

# 基于非对称乘积 Copula 函数的城市雨洪遭遇风险分析

李晓英<sup>1</sup>, 姜紫萍<sup>1</sup>, 樊红霞<sup>2</sup>, 袁 瑶<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610)

**摘要:** 针对沿江城市暴雨与外江洪水诱发的内涝问题, 对城市雨洪遭遇特性开展研究。以广东省肇庆市端州区为例, 利用长系列实测降水量和西江流量数据, 分别采用对称和非对称乘积 Copula 函数构建雨洪联合分布, 采用赤池信息准则和图形评价法选择最优 Copula 函数进行雨洪遭遇风险分析。结果表明: 非对称乘积 Frank Copula II 函数拟合效果最优; 以暴雨为主的组合中, 端州区发生较大量级暴雨时, 西江发生洪水的条件风险概率相对较高; 以洪水为主的组合中, 不同洪水重现期雨洪联合风险概率均略大于相应西江洪水出现频率。

**关键词:** 城市内涝; 雨洪遭遇; 非对称乘积 Copula 函数; 联合分布; 风险分析; 肇庆市

**中图分类号:** TV122

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-6933(2024)06-0078-07

**Risk analysis of urban rain-flood encounter based on asymmetric product Copula function//LI Xiaoying<sup>1</sup>, JIANG Ziping<sup>1</sup>, FAN Hongxia<sup>2</sup>, YUAN Yao<sup>1</sup>** (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** Aiming at the urban waterlogging problem induced by urban rainstorm and outer river flood, the characteristics of urban rain-flood encounter were studied. Taking Duanzhou District of Zhaoqing City, Guangdong Province as an example, rain-flood joint distributions were constructed with symmetric and asymmetric product Copula functions, respectively, based on long series of measured rainfall data and Xijiang River streamflow data. The optimal Copula function was selected by Akaike information criterion and the graph evaluation method for rain-flood encounter risk analysis. The results show that the asymmetric product Frank Copula II function has the best fitting effect. In the rainstorm-dominated combination, the conditional risk probability of Xijiang River flood is relatively high when heavy rain occurs in Duanzhou District. In the flood-dominated combination, the rain-flood combined risk probability under different flood recurrence periods is slightly greater than the corresponding frequency of Xijiang River flood.

**Key words:** urban waterlogging; rain-flood encounter; asymmetric product Copula function; joint distribution; risk analysis; Zhaoqing City

城市化进程和极端气候变化导致当前严重的城市内涝问题<sup>[1]</sup>和洪水频发<sup>[2-3]</sup>。沿江城市洪涝灾害的发生不仅与城市内暴雨有关,还与外江洪水有关,分析城市雨洪遭遇特性对城市洪涝风险研究有重要意义。

Copula 函数可用于多种变量组合特性研究,因其构造灵活被各领域广泛使用。21 世纪以来, Copula 函数在水文领域应用较多<sup>[4]</sup>,主要应用在水文事件多变量频率分析、水文事件遭遇组合分析、水文随机模拟等方面<sup>[5]</sup>。周月英等<sup>[6]</sup>采用干旱历时与烈度的 Gumbel Copula 函数分析了粤港澳大湾区

的干旱特征变化趋势;李继清等<sup>[7]</sup>采用阿基米德 Copula 函数构建川江干流与支流、支流与支流间年最大洪水量级的联合分布,对川江干支流洪水遭遇的可能性进行了分析,为河段制定合理的防洪调度方式提供依据;王磊之等<sup>[8]</sup>基于 Frank Copula 函数构建了深圳雨潮联合分布,分析了雨潮遭遇联合风险变化情况;赵玲玲等<sup>[9]</sup>采用阿基米德 Copula 函数构建了华南中小流域雨洪联合分布,分析了雨洪同频遭遇的风险概率;Yin 等<sup>[10]</sup>构建 Copula 函数定义极端持续性降雨事件,得到了设计降雨在不同回归期的降雨过程。可见 Copula 函数能够较好地解决

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52279013);湖南省重大水利科技项目(XSKJ2021000-04)

**作者简介:** 李晓英(1978—),女,副教授,博士,主要从事水资源系统规划与动能经济研究。E-mail:lix3@hhu.edu.cn

**通信作者:** 姜紫萍(1999—),女,硕士研究生,主要从事水资源系统规划研究。E-mail:525491555@qq.com

水文问题中相关性问题的,可用于雨洪遭遇概率的定量分析。

Copula 函数类型很多,不同类型 Copula 函数描述性能不同。在 Copula 函数的运用中,大多数考虑阿基米德 Copula 函数,但阿基米德 Copula 函数具有对称性,难以真实反映复杂的不对称相关结构<sup>[11]</sup>。因此,Liebscher<sup>[12]</sup>提出非对称 Copula 函数的构造方法,构造出非对称乘积 Copula 函数;李亦凡等<sup>[13]</sup>在研究干旱特性时采用非对称乘积 Copula 函数更加准确地分析了干旱历时和干旱峰值的联合概率分布;Yang 等<sup>[14]</sup>采用非对称乘积 Copula 函数构造了江苏地区洪量、降水和潮位的联合分布,证明了非对称乘积 Copula 函数可有效应用于水文要素相关性问题的研究。

针对城市区域内暴雨与外江洪水关系的复杂性和不确定性,陈琼等<sup>[15]</sup>利用 Gumbel Copula 函数建立了景德镇市区最大日降水量和昌江相应日流量的联合分布,并进行了雨洪遭遇分析;刘曾美等<sup>[16]</sup>采用 AMH (Ai-Mikhail-Haq) Copula 函数建立中珠联围内暴雨和外江洪水联合分布,得到感潮地区涝区暴雨与上游洪水的遭遇规律。现有雨洪遭遇研究大多仅考虑以年最大日降雨为主的雨洪组合,但在城市内涝发生的实际情况中,当城市暴雨发生时,外江水位并不固定,当外江处于高水位时,城市降雨情况也多种多样,两者往往并不同步<sup>[17]</sup>。单独以一种最大情况为主的雨洪组合分析会漏掉一些雨洪遭遇信息,有必要采用以区内暴雨为主和以外江洪水为主两种组合进行沿江城市雨洪遭遇分析。

本文以广东省肇庆市中心城区端州区为例,利用端州区长系列降水量和西江流量数据,采用对称和非对称乘积 Copula 函数分别构建区内年最大日降水量及相应西江洪峰流量的联合分布和西江年最大洪峰流量及相应区内日降水量的联合分布,利用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法求解 Copula 函数参数,以赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 和图形评价法选取最优 Copula 函数进行雨洪遭遇风险分析。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

广东省肇庆市端州区位于广东省中部偏西,是肇庆市政治、经济、文化中心,面积 154 km<sup>2</sup>。全境地势北高南低,北部以山地为主,中部为冲积平原,南临西江,见图 1。端州区属亚热带季风气候,降水量大且年内雨量分配不均,多年平均降水量为 1644 mm,4—9 月汛期降水量占全年雨量的 70%以

上<sup>[18]</sup>,尤其是每年 5 月中旬到 6 月下旬,端州区会出现“龙舟水”现象,降雨时间长、强度大,容易引发城乡积涝。端州区主要承泄区为西江,受到上游地区持续性强降雨的影响,汛期西江长期处于高水位,区内暴雨和西江洪水共同作用导致端州区洪涝问题严重。如 2017 年受台风“南玛”影响,西江流域出现强降雨,西江干流水位全线上涨,下游高要站出现 4.6 万 m<sup>3</sup>/s 洪峰流量,量级达到 20 年一遇,端州区出现雨洪叠加现象,造成局部区域受灾严重,防汛形势复杂。因此,对端州区进行雨洪遭遇风险分析尤为重要。

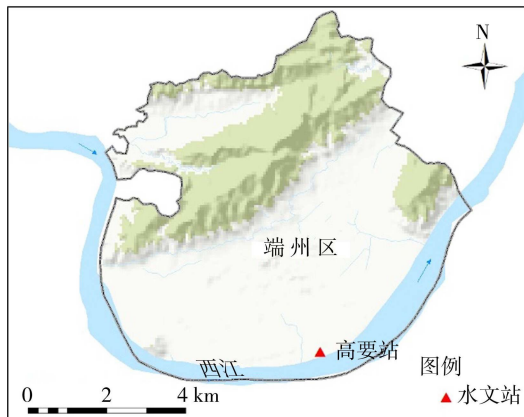


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

### 1.2 数据来源

端州区内西江干流设有高要水文站,高要站为国家级重要控制站,记录了 1959 年以来的降雨和西江流量数据,数据保存完整。本文依托 1959—2021 年高要站日降水量与西江流量数据,进行端州区雨洪遭遇风险分析。

## 2 研究方法

### 2.1 Copula 函数类型

#### 2.1.1 阿基米德 Copula 函数

Copula 函数能表达二元联合分布中变量间的相关性结构,即变量  $x$  和  $y$  的联合分布函数  $H(x, y)$  可用一个 Copula 函数  $C(u, v)$  来描述,其中  $u, v$  分别为变量  $x, y$  的边缘分布函数。在水文分析中一般采用阿基米德 Copula 函数,主要包括 Gumbel、Clayton 及 Frank Copula 函数<sup>[19-20]</sup>。阿基米德 Copula 函数要求  $u, v \in [0, 1]$ ,满足  $C(u, v) = C(v, u)$ ,因此,阿基米德 Copula 函数只能描述具有对称性的变量关系<sup>[21-22]</sup>,且阿基米德 Copula 函数参数单一,仅能反映变量间关系的一种特征,不能描述实际变量间的复杂关系。

#### 2.1.2 非对称乘积 Copula 函数

由于变量间可能存在因果关系或存在变量地位不对等的情况,不满足阿基米德 Copula 函数的要

求,因此,本文引入非对称乘积 Copula 函数<sup>[23]</sup>,主要有以下两种形式:

$$\bar{C}_I(u, v) = C_{\theta_1}(u^a, v^b)u^{1-a}v^{1-b} \quad (1)$$

$$\bar{C}_{II}(u, v) = C_{\theta_1}(u^a, v^b)C_{\theta_2}(u^{1-a}, v^{1-b}) \quad (2)$$

式中: $\bar{C}_I(u, v)$ 、 $\bar{C}_{II}(u, v)$ 为二元非对称 Copula 函数; $a, b, \theta_1, \theta_2$ 为 Copula 函数的参数, $a, b \in [0, 1]$ 。

将阿基米德 Copula 函数代入这两种非对称形式,可以得出以下 6 种非对称乘积 Copula 函数:

#### a. 非对称 Gumbel Copula I :

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

#### b. 非对称 Clayton Copula I :

$$C(u, v) = u^{1-a}v^{1-b} (u^{-a\theta} + v^{-b\theta} - 1)^{-1/\theta} \quad (4)$$

#### c. 非对称 Frank Copula I :

$$C(u, v) = -u^{1-a}v^{1-b}\theta^{-1} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{(e^{-\theta u^a} - 1)(e^{-\theta v^b} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right] \quad (5)$$

#### d. 非对称 Gumbel Copula II :

$$C(u, v) = \exp \left\{ - \left[ (-a \ln u)^{\theta_1} + (-b \ln v)^{\theta_1} \right]^{1/\theta_1} - \left\{ \left[ -(1-a) \ln u \right]^{\theta_2} + \left[ -(1-b) \ln v \right]^{\theta_2} \right\}^{1/\theta_2} \right\} \quad (6)$$

#### e. 非对称 Clayton Copula II :

$$C(u, v) = (u^{-a\theta_1} + v^{-b\theta_1} - 1)^{-1/\theta_1} \cdot (u^{-(1-a)\theta_2} + v^{-(1-b)\theta_2} - 1)^{-1/\theta_2} \quad (7)$$

#### f. 非对称 Frank Copula II :

$$C(u, v) = \theta_1^{-1}\theta_2^{-1} \ln \left[ 1 + \frac{(e^{-\theta_1 u^a} - 1)(e^{-\theta_1 v^b} - 1)}{e^{-\theta_1} - 1} \right] \cdot \ln \left[ 1 + \frac{(e^{-\theta_2 u^{1-a}} - 1)(e^{-\theta_2 v^{1-b}} - 1)}{e^{-\theta_2} - 1} \right] \quad (8)$$

## 2.2 Copula 函数选择

### 2.2.1 Copula 函数参数估计

Copula 函数的选择主要包括 Copula 函数参数估计和拟合优度评价<sup>[24-25]</sup>。由于非对称乘积 Copula 函数的参数较多,仅用秩相关系数法无法推求 Copula 函数的参数。本文采用 PSO 算法求解经验频率(式(9))与理论频率离差平方和最小时的 Copula 函数参数,参数估计步骤包括:①在 Copula 函数参数取值范围内随机生成粒子的初始位置和初始速度;②建立适应度函数 $f$ (式(10)),比较每个粒子当前适应度与历史最佳适应度,更新每个粒子的局部历史最优位置和全局最优位置;③通过式(11)更新粒子的位置和速度;④设置最大迭代次数控制

循环终止。

$$F_e(x_i, y_i) = n_i / (N + 1) \quad (9)$$

$$f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F_e(x_i, y_i) - F_I(x_i, y_i)]^2} \quad (10)$$

$$\begin{cases} v_{jd}^{(k+1)} = v_{jd}^{(k)} + c_1 r_1 (p_{jd}^{(k)} - z_{jd}^{(k)}) + c_2 r_2 (p_{gd}^{(k)} - z_{jd}^{(k)}) \\ z_{jd}^{(k+1)} = v_{jd}^{(k+1)} + z_{jd}^{(k)} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $F_e(x_i, y_i)$ 为观测值 $(x_i, y_i)$ 的经验频率; $F_I(x_i, y_i)$ 为观测值 $(x_i, y_i)$ 的理论频率,可由 Copula 函数计算得到; $n_i$ 为观测值升序排列后小于等于联合观测值 $(x_i, y_i)$ 的个数; $N$ 为联合观测值总对数; $k$ 为当前迭代次数; $z_{jd}^{(k)}$ 、 $z_{jd}^{(k+1)}$ 分别为第 $k$ 和 $k+1$ 次迭代时第 $j$ 个粒子 $d$ 维分量的位置( $j=1, 2, \dots, s; d=1, 2, \dots, D$ ); $v_{jd}^{(k)}$ 、 $v_{jd}^{(k+1)}$ 分别为第 $k$ 和 $k+1$ 次迭代时第 $j$ 个粒子 $d$ 维分量的速度; $p_{jd}^{(k)}$ 、 $p_{gd}^{(k)}$ 分别为第 $k$ 次迭代时第 $j$ 个粒子 $d$ 维分量的个体极值和整个粒子群 $d$ 维分量的全局极值; $c_1, c_2$ 为学习因子; $r_1, r_2$ 为在区间 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数。

### 2.2.2 Copula 函数拟合优度评价

采用 AIC 进行 Copula 函数拟合优度评价。AIC 在最小平方误差的基础上,惩罚具有更多参数的模型,能够考虑到模型的拟合程度和复杂程度<sup>[26]</sup>。AIC 值越小, Copula 函数拟合效果越好,其计算式为

$$C_{AI} = N \ln E_{MS} + 2m \quad (12)$$

式中: $C_{AI}$ 为 AIC 值; $E_{MS}$ 为均方误差; $m$ 为模型参数总数。

为检验 Copula 函数的拟合精度,采用图形评价法比较经验频率和理论频率是否一致,通过观测经验频率和理论频率点据与 $45^\circ$ 线的接近程度判断拟合优度。

### 2.3 雨洪遭遇风险概率计算

为揭示对城市安全不利的雨洪事件发生的概率,进行雨洪遭遇风险分析,从而制定风险应对策略。对于沿江城市来说,区内出现暴雨或者外江发生洪水都会威胁城市安全<sup>[27-29]</sup>。在以区内暴雨为主的组合中,当区内发生较大量级暴雨时,外江发生较大量级洪水会加重城市受灾程度,以外江洪水为主的组合同样如此。因此,雨洪遭遇风险分析中,需要分析区内暴雨或者外江洪水超过某一特定值的情况下另一水文变量超过某一特定值的概率,以及外江洪水或者区内暴雨超过某一特定值的概率,即条件风险概率和联合风险概率,其表达式分别为

$$P(Y > y | X > x) = \frac{1 - u - v + C(u, v)}{1 - u} \quad (13)$$

$$P(X > x \text{ or } Y > y) = 1 - C(u, v) \quad (14)$$



### 3 结果与分析

#### 3.1 边缘分布确定

利用 1959—2021 年端州区高要站的日降水量和西江流量数据进行以暴雨为主和以洪水为主的两种组合下雨洪遭遇分析。两种组合中,共有区内年最大日降水量及相应西江洪峰流量、西江年最大洪峰流量及相应区内日降水量 4 个水文变量,各自的边缘分布采用 P-III 分布,利用矩法估计各分布的统计参数,计算结果见表 1。

表 1 两种雨洪组合的 4 个变量边缘分布的参数估计

Table 1 Parameter estimation of marginal distribution of four variables in two rain-flood combinations

组合类型	变量	均值	$C_V$	$C_S$
以暴雨为主	端州区年最大日降水量	110.67	0.37	1.49
	相应西江洪峰流量	12063.62	0.53	1.01
以洪水为主	西江年最大洪峰流量	31981.03	0.30	0.51
	相应端州区日降水量	26.22	0.85	1.07

注:降水量均值单位为 mm,流量均值单位为  $m^3/s$ ,  $C_V$  为变差系数,  $C_S$  为偏差系数。

利用 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验对两种雨洪组合下 4 个变量边缘分布的拟合结果进行检验,年最大日降水量及相应西江洪峰流量、西江年最大洪峰流量及相应区内日降水量的 K-S 检验统计量分别为 0.094、0.071、0.058、0.080,均小于 10% 显著性水平下的 K-S 检验统计量临界值 0.1577,说明通过 K-S 检验。因此,4 个水文变量的边缘分布采用 P-III 分布是合理的。

#### 3.2 基于 Copula 函数的联合分布确定

确定变量边缘分布后,利用对称和非对称乘积 Copula 函数分别构建两种雨洪组合的联合分布,采用 PSO 算法估计 Copula 函数参数值。PSO 算法参数设置为:学习因子  $c_1=c_2=1.496$ ,种群规模  $s=50$ ,惯性权重  $w=0.729$ ,粒子维度随 Copula 函数参数个数变化,最大迭代次数  $G=100$ 。两种组合 Copula 函数均在 60 次迭代后参数趋于收敛。利用公式 (12) 计算 AIC 值,根据计算结果进行排序,结果见表 2。

a. 在两种雨洪组合中,非对称乘积 Copula 函数的 AIC 值普遍小于对称 Copula 函数,非对称乘积 Copula 函数拟合效果更好,能准确描述雨洪联合分布。

b. 非对称乘积 Frank Copula II 函数的 AIC 值最小,对两种雨洪组合的拟合效果最好。

对于两种雨洪组合,利用式 (9) 计算经验频率,利用表 2 中的 Frank Copula II 函数参数构建两种雨洪组合的联合分布,并根据式 (8) 计算理论频率,对经验频率和理论频率进行比较,结果见图 2。从图 2 可以看出两种雨洪组合的经验频率与理论频率点都

表 2 两种雨洪组合的 Copula 函数参数估计

Table 2 Parameter estimation of Copula functions for two rain-flood combinations

Copula 函数	参数	以暴雨为主			以洪水为主		
		参数取值	AIC 值	排序	参数取值	AIC 值	排序
Gumbel Copula	$\theta$	1.070	-340.148	7	1.019	-306.976	8
	$a$	0.150	-337.278	9	0.000	-310.580	4
Clayton Copula	$\theta$	0.337	-340.359	6	-1.139	-307.480	7
	$a$	48.991			92.787		
Gumbel Copula I	$a$	0.085	-341.308	3	0.040	-311.586	3
	$b$	0.100			0.347		
Clayton Copula I	$\theta$	62.707			92.709		
	$a$	0.040	-342.276	2	0.032	-308.460	5
Frank Copula I	$b$	0.347			0.347		
	$\theta$	3.038			-1.765		
Gumbel Copula II	$a$	0.196	-340.872	4	0.992	-313.143	2
	$b$	0.814			0.603		
Clayton Copula II	$\theta_1$	65.170			13.041		
	$\theta_2$	9.906	-338.872	8	11.624	-305.218	9
Frank Copula II	$a$	0.965			0.949		
	$b$	0.022			0.013		
Gumbel Copula I	$\theta_1$	9.913			1.021		
	$\theta_2$	9.116	-340.785	5	38.203	-307.820	6
Clayton Copula I	$a$	0.972			0.971		
	$b$	0.015			0.006		
Frank Copula II	$\theta_1$	37.278			-25.826		
	$\theta_2$	-8.620	-369.760	1	-1.161	-313.476	1
Gumbel Copula II	$a$	0.322			0.001		
	$b$	0.527			0.029		

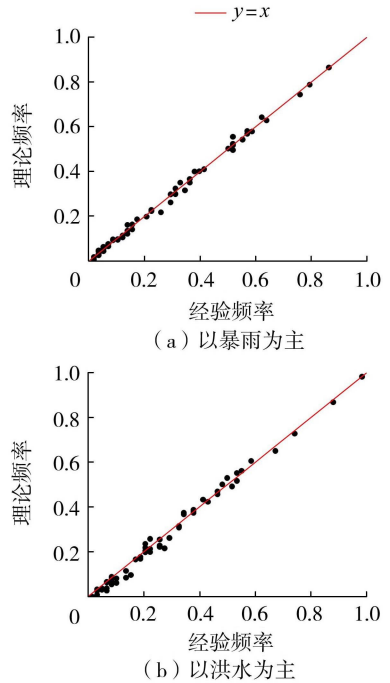
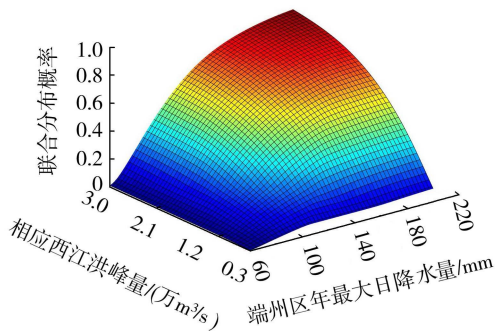


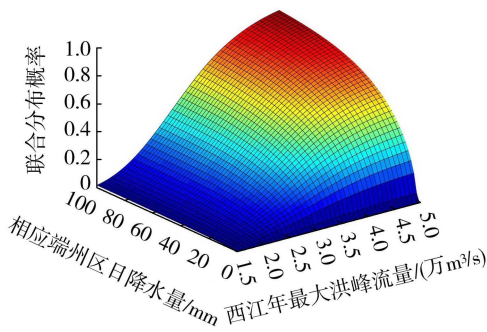
图 2 两种雨洪组合经验频率与理论频率比较  
Fig. 2 Comparison between empirical frequency and theoretical frequency of two rain-flood combinations

分布在 45°线附近, Frank Copula II 函数对实测数据拟合效果较好, 采用 Frank Copula II 函数进行雨洪遭遇分析是合理的。

综上, 选用 Frank Copula II 函数构建两种组合情况下端州区雨洪联合分布, 计算联合分布概率, 结果见图 3。



(a) 以暴雨为主



(b) 以洪水为主

图 3 两种组合的雨洪联合分布概率

Fig. 3 Joint distribution probability of two rain-flood combinations

### 3.3 雨洪遭遇组合概率分析

任一西江洪峰流量在其年最大洪峰流量频率曲线上存在对应频率<sup>[30]</sup>, 任一区内日降水量在其年最大日降水量频率曲线上也存在相应频率。利用区内年最大日降水量及相应西江洪峰流量的联合分布和西江年最大洪峰流量及相应区内日降水量的联合分布, 分别描述以暴雨为主和以洪水为主的两种组合下不同重现期区内暴雨和西江洪水遭遇的概率。不同雨洪组合下端州区雨洪遭遇的条件风险概率和联合风险概率计算结果见表 3 和表 4。

**a.** 在以暴雨为主的雨洪组合中, 当暴雨重现期不变, 条件风险概率随着洪水重现期的增大而减小, 当不同重现期暴雨遭遇相同重现期洪水时, 暴雨重现期越大, 西江确定量级洪水发生的概率越大, 如 50 年一遇、100 年一遇暴雨遭遇 10 年一遇西江洪水的条件风险概率分别为 14.01% 和 17.51%, 表明此时端州区出现雨洪叠加的风险较大。联合风险概率随着暴雨重现期和洪水重现期的增大而减小, 其中 10 年一遇区内暴雨遭遇 10 年一遇西江洪水的联合

表 3 区内暴雨遭遇西江洪水的风险概率

Table 3 Risk probability of regional rainstorm encountering flood in the Xijiang River

区内暴雨重现期/a	区内年最大日降水量/mm	西江洪水重现期/a	西江洪峰流量/(m <sup>3</sup> /s)	条件风险概率/%	联合风险概率/%
10	165.28	10	44 680.81	6.11	10.35
		20	49 026.31	3.79	10.20
		50	54 198.89	2.05	10.11
		100	57 815.68	1.33	10.07
20	190.51	10	44 680.81	9.17	5.50
		20	49 026.31	5.86	5.29
		50	54 198.89	3.25	5.15
		100	57 815.68	2.12	5.09
50	222.87	10	44 680.81	14.01	2.68
		20	49 026.31	9.09	2.40
		50	54 198.89	5.12	2.21
		100	57 815.68	3.37	2.13
100	246.83	10	44 680.81	17.51	1.79
		20	49 026.31	11.42	1.47
		50	54 198.89	6.47	1.25
		100	57 815.68	4.27	1.16

表 4 西江洪水遭遇区内暴雨的风险概率

Table 4 Risk probability of flood in the Xijiang River encountering regional rainstorm

西江洪水重现期/a	西江洪峰流量/(m <sup>3</sup> /s)	区内暴雨重现期/a	区内年最大日降水量/mm	条件风险概率/%	联合风险概率/%
10	44 680.81	10	165.28	2.88	10.43
		20	190.51	1.57	10.22
		50	222.87	0.70	10.10
		100	246.83	0.37	10.05
20	49 026.31	10	165.28	4.60	5.49
		20	190.51	2.98	5.24
		50	222.87	1.29	5.11
		100	246.83	0.68	5.06
50	54 198.89	10	165.28	4.66	2.63
		20	190.51	4.33	2.29
		50	222.87	3.06	2.11
		100	246.83	1.62	2.06
100	57 815.68	10	165.28	4.68	1.68
		20	190.51	4.35	1.34
		50	222.87	4.14	1.13
		100	246.83	3.18	1.06

风险概率最大, 为 10.35%。

**b.** 在以洪水为主的雨洪组合中, 不同重现期洪水遭遇暴雨的联合风险概率略大于洪水的出现频率, 同为 10 年一遇的洪水与暴雨联合风险概率最大, 为 10.43%; 10 年一遇洪水遭遇不同重现期暴雨的联合风险概率相对偏大, 均超过相应西江洪水的出现频率。

目前端州区主要采用排涝泵站抽排, 大多数泵站设计排涝标准为 10 年一遇 24h 暴雨 1d 排干, 雨洪遭遇风险分析表明设计排涝标准提高至 20 年一

遇更为安全;端州区目前防洪标准为 50 年一遇,结合上游控制性洪水调度,城区防洪能力可达到 100 年一遇,设计防洪标准较为安全。

## 4 结 论

a. 根据拟合优度评价结果,非对称乘积 Frank Copula II 函数拟合效果最佳,可用于构建雨洪联合分布。

b. 以暴雨为主的雨洪组合中,端州区发生较大量级暴雨时,西江发生洪水的概率相对较高;以洪水为主的雨洪组合中,不同重现期西江洪水遭遇区内暴雨的联合风险概率都略大于相应西江洪水出现频率。

### 参考文献:

[ 1 ] WANG Mo, FU Xiaoping, ZHANG Dongqing, et al. Assessing urban flooding risk in response to climate change and urbanization based on shared socio-economic pathways[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 880:163470.

[ 2 ] LIU Songnan, WANG Jun, WEI Jiangfeng, et al. Hydrological simulation evaluation with WRF-Hydro in a large and highly complicated watershed:the Xijiang River Basin[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, 38:100943.

[ 3 ] JONES J A, DRISCOLL C T. Long-term ecological research on ecosystem responses to climate change[J]. *BioScience*, 2022, 72(9) :814-826.

[ 4 ] 刘章君,郭生练,许新发,等. Copula 函数在水文水资源中的研究进展与述评[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1) : 148-159. (LIU Zhangjun, GUO Shenglian, XU Xinfa, et al. Application of Copula functions in hydrology and water resources: a state-of-the-art review[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1) :148-159. (in Chinese))

[ 5 ] 范敏韬,谢宇莹,余贞燕,等. 基于 pair-copula 结构的珠江三角洲河网区水位空间依赖性分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(3) : 222-228. (FAN Mintao, XIE Yuying, SHE Zhenyan, et al. Analysis of spatial dependence of water level in river network area of Pearl River Delta based on pair-copula construction [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3) :222-228. (in Chinese))

[ 6 ] 周月英,高艺桔,石莹怡,等. 基于 Copula 函数的粤港澳大湾区干旱遭遇风险分析[J]. *华北水利水电大学学报 (自然科学版)*, 2022, 43(4) : 20-28. (ZHOU Yueying, GAO Yijie, SHI Yingyi, et al. Risk analysis of drought in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area based on Copula function[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2022, 43(4) :20-28. (in Chinese))

[ 7 ] 李继清,谢宇韬,侯宇. 基于 Copula 函数的川江干支流洪水遭遇分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5) : 1275-1283. (LI Jiqing, XIE Yutao, HOU Yu. Analysis of floods encounter of the main stream and tributaries of Chuanjiang River based on Copula function [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(5) :1275-1283. (in Chinese))

[ 8 ] 王磊之,崔婷婷,李笑天,等. 降水变化条件下沿海地区暴雨-潮位遭遇联合风险[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4) :110-116. (WANG Leizhi, CUI Tingting, LI Xiaotian, et al. Joint risks of rainstorm and tidal level under varying precipitation conditions in coastal areas [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4) : 110-116. (in Chinese))

[ 9 ] 赵玲玲,张鑫辉,刘昌明,等. 华南中小流域设计暴雨洪水同频率检验与重现水平推算[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(2) :157-163. (ZHAO Lingling, ZHANG Xinhui, LIU Changming, et al. Same frequency test and recurrence level estimation of design storm flood in a small and medium-sized basin of South China [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2) :157-163. (in Chinese))

[ 10 ] YIN Changyan, WANG Jiayi, YU Xin, et al. Definition of extreme rainfall events and design of rainfall based on the Copula function[J]. *Water Resources Management*, 2022, 36(10) :3759-3778.

[ 11 ] 陈子燊,黄强,刘曾美. 基于非对称 Archimedean Copula 的三变量洪水风险评估[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5) : 763-771. (CHEN Zisheng, HUANG Qiang, LIU Zengmei. Risk assessment of trivariate flood based on asymmetric Archimedean Copulas [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5) :763-771. (in Chinese))

[ 12 ] LIEBSCHER E. Construction of asymmetric multivariate copulas [J]. *Journal of Multivariate Analysis*, 2008, 99(10) :2234-2250.

[ 13 ] 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. (LI Yifan, LI Dingfang. Application of two-dimensional asymmetric copula function in combined probability of drought characteristics [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(5) :236-240. (in Chinese))

[ 14 ] YANG Xing. Application of PSO method for Archimedean Copula parameter estimation in flood (rain) and tide joint distribution analysis [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2021, 26(3) :05020052.

[ 15 ] 陈琼,李国芳,包瑾. 基于 Copula 函数的景德镇市区暴雨与昌江干流洪水遭遇概率分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(12) :125-128. (CHEN Qiong, LI Guofang, BAO Jin. Analysis of encounter probability of rainstorm in Jingdezhen City and flood of Changjiang River based on

- Copula function[J]. *Water Resources and Power*,2022,40(12):125-128. (in Chinese))
- [16] 刘曾美,王尚伟,蔡玉婷,等. 感潮地区涝区暴雨与承泄区上游洪水的遭遇规律[J]. *水资源保护*,2021,37(2):89-94. (LIU Zengmei, WANG Shangwei, CAI Yuting, et al. Coincidence rules of rainfall in waterlogging area of tide-affected area and upstream flood in flood area of drainage receiver [J]. *Water Resources Protection*, 2021,37(2):89-94. (in Chinese))
- [17] 武传号,黄国如,吴思远. 基于 Copula 函数的广州市短历时暴雨与潮位组合风险分析[J]. *水力发电学报*,2014,33(2):33-40. (WU Chuanhao, HUANG Guoru, WU Siyuan. Risk analysis of combinations of short duration rainstorm and tidal level in Guangzhou based on Copula function[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(2):33-40. (in Chinese))
- [18] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2023,51(1):1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023,51(1):1-9. (in Chinese))
- [19] LEE W, KIM M, AHN J Y. On structural properties of an asymmetric copula family and its statistical implication [J]. *Fuzzy Sets and Systems*,2020,393:126-142.
- [20] 隆院男,黄春福,莫军成,等. 非一致性条件下松澧地区洪水遭遇规律分析[J]. *水利水电科技进展*,2024,44(4):14-22. (LONG Yuannan, HUANG Chunfu, MO Juncheng, et al. Analysis of flood coincidence law in Song-Li Region under non-consistency conditions[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(4):14-22. (in Chinese))
- [21] 刘俊杰,胡永宏. 基于 group SCAD 惩罚的非对称乘法 copula 模型选择及其应用[J]. *系统科学与数学*,2022,42(9):2508-2530. (LIU Junjie, HU Yonghong. Selection of asymmetric product copula model via group SCAD penalty and its application[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*,2022,42(9):2508-2530. (in Chinese))
- [22] RAZMKHAH H, FARAROUIE A, RAVARI A R. Multivariate flood frequency analysis using bivariate Copula functions [J]. *Water Resources Management*, 2022,36(2):729-743.
- [23] ZHANG Y, KIM C W, BEER M, et al. Modeling multivariate ocean data using asymmetric copulas [J]. *Coastal Engineering*,2018,135:91-111.
- [24] 刘曾美,熊腮敏,雷勇,等. 城镇内涝防治中市政排水与水利排涝的标准衔接研究[J]. *水资源保护*,2022,38(1):125-132. (LIU Zengmei, XIONG Saimin, LEI Yong, et al. Study on design standard matching between municipal drainage and water conservancy drainage in urban local flood control[J]. *Water Resources Protection*, 2022,38(1):125-132. (in Chinese))
- [25] 芮孝芳. 水文随机变量二维分布及其应用[J]. *水利水电科技进展*,2019,39(5):36-42. (RUI Xiaofang. Binary distribution function of hydrology random variable and it's applications [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019,39(5):36-42. (in Chinese))
- [26] 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. Multivariate hydrological analysis and estimation [J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(3):1-7. (in Chinese))
- [27] 黄亦轩,徐宗学,陈浩,等. 深圳河流域内陆侧洪涝风险分析[J]. *水资源保护*,2023,39(1):101-108. (HUANG Yixuan, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis on flood/waterlogging risk at inland side of the Shenzhen River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2023,39(1):101-108. (in Chinese))
- [28] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. *水利水电科技进展*,2022,42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022,42(1):33-39. (in Chinese))
- [29] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. *水利水电科技进展*,2024,44(6):41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng, ZHENG Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024,44(6):41-47. (in Chinese))
- [30] 刘曾美,陈子桑. 区间暴雨和外江洪水位遭遇组合的风险[J]. *水科学进展*,2009,20(5):619-625. (LIU Zengmei, CHEN Zisheng. Risk study of the bivariate encounter of interzone rainstorm and flood level of the outer river[J]. *Advances in Water Science*, 2009,20(5):619-625. (in Chinese))

(收稿日期:2024-01-21 编辑:施业)