

基于 Copula 函数的鄱阳湖流域极值流量遭遇频率及灾害风险*

孙 鹏^{1,2}, 张 强^{1,2**}, 陈晓宏^{1,2}

(1: 中山大学水资源与环境系, 广州 510275)

(2: 中山大学华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州 510275)

摘 要: 在以气温上升为主要特征的全球气候变化导致区域水循环加剧、极端气候水文事件频发的背景下, 对极端水文事件, 特别是水文极值遭遇频率的科学认识, 对区域防洪抗旱具有重要意义. 基于此, 本文引入当前多变量分析中较常用的 Copula 函数, 分析鄱阳湖流域主要支流赣江与抚河、乐安河与昌江的洪水、枯水流量联合概率特征, 并对引起该流域水文极值频率变化的原因及影响进行有益探讨. 结果表明: (1) 洪水、枯水的联合重现期小于其设计重现期, 而其同现重现期则大于设计重现期, 洪水、枯水联合重现期与设计重现期的差值小于同现重现期与设计重现期的差值; (2) 在设计重现期相同的情况下, 外洲站和李家渡站洪水联合重现期大于枯水联合重现期, 而洪水同现重现期小于枯水同现重现期, 并且重现期小于 10 年洪水同时遭遇的机率比较大, 重现期大于 10 年洪水遭遇的频率迅速的减小. 虎山站和李家渡站的洪水和枯水的联合重现期和同现重现期基本一致, 遭受洪水和枯水的频率基本一致; (3) 在设计重现期相同的情况下, 外洲站与李渡站洪水联合重现期略大于虎山站与渡峰坑站, 洪水同现重现期小于虎山站与渡峰坑站. 外洲站与李渡站枯水联合重现期小于虎山站与渡峰坑站, 枯水的同现重现期大于虎山站与渡峰坑站.

关键词: Copula 函数; 极值流量; 遭遇频率; 联合概率分布; 鄱阳湖流域

Copula-based evaluation of high- and low-flows frequency of the Lake Poyang Basin and the risk assessment

SUN Peng^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2} & CHEN Xiaohong^{1,2}

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

(2: *Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, P. R. China*)

Abstract: The currently global climate changes characterized by increasing temperature have the potential to alter the hydrological cycle in regional and global scale. The intensifying meteor-hydrological extremes should be due to altered hydrological cycle. Sound understanding and good knowledge of probability behaviors of meteor-hydrological extremes are the first step into effective management of resources and enhancement of human mitigation to natural hazards. In this case, the multivariate analysis method and the Copula function are used in this study with aim to investigate joint probability behaviors of high flow and low flow of the major tributaries of the Lake Poyang, the largest freshwater wetland in China. The results indicate that: (1) The joint return periods (JP) of high and low flows are shorter than the designed ones. However, the joint return periods given $X > x$ and $Y > y$ (JPS) are much longer than the designed ones. (2) Given the same designed return periods, the JPs of high flow at the Waizhou and Lijiadu stations are larger than those of low flow events. Besides, the JPSs of high flow are usually shorter than those of low flow, implying higher probability of high flow events at the Waizhou and Lijiadu stations. The probability of concurrent occurrence of high flow with return periods of < 10 years is larger than that of > 10 years. The JPs and JPSs of high flow and low flow events at the Hushan and Lijiadu stations are approximately similar, implying the similar probability of concurrent occurrence of high and low flow e-

* 国家自然科学基金项目(41071020,50839005)、中山大学“百人计划”人才引进项目(37000-3171315)、中山大学理工科青年教师重点培育计划项目(2009-37000-1132381)和中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-08-01)联合资助. 2010-06-22 收稿; 2010-08-16 收修改稿. 孙鹏, 男, 1986 年生, 硕士研究生.

** 通讯作者; E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn.

vents. (3) Given the same designed return periods, the JPs (JPSs) of high flow events at the Waizhou and Lijiadu stations are larger (smaller) than those at the Hushan and Dufengkeng stations. The JPs (JPSs) of low flow events at the Waizhou and Lijiadu stations are smaller (larger) than those at the Hushan and Dufengkeng stations.

Keywords: Copula function; hydrological extremes; concurrent occurrence; joint probability; Lake Poyang

当前,极端水文与气候问题已成为各国政府和公众及科学界关注的全球环境变化的焦点之一^[1-3]. 我国近年来频遭损失严重的旱涝灾害,如2000年、2001年全国大面积特大干旱、2006年重庆四川大旱以及西南五省区市2010年发生的“60年不遇”甚至部分地区“百年不遇”的干旱. 鄱阳湖作为国际重要湿地和长江干流重要调蓄性湖泊,在中国长江流域中发挥着巨大的调蓄洪水和保护生物多样性等特殊生态功能,是全球重要生态区之一,对维系区域和国家生态安全具有重要作用,因而鄱阳湖的气候、生态以及水文过程已备受关注.

许多学者在鄱阳湖流域的气象、水文等方面做了大量研究,并取得了丰硕的研究成果^[7-8],刘健等对鄱阳湖流域径流趋势变化的影响因素进行探讨^[9]. 前人在鄱阳湖流域极值流量的水文统计方面研究比较少,主要对鄱阳湖流域极端事件的趋势及原因进行探讨,针对某一具体的洪水年份的洪水特征进行研究. 基于Copula函数在水文事件遭遇分析中的广泛应用^[10],本文采用Copula函数计算赣江与抚河、饶河的两个分段河流——乐安河与昌江的洪水、枯水联合分布函数,计算并具体分析赣江与抚河、乐安河与昌江的丰枯遭遇频率及其机理. 该项研究对于赣抚平原地区、乐安河与昌江汇流后的下游地区以及鄱阳湖流域的防洪抗旱、生态环境演变与湿地研究具有重要科学与现实意义.

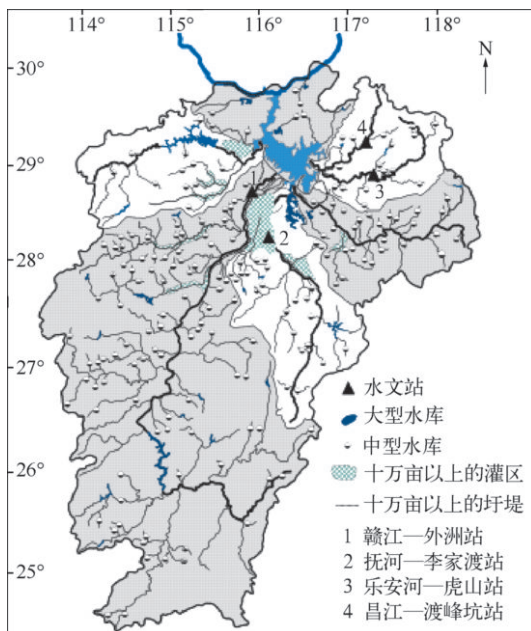


图1 鄱阳湖流域、水文站点、主要水库以及灌区地理位置

Fig. 1 Location of the Lake Poyang, hydrological stations, water reservoirs and irrigation areas in Lake Poyang

相关性, Kendall 相关系数 τ 与 Copula 函数 $C(x, y)$ 存在以下关系^[11]:

$$\tau = 4 \iint_F C(x, y) dC(x, y) - 1 \quad (2)$$

1 研究方法

1.1 Copula 函数的定义

Copula 函数是边缘分布为 $[0, 1]$ 区间均匀分布的联合分布函数, Sklar's 定理给出了 Copula 函数和两变量联合分布的关系. 设 X, Y 为连续的随机变量, 其边缘分布函数分别为 F_X 和 F_Y , $F(x, y)$ 为变量 X 和 Y 的联合分布函数, 那么存在唯一的 Copula 函数 C , 使得:

$$F(x, y) = C_\theta(F_X(x), F_Y(y)), \forall x, y \quad (1)$$

式中: $C_\theta(F_X(x), F_Y(y))$ 为 Copula 函数; θ 为待定参数.

从 Sklar's 定理可以看出, Copula 函数能独立于随机变量的边缘分布, 反映随机变量的相关性结构, 从而可将二元联合分布分为 2 个独立的部分, 即变量间的相关性结构和变量的边缘分布来分别进行处理, 其中变量间的相关性结构用 Copula 函数来描述. Copula 函数的优点在于不必要求具有相同的边缘分布, 任意形式的边缘分布经过 Copula 函数连接都可构造成联合分布, 由于变量的所有信息都包含在边缘分布里, 因此在转换过程中不会产生信息失真. 本文采用在水文上常用的 Kendall 秩相关系数 τ 度量 X, Y 相应的连接函数 Copula 变量的相关性,

1.2 Copula 函数的选择及参数估计

分布线型选择和参数估计是水文频率计算中的两个基本问题. 本文中外洲站和李家渡站的洪水和枯水流量频率曲线选用五参数的韦克比分布曲线拟合, 该频率分布函数在许多流域验证拟合非常好^[12], 虎山站和渡峰坑站的洪水、枯水频率曲线采用皮尔逊Ⅲ分布曲线. 联合分布 $F_{X,Y}$ 的参数估计分为两步: 第一步, 边缘分布 F_X 和 F_Y 的参数估计; 第二步, Copula 函数 $C_\theta(u, v)$ 的参数 θ 的估计. 边缘分布 F_X 和 F_Y 的参数估计通常采用线性矩法, Copula 函数的参数估计采用相关性指标法^[13-14].

Copula 函数总体上可以分为椭圆型、阿基米德型和二次型 3 类, 其中生成元为 1 个参数的阿基米德型 Copula 函数的应用最为广泛^[11,15]. 本文仅列出了在水文及相关领域文献里经常出现的三种阿基米德型 Copula, 并且利用变量间的 Kendall 秩相关系数 τ 与 Copula 函数参数 θ 存在确定的解析关系, 计算出单参数的二维阿基米德族 Copula 函数的参数 θ (表 1).

表 1 二维阿基米德型 Copula 函数的三种形式
Tab. 1 The three forms of two-dimensional Archimedean Copula function

连接函数	表达式	参数 θ 与 τ 的关系	适用范围
GH Copula	$C(u, v) = \exp\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta}\}$, $\theta \in [1, \infty)$	$\tau = 1 - \frac{1}{\theta}$, $\theta \in [1, \infty)$	变量正相关
Clayton Copula	$C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$, $\theta \in (0, \infty)$	$\tau = \frac{\theta}{2 + \theta}$, $\theta \in (0, \infty)$	变量正相关
Frank Copula	$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{(e^{-\theta} - 1)} \right]$, $\theta \in R$	$\tau = 1 + \frac{4}{\theta} \left[\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{e^t - 1} dt - 1 \right]$, $\theta \in R$	变量正/负相关

根据 Genest 和 Rivest^[16] 提出了一种选择 Copula 函数的方法, 分别计算理论估计值 $K_c(t)$ 和经验估计值 $K_e(t)$ (或称参数估计值和非参数估计值), 然后点绘 $K_e(t) - K_c(t)$ 关系图, 如果图上的点都落在 45° 对角线上, 那么表明 $K_c(t)$ 和 $K_e(t)$ 完全相等, 即 Copula 函数拟合得很好. 因此, $K_c(t) - K_e(t)$ 关系图可以用来评价和选择 Copula.

在水文事件中对于两变量的 Copula 联合分布, 对于洪水我们只关注水文变量 X 或 Y 超过某一特定值, 即联合重现期 T_o ; 水文事件中 X 和 Y 都超过某一特定值, 即同现重现期 T_a . 对于枯水我们关注水文变量 X 或 Y 不超过某一特定值, 即联合重现期 T'_o ; 水文事件中 X 和 Y 都不超过某一特定值, 即同现重现期 T'_a . 上述重现期可以通过下面的公式计算:

$$T_o(x, y) = \frac{1}{P[X > x \text{ or } Y > y]} = \frac{1}{1 - C(F_X(x), F_Y(y))} \tag{3}$$

$$T_a(x, y) = \frac{1}{P(X > x, Y > y)} = \frac{1}{1 - F_X(x) - F_Y(y) + C(F_X(x), F_Y(y))} \tag{4}$$

$$T'_o(x, y) = \frac{1}{P[X < x \text{ or } Y < y]} = \frac{1}{C(F_X(x), F_Y(y))} \tag{5}$$

$$T'_a(x, y) = \frac{1}{P(X < x, Y < y)} = \frac{1}{F_X(x) + F_Y(y) - C(F_X(x), F_Y(y))} \tag{6}$$

变量 X 和 Y 的单变量重现期 (或称边缘重现期):

$$T(x) = \frac{1}{1 - F_X(x)}, T(y) = \frac{1}{1 - F_Y(y)} \tag{7}$$

根据各自边缘分布, 变量 X 和 Y 分别取 T 年一遇设计值时, 根据两变量联合分布的 T_o 和 T_a 的定义, 该组合 (x_T, y_T) 的联合重现期 T_o 对应的事件为 x_T 或 y_T 中有一个被超过, 同现重现期 T_a 对应的事件为 x_T 和 y_T 均被超过. 由此可见, 联合重现期 T_o 小于或等于边缘重现期, 同现重现期 T_a 大于或等于边缘重现期, 即:

$$T_o(x, y) \leq \min(T(x), T(y)) \leq \max(T(x), T(y)) \leq T_a(x, y) \tag{8}$$

2 实例分析

本文选取鄱阳湖流域的赣江、抚河和饶河(由乐安河和昌江组成)的外洲、李家渡、虎山、渡峰坑水文站的最大连续7日平均流量(下文通称洪水流量)和最小连续7日平均流量(下文通称枯水流量)。数据均来自江西水文局,部分缺失数据通过与相邻水文站水文序列建立回归关系进行插补($R^2 > 0.8$)。由于缺测数据较少,插补后的数据可以较好的满足本文研究需要。采用二维阿基米德族 Copula 函数来分别分析鄱阳湖流域的洪水联合分布和枯水流量联合分布,其中分别选取外洲与李家渡、虎山与渡峰坑的洪水流量、枯水流量的概率分布作为边缘分布函数。

2.1 Copula 函数的确定

由 Genest-Rivest 检验法,分别对构建各所选 Copula 函数的理论估计值 $K_c(t)$ 和经验估计值 $K_e(t)$,并点绘 $K_e - K_c$ 关系图(图2)。由 $K_e - K_c$ 关系图可知,GH Copula 函数图上的点较之 Frank Copula、Clayton Copula 更接近于45°对角线,即表示 GH Copula 其拟合效果最好,因此本文选取 GH Copula 函数来拟合鄱阳湖流域内洪、枯水径流的联合分布。

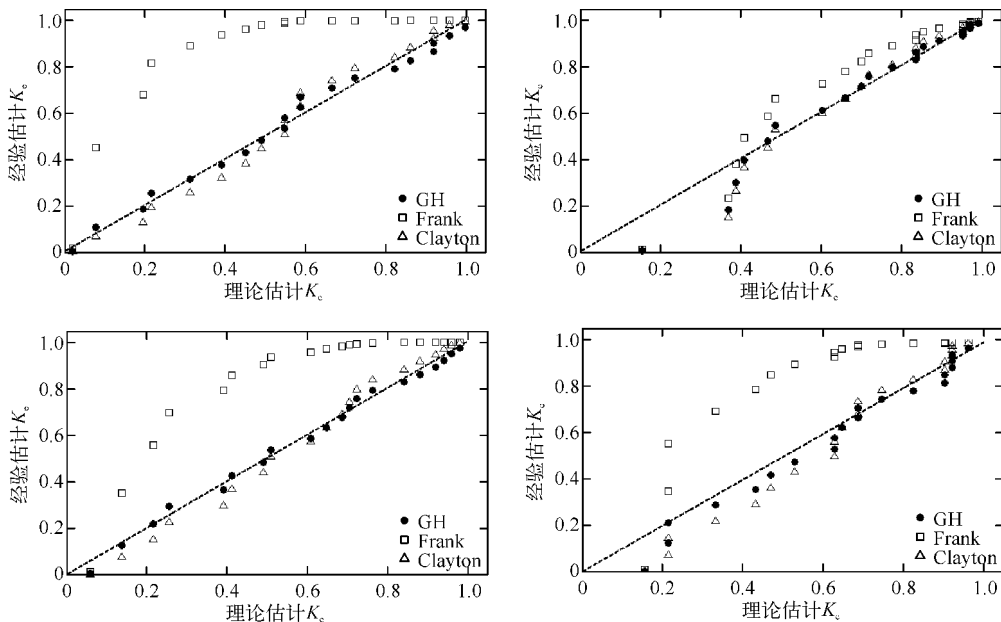


图2 Genest-Rivest 方法检验结果

Fig. 2 Test results of Genest-Rivest method

2.2 边缘分布和联合分布的确定

外洲和李家渡两边缘分布均采用韦克比分布,虎山和渡峰坑的两边缘分布均采用 P-III 型分布。采用比较稳健的线性矩法,在目估适线法辅助下确定各边缘分布的参数(表2、表3),由参数即可确定边缘分布(边缘分布公式略)。

表2 外洲和李家渡韦克比边缘分布参数

Tab. 2 The parameters of wakeby distribution function in Waizhou and Lijiadu stations

站点		α	β	γ	δ	ξ
外洲	洪水	144200.0	19.6	7541.5	-0.5	1872.7
	枯水	289.4	0.6	0	0	211.6
李家渡	洪水	198910.0	195.1	2765.1	-0.4	0
	枯水	0	0	11.7	0.3	-1.9

Copula 函数参数估计采用非参数估计法,即利用变量间的 Kendall 秩相关系数 τ 与参数 θ 间的解析关系确定.将 θ 值代入 GH Copula 即可建立流量的联合分布函数(表 4).由四个站联合分布函数,并根据式(3)-(6)分别计算洪水、枯水联合重现期、同现重现期,并绘制其分布图.外洲和李家渡洪水、枯水的联合重现期、同现重现期对应流量的差值随着重现期的增加而减小(图 3b、3c、图 4b、4c),高频率对应的枯水流量的变化比较明显,而低频率部分对应的流量的大小变化不明显(图 4a).由于篇幅所限,省略了虎山和渡峰坑洪水、枯水的联合重现期、同现期成果图.

表 3 虎山和渡峰坑 P-III 型边缘分布参数

Tab.3 The parameters of Pearson III distribution function in Hushan and Dufengkeng stations

站点		α	β	α_0
虎山	洪水	1.80	0.0015	665.20
	枯水	3.63	0.0046	2.18
渡峰坑	洪水	2.92	0.1900	3.73
	枯水	2.19	0.3000	1.81

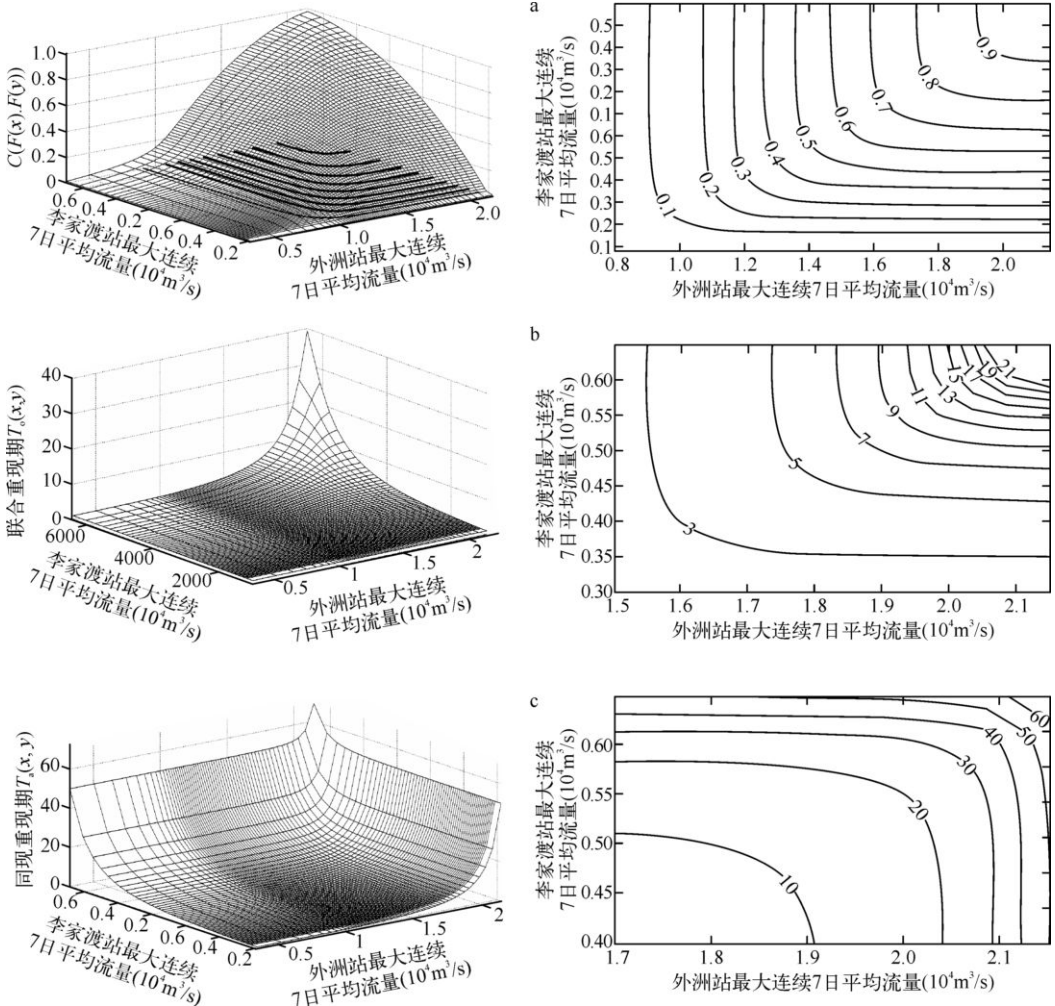


图 3 外洲、李家渡洪水的 Copula 联合分布(a)、联合重现期(b)、同现重现期(c)分布及等值线图

Fig.3 GH Copula's joint distribution(a), joint return period (b), the current return period (c) and contour map of high flow in Waizhou and Lijiadu stations

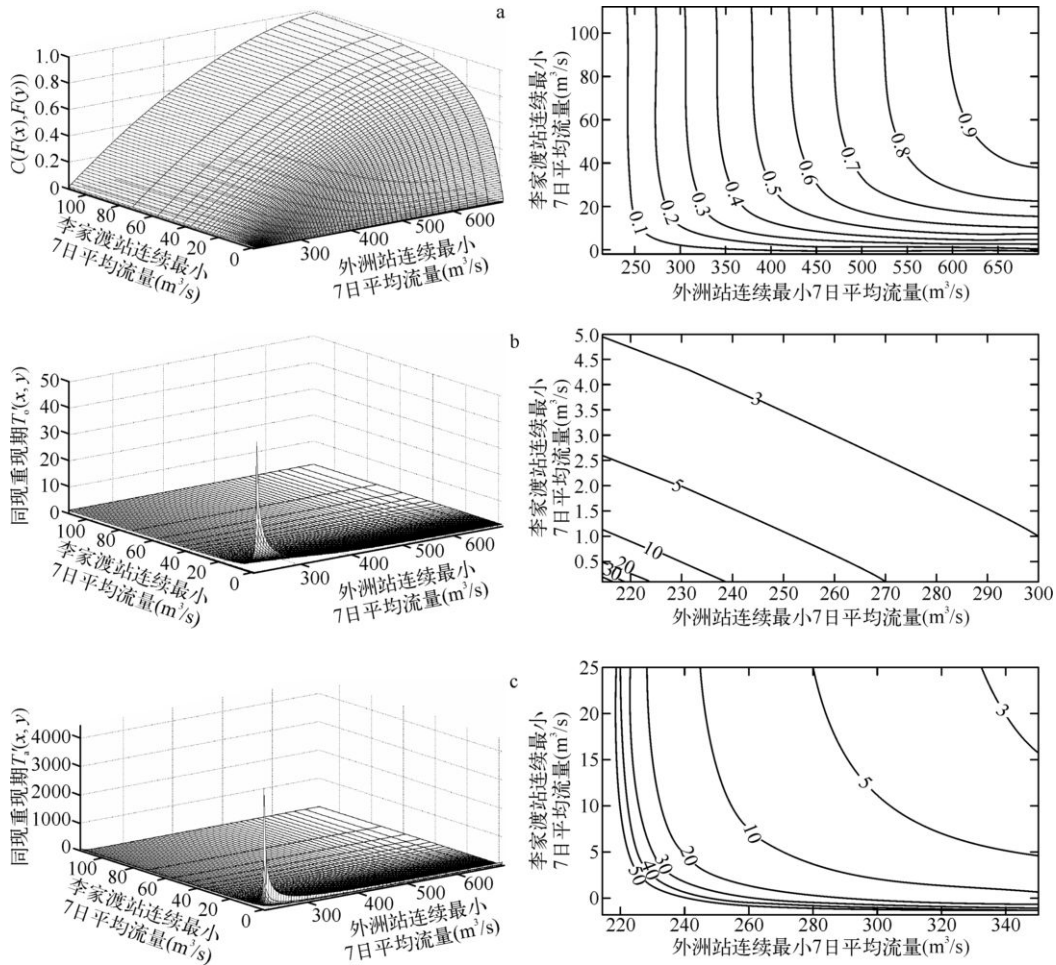


图4 外洲、李家渡枯水的 Copula 联合分布(a)、联合重现期(b)、同现重现期(c)分布及等值线图

Fig. 4 GH Copula's joint distribution(a), joint return period (b), the current return period (c) and contour map of low flow in Waizhou and Lijiadu stations

表4 GH Copula 函数参数估计结果

Tab. 4 The results of parameter estimation of GH Copula function

参数	τ	θ
外洲和李家渡洪水联合分布	0.6455	2.8208
外洲和李家渡枯水联合分布	0.1389	1.1613
虎山和渡峰坑洪水联合分布	0.4975	1.9899
虎山和渡峰坑枯水联合分布	0.5024	2.0097

2.3 结果分析

外洲站与李家渡站、虎山站与渡峰坑站在不同频率下洪水、枯水联合分布可知,洪水和枯水的联合重现期小于设计重现期,而其同现重现期大于设计重现期,洪水、枯水联合重现期与设计重现期的差值小于同现重现期与设计重现期的差值(表5)。在设计重现期相同的情况下,外洲站与李家渡站洪水联合重现期大于枯水联合重现期,而洪水同现重现期小于枯水同现重现期,而且重现期小于10年洪水同时遭遇的机率比较大,重现期大于10年的洪水遭遇频率比较小,这说明赣江和抚河的洪水遭遇频率远大于两河的枯水遭遇频率,两河下游的赣抚平原同时遭受两河洪水的频率大于同时遭受干旱的频率。虎山站与渡峰坑站的洪水和枯水的联合重现期和同现期基本一致,遭受洪水和枯水的频率基本一致,说明饶河地区洪枯水发生的频率基本相同。

表 5 不同频率组合、不同水文站点组合下洪水、枯水径流联合重现期和同现重现期
 Tab. 5 Different frequency combinations, different combinations of hydrological site high flow,
 low flow return period and with the current joint return period

设计重 现期 $T(a)$	外洲站和李家渡站				虎山站和渡峰坑站			
	洪水		枯水		洪水		枯水	
	联合重现 期 $T_o(a)$	同现重现 期 $T_a(a)$	联合重现 期 $T'_o(a)$	同现重现 期 $T'_a(a)$	联合重现 期 $T_o(a)$	同现重现 期 $T_a(a)$	联合重现 期 $T'_o(a)$	同现重现 期 $T'_a(a)$
5	3.7	7.8	2.9	18.6	3.4	9.8	3.4	9.7
10	6.8	19.0	5.4	65.5	6.2	26.1	6.2	25.8
20	12.8	46.1	10.5	230.8	11.7	69.7	11.7	68.7
30	18.6	77.4	15.5	482.1	17.1	123.8	17.1	121.8
50	30.1	148.7	25.5	1219.2	27.7	255.2	27.8	250.4
70	41.3	228.6	35.6	2246.6	38.3	411.1	38.3	402.7
90	52.5	315.2	45.6	3546.3	48.7	586.9	48.8	574.2
100	58.1	360.7	50.9	4294.3	54.1	666.4	54.1	666.4

在设计重现期相同的情况下,外洲站与李渡站洪水联合重现期略大于虎山站与渡峰坑站的洪水联合重现期,其差值随着设计重现期的增大而增大;外洲站与李渡站洪水同现重现期远小于虎山站与渡峰坑站,其差值随着设计重现期的增大而增大,表明赣江和抚河洪水发生的频率低于乐安江和昌江,但是前者的洪水遭遇频率大于后者.与洪水相比,枯水的联合重现期和同现重现期的变化恰好相反,外洲站与李渡站枯水联合重现期小于虎山站与渡峰坑站,但枯水的同现重现期大于虎山站与渡峰坑站,表明赣江和抚河发生干旱的频率大于乐安河和昌江,但是赣江和抚河干旱同时发生的频率小于乐安河和昌江.

赣江流域建成的 107 座水库(库容 $75.13 \times 10^8 \text{ m}^3$) 在鄱阳湖流域的“五河”中数量和库容均居首位,这也造成赣江流域的降雨与流量的自相关系数小于 0.8^[17],其中万安水库的建成可提高下游地区防御 30 年一遇的洪水.抚河拥有 18 座大中型水库(总库容 $17.18 \times 10^8 \text{ m}^3$) 在数量和库容上大于饶河拥有的 15 座大中型水库(总库容 $4.90 \times 10^8 \text{ m}^3$),赣江和抚河拥有的众多大中型水库是两河联合洪水频率低于饶河流域的原因之一.另一个原因是抚河和赣江的耕地面积在“五河”中排在第一位,沿河建设大量的灌溉渠系、圩堤和引水灌溉工程对区域的降雨起到一定的滞留作用,可以减缓滞留洪峰的遭遇.乐安河和昌江水利工程建设较少,而且主要以山地为主,产汇流时间比较短,1990 年以后饶河流域平均暴雨量和降雨量增加显著^[7],暴雨发生后迅速形成洪水,这也使得该区域洪水发生的频率大.赣江和抚河洪水遭遇频率大于饶河流域的主要原因是与降雨的分布有关系,鄱阳湖流域的洪水主要是暴雨造成^[18],因此暴雨中心的分布以及降雨时间的一致性对两河洪水遭遇的频率影响最大.近 50 年来赣江上游、中游、抚河的暴雨日数变化呈显著上升趋势,而饶河的暴雨日数变化趋势不显著^[19],因此赣江和抚河洪水同现期的频率高于饶河流域.从历史资料来看,赣江和抚河同时发生大洪水的年份有 1968 年、1982 年、1994 年和 1998 年,而饶河流域发生大洪水年份有 1955 年、1967 年和 1998 年^[18,20],进一步证明赣江和抚河洪水遭遇频率大于饶河.

枯水影响因素与洪水不同,森林可以在一定程度上削减中小洪水的洪峰流量,但对全流域长历时暴雨所造成的特大洪水的削减作用是极其有限的^[21],相反在枯水季节森林能显著增加河流径流量^[22].乐安河和昌江是鄱阳湖流域森林覆盖率最高的地区,其次是赣江流域,抚河流域森林覆盖率最低^[23].饶河流域的第一产业只占 12.11%,农业用地在“五河”中最少,土地类型主要以林地为主,森林植被明显增加河流枯季径流量^[33].饶河流域虽然暴雨日数趋势基本不变,但是降雨量呈增加趋势,因此其枯水遭遇频率低于其他地区.抚河流域农业用地比例最大,农业人口最多,而且抚河的径流趋势变化基本不变,甚至有降低的趋势^[24].赣江流域由于流域面积很大,各个地区的降雨分布不均匀,赣江中游地区的降雨呈减小的趋势^[21],但工农业用水需求很大,这也造成了枯季的供水更加紧张.虽然赣江和抚河修建大量引水灌溉工程,但是许多中小型水利设施由于年久失修并没有达到设计标准^[25],这些原因造成赣江和抚河干旱发生的频率大于乐安河和昌江地区.但是因为乐安河和昌江同属于饶河流域,其气候特点基本一致,饶河流域面积小,相比于流域面积大的赣江和抚河,饶河发生全流域的干旱机率大,因此乐安河和昌江的干旱遭遇频率大于赣江和抚河.

3 结论

由 Genest-Rivest 检验法计算得出, GH Copula 函数拟合效果最好, 可以拟合鄱阳湖流域内洪、枯水径流的联合分布. 赣江和抚河洪水发生的概率小于干旱发生的频率, 但是洪水的遭遇频率高于干旱的遭遇频率. 赣江和抚河的洪水发生的频率小于抚河的乐安河和昌江, 但是赣江和抚河洪水同时遭遇频率高于饶河区域. 赣江和抚河枯水发生频率高, 但是枯水同时出现的机率比饶河小. 本文采用 Copula 函数建立鄱阳湖流域极值流量两变量的联合分布, 用其概率密度函数来描述其遭遇的机率, 对鄱阳湖流域整体防洪排涝规划设计提供了科学依据与理论支持.

4 参考文献

- [1] Milly PCD, Wetherald PT. Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 2002, **415**(6871): 514-517.
- [2] Palmer TN, Räisänen J. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature*, 2002, **415**: 512-514.
- [3] Easterling DE, Meehl AG, Parmesan C *et al.* Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, **689**: 2068-2074.
- [4] Yu FL, Chen ZY, Ren XY *et al.* Analysis of historical floods on the Yangtze River, China: Characteristics and explanations. *Geomorphology*, 2009, **113**: 210-216.
- [5] Zhang Q, Marco G, Chen J. Climate changes and flood/drought variation and flood risk in the Yangtze Delta, China. *Quaternary International*, 2008, **176-177**: 62-69.
- [6] Zhang Q, Liu CL, Xu CY. Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past 130 years in the Yangtze River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2006, **324**: 255-265.
- [7] 郭 华, 姜 彤, 王国杰等. 1961-2003 年间鄱阳湖流域气候变化趋势及突变分析. *湖泊科学*, 2006, **18**(5): 443-451.
- [8] 王 凤, 吴敦银, 李荣昉. 鄱阳湖区洪涝灾害规律分析. *湖泊科学*, 2008, **20**(4): 500-506.
- [9] 刘 健, 张 奇, 左海军等. 鄱阳湖流域径流模型. *湖泊科学*, 2009, **21**(4): 570-578.
- [10] Favre AC, Adlouni SE, Perrault L *et al.* Multivariate hydrological frequency analysis using Copulas. *Water Resources Research*, 2004, **40**: 1-12.
- [11] Nelson RB. An introduction to Copulas. New York: Springer, 1999.
- [12] Zhang Q, Xu CY, Chen YQ *et al.* Extreme value analysis of annual maximum water levels in the Pearl River Delta, China. *Front Earth Sci China*, 2009, **3**(2): 154-163.
- [13] Salvadori G, Michele CD. Frequency analysis via Copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events. *Water Resources Research*, 2004, **40**(12): 1-17.
- [14] Zhang L, Singh VP. Bivariate flood frequency analysis using the copula method. *Journal of Hydrologic Engineering ASCE*, 2006, **11**: 150-164.
- [15] Kao Shih-Chieh, Rao S Govindaraju. A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology*, 2010, **380**: 121-134.
- [16] Genest C, Rivest L. Statistical inference procedures for bivariate Archimedean copulas. *Journal of American Statistical Association*, 1993, **88**: 1034-1043.
- [17] Zhao G, Georg H, Nicola F *et al.* Streamflow trends and climate variability impacts in Lake Poyang Basin, China. *Water Resources Management*, 2010, **24**: 689-706.
- [18] 谢 军, 黄智权, 杨巧言. 江西省自然地理志. 北京: 方志出版社, 2003: 213-219.
- [19] 许炯心. 长江上游干支流的水沙变化及其与森林破坏的关系. *水力学报*, 2000, (1): 72-80.
- [20] 江西水利厅-防汛抗旱概述-洪水灾害 (<http://www.jxsl.gov.cn/hszh.jsp>).
- [21] 王怀清, 赵冠男, 彭 静. 近 50 年鄱阳湖五大流域降水变化特征研究. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(7): 615-619.
- [22] 刘向东, 苏宁虎. 六盘山森林水文生态功能评价. 中国林学会森林水文与流域治理专业委员会/全国森林水文学术讨论会文集. 北京: 测绘出版社, 1989.
- [23] 江西文明信息库 (<http://ziliaoku.jxmw.cn/huanpoyanghu/pohuliuyu>), 2008, 11.
- [24] 孙 鹏, 张 强, 陈晓宏. 鄱阳湖流域水沙时空演变特征及其机理. *地理学报*, 2010, **65**(7): 828-840.
- [25] 江西水文局. 江西水系. 武汉: 长江出版社, 2007.