

磨刀门咸潮上溯对河口拦门沙地形变化的响应研究

林中源^{1,2}, 胡晓张^{1,2}, 邹华志^{1,2}, 张光³, 陈睿智^{1,2}, 唐琦²

(1. 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 广东 广州 510611; 2. 珠江水利科学研究院河流海岸研究所, 广东 广州 510611; 3. 中山大学海洋科学学院, 广东 珠海 519082)

摘要: 采用磨刀门河口拦门沙地形变化前后的2005年和2020年实测地形资料, 基于FVCOM三维数值模型, 对比分析了咸潮上溯对河口拦门沙地形变化的响应, 并探讨了拦门沙萎缩对盐分输运的影响机制。结果表明: 拦门沙萎缩导致磨刀门水道各取水口表、底层盐度差增大, 水体层化程度增强, 下游至上游层化增强程度逐渐减小, 广昌泵站势能异常最大值增大 25.2 J/m^3 , 马角水闸、平岗泵站、竹洲头泵站分别增大 8.3 、 2.9 、 0.2 J/m^3 ; 拦门沙萎缩后未改变磨刀门水道咸潮上溯规律, 半月潮周期盐度峰值依然出现在小潮后的中潮期; 拦门沙对咸潮上溯有较大阻碍作用, 底层 15 psu 等盐度线最大上溯距离向陆推进 5.1 km , 对于取水更为重要的表层 0.5 psu 等盐度线最大上溯距离向陆推进 2.9 km ; 稳定剪切盐通量显著增大是拦门沙萎缩后咸潮上溯加剧的主要原因, 并叠加潮汐震荡盐通量增大的影响。

关键词: 咸潮上溯; 河口拦门沙; FVCOM 三维数值模型; 盐通量; 磨刀门

中图分类号: P731.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)05-0104-08

Study on response of saltwater intrusion to topographic changes of mouth bar in Modaomen Estuary// LIN Zhongyuan^{1,2}, HU Xiaozhang^{1,2}, ZOU Huazhi^{1,2}, ZHANG Guang³, CHEN Ruizhi^{1,2}, TANG Qi² (1. Key Laboratory of Pearl River Estuary Regulation and Protection of Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China; 2. River and Coast Research Institute, Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510611, China; 3. School of Marine Sciences, Sun Yet-Sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Using measured terrain data from 2005 and 2020 before and after topographic changes of mouth bar in the Modaomen Estuary, a FVCOM three-dimensional numerical model was used to compare and analyze the response of saltwater intrusion to topographic changes of mouth bar, and to explore the impact mechanism of mouth bar shrinkage on salt transport. The results showed that the mouth bar shrinkage resulted in increases in the salinity difference between the surface and bottom layers of each water intake in the Modaomen Waterway, increases in the degree of water stratification, and gradual decreases in the degree of stratification enhancement from downstream to upstream. The maximum potential energy anomaly of Guangchang Pump Station increased by 25.2 J/m^3 , while Majiao Water Lock, Pinggang Pump Station, and Zhuzhoutou Pump Station increased by 8.3 , 2.9 , and 0.2 J/m^3 respectively. The shrinkage of the mouth bar did not change the upward trend of the saltwater intrusion in the Modaomen Estuary, and the peak salinity of the half-moon tide cycle still appeared in the middle tide period after the small tide. The mouth bar has a significant hindering effect on the upstream movement of the saltwater intrusion. The maximum upstream distance of the 15 psu iso-salinity line in the bottom layer is pushed towards the land by 5.1 km , while the maximum upstream distance of the 0.5 psu iso-salinity line in the surface layer, which is more important for water intake, is pushed towards the land by 2.9 km . The significant increase of stable shear salt flux is the main reason for the saltwater intrusion after the shrinkage of mouth bar, on top of which is the influence of tidal oscillation salt flux increase.

Key words: saltwater intrusion; mouth bar; FVCOM three-dimensional numerical model; salt flux; Modaomen Estuary

盐分输运是河口与海洋物质交换的重要组成部分, 来自海洋的高盐水通过河口环流及潮泵作用等物理过程入侵河口区域^[1-2], 形成咸潮上溯。咸潮上

溯受多种因素影响, 包括径流、潮汐、风、海平面、波浪等外部驱动力及内部地形变化^[3]。以往研究多聚焦于咸潮上溯对外部驱动力的响应及其物理机

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2023-01); 水利部重大科技项目(SKS-2022005)

作者简介: 林中源(1990—), 男, 工程师, 博士, 主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: lzy900414@126.com

通信作者: 邹华志(1979—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事河流河口治理研究。E-mail: zouhuazhi@163.com

制^[4-13]。关于地形变化对咸潮上溯的影响研究也较为广泛,如河口宽度和深度的收敛如何影响咸潮上溯^[14]、浅滩和航道的存在如何影响盐分输运^[15]、河床下切如何影响咸潮上溯距离等^[16-17]。然而河口拦门沙演变对咸潮的影响较少受到关注。河口拦门沙,又称河口沙坝,是河流三角洲系统中较为重要的地貌单元,径流、潮汐和波浪共同影响河口拦门沙的形成和演化^[18]。由于拦门沙较浅,阻碍了水体流动,产生了较强的底部切应力,从而增强水体混合和能量耗散,影响河口与海洋间的盐分输运。Gong等^[3]通过建立理想河口模型,发现拦门沙的存在会减弱咸潮上溯,最大上溯距离较拦门沙萎缩的情况下减少了15%~23%。目前关于真实河口的拦门沙地形变化对咸潮影响的研究仍相对薄弱。

珠江流域咸潮防控常年依靠珠江流域枯水期水量调度,基本保障了流域供水安全。但上游思贤窖控制断面2500 m³/s的压咸流量已较难满足近些年的压咸需求,压咸效果有所下降。基于此,本文采用2005年和2020年磨刀门拦门沙周边区域实测地形资料(珠江三角洲其他区域则保持2005年地形不变),通过FVCOM(finite volume coastal ocean model)三维数值模型,对比分析拦门沙地形变化对磨刀门水道水动力、咸潮上溯的影响,并探讨拦门沙变化对磨刀门水道盐分输运机制的影响,以期为河口治理与开发、区域供水安全保障提供参考。

1 研究区概况

珠江流域年径流总量居全国第二位,仅次于长江,但径流年内分配不均,枯季径流量仅占全年径流总量的23%,因此珠江河口枯季时极易受咸潮上溯影响。磨刀门为珠江口八大口门之一,其河口位于珠江西江流域下游,是西江最大的泄洪输沙通道,径流量约占珠江入海总流量的27%,咸潮灾害频发,对澳门、珠海和中山的供水造成极大威胁。2000年

以来,由于人类活动影响,磨刀门口拦门沙地形发生极大变化,2017年拦门沙中心-4 m以上浅滩消失,滩顶下切约3 m,拦门沙东汊基本淤积萎缩^[19]。针对这一现象,有学者开始关注拦门沙演变对咸潮上溯的影响,如程香菊等^[20]提出了拦门沙中心和东、西汉全部疏浚成-6 m的理想方案,发现疏挖后0.5 psu和5 psu等盐度线的上溯最远点分别向陆推进了700 m和2.5 km;朱泽文等^[21]则保持拦门沙中心地形不变,通过将拦门沙东、西汉疏浚成-4、-5.5、-7 m 3种形态,发现拦门沙东、西汉每深1.5 m,拦门沙上游距离口门15 km内的咸潮上溯距离增加约1 km,而对拦门沙上游距离口门25 km以外地区影响较小。目前相关研究建立在磨刀门拦门沙疏浚理想方案的基础上,且未形成统一认识,一些学者认为拦门沙附近区域全部萎缩后对于取水更为重要的0.5 psu等盐度线向陆推进了700 m^[20],而部分学者认为拦门沙东、西汉道疏浚对0.5 psu等盐度线的影响可忽略^[21]。此外,拦门沙地形变化对磨刀门水道盐分输运机制的影响也未有探讨。

2 研究方法

2.1 数值模型

基于FVCOM三维数值模型,本文构建了珠江河口三维数值模型,计算网格如图1所示。模型计算范围约为11.2万 km²,覆盖了珠江三角洲主要河道、河口湾及近岸水域,对研究区磨刀门水道及拦门沙附近区域进行局部加密,网格最小空间分辨率为50 m,垂向分为10层。上游流量边界使用西江梧州站、北江石角站、东江博罗站、增江麒麟咀站、潭江石咀站和白泥水道老鸦岗站的实测流量,外海边界为潮汐调和常数,包括M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1和Q1等8个主要分潮。

2.2 工况设置

为分析评估磨刀门口外拦门沙演变对咸潮上溯

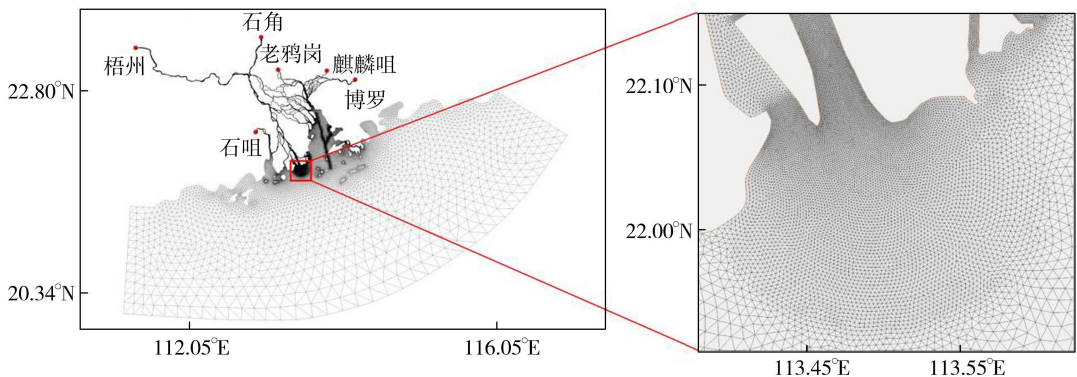


图1 模型计算网格

Fig. 1 Model computation grids

的影响,采用同一水文条件,两种地形工况进行数值模型模拟研究。工况一为模型计算范围内地形采用2005年实测资料,工况二为重点研究区磨刀门水道下游及拦门沙附近区域采用2020年实测资料,其他区域则保持2005年地形不变。图2为2005年和2020年河口拦门沙地形对比,可见相较2005年,2020年磨刀门拦门沙中心处明显萎缩,滩顶高程下切超过4 m,拦门沙两侧东、西汉消失,已形成深槽贯通直接入海的格局,且磨刀门水道下游河床明显下切,幅度超3 m。为了评估咸潮上溯强度,选取从口门外到磨刀门水道内的深泓线作为纵断面,全长近80 km,纵断面起点位于广昌泵站下游约33 km处,终点位于竹洲头泵站上游约19 km处,两个泵站中间分布平岗泵站、马角水闸等澳门-珠海供水系统、中山市南部三镇供水系统中最为重要的取水口。模型模拟计算时段为2004年10月1日至2005年2月3日,本文主要选取模型进入稳态后的2005年1月16日0时至1月31日23时的计算成果进行统计分析,小、中、大潮统计时间范围分别为1月18日9时至1月19日9时、1月21日9时至1月22日9时、1月25日9时至1月26日9时。

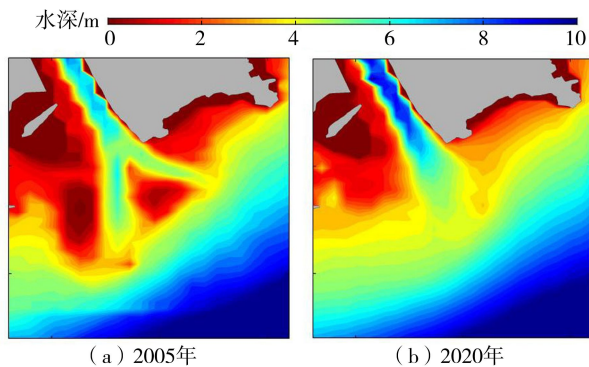


图2 2005年和2020年河口拦门沙地形对比

Fig. 2 Topographic comparison of mouth bar in 2005 and 2020

2004—2005年枯水期,珠江流域来水严重偏枯,珠江三角洲出现了1980年以来最为严重的咸潮灾害。为保障流域供水安全,水利部珠江水利委员会于2005年首次开展珠江压咸补淡应急水量调度。因此,本文选取时间段为咸潮极为严重时期,具有显著的代表性。此外,本文构建的数值模型率定验证资料为2005年1月珠江三角洲大范围50个站点的同步观测数据,数据内容较为全面,包括磨刀门水道在内的珠江三角洲其他主要站点流量、潮位、流速、盐度等,均已得到较好验证^[10,17],能准确刻画珠江三角洲水动力条件和盐度分层特性。

2.3 分析方法

采用势能异常^[22-23]反映河口内水体的垂向层

化状态,计算公式为

$$\varphi = \frac{1}{D} \int_{-h}^{h'} gz(\bar{\rho} - \rho) dz \quad (1)$$

其中

$$D = h + h'$$

式中: φ 为势能异常值,值越大表明水体层化越强; ρ 为水体密度; $\bar{\rho}$ 为垂向平均密度,代表水体密度达到垂向均一的混合状态下所需做的功; g 为重力加速度; z 为垂向坐标; D 为总水深; h' 为水位; h 为静止水深。

为了量化和分析盐分输运及其控制机制,根据Lerczak等^[24]的方法分解盐通量。潮平均的总盐通量计算公式为

$$F_s = \langle \int usdA \rangle \quad (2)$$

式中: F_s 为盐通量; $\langle \rangle$ 表示潮平均,本文取25 h; u 为轴向流速; s 为盐度; A 为横断面面积。 u 和 s 均可分解为平流输运项、稳定剪切项、潮汐振荡项,因此,潮平均盐通量的计算公式可转换为

$$F_s = Q_f s_0 + F_E + F_T \quad (3)$$

式中: Q_f 为径流量和潮流与断面面积波动之间的相关性产生的体积运输,无风情况下 Q_f 为负且等于径流量,在有风作用时 Q_f 不一定为负; s_0 为潮平均横断面面积; F_E 为稳定剪切输运,是由垂向和侧向剪切输运导致的潮平均剪切扩散盐通量; F_T 为 u 和 s 随时间变化而导致的潮汐振荡盐通量。重力环流将底层高盐水向陆输运,将表层淡水向海输运,由重力环流导致的盐度输运包含在 F_E 中,同时由风驱动的垂向与侧向环流也包含在 F_E 中。

3 结果与分析

3.1 拦门沙萎缩前后磨刀门口门盐度场和流场分布变化

图3为拦门沙萎缩前后磨刀门口门外涨急、落急时刻盐度和流速分布。由图3(a)(e)可见,相较拦门沙萎缩前,拦门沙萎缩后表层涨急时刻磨刀门水道和拦门沙西侧区域流速有所减小,最大流速由1 m/s降至约0.9 m/s,拦门沙附近盐度减小较为明显。由图3(b)(f)可见,拦门沙底层涨急时刻,拦门沙萎缩后东汉流速明显减小,同时磨刀门水道盐度明显增大,由25 psu增大至29 psu。由图3(c)(g)可见,表层落急时刻,拦门沙萎缩前东、西汉为主要落潮通道,萎缩后受科氏力影响,落潮流向整体呈西南向,并且磨刀门水道内盐度有所增大。由图3(d)(h)可见,拦门沙萎缩前后落急时刻底层盐度和流速与表层分布一致,拦门沙萎缩前东、西汉流速较大且磨刀门水道和拦门沙附近水域盐度较低,而拦门

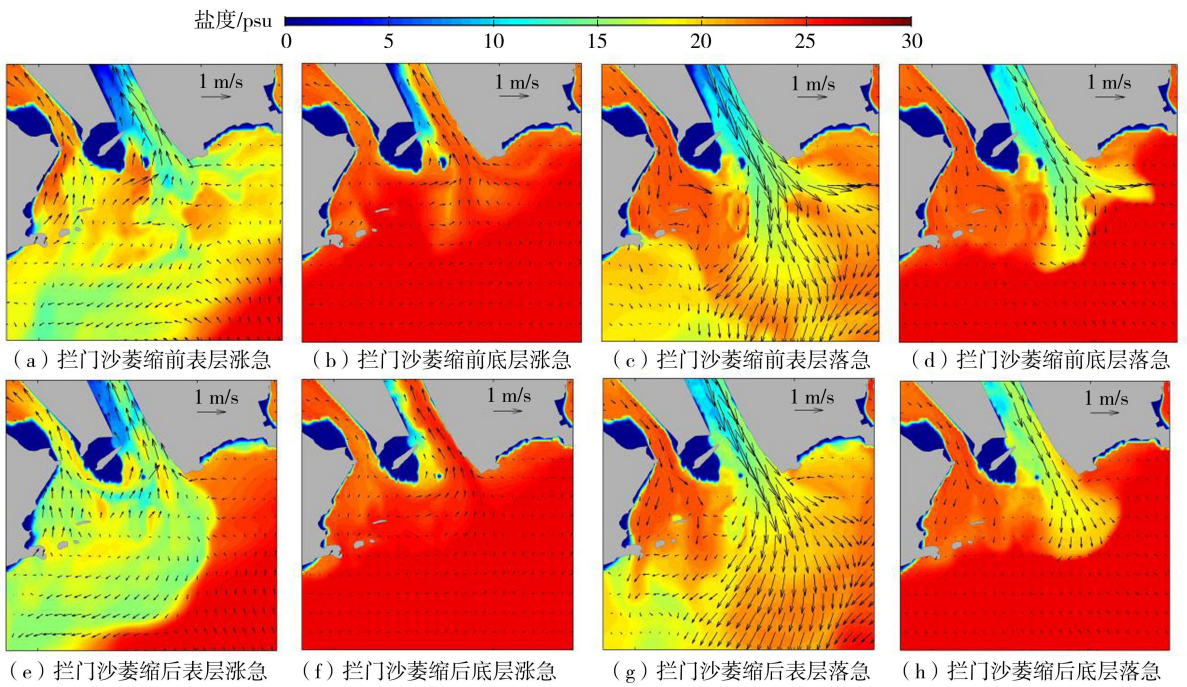


图3 拦门沙萎缩前后磨刀门门口外涨急、落急时刻盐度和流速分布

Fig. 3 Surface and bottom salinity and velocity distribution at peak flood and peak ebb before and after mouth bar shrinkage in Modaomen Estuary

沙萎缩后低盐度区范围减小,盐度整体明显增大。由此可知,拦门沙对咸潮上溯有较大的阻碍作用,拦门沙萎缩后靠近拦门沙位置的磨刀门下游河道处盐度增大较为明显,并且拦门沙萎缩后改变了拦门沙附近水域涨、落潮流场分布格局,对落潮流影响更为明显。

3.2 拦门沙萎缩前后各站点层化和混合程度变化

广昌、平岗、竹洲头泵站是澳门-珠海供水系统中最重要取水口,马角水闸是中山市南部三镇重要的淡水输送通道,当咸潮入侵时水闸关闭,当含氯度低于国标限制 250 mg/L (0.5 psu) 时水闸开启。分析拦门沙萎缩前后各站点层化和混合程度变化情况,图 4 为拦门沙萎缩前后各站点势能异常值时间序列。由图 4 可见,各站层化程度基本上保持一致的变化趋势,在小—中—大—中潮转换过程中,水体层化呈现先增大后减小再增大的趋势,小潮层化最强,大潮层化最弱,水体混合程度最强,后随着

潮差减小,层化又逐渐增强。磨刀门水道下游至上游层化程度逐渐减小,广昌泵站势能异常范围为 35~97 J/m³,显著大于马角水闸 (3~23 J/m³)、平岗泵站 (1.5~8 J/m³)、竹洲头泵站 (1~2.5 J/m³) 势能异常值。值得注意的是,拦门沙萎缩后各站点层化程度显著加强,表、底层盐度差增大,河口交换流增强,利于河流与海洋物质交换。此外,拦门沙萎缩后对磨刀门水道下游至上游层化的影响不断减小,与拦门沙萎缩前相比,拦门沙萎缩后广昌泵站势能异常最大值增大 25.2 J/m³,马角水闸、平岗泵站、竹洲头泵站分别增大 8.3、2.9、0.2 J/m³。综上所述,拦门沙萎缩后,磨刀门水道水体层化增强,重力环流增强,底部高盐水入侵加剧。

3.3 拦门沙萎缩前后纵断面咸潮上溯距离变化

图 5 为拦门沙萎缩前后磨刀门纵断面小、中、大潮平均盐度分布。由图 5 可见,随着小—中—大潮的转换,拦门沙萎缩前后咸潮上溯距离均呈现先

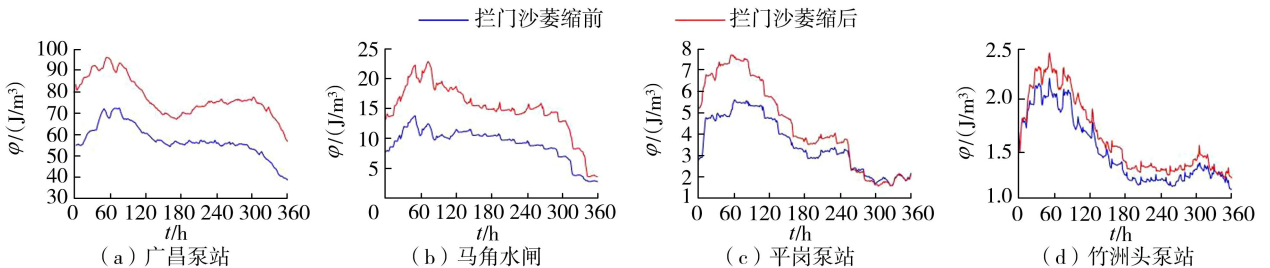


图4 拦门沙萎缩前后各站点势能异常值时间序列

Fig. 4 Potential energy anomaly value before and after mouth bar shrinkage

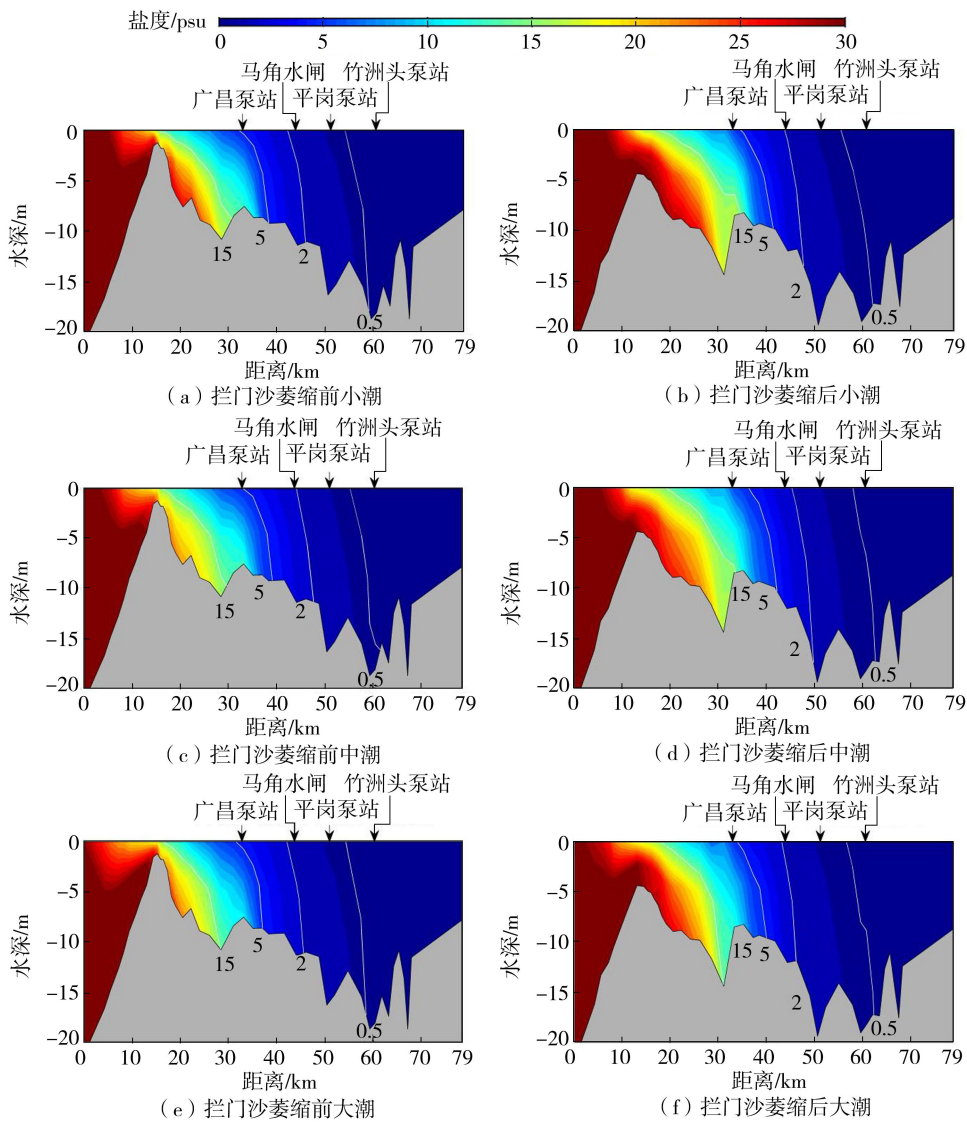


图5 拦门沙萎缩前后纵断面小、中、大潮潮平均盐度分布

Fig. 5 Mean salinity distribution during neap, middle and spring tide before and after mouth bar shrinkage

增大后减小的特征,其中中潮时咸潮上溯最强,小潮次之,大潮最弱,与 Gong 等^[4]研究结果一致。但拦门沙萎缩后外海 20 psu 高盐水团进入磨刀门水道明显增加,15、5、2、0.5 psu 各等盐度线均出现较大上移,其中底层上移更为剧烈。值得注意的是,拦门沙萎缩后 15、5 psu 等盐度线倾斜更为剧烈,表明表、底层盐度差增大,水体层化增强,磨刀门水道重力环流增强。在一个潮周期中,涨憩时刻咸潮上溯最强^[23],因此为了探究拦门沙萎缩后对半月潮周期咸潮上溯最大距离的影响,绘制中潮涨憩时刻盐度分布,如图 6 所示。由图 6 可见,与图 5(c)(d)中大潮平均状态相比,各等盐度线上溯距离明显增大,且各等盐度线倾斜减弱,尤其是 2、0.5 psu 等盐度线,说明中潮涨憩时刻表、底层盐度差较小,水体混合较为均匀。

表 1 为拦门沙萎缩前后小、中、大潮潮平均及中潮涨憩时刻各等盐度线上溯距离。由表 1 可见,拦

门沙萎缩后各等盐度线上溯明显加剧。其中,拦门沙萎缩后中大潮平均状态下 15 psu 等盐度线底层上溯距离增加 5.1 km,而对于取水更为重要的 0.5 psu 等盐度线表层上溯距离,小、中、大潮平均状态分别增加 2.0、2.2、2.3 km。半月潮周期内咸潮上溯最大距离发生在中潮涨憩时刻,拦门沙萎缩后表、底层 0.5 psu 等盐度线上溯距离分别增加 2.9、3.4 km。本文结果与程香菊等^[20]研究结果基本一致,即拦门沙萎缩后 0.5 psu 等盐度线向陆推进,但本文结果较大,主要原因为:①地形差异。本文中拦门沙中心处最小水深由 1 m 增至 5 m,东汉和西汉格局明显,而程香菊等^[20]研究中拦门沙中心处最小水深由 3 m 增至 6 m,拦门沙两侧无明显的潮汐通道。②咸潮上溯强度差异。本文半月潮周期内平岗泵站最大盐度超过 2 psu,而程香菊等^[20]研究中半月潮周期内平岗泵站最大盐度不足 1 psu。朱泽文等^[21]

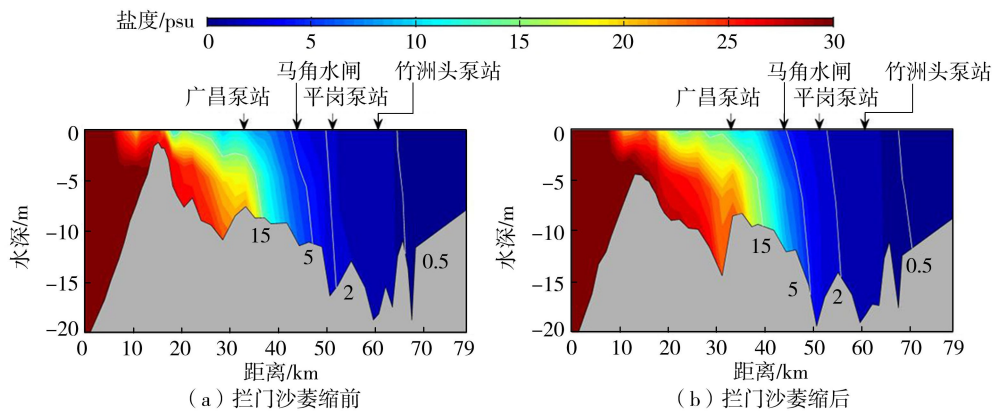


图6 拦门沙萎缩前后纵断面中潮涨憩时刻盐度分布

Fig. 6 Salinity distribution at flood slack of middle tide before and after mouth bar shrinkage

研究结果与本文和程香菊等^[20]均不一致的原因为地形工况设置差异,该研究中保持拦门沙中心地形不变,仅将东、西汉疏浚,最大疏浚幅度仅3 m,拦门沙依然存在阻碍咸潮上溯的作用,进入磨刀门水道内盐通量增幅有限,致使0.5 psu等盐度线基本无变化。

表1 拦门沙萎缩前后等盐度线上溯距离

Table 1 Distance of iso-salinity moving upstream before and after mouth bar shrinkage

潮汐时刻	表/底层	拦门沙萎缩前/后	上溯距离/km			
			15 psu等盐度线	5 psu等盐度线	2 psu等盐度线	0.5 psu等盐度线
小潮潮平均	表层	前	15.7	32.1	42.3	53.2
	表层	后	17.1	33.9	44.2	55.2
	底层	前	30.6	38.2	46.8	59.7
	底层	后	34.3	41.3	47.9	62.3
中潮潮平均	表层	前	16.3	33.3	44.4	55.8
	表层	后	19.1	36.3	45.4	58.0
	底层	前	29.3	38.9	45.3	60.9
	底层	后	34.4	42.4	50.0	63.1
大潮潮平均	表层	前	16.3	31.5	42.1	54.8
	表层	后	17.9	32.9	43.3	57.1
	底层	前	28.4	37.3	46.0	60.1
	底层	后	30.5	39.8	46.4	62.7
中潮涨憩	表层	前	17.8	42.3	51.6	65.0
	表层	后	21.5	44.4	52.9	67.9
	底层	前	36.8	46.9	53.6	67.7
	底层	后	39.6	49.7	55.8	71.1

3.4 拦门沙萎缩前后潮平均总盐通量机制分析

Gong等^[25]研究发现洪湾水道盐分输运对磨刀门咸潮上溯有较大影响,本文选取洪湾水道上游广昌泵站断面对次断面总盐通量进行机制分解,结合广昌泵站水位(图7),探究拦门沙萎缩前后盐分输运机制的变化,结果如图8所示。由图8可见,总盐通量(F_S)在小潮时保持向陆输运,咸潮上溯加剧,小潮后的中潮转为向海输运,此时咸潮上溯距离达到最大,随后咸潮上溯减弱,这便是磨刀门水道这种部分混合型河口咸潮上溯峰值发生于小潮后中潮的

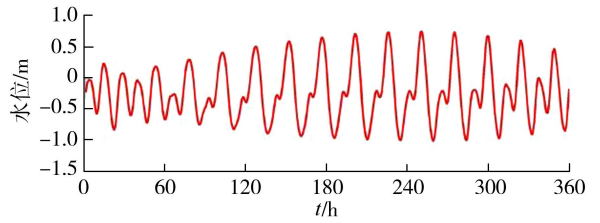


图7 广昌泵站水位

Fig. 7 Water level of Guangchang Pump Station

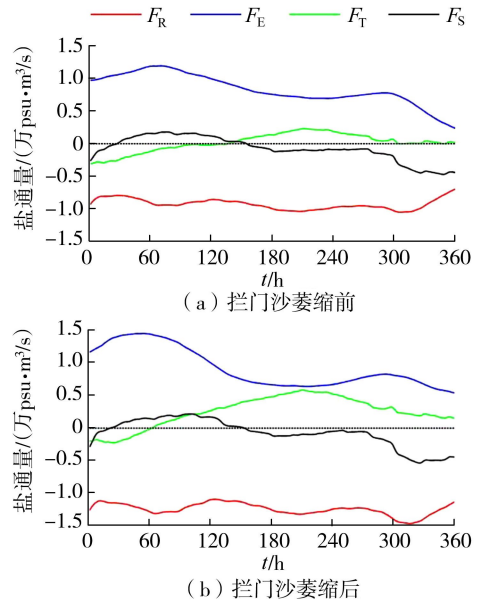


图8 拦门沙萎缩前后潮平均总盐通量机制分解

Fig. 8 Mechanism decomposition of subtidal total salt flux before and after mouth bar shrinkage

原因。与拦门沙萎缩前相比,拦门沙萎缩后向陆输运的稳定剪切项(F_E)显著增大,与前文磨刀门水道层化程度增大结果一致,同时潮汐振荡项(F_T)增大,尤其在大潮时增大较为明显,增加了大潮时盐分向陆输运。由于向海输运的平流输运项(F_R)的增大,抵消了稳定剪切项部分向陆输运的作用,但总盐通量依然有所增加,从而导致了拦门沙萎缩后咸潮上溯加剧。综上所述,稳定剪切盐通量显著增大是

拦门沙萎缩后咸潮上溯加剧的主要原因,并叠加潮汐震荡盐通量增大的影响。

3.5 讨论

除本文探讨的拦门沙、径流、潮汐等咸潮影响因素外,风、海平面和波浪也对咸潮上溯有重要影响。Lin 等^[5]研究发现风对磨刀门咸潮上溯年际变化贡献为 13%,在径流较为稳定时,风应力大小为咸潮上溯变化的控制性因素。Hong 等^[26]研究发现海平面上升,导致潮汐动力、水体层化加强,从而加剧珠江河口咸潮上溯。对于拦门沙萎缩后的磨刀门河口,枯季东北季风与寒潮带来的较大风速均会加剧咸潮上溯,叠加近些年气候变化导致的海平面上升,对于流域供水安全的挑战日益增大。Gong 等^[27]研究发现波浪通过增强河口水体混合的方式导致伶仃洋咸潮上溯减弱。当波浪从近海向陆传播时,拦门沙会导致波浪破碎和波能耗散,而拦门沙萎缩后波浪是否也会减弱磨刀门咸潮上溯还未被系统揭示。此外,在拦门沙萎缩的背景下,同时考虑径流、潮汐、风、海平面与波浪共同作用,咸潮上溯变化趋势及其背后的动力机制,值得深入探讨。

珠江流域咸潮防控措施较为单一,常年依赖于上游水库群调度增大径流压制咸潮,水利部珠江水利委员会 2005—2024 年连续组织实施枯水期压咸补淡应急水量调度,基本保障了珠江河口受咸潮影响区域供水安全。但面对拦门沙萎缩后咸潮加剧的结果,建议一是探寻河口拦门沙修复方案,加强河口采砂监管;二是动态调整压咸流量,保障日后咸潮加剧背景下的供水安全;三是多措并举,探寻新的咸潮防控措施,以面对未来可能出现的极端干旱、上游水库无水可调的不利局面。

4 结论

a. 磨刀门水道小潮时层化最强,大潮时层化最弱。拦门沙萎缩导致磨刀门水道各取水口表、底层盐度差增大,水体层化程度增大,下游至上游层化增强程度逐渐减小,广昌泵站势能异常最大值增大 25.2 J/m^3 ,马角水闸、平岗泵站、竹洲头泵站分别增大 8.3 、 2.9 、 0.2 J/m^3 。

b. 小、中、大潮的半月潮周期内,磨刀门水道中潮时咸潮上溯最强,小潮次之,大潮最弱,拦门沙萎缩后未改变磨刀门水道咸潮上溯规律。但拦门沙对咸潮上溯有较大阻碍作用,半月潮周期中,底层 15 psu 等盐线最大上溯距离向陆推进 5.1 km,对于取水更为重要的表层 0.5 psu 等盐线最大上溯距离向陆推进 2.9 km。

c. 磨刀门水道咸潮上溯峰值发生于小潮后的

中潮的原因:总盐通量在小潮时向陆输运,咸潮上溯加剧,小潮后的中潮转为向海输运,此时咸潮上溯距离达到最大,随后咸潮上溯减弱。拦门沙萎缩后增大了向陆输运的总盐通量,从而导致咸潮上溯加剧,其中稳定剪切盐通量显著增大是咸潮加剧的主要原因,并叠加潮汐震荡盐通量增大的影响。

参考文献:

- [1] MACCREADY P, GEYER W R. Advances in estuarine physics[J]. Annual Review of Marine Science, 2010, 2: 35-58.
- [2] 张钊汇,危小艳,张蔚. 三维理想河口盐水入侵对径潮驱动变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 96-102. (ZHANG Zhaohui, WEI Xiaoyan, ZHANG Wei. Response of three-dimensional ideal estuarine salt intrusion to changes in river and tidal forcing [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 96-102. (in Chinese))
- [3] GONG Wenping, ZHANG Guang, ZHANG Heng, et al. The effects of mouth bar on salt intrusion in a partially mixed estuary[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128261.
- [4] GONG Wenping, SHEN Jian. The response of salt intrusion to changes in river discharge and tidal mixing during the dry season in the Modaomen Estuary, China [J]. Continental Shelf Research, 2011, 31(7/8): 769-788.
- [5] LIN Zhongyuan, ZHANG Heng, LIN Hongyang, et al. Intraseasonal and interannual variabilities of saltwater intrusion during dry seasons and the associated driving forcings in a partially mixed estuary[J]. Continental Shelf Research, 2019, 174: 95-107.
- [6] GONG Wenping, LIN Zhongyuan, ZHANG Heng, et al. The response of salt intrusion to changes in river discharge, tidal range, and winds, based on wavelet analysis in the Modaomen estuary, China [J]. Ocean & Coastal Management, 2022, 219: 106060.
- [7] 王彪,朱建荣,吕爱琴. 珠江河口磨刀门枯水期盐度统计模型[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 42-48. (WANG Biao, ZHU Jianrong, LYU Aiqin, et al. Salinity statistical model for Modaomen of Pearl River Estuary during dry season [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 42-48. (in Chinese))
- [8] 陈晖,黄广灵,谭超,等. 东江咸潮上溯特征及盐度运输机理浅析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 195-203. (CHEN Hui, HUANG Guangling, TAN Chao, et al. Analysis of saltwater intrusion characteristics and salinity transport mechanism in the Dongjiang River [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 195-203. (in Chinese))
- [9] 杨芳,陈文龙,卢陈,等. 粤港澳大湾区咸潮综合防控体

- 系研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 32-41. (YANG Fang, CHEN Wenlong, LU Chen, et al. Research on comprehensive prevention and control system of saltwater intrusion in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 32-41. (in Chinese))
- [10] 林若兰, 卓文珊, 曾珂, 等. 不同风向对珠江东四口门盐水入侵的影响[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 66-75. (LIN Ruolan, ZHUO Wenshan, ZENG Ke, et al. Influence of different wind direction on saltwater intrusion in East four portals of Pearl River [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 66-75. (in Chinese))
- [11] 尹小玲, 赵雪峰, 黄舒琴, 等. 分层型河口咸水上溯对径流潮汐共同作用的基本响应[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 68-74. (YIN Xiaoling, ZHAO Xuefeng, HUANG Shuqin, et al. Basic response of saline water intrusion on combined action of runoff and tide in stratified estuary [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 68-74. (in Chinese))
- [12] 李若华, 马继侠, 张舒羽, 等. 强潮作用下钱塘江河口盐水入侵机制[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 37-44. (LI Ruohua, MA Jixia, ZHANG Shuyu, et al. Saltwater intrusion mechanism in the Qiantang River estuary under strong tide [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 37-44. (in Chinese))
- [13] 徐志, 戴会超, 高希超, 等. 长江口盐水入侵对径流变异和海平面变化的响应[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 15-21. (XU Zhi, DAI Huichao, GAO Xichao, et al. Response of saltwater intrusion to runoff variability and sea level change in Yangtze River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 15-21. (in Chinese))
- [14] KUIJPER K, VAN RIJN L C. Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; part II: salinity distributions in prismatic and convergent tidal channels [J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(11): 1743-1765.
- [15] ARISTIZÁBAL M, CHANT R. A numerical study of salt fluxes in Delaware Bay estuary [J]. Journal of Physical Oceanography, 2013, 43(8): 1572-1588.
- [16] 韩志远, 田向平, 刘峰. 珠江磨刀门水道咸潮上溯加剧的原因[J]. 海洋学研究, 2010, 28(2): 52-59. (HAN Zhiyuan, TIAN Xiangping, LIU Feng. Study on the causes of intensified saline water intrusion into Modaomen Estuary of the Zhujiang River in recent years [J]. Journal of Marine Sciences, 2010, 28(2): 52-59. (in Chinese))
- [17] 邹华志, 杨芳, 张亮亮. 河床下切对磨刀门水道咸潮上溯的影响[J]. 水电能源科学, 2019, 37(6): 36-39. (ZOU Huazhi, YANG Fang, ZHANG Langliang. Effect of riverbed degradation on saltwater intrusion in the Modaomen River channel [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(6): 36-39. (in Chinese))
- [18] GAO Weilun, SHAO Dongdong, WANG Zhengbing et al. Combined effects of unsteady river discharges and wave conditions on river mouth bar morphodynamics [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(23): 12903-12911.
- [19] 何用, 吴尧, 卢陈. 珠江河口演变与治理保护探讨[J]. 泥沙研究, 2022, 47(6): 1-8. (HE Yong, WU Yao, LU Chen. Study on the Pearl River Estuary protection and management associated with morphological progresses [J]. Journal of Sediment Research, 2022, 47(6): 1-8. (in Chinese))
- [20] 程香菊, 詹威. 数值分析磨刀门水道咸潮上溯控制工程措施的效应[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2012, 27(5): 597-604. (CHENG Xiangju, ZHAN Wei. Modeling approach to assess the effects of controlling engineering measures on saltwater intrusion in Modaomen estuary [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(5): 597-604. (in Chinese))
- [21] 朱泽文, 刘丙军. 珠江河口拦门沙演变对咸潮上溯的影响[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 48-51. (ZHU Zewen, LIU Bingjun. Research on the influence of evolution of sand bar in the Pearl River estuary on saltwater intrusion [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(11): 48-51. (in Chinese))
- [22] SIMPSON J H. The shelf-sea fronts: implications of their existence and behaviour [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1981, 302(1472): 531-546.
- [23] 陈文龙, 邹华志, 董延军. 磨刀门水道咸潮上溯动力特性分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 713-723. (CHEN Wenlong, ZOU Huazhi, DONG Yanjun. Hydrodynamic of saltwater intrusion in the Modaomen waterway [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 713-723. (in Chinese))
- [24] LERCZAK J A, GEYER W R, CHANT R J. Mechanisms driving the time-dependent salt flux in a partially stratified estuary [J]. Journal of Physical Oceanography: Boston, 2006, 36(12): 2296-2311.
- [25] GONG Wenping, WANG Yaping, JIA Jianjun. The effect of interacting downstream branches on saltwater intrusion in the Modaomen Estuary, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 45: 223-238.
- [26] HONG Bo, LIU Zhonghui, SHEN Jian, et al. Potential physical impacts of sea-level rise on the Pearl River Estuary, China [J]. Journal of Marine Systems, 2020, 201: 103245.
- [27] GONG Wenping, LIN Zhongyuan, CHEN Yunzhen, et al. Effect of winds and waves on salt intrusion in the Pearl River estuary [J]. Ocean Science, 2018, 14(1): 139-159.