

城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价

季孔阳¹, 李学明², 高见³, 徐佳颖¹, 高玉琴¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 四川水利职业技术学院, 四川 崇州 611200;
3. 江苏省农村水利科技发展中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 基于脆弱性概念阐述暴雨洪涝灾害下的城市脆弱性内涵, 从暴露度、敏感性和适应能力 3 个方面构建了包含 11 个指标的城市暴雨洪涝灾害脆弱性综合评价指标体系和评价模型, 并确定脆弱性等级划分标准。以南京市秦淮区为例, 针对 100 年一遇设计暴雨情景, 基于 MIKE 一二维耦合模型, 定量分析指标值, 采用构建的评价模型计算了城市暴雨洪涝灾害脆弱性指数, 对极端暴雨情景下研究区的脆弱性进行了评价, 绘制了研究区脆弱性空间分布图, 分析了脆弱性分布特点与成因。结果表明: MIKE 一二维耦合模型可用于暴露度指标中最大淹没水深和时段末淹没水深的获取; 河流沿岸且地势较为平坦的区域, 交通路网中的低洼区域、立交桥下易形成积水的区域, 人口稠密、GDP 产值高、暴露程度较高的居民住宅区与企业中心等区域脆弱性较高。

关键词: 极端暴雨; 城市脆弱性; 情景模拟; 综合指数法

中图分类号: TV122⁺.1; X43

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)03-0013-08

Assessment of urban vulnerability to heavy rain and flood disasters//JI Kongyang¹, LI Xueming², GAO Jian³, XU Jiaying¹, GAO Yuqin¹(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chongzhou 611200, China; 3. Jiangsu Province Rural Water Conservancy Science and Technology Development Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: The connotation of urban vulnerability to heavy rain and flood disasters is expounded based on the concept of vulnerability. A comprehensive evaluation index system and an evaluation model for urban vulnerability to heavy rain and flood disasters are constructed from three aspects: exposure, sensitivity, and adaptability, including 11 indicators. The criteria for dividing vulnerability levels are determined. Taking Qinhuai District of Nanjing City as an example, for a 100-year return period design rainstorm scenario, quantitative analysis of the indicator values is conducted using the MIKE coupled one- and two-dimensional model. The index of urban vulnerability to heavy rain and flood disasters is evaluated using the constructed evaluation model. A spatial distribution map of vulnerability in the research area is drawn, and the characteristics and causes of vulnerability distribution are analyzed. The results show that the MIKE coupled one- and two-dimensional model can be used to obtain the maximum inundation depth and end-of-period inundation depth in the exposure index. Areas along rivers with relatively flat terrain, low-lying areas in the transportation network, areas prone to water accumulation under overpasses, densely populated areas, high GDP value areas, and areas with high exposure levels such as residential areas and business centers exhibit higher vulnerability.

Key words: extreme rainstorm; urban vulnerability; scenario simulation; comprehensive index method

极端暴雨对人类社会具有何种影响, 如何提高防御能力、加强应对准备、降低极端暴雨致灾风险, 是如今的热点话题和亟待解决的难题。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第五次评估报告^[1]指出, 人类系统对气候变化风险, 尤其是对极端气候有着明显脆弱性和暴露性; IPCC 第六次评估报告^[2]指出, 对城市来说, 气候变化的某些方面可能会被放

大, 包括强降水事件造成的洪水。

由于人口、基础设施和人类活动的集中, 城市极易受到强降水和相关洪水等极端水文事件的影响。洪水脆弱性评估有助于识别洪水风险, 提高区域防灾减灾能力, 继 Müller 等^[3]进行的开创性研究开发了多个尺度的指标之后, Erena 等^[4]的研究结合了社会、物理和环境指标变量。Nazeer 等^[5]探讨了巴

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

作者简介: 季孔阳 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事防洪减灾、水利规划研究。E-mail: 211302030030@hhu.edu.cn

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

基斯坦洪水易发村庄的脆弱性水平异质性和驱动因素。Chan 等^[6]检验了多种洪水脆弱性评估方法的缺点,结果表明基于指标的方法可以更好地被用于脆弱性评估,而地理信息系统为测绘和精准分析、减轻洪涝灾害提供了有效帮助。

目前关于城市洪水风险和脆弱性的研究主要集中在于河流洪水,但极端暴雨洪水对城市的影响也不容忽视^[7]。此外,尽管 Muthusamy 等^[8]在利用洪水模型和地理信息系统研究洪水灾害损失时,考虑了不同类型洪水的危害,但忽略了社会和经济因素,而考虑城市洪涝的社会脆弱性研究通常在洪水的自然属性研究方面有所欠缺^[9-10]。

城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价是海绵城市建设和城市防灾减灾的重要基础性工作,对提高城市内涝灾害预防能力、降低城市洪涝风险、减轻受灾损失等具有重要意义^[11]。本文采用 MIKE 模型模拟极端暴雨情景下的洪水淹没历程,以南京市秦淮区的红花、光华路、月牙湖、秦虹、大光路 5 个相邻街道为例,综合考虑自然、社会、经济属性,对极端暴雨情景下的城市暴雨洪涝灾害脆弱性进行评价,分析其空间分布特征,以期管理者依据脆弱性程度因地制宜地考虑防灾减灾优先级提供参考。

1 城市暴雨洪涝灾害脆弱性概念界定

目前相关研究对脆弱性概念的表述存在模糊不清、混乱杂糅的情况,因此有必要对脆弱性的概念进行界定。参考 IPCC 第三次评估报告^[12]的概念框架,梳理国内外学者的研究成果,在灾害风险管理领域,脆弱性通常包括暴露度、敏感性和适应能力^[13-15]。本文认为脆弱性是在人文-自然视角下的综合概念,城市暴雨洪涝灾害脆弱性是城市复合系统及内部承灾体暴露于暴雨灾害区域而遭受的不利影响程度,是自然要素和社会、经济等人文要素驱动下的暴露度、敏感性与适应能力的综合表征^[16]。城市暴雨洪涝灾害脆弱性内涵框架如图 1 所示。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

南京市秦淮区地区主要骨干河道位于低洼平坦的平原圩区,支流河道大多源短流急,属山丘区河道,若汛期遇暴雨,洪水峰高势猛,对中下游两岸造成严重灾害,其中秦淮河下游受长江及秦淮河洪水共同威胁。如 2016 年 7 月,秦淮河流域遭遇长江洪水与天文大潮、本地洪水与长江洪水、区域强降雨与外河洪水叠加,秦淮河东山站最高水位 11.44 m,超过历史最高水位 0.27 m。由于秦淮河、长江等外河

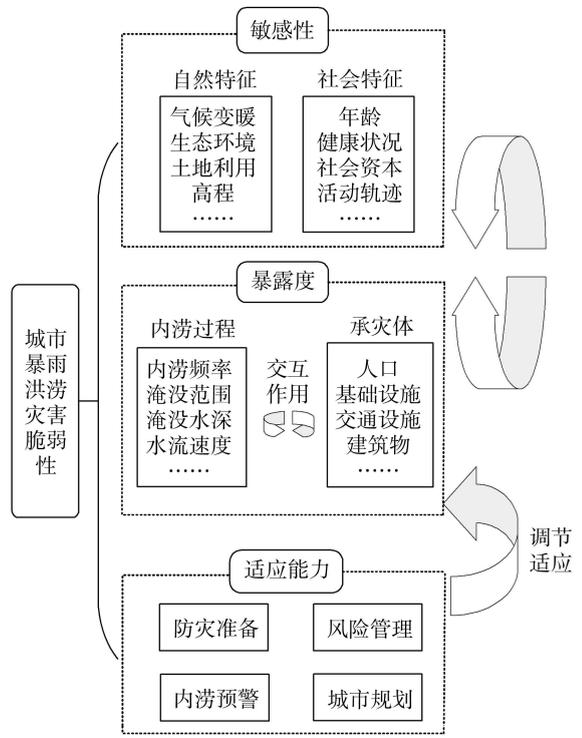


图 1 城市暴雨洪涝灾害脆弱性内涵框架

高水位顶托,城区河道水位普遍较高,不少地段高于城市地面和道路,多地受淹,多座城区排涝设施无法运行。

根据相关研究^[17],南京市秦淮区洪灾风险等级为高风险,孕灾环境敏感性和承灾体易损性都较高,在极端暴雨情景下的脆弱性方面有较高的研究价值。本文选取南京市秦淮区的红花、光华路、月牙湖、秦虹、大光路 5 个相邻街道作为研究区进行城市暴雨洪涝灾害脆弱性评估。研究区面积 32.36 km²,占秦淮区面积的 65.8%。研究区属秦淮河下游,主要涉及东山桥至武定门闸段,其间有运粮河、友谊河、响水河、月牙湖(东南护城河)共 4 条秦淮河 1 级支流汇入,如图 2 所示。



图 2 研究区概况

2.2 数据来源

为进行城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价,需做基础数据处理,本文将相关数据概化为 8.1 m 精度的矢量路网和矢量建筑轮廓数据,将道路宽度概化为 10 m。水系水域资料通过对比遥感影像修正,其中秦淮河含水系水域资料,月牙湖为水域资料,对月牙湖进行概化,得到月牙湖中心线,其余为水系资料。数据来源见表 1。

表 1 数据来源

数据名称	数据来源
遥感影像、DEM 数字高程	通过 91 卫图助手软件下载,精度为 8.1 m
土地利用类型	GlobeLand30: 全球地理信息公共产品 (http://www.globallandcover.com)
水文数据	《中华人民共和国水文年鉴长江流域水文资料》
人口密度、GDP 密度、水文调节价值	资源环境科学数据注册与出版系统 (http://www.resdc.cn)

根据断面数据、水系数据、地形道路数据等,率定和验证研究区 MIKE 模型 ($R^2 = 0.96$, 满足模拟精度),利用实测降雨资料进行模拟验证,耦合后研究区模拟结果中的淹没情况与实际历史积淹水点(表 2)匹配率达到 81.82%。

表 2 研究区历史积淹水点信息

位置	来源
光华路匝道口、商院路铁路桥涵、象房南村、紫杨路、观门北村、友谊村、御阳街积水整治、银龙路积水整治、石杨路积水片区整治、制药厂路积水整治	2016—2020 年积淹水点整治项目清单
苜蓿园大街梅花山庄、梅家廊路银龙六期段、石杨路银龙花园 5 期	2017 年全市积淹水点整改任务表
旭光西路	南京市水务局网站 (http://shuiwu.nanjing.gov.cn/)
运粮河西路、住建大厦门前、汇景北路周边	2022 年城市重点易积淹水点“一点一案”汇编
龙蟠中路、龙蟠南路、大明路西侧、甯子山、明匙路、秦虹路文安街	南京市主城区防汛应急预案

3 城市暴雨洪涝灾害脆弱性评估模型构建

极端暴雨情景下脆弱性评估通过以下步骤实现:①以研究区短历时强降水为背景设置极端暴雨情景进行洪水淹没模拟;②根据模拟结果,建立包含暴露度、敏感性和适应能力的城市暴雨洪涝灾害脆弱性评估指标体系,使用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)计算各指标权重;③标准化处理各项指标,依据综合指数法构造脆弱性指数,利用栅格计算器明确暴露度、敏感性和适应能力的空间分布;④可视化极端暴雨情景下的城市暴雨洪涝灾害脆弱性的分布。

3.1 极端暴雨情景下的洪水淹没模拟

我国不同区域降水差异较大,极端暴雨尚无统一标准和定义。例如:张金萍等^[18]选取 20 年一遇、100 年一遇设计暴雨和郑州 2021 年“7·20”暴雨为极端暴雨情景;俞小鼎^[19]将 1 h 雨量大于或等于 50 mm 或者 3 h 雨量大于或等于 100 mm 的降水事件称为极端短时强降水事件。

综合以上研究,本文以短历时强降水为背景设置极端暴雨情景,对于“极端性”选取 100 年一遇设计降雨情景。采用《南京市暴雨强度公式(修订)查算表》中的暴雨强度公式计算暴雨强度:

$$i = \frac{64.300 + 53.800 \lg P}{(t + 32.900)^{1.011}} \quad (1)$$

式中: i 为设计暴雨强度, mm/min; t 为降雨历时, min; P 为重现期, a。

采用设计暴雨过程更不利于城市排水的芝加哥雨型进行雨量分配。参考倪志楠等^[20]根据芝加哥雨型推求得到的南京市历时 60 min 和 120 min 综合雨峰系数 0.39,取雨峰系数 r 为 0.4。雨峰前后降雨强度可由下式计算:

$$i_a = \frac{a[(1-c)t_a/r + b]}{(t_a/r + b)^{1+c}} \quad (2)$$

$$i_b = \frac{a[(1-c)t_b/(1-r) + b]}{[t_b/(1-r) + b]^{1+c}} \quad (3)$$

式中: i_a 、 i_b 分别为峰前、峰后瞬时降雨强度, mm/min; t_a 、 t_b 分别为峰前、峰后降雨历时, min; a 、 b 、 c 为常数,由暴雨强度公式中的地区系数与暴雨重现期决定。

南京市 100 年一遇 1 h 雨量达 106.1493 mm,符合极端短时强降水定义。本文选用 MIKE 一二维耦合模型模拟研究区不同降雨强度下的洪水淹没情况。

3.2 评价指标体系构建与权重计算

3.2.1 指标选取

根据本文对城市暴雨洪涝灾害脆弱性概念的界定,从暴露度、敏感性和适应能力方面选取指标构建城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价指标体系,如图 3 所示。

a. 暴露度表征洪涝环境下的承灾体暴露情况,因此从洪涝因素和承灾体两方面选取评价指标。根据极端暴雨情景下的洪涝模拟结果选取最大淹没水深和时段末淹没水深作为洪涝因素指标,根据 GB 51222—2017《城镇内涝防治技术规范》和 GB 50352—2019《民用建筑设计统一标准》,当城市中积水深度超过 15 cm 时有内涝风险,机动车行驶受阻;当积水深度超过 40 cm 时有严重内涝风险,建

筑物受到威胁。此外,选取人口密度、GDP 密度、道路密度和建筑物密度反映承灾体暴露程度。

b. 敏感性指标选取敏感区域分布和敏感土地利用类型。人民群众的生命财产高度聚集的区域遭受洪水灾害将产生更加严重的后果,包括教育机构、文化服务场所、企业商场、地铁口等。不同土地利用与覆盖类型对洪水的敏感性不同,其中耕地和居民用地的敏感性较高。

c. 适应能力方面,生态水文调节服务能够调节地表径流,缓解暴雨洪涝灾害^[21];工程措施如水库、水闸、路涵等,非工程措施如雨量站、水位站、自动监测站等可有效提高防灾准备能力^[22];政府部门及时发布洪水预警、组织救援等风险管理措施可大幅减轻伤亡损失。因此分别以水文调节价值、水利设施防灾能力、政府部门调控能力作为适应能力指标。

3.2.2 指标权重计算

本文采用 8.1 m 精度栅格进行脆弱性评价,为避免栅格数据失真导致客观赋权法、组合赋权法失去客观性意义,或栅格计算量过于庞大导致计算烦琐,故采用主观赋权的 AHP 进行指标权重确定。

指标权重的计算步骤如下:①构建层次结构,根据指标体系,顶层为目标层,最底层(C)为指标层,中间层(B)为准则层;②构造判断矩阵,对同一层次中的各项因素进行两两比较,运用 1~9 位标度描述两个因素之间的相对重要性;③层次单排序和一致性检验,以一致性系数作为检验指标,一致性系数小于 0.1 时,一致性检验符合要求,否则需重新构建判断矩阵,直至通过一致性检验;④对总层次排序并进行一致性检验,最终得到层次排序结果。根据排序结果采用方根法计算得到各指标权重,如图 3 所示。

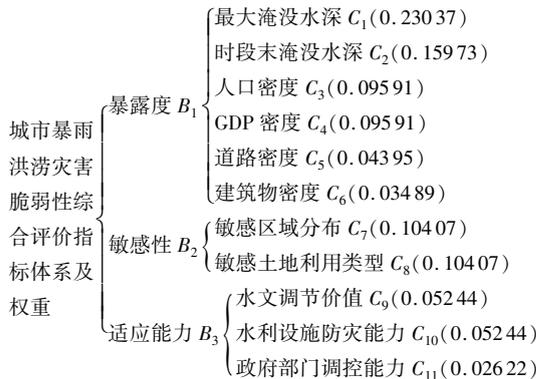


图 3 城市暴雨洪涝灾害脆弱性综合评价指标体系及权重

3.3 脆弱性综合指数

基于综合指数法,根据本文界定的城市暴雨洪涝灾害脆弱性内涵及评价指标体系(图 3)构建脆弱性指数,极端暴雨情景下的城市洪涝灾害脆弱性可以表示为

$$V = w_E E + w_S S + w_A A \quad (4)$$

式中: V 为脆弱性指数; E 、 S 、 A 分别为暴露度、敏感性和适应能力指数; w_E 、 w_S 、 w_A 分别为暴露度、敏感性和适应能力指数权重。

根据城市暴雨洪涝灾害脆弱性内涵可知,暴露度与敏感性对脆弱性具有正向作用,适应能力具有反向作用。

3.4 脆弱性等级划分

参考文献[22-23]对城市暴雨洪涝灾害脆弱性等级的划分,确定脆弱性等级划分阈值,分为低($0 \leq V < 0.1$)、较低($0.1 \leq V < 0.15$)、中等($0.15 \leq V < 0.2$)、较高($0.2 \leq V < 0.3$)和高($0.3 \leq V \leq 1$)共 5 个脆弱性等级。

4 结果与分析

4.1 脆弱性影响因素

4.1.1 暴露度

根据南京市暴雨强度公式设计 100 年一遇的 2 h 降雨强度,设计暴雨过程线如图 4 所示。由图 4 可知,雨峰出现在第 48 分钟,设置的极端降雨情景短短 2 h 降水总量高达 128 mm,城市排水压力大,极易形成积淹水甚至涝灾。

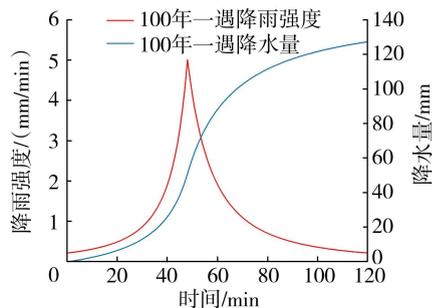


图 4 设计暴雨过程线

将设计暴雨过程线输入通过率定和验证的 MIKE 模型,模拟研究区不同降雨强度下的洪水淹没情况。随着降雨时间推进,积水范围和深度不断增加,到达雨峰时形成大范围积水,到模拟时段末积水仍未退却,积淹水点较多,如图 5(a)所示。约半数淹没范围达到 1 m 左右的水深,有部分区域达到 2 m 甚至 3 m 以上的极端水深。最大水深的淹没范围与时段末淹没范围相似但更广,其水深值也更高,最大水深分布如图 5(b)所示。对比遥感影像,其中水深异常高的区域与历史积淹水点信息和相关网络搜索结果(表 2)一致,符合实际。

图 6 为标准化处理后的人口密度、GDP 密度、道路密度和建筑物密度的空间分布。由图 6(a)可知,研究区内西北部人口较为稠密,东南部较为稀疏。东南部存在耕地、林地、在建楼盘、机场旧址、驾校等,人口密度相对西北部较低。西部人口密度较

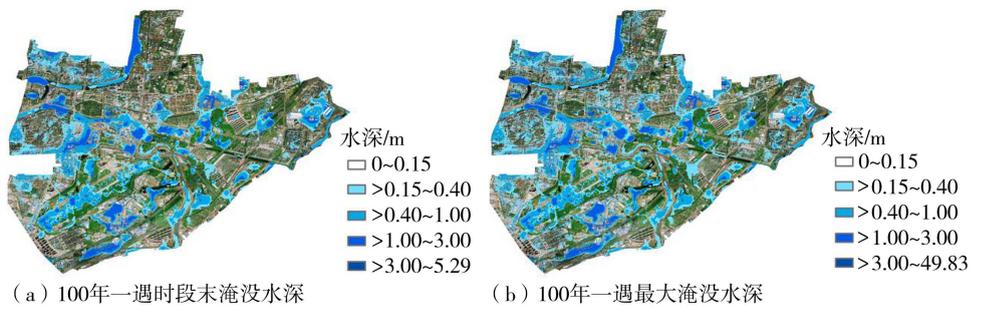


图5 模拟淹没水深

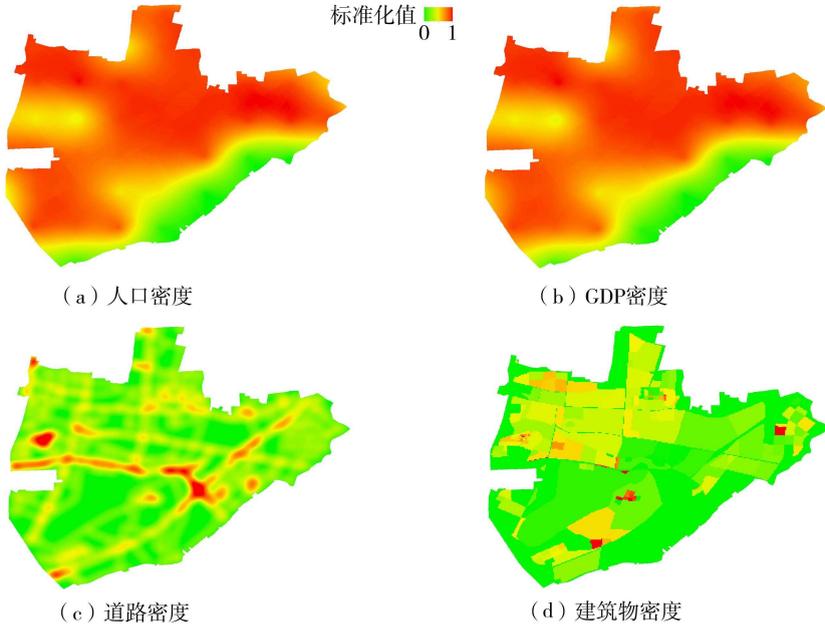


图6 承灾体暴露度指标空间分布

低的地区分别为秦淮河武定门闸、月牙湖水体及燕子门地铁站附近,符合实际情况。

由于人口密度与 GDP 密度两项数据采用相同的因子通过多因子权重分配法进行展布,研究区 GDP 密度空间分布(图 6(b))规律与人口密度空间分布基本一致。

道路密度(图 6(c))高的区域主要分为两类:①一级主干道、内环线、国道、高速公路交错处,如内环南线与京岚线(104 国道)在 S87 南京支线汇集;②密集居民建筑物的服务型道路,如秦虹街道的几个住宅区。这些区域一旦发生积淹将对城市交通和居民住行产生威胁。

建筑物密度空间分布(图 6(d))总体与人口密度空间分布相一致,呈西北高、东南低的走势,在个别地区如东南部的保利文华、金陵华夏中心等在建楼盘,东北部的南京乐金熊猫电器有限公司生产厂房密度较高,结合遥感影像认为与实际情况相符。

根据暴露度指标权重(图 3),计算得到 100 年一遇设计暴雨下的研究区暴露度指数如图 7 所示,研究区暴露度指数总体呈西北强东南弱趋势,除秦虹街道,红花街道夹岗村、双桥新村、林地,月牙湖街

道月牙湖公园,光华路街道撇洪河沿岸外基本呈中等或较高暴露度,积淹水严重的石杨路、胜利村路、紫杨路、京岚线积淹片区,秦淮科创集团,象房村小区,南部新城部分区域呈高暴露度。

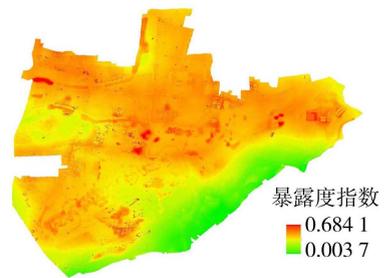


图7 研究区暴露度指数分布

4.1.2 敏感性

研究区内教育机构、文化服务场所、风景区、企业、大型商场、重要交通设施展布如图 8(a)所示。敏感区域在秦虹街道和红花街道交界处、月牙湖街道大光路以南、光华路街道运粮河沿岸、红花街道南部住宅区较为密集。

根据每种土地利用类型对极端暴雨情景下的城市洪涝敏感程度,将敏感性分为 5 级,并对其赋值,

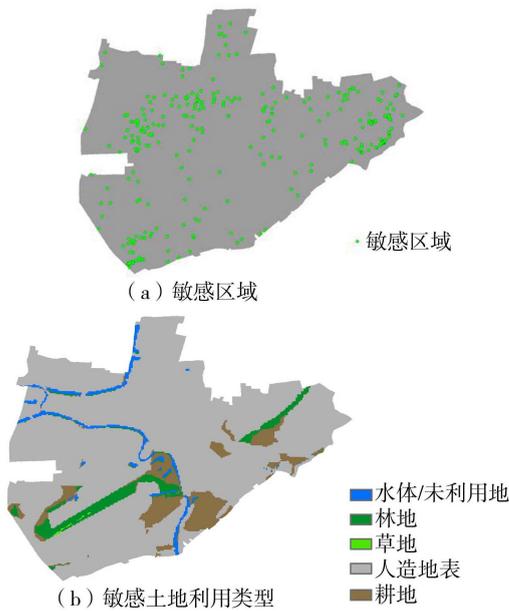


图8 敏感区域与敏感土地利用类型空间分布

参考陈萍等^[24]对不同土地利用类型赋值,将水体或未利用地赋值为0,林地赋值为1,草地赋值为2,人造地表赋值为3,耕地赋值为4,得到敏感土地利用类型赋值如图8(b)所示。

根据敏感性指标权重(图3),利用栅格计算器进行叠加计算得到研究区敏感性指数如图9所示。研究区敏感性程度最低的区域为水体、林地和草地,其次为人造地表中的非敏感区域,较高的为耕地,最高的为人造地表中的敏感区域。

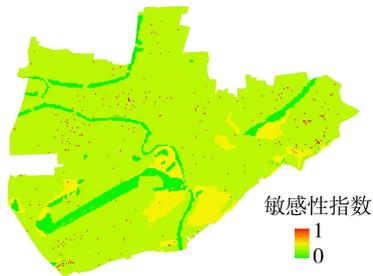


图9 研究区敏感性指数分布

4.1.3 适应能力

水文调节价值越大,适应能力越强,脆弱性越小,图10(a)为正向标准化处理后的水文调节价值分布图。水文调节价值较高的区域为月牙湖、秦淮河和响水河汇集处,价值较低的区域为水体相对较少的人造地表、耕地等。

距水利设施越近,水利设施防灾能力越强,适应能力越强,标准化处理后的水利设施防灾能力空间分布如图10(b)所示。水利设施多集中在秦淮河、月牙湖、友谊河水体及人口较为密集的区域。

距政府部门越近,政府部门调控能力越强,适应能力越强,标准化处理后的政府部门调控能力空间分布如图10(c)所示。政府部门分布呈北密南疏,

红花街道的大部分区域、大光路街道西北角以外尤为稀疏。

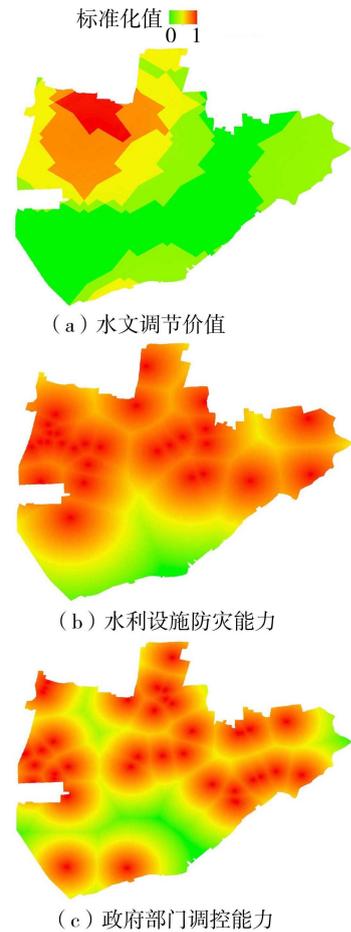


图10 适应能力指标空间分布

根据适应能力指标权重(图3),利用栅格计算器进行叠加计算得到研究区适应能力指数如图11所示,研究区适应能力呈北强南弱趋势,月牙湖街道、秦虹街道及友谊河以西适应能力最强,友谊河以东适应能力中等,红花街道适应能力最弱。

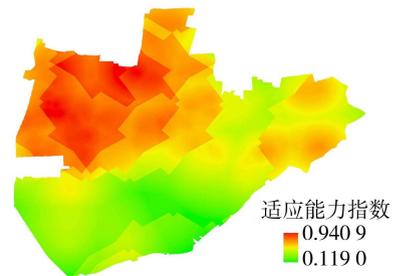


图11 研究区适应能力指数分布

4.2 脆弱性分布

根据综合指数法叠加计算得到100年一遇设计暴雨下的研究区脆弱性指数为0.0845~0.5730(图12(a)),脆弱性等级分布如图12(b)所示。

研究区脆弱性程度低的区域占比11.04%,较低的区域占比18.92%,分布相对集中,分别为月牙湖、秦淮河(研究区内上下游两端)、部分秦淮河支

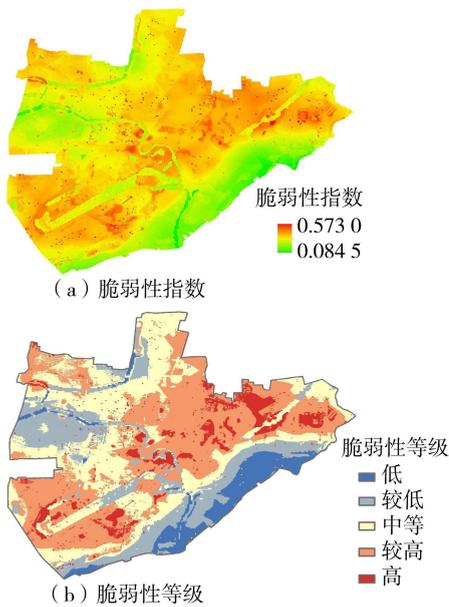


图 12 研究区脆弱性分布

流(清水塘路一段)一类水体及林地,暴露度和敏感性较低而适应能力较强的秦虹街道以及人口密度及GDP密度较低的东南、东部地区;其余大部分区域为中等或较高脆弱性,分别占总面积的47.91%和21.70%。较高脆弱性区域多集中在红花街道和光华路街道,包括红花街道大明路西侧住宅区、机场跑道旧址及南部新城其他在建楼盘,光华路街道梅家廊路银龙雅苑、东北部住宅区、科创企业及部分耕地,少部分区域位于大光路西侧街道住宅区、月牙湖街道东侧住宅区;脆弱性最高的区域仅占0.44%,分布在京岚线以东石杨路以北的耕地,淹没水深值突出的紫杨路东侧住宅区,以及光华路街道、红花街道的敏感区域,上述区域与研究区历史积水点高度契合,符合实际。

4.3 讨论

研究区脆弱性较高的区域分布符合两个特征:一是主要位于秦淮河、友谊河沿岸,二是高度城市化地区,高度城市化地区极端降雨趋势明显,同时影响了地表水文要素及产汇流的过程,脆弱性程度大大加深。

这些区域脆弱性成因大致相似,洪水淹没模拟的淹没范围较大,水深较高,尤其是红花街道区域;同时其人口密度、GDP密度较高,水文调节价值较低,且都存在耕地,因此暴露度和敏感性高而适应能力低。

研究区高脆弱性区域可按以下角度分类:

a. 河流沿岸且地势较为平坦的区域。如友谊河左岸(紫金南苑—钟山峰景苑—万达江南明珠)和秦淮河中部沿岸(银龙雅苑—七桥瓮生态湿地公园—云锦四季府),响水河下游与东风河交汇处,秦淮河支流沿岸(象房村路、酒精厂路)。

b. 交通路网中的低洼区域、立交桥下易形成积

水的区域。如大明路、明匙路、窖子山路、石杨路、紫杨路、京岚线、卡子门大桥高架等。

c. 人口稠密、GDP产值高、暴露程度较高的居民住宅区与企业中心。如紫金南苑、银龙雅苑、汇景家园、金陵华夏中心、紫杨佳园、万达紫金明珠和秦准科创集团等。

5 结论

a. MIKE 一二维耦合模型用于本文研究区的洪水淹没模拟具有较强的置信度,可用于暴露度指标中最大淹没水深和时段末淹没水深的获取。随着降雨强度的增强,研究区积水点明显增多,积水深度显著增加,极端水深分布更广。

b. 在防洪准备和城市规划中,应着重关注人口密度和GDP密度较高的区域,减轻人员伤亡和财产损失;对于建筑物密度和道路密度较高的区域应优先提高管网排涝标准,以防大面积内涝;政府部门还应加快响应速度,及时处理内涝情况。相关部门应根据脆弱性空间分布,设计相应的防灾减灾缓解措施,对脆弱性较高的居民住宅区和企业中心设立不同级别洪水相应响应程序,提出不同预案等。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [3] MÜLLER A, REITER J, WEILAND U. Assessment of urban vulnerability towards floods using an indicator-based approach: a case study for Santiago de Chile [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, 11(8): 2107-2123.
- [4] ERENA S H, WORKU H. Urban flood vulnerability assessments: the case of Dire Dawa City, Ethiopia [J]. Natural Hazards, 2019, 97(2): 495-516.
- [5] NAZEER M, BORK H R. A local scale flood vulnerability assessment in the flood-prone area of Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan [J]. Natural Hazards, 2021, 105(1): 755-781.
- [6] CHAN S W, ABID S K, SULAIMAN N, et al. A systematic review of the flood vulnerability using geographic information system [J]. Heliyon, 2022, 8(3): e09075.
- [7] TANAKA T, KIYOHARA K, TACHIKAWA Y.

- Comparison of fluvial and pluvial flood risk curves in urban cities derived from a large ensemble climate simulation dataset: a case study in Nagoya, Japan [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124706.
- [8] MUTHUSAMY M, RIVAS CASADO M, SALMORAL G, et al. A remote sensing based integrated approach to quantify the impact of fluvial and pluvial flooding in an urban catchment [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 577.
- [9] 陈轶, 刘涛, 张峰, 等. 面向城市洪涝的社会脆弱性空间识别与规划策略: 以南京市为例 [J]. *城市发展研究*, 2023, 30(2): 23-31. (CHEN Yi, LIU Tao, ZHANG Feng, et al. The spatial identification of social vulnerability to urban floods and planning strategy: a case study of Nanjing [J]. *Urban Development Studies*, 2023, 30(2): 23-31. (in Chinese))
- [10] 黄晶, 余靖雯. 长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性评估及影响因素分析 [J]. *河海大学学报(哲学社会科学版)*, 2020, 22(6): 39-45. (HUANG Jing, SHE Jingwen. Vulnerability assessment and influencing factors analysis of urban flood disaster in Yangtze River Delta city cluster [J]. *Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences)*, 2020, 22(6): 39-45. (in Chinese))
- [11] 汪群, 虞刘悦, 吴兆丹, 等. 长江经济带城市洪涝脆弱性评估: 以南京、武汉和成都为例 [J]. *水利经济*, 2020, 38(3): 55-61. (WANG Qun, YU Liuyue, WU Zhaodan, et al. Assessment of vulnerability to urban floods in Yangtze River economic belt: taking Nanjing, Wuhan and Chengdu as examples [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2020, 38(3): 55-61. (in Chinese))
- [12] WATSON R T, ALBRITTON D L, BARKER T, et al. Climate change 2001: synthesis report. A contribution of working groups I, II, and III to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [13] DE ANDRADE M M N, SZLAFSZTEIN C F. Vulnerability assessment including tangible and intangible components in the index composition: an amazon case study of flooding and flash flooding [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 903-912.
- [14] CUTTER S L, FINCH C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(7): 2301-2306.
- [15] WEIS S W M, AGOSTINI V N, ROTH L M, et al. Assessing vulnerability: an integrated approach for mapping adaptive capacity, sensitivity, and exposure [J]. *Climatic Change*, 2016, 136(3/4): 615-629.
- [16] 姚蕊, 杨群涛, 张书亮. 城市暴雨内涝灾害脆弱性研究综述 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 93-100. (YAO Rui, YANG Quntao, ZHANG Shuliang. Review on vulnerability of urban rainstorm waterlogging disaster [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 93-100. (in Chinese))
- [17] 高玉琴, 徐佳颖, 袁晨禹, 等. 南京市不同城市化水平区域洪灾风险评价 [J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(6): 120-128. (GAO Yuqin, XU Jiaying, YUAN Chenyu, et al. Flood risk assessment of regions at different urbanization levels in Nanjing City [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(6): 120-128. (in Chinese))
- [18] 张金萍, 张朝阳, 左其亭. 极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(2): 30-37. (ZHANG Jinping, ZHANG Zhaoyang, ZUO Qiting. Urban waterlogging simulation and emergency response capacity evaluation with extreme rainstorms [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2023, 44(2): 30-37. (in Chinese))
- [19] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法 [J]. *暴雨灾害*, 2013, 32(3): 202-209. (YU Xiaoding. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2013, 32(3): 202-209. (in Chinese))
- [20] 倪志楠, 李琼芳, 杜付然, 等. 南京市短历时设计暴雨雨型研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(2): 57-62. (NI Zhinan, LI Qiongfang, DU Furan, et al. Study on design of rainstorm pattern based on short duration in Nanjing City [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(2): 57-62. (in Chinese))
- [21] 蒋伟阳, 田健, 艾合麦提·那麦提, 等. 应对暴雨洪涝灾害的平原城市生态水文调节服务供需评估: 以天津市为例 [J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 4928-4942. (JIANG Feiyang, TIAN Jian, NAMAITI A, et al. Assessment of the supply-demand relationship of plain urban eco-hydrological regulation service in response to rainstorm-flood disaster: a case study of Tianjin City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4928-4942. (in Chinese))
- [22] 杨伟超. 山洪灾害多尺度格局演变分析与脆弱性评估调控研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [23] 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))
- [24] 陈萍, 王兴玲, 陈晓玲. 基于栅格的鄱阳湖生态经济区洪灾脆弱性评价 [J]. *地理科学*, 2012, 32(8): 958-964. (CHEN Ping, WANG Xingling, CHEN Xiaoling. Flood vulnerability assessment of Poyang Lake Economical Ecological Zone at raster level [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8): 958-964. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-05-16 编辑: 俞云利)