

海上溢油漂移监测与应急处置技术研究

张大鹏

中石化胜利油田分公司 山东东营 257100

摘要: 随着全球海洋油气资源开发与航运活动的加剧,使得海上溢油事故频发,海上溢油事故对海洋生态系统和人类经济活动构成严重威胁,亟需发展高效监测与处置技术体系。本文系统研究了溢油漂移机理、多维度监测技术及应急处置方法,旨在提升溢油动态感知与快速响应能力。研究表明,多技术联用可在一定程度上缩短应急响应时间并降低生态风险,未来需进一步开发智能决策平台与环保材料促进技术标准化应用。

关键词: 海上溢油; 漂移监测; 应急处置

引言

据统计,2000-2022年间全球重大溢油事故累计达187起,年均直接经济损失超12亿美元并导致约45万公顷滨海湿地退化。溢油污染物在风、流等动力作用下快速扩散,其漂移轨迹的精准预测与高效处置是国际海事领域的核心挑战。传统监测技术依赖单一卫星遥感或现场采样,存在重访周期长(重访周期指的是去现场的时间吗)、分辨率不足等问题,难以满足黄金72小时应急窗口需求(这里的72小时是否有依据?)。同时现有物理回收技术在薄油膜<1 mm和风速>10 m/s的情况下效率骤降,化学分散剂的生态毒性亦限制其应用范围。亟需构建多尺度监测网络、优化应急处置技术的协同机制,并量化关键参数以提升工程适用性。

一、海上溢油漂移机理与影响因素分析

1. 溢油漂移动力学模型

溢油漂移运动遵循海洋表层流体动力学规律,其运动轨迹由风场、海流场和潮汐场的矢量叠加效应决定。根据Lagrangian粒子追踪模型,油膜质心运动速度 \vec{V}_{oil} 可表示为:

$$\vec{V}_{oil} = \alpha \vec{V}_{wind} + \beta \vec{V}_{current} + \gamma \vec{V}_{tide}$$

式中, α, β, γ 分别为风因子系数、海流系数和潮汐修正系数,通常由现场观测或实验标定。风应力对油膜的作用力与风速平方成正比,其表达式为:

$$\tau_{wind} = \rho_{air} C_d \left| \vec{V}_{wind} \right|^2$$

其中, ρ_{air} 为空气密度,约1.225 kg/m³, C_d 为拖曳系数,风场方向的矢量分解影响油膜漂移轨迹。海流与潮汐耦合模型采用三维非静力海洋模型ROMS模拟背景流场,结合潮汐调和和分析M2修正瞬时流速,潮汐流速 V_{tide}

可表达为:

$$V_{tide} = \sum_{i=1}^n A_i \cos(w_i t + \phi_i)$$

式中, A_i, w_i, ϕ_i 分别为分潮振幅、角频率和相位角。

油膜边缘受湍流剪切作用发生扩散,其扩散系数 K_h 由海洋湍流动能(TKE)决定:

$$K_h = 0.4 \sqrt{k} \cdot L$$

其中, k 为湍流动能(m²/s²), L 为湍流积分尺度(m)。

2. 溢油漂移的影响因素分析

海上溢油漂移受多种环境因素的共同作用,其中主要包括风场、海流、潮汐以及海洋湍流。风场是影响溢油漂移的关键因素,风速的增加会显著提升油膜的漂移速度,并改变其运动方向。当风速较低时,油膜主要随海流和潮汐运动,而在高风速条件下,风驱动作用占主导地位,导致油膜向下风方向漂移。海流是决定溢油漂移轨迹的重要因素,油膜会随背景海流的方向和速度移动。不同海域的流速和流向受海洋环流、季节性洋流及局部涡流影响,导致油膜在不同区域的运动模式存在差异。在强海流区域,油膜漂移的速率增加,扩散范围扩大,而在弱海流区域,油膜可能聚集并形成较厚油层。潮汐作用则主要影响溢油的短周期运动特征,不同潮位和潮流相位会导致油膜出现周期性漂移或滞留。

海洋湍流对油膜的扩散起到重要作用。在湍流强度较大的近岸或风暴影响区域,油膜会受到强烈的剪切作用,导致其边缘破碎并形成细小油滴,加速油水混合。湍流效应还会增强油膜的垂向扩散,使部分油滴沉降至水体中,影响后续的应急处置策略。

二、海上溢油漂移监测技术

1. 卫星遥感与雷达监测技术

SAR影像通过微波后向散射差异识别油膜,即油膜

抑制海面微尺度波，导致雷达回波强度降低。油膜检测阈值可通过归一化雷达散射截面（NRCS）量化：

$$\Delta\sigma^0 = \sigma_{clean}^0 - \sigma_{oil}^0 > 3dB$$

其中，清洁海面 σ_{clean}^0 典型值为 $-5\sim-10$ dB（C波段，VV极化），油膜区域 σ_{oil}^0 可降至 -15 dB以下。多极化 SAR 数据可提升分类精度，油膜与低风速海面、生物油膜等伪目标的区分依赖极化熵 H 与各向异性度 A 参数：

$$H = -\sum_{i=1}^3 \lambda_i \log_3 \lambda_i, A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}$$

式中， λ_i 为协方差矩阵特征值 ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$)，油膜区域满足 $H < 0.6$ 且 $A > 0.7$ 。

红外光谱技术热辐射差异反演油膜厚度，根据 Stefan-Boltzmann 定律，油膜辐射亮度 L_λ 与厚度 d 的关系为：

$$L_\lambda(d) = \varepsilon_{oil}(d)B_\lambda(T_{oil}) + [1 - \varepsilon_{oil}(d)]L_{sea}$$

其中， ε_{oil} 为油膜发射率（与厚度非线性相关）， B_λ 为黑体辐射函数。

表1 地物极化参数对照表

地物类型	极化熵 H	各向异性度 A	平均 σ^0 (dB)
清洁海面	0.25~0.45	0.30~0.50	-7.2
溢油油膜	0.40~0.55	0.65~0.85	-14.6
生物油膜	0.60~0.75	0.20~0.40	-12.1
低风速海面	0.15~0.30	0.10~0.25	-5.8

2. 无人机与无人船协同监测系统

无人机（UAV）与无人船（USV）组成的空-海协同系统可弥补卫星重访周期长、分辨率不足的缺陷。多源传感器融合框架包括识别油膜边缘形态可见光相机（分辨率 ≤ 5 cm）的光学传感器，400~1000 nm 波段的高光谱成像仪，其光谱分辨率 ≤ 5 nm，利用油品特征吸收峰鉴别油种，而激光荧光雷达的激发波长 355 nm，检测油膜荧光光谱，实现夜间与低能见度监测。协同定位算法采用扩展卡尔曼滤波（EKF）融合 GPS/INS 数据：

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \left(z_k - h \left(\hat{x}_{k|k-1} \right) \right)$$

其中，状态向量 $x = [\varphi, \lambda, v, \theta]^T$ 含经纬度、速度与航向角，观测模型 $h(\cdot)$ 由 USV 声呐测距数据构建。

表2 定位精度对比表

定位模式	水平误差 (m)	高程误差 (m)	数据更新率 (Hz)
单无人机 GPS	± 3.2	± 5.8	1
单无人船 INS	± 8.5	-	10
空-海协同 EKF	± 1.4	± 2.1	5

3. 浮标追踪与数值模拟预测

漂流浮标与数值模型的动态耦合是提高轨迹预测精度的关键，浮标定位数据经过北斗/GPS 双模模块获取，其定位精度可达 ± 0.5 m（CEP50），内置传感器测量海表温度（精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ）、盐度（ ± 0.1 psu）及流速（ ± 0.03 m/s）。浮标数据以 10 分钟间隔传输至岸基中心。数值模型动态修正采用集合卡尔曼滤波（EnKF）生成 N 个集合成员，每个成员包含随机扰动的风场、流场参数，而后同化浮标观测数据，更新状态向量 $x = [u, v, \xi]^T$ （流速分量、水位）。

油膜扩散模型基于对流-扩散方程：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (vC) = \nabla \cdot (K\nabla C) + S$$

其中， C 为油膜浓度， v 为流速矢量， K 为湍流扩散系数， S 为含风化损失的源项。以墨西哥湾某次溢油事件验证，72 小时轨迹预测误差从 12.3 km 降至 5.8 km，具体如下表 3 所示：

表3 模型修正效果统计表

海域案例	原始误差 (km)	修正后误差 (km)	误差降低率 (%)
东海	9.7	4.1	57.7
北海	11.2	6.3	43.8
墨西哥湾	12.3	5.8	52.8

4. 典型监测技术对比与适用性分析

海上溢油监测技术包括卫星遥感、无人机与无人船协同监测、浮标追踪、激光荧光雷达、高光谱成像等，各技术在探测精度、响应速度、适用油种及环境适应性方面存在差异。卫星遥感适用于大范围溢油监测，能提供溢油位置和扩散趋势，但受重访周期限制，难以满足实时监测需求。无人机与无人船协同监测具备高空分辨率，可提供精准油膜边界信息，适用于近岸及应急响应，但监测覆盖范围受限。

激光荧光雷达可识别油膜厚度并区分油品类型，适用于夜间与低能见度环境，能有效探测原油及高黏度燃料油，但对轻质成品油的荧光响应较弱。高光谱成像可通过油品特征吸收峰鉴别油种，适用于不同油品泄漏情况，但数据处理复杂，受天气影响较大。漂流浮标追踪结合数值模拟可提供精确的油膜漂移轨迹预测，适用于长时间漂移监测，但前期布设成本较高。

三、海上溢油漂移应急处置技术

1. 物理回收

物理回收通过机械手段直接清除表层浮油，其效率受围油栏布控策略、撇油器吸油速率及油膜厚度分布的共同影响。围油栏有效拦截长度与油膜扩散速率的关系为：

$$L_{eff} \geq \frac{Q_{oil}}{h_{avg} \cdot V_{spread}}$$

式中, Q_{oil} 为溢油总量 (m^3), h_{avg} 为油膜平均厚度 (m), 转盘式撇油器回收速率 $Q_{skimmer}$ 由转盘转速 w 与油黏度 u 决定:

$$Q_{skimmer} = N \cdot \pi R^2 w \left(1 - e^{-\frac{k \cdot u}{\rho w R^2}} \right)$$

其中, N 为转盘数量, R 为转盘半径 (m), k 为黏滞修正系数 (0.2~0.5), 不同撇油器性能参数如表4所示。

表4 撇油器性能参数表

类型	处理量 (m^3/h)	适用油黏度 (cP)	最小油膜厚度 (mm)	动力功耗 (kW)
转盘式	10~50	100~5000	3	5~15
带式	20~100	50~3000	2	10~30
涡流式	5~20	500~10000	5	3~8

物理回收技术的实施需结合油膜动态分布与环境参数进行系统化操作, 基于油膜扩散模型预测结果采用围油栏在主导流向上游布控, 布设角度宜控制在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 以平衡拦截效率与抗流能力。针对厚度 >5 mm 的油膜区域, 优先部署处理量 $10 \sim 50 m^3/h$ 的转盘式撇油器, 如若低黏度原油 (<500 cP) 可提升至 50 rpm 以增大吸附量, 而高黏度重油 (>3000 cP) 需降低至 20 rpm 以避免堵塞。对于薄油膜 ($1 \sim 3$ mm) 带式撇油器 (处理量 $20 \sim 100 m^3/h$) 的连续吸附带可提升回收效率。实际作业中需实时监测风速与油膜厚度变化, 当风速 >10 m/s 或油膜厚度 <1 mm 时, 应暂停机械回收并切换至分散剂喷洒。

2. 化学分散剂

化学分散剂降低油水界面张力促进油膜乳化成微滴, 加速微生物降解, 其应用需权衡分散效率与生态毒性。新型环保分散剂研发的核心指标为亲水-亲油平衡值 (HLB), 理想范围为 $9 \sim 12$ 。含鼠李糖脂+纳米 SiO_2 生物基分散剂配方的界面张力 σ 可降至 5 mN/m 以下, 满足:

$$\sigma = \sigma_0 - k_c \cdot C_{disp}^{0.5}$$

式中, σ_0 为纯油-水界面张力, C_{disp} 为分散剂浓度 (ppm), k_c 为特性常数。

剂量控制模型中分散剂喷洒量 M_{disp} 与油膜面积 A 、厚度 h 的关系为:

$$M_{disp} = \frac{A \cdot h \cdot \rho_{oil} \cdot R_{disp}}{1000}$$

其中, R_{disp} 为剂油比, h 为油品密度 (kg/m^3), 但需注意过量喷洒 (>50 ppm) 会导致鱼类 $96h-LC50$ 毒性阈值超标。化学分散剂在作业前无人机高光谱成像确定油膜面积与油种类型, 结合剂量模型计算喷洒量。针对开

阔海域则优先选用生物基分散剂, 并将其喷洒浓度控制在 $20 \sim 30$ ppm, 既可将界面张力降至 5 mN/m 以下, 满足生态安全阈值, 不过敏感区域禁用分散剂, 可以改用水下声波或气幕屏障阻隔油膜扩散。

3. 生物降解

生物修复主要是借助功能微生物与吸附材料协同作用降解残留油污, 故其效率受菌剂活性、营养盐供给及吸附载体比表面积的综合调控。功能化微生物菌剂的石油烃降解速率遵循 Monod 方程:

$$r = \frac{u_{max} \cdot X \cdot S}{K_s + S}$$

其中, u_{max} 为最大比生长速率, X 为菌体浓度, S 为底物浓度, K_s 为半饱和常数, 外源添加氮磷营养盐 (C: N: P=100: 10: 1) 可使降解率提升 $2 \sim 3$ 倍。先在油膜边缘及岸线区域投加冻干功能菌剂, 投加量 5 kg/公顷, 配合缓释营养盐 (C: N: P=100: 10: 1) 以维持菌群代谢活性。针对难以回收的乳化油或沉淀油污布放石墨烯气凝胶吸附毯, 其吸附容量达 120 g/g, 可快速富集油滴并为微生物提供附着载体, 低温海域则需添加耐冷菌株并覆盖保温膜以提升降解速率。

结论

本文揭示了风-流-潮汐耦合作用下的油膜运动规律, 分析了监测技术实现的油膜动态的高精度感知, 并应急处置方面结合物理-化学-生物技术的梯度化联用提升污染控制效率与生态安全性, 多技术协同可有效缩短应急响应窗口降低长期环境风险。未来可以聚焦智能化决策平台开发、极端海况适应性装备研制及生态修复长效评估, 为海洋可持续发展提供保障。

参考文献

- [1]唐雪, 苏绍娟.京唐港海域溢油漂移扩散模拟分析[J].船海工程, 2024, 53(04): 118-123.
- [2]胡田, 潘家琳.风漂移系数对海上溢油扩展漂移影响的数值模拟[J].上海船舶运输科学研究所学报, 2022, 45(03): 68-74.
- [3]覃睿, 闫玲, 陈子健.无人机海上溢油跟踪监测系统设计及仿真[J].海洋通报, 2021, 40(06): 709-715.
- [4]李欢, 李程, 王国松, 潘嵩, 刘昭阳.中国近海海上溢油一体化预测预警系统研究——系统业务化应用[J].海洋信息, 2019, 34(01): 44-50.
- [5]安伟, 赵建平, 刘保占, 钱国栋, 赵宇鹏.海上溢油漂移预测预警系统的实验验证[J].船海工程, 2018, 47(02): 40-43.