

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0125

甘富万,张华国,黄宇明,等.干、支流洪水作用下洪水组合样本的选择对防洪设计的影响[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):180-187. GAN F W, ZHANG H G, HUANG Y M, et al. Influences of sample selection of synthetic floods from trunk stream and tributary on flood control design[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5):180-187. (in Chinese)

干、支流洪水作用下洪水组合样本的选择 对防洪设计的影响

甘富万^{1,2},张华国^{1,2},黄宇明^{1,2},覃丽娜^{1,2},高扬^{1,2},肖良^{1,2}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004)

摘要:不同的洪水组合样本反映的干、支流洪水变量相关性是不一样的,对防洪设计存在着一定的影响。以桂平航运枢纽水闸为例,运用 Copula 函数构建干流浔江年最大洪峰与支流郁江年最大洪峰、浔江年最大洪峰与相应时段郁江流量、郁江年最大洪峰与相应时段浔江流量 3 种洪水组合样本的联合分布,在此基础上随机模拟洪水组合经调洪计算推求防洪水位,对比这 3 种洪水组合样本对防洪设计的影响。研究表明:3 种洪水组合样本联合分布拟合最佳的 Copula 函数均为 Clayton Copula;浔江年最大洪峰与相应郁江洪峰流量组合样本得到的防洪水位更加合理,既不高估洪水风险也不会低估洪水风险,在经济性与安全性之间取得了较好地平衡,该组合样本推求的 100 a 一遇防洪水位为 43.54 m,相比采用经验方法确定的原设计洪水位 43.48 m 更安全。Copula-Monte Carlo 法考虑了干、支流洪水间相关性以及洪水组合与调洪耦合的关系,设计结果更合理。

关键词:洪水组合;样本选择;洪水相关性;调洪;Copula-Monte Carlo;防洪设计

中图分类号:TV122.3 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influences of sample selection of synthetic floods from trunk stream and tributary on flood control design

GAN Fuwan^{1,2}, ZHANG Huaguo^{1,2}, HUANG Yuming^{1,2}, QIN Lina^{1,2}, GAO Yang^{1,2}, XIAO Liang^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety, Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The correlation of variables of flood from trunk stream with those from a tributary varies with sample selection of synthetic floods, which has a certain impact on flood control design. In the case study of Guiping Shipping Hub, this paper applies Copula function to construct the joint distribution of three samples of synthetic floods, the annual flood peak of the trunk stream, Xunjiang, and that of the tributary, Yujiang, the annual flood peak of Xunjiang and the flow of Yujiang in the corresponding period, and the annual flood peak of Yujiang and the flow of Xunjiang in the corresponding period. Influences of three samples of synthetic floods on flood control design are evaluated by applying stochastic simulation of synthetic floods and derivation of flood control level through flood routing. The results show that the optimum Copula function fitted by the joint

收稿日期:2018-12-19 修回日期:2019-04-23 网络出版时间:2019-04-30

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190428.1516.006.html>

基金项目:国家自然科学基金(51178124);广西自然科学基金(2018GXNSFAA138042);广西高校中青年教师基础能力提升项目(2018KY0025)

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

通信作者:肖良(1985—),男,广西龙州人,讲师,博士,主要从事水文地质研究。E-mail:xiaoliang850425@sina.com

distribution of three samples of synthetic floods is Clayton Copula. The flood control level derived according to the synthetic flood of annual flood peak of Xunjiang and the flow of Yujiang in the corresponding period is more reasonable, neither overestimating nor underestimating flood risk, thus achieving a better balance between economy and safety. The derived flood control level for 100-year return period flood is 43.54 m, safer than the original design flood level determined by empirical method. By taking into account the correlation of flood from trunk stream with that from a tributary and the coupling relationship between synthetic flood and flood routing, the Copula-Monte Carlo method adopted in this paper is considered to be more applicable to the flood control design.

Key words: flood synthesis; sample selection; flood correlation; flood routing; Copula-Monte Carlo; flood control design

随着我国经济的高速发展,越来越多沿江城市在穿越河流的支流入汇处以及越来越多的沿海城市在入海河流、渠道入海口附近修建了大量的水闸,这些水闸同时起着抵御外江洪水(或潮水)倒灌和保证城市排涝及生态需水等多重作用,这些水闸在设计过程中必须要考虑洪水组合或洪潮组合的情况。干、支流交汇口处支流上的水闸防洪设计不仅要考虑支流洪水的直接影响还要考虑干流洪水顶托的影响,现行设计时多是根据经验组合进行调洪计算,如南宁市横县东安水闸设计过程中即采用特定的支流洪水遭遇干流的多年平均流量作为设计洪水组合^[1],该方法存在一定主观性,缺乏科学依据,没有充分地考虑干、支流洪水间的相关性。防洪标准^[2]是防洪保护对象要达到防御洪水的标准。在单一洪水作用下的水利工程以设计洪峰流量经调洪演算推求防洪设计水位基本上可满足工程防洪设计要求。在干、支流洪水或洪潮共同作用时,水利工程设计洪水的推求需要考虑干、支流洪水变量间的相关性或洪潮的相关性,是一个多变量的防洪设计问题。近年来,Copula 函数能够很好地描述多变量间的相关性结构,如张妞等^[3]利用 Copula 函数对黄河宁夏段干、支流洪水地区组成进行分析,认为青铜峡水库入库设计洪水若忽略干、支流洪水遭遇是不合理的,必须考虑支流对青铜峡入库洪水的影响。涂新军等^[4]运用 Copula 函数进行滨海城市雨潮遭遇设计,提出滨海城市雨潮遭遇设计实践中更为安全的方法。武传号等^[5]运用 Copula 函数构建了广州市城区年最大 1 h 降雨与年最大潮位、年最大潮位与相应 1 h 降雨及年最大 1 h 降雨与相应潮位 3 种联合概率分布,建立雨潮组合风险概率模型。类似地,干、支流洪水作用下的洪水组合类别的形式也有 3 种,不同洪水组合样本描述干、支流洪水间的相关性是不同的,从而导致防洪设计结果存在一定的差别,因此对于如何选取合适的洪水组合样本进行防洪设计至关重要。目

前国内外研究较多的是基于单变量情况下采用年最大值和超定量两种不同选样方法对设计值的影响^[4,7],但未见基于干、支流洪水作用下的洪水组合样本的选择对防洪设计的影响研究。

因此,为了研究干、支流洪水作用下洪水组合样本的选择对防洪设计的影响,本文以桂平航运枢纽水闸为例,采用 Copula 函数构建干流浔江年最大洪峰流量与支流郁江年最大洪峰流量、浔江年最大洪峰流量与相应时段郁江流量、郁江年最大洪峰流量与相应时段浔江流量这 3 种洪水组合样本的联合分布,在联合分布模型的基础上采用 Copula-Monte Carlo 模拟 n 组满足洪水间相关性的洪水组合经调洪计算推求水闸防洪设计水位,对比这 3 种洪水组合样本对防洪设计的影响,为干、支流洪水作用下或洪潮作用下的水闸防洪设计提供更加科学合理的依据。

1 研究区概况

桂平航运枢纽位于郁江、黔江、浔江三江汇合口附近的郁江段,是一个集航运、发电、灌溉、交通于一体的综合利用性航运枢纽工程,主要由航运船闸、溢洪坝及水闸组成。桂平航运枢纽设计洪水既受干流浔江顶托洪水的影响,也受支流郁江洪水的影响,因此设计时需要考虑郁江浔江的洪水组合情况。浔江洪水以大湟江口水文站为控制站,郁江洪水以贵港水文站为控制站,洪水组合选样有 3 种:(1)浔江年最大洪峰流量+郁江年最大洪峰流量组合;(2)浔江年最大洪峰流量+相应时段郁江洪峰流量组合;(3)郁江年最大洪峰流量+相应时段浔江洪峰流量组合。实际工程中,桂平航运枢纽水闸设计时^[25]采用的是大湟江口站重现期为 100 a 一遇的洪峰流量与 0.2 倍该洪峰值作为坝址设计洪水组合经调洪计算得到防洪标准为 100 a 一遇的水闸设计洪水位 43.48 m,该设计洪水位的确定方法为经验方法,缺乏一定的理论依据,能否满足防洪要求有待商榷。

2 3 种干支流洪水组合样本联合分布函数构建

2.1 Copula 函数

Copula 函数可以将多个具有相关关系的随机变量连接起来构成它们的联合分布函数。Copula 函数构建的步骤:(1)确定各变量的边缘分布;(2)确定 Copula 函数的参数;(3)根据评价指标选取最优

Copula 函数,建立联合分布。本文选取 Archimedean Copula 函数中应用最为广泛的 4 种 Copula 函数来分别构造干流浔江与支流郁江洪水联合分布,见表 1。表 1 中 $F(x,y)$ 为浔江干流流量 X 和郁江支流流量 Y 的联合分布函数; $u_1 = F(x)$ 和 $u_2 = F(y)$ 分别为边缘分布函数; τ 为 Kendall 秩相关系数; θ 为 Copula 函数的参数。

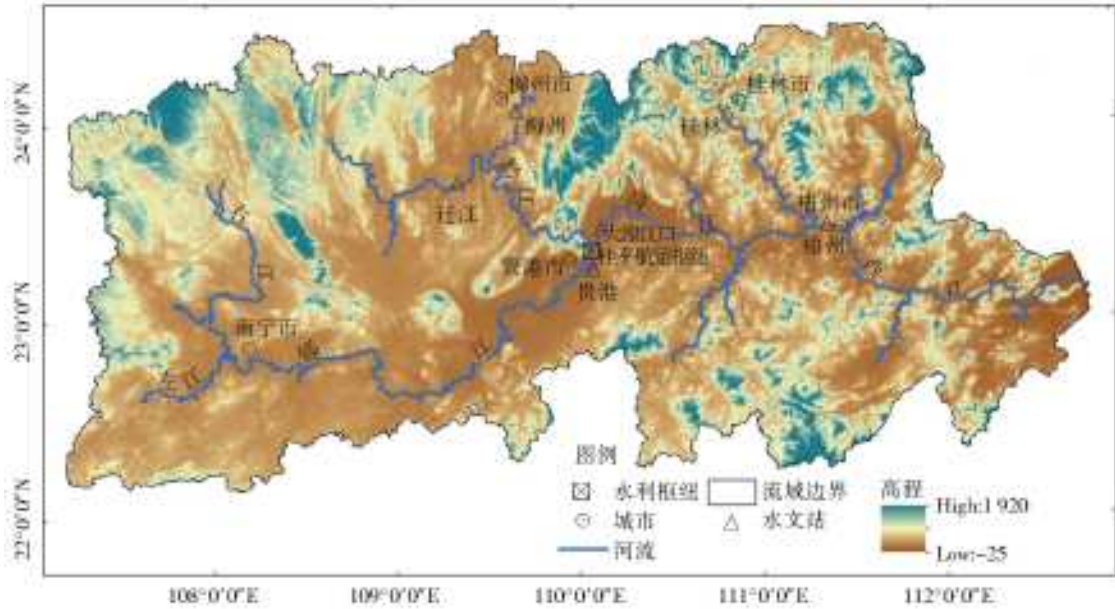


Fig. 1 Geographical location map of the study area

表 1 二维对称 Archimedean Copula 函数的几种形式

Tab. 1 Several forms of two-dimensional symmetric Archimedean Copula function

连接函数	形式	θ 与 τ 关系
GH Copula	$F(x,y) = C(u_1, u_2) = \exp\{-[(1-\ln u_1)^\theta + (1-\ln u_2)^\theta]^{1/\theta}\}$	$\tau = 1 - \frac{1}{\theta}$
AMH Copula	$F(x,y) = C(u_1, u_2) = u_1 u_2 / [1 - \theta(1-u_1)(1-u_2)]$	$\tau = (1 - \frac{2}{3\theta}) - \frac{2}{3}(1 - \frac{1}{\theta})^2 \ln(1-\theta)$
Clayton Copula	$F(x,y) = C(u_1, u_2) = (u_1^{-\theta} + u_2^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\tau = \frac{\theta}{2+\theta}$
Frank Copula	$F(x,y) = C(u_1, u_2) = -\frac{1}{\theta} \ln[1 + \frac{(e^{-\theta u_1} - 1)(e^{-\theta u_2} - 1)}{e^{-\theta} - 1}]$	$\tau = 1 + \frac{4}{\theta} [\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{e^t - 1} dt - 1]$

2.2 参数估计

本文根据浔江大湟江口水文站、郁江贵港水文站现有的 1953—2010 年连续 58 a 实测洪水资料,以贵港站发生年最大洪峰流量与相应时段大湟江口站洪峰流量以及大湟江口站发生年最大

洪峰流量与相应时段贵港站洪峰流量作为计算数据。边缘分布采用适用性较好的 P-III 型分布,参数估计结果见表 2。根据表 1 中 Kendall 相关系数 τ 与 θ 的关系求 Copula 函数的参数 θ ,结果见表 3。

表 2 边缘分布参数估计

Tab. 2 Estimation of edge distribution parameters

参数	郁江年最大洪峰流量	相应浔江洪峰流量	浔江年最大洪峰流量	相应郁江洪峰流量
均值/($m^3 \cdot s^{-1}$)	9 030	20 700	27 600	5 600
C_v	0.35	0.43	0.26	0.60
C_s	1.40	0.86	0.78	1.20

表 3 Copula 函数参数
Tab. 3 Copula function parameters

组合类别	函数名	τ	θ	AIC
浔江年最大洪峰流量与相应郁江洪峰流量	GH Copula	0.158 5	1.188 4	-334.26
	AMH Copula		0.592 0	-342.73
	Clayton Copula		0.376 7	-346.26
	Frank Copula		1.450 0	-339.62
郁江年最大洪峰流量与相应浔江洪峰流量	GH Copula	0.224 4	1.289 4	-422.10
	AMH Copula		0.775 0	-439.79
	Clayton Copula		0.578 8	-447.83
	Frank Copula		2.100 0	-427.89
浔江年最大洪峰流量与郁江年最大洪峰流量	GH Copula	0.126 4	1.144 7	-327.37
	AMH Copula		0.489 0	-333.55
	Clayton Copula		0.289 5	-338.83
	Frank Copula		1.150 0	-331.10

2.3 拟合度检验

为了检验 Copula 函数在多变量频率分析中的拟合精度,需要比较经验频率和理论频率是否一致。二维随机变量 X 和 Y 的联合不超过经验频率为

$$F_{\text{emp}}(x_i, y_i) = P(X \leq x_i, Y \leq y_i) = \frac{\sum_{m=1}^i \sum_{l=1}^i N_{ml} - 0.44}{N + 0.12} \quad (1)$$

利用式(1)计算得到的经验累积频率 F_{emp} 与表 1 用 Copula 函数公式计算得到的理论累积概率 F 绘与同一图中,以检验它的拟合精度,具体见图 2。由图 2 可知,理论值与经验值的点据均在 45° 线附近,说明两洪峰序列变量间的拟合状况都比较好。图形评价分析法可以直观地比较理论值与经验值拟合程

度,但无法选出最优的 Copula 函数,因此还需要定量计算,本文采用 AIC 信息准则进行定量评价,它的形式为

$$\begin{aligned} \text{MSE} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_{\text{emp}}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) - \\ & C(u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}))^2 \quad (2) \\ \text{AIC} &= n \ln(\text{MSE}) + 2k \end{aligned}$$

式中: $F_{\text{emp}}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ 表示经验频率值; $C(u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im})$ 表示理论频率值; m 为函数的维数; k 为模型参数的个数。如果 AIC 值越小,那么 Copula 函数拟合得越好。利用式(2)进行定量检验,结果见表 3。由表 3 可知,3 种联合分布中 Clayton Copula 函数的 AIC 值均是最小的,因此本文最终都选用 Clayton Copula 函数建立 3 种干支流洪水组合样本联合分布。

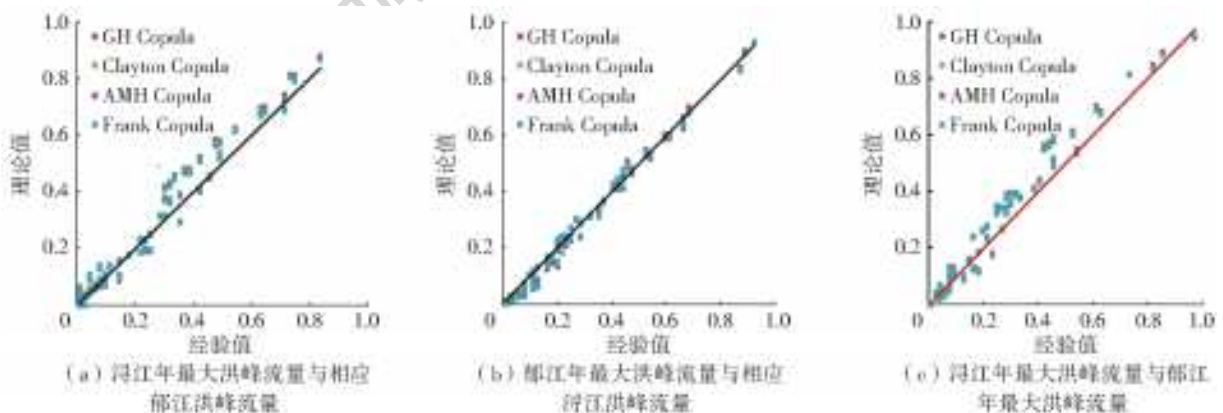


图 2 理论联合概率与经验联合概率拟合

Fig. 2 Fit of theoretical joint probability with empirical joint probability

2.4 联合分布

根据表 2 边缘分布统计参数和表 3 Clayton Copula 函数的参数,利用表 1 中 Clayton Copula 的公式计算上述 3 种组合样本的联合分布,如图 3 所示,从图中可以比较直观地查出 3 种联合分布下不同量级的

浔江干流与郁江支流洪水组合的联合概率。

3 基于 Copula-Monte Carlo 法的防洪水位计算

对于水库的防洪安全而言,最重要的是坝前最

高水位,防洪标准应当以超过坝前设计年最高水位的频率来衡量^[6,8]。坝前水位是与整个调洪过程密

切联系在一起的,本文采用基于 Copula-Monte Carlo 法进行求解,具体步骤如下。

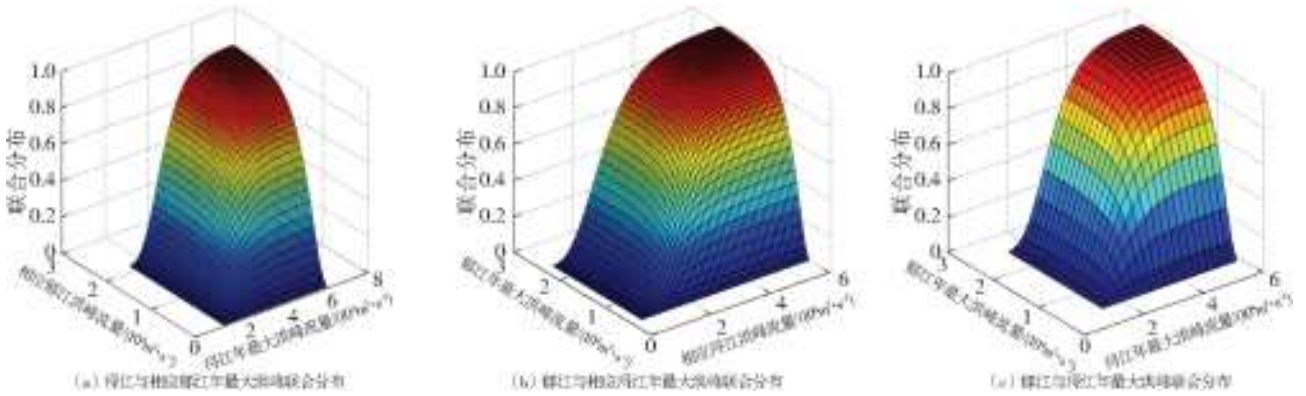


图 3 联合分布

Fig. 3 Joint probability distributions

(1) 给定干支流洪水的联合概率分布模型,采用随机抽样方法获得 N 场洪水组合。在利用 Copula 理论建立联合概率分布函数的基础上,随机洪水组合的生成包括以下 3 步:

- (a) 抽取 $[0, 1]$ 的独立标准均匀分布变量 $\mathbf{V} = (V_1, V_2, \dots, V_n)^T$;
- (b) $\mathbf{V} = (V_1, V_2, \dots, V_n)^T$ 将转化为服从联合分布函数的相关标准均匀分布变量 $\mathbf{U} = (U_1, U_2, \dots, U_n)^T$;
- (c) 将 $\mathbf{U} = (U_1, U_2, \dots, U_n)^T$ 映射为洪水变量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ 。

(2) 将随机模拟的 n 个洪水组合代入调洪模型进行调洪计算,得到各场洪水对应的 n 个坝前最高水位 Z 。

(3) 对 n 个坝前最高水位 Z 值,采用数学期望公式计算经验频率,获得坝前最高水位 Z 的概率分布曲线,给定防洪标准 T ,根据坝前最高水位概率分

布曲线查询可得到满足防洪标准的设计水位 $Z_{设}$ 。满足 $g = (X_1, X_2, \dots, X_n) = Z_{设}$ 的洪水组合即可作为防洪标准对应的设计洪水组合。

3.1 联合概率分布函数随机模拟

由于 3 种洪水组合样本联合分布最优的 Copula 函数均为 Clayton copula 函数,则基于二维 Clayton Copula 函数的模拟步骤如下:(1) 抽取独立标准正态分布 $\mathbf{K} = (K_1, K_2)^T$;(2) $\mathbf{V} = \Phi(\mathbf{K})$ 令得到独立标准均匀分布变量 $\mathbf{V} = (V_1, V_2)^T$;(3) 令 $U_1 = V_1, U_2 = [V_1^\theta (V_2^{-\theta/(\theta+1)} - 1) + 1]^{-1/\theta}$, 得到 $\mathbf{U} = (U_1, U_2)^T$;(4) 根据边缘分布函数推求郁江浔江洪水流量。图 4 给出了 3 种不同洪水组合样本联合概率分布函数随机模拟的 50 万组洪水组合与实测值的对比情况。由图 4 可以发现,Clayton Copula 函数均能很好地描述 3 种洪水组合样本的干、支洪水相关性结构,可以用来随机生成设计洪水组合用于防洪安全设计。

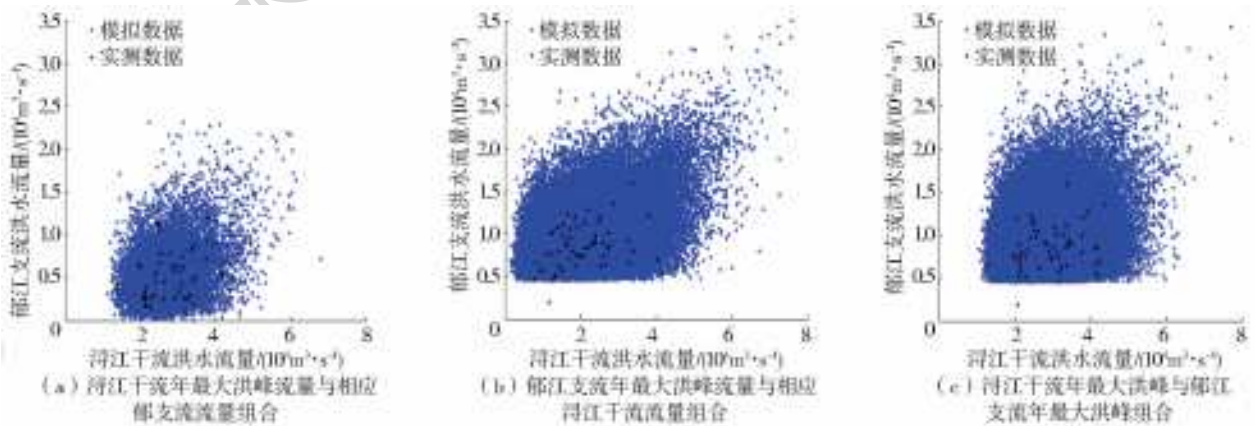


图 4 随机模拟数据与实测数据比较

Fig. 4 Comparison between random simulated data and observed data

3.2 防洪水位计算分析

桂平航运枢纽工程位于干支流的交汇口处的支

流上,坝址水位会受到浔江干流洪水、郁江支流洪水的共同影响,将 3.1 节随机模拟的 50 万组洪水组合

代入桂平航运枢纽的调洪模型进行调洪计算,调洪计算方法采用原工程设计的计算方法^[25],即可得到50万组洪水组合对应的坝前水位,其方框箱型图见图5。图5显示,郁江年最大洪峰流量与相应浔江洪峰流量组合的水位中位数、平均数都明显小于其他两种组合。

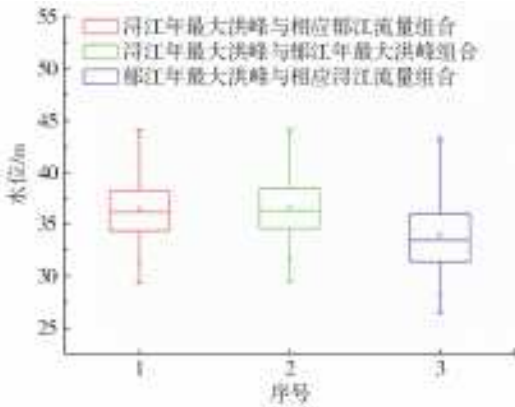


图5 3种洪水组合类别推求的坝前水位箱型图
Fig. 5 Box diagram of water levels upstream dam derived from three samples of synthetic floods

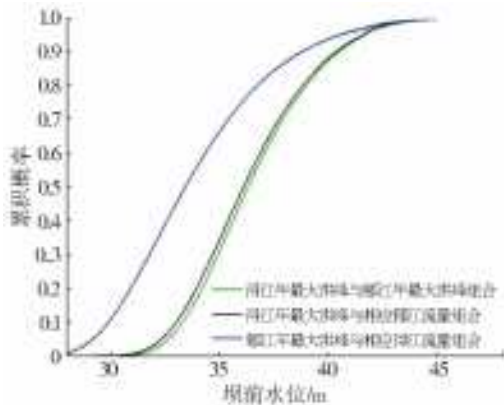


图6 3种洪水组合类别的坝前水位累积分布曲线
Fig. 6 Cumulative distribution curve of water levels upstream dam for three samples of synthetic floods

由于模拟的样本容量足够大,基于数学期望公式获得的经验频率曲线作为坝前水位的累积分布曲

线,见图6。图6给出了基于3种洪水组合类别联合分布基础上的坝前水位累积分布。可以看出,郁江年最大洪峰与相应浔江洪峰流量组合的水位累积分布曲线位于最上方,防洪设计值偏小,不利于工程的防洪安全。其他两种组合的水位累积分布曲线接近重合,浔江年最大洪峰与郁江年最大洪峰组合的水位累积分布曲线稍位于下方。从图6中可查得3种洪水组合样本不同防洪标准 $T=10、20、50、100、200$ a所对应的防洪水位 $Z_{设}$,结果见表4。给定 $Z_{设}$,所有满足 $g(x,y)=Z_{设}$ 的组合即为防洪标准所对应的设计洪水组合,即在干支流洪水作用下的桂平航运枢纽水闸防洪设计中,不同郁江、浔江洪水流量组合得到的坝前最高水位相同。由于洪水组合样本的不同,它们所对应的坝前最高水位会有所不同,图7为3种洪水组合样本的不同防洪标准的水位等值线图。若该水位等值线与 x 轴的夹角大于 90° 即斜率为负数,说明给定坝前最高水位,两者呈负相关关系,浔江洪水越大,郁江洪水则越小,反之亦然。如果该水位等值线与 x 轴垂直即斜率为 $+\infty$,说明调洪过程完全受浔江洪水影响,郁江洪水不起作用,如果水位等值线接近于与 x 轴平行即斜率为0,说明调洪过程完全受郁江洪水影响,浔江洪水不起作用。如果斜率绝对值小于1表明郁江洪水起主要作用,浔江洪水起次要作用,反之大于1则表明浔江洪水起主要作用,郁江洪水起次要作用。从图7可以看出3种洪水组合样本的水位等值线的斜率绝对值均大于1,说明浔江顶托洪水对调洪起主要作用,郁江洪水的影响较小。

由表4可以看出,防洪标准一定时,以郁江年最大洪峰与相应浔江洪峰流量组合推求的防洪水位最小,工程造价最低,安全性最低,以郁江年最大洪峰与浔江年最大洪峰组合推求的防洪水位最大,工程造价最高,安全性最高,而以浔江年最大洪峰与相应

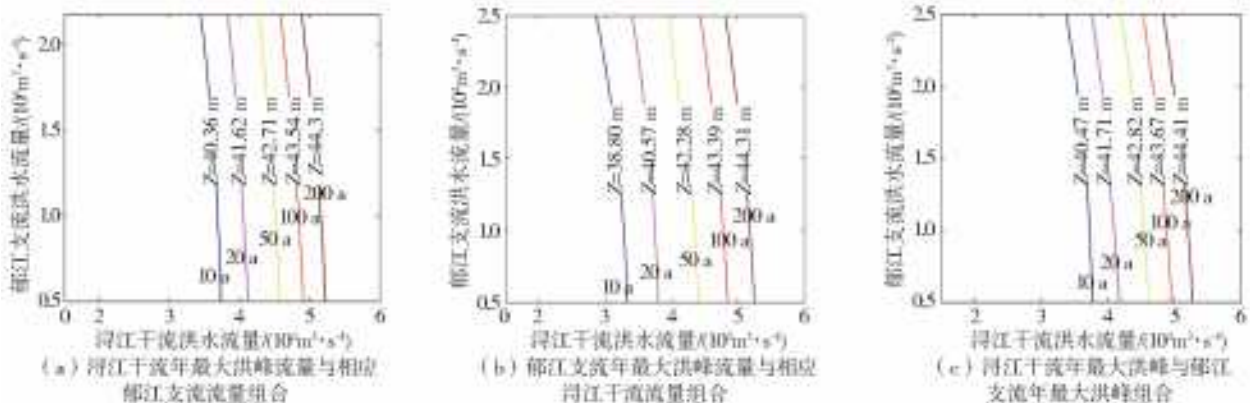


图7 3种洪水组合样本不同防洪标准水位等值线

Fig. 7 Isograms of water levels of different flood control standards for three samples of synthetic floods

表 4 3 种洪水组合类别不同防洪标准的设计水位
Tab. 4 Design flood levels of different flood control standards
for three samples of synthetic floods

组合类别	防洪标准/a	防洪水位/m
浔江年最大洪峰流量 与相应郁江洪峰流量	10	40.36
	20	41.62
	50	42.71
	100	43.54
	200	44.34
郁江年最大洪峰流量 与相应浔江洪峰流量	10	38.80
	20	40.57
	50	42.28
	100	43.39
	200	44.31
浔江年最大洪峰流量 与郁江年最大洪峰流量	10	40.47
	20	41.71
	50	42.82
	100	43.67
	200	44.41

郁江洪峰流量推求的防洪水位在两者之间,既不会高估洪水风险也不会低估洪水风险,在经济性与安全性之间取得了较好地平衡。这是因为由于郁江年最大洪峰与浔江年最大洪峰组合样本的 Kendall 相关系数 τ 最小即郁江、浔江洪水同时遭遇年最大洪水的概率非常小,该组合样本考虑的是两江同时发生小概率洪水对工程最为不利的情况,因此危险区域范围变大,会高估洪水风险,从而使得水位值偏大,而郁江年最大洪峰流量与相应时段浔江洪峰流量组合样本的 Kendall 相关系数 τ 最大即当郁江年最大洪峰大于某一设计值时,相应时段浔江洪水流量超过某一频率值发生的可能性最大,相对来说该组合样本考虑的是两江发生较大概率洪水对工程不利的情况,因此危险区域范围变小,会低估洪水风险,从而使得水位值偏小。

因此,在干、支流洪水作用下的桂平航运枢纽水闸设计中,建议采用浔江年最大洪峰与相应郁江洪峰组合样本建立联合分布进行随机模拟推求防洪设计水位。该组合样本推求的 100 a 一遇防洪水位为 43.54 m,相比于通过经验方法确定的原设计洪水水位 43.48 m 更安全。

4 结 论

本文以桂平航运枢纽水闸为例,采用基于 Copula-Monte Carlo 法推求干、支流洪水作用下水闸的防洪水位,对比分析 3 种洪水组合样本对防洪安全设计的影响。结论如下。

(1) 3 种洪水组合样本联合分布拟合最佳的 Copula 函数均为 Clayton Copula。

(2) 浔江年最大洪峰与相应郁江洪峰流量组合

样本得到的防洪水位更加合理,既不高估洪水风险也不会低估洪水风险,在经济性与安全性之间取得较好地平衡,该组合样本推求的 100 a 一遇防洪水位为 43.54 m,相比采用经验方法确定的原设计洪水水位 43.48 m 更安全。

(3) Copula-Monte Carlo 法考虑了干支流洪水间的相关性以及洪水组合与调洪耦合的关系,设计结果更合理。

参考文献(References):

- [1] 何来兴,梁英,李柳沅,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 L X, LIANG Y, LI L Q, et al. Preliminary design report on the reinforcement project of Dong'an Sluice in Heng County, Nanning [R]. Nanning: Nanning Water Conservancy and Electric Power Design Institute, 2012(in Chinese))
- [2] 肖义.水库大坝防洪安全标准及风险研究[D].武汉:武汉大学,2004.(XIAO Y. Study on flood control safety standards and risks of reservoir dams [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004 (in Chinese))
- [3] 张姐,廉铁辉,冯平,等.黄河宁夏段干支流洪水组成分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(2):158-163.(ZHANG N, LIAN T H, FENG P, et al. Flood composition analysis of the main and tributaries of the Ningxia section of the Yellow River [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(2): 158-163 (in Chinese))
- [4] 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 X J, DU Y L, CHEN X H, et al. Simulation and design of joint distribution of rain surges in coastal cities [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 49-58. (in Chinese))
- [5] 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 C H, HUANG G R, WU S Y. A risk analysis of short-term rainstorm and tidal position in Guangzhou based on Copula function [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 33-40. (in Chinese))
- [6] 丁晶,邓育仁,侯玉,等.水库防洪安全设计时设计洪水过程线法适用性的探讨[J].水科学进展,1992(1):45-52.(DING J, DENG Y R, HOU Y, et al. Discussion on the applicability of the design flood process line method in flood control safety design of reservoirs [J]. Advances in Water Science, 1992 (1): 45-52.
- [7] 周川,黄亚珏.设计洪水计算中年最大选样法与超定量选样法的比较[J].水电能源科学,2014,32(1):45-47,175.(ZHOU C, HUANG Y J. Comparison of middle-aged maximum sampling method and over-quantitative sampling method in design flood calculation [J]. Hydropower Energy Science, 2014, 32 (1): 45-47, 175. (in Chinese))
- [8] 郭生练,刘章君,熊立华.设计洪水计算方法研究进展

- 与评价[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 302-314. (GUO S L, LIU Z J, XIONG L H. Research progress and evaluation of design flood calculation methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 302-314. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150913.
- [9] 李天元. 基于 Copula 函数的设计洪水计算方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. (LI T Y. Research on design flood calculation method based on Copula function[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese))
- [10] 范嘉炜, 黄锦林, 袁明道, 等. 基于 G-H Copula 的水库防洪安全计算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(11): 76-79, 86. (FAN J W, HUANG J L, YUAN M D, et al. Study on calculation method of reservoir flood control safety based on G-H Copula[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(11): 76-79, 86. (in Chinese))
- [11] 李天元, 郭生练, 陈璐, 等. 基于 Copula 函数的水库防洪安全设计[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 50-56. (LI T Y, GUO S L, CHEN L, et al. Safety design of reservoir flood control based on Copula function[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 50-56. (in Chinese))
- [12] 张超, 胡志根, 刘全. 基于 Copula-Monte Carlo 方法的串联施工导流系统风险分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 46-50, 56. (ZHANG C, HU Z G, LIU Q. A risk analysis of series construction diversion system based on Copula-Monte Carlo method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4): 46-50, 56. (in Chinese))
- [13] 刘章君, 郭生练, 胡瑶, 等. 基于 Copula-Monte Carlo 法的水库下游洪水概率分布研究[J]. 水力发电, 2015, 41(8): 17-22. (LIU Z J, GUO S L, HU Y, et al. Study on probability distribution of floods downstream of reservoir based on Copula-Monte Carlo method[J]. Water Power, 2015, 41(8): 17-22. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2015.08.005.
- [14] 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 L X, SONG S B. Study on the 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)) DOI: 10.11660/slfdxb.20151004.
- [15] 侯芸芸. 基于 Copula 函数的多变量洪水频率研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. 5. (HOU Y Y. Multivariable flood frequency study based on Copula function [D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry, May 2010. (in Chinese))
- [16] SALVADORI G, MICHELE C D. Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydro-logical events [J]. Water Resources Research, 2004, 40(12): 229-244. DOI: 10.1029/2004WR003133.
- [17] REQUENA A I, MEDIERO L, GARROTE L. A bivariate return period based on copulas for hydrologic dam design: accounting for reservoir routing in risk estimation [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(8): 3023-3038. DOI: 10.5194/hess-17-3023-2013.
- [18] 陈子燊, 曹深西. 洪峰流量与水位不同遭遇条件下的防洪设计[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(4): 92-98. (CHEN Z S, CAO S X. Flood control design under different conditions of peak discharge and water level [J]. Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition), 2018, 57(4): 92-98. (in Chinese)) DOI: 10.13471/j.cnki.acta.snus.2018.04.012.
- [19] 吴帅兵, 李典庆, 周创兵. 联合分布函数蒙特卡罗模拟及结构可靠度分析[J]. 工程力学, 2012, 29(9): 68-74. (WU S B, LI D Q, ZHOU C B. Joint distribution function Monte Carlo simulation and structural reliability analysis [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 68-74. (in Chinese))
- [20] 刘章君, 郭生练, 许新发, 等. 两变量洪水结构荷载重现期与联合设计值研究[J]. 水利学报, 2018, 49(8): 956-965. (LIU Z J, GUO S L, XU X F, et al. Study on the recurrence period and joint design value of two-variable flood structure load [J]. Journal of Water Resources, 2018, 49(8): 956-965. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180466.
- [21] 尹家波, 郭生练, 吴旭树, 等. 两变量设计洪水估计的不确定性及其对水库防洪安全的影响[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 715-724. (YIN J B, GUO S L, WU X S, et al. Uncertainty of two-variable design flood estimation and its impact on reservoir flood control safety [J]. Journal of Water Resources, 2018, 49(6): 715-724. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180038.
- [22] VOLPI E, FIORI A. Hydraulic structures subject to bivariate hydrological loads: Return period, design, and risk assessment [J]. Water Resources Research, 2014, 50(2): 885-897. DOI: 10.1002/2013WR014214.
- [23] ZHANG L, SINGH V P. Bivariate flood frequency analysis using the Copula method [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(2): 150-164.
- [24] WANG J, TSAI C T. Bivariate frequency analysis of floods using Copulas [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(6): 1549-1564.
- [25] 徐永乐等. 西江航运建设第一期工程广西段初步设计报告(第一册 桂平航运梯级)[R]. 南宁: 广西壮族自治区交通勘测设计院, 1983. (XU Y L, et al. Preliminary design report of Guangxi Section of Xijiang shipping construction phase I project (Volume 1 Guiping Shipping Cascade)[R]. Nanning: Guangxi Zhuang Autonomous Region Traffic Survey and Design Institute, 1983. (in Chinese))
- [26] 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 F W, HUANG Y J, XIONG J, et al. Design flood level of Guiping navigation hub sluice based on Copula function [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(1): 284-290. (in Chinese)) DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2016.0284.