

基于汛期运行水位动态控制的水库群多目标 防洪风险分析

曾雨柔¹, 朱非林¹, 卢庆文², 樊宇堃¹, 李 敏³, 钟平安¹

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 江苏航运职业技术学院船舶与海洋工程学院; 3. 大连理工大学建设工程学院)

摘要:考虑到汛期运行水位动态控制所导致的起调水位不确定性对后续防洪调度的影响,提出了基于汛期运行水位动态控制的水库群多目标防洪风险分析方法,并采用蒙特卡罗法定量解析了水文、气象预报误差的协同效应,系统表征起调水位的不确定性;将起调水位不确定性纳入防洪风险源,构建了考虑上下游防洪目标冲突的水库群多目标防洪优化调度模型,提出了“库-点-面”多层级风险指标体系,揭示了随机环境下的风险互馈机制。东渭河流域实例结果表明:在短期的调洪过程中,起调水位的不确定性不可忽略;上下游防洪目标存在明显竞争关系,系统风险率随非劣解选择呈现边际效益特征;洪水预报与起调水位的不确定性耦合效应使水库群系统风险率降低了 8%,表明异质风险源间具有一定的协同抵消机制。

关键词:汛期运行水位动态控制;水库群多目标防洪调度;风险分析;洪水资源利用;东渭河流域

Multi-objective flood control risk analysis of reservoir groups based on dynamic control of operating water level during flood season//Zeng Yurou¹, Zhu Feilin¹, Lu Qingwen², Fan Yukun¹, Li Min³, Zhong Ping'an¹(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 2. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu Shipping College; 3. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology)

Abstract: Considering the impact of the uncertainty of the initial water level caused by the dynamic control of the operating water level during the flood season on subsequent flood control scheduling, a multi-objective flood control risk analysis method for reservoir groups based on the dynamic control of the operating water level during the flood season was proposed. And Monte Carlo method was used to quantitatively analyze the synergistic effect of hydrological and meteorological forecasting errors, systematically characterizing the uncertainty of the starting water level. A multi-objective flood control optimization scheduling model for reservoir groups considering upstream and downstream flood control target conflicts was constructed by incorporating the uncertainty of the starting water level into flood control risk sources. A multi-level risk index system of “reservoir-point-surface” was proposed, revealing the risk feedback mechanism in stochastic environments. The results of case study in the Dongpi River Basin indicate that the uncertainty of the starting water level cannot be ignored in the short-term flood control process. There is a clear competitive relationship between upstream and downstream flood control targets, and the system risk rate shows marginal benefit characteristics with the selection of non inferior solutions. The coupling effect of uncertainty between flood forecasting and water level adjustment reduces the risk rate of the reservoir group system by 8%, indicating a certain synergistic offsetting mechanism among heterogeneous risk sources.

Key words: dynamic control of operating water level during flood season; multi-objective flood control scheduling of reservoir groups; risk analysis; floodwater utilization; the Dongpi River Basin

洪水灾害的突发性和破坏性对流域防洪安全构成重大威胁^[1-3]。水库群作为防洪体系的核心工程,其防洪调度并非简单的系统响应过程^[4]。为确保工程结构安全、减少上游淹没损失,水库需增大泄洪量,而下游则要求控泄以保城镇安全^[5]。因此,水库群防洪调度实质上是一个需要统筹考虑上下游防

洪安全的多目标优化问题^[6-8]。随着经济的快速发展与社会用水需求的不断增长,诸多流域汛期防洪减灾困难和非汛期水资源短缺的矛盾愈发突出^[9-11]。

洪水管理已从单一灾害防控转向风险管控与资源利用并重的协同模式^[12-14],其中汛期运行水位动

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202801,2022YFC3202803);国家自然科学基金项目(52009029)
作者简介:曾雨柔(2001—),女,硕士研究生,主要从事流域防洪系统预报调度研究。E-mail:1102524724@qq.com
通信作者:朱非林(1992—),男,教授,博士,主要从事流域防洪系统预报调度与风险决策研究。E-mail:zhufeilin@hhu.edu.cn

态控制 (dynamic control of operating water level during flood season, DC-OWL-FS) 技术作为洪水资源化的有效实施手段^[15], 成为推动这一模式转型的关键。DC-OWL-FS 是在保障防洪安全的前提下, 利用实时预报信息蓄存预见期内可预泄的洪水资源, 从而减少汛期弃水, 实现洪水资源化利用的非工程措施^[16]。传统的汛限水位静态控制虽能保障水库在极端洪水下的安全性, 却因过度保守易使其陷入汛期过度弃水、汛后无水可蓄的不利局面^[17]。如何通过 DC-OWL-FS 实现洪水资源的高效利用已然成为当前水库调度领域的前沿热点问题^[18-19], 现有方法如预报预泄法^[20-21]、模糊推理法^[22]及库容补偿法^[23]已在单一水库中取得成效^[24-25], 但水库群系统受水力耦合与风险传递效应影响, 面临更大挑战。李玮等^[26]提出了一种基于预报及库容补偿的梯级水库 DC-OWL-FS 逐次渐进补偿调度模型。谭乔凤等^[27]针对梯级水库设计洪水地区组成不确定性问题, 结合库容补偿调节机制, 建立了梯级水库 DC-OWL-FS 域计算模型。DC-OWL-FS 域的确定主要依赖于实时预报信息, 但预报误差导致超蓄水量无法及时释放, 造成起调水位的不确定性, 进而导致后续调度风险^[28]。然而, 现有研究尚未有效量化洪水资源利用过程中气象、水文预报的双重不确定性。

水库实时防洪调度主要关注洪水预报误差及其与其他风险因子的协同作用所引起的调度风险^[29]。陈璐等^[30]建立了基于 Copula 函数的水文预报误差演进模型, 并通过随机模拟的方法量化了预报不确定性条件下水库的实时调度风险。Chen 等^[31]综合了洪水预报、库容曲线、泄流能力、洪水演进 4 类不确定性, 提出了基于分解-集成的水库群风险分析方法。然而, 现有研究存在双重局限: 大多假设调度过程从固定的汛限水位起调, 未能将 DC-OWL-FS 导致的起调水位不确定性纳入风险源, 容易高估或低估真实的防洪调度风险; 风险指标多局限于单尺度评价, 难以完整评估“水库群-断面节点-系统整体”的多层级风险特征。

针对上述局限, 本文基于 Lu 等^[32]研究中的两阶段预泄能力约束法, 通过风险因子的概率分布拟合进行超蓄水量随机模拟, 提出基于 DC-OWL-FS 的水库群多目标防洪风险分析方法。通过蒙特卡洛随机模拟定量解析洪水预报误差与连续无雨日误差的协同效应, 系统表征起调水位的不确定性; 将起调水位不确定性纳入调度风险源体系, 构建水库群多目标防洪优化调度模型; 为量化洪水资源利用产生的防洪风险, 提出“库-点-面”多层级风险指标体系。在此基础上, 通过情景模拟仿真揭示异质风险源组

合对水库群防洪风险的影响, 以期为实现洪水资源化利用的精细化风险管理提供理论支撑。

1 研究方法

1.1 研究框架

基于 DC-OWL-FS 的水库群多目标防洪风险分析研究框架如图 1 所示, 包括 3 部分: 基于预报预泄法的起调水位随机模拟、考虑上下游防洪目标的水库群多目标防洪优化调度模型、“库-点-面”多层级风险分析。

1.2 基于预报预泄法的起调水位随机模拟

1.2.1 两阶段预泄能力约束法

基于预报预泄法的两阶段预泄能力约束法, 通过整合无雨预报与洪水预报预见期内水库的预泄能力, 确定汛期运行水位动态控制的上限值。在实时调度过程中, 当水库利用前一场洪水尾水进行超原设计汛限水位蓄水后, 需通过兴利预泄与防洪预泄两种途径, 在下一场洪水来临前完成超蓄水量的安全消纳^[33], 计划超蓄水量计算公式见式(1)。具体实施时, 兴利预泄依据短期气象预报, 在连续无雨日(日降水量小于 0.1 mm 的连续无雨天数)内按兴利流量进行预泄; 洪水起涨后切换为防洪预泄模式, 该阶段需综合考量工程约束与下游安全裕度。图 2 为两阶段预泄能力约束法的示意图。

$$\Delta W = \Delta W_{\text{兴利}} + \Delta W_{\text{防洪}} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \Delta W_{\text{兴利}} = \sum_{t=1}^d (q_{m,t} - q_{in,t}) \times 24 \times 3600$$

$$\Delta W_{\text{防洪}} = \sum_{t=1}^{\tau} (q_c - q_{n,t}) \Delta t \times 3600$$

$$q_c = \min\{\beta q_A, \sum_{t=1}^{\tau} g(Z_t)/\tau\}$$

式中: ΔW 为计划超蓄水量; $\Delta W_{\text{兴利}}$ 为兴利超蓄水量; d 为连续无雨日; $q_{m,t}$ 、 $q_{in,t}$ 分别为连续无雨日内的平均兴利用水流量和平均入库流量; $\Delta W_{\text{防洪}}$ 为防洪超蓄水量; q_c 、 $q_{n,t}$ 分别为洪水预报预见期内的时段平均泄流量和时段平均入库流量; Δt 为洪水预报时段长; q_A 为下游安全泄量; β 为最大允许安全泄量折扣系数, $\beta \leq 1$, 反映预泄过程对下游防洪安全的裕度; $g(\cdot)$ 为水库泄流能力函数; Z_t 为水库水位; τ 为实时洪水预报的预见期。

1.2.2 起调水位不确定性的随机模拟

汛期运行水位动态控制的核心在于确定超蓄水量, 超蓄水量的计算依赖水文、气象预报信息。然而, 气象预报中的连续无雨日和水文预报中的入库洪水过程均存在误差^[34], 导致水库超蓄水量无法及时释放。当遭遇实际洪水时, 水库起调水位可能超

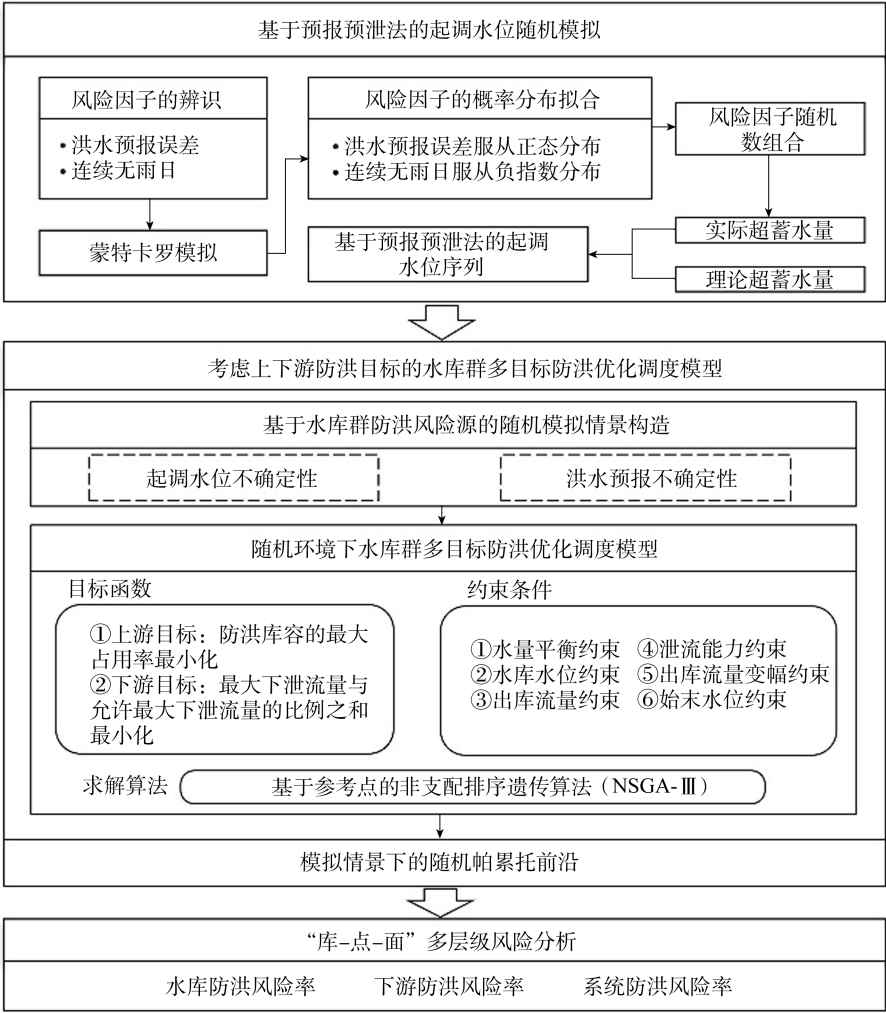


图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

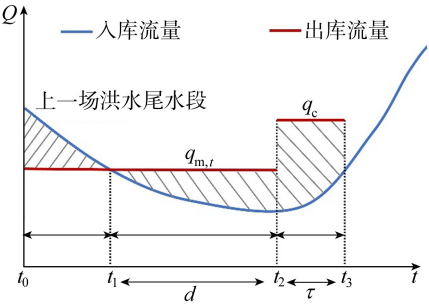


图 2 两阶段预泄能力约束法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two-stage pre-release capacity constraint method

出汛限水位,给后续防洪调度带来了风险。鉴于此,研究选取连续无雨日与洪水预报误差作为汛期运行水位动态控制过程的风险因子,采用蒙特卡罗法进行起调水位的随机模拟,以量化其不确定性特征。具体方法为:首先,基于各风险因子的概率分布生成 L 个随机数组组合;其次,将生成的随机数组组合叠加在汛期运行水位动态控制的过程中,通过两阶段预泄能力约束法计算实际超蓄水量 ΔW_l ;最后,在由原预

报信息确定的超蓄水量 ΔW_l 的基础上,根据实际运行情况释放 ΔW_l ,则考虑预报信息误差的第 l 个起调水位 $Z_{l,0}$ 表示为:

$$Z_{l,0} = f(V_x + \Delta W - \Delta W_l) \quad (l = 1, 2, \dots, L) \quad (2)$$

式中: V_x 为设计汛限水位相应的水库蓄水量; $f(\cdot)$ 为水位-库容函数。

1.3 水库群多目标防洪优化调度模型

水库群协同防洪调度的核心在于动态统筹各水库的调度策略,确保流域防洪体系的整体安全性^[35-36]。水库群的防洪目标是同时保障上游库区与下游防洪点的安全^[37]。具体而言,上游安全要求水库增大下泄流量实现库区水位快速下降,下游安全要求水库尽可能蓄滞洪水以削减洪峰,上下游防洪目标之间存在固有冲突^[38]。本文构建考虑上下游防洪目标的水库群多目标防洪优化调度模型,通过耦合起调水位序列与后续的次洪过程,构建具有概率特征的随机模拟情景集作为模型输入,进而量化解析目标冲突与风险传递之间的动态均衡机制。

1.3.1 目标函数

上游防洪目标是各水库对防洪库容的最大占用率 F_1 最小化,表示为:

$$F_1 = \sum_{i=1}^m \max \{ (V_{l,i,t} - V_{x,i}) / V_{\max,i} \mid t \in [1, T] \} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中: $V_{l,i,t}$ 为水库 i 在第 l 个随机情景下 t 时刻的蓄水量; $V_{x,i}$ 为水库 i 设计汛限水位相应的蓄水量; $V_{\max,i}$ 为水库 i 的防洪库容; m 为水库数量; T 为总时长。

下游防洪目标是使各水库的最大下泄流量与允许最大下泄流量的比例之和 F_2 最小化,表示为:

$$F_2 = \sum_{i=1}^m \max \{ q_{l,i,t} / q_{\max,i,t} \mid t \in [1, T] \} \quad (4)$$

式中: $q_{l,i,t}$ 为水库 i 在第 l 个随机情景下 t 时刻的出库流量; $q_{\max,i,t}$ 为水库 i 的允许最大下泄流量。

1.3.2 约束条件

a. 水量平衡约束:

$$V_{l,i,t+1} = V_{l,i,t} + \left(\sum_{k \in \Omega_{m,i}} q_{cl,k,t} + Q_{l,i,t} - q_{l,i,t} \right) \Delta t' \quad (5)$$

式中: $V_{l,i,t}$ 、 $V_{l,i,t+1}$ 分别为水库 i 在第 l 个随机情景下 t 时段初、时段末的蓄水量; $\Omega_{m,i}$ 为与水库 i 有直接水力联系的上游水库集合; $q_{cl,k,t}$ 为第 k 个上游水库的出库流量在第 l 个随机情景下演进到水库 i 时的流量; $Q_{l,i,t}$ 为水库 i 在第 l 个随机情景下 t 时刻的入库流量; $\Delta t'$ 为调度时段长。

b. 水库水位约束:

$$Z_{\text{down},i,t} \leq Z_{l,i,t} \leq Z_{\text{up},i,t} \quad (6)$$

式中: $Z_{l,i,t}$ 为水库 i 在第 l 个随机情景下 t 时刻的水位; $Z_{\text{down},i,t}$ 、 $Z_{\text{up},i,t}$ 分别为水库 i 在 t 时刻的水位下限和上限。

c. 出库流量约束:

$$q_{\text{down},i,t} \leq q_{l,i,t} \leq q_{\text{up},i,t} \quad (7)$$

式中: $q_{\text{down},i,t}$ 、 $q_{\text{up},i,t}$ 分别为水库 i 在 t 时刻的出库流量的下限和上限,设置下限以满足最小生态流量和基本供水,上限可根据下游防洪情况而定。

d. 泄流能力约束:

$$q_{l,i,t} \leq q_{\max,i,t} \quad (8)$$

e. 出库流量变幅约束:

$$|q_{l,i,t+1} - q_{l,i,t}| \leq \Delta q_i \quad (9)$$

式中: Δq_i 为水库 i 在相邻时刻允许的最大出库流量变幅。

f. 始末水位约束:

$$Z_{l,i,0} = Z_{l,0,i} \quad (10)$$

$$Z_{l,i,T} \rightarrow Z_{e,i} \quad (11)$$

式中: $Z_{l,i,0}$ 为水库 i 在第 l 个随机情景下的起调水位; $Z_{l,0,i}$ 为水库 i 在第 l 个随机情景下模拟的起调水位; $Z_{l,i,T}$ 为水库 i 在第 l 个随机情景下调度期末 T' 的水位; $Z_{e,i}$ 为水库 i 的目标期末水位,一般根据洪水资源利用的预测信息,将其设定为设计汛限水位或汛期运行水位动态控制域的上界。

1.3.3 求解算法

采用基于参考点的非支配排序遗传算法 (NSGA-III)^[39] 对水库群多目标防洪优化调度模型进行求解。该算法作为增强型多目标优化工具,通过引入动态参考点关联并辅以目标空间标准化技术,能够有效平衡解集的收敛性与分布性。选取各水库的出库流量作为决策变量,采用水库防洪调度中常用的分段试算法^[40] 进行约束处理,最终得到 L 组随机情景下的帕累托前沿。

1.4 “库-点-面”多层级风险分析

鉴于水文气象预报信息的不确定性,水库群汛期运行水位动态控制必然伴随风险^[41]。这种不确定性直接导致起调水位波动,并通过水文链式反应影响水库群系统后续防洪调度。因此,实施动态水位控制需承担因起调水位不确定性衍生的防洪风险,其影响范围涵盖上游库区、下游各防洪控制节点及整个水库群系统。本文建立基于“库-点-面”结构的多层级风险指标体系,根据求解水库群多目标防洪优化调度模型得到的随机优化调度结果,选取水库最高水位和下游防洪点最大流量作为目标变量,开展风险分析。“库-点-面”多层级风险指标体系包括 3 个指标。

a. 水库防洪风险率:

$$P_{R,i} = P(Z_{\max,i} > Z_{s,i}) = C(l | Z_{\max,l,i} > Z_{s,i}) / L \quad (12)$$

式中: $P_{R,i}$ 为水库 i 的防洪风险; $P(\cdot)$ 为概率函数; $Z_{\max,l,i}$ 为水库 i 在第 l 个随机情景下的最高水位; $Z_{s,i}$ 为水库 i 的安全水位阈值; $C(\cdot)$ 为计数函数,表示统计 L 个情景中某一事件发生的次数。

b. 下游防洪风险率:

$$P_{Q,i} = P(q_{c,\max,i} > q_{cs,i}) = C(l | q_{c,\max,l,i} > q_{cs,i}) / L \quad (13)$$

式中: $P_{Q,i}$ 为水库 i 下游防洪风险; $q_{c,\max,l,i}$ 为水库 i 在第 l 个随机情景下的下游防洪点最大流量; $q_{cs,i}$ 为水库 i 下游防洪点的安全流量阈值。

c. 系统风险率,当水库群中任一要素的运行结果超过给定的安全阈值时,认为系统存在风险^[42]。因此,本文将系统风险 P_s 定义为任意水库的最高水位或任意下游防洪点的最大流量超过其安全阈值的概率,表示为:

$$P_S = C(l|\exists Z_{\max,l,i} > Z_{s,i} \text{ or } \exists q_{c,\max,l,i} > q_{cs,i})/L$$

(14)

2 实例研究

2.1 研究区概况

本文以东淠河流域混联水库群系统为对象开展实例研究。该流域地处大别山东麓,地理坐标为31°00'N、116°00'E,属亚热带季风气候影响下的典型山地河流系统。现行汛限水位静态控制策略因其保守性导致防洪与兴利综合效益受到限制,未能充分挖掘水库群汛期的洪水资源潜力^[43]。该混联水库群系统由白莲崖、磨子潭、佛子岭3个水库及下游霍山防洪点构成,其中霍山防洪点的安全泄量为2 175 m³/s。研究区概况如图3所示,3个水库的主要特征参数见表1。

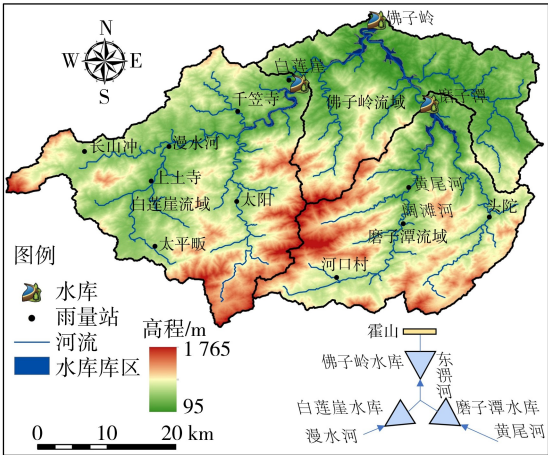


图3 研究区概况
Fig.3 Overview of study area

表1 3个水库特征参数

水库	校核洪水位/m	设计洪水位/m	正常高水位/ m	汛限水位/m	死水位/m	总库容/ 亿 m ³	防洪库容/ 亿 m ³	兴利库容/ 亿 m ³	调洪库容/ 亿 m ³	汛限水位下泄流能力/(m ³ /s)	下游安全泄量/(m ³ /s)
白莲崖	234.5	209.24	208	205	180	4.6	2.73	1.60	2.81	3 716	1 300
磨子潭	203.9	201.19	180	177	163	3.48		1.37	1.91	483	483
佛子岭	129.83	125.65	125.56	117.56	108.76	4.92	1.00	2.39	1.56	1 370	2 175

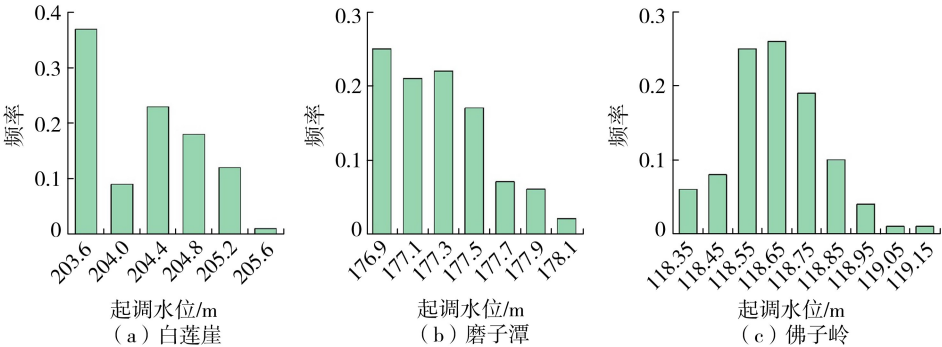


图4 3个水库的起调水位频率
Fig.4 Frequency of initial water levels of three reservoirs

2.2 起调水位的随机模拟

预报预泄法以气象预报无雨为前提,采用连续无雨日作为超蓄水量计算的无雨时长,根据2010—2015年白莲崖、磨子潭、佛子岭水库的场次洪水的定时预报成果及对应的实测资料,获取各库72 h预见期下的洪量预报误差样本并进行概率分布拟合,得到对应的误差分布为: $N(0,0.34^2)$ 、 $N(0,0.93^2)$ 、 $N(0,1.78^2)$ 。此外,经统计分析,该流域2010—2015年6—9月实际降雨系列的连续无雨日服从负指数分布 $\exp(0.373,1)$ 。根据上述风险因子的统计特性生成100组洪量预报误差、连续无雨日的随机数,各水库最大允许安全泄量折扣系数 β 取0.5,计算得到预报无雨时各库的理论超蓄水量 ΔW 和实际超蓄水量 ΔW_i 。进而得到预报误差扰动下各水库的起调水位频率(图4),由图4可知,3个水库经随机模拟生成的起调水位基本分布于汛限水位附近,其中白莲崖水库的起调水位低于原设计汛限水位的频率较高,磨子潭水库的起调水位高频分布在其汛限水位两侧,佛子岭水库的起调水位总体高于其汛限水位。

2.3 水库群防洪优化调度与风险分析

本文将汛期运行水位动态控制所导致的起调水位不确定性作为后续调洪过程的风险源,开展水库群多目标防洪优化调度与风险分析。

2.3.1 防洪优化调度模型参数设置与求解

水库群多目标防洪优化调度模型的参数设置见表2。采用NSGA-Ⅲ算法求解模型,以3个水库在洪水过程全时段(24个时段,时间步长为3 h)的出库流量作为决策变量,设定种群规模为50,最大迭

表 2 模型参数设置
Table 2 Model parameters set

水库	最小出库流量/(m ³ /s)	最大出库流量/(m ³ /s)	出库流量变幅/(m ³ /s)	最高水位/m	最低水位/m	期末水位/m
白莲崖	82	1000	500	230	170.00	208
磨子潭	54	1000	500	200	163.00	189
佛子岭	112	3450	500	129	108.76	125

代数 为 2 000 次,交叉概率为 0.5,变异概率为 0.5,模型运行次数为 100。

2.3.2 调度结果分析

为了定量分析汛期运行水位动态控制的不确定性对水库群防洪调度结果的影响,采用所建模型依次对 100 组随机情景进行优化调度,整合各情景输出得到随机优化调度结果。按上游防洪目标 F_1 对非劣解进行升序排序,受篇幅限制,选取第 1、10、20、30、40、50 个非劣解(编号 1~6,图 5)开展分析。结果表明,上下游的防洪目标之间呈现明显竞争的关系,非劣解 1~6 防洪库容最大占用率略有增加,而最大下泄流量有所减少,揭示了在不同调度策略

下,上下游防洪安全之间的权衡关系。

本文以白莲崖水库为例展示各非劣解的水位随机过程(图 6)和期望水位过程(图 7)。由图 6 可知,在考虑起调水位不确定性的多目标优化调度中,各水库水位过程呈现显著随机性。具体表现为初始时刻水位离散度达到峰值,随着调洪历时增加,离散度呈现逐步衰减规律。这一规律证实了起调水位对后续调洪过程的影响具有时间衰减效应,因此短期的调洪过程中起调水位的影响是不可忽略的。图 7 中白莲崖水库的期望水位过程随着非劣解的增大而呈现上升趋势,其中非劣解 6 对应最高的水位过程。

2.3.3 防洪调度风险评估

白莲崖、磨子潭、佛子岭水库的最高水位和下游防洪点(霍山)的最大流量是风险指标计算的目标变量,受起调水位不确定性的影响,其表现为特定概率分布的随机变量(图 8)。由图 8(a)~(c)可知,在非劣解 1~6 中,3 个水库的最高水位均呈现上升趋势,其中白莲崖水库最高水位均值的增幅达 1.78 m,最为显著;由图 8(d)可知,霍山断面的最大流量随非劣解 1~6 呈现下降趋势,最大流量均值的减幅为 88.86 m³/s。综合上述结果可知,水库的最高水位和下游防洪控制点的最大流量之间存在明显

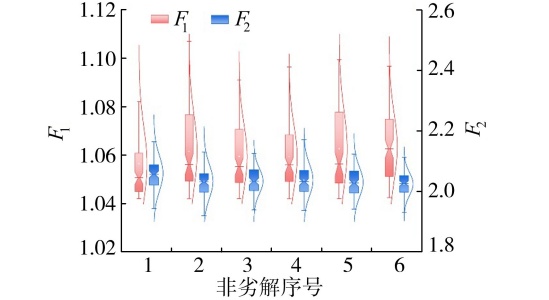


图 5 各非劣解的上游防洪目标值和下游防洪目标值
Fig.5 Upstream flood control target values and downstream flood control target values under each non-dominated solution

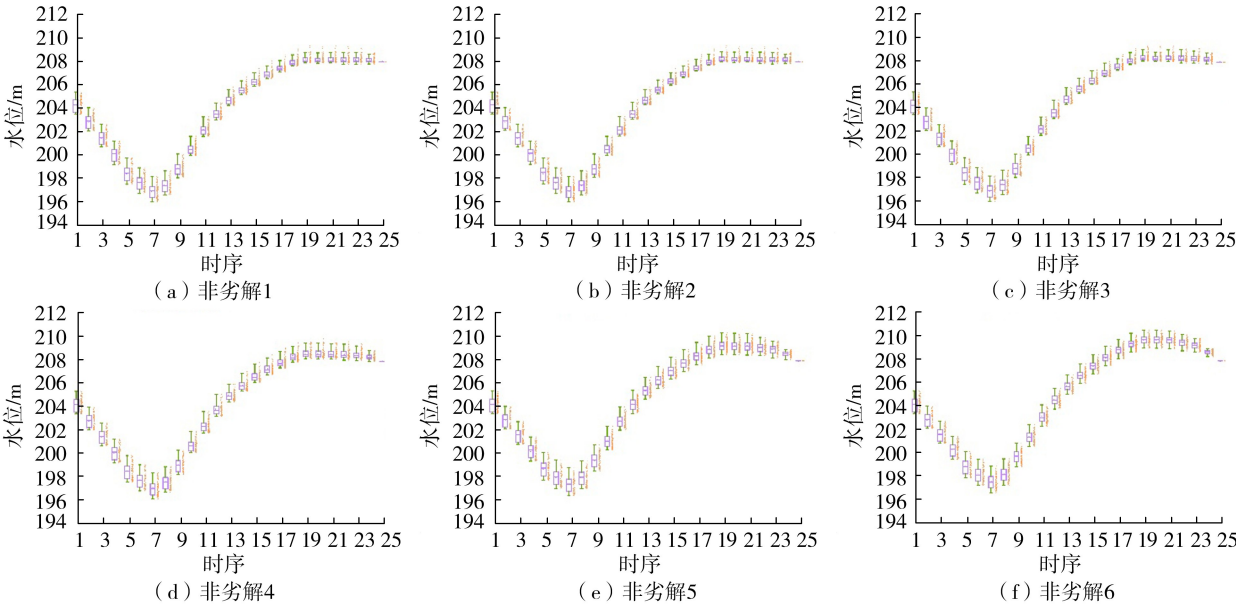


图 6 白莲崖水库各非劣解的水位随机过程

Fig.6 Stochastic water level processes of Bailianya Reservoir under each non-dominated solution

的竞争关系。

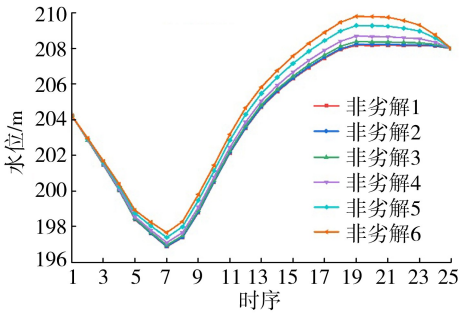


图7 白莲崖水库各非劣解的水位期望过程
Fig.7 Expected water level processes of Bailianya Reservoir under each non-dominated solution

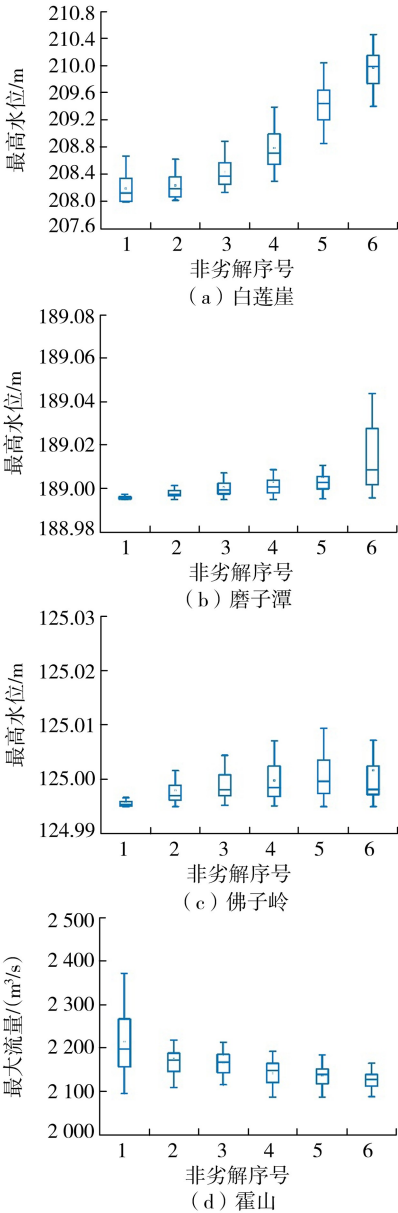


图8 3个水库最高水位和下游防洪点最大流量随机模拟结果
Fig.8 Stochastic simulation results of maximum water levels of three reservoirs and maximum discharge at downstream flood control point

各非劣解对应的“库-点-面”多层级风险率如表3所示。对比表3中各水库的防洪风险率可知,总体上白莲崖水库的防洪风险率较其余水库偏小,而佛子岭水库的防洪风险率最高(非劣解6达49%),这一差异可能是由于起调水位分布的不同所致。白莲崖水库随机模拟的起调水位主要分布于汛限水位以下,而佛子岭水库的起调水位多位于汛限水位以上,导致后者防洪库容预占用程度较高,遭遇洪水时水库的防洪风险率升高。值得注意的是,水库群系统风险率随非劣解的变化呈现出先降后升的边际效益特征:从非劣解1的63%下降至42%,随后非线性递增至非劣解6的56%。因此,决策时需选择中间部分的折中解以均衡风险。

表3 各非劣解对应的“库-点-面”多层级风险率
Table 3 Multi-level risk rate of “reservoir-point-surface” corresponding to each non-dominated solution

非劣解 序号	水库防洪风险率/%			下游防洪 风险率/%	系统风险 率/%
	白莲崖	磨子潭	佛子岭		
1	0	0	2	61	63
2	0	0	20	48	55
3	0	1	31	40	43
4	0	6	41	9	42
5	4	7	45	5	48
6	36	34	49	3	56

2.4 不同风险源对比分析

为辨识起调水位不确定性对水库群系统防洪风险的影响,本文在起调水位不确定性的基础上引入了传统风险源(洪水预报不确定性),鉴于后续洪水过程为72h,各水库采用的预报误差分布同2.2节所述,据此设置两种风险源组合情景作为模型输入:情景1,仅考虑次洪过程的洪水预报不确定性生成随机模拟情景,各水库起调水位均为原设计汛限水位;情景2,同时考虑次洪过程的洪水预报不确定性与起调水位不确定性生成随机模拟情景。

由于水库群多目标防洪优化调度模型产生的帕累托前沿上的极端非劣解存在风险边际效应,为平衡风险,选择第25个非劣解(经逼近理想解法验证)作为折中解进行分析计算。表4展示了折中解下不同情景的各级防护对象风险率。由表4可知,情景1因忽略起调水位不确定性导致各层级的风险率较高,情景2通过引入起调水位不确定性,风险源的组合效应使得大部分防护对象的风险率产生一定的降幅,水库群系统风险率降低8%。上述研究表明,DC-OWL-FS引发的起调水位不确定性可部分抵消洪水预报误差所带来的固有风险,体现了异质风险源间的协同抵消机制。

表 4 折中解下不同情景的各级防护对象风险率
 Table 4 Risk rates of protected objects at all levels of different scenarios under compromise solution

各级防护对象	风险率/%	
	情景 1	情景 2
白莲崖水库	1	0
磨子潭水库	7	2
佛子岭水库	49	40
下游防洪点	13	16
水库群系统	59	51

3 结 论

a. 基于 DC-OWL-FS 的水库群多目标防洪风险分析方法,识别并量化了 DC-OWL-FS 中的风险因子,结合蒙特卡罗模拟定量表征起调水位的不确定性,构建了考虑上下游防洪目标的水库群多目标防洪优化调度模型,并提出了“库-点-面”多层次风险指标体系。

b. 东淠河水库群的实例研究结果表明:由于洪水资源利用所导致的起调水位不确定性对后续调洪过程的影响随时间的推移而减小,因此在短期调洪过程中起调水位的不确定性不可忽视;水库群防洪调度中,上下游的防洪目标存在竞争关系,即水库的最高水位与最大下泄流量相互对立;起调水位作为调度初始条件,其不确定性可传播至水库调度环节;将起调水位的不确定性作为水库群多目标防洪调度的风险源展开分析,发现水库群系统风险率呈现出边际效益特征,应选择折中解以均衡风险;DC-OWL-FS 所导致的起调水位不确定性是水库群防洪调度的重要风险源,耦合该不确定性可部分抵消洪水预报误差所带来的固有风险,使水库群系统风险率减小 8%,体现了异质风险源间的协同抵消机制。

参考文献:

[1] 朱辉,何祺胜,李金阳,等. 基于多源遥感数据的蓄洪区洪涝遥感监测与分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 50-57. (Zhu Hui, He Qisheng, Li Jinyang, et al. Remote sensing monitoring and analysis of flood in flood storage area based on multi-source remote sensing data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 50-57. (in Chinese))

[2] 康玲,廖武丰,周丽伟,等. 耦合高斯-极值分布与云模型的防洪调度预案风险分析方法[J]. 水利学报, 2025, 56(3): 309-316. (Kang Ling, Liao Wufeng, Zhou Liwei, et al. A method coupled Gaussian-extreme distribution with cloud models for risk analysis of flood control operational scheme[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(3): 309-316. (in Chinese))

[3] Chen Jinyi, Gao Cheng, Zhou Hong, et al. Urban flood risk

assessment based on a combination of subjective and objective multi-weight methods [J]. Applied Sciences, 2024, 14(9): 3694.

[4] Jiang Yunzhong, Zhang Rui, Wang Bende. Scenario-based approach for emergency operational response: implications for reservoir management decisions [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 80: 103192.

[5] 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.

[6] 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))

[7] 田世民,江恩慧,王远见,等. 基于黄河流域系统治理的水库多目标调度约束阈值研究[J]. 水利学报, 2024, 55(6): 631-642. (Tian Shimin, Jiang Enhui, Wang Yuanjian, et al. Research on constraint thresholds for multi-objective scheduling of reservoirs based on Yellow River Basin system governance[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(6): 631-642. (in Chinese))

[8] 黄德春,朱宇昂,张修忠,等. 基于多理论视角的我国现代化水库运行管理矩阵建设研究[J]. 水利经济, 2025, 43(3): 84-93. (Huang Dechun, Zhu Yuang, Zhang Xiuzhong, et al. Research on the construction of modern reservoir operation and management matrix in China from multiple theoretical perspectives[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(3): 84-93. (in Chinese))

[9] 曲炜,陆海曙,田盛,等. 西北内陆干旱区水资源可利用量计算方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(2): 148-152. (Qu Wei, Lu Haishu, Tian Sheng, et al. Method for calculation of available volume of water resources for northwest inland arid areas [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(2): 148-152. (in Chinese))

[10] 王蔚,董增川,崔璨,等. 基于洪水资源化的洪泽湖后汛期蓄水策略[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 168-179. (Wang Wei, Dong Zengchuan, Cui Can, et al. Water storage strategy in post-flood period for Hongze Lake based on flood utilization[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 168-179. (in Chinese))

[11] 左其亭,张志卓,马军霞. 竞争性用水问题本质及解决途径与方法[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 1-8. (Zuo Qiting, Zhang Zhizhuo, Ma Junxia. Essence, resolutions, and dealing methods of competitive water use issues [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 1-8. (in Chinese))

[12] 向立云,魏智敏. 洪水资源化:概念、途径与策略[J]. 水

- 利发展研究, 2005, 5 (7): 24-29. (Xiang Liyun, Wei Zhimin. Flood resource utilization: concepts, approaches and strategies [J]. Water Resources Development Research, 2005, 5 (7): 24-29. (in Chinese))
- [13] 舒心怡, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 海绵措施空间布局优化下的晋城市洪涝水深-流速联合分布特征 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (1): 76-84. (Shu Xinyi, Xu Zongxue, Ye Chenlei, et al. Flood depth-flow velocity joint distribution characteristics of Jincheng City under spatial layout optimization of sponge facilities [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (1): 76-84. (in Chinese))
- [14] 董柏良, 夏军强, 王小杰, 等. 地表径流与地下管流耦合的城市暴雨洪涝动力学模型 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (6): 95-103. (Dong Boliang, Xia Junqiang, Wang Xiaojie, et al. Urban rainstorm flood dynamic model coupled with surface runoff and sewer flow [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (6): 95-103. (in Chinese))
- [15] 周研来, 郭生练, 王俊, 等. 梯级水库汛期运行水位协同浮动调度模型方法 [J]. 水利学报, 2023, 54 (5): 507-518. (Zhou Yanlai, Guo Shenglian, Wang Jun, et al. Methodology on synergetic control of flood operating water levels of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (5): 507-518. (in Chinese))
- [16] 王坤, 王宗志, 王敏慎, 等. 沿海中小河流域地表-地下水联合调控洪水资源利用研究: II. 实例应用 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (2): 55-63. (Wang Kun, Wang Zongzhi, Wang Minshen, et al. Research on floodwater resources utilization by conjunctive regulation of surface and underground reservoirs in coastal small-and medium-sized river basins: II. case study [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (2): 55-63. (in Chinese))
- [17] 郭生练, 刘攀, 王俊, 等. 再论水库汛期水位动态控制的必要性和可行性 [J]. 水利学报, 2023, 54 (1): 1-12. (Guo Shenglian, Liu Pan, Wang Jun, et al. Revisiting necessity and feasibility for dynamic control of reservoir water level during flood season [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (1): 1-12. (in Chinese))
- [18] 刘达, 黄本胜, 赵璧奎, 等. 飞来峡水库洪水资源化利用与风险分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (5): 18-24. (Liu Da, Huang Bensheng, Zhao Bikui, et al. Flood resource utilization and risk analysis of Feilaixia Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (5): 18-24. (in Chinese))
- [19] 杨亚锋, 李欣瑞, 王红瑞, 等. 基于“四水四定”的京津冀地区水资源空间均衡及其分布动态演进分析 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (1): 107-113. (Yang Yafeng, Li Xinrui, Wang Hongrui, et al. Analysis of water resources spatial equilibrium and dynamic evolution of water resources distribution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on “Basing Four Aspects on Water Resources” [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (1): 107-113. (in Chinese))
- [20] 李志鹏, 田淳, 何晓燕, 等. 碧口水库主汛期水位动态控制效益分析 [J]. 人民黄河, 2019, 41 (4): 23-26. (Li Zhipeng, Tian Chun, He Xiaoyan, et al. Analysis on the benefit of dynamic control of water level in the main flood season of Bikou Reservoir [J]. Yellow River, 2019, 41 (4): 23-26. (in Chinese))
- [21] 任明磊, 何晓燕, 丁留谦, 等. 基于改进预泄能力约束法的水库汛限水位分期动态控制域确定及应用 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16 (1): 16-22. (Ren Minglei, He Xiaoyan, Ding Liuqian, et al. Research and application of staged dynamic controlling domain of limited reservoir water level in flood season based on the improved pre-discharge capacity constrained method [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16 (1): 16-22. (in Chinese))
- [22] 张丽娟, 许海军, 方文莉, 等. 水库汛限水位动态控制综合信息模糊推理模式法及其应用 [J]. 东北水利水电, 2005, 23 (9): 34-35. (Zhang Lijuan, Xu Haijun, Fang Wenli, et al. Comprehensive information fuzzy inference model method of limited water level dynamic control in flood period and its application [J]. Water Resource & Hydropower of Northeast China, 2005, 23 (9): 34-35. (in Chinese))
- [23] 任明磊, 何晓燕, 丁留谦, 等. 水库汛限水位动态控制域确定方法研究发展动态综述 [J]. 水力发电, 2016, 42 (6): 61-65. (Ren Minglei, He Xiaoyan, Ding Liuqian, et al. Review on the methods of fixing dynamic control range of reservoir water level in flood season [J]. Water Power, 2016, 42 (6): 61-65. (in Chinese))
- [24] 沙永兵, 巴欢欢, 王也, 等. 基于预报预泄的五强溪水库主汛期运行水位优化 [J]. 长江科学院院报, 2024, 41 (12): 23-28. (Sha Yongbing, Ba Huanhuan, Wang Ye, et al. Optimization of operating water level of Wuqiangxi reservoir in main flood season based on forecast and pre-discharge [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41 (12): 23-28. (in Chinese))
- [25] 王坤, 王宗志, 白莹, 等. 沿海中小河流域地表-地下水联合调控洪水资源利用研究: I. 方法与模型 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 79-85. (Wang Kun, Wang Zongzhi, Bai Ying, et al. Research on joint regulation and utilization of flood resources by surface-underground reservoirs in coastal small and medium-sized river basins: I. methods and models [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 79-85. (in Chinese))
- [26] 李玮, 郭生练, 刘攀, 等. 梯级水库汛限水位动态控制模型研究及运用 [J]. 水力发电学报, 2008, 27 (2): 22-28. (Li Wei, Guo Shenglian, Liu Pan, et al. Dynamic control model for limiting level during flood season of cascade reservoirs operation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27 (2): 22-28. (in Chinese))
- [27] 谭乔凤, 雷晓辉, 王浩, 等. 考虑梯级水库库容补偿和设计洪水不确定性的汛限水位动态控制域研究 [J]. 工程

- 科学与技术, 2017, 49 (1): 60-69. (Tan Qiaofeng, Lei Xiaohui, Wang Hao, et al. Dynamic control bound of flood limited water level considering capacity compensation regulation and design flood uncertainty of cascade reservoirs[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49 (1): 60-69. (in Chinese))
- [28] 张晓琦, 刘攀, 陈进, 等. 基于两阶段风险分析的水库群汛期运行水位动态控制模型[J]. 工程科学与技术, 2022, 54 (5): 141-148. (Zhang Xiaoqi, Liu Pan, Chen Jin, et al. Dynamic control model of multi-reservoir flood limited water levels during flood seasons based on the two-stage flood risk analysis [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54 (5): 141-148. (in Chinese))
- [29] 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.
- [30] 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))
- [31] Chen Juan, Zhong Ping'an, Zhang Yu, et al. A decomposition-integration risk analysis method for real-time operation of a complex flood control system[J]. Water Resources Research, 2017, 53 (3): 2490-2506.
- [32] Lu Qingwen, Zhong Ping'an, Xu Bin, et al. Risk analysis of reservoir floodwater utilization coupling meteorological and hydrological uncertainties [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2020, 34 (10): 1507-1521.
- [33] 黄灵芝, 李守义, 司政. 汛限水位动态控制在石门水库主汛期调度中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28 (3): 146-150. (Huang Lingzhi, Li Shouyi, Si Zheng. Research on limited water level dynamic control of Shimen Reservoir dispatch in the main flood season[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28 (3): 146-150. (in Chinese))
- [34] 瞿思敏, 陆威村, 蒋思军, 等. 洪水预报的比例系数系统响应误差修正方法[J]. 水资源保护, 2025, 41 (2): 88-94. (Qu Simin, Lu Weicun, Jiang Sijun, et al. Proportional coefficient system response error correction method for flood forecasting[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 88-94. (in Chinese))
- [35] 李继清, 黄可, 陈思雨, 等. 基于 GAMS 的水库群调度及风险补偿研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (6): 10-19. (Li Jiqing, Huang Ke, Chen Siyu, et al. Research on reservoir group scheduling and risk compensation based on GAMS[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (6): 10-19. (in Chinese))
- [36] 方国华, 王海政, 吴承君, 等. 考虑弃水风险的梯级水库中长期多目标优化调度研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (6): 20-27. (Fang Guohua, Wang Haizheng, Wu Chengjun, et al. Study on mid- and long-term multi-objective optimal operation of cascade reservoirs considering water abandonment risk[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (6): 20-27. (in Chinese))
- [37] Wu Qiong, Jiang Zhiqiang, Chang Zongye, et al. Study on flood control operation of parallel reservoir groups considering the difference of solution order [J]. Water Resources Management, 2025, 39 (1): 109-125.
- [38] 陈甜, 董增川, 贾本有, 等. 考虑上游梯级水库群调度的小南海水电站坝址设计洪水分析[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2014, 42 (6): 476-480. (Chen Tian, Dong Zengchuan, Jia Benyou, et al. Analysis of design flood of dam site of Xiaonanhai hydropower station considering flood control operation of upstream cascade reservoir group[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42 (6): 476-480. (in Chinese))
- [39] Deb K, Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18 (4): 577-601.
- [40] 钟平安, 邹长国, 李伟, 等. 水库防洪调度分段试算法及应用[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23 (6): 21-23. (Zhong Ping'an, Zou Changguo, Li Wei, et al. Stage trial-and-error method and its application to reservoir operation for flood control[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23 (6): 21-23. (in Chinese))
- [41] 王俊, 郭生练. 三峡水库汛期控制水位及运用条件[J]. 水科学进展, 2020, 31 (4): 473-480. (Wang Jun, Guo Shenglian. On Three Gorges Reservoir control water level and operating conditions in flood season[J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (4): 473-480. (in Chinese))
- [42] 杜镇瀚, 钟启明, 董海洲, 等. 堰塞湖风险评估研究综述[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (4): 13-25. (Du Zhenhan, Zhong Qiming, Dong Haizhou, et al. A review of risk assessment studies on dammed lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (4): 13-25. (in Chinese))
- [43] 朱喜, 李诗琼, 王正华, 等. 乌江中下游干流梯级水库汛期联合调度运行水位动态控制策略研究[J]. 中国农村水利水电, 2025 (1): 111-116. (Zhu Xi, Li Shiqiong, Wang Zhenghua, et al. Study on the dynamic control strategy of water level in joint scheduling operation of cascade reservoirs in the middle and lower reaches of the Wujiang River during flood season[J]. China Rural Water and Hydropower, 2025 (1): 111-116. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-28 编辑: 王芳)