

水电站初期蓄水期下游梯级再调节优化策略研究 ——以叶巴滩 - 巴塘 - 苏洼龙梯级水电站为例

谢雨祚^{1,2*}, 李立平¹, 郭卫¹, 朱迪^{1,2}

¹长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

²武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年4月15日; 发布日期: 2026年6月29日

摘要

水电站初期蓄水期间下闸蓄水会对下游来水过程造成剧烈影响, 改变河道生态系统的稳定状态。本文以叶巴滩水电站初期蓄水为研究背景, 构建叶巴滩 - 巴塘 - 苏洼龙梯级水电站协同优化调度模型, 以修正全年流量偏差为目标, 下游奔子栏水文站为考核断面, 采用“参数化 - 模拟 - 优化”框架和自适应差分进化算法求解。结果表明: ① 再调节优化策略为巴塘、苏洼龙梯级在10月27日和11月10日叶巴滩蓄水的两个时间节点后进行反调节, 在叶巴滩水电站蓄至2845 m后需5 d的窗口期, 利用来水回充库容并再次进行补偿调度。② 相对原方案, 优化后奔子栏水文站断面多年平均AAPFD值降低了28.9%, 缓解了叶巴滩水电站初期蓄水对下游流量的不利影响。③ AAPFD值和发电损失量相互制约, 优化策略中巴塘、苏洼龙水电站调度期末可回蓄至正常蓄水位, 不影响后续联合发电调度。

关键词

梯级水电站, 初期蓄水, 协同优化, 径向基函数, 差分进化算法, 金沙江上游

Optimization Strategy for Downstream Cascade Re-Regulation during the Initial Reservoir Impoundment Period

—A Case Study of Yebatan-Batang-Suwalong Cascade Hydropower Stations

Yuzuo Xie^{1,2*}, Liping Li¹, Wei Guo¹, Di Zhu^{1,2}

¹Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

²State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: March 10, 2026; accepted: April 15, 2026; published: June 29, 2026

作者简介: 谢雨祚(1998-), 男, 湖北宣城人, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源分析计算方面研究。

*通讯作者 Email: xieyz@cjh.com.cn

文章引用: 谢雨祚, 李立平, 郭卫, 朱迪. 水电站初期蓄水期下游梯级再调节优化策略研究[J]. 水资源研究, 2026, 15(3): 211-221. DOI: 10.12677/jwrr.2026.153025

Abstract

During the reservoir preliminary impoundment period, gate closure for water storage significantly alters the natural flow regime downstream, destabilizing the ecological equilibrium of the riverine ecosystem. Focusing on the preliminary impoundment of the Yebatan reservoir, a coordinated optimal operation model for the Yebatan-Batang-Suwalong cascade hydropower system is developed in this study, aiming to minimize the Adjusted Annual Proportional Flow Deviation (AAPFD) value, with the Benzilan hydrological station downstream as the control section. The model uses a parameterization-simulation-optimization (PSO) framework integrated with an adaptive differential evolution algorithm. Results demonstrate that: 1) The re-regulation optimization strategy requires counter-regulation by the Batang and Suwalong cascade following the two Yebatan filling time nodes on October 27 and November 10. After the Yebatan reservoir reaches an elevation of 2845 m, a 5-day observation window is needed to replenish storage using incoming flows, followed by compensatory operation. 2) Compared with the original scheme, the optimization reduces the multi-year mean AAPFD value at the Benzilan control section by 28.9%, thereby mitigating the adverse impacts of the initial filling of the Yebatan Hydropower Station on downstream flows. 3) The AAPFD value and power generation losses exhibit a trade-off relationship. Under the optimized strategy, the Batang and Suwalong hydropower stations can refill to their normal storage levels by the end of the regulation period, unaffected subsequent coordinated power generation operations.

Keywords

Cascade Reservoir, Preliminary Impoundment, Coordinated Optimization, Radial Basis Function, Differential Evolution, Upper Jinsha River

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水电站初期蓄水期是指水电站主体工程基本完工后,首次将水电站从空库状态蓄水至死水位(或初期发电死水位)的阶段性过程,该阶段是水电站工程由建设期转向运行期的关键过渡期,需在确保工程安全的前提下逐步提升水位。初期蓄水期的水电站需要满足工程坝体工作形态安全[1]、工程防洪[2]和下游用水需求[3]等,因此具有明确的边界条件和管理要求[3],需具备成熟、规范的工程进度计划和下闸蓄水方案;对水电站所处的流域而言,初期蓄水期应协调流域防洪、发电、航运等多目标需求,否则可能造成坝址长时间断流[3],需尽量减缓电站初期蓄水对流域天然流量的影响,维持水生态系统健康稳定[4]。

国内外相关学者就初期蓄水阶段的水库电站调度开展了大量研究:针对白鹤滩水库初期蓄水,任在民等[5]综合考虑白鹤滩上游二滩和乌东德水库运行、下游溪洛渡和向家坝水库生态及航运用水等要求,制定了上下游梯级水库运行方案,以按期完成蓄水目标。张文斌等[6]以巴塘水电站为研究对象,选用75%来水频率作为典型过程,采用拉格朗日差值公式进行巴塘水电站初期蓄水计算。徐伟峰等[7]以雅口枢纽为研究对象,根据受上游控制性水库调度影响的来水量,构建了雅口航运枢纽初期两阶段蓄水模型,计算了初期蓄水过程。现有研究虽然考虑了上下游梯级对目标水电站初期蓄水方案制定的影响,但主要侧重于目标水电站蓄水方案的制定、保障蓄水任务如期达成。然而,在目标水电站蓄水计划较为完备的背景下,初期蓄水会造成天然流量的剧烈变化,现有研究忽略了初期蓄水对下游重要断面来水过程和梯级水电站发电等影响。

在目标水电站蓄水计划较为完备的背景下，为缓解初期蓄水对下游重要断面来水过程和梯级水电站发电等影响，本文以叶巴滩水电站初期蓄水为研究背景，以下游奔子栏水文站断面为重要节点断面，基于长系列日尺度水文年流量数据，构建叶巴滩-巴塘-苏洼龙梯级水电站协同优化调度模型，对叶巴滩下泄流量进行反调节，采用以 Gaussian RBF 为调度规则的“参数化-模拟-优化”框架和差分进化算法求解，探索下游梯级水电站的反调节对减缓上游水电站初期蓄水影响的优化思路。

2. 研究流域与梯级水电站概况

金沙江上游水能资源丰富，在我国能源资源中具有重要的战略地位。随着我国经济社会发展对电力需求的快速增长，作为西电东送的主要来源，金沙江上游水电资源的开发对于西部资源优势向经济优势的转化具有重要作用[8]。金沙江上游规划河段采取 13 级开发，总装机容量 13,920 MW，发电量 642.3 亿 kW·h，调节库容 64.4 亿 m³ [9]，目前仅巴塘和苏洼龙水电站正式投产发电。叶巴滩水电站为金沙江上游 13 级的第 7 级，其上游暂无投产运行水电站，叶巴滩水电站初期蓄水阶段从初始水位起至蓄至死水位 2855 m 止。

叶巴滩-巴塘-苏洼龙梯级水电站均由华电金沙江上游水电开发有限公司建设管理，图 1 绘出梯级水电站概化示意图和重要水文站点位置。其中，岗拖、巴塘水文站为叶巴滩水电站设计依据站，其坝址径流系列按控制流域面积内插推求，可生成坝址 1959~2024 年日尺度径流系列。而奔子栏水文站断面为《长江流域综合规划（2012~2030 年）》设置的长江流域主要控制节点，其生态基流为 234 m³/s；叶巴滩、巴塘和苏洼龙水电站需满足最小下泄流量分别不低于 165、171 和 180 m³/s。

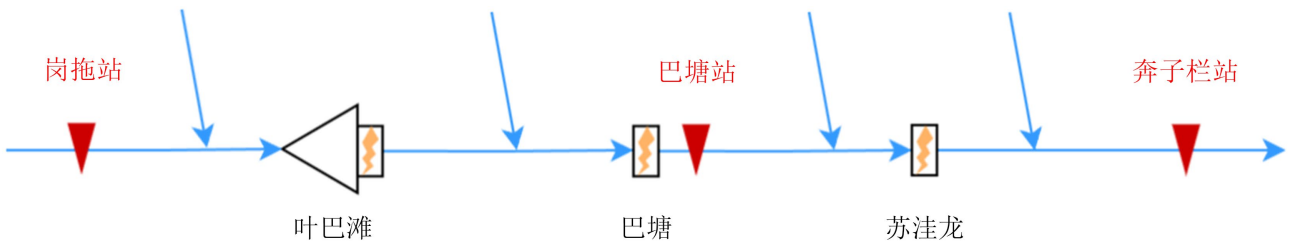


图 1. 梯级水电站和水文站点概化图

3. 梯级水电站协同优化研究方法

3.1. 叶巴滩水电站初期蓄水方案

根据叶巴滩水电站下闸蓄水规划原则，下闸蓄水满足上下游梯级调度运行要求，需要保证下游生态用水要求，且尽量减少对涉及电站的影响等。需要说明的是，初期蓄水阶段，叶巴滩水库蓄水速率需综合考虑工程蓄水需求及蓄水过程对坝体应力的影响，并以水位作为核心控制指标，具体要求为：2820 m 高程以下可考虑不控制库水位的上升速率，在满足叶巴滩水电站最小下泄流量的前提下，多余来水均可蓄入水电站；2820 m 高程以上按上升速率 ≤ 5 m/d 的速度控制，以满足大坝自调整、自适应过程；同时在 2845 m 高程需维持水位运行不少于 5 d，以监测其影响。

对叶巴滩水电站，其出库流量根据下闸程序和蓄水速率概化为调度规则 $\pi_1^{\text{PLAN}}(\bullet)$ ：

$$Q_1^{\text{PLAN}}(t) = \pi_1^{\text{PLAN}}(t, I_1(t), V_1(t)) \quad (1)$$

式中： $Q_1^{\text{PLAN}}(t)$ 为叶巴滩水电站依据下闸程序于 t 时刻的出库流量，m³/s； $I_1(t)$ 为叶巴滩水电站于 t 时刻的入库流量，m³/s； $V_1(t)$ 为叶巴滩水电站于 t 时刻的库容，亿 m³。初期蓄水过程中，叶巴滩水电站的下泄流量主要由时间、叶巴滩入库流量和叶巴滩库容决定，因此式(1)将调度规则表示为时间、叶巴滩入库流量和叶巴滩库容的

函数关系, $\pi_1^{\text{PLAN}}(\bullet)$ 中括号内的 “ $\bullet$ ” 为占位符, 是省略函数自变量的简写表达。

3.2. 叶巴滩 - 巴塘 - 苏洼龙梯级水电站联合调度模型

在上游叶巴滩水电站初期蓄水计划的约束下, 结合 “参数化 - 模拟 - 优化” 框架与差分进化算法, 建立叶巴滩 - 巴塘 - 苏洼龙梯级水电站联合优化调度模型。

3.2.1. 目标函数

初期蓄水期间梯级水电站优化目标紧扣叶巴滩水电站下闸蓄水规划原则, 综合考虑生态与发电等需求。自然水文情势是维持生物多样性和生态系统完整性的基础, 其未经调蓄的自然状态通常对应着最优的生态完整性。由于叶巴滩水电站未受上游大型水工程设施调蓄影响, 若能对其初期蓄水期间下泄流量进行反调节, 还原天然径流过程, 就能够在一定程度上减缓水电站调度对下游河道生态环境的不利影响, 提升河流生境质量[10]。修正全年流量偏差(Amended Annual Proportional Flow Deviation, AAPFD) [11]能够反映了水电站入库和出库引起的流量变化对河流生态系统的影响, 是一种常用的水文指数[12], AAPFD 值越大, 河流健康状况越差。本研究优化目标为奔子栏水文站断面初期蓄水期 AAPFD 值最小。

叶巴滩水电站初期蓄水需要尽量减少巴塘和苏洼龙水电站的发电损失, 且需保证初期蓄水末期巴塘和苏洼龙水电站的水位能够回蓄至正常蓄水位, 不影响后续巴塘、苏洼龙水电站正常运行。因此, 分别将损失电量与末期水位差额作为罚函数构建目标函数。分别归纳模型中初期蓄水期目标函数、 t 时段各水电站发电量、 t 时段各水电站发电出力、 t 时段各水电站净水头计算公式见式(2)至式(5)。其中, 式(2)的发电量部分由式(3)计算, 式(3)由式(4)算得, 式(4)中净水头由式(5)求得。

$$\min f = \sqrt{\sum_{t=1}^T \left(\frac{I_{\text{bzl}}(t) - I_{\text{bzl}}^{\circ}(t)}{I_{\text{bzl}}^{\circ}(t)} \right)^2} + \lambda_1 \sum_{m=2}^M \sum_{t=1}^T (E_m^{\circ}(t) - E_m(t)) + \lambda_2 \sum_{m=2}^M (Z_{\text{zc},m} - Z_m(t)) \quad (2)$$

$$E_m(t) = N_m(t) \cdot \Delta t \text{ 或 } E_m^{\circ}(t) = N_m^{\circ}(t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$N_m(t) = K_m Q_m(t) H_m(t) \text{ 或 } N_m^{\circ}(t) = K_m Q_m^{\circ}(t) H_m(t) \quad (4)$$

$$H_m(t) = (Z_{\text{u},m}(V_m(t)) + Z_{\text{u},m}(V_m(t+1))) / 2 - Z_{\text{d},m}(O_m(t)) - H_{\text{s},m} \quad (5)$$

式中: t 为时间变量, s; T 为研究时段总长度, $t=1,2,\dots,T$; Δt 为调度时间尺度; m 为梯级水电站(总数为 M) 从上至下的序号, $m=1,2,\dots,M$; $H_{\text{s},m}$ 为第 m 座水电站的发电水头损失, m; $I_{\text{bzl}}(t)$ 和 $I_{\text{bzl}}^{\circ}(t)$ 分别为考虑叶巴滩 - 巴塘 - 苏洼龙梯级水电站联合调度和天然情况下的奔子栏水文站断面流量, m^3/s ; $E_m(t)$ 和 $E_m^{\circ}(t)$ 分别为考虑和不考虑上游叶巴滩水电站初期蓄水的巴塘和苏洼龙水电站发电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$, $m=2$ 或 3 , 两者公式一致, 区别仅在于发电流量, 前者为受叶巴滩初期蓄水影响(入库流量为 $Q_m(t)$)的发电量, 后者为天然入库流量($Q_m^{\circ}(t)$)下的发电量, 因此仅作 $E_m(t)$ 的公式解释, 对 $E_m^{\circ}(t)$ 不再赘述, 且对 $N_m(t)$ 和 $N_m^{\circ}(t)$ 的区别不再赘述; $Z_{\text{zc},m}$ 为第 m 座水电站的正常蓄水位, m; $Z_m(t)$ 分别为第 m 座水电站在 t 时段的水位; λ_1 和 λ_2 为罚函数因子, 分别用于惩罚发电损失增大、调度期末巴塘和苏洼龙水电站水位并未恢复至正常蓄水位的情况。 $N_m(t)$ 为第 m 座水电站在 t 时段的出力, MW; $H_m(t)$ 为第 m 座水电站在 t 时段的净水头, m; $Q_m(t)$ 和 $O_m(t)$ 分别为第 m 座水电站在 t 时段的发电流量和出库流量, m^3/s ; $V_m(t)$ 和 $V_m(t+1)$ 分别为第 m 座水电站在 t 和 $t+1$ 初、末时段的水电站库容, m^3 ; $Z_{\text{u},m}(\bullet)$ 为第 m 座水电站坝上水位 - 库容关系函数; $Z_{\text{d},m}(\bullet)$ 为第 m 座水电站尾水位 - 出库流量关系函数。

3.2.2. 约束条件

梯级水电站联合调度主要约束条件依次列出如下:

1) 水量平衡约束: 水电站调度的核心物理基础方程, 刻画水电站时段内蓄水状态的动态变化规律。

$$V_m(t+1) = V_m(t) + (I_m(t) - O_m(t)) \cdot \Delta t \quad (6)$$

2) 梯级水力联系约束：梯级联合调度区别于单站调度的约束，定义上下游水库间的空间水力传递关系，实现梯级径流的时序衔接。

$$I_{m+1}(t) = f_r(O_m(t-\tau)) + Q_{z,m}(t) \quad (7)$$

3) 电站机组出力约束：水电站发电能力的物理边界，关联电站蓄水状态、泄流决策与调度优化目标。

$$N_m^{\min}(t) \leq N_m(t) \leq N_m^{\max}(t) \quad (8)$$

4) 水库库容及变幅约束：水库蓄水状态的物理安全边界，针对水量平衡方程中的状态变量设置运行限制，确保电站运行安全。

$$V_m^{\min}(t) \leq V_m(t) \leq V_m^{\max}(t) \quad (9)$$

$$|Z_m(t+1) - Z_m(t)| \leq \Delta Z_m^{\max} \quad (10)$$

5) 出库流量约束，为水库泄流决策的运行边界，针对水量平衡方程中的决策变量设置限制，兼顾下游用水安全与河道稳定。

$$O_m^{\min}(t) \leq O_m(t) \leq O_m^{\max}(t) \quad (11)$$

6) 非负约束，为模型数学求解的通用基础规则，确保所有变量符合现实物理意义。

$$V_m(0) = V_{b,m}, V_m(T) = V_{e,m} \quad (12)$$

式中： $I_m(t)$ 为 t 时段第 m 座水电站的入库流量， m^3/s ； $Q_{z,m}(t)$ 为第 m 和 $m+1$ 座水电站的区间流量， m^3/s ； $f_r(\cdot)$ 为水电站出库流量演算至下游水电站的函数，可采用错时相加或马斯京根法； τ 为滞时， s ，可根据长江水利委员会拟定的洪水平均传播时间确定。 $N_m^{\min}(t)$ 、 $N_m^{\max}(t)$ 分别为 t 时段第 m 座水电站的最小/最大出力限制， kW ； $V_m^{\min}(t)$ 、 $V_m^{\max}(t)$ 分别为 t 时段第 m 座水电站的最小/最大库容限制， m^3 ； $O_m^{\min}(t)$ 和 $O_m^{\max}(t)$ 分别为 t 时段第 m 座水电站的最小/最大出库流量限制， m^3/s ； $\Delta Z_m^{\max}$ 为第 m 座水电站相邻时段最大水位变幅， m^3 ； $V_{b,m}$ 和 $V_{e,m}$ 分别为第 m 座水电站调度期初、末库容， m^3 。

3.2.3. 优化调度规则和优化算法

决策因子指水电站与调度目标有相互关系、影响水电站蓄放水策略的因子，可以建模为决策变量的函数[13]。调度决策通常以实时库容/水位状态和入库流量作为最基本的决策参考。考虑到叶巴滩至苏洼龙的未控区间较小（相差 5.96%），因此梯级水电站决策因子中的入库流量仅设为叶巴滩入库流量。以日为最小时间单元，选取叶巴滩入库流量 $I_1(t)$ ，巴塘和苏洼龙水电站库容共计三个变量作为决策因子向量 $\mathbf{x}(t)$ ：

$$\mathbf{x}(t) = [V_m(t), I_1(t) | m=2,3] \quad (13)$$

并在 $[0, 1]$ 区间进行归一化处理。

径向基函数(RBF) $\phi(\mathbf{x}) = \phi(\|\mathbf{x}\|)$ 是一种沿径向对称的标量函数，表示变量空间距离和函数值的关系，通过多个径向基函数的线性组合，可构建具有高度适应性的响应曲面模型，有效表征复杂非线性系统的输入输出关系，可作为逼近马尔科夫决策过程的决策变量的函数[14]。RBF 的类型因 $\phi(\cdot)$ 函数而异，研究表明[15]当 $\phi(\cdot)$ 为高斯函数时(即 Gaussian RBF)拟合水电站调度规则的效果较好，因此采用 Gaussian RBF 结合所拟定的决策因子向量 $\mathbf{x}(t)$ ，构建水电站优化调度规则如下：

$$O_m^{\text{RBF}}(t) = \pi_m^{\text{RBF}}(\mathbf{x}(t)) = \sum_{i=1}^I \omega_{m,i} \phi_i(\mathbf{x}(t)), \quad m=2,3 \quad (14)$$

$$\varphi_i(\mathbf{x}(t)) = \exp \left\{ - \left[\sum_{j=1}^J \frac{(\mathbf{x}_j(t) - c_{j,i})^2}{b_{j,i}^2} \right] \right\} \quad (15)$$

式中： $O_m^{\text{RBF}}(t)$ 为 t 时刻由RBF生成的第 m 座水电站出库流量， m^3/s ； I 为各座水电站所采用的 Gaussian RBF 的数量； π_m^{RBF} 为由 Gaussian RBF 构建的调度规则； J 为决策因子 $\mathbf{x}(t)$ 中变量的个数； $\omega_{m,i}$ 为第 m 座水电站第 i 个 Gaussian RBF 对应的权重，满足 $\omega_{m,i} \in [0,1], \forall i$ 且 $\sum \omega_{m,i} = 1$ ； $c_{j,i}$ 、 $b_{j,i}$ 分别为第 i 个 Gaussian RBF 的参数， $c_{j,i} \in [-1,1], b_{j,i} \in (0,1], \forall i, j$ 。

采用 Gaussian RBF 构建调度规则时，所需参数 $[\omega_{m,i}, c_{j,i}, b_{j,i}, p_1, p_2]$ 的数量为 $I(M+2J)$ 个。本研究中 $J=3$ 、 $M=2$ 。由于初期蓄水历时不长，为了避免 Gaussian RBF 数量较少或较多可能导致的欠拟合或运行成本较高情况，各水电站均采用 5 个 Gaussian RBF ($I=5$)描述调度规则，则梯级水电站调度规则共计 40 个参数。每个 $\varphi_m(\cdot)$ 对应一种函数响应模式，不同模式按不同权重 ω_m 线性相加，可得到基于 Gaussian RBF 的 m 水电站 t 时段最终的出库流量 $O_m^{\text{RBF}}(t)$ 。

本研究采用自适应差分进化(Adaptive Differential Evolution/rand/1/bin/radius limited, ADE)算法求解优化模型[16]。与标准差分进化(Differential Evolution/rand/1/bin, DE)算法相比，自适应机制使 DE 算法变体的参数能够根据进化搜索的反馈动态改变控制参数[17]。而半径限制采样(Radius Limited Sampling)则是借鉴了琐碎地理(Trivial Geography)的概念[18]：在自然进化中，生物个体的交配、竞争等交互更可能发生在地理距离较近的个体之间，而非随机与整个种群互动。在进化算法中，“琐碎地理”简化了这种空间关系——为种群中的每个个体分配一个虚拟的“空间位置”(通过索引、距离函数等抽象定义)，使下一代的个体不再从整个种群中随机挑选，而是仅在当前较优个体的“虚拟半径范围”内选择候选个体。本研究设置初始种群数量为 2000，算法最大优化步数为 1000 万，相当于对目标函数计算约 1000 万次。

4. 结果分析

4.1. 叶巴滩水电站初期蓄水过程

根据叶巴滩水电站坝址 1959~2024 年日尺度径流系列，整理成 1959 年 6 月~2024 年 5 月的水文年系列，由于叶巴滩水电站初期蓄水主要集中在 10~12 月，统计 10~12 月叶巴滩坝址来水频率，再按各水文年 10 月 6 日导流洞分序下闸考虑，首先根据式(1)进行长系列径流计算，得到叶巴滩水电站历年水位及出库流量过程如图 2 所示，图中来水频率由枯到丰依次按黄绿蓝紫顺序表示。从图 2 中可以看出：① 叶巴滩初期蓄水主要过程可分为

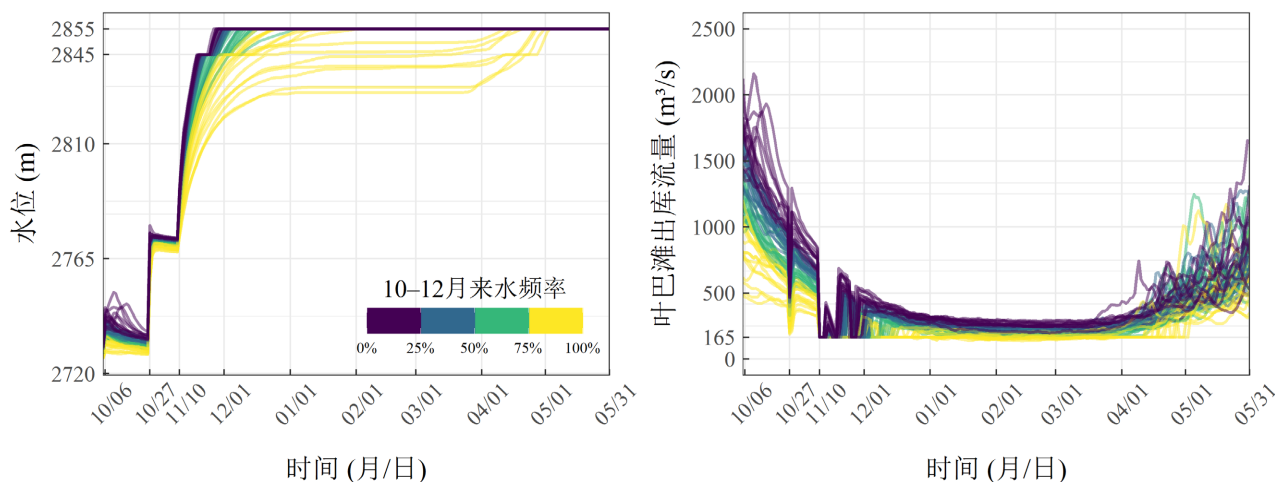


图 2. 叶巴滩水电站初期蓄水期多年模拟调度过程图

三段：10月27日至11月9日，叶巴滩蓄至2765 m以上；11月10日至水位达2845 m，叶巴滩水位蓄至2845 m之后维持水位运行5 d；水位从2845 m至2855 m，完成初期蓄水目标。② 叶巴滩水电站大于75%频率来水时可在次年1月初之前完成蓄水目标，之后按来水泄放流量；小于75%来水时最迟在次年5月初蓄至2855 m。③ 叶巴滩水电站出库流量主要在10月27日左右、11月10日至11月底出现较大幅度波动，在短时间内可能会影响生态系统稳定，整个蓄水阶段出库流量过程均不低于最小下泄流量165 m³/s。

综上所述，初期蓄水期间，叶巴滩水电站对入库流量进行了拦蓄，极大改变了天然来水过程，而来水过程的断层变化可能会影响该时期内的河流生境。基于叶巴滩多年初期蓄水过程，在开展下游梯级再调节优化策略研究时，确定以历年10月6日至次年5月31日为研究时段，缓解10月27日至10月底、11月10日至11月底两个时段流量断层变化的现象。

4.2. 下游巴塘 - 苏洼龙梯级水电站再调节优化结果

本文拟定原方案仅考虑下游巴塘和苏洼龙梯级水电站对最小下泄流量的补偿调度，优化方案采用高斯径向基函数构建巴塘和苏洼龙水电站的调度规则，采用自适应差分进化算法求解叶巴滩 - 巴塘 - 苏洼龙梯级水电站优化调度模型，其中AAPFD值计算范围为历年10月6日至次年5月31日，与优化调度的研究时段保持一致。

4.2.1. 多年平均结果比较

原方案和优化方案多年平均调度结果如表1所示，绘制巴塘、苏洼龙水电站多年优化调度坝上水位过程和奔子栏站多年流量过程如图3所示，图中曲线表示多年平均值，条带表示2%~98%分位区间。从图表中可以看出：① 当以AAPFD值为主要目标时，尽管以发电量损失量为惩罚因子，但是AAPFD值减少的同时，总发电损失量增加，说明叶巴滩水电站初期蓄水期间，AAPFD值和总发电损失量相互制约。优化方案的AAPFD值相较原方案减少了1.13(-28.9%)；而总发电损失量增加了0.25亿kWh(+13.7%)，其中以苏洼龙水电站发电量损失更大。② 从优化调度坝上水位过程可知，巴塘水电站于10月27日下泄流量进行首次流量下泄后，回蓄至正常蓄水位，于10月27日和苏洼龙水电站一同下泄流量至较低水位，利用叶巴滩2845 m水位平台的5 d观察期，回蓄一定库容后再次进行

表 1. 梯级水电站优化方案和原方案多年计算结果对比表

方案类型	AAPFD 值	发电损失量(亿 kWh)			调度期末巴、苏水位是否回蓄至正常蓄水位
		巴塘水电站	苏洼龙水电站	总计	
原方案	3.91	0.729	1.109	1.84	是
优化方案	2.78 (-28.9%)	0.769 (+5.4%)	1.322 (+19.2%)	2.09 (+13.7%)	

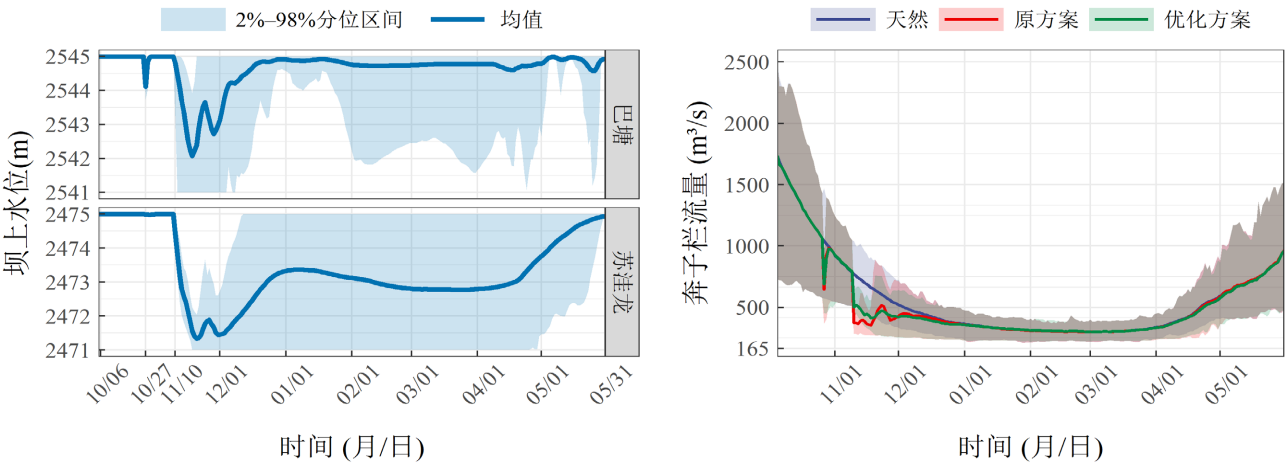


图 3. 巴塘和苏洼龙水电站优化调度过程图和奔子栏水文站流量过程对比图(多年)

下泄,随后巴塘水电站回蓄至较高水位,而苏洼龙水电站回蓄较缓慢,这也是苏洼龙水电站发电损失量较大的原因。

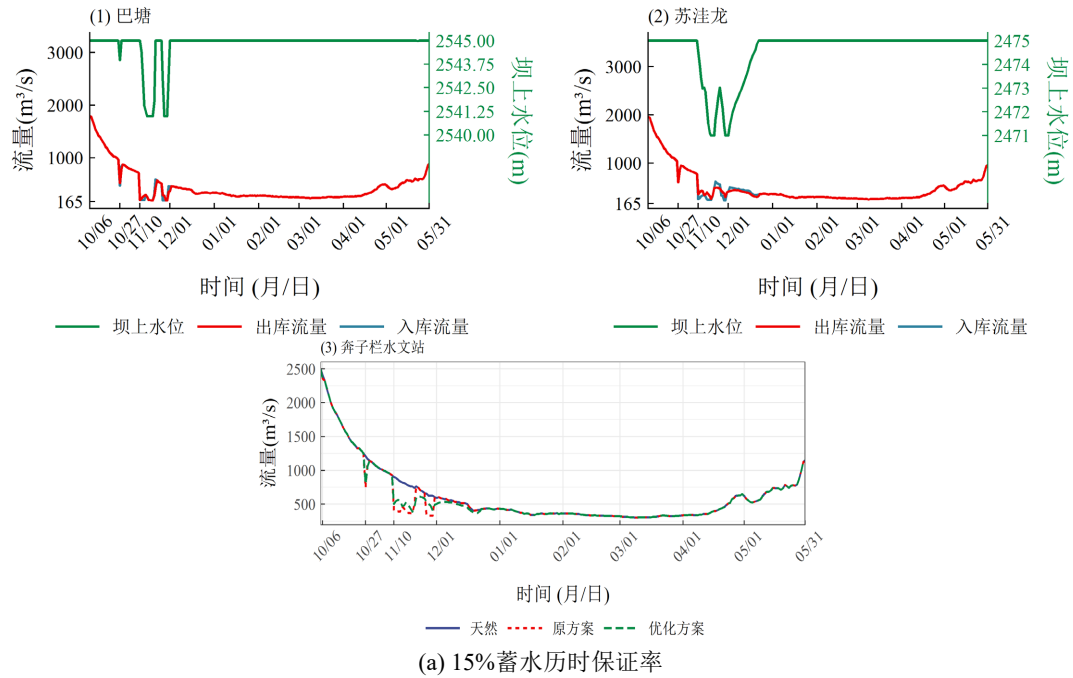
③ 优化方案的奔子栏水文站流量过程,相比原方案,10月27日和11月10日的流量突变情况有所缓解,其它时段优化再调节后的流量过程更加平滑,其2%~98%分位区间相对原方案更窄,叶巴滩初期蓄水阶段优化方案的2%分位数高于原方案。长系列历史流量数据覆盖由丰到枯的不同水情,所得出的下游巴塘-苏洼龙梯级水电站再调节优化策略能够根据实际来水情况进行适应性调整,符合工程实际面对未来不确定来水的调度需求。

4.2.2. 典型年结果比较

根据式(1)进行长系列径流计算,得到叶巴滩水电站下闸蓄水计划下的蓄满历时,再根据历时保证率进行排队,筛选出15%(1965年)、50%(1991年)和85%(1970年)蓄水历时保证率作为典型年进行实例分析调度结果,三个典型年蓄水历时分别为54、59和97d,其中85%蓄水历时保证率典型年叶巴滩水电站无法在年底蓄至死水位2855m。原方案和优化方案调度结果见表2所示,各典型年调度过程图见图4所示。从图表中可以看出:① 优化方案15%、50%和85%蓄水历时保证率的AAPFD值分别降低了28.5%、29.4%和28.9%,而巴塘、苏洼龙水电站总发电损失量分别增加了13.7%、13.6%和13.5%,AAPFD值越小、总发电损失量越大,同样反映了生态和发电相互制约的关系。② 巴塘和苏洼龙水电站分别在10月27日和11月10日叶巴滩蓄水的两个时间节点进行反调节,在叶巴滩水电站蓄至2845m之后的维持水位运行以监测坝体应力影响的5d窗口期,利用天然来水

表 2. 梯级水电站优化方案和原方案多年计算结果对比表

方案类型	蓄水历时保证率	AAPFD 值	发电损失量(亿 kWh)			调度期末巴、苏水位是否回蓄至正常蓄水位
			巴塘水电站	苏洼龙水电站	总计	
原方案	15%	3.89	0.723	1.104	1.827	是
	50%	4.02	0.73	1.112	1.842	
	85%	3.95	0.734	1.114	1.848	
优化方案	15%	2.78 (-28.5%)	0.762 (+5.4%)	1.316 (+19.2%)	2.078 (+13.7%)	
	50%	2.84 (-29.4%)	0.771 (+5.6%)	1.321 (+18.8%)	2.092 (+13.6%)	
	85%	2.81 (-28.9%)	0.769 (+4.8%)	1.328 (+19.2%)	2.097 (+13.5%)	



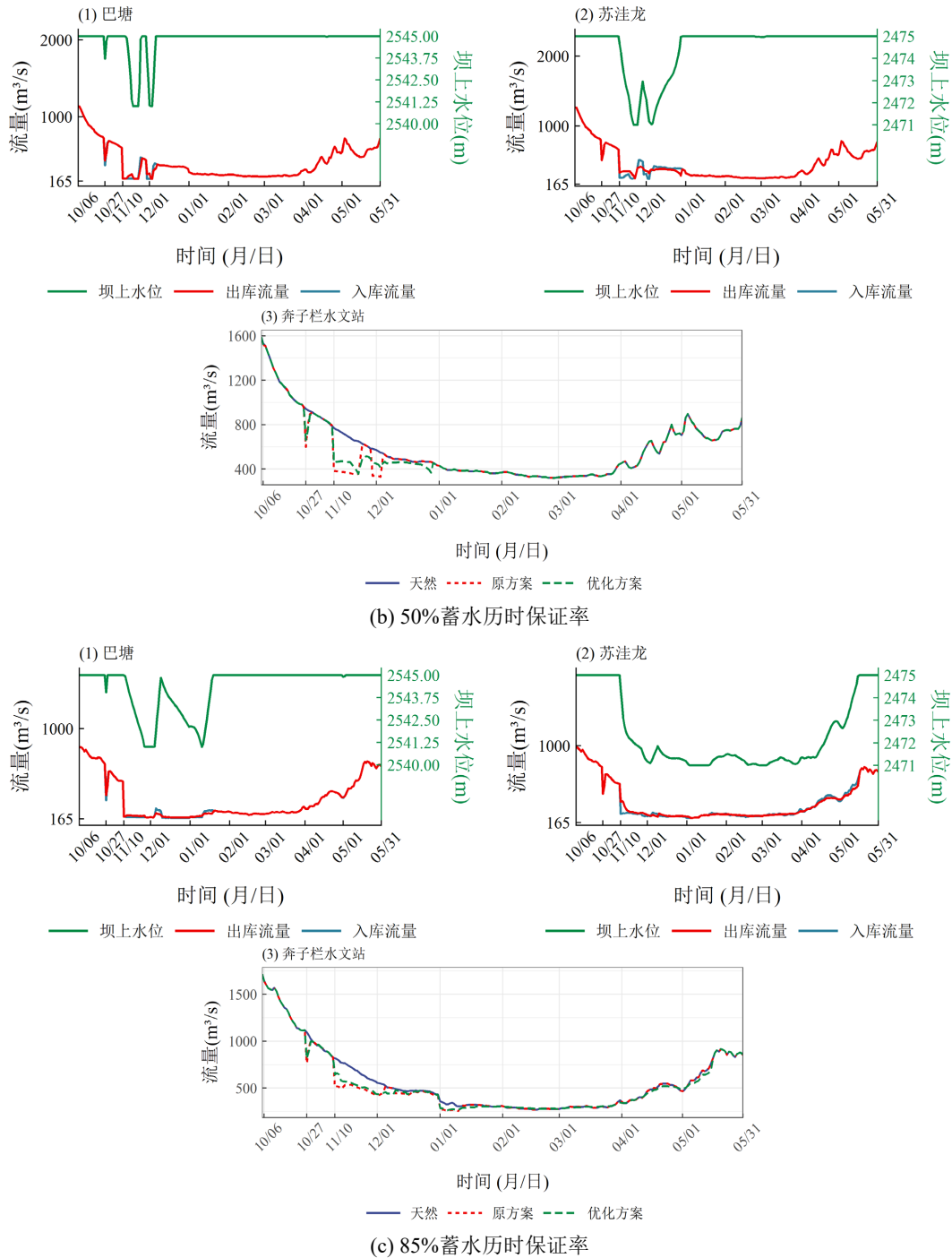


图 4. 巴塘和苏洼龙水电站优化调度过程图和奔子栏水文站流量过程对比图(典型年)

回充库容并再次进行补偿调度, 缓解流量突变对生态造成的不利影响。且年底巴塘、苏洼龙水电站水位均能回蓄至正常蓄水位, 不会影响后续联合发电调度的开展。③ 15%和 50%蓄水历时保证率下典型年调度差异不大, 叶巴滩(巴塘和苏洼龙)水电站能在年底蓄至 2855 m (回蓄至正常蓄水位); 而 85%蓄水历时保证率下优先保证调节库容较小的巴塘水电站尽早回蓄至正常蓄水位, 而调节库容较大的苏洼龙水电站在枯水期来水较小的情况下, 仅能在 5 月回蓄至正常蓄水位。经过下游巴塘、苏洼龙水电站的补偿调度, 奔子栏水文站断面的流量过程更加

平缓、在一定程度上缓解了叶巴滩水电站初期蓄水对下游生态造成的不利影响。

5. 结论

水电站初期蓄水过程会对天然径流过程产生显著的拦蓄扰动，引发下游河道水文情势变化、河流生态系统生境退化等问题，是流域水电开发与生态环境保护协同发展中亟需破解的关键技术难题。针对叶巴滩水电站初期蓄水对径流过程的改变影响，本文构建了兼顾生态与发电的叶巴滩-巴塘-苏洼龙梯级水电站协同优化调度模型，以奔子栏水文站断面 AAPFD 值为目标函数，考虑发电损失和回蓄库容的惩罚，采用自适应差分进化算法求解，系统分析了多年和不同来水保证率下协同调度的生态效益、运行机制与效益权衡规律，研究结论如下：

1) 下游梯级水电站的协同反调节是缓解上游水电站初期蓄水拦蓄对天然径流过程扰动的有效手段。针对叶巴滩水电站初期蓄水过程，巴塘、苏洼龙梯级协同优化调度策略为：在叶巴滩水电站 10 月 27 日、11 月 10 日两个蓄水时间节点后，下游梯级电站同步启动反调节以补偿上游拦蓄导致的下游流量缺口；在叶巴滩水电站蓄至 2845 m 后需观察 5 d 的窗口期，充分利用来水完成下游梯级电站库容回蓄，实现后续补偿调度的可持续性。

2) 梯级协同优化调度方案显著改善下游控制断面的水文情势。对比单电站初期蓄水的原方案，梯级协同优化方案在多年平均、15%丰水保证率、50%平水保证率、85%枯水保证率四种典型工况下，奔子栏水文站控制断面的 AAPFD 值分别降低了 28.9%、28.5%、29.4%和 28.9%，不同来水工况下生态水文情势的改善幅度均接近 30%，证实了该方案在枯水年等不利蓄水工况下仍具备稳定的径流修复能力。

3) 本研究明确了梯级水电站初期蓄水协同调度中，生态水文修复效益与梯级发电效益的制约机制：AAPFD 值的降低依赖巴塘、苏洼龙水电站调节库容的充分动用，通过反调节对冲上游蓄水扰动的过程，会打破电站原有的最优发电运行计划，且生态修复效果越好，下游电站发电损失越高。

基金项目

由国家自然科学基金项目(524B2128)和湖北省自然科学基金项目(2024AFD354)资助。

参考文献

- [1] 徐建荣, 王兴旺, 王建新, 等. 白鹤滩拱坝初期蓄水库岸变形机理研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(5): 31-41.
- [2] 赵太平. 水电工程蓄水安全鉴定中工程防洪应注意的问题[J]. 水力发电, 2010, 36(11): 91-93.
- [3] 张建华, 姚福海, 肖培伟, 等. 瀑布沟水电站下闸蓄水初期向下游供水方案及其实施[J]. 水力发电, 2010, 36(6): 26-28.
- [4] 李云玲, 袁勇, 徐震. 关于在推进江河保护治理中强化幸福河湖建设的思考[J]. 中国水利, 2025(14): 23-27.
- [5] 任在民, 王鹏飞, 王玮, 等. 考虑上下游复杂水力联系的水库初期蓄水方案研究——以白鹤滩水库为例[J]. 人民长江, 2023, 54(10): 228-234.
- [6] 张文斌, 李进, 毕小剑, 等. 金沙江上游巴塘水电站水库初期蓄水方案研究[J]. 四川水力发电, 2024, 43(3): 141-144.
- [7] 徐伟峰, 邴建平, 贾建伟, 等. 多约束条件下汉江雅口枢纽初期蓄水研究[J]. 人民长江, 2024, 55(11): 185-189.
- [8] 崔磊, 顾洪宾, 高繁. 水电开发利用金沙江自然河段的分析与建议[J]. 水力发电, 2022, 48(1): 1-4, 129.
- [9] 胡江军, 李溪然, 崔磊, 等. 金沙江上游水电梯级开发碳汇效应评估[J]. 水力发电, 2022, 48(12): 1-6, 61.
- [10] 陈悦云, 梅亚东, 蔡昊, 等. 面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度研究[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 628-638.
- [11] 童华敏, 王炜, 文昌斌, 等. 基于随机动态规划的水库生态优化调度研究[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(9): 1924-1929.
- [12] LADSON, A. R., WHITE, L. J. An index of stream condition: reference manual. Melbourne: Department of Natural Resources and Environment, Waterways Unit, 1999.
- [13] 杨光, 郭生练, 陈柯兵, 等. 基于决策因子选择的梯级水库多目标优化调度规则研究[J]. 水利学报, 2017, 48(8): 914-923.
- [14] 李芳芳, 曹广晶, 王光谦. 考虑径流不确定性的水库优化调度响应曲面方法[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 49-54.
- [15] GIULIANI, M., CASTELLETTI, A., PIANOSI, F., et al. Curses, tradeoffs, and scalable management: Advancing evolutionary

- multiobjective direct policy search to improve water reservoir operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016, 142(2): 04015050. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000570](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000570)
- [16] ZHANG, J., SANDERSON, A. C. Adaptive differential evolution. Berlin: Springer, 2009.
- [17] 程毅. 基于差分进化-自适应 Metropolis 算法的嘉陵江水库群联合供水调度[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(9): 1232-1240.
- [18] SPECTOR, L., KLEIN, J. Trivial geography in genetic programming. In: YU, T., RIOLO, R. and WORZEL, B., Eds., Genetic programming theory and practice III. Boston: Springer US, 2006: 109-123. https://doi.org/10.1007/0-387-28111-8_8