

文章编号:0559-9350(2019)07-0869-14

## 珠江磨刀门河口日均水位变化及影响因子辨识

杨昊<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 欧素英<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 傅林曦<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 刘锋<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 蔡华阳<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 杨清书<sup>1, 2, 3, 4</sup>

(1. 中山大学 海洋工程与技术学院 河口海岸研究所 广东 广州 510275;

2. 河口水利技术国家地方联合工程实验室 广东 广州 510275; 3. 广东省海岸与岛礁工程技术研究中心 广东 广州 510275;

4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000)

**摘要:** 珠江磨刀门河口日均水位变动的态势受自然过程与强人类活动的驱动, 呈现出明显的阶段性演变与季节性异变。辨识日均水位的影响因子, 是河口动力学研究的重要内容, 对河口治理和水资源高效开发利用具有重要指导意义。本文通过流量驱动的数据驱动模型, 对磨刀门河口沿程主要站点长时间日均水位序列(1959—2016年)进行分解, 分解出由地形和海平面边界共同驱动以及仅由上游马口站流量边界驱动引起的日均水位变化。地形和海平面边界共同驱动的结果表明: 甘竹-灯笼山河段春夏两季日均水位变化主要由河道挖沙引起, 日均水位下降(平均下降0.26 m); 秋冬两季则由口门围垦与海平面边界控制, 日均水位抬升(平均抬升0.07 m)。仅由上游马口站流量边界驱动的结果表明: 春夏秋三季日均水位变化主要由水库蓄水主导, 日均水位下降(平均下降0.13 m); 冬季日均水位变化受水库调枯影响, 日均水位抬升(平均抬升0.03 m); 从量值上看, 地形和海平面边界对磨刀门河口日均水位变动的的影响大于上游水库调蓄作用。

**关键词:** 日均水位; RTHA模型; 强人类活动; 径流; 海平面**中图分类号:** P343.5**文献标志码:** A**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20200069

## 1 研究背景

河口日均水位作为全球气候变化的重要指标, 其时空演变对河口三角洲系统的可持续发展具有重要指示意义。河口日均水位变动的态势由河道地形和动力边界(流量、海平面)等因子共同驱动, 全球气候变暖导致海平面上升<sup>[1]</sup>将影响河口日均水位的时空分布; 同时, 随着经济社会的高速发展, 强人类活动已成为河口三角洲系统演变的第三驱动力<sup>[2]</sup>。当气候变化与强人类活动干预的累积效应达到甚至超过水位阈值(即自然恢复能力所对应的水位变化极值)时, 河口日均水位将会发生异变(本文所提“异变”是指强人类活动驱动, 对河口地形及动力边界的改变, 无论是变化幅度和频度均超过自然因子所引起的变化, 变化特征有别于自然过程, 下同)。由于水位变化直接影响河口区的防洪和供水安全, 因此, 河口日均水位的异变态势及其影响因子辨识, 不仅是河口动力学研究的重要科学问题, 而且是河口治理和港口航道资源开发的关键<sup>[3-5]</sup>。

河口日均水位是径潮动力耦合的典型结果, 其时空演变过程是探究河口复杂径潮相互作用过程及机制的重要基础。在径流作用占主导河段, 河口日均水位的变化主要取决于上游来水量<sup>[6-7]</sup>, 而在感潮河段, 随着潮汐作用的增强, 日均水位变化还受径潮动力非线性作用的影响。径潮动力耦合下

收稿日期: 2020-02-14; 网络首发时间: 2020-07-15

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200713.1619.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402600); 国家自然科学基金项目(51709287, 51979296, 41706088, 41476073); 河口海岸学国家重点实验室开放课题基金资助项目(SKLEC-KF201809); 广东省自然科学基金项目(2017A030310321); 广东省水利科技创新项目(2016-20); 高校基本科研业务费青年教师培育项目(18lgy29)

作者简介: 杨昊(1993-), 博士生, 主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: yangh236@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 蔡华阳(1986-), 博士, 副教授, 主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: caihy7@mail.sysu.edu.cn

单一感潮河段的水位梯度主要与非线性摩擦项相平衡<sup>[8-9]</sup>，因此，感潮河段沿河流方向形成正的水位梯度，河口日均水位由口门至上游沿程抬升，并具有显著的大小潮和季节性变化<sup>[10-11]</sup>。采用功率谱分析、小波变换等分解方法能够有效统计分析河口日均水位的时空分布<sup>[3, 12]</sup>，基于数值模型与解析模型相结合的方法亦可对河口日均水位分布的形成机制进行探讨<sup>[13]</sup>。近年来，基于数据驱动模型率定参数反演自然过程下水温及水位的变化过程，从而辨识强人类活动以及自然变化对河口水文要素的影响程度得到广泛应用<sup>[14-15]</sup>。

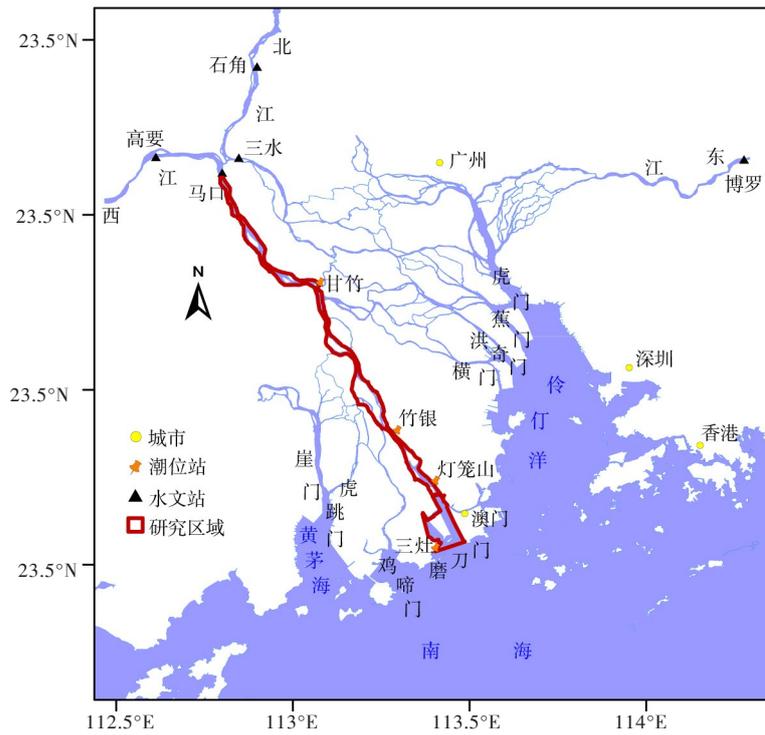
珠江三角洲(珠三角)是我国国家重大战略——粤港澳大湾区建设的重要依托，其面积仅占全国国土面积的0.5%，创造出全国GDP的14.02%<sup>[16]</sup>。西江下游磨刀门作为珠三角入海径流量和输沙量最大的河口，是珠江河口最主要的泄洪和取水通道，探究磨刀门河口沿程日均水位的时空演变对保障珠三角的防洪和供水安全起着极其重要的作用。从1950年代开始，磨刀门河口先后经历了大规模的滩涂围垦、联围筑闸和无序河道采沙等强人类活动。在各种人类活动的累积影响下，对磨刀门河口日均水位的影响进行辨识研究具有典型性及必要性。本文聚焦于珠江磨刀门河口，基于数据驱动模型对磨刀门河口长时间序列的日均水位资料进行分析，辨识地形与动力边界变化对日均水位时空演变的影响，探究强人类活动驱动下日均水位的季节性异变特征。研究成果可为珠江河网区的防洪防涝、河口治理、航道整治、堤围防护及水资源开发利用等提供科学依据。

## 2 研究区域概况

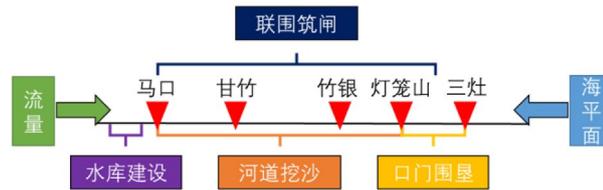
珠江河口具有三江(西江、北江和东江)汇流，八口(虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门、崖门)入海的特点。根据径流动力与潮汐动力的相对强弱，八大口门可划分为河优型和潮优型河口。磨刀门河口的输水输沙量大、潮差小，属于典型的径流强、潮流弱的河优型河口。作为西北江河网最主要的泄洪通道，磨刀门多年平均径流量为923亿 $m^3$ ，约占马口站径流量的三分之一，约占西、北江径流量的四分之一，居珠江八大口门之首<sup>[17]</sup>。磨刀门潮汐属于不正规半日潮，日不等现象显著，口门内潮流为往复流，流向与河道走向基本一致，口外主要潮流流向为西北-东南向，涨潮流为西北向，落潮流为东南向。本文研究范围为西江主干入海口——磨刀门河口，上游流量控制站为马口水文站，沿程涵盖甘竹、竹银、灯笼山和三灶4个潮位站，具体站位如图1(a)所示。据马口水文站1959—2016年月均流量资料统计，其多年平均流量为7078  $m^3/s$ ，最大月均流量达29 000  $m^3/s$ ，最小月均流量为1210  $m^3/s$ ，洪枯季差异显著。

珠江磨刀门河口的典型强人类活动主要包括：上游水库建设、河道无序采沙、联围筑闸工程及口门围垦整治，具体人类活动作用区域见图1(b)。珠江流域自1950年代开始已兴建超过9000座水库大坝，总库容达到650亿 $m^3$ ，约占珠江流域年径流量的23%<sup>[18]</sup>，其中西江流域水库建设强度在1990—2000年间有较大的提高，期间库容超过1亿 $m^3$ 的水库数达到10座，总库容达到162亿 $m^3$ <sup>[19]</sup>，由于水库工程担任着“削洪调枯”的任务，会对下泄流量的季节性分布产生直接影响。磨刀门河口自1980年代起出现大规模河道(马口-灯笼山河段)采沙活动，至1990年代初达到高峰。高强度的采沙导致磨刀门马口水文站的“水位-流量”关系发生显著改变，多年平均流量条件下水位下降约达2 m<sup>[20-22]</sup>。联围筑闸旨在控支强干，联围并流。口门围垦整治(灯笼山-三灶河段)导致河口快速向海延伸，至1990年代初磨刀门河口延伸长度达到13 km，河口水位逐渐抬升<sup>[23-24]</sup>。

总体而言，上游水库调蓄导致马口水文站流量(上游动力边界)呈现季节性异变，河道挖沙使得地形下切以及口门围垦使得河道变窄(地形边界)均导致磨刀门河口地形发生异变，而海平面的自然变化驱使下游动力边界发生改变。基于地形与动力边界的时空变化不均匀性的特征，磨刀门河口日均水位具有明显的阶段性异变特征。



(a) 研究区域



(b) 强人类活动概化示意图

图1 研究区域与强人类活动概化示意图

### 3 数据及方法

**3.1 数据处理** 本文收集了1959—2016年马口、甘竹、竹银、灯笼山和三灶5个站的逐日高、低潮位，以及对应时间段马口站的日均流量数据，具体信息见表1(三灶站起始时间为1966年，其余站点起始时间均为1959年)。所用数据来源于《广东省水文年鉴》和广东省水文局。潮位原始数据高程基面为冻结基面，已统一转换至珠江基面。将珠江磨刀门河口沿程站点的逐日高、低潮位数据插值得到逐时潮位，取24 h平均统计得到各站点的日均水位。日均水位坡度 $S$ 定义为日均水位随距离的变化率：

$$S = \frac{\Delta z}{\Delta x} \quad (1)$$

式中： $\Delta z$ 为两站点之间的日均水位之差，m； $\Delta x$ 为两站点之间的距离，m。

**3.2 RTHA模型理论** 本文采用径潮耦合的数据驱动模型<sup>[25]</sup>(River-Tidal Harmonic Analysis, 简称RTHA)用于反演径流驱动下的日均水位时空演变。该模型基于Matte等<sup>[26]</sup>提出的非线性调和思路，在传统调和理论的基础上，假设河口任意位置的分潮振幅及相位变化主要受上游流量和地形变化的非线性调制影响，适用于河优型河口，与本文研究区域的河口类型一致。

当潮波沿河道上溯，潮水位的变化可由一个余水位项和多个分潮波(天文分潮、浅水分潮及气象分潮等)的余弦曲线进行线性叠加：

表1 磨刀门河口沿程主要潮位(水文)站点数据

站点	经度	纬度	数据长度	共计(年)
马口	112°48'	23°07'	1959—2016	58
甘竹	113°04'	22°48'	1959—2016	58
竹银	113°17'	22°22'	1959—2016	58
灯笼山	113°24'	22°14'	1959—2016	58
三灶	113°24'	22°02'	1966—2016	51

$$z(t_j) = z_0 + \sum_{i=1}^n f_i H_i \cos(\sigma_i t_j + \varphi_i + g_i) \quad (2)$$

式中： $z(t_j)$ 为 $t_j$ 时刻的水位，m； $z_0$ 为分析时间段内平均水位，m； $H_i$ 、 $\varphi_i$ 、 $\sigma_i$ 为第 $i$ 个分潮的调和常数(振幅、迟角)及角频率； $f_i$ 、 $g_i$ 为天文校正因子； $n$ 为分潮个数。

假定河道平均水深为常数且不随时间发生变化，引入潮波衰减系数公式：

$$r = p_0 + p_1 [Q(t_j)]^\gamma \quad (3)$$

式中： $p_0$ 、 $p_1$ 、 $\gamma$ 均为待定常数； $Q$ 为流量， $m^3/s$ ，即河口潮汐的非线性衰减主要由上游径流控制。

假设河口区潮波非线性衰减主要受径流流量( $Q$ )大小控制，结合式(2)和式(3)，河口区水位 $z(t_j)$ 可由下式表示：

$$z(t_j) = \left\{ p_0 + p_1 [Q(t_j)]^\gamma \right\} \left\{ z_0 + \sum_{i=1}^n [b_i \cos(\sigma_i t_j) + c_i \sin(\sigma_i t_j)] \right\} \quad (4)$$

式中 $b_i$ 、 $c_i$ 为待定常数。

式(4)表明水位 $Z$ 可由两个随时间变化的部分表示：

$$z(t_j) = s(t_j) + F(t_j) \quad (5)$$

其中：

$$s(t_j) = d_0 + d_1 [Q(t_j)]^\gamma \quad (6)$$

$$F(t_j) = \sum_{i=1}^n \left\{ v_{0,i} + v_{1,i} [Q(t_j)]^\gamma \right\} \cos(\sigma_i t_j) + \sum_{i=1}^n \left\{ r_{0,i} + r_{1,i} [Q(t_j)]^\gamma \right\} \sin(\sigma_i t_j) \quad (7)$$

式中： $d_0$ 、 $d_1$ 为状态模型的待定参数； $v_0$ 、 $v_1$ 、 $r_0$ 、 $r_1$ 为各分潮的待定参数； $s(t_j)$ 为河床底高程、水深、径流流量、海平面变化等引起的平均海平面(MSL)的变化，其随径流流量、外海潮汐的改变而改变，称为平均水面状态函数； $F(t_j)$ 用来描述不同径流条件对分潮的调制影响。

式(5)即为径流驱动下的RTHA模型。

本文根据实测水位数据，基于式(5)一式(7)，建立多元回归方程组，求解得出待定参数 $d_0$ 、 $d_1$ 及隐含潮汐调和常数信息的、各分潮待定参数 $v_0$ 、 $v_1$ 、 $r_0$ 、 $r_1$ 。但在最终解方程组之前，流量的幂次方( $\gamma$ )是必须先给定的参数。本文采用粒子群优化算法<sup>[27]</sup>(Particle Swarm Optimization)，以水位的均方根误差RMSE值最小或相关指数 $R^2$ 最大为目标，迭代求解出流量的幂次方( $\gamma$ )。均方根误差RMSE和相关系数 $R^2$ 定义如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (z(t_j) - y(t_j))^2}{m}} \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (y(t_j) - \bar{y})(z(t_j) - \bar{z})}{\sum_{j=1}^m (y(t_j) - \bar{y})^2 \sum_{j=1}^m (z(t_j) - \bar{z})^2} \quad (9)$$

式中： $m$ 为各阶段的时间序列长度； $y$ 为各阶段水位实测值， $\bar{m}$ ； $\bar{y}$ 为各阶段水位实测值的均值， $m$ 。

本文虽采用分离径潮信号的数据驱动模型分离出径流信号和径流调制下的潮汐信号，但结果只选取由  $s(t_j)$  与  $F(t_j)$  之和所重构出的日均水位  $z(t_j)$  与实测日均水位进行比较(均统一至日均水位尺度)，并不分别讨论  $s(t_j)$  与  $F(t_j)$  各自的变化，及各分潮“调和常数”在时间上的变化。

**3.3 地形与动力边界对日均水位影响的辨识方法** 本文中马口与三灶站日均水位作为边界条件不参与模型计算，仅由马口站日均流量驱动对甘竹、竹银、灯笼山站日均水位进行模拟。累积距平法是显示单一因素在其长时间序列中突变年份的常用手段<sup>[28]</sup>。本文采用归一化的月均水位坡度(归一化是指对原始时间序列进行线性变换)，即归一化的月均水位坡度=(原始月均水位坡度-最小值)/(最大值-最小值)作为河口系统的特征动力指标，其构成的时间序列为  $S$ ，则任意时刻  $S$  的累积距平表示为：

$$S_t = \sum_{i=1}^t (S_i - \bar{S}) \quad (t=1,2,3,\dots,n) \quad (10)$$

式中： $S_t$ 为任意时刻  $t$  的月均水位坡度累积距平值； $S_i$  为第  $i$  月的月均水位坡度； $\bar{S}$  为  $n$  个月的月均水位坡度平均值。

通过绘制累积距平曲线将磨刀门河口日均水位序列分为缓变期、过渡期和调整期3个阶段。将人类活动作用前(地形未发生异变)自然状态下的日均水位记为缓变期\_实测值、强人类活动改造地形边界阶段内的日均水位记为过渡期\_实测值、人类活动作用减弱河口进入恢复调整阶段的日均水位记为调整期\_实测值。基于缓变期\_实测值率定出自然演变条件下日均水位与流量的函数关系与参数(缓变期\_计算值)，并以过渡期及调整期的日均流量驱动预报出对应阶段的日均水位(即过渡期\_预报值和调整期\_预报值)。根据 RTHA 模型重构出各站点日均水位的计算值(预报值)，并结合各站点实测值，可通过下式计算分别得到流量边界驱动值  $\Delta_{DIS}$ 、地形与海平面边界驱动值  $\Delta_{GEO\_MSL}$  和总变化值  $\Delta_{TOT}$ ：

$$\Delta_{DIS} = z_{\text{调整期(过渡期)}\_预报值} - z_{\text{缓变期\_计算值}} \quad (11)$$

$$\Delta_{GEO\_MSL} = z_{\text{调整期(过渡期)}\_实测值} - z_{\text{调整期(过渡期)}\_预报值} \quad (12)$$

$$\Delta_{TOT} = z_{\text{调整期(过渡期)}\_实测值} - z_{\text{缓变期\_实测值}} \quad (13)$$

$\Delta_{DIS}$  等效于仅由上游流量边界驱动下的水位变化值，主要反演上游水库建设对磨刀门沿程日均水位的影响(其中也包括流域的自然变化)，而  $\Delta_{GEO\_MSL}$  等效于剔除上游流量由地形改变(挖沙与口门围垦)和海平面边界影响下的日均水位变化值。采用缓变期所率定的参数来预测未受强人类活动改造的自然水位演变，通过预报值与实测值的对比来达到辨识目的。结合式(11)一式(13)可知： $\Delta_{TOT} = \Delta_{GEO\_MSL} + \Delta_{DIS} + \varepsilon$ ，式中  $\varepsilon = z_{\text{缓变期\_计算值}} - z_{\text{缓变期\_实测值}}$ ，即采用缓变期日均水位的平均偏差来表示 RTHA 模型的误差。

## 4 日均水位的阶段性演变及影响辨识

**4.1 日均水位的阶段性演变** 月均水位坡度是研究河口区日均水位时空变化的切入点，本文采用三灶-马口河段月均水位坡度的累积距平曲线对磨刀门河口日均水位的异变过程进行阶段性划分。统计得到三灶-马口段月均水位坡度并绘制累积距平曲线，结果如图2所示。累积距平曲线呈现先增大、再波动上升、后减小的阶段性变化特征，结合强人类活动作用于磨刀门的时间综合判断，可将1959—2016年分为3个阶段，即1959—1990年为缓变期(该阶段以自然变化为主，人类活动影响的累积效应甚微)，1991—2000年为过渡期(该阶段为强人类活动累积效应开始作用时期)，2001—2016年为调整期(强人类活动在该阶段的强度减弱，磨刀门河口进入自适应调整阶段)，其中图2中阴影部分为过渡期。从图2中可知，在1990年之前曲线持续上升为正距平即水位坡度大于整体数据的平均值，经历过渡期后曲线下降，表明2000年后为负距平即水位坡度小于整体数据平均值。累积距平曲

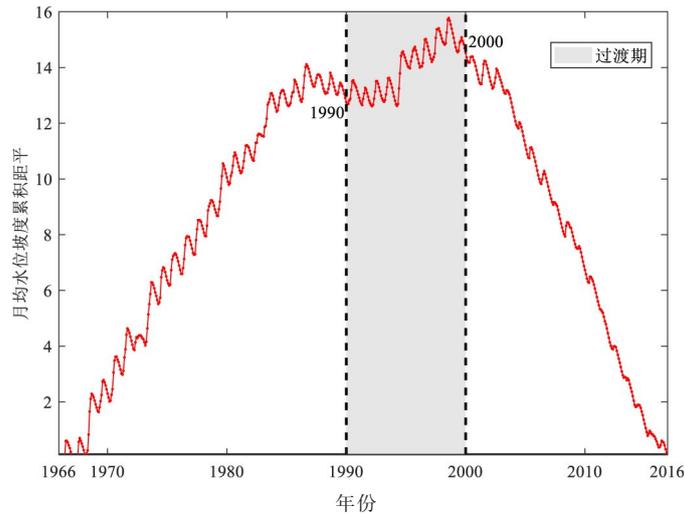


图2 三灶-马口段归一化月均水位坡度累积距平线

线呈现的结果表明自然调节与强人类活动驱动下磨刀门河口水位坡度变缓。

根据累积距平曲线对时间节点的划分,做出甘竹、竹银及灯笼山站缓变期(1959—1990年)和调整期(2001—2016年)的多年日平均水位过程线如图3所示。日均水位的季节分布表现为洪季大于枯季即上游流量越大日均水位抬升越明显,缓变期洪峰位于7月而进入调整期后洪峰转移至6月。当磨刀门河口进入调整期,甘竹、竹银站日均水位明显下降,由缓变期至调整期,甘竹站日均水位平均下降0.49 m,竹银站日均水位平均下降0.14 m。甘竹站调整期日均水位的季节分布均低于缓变期,竹银站2月份水位略高于缓变期,而其余时间段分布规律与甘竹站一致。灯笼山站调整期与缓变期季节分布差异较为复杂,调整期内夏、秋两季日均水位低于缓变期,而春、冬两季日均水位高于调整期,由缓变期至调整期,灯笼山站日均水位平均上升0.01 m。

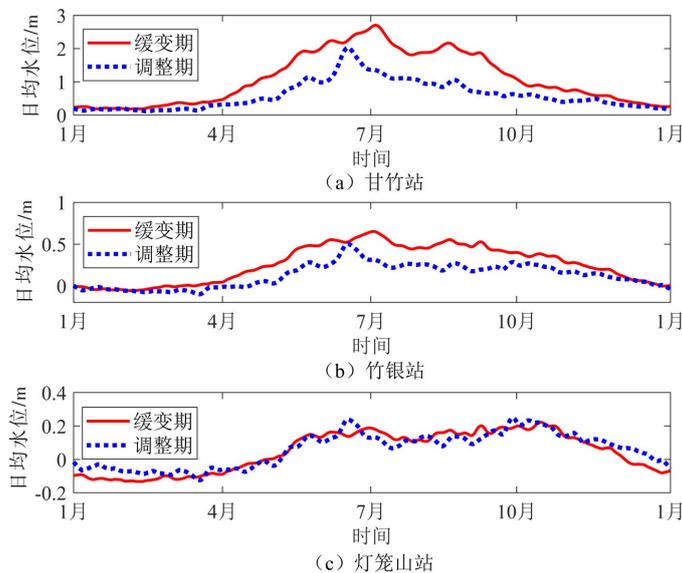


图3 磨刀门河口站点不同阶段日均水位的季节分布

**4.2 RTHA模型的率定与验证** 基于磨刀门河口实测日均水位的阶段性演变特征,采用RTHA模型反演缓变期阶段的日均水位时空变化,为模型效果评价提供依据。将缓变期分成2个阶段,缓变期前2/3(1959—1980年)时段用于参数率定并预报缓变期后1/3(1981—1990年)时段作进一步验证。模型率定及验证通过式(8)均方根误差( $RMSE$ )和式(9)相关系数( $R^2$ )来显示其模型效果。

图4为模型率定验证结果。表2显示的是缓变期以及率定与验证阶段的 $RMSE$ 、 $R^2$ 及利用PSO算

法得到的参数 $\gamma$ ，而各分潮参数由于数目众多并未在表2中显示。模型相关系数大于0.78，表明模拟效果较好，但由图4(a)可见该模型在大流量条件下存在较大误差；甘竹站缓变期整体日均水位的RMSE为0.19 m，竹银站缓变期整体日均水位的RMSE为0.19 m，灯笼山站整体缓变期日均水位的RMSE为0.20 m。RTHA数据驱动模型反演日均水位效果良好，可用于后续预报分析，后续预报过渡与调整期日均水位统一采用缓变期(1959—1990年)率定的参数 $\gamma$ (具体参数见表2)。

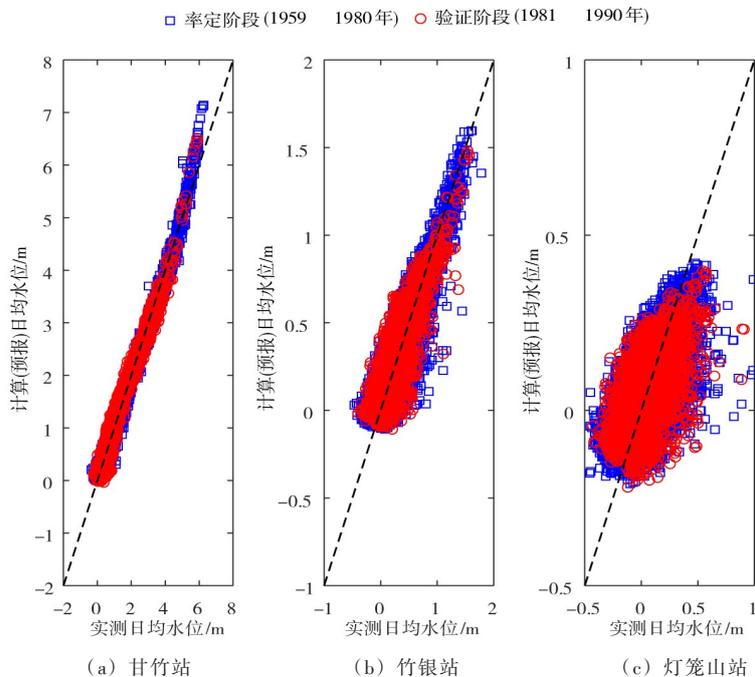


图4 磨刀门河口各站点RTHA模型计算值与实测值的对比

表2 率定及验证阶段RTHA模型参数及效果

站点	时段	参数		
		$\gamma$	$R^2$	RMSE
甘竹	率定阶段(1959—1980年)	1.07	0.97	0.18
	验证阶段(1981—1990年)	1.21	0.97	0.25
	缓变期(1959—1990年)	1.10	0.97	0.19
竹银	率定阶段(1959—1980年)	0.80	0.83	0.19
	验证阶段(1981—1990年)	0.98	0.80	0.20
	缓变期(1959—1990年)	0.85	0.82	0.19
灯笼山	率定阶段(1959—1980年)	0.23	0.79	0.20
	验证阶段(1981—1990年)	0.55	0.78	0.20
	缓变期(1959—1990年)	0.32	0.79	0.20

**4.3 日均水位的影响因子辨识** 图5是磨刀门河口甘竹、竹银与灯笼山站过渡及调整期日均 $\Delta_{\text{GEO\_MSL}}$ 与 $\Delta_{\text{DIS}}$ 的季节分布。根据甘竹、竹银与灯笼山站在磨刀门河口的空间位置其动力条件可分为3种类型，甘竹站为径流优势型、竹银站为径潮相互作用型、灯笼山站为潮流优势型。从 $\Delta_{\text{GEO\_MSL}}$ 季节分布来看，地形与海平面共同边界驱动下磨刀门河口3个站点由过渡期至调整期存在明显的累积现象，甘竹、竹银站累积效应主要体现在夏季，而灯笼山站的累积效应主要体现在秋、冬两季，说明人类活动改变地形以及海平面变化的影响都具有累积效应且呈现明显的季节特征。从过渡期至调整期，春夏两季的 $\Delta_{\text{GEO\_MSL}}$ 主要由挖沙导致的河床下切引起，累积效应量值持续增大方向为负(即日均水位下降)，秋冬两季由海平面及口门围垦主导， $\Delta_{\text{GEO\_MSL}}$ 持续增大方向为正(即日均水位抬升)，抬升最明

显的月份为10—11月。

三灶站日均水位的季节分布如图6(b)所示，其近似等效于海平面的季节分布，对比发现海平面在秋季(9—11月)有明显上升，与竹银、灯笼山站 $\Delta_{\text{GEO\_MSL}}$ 大于0的时间段吻合。海平面以及口门围垦对日均水位的影响越往上游其影响程度越弱，其影响主要体现在潮流优势及径潮相互作用河段(甘竹站调整期的 $\Delta_{\text{GEO\_MSL}}$ 仅在11月份略微大于0)，而挖沙对日均水位的影响主要体现在径流优势与径潮相互作用河段。

仅由上游流量边界驱动引起的日均水位变化 $\Delta_{\text{DIS}}$ 在过渡期呈现洪季抬升、枯季下降的变化趋势，这与过渡期内上游洪季流量大于缓变期，而枯季流量小于缓变期相对应，并未体现出水库的调蓄作用。西江磨刀门上游水库建设始于1964年，但库容小，大库容水库投入使用的时间为2000年(天生桥一级，库容量为103.60亿 $\text{m}^3$ )其库容量超过之前上游水库建设的总库容<sup>[18]</sup>，因此水库调蓄作用主要体现在调整期。当磨刀门河口进入调整期后， $\Delta_{\text{DIS}}$ 在7—11月出现明显下降，而1、2、12月出现明显抬升(图5(d)—图5(f))，这与图6(a)中马口站流量逐月分布因水库调蓄而发生洪季减小、枯季增大的季节性异变相对应。

地形与动力边界驱动下磨刀门河口日均水位调整期与缓变期的年均差值与季节差值如表3所示。由表3的年均差值可知，当磨刀门河口进入调整期后，甘竹、竹银的日均水位均有不同程度下降，

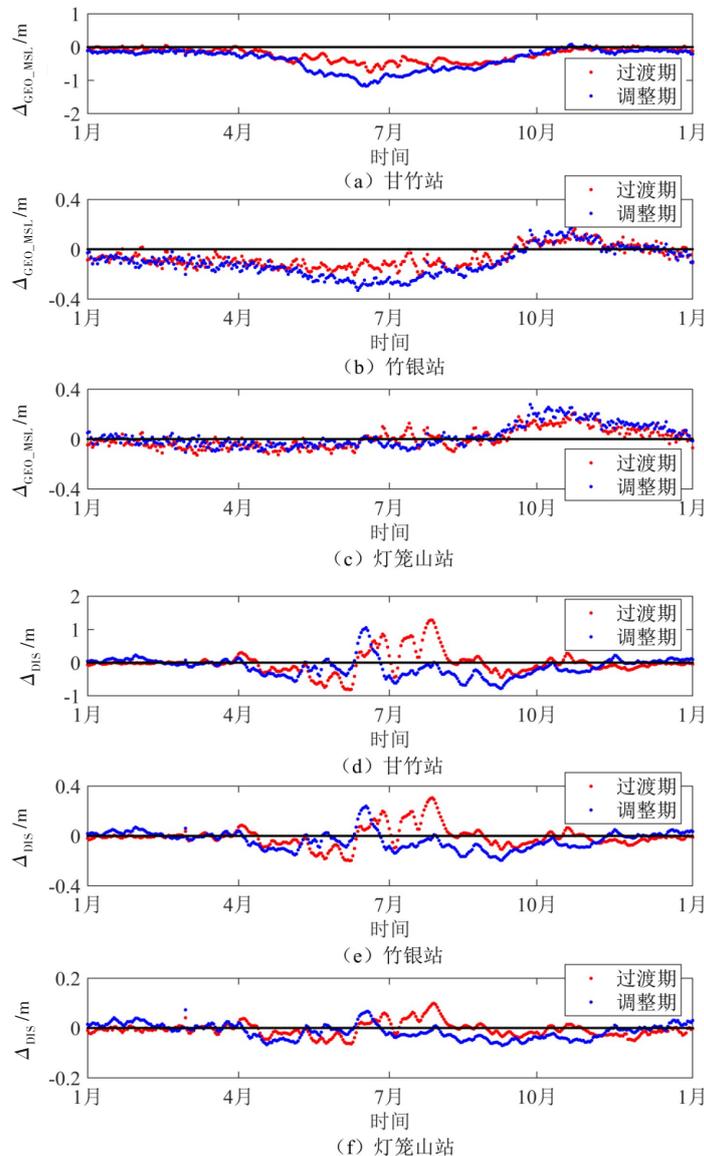


图5 过渡及调整阶段 $\Delta_{\text{GEO\_MSL}}$ 和 $\Delta_{\text{DIS}}$ 的季节分布

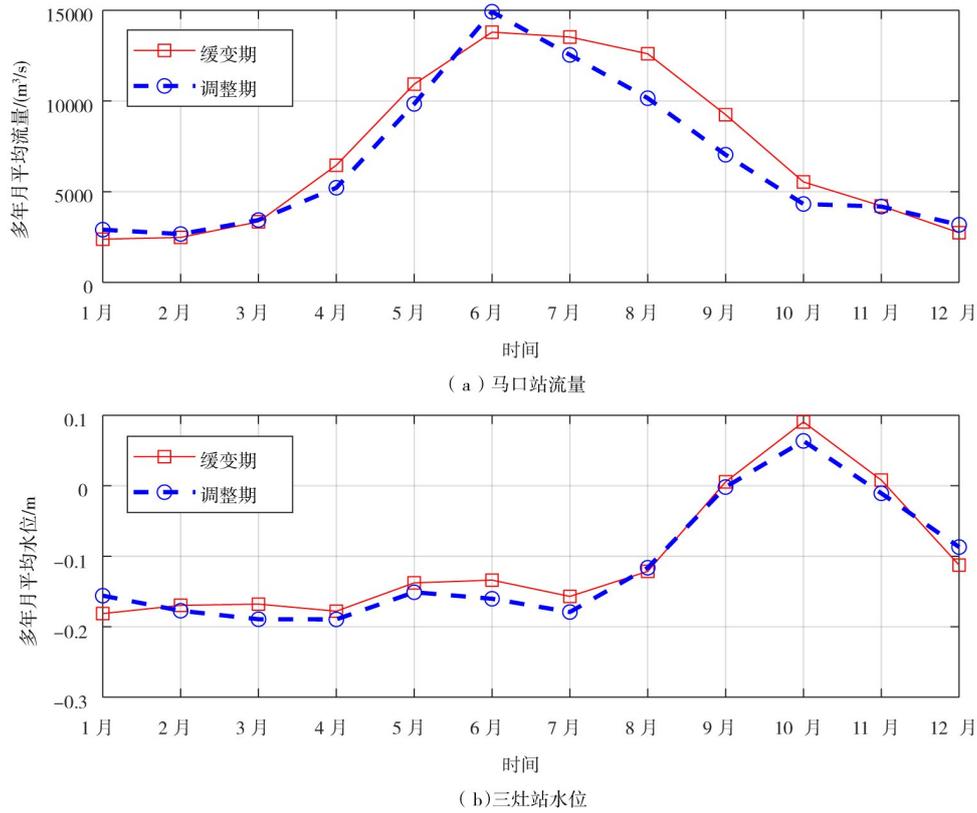


图6 磨刀门河口马口站流量与三灶站水位的季节分布

$\Delta_{TOT}$ 反映出越往上游(径流优势河段)下降幅度越大(甘竹站 $\Delta_{TOT} = -0.47$  m), 而下游灯笼山站 $\Delta_{TOT}$ 为正值即日均水位抬升(灯笼山站 $\Delta_{TOT} = 0.01$  m)。竹银与甘竹站 $\Delta_{GEO\_MSL}$ 为负值, 其中甘竹站 $\Delta_{GEO\_MSL}$ 达到 $-0.37$  m, 竹银站为 $-0.10$  m, 而灯笼山站是挖沙主要区域, 但 $\Delta_{GEO\_MSL}$ 为正值( $\Delta_{GEO\_MSL} = 0.02$  m), 说明灯笼山站受到与挖沙影响趋势相反的人类活动(如口门围垦)及海平面的影响, 且对日均水位的影响要大于挖沙活动。各站点 $\Delta_{DIS}$ 均为负值, 说明受上游水库调蓄影响下马口站日均流量整体减小导致磨刀门河口日均水位普遍下降。从量值上看 $\Delta_{GEO\_MSL}$ 对日均水位的影响明显大于 $\Delta_{DIS}$ 。

对比各站的季节差值, 甘竹与竹银站四季 $\Delta_{TOT}$ 变化趋势一致, 均表明日均水位下降, 呈现洪季大于枯季, 夏季最大, 冬季最小, 春秋两季交替的现象。灯笼山站四季 $\Delta_{TOT}$ 呈现秋冬季抬升(秋季 $\Delta_{TOT} = 0.01$  m、冬季 $\Delta_{TOT} = 0.06$  m)而春夏季减小的变化趋势, 与海平面的季节性变化相对应(图6(b))。

表3 磨刀门沿程站点缓变期至调整期的日均水位差 (单位: m)

潮位站	参数	春	夏	秋	冬	年均值
甘竹	$\Delta_{TOT}$	-0.47	-0.96	-0.45	-0.07	-0.49
	$\Delta_{DIS}$	-0.16	-0.18	-0.22	0.06	-0.13
	$\Delta_{GEO\_MSL}$	-0.37	-0.79	-0.16	-0.13	-0.37
	$\varepsilon$	0.05	0.01	-0.07	0.00	0.00
竹银	$\Delta_{TOT}$	-0.14	-0.25	-0.15	-0.02	-0.14
	$\Delta_{DIS}$	-0.04	-0.05	-0.07	0.02	-0.03
	$\Delta_{GEO\_MSL}$	-0.16	-0.22	0.03	-0.07	-0.10
	$\varepsilon$	0.06	0.02	-0.11	0.03	0.00
灯笼山	$\Delta_{TOT}$	-0.01	-0.02	0.01	0.06	0.01
	$\Delta_{DIS}$	-0.02	-0.02	-0.04	0.02	-0.01
	$\Delta_{GEO\_MSL}$	-0.05	-0.02	0.16	0.02	0.02
	$\varepsilon$	0.06	0.02	-0.10	0.02	0.00

各站 $\Delta_{DIS}$ 的四季变化规律一致，均呈现冬季抬升、春夏秋三季下降，这与水库洪季蓄水、枯季放水有良好的对应关系(图6(a))。但 $\Delta_{GEO\_MSL}$ 的季节性差异出现不同的变化趋势，甘竹站四季均值为负说明该区域水位变化主要受挖沙导致的地形下切所控制；竹银站春夏冬三季变化规律与甘竹站一致，但在秋季 $\Delta_{GEO\_MSL}$ 为正值( $\Delta_{GEO\_MSL} = 0.03 \text{ m}$ )，表明海平面以及口门围垦在竹银站秋季日均水位中占主导作用；灯笼山站的 $\Delta_{GEO\_MSL}$ 与其 $\Delta_{TOT}$ 规律一致，由于灯笼山站受到两种人类活动的影响且影响的趋势刚好相反，即在口门围垦和海平面综合作用下使得日均水位抬升，结果表现为灯笼山站秋冬两季的 $\Delta_{GEO\_MSL}$ 为正值(秋季 $\Delta_{GEO\_MSL} = 0.16 \text{ m}$ 、冬季 $\Delta_{GEO\_MSL} = 0.02 \text{ m}$ )，而挖沙使得日均水位下降导致灯笼山站春夏两季 $\Delta_{GEO\_MSL}$ 为负值(春季 $\Delta_{GEO\_MSL} = -0.05 \text{ m}$ 、夏季 $\Delta_{GEO\_MSL} = -0.02 \text{ m}$ )。

## 5 讨论

磨刀门河口主要潮位站日均水位发生阶段性变化，势必影响沿程日均水位坡度的时空分布。图7为灯笼山-甘竹河段日均水位坡度的季节分布。

将式(11)和式(12)中日均水位替换成日均水位坡度，则蓝、黑线围成的面积代表不考虑地形因素，仅由上游流量驱动的日均水位坡度变化值即 $\Delta_{S-DIS}$ ，红、黑线围成的面积代表地形及海平面边界共同引起的日均水位坡度变化值即 $\Delta_{S-GEO\_MSL}$ (图7阴影面积)。整体而言，灯笼山-甘竹河段日均水位坡度中 $\Delta_{S-GEO\_MSL}$ 所围的面积明显大于 $\Delta_{S-DIS}$ 所围面积，表明磨刀门河口地形与海平面边界对日均水位坡度的影响大于上游流量边界的影响。磨刀门河口灯笼山-甘竹河段日均水位坡度各参数如表4所示。由统计的日均水位坡度 $\Delta_{S-TOT}$ 的变化可知，整体而言强人类活动以及海平面上升使得磨刀门灯笼山-甘竹河段日均水位坡度变缓(即为负值)，夏季降幅最大(量值为 $3.43 \times 10^{-6}$ )，其次是春季和秋季，冬季变缓幅度最小。日均水位坡度的 $\Delta_{S-GEO\_MSL}$ 四季变化趋势与 $\Delta_{S-TOT}$ 一致，只是量值上有所差别；而日均水位坡度的 $\Delta_{S-DIS}$ 四季变化规律有所不同，受水库调蓄影响，秋季降幅大于春季(与 $\Delta_{S-TOT}$ 、

表4 灯笼山-甘竹河段缓变期至调整期的日均水位坡度差

区域	参数	春	夏	秋	冬	年均值
灯笼山-甘竹河段	$\Delta_{S-TOT}$	$-2.13 \times 10^{-6}$	$-4.20 \times 10^{-6}$	$-2.06 \times 10^{-6}$	$-5.82 \times 10^{-7}$	$-2.25 \times 10^{-6}$
	$\Delta_{S-DIS}$	$-6.71 \times 10^{-7}$	$-7.71 \times 10^{-7}$	$-6.89 \times 10^{-7}$	$1.13 \times 10^{-7}$	$-5.06 \times 10^{-7}$
	$\Delta_{S-GEO\_MSL}$	$-1.46 \times 10^{-6}$	$-3.43 \times 10^{-6}$	$-1.37 \times 10^{-6}$	$-6.95 \times 10^{-7}$	$-1.74 \times 10^{-6}$

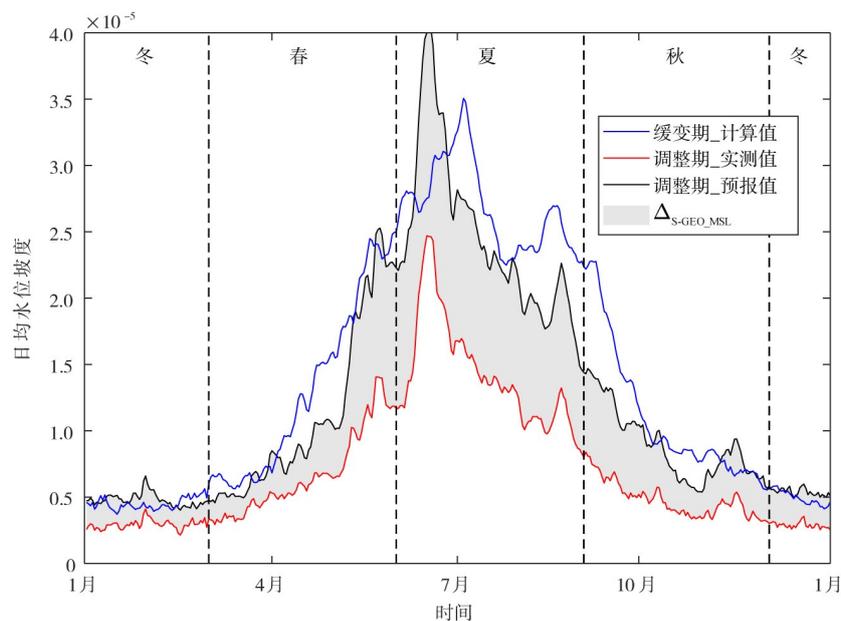


图7 甘竹-灯笼山段日均水位坡度的季节分布

$\Delta_{S-GEO\_MSL}$  规律不一致),而在冬季日均水位坡度的 $\Delta_{S-DIS}$ 为正值(量值为 $1.13 \times 10^{-7}$ ),即水库在冬季放水使得灯笼山-甘竹河段日均水位坡度变陡。

综上所述,磨刀门主要的三类强人类活动(上游水库建设叠加上无序挖沙和口门围垦)均导致沿程日均水位坡度变缓。根据简化的一维动量守恒过程可知,平均水位坡度项主要与有效摩擦项相平衡<sup>[11]</sup>,当平均水面坡降减缓,外海潮波传播所受的有效摩擦减弱,因此磨刀门河口潮差增大,咸潮上溯加剧。这表明珠江磨刀门河口进入调整期后的防洪纳潮、潮波传播及冲淤演变等正面临着水位坡降变缓和潮汐动力增强的影响。

## 6 结论

本文基于珠江磨刀门河口沿程5个站位1959—2016年的日均水位数据以及马口站日均流量数据,探究地形与动力边界异变格局下,甘竹、竹银、灯笼山站日均水位以及灯笼山-甘竹河段日均水位坡度的季节性异变,量化仅由上游流量驱动、地形变化与海平面共同驱动的日均水位(坡度)变化值,得到以下主要结论:

(1)由三灶-马口河段月均水位坡度的累积距平曲线可知,磨刀门河口的日均水位呈现出阶段性变化,1959—1990年为自然变化主导的缓变期、1991—2000年为强人类活动主导的过渡期、2001—2016年为自适应调整期。甘竹与竹银站日均水位由缓变期至调整期逐渐下降(分别下降0.49 m和0.13 m),灯笼山站日均水位总体上升0.01 m。因此造成磨刀门河口沿程水位坡降变缓,由缓变期至调整期,灯笼山-甘竹河段日均水位坡度平均下降 $6.75 \times 10^{-6}$ 。

(2)地形和海平面边界共同驱动下( $\Delta_{GEO\_MSL}$ ),磨刀门河口径流优势河段以及径潮相互作用河段的日均水位变化,均以河道下切作用主导,海平面和口门围垦作用仅在径潮相互作用河段的秋季成为主导因子。而在潮流优势河段中,洪季(春、夏)以河道下切因子为主,枯季(秋、冬)则替换成海平面以及口门围垦因子主导;其次 $\Delta_{GEO\_MSL}$ 具有累积效应,径流优势与径潮相互作用河段的累积效应均体现在夏季,而潮流优势河段则体现在秋、冬两季。上游流量边界驱动下( $\Delta_{DIS}$ ),磨刀门河口春夏秋三季的日均水位变化以水库蓄水主导,冬季则以水库调枯作用为主。整体而言, $\Delta_{GEO\_MSL}$ 对磨刀门河口日均水位的影响明显大于 $\Delta_{DIS}$ 。

(3)磨刀门河口上游水库建设导致仅由流量边界驱动下,灯笼山-甘竹河段冬季日均水位坡度变陡(冬季 $\Delta_{S-DIS}$ 为 $1.13 \times 10^{-7}$ );强人类活动改造地形边界叠加海平面变化导致灯笼山-甘竹河段日均水位坡度变缓,夏季 $\Delta_{S-GEO\_MSL}$ 变缓幅度最大(夏季 $\Delta_{S-GEO\_MSL}$ 为 $-3.43 \times 10^{-6}$ ),其次为春季、秋季,冬季变缓幅度最小(冬季 $\Delta_{S-GEO\_MSL}$ 为 $-6.95 \times 10^{-7}$ )。磨刀门河口日均水位坡度变缓导致潮波沿河口传播所受的有效摩擦减弱,磨刀门河口将面临潮汐动力增强导致咸潮与风暴潮强度加剧等自然灾害的影响。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] NEREM R S, BECKLEY B D, FASULLO J T, et al . Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era[J] . Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(9): 2022-2025 .
- [ 2 ] 陈吉余,程和琴,戴志军.河口过程中第三驱动力的作用和响应——以长江河口为例[J].自然科学进展,2008,18(9):994-1000 .
- [ 3 ] 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,2012(1):48-58 .
- [ 4 ] JAY D A, LEFFLER K, DEGENS S . Long-term evolution of Columbia River tides[J] . Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2011,137: 182-191 .
- [ 5 ] LIU F, XIE R Y, LUO X X, et al . Stepwise adjustment of deltaic channels in response to human interventions and its hydrological implications for sustainable water managements in the Pearl River Delta, China[J] . Journal of Hydrology, 2019, 573: 194-206 .

- [ 6 ] NITTROUER J A, SHAW J, LAMB M P, et al . Spatial and temporal trends for water-flow velocity and bed-material sediment transport in the lower Mississippi River[J] . Geological Society of America Bulletin, 2012, 124(3/4): 400-414 .
- [ 7 ] LAMB M P, NITTROUER J A, MOHRIG D, et al . Backwater and river plume controls on scour upstream of river mouths: Implications for fluvio-deltaic morphodynamics[J] . Journal of Geophysical Research Earth Surface, 2012, 117, F01002 .
- [ 8 ] BUSCHMAN F A, HOITINK A J F, VEGT M V D, et al . Subtidal water level variation controlled by river flow and tides[J] . Water Resources Research, 2009, 45(10):5803-5804 .
- [ 9 ] CHENG P, SWART H E D, VALLE LEVINSON A . Role of asymmetric tidal mixing in the subtidal dynamics of narrow estuaries[J] . Journal of Geophysical Research Oceans, 2013, 118(5): 2623-2639 .
- [ 10 ] JAY D A, LEFFLER K, DIEFENDERFER H L, et al . Tidal-Fluvial and Estuarine Processes in the Lower Columbia River: I . Along-Channel Water Level Variations, Pacific Ocean to Bonneville Dam[J] . Estuaries and Coasts, 2015, 38(2): 415-433 .
- [ 11 ] CAI H Y, SAVENIJE H H G, GAREL E, et al . Seasonal behaviour of tidal damping and residual water level slope in the Yangtze River estuary: identifying the critical position and river discharge for maximum tidal damping [J] . Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23, 2779-2794 .
- [ 12 ] GUO L, MICK V D W, JAY D A, et al . River-tide dynamics: Exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River estuary[J] . Journal of Geophysical Research Oceans, 2015, 120(5): 3499-3521 .
- [ 13 ] 杨昊, 欧素英, 姚鹏, 等 . 河口区斜压梯度对余水位的累积影响及其机制探讨[J] . 海洋学报, 2019, 41(1): 25-35 .
- [ 14 ] CAI H Y, SEBASTIANO P, HUANG J Z, et al . Quantifying the impact of the Three Gorges Dam on the thermal dynamics of the Yangtze River[J] . Environmental Research Letters, 2018, 13(5): 054016 .
- [ 15 ] CAI H Y, YANG H, LIU J Y, et al . Quantifying the impacts of human interventions on relative mean sea level change in the Pearl River Delta, China[J] . Ocean and Coastal Management, 2019, 173: 52-64 .
- [ 16 ] 展金泳, 张海荣, 李浩 . 粤港澳区域经济发展的时间演变与空间分布研究[J] . 城市发展研究, 2016, 23(8): 22-25 .
- [ 17 ] 吕海滨, 吴超羽, 刘斌 . 珠江口磨刀门整治前后水动力数值模拟[J] . 海洋科学, 2006, 30(11): 58-63 .
- [ 18 ] DAI S B, YANG S L, CAI A M . Impacts of dams on the sediment flux of the Pearl River, southern China[J] . Catena, 2008, 76(1): 0-43 .
- [ 19 ] LIU F, YUAN L, YANG Q S, et al . Hydrological responses to the combined influence of diverse human activities in the Pearl River delta, China[J] . Catena, 2014, 113: 41-55 .
- [ 20 ] 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 .
- [ 21 ] 贾良文, 吴超羽, 任杰 . 珠江口磨刀门河口动力平衡特点及人类活动对其影响[J] . 海洋工程, 2006, 24(2): 57-64 .
- [ 22 ] 张蔚, 严以新, 诸裕良, 等 . 人工采沙及航道整治对珠江三角洲水流动力条件的影响[J] . 水利学报, 2008, 39(9): 1098-1104 .
- [ 23 ] 何用, 卢陈, 杨留柱, 等 . 珠江河口口门区滩槽演变及对泄洪的影响研究[J] . 水利学报, 2018, 49(1): 72-80 .
- [ 24 ] 黄广灵 . 人类活动影响下的珠江河口洪水响应及其数值模拟[D] . 广州: 中山大学, 2012 .
- [ 25 ] 欧素英, 杨清书, 杨昊, 等 . 河口三角洲径流和潮汐相互作用模型及应用[J] . 热带海洋学报, 2017, 36(5): 1-8 .
- [ 26 ] MATTE P, SECRETAN Y, MORIN J . Temporal and spatial variability of tidal-fluvial dynamics in the St . Lawrence fluvial estuary: An application of nonstationary tidal harmonic analysis[J] . Journal of Geophysical Research Oceans, 2015, 119(9): 5724-5744 .
- [ 27 ] EBERHART R, KENNEDY J . A new optimizer using particle swarm theory[C]//MHS'95 . Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science . IEEE, 2002 .
- [ 28 ] 张宏利, 陈豫, 任广鑫, 等 . 近 50 年来渭河流域降水变化特征分析[J] . 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 236-241 .

## Quantifying the impacts of external forcing on daily averaged water levels in the Modaomen estuary of the Pearl River

YANG Hao<sup>1, 2, 3, 4</sup>, OU SuYing<sup>1, 2, 3, 4</sup>, FU LinXi<sup>1, 2, 3, 4</sup>, LIU Feng<sup>1, 2, 3, 4</sup>,  
CAI HuaYang<sup>1, 2, 3, 4</sup>, YANG QingShu<sup>1, 2, 3, 4</sup>

(1. Institute of Estuarine and Coastal Research, School of Marine Engineering and Technology,

Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510275, China;

3. Guangdong Provincial Engineering Research Center of Coasts, Islands and Reefs, Guangzhou 510275, China;

4. Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** The daily averaged water levels in the Modaomen estuary of the Pearl River are mainly driven by the natural processes and significant human interventions. Thus, the water level dynamics are featured by apparent stepwise evolution and seasonal variation. Understanding the evolution of water level dynamics and identifying the driving factors are essential with regard to sustainable water resources managements in estuaries. In this study, a data-driven model where the calibrated parameters were derived from river discharge was used to quantify the alterations in daily averaged water levels induced by the river flow observed at Makou station, and by the combined effects due to geometric change and mean sea level based on collected hydrological data from 5 stations along the Modaomen estuary over the period 1959–2016. The results show that the alterations in daily averaged water level driven by the combined effects of the geometric change and mean sea level in spring and summer are mainly controlled by sand excavation, leading to a reduction in the daily averaged water levels (decline by 0.26m on average) over the Denglongshan–Ganzhu reach; On the other hand, the alterations in autumn and winter are mainly controlled by land reclamation and mean sea level, leading to an increase in the daily averaged water levels (increase by 0.07m on average). The alterations in daily averaged water level driven by the river discharge is mainly due to the freshwater regulation by dams in the upstream catchment, which is negative in spring, summer and autumn, indicating a reduction in the daily averaged water levels (decrease by 0.13m on average), whereas it is positive in winter indicating an increase in the daily averaged water levels (increase by 0.03m on average). Overall, the combined influence of geometric change and mean sea level is stronger than that of freshwater regulation due to dam constructions.

**Keywords:** daily averaged water level; RTHA model; intensive human interventions; river discharge; mean sea level

(责任编辑: 杨虹)