

分期设计洪水频率与防洪标准关系研究

肖 义^{1,2}, 郭生练¹, 刘 攀¹, 熊立华¹, 方 彬¹

(1. 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; 2. 湖南省水利厅, 湖南 长沙 410007)

摘要: 现行分期设计洪水模式估算的分期设计洪水值均小于或等于年最大设计值, 达不到规定的防洪标准。采用 Gumbel-Hougaard Copula 函数描述两个分期的分期最大洪水之间的相关性结构, 并构造边缘分布为 P-分布的分期最大洪水联合分布, 建立分期最大洪水与年最大洪水的关系式, 讨论分期设计洪水频率与防洪标准应满足的关系, 探讨能够满足防洪标准的新的分期设计洪水模式。应用示例表明, 新模式主汛期设计值相对年最大设计值小幅度增加, 而非主汛期设计值则小于年最大设计值, 既满足不降低防洪标准的要求又能够起到优化设计洪水的作用, 为分期设计洪水研究提供了一条新的思路。

关键词: 分期设计洪水; 防洪标准; 联合分布; Copula 函数

中图分类号: TV122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2008)01-0054-07

分期设计洪水是确定分期汛限水位的重要依据, 利用分期汛限水位调控洪水资源已成为洪水资源化利用的重要技术手段^[1]。现行的分期设计洪水模式是在分析流域洪水季节性规律的基础上, 按照设计和管理要求, 把整个年内划分为若干个分期, 然后在分期的时段内进行分期最大值选样, 对分期最大洪水采用单变量的 P-型分布进行描述, 通过频率计算求得各设计频率的分期设计洪水, 其中, 分期设计洪水的频率通常假定为设计标准对应的重现期的倒数^[2,3]。

国家防洪标准^[4]规定的水库防洪标准以年为重现期单位, 反映的是年最大设计值被超过的概率。现行的分期设计洪水模式假定分期设计洪水频率均等于防洪标准的倒数, 其分期设计洪水值均小于等于年最大设计洪水值, 不能保证分期设计洪水能够真正达到规定的防洪标准。分期设计洪水都较年最大值设计洪水小, 会导致包括主汛期在内的各分期的分期汛限水位较原设计汛限水位抬高, 必定降低水库的防洪标准。为避免这种现象的发生, 很多规范与设计手册中都将主汛期设计洪水值强制等于年最大设计洪水值^[2,3], 但这种处理方法只能确保主分期设计洪水达到指定的防洪标准。叶秉如^[5]指出: 现行分期洪水的处理方法, 带有一定的经验性, 因为在洪水分期出现时, 总的防洪破坏概率究竟为多少, 是否恰好满足所需求的防洪设计标准, 此法并未明确答复。丁晶等^[6]指出: 现行分期设计洪水方法采用分期最大洪水选样, 根据这种洪水系列计算出的洪水频率本质上不同于全年最大洪水系列推求出的洪水频率, 前者是指洪水事件在某一分期发生的可能性, 后者是指洪水事件在一年内(包括所有分期)发生的可能性, 两者从水库防洪安全来看存在本质区别。王善序^[7]针对现行分期设计洪水方法, 讨论了分期最大洪水频率与重现期关系。经论证分析和实际计算后得出: 采用分期洪水频率等于防洪标准 T 的倒数的假定是错误的, 由此计算得出的 T 年一遇分期设计洪水一般系统偏小, 实际是 $T/(K+1)$ 年一遇的(K 为非负整数随机变量); 真正的 T 年一遇分期设计洪水与 T 年一遇全年最大洪水是相等的。他指出: 现时的分期设计洪水计算技术仍存在严重错误, 通过它来提高水库兴利效益, 是在冒降低水库防洪标准的风险。

分期最大洪水与年最大洪水的关系、分期设计洪水频率与防洪标准的关系研究对于研究分期设计洪水方法至关重要。《水利水电工程设计洪水计算手册》^[3]指出当各分期最大洪水相互独立时, 其频率曲线和全年最大洪

收稿日期: 2007-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679063;50609017); 霍英东青年教师基金资助项目(101077)

作者简介: 肖 义(1980-), 男, 湖南岳阳人, 博士, 主要从事水文学及水资源开发利用研究。E-mail: daro-xy@sohu.com

水的频率曲线之间存在一定的频率组合关系，分期最大洪水与年最大洪水的关系可采用全概率公式描述^[8]。王善序^[9]提出采用分期年最大值取样(即该分期发生的年最大洪水)估算分期设计洪水。该方法首先在假定发生各分期的年最大洪水相互独立的情况下，建立了一个年最大洪水与分期年最大洪水的关系式，然后基于该关系式提出一种新的分期设计洪水估计方法。这种方法仍然是基于年最大值系列，能够满足防洪标准的要求；又因为是对各分期分别进行取样，各分期的采用的样本不同，因此亦能够反映洪水的季节性规律。Singh 等^[10]指出分期的年最大样本具有同分布特征，因而比年最大值法更好。但是，该法在抽样中(包括分期抽样)仅取年最大值，可能导致非主汛期的分期抽取到的样本容量很少，最终导致该分期频率分析结果不可靠；且与我国现行的分期设计洪水抽样方法(分期最大值法)有所区别，难于直接移用。

现行分期设计洪水方法中，每个分期的分期最大洪水均可看作是独立同分布的随机变量，不同分期的分期最大洪水通常假定为相互独立的，而事实上，不同分期的分期最大洪水之间通常存在一定的弱相关性，并不是完全独立的。Copula 函数理论是构建多元联合分布的一种有效方法，适合于构建边缘分布为任意分布的联合分布，既可以描述相互独立的变量，也可以描述存在相关性的变量^[11~13]。本文采用 Gumbel-Hougaard Copula^[13,14]描述不同分期的分期最大洪水之间的相关性结构，并建立边缘分布为 P-型分布的两变量联合分布，用以描述不同分期的分期最大洪水。基于联合分布讨论分期最大洪水与年最大洪水之间的关系以及分期设计洪水的频率与防洪标准之间的关系，并对能够满足防洪标准的新的分期设计洪水模式进行初步探讨。

1 水文变量之间的相关性结构

从变量联合分布，可以通过分析得到变量的相关结构。设变量 X , Y 的理论联合分布为 $F(x, y)$, X 和 Y 各自的分布函数分别为 $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$, 即边缘分布分别为 $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$ 。令 $u = F_X(x)$, $v = F_Y(y)$, 可以求得：

$$x = F_X^{-1}(u) \quad y = F_Y^{-1}(v) \quad (1)$$

式中 F_X^{-1} 和 F_Y^{-1} 分别为 $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$ 的逆函数。将式(1)代入 $F(x, y)$ 得

$$C(u, v) = F(F_X^{-1}(u), F_Y^{-1}(v)) \quad (2)$$

式中二元函数 $C(u, v)$ 为变量 X 和 Y 之间的相关性结构。从联合分布 $F(x, y)$ 及边缘分布 $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$, 可以得到变量的相关性结构 $C(u, v)$; 那么, 反过来根据相关性结构 $C(u, v)$ 及边缘分布 $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$ 亦可以得到联合分布 $F(x, y)$ 。

2 分期最大洪水的联合分布

以汛期分为两期为例，分别为主汛期和非主汛期：主汛期的分期最大洪水 X 的概率分布为 $F_X(x)$ ；非主汛期的分期最大洪水 Y 的概率分布为 $F_Y(y)$ ； $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$ 均假定为 P-型分布^[2]。随机变量 X 和 Y 之间的相关性结构可以用一个二元函数描述，该二元函数的定义域和值域均属于 $[0, 1]$ 区间。Copula 函数是一种具有该性质的二元函数，可以能够用来描述 X 和 Y 之间的相关性结构。Gumbel-Hougaard Copula 是在水文领域研究和应用最多的 Copula 函数^[11,14~16]，本文采用该 Copula 描述不同分期之间分期最大洪水的相关性结构：

$$C(u, v) = \exp\{- [(-\ln u) + (-\ln v)]^\lambda\}, \quad 1 \quad (3)$$

由相关性结构(式(3))以及边缘分布 $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$, 可得到分期最大洪水的联合分布 $F(x, y)$

$$F(x, y) = C(u, v) = \exp\{- [(-\ln u) + (-\ln v)]^\lambda\} \quad 1 \quad (4)$$

$$u = F_X(x) \quad v = F_Y(y) \quad (5)$$

式中 λ 为表达相关性的参数。分期最大洪水之间的相关性越强，则变量之间的 Kendall 相关系数^[17]越大，值也越大，与 λ 之间关系式为 $\tau = 1/(1 - \lambda)$ ^[13]。当 $\lambda = 0$ 或 $\lambda = 1$ 时，为变量之间相互独立的情形，此时 $C(u, v) = uv$, $F(x, y) = F_X(x) \cdot F_Y(y)$ ；当 λ 趋于 1 或趋于 ∞ 时，变量完全相关， $\lim C(u, v) = \min(u, v)$ ^[13]，此时

7 应用示例

以清江流域隔河岩水库为例，采用建立的联合分布分析年最大洪水与分期最大洪水之间的关系以及分期设计洪水频率与防洪标准的关系，并计算能够满足防洪标准的分期设计洪水的组合。

隔河岩水库为年调节水库，该水库有54年实测坝址洪水资料(1951 - 2004年)，其年最大洪峰 Q 系列的统计特征值 $\mu^Q = 7400 \text{ m}^3/\text{s}$, $Cv^Q = 0.42$, $Cs^Q = 1.26$ ，采用分期最大取样方法，每年从主汛期和非主汛期取出一对

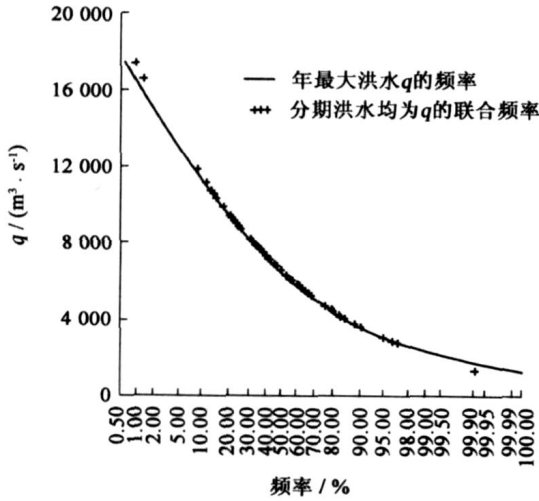


图1 比较检验 $F(q, q)$ 和 $F_Q(q)$ 频率曲线拟合情况

Fig.1 Comparison and verification of $F(q, q)$ and $F_Q(q)$ frequency curves

分期最大洪峰，主汛期最大洪峰 X 和非主汛期最大洪峰 Y 系列统计特征值分别为^[19] $\mu^X = 6580 \text{ m}^3/\text{s}$, $Cv^X = 0.49$, $Cs^X = 1.23$ ，以及 $\mu^Y = 4450 \text{ m}^3/\text{s}$, $Cv^Y = 0.64$, $Cs^Y = 1.60$ 。由统计特征值可以估计 P- 型边缘分布的参数^[20]。估计得到 x 和 y 的 Kendall 秩相关系数为 $\tau = 0.126$ ，Gumbel-Hougaard Copula 函数的参数 $\theta = 1/(1 - \tau) = 1.14$ 。参数估计以后，由式(4)和式(5)即可得到主汛期分期最大洪水 X 和非主汛期分期最大洪水 Y 的联合分布 $F(x, y)$ 。

由于分期洪水与年最大洪水所存在的关系(式(7))，合理的分期设计洪水联合分布应使得各年最大洪水 q 对应的联合分布 $F(q, q)$ 等于 $F_Q(q)$ 。对54个年最大洪峰 q 分别计算频率 $(1 - F(q, q))$ 和 $(1 - F_Q(q))$ ，根据计算结果可以点绘得到图1，图1表明所建立的联合分布基本上是合理的。

图2给出了根据式(18)得出的隔河岩水库设计标准 T ($T = T_{or} = 10000, 5000, 1000, 500, 100, 50, 20$ 年)的等值线图，其横、纵坐标分别为达到防洪标准要求的主汛期分期洪水设计频率 P_X 和非主汛期分期洪水设计频率 P_Y 。图2中斜实线上所有的 P_X 与 P_Y 值均相等，称为同频率线。当采用两个分期设计频率相等的假定时，同频率线与各等值线的交点坐标即为该设计标准 T 下分期洪水的设计频率 p_x 和 p_y 。当设计标准 $T = 1000$ 年时，根据式(18)计算得到 $p_x = p_y = 1/1833$ 。

由图2亦可得到主汛期洪水 X 和非主汛期洪水 Y 对应的设计标准 T 等值线图(图3)。图3中斜实线表示满足分期频率相等($P_X = P_Y$)的 X 、 Y 值，该线与各等值线的交点即为设计标准对应的设计值点，坐标值即为分期

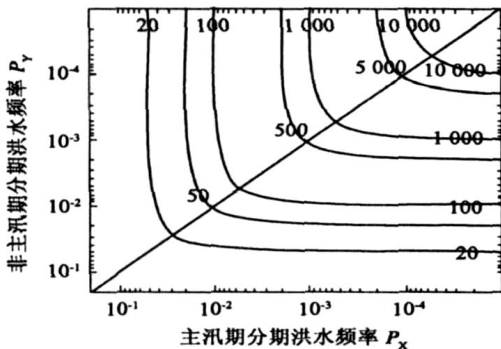


图2 P_X 和 P_Y 对应的设计标准 T 等值线图

Fig.2 Contours of flood frequency P_X and P_Y for different flood prevention standards

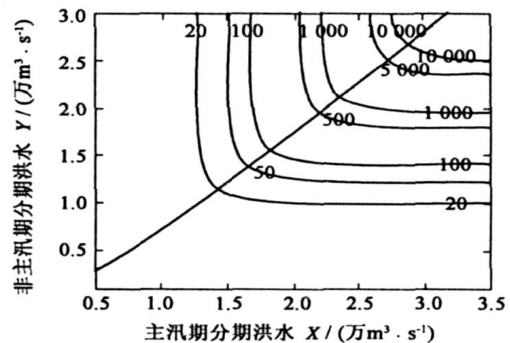


图3 X 和 Y 对应的设计标准 T 等值线图

Fig.3 Contours of design flood X and Y for different flood prevention standards

设计洪水值 x_{T0} 和 y_{T0} (见式 (21) 和式 (22))。各设计标准 T 对应的 X 和 Y 的设计值组合 x_{T0} 和 y_{T0} 见表 2。表 2 亦给出了根据现行分期设计洪水模式推求的设计重现期 T 的主汛期设计值 x_T 和非主汛期设计值 y_T 以及年最大洪水的设计值 q_T 。

表 2 隔河岩水库不同分期设计洪水模式估算的洪峰设计值

Table 2 Estimated peak discharges by different seasonal design flood models for the Geheyan reservoir

重现期 T/a	年最大 设计洪水 $q_T / (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$	现行分期设计洪水模式				满足防洪标准的分期设计洪水模式			
		x_T $/ (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$	$(x_T - q_T)$ $/ q_T (\%)$	y_T $/ (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$	$(y_T - q_T)$ $/ q_T (\%)$	x_{T0} $/ (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$	$(x_{T0} - q_T)$ $/ q_T (\%)$	y_{T0} $/ (\text{m}^3 \text{s}^{-1})$	$(y_{T0} - q_T)$ $/ q_T (\%)$
10000	27 754	27 475	- 1.0	25 292	- 8.9	28 829	3.9	26 740	- 3.7
5000	26 226	25 916	- 1.2	23 631	- 9.9	27 280	4.0	25 084	- 4.4
1000	22 627	22 241	- 1.7	19 746	- 12.7	23 633	4.4	21 213	- 6.3
500	21 051	20 629	- 2.0	18 060	- 14.2	22 038	4.7	19 534	- 7.2
100	17 304	16 794	- 2.9	14 099	- 18.5	18 251	5.5	15 593	- 9.9
50	15 638	15 087	- 3.5	12 366	- 20.9	16 571	6.0	13 871	- 11.3
20	13 364	12 753	- 4.6	10 038	- 24.9	14 279	6.8	11 554	- 13.5

由表 2 可以看出, 现行分期模式的设计值 x_T 和 y_T 均小于年最大洪水设计值 q_T ; 新的分期设计洪水模式的主汛期的设计值 x_{T0} 略大于年最大洪水设计值 q_T , 相对增加幅度 4% ~ 7%, 而非主汛期 y_{T0} 的设计值则小于 q_T , 相对减小幅度 4% ~ 14%。

8 结 论

本文建立了分期设计洪水频率与防洪标准应满足的关系式, 该关系式既适用于不同分期的分期最大洪水相互独立的情形, 又适用于存在相关性的情形。基于该关系式提出了一种能够满足防洪标准的新的分期设计洪水模式。与年最大值设计相比, 新的分期设计洪水模式通过小幅度提高的主汛期设计值, 使得在非主汛期设计值低于年最大值的情况下, 能保证分期设计洪水达到防洪标准, 为分期设计洪水研究提供了新思路。

参考文献:

- [1] 胡四一, 高 波, 王忠静. 海河流域洪水资源安全利用-汛限水位的确定与运用[J]. 中国水利, 2002(10): 105 - 108.
- [2] 中华人民共和国水利部、能源部. 水利水电工程设计洪水计算规范 SL44-93[S]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [3] 中华人民共和国能源部, 水利部. 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.
- [4] 国家技术监督局, 建设部. 中华人民共和国国家标准《防洪标准》GB50201-94[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.
- [5] 叶秉如. 水利计算及水资源规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [6] 丁 晶, 王文圣, 邓育仁. 合理确定水库分期汛限水位的探讨[A]. 全国水文计算进展和展望学术讨论会论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 1998. 501 - 506.
- [7] 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.
- [8] Durrans S R, Eiffe M A, Thomas Jr W O, et al. Joint seasonal/ annual flood frequency analysis[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2003, 8(4): 181 - 189.
- [9] 王善序. 设计洪水与洪水季节性[J]. 水文科技信息, 1994, 11(2): 1 - 5.
- [10] Singh V P, Wang S X, Zhang L. Frequency analysis of nonidentically distributed hydrologic flood data[J]. Journal of Hydrology, 2005, 307: 175 - 195.
- [11] Yue S. The Gumbel logistic model for representing a multivariate storm event[J]. Advances in Water Resource, 2001(24): 179 - 185.
- [12] 熊立华, 郭生练, 肖 义, 等. Copula 联结函数在多变量水文频率分析中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6): 16 - 19.
- [13] Nelson R B. An introduction to Copulas[M]. New York: Springer, 1999.
- [14] De Michele C, Salvadori G, Canossi M, et al. Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway[J]. Journal of Hydrologic

Engineering, 2005, 10(1) :50 - 57.

- [15] Shiau J T. Return period of bivariate distributed extreme hydrological events[J]. Stochastic Environment and Risk Assessment, 2003(7) : 42 - 57.
- [16] 肖 义, 郭生练, 熊立华, 等. 一种新的洪水过程随机模拟方法研究[J]. 四川大学学报(工学版), 2007(2) : 55 - 60.
- [17] Sprent P. Applied nonparametric statistical methods[M]. London:Chapman & Hall, 1989.
- [18] 盛 骤, 谢式干, 潘承毅.《概率论与数理统计》(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社, 1989.
- [19] 武汉大学, 长江水利委员会, 等. 隔河岩水库汛限水位设计与运用技术报告[R]. 武汉:武汉大学, 长江水利委员会, 2006.
- [20] 郭生练. 设计洪水研究进展与评价[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.

Seasonal flood frequency analysis and flood prevention standard^{*}

XIAO Yi^{1,2}, GUO Sheng-lian¹, LIU Pan¹, XIONGLi-hua¹, FANG Bin¹

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

2. Water Resources Department of Hunan province, Changsha 410007, China)

Abstract : The flood quantile estimated by conventional seasonal flood frequency is less than or equal to annual maximum estimator, and can not satisfy a given flood prevention standard. A bivariate joint distribution with Pearson Type III distribution margins is developed based on Gumbel-Huugaard Copula and used to describe two seasonal maximum flood series. A relational equation between annual maximum flood and seasonal maximum floods is developed, and the relationship between the frequencies of seasonal flood quantiles and design flood prevention standard is also given. Ultimately a new seasonal flood frequency analysis method is proposed and developed. Compared with the conventional annual maximum method, the seasonal design floods estimated with the proposed method are slightly greater in the main flood season and less in other flood seasons. It is shown that the proposed method could satisfy flood prevention standard and provide a new way for determining seasonal design floods.

Key words : seasonal flood ; flood prevention standard ; joint distribution ; Copula function

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50679063 ;50609017) .