

围头湾海域溢油风险模拟及对周围环境敏感区的影响研究

赵兴¹, 王宪鑫¹, 吴亮², 邢成路¹, 霍然¹

(1. 中海油能源发展股份有限公司安全环保分公司安全环保工程技术研究院, 天津 300457; 2. 中海石油环保服务(天津)有限公司, 天津 300457)

摘 要: 基于 MIKE21 水动力模型对围头湾海域进行潮流数值模拟, 对比实测数据来验证模型模拟的潮位、流速及流向的可靠性。基于拉格朗日“油粒子”理论考虑油膜运动过程风化行为, 建立了围头湾海域二维溢油扩散模型, 模拟预测 4 个不同条件下油膜扫海面积及油膜对环境敏感区的污染情况。结果表明: 溢油事故会对围头湾内环境敏感区均造成严重污染。夏季常风向(最不利风向)条件下油膜抵岸污染严重, 72 h 残油量高达 46.7%, 油膜漂移距离短, 扫海面积小于 60 km²; 冬季常风向条件下油膜漂移距离远, 扫海面积大于 228 km², 但 72 h 残油量较低, 为 37.1%。

关键词: MIKE21; 溢油事故; 数值模拟; 预测; 环境敏感区

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)01-0057-08

1 引言

随着世界航运业的迅速发展, 船舶溢油事故频发发生^[1]。船舶运输作为海上石油运输的主要手段之一, 在航行和码头作业过程中可能会突发事故, 导致船舶燃料油、污染性货物、油污水等污染物泄漏, 对海洋生态和自然环境造成巨大破坏。

为了科学评估溢油事故对生态环境的影响程度, 提高溢油事故处置和应急响应能力, 通常采用数值模拟方法对溢油自身扩展运动、溢油在水流和风场作用下的漂移和扩散以及各种风化行为进行预测^[2]。溢油扩散受多种因素影响, 包括油密度、粘度、挥发性等自身化学性质和温度、风向、潮流等环境因素^[3-4]。国外从 20 世纪 60 年代起开展海上溢油扩散数值模拟研究^[5], 预报方法先后经历油膜扩展模拟、对流扩散方程和“油粒子”理论 3 个阶段^[6], 其中“油粒子”理论已成为当今的主流模式, 在溢油模拟进程中具有跨时代意义。我国已针对岛屿^[7]、港口^[8]、航道^[9]、锚地^[10]、沿海近岸^[11]、船舶^[12]和海底管道^[13]等目标, 耦合多个模型开展了大量的溢油风险模拟工作。

由于围头湾海域溢油漂移模拟的相关文献资料较少, 本文基于 MIKE21 软件中非结构化网格的水动力模型对围头湾海域进行潮流数值模拟, 结合“油粒子”模型对该区域进行溢油模拟, 以期丰富该地区的溢油研究, 更好地保护该海域海洋环境。由于围头湾以潮流为主, 环流影响较小, 因此只计算潮流即可开展模拟。选取经分析确定的船舶溢油事故多发点为溢油事故点, 分析不同情况下油膜的扫海面积及对环境敏感区的危害程度。模拟结果对围头湾港口码头事故多发区潜在的溢油风险防控以及该区域的溢油漂移预测和环境影响评价具有积极的指导意义。

2 模型和方法

2.1 海域环境概况

围头湾是闽东南沿海重要的海上交通要道, 分为 5 个港口作业区和 5 条主要航道(见图 1)。海域内有较好的养殖条件, 沿海均开展了一定规模的海水养殖, 养殖品种包括牡蛎、紫菜、梭子蟹等。海域周边有较多的环境敏感资源, 包括围头湾养殖区、

收稿日期: 2021-09-08; 修回日期: 2022-02-10。

基金项目: 中国海洋石油集团公司项目(KJGG-2022-17-06)。

作者简介: 赵兴(1993-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海上溢油应急处置研究。E-mail: 178089267@qq.com

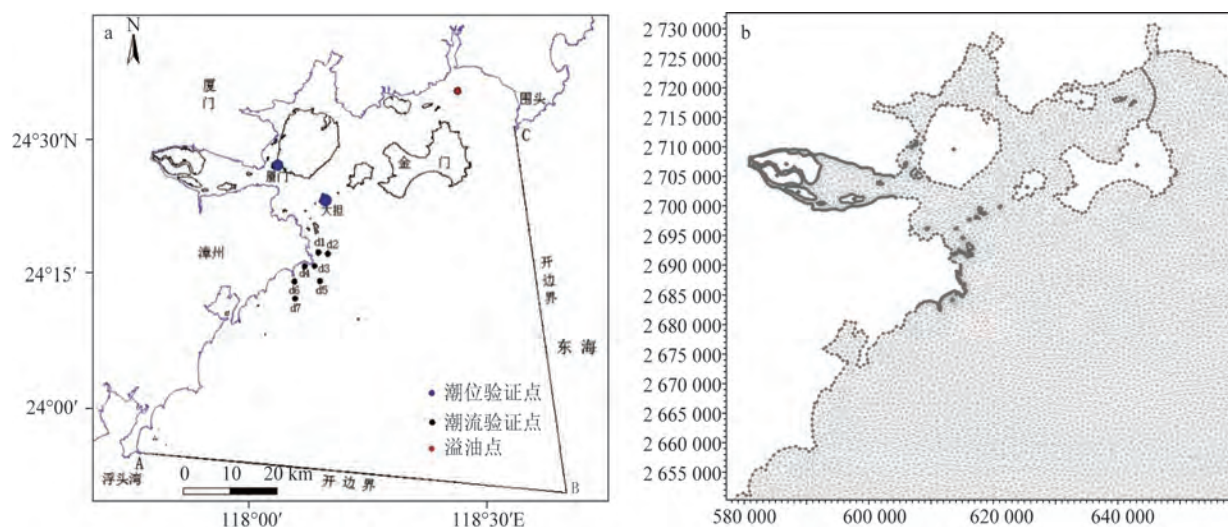


图2 大海域计算域和验证点位置(a)及网格图(b)

Fig.2 Large sea area computing domain and verification point location (a) and grid map (b)

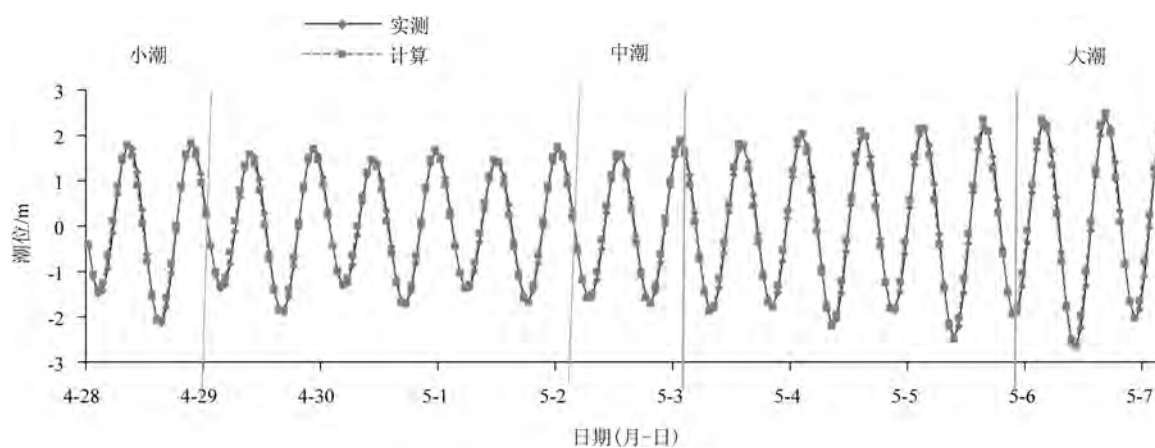


图3 厦门潮位验证曲线

Fig.3 Verification curve of Xiamen tide level

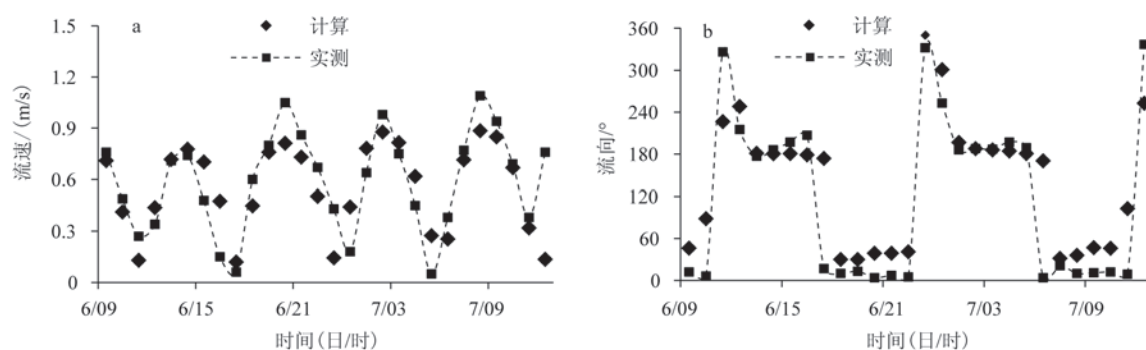


图4 d2潮位站(大潮)流速(a)和流向(b)验证曲线

Fig.4 Verification curves of velocity (a) and direction (b) of d2 tidal level station (spring tide)

表1 d2潮流验证点的潮位、潮流模拟结果误差

Tab.1 Error of tidal level and tidal flow simulation results at d2 tidal flow verification point

| 点位 | d2涨潮流/(m/s) | d2涨潮流向/° |
|------|-------------|----------|
| 平均误差 | 0.125 | 26.206 |
| 标准误差 | 0.167 | 35.208 |

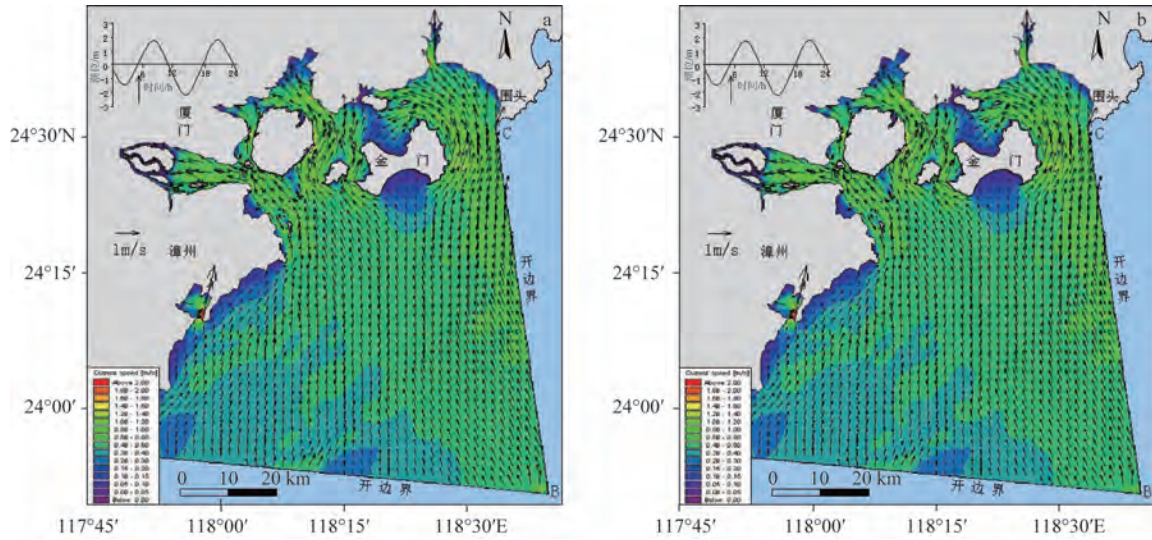


图5 大潮期间涨潮中间时(a)和落潮中间时(b)潮流场

Fig.5 Flow field during spring tide at the middle of high tide (a) and at the middle of low tide (b)

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \\
 & \quad \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \\
 & \quad \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \\
 & \quad \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} + \frac{\partial hvu}{\partial x} = fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \\
 & \quad \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \\
 & \quad \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S
 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: t 为时间; g 为重力加速度; η 为自由水面水位 (单位: m); $h = \eta + d$, h 为总水深 (单位: m), d 为海底到静止海面的距离; S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} 为辐射应力张量的分量值; u 、 v 为 x 、 y 方向垂线平均流速分量; ρ 为水体密度, ρ_0 为水体相对密度; P_a 为大气压力; S 为源汇项流量值; u_s 、 v_s 为源汇项流速值; $f =$

$2\omega \sin \varphi$, 其中 ω 是地球自转角速度, φ 是地理纬度; (τ_{sx}, τ_{sy}) 、 (τ_{bx}, τ_{by}) 为 x 、 y 方向表面风和海底剪切应力的分量; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 为横向应力, 包括粘性摩擦、湍流摩擦、平流摩擦。

2) 扩展过程

扩散速度分量在 Δt 时间内平均移动为:

$$\begin{aligned}
 S_{rmsL} &= \sqrt{2 \times D_L \times \Delta t} \\
 S_{rmsT} &= \sqrt{2 \times D_T \times \Delta t}
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: S_{rmsL} 和 S_{rmsT} 分别是纵向和横向距离的平均平方根; D_L 、 D_T 为水平扩散系数, 取值为 $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$; Δt 为时间步长。

(2) 非动力学过程

1) 蒸发

对于厚油膜部分:

$$F = (1/C) [\ln P_0 + \ln (K_m A v t C / RTV + 1/P_0)] \quad (4)$$

式中: F 为蒸发量; V 为溢出量 (单位: m^3); R 为空气常数; C 为常数; A 为厚油膜面积 (单位: m^2); T 为海面温度 (单位: K); v 为摩尔体积; t 为时间; K_m 为质输系

数,与 $U_{0.78}$ 成比例, U 为风速; $P_0 = C_r \cdot \exp(1 - T_0/T)$,其中 C_r 是常数, T_0 是沸点(单位:K)。

对于薄油膜的部分:

$$R_{\text{eva}} = C_{\text{eva}} (t/t_{\text{max}}^c) \quad (5)$$

式中: R_{eva} 为蒸发率; C_{eva} 为系数; t_{max}^c 为蒸发的最大时间,由溢油的组份决定。

2) 乳化作用

乳化物含水量计算公式为:

$$Y_w = \frac{1}{K_B} (1 - e^{-K_A K_B (1 + U_w)^{2t}}) \quad (6)$$

式中: Y_w 是乳化物含水量(单位:%); $K_A = 4.5 \times 10^{-6}$; U_w 是风速; $K_B = \frac{1}{Y_w^F} \approx 1.25$,其中 Y_w^F 为含水量; t 为时间。

① 密度变化

油密度受乳化影响公式为:

$$\rho_e = (1 - Y_w) \rho_0 + Y_w \rho_w \quad (7)$$

式中: ρ_e 是乳化后密度; ρ_0 是乳化前密度; ρ_w 是海水密度; Y_w 是乳化物含水量。

油密度受蒸发影响公式为:

$$\rho = (0.6 \rho_0 - 0.34) F + \rho_0 \quad (8)$$

集合乳化与蒸发对密度影响公式为:

$$\rho = (1 - Y_w) [(0.6 \rho_0 - 0.34) F + \rho_0] + Y_w \rho_w \quad (9)$$

② 粘性变化

蒸发和风化会使溢油粘性增加,此外环境温度也是导致粘性变化的重要因素。

$$\eta = \eta^{\text{oil}} \exp \frac{2.5 y_w}{1 - 0.654 y_w} \quad (10)$$

式中: η 是油在乳化后的运动粘性系数; η^{oil} 是油在乳化前的运动粘性系数; y_w 是乳化物含水量。

粘性受蒸发影响公式为:

$$\eta^{\text{oil}} = \eta_0^{\text{oil}} \exp(C_4 F_e) \quad (11)$$

式中: C_4 为无量纲量(wt%); F_e 为蒸发量。

乳化、蒸发因素综合运算公式如下:

$$\frac{d\eta^{\text{oil}}}{dt} = C_4 \eta_0^{\text{oil}} \frac{1}{V_{\text{oil}}^0} \frac{dV_e}{dt} + \frac{2.5 \eta^{\text{oil}}}{(1 - y_w^{\text{max}} y_w)^2} \frac{dy_w}{dt} \quad (12)$$

式中: V_e 为溢出量(单位: m^3)。

(3) 模型参数设定

模型中相关参数取值见表2。

表2 部分模型参数设置

Tab.2 Partial model parameters

| 参数 | 过程 | 系数过程取值 |
|-------------------------------|------|-----------------------|
| 风漂移系数(c_w) | 对流 | 0.035 |
| 油的最大含水率(y_w^{max}) | 乳化 | 0.85 |
| 油的最大含水率(K_1) | 乳化 | 5×10^{-7} |
| 释出系数(K_2) | 乳化 | 1.2×10^{-5} |
| 传质系数(K_{Si}) | 溶解 | 2.36×10^{-6} |
| 蒸发系数(k) | 蒸发 | 0.029 |
| 油辐射率(I_{oil}) | 热量迁移 | 0.82 |
| 水辐射率(I_{water}) | 热量迁移 | 0.95 |
| 大气辐射率(I_{air}) | 热量迁移 | 0.82 |
| 漫射系数 α (Albedo) | 热量迁移 | 0.1 |

模型中水平(横向和纵向)扩散系数 D_L 和 D_T 的取值非常重要,反映了油粒子在水体中的扩散强度和随机紊动强度,对模拟结果影响较大,而且不同的场合下取值范围相差很大,本次评价中 D_L 和 D_T 取值为 $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 。模型采用的是“油粒子”模型,其扩散系数概念与常规的对流扩散模型有所不同,体现在:油粒子只在水体表面运动;粒子不按水动力模型中设定的网格运移,而是按实际运移路径准确计算;扩散系数取值与模型网格布置方式和时间步长关系不大。

(4) 溢油预测时长

由于选取的研究位置周边溢油应急力量配备充足,船舶碰撞导致的泄漏溢油量有限,本文参考《水上溢油环境风险评估技术导则》,选择72 h作为溢油预测时长。

2.3.2 溢油模型方案设定

根据围头湾溢油事故统计分析,近10 a围头湾发生溢油事故78起,船舶碰撞事故占比达31%。该海域的船舶在由石井支航道进出港时会与另一航道的进出船舶相遇,碰撞事故发生的可能性增大。石井航道与菊江支航道交汇点为事故多发点,坐标为 $118^\circ 26' 51'' \text{E}$, $24^\circ 35' 06'' \text{N}$ 。选择涨潮期和落潮期为事故研究时段,油品性质为燃料油,模拟溢油量为41.5 t,由固定点源瞬时溢出,油粒子数为3 000,模拟时长跨度为72 h。该工程海域夏季盛行风向为SSW向,冬季为NE向,平均风速分别取4.5 m/s和5.5 m/s。鉴于周围环境敏感区的分布情况,选择最不利风向为SSW(夏季)。本文对两种风况和两种潮时下的4种情景进行溢油模拟(见表3)。

表3 4种溢油模拟场景表

Tab.3 Four kinds of oil spill simulation scenarios

| 情景 | 潮时 | 风况 | 风速/(m/s) |
|----|----|----------------|----------|
| 1 | 涨潮 | SSW夏季常风(最不利风向) | 4.5 |
| 2 | 落潮 | SSW夏季常风(最不利风向) | 4.5 |
| 3 | 涨潮 | NE冬季常风 | 5.5 |
| 4 | 落潮 | NE冬季常风 | 5.5 |

3 结果与讨论

4种典型溢油模拟情况下72 h内溢油扩散范围

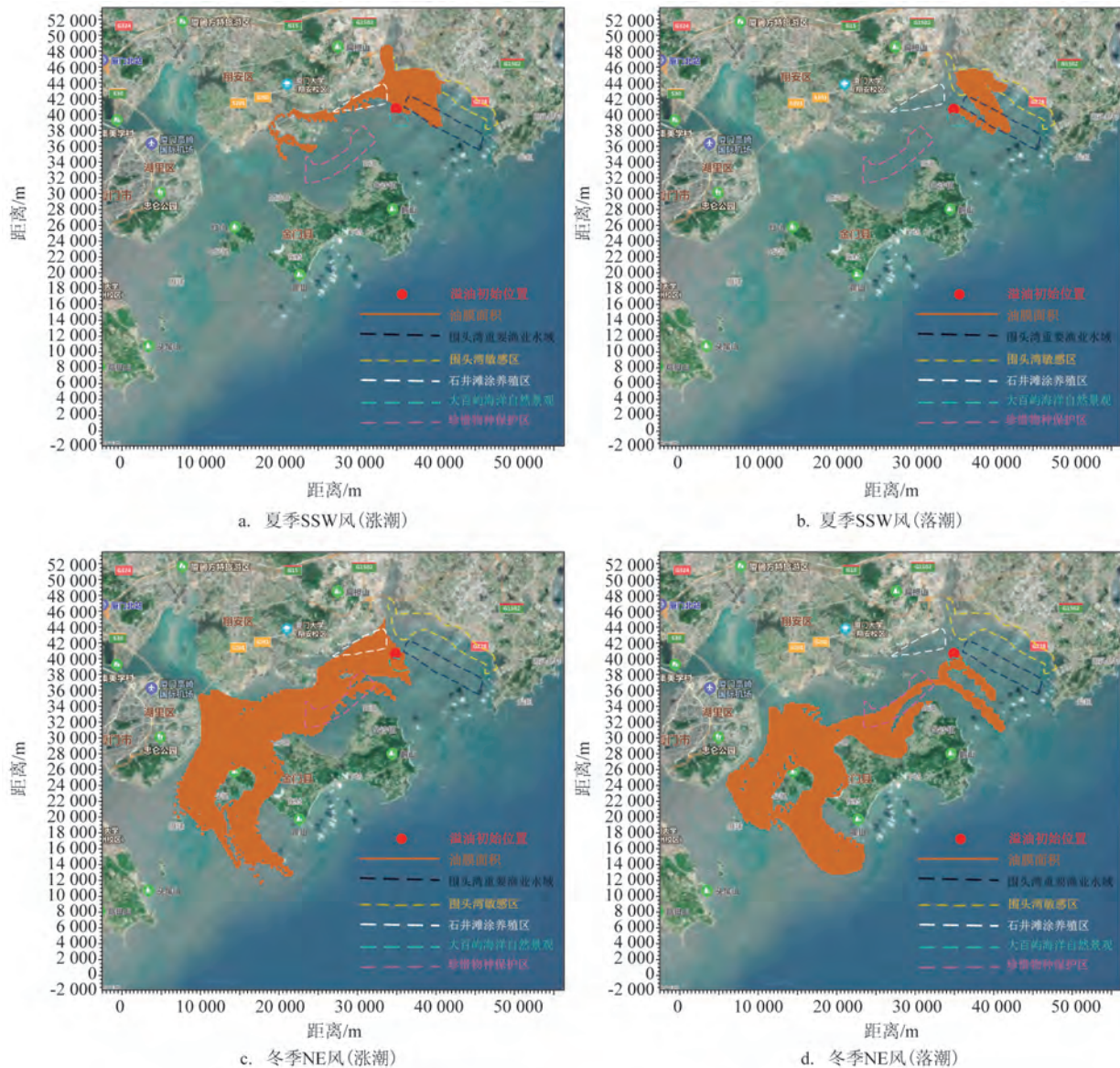


图6 72 h内4种典型模拟情况下油膜扫海情况

Fig.6 Oil film sweeping in four typical simulated situations within 72 h

见图6,72 h油膜扫海面积、扩散距离和残留量见表4。

在SSW风向(4.5 m/s 风速)涨潮发生溢油的72 h内,油粒子在风和潮流的共同作用下首先向东北方向扩散,少量油粒子在潮流影响下沿石井岸线向西漂移。溢油事故会对围头湾环境敏感资源区造成严重污染,2 h内污染围头湾重要渔业水域、大百屿海洋自然景观与历史文化遗迹生态保护区,24 h内污染石井滩涂养殖区,48 h内大面积污染围头湾养殖区。

在SSW风向(4.5 m/s 风速)落潮发生溢油的72 h内,在风和潮流的共同作用下油膜主体向东北扩

表4 不同风向、风速下油膜扫海面积与即时残油量

Tab.4 Sweeping area and immediate residual oil amount under different wind direction and wind speed

| 潮时 | 风况 | 扫海面积/km ² | 72 h 残油量/t | 72 h 漂移距离/km |
|----|--------------|----------------------|------------|--------------|
| 涨潮 | 夏季常风 (最不利风向) | 58.4 | 19.4 | 14.6 |
| 落潮 | 夏季常风 (最不利风向) | 30.8 | 17.4 | 8.4 |
| 涨潮 | 冬季常风 | 262.6 | 16.8 | 33.7 |
| 落潮 | 冬季常风 | 228.4 | 15.4 | 34.9 |

散。溢油事故会对围头湾环境敏感资源区造成严重污染,1 h内污染围头湾重要渔业水域、大百屿海洋自然景观与历史文化遗产生态保护区,24 h内大范围污染围头湾养殖区,48~72 h内溢油在东林镇海岸附近发生持续抵岸污染。

在NE风向(5.5 m/s 风速)涨潮发生溢油的72 h内,在风和潮流的共同作用下油膜主体向西南方向扩散。溢油事故会对大百屿海洋自然景观与历史文化遗产生态保护区、围头湾重要渔业水域、石井滩涂养殖区造成污染;48 h内油膜经过厦门珍稀海洋物种自然保护区,登陆大嶝县、金门县、小金门县海岸线;72 h内油膜越过金门县、小金门县后继续向西南方漂移,对大片海域造成污染。

在NE风向(5.5 m/s 风速)落潮发生溢油的72 h内,在风和潮流的共同作用下油膜主体向西南扩散。溢油事故会对大百屿海洋自然景观与历史文化遗产生态保护区、围头湾重要渔业水域与厦门珍稀海洋物种自然保护区造成污染;48 h内油膜在金门县西侧海岸线与小金门岛东侧抵岸;72 h内油膜越过金门县、小金门县后继续向西南方漂移,对大片海域造成污染。

由表4还可以得出,在NE风向落潮时72 h残油量最低,为37.1%,在SSW风向涨潮时72 h残油量最高,为46.7%;NE风向下,72 h内油膜扫海面积超过228 km²,而SSW风向下则小于60 km²。

4 结论

本文利用潮流数据对围头湾附近的溢油情景进行“油粒子”模型模拟。结论如下:

(1)水中油粒子运动行为受多种因素共同影响。不同潮流和风况条件下的油膜扫海面积与残

油量存在较大差异。

(2)风场和潮流是影响围头湾溢油扩散的主要因素。在SSW风向下油膜持续抵岸污染严重,72 h残油量高达46.7%,油膜漂移距离短,扫海面积小于60 km²,油膜会污染围头湾重要渔业水域、大百屿海洋自然景观与历史文化遗产生态保护区、石井滩涂养殖区与围头湾养殖区;在NE风向下油膜漂移距离远,扫海面积大于228 km²,但72 h残油量较低,为37.1%,油膜会污染大百屿海洋自然景观与历史文化遗产生态保护区、围头湾重要渔业水域和厦门珍稀海洋物种自然保护区。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2019年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京: 交通运输部, 2020.
Ministry of Transport. Statistical bulletin on the development of transport Industry in 2019[R]. Beijing: Ministry of Transport, 2020.
- [2] 王鹏, 申霞, 王船海, 等. 复杂河网水系油粒子模型开发及溢油污染模拟[J]. 水利学报, 2021, 52(6): 750-757.
WANG P, SHEN X, WANG C H, et al. Development of the oil particle model for complex river network and numerical simulation of oil spill pollution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(6): 750-757.
- [3] 齐庆辉, 东培华, 曲红玲, 等. 京杭运河苏北段溢油扩散数值模拟研究[J]. 水道港口, 2015, 36(3): 253-257.
QI Q H, DONG P H, QU H L, et al. Oil spill diffusion numerical simulation research in Subei canal section[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2015, 36(3): 253-257.
- [4] BI H P, SI H. Dynamic risk assessment of oil spill scenario for Three Gorges Reservoir in China based on numerical simulation[J]. Safety Science, 2012, 50(4): 1112-1118.
- [5] 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.
LI Y, YANG Y Q, PAN Q Q. Review on the oil spill numerical

- forecasting technology[J]. *Marine Forecasts*, 2017, 34(5): 89-98.
- [6] 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.
- [7] 李社生, 李瑞杰, 丰青, 等. 长江口枸杞岛附近海域溢油风险数值模拟[J]. *人民长江*, 2014, 45(21): 65-69.
- LI S S, LI R J, FENG Q, et al. Numerical simulation of oil spill risk in sea area near Gouqi Island in Yangtze River estuary[J]. *Yangtze River*, 2014, 45(21): 65-69.
- [8] 吴凡杰, 吴钢锋, 董平, 等. 象山港溢油数值模拟研究[C]//第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 重庆: 中国海洋工程学会, 2019: 722-728.
- WU F J, WU G F, DONG P, et al. Study on numerical simulation of oil spill in Xiangshan Port[C]//Proceedings of the 19th China Ocean (Shore) Engineering Symposium. Chongqing: Ocean Engineering Branch of China Ocean Society, 2019: 722-728.
- [9] 李曰嵩, 潘灵芝, 杨红. 长江口深水航道内溢油轨迹的数值模拟[J]. *海洋湖沼通报*, 2014(4): 153-159.
- LI Y S, PAN L Z, YANG H. Numerical simulation of oil spill trajectory for deep waterway in Yangtze Estuary[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2014(4): 153-159.
- [10] 杨红, 刘成秀, 李曰嵩, 等. 基于 GNOME 的长江口锚地溢油模拟[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(3): 384-390.
- YANG H, LIU C X, LI Y S, et al. Simulation of oil spill in anchorage out of Yangtze River Estuary based on GNOME[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22(3): 384-390.
- [11] 林伟波, 陈晓燕, 李婧慧. 徐圩港区邻近海域溢油模拟分析[J]. *海洋预报*, 2020, 37(3): 82-90.
- LIN W B, CHEN X Y, LI J H. The oil spill simulation around Xuwei Port Area[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(3): 82-90.
- [12] 金戈, 董仁杰, 蔡睿, 等. “桑吉轮”碰撞事故溢油模拟研究[J]. *水利规划与设计*, 2019(9): 64-67, 122.
- JIN G, DONG R J, CAI R, et al. Simulation analysis of oil spill simulation of Vessel SANCHI accident[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2019(9): 64-67, 122.
- [13] 林默涵, 何国玺, 李岩松, 等. 海底管道溢油扩散数值模拟研究[J]. *北京石油化工学院学报*, 2017, 25(4): 83-90.
- LIN M H, HE G X, LI Y S, et al. A numerical simulation on the spilled oil diffusion of submarine pipelines[J]. *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2017, 25(4): 83-90.
- [14] 杨红, 刘成秀, 李曰嵩, 等. 长江口南港水道溢油数值模拟[J]. *海洋通报*, 2013, 32(3): 345-351.
- YANG H, LIU C X, LI Y S, et al. Numerical simulation of oil-spill in the south channel of the stuary Yangtze River estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(3): 345-351.

The Oil Spill Risk Simulation in Weitou Bay and its impact on the surrounding Environmentally Sensitive area

ZHAO Xing¹, WANG Xianxin¹, WU Liang², XING Chenglu¹, HUO Ran¹

(1. Research Institute of Engineering and Technology for Safety and Environment, CNOOC EnerTech-Safety & Environmental Protection Co., Tianjin 300457, China; 2. China Offshore Environmental Service Ltd, Tianjing 300457, China)

Abstract: Based on the MIKE21 hydrodynamic model, a tidal current numerical simulation is carried out in the Weitou Bay area, and the reliability of the simulated tidal level, velocity and direction is verified by comparing the measured data. Based on the Lagrangian "oil particle" theory and considering the weathering processes during the movement of the oil film, a two-dimensional oil spill diffusion model in the Weitou Bay area is established to simulate and predict the sweeping area of oil film and the pollution of oil film to the environmentally sensitive areas under four oil spill scenarios. The results show that the oil spill accidents could cause serious pollution to all environmentally sensitive areas in Weitou Bay. In summer, under normal wind direction (the most unfavorable wind direction), the oil film arrives ashore and the pollution is serious with the residual oil content reaching 46.7% in 72 h, the short drift distance and the sea sweeping area less than 60 km². In winter, the drift distance is long under the normal wind direction with the sweeping sea area more than 228 km² and a lower 72 h residual oil volume of 36.1%.

Key words: MIKE21; oil spill accident; numerical simulation; predict; environmentally sensitive area