

考虑生态流量的梯级水库主从博弈优化调度研究

张启凡^{1,2,3}, 胡铁松³, 戴凌全^{1,2}, 曹光荣^{1,2}, 姜伟^{1,2}

(1. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 湖北 武汉 430014; 2. 长江经济带生态环境国家工程研究中心, 湖北 武汉 430014; 3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对传统集中式多目标优化范式未充分考虑多利益相关主体博弈关系对水库调度决策的影响, 导致难以保障河道生态流量的现实问题, 设置了共同保障和单独保障两种生态流量保障情景, 构建了发电服从防洪调度原则下的梯级水库主从博弈优化调度模型, 并在拉萨河流域旁多-直孔梯级水库开展了实例研究。结果表明: 梯级水库在共同保障生态流量下综合效益最优, 仅由直孔水库单独保障生态流量造成调度效益难以凸显, 其中防洪效益降低4.35%, 整体发电效益降低1.66%; 效益降低的主要原因在于单库保障模式下枯水期旁多水库倾向于蓄水而减少下泄, 导致直孔水库过度下降水位来保障生态流量。

关键词: 梯级水库优化调度; 防洪-生态-发电; 生态流量; 主从博弈; 拉萨河流域

中图分类号: TV697.1; TV213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)05-0069-09

Research on leader-follower game optimal operation of cascade reservoirs considering ecological flow//ZHANG Qifan^{1,2,3}, HU Tiesong³, DAI Lingquan^{1,2}, CAO Guangrong^{1,2}, JIANG Wei^{1,2} (1. Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, China; 2. National Engineering Research Center of Eco-Environment Protection for Yangtze River Economic Belt, Wuhan 430014, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In response to the practical problem of insufficient consideration of the impact of multi stakeholder game relationships on reservoir operation decisions in the traditional centralized multi-objective optimization paradigm, which makes it difficult to guarantee the ecological flow of rivers, two scenarios of joint guarantee and individual guarantee ecological flow were set up. A leader-follower game optimal operation model for cascade reservoirs under the principle of power generation obeying flood control scheduling was established, and a case study was conducted on Pangduo-Zhikong cascade reservoirs in the Lhasa River Basin. The results indicate that cascade reservoirs have the optimal comprehensive benefits under the joint guarantee of ecological flow. It is difficult to highlight the operation benefits under the ecological flow guaranteed by the Zhikong Reservoir alone, in which the flood control benefits are reduced by 4.35%, and the power generation benefits are reduced by 1.66%. The main reason for the decrease in benefits is that under the single reservoir guarantee mode, the Pangduo Reservoir tends to retain water and reduce discharge during the dry season, which leads to the excessive decline in the water level of the Zhikong Reservoir to ensure the ecological flow.

Key words: cascade reservoir optimal operation; flood control-ecology-power generation; ecological flow; leader-follower game; Lhasa River Basin

水库调度是实现水资源优化配置、满足人类多种需求的重要途径^[1]。近年来大型综合性水库比例逐渐上升, 开始形成梯级水库等水库群系统^[2-3]。为强化流域水库群联合调度, 加强跨区域、跨部门水资源丰枯调剂, 不断夯实水生态水资源等综合效益保障能力, 要求水库运行目标从单一防洪或兴利需

求向防洪、供水、航运、生态、发电等多重需求兼顾的多元化开发利用转变^[4-5]。每种目标背后是各自对应的决策主体, 这些主体应参与调度规则的制定和实施, 确保实现各自调度目标, 导致水库决策结构呈现多元化趋势, 相互间的博弈关系愈加复杂^[1,6]。因此, 识别各利益方的互馈联系, 分析各利益主体参

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2024AFB527); 湖北省重点研发计划项目(2023BCB110); 中国长江三峡集团有限公司科技攻关项目(202303298); 国家自然科学基金项目(91647204)

作者简介: 张启凡(1996—), 男, 工程师, 博士, 主要从事水库生态调度研究。E-mail: zhang_qifan@ctg.com.cn

通信作者: 胡铁松(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事水库生态调度研究。E-mail: tshu@whu.edu.cn

与水库调度决策模式对河流生态环境用水的影响,是实现流域水资源综合利用、确保河道生态健康的基础和关键。

随着水库群系统日益复杂,水库优化调度理论研究整体上同步呈现复杂化发展趋势,研究对象从单库拓展至多库,研究方法从单目标发展至多目标以及博弈理论。以往研究倾向于将水库防洪、生态及兴利等目标概化为多目标决策问题,并运用多目标优化(multi-objective optimization, MOP)为代表的优化算法和多目标决策方法获得最优策略^[7]。但其构建范式仍然是单一决策主体的集中式决策(centralized decision-making, CDM),基于集中理性假设,即假设所有水库管理都完全服从一个集中式决策者,由这个集中式决策者同时为所有水库做出整体效益最优的决策^[8]。然而实际的管理结构可能无法达到集中决策体制下的各利益相关者的利益重分配效果,表现为调度理论与实践间的偏差^[6,9-11]。这种偏差广泛存在于调度实践中,比如在水库防洪问题上,已有研究指出汛限水位动态控制的重要性及必要性,然而截至2015年,近10万座已建成水库中只有部分水库实际应用了分期汛限水位^[6]。在河流生态流量方面,尽管理论上已经开展了大量生态调度研究^[12-14],实践上全国各流域重点河湖已设置生态流量控制断面,但针对重点河湖120个生态流量控制断面的评价结果表明,由于工程调度运行机制不完善,少数控制断面生态流量仍无法满足^[15]。对70个主要河流控制断面的评价结果同样发现,部分断面生态基流不达标的原因仍是工程的调度方式^[16]。水库调度是多利益相关主体依据权责关系、调度目标的紧迫性及重要性,通过多方会商得到的结果^[17],而以多目标优化为代表的集中式调度模型结果代表目标权衡后系统理论上最理想的表现,可以概述管理结构或是治理机制改进的上限,而非易于应用于实际调度中的优化方式^[18-19]。

博弈论可以很好地描述水库调度这类多利益相关者参与的、相互之间存在竞争合作博弈关系的决策模式^[20]。博弈论可粗略分为合作博弈和非合作博弈两大类,分别从不同途径解析多利益主体参与的水库调度问题。合作博弈的基础在于博弈所有参与主体通过有约束力的协议相互合作,使多主体决策各自利益最优转化为单主体集中式决策联盟总利益最大^[21]。合作博弈将多主体多目标问题转化为单主体单目标问题,其核心难点并非求解而是合作剩余效益分配方案的设计,即合作博弈的解的概念,当前常用的求解方法有核仁法、Nash-Harsanyi讨价

还价法以及Shapley值法等^[22]。非合作博弈中,参与主体间不存在靠有约束力的协议而形成的联盟,而是彼此决策相互影响下的个体理性决策问题,故非合作博弈更广泛地存在于实际水库调度管理中^[20]。水库调度多利益主体之间关系决定了其非合作博弈模式,如果各利益主体之间地位均等且决策没有优先级顺序,即认为在同一层次上进行平等的Nash博弈,常见于供水调度中的各用户户^[23]、竞价上网中的各水库发电调度^[24]、跨界河流上下游协调调度^[25]等问题。如果存在地位差别或优先级顺序,比如“兴利服从防洪,发电服从供水”的调度原则,即表现为层级式的Stackelberg博弈^[26]。Stackelberg博弈在数学模型中常表示为主从二层规划模型(bi-level programming, BP),上层决策者被称为领导者(leader),下层决策者被称为追随者(follower),并由决策顺序保证了主从关系,近年来开始用于水库优化调度建模中,包括跨流域调水^[26]、优先性用水的供水调度^[27]、流域生态调度^[28]以及水库汛末提前蓄水^[29]等领域。

本文综合考虑河道生态流量的保障途径,识别防洪、生态和发电多利益相关主体参与梯级水库调度决策形成的博弈互馈关系,对不同博弈结构开发主从二层规划模型,设计模型求解算法,通过设置梯级水库下游河道断面生态流量的保障主体,将生态流量保障需求作为模型约束纳入梯级水库调度策略优化中,以量化河道生态流量保障模式对水库调度决策及效益的影响区间,为保障生态流量的梯级水库多利益主体博弈优化调度问题提供量化分析框架。

1 梯级水库多利益主体博弈模型构建与求解

1.1 多利益主体博弈关系解析

图1为流域中防洪-生态-发电梯级水库调度决策的管理结构概化图。由图1可见,对防洪-生态-发电综合利用梯级水库而言,调度决策过程中主要存在两类竞争合作博弈关系:水库防洪管理部门与发电运行部门间的博弈关系和梯级水库下游断面生态流量保障模式,分别对应图1中的联系①和②。对于联系①中水库防洪管理部门与发电运行部门间的博弈关系,根据《水库调度规程编制导则》要求,发电需要服从防洪,即对应主从二层规划模型,此时防洪和发电分别为构成二层规划结构上下层决策者各自的优化目标。对于联系②中梯级水库下游断面生态流量保障模式,可能存在两类管理结构及建模模式:下游断面生态流量由梯级水库A和B同时保

障,此时生态流量是各个水库发电运行部门共同的约束条件;由距离下游断面最近的水库 B 单独保障,此时生态流量是距离最近的水库 B 发电运行部门的约束条件。

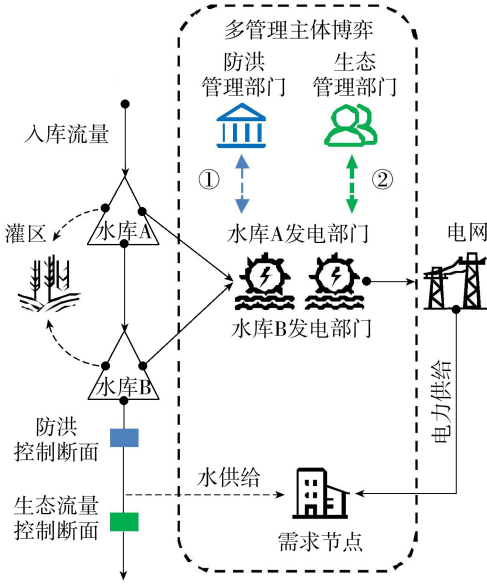


图1 防洪-生态-发电梯级水库调度决策的管理结构概化图

Fig. 1 Management structure generalization graph of flood control-ecological-power generation cascade reservoir scheduling decision making

1.2 目标函数与决策变量

构建考虑生态流量的主从二层优化调度模型,纳入防洪、生态和发电 3 个调度目标及对应的管理主体,采用调度图描述调度决策,具体的调度策略以水库水位(库容)作为状态变量,利用时段初状态变量所处区域及其对应的操作规则进行水库调度决策。

上层防洪管理部门决策目标是尽量降低洪水风险,其内涵是在刚性保证大坝自身安全的基础上,尽可能降低梯级水库下游防洪对象的洪水风险。梯级水库防洪损失条件风险价值的物理含义为下游防洪控制点超过水文频率 α (对应于置信水平) 的洪水洪量,如果 $\alpha=0.01$,条件风险价值即为下游防洪控制断面超过百年一遇洪水的洪量^[30-31],计算公式为

$$C_{\alpha} = \frac{\int_{F_{\alpha}}^{F_{\max}} L(x_i, \theta) f[L(x_i, \theta)] dL}{1 - \alpha} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

其中 $L(x_i, \theta) = w_i(x_i, \theta)$ 式中: C_{α} 为条件风险价值; x_i 为水库 i 的汛限水位值; m 为下游防洪控制断面对应的上游水库个数; θ 为设计洪水频率; $L(\cdot)$ 为损失函数,表示为防洪控制点水文频率超过 α 的洪量; $w_i(\cdot)$ 为下游防洪控

制点的洪量; $f(\cdot)$ 为损失分布的概率密度函数; F_{α} 、 F_{\max} 分别为对应水文频率 α 的损失函数值和损失函数最大值, α 取决于防洪部门风险承受能力, $\alpha \in [0, 1]$ 。

上层模型防洪目标 F_F 为水库调度前后防洪损失条件风险价值最低:

$$F_F: \sum_{t=1}^T \Delta C_{k, \alpha} = \sum_{t=1}^T (C_{N, k, \alpha} - C_{C, k, \alpha}) \quad (2)$$

式中: $\Delta C_{k, \alpha}$ 、 $C_{N, k, \alpha}$ 、 $C_{C, k, \alpha}$ 分别为下游防洪控制断面 k 的防洪损失条件风险价值变化量、无水库调蓄天然来水情况下的防洪损失条件风险价值以及经梯级水库调蓄后的防洪损失条件风险价值; T 为调度总时段数。

防洪管理部门决策变量为 $x = \{x_A, x_B\}$, 其中 $x_A = \{z_A, q_A\}$, 表示水库 A 的汛期逐旬分期汛限水位 z_A 和相对应的控泄流量 q_A ; $x_B = \{z_B, q_B\}$, 表示水库 B 的汛期逐旬分期汛限水位 z_B 和相对应的控泄流量 q_B 。

下层模型发电目标 $f_{H, A}$ 和 $f_{H, B}$ 为水库发电量最大:

$$f_{H, A}: E_{A, \text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^T N_{A, t} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^T \eta_A H_{A, t} q_{A, t} \quad (3)$$

$$f_{H, B}: E_{B, \text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^T N_{B, t} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^T \eta_B H_{B, t} q_{B, t} \quad (4)$$

式中: $E_{A, \text{avg}}$ 、 $E_{B, \text{avg}}$ 分别为水库 A、B 的多年平均发电量; n 为年时段数; $N_{A, t}$ 、 $N_{B, t}$ 分别为 t 时段水库 A、B 的出力; η_A 、 η_B 分别为水库 A、B 的电站综合出力系数; $H_{A, t}$ 、 $H_{B, t}$ 分别为 t 时段水库 A、B 的发电净水头; $q_{A, t}$ 、 $q_{B, t}$ 分别为 t 时段水库 A、B 的发电流量。

发电运行部门决策变量为 $y = \{y_A, y_B\}$, 即水库 A、B 发电调度图的逐月控制水位。

1.3 约束条件

1.3.1 上层模型防洪目标主要约束条件

a. 防洪安全约束:

$$Z_i \leq Z_{i, \max} \quad (5)$$

式中: Z_i 、 $Z_{i, \max}$ 分别为水库 i 的最高水位和坝前最高安全水位。

b. 汛限水位约束:

$$Z_{Di} \leq z_i \leq Z_{Ni} \quad (6)$$

式中: z_i 、 Z_{Ni} 和 Z_{Di} 分别为水库 i 的分期汛限水位、正常蓄水位和死水位。

1.3.2 下层模型发电目标主要约束条件

a. 水量平衡约束:

$$V_{i, t+1} = V_{i, t} + (Q_{li, t} - Q_{oi, t}) \Delta t - L_{i, t} \quad (7)$$

$$Q_{oi, t} = q_{i, t} + Q_{si, t} \quad (8)$$

$$Q_{la, t} = Q_{N, t} - Q_{u, t} - Q_{D, t} \quad (9)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为 t 时段初及 $t+1$ 时段初水库 i 的蓄水量; $Q_{i,t}$ 、 $Q_{oi,t}$ 分别为 t 时段水库 i 的入库流量和出库流量; $q_{i,t}$ 、 $Q_{Si,t}$ 分别为 t 时段水库 i 的发电流量和弃水流量; $L_{i,t}$ 为 t 时段水库 i 的蒸发渗漏损失; Δt 为时间步长; $Q_{IA,t}$ 、 $Q_{N,t}$ 、 $Q_{U,t}$ 、 $Q_{D,t}$ 分别为 t 时段上游水库 A 的入库流量、天然来水流量、城乡综合取水流量和灌溉取水流量。

b. 上下游水库关联约束:

$$Q_{IB,t} = Q_{OA,t} + Q_{J,t} \quad (10)$$

式中: $Q_{IB,t}$ 、 $Q_{OA,t}$ 分别为下游水库 B 的入库流量和上游水库 A 的出库流量; $Q_{J,t}$ 为 t 时段的区间流量。

c. 库容约束:

$$V_{i,t,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t,\max} \quad (11)$$

式中 $V_{i,t,\min}$ 、 $V_{i,t,\max}$ 分别为 t 时段水库 i 蓄水量的下限和上限。

d. 水轮机约束:

$$q_{i,t,\min} \leq q_{i,t} \leq q_{i,t,\max} \quad (12)$$

式中 $q_{i,t,\min}$ 、 $q_{i,t,\max}$ 分别为 t 时段水库 i 发电流量的下限和上限。

e. 出力约束:

$$N_{i,\min} \leq \eta_i H_{i,t} q_{i,t} \leq N_{i,\max} \quad (13)$$

式中: $N_{i,\min}$ 、 $N_{i,\max}$ 分别 t 时段水库 i 的最小出力和最大出力; η_i 为水库 i 的电站综合出力系数; $H_{i,t}$ 为水库 i 的发电净水头。

f. 水位变幅约束:

$$\Delta Z_i \leq \Delta Z_{i,\max} \quad (14)$$

式中 ΔZ_i 、 $\Delta Z_{i,\max}$ 分别为单位时段内水库 i 的水位变化量和最大水位变幅。

g. 出力调度线位置约束:

$$Z_{Di} \leq y_i \leq Z_{Li} \quad (15)$$

式中: y_i 为水库 i 出力调度线位置; Z_{Di} 、 Z_{Li} 分别为水库 i 蓄水位的下限和上限。

h. 水库下泄生态基流约束:

$$Q_i \geq Q_{eq,i} \quad (16)$$

式中: Q_i 为水库 i 出口断面流量; $Q_{eq,i}$ 为水库 i 出口断面的生态基流。

i. 重要控制断面生态流量约束。将生态因素选为核心约束,即梯级水库生态管理部门的目标,保证下游重要生态控制断面的生态流量。

$$\bar{Q} \geq \bar{Q}_{eq} \quad (17)$$

式中 \bar{Q} 、 \bar{Q}_{eq} 分别为梯级水库下游重要控制断面的实际流量和生态基流。

1.4 情景设计与求解算法

依据对梯级水库多利益主体间博弈机制的解析以及构建的目标函数、决策变量和约束条件,定义了两种建模情景:情景 1 水库防洪部门与发电部门间

为领导与服从关系,且梯级水库共同保障下游断面生态流量;情景 2 水库防洪部门与发电部门间为领导与服从关系,且下游水库单独保障下游断面生态流量。

由于梯级水库防洪任务和发电之间构成具有优先级的领导与服从关系,可描述为主从博弈的二层模型:

$$J_{\text{二层}} = \{ \text{上层:} [\max(F_F)], \text{下层:} [\max(f_{H,A}, f_{H,B})] \} \quad (18)$$

情景 1 下,生态流量约束为两库发电部门的耦合约束条件 $\bar{Q} \geq \bar{Q}_{eq}$,梯级水库相互合作来保障下游断面生态流量,进行集中式联合优化调度,其下层发电目标转化为两库总发电量最优,与上层防洪目标构成一主一从二层模型:

$$J_{\text{情景1}} = \{ \text{上层:} [\max(F_F)], \text{下层:} [\max(f_{H,A} + f_{H,B})] \} \quad (19)$$

$$\text{s. t. } \bar{Q}_{y_A, y_B} \geq \bar{Q}_{eq} \quad (20)$$

情景 2 下,生态流量约束为该水库的单一约束条件 $\bar{Q} \geq \bar{Q}_{eq}$,梯级水库之间没有合作联合调度空间,下层发电部门之间构成无耦合约束的均衡问题,两库进行分布式优化调度,下层发电目标为两库各自发电量最优,与上层防洪目标构成一主二从二层模型:

$$J_{\text{情景2}} = \{ \text{上层:} [\max(F_F)], \text{下层:} [\max(f_{H,A}, f_{H,B})] \} \quad (21)$$

$$\text{s. t. } \bar{Q}_{y_B} \geq \bar{Q}_{eq} \quad (22)$$

采用序列主从种群混合进化粒子群 (serial master-slaver swarms shuffling evolution algorithm based on particle swarm optimization, SMSE-PSO) 算法进行分层优化求解^[32],求解步骤为:①上层防洪模型确定一组初始分期汛限水位后传递给下层发电模型;②基于 SMSE-PSO 算法对下层发电模型进行优化求解,确定一组出力控制线,使得在上层给定的分期汛限水位下水库发电效益达到最优,将最优出力控制线传递给上层;③基于 SMSE-PSO 算法优化求解上层防洪模型,调整分期汛限水位使之在给定的出力控制线条件下防洪效果最佳,将调整后的分期汛限水位传递给下层模型;④反复迭代,直至满足设定的停止条件。具体流程如图 2 所示。

2 实例应用

2.1 梯级水库概况

拉萨河位于喜马拉雅山脉北侧的青藏高原中部,是雅鲁藏布江五大支流中最大的一级支流,流域

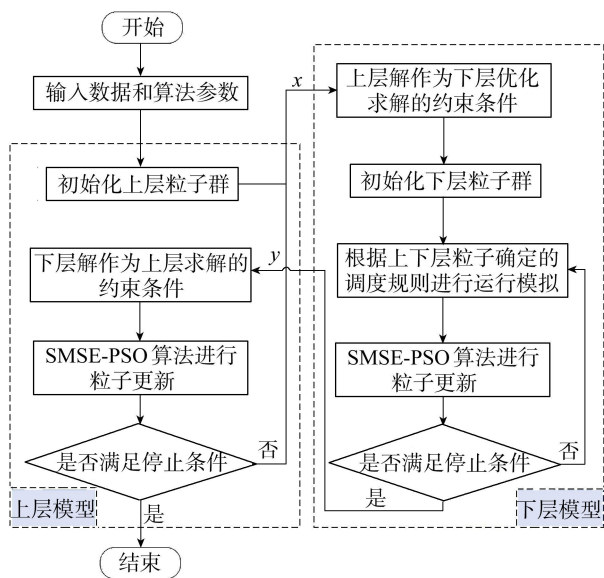


图2 SMSE-PSO 算法求解流程

Fig. 2 Flowchart of SMSE-PSO algorithm

($29^{\circ}18'N \sim 31^{\circ}16'N$ 、 $90^{\circ}5'E \sim 93^{\circ}31'E$) 地处雅鲁藏布江中游区域的左岸(图3)。拉萨河流域面积 3.18 万 km^2 , 平均海拔超过 4 500 m, 多年平均年径流量为 109.72 亿 m^3 , 干流河道全长 568 km, 干流段水能蕴含量 1 720 MW, 目前建有旁多水库和直孔水

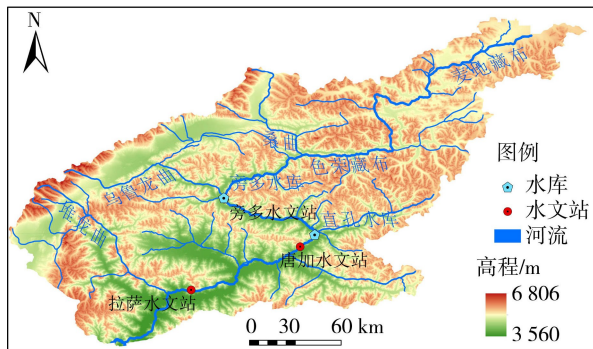


图3 拉萨河流域概况

Fig. 3 Overview of the Lhasa River Basin

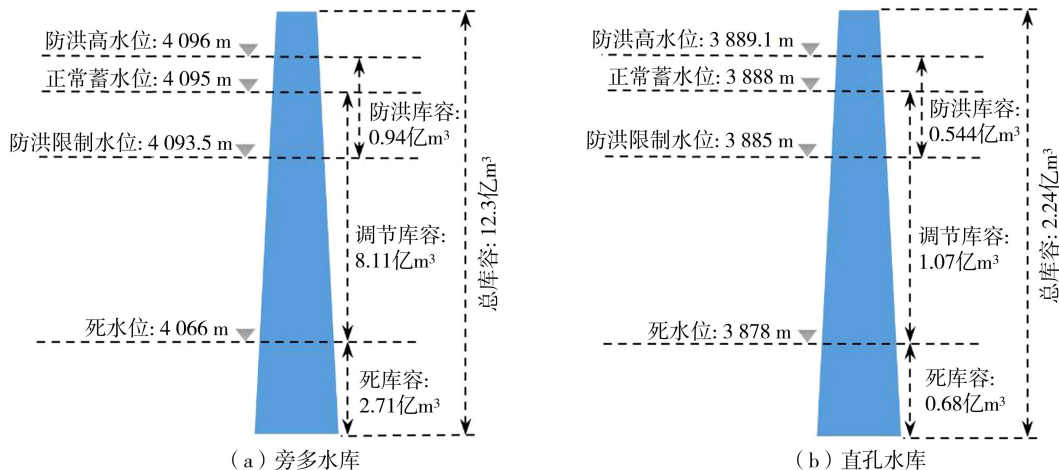


图4 旁多水库和直孔水库主要特征参数

Fig. 4 Main characteristic parameters of Pangduo Reservoir and Zhikong Reservoir

库组成的梯级水库系统^[33]。

旁多水库位于拉萨河干流中游,是具有防洪、供水、灌溉、发电等多目标开发的大(I)型水利枢纽工程,总库容为 12.3 亿 m^3 , 多年平均径流量为 62.1 亿 m^3 , 电站装机容量 160 MW, 保证出力为 32 MW, 是水电梯级开发的龙头水库^[34]。直孔水库地处拉萨河干流中下游的交界处,是兼顾防洪和发电功能的大(II)型水利枢纽工程,总库容 2.24 亿 m^3 , 电站装机容量为 100 MW, 保证出力为 21.35 MW, 距旁多水利枢纽约 61 km^[34]。两库除自身工程安全外,主要防洪目标均为下游拉萨市防洪需求,生态流量需求主要是拉萨水文站断面生态基流不小于 39.2 m^3/s ^[35]。旁多水库和直孔水库的主要特征参数如图 4 所示。

目前,旁多水库和直孔水库调度运行依然由各自主体单独管理,尚未建立联合调度合作机制。《拉萨河流域综合规划环境影响报告书》指出下游河道的生态环保目标须服从国家生态环境部及西藏环保厅的管理,但并未明确最关键的拉萨断面生态流量的具体保障措施与保障主体,导致拉萨断面生态流量的月保障率由梯级水库建设前的 99% 下降至 63.9%, 保障率较低的时段主要集中在每年 12 月至次年 4 月的枯水期。

2.2 不同情景下的调度效益分析

以旁多-直孔梯级水库 1956—2003 年长系列天然入库以及区间入流径流作为模型输入,以日为计算步长,对两种博弈情景进行优化求解。优化求解结果表明两种情景下均能够完全保障下游拉萨断面的生态流量,但梯级水库防洪和发电效益表现出显著差异。情景 1 下,梯级水库综合效益最优,拉萨断面超百年一遇洪水洪量降低 63.348 亿 m^3 , 梯级水库年均总发电量为 10.852 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 其中旁多水库

年均发电量 6.624 亿 kW·h,直孔水库年均发电量为 4.228 亿 kW·h。情景 2 下,直孔水库多年平均发电量降低 6.01%,旁多水库多年平均发电量略微改善,提升 0.23%,梯级水库防洪效益损失 4.35%。将生态流量需求分配给直孔水库消除了旁多水库发电部门与生态部门之间的竞争关系,改善了旁多水库发电效益。但直孔水库库容相对较小,仅由其单独保障生态流量对其发电效益影响较大,旁多水库发电量的增加不足以抵消直孔水库发电量的减少,导致梯级水库总年均发电量降低 1.66%。

2.3 不同情景下的调度策略分析

进一步分析不同情景下的调度效益存在差异性的原因,对比情景 1 和情景 2 的调度策略,旁多水库和直孔水库汛期逐旬分期汛限水位如图 5 所示。由图 5 可见,由直孔水库单独保障生态流量模式下,旁多水库汛限水位略高,而直孔水库汛限水位较低,说明此模式下直孔水库对防洪任务承担更多。而此时梯级水库防洪效益下降,这说明生态流量保障模式由两库合作保障变为直孔水库单独保障过程中,防洪任务表现出转移的迹象,导致梯级水库防洪效益降低^[36]。

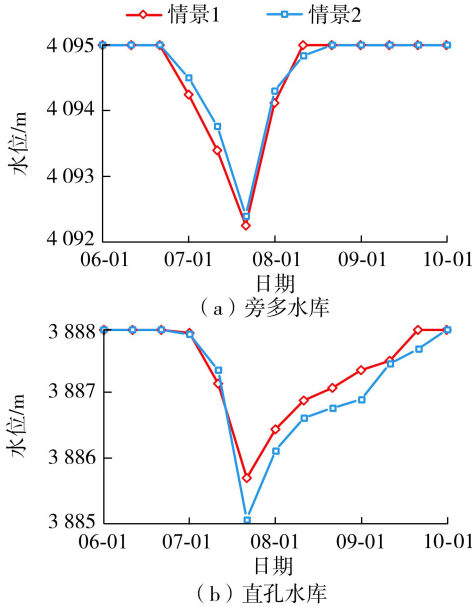


图 5 不同情景下旁多水库和直孔水库汛期的逐旬分期汛限水位

Fig. 5 Flood limit water level of Pangduo Reservoir and Zhikong Reservoir in flood season under different scenarios

图 6 和图 7 为不同情景下旁多水库和直孔水库的发电调度过程,图中折线之间的面积代表发电出力, N_b 为水库保证出力, N_y 为水库装机容量出力。由图 6 可见,在情景 1 下,枯水期(12 月到次年 4 月)旁多水库降低出力区明显更小,这意味着在枯水期,旁多水库可以加大下泄量,补偿直孔水库,保证直孔水库水量充足,以保障生态流量。由图 7 可见,在情景 2 下,在汛期及汛期结束后(6—12 月)直孔水

库的降低出力线较高,保证出力区较小,降低出力区较大,说明此时段为了保障生态流量,直孔水库更多地降低了发电出力来保证水库水位不会过度下降,避免在枯水期由于蓄水量缺乏而难以保证生态流量。

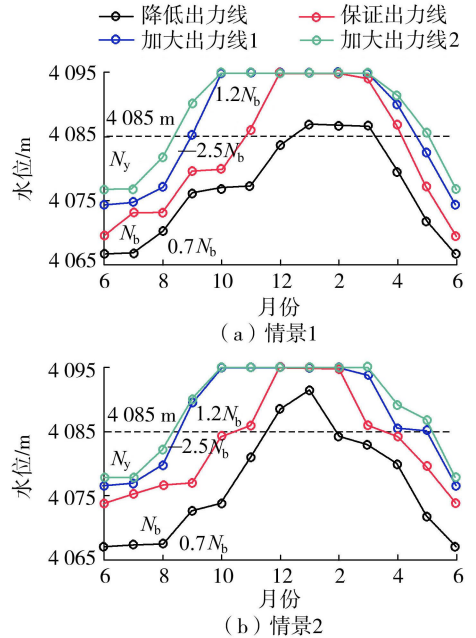


图 6 不同情景下旁多水库发电调度过程
Fig. 6 Power generation operation process of Pangduo Reservoir under different scenarios

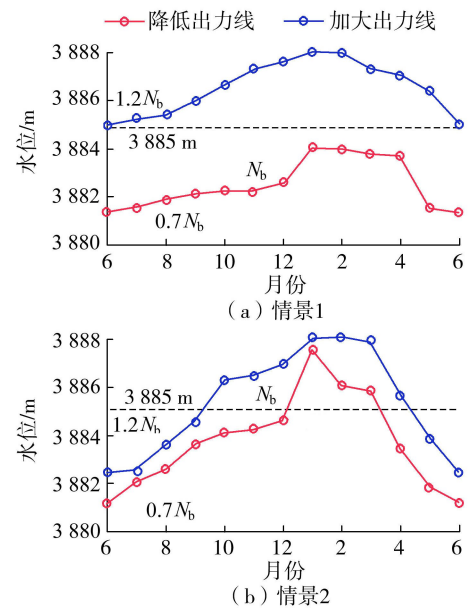


图 7 不同情景下直孔水库发电调度过程
Fig. 7 Power generation operation process of Zhikong Reservoir under different scenarios

2.4 不同情景下枯水期运行情况分析

2.4.1 梯级水库长系列枯水期运行情况分析

统计两种情景梯级水库最优调度策略下旁多水库和直孔水库长系列枯水期逐旬最小出力情况,结果如图 8 所示。由图 8 可见,两种情景下,梯级水库

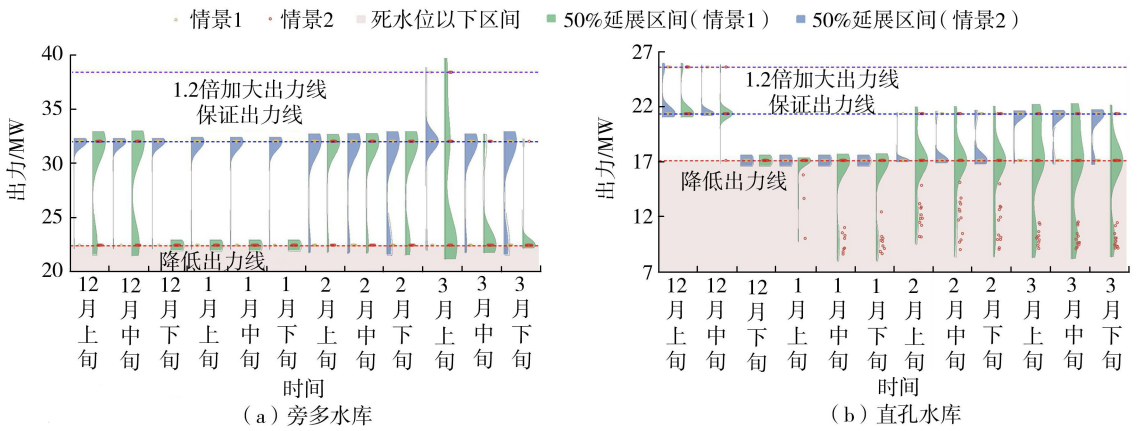


图8 不同情景下旁多水库和直孔水库枯水期长系列逐旬最低出力

Fig. 8 Long-series minimum output during dry period of Pangduo Reservoir and Zhikong Reservoir under different scenarios

枯水期整体上出力均较小,大部分时段运行在保证出力区以及降低出力区,但两水库运行情况差异较大。在情景1下,旁多水库枯水期倾向于维持较大出力,12月和1月最小出力均保持在保证出力区,2月和3月随着水位降低,逐渐从保证出力区降到降低出力区;直孔水库枯水期出力同样相对较大,长系列出力从未低于降低出力,也即水库水位从未降至死水位。在情景2下,旁多水库枯水期更倾向于降低出力,整个枯水期大都处于降低出力区,尽量蓄水维持高水位;此时直孔水库1—3月存在很多年份出力低于降低出力,意味着这些年份直孔水库降至死水位,导致无法维持降低出力。

综上所述,虽然两种情景下均能够保障拉萨断面生态流量,但两水库运行状态各异。情景1下,旁多水库在枯水期会尽量保证下泄流量充足,以补偿直孔水库,避免直孔水库水位过度下降;而情景2下,旁多水库在枯水期会尽量降低下泄流量以蓄高水位,导致直孔水库可能会降至死水位,枯水期直孔水库可能难以保证降低出力,大大增加生态流量保障风险。

2.4.2 梯级水库典型枯水期运行情况

通过统计分析拉萨河干流长系列水文数据,考虑到其来水的显著季节性,选取1971年12月至1972年4月为典型枯水期,流量过程如图9所示。统计该典型枯水期两种情景梯级水库最优调度策略下旁多水库和直孔水库的逐日水位流量过程,如图10所示。由图10可见,在整个枯水期,在情景1下旁多水库水位下降更快,保持了较大且稳定的下泄流量;此时直孔水库水位相对较高,未出现水位降至死水位而不得不减少下泄量的情况。在情景2下,整个枯水期旁多水位相对较高,下泄量较小且波动较大;而直孔水库水位下降较快,从12月的3885 m,而后近3月水位一直保持在死水位3878 m左右,导致部分时段下泄流量非常小且波动较大,仅勉强满足生态流量需求。直孔水库

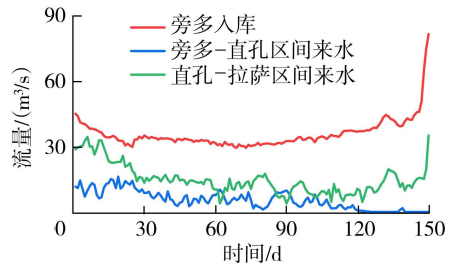


图9 典型枯水期流量过程

Fig. 9 Flow process of typical dry period

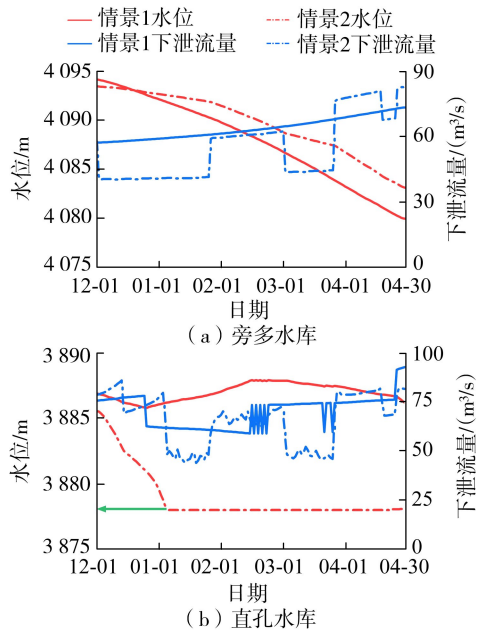


图10 不同情景下典型枯水期旁多水库和直孔水库水位流量过程

Fig. 10 Water level and water flow processes during typical dry period of Pangduo Reservoir and Zhikong Reservoir under different scenarios

下降至1月的3878 m,而后近3月水位一直保持在死水位3878 m左右,导致部分时段下泄流量非常小且波动较大,仅勉强满足生态流量需求。直孔水库

过度降低水位虽然在该长系列来水条件下能够勉强保障下游拉萨断面的生态流量,但难以满足电网需求,而且在枯水年其水位可能会降至死水位,增加了生态流量的保障难度,如果叠加极端干旱气候,更加无法保障生态流量。

3 结 论

a. 解析了梯级水库防洪、生态和发电多利益主体参与调度管理形成的博弈关系,针对性开发了防洪损失条件风险价值最低为上层目标、水库发电量最大为下层目标、保障下游断面生态流量为耦合约束或单一约束的主从博弈优化调度模型,并利用 SMSE-PSO 算法进行了分层嵌套求解。

b. 旁多水库和直孔水库合作共同保障下游断面生态流量时综合调度效益较优,拉萨断面超百年一遇洪水洪量降低 63.3 亿 m^3 ,梯级水库年均总发电量达 10.9 亿 $kW \cdot h$;仅由直孔水库单独保障时防洪效益损失 4.35%,旁多发电量略微改善 0.23%,但直孔发电量下降超过 6%,梯级水库整体发电量同样降低 1.66%,综合效益无法达到最优。

c. 仅由直孔水库单独保障时效益降低的主要原因是枯水期旁多水库减少下泄流量来蓄高水位,导致直孔水库来水不足,水位过度下降甚至跌至死水位,既影响水库综合效益发挥,又不利于应对突发干旱风险。

d. 将主从博弈理论应用于梯级水库优化调度揭示了水库管理模式对调度策略与效益的影响机制,量化结果说明了仅由单独保障生态流量作用有限,因此梯级水库联合调度合作保障下游断面生态流量为相对较好的管理模式。

参考文献:

[1] 王浩,王旭,雷晓辉,等. 梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J]. 水利学报,2019,50(1):25-37. (WANG Hao, WANG Xu, LEI Xiaohui, et al. The development and prospect of key techniques in the cascade reservoir operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019,50(1):25-37. (in Chinese))

[2] CHEN Ji, SHI Haiyun, SIVAKUMAR B, et al. Population, water, food, energy and dams [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 18-28.

[3] 戴凌全,张培培,常曼琪,等. 三峡水库出库流量变化对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 38-45. (DAI Lingquan, ZHANG Peipei, CHANG Manqi, et al. Effect of outflow from Three Gorges Reservoir on spawning habitat of sedentary fish in Dongting Lake [J]. Journal of Hohai

University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 38-45. (in Chinese))

[4] 冯平,白粟,张婷,等. 径流变异对滹沱河流域水库生态调度的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 99-108. (FENG Ping, BAI Su, ZHANG Ting, et al. Impacts of runoff change on ecological operation of reservoirs in the Hutuo River Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 99-108. (in Chinese))

[5] 李泽君,赵璧奎,黄本胜,等. 基于图论的韩江流域水库群生态调度[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 109-117. (LI Zejun, ZHAO Bikui, HUANG Bensheng, et al. Multi-reservoir ecological operation based on graph theory in the Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 109-117. (in Chinese))

[6] WANG Xin, HU Tiesong, ZENG Xiang, et al. A bilevel modeling framework to analyze the institutional gap between research and operation practices; case on the Three Gorges Reservoir pre-impoundment problem [J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124742.

[7] 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))

[8] 付湘,陆帆,胡铁松. 利益相关者的水资源配置博弈[J]. 水利学报, 2016, 47(1): 38-43. (FU Xiang, LU Fan, HU Tiesong. Game theory in water resources allocation for stakeholders [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(1): 38-43. (in Chinese))

[9] PETER H G. Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st Century [J]. Science, 2003, 302(5650): 1524-1528.

[10] DOYLE M W, PATTERSON L A. Federal decentralization and adaptive management of water resources; reservoir reallocation by the U. S. Army Corps of engineers [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2019, 55(5): 1248-1267.

[11] YEH W W G. Reservoir management and operations models; a state-of-the-art review [J]. Water Resources Research, 1985, 21(12): 1797-1818.

[12] 吉小盼,谭平,刘园,等. 长江流域上游梯级电站生态调度研究现状[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 8-14. (JI Xiaopan, TAN Ping, LIU Yuan, et al. Research status of ecological operation of cascade hydropower stations in the upper Yangtze River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 8-14. (in Chinese))

[13] 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 Chinese))
- [14] 白涛,洪良鹏,喻佳,等. 基于开源和节流的乌伦古河流域水库群生态调度[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 132-140. (BAI Tao, HONG Liangpeng, YU Jia, et al. Ecological operation of reservoir group in the Ulungur River Basin through increasing water sources and reducing water consumption[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 132-140. (in Chinese))
- [15] 孙翀,王猛,张建永,等. 我国重要河湖生态流量保障现状及问题分析[J]. 水利规划与设计, 2021(3): 4-7. (SUN Chong, WANG Meng, ZHANG Jianyong, et al. Analysis on the current situation and problems of ecological flow guarantee of important rivers and lakes in China[J]. Water Resources Planning and Design, 2021(3): 4-7. (in Chinese))
- [16] 张璞,刘欢,胡鹏,等. 全国不同区域河流生态基流达标现状与不达标原因[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 176-182. (ZHANG Pu, LIU Huan, HU Peng, et al. Current situation of compliance of river ecological base flow and noncompliance reasons in different regions of China[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 176-182. (in Chinese))
- [17] 王欣,胡铁松,曾祥,等. 水库汛末蓄水防洪与兴利合作关系建模分析[J]. 中国农村水利水电, 2023(12): 1-6. (WANG Xin, HU Tiesong, ZENG Xiang, et al. A model analysis of cooperative relationship between flood control and water conservation in reservoir pre-impoundment[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(12): 1-6. (in Chinese))
- [18] DOBSON B, WAGENER T, PIANOSI F. How important are model structural and contextual uncertainties when estimating the optimized performance of water resource systems? [J]. Water Resources Research, 2019, 55(3): 2170-2193.
- [19] YANG Y C E, CAI X M, STIPANOVIĆ D M. A decentralized optimization algorithm for multiagent system-based watershed management [J]. Water Resources Research, 2009, 45(8): W08430.
- [20] MADANI K. Game theory and water resources[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(3/4): 225-238.
- [21] 徐雨妮,付湘. 水库群系统发电调度的合作博弈研究[J]. 人民长江, 2019, 50(6): 211-218. (XU Yuni, FU Xiang. Study in cooperative game theory for operation of multi-reservoir system[J]. Yangtze River, 2019, 50(6): 211-218. (in Chinese))
- [22] 李英海,汪利,李清清,等. 梯级水电站补偿效益分摊方式研究综述[J]. 人民珠江, 2020, 41(8): 7-14. (LI Yinghai, WANG Li, LI Qingqing, et al. Review on the method of compensation benefit allocation for cascade hydropower stations[J]. Pearl River, 2020, 41(8): 7-14. (in Chinese))
- [23] ZAREI A, MOUSAVI S F, GORDJI M E, et al. Optimal reservoir operation using bat and particle swarm algorithm and game theory based on optimal water allocation among consumers [J]. Water Resources Management, 2019, 33(9): 3071-3093.
- [24] WU Xinyu, LI Shuming, CHENG Chuntian, et al. Simulation-optimization model to derive operation rules of multiple cascaded reservoirs for Nash equilibrium [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2019, 145(5): 4019013.
- [25] 蔡方园,何艳虎,陈晓宏. 澜沧江流域枯水年发电效益与下游生态-出境水互馈博弈研究[J]. 水利学报, 2020, 51(5): 536-544. (CAI Fangyuan, HE Yanhu, CHEN Xiaohong. Game study of Lancang River Basin's power generation benefit and downstream ecological water-outbound water in the dry years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(5): 536-544. (in Chinese))
- [26] GUO Xuning, HU Tiesong, ZHANG Tao, et al. Bilevel model for multi-reservoir operating policy in inter-basin water transfer-supply project [J]. Journal of Hydrology, 2012, 424/425: 252-263.
- [27] 谷长叶,韩义超,曾祥,等. 基于二层规划模型水库有序供水调度规则研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(8): 50-54. (GU Changye, HAN Yichao, ZENG Xiang, et al. Sequence water supply rule for reservoir operation based on bilevel programming [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(8): 50-54. (in Chinese))
- [28] 游进军,薛志春,林鹏飞,等. 二层结构的流域生态调度研究 I: 方法与模型 [J]. 水利学报, 2021, 52(12): 1449-1457. (YOU Jinjun, XUE Zhichun, LIN Pengfei, et al. Study on the integrated riverbasin ecological operation based on two-layer structure I: methodology and model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(12): 1449-1457. (in Chinese))
- [29] WANG Xin, WU Fengyan, HU Tiesong, et al. Modeling competitive-cooperative relationship between flood control and hydropower generation within hierarchical gaming structure of reservoir operation [J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129429.
- [30] 张晓琦,刘攀,陈进,等. 基于条件风险价值理论的水库群防洪库容协同作用 [J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 298-305. (ZHANG Xiaoqi, LIU Pan, CHEN Jin, et al. Research on the synergistic effect of multi-reservoir flood control capacity by considering the conditional value-at-risk [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 298-305. (in Chinese))

- [32] LONG D, LONGUEVERGNE L, SCANLON B R. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(2):1131-1151.
- [33] PAN Yun, ZHANG Chong, GONG Huili, et al. Detection of human-induced evapotranspiration using GRACE satellite observations in the Haihe River basin of China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1):190-199.
- [34] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(24):7798-7806. (YUAN Lihua, JIANG Weiguo, SHEN Wenming, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24):7798-7806. (in Chinese))
- [35] 石淞, 李文, 翟育涔, 等. 中国东北虎豹国家公园植被NDVI时空变化及原因探究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(4):31-41. (SHI Song, LI Wen, ZHAI Yucen, et al. Spatiotemporal changes of vegetation NDVI and those reasons in northeast China Tiger and Leopard National Park[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2023, 47(4):31-41. (in Chinese))
- [36] PARK S, IM J, HAN D, et al. Short-term forecasting of satellite-based drought indices using their temporal patterns and numerical model output[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21):3499.
- [37] FOOLADI M, GOLMOHAMMADI M H, SAFAVI H R, et al. Fusion-based framework for meteorological drought modeling using remotely sensed datasets under climate change scenarios: resilience, vulnerability, and frequency analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297:113283.
- [38] KRISHNAMURTI T, KISHTAWAL C M, LAROW T E, et al. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble [J]. *Science*, 1999, 285(5433):1548-1550.
- [39] 姜艳阳, 王文, 周正昊. MODIS MOD16 蒸散发产品在中国流域的质量评估[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(3):517-528. (JIANG Yanyang, WANG Wen, ZHOU Zhenghao. Evaluation of MODIS MOD16 evapotranspiration product in Chinese River Basins[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3):517-528. (in Chinese))
- [40] QU Wei, JIN Zehui, ZHANG Qin, et al. Estimation of evapotranspiration in the Yellow River basin from 2002 to 2020 based on GRACE and GRACE follow-on observations [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3):730.
- [41] 鞠艳, 张珂, 李炳锋, 等. 金沙江流域实际蒸散发时空分布特征及其影响因子[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6):104-110. (JU Yan, ZHANG Ke, LI Bingfeng, et al. Spatiotemporal distribution of actual evapotranspiration and its influencing factors in the Jinsha River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6):104-110. (in Chinese))

(收稿日期:2023-12-21 编辑:王芳)

(上接第77页)

- [31] WANG Yuanyi, HUANG Guohe, WANG Suo. CVaR-based factorial stochastic optimization of water resources systems with correlated uncertainties[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017, 31(6):1543-1553.
- [32] 江燕, 刘昌明, 胡铁松, 等. 新安江模型参数优选的改进粒子群算法[J]. *水利学报*, 2007, 38(10):1200-1206. (JIANG Yan, LIU Changming, HU Tiesong, et al. Improved particle swarm optimization for parameter calibration of Xin'anjiang model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(10):1200-1206. (in Chinese))
- [33] 安宝晟, 姚檀栋, 郭燕红, 等. 拉萨河流域典型区域保护、修复、治理技术示范体系[J]. *科学通报*, 2021, 66(22):2775-2784. (AN Baosheng, YAO Tandong, GUO Yanhong, et al. Protection, restoration, and governance technology demonstration system in the typical regions of the Lhasa River Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(22):2775-2784. (in Chinese))
- [34] 黄草, 黄梦迪, 胡铁松, 等. 拉萨河干流梯级水库库容-径流响应关系[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(1):64-70. (HUANG Cao, HUANG Mengdi, HU Tiesong, et al. Storage-runoff response of cascade reservoirs in mainstream of Lhasa River [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(1):64-70. (in Chinese))
- [35] 肖长伟, 何军, 向飞. 拉萨河水库调度模式对河流生态的影响及生态调度对策研究[J]. *水利发展研究*, 2013, 13(7):14-19. (XIAO Changwei, HE Jun, XIANG Fei. The impacts of Lhasa River Reservoir regulation mode on river ecology and the ecological regulation countermeasures [J]. *Water Resources Development Research*, 2013, 13(7):14-19. (in Chinese))
- [36] GAO J Y, CASTELLETTI A, BURLADO P, et al. Soft-cooperation via data sharing eases transboundary conflicts in the Lancang-Mekong River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 606:127464.

(收稿日期:2023-11-30 编辑:王芳)