



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230022

## 围填海对渤海湾泥沙冲淤的影响

王瑞清<sup>1,2</sup>, 闫伟<sup>3</sup>, 丁磊<sup>1,2</sup>

(1. 海洋资源化学与食品技术教育部重点实验室, 天津 300457;  
2. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457; 3. 天津临港建设开发有限公司, 天津 300452)

**摘要:** 基于 FVCOM (finite-volume coastal ocean model)-SWAN (simulating waves nearshore) 耦合模型进一步建立三维泥沙模型, 对渤海湾围填前后泥沙输运进行模拟, 分析了围填海对渤海湾泥沙冲淤的影响。结果表明: 围填海对围填海区附近海域泥沙输运的影响较为显著, 而对远离其海域的影响较小。涨急、落急时, 月均垂向平均含沙量在曹妃甸三港池口门、天津南港工业区附近海域和黄骅港部分海域增加, 在其他主要围填海区减少。渤海湾主要泥沙输运方向没有明显变化, 为由东向西的向岸输运。同时, 曹妃甸三港池口门附近冲淤发生变化, 内部其他水域淤积减少。天津港围填外边界附近海域淤积增加, 而临港经济区口门、南港工业区的口门及其围填外边界东南转角附近海域冲刷增加。紧邻黄骅港附近海域冲淤变化幅度较小。此外还研究了波浪对泥沙的影响。波流共同作用与不考虑波浪作用的情况相比, 总体上渤海湾沿岸海域的含沙量增加, 单宽悬沙通量变化较明显, 床面冲淤幅度差别显著。

**关键词:** 渤海湾; 围填海; 泥沙冲淤; 波流共同作用; FVCOM-SWAN 模型

中图分类号: P731 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2023)06-0027-08

## Influences of Land Reclamation on Sediment Erosion and Deposition in the Bohai Bay

WANG Ruiqing<sup>1,2</sup>, YAN Wei<sup>3</sup>, DING Lei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Resource Chemistry and Food Technology (TUST),  
Ministry of Education, Tianjin 300457, China;  
2. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;  
3. Tianjin Harbor Construction Development Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

**Abstract:** Based on the finite-volume coastal ocean model (FVCOM)-simulating waves nearshore (SWAN) coupling model, a three-dimensional sediment model was established to simulate the sediment transport in the Bohai Bay before and after land reclamation. Influences of the land reclamation on sediment erosion and deposition in the Bohai Bay were analyzed. Results showed that the land reclamation had a significant impact on the sediment transport near the reclamation area, but had little impact on those far away from it. The monthly-averaged and depth-averaged sediment concentration during flood and ebb tide increased for the waters near the third harbor gate of Caofeidian, Tianjin Nangang Industrial Zone (TNIZ) and part of Huanghua Port, while decreased for other main reclamation areas. The main direction of sediment transport in the Bohai Bay had no obvious change, showing an onshore transport from the East to the West. At the same time, the erosion and deposition near the third harbor gate of Caofeidian changed, while deposition decreased for other waters inside the third harbor. Deposition increased for the waters near the outer boundaries of Tianjin Port. Erosion increased for the waters near the gate of Tianjin Harbor Economic Area and the gate of TNIZ as well as its Southeast corner of outer boundary. The change range of erosion and deposition for the waters near Huanghua Port was relatively small. Moreover, the effects of wave on sediment were also investigated. Compared with the case where the wave-current interaction was not considered, in general,

收稿日期: 2023-02-08; 修回日期: 2023-05-04

基金项目: 天津市教委科研计划资助项目(2018KJ101)

作者简介: 王瑞清(1997—), 男, 山西忻州人, 硕士研究生; 通信作者: 丁磊, 副研究员, leiding2012@tust.edu.cn

the sediment concentration in the coastal waters of the Bohai Bay increased, the suspended sediment flux per unit width changed obviously, as well as the scour and deposition differed significantly.

**Key words:** the Bohai Bay; land reclamation; sediment erosion and deposition; wave-current interaction; FVCOM-SWAN model

在渤海湾进行的围填海工程,使得岸线变化十分明显<sup>[1]</sup>,导致渤海湾海域面积持续萎缩,进而带来水动力环境的变化<sup>[2]</sup>。水动力条件的改变也会影响泥沙输运,引起床面地形的冲淤变化,特别是港口建筑物附近,这种变化将更为剧烈,从而会威胁建筑物自身的安全。在变化的动力环境条件下合理预测海域泥沙冲淤分布和发展趋势,可以为及早采取防护措施提供依据,因而深入探究围填海对渤海湾泥沙冲淤的影响很有必要。

已有一些学者在围填海对泥沙冲淤的影响方面进行了研究。孙丽艳等<sup>[3]</sup>采用平面二维悬沙模型,比较了纯潮作用下 2005 年和 2013 年曹妃甸海域的冲淤情况。陆永军等<sup>[4]</sup>采用考虑波流耦合的平面二维输沙模型,研究曹妃甸前岛后陆的围垦方案引起的冲淤问题。结果表明甸头前沿深槽年冲刷 0.15 ~ 0.48 m,东侧前沿冲深 0.09 ~ 0.27 m,老龙沟航槽年回淤 0.06 ~ 0.83 m。Liang 等<sup>[5]</sup>研究波流共同作用下 2006 年—2010 年曹妃甸航道-浅滩系统的形态变化,结果显示:围垦位置对地形的影响大于围垦规模的影响,导致浅滩减少,航道淤积。陈丹茜<sup>[6]</sup>利用实测资料对比了 2009 年—2015 年天津港围填海工程对冲淤的影响:北部向陆的单宽输沙率增加,南部向陆的单宽输沙率减小。徐栋等<sup>[7]</sup>利用实测资料讨论了黄骅港岸段在进海路修建情况下的冲淤情况,认为处于动态平衡或略微冲刷的状态。匡翠萍等<sup>[8]</sup>利用 MIKE 软件分析了黄骅港一期工程和外航道整治工程后两种工况下泥沙浓度的变化。整治工程后,近岸最大悬沙浓度较一期工程明显减少。除此之外,还有学者研究波浪在其中的作用。滕涌等<sup>[9]</sup>利用 ECOMSED (estuarine coastal ocean model with sediment transport) 模型模拟了渤海湾 2004 年 11 月平均泥沙浓度,发现考虑波浪时的泥沙浓度较未考虑波浪时高 2 ~ 4 倍,而且更接近观测值。Zhang 等<sup>[10]</sup>利用波-流-泥沙耦合模型模拟了珠江口泥沙输运问题,表明波流共同作用时,模型精度提高了约 34%,均方根误差减小了约 38%。

综上所述,现有研究主要围绕单一围填海工程对泥沙冲淤的影响开展工作,为后续深入研究奠定了基础,然而关于渤海湾内多个围填海工程共同对泥沙

冲淤的影响研究还相对较少,而且已有工作中考虑的水动力条件较为单一,对波浪影响效应的认识尚显不足。因此,本文在先前建立 FVCOM (finite-volume coastal ocean model)-SWAN (simulating waves near-shore) 耦合模型<sup>[2]</sup>的基础上,进一步建立三维泥沙输运模型<sup>[11-13]</sup>,探究波流共同作用下围填海对渤海湾泥沙冲淤的影响,并比较考虑波浪作用与否的差别。

## 1 模型设置

本文沿用了先前工作<sup>[2]</sup>中围填前后的模型设置,采用 2000 年渤海湾岸线代表围填前的情况,用从 2010 年遥感数据中提取的岸线<sup>[1]</sup>叠加《天津市海洋功能区划(2011—2020 年)》和《河北省海洋功能区划(2011—2020 年)》中的围填海部分代表围填后的情况,其计算区域岸线和水深分布如图 1 所示,图中还显示了下文用于模型验证的测站位置。

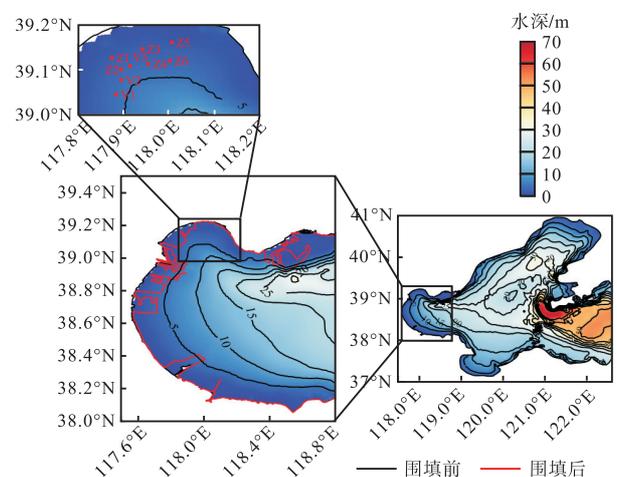


图 1 计算区域岸线和水深分布

Fig. 1 Shoreline and water depth distribution of calculation area

FVCOM-SWAN 耦合模型与泥沙模型均采用相同的三角形网格,在渤海湾区域进行局部加密,最小网格尺寸为 300 m,开边界处最大网格尺寸约为 10 000 m。模型网格点上的水深数据均由 Choi 等<sup>[14]</sup>提供的 1' × 1' 的东中国海水深数据插值得到。需要说明的是,为了突出岸线变化对泥沙冲淤的影响,参考

Liang 等<sup>[5]</sup>的处理方式,围填前后均采用上述同样的水深数据。开边界潮位数据通过 OTS (OSU tidal prediction software) 计算得到<sup>[15]</sup>,表面风场采用美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的 CFSR (climate forecast system reanalysis) 的 10 m 风速资料。FVCOM 模型垂向采用  $\sigma$  坐标系,共分 11 层,外模的计算时间步长为 5 s,内外模的计算时间步长比为 3 : 1,SWAN 模型的计算时间步长为 15 min。两模型各自运行,每 30 min 进行一次数据交换。FVCOM-SWAN 耦合模型中底部切应力采用 Soulsby<sup>[16]</sup>给出的公式进行计算。泥沙模型在 FVCOM 模型中运行,采用单组分泥沙进行计算,时间步长取为 15 s。泥沙的中值粒径取 0.03 mm,其他主要参数根据实测资料率定获得,其中泥沙沉速为 0.4 mm/s,侵蚀率为  $6 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,临界切应力为 0.02 Pa。

## 2 模型验证

本文关于 FVCOM-SWAN 耦合模型水动力计算结果的验证已在先前工作<sup>[2]</sup>中完成,这里将分别从含沙量和床面冲淤两方面给出泥沙模型的验证结果。分别选取 V1 测站 (117.884°E, 39.044°N)、V2 测站 (117.895°E, 39.077°N) 和 V3 测站 (117.915°E, 39.108°N) 的 2019 年 12 月 27 日 9 时至 28 日 12 时以及 Z1 测站 (117.874°E, 39.127°N)、Z2 测站 (117.895°E, 39.100°N)、Z3 测站 (117.942°E, 39.146°N)、Z4 测站 (117.955°E, 39.113°N)、Z5 测站 (118.006°E, 39.161°N) 和 Z6 测站 (118.002°E, 39.120°N) 的 2022 年 4 月 17 日 9 时至 18 日 10 时的含沙量实测数据与计算值进行比较,结果如图 2、图 3 所示,可见两者吻合较好。选取 Kuang 等<sup>[17]</sup>关于黄骅港附近海域 2003 年 10 月 10 日 12 时至 13 日 12 时 3 d 的床面冲淤数值模拟结果 (以下简称文献结果) 与本文计算结果进行比较,结果如图 4 所示。由图 4 可见,本文得到的黄骅港东西两侧近岸区域处于淤积状态,东西两侧离岸区域处于冲刷状态,这与文献结果相近,但西侧离岸区域的冲刷面积比文献结果大。同时,由于本文围填前岸线未包含滨州港部分,因此冲淤结果未体现滨州港的影响。黄骅港附近海域冲淤量值也与文献结果较为接近,大部分结果在  $-0.05 \sim 0.05 \text{ m}$  范围内。综上所述,本文所采用的模型能够较好地反映渤海湾海域水体含沙量的变化过程,并在一定程度上反映渤海湾较大范围的床面冲淤情况,将被应用于下文的研究。

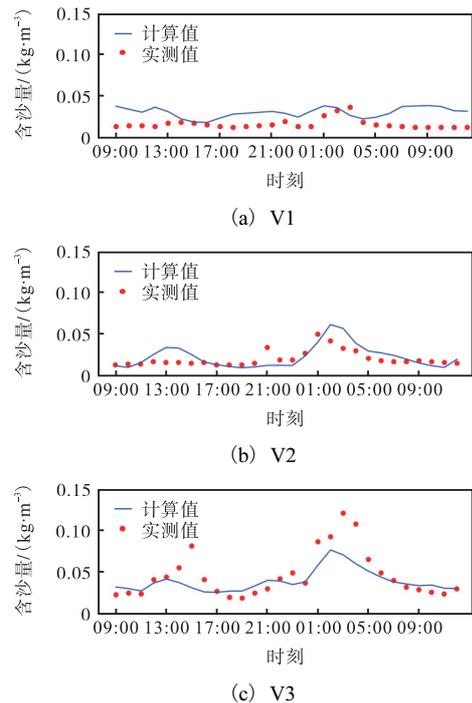
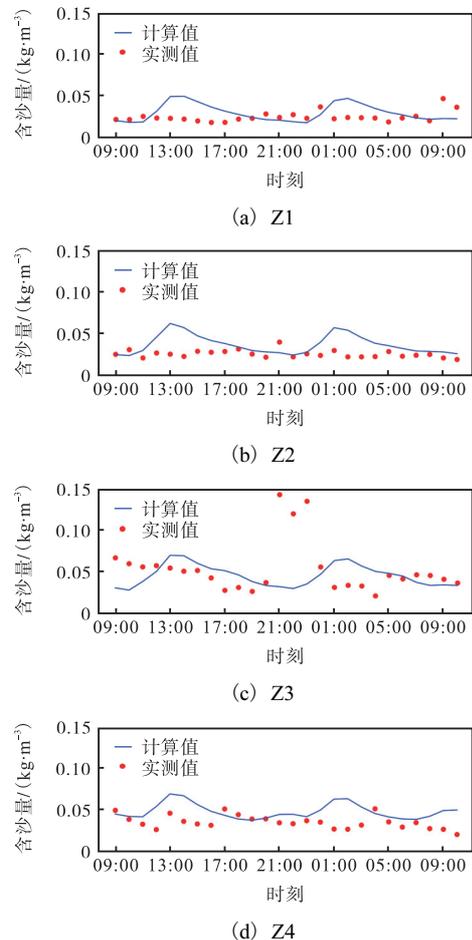


图 2 V1—V3 测站垂向平均含沙量的实测值与计算值的比较 (2019 年)

Fig. 2 Comparison of measured and computed depth-averaged sediment concentration at V1-V3 stations (2019)



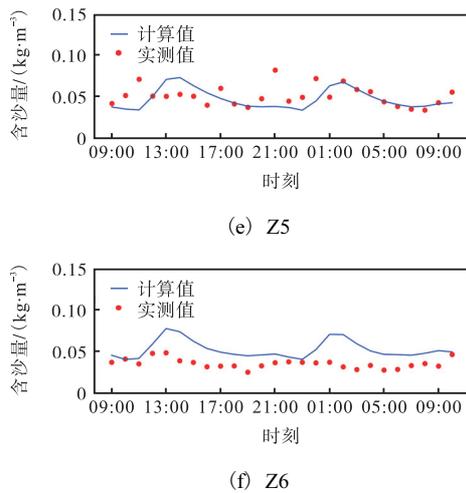


图3 Z1—Z6 测站垂向平均含沙量的实测值与计算值的比较(2022年)

Fig. 3 Comparison of measured and computed depth-averaged sediment concentration at Z1-Z6 stations (2022)

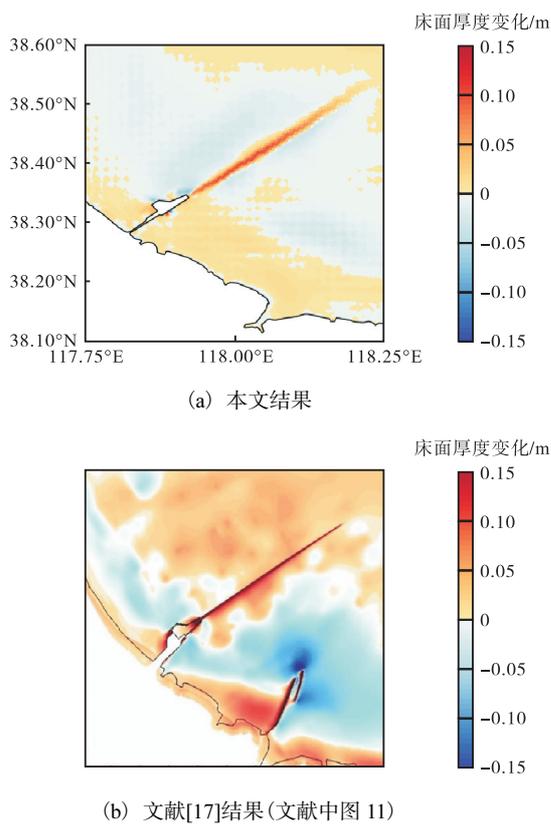


图4 黄骅港附近海域床面冲淤的比较

Fig. 4 Comparison of simulated bed change around Huanghua Port

### 3 结果分析

本文选取 2000 年 2 月波流共同作用下渤海湾围填前后的泥沙输运计算结果分析围填海对泥沙冲淤

的影响。同时,在其他条件相同情况下,对未考虑波浪作用的渤海湾围填后泥沙输运进行模拟,比较波浪相互作用与否的差别,并对波浪对泥沙的影响进行分析。

### 3.1 围填海对渤海湾泥沙冲淤的影响

#### 3.1.1 含沙量

分别对 2000 年 2 月中出现的所有涨急、落急时的垂向平均含沙量计算结果进行平均。涨急、落急时渤海湾围填前后月均垂向平均含沙量差值图(围填后减去围填前的对应结果)如图 5 所示。

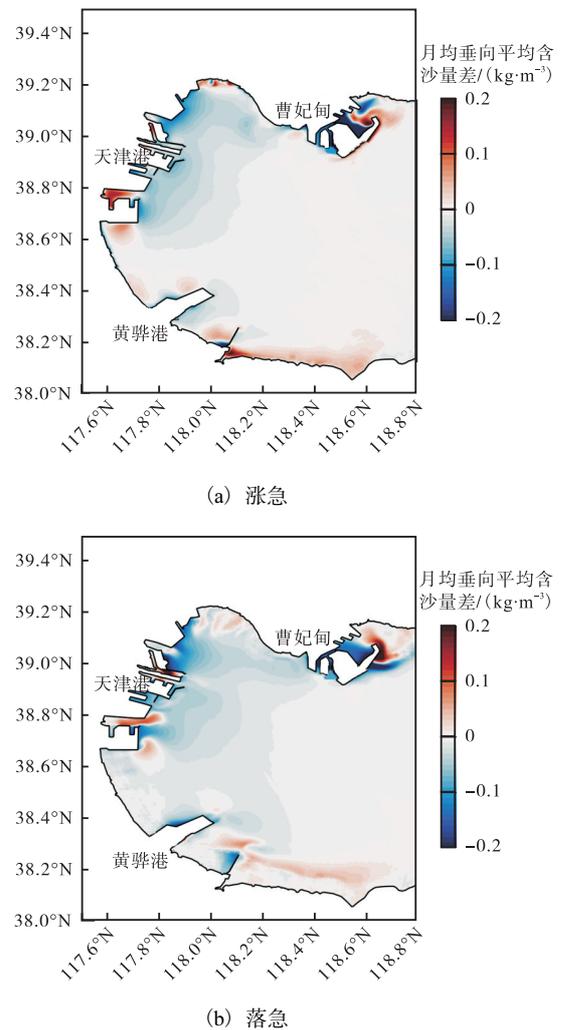


图5 渤海湾围填前后月均垂向平均含沙量变化图

Fig. 5 Variation of monthly-averaged and depth-averaged sediment concentration before and after land reclamation in the Bohai Bay

由图 5 可知:围填后,曹妃甸一港池和二港池以及纳潮河道在涨急、落急时含沙量较围填前均呈不同程度的减小,减幅大多在  $0.1 \sim 0.2 \text{ kg/m}^3$ 。同时,涨急时曹妃甸东北部三港池口门右侧及其邻近内部水域

含沙量增大,增幅在  $0.05 \sim 0.2 \text{ kg/m}^3$ ,其他位置含沙量减少,减幅在  $0.15 \sim 0.2 \text{ kg/m}^3$ 。落急时三港池含沙量增加区域退回至口门外部,特别是口门右侧附近,增幅在  $0.05 \sim 0.2 \text{ kg/m}^3$ ,含沙量减少区域已几乎覆盖整个三港池内部水域,减幅在  $0.1 \sim 0.2 \text{ kg/m}^3$ 。天津港附近海域涨急、落急时含沙量减小的范围较大,各功能区外边界附近海域减幅为  $0.07 \sim 0.13 \text{ kg/m}^3$ ,含沙量减幅为  $0.02 \sim 0.05 \text{ kg/m}^3$  的海域范围进一步向外海扩展,且落急时的扩展范围比涨急时大。同时,在南港工业区附近海域也出现了含沙量增加  $0.1 \sim 0.2 \text{ kg/m}^3$  的情况。黄骅港附近海域涨急、落急时含沙量变化幅度为  $0.02 \sim 0.1 \text{ kg/m}^3$ ,渤海湾中部含沙量变化幅度小于  $0.01 \text{ kg/m}^3$ 。将上述围填前后含沙量变化分布与先前工作<sup>[2]</sup>中给出的相应水动力变化分布进行比较,结果表明两者的变化是一致的,含沙量的变化与水动力的变化密切相关。

### 3.1.2 悬沙通量

为了进一步分析围填前后泥沙输运方向和强度的变化,本文参考罗克志等<sup>[18]</sup>的计算方式,分别计算了围填前后2月大潮期间两个连续潮周期单位宽度过水断面的悬沙净输移量(后文简称单宽悬沙通量),结果如图6所示。

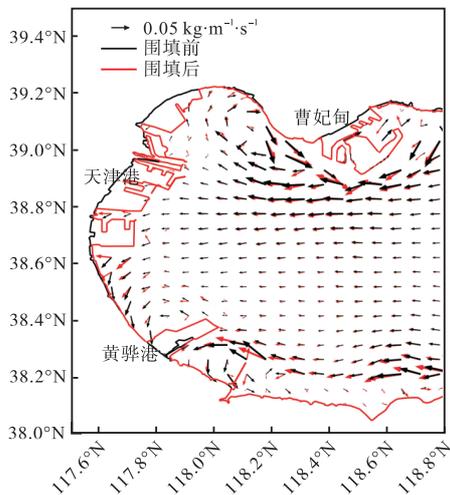


图6 渤海湾围填前后单宽悬沙通量图

Fig. 6 Suspended sediment flux per unit width before and after land reclamation in the Bohai Bay

由图6可知:围填前渤海湾泥沙输运方向主要是由东向西的向岸输运,至天津港外海后分成两股,一股向西北湾顶输运,自湾顶沿岸线折返经曹妃甸向湾外输运,单宽悬沙通量为  $0.03 \sim 0.09 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。另一股则转向西南方向至黄骅港海域附近,单宽悬沙通量为  $0.02 \sim 0.05 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。从泥沙输运强度分布来看,

渤海湾远离围填海域的单宽悬沙通量较小,在  $0.02 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$  左右,而曹妃甸附近海域以及自湾口至黄骅港沿岸海域单宽悬沙通量较大,为  $0.05 \sim 0.09 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。围填后渤海湾主要泥沙输运方向没有明显变化,仍呈现向岸输运,特别是远离围填海域,其单宽悬沙通量几乎未发生变化。同时,西北湾顶与渤海湾西南岸线较围填前变化较小,从而泥沙的输运方向和强度也未明显改变。对岸线改变较大的海域,围填建筑物阻碍了原有的泥沙输运方向。曹妃甸附近海域围填前沿岸线向湾外的泥沙围填后需要绕过甸头继续输运,至三港池附近时改变原有的输运方向经口门进入三港池,单宽悬沙通量约为  $0.03 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。天津港附近海域建筑物阻断了原两股路径上的部分泥沙输运,使其输运量相应减弱。黄骅港附近海域泥沙输运方向变化较大,但输运强度变化较小,同时自湾口至黄骅港沿岸海域单宽悬沙通量变化也较小。

### 3.1.3 床面冲淤

单宽悬沙通量的强度和方向会影响冲淤的程度和分布<sup>[19]</sup>,因此继续分析了围填前后渤海湾床面冲淤变化。本文分别计算了围填前后床面2月的冲淤值,如图7所示。需要说明的是,为了直观比较围填前后建筑物附近床面冲淤变化,在围填前的结果中叠加了围填后岸线。

围填海对其附近海域床面冲淤有着较为显著的影响,而对远离其海域的影响较小。围填后,曹妃甸一港池和二港池除最内端水域外,一港池其他位置的淤积较围填前增加,月淤积厚度增幅大多在  $0.05 \sim 0.10 \text{ m}$ 。二港池其他位置的淤积减少,月淤积厚度减幅主要在  $0.03 \sim 0.08 \text{ m}$ 。一港池和二港池的最内端水域以及纳潮河道围填前处于冲刷状态,围填后冲刷深度减小,月冲刷深度减幅主要为  $0.27 \sim 0.45 \text{ m}$ ,三港池口门左右两侧由围填前的淤积转变为围填后的冲刷状态,月变化幅度主要在  $0.10 \sim 0.20 \text{ m}$ 。邻近口门右侧的内部水域由围填前的冲刷转变为围填后的淤积,月变化幅度主要为  $0.10 \sim 0.30 \text{ m}$ 。三港池内部其他水域特别是西北部水域的淤积较围填前减少,月淤积厚度减幅大多为  $0.10 \sim 0.15 \text{ m}$ 。究其原因,三港池内部水域处于半封闭环境中,水动力减弱<sup>[2]</sup>,从而导致经口门进入三港池的泥沙在口门附近落淤,特别是邻近口门右侧含沙量增大的水域淤积增大,而远离口门的水域特别是西北部水域淤积则相应减少。同时,曹妃甸围填外边界原潮流流向改变较大的海域由于

流速增加使得冲刷较围填前增加,月冲刷深度增幅主要为 0.12 ~ 0.19 m。天津港东疆港区、临港经济区和南港工业区外边界附近海域的淤积较围填前增加,月淤积厚度增幅主要为 0.05 ~ 0.15 m。同时,临港经济区口门、南港工业区的口门及其围填外边界东南转角附近海域冲刷增加,月冲刷深度增幅大致在 0.15 ~ 0.25 m。紧邻黄骅港附近海域冲淤变化较小,月变化幅度小于 0.10 m。

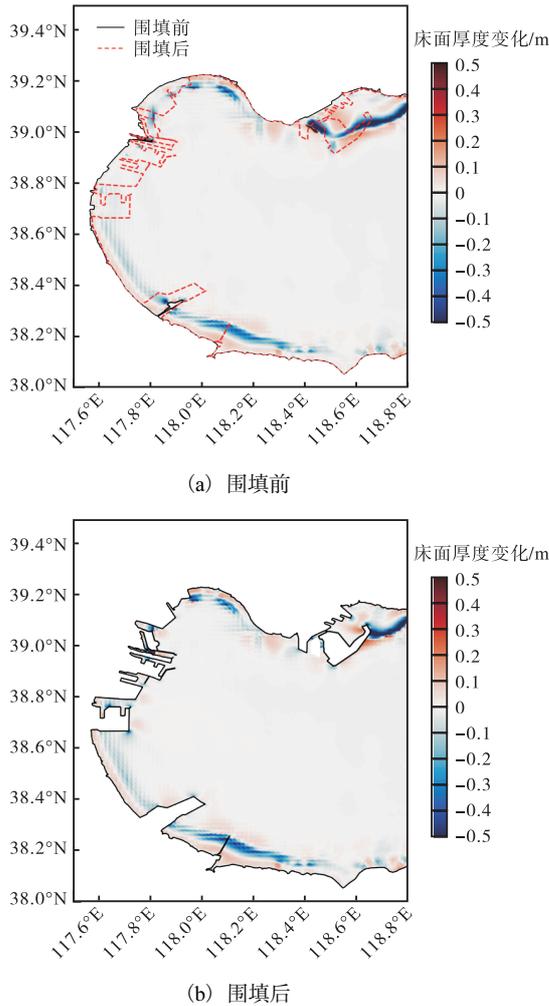


图 7 渤海湾围填前后床面月冲淤图

Fig. 7 Monthly bed change before and after land reclamation in the Bohai Bay

### 3.2 波浪对泥沙的影响

除了讨论围填海对渤海湾含沙量、悬沙通量和床面冲淤的影响外,本文还通过将上述 2000 年 2 月波流共同作用下渤海湾围填后的计算结果与未考虑波浪作用的对应结果进行比较,分析了波浪对泥沙的影响。

#### 3.2.1 含沙量

本文计算了渤海湾围填后 2 月大潮期间一个潮

周期内平均含沙量,如图 8 所示。图 9 同时给出了两者的差值(波流共同作用减去未考虑波浪作用的对应结果)。

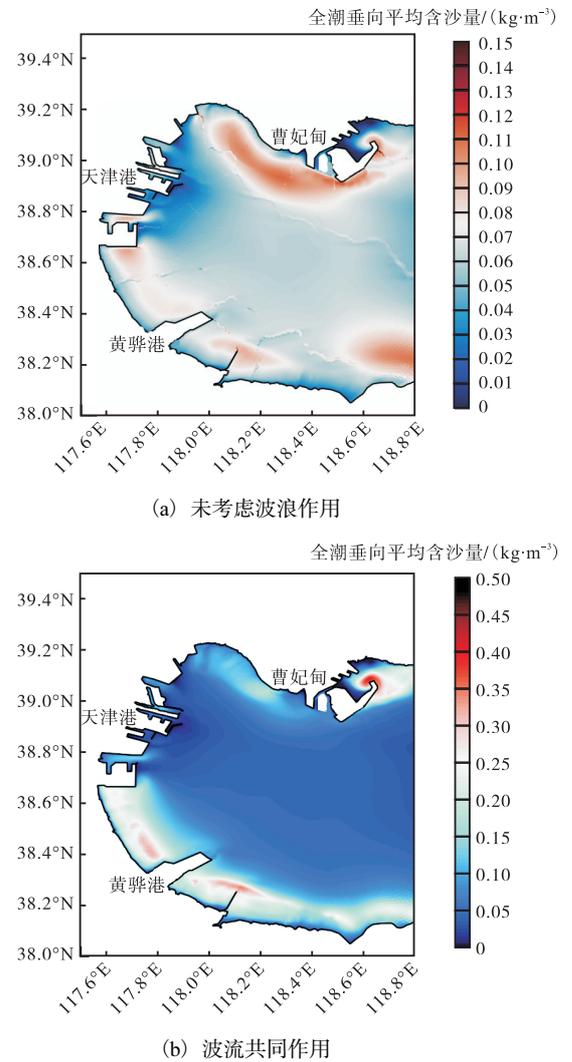


图 8 渤海湾围填后全潮垂向平均含沙量图

Fig. 8 Depth-averaged and time-averaged sediment concentration over a tidal cycle after land reclamation in the Bohai Bay

总体来看,与不考虑波浪作用相比,波流共同作用下渤海湾沿岸海域的平均含沙量增加,造成这一现象的主要原因是波流共同作用下沿岸海域底部切应力增大<sup>[2]</sup>,直接造成更多床面泥沙的起悬和输移。具体来说,波流共同作用下曹妃甸东北附近海域平均含沙量达到 0.35 kg/m<sup>3</sup>,较不考虑波浪作用时增加约 0.26 kg/m<sup>3</sup>。西北湾顶附近海域平均含沙量可达 0.25 kg/m<sup>3</sup>,较不考虑波浪作用时增加约 0.16 kg/m<sup>3</sup>。南港工业区附近海域平均含沙量达到 0.25 kg/m<sup>3</sup>,较不考虑波浪作用时增加约 0.17 kg/m<sup>3</sup>。自湾口至黄骅港沿岸海域平均含沙量达 0.25 ~ 0.35 kg/m<sup>3</sup>,较不考

虑波浪作用时增加约  $0.20 \sim 0.25 \text{ kg/m}^3$ 。由此可见, 该区域波流共同作用下的平均含沙量较不考虑波浪作用时增大了约2~4倍。上述关于平均含沙量变化范围及趋势的结果与宋兹霖等<sup>[20]</sup>的研究成果是一致的。

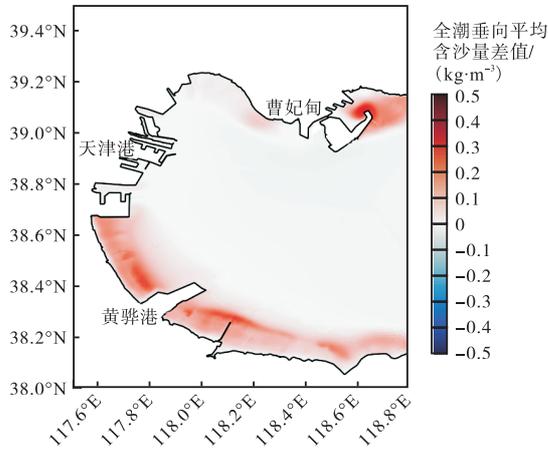


图9 渤海湾围填后全潮垂向平均含沙量变化图

Fig. 9 Variation of depth-averaged and time-averaged sediment concentration over a tidal cycle after land reclamation in the Bohai Bay

### 3.2.2 悬沙通量

分别计算了渤海湾围填后波流共同作用和未考虑波浪作用的单宽悬沙通量, 如图10所示。

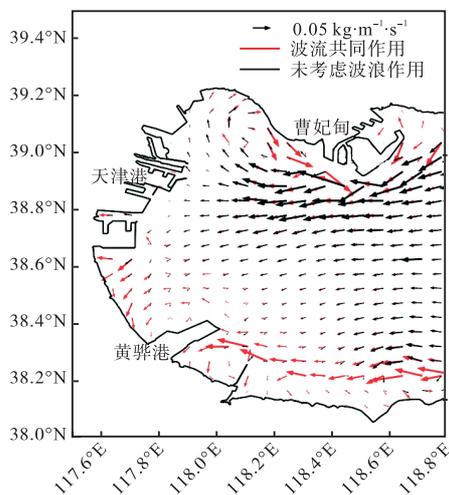


图10 渤海湾围填后单宽悬沙通量图

Fig. 10 Suspended sediment flux per unit width after land reclamation in the Bohai Bay

两种条件下, 渤海湾主要泥沙输运方向相同, 仍为由东向西的向岸输运。同时, 渤海湾远离围填海域单宽悬沙通量无明显变化, 波浪对泥沙输运的影响主要体现在沿岸海域。曹妃甸三港池附近海域波流共同作用较不考虑波浪作用下泥沙输运强度增加, 单宽悬沙通量幅值由不考虑波浪作用下的  $0.01 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$

左右增至约  $0.03 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。南港工业区和黄骅港之间沿岸海域、自湾口至黄骅港沿岸海域以及自西北湾顶沿岸线折返的泥沙输运强度增加更为明显, 单宽悬沙通量幅值由不考虑波浪作用下的  $0.02 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$  增至波流共同作用下的  $0.09 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

### 3.2.3 床面冲淤

图11给出了不考虑波浪作用下渤海湾围填后床面月冲淤值, 波流共同作用下的对应结果如图7(b)所示。

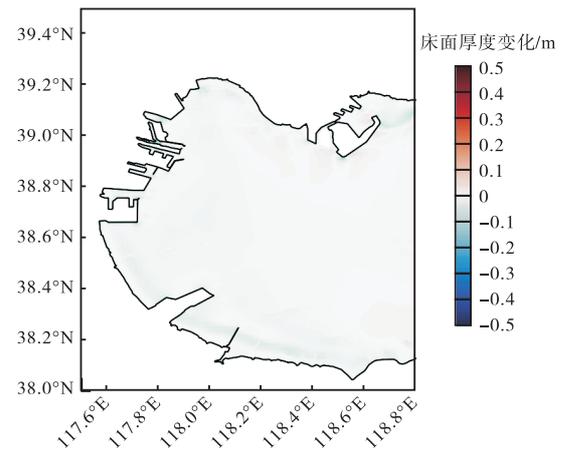


图11 未考虑波浪作用下渤海湾围填后床面月冲淤图

Fig. 11 Monthly bed change without wave effects after land reclamation in the Bohai Bay

两种条件下, 渤海湾围填后床面月冲淤分布总体上基本一致, 区别主要在于波流共同作用较不考虑波浪作用下的冲淤幅度大, 而且差别明显的区域主要分布在沿岸海域, 从而进一步说明波浪的影响在沿岸海域更为显著。在波流共同作用下, 曹妃甸一港池和二港池除各自最内端水域外, 其他位置的淤积较不考虑波浪作用时增加, 月淤积厚度增幅主要在  $0.01 \sim 0.02 \text{ m}$ 。一港池和二港池的最内端水域以及纳潮河道冲刷增加, 月冲刷深度增幅主要为  $0.12 \sim 0.25 \text{ m}$ 。三港池口门左右两侧冲刷增加, 月冲刷深度增幅主要在  $0.10 \sim 0.23 \text{ m}$ , 而邻近口门右侧的内部水域淤积增加, 月淤积厚度增幅主要为  $0.09 \sim 0.17 \text{ m}$ 。同时, 曹妃甸围填外边界原潮流流向改变较大的海域冲刷增加, 月冲刷深度增幅主要为  $0.02 \sim 0.05 \text{ m}$ 。天津港东疆港区、临港经济区和南港工业区外边界附近海域的淤积较不考虑波浪作用时增加, 月淤积厚度增幅主要为  $0.03 \sim 0.06 \text{ m}$ 。同时, 临港经济区口门、南港工业区的口门及其围填外边界东南转角附近海域冲刷增加, 月冲刷深度增幅大致在  $0.05 \sim 0.25 \text{ m}$ 。紧邻黄骅港附近海域冲淤变化较不考虑波浪作用时增加, 月变

化增幅主要为 0.06 ~ 0.08 m。西北湾顶、南港工业区与黄骅港之间的-1.0 ~ -2.0 m 等深线之间以及滨州港东西两侧-0.5 ~ -2.0 m 等深线之间的冲刷带中冲刷深度较不考虑波浪作用时增加,月冲刷深度增幅大致分别为 0.20 ~ 0.35 m、0.05 ~ 0.10 m、0.30 ~ 0.37 m。而西北湾顶、南港工业区与黄骅港之间-1.0 m 等深线以及滨州港东西两侧-0.5 m 等深线以浅的淤积带中淤积厚度增加,月淤积厚度增幅大致分别为 0.05 ~ 0.15 m、0.05 ~ 0.10 m、0.05 ~ 0.12 m。

#### 4 结 语

本文在 FVCOM-SWAN 耦合模型基础上进一步建立三维泥沙模型,对渤海湾围填前后泥沙输运进行模拟,分析了围填海对渤海湾泥沙冲淤的影响,并比较了是否考虑波浪作用对泥沙的影响。结果表明:围填海对围填海区附近海域泥沙输运的影响较为显著,而对远离其海域的影响较小。涨急、落急时,月均垂向平均含沙量在曹妃甸三港池口门、天津南港工业区附近海域和黄骅港部分海域增加,在其他主要围填海区减少。渤海湾主要泥沙输运方向没有明显变化,为由东向西的向岸输运。岸线变化较小的海域泥沙输运方向和强度未明显改变,岸线变化较大的海域围填建筑物阻碍了原有的泥沙输运方向。同时,曹妃甸一港池和二港池的最内端水域以及纳潮河道内冲刷减少。三港池口门左右两侧由淤积转变为冲刷,邻近口门右侧的内部水域由冲刷转变为淤积,内部其他水域淤积减少。天津港东疆港区、临港经济区和南港工业区外边界附近海域淤积增加,而临港经济区口门、南港工业区的口门及其围填外边界东南转角附近海域冲刷增加。紧邻黄骅港附近海域冲淤变化幅度较小。

波流共同作用与不考虑波浪作用的情况相比,总体上渤海湾沿海岸域的含沙量增加,单宽悬沙通量变化较明显,床面冲淤幅度差别显著,这主要是由波流共同作用对渤海湾沿海岸域水动力环境的影响更为显著决定的。

#### 参考文献:

- [1] 李秀梅,袁承志,李月洋. 渤海湾海岸带遥感监测及时空变化[J]. 国土资源遥感,2013,25(2):156-163.
- [2] 姚剑宇,丁磊,王刚,等. 围填海对渤海湾水动力环境的影响[J]. 天津科技大学学报,2022,37(3):28-36.
- [3] 孙丽艳,孙钦帮,张冲,等. 曹妃甸围填海工程对海床冲淤的影响预测分析[J]. 珠江水运,2019(14):73-76.
- [4] 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(6):793-800.
- [5] LIANG H D, KUANG C P, OLABARRIETA M, et al. Morphodynamic responses of Caofeidian channel-shoal system to sequential large-scale land reclamation[J]. Continental shelf research, 2018, 165: 12-25.
- [6] 陈丹茜. 渤海湾西部海域潮动力特征和细颗粒沉积物输运研究[D]. 南京:南京大学,2019.
- [7] 徐栋,杨敏,胡斌,等. 黄骅岸段人工开发对岸滩演变的影响研究[J]. 海岸工程,2016,35(3):43-51.
- [8] 匡翠萍,刘鹏晨,顾杰,等. 黄骅港外航道整治工程对风暴潮流下泥沙输运的影响[J]. 泥沙研究,2014(1):39-46.
- [9] 滕涌,杨永增,芦静,等. 波浪对泥沙作用的数值研究及在渤海区域的检验[J]. 海洋学报(中文版),2012,34(5):174-182.
- [10] ZHANG G, CHEN Y R, CHENG W C, et al. Wave effects on sediment transport and entrapment in a channel-shoal estuary: the Pearl River Estuary in the dry winter season[J]. Journal of geophysical research: oceans, 2021, 126(4): 16905.
- [11] CHEN C S, LIU H D, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2003, 20(1): 159-186.
- [12] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation[J]. Journal of geophysical research: oceans, 1999, 104(C4): 7649-7666.
- [13] 纪超. 波流耦合作用下三维泥沙输运和岸滩演变的数值模拟[D]. 天津:天津大学,2019.
- [14] CHOI B H, KIM K O, EMM H M. Digital bathymetric and topographic data for neighboring seas of Korea[J]. Journal of Korean society of coastal & ocean engineers, 2002, 14(1): 41-50.
- [15] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2002, 19(2): 183-204.
- [16] SOULSBY R. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications[M]. London: Thomas Telford Publishing, 1997.
- [17] KUANG C P, LI H Y, HUANG G W, et al. Sediment

- [45] WU R S S, WO K T, CHIU J M Y. Effects of hypoxia on growth of the diatom *Skeletonema costatum*[J]. Journal of experimental marine biology and ecology, 2012, 420: 65–68.
- [46] 殷建平, 王友绍, 徐继荣, 等. 海洋碳循环研究进展[J]. 生态学报, 2006(2): 566–575.
- [47] 陈炜, 梁明明, 白永安, 等. 小球藻不同生长时期总脂含量和脂肪酸组成的变化[J]. 水产科学, 2013, 32(9): 545–548.
- [48] 刘永定, 常锋毅, 潘晓洁, 等. 淡水生态系统稳态转换理论及其指导意义[C]//中国海洋湖沼学会藻类学分会. 中国海洋湖沼学会藻类学分会第七届会员大会暨第十四次学术讨论会论文摘要集. 呼和浩特: 中国海洋湖沼学会藻类学分会, 2007: 34.
- [49] RHEE G Y. Effects of N:P atomic ratios and nitrate limitation on algal growth, cell composition, and nitrate uptake[J]. Limnology and oceanography, 1978, 23(1): 10–25.
- [50] 蒲新明, 吴玉霖. 浮游植物的营养限制研究进展[J]. 海洋科学, 2000, 24(2): 27–30.
- [51] LANGER G, OETJEN K, BRENNEIS T. Coccolithophores do not increase particulate carbon production under nutrient limitation: a case study using *Emiliania huxleyi* (PML B92/11) [J]. Journal of experimental marine biology and ecology, 2013, 443: 155–161.
- [52] PERRIN L, PROBERT I, LANGER G, et al. Growth of the coccolithophore *Emiliania huxleyi* in light-and nutrient-limited batch reactors: relevance for the BIOSOPE deep ecological niche of coccolithophores[J]. Biogeosciences, 2016, 13(21): 5983–6001.
- [53] 李铁, 胡立阁, 史致丽. 营养盐对中肋骨条藻和新月菱形藻生长及氮磷组成的影响[J]. 海洋与湖沼, 2000(1): 46–52.
- [54] DUCKLOW H W, STEINBERG D K, BUESSELER K O. Upper ocean carbon export and the biological pump [J]. Oceanography, 2001, 14(4): 50–58.

责任编辑: 周建军

(上接第 34 页)

- transport and morphological responses of a silty coast to a cold front event in the southwest Bohai Bay of China[J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2022, 278: 108106.
- [18] 罗克志, 陶建峰. 岸线变化下渤海湾水沙通量变化研究[C]//第二届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集: 下. 南京: 河海大学出版社, 2022: 181–188.
- [19] 匡翠萍, 戚健文, 蒋茗韬, 等. 泥沙输运与海床演变对曹妃甸港口工程的响应特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1840–1845.
- [20] 宋竑霖, 匡翠萍, 梁慧迪, 等. 港口工程建设对渤海湾西南岸水沙动力环境的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 511–518.

责任编辑: 周建军