

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.020

大铲湾突堤开槽的水环境响应

唐榆森¹, 涂新军^{1,2,3}, 王 燕⁴, 梁巧茵⁴, 周文浩⁵, 赖荣标¹

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 广东省华南地区水安全调控工程技术研究中心, 广东 广州 510275;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519000; 4. 深圳市水务规划设计院股份有限公司,
广东 深圳 518036; 5. 长江水利委员会水文局长江三峡水文水资源勘测局, 湖北 宜昌 443000)

摘要:基于构建的中国南部伶仃洋二维水动力及水质模型,从潮流场、换水周期和污染带变化分析了粤港澳大湾区东部典型研究区大铲湾在突堤码头根部开槽的水环境响应。结果表明:大铲湾湾尖区域相对封闭,水流运动缓慢,受入湾河流陆源排污影响,水污染问题较为突出;开槽后,由于增加了新的潮汐通道,湾尖区域的涨落潮动力提高,换水周期明显缩短,污染带范围显著缩小,湾尖污染带面积占比随着开槽宽度的增加表现为先快速下降、后趋近平缓的特点;综合考虑海湾水环境改善效果和工程经济性,认为合理的开槽宽度为60~100 m。

关键词:突堤开槽;水环境响应;污染带;大铲湾;粤港澳大湾区

中图分类号:TV92 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0146-08

Water environment response to slotting on jetty in Dachan Bay // TANG Yusen¹, TU Xinjun^{1,2,3}, WANG Yan⁴, LIANG Qiaoyin⁴, ZHOU Wenhao⁵, LAI Rongbiao¹ (1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Center of Water Security Engineering and Technology in Southern China of Guangdong, Guangzhou 510275, China; 3. Guangdong Laboratory of Southern Ocean Science and Engineering, Zhuhai 519000, China; 4. Shenzhen Water Planning and Design Institute Limited Company, Shenzhen 518036, China; 5. Three Gorges Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Yichang 443000, China)

Abstract: With the two-dimensional hydrodynamic and water quality models of Lingdingyang estuary in South China, the marine water environment response to slotting at the root of the jetty in Dachan Bay, a typical study area in the eastern Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, was analyzed based on the changes of tidal current field, water e-folding time, and pollution zone. Results showed that the tip area of Dachan Bay was relatively closed with slow current, where water pollution was serious under the impact of land sewage discharge. After slotting, the fluctuation tidal power in the tip area of the bay was increased, the water e-folding time was obviously shortened, and the ranges of the pollution zone were significantly decreased due to the occurrence of the new tidal channel. With the increase of the slotting width, the proportion of the pollution zone in the tip area of the bay sharply decreased at first and then changed slightly. To improve the water environment and economic effectiveness of the project, it is considered that the reasonable slotting width should be 60~100 m.

Key words: slotting on jetty; water environment response; pollution zone; Dachan Bay; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

海湾作为优良的开发环境,在人类社会的建设发展进程中占据着重要的地位^[1]。但是随着人类对海湾原始环境的改造,势必会对海湾的水环境产生重大影响^[2-6]。针对受工程围截后海湾的水环境治理,学者开展了相关研究。崔峥等^[7]利用数学模

型研究了马銮湾海堤和高集海堤的不同开口方案对厦门西海域水体交换能力和水质改善的影响;徐婉明等^[8]采用数值模拟方法分析了南澳羊屿村围填海工程部分拆除、口门断面扩大对环抱式港池潮流场、纳潮量和水体交换能力的综合影响;林毅辉

基金项目:国家自然科学基金(51879288);广东省水利科技创新项目(2020-27)

作者简介:唐榆森(1997—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: tangys5@mail2.sysu.edu.cn

通信作者:涂新军(1972—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: eestxj@mail.sysu.edu.cn

等^[9]基于潮位及海流观测数据分析发现,高集海堤开口后厦门湾东西海域水动力显著增强,潮流特征明显变化,有利于改善海湾水环境。

深圳市大铲湾是粤港澳大湾区伶仃洋东岸的重要组成部分。随着区域开发的不断深入,滩涂围填、码头建设、港池开挖等各种人类活动日益增强,对大铲湾的水环境演变趋势产生重要影响。围绕大铲湾的水环境治理,董志慧等^[10]通过建立大铲湾局部物理模型对入湾河流的污水排放进行试验研究,提出了水动力导控治理湾内水质的思路;莫思平等^[11]基于水质物理模型探究了大铲湾湾区内无污染源情况下抽水、有污染源情况下注水等工程方案对湾区水体交换能力的改善效果;何梦云等^[12]则通过现场资料分析与水质物理模型对大铲湾海水廊道水动力条件和水体污染物浓度变化进行研究;刘岩等^[13]建立了大铲湾环境流体动力学模型,以湾区水龄为评价指标,分析得出填海工程对西乡河河口附近海域影响最大。目前,针对大铲湾突堤码头采取开槽措施,湾区水环境如何响应尚未有进一步的讨论。为此,本文以大铲湾水环境为研究对象,采用平面二维水动力模型对突堤码头不同宽度开槽工况下,湾区潮流场、水体换水周期以及污染带分布变化进行计算分析,以期采用突堤开槽工程措施改善大铲湾水环境状况提供科学依据,并为同类型海湾水环境问题提供参考。

1 研究区概况

大铲湾位于粤港澳大湾区深圳市的西部,为伶仃洋东部的次一级浅海湾。海域面积 5.89 km²,湾口水深约 3~5 m,湾内平均水深约为 2 m。湾区陆域入湾河流有西乡河、新圳河、双界河、桂庙渠和铲湾渠,如图 1 所示。

21 世纪初,为满足当地水路交通的战略需求,大铲湾兴建集装箱突堤码头。码头的建设使得湾区与整个伶仃洋海域水体交换的通道被束窄,排水通道由原来的 4.5 km 束窄至约 1 km,直接导致湾内水域变成相对封闭的港池,水动力严重不足。另一方面,大铲湾入湾河流的陆源污染汇入,使得污染物聚集在湾区难以消散,水体污染问题频发。根据当地水污染治理要求,大铲湾湾内水质将严格执行第三类海水水质标准。

2 研究方法

2.1 海湾水动力及水质数值模拟

海湾水动力模拟基于二维不可压缩 Reynolds 值均匀分布的 Navier-Stokes 方程组,服从 Boussinesq

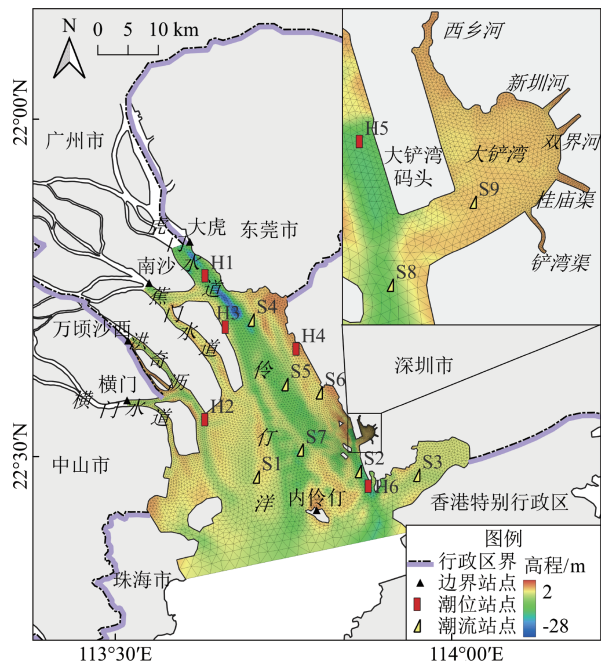


图 1 海湾位置、测站分布及模型网格

Fig. 1 Locations of bay, gauging stations, and interpolated grids

假设和静水压力假定:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} &= f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h\partial p_a}{\rho_0 \partial x} + \\ &+ \frac{gh^2 \partial \rho}{2\rho_0 \partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{lx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial (hT_{xx})}{\partial x} + \\ &+ \frac{\partial (hT_{xy})}{\partial y} + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial (h\bar{v}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} &= f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h\partial p_a}{\rho_0 \partial y} + \\ &+ \frac{gh^2 \partial \rho}{2\rho_0 \partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{ly}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} \right) + \frac{\partial (hT_{xy})}{\partial x} + \\ &+ \frac{\partial (hT_{yy})}{\partial y} + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$h = \eta + d \quad T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$$

$$T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$$

式中: η 、 d 、 h 分别为水底高程、静水深、表面高程; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分别为 x 、 y 方向上的水深平均流速; t 为时间; f 为地球自转偏转力; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; ρ_0 为水的相对密度; τ_{lx} 、 τ_{ly} 分别为底部摩擦力、表面摩擦力和流动阻力在 x 、 y 方向上应力分量; τ_{sx} 、 τ_{sy} 分别为风引起的表面应力在 x 、 y 方向上的分量; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为辐射应力在 x 、 y 方向上的二阶偏导数; p_a 为大气压强; S 为点源流量; u_s 、 v_s 分别为源、汇

项水流流速; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 分别为侧向应力在 x 、 y 方向上的分量,包括黏滞摩擦、湍流摩擦和差异平流,由基于水深平均流速梯度的涡黏性公式估算; A 为涡黏系数,采用 Samagorinsky 亚网格尺度模型计算。

二维水动力模型的物质输运基本方程为

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} = h\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(D_h\frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_h\frac{\partial C}{\partial y}\right)\right]$$

(4)

式中: u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的水流流速; C 为基于水深平均的物质浓度; D_h 为物质的水平扩散系数。

2.2 模型建立与验证

海湾水动力及水质模拟区域包括伶仃洋海域和大铲湾湾区,上边界为珠江三角洲东四口门(虎门水道、洪奇沥、蕉门水道及横门水道的入海口),下边界为内伶仃岛附近海域。采用非结构化三角网格,东四口门河道网格分辨率为 300~500 m、大铲湾及其入湾河流为 30~50 m、外海开边界附近为 2 km。模型中东四口门以及伶仃洋海域的地形数据来源于国家海事局 2017 年版海图,地形高程基面为珠江基面。模型网格及地形插值结果见图 1。

伶仃洋上边界输入采用东四口门测站的实测潮位,下边界由外海内伶仃站潮位外推得到^[14]。大铲湾陆域 5 条入湾河流流量采用当地防洪潮规划设计值。海底糙率作为重要参数分区给定,模型的糙率取值范围为 0.014~0.031,涡黏系数取 0.28。

以 2011 年 5 月 4 日 10:00 至 5 月 5 日 14:00 作为模型率定验证期,率定和验证采用相同时段不同站点实测数据^[15]。率定和验证测站分布如图 1,其中仙屋角(H1)和万顷沙(H2)为潮位率定站,舢板洲(H3)、正强码头(H4)、大铲港(H5)和赤湾(H6)为潮位验证站,S1~S3 和 S4~S9 分别为临时潮流流速流向的率定站和验证站。模型验证采用 Willmott 提出的模型精度评价系数^[16]:

$$\delta = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

(5)

式中: δ 为模型精度评价系数; S_i 为模拟值; O_i 为实

测值; $\bar{O}$ 为实测系列的平均值; N 为实测系列长度。

通常认为评价系数 δ 大于 0.85 时模型可信度极高,处于 0.65~0.85 时模型可信度很高,处于 0.50~0.65 时模型可信度高,低于 0.50 时模型可信度一般^[17-18]。如表 1 所示,潮位率定和验证期的 δ 均在 0.95 及以上,流速率定和验证期的 δ 为 0.74~0.94,流向率定和验证期的 δ 为 0.62~0.90。总体上看,建立的水动力模型模拟可信度很高,能够较好地模拟伶仃洋海域及大铲湾的潮流运动规律。

2.3 工况设置及水文水环境边界条件

基于海湾及码头突堤特点,大铲湾海域分为湾尖、湾中和湾口 3 个区域,如图 2 所示。当地规划拟在突堤码头根部开槽,以改善大铲湾的水环境状况。本次研究拟设置开槽深度为 2.5 m、开槽宽度 W 分别为 0 m、10 m、20 m、30 m、40 m、50 m、60 m、80 m、100 m、150 m、200 m 和 300 m,共 12 种工况,分析开槽宽度对大铲湾潮流场、水体换水周期及污染物浓度分布的影响。

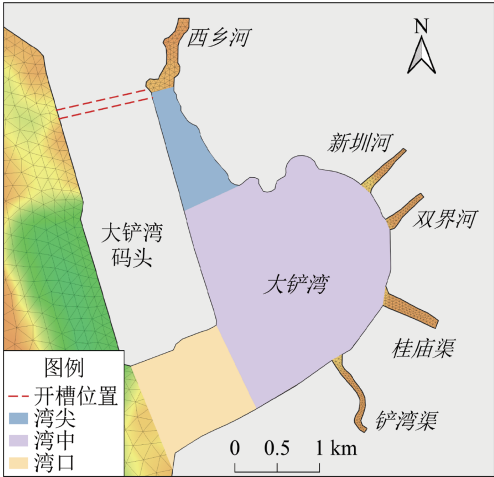


图 2 大铲湾区域划分及开槽位置

Fig. 2 Division of Dachan Bay and slot location

模拟时段选取 2011 年 5 月 1 日至 5 月 16 日,符合一个大小潮周期,其平均高潮位和小潮差对于大铲湾水体交换属不利的弱潮动力现象,比较具有代表性。陆域入湾河流选用平水期(水文频率 $P=50\%$)水文条件,即西乡河、新圳河、双界河、桂庙渠和铲湾渠河口入海的设计流量分别为 1.54 m³/s、1.35 m³/s、0.54 m³/s、1.39 m³/s 和 0.73 m³/s。主要

表 1 水动力模型率定验证期评价系数

Table 1 Assessment coefficients of hydrodynamic model in calibration and verification periods

项目	率定期精度评价系数					验证期精度评价系数									
	H1	H2	S1	S2	S3	H3	H4	H5	H6	S4	S5	S6	S7	S8	S9
潮位	0.98	0.98				0.95	0.98	0.97	0.98						
流速			0.94	0.86	0.90					0.89	0.90	0.79	0.84	0.74	0.75
流向			0.62	0.74	0.90					0.85	0.82	0.90	0.81	0.83	0.84

污染物选取化学需氧量 COD_{Mn} ^[19-21],入湾河流的 COD_{Mn} 排放质量浓度按地表水V类设定,即 15 mg/L。根据前人的研究成果^[22]和大铲湾水质月监测数据,伶仃洋和大铲湾的 COD_{Mn} 初始质量浓度分别为 1.85 mg/L和 2.66 mg/L。水质模拟时,海域污染物水平扩散系数为 $1 \text{ m}^2/\text{s}$ ^[23], COD_{Mn} 衰减系数取 0.07 d^{-1} ^[24]。大铲湾水体的换水周期采用基于浓度变化的指数衰减函数来表征^[25-26],即湾内示踪剂浓度降至初始浓度的 $1/e$ 时所需要的时间。

3 结果与讨论

3.1 潮流场变化

大铲湾突堤码头开槽前后湾区潮流场的流向分布如图 3 所示,图中开槽宽度为 150 m。整体上,开槽前后湾区内外潮流场的流向分布变化不大。涨潮时段,大铲湾外部区域水体的整体流向为东南至西北,湾口至湾尖流向由西南至东北转为东南至西北;落潮时段,湾区外部潮流流向为西北至东南,湾尖至湾口的潮流流向由西北至东南转为东北至西南。大铲湾码头根部未开槽时,湾尖水体在涨潮过程中主要受潮汐推力的作用涌向西乡河河口方向;开槽之

后,湾尖的潮汐通道增加,一部分继续涌入西乡河口,另一部分经由槽通道汇入大铲湾外部海域;落潮过程中,湾尖西侧海域水体则由槽通道进入大铲湾内部,加速湾尖水体向湾口方向的流动。

不同开槽工况下的大潮涨落潮时段平均流速统计结果见表 2。大铲湾内部水体的涨落潮流速随开槽宽度增加而增加。开槽宽度增至 300 m 时,湾尖、湾中和湾口的涨潮时段平均流速增幅分别为 124.9%、13.8% 和 7.0%,落潮时段平均流速增幅分别为 251.1%、22.5% 和 8.8%。码头根部开槽后,湾尖和湾中落潮时段的潮动力提升显著强于涨潮时段。

3.2 换水周期变化

不同开槽工况下大铲湾换水周期空间分布如图 4 所示,各分区统计结果见图 5。在未开槽情况下,大铲湾换水周期的空间异质性较强,各入湾河流的河口和大铲湾湾口处的换水周期较短,换水周期从湾口至湾尖逆时针方向呈梯度增加。湾尖的换水周期较长,其变化范围为 4.56 ~ 5.73 d,平均换水周期 4.90 d;其次为湾中,换水周期变化范围为 0.58 ~ 4.56 d,平均换水周期 2.09 d;湾口的换水周期较短,变化范围为 0.25 ~ 1.64 d,平均换水周期 0.92 d。主

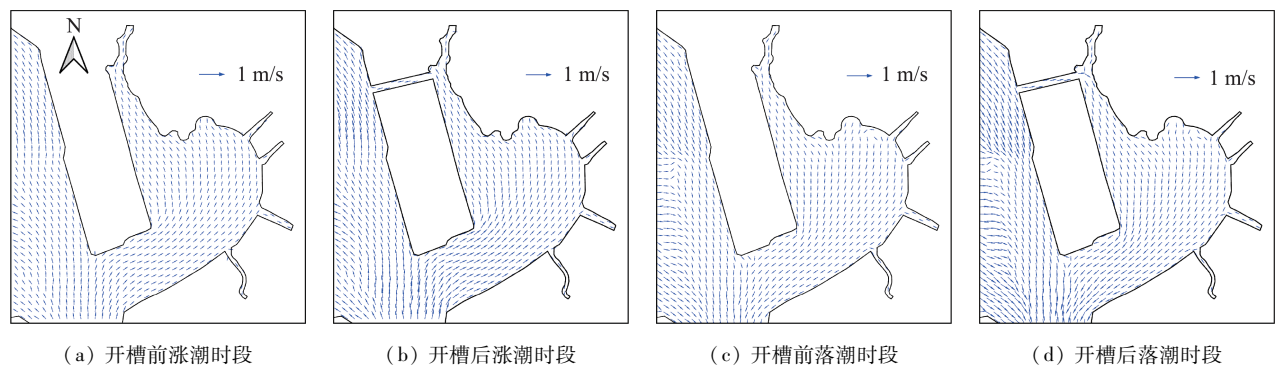


图 3 开槽前后大铲湾潮流场变化
Fig.3 Tidal current before and after slotting in Dachan Bay

表 2 大铲湾潮流流速随开槽宽度的变化

Table 2 Changes of tidal velocity with slotting width in Dachan Bay

开槽 宽度/m	涨潮流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			涨潮流速变幅/%			落潮流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			落潮流速变幅/%		
	湾尖	湾中	湾口	湾尖	湾中	湾口	湾尖	湾中	湾口	湾尖	湾中	湾口
0	0.052	0.091	0.264				0.058	0.092	0.293			
10	0.060	0.095	0.260	15.2	3.6	-1.7	0.068	0.095	0.291	18.4	2.5	-0.4
20	0.067	0.096	0.272	27.5	5.3	2.9	0.078	0.095	0.290	34.2	2.7	-0.8
30	0.073	0.096	0.270	39.7	4.9	2.2	0.088	0.096	0.291	51.9	4.5	-0.4
40	0.077	0.097	0.268	46.3	5.8	1.2	0.092	0.097	0.292	59.2	5.4	-0.2
50	0.082	0.098	0.267	56.0	7.3	0.8	0.105	0.099	0.291	81.7	6.8	-0.7
60	0.084	0.098	0.268	60.6	6.8	1.5	0.112	0.099	0.287	93.7	7.1	-1.8
80	0.092	0.100	0.273	74.9	8.8	3.1	0.123	0.102	0.301	112.8	10.2	2.8
100	0.095	0.100	0.272	82.1	8.9	2.9	0.140	0.103	0.299	142.1	11.6	2.0
150	0.107	0.102	0.274	104.9	11.5	3.6	0.161	0.107	0.303	179.0	16.0	3.4
200	0.109	0.103	0.278	107.8	12.6	5.0	0.181	0.111	0.310	213.6	20.8	6.1
300	0.118	0.104	0.283	124.9	13.8	7.0	0.203	0.113	0.319	251.1	22.5	8.8

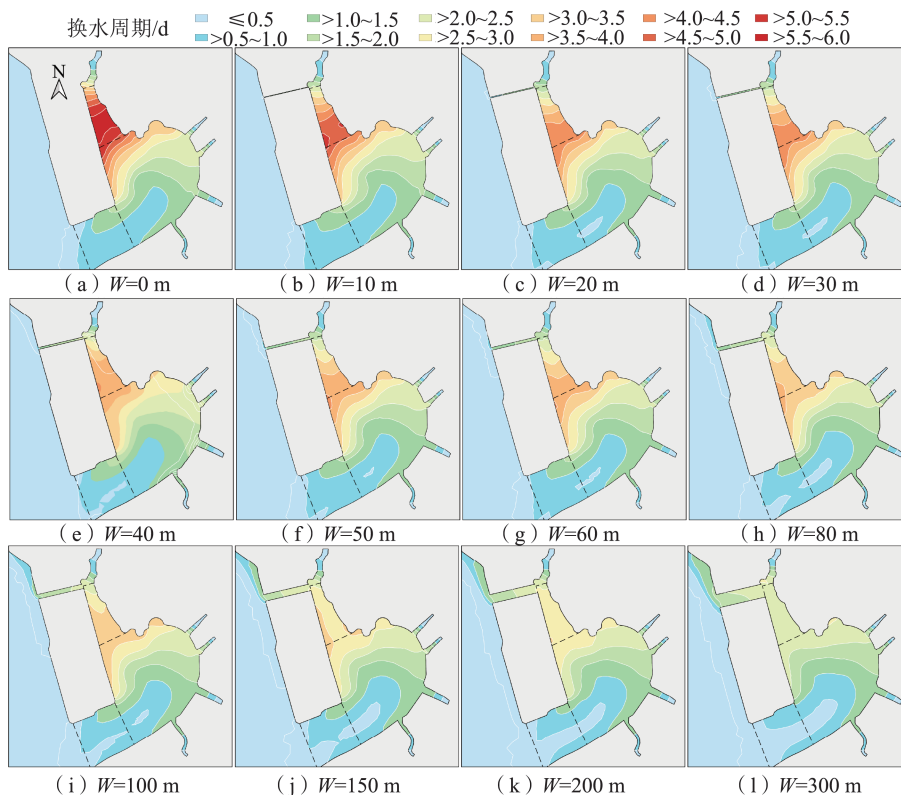


图4 大铲湾换水周期随开槽宽度的变化

Fig. 4 Changes of water e-folding time with slotting width in Dachan Bay

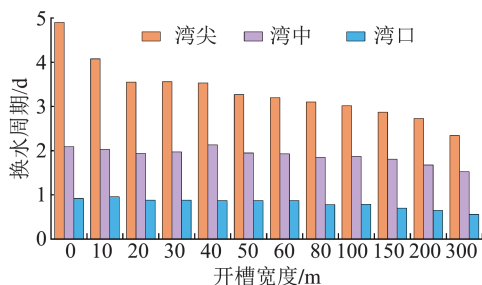


图5 大铲湾各分区平均换水周期随开槽宽度的变化

Fig. 5 Changes of average water e-folding time with slotting width in each sub-region of Dachan Bay

要原因是河口处的水体在上游径流的作用下,向湾内流动的速度得到基本保证,促使该区域的换水能力相对较强;湾口水体受潮流运动作用,与外海的交换能力较强;随着离湾口距离的增加,湾中的交换能力逐渐减弱;对于湾尖水体,一方面受西乡河的径流作用向湾口流动,另一方面在涨潮阶段同时受到潮流的顶托形成往复流动,致使该区域的水体交换能力较差。

若在码头根部开槽,大铲湾换水周期的空间异质性随开槽宽度的增加被进一步削弱,尤其是湾尖区域的换水周期明显缩短。开槽宽度增加至 100 m 和 300 m 时,湾尖的平均换水周期分别缩短至 3.02 d 和 2.34 d,与未开槽时相比减少了 39.4% 和 52.2%。

3.3 污染带变化

不同开槽工况下大铲湾各区域 COD_{Mn} 质量浓度

和 COD_{Mn} 平均质量浓度变化如图 6 和图 7 所示。未开槽时,受到入湾河流运输的陆源污染影响, COD_{Mn} 污染带 ($\rho(\text{COD}_{\text{Mn}}) > 4 \text{ mg/L}$) 主要分布在湾尖和湾中河口沿岸地区。由于湾尖距离湾口的潮汐通道较远并且呈垂向交叉关系,致使该区域成为潮动力最小的盲肠段, COD_{Mn} 平均质量浓度为 9.45 mg/L, 超标情况较为突出。湾中的超标水体受潮汐运动路径的影响,沿大铲湾岸线呈条带状分布,其中,距离湾口位置最远的新圳河河口附近超标水体呈现大面积聚集。开槽后,湾尖码头侧水体在潮流运动和西乡河径流的共同作用下,其 COD_{Mn} 质量浓度值明显低于湾尖内陆侧,污染带被压缩在河口及内陆侧沿岸地区。主要原因是槽通道垂直于湾尖内陆侧,落潮时外海水体由槽通道进入湾尖,推动污染带向内陆侧压缩。另外,开槽对湾中河口沿岸地区的污染带分布影响较小。

大铲湾分区污染带面积占比变化见图 8。未开槽时,湾尖、湾中污染带占比分别为 100%、28.4%。开槽后,随着开槽宽度增加,湾尖污染带面积占比表现为先快速下降后趋近平缓的特点,湾中污染带面积占比的变化范围则相对较小。湾尖的污染带面积占比在开槽宽度 60 m 时下降到 22.0%,开槽 100 m 时下降到 13.1%,之后随着开槽宽度增加,污染带范围变化较小。湾中区域的污染带面积占比,在开

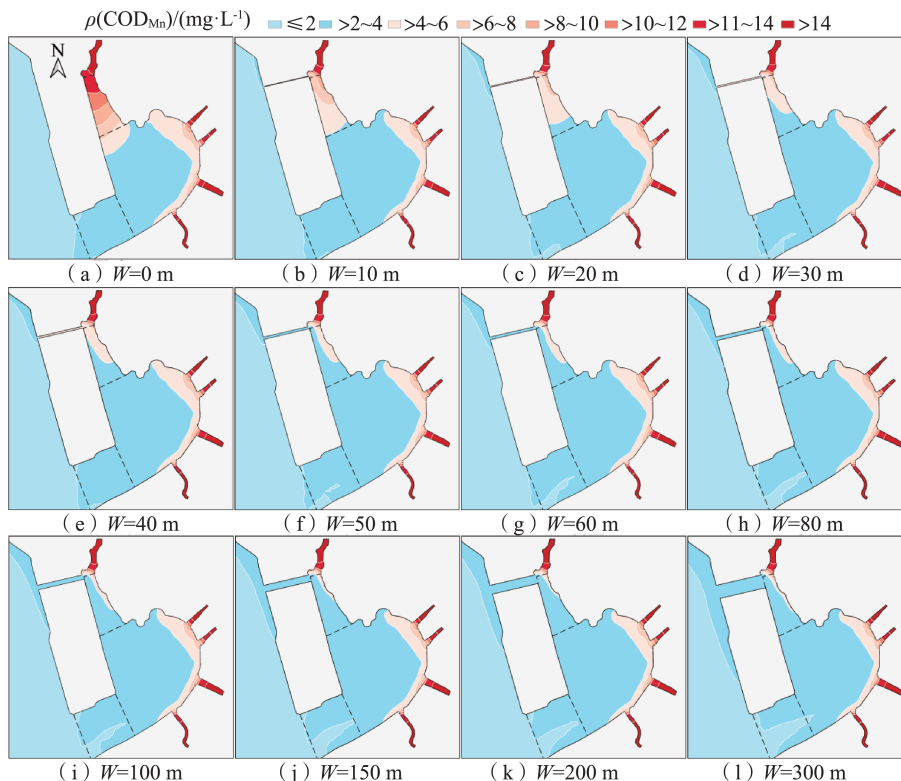


图6 大铲湾 COD_{Mn}质量浓度随开槽宽度的变化

Fig. 6 Changes of COD_{Mn} mass concentration with slotting width in Dachan Bay

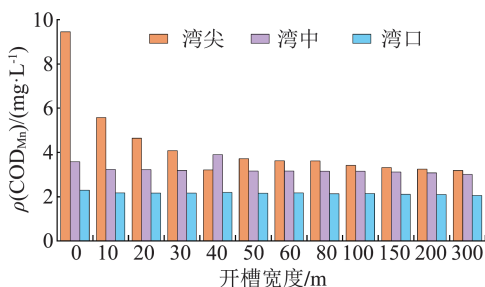


图7 大铲湾各分区平均 COD_{Mn}质量浓度随开槽宽度的变化

Fig. 7 Changes of average COD_{Mn} mass concentration with slotting width in each sub-region of Dachan Bay

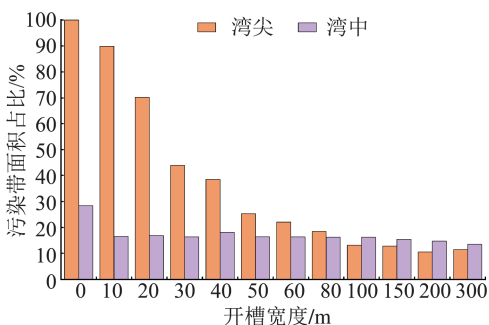


图8 大铲湾污染带面积占比随开槽宽度的变化

Fig. 8 Changes of proportion of pollution zone area with slotting width in Dachan Bay

槽宽度 10 m 时即下降到 16.5%, 之后轻微减少。上述结果表明, 码头根部开槽能够有效减少湾尖和湾中的污染范围。结合污染带总体削减趋势可知, 若

开槽宽度过小则难以实现污染状况的改善, 当开槽宽度增加到一定数值时, 污染状况进一步改善的效果甚微, 因此, 较为合理的开槽宽度为 60 ~ 100 m。

4 结 论

a. 由于突堤码头的建设, 大铲湾湾尖区域相对封闭, 水体运动缓慢。码头根部开槽后潮汐通道增加, 湾内水体在涨潮时经由槽通道流出, 落潮时外海水体流入湾区内。随着开槽宽度的增加, 湾区水体涨落潮流速均整体增加, 且开槽宽度的增加对改善湾尖区域潮动力效果最为明显。

b. 未开槽时大铲湾换水周期呈现较强的空间异质性, 从湾口至湾尖逆时针方向呈梯度增加; 随开槽宽度的增加, 换水周期的空间异质性被削弱, 湾尖区域的换水周期明显缩短。

c. 未开槽时大铲湾污染带分布在入海河口沿岸海域及整个湾尖区域。开槽后湾尖区域污染带范围明显收缩, 主要分布在湾尖内陆侧。湾尖污染带面积占比随着开槽宽度的增加表现为先快速下降后趋近平缓, 湾中污染带面积占比的变化范围则相对较小。

d. 未开槽情况下, 大铲湾湾尖区域水污染问题较为突出。突堤根部开槽后, 由于潮动力增强和换水周期缩短, 湾尖区域水环境得到了明显改善, 综合考虑水环境改善效果和工程经济性, 认为较为合理的开槽宽度为 60 ~ 100 m。

参考文献:

- [1] 黄小平,张凌,张景平,等.我国海湾开发利用存在的问题与保护策略[J].中国科学院院刊,2016,31(10):1151-1156. (HUANG Xiaoping, ZHANG Ling, ZHANG Jingping, et al. Problems in development of Chinese bays and the protection strategy [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1151-1156. (in Chinese))
- [2] 岳青华,丁聪.围填海工程对半封闭海湾水动力环境影响分析:以大鹏湾内围填海工程为例[J].中国农村水利水电,2019(11):129-132. (YUE Qinghua, DING Cong. Analysis on the influence of reclamation projects on hydrodynamic environment in semi-enclosed bay: a case study of Yantian Port reclamation project in Mirs Bay[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(11): 129-132. (in Chinese))
- [3] 汤立群,卢单,赵慧明,等.河口滩涂围垦对水动力环境影响研究综述[J].水利水电科技进展,2020,40(6):78-84. (TANG Liqun, LU Dan, ZHAO Huiming, et al. Review of impacts of tideland reclamation on hydrodynamic environment near estuarine area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 78-84. (in Chinese))
- [4] 潘存鸿,郑君,吴修广,等.杭州湾年最高潮位时空变化及其抬升原因分析[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):394-400. (PAN Cunhong, ZHENG Jun, WU Xiuguang, et al. Spatiotemporal variation of annual maximum high tide levels and reason analysis for their uplifting in Hangzhou Bay[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 394-400. (in Chinese))
- [5] 王璐,熊乐航,郝彩莲,等.疏浚工程对湄洲湾东吴港区水环境影响的数值模拟[J].海洋湖沼通报,2021,43(3):17-24. (WANG Lu, XIONG Lehang, HAO Cailian, et al. Numerical simulation of water environment effects of dredging project in Dongwu port area of Meizhou Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(3): 17-24. (in Chinese))
- [6] CAO Difan, SHEN Yongming, SU Meirong, et al. Numerical simulation of hydrodynamic environment effects of the reclamation project of Nanhui tidal flat in Yangtze Estuary [J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(3): 603-613.
- [7] 崔峥,余小建,徐啸.高集海堤打开后马銮湾开口对厦门东西海域的影响[J].应用海洋学学报,2018,37(4):496-505. (CUI Zheng, SHE Xiaojian, XU Xiao. Influence of Maluan Bay opening on the western and the eastern waters of Xiamen after Gaoji Crossway opening [J]. Journal of Applied Oceanography, 2018, 37(4): 496-505. (in Chinese))
- [8] 徐婉明,邓伟铸,倪锦锋,等.南澳羊屿村围填海拆除工程对水环境的影响[J].水资源与水工程学报,2020,31(2):115-120. (XU Wanning, DENG Weizhu, NI Jinfeng, et al. Impact of reclamation removal on water environment in Yangyu Village on Nan'ao Island [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(2): 115-120. (in Chinese))
- [9] 林毅辉,潘伟然,肖征,等.高集海堤开口后厦门湾潮流特征分析[J].海洋湖沼通报,2020(6):9-17. (LIN Yihui, PAN Weiran, XIAO Zheng, et al. Analysis of tidal current characteristics of the Xiamen Bay after the opening of Gaoji Seawall [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(6): 9-17. (in Chinese))
- [10] 董志慧,陈荣力,刘琼轶.大铲湾污水排放方案试验研究[J].水利科技与经济,2008,14(11):915-917. (DONG Zhihui, CHEN Rongli, LIU Qiongyi. The research on sewage discharge scheme for Dachan Bay [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2008, 14(11): 915-917. (in Chinese))
- [11] 莫思平,徐玫,季荣耀.伶仃洋大铲湾水交换物理模型试验研究[J].水电能源科学,2013,31(3):37-39. (MO Siping, XU Mei, JI Rongyao. Physical model test of water exchange in Dachan Bay beach of Lingdingyang estuary [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(3): 37-39. (in Chinese))
- [12] 何梦云,莫思平.深圳前海水廊道水体交换物理模型试验研究[J].人民长江,2016,47(5):17-22. (HE Mengyun, MO Siping. Physical model test on water exchange at Qianhai water corridor in Shenzhen [J]. Yangtze River, 2016, 47(5): 17-22. (in Chinese))
- [13] 刘岩,赵智杰.前海湾填海区的水龄特征及改善措施模拟[J].环境科学与技术,2015,38(2):162-168. (LIU Yan, ZHAO Zhijie. Simulation of water age characteristics and improving measures in the sea filling region of Qianhai Bay [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(2): 162-168. (in Chinese))
- [14] 林若兰,卓文珊,曾珂,等.不同风向对珠江东四口门盐water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))
- [15] 华厦,蓝尹余,黄惠明,等.水沙数学模型的认知与建立[J].科学技术与工程,2019,19(22):1-10. (HUA Xia, LAN Yinyu, HUANG Huiming, et al. Cognition and building of numerical model of flow and sediment [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(22): 1-10. (in Chinese))
- [16] WILLMOTT C J. On the validation of models [J]. Physical Geography, 1981, 2(2): 184-194.
- [17] HENRIKSEN H J, TROLDORGB L, NYEGAARD P, et al.

- Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark[J]. Journal of Hydrology, 2003, 280(1/2/3/4): 52-71.
- [18] HE Wei, ZHANG Jian, YU Xiaodong, et al. Effect of runoff variability and sea level on saltwater intrusion: a case study of Nandu River Estuary, China[J]. Water Resources Research, 2018, 54(12): 9919-9934.
- [19] 宋芳, 秦华鹏, 陈斯典, 等. 深圳河湾流域水污染源解析研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 317-328. (SONG Fang, QIN Huapeng, CHEN Sidian, et al. Water source apportionment of pollutions in Shenzhen Bay Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(2): 317-328. (in Chinese))
- [20] 董斯齐, 黄翀, 李贺, 等. 粤港澳大湾区 2015—2019 年入海河口水质变化趋势[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 48-55. (DONG Siqi, HUANG Chong, LI He, et al. Change trend of water quality in estuaries of Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area from 2015 to 2019[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 48-55. (in Chinese))
- [21] 梁志宏, 陈秀洪, 罗欢, 等. 深圳湾水质时空分布特征及污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 93-99. (LIANG Zhihong, CHEN Xiuhong, LUO Huan, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of water quality in Shenzhen Bay and pollution source analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 93-99. (in Chinese))
- [22] 蔡阳扬, 岑竞仪, 欧林坚, 等. 夏秋季珠江口水域 COD、DO、营养盐分布特征及其富营养化评价[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2014, 35(3): 221-227. (CAI Yangyang, CEN Jingyi, OU Linjian, et al. Distribution characteristics of COD, DO and nutrients in Pearl River Estuary and its eutrophication assessment in summer and autumn[J]. Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), 2014, 35(3): 221-227. (in Chinese))
- [23] 方神光. 水质扩散系数在伶仃洋水域水体交换中的影响分析[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(2): 177-185. (FANG Shengguang. Analysis of effect of water quality diffusion coefficient on water exchange in the Lingdingyang Bay[J]. Advances in Marine Science, 2012, 30(2): 177-185. (in Chinese))
- [24] 王扬, 李瑞杰, 盛建明, 等. 灌河口近岸海域污染物迁移扩散的数值模拟[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(3): 381-385. (WANG Yang, LI Ruijie, SHENG Jianming, et al. Numerical simulation of transportation and diffusion of pollutants in nearshore of Guanhe Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2013, 32(3): 381-385. (in Chinese))
- [25] TAKEOKA H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea[J]. Continental Shelf Research, 1984, 3(3): 311-326.
- [26] CUCCO A, UMGIESSER G. Modeling the Venice Lagoon residence time[J]. Ecological Modelling, 2006, 193(1/2): 34-51.

(收稿日期: 2021-10-12 编辑: 施业)

(上接第 110 页)

- [15] 郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 等. 基于 MODIS 蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 45-52. (GUO Xiaotong, MENG Dan, JIANG Bowu, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021, 48(3): 45-52. (in Chinese))
- [16] 徐冉, 铁强, 代超, 等. 雅鲁藏布江奴下水文站以上流域水文过程及其对气候变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 288-293. (XU Ran, TIE Qiang, DAI Chao, et al. Study on hydrological process in upper basin of Brahmaputra River from Nuxia Hydrological Station and its response to climate change[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(4): 288-293. (in Chinese))
- [17] TAPLEY B D, BETTADPUR S, RIES J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system[J]. Science, 2004, 305(5683): 503-505.
- [18] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U, et al. The global land data assimilation system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381-394.
- [19] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature, 2010, 467(7318): 951-954.
- [20] MU Qiaozhen, HEINSCH F A, ZHAO Maosheng, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(4): 519-536.
- [21] ZHANG Ke, KIMBALL J S, NEMANI R R, et al. A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006 [J]. Water Resources Research, 2010, 46(9): W09522.
- [22] 蔡涛. 基于 Mann-Kendall 方法的大凌河中上游 1956—2016 年降水变化特性分析[J]. 人民珠江, 2018, 39(11): 83-88. (CAI Tao. Analysis of precipitation variations in the middle and upper reaches of the Dalinghe River Basin from 1956 to 2016 based on the Mann-Kendall method[J]. Pearl River, 2018, 39(11): 83-88. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-07 编辑: 俞云利)