

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.018

基于水文水动力模型的洪泽湖汛末蓄水策略 智能优化设计

崔璨¹,董增川¹,罗赞^{1,2},张天衍¹,韩亚雷¹,杨婕³,
石晴宜⁴,童建⁴,郭玉法⁴

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098; 2. 黄河水利科学研究院,河南郑州 450003;
3. 杭州市钱塘区水利发展服务中心,浙江杭州 311222; 4. 江苏省水文水资源勘测局,江苏南京 210029)

摘要:针对洪泽湖丰水年汛末蓄水中蓄水时机与蓄水方案之间、防洪目标与蓄水目标之间的双重博弈,基于水文水动力模型精细化的仿真能力及枚举蓄水策略与数值模拟相结合的思路,构建了“时-量-标”三维映射关系,将水文水动力模型与NSGA-II多目标优化模型相耦合,提取了汛末多闸门组合下泄的最优调控规则。结果表明:丰水年湖泊防洪风险与蓄水效益之间的Pareto竞争关系较为明显,两目标可以通过置换关系相互补偿;典型丰水年2003年洪泽湖汛末蓄水策略的全局最优解为9月20日起蓄,将蓄水调度规则中13.00 m水位所对应的闸门下泄总量由1 600 m³/s提升至2 213 m³/s,在降低防洪风险的同时可减少弃水损失。

关键词:洪水资源化;汛末蓄水调度;多目标优化;水文水动力学模型;机器学习;洪泽湖
中图分类号:TV877 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0143-09

Intelligent optimization design of water storage strategy for post-flood period of Hongze Lake based on hydrological-hydrodynamic model // CUI Can¹, DONG Zengchuan¹, LUO Yun^{1,2}, ZHANG Tianyan¹, HAN Yalei¹, YANG Jie³, SHI Qingyi⁴, TONG Jian⁴, GUO Yufa⁴ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 3. Hangzhou Qiantang District Water Conservancy Development Service Center, Hangzhou 311222, China; 4. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract: Aiming at the dual games between impounding time and water storage schemes, flood control target and storage benefit target for the water storage problem of Hongze Lake in post-flood period in high-flow years, a three-dimensional “time-discharge-index” mapping relationship was constructed based on the refined simulation with the hydrological-hydrodynamic model and the idea of combining enumeration water storage strategies and numerical simulation. By coupling of the hydrological-hydrodynamic model with the NSGA-II multi-objective optimal model, optimal regulation rules for discharge under multi-gate combination in post-flood period were extracted. The results show that there is an obvious Pareto competition relationship between flood control risk and water storage benefits in high-flow years, and the two objectives can compensate each other through the replacement relationship. According to the obtained global optimal solution of the water storage strategy for Hongze Lake in post-flood period in a typical high-flow year of 2003, the impoundment should start from September 20th, and the discharge volume is recommended to increase from 1 600 m³/s to 2 213 m³/s corresponding to the water level of 13.00 m, which can decrease the flood control risk as well as the abandoned water loss.

Key words: flood utilization; water storage dispatch in post-flood period; multi-objective optimization; hydrological-hydrodynamic model; machine-learning; Hongze Lake

洪泽湖是淮河中下游防洪体系中“蓄泄兼筹”的多功能巨型调蓄水库,又是关系到上游回水区因

洪致涝的关键节点^[1-2],不但面临着洪水的严重威胁,又肩负苏北、淮北以及淮河两岸部分地区水资源

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

作者简介:崔璨(1999—),女,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:cuican_hhu@163.com

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

供给的重要任务,作为南水北调东线工程输水干线上的过水通道,每年还需向山东、河北、天津等缺水地区输送数十亿 m^3 的水资源。近年来,受全球气候变化影响,极端水文事件频发,洪泽湖周边地区常发生干旱性缺水;同时随着经济社会发展和国民用水需求的日益增长,湖泊供水能力受到了严峻挑战,致使洪泽湖需采取“江水北调”和“引沂济淮”等调度性措施进行补水。因此,在保证洪泽湖堤防及下游地区防洪安全的前提下,如何采用工程性措施或非工程性措施,科学合理地挖掘湖泊流域的洪水资源,实现从“灾害水”向“资源水”的转变,是当前研究的热点问题。

王蔚等^[3]采取枚举蓄水策略与大规模数值模拟相结合的方式逼近湖泊汛末蓄水策略的最优解,给出了不同典型年来水条件下洪泽湖下泄闸门的具体操控规则。该方法在一定程度上探索了湖泊汛末蓄水规律,但仍不可避免枚举法的局限性,存在陷入“局部最优”的缺点,尤其是在丰水年系列下,“先蓄后泄”策略中泄水效率较低的设计与“先泄后蓄”策略中蓄水效率较高的设计,二者的防洪风险较为相近,侧面说明湖泊系统的来水量越多,蓄水策略中“缓泄”和“急蓄”之间的博弈越激烈,因此需要为系统寻找最优解。

湖泊作为一类重要的水资源调蓄功能体,不同于传统的水库蓄水调度,即预先设定蓄水过程的目标需求和约束环境,在给定的来水条件下,基于水量平衡原理,采用常规或优化求解技术寻找满足条件的非劣蓄水过程作为调度决策解集^[4-7]。湖泊的水文要素对不同区域入湖径流组分的响应程度更为敏感^[1,8-10],其不同下泄通道的组合运用对湖区周边蓄滞洪区可能带来不可忽略的防洪风险,因此在生产实践过程中通常采用水文水动力学模型模拟闸门蓄放水替代水库的调洪过程^[11]。流域水文水动力耦合模型已被众多学者沿用至今^[12-16],但该模型通常仅用于高精度的数值模拟计算和洪水风险评估^[17-20],要实现水资源智能综合管理与方案决策,还需要进一步构建目标导向的优化决策模型。目前,基于智能算法的多目标寻优策略研究已经日趋成熟,并应用于水文领域,涵盖了以水资源可持续利用、经济社会与生态环境协同发展为目标的水库多目标联合调度^[21-23]、区域水资源优化配置^[24-25]、流域水文模型参数优化^[26-27]等,但在面对湖泊流域复杂的河网拓扑关系和不同层次防洪排涝工程调度之间的协调性问题时,只有将水文水动力学模型与多目标优化模型及算法进行耦合,才能把洪水演进模型与工程优化调度有机结合,从而提高优化调控模

型的可靠性与最优性,实现局部复杂河网地区水流精细化模拟与水资源的综合治理。

本文深入讨论了洪泽湖汛末蓄水策略的优化设计方法,通过耦合水文水动力模型与多目标智能优化算法,提取了汛末多闸门组合下泄的全局最优解,旨在为该地区的洪水资源利用与避险策略制定提供系统的理论支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

洪泽湖位于江苏省境内、淮河中下游结合部,处于东经 $118^{\circ}10' \sim 118^{\circ}52'$,北纬 $33^{\circ}06' \sim 33^{\circ}40'$,其西纳淮河、南入长江、东贯黄海、北连沂沭水系^[8],承泄淮河上中游 15.8 万 km^2 的来水(图 1)。洪泽湖湖盆形态呈西北高、东南低,湖底高程 10.0 m (1985 国家高程基准),死水位 11.30 m ,汛限水位 $12.50 \sim 13.50 \text{ m}$,正常蓄水位 13.50 m ,破圩警戒水位 14.50 m ,总库容 37.3 亿 m^3 ,现状防洪标准为 100 年一遇,多年平均水位 12.37 m ,历史最高、最低水位分别为 15.23 m 和 9.68 m 。研究区属南北气候过渡区,受东亚季风影响显著,降雨年内分配不均,多集中 5—8 月,极易形成流域性暴雨洪水。

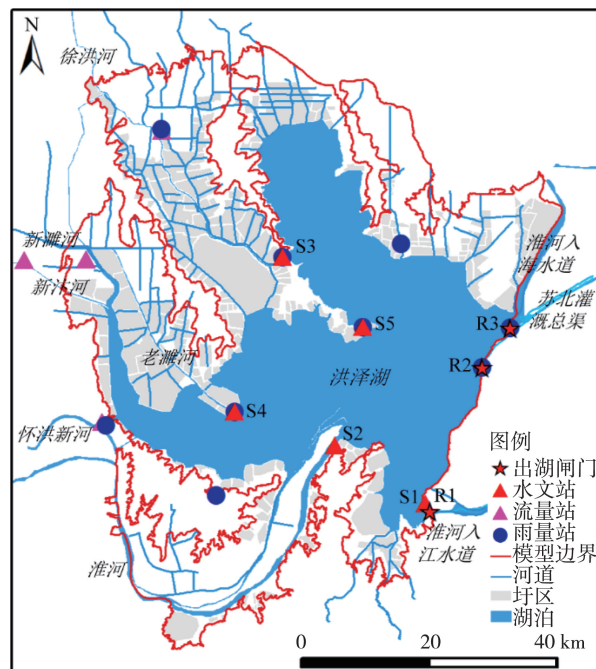


图 1 洪泽湖概况及入湖河流和水文站点分布

Fig. 1 Overview of Hongze Lake and distributions of rivers inflowing in lake and gauging stations

目前,洪泽湖的主要入湖河道为淮河干流,其他入湖河道包括北部的徐洪河、西部的怀洪新河、新老濉河、新汴河及南部的池河;泄水通道集中在湖区东部,洪水由三河闸、二河闸和高良涧闸分别泄入入江水道、苏北灌溉总渠、入海水道及淮沭新河。区域防

洪工程由入湖、出湖控制建筑物,洪泽湖大堤,滞洪区与行洪区等组成。长期以来,洪泽湖周边的蓄滞洪区作为洪水淹没和调蓄的场所,是宿迁、淮安市及省属洪泽湖农场、三河农场的防洪屏障,在淮河中下游防洪体系中发挥了重要作用。

1.2 数据来源

本文所采用的 2003 年主要出入湖河道的日径流量数据、湖区周边逐日降水、蒸发与水位数据来自水利部淮河水利委员会;构建水文水动力模型所需洪泽湖及其周边蓄滞洪区的基础地形与工程资料,包括 5 m × 5 m 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。

2 汛末蓄水策略优化设计

王蔚等^[3]考虑湖泊不同下泄通道组合可能给蓄滞洪区带来的风险,以及河道和湖面的降雨产流对湖区水情的影响,采用水文水动力学数值模拟代替水库调洪演算过程。基于研究成果能够更加方便地指导生产实践的理念,分析后汛期入湖洪水特征,制定蓄水时机和蓄水调度规则,并对两者进行遍历组合,给出蓄水策略集。将不同策略分别输入水文水动力学模型进行精细化模拟并优选模拟结果,总结不同来水条件下湖泊汛末蓄水时机和蓄水规则的组合规律,进行蓄水策略研究,最终确定最优湖泊提前蓄水时机和各闸门控制方式,达到预蓄预泄的目标。但在丰水年系列下,“先蓄后泄”策略中泄水效率较低的设计与“先泄后蓄”策略中蓄水效率较高的设计,二者的防洪风险较为相近,说明湖泊系统的来水量越多,蓄水策略中“缓泄”和“急蓄”之间的博弈越激烈。从侧面说明,目前蓄水策略中虽然包含了最优解,但是最优解的位置不够明确,需要更为系统的优化方法去寻找。因此,本文针对洪泽湖丰水

年来水情景,引入智能优化算法,探讨水文水动力数值模拟与传统调度模型相耦合的调控思路,旨在进一步提高蓄水效率,降低蓄水过程中的防洪风险。

2.1 蓄水策略样本库构建

a. 细化蓄水时机。鉴于蓄水时机对调度过程中的湖泊水位及弃水量有显著影响,因此将后汛期的起蓄时间间隔由原本的 10 d 缩短至 5 d,调整后的汛末蓄水时机集合 $T = \{8 \text{ 月 } 21 \text{ 日}, 8 \text{ 月 } 26 \text{ 日}, 8 \text{ 月 } 31 \text{ 日}, 9 \text{ 月 } 5 \text{ 日}, 9 \text{ 月 } 10 \text{ 日}, 9 \text{ 月 } 15 \text{ 日}, 9 \text{ 月 } 20 \text{ 日}\}$ 。

b. 深化蓄水调度规则。后汛期与前汛期作为主汛期与非汛期的过渡阶段,降雨和径流过程具有高度的相似性,在拟定蓄水调度规则时需要以洪泽湖现行前汛期的水位-泄量关系为基准,后汛期不仅需要承接前、主汛期调度的结果,还需应对降水不确定性带来的丰枯转换等复杂水文情势。因此,本研究对各闸门的调度规则进行深化,具体设计原则为:①根据汛限水位动态控制的上下限,确定以蒋坝站为代表水位站的湖泊水位操控范围为 12.50 ~ 13.50 m。②根据《淮河流域防洪规划》,确定下泄总量的变化范围为 600 ~ 9 600 m³/s,在此范围内二河闸关闭。考虑灌溉总渠和高良涧水电站的用水需求,优先使用高良涧闸下泄,其泄流能力为 600 ~ 800 m³/s,在达到该闸门的泄流能力前,三河闸保持关闭;若水位抬升至 14.00 m 及以上,转为采用主汛期的防洪调度规则,即水位 14.00 m 对应下泄总量为 9 600 m³/s。③以 2003 年优选蓄水方案^[3](方案 I)为基准,将湖水水位为 13.00 m 时的闸门下泄总量控制在 600 ~ 3 000 m³/s 范围内,方案Ⅱ~Ⅷ三河闸的下泄流量为以 400 m³/s 公差增长的等差数列;④参考洪泽湖主汛期的水位-泄量关系,设定湖水水位 13.50 m 与 13.00 m 的两闸门下泄总量以 1.3 倍比增加。

综上,共设置 7 组后汛期蓄水调度规则细化方案,构成方案集 Q ,如表 1 所示。

表 1 2003 年后汛期蓄水调度规则细化方案
Table 1 Refinement programs of storage scheduling rules in post-flood period of 2003

水位/m	下泄流量/(m ³ /s)							
	方案 I		方案Ⅱ		方案Ⅲ		方案Ⅳ	
	三河闸	高良涧	三河闸	高良涧	三河闸	高良涧	三河闸	高良涧
12.50	0	0	0	0	0	0	0	0
13.00	1 000	600	0	600	400	600	800	600
13.50	2 000	800	0	780	500	800	1 020	800
14.00	8 600	1 000	8 600	1 000	8 600	1 000	8 600	1 000

水位/m	下泄流量/(m ³ /s)							
	方案Ⅴ		方案Ⅵ		方案Ⅶ		方案Ⅷ	
	三河闸	高良涧	三河闸	高良涧	三河闸	高良涧	三河闸	高良涧
12.50	0	0	0	0	0	0	0	0
13.00	1 200	600	1 600	600	2 000	600	2 400	600
13.50	1 540	800	2 060	800	2 580	800	3 100	800
14.00	8 600	1 000	8 600	1 000	8 600	1 000	8 600	1 000

2.2 “时-量-标”三维映射关系量化

7种蓄水时机和7组蓄水调度规则组合构成了以最优解为核心的搜索空间,采用构建的湖泊及其蓄滞洪区联合运用的水文水动力学模型^[3]对49组蓄水策略进行洪水过程模拟,统计每组方案蓄水过程中的蒋坝水位超限率(R_e)、最高蓄水位($Z_{\max}$)两项反映防洪风险的指标,以及弃水量(W_d)、汛末蓄水位(Z_l)两项反映蓄水效益的指标,采用均匀分布方法形成4组 $100 \times 100 \times 100$ 的蓄水时机(时)、蓄水调度规则(量)、评价指标(标)的三维映射关系。

图2为蓄水时机、蓄水调度规则及防洪风险指标的三维映射关系,以下泄总量反映蓄水调度规则。由图2可知,蒋坝水位超限率和最高蓄水位随着起蓄点的推迟和下泄总量的增大均呈现下降趋势,但二者的下降规律存在一定差异。在进入后汛期的20d内起蓄时,蒋坝水位超限率对“时-量”的响应程度均不显著,相反地,最高蓄水位对“时-量”的响应

则较为明显,尤其在8月31日前起蓄时,此项指标的下降梯度最大;在后汛期结束前的10d内起蓄时,水位超限率和最高蓄水位则分别呈线性下降和指数下降趋势。

图3为蓄水时机、蓄水调度规则及蓄水效益指标的三维映射关系。由图3(a)可知,弃水量随着起蓄点的推迟和下泄总量的增大呈现上升趋势,蓄水时机为其主导因素,在后汛期前10d、后汛期中10~20d、后汛期末10d范围内起蓄时,弃水量的下降趋势为显著—平稳—显著。由图3(b)可知,下泄总量处于 $600 \sim 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,汛末蓄水位随着下泄总量的增大而降低,此时蓄水时机对其作用极微;而下泄总量处于 $2500 \sim 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,且起蓄点位于后汛期末10d范围内时,汛末蓄水位的变化非常明显。

2.3 指标值提取

为了实现水文水动力学模型与多目标智能算法的耦合计算,本研究采用基于KNN(K-nearest neighbors)算法的二维插值技术,对“时-量-标”三维

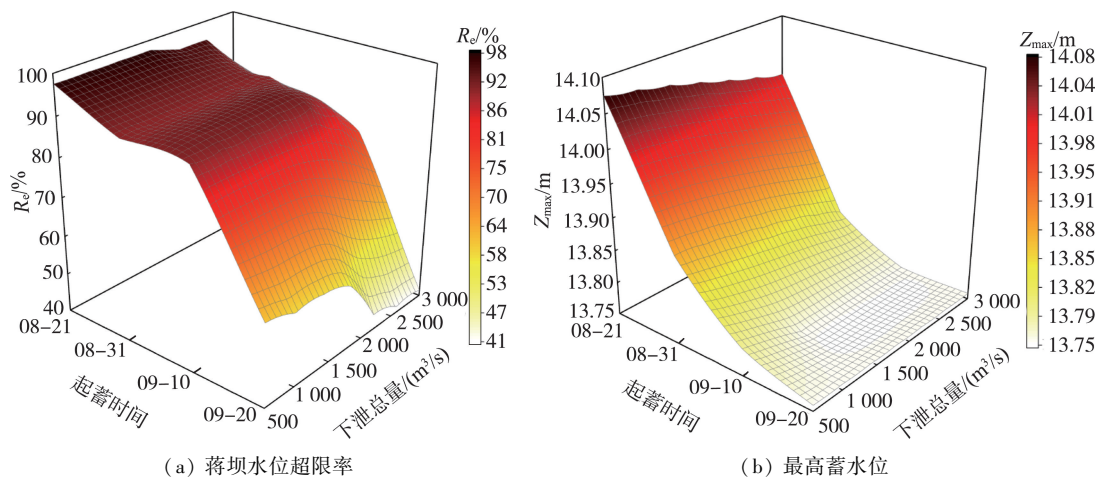


图2 蓄水时机、蓄水调度规则及防洪风险指标的三维映射关系

Fig. 2 Three-dimensional mapping relationship among impounding time, scheduling rules, and flood control risk indexes

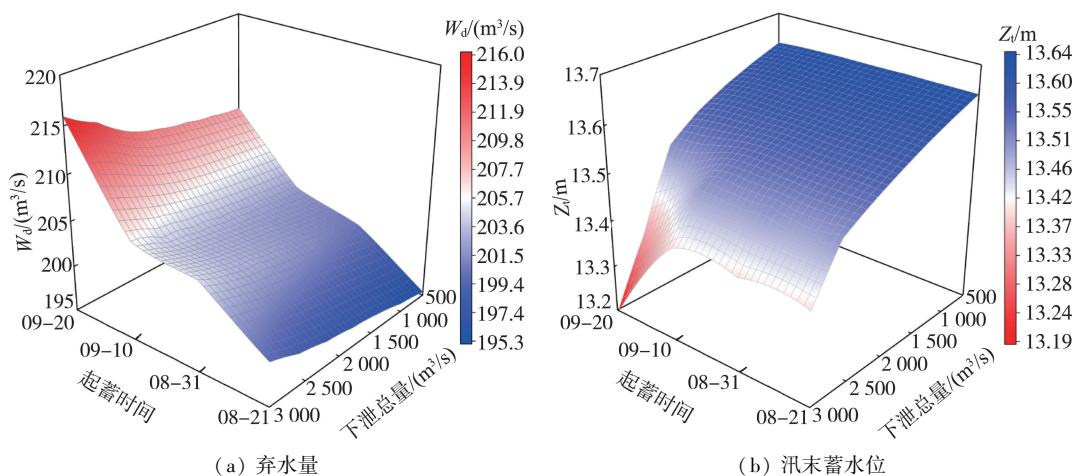


图3 蓄水时机、蓄水调度规则及蓄水效益指标的三维映射关系

Fig. 3 Three-dimensional mapping relationship among impounding time, scheduling rules, and water storage benefit indexes

映射图像进行指标值提取,获取不同蓄水时机与蓄水调度规则下的大量数据样本,便于后续优化模型中的循环迭代运算。KNN 方法在计算各对象间距离时采用欧氏距离,在“时-量-标”三维空间中,两个蓄水策略样本之间的欧氏距离 d 为

$$d = \sqrt{(t_1 - t_2)^2 + (q_1 - q_2)^2} \quad (1)$$

式中: t_1, t_2 为蓄水时机,范围为 $0 \sim 30$ d; q_1, q_2 为对应的下泄总量,范围为 $600 \sim 3\,000$ m³/s。

将 100×100 个“时-量-标”蓄水策略样本划分为训练集(8 000 个)和测试集(2 000 个),KNN 指标值提取法实施步骤为:①计算训练集中每个训练样本($j = 1, 2, \dots, 8\,000$)与测试集中每个目标样本($i = 1, 2, \dots, 2\,000$)之间的欧式距离 d_{ij} ;②选取与目标样本 i 最邻近的 k (设 k 的起始值为 1) 个训练样本点,根据它们的欧式距离,采用反距离权重法计算所有目标样本的预测值;③将目标样本与其预测值间的误差记为 E_{ik} ,目标样本总误差为 $E_k = \sum_{i=1}^{2000} E_{ik}$,令 $k = k + 1$,重复步骤②直至 $k = 8\,000$, E_k 取得最小值时的 k 即为最佳临近点;④将训练得到的 KNN 空间插值参数用于 NSGA (non-dominated sorting genetic algorithm)-II 优化求解,提取“时-量-标”三维空间中 4 项指标的插值样本。

依据以上步骤计算蒋坝水位超限率、最高蓄水位、弃水量和汛末蓄水位 4 项指标的最佳 k 值分别为 4、3、4、3,如图 4 所示。计算所得误差 E_k 在 $k > 200$

后随着 k 值的增大而不断递增,故图 4 仅绘制了 $k \leq 200$ 的部分。

3 汛末蓄水策略优化模型

3.1 目标函数

a. 防洪目标 F_1 。 F_1 越小则后汛期蓄水过程中的最高水位越低,超汛限水位的时长越短。

$$F_1 = \min \left(\alpha_1 \frac{Z_{\max,tq} - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} + \beta_1 \frac{R_{e,tq} - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \right) \quad (2)$$

式中: $Z_{\max,tq}$ 为第 t 日起蓄,下泄总量为 q 时的最高蓄水位; $Z_{\max}$ 和 $Z_{\min}$ 为所有可行蓄水策略下的最高蓄水位的上下限; $R_{e,tq}$ 为第 t 日起蓄,下泄总量为 q 时的水位超限率; $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 为所有可行蓄水方案下水位超限率的上下限; α_1 、 β_1 为防洪指标的权重因子, $\alpha_1 = \beta_1 = 0.5$ 。

b. 蓄水目标 F_2 。 F_2 越小则后汛期弃水量越少,汛末蓄水位越贴近目标蓄水位。

$$F_2 = \min \left(\alpha_2 \frac{|Z_{t,tq} - Z'_t|}{Z_{\max} - Z_{\min}} + \beta_2 \frac{W_{d,tq} - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} \right) \quad (3)$$

式中: $Z_{t,tq}$ 为第 t 日起蓄,下泄总量为 q 时的汛末蓄水位; Z'_t 为目标蓄水位, $Z'_t = 13.50$ m; $Z_{\max}$ 、 $Z_{\min}$ 分别为所有可行蓄水策略下汛末蓄水位的上下限; $W_{d,tq}$ 为第 t 日起蓄,下泄总量为 q 时的弃水量; $W_{\max}$ 、 $W_{\min}$ 分别为所有可行蓄水策略下弃水量的上下限; α_2 、 β_2 为蓄水效益指标的权重因子, $\alpha_2 = 0.8$ 、 $\beta_2 = 0.2$ 。

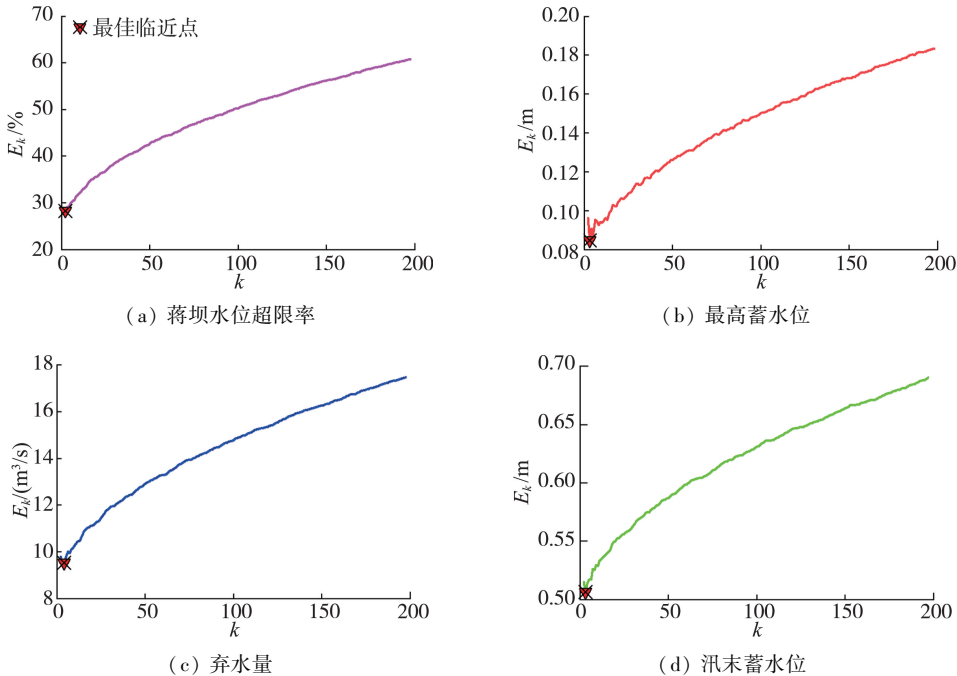


图 4 基于 KNN 机器学习算法的防洪风险及蓄水效益指标最佳临近点提取

Fig. 4 Extraction of optimum proximity point of flood control risk and water storage benefit indexes based on KNN machine-learning algorithm

3.2 约束条件

a. 蓄水时机约束:

$$T_{\min} \leq t \leq T_{\max} \quad (4)$$

式中 $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 分别为后汛期的起止时间。

b. 控制流量约束:

$$Q_{\min} \leq q \leq Q_{\max} \quad (5)$$

式中 $Q_{\max}$ 、 $Q_{\min}$ 分别为湖泊水位达 13.00 m 时闸门下泄总量的最大值和最小值。

c. 最高水位约束:

$$Z_{\max,tq} \leq Z_{\max} \leq Z_w \quad (6)$$

式中 Z_w 为破坏滞洪警戒水位, $Z_w = 14.50$ m。

d. 目标水位约束:

$$Z_r \leq Z_{t,tq} \leq Z'_r \quad (7)$$

式中 Z_r 和 Z'_r 分别为分期控制调整前后的汛限水位^[28], $Z_r = 12.50$ m, $Z'_r = 13.50$ m。

e. 水位超限率约束:

$$R_{\min} \leq R_{e,tq} \leq R_{\max} \quad (8)$$

式中 $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 分别为水位超限率约束的上下限,可以根据决策者的偏好调整,本研究中 $R_{\max} = 1$, $R_{\min} = 0$ 。

3.3 NSGA-II 模型求解

遗传算法是一种基于 Pareto 非劣前沿求解多目标问题的有效算法,但多数遗传算法在求解时存在收敛速度慢、耗时长、局部搜索能力差等缺点。通过引入快速非劣解排序、精英保留策略、拥挤距离排序等方法对其进行改进,形成了 NSGA-II 算法^[29-30]。NSGA-II 算法能够有效降低遗传算法的复杂度、避免遗传算法最优解丢失问题,极大提高了计算效率。本模型以蓄水时机和下泄总量作为决策变量,以“时-量-标”三维映射关系所提取的数据作为目标的计算依据,采用 NSGA-II 算法进行最优解搜索,设置迭代次数为 1 000,当迭代达到进化代数时,得到洪泽湖汛末蓄水策略问题两目标间的非劣前沿曲线。

4 结果与分析

4.1 Pareto 非劣前沿

由洪泽湖汛末蓄水策略优化模型求解得到的双目标 Pareto 前沿线,如图 5 所示。防洪目标、蓄水目标的均值分别为 0.224 和 0.169,且防洪目标值随着蓄水目标值的降低而增大,二者之间存在明显的 Pareto 竞争关系。由于非劣前沿无法直接利用,故

采用曲线拟合非劣前沿的函数表达式,从而定量表达目标函数间的非劣前沿响应关系,表达式为

$$F_2 = 0.052 F_1^{-0.447} \quad (9)$$

式中 F_1 、 F_2 取值范围为 $[0, 1]$ 。

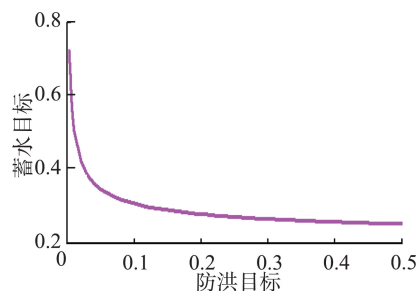


图 5 汛末蓄水策略 Pareto 前沿线

Fig. 5 Pareto front line of water storage strategies in post-flood period

4.2 置换关系分析

目标间置换率的含义是对于局部非劣前沿线上某点,在其他目标函数值均固定不变的条件下,若第 i 个目标函数值被提高(或降低)一个单位,则必须将第 j 个目标函数值降低(或提高) T_{ij} 个单位进行补偿,即通过目标的置换量反映目标间的影响程度。通过对 Pareto 前沿拟合函数求导,可以得到防洪目标与蓄水目标之间的置换关系表达式,并绘制置换关系曲线,如图 6 所示。置换关系曲线可以看作防洪风险决策对蓄水效益影响程度的定量表达,当防洪目标值小于 0.02 时,置换率 g 与防洪目标间的负相关关系显著,表明防洪安全保障程度越高,需要牺牲的蓄水需求越大;当防洪目标值大于 0.02 时,防洪目标值的变化对于置换率的影响极其有限,尤其是防洪目标值大于 0.1 时,湖泊的蓄水需求已经基本得到满足,不需要再承担过多的防洪风险。置换率表达式为

$$g = -0.023 2 F_1^{-1.447} \quad (10)$$

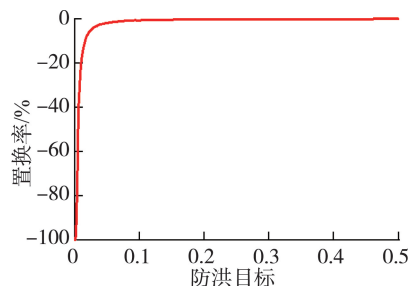


图 6 防洪目标-蓄水目标置换关系曲线

Fig. 6 Replacement relationship curve of flood control and water storage objectives

4.3 蓄水策略比选

为了尽可能降低和排除防洪目标与蓄水目标间

的冲突,获得折中的解决方案,本研究通过对上述计算结果的分析,在汛末蓄水策略优化模型的置换关系中选择防洪目标为 0.1 作为最优蓄水策略的备选方案,相应地,根据 Pareto 前沿线绘制非劣解集,如图 7 所示。

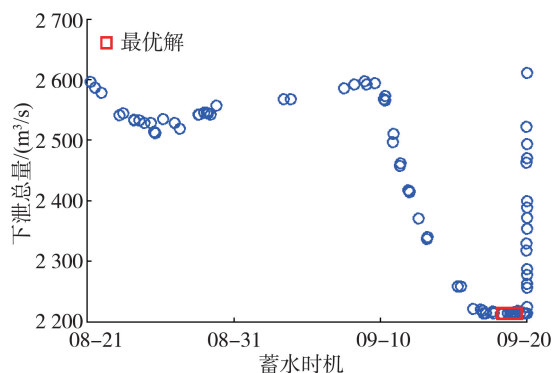


图 7 汛末蓄水策略 Pareto 非劣解集

Fig. 7 Pareto noninferior solution set of water storage strategies in post-flood period

由图 7 可知,采用 NSGA-II 优化算法可以得到蓄水策略最优解的大致位置:蓄水时机为进入后汛期的 28~30 d 之间,即 9 月 18 日(优化策略一)、9 月 19 日(优化策略二)和 9 月 20 日(优化策略三);蓄水调度规则处在方案 VI 与 VII 之间,即水位达 13.00 m 时闸门下泄总量为 2 213 m³/s。这与王蔚等^[3]将经验枚举与优劣解评价方法相结合得到的局部最优解,即 9 月 20 日起蓄,湖泊水位达 13.00 m 时的下泄总量为 1 600 m³/s(以下简称“枚举策略”)相比,存在一定差异,说明采用枚举法制定的汛末蓄水策略并不能全面覆盖各种蓄水情形。因此,针对枚举法和多目标优化算法计算得到的蓄水策略,绘制对应的水位变化过程线和下泄总量过程线,如图 8 所示,并进行对比分析。图 8(b)中 4 种策略下泄总量过程线与时间轴所围成的面积代表该蓄水策略下的弃水量。由图 8 可以得出蒋坝水位超限率、最高蓄水位、弃水量、汛末蓄水位这 4 项指标在不同蓄水策略下的差异。

从蓄水效益方面来看,4 种蓄水策略在汛末均达到了 13.50 m 的目标水位,汛末蓄满率为 100%;不同起蓄时间对应的弃水量略有差异,其中,枚举策略与优化策略三下的弃水量基本一致,且为所有方案中的最小值。从防洪风险方面来看,4 种蓄水策略的湖泊最高蓄水位均为 13.76 m;而在蒋坝水位超限率指标上差异明显,其中,优化策略一相较于其他 3 个策略表现最差,优化策略二与枚举策略的表现情况基本一致,但二者的水位过程在起蓄后的 9 月 18 日至 9 月 25 日内整体偏高,优化策略三表现最好,其水位过程在后汛期基本上贴近汛限水位上升,在

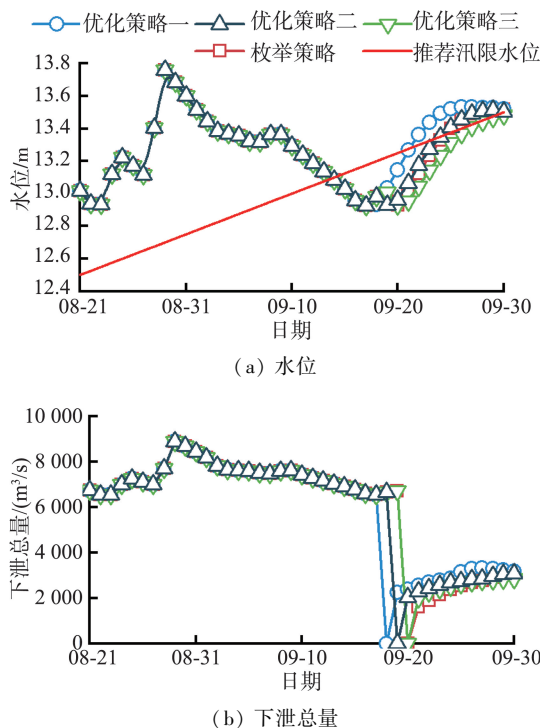


图 8 多目标优化策略与枚举策略下水位及下泄总量过程对比

Fig. 8 Comparison of water level and discharge processes under multi-objective optimized water storage strategies and enumeration strategy

保证防洪安全的基础上最大程度满足了蓄水要求。因此,选取优化策略三作为为 4 种蓄水策略中的最优蓄水策略。

综上所述,通过对比分析不同蓄水策略所对应的蓄水过程,可以验证以下结论:根据长期蓄水调度经验将蓄水策略枚举、大规模水文水动力数值模拟与优劣解评价方法相结合,可以有效逼近湖泊汛末蓄水策略的局部最优解;在此基础上利用多目标优化模型能够进一步提高蓄水效率,降低蓄水过程中的防洪风险,较为准确地得到全局最优解。

5 结 论

a. 在典型丰水年下,洪泽湖防洪风险与蓄水效益之间的 Pareto 竞争关系较为明显,通过二者置换关系分析可知,当防洪目标值大于 0.1 时,湖泊的蓄水需求已经基本得到满足,不需要通过承担过多的防洪风险来对其进行补偿。

b. 基于 NSGA-II 智能优化结果,对比分析枚举策略与 3 种优化策略下洪泽湖后汛期的调度过程线和下泄总量过程,最终确定了 2003 年洪泽湖后汛期蓄水策略的全局最优解,即 9 月 20 日起蓄,将蓄水调度规则中 13.00 m 水位所对应的下泄总量由 1 600 m³/s 增至 2 213 m³/s,在降低防洪风险的同

时减少弃水损失,进一步提高蓄水效率,为该地区的洪水资源利用与避险策略制定提供系统的理论支撑。

c. 针对枚举蓄水策略和优劣解评价“寻优”只能逼近局部最优解的缺陷,本文提出将平原湖泊水文水动力学模型与多目标遗传算法相耦合的方法,对于解决洪水资源最大化问题效果良好。

参考文献:

[1] 陈茂满. 洪泽湖蓄泄关系与淮河中下游防洪[J]. 水利规划与设计, 2004(2): 27-31. (CHEN Maoman. Relationship between storage and release of Hongzehu Lake and flood control of middle-and -lower reaches of Huaihe River[J]. Water Resources Planning and Design, 2004(2): 27-31. (in Chinese))

[2] 邓恒,徐国宾,樊贤璐,等. 洪泽湖洪水调蓄能力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 149-153. (DENG Heng, XU Guobin, FAN Xianlu, et al. Study on the flood regulation and storage capacity of Hongze Lake [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(2): 149-153. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 彭杨,李义天,张红武. 三峡水库汛末蓄水时间与目标决策研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 682-689. (PENG Yang, LI Yitian, ZHANG Hongwu. Study on the impounding time and objective decision of the Three Gorges Project at the end of flood period[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 682-689. (in Chinese))

[5] 李英海,刘冀,彭涛. 三峡水库汛末抗旱蓄水方式优化设计[J]. 水利水电技术, 2015, 46(1): 110-113. (LI Yinghai, LIU Ji, PENG Tao. Optimized design of impounding mode of Three Gorges Reservoir for drought relief during flood recession period[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(1): 110-113. (in Chinese))

[6] 周研来,郭生练,陈进. 溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库联合蓄水方案与多目标决策研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1135-1144. (ZHOU Yanlai, GUO Shenglian, CHEN Jin. Multi-objective decision and joint refill schemes of Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1135-1144. (in Chinese))

[7] 刘强,钟平安,徐斌,等. 三峡及金沙江下游梯级水库群蓄水期联合调度策略[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 62-70. (LIU Qiang, ZHONG Pingan, XU Bin, et

al. Joint operation strategy of water impoundment period of Three Gorges-Jinsha River lower reach cascade reservoirs [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 62-70 (in Chinese))

[8] 罗赟,董增川,刘玉环,等. 基于 Copula 函数的连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))

[9] 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.

[10] 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.

[11] 吴凤燕,张培青,任茂昆,等. 湖泊水文计算的水文水动力学模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(7): 31-35. (WU Fengyan, ZHANG Peiqing, REN Maokun, et al. Integrated simulation of hydrological and hydrodynamic processes of large lake [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(7): 31-35. (in Chinese))

[12] 陈炼钢,施勇,钱新,等. 闸控河网水文-水动力-水质耦合数学模型: I. 理论[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 534-541. (CHEN Liangang, SHI Yong, QIAN Xin, et al. Hydrology, hydrodynamics, and water quality model for impounded rivers: I. theory [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 534-541. (in Chinese))

[13] 李云良,张奇,姚静,等. 湖泊流域系统水文水动力联合模拟研究进展综述[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 263-270. (LI Yunliang, ZHANG Qi, YAO Jing, et al. Advances in integrated hydrological and hydrodynamic simulation of lake-catchment system [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(2): 263-270. (in Chinese))

[14] 曾志强,杨明祥,雷晓辉,等. 流域河流系统水文-水动力耦合模型研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 72-76. (ZENG Zhiqiang, YANG Mingxiang, LEI Xiaohui, et al. A review of hydrological-hydrodynamic coupling models for river-basin systems [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(9): 72-76. (in Chinese))

[15] 江春波,周琦,申言霞,等. 山区流域洪涝预报水文与水动力耦合模型研究进展[J]. 水利学报, 2021, 52(10): 1137-1150. (JIANG Chunbo, ZHOU Qi, SHEN Yanxia, et al. Review on hydrological and hydrodynamic coupling models for flood forecasting in mountains watershed [J].

- Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (10): 1137-1150. (in Chinese))
- [16] 张婷,徐彬鑫,康爱卿,等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (3): 11-19. (ZHANG Ting, XU Binxin, KANG Aiqing, et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (3): 11-19. (in Chinese))
- [17] 黄国如, 陈文杰, 喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展, 2021, 32 (3): 334-344. (HUANG Guoru, CHEN Wenjie, YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science, 2021, 32 (3): 334-344. (in Chinese))
- [18] 任汉承, 刘舒, 谢每超, 等. 基于精细化水动力模型的城市内涝特征分析及风险评估[J]. 水利水电技术, 2022, 53 (4): 24-40. (REN Hancheng, LIU Shu, XIE Meichao, et al. Refined hydrodynamic model-based analysis on urban waterlogging features and risk assessment[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53 (4): 24-40. (in Chinese))
- [19] 付晓花, 董增川, 韩锐, 等. 复杂河网地区气候-水文-水动力耦合模型模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39 (3): 162-169. (FU Xiaohua, DONG Zengchuan, HAN Rui, et al. Simulation of climate-hydrologic-hydrodynamic coupling model in complex river network area[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 162-169. (in Chinese))
- [20] 曹思佳, 李云良, 李宁宇, 等. 鄱阳湖典型洪泛区地下水数值模拟研究[J]. 湖泊科学, 2023, 35 (1): 298-312. (CAO Sijia, LI Yunliang, LI Ningning, et al. Groundwater numerical simulation in the typical floodplain of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35 (1): 298-312. (in Chinese))
- [21] 钟加星, 董增川, 姚弘祎, 等. 梯级水库群多目标优化调度规则研究: 以溪洛渡-向家坝为例[J]. 水力发电学报, 2021, 40 (9): 46-54. (ZHONG Jiaying, DONG Zengchuan, YAO Hongyi, et al. Multi-objective operation rules for cascade reservoirs: case study of Xiluodu-Xiangjiaba cascade [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40 (9): 46-54. (in Chinese))
- [22] 黄显峰, 吴志远, 李昌平, 等. 基于改进粒子群-逐次逼近法的水库调度图多目标优化[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (2): 1-7. (HUANG Xianfeng, WU Zhiyuan, LI Changping, et al. Multi-objective optimization of reservoir operation chart based on IPSO-DPSA [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2): 1-7. (in Chinese))
- [23] 李伶杰, 王银堂, 马敬梅, 等. 基于改进 NSGA- II 的龙江和瑞丽江梯级水电站联合优化调度[J]. 水资源保护, 2022, 38 (2): 83-90. (LI Lingjie, WANG Yintang, MA Jingmei, et al. Joint optimal scheduling of Longjiang and Ruilijiang cascade hydropower stations based on improved NSGA- II [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (2): 83-90. (in Chinese))
- [24] 姜秋香, 何晓龙, 王子龙, 等. 基于区间多阶段随机规划的水资源优化配置模型及应用[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (6): 1-7. (JIANG Qiuxiang, HE Xiaolong, WANG Zilong, et al. A model for optimal allocation of water resources based on interval multistage stochastic programming and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (6): 1-7. (in Chinese))
- [25] 吴云, 曾超, 杨侃, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的水资源多目标优化配置[J]. 人民黄河, 2020, 42 (5): 71-75. (WU Yun, ZENG Chao, YANG Kan, et al. Multi-objective optimal allocation of water resources based on improved NSGA-II algorithm [J]. Yellow River, 2020, 42 (5): 71-75. (in Chinese))
- [26] 杜彦臻. 沁水河流域水文模型参数优化及数值模拟研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [27] 周建中, 卢韦伟, 孙娜, 等. 水文模型参数多目标率定及最优非劣解优选[J]. 水文, 2017, 37 (2): 1-7. (ZHOU Jianzhong, LU Weiwei, SUN Na, et al. Study on multi-objective calibration of hydrological model and optimization method of optimal Pareto solutions [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37 (2): 1-7. (in Chinese))
- [28] 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))
- [29] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1994, 2 (3): 221-248.
- [30] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I: solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18 (4): 577-601.

(收稿日期: 2022-08-14 编辑: 施业)