

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.021

基于洪水资源化的洪泽湖后汛期蓄水策略

王蔚¹,董增川²,崔璨²,罗赞³,杨婕⁴,童建⁵,张天衍²,张游⁵

(1. 南京水利科学研究院水工水力学研究所,江苏南京 210029; 2. 河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098;
3. 黄河水利科学研究院,河南郑州 450003; 4. 杭州市钱塘区水利发展服务中心,浙江杭州 311222;
5. 江苏省水利厅水土保持监测总站,江苏南京 210029)

摘要:基于洪泽湖的地理地形特征,采用 MIKE 平台构建了湖泊及其蓄滞洪区联合运用的水文水动力模型,实现了对湖、陆水流运动和水量交换与控制的精细化模拟,并制定了后汛期不同蓄水时机和蓄水方案构成的蓄水策略样本库;通过丰、平、枯多种来水情景大规模的数值模拟,对不同典型年蓄水策略进行了评价和优选。结果表明:若洪泽湖后汛期来水属于丰水年系列,应于9月10—20日偏后期伺机蓄水,采用“先泄后蓄”、泄水效率较高的蓄水策略,尽量避开完整的洪水过程;若来水属于平水年系列,应于9月10—20日偏前期伺机蓄水,采用“先泄后蓄”、泄水效率较低的蓄水策略,在洪水的退水阶段起蓄;若来水属于枯水年系列,应于8月31日—9月10日起蓄,采用“先蓄后泄”的蓄水策略,泄水效率的选择应结合来水预报信息,在洪水的起涨段或中段即可拦蓄。

关键词:过水型湖泊;洪水资源化;蓄水调度;水文水动力模型;逼近理想解排序法;洪泽湖

中图分类号:TV877 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0168-12

Water storage strategy in post-flood period for Hongze Lake based on flood utilization // WANG Wei¹, DONG Zengchuan², CUI Can², LUO Yun³, YANG Jie⁴, TONG Jian⁵, ZHANG Tianyan², ZHANG You⁵ (1. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 4. Water Development Service Centre of Qiantang District in Hangzhou City, Hangzhou 311222, China; 5. Soil and Water Conservation Monitoring Station of Jiangsu Provincial Department of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the geographical and topographical characteristics of Hongze Lake, the MIKE platform was introduced to build a hydrological-hydrodynamic model for the incorporated system of the lake and its flood detention basin to realize an elaborate simulation of flow movement and water exchange and control between lakes and lands. Then, we developed a water storage strategy sample library composed of different impounding times and water storage schemes in the post-flood period, and carried out large-scale numerical simulations under various inflow scenarios, including high-flow, medium-flow, and low-flow scenarios. Finally, water storage strategies for different typical years were selected and evaluated. The results show that when facing a high-flow period, the impounding time should be set later between September 10th and September 20th, and a scheme of discharge before storage with higher discharge efficiency is recommended, in which a complete flood process should be avoided as far as possible; when facing a medium-flow period, the impounding time should be set earlier between September 10th and September 20th, starting in the flood recession stage, and a scheme of discharge before storage with relatively low discharge efficiency is recommended; when facing a low-flow period, the impounding time should be set between August 31st and September 10th, and a scheme of storage before discharge is recommended, in which the selection of discharge scale should be combined with flood forecasts, and the flood should be intercepted and stored in the rising or middle stage.

Key words: water-carrying lake; flood utilization; water storage dispatch; hydrological-hydrodynamic model; technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS); Hongze Lake

基金项目:江苏省水利科技基金(2019003);国家重点研发计划(2018YFC1508200)

作者简介:王蔚(1995—),女,工程师,硕士,主要从事城市水环境治理与城市防洪研究。E-mail:weiwang@nhri.cn

通信作者:董增川(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源规划管理与可持续利用研究。E-mail:zcdong@hhu.edu.cn

受季风气候影响,中国半干旱半湿润地区水资源时程分布极不均匀。近年来,随着经济的快速发展与社会用水需求的不断增长,诸多流域汛期防洪减灾困难和非汛期水资源短缺的矛盾愈发突出。因此,通过优化水利工程运行方式来承担适度防洪风险以获得更大蓄水效益的洪水资源化领域^[1-3]成为诸多学者研究的热点,该领域主要涵盖了洪水资源潜力评价^[4-5]、水库汛限水位分期运用^[6-7]及优化控制、蓄滞洪区低标准运用^[8-9]、洪水风险及效益评估^[10-11]等方面内容。李晓英等^[12]提出了基于二元极限理论的流域洪水资源利用现状与潜力分析方法,说明提高调控能力是挖掘水库水资源利用潜力的关键;汛限水位分期运用以刘克琳等^[13]提出的Fisher最优分割法最为成熟,具备多指标聚类 and 时序性划分等优点;汛限水位的动态控制则多结合实时洪水预报信息,采用不同智能算法^[14-17]对水库群多目标优化调度模型进行求解,如补偿调节法^[18-19]、预蓄预泄法^[20-21]及决策调度法^[22],用于指导汛限水位的实时调控。以蓄滞洪区为代表,Vorogushyn等^[23]构建了河道-堤防-漫滩为主体的蓄滞洪区破坏蓄水流量演进模型,指出蓄滞洪区的运用在降低下游防洪风险的同时可以增蓄水量,但也给区域内的农作物带来了较大的经济损失;相关学者结合水文水动力学数值模拟^[24-25],建立了考虑淹没损失、供水效益等因素的决策方法^[26],提出了蓄滞洪区分区分类运用与避险转移相结合的优化控制模式。

上述研究在以水库、蓄滞洪区为主体的洪水资源利用调控技术方面取得了突破性进展,延长了洪水在陆面的滞留时间,对于转移区域防洪压力、增加流域水源供给等均有良好的效果。然而大型过水型湖泊在功能上往往同时具有水库和蓄滞洪区的双重属性,如入湖洪水通常是多河流、多通道同时入湖,使得入湖洪水有别于入库洪水^[27-29];同时由于湖面无明显的汇流过程,水位-流量关系曲线适用性较差;此外,蓄滞洪区的存在所导致的先泄水行洪、后破坏滞洪的现象会使湖泊水位产生巨大波动。因此对其研究具有重要的学术和应用价值。

本文针对后汛期洪泽湖及其蓄滞洪区防洪与蓄水的双向博弈难题,利用水文水动力模型代替传统的调洪演算,基于 MIKE 平台构建了一维河网与二维洪泛区耦合的河网湖泊洪水演进模拟模型;拟定了具有规律性的后汛期蓄水策略,对各典型年开展大规模精细化模拟,并基于逼近理想解排序法 (technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 对蓄水策略进行评价与优选,以期 为过水型湖泊的洪水资源化利用和管理提供一套系

统的理论体系和技术方法。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

洪泽湖位于东经 118° 10′ ~ 118° 52′、北纬 33° 06′ ~ 33° 40′,是中国第四大淡水湖兼淮河流域最大的湖泊型水库。受东亚季风影响显著,区域内降雨时空分布不均,多集中于 5—8 月。目前洪泽湖的正常蓄水位为 13.33 m,相应的水域面积为 1 793 km²,库容为 37.3 亿 m³。死水位、汛限水位、设计洪水位、校核洪水位等特征水位分别为 11.13 m、12.33 m、15.83 m、16.83 m,其防洪库容为 98 亿 m³。

洪泽湖的主要入湖河道位于湖泊西部,有淮河、怀洪新河、新濉河、老濉河、新汴河、徐洪河、池河 7 条入湖河流,其中淮河是洪泽湖的主要补给来源。湖区主要有 5 个水文站,分别为蒋坝站 (S1)、老子山站 (S2)、香城庄站 (S3)、临淮头站 (S4)、尚嘴站 (S5)。区域主要防洪工程由泄流河道及对应控制建筑物、洪泽湖大堤、蓄滞洪区和行洪区 3 部分组成:①泄流河道主要为淮河入江水道、苏北灌溉总渠、淮河入海水道等,分别由三河闸 (R1)、高良涧闸 (R2) 和二河闸 (R3) 控制下泄,形成以入江为主、入海为辅的泄洪布局;②洪泽湖大堤位于湖区东部淮阴市内,全长 67.3 km,作为淮河下游 200 万 hm² 耕地、2 000 万人口的防洪屏障,主要起到拦蓄洪水的作用;③蓄滞洪区和行洪区占地面积分别为 2 132 km² 和 197.8 km²,当湖区水位超过 14.33 m 时开启圩区强制滞洪,直至洪水警报解除为止。研究区概况如图 1 所示。

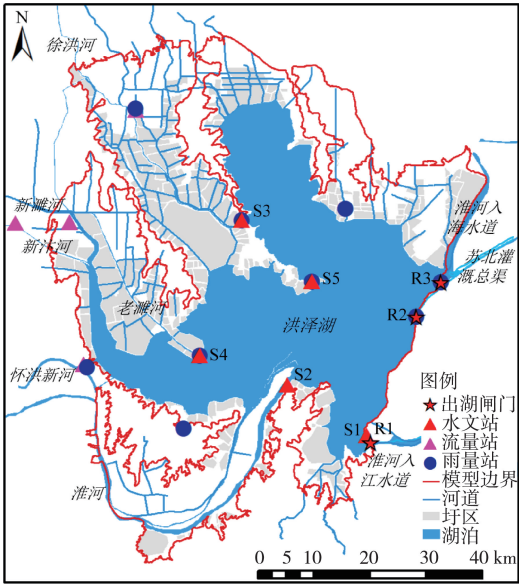


图1 研究区概况

Fig.1 Schematic diagram of study area

1.2 数据来源

1959—2014 年主要出入湖河道的日径流量数据以及 1979—2014 年湖区周边逐日降水、蒸发与水位数据来自中华人民共和国水利部淮河水利委员会。洪泽湖及周边蓄滞洪区建模所需的基础地形与工程资料,包括 5m×5m DEM 地形图、河流水系及河道断面、水工建筑物及堤防、土地利用分类等,均来自江苏省水利厅。汛期分阶段成果来自江苏省水文水资源勘测局。

2 湖泊水文水动力模型

为了实现对洪泽湖湖区及周边蓄滞洪区和行洪区、出入湖河道及闸门处水流运动、水量交换与控制的精细化模拟,本文基于 MIKE 11 建立了一维河网水动力模型,基于 MIKE 21 建立了二维洪泛区水动力模型,并在 MIKE FLOOD 模块中耦合一、二维模型。

2.1 一维河网水动力模型

一维河网模型以圣维南方程组为控制方程,方程组采用 Abbott 等^[30]提出的六点隐式差分格式进行离散,该离散格式能够交替计算按序排列的网格水位或流量,采用双向消除法求解离散方程。洪泽

湖区域周边一维河网模型在建模过程中共构建了对洪泽湖调蓄作用具有较大影响的河流沟渠 128 条、圩内河道 322 条,同时描述了 2 135 个河道断面、河道糙率以及相关水工建筑物的调度规则。建模数据如图 2 所示,该模型用于模拟一维条件下闸门启闭对河道水流运动的影响。

2.2 二维洪泛区水动力模型

二维洪泛区水动力模型服从 Boussinesq 和流体静压的假设,以不可压缩平均 Navier-Stokes 方程为控制方程,分别采用有限体积法^[31]和二阶精度的两步 Runge-Kutta 法^[32]对控制方程进行空间和时间上的离散。洪泽湖二维水动力模型在建模过程中,使用了 1:10 000 比例尺地形图和高分辨率 5 m×5 m 数字高程数据,将研究区划分出 85 894 个非结构化三角网格,概化道路 1 634 段,并根据下垫面的具体类型设置不同的糙率值,模型采用实际入流过程作为上边界,以出湖的水位-流量关系作为下边界。建模数据如图 3 所示,该模型用于计算和模拟湖区水体涌入周边蓄滞洪区的淹没过程。

2.3 一、二维耦合的洪水演进模拟模型

一、二维耦合的洪水演进模型示意图如图 4 所

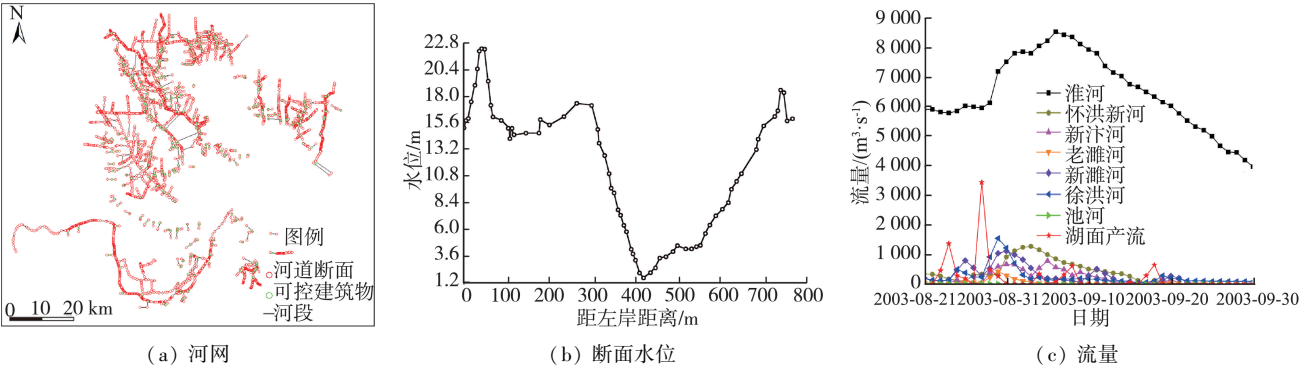


图 2 一维河网水动力模型建模数据

Fig. 2 Data for construction of one-dimensional river network hydrodynamic model

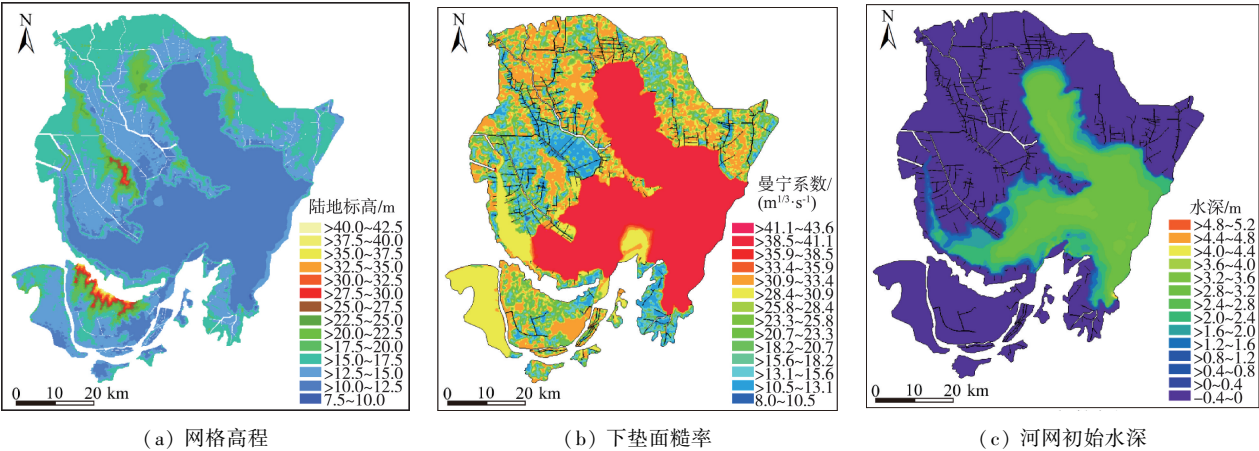


图 3 二维洪泛区水动力模型建模数据

Fig. 3 Data for construction of two-dimensional flood plain hydrodynamic model

示,模型用于实现洪水在河网、蓄滞洪区、湖泊三者之间的动态演进过程。模型在入湖河道与洪泽湖湖区、破圩口门与蓄滞洪区之间建立标准连接,将连接线映射到一个或多个网格单元的边界上形成耦合线,一维模型为二维模型提供边界流量,二维模型则将耦合线上的平均水位值返回给一维模型;模型在圩内河道与洪泛区之间建立侧向连接,将二维模型的网格单元从侧面连接到一个一维模型的河段上,耦合线由坐标确定,耦合线映射到的网格单元需要参与耦合,采用水工建筑物的流量公式计算通过侧向连接的水流大小。标准连接与侧向连接如图5所示。

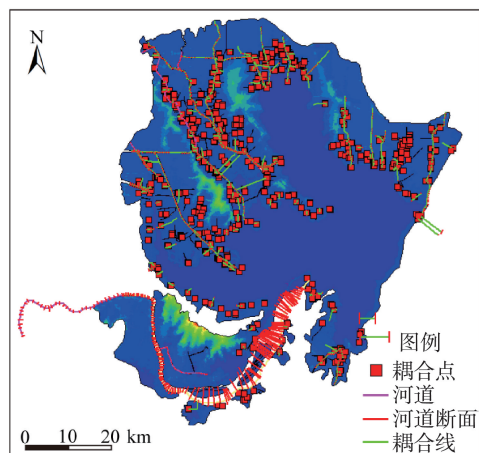
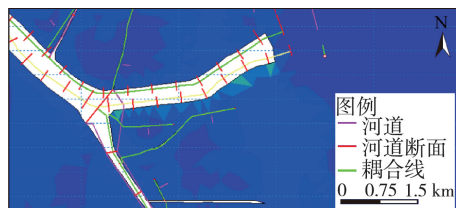
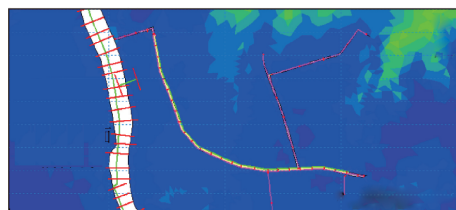


图4 耦合模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of coupling model



(a) 徐洪河入河口标准连接



(b) 团结河侧向连接

图5 标准连接与侧向连接

Fig.5 Standard connection and lateral connection

2.4 模型率定及验证

选取1991年和2006年作为实况年,对一维河道糙率及二维洪泛区下垫面糙率进行参数率定,结果均通过合理性检验^[33-34]。模型验证则采用2003年和2007年的典型洪水过程,对蒋坝(洪泽湖代表

水文站)、老子山、香城庄、临淮头、尚嘴5个水文站的实测水位与模拟水位进行对比,结果如图6所示。2003年洪水过程中5个测站的平均绝对误差分别为0.01 m、0.04 m、0.01 m、0.02 m、0.06 m,最大绝对误差分别为0.15 m、0.15 m、0.13 m、0.17 m、0.17 m;2007年洪水过程中5个测站的平均绝对误差分别为0.04 m、0.04 m、0.01 m、0.03 m、0.04 m,最大绝对误差分别为0.11 m、0.11 m、0.12 m、0.15 m、0.13 m。水位变化过程、峰现时间基本一致,说明该模型精度较高,合理可靠,能够为大规模精细化模拟提供支撑。

3 后汛期蓄水策略优选

根据淮河流域的气候特征和洪水特点,通常洪泽湖汛期划分为前汛期(5月1日—6月20日)、主汛期(6月21—8月20日)及后汛期(8月21日—9月30日)^[35]。作为汛期与非汛期的过渡期,后汛期同时具有汛期防洪与非汛期蓄水的双重任务,因此,在此时段内开展湖泊后汛期提前蓄水策略研究,寻求两者动态平衡,是解决区域内供水短缺,提高流域用水效率的有效手段。

3.1 蓄水策略样本库

从蓄水时机和闸门蓄水调度规则两个角度出发,组合制定蓄水策略样本库。

a. 蓄水时机。汛末蓄水时机指蓄水调度的开始时间,将后汛期的起始时刻作为第一个蓄水时机,并以此为起点等间隔拟定若干时刻作为蓄水时机方案集。时间间隔需要根据后汛期的洪水特性选取,通过计算和分析1959—2018年后汛期径流的集中度及集中期得出,自2000年以来径流在后汛期的分布偏向均匀化,无明显的聚集性特征,由此印证了等时间间隔拟定蓄水时机的合理性。根据洪水持续时间的排频拟合曲线,95%的洪水持续时间在10 d以上,因此将其作为时间间隔设置了4类蓄水时机,即8月21日、8月31日、9月10日和9月20日。

b. 蓄水调度规则。区别于水库优化调度中的最优水位过程线,洪泽湖后汛期的蓄水调度规则指在不同水位条件下,多个下泄闸门组合下泄,在保证防洪风险率的前提下,在汛末将湖泊蓄水至设定的蓄水目标。具体设计原则为:①确定水位的操控区间。研究显示12.33~13.33 m是洪泽湖后汛期汛限水位的推荐范围,对13.33 m及以上的水位保持现有汛期防洪调度规则;对低于12.33 m的水位,严格控制下泄流量、适度抬高水位,在后汛期寻找蓄水时机以达到汛末蓄至正

— 实测水位 模拟水位

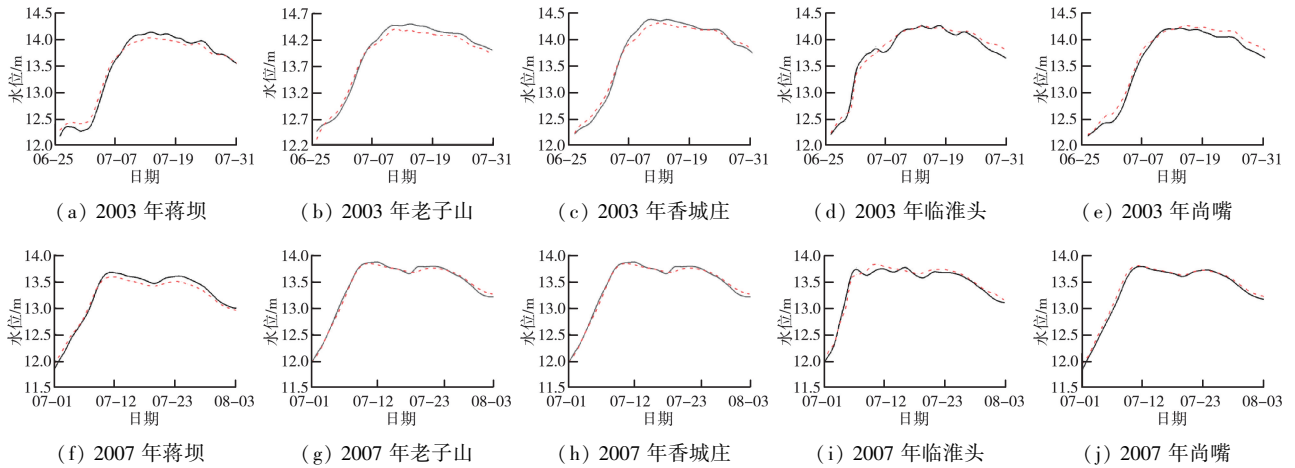


图6 5个水文站模拟水位与观测水位对比

Fig. 6 Comparison between simulated and observed water levels at five gaging stations

常蓄水位的目的^[35]。②选择合适的蓄水闸门。分析水位操控区间范围内出湖闸门的防洪调控规则,舍弃特殊情况下使用的闸门和泄流能力较小的闸门。③制定合理的闸门下泄流量。鉴于前汛期和后汛期来水规律的相似性,以前汛期的调度规则为基准调整后汛期的下泄流量,若来水较丰,在12.83 m低水位时降低下泄水量,在13.33 m高水位时增加下泄水量;若来水较少,则在达到汛末蓄水位之前不下泄。

后汛期蓄水方案的制定结果如表1所示。由于洪泽湖没有最小下泄控制约束,因此不对闸门的下泄流量设下限。现状汛期调度规则中规定湖区水位低于13.83 m时,只有三河闸和高良涧闸控制下泄,因此蓄水方案制定结果如下:①从偏安全与偏风险两个角度出发,针对来水较丰与较枯的情景,定义了“先泄后蓄”与“先蓄后泄”的调度规则,前者侧重于防洪安全,后者侧重于蓄水保证。将方案1~4称为“先泄后蓄”方案(当湖泊水位达到12.83 m时即开始下泄);方案5~8则称为“先蓄后泄”方案(当湖泊水位达到13.33 m时才开始下泄),同时采用最丰来水年2003年试算出两类蓄水方案的上限值,以

此设置方案1与方案8。②对于“先泄后蓄”方案1,由于采用1600 m³/s的下泄流量已不能满足汛末蓄满的要求,故根据设计原则③拟定了方案3和4,由此形成了泄水效率逐渐降低、蓄水效率逐渐提高的蓄水方案1~4。③对于“先蓄后泄”方案,为保证偏安全与偏风险方案的连贯性,令方案5与方案4在水位13.33 m保持相同的下泄流量,由此形成了泄水效率逐渐提高、蓄水效率逐渐降低的方案5~8。综上所述,共设置4类蓄水时机和8种蓄水方案组成的32组蓄水策略。

3.2 典型年选取

由于主汛期来水的量级及持续时间会对后汛期的初始水位(模型模拟初始值)产生一定影响,因此需要结合主汛期到后汛期的丰枯转换情况完成典型年的分类选取。对1959—2018年洪泽湖主汛期及后汛期来水总量进行分期排频分析,基于丰枯转换情况及洪水类型,在后汛期丰、平、枯每种来水类型中分别选取其主汛期来水为丰、平、枯的年份作为典型年,形成了含有丰丰、丰平、丰枯、平丰、平平、平枯、枯丰、枯平、枯枯9种转变形式的典型年样本库,如表2所示。

表1 后汛期蓄水方案

Table 1 Water storage schemes in post-flood period

蒋坝 水位/m	下泄流量/(m ³ ·s ⁻¹)															
	方案1		方案2		方案3		方案4		方案5		方案6		方案7		方案8	
	三河 闸	高良 涧闸	三河 闸	高良 涧闸	三河 闸	高良 涧闸	三河 闸	高良 涧闸	三河 闸	高良 涧闸	三河 闸	高良 涧闸	三河 闸	高良 涧闸	三河 闸	高良 涧闸
12.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12.83	1 000	600	1 000	600	500	450	500	450	0	0	0	0	0	0	0	0
13.33	2 000	800	1 000	800	1 000	800	500	650	500	650	1 000	800	2 000	800	3 000	800
13.83	8 600	1 000	8 600	1 000	8 600	1 000	8 600	1 000	8 600	1 000	8 600	1 000	8 600	1 000	8 600	1 000

注:方案2为现状前汛期调度规则。

表 2 典型年选取结果

Table 2 Results of typical year selection

年份	来水特征			后汛期洪水特征			
	主汛期	后汛期	后汛期来水频率/%	开始日期	结束日期	洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	峰现日期
2003	丰	丰	6.56	8月23日	9月16日	6 922.89	8月30日
2008	平	丰	24.59	8月20日	8月31日	5 509.55	8月24日
2004	枯	丰	27.87	8月27日	9月5日	3 470.30	9月1日
				9月20日	9月29日	1 701.00	9月23日
2000	丰	平	44.26	8月21日	9月20日	2 242.50	9月2日
				9月24日	12月15日	4 335.20	10月4日
1985	平	平	52.46	8月22日	9月10日	1 616.85	8月24日
				9月15日	9月28日	2 387.00	9月20日
2011	枯	平	54.10	8月24日	9月5日	3 451.51	8月27日
1996	丰	枯	63.93	9月5日	9月30日	2 260.30	9月23日
2006	平	枯	68.85	8月25日	9月22日	1 505.62	9月11日
1994	枯	枯	86.89	8月26日	9月23日	947.90	9月10日

3.3 基于灰色统计法的评价指标选择

从防洪风险和蓄水效益两方面进行蓄水策略评价。根据湖泊水资源管理与调度的关键控制要素,初步选取6项评价指标(蒋坝水位超限率、淹没面积、蓄水过程最高水位、汛末蓄水位、增加蓄水量和弃水率)构成评价指标体系,如表3所示。采用灰色统计法从评价指标体系中选出重要程度排在前三位的蒋坝水位超限率、汛末蓄水位及弃水率作为后汛期蓄水策略的评价指标。

表 3 蓄水策略评价指标选取

Table 3 Selection of evaluation indexes for water storage strategy

评价指标	灰类决策系数			重要程度
	$\eta_{\text{高}}$	$\eta_{\text{中}}$	$\eta_{\text{低}}$	
蒋坝水位超限率 C_1	8.67	1.33	0.00	高
淹没面积 C_2	0.67	6.67	2.66	中
蓄水过程最高水位 C_3	1.00	7.67	1.33	中
汛末蓄水位 C_4	8.67	1.33	0.00	高
增加蓄水量 C_5	3.67	5.33	1.00	中
弃水率 C_6	7.67	2.33	0.00	高

注: $\eta_{\text{高}}$ 、 $\eta_{\text{中}}$ 、 $\eta_{\text{低}}$ 分别为评价指标属于高、中、低灰类的决策系数,决策系数的最大值对应的灰类指向该指标的重要程度。

3.4 基于 TOPSIS 法的蓄水策略优选

基于上述选取的3项评价指标,采用 TOPSIS 根据评价对象与最优目标间的逼近程度对各典型年的32个后汛期蓄水策略进行评价及多目标决策优选。根据不同典型年蓄水策略的水文水动力模拟结果,建立原始评价指标数据矩阵 X ;将极小型指标(C_1 、 C_6)及中间型指标(C_4)分别做正向转化,得到正向标准化矩阵 Z ;由矩阵 Z 得到各项评价指标的正、负理想解,计算蓄水策略与正、负理想解之间的欧氏距离 D^+ 与 D^- ;最后求得蓄水策略的相对贴近度 d , d 值越大表明该蓄水策略越贴近理想蓄水策略,由此对各蓄水策略进行排序。计算公式如下:

$$z_{ij} = \begin{cases} x_{j,\max} - x_{ij} & \text{极小型指标} \\ 1 - \frac{|x_{ij} - x_{j,\text{best}}|}{\max |x_{ij} - x_{j,\text{best}}|} & \text{中间型指标} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} z_j^+ = \max(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{pj}) \\ z_j^- = \min(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{pj}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^q w_j (z_j^+ - z_{ij}^+)^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^q w_j (z_j^- - z_{ij}^-)^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$d_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (4)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个蓄水策略第 j 项指标的初始值 ($i = 1, 2, \dots, 32; j = 1, 2, 3$); z_{ij} 为正向转化后的指标值; $x_{j,\max}$ 、 $x_{j,\text{best}}$ 分别为第 j 项指标的最大值和最优值; z_j^+ 、 z_j^- 分别为第 j 项指标的正、负理想解; D_i^+ 、 D_i^- 分别为第 i 个蓄水策略与正、负理想解间的欧式距离; p 、 q 分别为蓄水策略数和评价指标数; w_j 为第 j 项指标的权重; d_i 为第 i 个蓄水策略的相对贴近度。

4 结果与分析

4.1 不同典型年模拟结果及评价

将288场次洪水模拟结果分成丰、平、枯3类典型年、4类蓄水时机及8种蓄水方案,分类统计蓄水过程中蒋坝水位超限率、弃水率与汛末蓄水位。

蒋坝水位超限率统计结果如图7所示。从蓄水方案角度,方案1~4与方案5~8相比较,整体防洪风险低,且下泄量的大小对超限率有显著影响;从蓄水时机角度,无论采用“先泄后蓄”还是“先蓄后泄”方案,蓄水时机对湖泊系统的防洪风险影响程度均较大,且蓄水时机越晚,防洪风险越低。上述两点符

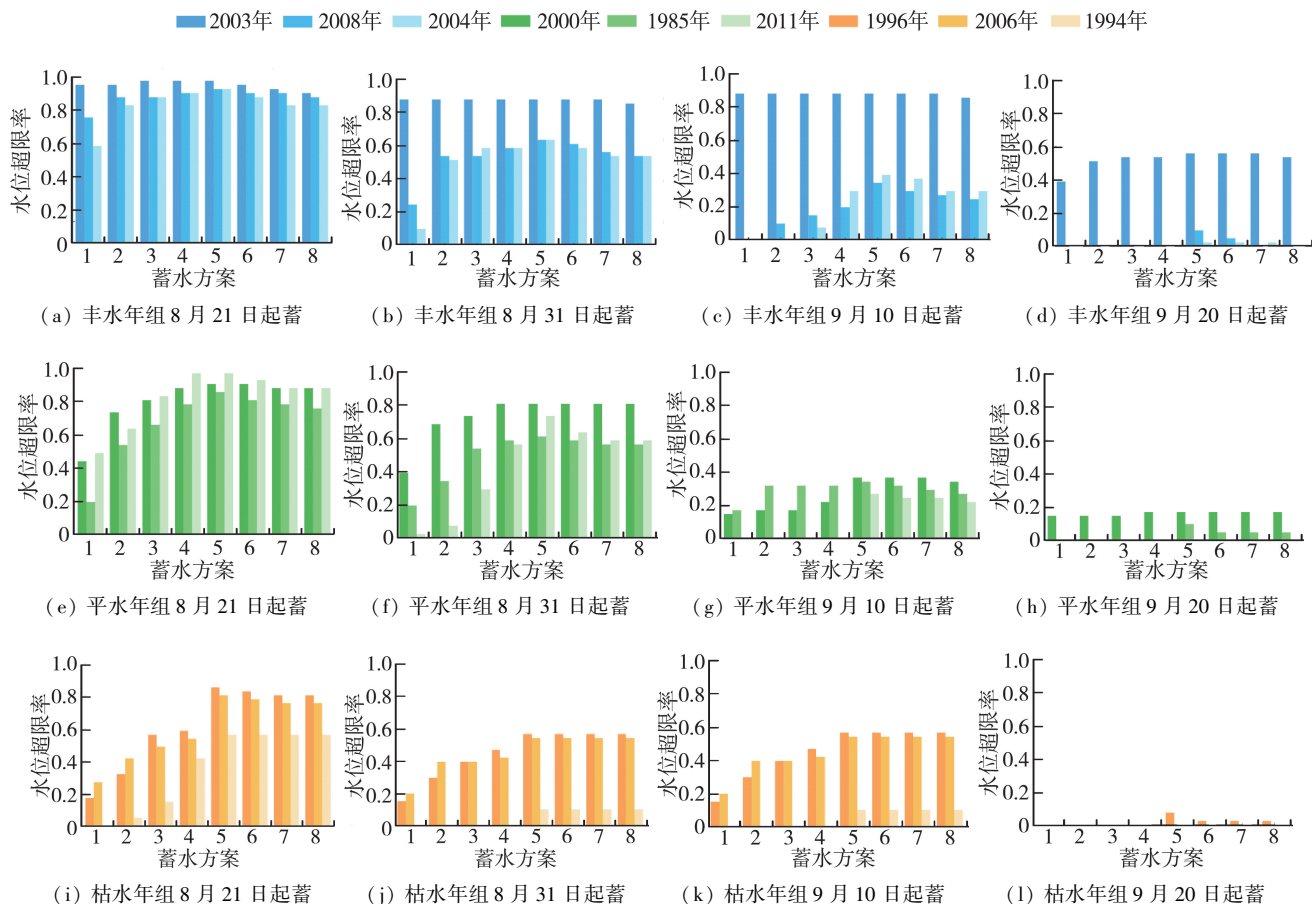


图7 蒋坝水位超限率统计结果

Fig.7 Statistical results of water level overrun rate at Jiangba Station

合不论来水丰枯,采取较晚的蓄水时机与较大的泄水量能够降低防洪风险的基本规律。从典型年的丰枯状态角度,整体上丰、平、枯水年的超限率依次降低。分析丰水年组的方案4和方案8可知,“先泄后蓄”、泄水效率较低的方案与“先蓄后泄”、泄水效率较高的方案风险程度相近,这种特征在平水年组、枯水年组逐渐减弱,说明来水量越丰,蓄水时机与蓄水方案之间的博弈越强烈;同时,对遭遇较大量级洪水的年份,如2003年,无论采用何种蓄水方案,在9月10日前蓄水均使水位超限率达到或超过0.9。

蒋坝弃水率统计结果如图8所示。从蓄水方案角度,“先泄后蓄”方案的弃水率整体上比“先蓄后泄”方案高,且前者受下泄效率变化的影响程度较大。从蓄水时机角度,无论采用何种蓄水策略,蓄水时机的改变均会对弃水率产生显著影响,且弃水率随着蓄水时机推迟而降低。从典型年的丰枯状态角度,弃水率整体上由丰水年向枯水年逐渐降低。观察2003年、2008年等来水量级较大的年份,方案4与方案8的弃水率几乎相同,说明来水量越丰,蓄水时机与蓄水方案之间的竞争关系越明显;对于同一

蓄水时机,弃水率在方案1~4呈下降趋势,而在方案5~8持平或微弱增加。

蒋坝汛末蓄水位统计结果如图9所示,汛末蓄水的理想状态是将水位控制在正常高水位13.33 m处(图9中虚线)。从蓄水方案角度,对比方案1~4与方案5~8可知,“先蓄后泄”方案汛末蓄水位对理想状态的贴合度整体更高,说明目前制定的蓄水方案能够覆盖大多数量级及形态的洪水,使洪水过程在调洪过后均能迅速地将湖区水位提高到正常蓄水位。从蓄水时机角度,4类起蓄时机形成的平均汛末蓄满率分别为:99.81%、99.78%、99.76%、99.35%(丰水年)、99.76%、99.72%、99.68%、99.35%(平水年)、99.14%、99.09%、98.54%、97.86%(枯水年),说明蓄水时机越早,完成蓄水任务的可能性越高。从典型年的丰枯状态角度,整体上枯水年的汛末蓄水位远低于平水年和丰水年。当来水较丰时,“先泄后蓄”方案虽然能使汛末蓄水位达到理想状态,但易出现超蓄现象,风险远大于“先蓄后泄”方案,因此需要权衡蓄水与防洪的矛盾,并根据实际需要调整两者的优先级。

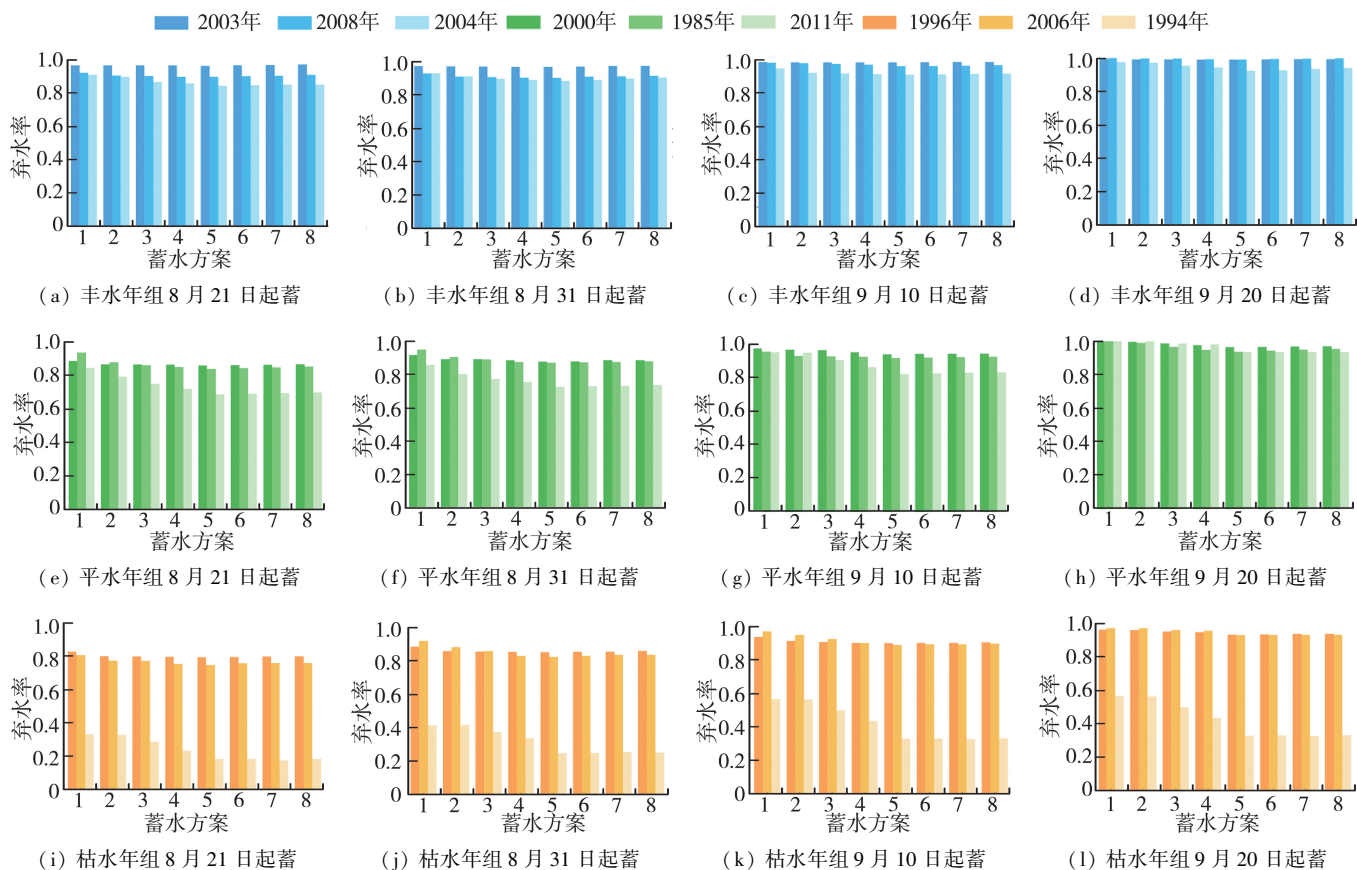


图8 蒋坝弃水率统计结果

Fig. 8 Statistical results of spillage rate at Jiangba Station

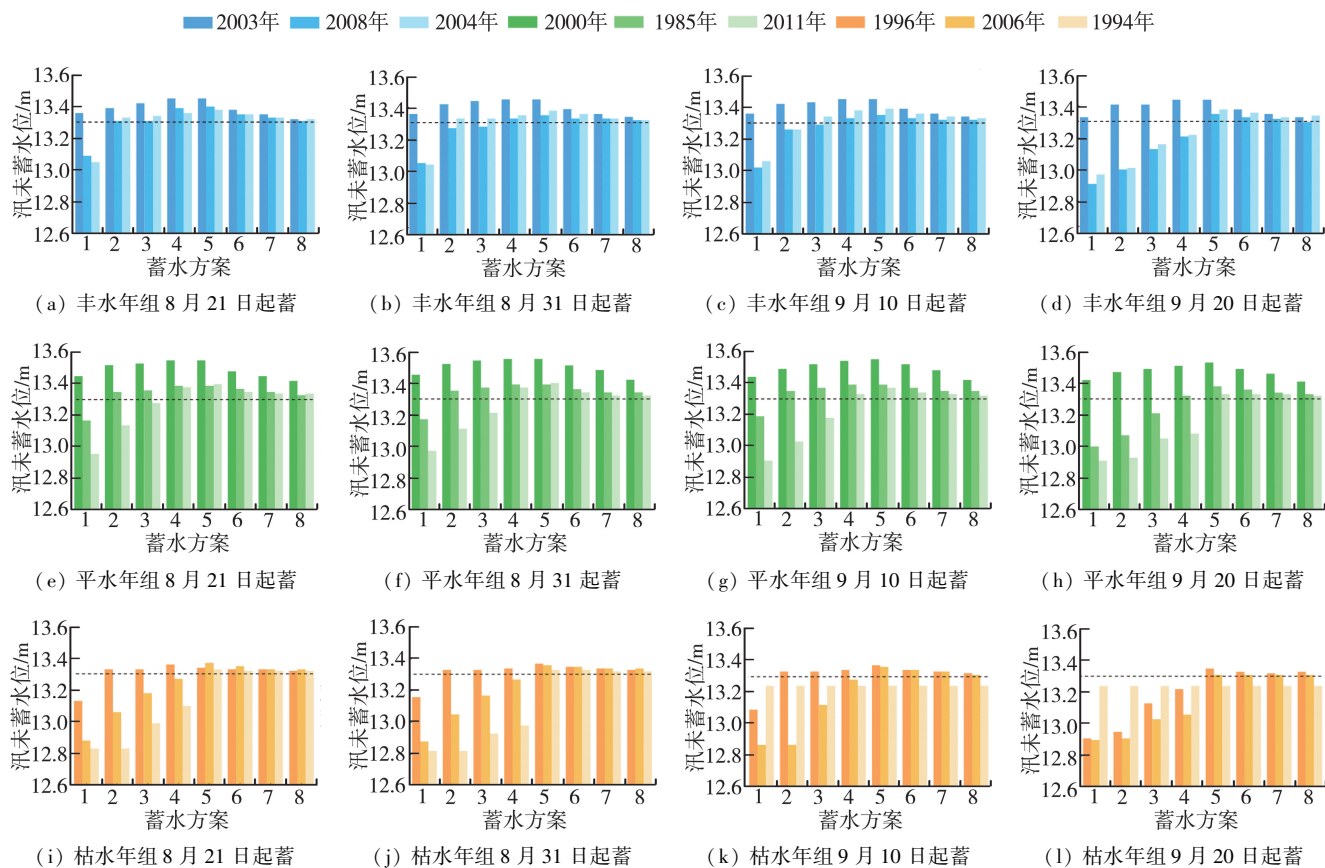


图9 蒋坝汛末蓄水水位统计结果

Fig. 9 Statistical results of storage level at end of flood period at Jiangba Station

4.2 不同典型年蓄水策略优选及调度过程分析

采用 TOPSIS 得到不同典型年的后汛期蓄水策略优选结果,统计该蓄水策略相比现行汛期防洪调度规则的汛末水位抬高及增蓄水效益,并绘制蓄水调度过程线,如表 4 及图 10 所示。

表 4 后汛期蓄水策略优选结果

Table 4 Optimal selection of water storage strategy in post-flood period

典型年	蓄水时机	蓄水方案	汛末水位抬高值/m	增蓄水量/亿 m ³
2003	9 月 20 日	方案 1	0.40	6.592
2008	9 月 20 日	方案 7	0.99	15.875
2004	9 月 10 日	方案 3	1.00	16.054
2000	9 月 10 日	方案 8	0.90	21.565
1985	9 月 20 日	方案 4	0.98	15.719
2011	9 月 10 日	方案 4	1.01	16.182
1996	9 月 10 日	方案 6	1.00	23.905
2006	9 月 10 日	方案 4	0.95	15.216
1994	8 月 31 日	方案 5	1.41	21.862

由图 10 可知,蓄水调度过程线在一定程度上取

决于洪水发生的量级、形态及持续时间。对于丰水年 2003 年,后汛期前段的较大洪水造成水位超限率较高,因此选取较晚的蓄水时机与早泄方案有利于满足整体蓄水调度阶段的风险和效益需求;而对于 2004 年,后汛期发生的两场小洪水并没有造成蓄水过程中水位的剧烈变化,超限现象不显著。对于平水年 1985 年及枯水年 1996 年,其后汛期均发生了洪峰偏后的中等量级洪水,使其后汛期蓄水位和水位超限率都有小幅增加,说明当汛末有洪水发生时应根据来水情况谨慎蓄水。对于枯水年 1994 年,由于其主汛期及后汛期均为枯水期,以 9 月 20 日起蓄时,所有蓄水方案均无法保证汛末蓄满,因此在来水较枯的年份,应适当提前蓄水时机,减少下泄流量。

4.3 后汛期蓄水规律

根据后汛期不同典型年所有蓄水策略的防洪风险和蓄水效率,结合其具体蓄水过程,总结洪泽湖后汛期蓄水规律如下:①若后汛期来水属于丰水年系列,

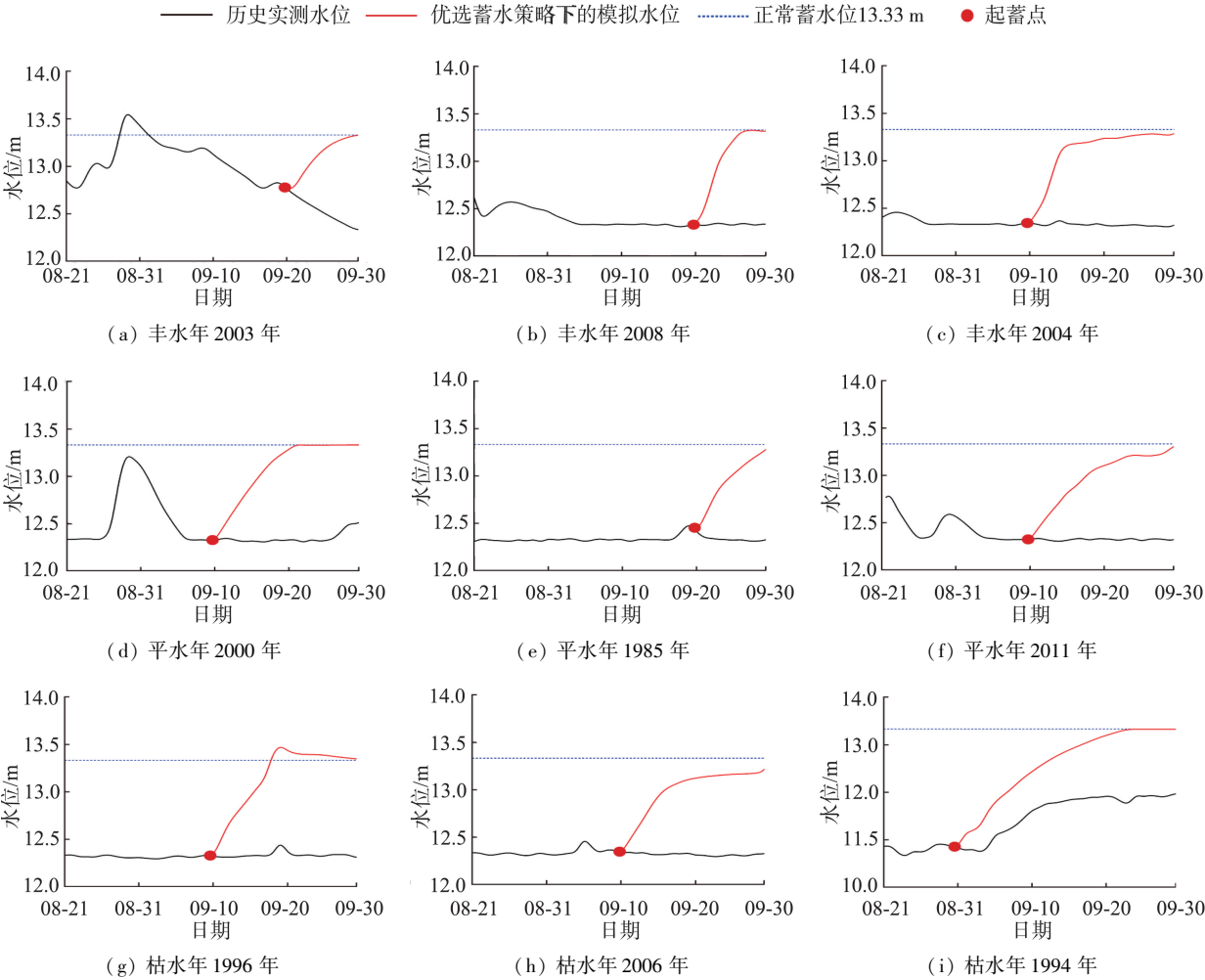


图 10 优选蓄水策略下的后汛期蓄水调度过程线

Fig. 10 Storage regulation process under optimized water storage strategies in post-flood period

应于9月10—20日(在此期间蓄水带来的防洪风险和蓄水效益呈现线性反向变化)偏后期伺机蓄水;若后汛期来水属于平水年系列,应于9月10—20日偏前期伺机蓄水;若后汛期来水属于枯水年系列,应于8月31日—9月10日起蓄。②若后汛期来水属于丰水年系列,应采用“先泄后蓄”、泄水效率较高的蓄水方案,尽量避开完整的洪水过程;若后汛期来水属于平水年系列,应采用“先泄后蓄”、泄水效率较低的蓄水方案,在洪水的退水阶段开始起蓄;若后汛期来水属于枯水年系列,应采用“先蓄后泄”的蓄水方案,其泄水效率的选择应结合后汛期的来水预报信息,在洪水的起涨段或中段即可拦蓄。③无论后汛期的来水状况如何,均应关注已发生的先验信息,即主汛期来水情况和后汛期洪水预报信息,在上述蓄水时机和蓄水方案内灵活调整。

5 结 论

a. 与传统的调洪演算相比,本文构建的大型过水型湖泊及其蓄滞洪区联合运用的水文水动力模型能够实现对洪水演进过程与淹没动态的精细化模拟,有利于对洪水资源利用风险与效益进行精准评估。

b. 基于防洪风险与蓄水效益的后汛期蓄水策略评价体系得到的后汛期蓄水策略为:若后汛期来水属于丰水年系列,应于9月10—20日偏后期伺机蓄水,采用“先泄后蓄”、泄水效率较高的蓄水策略;若后汛期来水属于平水年系列,应于9月10—20日偏前期伺机蓄水,采用“先泄后蓄”、泄水效率较低的蓄水策略;若后汛期来水属于枯水年系列,应于8月31日—9月10日开始蓄水,采用“先蓄后泄”的蓄水策略。

c. 鉴于丰水年的蓄水时机与蓄水方案存在明显的博弈关系,未来应结合具有较高预报精度的水文气象信息,耦合洪水数值模拟与优化调控模型,开展实时动态蓄水研究。

参考文献:

- [1] 王宗志,王银堂,胡四一,等. 流域洪水资源利用的理论框架探讨: I. 定量解析[J]. 水利学报, 2017, 48(8): 883-891. (WANG Zongzhi, WANG Yintang, HU Siyi, et al. Theoretical framework of floodwater resources utilization in a basin: I. quantitative interpretation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(8): 883-891. (in Chinese))
- [2] 王宗志,刘克琳,程亮,等. 流域洪水资源利用的理论框架探讨: II. 应用实例[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1089-1097. (WANG Zongzhi, LIU Kelin, CHENG Liang,

- et al. Theoretical framework of floodwater resources utilization in a basin: II. cases study [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1089-1097. (in Chinese))
- [3] 高玉琴,周桐,马真臻,等. 考虑天然水文情势的水库调度图优化[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 60-67. (GAO Yuqin, ZHOU Tong, MA Zhenzhen, et al. Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological regime [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 60-67. (in Chinese))
- [4] 胡庆芳,王银堂,杨大文. 流域洪水资源可利用量和利用潜力的评估方法及实例研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 20-27. (HU Qingfang, WANG Yintang, YANG Dawen. Assessment approach for flood resources availability and utilization potentiality and its application [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 20-27. (in Chinese))
- [5] DING Wei, ZHANG Chi, PENG Yong, et al. An analytical framework for flood water conservation considering forecast uncertainty and acceptable risk [J]. Water Resources Research, 2015, 51(6): 4702-4726.
- [6] 刘菁稳,玄英姬,陈星. 汛限水位分期控制方法在石岩水库的应用[J]. 人民黄河, 2018, 40(4): 32-36. (LIU Jingwen, XUAN Yingji, CHEN Xing. Application and analysis of stages control method of flood limited water level in Shiyan Reservoir [J]. Yellow River, 2018, 40(4): 32-36. (in Chinese))
- [7] 任明磊,何晓燕,丁留谦,等. 基于改进预泄能力约束法的水库汛限水位分期动态控制域确定及应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(1): 16-22. (REN Minglei, HE Xiaoyan, DING Liuqian, et al. Research and application of staged dynamic controlling domain of limited reservoir water level in flood season based on the improved pre-discharge capacity constrained method [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(1): 16-22. (in Chinese))
- [8] 艾小榆,刘霞,徐辉荣,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的滹江蓄滞洪区调度运用方案研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(12): 125-131. (AI Xiaoyu, LIU Xia, XU Huirong, et al. MIKE FLOOD model-based study on operation scheme of Pajiang River flood storage and detention area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(12): 125-131. (in Chinese))
- [9] HONG Y M, YEH N, CHEN J Y. The simplified methods of evaluating detention storage volume for small catchment [J]. Ecological Engineering, 2006, 26(4): 355-364.
- [10] 管新建,胡栋,孟钰. 多风险因素影响下的水库防洪调度风险综合评估研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(3): 161-166. (GUAN Xinjian, HU Dong, MENG Yu. Risk assessment of reservoir operation for flood control considering multiple risk factors [J]. China Rural Water

- and Hydropower, 2019(3):161-166. (in Chinese))
- [11] 李致家,朱跃龙,刘志雨,等. 中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1):13-18. (LI Zhijia, ZHU Yuelong, LIU Zhiyu, et al. Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1):13-18 (in Chinese))
- [12] 李晓英,郑浩然,吴淑君,等. 基于二元极限理论的流域洪水资源利用现状与潜力分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(2):70-77. (LI Xiaoying, ZHENG Haoran, WU Shujun, et al. Analysis of current and potential flood resources utilization in basin based on bivariate limit theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(2):70-77. (in Chinese))
- [13] 刘克琳,王银堂,胡四一,等. Fisher 最优分割法在汛期分期中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3):14-16. (LIU Kelin, WANG Yintang, HU Siyi, et al. Application of Fisher optimal dissection method to flood season division[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3):14-16. (in Chinese))
- [14] 喻杉,纪昌明,杨子俊,等. 基于逐步优化算法的水库预报预泄规则拟定研究[J]. 水力发电, 2012, 38(2):57-60. (YU Shan, JI Changming, YANG Zijun, et al. Research on making forecast and pre-discharge rules for hydropower station based on progressive optimality algorithm[J]. Water Power, 2012, 38(2):57-60. (in Chinese))
- [15] 刘喜峰. 基于混合智能算法的梯级水库群日优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10):76-80. (LIU Xifeng. Research on daily optimal dispatch of cascade reservoirs based on hybrid intelligent algorithm[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(10):76-80. (in Chinese))
- [16] 许凌杰,董增川,肖敬,等. 基于改进遗传算法的水库群防洪优化调度[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3):59-62. (XU Lingjie, DONG Zengchuan, XIAO Jing, et al. Optimal operation of flood control for reservoir group based on improved genetic algorithm [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(3):59-62. (in Chinese))
- [17] 孔波,付少杰,黄强. 大型复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调度[J]. 水资源保护, 2020, 36(6):67-72. (KONG Bo, FU Shaojie, HUANG Qiang. Multi-objective optimal operation of hydropower plant-reservoir-pumping station group in large complex inter-basin water transfer projects [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):67-72. (in Chinese))
- [18] 陈森林,李丹,陶湘明,等. 水库防洪补偿调节线性规划模型及应用[J]. 水科学进展, 2017, 28(4):507-514. (CHEN Senlin, LI Dan, TAO Xiangming, et al. Development and application of a compensative regulation linear programming model for reservoir flood-control[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(4):507-514. (in Chinese))
- [19] 李玮,郭生练,刘攀,等. 梯级水库汛限水位动态控制模型研究及运用[J]. 水力发电学报, 2008, 27(2):22-28. (LI Wei, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Dynamic control model for limiting level during flood season of cascade reservoirs operation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(2):22-28. (in Chinese))
- [20] 张验科,张佳新,俞洪杰,等. 考虑动态洪水预见期的水库运行水位动态控制[J]. 水力发电学报, 2019, 38(9):64-72. (ZHANG Yanke, ZHANG Jiaxin, YU Hongjie, et al. Dynamic control of reservoir operating stage considering dynamic flood forecast period [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(9):64-72. (in Chinese))
- [21] 董占飞,王丕国,梁国华,等. 英那河水库防洪预报调度方案制定与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3):55-59. (DONG Zhanfei, WANG Piguo, LIANG Guohua, et al. The analysis of flood forecast operation scheme for Yingnahe Reservoir [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3):55-59. (in Chinese))
- [22] 董增川,倪效宽,陈牧风,等. 流域水资源调度多目标时变偏好决策方法及应用[J]. 水科学进展, 2021, 32(3):376-386. (DONG Zengchuan, NI Xiaokuan, CHEN Mufeng, et al. Multi-objective time-varying preference decision-making method for basin water resource dispatch and its application [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3):376-386. (in Chinese))
- [23] VOROGUSHYN S, LINDENSCHMIDT K E, KREIBICH H, et al. Analysis of a detention basin impact on dike failure probabilities and flood risk for a channel-dike-floodplain system along the river Elbe, Germany [J]. Journal of Hydrology, 2012, 436-437:120-131.
- [24] 王宗志,程亮,王银堂,等. 高强度人类活动作用下考虑河道下渗的河网洪水模拟[J]. 水利学报, 2015, 46(4):414-424. (WANG Zongzhi, CHENG Liang, WANG Yintang, et al. Modelling the flood behavior in a river network considering the streambed infiltration and its application in Huaihe River Basin of China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4):414-424. (in Chinese))
- [25] 刘晓琴,刘国龙,王振. MIKE 系列模型在蓄滞洪区洪水模拟中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2020, 15(6):10-15. (LIU Xiaoqin, LIU Guolong, WANG Zhen. The study and application of flood simulation at detention basin based on Mike series model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, 15(6):10-15. (in Chinese))
- [26] 栾震宇,金秋,赵思远,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(2):81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD

- coupling model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2): 81-88. (in Chinese))
- [27] 罗赞,董增川,刘玉环,等. 基于 Copula 函数的连河通江湖泊防洪安全设计:以洪泽湖为例[J]. 湖泊科学, 2021, 33 (3): 879-892. (LUO Yun, DONG Zengchuan, LIU Yuhuan, et al. Safety design for rivers-connected lake flood control based on Copula function: a case study of Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33 (3): 879-892. (in Chinese))
- [28] LUO Yun, DONG Zengchuan, LIU Yuhuan, et al. Research on stage-divided water level prediction technology of rivers-connected lake based on machine learning: a case study of Hongze Lake, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35 (10): 2049-2065.
- [29] LUO Yun, DONG Zengchuan, LIU Yuhuan, et al. Safety design for water-carrying lake flood control based on copula function: a case study of the Hongze Lake, China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126188.
- [30] ABBOTT M B, IONESCU F. On the numerical computation of nearly horizontal flows [J]. Journal of Hydraulic Research, 1967, 5 (2): 97-117.
- [31] GAO Wei, LIU Ruxun, LI Hong. A hybrid vertex-centered finite volume/element method for viscous incompressible flows on non-staggered unstructured meshes [J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 28 (2): 324-334.
- [32] JACKIEWICZ Z, TRACOGNA S. A general class of two-step Runge-Kutta methods for ordinary differential equations [J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1995, 32 (5): 1390-1427.
- [33] 周洁,董增川,朱振业,等. 基于 MIKE FLOOD 的洪泽湖周边滞洪区洪水演进模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15 (5): 56-62. (ZHOU Jie, DONG Zengchuan, ZHU Zhenye, et al. Flood routing simulation of Hongze Lake detention basin based on MIKE FLOOD[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15 (5): 56-62. (in Chinese))
- [34] ZHU Zhenye, DONG Zengchuan, YANG Wanhong, et al. Optimal operation research of flood retarding in plain river network region[J]. Water, 2017, 9 (4): 280.
- [35] 王蔚,周春飞,侍翰生,等. 基于水资源利用的洪泽湖汛期水位控制运用研究[J]. 江苏科技信息, 2021, 38 (14): 65-70. (WANG Wei, ZHOU Chunfei, SHI Hansheng, et al. Study on water level control of Hongze Lake in flood season based on water resources utilization [J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2021, 38 (14): 65-70. (in Chinese))

(收稿日期:2022-01-25 编辑:施业)

(上接第 135 页)

- [39] 鲍振鑫,严小林,王国庆,等. 1956—2016 年黄河流域河川径流演变规律[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30 (5): 52-57. (BAO Zhenxin, YAN Xiaolin, WANG Guoqing, et al. The trend in streamflow of the Yellow River Basin during 1956-2016[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30 (5): 52-57. (in Chinese))
- [40] 景亚平. 黄河中游区四条一级支流径流量时空变化规律及预测研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [41] 王光辉. 近 60 年黄河干流径流泥沙变异性分析[D]. 北京:清华大学, 2019.
- [42] ZHAO Guangju, MU Xingmin, STREHMEL A, et al. Temporal variation of streamflow, sediment load and their relationship in the Yellow River Basin, China [J]. PLoS ONE, 2017, 9 (3): e91048.
- [43] 于海超,张扬,马金珠,等. 1969-2018 年黄河实测径流与天然径流的变化[J]. 水土保持通报, 2020, 40 (5): 1-7. (YU Haichao, ZHANG Yang, MA Jinzhu, et al. Variation of observed and natural runoff of Yellow River from 1969 to 2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40 (5): 1-7. (in Chinese))
- [44] 黄巧玲,栗晓玲. 基于小波支持向量机耦合的月径流预测方法[J]. 水力发电学报, 2015, 34 (3): 1-7. (HUANG Qiaoling, SU Xiaoling. Wavelet support vector machine-coupling method for monthly runoff forecasting[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34 (3): 1-7. (in Chinese))
- [45] 周聂,侯精明,陈光照,等. 基于机器学习的山洪灾害快速预报方法[J]. 水资源保护, 2022, 38 (2): 32-40. (ZHOU Nie, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. A rapid forecasting method for mountain flood disaster based on machine learning algorithms [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (2): 32-40. (in Chinese))
- [46] 谭江红,陈伟亮,王珊珊. 一种机器学习方法在湖北定时气温预报中的应用试验[J]. 气象科技进展, 2018, 8 (5): 46-50. (TAN Jianghong, CHEN Weiliang, WANG Shanshan. Using a machine learning method for temperature forecast in Hubei Province [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2018, 8 (5): 46-50. (in Chinese))
- [47] 崔鸿雁,徐帅,张利锋,等. 机器学习中的特征选择方法研究及展望[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41 (1): 1-12. (CUI Hongyan, XU Shuai, ZHANG Lifeng, et al. The key techniques and future vision of feature selection in machine learning [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41 (1): 1-12. (in Chinese))
- [48] FENG Zhongkai, NIU Wenjing, TANG Zhengyang, et al. Monthly runoff time series prediction by variational mode decomposition and support vector machine based on quantum-behaved particle swarm optimization [J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124627.

(收稿日期:2022-03-13 编辑:王芳)