

超标准洪水下鄱阳湖单退圩和蓄滞洪区 联合分洪运用研究

邹佳宇^{1,2}, 温天福^{1,3}, 顾平², 李港¹, 雷声¹, 王志超^{1,3}, 刘鑫¹, 鄢煜川⁴

(1. 江西省水利科学院, 江西 南昌 330029; 2. 南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330031;

3. 水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室, 湖北 武汉 430010;

4. 江西省鄱阳湖水利枢纽建设办公室, 江西 南昌 330009)

摘要:为合理启用单退圩和蓄滞洪区,有效降低鄱阳湖的洪水水位,基于 MIKE21 建立鄱阳湖及五河尾闾二维水动力模型,采用同频率法放大 2020 年鄱阳湖大洪水得到超标准洪水,通过设置单退圩和蓄滞洪区的启用水位形成 9 种组合方案并模拟其分洪运用过程,分析得出优选方案及其经济损失情况。结果表明:单退圩启用水位为 21.50 m(保护面积万亩以下)、22.30 m(保护面积万亩以上),蓄滞洪区启用水位为 22.50 m 时,单退圩和蓄滞洪区分洪量分别为 26.17 亿 m³ 和 25.69 亿 m³,最大 24 h 降低水位为 0.37 m 和 0.25 m,对鄱阳湖的分洪效果最佳;启用 48 h 后,单退圩的农业直接经济损失为 2.09 亿元,蓄滞洪区损失为 4.17 亿元,其中康山蓄滞洪区损失为 1.54 亿元。

关键词:单退圩;蓄滞洪区;降低水位;洪水损失;鄱阳湖

中图分类号:TV87

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)02-0054-09

Study on joint operation of semi-restoration polder and detention and retention area for flood diversion in Poyang Lake under extreme flood conditions//ZOU Jiayu^{1,2}, WEN Tianfu^{1,3}, GU Ping², LI Gang¹, LEI Sheng¹, WANG Zhichao^{1,3}, LIU Xin¹, YAN Yuchuan⁴(1. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 2. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. Key Laboratory of River and Lake Management and Flood Control in the Middle and Lower Reaches of the Changjiang River of MWR, Wuhan 430010, China; 4. Poyang Lake Water Control Project Construction Office of Jiangxi Province, Nanchang 330009, China)

Abstract: To reasonably activate the semi-restoration polder (SRP) and detention and retention area (DRA) and effectively reduce the water level of Poyang Lake, a two-dimensional hydrodynamic model of Poyang Lake and the downstream sections of its five tributaries was established using MIKE21. The extreme flood event was simulated by amplifying the 2020 Poyang Lake flood using the same-frequency method. Nine combination schemes were formulated by setting different activation water levels for SRP and DRA, and the flood diversion processes were simulated. The optimal scheme and its associated economic losses were further analyzed. The results indicate that the optimal flood diversion effect is achieved when the SRPs are activated at water levels of 21.50 m (for protection areas under 10 000 mu) and 22.30 m (for protection areas above 10 000 mu) and the DRAs are activated at water level of 22.50 m. Under this scheme, the flood diversion volumes for the SRPs and DRAs are 2.617 billion m³ and 2.569 billion m³, respectively, with maximum 24-hour water level reductions of 0.37 m and 0.25 m, respectively. After 48 hours of activation, the direct agricultural economic loss for the SRPs is 209 million yuan, while the loss for DRAs is 417 million yuan, of which the loss for the Kangshan DRA is 154 million yuan.

Key words: semi-restoration polder; detention and retention area; drawdown of water level; loss caused by flood; Poyang Lake

20 世纪 50 年代以来,鄱阳湖发生较大洪水 20 年、1995 年、1996 年、1998 年、1999 年、2020 年^[1]。余次,其中 7 次特大洪水分别发生在 1954 年、1983 大洪水对鄱阳湖的环境、社会经济情况造成了严重

基金项目:水利部重大科技项目(SKS-2022010);江西省水利科技项目(202325ZDKT14,202224ZDKT20,202124ZDKT02);长江科学院开放研究基金项目(CKWV20231164/KY);江西省技术创新引导类科技计划项目(20223AEI91008)

作者简介:邹佳宇(1999—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:1366790702@qq.com

通信作者:温天福(1981—),男,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:wen-tianfu@whu.edu.cn

影响,威胁湖区近 1 000 万人的生命财产安全^[2]。1998 年洪水中,鄱阳湖有 240 座保护面积千亩(1 亩=1/15 hm²)以上圩堤溃决,江西省有 2 010 万人受灾,农作物受灾面积 15 920 km²,直接经济损失达 376 亿元^[3]。相比之下,2020 年水位整体更高,由于圩堤被动决口转为有计划的主动进洪,10 余座圩堤溃决,受灾人口 673.3 万人,损毁房屋 12.3 万户,单退圩主动进洪的方式为群众转移财产赢得了时间,有效减轻了灾情^[4]。开展单退圩与蓄滞洪区联合运用的研究可为有效运用单退圩和蓄滞洪区来降低洪水的危害提供技术支撑。

洪水演进模拟是洪水分析的基础,可为洪水管理提供依据^[5-6]。MIKE21 模型具有强大的前、后处理功能,可以进行热启动,能够设置桥墩、堰、闸、涵洞等建筑物,是目前应用最广泛的水动力模型之一^[7]。杨民钦等^[8]分析了淮河行蓄洪区在防洪运用中存在的问题,建议提高行蓄洪标准,实现科学调度,合理运用行蓄洪区;魏凯等^[9]以淮河中游濠洼蓄滞洪区为研究对象,运用 MIKE21 模型计算了最危险分洪方案时蓄滞洪区内洪水淹没要素的时空变化过程,统计洪水到达时间、淹没水深、范围、淹没庄台及受困人口数等动态信息;陈平等^[10]针对大陆泽及宁晋泊蓄滞洪区建立了二维非恒定流洪水演进数学模型,模拟了蓄滞洪区现状条件下 50 年一遇洪水的演进过程,为洪水风险图的编制提供依据;常楚阳等^[11]采用 MIKE21 模型构建了杜家台分蓄洪区数值模型,计算了杜家台地区遭遇不同量级汉江洪水时的分洪情况,得到了洪水到达时间、洪水历时、洪水流速、淹没面积、淹没水深等要素的动态变化过程,进行了洪灾损失分析;蒋水华等^[12]基于 MIKE21 模型的洪水演进模拟方法,建立了基于蓄滞洪区洪水演进淹没数据的损失评估方法,准确估算了鄱阳湖康山大堤溃决造成的生命、经济、生态环境损失。针对鄱阳湖单退圩的研究较多。例如:傅春等^[13]根据万亩以下单退圩和万亩以上单退圩不同启用水位的方案组合,应用可变模糊优选理论进行了模糊优选,得出鄱阳湖单退圩防洪调度的优选方案;温天福等^[14]结合实际情况系统模拟了圩堤分洪过程并分析了分洪效果,运用模糊优选方法从降低水位、启用频率和年均损失等方面筛选启用方案,针对如何调整鄱阳湖圩堤系统的分洪布局、建立协同运行调度的决策机制提出了建议;马强等^[15]总结了 2020 年鄱阳湖单退圩实际分洪运用情况,并重现了 2020 年长江流域大洪水鄱阳湖单退圩运用后的防洪形势,分析了不启用单退圩方案的影响程度以及康山蓄滞洪区的分洪效果;雷声等^[4]针对单退圩总结了

2020 年鄱阳湖遭遇超历史记录洪水的防洪成效,同时也揭示了单退圩圩堤设置需优化、蓄排难度较大等问题,并调整了圩堤范围及优化运行方案。

综上所述,目前研究以单退圩或蓄滞洪区为主,单退圩和蓄滞洪区联合运用的研究较少。鄱阳湖洪水频发,单退圩和蓄滞洪区在进行安全建设工程后,已有的单退圩和蓄滞洪区启用水位条件过低,江西省水利规划设计研究院提出将万亩以上单退圩启用水位调到 22 m,将蓄滞洪区启用水位提高至 23 m 左右^[16]。本文基于 MIKE21 模型概化单退圩和蓄滞洪区,模拟鄱阳湖遭遇大洪水时分蓄洪的演进过程,分析单退圩和蓄滞洪区联合运用对湖区降低水位的影响及淹没损失,以期选出联合运用的效益最佳方案。

1 研究区概况

鄱阳湖位于长江流域中下游右岸,由主湖区和五河尾间组成,五河来水自南向北汇入鄱阳湖,再从湖口注入长江。4—6 月,上游河流的来水流量显著增加,湖区水位也随之上升;随后,上游河流的流量在 7—8 月逐渐减少,而长江的高水位阻碍了湖区水位的下降,导致该时期湖区水位最高。在高水位时期,长江水位高于湖口水位时,会出现长江顶托作用,导致湖口站出现长江水倒灌^[17]。鄱阳湖水位从 9 月开始逐渐下降,最低水位通常出现在 1 月。20 世纪以来,鄱阳湖的洪水频率和严重程度都有所增加^[18],1954 年长江自 5 月中旬起水位持续上涨,顶托倒灌,湖口站最高水位达 21.68 m,星子站最高水位达 21.85 m;1998 年鄱阳湖湖口站水位达 22.59 m,星子站出现历史最高水位 22.52 m;2020 年鄱阳湖湖口站最高水位达 22.49 m,星子站最高水位达 22.63 m,超出 1998 年历史最高水位 0.11 m^[19]。

鄱阳湖有单退圩 180 座,堤线总长 625.6 km,分洪容量 38.37 亿 m³,其中万亩以上圩堤有 33 座,万亩以下 147 座。万亩以下单退圩分洪容量 13.08 亿 m³,1 万~5 万亩单退圩分洪容量 16.07 亿 m³,5 万亩以上单退圩分洪容量 9.22 亿 m³。根据 2022 年资料统计,单退圩内有耕地面积 4.37 万 hm²,水面面积 2.55 万 hm²,粮食、经济作物面积 3.97 万 hm²,单退圩保护区域内人口有 5.86 万人,其中未迁人口 3.45 万人,返迁人口 2.41 万人。鄱阳湖有 4 座国家级蓄滞洪区:康山、珠湖、黄湖、方洲斜塘蓄滞洪区。总蓄洪容积 26.81 亿 m³,蓄滞洪区内现有农作物 2.27 万 hm²,总人口 21 万人。其中康山蓄滞洪区是最大的蓄滞洪区,蓄洪容积 16.58 亿 m³,占总

蓄洪容积的 61.8%，区内有耕地面积 1.17 万 hm^2 ，人口 9.8 万人；珠湖蓄滞洪区蓄洪容积 5.45 亿 m^3 ，占总蓄洪容积的 20.3%，区内有耕地面积 0.56 万 hm^2 ，人口 9.4 万人；黄湖、方洲斜塘蓄滞洪区蓄洪容积分别为 2.96 亿 m^3 和 1.82 亿 m^3 ，共有耕地面积 0.54 万 hm^2 ，区内人口 1.8 万人。鄱阳湖单退圩和蓄滞洪区分布见图 1。

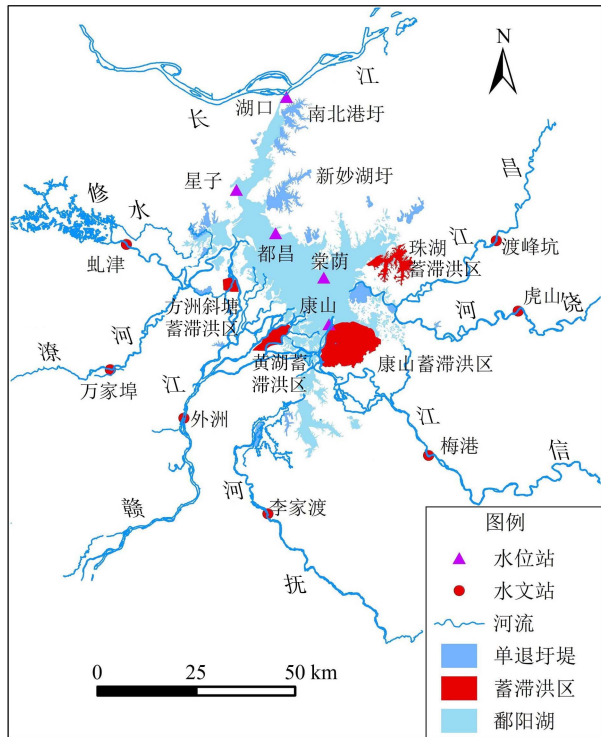


图 1 鄱阳湖单退圩和蓄滞洪区分布示意图

2 研究方法

2.1 水动力模型构建

MIKE21^[20] 是一个由丹麦水利研究所 (DHI) 开发的基于二维浅水方程的数学模型,能很好地对干湿单元进行判别,适应水位年内、年际波动较大且具有宽浅地形及复杂岸线的湖泊^[21],在鄱阳湖及其他湖泊均有应用^[22-24]。本文基于 MIKE21 构建鄱阳湖及五河尾间的二维水动力模型,模拟 2020 年鄱阳湖 7 月洪水时期的水动力过程,以下为模型相关参数:

a. 边界条件。鄱阳湖二维水动力模型设置了 8 个开边界,其中上边界条件采用流量边界,为五河七口的逐日流量过程。五河中 7 个水文站分别为外洲水文站、李家渡水文站、梅港水文站、虎山水文站、渡峰坑水文站、虬津水文站和万家埠水文站。下边界条件采用水位边界,为湖口水位站的逐日水位。

b. 网格划分。在鄱阳湖二维水动力模型构建过程中,不考虑风、浪、潮汐、温度、盐度等因素的影响,采用非结构网格模块、不规则三角形网格,最大

网格面积不超过 0.01 km^2 ,在鄱阳湖主河道以及堤防处适当加密。

c. 参数设定。时间步长为 3 600 s,最小计算时间步长为 0.01 s,最大计算时间步长为 30 s;曼宁系数为 40 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$;干湿水深动边界条件中设定干水深为 0.005 m,淹没水深为 0.05 m,湿水深为 0.1 m;涡黏系数计算结果为定值 0.28。

2.2 组合建筑物概化

鄱阳湖共有 180 座单退圩和 4 座蓄滞洪区,其中保护面积万亩以下的单退圩多采用人工扒口或进洪堰方式,万亩以上采用进洪闸和滚水坝结合方式,蓄滞洪区进洪方式为爆破开口进洪。模型构建时将保护面积万亩以下的单退圩根据地区和启用水位进行合并,将相邻且启用水位相同的万亩以下单退圩合并为整体,合并前后单退圩的启用条件和蓄洪容积保持一致;对于 23 座保护面积万亩以上的单退圩和蓄滞洪区,在模型中逐一概化。在模型中使用堤坝模拟单退圩和蓄滞洪区中堤防的挡水功能,使用闸门模拟实际情况中进洪设施的效果,闸门选择垂直方向全部过水,闸门默认状态关闭,通过湖口站水位控制闸门开启,闸门开启后不再关闭;通过导入堤坝的坐标来表示堤坝的位置,堤坝线和边界线需闭合以模拟闸门未开启时不进水的情况,堤坝高程设置为 25 m。

2.3 模型率定

2.3.1 湖区水位

湖区水动力模拟采用确定性系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、纳什效率系数 (NSE) 来评估模型的效果^[25-27]。星子、都昌、棠荫、康山 4 个水位站 2020 年洪水期水位实测值和模拟值见图 2。水动力模型模拟的鄱阳湖的水位变化与实测水位拟合程度较好,结果见表 1。4 个水位站的 R^2 均在 0.99 以上。经计算,模拟值与实测值的残差为 0.4, RMSE 均小于残差的一半,符合要求^[28]。4 个水位站的 NSE 均大于 0.7,表明模型性能良好。表 2 为鄱阳湖 4 个水位站的最高水位对比情况,4 个水位站的 RMSE 均在 0.1 m 以下,模拟最高水位时刻与实测最高水位时刻的滞时较小,符合精度要求。

2.3.2 分洪过程

新妙湖圩和莲北圩是鄱阳湖保护面积在 5 万亩以上的单退圩,分别位于鄱阳湖北部和南部。新妙湖圩分洪流量过程线和分蓄洪量见图 3(a)。新妙湖圩口门处分洪流量在闸门开启后 2 h 内达到最大值 1 235 m^3/s ,此后流量在 70 h 内逐渐降为 0;启用 24 h 后新妙湖圩分蓄洪量为 0.86 亿 m^3 ,启用 48 h 后分蓄洪量为 1.37 亿 m^3 ,在 70 h 时不再进洪,此时

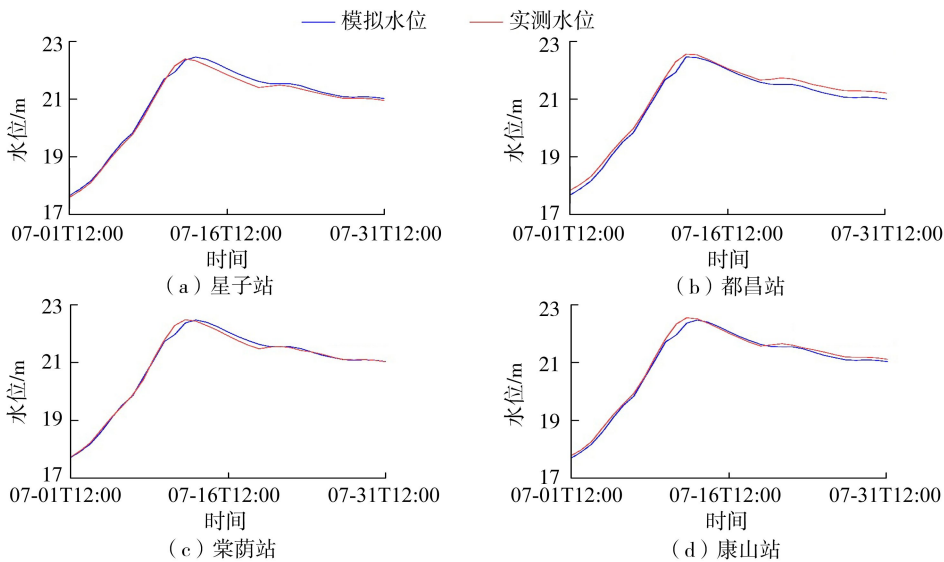


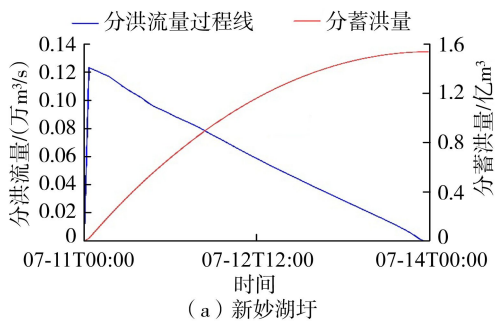
图2 鄱阳湖4个水位站模拟与实测水位对比

表1 鄱阳湖二维水动力模型率定结果

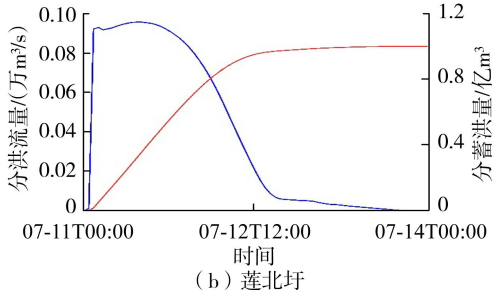
水位站	R^2	RMSE/m	NSE
星子	0.997	0.168	0.984
都昌	0.996	0.118	0.992
棠荫	0.996	0.110	0.993
康山	0.995	0.092	0.995

表2 鄱阳湖水电站的模拟与实测最高水位对比

水位站	实测最高水位/m	模拟最高水位/m	RMSE/m	水位滞时/h
星子	22.57	22.53	0.04	5
都昌	22.55	22.49	0.06	3
棠荫	22.51	22.47	0.04	2
康山	22.48	22.47	0.01	2



(a) 新妙湖圩



(b) 莲北圩

图3 新妙湖圩和莲北圩分洪流量过程线和分蓄洪量

分蓄洪量为 1.54 亿 m^3 , 新妙湖圩设计分蓄洪量为 4.21 亿 m^3 , 蓄洪率为 36.6%。莲北圩的口门处分洪流量过程线和分蓄洪量见图 3(b), 莲北圩进洪口门流量在 2h 内达到 931 m^3/s , 在 24h 内流量稳定在

960 m^3/s , 在 42 h 内下降到 57 m^3/s , 随后逐渐降为 0; 启用 24 h 后莲北圩分蓄洪量为 0.74 亿 m^3 , 启用 48 h 后分蓄洪量为 0.99 亿 m^3 , 总分蓄洪量为 1.05 亿 m^3 , 莲北圩设计蓄洪量为 1.62 亿 m^3 , 蓄洪率为 64.8%。根据雷声等^[4]计算的 2020 年单退圩进洪情况, 新妙湖圩和莲北圩分蓄洪量为 0.91 亿 m^3 。在模型概化过程中新妙湖圩和莲北圩合并了周围的 15 座千亩以下单退圩, 蓄洪面积增加, 导致本文计算的蓄洪率偏大。

2.4 分洪效果与损失

降低水位是防洪工程中评价分洪效果的重要指标, 它能够反映洪水的削减程度, 24 h 最大降低水位可用于评估单退圩和蓄滞洪区启用后的防洪效果。单退圩和蓄滞洪区内经济以农业为主, 其主要经济作物为水稻和油菜等。分蓄洪过程造成的经济损失主要是指耕地内淹没所造成的损失。为了更准确地评估这些损失, 采用了网格化的计算方法^[29], 即将每个单退圩和蓄滞洪区划分为若干个网格, 根据网格的不同水深为每个网格估算其直接经济损失:

$$R = \sum_{i=1}^m \eta_i W_i \quad (1)$$

其中

$$W_i = \frac{A_i}{A} \times V$$

式中: R 为经济损失; m 为网格数量; η_i 为不同水深下的损失率; W_i 为不同水深淹没范围内网格的经济价值; A_i 为网格在不同水深下的面积; A 为该区域内所有网格的总面积; V 为该区域内总价值。

本文结合鄱阳湖实际情况并参考相关的研究^[30], 将水深刻分为 4 个等级: $0 \sim 0.5$ m、 $>0.5 \sim 2.0$ m、 $>2.0 \sim 4.0$ m、 >4.0 m, 各等级对应的直接经

济损失率分别为 70%、85%、90%、100%。

3 结果与分析

3.1 方案设置与分析

根据 2015 年国务院批复的《长江防御洪水方案》^[30],单退圩运用方式为“湖口水位达到 20.5 m 和 21.68 m 时,分别启用保护面积万亩以下单退圩和保护面积万亩以上单退圩”,蓄滞洪区运用方式为“预报湖口水位将达到 22.50 m 并继续上涨,首先运用鄱阳湖的康山蓄滞洪区分蓄洪水,相继运用珠湖、黄湖、方洲斜塘蓄滞洪区”。2020 年大洪水期间,鄱阳湖全面启用单退圩,成功避免了蓄滞洪区的运用,遭遇超标准洪水时两者联合运用方式亟待研究。本文使用同频率法将 2020 年洪水的五河七口的来水流量放大 20%,根据现有运用规则提高单退圩和蓄滞洪区启用水位,分析在 2020 年的同类型超标准洪水下单退圩和蓄滞洪区的联合分洪运用效果。单退圩和蓄滞洪区启用水位组合方案见表 3。

表 3 单退圩和蓄滞洪区启用水位组合方案

方案	保护面积万亩以下单退圩/m	保护面积万亩以上单退圩/m	蓄滞洪区/m
1	20.50	21.68	22.50
2	21.00	21.68	22.50
3	21.00	22.00	22.50
4	21.50	21.68	22.50
5	21.50	22.30	22.50
6	20.50	21.68	22.80
7	21.00	21.68	22.80
8	21.00	22.00	22.80
9	21.50	21.68	22.80

根据模拟结果,不同方案下星子站水位变化情况见图 4。星子站水位在鄱阳湖区内的水位站中较为关键,处于鄱阳湖区进入束窄河道的部位,星子站水位的变化可以反映鄱阳湖区的水位变化情况。由图 4 可知,当单退圩的启用水位变化时,不同方案的进洪时间及降低水位的效果差异较大,经过数据统计得出不同方案下 24 h 最大降低水位及 24 h 时段见表 4。和方案 1 相比,方案 4 万亩以下单退圩启用水位高于方案 1,单退圩的启用时间向后推迟;和

方案 3 相比,同时提高万亩以下和万亩以上单退圩的启用水位后,方案 5 单退圩启用时间推后 10 h;和方案 4 相比,当提高蓄滞洪区启用水位时,方案 9 蓄滞洪区启用时间向后推迟 20 h,最大 24 h 降低水位变化较小。

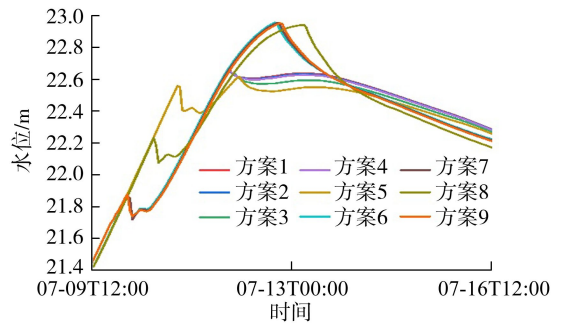


图 4 不同方案星子站水位变化

比较各方案中单退圩和蓄滞洪区的最大 24 h 降低水位,选出分洪效果最佳的方案。对比方案 1 和方案 4、方案 5 结果,当单退圩启用水位提高时,降低水位变大,单退圩启用水位从 21.68 m 提升至 22.30 m 后,降低水位增加 0.07 m,并且延缓单退圩和蓄滞洪区的启用时间;对比方案 1 和方案 6,在单退圩启用水位不变的情况下,蓄滞洪区启用水位提高后其降低水位减少,当蓄滞洪区启用水位为 22.50 m 时,单退圩和蓄滞洪区启用后鄱阳湖区水位依旧呈上涨趋势,当蓄滞洪区启用水位为 22.80 m 时,蓄滞洪区启用后湖区水位已经达到峰值,启用蓄滞洪区的效益不如启用水位为 22.50 m 时。因此根据降低水位对比情况,本文选择方案 5 为分洪效果最佳方案,即单退圩启用水位为 21.50 m (保护面积万亩以下)、22.30 m (保护面积万亩以上),蓄滞洪区启用水位为 22.50 m。

3.2 分洪流量过程线和分蓄洪量

3.2.1 单退圩

根据方案 5 中单退圩进洪后的洪水演进过程,通过进洪口门处的流量过程线计算各单退圩累计进洪量,单退圩的分洪流量过程线与蓄滞洪量如图 5 所示。单退圩分蓄洪量见表 5。启用 24 h 后单退圩

表 4 不同方案鄱阳湖主湖区最大 24 h 降低水位

方案	单退圩降低水位/m	单退圩降低水位最大 24 h 时段	蓄滞洪区降低水位/m	蓄滞洪区降低水位最大 24 h 时段
1	0.27	07-10T04:00~07-11T04:00	0.23	07-12T00:00~07-13T00:00
2	0.29	07-10T04:00~07-11T04:00	0.22	07-11T22:00~07-12T22:00
3	0.31	07-10T22:00~07-11T22:00	0.21	07-12T01:00~07-13T01:00
4	0.30	07-10T04:00~07-11T04:00	0.23	07-11T22:00~07-12T22:00
5	0.37	07-11T01:00~07-12T01:00	0.25	07-12T02:00~07-13T02:00
6	0.26	07-10T04:00~07-11T04:00	0.21	07-12T09:00~07-13T19:00
7	0.29	07-10T04:00~07-11T04:00	0.20	07-12T20:00~07-13T20:00
8	0.31	07-10T15:00~07-11T15:00	0.19	07-13T06:00~07-14T06:00
9	0.30	07-10T04:00~07-11T04:00	0.22	07-12T20:00~07-13T20:00

分蓄洪量为 20.34 亿 m^3 , 蓄洪率为 53.01%, 其中万亩以下单退圩分蓄洪量为 7.66 亿 m^3 , 蓄洪率为 58.56%, 1 万 ~ 5 万亩单退圩分蓄洪量为 7.99 亿 m^3 , 蓄洪率为 49.72%, 5 万亩以上单退圩分蓄洪量为 4.69 亿 m^3 , 蓄洪率为 50.86%, 启用 24 h 后, 万亩以下单退圩蓄洪率比万亩以上单退圩高。大部分单退圩在 72 h 以内结束进洪, 单退圩分蓄洪量为 26.17 亿 m^3 , 蓄洪率为 68.2%, 其中万亩以下单退圩分蓄洪量为 9.97 亿 m^3 , 蓄洪率为 76.2%, 1 万 ~ 5 万亩单退圩和 5 万亩以上单退圩分蓄洪量分别为 10.11 亿 m^3 和 6.09 亿 m^3 , 蓄洪率分别为 62.9% 和 66%。在单退圩启用后, 根据单退圩分蓄洪量和蓄洪率对比, 万亩以下单退圩在分洪过程中进洪效率更高, 蓄洪率高于单退圩平均蓄洪率。

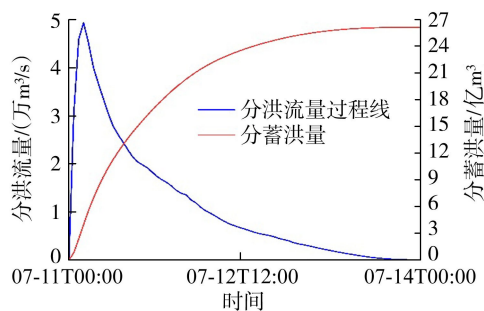


图 5 单退圩分洪流量过程线和分蓄洪量

表 5 单退圩累计分洪情况

保护面积/ 万亩	分蓄洪量/亿 m^3				蓄洪率/%
	24 h	48 h	总量	设计值	
<1	7.66	9.77	9.97	13.08	76.20
1~5	7.99	9.78	10.11	16.07	62.90
>5	4.69	5.82	6.09	9.22	66.00
合计	20.34	25.37	26.17	38.37	

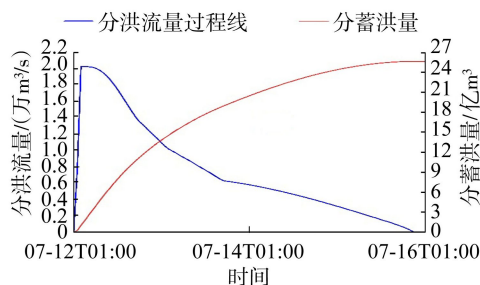
3.2.2 蓄滞洪区

蓄滞洪区分洪流量过程线与分蓄洪量见图 6(a), 启用 24 h 后蓄滞洪区进洪 13.86 亿 m^3 , 蓄洪率为 51.7%, 启用 48 h 后分蓄洪量为 20.52 亿 m^3 , 蓄洪率为 76.54%, 启用 72 h 后分蓄洪量为 24.45 亿 m^3 , 蓄洪率为 91.2%, 最终分蓄洪量为 25.69 亿 m^3 , 蓄洪率为 95.8%。蓄滞洪区分洪情况及蓄洪率见表 6。

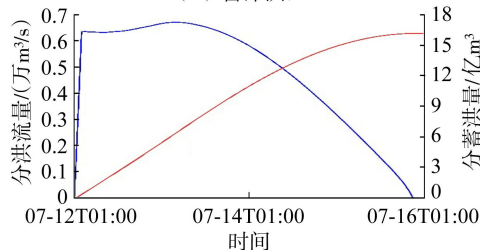
表 6 蓄滞洪区累计分蓄洪情况

蓄滞洪区	分蓄洪量/亿 m^3					蓄洪率/%
	24 h	48 h	72 h	最大值	设计值	
康山	5.44	10.99	14.91	16.16	16.58	97.50
珠湖	4.37	5.45	5.45	5.45	5.45	100.00
黄湖	2.51	2.53	2.53	2.53	2.96	85.50
方洲斜塘	1.54	1.56	1.56	1.56	1.82	85.70
合计	13.86	20.52	24.45	25.69	26.81	

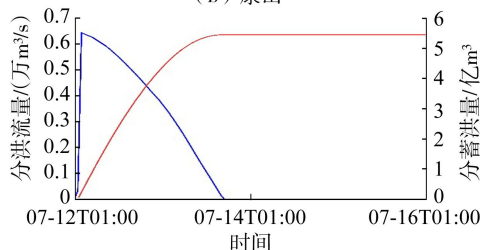
康山蓄滞洪区设计蓄洪容积为 16.58 亿 m^3 , 占 4 座蓄滞洪区设计蓄洪容积的 61.8%, 为最大的蓄



(a) 蓄滞洪区



(b) 康山



(c) 珠湖

图 6 蓄滞洪区分洪流量过程线和分蓄洪量

滞洪区; 珠湖蓄滞洪区设计蓄洪容积为 5.45 亿 m^3 , 占比 20%。康山蓄滞洪区分洪流量过程线与分蓄洪量见图 6(b), 其分洪流量在 2 h 以内达到 6362 m^3/s , 在 28 h 增长为 6710 m^3/s , 36 h 开始逐渐降为 0, 康山蓄滞洪区 24 h 分蓄洪量为 5.44 亿 m^3 , 48 h 分蓄洪量为 10.99 亿 m^3 , 72 h 分蓄洪量为 14.91 亿 m^3 , 在 92 h 达到最大分蓄洪量为 16.16 亿 m^3 。珠湖蓄滞洪区分洪流量过程线与分蓄洪量见图 6(c), 珠湖蓄滞洪区分洪流量在 2 h 以内达到 6440 m^3/s , 随后快速下降, 41 h 时降为 0; 珠湖蓄滞洪区 24 h 分蓄洪量为 4.37 亿 m^3 , 在 42 h 达到最大分蓄洪量 5.45 亿 m^3 , 珠湖蓄滞洪区分蓄洪量可以达到设计蓄洪容积。在蓄滞洪区进洪过程中, 康山蓄滞洪区在 92 h 时结束进洪, 蓄洪率为 97.5%, 珠湖、黄湖、方洲斜塘蓄滞洪区在 48 h 之内分蓄洪量达到最大值, 珠湖蓄滞洪区蓄洪率达到 100%, 黄湖蓄滞洪区和方洲斜塘蓄滞洪区蓄洪率在 85% 左右。

3.3 洪水演进分析

为了分析单退圩和蓄滞洪区在进洪后的淹没情况, 基于方案 5 的计算成果, 提取各单退圩和蓄滞洪区的关键信息, 包括洪水到达时间、淹没水深、淹没面积等。进一步计算单退圩和蓄滞洪区内的人口和耕地面积受灾情况, 参考鄱阳湖蓄滞洪区安全建设

相关设计和 2022 年单退圩调查数据,获取单退圩和蓄滞洪区的基本情况。

3.3.1 洪水淹没影响

根据模型计算的单退圩和蓄滞洪区的洪水演进情况,结合洪水到达时间以及区内人口和耕地的分布,计算单退圩和蓄滞洪区的淹没耕地面积和受灾人口的历时情况。图 7、图 8 和图 9 分别为单退圩、蓄滞洪区、康山蓄滞洪区进洪后的受灾人口和淹没耕地情况。

单退圩退人不退田,保护区内基本为水田和耕地,开始进洪后,高程较低的农田在 24 h 内被淹没,位于高处的农田也在 48 h 内进洪。圩堤保护区内的人口主要分布在保护区的腹地且地势较高的地方,受灾人口在 12 h 后递增。新妙湖圩是鄱阳湖 4 座 5 万亩以上单退圩之一,当新妙湖圩进洪,洪水最快到达靠近口门的村庄,12 h 后洪水演进至中段,36 h 后洪水到达远离口门的末端村庄,新妙湖圩淹没水深变化见图 10。单退圩启用 24 h 后,水深在

0.5 m 以下的耕地面积为 1 万 hm^2 ,水深在 0.5 ~ 2.0 m 之间的耕地面积为 0.38 万 hm^2 ,水深在 2 m 以上的耕地面积为 0.80 万 hm^2 ;单退圩启用 48 h 后,水深在 2 m 以上的耕地面积为 1.14 万 hm^2 ,水深在 0.5 m 以下的耕地面积仅为 0.58 万 hm^2 。

黄湖蓄滞洪区和方洲斜塘蓄滞洪区内多数面积为耕地且居住人口较少,地形较为平坦,因此洪水淹没速率更快。康山蓄滞洪区耕地面积在进洪后 18 h 内达到 1.05 万 hm^2 ,由于村庄分布在远离口门处,距离进洪口门较近的康山乡高程较高,12 h 后区内水位到达人口居住地后受灾人口递增,康山蓄滞洪区淹没水深变化见图 11。蓄滞洪区启用 24 h 后有 1.47 万 hm^2 耕地水深在 2 m 以上,占总耕地面积的 63.7%,启用 48 h 后有 1.81 万 hm^2 耕地水深在 2 m 以上,占比为 78.4%。

3.3.2 洪水损失分析

单退圩和蓄滞洪区内 48 h 的农业经济损失结果如图 12 所示。单退圩地区主要以耕地和水塘为

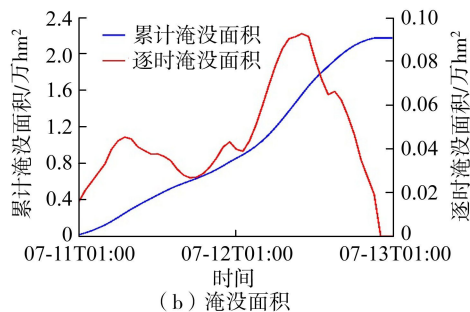
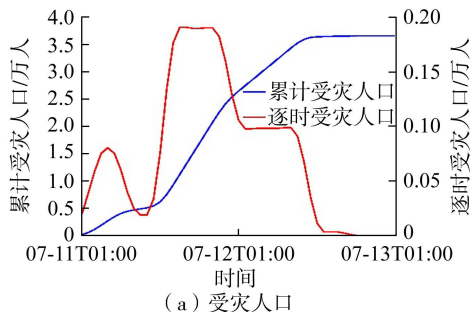


图 7 单退圩受灾人口和淹没耕地面积

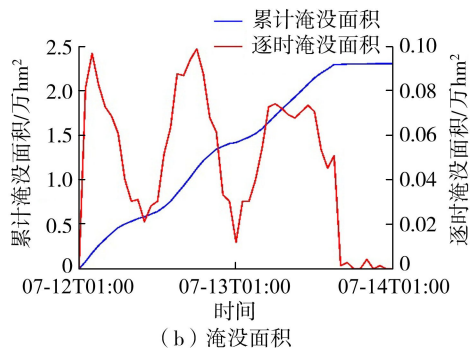
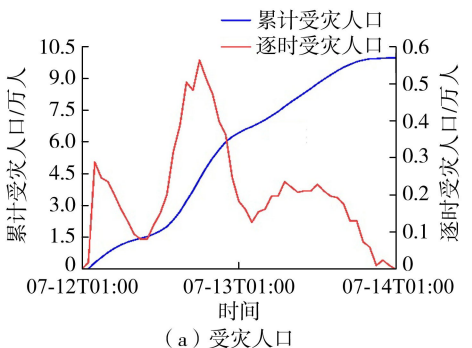


图 8 蓄滞洪区受灾人口和淹没耕地面积

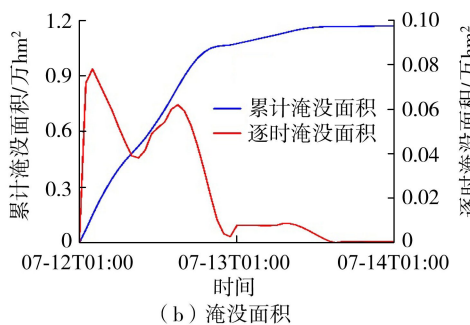
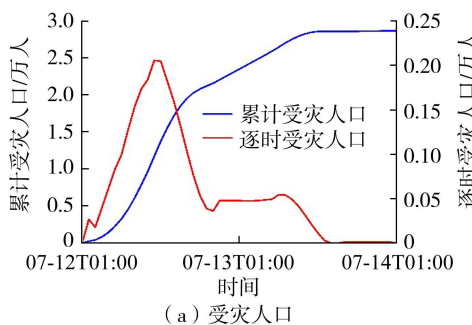


图 9 康山蓄滞洪区受灾人口和淹没耕地面积

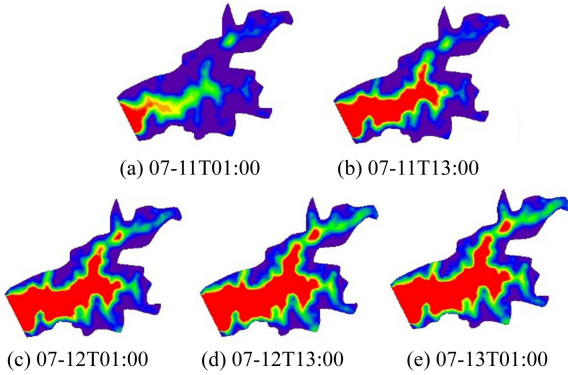
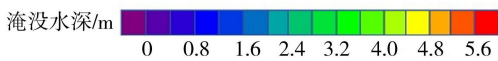


图 10 新妙湖圩启用后不同时刻淹没水深变化

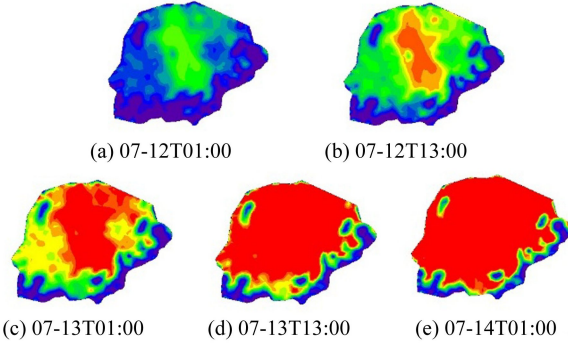
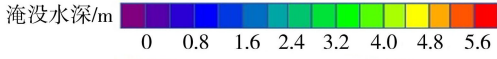


图 11 康山蓄滞洪区启用后不同时刻淹没水深变化

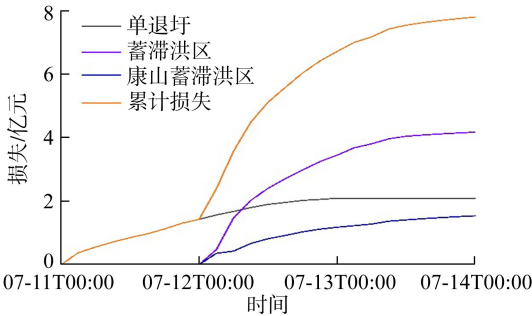


图 12 单退圩和蓄滞洪区农业经济损失

主,这些地区在洪水来临时阻力较小,更容易受到洪水的冲击。随着分洪流量的减少,农业经济损失的增速也在逐渐降低,单退圩启用 24 h 后造成 1.43 亿元的农业经济损失,启用 48 h 后造成 2.09 亿元的农业经济损失。蓄滞洪区启用 24 h 后造成 3.45 亿元的农业经济损失,启用 48 h 后造成 4.17 亿元的农业经济损失。洪水进入后,康山蓄滞洪区内首先受影响的是康山内湖周围的耕地。由于洪水迅速淹没了大片农田,农业经济损失的增速较快。随着洪水继续向蓄滞洪区内蔓延,康山内湖的广大水域延缓了洪水到达人口居住区域的时间,当洪水逐渐靠近村镇时,农业经济损失随着洪水水位的升高而不断增加。康山蓄滞洪区启用 24 h 内农业经济损失为

1.18 亿元,占蓄滞洪区总损失的 34.2%,启用 48 h 内造成 1.54 亿元的农业经济损失。蓄滞洪区中的珠湖蓄滞洪区、黄湖蓄滞洪区以及方洲斜塘蓄滞洪区在洪水进入后,同样经历了快速的损失增长。特别是在洪水进入后的 12 h 内,由于分洪流量大,这些地区的农业经济损失迅速增加,随着洪水水位不断升高,损失也逐渐累积。珠湖、黄湖、方洲斜塘蓄滞洪区启用 24 h 后造成损失 2.27 亿元,占蓄滞洪区总损失的 65.8%,启用 48 h 后造成损失 2.63 亿元。

4 结 语

本文基于 MIKE21 建立了耦合单退圩和蓄滞洪区的鄱阳湖及五河尾闾二维水动力模型,并进行了参数率定、方案分析和淹没分析。构建的鄱阳湖二维水动力学模型精度较好。分析对比单退圩和蓄滞洪区不同启用下主湖区水位变化,防洪效益最大的启用方案为单退圩启用水位为 21.50 m(保护面积万亩以下)和 22.30 m(保护面积万亩以上),蓄滞洪区启用水位为 22.50 m。启用 48 h 后,蓄洪量分别为 26.17 亿 m^3 和 5.69 亿 m^3 ,单退圩、蓄滞洪区经济损失为 2.09 亿元和 4.17 亿元。

参考文献:

- [1] LI Xianghu, ZHANG Qi, XU Chongyu, et al. The changing patterns of floods in Poyang Lake, China: characteristics and explanations[J]. *Natural Hazards*, 2015, 76(1): 651-666.
- [2] 胡振鹏,傅静. 长江与鄱阳湖水文关系及其演变的定量分析[J]. *水利学报*, 2018, 49(5): 570-579. (HU Zhenpeng, FU Jing. Quantitative study on hydrology relationship between the Yangtze River and Poyang Lake and its changes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(5): 570-579. (in Chinese))
- [3] 廖金源,康成英. 2020 年鄱阳湖流域超标准大洪水分析与思考[J]. *中国防汛抗旱*, 2021, 31(4): 45-48. (LIAO Jinyuan, KANG Shuying. Analysis and reflection on the excessive flood in the Poyang Lake Basin in 2020[J]. *China Flood & Drought Management*, 2021, 31(4): 45-48. (in Chinese))
- [4] 雷声,张秀平,袁晓峰,等. 鄱阳湖单退圩实践与思考[J]. *水利学报*, 2021, 52(5): 546-555. (LEI Sheng, ZHANG Xiuping, YUAN Xiaofeng, et al. Practice and thinking of SRPA around Poyang Lake region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(5): 546-555. (in Chinese))
- [5] 张秋霞,王义成. 二维非恒定流洪水演进模拟模型开发及应用[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(3): 62-64. (ZHANG Qiuxia, WANG Yicheng. Development and

- application of a two-dimensional unsteady flow flood evolution simulation model [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40 (3): 62-64. (in Chinese))
- [6] 何艳梅. 综合洪水风险管理理念下防洪法的防洪管理体制机制优化[J]. *水利经济*, 2024, 42(5): 72-81. (HE Yanmei. Optimization of flood control management system and mechanism of the Flood Control Law under concept of integrated flood risk management [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2024, 42(5): 72-81. (in Chinese))
- [7] 傅春, 付耀宗, 肖存艳, 等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(1): 33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD model in Yingtan City [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(1): 33-39. (in Chinese))
- [8] 杨民钦, 邱绵茹. 由 1998 年长江洪水对淮河行蓄洪区的思考[J]. *水利水电科技进展*, 1999, 19(2): 16-18. (YANG Minqin, QIU Mianru. Reflections on the Huaihe River Floodplain from the 1998 Yangtze River Floods [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 1999, 19(2): 16-18. (in Chinese))
- [9] 魏凯, 梁忠民, 王军. 基于 MIKE21 的濠洼蓄滞洪区洪水演算模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(6): 16-19. (WEI Kai, LIANG Zhongmin, WANG Jun. Flood routing simulation of Mengwa Detention Basin based on MIKE21 [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(6): 16-19. (in Chinese))
- [10] 陈平, 傅长锋, 于京要, 等. 基于 MIKE 21 数值模拟蓄滞洪区洪水演进研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(8): 113-116. (CHEN Ping, FU Changfeng, YU Jingyao, et al. Research on the numerical simulation of flood routing for the flood detention basin based on MIKE 21 [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(8): 113-116. (in Chinese))
- [11] 常楚阳, 周建中, 徐少军, 等. 基于 MIKE21FM 的杜家台分蓄洪区洪水演进模拟[J]. *人民长江*, 2017, 48(增刊 1): 14-18. (CHANG Chuyang, ZHOU Jianzhong, XU Shaojun, et al. Simulation of flood evolution in Dujiatai flood diversion and storage area based on MIKE21FM [J]. *Yangtze River*, 2017, 48(Sup1): 14-18. (in Chinese))
- [12] 蒋水华, 黄中发, 黄劲松, 等. 蓄滞洪区洪水演进模拟及堤防溃决损失评估方法[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(1): 131-139. (JIANG Shuihua, HUANG Zhongfa, HUANG Jinsong, et al. Flood evolution simulation in flood storage and detention area and evaluation methods for the dike-break losses [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2020, 31(1): 131-139. (in Chinese))
- [13] 傅春, 晏洪. 鄱阳湖单退圩堤防洪优化调度研究[J]. *人民长江*, 2009, 40(24): 9-11. (FU Chun, YAN Hong. Research on optimal operation of flood control for SRPA in Poyang Lake [J]. *Yangtze River*, 2009, 40(24): 9-11. (in Chinese))
- [14] 温天福, 雷声, 牛娇, 等. 2020 年鄱阳湖单退圩分洪效果及其方案优选[J]. *湖泊科学*, 2024, 36(6): 1888-1902. (WEN Tianfu, LEI Sheng, NIU Jiao, et al. Effects of flood diversion and scheme selection of Lake Poyang semi-restoration polder in 2020 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(6): 1888-1902. (in Chinese))
- [15] 马强, 刘佳明, 卢程伟. 2020 年鄱阳湖区单退圩堤运用效果分析及湖区防洪治理思考[J]. *水利水电快报*, 2021, 42(1): 39-42. (MA Qiang, LIU Jiaming, LU Chengwei. Analysis of the application effect of SRPA in Poyang Lake District in 2020 and reflection on flood control and management in the lake area [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2021, 42(1): 39-42. (in Chinese))
- [16] 江西省水利规划设计研究院. 鄱湖安澜百姓安居专项工程总体方案[R]. 南昌: 江西省水利规划设计研究院, 2020.
- [17] HU Qi, FENG Song, GUO Hua, et al. Interactions of the Yangtze River flow and hydrologic processes of the Poyang Lake, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 347(1/2): 90-100.
- [18] GUO Hua, HU Qi, JIANG Tong. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 355(1/2/3/4): 106-122.
- [19] 雷声. 2020 年鄱阳湖洪水回顾与思考[J]. *水资源保护*, 2021, 37(6): 7-12. (LEI Sheng. Review and reflection on Poyang Lake flood in 2020 [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(6): 7-12. (in Chinese))
- [20] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE21: a modeling system for rivers and channels reference manual [M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2007.
- [21] 李云良, 张奇, 姚静, 等. 鄱阳湖湖泊流域系统水文水动力联合模拟[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(2): 227-235. (LI Yunliang, ZHANG Qi, YAO Jing, et al. Integrated simulation of hydrological and hydrodynamic processes for Lake Poyang-catchment system [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(2): 227-235. (in Chinese))
- [22] 朱世云, 于永强, 俞芳琴, 等. 基于 MIKE21 FM 模型的洞庭湖区平原城市洪水演进模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(2): 132-138. (ZHU Shiyun, YU Yongqiang, YU Fangqin, et al. Flood routing simulation of Dongting Lakeshore plain city based on MIKE21 FM model [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2018, 29(2): 132-138. (in Chinese))

(下转第 68 页)

- [12] 熊悦丁. 辽河铁岭段污染物入河通量及支流污染物贡献率分析[J]. 水利规划与设计, 2022(9): 31-35. (XIONG Yueding. Analysis of pollutant flux into the river and pollutant contribution rate of tributaries in Tieling Section of Liaohe River [J]. Water Resources Planning and Design, 2022(9): 31-35. (in Chinese))
- [13] 赵子豪, 袁静, 田泽斌, 等. 洞庭湖出入湖氮磷通量特征及滞留效应研究[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(3): 74-82. (ZHAO Zihao, YUAN Jing, TIAN Zebin, et al. Characteristics analysis and retention effect of phosphorus and nitrogen fluxes in Dongting Lake [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(3): 74-82. (in Chinese))
- [14] 田泽斌, 王丽婧, 李小宝, 等. 洞庭湖出入湖污染物通量特征[J]. 环境科学研究, 2014, 27(9): 1008-1015. (TIAN Zebin, WANG Lijing, LI Xiaobao, et al. Characteristics analysis of pollutant influx and outflux in Dongting Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(9): 1008-1015. (in Chinese))
- [15] 孙瑞瑞, 吕文, 顾林森, 等. 阳澄西湖南湖河道水质时空变化特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 105-108. (SUN Ruirui, LYU Wen, GU Linsen, et al. Spatial and temporal variation characteristics of water quality in rivers flowing into West Yangcheng Lake [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 105-108. (in Chinese))
- [16] 刘帅, 谢茂嵘, 吕文, 等. 阳澄湖入湖河道分类、污染特征分析及治理策略[J]. 湖泊科学, 2024, 36(3): 741-755. (LIU Shuai, XIE Maorong, LYU Wen, et al. Classification, pollution characteristics and treatment strategy of the inflow rivers into Lake Yangcheng [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(3): 741-755. (in Chinese))
- [17] 黄伟, 诸青. 阳澄湖生态治理与修复关键技术研究与应用[J]. 水土保持应用技术, 2023(1): 27-29. (HUANG Wei, ZHU Qing. Research and application of key technologies for ecological governance and restoration of Yangcheng Lake [J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2023(1): 27-29. (in Chinese))
- [18] 陈霞, 周毅, 周强, 等. 环太湖出入湖污染物通量时空变化规律分析[J]. 水利信息化, 2023(1): 29-32. (CHEN Xia, ZHOU Yi, ZHOU Qiang, et al. Analysis on temporal and spatial variation of pollutant flux around Taihu Lake [J]. Water Resources Informatization, 2023(1): 29-32. (in Chinese))
- [19] 彭秋桐, 李中强, 邓绪伟, 等. 城市湖泊氮磷沉降输入量及影响因子: 以武汉东湖为例[J]. 环境科学学报, 2019, 39(8): 2635-2643. (PENG Qiutong, LI Zhongqiang, DENG Xuwei, et al. Nitrogen and phosphorus deposition in urban lakes and its impact factors: a case study of East Lake in Wuhan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(8): 2635-2643. (in Chinese))
- [20] 吕文, 孙瑞瑞, 王诚, 等. 阳澄湖西湖水源地富营养化年内变化分析[J]. 环境科学导刊, 2018, 37(5): 33-37. (LYU Wen, SUN Ruirui, WANG Cheng, et al. Analysis on annual variation of eutrophication in West Lake water source of Yangcheng Lake [J]. Environmental Science Survey, 2018, 37(5): 33-37. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-12-07 编辑: 俞云利)

(上接第 62 页)

- [23] 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))
- [24] LIU Yizhuang, YANG Shuqing, JIANG Changbo, et al. Flood mitigation using an innovative flood control scheme in a large lake: Dongting Lake, China [J]. Applied Sciences, 2019, 9(12): 2465.
- [25] LI Bing, YANG Guishan, WAN Rongsong, et al. Hydrodynamic and water quality modeling of a large floodplain lake (Poyang Lake) in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(35): 35084-35098.
- [26] NASH J E, SUTCLIFFE I V. River flow forecasting through conceptual models part 1-a discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [27] HO H, LIANG Dongfang, HUANG Guoxian, et al. Numerical study of hydro-environmental processes of Poyang Lake subject to engineering control [J]. Hydrology Research, 2021, 52(3): 760-786.
- [28] SINGH J, KNAPP H V, ARNOLD J G, et al. Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41(2): 343-360.
- [29] CHEN Jie. Dynamic and loss analysis of flood inundation in the floodplain area of the lower Yellow River considering ecological impact [J]. Journal of Engineering and Applied Science, 2023, 70(1): 26.
- [30] 国家防汛抗旱总指挥部. 长江防御洪水方案[R]. 北京: 国家防汛抗旱总指挥部, 2015.

(收稿日期: 2024-04-30 编辑: 俞云利)