

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2020.0097

郭晓亮,李贵阳,孙亚楠,等.嫩江、松花江洪水遭遇情况[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):102-108,114. GUO X L, LI G Y, SUN Y N, et al. Flood coincidence problems in Nen River and Songhua River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 102-108, 114. (in Chinese)

## 嫩江、松花江洪水遭遇情况

郭晓亮<sup>1</sup>, 李贵阳<sup>2</sup>, 孙亚楠<sup>3</sup>, 彭勇<sup>3</sup>

(1. 辽宁省水利水电科学研究院, 沈阳 110003; 2. 辽宁省河库管理服务中心(辽宁省水文局), 沈阳 110003;  
3. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 洪涝灾害是松花江流域的主要自然灾害之一, 尤其是嫩江、松花江(以下称为两江)交汇处时常出现洪水遭遇而造成的大洪水现象。以两江洪水在三岔河口附近的遭遇现象作为工程背景, 基于两江历史洪水资料分别采用统计学方法及 Copula 函数 2 种方法从定性和定量的角度综合分析两江洪水的洪峰遭遇及洪水过程遭遇情况, 为提高两江的防洪能力提供有力帮助。通过研究发现: 两江洪水以小量级洪水遭遇居多, 且遭遇发生在 8 月 7 日左右的概率最大; 通过计算还得到两江在同频率洪水下每日的遭遇风险以及遭遇概率最大时两江在不同频率洪水组合下的遭遇概率。采用 2 种方法所得的遭遇规律相同, 结论可信。洪水遭遇可通过上游水量调节等方式予以避免。

**关键词:** 洪水遭遇; Copula 函数; 松花江流域

中图分类号: TV122 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



### Flood coincidence problems in Nen River and Songhua River

GUO Xiaoliang<sup>1</sup>, LI Guiyang<sup>2</sup>, SUN Yanan<sup>3</sup>, PENG Yong<sup>3</sup>

(1. Liaoning Institute of Water Resources and Hydropower Research, Shenyang 110003, China;

2. Liaoning Province River Bank Management Service Center (Liaoning Provincial Hydrology Bureau),

Shenyang 110003, China; 3. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Flood disaster is one of the major natural disasters in Songhua River basin. In particular, the confluence of Nenjiang River and Songhua River (hereinafter referred as the two rivers) encounter often causes flood. The encounter phenomenon of two rivers flood is taken as the engineering background. Based on historical flood data of the two rivers, two methods of statistics and Copula function are respectively adopted to qualitatively analyze the flood peak encounter and flood process encounter of the two rivers, and quantitatively obtain the encounter risks of the two rivers in different time periods and flood combinations of different magnitudes, in order to make the Songhua River basin, especially the two river junctions and its flood control safety in downstream areas provides a valuable reference. The results of the two methods are the same, and the conclusion is credible. Flood encounter can be avoided by upstream water regulation.

**Key words:** flood encounter; Copula function; Songhua River basin

嫩江、松花江(以下称为两江)是松花江流域的骨干河道, 两江洪水演进情况较为复杂, 两江洪水遭

收稿日期: 2019-09-01 修回日期: 2019-11-15 网络出版时间: 2020-09-04

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20200903.1410.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0406005)

作者简介: 郭晓亮(1979—), 男, 辽宁大连人, 高级工程师, 从事山区及平原地区洪涝灾害防治、预报预警系统建设。E-mail: lnsky\_gxl@163.com

通信作者: 孙亚楠(1993—), 女, 河南新乡人, 主要从事水文水资源研究。E-mail: dlutsyn@126.com

遇后对两江交汇区及下游防洪安全影响较大。然而通过对两江洪水遭遇情况的分析研究,可为嫩江尼尔基水库、松花江丰满水库等水库的防洪调度方案制定以及下游防洪设施建设提供有价值的参考,对松花江流域特别是三岔河口及松花江干流(以下简称松干)的防洪减灾具有重要意义。常用的洪水遭遇研究方法包括统计分析及基于 Copula 函数的计算分析。

基于统计方法的研究多从历史资料入手,对实测水文数据作统计分析,可有效掌握历史上不同量级洪水遭遇情况,并给出定量和定性的结论<sup>[1-2]</sup>。该方法对于拥有长系列历史数据的研究区可靠性高,可准确掌握洪水遭遇规律。

Copula 是一种可连接多个变量边缘分布的联合分布函数,具有结构简单、求解便利等优势,是解决多变量联合分布问题的有效工具<sup>[3-7]</sup>。在洪水遭遇问题中可综合考虑不同河流、变量间的相关性及不同河流设计洪水的联合分布情况。因此,引入 Copula 函数对洪水遭遇情况进行计算分析。

本文针对两江洪水遭遇风险情况,利用江桥、扶余站年最大洪峰流量序列,采用统计及 Copula 方法对两江洪水时间遭遇及洪水量级遭遇等问题进行分析。研究成果可为松花江流域三岔河口上下游的防洪工作提供指导。

## 1 研究区概况及数据来源

两江交汇处即为松花江三岔河口区域,河流自三岔河口流向东北,是为松干。松干河网发达,水量较为充沛,自三岔河口附近到哈尔滨市全长约 240 km,河流主要经过松嫩平原的草原及湿地等。

嫩江流域范围内主要表现为大陆性气候,多年平均降水约 440 mm,汛期降水占全年的 80%<sup>[8-9]</sup>。洪水主要由汛期暴雨引发,年内最大洪水多与暴雨同期,故洪水峰高量大,且持续时间较长。松花江上游受大陆性季风气候控制,7 月下旬到 8 月下旬降水最为集中,洪水多由台风暴雨形成,故年洪峰流量以 8 月出现居多,上游洪水多呈陡涨陡落的单峰型变化,下游扶余站洪水变化较为缓慢,洪水历时约 30~45 d<sup>[10-11]</sup>。

两江的洪水量级及传播情况决定了三岔河口处河道洪水的演进规律。因此,选取嫩江江桥站及松花江扶余站作为两江的关键控制站,收集两站 1955—2016 年共 62 a 的实测年最大洪峰流量  $Q_m$ (年最大日平均流量)时间序列展开两江洪水遭遇情况研究。

## 2 基于统计方法的洪水遭遇规律分析

洪水遭遇一般分为洪峰遭遇及洪水过程遭遇。

洪峰遭遇指年最大洪峰流量同日抵达同一河段,一般认为  $W_{7d}$ (年最大 7 d 洪量)和  $W_{15d}$ (年最大 15 d 洪量)中有超过 1/2 的时段重合即为洪水过程遭遇<sup>[12]</sup>。分别对两江洪峰遭遇及洪水过程遭遇情况进行统计分析。

### 2.1 洪峰遭遇

由于江桥站距三岔河口较远,且洪水传播速度较慢,其洪水传播至三岔河口的时间较扶余站多出 6 d,考虑到两站传播时间差  $\tau_{JF}$ ,故当江桥站洪峰早于扶余站洪峰 6 d 出现时两江洪峰在三岔河口处遭遇。

两江峰现时间遭遇的情况统计见表 1,统计得到的 6 场遭遇洪水中,两站最大洪峰量级达到了 10 a 一遇,江桥站洪峰流量在 1 690~8 780  $m^3/s$ ,扶余站洪峰流量在 951~4 900  $m^3/s$ ,遭遇洪峰以小于 5 a 一遇的量级居多。1991 年及 2013 年出现了两江较大量级洪峰遭遇,1991 年两江同为较大量级,2013 年为嫩江大洪水遭遇松花江小量级情况,遭遇后松干下岱吉站洪峰流量均接近 10 000  $m^3/s$ 。

表 1 江桥、扶余站洪峰遭遇情况

Tab. 1 Flood peak coincidence in Jiangqiao and Fuyu station

年份	嫩江江桥站		二松扶余站		松干下岱吉站	
	洪峰流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	重现期/ a	洪峰流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	重现期/ a	洪峰流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	重现期/ a
1955	5 540	<5	1 770	<5	3 930	5
1975	1 690	<5	2 370	<5	3 000	<5
1986	4 490	<5	4 900	10	7 830	10
1991	7 040 (第 4 位)	10	4 050 (第 8 位)	5	9 620 (第 4 位)	15
1997	3 110	<5	951	<5	2 460	<5
2013	8 780 (第 3 位)	10	2 600	<5	9 990 (第 3 位)	15

注:括号中为该洪峰流量在 1955—2016 年各站实测洪峰流量序列中的排序。

### 2.2 洪水过程遭遇

通过统计可知,当 1955—2016 年江桥站出现年最大 7 d 及 15 d 洪水时,扶余站出现重叠洪水的概率分别为 21% 及 33.9%。重叠时间的多少反映洪水过程遭遇对下游洪水的影响<sup>[13]</sup>,分析不同历时下洪水过程重叠天数可知,年最大 7 d 洪水过程遭遇时以 4、5 d 居多,完全重叠情况极少,年最大 15 d 洪水以 8、13 d 为主。

分别对最大 7 d 和 15 d 洪水过程遭遇情况下江桥、扶余站的洪水量级分布情况进行统计分析,将  $W_{7d}$  遭遇洪量分为 4 个量级,  $W_{15d}$  分为 5 个洪水量

级。由表 2 可以看出,洪水过程遭遇以较小量级洪水为主,且两站最大洪水量级并非同步,不同量级洪水均可能出现遭遇。

表 2 江桥、扶余站洪水过程遭遇量级统计

Tab. 2 Statistics of floods encountered in Jiangqiao and Fuyu stations

历时/d	江桥站		扶余站	
	量级/亿 m <sup>3</sup>	频率/%	量级/亿 m <sup>3</sup>	频率/%
7	<15	30.8	<8	53.8
	15~<30	46.2	8~<16	30.8
	30~<45	15.4	16~<24	7.7
	≥45	7.7	≥24	7.7
15	<20	9.5	<15	42.9
	20~<40	33.3	15~<30	23.8
	40~<60	33.3	30~<45	19.0
	60~<80	14.3	45~<60	9.5
	≥80	9.5	≥60	4.8

### 3 基于 Copula 方法的洪水遭遇风险分析

#### 3.1 Copula 函数及方法介绍

##### 3.1.1 Copula 函数简介

Copula 函数实质上是连接一维边缘分布从而

在[0,1]上形成多元分布的函数。在给定变量边缘分布的情况下,其主要作用就是将各个变量的边缘分布联系在一起<sup>[14-17]</sup>。对于变量序列  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , 令  $H(x_1, x_2, \dots, x_n)$  为具有边缘分布  $F_k(x_k)$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ) 的  $n$  元联合分布函数, 则存在一个 Copula 函数  $C(u_1, u_2, \dots, u_n)$ , 满足

$$H(x_1, x_2, \dots, x_n) = C[F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)] \quad (1)$$

##### 3.1.2 水文中常用的 Copula 函数

Copula 函数种类繁多,常用到的 Copula 函数主要有 Archimedean Copula 函数、经验 Copula 函数等。因对称 Archimedean Copula 函数结构简单、参数少、易于求解,在水文中应用广泛。

Archimedean Copula 函数如式(2)所示

$$C(u_1, u_2, \dots, u_d) = \begin{cases} \varphi^{-1}[\varphi(u_1) + \varphi(u_2) + \dots + \varphi(u_d)], & \sum_{j=1}^d \varphi(u_k) \leq \varphi(0) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varphi(\cdot)$  为生成函数,满足: $\varphi(0) = 1, \varphi(1) = 0, \varphi^{-1}(\cdot)$  为  $\varphi$  的一阶导数。

常用的 Archimedean Copula 函数类型见表 3<sup>[18]</sup>。

表 3 函数类型及参数

Tab. 3 Function type and parameter

函数类型	$C(u_1, u_2)$	$\tau$
Gauss Copula	$\int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(u_1)} \int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(u_2)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\theta^2}} \exp\left(\frac{2\theta sw - s^2 - w^2}{2(1-\theta^2)}\right) dsdw; \theta \in [-1, 1]$	$\frac{2}{\pi} \arcsin\theta$
Clayton Copula	$(u_1^\theta + u_2^\theta - 1)^{-1/\theta}; \theta \in (0, \infty)$	$\frac{\theta}{2+\theta}$
Gumbel Copula	$\exp\{-[(-\ln u_1)^\theta + (-\ln u_2)^\theta]^{1/\theta}\}; \theta \in [1, \infty)$	$1 - \frac{1}{\theta}$
Frank Copula	$-\frac{1}{\theta} \ln\left[1 + \frac{(\exp(-\theta u_1) - 1)(\exp(-\theta u_2) - 1)}{\exp(-\theta) - 1}\right]; \theta \in R$	$1 + \frac{4}{\theta} \left[\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{\exp(t) - 1} dt - 1\right]$
AMH Copula	$u_1 u_2 / [1 - \theta(1 - u_1)(1 - u_2)]; \theta \in [-1, 1)$	$(1 - \frac{2}{3\theta}) - \frac{2}{3}(1 - \frac{1}{\theta})^2 \ln(1 - \theta)$

注:式中  $\tau$  为两变量的 Kendall 秩相关系数。

##### 3.1.3 Copula 函数参数估计

对于二维 Copula 函数,常用的参数估计方法是利用 Spearman 或 Kendall 秩相关系数等进行间接估计。对于常用二维 Archimedean Copula 函数的唯一参数  $\theta$ , 可利用其与 Kendall 秩相关系数  $\tau$  的关系求解得到。其中,  $\tau$  可根据两变量的实测水文资料计算得到, 见式(3)、(4)

$$\tau = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq n} \text{sign}[(x_i - x_j)(y_i - y_j)] \quad (3)$$

$$\text{sign}[(x_i - x_j)(y_i - y_j)] = \begin{cases} 1, & (x_i - x_j)(y_i - y_j) > 0 \\ -1, & (x_i - x_j)(y_i - y_j) < 0 \\ 0, & (x_i - x_j)(y_i - y_j) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $(x_i - y_i)(x_j - y_j)$  为随机变量; $n$  为样本总量。

##### 3.1.4 Copula 函数拟合优度检验

对初步选定的函数类型分别进行计算,通过多

种检验方法分析比较函数的拟合情况选取最适用的 Copula 函数用于后续计算。拟合优度检验方法包括  $P-P$  图、RMSE 法等。

### (1) $P-P$ 图拟合拟合优度检验。

$P-P$  图法通过比较实测点的理论累计概率估计值与经验累计概率估计值一致性好坏判断拟合效果<sup>[19]</sup>。

首先,对构造的 Copula 函数求各实测点的理论估计值  $P_c(t)$ ,并计算经验累计概率值  $P_e(t)$ 。将实测点  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ,按变量  $x_i$  升序排列,联合分布经验累计概率估计值如式(5)所示

$$P_c(t) = \frac{\sum_{m=1}^i \sum_{k=1}^j n_{mk} - 0.44}{n + 0.12} \quad (5)$$

式中: $n_{ij}$ 为样本联合观测值  $(x_i, y_j)$  发生的次数。

绘制  $P_c(t) - P_e(t)$  散点关系图,即为  $P-P$  图。当图中的点散落在  $45^\circ$  线附近时,说明拟合效果较好。

### (2) 离差平方和最小准则。

通过计算均方根误差 RMSE,可定量分析拟合程度。如式(6)<sup>[20]</sup>所示

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}} = \sqrt{E(x_e - x_c)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_e(i) - P_c(i)]^2} \quad (6)$$

式中: $n$ 为序列总量; $P_e$ 为经验累计概率估计值; $P_c$ 为理论累计概率估计值。

## 3.2 两江洪水时间遭遇分析

### 3.2.1 峰现时间的边缘分布

通过文献[21-23]可知,Von Mises 分布函数能准确描述峰现时间序列的分布情况。由于 Von Mises 分布的变化范围为  $0$  到  $\pi$ ,故先将变量峰现时间由线性序列转换为  $0$  到  $\pi$  上的弧度。

对于单峰状的峰现时间概率密度函数,Von Mises 分布计算公式为

$$f(x_i; \mu, k) = \frac{1}{2\pi I_0(k)} \exp\{k \cos(x_i - \mu)\} \quad (7)$$

式中: $\mu$ 代表位置参数,决定分布的位置, $\mu \in [0, 2\pi]$ ;  $k$ 为尺度参数,决定分布的整体形状, $k \in [0, +\infty]$ ;  $I_0(k)$ 代表第一类变形 0 阶 Bessel 函数。

分析可知两江的年最大洪峰流量主要出现在 5—9 月,故假定 5—9 月为两江汛期,共计 153 d。统计两站年最大洪峰流量出现在汛期各旬的次数,见图 1。

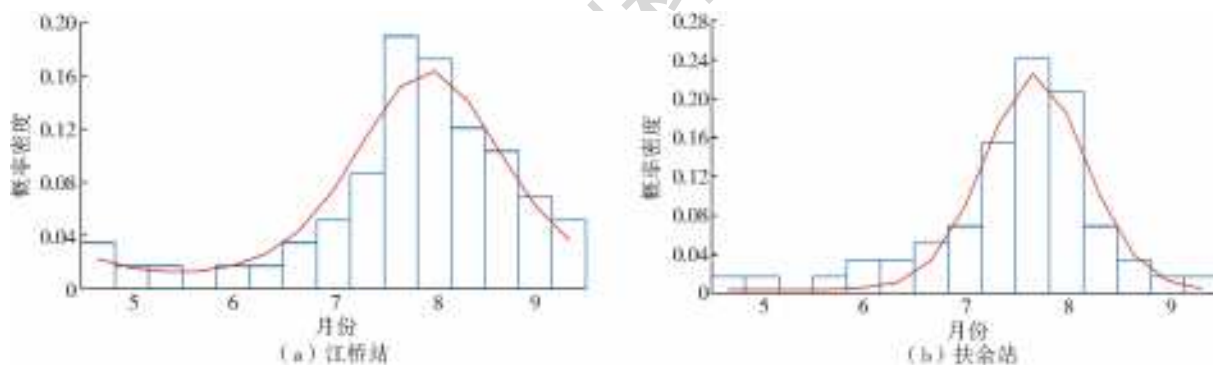


图 1 年峰现时间概率密度分布

Fig. 1 Probability density distribution diagram of annual peak time series

经计算得到江桥、扶余站峰现时间序列和的 Von Mises 分布参数以及拟合检验结果,见表 3。

表 3 洪峰序列边缘分布参数及检验结果

Tab. 3 The testing results of edge distribution parameters of flood peak sequence

站点	$\mu$	$k$	K-S 检验	RMSE	相关系数
江桥站	4.53	1.27	0.120(0.338)	0.020	0.930
扶余站	3.89	2.63	0.063(0.338)	0.015	0.984

注:括号中为 K-S 检验临界值。

### 3.2.2 峰现时间的联合分布

在两江峰现时间边缘分布已知的基础上,构建 Copula 联合分布函数。首先计算两江峰现时间的 Kendall 相关性系数,得知两者为较弱的负相关关

系,且由于 Gumbel Copula 能较好地拟合水文时间中极值频率,故采用 Gumbel Copula 作为描述两江峰现时间联合分布概率的函数。两站峰现时间序列的经验点距与 Gumbel Copula 联合分布理论点的拟合情况见图 2。从  $P-P$  图可看出,点基本散落在  $45^\circ$  线附近,拟合效果较好。

### 3.2.3 两江洪水时间遭遇问题分析

对 Gumbel Copula 联合概率分布进行参数估计,可得  $\theta$  为 1.050 6。则两江峰现时间的联合概率分布函数为

$$F_T(T_J, T_F) = \exp\{-[(-\ln(F_{T_J}(t)))^{1.0506} + (-\ln(F_{T_F}(t)))^{1.0506}]^{0.952}\} \quad (8)$$

式中: $T_J$ 、 $T_F$  分别为江桥、扶余站峰现时间; $F_{T_J}(t)$

和  $F_{T_F}(t)$  分别为江桥、扶余站峰现时间的边缘分布函数。

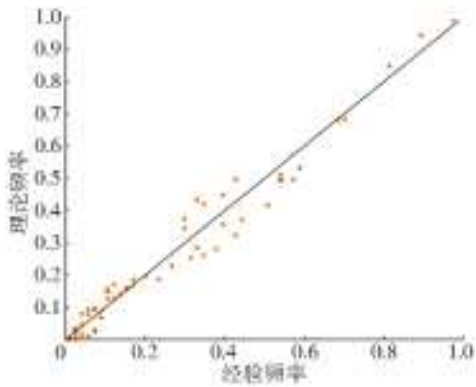


图 2 年峰现时间联合概率 P-P 图

Fig. 2 Joint probability P-P diagram of annual flood peak occurrence time

另外,考虑两江洪水到达三岔河口的时间差, 求算两江洪峰在统计时段第  $i$  天出现遭遇的概率  $p_i$  为

$$p_i = P(t_i \leq T_J \leq t_{i+1}, t_i + \tau_{JF} \leq T_F \leq t_{i+1} + \tau_{JF}) \quad (9)$$

式中:  $t_i$  表示汛期统计时段的第  $i$  天;  $\tau_{JF}$  为江桥、扶余站洪水到达三岔河口的传播时间差。

由式(9)计算可得两江在汛期每日的峰现时间遭遇概率,绘制概率过程线见图 3。

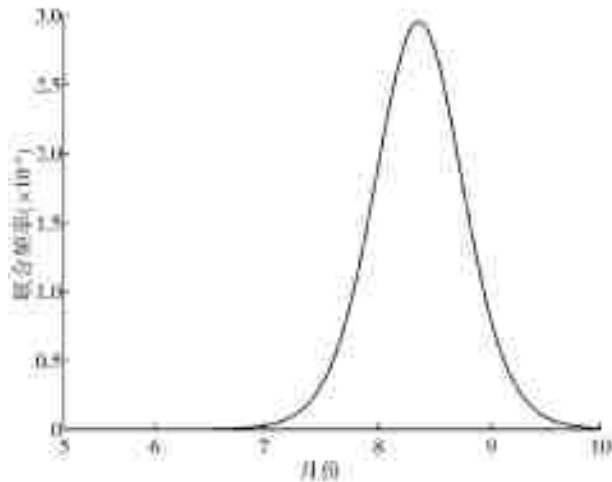


图 3 两江洪峰遭遇概率

Fig. 3 Flood peak encountering probability diagram of two rivers

由图 3 可以看出,两江洪峰时间遭遇概率呈单峰过程线。两江在 6 月中旬之前遭遇的概率极低,从 6 月下旬开始两江洪峰遭遇的概率逐渐增大,至 8 月 7 日左右概率到达最大,约为 0.03%。达到峰值之后,概率又逐渐减小,至 9 月中下旬逐渐接近 0。

具体来看,7 月 22 日至 8 月 27 日两江洪峰遭遇概率大于 0.01%,其中 7 月 30 日至 8 月 20 日大于 0.02%,8 月 2 日至 8 月 15 日大于 0.025%。因

此,该时间段内处理三岔河口及松干下游的防洪安全问题时,应充分考虑两江的遭遇风险,及时采取应对措施。

### 3.3 两江洪水量级遭遇风险分析

分别构建两站洪峰流量与峰现时间的 Copula 联合概率分布函数,进一步求算两江不同洪水量级下的遭遇概率。

#### 3.3.1 洪水量级与峰现时间的联合分布

采用 P-III 分布作为江桥、扶余站年最大洪峰流量序列  $Q_J$  和  $Q_F$  的边缘分布函数并确定边缘分布参数。通过分析两江峰现时间与洪峰量级的相关性可知,江桥站的峰现时间与洪峰量级呈弱的负相关性,而扶余站呈正相关性。因此,分别选用 Frank Copula 函数、Clayton Copula 函数构建江桥站和扶余站峰现时间与洪峰流量的联合分布函数。

根据两站峰现时间与洪峰流量的 Kendall 相关性系数(江桥站为 -0.019 7,扶余站为 0.128 3),分别采用对应的关系式求得参数  $\theta$ (江桥站 Frank Copula 参数为 -0.177 4,扶余站 Glayton Copula 参数为 0.294 4)。

$F_{Q_J}(t)$  和  $F_{Q_F}(t)$  分别记为江桥、扶余站年最大洪峰流量的边缘分布函数,  $F_{T_J}(t)$  和  $F_{T_F}(t)$  记为江桥、扶余站年峰现时间的边缘分布函数。江桥、扶余站的 Copula 联合分布函数分别为

$$F_J(Q_J, T_J) = \frac{1}{0.1774} \times \ln \left\{ 1 + \frac{[\exp(0.1774F_{Q_J}) - 1][\exp(0.1774F_{T_J}) - 1]}{0.1941} \right\} \quad (10)$$

$$F_F(Q_F, T_F) = [(F_{Q_F}(t))^{-0.2944} + (F_{T_F}(t))^{-0.2944} - 1]^{-3.3967} \quad (11)$$

对两站 Copula 函数拟合情况进行分析检验,计算联合分布的经验频率,分别绘制两站年洪峰流量值、峰现时间联合分布的经验频率点据同理论频率曲线的拟合,见图 4。

由图 4 可知经验频率点据与理论频率曲线拟合效果理想,说明 Copula 联合分布函数能较好地描述两站洪峰流量与峰现时间的联合分布情况,用于两江洪水量级遭遇的风险计算。

#### 3.3.2 两江洪水量级遭遇风险分析

同时考虑洪水量级与峰现时间的两江洪水量级遭遇风险概率公式为

$$P_i = P(t_i \leq T_J \leq t_{i+1}, t_i + \tau_{JF} \leq T_F \leq t_{i+1} + \tau_{JF}; Q_J \geq q_J, Q_F \geq q_F) \quad (12)$$

式中:  $P_i$  表示两江同时第  $i$  天发生洪峰流量分别大于  $q_J$  和  $q_F$  的风险概率。

由于江桥、扶余两站相距较远,且通过分析两站洪峰流量序列的相关性,可知两水文站年洪峰流量

量级的相关性较弱。因此,认为江桥、扶余站出现某量级年洪峰流量是独立事件,即两江不同洪水量级在某天遭遇的概率为两江各自在该日出现该量级洪峰流量概率的乘积。

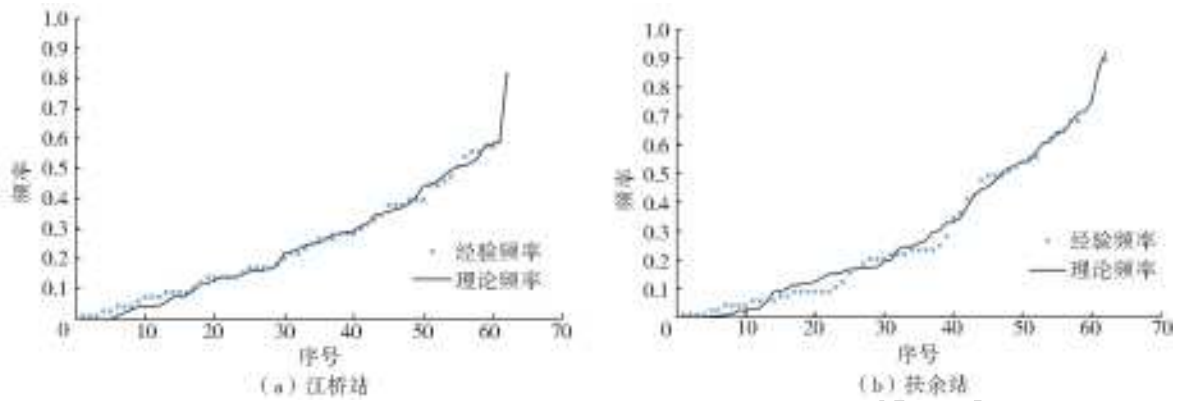


图4 江桥、扶余站经验频率拟合

Fig. 4 Empirical frequency fitting diagram of Jiangqiao and Fuyu Stations

根据江桥、扶余站年洪峰流量与其峰现时间的联合概率分布,可分别得到两站在汛期第  $i$  天出现某量级洪峰流量的风险率<sup>[24]</sup>为

$$p_{J_i} = P(t_i \leq T_J \leq t_{i+1}, Q_J \geq q_J) = F_{T_J}(t_{i+1}) - F_{T_J}(t_i) - F_J(t_i, q_J) - F_J(t_{i+1}, q_J) \quad (13)$$

$$p_{F_i} = P(t_i + \tau_{JF} \leq T_F \leq t_{i+1} + \tau_{JF}, Q_F \geq q_F) = F_{T_F}(t_{i+1} + \tau_{JF}) - F_{T_F}(t_i + \tau_{JF}) + F_F(t_i + \tau_{JF}, q_F) - F_F(t_{i+1} + \tau_{JF}, q_F) \quad (14)$$

式中:  $p_{J_i}$  和  $p_{F_i}$  分别为江桥站、扶余站在  $t_i$  天出现  $q_J$  和  $q_F$  量级洪峰流量的风险概率;  $F_{T_J}$  和  $F_{T_F}$  分别为江桥站和扶余站峰现时间的边缘分布函数;  $F_J$ 、 $F_F$  分别为江桥、扶余站洪峰流量与峰现时间的联合分布函数。

由于两江洪峰量级的出现是相互独立的,两江洪水在某天洪水量级遭遇的概率即为两江在该日洪水量级遭遇概率的乘积。绘制两江同频率洪水遭遇概率曲线,见图5。图5分别给出了两江同为10 a、20 a、30 a、50 a以及100 a一遇洪峰量级下,在汛期各日遭遇风险大小。为使图像更加直观易懂,概率曲线趋势更加显著,对纵坐标取遭遇概率的负对数  $-\ln(p_i)$ <sup>[25]</sup>。

针对某一频率下洪水遭遇情况来看,7月下旬至8月底是洪峰遭遇风险较高的时段。通过图5可查得不同洪峰量级遭遇在汛期内任一天发生的概率,其中,在8月7日两江洪峰遭遇风险最高,10 a一遇洪峰遭遇概率达到  $3.52 \times 10^{-6}$ ,20 a一遇的洪峰遭遇概率为  $0.89 \times 10^{-6}$ ,30 a一遇洪峰遭遇概率为  $0.39 \times 10^{-6}$ ,50 a一遇洪峰遭遇概率值为  $0.14 \times 10^{-6}$ ,

100 a一遇洪峰遭遇概率值仅  $0.04 \times 10^{-6}$ 。

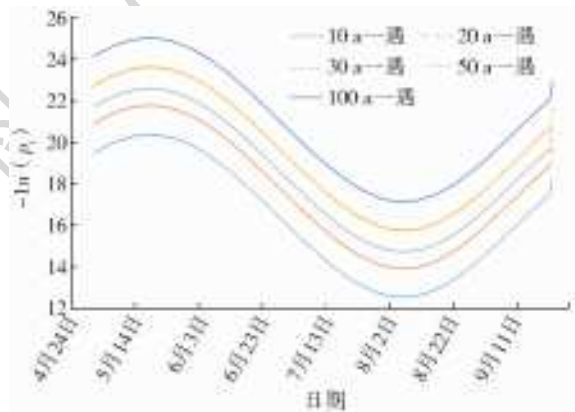


图5 两江不同量级同频率遭遇概率

Fig. 5 Two rivers encountering probability at different magnitudes and at same frequency

在计算两江不同重现期时汛期每日的洪水遭遇风险值时,由于数据量较大,仅对遭遇风险极值点8月7日不同重现期组合的洪水遭遇概率进行计算,结果见表4。分析可知,两江洪水在小量级下的遭遇风险与大量级下的遭遇风险相差较大,且随着两江洪水量级的减小,遭遇风险值迅速增大。

当两江洪水遭遇后,所产生的组合流量将会超过两江各自的洪水量级,对下游河道的防洪安全产生极其不利的影响。结合两江径流预报值,根据计算得到的两江不同频率的洪峰流量以及不同量级洪水组合下的遭遇风险值,可为汛期考虑洪水遭遇情况下的防洪工作提供一定的参考和帮助。根据水库调度规则,对两江上游水库等调蓄设施进行联合调度,以保证有效拦洪削峰,保障防洪安全。

表 4 两江不同量级洪水遭遇概率

Tab. 4 Probability of encountering floods at different magnitude in the two rivers

10<sup>-6</sup>

重现期	江桥重现期						
	5 a	10 a	20 a	30 a	35 a	50 a	100 a
5 a	13.814	6.924	3.466	2.309	1.981	1.387	0.694
10 a	7.017	3.517	1.760	1.173	1.006	0.705	0.352
20 a	3.533	1.771	0.886	0.591	0.507	0.355	0.177
扶余重现期	30 a	2.361	1.183	0.592	0.395	0.237	0.119
	35 a	2.025	1.015	0.508	0.339	0.203	0.102
	50 a	1.419	0.711	0.356	0.237	0.143	0.071
	100 a	0.710	0.356	0.178	0.119	0.071	0.036

#### 4 结 语

采用数理统计及 Copula 方法对两江的洪水遭遇情况进行了计算分析。基于实测资料的统计分析,发现 62 a 来两江共出现 6 次洪峰遭遇情况,以小于 5 a 一遇量级遭遇居多。年最大 7 d 及 15 d 洪量的洪水过程遭遇发生概率分别为 21% 及 33.9%,全过程重叠的概率较小。

基于 Copula 方法重点分析两江洪峰遭遇风险,发现两江洪峰遭遇概率呈现单峰状,且 8 月 7 日左右的遭遇概率达到最大,约为 0.03%。采用 Frank Copula 及 Clayton Copula 函数连接两江的洪峰量级及峰现时间的边缘分布,求得两江同频率洪水,在汛期各日的遭遇风险,以及时间遭遇概率最大的 8 月 7 日两江在不同频率洪水组合下的遭遇概率。两江出现 5 a 一遇洪水时遭遇概率达到  $13.814 \times 10^{-6}$ , 100 a 一遇洪水遭遇概率为  $0.036 \times 10^{-6}$ 。江桥站 5 a 一遇洪水与扶余 10 a 一遇洪水遭遇的概率为  $7.017 \times 10^{-6}$ ,扶余站 100 a 一遇洪水遭遇的概率为  $0.710 \times 10^{-6}$ 。

根据两江不同频率的洪峰流量以及不同量级洪水组合下的遭遇风险计算结果,可为汛期考虑洪水遭遇情况下的防洪工作提供一定的参考和帮助。

#### 参考文献:

- [1] 边玮,张新田.金沙江与长江中下游洪水遭遇分析[J].水利水电快报,2002(4):8-10. DOI:10.15974/j.cnki.slsdkb.2002.04.004.
- [2] 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.
- [3] 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(6):16-19.
- [4] 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.
- [5] 关帅,林颖妍,查悉妮,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. DOI:10.13471/j.cnki.acta.snus.2015.05.024.
- [6] 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.
- [7] 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. DOI:10.14188/j.1671-8844.2016-03-004.
- [8] 盛长滨,盛滨龙.嫩江流域洪水分析[J].东北水利水电,2011,29(11):35-36. DOI:10.14124/j.cnki.db-slsd22-1097.2011.11.027.
- [9] 张德福,李成林,崔桂凤.松辽流域防洪减灾回顾与展望[J].东北水利水电,2003(6):42-44. DOI:10.14124/j.cnki.db-slsd22-1097.2003.06.022.
- [10] 单玉芬,宋长虹.黑龙江省松花江干流历年洪涝灾害损失情况分析[J].水利科技与经济,2016,22(6):78-79.
- [11] 赵惠媛,李颖.松花江干流洪水组合与遭遇初步分析[J].东北水利水电,2005(7):25-28. DOI:10.14124/j.cnki.db-slsd22-1097.2005.07.013.
- [12] 张新田,邵骏,郭卫.雅砻江与川江洪水地区组成及遭遇规律分析[J].人民长江,2018,49(22):23-27. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.22.005.
- [13] 戴明龙,叶莉莉,刘圆圆.长江上游洪水与汉江洪水遭遇规律研究[J].人民长江,2012,43(1):48-51. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2012.01.028.
- [14] 钱丹青. Copula 选择及其条件核密度估计[D].武汉:华中科技大学,2008.
- [15] 李天元.基于 Copula 函数的设计洪水计算方法研究[D].武汉:武汉大学,2014.
- [16] 崔刚,韩曦.基于 Copula 理论的甘肃省干旱特征分析[J].人民黄河,2015,37(11):77-80. DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2015.11.021.
- [17] 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.

(下转第 114 页)

- 影响因素分析:以甘肃省张掖市实证调查为例[J]. 中国水利, 2019, 859(1): 69-71. DOI: CNKI: SUN: SLZG. 0. 2019-01-026.
- [18] YANG S, SUN X, DING J, et al. Effects of biochar addition on the NEE and soil organic carbon content of paddy fields under water-saving irrigation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(8): 8303-8311. DOI: 10. 1007/s11356-019-04326-8.
- [19] 田龙, 张青峰, 张翔, 等. 基于改进生态足迹模型的西北地区生态可持续性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 76-81. DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2015. 260.
- [20] XIN Y E, LIU G, LI Z S, et al. Evaluation of ecological effectiveness of protected areas in northwest China [J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(2): 1-14. DOI: 10. 1007/s11769-017-0854-1.
- [21] JIA C, YANG X, SHA Y, et al. The vulnerability evolution and simulation of social-ecological systems in a semi-arid area: A case study of Yulin City, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(2): 152-174. DOI: 10. 1007/s11442-018-1465-1.
- [22] WU J L, MA L. Lake evolution and climatic and hydrological changes in arid zone of Xinjiang[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(2): 135-144. DOI: 10. 3724/SP. J. 1140. 2011. 02135.
- [23] 梁变变, 石培基, 周文霞, 等. 河西走廊城镇化与水资源效益的时空格局演变[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 452-463. DOI: 10. 13866/j. azr. 2017. 02. 30.
- [24] 周苏娥, 张明军, 王圣杰, 等. 甘肃省河西地区自然-社会系统脆弱性评价[J]. 资源科学, 2018, 40(2): 452-462. DOI: CNKI: SUN: ZRZY. 0. 2018-02-020.
- [25] WANG L, ZHANG J, ZHAO L, et al. Ecological water requirement of plant-soil systems along the Silk Road Economic Belt: A case study of the Guanzhong-Tianshui region, China [J]. Geological Journal, 2017(3): 45-57. DOI: 10. 1002/gj. 3002.
- [26] 邓铭江. 南疆未来发展的思考: 塔里木河流域水问题与水战略研究[J]. 干旱区地理(汉文版), 2016, 39(1): 1-11. DOI: CNKI: SUN: GHDL. 0. 2016-01-001.
- [27] 王建顺, 林李月, 朱宇, 等. 西部民族地区流动人口户籍迁移意愿及影响因素: 以新疆为例[J]. 地理科学进展, 2018, 37(8): 132-141. DOI: 10. 18306/dlkxjz. 2018. 08. 013.

(上接第 108 页)

- [18] 张妞. 干支流洪水遭遇下的黄河宁夏段溃漫堤洪水风险分析[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [19] 宋松柏, 蔡焕杰, 金菊良, 等. Copulas 函数及其在水文中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [20] 侯芸芸. 基于 Copula 函数的多变量洪水频率计算研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [21] 何典灿. 基于多变量联合分布的洪水特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [22] 李子远. 非一致性洪水遭遇风险分析及其对河道防洪影响评价[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [23] 梁小青, 纪昌明, 张验科, 等. 雅砻江流域非一致性洪水分析[J]. 水力发电, 2019, 45(7): 11-17.
- [24] 李天元, 郭生练, 罗启华, 等. 双参数 Copula 函数在洪水联合分布中的应用研究[J]. 水文, 2011, 31(5): 24-28.
- [25] 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. DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2010. 05. 009.