

## 增强小浪底水库汛前调水调沙后续动力的三门峡水库优化调度研究\*

张为\*\*, 李阳光, 施展鹏, 王江瑜, 陈俊哲

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 黄河保护法明确提出要完善黄河水沙调控体系, 提高输沙能力。汛前调水调沙期是小浪底水库大量排沙恢复库容的关键期, 优化三门峡水库调度过程能够有效的为小浪底水库提供后续动力。国内外学者为此展开了广泛探索, 对于水库调度的研究已从单目标调度发展为多目标协同优化; 对于输沙计算的研究也已形成了数据驱动模型的多样化方法。尽管现有研究已取得丰富成果, 但针对汛前调水调沙期的研究仍显不足: 汛前三门峡水库调度过程缺乏较为准确的出库输沙量计算方法; 现有关于提升后续动力的同时兼顾发电与输沙效益的研究较为匮乏。本文以三门峡水库为研究对象, 基于 2003-2023 年潼关、三门峡水文站日均水沙序列, 构建融合注意力机制的XGBoost排沙预测模型, 耦合改进的NSGA-II算法建立三门峡水库多目标优化调度模型, 并结合AHP - 熵权组合赋权与VIKOR方法, 实现不同来水来沙工况下调度方案的多维度优选。结果表明: 本文构建的排沙预测模型精度较高, 验证集决定系数达 0.987, 预测值与实测值拟合度高, 可满足出库输沙量的计算需求; 建立的多目标优化调度模型在汛前六月下旬至七月上旬时段内典型工况下均表现出优于实际调度过程的结果, 不仅增加了下泄流量超过 2600 m<sup>3</sup>/s的天数, 还显著提升了敞泄期的日均出库流量, 实现了敞泄期内出库流量的整体提高, 有效缓解了汛前阶段小浪底水库后续动力不足问题。

**关键词:** 三门峡水库; 增强后续动力; 多目标优化调度; 汛前调水调沙; NSGA-II算法; 机器学习

### Research on the optimization scheduling of Sanmenxia Reservoir to enhance subsequent driving force for pre-flood water diversion and sediment flushing at Xiaolangdi Reservoir

Zhang Wei<sup>1</sup>, Li Yangguang<sup>1</sup>, Shi Zhanpeng<sup>1</sup>, Wang Jiangyu<sup>1</sup> & Chen Zhejun<sup>1</sup>

(State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China)

**Abstract:** The Yellow River Protection Law underscores the improvement of the river's water-sediment regulation system and the enhancement of its sediment transport capacity. The pre-flood water-sediment regulation period is a critical phase for the Xiaolangdi Reservoir to restore storage capacity through large-scale sediment discharge, during which optimized operation of the Sanmenxia Reservoir can effectively provide follow-up hydraulic power. Although reservoir operation research has evolved from single-objective to multi-objective collaborative optimization, and sediment transport modeling has progressed toward diverse data-driven methods, studies focusing specifically on pre-flood water-sediment regulation remain limited. Existing research lacks accurate methods for estimating sediment discharge from the Sanmenxia Reservoir during this period, and few studies consider the coordination between hydropower generation and sediment transport efficiency while enhancing downstream hydrodynamic conditions. This study takes the Sanmenxia Reservoir as its research focus. Based on daily water and sediment series (2003–2023) from the Tongguan and Sanmenxia hydrological stations, an XGBoost sediment discharge prediction model integrated with an attention mechanism is developed. Furthermore, a multi-objective optimal operation model for the Sanmenxia Reservoir is established by coupling an improved NSGA-II algorithm. The Analytic Hierarchy Process–Entropy Weight combination method and the VIKOR technique are employed to achieve multi-dimensional optimization and selection of operation schemes under varying inflow and sediment conditions. Results indicate that the proposed sediment discharge prediction model achieves high accuracy, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.987 on the validation set, and shows strong agreement between predicted and observed values, meeting the computational requirements for reservoir sediment discharge. The

\* 2025-07-28 收稿; 2025-10-23 收修改稿。

国家重点研发计划项目 (2023YFC3206204) 资助

\*\*通信作者: E-mail: zw97082@126.com;

developed multi-objective optimization model outperforms actual operation during the typical late-June to early-July period, increasing the number of days with discharge rates exceeding 2,600 m<sup>3</sup>/s, significantly raising the average daily outflow during gate-opening periods, and effectively mitigating the issue of insufficient downstream hydraulic power at the Xiaolangdi Reservoir before the flood season.

**Keywords:** Sanmenxia Reservoir; multi-objective optimal dispatching; pre-flood water and sand transfer; NSGA-II algorithm; machine learning

《黄河保护法》中明确提出要完善黄河水沙调控体系,提高输沙能力<sup>[1]</sup>。汛前调水调沙后期是小浪底水库大量排沙恢复库容的关键期。然而,受天然来水量有限、流量小等因素制约,实践往往面临着后续动力不足的问题<sup>[2]</sup>。如何有效应对黄河汛前调水调沙后续动力不足的问题,成为亟需解决的关键科学问题。

三门峡水库是黄河水沙调控体系的骨干工程,其运行直接影响小浪底水库的来水来沙特性<sup>[3,4]</sup>。在古贤水库投入使用前,如何通过优化三门峡水库的调度方式,挖掘三门峡水库汛前蓄水-泄流协同调度潜力,在保证下游冲刷效率的同时储存多余水量,为小浪底汛前调水调沙阶段提供后续动力,值得深入研究与探索<sup>[5-8]</sup>。准确计算水库出库输沙量是优化水库调度的核心内容。国内外学者对水库输沙计算开展了广泛研究,积累了大量研究成果,包括排沙比与库容、入库流量的关系式<sup>[9]</sup>,适用于优化调度的排沙比计算公式<sup>[10]</sup>,排沙量与入库水沙条件的关系式<sup>[11]</sup>等。在调度模型方面,滞后响应模型<sup>[12]</sup>及非支配排序遗传算法(NSGA-II)<sup>[13-16]</sup>等先进方法被广泛用于构建复杂的水库调度模型,使模型能够有效处理多目标间的权衡关系。三门峡水库调度方式研究已取得丰富成果,例如张金良等<sup>[5]</sup>针对小浪底调水调沙后续动力不足的问题,提出了三门峡水库的最优水位运用方案;李洁玉等<sup>[15]</sup>研究了三门峡与小浪底水库水沙调控的多目标协调,探讨了丰、平、枯典型年的调度策略;夏军强等<sup>[17]</sup>建立了考虑水库调度的水沙电耦合计算模型,并应用该模型研究了不同水沙条件和调度方式对水库冲淤和发电的影响。然而,现有关于增加后续动力的研究主要集中在汛期<sup>[18,19]</sup>,非汛期调度策略的相关研究相对较少。针对汛前调水调沙阶段的输沙预测与优化调度模型存在一定局限性,相关研究较为匮乏,仍缺乏系统、深入的探讨。具体表现为以下两方面:一是目前关于三门峡水库排沙规律的研究多集中于分析不同排沙冲刷模式与过程机理、排沙经验公式或数学物理方程构建等方面<sup>[20,21]</sup>,汛前三门峡水库调度过程缺乏较合理的出库输沙量计算方法;二是现有关于提升后续动力同时兼顾发电与输沙效益的研究较为匮乏,针对汛前调水调沙后续动力不足的优化调度研究尚不完善。

本文通过构建机器学习预测模型以实现出库输沙量的合理模拟,为优化调度提供可靠的目标函数;综合考虑水库坝前水位、发电效益、水库输沙、后续动力四个目标,建立三门峡水库多目标优化调度模型,在提升后续动力的同时兼顾发电与输沙效益,为水库调度运行方案的选择提供科学依据。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域概况

三门峡水库位于河南省三门峡市黄河干流中游,是黄河干流上首座以防洪防凌为核心任务,兼具发电、供水和灌溉功能的大型综合水利枢纽。三门峡水利枢纽工程于1957年开工建设,1960年初建成并投入运行。由于早期设计对黄河泥沙问题的认识不足,库区泥沙淤积问题严重。为应对这一挑战,水库通过两次增建与改建,并调整运行方式,先后经历了“蓄水拦沙”“滞洪排沙”“蓄清排浑”三个运用阶段。三门峡水库调洪方案需统筹两大核心目标:一是在确保下游防洪安全的前提下,对超过下游河道承载能力的大洪水实施有效削峰控量;二是配合小浪底等水库开展调水调沙,通过优化调度方式,增强小浪底水库调水调沙后续动力,最大限度减少小浪底库区泥沙淤积,维持水库长期调蓄功能。通过枢纽工程的持续优化和运行方式的调整,三门峡水利枢纽在过去60余年中,在防洪、防凌、灌溉、供水、发电及下游河道减淤等方面发挥了重要作用,取得了显著的社会效益与经济效益。

### 1.2 数据来源

潼关水文站是三门峡水库的入库控制站,三门峡站则为其出库控制站。两站均系统监测流量、输沙率、含沙量、水位等水文要素,并据此计算累积径流量与输沙量。这些观测数据经黄河水利委员会水文局统一

整编，每年收录于《中华人民共和国水文年鉴》发布。本文选择 2003–2023 年潼关站及三门峡站的日均水沙数据作为研究数据。

### 1.3 研究方法

本文构建基于 NSGA-II 算法的多目标优化调度模型，以三门峡水库汛前六月下旬到七月上旬这一时期（以下简称“六下七上”期）为研究时段，综合考虑动力、排沙与发电需求。模型以坝前最高水位最小、水库总发电量最大、下泄流量大于 2600 m<sup>3</sup>/s 的持续时间最长<sup>[5,6]</sup>以及出库输沙量最大为优化目标，并设定水量平衡、水位、流量及出力等约束条件。在输沙量计算方面，针对传统经验公式依赖河床抗冲系数、易造成误差的问题，本文引入基于机器学习的排沙预测模型，利用 XGBoost 机器学习算法对调度期内的出库输沙量进行计算，并与优化算法耦合实现调度求解。

基于上述研究方法框架，本文后续研究分为两部分展开：首先，针对汛前“六下七上”期三门峡水库的输沙特性，构建机器学习预测模型以实现出库输沙量的合理模拟，为优化调度提供可靠输入；其次，在预测模型基础上，建立多目标优化调度模型，综合考虑坝前水位、发电与排沙需求，利用 NSGA-II 算法求解不同来水来沙工况下的调度方案，并通过多指标决策方法优选最优调度策略。

## 2 三门峡水库六下七上期排沙预测模型的建立

### 2.1 六下七上期输沙率影响因素分析

本文选取表征水流势能的坝前水位  $H$  和入库水文站水位  $H_{in}$ 、表征水流动能的入库水文站流量  $Q_{in}$  和出库流量  $Q_{out}$ 、表征泥沙边界条件的入库含沙量  $S_{in}$  五个特征因子作为输入变量，以出库输沙率  $Q_{sout}$  作为模型输出变量，运用 SHAP 方法<sup>[22]</sup>分析三门峡水库“六下七上”期水库输沙的主要影响因素。结果表明，与出库输沙率  $Q_{sout}$  相关性较强的特征因子为坝前水位  $H$  和出库流量  $Q_{out}$ ，相关系数分别为-0.51 和 0.45，入库水位  $H_{in}$ 、入库流量  $Q_{in}$  和入库含沙量  $S_{in}$  与出库输沙率的关系偏弱，相关系数均在 0.4 以下。

基于实测资料进一步分析三门峡水库出库输沙率与出库流量及坝前水位的变化关系，结果如图 1 所示，随着出库流量的增加和坝前水位的下降，输沙率总体上表现出递增趋势。

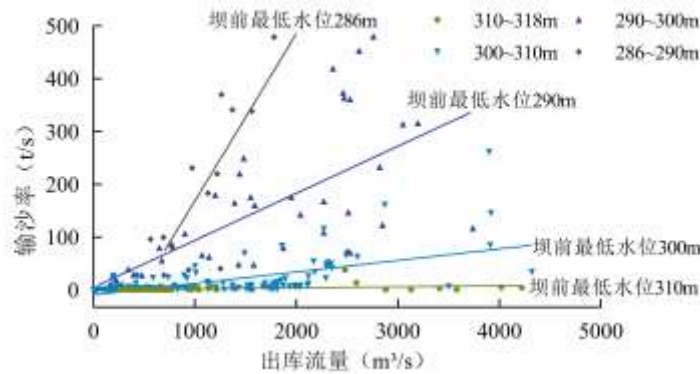


图 1 “六下七上”期水库出库输沙率与出库流量及坝前最低水位关系

Fig.1 Relationship between the sediment discharge rate at the reservoir outlet, the outflow rate and the lowest water level in front of the dam during the "sixth month down and seventh month up" period

### 2.2 基于机器学习的排沙预测

2.2.1 模型构建流程 (1) 将原始数据进行缺失值与异常值处理，并对数据进行 min-max 标准化处理。数据归一化公式为：

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中  $X_{norm}$  为归一化后的数据值,  $X$  为原始数据值,  $X_{min}$  为数据集中最小值,  $X_{max}$  为数据集中最大值。

(2) 选取 2003 年至 2022 年的潼关和三门峡水文站日均水沙资料作为模型的样本集, 对样本集进行随机打乱, 以 8:2 的比例划分为训练集与测试集, 同时选取 2023 年的水沙资料作为验证集来验证模型的预测效果。

(3) 利用 XGBoost 算法对训练集样本进行训练<sup>[23,24]</sup>, 采用随机搜索交叉验证方法对模型进行超参数优化, 建立预测性能最优的输沙率预测模型。并利用预测模型对归一化后的测试集和验证集进行预测, 通过反归一化公式还原预测值和真实值的量纲, 数据反归一化公式为:

$$X = X_{norm}(X_{max} - X_{min}) + X_{min} \quad (2)$$

(4) 选取平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE) 和决定系数 (R2) 作为评估模型预测效果的指标, 同时保存最优模型方便后续优化调度计算调用。

2.2.2 排沙预测模型效果分析 本文选取三门峡水库 2003 年至 2022 年“六下七上”期出库三门峡站和入库潼关站的水沙系列数据, 整理得到包含模型输入所需的 5 个特征因子和 1 个输出变量在内的共 620 个样本集, 并按照 8: 2 的比例将其划分为 496 个训练样本和 124 个测试样本, 同时预留 2023 年“六下七上”期的 31 个样本作为验证样本, 利用 XGBoost 机器学习算法对三门峡水库“六下七上”期出库输沙率进行预测, 预测值与实测值的对比如图 2 所示。

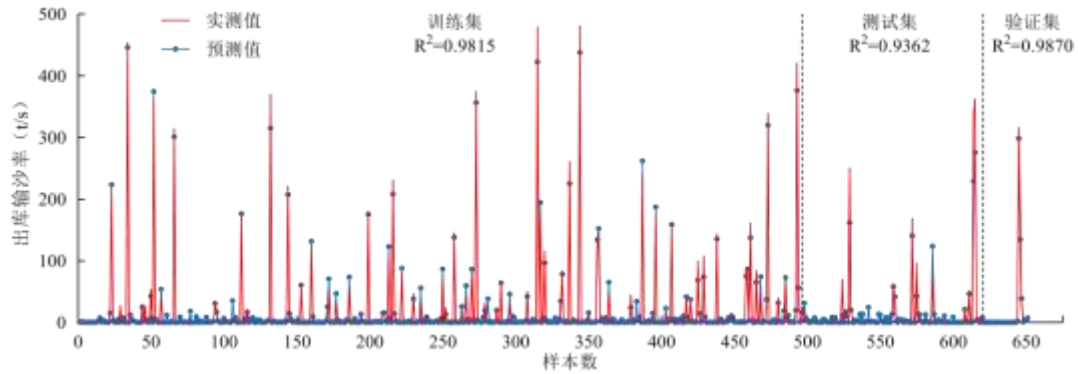


图 2 出库输沙率预测结果对比图

Fig.2 Comparison Chart of Outflow Sediment Discharge Prediction Results

结果显示, 对于低输沙率而言, 模型的预测效果较好, 但对于高输沙率部分, 模型预测值与实测值存在一定的偏差。具体来看, 训练集的平均绝对误差 (MAE) 为 3.54 kg/s, 均方根误差 (RMSE) 为 8.25 kg/s; 测试集的 MAE 为 6.39 kg/s, RMSE 为 18.15 kg/s, 高输沙率 (>300 kg/s) 区段预测误差最大不超过 20%, 且此类时段在整个调度期中占比不足 5%, 对整体排沙趋势及优化调度结果影响有限。这种差异也体现了三门峡水库排沙调度过程的特点: 在水库初期降水排沙阶段, 出库输沙率与坝前水位变化呈现较为稳定的线性关系; 随着水位持续降低, 出库含沙量逐渐增加, 但其变化的随机性亦随之增强, 显著影响模型预测的稳定性。考虑到本模型的主要用途是为多目标优化调度模型的出库输沙量模块提供计算依据, 而非单一极值点的绝对拟合预测, 其精度可满足优化调度的方案对比与决策需求。由图 2 可见, 模型预测值与实测值相关性较好, 能预测出与实测值分布一致的出库输沙率变化趋势, 同时表明基于机器学习的三门峡水库六下七上期多因子排沙预测模型可以用来计算多目标优化调度模型的出库输沙量计算。

2.2.3 出库输沙率特征因子权重值 对于排沙预测模型, 通过计算每个特征因子的平均绝对 shap 值量化其对排沙模型预测的贡献度, 并对 shap 值进行归一化。计算结果如图 3 所示。结果表明, 输沙率权重值排序与相关系数一致, 坝前水位  $H$  和出库流量  $Q_{out}$  排名靠前。从整体上看, 排沙预测模型调度过程因子  $H$  和  $Q_{out}$  与水沙条件因子  $H_{in}$ 、 $S_{in}$  和  $Q_{in}$  相比权重值偏大较多, 这说明调度过程因子对排沙过程具有较大的影响, 可以通过优化调度过程来改变水库的出库沙量。

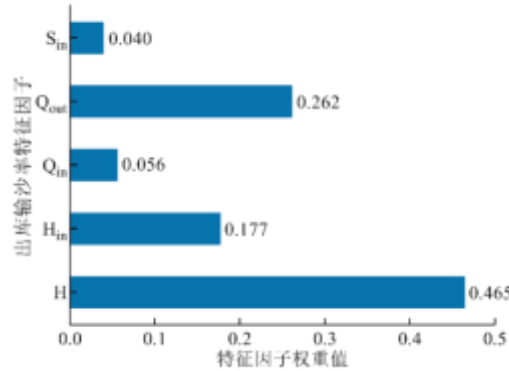


图3 出库输沙率特征因子权重分布图

Fig.3 Weight distribution of characteristic factors for reservoir outflow sediment discharge rate

经过模型效果分析及相关特征因子权重计算,该模型能够较为准确的预测三门峡水库出库输沙率,其权重分析结果符合客观规律,能够为后续三门峡水库优化调度过程提供科学的出库输沙量计算。

### 3 三门峡水库多目标优化调度模型的建立

#### 3.1 目标函数

以水库坝前水位、发电和减沙排淤等等作为水沙联合调度计算的基本目标,具体形式为:

(1) 为尽可能增强小浪底水库调水调沙后续动力,需要抬高三门峡水库水位并在合适的时机增泄更多的大流量过程。但水位抬高过多不仅会影响水库排沙,影响有效库容保持和潼关高程稳定控制,还会增加库区内居民住宅及耕地的淹没风险。为降低水位抬高所造成的影响,本研究以一个调度周期内坝前最高水位最小为目标,公式如下:

$$F_1 = \min(\max Z_t), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

式中, $F_1$  为坝前水位目标(m);  $Z_t$  为第  $t$  时段时水库的坝前水位(m);  $T$  为调度期总时段数。

(2) 以一个调度周期内的梯级水库总电量最大为发电效益目标,公式如下:

$$F_2 = \max\left(\sum_{i=1}^T N_i \Delta t\right), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

式中, $F_2$  为发电效益目标(kW·h);  $N_t$  为水电站在  $t$  时段的出力(kW)。

(3) 由于三门峡水库年均下泄大于  $2600\text{m}^3/\text{s}$  的水量代表了三门峡水库为小浪底补充后续动力的能力<sup>[5,6]</sup>,故本文以三门峡水库一个调度周期内出库流量大于  $2600\text{m}^3/\text{s}$  持续时间最长为目标,公式如下:

$$F_3 = \max\left(\sum_{i=1}^T T_i\right), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

式中, $F_3$  为流量大于  $2600\text{m}^3/\text{s}$  时间最长目标(d);  $T_t$  为为水电站在时段  $t$  内流量大于  $2600\text{m}^3/\text{s}$  的天数(d)。

(4) 以一个调度期内三门峡水库出库输沙量最大为目标,并采用机器学习预测模型,针对“六下七上”期三门峡水库出库输沙量进行计算。

$$F_4 = \max\left(\sum_{i=1}^T Q S_{out} \Delta t\right), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

式中,  $F_4$  为输沙量目标(t);  $Q_{S_{out}}$  为水库在  $t$  时段的输沙率(t/s)。

### 3.2 约束条件

综合考虑梯级水库的调度目标与实际运行情况, 本研究主要设定以下约束条件:

(1) 水库水量平衡约束

$$v_t = v_{t-1} + Q_{rk}(t) - Q_s(t) \quad (7)$$

式中,  $V_{t-1}$  及  $V_t$  分别为第  $t$  时段初、末蓄水量;  $Q_{rk}(t)$  为水库第  $t$  时段的天然入库径流;  $Q_s(t)$  为水库第  $t$  时段的下泄流量。

(2) 水位约束

$$Z_{min} \leq Z_t \leq Z_{max} \quad (8)$$

式中,  $Z_t$  为  $t$  时段水库水位(m);  $Z_{min}$  为  $t$  时段允许最低运行水位(m);  $Z_{max}$  为  $t$  时段允许最高运行水位(m)。

(3) 下泄流量约束

$$Q_{min} \leq Q_t \leq Q_{max} \quad (9)$$

式中:  $Q_t$  为  $t$  时段水库水位(m);  $Q_{min}$  为  $t$  时段各水库水轮机要求的最小引水流量( $m^3/s$ );  $Q_{max}$  为  $t$  时段最大允许引水流量( $m^3/s$ )。

(4) 水电站机组出力约束

$$N_{min} \leq N_t \leq N_{max} \quad (10)$$

式中,  $N_t$  为  $t$  时段水电站机组的出力(kW);  $N_{min}$  为  $t$  时段水电站机组被允许的最小出力(kW);  $N_{max}$  为  $t$  时段允许的最大出力(kW)。

(5) 变量非负约束

模型中所有变量均为非负值。

### 3.3 典型工况的选取

通过水文频率分析和 Pearson III 型曲线拟合, 基于潼关站 2003-2023 年共 21 年数据划分丰、平、枯水文年型, 并采用来沙系数  $\xi(\xi=S/Q, S$  为年平均含沙量,  $Q$  为年平均流量)判定来沙条件(表 1)。由表可知, 2012、2013 年潼关站径流量显著高于多年平均径流量; 2005、2013 年来沙系数远高于多年平均值, 故选取 2013 年(水多沙多)、2012 年(水多沙少)、2009 年(水少沙少)、2005 年(水少沙多)作为典型工况。

表 1 来水来沙典型工况选取

Tab.1 Selection of Typical Working Conditions for Water and Sediment Inflow

典型工况	多年平均	水多沙多	水多沙少	水少沙少	水少沙多
		2013 年	2012 年	2009 年	2005 年
潼关站径流量 (亿 $m^3$ )	18.93	30.88	24.16	8.48	11.68
潼关站输沙量 (亿 t)	0.11	0.48	0.04	0.02	0.45
来沙系数 ( $m^3/t$ )	0.0058	0.0155	0.0017	0.0024	0.0385

### 3.4 调度策略与参数设置

(1) 调度策略

自 2003 年以来, 三门峡水库非汛期运行水位一般控制在 318m 以下。为尽可能增强小浪底水库汛前调水调沙的后续动力, 需抬高三门峡水库水位, 在合适时机增泄更多的大流量过程。但水位抬高过多将影

响水库排沙，不利于有效库容保持，同时造成库区淹没线以下居民安全问题。本文根据现场调查情况，当水位控制在 320 m 以下时，仅有少量耕地淹没受损，淹没人口小于 150 人。因此，将 320 m 作为优化调度方案的上限水位，以在减少社会影响的前提下增强小浪底水库后续动力。针对来水量充沛的水多沙多和水多沙少典型工况，分别设置优化方案(坝前最高水位不超过 320m)和常规方案(坝前最高水位不突破 318m)两种方案。对于水少沙少和水少沙多典型工况，坝前最高水位突破 318m 长时间蓄水，从而导致三门峡水库发电总量显著减少。因此，这两种工况下仅考虑最高水位不超过 318m 的方案。各典型工况的调度方案如表 2 所示。

表 2 三门峡水库优化方案调度策略

Tab.2 Optimization Plan and Dispatching Strategy for Sanmenxia Reservoir

典型工况	方案
水多沙多	优化方案(坝前最高水位不超过 320m)
	常规方案(坝前水位不突破 318m)
水多沙少	优化方案(坝前最高水位不超过 320m)
	常规方案(坝前水位不突破 318m)
水少沙少	常规方案(坝前水位不突破 318m)
水少沙多	常规方案(坝前水位不突破 318m)

(2) 参数设置

优化调度模型采用 NSGA-II 算法，种群大小设置为 100，迭代次数设为 3000 次。交叉分布系数  $\eta_c$  和变异分布系数  $\eta_m$  均为 20。交叉率  $P_c$  设置为 0.8，模型采用多项式变异算子，每个决策变量的变异概率  $P_m$  为  $1/n$ ， $n$  为决策变量个数，由各工况具体情况确定。各典型工况下，模型调度周期与各年份实际汛前调水调沙时间一致，起调水位与末水位对应于各年份起止水位。具体取值如表 3 所示。

表 3 三门峡水库起止水位调度策略

Tab.3 Starting and Ending Water Level Dispatching Strategies of Sanmenxia Reservoir

典型工况	水多沙多	水多沙少	水少沙少	水少沙多
	2013 年	2012 年	2009 年	2005 年
起调水位 (m)	317.24	317.73	317.73	315.21
末水位 (m)	290.42	293.53	289.04	286.03

4 三门峡水库多目标优化调度模型求解与方案优选

4.1 优选模型权重的确定

采用 AHP 层次分析法<sup>[25]</sup>计算主观权重，在确保防洪安全的前提下，以调水调沙后续动力为首要目标，发电量和输沙量作为次要目标，坝前水位目标优先级最低，但在极端洪水等以防洪为主的场景下，需适当提高坝前水位目标权重。采用熵权法<sup>[26]</sup>计算各工况下非劣解集的客观权重，由最小鉴别信息原理<sup>[27]</sup>将已经得到的主观和客观权重进行组合，得到组合权重，计算结果如表 4 所示。

表 4 各工况组合权重计算结果

Tab.4 Calculation Results of Combined Weights for Each working condition

工况	调度方案	水位目标	发电目标	动力目标	输沙目标
水多沙多	优化方案	0.0658	0.0936	0.6338	0.2068
水多沙多	常规方案	0.1057	0.1906	0.5879	0.1157
水多沙少	优化方案	0.0853	0.1337	0.5971	0.1839
水多沙少	常规方案	0.1927	0.3427	0.3575	0.1071
水少沙少	常规方案	0.0727	0.1213	0.7127	0.0933
水少沙多	常规方案	0.0741	0.1754	0.5680	0.1824

#### 4.2 优选流程

本文基于 VIKOR 多属性决策方法<sup>[28]</sup>对多目标优化调度的非劣解集进行优选。具体步骤为：首先构建目标函数值决策矩阵，并计算正理想解与负理想解以确定各指标的理想最优与最劣状态；其次，依据指标偏差计算各方案的群体效用值  $S_j$ 、个体遗憾值  $R_j$  及折衷值  $Q_j$ ；最后，根据  $Q$  排序并结合  $Q$  值差异及  $R$ 、 $S$  排序稳定性判断方案是否具备可接受优势，从而选取相对最优调度方案。决策流程图如图 4 所示。

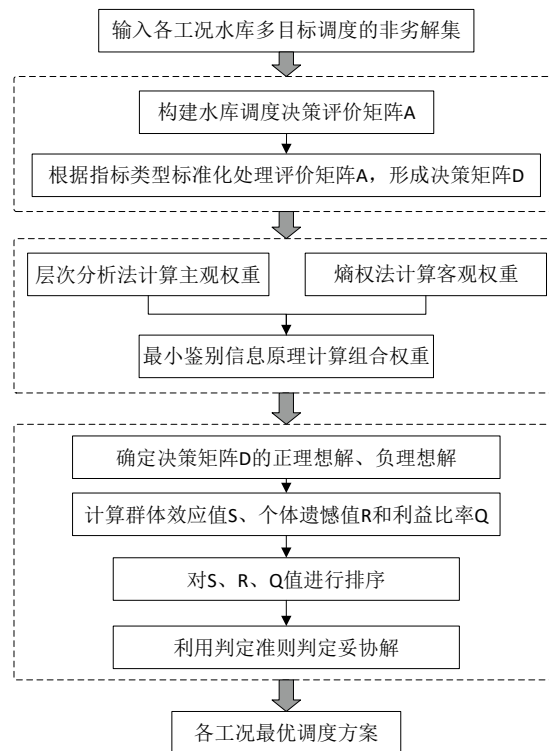


图 4 决策流程图

Fig.4 Decision-making Flowchart

#### 4.3 优选结果

为评价各最优方案的优化效果，将优化方案、常规方案与实际方案进行对比，结果如表 5 和图 5 所示。在水多沙多和水多沙少工况下，优化方案下泄流量大于  $2600\text{m}^3/\text{s}$  的天数和水库的输沙量显著高于常规方案。考虑到以增强汛前调水调沙后续动力为主要目标，故在水多沙多和水多沙少工况下，优化方案为

最佳调度方案。在水少沙少和水少沙多的工况下，常规方案为各工况的最优方案。

表 5 各工况下优化结果对比

Tab.5 Comparison of Optimization Results under Various Working Conditions

工况	目标函数	实际方案	优化方案	常规方案	优化方案 对比结果	常规方案 对比结果
水多沙多	坝前最高水位 (m)	317.61	319.06	317.24	+1.45	-0.37
	总发电量 (亿 kW·h)	1.090	1.258	1.423	+0.168	+0.333
	大流量天数 (d)	2	5	4	+3	+2
水多沙少	总输沙量 (亿 t)	0.370	0.307	0.290	-0.063	-0.080
	坝前最高水位 (m)	317.90	318.92	317.88	+1.02	-0.02
	总发电量 (亿 kW·h)	0.726	0.783	0.888	+0.057	+0.162
水少沙少	大流量天数 (d)	2	4	4	+2	+2
	总输沙量 (亿 t)	0.401	0.319	0.303	-0.082	-0.098
	坝前最高水位 (m)	317.73	\	317.75	\	+0.02
水少沙多	总发电量 (亿 kW·h)	0.475	\	0.529	\	+0.054
	大流量天数 (d)	0	\	2	\	+2
	总输沙量 (亿 t)	0.455	\	0.314	\	-0.141
水少沙多	坝前最高水位 (m)	315.41	\	315.59	\	+0.18
	总发电量 (亿 kW·h)	0.292	\	0.377	\	+0.085
	大流量天数 (d)	0	\	2	\	+2
	总输沙量 (亿 t)	0.431	\	0.361	\	-0.070

#### 4.4 结果分析

优化的调度方案在提升后续动力方面表现显著。与实际方案相比，优化方案不仅使下泄流量大于 2600 m<sup>3</sup>/s 的天数增加 2-3 天，更重要的是在 7 月 1 日之后的下泄过程中实现了日均出库流量的整体提高，即日均出库流量均高于实际方案，表现为高流量持续时间延长、日均出库流量整体提高。这一现象表明，最优方案通过调整蓄水与下泄节奏，有效缓解了汛前阶段小浪底水库天然来水有限导致的后续动力不足问题。

具体而言，最优方案在调度初期通过适度蓄水抬高坝前水位，为后续集中下泄提供了较高的水位条件；在敞泄排沙阶段，则通过延长高流量过程并提高日均出库流量，增强了水流挟沙能力。此种调度策略在不显著影响输沙效益的前提下，同时提升了发电收益和大流量过程持续性，实现了后续动力、发电与泥沙输移的多目标协同优化。对于在水多沙多工况下，最优方案较实际方案的发电量增加 0.168 亿 kW·h，大流量天数增加 3 天；在水多沙少工况下，发电量增加 0.057 亿 kW·h，大流量天数增加 2 天；在水少沙少与水少沙多工况下，发电增加分别为 0.054 亿 kW·h 与 0.085 亿 kW·h，大流量天数均增加 2 天。坝前最高水位较实际方案有所上升 (0.02-1.45 m)，尽管水位突破 319 m 的时间仅一天，对潼关高程影响较小，但由于会涉及到少量的人口和耕地淹没等问题，在实际运用时要及时观测，进一步优化调度方案并制定风险应对的预案。

综上所述，优化方案与常规调度趋势保持一致，但在关键阶段表现出更强的冲刷动力，验证了所构建多目标优化模型的合理性和适用性，为汛前提升小浪底水库后续动力提供了可行的调度策略。

#### 5 结论

本文基于 2003-2023 年潼关站与三门峡站的实测水沙数据，构建了基于机器学习的三门峡水库输沙预测模型，并结合 NSGA-II 算法建立多目标优化调度模型，对汛前“六下七上”期典型工况进行了优化求解与效果评估。主要结论如下：

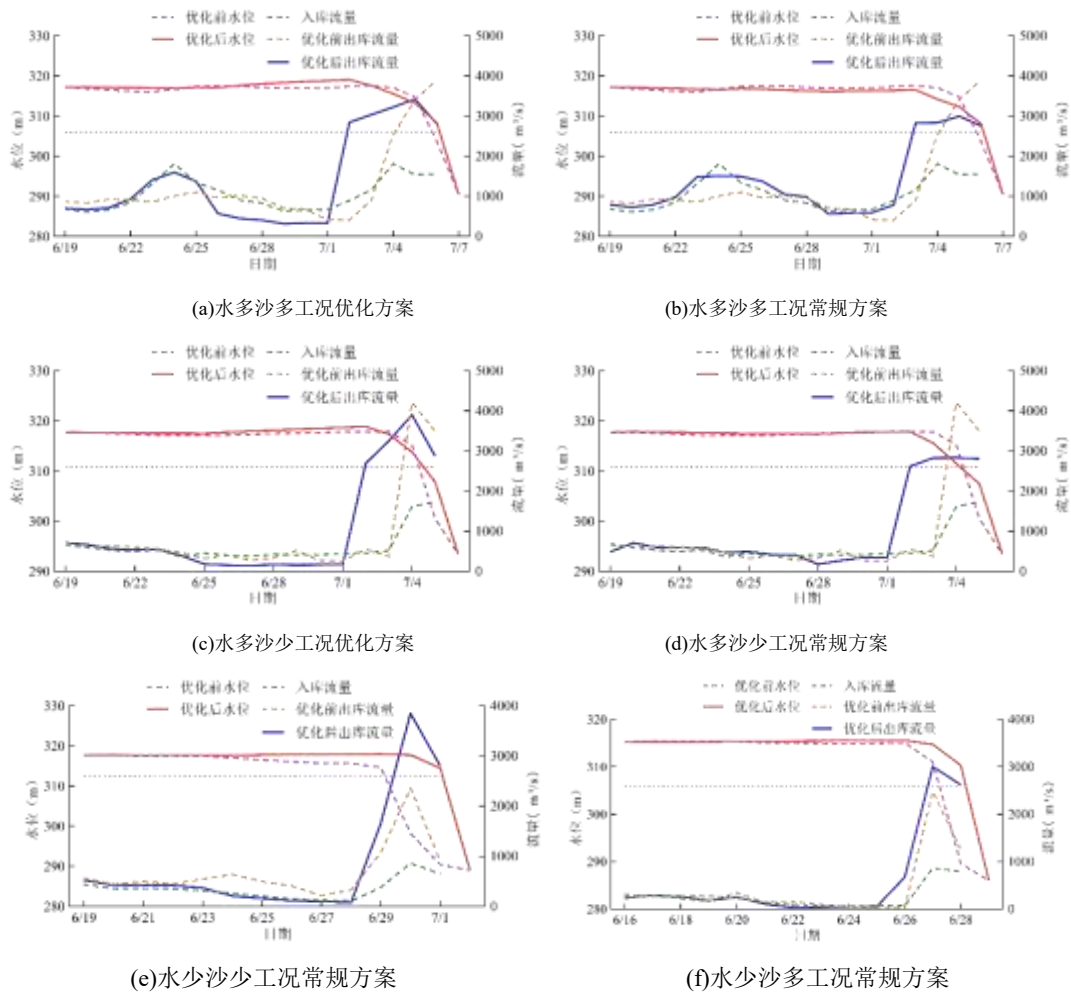


图5 各工况下不同方案调度过程

Fig.5 Scheduling processes of different schemes under various scenarios

(1) 构建的三门峡水库排沙预测模型能够准确反映坝前水位与出库流量对输沙率的主导影响关系。经过效果分析及相关特征因子权重计算能够说明模型预测精度较高,可为后续优化调度提供可靠的水沙输入条件。

(2) 以坝前最高水位最小、水库总发电量最大、下泄流量大于  $2600 \text{ m}^3/\text{s}$  的持续时间最长以及出库输沙量最大为优化目标,结合排沙预测模型与NSGA-II算法构建多目标优化调度模型,针对不同工况设计优化方案与常规方案的对比策略;并通过AHP与熵权法结合的组合赋权方法,以动力目标为核心、兼顾发电和输沙效益,确定各目标在不同工况下的综合权重,采用VIKOR多属性决策方法对方案优选,确定相对最优调度方案。

(3) 优化调度模型在典型工况下相较于实际调度表现出更优结果:不仅增加了下泄流量超过  $2600 \text{ m}^3/\text{s}$  的天数,还显著提升了7月1日后敞泄期的日均出库流量,实现了敞泄期内出库流量的整体提高;在水多沙多和水多沙少工况下,优化方案分别提升发电量  $0.168 \text{ 亿kW}\cdot\text{h}$  与  $0.057 \text{ 亿kW}\cdot\text{h}$ ;在水少工况下尽管提升幅度较小,但仍实现了2天的大流量增加及一定的发电量提升。本文系统分析并优化了三门峡水库汛前调水调沙期后续动力不足的问题。研究表明,通过科学调度能够在显著增强小浪底水库后续动力的同时兼顾三门峡水库的发电与输沙效益。但具体实施时要考虑可能的风险,尤其是在水位突破  $318.5 \text{ m}$  时会涉及到少量的人口和耕地淹没等问题,在实际运用时要及时观测,进一步优化调度方案并制定风险应对的预

案。

本文通过优化三门峡水库运用水位为增强小浪底水库后续动力提供了可能。受限于文章篇幅，现阶段仅对三门峡水库单库优化调度展开叙述，后续将结合万家寨、小浪底水库建立万-三-小联合调度模型对增强小浪底水库后续动力进行深入研究。

## 6 参考文献

- [1] 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国黄河保护法 [S]. 2022-10-30.
- [2] 张金良,鲁俊,韦诗涛,等.小浪底水库调水调沙后续动力不足原因和对策.人民黄河,2021,43(01):5-9.
- [3] 贾美平,宋喜雷,王育杰.三门峡水库在黄河调水调沙体系中的作用.人民黄河,2017,39(07):11-14.(Jia M P, Song X L, Wang Y J. Role of Sanmenxia Reservoir in the Yellow River Water-Sediment Regulation System . People's Yellow River, 2017, 39(07): 11-14.
- [4] 毕东升,蔡彬,张乐天.小浪底水库人工塑造异重流成因分析.人民黄河,2010,32(08):22-24+144.(Bi D S, Cai B, Zhang L T. Cause Analysis of Artificially Created Density Current in Xiaolangdi Reservoir . People's Yellow River, 2010, 32(08): 22-24+144. )
- [5] 张金良,鲁俊,高兴,等.增强小浪底调水调沙后续动力的三门峡水库水位方案优选.农业工程学报,2021,37(15):60-67.(Zhang J L, Lu J, Gao X, et al. Optimal Water Level Scheme of Sanmenxia Reservoir for Enhancing Follow-up Power of Xiaolangdi Water-Sediment Regulation . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(15): 60-67.
- [6] 万占伟,罗秋实,闫朝晖,等.黄河调水调沙调控指标及运行模式研究.人民黄河,2013,35(05):1-4.
- [7] 吴联春.小浪底水库2008—2009年调水调沙排沙比分析.人民黄河,2010,32(09):22-23+152.(Wu L C. Analysis of Sediment Delivery Ratio During Water-Sediment Regulation in Xiaolangdi Reservoir (2008—2009) . People's Yellow River, 2010, 32(09): 22-23+152. (in Chinese))
- [8] Shan Z, Juan H, Baosheng W. Water and Sediment Regulation by Cascade Dams at the Yellow River, China . Journal of Hydrologic Engineering, 2023, 28(11).
- [9] Brune G M. Trap efficiency of reservoirs . Transagu, 1953, 34.
- [10] 黄仁勇,谈广鸣,范北林.三峡水库蓄水运用后汛期洪水排沙比初步研究.水力发电学报,2013,32(05):129-133+152.(Huang R Y, Tan G M, Fan B L. Preliminary Study on Flood Sediment Delivery Ratio of Three Gorges Reservoir after Impoundment . Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(05): 129-133+152.
- [11] 侯素珍,胡恬,杨飞,等.三门峡水库汛期排沙效果研究.水利学报,2021,52(04):393-400.(Hou S Z, Hu T, Yang F, et al. Study on Sediment Discharge Efficiency of Sanmenxia Reservoir during Flood Season . Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(04): 393-400. (in Chinese))
- [12] 郑珊,吴保生,侯素珍,等.三门峡水库时空冲淤与滞后响应.水利学报,2019,50(12):1433-1445.DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20190289.
- [13] 张志刚,马光文.基于NSGA-II算法的多目标水电站群优化调度模型研究.水力发电学报,2010,29(01):213-218.(ZHANG Z G, MA G W. Multi-objective Optimal Operation of Hydro-thermal Power Systems Based on NSGA-II Algorithm . Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(01):213-218. (in Chinese))
- [14] Aman A J, Mohsen N, Saaid S, et al. Multi-objective Optimization of water resources in real time based on integration of NSGA-II and support vector machines..Environmental science and pollution research international,2022,30(6):16464-16475.
- [15] 李洁玉,李航,王远见,等.黄河水沙调控多目标协同模型构建及应用.水科学进展,2023,34(05):708-718.(LI J Y, LI H, WANG Y J, et al. Construction and Application of Multi-objective Coordination Model for Water-sediment Regulation in the Yellow River . Advances in Water Science, 2023, 34(05):708-718. (in Chinese))
- [16] Hojjati A, Monadi M, Faridhosseini A, et al. Application and comparison of NSGA-II and MOPSO in multi-objective optimization of water resources systems. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2018, 66(3):323-329.
- [17] 夏军强,张贤梓,王增辉,等.黄河三门峡水库水沙电耦合模型研究及应用.水科学进展,2023,34(02):238-249.DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2023.02.008.
- [18] 赵月,屈博,江恩慧,等.考虑多源入库水出库水的三门峡-小浪底水库汛期联合优化调控.人民黄河,2024,46(10):44-48+61.
- [19] 季利,王海军,贾美平,等.2021年三门峡水库调度运用及冲淤分析.人民黄河,2023,45(S2):33-34.
- [20] 郭秀吉,孙龙飞,王平,等.基于机器学习的三门峡水库多因子排沙预测模型比较研究.人民黄河,2024,46(12):37-43.
- [21] 李昆鹏,马怀宝,王瑞,等.三门峡水库降水冲刷机理与规律研究.人民黄河,2012,34(10):37-40.
- [22] 闫孟婷,毛玉鑫,张天遥,等.基于SHAP-XGBoost混合模型的梯级水电站流量动态滞时研究.电力系统保护与控制,2023,51(11):159-167.DOI:10.19783/j.cnki.pspc.221501.
- [23] Zakaria M N A, Ahmed A, Malek M A, et al. Exploring machine learning algorithms for accurate water level forecasting in Muda river, Malaysia . Heliyon, 2023, 9.
- [24] 史剑伟,江时俊,刘启兴.基于LSTM和XGBoost算法的径流预测模型研究.治淮,2020,(08):29-31.
- [25] Saaty T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures . Journal of Mathematical Psychology, 2000, 15(3): 234-281.
- [26] 周惠成,张改红,王国利.基于熵权的水库防洪调度多目标决策方法及应用.水利学报,2007,(01):100-106.
- [27] Kullback S, Leibler R A. On Information and Sufficiency . Annals of Mathematical Statistics, 1951, 22(1): 79-86.
- [28] Opricovic S. Multicriteria optimization of civil engineering systems . Faculty of civil engineering, Belgrade, 1998, 2(1): 5-21.