

风漂因子在溢油模拟中的影响分析

吴悠¹, 纪棋严^{1*}, 杨逸秋², 左军成³, 田逸伦¹, 张雨婷¹, 周婵娟⁴

(1. 浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022; 2. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 3. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 4. 武汉大学 生命科学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 对中国近海“桑吉”轮溢油和地中海黎巴嫩溢油案例进行深入分析, 比较了 GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) 和 NOOFM (NMEFC Operational Oilspill Forecasting Model) 两种溢油模型在处理风漂因子方面的差异以及风漂因子对溢油扩散产生的影响。研究结果表明: 风漂因子对溢油轨迹的模拟有显著影响, 尤其是在风速和风向变化的情况下。在“桑吉”轮溢油案例中, NOOFM 模型展现出对中国近海环境下风漂因子的高效处理能力, 模拟结果与实际观测接近。在黎巴嫩溢油案例中, NOOFM 模型在风的影响下表现出良好的近岸模拟效果, 而 GNOME 模型的溢油形态模拟则更符合卫星观测。研究结果进一步强调了风漂因子在溢油模拟中的重要性, 尤其在近海环境下需要提高溢油模型对风漂因子反应的准确性和适应性。

关键词: 风漂因子; 溢油模型; GNOME 模型; NOOFM 模型

中图分类号: P732.1; X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)02-0099-10

0 引言

随着世界经济的发展, 石油产业和海洋运输产业站上了世界能源竞争舞台, 在它们蓬勃发展的背后, 海上溢油事故也日益增加。据地中海区域海洋污染紧急响应中心 (Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea, REMPEC) 统计, 1977—2000 年地中海共发生 385 次海上泄漏事件 (平均每年 17 次), 而据欧洲海事安全局 (European Maritime Safety Agency, EMSA) 统计, 2015—2017 年期间, 卫星监测到的地中海溢油事件有 2 066 次 (平均每年 688 次)^[1]。溢油事故发生后, 大量的石油覆盖海面, 严重影响了附近海域的海气交换和光合作用, 对海洋生物也有一定的毒害作用, 同时会破坏邻近的滨海湿地。目前海上溢油的主要来源为船舶碰撞和翻沉以及海洋

采油平台储油输油设施泄漏等人为因素。溢油事故频发, 其对生态环境的危害也加剧, 因此事故发生后及时采取应急措施非常必要。在此过程中, 溢油监测系统和溢油数值模拟研究至关重要, 前者可以及时追踪油粒子所处区域和扩散面积, 后者可以预测油粒子的扩散轨迹, 为相关部门提供预测数据, 以便更好地制定应急措施。

目前, 海上溢油监测系统主要包括卫星遥感监测、航空遥感监测、船舶遥感监测、固定点监测、海洋浮标等。溢油预测模型包括溢油应急与响应模型 (Oil Spill Contingency and Response Model, OSCAR)^[2]、溢油影响模型应用包/石油模型应用包 (Spill Impact Model Application Package / Oil Modeling Application Package, SIMAP/OILMAP)^[3]、井喷与溢油发生模型 (Blowout and Spill Occurrence Model, BLOSOM)^[4] 以及三维表面与水下溢油综合

收稿日期: 2024-01-31。

基金项目: 国家自然科学基金 (42206218); 舟山绿色石化基地海洋环境跟踪监测模型研究项目 (21108000318); 国家重点研发计划 (2021-YFC3101702)。

作者简介: 吴悠 (1998-), 女, 硕士, 主要从事物理海洋学研究。E-mail: wuyou@zjou.edu.cn

*通信作者: 纪棋严 (1986-), 男, 副教授, 博士, 主要从事物理海洋学研究。E-mail: jiqiyan@zjou.edu.cn

模型 (Three - dimensional Comprehensive Oil Spill Model for Surface and Underwater Spills, COMBOS-3D)^[5-6]。自 20 世纪 70 年代以来,不少学者还利用已开发的模型来进行海上溢油数值模拟^[7]。美国土木工程师学会石油泄漏模型任务委员会 (American Society of Civil Engineers Task Committee on Modeling of Oil Spills) 研究开发出了“油粒子”模型^[8]; Zhang 等^[9]和 Hu 等^[10]建立了预测海面溢油轨迹的全动态模型; Omar 等^[11]使用加拿大 SL-Ross 预测溢油模型,对红海地区 Ras Gharib 港口附近石油钻井平台的溢油轨迹、石油搁浅等进行了预测。毕研军等^[12]运用美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的 GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) 模型模拟了“世纪之光”轮沉没溢油的漂移轨迹和扩散分布。

多模式耦合能够提升模型的模拟精度,许多学者开展了多项研究。Korotenko 等^[13]利用普林斯顿海洋模型 (Princeton Ocean Model, POM) 开发了 3D 溢油耦合模型。Berry 等^[14]利用区域海洋模拟系统 (Regional Ocean Modeling System, ROMS) 和模拟近岸波浪 (Simulating Waves Nearshore, SWAN) 模型开发了溢油传输模型。Li 等^[15]将有限体积社区海洋模型 (Finite Volume Community Ocean Model, FVCOM) 与 3D 水下溢油输送模型耦合,讨论了背景误差对溢油 3D 输送的影响以及油-沉降相互作用。此外, Cao 等^[16]开发了波浪作用模块,并将其嵌入到水下溢油模型中,结合 ROMS 模式研究了海浪对水下溢油运输的影响。Toz^[17]利用两种溢油模型模拟并预测了石油泄漏情况,利用石油泄漏自动数据查询 (Automatic Data Inquiry for Oil Spill, ADIOS) 进行自然降解计算,溢油模型和响应系统 OILMAP 用于表面扩散模拟。Duran 等^[18]基于 2003 年的驳船点井溢油数据,利用 FVCOM 做水动力初始场,对 BLOSOM 和 GNOME 两种溢油模型进行比较。Toz 等^[19]评估了 OILMAP 和潜在事件模拟、控制与评估系统 (Potential Incident Simulation, Control and Evaluation System, PISCES2) 在扩散和预测模拟中的性能水平。Barreto 等^[20]对 OSCAR 和溢油预测耦合模型 (Coupled Oil spill Prediction Model, CMOP) 进行了评估和比较。Balogun 等^[21]用

GNOME 模型进行了溢油轨迹研究,并耦合地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 进行了环境脆弱性映射。

在溢油模拟中,风漂因子的作用至关重要。风漂因子即风影响油膜漂移的拖曳系数,直接影响着溢油在海面上的运动、扩散速度和最终分布。风漂因子包含风对油膜施加的直接作用力,以及风通过诱发波浪进而对油膜行为造成间接影响的相关因素。其对于提高溢油扩散预测的准确性具有显著作用。Liu 等^[22]将支持向量回归参数化建模 (Support Vector Regression - based Parameterization Modeling, SVR-PM) 整合到溢油模型中,强化了对风引起的速度项的计算,显示了风漂因子在提高溢油模拟准确性方面的重要性。Balogun 等^[21]通过模拟溢油轨迹和环境脆弱性绘图,突出了风速和风向等环境因素在溢油扩散中的作用。这种综合性研究揭示了风漂因子对溢油行为影响的复杂性,并强调了环境条件在溢油响应中的重要性。此外,研究人员还通过一项涵盖了多模型的评估研究,使用了历史上重大溢油事件的遥感油迹观测数据^[23],来评估溢油模型预测的准确性,该成果让人们对各模型处理风漂因子的能力有了深入的了解和清晰的认识。尽管现有研究已提供了溢油模拟的基础知识,但仍有许多关键问题需要解决。上述研究成果不仅表明了风漂因子在溢油模拟中的重要性,也显示了现有研究的局限性,这也为进一步研究不同溢油模型在处理风漂因子的差异性提供了理论基础和研究空间。此类研究和比较不仅有助于提高模型的准确性,还对制定和优化溢油应急响应策略具有实际意义。

海上溢油会对海洋环境造成严重污染,因此快速预测技术的研发对于保护海洋环境至关重要,通过对溢油进行数值模拟并预测其扩散轨迹,能更迅速地开展溢油灾害预警并及时制定应急措施。近年来,溢油模型的研发和应用为海上溢油应急处置和风险评估提供了科学依据,不同模型在溢油漂移扩散影响因子的处理上各有侧重,其中风对海面溢油漂移扩散的影响尤为显著。本文主要采用 NOAA 开发的溢油模型 GNOME 以及国家海洋环境预报中心 (National Marine Environment Forecasting Center, NMEFC) 自主研发的业务化溢油预测模型 (NMEFC Operational Oilspill Forecasting Model,

NOOFM),通过中国近海和非中国海域两个溢油案例来比较两个模型在处理风漂因子时采用的方法及效果。本研究旨在评估并比较 GNOME 与 NOOFM 溢油模型在处理风漂因子方面的效能,以及探讨风漂因子的不同处理方法对溢油漂移扩散研究的影响,以此为优化溢油应急响应措施提供依据。

1 数值模型

1.1 GNOME 模型

GNOME 模型是免费提供溢油轨迹预测的专业溢油模型,该模型由美国 NOAA 危险品应急反应部门研究开发^[24]。通过 GNOME 模型的诊断模式,用户可以对风场、流场及其他影响因素进行设定,从而预测溢油的最佳轨迹;此外,还可以通过设置流场、风场的不确定性对轨迹进行最小遗憾预测。GNOME 模型采用标准的欧拉-拉格朗日粒子跟踪法,其中欧拉方法用于描述物理区域内的连续流场^[25]。海面油膜被分割成多个离散的油滴质点,每个质点都拥有独特的、随时间变化的坐标系。油滴的运动受环境因素的影响,包括风和流场。考虑到不同的质点代表的油种不同,其自身的蒸发、乳化等风化过程也不同,因此,最终利用油滴的数量和方向随时间的变化来判断溢油的面积、运动趋势和受影响的区域。

GNOME 模型采用欧拉-拉格朗日粒子追踪法系统模拟油膜的漂移,表达式为:

$$\vec{L} = \vec{L}_0 + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \vec{V}_t(x(t_0), y(t_0), t_0) dt \quad (1)$$

式中: \vec{L} 为 Δt 时刻后油膜新位置; \vec{L}_0 为 t_0 时刻的油膜位置; \vec{V}_t 是空间与时间的函数,表示 t_0 时刻的油膜运动速度。一般油膜的初始位置是不定的,因此初始位置不一定落在模型网格节点上,其速度可以通过周围网格节点的速度内插得到。空间每个网格的节点速度在某一时刻的表达式为:

$$\vec{V} = \vec{V}_T + \alpha \vec{V}_w \quad (2)$$

式中: \vec{V}_T 为 t 时刻节点的流场速度; \vec{V}_w 为 t 时刻节点的风场速度; α 为风漂因子; $\alpha \vec{V}_w$ 为 GNOME 模型采用的简单线性风生流^[26]。

GNOME 可以读取各种格式的网格流场数据和

常见格式的风场,并应用于任意海域的溢油预测模拟,模拟速度快,结果后处理方便。

1.2 NOOFM

国家海洋环境预报中心自 2007 年以来自主研发了海上三维溢油预报系统 NOOFM^[27],该系统采用基于拉格朗日粒子追踪的“油粒子”模型。模型水平方向考虑了平流过程和扩散过程,垂直方向考虑了垂向海流流速、浮力作用和湍流因素。由于卫星观测到的为海面溢油,因此可将三维溢油模型简化为二维,具体简化方程为:

$$u_0 = u_c + \alpha(u_a \cos \beta - v_a \sin \beta) + u_w + u' \quad (3)$$

$$v_0 = v_c + \alpha(u_a \sin \beta + v_a \cos \beta) + v_w + v' \quad (4)$$

式中: u_0 、 v_0 是海面油粒子在 x 、 y 方向上的水平运动速度; u_c 、 v_c 为海流速度在 x 、 y 方向上的分量; u_a 、 v_a 为海面 10 m 风速在 x 、 y 方向上的分量; α 、 β 为风漂因子和角度; u_w 、 v_w 为 Stokes 漂移速度在 x 、 y 方向上的分量; u' 、 v' 为湍流扩散速度。

$$u' = (2R - 1) \sqrt{c'E_x \Delta t} \quad (5)$$

$$v' = (2R - 1) \sqrt{c'E_y \Delta t} \quad (6)$$

式中: R 为随机数,取值为 $0 \sim 1$; E_x 、 E_y 为 x 、 y 方向上的湍流系数; c' 为比例系数。

2 数据与模型设置

2.1 溢油案例

本研究选取了“桑吉”轮溢油与黎巴嫩溢油两大案例作为研究对象。“桑吉”轮溢油案例作为中国近海近年来典型的瞬时释放溢油事件,其独特性和影响力使其在相关研究中占据重要地位。而黎巴嫩溢油案例则以其长达 144 h 的持续释放特征为研究者提供了与“桑吉”轮溢油案例不同的研究背景和参照。本文通过对这两个案例的深入分析和比较,旨在从时间和空间两个维度出发,全面而深入地评估风漂因子在不同溢油模式下的作用程度和机制。

2.1.1 “桑吉”轮溢油案例

研究采用的案例为近年来中国海域发生的最大的溢油案例——“桑吉”轮溢油。2018 年 1 月 6 日,伊朗“桑吉”号油轮在东海 $30^{\circ}42'N$ 、 $124^{\circ}56'E$ 海

域与香港籍货船相撞,载有13.6万吨天然气凝析油的“桑吉”(Sanchi)油轮在碰撞后起火,并在没有动力的情况下漂流了约8天,最终在28°22'N、125°55'E爆炸并沉没。凝析油在海面上的寿命有限,因此大部分泄漏的凝析油可能在“桑吉”轮沉没前就蒸发和燃烧了。然而,船只的燃料是一种蒸发损失相对较低的重油,泄漏入海后会形成稳定的乳化层。

卫星合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)探测到的浮油图像可以为溢油模型提供初始输入信息,包括溢油的时间和地点,也可以用来验证溢油模型的结果。在“桑吉”轮溢油案例中,我们从国家卫星海洋应用中心获得了两张卫星遥感图像,观测到海面上的溢油分布。在图1中,红色为2018年1月15日06:15(北京时,下同)卫星SAR探测到的溢油点浮油图像数据,黑色为1月17日17:42探测到的卫星浮油图像数据(网址:http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/user_guide.pdf)。

2.1.2 “黎巴嫩溢油案例”

2006年7月13日,以色列在空袭行动中击中了黎巴嫩的吉耶发电厂,致使其油库着火,一部分石油从破损的墙壁中流出并最终流入地中海。据估计,流入地中海的石油达11万桶,估计溢油量为15 000 t。海岸线被层层油污覆盖,沙滩和石滩上覆盖着厚厚的黑色石油,濒临灭绝的海龟刚刚孵化

出生便因油污致死,大批死鱼漂浮在海面上的油层里,水生动植物几乎全部灭绝。图2中红点为2006年7月13日08:00 秘鲁海的溢油泄露点(35°10'E, 33°41'N),黑色为7月19日10:35观测到的德国航空航天中心(Deutsches Zentrum für Luft - und Raumfahrt.V.,DLR)遥感数据中心的卫星影像溢油数据。

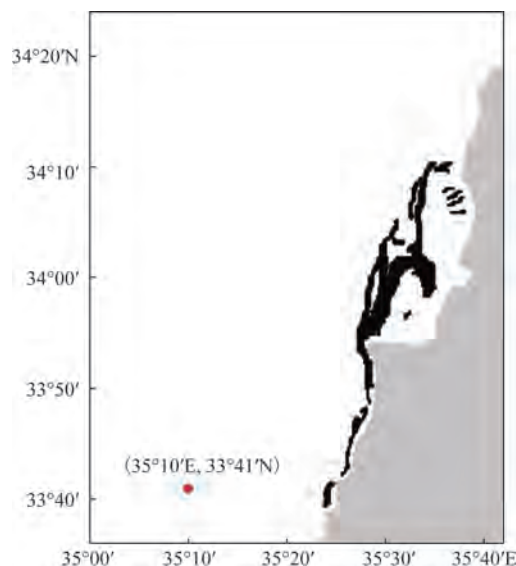


图2 黎巴嫩溢油案例溢油起始点(红点)和DLR卫星观测数据(黑色)

Fig.2 Lebanon oil spill case oil spill origin (red dot) and DLR satellite observation data (black)

2.2 风场与流场数据

地中海预测系统(Mediterranean Forecasting System, MFS)是一个海洋数值预报系统,可对整个地中海进行分析、再分析和短期预报,该系统包含了观测数据、数据收集、数据同化、海洋预测和生态系统建模和预测^[1]。MFS包含基于小尺度建模联盟模型地中海预测系统(Consortium for Small-scale Modeling Model Forecasts Mediterranean Forecasting System, COSMO MFS)的预测数据和基于欧洲中期天气预报中心地中海预测系统(European Centre for Medium - Range Weather Forecasts Mediterranean Forecasting System, ECMWF MFS)的预测数据,前者的水平网格分辨率为1/16°(大约为6.5 km),可在72个不均匀分布的垂直水平上进行分析,后者的水平网格分辨率为1/8°(大约为12.5 km)。两个案例

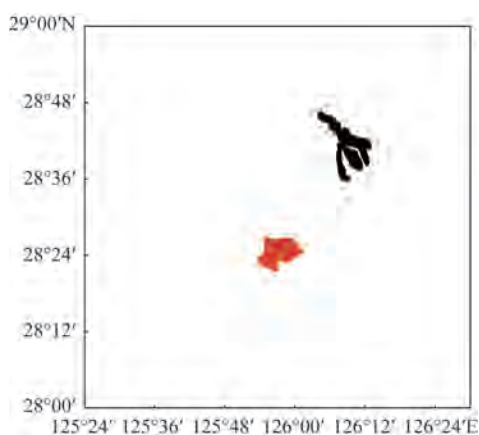


图1 “桑吉”轮溢油案例SAR观测的溢油点(红色)和卫星观测的溢油数据(黑色)

Fig.1 The starting point of the oil spill observed by SAR in the "Sanchi" oil spill case (red) and the oil spill data observed by satellite (black)

中的流场数据都来自 COSMO MFS 的每小时平均流场,时间步长为 1 h。

ECMWF 是一家提供全球预报、气候分析及特定数据集的机构,其拥有不同分辨率的全球实时观测数据。ERA-Interim 是 ECMWF 的全球大气再分析数据,时间为 1979 年 1 月—2019 年 9 月,空间分辨率从 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 到 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。风场数据都是采用空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 、时间步长为 6 h 的 ECMWF 再分析数据。

“桑吉”轮溢油案例的流场采用 NMEFC 业务化运行的西西北太平洋海流模型 (Northwestern Pacific Ocean model, NWPM) 模式^[28-29]。该模式基于 ROMS 预报系统,使用地形跟随坐标来定义自由表面的原始方程海洋环流模式,可以提供未来 120 h 逐时的海面洋流和温度预报,分辨率为 $1/30^{\circ}$,范围为 $8^{\circ}\text{S} \sim 52^{\circ}\text{N}$, $99^{\circ} \sim 160^{\circ}\text{E}$ 。

为了后续模式对比的严谨性,两个模型使用相同的风场和流场数据,区别在于“桑吉”轮溢油案例的起始时间为 2018 年 1 月 13 日,持续时长为 240 h,黎巴嫩溢油案例的起始时间为 2006 年 7 月 12 日,持续时长为 289 h。两个案例的风场、流场见表 1,合成的初始强迫场为溢油模型的强迫场见图 3 和图 4。

2.3 模型设置

为了比较两个模型的模拟结果,除了使用相同

表 1 两个案例的初始强迫场数据

Tab.1 Initial forcing field data for the two cases

案例	“桑吉”轮溢油	黎巴嫩溢油
起始时间	2018 年 1 月 13 日	2006 年 7 月 12 日
持续时间	240 h	289 h
流场数据	ROMS 运行的 NWPM 数据	MFS 平均流场
流场时间步长	1 h	1 h
流场空间分辨率	0.05°	$1/16^{\circ}$
风场数据	ECMWF	ECMWF
风场空间分辨率	0.125°	0.5°
风场时间步长	1 h	6 h

的流场和风场数据外,还设置了相同的模式开始时间、模拟时长、初始强迫场为强迫场、溢油初始点、石油类型、溢油点释放的溢油量、持续溢油时长、风漂因子。在“桑吉”轮溢油案例中,模型模拟了 1 月 15 日 06:19 卫星观测到的油膜区域,该区域瞬间释放了 300 个虚拟浮油粒子,粒子的石油类型为重油,整个模拟过程持续 60 h。在黎巴嫩溢油案例中,设置的是从溢油初始点持续 144 h 的释放过程,石油类型为 API=20 的 No.6 重质燃油^[30-31]。具体案例的输入数据见表 2 和表 3。

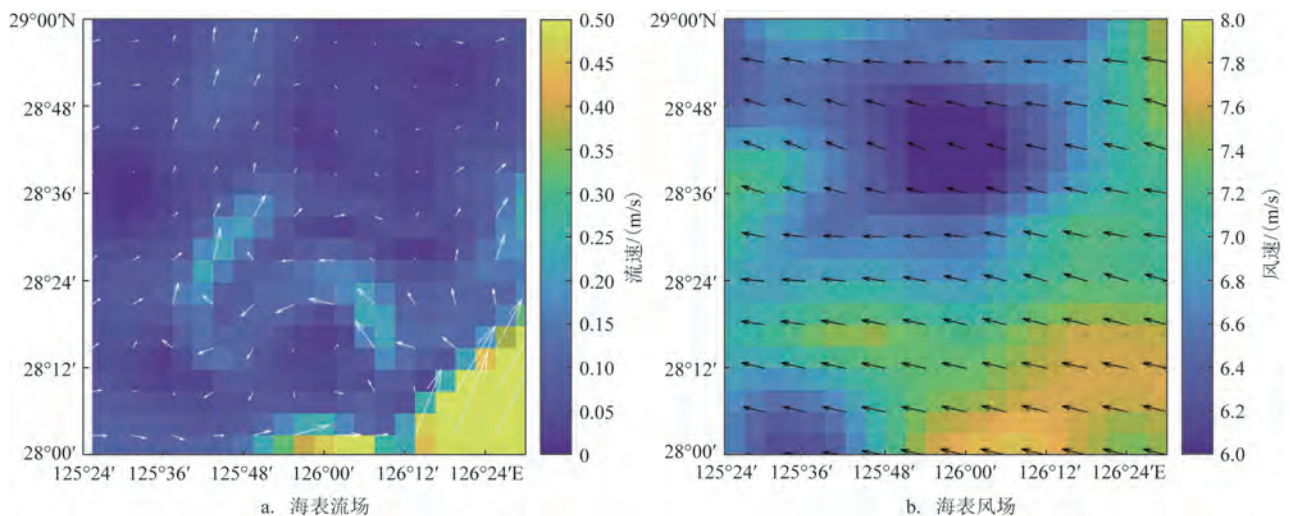


图 3 “桑吉”轮溢油案例初始强迫场

Fig.3 Initial forcing field of the "Sanchi" case

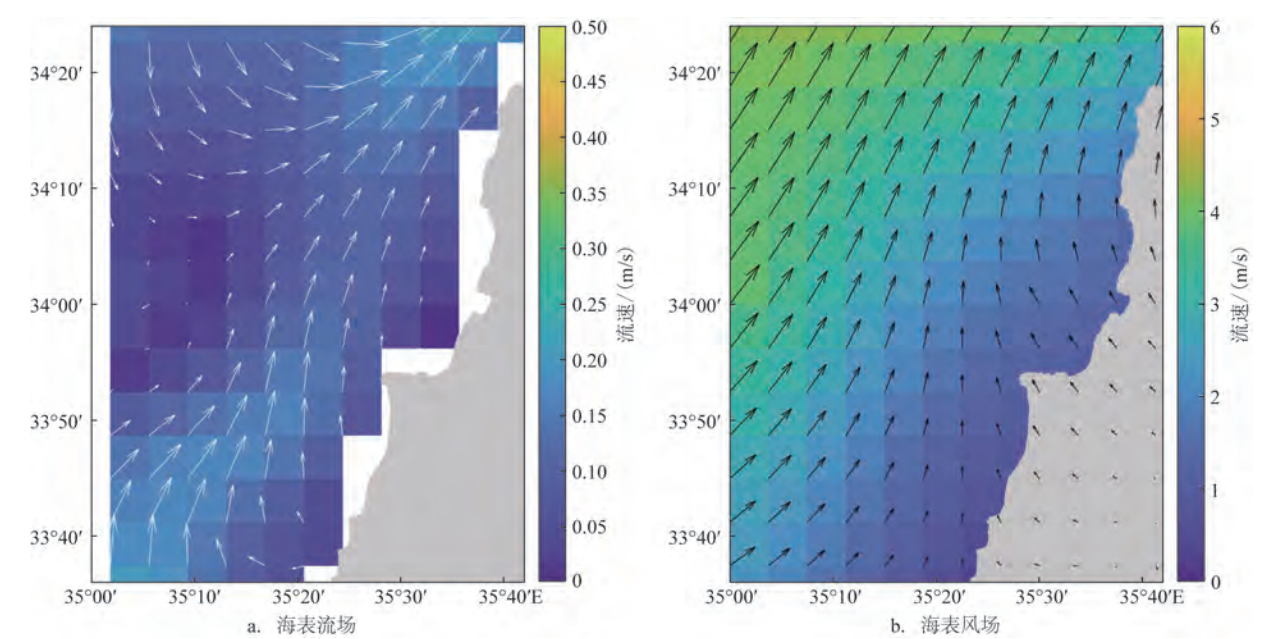


图4 黎巴嫩溢油案例初始强迫场

Fig.4 Initial forcing field of the Lebanon oil spill case

表2 “桑吉”轮溢油案例的模型基本参数		
Tab.2 Basic parameter settings for the "Sanchi" case model		
模型	GNOME	NOOFM
开始日期	2018年1月15日	2018年1月15日
开始时间点	06:00	06:00
模拟时长/h	60	60
海流场	NWPM	NWPM
风场	ECMWF	ECMWF
石油类型	6号重质燃油	API=20(重质燃油)
溢油量/t	5	5
风漂系数	3% 和 0	3% 和 0

表3 黎巴嫩溢油案例的模型基本参数		
Tab.3 Basic parameter settings for the Lebanon oil spill model		
模型	GNOME	NOOFM
开始日期	2006年7月13日	2006年7月13日
开始时间点	08:00	08:00
模拟时长/h	147	147
海流场	MFS	MFS
风场	ECMWF	ECMWF
溢油起始位置	35.166 67°E、 33.683 33°N	35.166 67°E、 33.683 33°N
石油类型	6号重质燃油	API=20(重质燃油)
持续释放/h	144	144
浮油溢出量/(t/h)	130.35	130.35
风漂系数	3% 和 0	3% 和 0

3 讨论

本研究通过对比NOOFM和GNOME模型在两个案例中对风漂因子的模拟结果,将模拟结果与溢油案例的实际卫星遥感数据进行对照,旨在探讨风漂因子在溢油模拟中的作用。“桑吉”轮溢油案例发生在中国海域,观测时间较短,黎巴嫩溢油案例发生于地中海近岸,观测时间较长。通过这两个案例,可以比较两种模式中的风漂因子在不同海域范

围和模拟时长下对模拟结果的影响。基于此,两个案例都进行了不考虑风漂因子的模拟实验,即将风漂因子分别设置为3%和0,其中3%风漂因子代表有风情况,0代表无风情况。

3.1 测试一:“桑吉”轮溢油案例

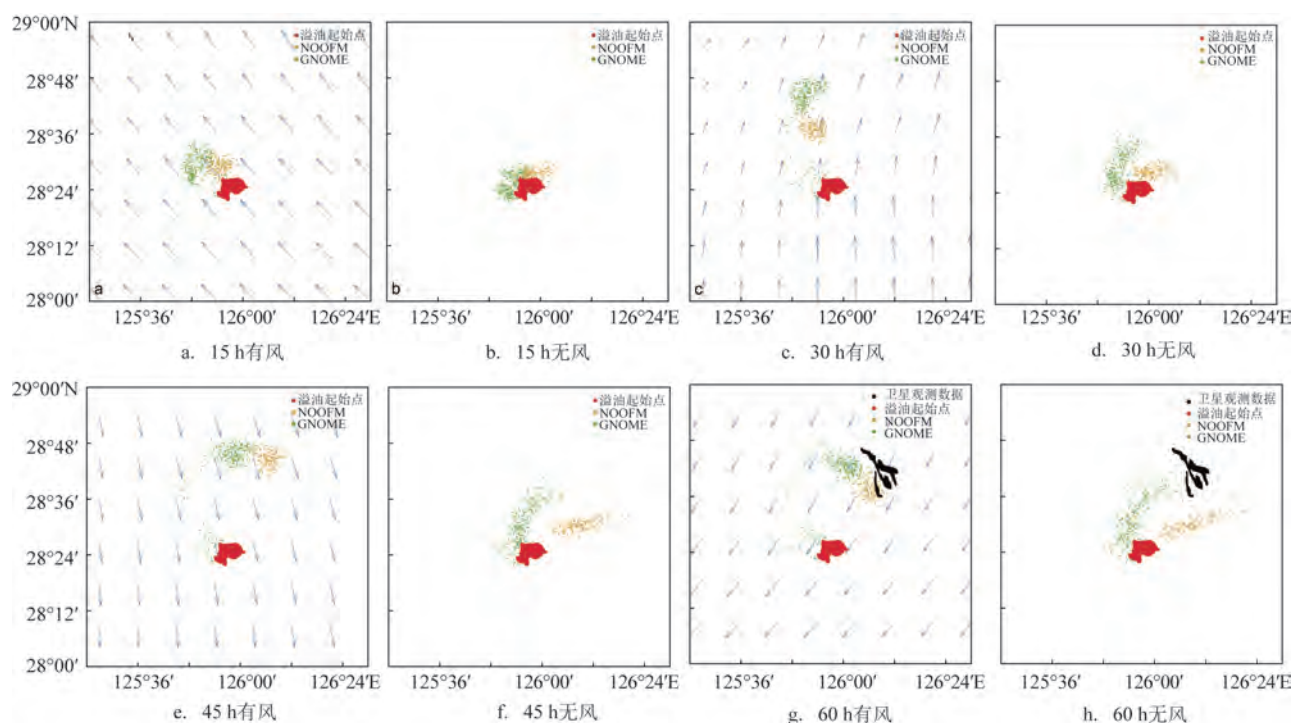
图5分别描述了“桑吉”轮溢油案例中两个模

型在有风(见图5a、c、e、g)和无风(见图5b、d、f、h)条件下的第15 h、30 h、45 h及60 h的模拟结果。从图中可以看出,第15 h的风为东南风,浮油粒子在风的作用下向西北方向运动,GNAME的模拟结果较NOOFM向西北方向偏移更远(见图5a);而无风条件下GNAME的模拟结果较NOOFM向西偏移(见图5b)。第30 h的风向为南风,在其作用下两个结果均向北漂移,其中GNAME的漂移距离更远,并与NOOFM的模拟结果拉开了一定的距离(见图5c);而无风条件下GNAME的轨迹向北漂移,NOOFM的轨迹向东漂移(见图5d)。第45 h的风向为北风,相较于第30 h(见图5c),GNAME的模拟结果从NOOFM的北边向南移动到与其同一纬度,GNAME的移动距离更远(见图5e);无风条件下GNAME和NOOFM的模拟结果都向东偏北方向漂移,NOOFM的延伸距离更远(见图5f)。第60 h的风向为东北风,两个模型结果都向西南方向漂移,其中NOOFM模拟的溢油轨迹更接近卫星观测数据,而GNAME在模拟途中都有遗留的溢油粒子,能较清晰地观测

到溢油轨迹(见图5g);相较于图5f,图5h的模拟结果向东漂移并扩散。

3.2 测试二:黎巴嫩溢油案例

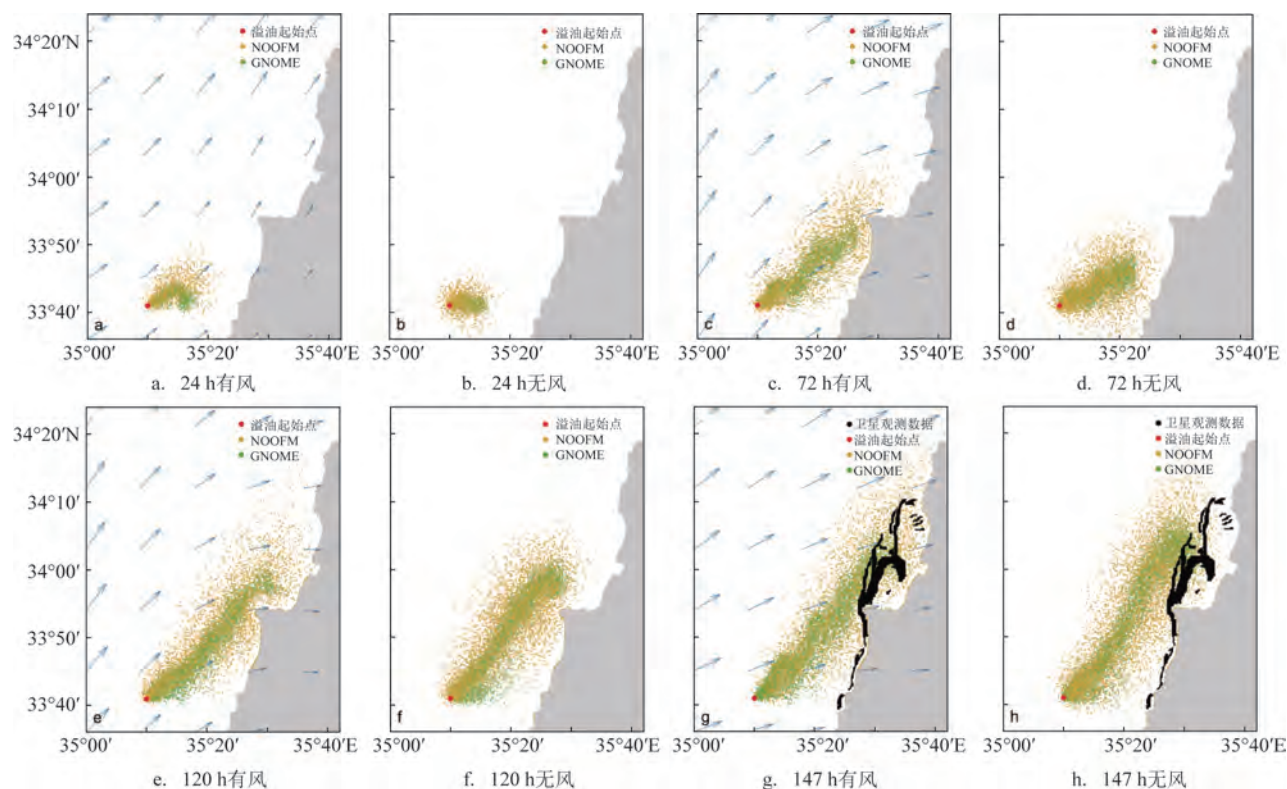
图6为从黎巴嫩溢油案例模拟的147 h中提取的4个时间点的模拟结果,其主导风向均为西南风。第24 h在有风漂因子的情况下,溢油轨迹向东北方向偏移,NOOFM的模拟结果扩散更广(见图6a);无风漂因子的两个模拟结果区别不大(见图6b)。第72 h的模拟结果都临近岸边,有风作用下的模拟结果都向东北偏移(见图6c);NOOFM较无风作用下的模拟结果更离散(见图6d),并且更快接近岸线。在第120 h有风作用时,GNAME的模拟结果逐渐接近岸线,NOOFM的模拟结果已有部分油粒子靠岸(见图6e),相较于无风情况(见图6f),NOOFM向东北方漂移的更远且更散。第147 h的卫星观测数据显示溢油南部已经靠岸,而NOOFM的模拟结果中比GNAME靠岸的数据更多,模拟结果更好(见图6g),而对于北部数据,NOOFM的模拟结果比实际



注:蓝色箭头表示风场

图5 “桑吉”轮溢油案例在有风和无风情况下 GNOME 和 NOOFM 模型在不同时刻的模拟结果

Fig.5 Simulation results of GNOME and NOOFM for the "Sanchi" oil spill case at the different times, both with and without the wind drift factor



注:蓝色箭头表示风场

图6 黎巴嫩溢油案例在有风和无风情况下 GNOME 和 NOOFM 模型在不同时刻的模拟结果

Fig.6 Simulation results of GNOME and NOOFM for the Lebanon oil spill case at the different times, both with and without the wind drift factor

观测数据更靠北,且扩散范围更大,其油膜形状与观测存在一定误差,而 GNOME 的油膜形状模拟结果更贴近观测数据。

4 结论与分析

本研究针对中国近海的“桑吉”轮溢油案例和地中海近岸的黎巴嫩溢油案例进行详细分析,重点探讨了风漂因子在溢油模型中的作用。本研究特别关注了 GNOME 和 NOOFM 两种模型在处理风漂因子时采用的方法及效果,以及这些方法对溢油漂移扩散产生的影响。

在溢油模拟中,风漂因子起着至关重要的作用。它不仅影响溢油的移动方向,还决定了溢油扩散的速度和范围。由于风力是动态变化的,这给溢油预测提出了额外的挑战。在不同的风速和风向条件下,溢油行为极具变化性,这也会影响溢油应

对措施的有效制定。

在“桑吉”轮溢油案例中,通过3%和0风漂因子两组实验,揭示了风漂因子在溢油模拟中的重要性以及在不同模型实验中的表现。NOOFM 模型的模拟结果更接近实际观测数据,这反映了该模型在处理中国近海环境下风漂因子的高效性和准确性。这种高度的适应性可能源于 NOOFM 模型的算法或参数设置更贴近中国海域特有的海洋环境和气象条件,从而能够更准确地捕捉和模拟风漂因子对溢油行为的影响。相反,GNOME 模型虽然对风漂因子表现出一定的响应,但在“桑吉”轮溢油案例模拟中的准确性略有不足。这可能是由于 GNOME 模型虽然能够捕捉风力的变化,但其对特定海域环境因素的适应性不如 NOOFM 模型。这表明在溢油模型的选择和应用中,理解模型对特定海域环境条件的响应能力和适应性是至关重要的。

在黎巴嫩溢油案例中,NOOFM 模型在近岸溢

油模拟中表现良好,但模拟的溢油扩散范围较广,与实际观测数据存在一定偏差。这表明NOOFM模型在处理风漂因子时可能采用了更为广泛的响应机制,导致风力作用下的溢油扩散模拟结果较为分散。从图6的风向结果可以看出,本案例中东北风占主导地位,在风漂因子的作用下溢油会靠近海岸,相比之下,GNOME模型没有模拟出这一情况,但其模拟出的溢油区域形状与卫星观测数据更为吻合。这种差异很可能是由于两种模型在处理风漂因子时所采用的方式不同,并且受到不同海域条件的影响所致。

总体而言,风漂因子对溢油扩散的影响是多方面的,它不仅改变溢油的移动方向,还影响扩散速度和范围。此外,本研究还发现不同的模型在不同海域条件下对风漂因子的响应存在显著差异,表明选择和应用溢油模型时需要充分考虑特定海域的特性。本研究结论可以为未来溢油模型的优化提供重要指导,特别是在提高模型对风漂因子的敏感性和适应性方面。正确理解和模拟风漂因子的作用,对于预测溢油行为、指导应急响应计划以及最终减轻溢油对海洋环境和沿海社区的潜在影响至关重要。未来的研究应继续探索不同环境条件下模型的响应方式,并通过改进算法和参数设置来增强模型的预测准确性和适用性。

参考文献:

- [1] POLINOV S, BOOKMAN R, LEVIN N. Spatial and temporal assessment of oil spills in the Mediterranean Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112338.
- [2] REED M, DALING P S, BRAKSTAD O G, et al. OSCAR2000: a multi-component 3-dimensional oil spill contingency and response model[R]. Ottawa: Environment Canada, 2000: 663-680.
- [3] SPAULDING M, LI Z K, MENDELSON D, et al. Application of an integrated blowout model system, OILMAP DEEP, to the Deepwater Horizon (DWH) spill[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 120(1-2): 37-50.
- [4] NELSON J R, GRUBESIC T H, SIM L, et al. Approach for assessing coastal vulnerability to oil spills for prevention and readiness using GIS and the Blowout and Spill Occurrence Model [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 112: 1-11.
- [5] YAPA P D, ZHENG L, NAKATA K. Modeling underwater oil/gas jets and plumes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125 (5): 481-491.
- [6] ZHENG L, YAPA P D. Simulation of oil spills from underwater accidents II: Model verification[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1998, 36(1): 117-134.
- [7] REED M, JOHANSEN Ø, BRANDVIK P J, et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state of the art [J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 1999, 5(1): 3-16.
- [8] ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills. State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 122(11): 594-609.
- [9] ZHANG Y L, BAPTISTA A M. SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation [J]. *Ocean Modelling*, 2008, 21(3-4): 71-96.
- [10] HU D C, ZHANG H W, ZHONG D Y. Properties of the Eulerian-Lagrangian method using linear interpolators in a three-dimensional shallow water model using z-level coordinates[J]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2009, 23 (3): 271-284.
- [11] OMAR M Y, SHEHADA M F, MEHANNA A K, et al. A case study of the Suez Gulf: Modelling of the oil spill behavior in the marine environment[J]. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2021, 47(4): 345-356.
- [12] 毕研军, 刘心田, 宋协法, 等. 基于 GNOME 的溢油污染渔业资源损失评估[J]. *渔业科学进展*, 2020, 41(3): 1-10.
BI Y J, LIU X T, SONG X F, et al. Oil spill pollution and fishery resource loss assessment based on GNOME[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(3): 1-10.
- [13] KOROTENKO K A, MAMEDOV R M, KONTAR A E, et al. Particle tracking method in the approach for prediction of oil slick transport in the sea: modelling oil pollution resulting from river input[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 48(1-4): 159-170.
- [14] BERRY A, DABROWSKI T, LYONS K. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(11): 2489-2501.
- [15] LI Y Q, CHEN H B, LV X Q. Impact of error in ocean dynamical background, on the transport of underwater spilled oil[J]. *Ocean Modelling*, 2018, 132: 30-45.
- [16] CAO R C, CHEN H B, RONG Z R, et al. Impact of ocean waves on transport of underwater spilled oil in the Bohai Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 171: 112702.
- [17] TOZ A C. Modelling oil spill around Bay of Samsun, Turkey, with the use of OILMAP and ADIOS software systems[J]. *Polish Maritime Research*, 2017, 24(3): 115-125.
- [18] DURAN R, ROMEO L, WHITING J, et al. Simulation of the 2003 foss barge-point wells oil spill: A comparison between BLOSUM and GNOME oil spill models[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2018, 6(3): 104.
- [19] TOZ A C, BUBER M. Performance evaluation of oil spill software systems in early fate and trajectory of oil spill: comparison analysis of OILMAP and PISCES 2 in Mersin bay spill[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(9): 551.

- [20] BARRETO F T C, DAMMANN D O, TESSAROLO L F, et al. Comparison of the Coupled Model for Oil spill Prediction (CMOP) and the Oil Spill Contingency and Response model (OSCAR) during the DeepSpill field experiment[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 204: 105552.
- [21] BALOGUN A L, YEKEEN S T, PRADHAN B, et al. Oil spill trajectory modelling and environmental vulnerability mapping using GNOME model and GIS[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115812.
- [22] LIU D R, LI Y, MU L. Parameterization modeling for wind drift factor in oil spill drift trajectory simulation based on machine learning[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1222347.
- [23] DE DOMINICIS M, BRUCIAFERRI D, GERIN R, et al. A multi-model assessment of the impact of currents, waves and wind in modelling surface drifters and oil spill[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, 133: 21-38.
- [24] BEEGLE-KRAUSE C J. GNOME: NOAA's next-generation spill trajectory model[C]//Oceans' 99. MTS / IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 99CH37008). Seattle: IEEE, 1999: 1262-1266.
- [25] YANG Y, CHEN Z L, LI Y, et al. Numerical simulation of oil spill in the Gulf of Mexico based on the GNOME and ADIOS [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 295-298: 1535-1542.
- [26] ZELENIKE B, O'CONNOR C, BARKER C H, et al. General NOAA operational modeling environment (GNOME) technical documentation[R]. Seattle: Emergency Response Division, 2012.
- [27] YANG Y Q, LI Y, LIU G M, et al. A hindcast of the Bohai Bay oil spill during June to August 2011[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(11): 21-26.
- [28] COPPINI G, DE DOMINICIS M, ZODIATIS G, et al. Hindcast of oil-spill pollution during the Lebanon crisis in the Eastern Mediterranean, July-August 2006[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(1): 140-153.
- [29] YANG Y Q, LI Y, LI J, et al. The influence of Stokes drift on oil spills: Sanchi oil spill case[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40 (10): 30-37.
- [30] LI Y, YU H, WANG Z Y, et al. The forecasting and analysis of oil spill drift trajectory during the Sanchi collision accident, East China Sea[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 187: 106231.
- [31] SHI S Q, WANG Y Q, LIU Y H. Analyzing and assessment of oil viscosity models based on the API ranges[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2017, 35(23): 2208-2215.

Impact of wind drift factor on oil spill simulation

WU You¹, JI Qian^{1*}, YANG Yiqiu², ZUO Juncheng³, TIAN Yilun¹, ZHANG Yuting¹, ZHOU Chanjuan⁴

(1. College of Ocean Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. College of Life Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This study conducts a detailed analysis of the Sanchi case in China's nearshore waters and the Lebanon case in the Mediterranean, comparing the differences between the GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) and NOOFM (NMEFC Operational Oil Spill Forecasting Model) oil spill models in handling wind drift factors and their varying impacts on oil spill diffusion. The results show that the wind drift factor significantly influences the simulation of oil spill trajectories, especially under changing wind speeds and directions. In the Sanchi case, the NOOFM model demonstrates efficient handling of the wind drift factor in China's nearshore environment, with the simulation results more closely aligning with actual observations. In the Lebanon case, the NOOFM model shows good nearshore simulation performance under the influence of wind, while the GNOME model simulation of oil spill morphology aligns better with satellite observation data. The results further emphasize the importance of wind drift factors in oil spill simulation, especially in improving the accuracy and adaptability of oil spill models to wind drift factors in different marine environments.

Key words: wind drift factor; oil spill model; GNOME; NOOFM