

## 钦州湾海上溢油扩散数值模拟\*

# Numerical Simulation of Oil Spill in the Qinzhou Bay

牙韩争,李谊纯,董德信

YA Hanzheng, LI Yichun, DONG Dexin

(广西科学院 广西近海海洋环境科学重点实验室,广西南宁 530007)

(Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

**摘要:**【目的】研究钦州湾海上溢油扩散特征及其影响因素。【方法】在对钦州湾水动力进行数值模拟的基础上,利用 MIKE 21/3 SA 溢油分析模块,对其海上溢油扩散进行数值模拟。【结果】常风况条件下,涨潮时刻发生溢油,溢油先向茅尾海方向漂移,待落潮后退出茅尾海;计算时段内,溢油向茅尾海方向及钦州湾外湾方向漂移的最远距离分别约为 17.51 km 和 10.73 km,扫海面积约为 71.83 km<sup>2</sup>。落潮时刻发生溢油,溢油则先向钦州湾外湾漂移,待涨潮后转向钦州湾湾颈方向;计算时段内,油膜向钦州湾外湾方向漂移最远距离约 17.96 km,油污扫海面积约为 50.72 km<sup>2</sup>。【结论】钦州湾溢油漂移扩散特征与溢油发生时刻及风作用密切相关,溢油时刻及风作用对钦州湾溢油漂移扩散的影响不容忽视。

关键词:钦州湾 海上溢油 数值模拟

中图分类号:X55 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2016)02-0156-07

**Abstract:**【Objective】The drift-diffusion feature and its affecting factors of oil spill in Qinzhou Bay were studied.【Methods】The diffusion characteristics of oil spill in the Qinzhou Bay areas was simulated by MIKE 21/3 SA oil spill model based on the hydrodynamic simulation results.【Results】The oil contamination was drifted towards Maowei Sea at first, and then move out Maowei Sea in ebbing tide when oil spill occurred in flood tide. The farthest drift distance of oil contamination towards Maowei Sea and outer Qinzhou Bay was about 17.51 km and 10.73 km, respectively, and the sweeping area of oil spill was about 71.83 km<sup>2</sup> within calculation interval. When oil spill occurred in ebb tide, the oil stain was drifted towards outer Qinzhou Bay and reversed towards the neck area of Qinzhou Bay in tide rising. In this case, the farthest drift distance of oil contamination towards outer Qinzhou Bay was about 17.96 km, and the sweeping area of oil spill was about 59.72 km<sup>2</sup>.【Conclusion】The drift-diffusion feature of oil spill in the Qinzhou Bay is closely related to the occurring time and the wind conditions, which cannot be ignored in the oil spill influence evaluation in Qinzhou Bay.

**Key words:** Qinzhou Bay, marine oil spill, numerical simulation

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20160512.003

## 0 引言

【研究意义】石油对工业生产和交通运输业具有不可替代的作用。随着海上运输业的发展,沿海港口发生溢油事故的可能性不断增加<sup>[1]</sup>。石油中含有烃类有毒有害物质,流入海洋,会对海洋环境造成严重影响,破坏海洋生态环境,危害海洋生态系统,因此,开展海上溢油数值模拟研究,科学预测海上溢油扩散

收稿日期:2016-03-11

作者简介:牙韩争(1988—),男,硕士,主要从事河口海岸物质输运研究。

\*国家自然科学基金项目(41576024),广西科学院基本科研业务费项目(12YJ25HY08,10YJ25HY03)和广西近海海洋环境科学重点实验室开放基金项目(GXKLHY14-01)资助。

特征,对海上溢油防范、扩散控制、应急处理、减少溢油对海洋生态环境的影响具有重大意义。而钦州湾是我国西南出海口的一个重要通道。“中国-东盟”贸易合作的加强以及广西经济的快速发展,钦州湾一带船舶运输业更为繁忙,使得钦州湾海域发生溢油事故的可能性大为提高,而钦州湾是一个半封闭式海湾,水交换能力差,周边又拥有着丰富的海洋资源,有多种典型生态系统,溢油事故一旦发生,极有可能对海洋生态、环境造成极大的影响。【前人研究进展】自 20 世纪 60 年代,有国外学者开始对海上溢油进行研究, Fay<sup>[2]</sup>对油膜扩散做出解释,提出经典的三阶理论,认为油膜的扩展主要受惯性力、重力、粘性和表面张力控制,并将溢油扩展分为惯性力扩展阶段、粘性力扩展阶段和表面张力扩展 3 个阶段。Blokker 等<sup>[3]</sup>建立单组份的溢油风化模型,但其未考虑油性随时间的变化,故计算结果不能很好反应溢油变化的真实情况。Mackay 等<sup>[4]</sup>将风速和溢油量加入模型中,建立了考虑风速和溢油量的蒸发经验公式,该理论已成为溢油风化研究的基础。Harrison 等<sup>[5]</sup>提出计算多组分油的蒸发公式,使得溢油风化计算更接近于实际。Lehr 等<sup>[6]</sup>在 Fay 的理论基础上对溢油扩展进行改进,在油膜的扩展中考虑风作用。Johansen 等<sup>[7]</sup>基于 lagrange 追踪法,改进了“油粒子”模型,该模型可直观地反应油膜在风、波浪等作用破碎、分离的实际情况。Zhang 等<sup>[8]</sup>考虑油膜的输运和风化过程,建立一种海上溢油行为的预报模式。张存智等<sup>[9]</sup>建立三维溢油动态预报模型,并将其成功应用于渤海湾溢油数值模拟。杨红等<sup>[10]</sup>基于拉格朗日粒子追踪法及自由走动理论建立长江口溢油模型对南港水道溢油进行模拟,模拟结果较好地反应了溢油在长江口南港水道的扩散情况。另外,黄娟等<sup>[11]</sup>、李怀明等<sup>[12]</sup>、陈义中等<sup>[13]</sup>学者也进行过类似的研究。对于多种数值模型,目前应用较为广泛的有美国研究所 (Applied science Associates, ASA) 研发的 OILMAP 模型、MARKREED 建立的 OSCAR 模型<sup>[14]</sup>,以及丹麦水利研究所 (DHI) 研究开发的 MIKE 21 OS/SA 溢油系列模型。【本研究切入点】钦州湾海域的溢油扩散特征未曾有报道。【拟解决的关键问题】采用 DHI 研发的 MIKE 21/3 SA 溢油分析模块,建立钦州湾海上溢油模型,对钦州湾海上溢油漂移扩散进行计算分析,探索钦州湾海上溢油漂移扩散特征及其影响因素,为钦州湾海上溢油事故防范、溢油事件应急处理、海洋生态环境保护等提供科学依据。

## 1 水动力条件数值模拟

水动力条件数值模拟是溢油漂移扩散预测的基础,其计算结果可为溢油扩散预测模型提供潮流项数据。本文采用 DHI 开发的 MIKE 21 HD 模块对海域水动力条件进行计算。

基础,其计算结果可为溢油扩散预测模型提供潮流项数据。本文采用 DHI 开发的 MIKE 21 HD 模块对海域水动力条件进行计算。

### 1.1 模型控制方程

MIKE 21 HD 水动力模型控制方程包括一个连续方程及两个动量方程。

连续方程:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

X 方向动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{H} \right) + gH \frac{\partial \xi}{\partial x} + \\ & \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 H^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right] - \Omega q - \\ & fV_x = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Y 方向动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{H} \right) + gH \frac{\partial \xi}{\partial y} + \\ & \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 H^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xy}) \right] - \Omega p - \\ & fV_y = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\zeta$  为水位;  $h$  为水深;  $H = h + \zeta$ ;  $p$ 、 $g$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的单宽流量;  $C$  为谢才系数,与曼宁系数的关系为  $C = n^{-1}/h^{1/6}$ ;  $g$  为重力加速度,  $f$  为风摩擦系数;  $V_x$ 、 $V_y$  分别为风速及其在  $x$ 、 $y$  方向的分量;  $\Omega$  为科氏力系数;  $\rho_w$  为水的密度;  $x$ 、 $y$  为距离;  $t$  为时间;  $u$ 、 $v$  分别为流速在  $x$ 、 $y$  方向的分量。  $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yy}$  分别为各方向剪切应力。

### 1.2 定解条件

初始条件给定初始时刻的水位及流速,本次模拟初始时刻水位及流速均设为零,即  $\zeta = \zeta(0)$ ;  $v(0) = 0, 0$ ;  $u(0) = 0, 0$ 。开边界采用水位边界条件,将潮位时间关系加入到边界网格上,即  $\zeta = \zeta(t)$ 。闭边界上采用不可入边界条件,法向量上的流速为零,即  $Q_n = 0$ 。自由表面边界主要为风应力,风作用下  $x$ 、 $y$  方向表面剪切应力计算式分别为  $\tau_{sx} = f\rho |W| W_x$ ;  $\tau_{sy} = f\rho |W| W_y$ , 其中,  $\rho$  为空气密度;  $W$  为风速矢量,  $f$  为风阻力系数。源汇项,考虑钦江、茅岭江径流输入,其多年平均径流量分别为  $63.7 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $71.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

### 1.3 计算区域的确定及网格划分

钦州湾海域岸线曲折,岛屿众多,地形变化大,潮波运动受地形控制明显,要准确模拟海域内潮波传播过程,需建立足够大的计算区域,因此,本次模型计算区域西边界取至企沙镇,东边界取至中三墩,南边界取至钦州湾外湾,北边界取至整个茅尾海,模型东西方向长约  $38 \text{ km}$ ,南北方向长约  $47 \text{ km}$ ,总面积约  $820$

km<sup>2</sup>, 计算区域地形图如图 1 所示。采用适应性较好的不规则结构网格对计算区域进行划分, 并就复杂的岛屿和岸线进行局部加密, 以保证计算精度。计算网格共包涵 10 280 个节点、19 389 个单元, 最小边长为 50 m, 最大水深约 21 m。

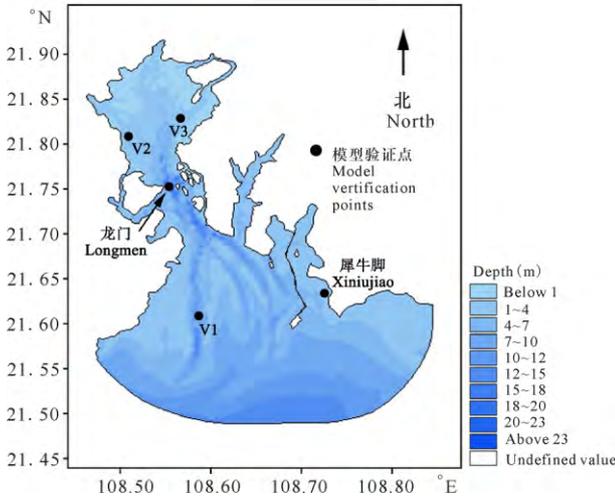


图 1 钦州湾水下地形及潮流要素验证点

Fig. 1 Schematic diagram of underwater topography of Qinzhou Bay and positions of model validation point

#### 1.4 计算结果验证

为验证水动力模型的可靠性, 采用 2012 年 5 月(小潮)及 2012 年 6 月(大潮)实测水文资料对计算结果进行验证, 包括 2 个潮位验证点及 3 个潮流验证点, 各潮流要素验证点点位如图 1 所示, 其中犀牛脚、龙门为潮位验证点, V1~V3 为潮流验证点。各点位潮流要素验证结果如图 2~5 所示, 由于篇幅有限, 这里只列举部分点位的结果验证。

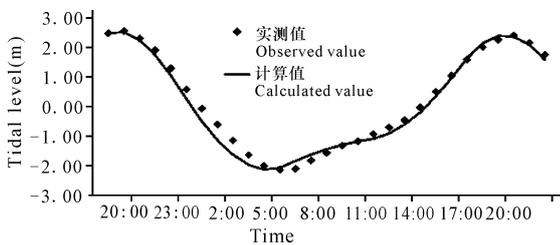


图 2 犀牛脚潮位验证图(大潮)

Fig. 2 Verification of tidal level in Xiniujiang (spring tide)

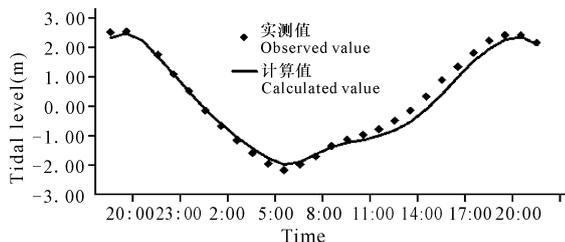


图 3 龙门潮位验证图(大潮)

Fig. 3 Verification of tidal level in Longmen (spring tide)

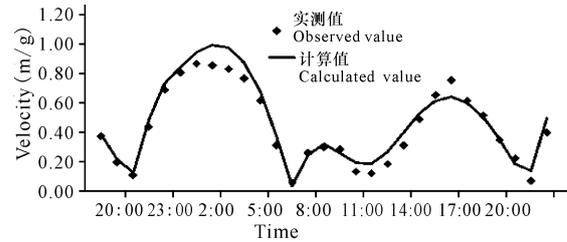


图 4 V1 站流速验证(大潮)

Fig. 4 Verification of current velocity in V1 (spring tide)

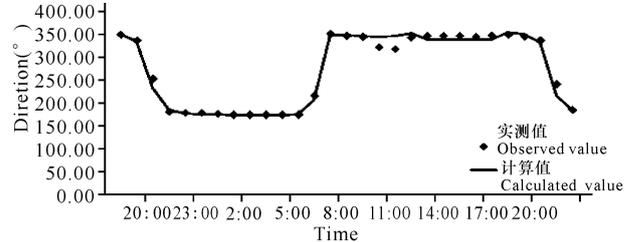


图 5 V1 站流向验证(大潮)

Fig. 5 Verification of current direction in V1 (spring tide)

由图 2~5 可知, 各潮位验证点潮位计算值与实测值有一定的偏差, 但相差不大, 最大潮差不超过 0.3 m, 龙门及犀牛脚两站潮位过程与实际监测结果几乎一致, 没有太大的差别。V1 站潮流计算值高潮位变化过程稍有偏差, 个别时段流速计算值比实测值略小, 但流速和流向的变化过程与实测值基本吻合。总体上, 模型计算值与实测值吻合良好, 位相、量值及过程线与实际情况基本一致, 可以用于溢油扩散数值模拟的计算研究。

## 2 溢油输移扩散模型的建立

溢油进入海洋水体后, 在自身重力及海洋水体物理化学的作用下, 同时发生扩展、漂移、扩散、蒸发、乳化、溶解等风化过程。本文采用 DHI 研发的 MIKE 21/3 SA 溢油分析模块建立钦州湾海上溢油模型, 对钦州湾海洋溢油进行预测。MIKE 21/3 SA 模块基于拉格朗日理论, 采用“油粒子”方法, 可模拟溢油在水体中漂移、扩散、蒸发、乳化、溶解等多种过程。

### 2.1 扩展

油粒子扩展是重力、惯性力、粘性力和表面张力等共同作用的结果。根据修正的 Fay 重力-粘力公式, 油膜扩散计算式为

$$\left(\frac{dA_{oil}}{dt}\right) = K_a A_{oil}^{1/3} \left(\frac{dV_{oil}}{A_{oil}}\right)^{4/3}, \quad (4)$$

其中,  $A_{oil} = \pi R_{oil}^2$ ,  $V_{oil} = \pi R_{oil}^2 h_s$ ;  $A_{oil}$  为油膜面积,  $R_{oil}$  为油膜半径,  $V_{oil}$  为油膜体积,  $t$  为时间,  $K_a$  为扩展系数,  $h_s$  为油膜厚度。

### 2.2 漂移

油粒子漂移是潮流运动及风拽力共同作用的结

果,其漂移速度与潮流流速及风速有关。油粒子漂移速度可用以下权重公式计算:

$$U_{oil} = V_s + C_{wind} U_{wind} \quad (5)$$

式中,  $U_{wind}$  为水面以上 10 m 处的风速,  $C_{wind}$  为风漂移系数,一般取值在 0.03~0.04,  $V_s$  为表面流速度。

### 2.3 扩散

油粒子扩散与水流紊动有关,根据随机扩散理论,假设各方向扩散具有同一性,一个时间步长内“油粒子”在  $a$  方向的扩散距离可表示为

$$D_a = R\sqrt{6C_a\Delta t} \quad (6)$$

式中,  $D_a$  为时间步长内溢油在  $a$  方向上的扩散距离,  $R$  为 -1~1 的随机数,  $C_a$  为  $a$  方向上的扩散系数,  $\Delta t$  为时间步长。

### 2.4 蒸发

油膜蒸发速率与气温、水温、溢油面积、风速、太阳辐射和油膜厚度等因素有关,可用以下公式表示:

$$\frac{dQ}{dt} = -k_E A_{oil} XMP/RT \quad (7)$$

其中,  $k_E = -kA_{oil}^{0.045} S_c^{-2/3} U_{wind}^{0.78}$ ,  $\frac{dQ}{dt}$  为油膜蒸发率,  $k_E$  为质量转移系数,  $k$  为蒸发系数;  $S_c$  为蒸汽 Schmidt 数,  $X$  为摩尔分数,  $M$  为摩尔质量,  $P$  为饱和蒸汽压力,  $R$  为气体常数。

### 2.5 乳化

溢油在经历一定时间的漂移扩散后,油膜厚度变小,水流紊动作用对油膜的影响逐渐增大。在水流紊动下,部分油膜被紊动力能量撕裂成油滴,形成水包油的粒子,从而形成一种油水相交乳化物。油膜乳化可用油膜含水率来表示,其计算式为

$$Y_w = \frac{1}{K_B} (1 - e^{-K_A K_B (1 + U_{wind})^2 t}) K_A \quad (8)$$

其中,  $K_B = 1/Y_{WF}$ ,  $Y_w$  为乳化物的含水量,  $K_A$  为经验参数,取值约为  $4.5 \times 10^{-6}$ ,  $Y_{WF}$  为油膜最终含水率。

### 2.6 溶解

溢油的溶解主要发生在低碳轻质油组分,溶解量通常很小,其溶解率用下式表示:

$$\frac{dV_{ds}}{dt} = K_s C_{ds} X \frac{M}{\rho} A_{oil} \quad (9)$$

式中,  $\frac{dV_{ds}}{dt}$  为油膜溶解速率,  $K_s$  为油膜溶解系数,取值约为  $2.36 \times 10^{-6}$ ,  $C_{ds}$  为溶解度。

## 3 钦州湾海上溢油扩散预测

### 3.1 溢油工况设计及参数选取

据《船舶油污事故等级标准》,溢油事故溢油量广西科学 2016 年 4 月 第 23 卷第 2 期

大于 10 t 时,称之为重大溢油事故。参照近年来各地溢油事故溢油量,本次研究溢油源强取为 10 t,并假设 1 h 内全部溢出。溢油点选择钦州港航道附近,这与溢油事故通常发生于港口航道等航运较繁忙区域的特点相适应。大潮期间,水动力能力相对较强,溢油扩散影响的范围较广,因此,本次溢油时刻选择大潮时期,包括涨潮时和落潮时两个时刻。根据钦州龙门气象站资料,钦州湾年平均风速不超过 5.0 m/s,最大风速达 28.0 m/s,常风向为 N 向风,频率为 26%,其次为南风,频率为 7%,综合考虑,本次计算风况选择 N、W、S、E 4 个风向,风速取为 5 m/s,另选一个静风情况。溢油模型各参数参照文献[15],油源密度取  $0.94 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,纵向扩散系数取 0.25 m/s<sup>2</sup>,横向扩散系数取 0.1 m/s<sup>2</sup>。模拟时段设为 24 h,并假定油膜最终扩展厚度为 0.01 mm<sup>[16]</sup>。各溢油计算工况及参数如表 1 所示,根据上述模型及参数,对钦州湾海上溢油漂移扩散进行模拟。

表 1 事故模拟情景条件

Table 1 Simulated scenes of accidents

事故情形 Accident case	环境条件 Environmental condition
溢油量 10 t Oil quantity 10 t	风向:N、W、S、E、静风 Wind direction: N、W、S、E、static wind
油源密度 Oil density: $0.94 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup>	风速 Wind speed: 5 m/s
溢油位置: 钦州港附近 Oil spilled location: Near Qinzhou Port	气温 Air temperature: 20°C
溢油时刻: 大潮(涨潮、落潮) Oil spilled time: Spring tide (Flood tide, Ebb tide)	水温 Water temperature: 25°C
溢油时间 Oil spilled period: 1 h	纵向扩散系数 Longitudinal dispersion coefficient: 0.25 m/s <sup>2</sup>
最终扩展厚度 Extended thickness: 0.01 mm	横向扩散系数 Transverse dispersion coefficient: 0.10 m/s <sup>2</sup>

### 3.2 结果与分析

#### 3.2.1 溢油漂移扩散特征

为分析钦州湾海上溢油扩散特征,在常风向情况下,对钦州湾海上溢油进行预测。图 6a 为涨潮时刻发生溢油 24 h 溢油扫海范围图,可知,当涨潮时刻发生溢油时,溢油先向茅尾海方向移动,由钦州湾湾颈进入茅尾海中部,待落潮时退出茅尾海直至钦州湾外湾,受溢油影响的区域主要为钦州湾湾颈至茅尾海中部以及钦州湾外湾中部一带海域,以及湾颈中部部分岛屿岸线。在潮流及油膜自身重力的作用下,油膜发生位置上变化的同时不断扩散,造成油膜面积的扩大。表 2 为常风向条件下各计算时刻溢油扩散计算结果统计表,可知,涨潮时刻发生溢油时,24 h 溢油

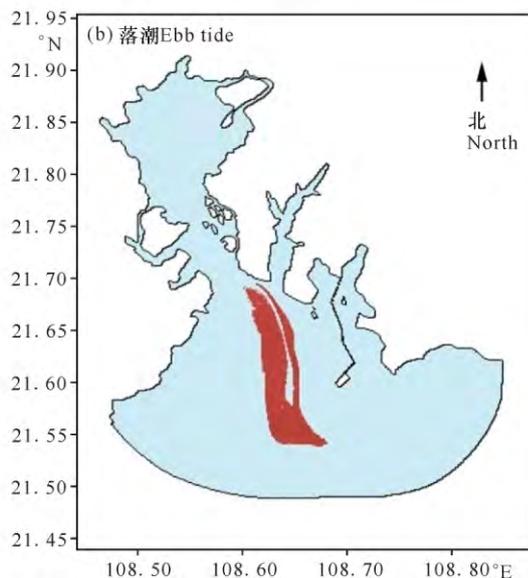
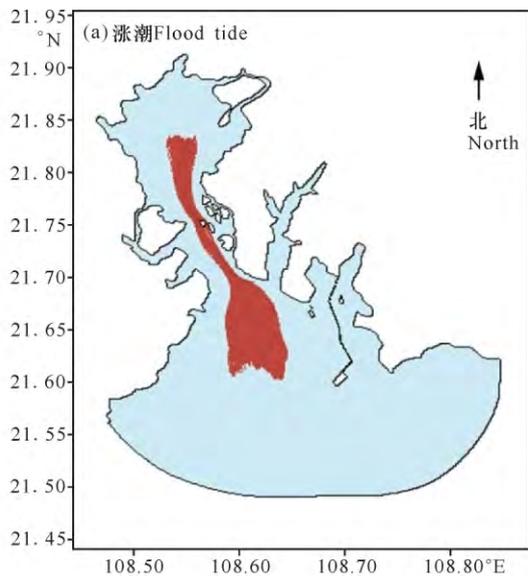


图6 常风向条件下24 h溢油扫海范围

Fig. 6 Sea swept area of spilled oil under N dominant wind conditions within 24 h

扩散面积约为  $9.80 \text{ km}^2$ , 扫海面积则可达  $71.83 \text{ km}^2$ 。整个计算时段, 溢油向茅尾海方向漂移的距离约为  $17.51 \text{ km}$ , 而向钦州湾外湾方向漂移的距离约为  $10.73 \text{ km}$ 。

图6b为落潮时刻发生溢油时24 h溢油扫海范围, 由图6b可知, 当落潮时刻发生溢油时, 溢油先向钦州湾外湾方向移动, 等涨潮后返回至钦州港附近海域, 受溢油影响区域主要为钦州湾外湾中部深水航道处。影响区域主要为深水航道附近, 其原因可能与航道处水动力条件好, 潮流流速大, 有利于物质的输运有关。由表2可知, 落潮时刻发生溢油时, 24 h油污扩散面积及扫海面积分别约为  $10.09 \text{ km}^2$  和  $50.72 \text{ km}^2$ , 油膜最远漂移距离约  $17.96 \text{ km}$ , 方向为钦州湾外湾方向。相比较涨潮时刻, 溢油落潮时大部分时刻

扩散面积稍大, 但扫海面积却较小, 其原因在于落潮时溢油漂移距离相对较短, 从而造成扫海面积较小。

### 3.2.2 溢油时刻对溢油漂移扩散的影响

图7为静风条件下不同时刻发生溢油时油污漂移轨迹, 由图7可知, 当涨潮时刻发生溢油时, 溢油将随着潮流向西北偏北方向移动, 由钦州湾湾颈中部进入茅尾海; 而当溢油发生在落潮时刻时, 溢油则向钦州湾外湾方向移动。溢油漂移轨迹的不同, 也造成了溢油扩散程度及扫海范围的差异, 由表2可知, 当涨潮时刻发生溢油时, 24 h油污扩散面积及扫海面积分别为  $9.80 \text{ km}^2$  和  $71.83 \text{ km}^2$ , 而落潮时刻发生溢油时, 这两个值分别为  $10.09 \text{ km}^2$  和  $50.72 \text{ km}^2$ , 有明显的差异。由于不同溢油时刻下海域水动力环境有一定的差异, 因此, 其漂移路径及扩散程度也不同, 其扩散结果也必将不同。说明溢油时刻对油膜运动过程有显著的影响, 溢油漂移扩散结果与溢油时刻有密切的关系。

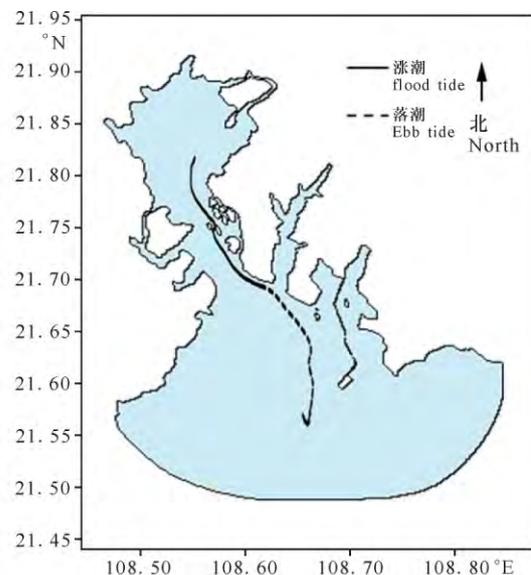


图7 不同溢油时刻下溢油漂移扩散轨迹

Fig. 7 Drift track of spilled oil under different time

### 3.2.3 风况对溢油漂移扩散的影响

对不同风况下涨潮时刻发生的溢油扩散特征进行计算, 结果如表3所示。由表3可知, 风作用对钦州湾溢油漂移扩散有显著的影响, 不同风况作用下的溢油扩散效果有明显的区别。以静风时及N风时为例, 静风作用下, 24 h油污扩散面、扫海面积分别为  $4.15 \text{ km}^2$  和  $27.04 \text{ km}^2$ , 而N向风存在时, 对应的两个值分别为  $9.80 \text{ km}^2$  和  $71.83 \text{ km}^2$ , 差异明显。相比较静风时, N风作用下, 溢油扩散面积及扫海面积更大, 其原因在于: N风作用下, 溢油在24小时内先后进入茅尾海和钦州湾的中部, 漂移所经过的海域水动力相对较强, 潮流对溢油扩散的推动作用明显; 同

表 2 常风向条件下不同时刻溢油扩散面积及扫海面积统计

Table 2 Statistical results of diffusion area and sweeping area at different time under dominant wind condition

溢油时刻 Oil spill time	扩散面积 (km <sup>2</sup> ) Diffusion area(km <sup>2</sup> )				扫海面积 (km <sup>2</sup> ) Sweeping area(km <sup>2</sup> )				最远漂移距离(km) Farthest drift distance(km)	
	6 h	12 h	18 h	24 h	6 h	12 h	18 h	24 h	茅尾海方向 Maowei Sea	钦州湾外湾方向 Outer Qinzhou Bay
	涨潮 Flood tide	2.93	3.90	10.87	9.80	8.27	21.42	69.78	71.83	17.51
落潮 Ebb tide	3.43	4.73	7.65	10.09	11.18	19.28	33.59	50.72	0.00	17.96

表 3 不同风况条件下不同时刻溢油扩散面积及扫海面积统计

Table 3 Statistical results of diffusion area and sweeping area at different time under different wind conditions

风况 Wind regime	扩散面积 (km <sup>2</sup> ) Diffusion area(km <sup>2</sup> )				扫海面积 (km <sup>2</sup> ) Sweeping area(km <sup>2</sup> )				最远漂移距离(km) Farthest drift distance(km)	
	6 h	12 h	18 h	24 h	6 h	12 h	18 h	24 h	茅尾海方向 Maowei Sea	钦州湾外湾方向 Outer Qinzhou Bay
	静风 Static wind	2.46	2.74	4.27	4.15	7.84	14.24	22.08	27.04	16.43
N 风 N wind	2.93	3.90	10.87	9.80	8.27	21.42	69.78	71.83	17.51	10.73
E 风 E wind	4.11	3.97	1.65	2.89	11.16	20.95	27.33	39.82	19.03	6.74
S 风 S wind	2.29	1.91	2.21	4.43	6.66	12.62	17.09	22.14	15.67	6.01
W 风 W wind	1.90	1.15	2.25	4.12	5.98	10.85	15.43	19.80	14.98	7.04

时,风力的作用也使得溢油向钦州湾外湾方向漂移距离明显增加,从而造成 N 风作用下溢油扩散面积及扫海面积相对较大的特点。

由图 8 可知,不同风况下,溢油影响区域有明显的区别。除 W 风外,其它各向风作用下的溢油均进入了茅尾海,S 风作用下,溢油倾向于进入茅尾海东部,而 N 风和 E 风作用时分别进入茅尾海中部及西

部。W 风作用下,溢油则直接漂向钦州港一带岸线,基本没有进入茅尾海。由于风对溢油的影响主要在于风应力对溢油漂移速度项的贡献,故风应力的存在会增大或减小溢油在水体中的漂移速度,从而影响溢油漂移扩散的整个过程,风作用对溢油漂移扩散的影响不容忽视。

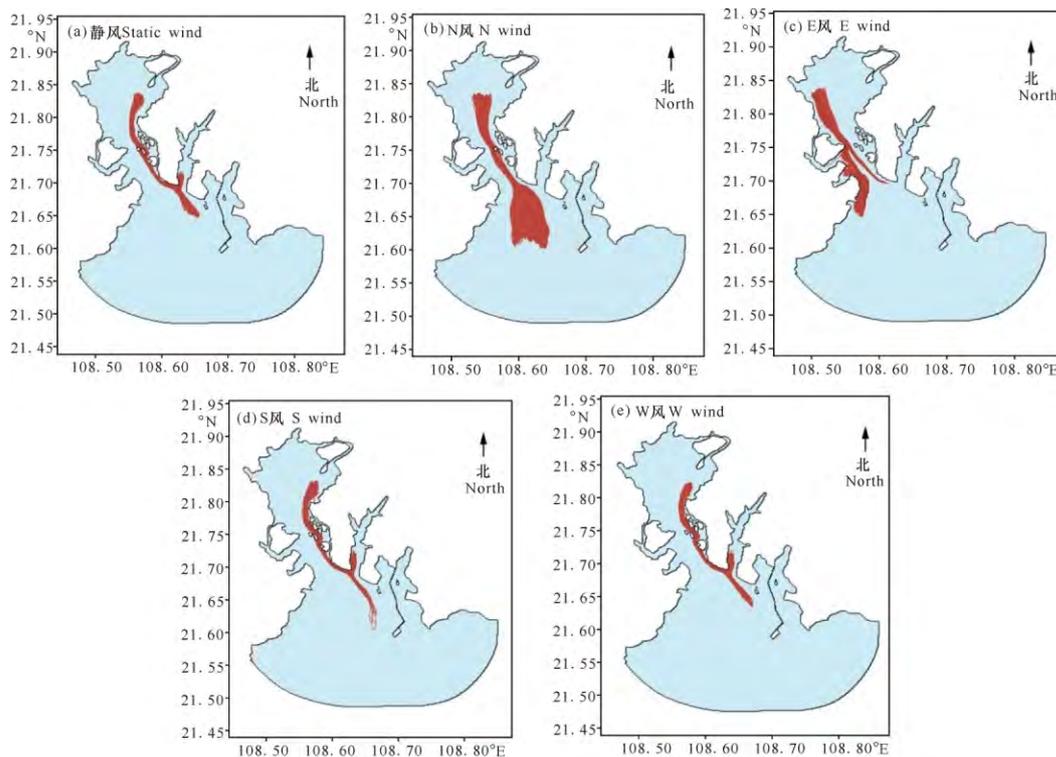


图 8 不同风况下涨潮时 24 h 内溢油扫海范围

Fig. 8 Sea swept area of spilled oil under different wind conditions within 24 h

## 4 结论

本文利用 MIKE 21 HD 模块建立钦州湾海域水动力模型对钦州湾海域潮流特性进行模拟,并在此基础上利用 MIKE 21/3 SA 溢油分析模块,分析钦州湾海上溢油漂移扩散的特点及其影响因素,结果表明 1)涨潮时发生溢油,溢油先向茅尾海方向漂移,待落潮后退出茅尾海;而落潮时刻发生溢油,溢油则先向钦州湾外湾漂移,待涨潮后转向钦州湾湾颈方向。2)涨潮时发生溢油,24 h 内溢油扩散面积及扫海面积分别约为 9.80 km<sup>2</sup> 和 71.83 km<sup>2</sup>,溢油向茅尾海方向及钦州湾外湾方向漂移的最远距离分别约为 17.51 km 和 10.73 km;而落潮时刻发生溢油,24 h 内油污扩散面积及扫海面积分别约为 10.09 km<sup>2</sup> 和 50.72 km<sup>2</sup>,油膜向钦州湾外湾方向漂移最远距离约 17.96 km。3)油污扩散面积、扫海范围及迁移路径与溢油发生时刻、风况密切相关,不同溢油时刻及风况下,其油污扩散面积、扫海范围、迁移路径有明显的差异,溢油时刻及风作用对溢油漂移扩散的影响不容忽视。

### 参考文献:

- [1] 陈宪云,陆海生,陈波. 广西海岸带海洋环境污染现状及防治对策[J]. 广西科学,2014,21(5):555-560.  
CHEN X Y, LU H S, CHEN B. Status and control countermeasures on marine environment pollution of Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2014, 21(5): 555-560.
- [2] FAY J A. The spread of oil slicks on a calm sea[C]// Oil on the Sea. New York: Plenum Press, 1969: 53-63.
- [3] BLOKKER P C. Spreading and evaporation of petroleum products on water[C]// Proceedings of the Fourth International Harbor Conference. Antwerp: Internat Harbour Conf, 1964: 911-919.
- [4] MACKAY D, MATSUGU R. Evaporation rate of liquid hydrocarbon spills on land and water[J]. Can J Chem Eng, 1973, 51(8): 434-439.
- [5] HARRISON W, WINNIK M A, KWONG P T Y, et al. Crude oil spills-Disappearance of aromatic and aliphatic components from small sea-surface slicks[J]. Environ Science Tech, 1975, 9(3): 231-234.
- [6] LEHR W J, CEKIRGE H M, FRAGA R J. Empirical studies of the spreading of oil spills[J]. Oil & Petrochemical Pollution, 1984, 2(1): 7-11.
- [7] ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills of the Water Resources Engineering Division. State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(11): 594-609.
- [8] ZHANG B, ZHANG C Z, OZER J. SURF-A simulation model for the behavior of oil slicks at sea[C]// Ozer J (ed.). Oil Pollution: Environmental Risk Assessment (OPERA). Proceedings of the OPERA Workshop, Dalian, China, 1991: 61-85.
- [9] 张存智, 龚振兴, 韩康, 等. 三维溢油动态预报模式[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(1): 22-29.  
ZHANG C Z, DOU Z X, HAN K, et al. A three dimensional model to predict the behavior of oil spills [J]. Marine Environmental Science, 1997, 16(1): 22-29.
- [10] 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.
- [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.  
HUANG J, CAO Y J, GAO S, et al. Numerical simulation of oil spill drift-diffusion in the Bohai Sea[J]. Marine Sciences, 2014, 38(11): 100-107.
- [12] 李怀明, 娄安刚, 王璟, 等. 蓬莱 19-3 油田事故溢油数值模拟[J]. 海洋科学, 2014, 38(6): 70-77.  
LI H M, LOU A G, WANG J, et al. A numerical simulation of the oil spill accident at Penglai 19-3 oil field [J]. Marine Sciences, 2014, 38(6): 70-77.
- [13] 陈义中, 朱建荣, 陈睿, 等. 渤海原油码头溢油漂移扩散的数值模拟[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2006(6): 25-33.  
CHEN Y Z, ZHU J R, CHEN R, et al. Numerical simulation of the drift and diffusion of oil film at the crude oil wharf in the Bohai Sea [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2006(6): 25-33.
- [14] 臧士文. 基于 FVCOM 模型的二维海上溢油数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.  
ZANG S W. Study on the Numerical Simulation for Two-Dimensional Oil Spills in Seas Based on FVCOM Model[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [15] 袁春光, 王义刚, 黄惠明, 等. 大亚湾芒洲岛海域移动溢油数值模拟研究[J]. 海洋通报, 2014, 33(6): 659-667.  
YUAN C G, WANG Y G, HUANG H M, et al. Oil spill numerical simulation on the wharf engineering of Mangzhou Island in the Daya Bay [J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(6): 659-667.
- [16] 吴晓丹, 宋金明, 李学刚, 等. 海洋溢油油膜厚度影响因素理论模型的构建[J]. 海洋科学, 2010, 34(2): 68-74.  
WU X D, SONG J M, LI X G, et al. Construction of theoretical model for thickness of marine oil spilled [J]. Marine Sciences, 2010, 34(2): 68-74.

(责任编辑:尹 闯)