

# 鄱阳湖五河入湖水沙丰枯遭遇关系分析

简鸿福<sup>1,2</sup>, 韩会明<sup>1,2</sup>

(1.江西省水利科学院, 南昌 330029; 2.江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 南昌 330029)

**摘要:**【目的】探究鄱阳湖五河入湖水沙丰枯变化及其影响因素。【方法】基于鄱阳湖“五河”流域控制水文站的径流量—输沙量资料, 利用滑动相关系数法、双累积曲线法和 Copula 函数, 揭示了流域水沙演变规律, 定量评估不同时期流域水沙丰枯遭遇事件发生的概率。【结果】五河入湖总径流量呈增加趋势, 其中修水增加趋势显著, 总输沙量呈显著减少趋势, 而饶河输沙量呈显著增多趋势; 五河入湖水沙关系除抚河外都出现突变变化, 其中信江水沙关系突变后径流量增幅最大为 15.9%, 赣江输沙量降幅最多为 67.3%, 饶河 P<sub>3</sub> 时期(2004—2018)的输沙量相较于 P<sub>1</sub> 时期(1956—1971)增幅高达 100.3%; 不同时期“五河”水沙丰枯异步的概率要小于丰枯同步, 且丰枯同平的概率最高; 【结论】极端降水特征、水土保持项目的实施、水库建设和河道采砂对流域水沙变化影响深远。

**关键词:** Copula 函数; 水沙关系; 鄱阳湖流域; 气候变化; 人类活动

中图分类号: TV141; P333.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022207

OSID: 

简鸿福, 韩会明. 鄱阳湖五河入湖水沙丰枯遭遇关系分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(7): 109-116.

JIAN Hongfu, HAN Huiming. High and Low Water and Sediment Flows in the Five Tributaries of Poyang Lake[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(7): 109-116.

## 0 引言

【研究意义】径流和输沙是影响水循环、资源利用和河道演变的重要水文要素。受气候变化和人类活动的双重影响, 水沙变化存在较大的不确定性, 水沙灾害问题日益突出<sup>[1]</sup>。水沙影响到水土资源规划与管理、水利基础设施建设与运行以及流域河道演变<sup>[2]</sup>。

鄱阳湖五河(赣江、抚河、信江、饶河、修水)作为入湖水沙的最主要来源, 对鄱阳湖的水沙调节起到决定性的作用。由于鄱阳湖流域自然、气候变化和人类活动加剧, 流域入湖水沙关系受到了深刻的影响因此, 诸多学者<sup>[3-5]</sup>围绕鄱阳湖流域水沙演变规律及其影响、归因开展研究并取得了丰硕成果。【研究进展】彭俊等<sup>[6]</sup>利用 1950—2012 年的水文资料研究了鄱阳湖流域水沙长期变化规律, 发现入湖总径流呈增加趋势, 总输沙量呈减少趋势; 刘同宦等<sup>[7]</sup>以 1956—2018 年的水沙实测资料为基础, 对五河入湖水沙及河道形态变化开展研究, 表明赣江、信江入湖沙量大减少, 2014 年前五河断面形态多呈锯齿状; 曾瑜等<sup>[8]</sup>根据鄱阳湖流域“五河”基本水文站 1961—2016 年实测的水沙及流域降水量资料, 对比研究入湖水沙演变过程及其影响因素, 指出年降水量和降水侵蚀力

对入湖径流量和输沙量起到关键作用; Gu 等<sup>[9]</sup>研究了 1961—2013 年鄱阳湖入湖径流量和入湖输沙量的时空变化, 评估了气候变化和人类活动对水沙变化的影响, 结果表明, 与参考期相比, 人类活动导致入湖径流量减少 5.5%, 输沙量减少 121.4%; 徐夏楠等<sup>[10]</sup>基于 1956—2010 年鄱阳湖流域水文资料定量分析了入湖输沙量的归因问题, 研究表明, 20 世纪 90 年代以前水库拦沙量和水土流失增沙量基本持平, 前者对输沙量的影响是后者的近 5 倍。

【切入点】近年来, 在气候变化和人类活动加剧下, 鄱阳湖入湖泥沙量受到深刻的影响, 这将导致河床冲淤变化和河道改变, 影响到洪水位的升降和流向, 进而可能引发水沙灾害。【拟解决的关键问题】然而, 目前有关鄱阳湖入湖水沙关系两变量联合分析略显不足, 同时, 近年来鄱阳湖流域水沙丰枯问题频现, 通过研究五河入湖水沙丰枯遭遇问题, 可定量揭示入湖水沙灾害发生频率, 为五河入湖水沙科学调控提供帮助。因此, 本文基于 1956—2018 年鄱阳湖五河径流和含沙量资料, 构建了水沙联合分布模型, 分析鄱阳湖五河入湖不同水沙条件下的丰枯遭遇频率, 探讨气候变化和人类活动对水沙变化的影响, 以为鄱阳湖流域的水沙调控、防洪减灾和生态保护等提供理论依据。

## 1 研究区域概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

鄱阳湖位于 115°47'—116°45'E, 28°22'—29°45'N

收稿日期: 2022-04-14 修回日期: 2023-03-18 网络出版日期: 2023-05-10  
基金项目: 江西省水利厅科技项目(202223YBKT05, 202223YBKT16, 202224ZDKT06, 202223YBZKT02)

作者简介: 简鸿福(1982-), 男, 江西新余人。高级工程师, 主要从事河流生态治理及水资源方面研究。E-mail: jianhongfu@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

之间, 北通长江, 属亚热带季风气候。流域总面积为 16.22 万  $\text{km}^2$ , 流域内地形地貌由山地、丘陵和冲积平原组成, 西部和东部高海拔, 中部低海拔。湖泊水沙主要来自赣江、抚河、信江、饶河和修水五大支流。五河流域占鄱阳湖流域面积的 84% 左右, 贡献了鄱阳湖 85% 以上的径流和输沙量<sup>[10]</sup>, 水沙入湖集中期一致, 主要在 4—7 月。湖面在丰水期 (4—9 月) 可超 3 000  $\text{km}^2$ , 而枯水期 (10 月—次年 3 月) 则少于 1 000  $\text{km}^2$ 。

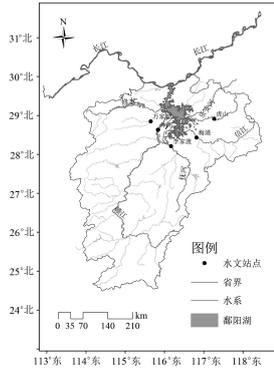


图 1 研究区概况及水文站点

Fig.1 Overview of the study area and hydrological stations

## 1.2 数据来源

本文所使用的逐日径流量和输沙量数据均来自于江西省水文监测中心, 资料年限为 1956—2018 年, 分别为鄱阳湖“五河”控制性水文站点, 分别为: 赣江流域水文控制站—外洲站, 抚河流域水文控制站—李家渡站, 信江流域水文控制站—梅港站, 饶河流域乐安河支流水文控制站—虎山站, 修水流域潦河支流

水文控制站—万家埠站, 森林覆盖和水库保持数据参考文献[6], 水库资料来源于 2018 年江西水利统计年鉴。

## 2 研究方法

### 2.1 水沙关系的联合分布

Copula 函数可以连接多个边缘分布得到联合分布, 其充当着随机向量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  各自边缘分布函数  $F_{X_1}(x_1), \dots, F_{X_n}(x_n)$  和联合分布函数  $H(x_1, x_2, \dots, x_n)$  之间的媒介, 对于水沙关系的两变量  $r$  和  $s$  而言, 其联合分布函数可以描述为:

$$H(r, s) = C(F_r(r), F_s(s)), \quad (1)$$

式中:  $r, s$  分别代表年径流量和输沙量;  $C$  为 Copula 函数;  $F_r(r)$  和  $F_s(s)$  分别代表年径流量和输沙量的边缘分布函数;  $H(r, s)$  为水沙关系的联合分布函数。

本文选取水文研究中最常用的 Archimedean 型 Copula 函数中的 3 种单参数分布<sup>[11]</sup>, 分别为: Gumbel copula、Clayton copula 和 Frank copula 函数拟合联合分布函数。并利用平方欧氏距离 ( $d^2$ ) 和赤司信息量准则法 (AIC 方法)<sup>[12]</sup>对 3 种 copula 函数进行拟合优选。

### 2.2 水沙丰枯遭遇频率划分

应用 Copula 函数分析不同情景下水沙丰枯遭遇的联合概率。  $P_f = P(X \geq x) = 25\%$  和  $P_k = P(X \leq x) = 75\%$  分别作为水沙丰枯频率的标准, 其中,  $P(X \geq x)$  表示  $X \geq x$  事件发生的概率, 表 1 给出了水沙丰枯遭遇划分的 9 种组合。

表 1 水沙关系丰枯组合

Table 1 Combination of abundance and depletion of water-sand relationship

组合	沙丰	沙平	沙枯
水丰	$P(R \geq r_{Pf}, S \geq s_{Pf})$	$P(R \geq r_{Pf}, s_{Pk} < S < s_{Pf})$	$P(R \geq r_{Pf}, S < s_{Pk})$
水平	$P(r_{Pk} < R < r_{Pf}, S \geq s_{Pf})$	$P(r_{Pk} < R < r_{Pf}, s_{Pk} < S < s_{Pf})$	$P(r_{Pk} < R < r_{Pf}, S \leq s_{Pk})$
水枯	$P(R \leq r_{Pk}, S \geq s_{Pf})$	$P(R \leq r_{Pk}, s_{Pk} < S < s_{Pf})$	$P(R \leq r_{Pk}, S \leq s_{Pk})$

注  $r$  为径流量;  $S$  为输沙量;  $P_f, P_k$  分别为丰、枯的频率。

### 2.3 水沙关系变异诊断方法

本文分别采用了滑动相关系数和双累积曲线法进行水沙关系变异诊断的相互比较验证。滑动相关系数法<sup>[13]</sup>利用径流量  $r$  和输沙量  $s$  的关系特点, 输沙量和径流量之间存在幂函数关系, 在同时取对数之后呈现明显的线性关系, 用  $\ln r$  和  $\ln s$  之间的相关关系变化来描述水沙关系的变化, 文中进行检验的滑动相关系数步长为 5; 双累积曲线法<sup>[14]</sup>则以年径流量累积值为横轴、输沙量累积值为纵轴, 根据水沙累积值拟合线斜率偏转程度来判断水沙关系突变情况, 观察直线斜率的变化过程, 如果直线斜率没有明显偏离, 说明人类活动对水沙无显著影响, 反之, 则说明人类活动有显著趋势性影响。斜率发生明显改变的点对应水沙关系发生显著变化的年份。此外, 采用 Mann-Kendall

非参数检验法对水沙变化的趋势进行检验, 方法参考文献[12]。

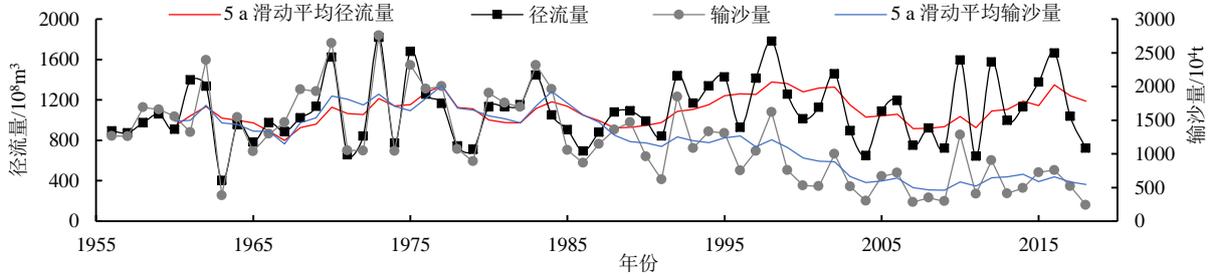
## 3 结果与分析

### 3.1 水沙年际变化分析

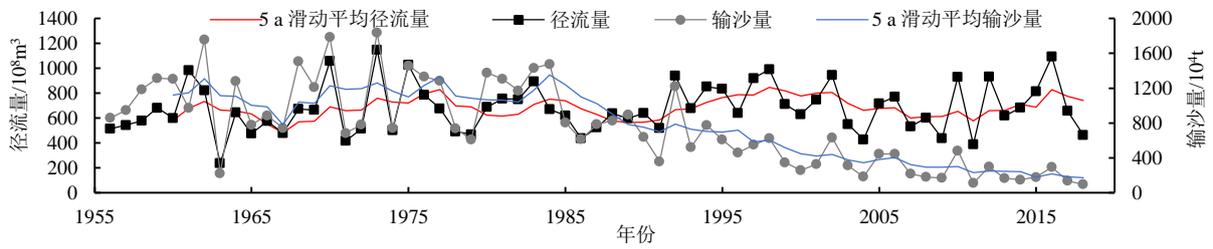
鄱阳湖流域及五河 1956—2018 年输沙和径流量变化过程如图 2 所示。鄱阳湖流域 1956—2018 年五河入湖径流总量多年平均值为 1 088.3 亿  $\text{m}^3$ , 输沙总量多年平均值为 1 194.4 万 t, 径流总量呈不显著的增加趋势, 输沙量呈显著的减少趋势 ( $Z_s > Z_{\alpha=0.05}$ ); 五河中只有抚河径流量呈不显著减少趋势, 其他四河均呈增多趋势, 修水径流量增加趋势显著 ( $Z_r > Z_{\alpha=0.05}$ ), 而输沙量则是饶河呈显著增加趋势 ( $Z_s > Z_{\alpha=0.05}$ ), 其他四河均呈降低趋势, 其中赣江、信江输沙量减少趋

势显著 ( $Z_s > Z_{\alpha=0.05}$ )；五河年均径流量和输沙量大小排序一致，依次为赣、信、抚、饶、修，其中，对入湖径流量和输沙量影响最大的赣江年均径流量和输沙量分别为680亿 $m^3$ 和764.4万t，占入湖总量的62.5%和64%；“五河”入湖总径流量和输沙量变化过程在1990年以前呈现相似的震荡变化趋势，1990年以后，水沙变化过程存在明显差异，径流量仍呈现增加-减

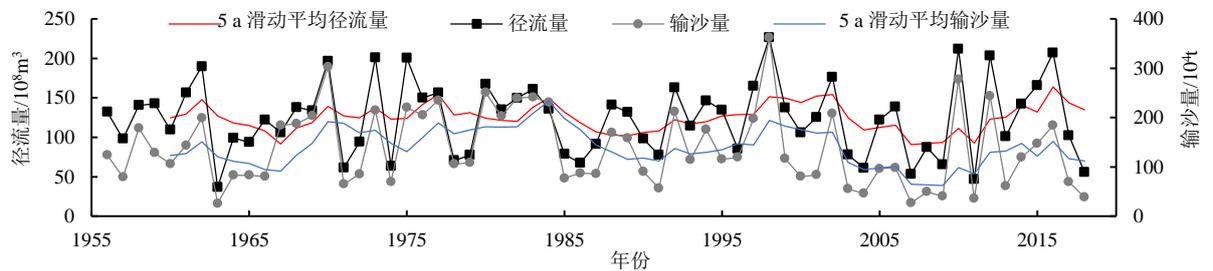
少-增加的波动变化，而输沙量明显地减少，直至2010年以后略有回升；对比五河流域同时期输沙量发现，除赣江从1990年以后持续减少外，其他四河从1990年初—1990年末—2000年末—2018年3个时期内，均呈增加-减少-增加的变化，与各自同时期的径流变化保持相似起伏变化。



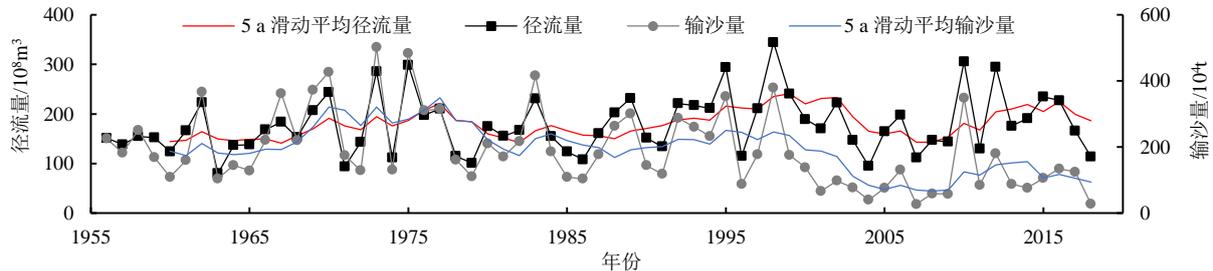
(a) 五河



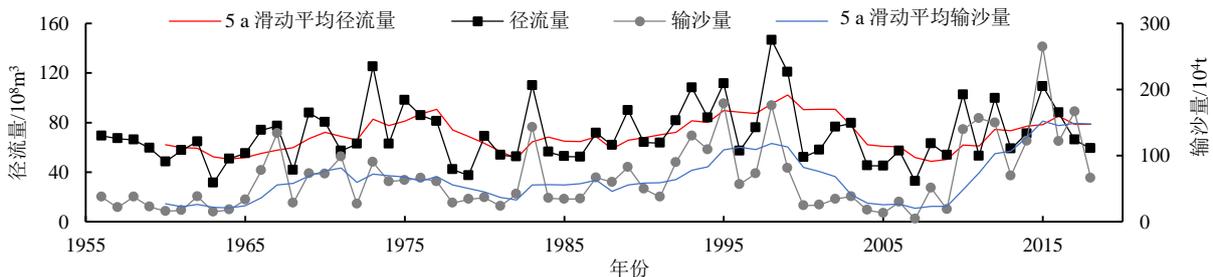
(b) 赣江



(c) 抚河



(d) 信江



(e) 饶河

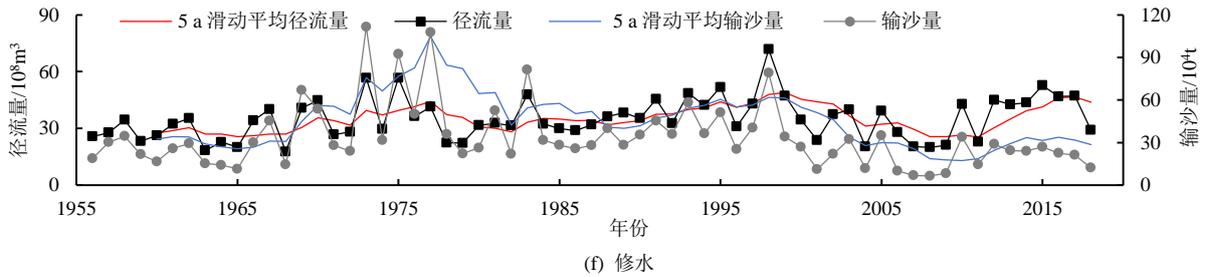


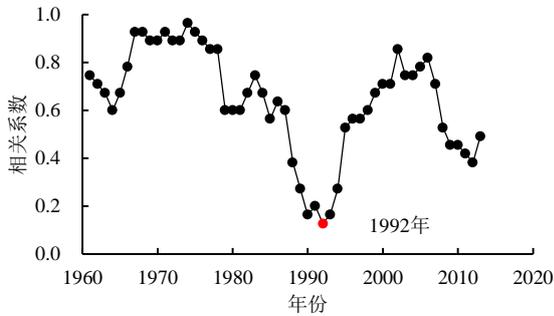
图 2 “五河”水沙年际变化过程

Fig.2 Interannual variation of water and sand in the ‘Five Rivers’

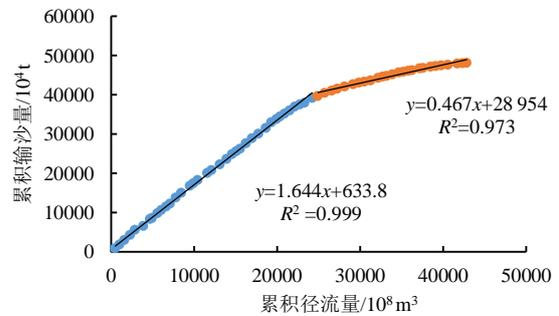
3.2 水沙关系变异诊断及特征分析

图 3 (a) 以赣江水沙关系的变异诊断为例。从图 3 (a) 水沙相关系数变化可知，水沙相关系数在 1992 年到达低谷，出现明显转折；同时采用双累积曲线法对水沙关系进一步诊断 (图 3 (b))，水沙双累积曲线在 1992 年前后线性拟合斜率从 1.644 降至 0.467，发生明显转折，同时线性关系有所减弱，说明赣江径流量对输沙量的影响变小，人类活动的影响使得水沙

关系累积曲线发生转折，这与已有的研究相一致<sup>[15-16]</sup>。1990 年在赣江干流上建成的万安水库，其库容达 22.16 亿 m<sup>3</sup>，对赣江泥沙起到重要的拦截作用，这也与滑动相关系数法和水沙关系双累积曲线法诊断的赣江水沙关系在 1990 年左右发生变异一致。此外，图 2 中，流域泥沙的显著变化而径流几乎不变说明了人类活动对水沙关系的影响显著。



(a) 滑动相关系数法诊断



(b) 双累积曲线法诊断

图 3 水沙关系变异诊断

Fig.3 Diagnosis of variation in water-sand relationship

采用滑动相关系数和双累积曲线法相互比较验证，对鄱阳湖“五河”进行水沙关系变异诊断，并分析其变异前后的统计参数 (表 2)。由表 2 可知，五河入湖总径流量在变异后增加 9.8%，输沙总量发生显著减少，输沙量减少 52.6%，变异系数 Cv 值也出现明显增加，表明变异前后水沙序列波动明显。赣江、信江和修水的水沙变化与入湖总量变化相似，径流量增减不明显，其中信江径流量增幅最高为 15.9%，输

沙量较变异前均出现不同程度减少，依次减少 67.3%、37.8%和 28.0%；抚河水沙关系未发生明显的变异，而饶河水沙关系则在 1971 年和 2003 年发生 2 次变异，与其他流域不同，饶河输沙量在 2 次变异后均出现明显增多，2 次增幅分别为 41.3%和 41.7%，相较于 P<sub>1</sub> 时期，P<sub>3</sub> 时期输沙量增幅更是高达 100.3%，其径流量则先增后减幅度不大。

表 2 水沙关系变异前后特征

Table 2 Characteristics before and after variation of water-sand relationship

名称	时期	Cv		径流		输沙量	
		径流	输沙量	均值	变化幅度/%	均值	变化幅度/%
五河总	P <sub>1</sub> : 1956—1992 年	0.287	0.365	1 045.838	-	1 526.060	-
	P <sub>2</sub> : 1993—2018 年	0.283	0.519	1 148.825	+9.8	722.565	-52.6
赣江	P <sub>1</sub> : 1956—1992 年	0.300	0.370	655.514	-	1 058.349	-
	P <sub>2</sub> : 1993—2018 年	0.263	0.552	714.750	+9.0	346.127	-67.3
抚河	P: 1956—2018 年	0.372	0.553	124.224	-	137.954	-
信江	P <sub>1</sub> : 1956—1990 年	0.307	0.492	166.840	-	230.242	-
	P <sub>2</sub> : 1991—2018 年	0.329	0.703	193.423	+15.9	143.104	-37.8
饶河	P <sub>1</sub> : 1956—1971 年	0.238	0.752	61.741	-	46.251	-
	P <sub>2</sub> : 1971—2003 年	0.271	0.643	76.374	+23.7	65.369	+41.3
	P <sub>3</sub> : 2004—2018 年	0.341	0.807	66.970	-12.3	92.658	+41.7
修水	P <sub>1</sub> : 1956—1983 年	0.322	0.707	32.394	-	39.757	-
	P <sub>2</sub> : 1984—2018 年	0.301	0.527	37.234	+14.9	28.609	-28.0

注 变化幅度指和前一个时期相比增加或减小的幅度。

### 3.3 水沙关系联合分布函数确定

通过平方欧氏距离 ( $d^2$ ) 和赤司信息量准则法 (AIC 方法) 分别确定鄱阳湖“五河”水沙关系变异前后的最优联合分布函数如表 3 所示。由表 3 可知, 在研究期内“五河”总量、赣江和抚河水沙关系最优的联合分布函数均为 Frank Copula; 而信江、饶河和

修水的最优联合分布函数在突变前后发生了变化, 信江在  $P_1$  时期最优联合分布含水为 Gumbel Copula,  $P_2$  时期则为 Frank Copula, 饶河在  $P_1$  时期和  $P_2$  时期均为 Frank Copula,  $P_3$  时期则变为 Clayton Copula, 修河在  $P_1$  时期最优联合分布为 Gumbel Copula,  $P_2$  时期为 Clayton Copula。

表 3 Copula 函数拟合优选

Table 3 Selection of the optimal Copula function

名称	时期	Gumbel		Frank		Clayton	
		$d^2$	AIC	$d^2$	AIC	$d^2$	AIC
五河总量	$P_1$ : 1956—1992 年	0.010	-129.964	<b>0.008</b>	<b>-132.956</b>	0.032	-111.051
	$P_2$ : 1993—2018 年	0.024	-76.383	<b>0.011</b>	<b>-85.274</b>	0.020	-78.795
赣江	$P_1$ : 1956—1992 年	0.029	-112.631	<b>0.012</b>	<b>-126.492</b>	0.037	-108.662
	$P_2$ : 1993—2018 年	0.016	-81.314	<b>0.011</b>	<b>-84.834</b>	0.026	-75.605
抚河	$P$ : 1956—2018 年	0.028	-208.478	<b>0.015</b>	<b>-224.997</b>	0.036	-201.980
信江	$P_1$ : 1956—1990 年	<b>0.006</b>	<b>-128.270</b>	0.009	-123.787	0.079	-90.276
	$P_2$ : 1991—2018 年	0.013	-90.655	<b>0.012</b>	<b>-92.373</b>	0.042	-76.660
饶河	$P_1$ : 1956—1971 年	0.014	-46.281	<b>0.010</b>	<b>-49.064</b>	0.103	-47.128
	$P_2$ : 1971—2003 年	0.018	-101.567	<b>0.016</b>	<b>-103.352</b>	0.104	-77.221
	$P_3$ : 2004—2018 年	0.025	-39.258	0.018	-41.484	<b>0.007</b>	<b>-47.155</b>
修水	$P_1$ : 1956—1983 年	<b>0.005</b>	<b>-102.781</b>	0.008	-96.780	0.046	-75.605
	$P_2$ : 1984—2018 年	0.038	-101.139	0.037	-101.806	<b>0.019</b>	<b>-112.240</b>

注 加粗数据为最优 Copula 函数类型。

### 3.4 丰枯遭遇分析

表 4 为应用 Copula 函数分析不同时期“五河”水沙关系的丰枯遭遇情况。由表 4 可知, 在水沙丰枯遭遇的 9 种情况中, 在不同时期“五河”水沙丰枯同平的概率最高, 均在 0.3~0.4 范围内, 同时丰枯异步的概率要小于丰枯同步; 水沙关系中水丰沙枯和水枯

沙丰 2 种相反组合发生的概率极小, 均不足 1%, 这也说明“五河”水沙关系具有较强的相关性; 赣江、信江和修水的水沙丰枯同步概率在  $P_1$  时期均高于  $P_2$  时期, 相较于  $P_1$  时期, 丰枯同步概率分别减小了 12%、5.3% 和 9.8%, 饶河水沙丰枯同步概率从  $P_1$ — $P_3$  时期都有略微的增加。

表 4 不同时期水沙关系丰枯遭遇

Table 4 Abundance and depletion encounters of water-sand relationship in different periods

名称	时期	丰枯同步概率				丰枯异步概率						
		水沙同丰	水沙同平	水沙同枯	合计	水丰沙平	水丰沙枯	水平沙丰	水平沙枯	水枯沙丰	水枯沙平	合计
五河总量	$P_1$ : 1956—1992 年	0.190	0.380	0.190	0.759	0.060	0.000	0.060	0.060	0.000	0.060	0.241
	$P_2$ : 1993—2018 年	0.185	0.372	0.185	0.743	0.064	0.001	0.064	0.064	0.001	0.064	0.257
赣江	$P_1$ : 1956—1996 年	0.178	0.358	0.178	0.713	0.071	0.001	0.071	0.071	0.001	0.071	0.287
	$P_2$ : 1997—2018 年	0.144	0.304	0.144	0.593	0.098	0.008	0.098	0.098	0.008	0.098	0.407
抚河	$P$ : 1956—2018 年	0.186	0.373	0.186	0.745	0.064	0.001	0.064	0.064	0.001	0.064	0.255
信江	$P_1$ : 1956—1990 年	0.201	0.382	0.180	0.763	0.049	0.001	0.049	0.069	0.001	0.069	0.237
	$P_2$ : 1991—2018 年	0.177	0.356	0.177	0.710	0.072	0.001	0.072	0.072	0.001	0.072	0.290
饶河	$P_1$ : 1956—1971 年	0.158	0.324	0.158	0.639	0.088	0.004	0.088	0.088	0.004	0.088	0.361
	$P_2$ : 1971—2003 年	0.166	0.337	0.166	0.668	0.082	0.003	0.082	0.082	0.003	0.082	0.332
	$P_3$ : 2004—2018 年	0.148	0.352	0.202	0.701	0.101	0.001	0.101	0.047	0.001	0.047	0.299
修水	$P_1$ : 1956—1983 年	0.197	0.375	0.176	0.747	0.052	0.001	0.052	0.073	0.001	0.073	0.253
	$P_2$ : 1984—2018 年	0.160	0.328	0.160	0.649	0.086	0.004	0.086	0.086	0.004	0.086	0.351

## 4 讨论

### 4.1 气候变化对水沙变化的影响

降水是影响流域土壤侵蚀产沙的主要驱动因子, 气候变化影响着降水的频率、强度等属性<sup>[17]</sup>。鄱阳湖流域雨季主要集中在夏季, 这也是流域土壤侵蚀和水土流失最严重的季节, 同时近几十年来由于流域的暖冬和降水增加, 导致冬季土壤侵蚀的风险也越来越高, 从而进一步导致集水区产沙量的变化; 诸多的研究表明<sup>[18-20]</sup>, 鄱阳湖流域降水量和降水侵蚀力呈升高趋势;

雷享勇等<sup>[21]</sup>发现气候变化背景下鄱阳湖极端降水事件呈频率高、强度大的新特征; Li 等<sup>[22]</sup>研究表明, 鄱阳湖流域土壤侵蚀力与极端降水指数有着较强的相关关系, 气候变化影响下极端降水加剧是土壤侵蚀力增加的重要因素; 此外, 2010 年的降水侵蚀力高于其他时期<sup>[23-24]</sup>, 这也增加了 2010 年以后“五河”入湖输沙量 (图 2 (a)); “五河”流域中饶河流域降水侵蚀力最大且升高趋势最强, 赣江流域最小且趋势最弱<sup>[25]</sup>, 这也与图 2 (e) 中饶河流域在 2010 年以后输沙量明显增多相一致, 降水侵蚀力空间上高值倾

向于流域的东北部，这也与地处流域东北部的饶河流域位置相吻合，其降水侵蚀力较高可能与东南登陆的台风型降水有关。虽然流域降水量和极端降水事件增多，加剧了土壤侵蚀，但针对性的治理措施会减少侵蚀和泥沙搬运，从而弱化了降水特征变化带来的影响。

#### 4.2 人类活动对水沙变化的影响

##### 1) 水土保持情况

图 4 为鄱阳湖流域森林覆盖率和水土流失面积比例。鄱阳湖流域历史上是森林资源丰富的地区，但新中国成立初，由于经济发展和人口迅速增长，森林砍伐现象日趋严重，森林覆盖率明显下降，在 1960 年降低至 31.2%，之后的 20 多年虽然略有增多，但一直维持在较低的水平，使鄱阳湖流域生态环境恶化，水土流失面积比例持续升高，在 1988 年水土流失面积比例高达 28.5%；由于 1950 年到 1980 年水土流失面积比例的不断攀升，从 1980 年开始，江西省开展了以“治湖必先治江，治江必先治山”的流域综合治理理念的山江湖工程建设，大量植树造林，森林覆盖率迅速提高<sup>[10]</sup>，加上“国家水土流失重点治理工程”、“小流域综合治理”等一系列水土保持工程的建设<sup>[15]</sup>，水土流失面积比例开始减少，并对影响流域产汇流状况，进而减少流域的输沙量<sup>[26]</sup>。如聂小飞等<sup>[27]</sup>对赣江上游平江流域的水土流失综合治理进行评估时发现，流域长期水土保持显著减少，以水土保持为主的长期生态保护工程导致平江全年、汛期、非汛期输沙量分别减少 59.3%、60.7%和 55.7%。

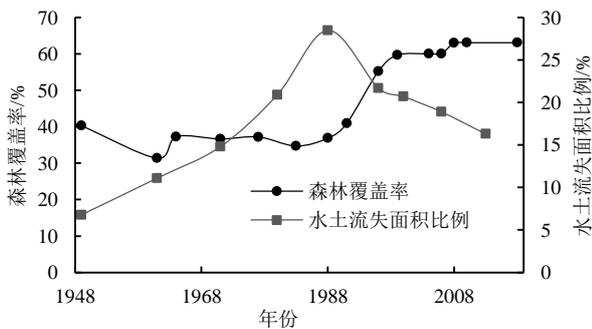


图 4 鄱阳湖流域森林覆盖率和水土流失面积比例

Fig.4 Proportion of forest coverage and soil erosion area in Poyang Lake Basin

##### 2) 水库建设情况

当河流受到水库蓄水的影响时，径流和泥沙量往往会迅速变化。如图 5 和图 6 所示，鄱阳湖流域水利工程经过近几十年不断的建设，流域水库库容不断增加；根据 2018 年江西水利统计年鉴，江西省已建水库 10 809 座，总库容 321.68 亿  $m^3$ ，其中大型水库 30 座，总库容 189.9 亿  $m^3$ ，中型水库 262 座，总库容 64.74 亿  $m^3$ ，10 517 座，总库容 67.04 亿  $m^3$ 。水库的建设不仅改变了径流和泥沙的关系，同时减少产沙量(图 6)；

从鄱阳湖流域水库总库容与入湖输沙量的关系图 6 可知，输沙量与总库容具有较好的负相关关系( $R^2=0.6$ )，随着库容的增加，入湖输沙量相应减少。赣江流域作为鄱阳湖“五河”中最大的支流，也是大中型水库最多的流域，据统计赣江流域已建大中型水库 132 座，累积库容近 95 亿  $m^3$ ，图 3 中由于万安水库蓄水影响赣江水沙关系于 1992 年发生突变，图 2 中赣江输沙量从 2010 年以后仍在持续减少，与其他“四河”输沙增多的趋势相反，这可能与这段时期水库的持续建设有直接关系。2010—2018 年间，赣江新增水库总库容 14.056 亿  $m^3$ ，其中修建在赣江干流上的峡江水利枢纽总库容为 11.87 亿  $m^3$ ，于 2015 年投入运行。水库建设对水沙关系的影响最为直接，但是，水库对泥沙量的影响不仅取决于其库容，还取决于其在河流中的位置；如新中国成立初至 20 世纪 80 年代，虽然赣江流域兴建了众多水库，但大多库容较小或是少数大型水库建在支流上，由于集水面积小，对输沙量的影响十分有限。直至万安水库、峡江水利枢纽这类直接建设在干流上的水库，流域的水沙关系开始出现明显变化。

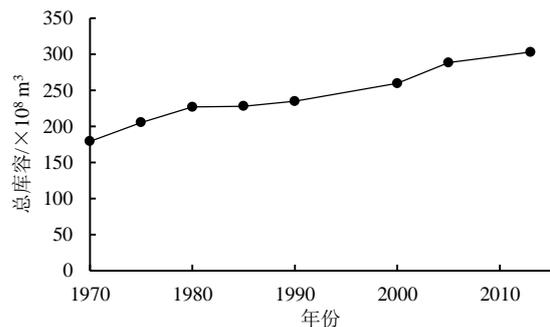


图 5 鄱阳湖流域水库累积库容变化

Fig.5 Changes of accumulated reservoir capacity in Poyang Lake basin

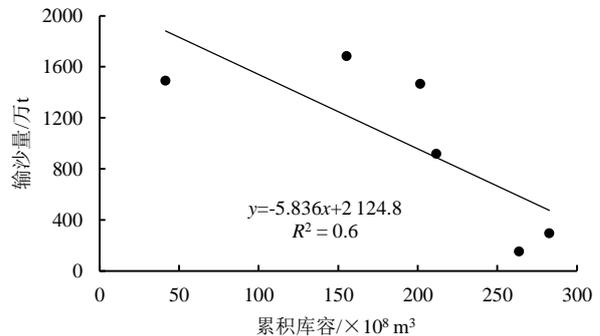


图 6 鄱阳湖流域水库累积库容与入湖输沙量的关系

Fig.6 Relationship between accumulated reservoir capacity and incoming sand transport in Poyang Lake basin

##### 3) 河道采砂情况

鄱阳湖流域航道整治和采砂活动对入湖输沙量也会产生影响。长江于 2000 年开始实施禁止采砂后，鄱阳湖流域逐渐出现大量采砂船只；邬国锋等<sup>[28]</sup>通过遥感技术对鄱阳湖流域 2000—2005 年间的采砂船只

进行识别中发现, 2000 年几乎没有大型船只开展采砂活动, 随后的 4 a 间采砂船数量不断增多, 2001 年大约 140 艘, 到 2004 年则约为 450 艘, 2005 年略有减少, 但仍有近 350 艘; 虽然 2006 年、2008 年江西省连续出台了河道采砂相关管理办法, 采砂船数有所减少, 但由于高利润驱使, 之后的 2010 年采砂船数明显反弹, 2014 年更是达到了 850 多艘; 2012 年规范采砂前, 仅赣江每年偷采砂量就达 3 000 万~4 000 万 t<sup>[7]</sup>; 采砂活动对河道演变、湖区地形等水文状况有着重要影响, Yao 等<sup>[29]</sup>发现随着采砂量的增加, 鄱阳湖出湖水位呈非线性累积下降。

本文对鄱阳湖五河入湖水沙丰枯遭遇关系进行分析, 并就降水特征变化、水土保持建设、水库建设和河道采砂等对入湖水沙关系的影响做了宏观上的时空介绍, 但文中发现五河水沙关系大致呈现出径流多水沙多的同步变化和径流多水沙少的异步变化特征, 为何出现这种差异特征还有待未来进一步细化研究。

## 5 结论

1) 鄱阳湖五河入湖径流总量呈不显著的增加趋势, 输沙量呈显著的减少趋势, 五河中径流量只有抚河呈减少趋势, 输沙量只有饶河呈增加趋势; 五河年均径流量和输沙量大小排序一致, 依次为赣、信、抚、饶、修, 其中, 赣江年均径流量和输沙量占入湖总量的 62.5% 和 64.0%;

2) 1992 年水沙关系发生突变后, 五河入湖总径流量增加 9.8%, 输沙量减少 52.6%; 其中, 信江径流量增幅最大为 15.9%; 赣江输沙量降幅最多为 67.3%;

3) 在不同时期“五河”水沙丰枯异步的概率要小于丰枯同步, 丰枯同平的概率最高。

4) 极端降水特征、水土保持项目的实施、水库建设和河道采砂对流域水沙变化影响深远。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

### 参考文献:

[1] 王军, 姚仕明, 周银军. 我国河流泥沙资源利用的发展与展望[J]. 泥沙研究, 2019, 44(1): 73-80.  
WANG Jun, YAO Shiming, ZHOU Yinjun. Review on river sediment resources utilization in China[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(1): 73-80.

[2] 刘翊竣, 徐国宾, 段宇. 基于 Copula 函数淮河流域水沙联合分布研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(6): 494-501.  
LIU Yijun, XU Guobin, DUAN Yu. Study on joint distribution of water and sediment in Huaihe River Basin based on Copula function[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(6): 494-501.

[3] GUO L P, YU Q, GAO P, et al. Trend and change-point analysis of streamflow and sediment discharge of the Gongshui River in China during the last 60 years[J]. Water, 2018, 10(9): 1 273.

[4] 唐洪武, 袁赛瑜, 肖洋, 等. 鄱阳湖及五河尾间演变特征[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(8): 805-813.

TANG Hongwu, YUAN Saiyu, XIAO Yang, et al. Fluvial processes of Poyang Lake and estuaries of “Five rivers”[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, 47(8): 805-813.

[5] GAO J H, XU X N, JIA J J, et al. A numerical investigation of freshwater and sediment discharge variations of Poyang Lake catchment, China over the last 1000 years[J]. The Holocene, 2015, 25(9): 1 470-1 482.

[6] 彭俊. 1950 年以来鄱阳湖流域水沙变化规律及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(10): 1 751-1 761.  
PENG Jun. Spatial and temporal changes of runoff and sediment loads in the Poyang Lake Basin since 1950 and their influence factors[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(10): 1 751-1 761.

[7] 刘同宦, 安智伟, 柴朝晖, 等. 鄱阳湖五河入湖水沙通量及典型断面形态变化特性分析[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 8-13, 39.  
LIU Tonghuan, AN Zhiwei, CHAI Zhaohui, et al. Changes of water and sediment flux and typical sectional shape of five rivers flowing into the Poyang Lake[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(11): 8-13, 39.

[8] 曾瑜, 刘进宝, 厉莎, 等. 鄱阳湖流域气候变化和人类活动对入湖水沙的影响[J]. 人民长江, 2020, 51(1): 28-35.  
ZENG Yu, LIU Jinbao, LI Sha, et al. Effects of climate variation and human activities on runoff and sediment into Poyang Lake[J]. Yangtze River, 2020, 51(1): 28-35.

[9] GU C J, MU X M, GAO P, et al. Effects of climate change and human activities on runoff and sediment inputs of the largest freshwater lake in China, Poyang Lake[J]. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(14): 2 313-2 330.

[10] 徐夏楠, 高建华, 贾建军, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域入湖输沙量影响的定量估算[J]. 地理研究, 2015, 34(5): 838-850.  
XU Xia'nan, GAO Jianhua, JIA Jianjun, et al. The quantitative estimation of sediment load changes entering Poyang Lake Basin induced by climate change and anthropogenic impacts[J]. Geographical Research, 2015, 34(5): 838-850.

[11] 韩会明, 刘喆玥, 刘成林, 等. 基于 Copula 函数的赣江流域气象干旱特征分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 9-13.  
HAN Huiming, LIU Zheyue, LIU Chenglin, et al. Analysis of meteorological drought characteristics in Ganjiang River Basin based on copula function[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(8): 9-13.

[12] 韩会明. 赣江流域干旱时空演变特征及重现期分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2020: 58-59.  
HAN Huiming. Spatial and temporal evolution characteristics and recurrence period of drought in Ganjiang River Basin[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020: 58-59.

[13] 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.

[14] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文, 2010, 30(4): 47-51.  
MU Xingmin, ZHANG Xiuqin, GAO Peng, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(4): 47-51.

[15] 胡强, 王姣, 刘颖, 等. 水库建设对赣江流域水沙情势的影响[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 1-5.  
HU Qiang, WANG Jiao, LIU Ying, et al. Effect of reservoir construction on runoff and sediment characteristics in Ganjiang River[J]. Yangtze River, 2021, 52(4): 1-5.

[16] 孙鹏, 张强, 陈晓宏, 等. 鄱阳湖流域水沙时空演变特征及其机理[J]. 地理学报, 2010, 65(7): 828-840.  
SUN Peng, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Spatio-temporal patterns of sediment and runoff changes in the Poyang Lake Basin and

- underlying causes[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(7): 828-840.
- [17] 李晓乐, 成晨, 张永娥, 等. 黄土高原典型流域输沙量变化及减沙贡献率分析[J]. *泥沙研究*, 2021, 46(3): 28-35.  
LI Xiaole, CHENG Chen, ZHANG Yong'e, et al. Contribution rates of sediment transport variation in typical watersheds in the Loess Plateau[J]. *Journal of Sediment Research*, 2021, 46(3): 28-35.
- [18] 肖丽英, 田伟, 吕莉. 鄱阳湖流域降水集中指标的时空变化特征[J]. *南昌工程学院学报*, 2020, 39(1): 25-31.  
XIAO Liying, TIAN Wei, LYU Li. Temporal and spatial change characteristics of precipitation concentration index in Poyang Lake Basin[J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2020, 39(1): 25-31.
- [19] 曹博, 张勃, 马彬, 等. 基于 SPEI 指数的长江中下游流域干旱时空特征分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(17): 6 258-6 267.  
CAO Bo, ZHANG Bo, MA Bin, et al. Spatial and temporal characteristics analysis of drought based on SPEI in the Middle and Lower Yangtze Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6 258-6 267.
- [20] 时光训, 刘健, 马力, 等. 1970—2014 年长江流域极端降水过程的时空变化研究[J]. *水文*, 2017, 37(4): 77-85.  
SHI Guangxun, LIU Jian, MA Li, et al. Spatio-temporal variations of extreme precipitation events in Yangtze River Basin during 1970—2014[J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(4): 77-85.
- [21] 雷享勇, 高路, 马苗苗, 等. 鄱阳湖流域极端降水时空分布和非平稳性特征[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3 277-3 287.  
LEI Xiangyong, GAO Lu, MA Miaomiao, et al. Temporal-spatial and non-stationarity characteristics of extreme precipitation in the Poyang Lake Basin, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3 277-3 287.
- [22] LI X, HU Q, ZHANG Q, et al. Response of rainfall erosivity to changes in extreme precipitation in the Poyang Lake Basin, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 75(4): 537-548.
- [23] 顾朝军, 朱永清, 李仁华, 等. 鄱阳湖流域降雨侵蚀力变化及其对入湖悬移质输沙量的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 45-54.  
GU Chaojun, ZHU Yongqing, LI Renhua, et al. Change of the rainfall erosivity in Poyang Lake Basin and its influence on suspended sediment load into the lake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 45-54.
- [24] 姬志军, 张连明. 鄱阳湖流域降雨量及降雨侵蚀力时空分布特征[J]. *人民黄河*, 2019, 41(6): 81-84.  
JI Zhijun, ZHANG Lianming. Spatial-temporal variation of distribution of rainfall erosivity in the Poyang Lake Basin[J]. *Yellow River*, 2019, 41(6): 81-84.
- [25] 何绍浪, 郭小君, 李凤英, 等. 中国南方地区近 60 a 来降雨量与降雨侵蚀力时空变化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(9): 1 406-1 416.  
HE Shaolang, GUO Xiaojun, LI Fengying, et al. Spatiotemporal variation of rainfall and rainfall erosivity in Southern China in recent 60 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(9): 1 406-1 416.
- [26] YE X C, ZHANG Q, LIU J, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 494: 83-95.
- [27] 聂小飞, 郑海金, 涂安国, 等. 南方红壤区长期水土流失综合治理显著减少河流输沙: 以鄱阳湖流域赣江上游平江为例[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 935-946.  
NIE Xiaofei, ZHENG Haijin, TU Anguo, et al. Long-term soil and water conservation in red soil region of Southern China significantly reduced riverine sediment load: A case study of Pingjiang River in the upper reaches of Ganjiang River, Lake Poyang Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3): 935-946.
- [28] 郭国锋, 崔丽娟. 基于遥感技术的鄱阳湖采砂对水体透明度的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6 113-6 120.  
WU Guofeng, CUI Lijuan. Remote sense-based analysis of sand dredging impact on water clarity in Poyang Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6 113-6 120.
- [29] YAO J, ZHANG D, LI Y L, et al. Quantifying the hydrodynamic impacts of cumulative sand mining on a large river-connected floodplain lake: Poyang Lake[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124 156.

## High and Low Water and Sediment Flows in the Five Tributaries of Poyang Lake

JIAN Hongfu<sup>1,2</sup>, HAN Huiming<sup>1,2</sup>

(1. Jiangxi Academy of Water Sciences and Engineering, Nanchang 330029, China;

2. Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake Basin, Nanchang 330029, China)

**Abstract: 【Objective】** Located in Jiangxi province, Poyang Lake is the largest freshwater lake in China. It has five tributaries, and this paper analyzes the change in water and sediment flows at their confluences with the lake.

**【Method】** The study was based on runoffs and sediments measured from hydrological stations in the five tributaries. Temporal evolutions of water flow and sediment transport were analyzed using the sliding correlation coefficient method, double cumulative curve method, and copula function. We also calculated the probability of occurrence of flooding and droughts during different periods in the basin. **【Result】** The analysis showed an overall increase in total runoff in all five tributaries, with the most significant increase observed in the Xiu River. In contrast, the total sediment flow exhibited a significant decrease, except the Rao River which showed a significant increase in sediment flow. Abrupt changes in water-sediment relationship were identified for all tributaries, except the Fuhe River. Following the abrupt changes, the Xinjiang River experienced a maximum increase in runoff (15.9%), whereas Ganjiang River had a maximum decrease (67.3%). Compared with the 1956—1971 period, the runoff in the Raohe River in the 2004—2018 period increased by 100.3%. Asynchrony between high and low levels of water and sediments in the five tributaries was less probable compared to synchronous high and low levels, with the highest probability observed for the same level of high and low levels. **【Conclusion】** Extreme precipitation, soil and water conservation projects, reservoir construction, and sand mining in the tributaries and lake are the factors that have significantly influenced water and sediment changes in the basin.

**Key words:** Copula function; water-sediment relationship; Poyang Lake Basin; climate change; human activities

责任编辑: 赵宇龙