

基于二次重现期的多变量洪水风险评估*

黄 强, 陈子桑**

(中山大学水资源与环境系, 广州 510275)

摘 要: 由于洪水是一种具有多个特征属性的随机事件, 频率分析成为洪水风险评估的一种有效手段, 多变量重现期与设计值的定义与计算则是洪水频率分析中的重点和难点. 本文通过构造洪水历时、洪峰与洪量的联合分布, 介绍了一种新的多变量重现期定义——二次重现期, 并探讨了“或”重现期、“且”重现期和二次重现期对安全与危险域识别的差异性, 以及在洪水风险管理与工程设计中的合理性与可靠性. 传统的“或”和“且”多变量重现期对安全与危险域的识别存在局限性, 利用 Kendall 函数定义的二次重现期则提供了更加合理的安全与危险域识别, 避免了对安全事件与危险事件的错误判定, 更有利于指导洪水风险的管理. 在给定的二次重现期条件下, 依据出现概率最大原则推算的历时、洪峰与洪量设计值组合可以满足工程设计以较低成本承受较大风险的追求, 相比于单变量设计值, 考虑了洪水多个属性联合特征的多变量设计值提供了更加全面和可靠的参考信息.

关键词: 多变量洪水特征; 极值分布; 安全与危险域; Kendall 函数; 二次重现期; 多变量设计值

Multivariate flood risk assessment based on the secondary return period

HUANG Qiang & CHEN Zishen

(Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, P. R. China)

Abstract: Frequency analysis is a useful tool for flood risk assessment, but the definition and calculation of return periods and design values in a multivariate framework are difficult tasks. In this paper, by constructing the joint distribution of flood duration, peak discharge and volume, we introduced the definitions of multivariate “OR”, “AND” and secondary return periods and discuss their differences in identifying the safe and dangerous regions in a critical level. The rationality and reliability of information provided from them in flood risk management and engineering design were then analyzed, respectively. The traditional “OR-AND” approach in multivariate return periods definition is limited in the identification of safe and dangerous regions, while the secondary return period based on the Kendall measure would be more rational. Consequently, mistakes in the recognition of safe and dangerous event can be avoided by the use of second return period, which, obviously, is better for the flood risk management. For a given second return period, the combination of flood duration, peak discharge and volume design values calculated from the most-likely approach, may have an advantage to meet the requirement that with low cost to bear greater risks in engineering design. Furthermore, the information provided from multivariate design values would be more considerate and reliable than the univariate ones.

Keywords: Multivariate flood characteristics; extreme value distribution; safe and dangerous regions; Kendall function; secondary return period; multivariate design values

洪水作为一种自然灾害事件, 每年造成的经济损失数以亿计, 如何控制洪水并减少损失一直是灾害风险管理的重点. 由于洪水事件发生的随机性, 频率分析成为洪水风险评估的一种有效手段, 重现期与设计值的定义与计算则是频率分析中的重点. 同一个洪水事件前后两次发生的平均间隔时间即为该事件的重现期, 若把该洪水事件造成的破坏和影响(以下称效应)作为洪水风险管理与工程设计的标准, 重现期更大的洪水事件则可视作该标准下的危险事件. 传统的单变量频率分析并不能满足洪水事件多个特征属性的特

* 国家自然科学基金项目(41371498)和广东水利创新基金项目(2009-41)联合资助. 2014-02-27 收稿; 2014-08-11 收修修改稿. 黄强(1989~), 男, 博士研究生; E-mail: huangq52@mail2.sysu.edu.cn.

** 通信作者; E-mail: cesczs@mail.sysu.edu.cn.

点,随着 Copula 函数在水文分析中的应用,多变量的洪水频率分析已成为近年来的研究热点^[14]. 与单变量重现期相比,多变量重现期的定义则要复杂得多,“或”和“且”定义法^[5]是目前最常用的两种多变量重现期定义方法,但在安全事件与危险事件的判定上,两者都存在局限性^[6]. Salvadori 等^[6]在“或”和“且”多变量重现期定义法的基础上,基于安全与危险域的概念提出了新的多变量重现期定义——二次重现期,相关概念与定义已在海岸工程设计的研究中有了初步的应用^[7-8].

本文以东江下游博罗站点为例,介绍多变量重现期新的定义与计算方法,通过分析传统重现期与二次重现期在安全与危险域识别的差异性,探讨二次重现期在洪水风险应用的合理性与可靠性. 本文的目的在于理论方法的介绍与探讨,为洪水风险管理与工程设计的研究提供一种新的思路和方法.

1 洪水特征属性

洪水事件具有多个特征属性,其中最重要的是历时、洪峰和洪量. 一场洪水的选取关键在于辨别洪水开始和结束的时间,当流量开始增加并超过了基流量时即可认为是洪水开始发生,当流量又退落到基流量时即意味着洪水的结束. 然而,由于每一场洪水的基流量都不一样,实际上要准确地辨认出基流量是十分困难的,一般可以将流量突然并持续增加的时刻看作是洪水开始的时间,将流量突然下降并退落至起涨流量或稳定流量的时刻看作是洪水结束的时间^[9].

洪水的特征属性可以按照流量过程线来提取,如图 1 所示,流量从突然增加到退落至稳定所经历的时间为洪水历时 $D(d)$,其间最大的流量即为洪峰流量 $Q(m^3/s)$,所增加的水量为洪水总量(洪量) V (斜线部分面积,日 m^3/s). 历时和洪量可分别根据下式计算^[9]:

$$D = t_e - t_s \tag{1}$$

$$V = \left[\sum_{i=t_s}^{t_e} q_i - \frac{1}{2}(q_{t_s} + q_{t_e}) \right] - \frac{1}{2}D(q_{t_s} + q_{t_e}) \tag{2}$$

式中, t_s 和 t_e 分别为洪水开始和结束的时间, q 为日流量观测序列.

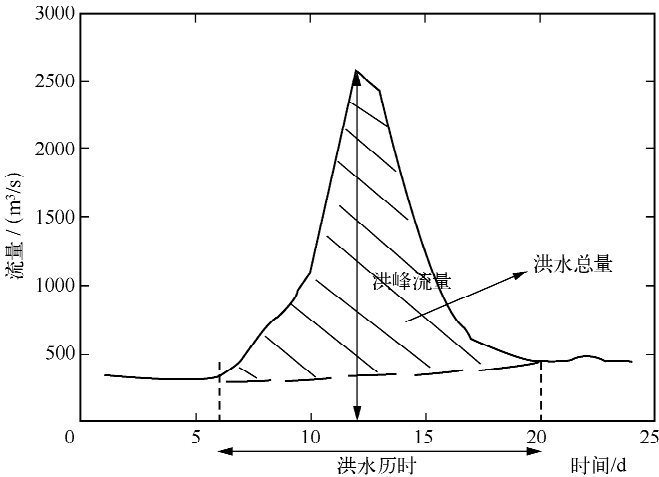


图 1 洪水过程及相应的特征属性

Fig. 1 The flood hydrograph and characteristics

2 边缘分布与联合分布

洪水频率分析中的样本序列主要通过年最大抽样的方法从每年发生的洪水事件中选取,选取的年最大洪水事件可认为是极值事件,根据极值理论,极值事件应服从极值分布^[10]. 极值理论中的单元极值分布为广

义极值分布 (GEV), 其分布函数为:

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1-k\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1}{k}}\right\}, k \neq 0 \\ \exp\left[-\exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right], k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, μ, σ 和 k 分别为位置、尺度和形状参数.

与传统的多变量分布函数相比, Copula 函数具有简单灵活的结构特点, 并且不受边缘分布的限制, 是一种可以适用于多个变量间不同相关结构的多变量分布函数^[11]. Archimedean copula 是水文分析中最常用的 Copula 函数族, 其基本形式为:

$$C(u_1, \dots, u_j) = \varphi_{\theta}^{[-1]}[\varphi_{\theta}(u_1) + \dots + \varphi_{\theta}(u_j)] \quad (4)$$

式中, $u_j \in [0, 1] (j > 1)$ 为边缘分布, φ_{θ} 为 Archimedean copula 生成元, θ 为参数. 当 C 满足下式时, 则 C 是一个多变量极值分布^[13].

$$C(u_1^t, \dots, u_j^t) = [C(u_1, \dots, u_j)]^t \quad (5)$$

可以证明 Gumbel-Hougaard copula 满足上式, 并且是 Archimedean copula 中唯一的多变量极值 copula^[12-13], 其结构形式为:

$$C(u_1, \dots, u_j) = e^{-[(-\ln u_1)^t + \dots + (-\ln u_j)^t]^{\frac{1}{t}}} \quad (6)$$

仅当边缘分布和 Copula 函数均具有极值性质时, 构造的联合分布才是极值分布^[13], 可用于极值事件的频率分析中.

3 多变量重现期与分位值

3.1 传统多变量重现期

若以历时、洪峰和洪量来描述洪水事件, 则洪水事件可以表示为 $E(D, Q, V)$. 在单变量的洪水频率分析中, 以洪峰作为特征变量, 设定一个阈值 q^* , 洪峰大于 q^* 的任何洪水事件都被定义为危险事件, 即 E 的危险域为 $\mathfrak{S}_E = \{q \in R: q > q^*\}$. 当考虑多个特征变量时, 可以将以下两类洪水事件定义为危险事件: (1) 历时、洪峰和洪量其中一个超过了设定的阈值 (记为事件 E^{\vee}); (2) 历时、洪峰和洪量同时都超过了设定的阈值 (记为事件 E^{\wedge}). 危险事件发生的概率即为危险率, 若将 E^{\vee} 作为危险事件, 则危险率为 $P(D > d^* \vee Q > q^* \vee V > v^*)$, 对应的危险域为 $\mathfrak{S}_E^{\vee} = \{(d, q, v) \in R^3: d > d^* \vee q > q^* \vee v > v^*\}$; 若将 E^{\wedge} 作为危险事件, 则危险率为 $P(D > d^* \wedge Q > q^* \wedge V > v^*)$, 对应的危险域为 $\mathfrak{S}_E^{\wedge} = \{(d, q, v) \in R^3: d > d^* \wedge q > q^* \wedge v > v^*\}$.

在传统的多变量重现期定义中, E^{\vee} 对应的重现期为“或”重现期 T^{\vee} , E^{\wedge} 对应的重现期则为“且”重现期 T^{\wedge} . 年最大洪水事件的 3 变量“或”重现期和“且”重现期可分别由以下两式计算:

$$T^{\vee} = \frac{1}{P(D > d^* \vee Q > q^* \vee V > v^*)} = \frac{1}{1 - C(u_d, u_q, u_v)} \quad (7)$$

$$T^{\wedge} = \frac{1}{P(D > d^* \wedge Q > q^* \wedge V > v^*)} = \frac{1}{\hat{C}(1 - u_d, 1 - u_q, 1 - u_v)} \quad (8)$$

式中, $\hat{C}(1 - u_d, 1 - u_q, 1 - u_v)$ 为生存 Copula 函数^[12].

假设 E 的安全率为 P_{safe} (危险率则为 $1 - P_{\text{safe}}$), 在 $P_{\text{safe}} = p$ 的条件下, 以两变量的情形进行阐述, “或”重现期和“且”重现期对安全与危险域的识别如图 2 所示. 在相同安全率的情况下, “或”重现期和“且”重现期标准下不同的分位值组合对应的安全与危险域都不一样.

一般地, 设计的水重现期越大, 相应的危险率就越小, 设置的灾害防御标准遭遇的风险就越低. 就此而言, “或”重现期和“且”重现期识别的安全与危险域显然具有局限性^[6]. 如图 3a 所示, 对于“或”重现期, A 点处的重现期大于 B 点 ($p_1 > p_2$), 而 A 点识别的危险域却有一部分在 B 点识别的危险域之外 (深灰色部分), 即当事件 E^* 发生时, 若以 B 点的组合值作为灾害防御的标准则可以认为 E^* 是安全的, E^* 造成的效应在防御

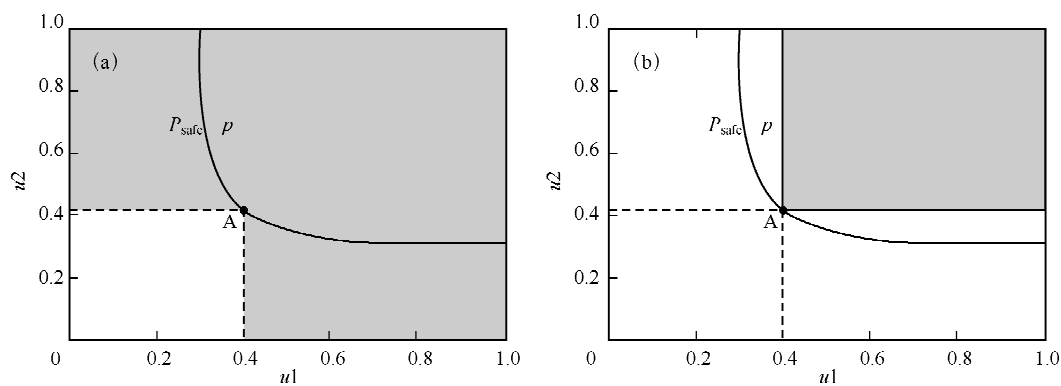


图 2 “或”重现期(a)和“且”重现期(b)的安全与危险域识别(灰色部分为危险域)
Fig. 2 Identification of safe and dangerous regions for “OR” return period(a) and “AND” return period(b) (the grey part represents the dangerous one)

的标准之下;若以重现期更大的 A 点组合值作为灾害防御的标准则 E^* 显然是危险事件. 高风险的防御标准识别的安全事件却被更低风险的防御标准识别为危险事件,这显然是矛盾的. 对于“且”重现期(图 3b), A 点处的重现期小于 B 点($p_1 < p_2$),但 A 点识别的危险域并没有完全覆盖 B 点的危险域,即当事件 E^* 发生时,若以 B 点的组合值作为灾害防御的标准, E^* 造成的效应超过了防御的标准,可认为 E^* 是危险事件;若以 A 点的组合值作为灾害防御的标准则 E^* 造成的效应在防御的标准下, E^* 是安全事件. 低风险防御标准识别的危险事件在更高风险的防御标准里却是安全事件,这显然也是矛盾的. 无论是“或”重现期还是“且”重现期,都会对安全事件与危险事件产生错误的识别,从而造成风险管理与工程设计经济浪费或抵御风险的不力.

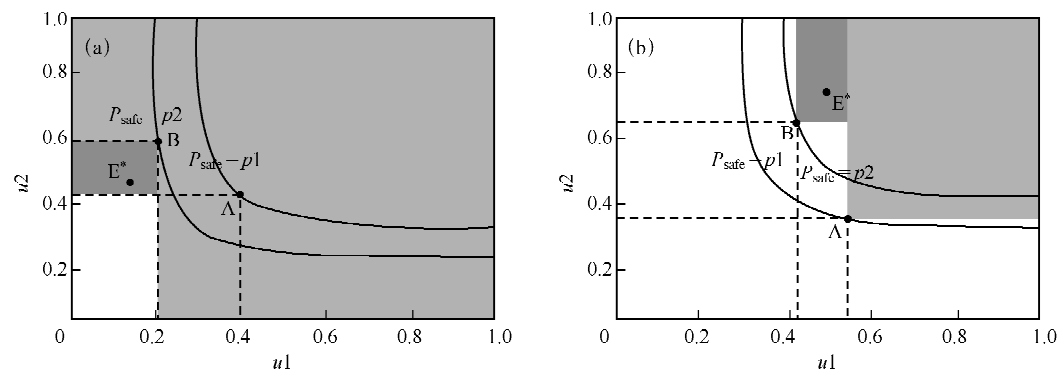


图 3 “或”重现期(a)和“且”重现期(b)对安全危险域识别的局限性
Fig. 3 Limitations on the identification of safe and dangerous regions for “OR” return period(a) and “AND” return period(b)

3.2 分位值曲面

不同历时、洪峰与洪量组合下的洪水事件有可能会造成相同的效应,即不同的 $E(D, Q, V)$ 可以具有相同的安全率或危险率^[14]. 对于 E^V , 给定一个 $p(0 < p < 1)$ 值, 存在不同的 (d, q, v) 组合使 $P_{\text{safe}} = p$ 成立, 即在三维的实数空间里, 具有相同效应的 (d, q, v) 点集构成了一个等曲面, 即 $P_{\text{safe}} = p$ 条件下的分位值曲面^[15]: $S_p^V = \{(d, q, v) \in R^3; P_{\text{safe}} = C(u_d, u_q, u_v) = p\}$; 同样地, 对于 E^A , 在 $P_{\text{safe}} = p$ 条件下具有相同效应的 (d, q, v) 点集构成的等曲面为: $S_p^A = \{(d, q, v) \in R^3; P_{\text{safe}} = 1 - \hat{C}(1 - u_d, 1 - u_q, 1 - u_v) = p\}$. 若将等曲面 S_p^V 或 S_p^A 当作一个临界面, 则可以将三维的实数空间划分成 3 部分: (1) 次临界域 $\mathfrak{R}_p^< = \{(d, q, v) \in R^3; P_{\text{safe}} < p\}$;

(2) 临界面 S_p^V 或 S_p^A ; (3) 超临界域 $\mathfrak{R}_p^> = \{(d, q, v) \in R^3 : P_{\text{safe}} > p\}$. 任意一个 $E(D, Q, V)$ 的空间点必然会落在这3部分其中一个之内, 若以等曲面作为洪水风险的临界面, 任何落在次临界域 $\mathfrak{R}_p^<$ 之内的 $E(D, Q, V)$ 都可视为临界条件下的绝对安全事件, 落在超临界域 $\mathfrak{R}_p^>$ 之内的 $E(D, Q, V)$ 都可视为临界条件下的危险事件, 落在临界面上的 $E(D, Q, V)$ 则为警戒事件或相对安全事件. 因此, 依据具有相同效应的历时、洪峰与洪量组合构成的等曲面划分的次临界域、临界面和超临界域可以分别定义为洪水风险临界条件 ($P_{\text{safe}} = p$) 下的绝对安全域、警戒面和危险域.

3.3 二次重现期

基于“或”重现期和“且”重现期对安全与危险域识别的局限性, 若将空间点落在 $\mathfrak{R}_p^>$ 内的事件视为危险事件, 空间点落在 $\mathfrak{R}_p^>$ 外的事件视为安全事件, 则临界条件下的安全与危险域如图4所示. 由图4可见, 临界面上的任意一点都具有相同的安全与危险域, p 值越大, 危险域越小 ($p_2 < p_1 < p_3$); p 值较小的危险域必定会覆盖 p 值较大的危险域 ($\mathfrak{R}_{p_2}^> \in \mathfrak{R}_{p_1}^> \in \mathfrak{R}_{p_3}^>$). 显然, 这样的安全与危险域定义对于洪水风险管理来说是非常合理的, 并且避免了对安全事件与危险事件的错误判定. 将 $C(u_d, u_q, u_v) = p$ 作为临界条件, 则 $E(D, Q, V)$ 落在 $\mathfrak{R}_p^>$ 内的概率即危险率为 $P[C(u_d, u_q, u_v) > p]$, 因此 $C(u_d, u_q, u_v) = p$ 条件下的重现期即可定义为:

$$T_k = \frac{1}{P[C(u_d, u_q, u_v) > p]} = \frac{1}{1 - K_c(p)} \tag{9}$$

T_k 称为二次重现期 (Secondary return period) 或 Kendall 重现期, K_c 为 Kendall 分布函数^[16]:

$$K_c(p) = p + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{(-1)^k}{i!} [\varphi(p)]^k h_i(p) \tag{10}$$

$$h_i(p) = \begin{cases} \frac{\partial p}{\partial \varphi(p)}, i = 1 \\ h_1(p) \frac{\partial h_{i-1}(p)}{\partial p}, i \geq 2 \end{cases} \tag{11}$$

对于三维 Gumbel-Hougaard copula, Kendall 分布函数可以表达为:

$$K_c(p) = p - \frac{p(3\theta - \ln p - 1) \ln p}{2\theta^2} \tag{12}$$

由公式(7)、(8)和(9)以及 C 的非递减性可知, 单变量重现期、“或”重现期、“且”重现期和二次重现期四者的关系^[14,17]为: $T^V \leq T \leq T_k \leq T^A$, 当且仅当 $u_j = 0$ 时, 等号成立.

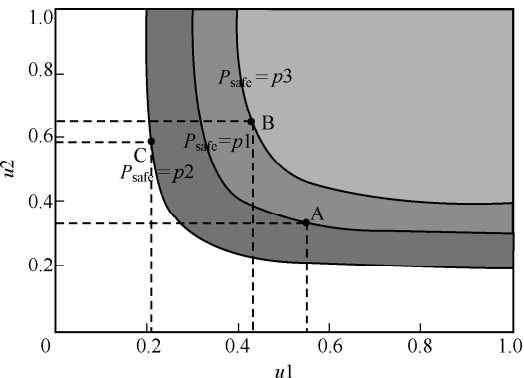


图4 二次重现期的安全与危险域识别
(灰色部分为危险域)

Fig. 4 Identification of safe and dangerous regions for secondary return period (the grey part represents the dangerous one)

3.4 多变量设计值

在单变量频率分析中, 给定一个重现期, 通过概率分布的反函数即可估算出对应的设计分位值. 而对于多变量的情形, 同一个重现期可以有不同的分位值组合与之对应, 并且这些分位值组合不能通过概率分布的反函数直接估算. 具有相同二次重现期 T_p ($C(u_d, u_q, u_v) = p$) 的历时、洪峰与洪量分位值组合构成了一个三维点集, 即等曲面 S_p^V . 在这些不同的分位值组合中, 必然存在一个组合 (d_{ml}, q_{ml}, v_{ml}) 使联合概率密度 $f(d, q, v)$ 达到最大值, 即在 T_p 条件下所有的分位值组合中, 该组合出现的可能性最大. 由于在洪水风险管理与工程的设计中, 常常要追求经济上的节约, 在成本较低的情况下可以承受较大的风险, 因此在设定的防洪重现期下, 出现可能性最大的历时、洪峰与洪量组合便成为

防洪工程设计参考标准的一种上佳选择.

$$(d_{ml}, q_{ml}, v_{ml}) = \arg \max_{(d,q,v) \in S_p^{\forall}} f(d, q, v)$$

(13)

$$f(d, q, v) = c(u_d, u_q, u_v) f_d(d) f_q(q) f_v(v)$$

(14)

式中, c 为三维 Gumbel-Hougaard copula 的概率密度函数, $f_d(d)$ 、 $f_q(q)$ 和 $f_v(v)$ 则分别为历时、洪峰和洪量的概率密度函数.

- 综上所述,二次重现期条件下的洪水多变量分位值估算步骤可以总结为:
- (1) 设定一个二次重现期 T_p , 通过公式(9)和(12)推求出 $p = K_c^{[-1]}(1 - 1/T_p)$;
 - (2) 利用式(4), 计算所有使 $C(u_d, u_q, u_v) = p$ 成立的概率组合 (u_d, u_q, u_v) ;
 - (3) 由式(15)计算出使 $f(d, q, v)$ 达到最大值的一组 (u_d, u_q, u_v) ;
 - (4) 最后分别再根据边缘分布的反函数推求出历时、洪峰和洪量的分位值 (d_{ml}, q_{ml}, v_{ml}) , $d_{ml} = F^{-1}(u_d)$ 、 $q_{ml} = F^{-1}(u_q)$ 、 $v_{ml} = F^{-1}(u_v)$.

4 案例研究

博罗站位于东江下游,是东江流域重要的水文控制站点之一. 本文选用博罗站 1953—2010 年的日流量观测数据作为研究资料,依据年最大极值理论,首先提取每年的最大日流量作为该年极端洪水事件的洪峰流量,以洪峰流量为基准,再按流量过程线提取并计算出该场洪水的历时与洪量,总共提取了 58 场洪水作为博罗站点多变量洪水频率分析的样本序列. 历时与洪峰、洪量样本两两间的 Kendall 秩相关系数表明洪水特征属性间存在较强的相关性,其中,洪峰与洪量的相关性最大(0.665),历时与洪量次之(0.623),历时与洪峰则相对较小(0.355).

为了检验 GEV 和 Gumbel-Hougaard copula 构造洪水事件联合分布的合理性,选用水文分析中常用的对数正态分布(GNO)、广义逻辑斯特分布(GLO)和皮尔逊三型分布(PE3),Clayton 和 Frank copula^[12] 分别对历时、洪峰和洪量样本进行拟合优度检验,并与 GEV 和 Gumbel-Hougaard copula 进行对比. 选用的分布参数均采用极大似然法进行估计,拟合优度检验则依据 Akaike 信息准则(AIC)^[7],AIC 值越小,代表拟合优度越高. 选用的备选分布都通过了 K-S 检验,表明选用的分布都可用于样本的拟合. 各种分布的拟合优度 AIC 值如表 1 所示,虽然拟合优度检验的结果并没有显示 GEV 和 Gumbel-Hougaard copula 对所有历时、洪峰和洪量样本以及它们间组合的拟合都是最优的(GEV 对历时和 Gumbel-Hougaard copula 对历时与洪量组合的拟合为次优),但从总体角度和出于极值分布的考虑,我们选用 GEV 和 Gumbel-Hougaard copula 分别作为边缘分布和多变量分布来构造洪水特征属性间的联合分布. 图 5 和图 6 所示的 GEV 和 Gumbel-Hougaard copula 对历时、洪峰和洪量样本的拟合效果亦表明两者用于构造洪水联合分布是合理的.

表 1 边缘分布与 copula 函数的拟合优度 AIC 值
Tab. 1 The AIC values for different marginal distributions and copulas

	边缘分布					Copula 函数		
	GEV	GNO	GLO	PE3		Gumbel-Hougaard	Clayton	Frank
历时	350.37	350.47	353.44	350.05	历时与洪峰	1333.69	1345.27	1343.07
洪峰	1018.75	1018.83	1019.11	1018.77	历时与洪量	713.50	706.67	718.23
洪量	438.01	438.52	439.94	438.26	洪峰与洪量	1377.44	1390.21	1384.88
					历时、洪峰与洪量	1685.41	1713.34	1708.35

历时、洪峰和洪量保证率分别为 96%、98%、99% 和 99.5% 时的单变量重现期、“或”重现期、“且”重现期和二次重现期计算值如表 2 所示,在同一保证率水平下(保证率不为 0),二次重现期与“且”重现期相差较小,与“或”重现期则相差较大;保证率越小,二次重现期与“或”重现期和“且”重现期之间的差值则越小,

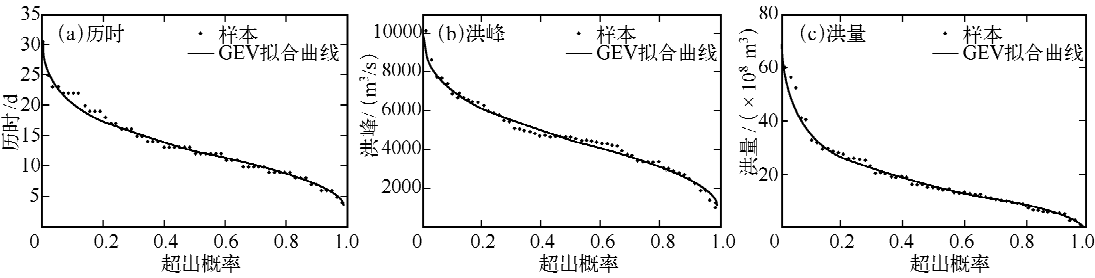


图 5 GEV 对洪水历时、洪峰和洪量样本的拟合优度
Fig. 5 The goodness of fit of GEV for flood duration, peak and volume

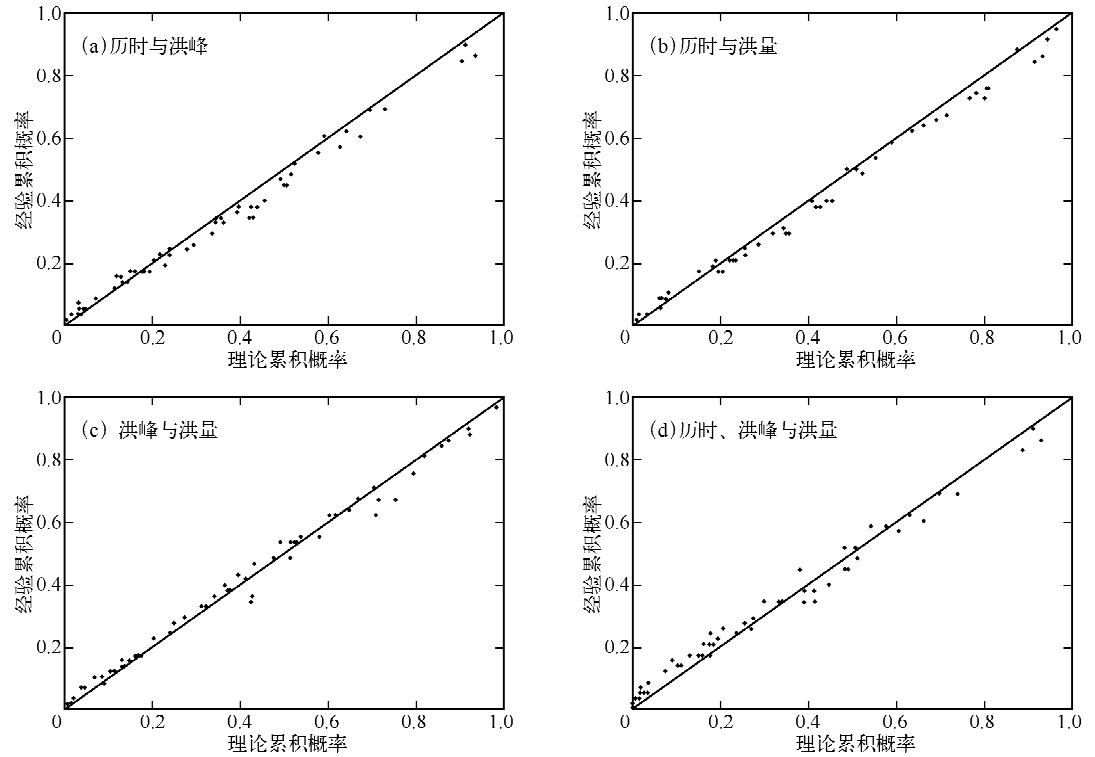


图 6 Gumbel-Hougaard copula 对洪水历时、洪峰和洪量样本的拟合优度
Fig. 6 The goodness of fit of Gumbel-Hougaard copula for flood duration, peak and volume

随着保证率的增大,三者的差值逐渐增大. 根据 3.4 所述步骤计算的 25、50、100 和 200 年重现期历时、洪峰和洪量的多变量设计值以及单独推算的单变量设计值如表 3 所示,单独推算的历时与洪量设计值均比多变量推算的大,而多变量洪峰设计值则要大于单变量设计值,并且随着重现期的增大,两者的差值逐渐减小. 一场洪水造成的效应并不是由单个特征属性决定的,而是多个特征属性共同作用的结果,如高洪峰伴随大洪量的洪水造成的影响和破坏要比高洪峰伴随小洪量的洪水大,长历时高洪峰的洪水造成的影响和破坏要比短历时高洪峰的洪水大. 再者,历时、洪峰与洪量之间的组合以及出现的概率又取决于它们间的相关结构和联合分布. 因此,相比于单变量设计值,考虑了洪水多个属性联合特征的多变量设计值为防洪工程设计提供了更加全面和可靠的参考信息.

表 2 同一保证率水平下的单变量、“或”、“且”和二次重现期计算值

Tab. 2 The calculation values of univariate, “OR”, “AND” and secondary return periods in the same probability level

保证率/重现期类型(年)	单变量重现期	“或”重现期	“且”重现期	二次重现期
96%	25	14	45	40
98%	50	28	91	82
99%	100	55	182	164
99.5%	200	110	365	330

表 3 25、50、100 和 200 年重现期历时、洪峰和洪量的单变量与多变量设计值

Tab. 3 The design values for flood duration, peak and volume in a multivariate framework under the secondary return periods of 25, 50, 100 and 200 years, respectively

重现期(年)/设计值	历时/d		洪峰/(m ³ /s)		洪量/(×10 ⁸ m ³)	
	单变量	多变量	单变量	多变量	单变量	多变量
25	24	21	8100	9192	46	37
50	26	24	8779	9473	56	46
100	28	26	9387	9763	67	56
200	31	29	9934	9989	79	68

5 结论

1) 传统的“或”和“且”多变量重现期对安全与危险域的识别具有局限性,重现期与危险域范围大小的矛盾会造成对安全事件与危险事件的错误识别。

2) 根据 $C(u_d, u_q, u_v) = p$ 临界条件并利用 Kendall 函数定义的二次重现期,具有同一临界水平下任意历时、洪峰与洪量组合对安全与危险域识别的一致性,重现期越大,对应的危险域则越小,避免了对安全事件与危险事件的错误识别,更有利于指导洪水风险的管理。

3) 给定二次重现期条件下的洪水事件可以具有不同的历时、洪峰与洪量组合,在工程设计中,与每个特征属性同时取较大值相比,依据出现概率最大的原则推算的设计值组合可以满足以较低成本承受较大风险的追求。相比于单变量设计值,考虑了洪水多个属性联合特征的多变量设计值为防洪工程设计提供了更加全面和可靠的参考信息。

6 参考文献

[1] 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. 水文,2008,28(3):1-6.

[2] Zhang L, Singh VP. Bivariate flood frequency analysis using the copula method. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2006, 11(2):150-164.

[3] Zhang L, Singh VP. Trivariate flood frequency analysis using the Gumbel-Hougaard copula. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2007, 12(4):431-439.

[4] 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. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010, 38(2):219-228.

[5] Shiau JT. Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resources Management*, 2006, 20: 795-815.

[6] Salvadori G, De Michele C, Durante F. On the return period and design in a multivariate framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15:3293-3305.

[7] Corbella S, Stretch DD. Multivariate return periods of sea storms for coastal erosion risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12:2699-2708.

- [8] Salvadori G, Tomasicchio GR, Alessandro FD. Multivariate approach to design coastal and off-shore structures. *Journal of Coastal Research*, 2013, **65**:386-391.
- [9] Yue S, Ouarda TBMJ, Bobée B *et al.* The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 1999, **226**(1):88-100.
- [10] Salvadori G, de Michele C, Kottegoda N *et al.* Extremes in Nature: An approach using copulas. Dordrecht: Springer, 2007:15-30.
- [11] Favre AC, Adlouni SE, Perreault L *et al.* Multivariate hydrological frequency analysis using copulas. *Water Resources Research*, 2004, **40**: W01101. doi:10.1029/2003WR002456.
- [12] Nelson RB. An introduction to copulas: Second edition. New York: Springer, 2006:115-143.
- [13] Salvadori G, de Michele C. Multivariate multiparameter extreme value models and return periods: A copula approach. *Water Resource Research*, 2010, **46**: W10501. doi:10.1029/2009WR009040.
- [14] Salvadori G, de Michele C. Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events. *Water Resources Research*, 2004, **40**: W12511. doi:10.1029/2004WR003133.
- [15] Chebana F, Ouarda TBMJ. Multivariate quantiles in hydrological frequency analysis. *Environmetrics*, 2011, **22**:63-78.
- [16] Genest C, Quessy JF, Rémillard B. Goodness-of-fit procedures for copula model based on the probability integral transformation. *Scandinavian Journal of Statistics*, 2006, **33**(2):337-366.
- [17] Graler B, van den Berg MJ, Vandenberghe S *et al.* Multivariate return periods in hydrology: a critical and practical review focusing on synthetic design hydrograph estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**: 1281-1296.