

文章编号:0559-9350(2018)06-0715-10

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

尹家波, 郭生练, 吴旭树, 刘章君, 熊 丰

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在两变量水文频率分析中, 样本系列容量一般较小, 使得水文设计值估计具有不确定性。本文基于 Copula 函数和 Parametric Bootstrap 方法, 并考虑联合设计值的最可能组合模式, 建立可描述两变量设计洪水估计不确定性的 C-PBU (Copula-based Parametric Bootstrap Uncertainty) 模型, 同时提出了定量评价两变量不确定性的度量指标, 分析了联合设计值估计不确定性对水库最高调洪水水位的影响, 并对比了不同典型洪水选取模式下的水位不确定性。以隔河岩水库为例, 推求了两变量设计值估计的 95% 置信区域; 比较了不同样本容量对不确定性的影响。结果表明: 设计洪水估计和典型洪水选择具有较大的不确定性, 可采用 C-PBU 模型推求置信区间, 来考虑设计洪水估计不确定性对水库防洪安全的影响。

关键词: 设计洪水; 防洪调度; 不确定性; Copula 函数; Bootstrap 方法; C-PBU 模型

中图分类号: TV122.3

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20180038

1 研究背景

洪水作为一种多变量随机水文事件, 通常需要多个特征量才能完整描述。为了考虑各个特征量之间的内在相关性, Copula 函数被引入多变量洪水频率分析中^[1]。对于多变量水文频率分析计算, 边缘分布和联合分布函数的确定都依赖于水文序列的样本容量, 而如果样本容量太小, 就会导致所估计的函数参数存在不确定性, 从而使联合设计值估计产生很大的不确定性^[2]。如何定量评价联合设计值估计的不确定性尤为重要。

近年来, 国内研究重点主要集中在单变量估计的不确定性上。例如: 鲁帆等^[3]通过贝叶斯 MCMC 方法估计边缘分布函数参数及设计值的后验分布, 并据此进行极值洪水的频率分析; 胡义明等^[4]利用 Bootstrap 方法, 研究了样本抽样不确定性对水文设计值的影响, 并分析了该方法在不同参数估计方法间的有效性; 冯平等^[5]依据贝叶斯理论将先验信息和样本信息有机结合, 采用 Gibbs-MCMC 算法对 P-III 型频率分布曲线参数的不确定性进行估计, 并对比分析了非一致性序列修正前后的不确定性区间。尽管上述文献能够较好地描述单变量水文频率分析方法的不确定性, 但是对多变量设计洪水的确定性研究在国内则尚未发现^[2]。国外已经开展多变量水文频率分析不确定性的研究, 但仍处于起步阶段, 如何对边缘分布和 Copula 函数的不确定性进行耦合是研究的难点。Serinaldi^[6]通过 Monte Carlo 随机模拟方法, 提出了描述两变量水文设计值估计不确定性的 ALGO 系列算法; Dung 等^[7]基于 Bootstrap 技术, 将重现期等值线上的联合设计值进行随机模拟, 并通过模拟设计值的分布规律分析了两变量设计值的不确定性。但是上述方法未能充分考虑水文事件发生的内在规律, 忽略了重现期等值线上不同联合设计值的发生概率, 使两变量设计值估计产生了较大的任意性和不确定性, 而且无法定量评价该不确定性。同时, 上述研究主要集中于如何估计联合设计值, 事实上坝前最高水位才是影响水库安全的最重要因素^[8-9], 国内外学者将设计洪水联合估计值引入水库防洪安全设计中,

收稿日期: 2018-01-12; 网络出版日期: 2018-06-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180627.1111.005.html>

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0402206); 国家自然科学基金重大项目(51539009)

作者简介: 尹家波(1992-), 男, 湖北鄂州人, 博士生, 主要从事水文水资源分析计算研究。E-mail: jboyn@whu.edu.cn

但却没有考虑联合设计值估计不确定性对水库调洪结果造成的影响。

本文基于 Copula 函数和 Parametric Bootstrap 方法, 考虑两变量设计值的最可能组合模式, 建立可描述两变量设计洪水估计不确定性的 C-PBU (Copula-based Parametric Bootstrap Uncertainty) 模型, 同时提出定量评价两变量不确定性的度量指标, 最后通过偏不利典型和相似特征典型两种洪水过程选取模式, 对比分析联合设计值估计不确定性对水库最高调洪水位的影响。

2 Copula 函数和联合重现期

Copula 函数可以将多个具有不同形式边缘分布的随机变量联结起来构造联合分布。令洪峰 Q 的概率分布为 $F_Q(q)$, 洪量 W 的概率分布为 $F_W(w)$ 。依据 Sklar 定理, Q 和 W 的联合分布函数可以用 Copula 函数 C 表示成 $f(q, w) = c(u, v)^{[10]}$, 其中 $u = F_Q(q)$, $v = F_W(w)$ 。

$f(q, w)$ 相应的联合概率密度函数可表示为^[11-13]:

$$f(q, w) = c(u, v) f_Q(q) f_W(w) \quad (1)$$

式中: $c(u, v) = \frac{\partial C(u, v)}{\partial u \partial v}$ 为 Copula 函数的密度函数; f_Q 、 f_W 分别为 Q 和 W 的概率密度函数。

Volpi 等^[13]对联合重现期进行过定义和讨论, 对于联合重现期的选择应当由研究对象的工程特性来确定, 一般采用 OR 重现期作为水库的防洪标准, 其定义如下^[12-14]:

$$T^U(q, w) = 1/[1 - F(q, w)] = 1/[1 - C(F_Q(q), F_W(w))] \quad (2)$$

式中: $T^U(q, w)$ 即为 (Q, W) 的联合重现期, 以年为单位。

3 基于 Copula 函数和 Parametric Bootstrap 方法的 C-PBU 模型

3.1 最可能组合法的数学描述 Serinaldi^[6]提出 ALGO-C 算法描述两变量设计值估计的不确定性, Dung 等^[7]借鉴该算法采用参数型 Bootstrap 方法研究了 Mekong 流域联合设计值估计的不确定性。但上述方法未考虑重现期等值线上不同联合设计值的发生概率, 不仅增加了计算的复杂性, 还会额外增加设计值估计的任意性和不确定性。事实上, 重现期等值线上虽然有无数组联合设计值满足防洪标准, 但是并非所有的组合模式都符合水文事件发生的内在规律^[10-13]。在工程设计中, 人们通过对实际发生洪水的内在特性规律分析, 通常关心洪水事件的最可能组合模式^[12]。因此, 为了避免联合设计值选取的任意性及盲目性, 本文从洪水发生可能性最大的角度, 采用洪峰 Q 与洪量 W 最可能发生的组合模式作为联合设计值。

设计洪水峰量最可能组合模式是指 (Q, W) 在满足防洪标准的条件下, $f(q, w)$ 取最大值时的两变量联合设计值。通过构建以下联合方程求解该问题:

$$\begin{cases} \max: f(q, w) = c(F_Q(q), F_W(w)) f_Q(q) f_W(w) \\ C[F_Q(q), F_W(w)] = 1 - 1/T^U \end{cases} \quad (3)$$

边缘分布函数及联合函数在 Q 及 W 的定义域内是连续的, 故在联合重现期约束下的 $f(q, w)$ 存在最大值。本文采用拉格朗日乘子法求解该问题, 构造拉格朗日函数如下:

$$\varphi(q, w) = c(F_Q(q), F_W(w)) f_Q(q) f_W(w) + \lambda [C[F_Q(q), F_W(w)] - (1 - 1/T^U)] \quad (4)$$

分别对 q 、 w 和 λ 求偏导数, 并令其为 0, 得到下式:

$$\begin{cases} \varphi_q = f_W(w) [c_u f_Q^2(q) + c f_Q'(q)] + \lambda \frac{\partial C[F_Q(q), F_W(w)]}{\partial u} f_Q(q) = 0 \\ \varphi_w = f_Q(q) [c_v f_W^2(w) + c f_W'(w)] + \lambda \frac{\partial C[F_Q(q), F_W(w)]}{\partial v} f_W(w) = 0 \\ \varphi_\lambda = C[F_Q(q), F_W(w)] - P_T = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： λ 为拉格朗日乘子； $c=c(u, v)$ ， $c_u=\frac{\partial c}{\partial u}$ ， $c_v=\frac{\partial c}{\partial v}$ ； $p_T=1-1/T^U$ ； $f_Q'(q)$ 、 $f_W'(w)$ 分别为相应概率密度函数的导函数。

式(5)可通过数值解法求解，如二分法、牛顿迭代法等。

3.2 C-PBU模型 现有研究证明，Copula函数类型选取不当会对模拟序列设计值估计带来显著的不确定性^[6-7]。本文为了减小该项不确定性，通过AIC统计量最小准则^[13-14]对模拟的新样本序列的联合分布函数进行优选。由于Archimedean族Copula函数在水文领域中应用广泛，而且适用于描述正相关或负相关的水文变量，故本文仅考虑该族函数。为了描述两变量设计值估计的抽样不确定性，考虑两变量设计值估计的最可能组合模式，建立了C-PBU模型，主要步骤如下：

(1)根据实测样本系列估计洪峰 Q 和洪量 W 的边缘分布及Copula函数参数，建立两变量联合分布函数 $F(q, w)$ ，可得到 W 关于 Q 的条件分布函数：

$$H_Q(w|Q=q) = P(W \leq w|Q=q) = \frac{\partial F(q, w)}{\partial q} \quad (6)$$

(2)设置Parametric Bootstrap需要模拟的样本容量 n ，产生 n 组服从 $[0, 1]$ 均匀分布的两个独立的随机数 $[r_{1i}, r_{2i}]$ ， $i=1, 2, \dots, n$ ；令 r_{1i} 为洪峰 q_i 发生的累积概率 $F_Q(q_i)$ ，由 $q_i = F_Q^{-1}(r_{1i})$ 得到洪峰模拟值 q_i 。

(3)令 r_{2i} 表征洪峰 q_i 发生时洪量 w_i 的条件概率分布函数值，即 $r_{2i} = H_Q(w_i|Q=q_i)$ ，从而可依据 $w_i = H_Q^{-1}(r_{2i}|Q=q_i)$ 计算得到 w_i 。

(4)设置Parametric Bootstrap模拟次数为 B ，重复步骤(2)–(3) B 次，即可得到 B 组样本容量为 n 的新序列 (q_{ij}, w_{ij}) ，其中 $i=1, \dots, n$ ， $j=1, \dots, B$ 。

(5)对于模拟的 B 组新样本序列，通过线性矩法(L-moment)估计边缘分布函数的参数。

(6)对于模拟的 B 组新样本序列，分别通过Gumbel-Hougaard(G-H)、Clayton和Frank Copula函数构建联合分布，采用Kendall秩相关性系数法^[7]估计参数值，选取AIC值最小的Copula函数作为联结函数，于是得到 B 个最优的联合分布函数 $F_j(q, w)$ 。

(7)对于步骤(6)得到的每一个联合分布函数 $F_j(q, w)$ ，给定某一联合重现期 T^U ，考虑两变量设计洪水的最可能组合模式，即通过求解式(5)得到重现期等值线上的最可能设计值 (q_{Tj}, w_{Tj}) 。

(8)对于给定的联合重现期 T^U ，对 B 组最可能联合设计值，采用最大密度区域(Highest density regions, HDR)方法^[15]得到对应于某一给定的置信水平 α 的 $(1-\alpha)$ 置信区域。HDR是一种非参数估计方法，根据点据的空间信息进行分析，从而求出包含 $(1-\alpha)$ 空间点集的最小区域。置信区域越大，则表示不确定性越大；反之，置信区域越小，则设计值估计的不确定性越小。

3.3 不确定性度量指标 现有方法^[6-7,10]均未能对两变量估计的不确定性进行定量评价，为此本文提出采用横向平均偏移幅度(D_Q)、纵向平均偏移幅度(D_W)、置信区域面积(S)和平均欧氏距离(d)作为两变量估计不确定性的度量指标。 D_Q (和 D_W)分别用于度量洪峰(和洪量)与实测样本系列推求的设计值在一维空间的估计偏差； S 和 d 用于度量模拟设计值点据与实测样本系列设计值的空间距离；4个度量指标越小，则表征不确定性越小。通过窗格舍取法计算置信区域的面积，其他指标的计算公式如下：

$$D_Q = \frac{1}{B} \sum_{j=1}^B |q_{Tj} - \hat{q}_T|; \quad D_W = \frac{1}{B} \sum_{j=1}^B |w_{Tj} - \hat{w}_T|; \quad d = \frac{1}{B} \sqrt{\sum_{i=1}^B (q_{Tj} - \hat{q}_T)^2 + (w_{Tj} - \hat{w}_T)^2} \quad (7)$$

式中： $[\hat{q}_T, \hat{w}_T]$ 是采用水库的实测洪水系列对应于联合重现期 T^U 的最可能设计值。

4 考虑洪水过程随机性推求设计洪水过程线

设计洪水过程线是水库防洪调度的基本依据，通常只选取一场或几场典型洪水过程进行放大，

我国规范推荐选取峰高量大、主峰靠后的典型洪水过程，本文称之为偏不利典型洪水。Requena等^[8]为了考虑洪水过程的随机性，根据洪水峰量设计值与M年实测洪水过程特征量的相似性来选择相应的典型过程，本文称为相似典型洪水，将该方法与C-PBU模型结合，具体如下：

在联合重现期 T^U 下，对于C-PBU模型步骤(7)得到的B组最可能联合设计值 (q_{T_j}, w_{T_j}) ，首先计算 q_{T_j} 和 w_{T_j} 的比值 $r_{T_j}=q_{T_j}/w_{T_j}$ ，统计最大、最小峰量比 $\max r_{T_j}$ 和 $\min r_{T_j}$ 。采用下式对模拟系列的峰量比进行归一化处理，产生(0, 1)之间的峰量比系列 R_{T_j} ：

$$R_{T_j} = \frac{r_{T_j} - \min r_{T_j}}{\max r_{T_j} - \min r_{T_j}} \quad (8)$$

同理，也可以计算出M场年最大实测洪水过程的峰量比 $\tilde{r}_k=Q_k/W_k$ ， $k=1, \dots, M$ 。参照式(10)，对 \tilde{r}_k 进行归一化处理，得到(0, 1)之间的峰量比系列 \tilde{R}_k 。对于B组模拟的联合设计值 (q_{T_j}, w_{T_j}) ，计算M场年最大实测洪水过程峰量比 \tilde{R}_k (归一化后)与设计值峰量比 R_{T_j} 之间的偏差绝对值 SS_{T_jk} ：

$$SS_{T_jk} = |R_{T_j} - \tilde{R}_k| \quad (9)$$

从M场实测洪水中选取偏差绝对值最小 $(\min\{SS_{T_jk}\})$ 的实测洪水过程，作为模拟值的相似特征典型洪水，该方法考虑了流域洪水的特点和多样性。

选取了偏不利或相似典型洪水过程后，均采用变倍比放大方法^[16]来获得设计洪水过程线：

$$DF(t) = (TF(t) - Q_D) \times (w_{T_j}/D - q_{T_j}) / (w_D/D - Q_D) + q_{T_j} \quad (10)$$

式中： $DF(t)$ 、 $TF(t)$ 分别为设计洪水过程和典型洪水过程在t时刻的流量； Q_D 、 W_D 分别为典型洪水的洪峰流量和洪水历时D内的洪量； q_{T_j} 、 w_{T_j} 分别表示联合重现期为T年时第j组样本求得的洪峰、洪量的最可能设计值。

这种方法不仅能完全控制洪峰和洪量的设计值，还可以较好地保持典型洪水过程的形状。

5 实例研究

清江属山溪性河流，是长江的主要支流之一，流域控制面积为1.7万 km^2 ，覆盖范围为东经 $108^\circ 35' \sim 111^\circ 35'$ ，北纬 $29^\circ 33' \sim 30^\circ 50'$ 。清江流域地形狭长，河道坡度较大，水流湍急，具有较快的汇流速度。清江流域的调节能力较弱，洪水峰形多样，既有常见的单峰和双峰洪水，也存在多次起伏的连续洪峰；清江的高峰洪水呈尖瘦形，也存在洪峰持续2~3d的肥胖形洪水。隔河岩水库位于清江下游，距清江河口62km，是一座以发电为主，兼顾防洪、航运效益的大型水利枢纽工程，具有年调节能力，防洪库容为5亿 m^3 。隔河岩坝址的断面单峰历时一般为3~5d，复峰可达10d，一般选取7d洪水过程进行水库防洪安全设计^[11]。选用隔河岩水库坝址断面1951—2004年3h流量系列，建立洪峰与7日洪量的联合分布，分析设计洪水估计及防洪调度的不确定性。

5.1 边缘分布及联合分布的确定 采用年最大值取样方法，获得隔河岩水库的年最大洪峰Q和7日洪量W，并采用线性矩法估计P-III函数的参数。采用 χ^2 检验法^[6]对其进行假设检验，表1中 $\chi^2_{0.05}$ 为临界值，表1显示洪峰和洪量系列均通过了检验。为了选定拟合效果最优的Copula函数，采用Archimedean族的G-H，Clayton和Frank函数建立隔河岩水库Q和W之间的二维联合分布，利用Kendall秩相关性系数法估计其参数，估计结果见表2。通过AIC准则、K-S检验和Cramer-von Mises检验方法^[17]比较了不同Copula函数的拟合效果；图1给出了不同Copula函数对应的模拟序列和实测值的对比图。从表2和图1中可以看出，G-H Copula函数的拟合效果最优。

5.2 单变量设计值及其不确定性 通过上节估计的实测样本系列参数，求出隔河岩水库的洪峰和洪量在相应设计频率下的理论设计值，列于表3。为了研究抽样不确定性对边缘分布及单变量设计值的影响，采用Parametric Bootstrap法生成B=10 000组样本容量n=54(实测样本序列长度)的新序列。对于这10 000组新样本，以P-III线型作为边缘分布函数，通过线性矩法估计其参数，分别计算洪峰和

表1 隔河岩水库洪水统计特征值和P-III型分布参数估计结果

变量	统计特征值				P-III型参数		χ^2 统计量	$\chi_{0.05}^2$
	E_x	$L-Cv$	$L-Cs$	α	β	a_0		
$Q/(m^3/s)$	7820	0.4	1.2	2.78	0.0005	2606.7	2.815	3.396
$W_7/亿 m^3$	17	0.5	1.5	1.78	0.1569	5.7	1.488	3.396

表2 Copula函数的参数估计值及统计试验结果

Copula函数	参数	统计检验		
	θ	$S_n^1(p值)$	D_n	AIC
G-H	2.98	0.011(0.44)	0.035	-312.5
Frank	9.93	0.015(0.28)	0.043	-289.4
Clayton	3.95	0.021(0.17)	0.048	-275.8

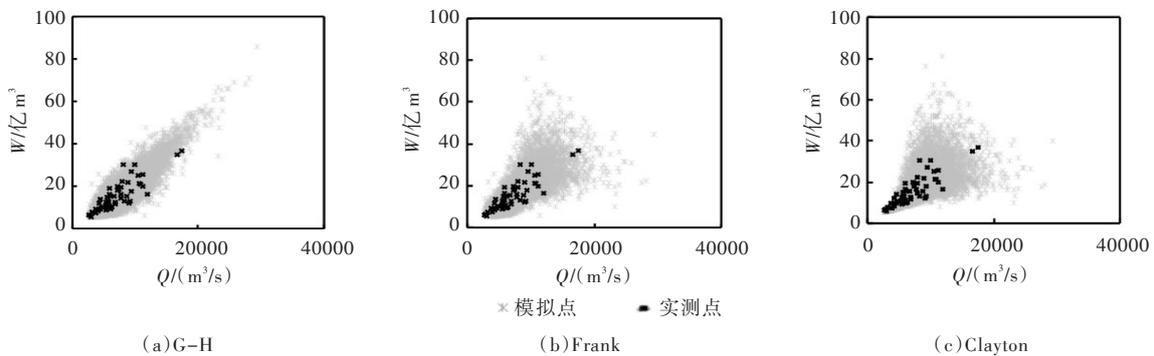


图1 隔河岩水库年最大洪峰和7日洪量实测值与模拟值对比

洪量的期望设计值及95%估计区间(表3), 进而绘制出累计频率曲线(图2)。为了进一步评价单变量设计值的不确定性, 通过下式计算了新样本序列估计值的标准差SD:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{B-1} \sum_{j=1}^B (x_{T_j} - \bar{x}_T)^2} \quad (11)$$

式中: x_{T_j} 为采用第j组样本序列估计的重现期为 T^j 时的设计值, \bar{x}_T 表示重现期为 T^j 时的期望设计值。标准差的计算结果也列于表3中。

从表3可以看出, 采用原始序列计算的理论设计值与10000组样本序列得到的期望设计值基本相同, 这说明随机模拟方法能够较好地保持样本序列的基本特征。从表3和图2中还可以看出, 设计值的95%置信区间几乎关于期望曲线呈对称分布; 而且随着设计标准的提高, 区间宽度和标准差逐渐增加, 表明设计值的估计不确定性随着设计标准的提高而增大。图2和表3均显示了较大的不确定性, 对于百年一遇设计值, 洪峰和7日洪量的95%置信区间分别达到了8178 m^3/s 和25.0亿 m^3 ; 标准差分别达到了2096 m^3/s 和6.4亿 m^3 。

5.3 两变量设计值及其不确定性 选取不同的联合重现期 T^j , 求解式(5)推求隔河岩水库设计洪水的最可能设计值。为了评价洪水最可能组合模式的合理性, 取置信水平 $\alpha=0.10$, 采用Volpi等^[13]提出的两变量联合设计值区间估计方法推求不同联合重现期对应的置信区间。图3给出了采用历史实测数据得到的设计值和95%置信区间的估计结果。从图3看出, 最可能设计值均位于95%置信区间内, 说明它是一种较合理的设计值组合模式, 适合用来描述隔河岩水库的洪水峰量特征。

目前, 对于两变量估计的不确定性问题, 一般选用小于样本容量的联合重现期作为研究对象^[6-7,10]。本文以 $T^j=20$ 年为例开展研究, 图3中的洪峰估计值(14360 m^3/s)和7日洪量设计值(35.27亿 m^3)比表3中单变量估计值分别偏大4.1%和5.0%, 这说明传统单变量的估计值偏小、降低了防洪标准^[11-13]。设置Parametric Bootstrap的模拟次数 $B=10000$, 样本容量分别取 $n=54$, $n=100$, $n=150$, $n=200$, 采用

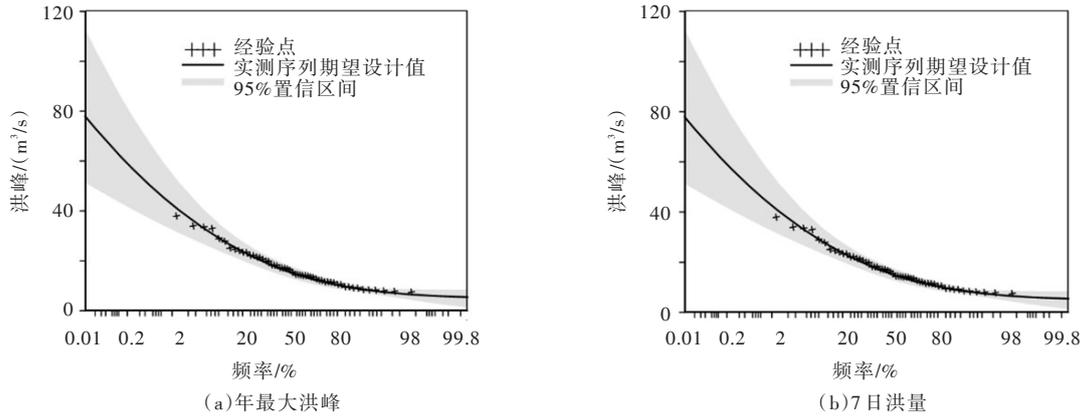


图2 隔河岩水库年最大洪峰和7日洪量实测序列累计频率曲线及95%置信区间

表3 隔河岩水库不同设计频率理论设计值、期望设计值及95%置信区间估计结果

变量	重现期	理论设计值	期望设计值	95%置信区间	区间宽度	标准差
$Q/(m^3/s)$	1000	22881	23018	[16 880, 30 781]	13902	3527
	500	21341	21454	[16 069, 28 227]	12157	3084
	100	17671	17733	[14 065, 22 243]	8178	2096
	50	16035	16077	[13 085, 19 685]	6601	1696
	20	13794	13812	[11 635, 16 322]	4687	1208
	10	12013	12017	[10 357, 13 836]	3480	888
$W/亿 m^3$	1000	61.5	61.9	[43.3, 85.9]	42.5	11.0
	500	56.7	57.0	[40.7, 77.8]	37.1	9.6
	100	45.3	45.5	[34.3, 59.4]	25.0	6.4
	50	40.3	40.4	[31.4, 51.6]	20.2	5.2
	20	33.6	33.6	[27.2, 41.3]	14.1	3.6
	10	28.3	28.3	[23.6, 33.8]	10.2	2.6

C-PBU模型分别推求不同方案下的两变量设计值95%置信区域。本文设置不同的样本长度，是为了分析比较不同的模拟结果；样本容量 $n=54$ 的方案代表了采用隔河岩水库实测数据估计联合设计值的不确定性。在工程案例中使用C-PBU方法推求估计不确定性时，应该设置样本容量与历史实测数据系列一致。图4中给出了采用历史实测数据得到的重现期等值线及理论设计值，并给出了对应于 $T^d=20$ 年的95%置信区域，表4给出了不确定性度量指标的计算结果。从图4和表4可以看出，95%置信区域的面积 S 、横向平均偏移幅度 D_Q 、纵向平均偏移幅度 D_W 和平均欧式距离 d 均随着样本容量的增加而减小，样本容量从 $n=54$ 增加到 $n=200$ 时，各项指标减小48%~60%，这说明样本容量对不确定性具有显著的影响。

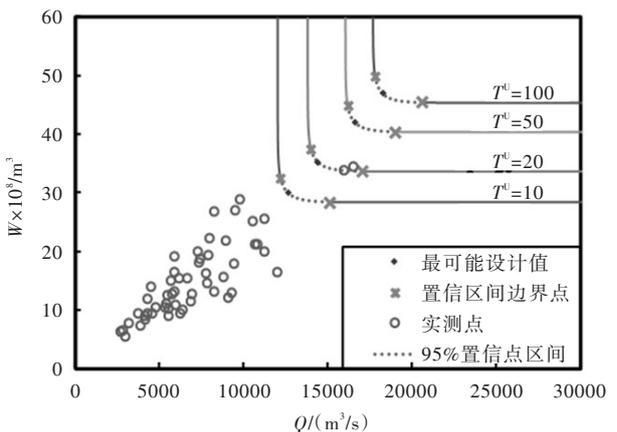


图3 隔河岩水库年最大洪峰和7日洪量联合设计值及95%置信区间

5.4 调洪最高水位的不确定性 就水库防洪安全而言，最重要的因素是坝前最高水位^[2,8]。本文以调洪最高水位作为设计洪水影响水库防洪安全的重要指标，将联合设计值估计的两变量不确定性问题转化为单变量的不确定性问题，不仅更加直观合理，还能为水库运行调度提供决策依据。以 $T^d=20$ 年对应的10 000组最可能联合设计值 (q_{T^d}, w_{T^d}) 作为控制条件，分别采用偏不利和相似特征方法选取典

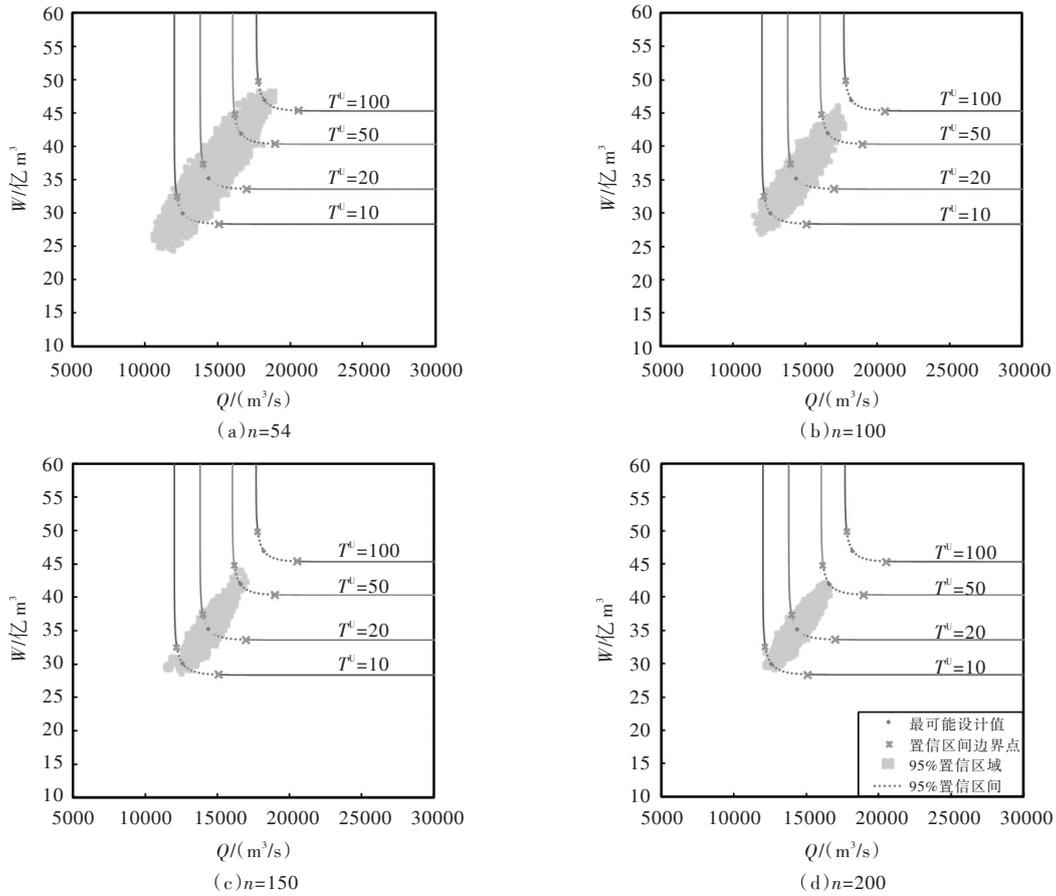


图4 隔河岩水库不同样本容量下 $T^d=20$ 对应的95%置信区域

表4 隔河岩水库不同样本容量下 $T^d=20$ 对应的不确定性度量指标结果

样本容量	95%置信区域面积 $S/亿 m^6/s$	横向平均偏移幅度 $D_Q/(m^3/s)$	纵向平均偏移幅度 $D_W/亿 m^3$	平均欧式距离 d
54	84154	1027	3.10	1089.89
100	56782	747	2.25	792.73
150	38256	601	1.81	638.21
200	34023	531	1.59	562.47

型洪水过程，再通过变倍比放大方法推求模拟设计洪水过程线。提取隔河岩水库1951—2004年共54年的年最大场次洪水过程，用于相似特征方法选取典型洪水过程。下面以偏不利典型洪水为例，介绍设计洪水估计不确定性引起的设计洪水过程线不确定性。采用单变量设计值进行调洪演算，峰量大、主峰靠后的1997年实测洪水为偏不利典型洪水过程^[11]。图5给出了对应于 $T^d=20$ 的10 000组模拟设计洪水过程线。从图5可以看出，采用原始序列推求的设计洪水过程线处于模拟设计洪水过程线的中间位置。当样本容量为54年时，设计洪水过程线的不确定性显得尤其大；样本容量增加到200年时，设计洪水过程线的不确定性区间明显减小。

将上述两种方案下推求的设计洪水过程线，按照隔河岩水库的调度规则进行调洪演算，分别得到水库的最高调洪水位 (Z_{max})，其方框盒须图如图6所示。表5给出了最高调洪水位的统计结果，从表5可以看出，在不同的样本容量下，通过选取相似典型洪水推求得到的最高调洪水位90%置信区间宽度和标准差均比偏不利典型方案下的统计值大，例如：在样本容量为100年时，前者比后者的区间宽度偏大4.8%，标准差偏大5.4%。这说明前者对54场洪水过程线进行了甄选，虽然增加了形状信息，但是也增加了调洪最高水位的不确定性。实际上，通过考虑洪峰洪量特征来选取典型洪水过程，虽然考虑了不同洪水典型的形状，具有一定的多样性，但是从表5中的水位信息来看，该方法也

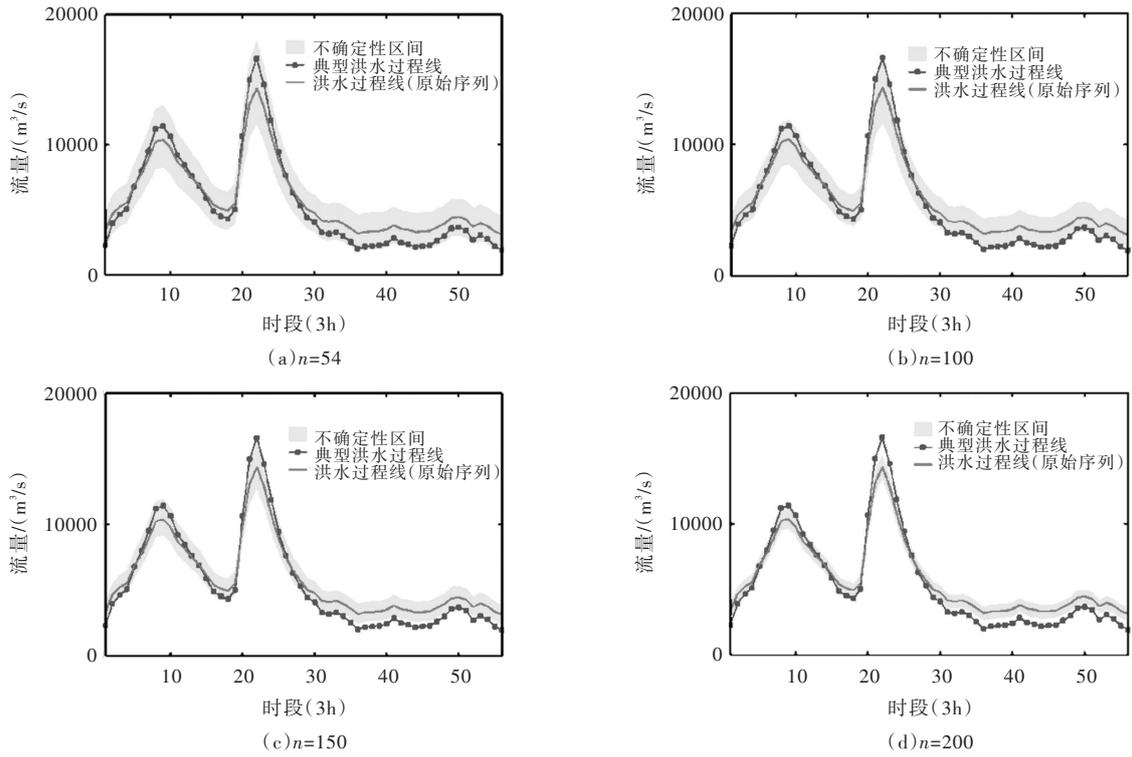


图5 隔河岩水库不同样本容量下 $T^d=20$ 对应的洪水过程线及其不确定性区间

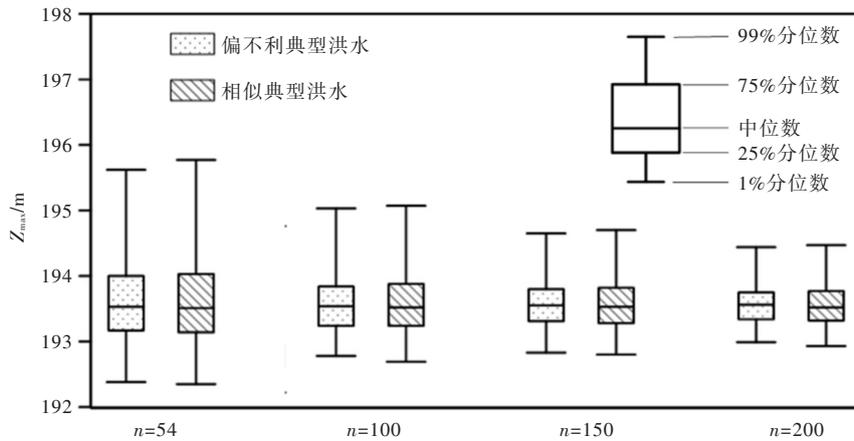


图6 隔河岩水库不同样本容量下 $T^d=20$ 对应的最高调洪水位

存在调洪结果可能偏于安全的问题，其是否适用需要根据工程的实际情况来考虑。在工程实践中，选取合理的洪水典型至关重要，对于强调防洪安全的水库而言，选取偏不利典型洪水过程操作简便，也减小了调洪结果的任意性和差异性。

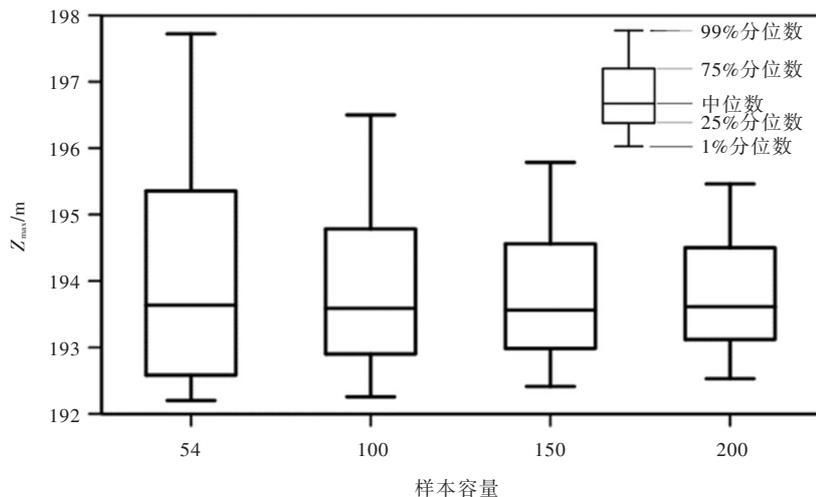
采用Dung等^[7]的parametric bootstrap方法得到隔河岩水库 $T^d=20$ 年对应的联合设计值估计不确定性，并选择偏不利典型洪水过程(1997年实测洪水)，通过调洪演算得到了最高调洪水位的不确定性区间如图7所示。对比分析图6和图7可以看出，当样本容量为实测序列长度(54年)时，两种方法模拟的最高调洪水位的90%置信区间宽度分别达到1.77 m和3.89 m，说明C-PBU模型考虑了洪水发生的最可能组合模式，有效克服了联合设计值随机取样引发的任意性和不确定性，结果比文献[7]方法更加合理可靠。

从表5还可以看出，样本容量小于100年时，两种方案下最高调洪水位的90%置信区间宽度均超过1.45 m，标准差则超过0.5 m，说明用于估计设计洪水的样本太小，对水库最高调洪水位产生了显著的不确定性。对于20年一遇洪水而言，只有样本容量超过200时，才能得到较可靠的调洪最高水

表5 隔河岩水库最高调洪水水位统计结果

(单位: m)

方案	样本容量	Z_{\max} (原始序列)	Z_{\max} (期望设计值)	90%置信区间	区间宽度	标准差
偏不利 典型	54	193.53	193.639	[192.95, 194.72]	1.77	0.712
	100		193.590	[193.01, 194.46]	1.45	0.502
	150		193.586	[193.03, 194.26]	1.23	0.412
	200		193.565	[193.11, 194.17]	1.06	0.341
相似典型	54	193.48	193.636	[192.91, 194.76]	1.85	0.749
	100		193.589	[192.96, 194.48]	1.52	0.528
	150		193.584	[193.02, 194.31]	1.29	0.432
	200		193.560	[193.08, 194.19]	1.11	0.360

图7 文献[7]中 parametric bootstrap 方法推求的隔河岩水库 $T^e=20$ 对应的最高调洪水水位

位结果。一般情况下,水文序列均较短,工程实践中难以满足样本容量的要求,所以考虑设计洪水不确定性对水库防洪调度的影响至关重要。

6 结论

本文考虑设计洪水峰量的最可能组合模式,建立了可描述两变量设计洪水估计不确定性的C-PBU模型,同时提出了定量评价两变量不确定性大小的度量指标,分析了联合设计估计值、不同典型洪水选取的不确定性对水库防洪调度的影响。隔河岩水库的应用验证结论如下:(1)单变量设计值估计的95%置信区间随着设计标准的提高而增加。对于隔河岩水库的百年一遇设计洪水,年最大洪峰和7日洪量95%置信区间的宽度分别达到了 $8178 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 25.0 亿 m^3 ,这表明采用54年的样本序列估计单变量设计洪水存在相当大的不确定性。(2)在不同的样本容量下,通过选取相似典型洪水推求得到的最高洪水90%置信区间宽度和标准差均比偏不利典型方案下的统计值大,说明偏不利典型模式有助于减小调洪最高水位的不确定性。(3)设计洪水估计的不确定性对水库防洪调度产生了显著的影响,而且显示了较大的不确定性。工程设计中的水文序列均较短,难以满足样本容量的要求,可以采用C-PBU模型推求置信区间,来考虑设计洪水估计不确定性对水库防洪安全的影响。

参 考 文 献:

- [1] 侯芸芸,宋松柏,赵丽娜,等.基于Copula函数的3变量洪水频率研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(2):219-228.
- [2] 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.

- [3] 鲁帆, 严登华. 基于广义极值分布和 Metropolis-Hastings 抽样算法的贝叶斯 MCMC 洪水频率分析方法[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 942-949.
- [4] 胡义明, 梁忠民, 王军, 等. 考虑抽样不确定性的水文设计值估计[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 667-674.
- [5] 冯平, 黄凯. 水文序列非一致性对其参数估计不确定性影响研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1145-1154.
- [6] SERINALDI F. An uncertain journey around the tails of multivariate hydrological distributions[J]. Water Resources Research, 2013, 49: 6527-6547.
- [7] DUANG N V, MERZ B, BARDOSSY A, et al. Handling uncertainty in bivariate quantile estimation-An application to flood hazard analysis in the Mekong Delta[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 704-717.
- [8] REQUENA A I, MEDIERO Orduña L, GARROTE de Marcos 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.
- [9] 周建中, 李纯龙, 陈芳, 等. 面向航运和发电的三峡梯级汛期综合运用[J]. 水利学报, 2017, 48(1): 31-40.
- [10] ZHANG Q, XIAO M, SINGH V P. Uncertainty evaluation of copula analysis of hydrological droughts in the East River basin, China[J]. Global and Planetary Change, 2015, 129: 1-9.
- [11] 李天元, 郭生练, 刘章君, 等. 基于峰量联合分布推求设计洪水[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 269-276.
- [12] 尹家波, 郭生练, 刘章君, 等. 设计洪水峰量最可能组合法的计算通式[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 69-76.
- [13] VOLPI E, FIORI A. Design event selection in bivariate hydrological frequency analysis[J]. Hydrological Sciences Journal, 2012, 57(8): 1506-1515.
- [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.
- [15] HYNDMAN R J, BASHTANNYK D M, GRUNWALD G K. Estimating and visualizing conditional densities[J]. J. Comput. Graph. Stat., 1996, 5(4): 315-336.
- [16] 肖义, 郭生练, 刘攀, 等. 基于 Copula 函数的设计洪水过程线方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(4): 13-17.
- [17] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 基于 Copula 函数的新疆极端降水概率时空变化特征[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 3-12.

Uncertainty of bivariate design flood estimation and its impact on reservoir flood prevention

YIN Jiabo, GUO Shenglian, WU Xushu, LIU Zhangjun, XIONG Feng

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The limited sample size would induce quantile estimation uncertainty in bivariate hydrological frequency analysis. A copula-based parametric bootstrap uncertainty (C-PBU) model considering the most likely realization to characterize the uncertainty of bivariate design flood estimation is proposed, and the quantitative uncertainty evaluation indexes are presented. The impacts of joint quantile estimation uncertainty on reservoir operation are explored and such uncertainty of highest reservoir water level derived from different typical flood hydrograph (TFH) schemes were compared. The 95% confidence regions of bivariate quantile estimation in the Geheyan reservoir are derived, and the influences of different sample sizes on uncertainty are investigated. The results demonstrate that the bivariate quantile estimation and TFH selection have large uncertainty. It is suggested to consider the uncertainty of reservoir flood prevention in practice by using of the C-PBU model.

Keywords: design flood; reservoir operation; uncertainty; copula function; bootstrap; C-PBU model

(责任编辑: 王成丽)