

Comparative Study of Flood Coincidence Probability Calculation Methods

Na Li, Shenglian Guo*, Feng Xiong, Jun Wang

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: nalily@whu.edu.cn, *slguo@whu.edu.cn

Received: Sep. 23rd, 2020; accepted: Oct. 6th, 2020; published: Oct. 13th, 2020

Abstract

The joint distributions of the annual maximum flood occurrence dates and magnitudes of the Jinsha and Min rivers were established based on Copula functions, and the coincidence probabilities of flood occurrence dates were calculated. The joint probability, co-occurrence probability and conditional probability were used to quantitatively analyze the coincidence risk of flood magnitudes, and the results were compared. The applicability and rationality of the three probabilities to describe flood coincidence risk were discussed. It is shown that the results of joint probability may be too large, while the co-occurrence probability and conditional probability are relatively reasonable and reliable, satisfying the natural law of flood coincidence.

Keywords

Flood Coincidence Probability, Copula Function, Joint Distribution, Conditional Probability, Comparative Study

洪水遭遇概率计算方法比较研究

李娜, 郭生练*, 熊丰, 王俊

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
Email: nalily@whu.edu.cn, *slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2020年9月23日; 录用日期: 2020年10月6日; 发布日期: 2020年10月13日

摘要

基于Copula函数分别建立金沙江和岷江年最大洪水发生时间和量级的联合分布, 推求两江洪水发生时间遭遇的

作者简介: 李娜(1996-), 女, 研究生, 主要从事水文分析计算研究。

*通讯作者。

文章引用: 李娜, 郭生练, 熊丰, 王俊. 洪水遭遇概率计算方法比较研究[J]. 水资源研究, 2020, 9(5): 461-470.

DOI: 10.12677/jwrr.2020.95049

概率,采用联合概率、同现概率和条件概率定量分析两江洪水量级遭遇的风险,并对三种遭遇概率的计算结果进行比较,探讨这三种概率描述洪水遭遇风险的适用性与合理性。结果表明:联合概率的计算结果可能偏大,用来描述洪水遭遇风险并不理想;同现概率和条件概率的计算结果相对合理可靠,符合洪水遭遇的一般规律。

关键词

洪水遭遇概率, Copula函数, 联合分布, 条件概率, 比较研究

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

流域内干支流洪水遭遇,会使洪峰和洪量出现不同程度的叠加,形成大洪水,威胁下游河道安全。研究洪水的遭遇问题,对流域洪水规律的认识和防洪减灾具有重要意义。目前,主要采用水文分析法研究洪水遭遇的规律,对研究区域历年同步的洪水资料作统计分析[1]。如郑静等[2]从洪量和洪水过程的角度出发,重点分析了金沙江中游与长江中下游洪水的遭遇规律。熊莹[3]分析了长江上游干支流洪水组成,考虑洪峰遭遇和洪量遭遇两种情况,研究了长江与岷江、嘉陵江及乌江的洪水遭遇规律。戴明龙和沈燕舟[4]采用水文分析法,从遭遇时间、遭遇次数、遭遇程度及洪峰和洪量等方面,详细地分析了长江上游与洞庭湖洪水的遭遇规律。肖天国[5]依据对年最大洪峰和时段洪量的统计,分析了金沙江和岷江的洪水组成和洪水遭遇规律。但传统的水文分析法只能对已经发生的洪水进行简单的统计,不能估计百年一遇或千年一遇等设计洪水的重现期和遭遇概率[1]。

洪水遭遇的本质是一个多变量的频率组合事件,可以采用多变量的频率分析算法对其进行研究[6]。目前,常用的多变量水文分析方法有非参数法、特定边缘构成的联合分布法、多元正态分布法、经验法和将多维联合分布转换成一维分布的方法,但这些方法都存在一定的局限和不足[7][8]。近年来, Copula 函数成为水文领域的研究热点,它克服了传统方法的不足,通过任意的边缘分布和相关性结构来构造多维联合分布,其形式灵活多样,求解较为简单,在暴雨、洪水和干旱的频率分析计算和洪水遭遇等问题中得到广泛的应用[7][9]。王占海等[10]引入 M-Copula 函数,建立长江上游干流寸滩站和宜昌站年最大洪峰的联合分布函数,分析洪水的遭遇组合及遭遇概率。甘富万等[11]采用 Copula 函数建立郁江和西江年最大洪峰的联合分布,对区域洪水遭遇进行多变量分析计算。张新田等[12]基于二维 Copula 函数建立金沙江攀枝花站与雅砻江桐子林站年最大洪峰流量联合分布,定量评价了金沙江与雅砻江不同量级洪水的遭遇概率。蒋楠等[13]以锦河与连锦河为研究对象,采用 Copula 函数构建两江洪峰的联合分布,推求两江洪水的遭遇概率。但这些研究都只考虑了洪水量级的遭遇,并没有考虑洪水的发生时间。近年来,一些学者在研究洪水遭遇问题时,同时考虑了洪水量级和洪水发生时间两个因素。如陈璐等[6]利用多维非对称 Archimedean Copula 函数,分别建立长江上游干支流洪水发生时间和洪水量级的联合分布,分析干支流洪水发生时间和量级的遭遇风险。闫宝伟等[14]以长江和清江为研究对象,基于二维 Copula 函数分别构造了两江年最大洪水发生时间以及洪水发生时间和量级的联合分布模型,估计洪水发生时间和洪水量级的遭遇概率。张超等[15]采用三维非对称 Archimedean Copula 函数建立宜昌站和城陵矶站年最大洪峰及其间隔时间的联合分布,分析长江上游与洞庭湖洪水的遭遇风险。仇红亚等[9]基于椭圆 Copula 函数,分别构造洞庭湖流域多源洪水发生时间和量级的联合分布模型,研究流域多源洪水发生时间和量级的遭遇概率。

本文以金沙江和岷江为研究对象,基于 Copula 函数分别建立两江年最大洪水发生时间和量级的联合分布,

估算洪水发生时间的遭遇概率, 采用联合概率、同现概率和条件概率分析推求洪水量级的遭遇风险, 重点研究比较三种计算方法得到的洪水遭遇概率, 并讨论各种方法的合理性与可行性。

2. 研究方法

2.1. Copula 函数

Copula 函数是定义在 $[0,1]$ 区间均匀分布的多维联合分布函数。依据 Sklar 定理, 设随机变量 X, Y 的边缘分布函数分别为 $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$, $F(x, y)$ 是 X 和 Y 的联合分布函数, 则必存在唯一的 Copula 函数使得[16]:

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

式中: C 为 Copula 函数; θ 为 Copula 函数的参数; u 和 v 为边缘分布函数, $u = F_X(x) = P_X(X \leq x)$, $v = F_Y(y) = P_Y(Y \leq y)$ 。

Copula 函数种类繁多, 其中 Archimedean Copula 函数结构形式多样、参数少、易求解、适应性强, 在水文领域得到广泛的应用。本文选用此族函数中最为常用的 Clayton Copula、Gumbel-Hougaard(GH)Copula 和 Frank Copula, 其结构形式如下[7]:

1) Clayton Copula:

$$C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}; \theta \in (0, \infty) \quad (2)$$

2) Gumbel-Hougaard Copula:

$$C(u, v) = \exp\left\{-\left[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta\right]^{1/\theta}\right\}; \theta \in [1, \infty) \quad (3)$$

3) Frank Copula:

$$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{(e^{-\theta} - 1)} \right]; \theta \in R \quad (4)$$

2.2. 洪水发生时间遭遇的概率

在不考虑洪水量级的情况下, 将洪水发生时间作为研究变量。一般流域内两江年最大洪水发生在同一天的概率极小。因此, 本文假定年最大洪水发生时间的间隔不超过 Δt 天即为遭遇, 同时考虑洪水传播时间, 则两江年最大洪水发生时间在第 k 天遭遇的概率 P'_k 为:

$$P'_k = P(t_k < T_i \leq t_{k+1}, t_k + \tau - \Delta t < T_j \leq t_{k+1} + \tau + \Delta t) \quad (5)$$

式中: i, j 表示水文控制站点, i 站在 j 站的上游; T_i, T_j 为两江年最大洪水发生时间, 以汛期某一天表示; t_k 表示汛期时段的第 k 天; τ 表示洪水从 i 站到 j 站的传播时间; Δt 表示两江年最大洪水发生时间的间隔。将汛期内洪水的日遭遇概率相加, 即可得到两江年最大洪水发生时间在整个汛期遭遇的概率 P' :

$$P' = \sum_{k=1}^N P'_k \quad (6)$$

式中: N 为汛期的天数。

2.3. 洪水量级遭遇的概率

在洪水频率分析计算中, 对于两变量 Copula 联合分布, 一般研究联合概率、同现概率和条件概率。联合概率是指两个变量中至少有一个超过其设计值时事件发生的概率。变量 X, Y 的联合概率为:

$$P(X > x \cup Y > y) = 1 - F(x, y) = 1 - C(u, v) \quad (7)$$

同现概率是指两个变量同时都超过设计值时事件发生的概率。变量 X, Y 的同现概率为:

$$P(X > x \cap Y > y) = 1 - F_X(x) - F_Y(y) + F(x, y) = 1 - u - v + C(u, v) \quad (8)$$

条件概率是指给定某一变量的范围, 另一变量发生的概率大小。当 $X > x$ 时, $Y > y$ 的条件概率为:

$$\begin{aligned} P(Y > y | X > x) &= \frac{P(X > x \cap Y > y)}{P(X > x)} \\ &= \frac{1 - F_X(x) - F_Y(y) + F(x, y)}{1 - F_X(x)} \\ &= \frac{1 - u - v + C(u, v)}{1 - u} \end{aligned} \quad (9)$$

将洪水量级作为研究变量。如果两江洪水不是在同一天发生或发生的时间间隔较大, 则不能认为洪水发生遭遇。两江洪水遭遇意味着两江发生的洪水量级在一定程度之上, 且洪水发生时间的间隔在一定范围之内。因此, 在研究洪水量级遭遇时, 必须考虑洪水发生时间。假设洪水发生时间和洪水量级是两个相互独立的随机变量, 则两江中至少有一江发生某一量级洪水遭遇的联合概率为:

$$P^T = P' \cdot P(Q_i > q_i^T \cup Q_j > q_j^T) \quad (10)$$

考虑洪水发生时间, 两江同时发生某一量级洪水遭遇的同现概率为:

$$P^T = P' \cdot P(Q_i > q_i^T \cap Q_j > q_j^T) \quad (11)$$

同理, i 江发生某一量级洪水时, j 江发生另一量级洪水遭遇的条件概率为:

$$P^T = P' \cdot P(Q_j > q_j^T | Q_i > q_i^T) \quad (12)$$

式中: q_i^T, q_j^T 为两江 T 年一遇的洪水设计值。

3. 研究实例

3.1. 研究区概况

长江流域的洪水多由暴雨形成。流域内发生特大暴雨, 上下游洪水先后叠加, 易形成峰高量大的洪水, 造成局部河段的洪水灾害。金沙江是长江的上游河段, 全长 3500 km, 控制流域面积为 50 万 km^2 。金沙江洪水主要由上游的融雪和中下游暴雨叠加形成, 洪量大、历时长、涨落幅度小。金沙江流域面积大, 流域形状狭长, 且降雨常连续发生, 使多场洪水连在一起, 洪水持续时间最长可达 40 天。岷江为长江上游左岸的一级支流, 全长 735 km, 流域面积 13.54 万 km^2 。岷江洪水多由暴雨形成, 历时短、洪峰高、涨落快, 洪峰一般持续 2~4 小时。两江流向与暴雨走向大体一致, 洪水易发生遭遇, 形成长江上游大洪水。如 1966 年, 金沙江发生自 1939 年以来实测最大洪水, 同时岷江也出现年最大洪水, 成为两江洪水遭遇的典型。

本文采用金沙江屏山站和岷江高场站 1951~2016 年共 66 年的汛期日径流资料, 采用年最大取样法, 分别得到两站年最大日流量及其发生时间的序列, 作为年最大洪水样本。

3.2. 边缘分布的建立

3.2.1. 洪水发生时间的边缘分布

方彬等[17]首次引入 von Mises 分布拟合年最大洪水发生时间, 结果表明 von Mises 分布能较好地拟合具有周期性特征的变量。洪水发生时间往往呈现出多峰的特征, 所以采用混合 von Mises 分布来描述其概率密度函数

[18]。

将洪水发生时间转换为弧度 x , $x = 2\pi D_j / L$, 其中 D_j 代表洪水发生在汛期的第 j 天, L 为汛期的总长度, 洪水发生时间 X 的概率密度函数为:

$$f_X(x) = \sum_{i=1}^m \frac{P_i}{2\pi I_0(k_i)} \exp^{[k_i \cos(x-u_i)]}; 0 \leq x \leq 2\pi, 0 \leq u_i \leq 2\pi, k_i > 0 \quad (13)$$

式中: p_i 为混合比例的系数; k_i 是尺度参数; u_i 是位置参数; $I_0(k_i)$ 是 0 阶 Bessel 函数; m 是有限混合 von Mises 分布的阶, 取 $m = 3$ 。

采用极大似然法估计混合 von Mises 分布的参数, 采用 Kolmogorov-Smirnov 法(K-S)和均方根误差法(RMSE)进行拟合检验, 结果如表 1 所示。在显著水平为 5% 的情况下, K-S 检验统计量均小于临界值 0.164, 说明两站的边缘分布都通过检验, 且两站理论分布与经验频率的 RMSE 值都比较小。因此, 采用混合 von Mises 分布拟合洪水发生时间是可行的。图 1 为屏山站和高场站年最大洪水发生时间经验点据与理论分布频率曲线的拟合图。由图可知, 理论值与经验频率拟合较好。

3.2.2. 洪水量级的边缘分布

根据《水利水电工程设计洪水计算规范》, 采用 P-III 型分布计算设计洪水, 即年最大洪水量级 Y 服从 P-III 型分布, 其概率密度函数如下[19]:

$$f_Y(y) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (y - \delta)^{\alpha-1} \exp[-\beta(y - \delta)]; \alpha > 0, \beta > 0, \delta \leq y < \infty \quad (14)$$

式中: α 、 β 和 δ 分别是 P-III 型分布的形状、尺度和位置参数; $\Gamma(\cdot)$ 是伽玛函数。

采用线性矩法估算 P-III 型分布的参数, 采用 χ^2 检验法和均方根误差法进行拟合检验, 结果如表 2 所示。当显著性水平为 5% 时, 自由度为 $k - r - 1$ (其中 r 为参数个数, k 为 χ^2 检验的分组数) 的 χ^2 检验的 p 值均大于临界值 0.05, 说明两站的 P-III 型分布都通过了假设检验, 且两站的 RMSE 值都较小。因此, 可以选用 P-III 型分布拟合年最大洪水量级。图 2 为两站年最大洪水量级经验点据与理论分布频率曲线拟合图。图中, 理论值与经验频率拟合情况良好。

Table 1. Parameters and test results of marginal distributions of flood occurrence dates

表 1. 洪水发生时间边缘分布参数及检验结果

控制站	u_i	k_i	p_i	K-S 检验	RMSE
屏山	4.33	68.01	0.17	0.060 (0.164)	0.020
	5.19	7.91	0.49		
	3.40	5.69	0.34		
高场	4.23	2.22	0.64	0.046 (0.164)	0.014
	3.66	300.00	0.13		
	2.88	7.87	0.23		

Table 2. Parameters and test results of marginal distributions of flood magnitudes

表 2. 洪水量级边缘分布参数及检验结果

控制站	α	β	δ	χ^2 检验 p 值	RMSE
屏山	7.93	0.0007	5129.4	0.262 (0.05)	0.018
高场	6.57	0.0005	3522.7	0.262 (0.05)	0.222

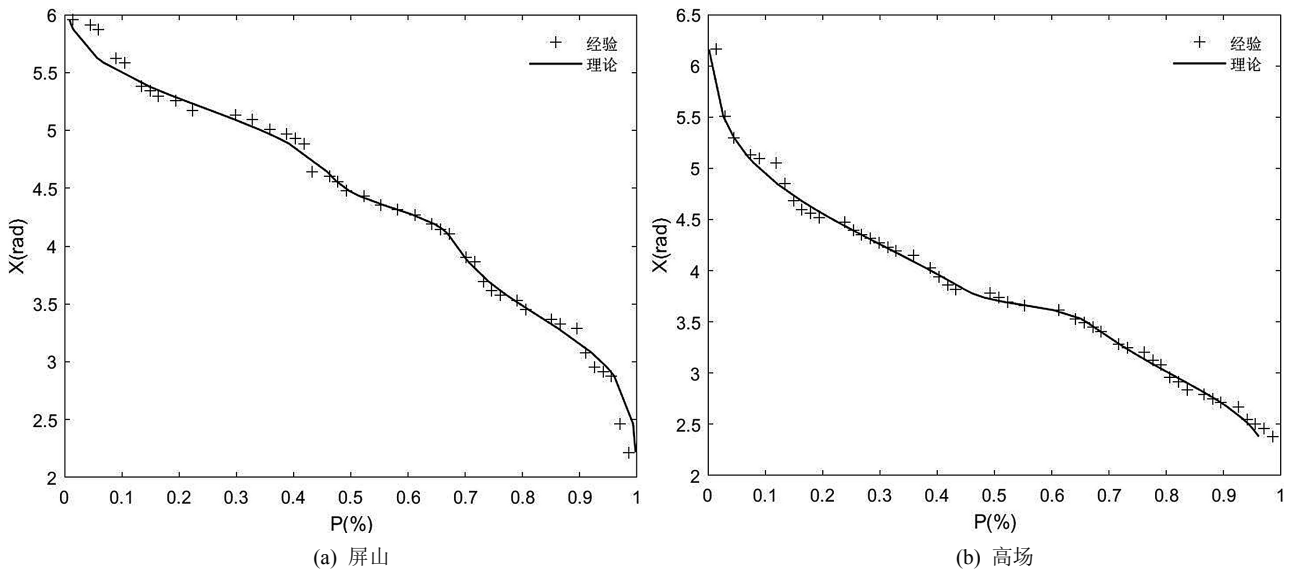


Figure 1. Fitting diagram of empirical plots and theoretical frequency curve of flood occurrence dates

图 1. 洪水发生时间经验点据与理论频率曲线拟合图

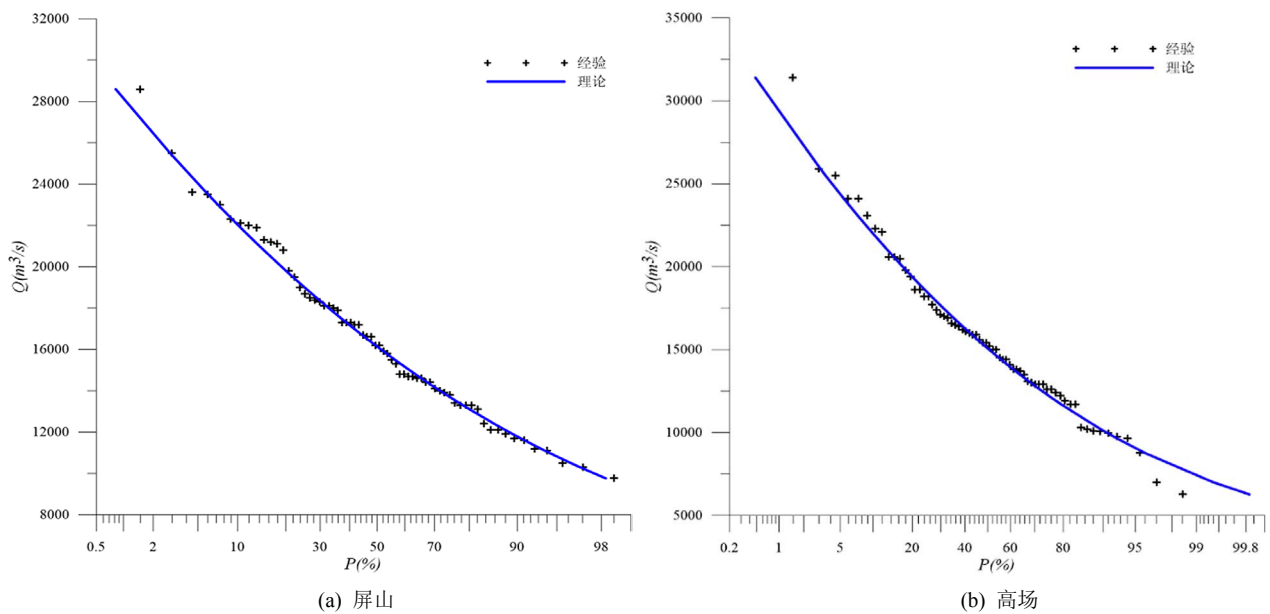


Figure 2. Fitting diagram of empirical plots and theoretical frequency curve of flood magnitudes

图 2. 洪水量级经验点据与理论频率曲线拟合图

3.3. 联合分布的建立

采用 Clayton Copula、GH Copula 和 Frank Copula 函数分别建立金沙江屏山站和岷江高场站年最大洪水发生时间和洪水量级的二维联合分布，即：

$$F(t_i, t_j) = C(T_i, T_j) \tag{15}$$

$$F(q_i, q_j) = C(Q_i, Q_j) \tag{16}$$

式中： T_i ， T_j 分别表示金沙江屏山站和岷江高场站年最大洪水发生时间； Q_i ， Q_j 分别表示两站的洪水量级。

利用 Kendall 秩相关系数估计 Archimedean Copula 函数的参数, 计算经验频率与理论频率的均方根误差进行拟合优度评价, 结果如表 3 所示。由表可知, 在洪水发生时间和洪水量级的联合分布中, 三种 Copula 函数的 RMSE 值都相差较小, 且 GH Copula 函数的 RMSE 值均最小, 拟合效果最佳, 故选用 GH Copula 函数分别建立两江洪水发生时间和量级的联合分布。图 3 分别为洪水发生时间和洪水量级联合分布的经验频率和理论频率关系图。由图可知, 拟合效果较好, 说明建立的联合分布合理可行。

Table 3. Parameter estimations and test results of the joint distributions of flood occurrence dates and magnitudes
表 3. 洪水发生时间及量级联合分布的参数估计值及拟合检验结果

Copula 函数	发生时间		洪水量级	
	θ	RMSE	θ	RMSE
Clayton	0.09	0.0296	0.43	0.0330
GH	1.04	0.0293	1.21	0.0269
Frank	0.39	0.0294	1.62	0.0285

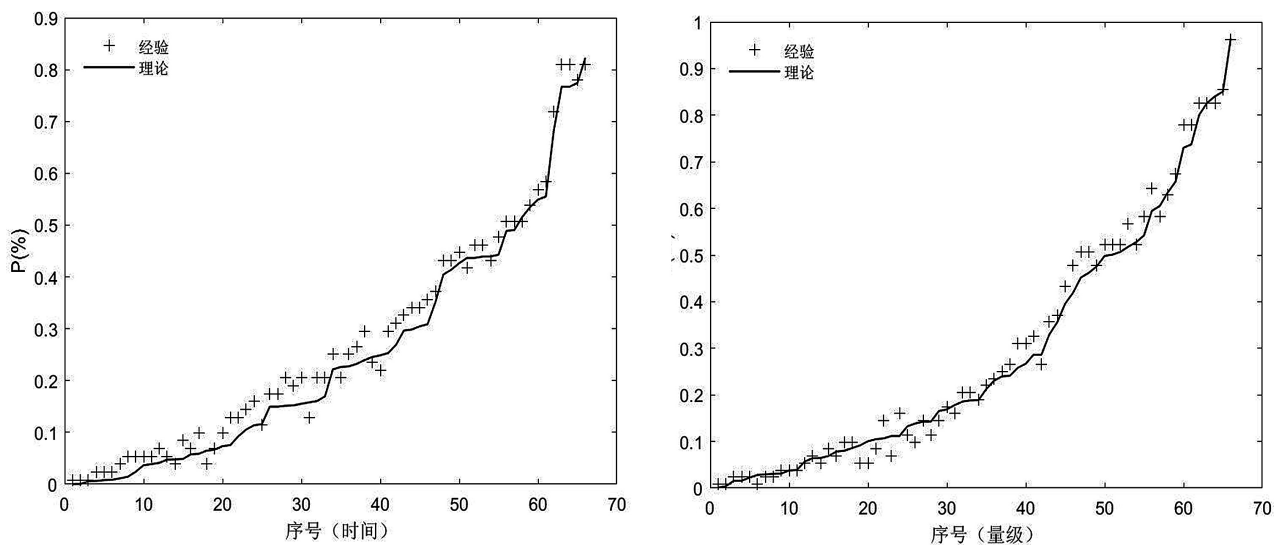


Figure 3. Fitting diagram of empirical frequency and theoretical frequency of the joint distribution of flood occurrence dates and magnitudes

图 3. 洪水发生时间和量级联合分布经验频率与理论频率拟合图

3.4. 金沙江和岷江洪水遭遇风险分析

3.4.1. 洪水发生时间遭遇的风险分析

如前所述, 流域内两江年最大日流量出现在同一天的概率极小。实测资料中, 金沙江和岷江年最大洪水发生在同一天的情况也非常少。金沙江洪水持续时间长, 涨落平缓, 而岷江洪水持续时间相对较短, 涨落较快, 一般为 5~7 天。因此, 认为两江年最大日流量发生时间的间隔在 4 天之内即为洪水发生遭遇。通过式(5)计算金沙江和岷江洪水发生时间遭遇的概率, 点绘第 k 天遭遇的概率 P'_k , 如图 4 所示。

由图可知, 金沙江和岷江洪水在 6 月份以前遭遇的概率非常小, 接近于 0; 在 7 月中旬~9 月初易发生遭遇, 遭遇概率基本维持在 1.0×10^{-3} 以上; 7 月下旬出现遭遇的高峰期, 7 月 24 日遭遇的概率最大, 达到 5.0×10^{-3} ; 8 月 10 日出现另一个小的峰值, 概率为 2.6×10^{-3} 。根据气候实测资料统计, 金沙江和岷江的暴雨都主要集中在 6 月~9 月, 8 月暴雨最多, 其次是 7 月。由此可见, 模型计算的年最大洪水发生时间遭遇结果与实测统计相一致。

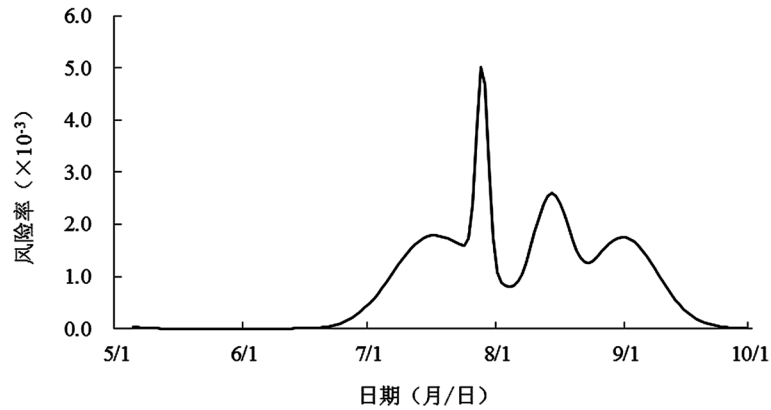


Figure 4. Daily coincidence risk of flood occurrence dates of the Jinsha River and Min River

图 4. 金沙江和岷江洪水发生时间的日遭遇风险

3.4.2. 洪水量级遭遇的风险分析

本文在研究洪水量级遭遇时，考虑了洪水发生时间，认为洪水发生时间与洪水量级相互独立，根据式(10)和式(11)分别计算金沙江和岷江发生大于某重现期洪水遭遇的联合概率和同现概率，根据式(12)计算金沙江发生大于特定重现期洪水时，岷江发生某重现期洪水的条件概率。表 4 列出了重现期分别为 5 年、10 年、20 年、50 年及 100 年情况下两江洪水遭遇的联合概率、同现概率和条件概率，对三种遭遇概率计算结果的分析讨论如下：

洪水发生量级遭遇的联合概率可能偏大。因为从联合概率定义的角度出发，不能保证两江都发生某一量级的洪水，若只有一江发生洪水，则不是洪水遭遇，这就会导致结果偏大。因此，在研究洪水遭遇问题时，采用联合概率描述遭遇风险并不合理，选用同现概率和条件概率更为恰当。

低重现期洪水遭遇的概率比高重现期洪水的大，且同现概率远小于条件概率。金沙江与岷江发生 5 年、10 年、20 年、50 年和 100 年一遇洪水遭遇的同现概率分别为 9.21×10^{-3} 、 3.73×10^{-3} 、 1.65×10^{-3} 、 0.61×10^{-3} 和 0.30×10^{-3} ，随着重现期的增大，洪水量级遭遇的同现概率明显减小。而两江发生 5 年、10 年、20 年、50 年和 100 年一遇洪水遭遇的条件概率分别为 46.03×10^{-3} 、 37.27×10^{-3} 、 32.94×10^{-3} 、 30.36×10^{-3} 和 29.50×10^{-3} ，随着重现期的增大，条件概率逐渐减小，但减小幅度不大。从同现概率和条件概率计算结果均可看出，金沙江和岷江大洪水发生遭遇的概率较小，中小洪水遭遇的概率更大，即中小洪水更容易发生遭遇，符合一般规律。

与发生小洪水相比，当上游金沙江发生大洪水时，下游岷江发生不同量级洪水的条件概率更大。金沙江发生 5 年一遇洪水时，岷江发生 5 年、10 年、20 年、50 年和 100 年一遇洪水遭遇的条件概率分别为 46.03×10^{-3} 、 27.90×10^{-3} 、 16.25×10^{-3} 、 7.56×10^{-3} 和 4.12×10^{-3} ；而金沙江发生 100 年一遇洪水时，岷江发生 5 年、10 年、20 年、50 年和 100 年一遇洪水遭遇的条件概率分别为 82.43×10^{-3} 、 68.94×10^{-3} 、 56.48×10^{-3} 、 40.66×10^{-3} 和 29.50×10^{-3} 。由于金沙江和岷江洪水量级的 Kendall 相关系数为 0.18，呈正相关关系，上游洪水对下游洪水有影响，且上游发生大洪水时，下游更容易发生洪水。

Table 4. Joint probability, co-occurrence probability and conditional probability of flood magnitudes coincidence of the Jinsha River and Min River ($\times 10^{-3}$)

表 4. 金沙江和岷江洪水发生量级遭遇的联合概率、同现概率和条件概率($\times 10^{-3}$)

河名	金沙江						遭遇概率
	重现期	5	10	20	50	100	
岷江	5	40.87	31.98	28.05	26.03	25.47	联合概率
	10	31.98	21.31	16.41	13.82	13.08	

Continued

	20	28.05	16.41	10.87	7.83	6.95	
	50	26.03	13.82	7.83	4.40	3.35	联合概率
	100	25.47	13.08	6.95	3.35	2.21	
	5	9.21	5.58	3.25	1.51	0.82	
	10	5.58	3.73	2.37	1.21	0.69	
	20	3.25	2.37	1.65	0.93	0.57	同现概率
岷江	50	1.51	1.21	0.93	0.61	0.41	
	100	0.82	0.69	0.57	0.41	0.30	
	5	46.03	55.80	64.99	75.60	82.43	
	10	27.90	37.27	47.36	60.24	68.94	
	20	16.25	23.68	32.94	46.50	56.48	条件概率
	50	7.56	12.05	18.60	30.36	40.66	
	100	4.12	6.89	11.30	20.33	29.50	

4. 结论

本文以金沙江屏山站和岷江高场站 1951~2016 年的汛期日径流资料为基础,采用混合 von Mises 分布拟合年最大洪水发生的时间,采用 P-III 型分布拟合年最大洪水的量级,基于 GH Copula 函数分别建立两江年最大洪水发生时间和洪水量级的联合分布,分析了金沙江和岷江洪水发生时间和量级的遭遇风险,重点研究比较了联合概率、同现概率和条件概率这三种分析计算方法描述洪水遭遇风险的合理性与可靠性,主要结论如下:

1) 金沙江和岷江洪水在 6 月份以前遭遇的概率接近于 0,7 月中旬~9 月初易发生遭遇,概率基本在 1.0×10^{-3} 以上,7 月 24 日出现遭遇峰值,概率为 5.0×10^{-3} ,8 月 10 日有另一个小的峰值,概率为 2.6×10^{-3} 。

2) 考虑到联合概率的定义,不能保证两江都发生特定量级的洪水,因此认为联合概率不适合用来描述洪水量级遭遇风险,同现概率和条件概率更合理可行,二者的计算结果也符合洪水遭遇的一般规律。

3) 低重现期洪水遭遇的概率比高重现期洪水的大。金沙江与岷江发生 10 年一遇洪水遭遇的同现概率为 3.73×10^{-3} ,而 100 年一遇洪水遭遇的概率仅为 0.30×10^{-3} ,中小洪水更容易发生遭遇。

4) 洪水发生量级遭遇的同现概率远小于条件概率。两江发生 100 年一遇洪水遭遇的同现概率为 0.30×10^{-3} ,而条件概率为 29.50×10^{-3} 。

5) 当上游金沙江发生大洪水时,下游岷江发生不同量级洪水的条件概率更大。金沙江发生 5 年一遇洪水时,岷江发生 100 年一遇洪水遭遇的概率为 4.12×10^{-3} ;金沙江发生 100 年一遇洪水时,岷江发生 100 年一遇洪水遭遇的概率为 29.50×10^{-3} 。

基金项目

国家重点研发计划课题(2016YFC0402206)和清江水电开发有限责任公司(ENQJ-TD1-FW-2019185)资助。

参考文献

- [1] 关帅,林颖妍,查悉尼,等.基于 Copula 函数的韩江流域干支流洪水遭遇分析[J].中山大学学报(自然科学版),2015,54(5):130-137.
GUAN Shuai, LIN Yingyan, ZHA Xini, et al. Copula function-based flood coincidence probability analysis for mainstream and tributary of the Hanjiangriver basin. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2015, 54(5): 130-137. (in Chinese)
- [2] 郑静,周鹏飞,许银山.金沙江中游与长江中下游洪水遭遇规律分析[J].人民长江,2015,46(18):43-47.

- ZHENG Jing, ZHOU Pengfei and XU Yinshan. Analysis on flood encountering law of middle Jinsha river and mid-lower Yangtze river. *Yangtze River*, 2015, 46(18): 43-47. (in Chinese)
- [3] 熊莹. 长江上游干支流洪水组成与遭遇研究[J]. 人民长江, 2012, 43(10): 42-45.
XIONG Ying. Research on flood composition and encounter of main streams and tributaries in upper Yangtze river. *Yangtze River*, 2012, 43(10): 42-45. (in Chinese)
- [4] 戴明龙, 沈燕舟. 长江上游与洞庭湖洪水遭遇规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6): 117-120.
DAI Minglong, SHEN Yanzhou. Encountered regulation research on upstream flood of Yangtze River with Dangtinglake flood. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2010, 21(6): 117-120. (in Chinese)
- [5] 肖天国. 金沙江、岷江洪水遭遇分析[J]. 人民长江, 2001(1): 30-32 + 48.
XIAO Tianguo. Analysis on flood encounter of Jinsha river and Minjiang river. *Yangtze River*, 2001(1): 30-32 + 48. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 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(3): 1-7.
GUO Shenglian, YAN Baowei, XIAO Yi, et al. Multivariate hydrological analysis and estimation. *Journal of China Hydrology*, 2008(3): 1-7. (in Chinese)
- [8] 闫宝伟, 郭生练, 郭靖, 等. 多变量水文分析计算方法的比较[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(1): 10-15.
YAN Baowei, GUO Shenglian, GUO Jing, et al. Comparative study of multivariate hydrological frequency analysis methods. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(1): 10-15. (in Chinese)
- [9] 仇红亚, 李妍清, 陈璐, 等. 洞庭湖流域洪水遭遇规律研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39: 1-13.
QIU Hongya, LI Yangqing, CHEN Lu, et al. Study on the law of flood coincidence in the Dongting Lake basin. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39: 1-13. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 甘富万, 韦吉华, 刘欣, 等. 基于 Copula 函数的郁江与西江干流洪水遭遇概率[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(3): 341-346.
GAN Fuwan, WEI Jihua, LIU Xin, et al. Flood encounter probability of Yujiang River and main stream of Xijiang river based on copula function. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(3): 341-346. (in Chinese)
- [12] 张新田, 邵骏, 邢建平, 等. 金沙江干流与雅砻江洪水遭遇规律研究[J]. 水文, 2018, 38(4): 29-34.
ZHANG Xintian, SHAO Jun, BING Jianping, et al. Flood coincidence probability analysis for Jinshajiang River and Yalongjiang River. *Journal of China Hydrology*, 2018, 38(4): 29-34. (in Chinese)
- [13] 蒋楠, 高成, 夏欢. 基于 Copula 函数的锦河与连锦河洪水遭遇分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 85-91.
JIANG Nan, GAO Cheng and XIA Huan. Analysis of flood encounters in Jin River and Lianjin River based on Copula function. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(3): 85-91. (in Chinese)
- [14] 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(5): 553-559.
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(5): 553-559. (in Chinese)
- [15] 张超, 彭杨, 纪昌明, 等. 长江上游与洞庭湖洪水遭遇风险分析[J]. 水力发电学报, 2020, 39(8): 55-68.
ZHANG Chao, PENG Yang, JI Changming, et al. Floods encountering risk analysis of the upper Yangtze River and Dongting Lake. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(8): 55-68. (in Chinese)
- [16] NELSEN, R. B. An introduction to copulas. New York: Springer Science & Business Media, 2007.
- [17] 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(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(4): 505-511. (in Chinese)
- [18] CARTA, J. A., BUENO, C. and RAMÍREZ, P. Statistical modelling of directional wind speeds using mixtures of von Mises distributions: Case study. *Energy Conversion and Management*, 2007, 49(5): 897-907.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.10.017>
- [19] 中华人民共和国水利部. SL44-2006 水利水电工程设计洪水计算规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL44-2006 regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese)