

高密度城区调蓄设施雨洪调控效能及运行参数优化研究

张虎*, 江思珉, 刘畅

同济大学水利工程系, 上海

收稿日期: 2026年2月17日; 录用日期: 2026年3月6日; 发布日期: 2026年3月16日

摘要

针对高密度滨海城市内涝风险防控需求,以上海市北外滩核心区(面积0.84 km²)为研究对象,基于SWMM模型构建研究区域排水系统模型,设置10a一遇、20a一遇2 h设计暴雨情景,系统研究调蓄池不同启用时刻(0~60 min, 步长6 min)与排水泵站不同启动时刻(60、75、90、105 min)的组合调控效果,定量评估调蓄设施对地表径流峰值与溢流风险的削减能力。结果表明:调蓄池启用时刻对雨洪调控效果影响显著,10a一遇与20a一遇情景下,调蓄池于降雨开始后48 min启用时峰值流量削峰效果最优,削减率分别为21.60%和15.14%;于30 min与36 min启用时溢流节点数量削减率最为显著,分别为40.68%和44.78%,启用时刻晚于雨峰则调控效果迅速衰减。排水泵站启动时间需与调蓄池运行协同,90 min与105 min延迟启动可延长调蓄容积有效利用时段,避免后期流量回升;在统一调度规则下,调蓄池群存在“上游池满、下游池闲”的空间分配失衡问题,需采用精细化调度策略。本研究通过参数化模拟验证了“源头消峰-过程蓄滞-末端有序排放”模式在高密度城区的适用性,可为同类滨海高密度城市排水防涝系统优化调度提供技术支撑与决策依据。

关键词

SWMM, 调蓄池, 排水泵站, 运行策略, 雨洪调控, 内涝防治

Study on Rainwater and Flood Regulation Efficiency and Operation Parameter Optimization of Storage Facilities in High-Density Urban Areas

Hu Zhang*, Simin Jiang, Chang Liu

Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai

*通讯作者。

文章引用: 张虎, 江思珉, 刘畅. 高密度城区调蓄设施雨洪调控效能及运行参数优化研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(3): 368-382. DOI: 10.12677/ag.2026.163034

Abstract

Aiming at waterlogging risk prevention in high-density coastal cities, this study takes the core area of North Bund in Shanghai (0.84 km²) as the research object, establishes a drainage system model based on SWMM, and sets two 2-hour design storm scenarios (10-year and 20-year return periods). It systematically studies the combined regulation effects of different storage tank activation times (0~60 min, 6 min interval) and drainage pumping station startup times (60, 75, 90, 105 min), quantitatively evaluating the reduction capacity of storage facilities on surface runoff peak and overflow risk. Results show that storage tank activation time significantly affects stormwater regulation. Under 10-year and 20-year return period storms, the optimal peak flow reduction (21.60% and 15.14%, respectively) is achieved when activated at 48 min after rainfall onset; the most significant reduction in overflow nodes (40.68% and 44.78%, respectively) occurs at 30 min and 36 min activation, with rapid effect attenuation if activated after the rainfall peak. Coordination between pumping station startup and storage tank operation is essential: delayed startup at 90 min and 105 min prolongs effective storage utilization and avoids late-stage flow rebound. A spatial imbalance (“full upstream tanks, idle downstream tanks”) exists in the storage tank group under unified scheduling, requiring refined strategies. This study verifies the applicability of the “peak reduction at source-storage in process-ordered discharge at terminal” mode in high-density urban areas, providing technical support for optimal scheduling of drainage and waterlogging control systems in similar coastal cities.

Keywords

SWMM, Storage Tank, Drainage Pump Station, Operation Strategy, Rainwater and Flood Regulation, Waterlogging Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

全球气候变化与城市化进程的叠加显著加剧了城市内涝的防控压力与治理难度[1] [2]。据《2025 年全球气候状况报告》，2023~2025 年为有记录以来最热三年，气候系统失衡导致极端天气频发，全球变暖提升了大气持水能力，直接引发强降雨事件在频率、强度和持续时间上的三维增长[3]。2025 年我国区域性暴雨呈现北方异常偏强、华西秋雨极端、南方前汛期偏弱、局地极端性突出的格局，全年共发生 43 次区域暴雨过程，全国平均降水量 668.0 mm，较常年偏多 4.5%，且暴雨引发的山洪、滑坡等次生灾害增多，灾害影响范围呈持续扩张态势[4]。与此同时，大规模城市扩张导致不透水地面(道路、建筑等)比例激增，自然调蓄水体萎缩，加剧了地表径流速度与总量。现有排水系统设计标准与极端降雨强度存在显著错配，叠加城市扩张带来的管网负荷压力，导致内涝风险呈现系统性升级。

在此背景下，调蓄池作为城市韧性水管理的关键设施，通过时空错峰调控机制展现出独特优势。其核心功能体现为暴雨期间暂存过量雨水，平抑洪峰流量，为排水系统争取关键缓冲时间[5] [6]。广州的地下调蓄池案例展示了调蓄池在应对短时强降雨中的有效性，不仅缓解了内涝，还优化了雨水的储存和排放[7] [8]。当前调蓄池的效能优化聚焦于三维度协同：容积配置需匹配流域水文特征，选址布局应遵循风险梯度分布，调度管理则强调动态响应能力。研究显示，基于 SWMM 模型的参数化设计可有效优化调蓄

池的规模和布局[9], 而融合博弈论与灰色关联分析的选址优化方案, 结合内涝风险评估, 使调蓄池的设置更具科学性[10][11]。在实际应用中, 如机场和重要公共设施的调蓄池设计, 不仅降低了暴雨中的内涝风险, 还增强了排水系统的整体效能[12]。针对调蓄池调度响应滞后、多池协同性不足的问题, 与机器学习方法结合能实现调蓄池开启时机的快速精准预判, 为防汛应急调度提供高效技术支撑[13]; 通过优化多座调蓄池的协同运行策略, 结合降雨强度与空间区位差异制定差异化规则, 显著提升了地表积水削减效果, 验证了调蓄系统运行优化的实践价值[14]。

作为典型高密度滨海城市, 上海的内涝脆弱性呈现多维叠加效应: 地理区位上濒临长江入海口且地势低平, 气候系统受亚热带季风影响显著, 叠加超大城市地表硬化特征, 形成复合型水文风险格局。2024年秋季双台风事件期间, 中心城区出现极端短时强降水, 引发多点严重内涝, 暴露出排水系统在应对超标准暴雨时的能力瓶颈[15]。现有以管网扩容为主的工程措施虽提升了排水效率, 但受限于调蓄空间不足, 在雨洪峰值调控方面仍存在显著短板。

本研究聚焦上海市中心城区北外滩片区排水系统, 系统评估调蓄设施在高密度建成区的雨洪调控效能与作用机制。研究基于多重重现期暴雨情景与多历时降雨过程耦合模拟, 构建调蓄池群与管网系统的水力模型, 解析调蓄池在不同运行策略下对系统排水能力的差异化影响。通过定量评估调蓄设施在极端降雨事件中的防灾效能, 研究旨在揭示调蓄设施运行方式与排水系统韧性之间的非线性关系, 为高密度城市排水防涝体系的运行优化提供决策依据。研究成果可为滨海特大型城市内涝防治的工程实践提供技术参考, 也为复杂城市水文系统的适应性管理提供理论支撑。

2. 研究区域

2.1. 研究区域概况

研究区域位于上海市虹口区南部北外滩核心区, 其范围为由周家嘴路 - 公平路 - 唐山路 - 海门路 - 东大名路 - 旅顺路 - 东汉阳路 - 商丘路围合而成的区域, 总占地面积约 0.84 km²。核心区各用地类型占比分别为公共设施用地 45.6%、绿化用地 10.5%、居住用地 11.7%、道路广场用地 28.1%、其他用地 4.1% (合计 100%)。研究区域地理位置及范围见图 1。

上海地处长江三角洲, 地势平坦, 研究区域内地面标高一般为 2.7~3.5 m (上海吴淞高程) 之间。由于地形低平且坡度较小, 区域内雨水需通过排水泵站提升后方可排入河道, 最终汇入黄浦江。上海市属亚热带季风气候, 夏秋季节台风过境频繁, 年均 1.5 次; 多年平均降雨量 1144 mm, 最大年降雨量 1673.4 mm, 最小年降雨量 708.2 mm, 区域气候特征为易涝少旱。

作为北外滩片区的核心滨水区域, 该片区兼具高密度建成区与滨江地带的双重特征, 下垫面硬化率高、水文汇流条件复杂, 且受黄浦江潮汐顶托与台风暴雨的双重影响, 雨洪调蓄与排水防涝压力突出, 是上海市中心城区内涝防治的关键区域。目前该区域已规划配套基础调蓄设施, 针对核心区特有的地理水文与城市建设特征, 适配该区域的调蓄设施运行调度策略仍缺乏系统性的模拟论证, 难以精准支撑后续规划设施落地后的雨洪调控实践。基于此, 本文以该核心区为研究对象, 聚焦调蓄设施运行调度策略开展专项研究, 通过数值模拟解析不同调度方案下的雨洪调控效能, 为该区域规划调蓄设施落地后的科学运行及同类高密度滨江城区调蓄系统的调度优化提供实证参考与技术支撑。

2.2. 调蓄设施方案

依据《上海市雨水调蓄设施规划建设导则(试行)》要求(2020年8月), 北外滩地区针对新建地块实施不低于 120 m³/ha 的雨水调蓄能力配置, 构建起“源头消峰 - 过程蓄滞 - 末端排放”的现代化排水体系。

为应对城镇化进程中雨水径流量增长带来的排水压力，通过绿地、广场及公共建筑地下空间布局集约化调蓄设施，既保障运营维护便利性，又实现与地下空间开发的高效协同。



Figure 1. The geographical location and scope of the study area

图 1. 研究区域地理位置及范围

依据《北外滩区域排水系统规划(2020~2035)》，结合核心区内新建公共绿地、广场、公建等地块，确定北外滩地区提标调蓄设施分布方案。调蓄设施具体参数及服务范围可见表 1 与图 2。

Table 1. Effective volume for upgraded storage facilities

表 1. 提标调蓄设施有效容积

序号	地块属性	所属地块占地面积(ha)	服务面积(ha)	占地面积(m ²)		有效容积(m ³)
				下层	上层	
1	公共绿地	2.2	17.1	900	150	2100
2	商业用地	3.3	5.6	330	70	700
3	公共绿地	1.8	9.0	450	80	1100
4	公共绿地	0.3	6.9	350	70	840
5	公共绿地	1.0	6.3	330	70	770
6	公共绿地	0.4	4.7	240	60	580
总计						6090

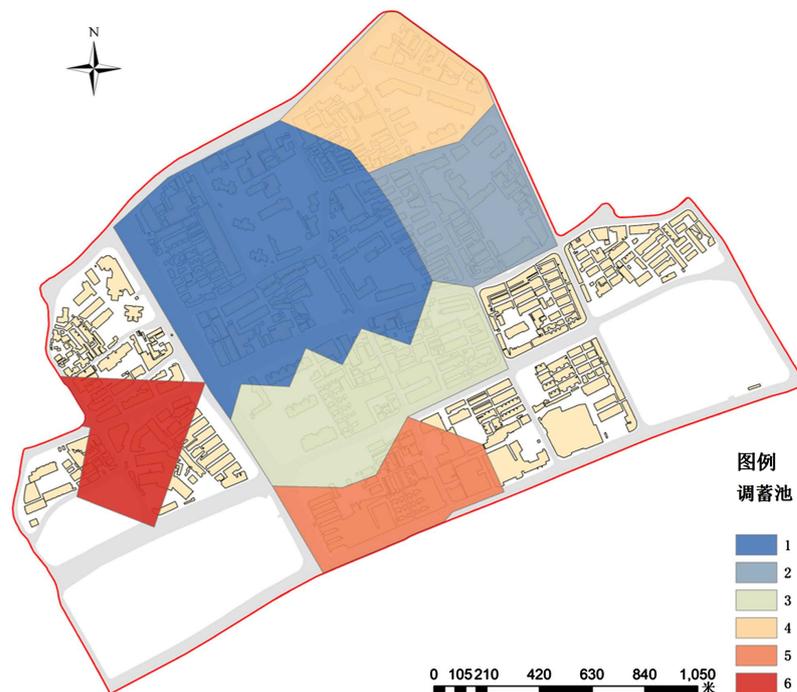


Figure 2. The service scope of storage facilities
图 2. 调蓄设施服务范围

3. 模型构建与情景设置

本研究基于 SWMM 模型，针对上海市北外滩核心区的排水系统进行优化模拟分析。研究区域面积为 0.84 km²，聚焦于高密度城区内涝问题的关键区域。研究采用了调蓄池、泵站等设施，通过对不同调度策略的优化，评估其对内涝风险的削减效果。模拟情景包括重现期为 10a 一遇和 20a 一遇的 2 h 设计降雨，在此基础上设置调蓄池与泵站的多组差异化联合调度情景。本研究通过这些模拟情景，分析调蓄池和泵站在不同暴雨条件下的雨洪调蓄效果，旨在为高密度城市区域的排水系统优化提供决策支持。

3.1. 模型基础框架

本研究基于前期构建的 SWMM 数值模型框架[16]，按照排水管网拓扑、道路边界及地块汇水特征将研究区域划分为 1288 个汇水分区，针对上海市北外滩核心区的排水系统进行优化模拟。与原有研究不同，本研究选择北外滩核心区作为研究区域，进行缩小区域模拟，研究区域为前期已发表研究核心子区域，下垫面特征、管网拓扑、水文汇流规律与原研究区域高度一致，且缩区过程未改变排水系统的核心水力特性，因此模型关键参数直接沿用前期率定结果[16]。此举主要基于以下两方面考虑：

(1) 典型性与应用价值：核心区作为高密度、高硬化率的城市关键区域，其排水系统复杂、内涝风险突出，雨洪汇流与排水响应特征具有较强代表性。选择该区域作为研究对象，可精准匹配调蓄设施针对排水瓶颈区域的优化需求，有效评估设施在极端降雨下的实际效能。

(2) 研究可行性与精度保障：聚焦核心区可有效规避全区域模拟中的冗余计算与复杂干扰，依托其集中分布的管网、调蓄设施及典型降雨响应特征，能够显著提升模拟精度与结果的可操作性。

在水文模拟中，本研究采用 Horton 入渗模型计算降雨产流；水力模拟采用动态波法求解圣维南方程，以模拟管网水流运动过程。该模型框架已通过 2020 年 7 月 7 日和 2021 年 7 月 25 日两场实测暴雨资料验证，纳什效率系数均大于 0.8；此外，在 2024 年 9 月 20 日强降雨事件模拟中，二维积水结果与实际内涝

范围高度吻合,充分验证了模型的合理性与可靠性[16]。本研究基于该模型,结合研究区域调蓄设施配置方案与排水调度策略,开展调度优化模拟与分析。研究区域排水系统概况见图3。



Figure 3. Overview of the drainage system in the study area
图3. 研究区域排水系统概况

3.2. 调蓄设施集成

结合北外滩核心区排水系统特征,本研究采用模块化建模方法,构建水文水动力耦合模型。在保留研究区域现有排水管网模型结构的基础上,具体实施步骤如下:

(1) 模型拓扑重构

依据表1提标调蓄设施有效容积统计结果,在SWMM模型中构建分布式调蓄设施单元。各调蓄单元采用TABULAR型调蓄曲线进行参数化表征,蓄水-排水动态过程通过离散时间序列实现;相关参数依据《雨水调蓄设施技术标准》(DG/TJ 08-2432-2023)及SWMM 5.1用户手册推荐值进行校核。

(2) 水力连接构建

为实现调蓄设施与排水系统的有效衔接,模型通过孔口连接建立管网节点与调蓄设施之间的水力联系。孔口参数基于经验取值,并保证满足设计重现期下的过流能力。结合地下空间布局约束,采用泵站控制规则与泵特性曲线模拟泵站提升运行过程。通过排水泵站,调蓄设施可将存蓄雨水经管网输送至下游排放节点,保障排水系统运行的连续性与高效性。调蓄池与排水系统的水力连接见图4。

3.3. 情景设置

3.3.1. 降雨情景设置

依据上海市地方标准《暴雨强度公式与设计雨型标准》(DB31/T 1043-2017),结合研究区域高密度建成区雨洪汇流特征,确定本次模拟的设计降雨条件。为精准模拟极端降雨下排水系统及调蓄设施的运行响应,本次研究采用芝加哥雨型构建设计暴雨情景,该雨型能够较好地拟合上海市暴雨时空分布特征,

适配高密度城区短历时、高强度的降雨规律。模拟共设置两种重现期设计降雨，分别为 10a 一遇、20a 一遇，统一设定降雨历时为 2 h，时间步长为 1 min，雨峰系数为 0.4，雨峰时刻为 48 min，确保降雨数据的精细化程度满足调蓄设施调度模拟需求，为后续不同调度情景下的雨洪调控效能分析提供可靠的水文驱动条件。设计降雨见图 5。

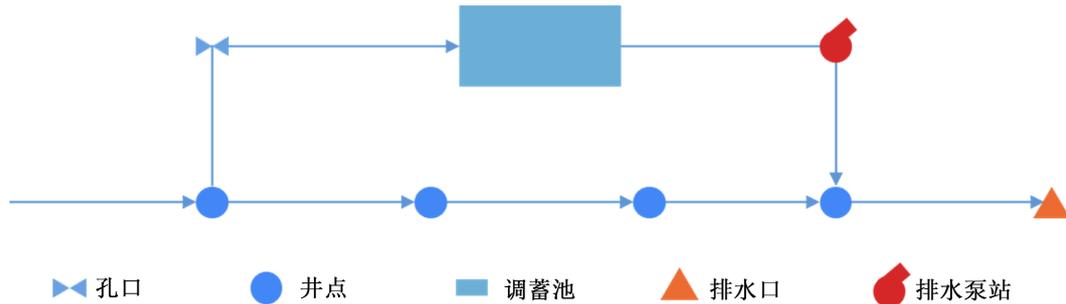


Figure 4. Schematic diagram of hydraulic connection between storage unit and drainage system
图 4. 调蓄池与排水系统水力连接示意图

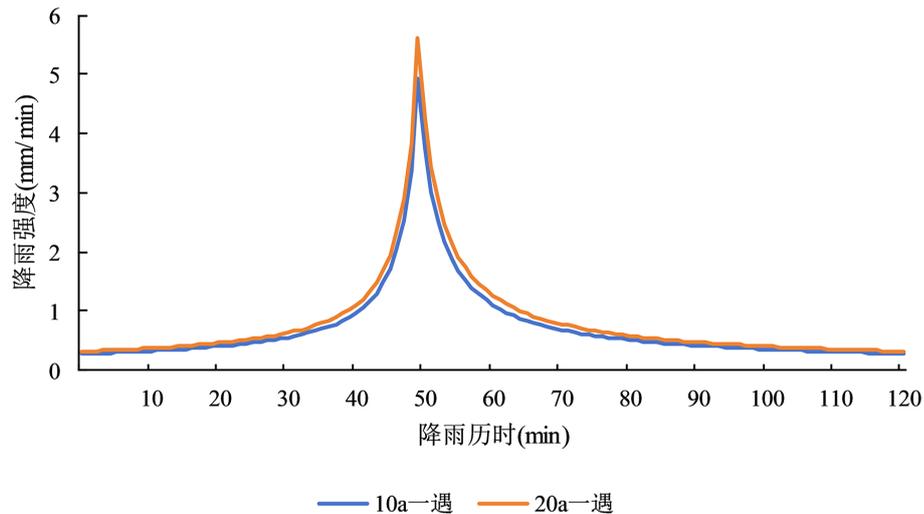


Figure 5. Short-duration rainfall scenarios with different return periods
图 5. 不同重现期短历时降雨情景

3.3.2. 调蓄池与排水泵站运行设置

为模拟暴雨情景下排水系统的实际调度过程，明确不同调度策略对雨洪调控的影响，本研究基于研究区域排水系统特征及调蓄设施设计参数，设定调蓄池与泵站的运行控制规则。其中，调蓄池启用时刻与泵站启动时刻作为调控核心参数，直接影响内涝缓解效果与排水系统运行稳定性，具体运行规则设定如下：

(1) 调蓄池运行规则

启用时刻控制：调蓄池启用时刻分别设置为降雨开始后 0 min、6 min、……、54 min、60 min，通过设置多组不同启用时间节点，模拟差异化排水调度策略，进而评估不同调度模式在不同降雨强度下的雨洪削峰效能。

水位动态控制：当调蓄池水位升至预设控制水深(0.9 H，其中 H 为调蓄池最大设计深度)时，通过孔口开度调节实现水位保护；当水位接近最大设计水位时，进一步限制入流流量，避免调蓄池满池溢流，

确保设施始终处于安全运行区间。

(2) 排水泵站运行规则

启用时刻控制：排水泵站启动时刻设定为降雨开始后 60 min、75 min、90 min、105 min，通过设置不同启动时间节点，模拟泵站差异化启动策略，分析其对排水系统运行稳定性的影响。

启停与流量控制：泵站采用水位 - 流量联合控制模式，即当调蓄池或管网内雨水积聚至预设水位阈值时，自动启动泵站排水；当水位降至安全阈值以下时，泵站自动停止运行。泵站排水流量依据预设泵特性曲线确定，并结合下游排水管网实际承载能力，动态调整排放流量，避免管网超负荷运行。

下游顶托保护控制：考虑到泵站启动时下游节点水位过高可能引发雨水回流、泵站负荷过载等问题，设置下游顶托保护机制。当监测到下游节点水位超出安全阈值时，自动限制泵站启动，防止下游节点发生溢流，保障排水系统整体协同稳定运行。调蓄池与泵站运行规则见表 2。

Table 2. Operation rules of storage units and pumps

表 2. 调蓄池与泵站运行规则

设施	运行参数	设置值
调蓄池	启用时刻(min)	0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60
	水位控制	0.9H
	满池保护	水位达到最大水位时，孔口开度调整为 0.1
排水泵站	启动时刻(min)	60, 75, 90, 105
	控制规则	根据水位和流量动态启停
	下游顶托保护	当下游水位过高时限制泵站启用

4. 结果与讨论

本研究以调蓄池启用时刻、排水泵站启动时刻为调控变量，采用枚举法开展全组合系统化优化分析，基于离散模拟结果量化提炼“雨峰蓄水、峰后排水”的核心调度逻辑，明确不同重现期下的最优调度策略区间，实现从参数扫描到优化决策的升级。

4.1. 调蓄池启用时刻对排水口排水量削峰效果的影响

图 6 展示了不同重现期降雨及泵站 90 min 启动下调蓄池不同启用时刻对排水口排水过程的影响。在两种重现期情景中，未调蓄情景与调蓄池不同启用时刻(0 min、6 min、12 min、24 min)下的排水量曲线趋势存在明显差异。由于降雨前 24 min 累计雨量较小，0 min 至 24 min 启用调蓄池的排水量曲线基本重合，表明在降雨初期阶段，调蓄池启用时刻对排水口峰值流量的削峰作用影响较小。

表 3 给出了 10a 一遇和 20a 一遇情景下，调蓄前与调蓄池在模拟开始启用时排水口峰值流量的对比结果。在 10a 一遇情景中，调蓄池启用后排水口峰值流量由 17.4279 m³/s 降至 14.6913 m³/s，削峰率为 15.70%；在 20a 一遇情景中，峰值流量由 19.2245 m³/s 降至 17.3017 m³/s，削峰率为 10.00%。上述结果表明，调蓄池的启用可有效缓解排水系统的峰值排水压力，验证了其削峰减载功能。

图 7、图 8 分别为 10a 一遇、20a 一遇设计降雨情景下，调蓄池不同启用时刻排水口排水量过程曲线。由图 7(a)~(d)及图 8(a)~(d)可见，在雨峰前至雨峰时刻启用调蓄设施(30 min、36 min、42 min、48 min)，可有效削减排水口峰值流量。结合表 4 可以看出，10a 一遇情景下上述时刻对应的削峰率分别为 15.65%、16.42%、17.84%和 21.60%，20a 一遇情景下削峰率分别为 10.19%、10.77%、11.76%和 15.14%，均处于较

高水平。调蓄池启用后，排水口流量开始低于未调蓄情景，峰值流量也明显降低，表明在雨峰前至雨峰时刻及时启用调蓄池，可在降雨强度较大阶段有效蓄存雨水，从而减轻排水管网的瞬时负荷。排水泵站启动后，排水口排水量逐步回升并形成第二个流量峰值，该峰值明显低于主峰值；在主峰值过后，调蓄池通过滞后排放策略逐步释放存蓄雨水，可有效平抑排水系统流量过程，避免管网受到剧烈冲击。

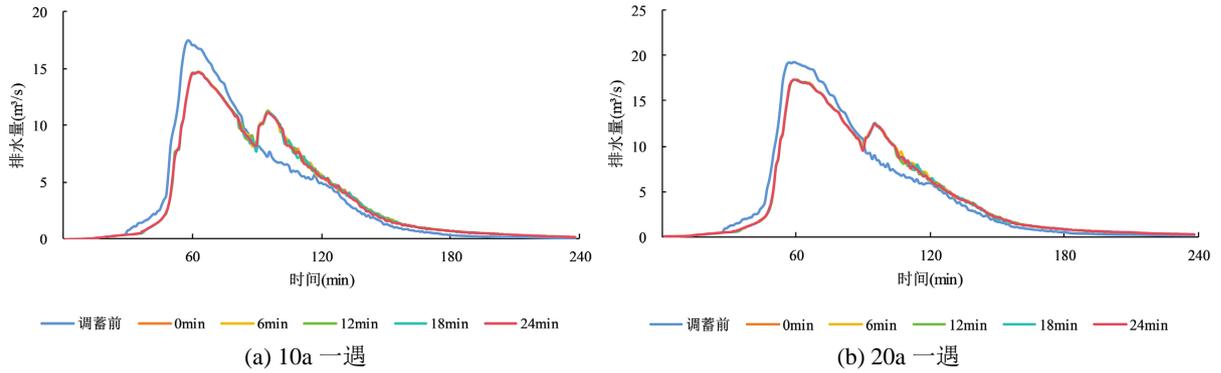
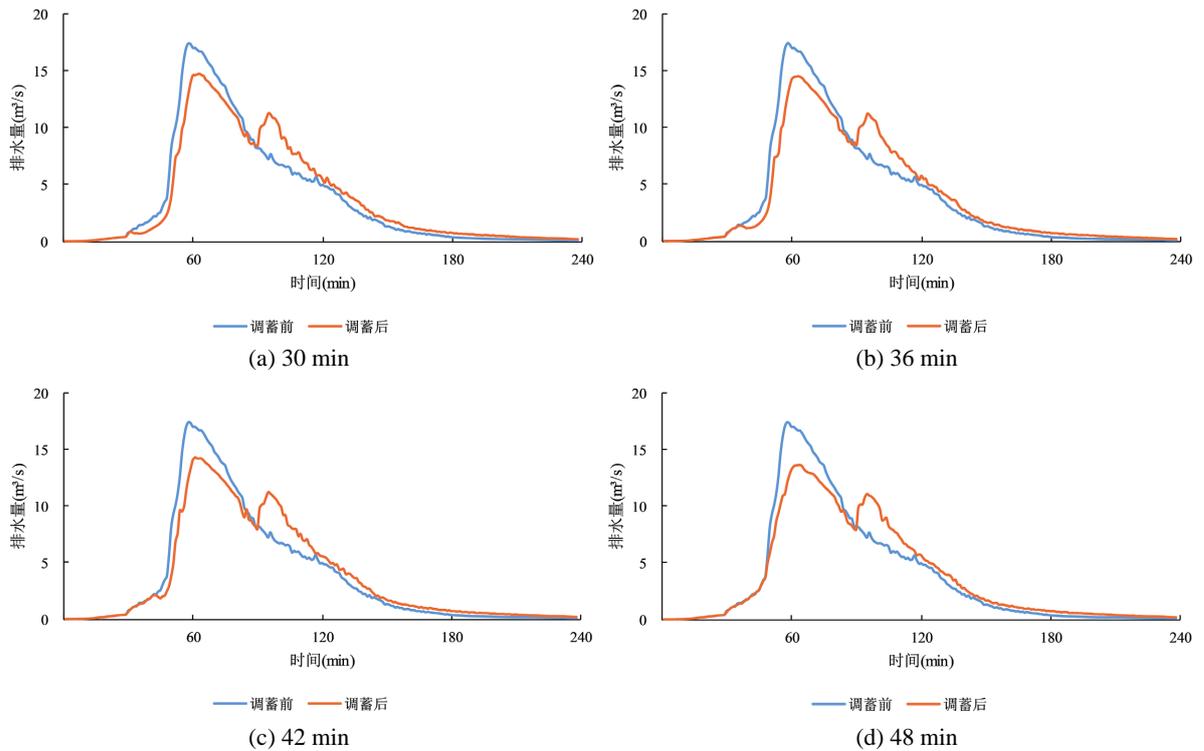


Figure 6. Outlet flow process under different short-duration design rainfalls
图 6. 不同短历时设计暴雨下排水口排水量过程

Table 3. Outlet peak flow with/without storage units under different short-duration rainfalls
表 3. 不同短历时设计暴雨下调蓄池启用与否排水口峰值流量对比

重现期	10a 一遇				20a 一遇				
	模式	调蓄前	调蓄后	削减量	削减率	调蓄前	调蓄后	削减量	削减率
峰值流量(m ³ /s)		17.4279	14.6913	2.7366	15.70%	19.2245	17.3017	1.9228	10.00%



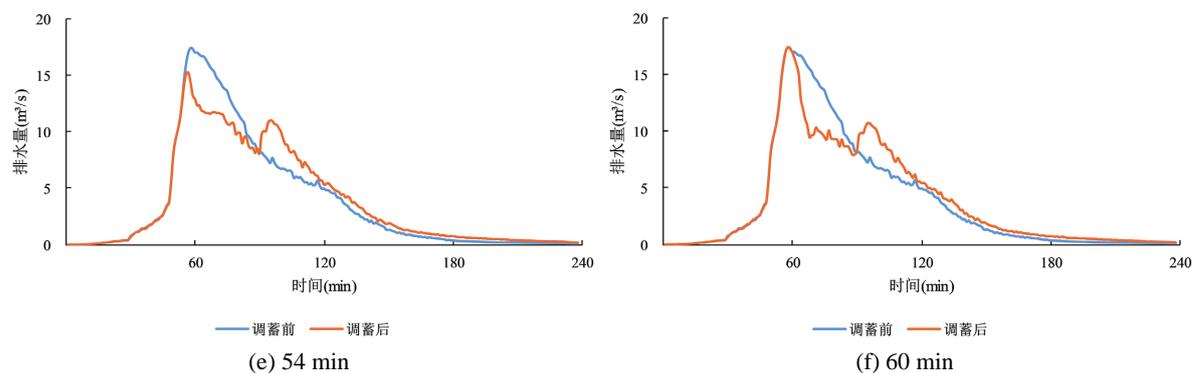


Figure 7. Outlet flow process under different startup times of storage units for 10-year design rainfall
图 7. 10a 一遇调蓄池不同起调时间下排水口排水量过程

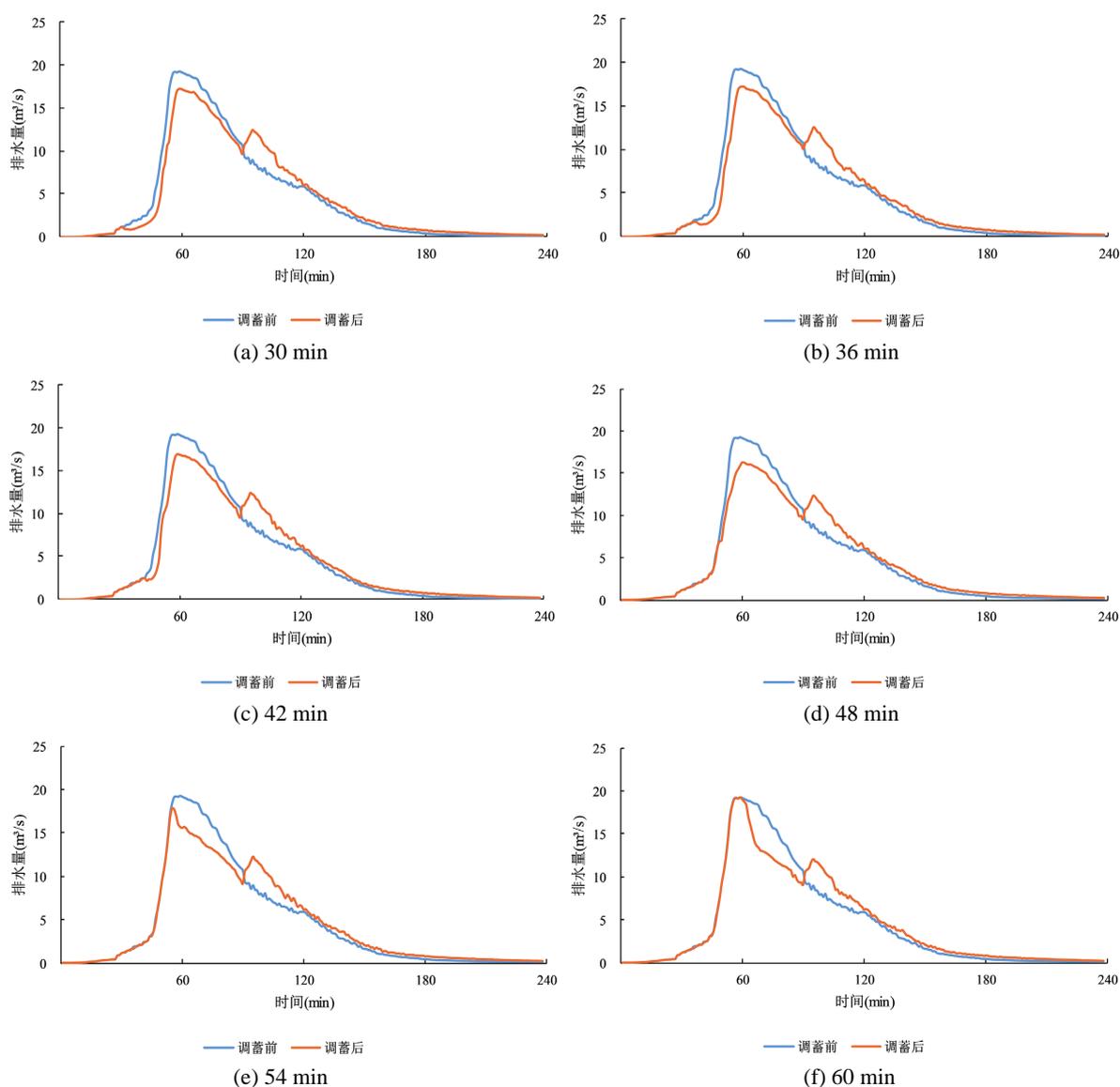


Figure 8. Outlet flow process under different startup times of storage units for 20-year design rainfall
图 8. 20a 一遇调蓄池不同起调时间下排水口排水量

Table 4. Peak discharge and peak deduction rate of outlet for different storage unit starting times
表 4. 调蓄池不同启用时刻下排水口峰值流量与削峰率

重现期	指标	30 min	36 min	42 min	48 min	54 min	60 min
10a 一遇	峰值流量(m ³ /s)	14.7000	14.5663	14.3185	13.6642	15.1652	17.4118
	削峰率(%)	15.65	16.42	17.84	21.60	12.98	0.09
20a 一遇	峰值流量(m ³ /s)	17.2653	17.1545	16.9633	16.3141	17.8288	19.2106
	削峰率(%)	10.19	10.77	11.76	15.14	7.26	0.07

由图 7(e), 图 7(f)及图 8(e), 图 8(f)可见, 当调蓄池启用时间晚于雨峰时刻后, 其调蓄作用难以充分发挥。调蓄池在 54 min、60 min 启用时, 调蓄池对排水口峰值流量的削峰作用逐步减弱, 甚至接近消失。由表 4 可知, 10a 一遇情景下 54 min、60 min 启用时削峰率仅为 12.98%和 0.09%, 20a 一遇情景下仅为 7.26%和 0.07%, 削峰效果大幅衰减。具体表现为: 排水口流量虽在启用后得到一定程度削减, 但削峰率显著下降, 且峰值出现时间较雨峰前启用情景有所提前。雨峰后启用调蓄池会直接削弱其流量调控效果, 尤其在高强度降雨条件下, 延迟启用会导致调蓄池对排水口流量的削减能力明显不足。对于容量有限的调蓄设施, 在雨峰前及时启用尤为关键, 可有效削减峰值流量, 避免管网超负荷运行。

4.2. 调蓄池启用时刻对溢流节点削减效果的影响

图 9 展示了 10a 一遇和 20a 一遇设计降雨情景下, 调蓄池不同启用时刻研究区域节点溢流情况。在雨峰及雨峰前及时启用调蓄池, 可有效削减研究区域内的溢流节点数量。具体而言, 在 10a 一遇情景中, 30 min 启用调蓄池时溢流节点削减率达到峰值, 为 40.68%; 随着启用时刻延后, 削减率逐步降低, 雨峰时刻(48 min)启用时削减率为 32.20%。在 20a 一遇情景中, 36 min 启用时削减率最高, 达 44.78%, 雨峰前启用的削减率均保持在 41%以上。这表明, 在雨峰前及时启用调蓄池, 可有效减轻排水系统的瞬时压力, 从而缓解内涝风险。

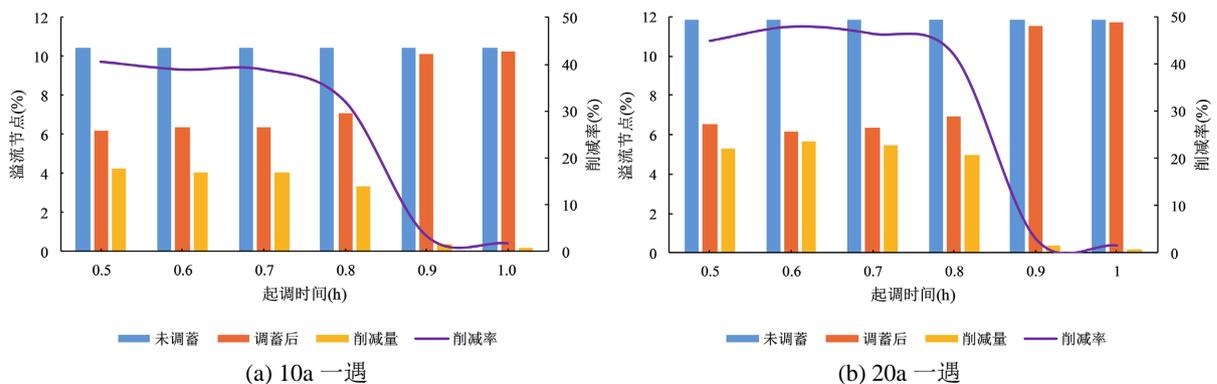


Figure 9. Effects of storage unit startup time on node overflow
图 9. 调蓄池启用时刻对节点溢流的影响

然而, 随着调蓄池启用时刻的延迟, 其对溢流节点数量的削减作用显著减弱。在 10a 一遇情景中, 54 min 启用时削减率骤降至 3.39%, 60 min 启用时仅为 1.69%; 在 20a 一遇情景中, 54 min 和 60 min 启用时的削减率分别为 2.99%和 1.49%。延迟启用调蓄池会显著削弱其调蓄效能, 既无法有效减轻排水系统压力, 也难以缓解内涝风险。

4.3. 排水泵站启动时刻对排水口排水过程的影响

图 10、图 11 分别为 10a 一遇、20a 一遇设计降雨情景下，调蓄池于 48 min 启用时，排水泵站在 60 min、75 min、90 min、105 min 启动对应的排水口排水量过程曲线。由图 10(a)、图 11(a)可见，在泵站 60 min 启动情景下，尽管调蓄池于 48 min 启用可削减部分排水流量，但由于泵站启动过早，调蓄池尚未完全蓄满即开始排水，导致排水口流量持续回升，峰值流量略有降低，峰现时间略微后移。这表明，过早启动泵站会导致调蓄池的储水能力未被充分利用，从而削弱其削峰效能。

由图 10(b)、图 11(b)可见，在泵站 75 min 启动情景下，调蓄池启用 27 min 后泵站开始排水，调蓄作用显著，排水口峰值流量明显降低。但随着泵站启动，调蓄池内存水逐步排放，排水流量回升并形成第二个峰值，该峰值由调蓄池排水引发，虽仍低于未调蓄状态，但可能导致排水系统压力再次升高。

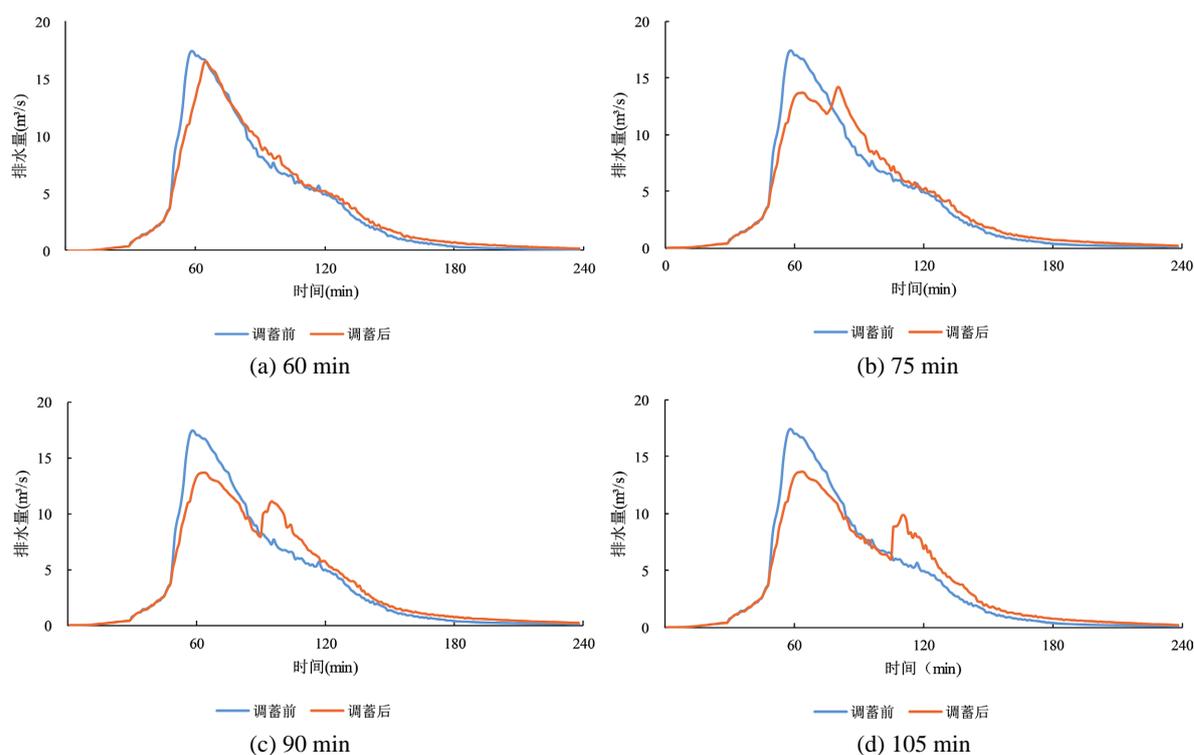
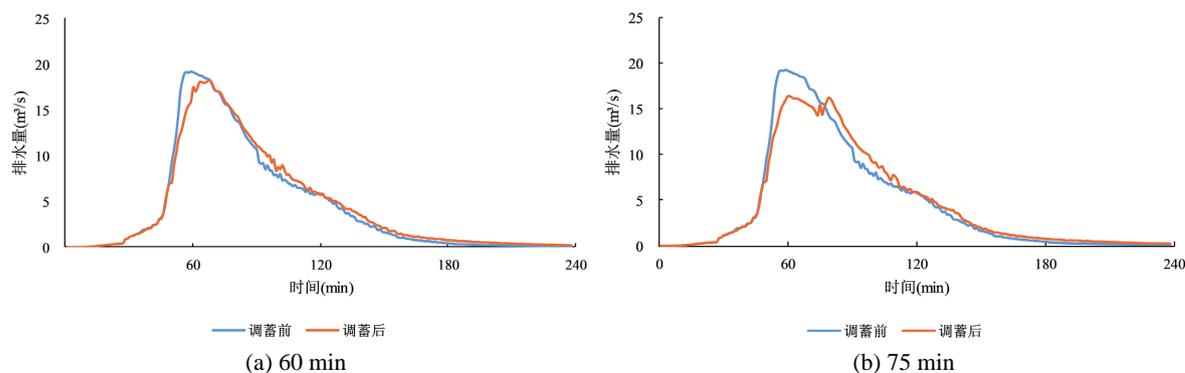


Figure 10. Outlet flow process under different startup times of drainage pumps for 10-year design rainfall

图 10. 10a 一遇排水泵站不同启动时间下的排水口排水量过程



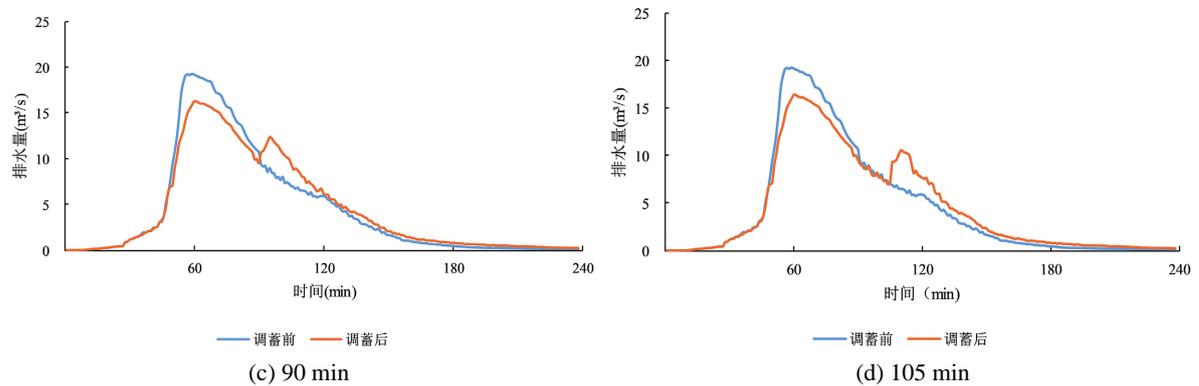


Figure 11. Outlet flow process under different startup times of drainage pumps for 20-year design rainfall
图 11. 20a 一遇排水泵站不同启动时间下的排水口排水量过程

由图 10(c), 图 10(d)及图 11(c), 图 11(d)可见, 在泵站 90 min 和 105 min 启动情景下, 调蓄池启用后储水时间更长, 排水系统的排水能力得到一定恢复, 泵站启动后的流量回升幅度显著降低, 第二个峰值明显低于主峰值; 且 105 min 启动情景下的第二个峰值低于 90 min 启动情景。通过延迟排放调蓄池内存水, 可有效降低后期排水反弹流量, 有助于排水系统恢复稳定。

4.4. 排水泵站启动时刻对调蓄池利用率的影响

图 12 展示了 20a 一遇设计降雨下, 调蓄池 48 min 启用时, 排水泵站不同启动时刻下部分调蓄池的水深变化过程。各情景下调蓄池启用后水深均快速上升, 说明 48 min 启用可有效实现雨峰期蓄水, 而排水时间对水深峰值维持时长影响显著: 泵站 60 min 过早启动时, 水深峰值维持不足 10 min 即快速回落, 调蓄容积未被充分利用; 90 min、105 min 延迟启动时, 峰值维持时长均超 30 min, 调蓄资源利用效率显著提升。以 105 min 启动情景为例, 3、6 号调蓄池容积利用率分别达 92.16%、90.36%, 印证了延迟排水对提升调蓄池利用率的显著作用。

排水时间直接决定调蓄池储水时长与削峰效能: 泵站 60 min 启动时, 调蓄池储水时间极短, 削峰作用难以发挥; 75 min 启动时储水时间仍较短, 易引发后期流量反弹, 削峰效果有限; 90 min、105 min 延迟启动时, 调蓄池水深在峰值附近维持更久, 储水时间充足, 既保障了削峰效果, 又为排水系统应对后期汇流提供有效缓冲, 提升了系统运行稳定性。

值得注意的是, 5 号调蓄池水深峰值显著低于 3 号、6 号池, 存在容积利用不足的问题, 这与调蓄池空间布局及统一调度规则密切相关。5 号池位于排水系统下游, 上游调蓄池优先承接蓄积雨水, 导致其汇水量大幅减少, 形成“上游池满、下游池闲”的空间分配失衡; 同时本研究中 1~6 号调蓄池采用统一的运行控制规则, 未结合各池管网位置、汇水范围的差异设置差异化调控逻辑, 统一的起调与排水时间无法匹配下游池来水滞后的特征, 进一步加剧了容积利用失衡。这表明高密度城区调蓄池群调控不能采用“一刀切”的统一规则, 需结合各池空间区位、汇水负荷等特征制定精细化控制策略。

结合调蓄池群上游高利用率、下游低利用率的量化失衡特征, 可将容积利用率超 80%为无失衡, 60%~80%为轻度失衡, 小于 60%为重度失衡。针对性制定分池差异化运行规则: 上游无失衡池维持原有调度规则并适度提高排水阈值, 充分发挥蓄水能力; 中游轻度失衡池提前 5~10 min 启用, 适配中等成都汇水特征, 蓄水窗口提前; 下游重度失衡池大幅提前 15~20 min 启用, 最大化匹配其严重滞后汇水规律。该差异化调度规则为解决高密度城区调蓄池群空间分配失衡问题提供了可执行的思路, 后续可通过针对性模拟验证其调控效能, 进一步优化规则参数并推广应用。

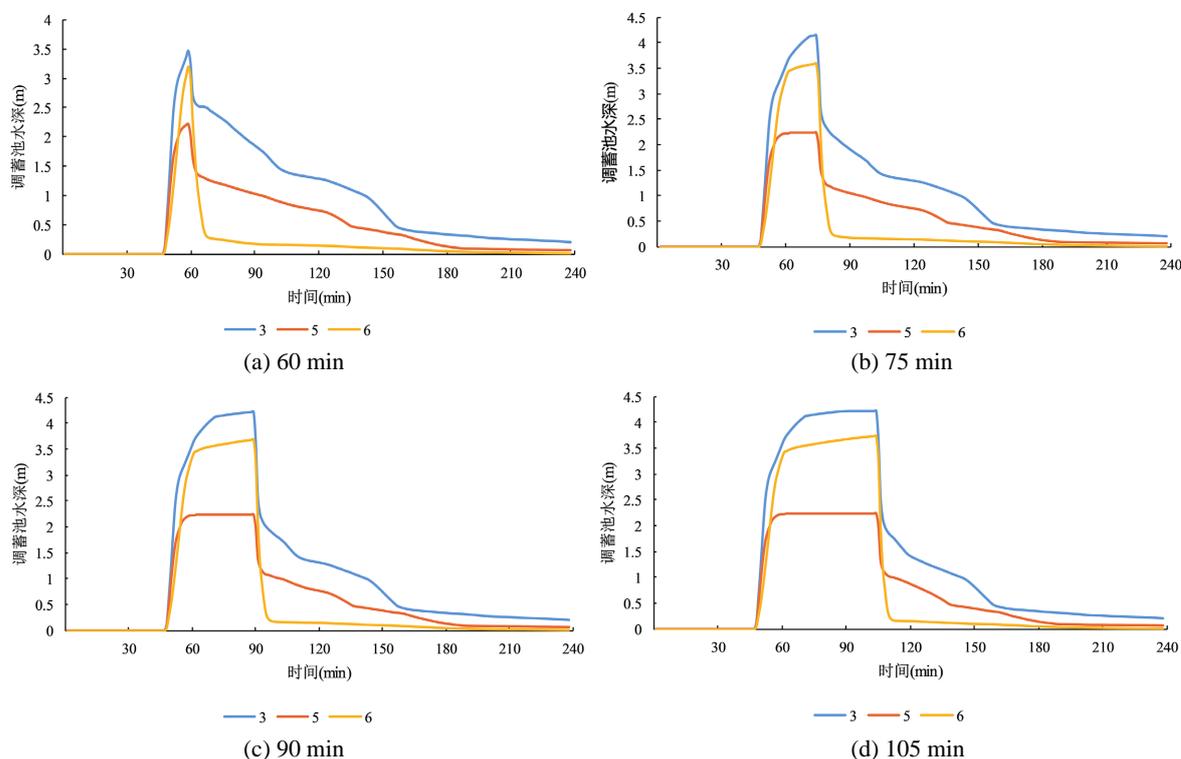


Figure 12. Variation of water depth in storage units under different drainage times for the 20-year design rainfall with activation at 48 min

图 12. 20a 一遇暴雨调蓄池 48 min 启用时不同排水时间下调蓄池水深变化过程

5. 结语

在全球气候变化与城市化快速推进的背景下，城市内涝问题愈发突出，高密度滨海城区排水防涝系统面临严峻考验。本文以上海市北外滩核心区为研究对象，基于 SWMM 模型构建排水系统模型，设置 10a、20a 一遇 2 h 设计降雨情景，系统研究调蓄池与排水泵站不同启动时刻的组合运行策略，定量分析其对排水口流量、峰值削减、节点溢流及调蓄设施利用率的影响，揭示二者联合运行的雨洪调控机制，为高密度城区排水防涝系统优化调度提供理论依据与技术支持。主要研究结论如下：

(1) 调蓄池启用时刻对雨洪调控效果影响显著，雨峰前至雨峰时刻启用可充分发挥削峰与溢流削减作用。10a、20a 一遇降雨下，调蓄池分别于 30 min、36 min 启用时溢流节点削减率最优，达 40.68%、44.78%；均于 48 min 启用时峰值流量削峰效果最佳，削峰率分别为 21.60%、15.14%，若启用时刻滞后于雨峰，调控效果将快速衰减甚至失效。

(2) 排水泵站启动时间需与调蓄池运行策略协同匹配。泵站 60 min 过早启动会造成调蓄容积利用不足、削峰效果受限；75 min 启动虽有一定削峰作用，但易引发后期流量反弹，造成管网二次承压；90 min、105 min 延迟启动可延长调蓄池蓄水时长，充分利用调蓄容积，在保障削峰效果的同时降低后期流量回升幅度，提升系统运行稳定性。

(3) 调蓄池与泵站联合系统通过“时空错峰”实现高效雨洪调控，调蓄池雨峰期蓄水、雨峰后滞后排放，可有效平抑峰值流量、减少溢流节点，验证了“源头消峰-过程蓄滞-末端有序排放”模式在高密度城区的适用性。但统一控制规则下，调蓄池群存在“上游池满、下游池闲”的空间分配失衡问题，体现出均匀布局与统一调度的局限性。

(4) 调蓄设施的调控效能依赖精细化运行策略，统一固定的调度规则难以适配不同位置调蓄池的汇

水特征,未来需结合管网拓扑、汇流时序与空间区位差异,制定分池、分时、动态的联合调度规则,提升调蓄系统整体利用效率与调控能力。

本研究仍存在一定局限:仅设置 10a、20a 一遇 2 h 设计暴雨情景,未考虑长历时、台风降雨及潮汐顶托等滨海城市复合灾害情景;未考虑管网淤积、设施老化等实际工程问题;调蓄池群采用统一控制模式,未设置分池差异化调度规则;评估仅聚焦水文水力指标,未开展技术经济综合效益分析。

未来可从多方面深化研究:拓展多情景耦合模拟,引入不同历时、重现期暴雨及潮汐顶托等边界条件;基于实测数据率定模型参数,纳入管网淤积、泵站运行特性等约束,提升模拟精度;结合空间布局与汇流时序差异,构建调蓄设施与泵站的在线监测动态调度规则;完善多维度评估体系,纳入建设成本、内涝减损效益等指标;强化工程应用,形成可推广的调蓄设施运行指南,为同类区域内涝防治提供参考。

参考文献

- [1] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [2] Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman, C.L., Wu, J., Bai, X., *et al.* (2008) Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, **319**, 756-760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- [3] World Meteorological Organization (2026) State of the Global Climate 2025. World Meteorological Organization.
- [4] 国家防灾减灾救灾委员会办公室, 应急管理部. 2025 年全国自然灾害情况[EB/OL]. https://www.mem.gov.cn:10443/xw/vjglbgzdt/202601/t20260116_592135.shtml, 2026-01-16.
- [5] 陈文龙, 张文, 吴辉明, 等. 深圳市罗湖区“9·7”极端特大暴雨防御对策与启示[J]. 中国水利, 2024(6): 53-56.
- [6] 刘琳燕, 张晓昕, 王强. 东京都暴雨应对策略经验借鉴与启示[J]. 北京规划建设, 2022(4): 24-28.
- [7] 刘海彪, 黄显. 大型雨水调蓄池工程设计与调度[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(7): 188-190.
- [8] 王坤. 全地下雨水泵站及初雨调蓄池工程设计[J]. 中国给水排水, 2024, 40(2): 82-86.
- [9] 陈丽群. 基于 SWMM 模型的雨水调蓄池优化设置研究[J]. 水利技术监督, 2023(2): 185-189.
- [10] 李红艳, 张翀, 崔建国, 等. 基于博弈论赋权耦合灰色关联分析的调蓄池优化选址[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 426-432.
- [11] 张翀, 李红艳, 崔建国, 等. 基于 AHP-GRA 的城市内涝风险评估及调蓄池选址[J]. 给水排水, 2021, 57(11): 149-154.
- [12] 罗佳杭, 刘家宏, 梅超, 等. 基于 SWMM 的机场调蓄设施在短历时暴雨过程中的响应模拟与分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(9): 36-44.
- [13] 潘鑫鑫, 侯精明, 陈光照, 等. 基于数值模拟与 BP 神经网络的城市调蓄池调度快速预报方法[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2023, 38(3): 409-420.
- [14] 李文钰, 侯精明, 李轩, 等. 基于雨洪数值模型的城市雨水调蓄池优化运行方案研究[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(5): 82-90.
- [15] 沙治银, 徐双全, 龚成刚, 等. 上海市应对 2413 号台风“贝碧嘉”和 2414 号台风“普拉桑”措施及建议[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(3): 86-88+97.
- [16] 王心舒, 江思珉, 郑茂辉, 等. 城市高密度区域排水系统优化方案模拟评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 49-56.