

南京市不同城市化水平区域洪灾风险评价

高玉琴¹, 徐佳颖¹, 袁晨禹¹, 李凯², 周昕³, 邱娅柳⁴

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 宿迁市水利局, 江苏宿迁 223800; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 311122; 4. 南京市高淳区水资源管理中心, 江苏南京 211399)

摘要:近年来,“城市看海”“城市看江”现象时有发生,引起专家学者的广泛关注。为研究城市化水平与洪灾风险之间的关系,综合考虑致灾因子、孕灾环境、承灾体、防洪减灾能力等因素,利用 ArcGIS 技术和综合评价法,以南京市部分行政区为例,进行不同城市化水平区域洪灾风险评价。结果表明:随着城市化水平的提高,研究区的洪灾风险总体呈上升趋势,洪灾风险与城市化水平基本呈正相关性,其中秦淮区和鼓楼区的风险等级最高,其次为建邺区和雨花台区,而江宁区和溧水区的风险等级较低,一直维持在较低风险的水平。研究结果能较好地反映南京市洪涝灾害风险的实际分布情况,表明研究方法的有效性和研究成果的可靠性,可为有关部门洪灾风险管理提供理论支撑。

关键词: 城市化水平; 区域洪灾风险; 风险评价; 南京市

中图分类号: TV122⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)06-0120-09

Flood risk assessment of regions at different urbanization levels in Nanjing City

GAO Yuqin¹, XU Jiaying¹, YUAN Chenyu¹, LI Kai², ZHOU Xin³, QIU Yaliu⁴

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Suqian Water Resources Bureau, Suqian 223800, China; 3. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 4. Nanjing Gaochun District Water Resources Management Center, Nanjing 211399, China)

Abstract: In recent years, the phenomena of “seeing the sea in cities” and “seeing the river in cities” have occurred from time to time, which have aroused widespread concern among experts and scholars. In order to study the interaction between urbanization level and flood risk, we used ArcGIS technology and the comprehensive evaluation method to evaluate the flood risk in some administrative districts of Nanjing City at different urbanization levels, taking into account the factors of disaster-causing factors, disaster-breeding environment, disaster-bearing body and flood mitigation capacity. The results show that with the increase of urbanization level, the overall flood risk in the study area shows an increasing trend, and the flood risk of the districts is basically positively correlated with the urbanization level, among which Qinhuai and Gulou district are at the highest risk level, followed by Jianye and Yuhuatai district, whereas Jiangning and Lishui district have been maintaining a low risk level. The research results can correctly reflect the actual distribution of flood risk in Nanjing, indicating the validity of the research method and the reliability of the research results. Therefore, it can provide a theoretical support for flood risk management of relevant government departments.

Key words: urbanization levels; regional flood risk; risk evaluation; Nanjing City

1 研究背景

随着全球气候变暖和城市化进程的不断推进,城市洪涝灾害频发,造成严重的人口伤亡和财产损失^[1],

城市洪涝灾害风险评价可以帮助有关部门提出针对性的防灾减灾预防措施,提高应急管理能力,减轻受灾损失。我国学者孔锋等^[2]分析了不同气象站点的极端降水强度与城市化水平的相互关系,结果表明城市化对

收稿日期:2022-04-10; 修回日期:2022-07-26

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:高玉琴(1978-),女,四川成都人,博士,教授,博士生导师,主要从事水资源规划与水利经济、城市洪涝灾害研究。

中国大部分气象站产生了不同程度的影响,尤其使得环渤海、长三角和珠三角地区的极端降水强度增大,还表明夏季极端降水的平均强度与城市化水平有很显著的线性正相关关系。对这一结论进行思考,洪灾风险与城市化水平的关系如何?如何研究洪灾风险与城市化水平之间的关系?本文以上述两个问题为研究导向,开展城市洪涝灾害风险评价研究。

城市洪涝灾害风险评价主要有4种方法,一是基于历史灾情数据进行概率分析^[3];二是建立指标体系^[4],运用模糊综合评判法^[5-6]、灰色聚类分析法^[7]、模糊聚类因子分析^[8]、智能算法^[9]等对洪涝灾害进行综合评价;三是基于洪涝灾害发生时的遥感图像、格网化的地理背景数据^[10]、空间化的社会经济数据^[11]等,利用 ArcGIS 的空间数据处理、空间分析及模型构建等功能开展洪涝灾害风险评估研究^[12];四是运用情景模拟技术建立水文水力学模型(如 MIKE 模型^[13]、SWMM (storm water management model)^[14]等)模拟洪涝过程,进而开展洪灾风险评价。该4种方法也可彼此结合,如张国芳等^[15]应用 GIS 技术、HEC-RAS(The Hydraulic Engineering Center-river analysis system)水文模型对汉江上游安康段不同重现期情景下的洪水灾害进行了风险评估;苑希民等^[16]从致灾因子、孕灾环境和承灾体3个方面建立指标体系,将模糊算法与层次分析法相结合确定各指标相对权重,并利用 GIS (geographic information system) 技术将多维指标映射为一维评判准则,建立了洪灾风险综合评价模型;陈鹏等^[17]结合自然灾害指数法、层次分析法和 GIS 技术,开展了哈尔滨市洪灾风险评价。

综合分析上述4种方法的优缺点,本文采用“指标体系+GIS技术”方法,其优势在于数据易于获取、建模相对简便,从各准则层选取指标建立指标体系,能够较为全面地反映洪灾风险程度,运用 GIS 强大的空间数据处理和分析功能可对区域洪灾风险的空间分布进行可视化表达。

南京市地处长江下游,属亚热带季风型气候,城市化水平较高,暴雨积涝现象发生频率较高、影响较大。因此本文以南京市部分行政区为研究区域,建立指标体系,采用综合评价法和 ArcGIS 技术,开展不同城市化水平区域的洪灾风险评价研究,以期南京市城市洪涝灾害风险管理提供理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

南京市地处江苏省西南部,是江苏省政治、文

化、经济中心,素有“东西要道、南北咽喉”之称。截至2019年,全市下辖11个区,总面积6587 km²,建成区面积约972 km²,常住人口850万人,城镇人口707.2万人,城镇化率达83.2%。

南京市属于北亚热带湿润季风气候区,四季分明。多年平均年降水量为1090.4 mm,从南向北依次递减;汛期(5-9月)降水量约占全年降水量的60%~70%;每年6-7月为梅雨期,期间常遭受多次大暴雨袭击,容易形成洪涝灾害;7-10月间还常会遭受台风影响。本文选取洪涝频发的秦淮河水系、石臼湖水系涉及的南京市鼓楼区、秦淮区、建邺区、雨花台区、江宁区、溧水区作为研究区(如图1所示)。研究区地理坐标为北纬31°22'~32°09',东经118°28'~119°14'。研究区总面积为2960.49 km²,占南京市总面积的44.95%。

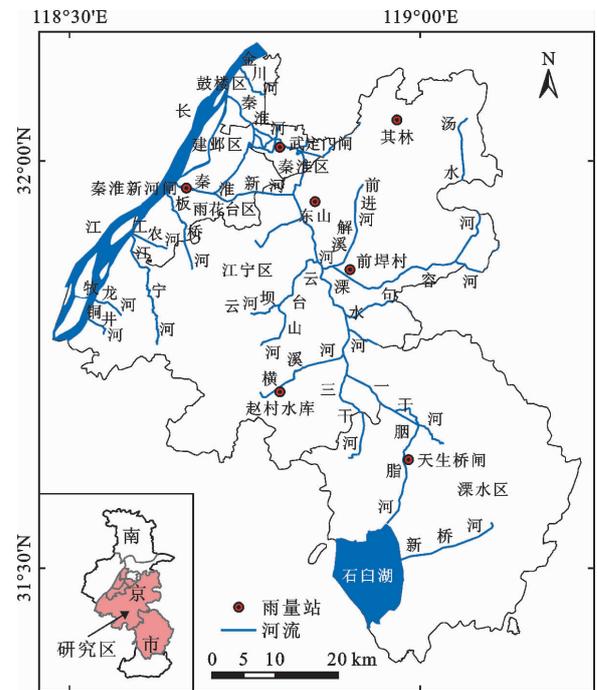


图1 研究区地理位置示意图

2.2 数据来源

(1)行政区划数据。采用2020年南京市行政区划数据。

(2)地形数据。通过地理空间数据云网站下载南京市 ASTER GDEM 30 m 分辨率数字高程数据,并运用 ArcGIS 软件的栅格裁剪功能基于研究区矢量数据得到研究区数字高程模型(digital elevation model, DEM),如图2所示。

(3)主要水系数据。考虑研究区属于平原河网地区,利用 GIS 直接提取的水系数据效果较差,通过 91 卫图助手软件下载中国矢量水系数据,参照研究

区实际水系资料,按照研究区范围进行裁剪得到主要水系数据。研究区主要水系见图1。

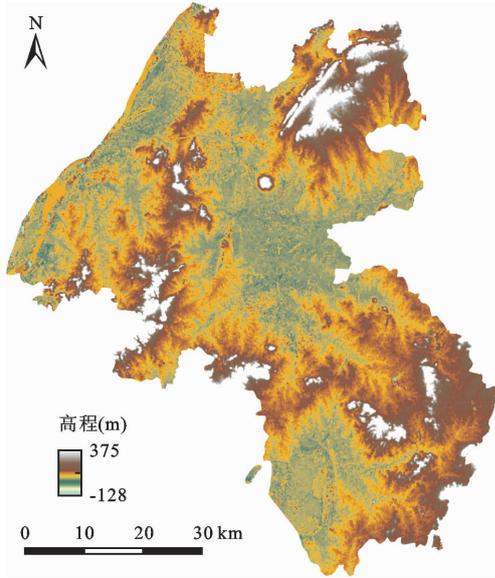


图2 研究区DEM图

(4)降雨数据。降雨数据采用1986-2018年33 a间研究区内赵村水库、武定门闸等7个雨量站

点的日降雨数据。根据该7个雨量站点的数据在空间上生成点图层,并利用ArcGIS根据点图层生成泰森多边形,最终划分的泰森多边形如图3所示,各雨量站对应的泰森多边形面积权重见表1,根据权重计算出研究区的面雨量数据。

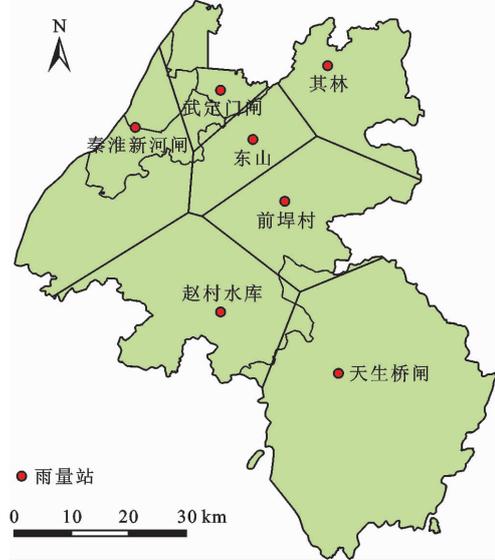


图3 研究区泰森多边形划分

表1 研究区各雨量站权重

雨量站	赵村水库	东山	武定门闸	前埠村	其林	天生桥闸	秦淮新河闸
权重	0.167	0.061	0.054	0.131	0.097	0.347	0.143

(5)土地利用数据。遥感影像数据是土地利用信息的重要来源,基于研究需要,从地理空间数据云网站下载2000、2010、2018年研究区遥感影像数据,并借助遥感图像处理工具ENVI(the environment for visualizing images)解译获得土地利用数据。

(6)土壤数据。研究区土壤数据来源于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD)(2009年,比例尺1:10000),包括HWSDCHINA栅格数据和HWSD_DATA属性表。

(7)其他数据。研究区人口、经济数据来源于《南京市统计年鉴》,每千人床位数来源于《南京卫

生年鉴》,居民受教育率、水利设施密度和社会保险投保率来源于相关文献、水利规划及专家评判。

(8)典型年选取。从人口城镇化率(常住人口/常住人口)和GDP两个方面考虑选取研究区的城市化典型年。2000-2018年南京市人口城镇化率、GDP变化趋势如图4、5所示。由图4、5中的变化趋势可以看出,2000-2010年南京市人口城镇化率增速相对较快,2010年之后增速趋缓,而GDP增速在2010年之后明显增大。因此根据代表性原则,选取2000、2010、2018年为城市化典型年开展区域洪灾风险分析。

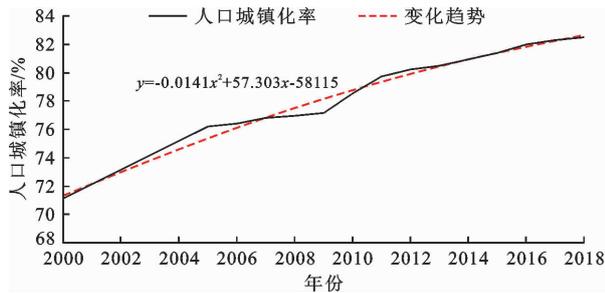


图4 2000-2018年南京市人口城镇化率变化趋势

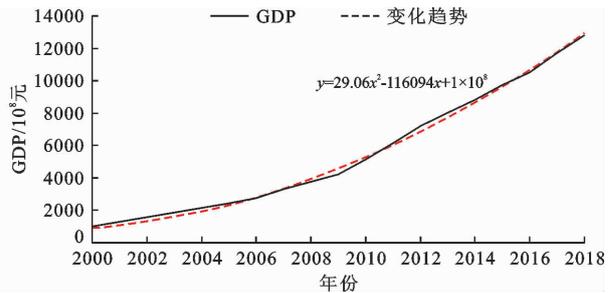


图5 2000-2018年南京市GDP变化趋势

2.3 研究方法

2.3.1 指标体系构建 在研究灾害风险时,国内学者往往采用灾害系统论的观点,即在一定的孕灾环境下,由致灾因子诱发并作用于承灾体即形成了洪水灾情。孕灾环境、致灾因子、承灾体之间相互作用,共同影响着洪水灾情,形成了一个具有一定结构、功能及特征的复杂体系,即洪水灾害系统^[18],如图 6 所示。

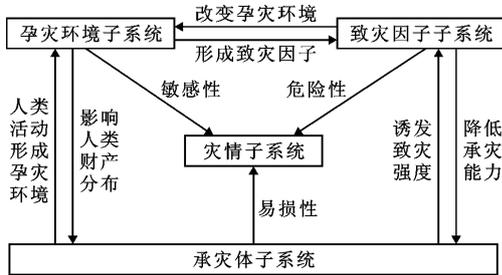


图 6 洪水灾害系统示意图

城市区域的洪灾风险特点较其他区域有所不同。城市人均 GDP 较高,避难所和水利设施较多,防洪减灾的能力更强。但随着城市化不断发展和社会经济持续增长,地区人口密度骤增、生态环境条件恶化等一系列问题也日益突出,间接性地导致地区局部气候和水循环条件产生改变,洪灾强度和频次不断增加。在城市化进程中,城市地表硬化使地面吸水能力大幅度下降,产汇流过程加快,城市排涝能力不足,短时间内形成局部区域积水导致内涝^[19]。相对于乡村地区,城市人口和固定资产较为集中,洪涝灾害造成的经济损失更大。

结合图 6,城市化对区域洪灾风险的影响主要表现为致灾因子危险性和孕灾环境敏感性激增、承灾体易损性增大以及防洪减灾能力提升,如图 7 所示。因此从致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性和防洪减灾能力 4 个方面构建洪灾风险评价指标体系。

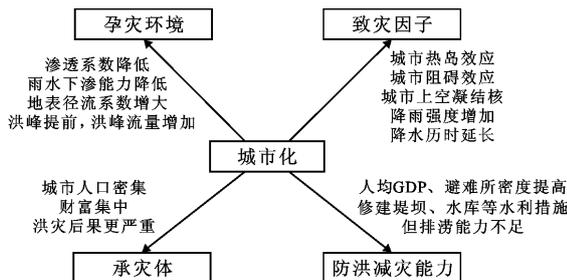


图 7 城市化对区域洪灾风险的影响示意图

(1)致灾因子危险性。城市洪灾的主要致灾因子通常为极端暴雨事件,降水强度、历时和范围都直

接影响着洪灾的严重程度。1986 - 2018 年期间研究区年降雨量、年最大日雨量、汛期雨量和暴雨日数有增加趋势但不显著,各降雨特征指标年际随机波动大。因此选取多年平均汛期雨量、多年平均暴雨日数、多年平均最大日雨量作为致灾因子危险性的评价指标。

(2)孕灾环境敏感性。国内孕灾环境敏感性评价选取的指标主要有地理高程^[20]、地形坡度^[21]、河网水系^[22]、距河道的距离^[23]及土地利用等。结合大量文献资料,参考刘娜^[24]对南京市主城区暴雨内涝灾害风险的评估,选取高程标准差、距水体距离、径流曲线数(CN 值)作为评价指标。

(3)承灾体易损性。承灾体易损性主要考虑洪涝灾害对社会经济的影响,可归纳为人口与经济产业两方面。人口影响因素包括人口总数、人口密度、性别比例、年龄分布等;经济和产业状况的影响因素主要有 GDP 总量、地均 GDP、农业产值等。参考大量文献资料,选取人口密度、地均 GDP、地均固定资产投资作为评价指标。

(4)防洪减灾能力。多数文献通常从 7 个方面对防洪减灾能力进行评价,即防洪排涝工程建设、城市维护保障、社会发展、科技投入、生态环境、灾害管理、应急救援^[25]。结合资料的可获得性,选取人均 GDP、每千人床位数、居民受教育率、社会保险投保率、水利设施密度作为评价指标。

综上所述,确定不同城市化水平区域洪灾风险评价指标体系如图 8 所示。

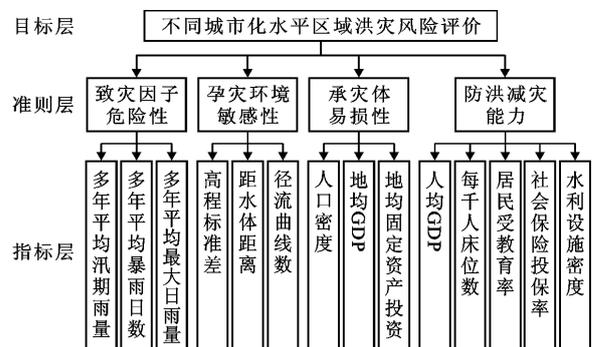


图 8 不同城市化水平区域洪灾风险评价指标体系

2.3.2 数据标准化 极差标准化是将所有指标转化为 0 ~ 1 之间的数值进行处理。对于洪灾风险的正相关型指标(正向指标)的极差标准化公式为:

$$P'_{ij} = \frac{P_{ij} - \min_i}{\max_i - \min_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

对于洪灾风险的负相关型指标(逆向指标)的极差标准化公式为:

$$N'_{ij} = \frac{\max_i - N_{ij}}{\max_i - \min_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中： P'_{ij} 为第 i 个准则层的第 j 个正向指标值； P_{ij} 为第 i 个准则层的第 j 个正向指标标准化值； N_{ij} 为第 i 个准则层的第 j 个逆向指标值； N'_{ij} 为第 i 个准则层的第 j 个逆向指标标准化值。其中，致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性为正向指标，防洪减灾能力为逆向指标。经过上述标准化处理后的评价指标，可以用于后续的综合评价分析。

2.3.3 综合评价法 综合评价法指综合考虑洪灾风险的各个具有代表性的影响因素，加权考虑各个指标，得到 1 个综合指数，从而对所有评价指标整体做出综合评价，综合指数公式如下：

$$I = \sum_{i=1}^n (Z_i \cdot w_i) \quad (3)$$

式中： I 为综合指数； Z_i 为第 i 个指标的标准值； w_i 为第 i 个指标的指标权重； n 为指标个数。

洪灾风险指数计算表达式为：

$$R = A_1 \cdot W_1 + A_2 \cdot W_2 + A_3 \cdot W_3 - A_4 \cdot W_4 \quad (4)$$

式中： R 为洪灾风险指数； A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 分别表示致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性与防洪减灾能力； W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 分别表示各自的权重。

2.3.4 指标权重确定 利用层次分析法对单因素下的影响指标进行两两比较，构造判断矩阵。本研究的判断矩阵通过 10 位相关研究专家学者的打分意见归纳分析得出，最终得到各层权重如表 2 所示。

表 2 研究区洪灾风险评价指标权重

目标层(O)	准则层(A)	准则层权重 W_i	指标层(B)	A - B 权重	O - B 权重
不同城市化水平区域洪灾风险评价	致灾因子危险性(A ₁)	0.3	多年平均汛期雨量(B ₁)	0.5666	0.1700
			多年平均暴雨日数(B ₂)	0.1104	0.0331
			多年平均最大日雨量(B ₃)	0.3230	0.0969
	孕灾环境敏感性(A ₂)	0.3	高程标准差(B ₄)	0.2498	0.0749
			距水体距离(B ₅)	0.3335	0.1001
			径流曲线数(B ₆)	0.4167	0.1250
	承灾体易损性(A ₃)	0.3	人口密度(B ₇)	0.5396	0.1619
			地均 GDP(B ₈)	0.2970	0.0891
			地均固定资产投资(B ₉)	0.1634	0.0490
	防洪减灾能力(A ₄)	0.1	人均 GDP(B ₁₀)	0.3635	0.0364
			每千人床位数(B ₁₁)	0.0957	0.0096
			居民受教育率(B ₁₂)	0.0454	0.0045
			社会保险投保率(B ₁₃)	0.0861	0.0086
			水利设施密度(B ₁₄)	0.4093	0.0409

3 结果与分析

3.1 致灾因子危险性评价

根据表 2 中给出的致灾因子危险性(A₁) 各指标权重，利用 ArcGIS 中的栅格计算器进行叠加计算，具体公式如下：

$$A_1 = 0.5666 \times B_1 + 0.1104 \times B_2 + 0.3230 \times B_3 \quad (5)$$

式中： B_1 为多年平均汛期雨量，mm； B_2 为多年平均暴雨日数； B_3 为多年平均最大日雨量，mm。

利用 ArcGIS 中的自然断点分级法进行分类，得到研究区致灾因子危险性等级分布，如图 9 所示。由图 9 可见，研究区致灾因子危险性整体呈中部高、两侧低的趋势，秦淮区与江宁区中部地区是致灾因子危险性等级最高的区域，江宁区致灾因子危险性空间分布差异较大，中部前埠村附近的致灾因子危

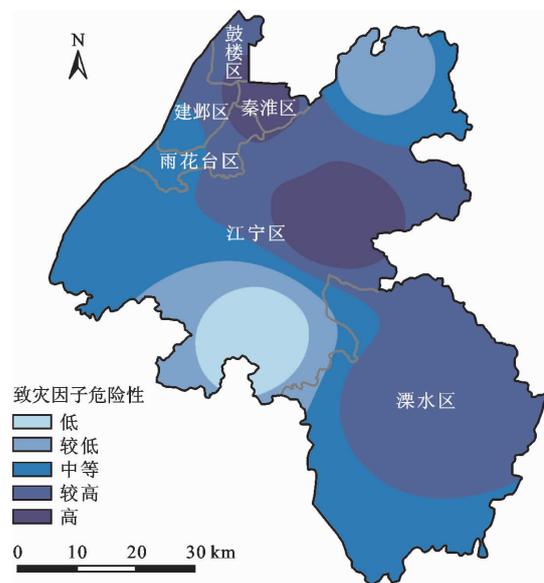


图 9 研究区致灾因子危险性等级分布

险性等级最高,其次为东北部的其林站附近,西南部的赵村水库附近致灾因子危险性等级最低。

3.2 孕灾环境敏感性评价

根据表 2 中给出的孕灾环境敏感性(A_2) 各指标权重,利用 ArcGIS 中的栅格计算器进行叠加计算,具体公式如下:

$$A_2 = 0.2498 \times B_4 + 0.3335 \times B_5 + 0.4167 \times B_6 \quad (6)$$

式中: B_4 为高程标准差, m; B_5 为距水体距离, m; B_6 为径流曲线数。

利用 ArcGIS 中的自然断点分级法进行分类,得到孕灾环境敏感性等级分布,如图 10 所示。

由图 10 可以看出,2000 - 2018 年研究区孕灾环境敏感性总体呈现增加趋势,河流湖泊以及水库附近缓冲区均为孕灾环境高敏感性区域,建成区均为孕灾环境较高敏感性区域,地形起伏较大、距离河流湖泊较远的非建成区属于孕灾环境低或较低敏感性区域。从行政区划角度分析,鼓楼区、秦淮区孕灾

环境敏感性一直较高,主要是由于城市化水平提高造成不透水表面占比增加,综合径流曲线数升高,对形成洪涝灾害具有促发作用。

3.3 承灾体易损性评价

根据表 2 中给出的承灾体易损性(A_3) 各指标权重,利用 ArcGIS 中的栅格计算器进行叠加计算,具体公式如下:

$$A_3 = 0.5396 \times B_7 + 0.2970 \times B_8 + 0.1634 \times B_9 \quad (7)$$

式中: B_7 为人口密度, 人 / km²; B_8 为地均 GDP, 10⁴ 元; B_9 为地均固定资产投资, 10⁴ 元。

对 2000、2010、2018 年研究区人口密度、地均 GDP、地均固定资产投资指标数据标准化并计算得到承灾体易损性标准值,见表 3。

利用 ArcGIS 中的相等间隔分类方法,按照承灾体易损性标准值处于 [0, 0.2)、[0.2, 0.4)、[0.4, 0.6)、[0.6, 0.8)、[0.8, 1] 划分得到研究区承灾体易损性等级分布,如图 11 所示。

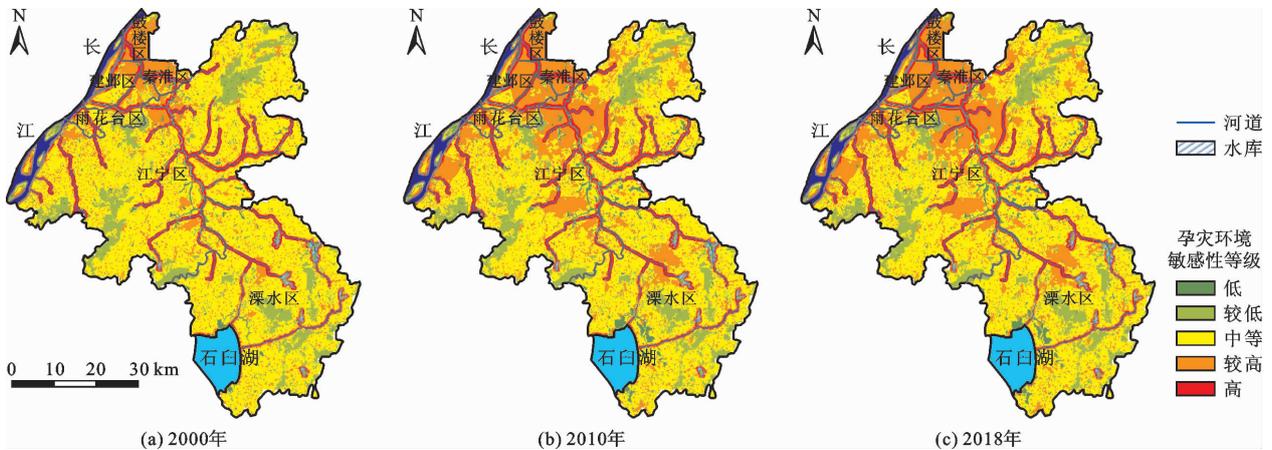


图 10 2000、2010、2018 年研究区孕灾环境敏感性等级分布

表 3 2000、2010、2018 年研究区承灾体易损性标准值

年份	指标	秦淮区	建邺区	鼓楼区	雨花台区	江宁区	溧水区
2000	人口密度	0.4376	0.1625	0.6224	0.0296	0.0039	0.0000
	地均 GDP	0.0993	0.0026	0.1007	0.0060	0.0011	0.0000
	地均固定资产投资	0.0996	0.0225	0.0689	0.0143	0.0020	0.0000
	承灾体易损性	0.2819	0.0921	0.3770	0.0201	0.0028	0.0000
2010	人口密度	0.8533	0.2023	1.0000	0.1092	0.0150	0.0008
	地均 GDP	0.3547	0.1064	0.4292	0.0596	0.0150	0.0079
	地均固定资产投资	0.1685	0.1078	0.1782	0.0822	0.0199	0.0102
	承灾体易损性	0.5933	0.1584	0.6962	0.0901	0.0158	0.0044
2018	人口密度	0.8443	0.2341	0.8706	0.1324	0.0189	0.0028
	地均 GDP	0.6663	0.2120	1.0000	0.1603	0.0502	0.0266
	地均固定资产投资	0.2334	0.2533	0.2671	0.1093	0.0225	0.0169
	承灾体易损性	0.6916	0.2307	0.8104	0.1369	0.0288	0.0122

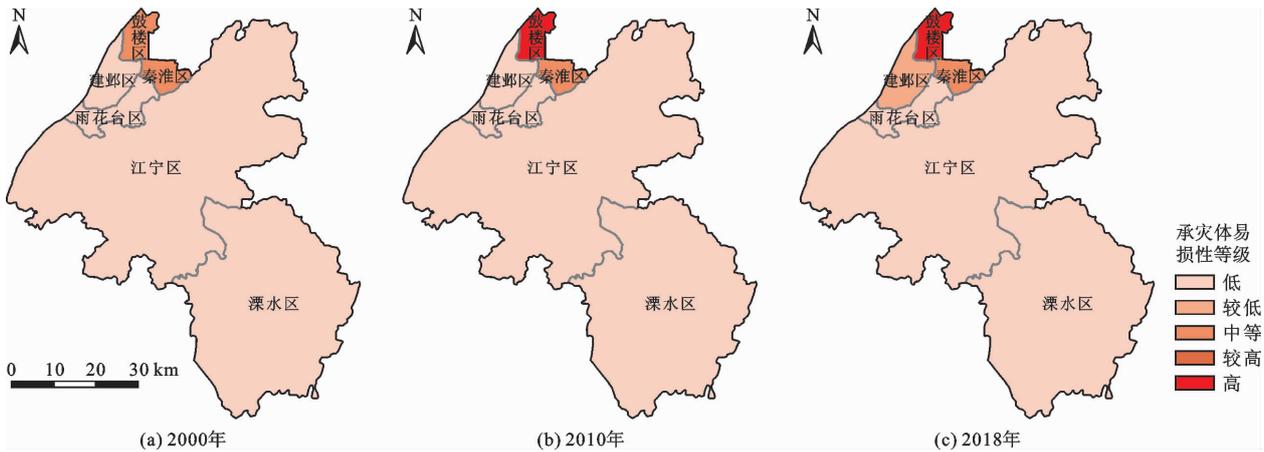


图 11 2000、2010、2018 年研究区承灾体易损性等级分布

由图 11 可见,鼓楼区 and 秦淮区的承灾体易损性与其他行政区相比更高,其他行政区主要为低等级,建邺区在 2018 年达到较低等级。

3.4 防洪减灾能力评价

根据表 2 中给出的防洪减灾能力(A_4) 各指标权重,利用 ArcGIS 中的栅格计算器进行叠加计算,具体公式如下:

$$A_4 = 0.3635 \times B_{10} + 0.0957 \times B_{11} + 0.0454 \times B_{12} + 0.0861 \times B_{13} + 0.4093 \times B_{14} \quad (8)$$

式中: B_{10} 为人均 GDP, 10^4 元; B_{11} 为每千人床位数; B_{12} 为居民受教育率,% ; B_{13} 为社会保险投保率,% ; B_{14} 为水利设施密度。

对 2000、2010、2018 年研究区人均 GDP、每千人床位数、居民受教育率、社会保险投保率、水利设施密度指标数据标准化计算得到 2000、2010、2018 年研究区防洪减灾能力标准值,见表 4。利用 ArcGIS 软件按照防洪减灾能力标准值处于 $[0, 0.2)$ 、 $[0.2, 0.4)$ 、 $[0.4, 0.6)$ 、 $[0.6, 0.8)$ 、 $[0.8, 1]$ 划分得到研究区防洪减灾能力等级分布,如图 12 所示。

由图 12 可见,2000、2010、2018 年研究区内各行政区防洪减灾能力呈增加趋势。鼓楼区、秦淮区和建邺区的防洪减灾能力与其他行政区相比更低,江宁区 and 溧水区的防洪减灾能力发展迅速,至 2018 年分别达到较高和高等级。

表 4 2000、2010、2018 年研究区防洪减灾能力标准值

年份	秦淮区	建邺区	鼓楼区	雨花台区	江宁区	溧水区
2000 年	0.1470	0.1254	0.1779	0.2124	0.2974	0.4309
2010 年	0.2118	0.1640	0.2420	0.2842	0.3717	0.5411
2018 年	0.3546	0.3495	0.4992	0.4792	0.6594	0.8266

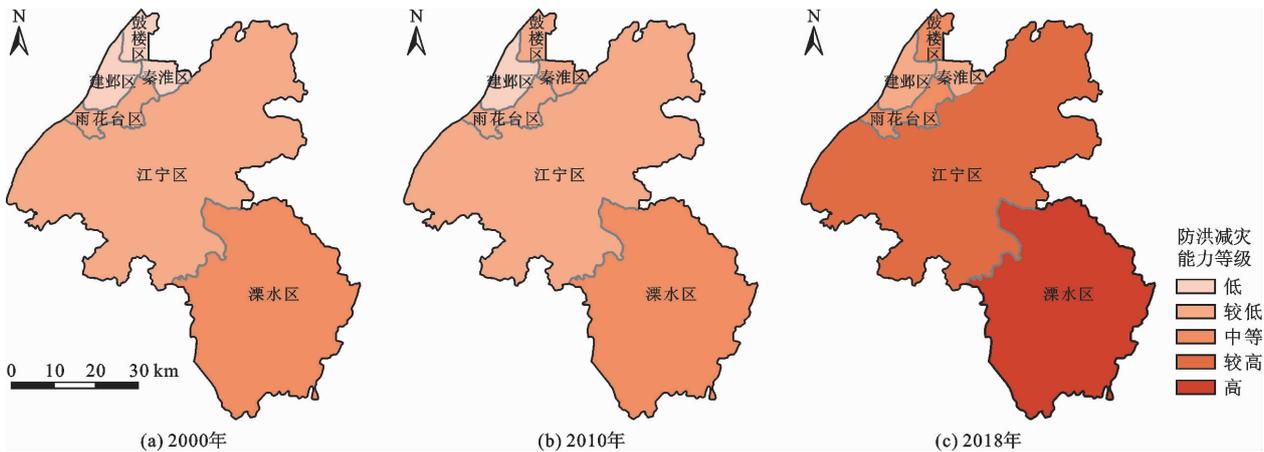


图 12 2000、2010、2018 年研究区防洪减灾能力等级分布

3.5 洪灾风险综合评价

根据表 2 中给出的各准则层指标权重,利用 ArcGIS 中的栅格计算器计算研究区洪灾风险指数 R ,具体公式如下:

$$R = A_1 \times 0.3 + A_2 \times 0.3 + A_3 \times 0.3 - A_4 \times 0.1 \quad (9)$$

参考已有文献[22]中洪水灾害风险的等级划分,按南京市实际情况略做调整,得到研究区洪灾风险等级划分,见表 5。根据公式(9)计算得到的 2000、2010、2018 年研究区洪灾风险指数的空间分布图如图 13 所示。

表 5 2000、2010、2018 年研究区洪水灾害风险等级划分表

洪灾风险等级	低风险	较低风险	中等风险	较高风险	高风险
洪灾风险指数	[0,0.25)	[0.25,0.35)	[0.35,0.45)	[0.45,0.55)	[0.55,1]

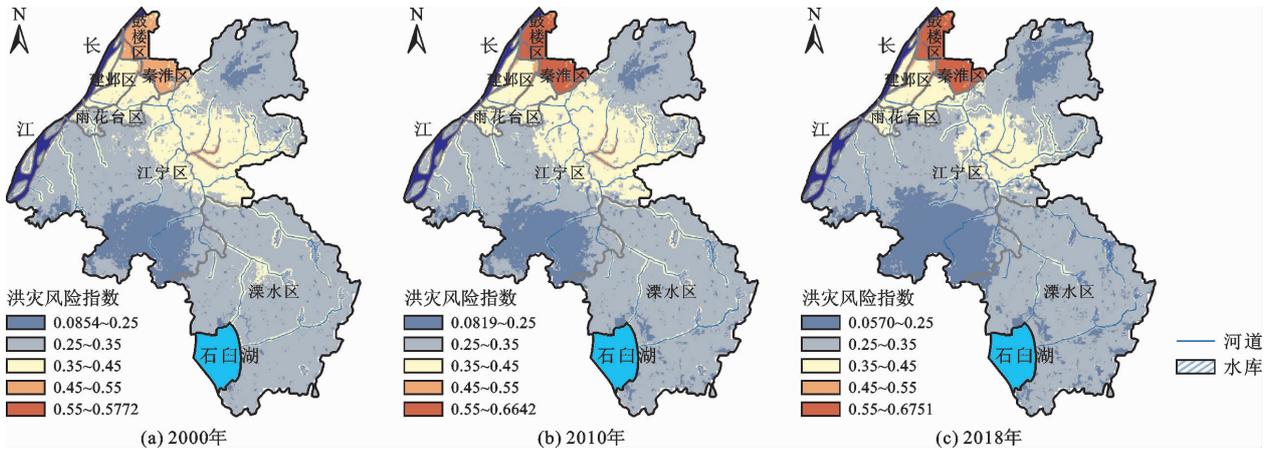


图 13 2000、2010、2018 年研究区洪水灾害风险指数空间分布

利用 ArcGIS 软件对 2000、2010、2018 年研究区各洪水灾害风险等级面积占比分别进行统计,按照最大隶属度原则,得到 2000、2010、2018 年各行政区的洪水灾害风险等级,见表 6。

表 6 2000、2010、2018 年研究区各行政区洪灾风险等级

行政区	2000 年	2010 年	2018 年
秦淮区	较高风险	高风险	高风险
建邺区	中等风险	中等风险	中等风险
鼓楼区	较高风险	高风险	高风险
雨花台区	中等风险	中等风险	中等风险
江宁区	较低风险	较低风险	较低风险
溧水区	较低风险	较低风险	较低风险

由图 13 和表 6 可知,2000、2010、2018 年研究区洪灾风险指数分别为 0.085 4 ~ 0.577 2、0.081 9 ~ 0.664 2、0.057 0 ~ 0.675 1。秦淮区和鼓楼区的洪灾风险较其他行政区而言明显较高,2000 年为较高风险,2010 和 2018 年均为高风险,建邺区和雨花台区 2000、2010、2018 年均为中等风险,江宁区 and 溧水区 2000、2010、2018 年均为低风险。秦淮区和鼓楼区的高风险值由高敏感性和高易损性为主导,江宁区 and 溧水区的低风险值因较强的防洪减灾能力而受益。

4 讨论

从时间角度,2000 - 2010 - 2018 年期间研究区的洪灾风险总体呈上升趋势,但幅度放缓;从空间角度,秦淮区和鼓楼区的风险等级最高,其次为建邺区和雨花台区,而江宁区 and 溧水区的风险等级较低,一直维持在较低风险的水平。

分析其原因,秦淮区和鼓楼区的孕灾环境敏感性和承灾体易损性都较高,城市化水平提高造成不透水表面占比增加,综合径流曲线数升高,对形成洪涝灾害具有促发作用;人口密度、地均 GDP、地均固定资产投资持续增长,造成承灾体易损性增强。但秦淮区和鼓楼区进一步扩张城市空间的可能性下降,防洪减灾能力不断加强,洪灾风险的增加幅度降低。而江宁区、溧水区面积较大,人口密度、地均 GDP 等承灾体易损性指标较低,人均 GDP 等防洪减灾能力指标较高,因此洪灾风险有减弱趋势。

由上述分析可知,当城市处于城市化快速发展阶段时,洪灾风险与城市化水平基本呈正相关性,城市化导致的孕灾环境敏感性和承灾体易损性变化对区域洪灾变化具有显著影响,少部分地区因防洪减灾能力较强呈负相关性。这与前人的研究成果^[4,26]

基本相符合。

南京市人民政府在《南京市主城区防汛应急预案》中提出城区重点巡检路段,秦淮区和鼓楼区涉及路段较多,建邺区和雨花台区较少,其他行政区未涉及,这与本文研究结果趋于一致。说明了本文研究方法的有效性及其研究成果的可靠性,可以为南京市防汛工作提供理论基础,对未来其他城市洪灾风险评价具有一定的参考意义。

本文在研究过程中存在基础资料不全、数据难以收集的问题,因此评价结果可能存在一定的局限性,如文中选取的评价指标范围有限,在今后的研究中,应该考虑更多的指标因子和更恰当的指标权重。本文经济社会及防洪减灾能力指标如人口、GDP、水利设施密度,默认为是均匀分布在行政区内的,在今后的研究中,可考虑将经济社会及防洪减灾能力指标数据空间格网化,进一步提高评价结果的准确合理性。

5 结论

(1)在分析城市化下区域洪灾风险特点的基础上,从致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性和防洪减灾能力4个方面构建指标体系,包括4个一级指标,14个二级指标,采用层次分析法确定指标权重,以南京市部分行政区为例,选取2000、2010和2018年为城市化典型年,采用综合评价法进行洪灾风险评价,并在ArcGIS中绘制洪灾风险指数分布图。表明了研究方法的有效性和研究成果的可靠性。

(2)建议政府有关部门针对性地制定洪灾风险管理措施,对高敏感性区域因地制宜地构建城市雨水的蓄渗空间,对高易损性区域转变现有的土地资源利用管理方式,同时提高防洪减灾能力,修建水利设施,完善城市排水管网系统,进行科学的城市规划,加强发挥政府部门的主导作用,做好监测、预报、预警、响应工作。

参考文献:

[1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等.中国城市洪涝问题及成因分析[J].水科学进展,2016,27(4):485-491.

[2] 孔锋,王一飞,方建,等.中国夏季极端降水空间格局及其对城市化的响应(1961~2010)[J].长江流域资源与环境,2018,27(5):996-1010.

[3] MUIS S, GUNERALP B, JONGMAN B. Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: A probabilistic analysis using global data[J]. Science of the Total Environment, 2015, 538: 445-457.

[4] 李国芳,郑玲玉,童奕懿,等.长江三角洲地区城市化对洪灾风险的影响评价[J].长江流域资源与环境,2013,22(3):386-391.

[5] 黄国如,李碧琦.基于模糊综合评价的深圳市暴雨洪涝风险评估[J].水资源与水工程学报,2021,32(1):1-6.

[6] 胡波,丁焯毅,顾思南,等.基于模糊综合评价的宁波暴雨洪涝灾害风险区划[J].暴雨灾害,2014,33(4):380-385.

[7] 伍仁杰,陈洪凯.基于灰色聚类的贵州省县城公路洪灾孕灾环境分区研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(4):88-93.

[8] 高玉琴,吴靖靖,王宗志,等.基于模糊聚类因子分析的区域洪灾风险评价[J].自然灾害学报,2018,27(2):141-148.

[9] 周超,方秀琴,吴小君,等.基于三种机器学习算法的山洪灾害风险评价[J].地球信息科学学报,2019,21(11):1679-1688.

[10] 吴瑞英,孙怀卫,严冬,等.基于格网数据和博弈论组合赋权的中巴经济走廊洪灾风险评价[J].农业工程学报,2021,37(14):145-154.

[11] 王宇飞,孙燕,张宏.洪灾损失快速评估中的社会经济统计数据空间展布模拟[J].水利经济,2016,34(5):69-74+82.

[12] 徐韧,吉阳光,赵东儒,等.基于遥感与GIS技术的洪水淹没状况分析——以安徽省安庆市望江县为例[J].水土保持通报,2018,38(5):282-287.

[13] 初祁,彭定志,徐宗学,等.基于MIKE 11和MIKE 21的城市暴雨洪涝灾害风险分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2014,50(5):446-451.

[14] 曹梦然,叶亚平,张其成,等.基于SWMM模型的南京秦淮区暴雨内涝风险分析[J].中国农村水利水电,2019(11):110-114.

[15] 张国芳,查小春,王光朋.汉江上游安康段不同重现期下洪水灾害风险评价[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,55(5):571-577+586.

[16] 苑希民,桑林浩,沈福新,等.基于模糊层次分析法的京津冀洪灾风险评价[J].水利水电技术,2018,49(10):37-45.

[17] 陈鹏,张继权,孙滢悦,等.哈尔滨市洪灾风险空间演变模式[J].南水北调与水利科技,2016,14(6):27-32.

[18] 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,2001,4(2):7-11+44.

[19] 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.

[20] 郭仁萍,邹嘉琪,王倩,等.基于GIS和AHP技术的延边州洪水灾害敏感性评价研究[J].山西建筑,2020,46(15):168-169.

[21] 李晓刚,张海龙.基于GIS的丹江流域洪水灾害危险性评价[J].商洛学院学报,2020,34(4):41-47.

(下转第136页)

桥墩壅水变化幅度变小且趋于平稳;两种洪水频率的水位壅高模拟值在 0.10~0.28 m 范围内,将模拟值及两种壅水经验公式计算结果与实测值相比较,Henderson 公式计算值及模拟值与实测值的变化趋势较为一致且在数值上更为接近,而陆浩公式计算结果相对偏大。

(3)通过对桥梁壅水特性的数值模拟与对比分析,认为基于 MIKE21 构建的二维水动力模型在河道防洪演算方面较为适用,对实际河道的仿真模拟结果较可靠。本次模拟与计算均在假定河道水流为恒定流的条件下进行,下一步拟开展对河道非恒定流条件下的桥墩壅水研究。

参考文献:

- [1] 吴时强,薛万云,吴修锋,等.城市行洪河道桥群阻水叠加效应量化研究[J].人民黄河,2019,41(10):96-102.
- [2] WARDHANA K, HADIPRIONO F C. Analysis of recent bridge failures in the United States[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17(3): 144-150.
- [3] 韩剑桥,段文中.卡口河段桥梁建设对河道行洪的影响——以渭河咸阳段为例[J].水土保持研究,2017,24(6):388-391.
- [4] 徐林春,赵明登,张庭荣,等.桥梁建设与河道行洪纳潮的适应性分析[J].武汉大学学报(工学版),2012,45(4):442-446.
- [5] 杨文海,路志强,刘涛.跨河桥梁防洪影响评价研究[J].水资源与水工程学报,2013,24(2):163-165+169.
- [6] 韩剑桥,段文中.卡口河段桥梁建设对河道行洪影响的数值模拟——以渭河咸阳段为例[C]//中国科学技术协会学会学术部,陕西省人民政府.第十八届中国科协年会——分15水土保持与生态服务学术研讨会论文集,2016.
- [7] 南京水利水电科学研究院,水利水电科学研究院.水工模型试验 第二版[M].北京:水利水电出版社,1985.
- [8] 王涛,郭新蕾,李甲振,等.河道糙率和桥墩壅水对宽浅河道行洪能力影响的研究[J].水利学报,2019,50(2):175-183.
- [9] 任梅芳,徐宗学,苏广新.基于二维水动力模型与经验公式的桥梁壅水计算及其对比分析[J].水力发电学报,2017,36(5):78-87.
- [10] 陈文学,穆祥鹏,崔巍.南水北调中线工程桥墩壅水特性研究[J].水利水电技术,2015,46(11):121-125.
- [11] 闫杰超,徐华,焦增祥.基于动量守恒的桥墩壅水预测及数值模拟[J].人民长江,2020,51(S2):280-284.
- [12] 李润祥,郭志学,张婧,等.基于HEC-RAS和二维水动力模型的斜交桥梁壅水计算优化[J].水利规划与设计,2021(8):137-142.
- [13] 袁晓渊,冯淑琳,王子凯,等.桥墩形状对水流影响的二维数值模拟[J].人民黄河,2020,42(S2):37-39+42.
- [14] 朱京德,陆洪亚,孙传文.二维水动力模型在多座桥梁行洪影响分析中的应用[J].水资源开发与管理,2021(5):10-16.
- [15] DHI. MIKE21 Flow Model FM hydrodynamic module user guide [M]. Denmark: DHI Water and Environment,2008.
- [16] 王开,傅旭东,王光谦.桥墩壅水的计算方法比较[J].南水北调与水利科技,2006(6):53-55.
- [17] CHARBENEAU R J, HOLLEY E R. Backwater effects of bridge piers in subcritical flow [R]. University of Texas at Austin: Project Summary Report, 2001.
- [18] 郭晓晨,陈文学,穆祥鹏,等.南水北调中线干渠桥墩壅水计算公式的选择[J].南水北调与水利科技,2009,7(6):108-112.
- [19] 陈绪坚,胡春宏.桥渡壅水水平面二维数学模型模拟研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2003,1(3):194-199.
- [20] 吴泽宇,蒋为群.南水北调中线工程输水渠道桥梁水头损失影响分析[J].水利水电快报,1997,18(15):1-4.
- [22] 廖丹霞,杨波,王慧彦,等.基于GIS的河北省滦县洪水灾害风险评价[J].自然灾害学报,2014,23(3):93-100.
- [23] 邹嘉琪,权赫春.基于GIS的图们江流域洪水灾害危险性分析[J].延边大学学报(自然科学版),2019,45(4):370-374.
- [24] 刘娜.南京市主城区暴雨内涝灾害风险评估[D].南京:南京信息工程大学,2013.
- [25] 王一新,苑希民.基于主成分分析的城市防洪减灾能力综合评价[J].自然灾害学报,2016,25(6):1-8.
- [26] 王思懿.基于GIS的北部湾经济区洪灾风险评价及风险变化研究[D].南宁:广西大学,2017.

(上接第128页)