

基于熵权 TOPSIS 评价法的上海市应对太湖流域 超标准洪水调度策略研究

孔令婷¹, 钱真¹, 刘敏²

(1. 上海市水务规划设计研究院(上海市海洋规划设计研究院), 上海 200233;
2. 太湖流域管理局水文局(信息中心), 上海 200434)

摘要:为有效应对太湖流域超标准洪水, 统筹流域行洪和区域除涝安全, 构建了上海大陆片区域精细化河网泵闸调度水文水动力数学模型, 经暴雨洪水多情景数值模拟, 基于熵权 TOPSIS 评价法提出统筹超大城市洪涝安全的最优调度策略。研究结果表明: 当太湖流域超标准洪水与上海区域大暴雨及以下量级暴雨遭遇时, 可实施有条件的流域分洪安全调度方案, 达到洪涝统筹最优调度的目标方案。

关键词:超标准洪水; 区域暴雨; 水文水动力模型; 洪涝统筹; TOPSIS; 上海市; 太湖流域

中图分类号:P333;TV12 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)03-0055-07

Study on scheduling strategies in Shanghai City for managing over-standard floods from the Taihu Basin based on entropy-weighted TOPSIS evaluation method//KONG Lingting¹, QIAN Zhen¹, LIU Min²(1. Shanghai Water Planning and Design Research Institute (Shanghai Ocean Planning and Design Research Institute), Shanghai 200233, China; 2. Bureau of Hydrology Information Center of Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China)

Abstract: In order to effectively cope with the over-standard floods from the Taihu Basin and to coordinate the basin flooding and regional flood control safety, a hydrological and hydrodynamic mathematical model for the refined river network pump gate scheduling in the mainland region of Shanghai was constructed. Through multi-scenario numerical simulations of rainstorm and flood events, an optimal flood scheduling strategy was proposed using the entropy-weighted TOPSIS evaluation method to ensure flood safety in megacities. The results indicate that when over-standard floods in the Taihu Basin coincide with heavy or moderate rainfall events in Shanghai, a conditionally feasible basin diversion strategy can be implemented to achieve the optimal coordinated dispatching goal for both flood control and urban drainage.

Key words: over-standard floods; regional rainstorm; coupled hydrological and hydrodynamic model; coordination of flooding and waterlogging safety; TOPSIS; Shanghai City; the Taihu Basin

受全球气候变化与城市化快速发展的影响, 近年来超标准流域性洪水、区域性大暴雨等极端气象水文事件频现, 如 2021 年郑州市“7·20”特大暴雨、2023 年海河“23·7”流域性特大洪水事件等, 所引发的洪涝灾害和城市防汛安全问题持续成为研究热点, 尤其是超特大城市在面对流域外洪和城市内涝灾害链联防联控中更是出现了亟待解决的关键科学技术问题^[1-3]。张建云等^[4]在洪涝成因分析的基础上, 提出了中国城市洪涝防治的应对策略; 刘建芬等^[5]提出了工程措施和非工程措施相结合的城市防洪减灾对策; 姜仁贵等^[6]遵循以防为主的防灾减

灾救灾理念, 提出了一种集情景预估、预测预报、分级预警、应急预案和防洪预演为一体的城市暴雨洪涝灾害“五预”应对机制。以往研究或以流域为尺度关注长历时、大尺度的大洪水, 或以城市为尺度关注短历时、高强度的暴雨内涝, 而以城市为尺度开展区域暴雨叠加流域超标准洪水的洪涝统筹调度策略研究尚不多见。

上海是长江三角洲世界级城市群的核心城市, 城市化水平和人口密度较高, 地势低平, 境内黄浦江是流域洪水东出长江口的主要出路之一, 东排水量承担着太湖流域 49% 的洪水外排量^[7]。上海面临

基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目(21DZ1202602)

作者简介:孔令婷(1980—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事防汛安全保障研究。E-mail: 345947475@qq.com

通信作者:钱真(1987—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事城市防洪除涝研究。E-mail: userqz987@163.com

区域暴雨、台风增水、高潮顶托、上游洪水等致灾因子组合叠加造成的洪涝威胁。据统计,上海市平均每年遭受2次台风风暴袭击,多的年份可达六七次,一般每年都会出现风、暴、潮、洪四个致灾因子“二碰头”“三碰头”现象,极端情况下出现“四碰头”^[8-9]。其中汛期太湖流域洪水过境给城市安全度汛带来威胁,特别是城市遭遇暴雨期间如何有效防控洪涝灾害成为亟待解决的问题。2020年太湖流域大洪水期间,洪水东出黄浦江水量约32.8亿m³,黄浦江上游米市渡站连续12d超过警戒水位,苏州河中上游水位全线超过当时历史最高水位纪录,若期间遭遇区域大暴雨袭击,上海将面临流域行洪和区域除涝安全的双向博弈难题。在长三角一体化背景下,统筹太湖流域行洪和区域暴雨除涝安全成为关乎上海城市韧性安全的重要工作之一^[10]。本文构建了上海大陆片区域精细化河网泵闸调度水文水动力数学模型,采用熵权TOPSIS法分析太湖流域超标准洪水与区域不同等级暴雨遭遇时不同洪涝调度方案对城市区域防洪除涝安全的影响,并提出兼顾流域行洪和区域除涝安全的优化调度策略,用于支撑上海市水灾害防御预案体系的完善,以期城市暴雨洪涝灾害防御的“四预”(预报、预警、预演、预案)应对机制提供案例实践。

1 研究区概况与研究对象

1.1 研究区概况

上海市地处长江三角洲东缘、太湖流域下游,东濒东海,南临杭州湾,北依长江口,其中大陆片区域

(图1)是指除崇明三岛及相关岛屿以外的区域,总面积约5155km²,占太湖流域总面积的14%左右,涉及太湖流域浦西区、浦东区、阳澄淀泖区、杭嘉湖区4个水利分区,共11个水利分片,区域现状除涝能力达到15年一遇。黄浦江干流是区域内最长的河流,防汛时承担太湖流域洪水和区域暴雨涝水排出的双重任务。

1.2 研究对象

1.2.1 流域超标准洪水

梅雨是造成太湖流域性洪涝灾害的主要原因之一。太湖100年一遇防洪设计水位为4.80m(本文太湖水位均为镇江吴淞高程,下同),因太湖及重要河道岸线堤防尚未全部实施完成,本文以太湖超过保证水位4.65m的洪水作为流域超标准洪水。2020年太湖流域梅雨期长达42d,期间太湖最高水位达4.79m,与历史第三高水位持平,超过保证水位0.14m,发生流域超标准洪水。杭嘉湖区和阳澄淀泖区河网水位全面超过警戒水位、大面积超过保证水位,上海大陆片区域内5个站点水位创历史新高,米市渡站最高水位达4.43m(本文上海防汛代表站潮水位均为余山吴淞高程,下同)。2020年太湖流域洪水期间具有完整详细的同步监测资料,水情、工情最接近现状,具有较强代表性,故本文以2020年作为计算典型年。

1.2.2 区域河网分洪方向

由于黄浦江河口未建挡潮闸,为满足区域除涝和城市防潮洪安全,黄浦江沿线支流均设置水闸控制,上游太湖流域洪水主要通过黄浦江吴淞口东排

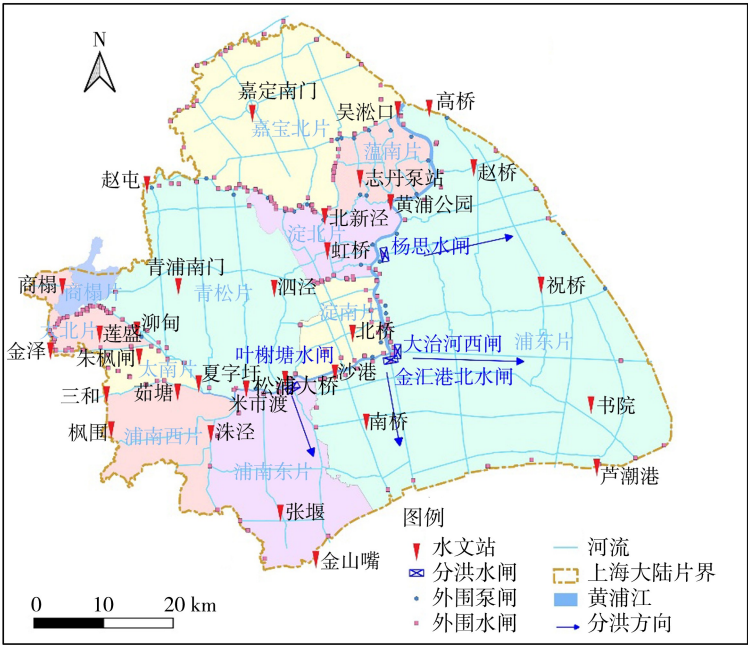


图1 研究区域防洪除涝体系示意图

长江口^[11]。在保障区域除涝安全的前提下,为提高流域超标准洪水东排效率,可考虑利用水利分片及其与黄浦江相连的区域骨干河道向杭州湾、长江口分洪。浦西区中的蕴南片、淀北片、淀南片 3 个水利片多为中心城区,青松片为大陆地势最低区域且排水出路最终仍为黄浦江,嘉宝北片在建吴淞江分洪工程且现状排涝能力有限,同时相较于浦西区,浦东区可直接向长江口、杭州湾排洪且距离更短,河湖水面率更高、河网调蓄空间更大,洪涝风险较低。因此选择浦东区的叶榭塘、金汇港、大治河、川杨河 4 条主要支流向杭州湾、长江口分洪,其与黄浦江相连处的口门控制分别为叶榭塘水闸、金汇港北水闸、大治河西闸、杨思水闸(以下简称“黄浦江分洪 4 座水闸”),位置见图 1。

2 研究方法

2.1 区域河网水文水动力模型

本文采用上海市水务规划设计研究院自主研发的一维数字河网水动力水质模型系统。该模型能够真实客观地反映感潮河网在多因素影响、多动力作用下的水流变化规律,已被广泛应用于上海的防洪排涝、水资源保护与利用等方面的课题研究、规划设计以及调度管理工作中^[12-16]。

2.1.1 河网概化

为真实反映河网水系水量交换、水位变化等水流特征,基于高精度河网水系、河道断面、闸门、泵站等空间数据,以河网输水和调蓄能力为恒量进行河网概化,并通过区域内实际河湖水面面积进行复核。上海市大陆片区域内河网被概化为 4072 条河段、3093 个节点(图 2),其边界条件包括沿长江口、杭州湾潮位过程、黄浦江水系上游节点的水位过程以及上海大陆片区域分区降雨,还考虑了 459 座水闸

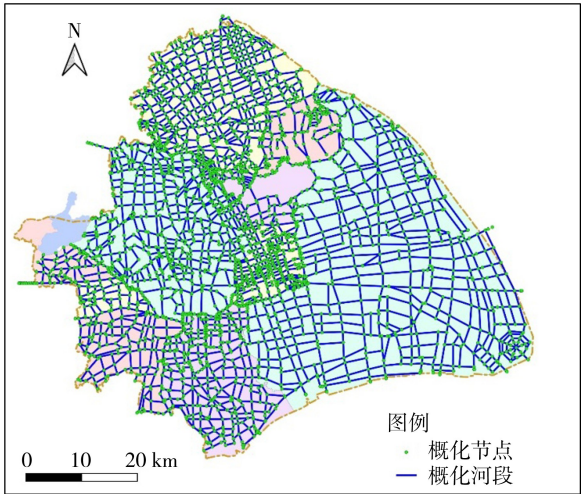


图 2 上海市大陆片区域河网概化图

和排涝泵站等防洪排涝控制工程。

2.1.2 模型率定和验证

根据区域内防汛代表站的实测潮(水)位数据开展模型率定验证,选择 2022 年 9 月 16—30 日和 2021 年 7 月 23—28 日“烟花”台风影响期间分别作为率定时段和验证时段。模型中泵闸调控按照实际调度模拟,初始水位为 2.7 m,静水启动,时间步长为 5 min,经率定黄浦江干流及其主要支流糙率系数为 0.015~0.035,其他河道糙率系数为 0.0225~0.035。经统计,黄浦江干流和其主要支流水位的计算值与实测值的统一平均误差分别小于 1%和 5%,水利片内日平均水位变化过程的平均误差小于 5%,率定期和验证期决定系数各站点的平均值大于 0.85(表 1),计算水位与实测水位过程线趋势基本一致(图 3 和图 4),拟合程度较好,构建的河网水文水动力模型可用于模拟遭遇流域洪水时区域河网水流情况。

表 1 各站水位决定系数统计

时段	最大值	最小值	平均值
率定期	0.992	0.769	0.898
验证期	0.990	0.975	0.980

2.2 方案模拟

2.2.1 区域设计暴雨

GB/T 20486—2017《江河流域面雨量等级》中定义的大暴雨(12 h 内降水量为 40.0~79.9 mm,或 24 h 内降水量为 60.0~149.9 mm 的降雨过程)与上海市地方标准 DB31/T 1121—2018《治涝标准》5 年一遇水利片 24 h 面雨量(100.0~150.0 mm)相对应,为考虑区域不同等级暴雨与流域超标准洪水遭遇的场景,选取 5 a 和 10 a 重现期的上海市最大 24 h 面暴雨为区域暴雨计算典型,雨型与《上海市防洪除涝规划》除涝标准“639”暴雨设计雨型一致。

2.2.2 调度方案设计

现行的防汛调度方案主要根据《上海市水利控制片水资源调度方案》(2020 年),防汛调度响应等级与暴雨预警等级一致。流域洪水来临时往往根据防汛经验和区域潮(水)位的可能变化趋势现场会商确定。然而很难根据经验评判水利片内水位降低到多少既可保障区域除涝安全,又能最大程度地承泄上游洪水。本文采用熵权 TOPSIS 评价方法来统筹洪涝安全,从而提出最优化调度策略。计算方案设计综合考虑水利片雨前水位预降能力,组合区域暴雨、泵闸调度形成 18 个可能调度策略情景,根据现状评估,区域遭遇 10 年一遇以上的暴雨时已无分洪能力,因此区域降雨考虑无降雨、5 年一遇、10 年一遇 3 种情形;水利片水位低于 2.4 m 时将开通航

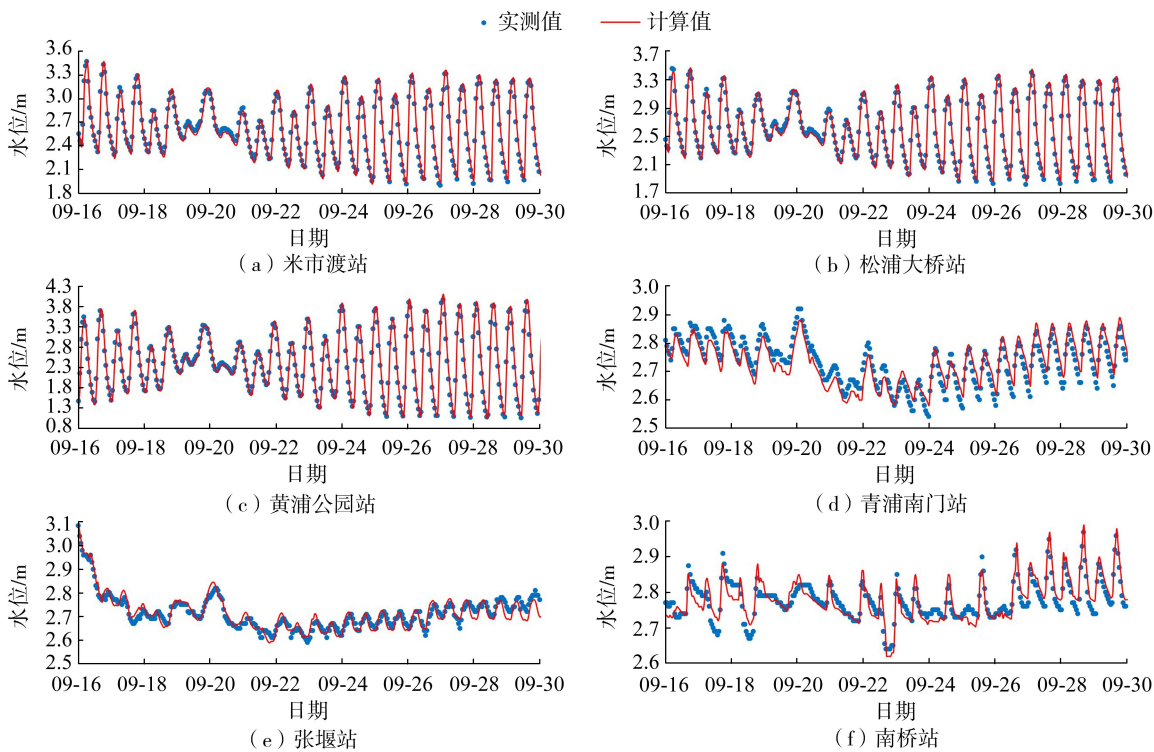


图3 率定期代表站水位计算值与实测值对比

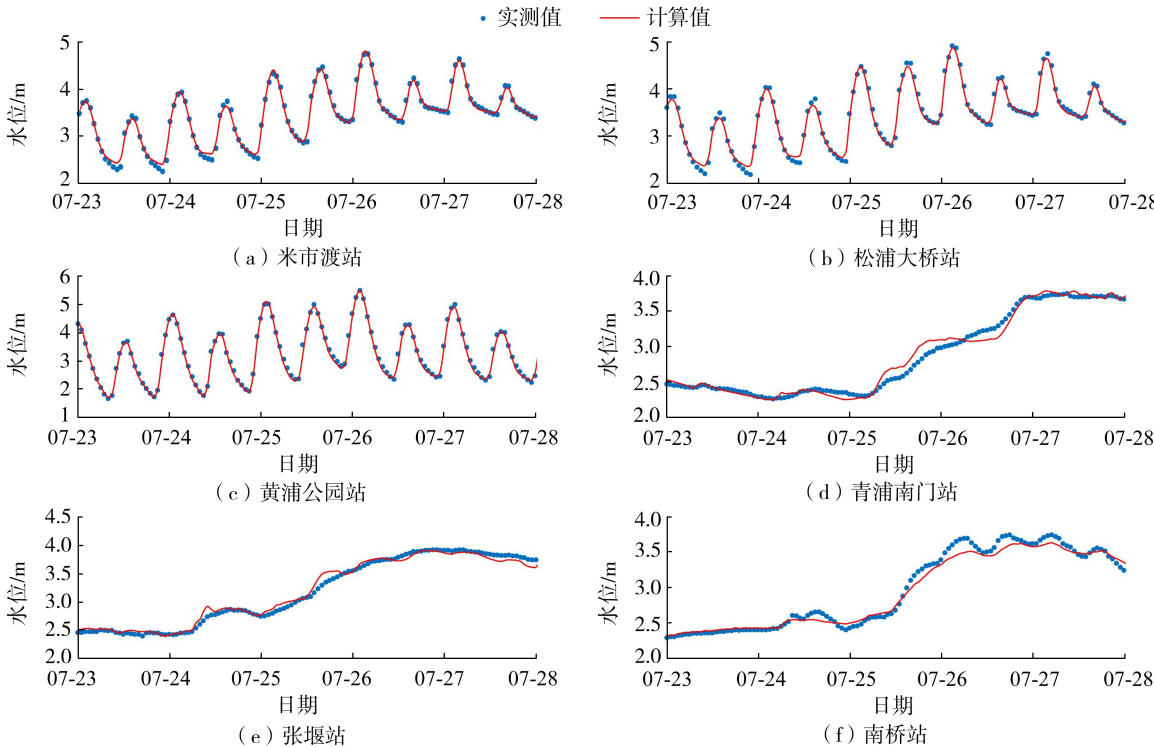


图4 验证期代表站水位计算值与实测值对比

河道安全产生影响,因此选取 2.4~2.7 m 不同预降水位情景,具体设计见表 2。

2.3 熵权 TOPSIS 评价模型

2.3.1 指标选取

“蓄泄兼筹、洪涝兼治”是太湖流域防洪工作方针,从区域除涝安全保障与流域分洪效益两个方面

评价调度方案,本研究选取超过保证水位幅度 X_1 、面最高水位超限幅度 X_2 、分洪水量 X_3 作为评价指标。其中,超过保证水位幅度为区域内防汛代表站实际水位与保证水位的差值总和,以表征对局部重点区域除涝安全的影响,值越大则区域除涝安全越不利;面最高水位超限幅度为浦东水利片面平均最

表 2 流域超标准洪水下区域洪涝统筹调度计算情景设计

方案	区域降雨	泵闸调度	雨前预降水位/m
H-0	无降雨	不分洪	
H-0F	无降雨	分洪	
YH-5-24	5 年一遇	不分洪	2.4
YH-5-25	5 年一遇	不分洪	2.5
YH-5-26	5 年一遇	不分洪	2.6
YH-5-27	5 年一遇	不分洪	2.7 *
YH-5-24F	5 年一遇	分洪	2.4
YH-5-25F	5 年一遇	分洪	2.5
YH-5-26F	5 年一遇	分洪	2.6
YH-5-27F	5 年一遇	分洪	2.7
YH-10-24	10 年一遇	不分洪	2.4
YH-10-25	10 年一遇	不分洪	2.5
YH-10-26	10 年一遇	不分洪	2.6
YH-10-27	10 年一遇	不分洪	2.7 *
YH-10-24F	10 年一遇	分洪	2.4
YH-10-25F	10 年一遇	分洪	2.5
YH-10-26F	10 年一遇	分洪	2.6
YH-10-27F	10 年一遇	分洪	2.7

注：* 表示常水位（不预降）。
高水位超除涝设计面平均高水位的差值,以表征对区域总体除涝安全的影响,值越大则区域除涝安全越不利;分洪水量为统计时段内黄浦江分洪 4 座水闸分洪量之和,值越大则分洪效益越高。

2.3.2 评价方法

TOPSIS 法是一种在方案系统中通过计算对象方案与理想方案距离排序的评估方案,被广泛应用于水资源评估、多目标优化调度与决策中^[17-20]。熵权 TOPSIS 法在传统 TOPSIS 法基础上,采用熵权法确定指标权重,其特点是充分利用原始数据信息,较客观进行权重赋值。根据水文水动力模拟结果,建立原始评价指标矩阵 **X**;将极小型指标(X_1 、 X_2 、 X_3)做正向化和标准化处理,得到正向标准化矩阵 **Z**;根据矩阵 **Z** 计算信息熵 e_j (下标 j 取 1、2、3,下同),由它得到熵权系数 h_j ;由熵权系数 h_j 和矩阵 **Z** 计算加权矩阵 **A**;由矩阵 **A** 得到最优解、最劣解,计算各个方案与最优解、最劣解的欧氏距离 d^+ 和 d^- ;最后计算各方案的评分 S , S 值越大表明该调度方案下区域除涝和流域分洪效益越大,由此对各方案进行排序。

3 结果与分析

3.1 不同情景模拟结果

流域超标准洪水期间区域无降雨时,分洪前后(方案 H-0、H-0F)主要防汛代表站最高水位均未超过保证水位。遭遇区域暴雨后,防汛代表站中出现了最高水位超过保证水位的情况,超过保证水位幅度最小(方案 YH-5-24)为 0.07 m(表 3),表明区域局部存在除涝风险;超过保证水位幅度随暴雨强度的增大而增加,表明区域局部除涝风险不断增加;分洪后较分洪前,超过保证水位幅度明显增加,最大增

幅可达 3.47 倍(方案 YH-5-24F 与 YH-5-24 相比),表明分洪会使区域除涝风险增加;分洪前后超过保证水位幅度都随预降水位的降低而降低,分洪后预降使超过保证水位幅度降低的最大降幅为 42.5%(方案 YH-5-24F 与 YH-5-27F 相比),表明在分洪调度前预降也是降低区域除涝风险的有效调度手段,见图 5(a)。

表 3 洪涝统筹的调度方案综合评价结果

排序	方案	超过保证水位幅度/m	面最高水位超限幅度/m	分洪水量/万 m ³	评分
1	H-0F	0.000	0.000	2241	0.0863
2	H-0	0.000	0.000	0	0.0758
3	YH-5-24	0.066	0.000	0	0.0752
4	YH-5-25	0.144	0.000	0	0.0737
5	YH-5-24F	0.295	0.000	2041	0.0726
6	YH-5-26	0.231	0.000	0	0.0713
7	YH-5-25F	0.326	0.000	2051	0.0713
8	YH-5-27	0.324	0.000	0	0.0683
9	YH-5-26F	0.400	0.000	1977	0.0681
10	YH-5-27F	0.513	0.025	1676	0.0623
11	YH-10-24	0.518	0.000	0	0.0614
12	YH-10-25	0.638	0.002	0	0.0571
13	YH-10-26	0.766	0.050	0	0.0500
14	YH-10-27	0.889	0.100	0	0.0419
15	YH-10-24F	1.026	0.257	1984	0.0229
16	YH-10-25F	1.101	0.261	1997	0.0201
17	YH-10-26F	1.225	0.290	1940	0.0138
18	YH-10-27F	1.368	0.336	1611	0.0078

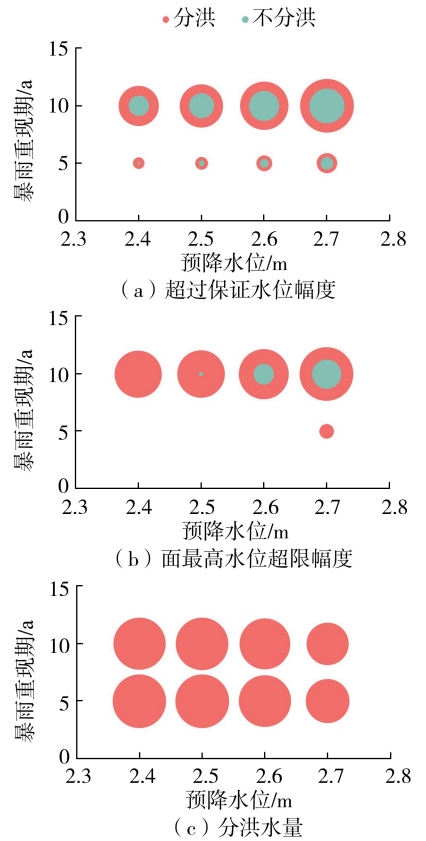


图 5 不同情景下评价指标气泡图

流域超标准洪水期间,分洪调度时 5 d 分洪水量可达 1611 万~2241 万 m³,分洪效益明显,且在区域无降雨时分洪效益最大;降雨时,若不预降(方案 YH-5-27F、YH-10-27F),区域河网高水时间增加,分洪时间减少,则分洪水量减少 15%~19%(表 3),预降水位为 2.5 m(方案 YH-5-25F、YH-10-25F)时,同一暴雨强度下分洪水量最大,可见从分洪水量看,优化预降也有利于分洪,见图 5(c)。

3.2 计算情景评价

熵权法中超过保证水位幅度、面最高水位超限幅度、分洪水量的权重系数分别采用 0.4520、0.4738、0.0742,可见区域河网水位是影响调度综合效益的主要因素,与以保证区域除涝安全为前提开展分洪调度的原则相符。根据熵权 TOPSIS 法的综合评价结果(表 3)可知,无区域降雨时,分洪调度方案(H-0F)得分最高,此时分洪对区域防洪除涝安全影响较小,区域河网可承泄部分流域洪水,防洪综合效益最大。遭遇区域 5 年一遇暴雨时,无预降分洪方案(YH-5-27F)得分最低,此调度方案的面最高水位超限幅度为 0.025 m,其余方案的面最高水位超限幅度均为 0.000 m;分洪预降水位控制在 2.5 m 及以下时(方案 YH-5-24F、YH-5-25F),情景得分在 0.07 以上,优于无预降不分洪调度方案(方案 YH-5-27)。遭遇区域 10 年一遇暴雨时,分洪情景均劣于不分洪情景,仅充分预降不分洪调度方案(YH-10-24)的面最高水位超限幅度为 0.000 m,可见此时保障区域除涝安全为首要任务,已无条件同步实施区域排涝与流域分洪安全调度。

3.3 应对超标准流域洪水调度方案建议

根据流域超标准洪水与不同等级区域暴雨遭遇的调度情景模拟和洪涝统筹最优评价结果,提出上海市应对太湖流域超标准洪水洪涝统筹的最优调度策略如下:

- a. 当区域无暴雨预警时,在日常调度的基础上通过开启黄浦江分洪 4 座水闸分洪,浦东片可最大限度地帮助承泄流域洪水,从而有效减轻黄浦江干流流域行洪压力。
- b. 当区域有大暴雨(5 年一遇)及以下量级暴雨预警时,在区域防汛调度的基础上,雨前预降浦东片河网水位至 2.5 m 以下,可实施有条件的流域分洪安全调度方案,达到洪涝统筹最优调度的目标。
- c. 当区域有大暴雨以上量级暴雨预警时,需停止分洪,并尽可能预降河网水位,实行涝水先行、充分排涝的防汛安全调度方案,待水位降低到一定幅度后可再次实施有条件的流域分洪安全调度方案。

4 结 论

- a. 熵权 TOPSIS 评价法可用于分析提出统筹流域超标准洪水下泄与超大城市防汛安全的最优调度策略,为其他河口感潮河网地区提出流域-区域协同的洪涝调度策略提供参考。
- b. 太湖流域超标准洪水期间,若区域发生 5 年一遇暴雨或不降雨时,在开启黄浦江分洪 4 座水闸分洪时,采用优化浦东片水位调度的方式可承担一定的泄洪量,达到洪涝统筹最优调度的目标;若区域同步发生 10 年一遇暴雨,区域除涝安全已不能得到保障,不再具有帮助流域行洪的能力。
- c. 应对流域超标准洪水的洪涝统筹最优调度方案为:若区域无暴雨预警时,通过开启黄浦江分洪 4 座水闸分洪;若区域有大暴雨及以下量级暴雨预警时,预降河网水位至 2.5m 以下,有条件地分洪;若区域有大暴雨以上量级暴雨预警时,实行涝水先行、充分排涝的调度方案。

参考文献:

[1] 刘家宏,梅超,刘宏伟,等. 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J]. 水科学进展,2023,34(2):172-181. (LIU Jiahong, MEI Chao, LIU Hongwei, et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities[J]. Advances in Water Science,2023,34(2):172-181. (in Chinese))

[2] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (LIU Dingrong, YANG Kai, SUN Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(4):23-29. (in Chinese))

[3] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1):1-9. (in Chinese))

[4] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))

[5] 刘建芬,王慧敏,张行南. 城市化背景下城区洪涝灾害频发的原因及对策[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2012,14(1):73-75. (LIU Jianfen, WANG Huimin,

- ZHANG Xingnan. Causes of flood-stricken urban areas in the context of urbanization and its countermeasures[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2012, 14(1): 73-75. (in Chinese))
- [6] 姜仁贵,王思敏,解建仓,等. 变化环境下城市暴雨洪涝灾害应对机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(1): 102-109. (JIANG Rengui, WANG Simin, XIE Jiancang, et al. Response mechanism of urban rainstorm and flood disasters under changing environment [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 102-109. (in Chinese))
- [7] 刘晓涛. 总体国家安全观视域下上海水旱灾害防御工作思考[J]. 中国水利, 2023(9): 40-43. (LIU Xiaotao. Reflection on flood and drought disaster prevention in Shanghai from the perspective of the overall national security concept [J]. China Water Resources, 2023(9): 40-43. (in Chinese))
- [8] 王璐阳,张敏,温家洪,等. 上海复合极端风暴洪水淹没模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30(4): 546-555. (WANG Luyang, ZHANG Min, WEN Jiahong, et al. Simulation of extreme compound coastal flooding in Shanghai [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(4): 546-555. (in Chinese))
- [9] 陈满荣,王少平. 上海城市风暴潮灾害及其预测[J]. 灾害学, 2000, 15(3): 26-29. (CHEN Manrong, WANG Shaoping. Storm-tide disaster and its forecast in Shanghai City [J]. Journal of Catastrophology, 2000, 15(3): 26-29. (in Chinese))
- [10] 吴娟,林荷娟,姜桂花,等. 太湖流域超标特大洪水风险预警系统建设及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 164-170. (WU Juan, LIN Hejuan, JIANG Guihua, et al. Risk warning system construction and application under excessive extreme flood [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 164-170. (in Chinese))
- [11] 季永兴. 黄浦江河口建闸研究 40 年回顾与展望[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5): 1-9. (JI Yongxing. Review and prospect of research on sluice construction at Huangpu River Estuary in past 40 years [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 1-9. (in Chinese))
- [12] 高丽莎,高程程,汪涛. 基于精细化河网水动力模型的长宁区除涝能力评估[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 62-67. (GAO Lisha, GAO Chengcheng, WANG Tao. Assessment of waterlogging control capacity in Changning District based on refined river network hydrodynamic model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 62-67. (in Chinese))
- [13] 钱真,谭琼,贾卫红. 城市雨洪综合模拟方法及应用[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(6): 57-61. (QIAN Zhen, TAN Qiong, JIA Weihong. Method for integrated simulation of urban storm water flow and its application [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6): 57-61. (in Chinese))
- [14] 钱真,贾卫红. 基于 GIS 的感潮地区城市区域除涝能力评估[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 85-87. (QIAN Zhen, JIA Weihong. Urban zonal water logging control evaluation in tidal region based on GIS [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(3): 85-87. (in Chinese))
- [15] 钱真. 金泽水源地突发性锑超标水动力成因分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 47-50. (QIAN Zhen. Hydrodynamic cause analysis of sudden antimony incident in Jinze drinking water source area [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(4): 47-50. (in Chinese))
- [16] 钱真,孔令婷,陈长太,等. 城市平原感潮河网地区涉河工程防洪影响计算方法研究[J]. 水利规划与设计, 2022(9): 41-45. (QIAN Zhen, KONG Lingting, CHEN Changtai, et al. Study on calculation method of flood control impact of river related projects in tidal river network area of urban plain [J]. Water Resources Planning and Design, 2022(9): 41-45. (in Chinese))
- [17] 王蔚,董增川,崔璨,等. 基于洪水资源化的洪泽湖后汛期蓄水策略[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 168-179. (WANG Wei, DONG Zengchuan, CUI Can, et al. Water storage strategy in post-flood period for Hongze Lake based on flood utilization [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 168-179. (in Chinese))
- [18] 关雪桦,陈志和,叶智恒. 中山市水资源系统动态模拟与敏感性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 103-111. (GUAN Xuehua, CHEN Zhihe, YE Zhiheng. Dynamic simulation and sensitivity analysis of water resources system in Zhongshan City [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 103-111. (in Chinese))
- [19] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7. (in Chinese))
- [20] 熊雪珍,何新玥,陈星,等. 基于改进 TOPSIS 法的水资源配置方案评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 14-20. (XIONG Xuezheng, HE Xinyue, CHEN Xing, et al. Evaluation on water resources allocation schemes based on improved TOPSIS [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 14-20. (in Chinese))
- [21] 朱洁,冯建刚,高玉琴,等. 基于 BWM-CRITIC-TOPSIS 的幸福河湖综合评价模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6): 8-14. (ZHU Jie, FENG Jiangang, GAO Yuqin, et al. Comprehensive evaluation model for happy rivers and lakes based on BWM-CRITIC-TOPSIS [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 8-14. (in Chinese))

(收稿日期:2024-10-27 编辑:俞云利)