

# 单一水库对下游远端水库和防洪控制点的防洪影响评估

陆彦彤<sup>1</sup>, 徐伟峰<sup>2</sup>, 刘攀<sup>1</sup>, 程潜<sup>1</sup>, 叶浩<sup>1</sup>

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室; 2. 长江水利委员会水文局)

**摘要:**为准确评估单一水库对下游远端水库和防洪控制点的防洪影响,基于流域防洪需求及水库特性,以最小化各水库最大出库流量和防洪控制点洪峰流量为目标,构建了水库群联合防洪优化调度模型,采用逐步优化-逐次渐进算法进行优化求解;基于最优调度过程,提出削峰贡献度、拦洪贡献度和配合拦洪率 3 个指标对研究水库的防洪作用进行评价。在长江上游的实例应用结果表明:流域水库群优化调度可平均削减防洪控制点洪峰流量  $1\ 108\ \text{m}^3/\text{s}$ ,提升削峰率 1.8%,削减洪量 59 亿  $\text{m}^3$ ;研究水库在流域水库群中的防洪贡献显著,削峰贡献度平均为 5.4%,拦洪贡献度平均为 13.3%,对下游远端水库的配合拦洪率平均为 54.3%。

**关键词:**防洪作用;联合防洪调度;优化调度;多水库系统;防洪控制点;长江上游流域

**Assessment of flood control impact of individual reservoir on downstream remote reservoir and flood control point**//Lu Yantong<sup>1</sup>, Xu Weifeng<sup>2</sup>, Liu Pan<sup>1</sup>, Cheng Qian<sup>1</sup>, Ye Hao<sup>1</sup> (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University; 2. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission)

**Abstract:** To accurately assess the impact of an individual reservoir on the downstream remote reservoir and flood control point, a joint flood control optimal scheduling model for the multi-reservoir system was developed. This model was constructed based on the basin-wide flood control requirements and the characteristics of each reservoir, to minimize the maximum outflow from the individual reservoir and the peak flood discharge at the flood control point. A hybrid algorithm, progressive optimality algorithm and successive approximation, was employed to optimize the model. Based on the optimal scheduling process, three indicators such as peak reduction contribution, flood retention contribution, and coordinated flood retention rate were proposed to evaluate the flood control role of the study reservoir. The example application results in the upper Yangtze River show that optimized joint operation of the multi-reservoir system, on average, reduces the peak flood flow at the flood control point by  $1\ 108\ \text{m}^3/\text{s}$ , increases the peak reduction rate by 1.8%, and decreases the flood volume by 5.9 billion  $\text{m}^3$ . The study reservoir makes a notable contribution to flood control within the multi-reservoir system, with an average peak reduction contribution of 5.4%, an average flood retention contribution of 13.3%, and an average flood retention coordination rate of 54.3% for the downstream remote reservoir.

**Key words:** flood control function; joint flood control operation; optimal scheduling; multi-reservoir system; flood control point; the upper Yangtze River

洪涝灾害是我国发生最频繁、危害最严重的自然灾害之一<sup>[1-3]</sup>。提升流域防洪水平,不仅需要加快控制性水库建设以增强洪水调蓄能力,更需通过科学调度与水库群联合调度提升防洪整体效能<sup>[4-6]</sup>。现有水库常规防洪调度多局限于单个水库,难以满足流域联合防洪的需求<sup>[7]</sup>。流域水库群汛期联合防洪调度是以水库承担的防洪任务为目标,确保水库自身安全,合理利用水库群防洪库容<sup>[8-9]</sup>,有计划

地调控河道径流过程,能够实现流域防洪效益最大化<sup>[10-11]</sup>。大型水库群拓扑结构复杂<sup>[12]</sup>,防洪控制点众多,防洪标准各异<sup>[13-14]</sup>,如何在保障各水库防洪目标的同时提升流域整体防洪效益已成为关键科学问题<sup>[15-17]</sup>。

在水库群联合防洪调度领域,国内外均已开展大量研究,在模型构建和算法求解方面取得显著进展。在模型构建方面,Hsu 等<sup>[18]</sup>构建了实时防洪调

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200302);湖北省自然科学基金联合基金项目(2024AFD354)

作者简介:陆彦彤(2001—),女,硕士研究生,主要从事水库调度研究。E-mail:luyantong@whu.edu.cn

通信作者:刘攀(1978—),男,教授,博士,主要从事水库调度研究。E-mail:liupan@whu.edu.cn

度模型,在控制调度期末水库水位的同时削减了下游防洪控制点洪峰流量;Pan 等<sup>[19]</sup>提出了一种并联水库群的最优联合防洪调度规则,对不同暴雨中心和量级的洪水进行了有效削峰。在算法求解方面,He 等<sup>[20]</sup>采用混沌粒子群优化算法结合分段线性插值函数对三峡水库优化防洪调度模型进行了求解,实现洪峰流量最小化;Zhang 等<sup>[21]</sup>提出了改进的逐步优化-逐次渐进算法(POA-SA),使梧州站在百年一遇洪水时的洪水削峰率平均提升了 12.8%。这些研究通过模型和算法提升了防洪效益,但对单一水库在流域中防洪作用的分析较为有限。邹强等<sup>[22]</sup>在长江上游水库群的联合防洪调度中对三峡水库采取了不同的调度策略,结果表明三峡水库投入更多的防洪库容能有效减少中下游超额洪量;苑如玮等<sup>[23]</sup>对洞庭湖四水流域进行了联合防洪优化调度研究,结果表明柘溪水库和五强溪水库通过加快预泄过程更有效地实现了对四水入湖洪水的错峰调节。但这些研究尚未评估流域中研究水库对下游远端水库和防洪控制点的影响。

鉴于此,本文为定量分析单一水库在大型库群系统中的防洪作用,构建水库群联合防洪优化调度模型,针对研究水库是否参与联合调度的两种情景在长江上游开展实例研究,基于最优调度过程,提出削峰贡献度、拦洪贡献度和配合拦洪率指标,探究该水库在流域水库群中的防洪贡献。

## 1 研究方法

### 1.1 水库群联合防洪优化调度模型

水库群联合防洪优化调度模型旨在最小化各水库出库洪水和下游防洪控制点洪水的洪峰流量,在满足水量平衡和上下游水力联系的前提下,考虑各水库的水位上下限、调度期初末水位、流量变幅、水位变幅和泄流能力约束。为解决这一多目标优化问题,本文采用加权法将多目标转化为单目标,并采用 POA-SA 进行求解,联合优化水库群调度过程,实现防洪效益最大化,进而提出削峰贡献度、拦洪贡献度和配合拦洪率指标用于评估水库在水库群系统中的防洪贡献。

#### 1.1.1 目标函数

水库群联合防洪优化调度模型采用最大削峰准则,综合考虑单个水库和流域关键控制点的防洪目标。

**目标 1** 为保证单个水库自身流量平稳性和防洪安全,考虑自身最大出库洪量最小:

$$\min q_{\max,i} = \min \left( \sum_{i=1}^T Q_{\text{out},i,t}^2 \right) \quad (1)$$

式中:  $q_{\max,i}$  为第  $i$  个水库的最大出库流量;  $Q_{\text{out},i,t}$  为第  $i$  个水库  $t$  时段的出库流量;  $T$  为调度时段总数。

**目标 2** 为提高流域整体防洪效益,减少中下游成灾洪水,考虑水库群下游关键防洪控制点洪峰流量最小:

$$\min q_{p,\max} = \min \left( \sum_{i=1}^T Q_{p,t}^2 \right) \quad (2)$$

式中:  $q_{p,\max}$  为防洪控制点的洪峰流量;  $Q_{p,t}$  为防洪控制点  $t$  时段流量。

采用加权平均法将多目标优化问题转化为单目标问题,各水库联合优化调度目标为:

$$G_i = \alpha_1 q_{p,\max} + \alpha_2 q_{\max,i} \quad (3)$$

其中

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1$$

式中:  $G_i$  为第  $i$  个水库的综合目标;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为整个流域和各水库最大削峰准则防洪目标在综合目标中的权重,取值范围为 0~1,采用敏感性分析确定。

#### 1.1.2 约束条件

a. 水量平衡约束:

$$(Q_{\text{in},i,t} - Q_{\text{out},i,t}) \Delta t = V_{i,t+1} - V_{i,t} \quad (4)$$

式中:  $Q_{\text{in},i,t}$  为第  $i$  个水库  $t$  时段入库流量;  $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$  分别为第  $i$  个水库  $t$ 、 $t+1$  时刻的库容;  $\Delta t$  为计算时段长。

b. 泄流能力约束:

$$Q_{\min,i,t} \leq Q_{\text{out},i,t} \leq f_{\text{xl},i} [(Z_{i,t} + Z_{i,t+1})/2] \quad (5)$$

式中:  $Q_{\min,i,t}$  为第  $i$  个水库  $t$  时段的最小下泄流量;  $Z_{i,t}$  为第  $i$  个水库  $t$  时段的水位;  $f_{\text{xl},i} [(Z_{i,t} + Z_{i,t+1})/2]$  为第  $i$  个水库在  $t$  时段水位为  $(Z_{i,t} + Z_{i,t+1})/2$  时的泄流能力。

c. 水位上下限约束:

$$Z_{\min,i,t} \leq Z_{i,t} \leq Z_{\max,i,t} \quad (6)$$

式中:  $Z_{i,t}$  为第  $i$  个水库  $t$  时刻水位;  $Z_{\min,i,t}$ 、 $Z_{\max,i,t}$  分别为第  $i$  个水库  $t$  时刻水位上、下限。

d. 调度期初末水位约束:

$$\begin{cases} Z_{i,1} = Z_{\text{st},i} \\ Z_{i,T+1} = Z_{\text{en},i} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $Z_{\text{st},i}$ 、 $Z_{\text{en},i}$  分别为第  $i$  个水库调度期初、调度期末水位;  $T$  为总调度期。

e. 泄量变幅约束:

$$|Q_{\text{out},i,t+1} - Q_{\text{out},i,t}| \leq \Delta q_i \quad (8)$$

式中:  $\Delta q_i$  为第  $i$  个水库出库流量的最大变幅,根据该水库实际运行数据确定。

f. 水位变幅约束:

$$|Z_{i,t+1} - Z_{i,t}| \leq \Delta z_i \quad (9)$$

式中:  $\Delta z_i$  为第  $i$  个水库水位的最大变幅,根据该水库实际运行数据确定。

g. 上下游水力联系约束:

$$Q_{in,i+1,t} = \varphi_i(Q_{out,i,t}, Q_{out,i,t-1}, \dots, Q_{out,i,t-\tau_i}) + \Delta q_{i+1,t} \quad (10)$$

式中： $\varphi_i(\cdot)$ 为第*i*个水库至第*i+1*个水库之间的洪水演进函数，采用分段马斯京根河道洪水演算方法计算； $\tau_i$ 为第*i*个水库出库流量演进至第*i+1*个水库的时滞； $\Delta q_{i+1,t}$ 为第*i+1*个水库*t*时段区间入流量。当演算到混联节点即有两个及以上支流汇合的节点时，该节点入流为各支流演算流量与各区间入流量之和<sup>[21,24]</sup>。

### 1.1.3 算法求解

水库群优化调度模型是一个多变量、多阶段、多约束、高度非线性的复杂系统优化问题<sup>[25-26]</sup>。传统算法在计算求解时常会面临“维数灾”问题，并且容易陷入局部最优。为解决这些问题，本文采用 POA-SA 优化求解水库群联合防洪调度问题。POA-SA 结合逐步优化法 (POA) 与逐次逼近动态规划算法 (DPSA)<sup>[21]</sup>，首先采用 DPSA 将多维复杂问题分解为一系列一维问题，每次仅优化一个水库，以降低模型空间维度；其次利用 POA 对单个水库逐步求解，每次只优化两个时段，从而减少模型时间维度。为确保优化结果收敛到全局最优，本文先考虑简单的水力联系，对单个水库进行动态规划 (DP) 求解，获得更接近全局最优的初始轨迹，将该轨迹输入前述模型，以提高优化效率。POA-SA 优化求解水库群联合防洪调度模型的流程如图 1 所示。

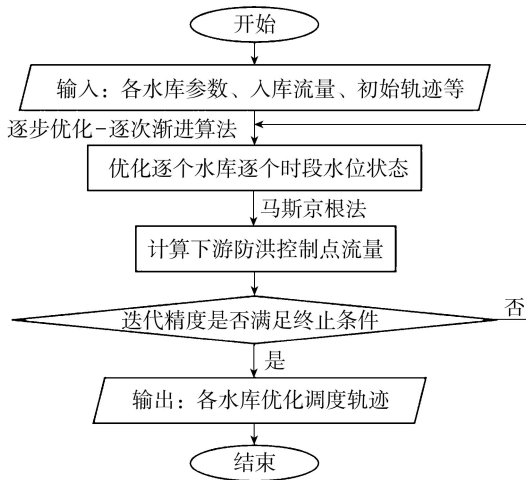


图 1 POA-SA 求解流程

Fig.1 POA-SA solution process

## 1.2 防洪评价指标

a. 削峰贡献度。设计洪水洪峰流量与水库群调洪后洪峰流量之差即为防洪控制点的削减洪峰值，定义削峰贡献度为研究水库参与调度后流域远端防洪控制点洪水削减洪峰值的变化程度，反映该水库在水库群系统中对远端防洪控制点洪水削峰的贡献。削峰贡献度的计算公式为：

$$I_1 = (\Delta Q_{p,\max} - \Delta Q_{\max}) / \Delta Q_{p,\max} \quad (11)$$

式中： $I_1$ 为研究水库的削峰贡献度； $\Delta Q_{p,\max}$ 为研究水库参与调度时防洪控制点洪峰的削减流量； $\Delta Q_{\max}$ 为研究水库不参与调度时防洪控制点削减洪峰流量。

b. 拦洪贡献度。设计洪水洪量与水库群调洪后洪量之差即为防洪控制点的拦蓄洪量值，定义拦洪贡献度为研究水库参与调度后流域远端防洪控制点洪水拦蓄洪量值的变化程度，反映该水库在水库群系统中对远端防洪控制点洪水拦洪的贡献。拦洪贡献度的计算公式为：

$$I_2 = (W_{\text{mp}} - W_r) / W_{\text{mp}} \quad (12)$$

式中： $I_2$ 为研究水库的拦洪贡献度； $W_{\text{mp}}$ 为研究水库参与调度时防洪控制点拦蓄洪量； $W_r$ 为研究水库不参与调度时防洪控制点拦蓄洪量。

c. 配合拦洪率。研究水库拦洪量中与流域远端水库同步拦蓄的洪量即为配合拦蓄洪量值，定义配合拦洪率为配合拦蓄洪量值在研究水库总拦洪量中的占比，反映该水库对流域远端水库的拦洪配合程度。配合拦洪率的计算公式为：

$$I_3 = V_{c,i} / V_r \quad (13)$$

其中

$$V_{c,i} = \begin{cases} \sum_{t=1}^T [(Q_{in,t} - Q_{out,t}) \Delta t] & Q_{in,i,t} \geq Q_{out,i,t} \\ 0 & Q_{in,i,t} < Q_{out,i,t} \end{cases}$$

式中： $I_3$ 为研究水库的配合拦洪率； $V_{c,i}$ 为研究水库对第*i*个水库的配合拦洪量； $V_r$ 为研究水库的总拦洪量。 $Q_{in,i,t} \geq Q_{out,i,t}$ 表示研究水库与第*i*个水库同步拦洪。

## 2 实例应用

### 2.1 研究区概况

长江流域频繁的暴雨洪涝严重威胁着沿岸防洪安全<sup>[27-29]</sup>。长江上游干流受各支流洪水的影响，洪水主要发生在每年7—9月。长江大洪水可分为区域性大洪水和流域性大洪水。区域性大洪水通常由一两次区域性暴雨引发，发生在某些支流或干流的某一河段，具有峰高、历时短、短时间洪量大的特点，常造成局部河段的洪水灾害。例如，1968年宜昌洪水与清江洪水遭遇，干流、洞庭湖和清江来水较大导致螺山洪水较大；1996年长江上游降水量不大但集中度高，与中游降水集中期极为接近<sup>[30]</sup>，导致干流和洞庭湖、清江年最大洪水过程分别发生遭遇，洞庭湖和清江来水较大导致螺山洪水较大。流域性大洪水则是由某些支流雨季提前或推迟，上、中、下游干支流雨季相互重叠，干支流洪水遭遇，形成长江中下

游峰高、量大、历时长的大洪水或特大洪水。例如, 1954 年长江上游雨季提前, 宜昌与洞庭四水、清江洪水过程相互遭遇, 干流、洞庭湖和清江来水均较大导致螺山洪水较大; 1998 年主汛期长江各大支流先后发生暴雨洪水, 宜昌与洞庭四水、清江洪水过程相互遭遇, 干流、洞庭湖和清江来水均较大导致螺山洪水较大<sup>[31]</sup>; 2020 年, 长江流域暴雨过程频繁、雨区重叠度高, 暴雨强度大、极端性强, 干支流来水均较大导致螺山大洪水<sup>[27]</sup>。

尽管目前长江防洪减灾体系基本完善, 但在发生类似 1954 年洪水的情况下, 城陵矶以下地区仍需分洪约 292 亿 m<sup>3</sup> 的超额洪水<sup>[22]</sup>。拟建水库作为长江干流唯一的多年调节水库, 具有显著的防洪效益。《长江流域综合规划(2012—2030 年)》明确指出, 该水库规划预留的防洪库容为 59 亿 m<sup>3</sup><sup>[32]</sup>, 约为三

峡防洪库容的 1/4, 其不仅能够提高本河段下游的防洪标准, 还能与三峡水库协同作用, 有效降低长江中下游的洪涝灾害风险。

为探究不同典型年和不同洪水量级下单一水库在大型库群系统中的防洪作用, 本文以拟建水库为研究水库, 以长江上游干支流已建的 23 座水库和研究水库为对象, 基于拓扑关系构建水库群联合防洪调度模型。研究选取 1954 年、1968 年、1996 年、1998 年、2020 年 5 个典型年份, 在设计洪水频率分别为 1%、2%、3%、5% 的条件下, 计算研究水库是否参与联合调度两种情景, 调度期为 7—9 月, 调度时段步长为 1 d。基于最优调度过程, 评估研究水库对下游远端水库三峡水库和防洪控制点宜昌的影响。长江上游概况如图 2 所示, 水库群拓扑结构如图 3 所示<sup>[33]</sup>。

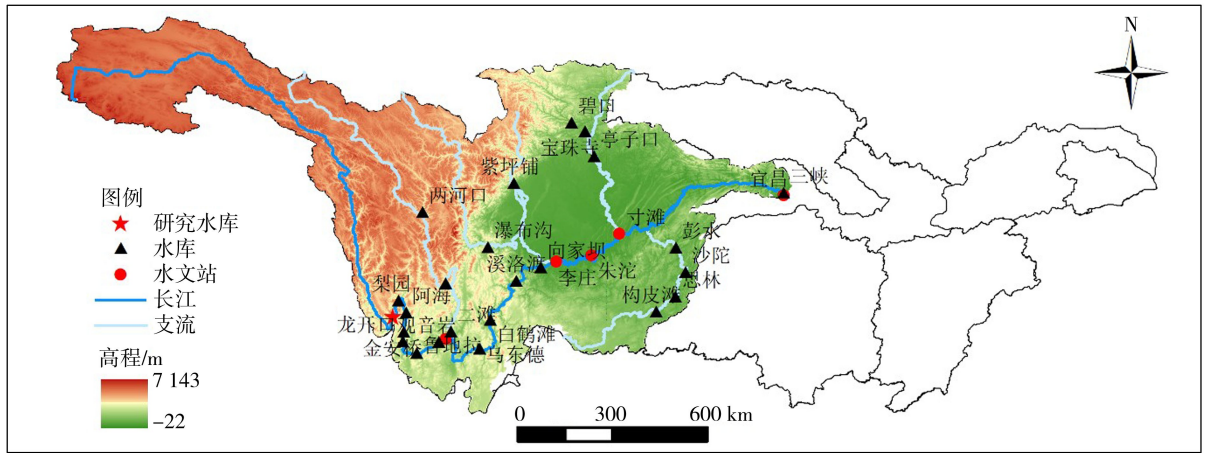


图 2 长江上游概况

Fig. 2 Overview of the upper Yangtze River

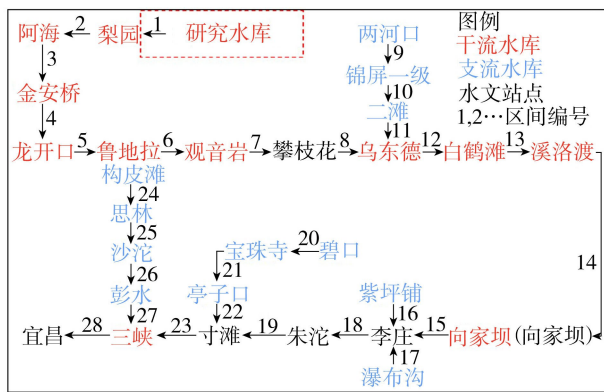


图 3 水库群拓扑结构

Fig. 3 Reservoir group topology structure

## 2.2 结果与分析

### 2.2.1 联合优化调度

为确定联合优化调度的多目标权重值, 本文采用均匀采样方法生成了 50 组权重组合, 覆盖权重空间 ( $\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \alpha_1, \alpha_2 \geq 0$ )。计算结果表明, 在不同权重组合下, 水库群下游关键防洪控制点的洪峰流量

变化范围较小, 最大相对偏差不超过 5%, 可见模型结果对权重变化不敏感, 调度决策具有稳健性。参考长江上游防洪调度实践, 选定一组固定权重 ( $\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.6$ ) 进行计算。

#### 2.2.1.1 优化调度过程

为分析研究水库优化调度对下游远端水库和防洪控制点的影响, 对比 2020 典型年洪水情景下, 下游远端水库在实际调度和研究水库启用前后联合优化调度下的运行水位和出库流量过程, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 2020 典型年洪水过程线呈多峰曲线, 前峰小、后峰大, 峰型偏“尖瘦”。与实际调度相比, 联合优化调度对洪水过程线的形状改变较大, 削峰效果明显, 洪峰削减量达到 8888 m<sup>3</sup>/s。在保持调度期初末下游远端水库水位一致的前提下, 联合优化调度降低了最高运行水位 2.65 m, 对应减少防洪库容运用 22.8 亿 m<sup>3</sup>, 减少了研究水库自身的防洪

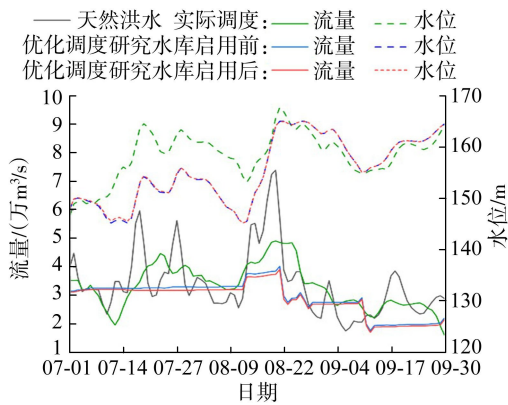


图 4 3 种调度方式下下游远端水库 2020 典型年洪水调度过程

Fig. 4 Flood regulation process of downstream remote reservoir during typical year in 2020 under three scheduling modes

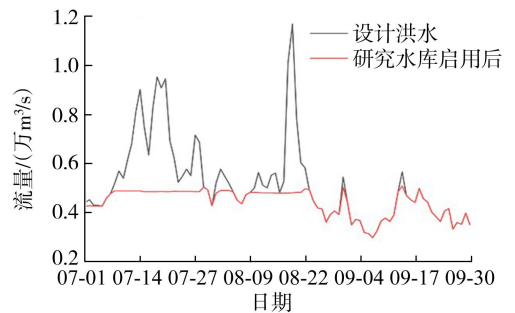
风险,同时,出库流量平均减少  $3854 \text{ m}^3/\text{s}$ ,提升了下游防洪安全。尽管下游远端水库的蓄泄过程趋势未发生明显变化,但联合优化调度下的出库流量变幅和最大洪峰均有所减小。其主要原因在于,联合优化调度通过在 7 月 7—16 日加大预泄,使下游远端水库水位在洪水到来前较实际调度降低了  $10.9 \text{ m}$ ,从而为后续洪水预留了更多库容。研究水库启用后,下游远端水库运行水位基本保持不变,但出库流量进一步减少,平均为  $1309 \text{ m}^3/\text{s}$ ,下游防洪安全进一步提升。总体而言,联合优化调度通过加大预泄,更有效地实现了流域水库群的错峰调节,启用研究水库则进一步降低了防洪控制点的洪水流量。

### 2.2.1.2 调度结果分析

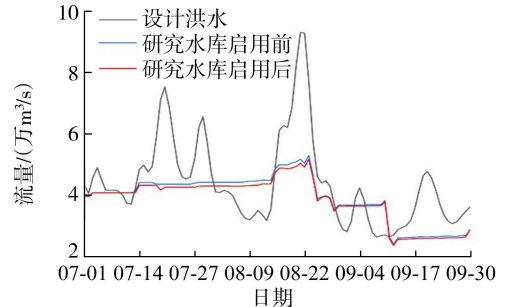
采用水库群联合防洪优化调度模型计算 5 个典型年、4 个设计频率的设计洪水,得到研究水库启用前后流域水库群的调度过程。以遭遇 2020 典型年螺山以上设计频率为 1% 的设计洪水为例,研究水库坝址和防洪控制点的调度过程如图 5 所示。

由图 5 可知,启用研究水库能有效降低防洪控制点的流量,发挥削峰拦洪作用。防洪控制点的洪水过程线与启用前趋势相似,但整体流量平均减少  $730 \text{ m}^3/\text{s}$ 。这一变化与研究水库的调控密切相关,在研究水库拦洪效果显著的 7 月 13 日至 8 月 22 日期间,防洪控制点流量的减少也更加明显。特别是在 8 月 19 日前后的最大洪峰期间,研究水库对坝址洪水洪峰的削减,有效避免了该部分洪水与下游干支流洪水的叠加,显著缓解了防洪控制点的防洪压力。

为量化研究水库对坝址洪水调度的效果,计算研究水库启用后坝址洪水的洪峰流量、削减量和削峰率,结果如图 6 所示。



(a) 研究水库坝址



(b) 防洪控制点

图 5 研究水库坝址和防洪控制点的调度过程

Fig. 5 Dispatching process of dam site of study reservoir and flood control point

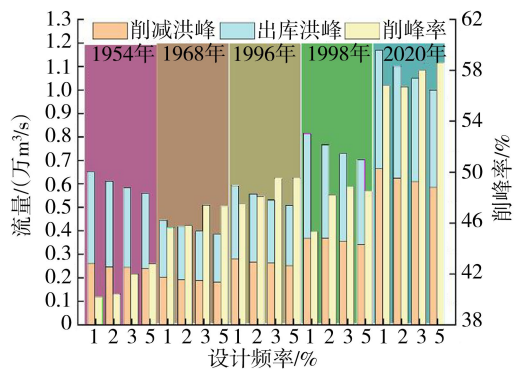


图 6 研究水库对坝址洪水调度的效果

Fig. 6 Scheduling effect of study reservoir on flood control at dam site

由图 6 可知,由于运用的研究水库防洪库容固定,随着设计洪水频率的增加,洪水量级减小,坝址洪水削减的洪峰流量随之减小,但削峰率则相应提高。例如,当螺山以上发生频率为 1% 的设计洪水时,研究水库启用后,坝址洪峰流量最高可减少  $6640 \text{ m}^3/\text{s}$ ,削峰率最高为  $56.8\%$ ;当发生频率为 2% 的设计洪水时,坝址洪峰流量最高可减少  $6240 \text{ m}^3/\text{s}$ ,削峰率最高为  $56.7\%$ 。总体而言,针对不同典型年和设计频率的洪水,研究水库启用后,平均可削减坝址洪峰流量  $3339 \text{ m}^3/\text{s}$ ,平均削峰率为  $48.5\%$ 。

为量化研究水库对流域水库群防洪作用的提升,将研究水库启用后防洪控制点的洪峰流量、削峰率与启用前进行对比,结果如图 7 所示。

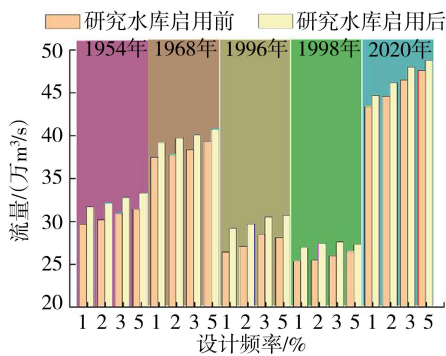


图7 研究水库启用前后防洪控制点的削峰率

Fig. 7 Peak shaving rate of flood control point before and after study reservoir opening

由图7可知,由于运用的流域水库群防洪库容固定,随着设计洪水频率的增加,洪水量级减小,防洪控制点洪水的削峰率相应提高。此外,研究水库启用后,防洪控制点的洪水削峰率均有所提升。以螺山以上发生频率为1%的设计洪水为例,研究水库启用后,防洪控制点的洪峰流量最多可削减1400 m<sup>3</sup>/s,削峰率最高提升2.8%。总体而言,对于不同典型年和频率的设计洪水,启用研究水库平均可削减防洪控制点洪峰流量1108 m<sup>3</sup>/s,提升削峰率1.8%。

### 2.2.2 防洪评价指标

#### 2.2.2.1 削峰贡献度

为量化研究水库对流域水库群削减洪峰的作用,计算研究水库在流域水库群中的削峰贡献度,结果如图8所示。

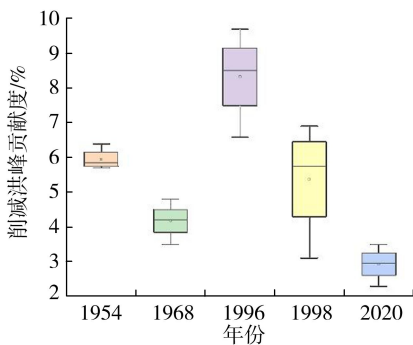


图8 研究水库的削峰贡献度箱线图

Fig. 8 Contribution of study reservoir to flood peak reduction

由图8可知,对于防洪控制点,研究水库在不同典型年和设计频率下,对流域洪水的削峰贡献度存在差异。总体而言,研究水库在流域水库群中的平均削峰贡献度为5.4%。在不同典型年洪水情景下,研究水库的削峰贡献度波动较大,主要原因在于不同典型年的洪水地区组成不同,进而影响了研究水库对防洪控制点的防洪作用。1968年和1996年

是区域性大洪水典型年,干支流洪水遭遇导致螺山站出现较高的洪水水位和洪量。1968年以支流来水为主,因此研究水库在流域水库群中的削峰贡献度较小,平均为4.2%;1996年则以金沙江来水为主,研究水库的削峰贡献度较大,平均为8.3%。1954年、1998年和2020年是流域性大洪水典型年,支流和金沙江来水均较大,研究水库在流域水库群中的削峰贡献度处于中等水平,其中2020年削峰贡献度偏低,平均为2.9%。这主要是因为该典型年设计洪水的洪峰流量极大,尽管研究水库削减洪峰的绝对值与1954年和1998年相近,但在削峰贡献度上的体现相对较小。

#### 2.2.2.2 拦洪贡献度

为量化研究水库对流域水库群拦蓄洪量的作用,将研究水库启用后防洪控制点的拦蓄洪量与启用前进行对比,并计算该水库在流域水库群中的拦洪贡献度,结果如图9所示。

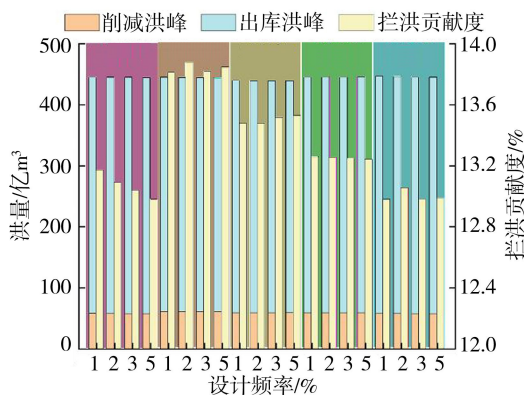


图9 研究水库的拦洪效果

Fig. 9 Flood retention effect of study reservoir

由图9可知,研究水库启用后,在不同典型年和频率的设计洪水下,流域水库群对防洪控制点的洪水削减量增加59亿m<sup>3</sup>,防洪作用显著。研究水库在流域水库群中的拦洪贡献度平均为13.3%。对于防洪控制点,研究水库的拦洪贡献度基本稳定,均在13.2%左右波动,变动幅度较小。这主要是由于研究水库的防洪库容及其在流域水库群总防洪库容中的占比固定为13.2%,从而在很大程度上决定了其拦洪贡献度。

#### 2.2.2.3 配合拦洪率

三峡水库是长江流域防洪体系中的关键性控制工程<sup>[34]</sup>。为量化研究水库的协同效应,计算其对下游远端水库(三峡水库)的配合拦洪率,结果如图10所示。

由图10可知,不同典型年情景下研究水库对下游远端水库的配合拦洪率波动较大。这主要是由于各年份的洪水过程不同,影响了研究水库防洪库容

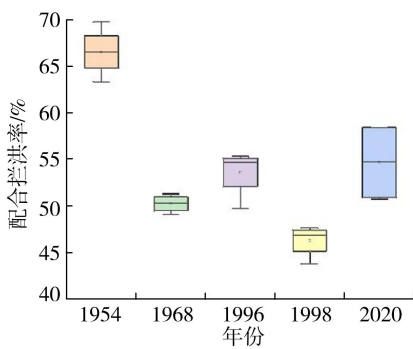


图 10 研究水库对下游远端水库配合拦洪率

Fig. 10 Flood-retaining rate of study reservoir in coordination with downstream remote reservoir

在调度时段内的分配,进而导致对下游远端水库的配合拦洪率发生变化。受洪水过程一致性影响,1998年研究水库与下游远端水库遭遇的洪水过程重合度较低,因此配合拦洪率较小,平均为46.3%;而1954年两者遭遇的洪水过程重合度较高,因此配合拦洪率较大,平均为66.6%。总体而言,针对不同典型年和设计频率的设计洪水,研究水库对下游远端水库的配合拦洪作用较为显著,平均配合拦洪率为54.3%。

### 3 结语

本文开展了大规模水库群联合防洪优化调度研究,并应用于长江上游包括拟建研究水库在内的流域水库群。基于各水库和流域整体的防洪需求以及水库群特性,构建了水库群联合防洪优化调度模型,针对不同典型年和不同设计频率洪水形成了流域水库群联合防洪优化调度方案,并提出了削峰贡献度、拦洪贡献度和配合拦洪率指标以评价单一水库在大型库群系统中的防洪作用。实例应用结果表明:①流域水库群优化调度可提升防洪控制点的防洪效益。与实际调度相比,联合防洪优化调度能更有效地实现水库群的错峰调节。对于不同典型年和不同频率设计洪水,启用研究水库可使防洪控制点洪峰流量平均削减 $1108\text{ m}^3/\text{s}$ ,削峰率提升1.8%,洪量减少59亿 $\text{m}^3$ 。②研究水库在流域水库群中的防洪贡献突出。在不同典型年不同设计频率的洪水条件下,研究水库对水库群的削峰贡献度平均为5.4%,拦洪贡献度平均为13.3%,对下游远端水库的配合拦洪率平均为54.3%。

### 参考文献:

[1] 刘永志,唐雯雯,张文婷,等.基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述[J].水资源保护,2021,37(1):20-27. (Liu Yongzhi, Tang Wenwen, Zhang Wenting, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain[J].

Water Resources Protection, 2021, 37(1): 20-27. (in Chinese))

[2] 徐宗学,任梅芳,陈浩.我国沿海城市洪潮组合风险分析[J].水资源保护,2021,37(2):10-14. (Xu Zongxue, Ren Meifang, Chen Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 10-14. (in Chinese))

[3] 刘丁蓉,杨凯,孙仕.珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J].水利经济,2024,42(4):23-29, 38. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4): 23-29. (in Chinese))

[4] 刘攀,张晓琦,邓超,等.水库适应性调度初探[J].人民长江,2019,50(2):1-5. (Liu Pan, Zhang Xiaoqi, Deng Chao, et al. Study on key technology for adaptive operation of reservoir[J]. Yangtze River, 2019, 50(2): 1-5. (in Chinese))

[5] 张玮,刘攀,刘志武,等.变化环境下水库适应性调度研究进展与展望[J].水利学报,2022,53(9):1017-1027. (Zhang Wei, Liu Pan, Liu Zhiwu, et al. State-of-the-art review of reservoir adaptation operation in changing environment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(9): 1017-1027. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 王本德,周惠成,卢迪.我国水库(群)调度理论方法研究应用现状与展望[J].水利学报,2016,47(3):337-345. (Wang Bende, Zhou Huicheng, Lu Di. The state-of-the-art review in the theory research and its application of multi-reservoir system operation in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 337-345. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 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))
- [10] 郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 496-503. (Guo Shenglian, Chen Jionghong, Liu Pan, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 496-503. (in Chinese))
- [11] 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[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(2): 298-305. (in Chinese))
- [12] 马强, 王浩雯, 张珂健, 等. 基于“23·7”特大洪水的永定河系数字孪生流域防洪模型构建[J]. *水资源保护*, 2025, 41(3): 75-82. (Ma Qiang, Wang Haowen, Zhang Kejian, et al. Construction of flood control model for digital twin basin of the Yongding River System based on “23·7” catastrophic flood[J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(3): 75-82. (in Chinese))
- [13] 董增川, 陈牧风, 倪效宽, 等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 233-240. (Dong Zengchuan, Chen Mufeng, Ni Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))
- [14] 高玮志, 高华勇, 王兆礼, 等. 基于机器学习的太湖流域多层次防洪调度方案综合评价[J]. *水资源保护*, 2023, 39(3): 118-125. (Gao Weizhi, Gao Huayong, Wang Zhaoli, et al. Comprehensive evaluation of multi-level flood control operation schemes in the Taihu Lake Basin based on machine learning[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 118-125. (in Chinese))
- [15] 王浩, 王旭, 雷晓辉, 等. 梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 25-37. (Wang Hao, Wang Xu, Lei Xiaohui, et al. The development and prospect of key techniques in the cascade reservoir operation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 25-37. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 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))
- [18] Hsu N S, Wei C C. A multipurpose reservoir real-time operation model for flood control during typhoon invasion[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(3/4): 282-293.
- [19] Pan Zihao, Chen Lihua, Teng Xiang. Research on joint flood control operation rule of parallel reservoir group based on aggregation-decomposition method[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125479.
- [20] He Yaoyao, Xu Qifa, Yang Shanlin, et al. Reservoir flood control operation based on chaotic particle swarm optimization algorithm[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(17/18): 4480-4492.
- [21] Zhang Wang, Liu Pan, Chen Xizhen, et al. Optimal operation of multi-reservoir systems considering time-lags of flood routing[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(2): 523-540.
- [22] 邹强, 丁毅, 肖扬帆, 等. 以三峡为核心的长江上游水库群防洪优化调度策略[J]. *人民长江*, 2023, 54(12): 8-14. (Zou Qiang, Ding Yi, Xiao Yangfan, et al. Optimal operation strategies for joint flood control of reservoirs in upper reaches of Changjiang River with Three Gorges Reservoir as a core[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(12): 8-14. (in Chinese))
- [23] 苑如玮, 王浩, 刘攀, 等. 洞庭湖四水流域水库群联合防洪优化调度[J]. *人民长江*, 2024, 55(4): 58-63. (Yuan Ruwei, Wang Hao, Liu Pan, et al. Optimal joint flood control operation of reservoir group in the Four Rivers, Dongting Lake Basin[J]. *Yangtze River*, 2024, 55(4): 58-63. (in Chinese))
- [24] 石朋, 樊鑫洋, 陈干琴, 等. 基于马斯京根法的区间洪水推求方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(6): 1-7. (Shi Peng, Fan Xinyang, Chen Ganqin, et al. An inter-basin flood calculation method based on Muskingum routing method[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(6): 1-7. (in Chinese))
- [25] Labadie J W. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2004, 130(2): 93-111.
- [26] 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))
- [27] 黄艳. 长江流域水工程联合调度方案的实践与思考: 2020 年防洪调度[J]. *人民长江*, 2020, 51(12): 116-

128. (Huang Yan. Practice and reflections on joint operation scheme of water projects of Changjiang River Basin; flood control and water projects operation in 2020 flood[J]. Yangtze River, 2020, 51(12): 116-128. (in Chinese))
- [28] 王小杰,夏军强,李启杰,等. 长江中下游各省市洪涝灾情时空变化及影响因素[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 78-86. (Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Li Qijie, et al. Spatiotemporal variation of flood distribution and influencing factors in provinces in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 78-86. (in Chinese))
- [29] 王小杰,夏军强,李启杰,等. 长江中下游地区洪灾损失率函数构建及洪涝灾害损失评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 88-98. (Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Li Qijie, et al. Construction of flood loss rate function and flood loss assessment in middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 88-98. (in Chinese))
- [30] 白淑英,张正,顾海敏,等. 长江流域汛期候尺度降水量时空集中特征和洪涝关系[J]. 气象科学, 2024, 44(5): 825-832. (Bai Shuying, Zhang Zheng, Gu Haimin, et al. Spatial and temporal concentration characteristics of pentad-precipitation and its relationship to flood-producing into the Yangtze River Basin [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2024, 44(5): 825-832. (in Chinese))
- [31] 张涛,胡挺,胡琼方,等. 长江流域历史典型洪水研究[J]. 人民长江, 2023, 54(9): 17-23. (Zhang Tao, Hu Ting, Hu Qiongfang, et al. Research on historical typical floods in Changjiang River Basin [J]. Yangtze River, 2023, 54(9): 17-23. (in Chinese))
- [32] 水利部长江水利委员会. 长江流域综合规划(2012—2030年)[R]. 武汉:水利部长江水利委员会, 2012.
- [33] 中华人民共和国水利部. 2024年长江流域水工程联合调度运用计划获水利部批复[R]. 北京:中华人民共和国水利部, 2024.
- [34] 郭生练,王俊,谢雨祚,等. 面向新时期新需求的三峡水库运行方案研究[J]. 水利学报, 2024, 55(4): 379-388. (Guo Shenglian, Wang Jun, Xie Yuzuo, et al. Three gorges reservoir operation scheme facing the new era and new demands [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(4): 379-388. (in Chinese))

(收稿日期:2025-09-09 编辑:王芳)

(上接第71页)

- [15] 李磊,马梦格,折亚亚,等. 复杂网络下雨洪灾害链风险分析及断链减灾研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 192-197. (Li Lei, Ma Mengge, She Yaya, et al. Risk analysis of rainstorm flood disaster chain and research on disaster mitigation of broken chain under complex network [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 192-197. (in Chinese))
- [16] 王治莹,马若涵,刘翰界. 考虑决策者不同情绪状态的洪水灾害链多阶段应急决策方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(5): 209-217. (Wang Zhiying, Ma Ruohan, Liu Hanjie. Multi-stage emergency decision-making method for flood disaster chain considering different emotional states of decision-makers [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(5): 209-217. (in Chinese))
- [17] 李选栋,申国朝. 郑州市京广北路隧道设计综述[J]. 城市道桥与防洪, 2013(7): 344-347. (Li Xuandong, Shen Guochao. Summarization on design of Jingguang road (N) tunnel in Zhengzhou City [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(7): 344-347. (in Chinese))
- [18] 杜磊,杨晓宽. 不同道路积水情况对交通影响及造成损失的研究[C]//科技创新 绿色交通:第十一次全国城市道路交通学术会议论文集. 大连:中国土木工程学会市政工程分会城市道路与交通学术委员会, 2011: 389-393.
- [19] Pudjaprasetya S R, Noor M M. An analysis of a three-phase versus a four-phase traffic lights regulation for a four-leg intersection [J]. Journal of the Indonesian Mathematical Society, 2020, 26(2): 192-201.
- [20] Hasman A. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference [M]. Burlington: Morgan Kaufmann Publishers, 1991: 221-225.
- [21] Hosseini F S, Choubin B, Mosavi A, et al. Flash-flood hazard assessment using ensembles and Bayesian-based machine learning models: application of the simulated annealing feature selection method [J]. Science of the Total Environment, 2020, 711: 135161.
- [22] Huang Shanqing, Wang Huimin, Xu Yejun, et al. Key disaster-causing factors chains on urban flood risk based on Bayesian network [J]. Land, 2021, 10(2): 210.
- [23] 王喆,孔维磊,方丹辉,等. 基于贝叶斯网络的城镇洪涝应急情景推演研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 182-188. (Wang Zhe, Kong Weilei, Fang Danhui, et al. Research on urban flood and waterlog emergency scenario deduction based on Bayesian network [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 182-188. (in Chinese))
- [24] 朱茵,孟志勇,阚叔愚. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(5): 119-122. (Zhu Yin, Meng Zhiyong, Kan Shuyu. Determination of weight value by AHP [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1999, 23(5): 119-122. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-13 编辑:王芳)