

Flood Coincidence Risk Analysis for the Middle Yangtze River and Poyang Lake

Tianyuan Li¹, Shenglian Guo², Zhangjun Liu², Guoqiang Liu¹, Sidong Zeng¹

¹Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan

²State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

Email: tyli1986@sina.com

Received: Oct. 10th, 2014; revised: Nov. 18th, 2014; accepted: Nov. 20th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The von Mises distribution was used to fit the series of annual maximum flood occurrence and interval dates. The Copula functions were used to establish the bivariate joint distribution of annual maximum flood occurrence dates and the multivariate joint distribution of interval dates and flood magnitude. The flood coincidence risk of annual maximum flood occurrence date, flood magnitude and flood process were analyzed based on the data series of Hankou and Hukou hydrological stations. The results show that the highest flood coincidence risk of annual maximum flood occurrence date and 7-day flood process between the middle Yangtze River and Poyang Lake may reach to 0.058% (on July 16th) and 7.31% respectively during the flood season. The research can provide scientific basis for Poyang Lake basin on flood prevention planning and ecological-economic zone construction.

Keywords

Poyang Lake, Middle Yangtze River, Flood Coincidence, Copula Function

鄱阳湖与长江干流洪水遭遇规律及风险分析

李天元¹, 郭生练², 刘章君², 刘国强¹, 曾思栋¹

¹长江勘测规划设计研究院, 武汉

²武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

Email: tyli1986@sina.com

作者简介: 李天元(1986-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 主要从事水文分析计算与水资源规划方面的研究。

收稿日期：2014年10月10日；修回日期：2014年11月18日；录用日期：2014年11月20日

摘要

本文引入 von Mises 分布及其混合形式拟合年最大洪水发生时间与间隔时间，应用 Copula 函数分别构造汉口、湖口两站年最大洪水发生时间二维联合分布和年最大洪水发生时间(间隔时间)与洪水量级的三维联合分布，分析了研究两站年最大洪水在时间、量级及过程三个方面的遭遇风险。结果表明：鄱阳湖和长江年最大洪水在7月16日遭遇的可能性最大，约为0.058%，鄱阳湖和长江年最大7d洪水过程发生遭遇的概率为7.31%。研究可为鄱阳湖流域防洪规划制定和生态经济区建设提供科学依据。

关键词

鄱阳湖，长江干流，洪水遭遇，Copula函数

1. 引言

关于洪水的遭遇风险，目前常用的方法是根据研究区域历年同步洪水资料进行统计[1] [2]，如王政祥[3]等统计了实测资料中汉江水源区与受水区丰枯遭遇概率。但是常规方法只能对已发生洪水进行简单的统计分析计算，对发生百年一遇或千年一遇等设计洪水的遭遇风险尚无法定量估算。近年来 Copula 函数已作为一种有效的工具，用于多变量的水文分析计算，Copula 函数能够通过边缘分布和相关性结构两部分来构造多维联合分布，且边缘分布的形式灵活多样，求解比较简单[4]。王占海等[5]采用混合 Copula 函数，分析了长江干流寸滩站和宜昌站的洪水遭遇问题；闫宝伟等[6] [7]通过构造长江和清江年最大洪水发生时间及量级的联合分布，分析了两江年最大洪水量级与洪水过程的遭遇概率；陈璐等[8] [9]基于多维 Copula 函数，研究了长江上游干流与多条支流的遭遇规律；李天元等[10]基于 Copula 函数建立了宜昌站与螺山站洪水发生时间和量级的联合分布，以此为基础分析了长江上、中游洪水在后汛期的遭遇规律。以上学者的研究为洪水遭遇问题提供了新的思路和方法。

鄱阳湖区自古就是为长江中下游洪涝灾害的重灾区和多发区，洪涝灾害危及湖区人民生命财产安全，严重地制约着湖区社会经济的发展。鄱阳湖区受五河来水及长江顶托影响，河湖关口系复杂，组合遭遇问题纷繁错综。长江干流下泄流量与鄱阳湖出流相互顶托，对长江湖口洪道以上河段洪水下泄及鄱阳湖出流的影响比较显著，同时五河的出流受到鄱阳湖顶托的影响。研究入湖各洪源之间以及鄱阳湖与长江洪水的遭遇问题具有重要意义。

本文引入 von Mises 分布及其混合形式拟合年最大洪水发生时间和间隔时间，应用 Copula 函数分别构造汉口、湖口两站年最大洪水发生时间及年最大洪水发生时间(间隔时间)与洪水量级的联合分布，分析研究两站年最大洪水量级及过程的遭遇风险，为鄱阳湖流域防洪规划制定和生态经济区建设提供科学依据。

2. Copula 函数简介

Copula 函数是定义域为[0, 1]均匀分布的多维联合分布函数，由 Sklar 定理，它可以将多个随机变量的边缘分布连接起来构造联合分布，对于二维来说，它可以表述为如下形式[11]：

$$F(x, y) = C_{\theta}(F_x(x), F_y(y)) = C_{\theta}(u, v) \quad (1)$$

式中： C 称为 Copula 函数， θ 为 Copula 参数， $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$ 为随机变量 X 和 Y 的边缘分布。

Archimedean Copula 函数是水文领域应用比较广泛的一类 Copula 函数，它包含 Gumbel-Hougaard Copula、Clayton Copula 和 Frank Copula 等函数形式，关于 Copula 函数形式及其选取和参数估计等一系列问题，文献[4]已有详细介绍，本文不再赘述。

3. von Mises 分布函数

洪水发生时间(间隔时间)可看作是具有周期性变化的矢量，von Mises 分布是描述具有周期性或季节性变量的常用分布，在医学、犯罪学等领域应用广泛，方彬等[12]首次采用该分布拟合年最大洪水的发生时间，拟合效果较好。von Mises 分布的密度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{2\pi I_0(k)} \exp[k \cos(x-u)], \quad 0 \leq x \leq 2\pi, \quad 0 \leq \mu \leq 2\pi, \quad k > 0 \quad (2)$$

式中： u 和 k 分别为位置参数和尺度参数； I_0 为 0 阶变型 Bessel 函数。如果洪水发生时间(间隔时间)呈现双峰特性(夏汛和秋汛)，则可采用混合 von Mises 分布。混合 von Mises 分布由多个 von Mises 分布按一定比例相加而得，可以有效拟合变量的双峰或多峰特征，其密度函数为：

$$f(x, G) = \sum_{i=1}^p \alpha_i f(x; u_i, k_i) \quad (3)$$

式中： $f(x; u_i, k_i)$ 为单一 von Mises 分布， α_i 为第 i 个成份的混合比例； p 为有限混合 von Mises 分布的阶数。

4. 年最大洪水量级遭遇的风险分析

4.1. 年最大洪水发生时间的遭遇风险

假定年最大洪水均发生于汛期，根据汉口、湖口两站 1959~2009 年汛期(5 月~10 月)日径流资料，得到长江和鄱阳湖年最大洪水发生时间 T_c 和 T_p 两个序列。采用混合 von Mises 分布来拟合 T_c ，采用 von Mises 分布来拟合 T_p 。以上参数采用带有约束的极大似然法估计得到，如表 1 所示。 T_c 和 T_p 的概率密度拟合如图 1 所示，可见，von Mises 及其混合形式的分布能较好地拟合洪水发生时间序列。

图 2 绘出了长江 - 鄱阳湖年最大洪水在汛期每天相遭遇的风险，可以看出，长江和鄱阳湖洪水在 6 月份之前遭遇的可能性很小，几乎为 0，主要是因为长江汉口站的汛期一般在 6 月~9 月，滞后鄱阳湖一个月左右，因此，长江和鄱阳湖洪水一般不会在 6 月份之前发生遭遇；长江和鄱阳湖洪水在 7 月 16 日遭遇的可能性最大，约为 0.058%。其中 6 月末至 8 月初是年最大洪水发生遭遇的一个集中期，尤其是整个 7 月份，每天遭遇的风险都在 0.02% 以上。

4.2. 汉口、湖口年最大洪水发生时间和量级的联合分布

根据年最大洪水取样法，得到长江和鄱阳湖的年最大日均洪峰流量序列，经分析，两站发生年最大

Table 1. Estimated parameters for von Mises distributions

表 1. von Mises 分布参数估计结果

参数	参数估计方法	u_1	k_1	u_2	k_2	α_1	α_2
汉口	混合 von Mises 分布	4.27	3.12	2.54	5.49	0.24	0.76
湖口	von Mises 分布	1.68	1.57	-	-	-	-

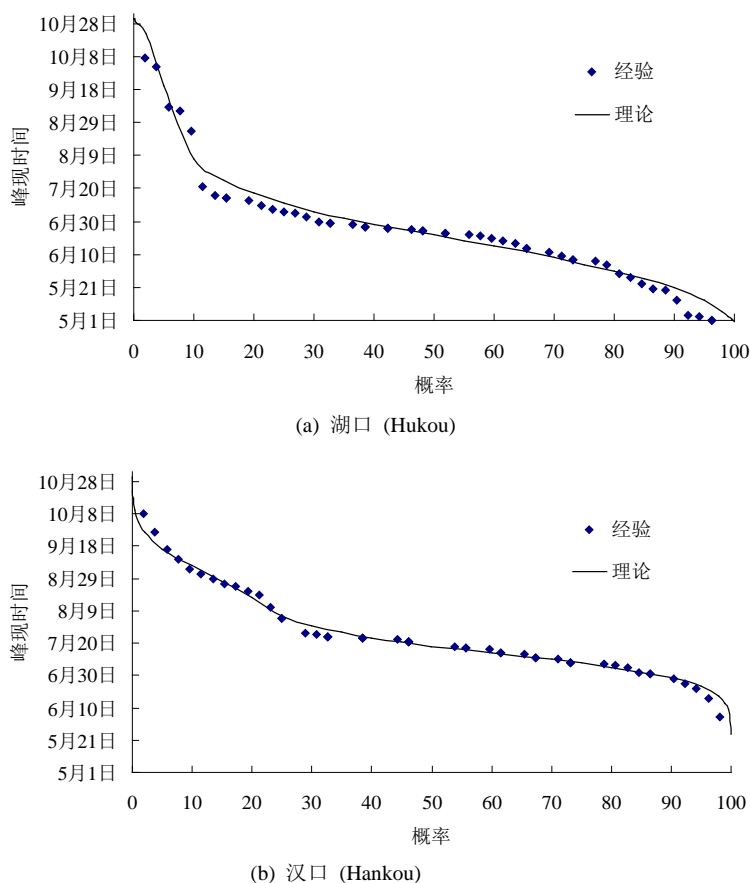


Figure 1. Probability fitting graph of annual maximum flood occurrence time for the Yangtze River and Poyang Lake
图 1. 长江和鄱阳湖年最大洪水发生时间概率拟合图

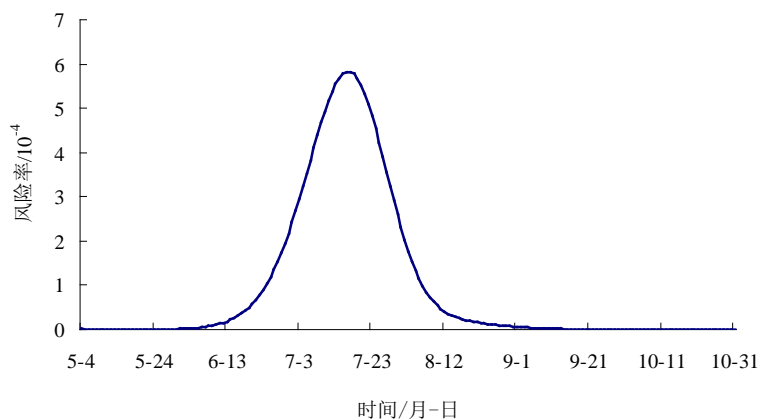


Figure 2. Daily coincidence risk of annual maximum flood occurrence time for the Yangtze River and Poyang Lake
图 2. 长江和鄱阳湖年最大洪水发生时间的日遭遇风险

洪水的量级可看作独立事件。因此，两站洪水量级遭遇的风险为两站单独发生洪水的风险率之积，但这样得到的风险率仅为洪水在一年内遭遇的风险，如果两站洪水不是发生在同一天或时间间隔较大时，这样的洪水根本谈不上遭遇。为分析长江和鄱阳湖洪水量级在汛期每天发生遭遇的风险，引入中间变量——

洪水发生时间，分别构造长江和鄱阳湖洪水发生时间和量级的联合分布，通过限定洪水发生时间便可以得到不同洪水量级在每天遭遇的风险。

4.3. 汉口、湖口年最大洪水量级遭遇风险分析

得到长江和鄱阳湖年最大洪水发生时间与其量级的联合分布后，就可以定义年最大洪水在第 i 天 (t_i) 发生量级分别为 q_C 和 q_P 的风险 $p_{q_C}^i$ 和 $p_{q_P}^i$ 为：

$$p_{q_C}^i = P(t_i - \tau \leq T_C < t_{i+1} - \tau, Q_C \geq q_C) = F_{T_C}(t_{i+1} - \tau) - F_{T_C}(t_i - \tau) + F_C(t_i - \tau, q_C) - F_C(t_{i+1} - \tau, q_C) \quad (4)$$

式中： τ 为传播时间，这里取 $2d$ 。

$$p_{q_P}^i = P(t_i \leq T_P < t_{i+1}, Q_P \geq q_P) = F_{T_P}(t_{i+1}) - F_{T_P}(t_i) + F_P(t_i, q_P) - F_P(t_{i+1}, q_P) \quad (5)$$

由于两站年最大洪水量级是相互独立的，因此，长江和鄱阳湖在某一天发生某一量级的年最大洪水也可以看作是独立的，则长江和鄱阳湖洪水量级在第 i 天遭遇的风险 p_q^i 为：

$$p_q^i = p_{q_P}^i \times p_{q_C}^i \quad (6)$$

同理，将汛期内长江和鄱阳湖某一量级洪水的日遭遇风险相加，得到整个汛期的洪水遭遇风险：

$$p_q = \sum_{i=1}^n p_q^i \quad (7)$$

据此就可以计算洪水各种量级(同频率或非同频率)在汛期每日的遭遇风险。表 2 列出了长江和鄱阳湖洪水在 0.1%、0.2%、0.5%、1%、2%、5%、10% 和 20% 频率下的设计流量及同频率遭遇后的组合流量。

图 3 给出了长江和鄱阳湖发生同频率洪水时的日遭遇风险，由该图就可以非常方便的查出长江和鄱阳湖每天遭遇各种同频率洪水时的风险。

5. 洪水过程遭遇的风险分析

5.1. 七天洪水过程间隔时间的特征分析

按年最大取样，得到长江和鄱阳湖年最大 $7d$ 洪量 $W_{7,C}$ 和 $W_{7,P}$ 及其间隔时间序列 T_q ，取 2 阶的混合 von Mises 分布描述间隔时间的分布特征，参数估计结果 $u_1 = 2.64$ ， $k_1 = 3.40$ 。拟合结果如图 4 所示，可见拟合效果较好，图中负号表示鄱阳湖洪水先于长江发生。

由图 4 可知，当纵坐标 $T_q = -178$ 时，意味着鄱阳湖年最大 $7d$ 洪量发生于 5 月 1 日~5 月 7 日，长江最大 $7d$ 洪量在 10 月 25 日之后发生，其概率为 0；当 $T_q = 178$ 时，即长江在 5 月 1 日~5 月 7 日洪量最大，鄱阳湖在 10 月 25 日之前出现年最大 $7d$ 洪量，其概率为 1，频率曲线呈现两端有限的趋势，这与之前的

Table 2. Encountering flows of identical frequency floods for the Yangtze River and Poyang Lake
表 2. 长江和鄱阳湖同频率洪水遭遇时的组合流量

设计流量 (m ³ /s)	遭遇频率(%)							
	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20
湖口	36,000	34,060	31,400	29,320	27,150	24,100	21,610	18,840
汉口	80,100	78,400	76,000	74,000	71,700	68,300	65,200	61,460
组合流量	116,100	112,460	107,400	103,320	98,850	92,400	86,800	80,300

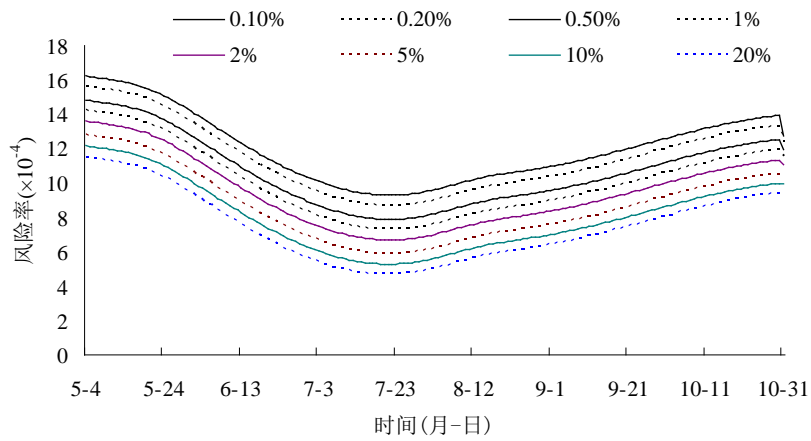


Figure 3. Daily coincidence risk of identical frequency floods for the Yangtze River and Poyang Lake

图 3. 长江 - 鄱阳湖同频率洪水在汛期每日的遭遇风险

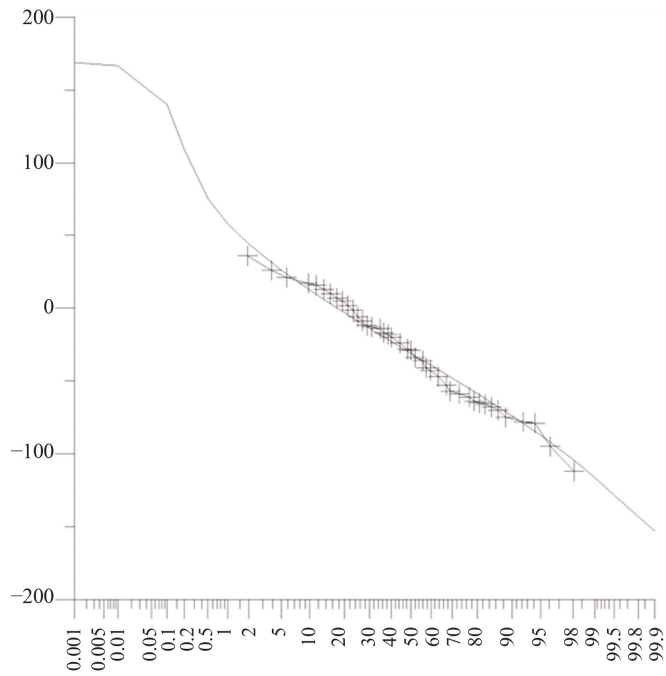


Figure 4. Frequency curve of interval time (T_d) of annual 7-d flood for the Yangtze River and Poyang Lake

图 4. 长江和鄱阳湖年最大 7 d 洪水间隔时间 T_d 的频率曲线

假定年最大洪水全部发生于汛期相吻合。 $T_d = 0$ 时，对应的概率值为 19.23%，意味着长江先于鄱阳湖发生年最大 7 d 洪水的概率为 19.23%，也即鄱阳湖先于长江发生年最大 7 d 洪水的概率为 80.77%，表明一般情况下，鄱阳湖先于长江发生年最大 7 d 洪水，在气候成因上符合长江流域洪水发生的一般规律。

由洪水过程遭遇的定义可知，间隔时间 $T_d \in [-4, 4]$ 时，长江和鄱阳湖年最大 7 d 洪水有 4 d 及以上重叠的概率为 7.31%，即长江和鄱阳湖年最大洪水过程发生遭遇的概率为 7.31%。其中 $T_d \in [-4, 0]$ 的概率为 4.30%， $T_d \in [0, 4]$ 的概率为 3.82%，也即在 7 d 洪水过程遭遇的情形下，鄱阳湖先于长江出现年最大 7 d 洪水的概率为 4.30%，长江先于鄱阳湖的概率为 3.82%。

5.2. 洪水量级与间隔时间的联合分布

长江和鄱阳湖年最大洪水量级与其发生的间隔时间之间存在一定的相关性，根据 Copula 函数构造联合分布的方法和步骤，建立长江和鄱阳湖年最大 7 d 洪量 $W_{7,C}$ 和 $W_{7,P}$ 与其间隔时间 T_d 的联合分布，联合经验频率按拟合图见图 5。

根据 Copula 函数的选取原则，采用 Clayton Copula 函数构造洪水间隔时间和量级的联合分布，统计参数由极大似然法估计而得： $\theta_1 = 0.1$ ， $\theta_2 = 0.5$ 。则长江和鄱阳湖年最大 7 d 洪量与其间隔时间的联合分布函数为：

$$\begin{aligned}
 F(T_d, W_{7,C}, W_{7,P}) &= C(F_{T_d}(t), F_{W_{7,C}}(W_7), F_{W_{7,P}}(W_7)) \\
 &= \left[\left(F_{T_d}(t)^{-0.5} + F_{W_{7,P}}(W_7)^{-0.5} - 1 \right)^{0.2} + F_{W_{7,C}}(W_7)^{-0.1} - 1 \right]^{-10}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

5.3. 七天洪水过程遭遇的风险分析

得到长江和鄱阳湖年最大 7 d 洪量与其间隔时间的联合分布后，就可以根据前面洪水过程遭遇的定义，得到长江和鄱阳湖洪水过程遭遇的风险为：

$$\begin{aligned}
 p_f &= P(t_1 \leq T_d \leq t_2, W_{7,P} > w_{7,P}, W_{7,C} > w_{7,C}) \\
 &= P(t_1 \leq T_d \leq t_2) - P(t_1 \leq T_d \leq t_2, W_{7,P} \leq w_{7,P}, W_{7,C} \leq +\infty) \\
 &\quad - P(t_1 \leq T_d \leq t_2, W_{7,P} \leq +\infty, W_{7,C} \leq w_{7,C}) + P(t_1 \leq T_d \leq t_2, W_{7,P} \leq w_{7,P}, W_{7,C} \leq w_{7,C}) \\
 &= F_{T_d}(t_2) - F_{T_d}(t_1) - C(F_{T_d}(t_2), F_{W_{15,P}}(w_{15}), 1) + C(F_{T_d}(t_1), F_{W_{15,P}}(w_{15}), 1) \\
 &\quad - C(F_{T_d}(t_2), 1, F_{W_{15,C}}(w_{15,C})) + C(F_{T_d}(t_1), 1, F_{W_{15,C}}(w_{15,C})) \\
 &\quad + C(F_{T_d}(t_2), F_{W_{15,P}}(w_{15,P}), F_{W_{15,C}}(w_{15,C})) - C(F_{T_d}(t_1), F_{W_{15,P}}(w_{15,P}), F_{W_{15,C}}(w_{15,C}))
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

当 $T_d \in [t_1, t_2] = [-4, 4]$ 时长江和鄱阳湖洪水过程才会遭遇。便于日后的查询，制作了几种设计频率组合下的遭遇风险表，如表 3 所示。对于实际中出现的遭遇组合可以通过内插进行估算。

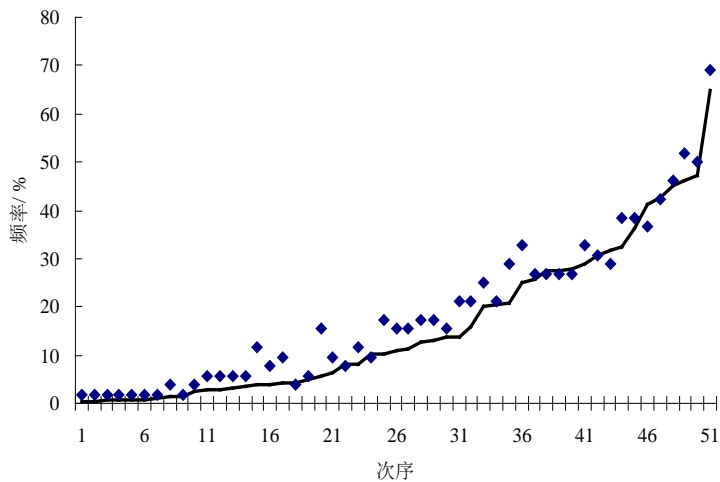


Figure 5. Joint probability fitting graph of annual maximum 7-d flood volumes and their corresponding interval occurrence time for the Yangtze River and Poyang Lake
 图 5. 长江和鄱阳湖年最大 7 d 洪量与其间隔时间的联合经验频率拟合图

Table 3. Coincidence risk of 7-d flood volumes for the Yangtze River and Poyang Lake ($\times 10^{-4}$)
表 3. 长江和鄱阳湖 7 d 洪量不同频率遭遇的风险率($\times 10^{-4}$)

湖口	1%	2%	5%	10%	20%
0.10%	0.012	0.022	0.052	0.102	0.198
0.20%	0.022	0.042	0.103	0.202	0.394
0.50%	0.053	0.103	0.255	0.503	0.982
1%	0.104	0.205	0.508	1.000	1.960
2%	0.206	0.409	1.010	2.000	3.920
5%	0.510	1.020	2.520	5.000	9.780
10%	1.010	2.020	5.030	9.960	19.500
20%	2.010	4.010	9.980	19.800	38.700

6. 结论

本文引入 von Mises 分布及其混合形式拟合年最大洪水发生时间与间隔时间, 应用 Copula 函数分别构造汉口、湖口两站年最大洪水发生时间及年最大洪水发生时间(间隔时间)与其量级的联合分布, 分析研究鄱阳湖和长江干流年最大洪水发生时间、量级及过程的遭遇风险。主要研究结论如下:

1) von Mises 分布及其混合形式能较好的拟合年最大洪水发生时间和发生的间隔时间。

2) 鄱阳湖和长江年最大洪水在 7 月 16 日遭遇的可能性最大, 约为 0.058%。其中 6 月末至 8 月初是年最大洪水发生遭遇的一个集中期, 尤其是整个 7 月份, 每天遭遇的风险都在 0.02% 以上。

3) 鄱阳湖和长江年最大 7 d 洪水过程发生遭遇的概率为 7.31%。其中鄱阳湖先于长江出现年最大 7 d 洪水的概率为 4.30%, 长江先于鄱阳湖的概率为 3.82%。

4) 为便于日后的查询, 制作了不同设计频率组合下的洪水遭遇风险表, 对于实际中出现的遭遇组合可以通过内插来估算遭遇风险。

基金项目

国家自然科学基金(51190094)资助项目。

参考文献 (References)

- [1] 赵英林, 王运辉. 洞庭湖设计洪水的分析与计算[J]. 水利学报, 1995, 10: 74-79.
ZHAO Yinglin, WANG Yunhui. Design flood analysis and estimation for Dongting Lake. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 10: 74-79. (in Chinese)
- [2] 肖天国. 金沙江、岷江洪水遭遇分析[J]. 人民长江, 2001, 32(1): 30-32.
XIAO Tianguo. Floods encounter analysis for Jinsha River and Min River. Yangtze River, 2001, 32(1): 30-32. (in Chinese)
- [3] 王政祥, 张明波. 南水北调中线水源与受水区降水丰枯遭遇分析[J]. 人民长江, 2008, 39(17): 103-105.
WANG Zhengxiang, ZHANG Mingbo. Encounter probability analysis of rich-poor precipitation between water source area and water receiving areas in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. Yangtze River, 2008, 39(17): 103-105. (in Chinese)
- [4] 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[J]. 水文, 2008, 28(3): 1-7.
GUO Shenglian, YAN Baowei, XIAO Yi, et al. Application of Copula function in multivariate hydrological analysis and estimation. Journal of China Hydrology, 2008, 28(3): 1-7. (in Chinese)
- [5] 王占海, 陈元芳, 黄琴, 等. M-Copula 函数在洪水遭遇中的应用研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 69-73.
WANG Zhanhai, CHEN Yuanfang, HUANG Qin, et al. Application study on M-Copula function in flood encounter.

- Water Resources and Power, 2009, 27(1): 69-73. (in Chinese)
- [6] 闫宝伟, 郭生练, 陈璐, 等. 长江和清江洪水遭遇风险分析[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 67-73.
YAN Baowei, GUO Shenglian, CHEN Lu, et al. Flood encountering risk analysis for the Yangtze River and Qingjiang River. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 67-73. (in Chinese)
- [7] 闫宝伟, 郭生练, 余维. 长江和清江洪水过程遭遇风险分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 50-53.
YAN Baowei, GUO Shenglian and YU Wei. Coincidence risk of flood hydrographs between Yangtze River and Qing River. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 50-53. (in Chinese)
- [8] 陈璐, 郭生练, 张洪刚, 等. 长江上游干支流洪水遭遇分析[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 323-330.
CHEN Lu, GUO Shenglian, ZHANG Honggang, et al. Flood coincidence probability analysis for the upstream Yangtze River and its tributaries. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 323-330. (in Chinese)
- [9] CHEN, L., SINGH, V. P., GUO, S. L., et al. Flood coincidence risk analysis using multivariate copula functions. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(6): 742-755.
- [10] 李天元, 郭家力, 李雨. 长江上游与中游后汛期洪水遭遇规律研究[A]. 梯级水库群洪水资源调控与经济运行[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012, 272-279.
LI Tianyuan, GUO Jiali and LI Yu. Flood coincidence analysis for upstream and middle Yangtze River at the post flood season. Beijing: China Water Power Press, 2012, 272-279. (in Chinese)
- [11] NELSON, R. B. An introduction to Copulas. New York: Springer, 1999.
- [12] 方彬, 郭生练, 肖义, 等. 年最大洪水两变量联合分布研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 505-511.
FANG Bin, GUO Shenglian, XIAO Yi, et al. Annual maximum flood occurrence dates and magnitudes frequency analysis based on bivariate joint distribution. Advances in Water Science, 2008, 19(4): 505-511. (in Chinese)