

珠江流域下游 1960—2019 水沙异变诊断及其控制因素

王永红¹, 彭锦¹, 黄畅¹, 吴宏旭², 蔡斯龙², 刘锋³

(1.中国海洋大学 海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;

2.广东省水文局, 广州 510150; 3.中山大学 海洋工程与技术学院, 广东 珠海 519082)

摘要:为了阐明强人类活动下珠江流域下游水沙异变时间节点以及异变机制,通过对 1960—2019 年珠江流域下游主要水文控制站西江高要、北江石角、东江博罗,以及西江干流马口和北江干流三水站的长时序水沙数据,采用 Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法、Pettitt 检验法和双累积曲线,诊断了三江不同流域的水沙异变点,并阐明异变的主控因子。结果表明:(1) 根据以上诊断方法,可以将水沙变化分为异变和显著变化两个层级;(2) 对于流量来说,马口站流量在 1986 年发生显著变化,主要受气候控制;三水站的流量在 1991 年发生异变,主要是由于人类挖沙导致三水剖面迅速下降,经过思贤滘的分水比增大引起了径流量异变。其他站位没有发生径流显著变化以及异变;(3) 5 个站位的输沙率只有石角站没有发生异变,但是在 1999 年发生了显著变化,主要受到上游水库的建设控制。其余 4 个站位的输沙率和输沙量都发生了异变,而每个站位的异变时间和原因并不相同。高要站和马口站输沙率在 1999—2000 年发生了异变,主控制因子为上游水库和大坝的建设。北江干流的三水站和东江博罗站输沙率分别在 2003 年、1988 年发生异变,主要是由于上游水土保持造成的。综上,珠江流域下游的水沙异变主要受到人类活动控制,理解其异变机制对河口生态环境保护和可持续利用具有重要意义。

关键词:珠江流域; 水沙异变; 机制分析; Mann-Kendall 趋势分析; Pettitt 检验

中图分类号:P333.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0021-11

Abnormal Changes Diagnosis and Its Control Factors of Water and Sediment Discharge in the Lower Reaches of Pearl River Basin from 1960 to 2019

WANG Yonghong¹, PENG Jin¹, HUANG Chang¹, WU Hongxu², CAI Silong², LIU Feng³

(1.Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 2.Guangdong Bureau of Hydrology, Guangzhou 510150, China; 3.School of Marine Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai, Guangdong 519082, China)

Abstract: In order to clarify the time node and mechanism of water and sediment variability in the lower reaches of the Pearl River Basin under strong human activities, we diagnosed their variations using Mann-Kendall nonparametric rank correlation test, Pettitt test method and double cumulative curve methods based on the long-time series water and sediment discharge from 1960 to 2019 at Gaoyao, Shijiao, Boluo, Makou and Sanshui hydrological stations. The main control factors of the variation were also clarified. The results show that: (1) according to the three study methods, the variation of the water and sediment changes can be divided into two levels; abnormal and significant changes; (2) the water discharge of Makou station changed significantly in 1986, which was mainly controlled by climate change; it had the abnormal change in 1991 at the Sanshui station, which was caused by the rapid decline of its transect caused by human sand excavation, and the water discharge increased rapidly after the redistribution of diversion ratio of water discharges between Sanshui and Makou; there were no abnormal and significant changes of water discharge in other stations; (3) the sediment discharge only has significant change at the Shijiao station in 1999, which is controlled by the construction of the upstream reservoir. However, the sediments have the abnormal changes at

收稿日期:2021-06-28

修回日期:2021-07-22

资助项目:国家重点研发计划项目“基于长序列及多要素观测模型的水沙异变研究”(2016YFC0402602)

第一作者:王永红(1969—),女,山东青岛人,教授,博士生导师,主要从事海洋地质与环境方面的研究工作。E-mail:yonghongw@ouc.edu.cn

the other four stations, and the change time and reason of each station are different. The sediment discharges of Gaoyao station and Makou station changed around 1999—2000, and the main control factor is the construction of upstream reservoirs and dams. The sediment discharges of Sanshui station in the main stream of the North River and Boluo station in the East River changed in 2003 and 1988 respectively, which is mainly caused by water and soil conservation in the upper reaches. In conclusion, the variation of water and sediment discharges in the lower reaches of the Pearl River Basin is mainly controlled by human activities. Understanding its variation mechanism is of great significance to the protection and sustainable utilization of the estuarine ecological environment.

Keywords: Pearl River Basin; water and sediment variability; mechanism analysis; Mann-Kendall trend analysis; Pettitt test

随着社会经济的发展,人类活动对于河口三角洲水沙变化的影响日益增强。强人类活动导致了水沙情势的异变,引起水道的洪潮水位、径流量和输沙率以及分流比等水文要素的变化,容易造成洪水灾害以及河段冲淤逆转等,从而直接影响河口三角洲社会的可持续发展。在珠江三角洲,强烈人类活动尤为显著,例如中上游水库建设,森林砍伐,水土保持,河网采砂,口门围垦以及河道疏浚等,都会造成河口三角洲区域水沙的异变,影响大湾区的水安全。因此各个相关部门都极为重视珠江流域以及河口三角洲的水沙变化及其原因,特别是自然和人类活动贡献的定量化,以及水沙发生异变的时间节点以及控制因素。

目前的研究手段基本可以定量区分自然因素和人类活动因素对于水沙变化的影响,认为目前人类活动对于水沙变化的贡献率在 80% 以上。例如在对珠江流域 1954—2018 年的水文气象数据以及高要、石角和博罗站水沙数据分析的基础上,发现人类活动特别是大坝建设造成了 96% 的输沙量变化,而 4% 是由于气候变化^[1]。在对 1950—2000 年的气候变化和人类活动对珠江流域(西北东江)径流和泥沙进行定量计算中,发现人类活动对三江的贡献值不同,贡献值从高到低依次为西东北江,其中西江的人类活动贡献值最大为 96%^[2]。对 1956—2013 年珠江流域(西北东江)输沙率进行研究得出 2000 年后人类活动对输沙率减少作用更加显著,贡献率达到 80%^[3]。通过对高要(西江)、石角(北江)和博罗(东江)水文站 1954—2011 年的径流和输沙率的相关关系计算得出气候变化和人类活动对输沙率的贡献值,认为人类活动的贡献值从 30% 增加到 80%^[4]。

对于珠江流域以及河口三角洲水沙的阶段性变化以及影响因素也有了一定的认识,例如一些学者在对西江流域(梧州站和高要站)的输沙进行研究时发现,输沙变化的主控因素是水土保持和水利建设等人

类活动^[5],如西江流域(梧州站)输沙量可以分为两个阶段,其发生阶段性变化主要受流域大型水利枢纽工程的建设拦沙等控制因素影响^[6]。另外,有研究认为珠江流域(西北东江)输沙率分为 3 个阶段,人类活动(大坝建设)是造成输沙率变化的主要原因^[7]。在对东江流域(博罗站)的输沙量的研究中发现,其输沙变化分为 3 个阶段,其控制因素主要为水库和采砂等人类活动^[8]。三水、马口站泥沙变化分为两个阶段,其变化的控制因素主要为上游大型水库建设和森林覆盖率的提高^[9]。

对于珠江流域的水沙变化的研究还有很多,但大都集中在珠江流域和河口三角洲区域的水沙阶段性变化趋势研究。虽然也有一些研究指明水沙的异变,但是只是在某一个站位,例如只谈了西江^[10],或者马口三水等^[11]。由于珠江流域和河网的复杂性,西江、北江和东江流域的气候以及人类活动程度不同,目前还没有给出每一个江的具体水沙异变时间节点以及明确的异变机制。主要的原因是研究者使用的数据时间长度序列不一样,或者研究的水文站位比较单一,空间分布不足,分析方法也不相同,从而造成对于水沙数据分段以及异变研究结果的不一致性。本文收集珠江流域下游 5 个典型水文站的 1960—2019 年最新的水沙数据,利用水沙突变检测和双累积曲线的方法,对珠江流域和网河区的水沙情势异变分别进行判断,并且使用异变分级的方法,给出三江不同流域的水沙异变点和显著变化点,并阐明异变的主控因子。

1 试验数据与方法

1.1 水沙数据来源

本文收集了高要、石角、博罗、马口和三水 5 个典型水文站(图 1)1960—2019 年年度流量与输沙率数据,数据来源于广东省水文局(历史测量数据),中山

大学(历史保存数据)、《中国河流泥沙公报》(2003—2019 版)(<http://www.mwr.gov.cn/>)。统计年份见表 1。珠江流域主要大坝建设数据来源于中国大坝工程学会网站(<http://www.chincold.org.cn/>)。

表 1 五大水文站历史水沙统计年份

站位	经纬度	水沙统计年份
马口	112°47′47″E, 23°06′53″N	1960—2019
三水	112°49′50″E, 23°09′36″N	1960—2019
高要	112°27′13″E, 23°02′43″N	1960—2019
石角	112°56′59″E, 23°33′39″N	1960—2019
博罗	114°17′42″E, 23°09′50″N	1960—2019

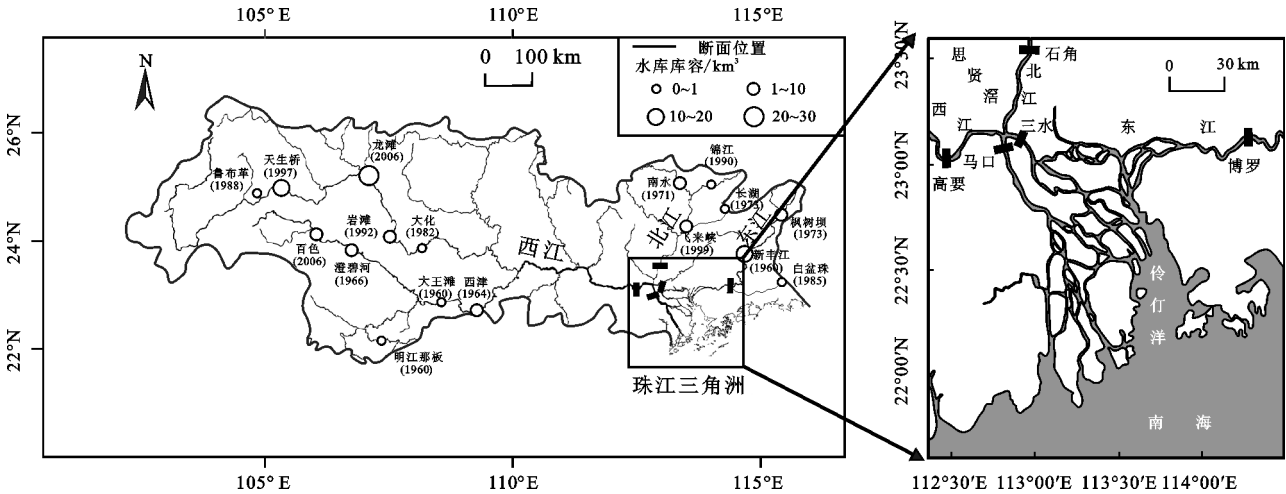


图 1 珠江流域下游 5 个典型水文站和上游水库位置

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad k=2,3,\cdots,n \tag{1}$$

其中:

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j, \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \tag{2}$$

在时间序列随机独立的假设下, S_k 的均值与方差分别为:

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \\ \text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \tag{3}$$

将 S_k 标准化为:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad k=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

式中: $UF_1=0$, 给定显著性水平 α , 若 $|UF| > U_\alpha$, 表明序列存在明显的趋势变化。将此方法引用到反序列, 序列顺序变为 $x_n, x_{n-1}, \cdots, x_1$, 反序列标准化由 UB_k 表示, UB_k, UF_k 可组成两条曲线, 在这里临界值 $U_{0.05}$ 为 ± 1.96 , 设定 α 值为 0.05。当 UB_k, UF_k 两条曲线出现交点, 则交点处可能是变化点^[11]。

1.2.2 Pettitt 检验法 Pettitt 检验法依据长时间序列趋势性的变化为基础, 确定序列突变点。假设序长

1.2 分析方法

1.2.1 Mann-Kendall 检验法 M-K 趋势分析法 (Mann-Kendall 检验法) 是一种非参数统计检验方法, 其优点是样本不需要遵循一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 更适用于类型变量与顺序变量, 计算也比较简便, 最初由曼和肯德尔提出原理并发展了这一方法。现已成为世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法, 适用于水文、气象等非正态分布的数据。其计算公式如公式(1—4), 设长时间序列(流量、输沙率)为 x_1, x_2, \cdots, x_n ; S_k 表示第 i 个样本 $x_i > x_j$ ($1 \leq j \leq i$) 的累计数:

度为 T , 变化点为 t , 把假设序列划分为前后两段, 即两样本为 x_1, x_2, \cdots, x_t 和 $x_{t+1}, x_{t+2}, \cdots, x_T$, Pettitt 突变检验的本质是检验序列中的两个样本是否来自于同一个样本的 Mann-Whitney 统计量。

统计量 U_t 的计算公式为:

$$U_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \text{if}(X_i - X_j) > 0 \quad & \text{sgn}(X_i - X_j) = 1 \\ \text{if}(X_i - X_j) = 0 \quad & \text{sgn}(X_i - X_j) = 0 \\ \text{if}(X_i - X_j) < 0 \quad & \text{sgn}(X_i - X_j) = -1 \end{aligned} \tag{6}$$

在检验序列时, 根据顺序统计量理论引用了 K-S 两样本检验, 检验两个样本累积分布函数的最大差值而求得的累积概率为 P , 即突变点位置。

$$K_t = \max_{1 \leq i \leq T} |U_t| \tag{7}$$

$$P(k_t \leq a) = [-\ln a (N^3 + N^2) / 6]^{1/2} \tag{8}$$

如果累积概率越接近于 1, 说明存在突变点的趋势越显著; 令 α 为置信度, 若 $p > P_\alpha$, 则突变点趋势显著。当 $\alpha < 0.5$ 时, 表示存在有效突变点; 当 $\alpha < 0.05$ 时, 表示存在显著突变点; 当 $\alpha < 0.01$ 时, 表示存在极显著突变点^[12-13]。

1.2.3 判别水沙异变的程度 本研究根据 Mann-

Kendall 检验和 Pettitt 检验的结果,对水沙变化程度进行层级划分。(1) 当 Mann-Kendall 检验的 UF 曲线超过置信度区间且在 0.05 显著水平内与 UB 曲线交点,此时 Pettitt 检验曲线超过 0.01 显著水平线时定义为异变点;(2) 当 Mann-Kendall 检验的 UF 曲线在置信度区间且在 0.05 显著水平内与 UB 曲线交点,同时 Pettitt 检验曲线仅超过 0.5 显著水平线时定义为显著变化点;(3) 当 Mann-Kendall 检验的 UF 曲线在置信度区间且在 0.05 显著水平内与 UB 曲线交点,同时 Pettitt 检验曲线未超过 0.5 显著水平线时只表示为一般趋势性变化点。本文结合水沙比(流量与输沙率的比值, m^3/kg)和水沙双累积曲线的变化趋势,重点分析水沙的异变点和显著变化点。

2 结果与分析

根据 Mann-Kendall 检验、Pettitt 检验以及双累积曲线的方法,对西江的高要站和马口站、北江的石角和三水站,以及东江的博罗站进行了异变点和显著变化点的确定(图 2,表 2)。异变点表明此点前后水沙发生了异变,显著变化点前后表明水沙发生了显著的变化,但不是异变(表 2)。

2.1 西江高要站和干流马口站水沙异变的主控因子

根据西江高要站径流量的 Mann-Kendall 检验和 Pettitt 检验,Mann-Kendall 检验中 UF 曲线在置信度区间且在 0.05 显著水平内与 UB 曲线有交点,同时 Pettitt 检验曲线未超过 0.5 显著水平线,因此可以认为高要站的流量没有异变点(图 2)。多年的径流量变化范围为 $3\,367\sim 10\,198\text{ m}^3/\text{s}$,平均值为 $6\,912\text{ m}^3/\text{s}$ (图 3,表 3)。西江高要站输沙率 Mann-Kendall 检验显示 UF 曲线超过置信度区间,且在 0.05 显著水平内与 UB 曲线交点,表明其异变点为 2001 年。Pettitt 高要站输沙率检验曲线超过 0.01 显著水平线,确定的异变点为 2000 年。结合输沙率过程图发现在 2000 年后输沙率开始进入一个新阶段,因此判断 2000 年为西江水沙异变点(图 3,表 3)。异变发生之前,1960—2000 年的输沙率变化范围为 $521\sim 4\,167\text{ kg/s}$,平均值为 $2\,249\text{ kg/s}$,水沙比为 $3.4\text{ m}^3/\text{kg}$ (表 3)。异变之后 2000—2019 年的输沙率变化范围为 $255\sim 1\,823\text{ kg/s}$,平均值为 764 kg/s ,水沙比为 $11\text{ m}^3/\text{kg}$ 。异变之后输沙率约为异变前的三分之一。说明输沙率在量级上已经发生了根本的变化。从双累积曲线也可看出在 2000 年前后斜率发生明显变化,斜率从 0.33 变为 0.10(表 3)。

高要站在 2000 年前后发生异变的主要原因是西江上游水库的建设。1960—2000 年,输沙率变化不

大,主要受到气候的控制。在 1960—1985 年,气候和人类活动贡献值分别为 83% 和 17%^[2],此时输沙率由于森林大量砍伐导致流域水土流失加剧而增大。此时广西的水土流失面积在 20 世纪 50—60 年代为 $12\,000\text{ km}^2$,而 80 年代为 $30\,600\text{ km}^2$,是 50—60 年代的近 3 倍。而同期广东省水土流失面积则从 $7\,444\text{ km}^2$ 增加到了 $17\,070\text{ km}^2$,是原来的约 2.3 倍^[14-15]。由于西江流域在广西境内集水面积共计 20.24 万 km^2 ,占全流域集水面积的 85.7%,因此广西壮族自治区和广东省的水土流失面积增加,使得高要站泥沙含量呈现上升趋势。

而在 1985—2000 年,人类活动开始增强,但输沙率仍然以气候控制为主。气候和人类活动贡献值分别为 63% 和 37%^[2]。此阶段水土流失程度减弱,广西壮族自治区 20 世纪 90 年代的水土流失面积为 $28\,100\text{ km}^2$,比 80 年代下降了 8.2%,变化不大^[14-15]。相反此时水库大坝的影响增强,1985—2000 年,西江上游主要修建的水库为鲁布革水库、岩滩水库和天生桥水库(表 4,图 1)。1992 年岩滩水库建成后高要站输沙率则由 1981—1991 年的 $7\,658\text{ 万 t/a}$ 降到了 1992—2002 年的 $6\,310\text{ 万 t/a}$,降低了 18%^[16-17]。岩滩水库的泥沙沉积速率为 35 Mt/a ,高要站的泥沙量减少了 10 Mt/a ^[18]。因此可以看出岩滩水库对于泥沙减少起到重要的调节作用^[17]。不过岩滩水库库容较少,因此对于泥沙的调节作用仍然有限,没有 1992 年前后引起输沙率的异变。

2000—2019 年,虽然前期岩滩水库调节作用有限,但在 1997 年建成的天生桥水库的库容量是岩滩水库的 3 倍多(表 4),建成后经过一定时间的蓄水和拦沙过程,导致 2000 年后的输沙率大幅下降,致使输沙率发生异变,之后在水库的调节作用下,输沙率保持稳定波动。其中天峨站(岩滩水库上游 150 km 处的一个水文站)在天生桥水库建成后的输沙量减少了 30 Mt/a ,发生了较大的变化,也可以帮助说明天生桥水库的巨大调节作用^[17]。值得注意的是 2006 年在西江上游建设了更大型的龙滩水库(表 4,图 1),其库容量约为天生桥水库的 2.5 倍。水库建成后使得 2006—2019 年输沙减小之后保持基本稳定(图 3),但是并没有引起输沙率的异变。这是因为天生桥水库位于西江上游(图 1),而龙滩水库位于天生桥水库下游,天生桥水库已经拦截大部分泥沙,从而导致在 2000 年输沙率发生异变,而龙滩水库库容量大,但建成后对下游的输沙影响不如天生桥水库,没有引起输沙率发生异变。

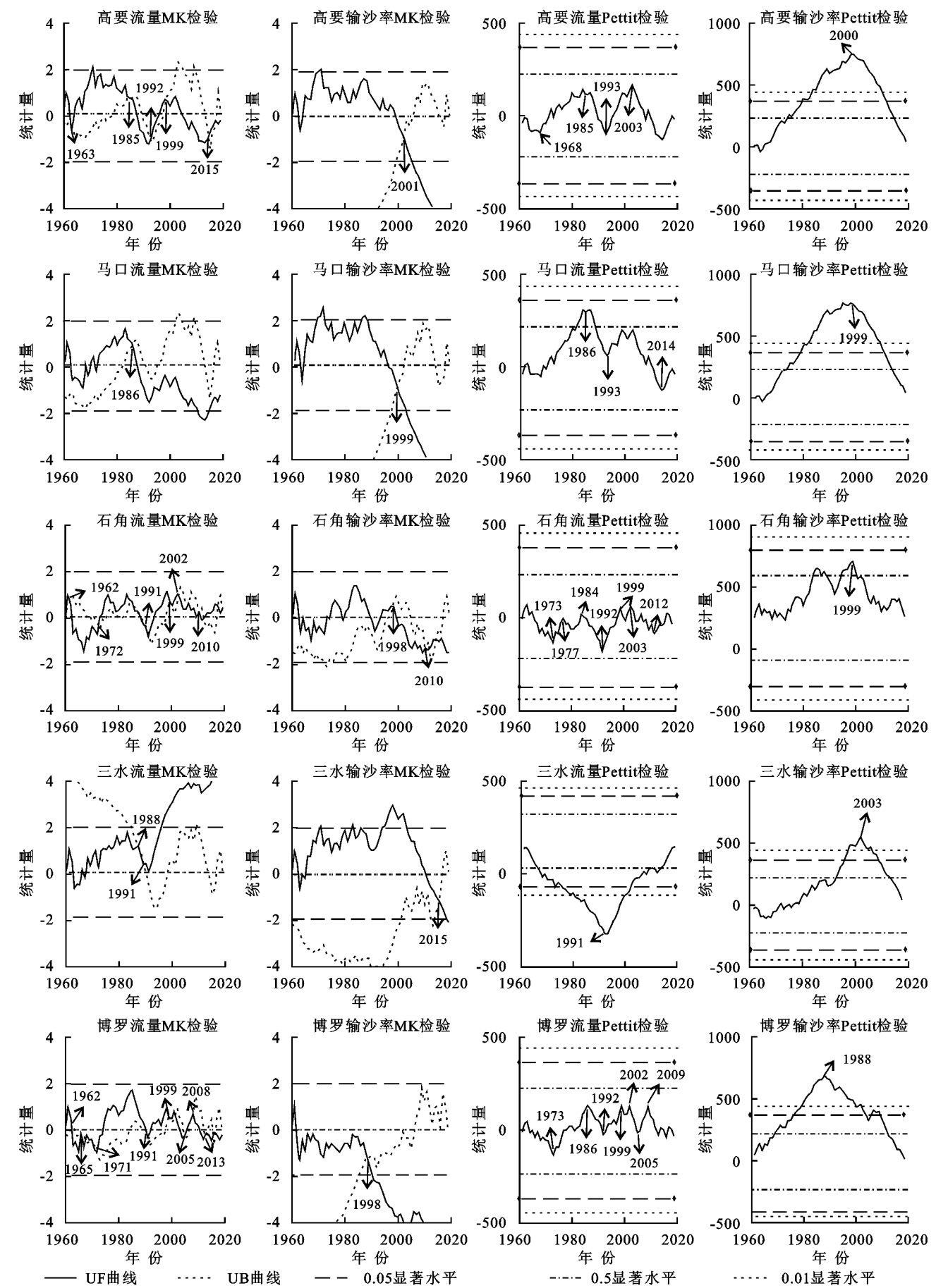


图2 1960—2019年珠江流域五站位年流量与年输沙率 MK 检验和 Pettitt 检验

表 2 珠江流域五站点异变的判定

流域	站名	检验	径流量发生趋势变化的年份							输沙率发生趋势变化的年份				异变年份
西江	高要	MK	1963	—	1985	1992	1999	—	2015	—	—	2001	—	2000
		Pettitt	1968	—	1985	1993	—	2003	—	—	—	2000	—	
	马口	MK	—	—	1986	—	—	—	—	—	—	1999	—	1999
		Pettitt	—	—	1986	1993	—	—	2014	—	—	1999	—	
北江	石角	MK	1962	1972	—	1991	1999	2002	2010	—	—	1998	2010	无
		Pettitt	—	1973	1984	1992	1999	2003	2012	—	—	1999	—	
				1977										
东江	三水	MK	—	—	—	1988	—	—	—	—	—	—	2015	1991
						1991								2003
	博罗	Pettitt	—	—	—	1991	—	—	—	—	—	2003	—	
		MK	1962	1971	—	1991	1999	2005	2008	—	1988	—	—	1988
			1965						2013					
		Pettitt	—	1973	1986	1992	—	2002	2009	—	1988	—	—	
								2005						

注：—表示无数据。字体下方实线表示异变年份，字体下方虚线表示显著变化年份。

输沙率异变后森林覆盖面积持续上升,例如广西壮族自治区森林覆盖率由 2000 年的 39% 增长到 2005 年的 53%^[11],因此水土保持使得输沙率持续小幅度降低。另外,1995—2014 年高要站附近也发生了挖沙的行为^[19],也对输沙率减少起到一定的作用。此阶段人类活动的贡献值大幅上升,气候和人类活动贡献值分别为 4% 和 96%^[2]。

据马口站流量的 Mann-Kendall 检验和 Pettitt 检验,发现在 1986 年 Mann-Kendall 检验的 UF 曲线在置信度区间且在 0.05 显著水平内与 UB 曲线交点,同时 Pettitt 检验曲线仅超过 0.5 显著水平线,因此可以认为马口站的流量在 1986 年存在显著变化点(图 2)。1960—1986 年的流量变化范围为 3 818~9 978 m³/s,平均值为 7 498 m³/s,水沙比为 3.3 m³/kg,水沙变化的相关系数为 0.52。双累积曲线斜率为 0.33。显著变化之后 1986—2019 年的流量变化范围为 4 403~9 602 m³/s,平均值为 6 777 m³/s,较异变前减少 9.6%。水沙比为 8.0 m³/kg,水沙变化的相关系数为 0.08,双累积曲线斜率为 0.17(表 3)。马口在 1986 年发生的径流显著变化,1986 年初期发生的径流量变化和当时剧烈的气候动荡变化有关^[4]。

西江马口站输沙率的 Mann-Kendall 检验线在 0.05 显著水平之外,显示的异变点为 1999 年;Pettitt 检验线 0.01 显著水平线之外,异变点为 1999 年。因此判断 1999 年为西江干流马口站水沙异变点(图 3)。异变发生之前,1960—1999 年的输沙率变化范围为 506~4 186 kg/s,平均值为 2 306 kg/s,水沙比为 3.5 m³/kg,水沙变化的相关系数为 0.36(表 3)。异变之后 1999—2019 年的输沙率变化范围为 202~

1 680 kg/s,平均值为 745 kg/s,水沙比为 10.8 m³/kg,水沙变化的相关系数为 0.46,输沙率约为异变前的三分之一。从双累积曲线可看出在 1999 年前后斜率发生明显变化,斜率为从 0.34 变为 0.10(表 3)。因此马口站的水沙变化基本和高要站相似。其不同阶段输沙异变的原因也和高要站一致。因此马口的输沙率异变主要受到上游水库的建设诱发。不过马口站的输沙率异变的时间略微早于高要站,可能和马口站和三水站的水流分水比在 1988—1997 年期间的显著变化有关^[11]。马口站的采砂活动主要集中在 1995—2006 年^[19],因此采砂会对输沙率有一定的影响,但并不是主要因素。

2.2 北江的石角站和干流三水站水沙异变和主控因子

根据径流和输沙率异变和显著变化的诊断标准,和高要以及马口站的判别方式一样,确定北江石角站径流量没有异变点。多年的径流量变化范围为 515~2 280 m³/s,平均值为 1 335 m³/s(图 3)。石角站输沙率没有异变点,但是存在显著变化点,结合输沙率过程图发现在 1999 年后输沙率开始进入一个新阶段,因此判断 1999 年为北江石角输沙率显著变化点(图 3,表 3)。1960—1999 年,输沙率整体平稳,呈现上升趋势,输沙率平均值为 190 kg/s,水沙比为 7.9 m³/kg,水沙变化的相关系数为 0.68,双累积曲线斜率为 0.15(表 3)。1965 年之前,几乎不受人类活动影响,气候贡献 90%,人类活动贡献 10%^[2]。该阶段降雨量减少,造成径流量和输沙率的降低^[2]。1965 年后人类活动逐渐增强。例如 1971 年修建的南水水库,库容量约为 12 亿 m³(表 4),引起了随后的输沙率的急剧减少(图 2)。

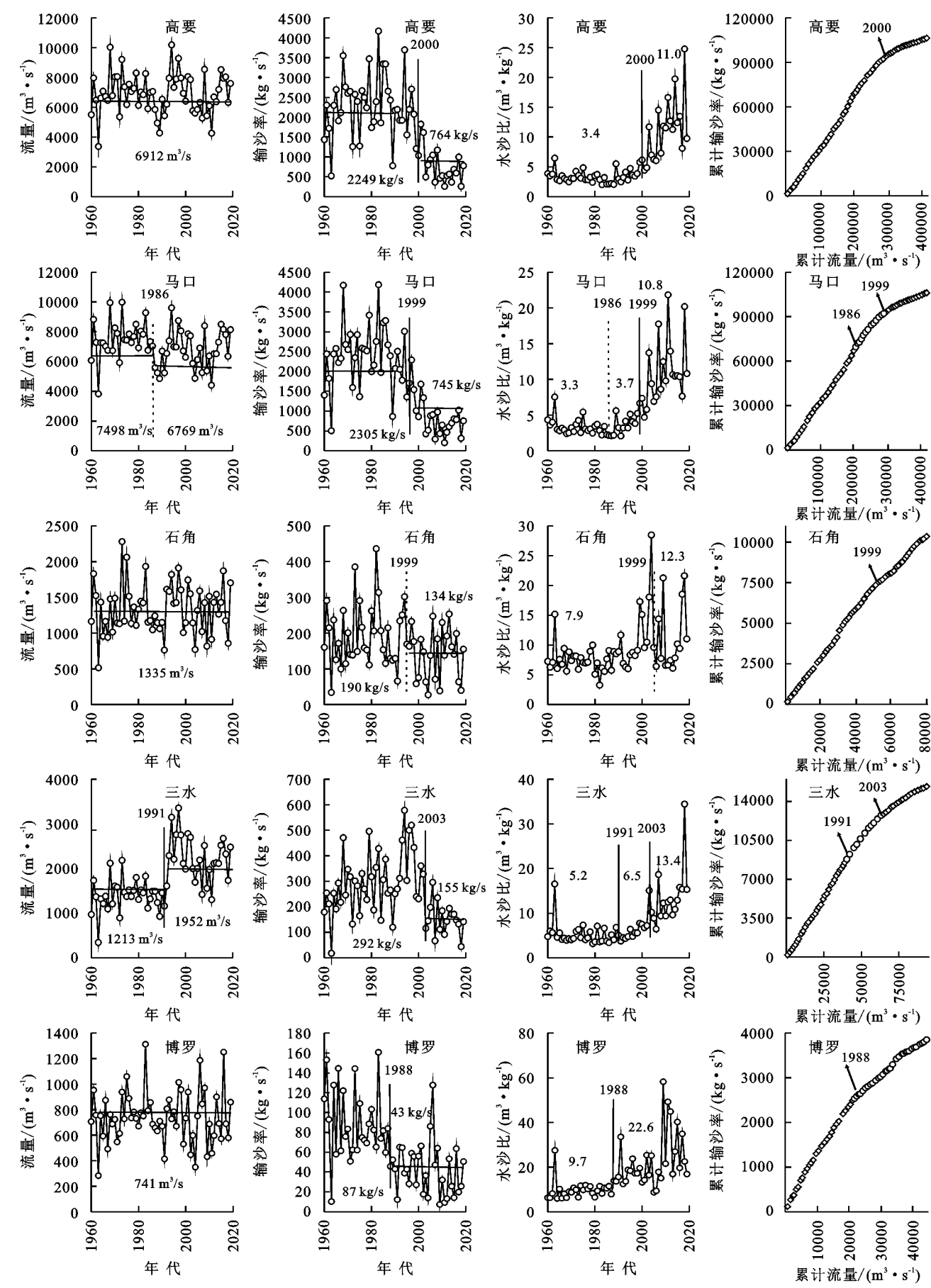


图3 1960—2019年珠江五站位年流量与年输沙率异变分析

表 3 珠江流域五站位流量与输沙率之间的相关关系

站位	年代	平均流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	变化 幅度	平均输沙率/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	变化 幅度	水沙比/ ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	相关 系数	双累积曲线 斜率
高要	1960—2000	/	/	2249	/	3.4	$R^2=0.47$	0.34
	2000—2019	/	/	764	−66.0%	11.0	$R^2=0.31$	0.10
马口	1960—1986	7498	/	/	/	3.3	$R^2=0.52$	0.33
	1986—2019	6777	−9.6%	/	/	8.0	$R^2=0.08$	0.17
	1960—1999	/	/	2306	/	3.5	$R^2=0.36$	0.34
	1999—2019	/	/	745	−67.7%	10.8	$R^2=0.46$	0.10
石角	1960—1999	/	/	190	/	7.9	$R^2=0.68$	0.15
	1999—2019	/	/	134	−29.5%	12.3	$R^2=0.67$	0.11
	1960—1991	1213	/	/	/	5.2	$R^2=0.61$	0.22
三水	1991—2019	1952	60.9%	/	/	10.5	$R^2=0.44$	0.12
	1960—2003	/	/	292	/	5.6	$R^2=0.56$	0.21
	2003—2019	/	/	155	−46.9%	13.4	$R^2=0.30$	0.09
博罗	1960—1988	/	/	87	/	9.7	$R^2=0.60$	0.11
	1988—2019	/	/	43	−50.6%	22.6	$R^2=0.68$	0.06

注：变化幅度均以第一阶段为参照；/表示第一阶段。

表 4 珠江流域较大规模水库建设情况

流域	水库名称	库容量/(10^8 m^3)	建成年份
西江	大王滩	5.85	1960
	明江那板	7.02	1960
	西津	30.00	1964
	澄碧河	11.30	1966
	大化	9.64	1982
	鲁布革	1.11	1988
	岩滩	33.80	1992
	天生桥	108.00	1997
	百色	56.00	2006
	龙滩	273.00	2006
北江	南水	12.43	1971
	长湖	1.49	1973
	锦江	1.90	1990
	飞来峡	19.50	1999
东江	新丰江	138.96	1962
	枫树坝	19.40	1973
	白盆珠	12.20	1985

虽然继续有水库的建设,但是水库库容量都小于 2 亿 m^3 ,对泥沙的拦截作用有限。同时森林砍伐引起的水土流失作用超过了水库拦沙的影响^[11],覆盖北江流域的广东省水土流失面积从 20 世纪 50—60 年代的 7 444 km^2 增加到了 80 年代的 17 070 km^2 ,增加了 1.3 倍^[14-15],比 1950s 初期增加了 2 倍多^[9],使得河口三角洲区域输沙率增加。而水库的建设所拦截的泥沙量小于水土流失的量,因此泥沙含量呈现

上升趋势。1985—1993 年珠江的降雨量、径流量和输沙率处于剧烈的减小阶段^[4],本阶段输沙率受到气候影响的贡献大致为 88%,人类活动影响的贡献为 12%^[2]。因而输沙率在该阶段前期呈下降趋势,但是输沙率在此阶段后期(1989 年)呈现一定上升,主要还是受到气候和径流的控制。

1999—2019 年,在 1999 年建设的飞来峡大坝(库容约为 20 亿 m^3),造成了石角站输沙率的显著变化,这一阶段的平均输沙率为 134 kg/s ,水沙比为 12.3 m^3/kg ,水沙变化的相关系数为 0.67,双累积曲线斜率为 0.11(表 3)。因此 1999 年的水库建设造成了石角输沙率的显著变化。本阶段气候贡献为 36%,人类活动贡献为 64%^[2]。这一阶段国家水土保持政策使得森林覆盖面积有一定增长,20 世纪 80 年代中期开始,在国家水土保持政策的引导下,北江森林覆盖率有一定的提高,北江区域面积为 4.8 万 km^2 ,森林覆盖率由 20 世纪 80 年代 3.5 万 km^2 增加到 20 世纪 90 年代 3.7 万 km^2 ,森林覆盖率由 73%上升为 77%^[7],上升速度并不快,因此水土流失得到一定控制,对输沙率的减少有一定的作用,但不是主控因子。另外,石角站从 2003—2014 年有持续的挖沙活动,也对输沙率的减小有一定贡献。虽然水沙存在显著性变化,但是不是异变,水沙相关性一直相对较好。

根据异变和显著变化的诊断标准,北江干流三水站径流量的异变点为 1991 年。异变发生之前,1960—1991 年的流量变化范围为 298~1 910 m^3/s ,平均值为 1 213 m^3/s 。异变之后 1991—2019 年的流量变化范围

为 $1\,139\sim 2\,938\text{ m}^3/\text{s}$, 平均值为 $1\,952\text{ m}^3/\text{s}$, 较异变前增加 61%。水沙比为原来的 2 倍, 水沙变化的相关系数变差, 双累积曲线斜率减小(表 3)。

北江三水站异变点为 2003 年(图 2)。异变发生之前, 1960—2003 年输沙率变化范围为 $18\sim 578\text{ kg/s}$, 平均值为 292 kg/s (表 3)。异变之后 2003—2019 年的输沙率变化范围为 $44\sim 296\text{ kg/s}$, 平均值为 155 kg/s , 水沙比为原来的 2.3 倍, 水沙变化的相关性变差。泥沙量约为异变前的二分之一, 说明输沙率在量级上已经发生了根本的变化。从双累积曲线可看出在 1991 年和 2003 年前后斜率发生显著变化, 斜率从 0.21 变为 0.09(表 3)。

虽然三水站主要的径流来自北江, 但是其异变现象并不和石角站一致, 石角站径流量并不存在异变点和显著变化点。三水站 1991 年前径流量基本保持稳定, 径流量突然增加的原因是由于三水站在 1989—2006 年发生了大量的采砂活动^[19], 而北江河网区的采砂量远远大于西江网河区, 致使北江河网区的河床出现大量下切, 导致三水站分流比升高, 更多的径流流入到三水站, 引起了径流量的突然增大, 是以前的 1.6 倍, 因而发生异变。而此时我们发现马口站并没有同时发生径流异变, 主要是因为马口站的径流量较大, 例如 20 世纪 80 年代之后, 马口站年径流量减少 12%, 而三水站年径流量增加 54%^[11], 因此由于和三水站分水分沙引起的变化量并不足以使得马口站产生径流量的异变。

同样, 三水站的输沙率并不和径流量异变时间一致, 而是在 2003 年发生异变, 1960—2003 年水沙变化的相关系数为 0.56, 异变后 2003—2019 年水沙相关性变差, 相关系数为 0.30(表 3)。这是因为虽然在三水站附近的挖沙活动集中于 1989—2006 年^[19], 加上 1999 年的飞来峡水库, 实际上已经造成了三水站输沙率的持续降低, 但三水站的输沙率在 1999—2003 年仍然保持一定的水平(图 3)。而 2003 年, 三水站的输沙率有了断崖式下降, 并且在 2003 年之后输沙率都在较低水平震荡, 说明 2003 年后的异变主要是这段时间的上游来沙量减少所致。2000 年左右, 广东省将水土保持面上资金纳入省财政专项, 每年固定投入 1 500 万元。近几年来, 广东省每年综合治理水土流失面积约 400 km^2 ^[20]。根据时间点变化, 判断上游的水土保持是三水站输沙率发生异变的主要原因。另外 2003—2004 年遭遇极其干旱的天气, 降雨量只有 $1\,423\sim 1\,315\text{ mm}$, 邻近的 2001 年、2002 年、2005

年、2006 年的降雨量都在 $1\,766\sim 2\,110\text{ mm}$ ^[21], 加剧了上游来沙量的减少。

2.3 东江博罗站的水沙异变和主控因子

根据异变和显著变化的诊断标准, 东江博罗站径流量不存在异变点。多年的流量变化范围为 $284\sim 1\,313\text{ m}^3/\text{s}$, 平均值为 $741\text{ m}^3/\text{s}$, 水沙比为 $16.4\text{ m}^3/\text{kg}$ 。东江博罗利用输沙率异变点为 1988 年(图 2)。异变发生之前, 1960—1988 年的输沙率变化范围为 $10\sim 161\text{ kg/s}$, 平均值为 87 kg/s , 水沙比为 $9.7\text{ m}^3/\text{kg}$ 。异变之后 1988—2019 年的输沙率变化范围为 $7\sim 128\text{ kg/s}$, 平均值为 43 kg/s , 水沙比为 $22.6\text{ m}^3/\text{kg}$ 。泥沙量约为异变前的二分之一。说明输沙率在量级上已经发生了根本的变化。从双累积曲线可看出在 1988 年前后斜率发生显著变化, 斜率从 0.11 变为 0.06(表 3)。

输沙率异变之前的 1960—1988 年, 此阶段输沙率变化较为平稳, 输沙率有略微下降。水沙变化的相关系数为 0.60(表 3)。此阶段主要由人类活动主导, 人类活动的贡献为 89%^[2]。河流输沙随着流域水库累计库容的增加而减少。主要受到上游新丰江水库(1962 年)、枫树坝水库(1973 年)和白盆珠水库(1985 年)的影响(表 4)。3 个水库的共同作用下虽然使输沙率减小, 但是总的库容量并不大, 对于白盆珠水库来说, 其多年平均流量为 $37.5\text{ m}^3/\text{s}$, 而博罗站本身径流量为 $741\text{ m}^3/\text{s}$, 远远大于其调节流量^[22-23]。从输沙率的变化过程图来看(图 3), 输沙率在 2004—2006 年较高, 也可以证明水库的调节作用有限, 因此水库建设对于博罗站输沙率异变影响不大, 不是异变的主要原因。而在 1988 年后, 1988—2003 年人类活动的贡献为从 89%降为 75%^[2]。在国家水土保持政策引导, 大范围的治山治水、开发“四荒”以及退耕还林, 水土流失得到较好控制。自 20 世纪 90 年代以来, 共治理东江中上游水土流失区域 961.3 km^2 , 植被覆盖率从治理前的 30%提高到 65%, 入河泥沙则从治理前 $800\sim 1\,000\text{ 万 t/a}$ 降到 $350\sim 400\text{ 万 t/a}$ ^[23]。2000 年左右, 广东省每年综合治理水土流失面积约 400 km^2 ^[20]。此阶段并没有大型水库建设, 根据时间点变化, 水土保持是造成博罗站的径流量的异变的主要控制因素。由于在博罗站附近 1998—2008 年阶段才有大规模持续的挖沙行为^[19], 特别是 2002—2005 年间, 新角水闸—谭公庙河段(博罗站上游)河床采砂量高达 $1\,800\text{ 万 m}^3$, 河床平均下切 5.7 m; 受此影响博罗站同流量级水位下降严重, 潮汐动力显著增强^[24], 但博罗站的输沙率在 1988 年就已经发生了异变, 因此挖沙对博罗站输沙率发生异变的影响很小。

3 讨论

从研究结果看,长序列的最新的水沙数据,以及对前人大量的工作成果总结,更加全面准确地认识珠江流域以及河口三角洲发生的水沙异变及其原因,基本解决了由于数据时间长度序列不一样、站位不同以及分析方法不同造成的计算和判别结果不一致的问题。特别是西江和北江及其干流、以及东江的同步数据分析,更加清晰地理解这些地区的水沙异变的时空变化及其原因。

水沙异变主要是在径流量和输沙率持续变化后由于大型的事件导致两者发生了数量上本质性的改变,除了三水的径流量发生异变后径流量大幅上升,异变后径流量平均值是异变前的1.6倍,其他各站径流量保持平稳。各站的输沙率发生异变或者显著变化后普遍减少,例如高要站和马口站输沙率发生异变后,输沙率只有异变之前的三分之一。三水和博罗站发生异变后,输沙率只有异变之前的二分之一。

近70 a来,珠江流域和河口三角洲的径流量除了个别站位,基本仍然受到气候的控制,而泥沙则受到人类活动的控制,上游水库建设、水土保持、以及河网区挖沙仍然是影响不同流域河流泥沙异变的主要原因。不过在珠江流域及河口三角洲区域,三江及其干流的水沙异变情势并不相同。在西江高要、北江石角、东江博罗,以及西江干流马口和北江干流三水,只有三水站的径流在1991年发生异变,主要是由于人类挖沙导致三水河槽剖面迅速下降,经过思贤滘的分水比增大引起了径流量异变。这和前人根据1954—2011年径流量和输沙率的数据确定三水站径流1990年发生突变相差不大^[11]。但是前人认为马口站在2002年前后径流量减少12%,发生异变,但本文根据判别标准,认为这种量级的变化并不构成异变,因此马口站径流只有显著变化,并没有发生异变,主要是因为马口站的径流量大,减少的水量不至于引起其异变。

5个站位有4个站位的输沙率量发生了异变,而每个站位的异变时间和原因并不相同。高要站和马口站在2000年和1999年发生了输沙率的异变,主控制因子为上游水库和大坝的建设。这与前人的研究结果相差不大。例如在西江流域(梧州站)以1960—2015年年输沙量为研究对象,采用R/S法和Mann-Kendall检验法分析确定2000年为异变点^[6]。对西江高要站1957—2016年的输沙数据通过滑动T检

验、有序聚类法和累积距平法综合判断西江高要站输沙量的异变点为1999年^[25]。

北江干流的三水站和东江博罗站的输沙率分别在2003年和1988年发生异变,主要是由于三水站附近挖沙以及东江上游水土保持造成的。只有石角站没有发生异变,但是在1999年发生了显著变化,1999年的显著减小是由于上游大坝的建设引起的。前人根据1957—2000年输沙量计算确立了石角站1982年为输沙量的明显变化点^[25],而1983年和1993年为两个水沙变化节点^[5],认为其主要控制因素是采砂活动和水库建设,和本文的研究结果有所差异,这些节点只能是一般趋势性变化节点。前人研究表明博罗站输沙量(1954—2011年)在20世纪80年代以来下降是一突变现象,并确定1984年前后输沙量发生异变,异变后输沙量减少46%^[11],这与本文结果相差不大。

另外,马口三水的径流量和输沙率的异变和其分流分沙比的异变并不相同。前人研究表明由于北江下游河道下切幅度大于西江河道下切幅度,使马口三水站分流比于1988年发生异变、分沙比1992年发生异变^[11]。不过三水的径流量异变发生在1991年,而输沙率异变发生在2003年。因此径流量发生异变是在马口三水的分流比异变后发生,主要和挖沙导致的河道下切有关。但是输沙率在2003年发生异变,却和分沙比1992年的异变没有关联,因为三水站输沙率的变化主要受到上游水土保持的剧烈变化有关,其分沙比引起的输沙率变化还不足以引起异变。

4 结论

(1) 根据Mann-Kendall检验法和Pettitt检验法两种诊断方法,将水沙变化分为异变和显著变化两个层级。当Mann-Kendall检验的UF曲线超过置信度区间且在0.05显著水平内与UB曲线交点,此时Pettitt检验曲线超过0.01显著水平线时定义为异变点。而当Mann-Kendall检验的UF曲线在置信度区间且在0.05显著水平内与UB曲线交点,同时Pettitt检验曲线仅超过0.5显著水平线时定义为显著变化点。

(2) 对于流量来说,马口站流量在1986年发生显著变化,主要受气候控制;显著变化前水沙比为 $3.3 \text{ m}^3/\text{kg}$,显著变化后水沙比为 $8.0 \text{ m}^3/\text{kg}$,水沙相关系数从0.52变为0.08;双累积曲线斜率也从0.33变为0.17。三水站的流量在1991年发生异变,异变后径流量较异变前增加61%,主要是由于人类挖沙导致

三水剖面迅速下降,经过思贤滘的分水比增大引起了径流量异变。异变前水沙比为 $5.2 \text{ m}^3/\text{kg}$,异变后水沙比为 $10.5 \text{ m}^3/\text{kg}$,水沙相关系数从 0.61 变为 0.44;双累积曲线斜率也从 0.22 变为 0.12。其他站位没有发生径流异变以及显著变化;

(3) 5 个站位的输沙量只有石角站没有发生异变,但是在 1999 年发生了显著变化;石角站发生输沙率显著变化后,较第一阶段减少 29.5%。水沙比从 $7.9 \text{ m}^3/\text{kg}$ 变为 $12.3 \text{ m}^3/\text{kg}$;双累积曲线斜率从 0.15 变为 0.11。受到上游水库的建设控制。

(4) 除石角外,其余 4 个站位的输沙率量都发生了异变,而每个站位的异变时间和原因并不相同。高要站和马口站在 1999—2000 年发生了输沙率的异变,输沙率只有异变之前的三分之一,异变前后两站水沙比变化幅度相似,从 $3.4 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{kg}$ 异变为 $11.0 \sim 10.8 \text{ m}^3/\text{kg}$;双累积曲线斜率两站变化幅度相同从 0.34 变为 0.10,主要受到上游水库和大坝的建设控制。北江干流的三水站和东江博罗站的输沙率分别在 2003 年和 1988 年发生异变,主要是由于上游水土保持造成的。异变后输沙率只有异变之前的二分之一,异变前后两站水沙比变化幅度相似,从 $5.6 \sim 9.7 \text{ m}^3/\text{kg}$ 异变为 $13.4 \sim 22.6 \text{ m}^3/\text{kg}$;双累积曲线斜率也从 0.11~0.21 变为 0.06~0.09。

参考文献:

- [1] Wei X, Cai S, Ni P, et al. Impacts of climate change and human activities on the water discharge and sediment load of the Pearl River, southern China[J]. Scientific Reports, 2020,10(1):1-11.
- [2] Wu C S, Ji C C, Shi B W, et al. The impact of climate change and human activities on streamflow and sediment load in the Pearl River basin[J]. International Journal of Sediment Research, 2019,34(4):307-321.
- [3] 田清.近 60 年来气候变化和人类活动对黄河、长江、珠江水沙通量影响的研究[D].上海:华东师范大学,2016.
- [4] 吴创收,杨世伦,黄世昌,等.1954—2011 年珠江入海水沙通量变化的多尺度分析[J].地理学报,2014,69(3):422-432.
- [5] 赖天程,张强,陈永勤.1960—2010 年西江流域水沙变化特征及其成因[J].武汉大学学报:理学版,2015,61(3):271-278.
- [6] 许景锋,尹开霞,易灵,等.近 60 年来西江流域年输沙量变化特征分析[J].人民珠江,2019,40(2):96-100.
- [7] Tan C, Huang B H, Liu K S, et al. Using the wavelet transform to detect temporal variations in hydrological processes in the Pearl River, China[J]. Quaternary International, 2016,440:52-63.
- [8] 刘成,何耘,刘桢.河流输沙量变化的主要驱动因素[J].水利水电科技进展,2017,37(1):1-7.
- [9] 杜文印.珠江三角洲近 30 年水沙分配变化分析[J].广东水利水电,2012(6):5-9.
- [10] 万家全.西江流域干流近年水沙变化特征[J].水运工程,2020(6):120-129.
- [11] 倪培桐,闻平,刘剑宇.珠江三角洲水沙年际变化趋势分析[J].人民珠江,2016,37(1):19-24.
- [12] 刘嘉琦,龚政,张长宽.重大水利工程运用对长江入海径流量的影响[J].水道港口,2013,34(6):461-466.
- [13] 田小靖,赵广举,穆兴民,等.水文序列突变点识别方法比较研究[J].泥沙研究,2019,44(2):33-40.
- [14] 夏汉平.论长江与珠江流域的水灾、水土流失及植被生态恢复工程[J].热带地理,1999,19(2):124-129.
- [15] 潘靖海.广西水土保持工作的回顾与展望[J].广西水利水电,2004(B11):47-49.
- [16] 覃杰,钟华昌.岩滩水库泥沙淤积分析[J].红水河,2003(B12):68-73.
- [17] 戴仕宝,杨世伦,蔡爱民.51 年来珠江流域输沙量的变化[J].地理学报,2007,4(5):545-554.
- [18] Wu C S, Yang S L, Lei Y P. Quantifying the anthropogenic and climatic impacts on water discharge and sediment load in the Pearl River (Zhujiang), China (1954—2009) [J]. Journal of Hydrology, 2012,452:190-204.
- [19] Wang Y H, Cai S L, Yang Y D, et al. Morphological consequences of upstream water and sediment changes and estuarine engineering activities in Pearl River Estuary channels over the last 50 years[J]. Science of the Total Environment, 2021,765,144172.
- [20] 刘树锋.广东省水土保持公报(第一期)[R].广州:广东省水土保持处,2013.
- [21] 林旭钿.广东省水资源公报 2001—2006 年[R].广州:广东省水利厅,2019.
- [22] 顾海挺,谢平,雷旭.东江流域枯水径流变异根本原因分析[J].水力发电学报,2016,35(6):20-29.
- [23] 李宁,王大刚.东江分水方案实施对三大水库调度的影响分析[J].广东水利水电,2018,4(12):1-3,13.
- [24] 季荣耀,陆永军,左利钦.东江下游博罗河段人类活动影响下的河床演变[J].泥沙研究,2010(5):48-54.
- [25] 苏丽丽.西江流域干流年径流量和年输沙量变化规律研究[D].广西桂林:桂林理工大学,2018.