

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2016.02.008

九龙江口-厦门湾悬沙浓度及多岔口 潮汐汊道泥沙运输的数值模拟*

谢森扬¹, 王金坑¹, 王翠¹, 郑斌鑫¹, 张超¹, Emma Chen²
(1. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005, Email: senyangxie@126.com;
2. 厦门大学高等教育科学研究所, 厦门 361005)

摘要: 基于环境流体动力学模型 (Environment Fluid Dynamic Code/EFDC) 水动力和泥沙模块, 该文针对九龙江口-厦门湾水域潮动力强、浅滩面积大的特点建立二维潮流泥沙数学模型并利用实测数据进行校验。模型精简适用, 成功反演了该水域的水动力场和悬沙浓度场, 并能正确反映浅水区域的水沙运动特征。结果表明: 在潮流作用下, 厦门湾水体中悬沙浓度由外向内递增, 悬沙随着潮流的涨落在湾内外作中-长距离的往复运动。湾内特别是浅滩区, 大潮期悬沙浓度大于小潮期且浓度随潮变化明显, 小潮期悬沙场则较为稳定。采用抓斗式挖泥船 (源强 $Q=7.5$ t/h) 在翔安东南侧浅滩疏浚作业对邻近保护区基本无影响, 但翔安南部“五岔口”型潮汐汊道存在能远程输运近岸疏浚泥沙的“泥泵式”水动力场, 促使形成环绕厦门岛东海域的带状悬沙分布, 该文进一步揭示了形成该分布的水动力机制。增大疏浚强度可导致白海豚保护区被污染, 悬沙带宽度增大, 浓度上升。

关键词: 潮汐潮流; 泥沙运输; 潮汐汊道; 浅滩疏浚; EFDC; 九龙江口-厦门湾

中图分类号: TV148

文献标识码: A

Numerical study on suspended sediment concentration in Jiulong Estuary-Xiamen Bay and sediment transport mechanism in tidal inlets with multi-fork

XIE Sen-yang¹, WANG Jin-keng¹, WANG Cui¹,
ZHENG Bin-xin¹, ZHANG Chao¹, Emma Chen²

(1. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China;
2. Research Institute of Higher Education Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Based on hydrodynamic and sediment transport module of Environment Fluid Dynamic Code/EFDC, a 2-Dimensional mathematical model was applied to the simulation of tidal current and sediment transport in Jiulong Estuary-Xiamen

* **收稿日期:** 2015-09-21(2016-03-10 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(41406121)

作者简介: 谢森扬(1990-), 男, 广东揭阳人, 硕士研究生.

通信作者: 王翠, Email: wangcui@tio.org.cn

Received: September 21, 2015 (Revised March 10, 2016)

Project supported by foundation: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41406121)

Biography: XIE Sen-yang (1990-), Male, Master Candidate.

Corresponding author: WANG Cui, Email: wangcui@tio.org.cn

Bay, which was set up with full consideration of the strong tide and large-area shoal in the study area. The model was calibrated and verified using observational data and the simulation results agreed with measured data well, which successfully re-acted the hydrodynamic field and suspended sediment transport in this area, including that of the shoal area. The research shows that, mainly controlled by tidal current, suspended sediment concentration (SSC) increases progressively from outside to inside of Xiamen Bay and suspended sediments move forth and back as tidal currents flow rectilinearly along channels. Inside the bay, especially in shoal area, SSC in spring season fluctuates tidally and is much higher than that in neap season which remains lower and more stable. Dredging in the shoal area positioned to the south east of Xiang'an using grab dredger with source strength of 7.5 t/h almost has no effect on the adjacent protection zone, however, the water area with five-forks positioned to the south of Xiang'an exists a dredge-pump-like hydrodynamic field, through which dredging-produced sediments can be transported in long distance. The special hydrodynamic field leads to the formation of ribbon-pattern distribution of suspended sediments located in the eastern waters of Xiamen island and the hydrodynamic mechanism of it is revealed. Amplifying dredging intensity can result in the pollution of White Dolphin Protection Zone, broadening of ribbon-pattern distribution and increasing of the SSC.

Key words: tide; sediment transport; tidal inlets; dredging on shoal; EFDC; Jiulong River-Xiamen Bay

引言

河口、海湾作为联系陆地和海洋的纽带,有着优越的地理位置和特殊的自然环境,是人类社会赖以生存和发展的重要资源。与河流、湖泊和其他水域系统相比,河口-海湾系统内的泥沙运动有其独特性,对人类利用海洋具有十分重要的价值。海砂资源开采、航道维护、倾废地点选取、二次污染治理、资源保护以及渔业生产等,都需要详细了解活动区域的泥沙运动状况。通过大规模现场观测、物理模型试验或者其他方法获得海湾整体的泥沙运动状况,不仅花费昂贵,还受到现场和仪器条件的限制,以及模型比尺等诸多问题。利用得到准确验证的泥沙数值模型,结合现场观测和遥感技术等手段得到的实测数据,作为研究海湾沉积物的迁移扩散,不仅可以获得较为可靠的泥沙时空分布,还可以对未来变化作出预测。此外,针对研究区域的特点可以对模型进行合理简化并达到研究目的,具有重要的科学意义和应用价值。

美国 Virginia 海洋研究所的 Hamrick 等根据多个数学模型集成开发研制的环境流体动力学模型(EFDC 模型)集水动力模块、泥沙运输模块、污染物运移模块和水质预测模块于一体,可以用于模拟水系统一维、二维和三维流场、物质运输(包括温、盐、多组分泥沙和有毒物质等的运输)生态过程及淡水入流等,其模拟范围包括河口、河流、湖泊、水库、湿地以及自近岸到陆架的海域,模型也同时考虑了风、浪、潮和径流等的影响。EFDC 模型是开源模型,自 1992 年发布以来,不断更新和完善,且开发有完整的前、后处理平台 EFDC-Explorer,采用可视化的界面操作,能快速地生成网格数据和处理图像文件^[1]。通过运行速度测试发现,EFDC 模型的计算效率较高,运行速率约是

POM 的 1.85 倍^[2]。该模型在国外已经得到广泛应用^[3-5],是美国环保署首推的近海水环境数值模拟工具。近年来,EFDC 模型在我国洱海、密云水库、太湖、长江及长江口等地区开始逐步被应用推广并展示了良好的发展前景^[6],已成为环保部环境工程评估中心首推的地表水环境影响评价模型。

本文是 EFDC 模型在九龙江口-厦门湾海域水沙运动数值模拟的首次开发应用,模拟结果和实测数据吻合良好。模型反演出该海域悬沙浓度场的时空变化,且揭示了翔安南部“五岔口”型潮汐河道远程输运近岸泥沙的水动力机制。模型适用于模拟和分析近海水环境动力场以及悬沙运动,为进一步构建该海域的水质模型提供正确的动力条件和载体,是研究当前厦门湾地区综合性水环境问题的一种有效工具。

1 研究区域概况

九龙江口及厦门湾地区是河流径流和海洋潮流相互作用的区域,见图 1。总体上水深较浅,河口区及近岸海床高程在 10 m-3 m 之间(以当地理论最低潮面为基准),低潮时浅水区滩面露出。它主要承接了九龙江的来水和泥沙,同时随着潮汐运动吞吐着台湾海峡的潮流。厦门海域属福建沿海潮波体系,厦门湾是强潮河道型海湾,潮汐性质为正规半日潮,潮差大,大小潮潮差变化明显,平均潮差为 3.99 m,最大潮差达 6.42 m^[7],高潮线和低潮线之间存在较大面积的滩涂;潮流属于往复流,潮流流速大;由潮汐振动形成的潮流是本海域的主要水流动力^[8],也是湾内泥沙及污染物运移的动力因子。该海域是以潮流作用为主、径流和波浪作用为辅的泥沙运移所产生的淤积环境^[9],潮流强度及区域分布特征对悬沙的分布和输运起到了关键性的作用,

一般情况下悬沙浓度受到潮流的制约而与潮流流速往复运动的周期性变化特征相对应^[10]。九龙江是流入本区的最大河流，流域总面积为 14 740 km²，年平均径流量为 121.1×10⁹ m³，年平均输沙量为 239.2×10⁴ t，最大年可达 647×10⁴ t (1991 – 2009)^[11]。

河口区、厦门岛东、西海域及同安湾区域的沉积类型主要以细颗粒物沉积为主，黏土质粉砂占到 65.22%，其中细颗粒物所占比例最大，达 60% 以上^[9]。翔安南部和金门岛周围大部分海域以及厦门外港部分海域的沉积物类型以黏土质粉砂、砂质粉砂和粉砂为主，该区平均粒径介于 4.80φ –

7.48φ。粗颗粒则主要集中在分布于金门岛东侧及南部，围头门口处，九龙江口海门岛附近以及零星散布在翔安南部^[12]。总体上，研究区域表层沉积物以细颗粒物物质为主。

2 水动力-泥沙运输模型

EFDC 水动力模型垂向上采用 σ 坐标变换，能较好地拟合近岸复杂的岸线和地形；采用 Gelperin 等修正的 Mellor-Yamada2.5 阶湍封闭模型较客观地

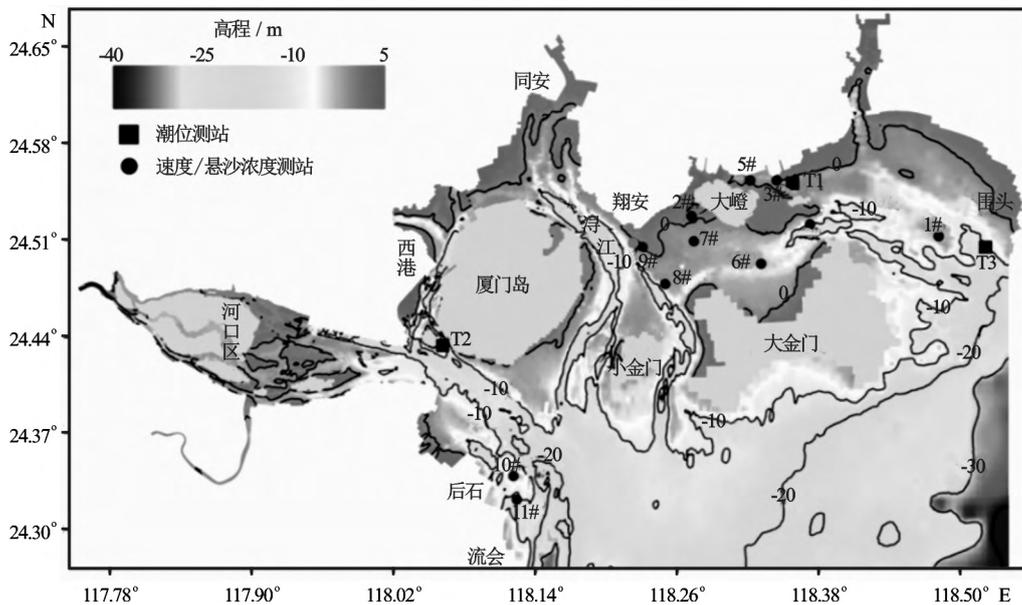


图 1 计算域水深形势及观测站点分布
Fig.1 Bottom elevation of study area and distribution of observation station

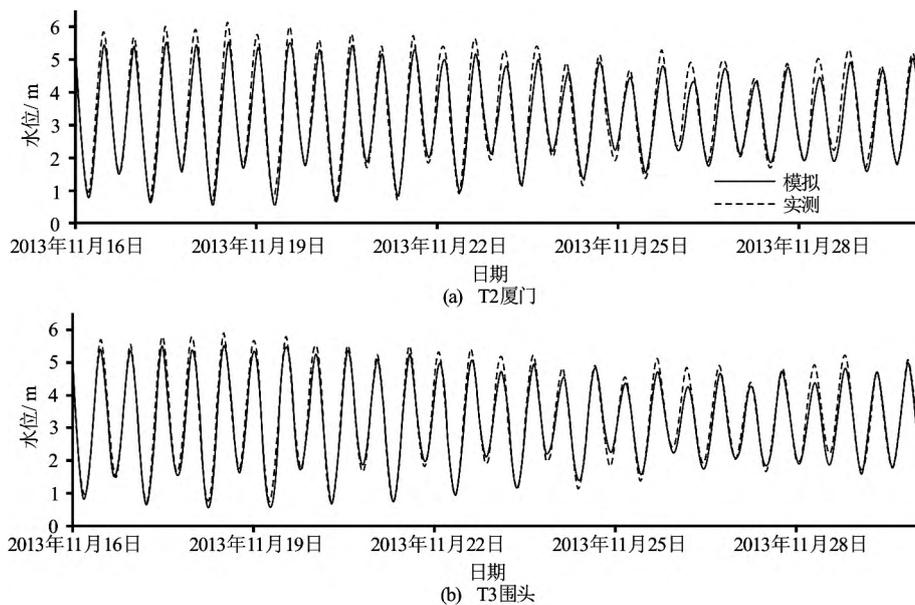


图 2 T2 和 T3 站实测潮位与模拟潮位对照
Fig.2 Tidal curves comparison between the observation and the computation of T2 and T3

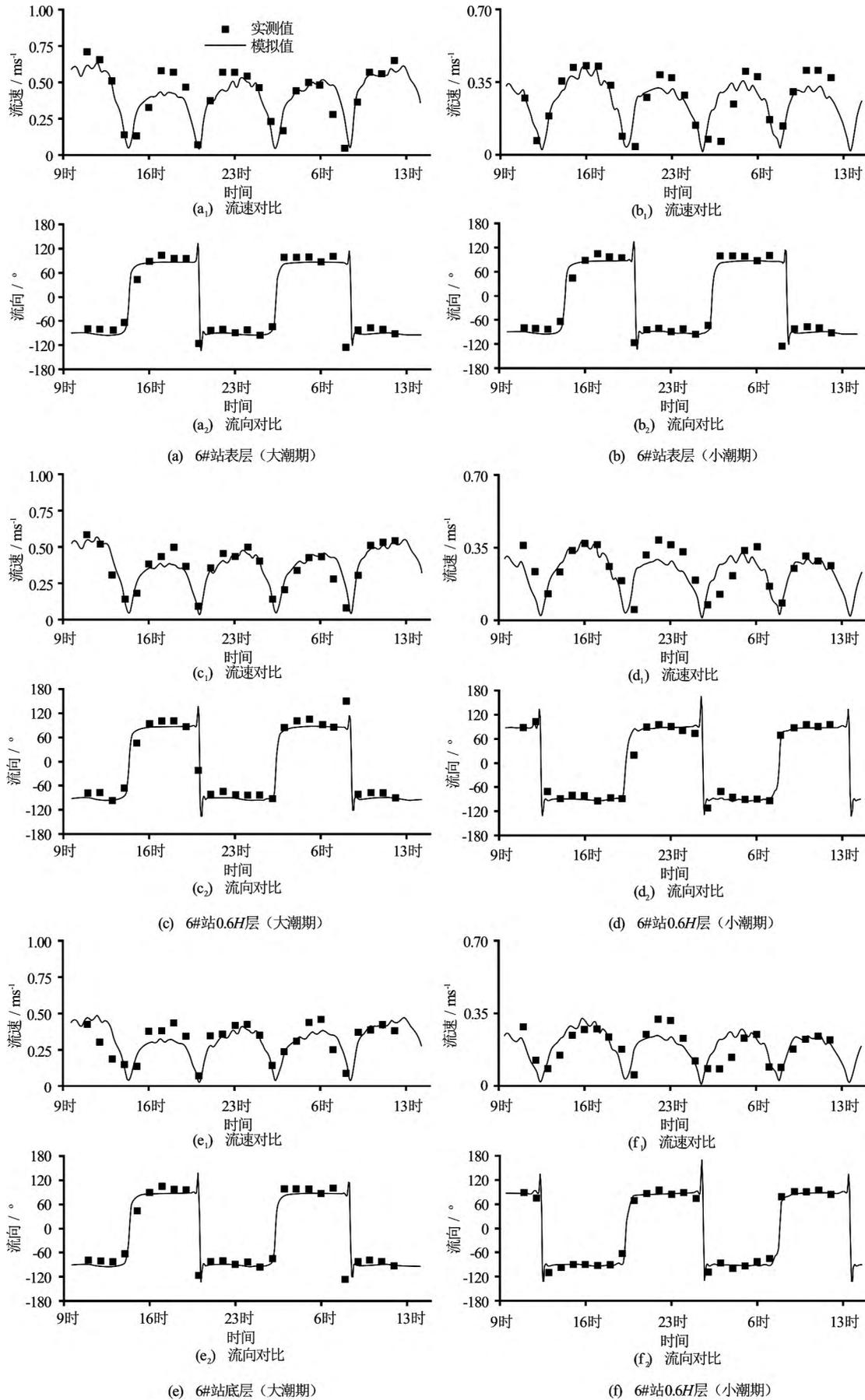


图 3 6#站模拟与观测潮流流速、流向对比

Fig.3 Comparison of the simulated and observed tidal currents during the spring and neap cycle at Station 6#

提供垂向混合系数, 避免人为选取而造成的误差; 使用质量守恒格式的干湿网格处理方法, 更好地模拟潮流的漫滩过程, 保证浅海区域计算结果的准确性; 计算上采用交错网格进行离散, 采用内外模分裂的方法, 外模利用正压条件, 采用二阶精度的三层时间步进行有限差分, 内模采用斜压条件求解, 节省计算时间。采用曲线正交网格进行计算, 这样可以在不提高计算成本的同时提高关注区域的分辨率及扩大模型区域。具体的动力学方程及其离散求解方法可以参考文献[13]。关于 EFDC 水动力模块以及九龙江口-厦门湾三维水动力场模型的建立和验证, 已在另文详细论述^[14], 这里仅直接给出 T2、T3 站潮位和 6#站潮流的验证(见图 2 和图 3)。本文着重论述泥沙输运模型的建立、验证及其在浅滩疏浚工程中的应用, 并进一步探讨岔口型潮汐河道泥沙输运的规律。

相对于其他泥沙模型, EFDC 泥沙模块的主要特点有: 高精度的水动力模拟; 代码的公开化、模块化, 用户可以根据研究区域的特点选用有针对性的泥沙模拟公式, 或者更改代码, 输入其他公式; 模型普适性、全面性, 模拟对象包括黏性沙及非黏性沙的多组分泥沙; 模拟过程包括悬移、推移、絮凝、沉降、沉积、河床分层、固结、粗化和浮泥层; 模拟范围包括河流、湿地、湖泊水库及海湾等; 功能有一维、二维及三维之分。

2.1 泥沙输运数学模型

泥沙在水体中以悬移质形态的运动由三维对流扩散方程来表示:

$$\begin{aligned} & \partial_t(m_x m_y H S) + \partial_x(m_y H u S) + \partial_y(m_x H v S) + \\ & \partial_z(m_x m_y w S) - \partial_z(m_x m_y w_s S) = \partial_x \left(\frac{m_y}{m_x} H K_H \partial_x S \right) + \\ & \partial_y \left(\frac{m_x}{m_y} H K_H \partial_y S \right) + \partial_z \left(m_x m_y \frac{K_v}{H} \partial_z S \right) + Q_s \end{aligned} \quad (1)$$

式中: u 和 v 为正交曲线坐标 x 方向和 y 方向上的水平速度分量; w 为 sigma 坐标下的垂向速度; m_x 和 m_y 为坐标变换因子; H 为瞬时总水深; K_v 和 K_H 为垂向和水平扩散系数, w_s 为泥沙沉降速度, S 为悬移质浓度, Q_s 为外部源汇项。

泥沙输运方程在水面 ($z=1$) 和底床 ($z=0$) 处的垂向边界条件如下:

$$-\frac{K_v}{H} \partial_z S - w_s S = 0, \text{ 当 } z=1 \quad (2)$$

$$-\frac{K_v}{H} \partial_z S - w_s S = J_o, \text{ 当 } z=0 \quad (3)$$

式中: $J_o = J_d + J_r$ 是底床进入水体的净泥沙通量, 等于泥沙沉积通量 J_d 和泥沙再悬浮通量 J_r 之和。

EFDC 中沉积通量 J_d 可表示为:

$$J_d = -w_s S_d \left(\frac{\tau_{cd} - \tau_b}{\tau_{cd}} \right), \quad \tau_b \leq \tau_{cd} \quad (4a)$$

$$J_d = 0, \quad \tau_b \geq \tau_{cd} \quad (4b)$$

式中: J_d 为泥沙沉积通量 dm/dt , 单位为 $g/(cm^2 \cdot s)$; m 为单位面积上沉积到底床上的泥沙质量, 单位为 g/cm^2 ; τ_b 为水流施于底床的应力; τ_{cd} 为临界沉积应力; S_d 为近底层沉积泥沙浓度。

再悬浮通量 J_r 可表示为

$$J_r = \frac{dm_e}{dt} \left(\frac{\tau_b - \tau_{ce}}{\tau_{ce}} \right)^\alpha, \quad \tau_b \geq \tau_{ce} \quad (5)$$

式中: J_r 为再悬浮通量, dm_e/dt 为底床单位面积的表面侵蚀速率; τ_{ce} 为再悬浮即表面侵蚀的临界应力; α 为与研究区域相关的参数。

对于作用在海床上的剪应力主要由潮流引起的情况, 底部剪应力表示为

$$\tau_b = c_b |u_1| u_1 \quad (6)$$

式中, u_1 为底部流速, 可由水动力学控制方程组求解得到^[14]; c_b 为潮流摩阻系数。

沉降速度 w_s 是非常关键的泥沙参数, 黏性泥沙的沉降与泥沙粒径、水体含沙量、湍流强度以及流速切变等诸多复杂的因素相关, 通常需要人为根据研究区域的特点将其参数化。本模型中, 沉降速度采用 Hwang 等^[15]提出的公式计算

$$w_s = \frac{aS^n}{(S^2 + b^2)^m} \quad (7)$$

该方程的曲线是一条抛物线, 在低含沙量条件下, 沉降速度随着含沙量的降低而减少, 在高含沙量条件下, 沉降速度随着含沙量的增加而减少。可使用最小二乘拟合法来确定方程的 4 个参数 a 、 b 、 m 和 n 。

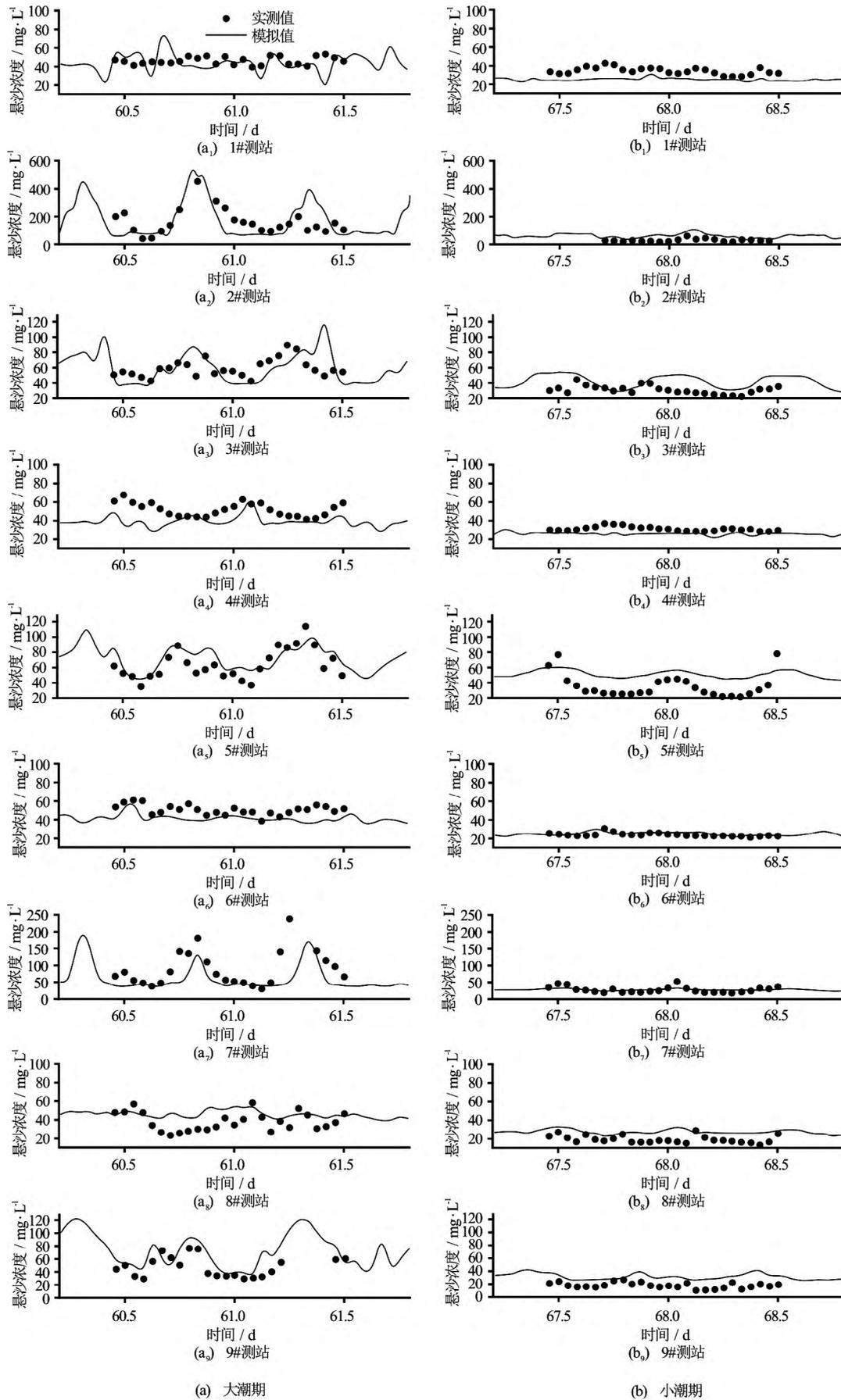


图 4 1#-9#站大、小潮期悬沙浓度观测值(点)-模拟值(线)照
 Fig.4 Comparison of the observed (dot) and simulated (line) SSC during the spring and neap

2.2 模型建立

为使模型精简适用，作者针对研究区域的特征对泥沙输运模型进行了简化。首先，由于研究区域水深较浅，潮动力强，水体混合程度较高，潮流强度及区域分布特征对悬沙的分布和输运起关键作用，故通过三维模型二维化（即水深平均）的方法对水沙场进行计算，且只考虑由潮流引起的底部剪应力的输沙作用。此外，研究区底床表层沉积物中细颗粒物占大部分^[9,12]，另据厦门湾及邻近海域水体悬沙粒度观测资料^[16,17]，水体中悬沙粒径范围介于 $5\phi - 7.5\phi$ ，悬浮物以细粉砂为主。基于此，模型简化为单颗粒的黏性泥沙模式。经调试、率定，模型主要参数设置如下：底床粗糙度 z_0 取 0.01 m，表面侵蚀速率 dm_e/dt 参考文献[18]取 $0.19 \text{ g}/(\text{m}^2\text{s})$ ，侵蚀指数 $\alpha=1$ ；悬沙的临界沉积应力 τ_{cd} 取 $0.0025 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ；底床的临界侵蚀应力 τ_{ce} 取 $0.004 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ；沉降速度计算参数取 $a=33.38$ 、 $b=3.7$ 、 $m=1.78$ 和 $n=1.6$ ；模型计算域为 $117.7^\circ\text{E} - 118.6^\circ\text{E}$ ， $24.25^\circ\text{N} - 24.7^\circ\text{N}$ ，包括九龙江口、厦门湾及邻近海域，见图 1。曲线正交网格的空间步长在 80-300 m 之间，对近岸、各水道及河口区的网格进行加密。采用 2014 年岸线，结合 2013 年新版海图及部分近岸实测数据插值确定各网格点的水深。外海开边界水动力条件由 11 个主要分潮（M2、S2、N2、K2、K1、O1、Q1、P1、M4、MS4 和 M6）的调和常数给定，采用下式给出开边界水位预报值：

$\zeta = \sum_{i=1}^{11} H_i \cos(\sigma_i t - \theta_i)$ ，式中 H_i 、 σ_i 和 θ_i 分别为各分潮的振幅、角频率和迟角。在九龙江（北溪、西溪和南溪）边界上加入多年平均径流量和含沙量以反映径流所带来的影响^[19]。外海开边界含沙量取为 $20 \text{ mg}/\text{L}$ ；模型干湿临界水深为 0.1/0.15 m，时间步长 5 s；全场初始悬沙浓度均设为 0，模型运行一个月后悬沙场基本稳定，待初始条件带来的影响消除后，取随后的计算结果进行分析。

2.3 模型验证及结果分析

根据国家海洋局第三海洋研究所在 2013 年 11 月至 12 月大、小潮期的实测悬沙数据（测站位置见图 1，1#-9#，垂向上将水体分为 6 层监测）及长江水利委员会水文局在 2013 年 6 月大潮期的实测数据（测站位置见图 1，10#-11#，垂向上将水体分为 6 层监测），本文取垂向平均浓度对二维悬沙浓度场的模拟结果进行验证和分析。

图 4 给出了 1#-9#测站大、小潮期的悬沙浓度观测值-模拟值对照，表 1 给出了 1#-11#测站大、小潮期悬沙浓度观测值-模拟值的误差统计。除了 2#站点小潮期的误差较大外，考虑到模型忽略风、浪等作用，其余站点的误差均处在合理的范围内，小潮期的误差均值（38.7%）略大于大潮期（30.9%），模拟结果与观测数据的吻合度较高，趋势一致，模型反演出该水域悬沙浓度场大、小潮期的时空变化特征，并能正确反映浅水区域的水沙运动特点：大潮期，水体悬沙浓度普遍大于小潮期，悬沙浓度明显表现出受潮流制约而与潮流往复运移的周期性

表 1 1#-11#站大、小潮期悬沙浓度观测值-模拟值误差统计
Table 1. Error analysis for observed and simulated SSC at 1#-11# station

站点	大潮期			小潮期		
	观测平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	模拟平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	平均相对误差/%	观测平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	模拟平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	平均相对误差/%
1#	45.8	44.2	17.7	34.3	25.5	25.8
2#	158.6	145.1	48.4	27.4	57.5	109.8
3#	59.1	58.8	24.9	30.6	42.2	39.3
4#	51.5	38.3	25.9	30.9	25.5	17.5
5#	63.4	71.0	19.6	35.4	51.1	53.3
6#	50.2	41.1	18.4	23.5	24.8	8.5
7#	88.5	46.3	48.9	27.1	27.6	21.0
8#	37.6	46.1	27.9	19.2	25.5	35.1
9#	46.9	61.8	35.9	17.7	33.8	38.2
10#	53.1	58.0	25.1	—	—	—
11#	42.5	55.1	47.7	—	—	—

注：误差均值，大潮期 30.9%，小潮期 38.7%（含 2#站点） 29.8%（不含 2#站点）。

变化相对应的“起伏变化”特征,且变化幅度较大。浅滩区悬沙浓度随潮变化的幅度最大,在大潮期的潮周期内,浅水区7#站点的悬沙浓度变化范围从50 mg/L至250 mg/L,水深更浅的2#站点悬沙浓度可从80 mg/L上升到500 mg/L左右。结合图5可知,一天当中的两个悬沙浓度峰值均是在落潮过程形成,至低潮前后悬沙浓度达到极大值。小潮期,各站点水体悬沙浓度总体维持在20-40 mg/L的稳定水平,没有明显表现出随潮流波动的特征。研究水域大、小潮期的悬沙运动情况差异大,涉及泥沙的施工活动应特别注意并利用该特点来规避环境风险。

图5给出了大、小潮期研究水域高、低潮时悬沙浓度的空间分布。总体上看,在潮流作用下,厦门湾水体悬沙浓度由外向内递增,呈现“西高东低”的分布格局,九龙江河口区和翔安-大嶝浅滩区为该地区悬沙浓度最高的区域,与罗健等^[20]和林强等^[21]基于多时相遥感图形反演的厦门湾悬沙浓度分布格局基本一致。悬沙随着潮流的涨落可在湾内外作中-长距离的往复运动;大潮期水体悬沙浓度大于小潮期,落潮过程悬沙浓度逐渐增大,低潮时整体水域的悬沙浓度最大。以上特征在河口区及湾内浅水区尤其明显。

下文着重讨论大潮期悬沙浓度的时空变化特征:大潮期,高潮时河口区最大浑浊带位于海门岛西北部,悬沙浓度最大值为250 mg/L左右;低潮时最大浑浊带向东移至海门岛东侧,悬沙浓度最大可达400 mg/L,这与王元领^[22]的观测结果较为一致。受九龙江上游来沙和河口区悬沙输出的影响,厦门岛南部至后石、流会之间的潮流通道中形成了一舌状的高悬沙浓度带(浓度范围介于75-150 mg/L),与河口区最大浑浊带一起随着涨落潮往复运动;落潮过程自河口区向外海输出的悬浮泥沙在涨潮过程一部分重新返回河口区,一部分由涨潮流挟带进入厦门西港,这与遥感反演^[20]和左书华^[9]应用GSTA模型得到悬沙输运趋势一致;翔安东南部至大嶝以东的浅域悬沙浓度大体上介于30-45 mg/L,仅近岸处形成60 mg/L以上的狭长悬沙带;落潮过程,随着水深变浅,翔安至大嶝之间的部分滩面逐渐露出(图5(a)),水体悬沙浓度迅速增大,至低潮时该水域悬沙浓度局部最高可达400-500 mg/L,此时大嶝以东的沿岸浅水区悬沙浓度则增大至60-75 mg/L。在同安湾,落潮过程滩涂逐渐显露(图5(a)),湾顶有河流泥沙注入,局部形成较高浓度悬沙带,湾顶高含沙量水体可顺着落潮流进入浔江后向湾外输出从而将泥沙带进外

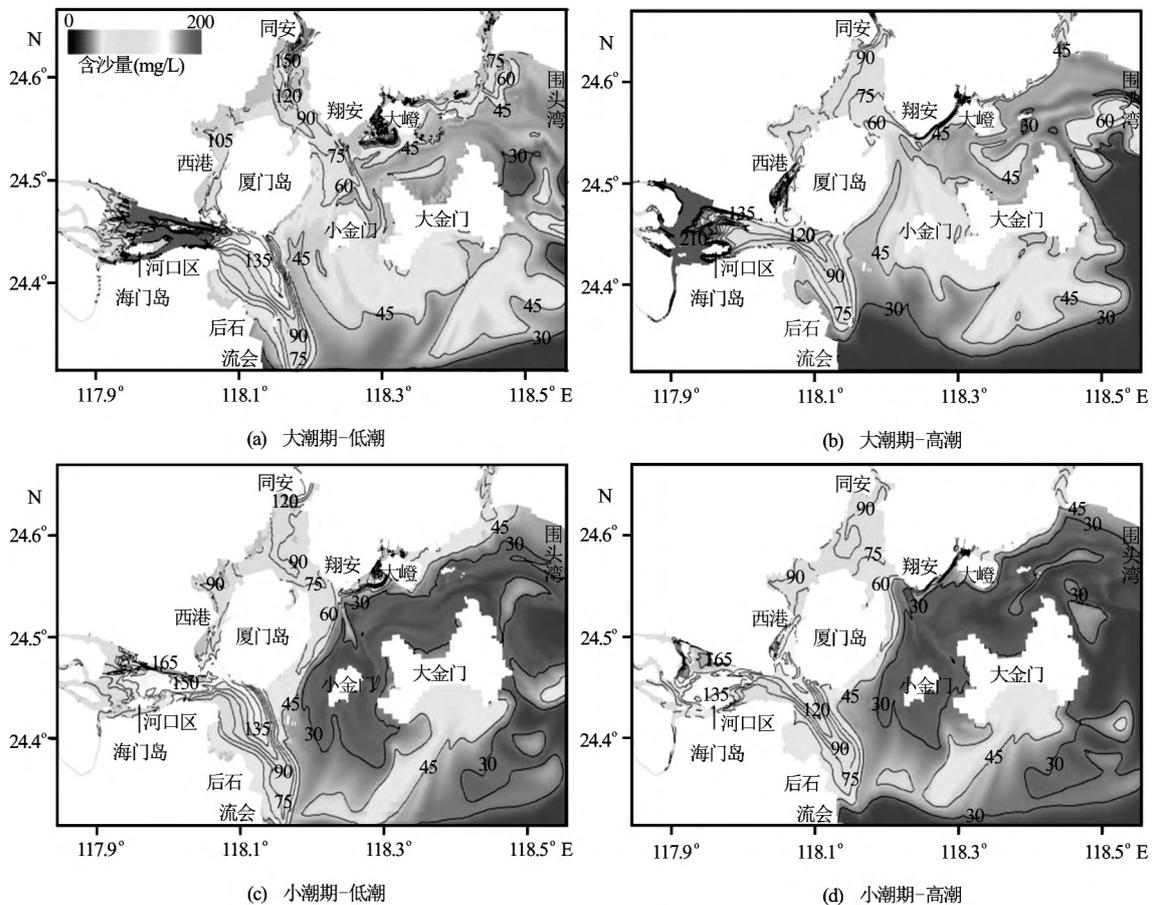


图5 大、小潮期研究水域高、低潮时悬沙浓度空间分布
Fig.5 Sediment concentration distribution in study area at high and low tide during spring and neap

海，涨潮过程部分悬沙又随着涨潮流返回同安湾；浔江水域悬沙浓度受同安湾高含沙水体和外海低含沙水体的交替影响而呈较大幅度的起伏变化，大潮低潮时悬沙浓度为 75–90 mg/L 而高潮时降至 45–60 mg/L。厦门东海域至大、小金门周边海域的悬沙浓度则没有明显随涨落潮变化的特征，大潮期大体稳定在 45–50 mg/L 左右，但小金门南、北两端、大金门西南以及大金门西北至围头湾内，在潮流强时都存在面积不大的相对较强（50–60 mg/L）的悬沙浓度场，这与遥感解译的结果也相符^[20]。小潮期，研究水域悬沙浓度的空间分布特征总体上与大潮期类似（图 5(c) 和图 5(d)），但水体的悬沙浓度及其变化的幅度和空间范围都相应地变小了。

对比历史观测资料^[23]，厦门岛西北侧-北侧局部水体的悬沙浓度模拟值稍偏高，造成模拟值偏高的原因可能是单一组分的泥沙模式未能很好地代表此处实际的底床泥沙及其悬移特征。而总体上，模型成功反演了九龙江口-厦门湾及邻近海域悬沙场的时空变化特征，同时浅滩区域的水沙运动模拟也达到了较高的精度，模拟结果可信，模型能进一步用于悬沙输运扩散的分析、评价工作。

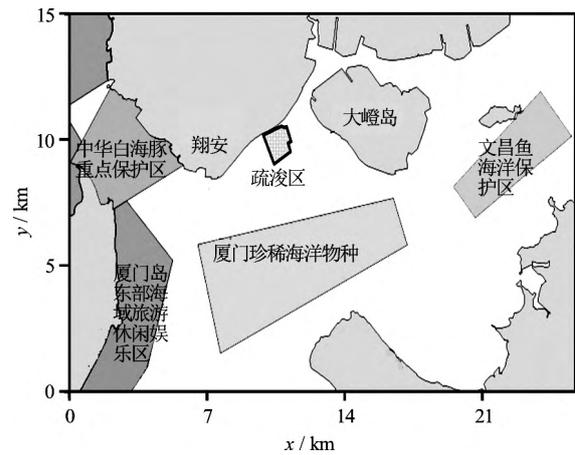


图 6 疏浚区及邻近海域保护区分布
Fig.6 Dredging area and adjacent protection zone

2.4 浅滩区疏浚过程的水沙运动

疏浚施工过程产生的泥沙入海，将对海水水质、海洋生物生态造成一定的影响。浔江、厦门岛以东、大嶝以南和大嶝东南方水域分布有中华白海豚重点保护区、厦门珍稀海洋物种文昌鱼保护区以及海域旅游娱乐功能区，在该区域邻近的疏浚工程

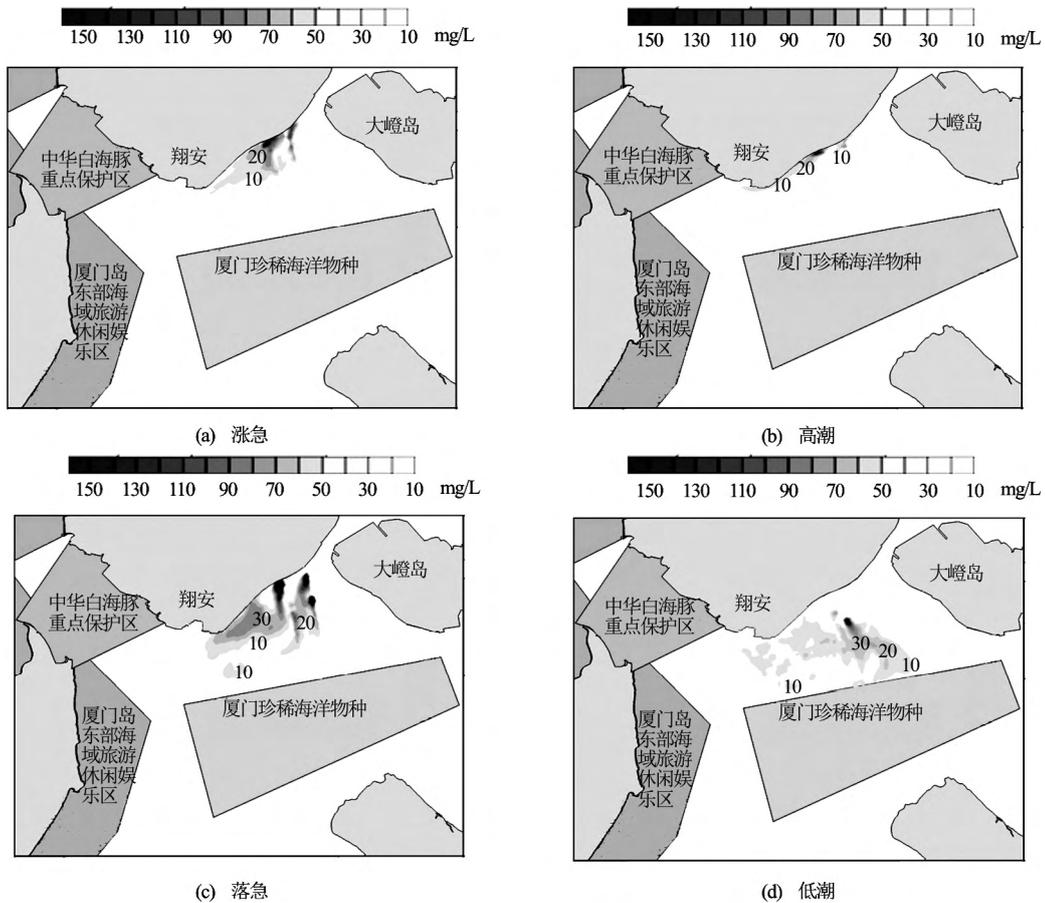


图 7 典型潮时悬沙浓度增量的空间分布
Fig.7 Spatial distribution of SSC increment at different time of tide

须明确施工过程的悬沙增量及其影响的时间尺度和空间范围。本文将构建好的泥沙运输模型进一步应用于翔安-大嶝浅滩区域疏浚过程的水沙运动模拟。

2.4.1 模型概化

疏浚区位于翔安东侧浅滩(疏浚区位置及其与邻近保护区和功能区的相对位置关系见图(6)),

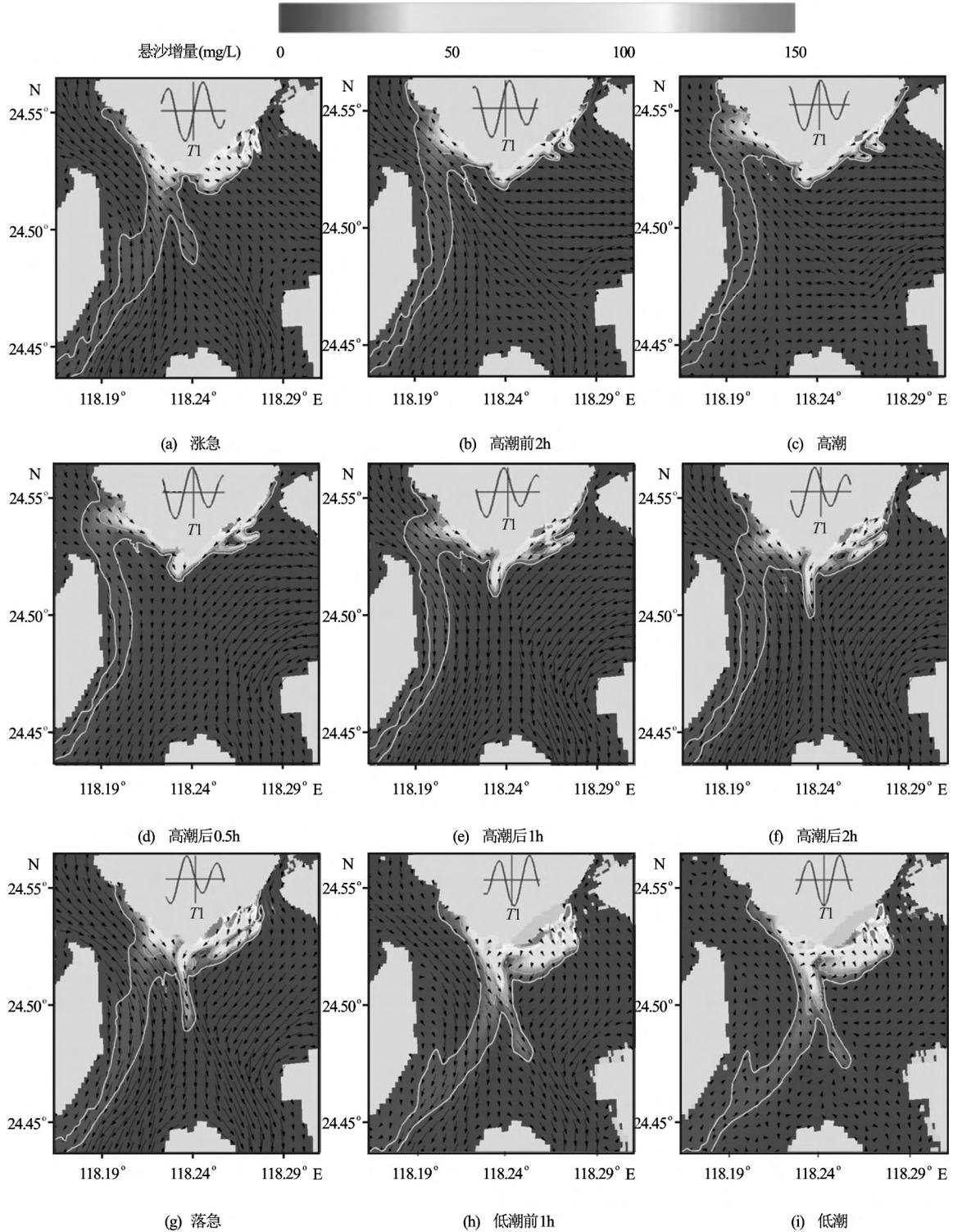


图 8 疏浚泥沙远程运输的水动力机制

Fig.8 Hydrodynamic mechanism of long-range transport of dredging-produced sediment

是海峡论坛建设工程的取泥区之一,安排 4 艘 8 m^3 抓斗挖泥船并每艘配 2 条 1500 m^3 自航泥驳施工。疏浚的悬浮泥沙发生量按《港口建设项目环境影响评价规范》(JTS105-1-2011)中提出的公式进行估算

$$Q = \frac{R}{R_0} T W_0 \quad (8)$$

式中: Q 为疏浚作业悬浮物发生量,单位为 t/h ; R 为发生系数 W_0 时的悬浮物粒径累计百分比,单位为%; R_0 为现场流速悬浮物临界粒子累计百分比,单位为%; T 为挖泥船疏浚效率,单位为 m^3/h ; W_0 为悬浮物发生系数,单位为 t/m^3 。疏浚效率 T 取 $3000\text{ m}^3/8\text{h}$, W_0 不大于 0.02;保守考虑,按 $R:R_0 = 1:1$ 计算悬浮泥沙产生量,采用 8 m^3 抓斗式挖泥船疏浚时, $Q \leq 7.5\text{ t/h}$,相当于 2.08 kg/s 。本模拟方案中,泥沙释放源均匀布置于疏浚区的四个边角点上,并假设所有设备同时施工;悬沙增量过程响应迅速,开始释放的时刻对模拟结果基本无影响;疏浚 24 h 连续作业,且不采取设防污帘等措施,因此模型的预测结果是偏保守的。

2.4.2 预测结果及分析

水体悬沙增量对浅滩疏浚排泥过程响应迅速,图 7 给出了连续疏浚作业第二天典型潮时悬沙增量的空间分布。受潮流控制和地形约束,涨潮过程(图 7(a)和图 7(b)),悬沙分布范围逐渐向岸、缩窄,高潮时分布范围局限在近岸狭长区域。疏浚产生的悬浮泥沙在较强的潮动力作用下混合稀释均匀,悬沙增量浓度较低($10\text{--}70\text{ mg/L}$);退潮过程(图 7(c)和图 7(d)),退潮流挟带悬沙离岸,悬沙增量的分布范围逐渐扩大,在低潮时影响范围最大。由于疏浚区域位于浅滩,退潮过程中施工区周围的潮滩逐渐显露,疏浚产生的悬浮泥沙逐渐缺乏潮流的混合、稀释及运输作用,因而在施工区局部范围内形成了高浓度(大于 150 mg/L)的悬沙分布;部分悬沙随退潮流朝离岸方向运输扩散,但该部分悬沙引起周边海域的悬沙浓度增量不大($10\text{--}30\text{ mg/L}$);至低潮时,疏浚区约 $3/4$ 露出水面, 10 mg/L 等值线最远扩展至文昌鱼保护区北部上缘,疏浚导致保护区内部悬沙浓度的增量很小(小于 10 mg/L),可以忽略其影响。若停止疏浚,悬沙增量经历一至两个潮周期后即沉降、消去。浅滩疏浚悬沙增量具有发生迅速、局部浓度上升迅速同时消去迅速的特点。相对高浓度(大于 15 mg/L)的悬沙增量基本上局限在疏浚区域附近,在上述的疏浚强度下一般不会对周边保护区造成污染。

2.4.3 近岸疏浚泥沙的远程运输机制

随着不间断疏浚作业的进行,相对较高浓度(15 mg/L 以上)的悬沙增量分布随潮时的变化与第二天的情况基本无异,但低浓度(15 mg/L 以下)悬沙增量分布的变化趋势则非常值得注意,它揭示了近岸疏浚泥沙的远程运输途径及其可能影响到的最大范围,是科学合理安排疏浚工程的重要参考。根据模拟结果,随着连续疏浚作业,低浓度悬沙增量逐渐形成了“源于翔安西南沿岸,环绕厦门岛东海域”的带状分布格局,自第八天起,该带状分布稳定存在并随潮摆动,图 8 示意了形成该分布的水动力机制。

图 8 所示水域是一个“五岔口”型潮汐水道,是厦门—小金门水道、大金门—小金门水道、大金门—大嶝水道、翔安—大嶝水道以及浔江的交汇地带,流态复杂。涨潮过程,从外海进入围头湾后绕过大金门北水道的潮流,几乎以垂直于翔安东南侧岸线的方向挺进(图 8(a)),到达近岸以后受地形和岸界的约束(图 8(b)和图 8(c)),这支潮流一分为二,一支向北进入翔安—大嶝水道,另一支则顺着岸线朝西南向运动至翔安南端后绕过端角,并顺着进入浔江的涨潮流沿岸向上。因此,涨潮流一方面将疏浚泥沙限制在近岸浅水域,另一方面将疏浚泥沙沿岸输送。其中北上进入大嶝水道的支流与经过围头湾后进入大嶝北水道的涨潮流相冲突(图 8(a)),流速猛降,挟沙能力减弱,故疏浚泥沙沿岸向上运输的范围十分有限;而南下的支流绕过翔安南端后与进入浔江的涨潮流形成合力,则能把疏浚泥沙远距离地输送到浔江北岸中段, 13 mg/L 等浓度线扩展至白海豚保护区内。涨潮流第三方面的输沙作用将结合下面退潮过程的输沙机制进行解释。

首先注意到,疏浚区近岸退潮流同样具有将疏浚泥沙沿岸向运输的功能(图 8(d)–图 8(f)),泥沙被运输至翔安南端,与涨潮过程被运输至浔江沿岸而部分在退潮过程返回的泥沙汇聚,汇聚处存在着将泥沙近乎直线向南运输的水动力场:由于特殊的地理位置,“五岔口”水域在退潮期间形成了特殊的流场,即从浔江退出、朝东南向的退潮流与绕过大金门西北角、朝西南向的退潮流交汇后又被小金门分流。从开始退潮至落急前后,两股退潮流势力相当(图 8(e)和图 8(f)),交汇处形成了从翔安南端到小金门正北处的“直线输送带”,被沿岸退潮流输送至翔安南端的疏浚泥沙经由该“输送带”径直南下,此处的流场起到了类似“泥泵”的作用,落急时泥沙可被泥泵输送至距翔安南端约 4.5 km 处(图 8(g))。落急之后,浔江退潮流较强(图 8-h),其退潮流路可以跨过小金门而进入大-

小金门水道,“直线输送带”流场的平衡被打破,之前径直南下的泥沙向东南方向偏转。至低潮时,疏浚泥沙向南运输的距离达到最远,距翔安南端约 6.8 km (图 8 (i))。此后的涨潮过程,从外海进入小金门东、西水道的强潮流(速度约 1m/s)挟带此前南下的泥沙进入浔江(图 8 (a)和图 8 (b)),这是涨潮流第三方面的输沙作用。

同时注意到,通过两种途径(沿岸流搬运和涨潮流输送)而被输运至翔安西南沿岸(即浔江北岸)的泥沙成为了一个新的“泥沙源”,退潮过程自浔江南下的强潮流(速度约 0.8 m/s)挟带沿岸泥沙绕过厦门岛东海域后进入外海,从而在厦门东部近岸海域形成了浓度小于 8 mg/L 的悬沙分布带。该分布带自第八天起稳定存在,并随潮摆动。上述就是“五岔口”水域远程输运翔安东南部浅滩疏浚泥沙的水动力机制,疏浚泥沙由此可能影响到的范围很大,应予以高度关注。

如前所述,相对高浓度(大于 15 mg/L)的悬沙增量分布基本固定而不会对邻近保护区造成污染。但随着疏浚的进行,白海豚保护区可出现小于 13 mg/L 的悬沙增量,文昌鱼保护区西侧可出现小于 8 mg/L 的悬沙增量,厦门东海域娱乐区可出现小于 8 mg/L 的悬沙增量。若按照本项目的施工强度(泥沙源强 $Q_0 = 2.08 \text{ kg/s}$)和施工位置进行疏浚,低浓度的悬沙增量所造成的影响甚微,但由于“泥泵式”水动力场的存在,从上述的泥沙远程输运机制及其导致的悬沙增量分布范围来看,加强疏浚强度($Q > 2.08 \text{ kg/s}$)或者原疏浚区附近存在其他疏浚工程,或者稍微移动疏浚位置(比如疏浚区域更加靠近翔安南端),则均可导致邻近保护区内悬沙增量的进一步升高,甚至造成污染。图 9 给出了增大 2 倍疏浚强度后($Q = 3Q_0$)的悬沙增量分布:高潮前后浔江水域白海豚保护区出现大于 30 mg/L 的悬沙增量,直接导致保护区被污染;低潮前后文

昌鱼保护区西侧的悬沙增量进一步升高约 10 mg/L;厦门岛东海域悬沙带宽度明显增加(2-3 倍),浓度进一步升高约 10 mg/L,范围覆盖整个东海域娱乐功能区。

复合岔口型潮汐汊道的流场复杂多变,在该类型水域进行疏浚、开采等活动之前应经过科学合理的论证,明确其物质输运机制并对输运途径和可能影响到的最大范围及程度作出预测、判断。

4 结论

在潮流作用下,厦门湾水体中悬沙浓度由外向内递呈“西高东低”的格局,悬沙随着潮流的涨落在湾内外作中-长距离的往复运动。湾内特别是浅滩区,大潮期水体悬沙浓度普遍高于小潮期,悬沙浓度明显表现出受潮流制约而与潮流往复运动的周期性变化相对应的“起伏变化”特征,且变化幅度大(最大幅度可达 400 mg/L 左右),一天当中的两个悬沙浓度峰值均是在落潮过程形成,至低潮前后悬沙浓度达到极大值。小潮期,悬沙浓度总体维持稳定,没有明显表现出随潮流波动的特征。九龙江河口区和翔安-大嶝浅滩为该地区悬沙浓度最高的区域。

浅滩疏浚工程导致的水体悬沙增量具有发生迅速、局部浓度上升迅速同时消去迅速的特点。采用抓斗式挖泥船(源强 $Q = 7.5 \text{ t/h}$)在翔安东南侧浅滩疏浚作业,相对高浓度(大于 15 mg/L)的悬沙增量分布基本局限在疏浚区域附近,对邻近保护区基本无影响,但翔安南部“五岔口”水域存在能远程输送疏浚泥沙的“泥泵式”水动力场,促使形成环绕厦门岛东海域的带状悬沙分布(浓度小于 8 mg/L);增大 2 倍疏浚强度直接导致白海豚保护区被污染,悬沙带宽度增加 2-3 倍,浓度上升约 10 mg/L,范围覆盖整个东海域娱乐功能区。

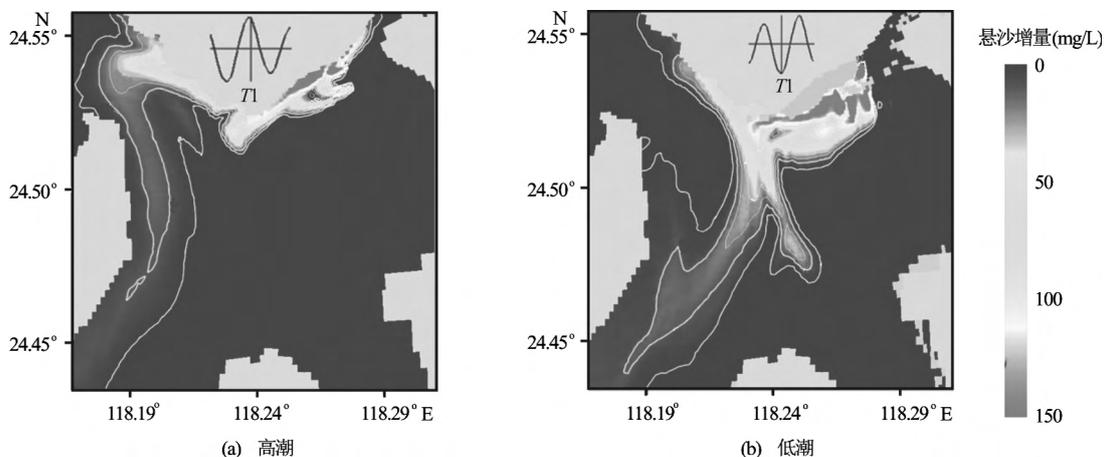


图 9 增大疏浚强度后($Q = 3Q_0$)悬沙增量分布

Fig.9 Distribution of SSC increment with treble dredging intensity ($Q = 3Q_0$)

参 考 文 献:

- [1] 王翠, 孙英兰, 张学庆. 基于 EFDC 模型的胶州湾三维潮流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2008, 38(5): 833-840.
WANG Cui, SUN Ying-lan, ZHANG Xue-qing. Numerical simulation of 3D tidal currents based on the EFDC model in Jiaozhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Science, 2008, 38(5): 833-840.
- [2] HAMRICK J M, WU T S. Computational design and optimization of the EFDC/HEM3D surface water hydrodynamic and eutrophication models[C]. Next Generation Environmental Models and Computational Methods. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997.
- [3] JI Z G, MORTON M R, HAMRICK J M. Wetting and drying simulation of estuarine processes[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 53(5): 683-700.
- [4] JI Z G, HAMRICK J M, PAGENKOPF J. Sediment and metals modeling in shallow river[J]. Journal of Environmental Engineering, 2002, 128(2): 105-119.
- [5] JI Z G, MORTON M R, HAMRICK J M. Three dimensional hydrodynamic and water quality modeling in a reservoir[C]. Proceedings of the Eighth International Conference on Estuarine and Coastal Modeling. Monterey, 2004: 608-627.
- [6] 艾海男, 张文时, 胡学斌, 等. 环境流体动力学代码 EFDC 模型的研究及应用进展[J]. 水资源研究, 2014, 3: 247-256.
AI Hai-nan, ZHANG Wen-shi, HU Xue-bin, et al. The research and application progress of environmental fluid dynamics code[J]. Journal of Water Resources Research, 2014, 3: 247-256.
- [7] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第八分册)[M]. 北京, 中国: 海洋出版社, 1993: 174.
Committee of Zhong Guo Hai Wan Zhi. Zhong Guo Hai Wan Zhi (8)[M]. Beijing, China: China Ocean Press, 1993: 174.
- [8] 林翩然, 温生辉, 汤军健. 厦门海域二维潮流数值计算[J]. 台湾海峡, 2008, 27(4): 526-532.
LIN Pian-ran, WEN Sheng-hui, TANG Jun-jian. Numerical simulation of two-dimensional tidal current filed in Xiamen Waters[J]. Taiwan Strait, 2008, 27(4): 526-532.
- [9] 左书华, 韩志远, 赵洪波, 等. 九龙江口厦门湾海域表层沉积物粒度分布特征及其动力响应[J]. 水利水运工程学报, 2011(4): 74-79.
ZUO Shu-hua, HAN Zhi-yuan, ZHAO Hong-bo, et al. Grain size characteristics of surface sediments and dynamic response in sea area of Jiulongjiang estuary and Xiamen bay[J]. Journal of Hydro-Science and Engineering, 2011(4): 74-79.
- [10] 郑祥靖, 潘伟然, 张国荣, 等. 厦门湾悬沙分布特征与动力分析[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2013, 52(4): 539-544
ZHENG Xiang-jing, PAN Wei-ran, ZHANG Guo-rong, et al. Distribution characters of suspended sediment and dynamic analysis in the Xiamen Bay[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2013, 52(4): 539-544.
- [11] 左书华, 吴以喜, 杨华. 九龙江口、厦门湾海域动力地貌及泥沙环境分析[R]. 天津, 中国: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2010.
ZUO Shu-hua, WU Yi-xi, YANG Hua. Analysis of dynamical geomorphology and sediment environment in the area of Jiulongjiang Estuary and Xiamen Bay[R]. Tianjin, China: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T, 2010.
- [12] 方建勇, 陈坚, 李云海, 等. 厦门湾现代沉积环境特征研究[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 356-364.
FANG Jian-yong, CHEN Jian, LI Yun-hai, et al. Study of modern sedimentary environment in the Xiamen Bay[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 356-364.
- [13] HAMRICK J M. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects[R]. Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering, 1992.
- [14] 谢森扬, 王金坑, 王翠, 等. 基于 EFDC 的九龙江口-厦门湾三维潮流及盐度数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2016, 31(1): 63-75.
XIE Sen-yang, WANG Cui, WANG Jin-keng, et al. Numerical simulation study on 3D tidal flow and salinity in the Jiulong Estuary-Xiamen Bay based on the EFDC[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(1): 63-75.
- [15] HWANG K N, MEHTA A J. Fine sediment erodibility in Lake Okeechobee[R]. Technical report to South Florida Water Management District, 1989.
- [16] 国家海洋局第三海洋研究所. 厦门新机场大小嶝造地二期工程海洋水文观测及分析计算报告[R]. 2014. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. Report of hydrological observation and computation results for the Xianmen Daxiaodeng reclamation program[R]. 2014.
- [17] 国家海洋局第三海洋研究所. 厦门新机场海砂资源

- 开采项目调查海洋水文专题报告[R]. 2013.
Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. Report of hydrological observation and computation results of southwest Xiamen Bay for the sea-sand exploitation program[R]. 2014.
- [18] 张珞平. 福建省海湾数模与环境研究—厦门湾[M]. 北京, 中国: 海洋出版社, 2009.
ZHANG Luo-ping. Numerical study and environmental research of bays of Fujian province—Xiamen Bay[M]. Beijing, China: Ocean Press, 2009.
- [19] 黄秀琴. 九龙江流域水文特性[J]. 水利科技, 2008, 1: 16-20.
HUANG Xiu-qin. Hydrological characters of Jiulong Jiang basin[J]. Hydrological Technic, 2008, 1: 16-20.
- [20] 罗健, 龚静怡, 张行南. 九龙江口及厦门湾悬沙分布和输移沉积的多时相遥感分析[J]. 水利水运科学研究, 1999(4): 368-379.
LUO-Jian, GONG Jing-yi, ZHANG Xing-nan. Multi-temporal analyses of remote sensing on distribution, transportation and sedimentation of suspended sediment in the Jiulongjiang Mouth and Xiamen Estuary[J]. Journal of Hydro-Science and Engineering, 1999(4): 368-379.
- [21] 林强, 陈一梅. 厦门湾悬沙分布的多时相遥感分析[J]. 水运工程, 2008, (12): 51-57.
LIN Qiang, CHEN Yi-mei. Multi-temporal analyses of remote sensing on distribution of suspended sediment in Xiamen Estuary[J]. Port & Waterway Engineering, 1999(4): 368-379.
- [22] 王元领. 福建九龙江口洪枯季悬沙输运过程初步研究[D]. 青岛, 中国: 中国海洋大学, 2005.
WANG Yuan-ling. Initiative research on the transportation of suspended sediments in Jiulong River Estuary, Fujian Province, at both flood and low water seasons[D]. Qingdao, China: Ocean University of China, 2005.
- [23] 国家海洋局第三海洋研究所. 厦门高集海堤开口改造工程补充水文泥沙测验及分析报告[R]. 2007.
Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. Supplementary report of test and analysis of hydrology and sediment transport for the opening and reform construction of Xiamen Gaoji Dam[R]. 2007.