

张恒飞, 申乾倩, 王帅, 等. 考虑期末蓄水效益的水库灌区水资源调配研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 123-132. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.011

ZHANG Hengfei, SHEN Qianqian, WANG Shuai, et al. Study on water resource allocation in reservoir irrigation areas considering the end of period storage benefits[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 123-132. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.011

考虑期末蓄水效益的水库灌区水资源调配研究

张恒飞^{1,2}, 申乾倩^{1,2}, 王帅^{1,2}, 王源楠^{1,2}, 刘康^{1,2}

(1. 长江信达软件技术(武汉)有限责任公司, 湖北武汉 430014; 2. 长江水利委员会互联网+智慧水利重点实验室, 湖北武汉 430014)

摘要:【目的】水资源优化调配是提高水资源综合利用效率的关键所在,旨在实现水资源利用总体效益最大化和最优化的目标。【方法】针对具有灌区灌溉任务的水库的水资源调配计划制定问题,提出了以水库调度期内综合效益最大、期末蓄水效益最大、弃水量最小为目标的水资源优化调配模型,构建了期末蓄水效益函数,并将多目标模型转化为单目标模型,采用遗传算法进行求解。以湖北省漳河水库灌区为例,基于需水预测模型分析生活、工业以及灌区侧需水,考虑水库调度期未来水不确定性建立期末蓄水效益关系,利用水资源优化调配模型实现水资源优化调配。【结果】结果显示:所提出的方法综合效益更高,基于2024年的需水预测结果和在不同降雨频率 $P=25\%$ 、 50% 、 75% 条件下,与调度图法调度相比,水库综合效益分别提高61万元、30万元、13万元,期末水位分别降低1.9 m、降低0.85 m、抬高0.25 m。【结论】结果表明:采用期末蓄水效益量化表示调度期结束后未来一段时间来水量不确定带来的综合效益风险在水资源优化调度中的重要作用,实现水库灌区最大经济效益目标的水库调度期内水资源优化配置,指导水库调度期末水位设置,从水源侧提高水资源综合利用效率。

关键词: 需水预测; 期末蓄水效益; 多目标; 水资源优化调度; 水资源; 水库; 径流; 不确定性

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.011

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV 213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)06-0123-10



Study on water resource allocation in reservoir irrigation areas considering the end of period storage benefits

ZHANG Hengfei^{1,2}, SHEN Qianqian^{1,2}, WANG Shuai^{1,2}, WANG Yuannan^{1,2}, LIU Kang^{1,2}

(1. Changjiang Schinta Software Technology Co., Ltd., Wuhan 430014, Hubei, China; 2. Internet+ Intelligent Water Conservancy Key Laboratory of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430014, Hubei, China)

Abstract: [Objective] The optimization and allocation of water resources was proven to be crucial in enhancing the overall efficiency of water utilization, aiming to maximize and optimize the overall benefits of water resource utilization. [Methods] Facing the challenge of formulating water allocation plans for reservoirs with irrigation tasks in irrigation districts, a water resources optimization and allocation model was proposed, targeting maximized comprehensive benefits during the reservoir operation period, maximized storage benefits at the end of the period, and minimized water discards. A benefit function for end-

收稿日期: 2024-07-10; 修回日期: 2024-10-21; 录用日期: 2024-10-30; 网络出版日期: 2024-12-06

基金项目: 国家重点研发计划(YFC1510805, YFC1508603)

作者简介: 张恒飞(1985—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水利及信息化方面的研究。E-mail: zhanghengfei@cjwsjy.com.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

of-period storage was constructed, and the multi-objective problem was transformed into a single-objective model, which was then solved using the genetic algorithm. Taking the Zhanghe Reservoir Irrigation District in Hubei Province as a past example, the model was utilized, based on a water demand forecasting model, to analyze domestic, industrial, and irrigation water demands. Considering the uncertainty of inflow at the end of the reservoir operation period, a relationship for end-of-period storage benefits was established. The model then facilitated the optimal allocation of water resources. [Results] The result revealed that the proposed method had yielded higher overall benefits. Based on water demand predictions for the year 2024 and under different rainfall frequencies ($P=25\%$, 50% , 75%), compared to the reservoir operation chart method that had been used, the comprehensive benefits of the reservoir were increased by 610, 000 yuan, 300, 000 yuan, and 130, 000 yuan, respectively, under different rainfall frequencies of $P=25\%$, 50% , and 75% . Meanwhile, the end-of-period water levels were lowered by 1.9 m, 0.85 m, and raised by 0.25 m, respectively. [Conclusion] The quantification of end-of-period storage benefits, which represent the risk of comprehensive benefits arising from uncertainty in future inflows after the operation period, played a significant role in water resources optimization. This approach enabled the optimal allocation of water resources during the reservoir operation period to achieve maximum economic benefits in the reservoir-irrigation district system. It also guided the setting of end-of-period water levels, thereby enhancing the overall efficiency of water utilization from the water source perspective.

Keywords: water demand forecasting; end-of-period water storage benefits; multi-target; optimal dispatch of water resources; water resources; reservoir; runoff; uncertainty

0 引言

水资源优化调配是遵循公平、高效和可持续利用的原则下,合理调配水源,满足用水部门的用水需求^[1],实现水资源利用总体效益最大化和最优化的目标,提高水资源的整体利用效率^[2]。水资源合理配置最早源于 Masse 提出的水库优化调度问题,随后国内出现了以水库优化调度为核心的水资源分配研究,形成最初的水资源配置。水资源优化配置包括水利工程控制单元的水资源配置、区域水资源优化配置和流域水资源优化配置^[3]。灌区水资源合理配置又是流域或区域水资源合理配置的重要部分^[4],是灌区内生活、工业、农业、生态等用水量的合理分配,实现水资源的高效利用。

对于区域水资源优化配置,国内外已经进行了大量的研究。1982年,PEARSON等^[5]以区域产值为优化目标对区域用水量进行优化分配,提出了分配水量和产值之间的控制曲线。1995年,WATKINS等^[6]构建了考虑风险和不确定性水资源规划模型,引入鲁棒优化寻求最优解,结果表明鲁棒优化。2002贺北方等^[7]提出了区域水资源优化配置模型,采用遗传算法进行求解;随后,2006年,陈南祥等^[8]建立经济效益、社会效益和生态效益最大的多目标优化配置模型。2020年,黄显峰等^[9]在区域水资源优化配置模型目标函数中加入缺水率和供用水过程碳的净排放量最小,采用理想点和遗传算法进行求解,实现缺水率和碳排放量的下降。2021年,王宗志等^[10]提出流域水资源供需双侧调控模型,建立需水侧“供水-效益关

系”和供水侧“配置-调度结合”的联合控制,实现总产值和供水保证率的提高。2022年,栾清华等^[11]构建了区域 SWAT 模型优化供水结构,使得优化后的区域供水结构改善显著,地下水供水量明显下降。2022年,CHEN等^[12]基于马斯洛的需求层次理论和基尼系数,从需求侧构建水资源均衡调节模型,应用于黄河流域实现了水资源的时空均衡调度。2023年,方国华等^[13]提出了先构建水资源优化调度模型计算最优调水方案,再依据水资源优化配置模型求解综合效益最大的水资源配置方案,以南水北调江苏段为例结果表明比基本方案缺水率有所下降。在灌区水资源优化配置中,2005年,张长江等^[14]建立了灌区经济效益最大的水资源优化配置模型,采用大系统递阶模型平衡协调求解,提高了区域农业水资源承载力。2023年,潘月等^[15]针对干旱绿洲灌区水资源系统中存在的水资源供需矛盾问题,采用 Lasso 算法预测玛纳斯河灌区不同规划水平年需水量,通过模糊综合评价模型评价灌区水资源配置和谐度。冯涛等^[16]针对引黄灌区构建多目标水资源优化配置调度双层模型,实现灌区综合效益最大化。

在水库水资源调度配置中,许多学者也进行了大量的来水预报不确定性研究^[17-18],通过增加降雨、径流等预报的预见期进行水库调度,提高水资源的综合利用效率^[19-22]。1984年,STEDINGER等^[23]采用预报来水临近期作为较准确的来水过程构建 SDP 模型,但缩短了水库调度预见期。2014年,汪芸等^[24]建立确定性系数和预报误差的关系,采用动态规划算法进行优化计算,分析出对水库长期优化调度的影响

较大因素包含入库来水量不确定性的误差、出库泄流能力和起调水位的变化。2024年, BECKER等^[25]采用移动层位线法和集成预测优化法,分析了来水预报时间范围长度对调度的影响,并集成多种预报来水过程进行优化调度,生成一种调度决策方案。

水资源优化调配是一个持续的水量分配过程,对于主要承担灌溉任务的水库而言,调度期结束后水库来水量的不确定性增加了水库调度期末水位设置、水库调度期内水资源调配的难度,水库有产生弃水或发生枯水的风险。为此,本文从区域-灌区-水利工程控制的水资源优化配置方面展开研究,采用期末蓄水效益量化表示调度期结束后未来一段时间来水量不确定带来的综合效益风险,提出了以水库调度期内综合效益最大、期末蓄水效益最大、弃水量最小为目标的水资源优化调配模型,基于需水预测模型分析各类用水需水情况,建立期末蓄水位与余留期内的期末蓄水效益关系,为水库制定调度期内水资源调配计划和调度期末水位提供依据,提高水库灌区水资源利用效率,降低水库产生弃水或发生枯水的风险。本文以湖北省漳河水库-灌区为例,对此方法进行了验证。

1 优化调配模型

1.1 目标函数

水资源优化调配是基于周边生活工业用水、灌区农业灌溉用水、电站发电用水等多种用水的保障程度及优先顺序,以水库的调度期内综合效益最大、期末蓄水效益最大、弃水量最小为目标,并考虑水库和电站复杂水力和电力约束,制定年内水资源调配计划以及期末水位的控制计划。

(1) 调度期内综合效益最大

$$\max F_1 = \sum_{t=1}^T (P_t^E \times E_t + P_t^{W^s} \times W_t^s + P_t^{W^g} \times W_t^g + P_t^{W^n} \times W_t^n) \quad (1)$$

$$E_t = N_t \times \Delta t^h \quad (2)$$

式中, F_1 为水库的期内综合效益; t 、 T 分别为时段号和总时段数; P_t^E 为 t 时段的电价; E_t 为 t 时段的发电量; $P_t^{W^s}$ 、 $P_t^{W^g}$ 、 $P_t^{W^n}$ 分别为生活、工业和农业用水在 t 时段的水价; W_t^s 、 W_t^g 、 W_t^n 分别为生活、工业、农业在 t 时段的用水量; N_t 为 t 时段的水电站的出力; Δt^h 为 t 时段小时数。

(2) 期末蓄水效益最大

$$\max F_2 = f(Z_T) \quad (3)$$

式中, F_2 为水库的期末蓄水效益; Z_T 为水库在调度

期末 T 时段末的水位。

(3) 弃水量最小

$$\min W^q = \sum_{t=1}^T W_t^q \quad (4)$$

$$W_t^q = \begin{cases} V_t - V_t^x, & Z_t - Z_t^x > 0 \\ 0, & Z_t - Z_t^x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, W_t^q 、 W^q 分别为 t 时段的弃水量和周期内弃水总量; V_t^x 、 Z_t^x 分别为 t 时段限制的库容和水位,判断 t 时段是否在汛期,汛期限制的水位为汛限水位,非汛期则为正常蓄水位。

1.2 约束条件

(1) 水量平衡约束

$$V_{t+1} = V_t + I_t - W_t^d - W_t^s - W_t^g - W_t^n - W_t^q - loss_t \quad (6)$$

$$W_t^s = \alpha_1 D_t^s \quad (7)$$

$$W_t^g = \alpha_2 D_t^g \quad (8)$$

$$W_t^n = \alpha_3 D_t^n \quad (9)$$

$$W_t^d = Q_t \times 3\ 600 \times \Delta t^h \quad (10)$$

式中, V_t 为 t 时段末的水库库容; I_t 为 t 时段的来水量; W_t^d 为 t 时段的发电用水量; $loss_t$ 为 t 时段的水量损失; D_t^s 、 D_t^g 、 D_t^n 分别为 t 时段生活、工业、农业的需水量; α_1 、 α_2 、 α_3 分别为生活、工业、农业用水的满足需求程度系数; Q_t 为 t 时段的发电用水量。

(2) 水位库容约束

$$Z_t = f(V_t) \quad (11)$$

式中, Z_t 为水库 t 时段末的水库水位。

(3) 尾水位泄量约束

$$Zd_t = f(Q_t) \quad (12)$$

式中, Zd_t 为水库 t 时段末的下游水位。

(4) 水头约束

$$Z_t^{ave} = \frac{(Z_{t-1} + Z_t)}{2} \quad (13)$$

$$Zd_t^{ave} = \frac{(Zd_{t-1} + Zd_t)}{2} \quad (14)$$

$$H_t = Z_t^{ave} - Zd_t^{ave} \quad (15)$$

式中, Z_t^{ave} 、 Zd_t^{ave} 为水库 t 时段的上游平均水位、下游平均水位; H_t 为水库 t 时段的水头。

(5) 水电出力约束

$$N_t = KQ_t H_t \quad (16)$$

式中, K 为水电站综合出力系数。

(6) 水量损失约束

$$V_t^{ave} = \frac{(V_{t-1} + V_t)}{2} \quad (17)$$

$$S_t^{ave} = f(Z_t^{ave}) \quad (18)$$

$$loss_t = \theta_t \times S_t^{ave} \times \nu + \mu \times V_t^{ave} \quad (19)$$

式中, V_t^{ave} 为 t 时段平均库容; S_t^{ave} 为 t 时段的水库平均面积; θ_t 为 t 时段水库蒸发强度; ν 、 μ 分别为蒸发和渗漏系数。

(7) 边界条件

$$\underline{Z}_t \leq Z_t \leq \bar{Z}_t \quad (20)$$

$$\underline{Q}_t \leq Q_t \leq \bar{Q}_t \quad (21)$$

式中, \bar{Z}_t 、 \underline{Z}_t 分别为水库在 t 时段的水位上下限; \bar{Q}_t 、 \underline{Q}_t 分别为水库在 t 时段的发电流量上下限, 发电流量下限为河道要求最小生态流量。

1.3 求解方法

1.3.1 多目标转化单目标问题处理策略

将水库的综合效益最大、期末蓄水效益最大、弃水量最小为多目标函数转化为单目标函数, 考虑水库调度期内效益和期末蓄水效益的重要性, 采用加权法将多目标式(1)和式(3)转化为式(22)、式(23), 采用约束法将式(4)转化为式(24), 具体为

$$\max F = \gamma_1 \times \left(\sum_{t=1}^T P_t^E \times E_t + P_t^{W^s} \times W_t^s + P_t^{W^g} \times W_t^g + P_t^{W^q} \times W_t^q \right) + \gamma_2 \times f(Z_T) \quad (22)$$

$$\gamma_1 + \gamma_2 = 1 \quad (23)$$

$$W^q = \sum_{t=1}^T W_t^q \leq \varepsilon \quad (24)$$

式中, γ_1 、 γ_2 分别表示水库调度期内综合效益和期末蓄水效益的重要程度; ε 为弃水允许的最大水量。

1.3.2 需水预测及供水保障问题处理策略

生活、工业需水预测主要包括物理过程模型^[26]和数理统计模型^[27]两种。考虑到生活工业需水量与时间序列相关联的特性, 本文采用总-分式线性回归预测, 先预测水库调度期内生活工业需水总量, 再根据历史各时段各片区的生活工业用水量的权重, 加权平均获得最终的需水预测总量, 其公式为

$$D_{all} = \delta \times (Time + 1) + \beta \quad (25)$$

$$D_{j,t} = \lambda_{j,t} \times D_{all} \quad (26)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \lambda_{j,t} = 1 \quad (27)$$

式中, D_{all} 为需水总量; δ 、 β 为线性回归率定的参数; $Time$ 为参与回归分析的历史时间总数; $\lambda_{j,t}$ 、 $D_{j,t}$ 分别为 j 片区 t 时段的用水量权重、用水量; J 为片区总数。

农业灌溉短期需水预测一般采用彭曼公式模型进

行^[28], 长期预测常采用经验公式法和定额法两种预测方式。本文采用典型年-定额法预测农业灌溉总需水量^[29-30], 考虑灌区内多种水源, 通过分析全灌区灌溉总水量和漳河水库灌溉供水量, 采用灌溉面积、全灌区灌溉总水量为影响因子, 水库灌溉供水水量占全灌区农业灌溉水量的比例为决策因子, 建立支持向量机(SVM)深度学习模型, 预测水库灌溉用水比例, 从而实现水库农业灌溉用水量预测。

考虑灌区生活工业、农业灌溉、电站发电、河道生态等多种用水的供水保证优先顺序, 遵循水资源分配“优先生活生产、农业灌溉, 兼顾发电”的原则, 在水库水量可满足用水时, 式(7)一式(9)中的 α 取 1; 在水量不足分配时, 按照既定的折减规则, 依次折减发电用水量、农业用水量、工业用水量和生活用水量。优先折减发电用水量直到折减为最小发电用水量, 再折减生活、工业、农业灌溉的供水保障程度, 即式(7)一式(9)中的 α_1 、 α_2 、 α_3 值, 实现缺水情景下的水库水量分配。

1.3.3 期末蓄水效益表述问题处理策略

在上述模型中难度主要体现在期末蓄水效益, 如何合理的表述期末蓄水效益是确定期末水位和求解水资源优化调配模型的关键。将时间序列划分为调度期和余留期^[31], 如图 1 所示, 期末蓄水效益是在调度期结束后期末蓄水量在余留期内受到供水、灌溉、发电、防洪等方面的影响从而创造的效益。针对期末蓄水效益, 本文考虑水库调度期末蓄水量对下一调度期内生活、工业、农业和生态用水保证供水量的影响和弃水风险, 采用水位-效益曲线分析方法来描述目标函数式(3)。

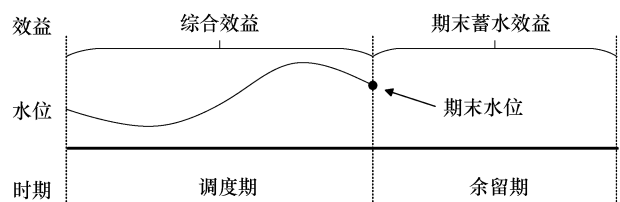


图 1 期末蓄水效益与调度期关系

Fig. 1 Relationship between final water storage efficiency and scheduling period

为了保证期末蓄水量可满足工业生活、农业灌溉和河道生态的用水, 实现水库多年调节, 本文采用基于水位-来水-需水的迭代寻优策略, 以确定不同水位对应的蓄水效益。具体步骤如下。

步骤 1: 根据水库连续丰水年和枯水年的特性, 判断并确定水库期末蓄水参与水库调节计算的总时

段 T' 。

步骤 2: 离散水库水位, 范围为 $Z'_{\min} \sim Z'_{\max}$, 初始水位设为 Z'_{\min} , 水位计算步长为 $\Delta\theta$ 。

步骤 3: 选取 I 组历史来水、历史用水, 计算每组来水的频率 p'_i , 初始来水量和用水量采用 $i=1$ 组。

步骤 4: 构建余留期效益最大模型, 以水库 T' 时段内综合效益最大为目标, 即式(1), 考虑水库约束和电站约束等, 包括式(5)一式(21), 计算第 i 组历史数据、初始水位 Z' 下的最大效益 $F'_{i, Z'}$; 若 $i < I$, 则 $i = i + 1$, 重复步骤 4; 若 $i = I$, 则转至步骤 5。

步骤 5: 计算水位 Z' 对应的综合效益 $F''_{Z'} = p'_i \times F'_{i, Z'}$ 。

步骤 6: 若 $Z' < Z'_{\max}$, 则 $Z' = Z' + \Delta\theta$, 转至步骤 3; 若 $Z' = Z'_{\max}$, 则计算结束。

根据前述方法迭代计算, 获取不同水位和蓄水效益之间的对应关系, 考虑水位-蓄水效益为离散的点, 采用拟合方法获得水位-蓄水效益连续函数, 将式(3)转化为

$$F_2 = a \times Z + b \quad (28)$$

式中, a 为水位与蓄水效益关系系数; b 为常数。

2 实例分析

2.1 工程背景

以湖北省漳河水库灌区水资源优化调配为例, 对本文方法进行验证。漳河水库是一等大(I)型水库, 具有多年调节能力, 以灌溉为主, 兼有防洪、城镇供水、发电、水产、航运、旅游、改善环境等功能。漳河水库的防洪和调节性能, 在供水系统中属于控制性工程, 在流域和区域水资源开发、利用、治理中发挥着关键性和骨干性作用。在流域水资源优化配置尤其是枯水期稳定供水系统、维护河流生态流量等方面, 具有决定性作用。

水库流域汇水面积为 $2\,212\text{ km}^2$, 总库容为 21.13 亿 m^3 , 多年平均来水量 7.97 亿 m^3 。漳河水库有观音寺、徐家湾、三佳与增容电站等水电站, 9 台机组, 总装机容量 9.22 MW , 设计年发电量 2.6 GWh 。在漳河水库调度运用中, 优先满足生活工业供水、农业灌溉, 其中生活、工业、农业、发电用水直接从库区取水, 利用电站发电对河道生态进行补水。漳河灌区设计灌区灌溉面积 17.37 万 hm^2 , 灌区内现有中小水库 300 余座, 塘堰 7 万余座, 总库容高达 10 余亿 m^3 。根据漳河水库近 20a 平均用水量, 如表 1 所列, 发电用水占比最大, 其次是农业灌溉用水与城镇供水^[32]。

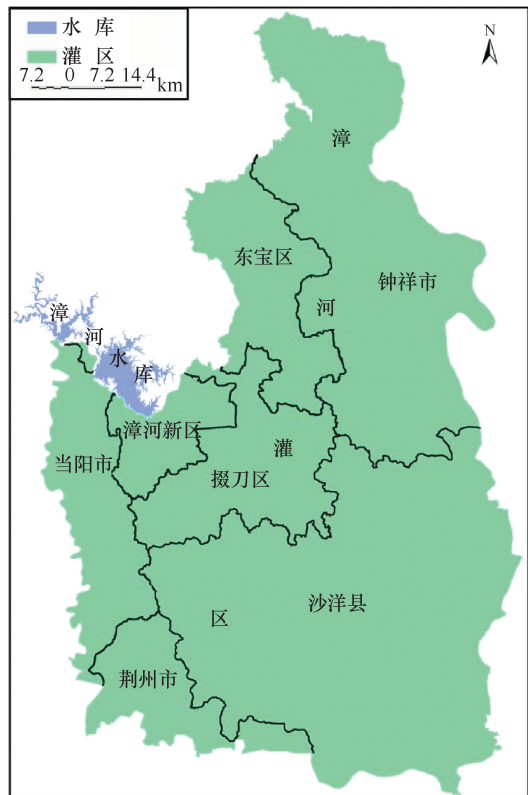


图 2 漳河水库灌区工程概况

Fig. 2 Overview map of the Zhanghe Reservoir irrigation area

表 1 漳河水库近 20 年平均用水量

Table 1 Average water consumption of Zhanghe Reservoir in the past 20 years

项 目	农业灌溉	发电用水	城镇供水	泄 洪	用水总量
用水量/亿 m^3	1.10	3.53	1.03	0.43	6.09
占比/%	18.06	57.97	16.91	7.06	

分析漳河水库缺水情形、水位降至死水位以下等情形, 均发生在连续枯水年情形, 如 2011—2014 年灌区连续 4 a 干旱, 灌区内水库、塘堰严重缺水情形下, 通过漳河水库保证灌区稳定供水。本文考虑连续 3 a 枯水情形较频繁, 拟设定 2 a 作为期末蓄水效益计算的周期。生活用水、工业用水和农业用水的水价分别为 0.008 元/m^3 、 0.35 元/m^3 、 0.058 元/m^3 , 考虑漳河水库的电站规模较小, 且模型计算的步长为月, 基于电网小水电电量为优化电量的原则, 不考虑电价波动, 采用基本电价 0.3 元/kWh 参与计算。模型主要参数如表 2 所列。结合漳河水库灌区的实际供水工程, 分析预测生活、工业、农业需水量, 建立期末蓄水位与期末蓄水效益关系, 结合水库优化调度模型, 采用遗传算法进行模型求解, 以水库的发电流量为决策变量, 获得漳河水库的优化调度计划。

表2 主要参数取值

Table 2 Main parameter values

参数	取值	参数	取值
$P_t^{W^s}$	0.008 元/ m^3	γ_1	0.5
$P_t^{W^g}$	0.35 元/ m^3	γ_2	0.5
$P_t^{W^n}$	0.058 元/ m^3	ε	0.01
P_t^E	0.3 元/kWh		

2.2 结果分析

采用2012—2021年实际生活工业用水量数据进行生活工业用水量预测,按照本文生活工业需水预测思路,采用历史5 a数据建立线性回归预测,预测水库调度期内生活工业需水总量。模型预测了2012—2021年的用水总量,相对平均误差为3.6%,可以做到简单精准预测,具体如表3所列。其中,2021年的预测模型中 k 、 β 参数分别为575.3、8468.9。

表3 年度生活工业用水总量预测对比

Table 3 Comparison of annual domestic and industrial water consumption forecast

年份	实际用水量/ $10^4 m^3$	预测用水量/ $10^4 m^3$	绝对误差/ $10^4 m^3$	相对误差/%
2012	7 250	7 437	-187	2.58
2013	7 756	7 409	347	4.48
2014	8 170	7 645	525	6.43
2015	8 587	8 108	479	5.58
2016	9 148	8 780	368	4.02
2017	9 466	9 570	-104	1.10
2018	10 009	9 945	64	0.64
2019	11 187	10 443	744	6.65
2020	11 164	11 498	-334	2.99
2021	12 163	11 921	242	1.99

以2021年为例预测生活工业用水量,并与SARIMA预测模型^[33]和实际值进行对比,本文预测更贴近实际用水过程,预测效果较好,如图3所示。由于SARIMA模型受前序数据影响比较大,2020年2月生活工业用水量的骤降导致了2021年同月的水量预测偏小。本文方法中各月的用水量采用前3年各月的用水量,符合用水周期性变化规律的同时避免了某一数据突变导致的预测过低或过高。预测2024年的需要漳河水库供水的生活工业用水量总量为13 515万 m^3 ,分别为8 638万 m^3 、4 877万 m^3 ,用水过程如图4所示。

通过本文农业灌溉需水预测方法,预测在降雨频率 $P=25\%$ 、 50% 和 75% 下全灌区农业灌溉总水量分别为32 550万 m^3 、37 070万 m^3 、43 890万 m^3 ,通过建立漳河水库灌溉面积、全灌区灌溉总水量和用水

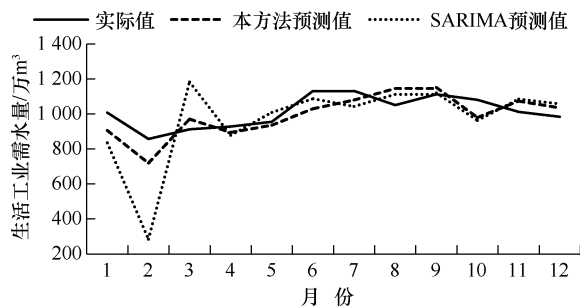


图3 2021年生活工业用水量的预测值与实际值
Fig. 3 Predicted and actual water consumption for domestic and industrial use in 2021

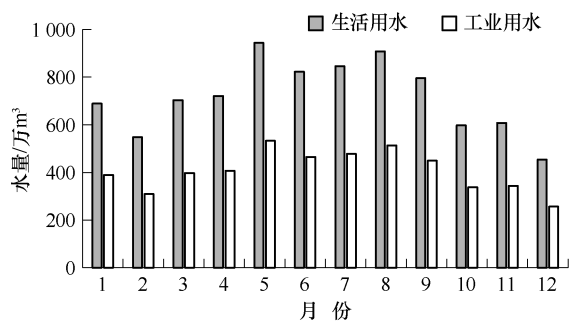


图4 2024年生活和工业预测用水量

Fig. 4 Forecast of domestic and industrial water consumption in 2024

比例的向量机(SVM)深度学习模型,进行模型训练,模型模拟过程如图5所示,确定性系数可达0.73,模拟效果与实际过程吻合度较高。预测需漳河供水灌区净灌溉水量分别为19 563万 m^3 、21 493万 m^3 、23 250万 m^3 ,预测实际灌溉需水量分别为23 015万 m^3 、24 992万 m^3 、26 420万 m^3 ,各月用水量如图6所示。

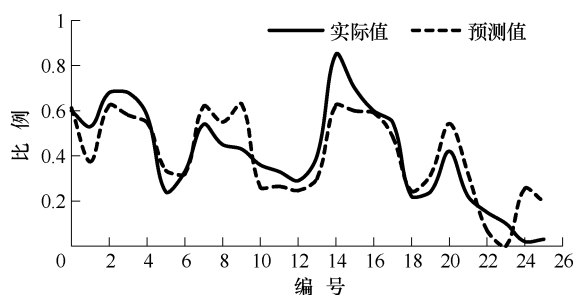


图5 SVM模型训练过程

Fig. 5 SVM model training process

采用本文期末蓄水效益计算方法,建立漳河水库期末蓄水效益计算模型,利用2000—2021年漳河水库的实际水资源分配数据进行期末蓄水效益计算,得到离散的期末水位和蓄水效益之间的关系,拟合之后

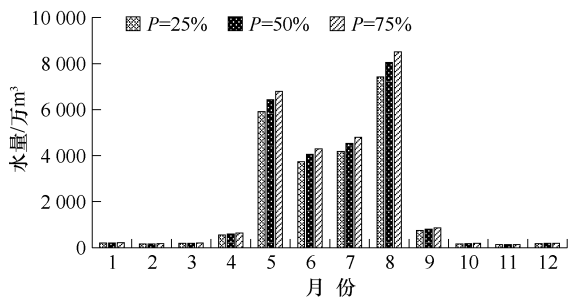


图6 不同降雨频率下漳河水库农业灌溉供水量

Fig. 6 Agricultural irrigation water supply of Zhanghe Reservoir under different rainfall frequencies

结果如图7所示, 确定性系数为0.999, 平均误差为0.15%, 表明拟合效果较好。可见期末水位与蓄水效益成正相关, 随着水位的升高而增大。

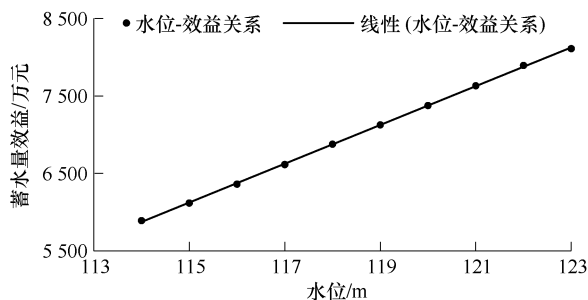


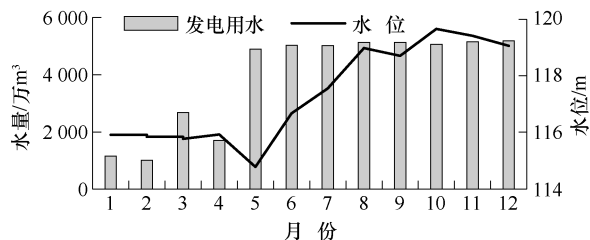
图7 漳河水库水位-蓄水效益关系

Fig. 7 Relationship between water level and storage efficiency of Zhanghe Reservoir

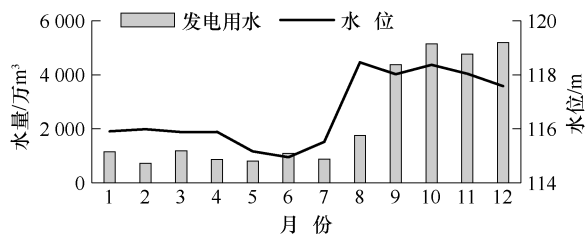
选择丰、平、枯水年的典型年的来水量, 根据预测的用水过程, 生活、工业、农业用水保障程度为100%时, 得到漳河水库假定初始水位116 m时在来水频率 $P=25%$ 、 $P=50%$ 和 $P=75%$ 的调度计划, 调度过程如图8所示, 水库调度期内效益分别为4 562万元、4 082万元、3 775万元, 期末水位分别为119.01 m、117.58 m、115.02 m。

采用本方法与漳河水库优化的调度图调度方式在相同设置情况下进行结果对比, 如表4所列。当降雨频率 $P=25%$ 时, 本方法的水库调度期内效益相比于调度图方法增加560万元, 期末水位降低1.99 m, 综合收益增加61万元; 当降雨频率 $P=50%$ 时, 本方法的水库调度期内效益相比于调度图方法增加243万元, 期末水位降低0.85 m, 综合收益增加30万元; 当降雨频率 $P=75%$ 时, 本方法的水库调度期内效益相比于调度图方法减小72万元, 期末水位增加0.25 m, 综合收益增加13万元。

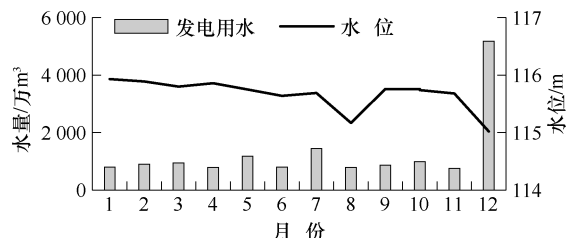
总体可见, 当来水水量较多时, 本方法降低期末水位, 减小第二年产生弃水的风险; 当来水水量较少



(a) 25%来水频率下调度计划



(b) 50%来水频率下调度计划



(c) 75%来水频率下调度计划

图8 不同降雨频率下调度计划

Fig. 8 Scheduling plan under different rainfall frequencies

时, 该模型增加期末水位, 缩小第二年供小于需的风险; 从水库调度期内和调度期末蓄水双重效益最大化, 实现整体运行效益最大化, 减少水库弃水、增加下一周期用水保证率, 提高水库的抗风险能力。

3 结果讨论

针对水库灌区水资源优化调配中调度期结束后来水不确定导致的调度期末水位设置、调度期内水资源调配的问题, 提出了以水库调度期内综合效益最大、期末蓄水效益最大、弃水量最小为目标的水资源优化调配模型, 并通过湖北省漳河水库灌区的年度优化水资源调配进行了实例验证。

期末蓄水效益将调度期结束后未来一段时间来水量不确定带来的综合效益风险量化, 将调度期内、调度期结束后一段时间的效益综合考虑, 实现在效益最大化目标下的调度期内的最优调度和调度期末水库水位的最优设置。相较于传统的水库优化调度模型, 由于考虑了更长预见期的效益, 需要基于蓄水效益关系, 在计算时长基本相同的情况下实现了水库调度期末水位的最优推荐和调度期内水资源的最优调配。

表4 调度效益对比

Table 4 Comparison of dispatch benefits

降雨频率/%	优化调度			调度图调度			水位变化/m	效益变化/万元
	期内效益/万元	期末水位/m	综合效益/万元	期内效益/万元	期末水位/m	综合效益/万元		
25	4 562	119.01	11 690	4 002	121	11 629	-1.99	+61
50	4 084	117.58	10 854	3 841	118.43	10 824	-0.85	+30
75	3 775	115.02	9 904	3 827	114.77	9 891	+0.25	+13

与文献[23]中通过增加降雨、径流等预报的预见期进行水库调度的方法相比,本方法通过集合不同来水频率不同期末蓄水水位对应的最优水资源综合效益,产生了一个期末蓄水水位对应一个综合效益的映射关系,简化了计算中的不同来水过程的优化计算量,形成一个最终的考虑综合风险的优化调配方案。而这种延长预见期考虑综合效益的方式,同样也使得该模型适用于对调度期结束后一段时间来水不确定的不同水库调节性能的月度水资源调配、周水资源调配等。

然而,这种方法存在一定的局限性。期末蓄水效益关系的建立需基于历史的来水过程和用水过程数据,这就需要对使用此模型的水库工程有较长序列的基础数据,当没有来水过程或用水过程的数据时,将无法采用该方法,当数据较少时,虽然可以构建期末蓄水效益函数,但存在可信度偏低的风险,导致模型计算结果存在较大偏差。

4 结论

调度期末水位的设置和调度期效益相互制约,在水库水资源进行调配时,不仅仅需要实现水库调度期内水资源的高效利用,还要考虑调度期末水位的合理设定,但对于水库运行管理来水,中长期来水预报的准确性较低,难以满足水资源调度计划的制定。针对具有大型灌区灌溉任务的水库的水资源调配计划制定问题,本文将水资源优化配置问题转化为大型水库的优化调度问题,并考虑水库来水预报的不确定性,提出了以水库调度期内综合效益最大、期末蓄水效益最大、弃水量最小为目标的水资源优化调配模型,为水库制定水资源调配计划提供依据,提高水库水资源利用效率,降低水库产生弃水或发生枯水的风险。

通过漳河水库-灌区进行实例验证,本文采用回归分析法预测生活工业需水效果较好,模型预测平均误差为3.6%,采用SVM模型预测灌区内农业用水中需漳河水库的供水量确定性系数达到0.73,在不同降雨频率在 $P=25\%$ 、 50% 、 75% 三种情况下灌区农业需求用水量增多情况下,与调度图调度相比,水库调度期内效益和期末蓄水效益的综合效益分别提高

61万元、30万元、13万元,期末水位丰水年平水年分别降低1.9m、0.85m,枯水年抬高0.25m,实现水库调度期内调度效益和期末水位的最优设置,在本年度综合效益最大的情况下,期末蓄水效益增大。本方法为大型水库控制控制-灌区区域水资源调配计划的编制提供最大经济效益依据,从水源侧提高水资源的综合利用效率。

参考文献(References):

- [1] 李原园. 水资源合理配置在实施最严格水资源管理制度中的基础性作用[J]. 中国水利, 2010(20): 26-28.
LI Y Y. Basic function of the reasonable allocation of water resources management in the implementation of the most rigorous system[J]. China Water Resources, 2010(20): 26-28.
- [2] 王浩, 王建华, 秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 123-128.
WANG H, WANG J H, QIN D Y. Research advances and direction on the theory and practice of reasonable water resources allocation [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 123-128.
- [3] 付银环, 李新旺, 徐宝同, 等. 不确定性多目标模糊规划在水资源优化配置中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(3): 470-479.
FU Y H, LI X W, XU B T, et al. Application of interval multi-objective fuzzy programming based on uncertainty in optimal allocation of water resources [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(3): 470-479.
- [4] 齐学斌, 黄仲冬, 乔冬梅, 等. 灌区水资源合理配置研究进展[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 287-295.
QI X B, HUANG Z D, QIAO D M, et al. Research advances on the reasonable water resources allocation in irrigation district [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 287-295.
- [5] PEARSON D, WALSH P D. The derivation and use of control curves for the regional allocation of water resources. optimal allocation of water resources[J]. Hydrological Sciences Journal, 1982, 27(2): 202.
- [6] WATKINS D W, MCKINNEY D C. Robust optimization for incorporating risk and uncertainty in sustainable water resources planning [J]. Series of Proceedings and Reports-International Association of Hydrological Sciences, 1995, 231: 225-232.
- [7] 贺北方, 周丽, 马细霞, 等. 基于遗传算法的区域水资源优化

- 配置模型[J]. 水电能源科学, 2002, 20(3): 10-12.
- HE B F, ZHOU L, MA X X. Optimal allocation model of regional water resources based on genetic algorithm [J]. Water Resources and Power, 2002, 20(3): 10-12.
- [8] 陈南祥, 李跃鹏, 徐晨光. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 308-313.
- CHEN N X, LI Y P, XU C G. Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 308-313.
- [9] 黄显峰, 石志康, 金国裕, 等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 47-51.
- HUANG X F, SHI Z K, JIN G Y, et al. Optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 47-51.
- [10] 王宗志, 叶爱玲, 刘克琳, 等. 流域水资源供需双侧调控模型及应用[J]. 水利学报, 2021, 52(3): 265-276.
- WANG Z Z, YE A L, LIU K L, et al. Modeling of bilateral joint regulation of basin-wide water resources supply and demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(3): 265-276.
- [11] 栾清华, 高昊悦, 刘红亮, 等. 基于GWAS模型的武安市水资源优化配置[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 32-42.
- LUAN Q H, GAO H Y, LIU H L, et al. Optimal allocation of water resources in Wu'an County based on GWAS model [J/OL]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 32-42.
- [12] NIU C, CHANG J X, WANG Y, et al. A water resource equilibrium regulation model under water resource utilization conflict: A case study in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Research, 2022, 58(6): e2021WR030779.
- [13] 方国华, 赵文萃, 李鑫, 等. 南水北调东线江苏段水资源调配研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 1-8.
- FANG G Y, ZHOU W C, LI X, et al. Study on water resources dispatching and allocation in the Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 1-8.
- [14] 张长江, 徐征和, 俞汝安. 应用大系统递阶模型优化配置区域农业水资源[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1480-1485.
- ZHANG C J, XU Z H, YAN R A. Optimal allocation of regional agricultural water resources based on large system level transfer model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1480-1485.
- [15] 潘月, 杨广, 田浩, 等. 水资源总量约束条件下玛纳斯河灌区水资源优化配置[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(10): 1065-1072.
- PAN Yue, YANG Guang, TIAN Hao, et al. Optimization of water resources in Manas River irrigation district under constraints of total water resources configuration [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(10): 1065-1072.
- [16] 冯涛, 闫丰, 左其亭, 等. 引黄灌区多目标水资源优化配置-调度双层模型[J]. 人民黄河, 2023, 45(12): 65-70.
- FENG T, YAN F, ZUO Q T, et al. Multi-Objective water Resources Optimal Allocation and Dispatching Two-Layer Model in Yellow River Diversion Irrigation Area [J]. Yellow River, 2023, 45(12): 65-70.
- [17] TEJADA-GUIBERT J, JOHNSON S, STEDINGER J. The value of hydrologic information in stochastic dynamic programming models of a multireservoir system [J]. Water Resources Research, 1995, 31(10): 2571-2579.
- [18] YOU J Y, CAI X. Hedging rule for reservoir operations: 1. A theoretical analysis [J]. Water Resources Research, 2008, 44(1): W01415.
- [19] 徐炜, 张弛, 彭勇, 等. 基于降雨预报信息的梯级水电站不确定优化调度研究 I: 聚合分解降维 [J]. 水利学报, 2013, 44(8): 924-933.
- XU W, ZHANG C, PENG Y, et al. Stochastic optimization operation for cascade hydropower reservoirs by using precipitation forecasts I. Using aggregation-decomposition methodology to reduce high computational costs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 924-933.
- [20] 徐炜, 彭勇, 张弛, 等. 基于降雨预报信息的梯级水电站不确定优化调度研究 II: 耦合短、中期预报信息 [J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1189-1196.
- XU W, PENG Y, ZHANG C, et al. Stochastic optimization operation for cascade hydropower reservoirs by using precipitation forecasts II. Coupling short and medium-term information [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(10): 1189-1196.
- [21] ROULIN E, VANNITSEM S. Skill of medium-range hydrological ensemble predictions [J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(6): 729-744.
- [22] MASCARO G, VIVONI E, DEIDDA R. Implications of ensemble quantitative precipitation forecast errors on distributed streamflow forecasting [J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(1): 69-86.
- [23] STEDINGER J R, SULE B F, LOUCKS D P. Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization [J]. Water Resources Research, 1984, 20(11): 1499-1505.
- [24] 汪芸, 郭生练, 周研来, 等. 水库长期发电优化调度的不确定性分析 [J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 61-65.
- WANG Y, GUO S L, ZHOU Y L, et al. Uncertain analysis of long-term generation optimal operation for reservoirs [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(3): 61-65.
- [25] BECKER B, KIM J, PUMMER E. Reservoir operations under uncertainty with moving-horizon approach and ensemble forecast optimization [J]. Journal of Applied Water Engineering and Research, 2024, 12(3): 265-276.
- [26] JAIN A, ORMSBEE C H, LINDELL E. Short-term water demand forecast modeling techniques-conventional methods versus [J]. American Water Works Association, 2002, 94(7): 64-72.
- [27] 徐彦君. 基于神经网络需水量预测方法的综合评价与分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2006.

- XU Y J. A Summary Evaluating and Analysis of the Method of Water Demand Prediction Based on the Artificial Neural Network [D]. Shenyang: Northeastern University, 2006.
- [28] 刘傲, 赵东保, 魏义长, 等. 顾及时空特征的参考作物蒸散量集成学习估算[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(2): 179-186.
- LIU Ao, ZHAO Dongbao, WEI Yichang, et al. Ensemble learning estimation of reference crop evapotranspiration taking into account spatial and temporal characteristics [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(2): 179-186.
- [29] 张欣, 张保祥, 李冰, 等. 基于用水定额的区域节水评价方法及应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 95-106.
- ZHANG X, ZHANG B X, LI B, et al. Evaluation and application of regional water saving based on water quota [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 95-106.
- [30] 李雪纯, 陈丹, 王琳琳, 等. 生态种养模式对稻田水足迹的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(2): 196-202.
- LI Xuechun, CHEN Dan, WANG Linlin, et al. Effect of ecological cultivation pattern on water footprint of paddy field [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(2): 196-202.
- [31] 艾学山, 穆振宇, 郭佳俊, 等. 考虑余留效益的水库长期优化调度图集及应用[J]. 水力发电学报. 2022, 41(2): 20-30.
- AI X S, MU Z Y, GUO J J, et al. Long-term optimal operation atlas of reservoirs considering remaining benefits and its application [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(2): 20-30.
- [32] 冯天权, 陈祖梅, 郑国. 漳河水库近 20 年调度运用分析[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(4): 5-10.
- FENG T Q, CHEN Z M, ZHENG G. Analysis on dispatch and operation of Zhanghe Reservoir in recent 20 years [J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(4): 5-10.
- [33] 苑希民, 王小姣, 田福昌, 等. 旱涝交替下驮英灌区年内水资源优化调控研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 8-15.
- YUAN X M, WANG X J, TIAN F C, et al. Study of optimal regulation and control of water resources in Tuoying Irrigation District under alternate drought and flood [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 8-15.

(责任编辑 王海锋)