

台风天气下湄洲湾海域溢油扩散数值模拟分析

陈 橙*, 林宏坤, 危闽坚, 邓 鑫

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: [目的] 湄洲湾位于福建沿海, 是台风频发区域, 每年夏季和秋季常受到路径复杂、风速强劲的台风影响, 这种天气特点为溢油扩散研究带来了独特挑战。本研究旨在探究台风天气下海上溢油的扩散规律。[方法] 以湄洲湾为研究对象, 通过大、小模型双重嵌套的方式, 采用 MIKE21 软件以二维浅水方程作为基本控制方程, 以非结构化网格为基础建立福建沿海海域和湄洲湾海域的水动力模型。溢油模型以水动力模型为驱动条件, 基于油粒子法建立二维溢油模型, 研究溢油扩散的过程与规律。通过耦合潮流场和风场, 研究夏季盛行风、冬季盛行风、静风和台风天气条件下 4 个特征潮时刻的油膜面积和油膜厚度变化规律。[结果] 研究表明湄洲湾的溢油膜运动主要受潮汐涨落和风场的共同影响, 短时间内潮汐对溢油膜瞬时运动的影响更大, 而长期漂移过程中风场起主导作用, 且油膜扩散方向与风向基本一致。在台风条件下油膜第一次抵岸时间显著缩短, 在涨急、涨憩、落急、落憩潮时刻分别最大缩短 1.7, 0.5, 30.0, 3.5 h。[结论] 该研究总结了台风天气下溢油在湄洲湾海域的扩散规律, 发现溢油膜的运动主要受涨落潮和风场的综合影响, 台风天气能显著缩短油膜抵岸时间。

关键词: 湄洲湾; 溢油扩散; 水动力模型; 台风天气

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)03-0461-11

Numerical simulation analysis of oil spill dispersion in Meizhou Bay waters under typhoon weather

CHEN Cheng*, LIN Hongkun, WEI Minjian, DENG Xin

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: [Objective] The transportation of oil by ships poses a significant threat to aquatic environments. Once an oil spill occurs, it can cause immeasurable harm to water bodies. Given the frequent occurrence of oil spill accidents, studying the mechanisms of oil spill diffusion is crucial. This study aims to investigate the impact of typhoon weather on the diffusion mechanisms of marine oil spills and compare to those under regular wind conditions, providing a scientific basis for responding to oil spill incidents during typhoon weather. Meizhou Bay, located along the coast of Fujian, is a typhoon-prone area. During summer and autumn, it is frequently affected by typhoons with complex paths and strong wind speeds. These weather conditions presents complex challenges for oil spill dispersion and management. [Methods] Meizhou Bay was selected as the target area. This research employed a dual nested model approach, using two-dimensional shallow water equations as the basic control equations. A hydrodynamic model was established for the coastal waters of Fujian and Meizhou Bay based on an unstructured grid. The calculations of the model were evaluated with measured data, demonstrating that the model accurately reflects the tidal characteristics of the actual sea area, making it suitable for further studies on oil spill patterns in Meizhou Bay. The oil spill model, driven by the hydrodynamic model, was developed using the oil particle method to analyze the diffusion process and patterns of oil spills. The typhoon wind field was generated by combining the

收稿日期: 2024-06-25 录用日期: 2024-10-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51809047); 福建省自然科学基金(2019J05029)

* 通信作者: cc@fzu.edu.cn

引文格式: 陈橙, 林宏坤, 危闽坚, 等. 台风天气下湄洲湾海域溢油扩散数值模拟分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 461-471.

Citation: CHEN C, LIN H K, WEI M J, et al. Numerical simulation analysis of oil spill dispersion in Meizhou Bay waters under typhoon weather[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 461-471. (in Chinese)



ERA5 background wind field with the Holland empirical formula for typhoon wind fields, and subsequently validated using data from typhoon Doksuri in 2023. The results indicated that the synthesized wind field could accurately reproduce typhoon conditions. By coupling tidal and wind fields, the study examined changes in oil slick area and thickness during four characteristic tidal moments under summer monsoon, winter monsoon, calm wind, and typhoon conditions. [Results] It is found that the movement of oil slick in Meizhou Bay is primarily determined by the combined effects of tidal fluctuations and wind fields. In the short term, tidal variations have a greater impact on the instantaneous movement of the oil slick. However, during prolonged drift periods, wind fields dominate, and the direction of oil slick diffusion usually aligns with the wind direction. Specifically, outside Meizhou Bay, strong hydrodynamics primarily drive the drift of oil slick. In the relatively enclosed waters inside the bay, weakened hydrodynamics suggest that the oil slick trajectory is subjected to stronger influence by wind fields. Comparing the first arrival time of oil slick onshore under typhoon conditions with three other regular wind conditions, it was found that the first arrival time of oil slick onshore was significantly reduced during typhoons across the four characteristic tidal moments, maximumly reduced 1.7 h, 0.5 h, 30.0 h, 3.5 h at the flooding tide, high slack tide, ebbing tide, and low slack tide, respectively. This indicates that typhoon conditions significantly impact the speed and direction of oil slick movement. [Conclusion] This study summarizes the diffusion patterns of oil spills in Meizhou Bay under typhoon conditions, showing that the movement of oil slick is mainly influenced by tidal fluctuations and wind fields. Under typhoon conditions, the first arrival time of oil slick onshore is significantly shortened, demonstrating that typhoons enhance the speed of oil slick diffusion. These findings provide valuable insights for improving emergency preparedness and response strategies for marine oil spills under typhoon weather.

Keywords: Meizhou Bay; oil spill dispersion; hydrodynamic model; typhoon weather

船舶运输的石油对水环境有着极大的威胁,溢油事故一旦发生,将会对水体产生不可估量的危害。汤旭红等^[1]通过使用地理网格化分析和预测研究指示出高风险区域,为海上航行提供了参考,从而降低海上风险。但在世界范围内,每年仍约有 600 万 t 油类进入海洋,主要原因包括泄漏和航运事故^[2]。约 0.5% 的全球石油开采量泄漏至海洋^[3],其中约 30% 源自航运事故^[4]。1970—2015 年间,全球发生了 451 起溢油量超过 700 t 的大型溢油事故^[5],1997—1999 年间,中国长江流域发生了 13 起溢油事故,总计泄漏千吨石油^[6-9]。湄洲湾海域也是海上溢油事故的多发地带,典型的有:2004 年 7 月,载重 15 万 t 的大型原油船“骏马输送者”自福炼港口作业区出港,在湄洲湾外,剑屿岛以东 1.6 海里(2.963 km)的海域与重载 16 万 t 进港的大型原油船“海角”发生碰撞,造成“骏马输送者”轮左舷船体破损,“海角”轮首水线以上部位受损,造成经济损失多达 3 200 万元人民币^[10]。鉴于溢油事故频发,溢油模型的研究显得尤为重要。

Okubo^[11]对溢油模型进行初步探索,对一系列溢油事故进行了分析与研究,发现油膜质量均方差与其直径成正比,深刻揭露了油膜质量近似正态分布是由扩展导致的,从而建立了首个油膜扩展模型。Blokker^[12]对油膜类型的运动轨迹进行了分析,在只考虑重力的情况下推导出新的油膜扩展模式。Fay^[13]提出了备受关注的油膜扩展三阶段理论,该理论充分考虑了重力、惯性力、表面张力和黏性力对油膜扩展轨迹各阶段的影响。Stiver 等^[14]对 Fay 的理论进行改良,加入

风影响因子,并提出了在水中存在厚油膜和薄油膜两种不同情况下的扩散方程。Lehr 等^[15-17]基于海上实验数据修正了 Fay 的三阶段理论。Proctor 等^[18]通过一系列的海上实验,确定了水平以及垂直扩散系数,溢油模拟结果的准确性大大加强。Wang^[19]对 Fay 理论中表面张力和黏滞力平衡阶段的公式进行改进,发现了一种新的油膜扩散模式。张存智等^[20]将拉格朗日追踪法应用于油粒子模型,从而体现了油膜在风和波浪等外界因素作用下的分离情况。

Li 等^[21]研究油滴在井喷和破碎波过程中的运动状态,解决了油膜分散黏度的问题,开发了统一的油滴尺寸模型。Liu 等^[22]在 Fay 三阶段理论的基础上,首次提出油膜扩展尺度随时间变化的统一公式。黄成^[23]研究了油膜在静风、冬季最不利风向、夏季最不利风向条件下的影响,发现静风条件下的溢油轨迹主要受潮流作用的控制,当有不利风向时,风作用力起决定性作用,潮流影响次之。匡翠萍等^[24]在考虑油粒子的漂移、扩散、蒸发、乳化等因素的前提下对蓬莱溢油事故进行模拟,总结出事故发生后油膜的漂移轨迹。袁晓娟等^[25]在不同风速和油品种类的情况下,对溢油的挥发、乳化、残余油量等过程进行了研究。Ying 等^[26]通过 MIKE21 数值模式建立了溢油模型,可以应用于常规天气和台风风暴潮情况下的溢油扩散模拟,能为溢油事故应急决策提供技术支撑。Kuang 等^[27]基于 MIKE21 建立长江口二维水动力及溢油模型,发现当其在台风情况下发生溢油,与正常天气条件相比扫海面积减少约 20%。

刘浩等^[28]和郭晓峰等^[29]对湄洲湾的研究主要集中在对湄洲湾波浪、潮流、泥沙等方面的研究分析,但对于溢油扩散模拟,特别是台风天气下的溢油扩散模拟较少涉及。因此,有必要对湄洲湾进行船舶溢油事故的模拟^[30],研究台风天气下发生溢油事故后油膜的扫海面积、漂移轨迹和对各敏感区的损害程度。本研究基于油粒子法建立二维溢油模型,通过耦合潮流场和风场分析台风天气下溢油在湄洲湾海域的扩散规律,以期提高湄洲湾发生溢油事故的应急决策时效性及准确性^[31],从而在最大程度上减少事故对生态系统的危害。

1 模型建立及验证

1.1 水动力模型

在大尺度海洋水动力模拟中可将海洋视为一个准二维的浅水系统进行近似处理。本模型控制方程基于沿深度平均的二维不可压缩流体雷诺(Reynolds)值均布的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)浅水方程,服从如下假设:

1) Boussinesq 假设。利用层流黏性应力对紊动应力进行变量化。

2) 静水压力假设。计算区域水平方向的尺度远大于垂直方向,垂向加速度可以忽略,垂向动量方程中近似假设为静水压力的关系。

下述公式中 (x, y) 为笛卡尔坐标系,水流连续方程^[32]表示为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS, \quad (1)$$

沿 x 方向的动量方程表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S, \end{aligned} \quad (2)$$

沿 y 方向的动量方程表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S. \end{aligned} \quad (3)$$

式中: u 和 v 分别为 x 和 y 方向的速度分量, \bar{u} 和 \bar{v} 为基于水深的平均流速, t 为时间, h 为总水深($h = \eta + d$, η

为河底高程, d 为静水深), f 为科氏力参数, g 为重力加速度, ρ 为水的密度, τ_{sx} 和 τ_{sy} 分别为海面风力 τ_s 沿 x 和 y 方向的分量, τ_{bx} 和 τ_{by} 分别为海底摩阻力 τ_b 沿 x 和 y 方向的分量, T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 为水平黏滞应力项, S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} 为辐射应力的分量, p_a 为大气压强, ρ_0 为水的相对密度, S 为点源流量, u_s 和 v_s 为汇源项水流的流速。

1.2 溢油模型

溢油事故发生后,油体在重力、黏性力、惯性力作用下持续向外扩散。在这个过程中,油膜厚度不断减小,面积逐渐增大。油膜扩展程度受限于油类凝固点,一旦油膜温度达到凝固点,扩展运动就会停止,在海面形成固化物。由于不同扩展阶段受力不同,一般分为 3 个阶段^[13]:当油层比水轻时重心高于浮力中心,由此产生的压力梯度使油膜向外扩展,主要受惯性力和重力作用,称第一阶段为重力-惯性力阶段;油层与水混合后黏度和密度增大,油膜主要受重力和黏性力作用,称第二阶段为重力-黏性力阶段;随着油膜面积的扩大,油膜逐渐变薄,重力影响可忽略不计,而水-空气的表面张力比油层-水的表面张力及油层-空气的表面张力都更大,油膜因此产生了向外侧拖曳的力,即表面张力,称第三阶段为黏性力-表面张力阶段。

在平静的海面上采用 Fay 三阶段扩展理论。Fay 的油膜三阶段扩展半径(L_1 、 L_2 、 L_3)公式为:

1) 重力-惯性力扩展阶段:

$$L_1 = K_1 (gV\Delta)^{1/4} t^{1/2}, \quad (4)$$

2) 重力-黏性力扩展阶段:

$$L_2 = K_2 [g(1-\Delta)\Delta]^{1/6} v_w^{-1/12} t^{1/4} V^{1/3}, \quad (5)$$

3) 黏性力-表面张力扩展阶段:

$$L_3 = K_3 g^{-1/4} \delta^{1/2} \rho^{-3/4} t^{3/4}. \quad (6)$$

式中: ρ_0 为油的密度, $\Delta = 1 - \rho_0/\rho_w$; v_w 为水的运动黏滞系数; K_1 、 K_2 、 K_3 为扩展系数,分别取 1.35, 1.60, 0.48; V 为连续溢流过程中油的体积; $\delta = \delta_{wa} - \delta_{ao} - \delta_{ow}$, δ_{wa} 、 δ_{ao} 、 δ_{ow} 分别为水-空气、油-空气、油-水之间的表面张力系数。

福建联合石化 30 万 t 级原油码头位于泉州港,是国内最大原油码头之一。依托泉州港区位优势,自建原油成品油专用深水码头,可全天候靠泊 30 万 t 级超大型油轮。设置先进的泊位系统和油气回收系统,年设计吞吐量达 1 800 万 t,拥有大容量储油能力,可保证原油到港储存和处理。本研究以此为背景,模拟船舶进港时发生原油泄漏的情形。湄洲湾地理位置见图 1。

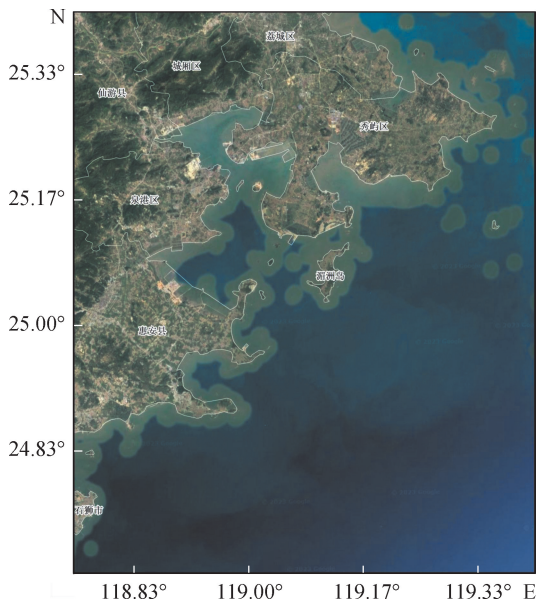


图 1 湄洲湾地理位置

Fig. 1 Geographical location of the Meizhou Bay

溢油源选择在油品装卸码头附近海域的主航道上,坐标为(119.03° E, 25.06° N). 本研究将油品分为 4 个组成部分:挥发性组分、不挥发的重质组分、蜡和沥青质. 根据《船舶油污污染事故等级》(JT/T 458—2001)^[33],入水量大于 10 t 为重大事故,且借鉴近年来各地溢油事故,假设固定源溢油总量为 100 t,油粒子数取 2 000 个. 本研究中油品泄漏方式为连续泄漏,时间 20 min,风场参数、乳化系数、溶解系数等见表 1.

表 1 溢油模型参数设置

Tab. 1 Setting of parameters for the oil spill model

参数	值	参数	值
时间步长/s	60	水平扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)	0.1
水的动力黏度/cP	1.002	油的动力黏度/cP	1.400
溶解系数/d ⁻¹	0.4	生物降解系数/s ⁻¹	0.005
乳化系数/(s·m ⁻²)	1×10 ⁻⁶	油品密度/(kg·m ⁻³)	900
蒸发系数/d ⁻¹	0.01	风漂移系数	0.03
冬季水温/°C	10	夏季水温/°C	28
冬季风速/(m·s ⁻¹)	8.6	夏季风速/(m·s ⁻¹)	6.5
冬季风向/(°)	45	夏季风向/(°)	225

注:水和油的动力黏度均为 20 °C 下数值.

1.3 水动力模型及验证

实测资料采用 2015 年 8—9 月的水文测量资料,潮汐站选取八方港口临时潮位站(119.07° E, 25.10° N)和湄洲岛临时潮位站(119.10° E, 25.02° N),潮流站选取 T1(119.03° E, 25.10° N)和 T2(119.05° E, 25.07° N) 2 个临时测站. 模拟时间段为 2015 年 8 月 15 日—9 月 15 日,时间步长为 60 s. 糙率值经过多次调试,最终确定湄洲湾海域的糙率系数为 0.038. 分别模拟了 4 个测站大潮时期和小潮时期的潮位、潮流变化过程,大潮期时间为 2015 年 8 月 30—31 日,小潮期时间为 2015 年 9 月 6—7 日. 模型验证结果见图 2 和 3: 计算潮位与实测潮位较吻合,计算流速与实测资料较吻

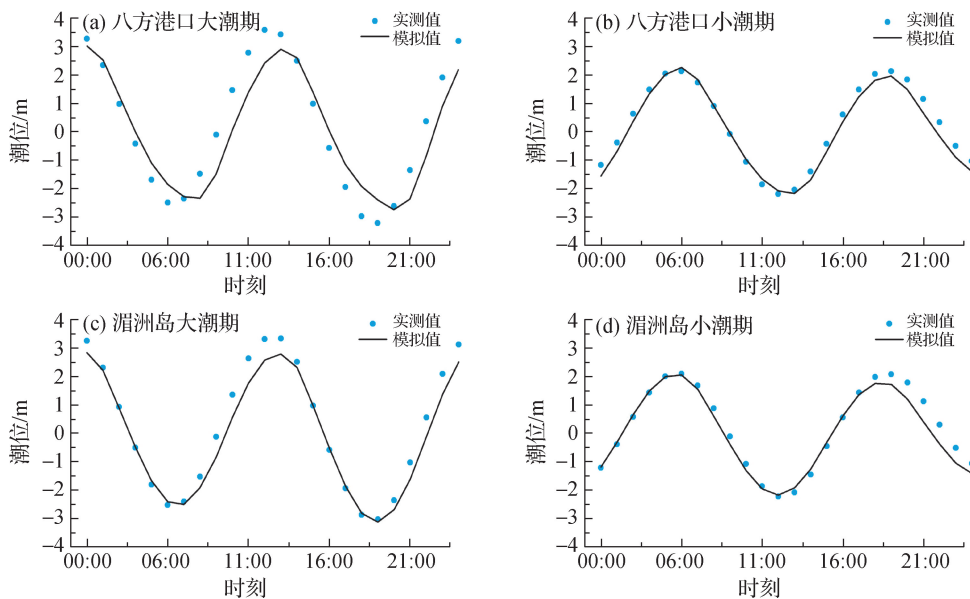


图 2 八方港口和湄洲岛大、小潮期的潮位验证

Fig. 2 Tidal level verification of Bafang Port and Meizhou Island for high and low tides

合,涨潮和落潮的流速和实测资料变化过程较一致,流向的拟合亦较好.上述结果说明模型计算参数设置

合理,潮流模拟准确可靠,可用于湄洲湾海域潮位、潮流的影响预测.

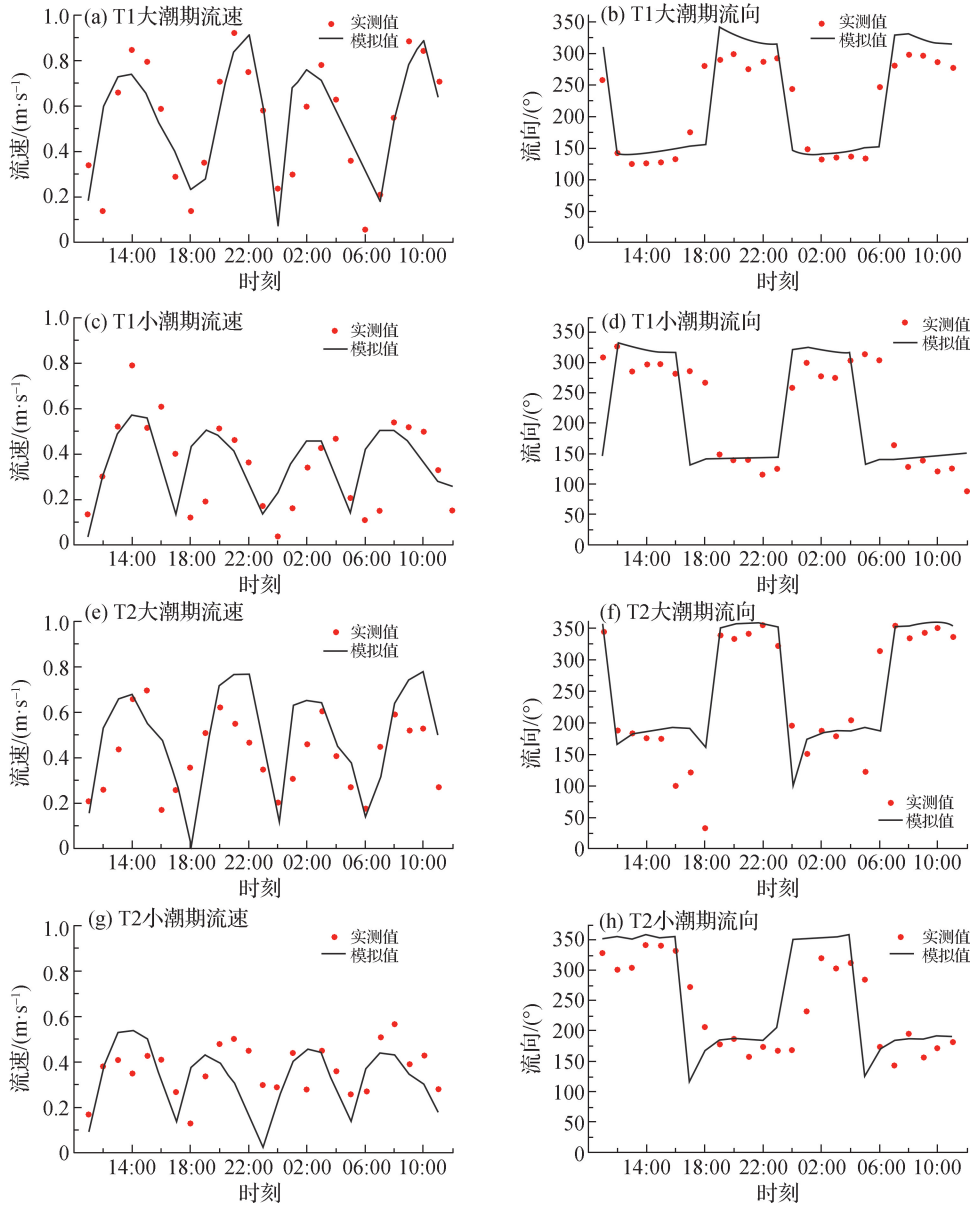


图 3 T1 和 T2 潮流的流速和流向验证

Fig. 3 Verification of tidal current velocity and direction at T1 and T2

2 研究区域及数值模拟

2.1 研究区域

模拟范围北至宁德市福鼎市,南至漳州市东山县,东部范围包括整个台湾岛.水动力模型的网格基于 Gauss Kruger—CGCS2000 3 Degree GK CM 117E 投影坐标系.由于陆地边界岸线蜿蜒复杂,对福建沿海近岸区域以及台湾岛等岛屿进行加密处理,模

型如图 4 所示.

2.2 潮汐

湄洲湾潮汐属于正规半日潮,其海域处于强潮海区,内外潮时几乎一致,各局部海域潮位变化同步.高潮时段,潮位由海口向湾内逐渐增高;低潮时段,潮位则由外向内逐渐降低.该区域最大潮差可达 7.0 m,平均潮差 4.60 m;平均高潮位可达 4.83 m,平均低潮位 0.31 m.潮位特征值见表 2.

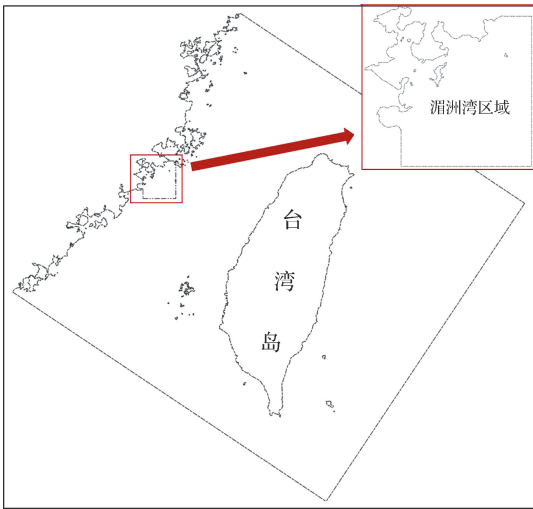


图 4 嵌套模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the nested model

表 2 潮位特征值

Tab. 2 Characteristic values of tidal levels

特征值	秀屿站	斗尾站	崇武站
多年最高潮位/m	8.18	4.10	7.15
多年最低潮位/m	0.04	-3.66	-0.03
平均高潮位/m	6.66	2.73	5.57
平均低潮位/m	1.55	-2.23	1.37
平均潮位/m	4.02	0.30	3.54
最大潮差/m	7.59	7.37	6.68
最小潮差/m	2.22	2.93	1.85
平均潮差/m	5.11	4.96	4.38
地理位置	118°59'59" E 25°13'09" N	119°02'46" E 25°04'17" N	118°57'00" E 24°52'59" N
统计年限	1980— 2005 年	1998— 1999 年	1980— 2005 年

2.3 潮流

湄洲湾潮流的流态表现为每天两次涨落潮,作往复复式运动,涨、落潮流向基本与当地的水下等深线走向一致,受地形影响有逆时针回旋流的特征.涨潮时,主流向偏西北向;落潮时,主流向偏东南向.表层潮流流速大于底层潮流流速,大潮流速大于小潮流速,潮流涨急、落急一般发生在高潮前后的 2~3 h.该海域的落潮周期大于涨潮周期,平均落潮历时约为涨潮的 1.48 倍.

在剑屿至黄干岛的湾口段,涨、落潮流的流向较顺直,涨潮流主流向在 300°~350°范围,落潮流主流向在 140°~180°范围.在黄干岛至大生岛的进港航道段,

涨、落潮流的流向有一定的分离角,涨潮流主流向在 200°~320°范围,落潮流主流向在 120°~180°范围.在大生岛至鲤鱼尾的主航道内段,涨、落潮流的流向较顺直,涨潮流主流向在 330°~360°范围,落潮流主流向在 150°~190°范围.

2.4 风况

湄洲湾夏季盛行西南风,冬季盛行东北风.受热带气旋影响,湄洲湾秋冬季沿海风大.据斗尾站实测资料统计:湄洲湾多年平均风速为 6.4 m/s;夏季平均风速为 5.8 m/s,盛行风平均风速为 6.5 m/s;冬季平均风速为 7.3 m/s,盛行风平均风速为 8.6 m/s.斗尾站风况统计见表 3.

表 3 斗尾站风况

Tab. 3 Wind condition of the Douwei station

风向	平均风速/ (m · s ⁻¹)	最大风速/ (m · s ⁻¹)	频率/%
N	5.21	19.68	4.43
NNE	7.71	13.65	29.53
NE	7.79	14.40	26.31
ENE	4.39	10.19	4.36
E	3.52	7.39	2.03
ESE	2.91	7.37	1.26
SE	2.45	6.07	1.06
SSE	2.95	6.33	1.28
S	4.31	14.53	2.92
SSW	6.25	15.14	15.17
SW	4.70	8.40	7.92
WSW	2.50	6.27	1.24
W	1.70	5.40	0.57
WNW	1.37	2.64	0.34
NW	1.85	8.96	0.57
NNW	3.21	18.39	0.99

3 模拟结果与分析

3.1 常规风况溢油扩散分析

伴随海水周期性的涨落现象,海水产生有规律的周期性运动,潮流运动和风场是影响溢油扩散运动的主要环境动力因素.为了研究溢油扩散的规律,将海面风场设置为夏季盛行风、冬季盛行风、静风 3 类条件,研究溢油发生 48 h 油粒子的运动规律.

一个潮周期包括涨潮、高潮、落潮和低潮 4 个时段。本研究分别选取这 4 个时段中的涨急(涨潮最快时刻)、涨憩(涨潮趋于停滞时刻)、落急(落潮最快时

刻)和落憩(落潮趋于停滞时刻)4 个特征时刻作为模拟溢油事故的发生时间,研究不同特征潮时刻溢油面积和油膜厚度的变化规律,模拟结果如图 5 和 6 所示。

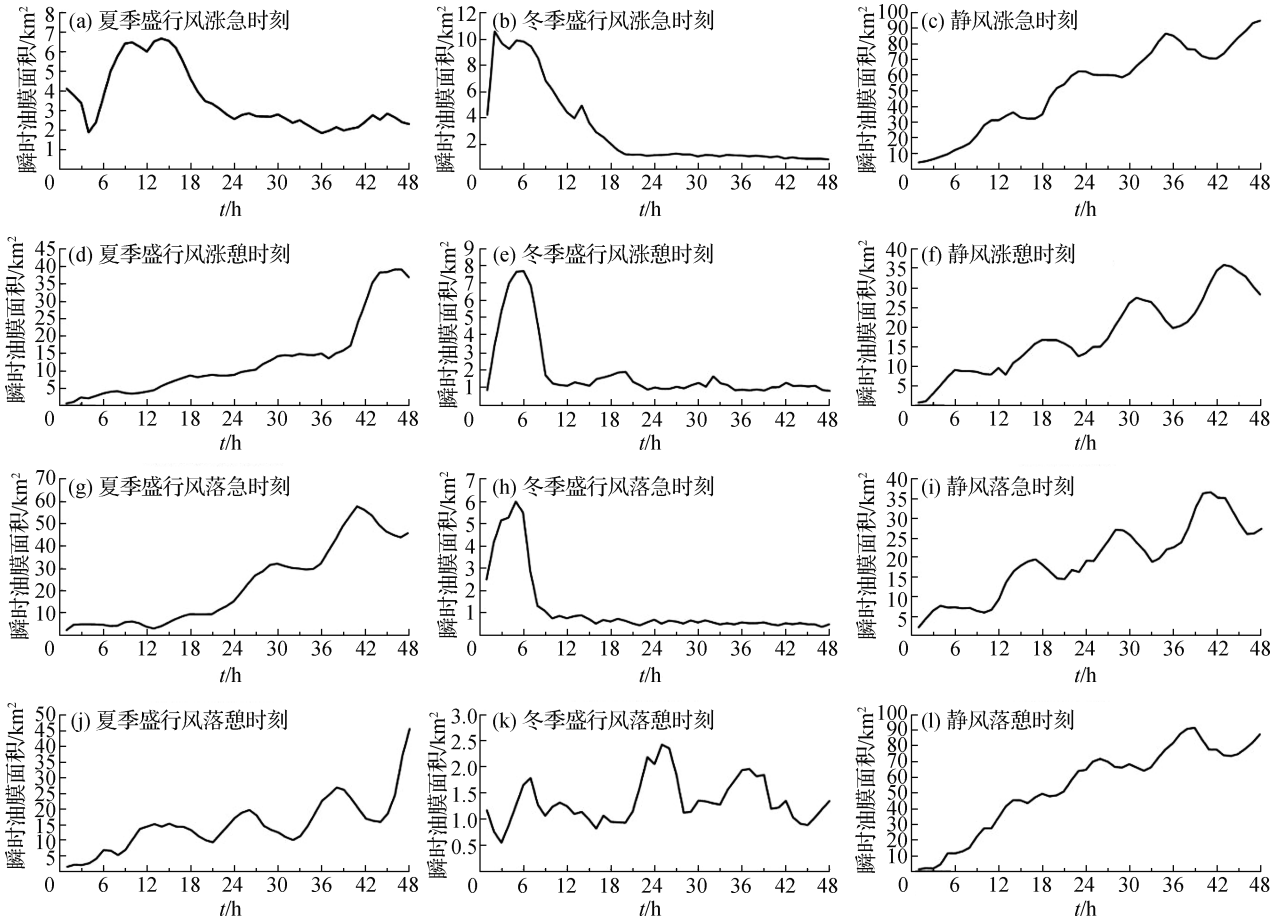


图 5 不同风况下 4 个特征时刻(涨急、涨憩、落急、落憩)的瞬时油膜面积变化过程

Fig. 5 Instantaneous oil slick area variation at four characteristic moments (flooding tide, high slack tide, ebbing tide, low slack tide) under different wind conditions

湄洲湾夏季盛行西南风,冬季盛行东北风。从图 5 和 6 可以看出:在冬季盛行风的作用下,在涨急、涨憩、落急和落憩时刻其油膜最后都发生抵岸吸附现象;在夏季盛行的作用下,涨急时刻其扩散到湄洲湾内部导致油膜吸附在岸边,其他时刻都由于盛行西南风的影响扩散到外海。油膜的运动由涨落潮和风主导,瞬时运动受涨落潮影响更多,长期扩散风场占主导作用,且扩散方向与风向一致。在湄洲湾湾外,水动力作用强,油膜的漂移轨迹由水动力占主导作用;在湄洲湾湾内,水动力作用弱,油膜的漂移轨迹由风场占主导作用。

3.2 台风天气与常规风况溢油扩散对比分析

本研究中台风风场由两个矢量场叠加而成:一是背景风场,采用的是由欧盟哥白尼气候变化服务

公司(C3S)及其合作机构提供的第五代全球气候再分析数据集(ERA5)数据;二是基于 Holland 经验公式的台风风场。以 2023 年 7 月 21 日生成的台风“杜苏芮”为例,表 4 为“杜苏芮”台风的时刻要素表。选取 1 号标(118.2° E,23.6° N)和 2 号标(119.4° E,24.5° N)两个站点进行风速验证,结果如图 7 所示。1 号标的均方根误差(RMSE)为 1.79,2 号标的 RMSE 为 2.88。模拟值与实测值吻合良好,说明该台风风场可用于台风天气下溢油扩散的分析。

台风天气的溢油模拟,由水动力模型耦合已经验证过的“杜苏芮”风场,分别将涨急、涨憩、落急、落憩 4 个特征潮时刻作为溢油的发生时间,研究不同时间台风作用下油膜的变化规律。

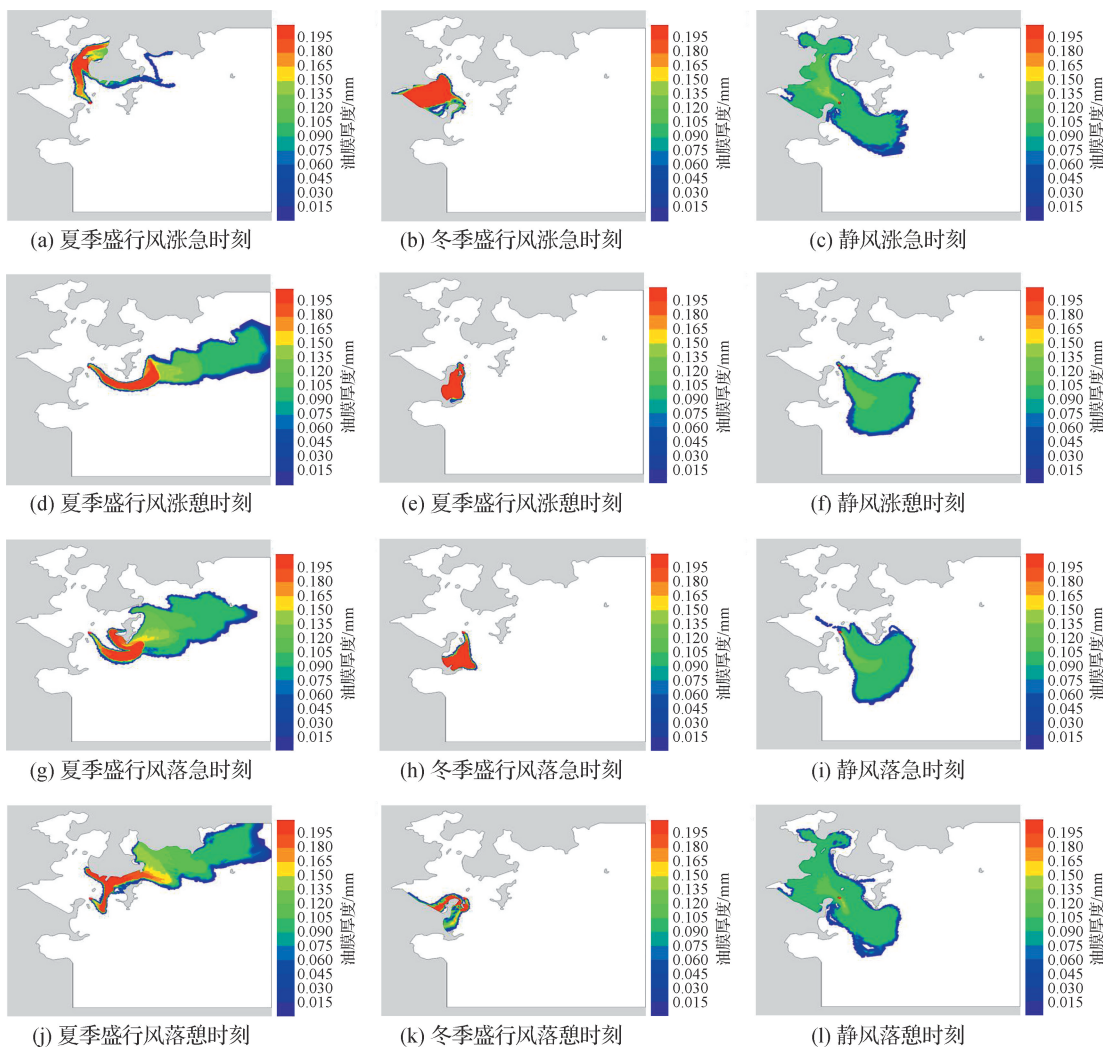


图 6 不同风况下 4 个特征时刻(涨急、涨憩、落急、落憩)的 48 h 扫海面积

Fig. 6 48 h swept sea area diagrams at four characteristic moments (flooding tide, high slack tide, ebbing tide, low slack tide) under different wind conditions

表 4 “杜苏芮”台风要素
Tab. 4 Elements of typhoon Doksuri

时刻	中心位置		中心风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	中心风力/级	中心气压/hPa
	东经/(°)	北纬/(°)			
2023-07-27 00:00	120.3	20.0	52	16	935
2023-07-27 06:00	120.0	20.1	50	15	940
2023-07-27 12:00	119.3	20.9	50	15	940
2023-07-27 18:00	119.2	21.5	52	16	935
2023-07-28 00:00	119.1	22.4	58	17	925
2023-07-28 06:00	118.9	23.6	55	16	930
2023-07-28 12:00	118.4	25.0	38	13	970
2023-07-28 18:00	117.8	26.4	25	10	990
2023-07-29 00:00	116.9	28.1	23	9	992

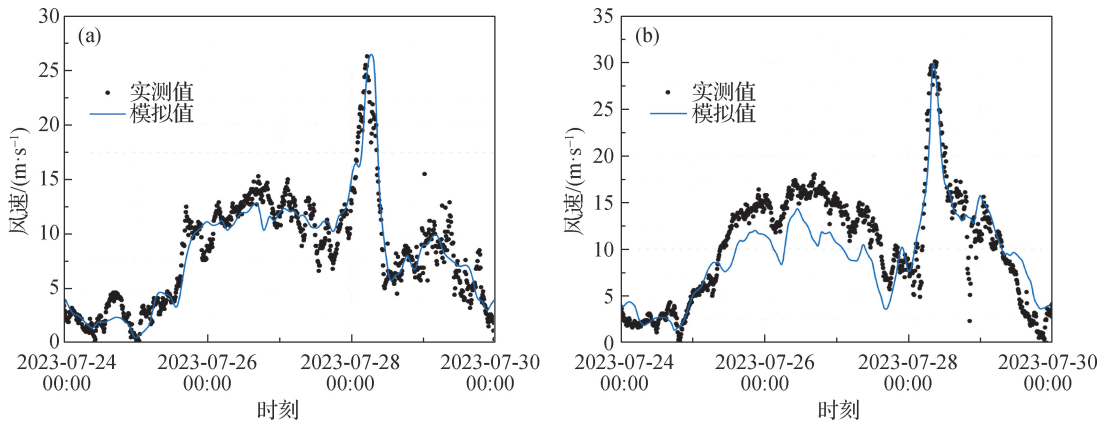


图 7 1 号标(a)和 2 号标(b)风速验证

Fig. 7 Wind speed verification of marker 1 (a) and marker 2 (b)

将各情况下油膜第一次抵岸的时间进行统计,如表 5 所示:对 4 个特征潮时刻进行对比,涨憩时刻抵岸时间早于涨急时刻,落憩时刻抵岸时间早于落急时刻,且涨憩时刻抵岸时间早于落憩时刻.上述结果说明在潮流作用最弱的时候发生溢油,溢油会更快抵岸吸附;而台风天气发生溢油时,第一次抵岸时间大多数情况下早于 3 种常规天气.

表 5 油膜第一次抵岸时间

Tab. 5 The first arrival time of oil slick onshore

天气情况	抵岸时间/h			
	涨急时刻	涨憩时刻	落急时刻	落憩时刻
夏季盛行风	3.0		8.0	5.0
冬季盛行风	3.0	1.0	4.3	1.5
静风	3.0		33.0	6.0
台风天气	1.3	0.5	3.0	2.5

注:夏季盛行风和静风下,涨憩时刻油膜未抵岸.

1) 涨急时刻:夏季盛行风油膜第一次抵岸时间为 3.0 h.静风情况发生溢油,油膜在涨潮流作用下,3.0 h 移动至肖厝港区.冬季盛行风时油膜 3.0 h 后抵岸.台风天气影响下油膜 1.3 h 移动至湄洲湾电厂取水口及东吴养殖区附近,与 3 种常规天气油膜第一次抵岸时间相比,台风天气抵岸时间缩短了 1.7 h.

2) 涨憩时刻:夏季盛行风为西南风,此时落潮流逐渐产生作用,在西南风的影响下,油膜被带离湄洲湾湾口,且在之后的运动过程中不会有抵岸过程.静风情况下潮流占主导作用,油膜随着涨落潮往复运动,最终也被带离湄洲湾.

3) 落急时刻:夏季盛行风作用下油膜第一次抵岸

时间为 8.0 h,西南风和落潮流共同作用,油膜抵岸吸附在湄洲岛下方呈“月牙形”.冬季盛行风作用下油膜 4.3 h 移动至惠女湾旅游景区及周围的后内码头和螺山码头.静风作用下长达 33.0 h 才第一次抵岸,此时大部分油膜已远离湄洲岛.台风天气作用下 3.0 h 抵岸,风向西南偏西,强风向的作用大于潮流作用,油膜漂移至湄洲岛左下方海域.

4) 落憩时刻:台风天气比冬季盛行风抵岸时间增加了 1.0 h,原因在于落憩时刻风场短时间占主导作用,溢油点位距离黄干岛更近,在东北风的影响下,油膜很快漂移至黄干岛;而台风天气此时风向为西南偏西,且溢油点位到湄洲岛的距离大于黄干岛,油膜在台风的影晌下于湄洲岛西侧发生抵岸现象.

台风不同时刻 48 h 扫海面积如图 8 所示:涨急时刻发生溢油,油膜面积总体呈波浪式上升的趋势,48 h 的扫海面积可达 290.28 km²;涨憩时刻发生溢油,48 h 的扫海面积可达 353.82 km²,污染范围和涨急时刻相似;落急时刻发生溢油,48 h 的扫海面积可达 181.34 km²,溢油面积呈现不规则上下波动变化,但总体呈上升趋势,污染范围主要为湄洲岛四周海域,湄洲湾内污染较少;落憩时刻发生溢油,48 h 的扫海面积可达 50.57 km²,溢油面积比其他 3 个时刻都小,主要原因是受湄洲岛地形的阻挡.

对溢油分布面积进行对比,发现台风天气第一次抵岸时油膜大量集中且溢油面积小于 3 种常规风况.原因有以下两点:一是台风作用是强风,风作用对油膜的影响大于潮流作用对油膜的影响,油膜在溢油初期就被强风聚集成一团,以集中的形式往某一方向运动;二是台风第一次抵岸时间比 3 种常规天气更短,同一种特征潮时刻下,运动时间越短,所受潮流的作用就越少.

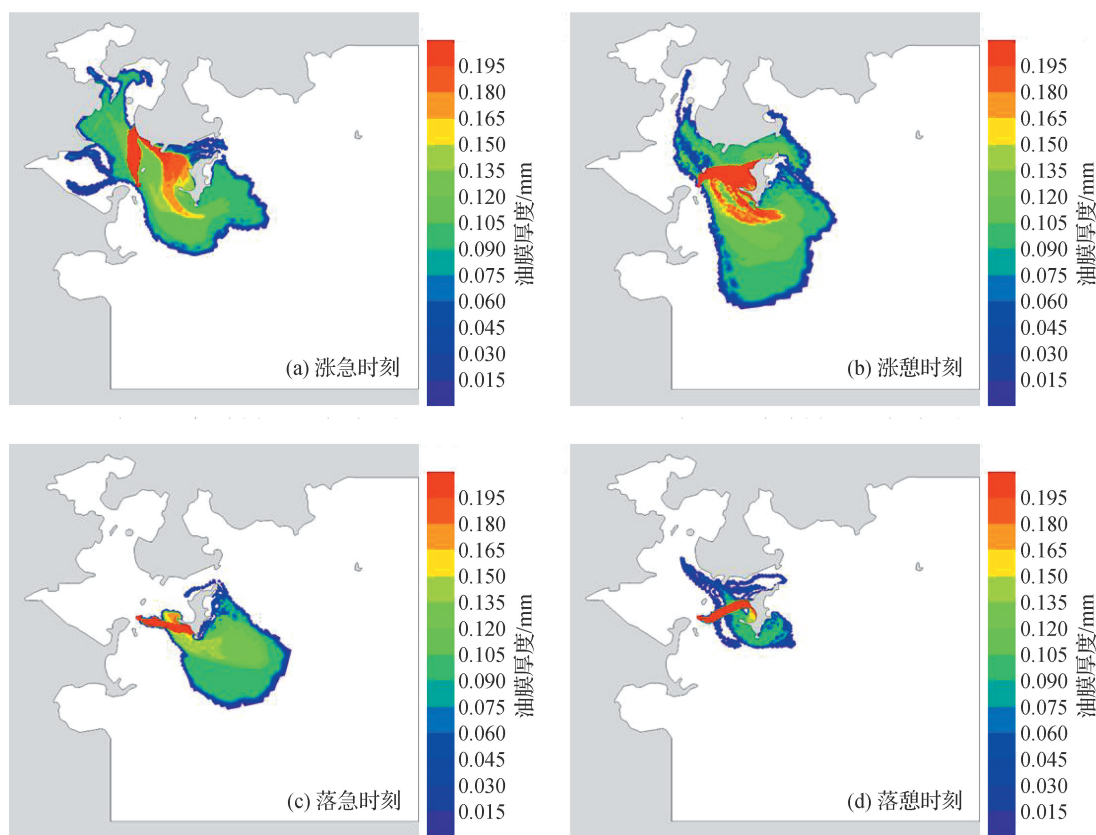


图8 台风不同时刻 48 h 扫海面积

Fig. 8 Typhoon swept sea area over 48 h at different times

综上所述,台风天气对突发性的溢油事故造成的危害更大,但溢油初期油膜面积小于其他 3 种常规风况,这有利于溢油回收,因此在初期时可以采用多道布设围油栏的方式进行溢油拦截。

4 结 论

本研究对台风天气下湄洲湾海域溢油扩散进行数值模拟分析,模拟的泄漏地点位于油品装卸码头附近海域的主航道上,得出如下结论:

1) 油膜的运动由涨落潮和风主导,瞬时运动受涨落潮影响更多,长期扩散风场占主导作用,且扩散方向与风向一致。在湄洲湾湾外,水动力作用强,油膜的漂移轨迹由水动力占主导作用;在湄洲湾湾内,水动力作用弱,油膜的漂移轨迹由风场占主导作用。

2) 4 个特征潮时刻中涨憩时刻第一次抵岸时间早于涨急时刻,落憩时刻第一次抵岸时间早于落急时刻,且涨憩时刻第一次抵岸时间早于落憩时刻,说明在潮流作用最弱的时候发生溢油,溢油会更快抵岸吸附;而台风天气发生溢油时,第一次抵岸时间大多数情况下早于 3 种常规天气。与 3 种常规风况对比,在涨急、

涨憩、落急、落憩 4 个特征潮时刻,台风天气油膜运动第一次抵岸时间分别最大缩短 1.7, 0.5, 30.0, 3.5 h。

综上,在水动力模拟中,本研究将海洋视为一个准二维的浅水系统进行近似处理,未考虑垂直尺度的影响。之后的研究将在现有二维模型的基础上引入适当的修正,以考虑垂直方向的影响。

参考文献:

- [1] 汤旭红,范耀天,蔡存强. 海上交通风险网格化分析和预测研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(3): 425-435.
- [2] 赵如箱. 浅谈溢油模型的发展及其应用设想[J]. 交通环保, 2000, 21(4): 15-17.
- [3] 陈建秋. 中国近海石油污染现状、影响和防治[J]. 节能与环保, 2002(3): 15-17.
- [4] 王传远,贺世杰,李延太,等. 中国海洋溢油污染现状及其生态影响研究[J]. 海洋科学, 2009, 33(6): 57-60.
- [5] 濮鸣锋. 福建霞浦东吾洋海域溢油模拟:以关门渔港为例[D]. 上海:上海海洋大学, 2016.
- [6] 赵小兵,徐彪,黄新磊. 内河船舶溢油控制面临的形势与对策思考[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(2): 146-148.
- [7] 王啸. 溢油扩展漂移和逆时追踪数值模拟研究[D]. 重庆:

- 重庆交通大学,2021.
- [8] 吴兆春. 潮汐河道溢油扩展漂移的数值模拟[D]. 上海:上海大学,2010.
- [9] 吴长生. 涓洲湾 30 万吨原油码头溢油风险评价与对策研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
- [10] 两外籍油轮相撞涓洲湾[EB/OL]. [2024-09-30]. <https://news.sina.com.cn/o/2004-07-10/09383044527s.shtml>.
- [11] OKUBO A. Some speculations on oceanic diffusion diagrams[C]// Rappports et Procès-Verbaux des Réunions du Conseil International pour l'Exploration de la Mer. Stockholm:[s. n.],1972.
- [12] BLOKKER P C. Spreading and evaporation of petroleum products on water [C] // 4th International Harbour Conference Organizing Committee. Proceedings of the 4th International Harbour Conference, Antwerp:[s. n.],1964:911-919.
- [13] FAY J A. The spread of oil slicks on a calm sea[M]. New York:Springer,1969:53-63.
- [14] STIVER W, MACKAY D. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures[J]. Environmental Science & Technology,1984,18(11):834-840.
- [15] LEHR W J, CEKIRGE H M, FRAGA R J, et al. Empirical studies of the spreading of oil spills[J]. Oil and Petrochemical Pollution,1984,2(1):7-11.
- [16] LEHR W J, FRAGA R J, BELEN M S, et al. A new technique to estimate initial spill size using a modified fay-type spreading formula[J]. Marine Pollution Bulletin,1984,15(9):326-329.
- [17] LEHR W J, SIMECEK-BEATTY D. The relation of Langmuir circulation processes to the standard oil spill spreading, dispersion, and transport algorithms[J]. Spill Science & Technology Bulletin,2000,6(3/4):247-253.
- [18] PROCTOR R, FLATHER R A, ELLIOTT A J. Modelling tides and surface drift in the Arabian Gulf; application to the gulf oil spill [J]. Continental Shelf Research,1994,14(5):531-545.
- [19] WANG K H. Characterization of circulation and salinity change in Galveston Bay [J]. Journal of Engineering Mechanics,1994,120(3):557-579.
- [20] 张存智, 窦振兴, 韩康, 等. 三维溢油动态预报模式[J]. 海洋环境科学,1997,16(1):22-39.
- [21] LI Z K, SPAULDING M, FRENCH MCCAY D, et al. Development of a unified oil droplet size distribution model with application to surface breaking waves and subsea blowout releases considering dispersant effects [J]. Marine Pollution Bulletin,2017,114(1):247-257.
- [22] LIU D S K, LEENDERTSE J J. A 3D oil spill model with and without ice cover[M]. [S. l.]:Rand Corporation,1981.
- [23] 黄成. 二维海上溢油扩散预测模型及其在广西近海的应用[D]. 长沙:长沙理工大学,2013.
- [24] 匡翠萍, 谢海浪, 苏平, 等. 蓬莱 19-3 溢油运移与归宿数值模拟和分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(10):1585-1594.
- [25] 袁晓娟, 李雪飞. 海上溢油事故残余油量影响因素分析[J]. 环境与发展,2019,31(1):156-159.
- [26] YING X M, YAN J H, ZHAO M L. Simulation of oil spill during storm surge in Daya Bay, Huizhou [J]. Marine Forecasts,2023,40(5):81-89.
- [27] KUANG C P, CHEN J L, WANG J, et al. Effect of wind-wave-current interaction on oil spill in the Yangtze River Estuary [J]. Marine Science and Engineering,2023,11(3):494.
- [28] 刘浩, 潘伟然, 骆智斌, 等. 涓洲湾潮流特性的数值研究[J]. 台湾海峡,2009,28(1):118-122.
- [29] 郭晓峰, 王翠, 陈楚汉, 等. 涓洲湾峰尾围垦工程施工期间海水悬浮泥沙输移扩散的数值模拟[J]. 应用海洋学学报,2014,33(1):125-132.
- [30] 曾濠. 广西北部湾海域溢油迁移扩散数值模拟研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2020.
- [31] 董俊言. 舟山海域马岙港区附近溢油扩散数值模拟研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2022.
- [32] MIKE. MIKE 21 & MIKE 3 flow model, hydrodynamic and transport module, scientific documentation [M]. Horsholm:DHI Water Environment Health,2010.
- [33] 中华人民共和国交通运输部. 船舶油污事故等级:JT/T 458—2001 [S]. 北京:人民交通出版社,2001:2-3.

(责任编辑:徐婷婷)