 城市扩张与土地利用变化

1995—2020年间,成渝城市群经历了显著的城市扩张(图4),城市用地总面积净增约4 232.06 km²。土地利用变化分析(表4)表明,新增城市用地绝大部分由农田用地转化而来,耕地是城市用地扩张的主要来源。

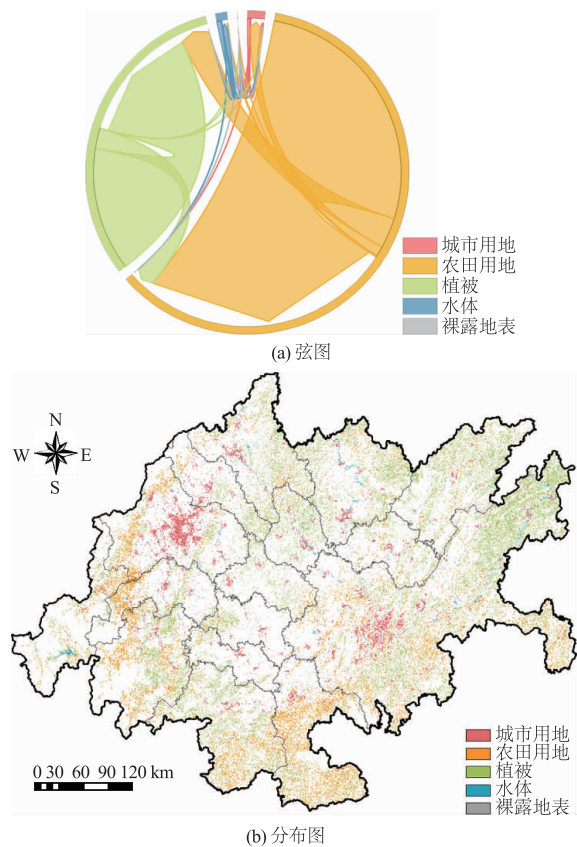


图 4 1995—2020 年成渝城市群土地利用变化
Fig.4 Chord diagram and distribution map of land use change in Chengdu-Chongqing urban agglomeration from 1995 to 2020

表 4 1995—2020 年成渝城市群土地利用类型变化率

Table 4 Changes of land use types in Chengdu-Chongqing urban agglomeration from 1995 to 2020 %

年份	城市用地	农田用地	植被	水体	裸露地表
1995—2000	35.59	0.20	-1.43	3.09	3.25
2000—2005	25.15	-0.20	-0.77	8.58	10.63
2005—2010	32.54	-2.61	3.63	12.59	2.18
2010—2015	35.53	-0.34	-1.43	2.95	4.47
2015—2020	20.36	-4.08	6.81	-3.07	-7.63

具体到城市(表 5),重庆和成都的城市用地扩张规模最大,均新增>1 200 km²;德阳、绵阳等城市的城市用地也增长显著,新增约 200~230 km²。城市用地的占比大幅上升,成渝城市群的城市用地占比从 1991 年的 0.72% 跃升至 2020 年的 2.98%,增幅>4 倍。快速的城市化进程虽然推动了区域经济发展,但也带来了自然生态用地的锐减和下垫面特性的剧变:大量透水的农田用地和植被被钢筋水泥所取代,削弱了地表涵养雨水的能力,增加了地表径流系数。这种土地覆被的剧变为洪水更快汇集和城市内涝埋下隐患,也对区域水文循环产生深远影响。

从人口和经济分布看(表 6),成渝城市群的发展呈现“双核”格局:重庆和成都作为核心城市,人口

表 5 1995—2020 年成渝城市群新增城市用地中各类土地占比

Table 5 Proportion of different types of land in newly added urban land in each city from 1995 to 2020

城市	1995—2020 年新增城市用地/km ²	农田用地占比/%	植被占比/%	水体占比/%	裸露地表占比/%
重庆	1 213.28	96.27	2.47	1.25	0.00
成都	1 216.07	98.76	0.17	1.08	0.00
自贡	68.77	98.32	0.50	1.19	0.00
泸州	137.76	91.04	4.40	4.55	0.00
德阳	207.95	98.99	0.12	0.89	0.00
绵阳	229.55	96.93	0.52	2.55	0.00
遂宁	123.18	98.00	0.20	1.80	0.00
内江	72.77	97.12	1.43	1.44	0.00
乐山	147.99	87.71	1.46	10.77	0.07
南充	198.55	98.48	0.19	1.34	0.00
眉山	153.39	96.88	0.45	2.67	0.00
宜宾	134.42	91.59	2.12	6.16	0.13
广安	102.16	96.53	1.43	2.04	0.00
达州	105.19	95.34	2.96	1.70	0.00
雅安	46.87	93.10	3.35	3.10	0.44
资阳	74.17	99.23	0.28	0.49	0.00
平均值	264.50	95.89	1.38	2.69	0.04

表 6 1995—2020 年人口密度、夜间灯光和 DI 变化情况

Table 6 Changes in population density, nighttime lights, and DI (development index) from 1995 to 2020

城市	人口密度/(人·km ⁻²)	夜间灯光强度/km ⁻²	DI/%
重庆	44.03	5.15	55
成都	118.96	9.32	81
自贡	-148.25	3.91	45
泸州	-11.31	2.10	45
德阳	-21.23	4.51	56
绵阳	-65.23	2.86	64
遂宁	-46.11	6.04	61
内江	-148.12	5.29	50
乐山	3.90	2.26	50
南充	-58.44	3.52	47
眉山	-21.68	5.50	73
宜宾	-66.97	2.94	62
广安	-177.10	5.54	66
达州	-48.67	1.94	37
雅安	-6.32	1.33	71
资阳	-152.65	2.92	41
平均值	44.03	5.15	55

密度和夜间灯光强度远高于其他城市,并在研究期内保持高速增长。例如,1995—2020 年成都的 DI 从约 19.5% 上升到近 100%,重庆则在 2015 年前后赶超密度并在 2020 年达到与成都相当的发展水平。一些中小城市的人口密度虽有所下降(如广安、资阳),但其夜间灯光亮度仍持续增强,反映出核心城市的经济辐射带动作用。总体而言,1995—2010 年区域发展迅猛,DI 总体提高了 58.66%,但总人口略

有下降;2010—2020年进入相对稳定阶段,DI增速放缓至42.18%,人口基本持平。这表明在研究后期,经济发展更多依赖于内部结构优化和核心带动,而人口红利作用减弱。

3.2 受洪涝影响的土地和人口演变

各市受洪水影响的城市用地信息见图5和表7。结果表明,成都和重庆是受洪水影响最严重的城市,受影响城市用地面积分别达1 465.15 km²和1 500.24 km²;成都新增城市用地中有80.17%受到洪水影响,其他发展较快城市如德阳、绵阳也分别有68.70%和54.86%的新增城市用地受到影响;此外,一些发展较为滞后的城市如资阳、眉山、达州,受影响的新增城市用地比例也很高(59.59%~72.93%)。这说明在城市快速扩张情境下,新增城市用地更易受到洪水影响。

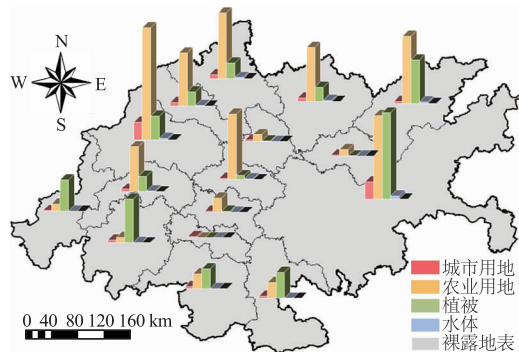


图5 2020年成渝城市群各市洪涝影响空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution of flood-affected areas across cities in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration in 2020

表7 2020年各市受洪水影响城市用地面积及新增城市用地受影响比例

Table 7 Area and proportion of urban districts affected by floods in each city in 2020

城市	城区面积/km ²	新增城市用地受洪水影响比例/%
重庆	1 465.15	14.96
成都	1 500.24	80.17
自贡	102.65	0.00
泸州	164.16	6.11
德阳	276.45	68.70
绵阳	345.78	54.86
遂宁	141.61	9.08
内江	108.67	9.38
乐山	228.80	1.95
南充	265.34	21.07
眉山	216.86	72.93
宜宾	197.09	5.56
广安	114.12	36.23
达州	151.18	59.59
雅安	72.31	40.58
资阳	91.70	81.93

2020年受洪水影响地区人口密度和灯光强度分布情况如图6所示,结果显示,2020年大多数受洪水影响地区人口密度与灯光强度具有一定重合性,平均影响人口密度119.56人/km²。受影响人口密度最大区域出现在成都,最高受影响人口密度达3 490人/km²,其周边地区如德阳、绵阳、资阳和眉山,受影响人口密度也较高,>100人/km²。

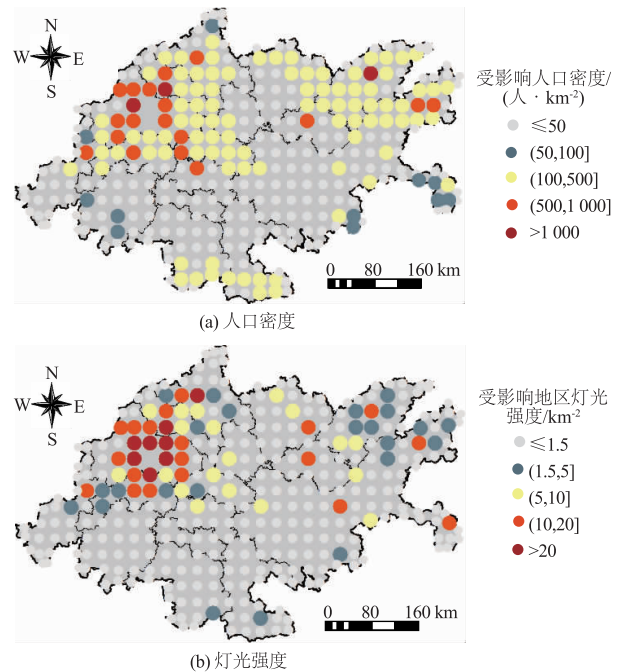


图6 2020年受洪水影响人口密度及灯光强度分布情况

Fig.6 Distribution of population density and nighttime lights intensity affected by floods in 2020

进一步分析表明,不同城市对极端降雨事件的响应存在明显区域差异。从空间格局看,成渝城市群整体呈“西北高、东南低”的地形特征,上游城市如成都、绵阳、德阳、眉山和雅安受山区来水及局地强降雨共同影响,洪涝响应较为敏感;而下游沿江城市如重庆、泸州和宜宾,则更多受到干支流汇流及低洼地带积水过程的共同制约,洪涝影响表现出更强的累积性和传递性。从年际变化特征来看,各城市受洪涝影响面积在2000年和2020年均出现不同程度增加,但增长幅度并不一致。总体上,上游和平原扩张较快的城市在极端年份中受影响面积增加更为明显,而部分地形起伏较大、排水条件相对较好的城市变化相对较缓。这说明区域地形条件、流域上下游位置及城市扩张方式共同影响了洪涝响应过程,导致不同城市在极端气候事件下呈现出差异化特征。

3.3 城市洪涝脆弱性差异及成因

统计发现,区域内新开发城区遭受洪涝的比例显著高于老城区。截至2020年,全区域新建城区中约42.26%曾经历洪涝淹没。分城市看,平原河网区的新

城尤为脆弱:例如成都在 1995—2020 年新增的城市用地中,有 80.17% 在 2020 年发生过积水或洪涝;德阳约 68.70% 的新城区受涝;眉山达 72.93%;资阳更是高达 81.93%。这些城市的新扩展区域大多由低洼耕地改造而来,土壤渗水能力弱且排水基础设施滞后,一遇强降雨极易积水成灾。相比之下,地势较高或扩张较少的城市,新增城区受洪涝影响的比例要低得多,如自贡新增城区几乎未受洪水波及。因此,在城市化过程中平原与水争地可能带来潜在的洪涝代价,新区建设必须同步考虑排水和防洪能力,否则城市扩张本身将显著提升区域洪涝暴露程度及潜在损失。

基于 K-Means 聚类结果,可将成渝城市群 16 城的洪涝脆弱性分为三类(见图 7)。

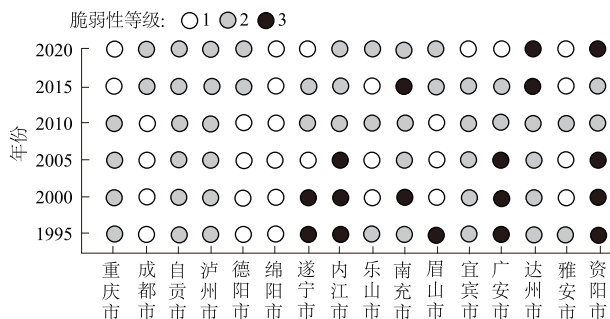


图 7 1995—2020 年各市洪水脆弱性聚类结果

Fig.7 Clustering results of flood vulnerability across cities from 1995 to 2020

1 级(高发展-低暴露)城市具备较强的抗洪能力,代表为绵阳市。绵阳始终保持在低脆弱性水平,一方面得益于其深入推进的防洪工程和“海绵城市”建设,使城市排涝体系完善;另一方面城区地势较高,天然减少了受淹可能。

2 级(中发展-中暴露)城市多为经济中等且地形有利的城市或经济快速发展但洪涝风险同步升高的城市。例如自贡、泸州等位于丘陵地区,城区选址于较高处。崎岖地形在一定程度上限制了这些城市的扩张规模,但也充当了天然防洪屏障,洪水往往沿低洼谷地下泄,城区很少直接遭遇深度淹水。重庆市在 1995—2010 年间被归为中等脆弱性(2 级),彼时重庆正经历高速城市化和人口集聚,城市下垫面硬化、水系侵占等问题突出,洪涝威胁不断上升。不过重庆通过实施一系列重大防洪减灾举措,在 2015 年后显著降低了脆弱性等级,成功转入 1 级行列。这一转变很大程度上归功于三峡工程等上游调蓄设施的大效益,以及市政排涝工程的升级(例如筑坝蓄洪、雨水管网改造)和科学的城市规划(如划定蓄滞洪区、限制洪泛区建设)。重庆案例表明,即便是经济快速增长的超大型城市,只要治理得当,洪涝脆

弱性是可以随时降低的。与之相反,成都则从初期的低脆弱性 1 级滑落到后期的中等脆弱性 2 级。虽然成都的经济总量和基础设施水平在区域中名列前茅,但其城市扩张模式使其洪灾易损性不断累积,大量开发平原区、削减湿地洼地,加之新建城区建筑密度大、下垫面硬化严重,导致稍有强降雨便出现大范围内涝。近年来成都平原的洪涝问题突出,表明经济发展水平较高的城市在快速扩张时若未同步提升防洪标准,其洪涝脆弱性也会上升。

3 级(低发展-高暴露)城市是最为脆弱的一类,往往是发展程度较低且抗灾能力薄弱的城市。资阳市就是这一类别的代表,经济欠发达使其缺乏充足的防洪投入,城区排水系统简陋,地势又平坦开阔,致使洪涝隐患长期存在。整个研究期内资阳洪涝脆弱性始终维持在高水平,新区受淹比例>80%,几乎没有显著改善迹象。除了资阳,达州、广安等发展相对滞后的城市也表现出较高的洪涝脆弱性,需要引起重视。

不同城市洪涝脆弱性的分化,反映了地理条件和发展模式的综合影响。总体来看,基础设施完备、经济持续增长的城市洪涝脆弱性有降低趋势;相反,无序扩张或发展停滞的城市洪涝风险往往积累上升。

以成都与重庆为典型代表,两者虽均为高发展水平城市,但脆弱性演变呈现出明显差异。重庆地处山地丘陵区,地表高差较大,天然排水条件较好,地表径流能够较快汇集并排出。同时,近年来持续加强的防洪排涝工程建设有效提升了其洪水调控能力,使洪涝脆弱性整体呈下降趋势。相比之下,成都位于川西平原腹地,地势低平、河网密集,排水坡降较小。1995 年以来城市快速扩张,大量新增建设用地由耕地和低洼地转化而来,不透水面比例显著增加,叠加排水系统压力增大及自然调蓄空间压缩,导致其洪涝脆弱性呈上升趋势。洪涝脆弱性的演变并不完全取决于受灾面积或发展水平,而是由地形条件、城市扩张方式及工程调控能力共同决定。

绵阳与资阳分别代表了“高投入、高收益”和“低投入、低收益”两种情形:绵阳通过“海绵城市”建设和综合防洪规划,将洪涝损失控制在最低程度;而资阳在城市化过程中未能有效改善基础设施,致使洪涝风险增大。由此可见,合理的城市规划与韧性建设是降低洪灾脆弱性的关键。新城区开发应同步建设雨洪调蓄和排涝设施,避免重蹈“先发展、后治理”的覆辙。同时,应保留必要的城市渗透空间和行洪通道,例如保护湿地、建设下沉式绿地等,以削减不透水面扩张带来的负面效应。在区域层面,

加强城市群内部的协同防洪也很重要:上游城市的水土保持措施和水库调度可降低下游洪峰,而下游平原城市的分洪滞洪措施也可为上游争取安全空间。这种联防联控的理念对于像成渝城市群这样水系相连的内陆城市群尤为适用。

4 结 论

本研究基于多源遥感数据与城市发展数据,系统分析了1995—2020年成渝城市群洪涝脆弱性演变特征及其脆弱性变化规律,主要结论如下:

(1)洪涝影响呈阶段性增强趋势。研究期内区域洪涝影响在年际尺度上总体呈波动上升趋势,2000年和2020年为典型高值年份,表现为降雨增强与地表积水响应的同步变化。空间上形成“西北高一东南低”的分异格局,不同城市对极端降雨的响应存在显著差异,体现出流域位置与地形条件的共同作用。

(2)城市扩张显著增加洪涝暴露。1995—2020年成渝城市群快速扩张,新增城市用地以耕地转化为主,不透水面比例显著提高,削弱了地表调蓄能力。2020年约42%的新增城区发生积水,部分平原城市超过80%的新增城区发生积水,表明快速城市化是洪涝影响增强的重要驱动因素。

(3)洪涝脆弱性呈现显著空间分化。不同城市在自然条件与发展模式共同作用下呈现差异化演变路径。基础设施完善且治理投入较高的城市脆弱性有所降低,而快速扩张或防洪能力不足的城市则呈现脆弱性上升趋势。成都与重庆的对比表明,洪涝脆弱性并不单纯取决于发展水平,而是受地形条件、城市扩张方式及工程调控能力的共同影响。

(4)区域洪涝防控需强化协同治理机制。成渝城市群同时面临流域性洪水与城市内涝的复合洪涝过程,应通过提升防洪排涝工程标准、优化城市空间结构及加强海绵城市建设,实现“发展-安全”协调。同时,应加强城市群内部上下游协同调控,构建多尺度联防联控体系,以提升整体防灾能力。

本研究从城市群尺度揭示了洪涝影响变化与城市发展之间的耦合关系,可为类似山地-平原复合区域的洪涝防控与韧性城市建设提供参考。未来应进一步结合高分辨率数据与水文模型,提升城市尺度洪涝过程模拟能力。

参考文献(References):

[1] 陈文龙,徐宗学,宋利祥,等.基于流域系统整体观

的城市洪涝治理研究[J].水利学报,2021,52(6):659-672.(Chen Wen-long, Xu Zong-xue, Song Li-xiang, et al. Research on the Control Measures of Pluvial and Fluvial Urban Floods Based on Holistic View of Watershed System[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(6): 659-672. (in Chinese))

[2] 王凯丰,张洪斌,力刚,等.城市洪涝韧性的研究进展及关键支撑技术综述[J].水利水电技术(中英文),2023,54(11):77-88.(Wang Kai-feng, Zhang Hong-bin, Li Gang, et al. Advances in Urban Flood Resilience Study and Its Key Supporting Technologies Review[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(11): 77-88. (in Chinese))

[3] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等.中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J].水科学进展,2020,31(5):713-724.(Xu Zong-xue, Chen Hao, Ren Mei-fang, et al. Progress on Disaster Mechanism and Risk Assessment of Urban Flood/Waterlogging Disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese))

[4] 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 Xiao-meng, Xu Nan-tao, Zhang Jian-yun, et al. Urban Flooding in China: Current Status, Causes and Challenges[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3): 357-373. (in Chinese))

[5] 赵瑞东,方创琳,刘海猛.城市韧性研究进展与展望[J].地理科学进展,2020,39(10):1717-1731.(Zhao Rui-dong, Fang Chuang-lin, Liu Hai-meng. Progress and Prospect of Urban Resilience Research[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1717-1731. (in Chinese))

[6] 刘家宏,梅超,刘宏伟,等.特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J].水科学进展,2023,34(2):172-181.(Liu Jia-hong, Mei Chao, Liu Hong-wei, et al. Key Scientific and Technological Issues of Joint Prevention and Control of River Flood and Urban Waterlogging Disaster Chain in Megacities[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 172-181. (in Chinese))

[7] Liu W, Feng Q, Engel B A, et al. A Probabilistic Assessment of Urban Flood Risk and Impacts of Future Climate Change[J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: 129267.

[8] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等.城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J].水资源保护,2020,36(6):1-6,17.(Huang Guo-ru, Luo Hai-wan, Lu Xin-xiang, et al. Study on Risk Analysis and Zoning Method of Urban Flood Disaster[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 1-6, 17. (in Chinese))

[9] 史培军,吕丽莉,汪明,等.灾害系统:灾害群、灾害链、灾害遭遇[J].自然灾害学报,2014,23(6):1-12.(Shi Pei-jun, Lü Li-li, Wang Ming, et al. Disaster

- System; Disaster Cluster, Disaster Chain and Disaster Compound [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(6): 1-12. (in Chinese))
- [10] 汪 辉, 李俊奇, 王文海, 等. 城市道路洪涝条件下足尺车辆失稳风险阈值试验研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(9): 76-94. (Wang Hui, Li Jun-qi, Wang Wen-hai, *et al.* Experimental Study on the Instability Risk Threshold of Foot-size Vehicles under Urban Road Flooding Conditions[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(9): 76-94. (in Chinese))
- [11] 王 晶, 薛联青, 张 敏, 等. 不同降水频率下淮河流域洪涝灾害风险评估[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(9): 1-5. (Wang Jing, Xue Lian-qing, Zhang Min, *et al.* Risk Assessment on Flood Disasters of Different Precipitation Frequencies in Huaihe River Basin[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(9): 1-5. (in Chinese))
- [12] 王金虎, 张东晖, 王钰尧. 城市洪涝风险的组合赋重方法研究与应用: 以淮安市为例[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(8): 91-104. (Wang Jin-hu, Zhang Dong-hui, Wang Yu-yao. Research and Application of Combined Empowerment Method for Urban Flood Risk: Take Huai'an City as an Example[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(8): 91-104. (in Chinese))
- [13] 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 Zhi-yong, Chen Xiao-hong, Lin Kai-rong, *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))
- [14] Tellman B, Sullivan J A, Kuhn C, *et al.* Satellite Imaging Reveals Increased Proportion of Population Exposed to Floods[J]. *Nature*, 2021, 596(7870): 80-86.
- [15] Shen X, Anagnostou E N, Allen G H, *et al.* Near-real-time Non-obstructed Flood Inundation Mapping Using Synthetic Aperture Radar[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 302-315.
- [16] 张冬冬, 严登华, 王义成, 等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. *灾害学*, 2014, 29(1): 144-149. (Zhang Dong-dong, Yan Deng-hua, Wang Yi-cheng, *et al.* Research Progress on Risk Assessment and Integrated Strategies for Urban Pluvial Flooding[J]. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(1): 144-149. (in Chinese))
- [17] 张云康, 刘 懿, 肖 婉, 等. 基于 Segformer 模型的洪水淹没范围提取与对比[J]. *长江科学院院报*, 2025, 42(10): 165-173, 182. (Zhang Yun-kang, Liu Yi, Xiao Wan, *et al.* Flood Inundation Range Extraction and Comparative Analysis Based on Segformer Model[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2025, 42(10): 165-173, 182. (in Chinese))
- [18] Li H, Yang D, Zhu Z, *et al.* Flood Risk Analysis of Urban Agglomerations in the Yangtze River Basin under Extreme Precipitation Based on Remote Sensing Technology [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(22): 4289.
- [19] 陈丽慧, 陈 洁, 高郭平. 滨海城市洪涝风险评估: 以上海临港新城为例[J]. *长江科学院院报*, 2025, 42(8): 84-93. (Chen Li-hui, Chen Jie, Gao Guo-ping. Flood Risk Assessment in Coastal Cities: a Case Study of Lingang New City, Shanghai[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2025, 42(8): 84-93. (in Chinese))
- [20] 严登华, 张建云, 王 浩, 等. 水旱灾害防御范式重构与关键问题[J]. *水科学进展*, 2026, 37(3): 409-420. (Yan Deng-hua, Zhang Jian-yun, Wang Hao, *et al.* Evolution of Flood and Drought Defense Paradigm and Its Key Issues[J]. *Advances in Water Science*, 2026, 37(3): 409-420. (in Chinese))
- [21] 夏 军, 陈 进, 王纲胜, 等. 从 2020 年长江上游洪水看流域防洪对策[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(1): 1-8. (Xia Jun, Chen Jin, Wang Gang-sheng, *et al.* Flood Control Strategies for the River Basin Enlightened by the 2020 Upper Yangtze River Floods[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(1): 1-8. (in Chinese))
- [22] Wei Y, Li H, Zhou Y, *et al.* Flood Vulnerability Assessment of Urban Agglomeration under the Background of Urban Expansion[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 662: 133962.
- [23] 李昌文, 师义杰, 刘佳明, 等. 成渝城市群洪涝灾害协同应对模式研究[J]. *中国水利*, 2023(9): 13-17. (Li Chang-wen, Shi Yi-jie, Liu Jia-ming, *et al.* Studies on Collaborative Response Model for Flood and Waterlogging Disasters in Chengdu-chongqing Urban Agglomeration[J]. *China Water Resources*, 2023(9): 13-17. (in Chinese))
- [24] 夏 军, 张世彦, 张永勇, 等. 城市水系统综合治理关键技术及其在长江经济带的示范应用[J]. *地理学报*, 2024, 79(9): 2163-2175. (Xia Jun, Zhang Shi-yan, Zhang Yong-yong, *et al.* Key Technologies of Integrated Urban Water System Management and Their Applications in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(9): 2163-2175. (in Chinese))
- [25] 宋晓猛, 徐楠涛, 董子然. 变化环境下城市洪涝风险评估与调控策略[J]. *水利发展研究*, 2025, 25(1): 56-64, 85. (Song Xiao-meng, Xu Nan-tao, Dong Zi-ran. Risk Assessment and Control Strategies of Urban Flooding under Changing Environments[J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(1): 56-64, 85. (in Chinese))