

# 港口工程建设对渤海湾西南岸水沙动力环境的影响

宋竑霖<sup>1</sup>, 匡翠萍<sup>1</sup>, 梁慧迪<sup>1</sup>, 谢海澜<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170)

**摘要:** 基于 Delft3D 数值模拟软件建立渤海湾西南岸二维潮流、波浪和泥沙输运数学模型. 运用验证合理的模型研究近 20 年的港口工程建设对渤海湾西南岸水沙动力特征的累积影响以及黄骅、滨州两港水沙动力的相互作用. 结果表明, 港口工程建设使渤海湾西南岸逐渐形成 3 个相对独立的海区; 波流耦合作用下, 全潮平均含沙量分布情况基本与纯潮流时相似, 但量值提高近 8 倍. 沿岸流的增强使含沙量等值线趋于与岸线平行, 涨潮输沙量的增加使黄骅港以西, 黄骅、滨州两港之间以及滨州港以东近岸区域的泥沙含量比例重新分配; 总体看来, 连片港口工程建设使渤海湾西南岸逐步达到新的输沙平衡状态. 黄骅港综合港区与滨州港防波堤一期工程(2012 年)与规划工程(2020 年)可分别削弱正常天气、常浪天气下港区泥沙相互运输的影响.

**关键词:** 港口工程; Delft3D; 水动力; 泥沙输运; 波流耦合  
**中图分类号:** TV148 **文献标志码:** A

## Impacts of Construction of Harbor Projects on Hydrodynamic and Sediment Transport Environments in the Southwest of Bohai Bay

SONG Honglin<sup>1</sup>, KUANG Cuiping<sup>1</sup>, LIANG Huidi<sup>1</sup>, XIE Hailan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** A 2DH hydrodynamic and sediment transport numerical model was established based on Delft3D. The validated model was applied to study the cultivated impact of the construction of harbor projects on the characteristics of hydrodynamics and sediment dynamics in the southwest of Bohai Bay and their interaction between Huanghua Harbor and Binzhou Harbor for nearly 20 years. The results indicate that the construction of harbor projects gradually divides the southwest of Bohai Bay into 3 independent regions. Under the wave-current interaction, the distributions of suspended

sediment concentrations (SSC) over a tidal circle are similar to the ones under pure current, but the magnitude increases eight times. The contour of SSC is parallel to the coastline on account of the enhancement of alongshore current while the proportion of nearshore SSC in the west of Huanghua Harbor, middle of Huanghua Harbor and Binzhou Harbor and east of Binzhou Harbor is redistributed on account of the increase of sediment load during flood. Overall, after the construction harbor projects, the southwest part of Bohai Bay gradually reaches its new equilibrium of sediment transport. The project of Huanghua and Binzhou Harbor in 2012 and their planning project in 2020 can reduce the impact of sediment transport between harbors in normal weather and normal wave weather, respectively.

**Key words:** harbor engineering; Delft3D; hydrodynamics; sediment transport; wave-current coupling

沿海地区是人类活动相对密集、经济较为发达的地带, 聚集了全球约 67% 的大中城市与 60% 的人口. 随着经济的快速发展与对土地需求的激增, 人类展开了大规模的滩涂开发活动, 且开发重心不断向外海延伸. 围填海、航道开挖等工程建设虽在一定程度上缓解了人地矛盾, 推动了经济发展, 但肆意违背自然规律, 无序、大规模的滩涂开发导致海域原有水沙环境与海床动态平衡遭到破坏; 海洋生态环境与质量下降; 岸线外推, 滩涂减少, 海岸带防灾减灾能力下降等. 1985—2010 年间, 中国有超过 70% 的围填海工程发生于北方, 而其中 35% 集中在中国经济“第三极”渤海湾<sup>[1]</sup>. 近 10 年来, 渤海湾内曹妃甸、天津港、黄骅港等的迅猛发展带来了大面积的围填海工程与导堤工程建设, 其围填面积超过 1 100 km<sup>2</sup>, 人工岸线增长近 300 km<sup>[2-3]</sup>. 虽然各工程大都在开发建设前进行了海域水动力、泥沙输运及潮滩演变等影响的专题研究, 以将其对海域环境的影响降至

收稿日期: 2016-04-08

基金项目: 国家海洋公益项目(201305003); 中国地质调查局项目(1212011120087)

第一作者: 宋竑霖(1991—), 男, 博士生, 主要研究方向为港口海岸工程. E-mail: 021\_hlsong@tongji.edu.cn

通讯作者: 匡翠萍(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为港口海岸工程. E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

最低,但大量单一工程微弱影响的长期累加可能会使区域整体动力地貌等发生显著改变.相关研究表明,工程连片大规模开发最直接、显著的影响对象即为海岸线,其通过减少纳潮量<sup>[4-5]</sup>、降低潮流动力<sup>[6-8]</sup>,使水动力分布情况改变,进而影响泥沙、污染物运输,破坏原有潮滩冲淤平衡与海洋生态平衡.同时,随着建设强度与规模的不断扩大,工程间的相互影响加剧<sup>[9]</sup>,可导致余流场<sup>[10-11]</sup>、潮波<sup>[12-13]</sup>等的特征显著改变.目前不少学者对工程连片大规模开发的整体影响与累积效应<sup>[14]</sup>展开了初步研究,但对连片港口工程间相互影响的定量分析研究还较为匮乏.

渤海湾西南岸属粉沙淤泥质海域,泥沙平均中值粒径  $d_{50} = 0.030 \sim 0.046 \text{ mm}$ ,黏土质量分数为  $13.0\% \sim 15.3\%$ ,泥沙起动流速小、沉速大、密实快<sup>[15]</sup>,在风浪作用下易发生骤淤,近岸海域环境对工程建设的敏感度较高.坐落于此的黄骅港从 1984 年开始建设至今,形成了  $26.5 \text{ km}$  长、 $8.2 \text{ km}$  宽的半封闭式港区,其在工程建设过程中对邻近海域水沙动力环境特征影响显著<sup>[16]</sup>.随着渤海湾内围填海工程的盛行,距黄骅港以东  $19.8 \text{ km}$  的滨州港海港港区在原有西导堤的基础上于 2005 年开工建设,并计划将其打造成为  $10 \text{ 万 t}$  级的规模化深水港区.由黄骅、滨州两港组成的连片工程势必会对渤海湾西南近岸海域的水动力和泥沙运输以及海床演变等产生综合影响.因此,本文采用 Delft3D 建立渤海湾西南岸二维潮流、波浪、泥沙运输数学模型,基于黄骅港、滨州港典型工况(2003 年、2006 年、2012 年)与规划工况(2020 年)下的潮流场与泥沙场,定量分析近 20 年的港口工程建设对渤海湾西南海域水沙动力特征的累积影响,并探讨黄骅、滨州两港的相互作用.

## 1 数学模型的建立

### 1.1 计算模型

Delft3D 数值模拟软件由荷兰 WL | Delft Hydraulics 研究所开发,可对海岸、河流和河口地区的二维和三维水流、泥沙运输、波浪、水质、底床演变和生态过程进行模拟.不少国内外学者将其运用到砂质( $d_{50} > 0.10 \text{ mm}$ )<sup>[17-18]</sup>、粉沙质( $d_{50} = 0.03 \sim 0.10 \text{ mm}$ )<sup>[19-21]</sup>与淤泥质( $d_{50} < 0.03 \text{ mm}$ )<sup>[22-23]</sup>海岸的泥沙运输研究中,表明 Delft3D 对不同泥沙粒径的模拟均有较强的适用性.

#### 1.1.1 模块介绍

水动力模块由 FLOW 潮流模块和 WAVE 波浪

模块组成.FLOW 潮流模块是 Delft3D 的核心模块,它基于浅水假定和 Boussinesq 假定求解不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程,基本控制方程包含连续方程和动量方程,方程通过交替方向隐式差分法(ADI)在 Arakawa-C 交错网格上求解<sup>[24]</sup>.WAVE 波浪模块采用的是基于波作用量平衡方程的第三代 SWAN 波浪模型<sup>[25-26]</sup>,考虑了波浪折射和绕射、白浪和破碎耗散、非线性波浪相互作用等.SED 泥沙运输模块嵌套于 FLOW 潮流模块中,可用于模拟黏性沙( $d_{50} \leq 0.063 \text{ mm}$ )和非黏性沙( $d_{50} > 0.063 \text{ mm}$ )的运输.黏性沙采用的是 Partheniades 的侵蚀公式和 Krone 的沉积公式<sup>[27]</sup>,非黏性沙则采用 Van Rijn<sup>[28]</sup>基于水深积分的对流扩散方程.对于我国河口海岸地区,取中值粒径或平均粒径作为泥沙代表粒径并采用均匀沙模型进行模拟被证实是可行的.因此,本文泥沙运输模型采用单一组分的黏性泥沙模拟粉沙淤泥质海岸的悬沙运输.

#### 1.1.2 各模块间的耦合计算

如图 1 所示,本次研究采用 Delft3D 水动力模块的波流双向耦合模式(two-way coupling),先由 FLOW 潮流模块计算得到水位和流速并通过耦合文件中输入 WAVE 波浪模块,后者计算得到波高、波向等波浪参数,同时将辐射应力、底部切应力、质量与动量通量等通过耦合文件返回 FLOW 潮流模块,实现波流双向耦合.SED 泥沙模块则通过调用波流计算所得的水位、流速、底部切应力等数据进行泥沙浓度计算.

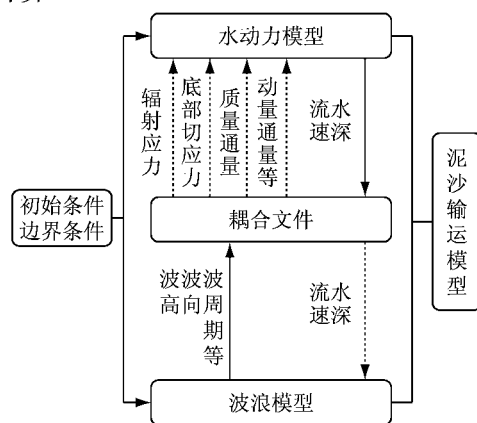


图 1 Delft3D 双向耦合计算过程示意图  
Fig.1 Schematic of two-way coupling calculation in Delft3D

#### 1.2 计算范围、网格及边界条件

模型计算范围为东经  $117^{\circ}36' \sim 118^{\circ}40'$ ,北纬  $38^{\circ}07' \sim 38^{\circ}51'$  的海域(图 2),由东北、西北和东南 3 条海域开边界以及 1 条岸线闭边界构成.其中潮流

边界采用潮位过程控制,数据由渤海大模型(图2,开边界为大连—烟台)计算而得。波浪边界条件为黄骅港附近7号平台统计计算得到的常浪数据(有效波高  $H_{sig}=0.73\text{ m}$ ,波周期  $T=3.40\text{ s}$ ,波浪来向  $\theta=63^\circ$ ),同时考虑风作用影响加入常浪对应风况(自由表面上部10 m处平均风速  $U_{10}=7.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风来向  $\theta'=63^\circ$ )。泥沙边界则根据实测资料线性插值得到。侧向固边界采用流速为零的不可滑移条件。平面坐标系统采用大地坐标,高程系统以黄骅港理论最低潮面为零点。关于地形,2003年和2006年模型采用的是2006年水深数据,2012年和2020年模型采用的是2012年水深数据。

模型计算网格经敏感性分析后采用  $197\times 125$  非均匀正交曲线网格,对重点研究区域加密并尽量

使网格贴合工程。网格空间步长在东北—西南方向为  $200\sim 430\text{ m}$ ,西北—东南向为  $70\sim 1480\text{ m}$ ,时间步长取  $1\text{ min}$ ,模型计算满足稳定性与精度要求。

### 1.3 参数设置

模型曼宁系数先根据床面糙率  $k_n$  与水深  $h$  分布关系进行赋值,经模型率定后取值为  $0.011\sim 0.016\text{ s}\cdot\text{m}^{-1/3}$ 。边界滩地采用动边界处理干湿交换过程。根据实测泥沙平均中值粒径  $d_{50}=0.036\text{ mm}$  计算得到床面泥沙干密度为  $952\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,泥沙沉降速度取  $0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ [29-30]。经过计算和率定调整,临界冲刷切应力取值范围为  $0.19\sim 1.60\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ ,临界淤积切应力取临界冲刷应力值的  $4/9$ [31],为  $0.084\sim 0.710\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ ,冲刷系数取  $0.000\ 064\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

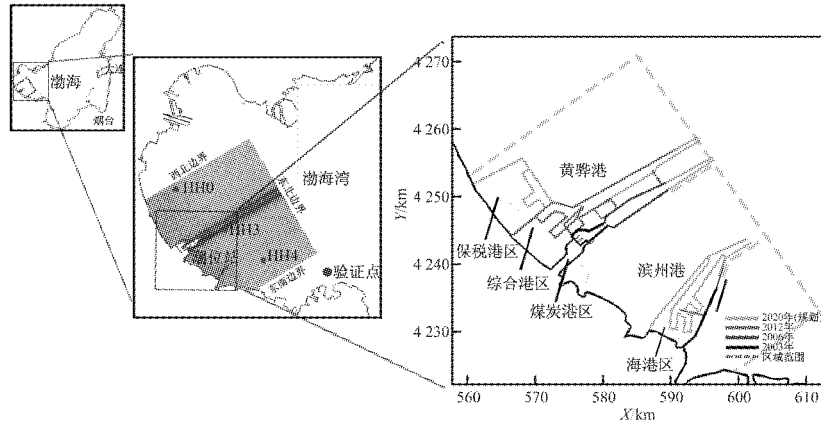


图2 计算区域、网格与港口工程布置

Fig.2 Computational domain, grid and layout of harbor projects

## 2 模型验证

采用2012年实测资料对模型进行率定和验证(测站位置见图2),其中水动力和泥沙验证资料选用计算区域内测站HH0,HH3,HH4在2012年10月15日5:00—10月16日6:00的大潮实测资料,潮位验证资料采用潮汐表2012年10月15日0:00—10月16日23:00黄骅港一期煤码头潮位站潮位资料。图3、图4分别为对应的潮位、流速、流向及含沙量验证结果。由图3、4可知,模型计算结果在大小和相位上均与实测值吻合较好(采用2010—2011年实测资料对水沙模型验证的结果同样较好,由于篇幅限制,本文不再展示)。7号平台处模拟所得波浪参数( $H_{sig}, T, \theta$ )与统计值的误差小于5.3%。同时,本模型已进行了极端天气下的地形变化验证[20],反证了模型参数设置的合理与泥沙计算结果的可靠。

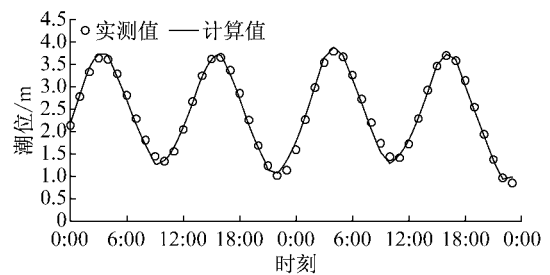


图3 潮位验证

Fig.3 Verification of tidal level

为进一步衡量水动力和泥沙输运数学模型的可行性,本文采用Willmott统计学方法[32]来定量评价模型模拟结果与实测数据的匹配程度,其计算公式如下:

$$S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |M - D|^2}{\sum_{i=1}^N (|M - \bar{D}| + |D - \bar{D}|)^2} \quad (12)$$

式中:  $M$  为模型计算结果;  $D$  为实测值;  $\bar{D}$  为实测平均值. 当  $S$  为 1 时, 表示模型计算值和实测值完全相符;  $S$  大于 0.65 时, 结果为极好;  $S$  在 0.65~0.50 之间为非常好;  $S$  在 0.50~0.20 为好;  $S$  小于 0.20 为差;  $S$  为 0 表示模型计算值和实测值完全不符. 通过式(12)计算本模型潮位、流速、流向和含沙量的  $S$  值范围分别为 0.97(极好), 0.69~0.79(极好), 0.66~0.73(极好)和 0.50~0.55(非常好). 通过对评价结

果与误差进行分析可知, 水动力验证中潮位、流速与实测值吻合极好, 流向验证虽整体评价极好, 但数值上存在一定偏差, 这主要是由模型局部地形精度不足所致. 泥沙计算值的变化趋势与实测值基本一致, 匹配程度一般可能是因为模型采用的是单一组分的黏性泥沙, 与实际存在一定差异. 整体看来, 所建水动力和泥沙输运数学模型合理, 可以用于后续计算分析.

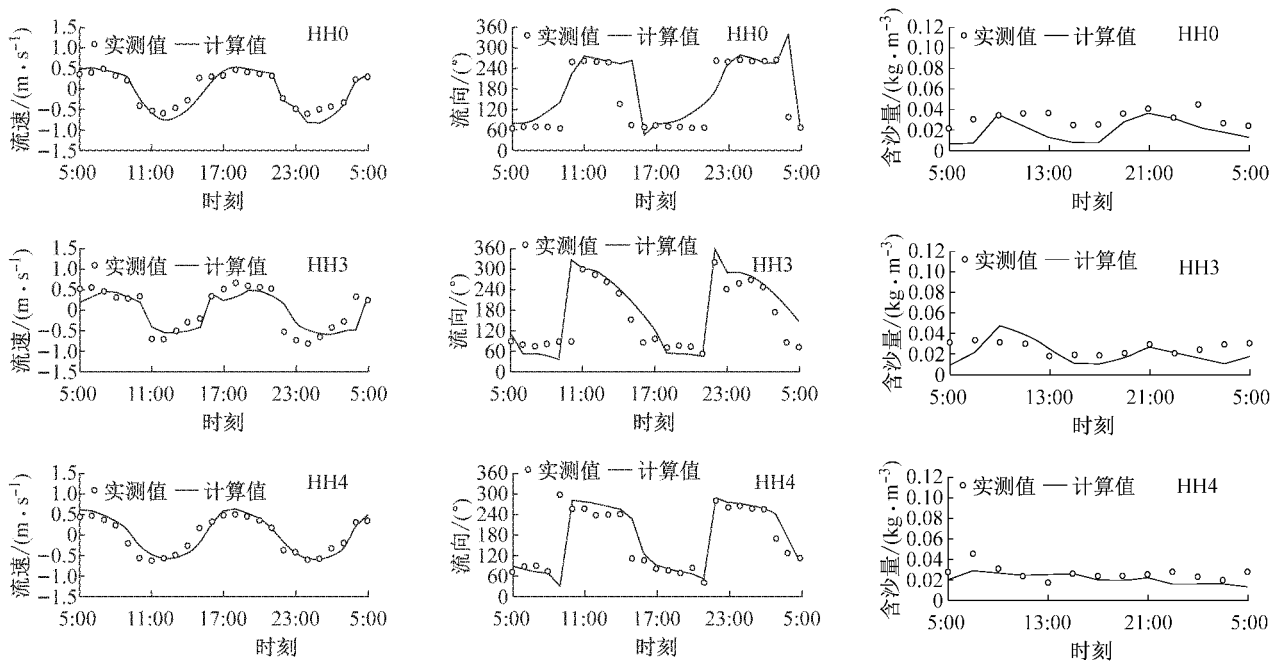


图 4 流速、流向、含沙量验证

Fig.4 Verification of flow velocity, flow direction, and sediment concentration

### 3 讨论与分析

渤海湾西南岸潮流受渤海西支潮波控制为逆时针旋转流, 泥沙运输机制为“波浪掀沙, 潮流输沙”. 为探究港口工程建设对渤海湾西南海域水沙动力环境与港口间相互作用的影响, 选取典型工况黄骅港一期工程(2003年)、黄骅港外航道整治工程(2006年)、黄骅港综合港区与滨州港防波堤一期工程(2012年)以及规划工程(2020年)作为研究对象, 运用验证合理的数学模型重点讨论分析黄骅港以西, 黄骅、滨州两港之间, 滨州港以东三大区域(图2所示灰色虚线)的水动力和泥沙输运特征的变化过程.

#### 3.1 港口工程建设对潮流的影响

潮流是改变海域动力地貌环境的主要驱动力, 港口工程通过阻流、导流、挑流等作用影响潮流动力, 变化在工程近区尤为显著. 2003—2020年, 渤海

湾西南岸人工岸线增长近 106.3 km, 潮流动力在不同工况下的变化特征不尽相同. 由图5中各工况涨急、落急流速矢量场可知, 总体上, 黄骅港以西, 黄骅、滨州两港之间, 滨州港以东三大区域在 2003 年由于导堤长度有限, 相邻两区域水体在转流期间交换畅通. 黄骅港外航道整治工程(2006年)后, 长达 11 km 的导堤将黄骅港两侧区域初步分割成为两个相对独立水域, 减少了水体交换, 2012 年的黄骅港综合港区与滨州港防波堤一期工程则进一步阻碍三大区域水体交换. 至 2020 年规划工程, 渤海湾西南岸已基本形成 3 个相对独立的海区, 长导堤对港口既起到了束水攻沙维护航道水深的作用, 还保障了港内平稳作业的环境.

进一步分析, 由于导堤的导流作用可使其附近潮流流速在沿导堤方向上的分量增加. 黄骅港以西区域的潮流动力在 2006 年和 2012 年工况下得到明显增强, 增强范围主要集中在堤头挑流区域与近岸

区域.其中,黄骅港外航道整治导堤(2006年)和综合港区导堤(2012年)的导流作用使该区域流速分别平均增加了 $0.08, 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .2006—2012年间,逐渐向外海延伸的黄骅港长导堤使该区域呈明显的往复流特征,并减少了其与黄骅、滨州两港之间的水体交换以及黄骅港一期工程(2003年)口门处的大范围横流作用.2020年规划工程后,黄骅港以西海域受新建保税区阻流作用影响显著,流速较2012年整体减小,保税港区前沿减幅最大;黄骅、滨州两港之间的潮流动力受工程影响最大,随着两侧导堤工程的不断延伸,该区域逐渐形成一个“挖入式”水域,纳潮量也因此较2003年工况分别减少了 $4.73\%$ (2006年)、 $8.42\%$ (2012年)以及 $20.69\%$ (2020年).相应地,两港间涨急流速整体减小了 $0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

( $9.13\%$ ), $0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ( $20.44\%$ ), $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ( $29.11\%$ ),见图5.图5中 $\Delta v$ 为2006年、2020年与2003年的流速差值.相较涨急,落急流速受纳潮量的影响较小,即对工程建设响应小,故流速差值场基本均呈现黄骅港南导堤与岸线组成的三角区域增加,其余区域减小的特征,滨州港以东区域受工程建设影响最小,其潮流动力变化特征与相邻的两港间区域相似,涨急时刻,2006年黄骅港外航道整治工程影响不到该区域,但滨州港2012年的防波堤一期工程的阻流作用使得区域流速整体减小了 $0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,2020年防波堤延伸工程进一步减小了堤头附近流速.滨州港导堤工程的建设(2012、2020年)对滨州港以东的落急流场几乎无影响,自2006年黄骅港外航道整治工程后流速差值场分布特征不变.

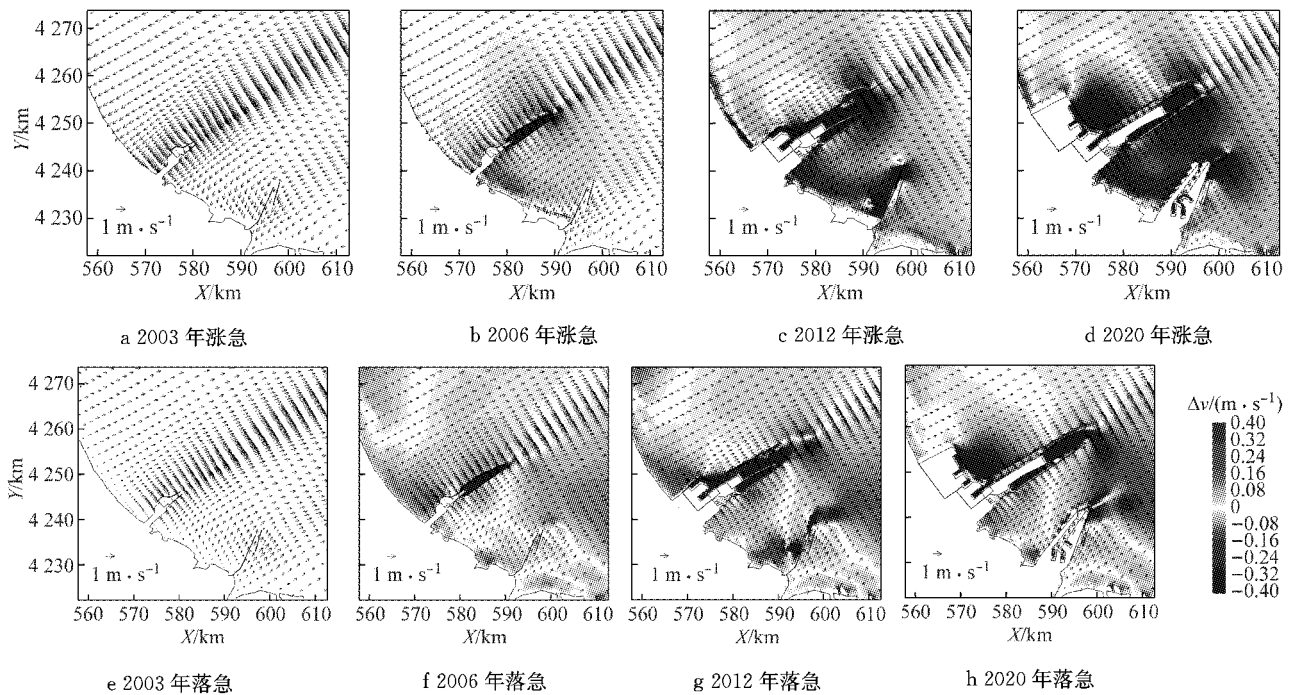


图 5 4 种工况下涨急、落急时刻流场和流速差值场

Fig.5 Current and velocity difference fields at the maximum flood and ebb at four construction stages

### 3.2 港口工程建设对泥沙输运的影响

渤海湾西南岸泥沙在潮流单独作用下即可启动,正常天气下渤海湾西南岸的泥沙输运特征主要取决于潮流.而该区域在大风或大浪情况下极易发生骤淤,因而有必要在纯潮流作用基础上进一步探究波流耦合作用下的泥沙输运情况.

#### 3.2.1 纯潮流作用

结合各工况在纯潮流作用下的全潮平均含沙量 $S$ 分布情况(图6a~6d)与净输沙率(图7a~7d)分析可知,当工程建设至2020年,三大区域含沙量已分

别降至2003年水平的 $75\%$ , $45\%$ , $65\%$ ,泥沙净输沙率也分别降至2003年水平的 $15\%$ , $66\%$ , $59\%$ ,逐步达到新的输沙平衡状态.

黄骅港外航道导堤建成后(2006年),黄骅港以西区域涨急、落急流速整体增加,底部切应力相应增大,使得该区域泥沙含量增加.尚存的门口横流作用仍可使泥沙在黄骅港东、西两区域间输运,可见长导堤的建设对该区域的泥沙输运影响较小(图7a,7b),但使原门口内的输沙率由 $7 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 降至现门口内的 $3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ .2012年黄骅

港综合港区的建成从横向上进一步阻断水体交换, 口门附近泥沙浓度明显下降, 至 2020 年高浓度泥沙仅出现在近岸区域, 且涨落潮流的对称促使泥沙输运达到新的平衡. 黄骅、滨州两港之间区域的泥沙净输运由 2003 年工况的逆时针旋转向港内输运逐渐变化为 2012 年工况的向外海偏转, 表明 2012 年工程已较好地解决了滨州港以东来沙使两港间含沙量高的问题. 这是因为滨州港防波堤一期工程的建设阻断了泥沙向两港间输运, 同时两港之间涨潮流不断减弱, 而沿岸/堤流动的落潮流不断增强, 使随水流向海外输运的泥沙量增加. 滨州港以东区域的泥沙含量在各工况下均为三个区域最高, 虽未在规划方案下达到输沙平衡, 其防波堤工程的建设(2012 年、2020 年)仍使该区域的净输沙率减小了, 高浓度泥沙范围也相应减小.

### 3.2.2 波流耦合作用

比较波流耦合(图 6e~6h)和纯潮流(图 6a~6d)作用下的全潮平均含沙量可知, 总体看来, 渤海湾西南岸“波浪掀沙, 潮流输沙”特征明显, 全潮平均含沙量分布形式与纯潮流时相似, 但波浪对近岸底部切应力的增大使掀沙作用明显加强, 含沙量提高

了近 8 倍, 常浪作用下的泥沙含量等值线趋于与岸线平行, 高浓度泥沙沿岸分布范围较纯潮流时更大, 这主要是由于波浪破碎波动量的转移使沿岸流增强, 沿岸输沙量增加. 同时, 紊动强烈的破波带使泥沙大量悬扬, 高浓度泥沙区向近岸移动至  $-1 \sim -3$  m 等深线附近. 由图 7e~7h 与 7a~7d 比较可知, 波浪改变了纯潮流时的泥沙输运规律, 在其作用下研究区域涨潮阶段的输沙量增加, 净泥沙输运方向整体向西偏转, 规划工程前部分泥沙越过导堤从东侧运移至西侧, 使三大区域泥沙含量比例重新分配, 呈黄骅港以西增加, 滨州港以东减少. 至 2020 年, 港口导堤延伸工程的完工阻断了波流耦合下泥沙的西运, 三大区域泥沙含量比例恢复至纯潮流时的水平.

综上所述, 连片港口工程建设使渤海湾西南岸泥沙含量与净输沙率持续降低, 逐步达到涨落潮输沙平衡状态. 2012 年工程与 2020 年工程可分别削弱正常天气、常浪天气下港区间泥沙相互输运的影响. 为进一步改善该区域泥沙环境, 建议延长滨州港海港港区导堤, 并开展滨州港以东的整治工程, 以解决东部含沙量高的问题.

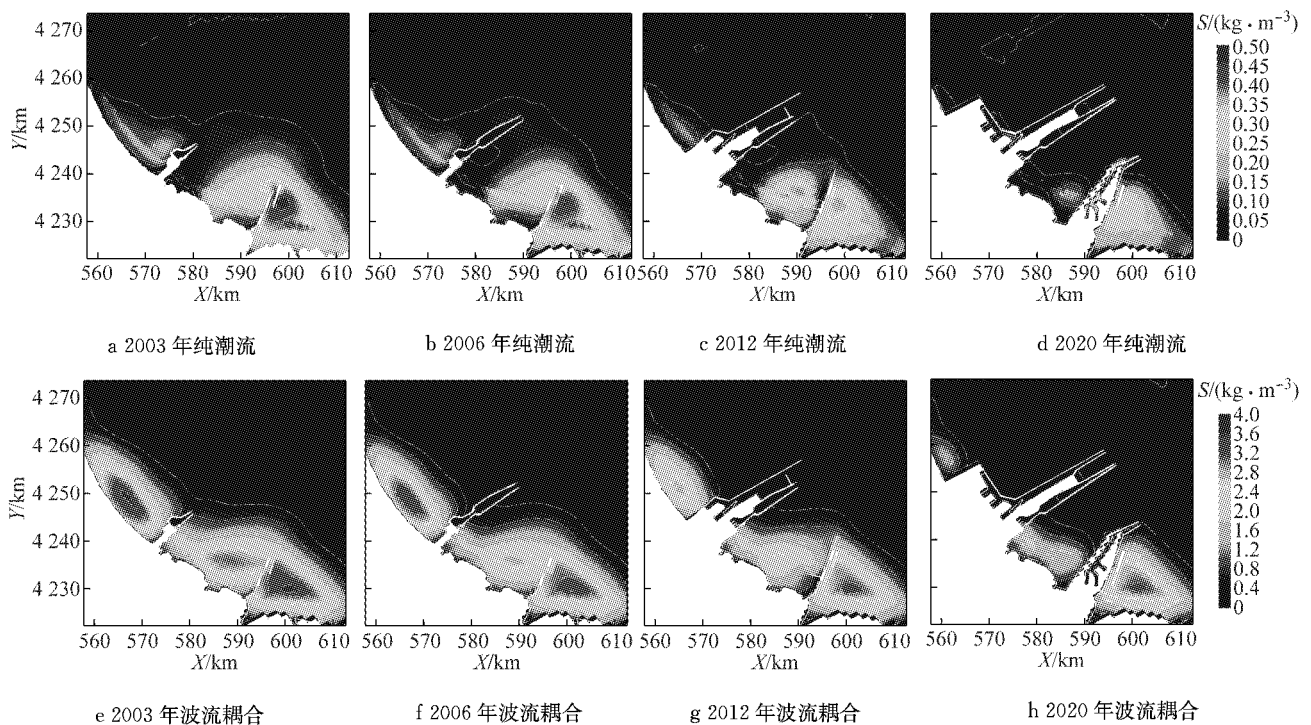


图 6 4 种工况下全潮平均含沙量

Fig.6 Distributions of suspended sediment concentrations over a tidal cycle at four construction stages

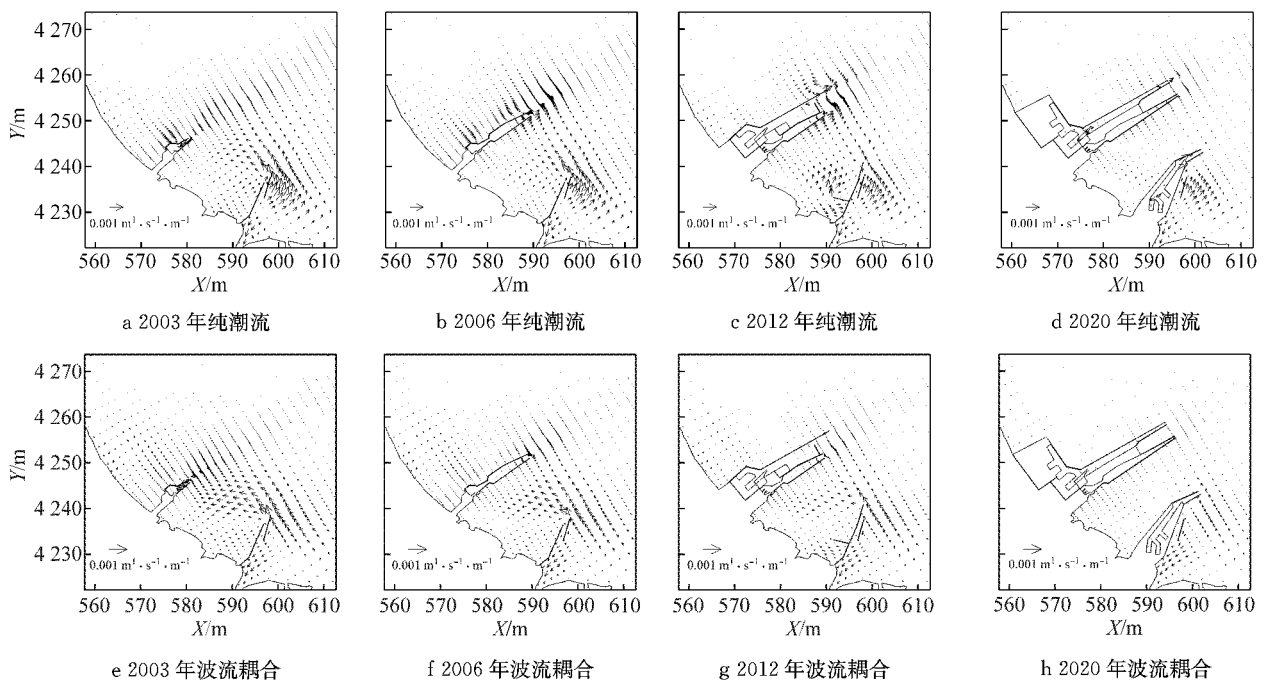


图7 4种工况下全潮平均净输沙率

Fig. 7 Net suspended sediment transport rate over a tidal cycle at four construction stages

## 4 结论

本文利用 Delft3D 建立渤海湾西南岸二维水动力、泥沙输运数学模型,运用验证合理的模型模拟了该区域 4 个典型工况下的潮流场、泥沙场,讨论分析了港口工程建设对该区域水沙动力特征的累积影响与港区间的相互作用,得出以下结论:

(1)连片港口工程建设使渤海湾西南岸逐步形成 3 个相对独立的海区,其中黄骅、滨州两港之间的潮流动力受工程建设影响最大,滨州港以东最小。

(2)纯潮流作用下,工程建设使渤海湾西南岸泥沙含量逐渐降低,至 2020 年,泥沙含量与净输沙率已分别降至 2003 年水平的 45%~75%,15%~66%。各工况下,滨州港以东的全潮平均含沙量均最高。

(3)波流耦合作用下,全潮平均含沙量分布情况基本与纯潮流时相似,但量值提高了近 8 倍,等值线趋于与岸线平行,高浓度泥沙沿岸分布范围更大,并向近岸移动。波浪增加了涨潮阶段的输沙量,使三大区域泥沙含量比例重新分配。

(4)总体看来,连片港口工程建设使渤海湾西南岸逐步达到新的输沙平衡状态。2012 年工程与 2020 年工程可分别削弱正常天气、常浪天气下港区间泥沙相互输运的影响。未来,建议延长滨州港海港港区导堤,并开展滨州港以东的整治工程。

## 参考文献:

- [1] TIAN B, WU W T, YANG Z Q, *et al.* Drivers, trends, and potential impacts of long-term coastal reclamation in China from 1985 to 2010[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 170: 83.
- [2] 王勇智,吴頔,石洪华,等. 近十年来渤海湾围填海工程对渤海湾水交换的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(3): 471.  
WANG Yongzhi, WU Di, SHI Honghua, *et al.* Impact of reclamation on water exchange in bohai bay in recent decade [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, 46(3): 471.
- [3] 胡聪. 围填海开发活动对海洋资源影响评价方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
HU Cong. Methods of reclamation impact evaluation on marine resources[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [4] 聂红涛,陶建华. 渤海湾海岸带开发对近海水环境影响分析[J]. *海洋工程*, 2008, 26(3): 44.  
NIE Hongtao, TAO Jianhua. Impact of coastal exploitation on the eco-environment of Bohai Bay[J]. *The Ocean Engineering*, 2008, 26(3): 44.
- [5] 孟伟庆,王秀明,李洪远,等. 天津滨海新区围海造地的生态环境影响分析[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(1): 83.  
MENG Weiqing, WANG Xiuming, LI Hongyuan, *et al.* Ecological impacts of marine reclamation in Binhai New Area of Tianjin[J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(1): 83.
- [6] 陆荣华,于东生,杨金艳,等. 围(填)海工程对厦门湾潮流动力累积影响的初步研究[J]. *台湾海峡*, 2011, 30(2): 165.  
LU Ronghua, YU Dongsheng, YANG Jinyan, *et al.* Cumulative effects of coastal reclamation on tidal current in Xiamen Bay[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2011, 30(2): 165.
- [7] 曾相明,管卫兵,潘冲. 象山港多年围填海工程对水动力影响的累积效应[J]. *海洋学研究*, 2011, 29(1): 73.

- ZENG Xiangming, GUAN Weibing, PAN Chong. Cumulative influence of long term reclamation on hydrodynamics in the Xiangshangang Bay[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2011, 29(1): 73.
- [8] SHI J H, LI G X, WANG P. Anthropogenic influences on the tidal prism and water exchanges in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 27: 57.
- [9] 杨欣. 多项填海工程作用下对渤海湾潮流场及污染物的影响[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- YANG Xin. Influence on tidal current and pollution diffusion of a number of reclamation project in Bohai Bay[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [10] 韩树宗, 吴柳, 朱君. 围海建设对天津近海水动力环境的影响研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(增 1): 18.
- HAN Shuzong, WU Liu, ZHU Jun. The research of reclamation to Tianjin coastal hydrodynamic environment[J]. *Periodical of Ocean University of China(Natural Science)*, 2012, 42(S1): 18.
- [11] 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 渤海湾岸线变化(2003—2011 年)对近岸海域水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(9): 2149.
- QIN Yanwen, ZHANG Lei, ZHENG Binghui, *et al.* Impact of shoreline changes on the costal water quality of Bohai Bay (2003—2011)[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(9): 2149.
- [12] GAO G D, WANG X H, BAO X W. Land reclamation and its impact on tidal dynamics in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 151: 285.
- [13] PELLING H E, UEHARA K, GREEN J A M. The impact of rapid coastline changes and sea level rise on the tides in the Bohai Sea, China[J]. *Journal of Geophysical Research(Space Physics)*, 2013, 118(7): 3462.
- [14] 侯庆志. 渤海湾连片开发对于海岸滩涂动力环境及演变过程的影响研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- HOU Qingzhi. Study for impacts of contiguous development in Bohai Bay on coastal mudflat hydraulic environment and evolution assessment [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013.
- [15] 曹祖德, 孔令双. 粉沙质海岸泥沙运动特性研究[J]. *海洋学报*, 2011, 33(5): 152.
- CAO Zude, KONG Lingshuang. Sediment problems of harbor on silt-sandy beach[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 33(5): 152.
- [16] 匡翠萍, 钱从锐, 姚凯华, 等. 潮流与泥沙输运对黄骅港工程的响应分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(10): 1516.
- KUANG Cuiping, QIAN Congrui, YAO Kaihua, *et al.* Responses of tidal current and sediment transport to Huanghua port[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2014, 42(10): 1516.
- [17] 龚文平, 李昌宇, 林国尧, 等. DELFT3D 在离岸人工岛建设中的应用——以海南岛万宁日月湾人工岛为例[J]. *海洋工程*, 2012, 30(3): 35.
- GONG Wenping, LI Changyu, LIN Guoyao, *et al.* Application of DELFT 3D model for plan design of an artificial island—a case study for the artificial island construction in the Riyue Bay, Wanning City, Hainan Island[J]. *The Ocean Engineering*, 2012, 30(3): 35.
- [18] DISSANAYAKE D M P K, WURPTS A, MIANI M, *et al.* Modelling morphodynamic response of a tidal basin to an anthropogenic effect: Ley Bay, East Frisian Wadden Sea—applying tidal forcing only and different sediment fractions[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 67: 14.
- [19] 吴志辉, 林中源, 龚文平, 等. 广东省镇海湾出海航道选线的数模研究[J]. *海岸工程*, 2015, 34(3): 12.
- WU Zhihui, LIN Zhongyuan, GONG Wenping, *et al.* Numerical modeling study of the navigation route selection in the Zhenhai Bay, Guangdong Province [J]. *Coastal Engineering*, 2015, 34(3): 12.
- [20] KUANG C P, MAO X D, LIU P C, *et al.* Influence of wind force on a silt-muddy coast: Huanghua Harbor coast, China[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2015, 141(6): 05015001.
- [21] 顾晨. 波浪共同作用下黄河入海悬浮物质三维扩散规律研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- GU Chen. A numerical study of 3D suspended matter transport of Yellow Rive with wave-current interaction[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [22] 张雪松, 梁丙臣, 徐照妍. 半封闭狭长型淤泥质海湾的冲淤演变数值分析[C]// 第二十六届全国水动力学研讨会. 青岛: 海洋出版社, 2014: 592-600.
- ZHANG Xuesong, LIANG Bingchen, XU Zhaoyan. Numerical analysis of the evolution of erosion and deposition of semi-closed narrow muddy gulf [C]// *Proceedings of the 26th National Conference on Hydrodynamics*. Qingdao: China Ocean Press, 2014: 592-600.
- [23] 陈维. 长江口北支、北槽冲淤变化及河势演变分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- CHEN Wei. Analysis on morphological change and evolution of river regime in the north branch and north passage of the Changjiang River Estuary [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [24] LESSER G R, ROELVINK J A, VAN KESTER J A T M, *et al.* Development and validation of a three-dimensional morphological model[J]. *Coastal Engineering*, 2004, 51: 883.
- [25] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. Third-generation wave model for coastal regions(part I): model description and validation [J]. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 1999, 104(C4): 7649.
- [26] RIS R C, BOOIJ N, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions (part II): verification [J]. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 1999, 104 (C4): 7667.
- [27] PARTHENIADES E. Erosion and deposition of cohesive soils [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1965, 91(1): 105.
- [28] VAN RIJN L C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas[M]. Blokzijl: Aqua Publications, 1993.
- [29] 张庆河, 张娜, 胡岫, 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.
- [30] 侯志强, 杨华. 黄骅港外航道淤积分析[J]. *水道港口*, 2004, 25(4): 213.
- HOU Zhiqiang, YANG Hua. Analysis of sudden siltation of outer channel of huanghua harbor[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2004, 25(4): 213.
- [31] 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.
- [32] WILLMOTT C J. On the validation of models[J]. *Physical Geography*, 1981, 2(2): 184.