

# The Application of Random Simulation in Predicting the Risk of Oil Spill in Ships

Yuxin Zhu, Ying Wang, Xin Xu, Mingchang Li

Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T, Tianjin  
Email: 55450526@qq.com, ruozhu1106@163.com, 147491256@qq.com, 252254889@qq.com

Received: Feb. 1<sup>st</sup>, 2018; accepted: Mar. 6<sup>th</sup>, 2018; published: Mar. 13<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

This study combines the hydrodynamic prediction model MIKE21 and the oil spill model OILMAP. Using the hydrodynamic prediction model to provide the accurate tidal current field for oil spill model, we apply oil particle tracing method and stochastic simulation method to predict and evaluate the risk of oil spill in the planned port area. The numerical simulation results show that the current and the wind will directly affect the range and trajectory of the oil film. Once the oil spill accident happens, the area with probability greater than 70% is about 191.5 km<sup>2</sup>, which is mainly affected by 5 km within two sides of port. Through risk prediction and assessment, we can provide necessary support for the regional emergency forces.

## Keywords

Oil Spill, Stochastic Simulation, Risk Prediction, OILMAP

---

# 随机模拟在船舶溢油污染风险预测中的应用研究

朱宇新, 王莹, 徐鑫, 李明昌

交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津  
Email: 55450526@qq.com, ruozhu1106@163.com, 147491256@qq.com, 252254889@qq.com

收稿日期: 2018年2月1日; 录用日期: 2018年3月6日; 发布日期: 2018年3月13日

---

## 摘要

本研究采用专业化的水动力预测模型MIKE21模型和溢油模型OILMAP模型相结合, 以水动力预测模型为

溢油模型提供准确的潮流场,在此基础上,应用油粒子跟踪方法和随机模拟的方法对规划港区的溢油污染风险进行预测和评估,研究结果表明,溢油事故发生后,潮流和风的共同作用会直接影响油膜的扫海范围及漂移轨迹;在规划港区口门处发生海损性事故后,受溢油影响概率大于70%的海域面积约为191.5 km<sup>2</sup>,其他水域受溢油的影响概率较小;本研究可以为港区应急能力规划提供必要的技术支撑。

## 关键词

溢油, 随机模拟, 风险预测, OILMAP

## 1. 引言

随着国内港口业的发展及运输的持续增长,船舶海上溢油事故频繁发生。据统计我国沿海,1976-2000年间共发生大小船舶溢油事故 2353 起,总溢油量约 3 万吨[1]。根据相关要求在发展港口的同时,也需要对港区应急能力进行建设,以适应相应的风险水平。因此为了提高东营市所辖海域风险应对能力和应急管理,需要在分析东营所辖海域特点的基础上进行东营市应急能力规划建设,而应急能力规划建设离不开船舶溢油污染风险预测和评估。本文利用溢油随机模块,根据东营市应急能力形势和需求,对所辖海域内可能发生风险事故的位置进行典型风和流条件下的溢油污染风险预测,为急能力规划建设提供强有力的技术支撑。

## 2. 数值模拟方法

溢油污染风险预测是溢油轨迹分析、溢油污染影响和溢油治理的关键技术之一,欧、美、日等国从 20 世纪 60 年代开始就对其进行了研究,并相继开发出了溢油预测的软件,其中美国 ASA (Ap edScience Associates, Inc.)公司的 OILMAP 软件是应用比较广泛一个商业软件[2]。但该软件在处理现状岸线、实际水深地形、外海开边界以及水动力参数方面存在更多的概化,导致进行溢油计算的水动力场存在一定的偏差。

本文在预测中,采用丹麦 DHI 公司开发的 MIKE21 模型建立二维潮流数学模型,该模型广泛应用于河流、湖泊、河口、海湾、海岸及海洋的水流、波浪、泥沙及环境等工程中,是专业化的水动力预测模型。通过 MIKE21 模型对研究海域的水动力场进行精确的模拟预测,模拟结果通过数据处理应用于 OILMAP,以实现水动力预测结果和溢油模型预测结果的准确性和可靠性。

### 2.1. 水流控制方程

本文计算域设置、水深和岸界条件、模型水边界输入条件与文献[3]相同,其他模型参数设置如下:水动力方程包括二维潮流连续方程[3]和运动方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (P_\alpha) = 0 \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega_p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (P_\alpha) = 0 \quad (1.3)$$

其中： $h(x, y, t)$ ——水位(= $\zeta - d, m$ )； $d(x, y, t)$ ——水深(m)； $\zeta(x, y, z)$ ——水位(m)； $p, q(x, y, t)$ ——在  $x, y$  方向上的流量通量； $C(x, y)$ ——Chezy 系数(m<sup>1/2</sup>/s)，它与曼宁数  $M$  的关系为  $C = M \times h^{1/6}$ ； $g$ ——重力加速度(m/s<sup>2</sup>)； $f(V)$ ——风摩擦因素 =  $\gamma_\alpha^2 \rho_\alpha$ ； $\gamma_\alpha^2$  为风应力系数， $\rho_\alpha$  为空气密度； $V, V_x, V_y(x, y, t)$ ——风速及在  $x, y$  方向上的分量； $\Omega(x, y)$ ——柯氏力系数(s-1)； $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ ——有效剪切力分量。

## 2.2. 溢油模型

溢油模型 OILMAP 是基于拉格朗日粒子跟踪方法，考虑由风、流、物理分散作用和 Stokes 散射等引起的粒子移动模型。

Lagrange 油粒子运动方程如下：

$$X = X_0 + (U + \alpha W_{10} \cos A + r \cos B) \Delta t \tag{1.4}$$

$$Y = Y_0 + (U + \alpha W_{10} \sin A + r \sin B) \Delta t \tag{1.5}$$

式中： $X_0, Y_0$  为某质点初始座标(m)； $U, V$  为流速(m/s)； $W_{10}$  为风速(m/s)； $A$  为风向； $\alpha$  为修正系数； $r$  为随机扩散项， $r = R \cdot E$ ， $R$  为 0~1 之间的随机数， $E$  为扩散系数； $B$  为随机扩散方向， $B = 2\pi R$ 。

OILMAP 模型可以对油品的漂移、风化、扩散、溶解、岸线吸附等一系列过程进行模拟，可以预测油膜漂移轨迹和泄漏油品归宿[4]，对其危害程度进行评估，其模拟程序见图 1。

## 3. 模型及参数的选取

### 3.1. 计算域的确定及网格剖分

模拟范围如图 2 所示，船舶溢油污染风险预测主要分析所在海域锚地、航道周边的风险源，因此本研究计算域从东至西涵盖了莱州湾及渤海湾南侧海域，计算域南北跨度约 171 km，东西跨度 248 km，模拟海域总面积达 15237 km<sup>2</sup>。

对整个计算区域采用结构网格进行剖分，计算网格步长为  $D_x = D_y = 250m$ ，同时对陆地和港区岸线进行二次精细光滑处理，以保证计算精度。全部计算区域共生成 671,300 个网格，其中参与计算的有效网格数约为 371,800 个。水下地形采用 2010 年海军司令部航海保证部海图。

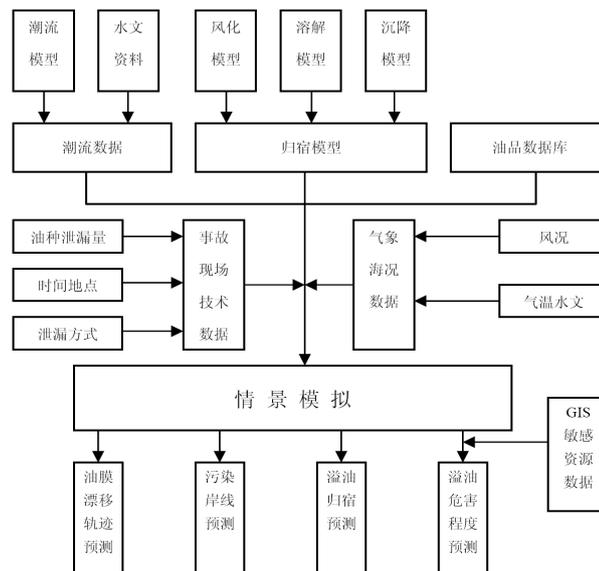
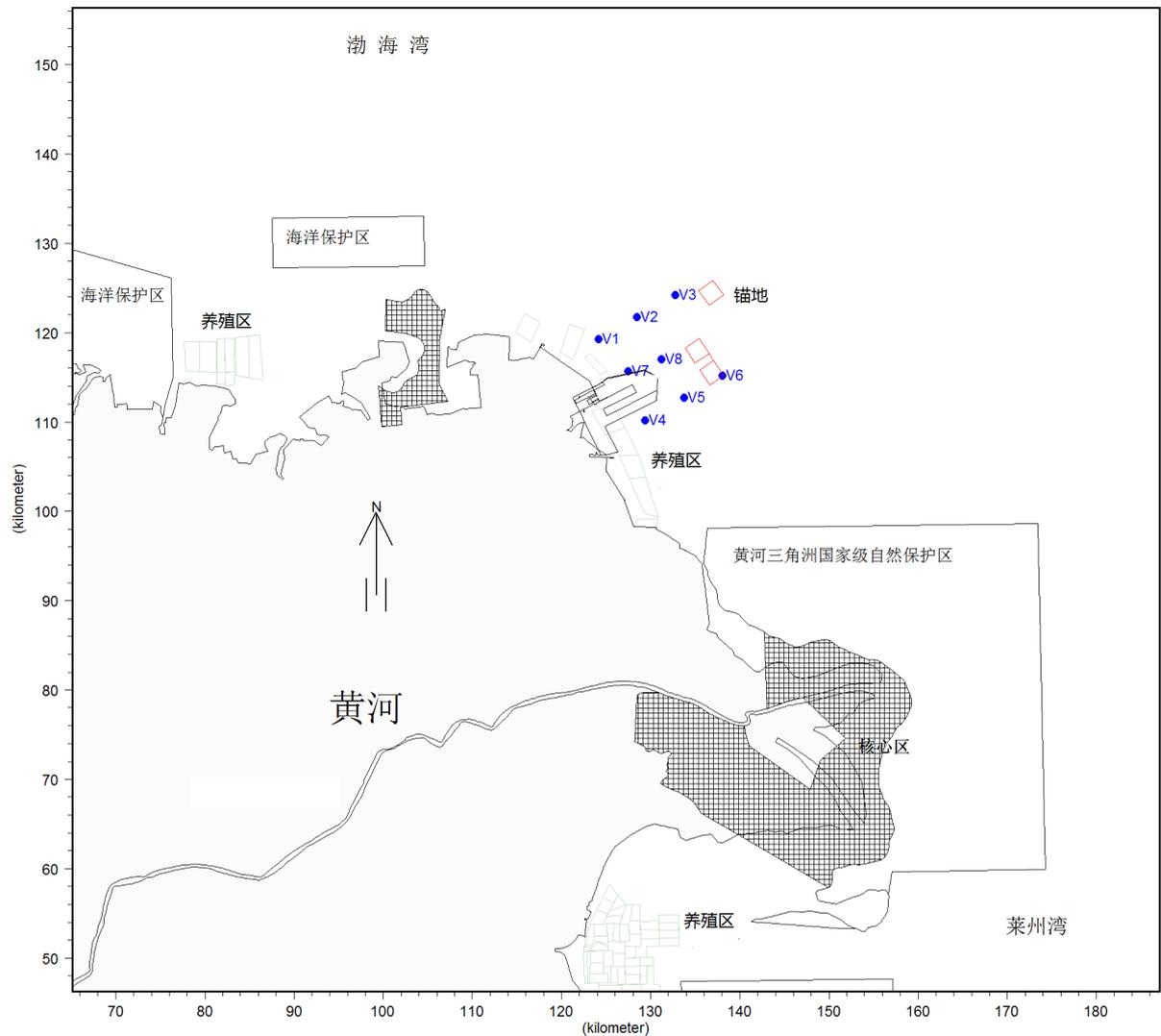


Figure 1. Simulation process  
图 1. 溢油模型模拟程序



**Figure 2.** Research domain and verification  
**图 2.** 研究范围及验证站位布置

### 3.2. 水动力计算参数设置

开边界采用水位控制，外海水位边界资料由渤海潮波模型提供。主要计算参数如表 1 所示。

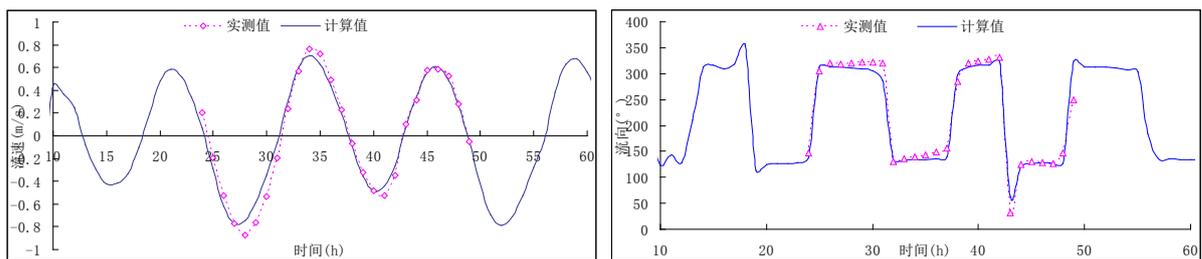
## 4. 验证计算及结果分析

### 4.1. 潮位与流速验证

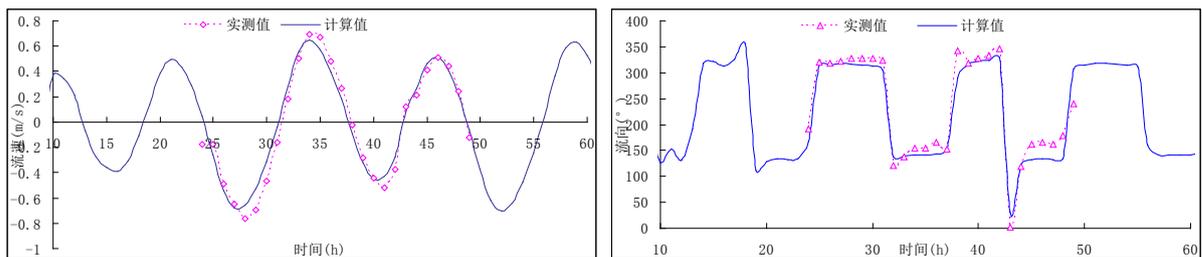
潮流站布置断面平行于港区航道轴线方向，共布置三个断面，每个断面上三个潮流站点，共计 9 个潮流站。文章中仅给出了锚地周边 V3 和 V6 站的验证结果(如图 3-4 所示)，从结果可以看出在本研究所海域内，潮流属正规半日潮性质[5]，潮流运动表现为往复流，涨潮向 NW，落潮向 SW，落潮流速大于涨潮流速，落潮历时略大于涨潮历时；模型中的计算位相、量值及过程线，均与原型吻合良好，符合《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》[6]的要求，模型达到相似要求，可以用于进行溢油扩散数值模拟计算研究。

**Table 1.** Selected coefficient by using mathematical model  
**表 1.** 模型计算参数采用表

参数名称	参数取值
网格步长 Dx/Dy	250 m
最小时间步长	30 s
糙率	0.020
紊动粘性系数	52 m <sup>2</sup> /s
干湿判别	0.2 m
柯氏力	$2\omega \cdot \sin(30.5^\circ) \text{s}^{-1}$
水容重	1020 kg/m <sup>3</sup>



**Figure 3.** V3 station velocity magnitude and direction  
**图 3.** V3 流速、流向验证



**Figure 4.** V6 station velocity magnitude and direction  
**图 4.** V6 流速、流向验证

## 4.2. 溢油研究区域的流场特征

通过 MIKE21 模型对研究海域水动力场进行预测并验证后, 得出准确的水动力场情况, 将水动力场通过数据转换输入 OILMAP 对油品的漂移、风化、扩散、溶解等过程进行预测, 其中图 5~8 给出了输入 OILMAP 模型中的水动力场的分布特征:

- 1) 研究海域位于莱州湾和渤海湾的分界处, 黄河三角洲向东北凸入渤海的最端[5] [7], 所在海域潮流流速较大;
- 2) 近岸区域潮流以往复流为主, 外海涨潮最大流速可达到 0.8 m/s, 落潮最大流速可达到 0.9 m/s。
- 3) 港区规划实施前, 潮流沿着海岸线方向流动;
- 4) 港区规划实施后涨、落潮流将受到港区的影响, 绕过外侧防波堤进行流动, 但在港池内部流速有明显减小趋势;
- 5) 港区规划会对近岸的潮流流速和流态产生一定的影响, 但对港区外海的水动力条件影响较小。

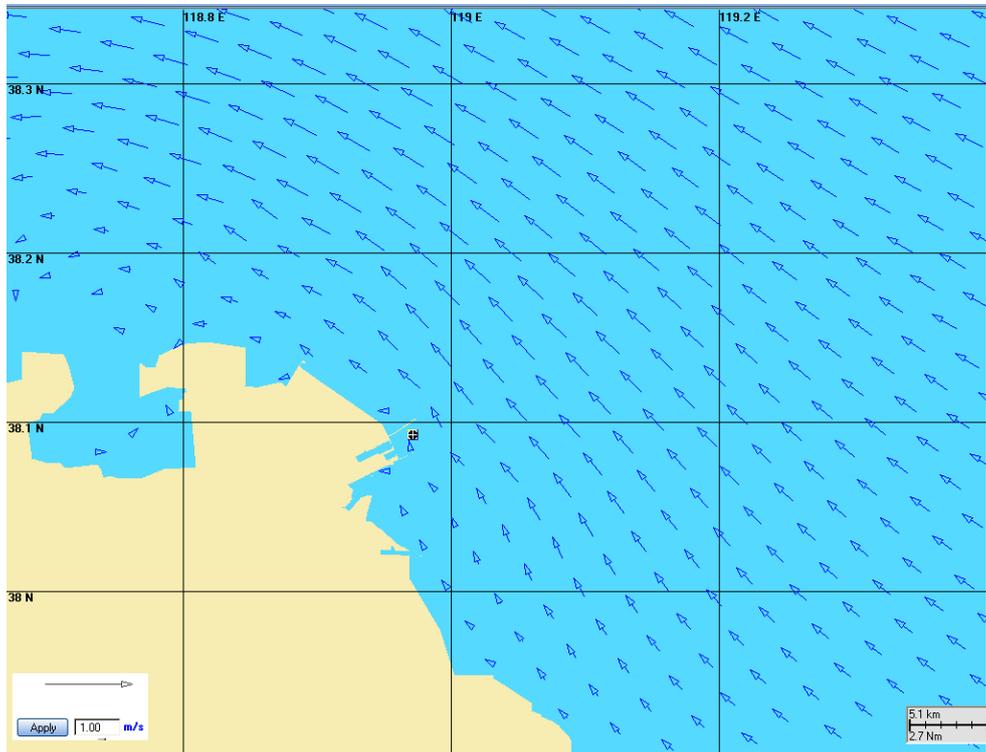


Figure 5. Flow field at flood tide at pre planning  
图 5. 规划前港区周边潮流涨急流态图

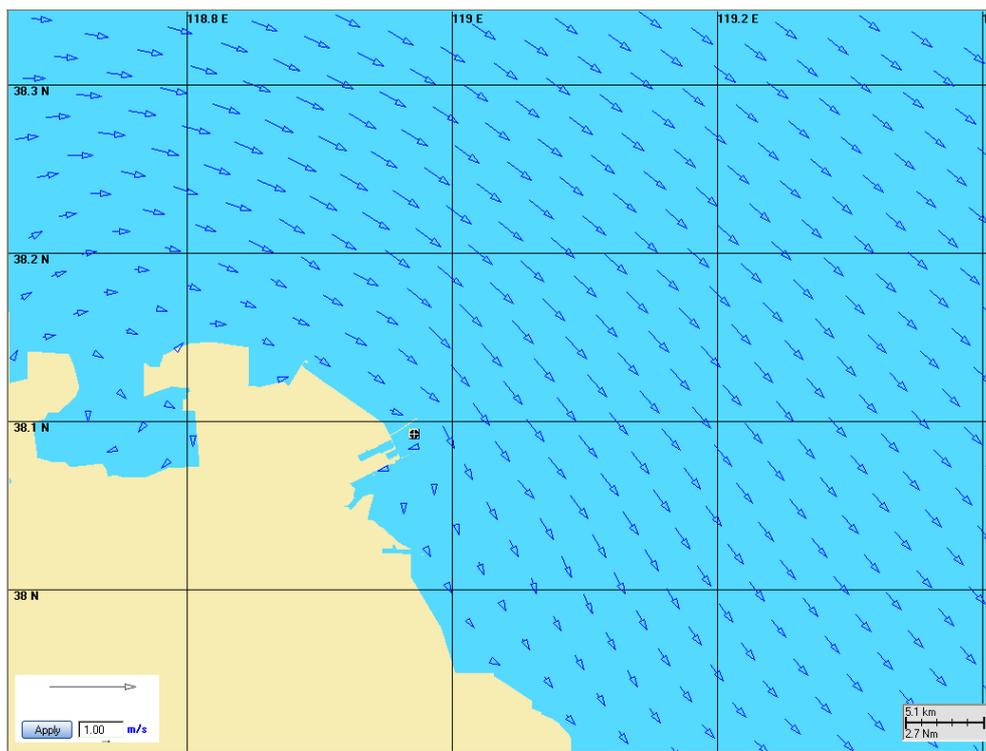


Figure 6. Flow field at ebb tide at pre planning  
图 6. 规划前港区周边潮流落急流态图

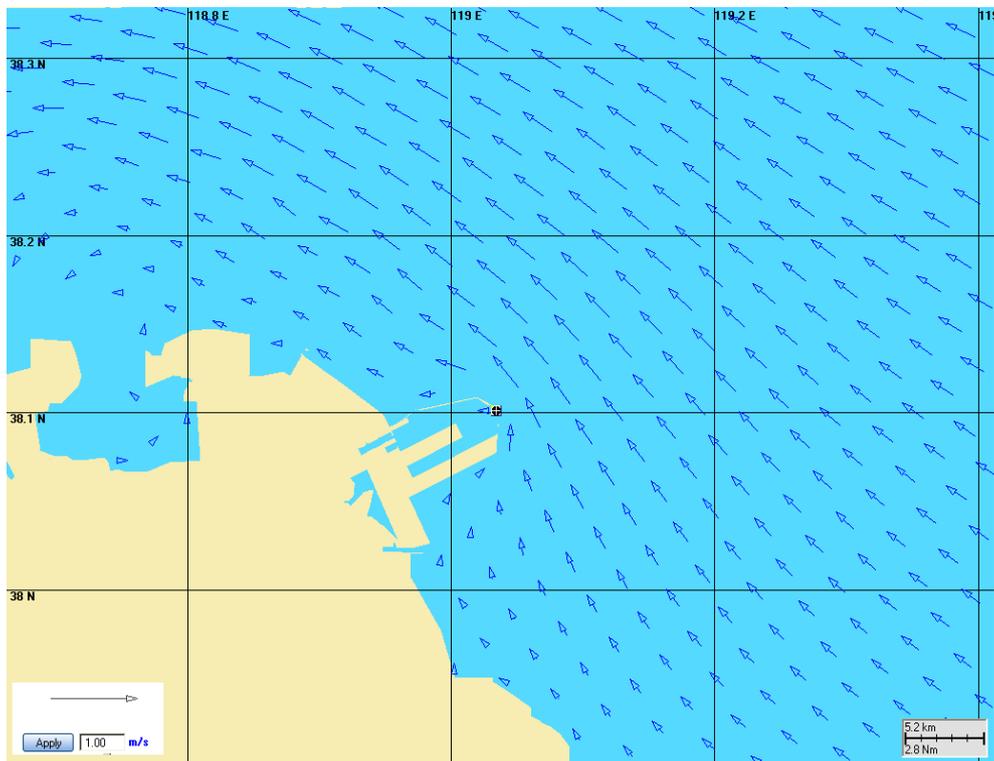


Figure 7. Flow field at flood tide after planning  
图 7. 规划后港区周边潮流涨急流态图

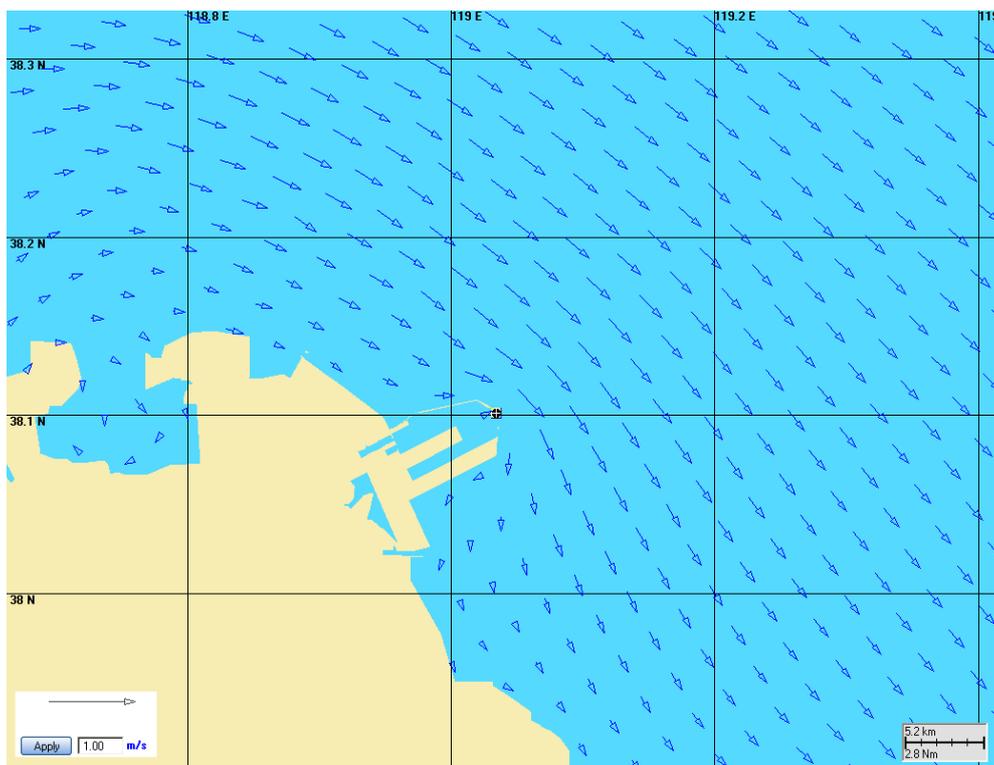


Figure 8. Flow field at ebb tide after planning  
图 8. 规划后港区周边潮流落急流态图

## 5. 溢油风险影响形势分析

### 5.1. 污染源项分析

综合考虑研究海域的特点，船舶及其作业活动的风险因素主要来自海损性事故，海损性事故主要发生在港区口门处、航道交汇处、锚地停泊处以及平台碍航区域，溢油量相对较大。

根据未来港区规划以及到港主力船型分析，最大可能风险源为 5 万吨级原油船，按照一个边舱货油全部溢出估算，海损性船舶污染事故溢油量为 2200 t。

因此本研究中风险因素选取海损性事故，污染源选取原油，泄漏量取为 2200 吨，原油相对密度取 0.75~0.95。海损性事故发生点选取港区口门、锚地和航道等位置处，由于锚地和航道等位置距离岸线较远，因此本文展示中主要以规划港区口门处发生海损性事故作为典型污染事故进行分析。

### 5.2. 典型污染事故后果预测

采用 Lagrange 油粒子跟踪方法对规划港区口门处油膜漂移轨迹和影响范围预测(结果见表 2 和图 9~11 所示)可知：

1) 在全年主导风向为 E 向、平均风速值 6.4 m/s 条件下，当溢油事故发生在涨潮时，溢油会随潮流和风的联合作用下将绕过北侧防波堤、很快向正西方向漂移，油膜基本沿着北侧防波堤外侧漂向近岸区域，在溢油 24 个小时后将抵岸，在整个过程中油膜均不会对北侧现状养殖区和保护区产生直接影响。

2) 当溢油事故发生在落潮时，油膜会在落潮流和风的作用下将向南侧漂移，在 19 小时后将抵达港区南防波堤处，其后沿着防波堤进行漂移扩散，不会对东营港南北两侧的环境敏感目标产生影响。

3) 在不利风 NW 风作用下溢油会随潮流和风的联合作用下向东南运动，18 小时后进入黄河三角洲海洋保护区(进入时油膜宽约 3.6 km)，之后油膜将对该保护区产生持续影响，持续影响时间为 49 个小时，在此过程中油膜扫海总面积约 226.5 km<sup>2</sup>，漂移距离为 62 km。

**Table 2.** Sea-swept area of oil spill

**表 2.** 溢油事故后扫海范围

Time (h)	全年主导风 E		不利风 NW
	涨潮面积 (km <sup>2</sup> )	落潮面积 (km <sup>2</sup> )	落潮面积 (km <sup>2</sup> )
0	0	0	0
1	0.6	0.6	0.4
2	1.2	1.8	1.4
3	2.2	2.5	2.8
4	3.2	3.1	5
5	3.8	3.5	6.9
6	4.8	3.5	8.7
7	6	3.5	10.2
8	6.2	3.1	11.6
9	6.3	2.5	12.5
10	5.7	1.9	13.2
11	5.4	1.3	14.1
12	4.6	0.2	15.7
...	...	...	...
71	0	0	66.2
72	0	0	68.1

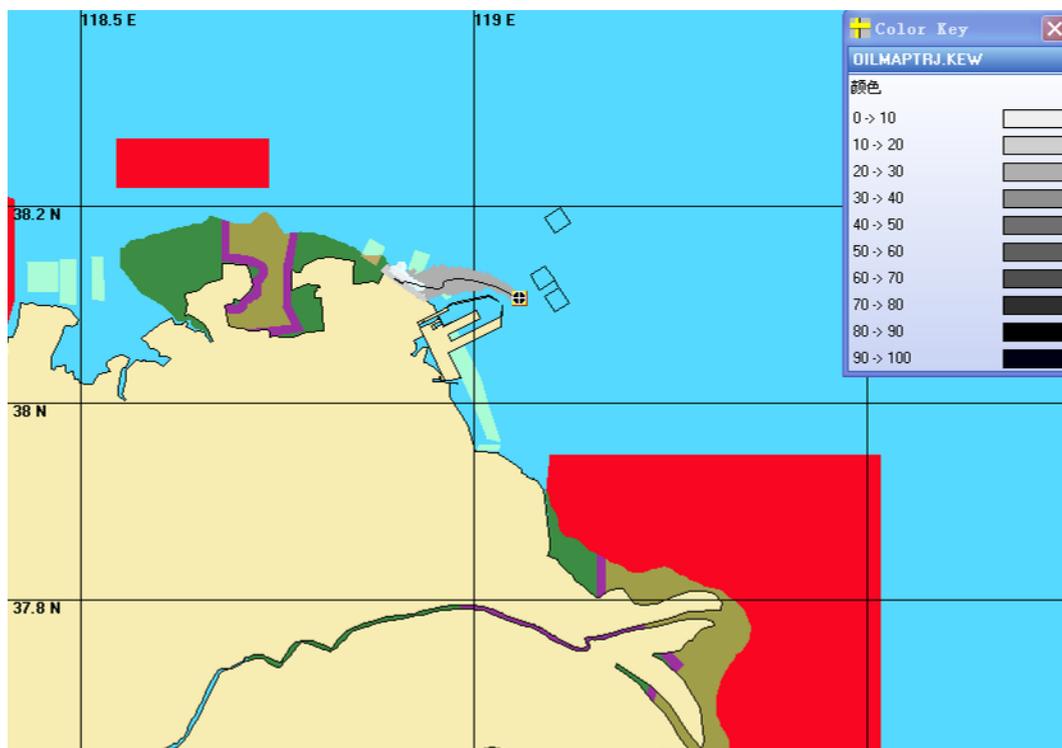


Figure 9. Trace and range of oil spill pollution when leading wind E and flood tide  
图 9. 全年主导风涨潮条件下溢油污染轨迹及范围

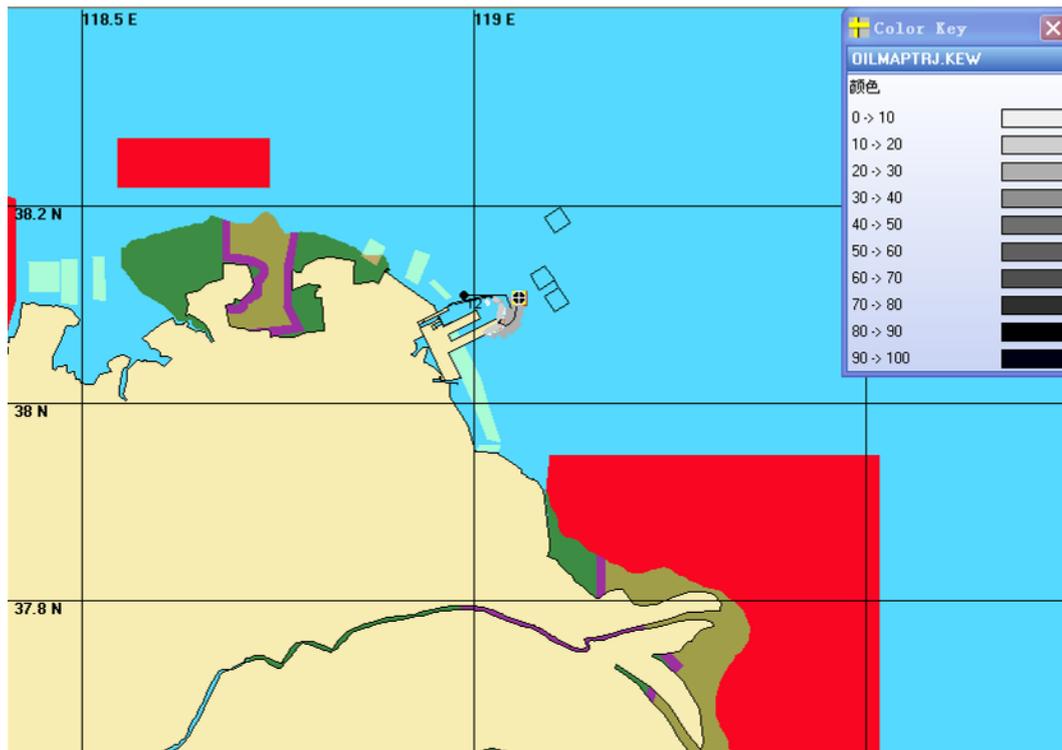
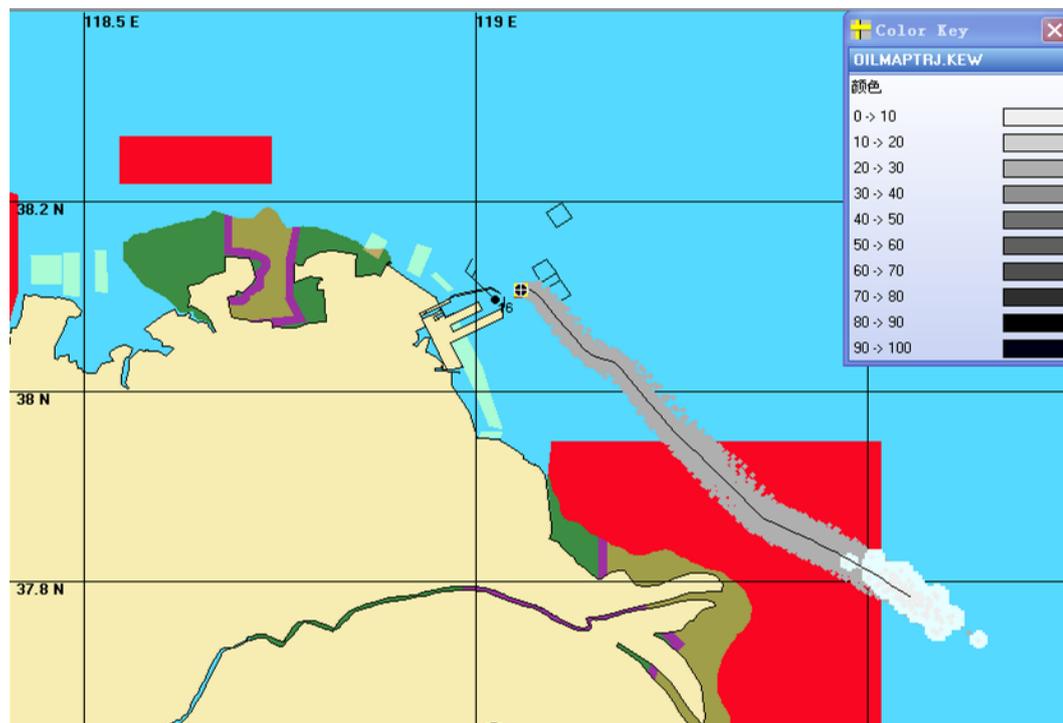


Figure 10. Trace and range of oil spill pollution when leading wind E and ebb tide  
图 10. 全年主导风落潮条件下溢油污染轨迹及范围



**Figure 11.** Trace and range of oil spill pollution when leading Adverse wind NW and flood tide  
**图 11.** 不利风 NW 风条件下溢油污染轨迹及范围

### 5.3. 随机动力条件下的溢油污染概率研究

随机选取近 3 年任意时刻作为事故发生时间，用相对应的模拟流场和实测风场作为驱动场，结合油粒子方法进行随机模拟，模拟时间取 96 小时，得出在发生海损性溢油事故后油膜污染概率空间分布特征和海面油膜最快到达时间(预测结果见图 12~13 所示)。结果显示：

- 1) 泄漏位置周围 1~30 km，航道两侧 5 km 范围内受溢油影响的概率超过 70%；
- 2) 在东营港北侧的黄河三角洲国家级自然保护区受溢油影响的概率不超过 10%；
- 3) 在规划港区周边，一旦发生溢油事故，受溢油影响概率大于 70%的海域面积约为 191.5 km<sup>2</sup>，主要集中在港区两侧 5 km 范围内，其他水域受溢油的影响概率较小；
- 4) 一旦发生溢油事故，将有超过 24 km 的海岸线有可能受到溢油污染，受影响概率较大的区域主要位于港区北防波堤外侧；
- 5) 油膜到达港区北侧现状养殖区的最快时间为 1~2 小时，到达西北侧的黄河三角洲国家级自然保护区最快时间超过 4 小时。

通过对港区溢油污染风险预测及评估，了解溢油随机事件的影响结果、受影响的概率情况、油膜抵达周边环境敏感目标最快时间，从而识别溢油高风险区域，从而为区域的应急配备、应急队伍建设、应急规划方案编制提供必要的技术支持。

## 6. 小结

本研究采用专业化的水动力预测模型 MIKE21 模型和溢油模型 OILMAP 模型相结合，以水动力预测模型为溢油模型提供准确的潮流场，在此基础上，应用油粒子跟踪方法和随机模拟的方法对规划港区的溢油污染风险进行预测和评估，研究结果表明：

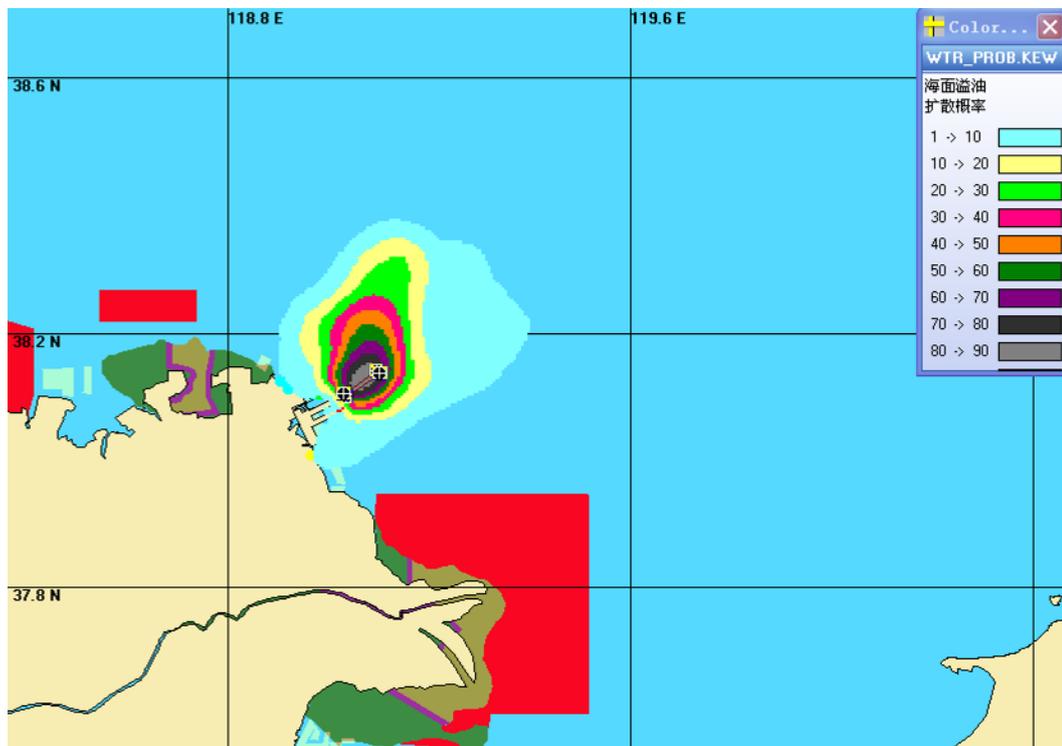


Figure 12. Influence probability of oil film  
图 12. 海面溢油漂移扩散污染概率



Figure 13. The fastest arrival time of oil film  
图 13. 海面油膜最快到达时间

1) 在规划港区实施后, 港区规划会对近岸的潮流流速和流态产生一定的影响, 但对港区外海的水动力条件影响较小;

2) 在不利风 NW 风作用下溢油会随潮流和风的联合作用下向东南运动, 18 小时后进入黄河三角洲海洋保护区;

3) 在规划港区口门处发生海损性事故后, 受溢油影响概率大于 70% 的海域面积约为 191.5 km<sup>2</sup>, 其他水域受溢油的影响概率较小;

4) 油膜到达港区北侧现状养殖区的最快时间为 1~2 小时, 到达西北侧的黄河三角洲国家级自然保护区最快时间超过 4 小时;

通过对港区溢油污染风险预测及评估, 可以更好地为港区应急能力规划提供必要的技术支撑。

## 资金项目

中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS160227,TKS160209)。

## 参考文献 (References)

- [1] 施欣, 袁群. 长江流域航运水污染影响与治理研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006.
- [2] 孙建伟, 孙昭晨, 陈轩, 等. NetCDF 格式数据的创建及应用[J]. 交通标准化, 2010(15): 31-34.
- [3] DHI (2009) MIKE21 User Guider. DHI, Copenhagen.
- [4] 李涛, 李筠, 陈俊峰. 基于 OILMAP 模型的洋浦港溢油风险研究[J]. 交通节能与环保, 2012, 8(3): 88-89.
- [5] 范天会. 透空式高桩码头船舶靠离泊数值模拟研究——以东营港扩建工程为例[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [6] JTJ/T233-98 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S].
- [7] 刘菲, 王轲道, 郭传阳, 等. 东营港附近水动力环境特征及其对岸滩地貌的作用[J]. 科学与财富, 2016(8).

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)