

田培楠, 刘舒, 杨娜娜, 等. 联圩并圩措施对平原河网城市防洪排涝影响评估: 以芜湖市新城南圩为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(10): 135-151. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.011

TIAN Peinan, LIU Shu, YANG Nana, et al. Evaluation of effect of dike merging measures on flood control and drainage in plain river network cities: A case study of Xinchengnanwei in Wuhu City[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(10): 135-151. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.011

联圩并圩措施对平原河网城市防洪排涝影响评估: 以芜湖市新城南圩为例

田培楠^{1,2}, 刘舒^{1,2}, 杨娜娜^{1,2}, 李敏^{1,2}, 刘媛媛^{1,2}, 谢胜³, 李运杰³,
郝晓丽^{1,2}, 何欣航^{1,2}, 罗玉俊³

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038;
3. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200029)

摘要:【目的】长江中下游平原河网城市地形平坦开阔、河网交错, 汛期水高城低导致排水不畅, 极易发生洪涝灾害, 联圩并圩是解决圩区自身洪涝问题的有效手段。【方法】以芜湖市新城南圩为例, 系统评估联圩并圩措施对防洪排涝的影响。通过构建精细化洪涝一体耦合模型, 结合工程建设情况、降雨和外江水位条件, 设计7种情景方案, 模拟联圩并圩措施实施前后洪涝风险变化。【结果】结果显示: 不同降雨和外江洪水重现期下研究区域内积水面积较联圩并圩前均有所降低; 尤其当重现期为10 a一遇时, 高风险区域积水面积的减小程度最大, 达到18.40%; 随着设计暴雨和洪水重现期的增大, 这些措施的效果逐渐减弱; 联圩并圩实施后, 圩区主要排水工程荆方泵站和竹港泵站可满足城市排水需求, 当遭遇超过20 a一遇降雨时, 需提前开启泵站预降荆山河水位以保证泵站正常运行。【结论】联圩并圩措施能够有效降低平原河网城市的洪涝风险, 结合排涝工程, 通过预降内河水位, 城市精细化洪涝一体耦合模型可以统筹模拟洪水和内涝交互过程, 研究成果可为平原河网城市防洪排涝规划、水工程调度等相关工作提供技术支撑, 也可为相似圩区城市精细化洪涝耦合模型的构建提供理论指导。

关键词: 联圩并圩; 平原河网城市; 防洪排涝; 数值模拟; 芜湖市

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.011

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)10-0135-17



Evaluation of effect of dike merging measures on flood control and drainage in plain river network cities: A case study of Xinchengnanwei in Wuhu City

TIAN Peinan^{1,2}, LIU Shu^{1,2}, YANG Nana^{1,2}, LI Min^{1,2}, LIU Yuanyuan^{1,2}, XIE Sheng³,
LI Yunjie³, HAO Xiaoli^{1,2}, HE Xinhang^{1,2}, LUO Yujun³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Research Center on Flood and

收稿日期: 2024-08-07; 修回日期: 2024-10-06; 录用日期: 2024-10-15; 网络出版日期: 2025-02-27

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3008502)

作者简介: 田培楠(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事洪水灾害分析和洪涝模型研究。E-mail: tianpeinan@edu.iwhr.com

通信作者: 刘舒(1975—), 男, 正高级工程师, 硕士研究生导师, 硕士, 主要从事城市洪涝特性及洪涝模拟研究。E-mail: fcds2001@iwhr.com

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

Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200029, China)

Abstract: [Objective] Plain river network cities in the middle and lower reaches of the Yangtze River are located in flat and open terrain with crisscrossed river networks. During flood seasons, higher water levels combined with lower urban elevation often lead to poor drainage, making these areas highly susceptible to flooding. Dike merging has proven to be an effective method for addressing flood issues within dike areas. [Methods] Taking Xinchengnanwei in Wuhu City as an example, the effect of dike merging measures on flood control and drainage was systematically evaluated. A refined flood-inundation coupled model was developed, incorporating engineering infrastructure, rainfall, and external river water levels. Seven scenarios were designed to simulate changes in flood risks before and after the implementation of dike merging measures. [Results] The result showed that, under different rainfall conditions and external river flood return periods, the inundation area in the study area decreased compared to before the implementation of dike merging measures. Specifically, when the return period was 10 years, the reduction in inundation area in high-risk zones was the most significant, reaching 18.40%. As the design storm and flood return periods increased, the effectiveness of these measures gradually diminished. After implementing the dike merging measures, the main drainage infrastructure in the dike area, such as the Jingfang Pump Station and Zhugang Pump Station, was able to meet the urban drainage needs. However, for rainfall events exceeding a 20-year return period, it was necessary to pre-lower the water level of the Jingshan River by activating pump stations in advance to ensure their proper operation. [Conclusion] Dike merging measures can effectively reduce the flood and inundation risks in plain river network cities. Combined with drainage engineering projects, pre-lowering internal river water levels enhances the city's flood control and drainage capacity. The refined flood-inundation coupled model can comprehensively simulate the interaction between floods and urban inundation. Technical support can be provided for flood control and drainage planning, as well as water engineering scheduling in plain river network cities, along with theoretical guidance for establishing refined flood-inundation coupled models in similar dike areas.

Keywords: dike merging; plain river network cities; flood control and drainage; numerical simulation; Wuhu City

0 引言

在全球气候急剧变化与城市化进程加速的双重背景下,近十年来,我国城市面临的暴雨洪涝风险显著加剧^[1]。2021年7月,河南郑州遭受的极端强降雨事件,不仅造成了巨大的财产损失,还引发了重大的人员伤亡^[2]。2023年7月,受台风“杜苏芮”北上与冷空气的叠加影响,海河流域更是经历了前所未有的强降雨,引发了流域性特大洪水,进一步凸显了城市防洪的紧迫性^[3]。回溯至2016年,长江流域的连续大暴雨亦给当地带来了深重的洪涝灾难,以芜湖市为例,为应对灾情,当地动员了超过20万人的抗洪抢险队伍,并紧急转移安置了13.4万名受灾群众^[4]。这一系列事件强烈警示,城市洪涝灾害的严峻挑战亟待有效应对^[5]。

城市洪涝问题涵盖了“外洪”与“内涝”两大方面,二者均由降雨诱发,但在特定条件下可相互转化^[6]。具体而言,城市“外洪”通常是由于客水入境造成的灾害;而“内涝”是排水系统不能及时将积水排走而造成受灾^[7]。在平原河网城市,洪涝灾害问题尤为严峻。长江中下游平原河网城市土壤肥

沃、雨量丰富、水网密布^[8],城市地面普遍介于江河湖泊的洪枯水位之间,每逢汛期,外河水位高于地面,加之内水排泄受阻,使得这些城市频繁遭受外洪内涝的双重夹击,当极端暴雨引发的洪涝灾害超出人工调控能力时,损失往往难以估量^[9]。为解决外洪内涝的矛盾,人们依据地形条件,沿江河两岸及湖泊低洼地带筑起堤防,围垦成圩,构筑起一道道抵御洪水的屏障,形成了独具特色的水网圩区生态系统^[10]。自20世纪50年代起,为进一步提升防洪效能,联圩并圩策略应运而生,通过将多个小圩整合为大圩^[11-12],不仅缩短了防洪战线,便于集中力量进行防御与管理,还通过建设泵站、实施预降水位等措施,显著增强了圩区的排涝能力与抗涝韧性。国外方面,圩堤建设多以围垦农田为目的^[13],荷兰在中世纪时期就开始修建堤坝以保护低洼地区^[14];孟加拉国也通过修建大规模的堤坝和防洪设施来保护农田^[15]。

国内外学者在平原河网城市洪涝问题上展开了广泛深入的研究,当前主要集中在规划建设和流域治理方面。刘克强等^[16]从洪涝协同治理的视角出发,为平原圩区的科学规划、治理策略及联合调度机制提供了深刻见解;张根福^[17]剖析了联圩并圩举措在生态

与社会层面的双重效应, 既表明了其对圩区防洪排涝和生产生活方面的积极贡献, 也揭示其在流域防洪、水环境治理等方面存在的潜在挑战。在水系动态模拟技术层面, 徐存东^[18]、王献辉^[19]等通过构建河网水力学模型, 为圩区水利工程的调控决策提供了坚实的技术支撑; 黄玄等^[20]通过将圩区精细化模型集成至流域模型中, 有效解决了计算边界不闭合的难题; 乔明叶等^[21]提出基于流域尺度系统实施城市排涝, 构建时空耦合的产汇流模型及水位调控机制, 精细化确定闸泵群设计规模及运用方式; 罗志洁^[22]利用 ArcGIS 与 MIKE11 软件, 成功构建了杭嘉湖平原地区河网水文水动力耦合模型, 为圩区洪涝灾害的精准模拟开辟了新路径; 李成^[23]通过分析水文气象资料对太湖流域洋溪大联圩防洪除涝能力提升提出建议。国外方面, 针对平原河网城市的洪涝问题, STEFAN 等^[24]通过多目标效率指数评估了奥地利费尔巴赫市的防洪排涝措施, 探索最为有效的措施; FAITH^[25]探讨了英国、荷兰、美国、日本 4 个国家从传统的洪水防御向可持续洪水风险管理转变的过程, 尽管各国的洪水管理策略各不相同, 但都为快速城市化的沿海大城市提供了宝贵的借鉴。JATIN^[26]从流域管理的角度出发, 结合水文学和水动力学模型, 以德里地区的亚穆纳河流域为例, 通过模型校准、验证及实时数据整合, 提高了洪水预测精度, 增强了城市的防洪抗灾能力。

为探索联圩并圩措施对城市防洪排涝的影响, 考虑圩区水系复杂、工程密布、洪涝过程强耦合等特点, 本文采用中国水利水电科学院自研的全分布式水文水动力学模型 (DHM Urban), 以芜湖市新城南圩为例, 建立地表产汇流、河道汇流、管网汇流、泵站调度“多位一体”的城市精细化洪涝耦合模型^[27], 并利用历史实测降雨过程对模型合理性进行分析。通过 K-means 聚类算法给出符合研究区域特征的设计降雨和外江洪水位, 对联圩前后及暴雨和洪水组合方案进行模拟计算, 统计分析圩区洪涝情况, 系统评估联圩并圩措施对城市防洪排涝的影响。

1 研究区域概况

1.1 研究范围

芜湖市位于安徽省东南部, 地处长江中下游平原河网地区, 南倚皖南山系, 北望江淮平原, 长江自城西南向东北流过, 青弋江自东南向西北穿城而过, 属于亚热带湿润季风气候, 雨量充沛, 年平均降雨量为 1 230 mm, 洪涝灾害频发。本文选取城南圩、三连

圩、荆山圩和埭南圩作为研究区域, 根据《安徽省芜湖市城市防洪规划报告》, 以上 4 个圩区将进行联圩并圩, 形成新城南圩, 总面积约为 207.86 km²。结合数据条件及地理位置信息, 选取芜湖水文站雨量数据和大垵坊、南陵(二)水位站数据进行边界条件分析。具体研究范围如图 1 所示。

1.2 研究区域现状

新城南圩地势中间高四周低, 以中间白马山、马头山等分为东西两片, 东部基本为农田水网, 城市建设用地基本集中在西部。目前共包含 19 个排水分区, 排涝泵站 34 座, 排水总流量 227.69 m³/s。圩区主要排涝水系有荆山河、方村河、欧阳河、竹港河等, 外边界河流为青弋江和青安江。目前欧阳河、方村河与外河交叉点处分别有拦河闸进行控制, 荆山河与青弋江交叉点处建有荆方泵站。

按照新城南圩联圩并圩规划, 原荆山圩排区、黑沙湖排区、小荆山排区、竹丝港排区和埭南北圩以及三连圩北部合并成为荆竹排区, 新城南圩重新划分为 15 个排区; 泵站方面, 在竹港河与青安江交叉点处新建竹港泵站, 对 8 座排涝泵站进行扩建, 废除荆山河沿岸 12 座泵站, 联圩并圩前后排水分区、堤防、泵站等调整情况如图 2 所示, 泵站联圩并圩前后排水能力情况如表 1 所列。

2 模型构建与方案设计

2.1 模型原理

2.1.1 地表模型

DHM Urban 模型地表采用分布式二维水文水动力学模型进行计算, 其基本控制方程为

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r - f - c \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \quad (3)$$

式中, H 为水深(m); t 为时间(s); x 、 y 为平面坐标系; M 、 N 分别为 x 和 y 方向垂向平均单宽流量 (m²·s⁻¹); r 为降雨强度 (mm·h⁻¹); f 为下渗强度 (mm·h⁻¹); c 为管网概化排水能力 (mm·h⁻¹); Z 为水位(m); u 、 v 分别为垂向平均流速在 x 、 y 方向的分量 (m·s⁻¹); n 为曼宁糙率系数; g 为重力加速度 (m·s⁻²)^[28]。

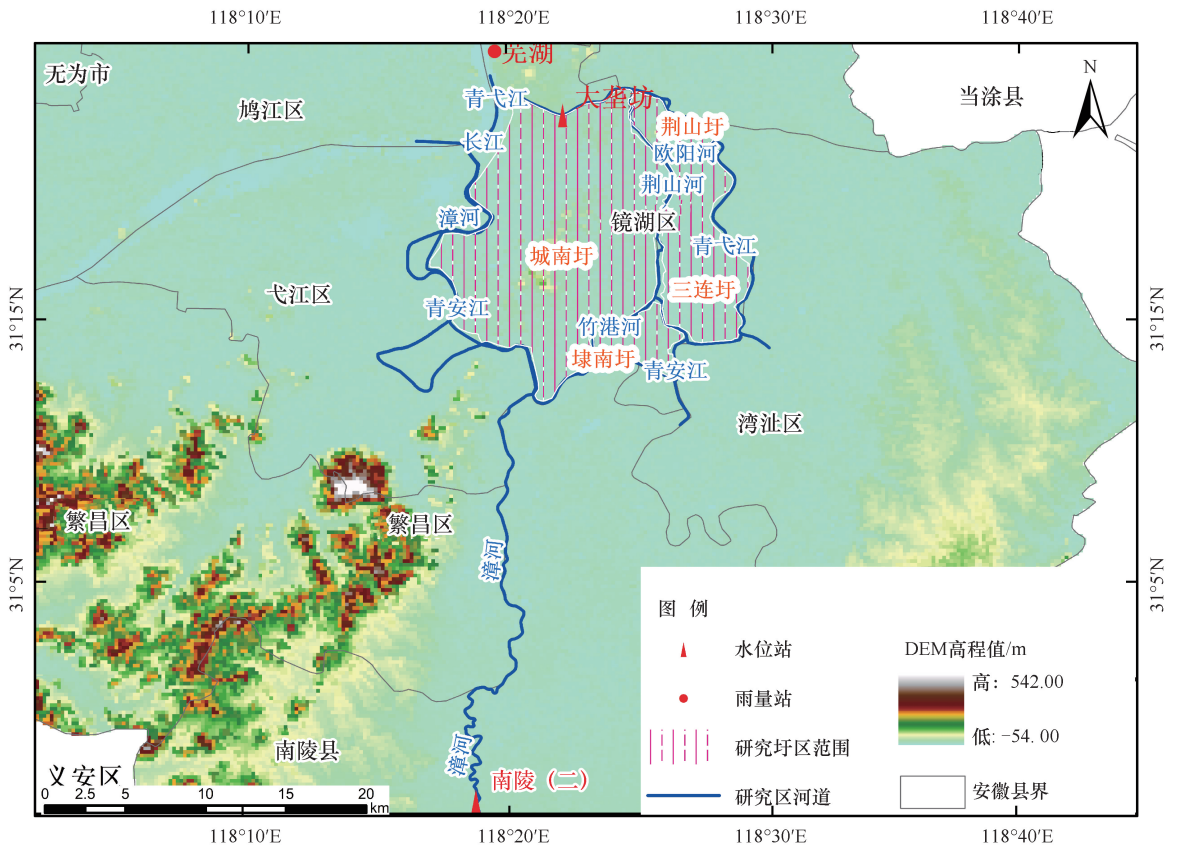
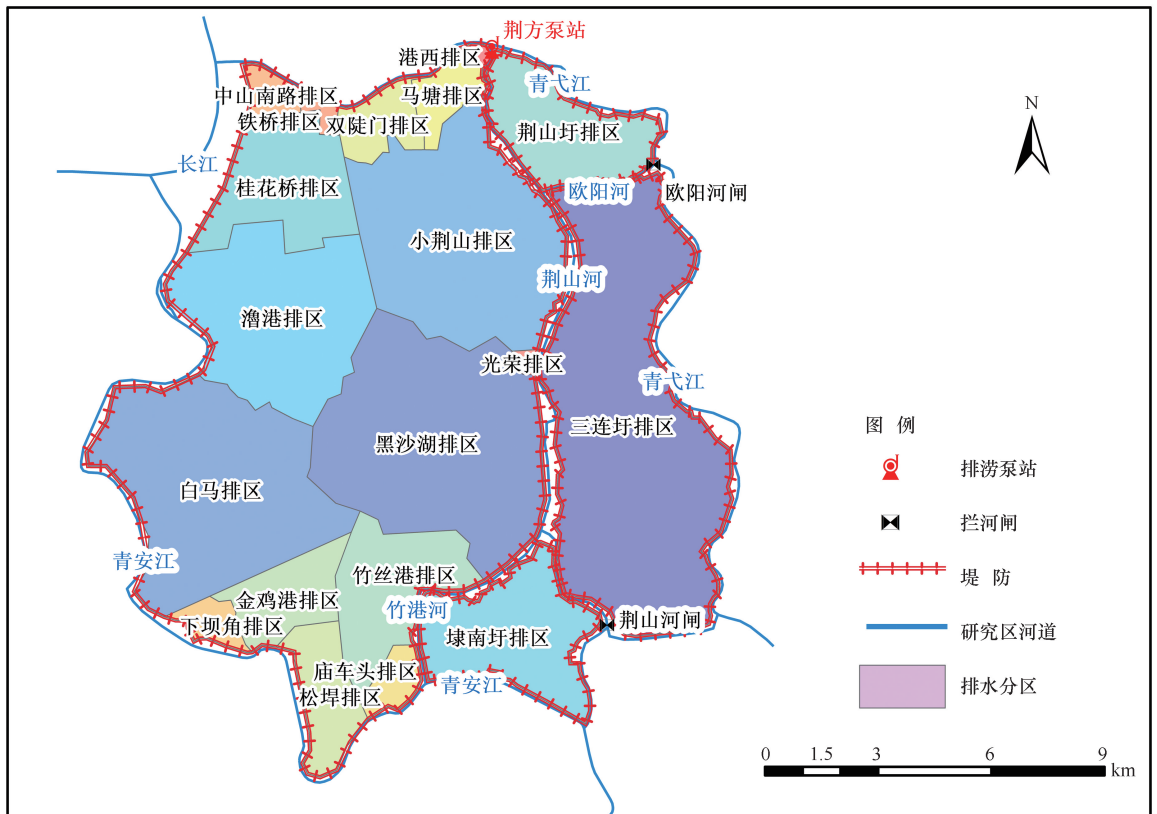
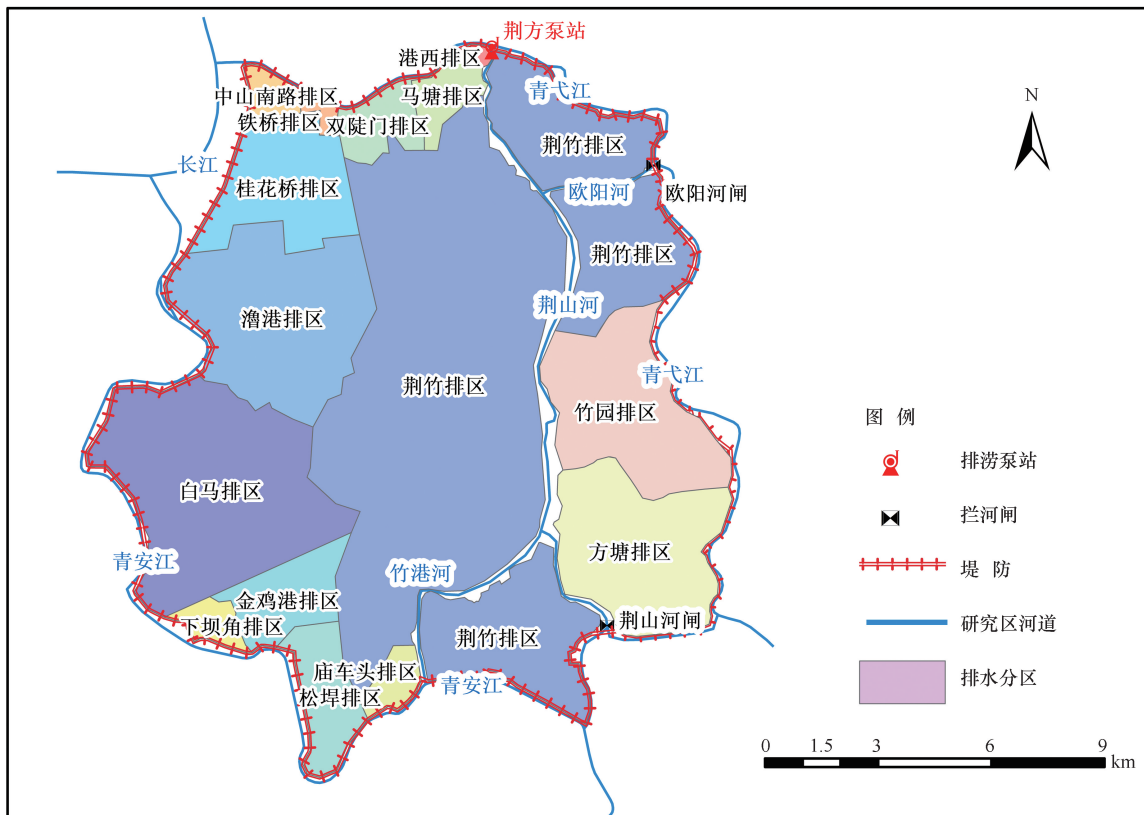


图 1 研究范围

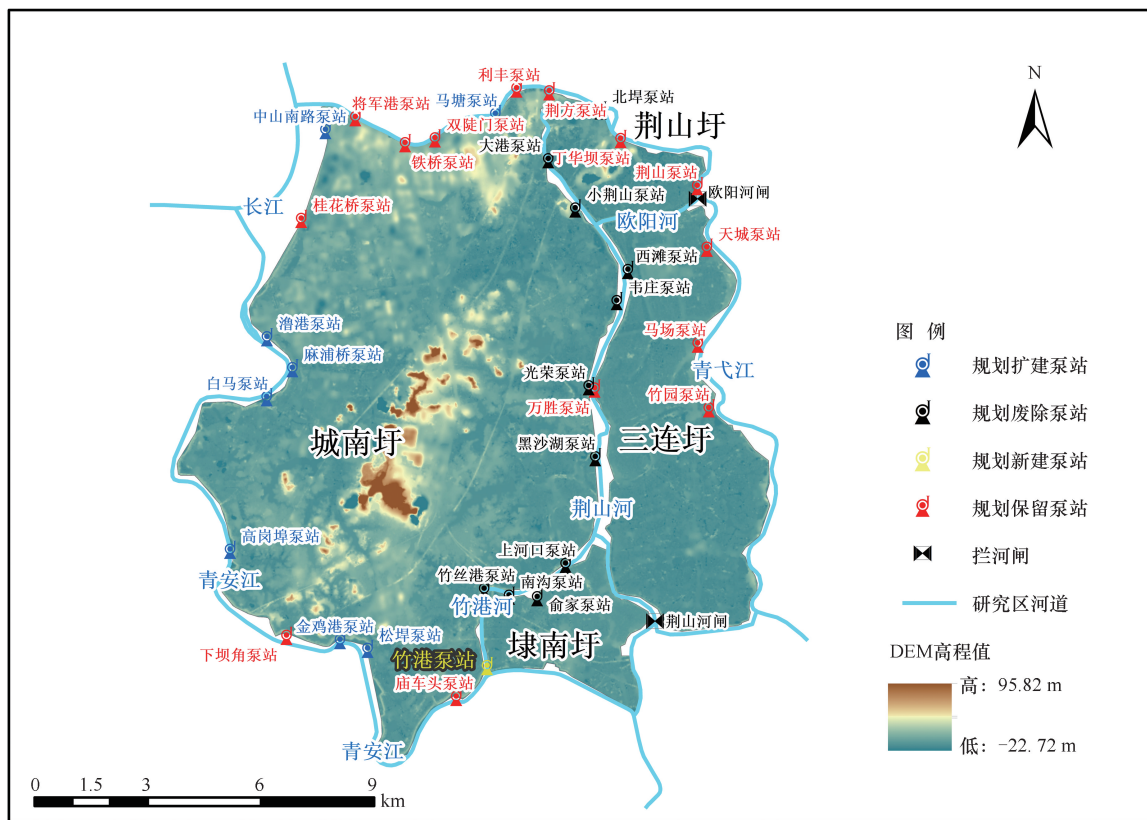
Fig. 1 Study area



(a) 联圩前堤防及排水分区



(b) 联圩后堤防及排水分区



(c) 联圩前后泵站分布

图 2 联圩前后排水分区及工程设施分布

Fig. 2 Drainage zoning and distribution of engineering infrastructure before and after dike merging

表 1 联圩并圩前后泵站排水能力变化

Table 1 Variations in drainage capacity of pump stations before and after dike merging

规划方式	泵站名称	排涝流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		规划方式	泵站名称	排涝流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
		现状	规划后			现状	规划后
规划保留	荆方泵站	50.00	50.00	规划扩建	高岗埠泵站	3.20	27.00
	桂花桥泵站	40.00	40.00		中山南路泵站	6.00	15.00
	将军港泵站	2.80	2.80		金鸡港泵站	2.90	20.00
	铁桥泵站	5.50	5.50		松埠泵站	3.90	16.00
	双陡门泵站	16.00	16.00	规划废除	大港泵站	1.10	0.00
	丁华坝泵站	2.30	2.30		黑沙湖泵站	5.20	0.00
	荆山泵站	10.00	10.00		上河口泵站	2.60	0.00
	马场泵站	1.20	1.20		西滩泵站	1.80	0.00
	庙车头泵站	1.20	1.20		光荣泵站	1.00	0.00
	下坝角泵站	0.50	0.50		竹丝港泵站	2.40	0.00
	利丰泵站	1.00	1.00		北斗泵站	2.10	0.00
	天城泵站	2.50	2.50		俞家泵站	1.80	0.00
	万胜泵站	3.10	3.10		南沟泵站	2.10	0.00
	竹园泵站	4.50	4.50		小荆山泵站	6.20	0.00
规划扩建	白马泵站	18.00	28.00	韦庄泵站	2.60	0.00	
	麻浦桥泵站	8.80	39.00	北埠泵站	1.10	0.00	
	漕港泵站	6.60	25.00	规划新建	竹港泵站	0.00	53.00
	马塘泵站	7.60	12.00	合计		227.70	375.60

2.1.2 河网模型

河道一维水力学模型适用于明渠非恒定流, 其基本控制方程(圣维南方程组)为

连续方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4)$$

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) + gAS_f - uq = 0 \quad (5)$$

式中, A 为过水断面面积 (m^2); Q 为断面流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); u 为侧向来流在河道方向的流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); t 为时间 (s); x 为沿水流方向的水平坐标; q 为侧向来流 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); α 为动量修正系数; g 为重力加速度; y 为河道水位 (m); S_f 为摩阻坡降, 可由曼宁公式求解。具体求解方法参照文献[29]。

2.1.3 管网模型

不同于河网模型, 管网模型基于“管线-节点”拓扑结构数值求解一维圣维南方程组, 针对管网内可能因管网能力限制而出现有压流或明满流交替的情况, 管网模型采用 Preissmann 窄缝处理方法实现明满交替流态的平滑过渡。计算公式为

连续方程

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right) + gAJ = 0 \quad (7)$$

式中, Z 为无压管流时的水位 (m); H 为有压时的压力水头 (m); B 为有压流时假设 Preissmann 窄缝的宽度 (m)。

2.2 模型构建

全分布式水文水动力学模型首先需要构建地表模型、河网模型、管网模型等单过程模型。

地表模型构建时结合城市建筑密度和计算成本及数字高程模型 (DEM) 等相关信息, 选择控制长度为 20~100 m 的非结构网格进行地表的有限拆分, 总计剖分网格 27 288 个; 根据其所处位置将网格边界划分为固边界型、普通型和河道型三种。

管网模型包括城南南片和城南北片两大部分, 首先对管线、节点数据进行标准化和合并处理, 并进行拓扑关系检查更新, 对缺失埋深等属性的管线进行梳理, 根据上下游数据及其关系进行填充, 在模型中共搭建 28 267 条管线, 设置 29 434 个节点, 管网总长度为 385.56 km。

河网模型包括荆山河、老荆山河、欧阳河、竹港河以及内河水系共 128 条, 设置断面 1 182 个; 联圩前共布设泵站 34 座, 联圩后泵站数量调整为 23 座。根据数据分析及实际情况设定河道初始水位为 4.50 m, 汛期青弋江站址处平均最低水位为 4.79 m, 基本没有自排可能, 完全依赖泵站进行外排。设定 2 a 一遇降雨时当水位上涨到 5.30 m 时开启泵站, 其余降雨情景下水位上涨到 6.00 m 时开启泵站, 当水位降至 5.00 m 时关闭泵站。

完成各单一模型构建后, 采用模型自动化快速耦合技术, 对不同物理过程间复杂的耦合关系进行处理, 衔接地表、河网与管网模型。模型构建信息如图 3 所示。

2.3 边界条件

降雨和外江水位是城市降雨径流模拟计算的关键输入数据, 影响着城市洪涝模拟的精度。本文通过 K-means 聚类算法对 78 场降雨进行分类, 当 $K=2$ 时分类效果最佳, 得到两种雨型: 第 I 类占 32.1%, 第 II 类占 67.9%, 且第 II 类雨型的降雨峰值出现在后期, 是更不利的雨型, 因此作为设计雨型。大砦坊站水位聚类结果显示, 第一类水位变化过程占 63.2%, 与实际情况较为接近, 选其作为输出结果; 南陵(二)站则第一类占 64.1%, 同样被选为水位变化输出。同时分析显示, 设计雨型与大砦坊及南陵(二)水位变化的 Pearson 相关系数分别为 0.698 和 0.838, 表明水位过程与降雨过程相关性较强, 适合作为洪涝模型的边界条件。聚类过程以及芜湖站不同重现期(2 a、5 a、10 a、20 a、50 a)下 24 h 的设计降雨过程与大砦坊、南陵(二)两个站

不同重现期下(2 a、5 a、10 a、20 a、50 a)设计水位过程如图 4 所示。

2.4 合理性分析

根据暴雨实测资料, 选取 2016 年 7 月 2 日、2024 年 6 月 12 日、2024 年 6 月 29 日、2024 年 7 月 13 日等 4 场降雨过程对模型进行合理性分析。选择白马山路白马小区下穿铁路涵洞、白马山路与漳河路交叉口至白马山路路段、禹王公路从森海小区东门到三潭路三个积水点作为内涝典型验证点, 将模型模拟最大积水深度和实测积水深度进行对比, 同时根据模拟水位与荆山河实测水位进行对比, 发现各代表验证点模拟积水深度、荆山河水位与实测值基本相符。其中, 2024 年 6 月 29 日和 7 月 13 日场降雨过程和水位验证情况如图 5 所示, 积水点验证情况如表 2 所列。

3 数值模拟分析

3.1 联圩并圩前后洪涝风险模拟

3.1.1 方案设计

为了全面评估联圩并圩措施对城市洪涝问题的影

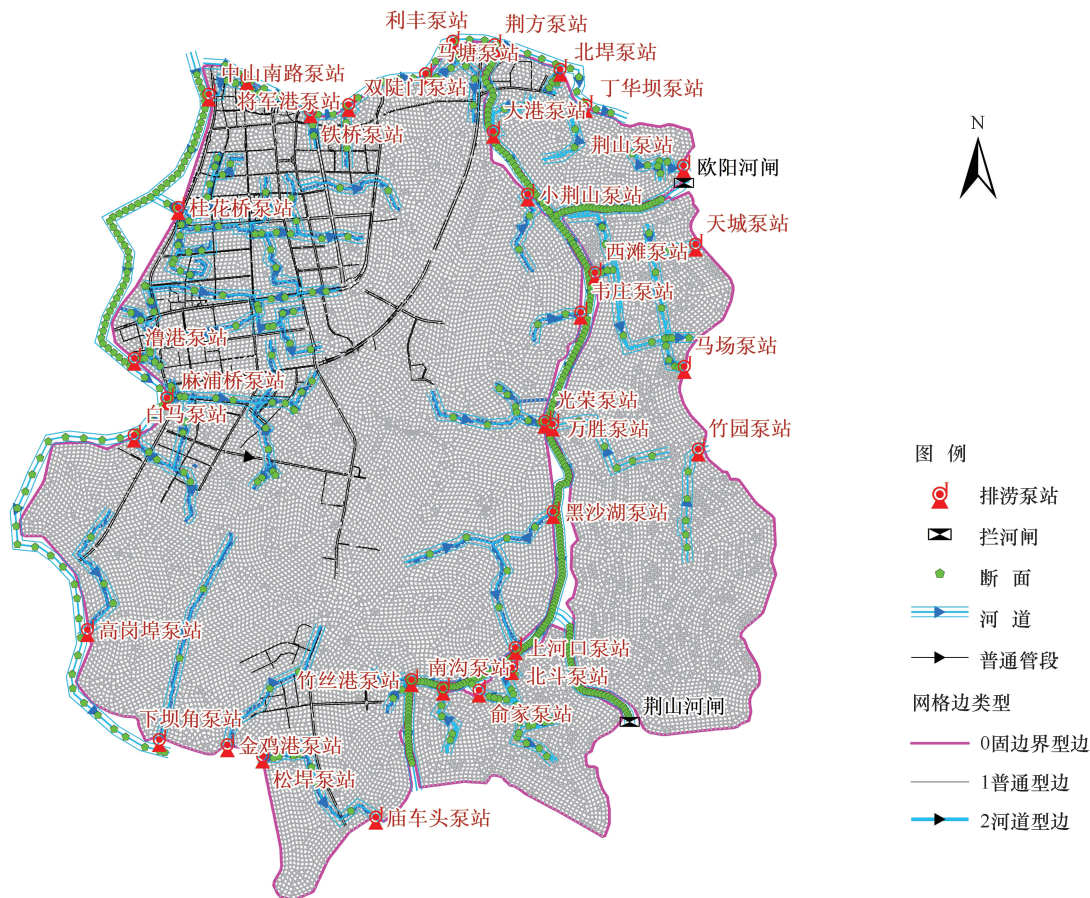


图 3 模型构建概况

Fig. 3 Overview of model establishment

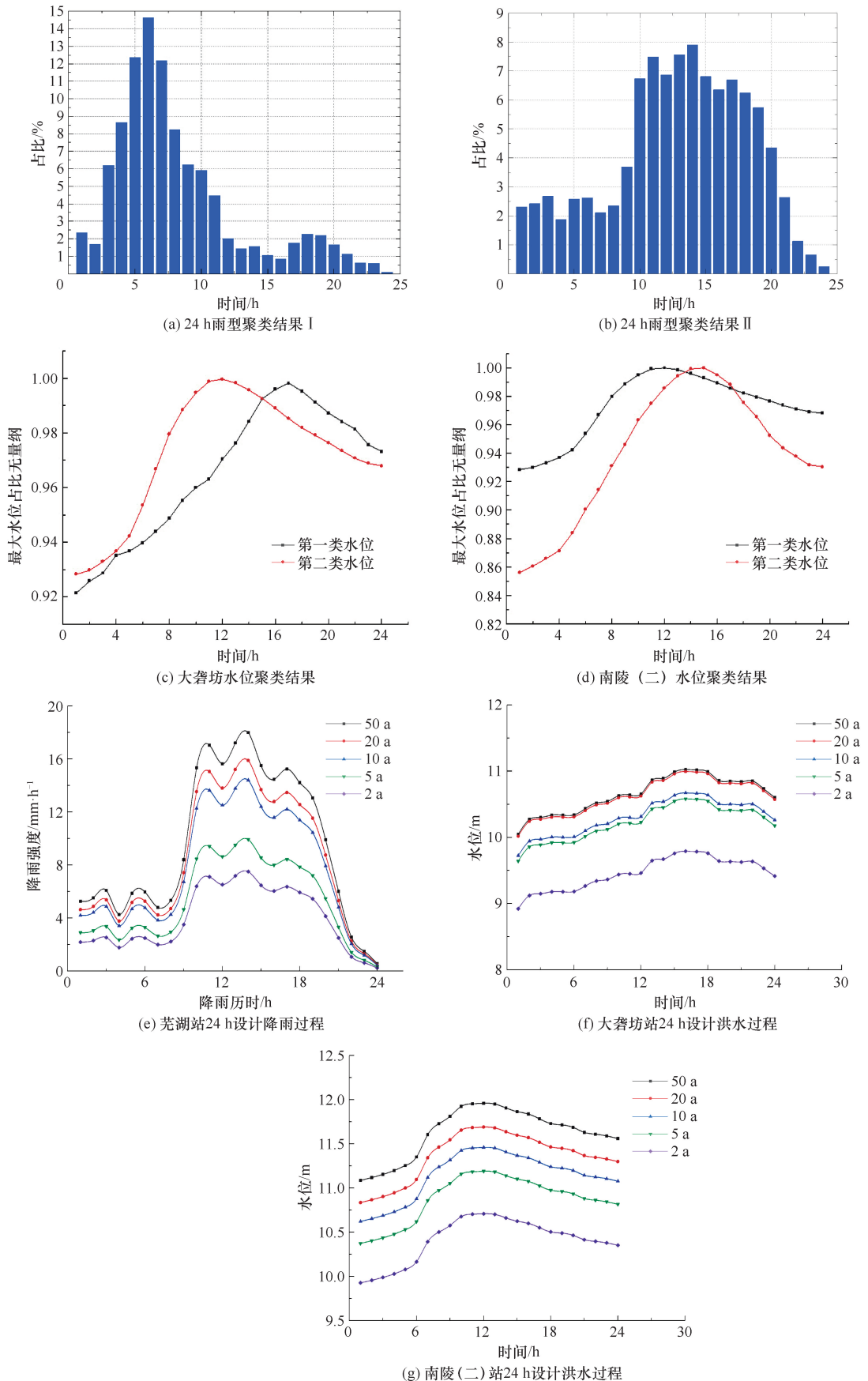


图4 设计降雨和水位数据

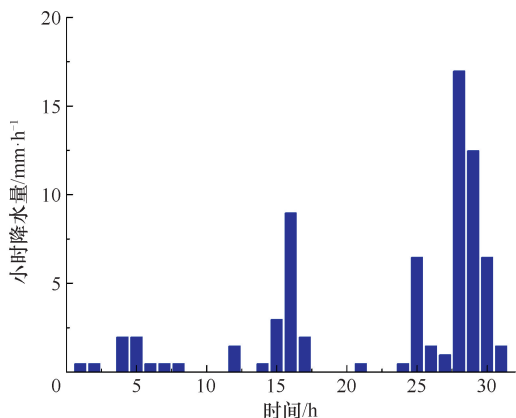
Fig. 4 Design rainfall and water level data

表2 积水点验证情况

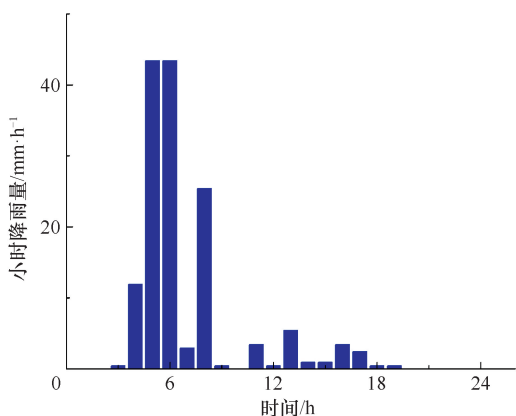
Table 2 Validation of inundation points

积水点位	降雨时间/年-月-日	积水深/m	模拟值/m	误差/%
白马山路白马小区下穿铁路涵洞	2024-06-29	0.25	0.21	13.06
	2024-07-13	0.34	0.31	8.04
白马山路与漳河路交叉口至白马山路路段	2024-06-29	0.38	0.35	7.63
	2024-07-13	0.45	0.44	3.11
禹王公路从森海小区东门到三潭路	2024-06-29	0.15	0.14	10.00
	2024-07-13	0.17	0.15	13.53

响, 根据联圩并圩前后水工程设施的不同建设情况, 在已搭建模型上分别设置联圩前后工况, 并综合考虑降雨与外江洪水位的组合情况, 对洪涝遭遇情景下圩区的洪涝风险进行模拟^[30]。在模型试算过程中发现, 降雨重现期一定时, 外江洪水位的变化对城市积水面积及荆山河水位的影响相对有限。本研究聚焦于相同重现期降雨与外江洪水位条件下的联圩前后对比, 考虑到2 a一遇及5 a一遇情况下对城市的防洪排涝影响较小, 以10 a一遇以上重现期进行主要分析, 设定涵盖6种工况的模拟方案(见表3), 以深入剖析联圩并圩措施对圩区洪涝防控能力的具体影响。



(a) 2024-06-29降雨



(c) 2024-07-13降雨

3.1.2 方案分析——地表模拟结果

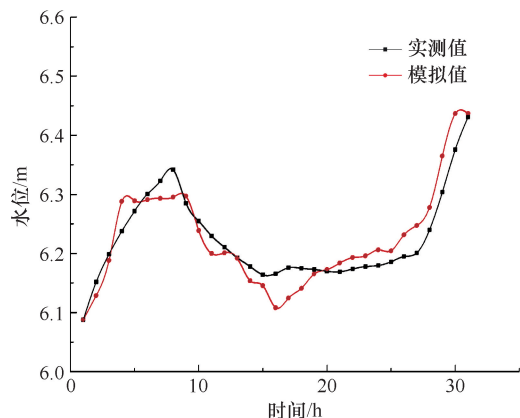
对不同设计方案进行模拟分析, 参考安徽省《城市内涝防治标准要求》, 根据积水深度将淹没风险分为低风险区、中等风险区和高风险区3个等级, 具体划分标准如表4所列。根据以上等级标准, 对同频率设计暴雨和洪水水位下6种模拟方案的淹没结果进行风险等级划分, 具体如图6—图8所示。

表3 模拟方案统计

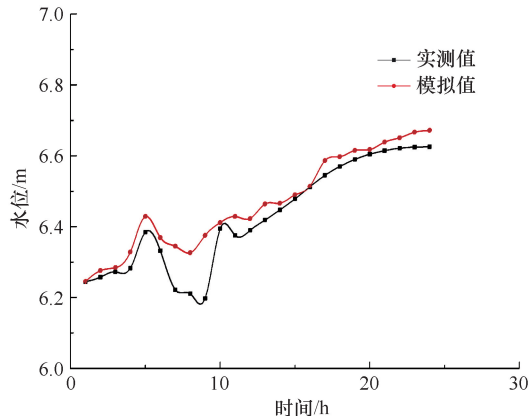
Table 3 Statistics of simulation scenarios

方案类型	设计频率		模拟方案内容	方案数量
	降雨重现期/a	洪水重现期/a		
方案类型	10	10	分别模拟联圩前后积水面积及荆山河水位过程	2
	20	20	分别模拟联圩前后积水面积及荆山河水位过程	2
	50	50	分别模拟联圩前后积水面积及荆山河水位过程	2
合计				6

从总积水面积上看, 随着降雨和外江洪水重现期的增加, 受淹区域总面积呈现出逐步扩大的趋势。从10 a一遇增长到50 a一遇, 联圩并圩前淹没面积从



(b) 2024-06-29水位



(d) 2024-07-13水位

图5 实测降雨过程及水位验证情况

Fig. 5 Observed rainfall process and water level validation

表4 城市内涝风险等级

Table 4 Urban inundation risk levels

风险标识	风险等级	淹没水深/m
蓝 I	低风险	0.15~0.30
橙 II	中风险	0.30~0.50
红 III	高风险	>0.50

7.53 km² 增长到 9.96 km², 联圩并圩之后, 积水面积由 6.87 km² 增长到 9.55 km², 联圩并圩措施对于积水面积的降低率从 8.76% 下降到 4.11%。

在不同风险等级淹没水深方面, 同一模拟方案中, 随着风险等级的升高, 联圩并圩措施的效果逐渐增强。10 a 一遇时联圩并圩后高风险区域积水面积削减效果达到 18.40%, 而低风险区域积水面积的削减效果仅为 5.16%; 同时, 通过联圩并圩措施, 原先部分风险等级较高的区域实现了风险的有效降低, 进而转变为风险等级较低的区域, 在 20 a 一遇和 50 a 一遇模拟方案中, 低风险区域面积联圩并圩后较联圩之前有所增加, 具体积水情况如表 5 所列。

表5 不同模拟方案下积水内涝面积

Table 5 Inundation areas under different simulation scenarios

设计降雨和外江洪水重现期/a	淹没深度/m	联圩前淹没面积/km ²	联圩后淹没面积/km ²	淹没面积减小率/%
10	0.15~0.30	3.61	3.42	5.16
	0.30~0.50	2.11	1.97	6.58
	>0.50	1.82	1.48	18.40
	合计	7.53	6.87	8.76
20	0.15~0.30	3.47	3.51	-1.13
	0.30~0.50	2.29	2.13	7.03
	>0.50	2.30	1.92	16.36
	合计	8.07	7.57	6.18
50	0.15~0.30	3.65	3.71	-1.55
	0.30~0.50	3.07	2.97	3.35
	>0.50	3.24	2.87	11.21
	合计	9.96	9.55	4.11

3.1.3 方案分析——河道模拟结果

联圩并圩之前, 荆山河是圩区外河, 水位与青弋江持平, 在 50 a 一遇降雨和外江洪水时, 水位达到 11.44 m。竹港泵站建设完成之后, 荆山河成为圩区主要排涝河流, 汛期依靠泵站进行外排。由模拟结果可知, 联圩并圩后各重现期降雨和外江洪水下荆山河最高水位得到明显降低, 遭遇 50 a 一遇降雨和外江洪水时最高水位为 7.26 m, 具体水位过程如图 9 所示。

3.2 极端降雨下预泄调度对洪涝风险的影响

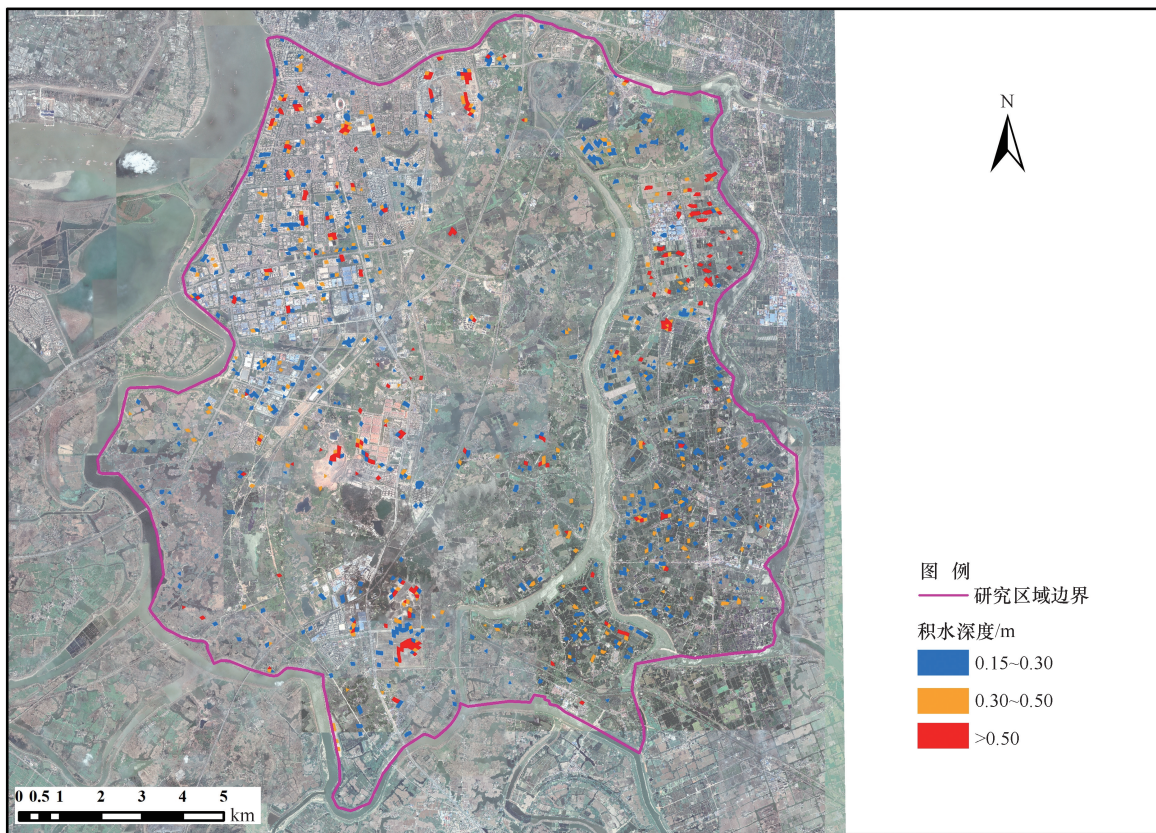
联圩并圩后, 荆山河不再承担防御外江洪水的任务, 其 1 级警戒水位为 6.96 m, 主要排水工程荆方泵站与竹港泵站防洪水位为 7.00 m。根据模拟结果, 遭遇 50 a 一遇降雨时, 荆山河最高水位为 7.26 m, 超过泵站防洪水位, 威胁泵站正常运行安全。为满足城市在遭遇极端降雨时的排水需求, 应提前开启泵站腾空河道增加排涝空间。对极端降雨下荆山河进行预泄调度模拟, 结果显示, 遭遇 50 a 一遇降雨情景时, 雨前将荆山河降至 3.90 m, 荆山河最高水位将降至 6.90 m, 低于 1 级警戒水位 0.06 m, 泵站可正常运行; 积水面积相较于降低水位前也略有减少, 从 9.55 km² 减小至 9.04 km²。具体淹没结果及河道水位过程如图 10 所示。

4 结果讨论

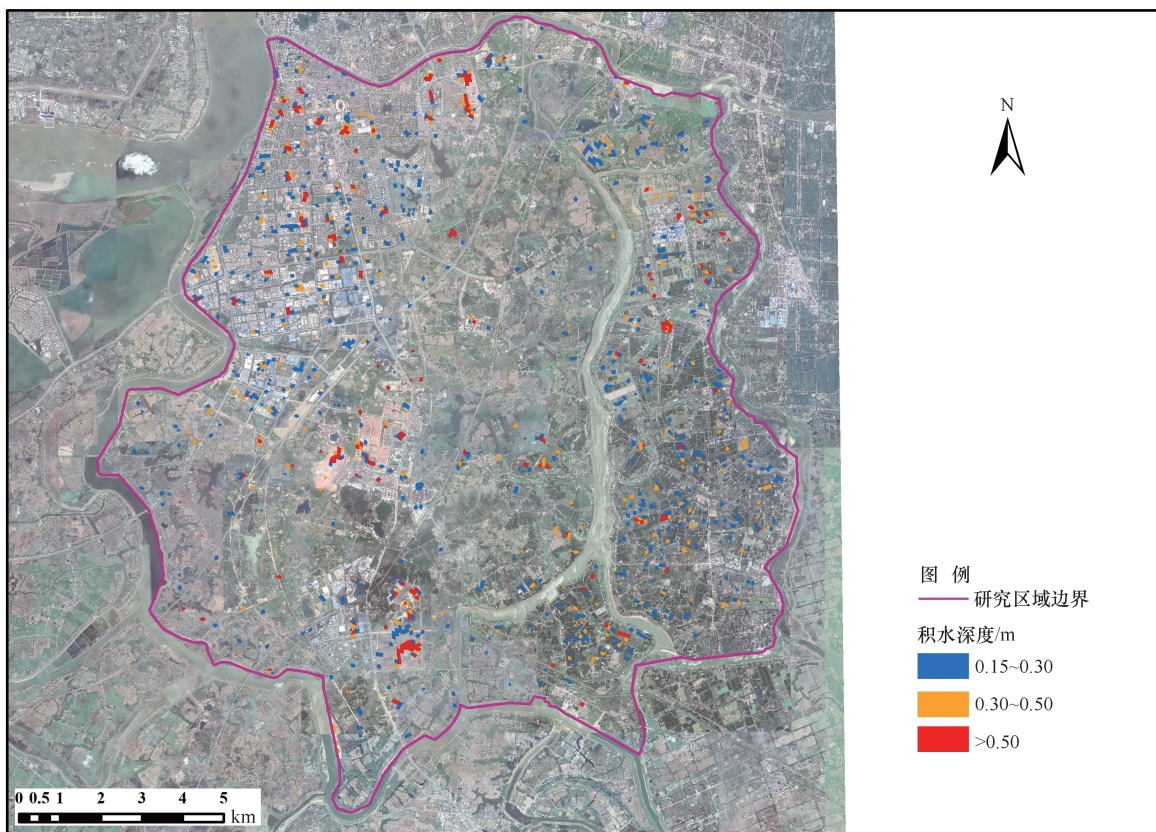
4.1 模型的适用性与局限性

平原河网地区地势低洼、河网密布, 洪涝灾害频发。圩区的建设在治理洪涝问题中起到了关键作用, 通过圩堤、泵站等设施, 可显著提升城市的排水和防洪能力。然而, 随着城市化的快速发展以及气候变化的影响, 圩区的洪涝风险日益增加。为应对这一挑战, 亟需采用水文和水动力模型对圩区的洪涝状况进行更为精确地模拟与预测, 以帮助预测洪水的淹没范围和水位变化, 进而提升城市的防洪排涝能力。

本文首先通过 K-means 聚类算法, 得出了符合芜湖市近年来雨型特征的结果。与传统雨型相比, 该方法所生成的数据更能反映极端天气条件对洪涝灾害的不利影响。在模型层面, ArcGIS 等地理信息系统技术已广泛应用于洪涝治理中。王越等^[31] 通过结合 ArcGIS 与水量平衡原理, 开发了一种简化的平原河网地区圩区内涝模拟方法, 通过考虑圩区的调度规则和泵站抽排能力, 采用“体积法”模拟内涝洪水的淹没情况; 朱丽丽等^[32] 则利用实测地形数据, 导入 ArcGIS 进行三角网格处理, 生成水位与调蓄量的关系曲线, 从而快速、精确地计算出圩区的内涝水位。这两种方法虽然操作简便, 但主要依赖于地形数据, 无法精细模拟降雨、径流、排水与积水之间的动态交互过程。相比之下, 城市精细化洪涝一体耦合模型通过高分辨率的地形、气象、水文等多维数据, 能够更加精确地模拟降雨、洪水与内涝的动态过程, 并预测内涝的发展情况, 适用于城市精细化管理和应急响应, 能够为城市防洪提供更加全面的决策支持。



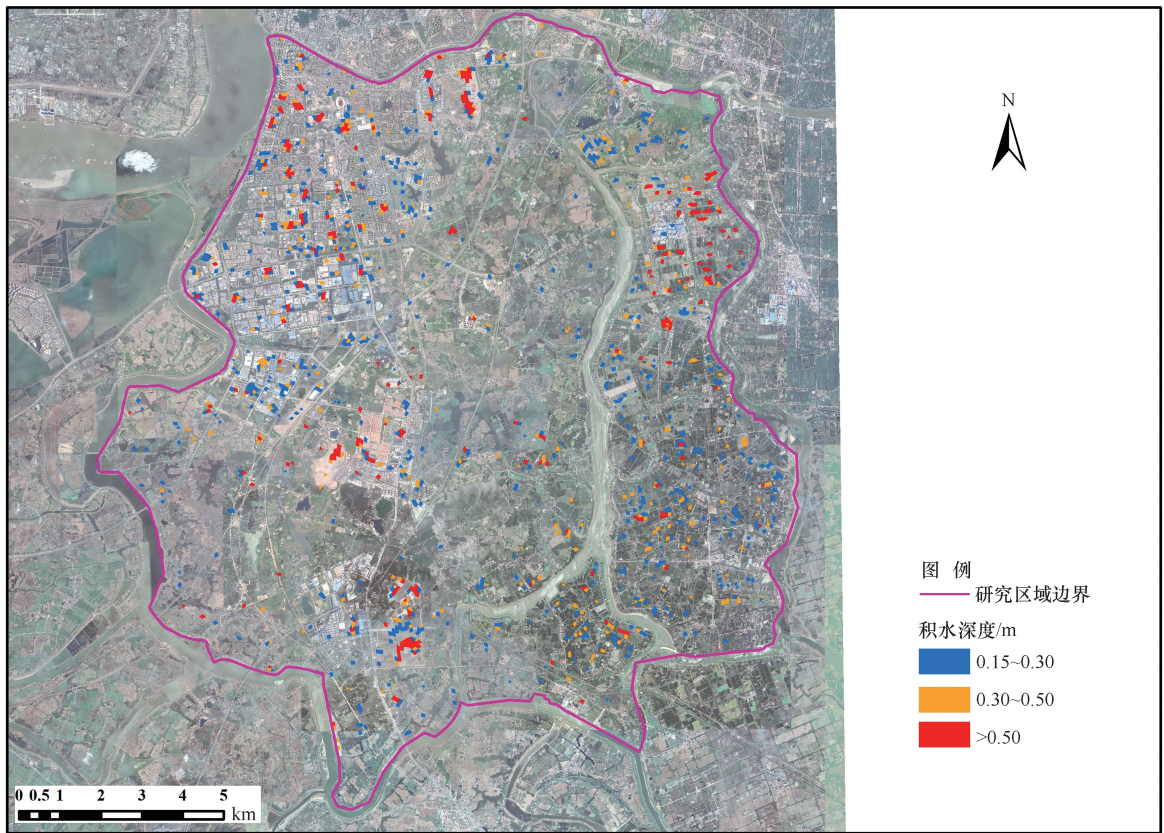
(a) 联圩前10 a一遇



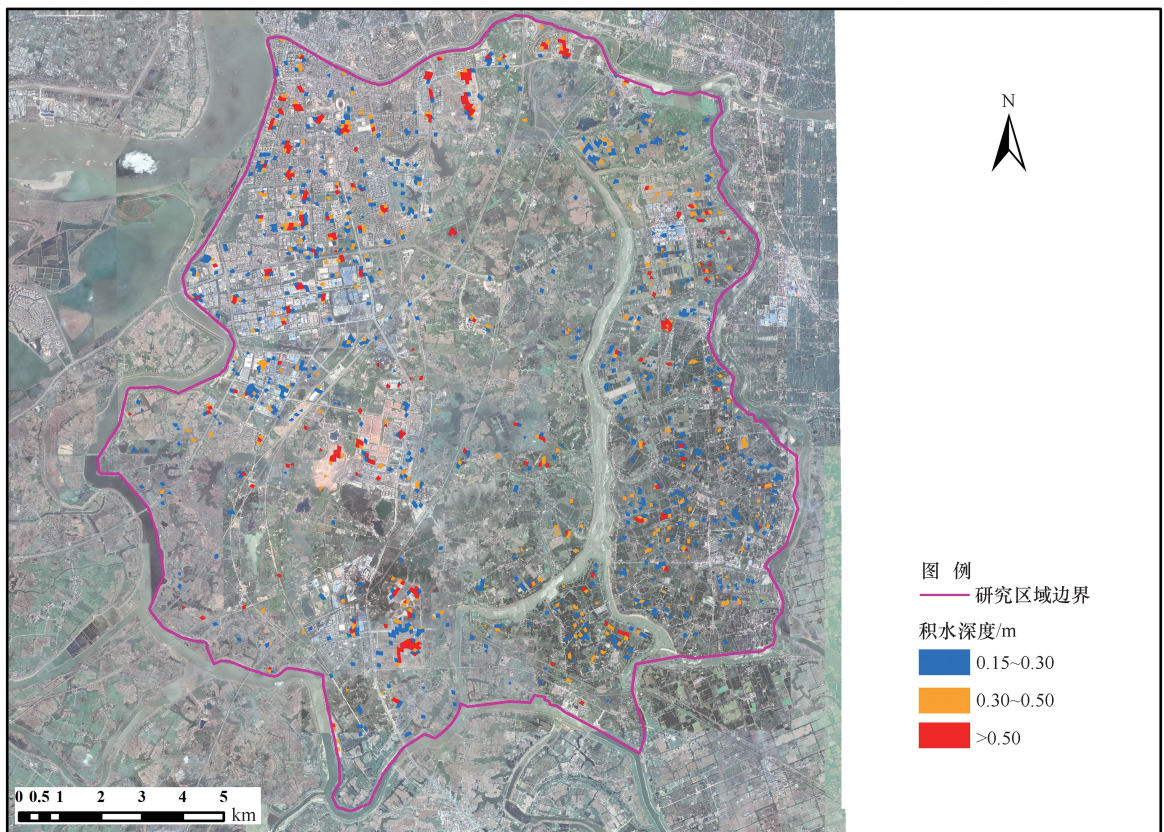
(b) 联圩后10 a一遇

图6 10 a一遇联圩前后积水情况

Fig. 6 Inundation conditions before and after dike merging for 10-year return period



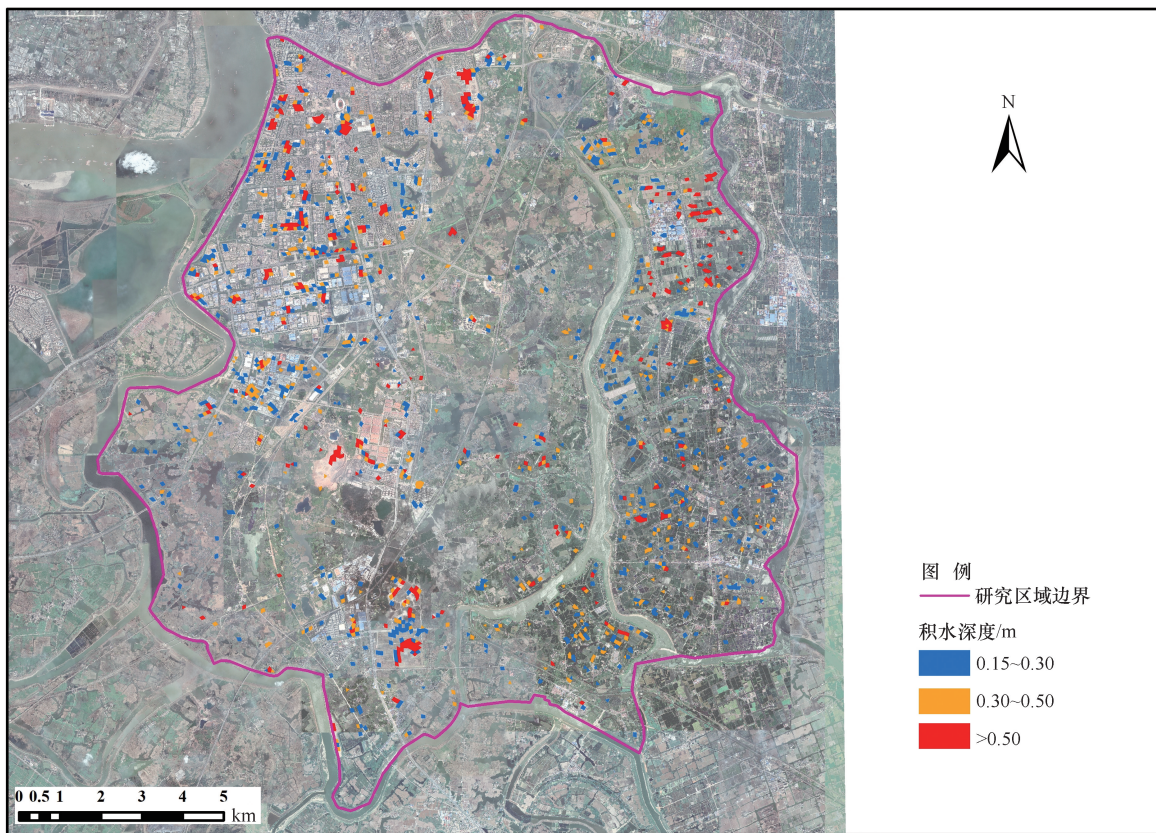
(a) 联圩前20 a一遇



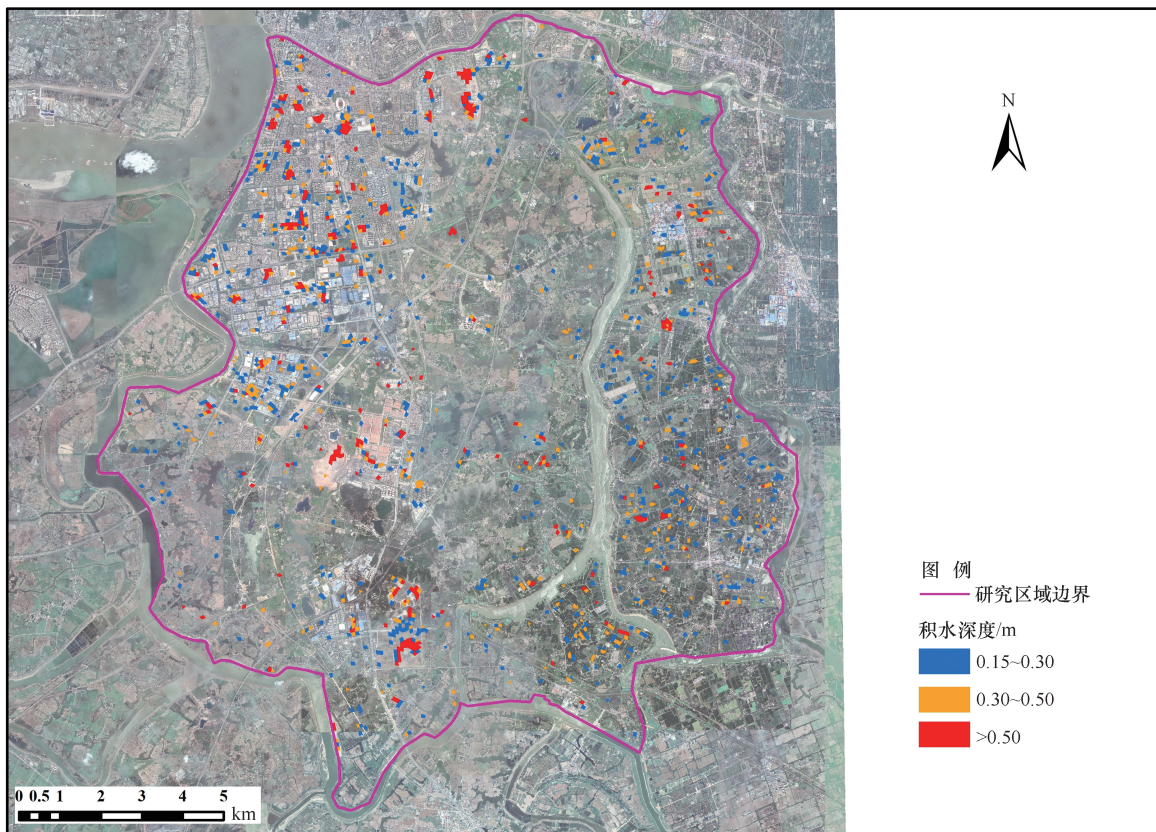
(b) 联圩后20 a一遇

图7 20 a一遇联圩前后积水情况

Fig. 7 Inundation conditions before and after dike merging for 20-year return period



(a) 联圩前50 a一遇



(b) 联圩后50 a一遇

图 8 50 a 一遇联圩前后积水情况

Fig. 8 Inundation conditions before and after dike merging for 50-year return period

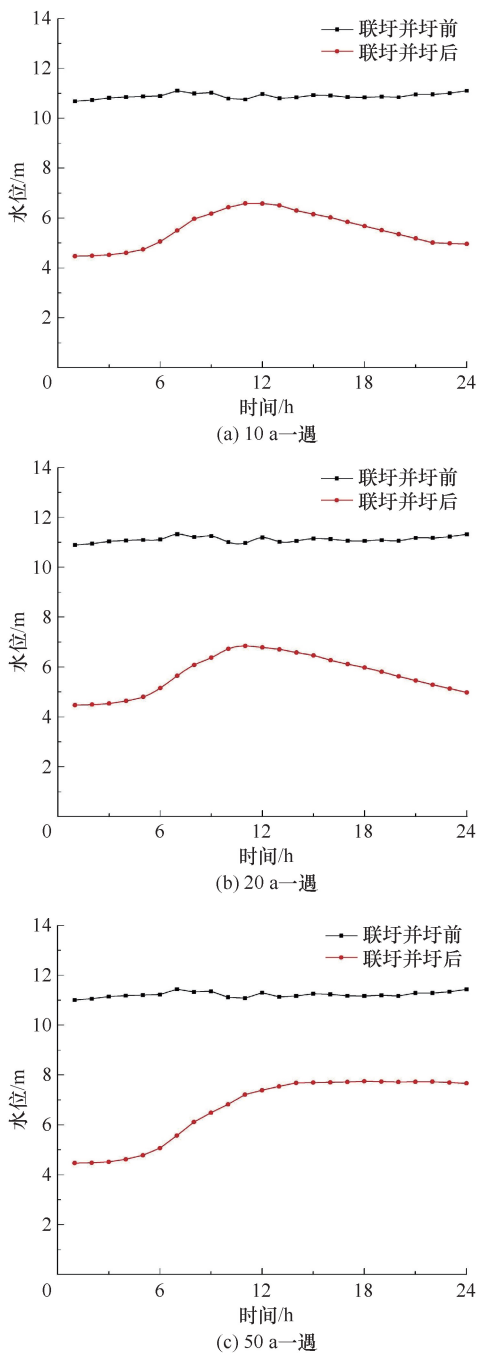


图9 联圩前后荆山河 10 a、20 a、50 a 水位

Fig. 9 Water levels of Jingshan River before and after dike merging for 10-year, 20-year, and 50-year return periods

然而, 耦合模型需要处理大量的数据, 计算复杂性较高, 且计算时间较长。因此, 精细化耦合模型更适合用于大城市及复杂水文系统的模拟, 而不适用于简单或需要快速分析的应用场景。

4.2 研究展望

本文采用城市精细化洪涝一体耦合模型对平原河网城市在联圩并圩前后的防洪排涝能力进行了模拟研究, 评估了联圩并圩措施对城市防洪排涝的综合影

响。通过模拟分析, 提出了在极端降雨情况下的调度建议, 并获得了一些初步成果。这些研究为联圩并圩措施在平原河网城市中的应用提供了依据, 显示了该措施在提升防洪排涝能力方面的潜力。然而, 未来的研究还需在更广泛的领域深入探讨, 以进一步优化防洪排涝体系。

首先, 本文尚未对当前城市内涝的成因进行深入分析, 而城市内涝的形成通常涉及多个复杂因素, 包括城市化进程带来的不透水面积增加、排水系统老化、地形低洼以及极端天气频发。针对这些问题, 未来的研究可以更系统地分析城市内涝的成因, 结合水文、地形和城市规划等多维因素, 全面梳理内涝发生的机制, 从而提出更具针对性的解决方案。例如, 除了建设和优化排水设施外, 还可以通过提升城市绿色基础设施、改善土地利用方式等手段来缓解内涝风险。

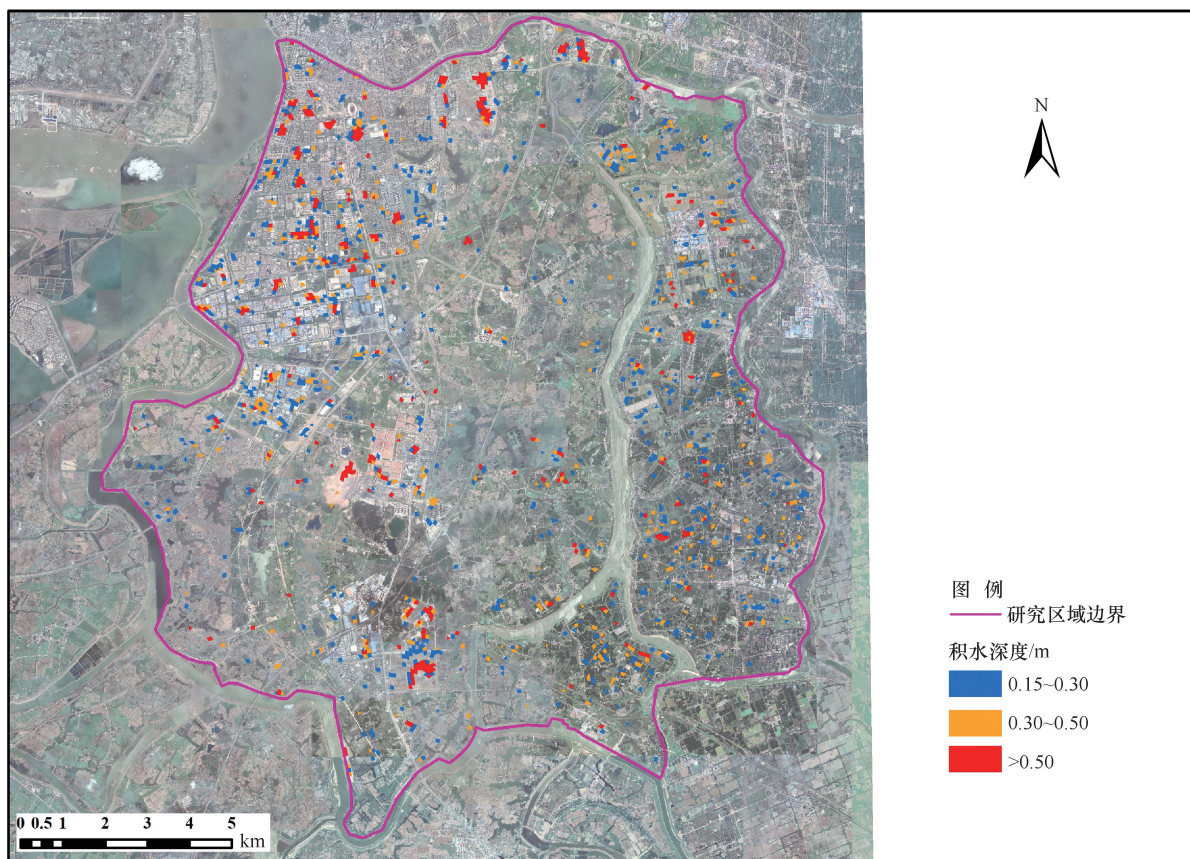
其次, 本文的研究主要集中在圩区内部的洪涝问题, 尚未对这些措施对整个流域的防洪效果进行定量分析。事实上, 联圩并圩作为一种区域性防洪措施, 不仅对局部圩区有影响, 还会通过改变水系的流动方式, 对上游和下游区域的水文条件产生连锁反应。因此, 未来研究可以扩展到整个流域层面, 利用水文和水动力模型, 定量评估联圩并圩对流域内洪水演进、排水能力以及上下游区域的影响。

5 结论

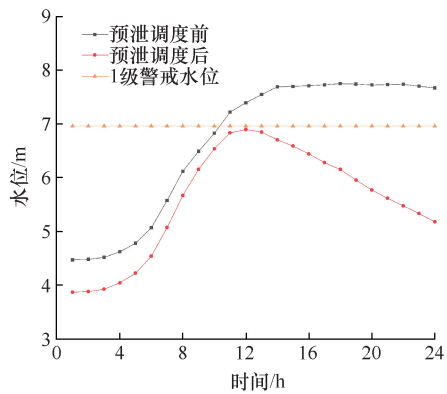
本文基于全分布式精细化城市洪涝模型对芜湖市典型圩区新城南圩进行建模, 评估了联圩并圩措施对平原河网城市防洪排涝的影响, 并分析了原因。结果如下。

(1) 联圩并圩后, 在降雨和外江洪水位重现期相同的情况下, 联圩后各设计频率下的城市积水面积均得到有效降低; 在各风险等级积水中, 中高风险积水区域明显减少, 10 a 一遇时最为明显, 削减效果达到 18.40%, 而部分原本属于较低风险的区域, 其淹没面积有所增加, 表明原先部分风险等级较高的区域在联圩并圩后转变为风险等级较低的区域, 这在一定程度上减轻了排涝压力, 降低了内涝危害; 然而随着设计暴雨和洪水重现期的增加, 这些措施的效果会逐渐减弱, 从 10 a 一遇的 8.76% 降到 50 a 一遇的 4.11%, 表明水利工程措施对洪涝问题的调控能力是有限的, 在遭遇极端降雨时, 应提前做好应急准备。

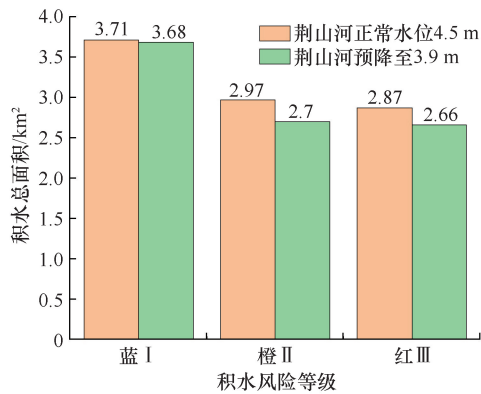
(2) 联圩并圩后, 荆山河水位降低, 其两侧河道可采取自流的方式进入荆山河, 降低了排涝压力, 缩



(a) 50 a一遇预泄调度后淹没结果



(b) 荆山水位



(c) 积水风险等级对比

图 10 极端降雨预降荆山水位后积水面积及河道水位变化

Fig. 10 Variations in inundation area and river water levels after pre-lowering Jingshan River water levels during extreme rainfall events

减了泵站的维护成本。在 20 a 一遇重现期以下, 荆竹排区的主要排涝泵站荆方泵站和竹港泵站可满足排水需求, 遭遇 20 a 一遇以上极端降雨时, 竹港泵站、荆方泵站提前开启, 将河道水位降低至 3.90 m 以增加排涝空间, 在 50 a 一遇情况下可避免出现超过 1 级警戒水位的情况, 同时也小幅度降低了研究区的积水面积, 提高了洪涝防控能力。

(3) 联圩并圩后, 新城南圩对于外江的防洪战线有效缩减, 由原 126.89 km 缩减至 72.10 km, 便于集

中力量进行防御与管理, 城市防洪压力得到降低; 同时排涝能力得到提升, 城市洪涝灾害问题得到有效解决。然而由于将 4 个小圩合并为一个大圩, 洪涝风险更加集中, 在工程质量和调度方面有了更高的要求; 此外, 在流域整体的防洪方面, 联圩并圩措施降低了流域整体的调蓄能力, 将洪涝风险转移至流域下游, 故该种措施需与流域规划相协调。

(4) 全分布式水文水动力学模型在模拟平原河网城市洪涝过程时, 可对地表、管网、河道、水工程设

施等进行全面分析, 具有较好的效果。

参考文献(References):

- [1] 王浩. 建立大安全大应急框架 加强城市洪涝联防联控[J]. 中国减灾, 2023(1): 18-21.
WANG H. Establishing a large-safety and large-emergency framework to strengthen urban flood control and prevention[J]. China Disaster Reduction, 2023 (1): 18-21.
- [2] 程晓陶, 刘昌军, 李昌志, 等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 757-768.
CHENG X T, LIU C J, LI C Z, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 757-768.
- [3] 麦合木提·图达吉, 童瑞, 徐宝宁, 等. 北京“23·7”特大洪水复盘分析[J]. 水力发电学报, 2024, 43(4): 12-22.
MAIHEMUTI Tudaiji, TONG Rui, XU Bao Ning, et al. Hindcasting on “July 2023” flood event in Beijing[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(4): 12-22.
- [4] 李鸾, 谢五三, 吴蓉. 基于GIS的芜湖市暴雨洪涝灾害风险区划分析[J]. 能源与环境, 2021(5): 96-97.
LI L, XIE W S, WU R. GIS-based risk zoning analysis of rainstorm flood disasters in Wuhu City[J]. Energy and Environment, 2021 (5): 96-97.
- [5] 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.
- [6] 王家卓. 科学谋划 加大投入 系统推进城市内涝治理[J]. 中国经贸导刊, 2021(12): 63-66.
WANG J Z. Scientific planning and increased investment for systematic urban waterlogging management[J]. China Economic & Trade Herald, 2021 (12): 63-66.
- [7] 兰仟, 林凯荣, 黄利燕, 等. 深圳城市两级排水系统设计暴雨重现期的衔接关系[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(3): 522-530.
LAN Q, LIN K R, HUANG L Y, et al. Cohesive relationship of design storm return period of two-stage urban drainage system in Shenzhen City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(3): 522-530.
- [8] 吕永鹏. 平原河网地区城市集水区非点源污染过程模拟与系统调控管理研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
LYU Y P. Process Simulation and Watershed Management for Non-Point Source (NPS) Pollution in Tidal Plain with Dense River Networks, China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [9] 程晓陶, 俞茜. 水利高质量发展转型中城市洪涝防治与韧性提升的探讨[J]. 水利发展研究, 2025, 25(11): 1-10.
CHENG Xiaotao, YU Qian. Discussion on urban flood prevention and resilience enhancement in the transformation of high-quality water conservancy development [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(11): 1-10.
- [10] 刘克强, 李敏. 平原河网地区圩区建设与规划的几点思考[J]. 水利规划与设计, 2009(5): 20-21.
LIU K Q, LI M. Some thoughts on construction and planning of polders in the plain areas of river networks [J]. Water Resources Planning and Design, 2009(5): 20-21.
- [11] 吴俊范. 20世纪下半叶太湖以东淀泖湖群的围垦改造与水环境[J]. 中国农史, 2020, 39(3): 105-117.
WU J F. Reconstruction and utilization of Dianmao Lake Group to the east of Taihu Lake in the second half of the 20th century and water environment problems [J]. Agricultural History of China, 2020, 39 (3): 105-117.
- [12] 左心怡. 杭嘉湖平原基塘圩田景观研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
ZUO X Y. Study on the Landscape of Dike-Pond Polder in Hangjiahua Plain [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.
- [13] SEGEREN W A. Introduction to polders of the world [J]. Water International, 1983, 8(2): 51-54.
- [14] HOEKSEMA R J. Three stages in the history of land reclamation in the Netherlands [J]. Irrigation and Drainage, 2007, 56(S1): S113-S126.
- [15] GAIN A K, MONDAL M S, RAHMAN R. From flood control to water management: A journey of Bangladesh towards integrated water resources management [J]. Water, 2017, 9(1): 55.
- [16] 刘克强, 蔡文婷. 太湖流域圩区治理现状调查与思考[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(8): 19-22.
LIU K Q, CAI W T. Investigation and thinking on the present situation of polder governance in Taihu Basin [J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(8): 19-22.
- [17] 张根福. 圩区建设与生态、社会效应: 20世纪50—70年代太湖流域联圩并圩的考察[J]. 中央民族大学学报(哲学社会科学版), 2012, 39(4): 36-41.
ZHANG G F. Polder construction and its ecological and social effects: An investigation of joint river embankment in Taihu drainage area (1950s—1970s) [J]. Journal of Minzu University of China (Philosophy and Social Sciences Edition), 2012, 39(4): 36-41.
- [18] 徐存东, 訾亚辉, 黄嵩, 等. 基于MIKE 21的圩区河网水动力调控方法研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(7): 161-170.
XU C D, ZI Y H, HUANG S, et al. Research on the hydrodynamic regulation method of river network in polder area based on MIKE 21 [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(7): 161-170.
- [19] 王献辉, 果利娟, 邓人超, 等. 基于MIKE11的排涝融合模型在城市圩区应用探讨[J]. 水利规划与设计, 2022(5): 32-36.
WANG X H, GUO L J, DENG R C, et al. Application of drainage integration model based on MIKE11 in urban polder area [J]. Water Resources Planning and Design, 2022(5): 32-36.
- [20] 黄玄, 刘国庆, 刘思恩, 等. 平原河网城市极端暴雨洪涝风险数值模拟方法研究[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(7): 21-27.
HUANG X, LIU G Q, LIU S E, et al. Study on numerical simulation method of extreme rain flood risk in plain river network cities [J].

- China Flood & Drought Management, 2023, 33(7): 21-27.
- [21] 乔明叶,周进. 平原河网区“洪涝统筹”体系构建关键技术探讨[J]. 水利发展研究, 2024, 24(10): 54-59.
QIAO M Y, ZHOU J. Discussion on key technology of flood planning system in plain river network area [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(10): 54-59.
- [22] 罗志洁,刘海生,杜世鹏. 基于圩区产流与调蓄的大型平原河网水文水动力耦合模型研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 14-17.
LUO Z J, LIU H S, DU S P. Study on hydrology hydrodynamic coupling model of large plain river network based on runoff generation and regulation in polder area[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(1): 14-17.
- [23] 李成. 洋溪大联圩防洪除涝能力提升措施研究[D]. 扬州:扬州大学, 2022.
LI C. Study on Improvement Measures of Flood Control and Waterlogging Removal Capacity of Yangxi Dalian Polder [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
- [24] REINSTALLER S, FUNKE F, KÖNIG A W, et al. Resilient urban flood management: A multi-objective assessment of mitigation strategies[J]. Sustainability, 2024, 16(10): 4123.
- [25] CHAN F K S, YANG L E, MITCHELL G, et al. Comparison of sustainable flood risk management by four countries-the United Kingdom, the Netherlands, the United States, and Japan-and the implications for Asian coastal megacities [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2022, 22(8): 2567-2588.
- [26] ANAND J, GOSAIN A K, KHOSA R. Hydrological and hydrodynamic modelling for flood management: A case study of the Yamuna River Basin in Delhi [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 56: 101960.
- [27] 刘媛媛,刘业森,刘方华,等. 基于流形学习算法的降雨数据时空分布特征提取及重构[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(9): 85-98.
LIU Yuanyuan, LIU Yesen, LIU Fanghua, et al. Spatiotemporal distribution features of rainfall data extracting and reconstructing based on manifold learning algorithm[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(9): 85-98.
- [28] 张红萍,郝晓丽,胡昌伟,等. 城市暴雨洪涝多尺度分层嵌套模拟技术[J]. 水科学进展, 2023, 34(4): 510-519.
ZHANG H P, HAO X L, HU C W, et al. A hierarchically nested multi-scale modeling technique for urban pluvial floods [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(4): 510-519.
- [29] 胡昌伟. 太湖流域洪水风险模拟研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.
HU C W. Flood Risk Simulation Study in the Taihu Basin [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013.
- [30] 王小杰,夏军强,周美蓉,等. 降雨和外江水位变化对城市洪涝的联合影响分析:以武汉市为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(5): 1061-1074.
WANG X J, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Joint impact of rainfall and river water level on urban flooding: A case study of Wuhan City[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(5): 1061-1074.
- [31] 王越,刘曙光. 基于 ArcGIS 的平原河网地区圩区内涝模拟方法研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 81-85.
WANG Y, LIU S G. Study on the simulation method of polder waterlogging in plain river network area based on ArcGIS[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 81-85.
- [32] 朱丽丽,杨勇,张钟鸣. 基于 ArcGIS 的圩区设计内涝水位计算[J]. 城市道桥与防洪, 2024(5): 135-137.
ZHU L L, YANG Y, ZHANG Z M. Calculation of design waterlogging level in polder area based on ArcGIS[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2024(5): 135-137.

(责任编辑 王璐)