

金沙江下游梯级与三峡水库群防洪库容优化分配模型比较研究

何志鹏, 郭生练*, 王 俊, 谢雨祚, 钟斯睿

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年5月20日; 录用日期: 2022年6月18日; 发布日期: 2022年6月29日

摘 要

以金沙江下游乌东德 - 白鹤滩 - 溪洛渡 - 向家坝梯级与三峡水库系统为研究对象, 建立了变权重剩余防洪库容最大、系统非线性安全度最大、梯级防洪风险率最小3种防洪库容优化分配模型, 选取6个典型年的洪水过程, 采用逐次淘汰法对各个模型的计算结果进行综合评价。结果表明: 基于梯级水库群防洪风险率最小的优化分配模型可以在不降低对下游防洪效果的基础上, 使各水库均衡地分摊防洪区域的防洪风险, 充分发挥水库群的防洪效益, 为最佳的防洪库容分配方案。

关键词

梯级水库, 防洪库容, 优化分配, 比较研究

Comparative Study of Optimal Allocation Model for Flood Control Capacity in the Lower Cascade Reservoirs of Jinsha River and Three Gorges Cascade

Zhipeng He, Shenglian Guo*, Jun Wang, Yuzuo Xie, Sirui Zhong

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: May 20th, 2022; accepted: Jun. 18th, 2022; published: Jun. 29th, 2022

Abstract

The Wudongde-Baihetan-Xiluodu-Xiangjiaba cascade reservoirs in the lower Jinsha River and Three

作者简介: 何志鹏(1999-), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事水安全风险管控方面研究, Email: zhipenghe@whu.edu.cn

*通讯作者: 郭生练, 男, 福建龙岩人, 教授, 主要从事水文水资源研究, Email: slguo@whu.edu.cn

Gorges Reservoir were considered as the objects of study. Three optimal allocation schemes, including the largest variable weight residual flood control storage capacity, the largest system nonlinear safety degree, and the smallest cascade flood control risk rate were established and compared. The typical flood data of 6 years were selected for analysis, and the comprehensive evaluation method was carried out by the successive elimination of the scheme based on the order and degree of efficiency. It is found that the smallest cascade flood control risk rate is the best allocation scheme for the flood control storage capacity of reservoirs group which can make the reservoirs share the risk of the flood control areas, given full play to the flood control benefits of the reservoirs in the condition that the flood control effect of the downstream is not deteriorated.

Keywords

Cascade Reservoirs, Flood Control Capacity, Optimal Allocation, Comparative Study

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

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

长江上游已经兴建了一批大型水库电站并投产运行, 水库防洪调度逐渐从单库调度转变为水库群联合调度, 其中防洪风险仍然是需要重点考虑的目标, 必须在各个调度决策时刻进行考虑与防范。如何在保障流域防护目标防洪安全的前提下, 充分利用洪水资源, 提高水库群的综合利用效益, 是当前国内外研究的重点与难点[1]。

水库群防洪联合调度研究可分为两个方向, 即建立防洪调度的优化模型和改良防洪调度的优化准则。上世纪 50 年代以来, 许多优化调度模型方法逐渐运用在实际防洪调度中[2] [3]。而对于防洪调度优化准则, 许多学者基于不同的水库群系统开展防洪库容优化分配研究。He 等[4]以水库出库流量标准差最小为优化目标函数, 基于下泄流量最小和削峰率最大策略, 制定了单个水库的调度方案。Liu 等[5]考虑了不同泄洪控制设施的启停顺序及使用规则, 采用光滑支持向量机模型拟合优化调度结果, 从而应用于实时调度之中。陈森林等[6]使用水库出流上下边界作为约束来划分水库不同控制阶段, 考虑累计蓄水量最小作为目标函数, 实现对水库防洪调度决策的优化控制。李映辉等[7]考虑实时洪水预报预见期较短的问题, 基于洪水动态展延理论, 建立水库防洪优化调度模型进行防洪调度决策。Jia 等[8]考虑实时防洪调度情况, 提出了多目标最优折中决策的思想, 并通过建立归一化函数和模糊层次分析法, 将防洪调度的多目标转换为单个目标表述。Moridi 等[9]以下游洪涝损害最小作为优化目标, 采用混合整数线性规划进行模型优化计算。张晓琦等[10]引入条件风险价值, 建立了水库群防洪库容协同作用研究方法, 计算了各水库防洪库容组合的可行空间。

对于目前的防洪库容优化分配模型研究而言, 需要以水库群防洪调度综合效益最优作为研究目标, 通过开发满足不同流域区域防洪要求的调度模型, 优化分配各水库的防洪库容。本文基于金沙江下游乌东德 - 白鹤滩 - 溪洛渡 - 向家坝梯级与三峡水库, 建立变权重剩余防洪库容最大模型、系统非线性安全度最大模型、梯级防洪风险率最小模型 3 种防洪库容优化分配策略及模型, 进行联合防洪库容优化分配设计。

2. 金沙江下游梯级与三峡水库概况

随着国家对长江防洪能力的重视, 长江沿岸堤防、分蓄洪区和流域控制性水利枢纽陆续建成, 大部分防洪设施进入使用阶段, 显著地提高了长江流域的防洪能力[11]。三峡水库是长江上游至关重要的控制型水库枢纽, 对保障中下游防洪安全有着显著作用, 但长江洪水具有峰高量大、持续时间长、汛期发生频繁等特点, 为保障

长江中下游流域的防洪安全，确保经济社会发展与人民生命安全，有必要开展长江流域水库群系统进行联合调度[12]。

金沙江下游乌东德 - 白鹤滩 - 溪洛渡 - 向家坝四座大型水库，主要承担川江河段和一部分长江中下游的防洪任务。金沙江下游四座梯级电站总装机容量 48,710 MW，相当于两个三峡，在防洪减灾、发电兴利等综合领域均起到了非常重要的作用[13]。金沙江下游梯级及三峡水库主要运行相关参数如表 1 所示。

Table 1. Characteristic parameters of the lower Jinsha River cascade and Three Gorges reservoirs
表 1. 金沙江下游梯级与三峡水库特征参数表

水库名称	汛限水位/m	正常蓄水位/m	防洪库容/亿 m ³	调节库容/亿 m ³	装机容量/MW	保证出力/MW
乌东德	952	975	24.4	30.2	10,200	3160
白鹤滩	785	825	75	104.36	16,000	5500
溪洛渡	560	600	46.5	64.6	13,860	3850
向家坝	370	380	9.03	9.03	7750	2009
三峡	145	175	221.5	165	22,500	4900

3. 模型计算

3.1. 水库群防洪库容分配模型

3.1.1. 变权重剩余防洪库容最大模型

为了考虑增加水库剩余防洪库容，周丽伟等[14]提出变权重剩余防洪库容最大模型。该模型在满足水库群下游共同防洪对象安全的前提下，综合考虑水库区间来水、水库设计防洪库容、水库地理位置等因素，对水库剩余防洪库容权重进行计算，以协调使用各水库防洪库容的使用。定义水库系数 $\alpha_{i,t}$ ，其数学表达式如下：

$$\alpha_{i,t} = \frac{Q_{i,t}}{V_i^{des} \cdot L_i} \quad (1)$$

式中： $Q_{i,t}$ 为水库 i 在时刻 t 的入库流量； V_i^{des} 为水库 i 的设计防洪库容； L_i 为水库 i 至下游防洪对象的距离。

将各水库系数归一化后，得到水库剩余防洪库容权重 $\omega_{i,t}$ ，其数学表达式如下：

$$\omega_{i,t} = \frac{\alpha_{i,t}}{\sum_{i=1}^N \alpha_{i,t}} \quad (2)$$

式中： $\alpha_{i,t}$ 为水库 i 在时刻 t 的水库系数； N 为水库个数。

3.1.2. 系统非线性安全度最大模型

在水库群联合防洪调度中，使用相同的防洪库容，对设计防洪库容大、调蓄能力强的水库的“安全”影响程度要更小，康玲等[15]从水库群“安全”的角度建立了系统非线性安全度最大模型。定义水库非线性安全度 S_i 为水库最大剩余防洪库容与水库设计防洪库容的非线性函数，其数学表达式为：

$$S_i = \sqrt{1 - \left(\frac{\max_{t \in T} (V_i^{des} - V_{i,t})}{V_i^{des}} \right)^2} \quad (3)$$

式中： S_i 为水库 i 的非线性安全度； V_i^{des} 为水库 i 的设计防洪库容； $V_{i,t}$ 为水库 i 在时刻 t 使用的防洪库容； T 为调度时段总数。

水库非线性安全度的下降速率随着水库防洪库容动用比例的提高而逐步加快。当防洪库容使用比例较低时，水库防洪库容使用比例的增加对系统非线性安全度的影响较小，因此可以优先使用该水库拦蓄洪水。

3.1.3. 梯级防洪风险率最小模型

在实际调度中，往往需要综合考虑各水库的调度方案、上下游位置、区间来水情况、防洪对象的防洪安全等因素。本研究提出梯级防洪风险率最小策略。梯级防洪风险率最小策略是在满足下游防洪对象安全的前提下，水库处于运行水位提高后的水位状态时，遭遇频率 P 洪水的风险率 R_p 最小。本文将相应的设计频率洪水经过调洪计算得到的最高水位值作为相应洪水标准的水位。梯级水库防洪风险以允许安全流量及防洪标准对应的最高运行水位作为判定条件，出现了超过相应阈值的事件即视为洪水风险的产生。相应的防洪风险率可采用确定起调水位后使用试算法进行调洪计算获得。

由于串联水库的调蓄作用，单库风险模型可扩展到串联水库，即若对于串联水库群，其中任一水库均满足防洪标准 F ，则串联水库群满足防洪风险 F 。

$$\begin{cases} R_{p1} \leq F \\ R_{p2} \leq F \\ \vdots \\ R_{pn} \leq F \end{cases} \Rightarrow R_p \leq F \quad (4)$$

式中： R_p 是聚合水库的防洪风险， R_{p1} 是第一个水库的防洪风险， R_{pn} 是从第二个起任一串联水库的防洪风险。

3.2. 梯级水库防洪库容联合优化分配计算

3.2.1. 梯级水库联合优化分配模型

1) 目标函数

1、梯级防洪控制站的超标准洪量最小：

$$\min W = \sum_{i \in \Gamma_1} \sum_{t=1}^T q_{i,t} \Delta t \quad (5)$$

式中： W 为梯级防洪控制站整个调度期内的总超标洪量； Γ_1 为防洪控制站集合； t 为调度时刻序号； T 为调度时段总数； $q_{i,t}$ 为第 i 个防洪控制站在 t 时刻的超标流量； Δt 为调度时刻单位。

2、不同模型要求的目标函数最优，分别为：

① 水库群变权重剩余防洪库容最大：

$$\max V = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \omega_{i,t} (V_i^{des} - V_{i,t}) \quad (6)$$

式中： V 为水库群在调度期内的累积变权重剩余防洪库容； $V_{i,t}$ 为水库 i 在时刻 t 使用的防洪库容； $\omega_{i,t}$ 为水库 i 在时刻 t 的剩余防洪库容权重系数； N 为水库个数； T 为调度总时段数。

② 水库群系统非线性安全度最大：

$$\max S = \frac{1}{N} \sum_{i \in \Gamma_2} S_i \quad (7)$$

式中： S 为水库群系统非线性安全度； S_i 为水库 i 的非线性安全度。

③ 水库群梯级防洪风险率最小：

$$\min R_p = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T R_{pt} \quad (8)$$

式中： R_p 为水库群梯级防洪风险率； R_{Pt} 为时刻 t 梯级水库水位对应的梯级防洪风险率。

2) 约束条件

1、水库水量平衡方程：

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Q_{i,t}^{in} - Q_{i,t}^{out}) \times \Delta t \quad (9)$$

2、水库防洪库容约束

$$0 \leq V_{i,t} \leq V_i^{des} \quad (10)$$

3、水库泄洪流量约束

$$Q_{i,\min}^{out} \leq Q_{i,t}^{out} \leq Q_{i,\max}^{out} \quad (11)$$

4、水库泄流变幅约束

$$X_{i,t} \leq |Q_{i,t+1}^{out} - Q_{i,t}^{out}| \quad (12)$$

式中： $Q_{i,t}^{in}$ 为水库 i 在时刻 t 的入库流量； $Q_{i,t}^{out}$ 为水库 i 在时刻 t 的出库流量； $Q_{i,\min}^{out}$ 为水库 i 允许的最小泄洪流量； $Q_{i,\max}^{out}$ 为水库 i 允许的最大泄洪流量； $X_{i,t}$ 为水库 i 允许的最大泄洪流量变幅。

3.2.2. 模型求解方法

Deb 等[16]在遗传算法(GA)的基础上，结合非支配排序方法，提出了带精英策略的非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)。该算法克服了 NSGA 算法计算复杂、效率不高的局限性，充分利用了非支配排序方法的优点，提高了算法的计算效率，使得该算法能够快速收敛至目标解集。同时，NSGA-II 算法在产生下一代时，选择将父代和子代进行合并后，再从中选取表现优秀的个体，能够最大限度地保留优良个体。NSGA-II 算法还引入了精英策略，确保表现优秀的个体在自然选择的过程中不会丢失。

3.3. 水库群防洪库容优化分配方案评价

3.3.1. 评价方法

多目标决策方法往往是对多个优化目标参数进行综合评价，首先拟定各个优化目标参数的权重，然后采用决策矩阵的方式对各个方案进行规范化处理转化为单目标问题。而备选方案逐次淘汰法直接构建评价矩阵，通过在 n 维空间上比较参数优劣进行逐步淘汰，最终获得偏好方案，能避免权重系数法中有较多主观因素影响的缺点。基于 k 阶有效概念的备选方案逐次淘汰法如下文所示[17]：

对方案集 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ ，假设 n 维属性集或属性空间 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 中所有属性均为定量型，类似多目标优化问题中 Pareto 最优解的概念，强 Pareto 最优概念 k 阶有效的定义为 k 阶有效或 k -Pareto 最优 (k -Pareto-optimal)。

方案 A_i 被称为 k 阶有效或 k -Pareto 最优方案，当且仅当方案 A_i 在 n 维属性空间 C 的所有 k 维子空间中不被任何其他方案所支配 ($1 \leq k \leq n$)，记为 k -Pareto 最优。

在上述定义中，Pareto 最优概念实际上是 k -Pareto 最优在当 $k = n$ 时的特殊情况。利用该定义进行多属性决策的方法称为基于 k 阶有效的备选方案逐次淘汰方法。

3.3.2. 评价指标

评价防洪库容优化分配方案，一方面需要考虑防洪库容的总体使用情况，另一方面还要考虑各水库防洪库容的协调分配情况。通过综合分析，本次设置使用最大使用防洪库容之和、最大使用防洪库容比例的均值、防洪库容使用比例的最大值、梯级最大防洪风险率 4 个评价指标。

1) 水库最大使用防洪库容之和，即各个水库最高水位对应的防洪库容之和，记为 C_1 ：

$$C_1 = \sum_{i=1}^N \max_{t \in T} (V_{i,t}) \quad (13)$$

2) 水库最大使用防洪库容比例的均值, 记为 C_2 :

$$C_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\max_{t \in T} (V_{i,t})}{V_i^{des}} \quad (14)$$

3) 水库防洪库容使用比例的最大值, 为各水库防洪库容分配比例的最大值, 记为 C_3 :

$$C_3 = \max_{i \in N} \left(\frac{\max_{t \in T} (V_{i,t})}{V_i^{des}} \right) \quad (15)$$

4) 梯级最大防洪风险率, 通过考虑梯级水库设计洪水特征值及调度规则, 计算得到梯级水库使用防洪库容提高运行水位后遭遇某一频率洪水时的防洪风险率, 记为 C_4 :

$$C_4 = \max_{t \in T} (R_{Pt}) \quad (16)$$

4. 计算结果分析

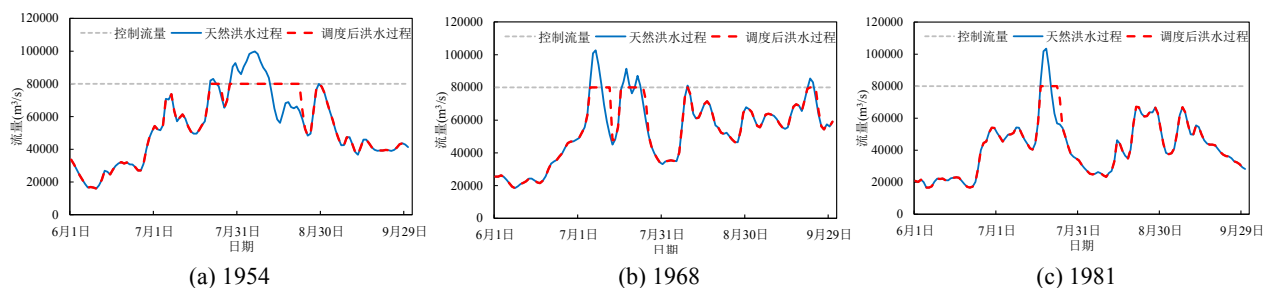
4.1. 优化分配方案计算

选择乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝、三峡水库群为研究对象, 当长江上游发生 1000 年一遇设计洪水时, 以枝城站流量不超过 $80,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 控制。选择考虑长江全流域大水年 1954 年、1998 年、2020 年, 上中游大水年 1968 年以及川渝河段大水年 1981 年、1982 年共 6 个典型年的汛期洪水, 按同倍比放大 30 d 洪量至 1000 年一遇。分别运用基于变权重剩余防洪库容最大模型、系统非线性安全度最大模型、梯级防洪风险率最小模型, 使用 NSGA-II 算法进行多目标优化调度计算, 得到每种洪水的 3 种不同的水库群防洪库容优化分配结果。

水库群优化调度后, 枝城站的洪水过程如图 1 及表 2 所示, 各场 1000 年一遇洪水枝城站的过流流量均不大于其 1000 年一遇控制流量 $80,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。可见, 本研究使用的优化分配模型对乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝、三峡五座水库进行联合防洪调度, 能保证枝城站的防洪安全。

1) 变权重剩余防洪库容最大模型

变权重剩余防洪库容最大模型防洪库容使用情况如表 3 所示。基于变权重剩余防洪库容最大的水库群防洪库容优化分配模型 s, 考虑了水库设计防洪库容、区间来水和水库至防洪对象的距离等因素对防洪调度的影响, 结合上述调度结果, 可以看出运用该模型能提高上游水库防洪库容的使用, 有效降低下游水库的防洪风险。但同时也能看到, 当参与联合防洪调度的水库之间地理空间位置跨度较大时, 运用该模型会造成距防洪对象较远的水库过度使用防洪库容, 导致其出现安全隐患。因此, 该模型适用于各水库距防洪对象地理位置相差不大的水库群。



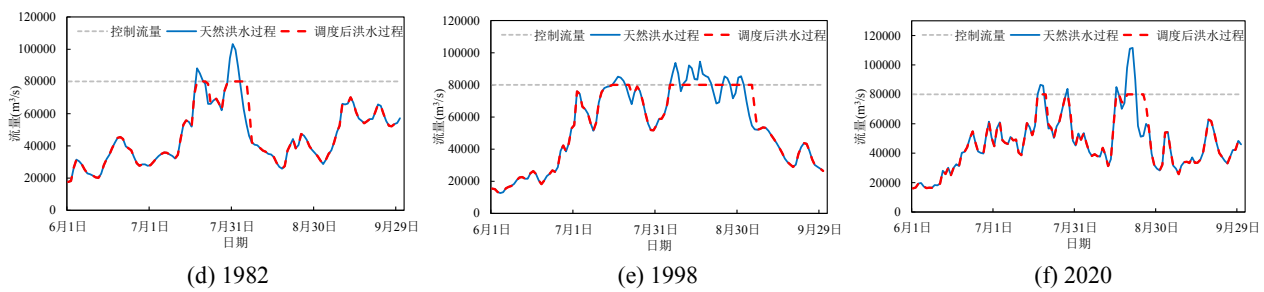


Figure 1. Flood process at Zhicheng hydrological station before and after optimal scheduling
图 1. 优化调度前后枝城水文站的洪水过程

Table 2. Flood index reduction rate after joint scheduling of 1000-year design flood at Zhicheng hydrological station
表 2. 枝城站千年一遇洪水联合调度后洪水指标削减率

年份	洪峰流量(m ³ /s)			7 天洪量(亿 m ³)			15 天洪量(亿 m ³)		
	调度前	调度后	削减率	调度前	调度后	削减率	调度前	调度后	削减率
1954	99,810	80,000	19.85%	459	361	21.38%	934	786	15.92%
1968	102,666	80,000	22.08%	481	427	11.24%	911	842	7.54%
1981	103,472	80,000	22.68%	555	503	9.46%	926	874	5.67%
1982	103,186	80,000	22.47%	507	450	11.28%	924	862	6.74%
1998	94,430	80,000	15.28%	416	367	11.64%	910	829	8.90%
2020	107,348	80,000	25.48%	571	492	13.79%	987	904	8.41%

Table 3. Flood control reservoir results table based on largest variable weight flood control storage capacity model (10⁸ m³)
表 3. 变权重剩余防洪库容最大模型防洪库容使用情况(亿 m³)

年份	乌东德	白鹤滩	溪洛渡	向家坝	三峡	梯级合计
1954	8.64 (35.39%)	75.00 (100.00%)	46.51 (100.00%)	9.03 (100.00%)	9.54 (4.30%)	148.71 (39.50%)
1968	0.00 (0.00%)	43.88 (58.50%)	4.55 (9.78%)	0.38 (4.20%)	5.31 (2.40%)	54.11 (14.37%)
1981	0.00 (0.00%)	52.56 (70.08%)	0.00 (0.00%)	0.00 (0.00%)	0.00 (0.00%)	52.56 (13.96%)
1982	0.00 (0.00%)	57.16 (76.22%)	0.00 (0.00%)	0.00 (0.00%)	0.00 (0.00%)	57.16 (15.18%)
1998	0.00 (0.00%)	75.00 (100.00%)	2.83 (6.08%)	0.00 (0.00%)	0.00 (0.00%)	77.83 (20.68%)
2020	0.00 (0.00%)	75.00 (100.00%)	3.65 (7.84%)	0.00 (0.00%)	0.00 (0.00%)	78.65 (20.89%)

2) 系统非线性安全度最大模型

系统非线性安全度最大模型防洪库容使用情况如表 4 及图 2 所示。可知水库非线性安全度变化大小与防洪库容使用比例有关。在调度过程中，优先使用安全度变化幅度较小的水库拦蓄洪水。水库防洪库容使用比例增加的同时，系统非线性安全度的变化幅度也随之增加。调度过程中根据非线性安全度的变化程度选择水库进行调蓄，可以保证防洪库容较大的水库多拦蓄洪水，也能保证防洪库容较小的水库参与洪水拦蓄。

3) 梯级防洪风险率最小模型

梯级防洪风险率最小模型防洪库容使用情况如表 5 及图 3 所示。与系统非线性安全度最大模型对比，该模型计算结果中的梯级总使用防洪库容不变，溪洛渡、向家坝由于位于金沙江下游梯级水库的下游，经过上游乌东德、白鹤滩两座防洪库容较大水库的调蓄，相应的防洪风险降低，所以可以分配更多的防洪库容；乌

东德、白鹤滩水库位于梯级水库群上游，防洪库容增加后对防洪风险的影响较大，所以防洪库容分配量相应减少；对于三峡水库而言，其为长江流域的大型水库，即使经过金沙江下游梯级水库的调蓄，向家坝-三峡区间的支流汇流量依旧很多，其防洪库容的使用仍然对流域梯级防洪风险影响较大，所以其防洪库容分配减小。

Table 4. Flood control reservoir results table based on largest system nonlinear safety degree model (10^8 m^3)
表 4. 系统非线性安全度最大模型防洪库容使用情况(亿 m^3)

年份	乌东德	白鹤滩	溪洛渡	向家坝	三峡	梯级合计
1954	2.86 (11.74%)	18.31 (24.41%)	7.21 (15.50%)	0.94 (10.41%)	119.39 (53.90%)	148.71 (39.50%)
1968	0.50 (2.05%)	4.55 (6.07%)	2.26 (4.86%)	0.24 (2.66%)	46.56 (21.02%)	54.11 (14.38%)
1981	0.41 (1.68%)	4.32 (5.76%)	2.29 (4.92%)	0.23 (2.55%)	45.31 (20.46%)	52.56 (13.96%)
1982	0.70 (2.86%)	5.53 (7.37%)	2.36 (5.07%)	0.24 (2.64%)	48.34 (21.82%)	57.16 (15.18%)
1998	0.91 (3.75%)	7.29 (9.72%)	3.87 (8.33%)	0.75 (8.28%)	65.01 (29.35%)	77.83 (20.68%)

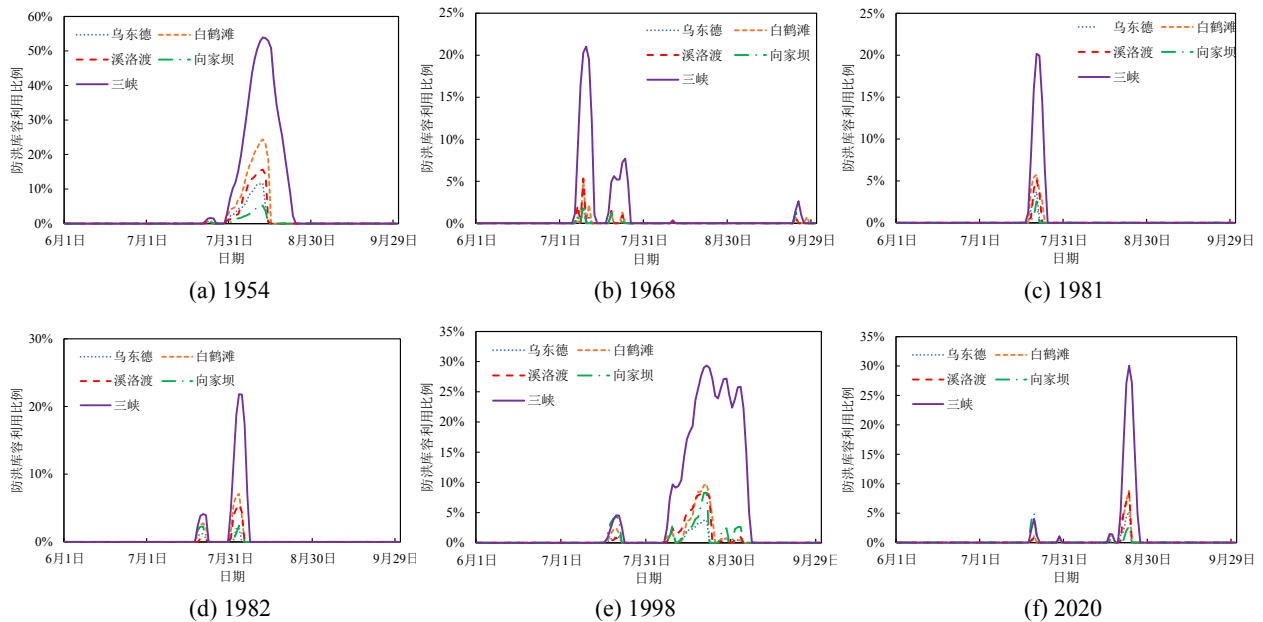


Figure 2. The process of the remaining flood control capacity ratio based on largest system nonlinear safety degree model
图 2. 系统非线性安全度最大模型各水库剩余防洪库容比例变化过程图

Table 5. Flood control reservoir results table based on smallest cascade flood control risk rate model (10^8 m^3)
表 5. 梯级防洪风险率最小模型防洪库容使用情况(亿 m^3)

年份	乌东德	白鹤滩	溪洛渡	向家坝	三峡	梯级合计
1954	1.13 (4.62%)	17.17 (22.90%)	6.69 (14.38%)	4.69 (51.97%)	119.03 (53.74%)	148.71 (39.50%)
1968	0.19 (0.80%)	4.98 (6.64%)	1.71 (3.67%)	1.41 (15.61%)	45.82 (20.69%)	54.11 (14.37%)
1981	0.10 (0.40%)	5.60 (7.47%)	0.63 (1.36%)	1.35 (14.91%)	44.88 (20.26%)	52.56 (13.96%)
1982	0.15 (0.62%)	6.9 (9.20%)	1.92 (4.14%)	1.67 (18.47%)	46.52 (21.00%)	57.16 (15.18%)
1998	0.39 (1.58%)	7.47 (9.95%)	3.16 (6.79%)	2.48 (27.48%)	64.34 (29.05%)	77.83 (20.68%)
2020	0.20 (0.82%)	11.28 (15.04%)	3.23 (6.94%)	1.07 (11.88%)	62.87 (28.38%)	78.65 (20.89%)

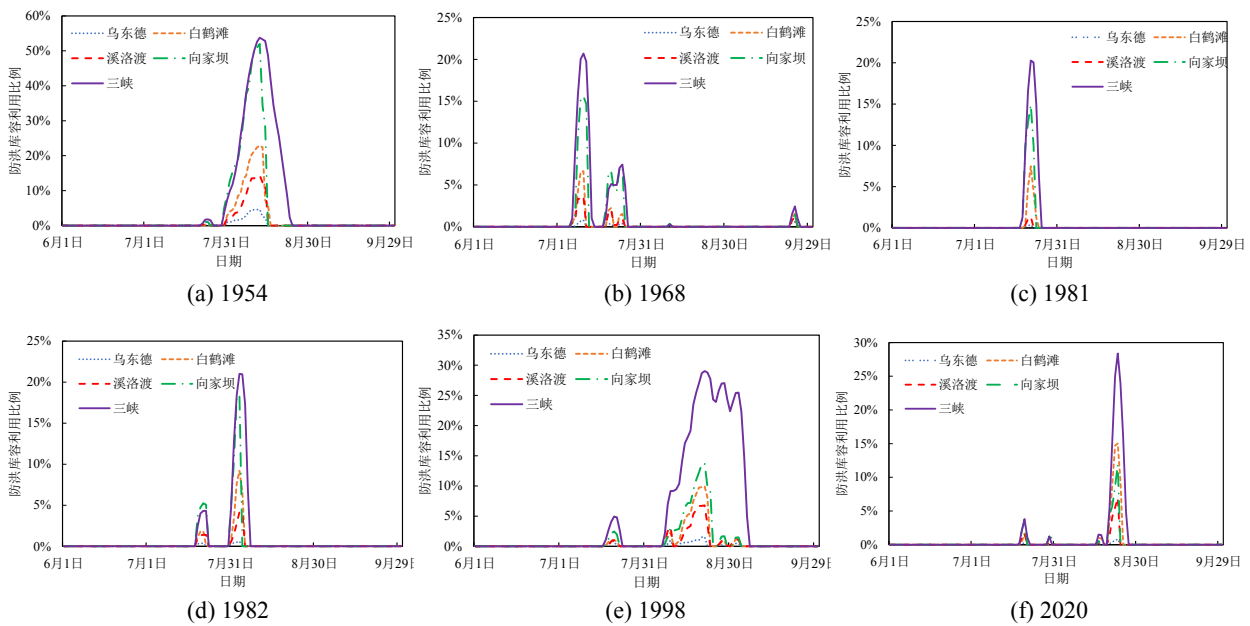


Figure 3. The process of the remaining flood control capacity ratio based on smallest cascade flood control risk rate model
图 3. 梯级防洪风险率最小模型各水库剩余防洪库容比例变化过程图

综上所述，变权重剩余防洪库容最大模型考虑了水库来水、水库设计防洪库容以及水库地理位置的影响，对水库剩余防洪库容设置变权重，使调度中权重小的水库优先动用防洪库容，该策略能够提高上游水库对防洪库容的使用比例；系统非线性安全度最大模型从系统安全的角度考虑水库群防洪库容的优化分配，建立防洪库容运用比例与安全度的非线性相关关系，能反映水库防洪库容使用比例在不同程度时对应的水库安全程度；梯级防洪风险率最小模型，从抵御洪水、降低风险的角度进行防洪库容优化分配计算，考虑了设计洪水因素及各自调度规则，在不降低防洪标准的情况下反映了调度期内梯级水库处于某一水位组合时遭遇洪水时对应的风险。

3 种水库群防洪库容优化分配策略都具有很好的防洪效果，但对水库群防洪库容的分配方式不同。水库群防洪库容优化分配是一个多目标多阶段决策问题，无法简单直观地评价每种策略的优劣，需要提出科学合理的多决策方案评价方法，并结合实际的水库群联合防洪调度区域，以及具体的防洪案例才能筛选出适合的水库群防洪库容优化分配方式。

4.2. 优化分配方案评价

分别基于变权重剩余防洪库容最大模型 A_1 、系统非线性安全度最大模型 A_2 、梯级防洪风险率最小模型 A_3 3 种防洪库容优化分配模型，得到每场洪水的 4 种不同的防洪库容优化分配方案。基于总库容 C_1 、比例均值 C_2 、最大比例 C_3 、最大风险率 C_4 的 4 个评价指标，采用基于 k 阶 p 级有效概念的方案，逐次淘汰法进行综合评价。

以 1954 年为例，统计不同水库群防洪库容优化分配方案的评价指标，如表 6 所示。

Table 6. Evaluation metrics of different schemes in 1954
表 6. 不同方案的评价指标(1954 年)

方案	C_1 (亿 m^3)	C_2 (%)	C_3 (%)	C_4 (%)
A_1	148.71	67.94	100.00	18.10
A_2	148.71	23.19	53.90	8.93
A_3	148.71	29.52	53.74	7.63

在四维属性空间上, A_1 的 4 个评价指标均劣于被其他方案, 由此淘汰 A_1 。 A_2 、 A_3 在四维属性空间不被其他方案支配, 故均为 4 阶有效方案。在三维属性空间上, 从 4 个评价指标选取三个, 一共有 4 对子空间, 分别是 $(C_1、C_2、C_3)$ 、 $(C_1、C_2、C_4)$ 、 $(C_1、C_3、C_4)$ 、 $(C_2、C_3、C_4)$, 每队子空间的支配情况如下: ① $(C_1、C_2、C_3)$, A_2 、 A_3 互不支配。② $(C_1、C_2、C_4)$, A_2 、 A_3 互不支配。③ $(C_1、C_3、C_4)$, A_3 支配 A_2 。④ $(C_2、C_3、C_4)$, A_2 、 A_3 互不支配。可见 A_2 为 3 阶 3 级有效方案, A_3 为 3 阶 4 级有效方案, 说明 A_3 代表的梯级防洪风险率最小的水库群防洪库容优化分配方案较好。

采用水库群防洪库容优化分配方案评价方法, 对其他典型年洪水下 4 种水库群防洪库容优化分配方案进行综合评价, 综合评价结果如表 7 所示。评价结果表明, 基于梯级防洪风险率最小防洪库容分配模型最适合乌东德 - 白鹤滩 - 溪洛渡 - 向家坝和三峡水库群联合防洪优化调度。

Table 7. Evaluation results of different typical flood processes

表 7. 不同典型年洪水的评价结果

年份	1954	1968	1981	1982	1998	2020
A_1	×	×	×	×	×	×
A_2	3 阶 3 级	3 阶 3 级	3 阶 3 级	3 阶 3 级	3 阶 3 级	3 阶 3 级
A_3	3 阶 4 级	3 阶 4 级	3 阶 4 级	3 阶 4 级	3 阶 4 级	3 阶 4 级

5. 结论

本文介绍了 3 种防洪库容优化分配模型, 使用非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行多目标优化调度, 得到水库群防洪库容优化分配模型计算结果, 并使用备选方案逐次淘汰法, 选出 3 种防洪库容优化分配方案中的最好方案。主要研究成果如下:

(1) 介绍了变权重剩余防洪库容最大、系统非线性安全度最大、梯级防洪风险率最小 3 种防洪库容优化分配原则的原理和计算方法, 建立了 3 种防洪库容优化分配方案。3 种水库群防洪库容优化分配策略都具有很好的防洪效果, 但对水库群防洪库容的分配方式不同, 各有优点和缺点。

(2) 以乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝、三峡五座水库为研究目标, 以防洪控制站枝城站流量不超过 80,000 m^3/s 控制, 选用 1954 年、1968 年、1981 年、1982 年、1998 年、2020 年 6 场汛期洪水, 按同倍比放大 30 d 洪量至 1000 年一遇。使用 NSGA-II 算法, 对 3 种防洪库容优化分配方案进行梯级水库防洪库容优化分配计算, 以防洪控制站的超标洪量最小及各优化调度准则最优为目标函数, 得到了优化调度计算结果。

(3) 基于最大使用防洪库容之和、防洪库容比例使用均值、防洪库容最大使用比例、最大梯级防洪风险率 4 个评价指标, 采用基于 k 阶 p 级有效概念的方案逐次淘汰法进行综合评价。基于梯级防洪风险率最小模型的防洪库容优化分配方案在不降低对下游防洪效果的基础上, 可使各水库均衡地分摊防洪区域的防洪风险, 充分发挥水库群的防洪效益, 是 3 种防洪库容优化分配方案中的最好方案。

基金项目

国家重点研发计划课题(2021YFC3200305), 中国长江三峡集团有限公司(0799254)项目资助。

参考文献

- 陈桂亚. 长江流域水库群联合调度关键技术研究[J]. 中国水利, 2017, 68(14): 11-13.
CHEN Guiya. Research on key technologies of joint operation of reservoir group in the Yangtze River basin. China Water Resources, 2017, 68(14): 11-13. (in Chinese)
- 王文川, 雷冠军, 尹航, 等. 基于群居蜘蛛优化算法的水库防洪优化调度模型及应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4):

- 48-51.
WANG Wenchuan, LEI Guanjun, YIN Hang, et al. Optimal dispatch model of reservoir flood control based on SSO algorithm. *Water Resources and Power*, 2015, 33(4): 48-51. (in Chinese)
- [3] 邹强, 王学敏, 李安强, 等. 基于并行混沌量子粒子群算法的梯级水库群防洪优化调度研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(8): 967-976.
ZOU Qiang, WANG Xuemin, LI Anqiang, et al. Optimal operation of flood control for cascade reservoirs based on parallel chaotic quantum particle swarm optimization. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(8): 967-976. (in Chinese)
- [4] HE, Y., XU, Q., YANG, S., et al. Reservoir flood control operation based on chaotic particle swarm optimization algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(17-18): 4480-4492. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.02.030>
- [5] LIU, X., CHEN, L., ZHU, Y., et al. Multi-objective reservoir operation during flood season considering spillway optimization. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 554-563. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.044>
- [6] 陈森林, 李丹, 陶湘明, 等. 水库防洪补偿调节线性规划模型及应用[J]. *水科学进展*, 2017, 28(4): 507-514.
CHEN Senlin, LI Dan, TAO Xiangming, et al. Development and application of a compensative regulation linear programming model for reservoir flood-control. *Advances in Water Science*, 2017, 28(4): 507-514. (in Chinese)
- [7] 李映辉, 钟平安, 朱非林, 等. 基于相似洪水动态展延的水库防洪调度决策方法及其应用[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(10): 39-43.
LI Yinghui, ZHONG Pingan, ZHU Feilin, et al. Real-time flood control operation method of reservoir based on dynamic extension of similar flood and its application. *Water Resources and Power*, 2020, 38(10): 39-43. (in Chinese)
- [8] JIA, B., SIMONOVIC, S. P., ZHONG, P., et al. A multi-objective best compromise decision model for real-time flood mitigation operations of multi-reservoir system. *Water Resources Management*, 2016, 30(10): 3363-3387. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1356-0>
- [9] MORIDI, A., YAZDI, J. Optimal allocation of flood control capacity for multi-reservoir systems using multi-objective optimization approach. *Water Resources Management*, 2017, 31(14): 4521-4538. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1763-x>
- [10] 张晓琦, 刘攀, 陈进, 等. 基于条件风险价值理论的水库群防洪库容协同作用[J]. *水科学进展*, 2022, 33(2): 298-305.
ZHANG Xiaoqi, LIU Pan, CHEN Jin, et al. Research on the synergistic effect of multi-reservoir flood control capacity by considering the conditional value-at-risk. *Advances in Water Science*, 2022, 33(2): 298-305. (in Chinese)
- [11] 陈进, 王永强, 张晓琦. 长江经济带供水安全保障战略研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(11): 1369-1378.
CHEN Jin, WANG Yongqiang and ZHANG Xiaoqi. Study on the strategy of water supply security in the Yangtze River Economic Belt. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(11): 1369-1378. (in Chinese)
- [12] 陈敏. 长江流域防汛抗旱减灾体系建设与成就[J]. *中国防汛抗旱*, 2019, 29(10): 36-42.
CHEN Min. Construction and achievements of flood control, drought relief and disaster reduction systems in the Yangtze River basin. *China Flood & Drought Management*, 2019, 29(10): 36-42. (in Chinese)
- [13] 欧阳硕, 周建中, 张睿, 等. 金沙江下游梯级与三峡梯级多目标联合防洪优化调度研究[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(6): 43-49+56.
OUYANG Shuo, ZHOU Jianzhong, ZHANG Rui, et al. Study on optimal scheduling of multi-objective joint flood control for lower Jinsha River cascade reservoirs and Three Gorges reservoir. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(6): 43-49+56. (in Chinese)
- [14] 周丽伟. 水库群防洪库容高效利用相关问题研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
ZHOU Liwei. Research on issues related to efficient utilization of flood control capacity of multi-reservoir. Ph.D. Thesis, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [15] 康玲, 周丽伟, 李争和, 等. 长江上游水库群非线性安全度防洪调度策略[J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39(3): 1-5.
KANG Ling, ZHOU Liwei, LI Zhenghe, et al. Nonlinear safety degree flood control strategy of multi-reservoirs in upper Yangtze River. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(3): 1-5. (in Chinese)
- [16] DEB, K., AGRAWAL, S., PRATAP, A., et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. *Lecture Notes in Computer Science*, 2002, 19(17): 849-858. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1763-x>
- [17] DAS, I. A preference ordering among various Pareto optimal alternatives. *Structural Optimization*, 1999, 18(1): 30-35. <https://doi.org/10.1007/s001580050065>