

舟山某客货滚装公用码头工程溢油事故风险评估

向美焘¹, 聂玉娟²

1. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 400016

2. 重庆阁林环保科技有限公司, 重庆 400039

DOI:10.61369/WCEST.2025050011

摘要 : 本客货滚装公用码头工程位于舟山市普陀区朱家尖岛西南侧岸线段, 周边海域航道纵横, 水上交通发达, 碰撞导致溢油事故发生的概率大。考虑到油膜运动受潮流、风向等复杂因素影响, 溢油事故发生后很难控制, 做好事前预测对有效应对溢油事故十分必要。通过构建二维潮流模型, 并耦合溢油模型, 对客货滚装公用码头附近发生的溢油事故进行风险评估, 模拟预测不同风向情况水域溢油污染的影响范围。研究结果表明: 各风向下, 溢油事故发生后油粒子扩散范围包括北至舟山岛北端, 西至宁波市近岸, 南至象山附近海域, 东至朱家尖岛离岸8km附近海域, 72h后扫海面积达到346.1~826.6km²; 在不同主导风向下油膜到达周边敏感水域的时间各有不同, 溢油时间发生后24h内, 油膜集中在各岛屿之间或近岸区域, 24h后扩散加剧, 至72h后已经影响到外海区域, 建议当溢油事故发生后, 应尽快启动相关紧急措施, 保证油污24h内能得到有效控制。

关键词 : 码头工程; 溢油事故; 水动力模型; 溢油模型; 风险评估

Risk Assessment of Oil Spill Accident at a public Passenger and Cargo Ro-Ro terminal Project in Zhoushan

Xiang Meitao¹, Nie Yujuan²

1. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., LTD., Chongqing 400016

2. Chongqing Gelin Environmental Protection Technology Co., LTD., Chongqing 400039

Abstract : This public terminal project for passenger and cargo roll-on/roll-off is located in the southwestern coastline section of Zhujiajian Island, Putuo District, Zhoushan City. The surrounding sea area is crisscrossed with waterways and has a well-developed water transportation system, resulting in a high probability of oil spill accidents caused by collisions. Given that the movement of the oil film is influenced by complex factors such as current and wind direction, and it is difficult to control an oil spill accident after it occurs, it is very necessary to make good predictions in advance to effectively deal with oil spill accidents. By constructing a two-dimensional tidal current model and coupling it with an oil spill model, a risk assessment of oil spill accidents occurring near the public terminal for passenger and cargo ro-ro is conducted to simulate and predict the impact range of oil spill pollution in water areas under different wind directions. The research results show that under all wind directions, after the oil spill accident, the diffusion range of oil particles includes the northern end of Zhoushan Island in the north, the coastal area near Ningbo City in the west, the sea area near Xiangshan in the south, and the sea area near 8 kilometers off the shore of Zhujiajian Island in the east. After 72 hours, the swept sea area reaches 346.1–826.6 km². The time it takes for the oil film to reach the surrounding sensitive waters varies under different prevailing wind directions. Within 24 hours after the oil spill occurs, the oil film is concentrated between the islands or in the nearshore areas. After 24 hours, the spread intensifies, and by 72 hours, it has already affected the outer sea areas. It is recommended that when an oil spill accident occurs, relevant emergency measures should be initiated as soon as possible to ensure that the oil pollution can be effectively controlled within 24 hours.

Keywords : wharf engineering ; oil spill accident; hydrodynamic model ; oil spill model; risk assessment

引言

本客货滚装公用码头工程位于舟山市普陀区朱家尖岛西南侧岸线段, 为客货滚装码头改造工程, 将现有码头改造为1个可兼靠5000

作者简介: 向美焘(1990—), 男, 汉族, 重庆开州区人, 硕士, 工程师, 研究方向为水动力数值模拟。

吨级杂货船的滚装。舟山群岛岛屿众多，航道纵横，水上交通发达，岛内航线密集而繁忙，船舶航行碰撞导致溢油事故发生的概率增大。根据相关研究^[1-2]，碰撞、搁浅、传统破损等是溢油事故发生的主要原因，由于近海航运的快速发展，与2014年相比，全国沿海港口海域2020年溢油事故风险指数均值和最大值分别增长27.8%和26.8%，其中宁波舟山港所在的长江口区域溢油风险增加明显，属于溢油高风险集中区。

港口海域溢油事故危害主要受风向和潮流等多因素影响。由于潮流及风向的复杂性及不确定性，导致溢油事故发生后一般很难快速控制，因此采用有效手段预测溢油风险，提前针对性的做好溢油事故的应急处置方案，做到未雨绸缪，显得尤其重要^[3-8]。本文通过建立工程区域二维水动力模型，并耦合溢油模型，对滚装码头工程进行溢油的漂移扩散、扫海面积及到达敏感区域时间进行预测，分析评估溢油事故发生风险程度，为工程溢油事故应急处置的方案制定提供理论指导。

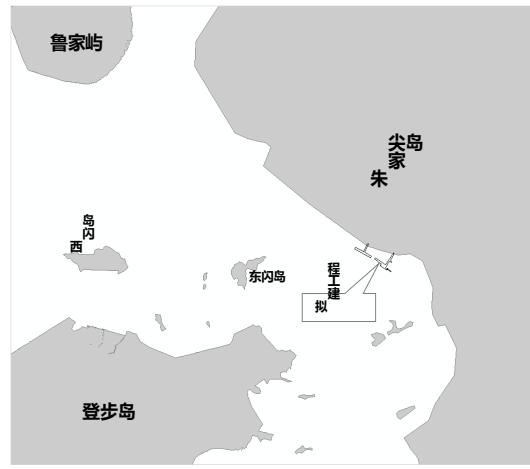


图1 客货滚装公用码头工程位置

一、水动力模型建立

(一) 模型控制方程

二维潮流数学模型控制方程组为沿垂向积分平均的浅水流动质量和动量连续方程，可分别表示为：

连续方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hs$$

X方向动量方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} = f\tilde{u}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_{ax}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + hu_s S$$

Y方向动量方程：

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial hvu}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = f\tilde{v}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{2\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\tau_{ay}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{h}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy})$$

式中， t 为时间； x 、 y 为笛卡尔坐标系空间坐标； ζ 为水面高程， d 为水深， h 为总水深 $h=\eta+d$ ； u 、 v 为流速在 x 、 y 方向上的分量； f 科氏力； g 为重力加速度； \tilde{n} 为水体密度； \tilde{n}_0 为参考密度； p_a 为大气压强； s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为辐射应力分量； T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 为水平粘滞应力； $(\hat{o}_{sx}, \hat{o}_{sy})$ 和 $(\hat{o}_{bx}, \hat{o}_{by})$ 为水面和底床的切应力在 x 、 y 方向上的分量； S 为源汇项流量； u_s 、 v_s 为源汇项对应的速度分量。

(二) 计算区域及网格

模型计算范围北至杭州湾北侧，南至象山港南侧的道人山附近海域，东部外海边界距离工程区约110km，水深约50m。模型横向宽度约220km，纵向长度约150km。

采用非结构三角形网格剖分计算域，码头桩基处网格最细，最小网格尺度为0.5~1m。在远离工程海域，网格相对稀疏，网格1000~2000m，网格数总计67975个。模型外部边界采用全球天文潮预报模型结果作为外海潮位边界，并适当修正用于模型计算。

床面曼宁系数取为0.015~0.025。

(三) 模型验证

模型验证采用2022年6月~7月的水文泥沙观测资料，对模型进行验证。测验海区位于浙江省舟山市朱家尖岛西部海域。2022年6月22日00:00时~2022年7月21日23:00时，对临时潮位站(CW西岙)进行了30个周日的潮位观测，本次主要依据临时潮位站(CW西岙)对模型进行率定验证。

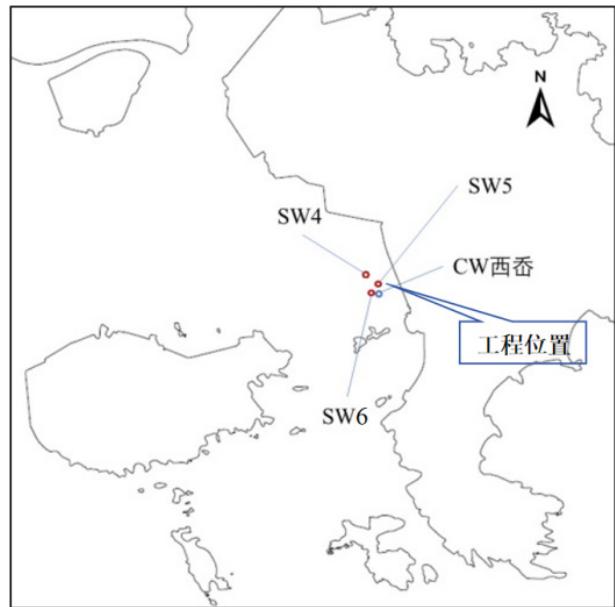


图2 工程区域水文观测点

图3为CW西岙潮位验证过程曲线，由图可知，无论是潮位过程还是高、低潮位值，计算与实测均符合较好，平均相对误差在10%以内。总体而言，验证结果表明模型采用的参数基本合理，计算方法可靠，满足规范要求^[9]，能够模拟计算域内潮波运动特性，可用于进一步预测。

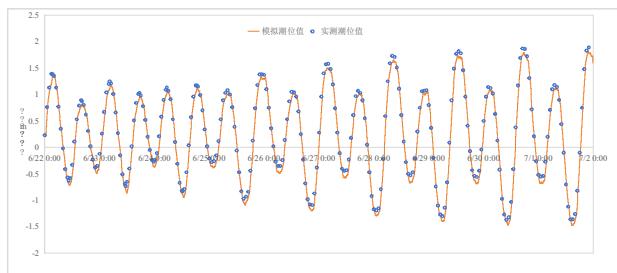


图3 临时潮位站潮位验证

二、预测方案

根据舟山普陀气象站1980年至今近40年的风况观测，本区呈现两个常、强风向，即偏北风和偏南风，偏北向（NW ~ NE）风占主导地位，合计频率占一半以上（54.0%），偏南向（SE ~ SW）风合计频率占32.9%；项目周边海域分布有农渔业区、国家级海洋特别保护区等，根据溢油扩散可能导致的结果，选取12个较为重点关注且最可能受影响的敏感区域，距工程距离在0.85~11.4km。溢油量按最大设计代表船型所载燃油全部泄漏计算，根据《船舶污染海洋环境风险评价技术规范（试行）》^[10]附录4中的方法一，本项目设计泊位及规模最大为5000t，按照燃油舱最大载油量取船舶总吨的12%，实载率按100%计，则燃油载油量约为600t，因此溢油量按照600t考虑，连续泄露1h，进行泄漏后72小时的溢油影响范围预测。

综合考虑潮流、风向、敏感点分布等因素，对各溢油点按天气类型和潮流类型进行组合，风速按照不利风速13.8m/s，潮型按照大潮考虑，本项目工程溢油工况设置详见下表。其中由于朱家尖岛以东以及南海域是东海带鱼种质保护区，为生态敏感区域，若发生泄露对该区域生态环境影响较大，因此，W风向为溢油泄露时间不利风向。

三、预测结果分析

建立二维海上溢油扩散预测模型，计算各工况下的油粒子扩散过程，包括油粒子扫海范围及扩散轨迹进行预测。从预测结果来看，船舶溢油事故在码头前沿水域发生后，水动力场、风况及溢油发生时刻等因素对典型油粒子漂移轨迹、溢油扫海面积以及油粒子扩散范围等均存在不同程度的影响。

（一）运动轨迹

在冬季主导风（NE、NW）影响下，油粒子漂移轨迹总体向南移动；NE风向下，涨潮时刻与落潮时刻泄露油膜轨迹差异不大，运动轨迹范围覆盖了登步岛、桃花岛、虾峙岛及六横岛东部海域，最远可达到到象山港周边海域；NW风向下，涨潮时刻与落潮时刻泄露油膜轨迹差异明显，涨潮时刻油膜主要集中在六横岛、桃花岛及宁波头洋港周边海域，落潮时刻油膜主要集中在桃

花岛至朱家尖周边海域。

在夏季主导风（SE、SW）影响下，受周边岛屿岸线影响，油粒子漂移轨迹总体向北部漂移；SW风向下，涨潮时刻与落潮时刻泄露油膜轨迹差异也不大，主要为朱家尖岛以北、舟山岛以东海域，包括普陀岛及葫芦岛周边海域；SE风向下，涨潮时刻泄露，油膜轨迹集中在舟山岛沿岸水域，落潮时刻泄露，油膜轨迹集中在朱家尖岛西岸及舟山岛北岸。

在不利风向（W）影响下，油粒子漂移轨迹集中在朱家尖岛、登步岛、桃花岛附近的海域范围。其中涨潮时刻泄露，油膜扩散范围集中在朱家尖岛周边海域，向东最远扩散至离岛8km海域，落潮时刻泄露，油膜扩散范围集中在登步岛、桃花岛周边海域，呈向东南方向扩散状态，扩散最东距桃花岛东端10km。

（二）溢油对各敏感区的影响分析

通过对各主要环境敏感目标在72小时内的溢油风险进行模拟预测，得出了在典型模拟情景下受溢油污染的最早时间，具体见表3。发生溢油72小时内泄露油膜污染对12个环境敏感目标均有影响。在冬季主导风（NE、NW）影响下，油膜24小时内会影响朱家尖西南涂养殖场取水口等最近的朱家尖沿线敏感水域，36小时左右会逐渐影响登步岛、桃花岛周边的敏感水域，沈家门农渔业区、普陀山风景名胜区海水浴场敏感水域由于处在峡湾处，72小时内未受明显影响；在夏季主导风（SE、SW）影响下，油膜12小时左右会影响朱家尖西南涂养殖场取水口等最近的朱家尖沿线敏感水域，24小时左右会逐渐影响沈家门农渔业区、东海带鱼种质保护区，登步岛及桃花岛周边敏感水域72小时未受影响；不利风向W风作用下，除沈家门农渔业区未受影响外，其他区域油膜到达时间与距朱家尖岛距离成反比，近岸区域敏感水域油膜最先达到，然后是登步岛，最后是桃花岛。

四、结论

（1）在冬季主导风（NE、NW）影响下，溢油事故发生后油粒子漂移运动轨迹范围覆盖了登步岛、桃花岛、虾峙岛及六横岛东部海域，最远可达到到宁波市近岸及象山港周边海域。在夏季主导风（SE、SW）影响下油粒子漂移轨迹范围主要为朱家尖岛以北、舟山岛以东海域，SE风向下轨迹集中在朱家尖岛西岸及舟山岛近岸区域。在不利风向（W）影响下，油粒子漂移轨迹集中在朱家尖岛、登步岛、桃花岛附近的海域范围，呈向东南方向扩散状态。

（2）在冬季主导风（NE、NW）下，溢油泄露后除沈家门农渔业区、普陀山风景名胜区海水浴场敏感等峡湾水域，其余敏感水域均受影响；在夏季主导风（SE、SW）影响下，溢油泄露后除登步岛及桃花岛周边敏感水域外，其他敏感水域均受影响；不利风向W风作用下，除沈家门农渔业区未受影响外，其他区域油膜到达时间与距朱家尖岛距离成反比。

(3) 本次模拟溢油量较大，各模拟工况下6h后扫海面积4.7~38.1km²，12h后扫海面积18.9~76.3km²、24h后扫海面积37.2~172.6km²，最终72h后各工况达到346.1~826.6km²。其中溢油时间发生后24h内，油膜主要朱家尖岛、舟山岛、登步岛、桃花岛等岛屿之间或近岸区域，大约在24h后扩散加剧，72h后已经

影响到东海带鱼种质保护区（实验区）等外海区域。建议溢油事故发生后，相关紧急措施应尽快启动，以保证油污24h内能得到有效控制，防止其更大范围的蔓延扩散。

参考文献

- [1] 张利国, 程金香, 韩兆兴, 等. 2014—2020年全国沿海溢油风险情势变化 [J]. 环境工程技术学报, 2024, 14 (2) : 692–698.
- [2] 周斌, 梁刚, 赵益栋. 我国沿海港口船舶溢油事故分析及对策研究 [J]. 海洋技术, 2009, 28(3): 87–90.
- [3] 陈磊. 基于 MIKE21 的舟山附近海域溢油数值模拟研究 [d]. 浙江: 浙江海洋大学, 2023.
- [4] 段驰, 宁灏, 丁志斌等. 基于 MIKE21 的三都港溢油风险研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2023, 23(01): 47–49.
- [5] 高志波. 基于溢油模拟的港口溢油污染风险分析研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [6] 胡田, 潘家琳. 基于 MIKE21 OS 模型的盘锦港航道溢油风险数值模拟预测 [J]. 环境与发展, 2022, 34(07): 78–84.
- [7] 李献丽, 陆凡, 王臣等. 舟山复杂海岛条件下某交通码头溢油环境风险评估 [J]. 浙江海洋大学学报, 2023, 42 (2) : 189–196.
- [8] 高建丰, 梅启亮, 郑豫等. 崂头洋海域岙山码头溢油扩散数值模拟 [J]. 中国水运, 2022, 22 (06) : 24–26.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程: JTS/T 231-2-2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [10] 中华人民共和国海事局. 海船舶 [2011] 588号《船舶污染海洋环境风险评价技术规范 (试行)》[EB/OL]. 2010.