

珠江磨刀门河口潮汐动力变化对人类活动的响应

蒋陈娟¹, 周佳楠¹, 杨清书^{2,3,4}

1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225127;
2. 中山大学海洋工程与技术学院河口海岸研究所, 广东 珠海 519082;
3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 珠海 519082;
4. 广东省海岸与岛礁工程技术研究中心, 广东 珠海 519082

摘要: 磨刀门河口是珠江流域西江的主干入海口, 20 世纪 80 年代以来受到网河区无序采砂和磨刀门整治工程的双重影响, 潮汐动力必然发生相应的调整。本文基于多年的水文资料, 结合统计分析、调和分析和数值模拟的方法, 对近五十年来磨刀门河口的潮汐动力变化过程及其对人类活动的响应进行研究。结果表明, 20 世纪 80 年代以前, 磨刀门河口总体上呈现出高、低潮位缓慢上升、潮差逐渐减小的趋势, 潮汐动力变化呈现出径流优势型入海口门水道向海延展的自然演变趋势; 20 世纪 80 年代以来, 网河区无序采砂使水位下降、诱使潮汐动力增强, 磨刀门整治工程使水位上升、潮汐动力减弱, 由于河口不同段受到人类活动以及外海潮汐多年变化和海平面上升的干扰程度不同, 其潮汐动力变化呈现出不同特征。近口段受网河区无序采砂影响较大, 水位下降, 潮汐动力增强; 河口段受两种人类活动的双重影响, 水位上升, 在整治工程期间(1983—1993)潮汐动力减弱, 在整治工程后(1993—2003)受网河区无序采砂的影响潮汐动力增强; 口外海滨段受外海潮汐多年变化和全球海平面上升以及整治工程的共同作用, 水位上升, 潮汐动力减弱

关键词: 潮汐动力; 网河区采砂; 河口整治工程; 磨刀门河口

中图分类号: P731.23 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2020)06-0066-11

Effects of human intervention on tidal dynamics in the Modaomen Estuary, Pearl River

JIANG Chenjuan¹, ZHOU Jianan¹, YANG Qingshu^{2,3,4}

1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;
2. Institute of Estuarine and Coastal Research, School of Marine Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;
3. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Zhuhai 519082, China;
4. Guangdong Provincial Engineering Research Center of Coasts, Islands and Reefs, Zhuhai 519082, China

Abstract: The Modaomen Estuary is the main outlet of the Xijiang River, where large-scale human intervention occurred since the 1980s, including sand excavation in the river network and estuarine regulation project, which inevitably caused the variation of tidal dynamics in the Modaomen Estuary. In this paper, we investigate the variation of tidal dynamics and its response to human intervention in recent 50 years by using statistical analysis and harmonic analysis on hydrological data, and hydrodynamic numerical simulation. The results reveal that the variation of tidal dynamics indicates a natural evolution trend of a river-dominated estuary, characterized by increase in tidal level and decrease in tidal range prior to the 1980s. However, after the 1980s sand excavation in the river network induced a decrease in tidal level and increase in tidal dynamics, while estuarine regulation project resulted in an increase in tidal level and decrease in tidal dynamics. In the inner estuary, tidal

收稿日期: 2019-12-27; 修订日期: 2020-04-30。林强编辑

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402601); 国家自然科学基金 (41806104)

作者简介: 蒋陈娟(1984—), 女, 江苏省江阴市人, 讲师, 博士, 主要从事河口海岸动力过程研究。email: jiangchenjuan001@163.com

Received date: 2019-12-27; Revised date: 2020-04-30. Editor: LIN Qiang

Foundation item: National Key R&D Program of China (2016YFC0402601); Natural Science Foundation of China (41806104)

Corresponding author: JIANG Chenjuan. email: jiangchenjuan001@163.com

dynamics was more affected by sand excavation, with decrease in tidal level and increase in tidal dynamics. In the central estuary, tidal dynamics was affected by both sand excavation and estuarine regulation project, with increase in tidal level and decrease in tidal dynamics during the regulation project (1983-1993) but increase in tidal dynamics after the regulation project (1993-2003). In the outer estuary, tidal dynamics was co-affected by global sea-level rise and estuarine regulation project, with increase in tidal level and decrease in tidal dynamics.

Key words: tidal dynamics; sand excavation; regulation project; Modaomen Estuary

河口是河流的尾闾, 它是对流域的自然变化和人为作用响应最敏感, 且与近岸海域环境变化密切相连的地区(陈吉余 等, 2002)。河口是在河口径流动力和海洋潮汐、波浪、近岸环流等综合作用下的复杂自然综合体, 上游河流开发导致河口来水来沙边界发生变化, 河口土地、航运、淡水等资源的开发利用使河口边界及动力过程发生变化, 而人类活动成为河口演变过程中重要的驱动力。美国哥伦比亚河口航道整治工程使潮间带和浅滩湿地面积大量减少, 潮棱体和河口混合强度减小, 河口动力明显减弱, 有从高能河口向高度发育的低能量河口发展的趋势(Sherwood et al, 1990)。美国诺福克港 100 年以来航槽疏浚使航槽的水深增大了 1.8 倍、泥沙沉积速率增大 90 倍、河口表面面积减小 26%, 潮量和河口水交换减少(Nichols et al, 1991)。英国默塞河口由于导堤建设, 河口水动力和口外泥沙输运模式发生变化, 1906—1977 年间河口发生了明显的淤积, 河口容积减小了 10%(Thomas

et al, 2002; Blott et al, 2006)。河口演变过程对人类活动驱动力的响应是河口海岸学研究的重要内容, 具有重要的科学意义。

磨刀门河口是珠江八大出海口之一, 是西江流域的主干入海口(图 1), 磨刀门河口历史时期就有围垦滩涂、联围筑闸等大规模人类活动。20 世纪 80 年代以来, 珠江三角洲网河区大规模无序采砂导致河床不均匀下切, 西、北江主干入海口的分流比发生变化, 从而改变了磨刀门的径流动力; 1983 年开始的磨刀门综合整治工程使河口地形边界发生巨大变化, 口门人为快速向外海延伸(图 2); 20 世纪 90 年代磨刀门河口采砂使其地形发生变化, 影响潮波传播过程。近几十年来在人类活动的强烈影响下, 磨刀门河口快速向海伸展, 其动力地貌过程及其对人类活动的响应是珠江三角洲地区研究的重要内容之一。20 世纪 80 年代以前的研究主要集中于磨刀门河口历史时期的地形演变和水文特征变化, 其中大部分是为磨刀门河口治理提供依据(曾昭璇, 1982a, 1982b; 欧兴进

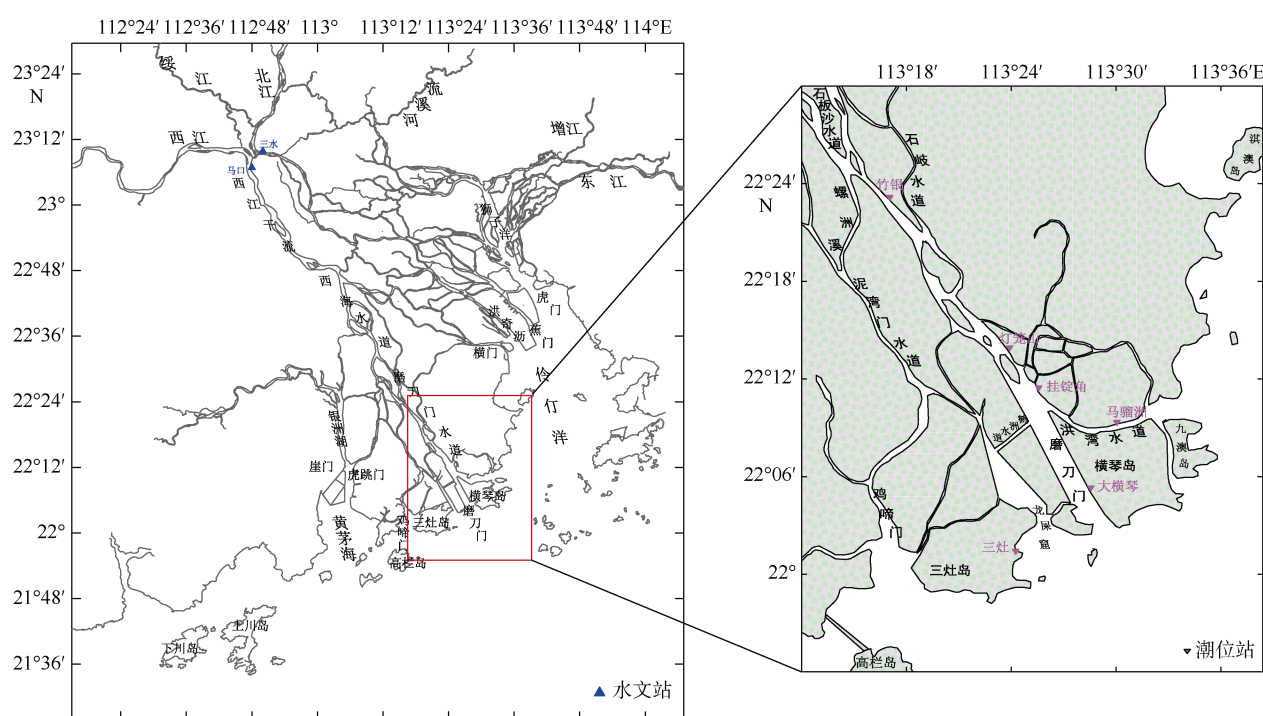


图 1 磨刀门河口位置及其概图

Fig. 1 Map of Modaomen Estuary

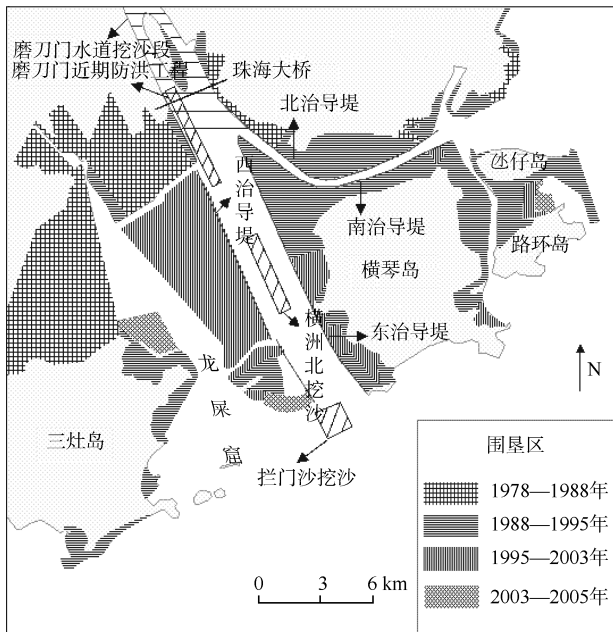


图2 磨刀门河口挖沙和围垦区

据珠江水利科学研究院(2005)转绘

Fig. 2 Areas of sand excavation and reclamation in Modaomen Estuary

等, 1983; 程明豪, 1984; 江沛霖 等, 1986a, b; 珠江水利委员会, 1986; 陈文彪 等, 1989); 而近期磨刀门河口动力地貌过程的研究则侧重于对磨刀门治理工程实施后的效益(戴良生 等, 1996; 王琳 等, 2001)及其对磨刀门地形和动力的影响(黄镇国 等, 2004, 2005; 吕海滨 等, 2006; 贾良文 等, 2007; 韩志远 等, 2010; Liu et al, 2019)。以上研究均指出磨刀门河口在人类活动影响下其河道地形和水动力过程已发生明显调整, 但针对河口潮汐动力过程对人类活动的响应仍未有研究。鉴于此, 本文对近五十年来磨刀门河口潮汐动力变化过程及其对人类活动的响应进行研究, 可为磨刀门综合整治规划提供理论参考, 具有现实意义。

1 研究区域概况及人类活动

1.1 区域概况

磨刀门河口为西江的主要泄洪通道, 多年平均径流量为 $9.2 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 居珠江三角洲八大口门之首。磨刀门潮汐属于不正规半日潮, 多年平均潮差为 0.86m, 多年最大潮差平均为 2.04m。磨刀门海区全年受波浪影响, 以 SE 向涌浪为主; 口外大万山站各月平均波高为 1.01~1.32m, 平均周期为 5.15~5.7s。受全面海平面上升的影响, 磨刀门口外相对海平面上升速率约为 $2.6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (Cheng et al, 2016; 陈特固 等, 2008)。

磨刀门河口地形滩槽分异明显, 口内有一系列的山丘、海岛, 岛屿之间有洪湾水道、磨刀门水道、白龙河水道和龙屎窟水道等。磨刀门水道主槽位于鹤洲和横琴岛之间, 呈 NW—SE 走向向海延伸(图 1)。磨刀门河口洪季潮区界位于竹银站附近, 枯季咸水界位于灯笼山附近, 根据河口动力条件的差异, 将河口分为竹银-灯笼山的近口段、灯笼山-大横琴的河口段和大横琴以外的口外海滨段(李春初, 1997)。

1.2 主要人类活动

磨刀门河口近半个世纪以来的人类活动影响最为集中, 对其河口演变和水动力变化影响较大的人类活动主要有: 1959 年完成的白藤湖海堤堵口工程、1975 年围垦白藤湖工程即河湖“分家”工程、20 世纪 80 年代开始的网河区大规模无序采砂活动、1983 年开始的磨刀门口门治理工程及近期实施的防洪工程。白藤堵海工程使泥湾门水流改由鸡啼门入海, 极大减弱了磨刀门内海区西部和西北部的水流动力条件, 加快了西部滩地(白藤堤外滩地)的淤积速度(罗章仁, 1985), 对磨刀门水道和洪湾水道影响较小。

珠江三角洲大规模的河道采砂开始于 20 世纪 80 年代, 在 20 世纪 80 年代中期至 90 年代初期达到高峰, 2000 年后渐止。珠江三角洲网河区 1984—1999 年采砂总量约为 $8.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相当于该区 70~125 年的自然淤积总量(罗宪林 等, 2002), 网河区河床由普遍缓慢淤积转为快速冲刷的“异变”, 河槽容积增大。1986—2003 年间, 西江、北江和东江河床分别平均下切 0.59~1.73m、0.34~4.43m 和 1.77~6.48m, 年平均水位下降 1.59~3.12m(Luo et al, 2007), 其中西江马口-灯笼山河段 1977-1999 年间河道深泓线平均下切 2.5m(Liu et al, 2019)。珠江三角洲无序采砂所致河床不均匀下切导致三角洲顶点西江马口站和北江三水站分流比出现变化, 西江马口站分流比在 20 世纪 60 到 80 年代时保持在 84.7%~86.2%, 从 1990—1992 年开始下降, 1993 年后大幅下降, 1997 年达最低值 73.8%, 之后又小幅回升, 但在 1997—2005 年均保持在 78% 以下(Luo et al, 2007; Liu et al, 2019)。

磨刀门水道采砂主要集中在珠海大桥以北, 1991—1994 年(采砂高峰期)和 1994—2000 年(采砂禁止期)从“竹银至珠海大桥”24.4km 河段分别挖河沙 $2.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $1.92 \times 10^7 \text{ m}^3$, 年均每公里河道挖沙量分别为 $3.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ 和 $1.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ (贾良文, 2005)。

磨刀门水道珠海大桥以南河段采砂主要为 1997 年横洲水道北口左侧河床采砂 $1 \times 10^7 \text{m}^3$ (图 2), 为建设“洪湾北保税区”时吹填基础所用(贾良文, 2005)。1999 年起, 水利部门对磨刀门实施疏浚、清障、护岸、控导等防洪工程措施, 疏浚工程包括: 磨刀门与洪湾水道分汊口段和交杯沙头部(图 2), 其中前者疏浚量为 $5 \times 10^6 \text{m}^3$ 。

1983 年起, 珠江水利委员会对磨刀门河口开始分期分批实施治理开发工程, 主要工程包括: 在直通横洲口门的干道上沿南北方向建造东、西两导堤, 东西导堤分别长 9.6km 和 18.6km, 导堤距宽 2.2~2.3km; 在洪湾水道内沿东西向建造南、北两支导堤, 南北两堤总长 24.3km, 堤距宽 500m; 同时封堵大二门水道。1992 年磨刀门水道的东、西治导石堤和洪湾水道的支堤基本完工, 形成一主一支河道格局(图 2)。磨刀门河口人工治导工程使原磨刀门内海区河道化, 原内海水域面积和蓄洪纳潮容积锐减, 面积由 173km^2 降为 37.8km^2 , 减小 78.6%, 纳潮容积由 $2.7 \times 10^8 \text{m}^3$ 降为 $1.7 \times 10^8 \text{m}^3$, 减小 37% (中山大学河口海岸研究所等, 2006), 磨刀门河口纳潮能力下降。

2 材料与方法

2.1 资料及其来源

本文搜集了磨刀门河口大量的地形资料和水文资料。地形资料包括: 1977 年海图(1:75000)和 2003 磨刀门地形图(1:5000)。水文资料包括: 1960—2003 年磨刀门河口竹银、灯笼山、大横琴和三灶四站的年平均高潮位、年平均低潮位和年均潮差数据, 数据来源于珠江水文年鉴和广东省水文局; 1977—2003 年竹银、灯笼山、大横琴三站 12 月逐日高、低潮位, 数据来自珠江水文年鉴; 1982 年 3 月竹银、灯笼山、大横琴、三灶四站逐日高、低潮位, 2003 年 12 月竹银站逐日高、低潮位和马骝洲、挂定角、大横琴、三灶站逐时潮位, 高、低潮位数据来自珠江水文年鉴, 逐时潮位为中山大学近岸海洋研究中心实测数据。以上潮位数据均统一到珠江基面, 各潮位站位置见图 1。

2.2 研究方法

本文研究方法包括对潮汐特征值的时间序列分析、潮位调和与分析、基于 ECOMSED 水动力数值模拟的潮能通量计算。以下对时间序列分析方法和潮能通量计算方法做简要介绍。

2.2.1 潮汐特征值的时间序列分析

时间序列分析主要应用定性的滑动平均趋势分

析法和定量的 Mann-Kendall 趋势检验法。

1) 滑动平均法趋势分析。连续水文数据由于受到复杂因素的影响而存在较大波动, 为找出时间序列的长期变化规律, 常用滑动平均法滤去资料中短周期的不规则变化(王文圣等, 2008; 赵军凯, 2011)。时间序列经滑动平均处理后, 短于滑动长度的周期成分大大削弱, 长期变化趋势更明显。本文对潮汐特征值的时间序列应用五年滑动平均的方法。

2) Mann-Kendall 趋势检验法。Mann-Kendall (M-K 法)是非参数统计方法, 亦称无分布检验。M-K 趋势分析不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 适用于类型变量和顺序变量的趋势分析(黄锡荃, 1993; 张建云等, 2007)。本文对潮汐特征值的整个时间序列和分阶段时间序列进行 M-K 趋势分析, 并对其进行置信度为 95% 的显著性检验, 通过检验的为具有显著趋势, 未通过检验的则趋势不显著。

2.2.2 潮能通量的计算

潮能通量是潮波在海洋或河口推进时, 单位时间通过单位宽度断面的潮能, 又称能通量密度(方国洪等, 1994)。潮能通量可分解为相互正交的两个分量(Harari et al, 2003; Horrevoets et al, 2004):

$$\begin{cases} \psi(U) = \rho U D \left[\frac{U^2 + V^2}{2} + g\eta \right] \\ \psi(V) = \rho V D \left[\frac{U^2 + V^2}{2} + g\eta \right] \end{cases} \quad (1)$$

其中, ψ 为潮波单位时间通过单位宽度断面的能量, 其单位为 $\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$, ρ 为水体密度, U 、 V 为速度分量, D 为水深, η 为水面波动值, g 为重力加速度。

磨刀门河口动力条件年内变化显著, 洪季受径流作用控制, 枯季潮汐动力较强, 故应用 Ecomsed 模型对整治工程前、后枯季的水动力进行模拟, 研究其潮能通量变化。整治工程前、后的模拟时段分别为 1982 年 3 月 1 日 9 时—15 日 9 时和 2003 年 12 月 1 日 10 时—15 日 10 时, 计算时间长度为 28 个潮周期。模型模拟的范围北起竹银, 南抵高栏岛, 东至大马洲岛, 西至鸡啼门, 南北长约 53km, 东西宽约 42km(图 3)。模型网格采用正交曲线网格, 网格步长为 500m 左右, 对重点关注区域局部加密至 100~200m。模型上游为竹银水位边界, 下游为半日分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2)和全日分潮(K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1)调和常数合成的潮位边界, 各边界点调和常数根据

桂山岛、高栏岛、三灶岛、大万山 4 点调和常数差值而得, 并选用灯笼山、大横琴、三灶、挂定角潮

位数据进行验证(图 4), 潮位相对误差小于 5%, 拟合程度较好。

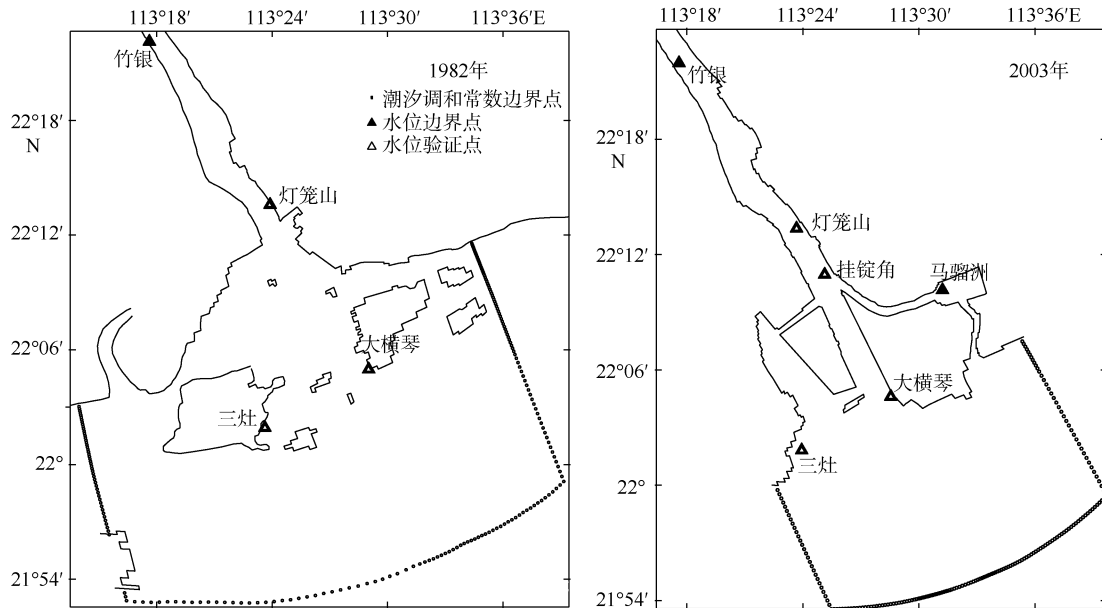


图 3 Ecomsed 模型边界点和验证点

Fig. 3 Ecomsed model boundary points and verification points

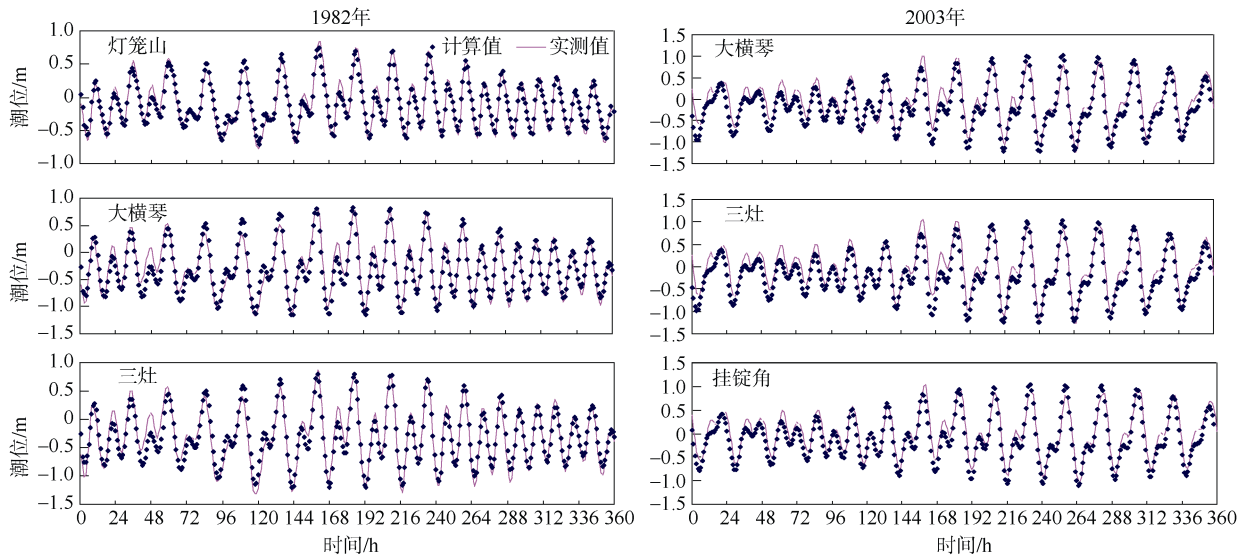


图 4 Ecomsed 模型潮位验证

Fig. 4 Tide level verification using Ecomsed model

3 结果

3.1 潮汐特征值变化

3.1.1 高、低潮位变化

近口段竹银站(图 5)高潮位总体呈波动变化, 变化趋势不明显; 1960—1982 年, 高潮位有明显的上升趋势; 1993—2005 年, 高潮位有明显的下降趋势(表 1)。竹银站低潮位总体呈波动减小的趋势, 1960—1982 年呈不显著的上升趋势, 1993—2005 年

低潮位大幅减小, 降幅达 0.2m, 下降趋势显著(表 1)。河口段灯笼山站(图 5)高、低潮位总体上呈小幅波动上升趋势; 1960—1982 年高、低潮位均呈上升趋势, 且低潮位上升趋势显著; 1983 年以后, 出现高潮位上升、低潮位下降的趋势, 但趋势不显著(表 1)。河口段大横琴站(图 5)高、低潮位均呈显著的上升趋势, 1983—1992 年低潮位上升幅度较大, 1993—2003 年高潮位上升趋势显著(表 1)。口外三灶站(图 5)高、

低潮位变化较一致，呈显著的波动上升趋势，其中高潮位 1993—2003 年间上升较显著，但总体上低潮位上升幅度略大于高潮位。1983 年前，河口各段高、低潮位均呈现不同程度的上升趋势。1983—1992 年，河口整治段大横琴站高、低潮位均上升，且低潮位上升显著。1993—2003 年，近口段高、低潮位显著下降，且低潮位减幅较大；河口段灯笼山站高潮位

上升，低潮位下降；河口段大横琴站和口外三灶站高、低潮位均上升，高潮位上升趋势显著，大横琴站上升幅度较大。河口各段潮位的不同步变化使水面坡降发生变化，1980 年以来，近口段和河口段各站间潮位差减小，竹银和大横琴之间高、低潮位差分别减小 0.1m 和 0.3m，水面坡降减小，潮波传播阻力减小。

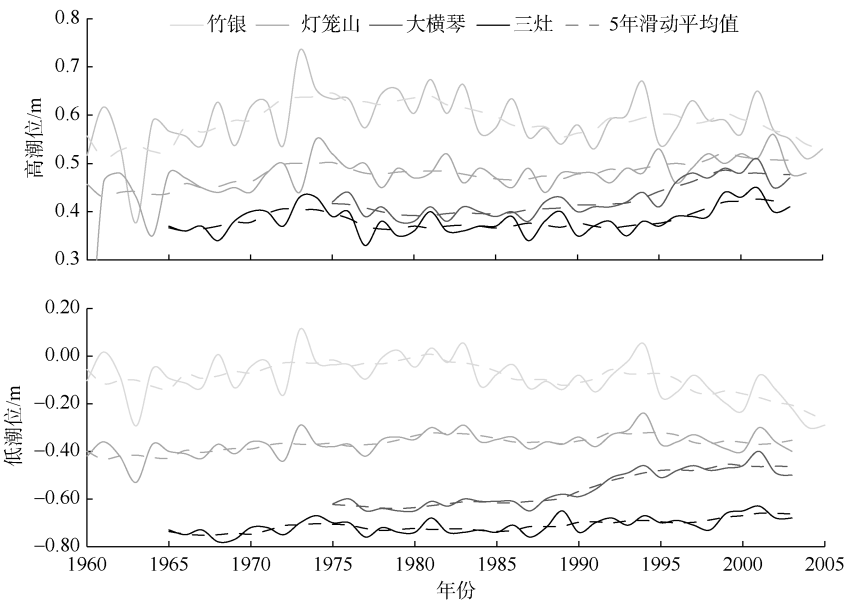


图 5 年平均高潮位和低潮位变化过程
Fig. 5 Variation of annual mean high water level and low water level

表 1 潮汐特征值不同阶段的变化趋势
Tab. 1 Trend of tidal characteristic values at different stages

站点	潮汐要素	变化趋势							
		1960—1982		1983—1992		1993—2003		1960—2003	
竹银	高潮位	增大	显著	减小	不显著	减小	显著	减小	不显著
	低潮位	增大	不显著	减小	不显著	减小	显著	减小	显著
	潮差	增大	不显著	增大	不显著	增大	显著	增大	显著
灯笼山	高潮位	增大	不显著	增大	不显著	增大	不显著	增大	显著
	低潮位	增大	显著	减小	不显著	减小	不显著	增大	显著
	潮差	减小	不显著	增大	不显著	增大	显著	减小	不显著
大横琴	高潮位	-	-	增大	不显著	增大	显著	增大	显著
	低潮位	-	-	增大	显著	增大	不显著	增大	显著
	潮差	-	-	减小	显著	增大	不显著	减小	显著
三灶	高潮位	增大	不显著	增大	不显著	增大	显著	增大	显著
	低潮位	增大	不显著	增大	不显著	增大	不显著	增大	显著
	潮差	减小	不显著	减小	显著	增大	不显著	减小	显著

注：大横琴站 1975 年前无数据，故 1960—1982 年时段不作分析

3.1.2 潮差变化

磨刀门河口潮差从口外到口内逐渐减小,不同河口分段的潮差变化规律各异(图 6)。近口段竹银站,1983 年后潮差有小幅上升,1993 年后潮差显著上升,1960—1992 年和 1993—2005 年平均潮差分别为 0.66m 和 0.74m,后者增大 0.09m。河口段,灯笼山站潮差呈波动变化,1993—2003 年间潮差呈明显上升的趋势;大横琴站 1993 年前平均潮差呈显著减小的趋势,1993 年后潮差有小幅回升;大横琴站潮差的变幅较大,1975—1983 年间平均潮差为 1.03m,1983—1992 年间平均潮差为 1.0m,1993—2003 年间平均潮差为 0.93m。口外海滨段三灶站,年平均潮差 1983—1992 年间减小趋势显著,但变化幅度不大。

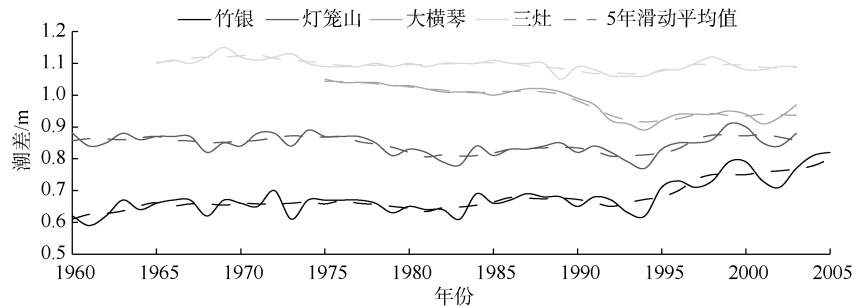


图 6 年平均潮差变化过程

Fig. 6 Variation of annual mean tidal range

表 2 各站潮汐分潮振幅(单位: cm)变化

Tab. 2 Amplitude variation of tidal components at each station. Units: cm

站位	分潮	1977 年	1983 年	1987 年	1993 年	2002 年
竹银	O ₁	20.7	22.3	24	17.9	22.4
	K ₁	28.7	29.8	30.4	26.2	28.2
	M ₂	34.2	30.9	30.7	27.8	28.2
	S ₂	11.3	13.3	12.8	8.1	10.5
灯笼山	O ₁	25.6	25.7	29.1	21.4	26.1
	K ₁	34.3	34.6	33.8	30.8	31.7
	M ₂	42.3	38.1	38.3	35.1	34.7
	S ₂	14	16.9	13	11.2	12.5
大横琴	O ₁	26.1	27.2	28.7	23.4	27.9
	K ₁	35.1	36.9	37.1	32.4	32.7
	M ₂	43.7	42	41.7	38.7	37.3
	S ₂	17.8	21.3	19.1	14.4	14.9

3.2.2 分潮传播速度变化

根据迟角差计算大横琴-灯笼山、灯笼山-竹银各主要分潮的传播时间(表 3), 半日分潮传播速度较全日分潮大, 河口段不同年代的传播速度变化较大, 近口段则变化不大, 故重点讨论分潮振幅占比较大的 M₂、K₁ 分潮在河口段传播速度变化。河口段 1977—1983 年 M₂、K₁

3.2 潮汐调和常数变化

磨刀门河口主要潮汐分潮为 M₂、S₂、K₁、O₁, 且以 M₂ 分潮为主, 其次为 K₁、O₁ 分潮。选取潮汐动力较强的枯水期 12 月份的潮位资料进行调和, 分析不同年代主要分潮波振幅和传播速度变化。

3.2.1 分潮振幅变化

从分潮振幅年际变化来看, M₂ 分潮振幅 1977—1993 年逐渐减小, 但 1993 年后变化不大; S₂、K₁、O₁ 分潮振幅则均呈波动变化, 1993 年达最小值, 1993—2002 年增大(表 2)。从沿程衰减幅度来看, 半日分潮衰减较全日分潮快, 河口段仅 S₂ 分潮衰减较快, 近口段则各分潮均有显著衰减, 且衰减程度随时间呈小幅波动下降趋势。

分潮传播时间分别增加 0.44、0.6h; 1983—1993 年分潮传播时间减小, 其中 1987—1993 年减小幅度大, M₂、K₁ 分别减少 0.44、0.75h; 1993—2002 年变化不明显。1983 年前, 潮波传播速度减慢为河口向海自然延伸、口门潮汐动力渐缓所致; 1993 年分潮传播速度较 1987 年明显增加, 与整治工程使宽阔内海区变为狭窄水道有关。

表 3 不同年代各分潮的传播时间(单位: h)

Fig. 3 Propagation time of tidal constituents in different years. Units: h

河口分段	分潮	1977	1983	1987	1993	2002
灯笼山-竹银 (近口段)	O ₁	1.55	1.19	1.21	1.41	1.21
	K ₁	1.38	1.09	1.15	1.22	1.22
	M ₂	1.02	0.74	0.93	0.87	0.87
	S ₂	1.08	0.79	0.74	0.77	0.68
大横琴-灯笼山 (河口段)	O ₁	1.93	2.24	1.72	1.01	0.85
	K ₁	1.23	1.83	1.66	0.91	0.95
	M ₂	0.87	1.31	1.15	0.71	0.69
	S ₂	0.57	1.09	0.57	0.56	0.32

3.3 潮能通量变化

潮波在河口中传播时, 受到非线性摩擦和径流耗能、河口截面变窄所致潮能辐聚作用, 二者的相对大小决定潮能通量的增减, 潮能通量以涨潮流方

向为正, 落潮流方向为负(Horrevoets et al, 2004; 蒋陈娟, 2008)。应用 Ecomsed 模型对整治工程前(1982 年)、后(2003 年)枯季的水动力进行模拟, 计算典型断面潮能通量(图 7)。

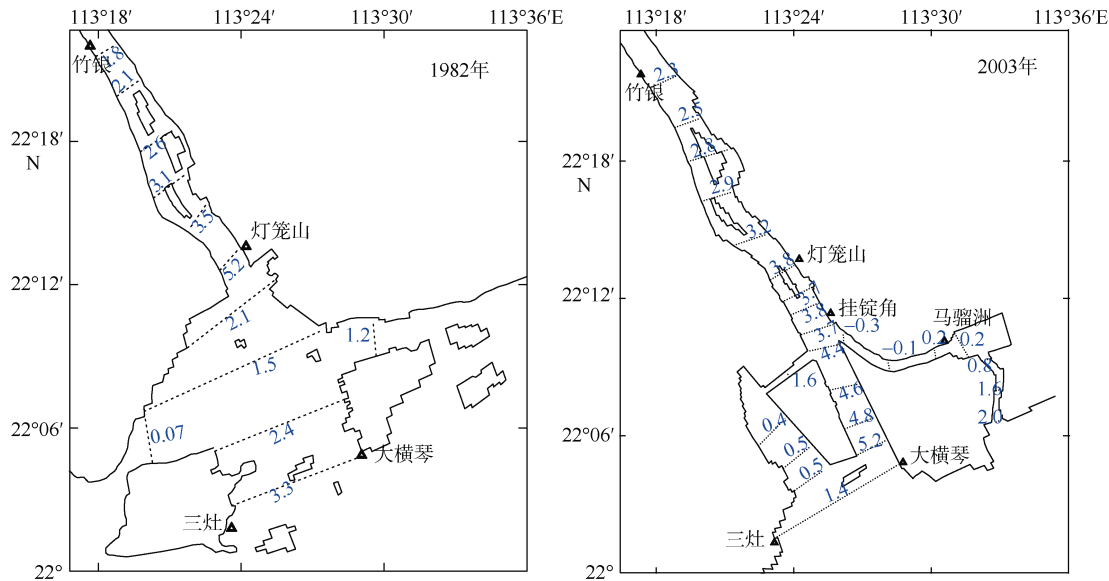


图 7 整治工程前后枯季潮能通量(单位: $\times 10^3 \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$)分布

Fig. 7 Tidal energy flux distribution before and after regulation project. Units: $\times 10^3 \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$

整治工程前, 磨刀门口外各潮汐通道的潮能通量由强到弱依次为: 大横琴-三灶断面、洪湾水道(上沟)和大二门水道。潮波由潮汐通道进入内海区, 由于非线性摩擦和径流耗能, 潮能通量减小; 挂铤角-灯笼山以截面大幅缩减所致潮能辐聚为主导, 潮能通量增大; 灯笼山-竹银以径流和摩擦耗能占主导, 潮能通量减小。

整治工程后, 磨刀门河口各潮汐通道的潮能通量由强到弱依次为: 磨刀门水道、十字门水道和白龙河水道。潮波由口外进入磨刀门水道和白龙河-鹤洲水道时, 由于前者水深远大于后者, 潮波主要由前者传入。磨刀门水道入口处由于河口截面突然

缩窄使得潮能通量突然增大, 潮波向上游传播时由于摩擦和径流耗能潮能通量逐渐减小; 潮波进入十字门水道后, 潮能通量减小, 进入洪湾水道后, 潮能通量进一步减小, 其中洪湾水道上段以落潮流占优势、潮能通量为负值。

整治工程实施前后, 磨刀门河口潮能分布出现显著变化。整治工程使宽阔内海区成为导堤控制的水道, 河口纳潮量大幅下降, 大横琴-三灶断面潮能通量降低 57.5%, 口外潮汐动力减弱; 河口段河床断面突然缩窄所致潮能辐聚处由灯笼山下附近下移至磨刀门水道出口处, 河口整治段潮能通量增大, 灯笼山-竹排沙尾潮能通量减小; 竹排沙以上潮能通

量增大, 潮汐动力增强。

4 讨论

以上结果分析表明磨刀门河口不同河段潮汐动力呈现不同步的异变, 为河口自然演变、人类活动以及外海潮汐多年变化和海平面上升综合作用的结果。三灶站处于口外海滨, 高、低潮位变化过程与口外大万山站年平均海平面变化总体趋势一致, 但上升幅度小于大万山站(图 8), 故其潮汐动力主要受外海潮汐长期变化和海平面上升的影响。对于口内近口段和河口段, 河口整治段大横琴站的潮位变幅远大于三灶站,

而上游灯笼山站和竹银站自 20 世纪 80 年代以来并非呈现单调上升趋势, 表明人类活动对近口段和河口段潮汐动力影响较大。已有研究成果指出: 珠江三角洲网河区无序采砂所致西江分流比减小导致磨刀门河口径流动力减弱, 潮汐动力加强(Zheng et al, 2014; Yuan et al, 2015); 西江网河区采砂所致河床大规模下切导致余水位坡度大幅变缓, 坡度变缓导致潮波传播所受有效摩擦减小, 潮波衰减作用减弱, 潮汐动力增强(Cai et al, 2018; 张先毅 等, 2019); 河口整治工程加速水位抬升, 使河口整治段断面平均径流流速增大, 减弱河口潮汐动力(贾良文 等, 2007)。

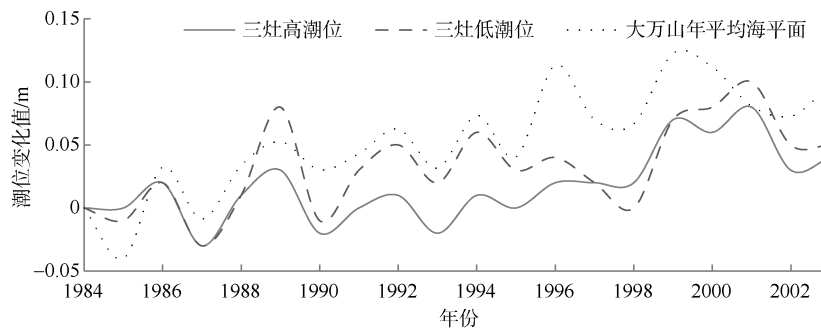


图 8 三灶站年平均高、低潮位与大万山年平均海平面变化过程

图中各数据均以 1984 年数据作为零点, 大万山数据来自魏晓宇 等(2010)

Fig. 8 Variation of annual mean high water level, low water level of Sanzao and annual mean sea level of Dawanshan

1983 年前, 人类活动影响较小, 近口段和河口段潮位抬升、潮差减小、潮波传播速度减慢, 为径流优势型入海水道向海延展的自然演变结果。1983—1992 年, 河口整治段高、低潮位上升, 但低潮位上升幅度更大, 潮差减小, 潮波传播速度加快, 为磨刀门整治工程使水道向外延伸和承洪纳潮的内海区消失的双重作用所致。1993 年后, 近口段高、低潮位下降, 主要与挖沙所致河床下切有关, 低潮位减幅较大是因为其对河床变化更为敏感; 河口段高、低潮位上升, 且整治段变化更为显著, 为整治工程导堤建设使径流动力向海推进所致; 近口段和河口段潮差增大, 潮汐动力有所增强, 这与西江网河区顶点马口站分流比减小和网河区大规模采砂引起的河床下切、满槽容量增大有关。

外海潮汐多年变化和海平面上升是河口潮汐动力变化的重要驱动力之一, 本研究未能将外海潮汐多年变化和海平面上升对河口不同段潮汐动力的影响从人类活动影响中分离出来, 外海潮汐多年变化和海平面上升对磨刀门河口潮汐动力的影响有待进一步研究。

5 结论

20 世纪 80 年代以前, 磨刀门河口总体上呈现出高、低潮位缓慢上升、潮差逐渐减小的趋势, 潮汐动力变化呈现出径流优势型入海口门水道向海延展的自然演变趋势。20 世纪 80 年代以来, 磨刀门河口潮汐动力受到网河区无序采砂和磨刀门整治工程的双重影响, 前者使西江网河区顶点分流比减小、满槽容量增大、水位下降、潮汐动力增强, 后者使河口快速向海延伸、水位上升、潮汐动力减弱。由于河口不同段受到人类活动以及外海潮汐多年变化和海平面上升的干扰程度不同, 其潮汐动力变化呈现出不同特征。

近口段受网河区采砂影响较大, 1993 年后高、低潮位显著下降, 潮差显著增大, 主要分潮振幅增大, 潮能通量增大, 潮汐动力增强。河口段受网河区采砂和磨刀门整治工程的影响均较明显, 河口整治段则受整治工程的影响较大, 高、低潮位明显上升, 低潮位的上升幅度较大; 整治工程实施期间(1983—1993), 原宽阔的内海区变为由导堤控制的狭窄水道,

河口纳潮量减小, 河口段潮差减小、主要分潮振幅减小, 潮汐动力减弱, 但潮波传播速度加快; 整治工程后(1993—2002), 受网河区采砂影响较大, 河口段潮差增大、主要分潮振幅增大, 潮汐动力增强,

潮波传播速度进一步加快, 潮能通量增大。口外海滨段受全球海平面上升影响, 高、低潮位均呈显著的波动上升趋势, 整治工程实施期间潮差有小幅下降, 潮能通量减小, 潮汐动力减弱。

参考文献 References

- 陈吉余, 陈沈良, 2002. 长江口环境生态变化与对策[C]//中国江河河口研究及治理、开发问题研讨会文集. 北京: 中国水利水电出版社.
- 陈特固, 时小军, 余克服, 2008. 近 50 年全球气候变暖对珠江口海平面变化趋势的影响[J]. 广东气象, 30(2): 1-3. CHEN TEGU, SHI XIAOJUN, YU KEFU, 2008. The impacts of climate warming on sea-level rise trends at Pearl River Estuary during 1957-2006[J]. Guangdong Meteorology, 30(2): 1-3 (in Chinese with English abstract).
- 陈文彪, 陈上群, 顾再仁, 等, 1989. 珠江口磨刀门河口治理的研究[J]. 泥沙研究, (4): 1-9. CHEN WENBIAO, CHEN SHANGQUN, GU ZAIREN, et al, 1989. The research for the improvement of Modaomen outlet of the Pearl River Estuary[J]. Journal of Sediment Research, (4): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- 程明豪, 1984. 西江河口(磨刀门)沉积环境分析[J]. 地理研究, 3(1): 51-65. CHENG MINGHAO, 1984. A study of the Sedimentary Environment in Modaomen Estuary, the main river-mouth of Xijiang (West River)[J]. Geographical Research, 3(1): 51-65 (in Chinese with English abstract).
- 戴良生, 黄荣新, 1996. 珠江磨刀门河口治理开发工程效益显著[J]. 人民珠江, (2): 27-31. DAI LIANGSHENG, HUANG RONGXIN, 1996. The improvement and development projects of Modaomen Coastal Area, Pearl River, has a significant benefit[J]. Pearl River, (2): 27-31 (in Chinese).
- 方国洪, 曹德明, 黄企洲, 1994. 南海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报, 16(4): 1-12.
- 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[J]. 地理科学, 30(4): 582-587. HAN ZHIYUAN, TIAN XIANGPING, OU SUYING, 2010. Impacts of large-scale human activities on riverbed morphology and tidal dynamics at Modaomen Estuary[J]. Scientia Geographica Sinica, 30(4): 582-587 (in Chinese with English abstract).
- 黄锡荃, 1993. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社. HUANG XIQUAN, 1993.
- 黄镇国, 张伟强, 2004. 人为因素对珠江三角洲近 30 年地貌演变的影响[J]. 第四纪研究, 24(4): 394-401. HUANG ZHENGUO, ZHANG WEIQIANG, 2004. Impacts of artificial factors on the evolution of geomorphology during recent thirty years in the Zhujiang Delta[J]. Quaternary Sciences, 24(4): 394-401 (in Chinese with English abstract).
- 黄镇国, 张伟强, 2005. 珠江河口磨刀门的整治与地貌演变[J]. 地理与地理信息科学, 21(6): 61-65, 73. HUANG ZHENGUO, ZHANG WEIQIANG, 2005. The administration and geomorphological evolution in Modaomen river mouth of Zhujiang Estuary[J]. Geography and Geo-Information Science, 21(6): 61-65, 73 (in Chinese with English abstract).
- 贾良文, 2005. 人类活动作用下的磨刀门河口动力特征和地貌演变研究[D]. 广州: 中山大学. JIA LIANGWEN, 2005. The study on the dynamic characteristics and morphological changes of Modaomen Estuary under the Action of the anthropogenic activities[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University (in Chinese with English abstract).
- 贾良文, 吴超羽, 2007. 磨刀门河口近期水文动力变化及人类活动对其影响研究[J]. 海洋工程, 25(4): 46-53. JIA LIANGWEN, WU CHAOYU, 2007. Hydrodynamic changes of Modaomen estuary in recent decades and impacts of human activities on the changes[J]. The Ocean Engineering, 25(4): 46-53 (in Chinese with English abstract).
- 蒋陈娟, 2008. 近三十年来磨刀门河口水动力变化及河口性质研究[D]. 广州: 中山大学. JIANG CHENJUAN, 2008. The study on the changes of hydrodynamics of Modaomen Estuary and nature of the estuary in recent 30 years[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University (in Chinese with English abstract).
- 江沛霖, 宾放, 1986a. 磨刀门浅海二十年的水文地貌(上)[J]. 人民珠江, (5): 27-32.
- 江沛霖, 宾放, 1986b. 磨刀门浅海二十年的水文地貌(下)[J]. 人民珠江, (6): 22-26.
- 李春初, 1997. 论河口体系及其自动调整作用——以华南河流为例[J]. 地理学报, 52(4): 353-360. LI CHUNCHU, 1997. On the estuarine system and its automatic adjustment[J]. Acta Geographica Sinica, 52(4): 353-360 (in Chinese with English abstract).
- 罗宪林, 杨清书, 贾良文, 等, 2002. 珠江三角洲网河区河床演变[M]. 广州: 中山大学出版社: 91-206. LUO XIANLIN, YANG QINGSHU, JIA LIANGWEN, et al, 2002. River Bed Evolution in the River Network of the Pearl River Delta[M]. Guangzhou: Sun Yat-sen University Press: 91-206 (in Chinese).
- 罗章仁, 1985. 白藤堵海工程对河道演变影响的分析[C]//华南地理文献选集. 广州: 科普出版社广州分社: 221-225.
- 吕海滨, 吴超羽, 刘斌, 2006. 珠江口磨刀门整治前后水动力数值模拟[J]. 海洋科学, 30(11): 58-63. LÜ HAIBIN, WU CHAOYU, LIU BIN, 2006. Hydrodynamic numerical simulation during the rebuilding of Modaomen Estuary of the Pearl River[J]. Marine Sciences, 30(11): 58-63 (in Chinese with English abstract).
- 欧兴进, 赵焕庭, 宋朝景, 1983. 西江磨刀门河口水文泥沙特征[J]. 热带海洋, 2(4): 278-288.
- 王琳, 陈上群, 2001. 磨刀门河口治理研究及工程实践效果分析[J]. 人民珠江, (5): 25-29. WANG LIN, CHEN SHANGQUN, 2001. Study on Modaomen outlet improvement and analysis

- of effects in engineering practice[J]. *Pearl River*, (5): 25–29 (in Chinese with English abstract).
- 王文圣, 丁晶, 金菊良, 2008. 随机水文学[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社: 10–55. WANG WENSHENG, DING JING, JIN JULIANG, 2008. Stochastic hydrology[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press: 10–55 (in Chinese).
- 魏晓宇, 刘雪峰, 2010. 大万山海洋站潮位变化及其极值与海面风的相关关系[J]. *人民珠江*, (5): 17–19. WEI XIAOYU, LIU XUEFENG, 2010. Tide variation in Dawanshan oceanographic station and correlation between extreme values and surface wind[J]. *Pearl River*, (5): 17–19 (in Chinese).
- 曾昭璇, 1982a. 从磨刀门历史地貌学研究看口门整治问题(上)[J]. *人民珠江*, (5): 11–15.
- 曾昭璇, 1982b. 从磨刀门历史地貌学研究看口门整治问题(下)[J]. *人民珠江*, (6): 11–20.
- 张建云, 章四龙, 王金星, 等, 2007. 近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. *水科学进展*, 18(2): 230–234. ZHANG JIANYUN, ZHANG SILONG, WANG JINXING, et al, 2007. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. *Advances in Water Science*, 18(2): 230–234 (in Chinese with English abstract).
- 张先毅, 黄竞争, 杨昊, 等, 2019. 长江河口潮波传播机制及阈值效应分析[J]. *海洋与湖沼*, 50(4): 788–798. ZHANG XIANYI, HUANG JINGZHENG, YANG HAO, et al, 2019. The governing mechanism of tidal wave propagation and threshold effect in the Changjiang River Estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 50(4): 788–798 (in Chinese with English abstract).
- 赵军凯, 2011. 长江中下游江湖水交换规律研究[D]. 上海: 华东师范大学. ZHAO JUNKAI, 2011. Study on the rules of river-lake water exchange in mid-lower reaches of Yangtze River[D]. Shanghai: East China Normal University (in Chinese with English abstract).
- 中山大学河口海岸研究所, 广东省珠江河口管理局, 2006. 磨刀门河口河床与拦门沙演变研究[R].
- 珠江水利科学研究院, 2005. 珠江河口滩涂资源调查与演变分析遥感专题研究报告[R]. 广州: 珠江水利科学研究院.
- 珠江水利委员会, 1986. 珠江磨刀门治理开发工程规划报告[R]. 广州: 珠江水利委员会.
- BLOTT S J, PYE K, VAN DER WAL D, et al, 2006. Long-term morphological change and its causes in the Mersey Estuary, NW England[J]. *Geomorphology*, 81(1–2): 185–206.
- CAI HUAYANG, HUANG JINGZHENG, NIU LIXIA, et al, 2018. Decadal variability of tidal dynamics in the Pearl River Delta: spatial patterns, causes, and implications for estuarine water management[J]. *Hydrological Processes*, 32(25): 3805–3819.
- CHENG XUHUA, XIE SHANGPING, DU YAN, et al, 2016. Interannual-to-decadal variability and trends of sea level in the South China Sea[J]. *Climate Dynamics*, 46(9–10): 3113–3126.
- HARARI J, DE CAMARGO R, 2003. Numerical simulation of the tidal propagation in the coastal region of Santos (Brazil, 24°S 46°W)[J]. *Continental Shelf Research*, 23(16): 1597–1613.
- HORREVOETS A C, SAVENIJE H H G, SCHUURMAN J N, et al, 2004. The influence of river discharge on tidal damping in alluvial estuaries[J]. *Journal of Hydrology*, 294(4): 213–228.
- LIU FENG, XIE RONGYAO, LUO XIANGXIN, 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[J]. *Journal of Hydrology*, 573: 196–204.
- LUO XIANLIN, ZENG E Y, JI RONGYAO, et al, 2007. Effects of in-channel sand excavation on the hydrology of the Pearl River Delta, China[J]. *Journal of Hydrology*, 343(3–4): 230–239.
- NICHOLS M M, HOWARD-STROBEL M M, 1991. Evolution of an urban estuarine harbor: Norfolk, Virginia[J]. *Journal of Coastal Research*, 7(3): 745–757.
- SHERWOOD C R, JAY D A, HARVEY R B, et al, 1990. Historical changes in the Columbia River Estuary[J]. *Progress in Oceanography*, 25(1–4): 299–352.
- THOMAS C G, SPEARMAN J R, TURNBULL M J, 2002. Historical morphological change in the Mersey Estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 22(11–13): 1775–1794.
- YUAN RUI, ZHU JIANRONG, 2015. The effects of dredging on tidal range and saltwater intrusion in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Coastal Research*, 31(6): 1357–1362.
- ZHENG JINHAI, ZHANG WEI, ZHANG PENG, et al, 2014. Understanding space-time patterns of long-term tidal fluctuation over the Pearl River Delta, South China[J]. *Journal of Coastal Research*, 30(3): 515–527.