

栅格尺度的流域洪涝韧性与洪涝风险分区研究

王好芳, 张玮珂, 陈怡馨, 赵然杭, 张金存

(山东大学土建与水利学院)

摘要:为准确识别洪涝韧性与风险的空间分布特征并划定洪水管理分区,构建了泮河流域大河水库下游 MIKE FLOOD 水文-水动力耦合模型,引入系统性能函数计算栅格尺度的洪涝韧性,开展了超标准洪水下的洪涝韧性与洪涝风险分区研究。结果表明:综合考虑栅格单元的淹没水深、淹没流速及土地利用类型的系统性能函数能更真实地反映流域系统承受洪涝扰动的能力,基于该系统性能函数评估的洪涝韧性结果更为科学合理;研究区洪涝韧性呈现显著的空间异质性,整体表现为上游高、下游低的空间分布特征,且与土地利用类型存在显著相关性,相关系数大小依次为草地、林地、耕地、道路、建设用地;研究区洪涝风险呈左岸高、右岸低的空间分布特征,随着洪水频率的减小,高风险栅格和较高风险栅格占比逐渐增大,中风险栅格占比先增后减,低风险栅格占比不断减小;基于洪涝韧性-风险耦合分析,识别出 4 类典型分区,包括高韧性-低风险区(河道顺直且地势平缓段)、低韧性-低风险区(中下游城镇化区)、低韧性-高风险区(河道弯曲段及支流汇入段)、高韧性-高风险区(河道急弯段及断面收缩段)。

关键词:MIKE FLOOD 耦合模型;洪涝韧性;洪涝风险;洪涝韧性-风险分区;大河水库;泮河流域

Research on flood resilience and flood risk zoning in river basin at grid cell scale//Wang Haofang, Zhang Yike, Chen Yixin, Zhao Ranhang, Zhang Jincun(*School of Civil Engineering, Shandong University*)

Abstract: To accurately identify the spatial distribution characteristics of flood resilience and risk and delineate flood management zones, a MIKE FLOOD hydrodynamic-hydraulic coupled model for the downstream of the Dahe Reservoir in the Pan River Basin was constructed. A system performance function was introduced to calculate the flood resilience of each grid cell, and the study on flood resilience and flood risk under extreme floods was conducted. The results show that the system performance function, which comprehensively considers the inundation depth, inundation velocity, and land use type of each grid cell, can more accurately reflect the ability of the basin system to withstand flood disturbances. The flood resilience results evaluated based on this system performance function are more scientific and reasonable. The flood resilience in the study area shows significant spatial heterogeneity, generally presenting a pattern of high in the upstream and low in the downstream, and has a significant correlation with land use types, with the order of correlation being grassland, forest land, cultivated land, road, and construction land. The flood risk in the study area shows a spatial distribution pattern of high on the left bank and low on the right bank. As the frequency of floods decreases, the proportions of high-risk grids and relatively high-risk grids gradually increase, the proportion of medium-risk grid cells first increases and then decreases, and the proportion of low-risk grid cells continuously decreases. Based on the coupled analysis of flood resilience and risk, four typical zones were identified: high resilience-low risk zone (straight river sections with gentle terrain), low resilience-low risk zone (urbanized areas in the middle and lower reaches), low resilience-high risk zone (bendy river sections and confluence sections of tributaries), and high resilience-high risk zone (sharp bend sections and sections with contracted cross-sections).

Key words: MIKE FLOOD coupling model; flood resilience; flood risk; flood resilience-risk zoning; Dahe Reservoir; the Pan River Basin

伴随气候变化问题日益严峻与城市发展持续加速,极端降雨事件呈现频发态势^[1],如何应对城市化发展与极端气候条件对流域防洪减灾的影响,已成为洪灾风险管理领域的研究热点^[2]。当前洪涝灾害管理的研究多聚焦于洪水预报预警及洪涝风险评估方面^[3],而对于流域遭遇暴雨洪水事件后恢复

基金项目:山东省智库高端人才成果研究转化项目(2022);山东省科学技术厅引智项目(20199748)
作者简介:王好芳(1970—),女,副教授,博士,主要从事生态水文与生态调度研究。E-mail:whf29@sdu.edu.cn
通信作者:张金存(1977—),女,讲师,博士,主要从事分布式水文模型研究。E-mail:zhangjincun@sdu.edu.cn

能力的研究尚处于起步阶段。为全面评估流域遭遇极端暴雨后的洪涝风险及恢复能力,精准识别防洪功能薄弱区域,定量探究流域对洪涝灾害的抵御与恢复能力至关重要^[4]。因此,亟须将洪涝韧性的概念引进洪涝灾害管理体系之中,通过量化方法探求流域在极端暴雨条件下的抗灾与恢复性能,对于定量评估流域的脆弱性和韧性、促进流域可持续发展具有重要意义。

韧性是指系统抵抗扰动与恢复原状的一种能力属性。1961年,Holling^[5]在研究生态种群时首次将韧性概念引入生态学,将其定义为系统吸收干扰并维持原有状态的能力,通过系统转换到不同状态前可能经历的扰动程度来衡量,最终形成了生态韧性理论。Mileti^[6]最早从灾害学视角阐释韧性概念,将其定义为系统遭遇重大自然灾害时的容许损失阈值。由于洪水受气候变化、植被覆盖和人类活动等多重不确定因素共同作用,韧性概念逐渐被引入洪涝风险研究,为洪灾管理体系建设和促进流域可持续发展提供了新视角。21世纪以来,韧性思想被广泛应用于洪涝风险研究领域。2012年,Liao^[7]创新性地提出了洪涝韧性的概念,将其定义为系统对洪水冲击的承受能力以及系统在遭受自然环境与社会经济冲击后的自我修复能力。Mugume等^[8]提出了一种基于系统性能曲线的韧性量化方法,采用总洪量和平均洪水历时评估城市排水系统失效后的剩余功能。目前洪涝韧性评估已从定性分析逐步演变为对洪涝韧性的定量计算和多维度指标体系评价两个方向^[9]。定量分析主要聚焦于系统对洪灾的抵抗、适应及恢复能力^[10],并逐步发展为基于系统性能函数的洪涝韧性计算^[11];指标体系评价则融合自然、社会、技术等多维因素构建评价体系,包括社会-经济-自然模型^[12]、压力-状态-响应模型^[13]、抵抗力-适应力-恢复力模型^[14]等。总体来说,指标体系评价主要适用于城市群等大空间尺度的系统评估,而系统性能曲线法通过分析灾害影响及系统响应客观揭示系统内部的韧性变化^[15],主要应用于城市汇水片区等小流域尺度的洪涝韧性量化研究。

现有研究表明,基于系统性能函数的洪涝韧性评估通常仅关注淹没水深的影响^[16],但水深阈值的设定往往高度依赖决策者主观判断,其不同取值对流域洪涝韧性的计算结果影响显著。随着城市化进程的快速发展,淹没流速对城市系统构成的威胁日益突出。Xia等^[17]的研究指出,即使地表水深较浅,若水流流速较高,也可能导致行人站立不稳或机动车发生倾覆。此外,洪水风险管理研究呈现从中宏观尺度向微观尺度延伸的趋势,但当前关于洪水风

险的研究多以区域为研究单元,基于栅格单元的精细化研究仍显不足,这在一定程度上制约了洪水风险的精细化管理。因此,本文在综合考虑栅格单元淹没水深和土地利用类型的前提下,进一步纳入淹没水流速对城市洪涝韧性的影响,相较于受水深阈值影响的传统流域洪涝韧性评估,所选用的系统性能评估模型更能差异化表征不同区域对洪灾的抵抗与恢复能力。

大河水库位于泮河上游,其下游河段贯穿泰安东西,其对洪灾的抵御能力和灾后恢复能力对泰安城区发展具有重要作用。大河水库设计标准为100年一遇,校核标准为1000年一遇,而泮河设计标准为50年一遇,当水库下游河段发生超标准洪水时,将给下游造成毁灭性的冲击和特大灾难。鉴于此,选取大河水库下游为研究区,基于高分辨率的DEM高程数据和土地利用数据构建MIKE FLOOD耦合模型,将韧性概念引入流域防洪减灾领域,利用系统性能函数对栅格的洪涝韧性进行量化,并基于水动力模型采用综合风险度方法进行洪涝风险分区,揭示流域内超标准洪水下的洪涝韧性与洪涝风险的耦合分布特征,以期类似流域的防洪减灾及安全路线转移的制定提供决策依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

大河水库位于泮河流域上游,控制流域面积为85.53 km²,库容2 997万 m³,从大河水库溢洪道至大汶河河口长25.5 km。泮河为大汶河的一级支流,起源于泰山西麓桃花峪,经大河水库,先后纳入七里河、凤凰河、奈河、梳洗河、明堂河等支流,在东子店汇入大汶河。泮河流域地势北高南低,面积368 km²,大河水库下游面积为282.47 km²,具体位置见图1。研究区多年平均年降水量为695.6 mm,年际变化较大,年最大降水量为1 296 mm(1990年),年最小降水量为341 mm(1989年),相差3.8倍。随着极端天气频发和城市化发展,研究区所面临的洪涝风险不断上升,开展流域尺度的洪灾韧性-风险定量研究,对于识别防洪薄弱环节、优化防灾减灾资源配置具有重要的实践价值。

1.2 数据来源

DEM高程数据获取自NASA地球科学数据中心(<https://nasadaacs.eos.nasa.gov/>),并根据建筑物、河道等地物信息对高程数据进行修正;河道及断面数据来源于泰安市大河水库管理服务中心收集的河道测绘资料,通过遥感影像对其修正,保留主干河道,调整河道走向,补充断面信息;土地利用数据来源

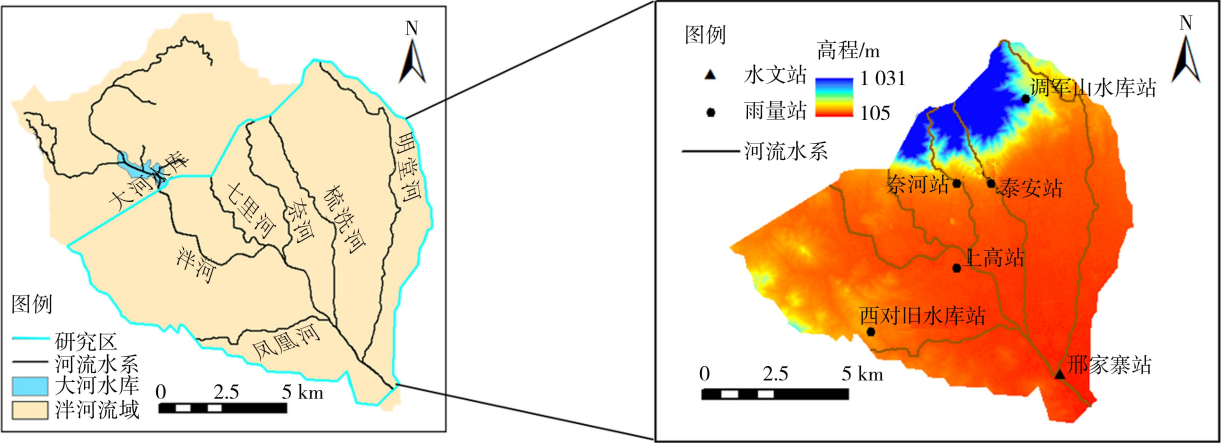


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

于中国科学院空天信息创新研究院发布的 2020 年全球 30 m 精细分类产品 (<http://data.casearth.cn/sdo/detail/5fbc7904819aec1ea2dd7061>), 通过 Arcgis 对研究区的土地利用类型进行整理和重分类; 降雨径流资料来源于山东省水文和山洪灾害监测预警平台的雨量站监测数据。

2 研究方法

2.1 水文-水动力模型

基于 MIKE FLOOD 构建水文-水动力模型^[18], 由 3 个核心模块组成: ①RR 降雨径流模块基于 NAM 集总式水文模型模拟流域尺度降水-径流转化过程, 生成的径流量以旁侧入流汇入河网模型; ②MIKE 11 一维水动力模块通过求解不可压缩流体圣维南方程组, 模拟河道内水流运动特征; ③MIKE 21 二维水动力模块采用非恒定流有限体积法, 计算洪泛区水体的时空演变规律。MIKE FLOOD 是一个将 NAM 模型、MIKE 11 和 MIKE 21 动态耦合的平台, 能有效地模拟水从河道漫流到洪泛区的运动。

基于高分辨率的 DEM 数据和土地利用数据, 通过拟定地表糙率等参数和初始边界条件构建研究区 MIKE FLOOD 耦合模型。利用 NAM 模型模拟的流量作为河道上边界条件, 利用曼宁公式推求下游出口断面的水位-流量关系。经过 MIKE11 河网概化, 研究区构建的河网包括 6 条河道, 共布设 33 个典型断面; MIKE 21 地表漫流模型的构建范围为大河水库下游河道, 经过网格局部加密和精细化处理, 最终生成二维模型的栅格节点数量为 21 350, 栅格数为 40 577, 如图 2 所示。基于收集的降雨径流资料, 筛选出 20230712、20230722、20230726 场次降雨径流过程用于参数率定, 20230730、20230821 场次降雨径流过程用于模型验证。邢家寨水文站的模拟结果

表明, 率定期 3 场洪水的洪峰流量相对误差分别为 12. 14%、9. 92% 和 9. 52%, 峰现时差均在 1. 0 h 以内, 确定性系数分别为 0. 959、0. 938 和 0. 882; 验证期 2 场洪水的洪峰流量相对误差分别为 2. 33% 和 -8. 31%, 峰现时差均在 0. 5 h 以内, 确定性系数为 0. 967 和 0. 965。参照《水文情报预报规范》, 构建的 MIKE FLOOD 模型拟合度较高, 符合精度要求, 可用于研究区的洪水演进模拟研究。

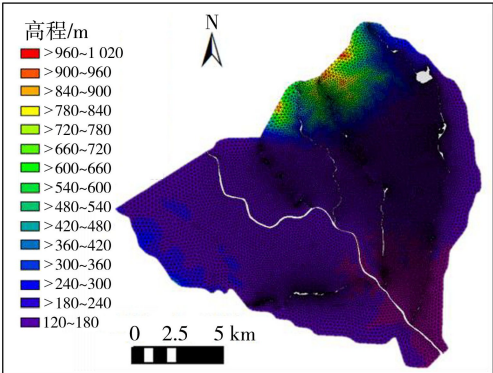


图 2 研究区栅格

Fig. 2 Grids of study area

2.2 洪涝韧性计算

洪涝韧性计算一般基于系统性能函数进行, 图 3 为系统性能函数示意图(图中 p_t 为系统性能, t_s 为系统性能开始减小的时间, t_{ps} 为系统性能减小到最小值的时间, t_{pe} 为系统开始恢复的时间, t_e 为系统恢复正常运行的时间, t_n 为洪水结束时间)。计算方法主要有两种: 一种以栅格单元淹没水深随时间的变化为自变量计算系统性能与洪涝韧性^[11], 不考虑淹没流速及土地利用类型的影响; 另一种综合考虑淹没水深、淹没流速及土地利用类型等因素, 通过危险度阈值法对流域洪涝韧性进行评估^[19]。后者考虑因素更为全面, 计算结果更为客观合理, 故本文采用后者进行洪涝韧性评价。利用危险度^[20] 表征

洪涝韧性,计算公式为:

H_{Ri,t}=d_{i,t}(v_{i,t}+0.5)+D_{Fi} \tag{1}

式中： $H_{Ri,t}$ 为 t 时刻栅格 i 的危险度； $d_{i,t}$ 为 t 时刻栅格 i 的淹没水深； $v_{i,t}$ 为 t 时刻栅格 i 的淹没流速； D_{Fi} 为栅格 i 的灾害附加系数^[19]，反映漂浮物、泥石流等加剧风险的程度，与土地利用类型、淹没水深 d 、淹没流速 v 有关，具体取值见表 1。

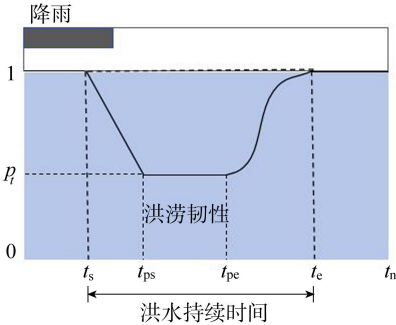


图 3 系统性能函数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of system performance function

表 1 不同土地利用类型的灾害附加系数

Table 1 Disaster additional coefficients for different land use types			
条件	草地/耕地	林地	建设用地/道路
$0 \leq d < 0.25\text{ m}$	0	0	0
$0.25\text{ m} \leq d < 0.75\text{ m}$	0	0.5	1
$d \geq 0.75\text{ m}$ 或 $v \geq 2\text{ m/s}$	0.5	1	1

参考 Abbasnejadfar 等^[21]的研究,当危险度小于 0.75 时洪水对周围环境无威胁,当危险度超过 2.5 则威胁显著提升,且洪涝威胁程度随危险度值升高而加剧。因此,将 0.75 与 2.5 设定为系统性能阈值,系统性能计算公式为:

p_{i,t} = \begin{cases} 1 & 0 \leq H_{Ri,t} < 0.75 \\ (2.5 - H_{Ri,t}) / 1.75 & 0.75 \leq H_{Ri,t} < 2.5 \\ 0 & H_{Ri,t} \geq 2.5 \end{cases} \tag{2}

式中： $p_{i,t}$ 为 t 时刻栅格 i 的系统性能值。

当前洪涝韧性评估普遍采用系统性能函数与时间坐标轴所围面积进行量化,但不同系统在性能损失幅度与恢复路径存在显著差异的情况下,仍可能得到相同的积分结果,受扰时长更短的系统理应具有更高韧性,该方法却无法有效区分,导致评估结果与客观实际相悖^[21]。鉴于此,在考虑淹没时段内系统性能动态演变的同时,引入系统性能受洪涝灾害影响的时间长度(D_p)这一参数^[22],进而得到洪涝韧性的计算公式:

R_{fi} = \left(\frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} p_{i,t} dt \right) \frac{D_{Pi}}{t_n} \tag{3}

其中

D_{Pi} = t_e - t_s

式中： R_{fi} 为栅格 i 的洪涝韧性； D_{Pi} 为栅格 i 的系统性能受洪涝灾害影响的时间长度。

2.3 洪涝风险评价

洪涝风险是指洪涝灾害事件发生的可能性及其对流域系统和人类社会所产生的可能影响或不利后果^[23]。洪涝风险评价主要包括两类研究路径:一类是通过综合分析致灾因子危险性、承灾体脆弱性及孕载环境暴露度来判定风险水平^[24],这类方法通常将社会经济、自然环境、资产分布等因素纳入风险指标体系,采用模糊层次分析法^[25]、模糊综合评价法^[26]等进行评价,但这类方法存在主观性,物理机制较弱;另一类是依托水文水动力模型模拟不同频率洪水的淹没水深、淹没流速等关键水力参数,并基于模拟结果采用综合风险度法^[27]等定量计算洪涝灾害事件发生的风险^[28],这类方法机理明确,能有效规避人为主观因素的干扰。因此,本文采用后者进行洪涝风险评价。

根据凸风险度量原理和期望理论^[29],考虑最大淹没水深、最大行进流速和最大淹没历时 3 个关键因素,选取当量水深衡量特定频率洪水下的风险程度。当量水深指物体在流体流动过程中受到的阻力与其在相同流体中自由落体受到的重力相等时的水深,计算公式见式(4)。进而得到综合风险度^[30],计算公式见式(5)。参考《洪涝风险区划技术导则(试行)》,基于综合风险度将洪涝风险划分为 4 个等级:0~<0.15 为低风险、0.15~<0.5 为中风险、0.50~<1 为较高风险、≥1 为高风险。

H = \alpha_1 \alpha_2 h \tag{4}

R = \frac{1}{2} \sum_k (P_k - P_{k+1}) (H_k + H_{k+1}) \tag{5}

其中 \alpha_1 = \begin{cases} 1.0 & v < 1.5\text{ m/s} \\ 1.2 & 1.5\text{ m/s} \leq v < 3.0\text{ m/s} \\ 1.5 & v \geq 3.0\text{ m/s} \end{cases}

\alpha_2 = \begin{cases} 1.0 & T < 3\text{ d} \\ 1.2 & 3\text{ d} \leq T < 7\text{ d} \\ 1.5 & T \geq 7\text{ d} \end{cases}

式中： H 为当量水深； α_1 为最大行进流速修正系数； α_2 为最大淹没历时修正系数； h 为最大淹没水深； T 为洪水持续时间； R 为综合风险度； P_k 为洪水频率， k 为 1、2、3 分别对应频率为 1%、0.2%、0.1%； H_k 为 P_k 所对应的当量水深。

2.4 洪涝韧性-风险分区划分

基于 Z-score 标准化理论^[31]对受淹栅格的洪涝韧性和洪涝风险进行标准化,横轴为栅格的洪涝韧性值,纵轴为栅格的洪涝风险值,4 个象限则代表 4

类分区：Ⅰ象限为高韧性-高风险、Ⅱ象限为低韧性-高风险、Ⅲ象限为低韧性-低风险、Ⅳ象限为高韧性-低风险。

3 结果与分析

研究区的设计洪水标准为 50 年一遇,为评估极端暴雨洪水对研究区的影响程度,选取频率 P 分别为 1%、0.2%、0.1% 暴雨洪水进行风险评估。根据研究区的降雨洪水特性,参考《泰安市防洪规划》,选取研究区 24 h 降水量分别为 322.01、419.13、460.06 mm 的设计暴雨,时程分配采用泰沂山北三日雨型的第三天分配比确定,依据《泰安市大河水水库汛期调度运用计划》中大河水水库遭遇同频率洪水时的下泄流量过程,利用已构建的 MIKE FLOOD 模型,模拟研究区频率分别为 1%、0.2%、0.1% 的洪水演进过程,分析洪水淹没情况。

3.1 洪水淹没情况

3.1.1 不同频率洪水最大淹没水深

图 4 为不同频率洪水最大淹没水深的空间分布。从空间分布格局来看,最大淹没水深主要分布于地势低洼且坡度平缓地带,符合区域地形地势的

整体特点。当频率为 1% 时,洪水主要集中于中游河段,最大水深出现在主河道区域,下游未发生明显淹没;当频率为 0.2% 时,上游河段中心区出现 4.5 m 的极值水深,中游区域出现 2.5~4.0 m 的淹没水深,河流末端淹没较浅;当频率为 0.1% 时,淹没范围达到最大值,上游水深超过 2 m 的区域进一步扩大。

3.1.2 不同频率洪水最大淹没流速

图 5 为不同频率洪水最大淹没流速的空间分布,可见最大淹没流速沿河道两侧整体呈带状分布,靠近河道两侧淹没范围内的流速较大。随着洪水频率的减小,洪水漫溢区域的水流动能显著增强,导致下游洪水演进速度明显加快。具体而言,当频率为 1% 时,上游区域的最大淹没流速分布在 0.2~0.42 m/s 范围,而中游部分区域流速值高于 0.45 m/s,流速分布主要受上游河道宽浅、进入中游河段后河道缩窄影响;当频率为 0.2% 时,上游区段大部分区域最大淹没流速超过 0.8 m/s,中游区段维持在 0.4~1.8 m/s 范围,下游区段低于 0.8 m/s;当频率为 0.1% 时,上游区段最大淹没流速大多高于 1 m/s,主河道的局部区域甚至出现 2 m/s 以上的高

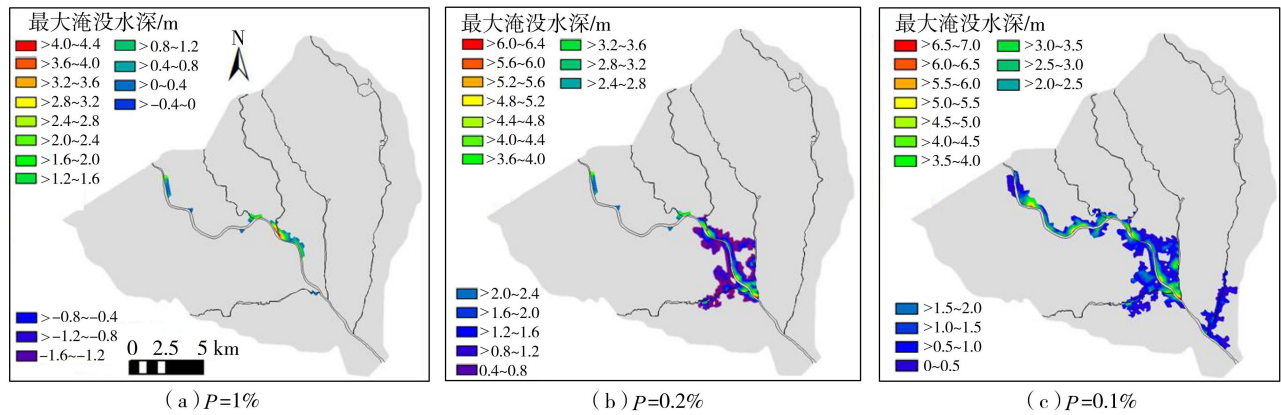


图 4 不同频率洪水最大淹没水深的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of maximum flood inundation depths at different frequencies

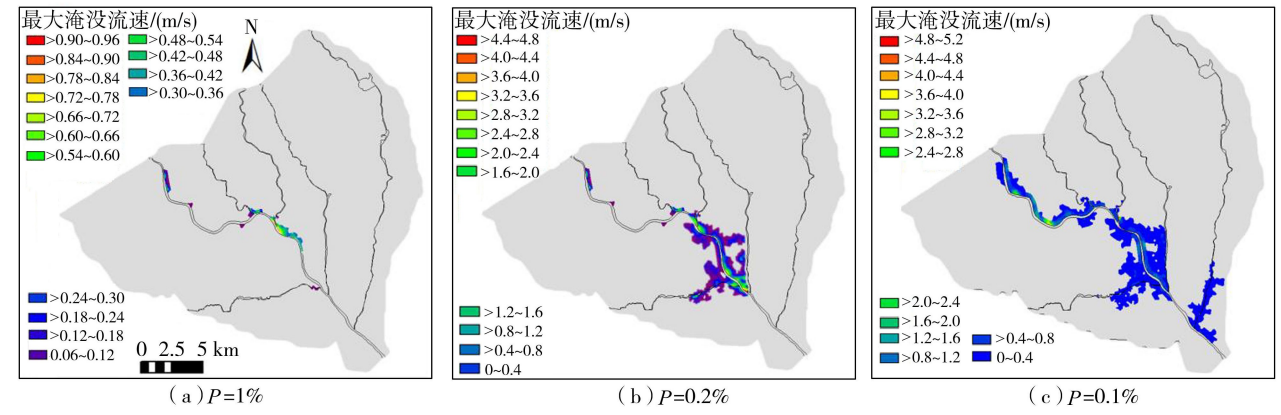


图 5 不同频率洪水最大淹没流速的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of maximum flood inundation flow velocities at different frequencies

流速区,中游在河道发生突变,尤其是断面急剧收缩和河流弯道处,局部水流流速明显增大,下游大部分漫溢区域最大流速不超过 1.2 m/s。

3.2 洪涝韧性

图 6 为不同土地利用类型的系统性能。由图 6 可见,随着洪水频率的减小,不同土地利用类型的系统性能均呈现降低趋势,表明洪水灾害能削弱流域系统性能的稳定性的。建设用地和道路的系统性能在不同频率洪水下变化最为显著,同一频率的洪水下,其最小性能值与其他土地利用类型相比处于较低水平,主要原因在于草地、林地等绿化用地具备良好的自我调节能力,可有效缓解洪涝对其系统性能的不利影响。另外,随着洪水频率的减小,不同频率洪水下各土地利用类型的 D_p 均呈增长趋势。草地、林地及耕地等绿化用地在不同频率洪水下 D_p 值相近且差异较小,说明其受洪涝影响时长基本一致。建设用地和道路的 D_p 大于其他土地利用类型,表明建设用地和道路受洪涝影响后,从系统功能受损恢复至原有性能较其他土地利用类型更为困难、耗时。

基于系统性能函数计算出各栅格的洪涝韧性值,结果如图 7 所示,频率为 1%、0.2%、0.1% 的洪涝韧性的范围分别为 0.85~0.95、0.79~0.93、0.76~0.92。当频率为 1% 时,研究区整体表现出较强的洪水适应能力,流域系统尚能满足排涝需求,洪涝韧性薄弱区集中于泮河中游及左岸洼地;当频率

为 0.2% 时,研究区的洪涝韧性值呈现普遍衰减,此时部分区域已接近防洪能力的临界点,流域系统面临失效弹性;当频率为 0.1% 时,河道行洪能力远超设计防洪标准,导致洪涝韧性指数明显降低,淹没范围内大部分区域已逼近其洪灾承载力阈值。

由于研究区的不同区域地形、地貌和土地利用类型具有明显差异,致使洪涝韧性在空间分布上具有显著异质性,整体上呈现上游大于下游的特征。研究区上游的洪涝韧性值范围为 0.86~0.98,下游洪涝韧性的范围为 0.62~0.79,主要原因在于上游区域的比降较大,洪水一旦形成将快速流至下游,故上游具有较强的洪水抵御及恢复能力。由于上游来水和河道漫溢洪水的叠加,下游的洪涝韧性相对较小,即遭遇洪水袭击后的恢复能力较差。此外,研究区下游也存在洪涝韧性较高的区域,主要因为该地区地形起伏及平均坡度较大,且植物覆盖率相对较高,因此对超标准洪水具有较高的抵御及恢复能力。

对于不同的土地利用类型,洪涝韧性随洪水频率的减小呈显著递减规律,并表现出差异化的响应特征。具体表现为:频率分别为 1%、0.2%、0.1% 时,自然覆被类型(草地、林地)维持较高韧性值(草地为 0.95、0.93、0.92;林地 0.93、0.91、0.89),而人工地表(建设用地为 0.85、0.79、0.76;道路为 0.86、0.83、0.79)韧性衰减更为显著。当频率为 0.1% 时,草地、林地、耕地、道路、建设用地的洪涝韧

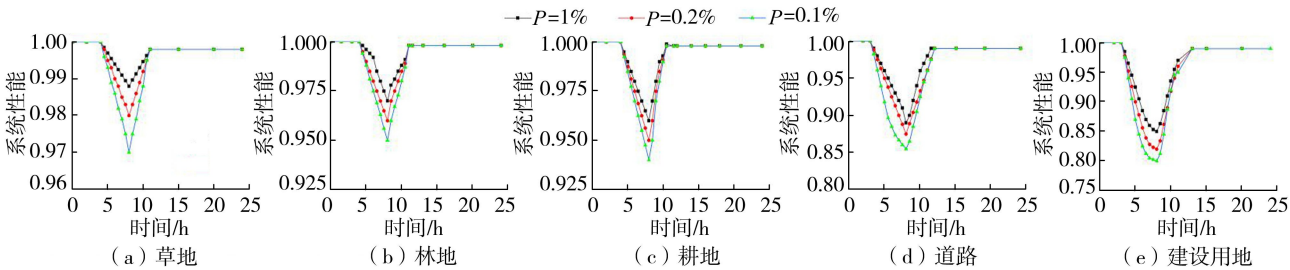


图 6 不同土地利用类型的系统性能

Fig. 6 System performance of different land use types

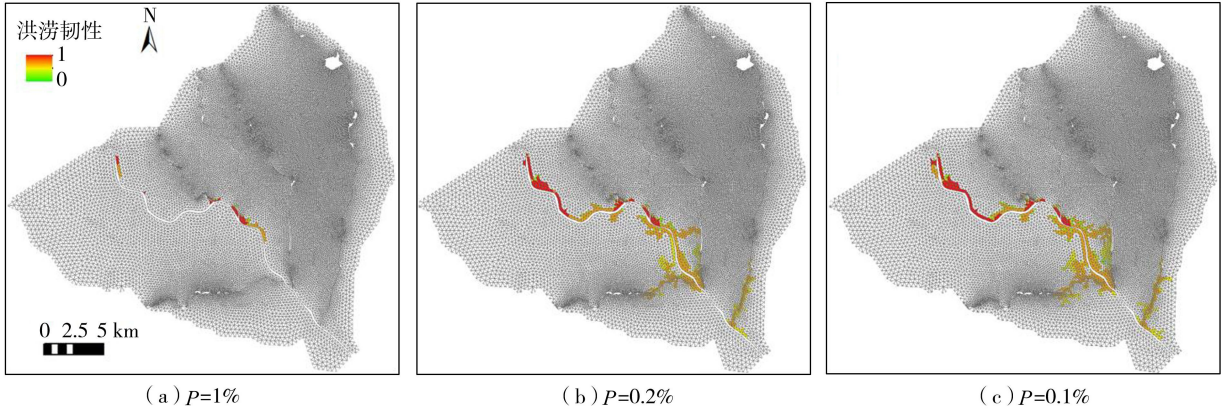


图 7 不同频率洪涝韧性计算结果

Fig. 7 Flood resilience calculation results at different frequencies

性逐渐降低,分别为 0.92、0.89、0.88、0.79、0.76。为分析土地利用类型对洪水灾害的敏感程度,计算其在不同频率下的洪涝韧性指标的标准差,道路和建设用地的洪涝韧性标准差分别为 0.03 和 0.04,草地、林地、耕地的洪涝韧性标准差分别为 0.01、0.02、0.02,可见人工地表对洪涝韧性的敏感性显著高于自然地表。这种差异主要源于不同土地利用类型的生态水文特性,自然地表的生物种类和覆盖类型丰富,具备较好的洪水拦截和渗透吸收能力;耕地是由人类创造的土地利用类型,植被覆盖类型较为单一,对于超标准洪水的抵御能力低于草地和林地;道路、建设用地由于不透水面积比例高、地表糙率低等特性,导致其水文调节功能严重退化。

3.3 洪涝风险等级

表 2 为不同洪涝风险等级的栅格数量及占比。随着洪水频率的减小,总的受淹栅格数量逐渐增多,但不同洪涝风险等级的栅格占比变化情况存在显著差异。随着洪水频率的减小,高风险栅格和较高风险栅格占比逐渐增大,中风险栅格占比先增大后减小,低风险栅格占比逐渐减小。主要原因在于随着洪水频率的减小,漫溢区域的洪水能量更强,下游洪水演进速度和最大淹没水深逐渐增大,此时低风险转变为更高等级的风险。基于综合风险度计算,当洪水最大行进流速处于 1.5~3.0 m/s 或最大淹没历时为 3~7 d 时,相应的修正系数 α_1 、 α_2 均取 1.2,导致不同风险等级间的转化阈值存在差异:低风险向中风险转化的阈值较低,因此在较高洪水频率范围内即发生显著转化;而中风险向较高风险转化需同时满足流速和历时阈值,其转化过程相对滞后。随着洪水频率持续减小,低风险继续转化为中风险,由于中风险栅格数量逐步增加,达到较高风险转化标准的栅格数量显著增加,其转化速率甚至超过低风险转化速度,导致中风险栅格占比出现小幅下降;较高

风险则大量转化为高风险,但暂未超过中风险向较高风险的转化速率,使得较高风险和高风险的栅格占比呈现持续增长趋势。

表 2 不同洪涝风险等级的栅格数量及占比

Table 2 Number and proportion of grids at different flood risk levels						
等级	栅格数量			占比/%		
	$P=1\%$	$P=0.2\%$	$P=0.1\%$	$P=1\%$	$P=0.2\%$	$P=0.1\%$
低风险	89	745	921	77.39	60.62	58.89
中风险	19	307	374	16.52	24.98	23.91
较高风险	6	130	196	5.22	10.58	12.53
高风险	1	47	73	0.87	3.82	4.67

图 8 为研究区洪涝风险等级的空间分布。受桥墩等水工建筑物阻碍河道行洪及居民依河而居等因素影响,研究区洪涝风险等级的空间分布具有明显差异。不同风险等级沿河道两侧整体呈带状分布,且呈现左岸高、右岸低的空间分布特征。靠近河道两侧淹没范围内的风险等级较高,较高风险和高风险主要集中于泮河中游河道发生突变处,符合区域地形地势的整体特点。

3.4 洪涝韧性-风险分区

表 3 为不同洪涝韧性-风险分区的栅格数量及占比。从总体上看,落入Ⅲ、Ⅳ象限栅格数量最多,表明研究区大部分区域为高韧性-低风险和低韧性-低风险,其次是低韧性-高风险,分布最少的是高韧性-高风险。随着洪水频率的减小,高韧性-高风险、低韧性-高风险和低韧性-低风险的栅格数量占比逐渐升高,而高韧性-低风险的栅格占比逐渐降低。频率为 0.1% 时,Ⅳ象限栅格数量占受淹栅格总数的 42.90%,表明这类分区内栅格在经受暴雨袭击时性能良好,即系统功能受暴雨干扰所带来的影响相对较小。Ⅱ象限栅格数量占比约为 19.88%,表明这类分区栅格的洪涝风险较大且洪涝韧性较低,即栅格的系统功能遭遇暴雨干扰后将受

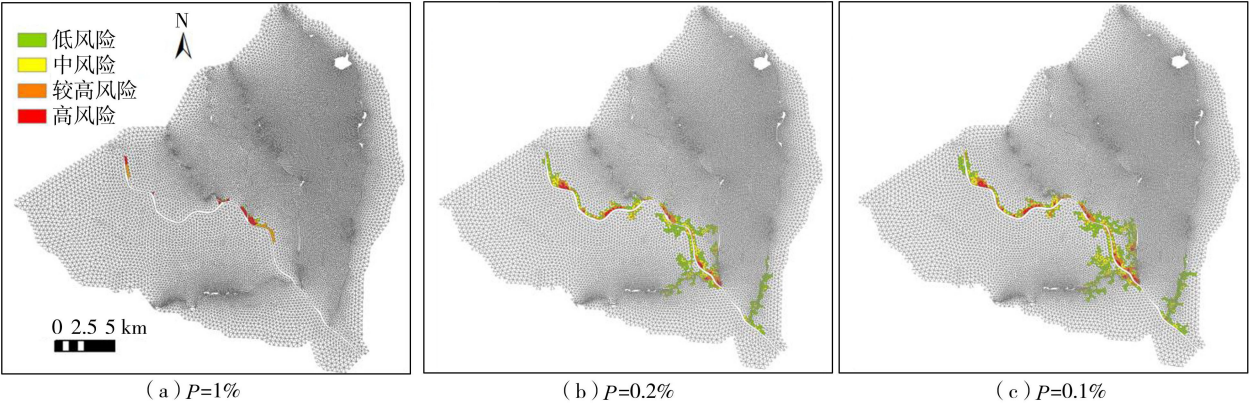


图 8 不同频率洪涝风险等级的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of flood risk levels at different frequencies

到严重影响。此外, I 和 III 象限面积占比分别为 6.59% 和 30.63%。

表 3 不同洪涝韧性-风险分区的栅格数量及占比
Table 3 Number and proportion of grids in different flood resilience-risk zones

分区	栅格数量			占比/%		
	$P = 1\%$	$P = 0.2\%$	$P = 0.1\%$	$P = 1\%$	$P = 0.2\%$	$P = 0.1\%$
高韧性-高风险	4	58	103	3.48	4.72	6.59
低韧性-高风险	15	226	311	13.04	18.39	19.88
低韧性-低风险	29	359	479	25.22	29.21	30.63
高韧性-低风险	67	586	671	58.26	47.68	42.90

图 9 为不同频率下洪涝韧性-风险分区的空间分布,可见 4 种分区在空间分布和形成机制上具有显著异质性。高韧性-高风险区呈零散分布格局,主要集中于泮河河道急弯段及断面收缩段,土地利用类型以草地和耕地为主,系统具有较强的自我调节能力;但由于毗邻河道且地势低洼,极易遭受高流速冲刷及临界水深影响发生漫溢。低韧性-高风险区集中分布于河道中游弯曲段及支流汇入段,其形成机制具有明显的流体动力学特征:①弯道外侧因水流加速导致侵蚀加剧,岸坡稳定性显著降低;②弯道内侧流速减缓引发泥沙淤积,河床抬升效应明显;③支流交汇处水流相互作用形成复杂的紊流结构。这些水动力过程共同作用使得该类区域既面临较高的洪水威胁,又因频繁的水力扰动而恢复能力受限。低韧性-低风险区聚集于中下游城镇化区域,该类区域地势平坦且远离河岸,极大削弱了洪水动能传递,故洪涝风险较低;但建设用地扩张等高强度的人类活动导致植被覆盖锐减,地表透水性下降,严重削弱了系统的水文调节能力。高韧性-低风险区广泛分布于河道顺直且地势平坦区域,该类区域植被覆盖率高,人类经济活动较不频繁,系统内部能进行高效的自我调节与修复,从而使得其洪涝韧性水平较高、洪涝风险水平较低。上述分区结果揭示了洪水

形成机制的空间异质性,为流域差异化风险管理提供了科学依据,特别是在气候变化加剧和快速城市化背景下,应着重关注各类分区之间的空间分布及驱动机制。

4 结 论

基于 MIKE FLOOD 水文-水动力耦合模型、洪涝韧性评价模型和洪涝风险评价模型构建了一套洪涝韧性-洪涝风险综合评价模型,以泮河流域大河水库下游河段为研究区,将系统性能函数应用于栅格尺度的洪涝韧性计算,并基于 Z-score 标准化方法进行了超标准洪水下的洪涝韧性-风险分区。得到以下结论:

- a. 突破单一淹没水深指标的局限性,综合考虑栅格单元的淹没水深、淹没流速、土地利用类型的系统性能函数能较好地解决单一水深指标产生的洪涝韧性偏差问题,使评价结果更为合理。
- b. 研究区上游洪涝韧性(0.86~0.98)显著高于下游(0.62~0.79),形成明显的上下游梯度变化。洪涝韧性与土地利用类型显著相关,相关系数由大到小依次为草地、林地、耕地、道路、建设用地。
- c. 研究区不同等级风险区沿河道两侧呈带状分布,整体上呈左岸高、右岸低的空间分布特征,符合区域地形地势的整体特点。随着洪水频率的减小,各等级风险栅格占比呈现规律性演变:高风险和较高风险持续增大,中风险先增后减,低风险持续减小。
- d. 研究区洪水韧性-风险分区的栅格占比及空间分布存在显著异质性:高韧性-低风险区占比最大(42.46%~56.52%),广泛分布于河道顺直且地势平缓区域;低韧性-低风险区(26.96%~31.07%)和低韧性-高风险区(13.04%~19.69%)次之;高韧性-高风险区占比最小(3.48%~6.78%),零散分布于河道急弯段及断面收缩段等特殊地形区域。

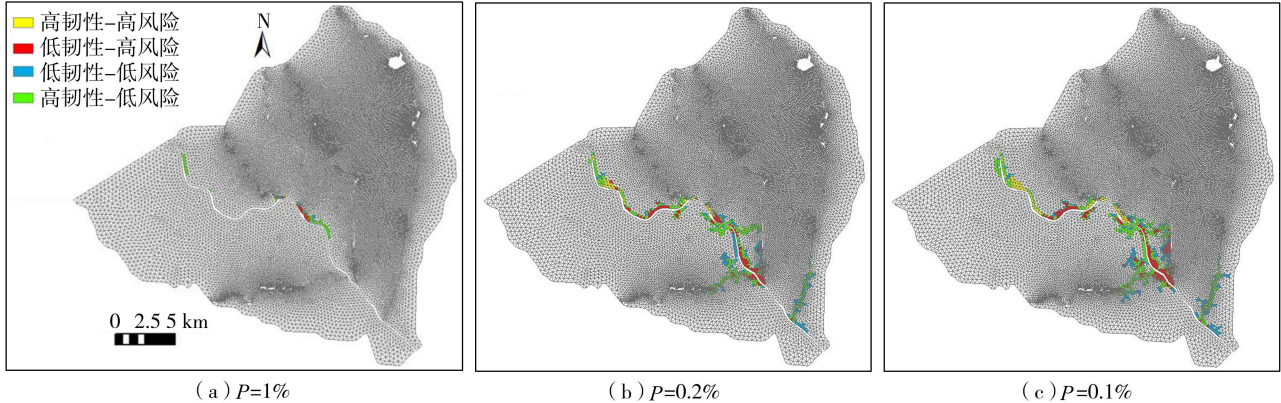


图 9 不同频率洪涝韧性-风险分区的空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of flood resilience risk zoning at different frequencies

参考文献:

[1] 刘家宏,宋天旭,梅超,等. 利比亚德尔纳 2023 年极端洪水模拟复盘分析[J]. 水利学报,2024,55(6):723-734. (Liu Jiahong, Song Tianxu, Mei Chao, et al. Retrospective simulation and analysis of 2023 extreme flood in Derna, Libya [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(6):723-734. (in Chinese))

[2] Jing Wenxia, Song Yinghua, Lyu Wei, et al. Risk assessment of flood disasters with multi-source data and its spatial differentiation characteristics [J]. Sustainability, 2025,17(15):7149.

[3] 李红艳,郝景开,刘大为,等. 基于元启发式算法优化的新乡市洪水风险评价[J]. 水资源保护,2024,40(6):104-112. (Lin Hongyan, Hao Jinkai, Liu Dawei, et al. Flood risk assessment in Xinxiang City based on meta-heuristic algorithm optimization [J]. Water Resources Protection,2024,40(6):104-112. (in Chinese))

[4] 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 Zongxue, Chen Hao, Ren Meifang, 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))

[5] Holling C S. Principles of insect predation [J]. Annual Review of Entomology,1961,6:163-182.

[6] Mileti D S. Disasters by design:a reassessment of natural hazards in the United States [M]. Washington: Joseph Henry Press,1999:45-49.

[7] Liao K H. A theory on urban resilience to floods:a basis for alternative planning practices [J]. Ecology and Society,2012,17(4):48.

[8] Mugume S N, Gomez D E, Fu Guangtao, et al. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems[J]. Water Research,2015,81:15-26.

[9] 孔锋,龚靖愉. 城市社区洪涝灾害韧性研究进展与展望[J]. 灾害学,2025,40(2):111-118. (Kong Feng, Gong Jingyu. Progress and prospects of flood resilience research in urban communities [J]. Journal of Catastrophology, 2025,40(2):111-118. (in Chinese))

[10] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(4):23-29. (in Chinese))

[11] 王运涛. 基于多源信息的城市洪水模拟与弹性分析[D]. 大连:大连理工大学,2018.

[12] 何祥,胡燕祝,王松. 一种基于改进 LMAW-AHP 的城市洪涝韧性评估方法[J]. 北京邮电大学学报,2025,48(4):1-6. (He Xiang, Hu Yanzhu, Wang Song. An urban flood resilience assessment method based on the improved LMAW-AHP method [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2025, 48 (4): 1-6. (in Chinese))

[13] 任捷,王子航,梁学琴,等. 基于 PSR 框架的黄河流域中心城市洪涝韧性研究[J]. 人民黄河,2025,47(3):62-68. (Ren Jie, Wang Zihang, Liang Xueqin, et al. Research on flood resilience of central cities in the Yellow River Basin based on PSR framework [J]. Yellow River, 2025,47(3):62-68. (in Chinese))

[14] 况诗祥,王渲,刘志鹏,等. 规划场景下基于涝水特征的城市洪涝韧性评估研究[J]. 给水排水,2025,51(2):43-49. (Kuang Shixiang, Wang Xuan, Liu Zhipeng, et al. Urban flood resilience assessment based on flood characteristics in planning scenarios [J]. Water & Wastewater Engineering, 2025,51(2):43-49. (in Chinese))

[15] 陈洋,杨文泰,李庆国,等. 基于损失函数的城市洪涝灾害弹性演化规律研究[J]. 防灾减灾工程学报,2024,44(4):800-808. (Chen Yang, Yang Wentai, Li Qingguo, et al. Research on evolution of urban flood resilience based on loss function [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44 (4): 800-808. (in Chinese))

[16] Zhang Xiwen, Mao Feng, Gong Zhaoya, et al. A disaster-damage-based framework for assessing urban resilience to intense rainfall-induced flooding [J]. Urban Climate, 2023,48:101402.

[17] Xia Junqiang, Falconer R A, Wang Yejiang, et al. New criterion for the stability of a human body in floodwaters [J]. Journal of Hydraulic Research,2014,52(1):93-104.

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

[19] 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.

[20] Defra J. Flood risks to people-phase 2 [R]. London: Department for Environment Food and Rural Affairs, 2006.

[21] Abbasnejadfad M, Bastami M, Abbasnejadfad M, et al. Novel deterministic and probabilistic resilience assessment measures for engineering and infrastructure systems based on the economic impacts [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2022,75:102956.

Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (23): 9470-9480. (in Chinese))

[42] 苏淑兰,姬海娟,张东,等. 青海草地生态系统水分利用效率特征及其影响因素分析[J]. *草地学报*, 2023, 31 (9): 2814-2825. (Su Shulan, Ji Haijuan, Zhang Dong, et al. Characteristics of water use efficiency and its influencing factors of grassland ecosystem in Qinghai Province[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31 (9): 2814-2825. (in Chinese))

[43] 陈凌伟. 2001—2020 年黄河流域水分利用效率时空变化及其对环境因素的响应[J]. *水土保持通报*, 2022, 42 (5): 222-230. (Chen Lingwei. Spatio-temporal variation of water use efficiency and its responses to environmental factors in Yellow River Basin during 2001-2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42 (5): 222-230. (in Chinese))

[44] 戴强玉,徐勇,赵纯,等. 四川盆地植被 EVI 动态变化及其驱动机制[J]. *中国环境科学*, 2023, 43 (8): 4292-4304. (Dai Qiangyu, Xu Yong, Zhao Chun, et al. Dynamic variation of vegetation EVI and its driving mechanism in the Sichuan Basin [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43 (8): 4292-4304. (in Chinese))

[45] 徐虹,刘琴. 2001—2019 年云南省植被 NDVI 变化及其气候因子的关系[J]. *水土保持研究*, 2022, 29 (1): 162-168. (Xu Hong, Liu Qin. Analysis of vegetation NDVI dynamic and its relationship with climatic factors in Yunnan Province during 2001-2019[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29 (1): 162-168. (in Chinese))

[46] Hao Xingming, Ma Haiyan, Hua Ding, et al. Response of ecosystem water use efficiency to climate change in the Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191 (9): 561.

[47] Zheng Han, Lin Henry, Zhou Weijian, et al. Revegetation has increased ecosystem water-use efficiency during 2000-2014 in the Chinese Loess Plateau: evidence from satellite data[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 507-518.

[48] 张艺菲,张俊玲. 气候变化和人类活动对云贵高原植被净初级生产力的影响[J]. *环境科学*, 2025, 46 (8): 5217-5228. (Zhang Yifei, Zhang Junling. Impact of climate change and human activities on net primary productivity of vegetation in the Yunnan-Guizhou Plateau [J]. *Environmental Science*, 2025, 46 (8): 5217-5228. (in Chinese))

[49] 蒋忠诚,罗为群,童立强,等. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. *中国岩溶*, 2016, 35 (5): 461-468. (Jiang Zhongcheng, Luo Weiqun, Tong Liqiang, et al. Evolution features of rocky desertification and influence factors in Karst areas of southwest China in the 21 Century [J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35 (5): 461-468. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 05 - 13 编辑: 王芳)

+++++

(上接第 67 页)

[22] 郑嘉璇. 不同空间尺度下城市洪涝韧性及洪涝风险评估研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2024.

[23] 李国一, 刘家宏, 邵薇薇. 洪涝灾害风险评估与分区研究进展[J]. *水文*, 2023, 43 (4): 15-20. (Li Guoyi, Liu Jiahong, Shao Weiwei. Research progress in flood disaster risk assessment and zoning [J]. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43 (4): 15-20. (in Chinese))

[24] Bhare S, Reddy M J. Flood risk assessment of suburban region in India by incorporating flood hazard, vulnerability and exposure[J]. *Natural Hazards*, 2025, 121 (6): 6625-6649.

[25] 尚楚豫. 雨洪灾害情景下城市内涝风险与韧性评估研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.

[26] Wang Guangpeng, Liu Yong, Hu Ziyi, et al. Flood risk assessment based on fuzzy synthetic evaluation method in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area, China [J]. *Sustainability*, 2020, 12 (4): 1451.

[27] Rather A F, Ahmed R, Bansal J K, et al. Glacial lake outburst flood risk assessment of a rapidly expanding glacial lake in the Ladakh region of Western Himalaya, using hydrodynamic modeling [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2024, 15 (1): 2413893.

[28] 张晚祺, 翁朝晖, 何小花, 等. 洪水风险区划中综合风险度的确定方法探讨[J]. *中国防汛抗旱*, 2025, 35 (5): 16-21. (Zhang Wanqi, Weng Zhaohui, He Xiaohua, et al. Discussion on the determination method of comprehensive risk degree in flood risk zoning [J]. *China Flood & Drought Management*, 2025, 35 (5): 16-21. (in Chinese))

[29] 宋利祥, 胡晓张. 洪水实时模拟与风险评估技术研究及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.

[30] 李德龙, 许小华, 丁志雄, 等. 基于综合风险度方法的大余县重点防洪区洪水风险区划研究[J]. *中国农村水利水电*, 2022 (11): 44-49. (Li Delong, Xu Xiaohua, Ding Zhixiong, et al. Research on the flood risk zoning of Dayu key flood control area based on the comprehensive risk method [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022 (11): 44-49. (in Chinese))

[31] 王舒, 张骞, 王子芳, 等. 基于 GIS 的三峡库区生态风险评估及生态分区构建[J]. *生态学报*, 2022, 42 (11): 4654-4664. (Wang Shu, Zhang Qian, Wang Zifang, et al. GIS-based ecological risk assessment and ecological zoning in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (11): 4654-4664. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 07 - 03 编辑: 王芳)