# 复杂海况下海底管道溢油行为特性数值模拟研究

胡超1,林建国1,于文1,郝燕妮2,王薇

(1.大连海事大学环境科学与工程学院,辽宁大连116026;2.国家海洋环境监测中心,辽宁大连116023)

摘 要:在波浪、海流及海风共同作用的复杂海况下,溢油事故的发生将会给环境造成巨大的经济损失 和环境破坏。本文基于 VOF 方法对 N-S 方程、k-e湍流模型进行了三维数值计算,研究复杂海况下的溢 油迁移扩散行为。结果表明:波长和海面风速对溢油浮升过程影响较小,主要影响溢油在海面的漂移 过程,海流速度主导着溢油在水下的偏移和海面上的漂移运动。当海流速度较大时,溢油达到水面需 要更长的时间,水下运动轨迹偏转角度较大,且油滴更为分散;溢油至海面后,在风速较大、波长较长、 海流速度较大时,溢油在海面水平漂移距离较远,溢油横向扩散程度较小。本文的研究结果可为溢油 事故处理提供参考依据,提高溢油应急行动效率。

关键词:复杂海况; 溢油; 迁移扩散; 数值模拟

中图分类号:X55 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2025)03-0412-09

# Numerical simulation of spreading characteristics of oil spilled behaviour from submarine pipeline under complex sea conditions

HU Chao<sup>1</sup>, LIN Jianguo<sup>1</sup>, YU Wen<sup>1</sup>, HAO Yanni<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>2</sup> (1.Environmental Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2.National Marine Environmental Monitoring Center, Department of Marine Remote Sensing, Dalian 116023, China)

Abstract: Oil spill accidents under complex sea conditions, with the joint action of waves, currents, and wind, will cause significant economic losses and environmental damage. In this paper, three-dimensional numerical calculations of the *N-S* equation and the k- $\varepsilon$  turbulence model, based on the VOF method, are conducted to study the oil spilled migration and diffusion behavior under complex sea conditions. The results reveal that the buoyancy process of oil spilled is less influenced by the wavelength and wind speed, which mainly affect the oil spilled drift process on the sea surface. The underwater deflection and surface drift motion of oil spilled are primarily dominated by the current speed. When the current speed is greater, it takes more time for the oil spilled to reach the water surface, the deflection angle of the underwater movement trajectory is larger and the oil droplets disperse more. After the oil spilled reaches the sea surface, when the wind and current speed is higher and the wavelength is longer, the oil spilled will drift farther on the sea surface, but the degree of lateral diffusion will be smaller. The results can provide a reference for oil spill accident handling and improve the efficiency of oil spille emergency response actions.

Key words: complex sea conditions; oil spill; migration and dispersion; numerical simulation

收稿日期:2024-04-10,修订日期:2024-09-30

作者简介:胡 超(1998-),男,河南周口人,硕士,主要研究方向为环境流体仿真模拟,E-mail:hc1120210606@dlmu.edu.cn 通信作者:郝燕妮(1986-),女,辽宁大连人,助理研究员,主要研究方向为海洋生态环境模拟、保护与修复,E-mail:ynhao@ nmemc.org.cn

王 薇, 女, 高级工程师, E-mail: wangw113@163.com

随着我国海上石油资源的不断开采,海底输油管道铺设越来越多,其安全运行问题备受关注。在复杂的海洋环境中,一旦管道破损发生溢油事故,将会对海洋环境造成极大的破坏<sup>[1]</sup>。因此,研究海底管道溢油的迁移扩散行为,有助于制定及时有效的应急措施,最大限度地减少溢油 对海洋环境的污染。

对海底管道溢油扩散的研究,国外起步较 早, Fay 等<sup>[2]</sup>提出了油膜三阶段扩展理论,得到 相应的扩展公式,但未考虑海水紊流作用。 Hirst<sup>[3]</sup>对二维和三维浮射流溢油进行了数值模 拟,并与实验数值进行了对比验证。Fanneløp 等<sup>[4]</sup> 进行了静水条件下的溢油浮射流实验, Fan<sup>[5]</sup>研 究了不分层流动环境下的溢油实验,大部分海底 溢油数值模型将其作为模型验证的数据资料。 Brandvik 等<sup>[6]</sup>和 Zhao 等<sup>[7]</sup>等均开展了大型水槽 的溢油实验,分析水下油滴粒径分布的特征。 Raznahan 等<sup>[8]</sup> 建立了三相瞬态流动的溢油数值 模型,研究了不同破冰下的溢油扩散特性。我国 对于海底管道泄漏溢油的研究起步较晚。王晶 等<sup>[9]</sup>建立了海底管道小孔溢油的数值模型,可 以预测油膜出现的位置。高清军等<sup>[10]</sup>基于 Fluent 分析比较了不同管内压力和不同水流速 度条件下的溢油行为;管永义等<sup>[11]</sup>考虑了风波 流共同作用下的海底管道溢油,但只分析了溢油 的上升过程,并未考虑其他海况。曹学文等<sup>[12]</sup> 建立了二维的波流环境下海底管道溢油扩散数 值模型,分析了海洋环境、油密度对原油扩散漂 移行为的影响。欧阳锡钰等<sup>[13]</sup>建立了二维的海 面水动力模型,研究溢油在海面的扩散漂移过 程。宋超等<sup>[14]</sup>建立了埋地输油管道泄漏模型, 分析了溢油在多孔介质中运移的影响因素与内 在机理。对于物理实验方面,钱国栋等<sup>[15]</sup>构建 了水下溢油模拟实验装置,使用蓬莱19-3 原油 开展了在静水环境下不同溢油条件的物理实 验。Zhu 等<sup>[16]</sup> 对不同流速和压差下的溢油水下 扩散进行了实验研究,并根据溢油实验提出了两 种形式的破裂和聚结。廖国祥等[17-18] 开展了静 水与非均匀流环境下的溢油浮射流实验与数值 模拟分析,其数值结果与实验观测结果总体上符 合较好,后又开展了横流环境下的水下溢油实 验,为后续的物理实验和数值模拟研究提供参考。林先传等<sup>[19]</sup>建立了小型溢油实验水槽模型进行实验验证,并数值模拟了波、流及波流共同作用下原油的水下扩散过程,但未考虑风速的影响。

目前,大多数学者对海底管道溢油问题的研究仅限于二维模型,未考虑溢油在海面上的横向扩散宽度变化,考虑复杂海况的影响也是非常少。鉴于此,本文以海底输油管道泄漏为例,基于 VOF 方法对 N-S 方程、k-ε湍流模型进行了三维数值计算,探究了溢油到达的海面时间和溢油的水下运动过程,细致分析了海流、波浪、海面风等因素对溢油漂移扩散的影响,计算了溢油在海面的横向扩散宽度及水平漂移距离变化,分析了溢油的漂移扩散运动规律,可以为相关部门处理突发溢油事故和制定应急策略提供理论指导。

# 1 材料与方法

1.1 基本控制方程

在三维空间中,流体质点的运动受质量、动 量方程控制,具体形式为:

连续性方程:

計量子担(NC子担)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \overline{u_i})}{\partial x_i} = 0 \tag{(1)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u}_{i}) + \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\rho \overline{u}_{i}\overline{u}_{j}) = -\frac{\partial P}{\partial x_{i}} + \mu \left(\frac{\partial^{2} \overline{u}_{i}}{\partial x_{j}\partial x_{j}}\right) + \frac{\partial \left(-\rho \overline{u'_{i}u'_{j}}\right)}{\partial x_{i}} + \rho g_{i}$$
(2)

式中: *i*, *j*=1、2、3, 代表三个维度;  $\rho$  表示流 体密度(kg/m<sup>3</sup>),  $\rho = \sum_{1}^{3} \varphi_{q} \rho_{q}$ ; *q*表示第*q*相,  $\varphi_{q}$ 表 示第*q*相的体积分数; *ū*表示混合质量平均速度, m/s;  $\mu$ 为流体动力黏度; *P*为流体压力; *g<sub>i</sub>*为*i*方向 上的重力加速度;  $-\rho \overline{u'_{i}u'_{j}}$ 表示雷诺应力,表达 式为:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: δ<sub>ij</sub>为 Kronecker 函数。

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, \ i=j\\ 0, \ i\neq j \end{cases} \tag{4}$$

湍流部分所用模型为 Realisable k- $\epsilon$ 湍流模型。Tauseef 等<sup>[20]</sup> 研究表明, Realisable k- $\epsilon$ 湍流模

型具有更高的精度;此外, Zhu 等<sup>[21]</sup>的数值研究 采用了流体体积法(VOF)结合 Realisable *k-e*湍流 模型,计算结果与实验数据吻合良好,因此,本文 采用 Realisable *k-e*湍流模型捕捉湍流的主要特 征。Realisable *k-e*湍流模型包含湍动能和湍流耗 散率两个方程<sup>[22-23]</sup>,即

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon$$

$$(5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\upsilon \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} (1 - C_{3\varepsilon}) \frac{\varepsilon}{k} G_b$$

$$(6)$$

式中:

$$C_{1} = \max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right), \eta = S\frac{k}{\varepsilon},$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}}\right)$$

$$G_{k} = -\rho \overline{u_{i}'u_{j}'}\frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}}, G_{b} = -g_{i}\frac{\mu_{t}}{Pr_{t}}\frac{\partial \rho}{\rho \partial x_{i}}, \mu_{t} = \rho C_{\mu}\frac{k^{2}}{\varepsilon}$$

式中: k、 $\varepsilon$ 分别为湍动能和湍流耗散率;  $\mu_t$ 为 湍流黏度; v为流体运动黏度; S为应变速率;  $G_k$ 、 $G_b$ 为平均速度梯度和升力引起的湍动能产 生项;  $Pr_t$ 为普朗特数, 取值为 0.85;  $C_\mu$ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、  $C_2$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验系数, 分别为 0.09、1.44、1.9 和 0.9;  $\sigma_k$ 和 $\sigma_{\varepsilon}$ 分别为k和 $\varepsilon$ 的普朗特数, 取值为 1.0、 1.2。

1.2 VOF 方法

本文研究海底管道溢油数值模拟中,计算域 存在油、水、气三相流体,由于流体互不相容,相 界面明显,对于油、水、气三相的相界面捕捉,适 合 VOF 方法。VOF 方法是一种欧拉多相流模 型,通过引进相体积分数*φ*<sub>q</sub>这一变量,求解一套 动量方程并且跟踪穿过计算区域的每一种流体 的体积分数来模拟两种或多种不相混合的流 体<sup>[24]</sup>,实现对每一个计算单元相界面的追踪。流 体体积分数*φ<sub>q</sub>*满足公式(7)、公式(8)。

$$\frac{\partial \varphi_q}{\varphi_t} + \nu \cdot \nabla \varphi_q = 0 \tag{7}$$

$$\sum_{q=1}^{5} \varphi_q = 1 \tag{8}$$

式中:q为各相编号,取值1、2、3代表油相、

水相和气相。

1.3 数值模型的建立

本文研究的溢油场景根据实际海洋尺度设 置环境水深,考虑小尺度水域复杂海况下的溢油 行为,由于实际海洋溢油的输运空间较大,本文 仅考虑溢油发生后至海面漂移扩散一段时间内 的溢油输运行为,对溢油的分布区域即对局部海 域简化为水槽模型,在局部海域,海面风速、海 流速度视为均匀稳定。

本文构建的数值模型(图1)长度为260m、 宽度为10m、高度为23m。由于渤海海湾一些 油气管道位于水深几米到几十米,因此,本文构 建模型的水深为18m,泄漏口距左端速度进口 60m。泄漏口位于管道正上方,根据IOGP发布 的《风险评估数据指南》<sup>[25]</sup>,海底管道等效泄漏孔 径分为小孔(d<20mm)、中孔(20mm<d<80 mm)、大孔(d>80mm)和完全破裂,其中,小孔和 中孔所占比例达90%。因此,本文选择泄漏孔直 径为0.06m,以开展复杂海况下海底管道泄漏的 数值模拟研究。



注: u<sub>c</sub>为海流速度; L<sub>s</sub>为计算域长度; W为计算域宽度; H为水 深; H<sub>air</sub>为空气域高度; h<sub>r</sub>为消波区高度, 设置为两倍波高; L<sub>r</sub>为 消波区长度, 为 1.5 倍波长

#### 图1 计算域示意

#### Fig. 1 Schematic of the computational domain

网格采用切割体网格,重点对泄漏口周边及 气液交界面进行局部加密处理,溢油区域网格 为 0.015 m×0.015 m,其余部分网格尺寸适当增 大。经网格无关性验证后确定的网格数为 2871423,具体的网格划分及局部加密如图 2 所示。 1.4 边界条件

本文选择用 Stokes 五阶波来构造波浪环境, 使用斯托克斯波理论的五阶近似对五阶波建模, 与通过一阶方法生成的波相比,此波更接近于真





Fig. 2 Diagram of grid division

正的波<sup>[26]</sup>。对于 Stokes 五阶波, 其速度势方程为:

$$\phi = \frac{c}{k} \sum_{n=1}^{5} \lambda_n \sin[n(kx - \omega t)] \cosh[nk(y + H)] \quad (9)$$

波面方程为:

$$\eta = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^{5} \lambda_n \cos\left[n\left(kx - \omega t\right)\right]$$
(10)

式中: $\omega$ 、k分别为圆频率、波数,即 $\omega$ =  $2\pi/T$ ,  $k = 2\pi/L$ , T为波周期, L为波长; c = L/T;  $\lambda_n$ 为速度势系数。

计算域左侧为速度进口边界条件,为水流、 波浪及风的入口,速度进口可表示为:

$$\begin{cases} u = u_x + u_c, \quad y \leq H + \eta \\ u = u_{\text{wind}}, \quad y > H + \eta \end{cases}$$
(11)

$$\begin{cases} v = u_y, \quad y \leq H + \eta \\ v = 0, \quad v > H + n \end{cases}$$
(12)

$$w = 0 \tag{13}$$

其中:

$$u_x|_{x=0} = c \sum_{n=1}^{5} n\lambda_n \cosh\left[nk\left(y+H\right)\right] \cos\left(-\omega nt\right) \quad (14)$$

$$u_{y}|_{x=0} = c \sum_{n=1}^{3} n\lambda_{n} \sinh[nk(y+H)] \sin[(-\omega nt)] \quad (15)$$

式中: $u_c$ 为均匀流水平流速,m/s; $u_x$ 为波浪 水平方向的速度,m/s; $u_y$ 为波浪竖直方向的速 度,m/s;H为水深,m; $u_{wind}$ 为海面风速。

计算域的前后边界为对称平面边界;底部设置为壁面,无滑移条件。油品泄漏口为速度进口边界条件;右侧和上方设置为压力出口,计算域上方边界定义压力为 0 hPa,右侧出口边界采用线性静压曲线来满足静水压力分布*P*out = ρg(H-y)。 1.5 数值验证

1.5.1 波形验证

以波长为36m为例,验证了波高为1m时

的波形。图 3 是波长为 36 m 时, X=36 m 处数值 波形变化与理论值进行对比,结果表明,数值波 形与理论波形吻合情况较好,数值解的峰值相对 于理论解峰值误差较小,但在合理范围内。图 4 为计算域波形图,可以看出右侧边界波形趋于平 缓,消波效果良好,无波的反射,可用于研究不同 波长对于溢油扩散过程的影响。





#### 1.5.2 模型验证

为验证本文所建立数值模型的准确性,将数 值模拟结果与 Zhu 等<sup>[16]</sup>的实验数据进行对比。 Zhu 等<sup>[16]</sup>的实验是基于小型实验水槽来探究溢 油的水下扩散特性,溢油实验环境为符合对数分 布的剪切流环境,水槽为 1.5 m×0.1 m×0.3 m,水 深为 18 cm,泄漏口径为 2 mm,位于管道的上部, 实验油品选用染色白油,密度为 905.7 kg/m<sup>3</sup>,黏 度为 0.0606 Pa·s。

根据实验几何条件与油品物性建立相匹配的数值模型。图 5 为实验和模拟条件下不同时刻的溢油结果,图 6 为实验和模拟条件下溢油垂直上升高度与泄漏时间的关系。经对比可以发现,数值计算结果与实验结果吻合良好,故模拟所采用的多相流和湍流模型是可行的,可用于后续溢油扩散规律的研究。



图 5 实验与模拟溢油体积分数云图

Fig. 5 Comparison of oil spilled experiments and simulation results





#### 2 结果与讨论

#### 2.1 工况参数选取

本文所选工况参数是根据我国渤海海洋条件情况选取的,根据陈红霞等<sup>[27]</sup>对中国近海波 浪季节特征的研究,渤海冬季波浪有效波高为 1~1.2 m,夏季波高平均低于冬季。因此,本文 在研究波浪对溢油的影响时选择波高为 $H_W$ = 1 m(振幅为 0.5 m),波长定义分别为 36 m、54 m 和 72 m;海流速度根据渤海特征,选取 0.1~ 0.3 m/s,结合渤海海域风特性统计,假设海上风 场匀速稳定,选取海面风速为 6 m/s、10 m/s、 15 m/s进行研究。空气和水的密度分别为 1.225 kg/m<sup>3</sup>和 1025 kg/m<sup>3</sup>,黏度分别为 1.8×  $10^{-5}$ Pa·s和1.003×10<sup>-3</sup>Pa·s,原油密度为950 kg/m<sup>3</sup>。 在渤海海域,漏油速度通常为 0.1~10 m/s<sup>[21]</sup>,本 文研究考虑溢油泄漏速度为 3 m/s,对渤海的海 底管道泄漏问题开展不同波长、海面风速、海流 速度下溢油扩散数值模拟研究。模拟工况参数 见表 1。

表 1 工况参数 Tab.1 Parameters of working conditions

		-		
工况	海流速度 $(V_W)/m \cdot s^{-1}$	波长(L)/m	风速( $Va$ )/m·s <sup>-1</sup>	
A1	0.1	36	0	
A2	0.1	54	0	
A3	0.1	72	0	
A4	0.1	36	6	
A5	0.1	36	10	
A6	0.1	36	15	
A7	0.2	36	10	
A8	0.3	36	10	

# 2.2 海浪波长的影响

本文仅考虑溢油发生后至海面漂移扩散一段时间内的溢油输运行为,将溢油的分布区域即局部海域简化为水槽模型,波浪选为 Stokes 五阶波,波高选为 1 m,未考虑波浪破碎、水滚等能量损失的影响。在海面无风时,海流速度为 0.1 m/s,不同波长下溢油在 X(水平偏移距离 L<sub>s</sub>)、Y(上升高度 H)、Z(横向扩散宽度)方向的扩散变化如图 7 所示。可以看出在泄漏条件一定时,波长对溢油浮升过程影响较小,主要影响溢油至海面后的水平漂移和横向扩散过程。

溢油到达海面后的漂移扩散过程主要受波 浪的传播作用影响,溢油的水平漂移距离整体呈 线性变化关系。在流速一定、波长更长的情况 下,溢油的水平漂移距离明显增加,当溢油时间





为 250 s、波长为 72 m 时溢油的水平漂移距离 为 54.52 m, 是波长(36 m)的 1.3 倍。

溢油横向扩散宽度变化在溢油至海面以后 变化较快,对于溢油上升至海面以后的扩散宽度 变化进行数据拟合(拟合公式及拟合优度在图中 给出),发现溢油在海面的横向扩散宽度变化整体 呈对数分布,溢油扩散宽度随着波长的增加而减 小。这是由于在波高一定、波长较长时海水表层 水质点向下游传播的速度较快,进而带动溢油向 下游传播,溢油在海面漂移距离较大,横向扩散宽 度较短,使溢油在海面的漂移距离高于横向扩散。

图 8 为不同波长下的溢油轨迹,可以看到在 溢油初始阶段,在波长较长的条件下,油滴率先发 生脱落现象,溢油射流发生明显的弯曲,当溢油 即将上升到水面时,在波浪的扰动下,首滴油滴跟 随水质点的运动到达水面较快,与后续生成的油 滴相隔较远。当溢油发生时间为 250 s 时,可以看 到油品上升至海面后的分布情况,在波长较小时, 溢油水平偏移较小,横向扩散最大;当波长增加 时,溢油横向扩散宽度较小,水平偏移距离较大。





Fig. 8 Oil spilled trajectories at different wavelengths

### 2.3 海面风速的影响

考虑海面风速的影响,当泄漏条件、波流海况条件一定时,不同海面风速下溢油在X、Y、

Z向的扩散变化如图9所示。可以看到,海面风 对溢油的上升过程的影响并不明显,主要影响溢 油在海面上的漂移扩散过程。当溢油达到海面 时,由于海面风的存在进一步带动海面水质点的 运动,风速越大,海面水质点的流动速度也越大, 使溢油的漂移距离越远,当风速为15 m/s、原油 泄漏250 s 时,溢油已到达计算域消波区处,漂移 距离相比于海面无风时扩大4倍。溢油的横向 扩散宽度随海面风速的增大而减小,宽度变化整 体呈对数分布,在扩散初期溢油横向扩散速度较 快,而后趋于平稳;当风速较大时,相同泄漏时间 内溢油横向扩散宽度相比无风时小。 图 10 为不同海面风速下的溢油运动轨迹, 可以看出海面风速对溢油在水下的运动影响较 小,当风速较大时,首先到达海面的油滴与后续 形成的油滴相距较远,对溢油的射流长度无明显 影响。溢油至海面后,油膜在风波流的共同作用 下向下游扩散,在风速较大时,油膜具有较小的 扩散宽度和较大的漂移距离。当溢油事故发生 时,需充分考虑海面风速的影响,避免溢油污染 范围的进一步扩大。









图 10 不同海面风速下的溢油运动轨迹



#### 2.4 海流速度的影响

当风速、波浪条件一定时,研究不同海流速 度对溢油扩散过程的影响。图 11 为不同海流速 度下溢油在 X、Y、Z 向的扩散变化,可以看到,在 泄漏条件一定的情况下,溢油的上升速度随海流 速度的升高而降低,达到海面所需的时间也会更 长。溢油在水下的偏移距离主要受海水流速的 影响,流速越大,溢油在水下的偏移距离越远。 在流速为 0.30 m/s,溢油至水面时,溢油在水下的 偏移距离为 14.44 m,水平偏移距离是海流速度 (0.10 m/s)的 3.1 倍。

当溢油到达海面后,溢油的漂移扩散过程受风波流的共同作用,在海面风速、波长一定时, 溢油在海面的漂移速度随着海流速度的增加而 增加,当溢油发生 250 s时,溢油已到达消波区 处,溢油的漂移距离整体呈线性关系变化,相同 泄漏时间内,海流速度越大,溢油的漂移距离越 远。溢油在海面的横向扩散宽度变化呈对数曲 线关系分布,在海流速度较大时,溢油横向的扩 散速度略低于水流速度较小的工况。



图 11 不同海流速度下溢油 *X*、*Y*、*Z* 向的扩散随时间变化 Fig. 11 Diffusion of oil spilled in X, Y and Z directions at different current speeds

图 12 为不同海流速度下的溢油运动轨迹, 可以看出海流速度主导着溢油在水下的偏移和 海面上的漂移运动。海流速度越大,溢油在水下 的运动轨迹发生的偏转角度越大,水下偏移距离 越远,油滴分布较为分散。当溢油泄漏时间为 250 s时,海流速度较小时,油膜的宽度较大,溢



图 12 不同海流速度下的溢油运动轨迹

Fig. 12 Oil spilled trajectories at different current speeds

油水平漂移距离较短。随着海流速度的增加溢 油在海面漂移的距离变远,横向扩散相比流速较 小时扩散程度较小。

## 3 结论

(1)海流速度显著影响溢油的浮升过程,在 泄漏条件一定的情况下,溢油的上升速度随着海 流速度的升高而降低,达到海面需要更长的时 间,溢油在水下的偏移距离也显著增加,溢油轨 迹发生的偏转角度较大。而海浪波长和海面风 速对溢油的浮升过程影响并不明显。

(2)溢油在海面的漂移扩散过程受波长、风速、海流速度的影响,溢油上升至海面后,油品 在横向的扩散宽度随时间变化呈对数分布,水平 漂移距离基本满足线性变化。随着波长、风速、 海流速度的增加,溢油在海面的横向扩散速度变 小,扩散宽度变短,溢油的水平漂移速度较快,漂 移距离较远。

#### 参考文献:

- 熊善高, 李洪远, 丁 晓, 等. 中国海域船舶溢油事故特征与 预防对策 [J]. 海洋环境科学, 2013, 32(6): 875-879.
- [2] FAY J A, HOULT D P. Physical processes in the spread of oil on a water surface[R]. Kodiak: United States Coast Guard, 1971: 463-467.
- [3] HIRST E. Buoyant jets with three-dimensional trajectories[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1972, 98(11): 1999-2014.
- [4] FANNELØP T K, SJØEN K. Hydrodynamics of underwater blowouts[C]//18th Aerospace Sciences Meeting. Pasadena: AIAA, 1980.
- [5] FAN L N. Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids: Report No. KH-R-15[R]. Pasadena, California: California Institute of Technology, 1967, 609: 211-222.
- [6] BRANDVIK P J, JOHANSEN Ø, LEIRVIK F, et al. Droplet breakup in subsurface oil releases-part 1: experimental study of droplet breakup and effectiveness of dispersant injection[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 73(1): 319-326.
- [7] ZHAO L, SHAFFER F, ROBINSON B, et al. Underwater oil jet: hydrodynamics and droplet size distribution[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 299: 292-303.
- [8] RAZNAHAN M, LI S S, WANG Z, et al. Numerical simulation of multiphase oil behaviors in ice-covered nearshore water[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2022, 251: 104069.
- [9] 王 晶, 李志军, GONCHAROV V K, 等. 渤海海底管线溢 油污染预测模型 [J]. 海洋环境科学, 2007, 26(1): 10-13.
- [10] 高清军, 褚云峰, 林建国. 海底管线溢油的数值模拟 [J]. 大

连海事大学学报, 2007, 33(增刊 2): 169-171.

- [11] 管永义,李 巍,林建国.水下输油管道溢油运动模拟及应 急处理[J].大连海事大学学报,2010,36(4):129-131.
- [12] 曹学文, 温家铭, 孙 媛. 海底管道泄漏原油扩散漂移规律 数值模拟 [J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(10): 18-24.
- [13] 欧阳锡钰, 信 书, 耿宝磊, 等. 浙江金塘港海域溢油扩散数 值模拟研究 [J]. 海洋环境科学, 2020, 39(2): 253-259.
- [14] 宋 超, 刘胜利, 杜胜男, 等. 埋地成品油管道泄漏扩散特性 研究进展 [J]. 环境工程, 2023, 41(增刊 2): 1059-1065.
- [15] 钱国栋, 赵宇鹏, 于 顺. 蓬莱 19-3 原油水下溢油的模拟实验[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(6): 901-907.
- [16] ZHU H J, YOU J H, ZHAO H L. An experimental investigation of underwater spread of oil spill in a shear flow[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 116(1/2): 156-166.
- [17] 廖国祥,李艳妮.静水和动水环境中水下溢油浮射流初步实 验及数值模拟 [J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(12): 71-77.
- [18] 廖国祥,李艳妮. 横流环境中水下溢油输移扩散的实验研究 [J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(6): 70-75.
- [19] 林先传, 季新然, 阳志文, 等. 波流耦合作用下的海底管道溢 油水下运动扩散规律研究 [J]. 海洋环境科学, 2024, 43(1): 136-145.
- [20] TAUSEEF S M, RASHTCHIAN D, ABBASI S A. CFD-based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(4): 371-376.
- [21] ZHU H J, YOU J H, ZHAO H L. Underwater spreading and surface drifting of oil spilled from a submarine pipeline under the combined action of wave and current[J]. Applied Ocean Research, 2017, 64: 217-235.
- [22] VAN MAELE K, MERCI B. Application of two buoyancymodified k-ε turbulence models to different types of buoyant plumes[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41(2): 122-138.
- [23] ROHDIN P, MOSHFEGH B. Numerical predictions of indoor climate in large industrial premises. A comparison between different *k*-ε models supported by field measurements[J]. Building and Environment, 2007, 42(11): 3872-3882.
- [24] REN B, LI X L, WANG Y X. An irregular wave maker of active absorption with VOF method[J]. China Ocean Engineering, 2008, 22(4): 623-634.
- [25] International Association of Oil & Gas Producers. Risk assessment data directory: riser & pipeline release frequencies: RE-PORT 434-04[R]. London: International Association of Oil & Gas Producers, 2019.
- [26] FENTON J D. A fifth order stokes theory for steady waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1985, 111(2): 216-234.
- [27] 陈红霞,华 锋,袁业立.中国近海及临近海域海浪的季节 特征及其时间变化 [J].海洋科学进展,2006,24(4):407-415.

420