

强人类活动驱动下珠江磨刀门河口径潮动力的季节性异变特征*

张先毅^{1, 2, 3, 4} 杨昊^{1, 2, 3, 4} 黄竞争^{1, 2, 3, 4} 傅林曦^{1, 2, 3, 4} 王恒^{1, 2, 3, 4}
刘俊勇⁵ 欧素英^{1, 2, 3, 4} 刘锋^{1, 2, 3, 4} 蔡华阳^{1, 2, 3, 4} 杨清书^{1, 2, 3, 4}

(1. 中山大学 海洋工程与技术学院 河口海岸研究所 广州 510275; 2. 河口水利技术国家地方联合工程实验室 广州 510275; 3. 广东省海岸与岛礁工程技术研究中心 广州 510275; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海) 珠海 519000; 5. 珠江水利科学研究院 广州 510611)

摘要 人类活动对河口环境影响巨大, 揭示在强人类活动驱动下河口径潮动力非线性相互作用的异变特征, 有利于了解人类活动影响河口动力地貌的机制, 对河口区水利工程建设及环境保护等具有重要指导意义。基于 1960—2016 年珠江磨刀门河口沿程潮位站(甘竹、竹银、灯笼山、三灶)的逐月高、低潮位数据及马口水文站的月均流量数据, 统计分析了磨刀门河口在强人类活动驱动下月均水位、潮波振幅及其空间梯度(即月均水位坡度和潮波振幅衰减率)的季节性异变特征。结果表明, 1990 年和 2000 年为磨刀门河口径潮动力的异变年份, 1990 年前为自然演变阶段, 2000 年后为恢复调整阶段, 1990—2000 年为过渡阶段; 高强度采砂导致的河床下切使磨刀门河口月均水位及月均水位坡度显著减小, 夏季减小幅度最为明显, 沿程平均分别减小 0.53m 和 8.93×10^{-6} ; 月均水位坡度减小导致潮波衰减效应减弱, 进而使沿程潮波振幅增大, 多年平均增大 0.071m; 磨刀门河口径潮动力相互作用具有明显的季节性差异, 夏季月均水位坡度随流量增大在上游抬升明显, 冬季月均水位坡度在上游显著减小, 但在下游略有抬升; 随着流量的增大潮波振幅的衰减作用增强, 但当流量超过阈值 $20000\text{m}^3/\text{s}$ 时, 月均水位坡度引起的底床摩擦增大效应不足以抵消横截面积辐散效应, 潮波衰减效应略有减弱。

关键词 径潮相互作用; 水位坡度; 潮波振幅衰减率; 强人类活动; 季节性变化

中图分类号 P731.23 **doi:** 10.11693/hyhz20190900176

河口处陆地与海洋的交界地带, 受上游径流和
外海潮波等自然因素共同作用, 径潮动力非线性相
互作用及多时空尺度变化显著(Guo *et al.*, 2014, 2015;
Jay *et al.*, 2015, 2016; 蔡华阳等, 2018; Cai *et al.*,
2018a)。然而, 由于自然资源丰富及交通条件便利,
河口地区人口高度集中, 经济及城镇化发展迅速, 人
类活动成为改变河口环境的第三驱动力(陈吉余等,
2008)。我国自 20 世纪以来河口地区人类活动大幅加

剧, 位于黄河的工农业引水引沙、干流水库建设等
人类活动影响了黄河口水沙分配, 导致水库上游主
槽淤积萎缩, 下游来水来沙减小, 海岸侵蚀加剧(陈
沈良等, 2004; 胡春宏等, 2008; 彭俊等, 2009)。长江
流域兴建的三峡工程, 导致入海泥沙急剧减少, 河床
发生侵蚀, 同时改变了长江河口流量的季节分配, 径
潮动力对三峡工程的响应具有显著的季节性变化(陈
吉余等, 1995; Dai *et al.*, 2013; Cai *et al.*, 2018a)。珠江

* 国家重点研发计划项目, 2016YFC0402600 号; 国家自然科学基金项目, 51709287 号, 51979296 号; 广东省自然科学基金项目, 2017A030310321 号; 广东省水利科技创新项目, 2016-20 号。张先毅, 硕士研究生, E-mail: zhangxy286@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 蔡华阳, 副教授, 硕士生导师, E-mail: caihy7@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2019-09-20, 收修改稿日期: 2019-12-09

河网区高强度采砂活动显著改变了西江和北江的水沙分配,增大了河槽容积进而使潮汐动力显著增强,而口门处滩涂围垦使河口三角洲淤积速率明显加快(张蔚等, 2008; Liu *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015)。本文把上述各种人为干预定义为强人类活动,即对河口环境的影响大大超过河口自身的调节和修复能力,使河口环境发生剧烈异变的高强度人类活动。在强人类活动影响下,河口“动力-沉积-地貌”格局发生异变,潮波振幅、余水位等潮波变量的变化特征不同于自然演变阶段,即河口径潮动力格局发生异变。研究全球气候变化背景下强人类活动对河口海岸环境的影响及异变问题,为河口环境保护与水资源可持续开发利用等提供科学依据,已成为当今世界河口海岸研究的重要课题(陈吉余等, 2002; Jay *et al.*, 2011; Cai *et al.*, 2019)。

国内外学者对河口区径潮动力的相互作用已有颇多研究,成果丰硕。研究表明,河口潮波传播变化主要受外海潮汐动力、河口地形及上游径流的非线性影响,且越往上游径流的季节性影响越显著(Jay *et al.*, 2015; Cai *et al.*, 2018a; 张先毅等, 2019)。径潮动力相互作用强度的改变直接影响河口区的泥沙输移及河口沿程悬沙浓度的分布和沉积动态,进而改变河口地貌形态(Guo *et al.*, 2014)。径流输入相当于增加涨潮阻力,使潮波传播能量损耗增大,导致潮波衰减增强,感潮河段的潮能也相应减小(Guo *et al.*, 2015; 欧素英等, 2016, 2017)。受径流影响强度较大的上游河段洪枯季流量差异明显,相应的潮波传播特征值(如潮差、水位等)亦有显著的季节性变化(刘新成等, 1999; 李国芳等, 2006)。径潮动力相互作用还直接影响河口盐水界、潮区界、潮流界和滞流点等特征动力界的移动,这些动力界距口门的距离基本与流量输入呈负相关关系,与外海潮汐动力呈正相关关系(An *et al.*, 2009; 黄李冰等, 2015; 路川藤等, 2016; 石盛玉等, 2018; 刘鹏飞等, 2018)。就河口区径潮动力的自然演变及其对外部动力的响应已有较多研究成果,然而强人类活动驱动下地形改变引起的径潮动力季节性异变过程及机制仍是尚待深入研究的科学问题。

珠江是我国第三大河,主要由西江、北江和东江三江汇流,并由崖门、虎跳门、鸡啼门、磨刀门、横门、洪奇门、蕉门和虎门八大口门汇入南海。位于西江下游的磨刀门河口是珠江输水输沙量最大的河口,径流作用强,是珠江最重要的泄洪通道。自 20 世纪 60 年代以来珠江流域上游建设水库 9000 余座,总蓄

水量高达 65km^3 ,占珠江年均流量的 23%(Dai *et al.*, 2008)。水库的建设使西江来沙量大幅减少,加剧下游河床的冲刷侵蚀作用(Zhang *et al.*, 2012)。同时由于西江干流的高强度采砂活动,其年均挖沙量已超过 249 万 m^3 ,加之珠江航道内实施的河道整治工程,使磨刀门河口底床严重下切(Luo *et al.*, 2007; 张蔚等, 2008)。位于磨刀门口门处的围垦工程(如白藤堵海工程和八一大围等)使口门滩地淤积,河宽束窄,磨刀门河口逐渐向窄深化演变(钱挹清, 2004; 贾良文等, 2007; 梁娟等, 2010; Tan *et al.*, 2015; 胡煌昊等, 2016)。强人类活动驱动下的地形异变直接改变磨刀门河口的径潮动力相互作用过程,河床下切使河口中上段水位显著下降,而海平面上升背景下滩涂围垦使口门附近水位略有抬升,最终导致磨刀门河口沿程平均水位坡度变缓(贾良文等, 2006; Cai *et al.*, 2018b),对潮波传播的衰减效应减弱,潮汐动力明显增强(Liu *et al.*, 2019)。而底床下切和水深增大则进一步减小潮波上溯过程所受的底床摩擦,加剧盐水界、潮流界和潮区界的上移,导致近年来磨刀门河口盐水入侵加剧(贾良文等, 2007; 韩志远等, 2010)。

综上所述,对强人类活动驱动下磨刀门河口地貌及动力格局演变已取得丰富研究成果,然而针对异变格局下径潮动力的季节性变化特征及其对强人类活动的响应过程与机制还有待进一步探索。本文通过对 1960—2016 年磨刀门河口沿程 5 个测站的月均高、低潮位资料及上游马口水文站的月均流量数据进行统计分析,重点分析强人类活动影响下磨刀门河口径潮动力的季节性异变过程及机制,为磨刀门河口的水沙调控及水资源高效开发利用等提供技术支撑。

1 研究区域概况

本文研究区域为珠江磨刀门河口,包括西江干流水道和磨刀门水道(图 1)。其中,思贤滘西滘口至百顷头约 86km 河段称为西江干流水道,百顷头至磨刀门口门约 60km 河段称为磨刀门水道(罗宪林, 2002)。上游流量控制站为马口水文站,沿程有甘竹、竹银、灯笼山、三灶 4 个潮位站(如图 1 所示)。磨刀门河口每日基本有两次涨潮两次落潮,口门附近灯笼山站的潮性系数为 1.5(梁娟等, 2010),属于不规则半日混合潮。位于口门处的三灶站多年平均潮差为 1.09m,属于弱潮型河口。磨刀门河口是珠江输水输沙量最大的口门,多年平均径流量达 923 亿 m^3 ,约占马口站径流量的三分之一(蔡华阳等, 2009)。西北江

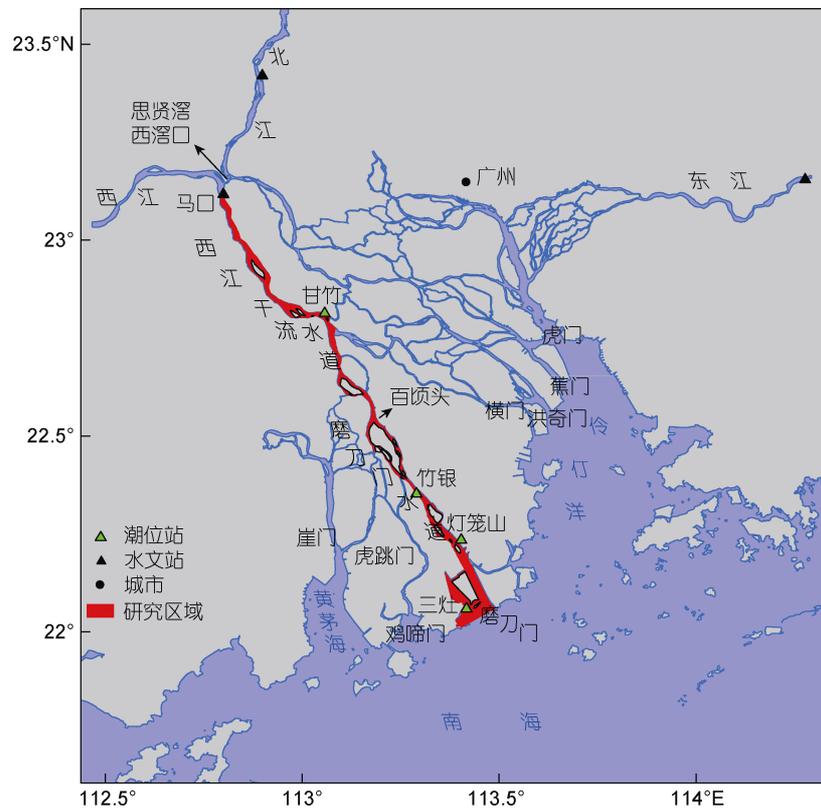


图1 研究区域图

Fig.1 Map of the study area (in red)

水在思贤滘汇合分流后经过马口站进入西江干流水道, 而后大部分通过磨刀门水道流入外海。据马口水文站 1960—2016 年月均资料统计, 其多年平均流量为 $7078\text{m}^3/\text{s}$, 最大月均流量达 $29000\text{m}^3/\text{s}$, 最小月均流量为 $1210\text{m}^3/\text{s}$, 流量季节性变化显著。

2 研究资料与方法

2.1 研究资料

本文收集了 1960—2016 年马口、甘竹、竹银、灯笼山和三灶 5 个测站的逐月高、低潮位, 以及马口站的月均流量数据。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。

2.2 研究方法

为分析磨刀门河口径潮动力的时空变化特征, 基于沿程各站位的月均高潮位(H_{HW})和低潮位(H_{LW})数据, 统计得到各个站位的月平均水位(m), 即月均高潮位与月均低潮位的平均值

$$\bar{z} = \frac{H_{\text{HW}} + H_{\text{LW}}}{2}, \quad (1)$$

和潮波振幅(m)

$$\eta = \frac{|H_{\text{HW}} - H_{\text{LW}}|}{2}. \quad (2)$$

并进一步计算得到月均水位和潮波振幅的空间梯度值, 即月均水位坡度 S 和潮波振幅衰减率 D 。

月均水位坡度 S 定义为月均水位随距离的变化率

$$S = \frac{\Delta z}{\Delta x}, \quad (3)$$

式中, z 为相邻两潮位站之间的月均水位之差, 即

$$\Delta z = z_{i+1} - z_i, \quad (4)$$

z_{i+1} (m)为河口上游站点的月均水位, z_i (m)为河口下游站点的月均水位, x (m)为两测站沿河道中轴线测得的距离。

潮波振幅衰减率 $D(\text{m}^{-1})$ 定义为单位潮波振幅的振幅随距离的变化率

$$D = \frac{1}{\eta} \frac{\Delta \eta}{\Delta x}, \quad (5)$$

式中, $\bar{\eta}$ 为两潮位站振幅的平均值, 即

$$\bar{\eta} = \frac{\eta_i + \eta_{i+1}}{2}, \quad (6)$$

$\Delta \eta$ 为两潮位站之间的振幅之差, 即

$$\Delta\eta = \eta_{i+1} - \eta_i, \quad (7)$$

$\eta_{i+1}(m)$ 为河口上游站点的潮波振幅, $\eta_i(m)$ 为河口下游站点的潮波振幅。

双累积曲线方法是检验两个参数之间关系一致性及其变化的常用方法, 目前常用于水文气象要素一致性或长期演变趋势分析(穆兴民, 2009)。所谓双累积曲线就是在直角坐标系中绘制出两个相关参数累积值的关系线, 其斜率发生突变的点就是两参数累积关系出现突变的时间。本文采用双累积曲线方法, 确定强人类活动驱动下磨刀门河口月均水位坡度与流量、潮波振幅衰减率与流量之间累积关系的突变点, 从而对径潮动力的异变过程进行阶段性划分, 并进行对比研究。

本文采用一维动量守恒方程对强人类活动驱动下磨刀门河口的径潮动力异变特征进行机制分析, 其方程如下(Cai *et al.*, 2019):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{gh}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + g \frac{U|U|}{K^2 h^3} = 0, \quad (8)$$

式中, $U(m/s)$ 为断面平均流速, $Z(m)$ 为自由水面高程, $h(m)$ 为水深, $g(m/s^2)$ 为重力加速度, $t(s)$ 是时间, $\rho(kg/m^3)$ 为密度, $x(m)$ 为距离口门的距离, $K(\sqrt[3]{m/s^2})$ 为曼宁摩擦系数的倒数。式(8)左边第5项为底摩擦项, 其与水深的 $4/3$ 次方呈反比, 即水深越浅, 潮波传播所受的底床摩擦越大。忽略惯性加速度项 $U \frac{\partial U}{\partial x}$ 和密

度梯度引起的斜压项 $\frac{gh}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}$, 假设流速 U 呈周期性变化, 对式(8)在一个潮周期内进行积分, 可得:

$$\frac{\overline{\partial Z}}{\partial x} = - \frac{\overline{U|U|}}{K^2 h^3}, \quad (9)$$

式中, 上划线表示潮周期平均。由式(9)可见潮平均条件下月均水位坡度主要与底摩擦项相平衡。

3 磨刀门河口径潮动力的季节性异变过程分析

3.1 异变过程的阶段性划分

通过双累积曲线关系图, 可以探究因变量(如月均水位坡度和潮波振幅衰减率)和主要控制变量(如流量)之间的趋势性变化, 从而根据转折点确定强人类活动对河口径潮动力的累积影响及其异变时间节点。图 2 为磨刀门河口灯笼山-马口河段累积月均水位坡度与潮波振幅衰减率绝对值随累积流量的趋势变化, 对月均水位坡度、潮波振幅衰减率绝对值和流量均作归一化处理, 即变量减去最小值, 再除以最大值与最小值的差值。由图 2 可见, 累积月均水位坡度和潮波振幅衰减率绝对值随流量变化的斜率值分别在 1990 年与 2000 年发生明显改变。其中, 累积月均水位坡度的斜率由 1990 年前的 0.97 减小至 2000 后的 0.52, 累积潮波振幅衰减率绝对值的斜率由 1990 年前的 2.37 减小至 2000 后的 0.66, 表明在强人类活动影响下, 相同流

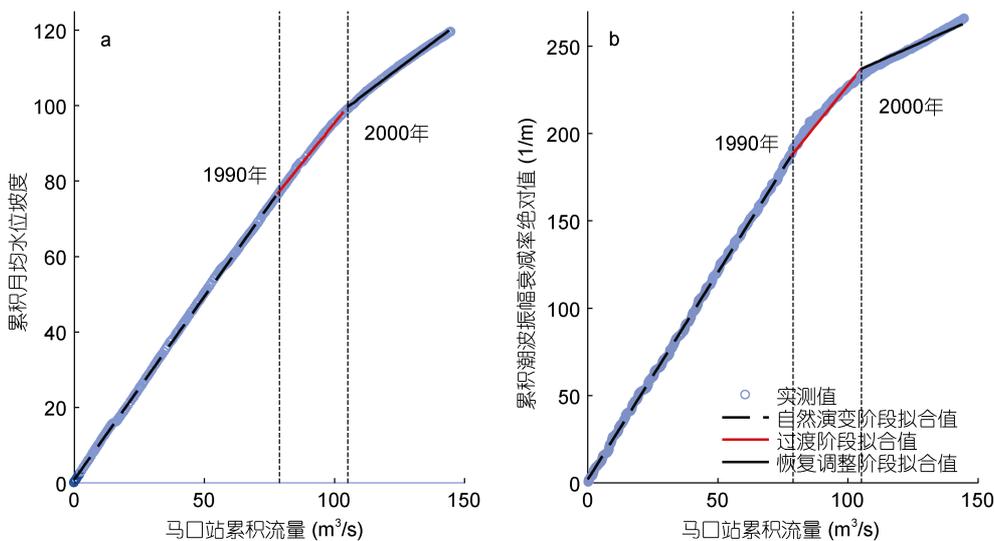


图 2 灯笼山-马口月均水位坡度与流量的累积关系(a)和潮波振幅衰减率绝对值与流量的累积关系(b)

Fig.2 Cumulative relationship between monthly average water level slope and river discharge (a), absolute value of tidal damping rate and river discharge (b) in the Denglongshan-Makou gauging station

量条件下月均水位坡度减缓, 潮波振幅衰减率绝对值减小(即衰减效应减弱)。磨刀门河口径潮动力的阶段性变化与强人类活动强度有关, 1990 年前磨刀门河口人类活动影响相对较弱, 属自然演变阶段, 1990—2000 年为强人类活动干预最剧烈的时期, 磨刀门河口处于过渡阶段, 其中, 高强度采砂、围垦等强人类活动对河口系统的累积效应最终在 2000 年使径潮动力发生异变, 而 2000 年后部分环保政策(如禁止采砂)的提出, 使磨刀门河口受强人类活动的影响有所减弱, 河口进入恢复调整阶段。因此, 根据月均水位坡度-流量和潮波振幅衰减率绝对值-流量的双累积曲线关系变化, 可把 1990 年前划分为强人类活动影响前的自然演变阶段, 2000 年后划分为受强人类活动影响后的恢复调整阶段, 1990—2000 年为过渡阶段。

3.2 磨刀门河口月均水位和振幅的异变过程分析

为揭示强人类活动驱动下磨刀门河口径潮动力的季节性异变过程, 以 1990 年和 2000 年作为磨刀门受强人类活动作用发生异变的分界年份, 1990 年前为自然演变阶段, 2000 年后为恢复调整阶段, 1990—2000 年为过渡阶段, 分别对比自然演变阶段与恢复调整阶段月均水位和潮波振幅的差异。图 3 为不同季节条件下月均水位(图 3a—d)和振幅(图 3e—h)在强人类活动前后(分别对应自然演变阶段与恢复调整阶段)

的时空变化。由图 3a—d 可见, 月均水位在口门处三灶站最小, 往上游逐渐上升; 沿程月均水位在夏季上升幅度最大, 从口门三灶至上游马口站月均水位增幅大于 2m, 其次为春季和秋季, 月均水位增幅约为 1m, 而冬季月均水位增幅最小, 在 0.5m 以下; 受强人类活动影响月均水位总体减小, 且越往上游减小幅度越大, 其中夏季减小幅度最大(甘竹和马口站分别减小 0.86m 和 1.53m), 其次为春、秋两季, 冬季最小, 这主要受河道不均匀采砂影响; 但冬季靠近下游端的三灶、灯笼山和竹银站在强人类活动影响后略有增大(见表 1), 这主要与海平面的季节性变化及口门围垦的共同作用有关。图 3e—h 显示的磨刀门沿程各站点月均潮波振幅的时空变化可见, 潮波振幅在三灶站最大, 向上游逐渐减小, 表明潮波沿河口向上传播过程逐渐衰减; 强人类活动影响后磨刀门河口全河段潮波振幅普遍增大, 仅在口门三灶站略有减小, 且越往上游强人类活动前后的振幅差异越大, 表明河口中上段受强人类活动的影响较显著; 由表 1 统计结果可知, 强人类活动影响后灯笼山-马口沿程各站点月均振幅增幅最明显的是秋季(沿程平均潮波振幅增大 0.086m), 其次是春季和夏季(沿程平均潮波振幅分别增大 0.073m 和 0.065m), 冬季最小; 值得注意的是, 强人类活动影响后夏季马口站的振幅增幅最小,

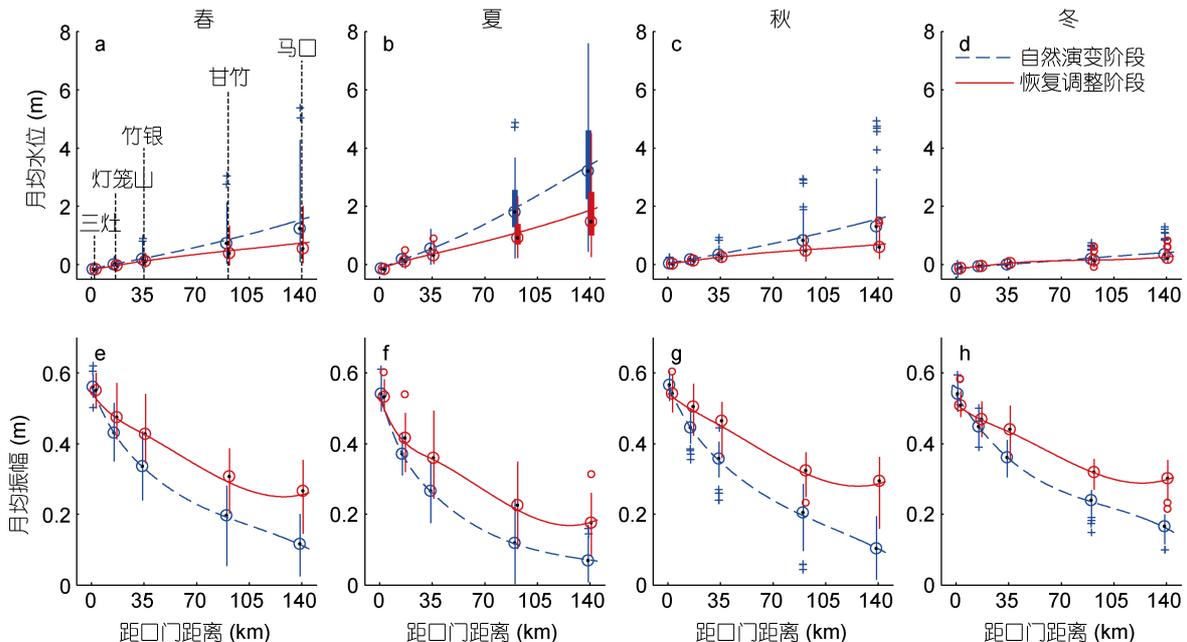


图 3 磨刀门河口沿程站点月均水位(a—d)与月均振幅(e—h)的时空变化箱线图

Fig. 3 Spatial-temporal variational boxplot of monthly averaged water level (a—d) and tidal amplitude (e—h) in the Modaomen estuary
注: 图中圆圈表示各站点变量的均值, 矩形色块表示各站点变量对应的箱线图

表 1 自然演变阶段与恢复调整阶段不同季节平均水位与潮波振幅变化的差值
Tab.1 Seasonal variation in monthly average water level and tidal amplitude in pre-and post-human periods

研究河段	水位(m)				振幅(m)			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
三灶	-0.010	-0.013	-0.015	0.020	-0.017	-0.012	-0.024	-0.026
灯笼山	-0.052	-0.060	-0.056	0.015	0.046	0.039	0.052	0.024
竹银	-0.094	-0.188	-0.108	0.040	0.095	0.094	0.101	0.074
甘竹	-0.374	-0.859	-0.438	-0.069	0.102	0.100	0.122	0.085
马口	-0.795	-1.534	-0.871	-0.155	0.139	0.103	0.179	0.133
沿程平均值	-0.265	-0.531	-0.298	-0.03	0.073	0.065	0.086	0.058

仅为 0.103m, 这可能与磨刀门河口夏季流量较大有关, 相同地形下切条件下, 潮波振幅增大的趋势受高流量影响反而有所抑制。

3.3 磨刀门河口月均水位坡度和潮波振幅衰减率的时空变化特征

图 4—5 分别为月均水位坡度和潮波振幅衰减率随流量的时空变化箱线图, 图中横坐标表示以 $5000\text{m}^3/\text{s}$ 间隔的流量区间, 每个箱线表示月均水位坡度或潮波振幅衰减率在相应流量区间内的变化情况。流量区间介于 $25000\text{—}30000\text{m}^3/\text{s}$ 内的只显示代表自然演变阶段的蓝色箱, 这是因为强人类活动干扰后(即

2000—2016 年), 受上游水库调蓄影响, 马口站最大月均流量未超过 $25000\text{m}^3/\text{s}$ 。由图 4 可见, 月均水位坡度随流量增大而增大, 且越往上游月均水位坡度对流量的响应越明显; 对比自然演变与恢复调整阶段的月均水位坡度可见, 磨刀门河口月均水位坡度普遍变缓, 靠近口门的三灶-灯笼山段月均水位坡度变缓幅度最小, 灯笼山-竹银、竹银-甘竹及甘竹-马口河段月均水位坡度随流量增大其减小幅度亦增大, 但当流量大于 $20000\text{m}^3/\text{s}$ 时, 强人类活动影响下甘竹-马口段的月均水位坡度减小幅度反而减小, 表明强人类活动干扰下月均水位坡度随流量的变化呈现非线性。

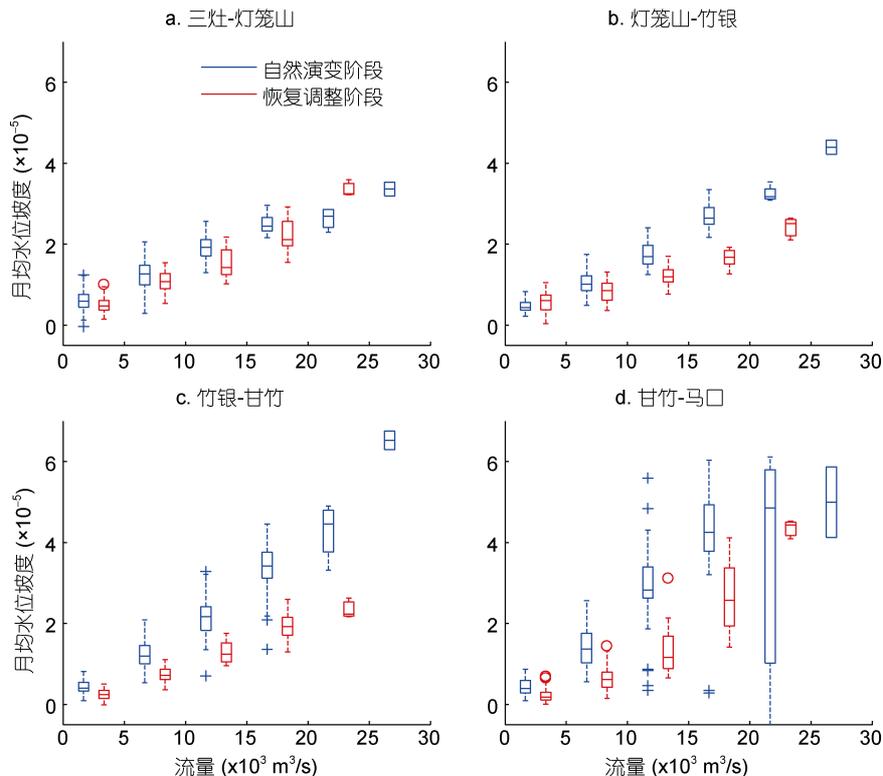


图 4 自然演变阶段与恢复调整阶段沿程月均水位坡度随上游流量的变化关系

Fig.4 Relationship between monthly average water level and river discharge in pre- and post-human periods in the Modaomen estuary

潮波振幅衰减率绝对值表示潮波所受衰减作用的强弱。由图 5 可见, 衰减作用基本与流量呈正相关关系, 即随着流量增大, 潮波振幅衰减率绝对值亦增大; 下游潮波振幅衰减率绝对值明显大于上游, 表明潮波在下游所受衰减作用较上游强; 由各河段潮波振幅衰减率随流量变化的幅度可知, 靠近口门的三灶-灯笼山段随流量变化的幅度最大, 减小幅度可达 1×10^{-5} , 越往河口上游其变化幅度越小, 表明潮波衰减效应增强对流量增大的响应程度逐渐减弱。从自然演变阶段与恢复调整阶段箱线大小来看, 灯笼山-

马口段箱线大小在恢复调整阶段明显减小, 表明强人类活动后磨刀门河口潮波振幅衰减率对流量的响应减弱。此外, 甘竹-马口段潮波振幅衰减率随流量变化有先减小后上升的特点, 即存在阈值效应。自然演变阶段在 $5000-10000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量条件时潮波振幅衰减率达到最小值(即衰减作用最强), 随后逐渐上升, 即潮波振幅衰减减弱; 而恢复调整阶段, 在流量 $15000-20000 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件时潮波振幅衰减率才出现上升, 即受强人类活动影响后达到潮波振幅衰减率阈值所需的流量增大。

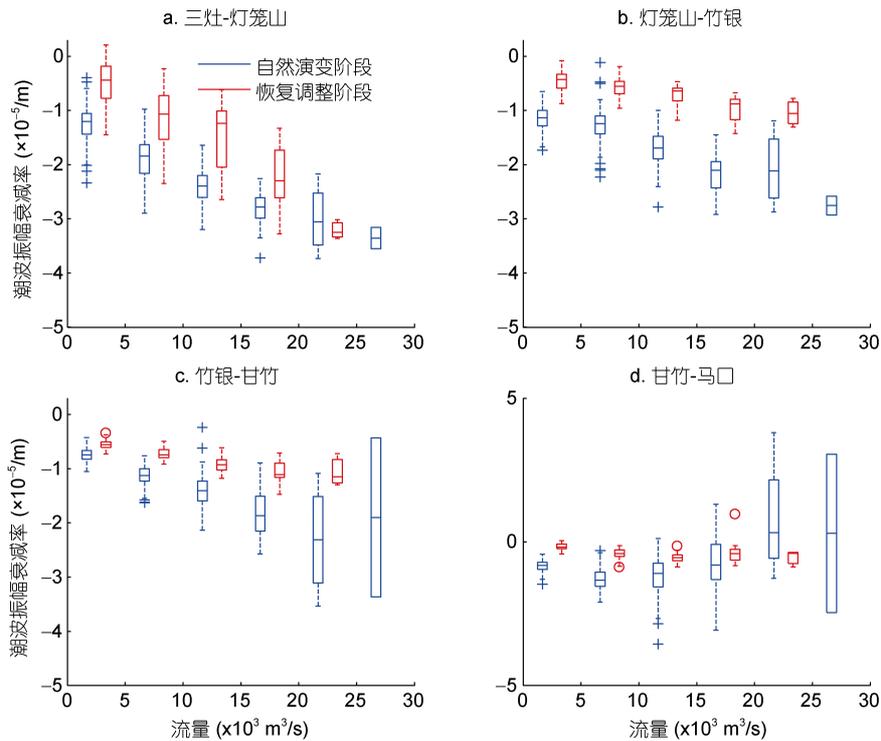


图 5 自然演变阶段与恢复调整阶段沿程潮波振幅衰减率随上游流量的变化关系

Fig.5 Relationship between tidal damping rate and river discharge in pre- and post-human periods in the Modaomen estuary

图 6 为自然演变阶段与恢复调整阶段季节平均的月均水位坡度与潮波振幅衰减率的沿程变化。总体来看, 平均水位坡度在夏季最大, 春、秋两季次之, 冬季最小, 这与流量的季节性变化基本一致; 平均水位坡度在自然演变阶段从下游至上游有逐渐增大趋势, 在春、夏、秋三季竹银站下游河段水位坡度变化不大, 而在竹银站上游河段水位坡度发生明显抬升, 冬季水位坡度沿程上升不明显; 强人类活动影响后的恢复调整阶段月均水位坡度基本不再出现明显上升的河段, 从下游至上游坡度逐渐变缓, 仅在夏季甘竹-马口段有所上升。潮波振幅衰减率绝对值在下游三灶-灯笼山站最大, 且夏季衰减率明显大于其他三

个季节, 表明夏季潮波在口门处所受衰减作用最强; 恢复调整阶段潮波振幅衰减率绝对值在三灶-灯笼山、灯笼山-竹银河段出现明显减小(表示潮波衰减效应减弱), 但在竹银以上河段变化较下游小(见表 2), 表明竹银站以下河段潮波振幅衰减率受强人类活动的影响较上游河段大。

表 2 是月均水位坡度与潮波振幅衰减率由自然演变阶段过渡到恢复调整阶段的变化值。由表 2 可见, 受强人类活动驱动, 月均水位坡度减小幅度在冬季最小, 沿程平均仅减小 6.75×10^{-7} ; 夏季减小幅度最大, 沿程平均减小幅度达 8.93×10^{-6} ; 春、秋两季减小幅度相似, 沿程平均分别减小 4.66×10^{-6} 和 5.07×10^{-6} ,

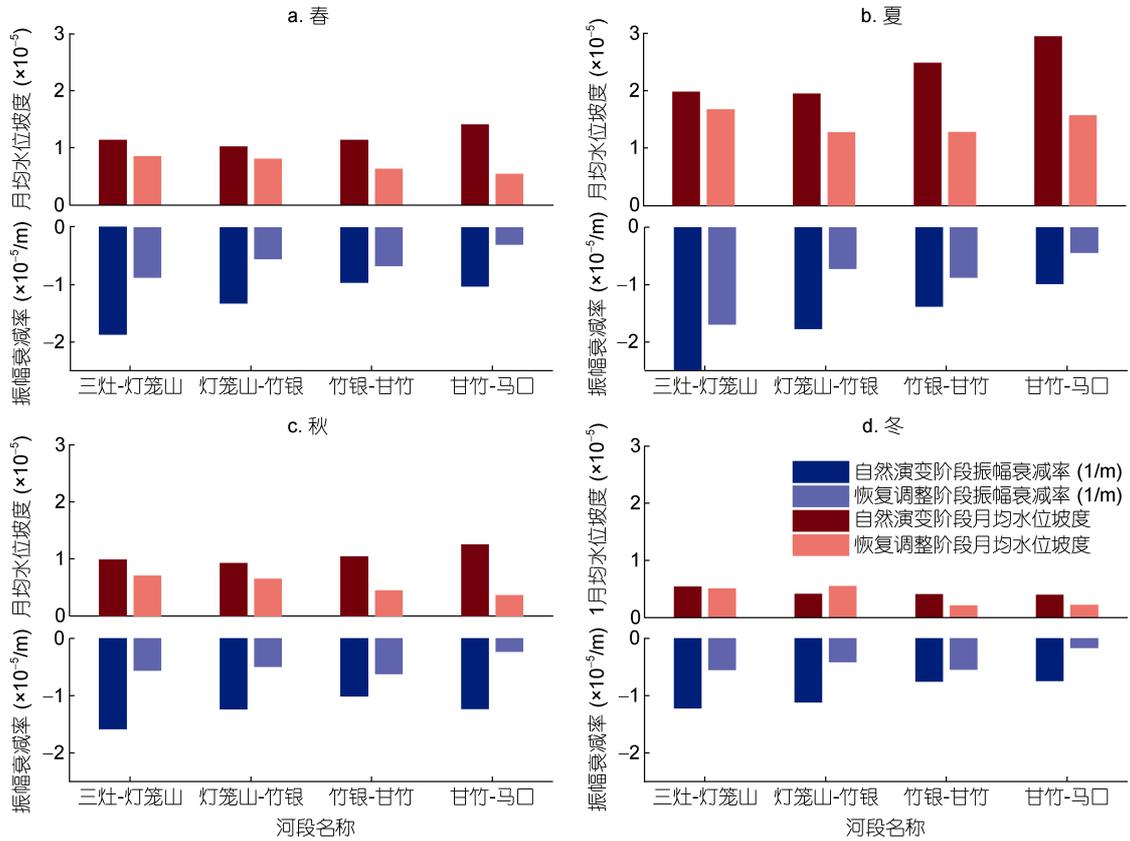


图 6 自然演变阶段与恢复调整阶段不同季节平均水位坡度和潮波振幅衰减率的时空变化
Fig.6 Seasonal changes in monthly average water level slope and tidal damping rate in pre- and post-human periods

表 2 自然演变阶段与恢复调整阶段季节平均水位坡度与潮波振幅衰减率的差值
Tab.2 Seasonal variations in monthly average water level slope and tidal damping rate in pre- and post-human periods

研究河段	坡度				衰减率(1/m)			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
三灶-灯笼山	-2.28×10^{-6}	-3.12×10^{-6}	-2.77×10^{-6}	-3.19×10^{-7}	8.79×10^{-6}	8.02×10^{-6}	1.02×10^{-5}	6.72×10^{-6}
灯笼山-竹银	-2.18×10^{-6}	-6.72×10^{-6}	-2.72×10^{-6}	1.34×10^{-6}	7.71×10^{-6}	1.05×10^{-5}	7.40×10^{-6}	7.06×10^{-6}
竹银-甘竹	-5.06×10^{-6}	-1.21×10^{-5}	-5.95×10^{-6}	-1.96×10^{-6}	2.97×10^{-6}	5.05×10^{-6}	3.93×10^{-6}	2.10×10^{-6}
甘竹-马口	-8.59×10^{-6}	-1.38×10^{-5}	-8.84×10^{-6}	-1.76×10^{-6}	7.32×10^{-6}	5.45×10^{-6}	9.99×10^{-6}	5.78×10^{-6}
沿程平均值	-4.66×10^{-6}	-8.93×10^{-6}	-5.07×10^{-6}	-6.75×10^{-7}	6.70×10^{-6}	7.27×10^{-6}	7.88×10^{-6}	5.42×10^{-6}

介于夏、冬之间。恢复调整阶段潮波振幅衰减率在竹银-甘竹河段增幅最小(表明衰减效应减弱不明显),但增幅在甘竹-马口河段增大,衰减率增幅沿程有先减小后增大的特点,仅夏季和冬季在灯笼山-竹银段增幅较下游三灶-灯笼山段有所增大。

4 强人类活动驱动下径潮动力的异变机制分析

通过上述对月均水位、潮波振幅及其空间梯度值时空变化的统计分析,可知强人类活动驱动下磨刀门河口径潮动力有以下基本特征:(1)潮波振幅在三

灶站减小,而在灯笼山-马口段均有所增大;(2)月均水位普遍减小,但在冬季竹银以下河段增大;(3)潮波衰减效应减弱,但随流量变化的幅度不大;(4)月均水位坡度明显减小,且灯笼山-甘竹段月均水位坡度随流量的变化幅度显著减小。

磨刀门口西侧(白藤湖等)的围填海工程使浅滩明显淤积,导致口门三灶站水深变浅,三灶湾内海区纳潮量仅剩约 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$,仅为原来的 1/4(贾良文等, 2007),由式(8)可知口门处底床摩擦增大,潮波振幅衰减增强,最终使潮差减小。而灯笼山-马口河段为磨刀门河口的主干道,受高强度采砂活动影响,加之

游水库建设导致来沙减少, 底床严重下切, 过渡阶段平均下切量在竹银-甘竹段高达 1.73m(罗宪林, 2002; Luo *et al.*, 2007)。水位为适应底床坡度的改变而下降, 导致磨刀门河道月均水位坡度减小。由式(9)可知月均水位坡度减小等效于减弱潮波沿河口传播所受的底床摩擦, 导致磨刀门河道的潮波振幅衰减减弱, 潮差明显增大。同时, 采砂活动和水库建设等强人类活动引起的河槽容积增大, 导致月均水位坡度对径流的响应减弱, 只有在靠近上游的甘竹-马口段才随流量发生明显变化。可见, 强人类活动驱动下磨刀门河口底床发生显著下切, 月均水位为适应底床坡度变化, 月均水位坡度变缓, 潮波振幅衰减效应减弱, 最终导致潮动力显著增强。

在强人类活动驱动下磨刀门河口的径潮动力还具有明显的季节性变化。月均水位坡度在夏季明显大于其他季节, 这与磨刀门河口流量主要集中在 6—8 月有关。图 6 显示月均水位坡度在自然演变阶段, 向上游沿程基本呈上升趋势, 表明越往上游径流对潮波传播的影响越大; 而冬季流量较小, 月均水位

抬升微弱, 因此坡度增大不明显。在强人类活动驱动下竹银以上河段底床下切严重, 导致月均水位下降, 月均水位坡度明显变缓, 仅在流量较大的夏季月均水位坡度才会有较小的抬升。在冬季, 竹银站及其下游河段受围垦及全球海平面上升影响, 月均水位有明显抬升, 且这种抬升现象在竹银最明显, 导致灯笼山-竹银段月均水位坡度大于自然演变阶段, 而在竹银-甘竹段月均水位坡度则急剧减小(较灯笼山-竹银段减小 57%)。

另外, 值得注意的是夏季马口站潮波振幅的年际差异有所减小(图 3), 这是由于自然演变阶段甘竹-马口站潮波振幅衰减率随流量的变化存在阈值现象, 即当夏季流量超过阈值后潮波振幅衰减效应反而减弱, 潮波振幅随流量增大的下降幅度反而减小, 导致其潮波振幅年际差异减小。为分析潮波振幅衰减率随流量产生阈值现象的原因, 做出月均潮波振幅衰减率随月均水位坡度变化的关系曲线(图 7)。随着月均水位坡度的增大, 二次拟合线呈上凹形, 即上游甘竹-马口河段潮波振幅衰减率先减小后增大(图 7d)。由式(9)

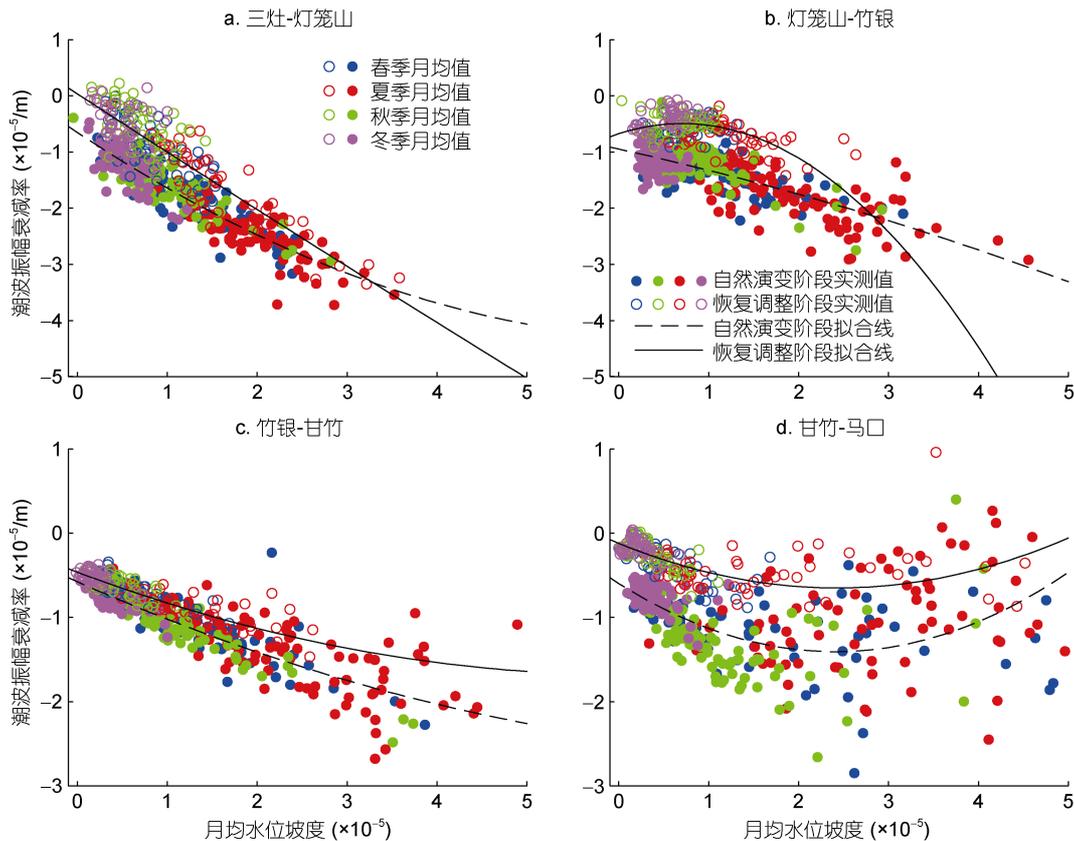


图 7 自然演变阶段与恢复调整阶段潮波振幅衰减率与月均水位坡度的变化关系

Fig. 7 Relationship between tidal damping rate and monthly average water level slope due to intensive human activities in the Modaomen estuary

可知, 月均水位坡度与潮波传播所受的底床摩擦相平衡, 随着月均水位坡度的增大潮波振幅衰减率应减小(即衰减效应增强), 但甘竹-马口段潮波振幅衰减率随月均水位坡度的增大先减小后增大的现象。这是由于月均水位增大导致水深增大, 河口的横截面积亦增大, 虽然潮波传播所受的底床摩擦随流量和月均水位坡度的增大而增强, 但横截面积增大导致的河道辐散效应(即从上游至下游横截面积逐渐减小)有利于径流势能(与月均水位成正比)的汇聚, 使潮波振幅衰减率反而增大, 即衰减效应减弱(Cai *et al.*, 2016, 2019)。当径流增大引起的底床摩擦效应(增大衰减效应)与水深增加引起的横截面积辐散效应(减小衰减效应)相平衡时, 潮波衰减达到阈值。随着流量进一步增大, 上游河道横截面积继续增大, 导致横截面积辐散效应强于径流增大引起的底床摩擦效应, 潮波振幅衰减率的绝对值反而减小(表明潮波衰减效应减弱), 潮波振幅下降幅度减小。由图 7 可见, 潮波振幅衰减的阈值现象在上游甘竹-马口河段最为明显, 竹银-甘竹段现象较弱, 而竹银以下河段基本无阈值现象。另外, 由不同季节的散点可知阈值现象主要出现在春夏秋三季, 冬季(蓝色散点)流量较小导致月均水位坡度较小, 潮波振幅衰减难以达到阈值。此外, 图 7d 显示甘竹-马口段在恢复调整阶段潮波振幅衰减率达到阈值所对应的月均水位坡度有所增大, 即所需阈值流量增大, 主要原因在于受强人类活动(特别是河道采砂)影响磨刀门河口的河槽容积增大, 需要更大的流量条件才能达到潮波振幅衰减率的阈值。

5 结论和讨论

5.1 结论

本文基于珠江磨刀门河口沿程 5 个潮位站(水文站)1960—2016 年的月均潮位数据以及马口站月均流量数据, 对河口的月均水位、潮波振幅、月均水位坡度及潮波振幅衰减率的时空变化特征进行统计分析, 揭示强人类活动驱动下磨刀门河口径潮动力的季节性异变过程, 并进行初步的机制探讨, 得到以下主要结论:

(1) 由流量-月均水位坡度及流量-潮波振幅衰减率绝对值的双累积曲线可知, 受强人类活动影响, 磨刀门河口月均水位坡度及潮波振幅衰减率绝对值随流量变化的趋势在 1990 年与 2000 年发生明显变化, 据此判定 1990 年和 2000 年为磨刀门河口径潮动力受强人类活动影响发生异变的年份。

(2) 受高强度采砂导致的河床下切及上游水库截流导致的来沙减少影响, 强人类活动影响前后磨刀门河口总体月均水位及月均水位坡度在夏季差异最大(沿程平均值分别减小 0.53m 和 8.93×10^{-6}), 冬季受影响最小。而月均水位坡度主要与潮波传播所受的有效摩擦相平衡, 其显著减小导致磨刀门河口潮波振幅衰减效应在夏季也有较明显的减弱。

(3) 在人类活动驱动下磨刀门河口径潮动力相互作用具有明显的季节性差异。仅在夏季大流量下泄条件下, 月均水位坡度在上游甘竹-马口段出现明显抬升; 而冬季流量输入较少条件下, 竹银站以下河段月均水位受口门围垦作用及全球海平面上升影响略有抬升, 进而导致竹银-甘竹段月均水位坡度明显减小(较灯笼山-竹银段减小 57%)。

(4) 流量增大导致月均水位坡度及月均水位随之增大, 因此, 随着流量增大潮波振幅衰减率绝对值增大(表示衰减作用增强)。但当流量超过一定阈值时, 月均水位坡度引起的底床摩擦增大效应不足以抵消因水深增大而引起的横截面积辐散效应, 潮波衰减效应反而减弱。

5.2 讨论

本文将磨刀门河口作为一个整体系统, 上边界为上游马口站的流量, 下边界为口门三灶站的潮位, 探讨磨刀门河口在地形边界和动力边界改变情况下径潮动力的季节性异变特征。由于珠江河网系统纵横河道交错发展, 西江流量从马口站输入后在天河、南华等位置经历多次分流, 马口流量对不同河段的影响程度不同, 分叉河道的作用及其对磨刀门河口径潮动力的季节性演变影响将在后续解析与数值模型研究中进一步深入探讨。

参 考 文 献

- 石盛玉, 程和琴, 玄晓娜等, 2018. 近十年来长江河口潮区界变动. 中国科学: 地球科学, 48(8): 1085—1095
- 刘鹏飞, 路川藤, 罗小峰等, 2018. 基于数学模型的长江潮流界变化特性. 科学技术与工程, 18(3): 346—353
- 刘新成, 沈焕庭, 杨清书, 1999. 长江河口段潮差变化研究. 华东师范大学学报(自然科学版), (2): 89—94
- 李国芳, 谭 亚, 张秀菊, 2006. 感潮河段上游流量对潮位预报的影响. 河海大学学报(自然科学版), 34(2): 144—147
- 张 蔚, 严以新, 诸裕良等, 2008. 人工采砂及航道整治对珠江三角洲水流动力条件的影响. 水利学报, 39(9): 1098—1104
- 张先毅, 黄竟争, 杨 昊等, 2019. 长江河口潮波传播机制及阈值效应分析. 海洋与湖沼, 50(4): 788—798
- 陈吉余, 陈沈良, 2002. 中国河口海岸面临的挑战. 海洋地质

- 动态, 18(1): 1—5
- 陈吉余, 徐海根, 1995. 三峡工程对长江河口的影响. 长江流域资源与环境, 4(3): 242—246
- 陈吉余, 程和琴, 戴志军, 2008. 河口过程中第三驱动力的作用和响应——以长江河口为例. 自然科学进展, 18(9): 994—1000
- 陈沈良, 张国安, 谷国传, 2004. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策. 水利学报, (7): 1—6, 13
- 欧素英, 田 枫, 郭晓娟等, 2016. 珠江三角洲径潮相互作用下潮能的传播和衰减. 海洋学报, 38(12): 1—10
- 欧素英, 杨清书, 杨 昊等, 2017. 河口三角洲径流和潮汐相互作用模型及应用. 热带海洋学报, 36(5): 1—8
- 罗宪林, 2002. 珠江三角洲网河河床演变. 广州: 中山大学出版社
- 胡春宏, 陈绪坚, 陈建国, 2008. 黄河水沙空间分布及其变化过程研究. 水利学报, 39(5): 518—527
- 胡煌昊, 徐 阳, 官明开等, 2016. 珠江河口水下三角洲冲淤演变分析. 水道港口, 37(6): 593—598
- 贾良文, 吴超羽, 2007. 磨刀门河口近期水动力变化及人类活动对其影响研究. 海洋工程, 25(4): 46—53
- 贾良文, 吴超羽, 任 杰, 2006. 珠江口磨刀门河口动力平衡特点及人类活动对其影响. 海洋工程, 24(2): 53—60
- 钱挹清, 2004. 珠江三角洲河道无序采沙影响及管理措施. 人民珠江, (2): 44—46, 58
- 黄李冰, 李义天, 韩剑桥等, 2015. 径潮动力对长江河口滞流点的影响. 水科学进展, 26(4): 572—578
- 梁 娟, 李春初, 2010. 人类活动影响下磨刀门河口的泥沙输运沉积. 泥沙研究, (3): 67—72
- 彭 俊, 陈沈良, 2009. 近 60 年黄河水沙变化过程及其对三角洲的影响. 地理学报, 64(11): 1353—1362
- 韩志远, 田向平, 欧素英, 2010. 人类活动对磨刀门水道河床地形和潮汐动力的影响. 地理科学, 30(4): 582—587
- 路川藤, 罗小峰, 陈志昌, 2016. 长江潮流界对径流、潮差变化的响应研究. 武汉大学学报(工学版), 49(2): 201—205
- 蔡华阳, 杨 昊, 郭晓娟等, 2018. 珠江磨刀门河口径潮动力耦合条件下余水位的多时空尺度分析. 海洋学报, 40(7): 55—65
- 蔡华阳, 杨清书, 2009. 西北江网河来水来沙及分水分沙变化特征. 热带地理, 29(5): 434—439, 444
- 穆兴民, 张秀勤, 高鹏等, 2010. 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. 水文, 30(4): 47—57
- An Q, Wu Y Q, Taylor S *et al*, 2009. Influence of the Three Gorges Project on saltwater intrusion in the Yangtze River Estuary. Environmental Geology, 56(8): 1679—1686
- Cai H Y, Piccolroaz S, Huang J Z *et al*, 2018a. Quantifying the impact of the Three Gorges Dam on the thermal dynamics of the Yangtze River. Environmental Research Letters, 13(5): 054016
- Cai H Y, Savenije H H G, Jiang C *et al*, 2016. Analytical approach for determining the mean water level profile in an estuary with substantial fresh water discharge. Hydrology and Earth System Sciences, 20: 1177—1195
- Cai H Y, Yang H, Liu J Y *et al*, 2019. Quantifying the impacts of human interventions on relative mean sea level change in the Pearl River Delta, China. Ocean & Coastal Management, 173: 52—64
- Cai H Y, Yang Q S, Zhang Z H *et al*, 2018b. Impact of river-tide dynamics on the temporal-spatial distribution of residual water level in the Pearl River channel networks. Estuaries and Coasts, 41(7): 1885—1903
- Dai S B, Yang S L, Cai A M, 2008. Impacts of dams on the sediment flux of the Pearl River, southern China. CATENA, 76(1): 36—43
- Dai Z J, Liu J T, 2013. Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: an example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River). Journal of Hydrology, 480: 10—18
- Guo L C, Van Der Wegen M, Jay D A *et al*, 2015. River-tide dynamics: exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River estuary. Journal of Geophysical Research: Oceans, 120(5): 3499—3521
- Guo L, Van Der Wegen M, Roelvink J A *et al*, 2014. The role of river flow and tidal asymmetry on 1-D estuarine morphodynamics. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 119(11): 2315—2334
- Jay D A, Borde A B, Diefenderfer H L, 2016. Tidal-fluvial and estuarine processes in the Lower Columbia River: II. Water level models, floodplain wetland inundation, and system zones. Estuaries and Coasts, 39(5): 1299—1324
- Jay D A, Leffler K, Degens S, 2011. Long-term evolution of Columbia River tides. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 137(4): 182—191
- Jay D A, Leffler K, Diefenderfer H L *et al*, 2015. Tidal-fluvial and estuarine processes in the Lower Columbia River: I. Along-channel water level variations, Pacific Ocean to Bonneville Dam. Estuaries and Coasts, 38(2): 415—433
- Liu F, Xie R Y, Luo X X *et al*, 2019. Stepwise adjustment of deltaic channels in response to human interventions and its hydrological implications for sustainable water managements in the Pearl River Delta, China. Journal of Hydrology, 573: 194—206
- Liu F, Yuan L R, Yang Q S *et al*, 2014. Hydrological responses to the combined influence of diverse human activities in the Pearl River delta, China. CATENA, 113: 41—55
- Luo X L, Zeng E Y, Ji R Y *et al*, 2007. Effects of in-channel sand excavation on the hydrology of the Pearl River Delta, China. Journal of Hydrology, 343(3—4): 230—239
- Tan C, Huang B S, Liu F *et al*, 2015. Transformation of the three largest Chinese river deltas in response to the reduction of sediment discharges. Journal of Coastal Research, 32(6): 1402—1416
- Zhang W, Wei X Y, Zheng J H *et al*, 2012. Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves. Continental Shelf Research, 38: 35—46
- Zhang W, Xu Y, Hoitink A J F *et al*, 2015. Morphological change in the Pearl River Delta, China. Marine Geology, 363: 202—219

IMPACT OF INTENSIVE HUMAN ACTIVITY ON SEASONAL VARIATION IN RIVER-TIDE DYNAMICS IN THE MODAOMEN ESTUARY OF ZHUJIANG (PEARL) RIVER

ZHANG Xian-Yi^{1, 2, 3, 4}, YANG Hao^{1, 2, 3, 4}, HUANG Jing-Zheng^{1, 2, 3, 4}, FU Lin-Xi^{1, 2, 3, 4}, WANG Heng^{1, 2, 3, 4},
LIU Jun-Yong⁵, OU Su-Ying^{1, 2, 3, 4}, LIU Feng^{1, 2, 3, 4}, CAI Hua-Yang^{1, 2, 3, 4}, YANG Qing-Shu^{1, 2, 3, 4}

(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*; 5. *The Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China*)

Abstract Human activities have a great impact on the estuarine environment. Study of the nonlinear river-tide interaction dynamics in modern time is conducive to understanding the impact of strong human activities on estuarine dynamic geomorphology, and important for the construction of water conservancy projects and environmental protection in the estuarine area. Using monthly high and low tide level data of the Modaomen estuary (Ganzhu, Zhuyin, Denglongshan, and Sanzao gauging stations), Guangdong, South China, and river discharge data of the Makou Hydrological Station from 1960 to 2016, seasonal variations of residual water level, tidal amplitude and their spatial gradients (i.e., residual water level slope and tidal damping rate) were analyzed. Results show that 1990 and 2000 were the critical points marking the periods of without (pre-1990) and with (post-2000) intensive human activities, respectively, in the variation of tidal dynamics in the Modaomen estuary. Specifically, pre-1990 was the natural evolution period, post-2000 was the recovery and adjustment period, and from 1990 to 2000 was the transitional period. Large-scale sand mining undercut the riverbed considerably, which reduced the residual water level and residual water level slope in the estuary, especially in summer (being 0.53m and 8.93×10^{-6} , respectively). The decreased residual water level slope weakened subsequently the tidal damping effect, which results in an increase of the tidal amplitude in the whole channel (increased by 0.071m after intensive human activities). Seasonal variations in the river-tide dynamics in the Modaomen estuary indicated that in summer the residual water level slope in the upstream increased obviously with substantial river discharge, while in winter it decreased significantly in the upstream and rose slightly in the downstream. With the increase of discharge, the tidal damping effect of tidal wave amplitude increased, but when the discharge exceeded the threshold value of $20000 \text{ m}^3/\text{s}$, the increase of riverbed friction due to residual water level slope was insufficient to offset the cross-sectional area divergence effect, and thus the tidal damping effect decreased slightly.

Key words river-tide interaction; residual water level slope; tidal damping rate; intensive human activity; seasonal variation