

基于空间信息格网的南京市洪水风险评估

高玉琴¹, 王慧¹, 刘钺², 王子睿¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 成都市应急管理局, 四川 成都 610042)

摘要: 分别采用 MIKE 模型和 ArcGIS 平台搭建洪水风险自然属性和社会属性空间信息格网并进行格网叠加, 构建洪水风险评价指标体系, 利用层次分析法和熵权法确定主客观权重, 进而计算得出洪水风险综合指数并对南京市秦淮区 3 个相邻街道进行洪水风险评估。结果表明: 不同降雨强度下, 洪水风险综合指数西北部较高、东南部较低、易受损敏感区相对较高; 随着降雨强度增大, 洪水风险综合指数较高的区域范围不断扩大; 研究区主要积水点均处于洪水风险综合指数较高区域; 基于空间信息格网的洪水风险评估可为精细化、动态化的洪水灾害风险评估与洪水管理提供参考。

关键词: 洪水灾害风险评估; 空间信息格网; MIKE 模型; ArcGIS 平台

中图分类号: TV87

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)06-0006-07

Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids//GAO Yuqin¹, WANG Hui¹, LIU Yue², WANG Zirui¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Chengdu Emergency Management Bureau, Sichuan 610042, China)

Abstract: Using the MIKE model and the ArcGIS platform, spatial information grids for the natural and social attributes of flood risks were respectively constructed and superimposed. The subjective and objective weights were calculated using the analytic hierarchy process and the entropy weight method, and the comprehensive flood risk index was computed to conduct a risk assessment for three adjacent streets in Qinhuai District of Nanjing City. The results show that, under different rainfall intensities, the spatial distribution of the comprehensive flood risk index is mainly characterized by higher values in the northwest and lower values in the southeast, with relatively higher values in vulnerable and sensitive areas. As the rainfall intensity increases, the area with higher values of the comprehensive flood risk index continuously expands. The main waterlogging treatment points in the study area are all located in regions with higher comprehensive flood risk indices. The flood risk assessment based on spatial information grids can provide references for more refined and dynamic flood disaster risk assessment and flood management.

Key words: flood disaster risk assessment; spatial information grid; MIKE model; ArcGIS platform

随着城市化进程加快, 洪泛区人口迅速增加, 资产密度急剧加大, 全球洪水灾害损失不断增长。根据联合国发布的《灾害的代价 2000—2019》, 2000—2019 年全球洪水灾害数从 1 389 起上升到 3 254 起, 占灾害总数的 44%。我国是世界洪涝灾害最严重的国家之一。当前我国的防洪战略已由洪水控制转移为洪水管理^[1], 洪水灾害风险评估是洪水管理的一个重要手段。

20 世纪 90 年代, 系统性的洪水风险理论逐步建立。史培军^[2]认为灾情是由孕灾环境、致灾因子、承灾体之间相互作用形成的, 与经典洪水风险三角形理论不谋而合。Okada 等^[3-4]提出了综合灾害

风险管理理论, 主要从洪水发生概率和承灾体脆弱性两方面分析洪水风险。魏一鸣等^[5]基于系统论构建洪水灾害系统分析洪水风险。目前国内外洪水风险理论已基本成熟, 通常认为洪水风险由洪水概率、承灾体暴露性、承灾体脆弱性三个要素组成^[6-7], 包括自然属性和社会属性两方面因素^[8]。

众多学者针对洪水灾害风险评估开展了大量工作, 并形成了多种研究方法, 如历史灾情法、情景模拟法、指标体系法等。洪水灾害风险评估多构建评价指标体系及其评价模型进行风险评估。一方面, 随着 3S 技术的发展, 更多相关技术在洪水灾害风险评估中得到应用^[9]; 另一方面, 综合性评价方法和

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3000104); 国家自然科学基金项目(52079039); 江苏省水利科技项目(2020050)

作者简介: 王慧(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事防洪减灾与河湖管理研究。E-mail: 20267589717@qq.com

通信作者: 高玉琴(1978—), 女, 教授, 博士, 主要从事防洪减灾、水利规划与水利经济研究。E-mail: yqgao@hhu.edu.cn

智能算法的发展,使洪水风险系统的复杂性得到更好刻画,更多能够提高评价准确性的模型方法得以探索开发^[10-14]。然而,由于社会经济数据通常以行政区作为统计单位,洪水风险评估中自然与社会属性数据精度不匹配的问题始终存在。丁志雄等^[15-17]利用空间信息格网技术建立模型以实现洪灾损失的评估计算,为洪涝灾害和风险评估提供了新方法;孔旭等^[18-19]初步建立了基于夜间灯光数据的山洪灾害损失评估模型,提高了洪灾损失评估精度。但较少学者结合洪水淹没数值模拟技术来对洪水风险系统进行综合性评估。

本文选取南京市秦淮区 3 个相邻街道作为研究区,采用 8.1 m 栅格尺度搭建研究区洪水风险空间信息格网进行洪水风险评估研究,以进一步提高洪水风险评估准确性,为采取更具针对性的防洪减灾措施提供依据。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

选取南京市秦淮区的红花、光华路、月牙湖 3 个相邻街道作为研究区,该区位于南京市中心城区,属秦淮河流域下游,大部分为河谷漫滩平原,存在渗漏、沉降、边坡稳定等地质问题。研究区地处北亚热带湿润季风气候区,每年汛期(5—9 月)降水量占全年的 60%~70%,梅雨季(6—7 月)常有大暴雨,由于洪水出路受限且调蓄能力不足,又受长江潮位顶托,泄流能力受阻,因此易发洪涝灾害,防洪压力极大。

1.2 数据来源与数据处理

1.2.1 数据来源

自然属性指标数据由 MIKE 模型模拟结果直接

生成,涉及的行政区划边界、遥感影像、DEM 数字高程等数据通过 91 卫图助手软件下载,水文数据来自《中华人民共和国水文年鉴·长江流域水文资料》,土地利用数据来自 GlobeLand30。社会属性指标数据中,人口密度、地区生产总值密度、夜间灯光密度来源于中国科学院科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),应急救援避难点与易受损敏感区可通过《南京市统计年鉴》、秦淮区教育信息网等政务网站及公开的研究区互联网信息地图中识别出相应的地点或场所。

1.2.2 数据处理

自然领域法操作简单、计算速度快,故人口密度、地区生产总值密度、夜间灯光密度采用自然领域法进行插值计算,展布到栅格尺度中。根据应急救援及避难能力随着距离增大而减小的原则,以各应急救援避难点为中心构建半径为 5 km 的缓冲区,认为各应急救援避难点的应急救援及避难能力为 1,缓冲区外为 0,利用反距离权重插值法模拟区域内全部栅格的应急救援及避难能力;另外,由于大型、综合型场所的应急救援能力显著高于其他中小型场所,故对研究区内 2 个大型场所(南京市中医院、秦淮区紧急避难场所)额外赋予 2 倍系数。

将识别出的研究区内企业、商场、地铁口和学校作为易受损敏感区,对其所在栅格进行赋值,以同等状况下易受损敏感区面临洪水风险更加严峻为原则,对易受损敏感区所涉及栅格赋值为 1,其他栅格赋值为 0。这一空间分布与研究区人口密度、地区生产总值密度、夜间灯光密度均有呼应,数据具备较好可靠性,能够为洪水风险的社会属性层补充更多细节,社会属性空间分布如图 1 所示。

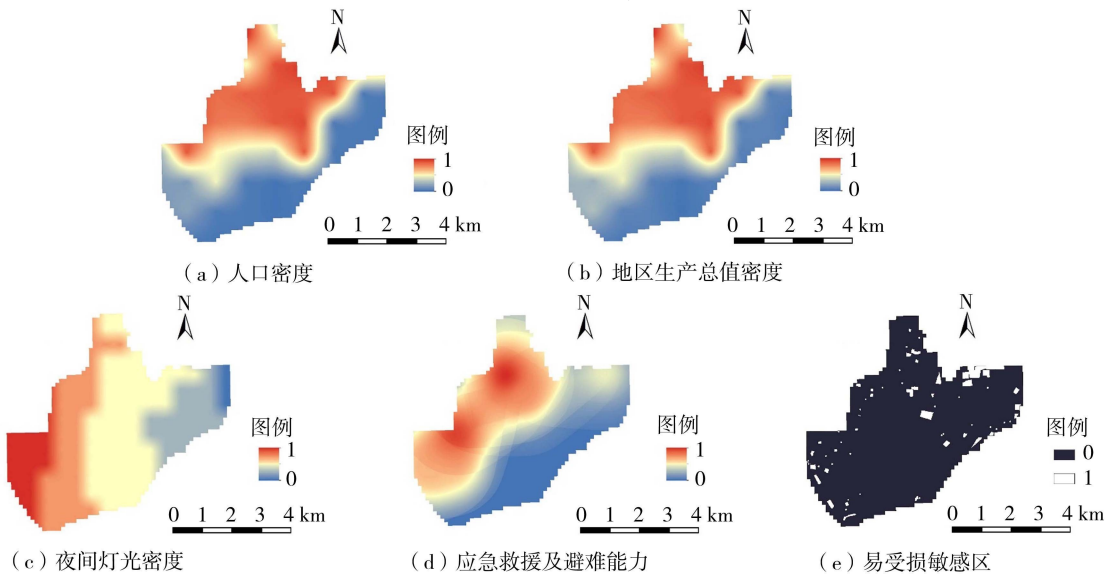


图 1 社会属性空间分布

2 研究方法

2.1 空间信息格网搭建

a. 自然属性空间信息格网搭建。MIKE 模型具有计算精度高、适应性强等特点,故采用 MIKE 模型进行洪水淹没模拟,并进行空间格网化处理。依据研究区具体情况,选取基础数据中的最优精度,即数字高程数据具备的 8.1 m 栅格尺度作为洪水风险评估基本单元,共划分出 457 669 个评估单元。

b. 社会属性空间信息格网搭建与格网叠加。利用 ArcGIS 平台对社会属性数据进行空间格网化处理,使其满足 8.1 m 栅格尺度。常见的空间插值方法有克里金法、反距离权重法、自然领域法等^[20-25],应针对不同数据的特性按需选用,并利用 ArcGIS 平台将两种属性空间格网叠加,如图 2 所示。

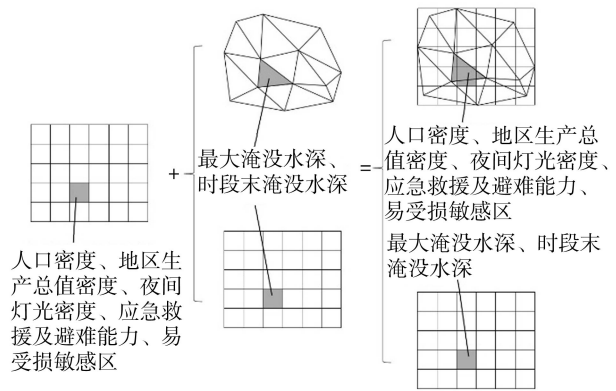


图 2 洪水风险空间信息格网叠加示意图

2.2 评价指标体系构建

数值模拟得到的淹没水深、范围、历时等模拟结果能综合反映洪水风险自然属性。为更好地体现空间分布特征,选取二维模拟结果中的淹没水深作为洪水风险的自然属性层,包括重现期为 2 年一遇、5 年一遇、20 年一遇、50 年一遇的最大淹没水深和时段末淹没水深。淹没水深是降雨强度和下垫面条件相互作用的结果,与洪水风险正相关。

选取人口密度、地区生产总值密度、夜间灯光密度、应急救援及避难能力、易受损敏感区 5 项指标为洪水风险的社会属性指标。人口、地区生产总值、灯光信息是体现地区经济发展水平的重要指标,三者均与洪水风险正相关。应急救援及避难能力是指面临洪水灾害时减少人员伤亡、财产损失的能力,与洪水风险负相关。易受损敏感区是指生命财产密集、洪水来临时受损更加严重的区域,如学校、科研院所、交通枢纽、商场、文化设施及重要企业等,与洪水风险正相关。

2.3 权重确定方法

格网叠加过程中,通过科学合理的权重对不同

属性层进行赋权。层次分析法^[26-30]简洁实用,但主观色彩较浓;熵权法结果更为客观准确,但忽略了指标本身的重要程度;乘法归一法适用于指标数较多、权重分配较均匀的情况^[31],采用该方法进行组合构权,可使决策结果既能体现决策者偏好,又能保留数据的客观信息。本文采用层次分析法确定主客观权重,采用熵权法确定客观权重,采用乘法归一法求解组合权重,组合权重计算公式为

$$w_j = w_{sj}w_{oj} / \sum_{j=1}^m w_{sj}w_{oj} \quad (1)$$

式中: w_j 为因素 j 的组合权重; w_{sj} 为因素 j 的主观权重; w_{oj} 为因素 j 的客观权重; m 为因素个数。

2.4 评估模型构建

本文认为格网中每个评估单元的洪水风险由洪水风险综合指数体现,该指数由自然和社会属性洪水风险指数共同构成,通过权重体现对洪水风险的贡献度:

$$I_{fr} = I_{frn} + I_{frs} \quad (2)$$

其中 $I_{frn} = \sum_{j=1}^m w_{nj}S_{nj}$ $I_{frs} = \sum_{j=1}^m w_{sj}S_{sj}$

式中: I_{fr} 为洪水风险综合指数; I_{frn} 为自然属性洪水风险指数; w_{nj} 为自然属性指标中指标 j 权重; S_{nj} 为自然属性指标中指标 j 标准化处理后的数据值; I_{frs} 为社会属性洪水风险指数; w_{sj} 为社会属性指标中指标 j 权重; S_{sj} 为社会属性指标中指标 j 标准化处理后的数据值。

由式(2)可计算得出每个评估单元的洪水风险综合指数,再利用 ArcGIS 平台进行可视化分析,具体评估流程如图 3 所示。

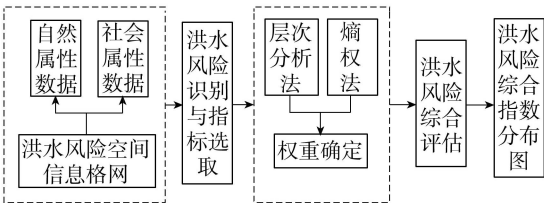


图 3 基于空间信息格网的洪水风险评估流程

3 结果与分析

3.1 MIKE 模型率定与验证

3.1.1 一维水动力模型率定验证

选取 2009—2017 年间的 6 场洪水观测资料,采用武定门闸站的逐日平均流量数据率定模型,采用中和桥流量数据验证模型,以 2009 年 7 月 5 日洪水过程为例,模拟情况如图 4 所示。选用相关系数 R^2 、纳什效率系数 N_{se} 和峰值相对误差 P_e 进行适用性评价,认为当 R^2 与 N_{se} 值大于 0.75 且 P_e 值小于 20% 时模拟结果较好。评价结果见表 1,合格率为

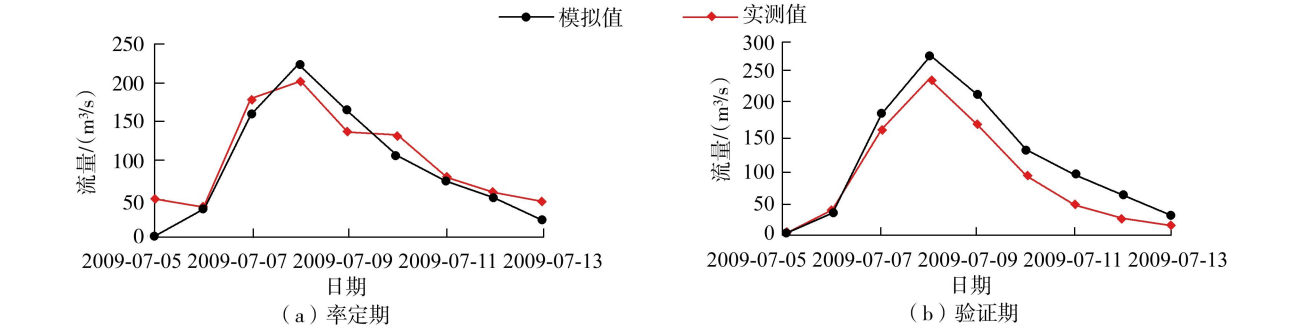


图 4 一维水动力模型模拟与实测流量过程线

表 1 研究区一维水动力模型模拟评价结果

洪水编号	率定期				验证期			
	R^2	N_{se}	$P_e/\%$	是否合格	R^2	N_{se}	$P_e/\%$	是否合格
20090705	0.97	0.84	9.87	是	0.98	0.84	15.49	是
20120712	0.97	0.77	3.25	是	0.97	0.88	24.87	否
20130703	0.94	0.76	4.19	是	0.96	0.88	3.06	是
20160630	0.93	0.78	31.09	否	0.96	0.90	10.18	是
20170608	0.95	0.84	6.62	是	0.94	0.85	2.26	是
20170922	0.96	0.81	3.16	是	0.98	0.88	11.63	是

83.3%,满足精度要求。其中,20160630 次洪水率定期 P_e 值、20120712 次洪水验证期 P_e 值偏大,是受武定门闸站对丰年洪水调节作用的影响。总体而言,该模型适用于研究区的洪水过程模拟。

3.1.2 二维水动力模型与耦合模型率定验证

选取 2017 年 6 月 10 日 2 时至 20 时实测降雨,得到模拟积淹点与 16 个历史积淹点的匹配数为 12 个,匹配率为 75%;其中友谊河路与石杨路交叉口处历史水深为 40 cm,模拟最大水深约为 40 cm。耦合一维水动力模型后,匹配数上升至 13 个,匹配率上升至 81.25%,友谊河路与石杨路交叉口处模拟最大水深同样约为 40 cm。积淹点位置和典型积淹水深对比结果表明,模型基本能反映实际积淹水情况。

3.2 指标权重

设定最大淹没水深与时段末淹没水深主观权重均为 0.5;综合 15 名专家意见和已有文献^[32-34]得到社会属性指标判断矩阵(表 2),且通过了一致性检验。利用 ArcGIS 平台字段计算器求解客观权重。设定主观权重与客观权重同等重要,得到指标权重见表 3,其中自然和社会属性指标各组合权重值分别进行归一化处理。

表 2 研究区社会属性指标判断矩阵

指标	人口密度	地区生产总值密度	夜间灯光密度	应急救援及避难能力	易受损敏感区
人口密度	1	1/2	1/2	3	6
地区生产总值密度	2	1	1	4	8
夜间灯光密度	2	1	1	4	8
应急救援及避难能力	1/3	1/5	1/5	1	4
易受损敏感区	1/6	1/8	1/8	1/5	1

表 3 研究区洪水风险空间信息格网各指标权重

指标层	主观权重	客观权重	组合权重
2 年一遇最大淹没水深	0.5000	0.2576	0.2576
2 年一遇时段末淹没水深	0.5000	0.7424	0.7424
5 年一遇最大淹没水深	0.5000	0.2994	0.2994
5 年一遇时段末淹没水深	0.5000	0.7006	0.7006
20 年一遇最大淹没水深	0.5000	0.3320	0.3320
20 年一遇时段末淹没水深	0.5000	0.6680	0.6680
50 年一遇最大淹没水深	0.5000	0.3908	0.3908
50 年一遇时段末淹没水深	0.5000	0.6092	0.6092
人口密度	0.3372	0.0793	0.3089
地区生产总值密度	0.3372	0.0676	0.2632
夜间灯光密度	0.2000	0.0201	0.0464
应急救援及避难能力	0.0913	0.0769	0.0811
易受损敏感区	0.0344	0.7560	0.3003

3.3 洪水风险叠加结果

3.3.1 社会属性洪水风险分布

利用 ArcGIS 平台栅格计算器叠加社会属性指标的各项数据,计算研究区社会属性洪水风险指数 I_{frs} 分布,结果如图 5 所示。可知 I_{frs} 值与承灾体脆弱性正相关,建筑物较密集、路网较复杂的西北大部 I_{frs} 值较高,建筑相对稀疏、土地利用以耕地和林地

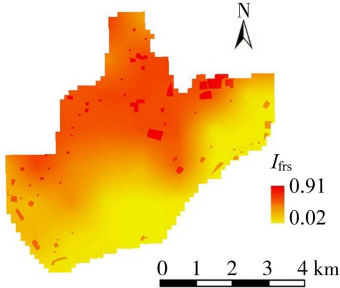


图 5 社会属性洪水风险指数分布

为主的东南小部分区域 I_{frs} 值较低,被标记为易受敏感区的 I_{frs} 值相对偏高。

3.3.2 自然属性洪水风险分布

叠加自然属性指标中的各项数据,计算不同降雨强度下研究区的自然属性洪水风险指数 I_{fm} 分布,结果如图 6 所示。可知同一降雨强度下,较高的 I_{fm} 值主要集中在以下几类区域:①河流沿岸且地势较为平坦区域,如友谊河沿岸(银城东苑小区—友谊河路—将军塘)和秦淮河沿岸(七桥瓮生态湿地公园—御水湾花园小区)设计流量较小,蓄水能力不足,其周边区域易发生内涝;②路网中的低洼区域及高架出口、立交桥下,如大明路—大明西路段、绕城高速内环南线绕城路等高架附近,易形成积淹水;③机场跑道旧址及周边人工坑、塘、渠。随着降雨强度增大, I_{fm} 值偏高区域范围明显扩大。

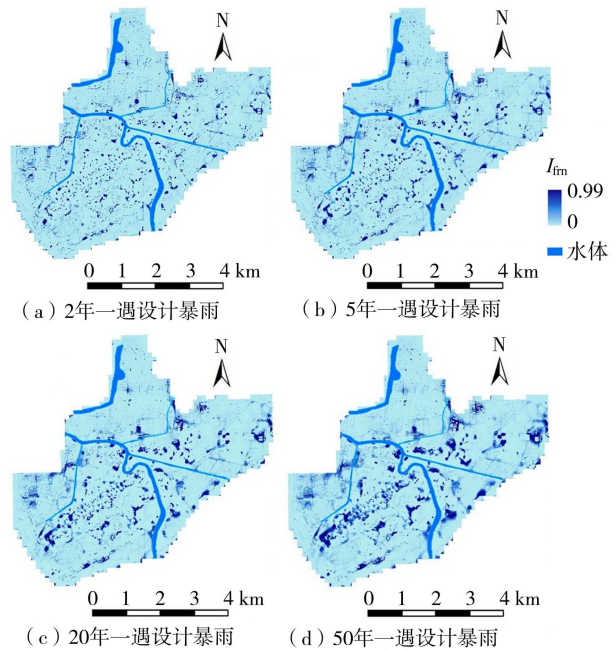


图 6 不同降雨强度下的自然属性洪水风险指数分布

3.3.3 洪水风险叠加

设定自然和社会属性的洪水风险等权重,直接进行叠加,分别计算研究区不同降雨强度下的洪水风险综合指数 I_{fr} 分布,并对 I_{fr} 值进行标准化处理,得到不同降雨强度下的洪水风险综合指数分布如图 7 所示。

3.4 风险评估结果分析

I_{fr} 值代表研究区的洪水风险水平, I_{fr} 值越高表明研究区面临洪水风险越大。根据图 7 的评估结果,研究区主要积淹点均处于 I_{fr} 较高区域,说明评估结果基本具备可靠性。研究区洪水风险空间分布特征及不同降雨强度下的变化规律如下。

3.4.1 定性分析

不同降雨强度下, I_{fr} 值空间分布格局基本一

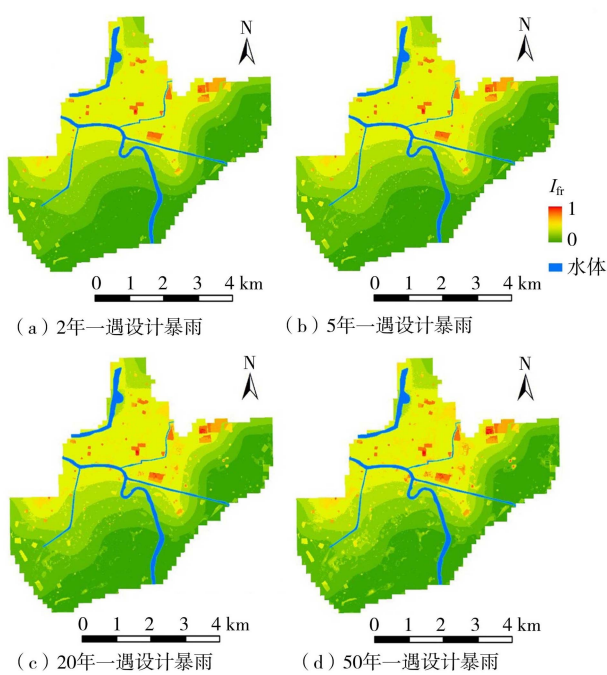


图 7 不同降雨强度下的洪水风险综合指数分布

致,主要表现为西北部较高、东南部较低、易受敏感区相对较高,与 I_{frs} 值空间分布规律一致。随着降雨强度的增大, I_{fr} 值较高的区域范围不断扩大,与 I_{fm} 值变化规律一致。高 I_{fr} 值主要分布在河流沿岸及零散分布的易受敏感区,这些区域同时具有较高的 I_{fm} 值和 I_{frs} 值。此外,受较高的 I_{fm} 值影响,一些高架、立交桥附近及西北部部分路网出现相对较高的 I_{fr} 值,呈零散分布状态。

3.4.2 定量分析

为简明快速地统计研究区洪水风险水平,对 I_{fr} 值以 0.2 为 1 个区间共划分 5 个级别,分别对应洪水风险的低风险区、较低风险区、中风险区、较高风险区、高风险区。利用 ArcGIS 平台统计不同降雨强度下不同风险区面积占研究区总面积的比例及变化,结果见表 4。

表 4 不同风险区面积占比

重现期/a	面积占比/%				
	低风险区	较低风险区	中风险区	较高风险区	高风险区
2	41.15	26.89	29.65	2.25	0.06
5	40.75	26.96	29.91	2.28	0.10
20	40.19	27.02	30.23	2.42	0.14
50	38.88	27.33	30.65	2.94	0.21

由表 4 可见,同一降雨强度下,低风险区占比 40%左右,较低风险区占比 27%左右,中风险区占比 30%左右,较高风险区和高风险区共占比 3%左右,表明研究区大部分地区处于中低洪水风险水平。随着降雨强度的增大,除低风险区面积占比表现出下降趋势外,其余区域面积占比均表现出上升趋势,说明随着降雨强度增大洪水风险也增大,并且高风险

地区洪水风险增幅最大。

4 结 论

a. 南京市秦淮区红花、光华路、月牙湖 3 个街道相邻洪水风险综合指数西北部较高、东南部较低、易受损敏感区相对较高,研究区主要积淹点均处于洪水风险综合指数较高区域。

b. 同一降雨强度下,研究区低风险区占比 40% 左右,较低风险区占比 27% 左右,中风险区占比 30% 左右,即大部分区域处于中低洪水风险水平。

c. 随着降雨强度增大,洪水风险综合指数较高的区域范围不断扩大,中高风险区域占比上升,且高风险地区洪水风险增幅最大。

参考文献:

[1] 左其亨,程琰,马军霞. 水灾害和谐防控与智慧模拟研究框架与展望[J]. 水利水电科技进展,2024,44(2): 15-21. (ZUO Qiting, CHENG Yan, MA Junxia. Research framework and prospect of harmonious prevention and control and intelligent simulation of water disasters[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(2):15-21. (in Chinese))

[2] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报,1996(4):8-19. (SHI Peijun. Re-discuss the theory and practice of disaster research[J]. Journal of Natural Disasters,1996(4):8-19. (in Chinese))

[3] OKADA N, AMENDOLA A. Research challenges for integrated disaster risk management[C]//Presentation to the first annual IIASA-DPRIM meeting on integrated disaster risk management: reducing socio-economic vulnerability. Laxenburg:[s. n.],2001.

[4] OKADA N. Lrban diagnosis and integrated disaster risk management [C]//Proceedings of the China-Japan EQTAP Symposium on Police and Methodology for Urban Earthquake Disaster Management. Xianmen:[s. n.], 2003.

[5] 魏一鸣,范英,金菊良. 洪水灾害风险分析的系统理论 [J]. 管理科学学报,2001(2):7-11. (WEI Yiming, FAN Ying, JIN Juliang. Systematic theory of flood hazard risk analysis[J]. Journal of Management Sciences in China, 2001(2):7-11. (in Chinese))

[6] ALLEN S K, LINSBAUER A, RANDHAWA S S, et al. Glacial lake outburst flood risk in Himachal Pradesh, India;an integrative and anticipatory approach considering current and future threats[J]. Natural Hazards,2016,84: 1741-1763.

[7] DE MOEL H, JONGMAN B, KREIBICH H, et al. Flood risk assessments at different spatial scales[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2015, 20:

865-890.

[8] 金菊良,宋占智,周玉良,等. 水旱灾害风险评估方法体系及其实证研究[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):142-151. (JIN Juliang, SONG Zhanzhi, ZHOU Yuliang, et al. Risk assessment method system for flood and drought disasters and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5):142-151. (in Chinese))

[9] 曹罗丹. 基于遥感与 GIS 的浙江省洪涝灾害风险评估研究[D]. 宁波:宁波大学,2014.

[10] 刘东,杨丹,张亮亮,等. 基于 BOA-SVM 模型的区域洪水灾害风险评估与驱动机制[J]. 农业机械学报,2023,54(10):304-315. (LIU Dong, YANG Dan, ZHANG Liangliang, et al. Regional flood disaster risk assessment and driving mechanism based on BOA-SVM model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery,2023,54(10):304-315. (in Chinese))

[11] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. 水资源保护,2024,40(4):36-47. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4):36-47. (in Chinese))

[12] 何朝飞,王晓云,陈伏龙,等. 玛纳斯河不同峰量组合下的融雪洪水风险分析[J]. 水利水电科技进展,2023,43(1):15-21. (HE Chaoifei, WANG Xiaoyun, CHEN Fulong, et al. Risk analysis of snowmelt flood under different combination of flood peaks and flood volumes in Manas River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(1):15-21. (in Chinese))

[13] 许怡,吴永祥,王高旭,等. 伦敦城市洪水风险管理的启示[J]. 水利水电科技进展,2019,39(4):13-18. (XU Yi, WU Yongxiang, WANG Gaoxu, et al. Enlightenment of urban flood risk management in London [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(4):13-18. (in Chinese))

[14] 叶建春,章杭惠. 太湖流域洪水风险管理实践与思考 [J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):136-141. (YE Jianchun, ZHANG Hanghui. Practices and thinking of flood risk management in Taihu Lake Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(5):136-141. (in Chinese))

[15] 丁志雄,胡亚林,李纪人. 基于空间信息格网的洪灾损失评估模型及其应用[J]. 水利水电技术,2005(6):93-96. (DING Zhixiong, HU Yalin, LI Jiren. Model for loss assessment of flood disaster based on spatial information grid[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005(6):93-96. (in Chinese))

[16] 仇蕾,王慧敏,马树建. 极端洪水灾害损失评估方法及应用[J]. 水科学进展,2009,20(6):869-875. (QIU

- Lei, WANG Huimin, MA Shujian. Methods and applications of extreme flood disaster loss assessment[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 869-875.
- [17] 刘小生, 赵小思. 基于空间信息格网的洪灾损失评估[J]. 工程勘察, 2013, 41(6): 66-69. (LIU Xiaosheng, ZHAO Xiaosi. Flood loss evaluation based on spatial information grid [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(6): 66-69. (in Chinese))
- [18] 孔旭. 山洪灾害损失评估模型研究及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [19] 郭磊, 舒全英, 李军. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的洪水灾害损失评估[J]. 水利发展研究, 2020, 20(2): 62-68. (GUO Lei, SHU Quanying, LI Jun. Flood damage assessment based on NPP-VIIRS night light [J]. Water Resources Development Research, 2020, 20(2): 62-68. (in Chinese))
- [20] 魏继德. 空间插值方法的比较与优化[D]. 福州: 福州大学, 2010.
- [21] 陈美, 司伟, 王庆平, 等. 局部组合降雨空间插值方法适应性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024(8): 59-68. (CHEN Mei, SI Wei, WANG Qingping, et al. Research on adaptation of local combined rainfall spatial interpolation method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024(8): 59-68. (in Chinese))
- [22] 盖姜坤, 解恒燕, 郑鑫. 乌裕尔河流域降水量空间插值方法比较研究[J]. 河南科技, 2022, 41(23): 99-102. (GAI Jiangkun, XIE Hengyan, ZHENG Xin. Comparative study on spatial interpolation methods for precipitation data in the Wuyuer River Basin [J]. Henan Science and Technology, 2022, 41(23): 99-102. (in Chinese))
- [23] TAN J, XIE X, ZUO J, et al. Coupling random forest and inverse distance weighting to generate climate surfaces of precipitation and temperature with multiple-covariates [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126270.
- [24] 鲁晨阳, 李雪聪, 田凌云, 等. 插值方法对河道数字水深模型精度的影响[J]. 四川水力发电, 2021, 40(4): 33-36. (LU Chenyang, LI Xuecong, TIAN Lingyun, et al. Influence of interpolation methods on the accuracy of channel digital bathymetric model [J]. Sichuan Water Power, 2021, 40(4): 33-36. (in Chinese))
- [25] 杜飞, 胡庆芳, 王银堂, 等. MSWEP 对江苏省太湖流域日降水量和极值降水量的表征能力解析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 167-175. (DU Fei, HU Qingfang, WANG Yintang, et al. Validation of MSWEP daily and extreme precipitation of the Taihu Lake Basin in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 167-175. (in Chinese))
- [26] 贾艳红, 白莹, 翟禄新. 基于 AHP-熵权法的广西暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(10): 13-17. (JIA Yanhong, BAI Ying, ZHAI Luxin. Risk assessment of flood and water-logging disaster in Guangxi Province based on AHP-entropy method [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2023, 46(10): 13-17. (in Chinese))
- [27] 王德运, 冀承泽, 张露丹, 等. 城市洪涝风险的多方法组合评估与应用[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 96-103. (WANG Deyun, JI Chengze, ZHANG Ludan, et al. Risk assessment of urban flood disasters in Hubei Province based on composite weight evaluation method [J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 96-103. (in Chinese))
- [28] 高玉琴, 汪键, 高见, 等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 22-29. (GAO Yuqin, WANG Jian, GAO Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 22-29. (in Chinese))
- [29] 郑德凤, 高敏, 李钰, 等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 1-8. (in Chinese))
- [30] 石晓静, 查小春, 刘嘉慧, 等. 基于云模型的汉江上游安康市洪水灾害风险评价[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 29-34. (SHI Xiaojing, ZHA Xiaochun LIU Jiahui, et al. Cloud model-based risk assessment of flood disasters in Ankang City on upper reaches of Hanjiang River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 29-34. (in Chinese))
- [31] 李刚, 李建平, 孙晓蕾, 等. 主客观权重的组合方式及其合理性研究[J]. 管理评论, 2017, 29(12): 17-26. (LI Gang, LI Jianping, SUN Xiaolei, et al. Research on the combination of subjective and objective weights and its rationality [J]. Management Review, 2017, 29(12): 17-26. (in Chinese))
- [32] 张汉林. 甘肃省洪水灾害风险研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [33] 刘仪航, 韩剑桥, 谢梦霞, 等. 基于 GIS 与 AHP 集成的黄土高原洪水灾害风险评估[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 129-134. (LIU Yihang, HAN Jianqiao, XIE Mengxia, et al. Risk assessment of flood disaster on the loess plateau based on integration of GIS and AHP [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 129-134. (in Chinese))
- [34] 李子威. 基于 SWAT 模型的漓江流域洪水灾害风险评估[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.

(收稿日期: 2023-11-28 编辑: 骆超)