

# 潮流与泥沙输运对黄骅港工程的响应分析

匡翠萍<sup>1</sup>, 钱从锐<sup>1</sup>, 姚凯华<sup>1,2</sup>, 顾杰<sup>3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 3. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要:** 黄骅港的泥沙淤积问题一直是影响通航能力和投资建设的关键因素。黄骅港通过 2011 年整治工程大大改善了航道的通航能力, 并减缓了泥沙的淤积, 为港池提供了平稳的水域。基于验证的 MIKE 21 软件中的潮流和泥沙数学模型, 计算分析了 2011 年工况下港区的潮流场以及泥沙浓度场对工程的响应, 并对比分析了有无波浪作用下泥沙浓度场的变化, 得出以下结论: 防波堤外延把黄骅港分为了两个相对独立的区域, 明显的阻流作用迫使潮流携带泥沙沿堤向外海侧搬运; 无波浪作用时, 港区含沙量在平均值  $0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  附近变化, 有波浪作用时, 含沙量大幅上升, 近岸区形成高含沙水体; 防波堤阻碍高含沙水流跨过航道, 提高了航道的使用寿命。

**关键词:** 黄骅港; 潮流; 泥沙输运; 航道; MIKE 21

**中图分类号:** TV 148

**文献标志码:** A

## Responses of Tidal Current and Sediment Transport to Huanghua Port

KUANG Cui ping<sup>1</sup>, QIAN Cong rui<sup>1</sup>, YAO Kai hua<sup>1,2</sup>, GU Jie<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China; 3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The sediment deposition problem of Huanghua Port is a key factor to influence the navigation capacity and investment in construction. After the regulation project in 2011, the navigation capacity of Huanghua Port was greatly improved, the sediment siltation was mitigated, and a steady water area was, therefore, provided for harbour basin. On the basis of the verified tidal current and sediment transport mathematical model from MIKE 21 software, the responses of the tidal current field and sediment concentration field to the engineering area of Huanghua Port in 2011 were analyzed. Besides, the changes of sediment concentration in the whole field whether the normal wave being considered or not were

compared. The results indicate that the extension of breakwater divides Huanghua Port into two relatively separate regions, and the resistance induced by breakwaters forces the sediment carried by tidal current to transport along the dike seaward; the average sediment concentration in Huanghua Port is about  $0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  without the effect of wave, however, the sediment concentration increases drastically and forms high sediment concentration zone in offshore water when considering the effect of normal wave; Breakwaters, which can block high concentration of sediment across the channel, improve the service life of the navigation channel.

**Key words:** Huanghua Port; tidal current; sediment transport; navigation channel; MIKE 21

黄骅港位于河北省与山东省交界处、距沧州市区以东约 90 km 的渤海之滨, 由煤炭、综合和河口 3 个港区组成(图 1)。作为国务院批准建设的我国第二大型煤炭外运码头, 也作为河北沧州的大宗进出口货物的中转站, 黄骅港扮演着重要的纽带作用, 带动了河北省经济的发展。

航道淤积是港口工程界关心的问题之一。国外 L. K. Ghosh 等<sup>[1]</sup>在分析了波浪、风等环境数据的基础上, 研究了港口航道泥沙的沉降特性。国内 Shi Changxing 学者<sup>[2]</sup>则解释了降低黄河水位会使河道泥沙连续沉降的原因。泥沙输运特性以及海床演变对港口航道的建设有着非常重要的指导意义, 相关学者已做过一定的研究<sup>[3-5]</sup>。

黄骅港属于粉砂淤泥质海岸, 一期工程建设以来, 在外航道疏浚施工过程中, 曾发生多次较为严重的回淤现象<sup>[6]</sup>。由于黄骅港处于废弃的黄河河口, 该区域坡度平缓, 海滩淤积的粉砂淤泥极易被风浪掀起再经水流携带进入港池。粉砂质海岸水体的含沙量大小与风浪有密切的关系, 风平浪静时, 水体清

收稿日期: 2013-12-08

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011120087); 海洋公益性行业科研专项(201305003)

第一作者: 匡翠萍(1966—), 女, 教授, 工学博士, 主要研究方向为河口海岸工程。E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通讯作者: 顾杰(1961—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为海洋环境。E-mail: jgu@shou.edu.cn

澈,含沙量很小,有风浪时,水体含沙量增大,外航道淤积也随之增大<sup>[7]</sup>.正如杨华<sup>[8]</sup>所述,影响航道泥沙淤积的主要泥沙来源是当地泥沙的侵蚀-搬运-沉积作用.

自 2000 年外航道全面施工后,2000 年 12 月中旬至 2001 年 2 月底两个半月期间,外航道回淤了 628 万  $m^3$ ,与建港前的预测年回淤量 200~300 万  $m^3$  相差甚远,且回淤物质由港池和内航道开挖时的黏土变为了粉土.张庆河等<sup>[9-10]</sup>研究表明,造成黄骅港骤淤的主要原因是风浪引起的泥沙悬扬,而港口建筑物周围的水流运动对航道局部淤积也起着十分重要的作用.

随着黄骅港 2011 年工程的完成,有必要研究潮流场和泥沙输运对工程的响应,从而为后一阶段治理黄骅港提供科学依据.图 1 显示了工程的平面布置、港区分布以及验潮点和观测点位置.本文运用 MIKE 21 软件下的潮流和泥沙模块建立了相应的数学模型,通过 2011 年 9 月 27 日 8:00 到次日 9:00 的 26 个时刻的实测数据验证了模型的合理性,并且分析了一个潮周期的潮流场和泥沙输运场对 2011 年工程的响应关系.

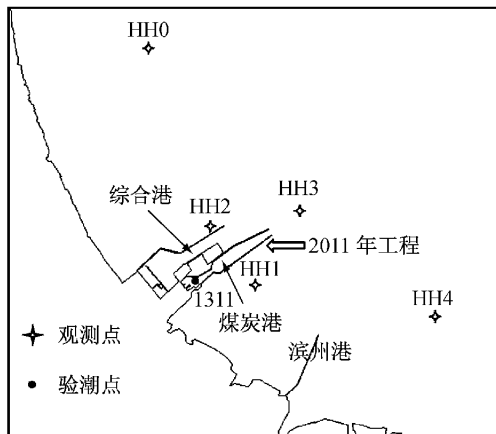


图 1 验潮点及观测点位置

Fig.1 Location of tidal gauge and observation stations

## 1 二维潮流、泥沙数学模型简介

MIKE 21 是丹麦水力学研究所 (danish hydraulic institute, DHI) 研发的通用数值模拟系统,主要模拟河流、湖泊、河口、海洋及海岸的水流、波浪、泥沙及环境变化,为工程应用、海岸管理及规划提供了完备、有效的设计环境. MIKE 21 Flow Model FM 子模块属二维潮流、泥沙数学模型,根据 Boussinesq 假设、静水压力假设、浅水条件和适定边

界条件,通过控制体积法求解由不可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 方程概化的浅水方程<sup>[11-12]</sup>.

水动力模块可以模拟由于各种作用力的作用而产生的水位及水流变化. MIKE 21 潮流模块的基本方程为连续方程和动量方程. MIKE 21 中泥沙模块为水深平均的二维泥沙数学模型,可对波流共同作用下多组粒径、多层底床的泥沙输运、沉积过程进行数值模拟,包括絮凝、干扰沉降和底床固结过程,以及泥沙运移引起的航道冲淤变化.泥沙模型中源项分为冲刷项  $S_E = E(\tau_b/\tau_{ce} - 1)^n$  和沉降项  $s_d = \omega_s c_b p_d$ . 式中参数分别为:海床侵蚀度  $E$ ,剪应力  $\tau_b$ ,冲刷剪应力  $\tau_{ce}$ ,冲刷度  $n$ ,泥沙沉降速度  $\omega_s$ ,近河床泥沙含量  $c_d$ ,以及沉降概率  $p_d$ . 数学模型中其他方程和公式参考文献<sup>[12]</sup>.

## 2 数学模型的建立与验证

### 2.1 数值解法

MIKE 21 FM 子模块在空间上采用有限体积法进行离散,在时间上采用显性欧拉法进行离散.模块有低阶算法(一阶显式欧拉法)和高阶算法(二阶龙格-库塔法)两种算法可供选择.本文在保证计算精度的情况下,选择快速的一阶显式欧拉法<sup>[12]</sup>.

### 2.2 计算范围及网格

模型计算范围:边界向黄骅港西北延伸约 12.2 km,向东南延伸约 14.3 km,向外海延伸 10.9~19.6 km,海向开边界长 24.7 km,面积约 376.3  $km^2$ .计算节点数为 21 859,网格数为 42 793;为提高计算精度,对模型中港口附近区域的网格进行了加密,网格空间最小步长约为 14 m;为提高计算效率,远离港口的外海网格比较稀疏,网格单元面积较大,其空间步长达 870 m.

### 2.3 边界条件、初始条件及参数选取

#### 2.3.1 边界条件

该数学模型总共有四条边界:开边界分别为东北边界、西北边界和东南边界,闭边界为陆域边界.水动力边界一般包括四种类型:陆域边界、水位边界、流速边界和流量边界.本文选择了比较易行的水位边界条件.海域开边界采用潮位过程来控制,侧向固边界采用流速为零的不可滑移条件.为了获取计算区域的开边界条件,本次研究首先建立一个包含该区域的渤海潮流模型,开边界为烟台至大连,由潮位过程控制<sup>[13]</sup>.渤海湾大模型经验证后为黄骅港小模型提供潮位边界条件.

### 2.3.2 初始条件

本数学模型的初始条件主要包括潮位条件、流速条件和含沙量条件. 潮位取计算开始时刻的各边界潮位平均值, 初始流速为零, 初始含沙量为  $0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

### 2.3.3 相关参数的选取

计算时间步长为  $30 \text{ s}$ , 曼宁系数变化范围  $0.011 \sim 0.016$ , 滩地采用干湿边界控制滩地涨落潮期间的出露和淹没, 分别取值为  $h_{\text{dry}}=0.005 \text{ m}$ ,  $h_{\text{flood}}=0.05 \text{ m}$  和  $h_{\text{wet}}=0.1 \text{ m}$ , 当网格的计算水深小于  $h_{\text{dry}}$  表示干单元, 当网格的计算水深介于  $h_{\text{flood}}$  与  $h_{\text{wet}}$  之间表示半干单元, 当网格的计算水深大于  $h_{\text{wet}}$  表示湿单元. 由于不同中值粒径的黄骅港泥沙呈现明显差异的沉降特性<sup>[14]</sup>, 根据文献资料取泥沙平均沉降速度为  $0.0005 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 经过计算和率定调整, 临界冲刷切应力取值范围为  $0.42 \sim 1.55 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ , 临界淤积切应力取临界冲刷应力值的  $4/9$ <sup>[15]</sup>.

### 2.4 模型的率定和验证

潮位验证点的位置见图 1, 潮位验证资料采用 2011 年 9 月 27 日 8:00 至 9 月 28 日 9:00 实测夏季大潮潮位过程<sup>[16]</sup>, 从大潮潮位验证图(图 2)可以看出模拟的潮位和实测的潮位变化趋势基本一致. 潮位过程也显示黄骅港海域属于不规则半日潮, 涨潮过程持续  $6 \text{ h}$  左右, 落潮过程持续约  $7 \text{ h}$ .

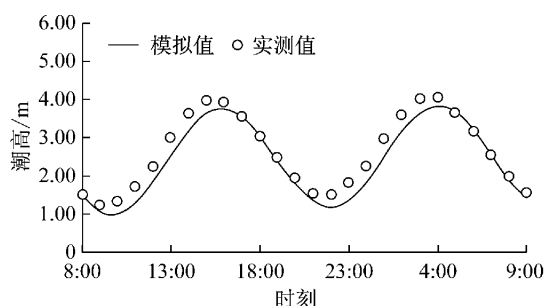


图 2 黄骅港夏季大潮潮位过程验证

Fig. 2 Tidal verification during a summer spring tide of Huanghua Port

潮流、泥沙验证资料采用 2011 年 9 月 27 日 8:00 至 9 月 28 日 9:00 时在黄骅港区域布测的 5 个站点(HH0, HH1, HH2, HH3, HH4)的同步实测过程<sup>[16]</sup>, 测站点如图 1 所示. 图 3 为两个典型站点(HH1, HH3)的大潮流速、流向和泥沙二维验证过程, 结果显示数学模型模拟的潮流过程与实测的潮流过程比较吻合, 涨、落潮流的流速大小和流向均得到了较好的验证, 同时也说明计算泥沙浓度与实测过程较一致.

## 3 潮流场对工程的响应分析

图 4 为当前工程下大潮一个潮周期整个黄骅港模拟区域的涨落急时刻和涨落憩时刻的流场图, 图中横纵坐标轴采用大地坐标系. 根据流场图可以得出以下分析结论:

落憩时刻(图 4a), 煤码头防波堤南侧的水流向西北方向流动, 落潮转涨潮后受到南防波堤的阻挡作用, 水流绕过南防波堤, 在堤南侧向海流动形成的沿堤流, 在口门处形成横流. 这一绕流作用使得港口南侧泥沙的离岸搬运时间延长.

涨憩时刻(图 4c), 综合港区北侧的水流从涨潮转向落潮向东南方向流动, 水流受到了综合港北防波堤的阻挡作用绕过该堤, 在堤北侧呈现海向沿堤流, 到达口门处形成横流, 因此, 港口北侧泥沙的离岸搬运时间由于绕流作用被延长.

涨急时刻(图 4b)和落急时刻(图 4d), 不管是综合码头、煤码头还是滨州港, 从流场矢量图上可以明显地看到: 由于防波堤的作用, 近工程区潮流呈现沿堤流特性, 流向几乎垂直于岸线. 涨急时刻防波堤内侧流向沿着航道向岸线, 但是外海域的流向基本没变, 遵循大致涨潮向西的规律; 落急时刻防波堤内侧流向外海, 外海域流向遵循大致落潮向东的规律.

表 1 为大潮期间实测与模拟平均涨落潮流流速的对比, 涨潮平均流速在  $0.32 \sim 0.49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 落潮平均流速在  $0.39 \sim 0.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 可以看出最大平均流速误差为  $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (HH3 落潮), 最大平均流向误差为  $-12^\circ$  (HH3 落潮), 这是由于 HH3 测站点在双导堤前端, 处于深水航道附近, 水流流态为复杂的旋转流, 总体来说各点的涨落潮流速相差不大. 黄骅港涨潮平均流向在  $243^\circ \sim 269^\circ$  之间变化, 平均为  $256^\circ$ , 落潮平均流向在  $58^\circ \sim 87^\circ$  之间变化, 平均为  $75^\circ$ , 基本上遵循涨潮向西, 落潮向东的往复运动.

## 4 泥沙输运场对工程的响应分析

图 5 和图 6 分别为黄骅港 2011 年工程在无波浪和有常浪情况下的涨急和落急含沙量场, 根据 7 号平台( $5 \text{ m}$  等深线附近)13 年实测数据<sup>[6]</sup>分析, 黄骅港港区东北偏东向  $18^\circ$  波浪的出现频率为  $41.2\%$ , 特征波高  $H_{\text{sig}}=0.73 \text{ m}$ , 对应波周期  $3.4 \text{ s}$ , 以此作为常浪情况. 从图 5a 和图 6a 可以看到, 在没有加波浪的情况下, 黄骅港港区周围泥沙含量变化不明显,

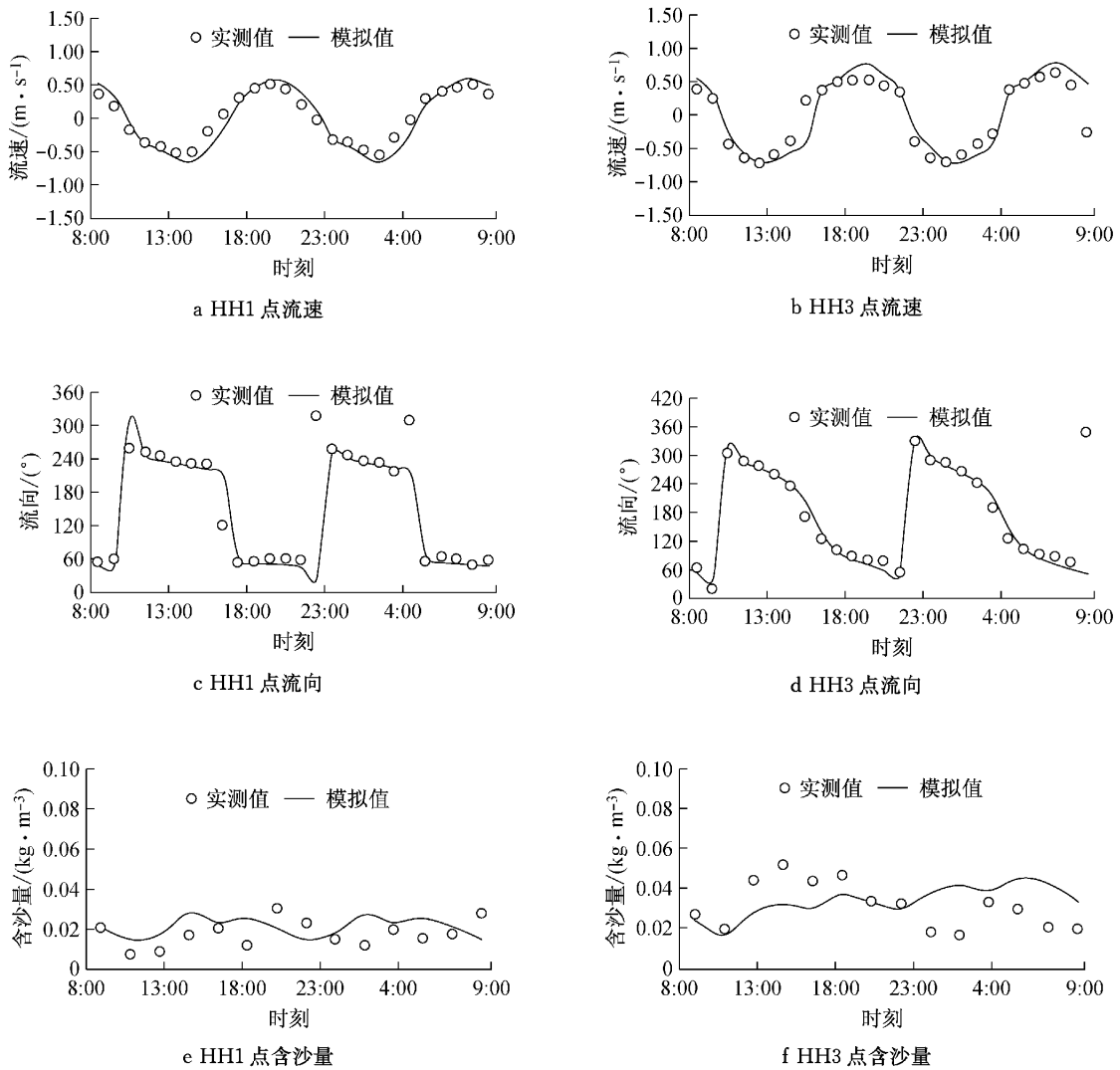


图 3 夏季大潮流速、流向、含沙量二维验证

Fig.3 Two-dimensional verification of velocity magnitudes, directions and sediment concentration during a summer spring tide

表 1 大潮期间涨、落潮平均流速、流向比较

Tab.1 The comparison of average velocity magnitudes and directions between flood and ebb period during a summer spring tide

| 测站点 | 平均涨潮流                       |                       |                             |                       |                             |                       | 平均落潮流                       |                       |                             |                       |                             |                       |
|-----|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
|     | 实测                          |                       | 模拟                          |                       | 差值                          |                       | 实测                          |                       | 模拟                          |                       | 差值                          |                       |
|     | 流速/<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 流向/<br>( $^{\circ}$ ) | 流速/<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 流向/<br>( $^{\circ}$ ) | 流速/<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 流向/<br>( $^{\circ}$ ) | 流速/<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 流向/<br>( $^{\circ}$ ) | 流速/<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 流向/<br>( $^{\circ}$ ) | 流速/<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 流向/<br>( $^{\circ}$ ) |
| HH0 | 0.35                        | 260                   | 0.44                        | 258                   | 0.09                        | -2                    | 0.33                        | 76                    | 0.39                        | 87                    | 0.06                        | 11                    |
| HH1 | 0.32                        | 252                   | 0.38                        | 245                   | 0.06                        | -7                    | 0.34                        | 64                    | 0.41                        | 58                    | 0.07                        | -6                    |
| HH2 | 0.37                        | 246                   | 0.45                        | 243                   | 0.08                        | -3                    | 0.32                        | 69                    | 0.41                        | 65                    | 0.09                        | -4                    |
| HH3 | 0.49                        | 277                   | 0.52                        | 269                   | 0.03                        | -8                    | 0.44                        | 92                    | 0.56                        | 80                    | 0.12                        | -12                   |
| HH4 | 0.40                        | 258                   | 0.49                        | 263                   | 0.09                        | 5                     | 0.39                        | 78                    | 0.45                        | 84                    | 0.06                        | 6                     |

最大含沙量在  $0.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  左右, 港区近岸侧的含沙量比外海大. 潮流掀沙的能力有限, 底部的泥沙不能大量悬扬. 计算区域增加常浪以后(图 5b 和 6b), 整个区域的泥沙含量迅速增加, 特别是在波浪破碎带附近, 底部泥沙大量悬扬, 最大含沙量达  $3 \text{ kg} \cdot$

$\text{m}^{-3}$  左右, 潮流携带着底部高含沙水体沿防波堤输运, 在口门横流的作用下泥沙易于在口门附近淤积; 同时高含沙水体跨过外航道时也会淤积, 这将加大航道整治难度.

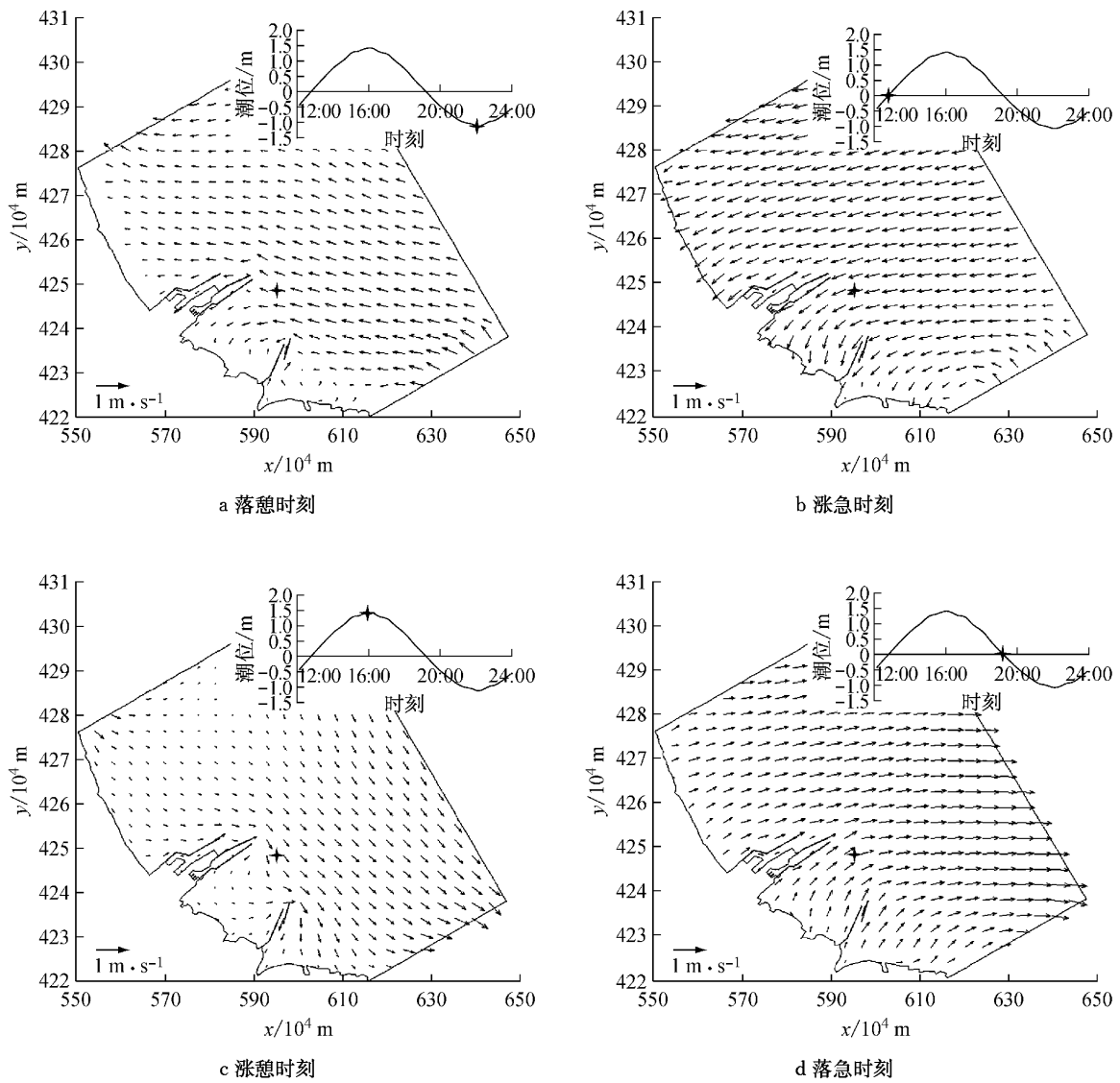


图 4 夏季大潮典型时刻流场

Fig. 4 Flow fields during a summer spring tide

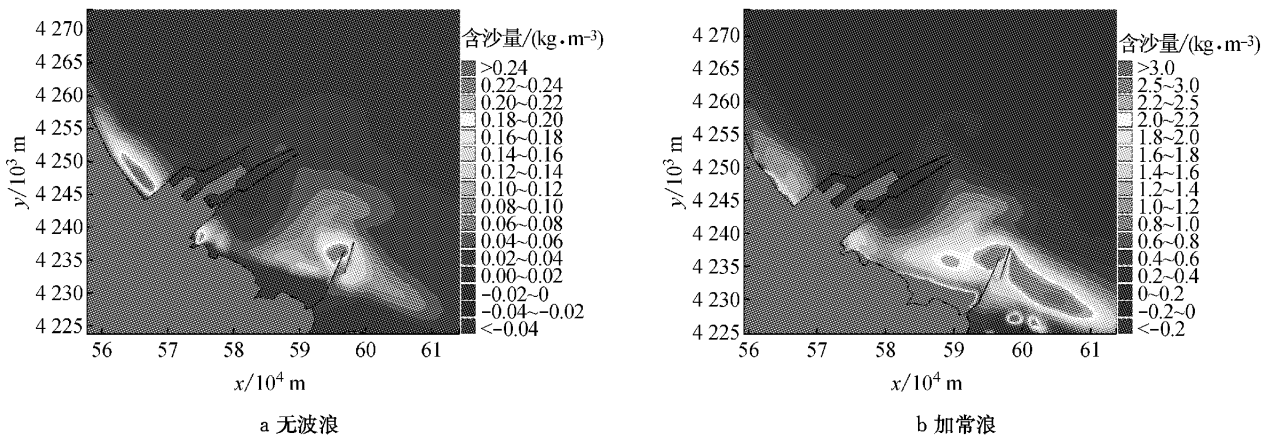


图 5 涨急含沙量场

Fig. 5 Sediment concentration distributions at the moment of maximum flood flow

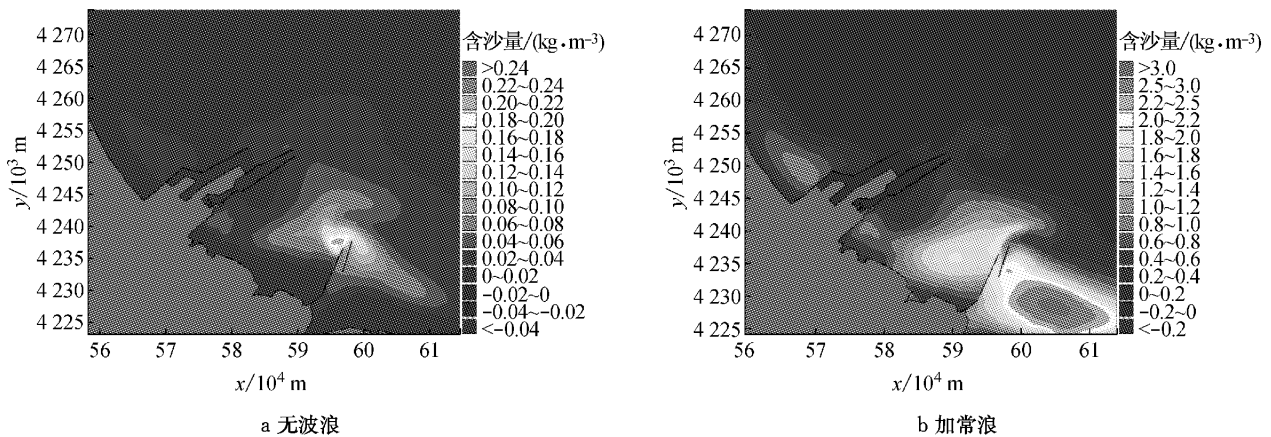


图 6 落急含沙量场

Fig. 6 Sediment concentration distributions at the moment of maximum ebb flood flow

## 5 结论

黄骅港地理位置和泥沙的特性决定了港区泥沙输运的复杂性,本文利用 MIKE 21 FM 软件对黄骅港工程和邻近海域建立了平面二维潮流、泥沙数学模型,通过实测潮位、潮流和流向以及泥沙浓度对模型进行了率定和验证,该数学模型较好地模拟了整个工程区域的流场变化和含沙量的分布. 2011 年工况下黄骅港海域潮流场的变化以及携沙水流对航道的的影响分析表明:

(1) 流场大体上遵循涨潮向西,落潮向东的往复流动,且涨落潮平均流速接近,工程对远区的流场影响小,工程近区的流场变化大.

(2) 防波堤能明显改变水流的流向,形成绕流,靠近防波堤侧的水流较多为沿堤流,并在防波堤口门处形成横流,同时把堤两侧分割成相对独立的区域.

(3) 在无波浪的情况下,港区海域底床的泥沙很难启动,水体中含沙量低,潮流输沙量少.

(4) 有波浪时,港区海域底部泥沙大量悬浮,在近岸及破波带附近最为明显,底部高含沙水体沿堤随水体向海侧输运,易在口门和外航道淤积.

### 参考文献:

- [1] Ghosh K L, Prasad N, Joshi B N, *et al.* A study on siltation in access channel to a port[J]. *Coastal Engineering*, 2001, 43 (1): 59.
- [2] SHI Changxing. Causes for continuous siltation of the lower Yellow River[J]. *Geomorphology*, 2005, 68: 213.
- [3] 谢东风,高抒,潘存鸿,等. 杭州湾沉积物宏观输运的数值模拟[J]. *泥沙研究*, 2012(3): 51.

XIE Dongfeng, GAO Shu, PAN Cunhong, *et al.* Modelling macro-scale suspended sediment transport patterns in Hangzhou Bay, China[J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(3): 51.

- [4] 潘灵芝,丁平兴,葛建忠,等. 长江口深水航道整治工程影响下北槽河床冲淤变化分析[J]. *泥沙研究*, 2011(5): 51.  
PAN Lingzhi, DING Pingxing, GE Jianzhong, *et al.* Analysis of influence of deep waterway project on morphological change in north passage of Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2011(5): 51.
- [5] 英晓明,孔亚珍. 洋山港南北汉道水体和悬沙输运变化[J]. *泥沙研究*, 2012(4): 58.  
YING Xiaoming, KONG Yazhen. Variation of water and suspended sediment transport in north and south inlets of Yangshan Harbor[J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(4): 58.
- [6] 神华集团黄骅港建设指挥部,交通部天津水运工程科学研究所. 黄骅港泥沙淤积研究资料汇编[R]. 天津:交通部天津水运工程科学研究所, 2003.  
Construction Headquarters of Shenhua Group in Huanghua Port, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering. Data compilation of research for sediment deposition in Huanghua Port[R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering of the Ministry of Transport, 2003.
- [7] 曹祖德,杨华,候志强. 粉沙质海岸的泥沙运动和外航道淤积[J]. *水道港口*, 2008, 29(4): 247.  
CAO Zude, YANG Hua, HOU Zhiqiang. Sand movement of silt-sandy beach and the outer navigation siltation[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2008, 29(4): 247.
- [8] 杨华. 黄骅港外航道泥沙问题的治理及其效果[J]. *水道港口*, 2009, 30(4): 233.  
YANG Hua. Regulation and effect on siltation in outer channel of Huanghua Harbor[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2009, 30(4): 233.
- [9] 张庆河,林全泓,秦崇仁,等. 黄骅港海域沿堤流现象遥感图像分析[J]. *中国港湾建设*, 2004(1): 29.  
ZHANG Qinghe, LIN Quanhong, QIN Chongren, *et al.* Investigation of currents along breakwater for Huanghua Port with help of satellite remote sensing images[J]. *China Harbour Engineering*, 2004(1): 29.

- [10] 张庆河, 王崇贤, 杨华, 等. 黄骅港海域表层泥沙特性及其影响[J]. 中国港湾建设, 2004(4): 14.  
ZHANG Qinghe, WANG Chongxian, YANG Hua, *et al.* Property and influence of sediments on seabed surface around Huanghua Harbour[J]. China Harbour Engineering, 2004(4): 14.
- [11] 冯静. MIKE 21 FM 数值模型在海洋工程环境影响评价中的应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.  
FENG Jing. Application of MIKE 21FM numerical model in environmental impact assessment of ocean engineering [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [12] DHI Hydraulics. MIKE 21 & MIKE 3 flow model hydrodynamic and transport module scientific documentation [R]. [S. l.]: DHI Water & Environment, 2009.
- [13] 冒小丹, 匡翠萍, 潘毅, 等. 潮流对老虎石海滩养护工程响应的数值预测[J]. 海洋地质前沿, 2013, 23(2): 71.  
MAO Xiaodan, KUANG Cuiping, PAN Yi, *et al.* Numerical study on hydrodynamic responses to nourishment project of laohushi beach[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 23(2): 71.
- [14] 张庆河, 张娜, 胡媚, 等. 黄骅港泥沙静水沉降特性研究[J]. 港工技术, 2005(1): 1.  
ZHANG Qinghe, ZHANG Na, HU Mei, *et al.* Settling properties of Huanghua Harbour sediment in still water[J]. Port Engineering Technology, 2005(1): 1.
- [15] 曹祖德, 王运洪. 水动力泥沙数值模拟[M]. 天津: 天津大学出版社, 1994.  
CAO Zude, WANG Yunhong. Hydrodynamic and sediment numerical simulation[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1994.
- [16] 匡翠萍, 姚凯华, 邓凌, 等. 渤海新区近岸海洋水动力环境数值模拟研究报告[R]. 上海: 同济大学, 2012.  
KUANG Cuiping, YAO Kaihua, DENG Ling, *et al.* Research report on numerical simulation of nearshore marine hydrodynamic environment in Bohai New District [R]. Shanghai: Tongji University, 2012.

~~~~~  
(上接第 1515 页)

- [11] Bea RG. Pile capacity for axial cyclic loading [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992, 118(1): 34.
- [12] Aldouri RH, Poulos H G. Predicted and observed cyclic performance of piles in calcareous sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, 121(1): 1.
- [13] 徐和, 陈竹昌, 任陈宝. 在轴向循环荷载作用下砂土中模型桩的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 64.  
XU He, CHEN Zhuchang, REN Chenbao. Model test of pile under axial cyclic loading in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 64.
- [14] 黄雨, 柏炯, 周国鸣, 等. 单向循环荷载作用下饱和砂土中单桩沉降模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1440.  
HUANG Yu, BAI Jiong, ZHOU Guoming, *et al.* Model tests on settlement of a single pile in saturated sand under unilateral cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1440.
- [15] 朱斌, 任宇, 陈仁朋, 等. 竖向压循环荷载作用下单桩承载力及累积沉降特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 186.  
ZHU Bin, REN Yu, CHEN Renpeng, *et al.* Model test on bearing capacity and accumulated settlement of single pile subjected to axial cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 186.
- [16] Poulos H G, Davis E H. Pile foundation analysis and design [M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [17] Randolph MF, Wroth CP. An analysis of the vertical deformation of pile groups [J]. Geotechnique, 1979, 29(4): 423.
- [18] 梁发云, 姚国圣, 陈海兵, 等. 土体侧移作用下既有轴向受荷桩性状的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1063.  
LIANG Fayun, YAO Guosheng, CHEN Haibing, *et al.* Model tests on behavior of axially loaded piles subjected to lateral soil movement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1063.
- [19] 中华人民共和国建设部. JGJ 106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ 106—2003 Technical code for testing of building foundation piles [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.