

# 泥沙输运与海床演变对曹妃甸港口工程的响应特征

匡翠萍<sup>1</sup>, 戚健文<sup>1</sup>, 蒋茗韬<sup>1</sup>, 顾 杰<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要:** 采用 Delft3D 软件建立了波流共同作用下曹妃甸海域三维泥沙输运与海床演变数学模型, 使用 2012 年实测潮流和含沙量对模型进行验证. 运用验证后的数学模型对 2012 年曹妃甸工程的泥沙输运和海床演变进行模拟, 从而分析泥沙输运与海床演变对港口工程的响应特征, 得出以下结论: 曹妃甸海域含沙量较低, 小于  $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 呈现在平面上为西部高、东部低, 滩地高于外海, 在垂向上为由表层至底层增大的特点; 甸头、西部滩地和东坑坨海域为主要冲刷区, 西部深槽和东部老龙沟深槽为主要淤积区. 海床一年的冲淤演变总体在 0.5 m 以内, 海床是动态稳定的, 冲刷率和淤积率均是港口运行可接受的.

**关键词:** 潮流; Delft3D; 泥沙输运; 海床演变; 曹妃甸

**中图分类号:** TV148

**文献标志码:** A

## Responses of Sediment Transport and Bed Evolution to Caofeidian Harbour Project

KUANG Cuiping<sup>1</sup>, QI Jianwen<sup>1</sup>, JIANG Mingtao<sup>1</sup>, GU Jie<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** A 3D numerical model of sediment transport and bed evolution of Caofeidian sea area under the combined forces of tidal current and wave was established based on Delft3D. This model was validated with the field measured tidal flow and sediment concentration in 2012. The validated model was used to simulate flow and sediment concentration fields and morphology evolution under the scenario of 2012. The responses of sediment transport and bed evolution were analyzed. The results show that: the sediment concentration in Caofeidian sea area is low, normally less than  $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , its horizontal distribution presents higher in the west than in the east, and also in the nearshore and shoal areas than in the offshore area, while vertically increases from the surface to the bottom generally; the main erosions occur around

Caofedian foreland, nearshore and shoals in the west and Dongkengtu, the severe sedimentations appear in the western deep channels and Laolonggou creek. In general, the annual bed evolution is less than 0.5m and the morphology is stable with acceptable erosion and sedimentation rates.

**Key words:** tidal current; Delft3D; sediment transport; bed evolution; Caofeidian Harbour

曹妃甸位于渤海湾的西北岸, 距离唐山市约 70 km. 曹妃甸水深岸陡, 岛前 500 m 水深即达 25 m, 30 m 等深线水域东西长约 6 km、南北宽约 5 km, 是渤海湾唯一不需要开挖航道和港池即可建设 30 万吨级大型泊位的“钻石级”港址, 为大型深水港口建设和临港产业发展提供了优越条件<sup>[1]</sup>. 曹妃甸港口工程于 1992 年开始预研, 2003 年开始建设, 目前仍在建设之中. 在此期间, 许多学者对这一区域的水动力和泥沙问题进行了相关研究.

杨华等<sup>[2]</sup>通过对工程前曹妃甸海域实测水文泥沙资料、卫星遥感资料及历年地形资料的分析, 论证了曹妃甸滩槽多年来保持基本稳定、局部略有冲刷的基本特点. 龚政等<sup>[3]</sup>基于平面二维潮流数学模型, 采用 2006 年实测资料, 模拟了围垦工程前后曹妃甸海域的潮流场, 预测正常天气年淤积强度和大风天港内泥沙淤积厚度. 港池计算年淤积厚度小于 10 cm, 在大风浪作用下, 泥沙淤积厚度在 5 cm 以内. 陆永军、左利钦和季荣耀等<sup>[4-9]</sup>分析了曹妃甸海域潮流、波浪和泥沙冲淤的特点, 建立了波流作用下的二维泥沙数学模型, 研究了曹妃甸深水港开发引起的潮流泥沙和冲淤问题, 探讨了两个潮汐深槽的主要动力形成机制和老龙沟拦门沙航道回淤的问题. Kuang 等<sup>[10-12]</sup>利用实测资料分析了曹妃甸区域的潮流泥沙特点, 建立了一个二维的波流相互作用下的泥沙输运模型, 研究了 2008 年工程对该区域水动

收稿日期: 2014-02-21

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, 博士生导师, 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, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为海洋环境. E-mail: jgu@shou.edu.cn

力、泥沙和底床冲淤演变的影响。与未开工时相比,2008 年工况下,甸头前沿流速增加,老龙沟流速减弱,甸头前沿区域呈现冲刷态势。

遥感及实测数据分析也是一种常用的研究方法。杜东等<sup>[13]</sup>通过实地调查及取样测试,获得了2009 年曹妃甸区域 49 站位不同深度的悬浮泥沙含量,并初步建立了悬浮泥沙浓度在空间上的相关性经验模型。崔娟<sup>[14]</sup>以水体悬浮泥沙浓度光谱观测数据为依据,建立曹妃甸近岸海域悬浮泥沙遥感反演模型,采用两期中分辨率成像光谱仪遥感数据,分析近岸水体悬浮泥沙浓度变化。侯庆志等<sup>[15]</sup>利用 4 景专题制图仪及卫星影像,进行了渤海湾曹妃甸海域近年来围填海工程造成的岸线变化监测和水动力环境及冲淤演变影响分析。

曹妃甸港口大规模的建设会对水动力及泥沙环境产生一定的影响,并且工程的不同阶段其影响程度存在差异。但目前的实测资料和相关研究主要集中在2009 年以前的工况,且以二维模型为主;对于近年工程状况下的研究较少。因此,水文泥沙对现阶段工程下的响应的研究具有重要的价值和意义。本课题组和合作单位于2008—2012 年对曹妃甸海域潮流和泥沙进行了连续观测,利用观测资料及 Delft3D 软件建立了三维潮流泥沙数学模型,详细分析了曹妃甸大规模围垦工程的响应特征。

## 1 数学模型的建立与验证

### 1.1 潮流、泥沙数学模型简介

Delft3D 模型是目前国际上较为先进的水流、泥沙和水质模型之一,具有计算二维和三维水流、水质、生态和动床泥沙等诸多功能。曾用于许多国家河口治理的研究,获得了国际水利界的认同<sup>[16]</sup>。Delft3D 包括水动力模块、波浪模块、泥沙输移模块和动力地貌模块。潮流模块的控制方程主要为连续性方程和动量方程,模型通过差分方法,联立偏微分方程并结合实际的初始和边界条件求解所需的变量。泥沙侵蚀率和泥沙沉积率使用 Partheniades 和 Krone 方程来模拟。床面变化直接决定于泥沙的淤积通量和冲刷通量<sup>[17]</sup>。

### 1.2 计算范围及网格

曹妃甸的位置如图 1 所示。为保证计算边界不受工程建设的影响,数学模型开边界设在曹妃甸以东,距离为曹妃甸工程区离岸距离的 6 倍左右。模型南北长 160 km,东西宽 140 km,包括了天津港、京唐港、黄骅港和曹妃甸等港口,网格总数为 425×285,网格空间步长最大为 1 200 m,最小为 200 m。网格

垂向采用  $\sigma$  网格,分为均匀的 10 层。模型时间步长为 2 min。

### 1.3 模型参数设置

模型边界条件采用潮位过程,根据边界上潮位的变化特征,将边界分为 3 段。边界条件采用大小模型耦合的方式从渤海大模型计算取得,渤海大模型边界为大连—烟台连线,覆盖整个渤海区域,模型采用正交曲线网格,模型网格总数 450×350。

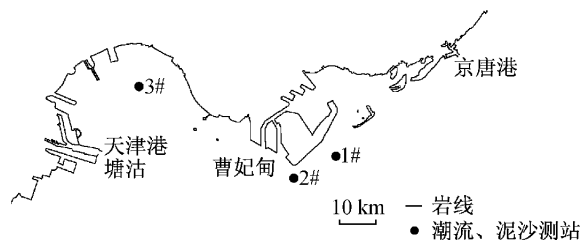


图 1 计算区域位置示意图

Fig.1 Location of study area

模型水平紊动黏滞系数取  $20 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,曼宁系数根据底部泥沙粒径分布与水深资料计算,分区域给出,取值范围为 0.013~0.019。滩地的干湿交换过程采用动边界处理,界限水深取 0.1 m。

床面泥沙干密度取  $952 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,泥沙沉降速度为  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。底部泥沙中值粒径  $d_{50}$  的分布,主要采用 2005 年和 2006 年的实测粒径资料插值得到。

临界冲刷切应力  $\tau_{ce}$  由下式计算:

$$\tau_{ce} = \rho u_{cr,e}^2 \quad (1)$$

式中: $\rho$  为水的密度; $u_{cr,e}$  为临界起动流速。相应的断面起动平均流速  $v_0$  由文献<sup>[18]</sup>公式计算。

$$v_0 = \frac{m}{m+1} \left( \frac{H}{d_{50}} \right)^{1/m} \sqrt{3.2 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d_{50} + \left( \frac{\gamma'}{\gamma_0} \right)^{10} \frac{c}{\rho d_{50}}} \quad (2)$$

式中: $m$  为系数,取 6; $H$  为水深; $\gamma_s$  和  $\gamma$  为泥沙和水的密度,分别取  $2.65 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $\gamma_0$  为泥沙的稳定湿密度, $\gamma_0 = 1.6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $\gamma'$  为淤泥的实际湿密度,取  $\gamma'/\gamma_0 = 1$ ; $c$  为系数, $c = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1}$ ;经计算和率定调整,临界冲刷切应力取值范围为 0.19~1.91  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ,临界淤积切应力取 4/9 的临界冲刷应力值。初始含沙量取  $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

### 1.4 模型的率定和验证

采用 2012 年 10 月 15 日 0:00 至 10 月 16 日 23:00 京唐港和塘沽潮位观测站的潮位资料以及 2012 年 10 月 15 日 5:00 至 10 月 16 日 5:00 测站 1#(垂线平均),2# 表层(0.1H)、中层(0.6H)、底层(0.9H)和 3#(垂线平均)的实测潮流资料对模型进行验证。图 2 为计算潮位过程与实测潮位过程比较,图 3 为各测点计算潮流过程与实测潮流过程比较。

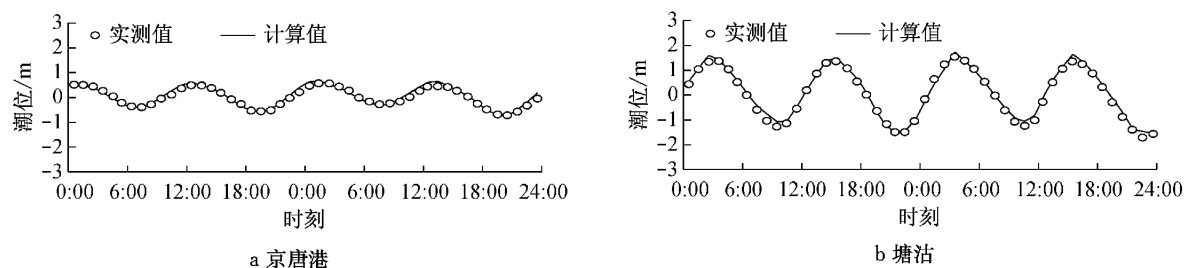


图 2 潮位验证(2012 年 10 月 15—16 日)

Fig.2 Verification of tidal level(Oct.15—16, 2012)

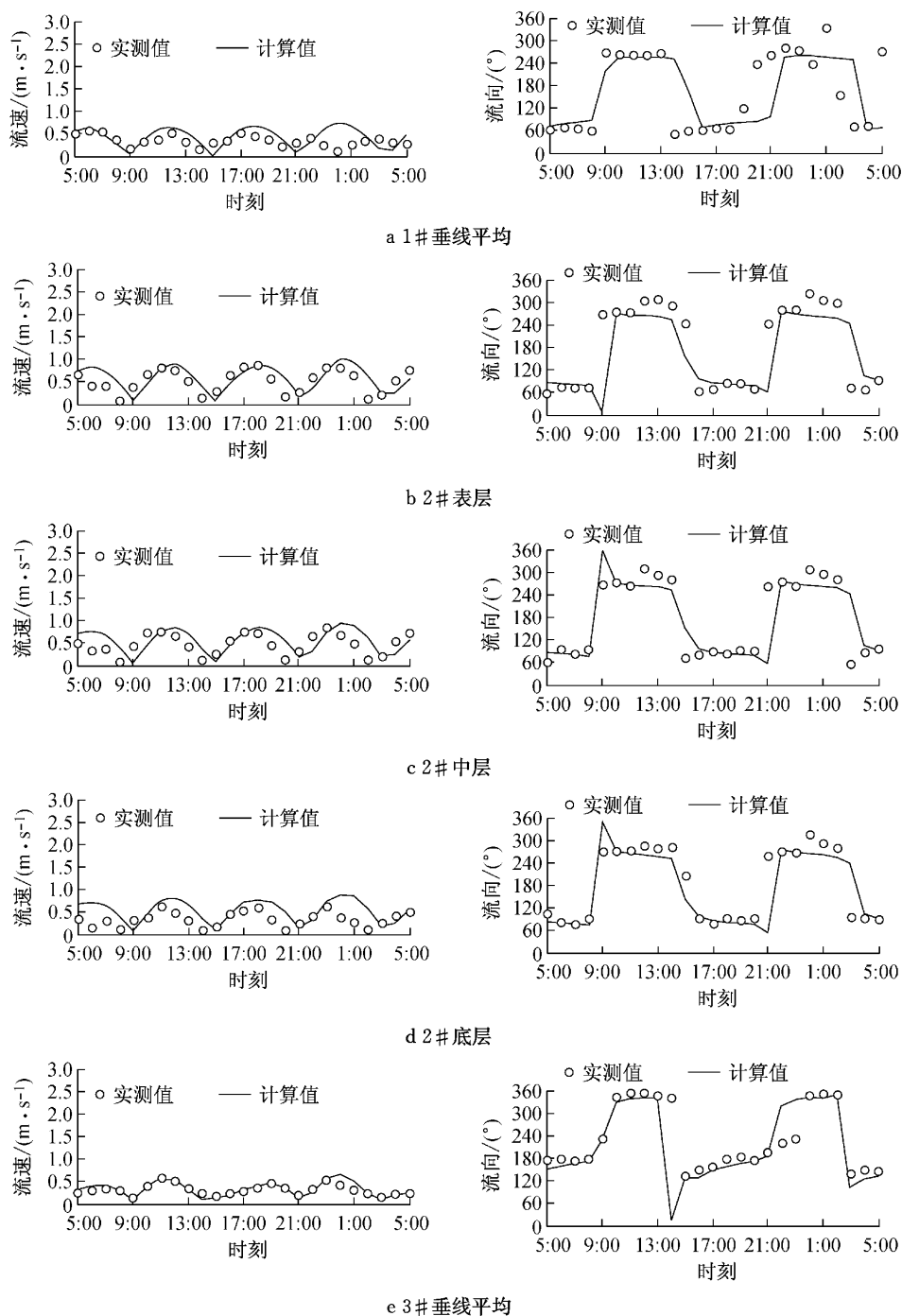


图 3 曹妃甸海域部分流速、流向验证(2012 年 10 月 15—16 日)

Fig.3 Verification of tidal current velocity and direction (Oct.15—16, 2012)

使用 Wilmott<sup>[19]</sup>所提出的统计学方法分别对 3 个测点各层流速流向的计算结果进行评价. 计算所得的模型效率系数的范围在 0.47 至 0.93 之间, 评价结果为好至极好. 表明模型能够较好地体现出研究区域的潮流特征.

由于曹妃甸海域的波浪的实测资料来源于甸头南侧 26 m 水域等深线处的单个测点, 所以波浪模型的验证主要通过比较测点处波高、波周期的模拟值和实测值来进行. 考虑到海床演变长期冲淤模拟的需要, 选定 SE 偏东 6° 和 SW 偏西 5° 波浪为本次模拟的波浪方向<sup>[5]</sup>. SE 偏东 6° 波的  $H_{1/10}$  波高(波高最大的十分之一波的平均波高)为 0.77 m, SW 偏西 5° 波的波高为 0.57 m<sup>[6]</sup>. 通过波高与周期计算关系<sup>[20]</sup>, 得出该处 SE 偏东 6° 波对应的平均波周期为 2.50 s, SW 偏西 5° 波对应的平均波周期为 2.23 s. 甸头南侧 26 m 水域等深线处, SE 偏东 6° 波下, 计算得到的波高为 0.77 m, 波周期为 2.53 s; SW 偏西 5° 波下, 计算得到的波高为 0.57 m, 周期为 2.24 s. 模拟波高和波周期均与实际值基本一致.

为了验证泥沙模型的合理性, 采用 2012 年 10 月 15 日 5:00 至 10 月 16 日 5:00 测站 1#(垂线平均)、2#表层(0.1H)、中层(0.6H)、底层(0.9H)和 3#(垂线平均)的实测含沙量与计算的含沙量进行比较. 计算时波浪取 SE 偏东 6° 向波浪. 图 4 为潮流与波浪耦合作用下, 测点各层含沙量计算值与实测值的比较. 同样使用 Wilmott<sup>[19]</sup>的统计学方法分别对 3 个测点各层含沙量的计算结果进行评价. 模型效率系数的范围在 0.34 至 0.62 之间, 评价结果为好与很好. 表明模型能够较好地体现研究区域的泥沙特征.

## 2 泥沙场对工程的响应

图 5 和图 6 分别为模型计算的 2012 年波浪与潮流耦合下大潮涨急和落急垂线平均含沙量场.

计算结果表明, 曹妃甸海域整体悬沙含沙量较低, 基本低于  $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . 由于甸头的挑流作用, 甸头西部流速普遍大于东部. 因此, 含沙量分布呈现西部高, 东部低, 滩地高于外海的特点. 西部近岸海域的含沙量在涨落急时刻约为  $0.15 \sim 0.20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 并向外海逐渐减小至  $0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  以下. 甸头附近的含沙量相对较小, 涨急时刻为  $0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  左右, 落急时刻由于潮流方向向东, 西部泥沙随潮流扩散至甸头附近, 落急时刻含沙量比涨急时刻稍高,

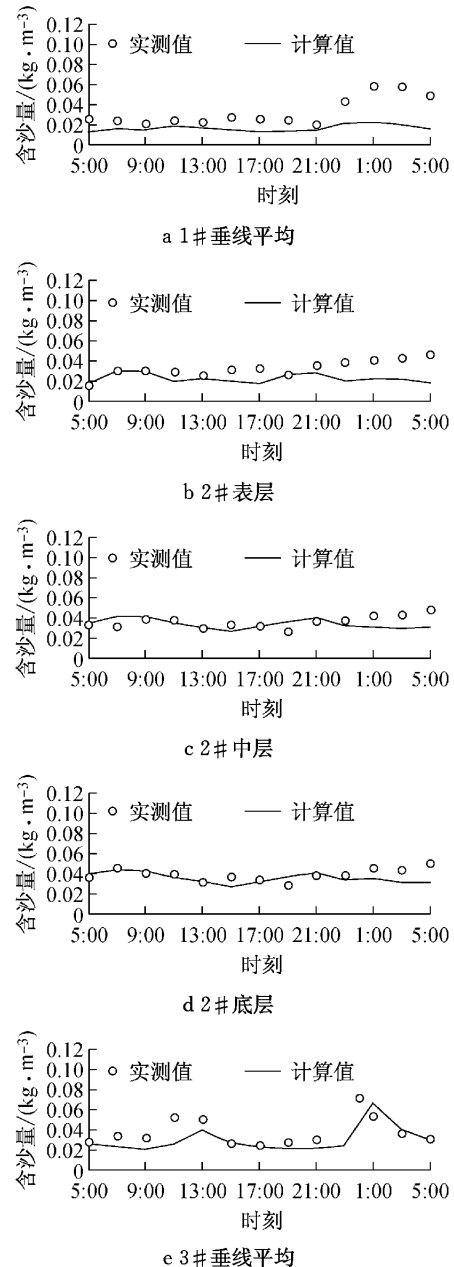


图 4 曹妃甸海域部分含沙量验证

Fig. 4 Verification of sediment concentration

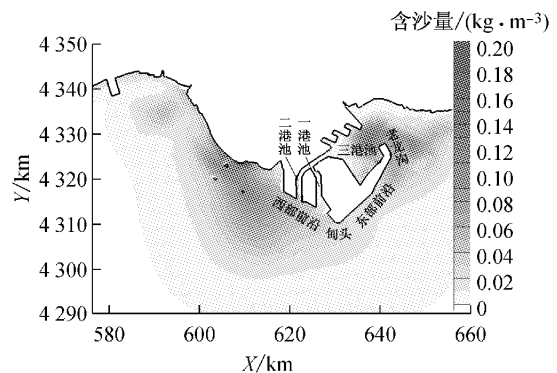


图 5 涨急时刻垂线平均含沙量分布

Fig. 5 Depth averaged sediment concentration field during flood flow

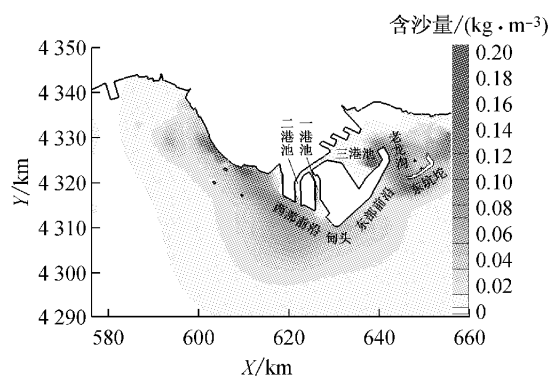


图 6 落急时刻垂线平均含沙量分布

Fig. 6 Depth averaged sediment concentration field during ebb flow

为  $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  左右. 东部三港池和老龙沟区域附近的水流受到工程的阻碍作用, 含沙量相对较高, 涨落急时刻在  $0.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  左右.

由于研究区域的潮流主要为东西向的往复流, 外海和潮沟内的悬沙以平行于岸线的纵向运动为主. 而近岸边滩和浅滩水域的泥沙受到不同含沙量的影响, 主要以自岸向海的横向运动为主. 研究区域的涨潮平均含沙量略大于落潮平均含沙量. 且含沙量由表层至底层依次增大.

### 3 海床冲淤对工程的响应

海床冲淤演变的计算中考虑了潮流与多年平均波浪要素的共同造床作用. 由甸头南侧 26 m 水域等深线处的测点波浪资料分析, SW 偏西  $5^\circ$  波和 SE 偏东  $6^\circ$  波分别占 27.6% 和 47.4%, 其余为潮流作用下的造床贡献<sup>[5]</sup>.

图 7 为曹妃甸区域 2012 年工程波流耦合情况下 1 年冲淤分布预测图. 冲刷区域主要集中在流速较大和地形变化较明显的区域, 即曹妃甸甸头、西部滩地和东坑坨附近. 而西部深槽和东部老龙沟区域为主要的淤积区域.

在 2012 年工程情况下, 曹妃甸甸头前 0~3 km 范围内 1 年后冲刷深度 0.04~0.07 m, 甸头 5 km 外冲刷甚微. 甸头西侧 1 年后冲刷深度为 0.02~0.05 m; 西部前沿区 0~3 km 范围内 1 年后淤积厚度为 0.03~0.11 m, 而 5~6 km 外转为冲刷, 1 年后最大冲刷深度为 0.1 m. 一港池口门附近最大淤积厚度为 0.07 m. 曹妃甸西部滩地和东坑坨近处 1 年后出现 0.21 m 和 0.43 m 左右的冲刷. 而东坑坨附近的冲刷使得老龙沟深槽出现淤积, 1 年后淤积厚度为 0.11~0.24 m. 西部滩地前部的深槽出现淤积, 1

年后淤积厚度为 0.09~0.16 m.

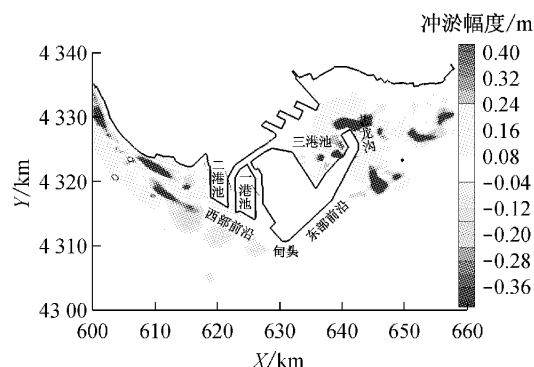


图 7 曹妃甸 2012 年工程下 1 年的海床冲淤分布

Fig. 7 Distribution of annual bed evolution under 2012 engineering scenario

总体来看, 在曹妃甸 2012 年工程的影响下, 海床演变基本处于稳定状态, 对港口运行的影响不大.

在相同的波流条件下, 对 2009 年工程的冲淤情况进行了计算. 2012 年工况较 2009 年工况, 甸头东侧冲刷变化较小, 甸头西侧淤积减弱; 2012 年工况下, 老龙沟区域淤积程度增加, 冲刷程度减弱, 变化幅度为 0.01~0.12 m; 东部和西部前沿的淤积厚度总体上有所减小, 且减小幅度在 0.03 m 以内; 其余区域的变化不明显.

### 4 结论

本文建立了曹妃甸海域波流共同作用下三维泥沙输运与海床演变数学模型. 潮位、流速、流向和含沙量的计算值与实测值吻合良好, 表明数学模型较为合理, 能够用于计算研究区域的水动力和泥沙环境. 计算结果表明, 2012 年曹妃甸海域的整体悬沙含沙量较低, 含沙量分布西部高, 东部低, 滩地高于外海. 涨潮平均含沙量略大于落潮平均含沙量. 含沙量总体表现出由表层至底层依次增大的趋势.

波流耦合作用下曹妃甸甸头、西部滩地和东坑坨附近为主要的冲刷区域, 而西部深槽和东部老龙沟区域为主要的淤积区域. 海床年最大冲淤幅度基本小于 0.5 m, 稳定性良好. 2012 年工况较 2009 年工况, 除老龙沟区域的冲淤变化幅度最大为 0.1 m 左右外, 其余区域的变化不明显.

### 参考文献:

- [1] 曹妃甸工业区管理委员会. 加快曹妃甸开发建设 努力成为拉动环渤海地区经济发展新引擎[J]. 港口经济, 2008(3): 42.

- The Administration Committee of Caofeidian Industrial District. Expedite the development and construction of Caofeidian area and strive to be the new engine that pull the economic development of Bohai circle areas[J]. *Port Economy*, 2008(3): 42.
- [2] 杨华,赵洪波,吴以喜. 曹妃甸海域水文泥沙环境及冲淤演变分析[J]. *水道港口*, 2005, 26(3): 130.  
YANG Hua, ZHAO Hongbo, WU Yixi. Analysis of hydrodynamic and sediment transport of Caofeidian sea area [J]. *Journal of Waterway and Harbour*, 2005, 26(3):130.
- [3] 龚政,张长宽,陶建峰,等. 曹妃甸粉沙质海岸围垦后港内泥沙研究[J]. *海洋工程*, 2012, 30(1): 112.  
GONG Zheng, ZHANG Changkuan, TAO Jianfeng, *et al.* Siltation in harbor basin after reclamation in Caofeidian silty coast[J]. *The Ocean Engineering*, 2012, 30(1):112.
- [4] 陆永军,季荣耀,左利钦,等. 海湾型潮汐通道中大型深水港开发的水沙问题研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(12): 1426.  
LU Yongjun, JI Rongyao, ZUO Liqin, *et al.* Study on hydrodynamic and sedimentation problems in development of harbors located at inlet of tidal bay [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(12): 1426.
- [5] 陆永军,左利钦,季荣耀,等. 渤海湾曹妃甸港区开发对水动力泥沙环境的影响[J]. *水科学进展*, 2007, 18(6): 793.  
LU Yongjun, ZUO Liqin. JI Rongyao, *et al.* Effect of development of Caofeidian harbor area in Bohai bay on hydrodynamic sediment environment [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(6): 793.
- [6] 陆永军,季荣耀,左利钦. 曹妃甸深水大港滩槽稳定及工程效应研究[J]. *水利水运工程学报*, 2009(4): 33.  
LU Yongjun, JI Rongyao, ZUO Liqin. Stability and engineering effect of shoals and channels in Caofeidian deep-water harbor area [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2009(4):33.
- [7] Lu Y J, Zuo L Q, Ji R Y, *et al.* Effect of development of Caofeidian harbor area in Bohai Bay on hydrodynamic sediment environment [J]. *China Ocean Engineering*, 2008, 22(1): 97.
- [8] Lu Y J, Ji R Y, Zuo L Q. Morphodynamic responses to the deep water harbor development in the Caofeidian sea area, China's Bohai Bay [J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(8): 831.
- [9] 左利钦,季荣耀,陆永军. 离岸沙坝-潟湖海岸拦门沙航道回淤——以渤海湾曹妃甸海域老龙沟拦门沙为例[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 87.  
ZUO Liqin, JI Rongyao, LU Yongjun. Case study of siltation in channel-mouth bar in offshore barrier-lagoon coast [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1):87.
- [10] Kuang C P, Chen S Y, Zhang Y, *et al.* A two-dimensional morphological model based on next generation circulation solver II: Application to Caofeidian, Bohai Bay, China [J]. *Coastal Engineering*, 2011, 59(1): 14.
- [11] Kuang C P, Yao K H, Gu J, *et al.* Analysis on the Tidal Current Characteristics of the Caofeidian Sea Area [C]//1st International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials. Haikou: Trans Tech Publications Ltd, 2011: 3050-3054.
- [12] Kuang C P, Hu Y, Gu J, *et al.* Analysis of the Sediment Characteristics of the Caofeidian Sea Area [C]//1st International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials. Haikou: Trans Tech Publications Ltd, 2011: 3484-3488.
- [13] 杜东,刘宏伟,秦雅飞,等. 河北省曹妃甸近岸海域悬浮泥沙含量分布特征研究[J]. *地质调查与研究*, 2012, 35(2): 189.  
DU Dong, LIU Hongwei, QIN Yafei, *et al.* Study on distribution characteristics of the suspended particulate matter (SPM) concentration in the Caofeidian coastal area [J]. *Geological Survey and Research*, 2012, 35(2): 189.
- [14] 崔娟. 曹妃甸近岸海域悬浮泥沙浓度遥感动态监测与分析[D]. 西安:长安大学, 2011.  
CUI Juan. Dynamical monitor and analysis of suspended sediment concentration by remote sensing in Caofeidian offshore areas[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [15] 侯庆志,季荣耀,左利钦,等. 曹妃甸海域围填海工程动力地貌环境遥感分析[J]. *水利水运工程学报*, 2013(3): 1.  
HOU Qingzhi, JI Rongyao, ZUO Liqin, *et al.* Remote sensing monitoring and environmental impact analysis of reclamation in Caofeidian sea area [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2013(3): 1.
- [16] 刘曙光,郁微微,匡翠萍,等. 三峡工程对长江口南汇边滩近期演变影响初步预测[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2010, 38(5): 679.  
LIU Shuguang, YU Weiwei, KUANG Cuiping, *et al.* Preliminary prediction on recent topography evolution of Nanhui tidal flat in Yangtze estuary due to Three Gorges project [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2010, 38(5): 679.
- [17] WLI Delft Hydraulics. Delft3D user manual[M]. Delft: WLI Delft Hydraulics, 2006.
- [18] 唐存本. 泥沙起动规律[J]. *水利学报*, 1963(2): 1.  
TANG Cunben. Sediment incipient motion [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1963(2): 1.
- [19] Wilmott C J. On the validation of models [J]. *Physical Geography*, 1981, 2(2): 184.
- [20] 孙连成. 渤海湾西南部风浪关系分析[J]. *水道港口*, 1993, 14(1): 35.  
Sun Liancheng. Analysis of relation between wind and wave in southwest Bohai Bay[J]. *Journal of Waterway and Harbour*, 1993, 14(1): 35.