

考虑预报不确定性的梯级水库群联合优化调度

赵紫薇¹, 杨哲^{1,2}, 张全旺¹, 宋松柏^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为实现梯级水库发电和生态效益双赢,构建了“预报→调度→风险分析”动态模拟链;借助预报演进鞅模型(MMFE)揭示预报误差演进过程,基于拉丁超立方采样的蒙特卡洛模拟(MCS)方法生成滚动入库径流情景。以清江流域梯级水库群为例,在知晓区域不确定性水情信息的基础上,对水布垭、隔河岩水库下游控制断面最小、适宜和理想等级生态流量进行计算,构建梯级水库群发电-生态效益协同调控模型,并借助多目标混合蛙跳算法(MOSFLA)进行求解,分析了径流预报不确定性影响下水量调控的潜在风险。结果表明,该模拟方法能够动态识别从径流预报到水库调度传递的不确定性信息,有助于降低水量调控的潜在风险,提高梯级水库水资源调节的稳健性。

关键词:梯级水库;预报不确定性;多目标优化调度;MOSFLA;风险分析;生态流量;清江流域

中图分类号:TV697.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)04-0067-09

Joint optimal operation of cascade reservoirs considering forecast uncertainty//ZHAO Ziwei¹, YANG Zhe^{1,2}, ZHANG Quanwang¹, SONG Songbai^{1,2} (1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to achieve a win-win situation for both power generation and ecological benefits of cascade reservoirs, a dynamic simulation chain of “forecasting-scheduling-risk analysis” was constructed. The forecast error evolution process was revealed by the martingale model of forecast evolution (MMFE). The rolling inflow forecast scenarios were generated by the Monte Carlo simulation (MCS) based on Latin hypercube sampling (LHS). Using cascade reservoirs in the Qingjiang River Basin as an example, on the basis of regional hydrological information with uncertainty, the minimum, suitable, and ideal ecological flow rates of the downstream control sections of the Shuibuya and Geheyan reservoirs were calculated, and a synergistic regulation model of power generation and ecological benefit of cascade reservoirs was constructed and solved using the multi-objective shuffling frog leaping algorithm (MOSFLA). The potential risk of water regulation under the influence of runoff forecast uncertainty was analyzed. The results demonstrate that the proposed model can dynamically identify the uncertain information propagated from the inflow forecast to reservoir scheduling, helping to reduce potential water regulation risk and enhance the robustness of water resources regulation for cascade reservoirs.

Key words: cascade reservoirs; forecast uncertainty; multi-objective optimal scheduling; MOSFLA; risk analysis; ecological flow; the Qingjiang River Basin

在高效的水库管理中,入库径流预报发挥着至关重要的作用^[1]。当前机器学习算法虽然在径流预报、水库调度方面取得了良好的成果,但在预测中长期入库径流时准确性低。虽然新兴的深度学习方法预测精度明显提高,但仅限于短期预测^[2-5]。径流预报的不确定性会给梯级水库的兴利和生态造成一定程度的影响^[6-8]。

为降低预报不确定性对梯级水库群联合优化调度的影响,基于物理的和数据驱动的入库径流预报模型被广泛探索。例如:Wang等^[9]提出了一种基于改进灰狼优化器(IGWO)和支持向量机(SVM)^[10]的嵌入式预测模型(EFS-SVMIGWO);张科峰等^[11]聚焦于非平稳条件下水文变量间动态可变的相依性特征,开发了一个考虑非平稳的图形建

基金项目:国家自然科学基金项目(52109034);中国博士后科学基金项目(2023M732891);唐仲英基金会项目(K4050723175);陕西省博士后科学基金项目(2023BSHYDZZ64)

作者简介:赵紫薇(1999—),女,硕士研究生,主要从事水资源调度研究。E-mail:17861501928@nwfufu.edu.cn

通信作者:杨哲(1991—),男,副教授,博士,主要从事流域水文模拟预报与水资源调度研究。E-mail:zyang7279@nwfufu.edu.cn

模-贝叶斯网络 (NGM-BNs) 模型。尽管学者们不断努力提高预测的准确性,但完美的预测是不可能实现的。因此,应将水库调度问题视为考虑预测不确定性的多目标优化问题^[12]。近年来,国内外学者开发了许多水文预报不确定性的量化方法,主要包括贝叶斯概率水文预报法、误差概率分布法、分位数回归法、广义线性模型等。例如:蒋志强等^[13]提出了一种水电站发电调度模糊风险分析模型,该模型实现了水文预报误差模糊性与水电站短期发电调度风险的耦合和转化,但忽略了洪水预报不确定性随时间演进的特征,没有定量分析预报随时间的演进过程;纪昌明等^[14]利用高斯混合模型的良好自适应性,建立了 GMM-Copula 模型,用于预测锦屏一级水库在不同预见期内的入库径流预报误差。但是该研究并没有与水库调度紧密结合,入库径流预报误差随机模型的实际应用效果需要在水库调度过程中进一步检验;在高斯混合随机模拟 (GMM-Copula) 方法的基础上,张佳新^[15]建立了一种改进的入库径流过程预报误差随机模拟模型 (SMRPE),但是对于不同研究对象可能需要建立不同高斯混合模型进行综合分析。

从 19 世纪 70 年代开始,国内外的专家学者便将风险的概念引入水库调度研究领域,且至今仍是热点话题。例如:白涛等^[16]以三河口水库供水调度为例,构建了风险指标体系,采用四维坐标系分析了调度方案的风险变化;王伟等^[17]基于 Copula 贝叶斯方法对丹江口水库入库洪水流量进行了概率预报,并在此基础上开展了水库调度风险策略分析;张验科等^[18]考虑预报入库洪峰流量和预报误差不确定性的影响,建立了中小水电站水库汛期运行调度多目标风险分析模型。目前,虽然存在很多水库调度风险分析方法,但大多针对的是水库自身存在的风险,未考虑库间联系以及风险随时间的演进规律。因此,如何表征一个动态的传递过程并将这种传递规律运用到水库调度中是一个需要解决的关键科学问题。

基于此,本文将径流预报不确定性分析、梯级水库多目标优化调度、水库调度风险分析等要点集成于一个系统的动态模拟链,以期揭示长期预报不确定性对清江流域梯级水库发电效益和下游生态健康的影响^[19],为区域水安全和水资源科学管理提供切实有效的新方法。

1 预报误差演进过程及其不确定性模拟

由于径流预报过程存在不确定性,借助预报演进鞅模型 (martingale model of forecast evolution, MMFE)^[20-23]分析预报过程存在的误差及其演进过

程。MMFE 通过预报改进求得预报误差,此预报误差为绝对误差,可用于对预报不确定性的定量分析。然而,在实际应用中,流量或洪水量级会对绝对误差产生影响,导致不能准确反映预报的不确定性和模型的预报精度。采用相对预报误差代替 MMFE 中传统的绝对误差,可有效解决径流预报量级的影响^[24]。

基于 MMFE 的假设,水库调度期各时段预报误差改进可由预报改进向量的方差协方差矩阵 (V_{CV}) 表示。利用 σ 和 ρ 两个参数对预报改进方差协方差半正定矩阵进行简化,简化后的矩阵为

$$V_{CV} = \begin{pmatrix} \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \\ \sigma^2 & \rho\sigma^2 & 0 & \cdots & 0 \\ \rho\sigma^2 & \sigma^2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \sigma^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: ρ 为相关系数,用来表征临近时段预报相对误差的相关性; σ 为预报改进标准差,代表预报不确定性程度; $\rho\sigma^2$ 表示临近时段预报改进的协方差。

通过生成预报改进和计算预报相对误差,结合实测入库径流,借助 MMFE 和拉丁超立方采样的蒙特卡洛模拟进行入库径流集合预报模拟。模拟的入库径流序列包含共计 Tol 个预报情景 (模拟次数),每一情景入库径流过程均包含从当前时段 s 至预见期 H 内各时段的径流预报过程。因此,在时段 s 进行的径流预报可视为各预报情景径流序列的集合。

2 多目标优化调度模型

2.1 目标函数

调度模型从经济、生态效益两个方面,选用梯级水电站总发电量和下游河道生态溢缺水量为优化调度目标。发电量最大目标函数和生态溢缺水量最小目标函数分别为

$$\begin{cases} \max E_{LEC} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T N_{i,t} \Delta t \\ N_{i,t} = K_i Q_{ELCi,t} H_{i,t} \\ H_{i,t} = Z_{i,t} - Z_{ci,t} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \min Z_{CO} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N G_{i,t} \Delta t \\ G_{i,t} = |Q_{OUTi,t} - Q_{DEi,t}| \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_{LEC} 为多目标调度的经济效益; i 为水库编号; N 为水库总数; T 为调度时段总数; $N_{i,t}$ 为第 i 个水库在 t 时段的发电出力; Δt 为调度时段; K_i 为第 i 个水库发电机组的综合出力系数; $Q_{ELCi,t}$ 为第 i 个水库 t 时段的发电流量; $H_{i,t}$ 为平均发电水头; $Z_{i,t}$ 为第 i 个电站在 t 时段的上游水位; $Z_{ci,t}$ 为第 i 个电站在 t

时段的下游水位; Z_{CO} 为多目标调度的生态效益; $G_{i,t}$ 为第 i 个水库在 t 时刻的生态需水溢缺量; $Q_{OUTi,t}$ 为第 i 个水库在 t 时刻的下泄流量; $Q_{DEi,t}$ 为第 i 个水库下游河道控制断面在 t 时刻的生态需水量。

2.2 约束条件

a. 水量平衡约束:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t} - Q_{OUTi,t} - L_{i,t}) \Delta t \quad (4)$$

式中: $V_{i,t+1}$ 、 $V_{i,t}$ 分别为第 i 个水库在 $t+1$ 、 t 时刻的水库蓄存水量; $I_{i,t}$ 、 $L_{i,t}$ 分别为第 i 个水库在 t 时刻的入库流量和弃水量。

b. 梯级水库群水力联系:

$$I_{i,t} = Q_{i-1,t} + L_{i-1,t} + I_{ini,t} \quad (5)$$

式中 $Q_{i-1,t}$ 、 $L_{i-1,t}$ 、 $I_{ini,t}$ 分别为第 $i-1$ 个水库在 t 时刻的发电流量、弃水流量和区间入流量。

c. 电站机组出力约束:

$$N_{bi,t} \leq N_{i,t} \leq N_{maxi,t} \quad (6)$$

式中 $N_{bi,t}$ 、 $N_{maxi,t}$ 分别为第 i 个水库在 t 时刻的最小保证出力和机组最大出力。

d. 水库蓄水位约束:

$$Z_{mini,t} \leq Z_{i,t} \leq Z_{maxi,t} \quad (7)$$

式中 $Z_{mini,t}$ 、 $Z_{maxi,t}$ 分别为第 i 个水库在 t 时刻的允许蓄水位上、下限值。

e. 水库调蓄和下泄流量约束:

$$\begin{cases} V_{mini,t} \leq V_{i,t} \leq V_{maxi,t} \\ Q_{mini,t} \leq Q_{i,t} + L_{i,t} \leq Q_{maxi,t} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $V_{mini,t}$ 、 $V_{maxi,t}$ 分别为第 i 个水库在 t 时刻的最小、最大蓄水量; $Q_{mini,t}$ 、 $Q_{maxi,t}$ 分别为第 i 个水库在 t 时刻的最小、最大下泄流量。

2.3 求解算法

本文采用多目标混合蛙跳算法 (multi-objective shuffling frog leaping algorithm, MOSFLA) 进行求解。MOSFLA 是在 SFLA^[25-26] 的基础上从混沌理论初始种群生成机制、分组策略、局部搜索策略、精英青蛙集维护和更新策略、精英青蛙集进化策略等方面优化改进后的高效智能求解算法,其计算流程如图 1 所示。MOSFLA 融合模因演化和基于群体行为的粒子群优化算法^[27] 的优点,源于对青蛙觅食行为的研究。研究表明,相对其他的传统智能优化算法, MOSFLA 的收敛速度更快,能够在较短的时间内找到较优的解;该算法对于求解空间复杂、多维与非线性的问题具有更好的适应能力,在梯级水库多目标优化调度问题中表现出色;MOSFLA 的概念简单,需要调整的参数少,易于实现,降低了算法在实际应用中的难度和复杂性^[28-30]。经分析对比后控制参数选取如下:初始化混沌映射迭代数为 100;青蛙种群

大小 $M=200$,子种群数目 $P=20$,每个子种群青蛙数 $n=10$;鉴于水布垭、隔河岩和高坝洲水库的水位约束廊道变化范围的差异,将青蛙跳跃步长变化区间设为 $[-4,4]$;子种群局部迭代数设为 20,全局混合迭代数设为 3 000。

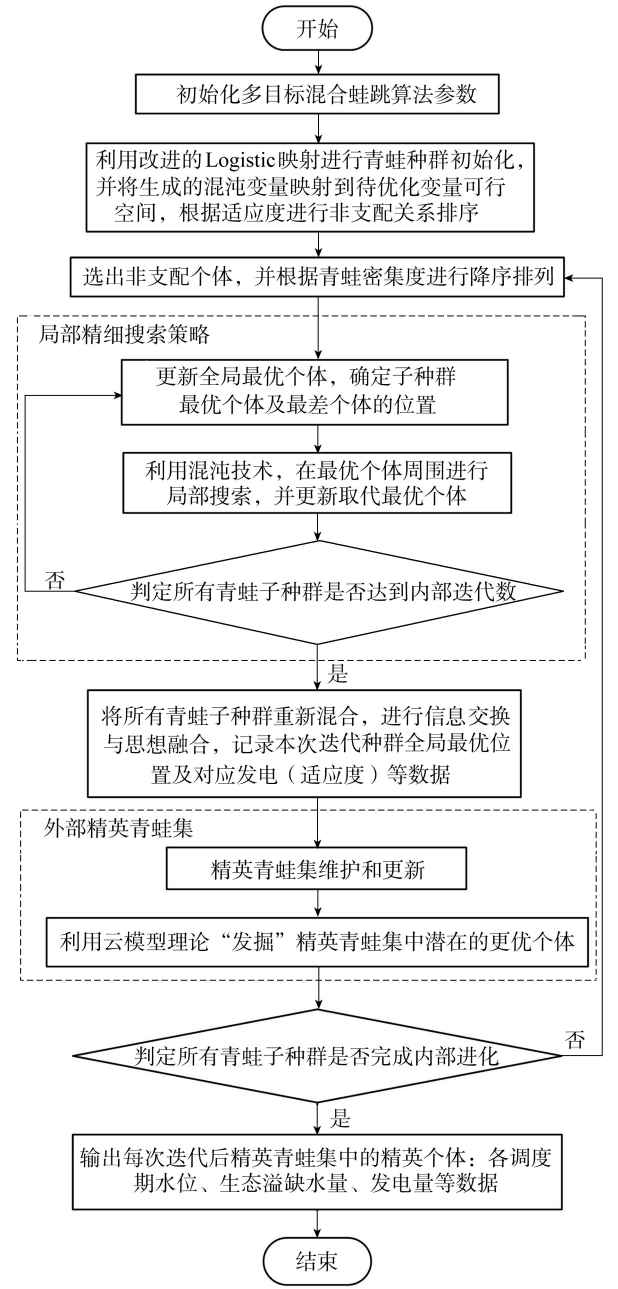


图 1 MOSFLA 计算流程图

3 水库调度风险分析

以入库径流预报误差作为水库调度的风险因子,选取发电量不足风险率、弃水风险率和生态溢缺风险率为风险指标剖析径流不确定性影响下水量调控的潜在风险。

发电量不足风险率表示入库径流不确定性导致发电量不满足预期发电计划的概率,可通过不满足模拟次数与总模拟次数的比值进行计算;弃水风险

率表示入库径流实际值大于预报值被迫弃水事件发生的概率;生态溢缺风险率表示生态溢缺水量超越设定阈值的概率。参考李继清等^[31]对水库调度风险研究的方法,假定水库发电量可调节安全区间为 $[E_l, E_u]$,水库生态需水量可调节安全区间为 $[0, Z_u]$ 。在水库发电量和生态溢缺水量处于可调节安全区间内时,水库可以通过自身的调节来控制水流,以确保水库按照计划运行。然而,当水库发电量低于可调节安全区间下限时,水库将无法完成发电任务,面临发电不足的风险。当水库发电量超过可调节安全区间上限时,唯一的选择就是弃水,这将带来弃水风险。当水库的生态溢缺水量超过生态可调节安全区间上限时,就会出现生态溢缺风险。发电量不足风险率 P_b 、弃水风险率 P_q 以及生态溢缺风险率 P_s 的计算公式分别为

$$P_b = \varphi(E_d < E_l) / D \tag{9}$$

$$P_q = \varphi(E_d > E_u) / D \tag{10}$$

$$P_s = \varphi(Z_d > Z_u) / D \tag{11}$$

式中: E_d 为水库模拟年发电量; E_l 为水库发电量可调节安全区间下限; E_u 为水库发电量可调节安全区间上限; Z_d 为水库模拟生态溢缺水量; Z_u 为生态需水量可调节安全区间上限; $\varphi(\cdot)$ 为符合条件的调度次数; D 为模拟总次数。

4 实例应用

4.1 研究区概况及方案设置

清江是长江上的一大支流,全长 423 km。清江干流先后建成隔河岩、高坝洲、水布垭 3 座大型水电站,梯级水库的分布情况见图 2。径流资料选取 1971—2016 年。由于水布垭站只有 1999—2016 年流量资料,故以渔峡口站 1971—1986 年的月(旬)均入库流量资料为基础,根据水布垭和渔峡口控制流域面积比对其各年入库月径流资料进行修正。同理以隔河岩站 1987—1998 年月(旬)均入库流量资料为基础,补齐水布垭所缺失的 1987—1998 年月(旬)均入库流量资料。最终确定 1980 年为历史典型丰水年,2014 年为历史典型平水年,1990 年为历史典型枯水年。各水库及电站主要参数如表 1 所示。

本文以水库发电调度为主要目标,同时考虑水布垭、隔河岩下游不同等级生态用水需求,设置两组

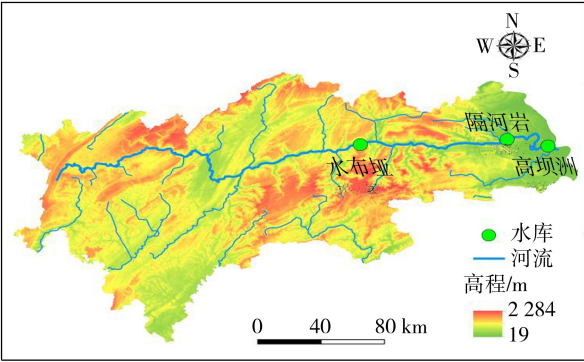


图 2 清江流域概况

调度方案:①考虑不同生态需水要求,模拟生态需水等级对梯级水库优化调度的影响;②考虑不同的预报改进标准差 σ ,模拟预报不确定性等级对梯级水库优化调度的影响。

4.2 生态流量获取

结合多年的径流情况和生态环境的健康状况,确定了水布垭水库和隔河岩水库下游控制断面的最小、适宜和理想的生态流量。最小生态流量采用 Tennant 法^[32]计算,以多年平均径流的 10%为基准计算 11 月至次年 4 月的生态需水量,5—10 月为鱼类繁殖期,生态需水量提升至 15%。适宜和理想生态需水量按生态需水等级指数法计算,计算结果如表 2 所示。

4.3 调度结果分析

4.3.1 径流预报的生成

以典型年历史径流为输入,借助 MMFE 模拟不确定性演化过程,预测范围为 12 月,分为 12 个时间段。图 3 为 1 月预测的各月入库径流箱型图,图 4 为各月预测的 12 月入库径流箱型图。由图 3 和图 4 可知,MMFE 可以模拟径流预报不确定性的两个重要特性:径流预报的不确定性随着预见期的增加而增加,预见期越长,径流预报的不确定性越大;随着时间的推移和预报信息的更新,预报不确定性减少。

4.3.2 多目标调度模型建立与求解

根据所构建的多目标调度模型,在所有入流情景下借助 MOSFLA 得到 50 组帕累托非支配解,在 50 组非劣解中选取发电量最大的解作为进一步分析的典型样本(其中发电量为 74.06 亿 kW·h,生态溢缺水量为 132.42 亿 m³)。当 σ 为 5 时,水布垭水库发电量(PG_1)与生态溢缺水量($EWSS_1$)、隔河

表 1 梯级水库及电站的主要参数

水 库	正常蓄水位/m	汛期水位/m	死水位/m	总库容/亿 m ³	兴利库容/亿 m ³	装机容量/MW	装机年利用时间/h	保证出力/MW	综合处理系数	最大水头/m	最小水头/m	平均水头/m
水布垭	400	391.8	350.00	45.89	23.83	1840	2450	310.0	8.5	203.0	147.0	186.6
隔河沿	200	193.6	160.00	30.18	19.75	1212	2533	241.0	8.5	121.6	80.7	112.0
高坝洲	80	78.5	78.09	4.03	0.54	270	3563	77.3	8.4	40.0	22.3	35.4

表 2 生态需水量计算成果

调度期	月份	控制断面生态需水量/(m ³ /s)					
		水布垭水库			隔河沿水库		
		最小	适宜	理想	最小	适宜	理想
汛期(鱼类繁殖期)	5	71.00	114.82	181.44	94.37	152.62	241.17
	6	74.67	125.64	198.42	104.84	176.40	278.57
	7	101.02	165.92	260.59	134.36	220.67	346.59
	8	61.52	99.72	157.80	77.32	125.34	198.34
	9	36.22	62.11	97.83	64.94	111.36	175.41
	10	24.44	38.36	61.36	53.32	83.68	133.84
非汛期	11	22.98	36.42	54.53	24.30	38.52	57.67
	12	12.99	22.38	33.90	10.30	17.74	26.87
	1	5.82	9.34	15.18	8.64	13.87	22.54
	2	6.67	10.46	18.49	11.31	17.75	31.37
	3	24.23	40.44	63.63	21.87	36.50	57.43
	4	32.50	49.75	80.78	42.35	64.83	105.27

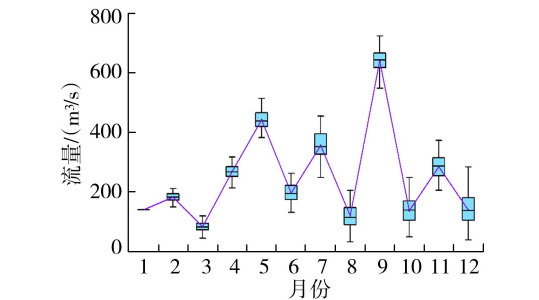


图 3 1月预测的各月入库径流箱型图

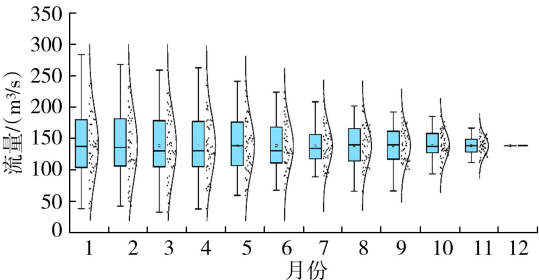


图 4 各月预测的 12 月入库径流箱型图

岩水库发电量(PG_2)与生态溢缺水量($EWSS_2$)、高坝洲水库发电量(PG_3)以及梯级水库总发电量(PG)、总生态溢缺水量($EWSS$)7个目标在所有入流预测情景下的最优对应关系如图 5 所示。

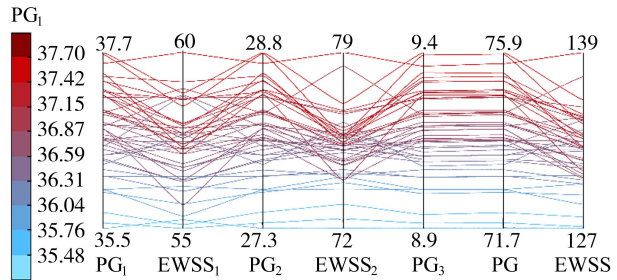


图 5 σ 为 5 情景下水库调度多目标平行集图

由图 5 可知,清江梯级水库发电效益和水布垭、隔河岩下游生态效益呈现明显相互制衡关系,生态溢缺水量随着发电量的提升显著扩大,并不能同时

实现最优,对立性较为明显。生态溢缺水量相对于发电量的变化更加敏感,变化幅度较大。所有水库调度情景在相同求解条件下,所选非劣解各目标存在明显的差异。

4.3.3 不同生态需水等级下水库调度结果分析

借助 MMFE,预报改进标准差 σ 设为 5,利用典型枯水年历史来水情况生成一系列随机入库过程。然后,将模拟径流序列作为输入驱动调度模型,优化计算得到水库的调度结果。不同生态需水等级下水库调度结果如图 6 和图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知,按照不同生态需水量调度时,水布垭水库模拟调度发电量的均值维持在 26.80 亿 $kW \cdot h$ 左右,可见同一水库发电量的调度结果差异不大。而生态溢缺水量的调度结果变化较大,模拟调度的均值分别为 44.68 亿、40.55 亿、34.16 亿 m^3 。随着生态需水等级的升高,各水库下游的生态溢缺水量均呈减小趋势,故此时生态溢缺水量主要为溢水量。结合表 3,各调度目标的统计指标随着生态需水要求升高并没有明显变化,故预报不确定性对按照不同生态需水量进行调度的结果影响不显著。位于梯级水库上游的水布垭水库调度结果数据波动性最大,而下游的高坝洲水库调度结果数据波动性最小。当上游水库实际入库径流与预报径流存在较大误差时,水库可以通过控制蓄、泄水,将误差造成的影响分散到多个水库中,从而减小风险。

4.3.4 不同预报等级下水库调度结果分析

以平水年为例,设置预报改进标准差 σ 分别为 5、10、15、20,借助 MMFE 各自生成一系列随机水库入库过程,模拟入库径流的不同预报精度对水库优化调度的影响。图 8 为不同预报精度下的入库径流。

以生成的模拟入库径流为输入,优化计算得到水库的调度结果。不同预报误差等级下的水库调度

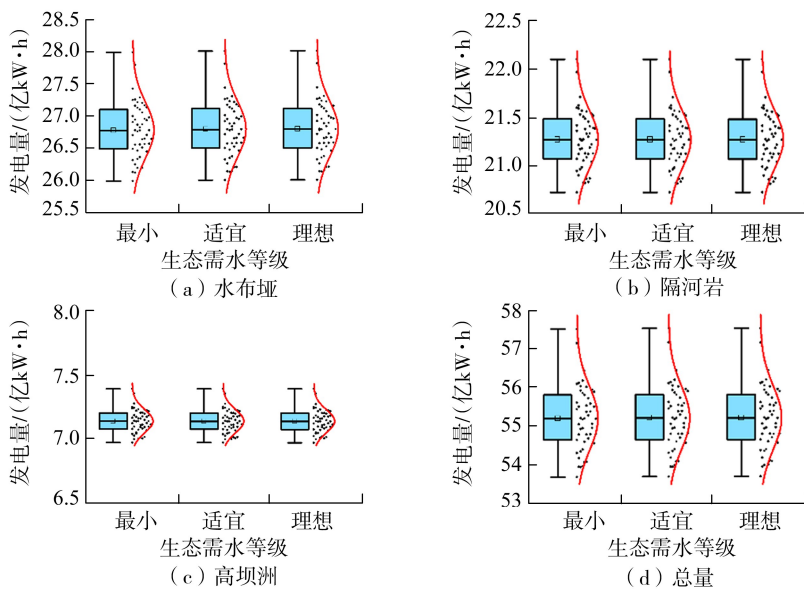


图 6 不同生态需水等级下水库调度结果(发电量)

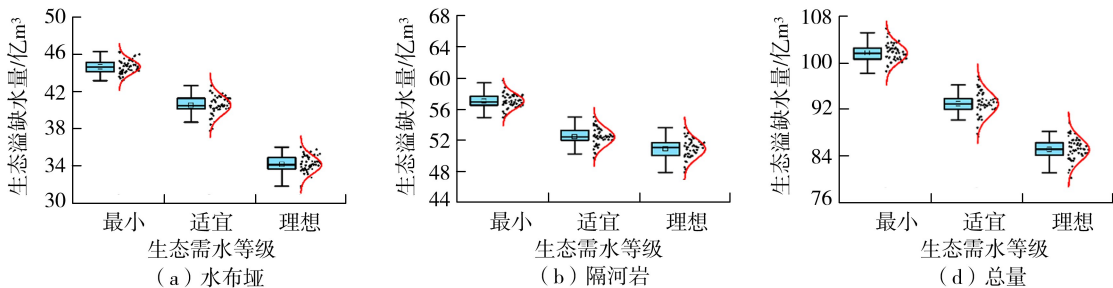


图 7 不同生态需水等级下水库调度结果(生态溢缺水量)

表 3 考虑预报误差的不同生态需水等级下调度结果统计指标值

指标	水库	极差			方差			平均绝对误差		
		最小	适宜	理想	最小	适宜	理想	最小	适宜	理想
发电量	水布垭	2.01	2.01	2.01	0.18	0.19	0.19	0.34	0.34	0.34
	隔河岩	1.39	1.39	1.39	0.09	0.09	0.09	0.24	0.24	0.24
	高坝洲	0.42	0.42	0.42	0.01	0.01	0.01	0.07	0.07	0.07
	总和	3.82	3.82	3.83	0.28	0.29	0.29	0.65	0.65	0.65
生态溢缺水量	水布垭	3.12	4.86	4.39	0.60	1.13	0.89	0.93	0.85	0.78
	隔河岩	4.77	5.48	5.72	0.94	1.36	1.56	0.78	0.89	0.98
	总和	7.89	10.34	10.11	1.54	2.49	2.45	1.71	1.74	1.76

结果如图 9 所示。限于篇幅,以发电量为例来展示主要结果。由图 9 可知,随着预报不确定性的增大,发电量误差变大。当预报误差标准差为 5 时,模拟年发电量最大可达 76 亿 kW·h,最小为 72 亿 kW·h,误差的极差仅为 4 亿 kW·h。当预报误差标准差为 20 时,模拟年发电量最大可达 83 亿 kW·h,最小为 68 亿 kW·h,误差的极差可达 15 亿 kW·h。虽然水库对径流有一定的调节能力,但当入库径流预报误差超过一定范围时,仍会造成较大风险。

以实测发电量 E 与实测生态流量 Z 为参照,假定 $[0.96E, 1.04E]$ 为梯级水库群发电可调节安全区间, $[0, 1.05Z]$ 为梯级水库群生态可调节安全区间。

根据式(9)(10)(11)计算梯级水库群发电量不足风险率、弃水风险率和生态溢缺风险率,结果见表 4。由表 4 可知,当径流预报精度较高时,水库发电量不足风险率、弃水风险率和生态溢缺风险率为 0;随着入库径流预报精度的降低,风险率逐渐增大;当 $\sigma = 20$ 时,风险率最大,水库发电量不足风险率、弃水风险率和生态溢缺风险率分别为 16%、18%、48%。调度结果符合入库径流预报精度越低,3 个风险率越大的规律。

为分析不确定性演进对水量调控的影响,以方案②为例,计算预报改进标准差 σ 为 20 情景下不同预见期水库调度的风险率,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,当根据 3 月的预报进行水库调度

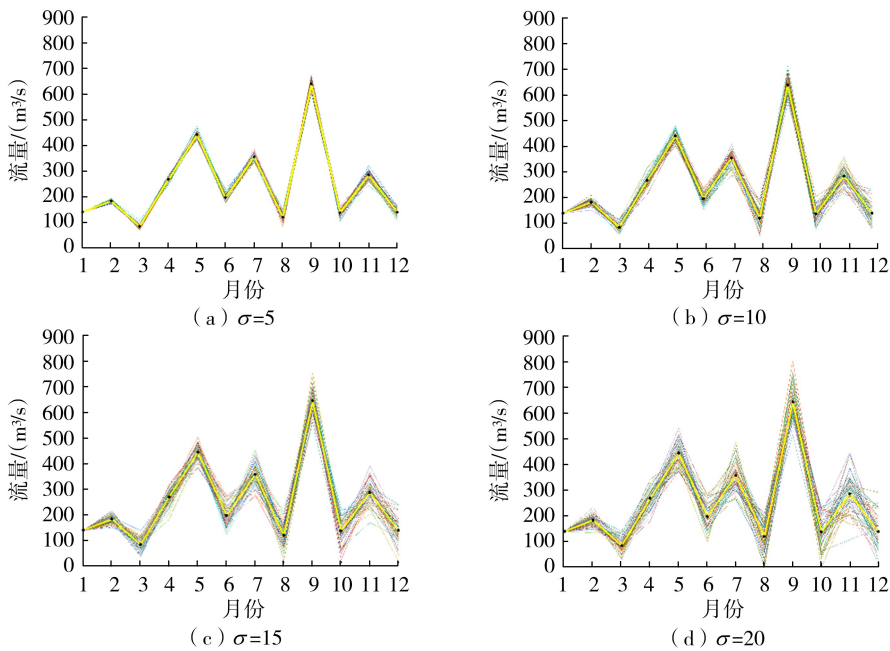


图8 不同预报精度下的入库径流

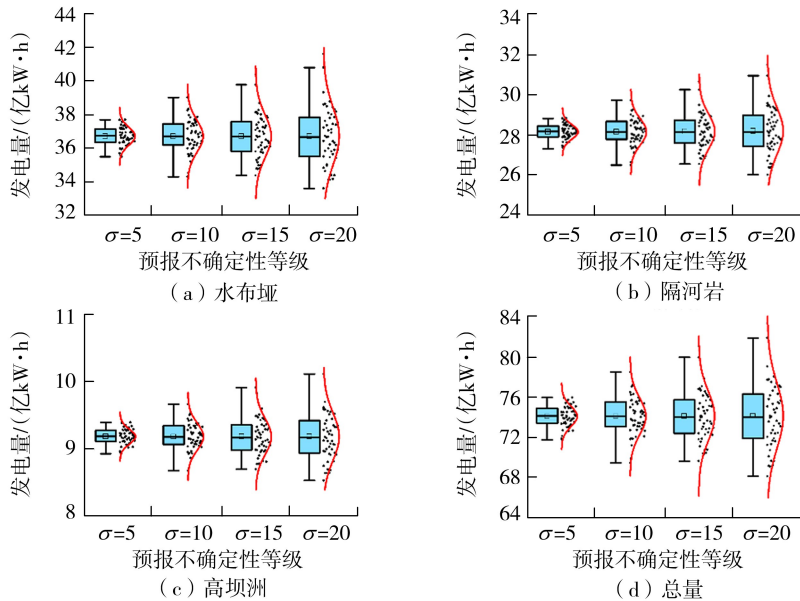


图9 不同预报精度下水库调度结果(发电量)

表4 不同预报精度水库调度风险

σ	发电量不足 风险率/%	弃水风险 率/%	生态溢缺 风险率/%
5	0	0	0
10	4	4	4
15	12	6	34
20	16	18	48

时,梯级水库群发电量不足风险率、弃水风险率和生态溢缺风险率分别为 14%、12%、32%;当根据 6 月的预报进行调度时,3 个风险率分别为 8%、6%、12%。随着预报预见期时段的不断演进,预报改进会持续更新,预报的水库入流精度也会不断提升,径流不确定性影响下的水量调控潜在风险会逐渐降

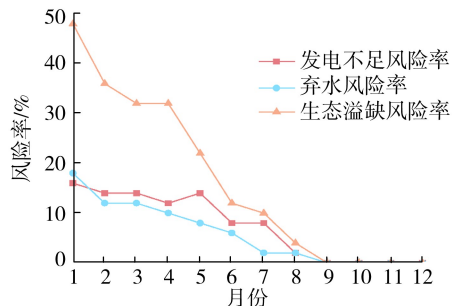


图10 不同预见期水库预报调度风险

低。滚动的径流预报能有效降低水量调控的潜在风险,提高梯级水库水资源调节的稳健性。在制定水库调度策略时,还需综合考虑各方面的需求,平衡发

电和生态环境的利益,采取灵活的水库调度措施,以最大程度减轻径流预报误差对水库调度的影响。

5 结 语

本文构建了“预报→调度→风险分析”模拟链,并应用于清江流域水布垭、隔河岩和高坝洲水库,分别探究了不同生态需水等级和不同径流预报误差等级对梯级水库群多目标优化调度的影响。研究结果显示:当水库按照不同生态需水要求调度时,预报不确定性对水库调度的影响不会随生态需水等级的改变而改变;当径流预报精度较高时,水库发电量不足风险率、弃水风险率和生态溢缺风险率较低;随着入库径流预报精度的降低,水库发电量不足风险率、弃水风险率和生态溢缺风险率逐渐增大。另外,随着预报预见期时段的不断演进,预报改进会持续更新,水库的入库径流预报精度也会不断提升,径流不确定性影响下的水量调控潜在风险会逐渐降低。“预报→调度→风险分析”模拟链能够动态识别从径流预报到水库调度所传递的不确定性信息。滚动的径流预报有助于降低水量调控的潜在风险,提高梯级水库水资源调节的稳健性。

参考文献:

[1] MADDU R, PRADHAN I, AHMADISHARAF E, et al. Short-range reservoir inflow forecasting using hydrological and large-scale atmospheric circulation information [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128153.

[2] 李菊, 崔东文. 基于 WPT-IDBO-RELM 和 WPT-IDMO-RELM 模型的日径流预测 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (6): 48-55. (LI Ju, CUI Dongwen. Daily runoff prediction based on WPT-IDBO-RELM and WPT-IDMO-RELM models [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (6): 48-55. (in Chinese))

[3] MO Chongxun, HUANG Keke, RUAN Yuli, et al. Quantifying uncertainty sources in runoff change attribution based on the Budyko framework [J]. Journal of Hydrology, 2024, 630: 130790.

[4] 岳兆新, 艾萍, 熊传圣, 等. 基于信息熵与改进极限学习机的中长期径流预测 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (4): 7-14. (YUE Zhaoxin, AI Ping, XIONG Chuansheng, et al. Medium-long term runoff forecasting based on information entropy and improved extreme learning machine [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (4): 7-14. (in Chinese))

[5] 张长征, 李洪梅. 基于可变模糊评价法的小型水库运行管理评价研究 [J]. 水利经济, 2023, 41 (6): 30-36. (ZHANG Changzheng, LI Hongmei. Study on the evaluation of small reservoir operation and management based on variable fuzzy evaluation method [J]. Journal of

Economics of Water Resources, 2023, 41 (6): 30-36. (in Chinese))

[6] 纪昌明, 刘源, 王弋, 等. 耦合整体预报不确定性的水电站短期优化调度模型 [J]. 水利学报, 2021, 52 (8): 907-916. (JI Changming, LIU Yuan, WANG Yi, et al. Short-term optimal operation model of hydropower station coupling the integrality of forecast uncertainty [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (8): 907-916. (in Chinese))

[7] 钟华昱, 黄强, 明波, 等. 耦合集合预报信息的水库高效调度方法研究 [J]. 水力发电学报, 2021, 40 (5): 44-55. (ZHONG Huayu, HUANG Qiang, MING Bo, et al. An efficient method for deriving reservoir operating rules by coupling ensemble forecasting information [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40 (5): 44-55. (in Chinese))

[8] 孙周亮, 刘艳丽, 张建云, 等. 中长期径流预报研究进展与展望 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 136-144. (SUN Zhouliang, LIU Yanli, ZHANG Jianyun, et al. Research progress and prospect of mid-long term runoff prediction [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 136-144. (in Chinese))

[9] WANG Qingjie, YUE Chunfang, LI Xiaoqing, et al. Enhancing robustness of monthly streamflow forecasting model using embedded-feature selection algorithm based on improved gray wolf optimizer [J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 128995.

[10] 崔东文. 多组群教学优化算法-神经网络-支持向量机组合模型在径流预测中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2019, 39 (4): 41-48. (CUI Dongwen. Combined model of multi-group teaching optimization algorithm-neural network-support vector machine in runoff prediction application [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 (4): 41-48. (in Chinese))

[11] 张科峰, 王娟, 魏苗. 基于非平稳贝叶斯网络模型的月径流预报模拟研究 [J]. 中国农村水利水电, 2024 (11): 54-61. (ZHANG Kefeng, WANG Juan, WEI Miao. Simulation study on monthly runoff forecasting based on nonstationary Bayesian network model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024 (11): 54-61. (in Chinese))

[12] 钟加星, 董增川, 孟金玉, 等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (6): 30-37. (ZHONG Jiaxing, DONG Zengchuan, MENG Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (6): 30-37. (in Chinese))

[13] 蒋志强, 武文杰, 覃晖, 等. 考虑预报误差的水电站短期调度模糊风险研究 [J]. 水力发电学报, 2019, 38 (2): 36-46. (JIANG Zhiqiang, WU Wenjie, QIN Hui, et al. Fuzzy risk of short-term operation of hydropower stations

- considering runoff forecasting errors [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38 (2): 36-46. (in Chinese))
- [14] 纪昌明,梁小青,张验科,等. 入库径流预报误差随机模型及其应用[J]. 水力发电学报,2019,38(10):75-85. (JI Changming, LIANG Xiaoqing, ZHANG Yanke, et al. Stochastic model of reservoir runoff forecast errors and its application [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019,38(10):75-85. (in Chinese))
- [15] 张佳新. 入库径流过程预报误差随机模拟模型及应用研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2021.
- [16] 白涛,喻佳,魏健,等. 考虑不同需水过程的三河口水库调度风险研究[J]. 水力发电学报,2021,40(8):12-22. (BAI Tao, YU Jia, WEI Jian, et al. Study on risk analysis of Sanhekou Reservoir operation based on different water demand processes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021,40(8):12-22. (in Chinese))
- [17] 王伟,王乐,田逸飞,等. 丹江口水库入库洪水概率预报及调度风险分析[J]. 人民长江,2023,54(11):60-67. (WANG Wei, WANG Le, TIAN Yifei, et al. Probabilistic forecasting on inflowing flood to Danjiangkou Reservoir and scheduling risk analysis [J]. Yangtze River, 2023,54(11):60-67. (in Chinese))
- [18] 张验科,张建新,卢垚键,等. 中小水电站水库汛期运行调度多目标风险分析[J]. 水电能源科学,2023,41(12):58-62. (ZHANG Yanke, ZHANG Jianxin, LU Yaojian, et al. Multi-objective risk analysis for operation scheduling of medium and small hydropower station reservoirs in flood season [J]. Water Resources and Power, 2023,41(12):58-62. (in Chinese))
- [19] YANG Zhe, WANG Yufeng, SONG Songbai, et al. Multi-objective operation-decision-making-risk propagation analysis for cascade reservoirs affected by future streamflow process variations [J]. Journal of Hydrology, 2023,620:129518.
- [20] HEATH D C, JACKSON P L. Modeling the evolution of demand forecasts ith application to safety stock analysis in production/distribution systems [J]. IIE Transactions, 1994,26(3):17-30.
- [21] ZHAO Tongtiegang, CAI Ximing, YANG Dawen. Effect of streamflow forecast uncertainty on real-time reservoir operation [J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(4):495-504.
- [22] ZHU Feilin, ZHONG Ping' an, SUN Yimeng, et al. Real-time optimal flood control decision making and risk propagation under multiple uncertainties [J]. Water Resources Research, 2017,53(12):10635-10654.
- [23] XU Bin, ZHONG Ping' an, LU Qingwen, et al. Multiobjective stochastic programming with recourses for real-time flood water conservation of a multireservoir system under uncertain forecasts [J]. Journal of Hydrology, 2020,590:125513.
- [24] 陈璐,卢韦伟,周建中,等. 水文预报不确定性对水库防洪调度的影响分析[J]. 水利学报,2016,47(1):77-84. (CHEN Lu, LU Weiwei, ZHOU Jianzhong, et al. Effect of streamflow forecast uncertainty on reservoir operation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(1):77-84. (in Chinese))
- [25] GUO Yuxue, TIAN Xin, FANG Guohua, et al. Many-objective optimization with improved shuffled frog leaping algorithm for inter-basin water transfers [J]. Advances in Water Resources, 2020,138:103531.
- [26] SINGH R K, KUMAR S, PASUPULETI S, et al. Evaluating evolutionary algorithms for simulating catchment response to river discharge [J]. Journal of Water and Climate Change, 2023,14(8):2736-2754.
- [27] CHEN Haitao, WANG Wenchuan, CHEN Xiaonan, et al. Multi-objective reservoir operation using particle swarm optimization with adaptive random inertia weights [J]. Water Science and Engineering, 2020,13(2):136-144.
- [28] 杨哲,杨侃,夏怡,等. 考虑不同生态流量要求梯级水库群生态调度及其算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(12):1266-1277. (YANG Zhe, YANG Kan, XIA Yi, et al. Optimal ecological operation of cascade reservoirs and the algorithm considering different ecological flow demand [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(12):1266-1277. (in Chinese))
- [29] 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))
- [30] SHARIFAZARI S, SADAT-NOORI M, RAHIMI H, et al. Optimal reservoir operation using Nash bargaining solution and evolutionary algorithms [J]. Water Science and Engineering, 2021,14(4):260-268.
- [31] 李继清,谢宇韬,孙凤玲. 基于 Vine Copula 的梯级水库短期发电调度风险估计[J]. 水资源保护,2024,40(4):17-26. (LI Jiqing, XIE Yutao, SUN Fengling. Risk estimation of short-term power generation operation of cascade reservoirs based on Vine Copula [J]. Water Resources Protection, 2024,40(4):17-26. (in Chinese))
- [32] 武连洲,白涛,黄强. 基于 RVA 阈值区间集成的河道内生态需水计算与应用[J]. 水资源保护,2022,38(6):168-174. (WU Lianzhou, BAI Tao, HUANG Qiang. Integrated calculation of ecological water demand of rivers based on RVA threshold interval and its application [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6):168-174. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-31 编辑:俞云利)