

# 基于年防洪标准的水库分期优化调度研究

张涛<sup>1</sup>, 蔡振华<sup>2</sup>, 刘英豪<sup>1</sup>, 于东平<sup>1</sup>

(1. 山东省水利勘测设计院, 山东 济南 250013; 2. 山东省水文水资源勘测局, 山东 济南 250014)

**摘要:**以棉花滩水库为例,在不降低年防洪标准的前提下进行汛限水位分期优化调度。采用传统水文频率分析法推求分期设计洪水,分期洪水组合概率应与年洪水概率一致;建立分期设计洪水频率与相应防洪库容的两变量序列,根据拟定汛限水位的防洪库容插值求得防洪风险率;在分期防洪风险率组合满足年防洪标准的前提下,根据发电、调洪规则及其它约束条件进行长系列模拟,对各分期进行风险和效益转移,寻求整体最大效益。结果表明:汛限水位前汛期取168.78 m,后汛期取169.58 m,防洪风险率分别为1.217%、0.783%,组合风险率为1.99%;与年防洪标准2%基本一致,同时具有较大的兴利效益。

**关键词:**汛限水位;分期调度;概率组合;长系列模拟;风险效益转移;效益最大化

中图分类号:TV697.1<sup>+</sup>1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)01-0128-06

## Research on optimized reservoir staged operation based on annual flood control standard

ZHANG Tao<sup>1</sup>, CAI Zhenhua<sup>2</sup>, LIU Yinghao<sup>1</sup>, YU Dongping<sup>1</sup>

(1. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250013, China;

2. Hydrology and Water Resource Office of Shandong Province, Jinan 250014, China)

**Abstract:** Taking Mianhuatan reservoir as an example, staged optimization operation without reducing annual flood control standard is implemented. Traditional hydrological frequency method is used to calculate stage design flood, and probability combination should be consistent with annual flood probability. Two variable sequences between staged design flood control capacity and frequency are established. The flood risk is calculated according to flood control capacity under staged limited water level. Under the premise that risk combination satisfied annual flood control standard, long series simulation is conducted based on power generation and flood regulation rules, to seek great overall benefit by transferring stage's risk and benefit. The results show that, limited water level in main and secondary flood season is 168.78 m and 169.58m respectively, flood risk rate is namely 1.217% and 0.783%, whose combination risk ratio is 1.99%, consistent with annual flood control standard 2%, and has greater benefit.

**Key words:** limited water level; staged operation; probability combination; long series simulation; risk-benefit transfer; maximum benefit

## 1 研究背景

汛限水位分期调度考虑汛期洪水的季节变化特性,在不同的汛期分期执行不同的汛限水位方案,更具有科学性、合理性。相对于汛限水位动态控制须借助于水文气象预报等一系列技术设施辅助手段,分期控制操作相对简单,易于执行<sup>[1]</sup>,目前我国已有多座水库采用了分期调度,获得较好的兴利效益。

分期控制常规计算方法与全汛期固定控制的计算方法基本相同<sup>[2]</sup>,包括汛期划分、分期洪水设计及洪水调算等。采用分期调度是否会降低年防洪标准,目前存在一定争议<sup>[3-5]</sup>,主要是分期设计洪水与年设计洪水标准关系<sup>[5-7]</sup>,以及分期防洪风险组合与年防洪风险标准关系的一致性<sup>[8]</sup>。王善序等<sup>[6]</sup>认为现行分期洪水计算频率与重现期的倒数存在一定差异,现行汛限水位分期调度确定方法存

收稿日期:2017-09-10; 修回日期:2017-11-01

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201501054)

作者简介:张涛(1980-),男,山东诸城人,博士,高级工程师,从事水利规划设计工作。

在一定的防洪安全隐患;陈守煜等<sup>[9]</sup>采用模糊统计法划分汛期及确定分期汛限水位;曹升乐<sup>[10]</sup>根据丰枯季节暴雨特性确定分期汛限水位过程线,但分期防洪风险组合与年防洪标准的关系具有不确定性;文献[11-12]通过对分期防洪概率事件进行概率组合,在满足年防洪标准的条件下可获得一定的兴利效益。本文从分期洪水组合概率与年设计洪水概率关系一致性,以及分期防洪风险率组合与年防洪风险标准关系一致性两个方面进行探讨,以棉花滩水库为例,在不降低年防洪标准的前提下,考虑调洪、发电规则及约束条件进行汛限水位分期优化设计,寻求最大兴利效益,并确保水库防洪安全。

## 2 分期设计洪水计算

### 2.1 洪水计算方法

分期设计洪水是水库分期调洪计算的基本数据,汛期划分则直接关系到分期洪水取样及分期调度的合理性。根据洪水的季节变化规律合理划分汛期<sup>[9]</sup>,并考虑到运行管理方便,常对汛期实行硬性划分,如以整月或整旬为单元划分为汛期。采用传统水文频率分析法推求分期设计洪水,洪水样本选择为相应分期最大样本选择。考虑流域洪水的时空分布不确定性因素,适当进行跨期取样<sup>[7]</sup>,跨期通常取5~10 d。采用P-Ⅲ型等频率曲线进行频率适线,按同倍比或同频率法对典型洪水进行放大从而得到设计洪水过程线。

### 2.2 分期设计洪水概率组合

假定汛期分为前汛期和后汛期,年最大洪水均发生在汛期内。同一年份中,前汛期、后汛期最大洪水样本分别为 $Y_1$ 、 $Y_2$ ,全汛期最大洪水样本为 $Y_0$ ,即 $Y_0 = \max(Y_1, Y_2)$ ,其中 $\max()$ 为取大函数。假定前、后汛期洪水事件相互独立,其概率组合关系<sup>[2]</sup>为:

$$P_0(Y_0 \geq y) = P_1(Y_1 \geq y) \cup P_2(Y_2 \geq y) = P_1(Y_1 \geq y) + P_2(Y_2 \geq y) - P_1(Y_1 \geq y)P_2(Y_2 \geq y) \quad (1)$$

式中: $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 分别为全汛期、前汛期、后汛期洪水样本变量不小于 $y$ 的上区间概率。

设计洪水频率计算是以洪水样本序列为依据进行频率适线,分期设计洪水组合概率应与年设计洪水概率一致<sup>[7]</sup>,即满足上述概率组合公式(1)。由于受分期跨期取样、样本容量、频率参数选取等影响,分期洪水组合与年洪水并非完全符合概率组合公式(1),通常存在一定的偏差。

## 3 分期优化调度设计模型

### 3.1 防洪风险率计算

根据调洪规则对设计洪水进行调洪计算,当调洪高水位等于或超过防洪高水位则认为是风险事件。给定汛限水位,当对应分期设计洪水频率为 $p$ 的调洪高水位达到防洪高水位时,则认为频率 $p$ 即为该汛限水位下的防洪风险率。

可调控洪水下,洪水量级与防洪库容为单调函数关系,当洪水频率越小、洪水量级越大时,则需要的防洪库容则越大。为便于快速计算各汛限水位的防洪风险率,根据分期洪水的防洪库容推求防洪风险率。假定可调控洪水的调洪规则为:洪水初期洪水来多少泄多少,大于安全泄流时则按安全泄流控泄,确保调洪高水位不超过防洪高水位,设计洪水频率 $p$ 下的防洪库容 $W_p$ 计算公式为:

$$W_p = \Delta t \sum_t (Q_{t,p} - q_{t,p}), \quad q_{t,p} = \min(Q_{t,p}, q_{t,an}) \quad (2)$$

式中: $Q_{t,p}$ 、 $q_{t,p}$ 分别为洪水频率 $p$ 下的 $t$ 时刻设计入库流量、相应出库流量, $m^3/s$ ;  $\Delta t$ 为时段时长, $s$ ;  $T$ 为洪水离散时段数; $\min()$ 为取小函数; $q_{t,an}$ 为安全泄流量, $m^3/s$ 。

对频率微分,建立洪水频率 $p_i$ 与相应洪水防洪库容 $W_{pi}$ 的两变量序列。给定汛限水位 $h$ ,计算该水位与防洪高水位之间的防洪库容 $W_h$ ,由已知 $W_{pi} \sim p_i$ 两变量序列采用线性插值求得对应库容 $W_h$ 的洪水频率 $p_h$ ,即为该汛限水位下的防洪风险率。为简化计算,本文未考虑洪水预报、调度操作等因素<sup>[13]</sup>对防洪风险的不确定性影响。

### 3.2 年防洪标准下的分期防洪风险组合

假定前汛期、后汛期的风险事件相互独立,根据全概率公式,全汛期的防洪风险率组合公式为:

$$P_f[h_{\max}(h) \geq H] = P_{f,1}[h_{\max}(h_1) \geq H] + P_{f,2}[h_{\max}(h_2) \geq H] - P_{f,1}P_{f,2} \quad (3)$$

式中: $P_f[h_{\max}(h) \geq H]$ 为全汛期汛限水位 $h$ 下的调洪高水位不低于 $H$ 的风险率,简记为 $P_f$ ;  $h_{\max}(h)$ 为对应汛限水位 $h$ 的调洪高水位; $P_{f,1}[h_{\max}(h) \geq H]$ 为前汛期汛限水位 $h_1$ 下的调洪高水位不低于 $H$ 的风险率,简记为 $P_{f,1}$ ;  $P_{f,2}[h_{\max}(h_2) \geq H]$ 为后汛期汛限水位 $h_2$ 下的调洪高水位不低于 $H$ 的风险率,简记为 $P_{f,2}$ 。

当全汛期风险率一定时,则存在满足条件的多种分期汛限水位概率组合<sup>[11]</sup>,通过对各分期进行风

险及效益转移,寻求整体最大效益。一般情况下,主汛期大洪水发生频次高于次汛期,其防洪任务较重,因此,可通过降低前汛期的兴利效益,以提高防洪效益;降低后汛期的防洪效益,以提高兴利效益。

### 3.3 效益最大化目标

分期汛限水位防洪风险率组合按年防洪标准控制,拟定汛限水位组合方案,根据长期发电调度规则、调洪规则进行长系列模拟,计算主要效益指标,以综合效益最大化为目标确定最优方案。

(1)发电效益。考虑洪水的丰枯季节变化特性,在枯水期内多为低出力运行,与丰水期相比,枯水期的发电效益增加效果更加显著。另外,水电站保证出力的日保证率越大,则对电网的平衡作用越稳定。考虑电网平衡作用,不同季节时段采用不同的效益权重,发电效益为:

$$E_c(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I [C_{i,n} E_{i,n}(x)] \quad (4)$$

式中:  $E_c(x)$  为方案  $x$  下的年均发电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $E_{i,n}(x)$  为方案  $x$  下第  $n$  年第  $i$  分期的发电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $N$  为年数;  $I$  为年内分期数;  $C_{i,n}$  为第  $n$  年第  $i$  分期的效益权重。

考虑权重时发电效益需进行归一化处理,归一化公式为:

$$E_c^l(x) = \frac{E_c(x) \bar{E}_0}{\bar{E}_c}, \quad \bar{E}_0 = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X E_0(x),$$

$$\bar{E}_c = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X E_c(x) \quad (5)$$

式中:  $E_c^l$  为考虑效益权重方案  $x$  归一化后的年均发电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $\bar{E}_0$  为不考虑效益权重所有  $X$  个方案的平均年发电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $\bar{E}_c$  为考虑效益权重所有  $X$  个方案的平均年发电量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $X$  为方案个数。

(2)防洪效益。由于洪灾损失难以准确地定量描述,具体的防洪效益较难计算,可采用遭遇大洪水的平均余留库容  $\bar{V}_f(x)$  作为评价防洪效益的一个指标<sup>[14]</sup>:

$$\bar{V}_f(x) = \frac{1}{K} \sum_k^K [V_H - V_{k,\max}(x)] \quad (6)$$

式中:  $K$  为较大洪水场次;  $V_H$  为防洪高水位对应的库容,  $\text{m}^3$ ;  $V_{k,\max}(x)$  为方案  $x$  下第  $k$  场洪水调洪高水位对应的库容,  $\text{m}^3$ 。

(3)供水效益。主要包括农业、生活、工业、生态等供水效益。

(4)综合效益最大化目标。结合约束条件,对各效益指标进行经济效益定量化,如发电效益通过

发电量及电网价格衡量,供水效益通过供水量及水费价格衡量,效益最大化目标函数为:

$$\max \sum_{m=1}^M B_m(x), \text{ 且 } R_{j,\min} \leq R_j(x) \leq R_{j,\max} \quad (7)$$

$$(j = 1, 2, \dots, J)$$

式中:  $B_m(x)$  为方案  $x$  下的第  $m$  个效益指标的经济效益;  $M$  为效益指标个数;  $R_j(x)$  为  $x$  方案下第  $j$  个约束,如下泄流量等;  $R_{j,\min}$ 、 $R_{j,\max}$  为第  $j$  个约束的最小、最大约束范围;  $J$  为约束个数。

对于以发电为主的水库,在满足各约束条件前提下提高发电效益是主要目标,当其它指标差异不大的情况下,可以发电效益等主目标进行方案优选。当各方案指标差异不明显、难于定量化时,可采用多目标模糊评价法<sup>[15]</sup>进行方案评价。

### 3.4 约束条件

调洪及发电调度需满足库水位限制、下游防洪安全、机组出力等约束条件。

(1)库水位。包括水库死水位、限制水位、防洪高水位等约束,库水位  $Z_t$  满足:

$$Z_{t,\min} \leq Z_t \leq Z_{t,\max} \quad (8)$$

式中:  $Z_{t,\min}$  为  $t$  时刻水库死水位或其它运用要求的最低水位,  $\text{m}$ ;  $Z_{t,\max}$  为  $t$  时刻上限水位,  $\text{m}$ ,其中汛期洪水期内为防洪高水位(遭遇超标准洪水时则按调洪规则确定),汛期非洪水期内为汛限水位,非汛期正常蓄水位。

(2)电站出力。包括水电站发电降低出力、预想出力等约束,出力  $N_t$  满足:

$$N_{t,\text{low}} \leq N_t \leq N_{t,\text{exp}} \quad (9)$$

式中:  $N_{t,\text{low}}$ 、 $N_{t,\text{exp}}$  分别为  $t$  时刻水电站的降低出力、预想出力,  $\text{kW}$ 。

(3)发电流量。包括水轮机发电允许最小、最大流量等约束,发电流量根据出力、上游水位及尾水位等确定,发电流量  $Q_{t,E}$  满足:

$$Q_{E,\min} \leq Q_{t,E} \leq Q_{E,\max}, \quad Q_{t,E} = \frac{N_t}{A(Z_t - Z_{t,\text{wei}})} \quad (10)$$

式中:  $Q_{E,\min}$ 、 $Q_{E,\max}$  分别为水轮机允许的的最小、最大过流能力,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $A$  为出力系数;  $Z_{t,\text{wei}}$  为  $t$  时刻发电尾水位,  $\text{m}$ 。

(4)下泄流量。水库控泄阶段的下游用水、最大泄流等约束,控泄流量  $q_t$  满足:

$$q_{t,\min} \leq q_t \leq q_{t,\text{an}} \quad (11)$$

式中:  $q_{t,\min}$  为  $t$  时刻水库下游用水下限流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_{t,\text{an}}$  为  $t$  时刻下游安全泄流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

## 4 分期调度实例计算

### 4.1 水库基本情况

(1)主要参数。棉花滩水库是以发电为主,兼有防洪、航运等功能的大型水库,总库容  $20.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,机组保证出力  $8.8 \times 10^4 \text{ kW}$ ;防洪标准为 50 年一遇,防洪高水位为 173 m;前汛期为 5 月 1 日 - 6 月 30 日,后汛期为 7 月 1 日 - 8 月 25 日。

(2)调洪及发电基本规则。洪水调度以库水位和入库流量作为判别标准,前汛期、后汛期安全泄流分别为  $5\,210$ 、 $4\,650 \text{ m}^3/\text{s}$ ,当库水位低于 173 m 时,泄流按来水控制且不大于安全泄流;当库水位高于 173m 时,逐步加大泄流直至全部敞泄。汛期当遇到洪水则蓄到汛限水位,尽量减少弃水,加大出力;在汛限水位附近及以上时满荷预想出力,尽快回落到

汛限水位。

(3)约束条件。水库运行最低水位 146.0 m,长系列中无超标洪水,汛期洪水期内的上限水位取 173 m,汛期非洪水期内的上限水位为相应汛限水位,非汛期的上限水位为 173 m;电站降低出力  $6.8 \times 10^4 \text{ kW}$ ,预想出力  $60 \times 10^4 \text{ kW}$ ;水轮机允许的的最小、最大流量分别为  $70$ 、 $280 \text{ m}^3/\text{s}$ ;水库下游用水下限为  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ ,控泄阶段泄流不超过相应安全泄流。

(4)分期设计洪水计算。采用 P - III 型曲线对洪水样本进行频率适线;以前汛期(1973 年 6 月)、后汛期(1959 年 8 月)大洪水为典型洪水,采用同频率法对洪峰、洪量进行过程放大得到设计洪水过程。设计洪水频率参数、典型频率设计成果以及典型洪水统计参数见表 1。表 1 中  $Q_m$  为洪峰; $W_{24}$ 、 $W_{72}$ 、 $W_{120}$  分别为最大 24、72、120 h 洪量。

表 1 设计洪水及典型洪水统计参数

$\text{m}^3/\text{s}, 10^8 \text{ m}^3$

项目	全汛期				前汛期				后汛期				
	$Q_m$	$W_{24}$	$W_{72}$	$W_{120}$	$Q_m$	$W_{24}$	$W_{72}$	$W_{120}$	$Q_m$	$W_{24}$	$W_{72}$	$W_{120}$	
频率参数	均值	3360	2.299	4.898	6.636	3132	2.160	4.479	6.105	2175	1.558	3.330	4.394
	$C_v$	0.46	0.525	0.525	0.515	0.470	0.545	0.555	0.540	0.590	0.625	0.630	0.620
	$C_s/C_v$	4.0	3.5	3.5	3.5	4.0	3.5	3.5	3.5	4.0	3.5	3.5	3.5
典型频率/%	0.1	12154	9.165	19.514	25.936	11607	8.951	18.981	25.101	10351	7.568	16.289	21.055
	0.5	9811	7.335	15.618	20.817	9322	7.139	15.063	20.003	8019	5.880	12.653	16.434
	1	8802	6.547	13.94	18.594	8348	6.346	13.373	17.801	7031	5.159	11.114	14.452
	2	7783	5.752	12.246	16.372	7364	5.554	11.674	15.588	6041	4.447	9.564	12.460
	5	6427	4.695	9.996	13.407	6057	4.502	9.431	12.660	4755	3.511	7.538	9.855
典型洪水	7130	5.347	10.179	14.694	7130	5.347	10.179	14.694	4427	2.955	5.673	6.814	

通过验算,前、后汛期洪水组合概率与全汛期概率基本一致。如洪峰为  $7\,783 \text{ m}^3/\text{s}$  时,对应全汛期洪峰频率为 2%;对应前、后汛期洪峰频率分别为 1.49%、0.58%,根据公式(1),概率组合为 2.06%,与全汛期频率 2% 基本一致。

### 4.2 防洪风险率计算

拟定汛限水位试算范围前汛期为 168.40 ~ 169.85 m,后汛期为 169.00 ~ 170.45 m,水位步长 0.01 m,共 146 组。假定洪水均为可调控,根据调洪规则,推求各频率分期设计洪水的防洪库容,频率区间[0.01% ~ 5%],频率步长 0.01%,得到洪水频率与相应防洪库容两变量序列。分期防洪库容与风险率、库水位与相应防洪库容关系曲线见图 1。根据拟定分期汛限水位与防洪高水位之间的库容,采用线性插值方法求得分期汛限水位对应的防洪风险率,见图 2。

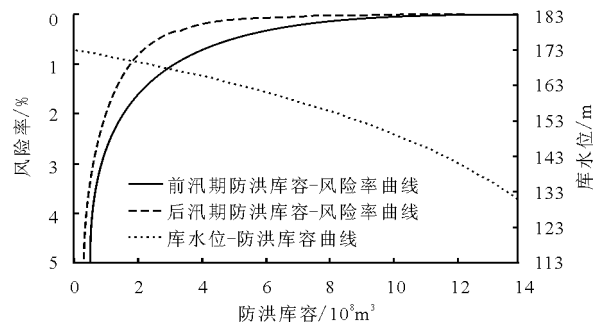


图 1 分期防洪库容与风险率、库水位关系曲线

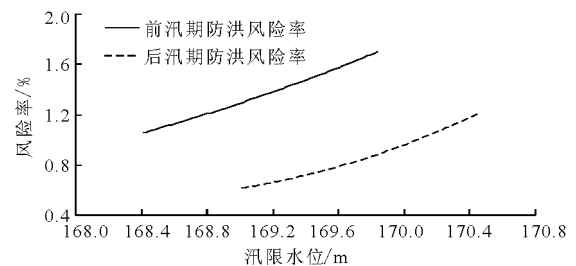


图 2 分期汛限水位防洪风险率 ( $h_{\text{max}} \geq 173 \text{ m}$ )

根据公式(3),按年防洪风险率2%进行分期汛限水位防洪风险率组合,部分方案组合见表2。

表2 分期汛限水位防洪风险组合

方案	前汛期			后汛期			风险率组合/%
	汛限水位/m	防洪库容/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	风险率/%	汛限水位/m	防洪库容/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	风险率/%	
	1	168.66	2.504	1.175	169.72	1.937	
2	168.70	2.482	1.187	169.67	1.964	0.793	1.970
3	168.74	2.461	1.202	169.64	1.983	0.795	1.987
4	168.78	2.440	1.217	169.58	2.010	0.783	1.990
5	168.82	2.418	1.224	169.55	2.031	0.778	1.993
6	168.86	2.397	1.240	169.48	2.062	0.751	1.981
7	168.90	2.375	1.245	169.43	2.089	0.734	1.970
8	168.94	2.354	1.251	169.38	2.118	0.717	1.959
9	168.98	2.333	1.269	169.32	2.151	0.698	1.958
10	169.12	2.260	1.342	169.12	2.260	0.639	1.972

4.3 长系列模拟计算

该水库于2001年建成,建成后的天然水文资料一致性较差。因此,主要对1959年1月1日-2001年12月31日的日流量,根据长期发电、调洪规则进

行长系列模拟,日流量系列见图3。前汛期汛限水位为168.50~169.5m,水位步长0.01m,后汛期为组合防洪风险率为2%的相应汛限水位;初始调算水位为死水位146.0m。

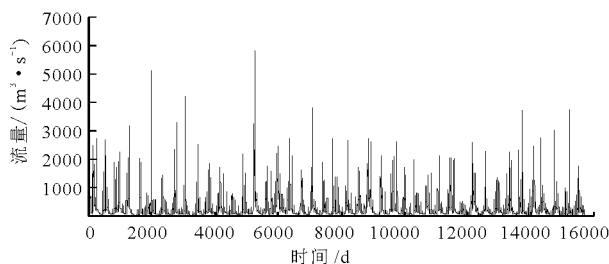


图3 1959-2001年入库日流量系列

计算指标包括全年、非汛期、前汛期、后汛期发电量以及发电、日保证率、洪峰≥2000m<sup>3</sup>/s的大洪水平均余留库容(简记平均余留库容)、弃水量、超安全泄流次数。结合地区电力平衡作用,各分期的发电效益权重系数非汛期取1.25、前汛期取0.9、后汛期取1.05,通过归一化处理求得全年(权)发电量。部分汛限水位组合方案的计算结果见表3;平均全年发电量、全年(权)发电量以及组合防洪风险率为2%下的前、后汛期汛限水位组合见图4。

表3 长系列模拟计算指标

方案	汛限水位/m		平均发电量/10 <sup>8</sup> (kW·h)					保证率/%	平均余留库容/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	弃水量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	超安全泄流次数
	前汛期	后汛期	全年	非汛期	前汛期	后汛期	全年(权)				
1	168.66	169.72	16.078	8.675	4.884	2.519	16.084	93.83	2.521	4.818	0
2	168.70	169.67	16.079	8.663	4.888	2.529	16.083	93.86	2.508	4.798	0
3	168.74	169.64	16.075	8.660	4.888	2.527	16.078	93.82	2.491	4.812	0
4	168.78	169.58	16.087	8.656	4.898	2.533	16.087	93.82	2.475	4.780	0
5	168.82	169.55	16.079	8.656	4.891	2.533	16.081	93.68	2.461	4.822	0
6	168.86	169.48	16.080	8.654	4.887	2.540	16.082	93.68	2.454	4.806	0
7	168.90	169.43	16.080	8.650	4.895	2.535	16.080	93.77	2.433	4.814	0
8	168.94	169.38	16.086	8.639	4.899	2.548	16.083	93.53	2.422	4.796	0
9	168.98	169.32	16.087	8.630	4.893	2.564	16.083	93.25	2.410	4.784	0
10	169.12	169.12	16.075	8.592	4.901	2.582	16.064	93.10	2.409	4.788	0

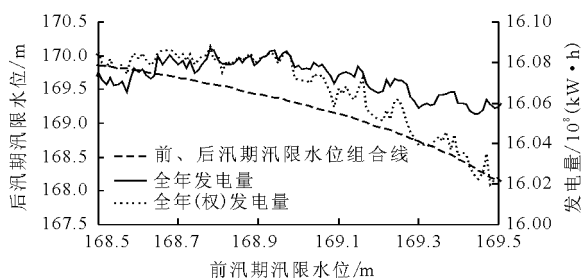


图4 分期汛限水位组合及发电效益图

4.4 结果分析

(1)效益分析。方案10中,汛期采用单一汛限水位169.12m,年均发电量为16.075×10<sup>8</sup> kW·h,发电效益相对较小,日保证率93.10%,平均余留库容2.409×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。方案4中,汛限水位前汛期取168.78m、后汛期取169.58m时,年均发电量为16.087×10<sup>8</sup> kW·h,相对于方案10,平均每年多发电量120×10<sup>4</sup> kW·h,非汛期多发电量640×10<sup>4</sup>

kW·h,日保证率93.82%,平均余留库容 $2.475 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该方案的年发电量、日保证率、平均余留库容等指标均优于方案10相应指标,其不考虑权重和考虑权重的年均发电量均为最大。

(2)上游洪水遭遇分析。根据1959-2001年洪水统计,日最大流量大于 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水共计61场,其中前汛期45场、后汛期16场;日最大流量大于 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水共计13场,其中前汛期10场、后汛期3场。前汛期发生大洪水的场次基本为后汛期的3倍,一般情况下,前汛期汛限水位越低,全汛期大洪水的平均余留库容则越大,有利于防洪安全,因此宜适当降低前汛期汛限水位,以获得较大的防洪效益。

(3)下游泄洪分析。长系列模拟的日水位均未超过防洪高水位,最大泄流均未超过安全泄流。最大场次洪水为1973年前汛期6月中旬的大洪水,最大24h洪量达 $5.347 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,方案4中的调洪高水位为170.23m,最大泄流达到安全泄流 $5210 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

综上所述,以发电效益作为主目标评价各方案时,方案4为最优。即汛限水位前汛期取168.78m、后汛期取169.58m,分期防洪风险率分别为1.217%、0.783%,组合风险率为1.990%,能满足年防洪标准及各约束条件;相对于单一汛限水位控制方案,多年平均全年、非汛期发电量提高比例分别为0.07%、0.74%,具有一定的兴利效益。

## 5 结论

(1)不降低年防洪标准进行水库分期调度,主要是基于两种概率组合关系,一是分期洪水组合概率应与年设计洪水概率一致,保证分期设计洪水的合理性及防洪风险率计算的可靠性;二是分期防洪风险率组合应与年防洪标准一致,组合标准不降低年防洪标准,通过对各分期进行风险和效益转移,总体上获得较大效益。

(2)防洪与兴利是棉花滩水库运行的关键矛盾问题,当前汛期采用较低的汛限水位,降低兴利效益,但增大了防洪库容,减小了前汛期的洪灾风险;后汛期采用较高的汛限水位,减小了防洪库容,但提

高了发电等兴利效益。

(3)随着现代化气象降雨预报技术的广泛应用,可结合水文气象预报实施汛限水位动态控制;并进一步分析不确定性防洪风险及效益的量化方法,挖掘洪水资源利用潜力。

## 参考文献:

- [1] 王雅莉,周密. 水库汛限水位控制方法对比分析[J]. 中国农村水利水电,2013(9):83-85.
- [2] 华家鹏,孔令婷. 分期汛限水位和设计洪水位的确定方法[J]. 水电能源科学,2002,20(1):21-23.
- [3] 田杏丽,黄强,王义民,等. 我国水库洪水资源化研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(5):24-28.
- [4] SINGH V P, WANG S X, ZHANG L. Frequency analysis of nonidentically distributed hydrologic flood data [J]. Journal of Hydrology,2005,307(1):175-195.
- [5] 王善序. T年一遇水库汛期分期设计洪水[J]. 水资源研究,2005,26(4):11-13.
- [6] 王善序. T年一遇水库汛期分期设计洪水问题探讨[J]. 水文,2007,27(3):16-19.
- [7] 张涛,赵培青,李光吉,等. 分期设计洪水的合理性分析[J]. 水电能源科学,2011,29(2):35-37+128.
- [8] 肖义,郭生练,刘攀,等. 分期设计洪水频率与防洪标准关系研究[J]. 水科学进展,2008,19(1):54-60.
- [9] 陈守煜,王淑英,郭瑜,等. 水库设计汛限水位动态模糊控制分析[J]. 大连理工大学学报,2005,45(5):735-739.
- [10] 曹升乐. 设计暴雨与动态汛限水位过程线[J]. 西安理工大学学报,1996,12(3):191-194.
- [11] 刘攀,郭生练,肖义,等. 水库分期汛限水位的优化设计研究[J]. 水力发电学报,2007,26(3):5-10.
- [12] 莫崇勋,孙桂凯,刘方贵. 基于概率组合的水库洪水分期调度研究[J]. 长江科学院院报,2009,26(5):22-24+30.
- [13] 董前进,曹广晶,王先甲,等. 水库汛限水位动态控制风险分析研究进展[J]. 水利水电科技进展,2009,29(3):85-89.
- [14] 李梅,刘俊萍,黄强,等. 水库实时优化调度余留库容的云决策方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(3):238-244.
- [15] 王本德,郑德凤,周惠成,等. 汛限水位动态控制方案优选方法及指标体系研究[J]. 大连理工大学学报,2007,47(1):113-118.