

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20180341

# 基于二次重现期的桂平航运枢纽水闸设计洪水组合研究

甘富万<sup>1</sup>, 张华国<sup>1</sup>, 黄宇明<sup>1</sup>, 肖良<sup>1</sup>, 胡秀英<sup>2</sup>

(1.广西大学土木建筑工程学院,广西 南宁 530004;2.南宁学院土木与建筑工程学院 广西 南宁 530220)

**摘要:**干、支流交汇处支流上的水闸不仅受到支流洪水的影响还受到干流洪水顶托的影响,设计水位的推求需要考虑干支流洪水之间的相关性和同时发生的概率。以桂平航运枢纽水闸为例,采用Copula函数构建干流浔江与支流郁江洪水的联合分布,对比分析同现重现期和二次重现期差异,分别根据同频率和最可能组合经调洪演算推求水闸防洪水位。研究表明:浔江、郁江洪水之间存在较弱的正相关性,Clayton Copula能较好模拟浔江、郁江洪水的联合分布;二次重现期的浔江、郁江洪水流量均大于同现重现期,因此二次重现期更安全。同频组合经调洪演算推求桂平航运枢纽水闸防洪水位要高于最可能组合,最可能组合偏重于较大的郁江流量,浔江流量设计值偏小。

**关键词:**水闸;Copula 函数;二次重现期;设计组合;调洪

**中图分类号:**TV122.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2020)02-0048-07

干支流洪水遭遇下的水利防洪工程设计,通常以特定的支流洪水遭遇干流多年平均流量作为设计洪水组合<sup>[1]</sup>,进行调洪演算推求防洪设计水位。这种设计方法比较主观,缺乏理论依据,一定程度上忽略了干支流洪水间的相关性及同时发生的概率。近年来,Copula<sup>[2]</sup>函数广泛地应用于多变量的水文频率分析。基于Copula 函数的水文遭遇研究,受到许多学者的关注,如洪水遭遇<sup>[3]</sup>、雨洪遭遇<sup>[4]</sup>、雨潮遭遇<sup>[5-6]</sup>,高潮位潮差遭遇<sup>[7]</sup>等。

水利工程的防洪标准往往采用设计洪水的重现期来表示,重现期越大,防洪标准越高,工程抵抗洪水风险的能力越强。基于联合概率的重现期,国内主要分为联合重现期和同现重现期<sup>[8]</sup>。对于上述遭遇事件,主要关注两变量均大于某特征值的情况。因此,在防洪潮设计以及干支流洪水遭遇下的水利工程设计中,同现重现期对于防洪工作的意义更重大,如刘学<sup>[7]</sup>采用同现重现期推求设计潮位过程线。联合重现期和同现重现期在安全事件与危险事件的判定上两者均存在局限性<sup>[8-9]</sup>,为此,Salvadori<sup>[10]</sup>等提出了二次重现期的概念。在干支流洪水遭遇下的水闸设计中,需明确给出具体的设计

洪水组合值,进而经过调洪演算推求防洪水位。任一给定二变量重现期,理论上有无数种水闸设计洪水组合,对应的调洪水位也可能有无数个,从而采用同一个重现期的不同洪水组合进行设计得到的水闸防洪能力不同。因此,如何合理选取重现期所对应的设计洪水组合值成为难点。

本文以桂平航运枢纽水闸为例,通过采用Copula函数构建干流浔江与支流郁江洪水的联合分布,对比分析干支流洪水遭遇下同现重现期和二次重现期的差异,采用同频组合和最可能组合进行调洪演算推求桂平航运枢纽水闸的防洪水位,探讨二变量重现期类型和设计洪水组合值选取方法对干支流洪水遭遇下水利工程防洪设计的影响。

## 1 Copula 函数

干支流交汇处的水闸设计需要考虑干支流洪水的影响,是一个多变量的联合分布问题。Copula 函数是连接多变量联合分布及其一维边缘分布的函数,假设 $X_{干}$ 和 $Y_{支}$ 分别表示干流和支流的洪水流量,则二维Copula 函数为:

收稿日期:2018-09-05

基金项目:广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA138042);南宁学院科研基金资助项目(2017XJ24)

作者简介:甘富万(1981-),男,广西北流人,博士,副教授,主要从事洪水调度研究。E-mail:gxugfw@126.com

通讯作者:胡秀英(1990-),女,广西桂林人,讲师,硕士,主要从事河流数值模拟研究。E-mail:954203533.com

$$F(x_{干}, y_{支}) = C_\theta(F_x(x_{干}), F_y(y_{支})) = C_\theta(u, v) \quad (1)$$

式中: $F(x_{干}, y_{支})$ 为干、支流洪水流量的联合分布; $u=F_x(x_{干})$ , $v=F_y(y_{支})$ 分别为不超越概率; $\theta$ 为Copula函数的参数。

Clayton Copula 属于 Archimedean Copula 函数,能够描述变量间的正相关性,故可用 Clayton Copula 函数求联合概率,其表达式为<sup>[10]</sup>:

$$C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta} \quad (2)$$

## 2 二变量重现期

### 2.1 同现重现期

水利工程中常用重现期来描述水文事件的严重性,设计标准常以重现期表示。二变量联合分布概率,理论上有很多组合。就干支流洪水遭遇下的水闸设计而言,通常关注干、支流洪水流量均大于特定值的事件。因此,干、支流洪水流量的超阈概率分别为 $\bar{u}=F_x(x_{干})=1-F_x(x_{干})$ 和 $\bar{v}=F_y(y_{支})=1-F_y(y_{支})$ , $\hat{C}$ 为生存 Copula 函数,则危险事件发生的概率为:

$$P(X_{干}>x_{干}, Y_{支}>y_{支}) = \hat{C}(\bar{u}, \bar{v}) = 1-u-v+C(u, v) \quad (3)$$

对应的同现重现期 $T_{and}$ 为:

$$T_{and} = \frac{1}{\hat{C}(\bar{u}, \bar{v})} \quad (4)$$

### 2.2 二次重现期

Salvadori<sup>[11]</sup>研究表明,同现重现期缩小了危险区域,使得推求的洪水设计值偏小,为此提出了二次重现期。基于同现重现期 $T_{and}$ 的二次重现期的核心思想是通过生存联合概率等值线 $\hat{C}(\bar{u}, \bar{v})=t$ 作为临界标准,将多维极值事件组合转化为单维分布,使得同一防洪标准对应的危险区是唯一的。满足 $\hat{C}(\bar{u}, \bar{v})=t$ 的 $(u, v)$ 洪水组合值形成的曲线 $G_t$ 将二维的实数空间划分为3部分:超临界区,临界区,亚临界区。二次重现期即事件发生在超临界区域的平均间隔长度。根据生存 Kendall 测度的定义,二次重现期对应的超阀联合分布概率,可以用基于 $\hat{C}(\bar{u}, \bar{v})$ 的生存 Kendall 分布函数 $K_c(t)$ 来表示<sup>[9]</sup>,即:

$$K_c(t) = P(\hat{C} \leq t) \quad (5)$$

基于同现重现期(“and”)所对应的二次重现期公式为:

$$T_k = \frac{1}{P\{\hat{C}(\bar{u}, \bar{v}) \leq t\}} = \frac{1}{K_c(t)} \quad (6)$$

由此,相同二次重现期的任意 $(u, v)$ 组合都具有相

同的安全与危险域,相对于同现重现期 $T_{and}$ ,二次重现期的定义更加严谨。两种二变量重现期定义、危险区域划分和计算公式对比如表1所示。由式(6)可看出, $T_k$ 的求解取决于 $\hat{C}(\bar{u}, \bar{v})$ 的选取和临界值 $t$ 的确定,为了计算 $T_k$ ,首先要确定 $t$ 。这里由于 $t$ 不存在解析解,无法通过公式推导的途径求解,因此本文通过随机模拟途径进行求解<sup>[9]</sup>,即:

$$K_c(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\hat{C} \leq t) \quad (7)$$

式中: $m$ 为随机模拟 $(u, v)$ 组合数,本文 $m$ 的取值为 $10^5$ , $t \in (0, 1)$ 。

表1 二变量重现期定义、危险区域划分和计算公式

Table1 The two-variable return period definition, risk area division and calculation formulas

二变量重现期	定义	危险区域划分	计算公式
同现重现期	干支流洪水流量同时超过某一特定设	某一特定设	$T_{and} = \frac{1}{\hat{C}(u, v)}$
二次重现期	干支流洪水流量同时超过某一特定值	计值组合,不唯一	$T_k = \frac{1}{P\{\hat{C}(\bar{u}, \bar{v}) \leq t\}}$

## 3 设计组合值

单变量的洪水事件,其重现期与设计洪峰是一一对应的关系,以该洪峰值进行调洪演算,可以使得设计洪水位达到防洪标准的要求。在干、支流交汇处支流上的水闸同时受到干支流洪水的作用,是二变量洪水组合问题,任一给定的二变量重现期,理论上有很多种设计洪水组合。在干支流洪水遭遇下的防洪工程设计中,需要明确出具体的干支流洪水设计组合值,从而进行调洪演算推求设计水位。目前较为常用的具有统计基础的两种组合分别是同频组合<sup>[12]</sup>和最可能组合<sup>[9]</sup>。同频组合是在考虑干支流洪水相关性的基础上提出的,即在满足干支流洪水重现期等于 $T_{and}$ 、 $T_k$ 的前提下,求解式(4)、(6)中 $u=v$ 时的解。最可能组合在满足防洪标准的条件下, $f(u, v)$ 取最大值时的组合模式,即:

$$\begin{aligned} (u_m, v_m) &= \arg \max f(u, v) \\ f(u, v) &= c(u, v)f(x)f(y) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $(u_m, v_m)$ 为该方法选取的干支流洪水设计组合值; $c(u, v)$ 为干支流洪水联合分布概率密度; $f(x), f(y)$ 分别为干、支流洪水流量的概率密度函数。

## 4 应用实例

桂平航运枢纽处于郁江支流与浔江干流的汇合口附近的郁江段,受到郁江和浔江洪水的共同影响,是一个多洪水作用下的水利枢纽工程(见图1)。郁江洪水以贵港水文站为控制站,浔江洪水以大湟江口水文站为控制站,在干支流洪水遭遇设计选样过程中有两种方法:(1)以浔江年最大洪水遭遇相应郁江洪水,记为A;(2)以郁江年最大洪水遭遇相应浔江洪水,记为B。

由于气候变化和人类活动的影响,可能会引起水文极值系列的非平稳性,将年最大洪峰流量和5点滑动平均过程线绘制在同一个坐标系,如图2所示。由图2可知,大湟站的洪水序列存在着上升趋势,贵港站的洪水序列存在下降趋势。选定显著水平为0.05,采用

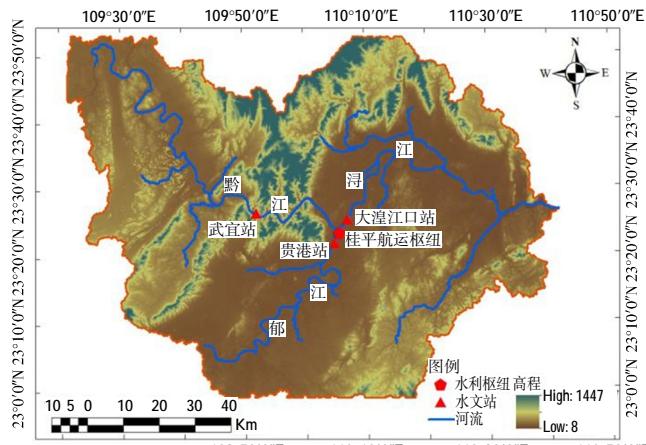


Fig.1 The geographical location of the study area

Mann-Kendall 趋势方法<sup>[13]</sup>对各洪水序列进行趋势分析,得出大湟江口站和贵港站的年最大洪峰流量统计检验值  $Z_c$  绝对值都小于 1.96(见表2),未能通过置信度 95% 的显著性检验,表明大湟江口站和贵港站年最大洪峰的上升和下降趋势不显著。采用基于 Hurst 系数的变异性检验方法<sup>[14]</sup>对大湟江口站和贵港站的年最大洪峰流量序列进行变异诊断,选取置信水平  $\alpha=0.05, \beta=0.02$  对应的临界值分别为  $h_\alpha=0.667, h_\beta=0.693$  计算得到两水文站年最大洪峰流量 Hurst 系数分别为  $H_{\text{大湟}}=0.518, H_{\text{贵港}}=0.589$ , 两者都小于  $h_\alpha$ , 据此可推断出大湟江口和贵港水文站的年洪最大洪峰序列均不存在变异。

### 4.1 边缘分布

对于洪水序列来说, P-III 分布曲线是适用性较好的线型,因此本次的分布线型均采用 P-III 分布,它的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (9)$$

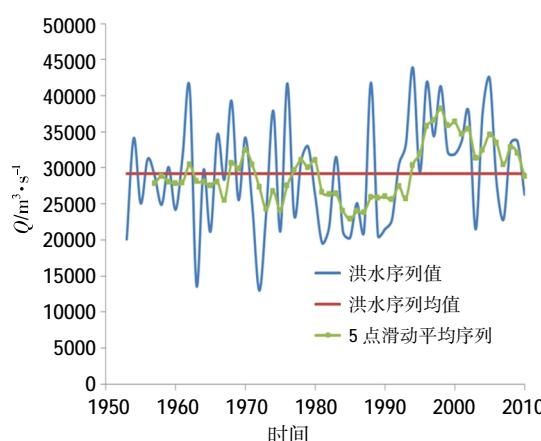
式中: $\alpha, \beta, a_0$  为统计参数,采用稳健的线性矩法对其进行估计,采用 K-S 检验来评价边缘分布是否符合 P-III 分布。两种选样方法的边缘分布参数估计值及

表2 M-K趋势检验结果

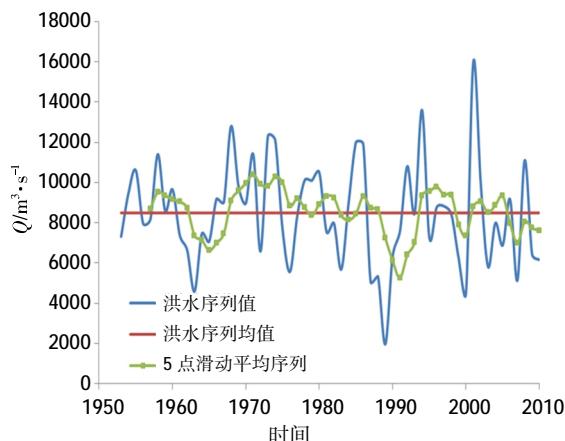
Table2 The M-K trend test results

所处流域	站点	均值/ $m^3 \cdot s^{-1}$	$Z_c$	趋势	显著性
浔江	大湟江口	29 200	1.53	上升	不显著
郁江	贵港	8490	-1.15	下降	不显著

注:置信度为 95% 的的临界值分别为 1.96。



(a)大湟江口站年最大洪峰流量



(b)贵港站年最大洪峰流量

图2 各洪水序列及其5点滑动平均过程线

Fig.2 The flood serie and its 5-point sliding average processes

K-S 检验值如表 3 所示。由表 3 可知两种选样方法变量的边缘分布检验值均小于临界值, 即通过优度拟合检验。

#### 4.2 联合分布

分别计算浔江年最大洪峰流量与相应郁江流量的相关系数  $\tau_A$  和郁江年最大洪峰流量与相应浔江流量的相关系数  $\tau_B$  ( $\tau_A=0.1585$ ,  $\tau_B=0.2244$ ), 表明浔江郁江洪水之间相关性较弱, B 选样略高于 A 选样方法。四种 Archimedean Copulas 的参数值  $\theta$ , AIC 值, OLS 值计算结果如表 4 所列。由表 4 可知两种选样方法中 AIC 值和 OLS 值最小的 Copula 函数均为 Clayton Copula。图 3 显示, 样本 A 和样本 B 的 Clayton Copula 理论概率与经验概率的拟合关系非常好, 均方误差值小, 分别

为 0.00247 和 0.00043。

如图 4(a)所示, 在同现重现期等值线图的左半部分, B 选样的等值线整体向上移动, 在右下部分, A 选样和 B 选样的等值线基本重合。这说明了当干流浔江设计流量较小时(小于约  $28\ 000\text{m}^3/\text{s}$ ), 以同现重现期作为防洪标准, B 选样的支流郁江设计流量更大, 因此 B 选样适用于干流流量较小, 支流流量较大的情况。图 4(b)显示, A 选样二次重现期的等值线基本上整体向上移动。相同的设计洪水组合时, B 选样的二次重现期大于 A 选样。因此, 以二次重现期为防洪标准时, A 选样的干、支流洪水流量设计值更安全。图 5 显示, 无论 A 选样还是 B 选样, 相对于同现重现期, 二次重现期都整体向右上移动, 表明相同的干、支流洪水流量设计组合值, 二次重现期均要小于同现重现期。也就是说, 对于干支流洪水遭遇下的桂平航运枢纽水闸防洪设计而言, 当干流浔江流量较大时, 阀址水位对干流浔江洪水更敏感, A 选样相对于 B 选样更安全, 以二次重现期为防洪标准比同现重现期更安全。

#### 4.3 干支流洪水遭遇联合设计

由图 6 可知, 对于给定一个超阈概率, 有无数个

表3 边缘分布参数值及检验结果

Table3 The marginal distribution parameter values and test results

变量	选样方法	$\alpha$	$\beta$	$a_0$	检验值	临界值
干流浔江流量	A	6.57	0.0004	9200	0.166	0.179
	B	5.41	0.0003	0	0.049	0.179
支流郁江流量	A	2.78	0.0005	0	0.087	0.179
	B	3.40	0.0006	4071	0.048	0.179

表4 各Copula函数的 $\theta$ 、AIC、OLS值

Table4 The values of  $\theta$ , AIC and OLS of each Copula function

选样	函数名字	G-H Copula	Clayton Copula	AMH Copula	Frank Copula
A 选样	参数值 $\theta$	1.189	0.377	0.592	1.450
	AIC 值	-334.26	-346.26	-342.73	-339.52
	OLS 值	0.0424	0.0397	0.0399	0.0497
B 选样	参数值 $\theta$	1.289	0.579	0.775	2.100
	AIC 值	-422.10	-447.83	-439.79	-427.89
	OLS 值	0.0258	0.0207	0.02218	0.02458

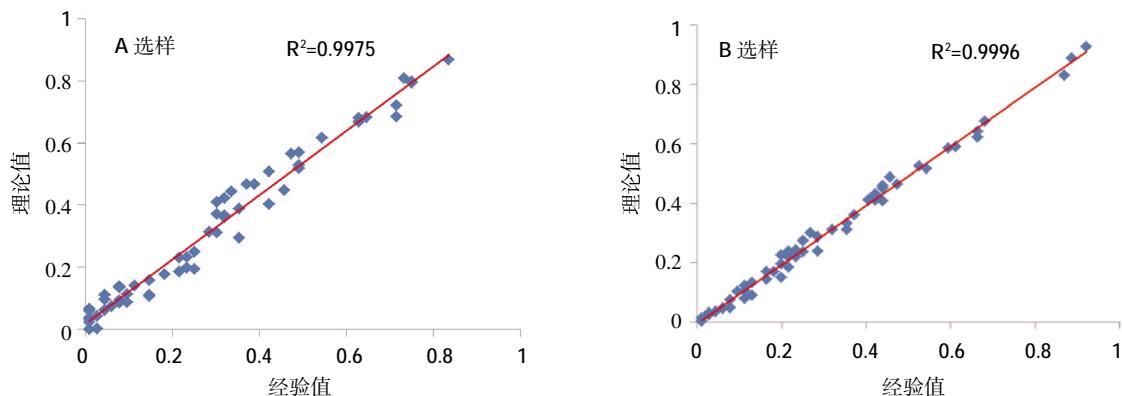


图3 Clayton Copula 的理论分布与经验分布拟合

Fig.3 The theoretical distribution and empirical distribution fitting based on Clayton Copula

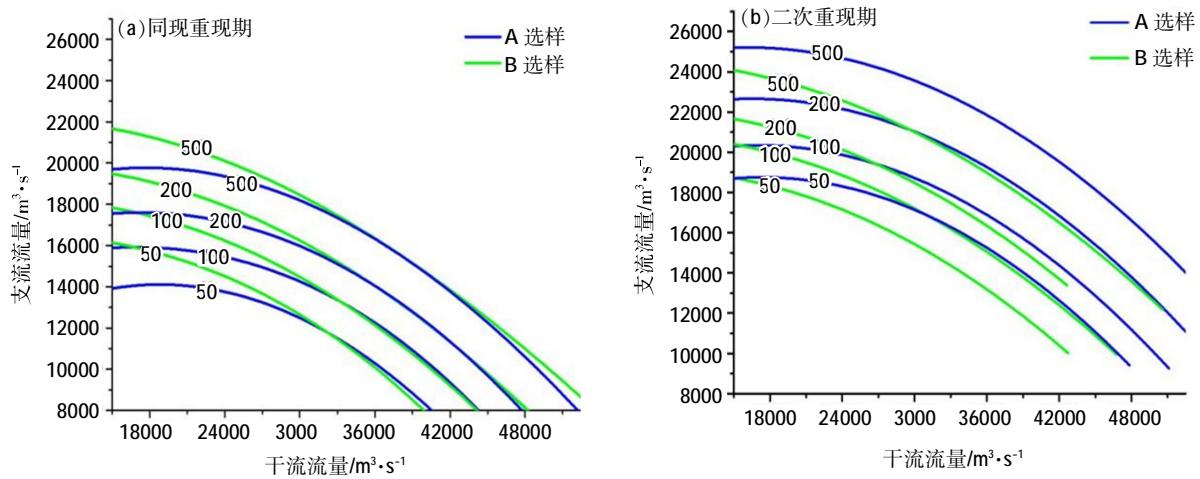


图4 相同二变量重现期两种不同选样方法对比

Fig.4 The comparison between the two different sampling methods for the same bivariate return period

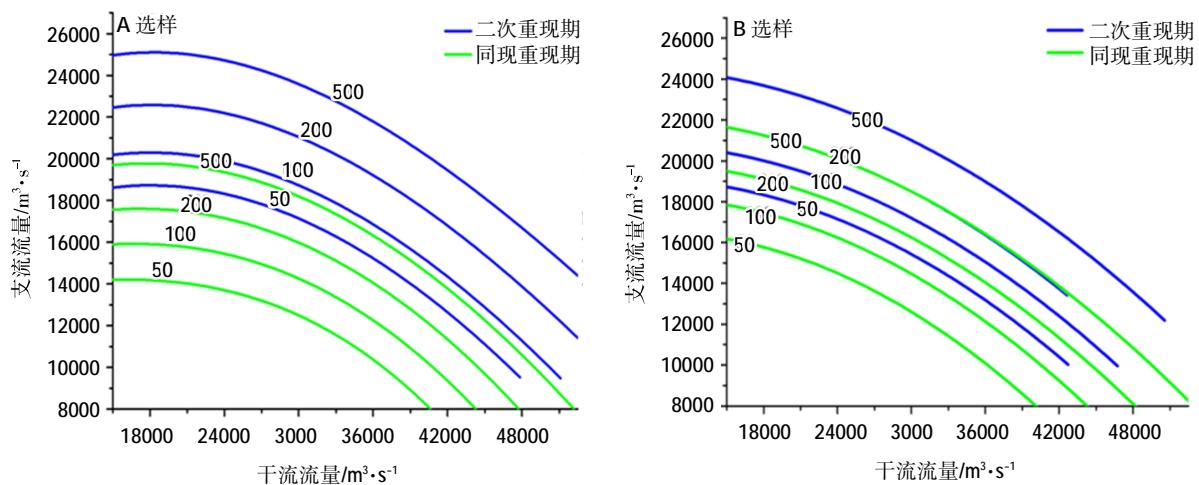


图5 相同选样两种不同二变量重现期对比

Fig.5 The comparison between the two variable return periods for the same sampling

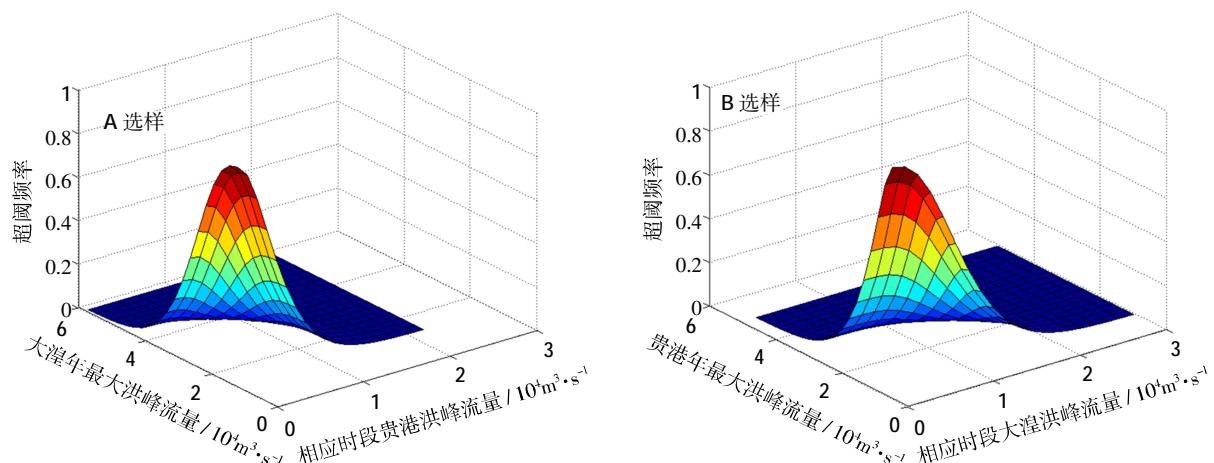


图6 干支流洪水超阈联合分布概率图

Fig.6 The joint distribution probability of the floods over threshold from the mainstream and tributaries for sample A and sample B

水闸设计洪水组合与之相对应,如何选取具体的洪水组合进行调洪演算推求水闸的防洪设计水位是个难点。下面主要讨论的是同频组合和最可能组合这两种组合的情况。给定二变量重现期 50a、100a、200a、500a 对应设计洪水组合值,按照桂平航运枢纽的调洪规则<sup>[15]</sup>,经调洪演算得到桂平航运枢纽水闸的防洪水位(见表5)。

同频组合作为桂平航运枢纽水闸设计洪水组合时,二次重现期的浔江、郁江洪水流量均明显大于同现重现期的浔江、郁江洪水流量,它相应的防洪水位均比同现重现期高约 1m 左右。**A** 选样同现重现期和二次重现期的浔江流量均大于 **B** 选样, 郁江流量均小于 **B** 选样, 但调洪演算结果均是 **A** 选样的水位高于 **B** 选样, 其主要的原因是由于干流浔江的天然来水量大, 发生年最大洪水时的洪峰流量大于支流郁江的年最大洪峰流量, 导致位于支流上干流入汇口处桂平航运枢纽的闸址水位对干流浔江洪水更加敏感, 受到干流浔江洪水的顶托作用更明显。

最可能组合作为桂平航运枢纽水闸设计洪水组合时,该组合显著的特征是干流浔江流量相对较小, 支流郁江流量较大, 这种组合适用于支流来水量较大, 支流洪水对坝址水位影响更大的情况。对于桂平航运枢纽水闸来说, 闸址水位受到支流郁江洪水影响相对较小, 因而该组合的调洪水位会偏小。因此在主要考虑干流浔江洪水对闸址水位影响的桂平航运枢纽水闸设计

中, 建议采用二次重现期作为防洪标准, 以同频组合作为水闸的设计洪水组合经调洪演算推求防洪水位。

## 5 结论

(1)浔江郁江洪水之间存在较弱的正相关性, Clayton Copula 能较好模拟浔江郁江洪水的联合分布。

(2)干支流洪水遭遇下的桂平航运枢纽水闸防洪设计中, 浔江年最大洪水遭遇相应郁江洪水的选样更安全, 以二次重现期为防洪标准比同现重现期更安全。

(3)同频组合经调洪演算推求桂平航运枢纽水闸防洪水位要高于最可能组合, 最可能组合偏重于较大的郁江流量, 浔江流量设计值偏小。

## 参考文献:

- [1] 何来兴,梁英,李柳沆,等.南宁市横县东安水闸除险加固工程初步设计报告[R].南宁:广西南宁市水利电力设计院, 2012. (HE Laixing, LIANG Ying, LI Liuhang, et al. Preliminary design report on the reinforcement project of Dong'an sluice in Hengxian county, Nanning [R]. Nanning: Nanning Water Conservancy and Electric Power Design Institute, 2012. (in Chinese))
- [2] Sklar A. Fonctions de repartition an dimensions et leurs marges [J]. Universite Paris,1959,8:229-231
- [3] 陈璐,郭生练,张洪刚,等.长江上游干支流洪水遭遇分析[J].水科学进展, 2011,22(3):323-330. (CHEN Lu, GUO Shenglian, ZHANG Honggang, et al. Flood coincidence probability analysis for the upstream Yangtze River and its tributaries [J]. Advances in Water

表5 干支流洪水遭遇设计组合值及调洪演算结果  
Table5 The results of the flood combination design and flood routing for the mainstream and tributaries

选样	重现期/a	同频组合				最可能组合			
		u=v	设计值(流量)		调洪 /m	干流浔江/m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	设计值	v	设计值
			干流浔江 /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	支流郁江 /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>					
<b>A</b> 选样	同现重现期	50	0.8767	36 036	9 504	39.99	0.5855	28 223	0.9614
		100	0.9134	37 955	10 510	40.74	0.5967	28 436	0.9803
		200	0.9390	39 771	11 478	41.14	0.6039	28 574	0.9900
	二次重现期	500	0.9616	42 063	12 722	41.99	0.6099	28 692	0.9960
<b>B</b> 选样	同现重现期	50	0.9521	40 982	12 133	41.84	0.7943	33 039	0.9885
		100	0.9657	42 607	13 021	42.16	0.8015	33 258	0.9939
		200	0.9790	44 912	14 299	42.86	0.8085	33 476	0.9976
		500	0.9873	47 192	15 581	43.51	0.8139	33 649	0.9992
	二次重现期	50	0.8837	31 562	12 829	38.50	0.7258	25 043	0.9491
		100	0.9185	33 995	13 824	39.51	0.7670	26 373	0.9706
		200	0.9428	36 316	14 793	40.40	0.8004	27 587	0.9831
		500	0.9640	39 230	16 035	41.48	0.8360	29 072	0.9919

- Science, 2011,22(3):323-330. (in Chinese))
- [4] 刘曾美,陈子燊. 区间暴雨和外江洪水位遭遇组合的风险[J]. 水科学进展, 2009,20(5):619-625. (LIU Zengmei, CHEN Zishen. Risk study of the bivariate encounter of interzone rainstorm and flood level of the outer river [J]. Advances in Water Science, 2009,20(5):619-625. (in Chinese))
- [5] 涂新军,杜奕良,陈晓宏,等. 滨海城市雨潮遭遇联合分布模拟与设计[J]. 水科学进展, 2017,28(1):49-58. (TU Xinjun, DU Yuliang, CHEN Xiaohong, et al. Modeling and design on joint distribution of precipitation and tide in the coastal city [J]. Advances in Water Science, 2017,28(1):49-58. (in Chinese))
- [6] 武传号,黄国如,吴思远. 基于 Copula 函数的广州市短历时暴雨与潮位组合风险分析[J]. 水力发电学报, 2014,33(2):33-40. (WU Chuanhao, HUANG Guoru, WU Siyuan. Risk analysis of combinations of short duration rainstorm and tidal level in Guangzhou based on Copula function [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(2):33-40. (in Chinese))
- [7] 刘学,诸裕良,孙波,等. 基于 Copula 函数推求设计潮位过程线[J]. 水利学报, 2014,45(2):243-247. (LIU Xue, ZHU Yuliang, SUN Bo, et al. Designing the tidal process line based on Copula function [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,45(2):243-247. (in Chinese))
- [8] 史黎翔,宋松柏. 基于 Copula 函数的两变量洪水重现期与设计值计算研究[J]. 水力发电学报, 2015,34(10):27-34. (SHI Lixiang, SONG Songbai. Research on two-variable flood return period and design value calculation based on Copula function [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015,34(10):27-34. (in Chinese))
- [9] 黄强,陈子燊. 基于二次重现期的多变量洪水风险评估 [J]. 湖泊科学, 2015,27(2):352-360. (HUANG Qiang, CHEN Zishen. Multivariate flood risk assessment based on the secondary return period [J]. Journal of Lake Science, 2015,27(2):352-360. (in Chinese))
- [10] 宋松柏,蔡焕杰,金菊良. Copulas 函数理论及其在水文中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. (SONG Songbai, CAI Huanjie, JIN Juliang. Copulas Function Theory and Its Application in Hydrology [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [11] Salvadori G, Michele C De, Durante F. On the return period and design in a multivariate framework [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011,15(11).
- [12] 李天元,郭生练,闫宝伟,等. 基于多变量联合分布推求设计洪水过程线的新方法[J]. 水力发电学报, 2013,32(3):10-14. (LI Tianyuan, GUO Shenglian, YAN Baowei, et al. Derivative design flood hydrograph based on trivariate joint distribution [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013,32(3):10-14. (in Chinese))
- [13] 陆阳,尹剑,邹逸江,等. 淮河流域近 50 年来气候变化及突变分析[J]. 世界科技研究与发展, 2016,38(4):814-820. (LU Yang, YIN Jian, ZOU Yijiang, et al. Analysis of climate change and mutation in Huaihe river basin during last 50 years [J]. World Science and Technology Research and Development, 2016,38(4):814-820. (in Chinese))
- [14] 谢平,雷红富,陈广才,等. 基于 Hurst 系数的流域降雨时空变异分析方法 [J]. 水文, 2008,(5):6-10. (XIE Ping, LEI Hongfu, CHEN Guangcai, et al. A spatial and temporal variation analysis method of watershed rainfall based on Hurst coefficient [J]. Journal of China Hydrology, 2008,(5):6-10. (in Chinese))
- [15] 甘富万,黄永俊,熊健,等. 基于 Copula 函数的桂平航运枢纽水闸设计洪水位[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016,41(1):284-290. (GAN Fuwan, HUANG Yongjun, XIONG Jian, et al. Design flood level of sluice of Guiping shipping hub based on Copula function [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016,41(1):284-290. (in Chinese))

## Study on Design Flood Combination of Guiping Shipping Hub Sluice Based on Secondary Return Period

GAN Fuwan<sup>1</sup>, ZHANG Huaguo<sup>1</sup>, HUANG Yuming<sup>1</sup>, XIAO Liang<sup>1</sup>, HU Xiuying<sup>2</sup>

(1. College of Civil Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. College of Civil Architectural Engineering , Nanning University, Nanning, 530220, China)

**Abstract:** The sluices at the intersection of the mainstream and tributaries are not only affected by tributary floods, but also affected by the backwater of the mainstream floods. The correlation between the mainstream and tributary floods and the probability of simultaneous occurrence should be taken into account in the calculation of the design water level. Taking Guiping shipping hub sluice as an example, this paper used Copula function to construct the joint distribution of floods in the rivers of Xunjiang (mainstream) and Yujiang (tributary), and analysed the difference between the co-occurrence return period and the secondary return period, then calculated the flood control level of the sluice according to the same frequency and most possible combination. The results show that there is a weak positive correlation between the Xunjiang and Yujiang floods, and Clayton Copula can better simulate the joint distribution of Xunjiang and Yujiang floods. The flood discharge of the rivers of Xunjiang and Yujiang in the secondary return period is larger than that in the co-occurrence return period, so that the secondary return period is safer. The flood control level of the Guiping shipping hub sluice obtained by using flood regulation calculation with the same frequency combination is higher than the most likely combination. And the most likely combination focuses on the larger Yujiang discharge, while the Xunjiang discharge design value is smaller.

**Key words:** sluice; Copula function; secondary return period; design combination; flood regulation