



“韦帕”台风连云港海域 三维潮流、泥沙数值模拟*

谢军, 丁琦, 曹慧江, 王大伟, 贾雨少
(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 大风天航道骤淤是连云港海域深水航道建设的关键问题之一。采用三维风浪、潮流及泥沙数学模型, 对“韦帕”台风期间连云港海域的风浪、潮流及泥沙进行了模拟研究, 模型计算值与实测值吻合良好; 对“韦帕”台风期间连云港海域的水位变化、潮流与含沙量的空间分布特征等进行分析, 并利用该模型对连云港深水航道二期工程台风期间航道回淤进行了模拟预测, 结果表明, 在类似“韦帕”台风的大风作用下, 连云港二期航道没有发生泥沙骤淤碍航现象。

关键词: “韦帕”台风; 连云港海域; 三维潮流和泥沙; 数值模拟

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0034-07

3D numerical simulation of tidal current and sediment during Typhoon Wipha in Lianyungang sea area

XIE Jun, DING Qi, CAO Hui-jiang, WANG Da-wei, JIA Yu-shao

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: The sudden siltation is one of the key issues in the construction of Lianyungang waterway. A 3D numerical model which contains modules of wind, wave, tide and sediment is established to simulate and study the wind wave, tide and sediment during Typhoon Wipha in Lianyungang sea area. The results are in high coincidence with the observed data. The variation of water level and the characteristics of spatial distribution of tide and sediment in the said waters during Typhoon Wipha are also analyzed herein. The model is then used to predict the siltation during the construction of Phase II Lianyungang waterway project in typhoon period. The result shows that the navigation obstruction due to sudden siltation would not occur in Lianyungang waterway under the impact of a strong wind like Typhoon Wipha.

Keywords: Typhoon Wipha; Lianyungang sea area; 3D tidal current and sediment; numerical simulation

连云港海岸为典型的淤泥质海岸, 其滩面泥沙颗粒较细, 有较强的粘结力。在正常天气条件下, 掀沙动力以潮流为主, 由于本海域外源泥沙补给基本枯竭, 加之潮流动力较弱, 滩面泥沙较难起动, 常年水体中含沙量很低, 对航道淤积的影响较小; 而大风天气下, 波浪成为主要掀沙动力, 对破波带浅滩的泥沙掀动强烈, 含沙量较正

常天气时有显著增大, “韦帕”台风作用期间, $-5 \sim -3$ m 等深线处实测近底层水体的含沙量可达到 5.0 kg/m^3 以上, 垂向上的含沙量差异十分明显。滩面高含沙量水体的存在及运动, 使航道有发生骤淤的可能。

大风天气下, 水流及泥沙具有较强的三维特性, 如三维流场结构、表底层含沙量垂向差异、

收稿日期: 2016-03-29

*基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2012AA112509)

作者简介: 谢军 (1967—) 男, 博士, 教授级高工, 从事港口航道工程设计研究工作。

泥沙输运方向及速率差异等, 利用三维模型, 可更好地模拟大风天水流及泥沙的空间分布及运动。目前较常用的三维计算模式主要有开源的 ECOM 计算模式, 商业化的有丹麦 DHI 开发的 MIKE3、荷兰 Delft Hydraulic 开发的 DELFT3D 等。针对连云港海域的大风天泥沙问题, 天科院的赵群于 2008 年基于 SWAN 风浪模式、POM 模式及 ECOMsed 模式, 开发了台风浪的波流耦合三维水沙模型对其进行研究。此外, 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室基于 ECOM 模式, 对长江口潮汐潮流、环流、盐水入侵、悬沙输运等问题进行了研究。

本文利用中交上海航道勘察设计研究院有限公司与华东师范大学合作开发的三维风浪、潮流、泥沙模拟系统, 对“韦帕”台风期间, 连云港海域的风浪、潮流及含沙量分布进行模拟, 并用此模式预测了连云港二期航道在“韦帕”台风的大风作用下的航道回淤, 研究航道中发生骤淤的可能性。

1 数学模型的建立与验证

1.1 模型简介

本文采用三维计算模型, 架构中含风场模型、波浪模型、潮流模型和泥沙模型, 其中风场模型基于 WRF 模型建立, 波浪模型基于 SWAN 建立, 潮流模型基于华东师范大学改进后的 ECOM-si 模型建立^[1], 泥沙输运模型在 ECOM-si 模型基础上参考 MIKE3、ECOMsed 模型建立。该模型考虑了风场对波浪场和潮流场的作用, 波、流间的相互作用, 波、流对泥沙的共同作用等, 是一个具有广泛适用性和较高分辨率的三维模拟系统。

本文主要介绍“韦帕”台风作用期间, 利用本模型模拟的连云港海域的潮流、泥沙特征, 有关风场、波浪场的模拟计算见文献[2]。

1.2 潮流模型

1.2.1 控制方程

在流体不可压缩、Boussinesq 和静力近似下, 给出非正交坐标系下三维潮流控制方程组。引入水平非正交曲线和垂向 σ 坐标系, $\xi = \xi(x, y)$, $\eta =$

$\eta(x, y)$, $\sigma = \frac{z-\xi}{H+\xi}$, 三维潮流控制方程组 (包括运动方程和连续性方程) 为:

$$\frac{\partial(DJu_1)}{\partial t} + \frac{\partial(DJ\hat{U}u_1)}{\partial \xi} + \frac{\partial D(J\hat{V}u_1)}{\partial \eta} + \frac{\partial(J\omega u_1)}{\partial \sigma} - Dh_2\hat{V}\left[v_1\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{J}{h_1}\right) - u_1\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{J}{h_2}\right) + Jf\right] - Dh_2u_1v_1 \cdot \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{h_3}{h_1h_2}\right) = -h_2gD\frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(K_m\frac{\partial Ju_1}{\partial \sigma}\right) + DJF_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial(DJv_1)}{\partial t} + \frac{\partial(DJ\hat{U}v_1)}{\partial \xi} + \frac{\partial(DJ\hat{V}v_1)}{\partial \eta} + \frac{\partial(J\omega v_1)}{\partial \sigma} + Dh_1\hat{U}\left[v_1\frac{\partial}{\partial \xi}\left(\frac{J}{h_1}\right) - u_1\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{J}{h_2}\right) + Jf\right] - Dh_1u_1v_1 \cdot \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\frac{h_3}{h_1h_2}\right) = -h_1gD\frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(K_m\frac{\partial Jv_1}{\partial \sigma}\right) + DJF_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\rho g \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{J}\left[\frac{\partial}{\partial \xi}(DJ\hat{U}) + \frac{\partial}{\partial \eta}(DJ\hat{V})\right] + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (4)$$

其中:

$$\omega = w - \sigma\left(\hat{U}\frac{\partial D}{\partial \xi} + \hat{V}\frac{\partial D}{\partial \eta}\right) - \left[(1+\sigma)\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \hat{U}\frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \hat{V}\frac{\partial \zeta}{\partial \eta}\right] \quad (5)$$

式(1)~(3)分别是 ξ 、 η 和垂向方向的运动方程, 式(4)是连续性方程。 ζ 为海表面波动; H 为总水深; ξ 和 η 方向速度分量 (定义为 u_1 和 v_1), 可表示为:

$$u_1 = \frac{h_2}{J}(x_\xi u + y_\xi v) \quad (6)$$

$$v_1 = \frac{h_1}{J}(x_\eta u + y_\eta v) \quad (7)$$

式中: u 、 v 为 x 、 y 方向速度分量; J 为雅可比函数, 表示为 $J = x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi$, 坐标变换后的因子 h_1 和 h_2 定义为

$$h_1 = \sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2} \quad (8)$$

$$h_2 = \sqrt{x_\eta^2 + y_\eta^2} \quad (9)$$

$$\hat{U} = \frac{1}{J}\left(h_2u_1 - \frac{h_3}{h_1}v_1\right) \quad (10)$$

$$\hat{V} = \frac{1}{J}\left(h_1v_1 - \frac{h_3}{h_2}u_1\right) \quad (11)$$

$$h_3 = y_\xi y_\eta + x_\xi x_\eta \quad (12)$$

式中： f 为科氏参数； g 为重力加速度； K_m 为垂向涡动黏滞系数； F_u 、 F_v 代表水平动量扩散项，由 Smagorinsky 公式计算，其中水平扩散系数和水平网格单元大小成正比； K_m 使用改进后 Mellor & Yamada 2.5 阶湍流闭合模型计算。

1.2.2 数值计算格式

模型水平方向采用非正交曲线网格，采用“C”网格有限差分格式；动量方程中的正压梯度力采用隐式方法，连续方程的求解采用半隐方法。输运方程中平流项数值计算格式采用高阶的 TVD 数值格式，完全消除数值计算频散、大幅降低数值计算耗散。

1.3 泥沙模型

1.3.1 控制方程

基于改进后的 ECOM-si 模式，耦合悬沙输运方程为：

$$\frac{\partial(JDS_C)}{\partial t} + \frac{\partial(JD\hat{U}S_C)}{\partial \xi} + \frac{\partial(JD\hat{V}S_C)}{\partial \eta} + \frac{\partial(J\omega S_C)}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\omega_s S_C + \frac{K_V}{D} \frac{\partial S_C}{\partial \sigma} \right) \quad (13)$$

式中： S_C 为悬浮泥沙浓度； ω_s 为泥沙沉降速度。

在 σ 坐标系下，表底边界条件为： $-\omega_s S_C - \left(\frac{K_V}{D} \frac{\partial S_C}{\partial \sigma} \right) = 0, \sigma = 0$ 。

在 σ 坐标系下，流体与海底沉积物界面处的边界条件为： $-\omega_s S_C - \left(\frac{K_V}{D} \frac{\partial S_C}{\partial \sigma} \right) = F, \sigma = -1$ 。其中 F 为泥沙的冲淤函数。

1.3.2 冲淤函数

泥沙冲淤函数 $F = q_{ero} - q_{dep}$ ， q_{ero} 、 q_{dep} 分别为海底的侵蚀通量和泥沙的沉积通量，两者之差为单位时间单位面积由海底进入水体的净物质通量。 q_{ero} 由下式确定：

$$q_{ero} = M \left(\frac{\tau}{\tau_e} - 1 \right) \quad (14)$$

式中： τ_e 为临界冲刷切应力； τ 为底部切应力。当 $\tau \geq \tau_e$ ，床面泥沙发生再悬浮； M 为冲刷系数，量纲为 $kg/(m^2 \cdot s)$ 。

q_{dep} 由下式确定：

$$q_{dep} = \alpha' \omega_s S_C \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d} \right) \quad (15)$$

式中： τ_d 为临界淤积切应力，当 $\tau \leq \tau_d$ 时，悬沙落淤； α' 为沉降几率。

当 $\tau_d \leq \tau \leq \tau_e$ 时，悬沙与底沙不发生交换，即 $q_{ero} = 0$ 、 $q_{dep} = 0$ 。

1.3.3 泥沙沉降

泥沙沉降速度采用张瑞瑾^[3]泥沙沉降速度的通用公式：

$$\omega_0 = \sqrt{\left(13.95 \frac{v}{d_0} \right)^2 + 1.09 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_0} - 13.95 \frac{v}{d_0} \quad (16)$$

式中： ρ_s 、 ρ 分别为水、泥沙的密度； d_0 为悬浮泥沙的中值粒径； v 为黏滞系数。

由于淤泥质海岸悬沙沉降主要为絮凝沉降， d_0 取为絮凝当量粒径；同时考虑到含沙量对沉速的影响，构造了以下函数^[2]来对沉速的计算进行修正：

$$\omega_s = k \omega_0 \quad (17)$$

$$k = f_1 f_2 \quad (18)$$

$$f_1 = a S_C^b \quad (19)$$

$$f_2 = \tanh [dws_s_{loptans} \cdot (S_C - dws_S_{trans})] / 2.0 + 0.5 \quad (20)$$

式中： ω_s 为根据含沙量修正后的悬沙沉降速度； S_C 为含沙量；参数 a 、 b 用以下公式计算：

$$a = (dws_f_{max} / dws_S_{max})^b \quad (21)$$

$$b = \frac{\lg(dws_f_{max} / dws_f_{trans})}{\lg(dws_S_{max} / dws_S_{trans})} \quad (22)$$

a 、 b 计算中有关的参数包括泥沙浓度最大（即 dws_S_{max} ）对应的最大倍数（即 dws_f_{max} ）、泥沙浓度为中等大（即 dws_S_{trans} ）时的对应泥沙沉速系数（即 dws_f_{trans} ）。

构造此函数可满足在浓度较高时缩小泥沙沉速系数，防止泥沙过度沉降；而在浓度适当时，则保持一定的沉降倍数，使沉速随含沙量上升而适当增加。

1.3.4 数值计算格式

悬沙输运方程为对流扩散方程，包括了泥沙的平流、扩散以及自身沉降等。其中平流项和水

平流扩散项采用显式, 垂向湍流扩散项采用隐式。泥沙的沉降过程在数学模型中较为复杂, 采用中央差的格式容易把下层的泥沙信息带入上层, 无法正确模拟泥沙的沉降过程, 本模型对沉降过程采用 3rd HSIMT-TVD 格式进行处理, 能较好地确保数值模式精度。

1.4 模型范围及网格划分

模型的计算区域覆盖了整个海州湾, 网格数为 344×275, 对港区及航道水域进行了局部加密。其中航道水域的网格分辨率约为 40 m, 横向上约有 5 个网格, 能较好地分辨航道地形; 模型在垂向上均匀分为 6 层。

1.5 参数选取

模型的计算时间步长为变步长, 为 10~30 s; 根据模型的率定, 临界淤积切应力 τ_d 取为 0.08~0.1 N/m², 临界冲刷切应力 τ_e 取为 0.35 N/m², 冲刷系数 M 取 2.0×10^{-5} kg/(m²·s), 泥沙沉降几率 α' 取为 0.7。在验证“韦帕”台风所引起的航道回淤时, 考虑到风后航道水深测量时间(2007 年 9 月 21 日)与台风过境时间(2007 年 9 月 19 日—9 月 21 日)接近, 航道中的淤积物主要为浮泥, 参考文献[4]的成果, 回淤土的密度应在 1.11~1.18 t/m³, 故干密度取为 200 kg/m³ 进行计算; 方案计算中, 影响航道通航的为泥沙密实后的实质性回淤, 回淤土的干密度取为 640 kg/m³。

1.6 模型验证

台风“韦帕”过境期间, 在-3 m 和-5 m 水域各设置了一个测站(图 1), 对潮流、泥沙、波浪等进行观测。

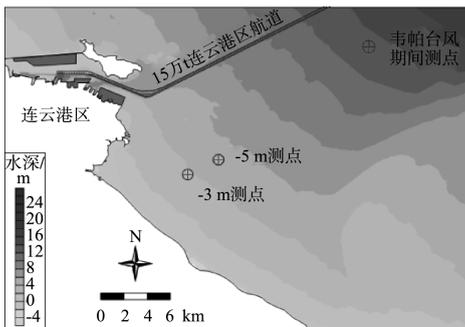


图 1 模型验证点位置

-5 m 测点的潮位验证结果见图 2, 流速、流向验证结果见图 3。模型的计算结果与实测资料较为吻合, 台风期间的水位变化过程与实际情况基本一致, 高、低水位也接近实测值; 底层流速较实测值偏小, 但较好地体现了风前、台风期间及风后的流场过程, 台风期间底层的流速双峰结构等。

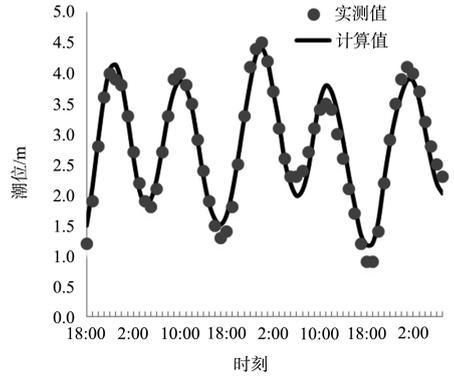
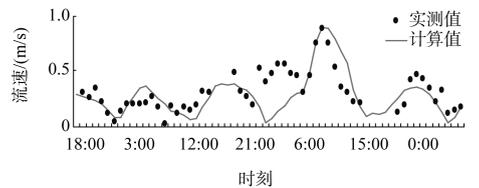
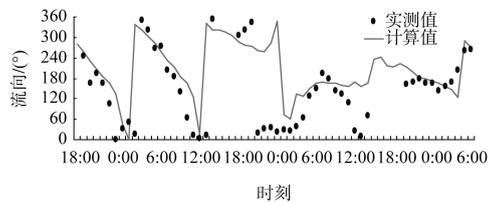


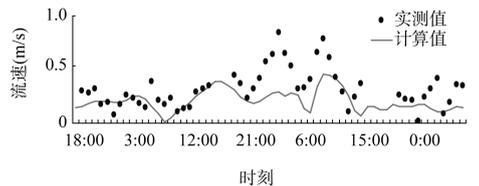
图 2 2007 年 9 月 18—21 日-5 m 测点潮位验证



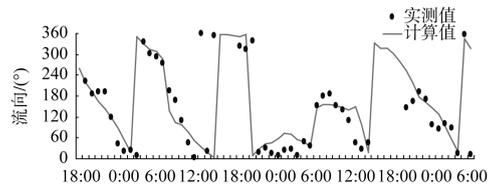
a) 表层流速



b) 表层流向



c) 底层流速



d) 底层流向

图 3 2007 年 9 月 18—21 日-5 m 测点流速、流向验证

含沙量验证结果见图4。模型总体上较好地复演了台风过境前后本海域的含沙量变化过程。两测点风前的含沙量在 0.05 kg/m^3 左右，实测值与计算值相差不大；随着风力和波浪的逐渐增强，含沙量也随之上升，表层与底上 0.5 m 处的含沙量计算峰值与实测值相差不大，而 -3 m 测点底上 1.5 m 处的计算值要比实测值偏大；风后含沙量较快恢复至常风天水平，计算值与实测值也基本一致。

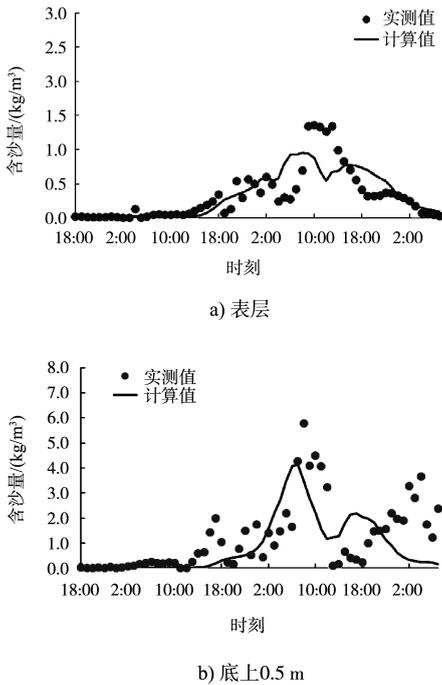


图4 2007年9月18—21日-5 m测点含沙量验证

“韦帕”台风作用后连云港航道的回淤验证结果见图5。由计算所得回淤分布曲线可见，在“韦帕”台风作用下，连云港港区航道的回淤强度由W弯段向外海侧逐渐增大，在W弯段外约 2.3 km 处，淤强达到最大值 (0.5 m 左右)，而后向外海侧逐渐减小。模型计算的回淤值与实测值总体上吻合程度较好，较好地复演了台风期间的航道冲淤趋势。

从验证结果来看，本文三维模型的计算精度总体上满足规范^[5]的要求，较好地再现了台风作用期间连云港海域的水流泥沙特征及航道冲淤情况。

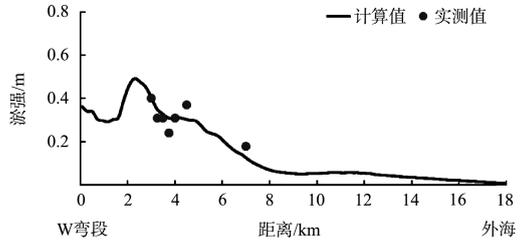


图5 “韦帕”台风作用后(2007-09-13—2007-09-21)航道回淤验证

2 台风期间流场及含沙量分布特征

2.1 流场特征

“韦帕”台风作用下，连云港海域全潮平均水位较正常天气下均有所增高(图6)，增幅从外海至岸线逐渐增大。连云港港区平均水位增加值约为 0.22 m ；徐圩港区增加值约为 0.24 m ；连云港港区西北侧靠岸处增幅最大，可达到 0.34 m 。

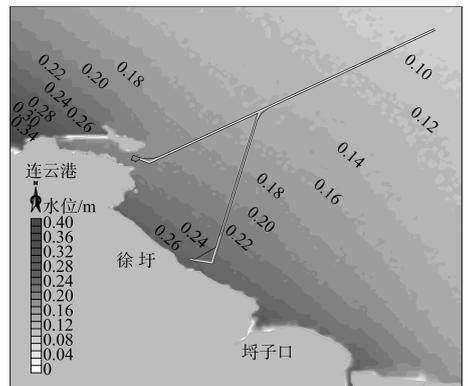
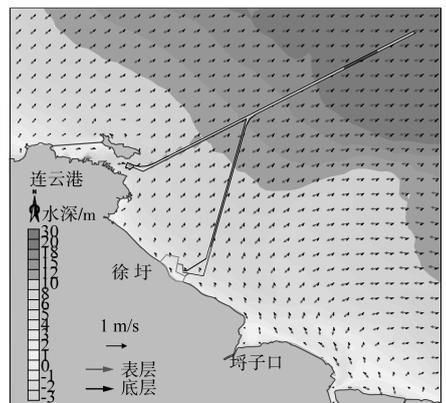
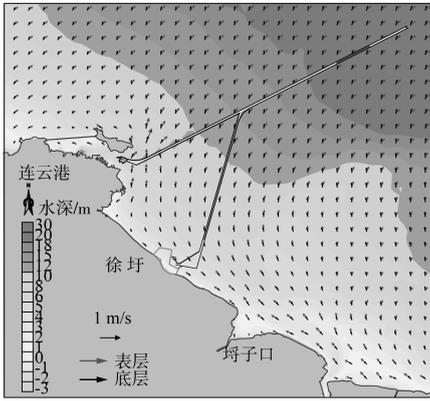


图6 “韦帕”台风期间连云港港海域全潮平均水位变化

“韦帕”台风期间表、底层潮流涨、落急流场见图7。受台风影响，潮流特征与正常天气下有所不同，且在涨潮期间比较明显。



a) 涨急



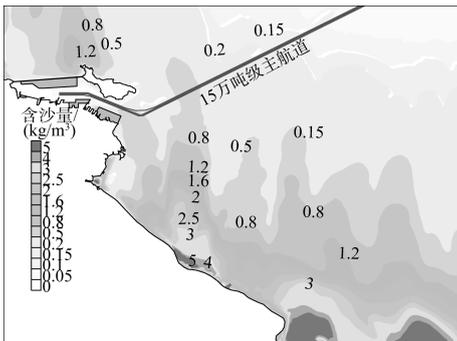
b) 落急

图 7 “韦帕”台风期间连云港海域流矢

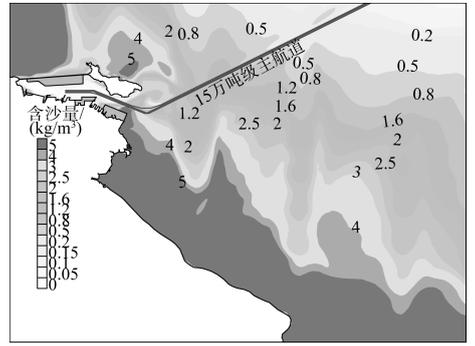
涨潮期, 底层流流向与正常天气情况下较为接近, 由外海的 NE-SW 向逐渐向近岸转变为 N-S 向; 而表层流受风应力影响, 在外海侧接近于 E-W 向, 向近岸逐渐偏向 NE-SW 向; 落潮期影响相对较小一些, 表、底层的流向较为接近。

2.2 含沙量分布特征

“韦帕”台风作用期间, 连云港海域含沙量达到最大时的分布见图 8。台风浪对海底底面扰动剧烈, 含沙量较正常天气时有显著上升, 尤其是近岸侧的破波带, 最大含沙量能达到 5.0 kg/m^3 以上, 使外海深水侧和近岸侧的含沙量水平分布差异更为明显。同时含沙量在垂向分布上也有显著差异, 连云港港区口门附近的表层最大含沙量在 0.5 kg/m^3 左右, 而底层则可以达到 2.0 kg/m^3 以上, 徐圩海域的大片水域位于浅滩区破波带, 因而底部含沙量更高。



a) 表层



b) 底层

图 8 “韦帕”台风期间连云港海域最大含沙量分布

3 工程方案模拟预测

选取连云港港 30 万吨级航道二期工可中的远期方案^[6]作为研究对象, 模拟该方案在类似“韦帕”台风的一场大风作用后的回淤情况。方案的工程布置见图 9, 航道尺度见表 1。

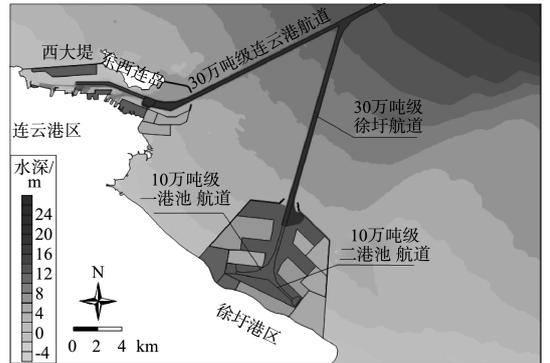


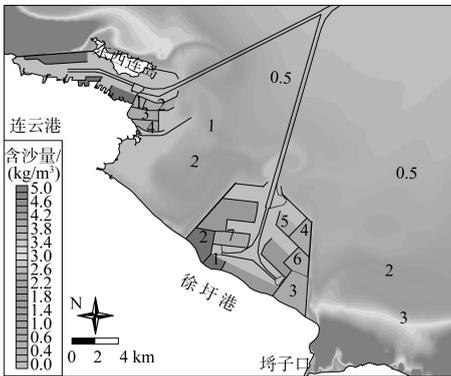
图 9 计算方案工程布置

表 1 航道设计尺度

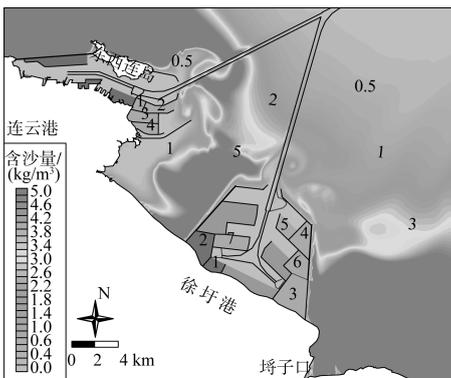
航道段	有效宽度/m	设计底高程/m	长度/km	轴线走向/°
连云港外航道内段	290,310	-22.5	17.3	112~292 063~243
连云港外航道外段	350	-23.0	35.6	063~243
徐圩航道	350,370	-22.0	17.6	016~196
徐圩一港池航道	210	-13.3	7.3	100~290
徐圩二港池航道	170	-13.3	2.6	132~312

注: 水深基面为当地理论最低潮面。

模型计算的最大含沙量分布见图 10, 航道回淤见图 11。



a) 表层



b) 底层

图 10 “韦帕”台风期间最大含沙量分布

徐圩港的圈围工程使浅滩的掀沙面积减小，防波堤的建造阻挡了口外来沙，也降低了港内的波高，使港内的含沙量显著低于口门外。“韦帕”台风作用期间，徐圩港口门外表、底层的最大含沙量分别在 1.0 和 4.0 kg/m³，港内水体的含沙量低于 0.5 kg/m³。连云港口门外的表、底层的最大含沙量分别在 0.8 和 3.5 kg/m³，港内水体的含沙量也低于 0.5 kg/m³。

两航道的沿程回淤分布规律较为接近，以干密度 640 kg/m³ 折算的回淤厚度，最大淤厚均出现在口门外侧，向口门处，防波堤束流作用明显，淤厚迅速减小，港内淤积不大；向外海侧，淤厚也逐渐减小。连云港航道的最大淤厚为 0.31 m，出现在口门外侧约 1.3 km 处；徐圩航道的最大淤厚要小于连云港航道，为 0.22 m，出现在口门外侧约 700 m 处。从大风回淤预测强度来看，两航道在类似于“韦帕”台风的大风作用下，均不会发生骤淤现象。

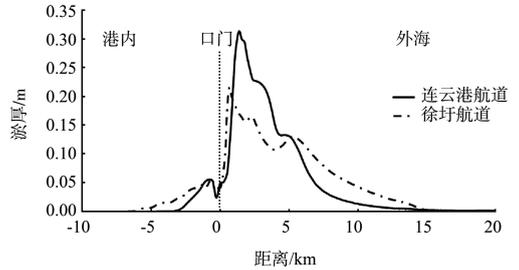


图 11 “韦帕”台风作用后连云港及徐圩航道沿程回淤分布

4 结语

1) 利用三维风浪、潮流、泥沙数学模型，对连云港海域在“韦帕”台风作用期间的流场、含沙量场进行模拟。从验证结果来看，模型计算的各测点流速、含沙量过程及航道冲淤与实测值吻合良好，符合相关规范的要求。

2) 利用本模型，对连云港二期航道在类似于“韦帕”台风一场大风作用后的回淤进行了预测。结果表明，连云港区 30 万吨级航道的最大淤强为 0.31 m，徐圩港区 30 万吨级航道的最大淤强为 0.22 m。两航道中均没有出现大风骤淤碍航的现象，表明在海面开敞、海床平缓的淤泥质海岸开挖深水航道，不会出现大风骤淤现象。

参考文献:

- [1] 朱建荣, 朱首贤. ECOM 模式的改进及在长江河口、杭州湾及邻近海区的应用[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(4): 364-374.
- [2] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 华东师范大学河口海岸研究院. 三维风浪、潮流及泥沙数值模拟系统开发研究[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2011.
- [3] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [4] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 连云港主港区航道淤积泥沙水力特性试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2008.
- [5] JTS/T 23-2—2010 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S].
- [6] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 连云港港 30 万吨级航道二期工程潮流泥沙数模研究报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2012.

(本文编辑 武亚庆)