

徐圩港区邻近海域溢油模拟分析

林伟波¹, 陈晓燕¹, 李婧慧²

(1. 江苏省海涂研究中心, 江苏 南京 210036; 2. 江苏省海洋环境监测预报中心, 江苏 南京 210036)

摘要: 利用 MIKE21 水动力模型对徐圩港区附近海域进行潮流数值模拟, 并利用实测资料对模型计算的潮位、流速及流向进行验证。验证结果显示: 数模结果与实测值吻合较好。该潮流数学模型可以反映研究海域水动力特性, 并作为溢油模块的水动力基础数据。基于欧拉-拉格朗日“油粒子”理论考虑油膜运动过程中扩散、蒸发、乳化等过程, 建立了徐圩港区邻近海域二维溢油扩散模型, 模拟不同潮时情况下发生溢油, 考虑不同风况(夏季常风向、冬季常风向和最不利风向), 分析不同情况下的溢油油膜漂移路径、漂移路程及扫海面积。结果表明: 72 h 内油膜最大扫海面积及漂移路程均出现在落潮期最不利风时溢油, 分别为 28.2 km² 和 25.8 km。在夏季常风和最不利风的落潮期发生溢油, 油膜会经过口门飘向西北侧海域, 对该区域生态环境会造成一定影响。

关键词: MIKE21; 溢油; 漂移路程; 扫海面积

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)03-0082-09

1 引言

近年来, 随着我国近海及海上船舶施工和油气储运设施增多, 油品泄漏事故增加, 不仅给企业带来重大经济损失, 而且对海洋生态环境造成巨大威胁。海上溢油事故发生后, 油膜在海域内的运动及变化是一个极其复杂的过程, 它是海洋环境问题的难点之一。国外自 20 世纪 60 年代开始溢油输运扩散数值模拟预报方法的研究^[1]。Reed 等^[2]对 20 世纪溢油模型的研究和发展进行了回顾, 主要经历了油膜扩展理论、对流扩散方法和油粒子法 3 个阶段。“油粒子”模式在溢油模拟发展过程中具有划时代的意义, 也成为了当今主流的溢油模式^[3]。国内的学者在海南岛南部^[4]、福建东吾洋湾^[5]、福宁湾^[6]、浙江乐清湾^[7]、长江口^[8]、江苏滨海^[9]、胶州湾及渤海湾等^[10-12]不同海域运用该方法开展了大量的溢油数值模拟预报研究工作。

本文基于丹麦水利研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)开发的 MIKE 软件中非结构化网格的

水动力模型对徐圩港区附近海域进行潮流数值模拟, 在此基础上通过“油粒子”模型对该区进行溢油模拟, 并分析不同情况下溢油油膜的漂移轨迹、扫海面积, 为海洋环境影响评价和溢油事故应急措施的制定提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 水动力模型控制方程

MIKE21 HD 是一个可用于河口、海湾以及近海潮位及潮流的综合数值模型, 对于二维流场模拟已经被应用于许多工程之中。本文使用该模块对徐圩港区进行了水动力模拟实验, 潮流数据验证良好后输入溢油模块, 作为溢油水动力场的驱动条件。水动力模型用连续方程和动量守恒方程来描述流场和潮位的变化。

连续方程:

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-08-01。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC0407504); 江苏省级海洋科技创新专项(HY2018-1、HY2017-2)。

作者简介: 林伟波(1980-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事河口海岸水动力研究。E-mail: lwblayman@163.com

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \zeta)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(h + \zeta)v] = 0 \quad (1)$$

x 向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) - f_b \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h + \zeta} u \end{aligned} \quad (2)$$

y 向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) - f_b \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h + \zeta} v \end{aligned} \quad (3)$$

式中: x, y 为直角坐标系坐标; t 为时间; ζ 为相对某一基面的水位(单位:m); h 为相对某一基面的水深(单位:m); u, v 分别为 x, y 方向上的垂线平均流速分量; N_x 为 x 向水流紊动粘性系数(单位: m^2/s); N_y 为 y 向水流紊动粘性系数(单位: m^2/s); f 为科氏力系数, $f = 2\omega \sin \varphi$, φ 为纬度; ω 为地球自转速度; f_b 底部摩擦系数, $f_b = g/C^2$, 其中 C 为谢才系数, g 为重力加速度。

2.2 溢油控制方程

(1) 随机游动与扩散过程

在流场计算的基础上,将溢油分成有限个质点,每个质点的漂移位置按下式计算:

$$X = X_0 + (U + \alpha W_{10} \cos A + r \cos B) \Delta t \quad (4)$$

$$Y = Y_0 + (V + \alpha W_{10} \sin A + r \sin B) \Delta t \quad (5)$$

式中: X_0, Y_0 为某质点的初始坐标; U, V 为 X, Y 方向的流速分量; W_{10} 为海面 10 m 高处风速; A 为风向; α 为修正系数; r 为随机扩散系数, $r = R \cdot E$, R 为 0~1 之间的随机数, E 为扩散系数; B 为随机扩散方向, $B = 2\pi R$ 。

(2) 延展过程

延展过程决定了表面浮油的面积扩展,从而进一步影响水面油膜的蒸发、溶解、扩散和光氧化作用。延展是湍流扩散以及重力、惯性、黏性和表面张力平衡的联合作用结果。采用修正的 Fay 理论基础上的重力-粘力公式计算油膜扩展:

$$\left(\frac{dA_{oil}}{dt} \right) = K_a \cdot A_{oil}^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{V_{oil}}{A_{oil}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (6)$$

式中: A_{oil} 为油膜面积, $A_{oil} = \pi R_{oil}^2$; R_{oil} 为油膜半

径; K_a 为系数(率定为 0.6); t 为时间; 油膜体积 V_{oil} 为:

$$V_{oil} = R_{oil}^2 \cdot \pi \cdot h_s \quad (7)$$

式中: h_s 为油膜初始厚度。

(3) 蒸发过程

蒸发过程可导致 10%~30% 的浮油从水面进入大气,具体百分比取决于油种。简单时间型蒸发计算式如下:

$$\text{loss}(\% \text{weight}) = (A + B \cdot T) \cdot \ln(t) \quad (8)$$

式中: A 为油特征常数; B 为油的温度特征常数; T 为油温,单位: $^{\circ}\text{C}$; t 为油龄,单位: min 。

(4) 水体携带过程

水面浮油暴露在风和浪中,浮油会被携带或扩散进入水体。水体携带是一种物理过程,在破碎浪的作用下,油滴从水面迁移到水体中。水体携带速率 Q_d ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 和油粒子大小之间的关系见下式:

$$Q_d = C^* D_d^{0.57} S F d^{0.7} \Delta d \quad (9)$$

式中: C^* 为与油种和风化状态相关的水体携带速率经验常数; D_d 为单位表面积耗散的破碎波能量,单位: J/m^2 ; S 为浮油覆盖的水面面积分数; F 为受破碎浪侵袭的水面面积分数; d 为油粒子直径,单位: m ; Δd 为油粒子直径差,单位: m 。

(5) 乳化过程

水-油乳化物(或称为乳胶状物)的形成取决于油的组分和水环境条件。乳化油可能有 80% 是以连续相油存在的微米级油粒子。一般乳化油的黏度要高于形成乳化油之前的油品黏度。由于水的混入,油/水混合物的体积明显加大。水混入油相的速率计算方法见下式:

$$\text{水的吸收速率} = K_{em} \times (U + 1)^2 \times \frac{(Y_{\max} - Y_w)}{Y_{\max}} \quad (10)$$

式中: U 为风速,单位: m/s ; K_{em} 为乳化率常数; Y_w 为水分数; Y_{\max} 为水在油相中的最大比例。

2.3 水动力计算参数及网格

模型计算域从南至北包含了盐城、连云港、日照所在海域,南北跨度约 130 km,东至 30 m 等深线处。将其划分成非结构三角形网格,并在徐圩港区内进行了加密处理,在港区内部附近分辨率最大达到 30 m,港池内水深在 1~5 m 之间,整个计算区域

包括三角形网格 39 544 个,网格节点数 20 554 个(见图 1)。开边界上使用东中国海模型预报得到边界水位进行驱动,闭边界采用干湿边界处理。模型使用冷启动,时间步长为 60 s,每小时输出潮流场数据,计算 10 d,取后 6 d 稳定流场进行验证分析,得到该区水动力场。

2.4 溢油模型参数设置

工程实施过程中的施工船舶燃料油泄漏会造成海域泄漏事故,不同船型、不同事故情况的溢油量都不同,具有较大的随机性。此次模拟的溢油油品设定为燃料油,密度为 920 kg/m^3 ,最大含水率为

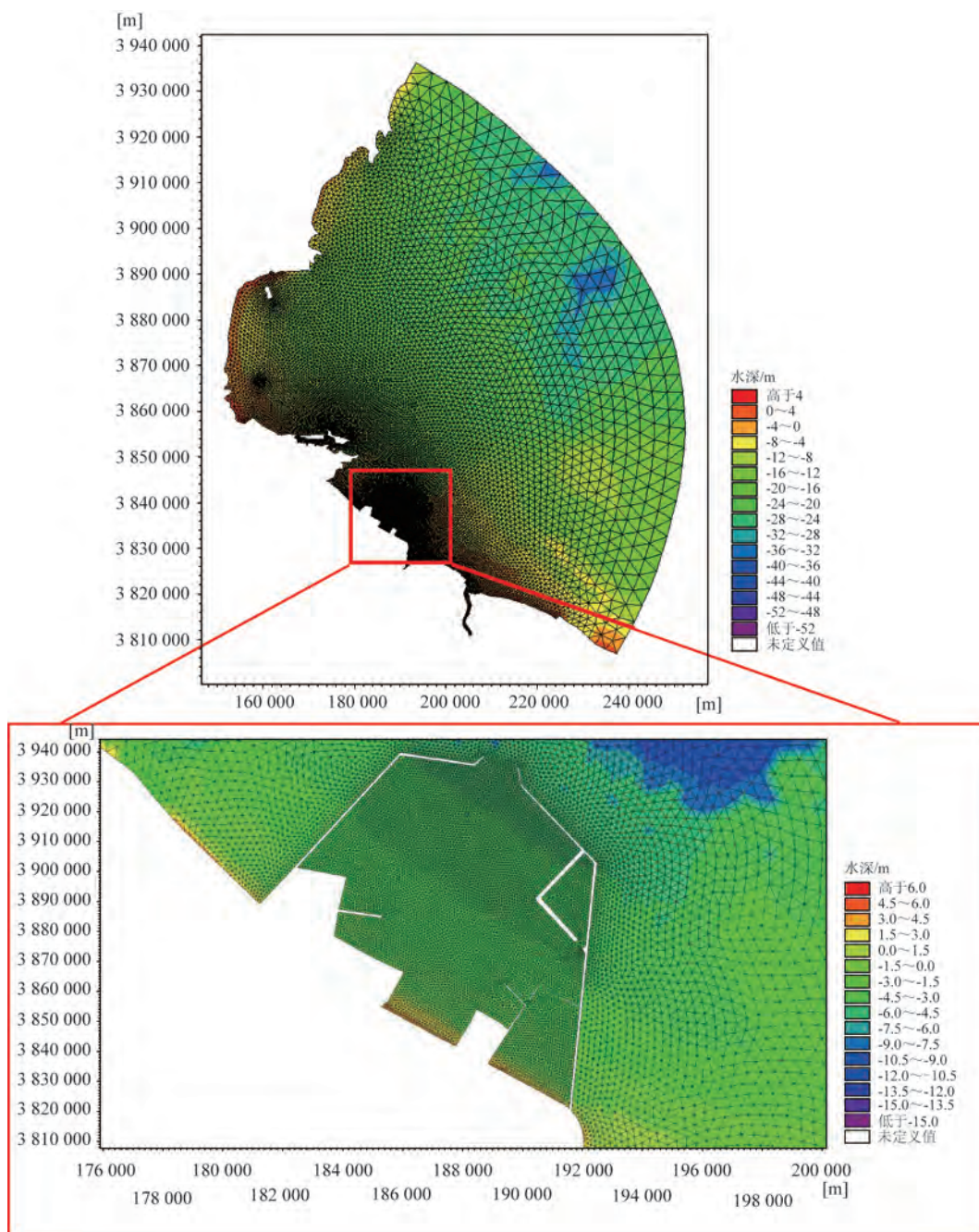


图1 模型计算网格(单位:m)

表 1 溢油风况及潮时组合

| 情景 | 溢油时刻 | 风况 | 风向 | 风速/(m/s) |
|----|------|------|----|----------|
| 1 | 涨潮 | 夏季常风 | E | 4.8 |
| 2 | 涨潮 | 冬季常风 | N | 4.5 |
| 3 | 落潮 | 夏季常风 | E | 4.8 |
| 4 | 落潮 | 冬季常风 | N | 4.5 |
| 5 | 落潮 | 最不利风 | SE | 10.7 |

0.85,以10 t燃料油作为泄漏源强。溢油类型为固定点源瞬时溢油,油粒子数为1 000。油膜漂移过程中抵达岸边视为被拦截,不再计算溢油量。在本工程实施时,溢油最大风险可能发生位置位于四区导堤龙口南侧区。根据连云港海洋站1974—2005年风速、风频率资料,夏季常风向为E,风速为4.8 m/s,冬季常风向为N,风速为4.5 m/s,最不利风向为SE,风速为10.7 m/s。本文模拟了夏季常风向、冬季常风向及最不利风向下涨潮和落潮时刻分别发生溢油的共计5种情景,具体溢油风况及潮时组合见表1。利用水动力结果作为溢油模型驱动,考虑风况及溢油潮时组合,溢油模型时间步长为3 600 s,每小时输出溢油结果,模拟6个潮周期(72 h)内油膜漂移运动。溢油模型考虑水平扩散、蒸发和乳化过程,水平扩散系数取 $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$,蒸发常数A和B取2.67和0.06,乳化率常数取 10^{-6} ,最大水分数取0.75。溢油蒸发比例随时间变化在10%~26%之间。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

潮位验证数据潮位采用2015年1月23日13时—1月29日15时(北京时,下同)的现场实测资料,共设3个潮位站,分别为赣榆港区H1、西连岛H2和开山岛H3站,流速及流向验证数据为徐圩港区V1及灌河口外部V2测站2015年1月23日13时—1月24日16时的大潮实测资料,2015年1月28日11时—1月29日15时的小潮期实测资料,潮流、潮位测站分布见图2。图中流速的正负分别代表潮流的涨落,落潮流速为正值,涨潮流速为负值。根据验证结果可知,该模型模拟所得潮位及流速流向与实测数据验证较为吻合,可较好地反映当地水动力形态,计算所得水动力场可用于溢油模型(见图3—7)。

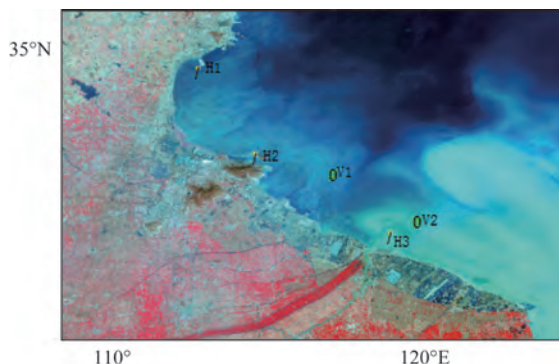


图2 潮位、潮流验证测站位置

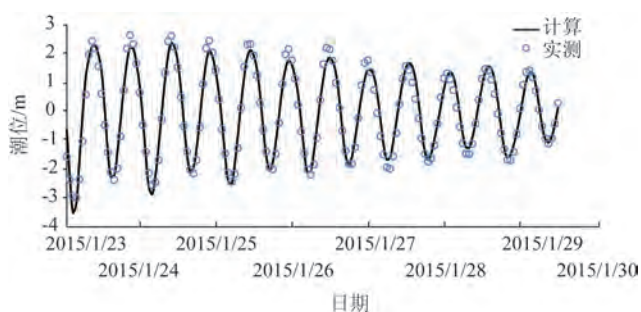


图3 赣榆港区H1潮位站潮位验证过程线

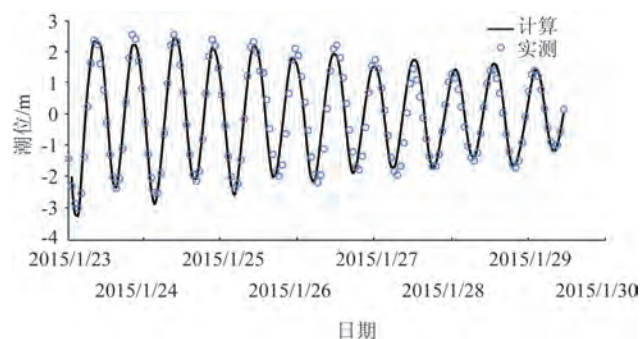


图4 西连岛H2潮位站潮位验证过程线

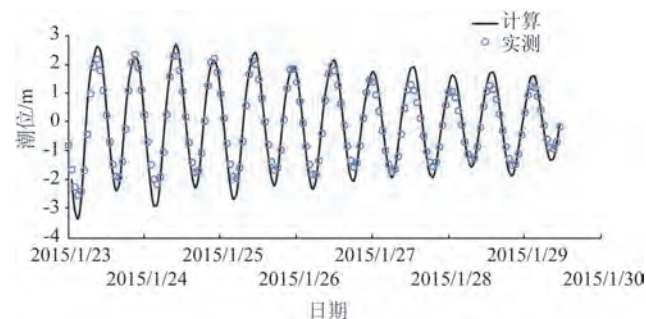


图5 开山岛H3潮位站潮位验证过程线

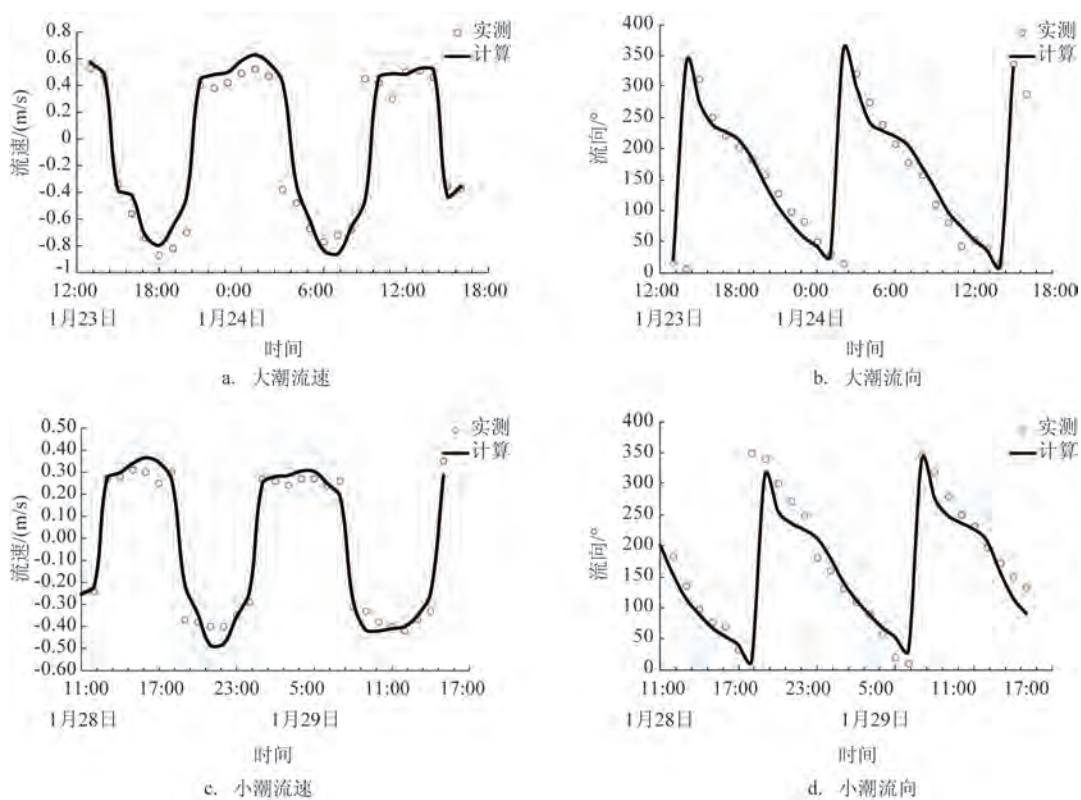


图6 V1测站流速与流向计算值与实测值的比较

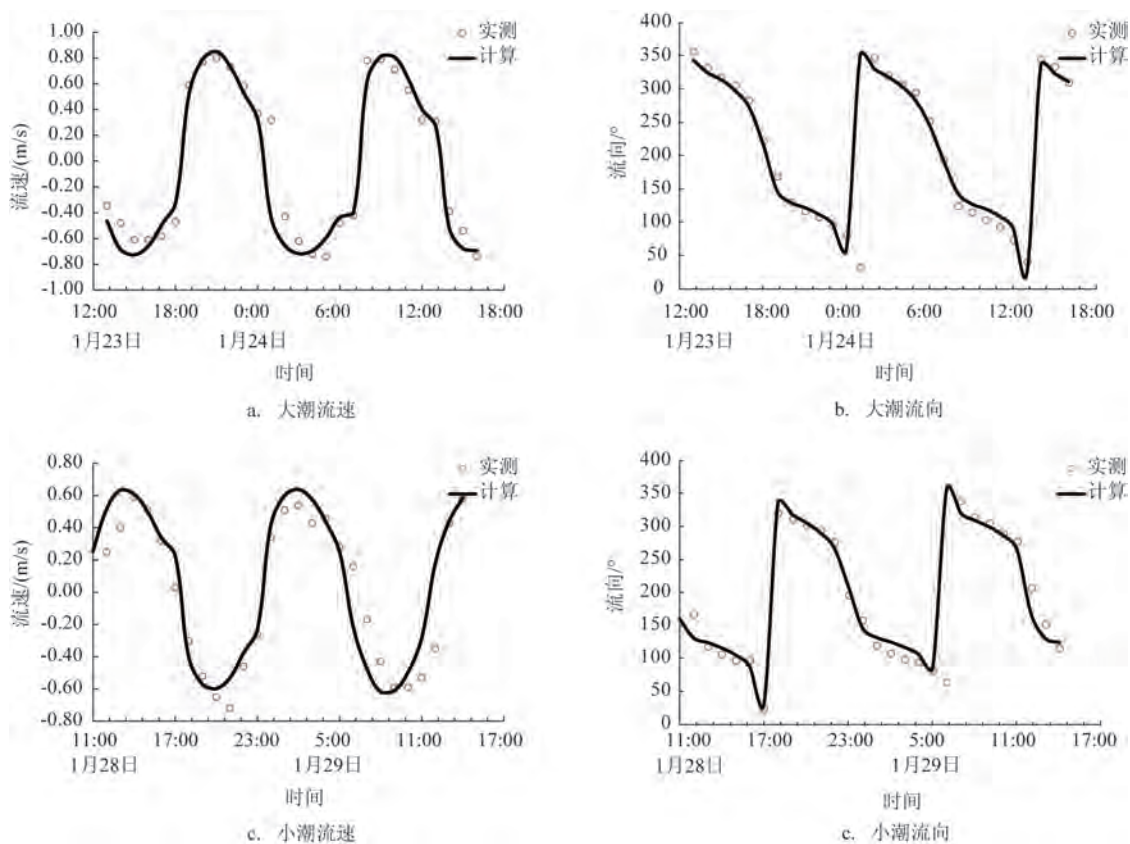


图7 V2测站流速与流向计算值与实测值的比较

3.2 水动力模拟结果

油类在海面漂移,表层流场为其主要的驱动力,图8为大潮期涨落潮表层流场分布图,涨潮时,外海潮流基本以NE~SW方向进入海州湾;落潮时,潮流则基本以SW~NE向退出海州湾;潮流的流向与等深线或岸线的交角较大,即潮流的沿岸运动趋势较小,而以离岸、向岸的往复运动为主。

3.3 溢油模拟结果

表2和图9—11显示了当船舶分别在涨潮阶段及落潮阶段发生泄漏时,油膜粒子经72 h后的漂移轨迹及扫海范围。

通过预测可以看出,在夏季常风条件下,当泄

漏发生在涨潮阶段,油膜向北侧围堤内漂移,72 h后油膜扫海面积 0.6 km^2 ;当泄漏发生在落潮阶段,油膜在落潮流和风作用下,油膜先向西北漂移出防波堤口门后,再往西漂移,72 h后油膜扫海面积约 15.8 km^2 。

表2 溢油风险预测分析

| 潮时/(年/月/日/时) | 风况 | 72 h扫海面积/ km^2 | 72 h漂移路程/km |
|--------------------|------|-------------------------|-------------|
| 涨潮 2015/1/23/18:00 | 夏季常风 | 0.6 | 1.9 |
| 落潮 2015/1/23/23:00 | 夏季常风 | 15.8 | 29.0 |
| 涨潮 2015/1/23/18:00 | 冬季常风 | 2.1 | 5.5 |
| 落潮 2015/1/23/23:00 | 冬季常风 | 11.8 | 20.8 |
| 落潮 2015/1/23/23:00 | 最不利风 | 28.2 | 25.8 |

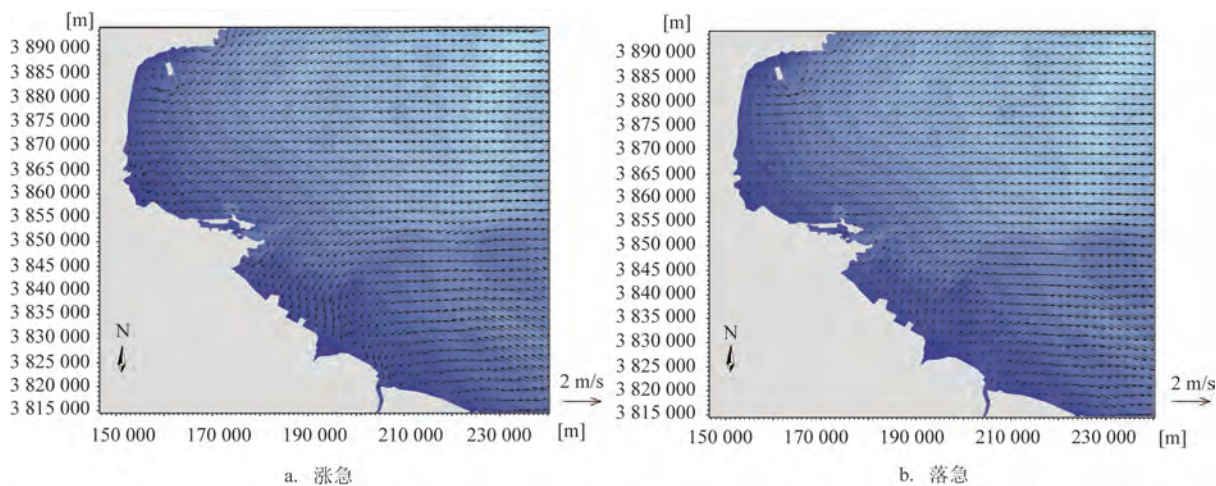


图8 大潮流场分布(单位:m/s)

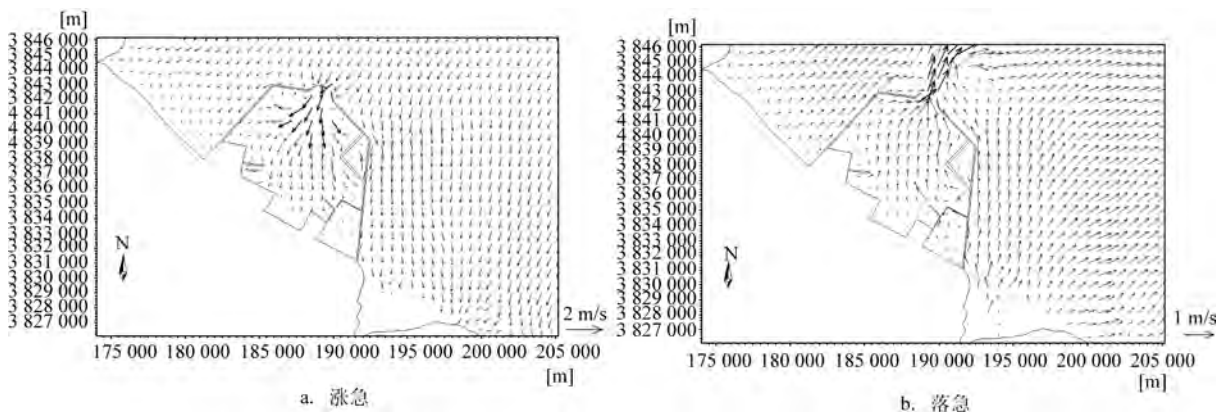
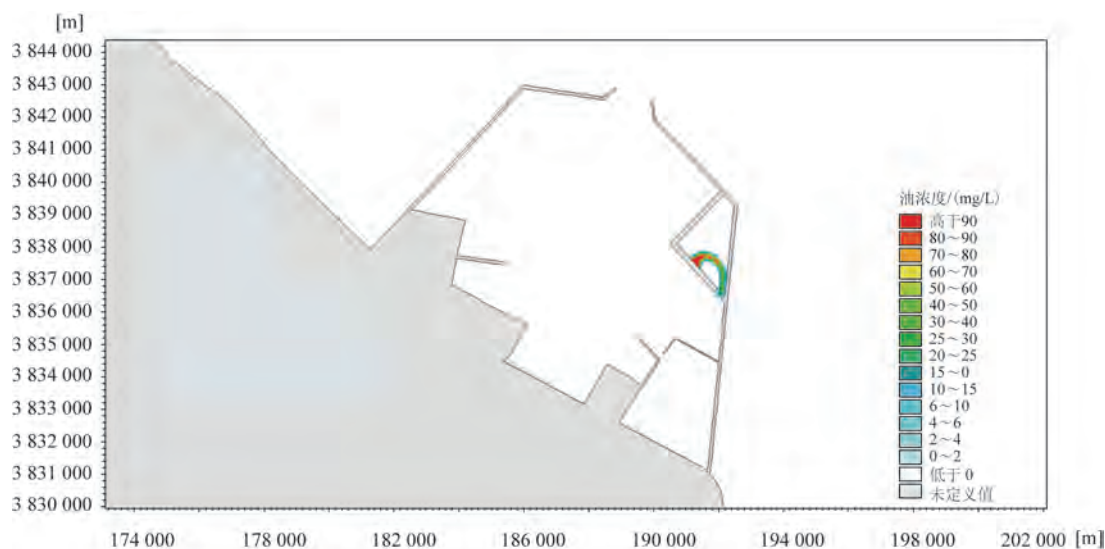
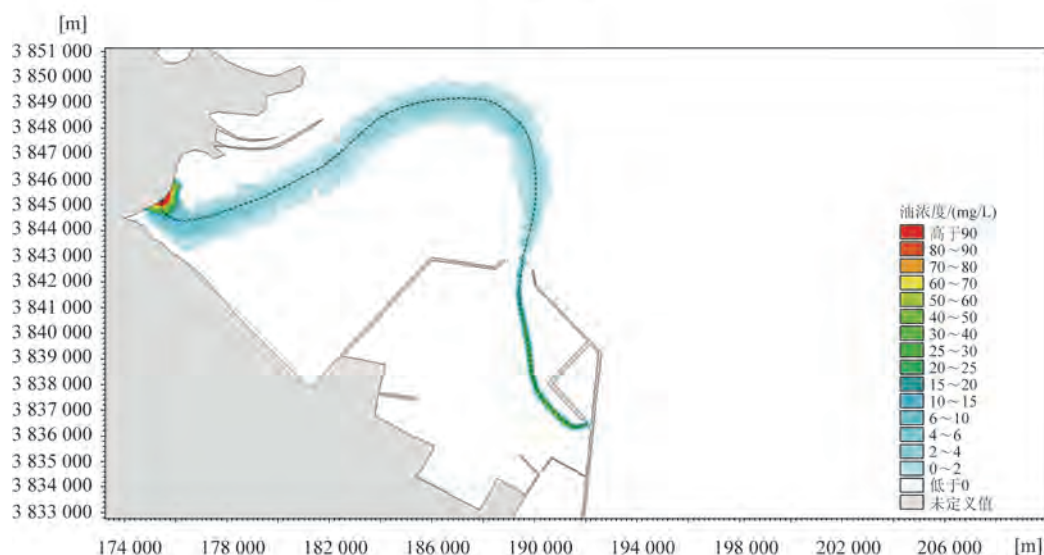


图9 工程局局部大潮流场分布(单位:m/s)



a. 涨潮期



b. 落潮期

图10 夏季常风条件下1~72 h扫海面积和漂移轨迹

在冬季常风条件下,当泄漏发生在涨潮阶段,油膜向北侧围堤内漂移,72 h后油膜扫海面积 2.1 km^2 ;当泄漏发生在落潮阶段,油膜在落潮流和风作用下,油膜先向西北侧漂移,出口门后,在 N 风的作用下,往口门内侧移动,72 h后油膜扫海面积约 11.8 km^2 。

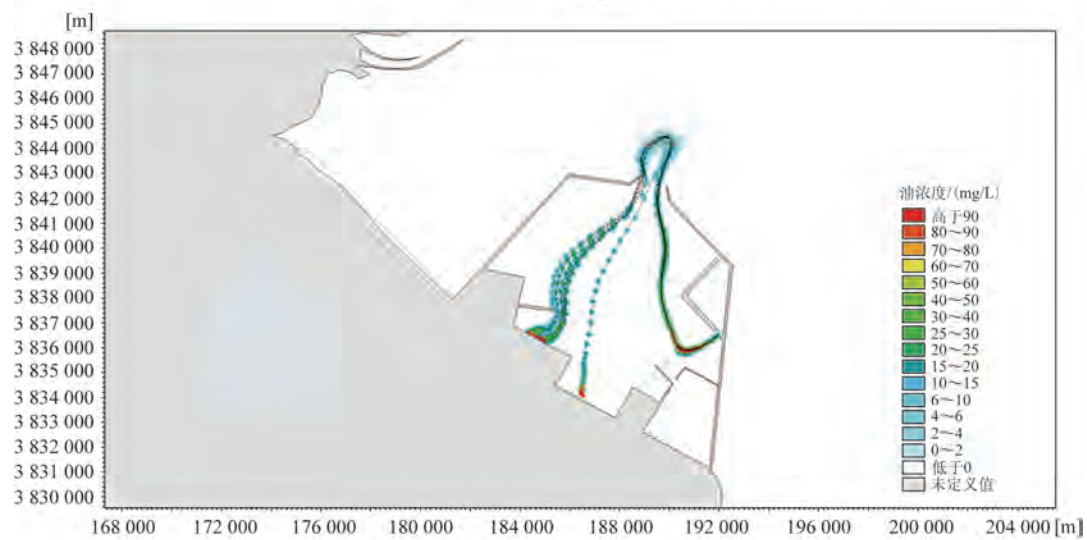
从夏季和冬季常风向的实验中可以看出涨潮时溢油仅在围堤内漂移,因此本文对涨潮时最不

利SE风向的情况不再计算。

在最不利风向条件下,当泄漏发生在落潮阶段,油膜在落潮流和风作用下,油膜先向西北侧漂移,在3.5 h后抵达东西防波堤口门,之后在SE风和潮流的共同作用下,往西北方向移动,在11 h后到达田湾核电站取水工程,此时油膜距离泄漏位置漂移路程约为 25.8 km ,72 h后油膜扫海面积约 28.2 km^2 。



a. 涨潮期



b. 落潮期

图 11 冬季常风条件下1~72 h扫海面积和漂移轨迹

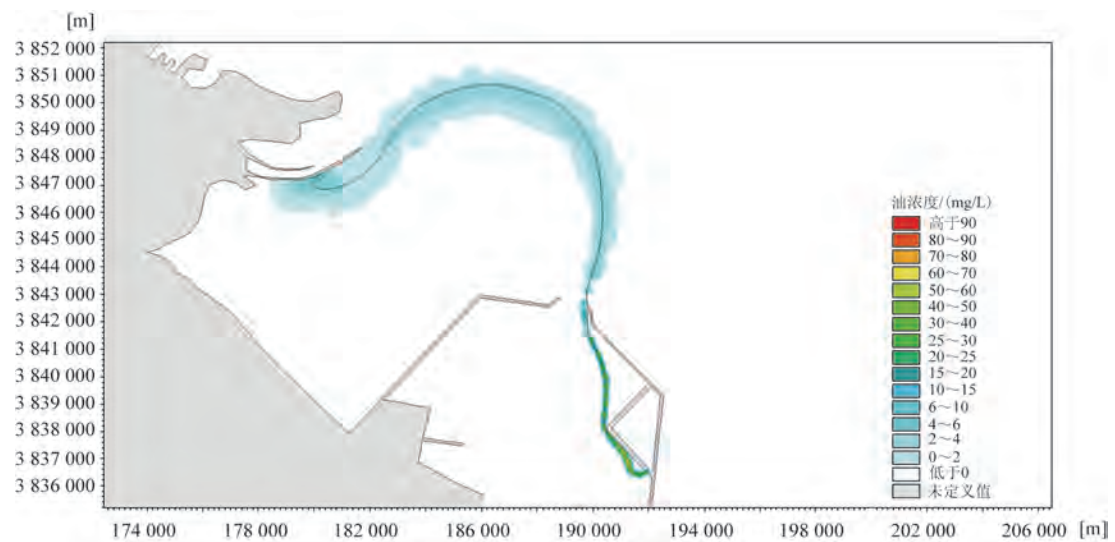


图 12 落潮期最不利风条件下1~72 h扫海面积和漂移轨迹

4 结论

利用 MIKE21 HD 模块建立了连云港海域水动力模型,较好地模拟了该海域的潮流情况。在此基础上,利用拉格朗日“油粒子”模型对徐圩港区附近溢油情景进行了模拟,由数值模拟结果可得到以下结论:

(1)油类在水中运动受多种因素共同影响,不同潮时不同风况下溢油的漂移轨迹、漂移路程及扫海面积都存在较大差异。

(2)徐圩港区附近溢油漂移扩散主要受潮流和风场影响,72 h 内油膜最大扫海面积及漂移路程均出现在落潮期最不利风时溢油,分别为 28.2 km² 及 25.8 km。徐圩港区内落潮时发生溢油,在夏季风 E 风和最不利风 SE 风的条件下,油膜会经过口门飘向西北侧海域,对该区生态环境会造成一定影响。

(3)不同风况下溢油,油膜受风及潮流共同驱使,油膜漂移方向与表面海流和风所引起的流速之矢量和的方向大致相同。

参考文献:

[1] 李燕,杨逸秋,潘青青.海上溢油数值预报技术研究综述[J].海洋

预报,2017,34(5): 89-98.

[2] Reed M, Johansen Ø, Brandvik P J, et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1999, 5(1): 3-16.

[3] 李彤,向运荣,张恒.水上事故溢油运动轨迹与环境归宿预测模型的研究进展[J].环境监控与预警,2013,5(3): 5-11.

[4] 王璟,娄安刚,曹振东.崖城油气田附近海域溢油漂移轨迹数值模拟预测[J].海洋预报,2012,29(3): 73-80.

[5] 濮鸣峰,杨红,张午.东吾洋关门渔港邻近海域溢油模拟分析[J].海洋环境科学,2017,36(1): 121-128.

[6] 张海文,赵懿珺,纪平.福宁湾海域溢油扩散影响的数值模拟研究[J].应用海洋学报,2019,38(1): 84-92.

[7] 顾恩慧,姚炎明.乐清湾北港区溢油轨迹的分形模拟[J].海洋通报,2013,32(4): 460-466.

[8] 宋泽坤,程和琴,刘昌兴,等.长江口溢油数值模拟及对水源地影响[J].长江流域资源与环境,2013,22(8): 1055-1063.

[9] 郭健,杨红,张午,等.江苏滨海北区风电场溢油风险数值模拟[J].海洋湖沼通报,2018(3): 68-78.

[10] 吴亚楠,董胜,高俊国,等.海庙港溢油扩散数值模拟研究[J].海洋湖沼通报,2015(2): 177-184.

[11] 黄娟,曹雅静,高松,等.渤海海上溢油漂移扩散数值模拟研究[J].海洋科学,2014,38(11): 100-107.

[12] 娄安刚,王学昌,孙长青,等.胶州湾海面溢油轨迹的数值模拟[J].黄渤海海洋,2001,19(1): 1-8.

The oil spill simulation around Xuwei Port Area

LIN Wei-bo¹, CHEN Xiao-yan¹, LI Jing-hui²

(1. Tidal Flat Research Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036 China; 2. Jiangsu Marine Environment Monitoring and Forecasting Center, Nanjing 210036 China)

Abstract: The tidal current surrounding Xuwei Port is simulated using MIKE21 hydrodynamic module, and the computed tidal level, current velocity and direction are validated by comparing with observations. It shows that the numerical simulation results agree well with observations. As a result, the tidal current mathematical model could reflect the local hydrodynamic characteristics and can be used as a hydrodynamic base for oil spill model. A two-dimensional oil spill diffusion model around Xuwei Port is established based on the Eulerian-Lagrangian “oil particle” method, which considers the diffusion, evaporation and weathering processes of the oil film. The model is used to simulate oil spill situations in different moments of tide, and to analyze the drift path, drift distance and swept area of oil film under different wind conditions. The results show that both the maximum swept area and drift distance of the oil film within 72 hours occur during the ebb tide under the most unfavorable wind condition, which are 28.2 km² and 25.8 km, respectively. The oil film will pass by the entrance of Xuwei Port and drift to the northwest sea area when the oil spill occurs at ebb tide under winter monsoon and the most unfavorable wind condition, which affects the ecological environment in this area.

Key words: MIKE 21; oil spill; drift distance; swept area