

基于Copula函数的大通站水沙特征分析

黄宇明, 缴健, 窦希萍, 郭海军, 丁磊

Analysis of runoff and sediment characteristics of Datong Station based on Copula function

HUANG Yuming, JIAO Jian, DOU Xiping, GUO Haijun, DING Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210408003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江宜昌—监利段河床冲淤对宜昌站水沙变化的响应

Response of riverbed evolution of Yichang–Jianli reach of the Yangtze River to water and sediment conditions of Yichang Station

水利水运工程学报. 2020(4): 48 <https://doi.org/10.12170/2019062004>

基于分形和R/S分析的渭河干流径流变化特征研究

Analysis of runoff variation characteristics in the mainstream of Weihe River based on fractal theory and R/S analysis method

水利水运工程学报. 2019(1): 102 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.013>

宁夏清水河流域水沙变化特点分析

Analysis on the characteristics of flow and sediment variation in Qingshuihe River basin of Ningxia

水利水运工程学报. 2020(4): 57 <https://doi.org/10.12170/20200213002>

甬江及河口附近海域枯季水沙特性分析

Analysis of water–sediment characteristics of the Yong River mouth and adjacent sea waters during dry season

水利水运工程学报. 2017(5): 51 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.008>

基于相对差异函数的海绵城市弹性评价

Resilience evaluation of sponge city based on relative difference function

水利水运工程学报. 2021(1): 53 <https://doi.org/10.12170/20200318002>

大渡河流域年径流变化特征及其归因分析

Variation characteristics of annual runoff and its attribution analysis in Dadu River basin

水利水运工程学报. 2021(3): 96 <https://doi.org/10.12170/20200608001>



DOI:10.12170/20210408003

黄宇明, 缴健, 窦希萍, 等. 基于 Copula 函数的大通站水沙特征分析 [J]. 水利水运工程学报, 2022(4): 37-45. (HUANG Yuming, JIAO Jian, DOU Xiping, et al. Analysis of runoff and sediment characteristics of Datong Station based on Copula function[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(4): 37-45. (in Chinese))

基于 Copula 函数的大通站水沙特征分析

黄宇明^{1,2}, 缴健¹, 窦希萍¹, 郭海军¹, 丁磊¹

(1. 南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 武汉大学 水资源与水工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 长江口受人类活动影响较为强烈, 其水沙序列一致性遭到破坏。以大通站 1965—2019 年逐月径流量和来沙量资料为基础, 采用滑动窗口算法结合 Copula 理论的方法, 研究长江口来水来沙变化特征及丰枯一致性问题, 并分析水沙联合分布模型边缘函数选取不确定性问题。结果表明: (1) 受人类活动的影响, 大通站水沙组合在 1965—2019 年间均呈减少趋势, 并且在 1979 和 2000 年发生突变, 水沙序列 1965—1979 年和 1980—2000 年阶段最优函数模型均为 Clayton 模型, 2001—2019 年则为 Frank 模型; (2) 大通水文站 3 个阶段水沙序列同步频率分别是 84.52%、84.40% 和 83.20%, 远大于丰枯异步频率, 揭示了长江上游来水来沙条件具有较强的一致性; (3) PE3-PE3 边缘分布组合的 95% 置信区间小于 PE3-GPD 组合, 说明采用 PE3-PE3 组合可以减少函数选取的不确定性。通过探讨大通站来水来沙联合变化特征, 可为长江口水域水资源管理、河道整治等工作提供参考。

关键词: 长江口; 大通站; 滑动 Copula 函数; 水沙组合; 联合分布; 不确定性分析

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)04-0037-09

近年来, 随着人类活动对自然生态系统影响的不断增强, 流域下垫面情况发生显著变化, 加之全球范围内的极端天气频发, 使得水文序列表现出多时间尺度的随机性和突变性^[1]。流域水文要素如降雨、径流、气温和来沙量等发生剧烈变化, 水文一致性过程遭到破坏。水、沙要素响应过程一直是河流研究工作者关注的重点, 河流水沙变化的一致性关系到河床冲淤、深水航道疏浚等工程实际。因此, 开展河道水沙关系突变性分析, 对水库稳定运行、河道规划管理及维持变化环境下的水沙关系动态平衡过程具有重要意义。

目前, 针对单个水文要素的突变分析, 最常用的方法有 Mann-Kendall 秩相关检验法、滑动 F 检验法^[2]、滑动 T 检验法^[3] 及 Hurst 系数法^[4-5] 等。二变量条件下的水文变异分析则一般采用滑动偏相关系数法^[6] 或 Copula 函数理论。其中, Copula 函数作为一种能够将多个不同变量拟合起来的简单有效的实用分析工具, 已被广泛应用于多变量水文分析研究^[7]。李艺珍等^[1] 采用滑动 Copula 函数研究了变化环境下金沟河流域径流与气象因素关系的变异情况; 李艳玲等^[8] 结合滑动窗口算法和 Copula 函数理论, 对流域降雨径流关系变异进行了研究分析; 郭爱军等^[9] 利用 Copula 函数建立了水沙联合分布, 分析了水沙组合的变化特征; 何兵等^[10] 基于滑动 Copula 函数理论分析了新疆内陆干旱河流的水文气象要素的变化特性。

综上所述, Copula 函数方法是现阶段多变量水文变异分析最常用的。基于变量序列的相关参数突变分析, 将水文序列根据突变点划分为不同长度的子序列并分别采用 Copula 函数建模, 能够有效表征各子序列的不同特性, 但同时也增加了各子序列边缘分布组合方式的多样性, 而对基于 Copula 理论的多变量水文分

收稿日期: 2021-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979172); 水利部三峡后续工作项目(12630200100020J001)

作者简介: 黄宇明(1994—), 男, 广西岑溪人, 博士研究生, 主要从事河口水沙运动研究。E-mail: huangzy127@163.com
通信作者: 缴健(E-mail: jjiao@nhri.cn)

析的边缘分布不确定性分析却缺乏足够的研究。因此,本文采用滑动窗口方法计算大通水文站水沙组合 1965—2019 年逐月序列的相关系数,分析水沙组合变异特性,基于 Copula 函数理论构建水沙联合分布模型,计算水沙同步、异步的遭遇概率,并对不同序列水沙组合的边缘分布函数选取不确定性问题进行分析,以期揭示在人类活动影响下的大通水文站水沙组合序列演化规律及突变特征,并为流域水沙规划、滩涂治理、深水航道泥沙冲淤平衡及水资源调控等提供参考。

1 研究方法 with 理论

根据 Sklar 理论^[1], Copula 函数的一般表达式可描述如下:

$$F_{X_1,X_2,\cdots,X_n}(x_1,x_2,\cdots,x_n)=C[F(x_1),F(x_2),\cdots,F(x_n)]=C[u_1,u_2,\cdots,u_n,\theta] \tag{1}$$

式中: X_i 为不同的随机变量; $F(x_i)=u_i$ 为不同随机变量的边缘分布函数; θ 为 Copula 函数的相关参数。表 1 列举了 4 个不同的 Copula 函数类型,其中 Clayton、Frank 和 G-H 是 3 种常见的阿基米德 Copula 函数; Gaussian 是将标准正态分布与二重积分结合的 Copula 函数, Φ^{-1} 是标准正态分布函数的逆函数。

表 1 4 种不同的 Copula 函数
Tab. 1 Four different Copula functions

类型	函数表达式
Clayton	$C(u,v;\theta)=(u^{-\theta}+v^{-\theta}-1)^{(-1/\theta)}, \theta \in (0,\infty)$
Frank	$C(u,v;\theta)=-\frac{1}{\theta}\ln\left\{1+\frac{[\exp(-\theta u)-1][\exp(-\theta v)-1]}{\exp(-\theta)-1}\right\}, \theta \in R$
G-H	$C(u,v;\theta)=\exp\left\{-\left[(-\ln u)^\theta+(-\ln v)^\theta\right]^{\frac{1}{\theta}}\right\}, \theta \in [1,\infty]$
Gaussian	$C(u,v;\theta)=\int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u)}\int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(v)}\frac{1}{2\pi\sqrt{1-\theta^2}}\exp\left[-\frac{x_1^2-2\theta x_1x_2+x_2^2}{2(1-\theta^2)}\right]dx_1dx_2, \theta \in [-1,1]$

注: 表中Copula函数参数 θ 的取值均采用Kendall秩相关系数方法求解。

采用欧氏距离 d 评价 Copula 函数拟合优度,其表达式如下:

$$d=\sqrt{\sum_{i=1}^n|C_n(u_i,v_i)-\hat{C}_n(u_i,v_i)|^2} \tag{2}$$

欧氏距离 d 越小,则 Copula 函数模型的拟合度越高。 $C_n(u_i,v_i)$ 和 $\hat{C}_n(u_i,v_i)$ 分别是水沙序列的理论频率和经验频率,经验频率的计算如下:

$$\hat{C}_n(u_i,v_i)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nI_{[F_n(x_i)\leqslant u]}I_{[G_n(y_i)\leqslant v]} \quad u,v\in[0,1] \tag{3}$$

式中: $I_{[\bullet]}$ 是示性函数,当 $F_n(x_i)\leqslant u$ 时,有 $I_{[\bullet]}=1$,反之 $I_{[\bullet]}=0$ 。

对于常见的二变量水文分析如洪水峰、量组合,降雨、径流组合或者干旱强度、烈度等,需要考虑的有联合(OR)、同现(AND)、Kendall 及生存 Kendall^[12]等 4 种不同的设计重现期。其中,联合(OR)重现期是指二变量中至少 1 个变量大于其对应设计值的概率,表达式如下:

$$T_{\text{OR}}=1/P(X>x\cup Y>y)=1/[1-C(u,v)] \tag{4}$$

与传统的单变量水文分析不同,在多变量水文分析中,在给定设计重现期 T 或设计频率 P 的情况下,同一个设计频率对应着无数个变量组合,最大可能组合是其中最受关注的一个。

$$(u_m,v_m)=\arg\max c(u,v)f(x)f(y) \tag{5}$$

式中: $c(u,v)$ 、 $f(x)$ 和 $f(y)$ 分别是 Copula 函数和边缘分布函数的概率密度函数。

以大通水文站 1965—2019 年的 55 年径流量和输沙量资料为基础样本, 进行滑动窗口计算, 具体如下: (1)确定滑动步长 L , 滑动窗口长度 W ; (2)保持滑动窗口 W 不变, 从水、沙序列的第 1 个数据开始, 以基本步长 L 滑动窗口, 计算每个窗口内两个序列的相关参数; (3)根据水沙序列的相关参数变化情况进行水沙变异判断; (4)采用 Copula 函数对每一段序列进行建模分析。

2 研究区域及数据

长江口是连接长江干流与外海的重要部分, 广义的长江口是指从安徽大通水文站到外海 50 m 等深线长 660 km 的河段(见图 1)。长江口是典型的喇叭形河口, 由于地球自转偏向力的影响, 长江河口北岸冲刷而南岸泥沙淤积, 从而形成了“三级分汊, 四口入海”的河口地貌特征^[13-14]。大通水文站是长江口区域的重要水文站点, 多年数据统计分析表明, 大通站以下的长江干流入流量仅为大通水文站径流量的 3%, 因此可以认为大通水文站的水沙情况基本上反映了长江干流的来水来沙特征^[15]。本文收集了 1965—2019 年大通水文站逐月径流及相应的来沙量资料, 作为实测样本数据进行分析计算。



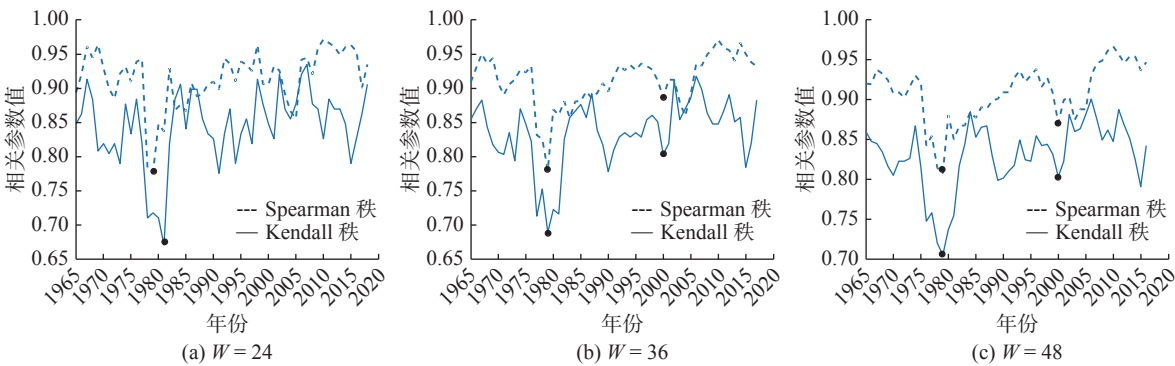
图 1 长江口示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Yangtze River estuary

3 水沙变化特征分析

3.1 水沙关系突变判别

采用滑动窗口算法计算水沙组合的 Spearman 秩和 Kendall 秩相关系数, 基本步长 L 取 12 个月, 6 个不同的滑动窗口 W 取为 24、36、48、60、120 和 240 个月。根据相关参数的波动情况来判断水沙组合的变异特性, 计算结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 当滑动窗口 W 较小($W=24$)时, 相关参数上下波动较为频繁, 且波动范围也相对较大; 相反, 当滑动窗口 W 较大($W=240$)时, 相关参数波动范围较小。因此, 在滑动窗口取值偏小或偏大的情况下, 并不能准确地判断水沙组合的突变年份。而当滑动窗口 W 取为 36、48、60 及 120 的情况下, 可以发现水沙组合的相关参数在 1979 年和 2000 年波动较大且具有一致性。



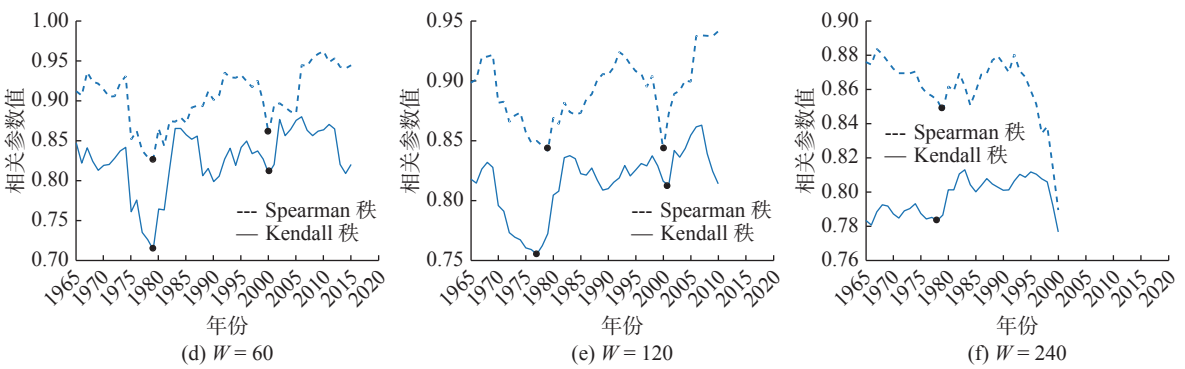


图 2 变化滑动窗口下大通站径流量与来沙量相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient of runoff and sediment discharge under the changing sliding window of Datong Station

3.2 水沙关系突变前后分析

根据水沙关系变异分析结果,以 1979 和 2000 年作为划分点,将大通站水沙序列分为 1965—1979 年、1980—2000 年和 2001—2019 年 3 个阶段。采用 PE3 分布对分段后的径流量序列和输沙量序列进行拟合,并计算 3 个阶段重现期为 1~100 a 对应的水、沙特征值,计算结果见表 2。由表 2 可见,从 1965 到 2019 年,径流量与输沙量均呈减少趋势;在 2000 年之前,大通站水沙序列表现出相对稳定的状态;2000 年后,水、沙序列均表现出减少的趋势,其中,来沙量减少幅度达到 200% 以上。造成长江干流输沙量在 2000 年以后大幅减少的主要原因可以归结两方面:一是以三峡工程为主的大型水利工程相继建成运行;二是流域森林植被覆盖率大幅提升。研究表明,相较于 1985—2000 年,在 2001—2013 年间由于水库建设使得输沙量下降达到 83.1%,而长江流域植被覆盖率上升导致的输沙量下降占实际输沙量下降的 18.0%^[16]。同时也可看出,1965—1979 年和 2001—2019 年的水沙序列均有较好的变化一致性,而 1980—2000 年的水沙序列相较于前一个阶段却表现出了水增沙减的趋势,造成这一现象的原因可能是由于在 1980 年到 2000 年,长江流域处于水能资源开发的高潮时期,同时流域环境破坏使得植被覆盖率降低,且在 20 世纪 90 年代后期遭遇了极端洪水年份,破坏了这一阶段水沙关系变化的协调一致性。

表 2 水沙关系突变前后特征值分析
Tab. 2 Analysis of eigenvalues before and after the mutation of runoff-sediment relationship

设计重现期/a	月径流量/亿m ³			月输沙量/万t		
	1965—1979年	1980—2000年	2001—2019年	1965—1979年	1980—2000年	2001—2019年
2	677.72	720.23	657.74	2 652.03	2 389.41	837.82
5	927.69	1 048.81	986.92	6 068.86	5 241.05	1 962.10
10	1 082.74	1 255.17	1 201.09	8 668.20	7 215.87	2 825.71
20	1 224.00	1 444.40	1 401.03	11 273.70	9 046.30	3 700.80
50	1 397.71	1 678.36	1 651.86	14 723.83	11 262.24	4 875.47
100	1 522.38	1 846.96	1 834.63	17 336.35	12 796.82	5 777.79

采用指数方程对 3 个阶段的水沙序列进行函数拟合,计算结果如图 3 所示。3 个阶段的 R^2 分别是 0.785 6、0.745 0 和 0.708 5,但 1980—2000 年阶段的拟合函数表达式过于复杂,且拟合曲线趋于直线,可能由于数据离散化太严重导致了过拟合,与根据表 2 计算结果分析的水沙数据不协调相一致。

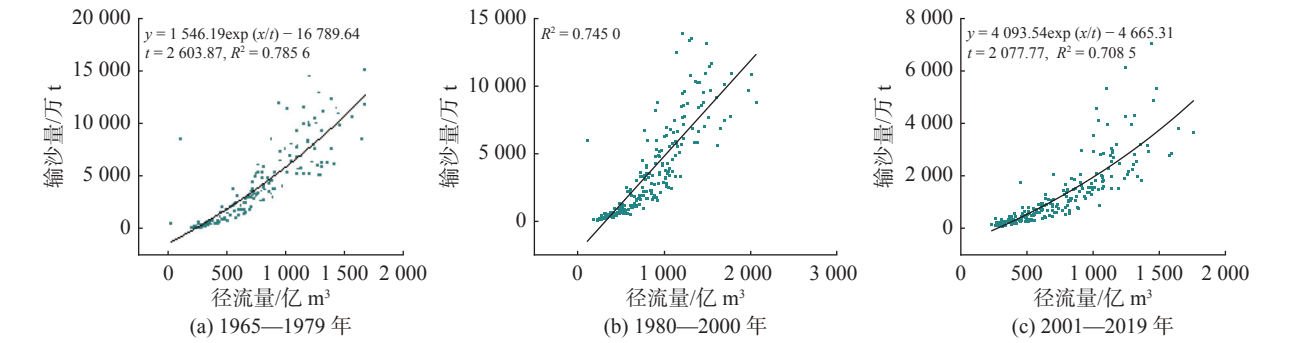


图 3 不同阶段大通站径流量与来沙量关系

Fig. 3 Relationship between runoff and sediment discharge in different periods of Datong Station

4 水沙联合特征及不确定性分析

4.1 水沙联合分布特征分析

根据水沙突变分析结果, 将水沙序列分为 1965—1979 年、1980—2000 年和 2001—2019 年等 3 段。采用 PE3、广义帕累托 (GPD) 和广义 Logistic (GLD) 3 种分布函数分别对水沙序列进行边缘分布函数拟合, 并采用 AIC 信息准则和 RMSE 对边缘分布函数拟合优度进行评价, 计算结果见表 3。根据 AIC 值和 RMSE 值越小拟合越优的评价准则, 1965—1979 年阶段的水沙序列最优边缘分布是 PE3-PE3, 而 1980—2000 年和 2001—2019 年阶段的水沙序列则是 PE3-GPD 拟合最优。

表 4 是水沙联合分布模型优度评价计算结果, 1965—1979 年阶段的 Clayton、1980—2000 年阶段的 Clayton 及 2001—2019 年阶段的 Frank 对应的欧式距离 d 分别是 0.045 7、0.045 6 和 0.052 6, 为各阶段最小。因此水沙序列 3 个阶段的联合分布模型分别由 Clayton、Clayton 和 Frank Copula 函数来拟合。

表 3 水沙边缘分布选取					
Tab. 3 Selection of marginal distribution of runoff and sediment					
阶段	变量	评价准则	PE3	GPD	GLO
1965—1979年	径流	AIC	-299.285	-249.523	-297.387
		RMSE	0.428	0.492	0.431
	来沙量	AIC	-292.955	-280.809	-290.845
		RMSE	0.436	0.451	0.438
1980—2000年	径流	AIC	-444.970	-289.279	-417.867
		RMSE	0.409	0.557	0.431
	来沙量	AIC	-405.640	-463.132	-445.233
		RMSE	0.442	0.394	0.409
2001—2019年	径流	AIC	-409.383	-252.618	-371.375
		RMSE	0.402	0.567	0.437
	来沙量	AIC	-368.871	-463.444	-444.361
		RMSE	0.440	0.357	0.373

表 4 水沙联合模型选取			
Tab. 4 Selection of runoff-sediment joint model			
阶段	Copula函数	参数 θ	欧氏距离
1965—1979年	Clayton	8.151	0.045 7
	Frank	18.497	0.069 2
	G-H	5.076	0.066 6
	Gaussian	0.953	0.315 7
1980—2000年	Clayton	8.066	0.045 6
	Frank	18.324	0.057 3
	G-H	5.033	0.064 4
	Gaussian	0.952	0.251 6
2001—2019年	Clayton	7.066	0.074 5
	Frank	16.302	0.052 6
	G-H	4.533	0.058 0
	Gaussian	0.941	0.496 3

根据 Copula 函数优度评价结果, 3 个阶段水沙组合的联合模型为式(6)~(8), 由式(4)计算水沙组合不同序列的风险模型及联合 (OR) 重现期等值线见图 4。图 4 为 3 个阶段在重现期水平 100、50、20、10、5 和 2 a 联合重现期等值线, 同一个重现期对应着无数个水沙组合。不同重现期等值线分布较为规律, 说明各阶段的水沙组合并未出现较大的波动。

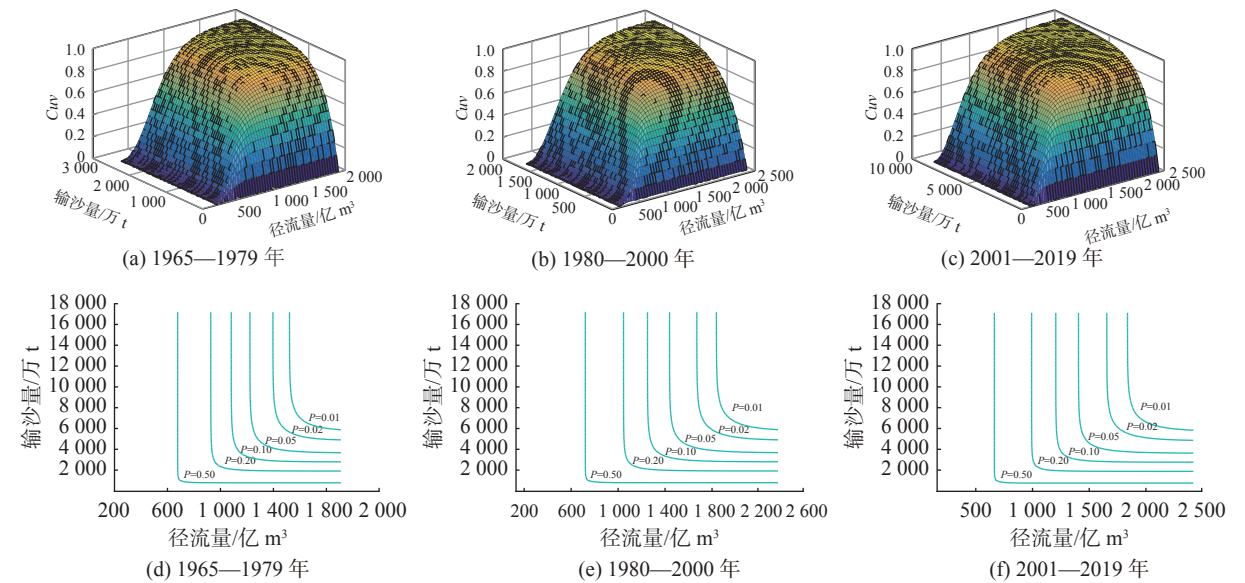


图 4 3 个阶段水沙联合分布及联合重现期等值线

Fig. 4 Joint runoff-sediment distribution and joint recurrence contours in three periods

对于 1965—1979 年,有:

$$C_{\text{Clayton}}(u, v) = \left(u^{-8.151} + v^{-8.151} - 1\right)^{-1/8.151} \tag{6}$$

对于 1980—2000 年,有:

$$C_{\text{Clayton}}(u, v) = \left(u^{-8.066} + v^{-8.066} - 1\right)^{-1/8.066} \tag{7}$$

对于 2001—2019 年,有:

$$C_{\text{Frank}}(u, v) = -\frac{1}{16.302} \ln \left[1 + \frac{(\exp(-16.302u) - 1)(\exp(-16.302v) - 1)}{\exp(-16.302) - 1} \right] \tag{8}$$

二变量水文分析中,各变量之间的变化是否具有 consistency,反映了变量之间的相关关系。本文以 $p_f=25\%$ 、 $p_k=75\%$ 作为划分频率,将水沙概率分为丰、平、枯 3 种状态,9 种不同组合方式^[17],对水沙组合的变化特征进行分析,计算结果如表 5 所示。从整体上看,3 个不同序列的水沙同步频率分别为 84.52%、84.40% 和 83.20%,要远大于水沙异步的频率,说明大通水文站水沙序列之间具有较强的相关性,但水沙同步概率在 3 个阶段依次减小也反映了人类活动对流域水沙一致性的影响在逐步扩大。在水沙同步频率中,水平沙平的占比较高(分别为 42.26%、42.20% 和 41.60%),而水丰沙丰、水枯沙枯的比例则较为接近。其次,在水沙异步频率中,水丰沙枯(或水枯沙丰)的概率均为 0,说明来水来沙条件维持在相对稳定的平衡状态,极端情况较少。

4.2 边缘函数选取不确定性分析

多变量水文分析中,导致结果不确定性的主要

表 5 大通水文站水沙丰枯遭遇计算

Tab. 5 Calculation of flood and drought of runoff and sediment at Datong Hydrological Station

类型	组合	1965—1979年	1980—2000年	2001—2019年
水沙异步 频率/%	$X \geq x_{p_f}, y_{p_k} < Y < y_{p_f}$	5.70	5.74	4.20
	$X \geq x_{p_f}, Y \leq y_{p_k}$	0	0	0
	$x_{p_k} < X < x_{p_f}, Y \geq y_{p_f}$	5.70	5.74	4.20
	$x_{p_k} < X < x_{p_f}, Y \leq y_{p_k}$	2.04	2.06	4.20
	$X \leq x_{p_k}, Y \geq y_{p_f}$	0	0	0
	$X \leq x_{p_k}, y_{p_k} < Y < y_{p_f}$	2.04	2.06	4.20
	总计	15.48	15.60	16.80
水沙同步 频率/%	$X \geq x_{p_f}, Y \geq y_{p_f}$	19.30	19.26	20.80
	$x_{p_k} < X < x_{p_f}, y_{p_k} < Y < y_{p_f}$	42.26	42.20	41.60
	$X \leq x_{p_k}, Y \leq y_{p_k}$	22.96	22.94	20.80
	总计	84.52	84.40	83.20

原因有两方面: 一是由于样本实测数据长度不够, 导致样本容量代表总体时出现偏差; 二是模型函数的选取及函数参数的确定^[18]。本文开展了针对边缘分布函数选取的不确定性分析, 分别计算了联合重现期为 20 a 条件下每个序列不同边缘分布对应的 1 000 组最可能组合, 进行边缘函数选取不确定性分析, 结果如图 5 和表 6 所示。

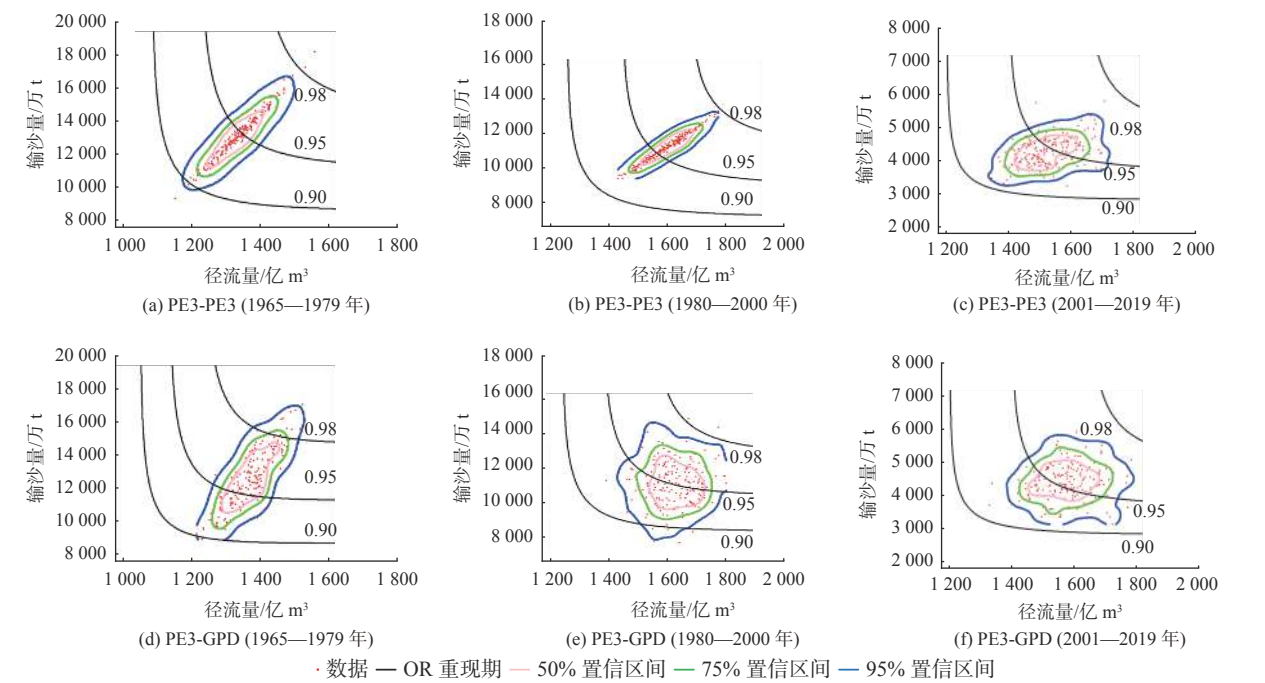


图 5 3 个阶段不同边缘分布组合对应的 50%、75% 和 95% 置信区间面积

Fig. 5 Areas of 50%, 75%, and 95% confidence intervals for different combinations of marginal distributions in three periods

由图 5 可以看出 1965—1979 年和 1980—2000 年阶段的 PE3-PE3 组合方式对应的最可能组合相对集中, 因此置信区域呈细长型, 其他 4 个则呈椭圆形, 6 种情况下的 95% 置信区间均跨越了各自对应的 10 a 和 20 a 联合重现期等值线。从表 6 计算结果可以发现, 不同的边缘分布组合条件下, Copula 函数参数 θ 的变化幅度不大; 对比 3 个序列的 95% 置信区间面积可以发现, 采用 PE3-PE3 组合方式对应的置信区间面积明显小于 PE3-GPD 组合的置信区间面积, 说明在本文中 PE3-PE3 边缘函数组合方式可以减少函数选取的不确定性。

5 结 语

本文基于大通水文站 1965—2019 年的逐月经流量与来沙量资料, 采用滑动 Copula 函数对水沙联合序列进行变异分析, 通过对分段序列进行 Copula 函数建模, 分析水沙变异的一致性, 并对各段序列的边缘函数选取进行不确定性分析研究, 得出主要结论如下:

表 6 边缘分布选取不确定性评价指标的 95% 置信区间取值
Tab. 6 Values of 95% confidence interval of uncertainty evaluation index selected by marginal distribution

阶段	组合	参数 θ	参数 变幅/%	置信区间面积 $S_{95\%}$ /(亿 m³·万 t)
1965—1979 年	PE3-PE3	[8.248, 8.379]	1.588	2.643×10^5
	PE3-GPD	[8.220, 8.346]	1.533	1.432×10^6
1980—2000 年	PE3-PE3	[8.078, 8.183]	1.300	1.404×10^5
	PE3-GPD	[8.082, 8.187]	1.299	1.923×10^6
2001—2019 年	PE3-PE3	[16.288, 16.434]	0.896	4.756×10^5
	PE3-GPD	[16.296, 16.442]	0.896	6.983×10^5

(1)大通水文站多年水沙序列关系变异发生在 1979 年和 2000 年。1965—2019 年间径流量和输沙量均呈减小趋势;相比 1965—1979 年阶段,1980—2000 年间水沙变化波动出现不一致现象;2000 年后径流量和输沙量减少趋势较为明显,其中输沙量减少达 200% 以上。

(2)1965—1979 年、1980—2000 年和 2001—2019 年 3 段序列的最优 Copula 函数模型分别是 Clayton、Clayton 和 Frank Copula。水沙丰枯一致性计算结果表明,大通水文站多年水沙序列同步频率分别是 84.52%、84.40% 和 83.20%,远大于异步频率,反映了大通站水沙序列具有较强的一致性。

(3)边缘分布函数选取不确定性分析表明,采用 PE3-PE3 边缘函数的组合方式的 95% 置信区间远小于采用 PE3-GPD 组合的置信区间面积,说明在本文中 PE3-PE3 边缘函数组合方式可以减少函数选取的不确定性。

参 考 文 献:

- [1] 李艺珍,岳春芳,曹伟. 基于滑动Copula函数的金沟河流域径流-气温关系变异诊断[J]. [长江科学院院报](#), 2020, 37(11): 33-39. (LI Yizhen, YUE Chunfang, CAO Wei. Variation diagnosis of runoff-temperature relation in Jingou River basin based on sliding Copula function[J]. [Journal of Yangtze River Scientific Research Institute](#), 2020, 37(11): 33-39. (in Chinese))
- [2] 陈广才,谢平. 水文变异的滑动F识别与检验方法[J]. [水文](#), 2006, 26(2): 57-60. (CHEN Guangcai, XIE Ping. Slide F test of change-point analysis[J]. [Journal of China Hydrology](#), 2006, 26(2): 57-60. (in Chinese))
- [3] 武连洲,白涛,哈燕萍,等. 水文序列变异对水库调度运行的影响研究[J]. [水资源与水工程学报](#), 2016, 27(4): 88-92. (WU Lianzhou, BAI Tao, HA Yanping, et al. Effect of hydrological sequence variation on operation reservoir[J]. [Journal of Water Resources and Water Engineering](#), 2016, 27(4): 88-92. (in Chinese))
- [4] 谢平,陈广才,雷红富. 基于Hurst系数的水文变异分析方法[J]. [应用基础与工程科学学报](#), 2009, 17(1): 32-39. (XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu. Hydrological alteration analysis method based on Hurst coefficient[J]. [Journal of Basic Science and Engineering](#), 2009, 17(1): 32-39. (in Chinese))
- [5] 李彬彬,谢平,李析男,等. 基于Hurst系数与Bartels检验的水文变异联合分析方法[J]. [应用基础与工程科学学报](#), 2014, 22(3): 481-491. (LI Binbin, XIE Ping, LI Xi'nan, et al. Joint analysis method for hydrological variation based on Hurst coefficient and bartels test[J]. [Journal of Basic Science and Engineering](#), 2014, 22(3): 481-491. (in Chinese))
- [6] 刘丽芳,王中根,姜爱华,等. 近50年济南三川流域降雨-径流关系变化分析[J]. [南水北调与水利科技](#), 2018, 16(1): 22-27, 56. (LIU Lifang, WANG Zhonggen, JIANG Aihua, et al. Analysis of rainfall-runoff relationship variation characteristics in Sanchuan watershed in Jinan city over recent 50 years[J]. [South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology](#), 2018, 16(1): 22-27, 56. (in Chinese))
- [7] 甘富万,张华国,黄宇明,等. 基于二次重现期的桂平航运枢纽水闸设计洪水组合研究[J]. [水文](#), 2020, 40(2): 48-54. (GAN Fuwan, ZHANG Huaguo, HUANG Yuming, et al. Study on design flood combination of Guiping shipping hub sluice based on secondary return period[J]. [Journal of China Hydrology](#), 2020, 40(2): 48-54. (in Chinese))
- [8] 李艳玲,畅建霞,黄强,等. 基于滑动Copula函数的降水和径流关系变异诊断[J]. [水力发电学报](#), 2014, 33(6): 20-24, 60. (LI Yanling, CHANG Jianxia, HUANG Qiang, et al. Diagnosis of abrupt changes in precipitation and runoff relation based on sliding Copula function[J]. [Journal of Hydroelectric Engineering](#), 2014, 33(6): 20-24, 60. (in Chinese))
- [9] 郭爱军,黄强,畅建霞,等. 基于Copula函数的泾河流域水沙关系演变特征分析[J]. [自然资源学报](#), 2015, 30(4): 673-683. (GUO Aijun, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. Variation of relationship between runoff and sediment based on Copula function in the Jinghe River basin[J]. [Journal of Natural Resources](#), 2015, 30(4): 673-683. (in Chinese))
- [10] 何兵,高凡,唐小雨,等. 基于滑动Copula函数的新疆干旱内陆河流水文气象要素变异关系诊断[J]. [水土保持研究](#), 2019, 26(1): 155-161. (HE Bing, GAO Fan, TANG Xiaoyu, et al. Diagnosis of variation of the relationship between hydrological and meteorological elements in arid inland rivers of Xinjiang based on the sliding Copula function[J]. [Research of Soil and Water Conservation](#), 2019, 26(1): 155-161. (in Chinese))
- [11] SKLAR A. Fonctions de repartition an dimensions et leurs marges[J]. [Universite Paris](#), 1959, 8: 229-231.
- [12] SALVADORI G, DE MICHELE C, DURANTE F. On the return period and design in a multivariate framework[J]. [Hydrology and Earth System Sciences](#), 2011, 15(11): 3293-3305.

- [13] 赵德招, 刘杰, 程海峰, 等. 长江口深水航道疏浚土处理现状及未来展望[J]. 水利水运工程学报, 2013(2): 26-32. (ZHAO Dezhaoh, LIU Jie, CHENG Haifeng, et al. Current situation and future prospect of dredged material disposal in the Yangtze estuary deepwater navigation channel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(2): 26-32. (in Chinese))
- [14] 刘杰, 程海峰, 韩露, 等. 流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响[J]. 水利水运工程学报, 2021(4): 1-9. (LIU Jie, CHENG Haifeng, HAN Lu, et al. New trends of river channel evolution of the Yangtze River estuary under the influences of inflow and sediment variations and human activities[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(4): 1-9. (in Chinese))
- [15] 窦希萍, 缴健, 储廪, 等. 长江口水沙变化与趋势预测[J]. 海洋工程, 2020, 38(4): 2-10. (DOU Xiping, JIAO Jian, CHU Ao, et al. Review of hydro-sediment change and tendency in Yangtze estuary[J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(4): 2-10. (in Chinese))
- [16] 武旭同, 王腊春, 李娜. 近60 a来长江干流输沙量变化及原因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 116-124. (WU Xutong, WANG Lachun, LI Na. Analysis on the change of sediment discharge of the Yangtze River in recent 60 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(1): 116-124. (in Chinese))
- [17] 周念清, 赵露, 沈新平. 基于Copula函数的洞庭湖流域水沙丰枯遭遇频率分析[J]. 地理科学, 2014, 34(2): 242-248. (ZHOU Nianqing, ZHAO Lu, SHEN Xinping. Copula-based probability evaluation of rich-poor runoff and sediment encounter in Dongting Lake Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(2): 242-248. (in Chinese))
- [18] MOU S Y, SHI P, QU S M, et al. Uncertainty analysis of two copula-based conditional regional design flood composition methods: a case study of Huai River, China[J]. Water, 2018, 10(12): 1872.

Analysis of runoff and sediment characteristics of Datong Station based on Copula function

HUANG Yuming^{1,2}, JIAO Jian¹, DOU Xiping¹, GUO Haijun¹, DING Lei¹

(1. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of MOT, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The Yangtze River estuary has been strongly influenced by human activities, and the consistency of its runoff-sediment sequence has been damaged. Based on the monthly runoff and sediment data from 1965 to 2019 at Datong Station, a sliding window algorithm based on Copula is applied to investigate the variation characteristics of runoff and sediment in the Yangtze estuary and the consistency of its abundance-depletion, and the uncertainty of the marginal distribution selection for the joint runoff-sediment distribution model is also analyzed. The results show that: (1) The runoff-sediment combination at Datong Station shows a decreasing trend from 1965 to 2019 due to human activities, and changes abruptly in 1979 and 2000. The optimal function models for the runoff-sediment series in 1965—1979 and 1980—2000 are Clayton, while 2001—2019 is best modeled by Frank; (2) the synchronous frequencies of the runoff-sediment series in the three periods are 84.52%, 84.40% and 83.20% respectively, which are much greater than the asynchronous frequencies of abundance-depletion, revealing the strong consistency of the incoming runoff-sediment in the upper reaches of the Yangtze River; (3) the 95% confidence interval of the PE3-PE3 marginal distribution combination is smaller than that of the PE3-GPD combination, indicating that the PE3-PE3 combination would reduce the uncertainty of function selection. By exploring the joint variation characteristics of incoming runoff and sediment at Datong station, this study provides a reference for water resources management and river regulation in the Yangtze estuary.

Key words: Yangtze River estuary; Datong Station; sliding Copula function; runoff-sediment combination; joint distribution; uncertainty analysis