

# 基于 Copula 函数的锦河与连锦河洪水遭遇分析

蒋楠<sup>1</sup>, 高成<sup>1</sup>, 夏欢<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学 农业工程学院, 江苏南京 210098)

**摘要:** 以实测洪峰流量估算 Copula 函数参数, 建立联合概率分布模型计算连锦河和锦河洪水遭遇的概率。首先, 建立 4 种最常见的 Copula 函数, 并用 Q-Q 图及优度评价准则评价拟合效果, 选择效果最佳的 Frank 函数进行洪水遭遇分析。结果表明, 锦河与连锦河同时发生同一量级的洪水概率很小, 锦河与连锦河同时发生 20 年一遇洪水的概率不大于 0.61%, 锦河 10 年一遇的大洪水遭遇连锦河 20 年一遇的洪水的概率高达 23.01%。最后运用 MIKE11 模型计算该工况下锦河与连锦河的洪水水面线, 其洪水遭遇概率的研究与水面线的计算成果对该市防洪工程具有重大意义。

**关键词:** 洪水遭遇; Frank 函数; Copula 函数水面线; 优度评价准则

中图分类号: TV122 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2019)03-0085-07

## Analysis of flood encounters in Jin River and Lianjin River based on Copula function

JIANG Nan<sup>1</sup>, GAO Cheng<sup>1</sup>, XIA Huan<sup>2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The Copula function parameters were estimated by the measured flood peak flow, and the joint probability distribution model was established to calculate the flood encounters probability of the Lianjin River and Jin River. First, four kinds of the most common Copula functions were established, and the fitting effect was evaluated by Q-Q graph and goodness evaluation criterion, and the Frank function with the best effect was selected for flood encounter analysis. The results showed that the probability of flooding in the same magnitude of Jin River and Lianjin River is relatively small. The probability of a flood in the Jin River and Lianjin River at the same time is less than 0.61%. The probability of a once every 10 years flood in the Jin River and once every 20 years flood in Lianjin River was as high as 23.01%. Finally, the MIKE11 model was used to calculate the flood surface line of Jin River and Lianjin River under this condition. The study of the flood encounter probability and the calculation result of the water surface line are of great significance to the flood control project of the city.

**Key words:** flood encounter; Frank function ; Copula function surface line; goodness evaluation criteria

## 1 研究背景

洪水发生及产生的灾害是难以避免的自然现象。作为能够有效抵御洪水的手段之一, 防洪工程措施在防治大洪水中起到了不可小觑的作用。在拟定防洪方案过程中, 洪水计算是不可或缺的。因此在进行防洪评价的洪水计算部分有必要进行洪水遭

遇的概率分析。利用 Copula 函数进行多变量水文概率分析已十分常见。例如: 王占海等<sup>[1]</sup>使用多维 Copula 函数研究长江干流宜昌水文站各设计标准洪水空间分布的合理性。侯芸芸等<sup>[2]</sup>在基于三变量 Copula 函数算法上建立了峰量以及历时的联合概率分布模型。陈璐等<sup>[3]</sup>利用多维 Archimedean Copula 函数计算长江干支流沿岸水文站洪水发生时间及量

收稿日期:2018-12-04 修回日期:2019-02-17

基金项目:江苏省水利科技项目(2017006);中央高校基本科研业务费项目(2014B16814)

作者简介:蒋楠(1995-),女,湖北宜昌人,硕士研究生,研究方向为城市水务和城市防洪与排水。

通讯作者:高成(1983-),男,江苏南京人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为城市水文学和城市防洪与排水。

级遭遇的概率,李子远<sup>[4]</sup>采用 Gumbel Copula 函数模拟两河洪峰发生时间的双变量联合分布,以此计算洪峰遭遇概率。叶姗姗等<sup>[5]</sup>运用 Copula 函数风险概率模型对宿迁市暴雨雨型风险率进行了研究;高玉琴等<sup>[6]</sup>采用三维 G-H Copula 函数对秦淮河流域的洪峰和洪水位进行了风险率的计算;王亚雄等<sup>[7]</sup>用最优 Copula 函数进行了飞来峡水库坝址洪峰和最大 7 日洪量的联合重现期与边缘分布重现期的比较;Salvadori 等<sup>[8]</sup>运用二维的 Copula 函数对降雨历时和降雨强度的联合概率分布进行模拟。Poulin 等<sup>[9]</sup>分析了概率模型的多种边缘分布函数特性,并将之应用于实例。Hochrainer - stigler 等<sup>[10]</sup>对 Copula 函数的原理结构进行了研究并用于系统整合风险分析。但以上的 Copula 函数研究还存在一定局限性,主要为以下几点:

(1) 在水文频率计算中,经验频率法是基于实测资料进行经验公式计算的一种方法,它需要足够长的实测系列资料才能满足计算精度,其次,该方法在外延预测方面效果不佳。

(2) 大多数水文变量服从偏态分布,如果假设这些变量属于正态分布会使得计算结果的精度不高。

(3) 部分地区有高潮出现时,其降雨类型复杂,Copula 函数在雨潮组合遭遇的风险分析方面还有待进一步研究。

(4) Copula 函数在干支流特大洪水同时发生的分布模型还需要探索。

在以上研究基础上,本文主要研究应用 Copula 函数计算锦河和连锦河洪水遭遇概率,收集江西省高安和宜丰两个水文站的实测洪峰流量资料,采用年最大值法选取年最大流量,并计算其经验频率,其边缘分布为 P-III 型曲线。然后选择 4 种常用的 Archimedean Copula 函数对锦河和连锦河洪水遭遇的联合分布概率进行研究,经相关参数估算后,以 AIC<sup>[11]</sup> 和 OLS 值最小的原则来选出模拟效果最佳的 Archimedean Copula 函数,将其应用于计算锦河和连锦河洪水的同现概率及条件概率,对计算进行分析研究,并可将洪水遭遇概率及河道水面线的计算成果应用于实际工程项目中。

## 2 研究区概况

锦河流域位于江西省高安市西部。本文研究内容为流域内的锦河与连锦河的洪水遭遇情况。锦河起源于湘赣交界的幕阜山脉海拔高程为 628.6 m 的

东麓坪子岭。全长 304.55 km,流域面积 7 884 km<sup>2</sup>,是赣江下游西岸的一条重要支流,也是流经高安的第一大河流。锦河干流城区段河长约 13 km,宽约 150~300 m,河床底高程 20~24.5 m,较河岸低 8.0~12.0 m,河道纵坡约为(0.6~2.0)/10000。其流域水系图见图 1。

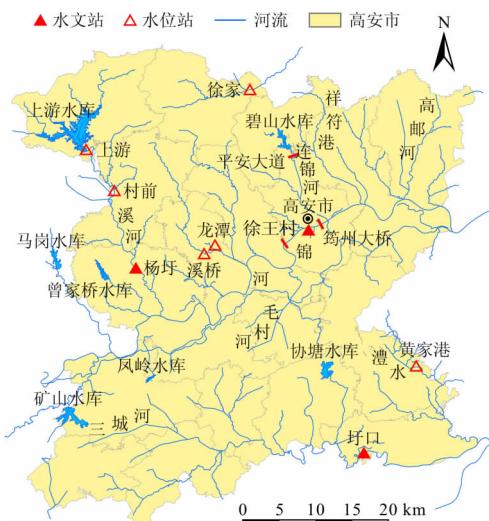


图 1 锦河流域水系图

连锦河,又名港溪水,位于锦河干流左岸,为高安城区主要支流之一,其河道左岸地势较高,右岸城区段的地势低洼。该河流发源于高安市奉新县交界的米岭南麓,自北向南流经仓下村、汪家圩、港溪、水口庵,至连锦桥进入城区,于五口桥汇入锦河。流域面积 89.85 km<sup>2</sup>,主河道全长 23.01 km,主河道纵比降 1.91‰,高安城市规划内连锦河的河段长约 5.5 km,一般河宽 50~80 m。

## 3 研究方法

### 3.1 边缘分布函数计算

Copula 函数计算概率之前首先要确定水文变量的边缘分布函数。P-III 型曲线能够较好地拟合暴雨洪水等变量的概率分布,是国内一种应用较为广泛的边缘分布函数。本文给定高安站及宜丰站的洪峰流量服从 P-III 分布函数<sup>[12]</sup>,其概率密度函数如公式(1)所示。

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (1)$$

式中:  $\Gamma(\alpha)$  为  $\alpha$  的伽马函数,  $\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$ ;  $\beta, \alpha, a_0$  分别为 P-III 型分布函数的尺度、形状和位置参数,  $\alpha > 0, \beta > 0$ <sup>[2]</sup>。

由参数  $\beta, \alpha, a_0$  确定 P-III 概率密度函数,并且

这些参数与总体统计参数  $\bar{x}$ 、 $C_V$ 、 $C_s$  的计算结果如表 1 所示。

锦河流域内有重要的水文测站高安站,其实测洪水能较好地代表锦河洪水过程。该水文站位于高安市城区高安大桥上游 200 m 处,控制集水面积为  $6.215 \text{ km}^2$ ,有 1964、1991–2016 年历年实测洪峰流量资料,经附近贾村站插补延展有 1964 年至 2016 年洪峰流量资料。宜丰水文站位于锦河左岸支流连锦河,控制流域面积为  $519 \text{ km}^2$ ,河道坡降为  $1.91\%$ ,现有 1957–2016 年实测洪峰流量资料。资

料条件系列长,数据精度高,可作为连锦河水文站,由于连锦河上游有一碧山水库,其上游集水面积为  $31.7 \text{ km}^2$ ,坝址以上河长  $8.70 \text{ km}$ ,平均坡降为  $5.58\%$ ,水库正常蓄水位  $58.01 \text{ m}$ ,总库容  $1.979 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,考虑其调蓄作用,进行了调洪计算,在边缘分布计算中洪峰流量将减去其调蓄流量。对宜丰站、高安站流量进行排频分析,并将高安站 1913 年调查最大流量作特大值处理,采用 P-III 曲线适线,可进行洪水频率计算并得到锦河和连锦河 P-III 分布函数的统计参数见表 1。

表 1 锦河和连锦河 P-III 分布函数统计参数值表

洪峰流量参数	$\bar{x} / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$C_V$	$C_s$	$\alpha$	$\beta$	$a_0$
锦河	2310.40	0.39	0.82	5.95	0.0027	112.70
连锦河	375.020	0.54	1.54	1.69	0.0064	112.02

### 3.2 边缘分布函数的检验

水文变量的理论分布是否能够准确代表变量总体的分布,需要进行假设检验。为保证检验的准确性,本文采用 Kolmogorov-Smirnov 检验、Anderson-darling 检验以及均方根误差( RMSE )来分别衡量高安站和宜丰站洪峰流量的边缘分布函数。

将两个水文站的洪峰流量系列导入 SPSS 中进行 K-S 非参数检验,得出两个测站的  $P$  值均为 0.2,大于 0.05,表明该边缘分布通过 K-S 检验。Anderson-darling 检验中计算出的高安站与宜丰站的  $P$  值分别为 0.26 和 0.29,大于 0.05,该分布通过了 Anderson-darling 检验。计算得出两个测站的 RMSE 分别为 0.025 和 0.022,表明二者的均方根误差均较小。根据上述检验,可以确定两站的 P-III 分布可作为边缘分布函数。

### 3.3 Archimedean Copula 函数

Archimedean Copula 函数可用于构建水文界常见的联合概率分布模型,它的结构形式多种多样,不同结构对不同类型的洪水拟合效果有较大差异,本文选用以下 4 种对称式的结构形式。

(1) Gumbel-Hougaard Copula<sup>[7]</sup>:

$$C(u_1, u_2) = \exp\left\{-\left[\left(-\ln u_1\right)^{\theta} + \left(-\ln u_2\right)^{\theta}\right]^{1/\theta}\right\} \quad \theta \in [1, +\infty) \quad (2)$$

(2) Clayton Copula<sup>[7]</sup>:

$$C(u_1, u_2) = (u_1^{-\theta} + u_2^{-\theta} - 1)^{-1/\theta} \quad \theta \in (0, +\infty) \quad (3)$$

(3) Ali-Mikhail-Haq Copula<sup>[7]</sup>:

$$C(u_1, u_2) = u_1 u_2 / [1 - \theta(1 - u_1)(1 - u_2)] \quad (4)$$

$$\theta \in [1, +\infty)$$

(4) Frank Copula<sup>[7]</sup>:

$$C(u_1, u_2) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[ 1 + \frac{(\exp(-\theta u_1) - 1)(\exp(-\theta u_2) - 1)}{\exp(-\theta) - 1} \right] \quad (5)$$

$$\theta \in R$$

式中:  $C$  为 Copula 函数;  $u_1$  和  $u_2$  为边缘分布函数,  $u_1 = F_1(x_1)$ ,  $u_2 = F_2(x_2)$ ;  $\theta$  为相关参数。

### 3.4 Archimedean Copula 函数参数估计

估计 4 种函数的参数是一个不可或缺的环节。以相关指数法来计算上述 4 种洪峰联合分布函数的参数。相关指数法是依据 Kendall 秩相关系数  $\tau$ <sup>[13]</sup> 来计算 Copula 函数的参数  $\theta$ ,两参数的函数关系式见表 2。

表 2 Copula 函数的  $\tau$  与  $\theta$  函数关系<sup>[14]</sup> 表

Copula 函数	函数关系
GH	$\tau = 1 - \frac{1}{\theta}$
Clayton	$\tau = \frac{\theta}{2 + \theta}$
AMH	$\tau = (1 - \frac{2}{3\theta}) - \frac{2}{3}(1 - \frac{1}{\theta})^2 \ln(1 - \theta)$
Frank	$\tau = 1 + \frac{4}{\theta} \left[ \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \left( \frac{t}{\exp(t) - 1} \right) dt - 1 \right]$

根据 SPSS 软件分析得出两站洪峰流量 Kendall 秩相关系数  $\tau$  为 0.174,根据函数关系计算出的参数  $\theta$  值见表 3。

表 3 Copula 函数的  $\theta$  计算成果表

GH	Clayton	AMH	Frank
1.21	0.42	0.64	2.51

### 3.5 Archimedean Copula 函数选择

由上节计算出函数的  $\theta$ , 可建立两水文站洪峰流量的 4 种 Archimedean Copula 函数的联合概率分布, 以上函数是否能够较为准确地拟合两变量之间的关系, 需要进行函数拟合检验, 然后通过优度评价准则选择出一种拟合效果最好的 Copula 函数。

3.5.1 图形评价分析法 本文主要利用 Q-Q 图

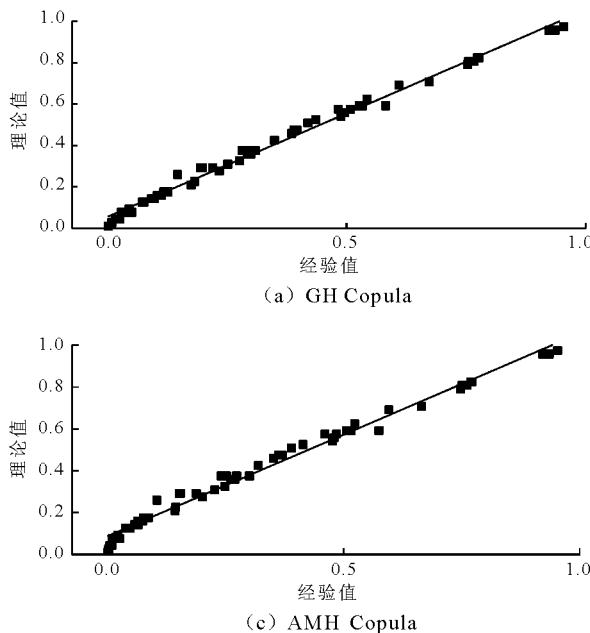


图 2 4 种 Copula 函数的理论与经验值 Q-Q 图

根据 Q-Q 图可见以上 4 种 Copula 函数的理论与经验联合概率点据均位于  $45^{\circ}$  线上下, 则可说明这 4 种 Copula 函数构建的联合概率分布模型的模拟效果较为满意。

3.5.2 最优 Copula 函数选取 为选出对锦河和连锦河洪峰遭遇拟合效果最好的 Copula 函数, 需采用优度评价准则即 AIC 准则及 OLS 准则来评价 4 种 Copula 函数。

AIC 准则结构如下所示:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_{emp}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) - C(u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}))^2 \quad (7)$$

$$AIC = n \ln(MSE) + 2k \quad (8)$$

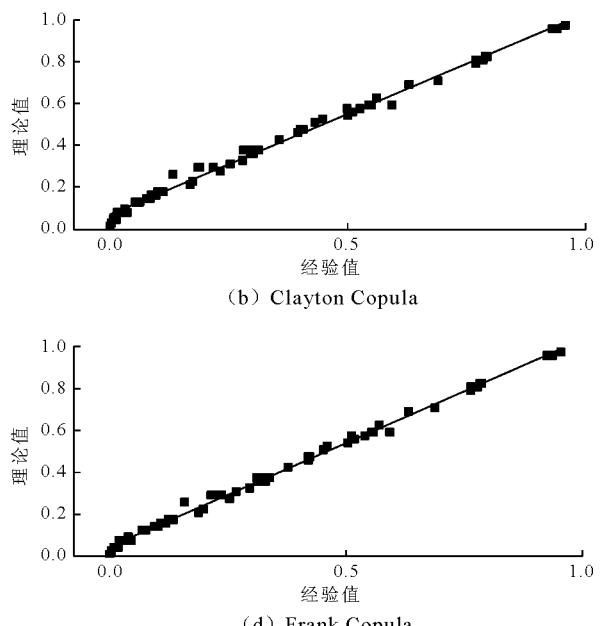
式中:  $m$  为函数的维数;  $k$  为模型参数的数量。AIC 值越小, 表明函数的联合概率分布拟合效果越佳。

的方法直观表示拟合效果的优劣。将经验和理论联合概率值点据呈现在一张图上, 若各点大致位于  $y = x$  线左右, 则说明构建的模型有一定可靠度。二维经验联合概率计算见公式(6):

$$F_{emp}(x_{i1}, x_{i2}) = P(X_1 \leq x_{i1}, X_2 \leq x_{i2}) \\ = \frac{\left( \sum_{g=1}^n \sum_{k=1}^n n_{g,k} - 0.44 \right)}{(n + 0.12)} \quad (6)$$

式中:  $F_{emp}$  为经验联合概率;  $n_{g,k}$  为满足  $X_1 \leq x_{i1}$ ,  $X_2 \leq x_{i2}$  的联合观测数量;  $n$  为系列长度。

将 4 种 Copula 函数的理论与经验联合概率值点绘为散点图, 见图 2。



OLS 准则结构如下:

OLS =

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_{emp}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) - C(u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}))^2} \quad (9)$$

根据公式(8)与(9)计算出 4 种 Copula 函数的 AIC 值与 OLS 值如表 4 所示。

表 4 AIC 值与 OLS 值计算成果表

Copula 函数	GH	Clayton	AMH	Frank
AIC 值	-378.27	-383.01	-332.14	-409.38
OLS 值	0.0407	0.0391	0.0597	0.0314

由表 4 可知 AIC 值与 OLS 值最小的均为 Frank Copula 函数, 则可说明 Frank Copula 函数是模拟该

流域洪水洪峰遭遇概率效果最佳的函数,因此,本文选择Frank Copula函数进行锦河与连锦河洪水遭遇概率分析。

#### 4 干支流洪水遭遇分析

利用Frank Copula函数的原理与结构,建立锦河与连锦河洪峰遭遇两变量联合分布模型<sup>[16]</sup>,计算工程中两河多种设计标准下洪水遭遇概率。水文界中常用重现期来表示随机变量值在一段长时间内多少年一遇,重现期T与超值累计概率P的关系为 $T = \frac{1}{P}$ <sup>[17]</sup>。为全面体现洪水遭遇情况,计算的概率有联合概率、同现概率以及条件概率<sup>[18]</sup>。

洪峰流量( $x_1, x_2$ )的联合分布为 $F(x_1, x_2)$ ,则:

$$\begin{aligned} F(x_1, x_2) &= P(X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2) \\ &= \int_{-\infty}^{x_2} \int_{-\infty}^{x_1} f(u_1, u_2) du_1 du_2 \\ &= C(u_1, u_2) \end{aligned} \quad (10)$$

锦河和连锦河同时发生某一设计标准的洪水的概率为重现概率,以 $H_0$ 表示,则:

$$H_0(x_1, x_2) = P(X_1 > x_1, X_2 > x_2)$$

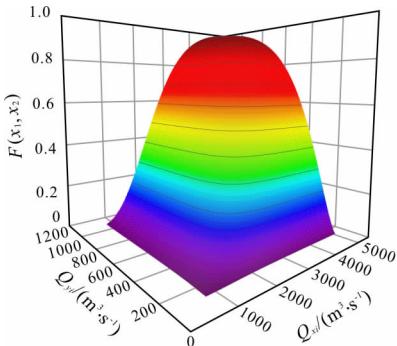


图3 锦河与连锦河联合概率分布图

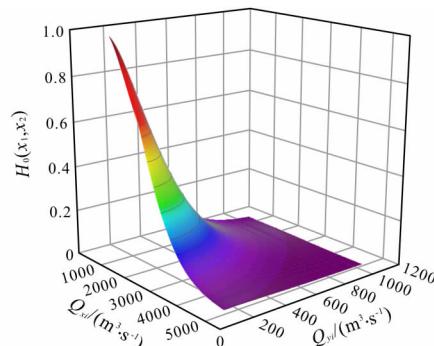


图4 锦河与连锦河同现概率分布图

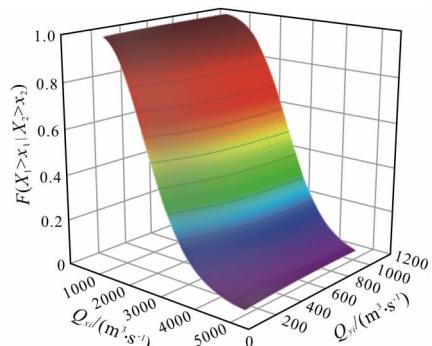


图5 锦河与连锦河条件概率分布图

表5 锦河和连锦河洪水遭遇概率计算表

锦河洪水		连锦河洪水		概率/%		
洪峰流量/(m³ · s⁻¹)	重现期/a	洪峰流量/(m³ · s⁻¹)	重现期/a	联合分布	同现	条件
4927	100	1054	100	98.03	0.027	2.662
4927	100	934	50	97.05	0.053	2.630
4529	50	934	50	96.10	0.104	5.198
4529	50	771	20	93.25	0.251	5.019
3971	20	771	20	90.61	0.607	12.144
3971	20	645	10	86.15	1.151	11.507
3515	10	771	20	86.15	1.151	23.014
3515	10	645	10	82.19	2.194	21.942

$$= 1 - u_1 - u_2 + C(u_1, u_2) \quad (11)$$

在锦河发生一种重现期的洪水前提下,连锦河发生某一数量级的洪水概率如公式(12):

$$\begin{aligned} F(X_1 > x_1 | X_2 > x_2) &= \frac{P(X_1 > x_1, X_2 > x_2)}{P(X_2 > x_2)} \\ &= \frac{1 - u_1 - u_2 + C(u_1, u_2)}{1 - u_2} \end{aligned} \quad (12)$$

锦河和连锦河的洪峰联合概率分布、同现概率与条件概率如图3、4、5所示。

图中 $Q_{xi}$ 为锦河的洪峰流量(m³/s), $Q_{yi}$ 为连锦河的洪峰流量(m³/s)。由图4可知,锦河的洪峰流量大于5 000 m³/s(约100年一遇)和连锦河的洪峰流量大于1 200 m³/s(约100年一遇)的洪水发生的概率极小。锦河和连锦河的洪水同现概率随着洪水的量级的增大而减小,联合概率随着洪水的量级的增大而增大。在锦河发生20年一遇的洪水工况下,连锦河发生同等量级的洪水概率明显增加。在锦河发生一特定数量级的洪水前提下,连锦河发生洪水的概率随着洪水量级的增加略有增加。以上规律经验证符合两河洪水发生的概况。表5统计了100年一遇量级以下锦河和连锦河的洪水遭遇的概率。

由表 5 可知, 锦河和连锦河同量级洪水同时出现的概率较小, 在锦河出现 100 年一遇工况的洪水时, 连锦河发生同一设计标准洪水的几率仅有 2.662%。两河发生 20 年一遇量级洪水的概率较大, 在锦河发生 10 年一遇以上洪水的情况下, 连锦河同时发生 20 年一遇以上洪水的概率高达 23.01%。由此可见锦河和连锦河大量级洪水遭遇的可能性较小, 而小量级洪水遭遇的机率较大, 该结论与《赣江流域水文年鉴》中近几十年的洪水统计资料相符合。

## 5 水面线计算

根据水文年鉴上的洪水实测资料, 估算连锦河洪水传播时间约为 2.8 h。锦河上高水文站到高安站距离为 79 km, 洪水传播时间约为 18 h。因此, 锦河干流与连锦河支流洪峰在时间上是错开的, 同时遭遇的几率甚小, 所以不按同频遭遇考虑。工程研究的河段对于锦河而言是从徐王村到筠州大桥, 桩号为 -K5 +910 ~ K1 +523, 连锦河的研究河段为平安大道到连锦河河口, 桩号为 -K2 +966 ~ K2 +027。

### 5.1 模型原理

MIKE11 一维河网汇流模型采用非恒定流圣维南 (Saint-Venant) 方程组构建<sup>[19]</sup>。

连续方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (13)$$

动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q + |Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (14)$$

式中:  $A$  为河道过水面积,  $\text{m}^2$ ;  $Q$  为流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $t$  为时间,  $\text{h}$ ;  $x$  为与水流方向一致的横向坐标,  $\text{m}$ ;  $q$  为河道旁侧入流,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $h$  为水位,  $\text{m}$ 。

为了推求高安城区锦河和连锦河的水面线, 将对河道进行概化<sup>[20]</sup>, 利用 MIKE11 一维水动力模型对锦河 10 年一遇遭遇连锦河 20 年一遇洪水情况进行模拟, 并计算得出该工况下的洪水下水面线。将河网概化, 生成河网文件, 编辑河道参数(长度, 断面), 输入初始条件和边界条件。

计算时间步长为 0.16 h。

边界条件: 锦河上游给定 10 年一遇的流量时间序列, 连锦河上游给定 20 年一遇的流量时间序列, 锦河下游河口位置给定水位流量关系曲线。

根据《水力计算手册(第二版)》对糙率取值要

求, 结合计算区域土地利用等情况, 需要对锦河、连锦河一维河道模型糙率进行选取和率定。根据历史相关资料和经验, 各河段糙率选取 0.033。

模型断面迭代的初始水深为 1.84 m。

### 5.2 计算结果分析

由第 4 节可知, 锦河发生 10 年一遇以上洪水遭遇连锦河发生 20 年一遇以上洪水的概率较大, 属于河道工程常见工况, 水利模型构建必不可少。因此用 MIKE11 模型计算锦河与连锦河这种工况的洪水水面线。如表 6 所示。

由表 6 可知, 当锦河出现 10 年一遇的洪水时, 连锦河出现 20 年一遇情况的水位较高, 这种工况的洪水同期遭遇概率相对较大, 结合实际询问调查, 得出连锦河河口段高水位往往是受锦河洪水顶托影响的结论, 该工况下的水面线计算结果对高安市的防洪工程具有重大意义。

表 6 锦河 10 年一遇遭遇连锦河 20 年一遇洪水水面线表

锦河水面线		连锦河水面线	
桩号/m	10 年一遇	桩号/m	20 年一遇
-K5 +910	32.71	-K2 +966	34.37
-K5 +510	32.68	-K2 +782	34.30
-K4 +902	32.59	-K2 +597	34.28
-K4 +689	32.56	-K2 +229	34.24
-K4 +475	32.54	-K2 +060	34.23
-K4 +296	32.51	-K2 +044	34.22
-K3 +885	32.45	-K1 +860	34.20
-K3 +691	32.43	-K1 +660	34.13
-K3 +333	32.35	-K1 +570	34.02
-K3 +112	32.27	-K1 +450	33.97
-K2 +942	32.26	-K1 +440	33.92
-K2 +770	32.25	-K1 +170	33.75
-K2 +520	32.22	-K1 +150	33.69
-K2 +369	32.19	-K0 +900	33.50
-K2 +080	32.18	-K0 +650	33.31
-K1 +880	32.15	-K0 +130	32.89
-K1 +680	32.16	K0 +000	32.88
-K1 +480	32.13	K0 +077	32.84
-K1 +280	32.10	K0 +130	32.82
-K1 +080	32.07	K0 +177	32.81
-K0 +680	32.02	K0 +477	32.79
-K0 +480	32.01	K0 +677	32.79
-K0 +280	31.96	K0 +727	32.79
K0 +125	31.89	K0 +810	32.78
K0 +325	31.89	K1 +027	32.78
K0 +525	31.88	K1 +135	32.77
K0 +725	31.86	K1 +427	32.77
K0 +925	31.85	K1 +627	32.76
K1 +325	31.78	K1 +827	32.75
K1 +523	31.77	K2 +027	32.75

## 6 结论与展望

本文以高安市锦河与连锦河的洪峰流量资料为研究对象,采用Copula函数建立了两水文站洪峰的同现概率分布与条件概率分布来研究干支流的洪水遭遇问题,对高安市的防洪评价工程有重要意义。得出以下4点结论:

(1)通过边缘分布函数的K-S和A-D检验,锦河和连锦河的洪峰分布服从P-III型分布。

(2)Archimedean Copula函数的4种形式对洪峰的联合概率分布均能较好地拟合,通过优度评价准则评价后,得出拟合效果最好的函数是Frank Copula函数的结论。

(3)锦河和连锦河的洪水同现概率随着洪水的量级的增大而减小,联合概率随着洪水的量级的增大而增大。在锦河发生某一重现期的洪水情况下,连锦河发生洪水的概率随着洪水量级的增加略有上升。

(4)锦河和连锦河大量级洪水遭遇的可能性较小,而小量级洪水遭遇的几率较大,锦河和连锦河同时发生20年一遇的洪水概率为12.14%,在锦河发生10年一遇以上洪水的情况下,连锦河发生20年一遇以上洪水的概率为23.01%,并对该工况下的洪水水面线进行了计算,这对锦河流域的防洪评价等工程具有重要的实践价值。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2):219–228.
- [3] 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.
- [4] 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[J]. 天津:天津大学,2015.
- [5] 叶姗姗,叶兴成,王以超,等. 基于Copula函数的设计暴雨雨型研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 63 – 68.
- [6] 高玉琴,叶柳,赖丽娟. 基于G-H copula函数的秦淮河流域洪水风险分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1):172–177.
- [7] 王亚雄,刘祖发,陈俊合. 基于Copula函数的飞来峡水库坝址洪水峰量联合分布研究[J]. 广东水利水电, 2014(5):18–22.
- [8] SALVADORI G , DE MICHELE C . Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events [J]. Water Resources Research, 2004, 40 (12):1–17.
- [9] POULIN A, HUARD D, FAVRE A C, et al. Importance of tail dependence in bivariate frequency analysis[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2007, 12(4):394–403.
- [10] HOCHRainer – STIGLER S , PFLUG G , DIECKMANN U , et al. Integrating systemic risk and risk analysis using copulas[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2018, 9(4):561–567.
- [11] 李亦凡,李订芳. 二维非对称copula函数在干旱特性联合概率中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5):236–240.
- [12] 成丹,陈正洪,方怡. 宜昌市区短历时暴雨雨型特征[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(3):249–253.
- [13] 袁超,宋松柏. 基于Copula函数的水文干旱联合概率分布研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6):50–53.
- [14] 郭生练,闫宝伟,肖义. 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.
- [15] 韩晓庆. Copula函数的理论及其应用[D]. 温州:温州大学,2013.
- [16] 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, 2009, 42(1):10–15.
- [17] 孙鹏,张强,陈晓红. 基于Copula函数的鄱阳湖流域极值流量遭遇频率与灾害风险[J]. 湖泊科学, 2011, 23(2):183–190.
- [18] 王文圣,丁晶,邓育仁. 非参数统计方法在水文水资源中的应用与展望[J]. 水科学进展, 1999, 10(4): 458–463.
- [19] 孔鲁志. 基于MIKE模型的山区性天然河道水力特性数值仿真应用研究[D]. 昆明:云南农业大学.
- [20] 徐海亮. 西江流域洪水灾害和水文变异分析[J]. 人民珠江, 2007(4):42–46.