

基于水力学模型和综合风险度的洪水风险区划

李亚琳, 李德龙, 许小华, 梁 秀

江西省水利科学院, 江西 南昌

收稿日期: 2022年9月5日; 录用日期: 2022年11月29日; 发布日期: 2022年12月31日

摘 要

洪水灾害风险区划是洪灾评估与管理的重要内容。本文以江西省兴国县为例, 采用MIKE软件构建二维水力学模型, 对研究区进行了多重现期洪水风险要素分析。在数值模拟成果的基础上, 综合考虑最大淹没水深、最大行进流速、最大淹没历时等洪水风险要素指标, 利用融合不同洪水频率的区划方法, 对研究区进行了洪水风险区划, 同时采用了最大水深 × 最大流速法进行了对比验证。结果表明, 淹没范围较大、洪灾风险较高的区域集中于激水和滩水交汇处以及下游乡村部分区域, 洪灾对上游兴国县城的影响较小; 综合风险度法更能全面直观地反映多重现期的洪水风险空间分布特征, 为洪水风险管理、防洪减灾规划等决策部门提供理论依据和技术支撑。

关键词

水力学模型, 洪水风险区划, 综合风险度, 水深, 流速

Flood Risk Zoning Based on Hydraulic Modelling and Comprehensive Risk

Yalin Li, Delong Li, Xiaohua Xu, Xiu Liang

Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang Jiangxi

Received: Sep. 5th, 2022; accepted: Nov. 29th, 2022; published: Dec. 31st, 2022

Abstract

Flood hazard risk zoning is an important element of flood assessment and management. In this paper, taking Xingguo County of Jiangxi Province as an example, a two-dimensional hydraulic model was constructed using MIKE software to analyze the multi-recurrence flood risk elements in the study area. Based on the results of numerical simulation, a zoning method integrating different flood frequencies was employed to zone the flood risk area, with considering flood risk elements such as maximum inundation depth, maximum flow velocity, maximum inundation duration. At the same time, the maximum

作者简介: 李亚琳, 河南商丘人, 出生于1989年3月, 硕士学位, 工程师, 主要研究方向为城市内涝与防洪等, Email: 1584171709@qq.com

water depth plus maximum flow velocity method was used for comparison and verification. Results show that the confluence of Lianshui River and Huishui River and the downstream villages are more vulnerable to flood disaster than the Xingguo central area, with larger inundation area and higher flood risk. The comprehensive risk degree method can comprehensively and intuitively reflect the spatial distribution characteristics of flood risk in flood scenarios of multiple recurrence periods, and could provide theoretical basis and technical support for the decision-making departments of flood risk management, flood prevention and mitigation planning.

Keywords

Hydraulic Model, Flood Risk Zoning, Comprehensive Risk, Water Depth, Velocity

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

洪涝灾害是江西省发生频繁、分布广泛的自然灾害，是社会经济发展的心腹之患。洪水风险区划是制定减灾政策和措施的必要步骤，能够科学有效地指导防洪规划和风险管理[1]。

自 20 世纪 50 年代以来，国内外学者、机构在洪水风险区划方面做了诸多研究。日本于 70 年代便展开了全国山洪灾害规律的研究[2]；联合国[3]也于 1991 年提出了自然灾害风险评价模型，以危险性(H)和易损性(V)的乘积计算自然灾害的风险(R)。随后该评价模型被拓展、融入其他指标，其中以综合危险性、暴露度(E)和易损性的计算方法较为主流，洪灾风险为其主要评价对象之一[4] [5] [6] [7]。上世纪 90 年代，我国开始研究洪水及相关自然灾害的风险区划与评价，将洪灾风险视为致灾因子、孕灾环境和承灾因子的综合产物[2] [8]。根据风险评价数据的来源[9]，洪灾风险分析模型可划分为三类：基于历史数据、基于系统指标以及基于遥感数据的洪灾风险分析；上述基于 H 、 E 、 V 等指标的模型即属于第二类，该模型及其衍生模型在我国也被广泛应用[10] [11] [12]。在洪灾风险区划的过程中，评价指标的数值(水深、流速等)来源多为模型模拟结果[13]，其权重赋值则通过层次分析、模糊评价等[1] [12]方法获取。《洪水风险区划技术导则(试行)》提出了洪水风险区划的综合风险度(R)法，虽然部分研究探讨了其计算方法的调整以及实例应用[14] [15]，但利用该方法区划多重现期洪水风险的研究仍然有限。

本文以水动力模型产出的洪水风险要素为基础，将综合风险度法应用到江西省兴国县平江流域，评价该流域的洪水风险并绘制风险等级区划图。

2. 研究区域与方法

2.1. 研究区域概况

兴国县位于江西省中南部，隶属于江西省赣州市，全县山地面积为 2240 km²，占总面积的 70%。境内主要受平江河流影响，平江分潏水、潏水两支。兴国县主县城(潏江镇)上游主要受潏水影响，且有多条支流汇入，流经高兴镇，后于文溪大桥附近汇入主县城区。由于境内东北西三面地势较高，向中部和南部倾斜，河道支河多呈扇形分布，源短流急，潏水及多条支流流经高兴镇后迅速汇入主县城人口密集区，且下游多为低洼地区，极易形成洪水灾害。本文研究范围以潏水等多条支流汇合处(文溪大桥附近)为起点，下游至翰林桥水文站约 70 km 处为终点，并沿平江河流流向，以平江河为中心，向两岸居民区辐射至高山区域位置，设定为两边边界，研究区面积约 346.1 km²，如图 1 所示。

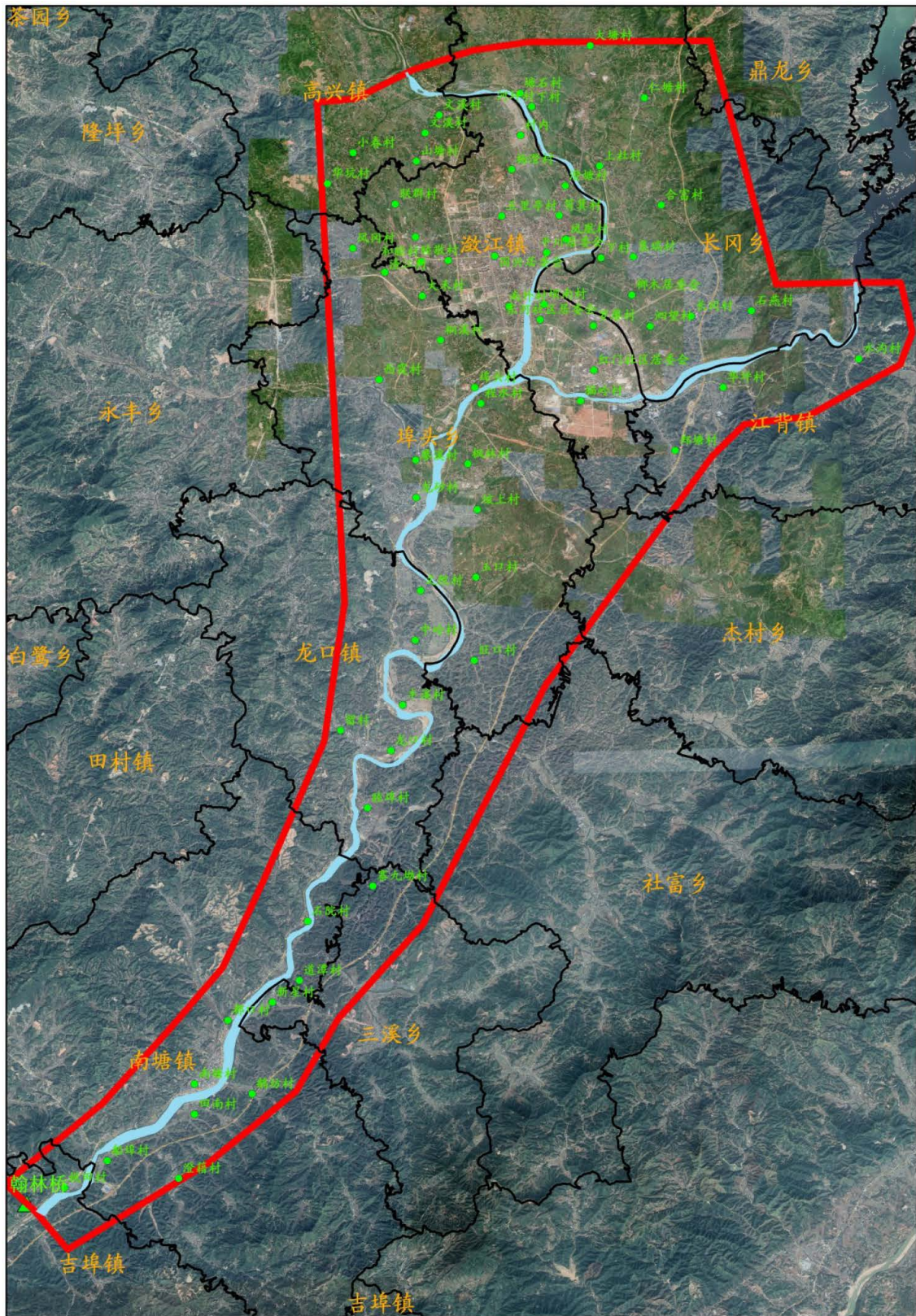


Figure 1. Simulation range of the study area
图 1. 研究区域及计算范围

2.2. 水动力模型

利用 MIKE 软件构建了河道和保护区整体二维水动力模型，模拟可能的淹没范围、水深等特征要素。模型对平面水流按二维非恒定流进行模拟，模型将有限体积法与有限差分法的优点相结合，采用无结构不规则网格对研究区域进行离散，在网格形心处计算水深，在网格周边通道上计算流量。

MIKE 二维水动力模型对地形高程数据有一定要求，研究中对计算范围内的淤水、淤水、平江和江背河进行了加密处理，并利用无人船航测数据对区内的平江河两岸高程、河底高程进行了修正。为了减少模型运行期间出现的错误，对计算范围内的高楼、房屋等做了局部高程修正实现概化处理。模型的边界条件通过水文比拟法推求县城上游平江河流、江背河的流量过程，以及长冈水库的下泄流量过程；出流边界条件利用翰林桥 1957~2020 年实测水位和流量数据，推求翰林桥水位 - 流量关系曲线。

2.3. 洪水风险区划方法

依据《洪水风险区划技术导则(试行)》，本文采用综合风险度(R)法对洪水风险进行区划，其计算公式如下：

$$R = \sum_{i=0}^n p_i - p_{i+1} \frac{H_i + H_{i+1}}{2} \tag{1}$$

式中， p_i 为洪水淹没频率， H_i 为计算单元对应 p_i 的当量水深。当量水深 H 的计算公式如下：

$$H = \alpha_1 \alpha_2 h \tag{2}$$

式中， α_1 为最大行进流速(v)修正系数， α_2 为最大淹没历时(t)修正系数， h 为最大淹没水深。当 $v < 1.5$ m/s 时， $\alpha_1 = 1.0$ ； $1.5 \leq v < 3.0$ m/s 时， $\alpha_1 = 1.2$ ； $v \geq 3.0$ m/s 时， $\alpha_1 = 1.5$ 。当 $t < 3$ d 时， $\alpha_2 = 1.0$ ； $3 \leq t < 7$ d， $\alpha_2 = 1.2$ ； $t \geq 7$ d， $\alpha_2 = 1.5$ 。

由上述公式可知，综合风险度法在着重强调最大淹没水深的同时，综合考虑了最大行进流速和最大淹没历时的影响。如洪水频率和洪水风险特征曲线图(图 2)所示，随着洪水频率的增加，洪水风险呈凸性递减的趋势。基于综合风险度(R)法的洪水风险等级划分规则： $R < 0.15$ 为低风险， $0.15 \leq R < 0.5$ 为中风险， $0.5 \leq R < 1$ 为高风险， $R \geq 1$ 为极高风险。

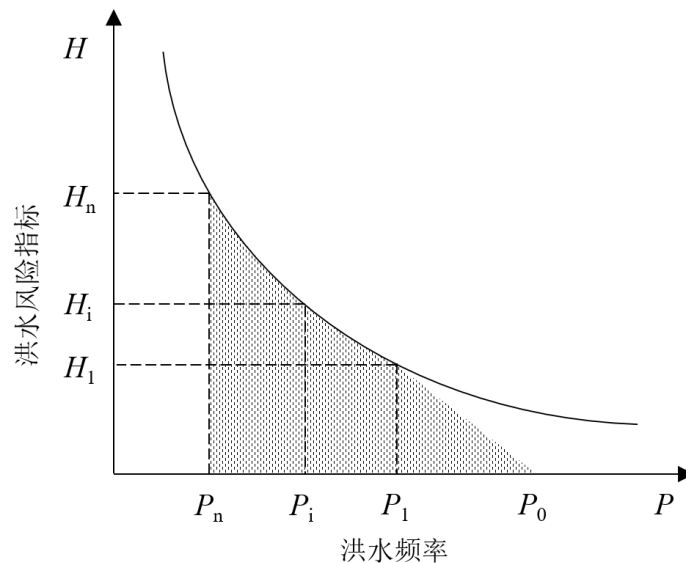


Figure 2. Calculation diagram of the comprehensive risk method (the shaded area equals the R value)

图 2. 综合风险度计算示意图(阴影部分面积即为 R)

3. 结果与分析

3.1. 模型构建与验证

本研究水动力模型采用非结构不规则网格进行网格划分,对区内的一些典型线状地物、河渠以及城镇和村庄房屋做了概化处理,并对网格适当加密。根据 1:50,000 土地利用数据及最新年份遥感影像数据,对区内地形进行片区划分(如水田、树丛、村庄和空地等),确定研究区的糙率数值,并利用 2019 年 6 月 9 日的实测洪水对模型进行验证。通过对比洪痕点的水位,模型验证的水位误差绝对值不超过 0.1 m,验证结果符合洪水风险分析的精度要求(表 1)。

Table 1. Error analysis of the flood peak stage within the study area

表 1. 研究区洪峰水位误差分析

位置	实测水位(m)	计算水位(m)	误差(m)	相对误差(%)
塘石村上甲	149.54	149.47	-0.07	0.05
上社村水尾	147.05	147.01	-0.04	0.03
上社村车脑上	145.87	145.81	-0.05	0.03
红军桥	143.12	143.16	0.04	0.03

本文洪水量级考虑防洪工程设计防洪标准、超防洪标准一级和超防洪标准二级洪水,即 20 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇洪水。同时考虑区间来水等情况以及水库等工程影响。计算范围内险工险段较少且都经过除险加固,故主要考虑洪水漫溢对沿河两岸区域的影响。对 3 种方案的水量平衡进行了统计分析(表 2),通过计算入流量、出流量和模型计算范围内淹没水量,判断分析入流量减去出流量与区内淹没总水量的误差是否在 10^{-5} 之内,误差在 10^{-5} 之内的可以认为洪水模拟结果合理。从表可知,各方案总水量差值相对于计算区的入流量,误差均在合理范围内,模型模拟结果合理。

Table 2. Water balance analysis of simulation schemes

表 2. 模拟方案水量平衡分析

方案名称	入流量(亿 m^3)	出流量(亿 m^3)	保护区内最终(亿 m^3)	水量误差(亿 m^3)	相对误差(%)
20 年一遇	2.014	1.605	0.409	0.97×10^{-5}	4.82×10^{-6}
50 年一遇	2.382	1.960	0.422	0.94×10^{-5}	3.95×10^{-6}
100 年一遇	2.767	2.290	0.477	0.90×10^{-5}	3.25×10^{-6}

3.2. 洪水风险要素分布

利用率定与验证后的模型参数建立研究区二维水动力学模型,计算平江及其支流发生 20 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇洪水时洪水风险要素分布情况。以 50 年一遇洪水计算方案为例,提取研究区内各计算单元的风险要素指标,包括最大淹没水深、最大行进流速、最大淹没历时等(图 3)。结合研究区地形变化可知,最大淹没水深较多出现在地形较低洼的地区,最大洪水流速较多出现在地形坡度较大的地区,研究区内除局部线状地物淹没历时较小外,整个区域淹没历时均较大。洪水风险要素分布合乎常理,与相关研究结果一致[7]。

具体分析,兴国县主城区淹没范围不大,淹没主要集中在杨风河堤左岸(受影响的主要有澄塘村、凤凰村、笕箕村等)和塘坝河堤右岸(受影响的塘石村、河坪村、上社村、下村、集瑞村、坝南村、罗廖村、洪门村等区域)的地势低洼地区,水深较浅,约 0.5~1.0 m 之间;而程垓河堤右岸地势低洼地区(程水村、枫林村、垓上村、中岭村)水深较深,超过 1.0 m,沿平江河流向下游方向的村庄因地势较高,水深主要集中在河道内。受淹范围内

城区最大淹没位置均在滨江湿地公园处，此处遭遇 20 年、50 年和 100 年一遇洪水淹没的水深分别为 1.92 m、2.13 m、2.27 m。

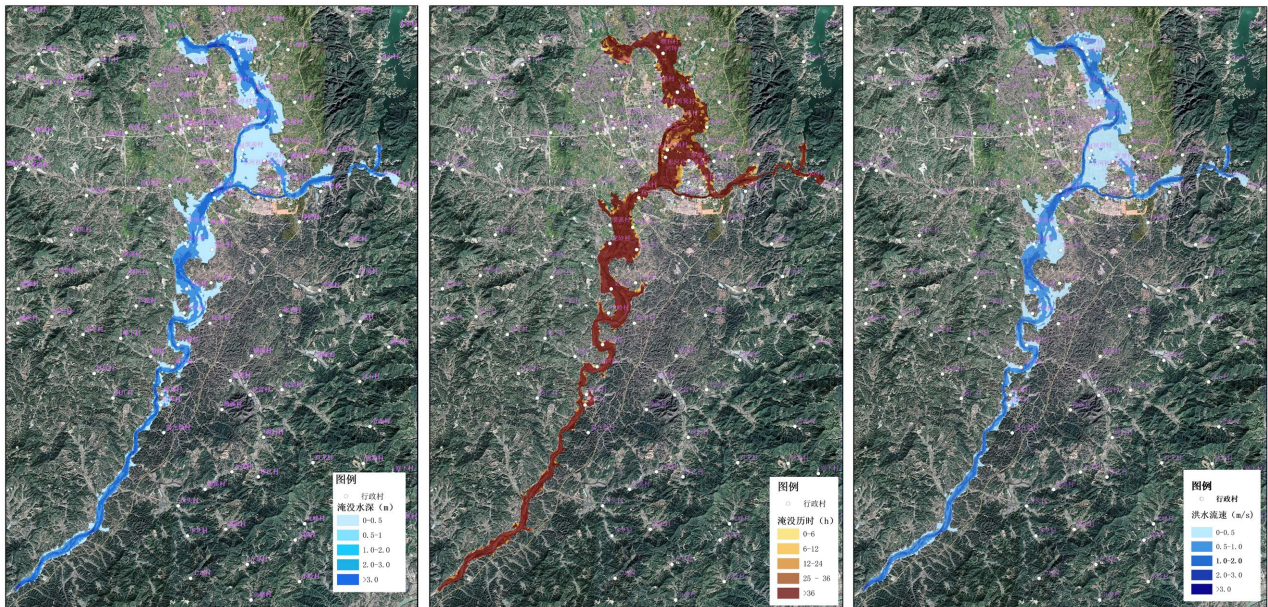


Figure 3. Distributions of the flood risk elements
图 3. 洪水风险要素分布图

3.3. 洪水风险区划分析

以兴国县三种模拟计算方案的洪水风险要素特征为基础，利用综合风险度(R)法和最大水深与最大流速乘积法对模拟区域的洪水风险等级进行区划。其中，水深、流速乘积法由澳大利亚新南威尔士州的 Hawkesbury-Nepean 洪泛区管理委员会提出，该方法着重考虑洪水的动量因素，综合衡量淹没水深、流速以及两者的乘积以分区划定洪水危害等级(图 4)。

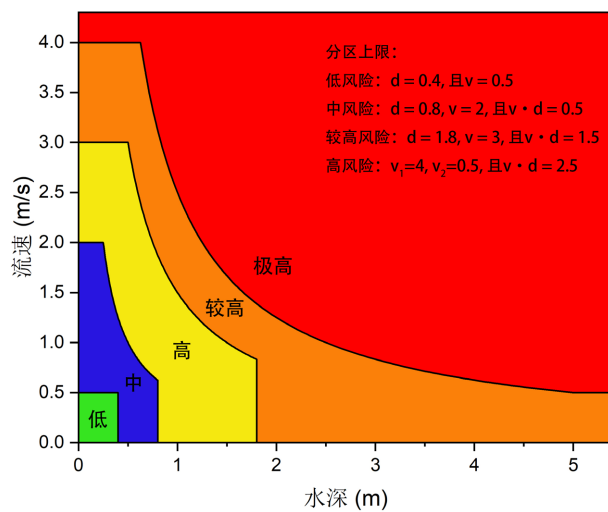


Figure 4. Boundary conditions of the max water depth plus max velocity zoning method
图 4. 最大水深 × 最大流速法分区的边界条件

结合综合风险度洪水风险等级区划结果和洪水要素分布(图 3), 汇流前的澧水两岸风险最小, 城区所在的澧水周边有部分地区存在洪灾中高风险, 这些地区的淹没水深和淹没历时相对较低, 两河交汇处有较大高风险区域。相较于上游的两条支流, 平江下游部分地区(如龙砂村、垓上村以及文院村、中岭村等)因为存在较大的水深和淹没历时, 出现了极高的洪灾风险(图 5)。鉴于兴国县城区洪灾风险范围和等级较下游乡村小, 且前者的应急抢险能力远大于后者, 因此应完善以下游乡村为主的洪灾应急预案, 保障村民生命安全的同时降低经济损失。

对比分析综合风险度法和最大水深 × 最大流速法(图 6), 并将两种方法不同风险区域的面积进行统计(表 3)。结果显示, 综合风险度法划分的低风险区、中风险区、高风险区和极高风险区的比例分别为 85.44%、3.00%、2.07%、9.50%, 最大水深 × 最大流速法(以 100 年一遇洪水)划分的低风险区、中风险区、高风险区、较高风险区和极高风险区的比例分别为 84.15%、2.92%、2.99%、2.41%、7.52%。综合风险度法和最大水深 × 最大流速法的低风险区域相仿, 前者的高风险区面积明显小于后者; 随着洪水频率的降低, 后者划分的高风险及以上区域的面积逐渐增加, 并超越前者相应的区划面积。

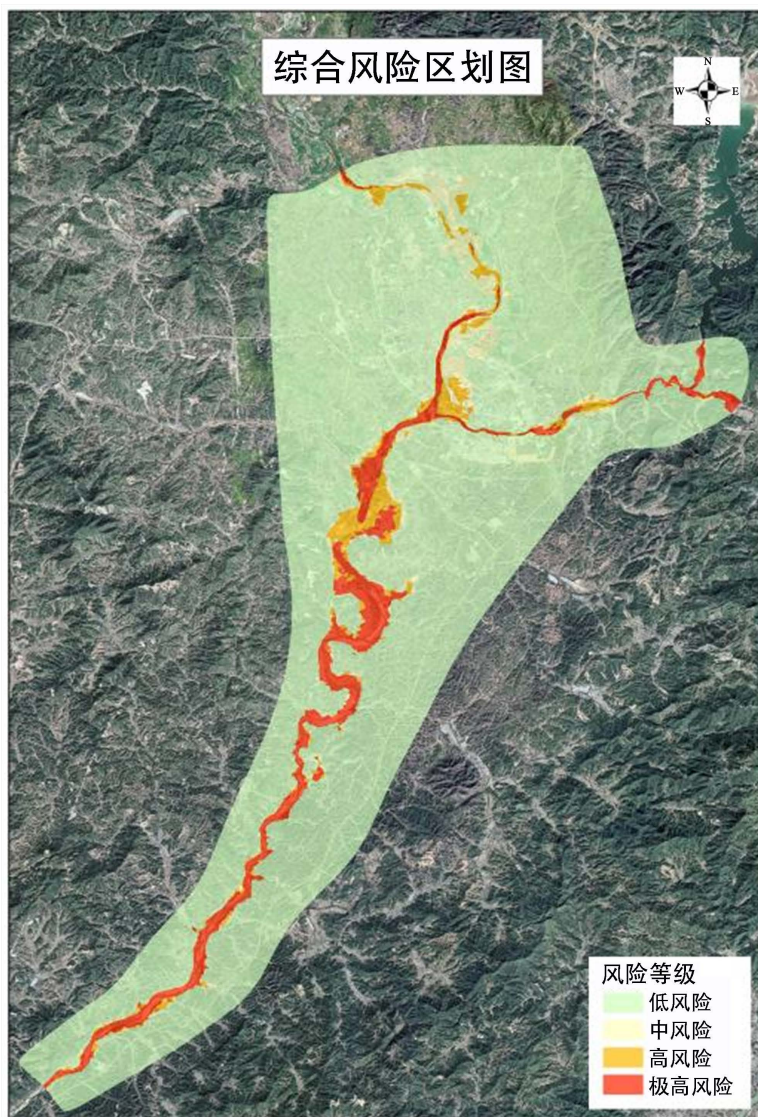


Figure 5. Zoning result of the comprehensive risk method
图 5. 综合风险度法区划结果

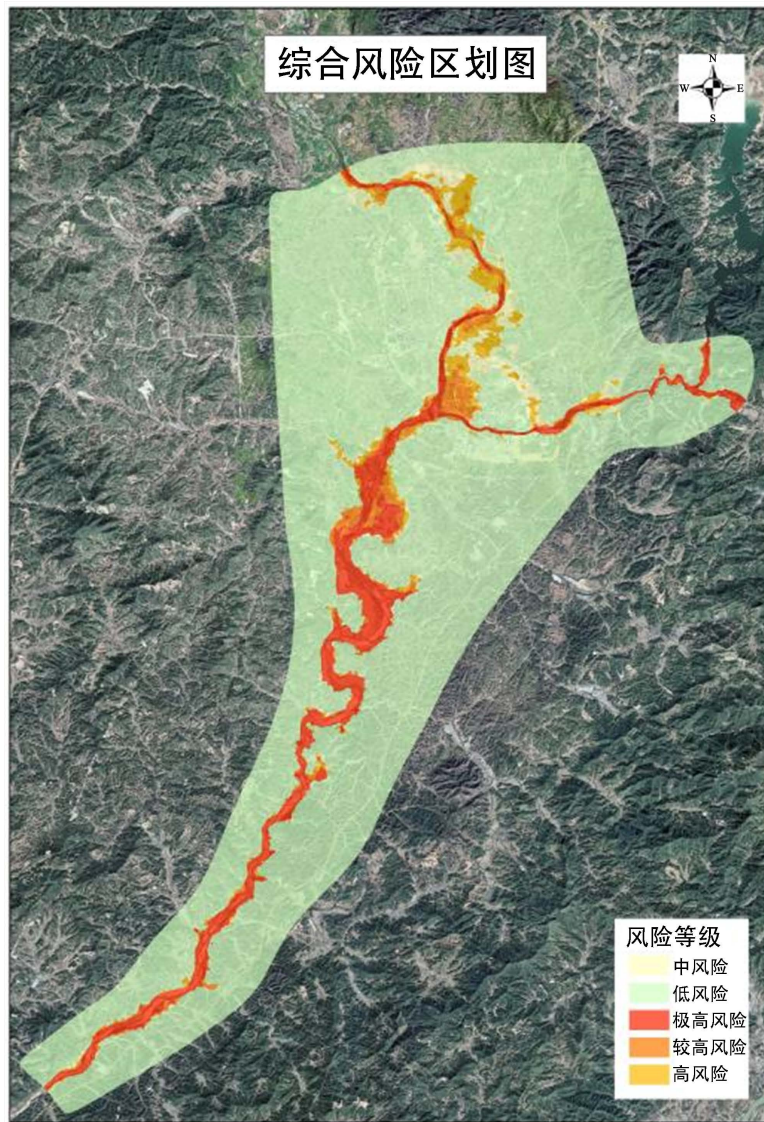


Figure 6. 100-year return period zoning result of the max water depth plus max velocity method
 图 6. 100 年一遇最大水深 × 最大流速法区划结果

Table 3. Area statistics of different risk levels corresponding to the zoning methods
 表 3. 不同区划方法风险等级区域面积统计表

风险等级	区划方法			
	综合风险度法(R)	最大水深 × 最大流速法		
		20 年一遇设计洪水	50 年一遇设计洪水	100 年一遇设计洪水
低风险	295.7	300.22	290.71	290.25
中风险	10.37	14.45	13.81	10.11
高风险	7.15	9.17	9.74	10.36
较高风险		7.94	8.39	8.33
极高风险	32.88	14.32	18.79	27.04

两种区划方法的计算均涉及洪水要素的乘积形式,最大水深 × 最大流速法直接区划水深、流速及两者之积,三者共同限制区划结果;综合风险度法则增加了淹没历时因素,并将之与流速分级后以系数的形式加权到核心要素——水深,继而与洪水频率结合进行风险分区。最大水深 × 最大流速法的不足之处在于强化了流速指标,在地形坡度较大的地方会导致风险值偏高[14]。因此,综合考虑洪水风险要素以及地形变化等情况,综合风险度法区划的结果更加合理。但综合风险度的简单使用让其局限于水文层面,忽略了承灾体的承受能力、经济损失等因素,所以在综合风险度的基础上可以增加其他类型的要素(如人口、GDP、土地类型等),获取更全面、实用性更强的洪灾风险区划结果[15]。

4. 结论

本文依据《洪水风险区划技术导则(试行)》中提出的综合风险度的概念,选取数值模拟成果提取的最大淹没水深、最大行进流速、淹没历时指标作为评价研究区的洪水风险因子,开展兴国县洪水风险区划研究。研究结果表明,平江上游两条支流周边(包括兴国县主城区)淹没水深、淹没历时等洪水要素均较小,主要为小范围零散的中、高风险区;平江下游的部分乡村区域淹没水深和历时较大,是洪灾极高风险区,需建立并完善防洪应急预案。相较于最大水深 × 最大流速法,综合风险度法将流速和淹没历时加权到水深要素,区划结果更加合理;可以考虑叠加人口密度、GDP 等非水文要素,强化该方法的全面性和实用性。研究成果可以作为兴国县防洪减灾、应急抢险的理论基础,并为相关水利决策部门提供技术支撑。

基金项目

《城市道路积水智能监测方法研究》,江西省水利厅推广课题(编号:202223YBKT24)。

参考文献

- [1] 王建中,王铁锋,刘翠杰,等. 基于模糊综合评价法的防洪保护区洪水风险区划[J]. 人民珠江, 2018, 39(10): 112-117.
WANG Jianzhong, WANG Tiefeng, LIU Cuijie, et al. Flood risk zoning of flood protection areas based on fuzzy comprehensive evaluation. Pearl River, 2018, 39(10): 112-117. (in Chinese)
- [2] 赵世鹏. 中国山洪灾害系统的整体特征及其危险度区划的初步研究[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(3): 95-101.
ZHAO Shipeng. An elementary study on whole characteristics of mountain torrents disaster system in China and its hazard regionalization. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(3): 95-101. (in Chinese)
- [3] UN. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management. Geneva: United Nations Department of Humanitarian Affairs, 1992.
- [4] 周姝天,翟国方,施益军,等. 城市自然灾害风险评估研究综述[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 180-186.
ZHOU Shutian, ZHAI Guofang, SHI Yijun, et al. A literature review of urban natural disaster risk assessment[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 180-186. (in Chinese)
- [5] DAVIDSON, R. A., LAMBERK, B. Comparing the hurricane disaster risk of U.S. coastal counties. Natural Hazards Review, 2001(8): 132-142. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2001\)2:3\(132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2001)2:3(132))
- [6] TSAKIRIS, G. Flood risk assessment: Concepts, modelling, applications. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(5): 1361-1369. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1361-2014>
- [7] APEL, H., THIEKEN, A. H., MERZ, B., et al. Flood risk assessment and associated uncertainty. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, 14(5): 1361-1369.
- [8] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9.
SHI Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(3): 1-9. (in Chinese)
- [9] 孙章丽,朱秀芳,潘耀忠,等. 洪水灾害风险分析进展与展望[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 125-130, 136.
SUN Zhangli, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Flood risk analysis: Progress, challenges and prospect. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 125-130, 136. (in Chinese)
- [10] 张会,张继权,韩俊山. 基于 GIS 技术的洪涝灾害风险评估与区划研究——以辽河中下游地区为例[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 141-146.

- ZHANG Hui, ZHANG Jiquan and HAN Junshan. GIS-based assessment and zoning of flood/waterlogging disaster risk: A case study on middle and lower reaches of Liaohe River. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(6): 141-146. (in Chinese)
- [11] 孙煜航, 程舒鹏, 张祺, 等. 黄河下游花园口至艾山河段滩区洪水漫滩风险度评估研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 575-586.
- SUN Yuhang, CHENG Shupeng, ZHANG Qi, et al. Research on flood risk assessment of floodplains from Huayuankou to Aishan section in the lower Yellow River. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, 57(3): 575-586. (in Chinese)
- [12] 刘卫林, 刘丽娜, 梁艳红, 等. 基于 MIKE FLOOD 的中小河流溃堤洪水风险分析[J]. 水利水电技术, 2002, 51(1): 88-99.
- LIU Weilin, LIU Lina, LIANG Yanhong, et al. Risk assessment of floods of dike-break in medium and small rivers based on mike flood. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(1): 88-99. (in Chinese)
- [13] 吴沛霖, 俞芳琴, 王婷, 等. 基于 SWMM 的张家港市排水防涝风险评估[J]. 水文, 2020, 40(2): 31-37.
- WU Peilin, YU Fangqin, WANG Ting, et al. Waterlogging risk assessment based on SWMM in Zhangjiagang City. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(2): 31-37. (in Chinese)
- [14] 王秀杰, 王艳鹏, 苑希民, 等. 基于多重现期洪水情境模拟和综合风险度方法的入海河口地区洪水风险区划研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(5): 1-11.
- WANG Xiujie, WANG Yanpeng, YUN Ximin, et al. Research on flood risk zoning in the estuarine area based on multiple return periods flood situations simulation and comprehensive risk method. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(5): 1-11. (in Chinese)
- [15] 刘江侠, 韩云鹏, 李永庆. 防洪保护区洪水风险区划综合风险度计算方法探讨[C]//中国水利学会 2020 学术年会论文集第五分册. 北京: 中国水利水电出版社, 2020: 401-405.
- LIU Jiangxia, HAN Yunpeng and LI Yongqing. Research on the adjustment of comprehensive risk calculation method applying to flood risk zoning in flood control protected area. In *Proceedings of 2020 Chinese hydraulic engineering society annual conference*, Volume 5. Beijing: China Water & Power Press, 2020: 401-405. (in Chinese)