

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.005

基于机器学习的黄河上游梯级水库群 多目标优化调度规则提取

钟加星^{1,2},董增川³,孟金玉³,王凯^{1,2},胡友兵^{1,2},赵梦杰^{1,2}

(1. 淮河水利委员会水文局(信息中心),安徽 蚌埠 233001;

2. 淮河流域水文测报重点实验室,安徽 蚌埠 233001; 3. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:为最大化发挥多功能水库综合效益,构建了黄河上游梯级水库群发电、供水、防洪、防凌、生态多目标优化调度模型,采用多元线性回归模型、随机森林模型和 LightGBM 模型提取了梯级库群多目标调度规则,并通过改进泰勒图和典型调度方案对提取效果进行了评价。结果表明:随机森林模型和 LightGBM 模型对调度规则提取的效果整体优于传统的多元线性回归模型,LightGBM 模型训练结果更有实际指导意义,在发电、供水及均衡调度需求下均能有效指导水库贴近优化下泄过程。

关键词:梯级水库群;多目标调度;调度规则;机器学习;黄河上游

中图分类号:TV697.1

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2024)06-0030-08

Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning

ZHONG Jiaxing^{1,2}, DONG Zengchuan³, MENG Jinyu³, WANG Kai^{1,2}, HU Youbing^{1,2}, ZHAO Mengjie^{1,2}

(1. Hydrological Bureau (Information Center), Huaihe River Water Resources Commission, Bengbu 233001, China;

2. Laboratory of Hydrological Monitoring and Forecasting of Huaihe River Basin, Bengbu 233001, China;

3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098 China)

Abstract: To maximize the comprehensive benefits of multifunctional reservoirs, a multi-objective optimization operation model for power generation, water supply, flood control, ice prevention, and ecology of cascade reservoirs in the upper reaches of the Yellow River was constructed. Multiple linear regression model, random forest model, and LightGBM machine learning model were combined to extract multi-objective operation rules for cascade reservoirs, and the extraction effect was evaluated by combining improved Taylor plots and typical operation schemes. The results show that the two machine learning models have overall better performance in extracting operation rules than traditional multiple linear regression model. The newly introduced LightGBM model training results have more practical guidance significance, and can effectively guide the optimization of reservoir discharge under power generation, water supply, and balanced operation needs.

Key words: reservoirs group; multi-objective operation; operation rule; machine learning; upper reaches of Yellow River

黄河是中华民族的母亲河,作为沟通青藏高原、黄土高原和华北平原的生态廊道,黄河流域水资源的合理开发与利用是支撑流域社会经济可持续性发展的基石^[1-2]。黄河上游地区天然条件好、建设基础优越,目前已形成了大规模梯级水库群,对整个黄河流域的径流调节、生态保障有着深刻影响^[3]。随着水库群规模的增大,功能增多,如何合理协调水库群在流域防洪、供水、生态保护等方面的功能,实现水库群的联合调度成为人们越来越关注的问题^[4-9]。

水库确定性优化调度是基于历史径流序列得到最优调度过程,但由于径流的随机性和不可重复性,无法直接运用其调度结果指导水库运行,因而需要从调度结果中提取出具有一定规律性的水库蓄放水策略,形成

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402209);江苏省水利科技项目(2022042)

作者简介:钟加星(1997—),男,助理工程师,硕士,主要从事水资源管理和水文预报研究。E-mail:jxzhong@hrc.gov.cn

引用本文:钟加星,董增川,孟金玉,等.基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):30-37.

ZHONG Jiaxing, DONG Zengchuan, MENG Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 30-37.

一套适用于未来径流的调度规则^[10]。调度函数是调度规则的形式之一,通过建立水库调度面临时段的决策变量(下泄流量、库水位等)与当前时段或面临时段的决策因子(库水位、来水量等)之间的关系来指导水库运行,主要有显函数和隐函数两种形式^[11]。传统的调度函数提取方式依托于数学工具,调度函数的形式经历了由二元线性构型向多元线性构型发展的过程,通过回归的方式获取显函数中的参数得到调度函数^[12-14]。但回归方法受限于线性显函数构型,无法表达水库运行决策变量与决策因子间的非线性关系^[15]。

近年来,随着数据挖掘、机器学习等计算机技术在水文领域的应用^[15-19],提取大型复杂水库群系统调度规则时,人工神经网络、随机森林模型等可以很好地解决隐函数形式的调度函数非线性、多维度问题。如杨光等^[10]采用极端随机森林模型挖掘了丹江口水库汛期、非汛期单目标调度规则;Kumar 等^[20]针对发电、灌溉两目标,分别采用了传统提取方法和人工神经网络等数据挖掘方法提取了调度规则并进行了应用;李基栋等^[21]分别建立了多元线性回归模型、门限回归模型和 BP 人工神经网络模型,发现在提取同一水库调度规则时,采用数据挖掘算法的两个模型比传统回归模型模拟效果更好。因此,在传统回归模型的基础上,新的计算机技术可以有效提高调度函数提取精度,但由于机器学习模型本身由数据驱动,优化模型缺乏约束和边界时,部分机器学习算法提取水库调度函数并不完全适用实际调度^[22],且在评价调度结果时,一是缺乏多机器学习方法之间的比较,二是对调度效果提取的评价缺乏综合性,多采用训练期和验证期的拟合精度单一指数进行评价,无法体现水库调度函数指导实际调度的效果。

随着计算机技术的发展,机器学习方法不断得到提升,在传统回归模型和机器学习模型的基础上,需要进一步探索更适用于水库调度规则提取的新技术,为此本文采用轻量级梯度提升机器(light gradient boosting machine, LightGBM)学习模型寻求决策变量和决策因子间的规律,并尝试比较不同算法在提取精度、指导实际调度过程方面的优缺。

1 研究区概况

黄河上游地区为内蒙古托克托县河口镇以上区域,是黄河流域的主要产流区和水源涵养区,干流河道长 3472 km,流域面积 42.8 万 km²,占流域总面积的 53.8%,多年平均来水量为 326.7 亿 m³,占黄河天然径流量的 62.0%^[23]。上游地区天然地理条件好、资源集中、水量稳定,自 20 世纪 60 年代以来,黄河上游已建大型水库 12 座,中型水库 35 座,总装机容量达 1 508 万 kW,总库容达 349 亿 m³^[24]。

选择黄河上游龙羊峡和刘家峡水库为主体的黄河上游梯级水库群作为研究对象,其中龙羊峡水库为多年调节水库,刘家峡水库为不完全年调节水库,两库调节性能都较强,调度时考虑两水库的调节作用^[25];其他水库为周或日调节水库,不考虑调蓄作用,作为发电目标时视作径流式电站。

2 梯级库群多目标优化

黄河上游地区涉及复杂的防洪、发电、供水、生态多目标问题,研究区内还存在特殊的防凌调度需求^[26-27],本文将发电、供水作为模型的优化目标,防洪、防凌、生态作为模型的约束条件构建多目标优化调度模型。

2.1 目标函数

选取梯级水库群在调度期内的总发电量最大作为目标函数:

$$\max F = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^T N_{ij} \Delta t = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^T K_i H_{ij} q'_{ij} \Delta t \tag{1}$$

式中: F 为整个调度期内梯级水库群的总发电量; M 为梯级水库总数; T 为调度期的总时段长度,选取 12 年共 144 个月为调度总时段; K_i 为水库 i 的发电出力系数; Δt 为时段间隔; N_{ij} 、 H_{ij} 、 q'_{ij} 分别为水库 i 在时段 j 的出力、水头和发电流量。

上游梯级水库群需要兼顾上中游的供水任务,特别是宁夏、内蒙古灌区的农业需水^[28]。从供给侧(水库群)和需求侧的角度出发,本文还选用缺水率平方和最小表征供水优化目标:

$$\min S = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T \alpha_j^2 \tag{2}$$

其中

$$\alpha_j = \begin{cases} 0 & q_j \geq D_j \\ (D_j - q_j)/D_j & q_j < D_j \end{cases}$$

式中: S 为供水优化目标,即缺水率平方和; D_j 为时段 j 的总社会经济需水量,模型概化为下游断面取水流量; q_j 为时段 j 的刘家峡水库下泄流量。

2.2 约束条件

2.2.1 防凌约束

刘家峡水库是上游地区凌汛河段所处位置距离最近的具有调节性能的水库。针对宁蒙河段特殊的防凌需求,凌汛期(11月至次年3月)需控制刘家峡水库的出流量以保证防凌断面的防凌要求:

$$q_j \leq Q_{\max,j}$$

(3)

式中 $Q_{\max,j}$ 为防凌 j 时段的最大下泄流量要求。

防凌控制流量上限($Q_{\max}$):11月为 $860\text{ m}^3/\text{s}$,12月、1月、2月为 $530\text{ m}^3/\text{s}$,3月为 $600\text{ m}^3/\text{s}$,其余月份无防凌需求。

2.2.2 生态约束

本文采用逐月频率法计算兰州断面的逐月适宜生态流量过程,研究^[29]表明,全年均采用50%频率的适宜生态流量过程更适应于河流生态健康。本文选用逐月频率法对兰州断面1952—2020年天然径流量进行P-Ⅲ型适线,并与Tennant法^[30]推求的适宜生态流量区间结果进行比较,验证其合理性,得到其逐月适宜生态流量过程取值如下:1月为 $476\text{ m}^3/\text{s}$,2月为 $439\text{ m}^3/\text{s}$,3月为 $468\text{ m}^3/\text{s}$,4月为 $706\text{ m}^3/\text{s}$,5月为 $1\,086\text{ m}^3/\text{s}$,6月为 $1\,150\text{ m}^3/\text{s}$,7月、8月为 $1\,420\text{ m}^3/\text{s}$,9月为 $1\,274\text{ m}^3/\text{s}$,10月为 $1\,243\text{ m}^3/\text{s}$,11月为 $842\text{ m}^3/\text{s}$,12月为 $548\text{ m}^3/\text{s}$ 。

选取兰州断面作为生态控制断面,控制刘家峡水库下泄大于兰州断面的适宜生态流量过程:

$$q_j \geq E_j$$

(4)

式中 E_j 为兰州断面时段 j 的适宜生态流量。

非负、水量平衡等其他约束,不再赘述。

2.3 优化结果

选取资料翔实、调度周期相对完整的2005年9月至2017年8月(共12年)作为模型的研究时段,以龙羊峡和刘家峡的下泄流量作为决策变量,采用基于向量角的多目标进化算法(vector angle-based evolutionary algorithm, VaEa)^[31]进行求解,设置种群大小为100,进化代数数为20 000,进行评价。由于多目标算法本身存在随机性,每次运算的非劣前沿并非完全一致,因此本文独立运行10次,得到VaEa算法的非劣前沿集(图1),建立调度规则提取样本库。

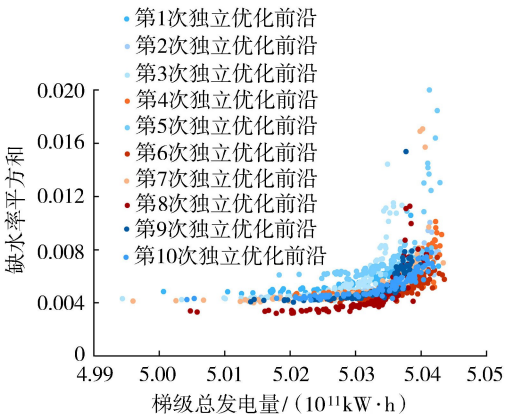


图1 VaEa 算法非劣解集

Fig.1 Non-inferior solution set of VaEa algorithm

3 调度函数提取

3.1 LightGBM 模型

梯度提升决策树(gradient boosting decision tree,GBDT)是机器学习的一种经典模型^[32-33],多用于排序、分类、回归等,其主要思想是利用决策树的迭代训练得到最优模型。LightGBM 模型^[34]原理提升主要有以下两部分:基于Histogram的决策树算法(直方图算法)、带深度限制的 Leaf-wise 算法。

直方图算法的基本思想:把样本中的连续浮点特征值离散化为 K 个整数,同时构造一个 K 宽度的直方图,在遍历样本时,根据离散化值作为索引,在直方图中累积统计量,完成遍历后,根据直方图离散值,遍历寻找最优分割点,其对于数据的处理如图2所示。

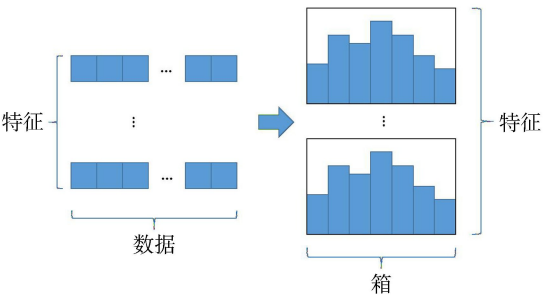


图2 直方图算法示意图

Fig.2 Schematic diagram of histogram algorithm

在直方图算法的基础上,LightGBM 模型做出了进一步优化,相较于传统算法中的决策树按层生长策略,转为采用带有深度限制的按叶子生长策略,即 Leaf-wise 算法^[35]。按

叶子生长策略每次从当前所有叶子中,找到分裂增益最大的一个叶子,然后分裂,如此循环(图 3)。Leaf-wise 的优点是在分裂次数相同的情况下,Leaf-wise 算法能够做到减小误差,提高精度;缺点是可能会长出比较深的决策树,产生过拟合,因此需要引入深度限制参数,避免过拟合现象。

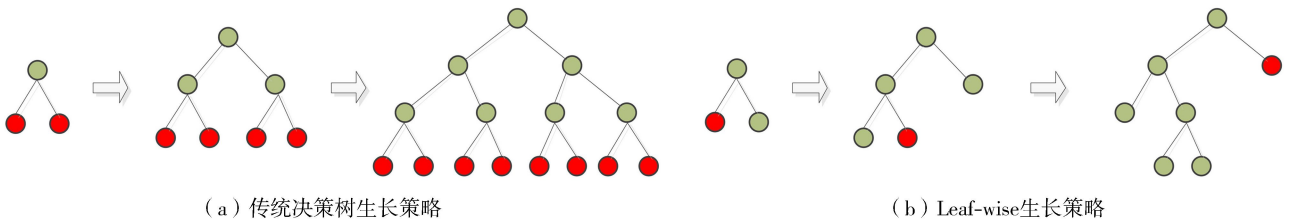


图 3 LightGBM 模型决策树生长策略

Fig.3 Growth strategy of decision tree using LightGBM model

为提高 LightGBM 模型的准确率,避免过拟合等问题,挑选了最大深度、决策树的叶子节点数、学习率、树的数量、特征抽样比例、数据抽样比例等主要影响参数作为模型的调参选项(表 1)。

3.2 提取流程

基于多目标优化调度模型求解得到的黄河上游梯级水库群优化调度解集,建立调度规则训练样本库。引入机器学习中的 LightGBM 模型、随机森林模型^[36]及传统多元线性回归模型组合提取龙羊峡、刘家峡水库的调度函数。机器学习算法均采用隐函数形式,多元线性回归模型采用显函数形式,构造调度函数,提取流程如图 4 所示。

表 1 LightGBM 模型主要参数说明

Table 1 Main parameter description of LightGBM model

参 数	取值范围	表征
最大深度	整数	限制树模型最大深度
决策树的叶子节点数	非负整数	叶子节点包含样本数
学习率	大于 0	影响模型归一化权重
树的数量	非负整数	与拟合效果正相关,一定值时稳定
特征抽样比例	0 ~ 1	每棵树训练前的特征选取比例
数据抽样比例	0 ~ 1	选取样本百分比避免重复训练

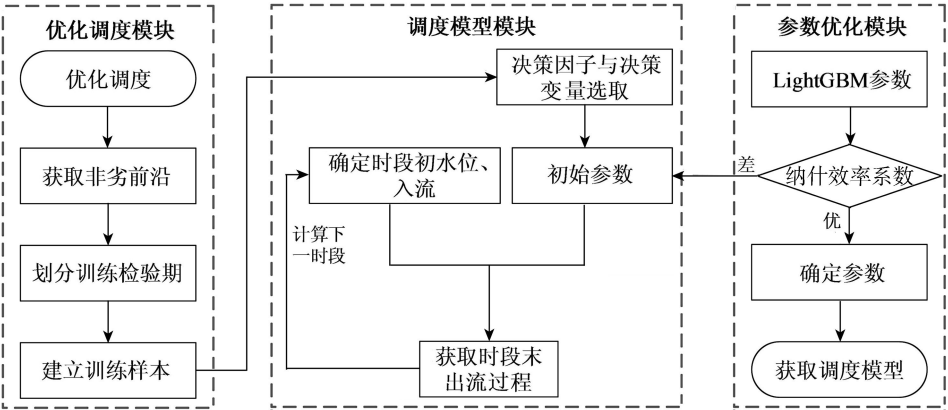


图 4 LightGBM 模型调度规则提取流程

Fig.4 Flow chart of operating rule using extraction LightGBM model

调度函数中,常用的决策因子通常为水库的入流、库水位或与该库有水量关系的其他库因子,决策变量通常选取为库水位或下泄流量。

3.3 函数提取结果

将多目标调度模型获取的非劣解集作为模型训练样本,选取 2005 年 9 月至 2013 年 8 月共 8 年月径流资料作为样本对 3 种模型进行训练,2013 年 9 月至 2017 年 8 月共 4 年作验证。通过变量优选分析,对龙羊峡水库,选取时段 t 的期初水位和平均入流、时段 $t-1$ 的期初水位作为自变量,预测时段 t 的平均下泄流量;对刘家峡水库,选取时段 t 的期初水位、平均入流、龙羊峡时段 t 的期初水位作为自变量,预测时段 t 的平均下泄流量。为了进行调度函数提取效果优劣比较,各模型选取了相同的自变量和因变量作为训练样本,得到龙羊峡水库、刘家峡水库 LightGBM 模型参数见表 2,另外两种模型参数不再详述。

表 2 LightGBM 模型调度模型参数
Table 2 Operation model parameters of LightGBM

月份	最大深度		决策树的叶子节点数		学习率		树的数量		特征抽样比例		数据抽样比例	
	龙羊峡	刘家峡	龙羊峡	刘家峡	龙羊峡	刘家峡	龙羊峡	刘家峡	龙羊峡	刘家峡	龙羊峡	刘家峡
1	10	2	10	8	0.8	0.8	1000	600	0.8	0.8	0.8	0.8
2	8	2	10	4	0.9	0.4	1200	40	0.5	0.8	0.5	0.8
3	8	2	12	4	0.9	0.5	1000	100	0.8	0.8	0.8	0.8
4	10	4	10	10	0.9	0.5	1200	500	0.8	0.8	0.8	0.8
5	8	4	12	10	0.9	0.5	1000	200	0.8	0.8	0.8	0.8
6	8	8	12	8	0.9	0.1	1000	200	0.8	0.8	0.8	0.8
7	8	8	12	8	0.5	0.2	1000	400	0.8	0.8	0.8	0.8
8	10	10	10	10	0.5	0.5	200	200	0.8	0.8	0.8	0.8
9	4	4	10	10	0.5	0.5	400	400	0.8	0.8	0.8	0.8
10	8	4	8	10	0.06	0.2	1000	200	0.8	0.8	0.8	0.8
11	8	4	8	12	0.06	0.5	1000	400	0.8	0.8	0.8	0.8
12	12	10	12	10	0.9	0.5	1000	400	0.8	0.8	0.8	0.8

4 调度规则提取效果评价

针对多元线性回归模型、随机森林模型及 LightGBM 模型提取的调度规则,采用改进泰勒图形式对训练期和验证期的拟合精度进行评价,并优选出偏发电、偏供水、均衡 3 种典型调度方案,比较调度规则指导下调度过程与优化过程的贴近程度。

4.1 改进泰勒图评价

一般对于调度规则的评价只采用率定期和验证期的拟合精度单一指数(如纳什效率系数),不能全面反映模型的提取效果,因此本文引入泰勒图^[37]评价不同训练模型对于龙羊峡、刘家峡两水库下泄流量训练拟合与预测的效果。泰勒图是一种采用标准差、中心均方根误差及相关系数多指标表征多种模型精度的形式,但泰勒图的评价指标更倾向于对多模型单一结果评价,关注点在于表征精度与离散度,对于调度规则模型精度评价,其结果本就非单一值,无法完全适用。因此本文改进了传统的泰勒图形式,引入纳什效率系数与均方根误差替代中心均方根误差与标准差,同时保留相关系数。纳什效率系数用于量化调度规则训练模型的预测精度,计算值越接近 1 代表模型预测能力越好,为评价指标中的主要指标;均方根误差可以反映训练或验证结果与优化结果的偏差,取值范围为非负实数,越小代表误差越小。分别绘制两水库训练期和验证期 LightGBM 模型、随机森林模型模型和多元线性回归模型的改进泰勒图(图 6),位置越接近极坐标中心点,颜色越接近深红代表模型训练拟合效果最优。

由图 5(a)(b)可知,训练期 LightGBM 模型针对龙羊峡、刘家峡两水库的整体拟合效果均为最优,龙羊峡水库的纳什效率系数达到了 0.966,刘家峡水库达到了 0.996,代表其在训练期可以基本实现模型的高度拟合,随机森林模型拟合效果次之,多元线性回归模型效果最差。总体上,3 种模型在训练期的表现均较优。

由图 5(c)(d)可知,3 种模型验证期对两水库的预测效果较训练期精度均有所下降,整体拟合效果 LightGBM 模型依旧为最优,特别对于刘家峡水库其验证期纳什效率系数可以达到 0.907,可以视为有效提取了其调度规则模型。其次为随机森林模型,多元线性回归模型拟合效果最不理想,在龙羊峡水库的纳什效率系数已表现为负数。

4.2 典型调度方案对比

由于龙羊峡水库缺乏多调度周期样本,多元线性回归模型提取效果不理想,因此选取刘家峡水库典型调度方案比较不同模型提取效果。依据多目标优化模型获取的非劣前沿上发电、供水目标函数值,采用 TOPSIS 法^[38]优选出偏发电、偏供水、均衡 3 种调度方案,比较水库在 3 种不同情景下,按照不同模型提取的调度函数下泄的实际运用效果,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,3 种模型在不同情景下能够有效指导刘家峡水库按照最优水位运行,LightGBM 模型指导情况最贴近优化下泄过程,随机森林模型与多元线性回归模型在大流量下泄预测上容易出现偏大情况,特别表现在 2016—2017 年期间。这与改进泰勒图对于模型精度评价的结论一致,总体上机器学习模型对于调度规则的提取效果优于传统多元线性回归模型,引入的 LightGBM 模型相较随机森林模型能够有效训练出刘家峡

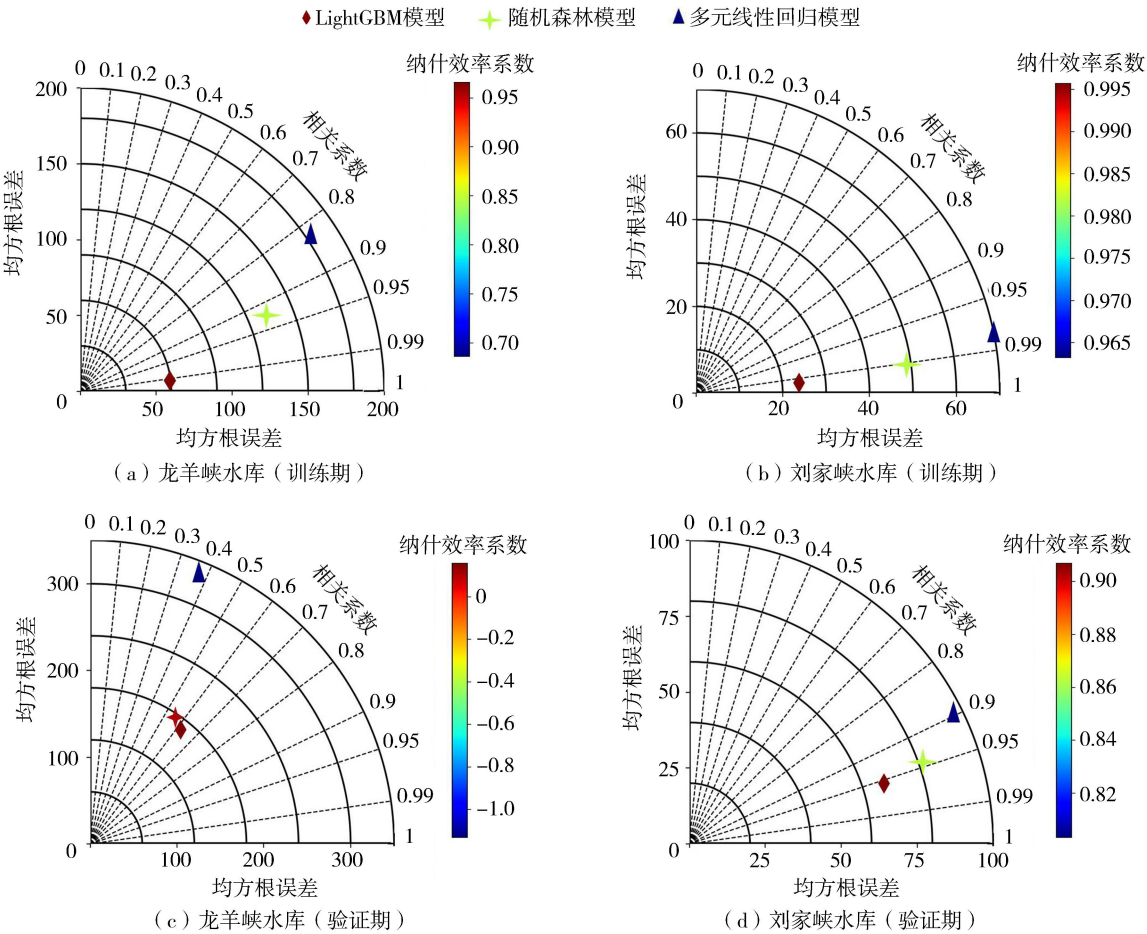


图 5 调度规则模型效果改进泰勒图分布

Fig. 5 Taylor plot distribution of the effectiveness improvement of operation rule models

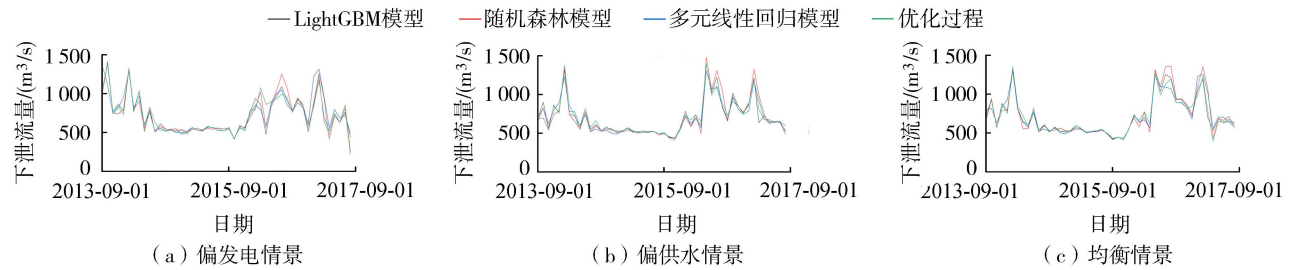


图 6 刘家峡水库不同情景下 3 种模型提取调度函数下泄过程线

Fig. 6 Guiding discharge lines of three operation rules training models for Liujiaxia Reservoir under different scenes

水库调度规则,对实际调度起到指导意义。

5 结 语

建立了黄河上游梯级水库群发电、供水、生态、防洪、防凌多目标优化调度模型,采用 VaEa 算法求解获取了目标函数非劣前沿,并优选出了 3 种典型调度方案。建立了龙羊峡、刘家峡水库调度规则训练样本库,引入了机器学习 LightGBM 模型并组合随机森林模型及多元线性回归模型获取了两水库的调度函数。机器学习模型对于龙羊峡水库和刘家峡水库调度规则提取效果均优于多元线性回归模型,而引入 LightGBM 模型训练结果更有实际指导意义,在发电、供水及均衡调度需求下均能有效指导水库贴近优化下泄过程调度。

参考文献:

[1] 金凤君. 黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略[J]. 改革,2019(11):33-39. (JIN Fengjun. Coordinated promotion strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Reform,2019(11):33-39. (in Chinese))

[2] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护,2020,36(2): 1-7. (ZUO Qiting,ZHANG Zhizhuo,WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):1-7. (in Chinese))

[3] 张强,叶培龙,王健顺,等. 对黄河上游自然环境要素协调性的几点科学探讨与思考[J]. 地球科学进展,2023,38(3):320-329. (ZHANG Qiang,YE Peilong,WANG Jianshun,et al. Scientific discussion and ponder on the coordination of natural environmental in the upper Yellow River Basin[J]. Advances in Earth Science,2023,38(3):320-329. (in Chinese))

[4] DONG Zengchuan,NI Xiaokuan,CHEN Mufeng,et al. Time-varying decision-making method for multi-objective regulation of water resources[J]. Water Resources Management,2021,35(10):3411-3430.

[5] 董增川,陈牧风,倪效宽,等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3): 233-240. (DONG Zengchuan,CHEN Mufeng,NI Xiaokuan,et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(3):233-240. (in Chinese))

[6] CHEN Haitao,WANG Wenchuan,CHEN Xiaonan,et al. Multi-objective reservoir operation using particle swarm optimization with adaptive random inertia weights[J]. Water Science and Engineering,2020,13(2):136-144.

[7] 王钦,王银堂,胡庆芳,等. 考虑河道内生态需水与径流情势的水库群优化调度[J]. 水资源保护,2023,39(5):109-117. (WANG Qin,WANG Yintang,HU Qingfang,et al. Optimization of reservoir group operation considering instream ecological water demand and flow regime[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):109-117. (in Chineses))

[8] 张长征,李洪梅. 基于可变模糊评价法的小型水库运行管理评价研究[J]. 水利经济,2023,41(6):30-36. (ZHANG Changzheng,LI Hongmei. Study on the evaluation of small reservoir operation and management based on variable fuzzy evaluation method[J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(6):30-36. (in Chinese))

[9] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA- II 算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):51-58. (HUANG Xianfeng,WANG Ning,LIU Zhijia,et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA- II algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):51-58. (in Chinese))

[10] 杨光,郭生练,陈柯兵,等. 基于决策因子选择的梯级水库多目标优化调度规则研究[J]. 水利学报,2017,48(8):914-923. (YANG Guang,GUO Shenglian,CHEN Kebing,et al. Multi-objective cascade reservoir optimal operation rules based on decision factor selection[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(8):914-923. (in Chinese))

[11] 钟加星,董增川,姚弘伟,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 Jiaxing,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))

[12] 卢华友,郭元裕. 利用多层递归回归分析制定水库优化调度函数的研究[J]. 水利学报,1998,29(12):71-75. (LU Huayou, GUO Yuanyu. Study on applying multi-stratum recursive regression analysis to formulate operation function of reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1998,29(12):71-75. (in Chinese))

[13] 王丽萍,周婷. 水电站月度调度函数的模型制定与模拟结果评价[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2009,36(1):80-83. (WANG Liping,ZHOU Ting. Model establishment and simulation result evaluation of hydropower station monthly operation function[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2009,36(1):80-83. (in Chinese))

[14] 纪昌明,苏学灵,周婷,等. 梯级水电站群调度函数的模型与评价[J]. 电力系统自动化,2010,34(3):33-37. (JI Changming,SU Xueling,ZHOU Ting,et al. Model establishment and evaluation of operation function for cascade reservoirs[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(3):33-37. (in Chinese))

[15] 张伟,郑雅莲,刘志武,等. 物理机制引导的水库调度深度学习模型研究[J]. 水力发电学报,2023,42(3):13-25. (ZHANG Wei,ZHENG Yalian,LIU Zhiwu,et al. Deep learning model guided by physical mechanism for reservoir operation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2023,42(3):13-25. (in Chinese))

[16] 高玮志,高华勇,王兆礼,等. 基于机器学习的太湖流域多层次防洪调度方案综合评价[J]. 水资源保护,2023,39(3):118-125. (GAO Weizhi,GAO Huayong,WANG Zhaoli,et al. Comprehensive evaluation of multi-level flood control operation schemes in the Taihu Lake Basin based on machine learning[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):118-125. (in Chinese))

[17] 鲁扬,赵杏杏. 数字经济背景下的江苏省数字孪生流域建设实践[J]. 水利经济,2023,41(6):79-86. (LU Yang,ZHAO Xingxing. A study on the practice of building digital twin watersheds in the context of digital economy[J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(6):79-86. (in Chinese))

[18] 顾正华,周统,翁晓丹,等. 城市原水系统调度研究与应用综述[J]. 水利水电科技进展,2023,43(5):10-17. (GU Zhenghua,ZHOU Tong,WENG Xiaodan,et al. Review of research and application on urban raw water system scheduling[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(5):10-17. (in Chinese))

[19] SHARIFAZARIA S,SADAT-NOORI M,RAHIMI H,et al. Optimal reservoir operation using Nash bargaining solution and evolutionary algorithms[J]. Water Science and Engineering,2021,14(4):260-268.

[20] KUMAR A R S, GOYAL M K, OJHA C S P, et al. Application of ANN, Fuzzy logic and decision tree algorithms for the development of reservoir operating rules[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(3): 911-925.

[21] 李基栋, 黄炜斌, 马光文, 等. 雅砻江下游梯级水库隐随机联合优化调度函数研究[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(12): 49-53. (LI Jidong, HUANG Weibin, MA Guangwen, et al. Research on ISO dispatching function of cascade hydropower plants on lower reaches of Yalongjiang River[J]. *Water Resources and Power*, 2014, 32(12): 49-53. (in Chinese))

[22] KARPATNE A, ATLURI G, FAGHMOUS J H, et al. Theory-guided data science: a new paradigm for scientific discovery from data[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2017, 29(10): 2318-2331.

[23] 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 155-163. (LI Erhui, MU Xingmin, ZHAO Guangju. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919-2010[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 155-163. (in Chinese))

[24] 韩世亮, 陈泰霖. 气候变化影响下黄河上游梯级水库群未来发电量预测[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(3): 32-38. (HAN Shiliang, CHEN Tailin. Future power generation prediction of cascade reservoirs in upper reaches of the Yellow River under climate change[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(3): 32-38. (in Chinese))

[25] 彭少明, 王煜, 尚文绣, 等. 应对干旱的黄河干流梯级水库群协同调度[J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 172-183. (PENG Shaoming, WANG Yu, SHANG Wenxiu, et al. Response of synergetic optimal operation of cascade reservoirs to drought in the main stream of the Yellow River[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 172-183. (in Chinese))

[26] YAO Hongyi, DONG Zengchuan, LI Dayong, et al. Long-term optimal reservoir operation with tuning on large-scale multi-objective optimization: case study of cascade reservoirs in the Upper Yellow River Basin[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 40: 101 000.

[27] 刘百灵, 李仓水, 刘芳业. 基于 NSGA-III 的黄河上游梯级水库多目标调度研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(4): 140-144. (LIU Bailing, LI Cangshui, LIU Fangye. Study on multi-objective operation of cascade reservoirs in the upper reaches of the Yellow River Based on NSGA-III[J]. *Yellow River*, 2022, 44(4): 140-144. (in Chinese))

[28] 薛松贵. 黄河流域水资源综合规划概要[J]. *中国水利*, 2011(23): 108-111. (XUE Songgui. Summary of Yellow River Basin integrated water resources plan[J]. *China Water Resources*, 2011(23): 108-111. (in Chinese))

[29] 李捷, 夏自强, 马广慧, 等. 河流生态径流计算的逐月频率计算法[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2916-2921. (LI Jie, XIA Ziqiang, MA Guanghui, et al. A new monthly frequency computation method for instream ecological now[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2916-2921. (in Chinese))

[30] 华祖林, 董越洋, 褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法[J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1): 140-144. (in Chinese))

[31] 顾清华, 徐青松, 李学现. 基于距离优势关系的高维多目标进化算法[J]. *计算机科学与探索*, 2022, 16(11): 2642-2652. (GU Qinghua, XU Qingsong, LI Xuexian. Many-objective evolutionary algorithm based on distance dominance relation[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2022, 16(11): 2642-2652. (in Chinese))

[32] KE Guolin, MENG Qi, FINLEY T. LightGBM: a highly efficient gradient boosting decision tree[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach: Curran Associates Inc., 2017: 3149-3157.

[33] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.

[34] FRIEDMAN J H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine[J]. *The Annals of Statistics*, 2001, 29(5): 1189-1232.

[35] 李占山, 姚鑫, 刘兆赓, 等. 基于 LightGBM 的特征选择算法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(12): 1688-1695. (LI Zhanshan, YAO Xin, LIU Zhaogeng, et al. Feature selection algorithm based on LightGBM[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(12): 1688-1695. (in Chinese))

[36] 周杰英, 贺鹏飞, 邱荣发, 等. 融合随机森林模型和梯度提升树的入侵检测研究[J]. *软件学报*, 2021, 32(10): 3254-3265. (ZHOU Jieying, HE Pengfei, QIU Rongfa, et al. Research on intrusion detection based on random forest and gradient boosting tree[J]. *Journal of Software*, 2021, 32(10): 3254-3265. (in Chinese))

[37] 向竣文, 张利平, 邓瑶, 等. 基于 CMIP6 的中国主要地区极端气温/降水模拟能力评估及未来情景预估[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(1): 46-57. (XIANG Junwen, ZHANG Liping, DEGN Yao, et al. Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in major regions of China by CMIP6 models[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(1): 46-57. (in Chinese))

[38] 方国华, 李智超, 钟华昱, 等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(3): 10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(3): 10-18. (in Chinese))