

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240622002

基于损失函数的城市洪涝灾害弹性演化规律研究*

陈 洋, 杨文泰, 李庆国, 刘丰铭, 刘 杰, 刘玉玉

(济南大学水利与环境学院, 山东 济南 250022)

摘要: 为了提升城市防洪水平与洪涝灾害恢复能力以及推进以人为核心的新型城镇化战略的目标任务,以潍坊市城区为研究区域,借助基于元胞自动机的CAflood模型获取淹没水深数据,并通过数据挖掘与相似性分析方法直接移植引用城市损失率建立研究区淹没水深-损失率函数,构建基于损失函数的城市洪灾弹性模型方法并计算了潍坊城区在遭遇5、50、100及200 a重现期降雨时的内涝弹性指数分布。同时,分析研究区在2012、2017和2022年3种不同土地利用情况下,潍坊市城区洪涝灾害弹性的时空变化趋势,揭示潍坊城区城市演化与区域洪涝灾害弹性响应关系。结果表明:潍坊市城区洪涝灾害弹性随重现期增加总体呈下降的趋势,且下降剧烈区域主要集中在人造地表面积占比较大的中心城区、街道和东部开发区,以及河流周边平坦低洼区域。从空间分布上看,这种下降趋势呈现出以主城区为中心向外扩张的趋势。此外,随着城市化程度的增加,研究区各分区的平均弹性指数均有不同程度的降低,其中C7山丘区一直处于弹性较高水平,C4高新开发区在多种模拟情景下均处于较低水平,并且在遭遇相同重现期降雨后,城市化程度越高,各分区的平均弹性指数降幅越大。研究结果为潍坊市应对未来增长的洪涝风险,实施城市洪灾弹性提升策略提供了科学支撑。

关键词: 潍坊城区; 损失率函数; 弹性指数; 城市防洪

中图分类号: TV87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0800-09

Research on Evolution of Urban Flood Resilience Based on Loss Function

CHEN Yang, YANG Wentai, LI Qingguo, LIU Fengming, LIU Jie, LIU Yuyu

(School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: To enhance urban flood protection and resilience to floods, and to advance the new strategy of human-centered urbanization, Weifang's urban area was selected as the study area. The CAflood model, based on cellular automata, was employed to derive inundation depth data. Using data mining and similarity analysis, urban loss rate was referenced and applied to establish an inundation depth-loss rate function for the study area. Based on this function, an urban flood resilience model was developed, which was then used to calculate the flood resilience index distribution in Weifang's urban area under rainfalls with 5, 50, 100 and 200-year return periods. Additionally, the temporal and spatial trends of flood resilience in Weifang's urban area were analyzed under three different land use scenarios for 2012, 2017 and 2022, revealing the relationship between urban evolution and regional flood resilience. The results indicated that the flood resilience of the Weifang's urban area generally decreased with an increase in return periods. The most significant decreases were primarily observed in the cen-

* 收稿日期:2024-06-22;修回日期:2024-07-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51909105)、山东省自然科学基金面上项目(ZR2021ME229)资助

作者简介:陈洋(2000—),男,硕士研究生。主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:2205322332@qq.com

通信作者:李庆国(1976—),男,副教授,博士。主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:stu_liqg@126.com

tral urban area, streets, and the eastern development zone, which have a higher proportion of man-made surfaces, as well as in the flat and low-lying areas around rivers. Spatially, the declining trend expanded outward from the central urban area. Moreover, as urbanization intensifies, the average resilience index in each sub-district of the study area decreased to varying extents. Among these, the C7 hilly area consistently showed a higher level of resilience, while the C4 high-tech development zone exhibited lower resilience under various simulation scenarios. The higher the degree of urbanization, the greater the decrease in the average resilience index of sub-districts after the same return period rain-falls. The research results provide scientific support for Weifang to address the growing flood risk and to implement strategies to enhance urban flood resilience in the future.

Keywords: Weifang's urban area; loss rate function; flood resilience index; urban flood control

0 引言

过去几十年,城市迅速演化、气候显著变化使得城市地表洪水愈加严重^[1],洪涝灾害发生的频率和强度急剧增加,给全球许多城市造成了严重的负面后果^[2]。在此背景下,传统的城市防洪措施难以应对不断增加的洪涝风险。近年来,为了提升城市在面临洪涝灾害时的抵御能力和快速恢复能力,适应城市化进程中不断变化的洪涝灾害风险,众多学者将弹性概念延引至城市内涝灾害的研究中,为城市洪灾管理体系建设和促进区域可持续发展提供了新思路^[3-5]。

目前城市洪涝灾害弹性评估的研究主要分为两大类:利用水文或水力模型模拟结果定量分析和构建指标体系进行评价。在水文或水力模型的应用中,S.N.Mugume等^[6]利用SWMM模型详尽探讨了排水管网在各种情景下总洪水量和洪水持续时间,并首创性地基于系统性能函数进行弹性评估。傅春等^[7]利用MIKE FLOOD模型模拟了南昌市朝阳新城在不同重现期下的内涝淹没状态,并结合系统性能函数分析讨论城市内涝弹性。指标体系法常从水资源系统理论出发,结合社会经济、人口、地理环境等因素多角度考虑构建指标体系。唐桂娟^[8]于2017年提出了一个包含技术、组织、社会和经济四个维度的评价指标体系,进一步从多个维度反映城市洪涝灾害弹性,为城市抗灾减灾提供了新的方法和思路。陈长坤等^[9]从抵抗力、恢复力和适应力等城市韧性属性出发,建立了包含3个一级指标和25个二级指标的评估指标体系,结合KL-TOPSIS综合评估模型分析洪灾韧性随时间的变化趋势。上述两种方法中指标体系法主要用于不同空间尺

度在大时间跨度下的城市弹性量化研究,而基于模型的模拟方法主要用于单个灾害事件的发展过程,通过洪灾对系统的影响及系统的响应来客观和准确的评价洪灾弹性变化规律。

相关研究可见,基于系统功效的洪灾弹性评估方法一般利用系统性能函数结合淹没水深计算洪灾弹性^[10-12],而淹没水深的阈值设定往往与决策者的使用目的密切相关,不同阈值的选取对于区域洪水弹性的分析会造成较大影响,尽管可以通过不同区域的土地类型划分不同的水深阈值,但这些阈值的选取往往是从区域尺度进行的,同一区域的不同栅格的水深阈值是相等的,这会导致其在洪灾弹性计算的精度上出现一定的误差。以洪灾淹没水深为自变量、社会经济损失率为因变量的洪灾损失函数在具体的洪涝灾害事件过程或较小的研究区域能够精确评估洪灾损失^[13-14],相较于传统区域洪水弹性受水深阈值的影响,栅格损失率变化曲线能够反映不同区域对于洪灾的抵抗和恢复能力^[15]。

本文以潍坊城区为例对城市洪涝弹性进行研究,引入损失率函数构建栅格的系统性能函数曲线和洪涝弹性函数曲线,通过栅格损失率的变化计算栅格弹性,避免了因区域水深阈值选取和栅格水深尺度不匹配所造成的计算误差,为城市防洪规划的制定和洪涝灾害弹性的管理提供了科学依据。

1 基于损失函数的城市洪涝灾害弹性评价模型方法

1.1 城市洪灾损失函数构建

在区域洪水弹性定义及量化的基础上引入以

洪灾淹没水深为自变量、社会经济价值损失率为因变量的洪灾损失率函数的构建方法,但是采用上述方法设计函数需要详细的地区洪灾灾情资料。而我国很多城市特别是中小型城市,尽管极端气候影响下洪涝灾害风险同样急剧增加,但相关历史洪涝灾害资料数据往往缺乏积累。针对上述情况,参考吕鸿等^[16]提出的理论方法,以中国典型城市为对象,挖掘引用城市的灾情数据,通过影响洪灾损失率的特征指标体系判断选取相似性最高的引用城市进行缺资料地区的损失率函数的构建。其具体方法如下:

(1)选取合适的洪灾损失率函数。目前国内外研究中关于损失率函数有多种形式,其中具有初期缓慢、中期迅急、后期趋缓的洪灾损失特征的“S”型增长函数与洪灾中的洪水弹性变化特征较为相似,因此选取“S”型增长函数中的 Boltzmann 函数作为拟合函数。其表达式为:

$$y = A - \frac{A}{1 + e^{\frac{(x-c)}{k}}} \quad (1)$$

式中, x 为淹没水深, m ; y 为洪灾经济损失率,%; A 、 c 、 k 为待定参数。

(2)建立特征指标体系,确定引用城市。通过数据搜集得到多个城市完备的损失率数据,分析影响损失率的社会经济状况、防洪工程标准和区域综合脆弱性等要素,选取地均GDP、居民人均存款、河网密度、城市排水管网密度、绿化率等特征指标构建影响洪灾损失率的指标体系,采用相对差值法计算各引用城市指标与潍坊市的相似性,具体公式为:

$$S_{ij} = \left| \frac{H_{ij} - W_j}{W_j} \right| \quad (2)$$

式中, S_{ij} 为第*i*个城市第*j*个指标与潍坊市第*i*个指标值的相对差值,值越小表示与潍坊市指标值越相近; H_{ij} 为第*i*个城市第*j*个指标值; W_j 为潍坊市第*j*个指标值。

(3)拟合损失率函数。引用城市水深-洪灾损失率数据,通过lsqcurvefit函数进行非线性最小二乘迭代拟合,得到待定参数,通过决定系数 R^2 判断拟合程度, R^2 越接近1,曲线拟合效果越好。

1.2 基于损失函数的城市洪灾弹性模型

由于洪灾弹性需要反映到各个栅格上,本文提出采用基于二维洪涝模拟的洪涝灾害弹性模型的

构建方法,该方法在洪涝弹性的计算精度方面有较大改善。首先需要采用二维的洪涝模型对城区洪涝过程进行模拟,获得不同条件下的洪涝情景。本文中采用基于元胞自动机原理的Caflood程序,获得模拟的不同情景下的栅格淹没水深、流速等。然后利用拟合的水深-损失率函数计算出各个栅格的洪灾损失率,并用洪灾损失率构建系统性能函数和栅格弹性函数,以栅格单元为载体进而评估整个研究区的洪灾弹性能力。其中系统性能函数与洪灾弹性函数如式(3)、(4)所示:

$$u(t) = 1 - \frac{L}{L_{\max}} \quad (3)$$

式中, $u(t)$ 为系统性能函数; L 为某一栅格*t*时刻损失率,%; L_{\max} 为某一栅格降雨情景下的最大损失率,%。

$$R = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt \quad (4)$$

式中, R 为洪灾弹性指数,取值范围为0~1, R 值越大说明栅格洪涝灾害弹性越强; t_1 为初始发生水深淹没时间; t_2 为淹没模拟3小时时刻。

1.3 基于损失函数的城市洪涝灾害弹性评价方法

基于以上损失函数及弹性模型,本文提出城市洪涝灾害弹性评价的具体方法及过程如下:

(1) 损失函数确定及计算

考虑洪涝灾害弹性时空变化特点,结合研究区的孕灾环境确定洪灾损失函数的基本形式,通过相似性分析挖掘数据,并结合式(1)确定损失函数参数。

(2) 结合二维洪涝模型的淹没水深计算

以潍坊市城区高精度DEM数据、土地利用数据作为输入条件,通过设定初始边界条件和土地糙率等参数构建二维洪涝模型并利用实际雨型进行参数率定,以不同设计雨型模拟多情景下研究区的淹没状态并计算栅格淹没水深。

(3) 结合损失函数和弹性模型的洪涝灾害弹性计算

通过拟合后的损失函数将栅格淹没水深转换为栅格损失率,结合式(3)、(4)计算区域栅格洪灾弹性指数。

(4) 分区洪灾弹性能力分析

通过栅格弹性指数的分布情况,结合可视化工具分析城市化进程和极端降雨对潍坊城区洪涝弹性特征的影响。

2 应用实例与分析

2.1 研究区概况及数据来源

潍坊市位于山东半岛西部,地形以平原为主,南

部为山区、丘陵,中部为冲积平原,北部沿海为滨海平原,北临渤海莱州湾。地势南高北低,同时受暖温带季风气候和城市化水文效应的影响,60%以上的降雨量集中在汛期(6~8月),降雨时空分布不均。本次研究以主城区为研究对象,涉及潍城区、奎文区、坊子区三大区,研究区面积约457 km²,如图1所示。

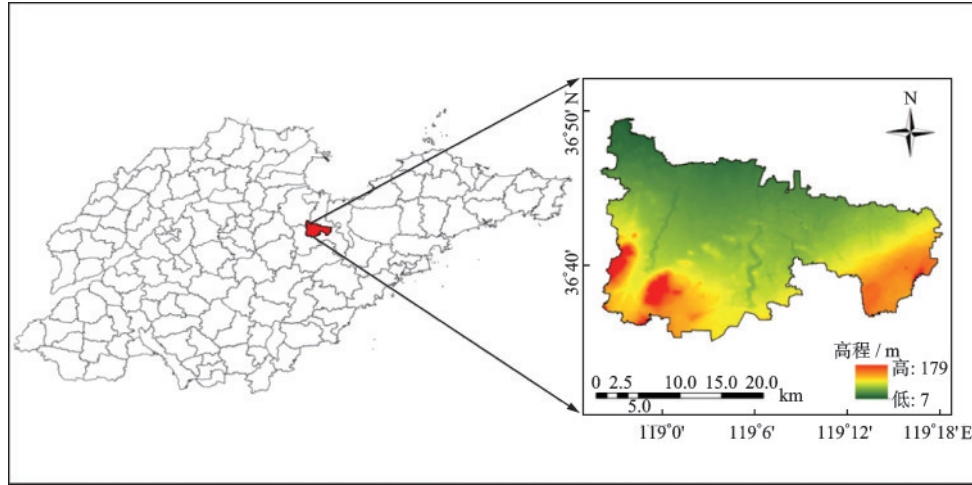


图1 研究区域地理位置

Fig.1 Geographic location of study area

本文数据资料主要为:①水文数据,潍坊市“温比亚”台风、“利奇马”台风期间降雨数据主要从潍坊防汛预防预警平台获取,实测淹没水深资料由实地调研和调查问卷的方式获取;②基础地理数据,潍坊市DEM数据从NASA、地理空间数据云获取;潍坊市遥感影像数据和土地利用监测数据分别从地理空间数据云和欧洲航天局获取;③引用城市灾情数据与洪灾损失率数据,潍坊市GDP、人均存款、绿化率等数据集来源于潍坊市年鉴,引用城市的相关数据主要来源于知网和Web of science 相关文献搜集^[17-22]。

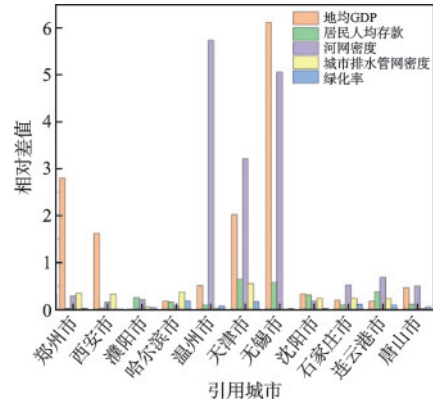


图2 各引用城市相对差值

Fig.2 Relative difference across referenced cities

2.2 潍坊城区洪涝灾害弹性评价

2.2.1 引用城市选取与洪灾损失函数拟合

通过前文基于损失函数的城市洪涝灾害弹性评价模型方法,计算各引用城市指标的相对差值,其结果如图2所示。濮阳市的5类指标均在0.3以下,其中地均GDP差值为0,相比与其它引用城市,其与潍坊市的指标相似性更高。通过濮阳市的洪涝淹没水深对应损失率数据,拟合洪灾损失函数,经过8次迭代后满足函数收敛并得到最佳拟合参数,其中 $A=30.9413$ 、 $c=1.2307$ 、 $k=0.2725$ 。计算其拟合优度,即决定系数 $R^2=0.99833$,说明拟合结

果较为理想,拟合曲线如图3所示。

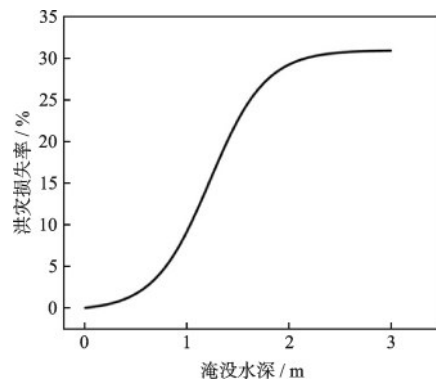


图3 Boltzmann 函数拟合曲线

Fig.3 Boltzmann function fitting curve

2.2.2 基于CAflood的二维洪涝模型模拟

(1) CAflood模型构建

通过 ArcGIS 10.7 软件将 DEM 数据与土地利用数据进行填注、裁剪和重采样等预处理后转化为 ASCII 格式文件。参考《城市防洪规划规范》^[23] (GB 51079—2016) 和《洪水风险图编制导则》(SL 483—2017) 对研究区不同土地利用类型下网格的糙率进行赋值,并通过不同的降雨文件数据控制模拟情景,构建二维洪水淹没模拟的水动力模型。

(2) 模型率定与验证

由于潍坊城区缺少相关的实测淹没水深资料,通过走访和调查问卷的方式获取潍坊城区最近两次台风期间洪灾数据进行模型参数率定和验证。以 2019 年 8 月 11 日“利奇马”台风期间实际雨型进行参数率定,以 2018 年 8 月 19 日“温比亚”台风期间实际雨型和 23 个易涝点实际淹没水深对率定后的模型进行验证。模型验证结果表明,易涝点模拟结果与实际结果误差小于 0.2 m 的点位占总点位数的 74%,证明构建的 CAflood 模型的模拟结果与实际水深变化情况基本相符,能够用于潍坊城区多情景洪涝模拟。

2.2.3 不同重现期下现状年洪涝灾害弹性

利用洪涝灾害弹性模型计算潍坊城区 2022 年不同重现期下洪涝弹性指数,如图 4 所示。

由图 4(a)可知,当降雨强度较小时,潍坊城区洪涝弹性总体较高,城区防洪排涝能力足以满足排涝需求,其中洪涝弹性指数相对较低的区域主要分布在城区东部以及大于河上游低洼区域。由图 4(b~d)可以看出,随着设计降雨强度增大,研究区整体颜色逐渐加深,多个区域的洪涝灾害弹性指数出现了不同程度的降低,其洪涝弹性指数总体呈下降趋势。

从空间上看,随着重现期的增加,北部弹性指数较低区域由北宫东街以南扩张至玄武西街附近;东部弹性较差区域则由北海路以西扩张至北海路以东;南、西两部弹性指数较低区域则分别由健康东街以北扩张至宝通街附近和安顺路以东扩张至长松路附近。进一步对比图 4(c、d)可以发现,4(d)中弹性较低的区域大多由图 4(c)中弹性较低区域向四周扩张形成的,其中中心城区和东部开发区附近弹性变化最为显著,这种变化进一步凸显了城市演化下主城区扩张与洪涝灾害弹性指数下降之间

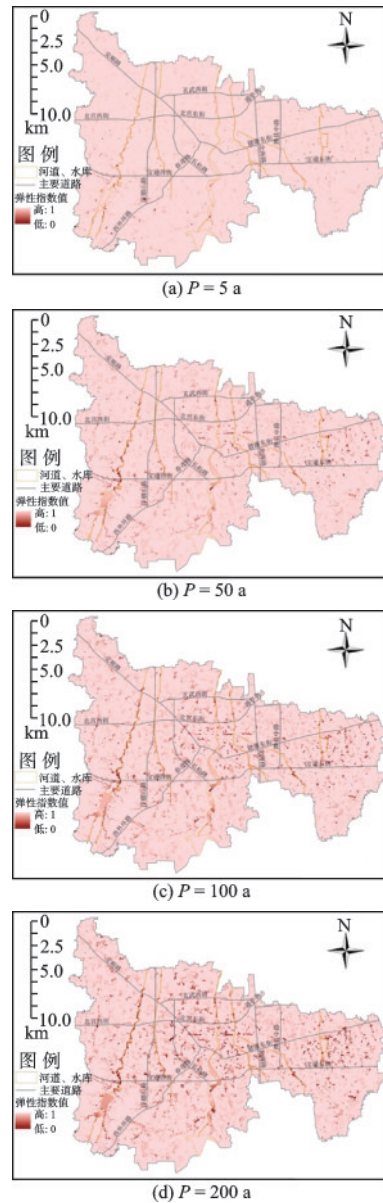


图 4 不同重现期下潍坊城区洪涝灾害弹性指数分布图
Fig.4 Distribution of flood resilience index in Weifang's urban area under different return periods

有着密切关系。

2.2.4 不同重现期和城市演化对各分区弹性变化影响分析

为进一步明确研究区洪灾弹性演化规律,利用 ArcGIS 中水文分析板块功能对研究区域进行汇水区划分,通过手动合并的方式将研究区域分成 C1-C7 共 7 大区域,其中 C1 为城区西北部村庄区域,C2、C3、C5、C6 主要为中心主城区,分别为中心城区的北部、东部、西部、南部,C4 为城区东部高新开发区,C7 为城区南部山丘区域,具体分区情况如图 5 所示。结合潍坊市城区的用地规划,选择研

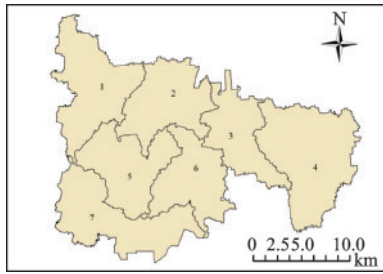


图5 水文分析分区图

Fig. 5 Hydrological analysis zoning map

表1 各分区不同土地利用类型栅格数量占比

Table 1 Proportion of grid numbers for different land use types in each sub-district

单位: %

年份	土地类型	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	总研究区
2012	水体	0.31	1.34	0.68	0.68	0.27	4.12	6.95	2.02
	植被	1.27	0.79	1.38	2.34	1.51	4.21	6.11	2.56
	耕地	52.79	27.29	12.88	37.97	50.59	27.46	58.8	39.93
	人造地表	45.64	70.58	85.05	59.01	47.63	64.21	28.14	55.50
2017	水体	0.29	1.31	0.69	0.67	0.26	4.01	6.89	1.98
	植被	1.06	0.75	1.38	2.29	1.36	3.78	5.58	2.36
	耕地	47.13	24.01	12.03	35.21	47.91	25.23	57.42	37.15
	人造地表	51.53	73.93	85.91	61.84	50.47	66.99	30.11	58.50
2022	水体	0.30	1.33	0.68	0.64	0.24	4.17	6.56	1.95
	植被	0.88	0.68	1.44	2.22	1.23	4.03	5.07	2.25
	耕地	42.75	22.49	10.8	32.74	44.01	22.46	56.75	34.70
	人造地表	56.07	75.50	87.08	64.39	54.52	69.34	31.61	61.11

从不同设计降雨历时对区域洪涝灾害弹性影响的角度来看,由图6(a)可知,当降雨强度较低时,各分区栅格洪灾弹性指数大多集中在0.9~1.0附近;如图6(b)、(c)所示,随着降雨重现期的增加,各分区相同年份的栅格概率密度曲线逐渐出现较多的重叠部分,这表明各分区的洪灾抵御能力开始接近,研究区的排水能力逐渐接近极限;如图6(d)所示,随着降雨强度进一步增加,各分区的概率密度曲线逐渐变得离散,此时各个分区的洪灾弹性出现较为显著的差异,这表明研究区中部分区域已经濒临洪灾抵御能力极限,排水系统接近瘫痪。结合潍坊地形数据和土地利用状况可知,C7区是地势较高且植被较多的山丘区域,其在面对极端降雨时拥有优越地理位置和强大的排水下渗能力,在不同重现期下均能维持较高的弹性指数;相比之下,C2、C3、C6等区由于靠近主城区,人造地表等不透水面面积占比较高,洪灾弹性指数受降雨强度的影响较大,其概率最大值对应的洪灾弹性指数波动明显。

从不同城市化的角度来看,自2012年至2022

研究区2012、2017以及2022年的土地利用情况代表低、中、高3种不同程度的城市化进程,并统计各分区水体、植被、耕地和人造地表等4种下垫面类型组成情况,详见表1。在水文分区的基础上,通过洪涝灾害弹性评价模型方法计算不同城市化背景下4种降雨情景各分区中所有栅格的弹性指数,通过统计不同弹性指数的栅格数量拟合概率密度曲线,如图6所示。

年潍坊市城区人造地表面积不断增大,耕地与植被面积减小,其中耕地面积降幅远高于植被面积,可见潍坊市城区城市化呈不断扩大的趋势。以图6(a)为例,通过对比同一分区不同城市化下概率密度曲线发现,低、中、高3种城市化曲线按照从右到左的顺序排列,进一步对比其它重现期下的不同分区发现其曲线也是按照此方式排列。研究区的洪灾弹性指数概率曲线代表了整个研究区的弹性指数数值大小分布,其中较大的弹性指数占比越多,说明在整个模拟过程中研究区的系统性能损失越小,通过上述的曲线排布规律可以发现,随着城市化的发展研究区各个分区的弹性指数均有不同程度的降低。

2.2.5 各分区平均弹性时空特征分析

为进一步明确潍坊市城区洪涝灾害弹性的时空变化趋势,在水文分区的基础上进一步统计各分区在不同重现期下2012、2017、2022三年的平均洪涝灾害弹性指数值,如图7所示。

由图7可知,C7区在3种城市化状态下经历不

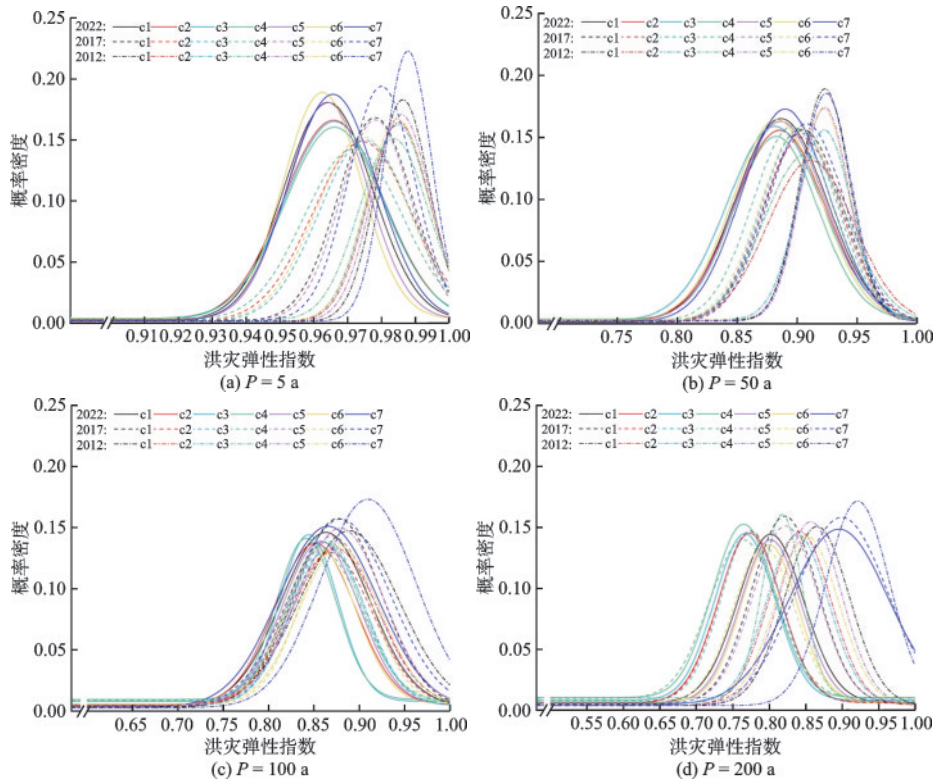


图6 不同重现期下3种城市化情景时各分区洪灾弹性指数分布概率图

Fig.6 Probability distribution of flood resilience index in each sub-district under three urbanization scenarios for different return periods

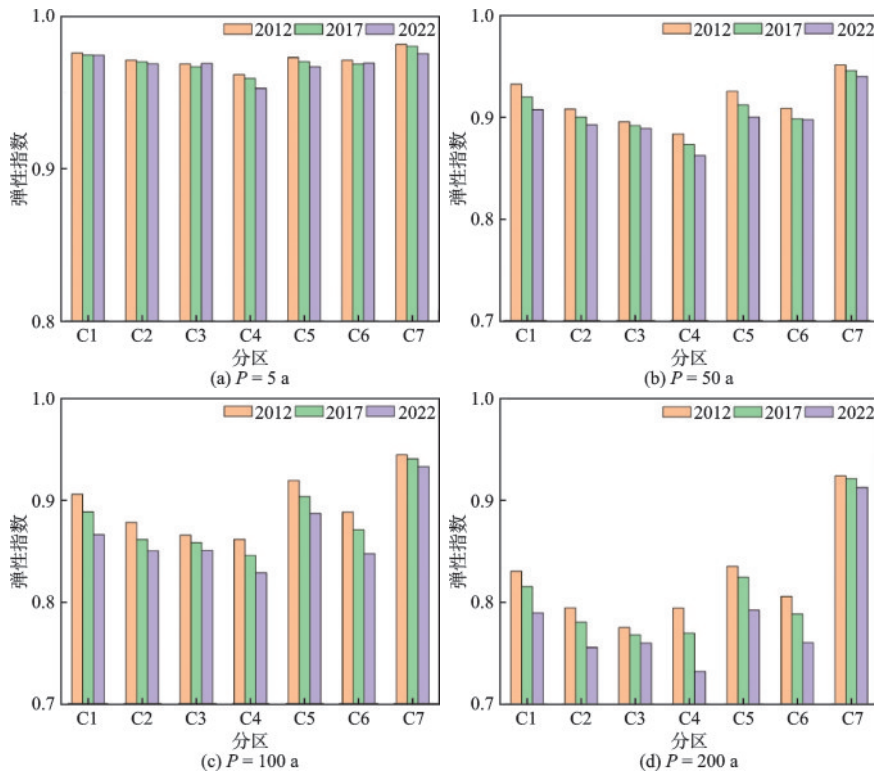


图7 不同重现期下潍坊城区各分区平均洪涝灾害弹性指数值

Fig.7 Average flood resilience index values for each sub-district in Weifang urban area under different return periods

同重现期降雨模拟,其平均弹性指数均为各分区中最高;在重现期为5、50和100 a一遇时,C4区的平

均弹性指数在3种城市化条件下均为各分区中最低;在重现期为200 a一遇时,2012和2017年C3区

的平均弹性指数最低,2022年C4区的平均弹性指数最低。

结合各区的土地利用情况可知,随着城市化的发展,C7区仍然在各分区中有着最高的植被、水体占比和最低的人造地表占比;C3区主要位于主城区中心区域,城市化程度自2012年以来一直保持较高水平,同时其排水能力随地下管网等排涝设施的完善逐渐加强;C4区作为潍坊市东部高新开发区,由于城市化进程的迅速发展,该区域的土地利用状况发生了显著的变化,该变化致使C4区的洪灾平均弹性指数始终保持在较低水平。

进一步对比图7(a)、(b)发现,当重现期由5 a增加到50 a时,各分区的平均弹性指数呈下降趋势,并且在2022年降幅最大,2012年降幅最小。以C4区为例,在重现期由5 a增加到50 a时,2022年的平均弹性指数下降率为9.47%,2012年的下降率为8.12%。继续对比图7(b~d)发现,当重现期由50 a增加到100 a和100 a增加到200 a时,各分区的平均弹性指数仍是2022年降幅最大、2012年降幅最小。在遭遇相同的重现期改变时,研究区各分区的城市化发展程度越高,其洪灾抵御能力受到的冲击越大,其平均弹性指数的降幅就会越大。

3 结 论

提出一种以洪灾损失率代替传统的淹没水深作为系统性能函数自变量的城市洪水弹性能力量化的新方法。以潍坊市城区作为研究区,利用4个设计降雨重现期、3个城市化演化进程,得到研究区在不同情景下洪水弹性变化过程,主要结论如下:

(1)潍坊城区在遭遇5 a一遇设计降雨时,其洪涝弹性整体较高,各分区平均弹性指数在0.95以上;随着降雨重现期的增加,当 $P=50$ 、100和200 a时,各分区的平均弹性指数分别集中在0.90~0.94、0.85~0.91和0.75~0.83。

(2)在同一降雨事件中,研究区域中位于南部山区的集水区在洪涝灾害弹性方面有明显的地域优势,其各年份平均弹性指数主要集中于0.91~0.98;位于东部高新开发区的集水区在应对高降雨强度时,其平均弹性指数整体偏低,主要集中于0.88~0.73。

(3)潍坊城区的城市化发展呈现向周边不断扩大的趋势,并且城市化的发展会加大降雨强度对于

洪灾弹性的影响,即城市化程度越高,在同一降雨事件中,研究区的洪水弹性越低。

后续可进一步在已有指标体系的基础上设立区域差异性指标,降低引用城市数据与城市实际情况的误差影响,同时在选择洪灾损失率函数时,可将目前国内外常用的函数作为待拟合函数集,采用拟合程度最高的函数作为最终的淹没水深-损失率函数曲线,降低主观因素所导致的影响,以实现更加精准的城市洪涝灾害弹性量化研究。

参考文献:

- [1] 张金良,罗秋实,王冰洁,等.城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J].水资源保护,2024,40(1):6-15. Zhang J L, Luo Q S, Wang B J, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rain-storm-induced urban flood disasters[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese)
- [2] Hammond M J, Chen A S, Djordjević S, et al. Urban flood impact assessment: a state-of-the-art review [J]. Urban Water Journal, 2015, 12(1): 14-29.
- [3] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [4] Liao G X, Lin H J, Wang Y. A theory on urban resilience to floods: a basis for alternative planning practices [J]. Urban Planning International, 2015, 17(4): 388-395.
- [5] Chen K F, Leandro J. A conceptual time-varying flood resilience index for urban areas: Munich city [J]. Water, 2019, 11(4): 830.
- [6] Mugume S N, Gomez D E, Fu G, et al. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems [J]. Water Research, 2015, 81: 15-26.
- [7] 傅春,黄金燕,付耀宗,等.不同城市化程度对内涝弹性的影响研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(6): 1402-1412. Fu C, Huang J Y, Fu Y Z, et al. Research on the influence of different urbanization degrees on waterlogging elasticity [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(6): 1402-1412. (in Chinese)
- [8] 唐桂娟.城市灾害恢复力指标体系的构建与综合评价[J].广州大学学报(社会科学版),2017,16(2): 31-37. Tang G J. Index system construction and comprehensive evaluation of urban disaster resilience [J]. Journal

- of Guangzhou University (Social Science Edition) , 2017, 16(2): 31-37. (in Chinese)
- [9] 陈长坤,陈以琴,施波,等.雨洪灾害情境下城市韧性评估模型[J].中国安全科学学报,2018,28(4):1-6.
Chen C K, Chen Y Q, Shi B, et al.An model for evaluating urban resilience to rainstorm flood disasters[J]. China Safety Science Journal, 2018,28(4):1-6. (in Chinese)
- [10] Simonovic S, Peck A. Dynamic resilience to climate change caused natural disasters in coastal megacities quantification framework[J]. British Journal of Environment and Climate Change, 2013, 3: 378-401.
- [11] Chen J L, Chen W J, Huang G R. Assessing urban pluvial flood resilience based on a novel grid-based quantification method that considers human risk perceptions[J]. Journal of Hydrology, 2021, 601(9):126601.
- [12] Zhang X W, Mao F, Gong Z Y, et al. A disaster-damage-based framework for assessing urban resilience to intense rainfall-induced flooding [J]. Urban Climate, 2023, 48: 101402.
- [13] 李超超,程晓陶,王艳艳,等.洪涝灾害三参数损失函数的构建 I ——基本原理[J].水利学报,2020,51(3):349-357.
Li C C, Cheng X T, Wang Y Y, et,al. A three-parameter flood damage function, part I : Theory and development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(3):349-357. (in Chinese)
- [14] 王小杰,夏军强,李启杰,等.长江中下游地区洪灾损失率函数构建及洪涝灾害损失评估[J].水资源保护,2023,39(5):88-98.
Wang X J, Xia J Q, Li Q J, et al. Construction of flood loss rate function and flood loss assessment in middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2023,39(5):88-98. (in Chinese)
- [15] Eui L, Joong K. Development of resilience index based on flooding damage in urban areas[J]. Water, 2017, 9(6):428.
- [16] 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 H, Wu Z N, Guan X J, 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)
- [17] Wang J, Chen Z L, Xu S Y, et al. Medium-scale natural disaster risk scenario analysis: a case study of Pingyang County, Wenzhou, China[J]. Natural Hazards, 2013, 66(2): 1205-1220.
- [18] 冯平,崔广涛,钟昀.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 P, Cui G T, Zhong Y. On the evaluation and prediction of urban flood economic loss[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(8): 64-68. (in Chinese)
- [19] 李红英.基于GIS的洪灾损失评估研究:以黑河为例[D].西安:西安理工大学,2007.
Li H Y. Flood damage loss assessment based on GIS-For heihe as an example[D]. Xi'an : Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [20] 李汉浸,王运行,张相梅,等.濮阳高新区洪灾城市经济损失评估[J].气象,2009,35(1):97-101.
Li H J, Wang Y H, Zhang X M, et al. Economy loss assessment of flood disaster in Puyang of Henan [J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(1): 97-101. (in Chinese)
- [21] 王营.城乡洪灾淹没损失分析方法研究[D].大连:大连理工大学,2012.
Wang Y. Research on flood loss analysis method of city and country side [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [22] Wu X H, Zhou L, Gao G, et al. Urban flood depth-economic loss curves and their amendment based on resilience: evidence from Lizhong Town in Lixia River and Houbai Town in Jurong River of China[J]. Natural Hazards, 2016, 82(3): 1981-2000.
- [23] 《城市防洪规划规范》:GB 51079—2016[S].北京:中国计划出版社,2016.

(本文编辑:赵霞)



(上接第 771 页)

- [14] 苗展堂.微循环理念下的城市雨水生态系统规划方法研究[D].天津:天津大学,2013.

Miao Z T. Study on the planning method of urban rainwater ecosystem based on microcirculating concept[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)