

基于碳减排的梯级水库消落期多目标水碳调度研究

周颖, 周研来, 鲁圆圆

(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: 提出基于碳减排的梯级水库消落期多目标水碳调度模型, 将碳排放因子法应用于梯级水库水碳调度研究, 为梯级水库消落期水碳协同调度提供技术支撑。以发电量最大和温室气体排放量最小为调度目标, 采用 NSGA-II 算法求解模型, 并以金沙江中下游 6 座水库与三峡水库组成的梯级水库为研究对象进行实例研究。结果表明: 相较现行调度方案, 在丰、平、枯不同水文情景下, 发电效益最佳方案可使梯级水库年发电量提高 44.3~75.9 亿 kW·h, 增长率为 4.0%~5.2%; 碳减排效益最佳方案可减少温室气体排放量(CO₂ 当量) 37.5~42.5 Gg/a, 降低 4.2%~4.7%; 协调调度方案可提高年发电效益 36.4~73.8 亿 kW·h (增长率 3.2%~5.0%), 减少温室气体排放量(CO₂ 当量) 36.3~41.4 Gg/a, 降低 4.0%~4.6%。

关键词: 水碳调度; 消落调度; 多目标优化; 梯级水库

中图分类号: TV741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2024)01-0018-08

我国水电发电总量与水库数量均位居世界第一, 水电已成为能源结构调整、实现“碳达峰、碳中和”的中坚力量, 水库运行引起的库水位和出库流量变化会显著影响水库碳排放量(Huang et al, 2023)。为实现高质量发展和“双碳”目标, 合理调度水库至关重要。

水库的汛前消落控制是衔接水库枯水期和汛期的关键调度方式(郑雅莲等, 2022)。梯级水库消落期往往面临生态调度、发电调度、供水调度、库岸边坡稳定等多项需求(戴凌全等, 2022)。目前国内外学者围绕水库消落期调度开展了一系列的研究。如郑雅莲等(2022)以最大化发电量和最小化弃水量为调度目标, 提出了一种双层优化调度模型, 综合确定梯级水库汛前消落水位区间; 张松等(2021)针对水库消落期出现的典型水生态问题, 建立了考虑多维生态效益的梯级水库多目标消落调度模型; 周颖等(2023)基于流域天然流量模式调度需求, 以最大化发电量、供水满足度和最小化河道流量偏差为目标, 建立了水库群多目标消落调度模型; 龚文婷等(2022)拟定了 3 种消落方式, 通过对比分析各消落方案的综合效益, 提出了梯级水库最佳消落次序。当前水库消落调度

研究更多关注发电、生态流量和供水效益等需求, 缺乏考虑碳减排需求的水库消落期调度研究。开展梯级水库消落期多目标水碳调度研究, 不仅可解析碳排放与消落调度目标的协同竞争关系, 还可提升梯级水库水碳综合效益, 科学意义与应用价值重大。

开展基于碳减排的水库消落期调度, 需要碳通量评估方法的基础支撑。李雨晨等(2023)基于 IPCC 国家温室气体清单指南, 评估了长江上中游水库群的碳排放量, 并进行了不确定性分析。李哲和王殿常(2022)提出水库蓄水前后碳通量评估的技术路线, 系统分析了水库的“淹没、阻隔、重建、消纳”等对水库温室气体通量的影响。目前水库碳通量评估方法可分为基于物理过程的碳通量评估方法和基于碳排放因子/有机碳埋藏因子的碳通量评估方法。前者需要有多种碳排放途径和有机碳埋藏过程实测资料的支撑, 而后者可移用物理特性相近的水库碳排放因子/有机碳埋藏因子, 操作简便易行。受限于碳排放和有机碳埋藏监测资料的可利用性, 本研究将基于碳排放因子法开展梯级水库消落期水碳调度研究。

考虑到梯级水库消落期调度研究尚未开展碳减排调度, 本研究提出基于碳减排的梯级水库消落期多目标水碳调度模型, 首次将碳排放因子法应用于梯级水库水碳调度研究。以发电量最大和温室气体排放量最小为调度目标, 建立梯级水库消落期多目标水碳调度模型, 采用 NSGA-II 算法求解模型, 选取金沙江中下游 6 座水库与三峡水库组成的梯级水库为研究对象, 开展实例研究。研究成果可为梯级水库消落期水碳协同调度提供技术支撑。

收稿日期: 2023-10-25

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200303)。

作者简介: 周颖, 2000 年生, 女, 硕士研究生, 主要从事水库消落调度研究。E-mail: zhouyingc@whu.edu.cn

通信作者: 周研来, 1985 年生, 男, 教授, 博导, 主要从事水库调度研究。E-mail: yanlai.zhou@whu.edu.cn

表 2 梯级水库消落调度规则与约束汇总

Tab.2 Drawdown operation rules and constraints of the cascaded reservoirs

水电站	最小下泄流量 /m ³ ·s ⁻¹	生态流量 /m ³ ·s ⁻¹	最大 下泄流量/ m ³ ·s ⁻¹	水位约束 (考虑泥沙冲淤调度、 水位变幅)/m·d ⁻¹	消落期调度规则
鲁地拉	439	400	16500	≤2.0	当坝下水位低于 1132.5 m 时,按照瞬时流量控制;当坝下水位高于 1132.5 m 时,按照日均流量控制。
观音岩	439	350	17100	≤2.0	最小下泄流量按瞬时流量不小于 350 m ³ /s,日均流量不小于 439 m ³ /s 控制。
乌东德	900(8月-次年2月) 1160(3-7月)	1200	49400	≤2.0	非汛期水库根据兴利需求进行调度。
白鹤滩	1160(8月-次年2月) 1260(3-7月)	1200	49700	≤2.0	非汛期水库根据兴利需求进行调度。
溪洛渡	1200	1200	43700	≤2.0	非汛期水库根据兴利需求进行调度。
向家坝	1200	1200	49800	≤2.0	非汛期水库根据兴利需求进行调度。
三峡	6000	5500	98800	≤0.6(12月-次年4月); ≥0.4且≤1.0(5-6月)	① 水库可蓄满时,1-2月水库出库流量按不小于 6000 m ³ /s 控制,3-5月的最小出库流量应保证下游庙嘴水文站的水位不低于 39 m。水库未能蓄满时,根据水库可利用水量合理控制出库流量。 ② 汛前,三峡水库水位根据长江来水情况均匀消落,5月 25 日水库水位一般不高于 155 m,至 6 月 10 日三峡水库将消落至汛限水位。

的 CH₄ 排放因子(Chenet al,2011), $r_{N_2O(i,t)}$ 为第 i 个水库 t 时段的 N₂O 排放因子, $A_{surf(i,t)}$ 和 $A_{draw(i,t)}$ 分别为第 i 水库 t 时段的水体面积和消落带面积; $Z_{(ij)}$ 为第 i 水库 t 时段库水位; $A_{surf(i,t)}$ 为第 i 水库 t 时段库水位对应水体面积。

2.2 约束条件

(1) 水量平衡方程

$$V_i(t+1) - V_i(t) = [Q_{i,in}(t) - Q_{i,out}(t) - Q_{i,loss}(t)] \cdot \Delta t \quad (6)$$

式中: $V_i(t)$ 为第 i 个水库 t 时段库容; $Q_{i,in}(t)$ 、 $Q_{i,out}(t)$ 和 $Q_{i,loss}(t)$ 分别为水库 t 时段的入库流量、出库流量和损失流量; Δt 为计算时段长。

(2) 下泄流量约束

$$Q_{min} \leq Q_{i,out} \leq Q_{max} \quad (7)$$

式中: Q_{min} 和 Q_{max} 为最小下泄流量和最大下泄流量。

(3) 电站出力约束

$$N_{min} \leq N_i(t) \leq N_{max} \quad (8)$$

式中: N_{min} 和 N_{max} 为最小出力和最大出力; $N_i(t)$ 为第 i 个水库 t 时段平均出力。

(4) 各库上下限水位约束

$$\underline{Z}_i(t) \leq Z_i(t) \leq \overline{Z}_i(t) \quad (9)$$

式中: $Z_i(t)$ 为第 i 个水库 t 时段计算水位; $\underline{Z}_i(t)$ 为第 i 个水库 t 时段允许下限水位; $\overline{Z}_i(t)$ 为第 i 个水库

t 时段允许上限水位。

(5) 调度期初和期末水位约束

$$Z_i(1) = Z_i^{start} \quad (10)$$

$$Z_i^{si} \leq Z_i^{end} \leq Z_i^{sx} \quad (11)$$

式中: Z_i^{start} 和 Z_i^{end} 为第 i 水库的调度期初和期末水位; Z_i^{si} 和 Z_i^{sx} 分别为第 i 水库消落期末水位下限和上限。

(6) 梯级水库水量平衡约束

$$Q_{i+1,in}(t) = Q_{i,out}(t) + q_{i,t} \quad (12)$$

式中: $q_{i,t}$ 为第 i 库与上游第 $i+1$ 个水库之间 t 时段的区间流量。

(7) 生态约束

$$Q_{i,out}(t) \geq Q_{i,st}(t) \quad (13)$$

式中: $Q_{i,st}(t)$ 为第 i 库个水库 t 时段的最小生态流量,以 90% 保证率下的流量作为生态基流(Goldberget al, 1989)。

2.3 求解算法

本研究采用多目标优化算法 NSGA-II 对上述模型进行求解(Deb et al, 2002),该算法相比非支配排序遗传算法(NSGA),减小时间复杂度,提高了算法的求解性能,大幅提升排序速度,在最大限度保持各个优化目标独立性的同时,加速 Pareto 前沿收敛,对多目标优化问题适用。其具体求解步骤如下:

(1)设置生成初始化种群:设置种群规模 N_p 、最大迭代次数 G_{\max} 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 等参数,将水位作为决策变量。

(2)生成子代种群:以设定的 P_c 概率交叉操作,重组从初始种群中选择的2个亲代的染色体,以 P_m 概率变异,保持种群基因的多样性,生成子代种群。

(3)拥挤度计算:亲代种群与子代种群合并并且进行快速非支配排序,计算不同等级种群的拥挤距离。

(4)生成新种群并评价种群适应度:根据非支配关系以及个体的拥挤度选择合适个体组成新的亲代种群,重复步骤(2)生成子代种群,评价种群的适应度。

(5)终止条件判断:当迭代次数达到 G_{\max} 时终止计算,并输出 Pareto 解集,否则重复步骤(2)~(5)。NSGA-II 参数设置如下:种群规模 $N_p=1000$ 、最大迭代次数 $G_{\max}=500$ 、交叉概率 $P_c=0.8$ 、变异概率 $P_m=0.1$ 。

2.4 评价指标

(1)碳排放强度

$$CI = \frac{GHG_{emi}}{E} \quad (14)$$

式中:CI为碳排放强度; GHG_{emi} 为温室气体排放量; E 为发电量。碳排放强度为IEA选定的2040年可持续发展目标,可用于对比不同类型、量级发电工程的碳排放表现。

(2)碳收支

$$CB = \frac{C_{emi}}{C_{bur}} \quad (15)$$

$$C_{bur(i,t)} = A_{surf(i,t)} \cdot r_{sbur} + A_{draw(i,t)} \cdot r_{dbur} \quad (16)$$

式中:CB为碳收支; C_{emi} 为碳排放量; C_{bur} 为有机碳埋藏量; r_{sbur} 、 r_{dbur} 分别为水库水体表面和消落带的有机碳埋藏因子(Dong et al, 2012; Mendonça et al, 2016)。该指标通常被用于水库碳源汇分析(Keller et al, 2021)。

(3)河道流量偏差函数

$$AAPFD = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \frac{|Q_{i,out}(t) - Q_{i,N}(t)|}{Q_{i,N}(t)} \quad (17)$$

式中: $Q_{i,N}(t)$ 为第*i*个水库第*t*时段对应河道天然流量;AAPFD为河道流量偏差函数(Ladson et al, 1999),该函数用于识别流量变化对河流生态环境的影响,可作为生态效益的评价指标之一。最小化AAPFD值,旨在使得水库出库流量过程逼近河道内

天然流量过程,促进河道生态系统的稳定与健康(Chien et al, 1985; 邓铭江等, 2020)。考虑到出库流量有可能会远超过或远低于河道天然流量,特对流量偏差取绝对值,当河道流量偏差函数增大时,说明人类活动对生态环境产生影响越强。

(4)弃水量

$$Q_{i,spill}(t) = Q_{i,out}(t) - Q_{i,fd}(t) \quad (18)$$

$$W_{spill} = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n Q_{i,spill}(t) \cdot \Delta t \quad (19)$$

式中: $Q_{i,out}(t)$ 、 $Q_{i,spill}(t)$ 分别为第*i*个水库*t*时段的出库流量和弃水流量; W_{spill} 为梯级水库的总弃水量。

3 结果与分析

3.1 调度目标间关系分析

图2展示了丰、平、枯不同来水情景下多目标 Pareto 前沿图。由图2可知发电量与温室气体排放量之间存在一定的竞争关系,发电量增大的同时温室气体排放量也增大。河道流量偏差函数(AAPFD)也与温室气体排放量呈现竞争关系,温室气体排放量减小的同时AAPFD增大。从成因上看,水库发电量受发电水头及流量共同影响,水库水位与出库流量存在明显的竞争关系。梯级水库的库容特征不同,水体表面及消落带碳排放因子也不同。温室气体排放量受水体表面积、消落带面积、碳排放因子等多因素影响。梯级水库蓄放次序、不同调度过程都将影响多个变量。当上游水库加大出力、增加下泄流量时,会抬高三峡的发电水头,一定程度上增加整体发电量。但与此同时也增大了消落带面积。由于消落带碳排放因子远大于水体表面,因此累积得到的温室气体排放量也会增大。而当下泄流量较小时,水库积蓄水头,减小消落带面积,从而减少温室气体排放量,但此时出库流量常低于河道天然流量,导致AAPFD值增大。

3.2 调度综合效益分析

表3汇总了3种调度方案(图2中A、B、C点)对比现行调度方案(图2中D点)的综合效益改善率。其中方案A取 Pareto 前沿上最右侧侧解(发电量最大且AAPFD值较小),方案B取 Pareto 前沿上最下方解(温室气体排放量最小但AAPFD值较大),方案C取 Pareto 前沿上中间区域解(发电量与温室气体排放量各采用40%~60%综合纳入考虑),方案D(现行调度方案)为按照水库调度图所得调度方案,水库在消落期满足保证出力、下游航道维持一定通航水深的前提下,尽可能维持高水位运行。从表3可知,在丰水年、

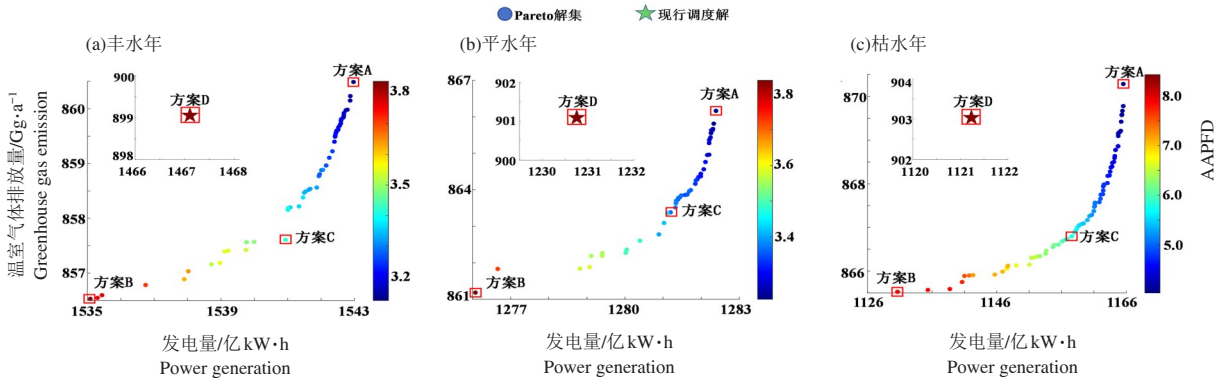


图 2 不同来水情景下多目标 Pareto 前沿曲线

Fig.2 Multi-objective Pareto frontiers under different inflow scenarios

平水年、枯水年和现状年时,方案 A 可分别提高年发电效益 75.9 亿 (增长 5.2%)、51.6 亿 (增长 4.2%) 和 44.3 亿 kW·h(增长 4.0%);方案 B 可分别减少温室气体排放量(CO₂ 当量)42.5(降低 4.7%)、39.9(降低 4.4%)和 37.5 Gg/a(降低 4.2%);方案 C 可分别提高年发电效益 73.8 亿(增长 5.0%)、50.4 亿(增长 4.1%)和 36.4 亿 kW·h 增长 3.2%),减少温室气体排放量(CO₂ 当量)41.4(降低 4.6%)、37.9(降低 4.2%)和 36.3 Gg/a(降低 4.0%)。

水库运行时,发电量受水头和水量 2 种因素共同影响,需判断各阶段水头效益和水量效益来实现发电效益最大化。温室气体排放量与水库调度控制的水位-出库流量存在映射关系,由于水库水体表面及消落带的碳排放因子和有机碳埋藏因子不同,水面和消落带产生的碳排放量和有机碳埋藏量存在较大差异。当温室气体排放量越小、发电量越大时,对应的碳排放强度越小,说明电站的碳排放表现较好;碳收支较小时可知水库碳排放量相对较小,有机碳埋藏量相对较大,碳减排效益增强;对于弃水量指标,一味加大下泄流量并不能取得更好的生态效益,并且在调度期末时可能还会造成大量弃水。

不同年份天然来水不同,调度空间存在差异。丰水年天然来水较多,可调节空间较大,因此各指标变幅更为显著。枯水年消落带面积较大,消落带温室气体排放量较大,同时枯水年发电量较小,两者共同导致碳排放强度增加,枯水年来水较少,调度期内水库没有弃水。丰水年部分水库于 6 月产生弃水,协调调度方案通过均匀增加 5 月底出库流量、减少 6 月出库流量,以降低整体弃水量。由表可知,发电量最大方案、碳减排效益最优方案及协调方案 3 种方案,均有效改善了上述 6 个评价指标,提升电站的综合效益。

3.3 典型案例分析

限于篇幅,本研究仅列出枯水情景下(1987 年

12 月 1 日-1988 年 6 月 10 日)三峡水库调度过程(如图 3),其他年份与枯水年存在类似调度规律。相较于单库优化调度模式,梯级水库联合调度可在一定程度上提高消落期内总发电量。从调度期内水库水位过程来看,整体上各库优化调度方案的水位高于现行调度方案。梯级水库上游部分水库在 3 月、4 月开始加大出力,一方面是该时期天然来水少,能增加枯水期下泄流量;另一方面是通过牺牲发电水头,抬高三峡发电水头。上游各个电站放水不仅有助于上游电站发电,还能重复利用增加其下游电站的发电量,且使下游电站维持高水位运行。因此,采用上游电站先放水、下游电站保持高水位的运行规律,可以充分发挥梯级电站运行的水头、水量效益,最大程度地开发梯级电站的发电能力,提升梯级电站的总发电量。在调度期末时,应在保障流域供水的前提下优化梯级水库出库流量,减少弃水量。梯级水库消落运用方式应综合考虑枯水期整体效益,以枯期发电效益最大、温室气体排放量最小为目标,统筹协调各目标之间的关系,同时避免水位集中消落带来的不利影响。

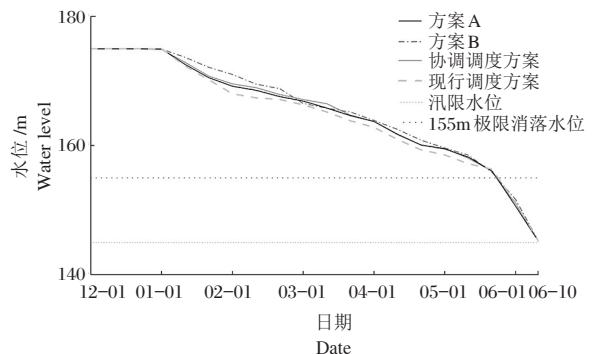


图 3 枯水年三峡水库消落调度水位过程

Fig.3 Water level of Three Gorges Reservoir during the drawdown operation period in dry years

表3 不同来水情况下各方案调度结果

Tab.3 Results of operation schemes under different inflow scenarios

水平年	目标函数值	方案A	方案B	方案C	方案D
		发电最大	温室气体排放量最小	协调方案	现行方案
丰水年	年发电量/亿kW·h	1542.97	1535.08	1540.94	1467.11
	变幅/%	5.2	4.6	5.0	—
	温室气体排放量/Gg·a ⁻¹	860.49	856.50	857.61	899.04
	变幅/%	-4.3	-4.7	-4.6	—
	碳排放强度/g·(kW·h) ⁻¹	3.85	3.83	3.84	5.78
	变幅/%	-33.4	-33.7	-33.6	—
	碳收支	1.47	1.44	1.46	1.81
	变幅/%	-18.8	-20.4	-19.3	—
	AAPFD	3.12	3.95	3.43	4.26
	变幅/%	-26.8	-7.3	-19.5	—
弃水量/亿m ³	1.04	0.89	0.92	2.88	
变幅/%	-63.9	-69.1	-68.1	—	
平水年	年发电量/亿kW·h	1282.39	1276.07	1281.19	1230.78
	变幅/%	4.2	3.7	4.1	—
	温室气体排放量/Gg·a ⁻¹	866.16	861.18	863.18	901.09
	变幅/%	-3.9	-4.4	-4.2	—
	碳排放强度/g·(kW·h) ⁻¹	5.15	5.61	5.13	6.11
	变幅/%	-15.7	-8.2	-16.0	—
	碳收支	1.46	1.43	1.45	1.89
	变幅/%	-22.8	-24.3	-23.3	—
	AAPFD	3.22	3.84	3.36	4.86
	变幅/%	-33.7	-21.0	-30.9	—
弃水量/亿m ³	0	0	0	0	
枯水年	年发电量/亿kW·h	1165.55	1130.63	1157.58	1121.23
	变幅/%	4.0	0.8	3.2	—
	温室气体排放量/Gg·a ⁻¹	870.29	865.53	866.79	903.04
	变幅/%	-3.6	-4.2	-4.0	—
	碳排放强度/g·(kW·h) ⁻¹	5.43	5.45	5.42	6.48
	变幅/%	-16.2	-15.9	-16.4	—
	碳收支	1.44	1.42	1.44	1.91
	变幅/%	-24.6	-25.7	-24.6	—
	AAPFD	4.04	8.43	5.78	9.63
	变幅/%	-58.1	-12.5	-40.0	—
弃水量/亿m ³	0	0	0	0	

注:变幅=(优化调度方案计算值-现行调度方案计算值)/现行调度方案计算值;正值代表增加、负值代表减少。

Note: Amplitude=(calculated value of optimized scheduling scheme - calculated value of current scheduling scheme) / calculated value of current scheduling scheme; positive value represents increase, negative value represents decrease.

综上所述,梯级水库通过合理调度,出库流量可满足下泄流量标准,且能够兼顾生态、航运需求,提高流域发电效益和碳减排效益,减少弃水量。三峡水库作为长江关键性控制工程,库容较大,水位变化会对整体效益产生更大影响,决策者在调度时也应予以更多关注。

4 结语

面向“双碳”目标新需求,综合考虑发电、碳减排等多种效益至关重要。本研究以发电量最大、温室气体排放量最小为目标,构建了考虑碳减排的梯级水库消落期多目标优化调度模型,以金沙江中下游6座水库和三峡水库为研究对象,考虑了流域丰水年、平水年、枯水年水文情景,采用NSGA-II算法进行求解,优选水库调度方案。

首先,温室气体排放量最小方案的消落水位过程线高于发电量最大方案的消落水位过程线,协调方案对应的上游水库水位过程线要低于现行方案的水位过程线,而下游水库如三峡水库协调方案的水位过程线则高于现行方案的水位过程线;其次,对比现行调度方案,协调方案能提高3.2%~5.0%的发电效益,降低4.0%~4.6%的温室气体排放量。梯级水库中上游水库采取先消落的调度方式可显著抬升末端三峡水库的发电水头,有效挖掘了流域梯级的水量与水头利用潜力,对提升梯级发电量更有利。虽然中上游水库进行提前消落调度,会导致消落带面积增大,进而温室气体排放量会增加,对碳减排效益产生不利影响,但是通过优化调度提升的梯级水库发电量的碳当量,要显著高于消落带的碳排放量。当面临丰水年情景时,决策者需侧重考虑发电需求,可通过采用发电量最大方案,促使中上游水库加大出流提前消落,以提升梯级发电效益;当面临平水年情景时,决策者可通过采用协调调度方案,有效权衡发电和碳减排目标;当面临枯水年、特枯水年情景时,决策者需侧重考虑碳减排需求,可通过采用碳减排最大方案,指导各水库缓慢消落水位,减少消落带面积的同时可提升梯级水库水量预留效益。

限于监测资料,目前模型在水面和消落带排放因子选择上对时空不确定性因素考虑不足,未来将开展坝下消气释放、气泡释放通量、下游河段温室气体释放监测分析,结合水碳循环模拟,建立更精确的水碳调度模型,拓展应用范围。

参考文献

- 戴凌全,戴会超,李玮,等,2022. 兼顾四大家鱼产卵需求的梯级水电站生态调度[J]. 水力发电学报,41(5):21-30.
- 邓铭江,黄强,畅建霞,等,2020. 大尺度生态调度研究与实践[J]. 水利学报,51(7):757-773.
- 龚文婷,李帅,胡挺,等,2022. 金沙江下游梯级及三峡水库消落次序研究[J]. 人民长江,53(9):187-194.
- 李雨晨,秦宇,杨柳,等,2023. 长江上游大中型水库碳排放量估算与分析:以 IPCC 国家温室气体清单指南为基础[J]. 湖泊科学,35(1):131-145.
- 李哲,王殿常,2022. 从水库温室气体研究到水电碳足迹评价:方法及进展[J]. 水利学报,53(2):139-153.
- 张松,王新,王超,等,2021. 考虑多维生态效益的梯级水库群消落期优化调度研究[J]. 水利水电技术,52(11):186-194.
- 周颖,周研来,郭生练,等,2023. 水库群消落期多目标智能化调度研究[J]. 水力发电学报,42(9):70-78.
- 郑雅莲,刘攀,李潇,等,2022. 协调发电量及弃水量的水库群汛前消落水位研究[J]. 中国农村水利水电,(5):216-220, 226.
- Chen H, Yuan X, Chen Z, et al, 2011. Methane emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D21): 21306.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al, 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2): 182-197.
- Dong X, Anderson N J, Yang X, et al, 2012. Carbon burial by shallow lakes on the Yangtze floodplain and its relevance to regional carbon sequestration[J]. Global Change Biology, 18(7): 2205-2217.
- Goldberg D E, 1989. Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning[M]. Boston: Addison-Wesley Longman Press.
- Chien N, 1985. Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 10(2): 143-159.
- Huang J, Li Z, 2023. Carbon emissions affected by real-time reservoir operation: a hydrodynamic modeling approach coupled with air-water mass transfer[J]. Water Research, 241:120118.
- IPCC, 2014. The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Keller P S, Marce R, Obrador B, et al, 2021. Global carbon budget of reservoirs is overturned by the quantification of drawdown areas[J]. Nature Geoscience, 14(6): 402-408.
- Ladson A R, White L J, Doolan J A, et al, 1999. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia[J]. Freshwater Biol, 41(2): 453-468.
- Li Z, Lu L, Lv P, et al, 2017. Carbon footprints of pre-impoundment clearance on reservoir flooded area in China's large hydro-projects: Implications for GHG emissions reduction in the hydropower industry[J]. Journal of Cleaner Production, 168(Supplement C): 1413-1424.
- Mendonça R, Kosten S, Sobek S, et al, 2016. Organic carbon burial efficiency in a subtropical hydroelectric reservoir[J]. Biogeosciences, 13(11): 3331-3342.
- Ning Z, Zhou Y, Lin F, et al, 2023. Exploring a novel reservoir impoundment operation framework for facilitating hydropower sustainability[J]. Sustainability, 15(18): 13400.
- Zhao Y, Wu B F, Zeng Y, 2013. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China[J]. Biogeosciences, 10(2): 1219-1230.

(责任编辑 郑金秀)

Multi-objective Water-carbon Operation of Cascaded Reservoirs in the Drawdown Period Based on Carbon Emission Reduction

ZHOU Ying, ZHOU Yan-lai, LU Yuan-yuan

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

Abstract : Current studies on the drawdown operation of cascaded reservoirs have not focused on reducing carbon emissions. In this study, six reservoirs in the middle and lower reaches of Jinsha River and Three Gorges Reservoir were selected for case study, and we developed a multi-objective drawdown operation model of cascaded reservoirs that increases hydropower production and reduces carbon emissions. The carbon emission factor method was initially to research the water-carbon operation of cascaded reservoirs, and the maximum hydropower output and the minimum greenhouse gases (GHG) emissions were taken as the objectives for model development. The operation model was solved by using the fast Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II). Results show that, compared with the current operation scheme, the maximum hydropower output scheme improves hydropower generation by 4.43 billion–7.59 billion kW · h/a (4.0%–5.2%) and the minimum GHG emission scheme reduces GHG emissions by 37.5–42.5 Gg CO₂ e/a (4.2–4.7%). The synergized operation scheme, under three hydrological scenarios (dry, normal, wet), increases power generation by 3.64 billion–7.38 billion kW · h/a (3.2%–5.0%) and decreases GHG emissions by 36.3–41.4 Gg CO₂ e/a (4.0%–4.6%). The operation schemes proposed in this study provides an effective means for synergizing the water-carbon drawdown operation of cascaded reservoirs.

Key words : water-carbon operation; drawdown operation; multi-objective optimization; cascaded reservoirs