

清江梯级发电与生态均衡优化调度研究

林伟^{1,2}, 李英海^{1,3}, 郭家力^{1,3}, 徐文^{1,3}, 夏青青¹, 汪利¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002;

2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335;

3. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北宜昌 443002)

摘要: 鉴于清江梯级水电站联合调度运行尚未考虑河流生态需求的现状, 导致自然径流过程发生极大改变, 采用逐旬频率计算法, 确定清江梯级生态流量区间范围, 进而在梯级发电调度的基础上, 引入径流生态离差系数, 建立发电与生态均衡优化调度模型, 并提出了基于粒子群算法的模型解算方法, 构建调度方案的发电与生态综合评价指标体系, 对比分析清江梯级2008-2010年优化调度方案。结果表明, 发电与生态均衡优化调度方案在梯级发电量仅减少1.85%的情况下, 径流生态离差系数提高6.81%, 梯级生态溢水量减少57.66亿m³, 梯级生态缺水量减少3.92亿m³, 生态调度效果显著。研究成果可为当前长江大保护与清江流域环境保护背景下清江梯级联合调度运行提供科学依据与决策支持。

关键词: 清江梯级; 均衡调度; 逐旬频率法; 粒子群算法

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2020)03-0009-08

清江作为三峡以下长江中游第二大支流, 全长423 km, 其干流上建有水布垭、隔河岩和高坝洲3座大型水电站。2018年, 《湖北省清江流域水环境保护条例(草案)》明确设定了生态补水流量条款, 规定清江流域干流、一级支流及其二级支流水电站, 应当根据生态环境用水与生态补水方案, 下排生态用水量不得低于多年平均径流量的10%。近年来, 学者更多关注以三峡水库为核心的三峡-葛洲坝梯级生态调度问题。程根伟和陈桂蓉(2007)根据长江河流的水沙特性和黄河小浪底水库调水调沙实践, 认为三峡水库梯级的生态调度试验目标应为四大方面, 即保持河流洪水节律、维持上下游输沙平衡、促进库区水量交换和实现防洪补偿调节; 针对三峡梯级从维持天然河道内环境流量和有利于水库下游中华鲟及“四大家鱼”产卵繁殖的角度, 郭文献等(2009)确定了水库生态调度目标; 徐薇等(2014)认为三峡水库生态调度制造的涨水过程能够在一定程度上满足不同鱼类自然繁殖的水文需求, 可削弱三

峡水库运行对长江中游鱼类自然繁殖的不利影响, 对维护鱼类种群资源补充具有重要的意义。有关清江梯级联合调度方面的研究主要面向发电、防洪调度等问题, 杨侃等(2012)针对清江高坝洲水电站下游水位流量关系受长江顶托的影响和梯级水库间流量传播处理问题, 建立了三峡梯级和清江梯级水电站短期联合优化调度模型; 陈炯宏等(2013)就三峡和清江梯级水库群防洪库容投入时间问题, 分别从各梯级投入时机、各水库投入次序展开讨论, 并分析了不同时机方案对荆江河段的防洪补偿联合调度效果; 周研来等(2013)以三峡梯级和清江梯级组成的混联水库群为例, 建立了水库群汛限水位的联合运用和动态控制模型, 在不降低水库群防洪标准的前提下, 最大限度地发挥水库群的兴利效益。

目前, 清江梯级生态调度的研究较为欠缺, 在当前清江流域生态环境问题日益受到重视、水生态环境保护立法工作积极开展的大背景下, 进行清江梯级发电与生态均衡优化调度研究十分必要。本文针对清江梯级水电站中长期优化调度问题, 通过逐旬频率法确定生态流量范围, 将其作为梯级调度的流量约束条件(邹淑珍等, 2011), 进而引入径流生态离差系数, 并将其与发电调度目标函数相结合, 构建发电与生态均衡调度模型, 提出基于粒子群算法的模型优化求解方法, 并建立调度方案的发电与生态综合评价指标体系, 旨在为清江梯级联合调度运行提供科学依据与决策支持。

收稿日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409152); 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金课题(KF2019-13); “十三五”国家重点研发计划课题(2017YFC0405606)。

作者简介: 林伟, 1992年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为水库群生态优化调度。E-mail: linwei@sidri.com

通信作者: 李英海, 1981年生, 男, 博士, 副教授, 主要从事流域水资源优化配置研究。E-mail: liyinghai@ctgu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

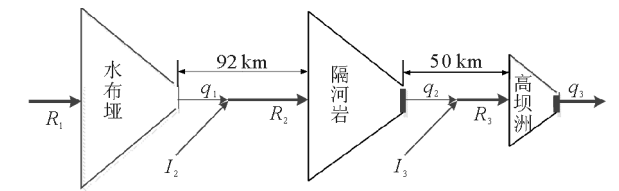
本研究以清江流域3座梯级水电站水布垭、隔河岩、高坝洲为对象。其中,水布垭具有多年调节能力,隔河岩具有年调节能力,高坝洲为径流式电站,具有日调节能力,调节库容分别为23.94亿m³、19.75亿m³、0.51亿m³,装机容量分别为184万kW、121.2万kW、27万kW。清江梯级拓扑关系如图1所示。

清江流域主汛期集中在每年的6-7月,其中水布垭5月下旬、8月上旬设为前汛期和后汛期,限制水位为397m。各水电站基本特征参数(林伟等,2018)如表1所示。

1.2 基于逐旬频率法计算清江梯级生态流量

一般情况下,河流生态环境胁迫起始年份为河流参考断面上的大坝开始建设年份,清江梯级水电站建设的第一个大坝隔河岩于1987年1月开工。以1987年作为生态环境胁迫的前后分界线,将清江历史水文系列划分为天然状态(1951-1986年)和胁迫状态(1987-2010年)两部分。在李捷等(2007)提出的逐月频率算法基础上,通过P-III

型分布对天然状态下(1951-1986年)的清江梯级各水电站入库平均径流逐旬进行水文频率分析,提出一种逐旬频率算法。根据变化范围法RVA框架的建议,取70%逐旬频率对应流量过程作为生态适宜流量下限,取30%逐旬频率对应流量过程作为生态适宜流量上限,同时取90%和10%两个极端逐旬频率对应流量过程分别作为最小生态流量约束和最大生态流量约束(Wang et al,2015),各水电站生态流量(陈端等,2011)过程如图2所示。



R_i 为第 i 个水电站的入库流量; q_i 为第 i 个水电站的下泄流量; I_i 为第 $i-1$ 个水电站与第 i 个水电站之间的区间流量。

图1 清江梯级水电站的拓扑关系

R_i is the inflow of the i th hydropower station; q_i is the downstream discharge of the i th hydropower station; I_i is the interval flow between the $i-1$ st hydropower station and the i th hydropower station

Fig.1 Schematic of the topological relationship of the three Qingjiang cascaded dams

表1 清江梯级水电站基本参数

Tab.1 Basic parameters of the Qingjiang cascaded hydropower stations

水电站	出力系数	保证出力/	调节库容/	正常蓄水位/	死水位/	防洪限制	汛前限制水位/	汛后限制
		MW	亿 m ³	m	m	水位/m	m	水位/m
水布垭	8.5	310.5	23.94	400	350	391.8	397	397
隔河岩	8.5	187.0	19.75	200	160	192.2	/	/
高坝洲	8.4	77.3	0.51	80	78	79.5	/	/

1.3 清江梯级发电与生态均衡优化调度模型

1.3.1 目标函数 (1)发电调度目标。传统梯级中长期优化调度以年发电量最大为目标,建立梯级水电站发电量最大的优化调度模型(周建中等,2010),其目标函数为:

$$\max E_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T P_t^i \cdot \Delta t \tag{1}$$

式中: E_1 为调度期内梯级总发电量; n 为梯级水电站数量; T 为年内计算总时段数; P_t^i 为第*i*个水电站第*t*时段的出力; Δt 为时段长。

(2)发电与生态均衡调度目标。为综合考虑生态径流的流量大小约束,将最小、最大生态流量作为强约束,适宜上限、下限流量作为弱约束,以使清江梯级调度过程中下泄流量在满足最小、最大生态流量的强约束条件下,尽可能落在生态适宜上限流量与生态适宜下限流量之间,由此引入径流生态离差

系数如下:

$$\gamma_i = 1 - \left[\omega_1 \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{dQ_{ecoLow,t}^i}{\max(dQ_{ecoLow,t}^i)} + \omega_2 \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{dQ_{ecoHigh,t}^i}{\max(dQ_{ecoHigh,t}^i)} \right] \tag{2}$$

式中: γ_i 为第*i*个水电站的径流生态离差系数; ω_1 为生态缺水量权重系数, ω_2 为生态溢水量权重系数, $\omega_1 + \omega_2 = 1$,本文将水电站生态缺水与生态溢水视为同等重要,取 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$; $dQ_{ecoLow,t}^i$ 为第*i*个水电站第*t*时段生态适宜下限流量与水电站下泄流量的差值,当值为负数时赋值为0; $dQ_{ecoHigh,t}^i$ 为第*i*个水电站第*t*时段下泄流量与生态适宜上限流量的差值,当值为负数时赋值为0,求取电站下泄流量与适宜上限、下限流量标准离差的加权值之和,可计算出 γ_i 在 $[0,1]$ 之间,取0时表示生态调度最差,取1时表示生态调度最好。

将径流生态离差系数加入到以年发电量最大的目标函数中,从而建立梯级水电站发电与生态均衡优化调度目标函数:

$$\max E = \sum_{i=1}^n \gamma_i \sum_{t=1}^T P_t^i \cdot \Delta t \tag{3}$$

式中: E 为调度期内清江梯级生态与发电均衡调度目标函数; n 为梯级水电站数量; T 为年内计算总时段数; P_t^i 为第 i 个水电站第 t 时段的出力; Δt 为时段长。

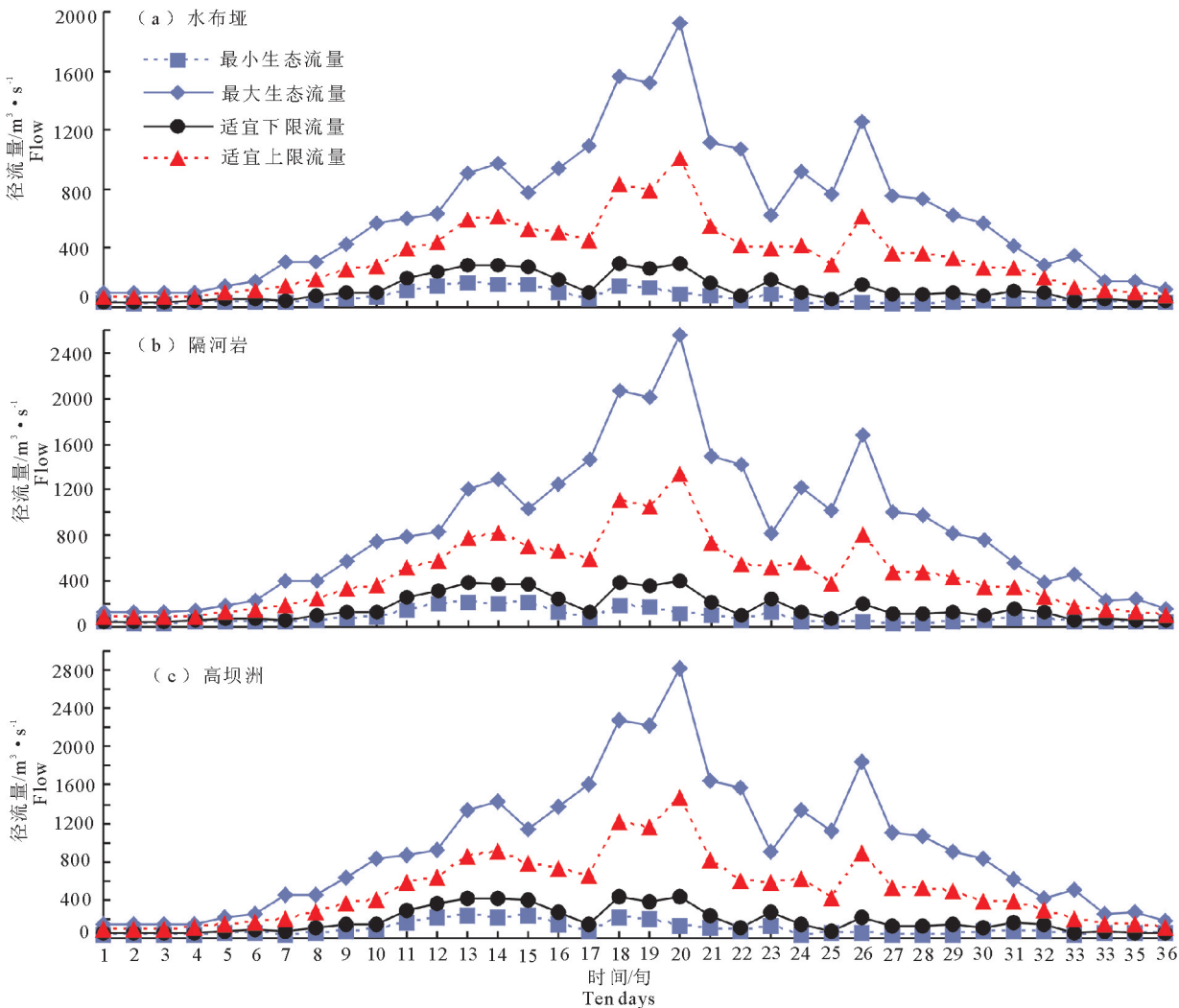


图 2 清江梯级逐旬频率法的生态流量

Fig.2 Calculated ecological flow through the Qingjiang cascaded hydropower stations

1.3.2 约束条件

(1)水量平衡约束。

$$Q_t^i = (V_{t-1}^i - V_t^i) / \Delta t + I_t^i + q_{t-1}^{i-1} - S_t^i \tag{4}$$

式中: Q_t^i 为第 i 个水电站第 t 时段的发电引用流量; V_{t-1}^i 为第 i 个水电站第 $t-1$ 时段末的蓄水量; I_t^i 为第 $i-1$ 个水电站与第 i 个水电站之间第 t 时段的区间来水量; S_t^i 为第 i 个水电站第 t 时段的弃水流量; q_{t-1}^{i-1} 为第 $i-1$ 个水电站第 t 时段末的下泄流量,且 $q_t^i = Q_t^i + S_t^i$

(2)水位、流量、出力上下限约束。根据各时段梯级各水电站水位、生态流量及电网出力限制,确定各时段水位、流量及出力上下限约束条件。

$$Y_{t,\min}^i \leq Y_t^i \leq Y_{t,\max}^i \tag{5}$$

式中: Y_t^i 表示第 i 个水电站 t 时段的水位、下泄流量及出力; $Y_{t,\min}^i$ 和 $Y_{t,\max}^i$ 分别表示水库水位、下泄流量和出力最小与最大约束取值。

(3)水位、流量时段变幅约束。根据调度运行安全稳定需求,各水电站水位及流量时段变幅应小于设定值。

$$|Y_t^i - Y_{t+1}^i| \leq \Delta Y_t^i \tag{6}$$

(4)保证出力约束。

$$P_t^i = \begin{cases} P_{rt}^i & P_{rt}^i \geq P_{bt}^i \\ P_{rt}^i + \beta(P_{rt}^i - P_{bt}^i) & P_{rt}^i < P_{bt}^i \end{cases} \tag{7}$$

式中: P_t^i 为第 i 个水电站第 t 时段惩罚出力;

P_{it} 为第 i 个水电站第 t 时段实际出力; P_{bt} 为第 i 个水电站第 t 时段保证出力; β 为惩罚系数。

1.4 清江梯级优化调度的粒子群算法设计

粒子群(PSO)算法是一种基于集群智能的新型优化算法(张铭等, 2010; Saber et al, 2016), 具有简便易行、依赖参数少、收敛速度快等特点, 目前已广泛应用于梯级水电站优化调度中。PSO 算法应用于梯级水电站优化调度核心运算公式如下:

$$V_{i,t}^k = \omega \cdot V_{i,t}^{k-1} + c_1 \cdot R_1 \cdot (p_{best,i} - Z_{i,t}^{k-1}) + c_2 \cdot R_2 \cdot (g_{best} - Z_{i,t}^{k-1}) \quad (8)$$

$$Z_{i,t}^k = Z_{i,t}^{k-1} + V_{i,t}^k \quad (9)$$

式中: $V_{i,t}^k$ 表示为粒子 i 在第 t 维(句)第 k 次迭代后的速度; ω 为惯性权重; c_1 和 c_2 为常量, 被称为加速系数, 其取值根据经验确定, 通常取 $c_1 = c_2 = 2$; R_1 和 R_2 是 $[0, 1]$ 之间的随机数; $p_{best,i}$ 为粒子 i 的个体最优解(个体极值); g_{best} 为整个种群目前找到的最优解(全局极值); $Z_{i,t}^k$ 表示为粒子 i 在第 t 维(句)第 k 次迭代后的水位。

1.4.1 设定算法参数 确定粒子群大小、最大迭代数、加速系数 c_1 与 c_2 、动量项系数 ω 、粒子群速度变化范围 $[-V_{max}, V_{max}]$ 等 PSO 算法参数。其中, 粒子群速度变化范围 $[-V_{max}, V_{max}]$ 与梯级各水电站消落深度有关, 由于水布垭水电站死水位(350 m)到正常蓄水位(400 m)相隔 50 m, 隔河岩水电站从死水位(160 m)到正常蓄水位(200 m)相隔 40 m, 而高坝洲水电站死水位(78 m)到正常蓄水位(80 m)相隔仅 2 m, 有必要分别对 3 个水电站分别设定粒子群速度变化范围。本文对 3 个水电站从上游至下游依次分别设定为 $[-5, 5]$ 、 $[-4, 4]$ 、 $[-0.5, 0.5]$ 。

1.4.2 生成初始粒子群 为保证缩短算法的寻优时间, 在约束条件范围内随机产生初始化粒子。对于水量平衡约束的实现, 可由每时段(即每旬)的平均入库流量计算水电站的水位上下限, 下泄流量等于最小生态流量时对应水电站所能达到的最高水位与正常蓄水位或防洪限制水位相比较, 取小者作为每一时段的水位上限, 下泄流量等于最大生态流量时对应的水电站所能达到的最低水位与死水位相比较, 取大者作为每一时段随机的水位下限, 该时段粒子可在每一时段水位的上限与下限之间随机选取, 从而保证生成的粒子满足最小、最大生态流量强约束。在粒子群算法初始化中不指定期末水位, 形成一系列初始解。在寻优迭代过程中, 设定达到指定的期末水位, 通过水量平衡约束逐渐淘汰那些不满足条件的解。

1.4.3 位置和速度更新 利用粒子群(PSO)核心运算公式(8)和式(9)对粒子进行位置和速度的更新迭代。初始粒子的第一次迭代, 其个体最优就是其本身, 之后则通过不断寻优确定最优解。在迭代过程中, 如果计算出的速度超过了速度变化范围, 则将其设定为对应的边界值。

1.4.4 约束处理与判别条件 判断更新后的粒子是否满足约束条件, 对于不满足水量平衡约束、指定期末水位约束的粒子群适应度值赋值为零; 对于保证出力约束条件计算约束破坏程度, 构造公式(7)中的惩罚函数进行惩罚的方法进行处理。处理后重新计算适应度值, 评价个体极值与全局极值; 对于适宜上、下限流量约束条件, 通过径流离差系数影响目标函数适应度值, 通过迭代更新保证下泄流量尽可能落在适宜上限与下限流量之间。判断找到的最优解是否达到最大迭代次数, 如满足条件, 则退出, 否则返回第(3)步进行迭代更新。

1.5 发电与生态均衡优化调度评价指标体系构建

目前, 已有很多学者进行了生态评价指标方面的研究。卢有麟等(2011)提出下游河道生态缺水指标, 以发电量最大和生态缺水最小为目标建立了三峡梯级电站多目标生态优化调度模型; 结合生态效益评价标准, 王学敏等(2013)提出了下游河道生态溢缺水指标, 构建了三峡梯级生态友好型多目标发电优化调度模型; 徐鑫等(2018)以辽西北供水工程为例, 从多方面分析跨流域调水工程对水源区水生生态环境的影响, 建立了基于水文水质—水生生物—生态经济补偿技术模型的跨流域调水工程水源区水生生态环境评价指标体系。本文结合清江梯级具体调度情况, 提出定量计算方法, 建立发电与生态均衡优化调度评价指标体系。从发电兴利的角度对清江梯级水电站调度方案进行评价, 主要考虑各水电站及梯级发电总量、梯级弃水总量评价指标; 从流域生态角度对调度方案进行评价, 提出梯级径流生态离差系数、梯级生态溢水量、梯级生态溢水量百分比、梯级生态缺水量、梯级生态溢水量百分比共 5 个生态调度评价指标。

1.5.1 梯级径流生态离差系数

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \gamma_i \quad (10)$$

式中: n 为梯级水电站数量; γ_i 为各水电站径流离差系数; λ_i 为各梯级水电站的加权值, $\lambda_i = 1/n$, 本文取 $n=3$, $\gamma_i = 1/3$ 。

1.5.2 梯级生态溢水量及百分比 描述梯级水电

站生态适宜上限流量约束破坏程度的生态溢水量及其百分比。

$$V_{ecoOver} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T dQ_{ecoHigh,t}^i \cdot \Delta t$$

(11)

$$\delta_{ecoOver} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{\sum_{t=1}^T dQ_{ecoHigh,t}^i \cdot \Delta t}{\sum_{t=1}^T Q_{ecoHigh,t}^i \cdot \Delta t} \times 100\%$$

(12)

式中: $V_{ecoOver}$ 为梯级生态溢水量; $\delta_{ecoOver}$ 为梯级生态溢水量百分比, $Q_{ecoHigh,t}^i$ 为第*i*个水电站第*t*时段生态适宜上限流量。

1.5.3 梯级生态缺水量及百分比 描述生态适宜流量下限约束破坏程度的生态缺水量及其百分比。

$$V_{ecoLack} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T dQ_{ecoLow,t}^i \cdot \Delta t$$

(13)

$$\delta_{ecoLack} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{\sum_{t=1}^T dQ_{ecoLow,t}^i \cdot \Delta t}{\sum_{t=1}^T Q_{ecoLow,t}^i \cdot \Delta t} \times 100\%$$

(14)

式中: $V_{ecoLack}$ 为梯级生态缺水量, $\delta_{ecoLack}$ 为梯级生态缺水量百分比, $Q_{ecoLow,t}^i$ 为第*i*个水电站第*t*时段生态适宜下限流量。

表 2 两种方案下梯级水电站发电与生态调度评价结果

Tab.2 Evaluation results for the Qingjiang cascaded hydropower stations under the two operation schemes

评价指标	发电总量/ 亿 kW·h	弃水量/ 亿 m ³	径流离 差系数	生态溢水		生态缺水	
				水量/亿 m ³	比例/%	水量/亿 m ³	比例/%
发电调度	80.93	4.01	0.88	699.49	21.05	5.67	4.05
均衡调度	79.43	10.46	0.94	641.83	18.40	1.75	1.26
差值	-1.50	6.45	0.06	-57.66	-2.65	-3.92	-2.79

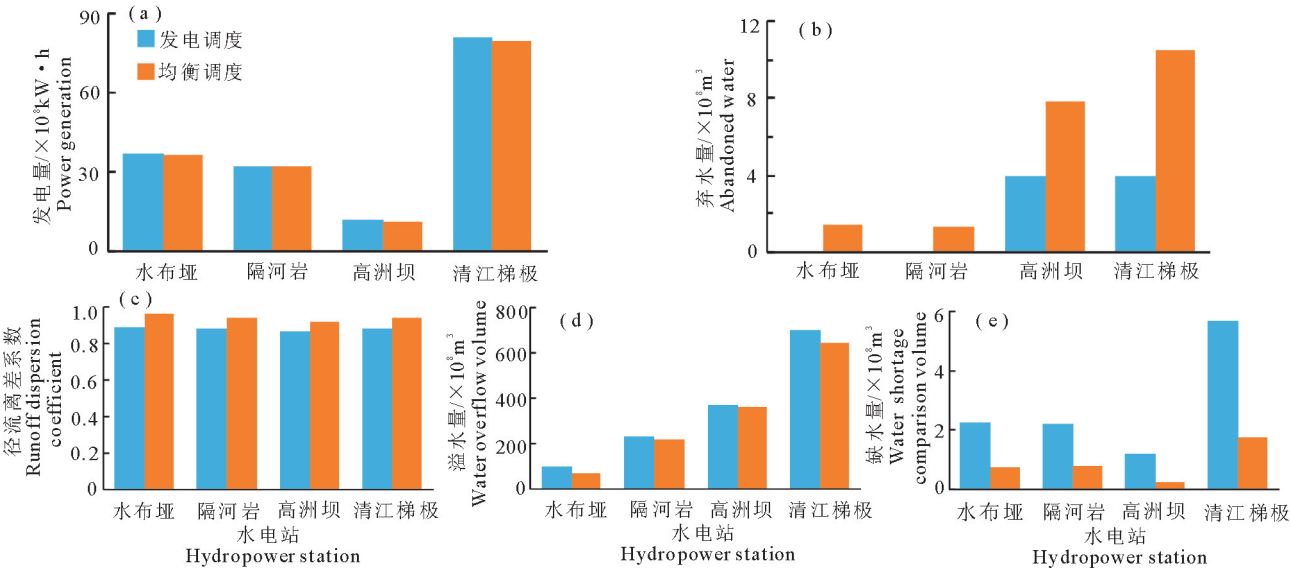


图 3 发电与生态评价指标对比

Fig.3 Comparison of evaluation indices for power generation and ecological flow regulation

3 讨论

以2010年调度为例,水布垭、隔河岩、高坝洲水电站实际调度起始水位和终止水位分别为382.88 m和388.44 m、186.15 m和198.00 m、79.06 m和79.33 m;图4为两种调度方案的变化过程。

3.1 水布垭水电站

从图4-a可以发现,均衡调度方案水位在0~13旬高于发电调度方案,下泄流量相对较小,在14~29旬低于发电调度方案,下泄流量相对较大,在30~36旬水位基本一致。

从图4-b可以看出,发电调度方案和均衡调度方案中的下泄流量在0~11旬都要高于适宜上限流量,但均衡调度方案下泄流量要更加接近适宜上限流量,有效减少了生态溢水量,12~15旬发电调度方案出现连续性的生态缺水,而均衡调度方案的下泄流量都落在适宜流量范围内,减少了生态缺水量,16~36旬发电调度方案在21旬、25旬、29旬出现3次较大的生态溢水,而均衡调度方案中仅在23旬出现一次生态溢水。

3.2 隔河岩水电站

从图4-c可以发现,均衡调度方案水位在0~15旬低于发电调度方案,下泄流量相对较大,在16~21旬高于发电调度方案,下泄流量相对较小,在24~36旬水位基本一致。

从图4-d可见,0~10旬发电调度方案和均衡调度方案分别在8旬、1旬各出现一次生态溢水;发电调度方案在11~14旬出现连续性的生态缺水,在15~29旬,发电调度方案在15旬、25旬、29旬出现3次生态溢水;30~36旬两种方案下泄流量基本一致。

3.3 高坝洲水电站

从图4-e可以发现,由于高坝洲水电站为日调节型水库,调节库容小,水位变幅较大,发电调度方案出现4次水位大幅度变动,且在低水位持续的时间更久,而均衡调度方案中仅出现了3次,出力相对而言更加稳定。

从图4-f可见,高坝洲在8旬、15旬、25旬出现了3次生态溢水,且在12~14旬出现连续性的生态缺水。

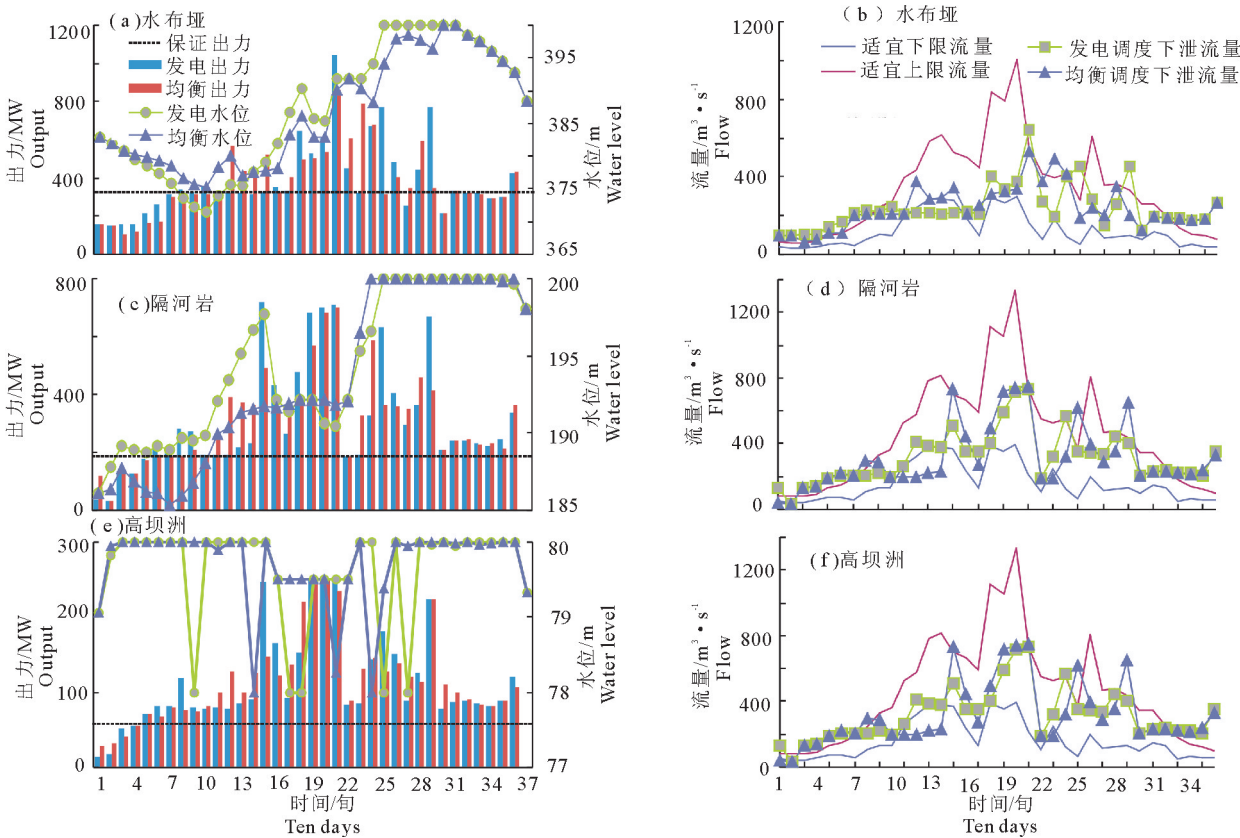


图4 2010年清江梯级优化调度结果

Fig.4 Optimal operation of the Qingjiang cascades using 2010 data

综上所述,均衡调度方案中,下泄流量更能满足生态适宜流量要求,改善了水利工程胁迫下的河道生态流量环境,有效减少了生态溢水量与缺水量。

4 小结

(1)与发电调度方案相比,均衡调度方案能够以损失微小的发电效益和弃水量的小幅增加来获得更大的生态效益,最大程度的满足生态适宜流量要求,下泄流量尽可能落在适宜流量范围之内。

(2)均衡调度方案可以有效减少梯级水电站调度过程中产生的生态溢水与生态缺水,提高了梯级径流生态离差系数,有效改善了水利工程胁迫下的河道生态流量环境。

(3)均衡调度方案减少了水电站的水位大幅波动,使得水电站出力更加稳定,更好地满足电网用电需求。

参考文献

陈端,陈求稳,陈进,2011. 考虑生态流量的水库优化调度模型研究进展[J]. 水力发电学报, 30(5):248-256.

陈炯宏,丁毅,张先平,2013. 清江梯级和三峡梯级防洪库容投入时机方案研究[J]. 水电能源科学, 31(2):80-82, 108.

程根伟,陈桂蓉,2007. 试验三峡水库生态调度,促进长江水沙科学管理[J]. 水利学报, (S1):526-530.

郭文献,夏自强,王远坤,等,2009. 三峡水库生态调度目标研究[J]. 水科学进展, 20(4):554-559.

李捷,夏自强,马广慧,等,2007. 河流生态径流计算的逐月频率计算法[J]. 生态学报, 27(7):2916-2921.

林伟,李英海,董晓华,等,2018. 基于二维嵌套动态规划的清江梯级联合调度研究[J]. 水力发电, 44(6):75-79.

卢有麟,周建中,王浩,等,2011. 三峡梯级枢纽多目标生态优

化调度模型及其求解方法[J]. 水科学进展, 22(6):780-788.

王学敏,周建中,欧阳硕,等,2013. 三峡梯级生态友好型多目标发电优化调度模型及其求解算法[J]. 水利学报, 44(2):154-163.

徐薇,刘宏高,唐会元,等,2014. 三峡水库生态调度对沙市江段鱼卵和仔鱼的影响[J]. 水生态学杂志, 35(2):1-8.

徐鑫,倪朝辉,沈子伟,等,2018. 跨流域调水工程对水源区生态环境影响及评价指标体系研究[J]. 生态经济, 34(7):174-178.

杨侃,郑姣,郝永怀,等,2012. 三峡梯级和清江梯级水电站短期联合优化调度方法研究[J]. 水力发电学报, 31(4):12-15.

张铭,李崇浩,范子武,等,2010. 粒子群算法在梯级水库优化调度中的应用研究[J]. 水力发电, 36(12):60-64.

周建中,李英海,肖舸,等,2010. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报, 41(10):1212-1219.

周研来,郭生练,刘德地,等,2013. 三峡梯级与清江梯级水库群中小洪水实时动态调度[J]. 水力发电学报, 32(3):20-26,46.

邹淑珍,吴志强,张铭,等,2011. 赣江中游水利枢纽群生态优化调度的预测分析[J]. 水生态学杂志, 32(6):61-65.

Saberchenari K, Abghari H, Tabari H, 2016. Application of PSO algorithm in short-term optimization of reservoir operation[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 188(12):667. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5689-1>.

Wang H, Brill E D, Ranjithan R S, et al,2015. A framework for incorporating ecological releases in single reservoir operation[J]. Advances in Water Resources, 78:9-21.

(责任编辑 万月华)

**Optimizing Operation of the Qingjiang Cascaded Hydropower Stations:
Balancing Power Generation and Ecological Regulation**

LIN Wei^{1,2}, LI Ying-hai^{1,3}, GUO Jia-li^{1,3}, XU Wen^{1,3}, XIA Qing-qing¹, WANG Li¹

(1.College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges
University, Yichang 443002,P.R.China;

2.Shanghai Investigation,Design & Research Institute Co,Ltd,Shanghai 200335,P.R.China;

3.Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region,
Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002,P.R.China)

Abstract: Qingjiang River is the second largest tributary of the Yangtze River downstream of Three Gorges and three cascaded hydropower stations, Shuibuya, Geheyan and Gaobazhou, are operating on the river. Ecological operation of cascaded hydropower stations has become an important part of Yangtze River protection and river basin conservation. Additionally, water conservancy departments from provinces and cities have issued ecological flow requirements for numerous reaches of the river. To address these developments, we studied operating conditions that optimize the balance between power generation and ecological regulation for the three cascaded hydropower stations using ten day test periods. Firstly, a ten-day frequency method was used to calculate the ecological flow range for Qingjiang River. Then, an equilibrium operation model was developed for the cascaded dams to optimize the balance between power generation and ecological flow. The model uses an runoff deviation coefficient and is based on a particle swarm optimization method. A comprehensive index system of operation schemes was used to evaluate the model. Finally, we compared an operation scheme that considered only power generation with the equilibrium operation scheme using historical ten-day runoff data (2008 – 2010). Compared with the power generation operating scheme, the equilibrium operation increased the runoff dispersion coefficient by 6.81%, reduced cascade overflow by 5.766 billion m³ and reduced cascade water shortage by 392 million m³. Cascade power generation decreased only slightly, by 1.85%. The optimized operation scheme was examined greater detail by looking at the cascade operation during each 10-day period, of 2010. Discharge from the Shuibuya hydropower station under the optimized operation scheme was close to the upper flow limit from period 1 to 11, and ecological overflows decreased. The discharge was in the appropriate flow range from period 12 to 15, and ecological water shortages decreased. From period 16 to 36, ecological overflows occurred only in period 23. Under the power generation only scheme, an ecological water shortage occurred in periods 11 to 14 at the Geheyan hydropower station and overflows occurred in periods 15, 25 and 29. Under the optimized operation scheme, Gaobazhou hydropower station maintained a high water level, with less fluctuation and a more stable power output. But with the power generation scheme, ecological overflow occurred in periods 8, 15 and 25, and a water shortage occurred from period 12 to 14. In conclusion, the proposed optimal equilibrium scheme improved the ecological flow environment of the river under the pressure of water conservancy projects and provides a scientific basis and decision support for operating cascaded hydropower projects more ecologically.

Key words: Qingjiang cascade hydropower stations; equilibrium operation; ten-day frequency calculation method; particle swarm optimization