

杨翊辰, 刘攀, 王奕博, 等. 基于长短期记忆模型的汉江中下游藻类防控调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 324-331. YANG Y C, LIU P, WANG Y B, et al. Reservoir operating for phytoplankton prevention and control in middle-lower reaches of Han River based on Long Short-Term Memory model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 324-331. (in Chinese)

基于长短期记忆模型的汉江中下游藻类防控调度

杨翊辰¹, 刘攀¹, 王奕博¹, 李诗琼¹, 林东升², 张杨²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 重庆嘉陵江利泽航电开发有限公司, 重庆 401546)

摘要: 创建基于长短期记忆模型的藻类防控调度方法, 可提高藻类的模拟精度, 提升水库调度效益。以汉江中下游藻类及丹江口水库为研究对象, 构建包括经济和生态目标函数的藻类防控调度模型, 采用水体综合营养指数和浮游植物密度的长短期记忆模型建立生态目标函数, 最后采用布谷鸟优化算法求解。结果显示: 基于长短期记忆模型的综合营养指数和浮游植物密度模拟模型的模拟值与实测值在 0.01 水平相关性显著, 藻类模拟效果良好; 与常规调度相比, 提出的藻类防控调度方案多年平均供水量可提高 0.45%, 多年平均发电量可提高 1.06%, 浮游植物平均密度降低 1.57%, 在有效控制汉江中下游藻类的同时, 可进一步提升丹江口水库调度综合效益。研究成果可以为河流藻类防控提供技术支撑。

关键词: 长短期记忆; 藻类模拟; 水库调度; 多目标优化; 藻类防控

中图分类号: TV214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0033

在深入推进生态文明建设的背景下, 河流生态文明建设和环境治理理念对水利事业产生了深刻影响, 水库生态调度理论迅速发展^[1-3]。目前, 可通过生态调度实现生态流量保证、自然水文情势恢复、水体污染防治、藻类防控等目标^[4-5]。

浮游植物是河流生态系统中的重要初级生产者, 当气候适宜且河流流量较小时可在短时间内大量繁殖形成水华, 危害河流生态环境^[6]。针对水华现象, 目前常采用潮汐式调度快速改变河道内流量, 人为造成水位波动, 破坏浮游植物的生长条件^[7-8]; 或采用引清调度, 引入相对清洁的水体, 减轻环境破坏^[9-10]。由于水华常出现在冬春交替时期, 水库处于低水位运行, 可用于调节的水量十分有限, 并且抑制水华暴发和促进水华消退的下泄流量、下泄时机和调度时长难以把握, 因此准确高效地进行藻类防控调度成为当前研究的重要课题^[11]。

浮游植物生长的影响因素可分为环境因子和生理生态因子, 环境因子包括营养盐含量、温度、水文气象条件等, 生理生态因子包括浮游植物种类、生

境需求等。藻类防控调度一般利用破坏藻类生长的环境因子限制其生长繁殖, 但目前尚无完善的机理模型^[12]。数据驱动模型可从历史数据中寻找隐含规律, 解决机理不明晰的问题, 针对藻类模拟常用的数据驱动模型有 RBF 神经网络、随机森林、长短期记忆模型等^[13-14]。相较常规算法长短记忆模型能够更好地提取藻类繁殖的特征信息, 从波动数据中寻找规律^[15-17]。

将长短期记忆模型与多目标优化算法相耦合, 可权衡水库的经济效益和生态效益, 减小人工率定两者优先级所带来的主观影响^[18-19]。多目标优化求解可得到多组调度方案, 在保证水库经济效益并提升水库生态效益的原则下, 选出满意的藻类防控调度方案^[20-21]。

本文针对汉江中下游的藻类防控问题, 基于长短期记忆模型模拟浮游植物密度的年内分布规律, 构建丹江口水库面向供水、防洪、发电、生态的多目标优化模型, 提出藻类防控调度方案, 在保证丹江口水库经济效益的前提下, 提高其生态效益。

收稿日期: 2022-12-24 修回日期: 2023-03-31 网络出版时间: 2023-04-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230412.1037.009.html>

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(52225901)

作者简介: 杨翊辰(2000—), 男, 河南淮阳人, 主要从事水库生态调度研究。E-mail: yangyc@whu.edu.cn

通信作者: 刘攀(1978—), 男, 湖南湘潭人, 教授, 博士, 主要从事水文及水资源开发利用研究。E-mail: liupan@whu.edu.cn

1 研究方法

针对汉江中下游地区藻类防控问题,采用长短期记忆模型建立藻类模拟模型,耦合多目标优化改进调度方案,研究方法主要包含3个步骤:

优化调度模型。确定多目标优化的生态目标和经济目标,选取水体营养状态破坏率和浮游植物多年平均密度作为调度的生态目标,选取多年平均供水量和多年平均发电量作为调度的经济目标。

藻类模拟模型。根据优化目标,对各个子指标建立长短期记忆模型,验证模型的模拟效果。

多目标优化求解。通过布谷鸟算法得到非劣解集,按照优选方案选取满意解,得到藻类防控调度方案。

1.1 优化调度模型

1.1.1 目标函数

本研究共考虑4个优化目标。经济目标为多年平均供水量和多年平均发电量,生态目标为水体营养状态破坏率和多年平均浮游植物密度。

多年平均供水量(W_s),是反映水电站经济效益的重要指标之一,是指一定调度期内平均每年向用户提供的水量。多年平均供水量目标函数为

$$\max W_s = \sum_{t=1}^S W_{SM_t} / S \quad (1)$$

式中: S 为调度期总长度; W_{SM_t} 为各时段的供水量, m^3 。

多年平均发电量(H_G),也是反映水电站经济效益的重要指标之一,是指一定调度期内水电站每年平均提供的发电量。多年平均发电量的目标函数为

$$\max H_G = \sum_{t=1}^S H_t / S \quad (2)$$

式中: H_t 为各时段的发电量, $kW \cdot h$ 。

水体营养状态破坏率($I_{TL\sigma}$)。水体的营养状态一般采用综合营养指数来表示,当综合营养指数低于或者超出合理的阈值时,往往会造成生态环境破坏。综合营养指数在水体富营养化评价中应用广泛,主要包括叶绿素a质量浓度、总氮质量浓度、总磷质量浓度、高锰酸盐指数和水体透明度5个指标,能够反映水体的富营养化程度^[22-23]。叶绿素a质量浓度评价指标的权重最高,是综合营养指数的直接指示;基于水体理化性质的其余4个指标权重较低,是综合营养指数的间接指示。综合营养指数法各指标及其代表符号见表1^[24]。

综合营养指数计算公式为

$$I_{TL} = \sum_{j=1}^m W_j \times I_{TL,j} \quad (3)$$

式中: I_{TL} 为综合营养指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $I_{TL,j}$ 为第 j 种参数的营养状态指数; m 为评价指标个数。

表1 综合营养指数法评价指标

Tab. 1 Comprehensive nutrition state index method evaluation index

指标	代表符号
叶绿素a质量浓度/($mg \cdot m^{-3}$)	ρ_{Chl-a}
总磷质量浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	ρ_{TP}
总氮质量浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	ρ_{TN}
水体透明度/m	P_{SD}
高锰酸盐质量浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	ρ_{COD}

由于各指标对水体营养状态的影响程度和响应程度不同,因此要确定各指标的权重。以Chl-a为基准参数,第 j 种参数的相关权重计算公式为

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (4)$$

式中: r_{ij} 为第 j 种参数与基准参数Chl-a的相关系数。

各种参数营养状态指数评价因子计算公式为

$$\begin{cases} I_{TL,Chl-a} = 10(2.54 + 1.0861 \times \ln \rho_{Chl-a}) \\ I_{TL,TP} = 10(9.436 + 1.624 \times \ln \rho_{TP}) \\ I_{TL,TN} = 10(5.453 + 1.694 \times \ln \rho_{TN}) \\ I_{TL,SD} = 10(5.118 - 1.94 \times \ln P_{SD}) \\ I_{TL,COD} = 10(0.109 + 2.661 \times \ln \rho_{COD}) \end{cases} \quad (5)$$

为了量化水库的营养状态,对水体的不同营养状态进行评价,综合营养指数采用0到100的连续数字将水体营养状态分级,见表2。

表2 综合营养指数法营养状态分级

Tab. 2 Comprehensive nutrition state index method nutritional status classification

综合营养指数范围	评价等级
$0 < I_{TL} \leq 30$	贫营养
$30 < I_{TL} \leq 50$	中营养
$50 < I_{TL} \leq 60$	轻度富营养
$60 < I_{TL} \leq 70$	中度富营养
$70 < I_{TL} \leq 100$	重度富营养

对于自然水体,中营养状态为最理想的河道内生态环境。当水体营养物质较少时,水体会陷入贫营养化,使水生物的生长发育受到限制;当水体营养物质较多且外界条件适宜时,浮游植物密度可能会出现暴发式增长,造成水体缺氧,水生物死亡,水质恶化,破坏河流生态。因此,应通过合理的调度手段,控制水体富营养化指数为 30~50,维持水体中营养化状态,保持良好的河流生态环境。

在调度过程中,当水库下游水体综合营养状态指数低于 30 或高于 50 时,即认为水体营养状态发生破坏。计算各年水体营养状态破坏时段占全年时段的比例,即水体营养状态破坏率,作为指导生态调度的目标函数:

$$\min I_{TL\sigma} = S_{\sigma} / S \quad (6)$$

式中: $I_{TL\sigma}$ 为水体营养状态破坏率; S_{σ} 为调度期发生破坏的时段长度。

浮游植物多年平均密度 (D_p)。浮游植物作为河流生态系统最重要的生产者之一,其密度很大程度上决定了河流生态系统的健康程度。浮游植物过度生长是河流水体出现水华的根本原因。采用多年平均浮游植物密度作为调度目标函数:

$$\min D_p = \sum_{i=1}^S D_{p,i} / S \quad (7)$$

式中: $D_{p,i}$ 为各时段的浮游植物密度, L^{-1} 。

1.1.2 约束条件

水库运行时需要满足水库自身安全、下游防洪要求、河道最小流量等方面要求,生态调度的约束条件如下。

水量平衡约束为

$$V_{i+1} = V_i + (Q_{i,i} - Q_{o,i})\Delta t \quad (8)$$

式中: V_i 表示第 i 时段的库容; $Q_{i,i}$ 表示各个时段入库流量; $Q_{o,i}$ 表示各个时段出库流量。

水库库容约束为

$$\underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad (9)$$

式中: \underline{V}_i 、 \bar{V}_i 分别表示第 i 时段的库容上、下界。

出库流量约束为

$$\underline{Q}_{o,i} \leq Q_{o,i} \leq \bar{Q}_{o,i} \quad (10)$$

式中: $\underline{Q}_{o,i}$ 、 $\bar{Q}_{o,i}$ 分别表示第 i 时段的出库流量上界和下界。

水库初始状态为

$$V_1 = V_s \quad (11)$$

式中: V_s 表示调度期初始库容。

河道最小流量限制为

$$Q_e \leq Q_{o,i} \quad (12)$$

式中: Q_e 表示下游河道内最小生态流量。

1.2 藻类模拟模型

本文通过长短期记忆模型建立流量、时间与水体综合营养指数、浮游植物密度的模拟模型,并验证其可靠性。

长短期记忆模型(LSTM)是门限循环神经网络中的一种,于 1997 年由 Hochreiter 等^[25] 提出,它具有输入层、隐藏层、输出层 3 层架构,在时序预测、分析回归等领域有大量应用。该算法缓解了 RNN 循环神经网络在训练过程中可能出现的梯度消失和梯度爆炸问题,更适用于水文序列的回归和拟合^[26],缺点是训练速度较慢、计算量大。建立水体综合营养指数和浮游植物密度的长短期记忆模型,训练所采用的超参数见表 3。

表 3 长短期记忆模型的超参数

Tab. 3 Hyperparameters of LSTM model

超参数	Hyperparameter	浮游植物 密度模型	综合营养 指数模型
隐含单元数量	HiddenUnits	10	8
最大迭代次数	MaxEpochs	1 000	1 000
梯度阈值	GradientThreshold	1	1
初始学习率	InitialLearnRate	0.05	0.05
学习率下降轮次	LearnRateDropPeriod	100	100
学习率下降因子	LearnRateDropFactor	0.8	0.8

采用不同参数组合训练模型至模型输出误差最小。调整隐含单元数量可以防止模型出现过拟合或欠拟合;学习率确定每次迭代中的步长,使损失函数收敛至最小值;等间隔调整学习率可以防止模型误差无法收敛至最小。

采用纳什效率系数 (E_{NS}) 和平均绝对百分比误差 (E_{MAP}) 评价 LSTM 模拟效果。 E_{NS} 反映模型输出序列与原始序列的吻合度, E_{MAP} 反映模型输出序列的精度,计算公式为

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad (13)$$

$$E_{MAP} = \frac{100\%}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{y_k - \hat{y}_k}{y_k} \right| \quad (14)$$

式中: y_k 为原始序列; \hat{y}_k 模型模拟序列。

为了说明长短期记忆模型相较其他模型在模拟效果上的优越性,采用同样的数据集构建多元线性回归模型和 BP 神经网络模型进行对比。多元线性回归具有计算速度快、原理简单的优点,对于序列

较短、相关性强的数据序列有着更好拟合效果。BP神经网络将各表示层的简单非线性函数进行组合,使得输入序列和输出序列进行足够多次的转换,从而学习到其中深层次的非线性联系。

1.3 多目标优化求解

多目标优化算法可以使多个目标函数在一定的约束条件下尽可能地同时达到最优状态^[27]。本文共考虑4个目标,为了在生态调度过程中降低人为率定各目标权重系数对研究产生的主观影响,采用布谷鸟算法进行调度计算。布谷鸟算法是一种新兴的启发算法,由于其强大的搜索性能被广泛应用于寻优计算中。布谷鸟算法相较其他多目标优化算法所需参数少,易与水库调度计算相耦合,由于其寻优过程中交替使用大步长和小步长,具有更强的全局搜索能力。布谷鸟算法运算过程如下:设定算法参数及优化目标函数,初始化优化种群;评价各个鸟巢的目标函数,并通过Levy飞行更新鸟巢的位置,按照发现概率丢弃部分鸟巢并随机建立新鸟

巢;重复以上步骤,达到最大迭代次数后输出最优解。设置经济目标为多年平均供水量最大、多年平均发电量最大,生态目标为水体营养状态破坏率最小、多年平均浮游植物密度最小。

2 研究对象

汉江是长江最长的支流,拥有丰富的水生物资源。在过去的30年间,汉江中下游地区曾出现过藻类过度繁殖现象,影响了汉江的生态环境^[28]。汉江中下游有多个监测水生态数据的水文测站,见图1。距离水库较近的地区,如黄家港站,受到水库泄流扰动大,一定程度上破坏了浮游植物生长的条件,河流浮游植物密度较低^[29]。距离丹江口大坝一定距离的皇庄、沙洋、仙桃水文站,由于距离水库距离长,河道比降降低,河道断面变宽,河流流速减缓,更利于藻类繁殖。自1992年以来,汉江中下游的所有藻类暴发事件几乎都发生在襄阳以下流域^[8]。

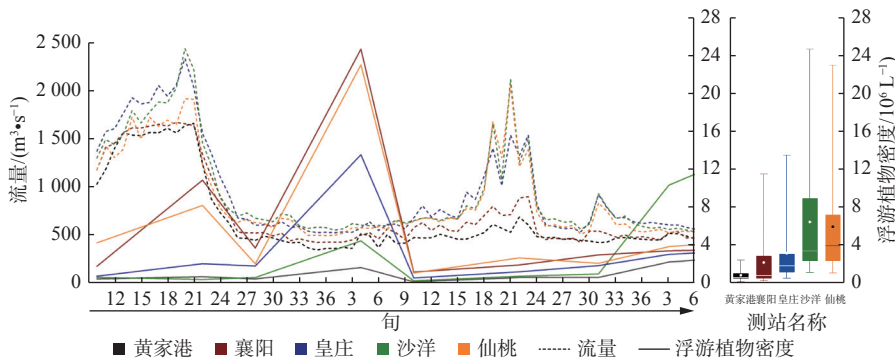


图1 汉江中下游浮游植物密度分布情况

Fig. 1 Distribution of phytoplankton density in the middle and lower reaches of the Han River

丹江口水库位于汉江中上游,1973年建成^[30]。丹江口水库具有供水、防洪、发电、灌溉等综合效益,其运行特性见表4。

表4 丹江口水库运行特性

Tab. 4 Danjiangkou Reservoir operating characteristics

指标	参数
总库容/亿m ³	290.5
装机容量/MW	900
保证出力/MW	247
最小出流量/(m ³ ·s ⁻¹)	490
正常蓄水位/m	170
死水位/m	145
6月21日至8月10日汛限水位/m	160.0
8月21日至9月20日汛限水位/m	163.5
调节能力	多年调节

选取1979年至2020年的丹江口水库径流数据进行常规调度及多目标优化调度。丹江口水库常规调度见图2。

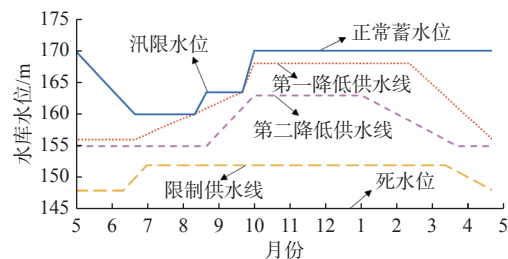


图2 丹江口水库常规调度线

Fig. 2 Conventional operating rule curves for the Danjiangkou Reservoir

水生态数据包括汉江中下游多个站点的总氮质量浓度、总磷质量浓度、水体透明度、高锰酸盐指数、叶绿素a质量浓度、浮游植物密度,个别缺失数

据采用线性插值插补取得。

对水库调度线的拐点优化, 每条调度线设置 4 个拐点。设置优化种群规模为 100, 迭代次数为 200, 优化变量总数为 27。优化变量的下边界为死水位, 上边界为汛限水位, 水库优化调度线不应相互交叉。多目标优化得到非劣解集, 根据在不损害水库经济效益的前提下, 尽可能提高水库生态效益的原则优选本次调度的满意解。

3 研究结果

3.1 长短期记忆模型

长短期记忆模型率定期、检验期的模拟效果见表 5。

浮游植物密度年内变化剧烈, 最大值可达最小值的 10 倍以上, 导致 E_{MAP} 较大。采用多元线性回归和 BP 神经网络建立相同模型, 综合营养指数的 E_{NS} 分别为 0.17 和 0.64, 浮游植物密度的 E_{NS} 分别为 0.16 和 0.32, 均劣于长短期记忆模型。长短期记忆模型的纳什效率系数和平均绝对百分比误差均在可接受范围内, 模拟序列与实测序列在 0.01 水平下相关性显著, 可认为各长短期记忆模型模拟效果良好。

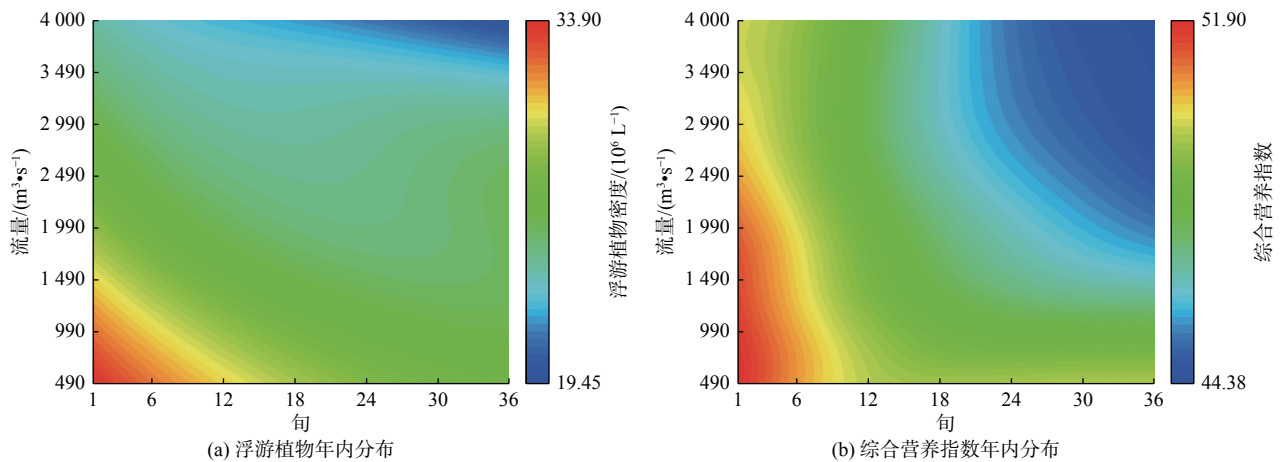


图 3 浮游植物密度及综合营养指数年内分布情况

Fig. 3 Intra-year distribution of phytoplankton density and comprehensive nutrition state index

3.2 调度结果

3.2.1 常规调度结果

结合上述藻类模拟模型对丹江口水库进行常规调度计算, 水库依照调度图供水, 水电站按照保证出力发电。常规调度结果见表 6。

3.2.2 多目标优化结果

通过多目标优化得到非劣解集, 该解集由 100 组非劣解组成, 每个解的 4 个指标各有侧重。图 4 反

表 5 长短期记忆模型模拟结果

Tab. 5 Regression performance of LSTM model

指标	E_{NS}		$E_{MAP}/\%$	
	率定期	检验期	率定期	检验期
浮游植物密度	0.95	0.79	26.34	17.37
综合营养指数	0.83	0.97	1.54	4.52

采用随机流量序列检验浮游植物密度和综合营养指数的年内分布。将丹江口水库历史 40 年的旬均出库流量排频, 可发现超过 98% 的时段水库出库流量低于 $4000 m^3/s$, 因此设置随机流量上界 $4000 m^3/s$, 下界 $490 m^3/s$ 。随机流量检验结果见图 3。

由图 3(a) 可以看出, 浮游植物密度受季节和流量影响明显。在季节方面, 浮游植物密度在春季较大, 随季节推移而逐渐减少; 在流量方面, 浮游植物密度与河道流量呈反比, 流量减小则浮游植物密度明显增大。图 3(b) 则反映了综合营养指数的年内变化, 高值主要集中在春季和低流量区域, 与浮游植物密度年内分布相似。

以上各模型反映了浮游植物密度和综合营养指数的年内分布, 模拟效果良好, 相符现实情况, 可以用于指导生态调度。

映了常规调度结果与满意解的优劣。4 个调度目标中, 多年平均供水量和多年平均发电量越大越好, 水体营养状态破坏率和多年平均浮游植物密度越小越好, 改进方向由虚线箭头标出。彩色线条为多目标优化所得的非劣解集, 黑色线条为常规调度结果, 红色线条为多目标优化的满意解。满意解的结果见表 7。多年平均供水量、多年平均发电量、水体营养状态破坏率和浮游植物密度相对常规调度的改进率分别为 0.45%、1.06%、0 和 1.57%。

表 6 常规调度结果

Tab. 6 Results of regular operating

调度目标	目标值
多年平均供水量/亿m ³	107.56
多年平均发电量/(亿kW·h)	32.19
水体营养状态破坏率/%	24.93
平均浮游植物密度/(10 ³ L ⁻¹)	2 902.54

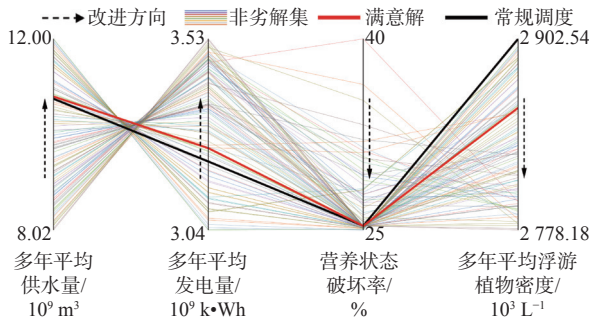


图 4 非劣解集与常规调度结果对比

Fig. 4 Comparison of non-inferior solution set and conventional operating result

表 7 满意解结果

Tab. 7 Preferred solution of non-inferior solution set

调度目标	目标值
多年平均供水量/亿m ³	108.05
多年平均发电量/(亿kW·h)	32.53
水体营养状态破坏率/%	24.93
平均浮游植物密度/(10 ³ L ⁻¹)	2 857.69

3.2.3 藻类防控方案的水库调度图

根据满意解确定相应的调度图见图 5。调度图中包含汛限水位线、正常蓄水位线、第一降低供水线、第二降低供水线、限制供水线和死水位线,依照该调度图进行水库调度可有效防控河流藻类。

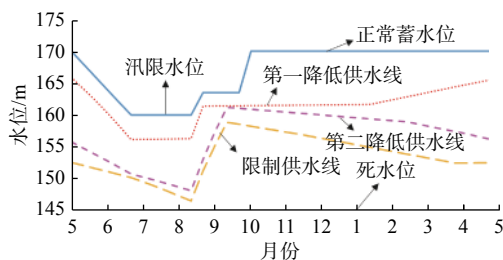


图 5 丹江口水库藻类防控调度线

Fig. 5 Phytoplankton prevention and control operating curves of Danjiangkou Reservoir

4 结语

针对汉江中下游的藻类防控问题,将长短期记忆模型与多目标优化耦合求解得到满意的调度方案。以汉江中下游为研究区域,得到以下结论:

通过长短期记忆模型建立的综合营养指数和浮游植物密度模型模拟效果良好,相较其他模型有明显优势,实测序列与模拟序列均在 0.01 水平相关性显著,可用于指导生态调度。

相较常规调度,多目标优化满意方案的多年平均供水量提高 0.45%,多年平均发电量提高 1.06%,浮游植物多年平均密度降低 1.57%,在保证经济效益的同时提升了调度的生态效益,取得了良好的成果,验证了该调度方案的可行性。本研究提出的生态调度方案在一定程度上能够减轻汉江中下游的藻类危害。

不同地区的藻类差异性较大,不同河段的优势藻类也有所不同。研究提出的调度方案制定方法基于历史数据,易于确定有针对性的方案。对于不同生活习性的藻类可分别建立长短期记忆模型模拟,再耦合多目标优化科学确定藻类防控调度方案。布谷鸟算法的多目标寻优效果好,易于找到可行域内的最优解来指导调度,在供水、发电、生态等方面均取得了一定改进。但鉴于实际调度问题的复杂性、藻类生长影响因素的多样性,调度方案的时间尺度仍不够精确,未来可将本研究与水库实时调度和应急调度结合,进一步提高防控的效果和精度。

参考文献:

- [1] 夏军,陈进.长江大保护实践与对策[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):625-630. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0064.
- [2] 黄琰,封国林,董文杰.近50年中国气温、降水极值分区的时空变化特征[J].气象学报,2011,69(1):125-136. DOI: 10.11676/qxb2011.011.
- [3] REID A J, CARLSON A K, CREED I F, et al. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity.[J]. Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2019, 94(3): 849-873. DOI: 10.1111/brv.12480.
- [4] 李千珣,郭生练,邓乐乐,等.汉江流域水生态文明建设评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):498-505. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0050.
- [5] 陈志刚,程琳,陈宇顺.水库生态调度现状与展望[J].人民长江,2020,51(1):94-103,123. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.01.015.
- [6] 湖北省水力发电高学会丹江口分会.丹江口水利枢纽工程建设概况[J].湖北水力发电,2008(5):1-3.

- DOI: 10.3969/j.issn.1671-3354.2008.05.001.
- [7] 崔巍, 刘哲, 穆祥鹏, 等. 南水北调中线总干渠藻类的生态调度[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 79-86. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0009.
- [8] 李建, 尹炜, 贾海燕, 等. 汉江中下游水华防控生态调度研究[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(3): 740-751. DOI: 10.18307/2022.0304.
- [9] 陶洁, 李行, 左其亭. 湖泊生态需水计算方法比较及实例应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 365-374. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0037.
- [10] 蔡浚, 王春树, 王卫. 开展水资源引清调度对改善河道水环境的探讨[J]. *中国水利*, 2011(7): 39-41. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2011.07.015.
- [11] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 443-454. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20151304.
- [12] 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(10): 3020-3030. DOI: 10.5846/stxb201202140200.
- [13] 王兴菊, 梁佳佳, 刘唐琼, 等. 湖库型水源地水华风险评价模型研究与应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1128-1138. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0111.
- [14] NI J, LIU R, LI Y, et al. An improved transfer learning model for cyanobacterial bloom concentration prediction[J]. *Water*, 2022, 14(8): 1300. DOI: 10.3390/w14081300.
- [15] MELLIOS N, MOE S, LASPIDOU C. Machine learning approaches for predicting health risk of cyanobacterial blooms in northern European lakes[J]. *Water*, 2020, 12(4): 1191. DOI: 10.3390/w12041191.
- [16] TIM C D L. A translucent box: Interpretable machine learning in ecology[J]. *Ecological Monographs*, 2020, 90(4): e01422. DOI: 10.1002/ecm.1422.
- [17] OLDEN J D, LAWLER J J, POFF N L. Machine learning methods without tears: A primer for ecologists[J]. *The Quarterly review of biology*, 2008, 83(2): 171-193. DOI: 10.1086/587826.
- [18] 张利升, 张睿, 孟明星. 丹江口水利枢纽供水调度方式[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(3): 25-29. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.03.005.
- [19] 康玲, 黄云燕, 杨正祥, 等. 水库生态调度模型及其应用[J]. *水利学报*, 2010, 41(2): 134-141. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.02.008.
- [20] 杨光, 郭生练, 李立平, 等. 考虑未来径流变化的丹江口水库多目标调度规则研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(12): 54-63. DOI: 10.11660/slfdbx.20151206.
- [21] WANG Y, LIU P, DOU M, et al. Reservoir ecological operation considering outflow variations across different time scales[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107582. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107582.
- [22] 邹伟, 朱广伟, 蔡永久, 等. 综合营养状态指数(TLI)在夏季长江中下游湖库评价中的局限及改进意见[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 36-47. DOI: 10.18307/2020.0104.
- [23] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*, 2002(5): 47-49. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6002.2002.05.018.
- [24] 吴都, 唐德善. 熵权属性识别模型在水库富营养化评价中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(2): 249-251+273. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.02.013.
- [25] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8): 1735-1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
- [26] 张驰, 郭媛, 黎明. 人工神经网络模型发展及应用综述[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(11): 57-69. DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2102-0256.
- [27] JOSHI A S, KULKARNI O, KAKANDIKAR G M, et al. Cuckoo search optimization: A review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(8): 7262-7269. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.07.055.
- [28] 李昱燃, 李欣悦, 林莉. 2018年汉江中下游水华现象的思考与建议[J]. *人民长江*, 2020, 51(8): 62-66. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.08.011.
- [29] 王俊, 汪金成, 徐剑秋, 等. 2018年汉江中下游水华成因分析与治理对策[J]. *人民长江*, 2018, 49(17): 7-11. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.17.002.
- [30] 赵志楠, 王俊健, 张元娜, 等. 南水北调中线水源区浮游植物群落结构及其生物多样性[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(5): 914-924. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0091.

Reservoir operating for phytoplankton prevention and control in middle-lower reaches of Han River based on Long Short-Term Memory model

YANG Yichen¹, LIU Pan¹, WANG Yibo¹, LI Shiqiong¹, LIN Dongsheng², ZHANG Yang²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Chongqing Jialing River Lize Navigation Electrical Development Co., Ltd., Chongqing 401546, China)

Abstract: Reservoirs improve the spatial and temporal distribution of water resources and create huge socio-economic benefits, while also providing a powerful tool for operating the downstream ecological environment. In the middle and lower reaches of the Han River, water bloom tends to occur in late winter and early spring. Operating through hydrodynamic methods can destroy the growth conditions of phytoplankton and effectively prevent and control phytoplankton growth. However, the formation mechanism of phytoplankton growth is complex and difficult to simulate accurately, which makes the reservoir operating for phytoplankton growth prevention and control inefficient. The problem of missing mechanism can be solved to some extent by machine learning method for phytoplankton simulation.

A Long Short-Term Memory-based operating method is suitable for phytoplankton growth prevention and control, which can improve the accuracy of phytoplankton growth simulation and enhance the efficiency of reservoir operating. Taken the water bloom problem in the middle and lower reaches of Han River and Danjiangkou Reservoir as the research object, a phytoplankton growth prevention and control operating model including economic and ecological objective functions; the LSTM model of comprehensive nutritional index and phytoplankton density of water bodies is used to establish ecological objective functions; and the cuckoo optimization algorithm is used to solve the problem.

The results show that: (1) the simulated values of comprehensive nutritional index and phytoplankton density simulation model based on LSTM model are significantly correlated with the measured values at 0.01 level, and the phytoplankton density simulation effect is good; (2) compared with the conventional operating, the proposed phytoplankton prevention and control operating scheme can increase the multi-year average water supply by 0.45%, the multi-year average power generation by 1.06%, and the average phytoplankton density is reduced by 1.57%, which further enhances the comprehensive benefits of Danjiangkou Reservoir operating while effectively controlling phytoplankton in the middle and lower reaches of Han River.

The non-inferior solution is obtained from the operating chart of Danjiangkou Reservoir for phytoplankton growth prevention and control. The operating chart contains the flood limit line, normal storage level line, first reduced water supply line, second reduced water supply line, restricted water supply line and dead water level line, and the reservoir operating according to this chart can effectively prevent and control the phytoplankton growth in the middle and lower reaches of Han River. The research results can provide technical support for the prevention and control of river phytoplankton.

Key words: Long Short-Term Memory; phytoplankton simulation; reservoir operating; multi-objective optimization; phytoplankton prevention and control