

# Impact of Reservoir on Downstream Flood Prevention

Zhangjun Liu<sup>1,2</sup>, Shenglian Guo<sup>1,2</sup>, Tianyuan Li<sup>1,2</sup>, Lihua Xiong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

<sup>2</sup>Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resource Security, Wuhan

Email: [liuzhangjun@whu.edu.cn](mailto:liuzhangjun@whu.edu.cn)

Received: Mar. 4<sup>th</sup>, 2014; revised: Aug. 1<sup>st</sup>, 2014; accepted: Aug. 10<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The hydrological regime of the natural flow at the downstream site has been changed after the reservoir was built. The quantitative evaluation of reservoir's flood prevention function for the downstream site is very important and an assessment method is established. The Shuibuya reservoir in the Qingjiang basin was chosen as the case study. The flood prevention function at the Geheyan site with or without reservoir was compared and analyzed. If 1000-year flood both occurred at Shuibuya reservoir and interval basin, the peak discharges at Geheyan site were equal to 22,880 m<sup>3</sup>/s and 21,570 m<sup>3</sup>/s without and with Shuibuya reservoir respectively, and the return period was reduced to 550 years. If 200-year flood both occurred at Shuibuya reservoir and interval basin, it was equivalent to 100-year natural flood condition after reservoir storage regulation. This study indicates that the flood protection standard of the Geheyan site is greatly improved when the Shuibuya reservoir has been built.

## Keywords

Reservoir Storage, Flood Combination, Flood Prevention, Copula Function, Qingjiang Basin

---

# 水库对下游断面的防洪作用分析

刘章君<sup>1,2</sup>, 郭生练<sup>1,2</sup>, 李天元<sup>1,2</sup>, 熊立华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

<sup>2</sup>水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉

作者简介: 刘章君(1991-), 男, 江西吉安人, 博士生, 主要从事水文分析与计算研究。

Email: [liuzhangjun@whu.edu.cn](mailto:liuzhangjun@whu.edu.cn)

收稿日期: 2014年3月4日; 修回日期: 2014年8月1日; 录用日期: 2014年8月10日

## 摘要

流域上游建库蓄水改变了水库下游断面洪水的情势, 必须定量地评价水库对下游断面防洪形势的影响。建立了水库对下游断面的防洪作用评价模型, 以清江流域为例, 分析水布垭水库对隔河岩断面的防洪作用。研究表明: 水布垭水库和区间均发生千年一遇洪水, 隔河岩断面洪峰流量在无水布垭水库时为 $22,880 \text{ m}^3/\text{s}$ , 有水布垭水库时为 $21,570 \text{ m}^3/\text{s}$ , 洪水重现期从1000年减小为550年。水布垭水库和区间均发生二百年一遇洪水, 经水布垭水库调蓄后, 相当于天然情况下水布垭水库和区间均发生百年一遇洪水。水布垭水库的修建提高了下游隔河岩断面的防洪能力。

## 关键词

水库调蓄, 洪水组成, 防洪作用, Copula函数, 清江流域

## 1. 引言

变化环境下的工程水文分析计算是近年来水文水资源研究的前沿和热点问题。流域上游修建水库改变了水库下游的水文情势, 直接影响到下游断面的设计洪水[1]。因此, 如何定量地评价水库对下游断面防洪形势的影响至关重要。

由于上游水库的调洪作用与设计断面设计洪水的地区组成有关, 需要拟定洪水地区组成方案进行计算。因此, 一般通过拟定防洪设计断面以上洪水地区组成, 分析水库对下游断面的防洪作用。李天元等[2]详细地综述了设计洪水地区组成的计算方法及研究进展, 分析了现有方法的优缺点, 并提出进一步开展研究工作的建议。我国《水利水电工程设计洪水计算规范》[3](以下简称《规范》)采用地区组合法推求设计洪水的地区组成。但该法只考虑一种或少数几种组成, 并不能保证所拟定的组成方案既是最可能发生的, 也是对设计断面防洪最不利的情形[4]-[9]。

本文以清江流域梯级水库为例, 拟定水布垭水库断面和水布垭-隔河岩区间的各种洪水地区组成方案, 分别推求有无水布垭水库两种情况下的隔河岩断面洪峰流量, 通过比较分析, 定量评估水布垭水库对下游隔河岩断面防洪的影响。同时基于各组成方案联合概率密度值对其发生的可能性进行评价, 为决策人员明晰风险提供参考。

## 2. 水库对下游断面的防洪作用评价

水库对洪水的调洪作用有两种不同方式, 一种是滞洪作用, 另一种是蓄洪作用。水库调洪演算时, 把水库作为一个系统, 以入库洪水过程线作为输入, 经过水库调节后, 输出下泄洪水过程线。水库调洪后的下泄流量过程与天然洪水过程相比, 一般洪峰流量减小, 峰现时间延后。水库这种削峰及延后峰现时间的效应, 随天然洪水量级的大小和洪水过程线形状的不同而不同。

要分析修建水库对下游断面的防洪作用, 可以对建库前和建库后设计断面的防洪形势进行比较[10]。分别假定“无水库”和“有水库”两种情况, 给定水库断面和区间洪水的组合方案, 推求下游断面的洪峰流量, 通过比较分析评价水库对下游断面防洪作用。

在计算水库下游断面的设计洪水时, 考虑到水量平衡, 通常将设计断面的设计洪量分配给水库断面

和区间[11]。无水库时，下游断面洪水为天然情况，考虑其逆过程，已知水库断面和区间洪量后，可以将各分区洪量叠加得到下游断面设计洪量，在假定峰量同频率的条件下推求下游断面的洪峰流量。有水库时，入库洪水过程线经水库调洪后的下泄流量过程线与区间洪水过程线，分别演算到下游控制断面后叠加，得到下游断面受水库调洪影响后的洪水过程线。

### 3. 洪水地区组成方案

#### 3.1. 边缘分布和联合分布

1) 边缘分布。我国设计洪水理论频率曲线型一般采用 P-III 型分布，其概率密度函数为[2]：

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (1)$$

式中： $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $a_0$  分别为形状、尺度和位置参数。

2) 联合分布。采用 Gumbel-Hougaard Copula 函数来构造水库断面洪水  $X$  和区间洪水  $Y$  的联合分布，数学表达式为[12]：

$$F(x, y) = C(u, v) = \exp \left\{ - \left[ (-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta \right]^{\frac{1}{\theta}} \right\}, \quad \theta \geq 1 \quad (2)$$

式中： $u = F_X(x)$ ， $v = F_Y(y)$  分别为随机变量  $X$  和  $Y$  的边缘分布。参数  $\theta$  与 Kendall 秩相关系数  $\tau$  的关系为  $\theta = 1/(1-\tau)$ 。

#### 3.2. 洪水地区组成方案

采用任意给定水库断面和区间洪水地区组成的方式，假定水库断面有  $n_x$  种重现期的洪水发生，区间有  $n_y$  种重现期的洪水发生，将其进行两两组合，共可得到  $n_x n_y$  种可能的洪水组成方案。

#### 3.3. 洪水地区组成发生可能性

拟定了洪水地区组成方案后，我们必须了解各方案发生的可能性，为决策人员明晰风险提供参考。用水库断面洪水  $X$  和区间洪水  $Y$  的联合概率密度大小来衡量该洪水地区组成发生的可能性大小，其表达式为[13]：

$$f(x, y) = c(u, v) f_X(x) f_Y(y) \quad (3)$$

式中： $f_X(x)$  和  $f_Y(y)$  分别为  $X$  和  $Y$  的概率密度函数； $c(u, v) = \frac{\partial^2 C(u, v)}{\partial u \partial v}$  为 Copula 函数的密度函数，它反映了  $X$  和  $Y$  的相依结构。

联合密度函数在点  $(x, y)$  的函数值可以反映水库断面和区间洪水在  $(x, y)$  附近遭遇的几率。计算各方案的联合概率密度值，对其发生可能性进行分析评价。联合概率密度值越大，表明该地区组成方案发生的可能性也较大。

## 4. 实例研究

### 4.1. 研究区域概况

以清江流域为例，研究水布垭水库对下游隔河岩水库断面的防洪作用。水布垭水库位于清江流域中游的巴东县水布垭镇，以发电为主，兼顾防洪、航运等任务。坝址以上流域面积 10,860 km<sup>2</sup>，占清江全流域面积的 63.9%。水库死水位 350 m，正常蓄水位 400 m，调节库容 23.83 亿 m<sup>3</sup>，总库容 45.8 亿 m<sup>3</sup>，

库容系数 25.3%，水库具有多年调节能力。水库为长江错峰预留防洪库容 5.0 亿  $m^3$ ，防洪限制水位 391.8 m。其下游 92 km 处建有隔河岩水库，控制面积 14,430  $km^2$ ，水布垭 - 隔河岩区间流域面积为 3570  $km^2$ 。

### 4.2. 边缘分布及联合分布的确定

根据《规范》，对水布垭 - 隔河岩区间最大 3 日洪量 ( $W_3$ ) 进行频率计算，对水布垭水库断面、隔河岩断面最大 3 日洪量 ( $W_3$ ) 及洪峰流量 ( $Q_m$ ) 进行复核。结果发现，设计洪水参数基本稳定(见表 1)，均值稍有减小，设计值误差在 -2.2% ~ -4.3%。鉴于原成果广泛应用且大部分偏安全，本文仍采用初设阶段审定的统计参数和设计值。

采用水布垭水库断面和区间 1965~2010 年资料推求 Copula 联合分布函数的参数，得到水布垭水库断面和区间最大 3 日洪量的秩相关系数  $\tau = 0.468$ ，参数  $\theta = 1.88$ 。经验频率分布与理论分布见图 1(直线为 45°线，点据越靠近 45°线，经验频率与理论频率拟合越好)。由图 1 可以看出，点据均落在 45°线附近，经验频率与理论频率值的拟合情况较好，说明构建的联合分布能较好地反映真实情况。

### 4.3. 水布垭水库调洪作用分析

枢纽调洪原则为：1) 当来水小于等于 5% 频率洪峰流量时，控制坝前水位不超过 397 m；2) 当来水大于 5% 频率洪峰流量并小于泄洪能力时，按来量下泄，若来量大于泄流能力时，按泄流能力下泄。

选取 1997 年水布垭水库断面年最大 3 日洪水过程线作为典型洪水过程，采用最大 3 日洪量同倍比放

Table 1. Estimated parameters of the marginal distribution for each region

表 1. 各分区边缘分布参数估计结果

变量	计算阶段	统计参数			设计值		
		$EX$	$C_V$	$C_S/C_V$	0.1%	1%	2%
水布垭水库断面 $W_3/亿 m^3$	设计	7.94	0.44	3.0	25.33	19.19	17.27
	复核	7.60	0.44	3.0	24.26	18.37	16.53
隔河岩断面 $W_3/亿 m^3$	设计	11.10	0.49	3.0	39.35	29.12	25.96
	复核	10.21	0.52	3.0	38.45	28.08	24.90
隔河岩断面 $Q_m/m^3/s$	设计	7820	0.40	3.0	22,800	17,700	16,000
	复核	7280	0.42	3.0	22,300	17,000	15,400
区间 $W_3/亿 m^3$	设计	3.08	0.62	3.0	14.01	9.83	8.56

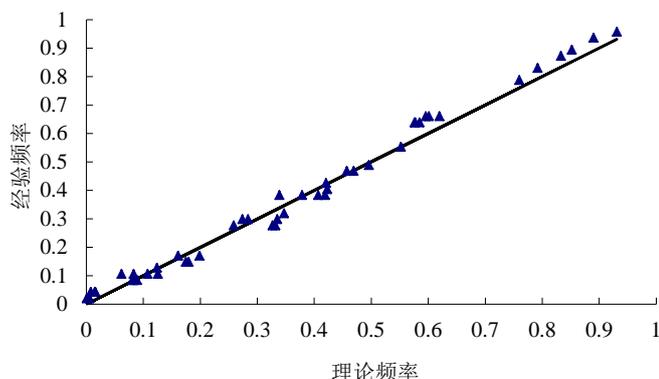


Figure 1. Theoretical and observed bivariate probability distributions

图 1. 理论分布与经验分布

大得到重现期为 1000, 950, 900, 850, …… , 150, 100, 50 年共 20 条入库洪水过程线。将其输入水库进行调洪演算, 得到下泄洪水过程线, 分析水库对不同重现期设计洪水的调蓄作用, 计算结果表 2。

从表 2 可以看出, 随着水布垭水库断面设计洪水重现期的增大, 入库、出库和削峰量都逐渐增大。水布垭水库断面发生百年一遇洪水时, 入库洪峰流量为 12,690 m<sup>3</sup>/s, 出库流量为 8530 m<sup>3</sup>/s, 削峰 4160 m<sup>3</sup>/s; 发生千年一遇洪水时, 入库洪峰流量为 16,750 m<sup>3</sup>/s, 出库流量为 11,290 m<sup>3</sup>/s, 削峰 5460 m<sup>3</sup>/s。

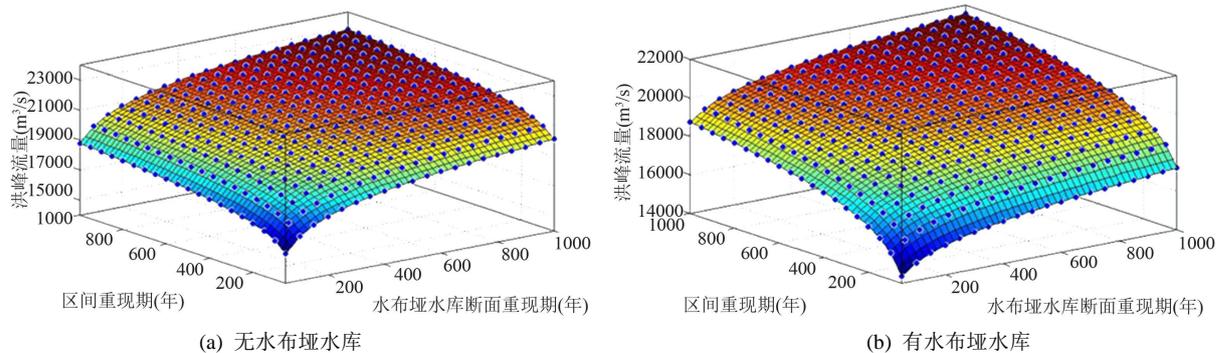
#### 4.4. 组成方案隔河岩断面洪峰流量

拟定水布垭水库断面和区间分别发生 1000, 950, 900, 850, …… , 150, 100, 50 年共 20 种重现期的洪水, 将其进行两两组合, 得到 400 种洪水地区组成方案。按有无水布垭水库两种情况下不同洪水组成方案得到隔河岩断面洪峰流量值, 分别见图 2(a)和 2(b)。图 3 给出了修建水布垭水库后, 不同洪水组成方案隔河岩断面洪峰流量削减量。

由图 2(a)和 2(b)知, 不论有无水布垭水库, 水布垭水库和区间流域洪水重现期越大, 隔河岩断面洪峰流量越大。水布垭水库和区间流域均发生千年一遇洪水, 有无水布垭水库调蓄两种情况下的隔河岩断面

**Table 2.** Flood storage and regulation function of the Shuibuya reservoir with different return periods  
**表 2.** 水布垭水库对不同重现期设计洪水的调蓄作用

重现期(年)	入库洪峰(m <sup>3</sup> /s)	出库洪峰(m <sup>3</sup> /s)	削峰量(m <sup>3</sup> /s)
1000	16,750	11,290	5460
900	16,570	11,160	5410
800	16,360	11,020	5340
700	16,130	10,850	5280
600	15,860	10,660	5200
500	15,540	10,440	5100
400	15,150	10,160	4990
300	14,650	9800	4850
200	13,930	9300	4630
100	12,690	8530	4160
50	11,420	7930	3490



**Figure 2.** Peak discharges at the Geheyan site for different regional combination schemes  
**图 2.** 不同地区洪水组成方案隔河岩断面洪峰流量

洪峰流量分别为  $22,880 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $21,570 \text{ m}^3/\text{s}$ ；水布垭水库和区间流域均发生百年一遇洪水，有无水布垭水库调蓄两种情况的隔河岩断面洪峰流量分别为  $17,620 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $15,950 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

从图 3 可知，各种地区洪水组成方案下，水布垭水库蓄水调节后，对隔河岩水库断面的削峰作用十分显著。当水布垭水库和区间流域发生千年一遇洪水时，隔河岩断面削峰量为  $1310 \text{ m}^3/\text{s}$ 。图 4 点绘了水布垭水库洪水比例与隔河岩断面削峰量的关系，发现隔河岩断面洪峰流量削减( $y$ )与水布垭水库断面洪水比例( $x$ )具有很好的线性关系。

由于相关系数为正，故水布垭水库断面洪水比例越大，隔河岩断面洪峰流量削减越多。水布垭水库断面洪水比例每增加 1%，削峰量约增加  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 。隔河岩断面洪水主要来自上游水布垭水库断面，当隔河岩断面发生不超过千年一遇洪水时，水布垭水库断面洪水比例超过 60% [7]，根据回归方程估算隔河岩断面削峰量超过  $785 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

将地区组成方案中的水布垭水库和区间流域分别发生重现期为 1000、500、200、100 和 50 年洪水时，有无水布垭水库调蓄两种情况下的隔河岩断面洪峰流量列于表 3。由于水布垭水库调蓄的影响，隔河岩断面洪峰流量概率分布已非天然状况。为了与无水布垭水库时进行比较，将其换算到隔河岩断面天然洪峰流量频率曲线上，得到对应的重现期。

由表 3 可知：1) 若水布垭水库和区间流域均发生千年一遇洪水，经过水布垭水库的调蓄，隔河岩断

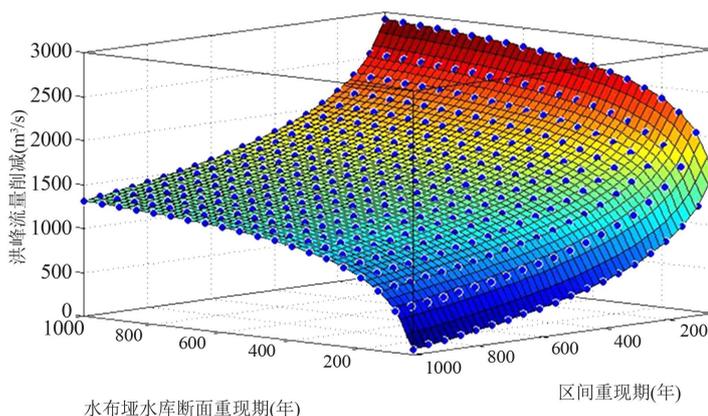


Figure 3. Reduced peak discharges at the Geheyang site for different regional combination schemes

图 3. 不同地区洪水组成方案隔河岩断面洪峰流量的削减量

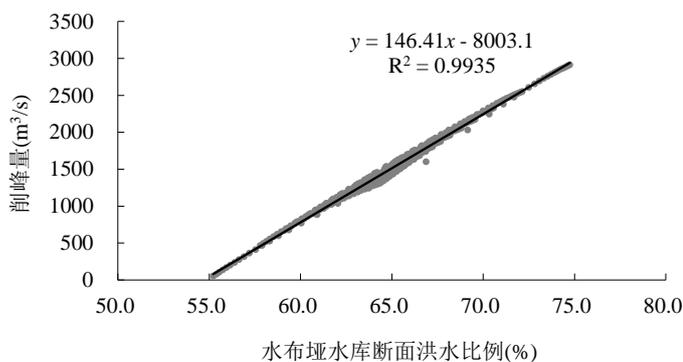


Figure 4. Relationship between reduced peak discharges and flood volume proportion

图 4. 隔河岩断面削峰量与水布垭水库洪水比例关系

面洪峰流量有较大的削减,其洪峰流量的重现期为 550 年。2) 若水布垭水库和区间流域均发生 200 年(或 100 年)一遇洪水,经水布垭水库调蓄后,隔河岩断面的洪峰流量为 17,580 m<sup>3</sup>/s(或 15,950 m<sup>3</sup>/s);相当于隔河岩断面发生 100 年(或 50 年)一遇洪水时的洪峰流量值 17,620 m<sup>3</sup>/s(或 15,970 m<sup>3</sup>/s)。

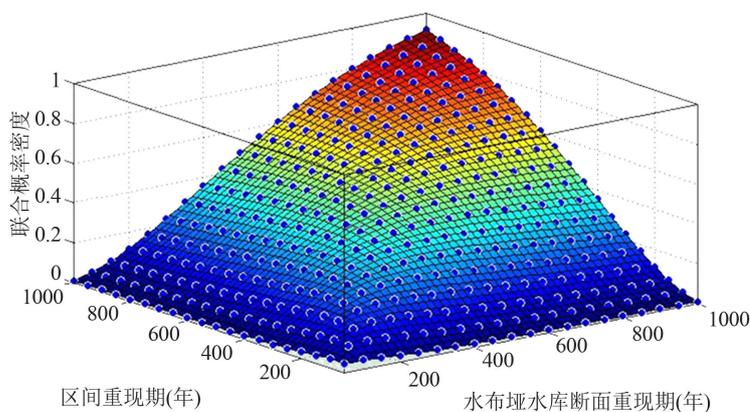
#### 4.5. 组合方案发生可能性分析

图 5 给出了各组成方案的水布垭水库断面和区间洪水的联合概率密度。可以看出,不同地区洪水组成方案发生的可能性不同。例如,水布垭水库断面和区间洪水组合(1000, 1000)、(1000, 500)和(1000, 50)的联合概率密度值分别为 0.9195、0.4865 和 0.0090。可知组合(1000, 1000)发生可能性是最大的,符合流域洪水地区组成规律;组合(1000, 50)从概率意义上讲,属于小概率事件,几乎是不可能发生的事件,与流域洪水地区组成规律相悖;组合(1000, 500)发生可能性介于前两种组合之间,比较符合流域的洪水地区组成规律。

结合图 5,下面我们讨论三种特殊情况的联合概率密度变化规律:

**Table 3. Peak discharges at the Geheyan site with different design flood return periods**  
**表 3. 不同洪水重现期方案推求的隔河岩断面洪峰流量**

组成方案 编号	水布垭 重现期(年)	区间 重现期(年)	无水库调蓄		有水库调蓄	
			洪峰流量(m <sup>3</sup> /s)	重现期(年)	洪峰流量(m <sup>3</sup> /s)	重现期(年)
1	1000	1000	22,880	1000	21,570	550
2	1000	500	22,250	750	20,560	350
3	500	1000	21,960	660	20,820	400
4	500	500	21,320	500	19,810	250
5	200	200	19,230	200	17,580	100
6	200	100	18,580	150	16,570	60
7	100	100	17,620	100	15,950	50
8	100	50	16,960	75	14,930	30
9	50	100	16,630	65	15,380	40
10	50	50	15,970	50	14,370	25



**Figure 5. Joint probability density for different combinations of Shuibuya reservoir and interval basins**

**图 5. 不同地区组成方案水布垭水库断面和区间流域洪水联合概率密度**

1) 当水布垭水库断面和区间流域发生同频率洪水时, 随着洪水重现期的增大, 联合概率密度值逐渐增加。说明水布垭水库和区间流域同时遭遇大洪水比同时发生小洪水的几率要大。这是由水布垭水库断面和区间洪水的尾部相关性决定的。对于设计洪水而言, 一般具有上尾相关性。选用 Gumbel-Hougaard Copula 构建水布垭水库断面和区间洪水联合分布, 其上尾相关系数  $\lambda_U = 2 - 2^\theta = 0.554$ , 下尾相关系数  $\lambda_L = 0$  [14]。由于  $\lambda_U > \lambda_L$ , 故水布垭水库和区间流域一起发生大洪水的可能性比一起发生小洪水的可能性要大很多。

2) 当水布垭水库洪水重现期一定时, 洪水组成方案的联合概率密度随着区间洪水重现期的不同而不同。图 6(a)和 6(b)分别给出了当水布垭水库发生千年一遇和百年一遇洪水时的联合概率密度。可知, 水布垭水库发生千年一遇洪水时, 可能遭遇各种重现期的区间洪水, 从 50 年到 1000 年一遇遭遇的几率逐渐增大; 水布垭水库发生百年一遇洪水时, 也可能遭遇各种重现期的区间洪水, 从 50 年到 1000 年一遇遭遇的几率先增大后减小, 150 年达到最大。可知拟定方案中的(1000, 1000)和(100, 150)分别为最可能发生的水布垭水库和区间流域洪水重现期组合。

水布垭水库发生不同重现期洪水时, 区间最可能发生的洪水重现期及区间流域发生最可能重现期洪水和相同重现期洪水的联合概率密度列于表 4。结果表明, 同频率方案的联合概率密度值比最可能方案的联合概率密度值略小。

3) 当区间流域洪水重现期一定时, 洪水组成方案的联合概率密度随着水布垭水库洪水重现期的不同而不同。水布垭水库发生不同重现期洪水时, 区间最可能发生的洪水重现期及水布垭水库发生最可能重现期洪水和同重现期洪水的联合概率密度列于表 5。结果表明, 同频率方案的联合概率密度值比最可能方案的联合概率密度值略小, 拟定方案中的(1000, 1000)为最可能发生的水布垭水库和区间流域洪水重现期组合。

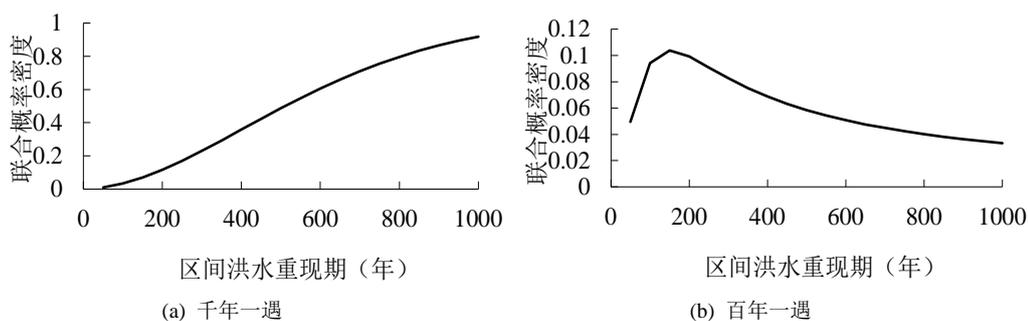


Figure 6. Joint probability density with 1000 or 100-year design floods at Shuibuya reservoir

图 6. 水布垭水库分别发生千年或百年一遇设计洪水时的联合概率密度

Table 4. Most likely interval basins flood return periods and joint probability density

表 4. 区间洪水最可能重现期及联合概率密度

水布垭重现期(年)	区间最可能重现期(年)	最可能方案	同频率方案
1000	1000	0.9195	0.9195
500	750	0.5105	0.4632
200	300	0.2062	0.1872
100	150	0.1038	0.0942
50	100	0.0498	0.0472

**Table 5. Most likely Shuibuya reservoir flood return periods and joint probability density**  
**表 5. 水布垭水库洪水最可能重现期及联合概率密度**

区间重现期(年)	水布垭最可能重现期(年)	最可能方案	同频率方案
1000	1000	0.9195	0.9195
500	750	0.5095	0.4632
200	300	0.2058	0.1872
100	150	0.1035	0.0942
50	100	0.0495	0.0472

## 5. 结论

本文以清江流域为例，分析比较了水布垭水库对隔河岩断面防洪作用的影响，主要结论如下：

1) 各洪水地区组成方案的计算结果表明，水布垭水库建成蓄水后显著地提高了隔河岩断面的防洪能力。水布垭水库流域洪水的比例越大，对隔河岩断面的削峰作用就越大。

2) 若水布垭水库和区间流域均发生千年一遇洪水，经水布垭水库的调蓄作用，隔河岩断面的洪峰流量为 21,570 m<sup>3</sup>/s，仅相当于天然情况下 550 年一遇的洪水。

3) 水布垭水库和区间流域洪水地区组成的联合概率密度曲线表明，水布垭水库和区间流域发生同频率洪水组成方案的联合概率密度值比最可能洪水组成方案略小，即清江发生全流域同频率洪水的可能性较大。

## 基金项目

国家自然科学基金(51190094)。

## 参考文献 (References)

- [1] 宋德敦, 雷时忠, 胡四一, 等. 梯级水库下游洪水情势的概率描述[J]. 水文, 1987, 1: 1-8.  
SONG Dedun, LEI Shizhong, HU Siyi, et al. The flood situation describing by the probability at downstream cascade reservoirs. Journal of China Hydrology, 1987, 1: 1-8. (in Chinese)
- [2] 李天元, 郭生练, 李妍清, 等. 梯级水库设计洪水方法及研究进展[J]. 水资源研究, 2012, 1(2): 14-20.  
LI Tianyuan, GUO Shenglian, LI Yanqing, et al. Review of design flood estimation methods for cascade reservoirs. Journal of Water Resources Research, 2012, 1(2): 14-20. (in Chinese)
- [3] 水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范(SL44-2006)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.  
Ministry of Water Resources. Design flood calculation regulating for water resources and hydropower engineering. Beijing: Hydropower and Electrical Press, 2006. (in Chinese)
- [4] 谭维炎, 黄守信. 水库下游城市防洪风险的估算[J]. 水利学报, 1983, 7: 37-40.  
TAN Weiyan, HUANG Shouxin. Flood risk estimation for city at reservoir downstream. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 7: 37-40. (in Chinese)
- [5] 王锐琛, 陈源泽, 孙汉贤. 梯级水库下游洪水概率分布的计算方法[J]. 水文, 1990, 1: 1-8.  
WANG Ruichen, CHEN Yuanze and SUN Hanxian. Flood distribution estimation at downstream cascade reservoirs. Journal of China Hydrology, 1990, 1: 1-8. (in Chinese)
- [6] 闫宝伟, 郭生练, 郭靖, 等. 基于 Copula 函数的设计洪水地区组成研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 60-65.  
YAN Baowei, GUO Shenglian, GUO Jing, et al. Regional design flood composition based on Copula function. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 60-65. (in Chinese)
- [7] 栗飞, 郭生练, 李天元, 等. 不连续序列的设计洪水地区组成方法研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(5): 47-49.  
LI Fei, GUO Shenglian, LI Tianyuan, et al. Design flood region composition method by considering historical information. Water Resources and Power, 2011, 29(5): 47-49. (in Chinese)
- [8] 刘章君, 郭生练, 李天元, 等. 考虑水库调蓄影响的设计洪水计算方法[J]. 水资源研究, 2012, 1(4): 211-216.

- LIU Zhangjun, GUO Shenglian, LI Tianyuan, et al. Design flood estimation at downstream site by considering the impact of upstream reservoir regulation. *Journal of Water resources Research*, 2012, 1(4): 211-216. (in Chinese)
- [9] 刘章君, 郭生练, 李天元, 等. 基于 Copula 函数的梯级水库设计洪水地区组成研究[J]. *水资源研究*, 2014, 3(2): 124-135.  
LIU Zhangjun, GUO Shenglian, LI Tianyuan, et al. Regional flood composition of cascade reservoirs based on copula function. *Journal of Water resources Research*, 2014, 3(2): 124-135. (in Chinese)
- [10] 宁磊, 胡昌盛, 游中琼. 溪洛渡、向家坝水电站对长江中下游防洪作用分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2009, 42(4): 443-446.  
NING Lei, HU Changsheng and YOU Zhongqiong. Analysis on flood prevention fuction of the Xiluodu and Xiangjiaba Reservoirs for middle and lower reaches of Yangtze River. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(4): 443-446. (in Chinese)
- [11] 水利部长江水利委员会水文局, 水利部南京水文水资源研究所. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.  
Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Nanjing Institute of Hydrology and Water Resources. Handbook of calculation design flood for water resources and hydropower projects. Beijing: Hydropower and Electrical Press, 2001. (in Chinese)
- [12] 郭生练, 闫宝伟, 肖义, 等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. *水文*, 2008, 28(3): 1-7.  
GUO Shenglian, YAN Baowei, XIAO Yi, et al. Application of Copula function in multivariate hydrological analysis and estimation. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(3): 1-7. (in Chinese)
- [13] NELSEN, R. B. An introduction to Copulas (2nd edition). New York: Springer, 2006.
- [14] 闫宝伟, 郭生练, 陈璐, 等. Copula 函数在水文计算中的适用性分析[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(3): 85-93.  
YAN Baowei, GUO Shenglian, CHEN Lu, et al. Applicability of Copula function in hydrological estimation. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(3): 85-93. (in Chinese)