

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.004

汉江上游石泉—安康梯级水库联合防洪调度研究

梁艺缤, 郭爱军, 畅建霞

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 我国大江大河防洪系统已经或正在形成梯级水库联合防洪调度态势。梯级水库联合防洪调度可有效利用水库间防洪库容的补偿调节作用, 在提高流域防洪减灾水平、洪水资源利用效益等方面具有重要作用。本文以汉江上游石泉—安康梯级水库防洪调度系统为研究对象, 以 20 年一遇流域区间型洪水为例, 建立了考虑河道流量演进的梯级水库防洪调度优化模型, 分析了梯级水库间的防洪库容协调关系, 该典型洪水下, 石泉水库削峰率为 14.82%, 可分担安康水库部分防洪任务, 并揭示了在保证石泉县、安康市防洪安全的情况下, 石泉、安康水库防洪库容可变区间分别为 0.80~0.98 亿 m^3 、2.89~3.60 亿 m^3 , 研究结果可为流域防洪减灾提供技术支撑。

关键词: 梯级水库; 防洪; 补偿调度

中图分类号: TV697.13

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)03-0294-06

Study of joint flood control operation of Shiquan-Ankang cascade reservoirs in the upper reaches of Hanjiang River

LIANG Yibin, GUO Aijun, CHANG Jianxia

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The joint flood control operation mode of cascade reservoirs is being formed in China's River flood control system. The joint flood control operation of cascade reservoirs not only effectively utilizes the compensation and regulation function of flood control storage capacity between reservoirs, but also plays an important role in improving the level of flood control and disaster reduction and the utilization efficiency of flood resources. In this paper, the flood control operation system of Shiquan-Ankang cascade reservoirs in the upper reaches of Hanjiang River is studied. Taking the interval flood of twenty years return period as an example, this paper establishes a flood control operation optimization model of cascade reservoirs considering flow evolution of channel, with the coordination relationship of flood control storage capacity among cascade reservoirs analyzed. Under the condition of ensuring the safety of flood control in Shiquan County and Ankang City, the variable ranges of flood control storage capacity of Shiquan and Ankang reservoirs are of 80 - 98 million m^3 and 289 - 360 million m^3 respectively. The research results can provide technical support for flood control and disaster reduction.

Key words: cascade reservoir; flood control; compensation regulation

随着大型控制性水库相继建成投运, 我国大部分流域已经或正在形成梯级水库联合防洪调度态势, 研究联合防洪调度系统运用方式对于水库群安全及其高效运行具有重要意义。水库群调度需考虑水文气象、洪水情势等多种因素, 并涉及上下游、不

同防洪对象之间的利害冲突, 是一个复杂的决策优化问题, 也是防洪减灾领域的研究热点^[1]。

以流域整体为研究对象, 把流域内已建水库作为一个防洪调度系统, 有效分配各水库防洪库容, 可使流域防洪风险降至最低, 最大程度发挥防洪效益。

收稿日期: 2020-09-07; 网络出版日期: 2020-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200928.1228.012.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879214, 51909207)

第一作者: 梁艺缤, 女, 硕士生, 研究方向为水库群优化调度。E-mail: 1335764281@qq.com

通信作者: 郭爱军, 男, 博士, 讲师, 研究方向为水库群优化调度。E-mail: aijunguo@xaut.edu.cn

李玮等^[2]利用流域洪水预报和水库实时动态信息,将水文预报和库容补偿调度相结合,建立汛限水位动态控制逐次渐进补偿调度模型。周新春等^[3]提出了防洪库容互用性的概念,列出串并联水库防洪库容互用比例的计算方法,分析了金沙江下游梯级、三峡水库之间的防洪库容互用比例。周丽伟^[4]提出了防洪库容等效比的概念,利用已建立的基于系统线性安全度最大的防洪库容优化分配模型,提出了水库群防洪库容等效性的定量方法。陈芳^[5]以金沙江下游梯级水库群为研究对象,以动用防洪库容最小为目标函数,把防洪优化调度和防洪补偿调度相结合,建立了防洪补偿调度优化模型。钟平安等^[6]利用水库下游不同防洪控制点的重要程度,把补偿调度和削峰调度相结合,对并联水库建立了防洪联合调度库容分配模型。Tan等^[7]提出了一种考虑库容补偿调节和洪水空间分布不确定性的串联多用途水库系统的洪水动态控制临界计算模型。Jia等^[8]提出了由防洪库容、入库流量、洪水传播时间和配合运行期等要素构成的水库防洪联合补偿调度模型,建立了水库群系统防洪联合补偿调度模型。

汉江流域是长江经济带的重要组成部分,起着连南接北、承东启西的纽带作用,是一条典型的雨洪河流,通常为暴雨致洪,其水位、流量变化与降雨变化相一致,且流量变幅大,径流年内分配不均,年内最大最小月径流比一般可达10倍以上^[9]。本文以汉江上游石泉水库、安康水库为研究对象,构建考虑河道流量演进的石泉-安康梯级水库联合防洪调度系统,分析石泉-安康水库联合防洪调度规则,通过建立两库的防洪库容变化方案集,探讨了在确保两库防洪对象安全时的防洪库容可变区间。

1 考虑河道流量演进的梯级水库防洪调度优化模型

1.1 马斯京根法流量演算

马斯京根法作为一种河道流量演算的有效快捷方法,在实际工程中得到了广泛运用。本文采用该方法推求石泉断面流量演算至安康断面的洪水过程线。马斯京根法属于河道流量演算的水文学方法,演算公式不考虑圣维南方程中的惯性项,是把动力方程简化为槽蓄方程,并与水量平衡方程进行差分求解。

水量平衡方程:

$$I - Q = \frac{dW}{dT} \quad (1)$$

槽蓄方程:

$$W = K[xI + (1-x)Q] = KQ' \quad (2)$$

式中: I 为河段入流, m^3/s ; Q 为河段出流, m^3/s ; W 为河段槽蓄量, m^3 ; T 为时间, s ; K 为蓄量流量关系曲线的坡度; x 为流量比重系数; Q' 为示储流量, m^3/s 。

将式(1)与式(2)进行差分求解,可得到马斯京根法流量演算公式:

$$Q_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 Q_1 \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} C_0 = \frac{0.5\Delta T - Kx}{0.5\Delta T + K - Kx} \\ C_1 = \frac{0.5\Delta T + Kx}{0.5\Delta T + K - Kx} \\ C_2 = \frac{-0.5\Delta T + K - Kx}{0.5\Delta T + K - Kx} \end{cases} \quad (4)$$

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad (5)$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为演算时段初、末的出流量, m^3/s ; I_1 、 I_2 分别为演算时段初、末的入流量, m^3/s ; C_0 、 C_1 、 C_2 均为系数; ΔT 为演算时段, h 。

1.2 优化模型

在建立考虑河道流量演进的梯级水库防洪调度优化模型前,要先明确水库防洪调度的目标,本研究以水库保证下游防洪对象安全为目标,即水库群最大下泄流量最小。

目标函数:

$$\min F = \min\{\max(q_{t,1}) \times \max(q_{t,2})\} \quad (6)$$

式中: $q_{t,1}$ 为石泉水库 t 时刻的下泄流量, m^3/s ; $q_{t,2}$ 为安康水库 t 时刻的下泄流量, m^3/s 。

约束条件:

1) 水量平衡约束:

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + \frac{I_{i,t} + I_{i,t-1}}{2} \Delta t - \frac{q_{i,t} + q_{i,t-1}}{2} \Delta t \quad (7)$$

式中: $V_{i,t}$ 为第 i 个水库 t 时刻水库库容,亿 m^3 ; $V_{i,t-1}$ 为第 i 个水库 $t-1$ 时刻水库库容,亿 m^3 ; $I_{i,t}$ 为第 i 个水库 t 时刻入库流量, m^3/s ; $I_{i,t-1}$ 为第 i 个水库 $t-1$ 时刻入库流量, m^3/s ; Δt 为 t 、 $t-1$ 相邻时刻的时段长, h ; $q_{i,t}$ 为第 i 个水库 t 时刻下泄流量, m^3/s ; $q_{i,t-1}$ 为第 i 个水库 $t-1$ 时刻下泄流量, m^3/s 。

2) 水位库容关系:

$$Z_{i,t} = f(V_{i,t}) \quad (8)$$

式中: $Z_{i,t}$ 为第 i 个水库 t 时刻的水位, m ; $f(\cdot)$ 为水位库容关系曲线。

3) 库容约束:

$$V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max} \quad (9)$$

式中: $V_{i,\min}$ 为第 i 个水库汛限水位对应库容,亿 m^3 ; $V_{i,\max}$ 为第 i 个水库防洪高水位对应库容,亿 m^3 。

4) 泄流能力约束:

$$q_{i,t} \leq q_{i,\max} \quad (10)$$

式中: $q_{i,\max}$ 为第*i*个水库下泄最大流量, m^3/s 。

5) 下游河道安全泄量约束:

$$q_{i,t} + q_{i,\text{RE}} \leq q_{i,\text{SA}} \quad (11)$$

式中: $q_{i,\text{RE}}$ 为第*i*个水库下泄遇见的区间洪水流量, m^3/s ; $q_{i,\text{SA}}$ 为第*i*个水库下游防护对象的安全泄量, m^3/s 。

6) 泄量变化约束:

$$|q_{i,t} - q_{i,t-1}| \leq \Delta q_i \quad (12)$$

式中: Δq_i 为第*i*个水库允许的最大下泄流量变化量, m^3/s 。

2 粒子群算法求解优化模型

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)的基本思想是模拟鸟群随机搜寻食物的捕食行为。其中,优化问题的可行解类比为搜索空间中的一只鸟(粒子),最优解类比为食物最多的点,搜寻过程中鸟群会依据个体经验和种群交流来不断调整搜寻方向和路径。每个粒子都有两个参量:在*N*维空间中的位置 $\mathbf{X}_i = (X_{i,1}, X_{i,2}, X_{i,3}, \dots, X_{i,N})$ 、粒子的飞行速度 $\mathbf{V}_i = (V_{i,1}, V_{i,2}, V_{i,3}, \dots, V_{i,N})$ 。每个粒子都有一个由目标函数决定的适应值(fitness value),在每一次的迭代运算中,粒子知道当前个体的最优位置($\mathbf{Pbest}_i = (P_{i,1}, P_{i,2}, P_{i,3}, \dots, P_{i,N})$),也知道当前整个种群的最优位置($\mathbf{Gbest}_i = (G_{i,1}, G_{i,2}, G_{i,3}, \dots, G_{i,N})$)。在粒子找到这两个最优后,通过如下公式进行速度更新与位置更新:

$$V_{i,n} = \omega \cdot V_{i,n} + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{i,n} - X_{i,n}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G_{i,n} - X_{i,n}) \quad (13)$$

$$X_{i,n} = X_{i,n} + V_{i,n} \quad (14)$$

式中: $V_{i,n}$ 为第*i*个粒子的速度; $X_{i,n}$ 为第*i*个粒子的位置; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 分别为个体学习因子和种群学习因子; r_1 、 r_2 均为0至1间的随机数; $P_{i,n}$ 为第*i*个粒子当前找到的个体最优解; $G_{i,n}$ 为第*i*个粒子当前找到的种群最优解, $n = \{1, 2, 3, \dots, N\}$ 。

式(13)的第一项为惯性项:表示粒子上一次搜寻速度对本次的影响;第二项为个体经验项:粒子识别现在所处位置,并比较个体历史经历的最优位置;第三项为种群经验项:粒子识别现在所处位置,并比较种群历史经历的最优位置。通过对这三项赋予不同的权重,最终决定粒子本次搜寻速度。式(14)表示粒子通过自身经验和种群交流决定下一个位置。

3 案例分析

汉江上游多发山溪性洪水,暴涨陡落,变幅大,

历时短^[10]。此类洪水一般由暴雨径流形成,具有季节性分布规律,流域大洪水一般发生在6~9月。

石泉水电站是汉江上游(陕西段)规划开发的7级水电站中的第2级水电站,防洪对象为石泉县,防洪标准为20年一遇,石泉水库控制流域面积23 400 km^2 ,多年平均流量308.3 m^3/s ,为不完全季调节水库,防洪库容为0.98亿 m^3 ,总库容为3.98亿 m^3 。喜河水电站是汉江上游(陕西段)规划开发的7级水电站中的第3级水电站,无滞洪调洪能力,其洪水调度方式基本取决于石泉水库的洪水调度方式,因此,本文在汉江上游防洪调度中不考虑喜河水库的调节作用。安康水电站是汉江上游(陕西段)规划开发的7级水电站中的第4级水电站,距上游石泉水电站约170 km,防洪对象为安康市,防洪标准为20年一遇,安康水库控制流域面积35 700 km^2 ,多年平均径流量195.73亿 m^3 ,为不完全年调节水库,防洪库容为3.6亿 m^3 ,总库容为32.0亿 m^3 。

石泉至安康区间(石—安区间)流域面积为1.23万 km^2 ,占安康水库坝址控制流域面积的34.5%,若遇区间型洪水(石—安区间),则对安康水库防洪不利,可让石泉水库适当拦蓄部分洪水,减小泄洪量,进行错峰调节。

3.1 洪水资料处理

本文以汉江上游1983年典型洪水为例:石泉洪峰流量为14 000 m^3/s 、石(泉)—安(康)区间洪峰流量为17 500 m^3/s ,均接近20年一遇水平。对石泉断面洪水、石—安区间洪水采用同频率放大法进行缩放,石泉、石—安区间20年一遇设计洪水如表1所示,石泉、石—安区间20年一遇设计洪水过程如图1所示。

表1 石泉、石—安区间20年一遇设计洪水

Tab.1 Design flood with 20-year return period in Shiquan and Shi-An section

| 研究区域 | 洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 1 d 洪量/ (亿 m^3) | 3 d 洪量/ (亿 m^3) |
|-------|---|------------------------------|------------------------------|
| 石泉 | 11 074 | 8.15 | 16.13 |
| 石—安区间 | 14 010 | 8.01 | 11.91 |

3.2 马斯京根参数确定

本文选取1956年8月、1958年8月、1962年7月三场单峰型洪水(时段为6 h),洪水量级接近20年一遇水平,采用最小二乘法^[11]对参数 C_0 、 C_1 、 C_2 进行推求,结果如表2所示。三场洪水计算所得参数 C_0 、 C_1 、 C_2 的平均值分别为-0.35、0.72、0.63。

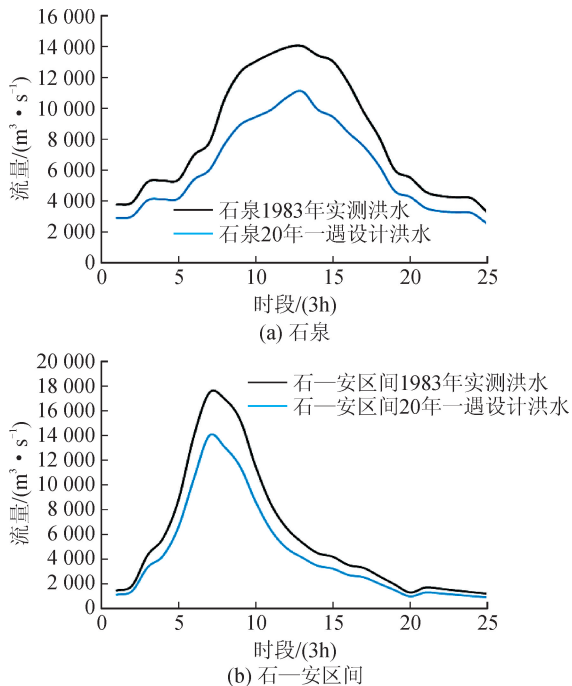


图1 石泉、石一安区间 20 年一遇设计洪水过程
Fig.1 Design flood hydrograph with 20-year return period in Shiquan and Shi-An section

表2 马斯京根参数推求

Tab.2 Derivation of Maskingen parameters

| 洪号 | C_0 | C_1 | C_2 |
|--------|-------|-------|-------|
| 560831 | -0.43 | 0.77 | 0.66 |
| 580821 | -0.34 | 0.73 | 0.61 |
| 620728 | -0.28 | 0.66 | 0.62 |
| 平均值 | -0.35 | 0.72 | 0.63 |

3.3 计算结果分析

3.3.1 梯级水库联合防洪调度结果分析

如上所述,文章采用马斯京根法确定石泉水库、安康水库间的流量演进特征,以此为基础,构建石泉-安康梯级水库防洪调度优化模型,具体约束条件参见文献[12-13]。其中,安康水库下游河道安全泄量约束参考安康市防汛指挥部“一号命令”中的限制流量制定,石泉水库下游河道安全泄量约束参考其同量级入库洪水下的防洪调度规则制定。需要说明的是,为进一步提升防洪对象安全水平,文中所用 20 年一遇洪水下,安康水库与石泉水库下游河道安全泄量约束均小于其制定时的参考标准,该约束设置得较为保守,对防洪对象安全比较有利。

水库防洪作用评估方面,选取安康水库最大下泄流量、动用总防洪库容和联合调度时安康水库的削峰率 3 个指标来分析安康水库的防洪作用;同时,选取石泉水库削峰率来表征该水库在联合防洪调度中对安康水库防洪做出的贡献。

安康水库常规调洪过程如图 2 所示。按照安康水库原有的分级控泄防洪调度规则,遭遇 20 年一遇洪水时,安康水库的最大下泄流量为 $17\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 、削峰率为 4.27%。

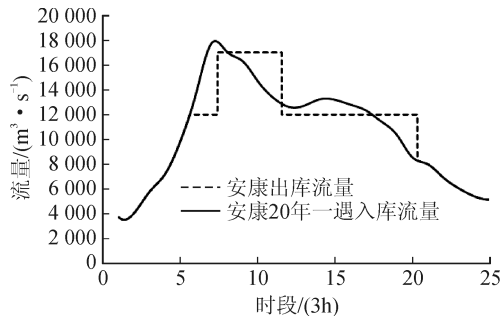


图2 安康水库常规调洪过程
Fig.2 Routine flood regulation process of Ankang reservoir

联合调度情况下,安康水库调蓄 20 年一遇洪水时,其最大下泄流量为 $12\ 457\ \text{m}^3/\text{s}$,削峰率为 29.86%,如图 3 所示。水库最大下泄流量减少了 $4\ 543\ \text{m}^3/\text{s}$,很大程度上提高了安康市的防洪安全。

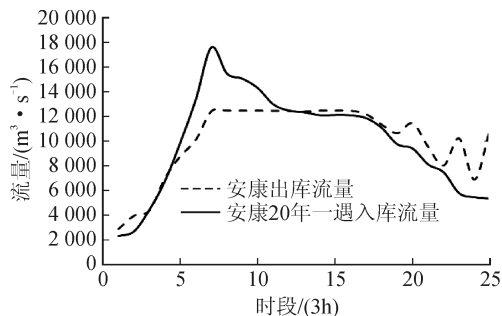


图3 联合调度时安康水库调洪过程
Fig.3 Regulation process of Ankang reservoir in joint operation

3.3.2 梯级水库防洪库容可变区间分析

在确保石泉县、安康市主城区防洪安全的情况下,为探索石泉水库、安康水库联合调度时防洪库容的可变区间,本研究将设立多种两库防洪库容变化方案,来推求确保防洪对象安全时的两库临界防洪库容。

石泉水库原有设计的汛限水位为 405 m,防洪高水位为 410 m(20 年一遇设计洪水对应水位),防洪库容为 0.98 亿 m^3 ;安康水库原有设计的汛限水位为 325 m,防洪高水位为 330 m,20 年一遇设计洪水对应防洪水位为 328 m,防洪库容为 3.6 亿 m^3 。本文以 0.5 m 为步长,令石泉水库汛限水位从 404.5 m 上升至 407.0 m,安康水库汛限水位从 324.5 m 上升至 327.0 m,共得到 36 组防洪库容变化方案,运用 PSO 算法求解联合调度模型,分析联

合调度时防洪库容变化对防洪目标的影响,计算结果如图4、图5、表3所示。

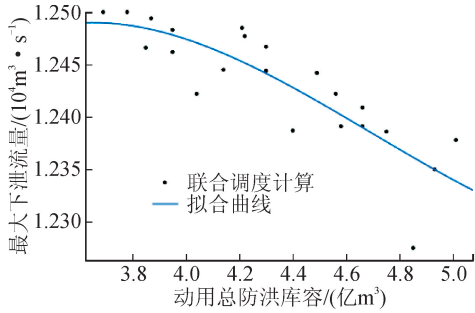


图4 联合调度时安康水库最大下泄流量变化过程
Fig. 4 Variation of maximum discharge of Ankang reservoir in joint operation

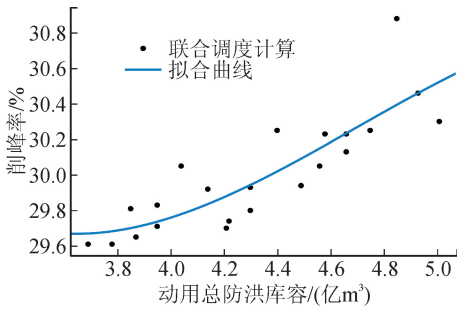


图5 联合调度时安康水库削峰率变化过程
Fig. 5 Variation of peak shaving rate of Ankang reservoir under joint operation

表3 联合调度时石泉水库削峰率

Tab. 3 Peak shaving rate of Shiquan reservoir in combined operation

| 石泉汛限水位/ m | 石泉防洪库容/ (亿 m ³) | 石泉削峰率/ % |
|--------------|--------------------------------|-------------|
| 404.5 | 1.06 | 14.96 |
| 405.0 | 0.98 | 14.82 |
| 405.5 | 0.89 | 14.92 |
| 406.0 | 0.80 | 14.82 |
| 406.5 | 0.70 | 14.96 |
| 407.0 | 0.61 | 14.74 |

由图4、图5可看出,随着动用总防洪库容的不断减小(小于原有石泉水库与安康水库防洪库容之和),安康水库最大下泄流量不断增加,水库削峰率不断减小,但均可满足安康市20年一遇防洪流量限制要求。由表3可以看出,石泉水库防洪库容从1.06亿m³降低至0.61亿m³,洪峰从1657m³/s削减至1632m³/s,削峰率减小了0.22%。其变化原因:石泉水库汛限水位上升、防洪库容减小,石泉水库的调蓄能力降低、削峰率下降。石泉水库防洪库容虽小,但通过补偿调度,可为安康水库有效削减

洪峰。

以36组防洪库容方案为约束,开展石泉-安康梯级水库联合调度。在表4、表5中分别找出石泉、安康水库最大下泄流量极限值(不超过防洪目标限制值),并在表6中找出对应的防洪库容方案,然后确定梯级水库防洪调度系统的临界状态(即确保防洪对象安全时的防洪库容临界值):石泉水库防洪库容为0.80亿m³,安康水库防洪库容为2.89亿m³。此处,不超过石泉水库防洪目标临界值9500m³/s和不超过安康水库防洪目标临界值12500m³/s。防洪库容变化方案计算中(减小石泉、安康水库原有总防洪库容),动用总防洪库容均可满足石泉县和安康市的防洪标准,可为今后兼顾两水库的防洪调度提供参考。

表4 联合调度时石泉水库最大下泄流量

Tab. 4 Maximum discharge of Shiquan reservoir in joint operation

| 安康 汛限 水位/ m | 石泉水库最大下泄流量/(m ³ ·s ⁻¹) | | | | | |
|----------------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 石泉汛 限水位 | 石泉汛 限水位 | 石泉汛 限水位 | 石泉汛 限水位 | 石泉汛 限水位 | 石泉汛 限水位 |
| 324.5 | 9 417 | 9 417 | 9 417 | 9 417 | 9 417 | 9 417 |
| 325.0 | 9 417 | 9 417 | 9 417 | 9 417 | 9 417 | 9 409 |
| 325.5 | 9 417 | 9 417 | 9 417 | 9 417 | 9 417 | 9 498 |
| 326.0 | 9 417 | 9 481 | 9 436 | 9 479 | — | — |
| 326.5 | — | — | — | — | — | — |
| 327.0 | — | — | — | — | — | — |

注:灰色方格表示不超过石泉水库防洪目标临界值9500m³/s的最大下泄流量极限值。

表5 联合调度时安康水库最大下泄流量

Tab. 5 Maximum discharge of Ankang reservoir in joint operation

| 安康 汛限 水位/ m | 安康水库最大下泄流量/(m ³ ·s ⁻¹) | | | | | |
|----------------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 石泉汛 限水位 | 石泉汛 限水位 | 石泉汛 限水位 | 石泉汛 限水位 | 石泉汛 限水位 | 石泉汛 限水位 |
| 324.5 | 12 378 | 12 350 | 12 275 | 12 386 | 12 409 | 12 422 |
| 325.0 | 12 391 | 12 391 | 12 442 | 12 387 | 12 467 | 12 485 |
| 325.5 | 12 444 | 12 477 | 12 445 | 12 422 | 12 483 | 12 466 |
| 326.0 | 12 462 | 12 494 | 12 500 | 12 500 | — | — |
| 326.5 | — | — | — | — | — | — |
| 327.0 | — | — | — | — | — | — |

注:灰色方格表示不超过安康水库防洪目标临界值12500m³/s的最大下泄流量极限值。

表6 动用总防洪库容变化方案

Tab. 6 Change scheme for total flood control storage capacity

| 安康 汛限 水位/ m | 动用总防洪库容变化方案/(亿 m ³) | | | | | |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 石泉汛 限水位 404.5 m | 石泉汛 限水位 405.0 m | 石泉汛 限水位 405.5 m | 石泉汛 限水位 406.0 m | 石泉汛 限水位 406.5 m | 石泉汛 限水位 407.0 m |
| 324.5 | 5.01 | 4.93 | 4.85 | 4.75 | 4.66 | 4.56 |
| 325.0 | 4.66 | 4.58 | 4.49 | 4.40 | 4.30 | 4.21 |
| 325.5 | 4.30 | 4.22 | 4.14 | 4.04 | 3.95 | 3.85 |
| 326.0 | 3.95 | 3.87 | 3.78 | 3.69 | 3.59 | 3.50 |
| 326.5 | 3.59 | 3.52 | 3.43 | 3.34 | 3.24 | 3.15 |
| 327.0 | 3.24 | 3.17 | 3.08 | 2.99 | 2.89 | 2.80 |

注:灰色方格表示防洪库容临界值。

4 结 论

1) 维持安康水库防洪库容 3.6 亿 m³ 不变,通过与石泉水库进行联合调度,安康水库最大下泄流量从 17 000 m³/s 减小至 12 457 m³/s,相较于单库常规调度,其削峰率增加了 25.59%。

2) 当遭遇 20 年一遇区间型洪水,且不破坏梯级水库防洪对象安全(即石泉水库最大下泄流量小于 9 500 m³/s,安康水库最大下泄流量小于 12 500 m³/s)时,石泉水库防洪库容最小为 0.80 亿 m³,安康水库防洪库容最小为 2.89 亿 m³。

3) 石泉、安康水库原有防洪库容分别为 0.98 亿 m³、3.60 亿 m³,由本文确定的石泉、安康水库最小防洪库容,得到石泉、安康水库防洪库容可变区间分别为 0.80~0.98 亿 m³、2.89~3.60 亿 m³。

4) 在确定石泉、安康水库最小防洪库容后,计算得到石泉水库的削峰率为 14.82%,石泉水库能对安康水库进行有效补偿,从而达到两水库联合运用的目的。

参考文献:

- [1] 周建中,顿晓晗,张勇传. 基于库容风险频率曲线的水库群联合防洪调度研究[J]. 水利学报, 2019, 50(11): 1318-1325.
ZHOU Jianzhong, DUN Xiaohan, ZHANG Yongchuan. Study on joint flood control dispatching of reservoir groups based on reservoir capacity risk frequency curve [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(11): 1318-1325.
- [2] 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.
- [3] 周新春,许银山,冯宝飞. 长江上游干流梯级水库群防洪库容互用性初探[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 421-428.
ZHOU Xinchun, XU Yinshan, FENG Baofei. An ex-

ploration on the interoperability of the flood control capacities of cascade reservoir groups in the upper reaches of Yangtze River [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 421-428.

- [4] 周丽伟. 水库群防洪库容高效利用相关问题研究[D]. 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 [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [5] 陈芳. 金沙江下游梯级水库群优化调度研究及应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
CHEN Fang. Research and application of optimal scheduling of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [6] 钟平安,李兴学,张初旺,等. 并联水库群防洪联合调度库容分配模型研究与应用[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(6): 51-54.
ZHONG Ping'an, LI Xingxue, ZHANG Chuwang, et al. Model and its application of reservoir storage allocation of parallel multi-reservoir united regulation for flood control [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(6): 51-54.
- [7] TAN Q F, WANG X, LIU P, et al. The dynamic control bound of flood limited water level considering capacity compensation regulation and flood spatial pattern uncertainty [J]. Water Resources Management, 2017, 31(1): 143-158.
- [8] JIA B, WU S, FAN Z. A dimension reduction method for flood compensation operation of multi-reservoir system [C]// American Geophysical Union, Fall Meeting 2017, abstract, 2017.
- [9] 段唯鑫. 汉江流域控制性水库调度运行及影响研究[D]. 武汉:武汉大学, 2017.
DUAN Weixin. Controlling reservoir operation and impact study in Hanjiang Basin [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [10] 王学琪. 汉江上游流域暴雨洪水特征[J]. 陕西水利, 1988(1): 26-33.
- [11] 瞿富强,李幼木,何伟. 安康水电站汛限水位动态控制关键技术[J]. 陕西电力, 2008, 36(11): 25-27.
QU Fuqiang, LI Youmu, HE Wei. Key technology of dynamic control for limiting flood water level in Ankang hydropower station [J]. Shaanxi Electric Power, 2008, 36(11): 25-27.
- [12] 马永胜. 安康水库汛限水位动态控制研究[D]. 西安:西安理工大学, 2009.
MA Yongsheng. Study on dynamic control of flood limit water level of Ankang reservoir [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [13] 刘招. 水库的洪水资源化理论和方法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2008.
LIU Zhao. Study on theory and method of the flood resources utilization based on reservoir [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.