

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202001085



本刊网刊

黄河小浪底水库水-沙-电耦合过程计算

夏军强¹, 陈奕锦¹, 邓珊珊¹, 周美蓉¹, 王增辉²

(1.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:小浪底水库是保障黄河下游防洪、供水等目标的关键性骨干工程, 故研究小浪底水库优化调度方式对于水库塑造下游河道形态及排沙减淤等方面具有重要意义。研究建立了小浪底水库水-沙-电耦合的优化调度模型, 通过经济价值量化发电效益与水库排沙减淤效益, 形成发电效益最大和综合效益最大两类优化目标; 根据小浪底水库拦沙后期调度规程, 对坝前水位、下泄流量、水轮机出力进行约束, 并采用动态规划逐日求解, 分析了在不同优化目标下典型枯水年(2015年)与丰水年(2012年)的调度方案及其结果。结果表明: 1) 当优化目标为发电效益最大时, 2015年和2012年的优化方案分别实现了 71.30×10^8 和 102.15×10^8 kW·h的发电量。2) 当优化目标为综合效益最大时, 2015年的优化方案可实现排沙量 0.31×10^8 t与发电量 70.17×10^8 kW·h, 而2012年的优化方案可实现排沙量 1.66×10^8 t与发电量 95.24×10^8 kW·h。3) 2种优化目标都实现了综合效益的提升, 而以综合效益最大为优化目标时, 牺牲部分发电效益换取汛期库区冲刷, 增加了水库使用寿命与水库排沙减淤效益, 相较实际方案进一步提升了综合效益。4) 2个典型年份的优化方案均较实际调度结果实现了发电效益与综合效益的提升, 且丰水年的提升更为明显; 此外, 还针对典型年份现有调度方式, 提出了相应的优化建议。

关键词:水-沙-电耦合; 水库调度; 优化效益; 动态规划; 小浪底水库

中图分类号:TV697.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)06-0113-09

Coupled Modeling of Flow-Sediment Transport and Power Generation in the Xiaolangdi Reservoir

XIA Junqiang¹, CHEN Yijin¹, DENG Shanshan¹, ZHOU Meirong¹, WANG Zenghui²

(1.State Key Lab. of Water Resources and Hydropower Eng. Sci., Wuhan Univ., Wuhan 430072, China;

2.College of Water Resources and Architectural Eng., Northwest A & F Univ., Yangling 712100, China)

Abstract: As the controlling reservoir that possesses a large storage capacity in Yellow River, the operation of Xiaolangdi Reservoir (XLD) is of great importance to the reservoir maintenance and the downstream channel shaping. Considering the integrated economical profit of power generation and sediment discharge, an operation model of XLD was established by coupling the calculations of water-sediment balances with the calculation of power generation. There were two types of optimization objectives: the maximum of power generation and the maximum of integrated profits. The hydrographs of water level, discharge and turbine output were constrained according to the regulation rules during the late sediment-retaining period of the XLD Reservoir. The model was solved by the dynamic programming, and was adopted to obtain different operation schemes under different optimization objectives in a typical dry year of 2015 and a typical high flood year of 2012. The results showed that: 1) with the power generation as the optimization objective, the operation scheme could to energy outputs of 7.130×10^9 kW·h in 2015 and 10.215×10^9 kW·h in 2012; 2) with the integrated profits as the optimization objective, an annual power outputs of 7.017×10^9 kW·h and 9.524×10^9 kW·h could be achieved in 2015 and 2012 respectively, along with sediment discharges of 31×10^6 t and 166×10^6 t; 3) when comparing these two schemes with different optimization objectives, it could be found that both schemes would finally achieve an increase in the integrated profits, whereas the latter would result in a larger increase by sacrificing part of the power generation in exchange for a silting reduction in the reservoir;

收稿日期:2020-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51725902; 51809196); 国家重点研发计划项目(2017YFC0405501)

作者简介:夏军强(1974—),男,教授,博士。研究方向:河流动力学。E-mail: xiajq@whu.edu.cn

网络出版时间:2021-11-05 15:53:21

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20211105.0842.001.html>

4) optimization schemes in both typical years would produce an increase in power generation and integrated profits, with a larger increase being obtained for the typical high flow year. Furthermore, some suggestions were also proposed for improving the current operation schemes in some typical years.

Key words: flow-sediment transport and power generation; reservoir regulation; integrated profits; dynamic programming; Xiaolang-di Reservoir

小浪底水库作为黄河中游最后一个峡谷出口处的水库,控制着92.3%的黄河流域面积及近100%的来沙量^[1]。小浪底水库于1999年10月投入运行,自2007年10月起进入拦沙后期。针对小浪底水库拦沙后期入库水沙形势变化、水库库容减少、排沙比增大等特点,其水沙调度实践以防洪-发电-减淤等多目标调度为主,需要综合考虑下游河道防洪安全、供水灌溉、水库蓄水发电及库区减淤等需求,但同时也遇到一些新问题,如下游河道冲刷能力降低、水库淤积补偿率较低等^[2]。故研究小浪底水库拦沙后期的优化调度方式,对提高水库发电效益、确保汛期下游河道行洪安全、减少库区泥沙淤积等实际问题具有重要意义。

现有水库优化调度研究,主体思路为利用多目标规划理论,建立并求解单目标或多目标、单库或多库的水沙调度模型^[3]。通过动态规划与多目标决策,建立水库水沙联合调度模型,优化调度结果表明:在优化调度中,发电与排沙存在一定矛盾,且在汛期表现尤为明显,其根本原因是水库水位要求不同,排沙需要尽量降低水位运用,发电则相反^[4];各子模型耦合过程中,基于子模型计算结果,可通过建立水库运行参数与目标之间的函数关系,在保证较好协调防洪、发电等目标之间矛盾的同时,降低水沙联合调度计算工作量^[5];在优化方案设置中,可根据不同优化目标与边界条件,形成若干求解方案,将相应结果进行比较,论证各方案合理性与适用性^[3];在优化调度算法选取方面,主要包括线性规划、动态规划、非线性规划、逐步优化算法等传统数学方法^[6-11]及粒子群算法、遗传算法、人工神经网络等智能算法^[12-16],其中,以动态规划研究与应用最为广泛;除此之外,还可基于K判别式法与水库调度图求解水库调度优化问题^[17-19]。

上述研究表明,水库多目标优化调度方案与优化目标的耦合方式及采用的算法关系密切,但从已取得的研究成果来看,模型采取何种方式实现多目标耦合仍未得到有效解决,而采用智能算法又会出现缺少数学理论支撑的问题。研究基于水库调度原理,以水库排沙、发电、防洪效益最大为优化目标,以小浪底水库为研究对象,构建多目标水库调度优化模型,通过经济价值量化发电效益与水库排沙减淤效益,并通过动态规划进行求解,最终得出不同典型年份、不同优化目标下的调度方案,并分析不同方案之间结果差异,给出对现有调度方式的优化建议。

1 小浪底水库概况

小浪底水库属于大型年调节水库,是黄河干流上三门峡以下唯一具有较大库容的控制性工程,其建成后不仅极大地改变了黄河下游的水沙过程及冲淤情况,同时通过优化调度也产生了较好的综合效益,如防汛效益、发电效益等。

1.1 枢纽概况

小浪底水利枢纽位于三门峡水利枢纽下游130 km、河南省洛阳市以北40 km的黄河干流上,流域面积 $69.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,其功能以防洪、减淤、防凌为主,兼顾供水灌溉和发电。小浪底拦河坝采用带内铺盖的斜心墙堆石坝,正常蓄水位275 m,汛限水位254 m,死水位230 m。设计原始库容 $126.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,约 $40.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 为防洪库容,约 $72.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 为拦沙库容,能够长期保持 $51.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的有效库容^[1]。

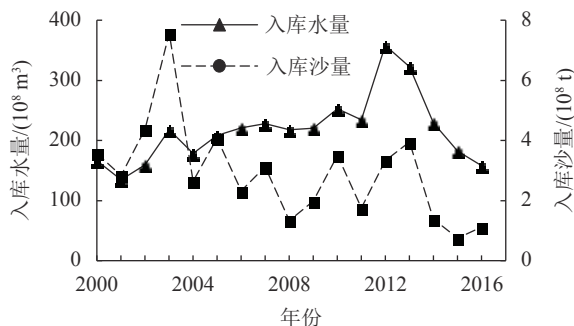
1.2 库区来水来沙及库区淤积变化

自小浪底水库投入使用以来,黄河下游来水来沙同步减少。2000—2016年年均来水量为 $217.11 \times 10^8 \text{ m}^3$,来沙量为 $2.92 \times 10^8 \text{ t}$ (图1(a))。2000—2016年小浪底库区累计淤积 $39.12 \times 10^8 \text{ t}$ 的泥沙,其中,干流淤积为 $31.29 \times 10^8 \text{ t}$,占总库区淤积的80.0%,故干流淤积为小浪底库区泥沙淤积的主要部分。小浪底水库泥沙淤积集中发生于汛期,2000—2016年汛期淤积泥沙 $36.00 \times 10^8 \text{ t}$,占总淤积泥沙92.0%。在非汛期,汛前调水调沙期为产生泥沙淤积主要时段。对于淤积情况年际分配,受小浪底水库汛期水位与黄河泥沙年际变化影响,淤积量年际变化较大(图1(b))。其中:小浪底水库2015年淤积主要发生在大坝至HH20(距坝33.48 km)段,HH20至HH38(距坝64.83 km)段发生一定冲刷,库区总淤积量为 $0.50 \times 10^8 \text{ t}$;2012年淤积几乎全部发生在大坝至HH20段,冲刷接近为0,总淤积量为 $2.03 \times 10^8 \text{ t}$ ^[20]。

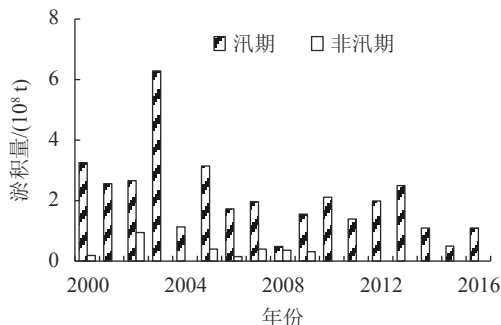
1.3 小浪底水库运用现状

1.3.1 拦沙后期小浪底调度方式

拦沙后期,小浪底水库年内调度主要体现在防洪、防凌、调水调沙、发电及供水灌溉5个方面。在防洪调度中,应根据洪水规模制定相应调度目标,同时适时与故县水库、三门峡水库、陆浑水库进行联合调度。防凌调度期间则应根据不同年份实际情况确定封河期水库下泄。调水调沙调度则为充分利用下游



(a) 2000—2016 年来水来沙情况



(b) 2000—2016 年淤积量

图1 小浪底水库来水来沙及库区淤积量的年际变化

Fig. 1 Variations in the flow-sediment regime and reservoir sedimentation volume

河道输沙能力,调控花园口站流量小于 $800 \text{ m}^3/\text{s}$ 或大于 $2600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。发电调度采用“以水定电”的总体调度原则,并结合当日来沙条件与水轮机运行特性曲线进行调整。在汛期,小浪底水库调度应以防洪调度为主,发电调度为辅;在非汛期,应结合防凌、供水、灌溉、调水调沙对下泄流量的需要,开展发电调度,保证发电效益^[21]。

1.3.2 小浪底水库综合效益

小浪底水库的综合效益主要包括防汛及发电效益。对于防汛效益,自小浪底水库建成以来,黄河下游河道实现了全面的连续性冲刷,河道过流能力显著增加,下游平滩流量 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上的中水河槽已经形成,防洪能力显著提高;通过调节下泄流量,扭转了黄河下游频繁断流的局面,满足了输沙及生态环境用水的要求^[2]。

对于发电效益,2001年底小浪底水电站建设完成,共装有6台 $30 \times 10^4 \text{ kW}$ 混流式水轮发电机组,总装机容量为 $180 \times 10^4 \text{ kW}$,额定水头 112 m 。小浪底水电站前10 a的多年平均发电量为 $45.99 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,后10 a的多年平均发电量为 $58.51 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,是河南电网理想的调峰电站^[7]。

2 小浪底水库水-沙-电耦合计算模型

优化调度模型采用2种目标函数:发电效益最大、

兼顾发电及库区减淤的综合效益最大。前者可根据水轮机出力公式直接得出;后者通过经济价值量化发电效益与库区减淤效益,从而完成子模型的耦合。2种优化调度模型均采用动态规划逐日求解,最终得出全年优化调度方案。

2.1 模型建立

2.1.1 计算原理

1) 水量计算。水量平衡方程:时段的转换通过水量平衡方程实现,其表达形式为:

$$V^{i+1} = V^i + (Q_{\text{in}}^i - Q_{\text{out}}^i) \Delta t \quad (1)$$

式中: V^i 、 V^{i+1} 为时段初末的水库库容, m^3 ; Q_{in}^i 、 Q_{out}^i 为水库入库、出库流量, m^3/s ; Δt 为每个计算步长的时间,研究采用逐日计算的方式对小浪底水库进行优化调度,此处取为 $\Delta t = 86400 \text{ s}$ 。

根据计算年份实际日均坝前水位与相应库容,拟合水库水位与库容之间关系,研究采取2次多项式回归的方式对2015年与2012年小浪底水库的水位-库容关系进行拟合,分别可表示为:

$$V = 0.0176Z^2 - 6.9669Z + 684.19 \quad (2)$$

$$V = 0.0189Z^2 - 7.6613Z + 776.94 \quad (3)$$

式中: Z 为坝前水位, m ; V 为水库库容, m^3 。

2) 沙量计算。在计算水库冲淤的过程中,根据计算排沙比的经验公式反推出库水流含沙量,所采用的排沙比的计算公式可写为^[22]:

$$\eta^i = 1.493 \left(\frac{V^i}{Q_{\text{out}}^i} \right)^{-1.008} \left(\frac{Q_{\text{in}}^i}{Q_{\text{out}}^i} \right)^{-0.278} (S_{\text{in}}^i)^{-0.404} \quad (4)$$

由此,出库含沙量可表示为:

$$S_{\text{out}}^i = (\eta S_{\text{in}} Q_{\text{in}}^i) / Q_{\text{out}}^i \quad (5)$$

式中: η^i 为排沙比; S_{in}^i 为水库入库含沙量, kg/m^3 ; S_{out}^i 为水库出库含沙量, kg/m^3 。

利用质量守恒方程,计算水库淤积量为:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^T (Q_{\text{in}}^i S_{\text{in}}^i - Q_{\text{out}}^i S_{\text{out}}^i) \Delta t / \rho' \quad (6)$$

式中: ΔV 为水库全年累计冲淤量, m^3 ; T 为总计算时长, d ; ρ' 为床沙干密度,此处取为 $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$ ^[21]。

3) 电量计算。根据水轮机出力公式计算发电量,即:

$$E^i = K \tilde{Q}_{\text{out}}^i (Z^i - Z^0) \Delta t \quad (7)$$

式中: E^i 为水轮机日发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; K 为水轮机出力系数,大型水电站出力计算中, $K = 8.5$; $\tilde{Q}_{\text{out}}^i$ 为小浪底过机流量, m^3/s ; Z^i 为1年中第 i 天坝前水位, m ; Z^0 为水轮机层安装高程,取 $Z^0 = 129.0 \text{ m}$ 。

2.1.2 目标函数与约束条件

1) 目标函数。采用2种不同的评价方式计算水库

的效益:

发电效益最大时的目标函数可表示为:

$$\max F = a \sum_{i=1}^T E^i = a \sum_{i=1}^T K \tilde{Q}_{\text{out}}^i (Z^i - Z^0) \Delta t \quad (8)$$

综合效益最大时的目标函数可表示为:

$$\begin{aligned} \max F = & a \sum_{i=1}^T E^i - b \Delta V = \\ & a \sum_{i=1}^T K \tilde{Q}_{\text{out}}^i (Z^i - Z^0) \Delta t - b \Delta V \end{aligned} \quad (9)$$

式中: F 为综合效益评价指标, 元; a 为小浪底水电站上网电价, 元/(kW·h); b 为水库建设总费用与水库总库容的比值, 元/ m^3 。根据相关资料^[23], 此处取 $a=0.37$ 元/(kW·h), $b=2.75$ 元/ m^3 。

2) 约束条件。水位约束: 小浪底水库属于年调节水库, 水位在汛期处于最低运用水位和汛限水位之间, 在非汛期不超过正常蓄水位, 即可表示为:

$$Z_{\min}^i \leq Z^i \leq Z_{\max}^i \quad (10)$$

式中, $Z_{\min}^i$ 、 $Z_{\max}^i$ 为1年中第 i 天坝前水位的下限和上限, m。

下泄流量约束: 下泄流量受泄水建筑物过流能力限制。不同时段, 在其过流能力范围内, 考虑防洪、防凌、减淤、供水、发电及生态需求进行下泄, 即:

$$Q_{\min}^i \leq Q_{\text{out}}^i \leq Q_{\max}^i \quad (11)$$

式中, $Q_{\min}^i$ 、 $Q_{\max}^i$ 为1年中第 i 天出库流量的下限和上限, m。

出力约束: 水轮机存在有最大的出力限制, 也存在最小的出力要求, 即:

$$N_{\min}^i \leq N^i \leq N_{\max}^i \quad (12)$$

式中: $N_{\min}^i$ 、 $N_{\max}^i$ 为1年中第 i 天水轮机出力的下限和上限, kW; N^i 为水轮机出力, kW。

非负约束: 所有变量均为非负数。

2.2 模型求解

研究中, 所考虑的问题只涉及小浪底水库, 不涉及多库联合调度, 且目标函数较为简单, 不会引起“维数灾”的问题。因此, 在求解模型的过程中, 采用动态规划逐日计算, 最终求得全年优化水位、下泄流量、累计发电量及出库含沙量过程。

动态规划(dynamic programming, DP)是求解离散系统最优控制问题的一种迭代程序计算方法, 求得的最优解满足Bellman原理的特性。该原理将多阶段决策控制问题通过一个基本的递推关系式, 转变为单阶段最优控制问题, 通过每个阶段的寻优, 找到整个系统的最优解^[24]。

动态规划的计算方法分为顺序法和逆序法2种, 其算法分为2个部分: 1) 根据Bellman原理逐步求得最优效益过程; 2) 根据求得的最优效益过程, 反推最

优下泄流量、水位、累计发电量、出库含沙量过程。本文采用逆序法进行计算, 求解步骤如下:

1) 按照时间尺度把水库调度的计算时段进行划分, 并对时段内可调库容进行离散化处理。

2) 水库的每个计算时段的库容变化仅与该时段初的库容和该时段的库区入流和出流有关, 与其他时段的库容或者水位变化没有直接关系, 具有无后效性。

3) 在调水调沙期, 需要重新根据当年调水调沙的实际情况, 设定调水调沙期下泄流量的上下限。一般情况下, 调水调沙期, $Q_{\max}^i=4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{\min}^i=2\,600\text{ m}^3/\text{s}$, 不同年份的不同调度时段需要根据当年来水来沙实际情况进行调整。

4) 根据出库流量的上下限 $Q_{\max}^i$ 、 $Q_{\min}^i$ 与不同水位的上下限 $Z_{\max}^i$ 、 $Z_{\min}^i$, 通过水量平衡方程, 重新计算全年水位的上下限 $Z_{\max}^i$ 、 $Z_{\min}^i$, 排除因为下泄流量的限制而在某个阶段无法达到的水位状态。

5) 根据动态规划得出的递推关系式为:

$$\begin{cases} f_i(V_i) = \max \{ f_{i+1}(V_{i+1}) + \\ F_i(V_i, Q_{\text{out}}^i), i = 1, 2, \dots, T; \\ f_{T+1}(V_{T+1}) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: f_i 为第 i 天至第 T 天的累计效益, 元; F_i 为第 i 天的优化效益, 元。逐步寻优, 求得每一阶段最优发电过程以及排沙过程。

6) 根据设定的初始水位, 求得递推到初始水位的整个计算时段的最大效益过程及排沙过程。

7) 根据求得的每一个阶段最大效益, 反推整个计算时段下泄流量过程、水位过程及排沙过程。

3 典型年优化调度方案

2015年是严重的枯水年, 总来水量只有 $183.80 \times 10^8\text{ m}^3$, 相较2000—2015年均来水量 $220.80 \times 10^8\text{ m}^3$ 减少了17%^[20]; 而无论是从小浪底水库泄水, 还是花园口断面来看, 2012年是小浪底水库运用以来水量最多的一年, 也是大流量水量较多的一年, 总来水量为 $358.20 \times 10^8\text{ m}^3$, 相较2000—2012年均来水量 $215.30 \times 10^8\text{ m}^3$ 增加了66%^[25]。故选取2015年为典型枯水年, 2012年为典型丰水年, 对2个典型年份的来水来沙过程及出库水沙情况进行分析。以三门峡出库流量、含沙量作为模型入口边界条件, 求解得出2个典型年份在2种优化目标下的优化调度方案, 并将优化方案的计算结果与实测值对比, 对实际调度提出优化建议。

3.1 典型年份实际调度情况

2015年是少水少沙年, 全年来水量和水库泄水量均较少。该年内小浪底水库总泄水量为 $252.90 \times$

10^8 m^3 , 相应的入库沙量仅为 $0.75 \times 10^8 \text{ t}$ [20], 但全年累计发电量较大, 为 $69.81 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 相较于后 10 a 多年平均发电量增加了 19%。图 2 为 2015 年小浪底水库实际入库、出库流量以及含沙量过程, 该年内最大和最小日均入库流量分别为 $2\,840$ 和 $25 \text{ m}^3/\text{s}$, 出库流量分别为 $3\,400$ 和 $150 \text{ m}^3/\text{s}$; 最大入库含沙量为 $176 \text{ kg}/\text{m}^3$, 全年无排沙。

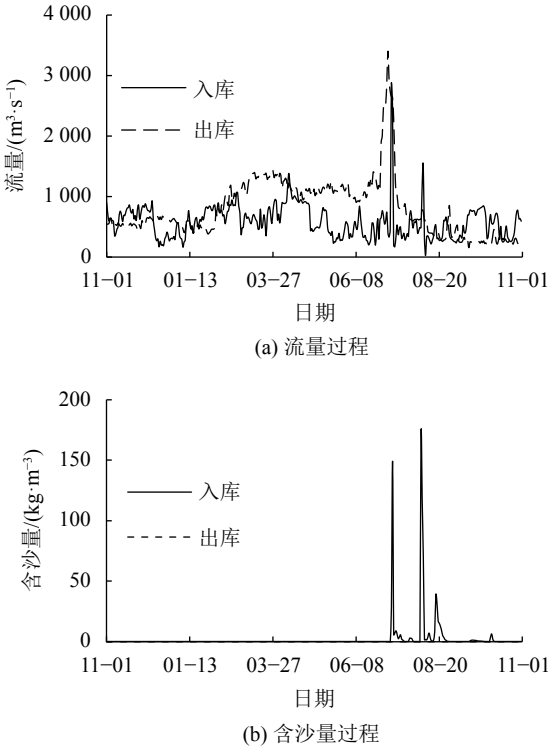


图 2 2015 年小浪底水库流量及含沙量过程实际调度结果
Fig. 2 Discharge and sediment concentration of the Xiaolangdi Reservoir based on the actual regulation results in 2015

2012 年为小浪底水库运用以来, 水库来水量和水库泄水量最多的一年。2012 年小浪底水库总泄水量为 $384.20 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相较 2000—2011 年每年均泄水量 $212.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加了 81%。同时, 水库排沙也较多, 为 $1.23 \times 10^8 \text{ t}$, 且全部集中于汛期, 相较 2000—2011 年年均 $0.61 \times 10^8 \text{ t}$ 增加 112% [25]。全年累计发电量较大, 为 $90.87 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 相较于后 10 a 多年平均发电量增加了 55%。图 3 为 2012 年小浪底水库实际入库、出库流量及含沙量情况, 该年内最大和最小日均入库流量分别为 $4\,560$ 和 $168 \text{ m}^3/\text{s}$, 出库流量分别为 $4\,330$ 和 $264 \text{ m}^3/\text{s}$; 最大入库含沙量为 $106 \text{ kg}/\text{m}^3$, 出库含沙量为 $165 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

3.2 发电效益最大的调度结果

图 4 及 5 分别给出以发电量最大为优化目标时, 2015 年及 2012 年优化调度方案的水位、下泄流量及累计发电量过程。

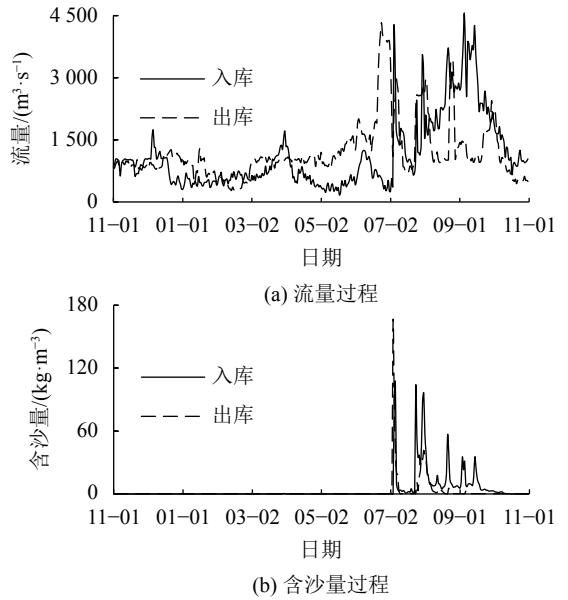


图 3 2012 年小浪底水库流量及含沙量过程实际调度结果
Fig. 3 Discharge and sediment concentration of the Xiaolangdi Reservoir based on the actual regulation results in 2012

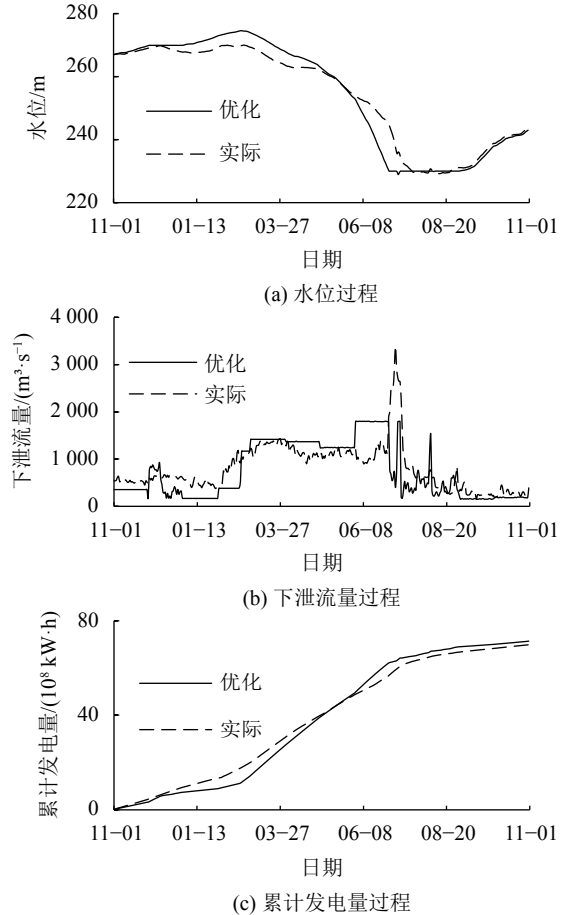


图 4 2015 年小浪底水库基于发电效益最大的优化调度结果
Fig. 4 Calculated results obtained from the optimal regulation scheme of the Xiaolangdi Reservoir in 2015 based on the rule of maximum power generation

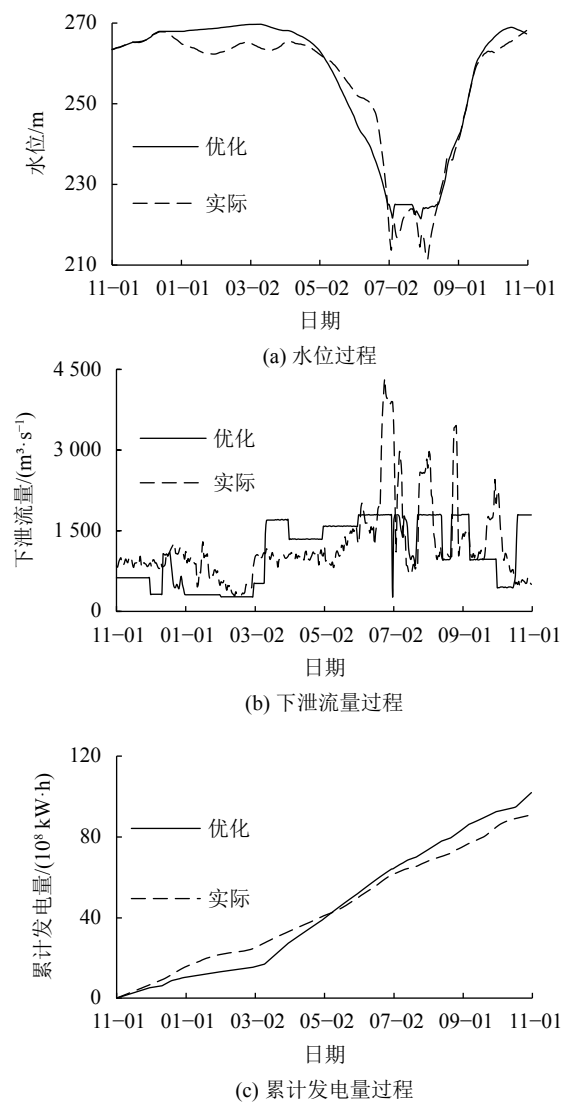


图 5 2012 年小浪底水库基于发电效益最大的优化调度结果
Fig. 5 Calculated results obtained from the optimal regulation scheme of the Xiaolangdi Reservoir in 2012 based on the rule of maximum power generation

2015 年优化方案中：小浪底水库非汛期最大下泄流量 $1\,802\text{ m}^3/\text{s}$ ，最小下泄流量 $167\text{ m}^3/\text{s}$ ；该时期最高水位 274.68 m ，最低水位 230.74 m 。汛期最大下泄流量 $1\,798\text{ m}^3/\text{s}$ ，最小下泄流量 $150\text{ m}^3/\text{s}$ ；最高水位 243.01 m ，最低水位 228.87 m 。全年优化发电量 $71.30\times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$ ，略高于实际年发电量 $69.81\times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

2012 年优化方案中，小浪底水库非汛期最大下泄流量 $1\,801\text{ m}^3/\text{s}$ ，最小下泄流量 $269\text{ m}^3/\text{s}$ ；该时期最高水位 269.77 m ，最低水位 226.03 m 。汛期最大下泄流量 $1\,803\text{ m}^3/\text{s}$ ，最小下泄流量 $262\text{ m}^3/\text{s}$ ；最高水位 269.00 m ，最低水位 221.53 m 。全年优化发电量 $102.15\times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$ ，相较实际年发电量 $90.87\times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$ 有一定的提高。

在 2 个典型年份非汛期，下泄流量相较实际过程，前期较小，后期较大，优化水位整体高于实际水位，

这与前期水库蓄水以满足后期供水灌溉及发电有关；在汛期，因不考虑大流量泄水冲沙，仅以发电效益最大为优化目标，故下泄流量最大均为 $1\,800\text{ m}^3/\text{s}$ ，即水轮机过机流量上限。水位过程相较实际过程均较平稳。2 个典型年份优化方案均实现了发电效益提升，但丰水年发电效益提升更明显。

3.3 综合效益最大的调度结果

图 6 和 7 分别为以综合效益最大为优化目标时，2015 年与 2012 年优化调度方案的水位、下泄流量及累计发电量过程。

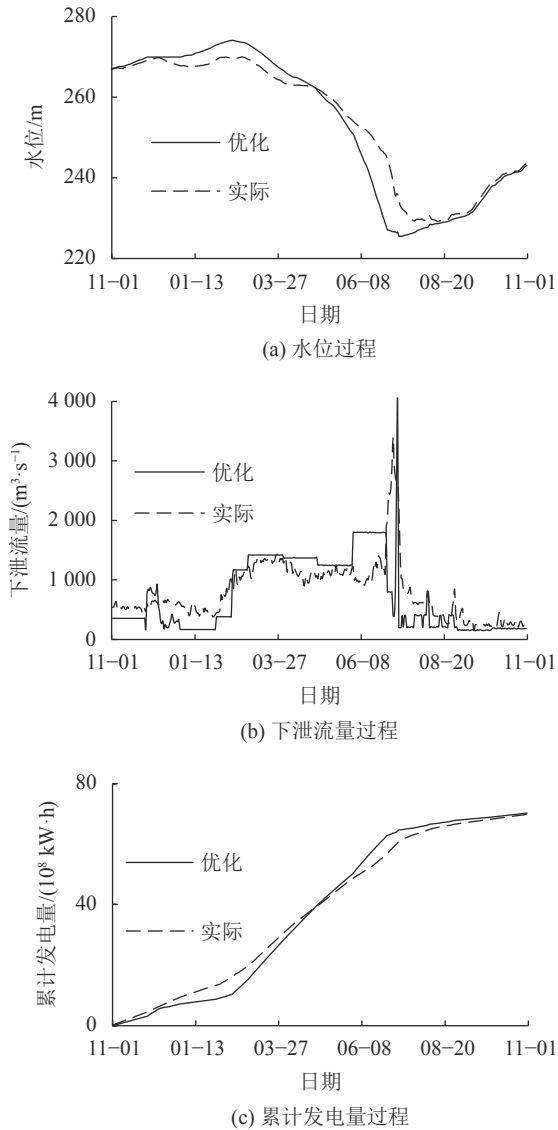


图 6 2015 年小浪底水库基于综合效益最大的优化调度结果
Fig. 6 Calculated results obtained from the optimal regulation scheme of the Xiaolangdi Reservoir in 2015 based on the rule of maximum integrated profits

2015 年优化方案中，小浪底水库非汛期最大下泄流量 $1\,803\text{ m}^3/\text{s}$ ，最小下泄流量 $167\text{ m}^3/\text{s}$ ；该时期最高水位 274.17 m ，最低水位 227.79 m 。汛期最大下泄流量 $3\,989\text{ m}^3/\text{s}$ ，最小 $150\text{ m}^3/\text{s}$ ；最高水位 243.07 m ，最

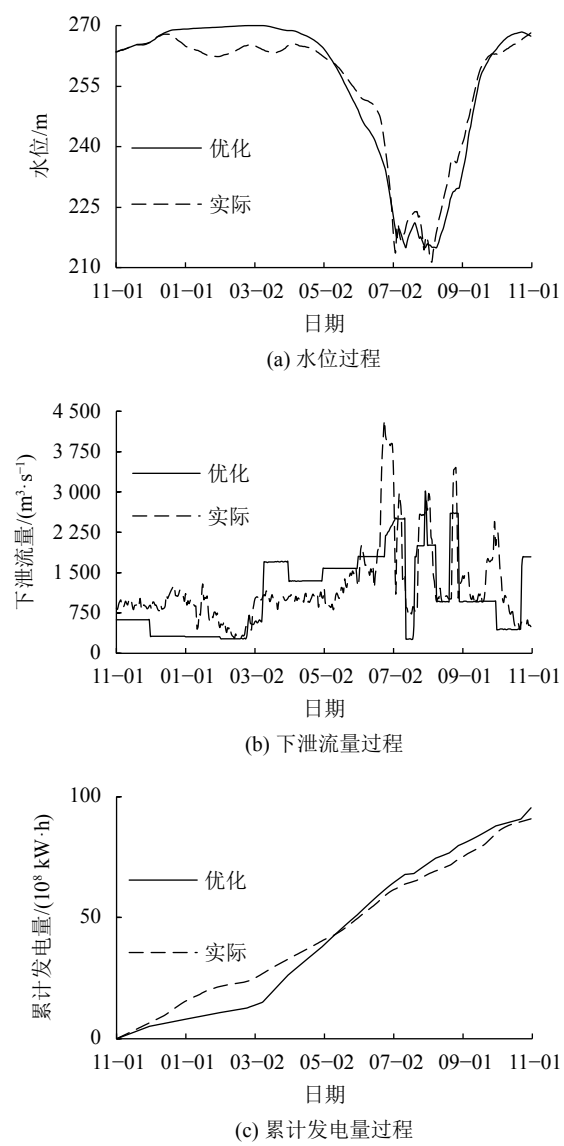


图 7 2012 年小浪底水库基于综合效益最大的优化调度结果
Fig. 7 Calculated results obtained from the optimal regulation scheme of the Xiaolangdi Reservoir in 2012 based on the rule of maximum integrated profits

低水位 225.42 m。2015 年优化发电量 $70.17 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 略高于实际的全年累计发电量 $69.81 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。全年累计排沙量为 $0.31 \times 10^8 \text{ t}$, 实际情况下全年无排沙。由于实际调度方案中未利用好枯水年份中汛期洪峰凑泄洪水冲沙, 因此, 相较于优化结果淤积量较大, 不利于减少坝前淤积和延长水库使用寿命。

表 1 2015 年和 2012 年实际效益与优化效益对比

Tab. 1 Comparison between actual benefits and optimized benefits in 2015 and 2012

	2015 年			2012 年		
	年发电量/ $(10^8 \text{ kW}\cdot\text{h})$	年排沙量/ (10^8 t)	经济效益/亿元	年发电量/ $(10^8 \text{ kW}\cdot\text{h})$	年排沙量/ (10^8 t)	经济效益/亿元
发电效益最大	71.30	0	24.18	102.15	0	27.82
综合效益最大	70.17	0.31	24.60	95.24	1.66	29.84
实际调度方案	69.81	0	23.63	90.87	1.30	27.23

2012 年优化方案中, 小浪底水库非汛期最大下泄流量 $2\,635 \text{ m}^3/\text{s}$, 最小下泄流量 $269 \text{ m}^3/\text{s}$; 该时期最高水位 270.00 m , 最低水位 226.22 m 。汛期最大下泄流量 $3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, 最小下泄流量 $256 \text{ m}^3/\text{s}$; 最高水位 268.42 m , 最低水位 215.00 m 。全年累计发电量 $95.24 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 略高于实际累计发电量 $90.87 \times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。全年累计排沙量 $1.66 \times 10^8 \text{ t}$, 相较实际情况 $1.30 \times 10^8 \text{ t}$ 有所提升。同时, 在汛前降低水位准备汛期防洪时, 实际调度方案存在水位对接不平稳、短时间内下泄流量偏大等问题。

在 2 个典型年份非汛期, 由于无排沙需求, 故与以发电效益最大为优化目标的调度方案较相似; 而在汛期, 当加入沙量调度后, 2015 年实现了一次大流量泄水冲沙, 2012 年相应泄洪流量虽整体低于实际泄洪流量, 但对水库淤沙持续冲刷时间较长, 故 2 个年份优化水位均整体低于实际水位。2 个典型年份优化发电量较实际情况有一定提升, 但提升幅度小于以发电效益最大为优化目标的结果; 优化排沙量均较实际情况有所增长, 尤其是在 2015 年, 相较于实际方案全年无排沙, 优化结果排沙比为 41.3% , 其增长较为显著。

3.4 优化方案结果比较

在 2 个典型年份中, 针对不同的目标函数, 各项实际效益与相应优化效益的对比如表 1 所示。从表 1 中可以看出:

1) 针对发电效益, 2 种优化后的调度方式较实际调度方式均实现了发电量的增长。特别是以发电量最大为优化目标时, 丰水年甚至可以实现年发电量的增长超过 10% , 而正是因为丰水年可支配利用的水资源较为丰富, 各项效益的增长幅度大于枯水年。但发电量最大的优化方式也存在不合理之处, 如在汛期不考虑排沙和水库淤积, 从而将某些时段原应是发电弃水流量分配到其他时段, 通过这种方式实现的发电量大量增加较为理想化, 并不符合黄河实际情况。

2) 对比以综合效应最大为目标的调度结果与水库实际调度结果可知: 前者仍实现了发电效益的提升, 并实现了较大流量的泄洪排沙; 与只考虑发电效益最大不同, 虽无法实现发电弃水的有效利用, 但可

以将这部分水资源化为泄洪排沙所需, 得出结果更加符合黄河实际情况。在保证发电效益有一定规模增长的同时, 兼顾了水库排沙减淤效益, 从最终收益上来看, 综合考虑水库发电效益与减淤效益可以实现获利最多, 因此更加值得采纳与推广。

3.5 优化建议

分析2个典型年份的优化调度结果, 针对实际调度方案提出如下优化建议:

1) 枯水年在保证汛期坝前水位不低于死水位的情况下, 也可进行1~2次水库排沙减淤。即优化洪水期水库调度, 在较短的洪水期内凑泄大流量洪水造峰, 尽可能使下泄水量大于入库水量, 减少水库蓄水, 同时利用洪水初期入库含沙量高的优势, “大水带大沙”, 减少水库淤积, 延长水库拦沙寿命。优化后的调度同时可以保证水库主汛期泄水量与排沙量均符合调水调沙需要, 防止下游河槽出现平水淤积。

2) 在丰水年, 可根据水文预报在汛前调整下泄方案, 保证水位的平稳下降, 做好与汛期防洪方案的对接, 避免出现2012年汛前水位陡降的情况, 即由于汛前调水调沙期前期下泄水量不足, 导致在后期虽然上游无洪水且水库无排沙, 但仍不得不进行持续大流量下泄, 以满足在汛期的防洪需要^[25]。同时, 随着小浪底水库投入运行, 下游河道行洪能力增强, 并且小浪底水库具备增加排沙的条件, 因此, 在汛期保证其他需求时, 可利用高含沙洪水实现较大规模排沙, 减少库区泥沙淤积^[21]。

4 结 论

为优化小浪底水库在不同典型年份的调度方案, 更好地兼顾水库排沙减淤与发电等各方面效益, 本文基于水库调度基本理论和排沙比经验公式, 建立小浪底水库水-沙-电耦合的优化调度模型, 模型采用2种不同优化目标, 通过动态规划进行求解, 最终得出2个典型年份优化方案, 与实际调度进行比较, 提出优化建议。得出主要结论如下:

1) 相较于发电效益最大的方案, 综合考虑水库排沙与发电效益的方案更接近实际情况, 避免了在调水调沙期只有发电洞泄水、没有排沙洞排沙的发生。例如: 2012年优化方案结果中, 相较发电效益最大的方案, 牺牲 6.91×10^8 kW·h的发电量换取 1.66×10^8 t的排沙量, 最终综合效益却有2.02亿元的增长, 论证了在汛期通过“大水带大沙”进行库区冲沙的必要性, 较好平衡了发电与排沙减淤之间的关系。

2) 相较实际调度方案, 综合效益最优的方案能够在枯水年实现大水冲沙, 例如: 在2015年通过凑泄洪水实现了 0.31×10^8 t的排沙量; 在丰水年能够实现

汛前与汛期平稳对接水位; 在汛前均无泄水冲沙情况下, 2012年实际调度方案汛前最大泄水流量达到 $4\,330 \text{ m}^3/\text{s}$, 综合效益最优的调度结果只有 $2\,365 \text{ m}^3/\text{s}$ 。综合效益最优的优化方案能够在丰水年和枯水年均获得全局均衡解。

然而, 除发电、排沙减淤目标外, 小浪底水库与黄河中游其他水库组成的水库群还承担了生态、供水灌溉等多方面的调度任务。选用较为简单的综合发电效益与排沙效益的目标函数, 可适用于小浪底单库调度; 但对于水资源严重短缺、水土流失严重、下游水患频发的黄河, 应采用多库联合调度的方式, 建立综合考虑防洪、发电、排沙减淤、生态以及供水灌溉的水库群多目标调度模型, 并探寻其高效求解方法, 后续将开展相关研究工作。

参考文献:

- [1] 张俊华, 陈书奎, 李书霞, 等. 小浪底水库拦沙初期水库泥沙研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2007.
- [2] Chen Jianguo, Zhou Wenhao, Sun Gaohu. Studies on operation scheme and water-sediment regulation of Xiaolangdi reservoir[J]. *Journal of Sediment Research*, 2016(4): 1-8. [陈建国, 周文浩, 孙高虎. 论黄河小浪底水库拦沙后期的运用及水沙调控[J]. *泥沙研究*, 2016(4): 1-8.]
- [3] Bai Tao, Kan Yanbin, Chang Jianxia, et al. Single- multi-objective operation models and its application on the regulation of water and sediment by cascade reservoirs[J]. *Advance in Water Science*, 2016, 27(1): 116-127. [白涛, 阚艳彬, 畅建霞, 等. 水库群水沙调控的单-多目标调度模型及其应用[J]. *水科学进展*, 2016, 27(1): 116-127.]
- [4] Zhang Yuxin, Feng Shangyou. Multi-objective programming model in reservoir operation and its application[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988(9): 19-27. [张玉新, 冯尚友. 水库水沙联调的多目标规划模型及其应用研究[J]. *水利学报*, 1988(9): 19-27.]
- [5] Peng Yang, Li Yitian, Zhang Hongwu. Multi-objective decision-making model of the reservoir water sand joint scheduling[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(4): 1-7. [彭杨, 李义天, 张红武. 水库水沙联合调度多目标决策模型[J]. *水利学报*, 2004, 35(4): 1-7.]
- [6] Qin Hui, Zhou Jianzhong, Xiao Ge, et al. Multi-objective optimal dispatch of cascade hydropower stations using strength pareto differential evolution[J]. *Advance in Water Science*, 2010, 21(3): 377-384. [覃晖, 周建中, 肖舸, 等. 梯级水电站多目标发电优化调度[J]. *水科学进展*, 2010, 21(3): 377-384.]
- [7] Tan Guangming, Gao Guoming, Wang Yuanjian, et al. Research and application of water-sediment co-scheduling model of reservoir based on reservoir-channels coupling relationships[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(7): 795-802. [谈广鸣, 郜国明, 王远见, 等. 基于水库-河道耦合关系的水库水沙联合调度模型研究与应用[J]. *水利学报*, 2018, 49(7): 795-802.]

- [8] Alexander Sarah, Yang Guang, Addisu Girmachew, et al. Forecast-informed reservoir operations to guide hydropower and agriculture allocations in the Blue Nile basin, Ethiopia[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2021, 37(2): 208–233.
- [9] Ji Changming, Li Chuangang, Liu Xiaoyong, et al. Research and application of dynamic programming algorithm in reservoir operation based on functional analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(1): 1–9. [纪昌明, 李传刚, 刘晓勇, 等. 基于泛函分析思想的动态规划算法及其在水库调度中的应用研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(1): 1–9.]
- [10] Zhao Zhipeng, Liao Shengli, Cheng Chuntian, et al. Discrete gradient progressive optimality algorithm for mid-long-term optimal operation of multi-reservoir system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(10): 1243–1253. [赵志鹏, 廖胜利, 程春田, 等. 梯级水电站群中长期优化调度的离散梯度逐步优化算法[J]. *水利学报*, 2018, 49(10): 1243–1253.]
- [11] Chen Senlin, Li Dan, Tao Xiangming, et al. Development and application of a compensative regulation linear programming model for reservoir flood-control[J]. *Advance in Water Science*, 2017, 28(4): 507–514. [陈森林, 李丹, 陶湘明, 等. 水库防洪补偿调节线性规划模型及应用[J]. *水科学进展*, 2017, 28(4): 507–514.]
- [12] Kumar D N, Reddy M J. Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation[J]. *Water Resources Management*, 2006, 20(6): 879–898.
- [13] Chen Xiuxiu, Ye Sheng, Hong Yanyan, et al. The construction and application of objective function for water and sediment operation of major reservoirs in the Yellow River[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(3): 727–739. [陈秀秀, 叶盛, 洪艳艳, 等. 黄河骨干水库水沙调度的目标函数构建和应用[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(3): 727–739.]
- [14] Bai Tao, Kan Yanbin, Chang Jianxia, et al. Fusing feasible search space into PSO for multi-objective cascade reservoir optimization[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 51: 328–340.
- [15] Shaw A R, Smith S H, LeBoeuf E J, et al. Hydropower optimization using artificial neural network surrogate models of a high-fidelity hydrodynamics and water quality model[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(11): 9444–9461.
- [16] Zou Qiang, Wang Xuemin, Li Anqiang, et al. Optimal operation of flood control for cascade reservoirs based on parallel chaotic quantum particle swarm optimization[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(8): 967–976. [邹强, 王学敏, 李安强, 等. 基于并行混沌量子粒子群算法的梯级水库群防洪优化调度研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(8): 967–976.]
- [17] Yang Guang, Guo Shenglian, Liu Pan, et al. PA-DDS algorithm for multi-objective reservoir operation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(6): 789–797. [杨光, 郭生练, 刘攀, 等. PA-DDS算法在水库多目标优化调度中的应用[J]. *水利学报*, 2016, 47(6): 789–797.]
- [18] Zhang Yongchuan, Li Fusheng, Du Yufu, et al. The optimization of hydropower station reservoir dispatching[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1981, 9(6): 49–56. [张勇传, 李福生, 杜裕福, 等. 水电站水库调度最优化[J]. *华中工学院学报*, 1981, 9(6): 49–56.]
- [19] Zhang Ming, Ding Yi, Yuan Xiaohui, et al. Study of optimal generation scheduling in cascaded hydroelectric stations[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34(6): 90–92. [张铭, 丁毅, 袁晓辉, 等. 梯级水电站水库群联合发电优化调度[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(6): 90–92.]
- [20] Wang Ting, Wang Yuanjian, Qu Shaojun, et al. Deposition in Xiaolangdi Reservoir since operation[J]. *Yellow River*, 2018, 40(12): 1–3. [王婷, 王远见, 曲少军, 等. 小浪底水库运用以来库区泥沙淤积分析[J]. *人民黄河*, 2018, 40(12): 1–3.]
- [21] 张晓华, 李小平, 王婷, 等. 黄科院年度咨询及跟踪研究 2014—2015 年年度咨询简要报告[R]. 郑州: 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 2015.
- [22] Zhang Shuai, Xia Junqiang, Li Tao. Study on flood-season sediment delivery ratio of the Xiaolangdi Reservoir[J]. *Yellow River*, 2018, 40(1): 7–11. [张帅, 夏军强, 李涛. 小浪底水库汛期排沙比研究[J]. *人民黄河*, 2018, 40(1): 7–11.]
- [23] Wu Leping. Study on optimal regulation of water and sediment in Xiaolangdi Reservoir considering sediment discharge and power generation benefits[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019 [吴乐平. 兼顾排沙与发电效益的小浪底水库水沙优化调度研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.]
- [24] Richard Bellman. Dynamic programming and stochastic control processes[J]. *Information and Control*, 1958, 1(3): 228–239.
- [25] 孙赞盈, 彭红, 田世民, 等. 2012年黄河下游河道冲淤演变分析[R]. 郑州: 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 2013.

(编辑 张琼)

引用格式: Xia Junqiang, Chen Yijin, Deng Shanshan, et al. Coupled modeling of flow-sediment transport and power generation in the Xiaolangdi Reservoir[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(6): 113–121. [夏军强, 陈奕锦, 邓珊珊, 等. 黄河小浪底水库水-沙-电耦合过程计算[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(6): 113–121.]