

# 西北江三角洲低水位变化及其影响因素

李莲秀<sup>1</sup>, 顾展飞<sup>1</sup>, 李玉隆<sup>2</sup>, 赵东<sup>3</sup>

(1.郑州航空工业管理学院, 土木建筑学院, 郑州 450000; 2.四川大学

水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 3.四川省生态环境科学研究院, 成都 610041)

**摘要:** 河流三角洲低水位的变化受气候因素和人类活动共同控制, 对河道的通航与取水具有重要意义。为探明西北江三角洲低水位的演变趋势和各影响因素对其的作用, 基于马口、三水站 1972—2017 年最低水位序列, 结合两站河床地形、流域降水、径流和下边界海平面高度等资料, 识别出年最低水位的演变趋势, 并探讨了各影响因素在其变化过程中起到的作用。结果表明: 马口、三水站年最低水位演变过程可分为波动期(1972—1990 年)、突变下降期(1991—2003 年)和缓变回升期(2004—2017 年)。1972—1990 年最低水位受降水因素的控制在一 0.11 m 上下波动, 而 1991—2003 年在河床地形剧烈下切的驱动下最低水位大幅下降至 -0.50 m 以下, 进入 2004—2017 年最低水位在水土保持措施和水库对枯季径流的调节作用等多因素共同影响下又有所回升。近年来, 人类活动对西北江三角洲低水位的影响已经逐步超过气候因素, 成为低水位演变的主导因素。

**关键词:** 西北江三角洲; 低水位; 降水; 人类活动

中图分类号: TV143

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)03-0404-07

## Variation of Low Water Level and Its Influencing Factors in the West and North River Delta

LI Lianxiu<sup>1</sup>, GU Zhanfei<sup>1</sup>, LI Yulong<sup>2</sup>, ZHAO Dong<sup>3</sup>

(1.School of Civil engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450000, China; 2.State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3.Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The variation of low water level in river deltas is controlled by climate factors and human activities, and it is of great significance for channel navigation and water intake. In order to investigate the evolution of low water level and its influencing factors in the West and North River Delta, based on the annual lowest water level data of the Makou and Sanshui stations during the 1972—2017, and the data of riverbed topography, precipitation, runoff and sea level of these two stations, the evolution trend of annual lowest water level was identified and the effects of influencing factors on the process of its evolution were discussed. The results show that the evolution process of the annual lowest water level of the Makou and Sanshui stations can be divided into the fluctuation period (1972—1990), the significant decrease period (1991—2003) and the recovery period (2004—2017). From 1972 to 1990, the lowest water level fluctuated around -0.11 m under the control of precipitation. Between 1991 and 2003, the lowest water level dropped to below -0.50 m due to the severe riverbed down-cutting. During 2004—2017, the lowest water level slightly rose under the combined influence of multiple factors, such as the regulating effect of soil-water conservation and reservoir on runoff in dry season. In recent years, the influence of human activities on the low water level in the West and North River Delta has gradually surpassed the climatic factors and become the dominant factor of the evolution of low water level.

**Keywords:** West and North River Delta; low water level; precipitation; human activities

河流三角洲低水位的演变,是气候变化和人类活动干扰共同作用下的结果,其对航运、供水和桥梁安全等均造成了不可忽视的影响<sup>[1-2]</sup>。以往对于低水位的研究,大多关注气候变化所引起的水位振荡,如厄尔尼诺现象造成低水位骤降<sup>[3]</sup>。但随着近年来人类对河流三角洲系统开发利用程度的增大,人为干扰逐渐成为影响低水位演变的主导因素。坐拥世界上最大城市群的珠江三角洲,其河网水位的演变无疑也在很大程度上被人类活动所控制<sup>[4]</sup>。蒋陈娟等<sup>[5]</sup>通过分析珠江三角洲河网区 25 个潮位站的长时间水位序列,发现从口门处至河网区上端,水位变化趋势由下降转为上升。贾良文和陆永军等则进一步指出,20 世纪 80 年代以来河网上段低水位大幅下降的主要原因是河床大量采砂导致河槽容积增大、河床高程明显降低<sup>[1,6]</sup>。而进入 21 世纪后采砂活动的减弱,河床下切趋势放缓,同时流域上游水土保持措施的实施和水库对天然径流的调节作用使得三角洲枯季来流量增大,加之海平面的逐年抬升,珠江三角洲低位水位在近年又有了一定程度的回升<sup>[7]</sup>。

虽然前人在人类活动对珠江三角洲水位演变特

性的影响上已做了较多研究,但对于低水位阶段性变化及其成因的探讨和认识尚且不足。本文以 1972—2017 年以来珠江西北江三角洲顶点马口、三水站的水位和河床地形资料以及流域降水数据为基础,梳理两站年最低水位的变化趋势,并讨论气候因素和人类活动在低水位演变过程中的影响,以期对西北江三角洲水位演变的相关研究提供新的认识。

## 1 研究区概况

珠江流域是中国流域面积第三大的流域,面积达  $4.52 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,多年平均降水量和径流量分别为 1 200~2 200 mm 和 3 100 亿  $\text{m}^3$ <sup>[8]</sup>。流域内修建有龙滩水库、新丰江水库等多座大(一)型水库(容积 > 10 亿  $\text{m}^3$ ),其三大主流西江、北江和东江在广东省东南部汇聚形成珠江三角洲(见图 1A)。本文研究区域为西江和北江共同冲积形成的西北江三角洲,其内坐落有广州、中山、澳门等多座大城市,社会经济发达,人类活动密集(见图 1B)。流域来水来沙经上游高要站和石角站输入西北江三角洲,在顶点马口、三水处重新分配后流经三角洲河网汇入南海。

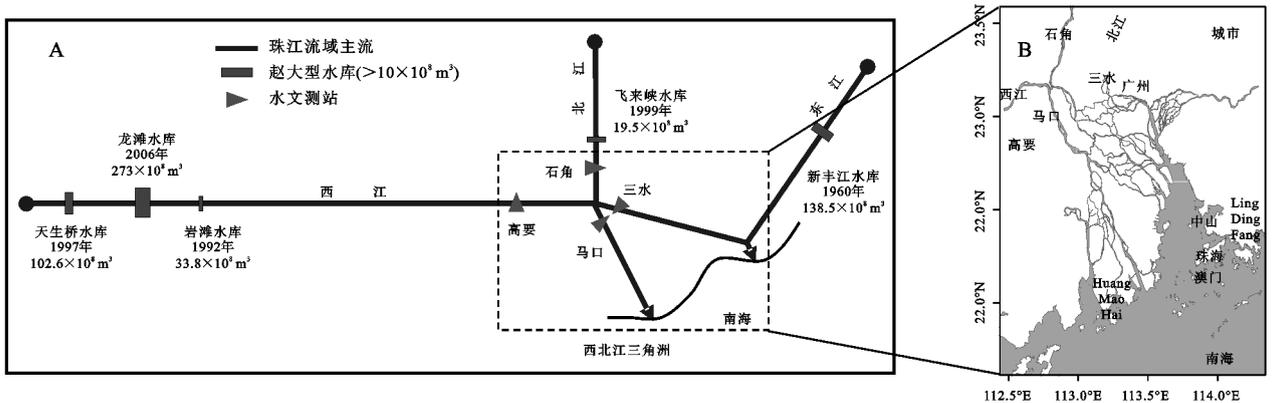


图 1 研究区域简图

## 2 数据及方法

### 2.1 水文数据

本文使用的水文气象数据主要包括:(1)高要和石角站枯季径流量数据,引自中国泥沙公报(2003—2017年)和Liu等<sup>[9]</sup>(1972—2002年);(2)珠江流域内42个雨量站1972—2017年的月均降水数据,源自中国气象局网站;(3)1972—2017年中国南海海平面平均高度,源自美国国家海洋和大气管理局网站(NOAA);(4)1972—2017年西北江三角洲马口、三水站水位和河床高程资料,引自《珠江流域水文资料》(珠江三角洲河口区(一))和Wang等<sup>[10]</sup>。

### 2.2 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验(MK 检验)是由 Mann 提出

(1945年)、后由Kendall(1975年)改进的一种非参数检验方法<sup>[11]</sup>。MK 检验不要求样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,可应用范围很广,因此被世界气象组织推荐作为评估水文序列趋势变化的方法。本文使用 MK 检验法评估西北江三角洲马口、三水站年最低水位序列的变化趋势,并识别出可能的趋势突变点。

根据马口站(或三水站)年最低水位序列( $x_1, x_2, \dots, x_n$ )构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

其中,

$$r_i = \begin{cases} +1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (2)$$

可见,秩序列  $S_k$  是第  $i$  时刻数值大于  $j$  时刻数值

个数的累计数。在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

其中:  $UF_1 = 0$ ,  $E(S_k)$ ,  $\text{var}(S_k)$  是累计数  $S_k$  的均值和方差,可由下式算出:

$$E(s_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (4)$$

$$\text{var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (5)$$

把时间序列  $x$  逆序排列 ( $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ ) 再通过式(2—3)求出  $UF_k$ , 同时令  $UB_k = -UF_k$  ( $k = n, n-1, \dots, 1$ ),  $UB_1 = 0$ 。得到的统计序列  $UF_k$  和  $UB_k$ ,  $UF_k$  为正则表明  $x_k$  序列呈上升趋势,为负则表明呈下降趋势,当其超过显著性临界直线时,说明趋势显著。 $UF_k$  和  $UB_k$  曲线的交点如果在临界线之间,则其对应的时刻为可能发生突变的时间

### 2.3 相对权重法

相对权重法(relative weight)是由 Johnson 和 Jeff 于 2000 年提出的一种估计线性模型中自变量相对重要性的方法<sup>[12]</sup>。本文使用该方法来量化各影响因素(降水变化、海平面上升、河床下切和水库群对径流的调节)对西北江三角洲低水位演变的相对贡献率。该方法首先以自变量分解出的正交变量作为中间载体,然后分别通过自变量对正交变量、因变量对正交变量建立线性回归方程,最后自变量的相对重要性则为两组回归系数平方的积的和。相对权重法的主要步骤简述如下:

(1) 将自变量(降水变化、海平面上升、河床下切、人类活动对枯季径流的扰动)和因变量(马口、三水站年最低水位)进行标准化处理( $X, Y$ );

(2) 将标准化的自变量矩阵  $X$  进行奇异值分解,进而将矩阵  $X$  转化为相互独立的正交变量  $Z$ ;

(3) 将正交变量分别与标准化的因变量和自变量建立线性回归方程,求出因变量  $Y$  与正交变量  $Z$  的回归系数  $B_k$  和自变量  $X$  与正交变量  $Z$  的相关系数  $\lambda_{kj}$ ;

(4) 由于矩阵  $Z$  中的正交变量间是不相关的,因此,可用  $\lambda^2$  表示正交变量矩阵  $Z$  所占原始变量矩阵  $X$  的贡献比例。最后,各变量的相对权重  $\epsilon_j$  可表示为:

$$\sum_{j=1}^n \epsilon_j = \sum_{j=1}^n (\sum_{k=1}^m \lambda_{jk}^2 B_k^2) = R_{y(x_1, x_2, \dots, x_n)}^2 \quad (6)$$

由于相对权重是由原始变量经过正交转换得到的,因此可以更好地避免变量之间的相互作用(多重共线性)的问题。此外,相对权重的一大特性为各个

自变量权重之和等于整个模型的  $R^2$ 。最后,各自变量的相对权重可以以百分比的方式来表示,即:

$$\epsilon_j = \frac{\epsilon_j}{R^2} \times 100\% \quad (7)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 西北江三角洲低水位演变过程

本文统计了西北江三角洲顶点处马口、三水站 1972—2017 年年最低水位的变化情况。由图 2 看出,马口站年最低水位序列在 1990 年附近存在突变,1990 年前水位序列趋势线  $UF$  在 0 基准线上下波动,表明此期间年最低水位无明显的变化趋势;1990 年后水位序列趋势线  $UF$  下降到置信水平为 0.05 的基准线  $-1.96$  以下,表明水位呈现出显著的下降趋势。而水位序列的逆序列趋势线  $UB$  在序列前 14 a 处于  $-1.96$  基准线以下,表明水位逆序列在此期间亦呈现显著的下降趋势,即正序列的后 14 a 可能表现一定程度的回升。据此将马口站 1972—2017 年的低水位演变过程划分为 3 个阶段:波动期(1972—1990 年),年最低水位在  $-0.11$  m 的均值上下波动;突变下降期(1991—2003 年),年最低水位由  $-0.11$  m 大幅下降至  $-0.50$  m 以下;缓变回升期(2004—2017 年),年最低水位逐渐回升,到 2017 年已升至  $-0.30$  m。

三水站的年最低水位序列的突变点虽然较马口站前移 2 a,但演变过程与马口站相似,也可大致分为波动、突降和回升 3 个时期。因此本文将两站年最低水位的演变过程统一划分为波动期(1972—1990 年)、突变下降期(1991—2003 年)和缓变回升期(2004—2017 年)。

### 3.2 低水位演变的影响因素分析

3.2.1 降水波动 在自然演变的条件下,河道内水位的变化往往受气候因素(降水)的控制。由图 3 看出,本文统计了马口、三水站 1972—1990 年最低水位和当年最小月均降水量,回归分析结果显示两者之间具有较好的线性正相关关系,表明在此期间降水因素是西北江三角洲顶点低水位波动的主导因素,低水位演变过程近似处于自然状态。而用此时期拟合得到降水—水位关系式来预测各年份马口和三水站的最低水位,可以发现,1990 年前理论预测值与实测值吻合良好,但 1990 年后实测值要明显低于理论预测值,表明 1990 年后两站最低水位受其他因素的显著降低,降水的波动此时已不再是最低水位变化的主导因素。

3.2.2 海平面上升 由于大河三角洲位于陆地与海洋的连接处,河网内的水动力特性被径流作用和潮汐

动力所共同控制,其水位也受到下游海平面的顶托,这种影响在枯季径流作用较弱时更为明显,因此在研究三角洲低水位的演变时不能忽视下游边界海平面变化带来的影响。图 4 是 1970—2018 年中国南海海平面平均高度的变化情况,可以看到海平面整体上呈

现持续上升的趋势,1994 年以前上升趋势较为平缓,年均抬升约 1.6 mm,而 1994 年后上升速度明显加快,达到 2.8 mm/a,在 2004—2017 年海平面整体抬升 40 mm,是此期间西北江三角洲低水位有所回升的原因之一。

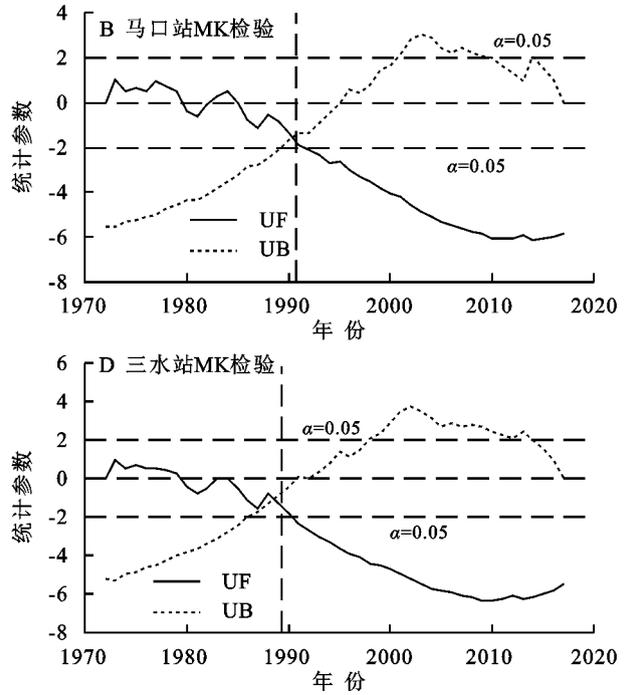
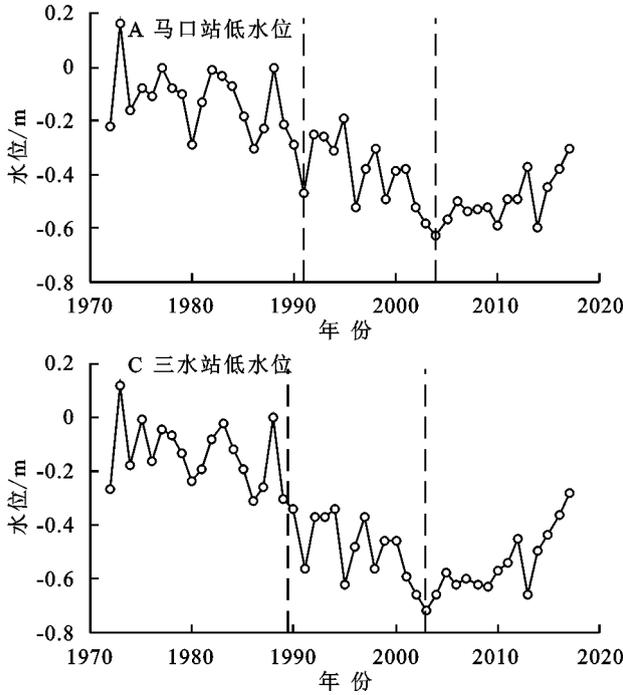


图 2 马口、三水站年最低水位演变趋势

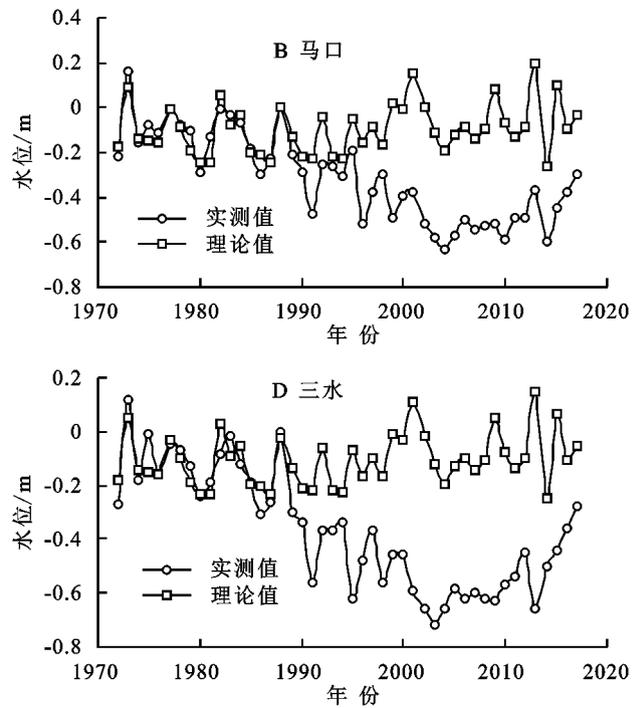
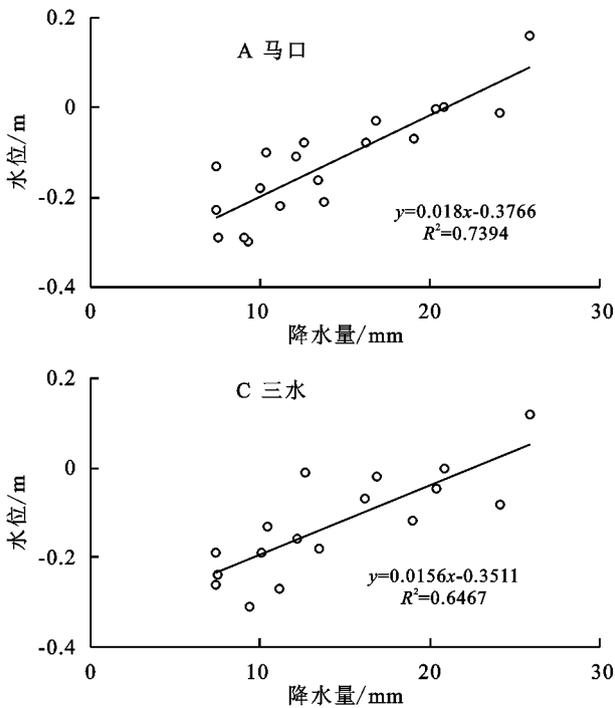


图 3 马口、三水站年最低水位与最小月均降水量之间的关系

3.3.3 河床下切 西北江三角洲因其优越的地理位置,经济社会发展迅速,城市化程度高,人口密集,人类活动频繁。人类对于河流系统的开发利用很大程度上改变了河床演变的进程,甚至成为河床演变的主

导因素。为满足城市化进程中对于建筑材料的需求,西北江三角洲在 1980s 中期兴起了大规模人工采砂活动,加上 1988 年后西北江三角洲上游流域实施的水土保持措施和大型水库的拦沙效应大幅削减了三

角洲的泥沙来源,引起三角洲河网河床大范围不均匀地下切<sup>[8,13]</sup>。由图5统计的1972—2017年马口和三水站断面平均河床高程变化可知,1990年前两站河床高程均保持相对稳定,而在1990年左右开始显著降低,其中马口断面在1990—2006年平均下切深度超过5 m,三水断面在1990—2006年平均下切深度也接近6 m。2006年后马口断面河床高程略有抬升,而三水断面河床高程则继续保持轻微的下切态势。如此剧烈的河床下切势必会使得西北江三角洲河道内的水位流量关系发生相应的调整,这也是1991—2003年马口、三水站年最低水位发生大幅度下降的主要原因之一。

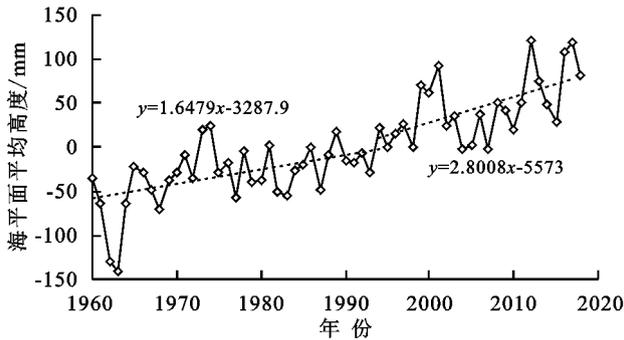


图4 马口、三水站年最低水位与最小月均降水量之间的关系

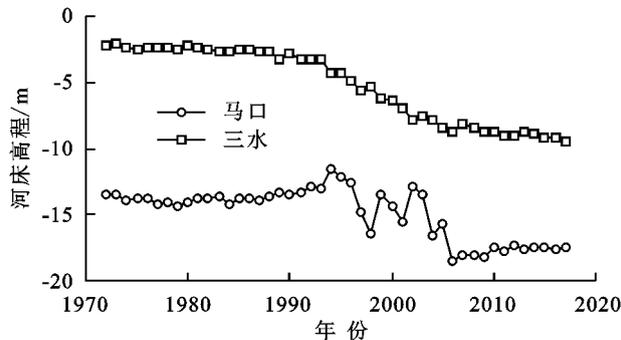


图5 马口、三水断面河床高程变化情况

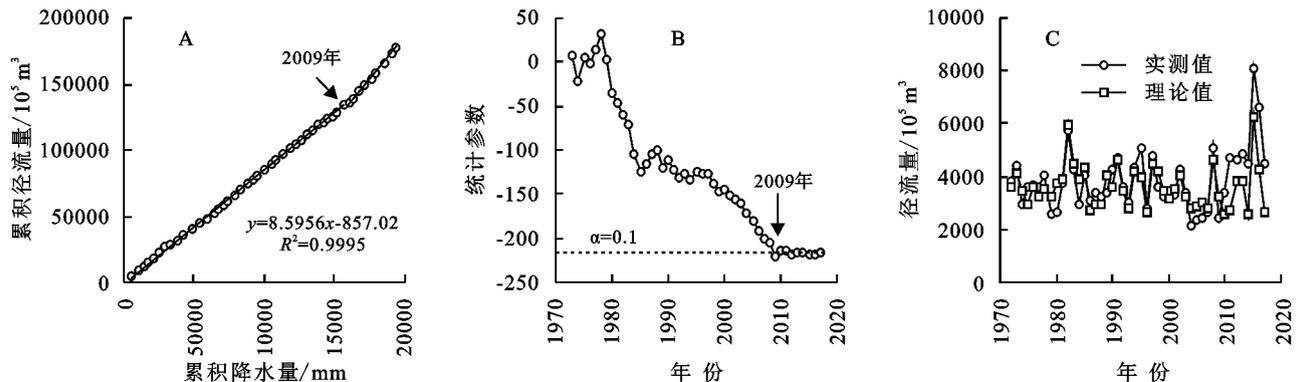


图6 基于双累积曲线的西北江三角洲枯季径流量与降水量关系及其突变检验

3.4.5 各影响因素对低水位演变的相对贡献率 本文将马口、三水站年最低水位序列作为因变量,两站对应的流域枯季降水序列、海平面平均高度序列、河床高程序列和枯季径流扰动序列作为自变量,运用相

3.4.4 枯季径流增大 为了满足流域防洪安全以及日益增长的工农业用水需求,在1960—2006年,珠江流域共建设了19座大型水库和超过8 000座不同规模的水库大坝,这些水库的容积超过894亿 $\text{m}^3$ ,接近珠江流域年径流量的30%<sup>[10]</sup>。由此可见,在西北江三角洲上游流域的水库群能对西北江三角洲的径流过程产生强有力的调节作用。而进入2000s后,随着国家科学发展观的提出以及“可持续发展”理念、《水土保持法》等法律条例的推行,1950s以来毁林开荒乱象得到了有效控制,同时政府实施封育保护、生态修复和植树种草等水土保持措施,使得流域内森林覆盖率显著提升,以广东省为例,至2010年其森林覆盖率上升至58.9%,是1985年的2倍多<sup>[14]</sup>。随着森林覆盖率的增大,加之流域水管理部门利用上游水库群的联合调度进行补淡压咸,流域径流的年内分配将发生很大程度上的调整<sup>[15-16]</sup>。如图6A所示,累积径流量与累积降水量呈现很好的线性正相关关系。参考Gao等<sup>[17]</sup>对于双累积曲线转折点识别方法的研究,基于Pettitt方法对该双累积曲线的逐年斜率序列进行检验(见图6B),可以发现曲线斜率在2009年后发生转折,呈现出较为显著的增大趋势(置信水平90%),表明在相同的降水条件下,2009年后枯季的径流量有所增大。这种在水土保持和水库调节共同作用下的枯季径流量增大,也是西北江三角洲低水位在近年有所回升的原因之一。为了进一步探讨人类活动引起的枯季径流扰动在低水位演变过程中的相对贡献率,本文通过回归分析拟合得到2009年前的枯季降水—径流关系式,用各年枯季降水量代入关系式计算得到各年枯季径流量理论值,将各年理论值与其对应实测值之间的差值序列视为代表人类活动引起的枯季径流扰动的水文序列(见图6C)。

对权重法探讨上述影响因素在年最低水位演变过程中的相对贡献率。表1的相对贡献率计算结果表明,在1972—1990年,降水因素是影响低水位变化最主要的因素,其对马口和三水站年最低水位变化的贡献

率分别达到 50.62% 和 66.48%，明显超过其他 3 个影响因素，这是因为在近似自然演变状态下河道水位变化主要受气候条件的控制。而 1991—2003 年，降水因素对于马口和三水站年最低水位变化的贡献率分别降至 17.92% 和 27.25%，已不是引起低水位变化的主要原因，此时对马口和三水站年最低水位的显著降低起主导作用的影响因素是河床地形的变化（河床的下切），贡献率分别达到 55.81% 和 59.59%，这也与贾良文和陆永军等<sup>[6-7]</sup>得到的珠江河网大量采沙导致河网上段低水位大幅度降低的结论相一致。进入 2004—2017 年，河床地形变化趋缓，其对低水位变化的影响也明显减弱，而此时马口、三水站低水位在海平面的持续抬升和枯季径流增大作用下出现回升的现象。对于马口站，海平面上升和径流增大对其年最低水位变化的贡献率分别为 29.88% 和 40.83%；三水站两者的贡献率则分别为 30.56% 和 45.02%。可见水土保持和水库调节对枯季径流的增大作用还是这一时期低水位回升的最主要原因。此外，流域降水的周期性增大，也对低水位的升高起到一定的作用，贡献度为 15%~20%。

表 1 各影响因素对马口、三水站年最低水位演变的贡献度/%

位置	年份	自然因素		人为干扰	
		降水波动	海平面上升	河床地形变化	枯季径流扰动
马口	1972—1990	50.62	4.16	19.23	25.98
	1991—2003	17.92	12.79	55.81	13.48
	2004—2017	15.56	29.88	13.74	40.83
三水	1972—1990	66.48	6.35	10.92	16.25
	1991—2003	27.25	11.50	59.59	1.66
	2004—2017	19.54	30.56	4.88	45.02

上述影响因素中，年际降水波动和海平面上升主要受到自然（气候）因素的控制，而河床地形变化以及枯季径流扰动的主要驱动力则是强人类活动的影响，如大规模的河网采砂、流域上游的水土保持措施及大型水库建设。可以看到，在 1990 年以前，影响马口、三水站年最低水位演变趋势的主导因素是气候条件的变化（55%~73%）；而 1991—2003 年，珠江河网地区人类活动影响呈现出无序且剧烈的发展态势，其对低水位的影响程度（61%~69%）也超过了气候条件变化所带来的影响；2004 年以后，随着珠江三角洲及流域水管理部门对开发活动的科学规划，区域的无序开发得到一定程度的治理，人类活动对于低水位的影响程度有所减弱（接近 50%），本时期低水位受到人

类活动和气候因素的共同控制。值得注意的是，诸如修建水闸、丁坝等河道整治工程，也会显著地改变局部地区的低水位，但本文没有考虑此类人类活动的影响。此外，区域的取水用水也会对低水位造成一定的影响，本文统计了 1997—2019 年广东省年用水量变化情况见图 7<sup>[18]</sup>，可以看到 2010 年以前，用水量呈现出平稳增长的态势，而 2010 年以后，随着用水结构的调整优化，用水量有了一定程度的下降，2019 年用水量比 2010 年减少了约 56 亿 m<sup>3</sup>（远小于流域年径流量 3 100 亿 m<sup>3</sup>）。用水量的变化对低水位的回升具有一定贡献，但相比于水土保持措施及大型水库建设等人类活动，其影响程度十分有限。

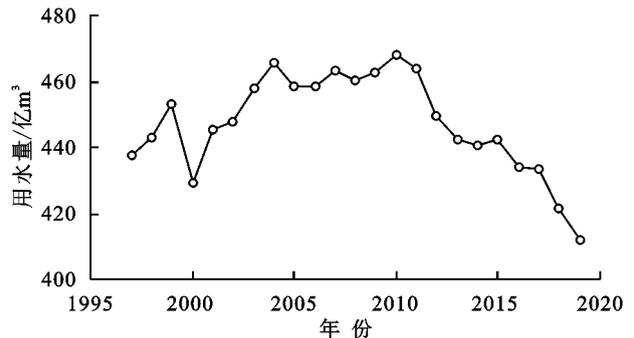


图 7 广东省年用水总量变化（引自《广东省水资源公报（2019）》）

## 4 结论

(1) 马口、三水站年最低水位演变过程可大致分为 3 个阶段，分别是 1972—1990 年的波动期，1991—2003 年的突变下降期和 2004—2017 年的缓变回升期。

(2) 1972—1990 年，马口、三水站年最低水位在 -0.11 m 上下波动，降水因素（气候条件）是其变化的最主要驱动力，对两站水位变化贡献率分别达到 50.62% 和 66.48%。

(3) 1991—2003 年，马口、三水站年最低水位由 -0.11 m 大幅下降至 -0.50 m 以下，这种变化的主导因素是河床地形的下切，对两站水位变化贡献率分别达到 55.81% 和 59.59%。

(4) 2004—2017 年，马口、三水站年最低水位呈现出回升的趋势，这是海平面上升、水土保持、水库调节和降水周期性增大共同作用下的结果，其中贡献程度最大的影响因素是水土保持和水库调节对枯季径流的增大作用，其对两站水位变化贡献率分别为 40.83% 和 45.02%。

### 参考文献：

- [1] 陆永军, 季荣耀, 王志力, 等. 珠江三角洲网河区低水位时空变化规律[J]. 水科学进展, 2019, 30(6): 800-809.

- [2] 陈进,黄薇.湘江近年枯季低水位的原因及解决对策[J].长江科学院院报,2010,27(10):1-4.
- [3] Naik P K, Jay D A. Distinguishing human and climate influences on the Columbia River: Changes in mean flow and sediment transport [J]. *Journal of Hydrology*, 2011,404(3/4):259-277.
- [4] 郑国栋,顾立忠,李虎成,等.珠江三角洲河道地貌变化对网河水情影响研究[J].中国农村水利水电,2010(7):33-36.
- [5] 蒋陈娟,杨清书,戴志军,等.近几十年来珠江三角洲网河水位时空变化及原因初探[J].海洋学报:中文版,2012,34(1):48-58.
- [6] 贾良文,陆永军,莫思平.大量采沙对东江下游及东江三角洲河道低水位的影响[J].水利水运工程学报,2006(3):1-8.
- [7] 时翠,陈晓宏,张强.近几十年来珠江三角洲1月和7月水位变异分析[J].热带地理,2012,32(3):233-240.
- [8] 杨远东,王永红,蔡斯龙,等.珠江流域下游近60年输沙率年际与年内变化特征[J].水土保持研究,2021,28(2):154-162.
- [9] Liu F, Hu S, Guo X, et al. Recent changes in the sediment regime of the Pearl River (South China): Causes and implications for the Pearl River Delta[J]. *Hydrological Processes*, 2018,32:1771-1785.
- [10] 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*, 2020,765(1):144-172.
- [11] Yue S, Pilon P, Ca Vadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. *Journal of Hydrology*, 2002,259:254-271.
- [12] Johnson, Jeff W. A heuristic method for estimating the relative weight of predictor variables in vultiple regression[J]. *Multivariate Behavioral Research*, 2000,35(1):1-19.
- [13] Luo X L, Zeng E Y, Ji R Y, et al. Effects of in-channel sand excavation on the hydrology of the Pearl River Delta, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2007,343(3/4):230-239.
- [14] 陈哲华,杨超裕,邓冬旺,等.广东省森林覆盖率的影响因素分析和模型预测:基于灰色关联分析和GM(1,1)模型[J].林业与环境科学,2017,033(5):101-106.
- [15] 李传哲,王浩,于福亮,等.延河流域水土保持对径流泥沙的影响[J].中国水土保持科学,2011,09(1):1-8.
- [16] 方神光,崔丽琴.枯季西江中游梯级水库调度对梧州流量影响初探[J].中国农村水利水电,2017,418(8):65-69.
- [17] Peng G, Li P, Zhao B, et al. Use of double mass curves in hydrologic benefit evaluations[J]. *Hydrological Processes*, 2017,31(16):4639-4646.
- [18] 广东省水利厅.广东省水资源公报(2019)[R].广州,2019.
- [35] Roy J, Saha S. Landslide susceptibility mapping using knowledge driven statistical models in Darjeeling District, West Bengal, India[J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2019,6(1):1-18.
- [36] 张雷雨,杨毅,梁霄.地理加权回归模型的多重共线性诊断方法[J].测绘与空间地理信息,2017,40(10):28-31.
- [37] Arabameri A, Saha S, Roy J, et al. Landslide susceptibility evaluation and management using different machine learning methods in the Gallicash River Watershed, Iran[J]. *Remote Sensing*, 2020,12(3):475. <https://doi.org/10.3390/rs12030475>.

(上接第403页)

- [33] Chen W, Xie X, Peng J, et al. GIS-based landslide susceptibility evaluation using a novel hybrid integration approach of bivariate statistical based random forest method[J]. *Catena*, 2018,164:135-149.
- [34] Arabameri A, Pradhan B, Rezaei K, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping using numerical risk factor bivariate model and its ensemble with linear multivariate regression and boosted regression tree algorithms[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019,16(3):595-618.