

李子祥, 杨帆, 范子武, 等. 基于多暴雨情景的城市洪涝模拟与风险评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(10): 84-96. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.007

LI Zixiang, YANG Fan, FAN Ziwu, et al. Urban flood risk simulation and assessment in cities based on multi rainstorm scenarios [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(10): 84-96. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.007

基于多暴雨情景的城市洪涝模拟与风险评估

李子祥^{1,2}, 杨帆^{1,2}, 范子武^{1,2}, 刘国庆^{1,2}, 乌景秀^{1,2}, 朱沈涛^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:【目的】洪涝模拟与风险评估在应对城市洪涝灾害中具有重要意义, 目前的研究主要基于区域水文水动力模型进行暴雨情景分析。为提高水文水动力模型的计算精度并开展多情景分析, 【方法】以江阴市为研究区域, 采用太湖地区模型与江阴市洪涝模型嵌套的模式, 开展城市洪涝的多情景模拟与评估。考虑长历时梅雨型、短历时强降雨和台风雨三种典型降雨特征, 设置“郑州7·20”暴雨、特大暴雨和水利设计降雨三类情景共10组工况, 构建研究区域水文水动力一二维河网管网耦合的洪涝模型, 模拟并分析地表内涝淹没与风险分布。【结果】结果表明:“郑州7·20”暴雨情景下, 风险区域内涨水速度快、水位峰值高、退水过程久, 遭遇最大降雨量级时, 研究区域淹没风险面积占比达37.32%; 特大暴雨情景下, 淹没面积受总降雨量与最大小时降雨量共同影响, 最大降雨强度下总风险面积占比13.2%, 淹没水深达0.60 m; 水利设计降雨情景下, 中风险区域占比最大, 随着设计降雨量增加, 中风险、高风险区域淹没面积明显增加, 研究区内涝受本地降雨量和周边区域雨水情共同影响。【结论】研究成果揭示了江阴市遭遇极端暴雨的应对能力, 预测了不同降雨情景下的风险要素, 可为江阴市针对性制定应对对策与措施提供决策依据, 提高城市应对极端暴雨洪涝灾害的能力。

关键词: 情景分析法; 洪涝模拟; 风险评估; 江阴市; 气候变化; 降雨; 城市内涝;

水文水动力模型

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.007

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)10-0084-13



与作者互动
听语音 | 翻译 | 朗读

Urban flood risk simulation and assessment in cities based on multi rainstorm scenarios

LI Zixiang^{1,2}, YANG Fan^{1,2}, FAN Ziwu^{1,2}, LIU Guoqing^{1,2}, WU Jingxiu^{1,2}, ZHU Shentao^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Water Governance of the Taihu Lake Basin, Nanjing 210029, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] Flood simulation and risk assessment are recognized as of great significance in addressing urban flood disasters. Utilizing regional hydrological hydrodynamic models to analyze rainstorm scenarios has become a predominant approach

收稿日期: 2024-10-14; 修回日期: 2024-12-05; 录用日期: 2024-12-06; 网络出版日期: 2025-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202603); 广西科技重大专项项目(桂科 AA23062053); 江苏省水利科技项目(2023008); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(Y124002)

作者简介: 李子祥(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事城市水力学研究。E-mail: zxi@nhri.cn

通信作者: 范子武(1970—), 男, 正高级工程师, 南京水利科学研究院大数据与智慧水利研究中心主任, 博士, 主要从事智慧水利、城市水力学、城市水环境提升和洪水风险管理等研究。E-mail: zwan@nhri.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

in current research. This method aims to improve the computational accuracy of hydrological and hydrodynamic models, thereby enabling more effective multi-scenario analysis. [Methods] Jiangyin City was selected as the study area, and a nested model of the Taihu Lake area model and Jiangyin City flood model were employed to conduct multi-scenario simulations and assessment of urban flood. Considering the three typical rainfall characteristics of long-duration plum rain type, short-duration heavy rainfall, and typhoon rain, a total of 10 working conditions were established across three key scenarios: the “July 20 rainstorm in Zhengzhou,” extremely heavy rainstorm, and water conservancy design rainfall. A flood model coupled with hydrological and hydrodynamic forces and a two-dimensional river network management network in the study area was constructed. Detailed simulations and analyses of surface waterlogging and associated risk distributions were enabled. [Results] The result indicated that under the scenario of “July 20, Zhengzhou,” the risk area experienced a rapid rise in water level reaching high peaks, and a prolonged receding process. When subjected to the maximum rainfall magnitude, the inundated risk area within the study area accounts for 37.32%. In the case of the extremely heavy rainstorm scenario, the submerged area were jointly influenced by the total rainfall and the maximum hourly rainfall. At the maximum rainfall intensity, the total risk area accounted for 13.2%, and the submerged water depth reached 0.60 m. Under the rainfall scenario of water conservancy design, the proportion of medium-risk areas was the highest. With the increase of design rainfall, the submerged area of medium-risk and high-risk areas significantly increased. Surface waterlogging in the study area was jointly affected by local rainfall and surrounding rainfall conditions. [Conclusion] The research result revealed the adaptability of Jiangyin to encounter extreme rainstorms and predicted the risk factors under different rainfall scenarios, which can provide a decision-making basis for Jiangyin to formulate targeted countermeasures and measures, thereby enhancing the city’s capacity to cope with extreme rainstorm and flood disasters.

Keywords: situational analysis method; flood simulation; risk assessment; Jiangyin City; climate change; rainfall; urban waterlogging; hydrological and hydrodynamic model

0 引言

受全球气候变化加剧和经济社会高速发展的影响, 极端降雨事件日益频繁^[1]。城市洪涝灾害作为自然灾害的一种, 往往由极端降雨事件引发, 具有突发性强、隐患点多、影响广泛、洪涝相互交织、次生灾害多样及损失巨大等特点^[2]。例如, 2021年7月20日, 河南省郑州市遭遇了最大小时降雨量为201.9 mm的极端暴雨, 重现期达千年一遇, 导致了严重的洪涝灾害, 造成全市300余人死亡或失踪, 直接经济损失超过400亿元^[3]。有效应对城市洪涝灾害必须制定严密的防灾减灾计划, 而制定防灾减灾计划必须以洪涝灾害风险评估为基础。因此, 开展极端暴雨下城市洪涝灾害风险评估具有重要意义, 不仅关乎保障人民生命财产安全, 也直接关系到社会的健康发展。

洪涝灾害风险评估是减少洪水发生和灾害损失的最有效途径之一^[4], 也是城市防灾减灾评估决策的关键技术支撑^[5]。目前对洪涝灾害风险评估的方法主要有数理统计法^[6-7]、指标体系法^[8-9]、空间分析法^[10]和情景分析法^[11-12]。数理统计法利用研究区域的历史洪水资料, 结合历史、地理及统计学等多学科方法来评估洪涝灾害的发生规律, 该方法的准确性依赖于历史数据的样本数量和完整性。指标体系法又称

综合评价法, 根据洪涝灾害的特点选取指标因子, 从灾害的危险性、敏感性、易损性和易受害性等角度评估洪涝灾害的风险, 评估过程中常用模糊综合评价法、层次分析法、灰色关联分析法等^[13-15], 但评价结果可能受主观性影响, 易受到评价过程中的随机性和计算不确定性影响。空间分析法依赖遥感影像和地理信息系统软件确定洪涝灾害的风险, 其评估结果的精确性通常取决于高精度的数字高程和影像数据。情景分析法则基于灾害情景假设, 分析各种情景下的具体风险要素^[16], 该方法能更好地揭示洪涝灾害的时空分布特征, 进而为防洪减灾工作提供更为有效的决策支持。

情景分析法中的情景结果通过算法模型和软件进行分析, 常用的模型和软件包括 InfoWorks ICM、CA-flood、SWMM、LISFLOOD、MIKE21、TELEMAC-2D等。黄国如等^[17]基于 InfoWorks ICM 构建城市洪涝仿真模型, 模拟3种暴雨重现期情景下广州市东濠涌流域的洪涝过程, 并获取致灾因子数据进行洪涝风险评估。王京晶等^[18]基于元胞自动机 CAflood 模型, 开展重现期为1~100 a一遇6个情景下济南市主城区的洪涝风险评估, 并分析出了洪涝风险性最大的暴雨重现期。QIAO等^[19]基于 SWMM 模型模拟降雨情景下城市道路的洪水风险, 建立风险指标体系确定不同情景下的洪水风险程度, 并提出了应用于淹没道路的风险

评估方法。ZHAO 等^[20]基于 SWMM 与 MIKE21 耦合模型,开展天津市南区 4 种回潮期暴雨情景下洪水特征的影响,并量化分析了低影响开发对缓解城市洪水的效果。曾照洋等^[21]基于 SWMM 与 LISFLOOD 耦合模型,开展了东莞市典型区域 5 种重现期情景下的暴雨内涝模拟,并评估了东莞市排水能力与内涝风险。MEI 等^[22]基于 TELEMAC-2D 模型,对 12 次设计降雨进行不同重现期模拟,分析了降雨强度和降雨模式对城市淹没和破坏的影响机制。王兆礼等^[23]基于 TELEMAC-2D 与 SWMM 耦合模型,模拟了 6 种重现期情景下广州长湴内涝范围,并提出降低暴雨内涝影响的方案。LIN 等^[24]采用未来土地利用模拟 FLUS 模型进行了不同情景下中国沿海城市的洪水风险评估,预测了城市的洪水淹没面积及洪水的空间分布。叶陈雷等^[25]基于 SWMM 与 InfoWorks ICM 构建城市街区洪涝模型,模拟 10~100 a 一遇 4 种重现期下福州市淹没面积,分析了城市街区地表淹没与危险性分布。

随着计算机技术的发展,情景分析法已成为研究城市洪涝灾害模拟的主要方法^[26]。情景分析法对区域水文水动力模型的精度要求较高,目前研究集中于区域单一模型或单一区域的构建,模型的精度受

限,而采用多种模型耦合与多区域耦合的方式可以显著提高区域水文水动力模型的计算精度^[27]。此外,目前研究主要考虑暴雨重现期情景,而根据降雨分布、降雨量等特征开展更多情景下城市洪涝分析,也可以为防灾减灾工作提供更多支持^[28]。为此,本文以江阴市为研究对象,基于 Infoworks ICM 模型,通过流域性模型与研究区域精细化模型嵌套的方式构建水文水动力一二维模型,考虑复杂下垫面,进行汇水单元划分及选取产汇流模型,完成河流精细化创建及耦合城区管网的洪涝分析模型。最后开展多情景下洪涝模拟分析,预测不同情景下洪水演进过程、淹没水深和积水分布等风险要素,以期提高城市应对极端暴雨风险管控的能力,为城市洪涝灾害防御工作提供技术参考。

1 概况

1.1 研究区概况

江阴市,简称澄,位于太湖水网平原北侧和长江南部冲积平原地带,境内共有 7 个街道和 10 个镇,总面积为 987.53 km²,境内地势平缓,平均海拔约为 6 m,研究范围如图 1 所示。该地区属于北亚热带季

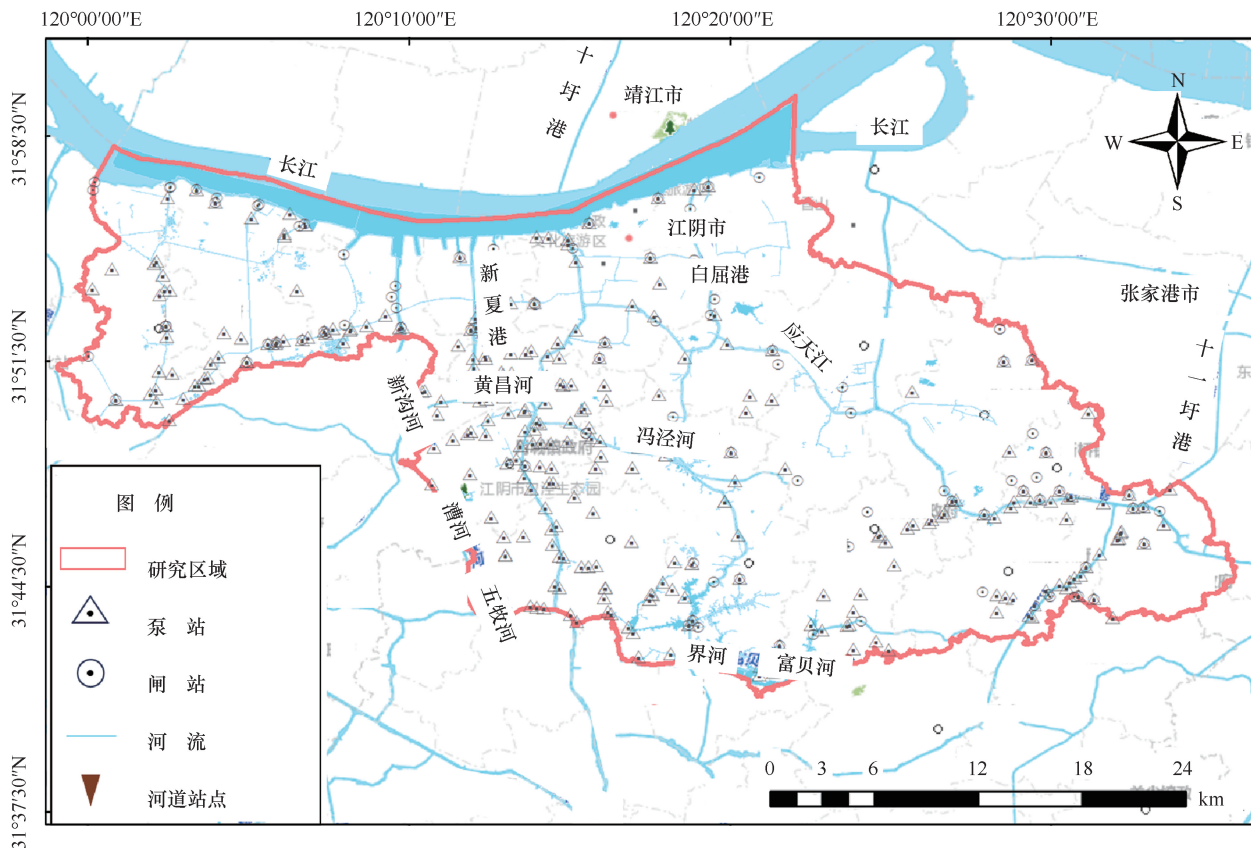


图 1 研究区域空间位置

Fig. 1 Spatial location of the study area

风性湿润气候, 四季分明, 降水丰沛, 年平均降水量为 750 mm。区域内已形成新沟河、锡澄运河和张家港河等三大水系, 集水面积达 1 221 km², 河道总数为 1 034 条, 总长度达 1 478.7 km。区域内防洪标准达到 50 a 一遇, 排涝标准达到 20 a 一遇。区域防洪工程由长江沿线工程和内部圩区工程组成, 长江沿线设有 14 条通江河道, 所有口门均有节制闸、抽水站或套闸控制。内部 103 个圩区建有 153 座闸站和 255 座泵站, 整体运行良好。

1.2 数据来源

研究所需的数据包括遥感影像、数字高程、土地利用类型、河网水系断面、水利工程及调度等资料。遥感影像用于支撑一二维耦合模型构建, 在空间上展示暴雨引发的洪涝淹没水深。数字高程由江阴市自然资源和规划局提供, 用于模拟暴雨洪涝在地面的演进过程, 数据精度为 1:500。土地利用类型由无锡市自然资源和规划局提供, 研究区下垫面的类型经处理合并后划分为水田、水面、建筑用地、旱地以及其他五种类型。河网水系及断面由江阴市水利局提供, 其中市级河道 26 条, 镇级河道 181 条, 村级河道 804 条。水利工程及调度资料由江阴市水利局获取, 涵盖研究区内的堤防、圩区、水闸、泵站等相关统计资料。

2 研究方法

2.1 Infoworks ICM 模型

Infoworks ICM 模型, 具有水文、一二维水动力等多个计算模块。水文模型的选择对产汇流模拟的精度有着直接影响, 由于研究区域内下垫面条件复杂, 模拟范围分为山丘区和平原区, 本文采用分布式水文模型模拟研究区域降雨产汇流过程, 山丘区产流采用 PDM 模型^[29], 平原区建筑用地和水面产流采用不透水城区的固定系数模型、旱地产流采用 Horton 模型^[30]、水田产流采用 SCS 模型^[31], 汇流过程采用 SWMM 汇流模型^[32]。水动力模型由一维河网模型、一维管网模型、二维地面演进模型和水利工程调度模型耦合构成。

一维河网和管网水动力模拟, 控制方程为圣维南方程, 包括连续方程和运动方程, 其公式为

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Qu) + gA \frac{\partial h}{\partial x} - gAS_0 + gAS_f = 0 \quad (2)$$

式中, Q 为流量(m³/s); B 为河面宽度(m); z 为水

位(m); A 为过水断面面积(m²/s); h 为水深(m); S_0 为河底比降; S_f 为摩阻比降; u 为断面平均流速(m/s)。

二维模型控制方程采用浅水方程, 即水深平均的 NS 方程, 控制方程组为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + \frac{gh^2}{2}\right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \tau_{bx} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2 + \frac{gh^2}{2}\right) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \tau_{by} \quad (5)$$

式中, h 为水深(m); u 和 v 分别是 x 和 y 方向的速度分量(m/s); q 为流量(m³/s); u_i 和 v_i 分别为网格单元上因降雨产生的流速(m/s); g 为重力加速度(m²/s); z_b 为底坡高程(m); τ_{bx} 和 τ_{by} 分别代表 x 和 y 方向的摩阻力。

2.2 洪涝模型构建

平原河网地区水系互联互通难以划分内部边界, 为了提高模型计算结果的准确性, 模型采用太湖地区模型—江阴市洪涝模型嵌套模式进行构建^[33]。太湖地区模型为水文—一维河网水动力耦合模型, 太湖地区根据水系分区特点可以分为湖西区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区和浦南区等区域, 根据行政区划方面可以分为苏州、无锡、常州和镇江市等^[34]。太湖地区模型与江阴市模型嵌套耦合过程, 分为太湖地区模型—水系分区模型—城市模型三级嵌套模式构建过程, 首先根据武澄锡虞区水系分区, 将河网模型和枢纽工程从太湖地区模型中抽取出来构建水利分区模型并设置边界点, 然后通过城区范围构建江阴市模型并关联水系分区模型边界点。江阴市洪涝模型计算过程中, 能够直接获取太湖地区模型的水位和流量边界, 为江阴市洪涝模型提供计算边界条件, 从而解决模型外边界的封闭问题。

进一步构建江阴市洪涝模型, 该模型为精细化水文水动力—一二维河网管网耦合模型, 重点对江阴市 987.53 km² 研究范围内圩区、工程、河网、管网进行精细化构建。模型构建要素主要包括水文模型、一维河网模型、一维管网模型、二维地面模型、水利工程及调度模型。水文产汇流模型是复杂水文模型的概化, 能够模拟水循环过程的主要特征。首先依据研究范围内土地利用类型进行下垫面处理和划分, 太湖流域下垫面类型可细分为 39 种, 通常将 39 种下垫面

类型合并为水田、水面、建筑用地、旱地以及其他五种用地类型。其次,通过对研究区域地形进行水文分析,划分出水系和汇水单元,共划分出 29 169 个汇水单元,依据水系进一步合并汇水单元,并将汇水单元的流向匹配至沿程河道。最后,将汇水单元和下垫面进行空间叠加,计算出每个汇水单元中各种用地类型的占比,进而根据不同用地类型产汇流模型计算出每个汇水单元流量过程。一维河网模型构建范围为研究区域内国家普查河流,采用河道中心线和实测断面进行河网构建,无实测断面的河道采用概化断面处理,共构建 970 条河道,总长 1 142 km。一维管网模型重点构建主干管网,依据研究区域管网资料构建管网模型,并梳理和检查管网的拓扑关系,进一步将管网模型与河网模型进行耦合,共构建管网总长度 857 km、检查井 3.6 万个。二维地面模型通过高精度 DEM 构建,网格单元面积不大于 1 000 m²,共构建 83 万个计算网格。水利工程及调度模型构建所有涉及城市防洪排涝的闸泵工程,参照水利工程资料构建研究区域内水利工程,主要设置的调度规则包括沿江水利工程、排水片外排工程及圩区外排工程。研究区域精细化洪涝模型如图 2 所示。

2.3 分析方案

本文共设置三类暴雨情景,降雨过程如图 3 所

示,详细计算方案如表 1 所列。

(1)“郑州 7·20”暴雨情景,考虑平原城市的气象特征,研究区域发生“郑州 7·20”暴雨量级的概率较小,分析方案进一步关注研究区域遭遇不同倍比“郑州 7·20”暴雨量级下的洪涝风险。研究区域防洪标准为 100 a 一遇,设计 24 h 面雨量为 213.2 mm,72 h 面雨量为 298.9 mm,占比约为 0.35 倍“郑州 7·20”暴雨量级,综合考虑,制定研究区域遭遇 0.35 倍、0.50 倍、0.75 倍和 1.00 倍“郑州 7·20”降雨过程(工况 1—4)的洪涝风险评估。

(2)特大暴雨情景,根据研究区域历史降雨特征,制定 1 h 累计 100 mm、6 h 累计 200 mm 和 24 h 累计 250 mm 降雨过程(工况 5—7),三组工况不仅涵盖短历时降雨的突发性,也考虑了长时间累计降雨的持续性。

(3)水利设计降雨情景,制定 10 a 一遇、20 a 一遇和 50 a 一遇设计暴雨(工况 8—10)。三种工况下降雨过程由雨量频率曲线推算得出,通过对研究区域的气象资料进行统计分析,选取研究区域 2000—2022 年的雨量记录,拟合不同降雨历时下雨量频率曲线,最终推算出不同重现期下 24 h 降雨过程。

2.4 淹没风险等级划分

基于洪涝模拟模型计算得到的水深,对研究区

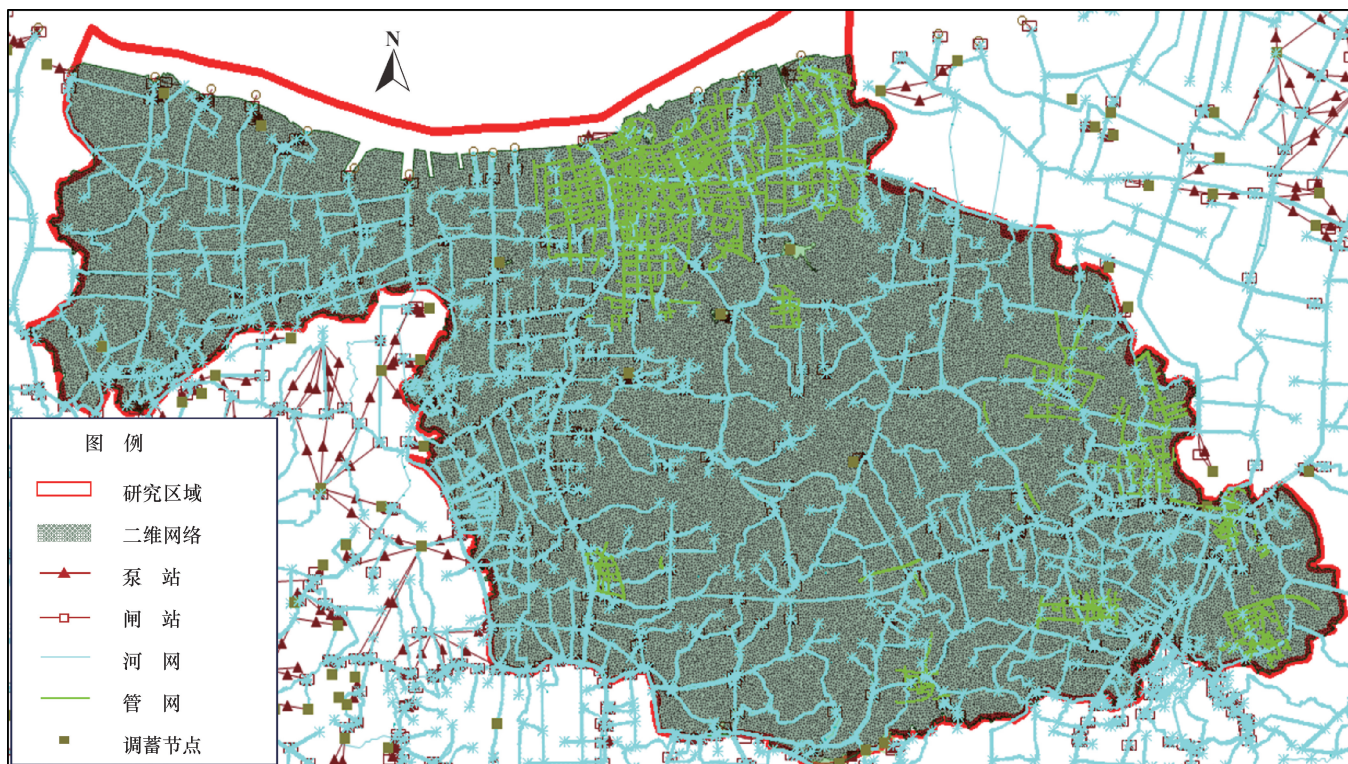


图 2 研究区域精细化洪涝模型

Fig. 2 Refined flood model for the study area

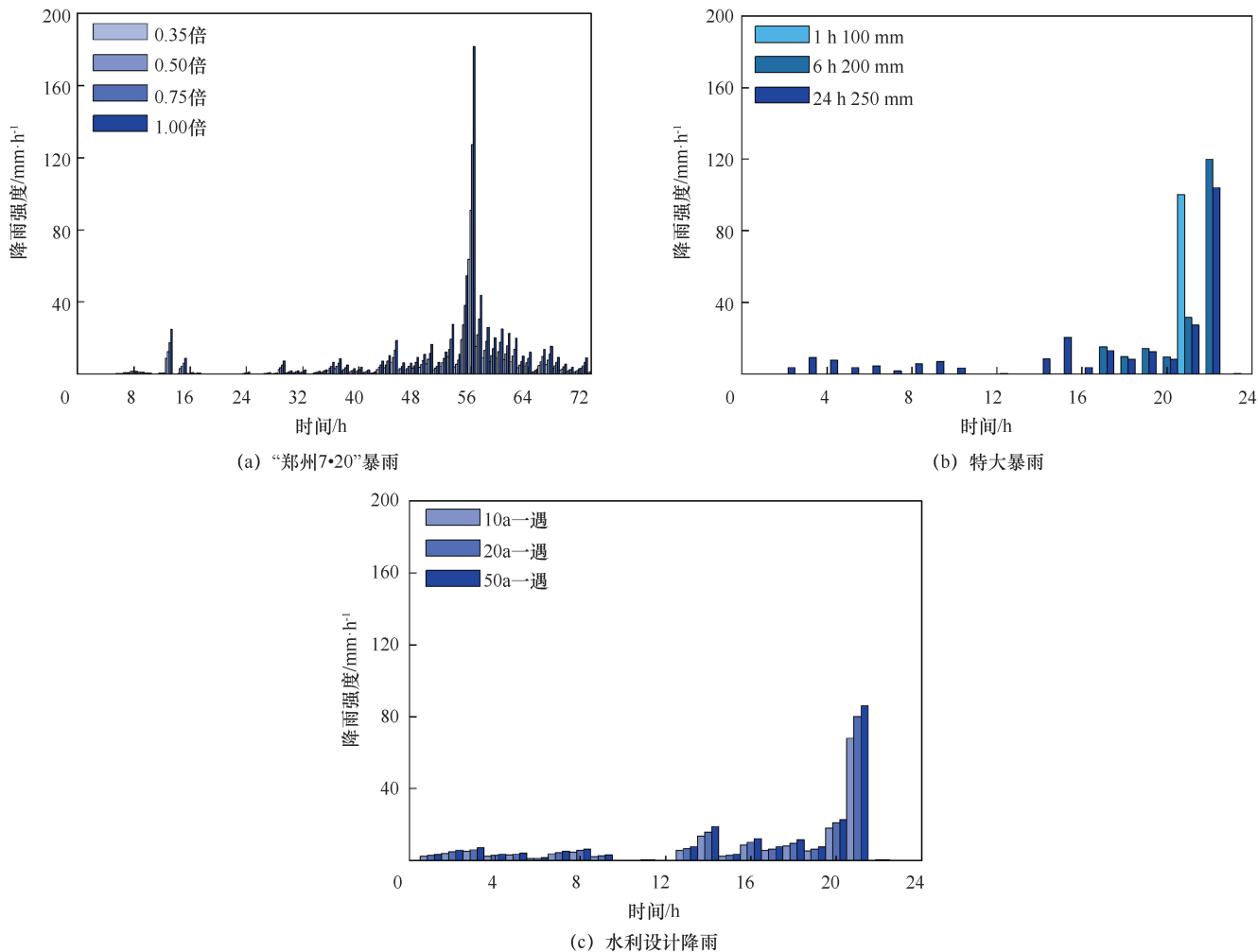


图3 不同情景下的降雨过程

Fig. 3 Rainfall process under different scenarios

表1 降雨情景计算方案表

Table 1 Rainfall scenario calculation scheme

情景名称	工况编号	方案名称	累计降雨量/mm	水位边界
“郑州7·20”暴雨	1	0.35倍降雨	276.2	20160701 场次 下长江沿程实 测水位、太湖 水位、苏南运 河水位和苏州 枫桥水位
	2	0.50倍降雨	394.5	
	3	0.75倍降雨	522.4	
	4	1.00倍降雨	789.1	
特大暴雨	5	1 h 100 mm	100	
	6	6 h 200 mm	200	
	7	24 h 250 mm	250	
水利设计降雨	8	10 a 一遇	163.4	
	9	20 a 一遇	192.3	
	10	50 a 一遇	229.6	

风险程度划分如表2所列。

表2 洪涝风险等级划分表

Table 2 Classification of flood risk levels

风险等级	淹没水深/m	风险程度	图例
无风险	<0.15 m	对公共出行影响较小	
低风险	0.15~0.30	公共出行受显著影响	
中风险	0.30~0.60	儿童出行受到威胁	
高风险	0.60~1.00	未成年人出行受到威胁	
极高风险	>1.00	全体成员出行受到威胁	

域的洪涝风险进行评估。洪涝风险等级参考《洪水风险图编制导则》和《洪水风险图编制技术细则》中的风险指标进行划分^[35]，依据淹没水深对居民出行、财产保障、人员生命安全的威胁程度，将风险等级分为无风险、低风险、中风险、高风险与极高风险。洪涝

3 结果与讨论

3.1 模型率定与验证

模型率定与验证场次选取长历时梅雨型20160701场次、短历时强降雨20170923场次、台风雨20210724场次三个典型降雨过程，计算水位边界

选取降雨场次对应的实测水位过程。本文采用 20210724 场次开展模型参数率定, 采用 20160701 和 20170923 场次验证评估模型精度。一维模型糙率根据河道特性进行设置, 骨干河道糙率设置为 0.01~0.015, 其余河道糙率设置为 0.012~0.035; 二维模型模型地面根据空地、旱地、树丛等土地利用类型, 设置糙率为 0.035~0.065。水文模型参数根据研究区域内下垫面特征设置, 固定径流系数模型的产流系数设置为 0.7~0.85, SCS 模型的初定系数值设置在

0.4~1.0, SWMM 模型的汇流系数设置在 0.01~0.1 之间。

模型率定与验证结果如图 4—图 6 所示, 河道水位站 A 和 B 的计算水位与实测水位准确度显示模型计算结果与实际值吻合较好。为进一步量化率定与验证结果, 表 3 列出三场率定与验证工况中 A 和 B 的水位峰值和决定系数 R^2 。由表 3 可以看出, 在三场降雨过程中, 各站点的水位误差均较小且决定系数均大于 0.90, 表明率定与验证的整体结果较好, 该模

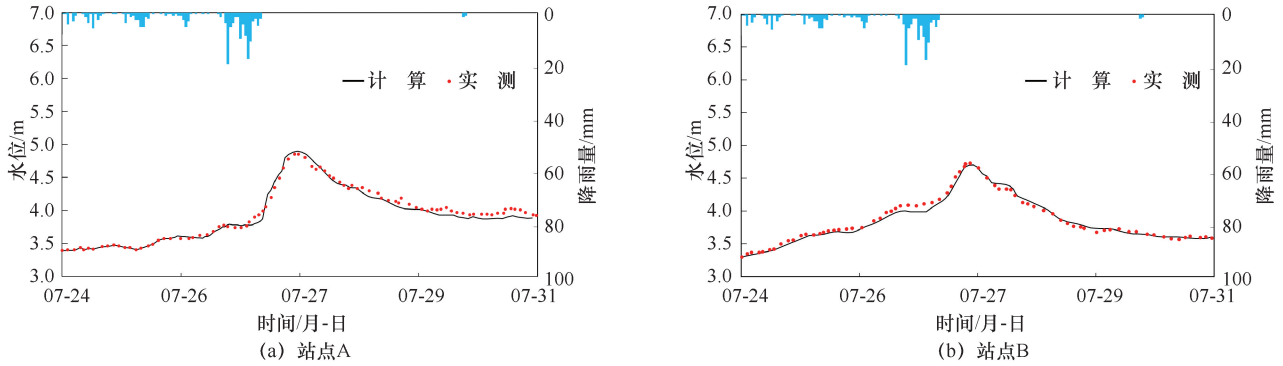


图 4 20210725 场次模型率定结果

Fig. 4 Calibration results of model calibration for 20210725

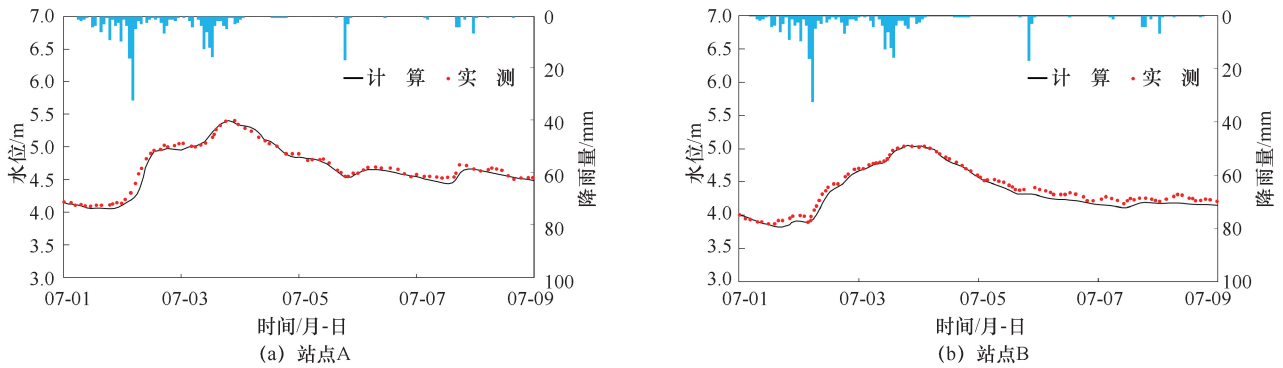


图 5 20160701 场次模型验证结果

Fig. 5 Verification results of model calibration for 20160701

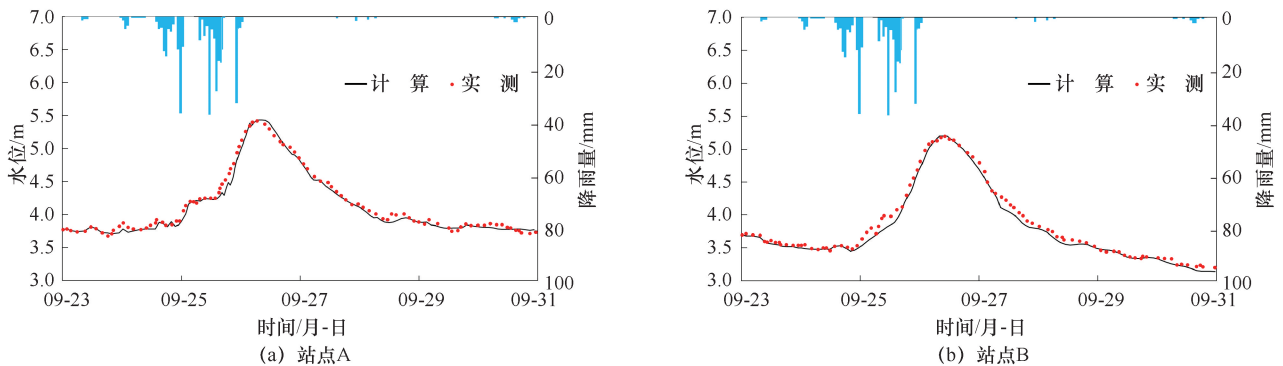


图 6 20170923 场次模型验证结果

Fig. 6 Verification results of model calibration for 20210725

型具备较高的精度。另外, 选取 20210725 场次进行模拟结果与统计的积淹水点位复核, 复核结果如图 7 所示。模拟结果与实际积淹水点位统计结果基本吻合, 共复核积淹点为 56 个, 约 63% 点位计算正确, 部分点位与模拟淹没位置有一定偏差, 主要原因是在积淹水点矢量化处理过程中因位置记录不明确存在一定偏差。

表 3 三场降雨过程的模型验证结果

Table 3 Validation results of three rainfall

场次	站点	水位峰值/m		R^2
		实测	计算	
20210724	A	4.87	4.90	0.90
	B	4.70	4.71	0.93
20160701	A	5.40	5.42	0.96
	B	5.04	5.05	0.95
20170923	A	5.42	5.43	0.95
	B	5.20	5.20	0.91

3.2 “郑州 7·20” 暴雨情景

工况 1—4 对应遭遇不同倍比“郑州 7·20”暴雨的淹没风险, 淹没风险如图 8 所示。由图 8 可以看出, 随着降雨量倍比增大, 淹没水深增加, 地面积水范围变大, 高、极高两种风险性区域面积增加, 其中极高风险面积增加显著。工况 1—4 的高、

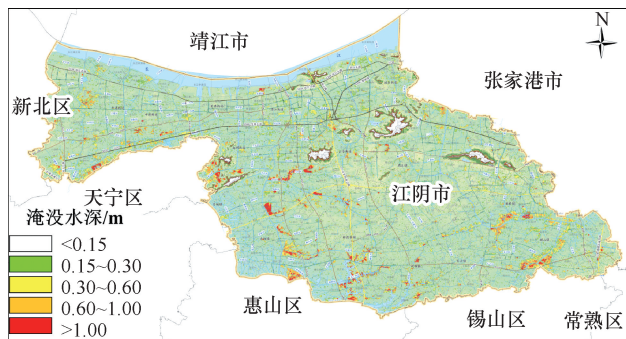


图 7 暴雨积淹水点位验证

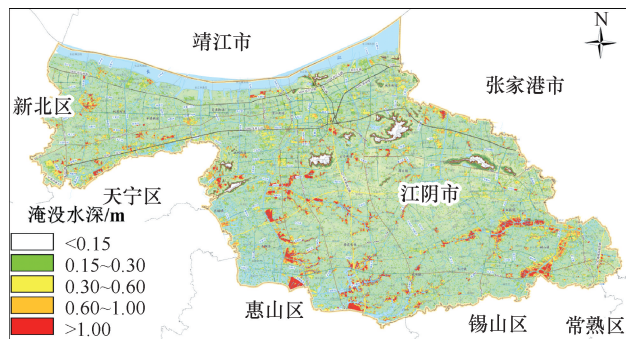
Fig. 7 Verification of rainstorm flooding points

极高风险面积占比和分别为 7.11%、12.85%、20.26% 和 29.97%, 高、极高风险区域主要集中在城市南部河网较为密集的区域, 表明该区域现状工程体系应对极端暴雨能力不足。此外, 从图 8(d) 可以看出, 遭遇 1.00 “郑州 7·20” 降雨时, 研究区域淹没风险面积占比达 37.32%, 且风险等级基本为高、极高风险, 其中 47% 的镇街的淹没风险面积超过 40%, 表明研究区域的防洪排涝已远超现状体系的抵御能力。

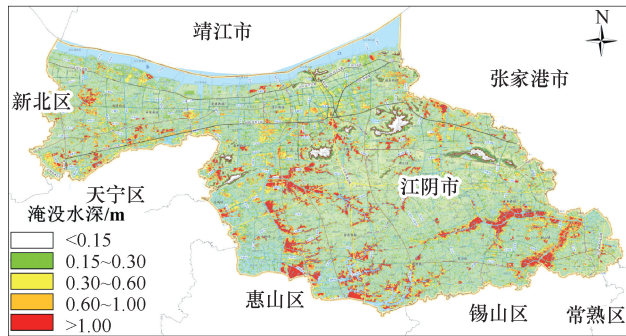
工况 4 为研究区域防洪形势最不利的工况, 综合考虑现状工程体系, 选择 6 个特征点位, 通过洪涝模



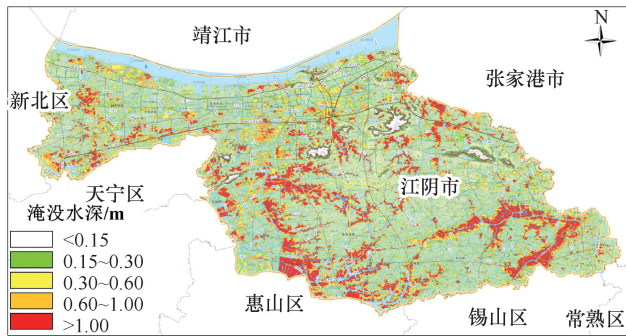
(a) 工况1



(b) 工况2



(c) 工况3



(d) 工况4

图 8 工况 1—4 的洪涝风险空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of flood risk for conditions 1—4

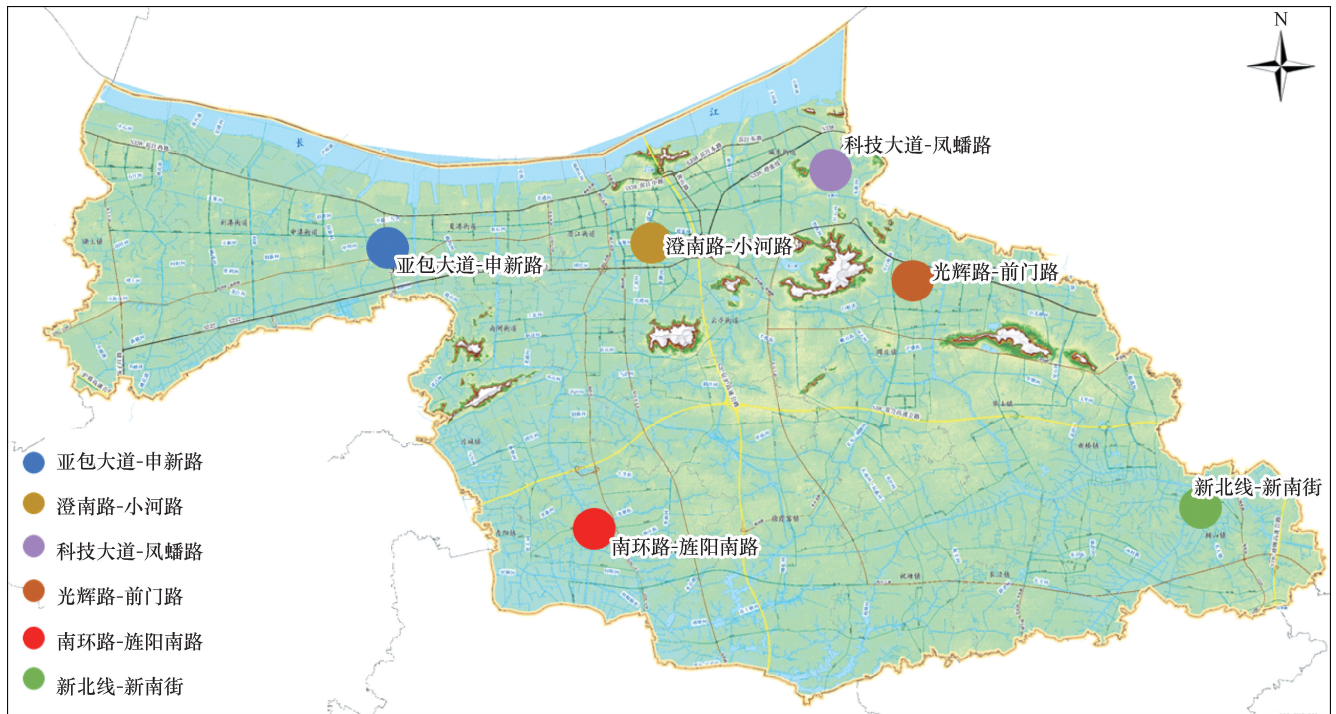


图9 积淹水点代表点位分布

Fig. 9 Distribution of representative locations of flood points

型计算不同时刻下各特征点位的淹没水深, 分析研究区域的积退水过程。积淹水点代表点位分布如图9所示, 代表点退水过程如图10所示。

由图10可以看出, 工况4下代表点淹没水深的峰值出现在降雨峰值后2~13 h, 总体水位变化过程表现为涨水速度快、水位峰值高、退水过程久。由于管网分布、汇水范围和地形不同造成的各点淹没水深峰值时间略有不同, 最大积水深度为0.60~1.60 m, 降雨结束之后, 除去亚包大道-申新路交汇口、光辉路-前门路两个代表点, 其他区域基本在降雨结束48 h后积水逐渐退去。

3.3 特大暴雨情景

工况5—7分别对应1 h 100 mm降雨、6 h 200 mm降雨、24 h 250 mm降雨, 其中最大小时降雨量分别为10 mm、120 mm和104 mm, 工况5—7的淹没风险图如图11所示。由图11可以发现, 工况7降雨下淹没面积高于其他两组工况, 总风险面积占比13.15%, 其中高与极高风险面积和占比3.23%, 且24%的镇街的淹没风险面积超过15%。此外,

工况6的淹没面积略小于工况7, 表明遭遇特大暴雨时, 地面积水淹没面积不仅受到总降雨量的影响, 还与最大小时降雨量有关。

由图12代表点积退水过程可以看出, 工况7下代表点淹没水深的峰值出现在降雨峰值后1~5 h, 最大积水深度为0.05~0.60 m。降雨结束后, 除亚包大道-申新路交汇口、光辉路-前门路交汇口两个代表点, 其他区域基本在降雨结束27 h后积水逐渐退去。

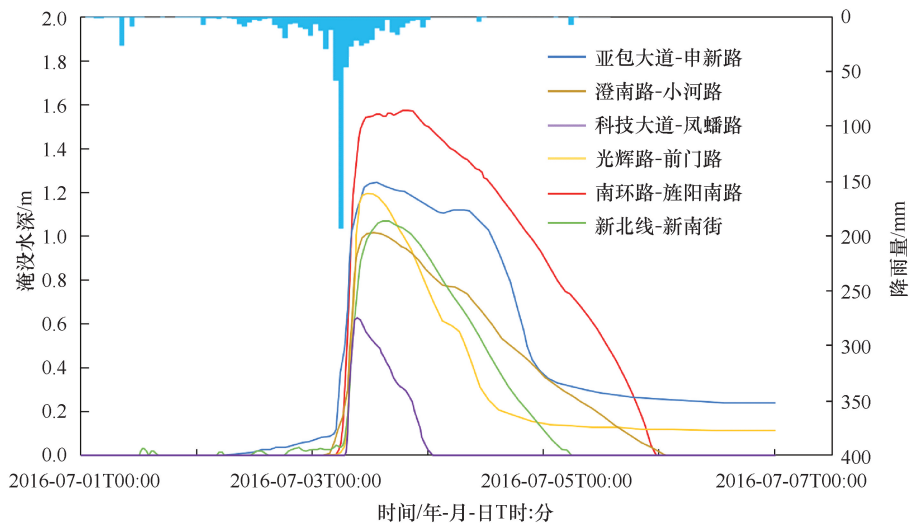


图10 工况4下积淹水点淹没水深

Fig. 10 Submerged depth of flood points under condition 4

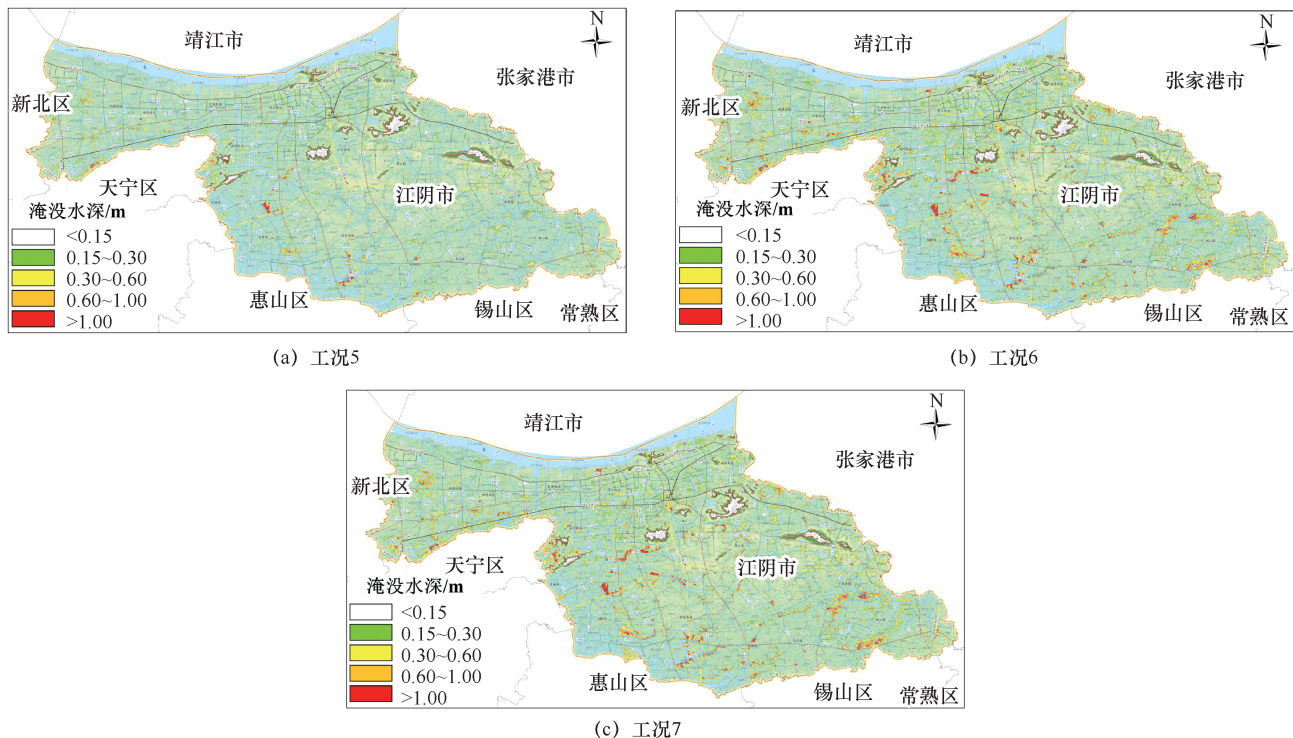


图 11 工况 5—7 的洪涝风险空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of flood risk for conditions 5—7

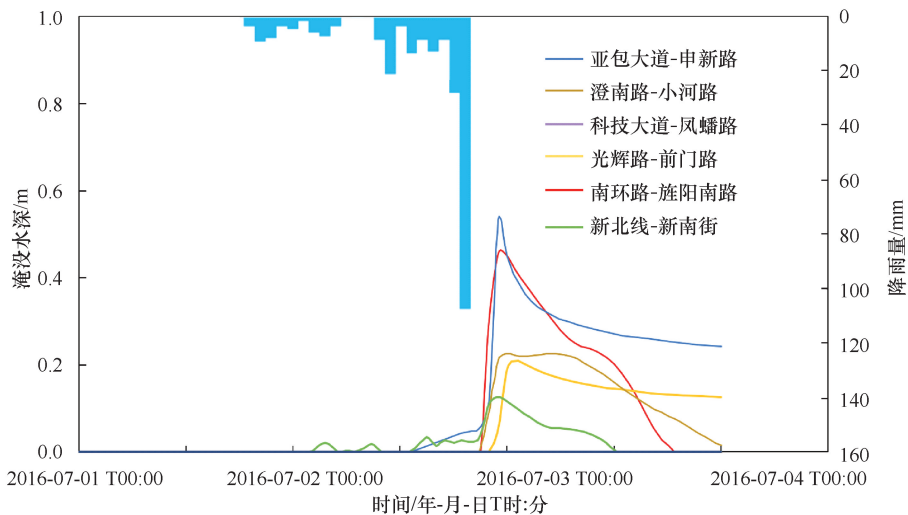


图 12 工况 7 下积水点淹没水深

Fig. 12 Submerged depth of flood points under condition 7

3.4 水利设计降雨情景

工况 8—10 的累计总雨量分别为 163.4 mm、192.3 mm 和 229.6 mm，最大小时雨量分别为 68.1 mm、80.1 mm 和 95.6 mm。工况 8—10 的总淹没面积占比分别为 4.39%、6.58% 和 9.41%，其中中风险区域占比最大，分别为 1.76%、2.42% 和 3.61%，其次是低风险区，占比分别为 1.74%、2.29% 和 3.20%。由图 13 可以看出，随着设计降

雨增加，总淹没面积增加较明显，各风险等级的淹没面积均呈现增长趋势。同时发现，即使遭遇 10 a 一遇设计降雨情况下，仍会出现淹没风险区域，淹没风险区域与之前情景中洪涝分布情况一致，这一现象的原因在于研究区域为江苏南部地区平原城市之一，流域-区域-城市不同尺度间河网互联互通，周边河网水体会向研究区域汇集。这表明研究区域不仅受到本地降雨的影响，周边区域的降雨情况也

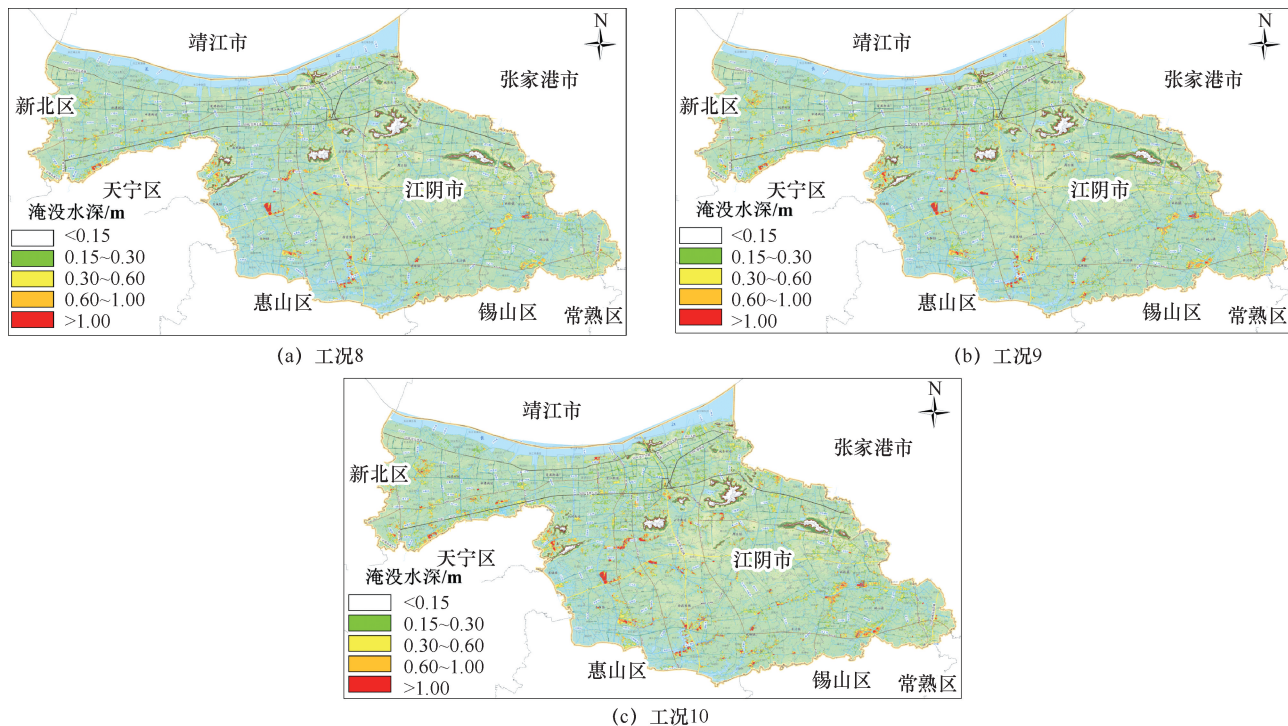


图 13 工况 8—10 的洪涝风险空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of flood risk for conditions 8—10

对其具有较大的影响。

4 结论

结合江阴市洪涝特性、历史实况暴雨情况和防洪排涝标准, 制定三种暴雨情景, 共 10 组计算方案。通过构建水文水动力一二维河网管网耦合的洪涝分析模型, 开展暴雨洪涝灾害模拟与评估, 取得结论如下。

(1) 在“郑州 7·20”暴雨情景下, 淹没风险面积随降雨量增大而增加, 其中极高风险面积随降雨量增大显著增加。遭遇 1.00 倍郑州“7·20”降雨时, 区域总风险面积占比 37.62%, 高与极高风险面积占比 19.83%, 47% 的镇街的淹没风险面积超过 40%, 现状防汛排涝工程压力较大。

(2) 在特大暴雨情景下, 淹没面积受总降雨量与最大小时降雨量共同影响, 24 h 降雨量 250 mm 下总淹没风险面积占比 13.20%, 高与极高风险面积占比 3.23%, 略大于 1 h 100 mm 降雨和 6 h 200 mm 降雨的总淹没面积。

(3) 水利设计降雨情景下, 随设计降雨雨量增加, 淹没风险面积和淹没水位显著增加。此外江阴市内涝受本地降雨量以及周边区域雨水情共同影响。

参考文献 (References):

- [1] ZHU Huanhuan, JIANG Zhihong, LI Laurent. Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6 [J]. Science Bulletin, 2021, 66(24): 2528-2537.
- [2] 赵超辉, 万金红, 张云霞, 等. 城市内涝特征、成因及应对研究综述[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 220-228.
ZHAO Chaohui, WAN Jinhong, ZHANG Yunxia, et al. Review of the characteristics, causes and governance of urban flood in China [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 220-228.
- [3] 姚秀萍, 李若莹. 河南“21.7”极端暴雨的研究进展[J]. 气象学报, 2023, 81(6): 853-865.
YAO Xiuping, LI Ruoying. Progress in research of the July 2021 extreme precipitation event in Henan Province, China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2023, 81(6): 853-865.
- [4] LI C L, LIU M, HU Y M, et al. Spatial distribution patterns and potential exposure risks of urban floods in Chinese megacities [J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127838.
- [5] 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.
HUANG Wei, YUE Zhiyuan, SUN Nan, et al. Review on hydrodynamic modelling of flash floods [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(4): 15-20.
- [6] BENITO G, LANG M, BARRIENDOS M, et al. Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. review of scientific methods [J]. Natural Hazards, 2004, 31(3): 623-643.

- [7] 王仲梅, 全逸峰, 荆新爱. 黄河下游洪灾风险的定量分析与计算[J]. 人民黄河, 2013, 35(1): 14-16.
WANG Zhongmei, TONG Yifeng, JING Xinai. Quantitative analysis and computation on flood risk of the lower Yellow River floodplain [J]. Yellow River, 2013, 35(1): 14-16.
- [8] 夏兴生, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 基于历史案例的自然灾害灾情评估方法研究[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 219-225.
XIA Xingsheng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Study on evaluation method of natural disaster based on historical cases [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 219-225.
- [9] 朱贵玉, 方世跃, 尹春风, 等. 基于 FAHP-CRITIC 的暴雨洪涝灾害风险评估: 以西安市临潼区为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(4): 37-48.
ZHU Guiyu, FANG Shiyue, YIN Chunfeng, et al. Risk assessment of rainstorm-flood disaster based on FAHP-CRITIC: Taking Lintong District of Xi'an City as an example [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(4): 37-48.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 马鑫, 侯精明, 李丙尧. 城市极端暴雨涝情变化特征模拟分析: 以宁夏固原市为例[J]. 人民长江, 2023, 54(7): 1-7.
MA Xin, HOU Jingming, LI Bingyao. Simulation on variation characteristics of urban extreme rainstorm and waterlogging: Case of Guyuan City, Ningxia Autonomous Region [J]. Yangtze River, 2023, 54(7): 1-7.
- [13] 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.
HUANG Guoru, LI Biqi. Risk assessment of storm water flooding in Shenzhen City based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(1): 1-6.
- [14] 宋晓猛, 徐楠涛, 董子然. 变化环境下城市洪涝风险评估与调控策略[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 56-64, 85.
SONG Xiaomeng, XU Nantao, DONG Ziran. Risk assessment and control strategies of urban flooding under changing environments [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(1): 56-64, 85.
- [15] 康亚静, 刘宇, 解家毕. 超标准暴雨洪水条件下南水北调中线工程沿线各单元风险评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 342-351.
KANG Y J, LIU Y, XIE J B. Risk assessment of each unit along the middle route of South-to-North Water Transfer Project under over-standard rainstorm flood conditions [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 342-351.
- [16] YOUNG A F, PAPINI J A J. How can scenarios on flood disaster risk support urban response? A case study in Campinas Metropolitan Area (So Paulo, Brazil) [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 61: 102253.
- [17] 黄国如, 罗海婉, 陈文杰, 等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾情情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643-652.
HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong Basin, Guangzhou [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643-652.
- [18] 王京晶, 徐宗学, 李福林, 等. 济南市主城区城市洪涝风险分析[J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 22-26.
WANG Jingjing, XU Zongxue, LI Fulin, et al. Urban flooding/waterlogging risk analysis in the downtown area of Jinan City [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(1): 22-26.
- [19] QIAO Y N, WANG Y X, JIN N, et al. Assessing flood risk to urban road users based on rainfall scenario simulations [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 123: 103919.
- [20] ZHAO H B, GU T S, TANG J Q, et al. Urban flood risk differentiation under land use scenario simulation [J]. iScience, 2023, 26(4): 106479.
- [21] 曾照洋, 王兆礼, 吴旭树, 等. 基于 SWMM 和 LISFLOOD 模型的暴雨内涝模拟研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 68-77.
ZENG Zhaoyang, WANG Zhaoli, WU Xushu, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 68-77.
- [22] MEI C, LIU J H, WANG H, et al. Urban flood inundation and damage assessment based on numerical simulations of design rainstorms with different characteristics [J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(11): 2292-2304.
- [23] 王兆礼, 陈昱宏, 赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 117-124.
WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124.
- [24] LIN W B, SUN Y M, NIJHUIS S, et al. Scenario-based flood risk assessment for urbanizing deltas using future land-use simulation (FLUS): Guangzhou Metropolitan Area as a case study [J]. Science of the Total Environment, 2020, 739: 139899.
- [25] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街区洪涝模拟与分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 87-94.
YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 87-94.
- [26] QIN X L, WANG S F, MENG M. SEA for better climate adaptation in the face of the flood risk: Multi-scenario, strategic forecasting,

- nature-based solutions [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 106: 107495.
- [27] WANG L Y, HUANG Z Y, GAN B, et al. Climate change impacts on magnitude and frequency of urban floods under scenario and model uncertainties [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 366: 121679.
- [28] GAO L, MEI J P, LI J H, et al. Effect of intense rainfall and high riverine water level on compound flood hazards in a river-valley city: A case study of Yingde, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 130044.
- [29] 郝偲楠, 刘登嵩, 孙英军, 等. 基于概率分布模型的流量预报及参数动态识别[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(6): 39-48.
HAO Ruonan, LIU Dengsong, SUN Yingjun, et al. Runoff forecasting and dynamic parameter identification using probability distributed model [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(6): 39-48.
- [30] 杜晓丽, 杨明哲, 尹子杰, 等. 全堵塞周期内透水砖路面的下渗-产流模型研究[J]. *水资源保护*, 2023, 39(5): 25-31.
DU Xiaoli, YANG Mingzhe, YIN Zijie, et al. Study on infiltration-runoff model of permeable brick pavement during full clogging cycle [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 25-31.
- [31] 张涛, 訾丽, 杨文发, 等. SCS模型在山区小流域山洪灾害预报预警中的适用性分析[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(9): 71-76.
ZHANG Tao, ZI Li, YANG Wenfa, et al. Applicability of SCS model in flash flood forecasting and early warning [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(9): 71-76.
- [32] 邓成, 夏军, 余敦先, 等. 基于水文水动力耦合模型的深圳市典型区域城市内涝模拟[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2023, 56(8): 912-921.
DENG Cheng, XIA Jun, SHE Dunxian, et al. Urban waterlogging simulation in a typical area in Shenzhen based on hydrological-hydrodynamic coupling model [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2023, 56(8): 912-921.
- [33] 杨帆, 周钰林, 范子武, 等. 苏南运河沿线精细化水文-水动力模型构建及验证[J]. *水利水运工程学报*, 2020(1): 16-24.
YANG Fan, ZHOU Yulin, FAN Ziwu, et al. Building and verification of refined hydrology-hydrodynamic model for South Jiangsu Canal and its river networks [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(1): 16-24.
- [34] 吴时强, 黎东洲, 范子武, 等. 多尺度分级河网模型在江苏省太湖地区的应用研究[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(8): 1-6.
WU Shiqiang, LI Dongzhou, FAN Ziwu, et al. Study on risk assessment and countermeasures of urban extreme rainstorm flood disaster [J]. *China Flood and Drought Management*, 2023, 33(8): 1-6.
- [35] 王静, 李娜. 上海城区动态洪水风险图应用系统及典型暴雨内涝分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(3): 61-76.
WANG Jing, LI Na. The dynamic flood hazard map application system of urban area in Shanghai and typical rainstorm waterlogging analysis [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(3): 61-76.

(责任编辑 王海锋)