

基于Copula函数的洞庭湖流域水沙丰枯遭遇频率分析

周念清¹, 赵 露¹, 沈新平²

(1. 同济大学水利工程系, 上海 200092; 2. 湖南省洞庭湖水利工程管理局, 湖南 长沙 410007)

摘要: 受人类活动的影响, 水沙灾害事件相继发生, 对人们的生产、生活造成了威胁。以洞庭湖流域代表性水文站的年径流量和年输沙量系列数据为基础, 应用P-III型曲线分别拟合并求得“松滋口、太平口、藕池口”三口入湖、“湘江、资江、沅水、澧水”四水入湖和城陵矶站出湖年径流量、年输沙量的边缘分布函数, 再采用水文事件遭遇分析中广泛应用的Copula函数, 建立洞庭湖流域水沙联合分布模型, 分析洞庭湖流域水沙丰枯遭遇频率。研究表明洞庭湖三口、四水和城陵矶站的水沙丰枯遭遇频率关系与洞庭湖流域的水沙运动有密切联系, 运用该水沙耦合模型可以为洞庭湖流域防洪减灾提供重要的理论依据。

关键词: Copula函数; 水沙关系; 丰枯遭遇频率; 洞庭湖流域

中图分类号: TV122; TV145

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2014)02-0242-07

流域的水沙关系一直是水科学领域的重点研究对象。目前国内对流域水沙关系的研究多为从产流、产沙的角度出发: 杨永德研究建立了长江流域小流域尺度的流域输沙响应关系模型^[1]; 许盛国从误差传播及经验关系分析二条途径出发, 研究了流量输沙率相对关系的不确定度^[2]; 彭荔红以李子溪流域为实例, 运用降雨量、降雨历时、洪峰流量和洪量等因子建立流域输沙量和最大输沙率的BP人工神经网络预测模型^[3]。河川径流与泥沙相互作用关系密切, 降雨冲刷地表造成水土流失, 从而导致河流含沙量增加, 造成河道淤积和洪水位的抬升, 最终引起水患灾害的发生。因此, 径流和泥沙作为致灾的两个重要要素, 建立水沙耦合风险评价模型对流域防洪减灾以及风险控制具有重要意义。

洞庭湖一直是国内学者研究水沙作用的热点区域。洞庭湖北承荆江三口(松滋口、太平口、藕池口), 南纳潇湘四水(湘江、资水、沅江、澧水), 是长江中游重要的调蓄型湖泊和水源地。受自然和人为因素的影响, 洞庭湖水沙条件先后发生过多

次大的调整, 三口分流分沙及洞庭湖容积、面积均有大幅减小。国内外学者以往对洞庭湖的研究多为泥沙输移与淤积计算、洪涝灾害与防洪体系、生态系统服务功能、湿地及水生生物、洪道输挖技术等方面^[4-6]。李景保等研究了洞庭湖1951~1998年径流、泥沙演变过程并分析其驱动力, 得到不同水文条件下径流、泥沙具有同步变化的密切关系^[7]; 李正最等综合运用数理统计、小波分析等方法, 分析了洞庭湖入湖和出湖径流和输沙量的变化特征^[8]。要进一步深入的了解洞庭湖流域水沙耦合作用下的复杂水文事件, 必须全面考虑径流、泥沙2个相关变量, 建立水沙二维联合分布模型。

本文以洞庭湖流域代表性水文站年径流量和年输沙量系列试验数据为基础, 应用P-III型曲线拟合, 求得三口入湖、四水入湖和城陵矶站出湖年径流量和年输沙量的边缘分布函数, 再采用在水文事件遭遇分析中广泛应用的Copula函数, 建立洞庭湖流域水沙联合分布模型, 从而分析洞庭湖流域水沙丰枯遭遇频率, 为洞庭湖流域的防洪减灾及工程治理提供技术支持和参考依据。

收稿日期: 2013-01-23; **修订日期:** 2013-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(41272249)和博士点专项基金(20110072110020)资助。

作者简介: 周念清(1964-), 男, 湖南石门人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源、地下水数值模拟与水环境评价方面的研究。E-mail: nq.zhou@tongji.edu.cn

1 研究区概况

洞庭湖是长江流域典型的吞吐调蓄型湖泊之一,位于湖南省东北部,长江中游荆江段南岸,跨湘鄂两省的广大冲积平原和湖泊水网地区。洞庭湖属亚热带湿润季风气候,气候温和,雨量充沛,年降水量为 1 200~1 450 mm。洞庭湖与长江有着千丝万缕的联系,通过三口(松滋口、太平口、藕池口)分泄长江来水,并接受“湘江、资水、沅江、澧水”4 条水系的补给,经洞庭湖又由城陵矶注入长江。

洞庭湖原为中国第一大淡水湖,1825 年其面积曾达到 6 000 km²,容积约 400×10⁸ m³。由于洞庭湖一直处于淤积状态,加之 20 世纪 50 年代以来的大量围垦,演变剧烈,近几十年来面积和容积的损失都比较大,现在湖体已明显分化为南洞庭湖、东洞庭湖和西洞庭湖 3 个不同的湖区,以及由 200 多个大小不等的堤垸相隔而成的纵横交错的河网。

2 研究方法

单变量的水文分析难以全面反映水文事件各个变量间的相依性,通过对多变量的联合分布来研究水文事件的频率已经成为水文领域的研究重点。Copula 函数是一种建立多变量联合分布的有效方法,它能够灵活构造任意边缘分布的水文变量联合分布。张强等采用 Copula 非参数估计方法构建了两降水指标联合分布函数,系统分析了极端降水单变量极值及降水极值二维联合概率分布特征,研究了新疆地区降水极值概率变化的空间演变特征^[9]。康玲等采用联合 Copula 函数和贝叶斯网络理论,建立了南水北调中线工程水源区和受水区降水丰枯遭遇风险分析模型,对南水北调中线工程调水最不利的丰枯遭遇风险概率进行了研究^[10]。张翔等利用 Copula 函数构造了水量水质的二维和三维联合分布函数,对蚌埠闸的水量水质联合分布频率进行了分析^[11]。应用多变量分析方法可以反映水文事件多个方面的特征属性,从而全面的反映水文事件的真实特征。

2.1 Copula 函数的定义与性质

Copula 理论是由 Sklar 在 1959 年提出的,他指出,可以将任意一个 n 维联合累积分布函数分解为 n 个边缘累积分布和一个 Copula 函数^[12]。边缘分布描述的是变量的分布, Copula 函数描述的是变

量之间的相关性,它实际上是一类将变量联合累积分布函数连接起来的函数,因此也有人称其为“连接函数”。其定义如下:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C_\theta(F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)) \quad (1)$$

式中, $C(\cdot)$ 为 Copula 函数; θ 为 Copula 参数; F_1, F_2, \dots, F_n 为各随机变量的边缘分布。

基于 Sklar 定理,令 $H(\cdot, \cdot)$ 为具有边缘分布 $F(\cdot)$ 和 $G(\cdot)$ 的联合分布函数,那么存在一个 Copula 函数 $C(\cdot, \cdot)$, 满足:

$$H(x, y) = C(F(x), G(y)) \quad (2)$$

若 $F(\cdot), G(\cdot)$ 连续,则 $C(\cdot, \cdot)$ 唯一确定;反之,若 $F(\cdot), G(\cdot)$ 为一元分布函数,为相应的 Copula 函数,那么由上式定义的 $H(\cdot, \cdot)$ 是具有边缘分布 $F(\cdot), G(\cdot)$ 的联合分布函数。

由 Sklar 定理可以看出, Copula 函数能独立于随机变量的边缘分布反映随机变量的相关性结构。联合分布可分为两部分:变量的边缘分布和变量间的相关性结构,其中 Copula 函数用来描述变量之间的相关性。Copula 函数不要求具有相同的边缘分布,任意边缘分布都可以通过 Copula 函数连接构成联合分布。联合分布里包含了变量所有的信息,因此,在转换过程中不会产生信息失真。

2.2 Copula 函数的主要类型

Copula 函数总体上可以分为 3 类:椭圆型、二次型和 Archimedean 型^[13]。其中 Archimedean 型(分为对称 Archimedean 型和非对称 Archimedean 型)在水文领域应用最为广泛。表 1 列出 3 种常用的 Archimedean 型 Copula 函数。

2.3 函数的参数估计

Copula 函数的参数估计方法包括矩法估计、核估计法、非参数估计法、极大似然估计法^[14]等。其中随机变量的边缘分布一般采用极大似然估计和矩法估计,而 Copula 连结函数的估计通常采用非参数估计法^[15]、适线法和极大似然法。其中非参数估计法即用 Kendall 秩相关系数 τ 和 Copula 函数的参数 θ 之间的关系求得(如表 1)。

2.4 函数的拟合优度检验

函数的拟合优度检验包括边缘分布模型的检验和 Copula 连结函数的检验。随机变量的边缘分布对实际分布的拟合情况,对于 Copula 连结函数描述变量之间相关性结构至关重要。Copula 函数拟合优度的检验方法主要包括离差平方和最小准则(OLS)和 AIC 信息准则法。选取 OLS 最小的

表1 3种常用的 Archimedean 型 Copula 函数

Table 1 Three types of popular Archimedean Copula

名 称	$C_q(u,v)$ 的形式	t 与 q 的关系
Clayton Copula	$C(u,v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\tau = \frac{\theta}{2+\theta}, \theta \in (0, \infty)$
Frank Copula	$C(u,v) = -\frac{1}{\theta} \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{(e^{-\theta} - 1)} \right]$	$\tau = 1 - \frac{4}{\theta} \left[-\frac{1}{\theta} \int_{-\theta}^0 \frac{t}{\exp(t) - 1} dt - 1 \right], \theta \in R$
Gumbel-Hougaard Copula	$C(u,v) = \exp \left\{ - \left[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta \right]^{1/\theta} \right\}$	$\tau = 1 - \frac{1}{\theta}, \theta \in [1, \infty)$

Copula 函数作为连结函数, OLS 的计算公式为:

$$OLS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{ei} - p_i)^2} \quad (3)$$

式中, p_{ei} 、 p_i 分别作为经验频率和理论频率; i 为数据系列序号。

AIC(Akaike information criterion)信息准则法^[16]包括函数拟合的偏差和参数变量带来的不可靠性两个部分, AIC 值越小, 说明函数拟合程度越好。

$$AIC = n \log(RSS/n) + 2m \quad (4)$$

式中, n 是样本个数, m 是参数个数, RSS 是残差平方和。

3 洞庭湖流域水沙联合分布模型

3.1 选择边缘分布

选用 1956~2008 年荆江三口的新江口、沙道观、弥陀寺、管家铺、康家岗 5 个水文站和“湘、资、沅、澧”四水的湘潭、桃江、桃源、石门 4 个控制站以及城陵矶站的年径流量及年输沙量资料。资料来源于湖南省水文水资源勘测局以及相关文献^[8]。在水文分析计算中, 对于单变量水文数据系列的分析常假定水文序列服从 P-III(皮尔逊)型分布, 对于泥沙序列也可以尝试建立泥沙频率曲线再验证拟合情况^[17]。采用以下公式计算边缘分布的经验频率:

$$H(x) = P(X \leq x_m) = (m - 0.44) / (N + 0.12) \quad (5)$$

式中, P 为 $x \leq x_m$ 的经验概率; m 为 x_m 的序号; N 为样本容量。

采用适线法对 P-III 型分布进行参数估计。最终得到三口、四水和城陵矶年径流量和年输沙量分布拟合情况及参数估计值, 如图 1 和表 2 所示。从它们的频率曲线拟合结果可以看出, 各边缘分布能较好的拟合年径流量和年输沙量的经验频率分布。

3.2 确定 Copula 函数

1) 二维联合经验分布。将年径流量资料(X)和年输沙量资料(Y)按照年径流量资料升序排列, 挑选排好次序系列中的 $X_i \leq X_j, Y_i \leq Y_j (i < j = 1, \dots, n)$ 的数据对, 通过这些数据对来计算联合分布的函数的经验频率值。计算公式如下:

$$H(x_i, y_j) = P(X \leq x_i, Y \leq y_j) = \frac{\sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^j N_{mn} - 0.44}{N + 0.12} \quad (6)$$

式中, P 为 $X \leq x_i, Y \leq y_j$ 的二维联合概率值; N_{mn} 为的序号; N 为总的的数据对数目。

2) 二维联合理论分布。通过计算得到城陵矶年径流量和年输沙量的 Kendall 秩相关系数为 0.398, 三口年径流量和年输沙量的 Kendall 秩相关系数为 0.836, 四水年径流量和年输沙量的 Kendall 秩相关系数为 0.279, 其中三口的年径流量和年输沙量的相关性较好。选择 3 种常用的 Archimedean Copula 函数 Clayton Copula、Gumbel-Hougaard Copula、Frank Copula 来构造联合分布函数, 拟合优度检验结果如表 3 所示, 综合拟合优度检验的结果, 选择 Gumbel-Hougaard Copulas 函数作为水沙二维联合分布的连结函数。以城陵矶计算结果为例, 年径流量与年输沙量二维联合分布与经验联合分布值的拟合结果如图 2 所示。

以城陵矶站出湖年径流量和年输沙量为例, 选定 Gumbel-Hougaard Copulas 函数建立的水沙二维联合分布如图 3 所示。

4 洞庭湖流域水沙丰枯遭遇频率分析

根据上述水沙联合分布模型对洞庭湖流域的水沙丰枯遭遇进行研究, 因丰枯划分的保证率超过概率, 因此需将其转化成累积频率。设年径流量系列累积分布为 X , 年输沙量系列的累积分布为 Y , 则两者之间的联合分布可以表示为:

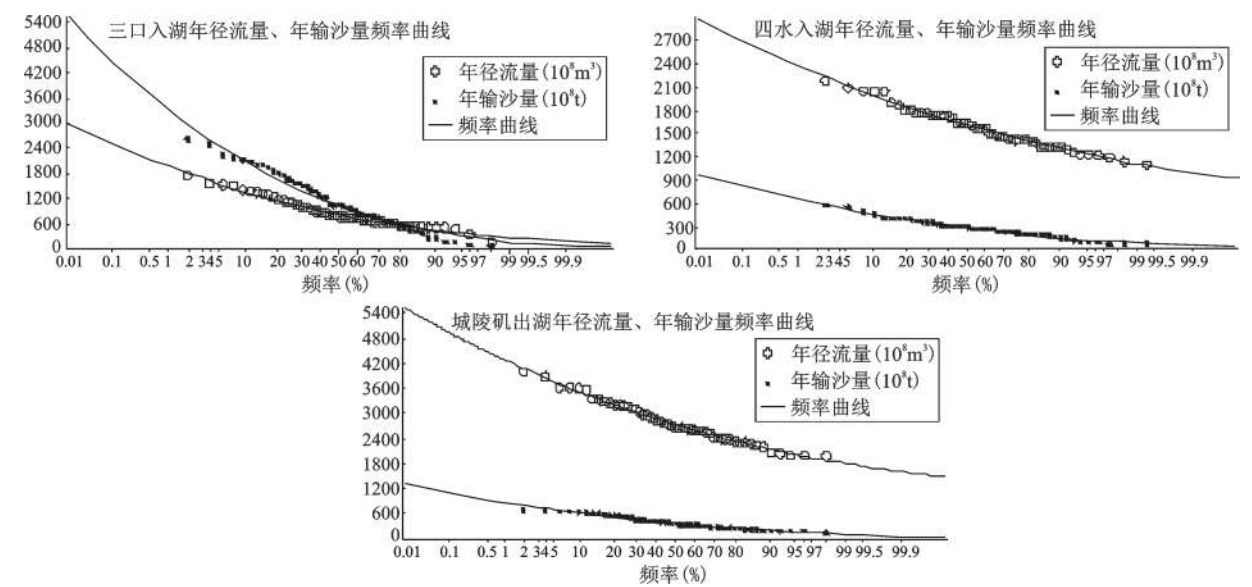


图1 三口入湖、四水入湖、城陵矶出湖年径流量、年输沙量频率曲线
Fig. 1 Frequency curve of annual runoff and sediment of Sankou,Sishui and Chenglingji

表2 各边缘分布参数

Table 2 Parameters of each marginal distribution function

	城陵矶		三口		四水	
	年径流量 (10 ⁸ m ³)	年输沙量 (10 ⁴ t)	年径流量 (10 ⁸ m ³)	年输沙量 (10 ⁴ t)	年径流量 (10 ⁸ m ³)	年输沙量 (10 ⁴ t)
均值	2784.20	383.08	1145.52	855.51	1639.09	266.27
Cv	0.191	0.429	0.592	0.428	0.178	0.484
Cs	0.641	0.858	1.184	0.946	0.623	0.968

表3 各Copula函数拟合优度检验

Table 3 Goodness-of-fit test of each copula joint distribution

	检验方法	Clayton Copulas	Gumbel-Hougaard Copulas	Frank Copulas
城陵矶	OLS	0.024	0.024	0.021
	AIC	-391.828	-391.754	-407.144
三口	OLS	0.028	0.030	0.027
	AIC	-375.270	-370.788	-381.026
四水	OLS	0.040	0.030	0.034
	AIC	-339.196	-368.649	-355.372

$$F(X,Y)=\exp\left\{-\left[(-\ln x)^{\theta}+(-\ln y)^{\theta}\right]^{1/\theta}\right\}\tag{7}$$

采用频率法将水沙频率分为丰、平、枯3种状态,以p_丰=37.5%、p_平=62.5%作为水沙丰枯划分的频率,则丰枯遭遇组合包括以下9种情况(如表4);经计算,得到洞庭湖水沙丰枯遭遇分析结果如表5所示:

由表5可知:① 在洞庭湖三口入湖水沙丰枯遭遇频率中,水沙丰枯同步频率远大于水沙丰枯异步频率;在水沙丰枯同步频率中,同丰、同枯、同丰的频率基本相等。② 在洞庭湖四水入湖、城陵矶出湖水沙丰枯遭遇频率中,水沙丰枯同步频率与水沙丰枯异步频率大致相当,且在水沙丰枯同步频率中,同丰的频率最大,同枯的频率次之,同

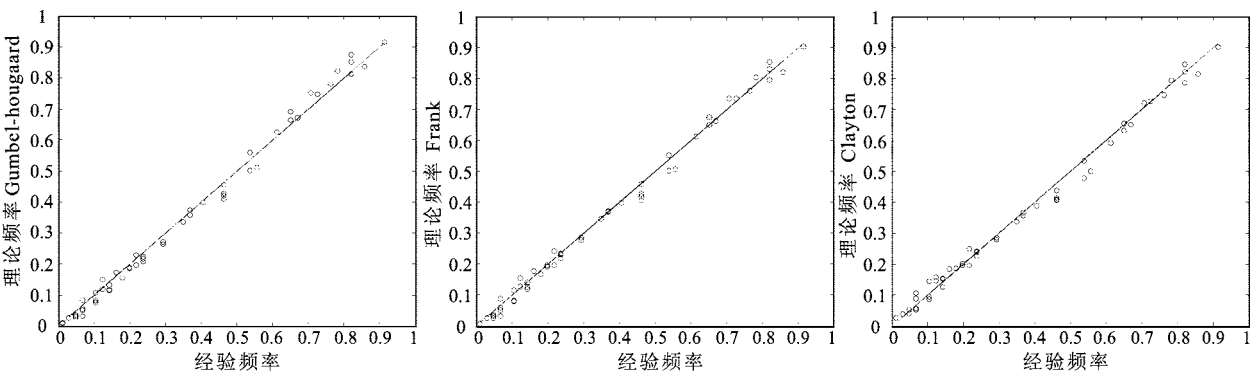


图2 城陵矶站出湖水沙经验频率与各Copula函数拟合结果

Fig. 2 Fitting result of empirical frequency and Copula-constructed theory frequencies of runoff and sediment in Chenglingji Station

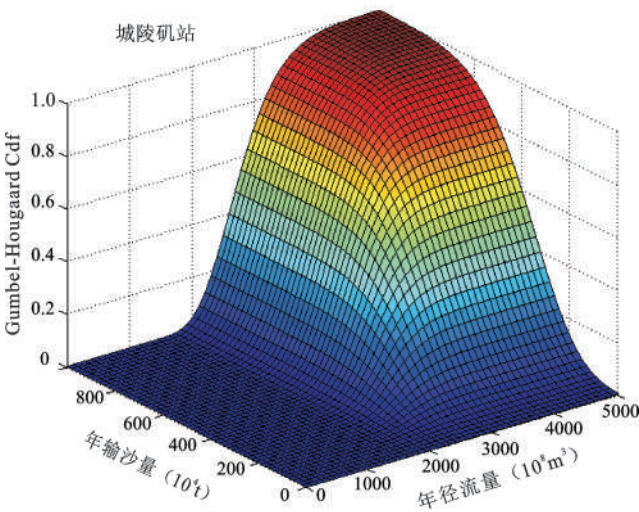


图3 城陵矶站水沙二维联合分布

Fig. 3 Two-dimensional joint distribution graph of runoff and sediment in Chenglingji Station

表4 水沙丰枯遭遇组合

水丰		水平		水枯	
沙丰	$p_1=P(X\geq x_{if}; Y\geq y_{if})$	$p_2=P(x_{pk}<X<x_{if}; Y\geq y_{if})$		$p_3=P(X\leq x_{pk}; Y\geq y_{if})$	
沙平	$p_4=P(X\geq x_{if}; y_{pk}<Y<y_{if})$	$p_5=P(x_{pk}<X<x_{if}; y_{pk}<Y<y_{if})$		$p_6=P(X\leq x_{pk}; y_{pk}<Y<y_{if})$	
沙枯	$p_7=P(X\geq x_{if}; Y\leq y_{pk})$	$p_8=P(x_{pk}<X<x_{if}; y_{pk}<Y<y_{if})$		$p_9=P(X\leq x_{pk}; Y\leq y_{pk})$	

表5 洞庭湖水沙丰枯遭遇结果分析

Table 5 Encounter probabilities of rich-poor runoff and sediment in Dongting Lake Basin											
	水沙丰枯同步频率(%)				水沙丰枯异步频率(%)						
	同丰	同枯	同平	合计	丰平	丰枯	平丰	平枯	枯丰	枯平	合计
城陵矶	20.06	18.15	15.25	53.46	8.92	3.52	8.92	10.83	3.52	10.83	46.54
三口	28.39	28.39	27.79	84.57	3.11	0.01	3.11	4.1	0.01	4.1	14.44
四水	17.31	15.68	13.87	46.86	9.75	5.44	9.75	11.38	5.44	11.38	53.14

平的频率最小。③ 洞庭湖三口入湖、四水入湖和城陵矶出湖的水沙丰枯异步频率中“水丰沙枯”和“水枯沙丰”组合的遭遇频率最小,表明水沙频率存在较大的相关性,出现二者截然相反的状态的机率最小。

丰枯频率结果的差异与洞庭湖水沙的基本特征有着密切联系:洞庭湖来水主要以四水(湘、资、沅、澧)水量为主,占城陵矶出湖总量的58.87%,而洞庭湖的来沙量则主要以三口入湖为主,多年平均输沙量约为四水入湖沙量的3倍(见表2)。从三口、四水进入洞庭湖的水沙受到洞庭湖本身的过水、过沙能力的影响后从城陵矶站排出,因此,城陵矶站出湖水沙丰枯的各种遭遇组合频率较三口入湖、四水入湖处分布最为均匀。

5 结 论

通过对洞庭湖流域三口入湖、四水入湖和城陵矶出湖的年径流量和年输沙量系列数据的研究,采用 Copula 函数分析水沙丰枯遭遇频率,可以得出以下主要结论:

1) 洞庭湖三口入湖水沙丰枯遭遇频率中,水沙丰枯同步频率远大于水沙丰枯异步频率;而同丰、同枯、同平的频率基本相等。

2) 洞庭湖四水入湖、城陵矶出湖水沙丰枯遭遇频率中,水沙丰枯同步频率与水沙丰枯异步频率大致相当,且在水沙丰枯同步频率中,同丰的频率最大,同枯的频率次之,同平的频率最小。

3) 洞庭湖三口入湖、四水入湖和城陵矶出湖的水沙丰枯异步频率中“水丰沙枯”和“水枯沙丰”组合的遭遇频率最小。

通过对洞庭湖水沙丰枯遭遇频率的计算可以进一步定量的了解洞庭湖水沙灾害的发生频率,

从而对洞庭湖区水沙工程治理提供决策和指导。

参考文献:

- [1] 杨永德,郭希望,郭芳,等.李子溪流域水土流失及泥沙输移规律初步研究[J].人民长江,1994,25(9):40~43,63.
- [2] 许盛国,张中,许平,等.流量输沙率关系不确定度的分析[J].水文,1999,(4):1~4.
- [3] 彭荔红,方志山,李祚泳.流域输沙量和输沙率的B-P人工神经网络预测[J].水土保持学报,2001,15(5):22~25.
- [4] 来红州,莫多闻.构造沉降和泥沙淤积对洞庭湖区防洪的影响[J].地理学报,2004,59(4):574~580.
- [5] 赖锡军,姜加虎,黄群.洞庭湖洪水空间分布和运动特征分析[J].长江科学院院报,2006,23(6):22~26.
- [6] 李景保,巢礼义,杨奇勇,等.基于洪水资源化的水库汛限水位调整及其风险管理[J].自然资源学报,2007,22(3):329~339.
- [7] 李景保,王克林,秦建新,等.洞庭湖年径流泥沙的演变特征及其动因[J].地理学报,2005,60(3):503~510.
- [8] 李正最,谢悦波,徐冬梅.洞庭湖水沙变化分析及影响初探[J].水文,2011,31(1):45~53,40.
- [9] 张强,李剑锋,陈晓宏,等.基于 Copula 函数的新疆极端降水概率时空变化特征[J].地理学报,2011,66(1):3~12.
- [10] 康玲,何小聪.南水北调中线降水丰枯遭遇风险分析[J].水科学进展,2011,22(1):44~50.
- [11] 张翔,冉啟香,夏军,等.基于 Copula 函数的水量水质联合分布函数[J].水利学报,2011,42(4):483~489.
- [12] Sklar A. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges [J]. Publ. Inst. Statist. Univ. Paris, 1959, 8(1): 11.
- [13] Nelsen R B. An introduction to copulas[M]. Springer, 2006.
- [14] 邱小霞,刘次华,吴娟. Copula 函数中参数极大似然估计的性质[J].经济数学,2008, 25(2): 210~215.
- [15] Genest C, Rivest L P. Statistical inference procedures for bivariate Archimedean copulas[J]. Journal of the American Statistical Association, 1993, 88(423): 1034~1043.
- [16] Joe H. Multivariate models and multivariate dependence concepts[M]. Chapman & Hall/CRC, 1997.
- [17] 金鑫,郝振纯,张金良.黄河中游水沙频率关系研究[J].泥沙研究,2006,(3):6~13.

Copula-based Probability Evaluation of Rich-Poor Runoff and Sediment Encounter in Dongting Lake Basin

ZHOU Nian-qing¹, ZHAO Lu¹, SHEN Xin-ping²

(1. *Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*; 2. *Dongting Lake Water Resources Administration Bureau of Hunan Province, Changsha, Hunan 410007, China*)

Abstract: Under the influences of human activities, the successive water and sediment disasters posed threats on people's production and life. Based on the series data of annual runoff and sediment of representative hydro-metric stations in Dongting Lake Basin, P-III distribution curve is applied to fit the marginal distribution of annual runoff and sediment of 3 inlets (Songzikou, Taipingkou, Ouchikou), four rivers (Xiangjiang River, Zijiang River, Yuanjiang River and Lishui River) (entering the lake) and Chenglingji (coming out of the lake). The application of popular Copula-constructed two-dimensional joint distribution of runoff and sediment was illustrated, and the joint distribution was used to calculate the encounter probability of rich-poor runoff and sediment in Dongting Lake Basin. Result shows that 1) Synchronous frequency of the runoff and sediment in 3 inlets is far more than asynchronous frequency, and the frequencies of rich water-rich sediment, poor water-poor sediment and normal water-normal sediment are equal basically. 2) Synchronous frequency of the runoff and sediment in four rivers and Chenglingji approximately equals asynchronous frequency, and the frequency of rich water-rich sediment is the highest in synchronous frequency, the frequency of poor water-poor sediment ranks the second, and the frequency of normal water-normal sediment is the lowest. 3) The frequency of the encounter of opposite status of runoff and sediment (the frequency of rich water-poor sediment and the frequency of poor water-rich sediment) is the lowest of the asynchronous frequencies of rich-poor runoff and sediment encounters in Chenglingji, 3 inlets and 4 rivers. The research results show that the model possesses good evaluating performance and reveals a close contact with the basic characteristics of the runoff and sediment in Dongting Lake. With the analysis of the rich-poor runoff and sediment encounter probability, the frequency of water-sediment disasters can be understood quantitatively, so the study can provide a technical guidance for the flood prevention and disaster reduction in Dongting Lake Basin.

Key words: Copula; runoff and sediment; probability of rich-poor encounter; Dongting Lake Basin