

平原圩区城镇雨洪淹没模拟与调控策略

——以昆山市淀山湖镇为例

王 玎¹ 孔繁花^{1*} 尹海伟² 周可婧¹ 刘宏庆¹ 班玉龙³ 许伟健³

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京大学建筑与城市规划学院, 江苏 南京 210093;

3. 昆山市水务局, 江苏 昆山 215300)

【摘要】：模拟与评价雨洪淹没特征是科学评估暴雨洪涝灾害风险与优化雨洪调控措施的基础。以长三角典型平原圩区城镇淀山湖镇的 8 个圩区为例，基于地形、气象、雨水管网等数据，通过构建多重现期的降雨情景，采用一维 SWMM 模型模拟了雨水管网的溢流特征，耦合二维 CADDIES 模型识别了管网溢流在地表形成的雨洪淹没区域，定量评估了雨洪淹没特征的主要影响因素，并阐明提升泵站排涝能力与增加水面面积 2 种雨洪调控情景的优化效果。结果表明：(1) 溢流点数量受圩区地表属性和降雨特征的共同影响，淹没面积与降雨特征显著相关，降雨重现期大于 0 且逐渐增大时，淹没面积亦随之显著增加；(2) 在强降雨情景下，淀山湖镇雨水管网负荷较高且不能有效应对超过 50 a 的强降雨事件；(3) 提升泵站排水能力能有效减少淹没面积，但未能减少溢流河道以及雨水管网溢流点数量；(4) 增加水面面积能显著提升圩区雨洪调控能力，当新兴圩、永胜圩和红旗圩水面率分别达到 6 和 8 时，可有效抵御 100 a 降雨事件所导致的河道溢流状况。研究结果可为长三角地区平原圩区的雨洪灾害风险评估与雨洪调控措施优化提供决策参考。

【关键词】：平原圩区；雨洪调控；SWMM 模型；CADDIES 模型；昆山市

【中图分类号】：TV122 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004- 8227(2023)03- 0596- 15

【DOI】：10.11870/cjlyzyyhj202303014

【收稿日期】：2022- 03- 29；**【修回日期】**：2022- 11- 08

【基金项目】：国家自然科学基金项目(31670470)；昆山市河湖生态空间格局优化方案(RHZH2022-KS-Y-02-06)

【作者简介】：王 玎(1997 ~)，男，硕士研究生，主要研究方向为城市生态与可持续发展。E-mail: 1497888089@qq

【* 通讯作者 E-mail】：fanhuakong@nju

全球气候变化和快速城市化导致区域自然水文循环发生显著改变, 极端降雨事件频发, 城市洪涝灾害日益严重, 给我国许多城市造成了严重的生命财产损失^[1,2,3]。2012 年, 北京遭受的特大暴雨致使 79 人死亡, 直接经济损失 116 亿元^[4]; 2021 年 7 月, 河南特大暴雨直接导致 25.3 万 hm^2 作物绝收, 302 人遇难, 50 人失踪^[5]。如何科学模拟和准确评估雨洪溢流与淹没特征, 为雨洪灾害风险评估与雨洪调控措施优化提供决策依据, 成为当前城镇雨洪管理亟需解决的热点问题。

圩区指平原河网低洼易涝地区, 通过圈圩筑堤形成的封闭防洪排涝保护区域。长江三角洲地区地势平坦, 大部分地区高程在江河的洪枯水位之间, 因而城镇多建立圩区, 以外御洪水、内除涝水^[6]。平原圩区内的土地利用类型复杂, 空间异质性高, 导致产汇流模式复杂多样。目前, 该地区河网水系流动性差、泵站抽排效率低, 圩内雨水内涝、圩外洪水顶托等风险并存。以昆山市淀山湖镇为例, 区域内管网漏损率较高^[7]、部分工程老化、水面率较低, 在极端暴雨洪涝事件下存在排水不畅、外河倒灌等问题, 是典型的高雨洪风险圩区城镇^[8]。因此, 亟需基于圩区产汇流模式解析圩区的雨洪淹没特征, 制定切实可行的排水优化策略, 为雨洪灾害风险评估与排水优化策略制定提供决策依据。

雨洪模型是研究城市雨洪溢流与淹没特征的重要手段之一。目前, 雨洪模型逐渐拓展应用于刻画平原圩区的复杂水文-水动力过程。国际常用的一维河道/管网模型包括 HEC-RAS、MIKE 11、SOBEK、InfoWorks 和 SWMM 等, 我国学者也自主建立了城市雨洪模型, 如 SSCM、CSPSM、WHDM 等^[9,10,11]。这些一维模型能模拟雨水管网的溢流情况和泵站的调度过程^[12,13,14,15], 但对于描述城市地表水动力条件和雨洪淹没过程存在一定局限性。二维水动力模型可有效模拟城市雨洪淹没范围、淹没深度、地表径流流速, 但数据要求高、运行速度慢, 难以满足雨洪灾害预测和模拟的要求^[16]。近年来, 基于元胞自动机开发的二维水动力模型 CADDIES, 可以通过概化地面特征模拟地表径流的扩散过程, 有效降低数据门槛, 大幅提高模拟效率。杨帆等^[17]、Guidolin 等^[18]运用元胞自动机快速有效地模拟了城市雨洪淹没过程, 证实了 CADDIES 模型的可靠性。然而, CADDEIS 模型忽略了排水管网、水网、不透水面积占比等重要特征信息, 仅采用 CADDIES 模型模拟地表径流的扩散过程, 其结果存在一定的不确定性。为了更加精确、科学地表征雨洪淹没特征, 使用水文和水动力耦合模型可以进行优势互补。Yin 等^[19]、Jamali 等^[20]的研究表明一维和二维模型耦合模拟结果精度高、结果运行速率快。受限于下垫面特征与水工设施的复杂性, 目前常见的一维二维耦合模型难以直接反映圩区雨洪淹没过程。SWMM 和 CADDIES 耦合模型既可以模拟雨水管网的水力特征以及圩区复杂的产汇流模式, 又能快速识别雨洪灾害下的管网溢流与地表淹没, 契合了圩区雨洪调控研究的需求。

鉴于长三角地区洪涝灾害频发、管理措施不足等现状, 本研究以典型圩区城镇淀山湖镇为例, 结合 2020 年淀山湖镇土地利用、水系河网、排水管网等数据以及陆泥浦站点降雨观测数据, 耦合一维 SWMM 模型和二维 CADDIES 模型, 分析淀山湖镇圩区在强降水事件下的管网溢流与地表淹没特征。基于地表产流-管网溢流-地表汇流过程的耦合模拟, 明确了平原圩区城镇雨洪淹没的多情景时空分布特征, 揭示了人工排涝设施和河道水系 2 种雨洪调控情景的优化效果, 为平原河网圩区防洪排涝措施的制定提供决策参考。

1 研究区与实验方法

1.1 研究区概况

研究区为昆山市淀山湖镇, 面积约为 55.85 km^2 (不包括淀山湖); 属长三角太湖平原, 境内地势平坦, 自然坡度较小, 年降雨量 1139 mm , 年平均气温 15.5°C , 河网密布, 湖荡众多。根据地方防涝规划, 研究区共分为 10 个圩区(图 1), 其中姚家圩和四镇联圩是农业圩区, 本研究未予考虑。8 个圩区的水文状况差异较大, 水面率 $7\%\sim 17\%$, 不透水面占比 $13\%\sim 42\%$, 防洪泵站数量 $3\sim 7$ 个(表 1)。

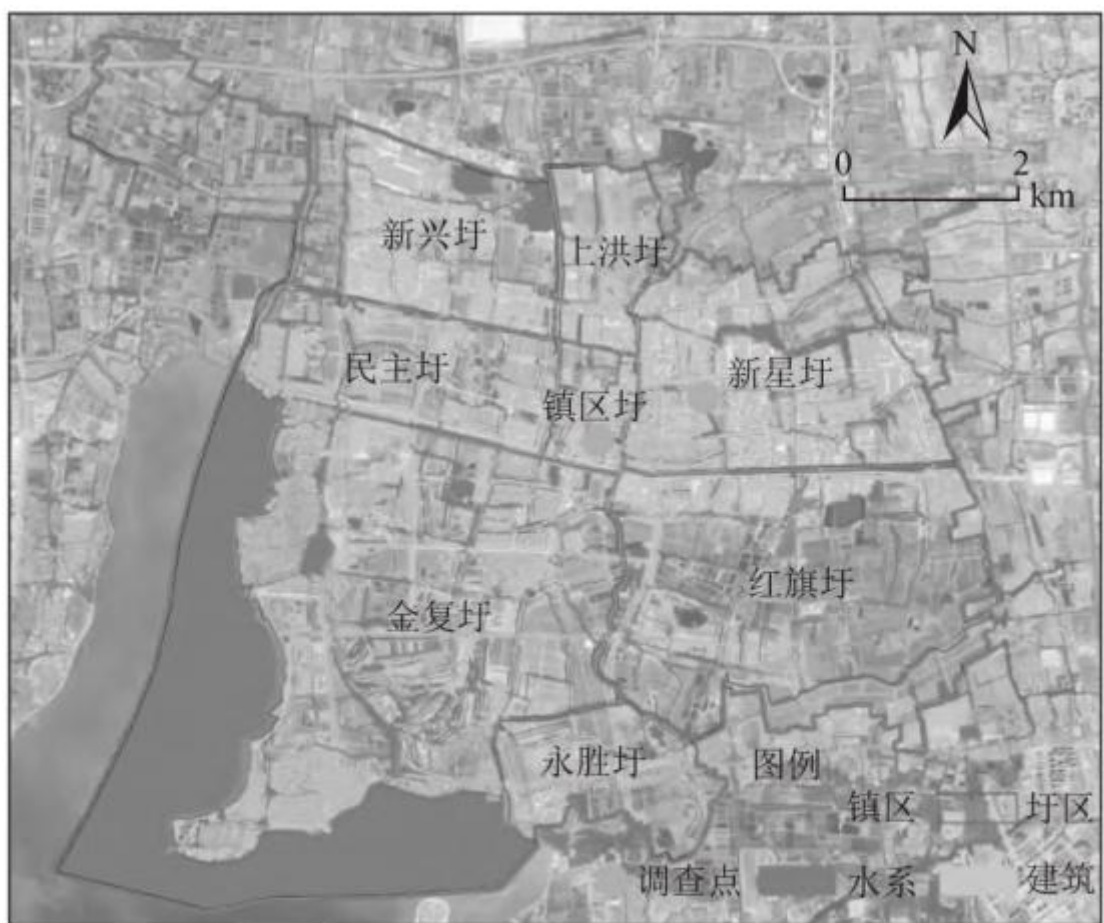


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of research area

表 1 研究区圩区特征

圩区名	面积 (ha)	水面率 (%)	不透水面率 (%)	泵站数量 (个)
镇区圩	111.8	11.05	41.17	4
民主圩	414.5	8.54	31.00	3
新星圩	748.1	7.57	40.48	4
新兴圩	516.2	6.01	33.67	5
永胜圩	291.4	9.33	15.48	4
上洪圩	206.7	6.17	36.59	3

红旗圩	1 130.7	8.61	13.80	5
金复圩	1 476.4	12.31	26.48	7

1.2 数据来源

本研究使用的主要数据有：(1)淀山湖镇陆泥浦气象站 2020 年 7~10 月的降雨数据，时间间隔为 15 min；(2)1：2000 地形(高程点)数据；(3)镇区管网、房屋建筑、土地利用等数据。将地形数据与房屋建筑数据进行叠加，生成 5 m×5 m 的数字表面模型(DSM),作为 CADDIES 模型的参数输入。

1.3 研究方法

将 SWMM 模型应用参数及模拟结果作为二维水动力 CADDIES 模型的输入参数与信息，实现一维水文模型 SWMM 与二维水动力 CADDIES 模型的耦合，模拟强降水情景下平原圩区溢流与淹没特征(图 3)。

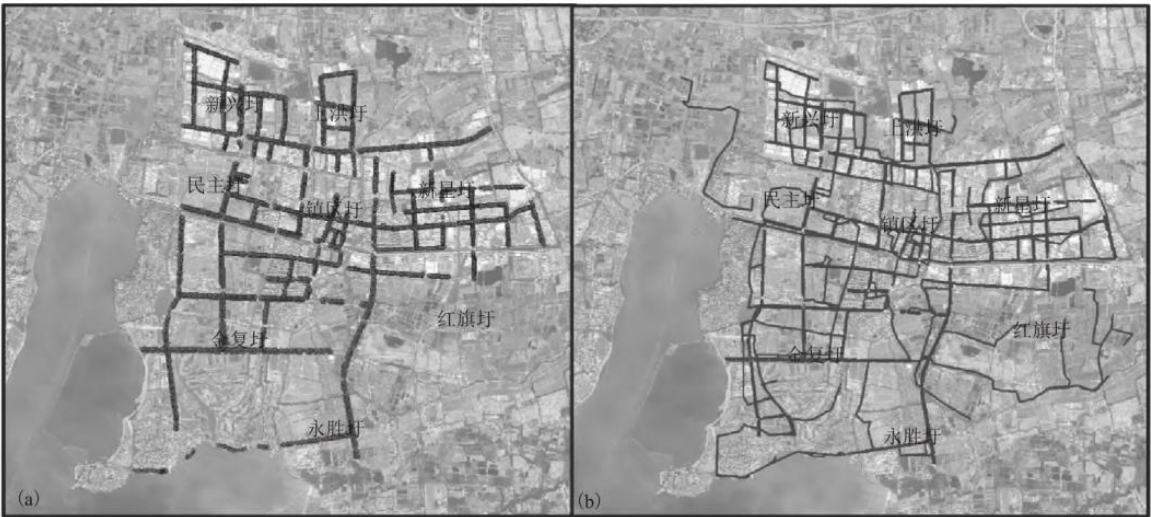


图 2 研究区管网结构图：(a) 雨水井分布，(b) 雨水管网分布

Fig. 2 Study area pipe network diagram, (a) Distribution of rainwater wells, (b) Distribution of rainwater pipe network

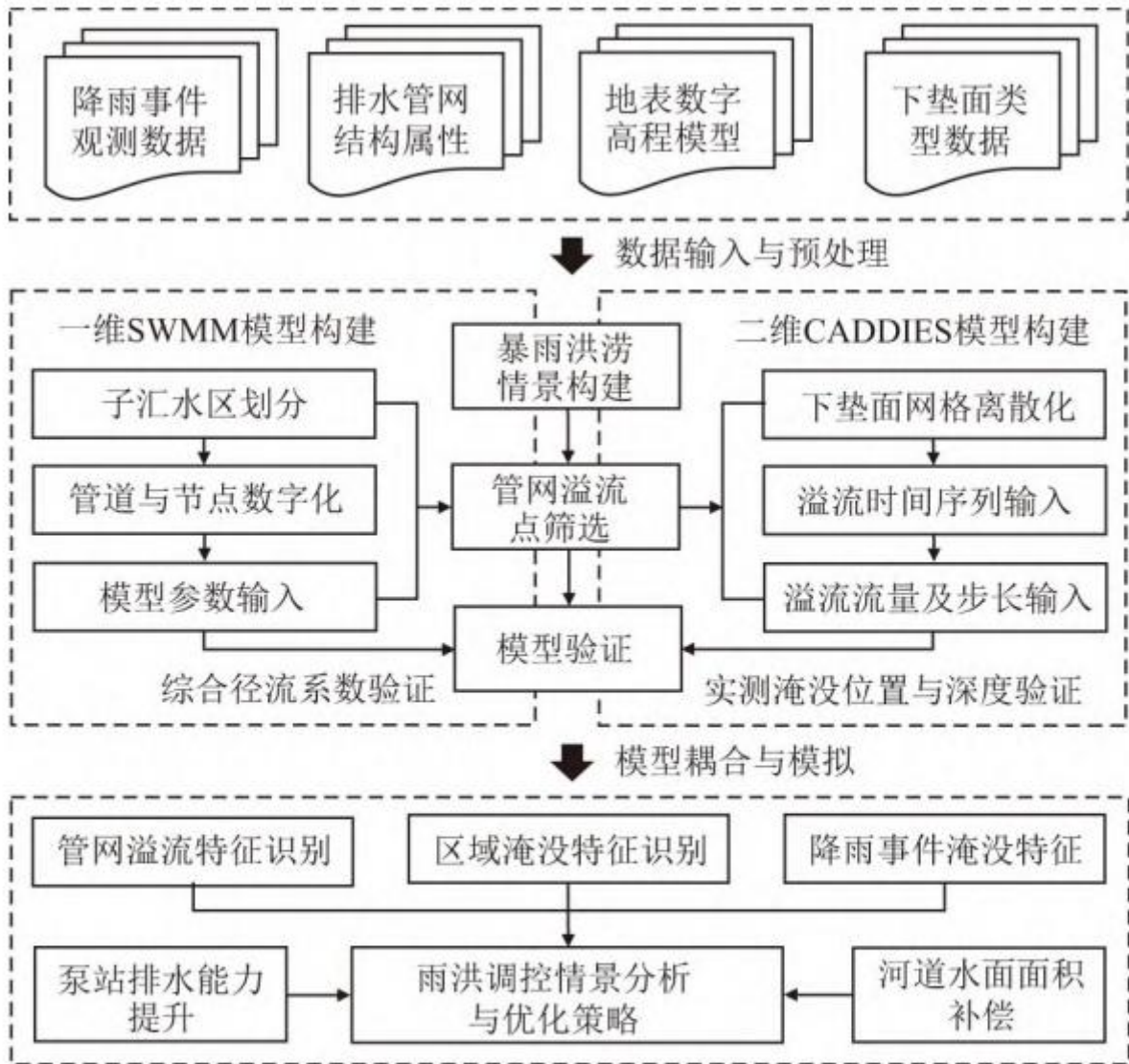


图 3 研究方法框架图

Fig. 3 Research method framework

1.3.1 基于 SWMM 模型的溢流点选取

(1) 降雨事件选取

本研究以 6h 的无雨间隔为阈值将 2020 年 7~10 月降雨数据划分为 12 场单独的降雨事件^[21, 22], 以降雨重现期^[23]为依据, 选取 4 场不同重现期降雨 R1(0702)、R2(0804)、R3(0910)、R4(0914) 作为本研究的降雨事件。此外, 为更好地模拟管网的溢流情况, 本研究根据芝加哥雨型设计了 R5(1 a)、R6(50 a)、R7(100 a) 3 种降雨情景, 其中 R5(1 a) 降雨事件用于标准雨型下的模型验证。

(2) 研究区 SWMM 模型的构建与验证

科学划分子汇水区是提高模型精度与可靠性的基础。本研究基于水文分析结果、坡度和用地类型,将 8 个圩区共划分为 260 个子汇水区。参考 SWMM 手册以及前人研究^[24]对子汇水区透水面与不透水面的曼宁系数、洼地蓄水量等参数进行了设置(表 3);基于 GIS 软件平台,进行雨水管网的数字化,由于管网直排临近的河流导致河道洪泛与管道节点溢流并存,本研究保留原始管网与节点(图 2),由此构建一维 SWMM 模型。淀山湖镇缺少实测河流实测数据,故本研究采用基于径流系数的降雨径流模型参数校准方法^[25],此校准方法在常用降雨重现期内模型校准参数集的稳定性较好,先前研究已证实参数校准的可靠性^[26]。

表 2 选取降雨事件特征统计

降雨事件	总降雨量(mm)	持续时间(min)	最大雨强*(mm/15 min)	平均雨强(mm/min)	降雨重现期(a)
R1 (0702)	63.90	660	1.70	0.09	0.25
R2 (0804)	118.50	2 175	3.60	0.05	0.41
R3 (0910)	49.10	555	1.70	0.08	0.15
R4 (0914)	246.60	2 505	2.30	0.09	7.79
R5 (1a)	52.60	120	3.04	0.43	1
R6 (50 a)	105.48	120	6.10	0.87	50
R7 (100 a)	114.85	120	6.64	0.95	100

注: *由于 R1、R2、R3、R4 的降雨观测间隔是 15 min, 本文使用 mm/15 min 为最大雨强单位。

表 3 SWMM 模型参数表

圩区名	子汇水区 (个)	不透水面		透水面	
		曼宁系数	洼地蓄水量	曼宁系数	洼地蓄水量
镇区圩	22	0.015	1.162 5	0.17	5.087 8
民主圩	34	0.015	1.038 0	0.15	4.563 5
新星圩	52	0.015	1.162 5	0.30	5.087 8
新兴圩	33	0.015	1.162 5	0.15	5.087 8
永胜圩	20	0.015	1.162 5	0.15	5.087 8
上洪圩	21	0.015	1.162 5	0.30	5.087 8
红旗圩	25	0.015	1.162 5	0.18	5.087 8
金复圩	53	0.015	1.162 5	0.30	5.087 8

(3) 溢流点筛选规则

限于部分管网数据缺失以及管网数据精度不匹配,研究区出现大面积地表径流直接流向道路管网的情况,需对 SWMM 模型模拟的潜在溢流点进行数据筛选。

根据《室外排水设计规范》(GB50014-2006)要求排水管渠的流量:

$$Q = Av \quad (1)$$

式中: Q 为设计流量(m^3/s); A 为水流有效断面面积(m^2); v 为流速(m/s)。

排水管道和合流管道的设计流速在 $0.75 \sim 5 m/s$, 由《室外排水设计规范》可知 150、200、400 和 600 mm 等不同管径管道最大充满度为 $0.55 \sim 0.7$, 管道流量范围在 $0.009 \sim 1.26 m^3/s$ 。研究基于此流量范围并结合降雨事件选择不同的流量阈值;其次,最大淹没深度对应的时间需与降雨数据匹配,淹没时长依据降雨时长设置百分比阈值。研究提取的潜在溢流点位置与淀山湖镇给排水管网信息系统标注的 4 处易涝点位置重合度为 100%,表明溢流点筛选规则可靠,筛选结果可信。

1.3.2 基于 CADDIES 模型的淹没区识别

CADDIES 模型是以元胞自动机为基础的二维水动力模型,由离散空间、邻域关系、单元状态、演化时间步长以及演化规则 5 部分组成,以规则网格单元作为离散空间的独立最小元胞,通过制定演化规则影响相邻单元,模拟复杂系统的变化^[27,28]。本研究中采用摩尔型邻域关系,以模拟起始时间、数字表面模型和 SWMM 模型率定参数为 CADDIES 模型输入参数,结合 SWMM 模拟结果的溢流数据,计算区域溢流范围、地表径流流速以及最大积水深度等信息,输出数据为 $5 m \times 5 m$ 的栅格。

1.3.3 雨洪淹没调控情景构建

研究构建的雨洪淹没调控情景从扩大排水能力和增加蓄水能力^[29,30,31]出发,选取优化泵站抽排量和增加圩区水面率,开展区域雨洪调控优化研究。首先,选取靠近溢流点的泵站,在原始排水量的基础上以 $0.1 m^3/s$ 的增量递增,构建泵站排水优化情景。其次,选取出现河道淹没情况的圩区,以 $500 m^2$ 为递增单位,阶梯式设定淹没河道面积补偿参数,构建淹没河道面积补偿优化情景。对比不同圩区、不同情景的地表淹没情况,探讨满足圩区排涝要求的泵站配置,以强化圩区在暴雨事件下水系河网的行洪、调蓄能力,为圩区雨洪调控优化方案提供支撑。

2 结果与讨论

研究选取 2020 年 7~10 月降雨事件 R1 率定,降雨事件 R2、R3 以及设计降雨 R5 进行 SWMM 模型验证^[26]。圩区的不透水率在 13%~42%,故其综合径流系数范围在 $0.3 \sim 0.5$ 以及 $0.4 \sim 0.6$,模拟的综合径流系数均在规定的范围内(表 4),表明 SWMM 模型参数设置具有较好的可靠性与稳定性。

2.1 不同降雨情景下圩区溢流点特征

从溢流点分布格局来看,各圩区内部溢流点分布较散,在建筑密集区域相对较多,距离河网和不透水面较远(图 5)。随着降雨重现期增大,具有较高不透水面占比的镇区圩、民主圩、新星圩、新兴圩以及上洪圩的溢流点位置分布不均,而金复圩、永胜圩和红旗圩在不同降雨条件下的溢流点位置则更为集中(图 5)。

表 4 SWMM 模型验证

圩区名	子汇水区 (个)	综合径流系数(%)			
		R1	R2	R3	R5
镇区圩	22	48.11	55.77	40.62	58.85
民主圩	34	50.92	52.77	40.69	57.94
新星圩	52	49.88	57.74	42.02	52.46
新兴圩	33	53.60	58.94	45.15	58.82
永胜圩	20	41.80	48.78	31.35	48.37
上洪圩	21	50.45	57.77	42.25	53.06
红旗圩	25	41.59	50.05	30.00	40.60
金复圩	53	39.38	49.70	30.61	41.20



图 4 降雨导致的实际淹没情景(2020 年 7 月 4 日积水清除): (a)新星圩双马路, (b)镇区圩东大街

Fig. 4 On-site photos of flood inundation (July 4, 2020 Waterlogged Clearance): (a) Shuangma Road, Xinxing polder, (b) East Street, Zhenqu polder

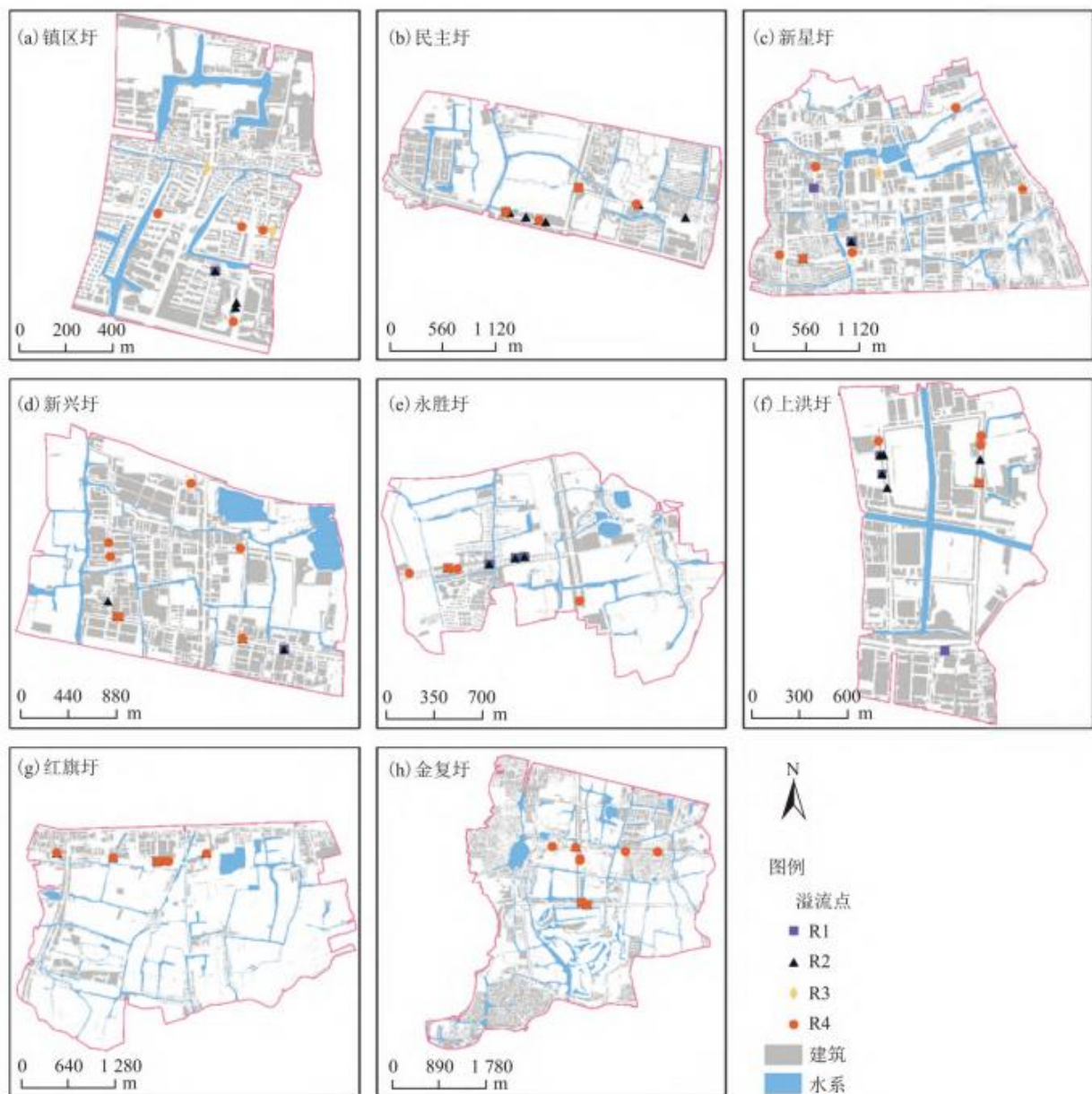


图 5 不同降雨情景下多圩区溢流点空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of overflow plots in polders under different rainfall events

从溢流点数量上来看, 淀山湖镇 8 个圩区在 R1 至 R4 降雨情景下各有 20、35、14、42 个溢流点数(图 6)。各圩区溢流点数量分布不均匀, 新兴圩溢流点个数最多为 17 个, 镇区圩的溢流点个数最少为 8 个。以往研究发现排水系统的负荷能力会影响溢流结果^[25, 26], 但本研究区内部河网密集, 雨水管网径流直接流向最近河道, 管网之间的径流流动较少, 故管网负荷能力对溢流结果的影响相对较小。基于对圩区特征(水面率、不透水面积占比)、降水事件特征(总降雨量、降雨时长、最大雨强、平均雨强、降雨重现期)和溢流点数量的相关分析发现, 溢流点数量与总降雨量、降雨时长、最大雨强、降雨重现期都显著相关, 相关系数分别为 0.7 ($p < 0.01$)、0.753 ($p < 0.01$)、0.49 ($p < 0.01$)、0.574 ($p < 0.01$), 表明溢流点数量与降水事件特征显著相关; 溢流点数量与不透水面积占比和水面率相关系数分别为 -0.033 与 -0.182, P 值均大于 0.1, 说明相关性不显著。

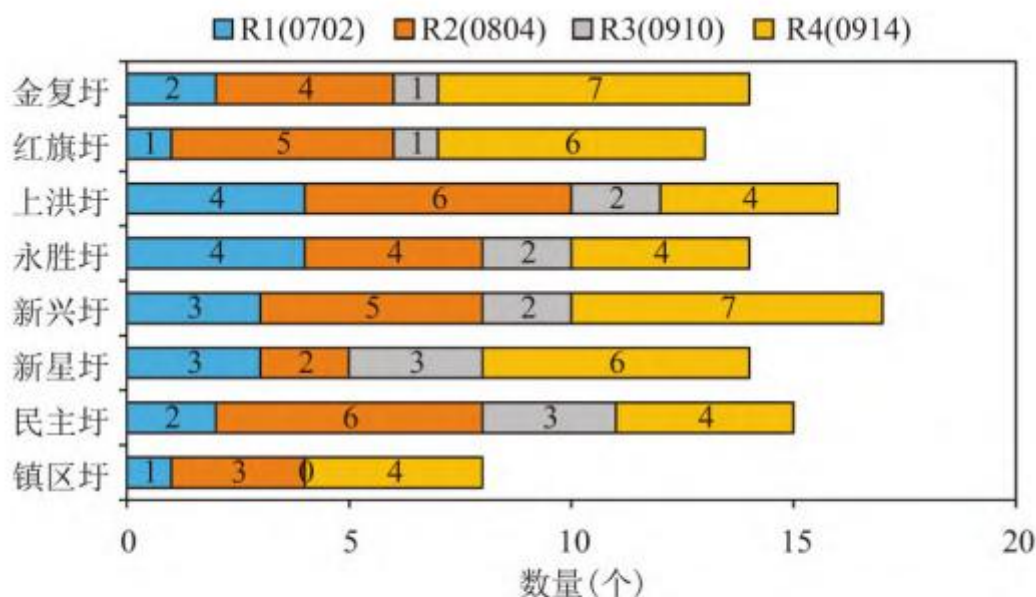


图 6 不同降雨情景下多圩区溢流点数量统计

Fig. 6 Statistics of overflow plots in multi polder area under different rainfall scenarios

部分溢流点在低重现期降雨事件下也会出现溢流现象,这可能是由于降雨事件在局部时段的雨强较大。独立降雨事件呈现多段降雨,在首段出现短时间的强降雨,后续多段降雨趋于缓和,导致整场降雨事件为低重现期(表 2)。同时,由于部分数据缺失或精度不足(如缺少出水口流量数据、降雨数据精度不足),以及对溢流点进行的二次筛选,都会对溢流点结果有一定影响。此外,若降雨前透水面已接近饱和,地表径流直接流入雨水管网,亦会导致低重现期降雨事件下雨水井发生溢流。因此,在今后的相关研究中,有必要对缺失的数据以及实际淹没点进行更多的测量记录以形成更加完善的研究体系。

2.2 不同降雨条件下淹没区辨识

各溢流点的溢流水量在地表径流后的淹没范围如图 7 所示。R1 降雨情景下,镇区圩、上洪圩、新星圩和永胜圩都出现淹没状况,分别为 0.029、0.038、0.325 和 0.256 m。R2 降雨情景下,部分圩区的最大淹没深度超过 R4 降雨情景下的深度。R4 降雨情景下,民主圩和新星圩淹没范围较小而最大淹没深度较大,这与区域地形和用地类型有关,淹没范围较大的区域地势低且属于不透水面,导致溢流水量在地表形成径流后直接汇聚在地势低洼处。

路面洪水淹没会影响人民群众的日常出行,本研究以不影响步行的最大淹没深度 0.03 m 为阈值进行修正淹没面积统计^[32](图 8)。在 R1 情景下,只有新星圩、永胜圩和上洪圩出现淹没状况,淹没面积总共约 2 352 m²;R2 情景下,6 个圩区出现大面积的淹没状况,淹没面积总共约 18 621 m²;R3 情景下,只有民主圩和新星圩出现淹没状况,淹没面积总共约 2 156 m²;R4 情景下,7 个圩区出现大面积的淹没状况,且淹没面积总共约 32 441 m²,特征与 R2 情景类型类似。上述结果表明,淹没面积总体上随着降雨重现期递增。

为探究影响淹没面积的影响因子,本研究选取水面率、不透水面占比、总降雨量、降雨时长、最大雨强、平均雨强、降雨重现期等因子进行相关性分析。研究表明淹没面积与总降雨量、降雨时长、最大雨强、降雨重现期显著相关,相关系数分别为

0.600 ($p<0.01$)、0.595 ($p<0.01$)、0.317 ($p<0.1$)、0.531 ($p<0.01$)；水面率和不透水面占比与淹没面积的单因子相关性不显著。降雨时长、总降雨量、最大雨强以及降雨重现期与淹没面积显著相关，这表明降雨特征对淹没面积的影响占主要因素。

有部分圩区出现低重现期淹没面积更大的现象。例如，R1 降雨事件下民主圩未淹没，新星圩淹没面积 588 m^2 ，在 R3 降雨事件下民主圩和新星圩淹没面积分别为 981 和 $1\ 176\text{ m}^2$ 。该现象主要受到数据处理方式和地域特征的影响，一方面，路面淹没深度筛选后仅保留淹没深度较大的区域，缩小了两个降雨情景淹没面积的差距；另一方面，本研究只选取不透水面占比和水面率参数差异化不同圩区，更多元化的参数将有助于全面量化圩区地域特征对淹没面积的影响。

2.3 设计降雨情景淹没特征分析

设计降雨 R6 和 R7 为单峰标准雨型，各圩区的溢流点位置在设计降雨情景下具有高度重叠性，且分布在不透水面附近(图 9)。以 0.03 m 的阈值对淹没深度进行筛选，除镇区圩、永胜圩外，圩区内部最大淹没深度随着降雨重现期的增大而增大，且 R6 和 R7 情景下的淹没面积接近(图 10)。R6 情景下，镇区圩最大淹没深度为 0.373 m ，永胜圩最大淹没深度为 0.891 m ；在 R7 情景下，镇区圩最大淹没深度为 0.360 m ，永胜圩最大淹没深度为 0.861 m (图 11)。

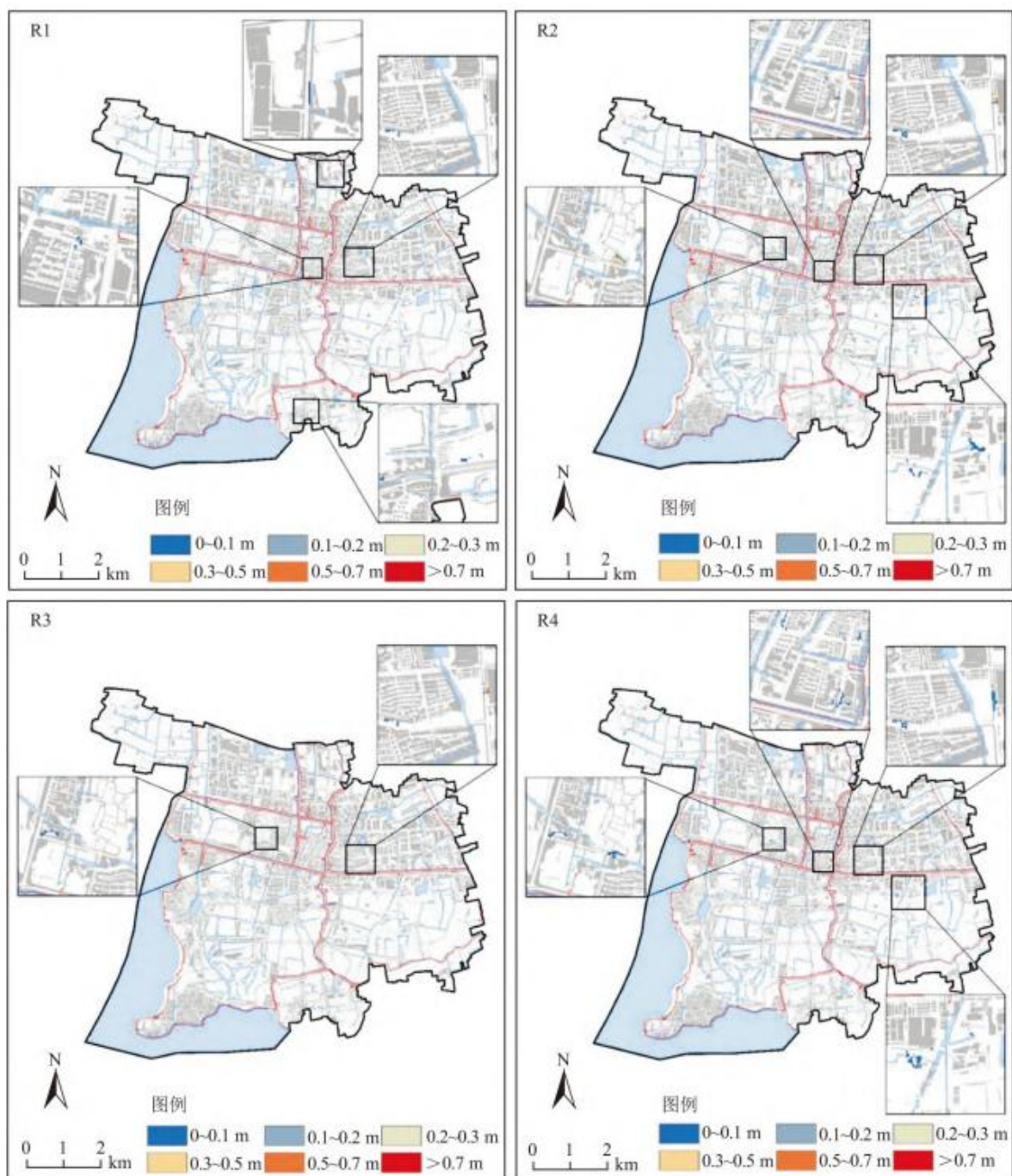


图 7 不同情景降雨下多圩区淹没深度

Fig. 7 Inundation depth of multi polder areas under different rainfall scenarios

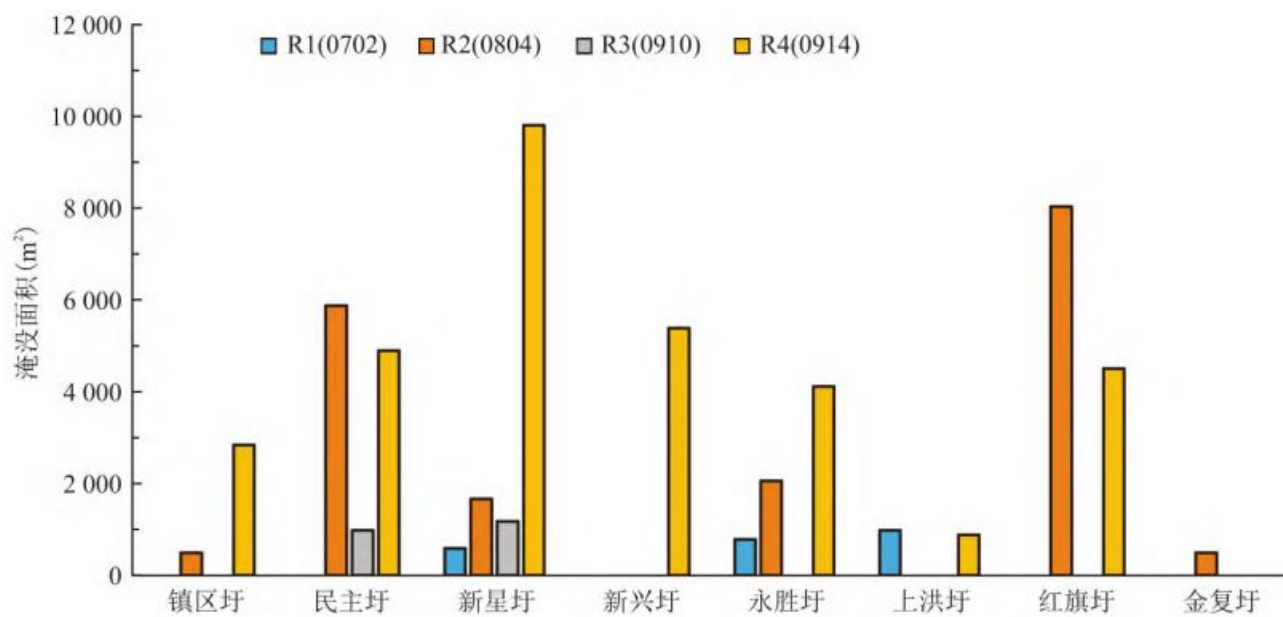


图 8 不同情景降雨下多圩区淹没面积

Fig. 8 Inundation area of multi polder areas under different rainfall scenarios

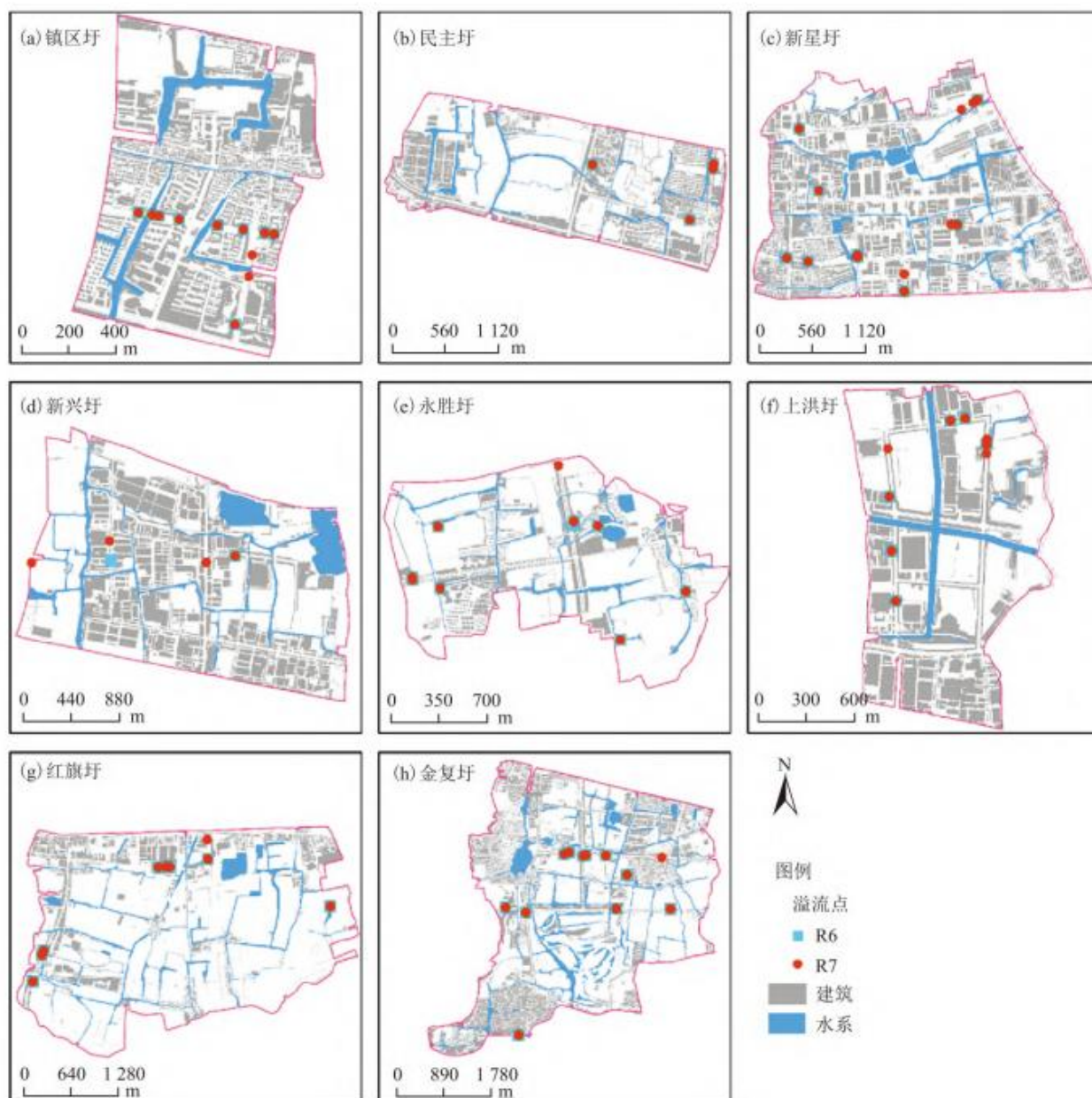


图 9 设计降雨情景下溢流点空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of overflow plots under design rainfall scenario

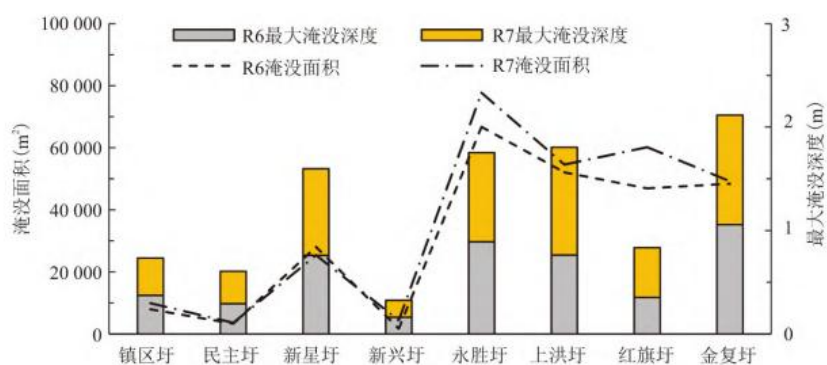


图 10 设计情景降雨下多圩区淹没面积及最大淹没深度

Fig. 10 Maximum depth and inundation area of overflow plots in multi polder areas under rainfall in design scenario

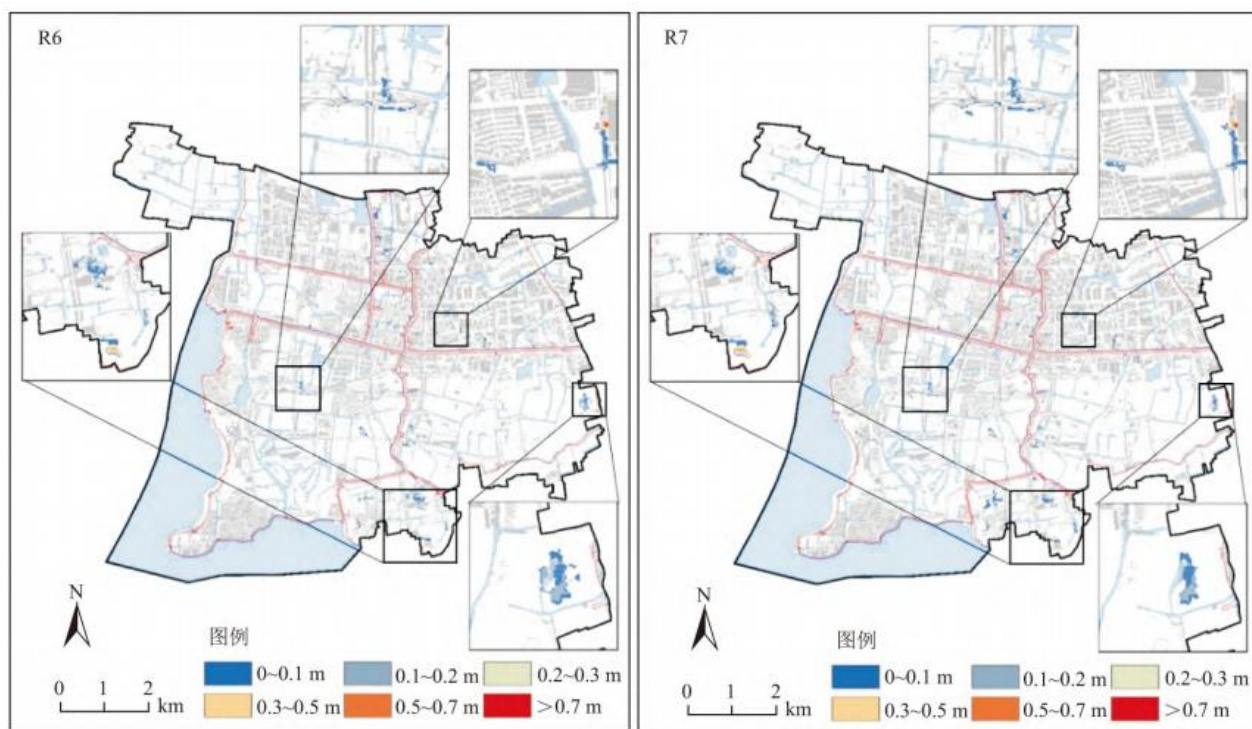


图 11 设计情景降雨下多圩区淹没深度

Fig. 11 Inundation depth of multi polder areas under design scenario rainfall

在设计降雨情景下，地表径流在不透水面快速向雨水管网汇聚，研究区管网的排水能力负荷率过载，难以在短时间内将雨水全部排向河道，故更容易引起节点溢流。而淹没区域是溢流水量在地表汇流后形成的结果，随着淹没区域的扩大，溢流水量最终从地表直接流入河道，从而限制了淹没区域范围。

此外，研究发现新兴圩、永胜圩、红旗圩在 R6 和 R7 的降雨情景下出现了河道溢流现象。这些溢流河道多为位于透水区(如

农田等)窄河道,在降水影响下土壤饱和后形成地表径流并汇集;窄河道和主河道之间水位差较小,径流输出缓慢,从而出现溢流状况。上述结果说明,淀山湖镇圩区的河道与雨水管网应对极端降水情况的能力不足。

2.4 雨洪调控情景分析与优化策略

淹没面积的影响因素分析结果表明,圩区溢流点数量和淹没面积与水面率、不透水面占比以及降雨特征有关。平原圩区可通过调整泵站抽排水量以扩大圩区排水能力,减缓圩区内淹没状况,并通过调整水面率以扩大圩区蓄水能力,减少极端降雨事件下河道溢流。

2.4.1 泵站排水能力提升

泵站能强化河道水动力条件,有效控制河道水位,降低河道洪涝灾害风险^[33]。本研究针对设计降雨情景下出现河道溢流的新兴圩、永胜圩和红旗圩,选取靠近溢流点的泵站,在原始排水量的基础上以 0.1 m³/s 的增量递增,构建泵站排水优化情景,以探讨满足圩区排涝要求的泵站配置(表 5)。

新兴圩优化后 R7 情境下河道溢流量减少 7.97 m³;优化后永胜圩组合 1 和组合 2 在 R6 和 R7 情景溢流量分别减少 26.94、35.18 和 35.35、56.04 m³,具有更大泵站排水量的组合 3 未能进一步减少溢流量;优化后红旗圩不同组合在 R6 和 R7 情景溢流量分别减少 8.81、24.14、24.78 和 12.35、32.37、33.62 m³。新兴圩在 R7 情景下河道溢流量较少,排水泵站设在溢流河道上,仅通过调整部分泵站抽水量即可降低溢流河道水位。永胜圩调整泵站抽水量后减少了淹没面积,在组合 2 的泵站排水后减少了一条溢流河道。由于排水泵站距离溢流河道较远且圩内水系连通性不足,泵站排水量的提升不能直接影响溢流河道,具有更大泵站排水量的组合 3 未能进一步减少淹没面积。红旗圩所调整的泵站在溢流河道附近,由组合 1 至组合 3 排水量不断增大,虽然没能直接解决河道溢流问题,但是有效减少河道溢流面积,减少淹没损失。

表 5 泵站优化方案及淹没影响

		泵站 1 (m3/s)	泵站 2 (m3/s)	泵站 3 (m3/s)	泵站 4 (m3/s)	泵站 5 (m3/s)	R6 溢流河段 数 (个)	R7 溢流河段 数 (个)	R6 修正面 积 (m2)	R7 修正面 积 (m2)
新兴圩	原始	1.0	3.2	3.2	3.2	1.0	0	1	1 764.18	4 410.45
	组合 1	1.5	3.2	3.2	3.2	1.0	0	0	1 764.18	3 528.36
永胜圩	原始	3.2	2.6	1.0	1.0	/	5	5	66 744.81	77 721.93
	组合 1	4.0	3.0	2.0	2.0	/	5	5	63 804.51	77 133.87
	组合 2	8.0	6.0	4.0	4.0	/	4	4	59 002.02	60 570.18
	组合 3	16.0	12.0	8.0	4.0	/	4	4	59 002.02	60 570.18

红旗圩	原始	3.2	3.2	3.2	3.2	6.0	1	1	46 946.79	60 178.14
	组合 1	3.2	3.2	3.2	4.0	8.0	1	1	44 300.52	59 688.09
	组合 2	3.2	3.2	3.2	8.0	12.0	1	1	43 908.48	58 413.96
	组合 3	3.2	3.2	3.2	12.0	16.0	1	1	43 320.42	57 531.87

2.4.2 增加圩内水面面积

河网的调蓄能力对区域的防洪减灾起着至关重要的作用^[34],增强圩内河道水面积,有助于增强河道的调蓄能力,缓解河道溢流状况。本研究在 R6 和 R7 情景下,以 500 m²为递增单位,对新兴圩、永胜圩、红旗圩 3 个圩区的淹没河道设置淹没河道面积补偿参数,构建淹没河道面积补偿优化情景(表 6)。在 R6 降雨情景下,新兴圩、永胜圩和红旗圩水面率分别为 6.01%、10.46%以及 8.76%时,可以抵御所导致的河道溢流状况,其中永胜圩和红旗圩直接减少溢流量 244.95 和 38.55 m³;R7 降雨情景下,当水面率分别达到 6.03%、10.87%以及 8.83%时可以在河道依旧保持正常调蓄功能,相比现状河道溢流量减少 6.43、361.41、84.32 m³,无溢流状况出现。

表 6 水面率优化方案及淹没影响

		河道 1 面积 (m2)	河道 2 面积 (m2)	河道 3 面积 (m2)	河道 4 面积 (m2)	河道 5 面积 (m2)	水面 积率 (%)	R6 溢流 河段数 (个)	R7 溢流 河段数 (个)	R6 修正 面积 (m2)	R7 修正 面积 (m2)
新兴圩	原始	6 305	/	/	/	/	6.01	0	1	1 764.18	4 410.45
	组合 1	7 400	/	/	/	/	6.03	0	0	1 764.18	3 528.36
永胜圩	原始	9 943	4 943	12 313	10 165	9 023	9.33	5	5	66 744.81	77 721.93
	组合 1	15 000	8 000	18 000	11 500	11 000	9.96	2	5	29 206.98	43 418.43
	组合 2	27 000	12 000	18 000	12 000	12 000	10.46	0	5	4 704.48	33 911.46

	组合 3	30 000	14 500	20 500	14 000	12 500	10.87	0	0	4 704.48	3 822.39
红旗 圩	原始	10 081	/	/	/	/	8.61	1	1	46 946.79	60 178.14
	组合 1	27 500	/	/	/	/	8.76	0	1	17 053.74	56 551.77
	组合 2	35 000	/	/	/	/	8.83	0	0	17 053.74	32 343.30

上述优化策略表明，提升泵站排水能力和增加水面面积可以有效减少平原圩区的淹没范围，这与胡继刚等^[9]提出的通过泵站等工程促进水体流动，以及袁雯等^[35]探索河流结构特征的调蓄作用研究结果相吻合。相比于泵站工程，河网水面面积优化从源头降低了溢流河道的数量，直接减少了河道洪泛水量，促使优化河网后的淹没面积出现了大幅度降低。因此，补偿河道面积可以直接有效提升平原圩区的暴雨洪涝调蓄能力，缓解圩区内部河道溢流问题。同时，河网优化后可影响土壤含水特征和地下水基流，需要结合淀山湖镇地质构造、地形地貌和气象条件进一步深入探讨。未来研究可以考虑改变泵站位置、增加泵站数量以及增加水系连通性等其他方式，从多角度考量优化配置，完善河道面积补偿的配套政策，从流域尺度综合分析区域水文过程。

3 结论

本研究基于 SWMM 与 CADDIES 耦合模型，以昆山市淀山湖镇 8 个平原圩区为例，开展了多降雨情景的雨水管网溢流与地表淹没过程模拟。研究表明：(1) 溢流点数量受圩区地表属性和降雨事件共同影响。目前，暴雨事件下淀山湖镇雨水管网负荷较大，圩区内部管网不能有效应对降雨重现期超过 50 a 的降雨事件；(2) 淹没面积与降雨特征显著相关。在降雨重现期大于 0.63 a 时，淹没面积呈递增趋势；(3) 对比提升泵站排水能力和增加水面面积 2 种雨洪淹没调控情景，提高泵站排水量能有效减少淹没面积，但无法减少溢流河道数量，补偿河道面积可以直接提升调蓄能力且有效缓解河道溢流。研究结果明确了河道水系修复与泵站扩容工程结合对于缓解暴雨洪涝风险的重要意义，以为长三角地区平原圩区的雨洪灾害风险评估与应对策略制定提供决策参考。

附图：不同降雨情景下圩区淹没深度



参考文献

[1] 孙殿臣, 王慧敏, 黄晶, 等. 鄱阳湖流域城市洪涝灾害风险及土地类型调整策略研究——以景德镇市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12):2856-2866. SUN D C, WANG H M, HUANG J, et al. Analysis of urban flood disaster risk in the Poyang

Lake basin and land type adjustment strategy study—a case study of Jingdezhen city[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(12):2856-2866.

[2] ALFIERI L,BISSELINK B,DOTTORI F,et al.Global projections of river flood risk in a warmer world[J].Earth's Future,2017,5(2):171-182.

[3] 程先富,郝丹丹,韩平,等.基于格网数据的巢湖流域洪涝灾害损失评估[J].长江流域资源与环境,2014,23(10):1479-1484.CHENG X F,HAO D D,HAN P,et al.Flood loss assessment in Chaohu Basin based on grid data[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(10):1479-1484.

[4] 陈吉虎.北京市“7·21”特大暴雨对城市水土保持和监测工作的启示[J].水土保持通报,2013,33(6):313-316.CHEN J H.Enlightenment of torrential rains on 21st July in Beijing city on urban soil and water conservation and monitoring[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2013,33(6):313-316.

[5] 河南省新闻办.河南省人民政府网站[EB/OL].河南省防汛救灾新闻发布会第十场,2021-08-02.<https://www.henan.gov.cn/2021/08-02/2194036.html>.The People's Government of Henan Province[EB/OL].The tenth press conference on flood control and disaster relief in Henan Province,2021-08-02.

[6] 许正甫.平原圩区治涝与内湖综合利用问题[J].自然灾害学报,1992,1(4):15-21.XU Z F.Waterlogging control in polder area and comprehensive utilization of inner lakes[J].Journal of Natural Disasters,1992,1(4):15-21.

[7] 苏州市昆山生态环境局.昆山市淀山湖镇总体规划[S].2021-8-23.Suzhou Kunshan Ecological Environment Bureau.Overall planning of Dian Shanhu Town,Kunshan City[S].2021-8-23.

[8] 李正兆,傅大放,王君娴,等.应对内涝灾害的城市韧性评估模型及应用[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(2):266-276.LI Z Z,FU D F,WANG J X,et al.Urban resilience assessment model for waterlogging disasters and its application[J].Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2022,62(2):266-276.

[9] 岑国平.城市雨水径流计算模型[J].水利学报,1990,21(10):68-75.CEN G P.A model to simulate stormwater runoff in urban area[J].Journal of Hydraulic Engineering,1990,21(10):68-75.

[10] 唐莉华,彭光来.分布式水文模型在小流域综合治理规划中的应用[J].中国水土保持,2009(3):34-36.TANG L H,PENG G L.Application of distributed hydrological model in comprehensive management planning of small watershed[J].Soil and Water Conservation in China,2009(3):34-36.

[11] 周玉文,戴书健.城市排水系统非恒定流模拟模型研究[J].北京工业大学学报,2001,27(1):84-86,95.ZHOU Y W,DAI S J.Study on unsteady flow simulation model of urban drainage system[J].Journal of Beijing Polytechnic University,2001,27(1):84-86,95.

[12] 胡继刚,苏晨,陈晨,等.昆山市张浦镇唐村联圩活水畅流方案研究[J].黑龙江水利科技,2020,48(12):71-73,83.HU J G,SU C,CHEN C,et al.Study on scheme of uniting fresh water flow in Tang Village,Zhangpu town,Kunshan City[J].Heilongjiang Hydraulic Science and Technology,2020,48(12):71-73,83.

-
- [13] 刘默蕾, 陈婕, 刘俊. 平原河网圩区城市化对排涝的影响及排涝措施研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4):68-71. LIU M L, CHEN J, LIU J. Study on influence of urbanization on polder areas in plain river networks and corresponding waterlogging control measures[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(4):68-71.
- [14] 李硕, 赖正清, 王桥, 等. 基于 SWAT 模型的平原河网区水文过程分布式模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6):106-112. LI S, LAI Z Q, WANG Q, et al. Distributed simulation for hydrological process in Plain River network region using SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(6):106-112, 2.
- [15] 缪岳军, 邹明忠, 张丽, 等. 圩区防洪调度研究——以江阴市马甲圩为例[J]. 中国水利, 2020(5):32-35. MIAO Y J, ZOU M Z, ZHANG L, et al. Study on flood control operation in polder area—Taking Majia polder area as an example[J]. China Water Resources, 2020(5):32-35.
- [16] 谢五三, 吴蓉, 丁小俊. 基于 FloodArea 模型的城市内涝灾害风险评估与预警[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12):2848-2855. XIE W S, WU R, DING X J. Risk assessment and early warning of urban waterlogging based on FloodArea model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(12):2848-2855.
- [17] 杨帆, 徐建刚, 林蔚. 基于元胞自动机的低影响开发对城市内涝削减效果模拟[J]. 自然资源学报, 2017, 32(7):1158-1169. YANG F, XU J G, LIN W. Cellular automaton simulation of the effect of low impact development on urban water-logging reduction[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(7):1158-1169.
- [18] GUIDOLIN M, CHEN A S, GHIMIRE B, et al. A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 84:378-394.
- [19] YIN D, EVANS B, WANG Q, et al. Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact development facilities on community scale[J]. Science of the Total Environment, 2020, 720:137630.
- [20] JAMALI B, LÖWE R, BACH P M, et al. A rapid urban flood inundation and damage assessment model[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564:1085-1098.
- [21] JOO J, LEE J, KIM J, et al. Inter-event time definition setting procedure for urban drainage systems[J]. Water, 2013, 6(1):45-58.
- [22] 吴滨, 李玲, 杨丽慧, 等. 福建省不同短历时暴雨变化特征及天气背景分析[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(6):207-216. WU B, LI L, YANG L H, et al. Analysis on characteristics of climate change and weather background of different short-time rainstorm in Fujian Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(6):207-216.
- [23] 昆山市人民政府办公室. 市政府关于公布昆山市暴雨强度公式[S]. 2017. Kunshan Municipal People's Government. Announcement of the municipal government on the formula of rainstorm intensity in Kunshan City[S]. 2017.
- [24] DENG J, YIN H, KONG F, et al. Determination of runoff response to variation in overland flow area by flow routes using UAV imagery[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 265:109868.
- [25] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. 给水排水, 2009, 45(11):213-217. LIU X P. Parameter

calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient[J].Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(11):213-217.

[26] 徐慧珺. 基于 SWMM 模型的南京典型区雨洪模拟研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017. XU H J. Study of urban stormwater simulation in typical area of Nanjing based on SWMM[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017.

[27] GHIMIRE B, CHEN A S, GUIDOLIN M, et al. Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach[J]. Journal of Hydroinformatics, 2013, 15(3):676-686.

[28] LI Y, GONG J, LIU H, et al. Real-time flood simulations using CA model driven by dynamic observation data[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2015, 29(4):523-535.

[29] 梁益闻. 城市河湖闸泵群防洪排涝优化调度模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018. LIANG Y W. Research on optimal scheduling model of urban river lake sluice pump group drainage system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.

[30] 夏军, 高扬, 左其亭, 等. 河湖水系连通特征及其利弊[J]. 地理科学进展, 2012, 31(1):26-31. XIA J, GAO Y, ZUO Q T, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment[J]. Progress in Geography, 2012, 31(1):26-31.

[31] 吕慧华, 周峰, 李娜, 等. 苏北里下河典型区河网水系演变特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2):380-385. LV H H, ZHOU F, LI N, et al. Evolution characteristics of the river network in the typical area of Lixiahe region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(2):380-385.

[32] 叶丽梅, 周月华, 向华, 等. 基于 GIS 淹没模型的城市道路内涝灾害风险区划研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(6):1002-1008. YE L M, ZHOU Y H, XIANG H, et al. Risk regionalization of urban roads waterlogging disasters based on GIS rainstorm flood inundation model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(6):1002-1008.

[33] 曾台衡, 谢文俊, 曹国良. 平原河网地区城市排涝泵站设计流量分析方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(9):44-47. ZENG T H, XIE W J, CAO G L. Research on the design flow analysis method of urban drainage pumping station in plain river network areas[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(9):44-47.

[34] 孟慧芳. 鄞东南平原河网区水系结构与连通变化及其对调蓄能力的影响研究[D]. 南京: 南京大学, 2014. MENG H F. Changes of river network structure and connectivity of the southeast plain river network area of the Yinzhou and their impacts on storage capacity[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.

[35] 袁雯, 杨凯, 唐敏, 等. 平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响[J]. 地理研究, 2005, 24(5):717-724. YUAN W, YANG K, TANG M, et al. Stream structure characteristics and their impact on storage and flood control capacity in the urbanized plain river network[J]. Geographical Research, 2005, 24(5):717-724.