

文章编号: 1674-5566(2013)03-0384-07

## 基于 GNOME 的长江口锚地溢油模拟

杨红<sup>1</sup>, 刘成秀<sup>1</sup>, 李曰嵩<sup>1</sup>, 潘灵芝<sup>2</sup>, 丁丽丽<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 国家海洋局东海预报中心, 上海 200081)

**摘要:** 基于 GNOME 溢油模型模拟长江口外锚地发生溢油时的漂移轨迹与扩散情况, 先利用 FVCOM 建立潮流场, 并选用主导风作为常风场, 一起输入 GNOME 溢油模型, 以中质原油为油种, 模拟了 100 t 溢油量下、一个潮周期内涨急、涨憩、落急、落憩 4 个时段发生溢油后 4 d 中的溢油轨迹和最终分布, 通过计算 1 d 的溢油扩散面积及距离来讨论风向与流场共同作用下对油膜漂移扩散的影响。结果表明: 无风情形下溢油向西南方向扩散; 西北风情形下的溢油均呈螺旋状向南扩散; 东南风情形下的溢油除涨急时向北漂移外, 其余均在杭州湾近上海海域振荡, 部分吸附于上海岸线; 1 d 中西北风情形下的油膜质心漂移距离大于东南风下, 溢油扩散面积上则相反。

**研究亮点:** GNOME 作为 NOAA 的一个免费的溢油模拟软件, 具有快速可视化的优点, 只需输入准确的流场和风场等环境特征数据, GNOME 即可提供可靠的溢油预测。但其自身在国内应用较少, 尤其在船舶溢油风险较高的长江口海域。本文结合 FVCOM 和 GNOME 对长江口外溢油扩散情况作一初步探讨。

**关键词:** GNOME; 长江口; 锚地; 溢油; 模拟

**中图分类号:** X 55

**文献标志码:** A

随着我国对石油的需求量的不断增加、交通运输业的不断发展, 海上船舶溢油事故日趋增加。据统计 1973-2006 年我国沿海发生大小船舶溢油事故 2 635 起, 总溢油 37 077 t<sup>[1]</sup>。石油进入海洋后对海洋生态环境严重污染, 不仅破坏生态平衡, 影响海洋养殖业、旅游业的发展, 而且威胁人类的健康, 近来海上石油泄露已逐渐引起社会和人们的关注。

对溢油进入海洋后的行为与归宿的研究是溢油事故处理和决策的基础和依据。欧美国家从上世纪 60 年代就开始对海上溢油进行预测研究<sup>[2]</sup>, 现在已建立了很多综合溢油模型, 如 ADIOS、OILMAP、OSIS、OSCAR、GNOME 等。我国的研究起始于 20 世纪 80 年代, 目前的溢油模型多属于改进型, 如赵文谦等的溢油行为预测组合模型<sup>[3]</sup>; 熊德琪的“大连海域溢油模拟系统”<sup>[4]</sup>。然而这些改进型的模型往往缺乏便捷的操作界面或使用手册, 也只有数值模式开发者能做到最有效的应用。还有的研究者如 WANG 等<sup>[5]</sup>, 韩

众<sup>[6]</sup>基于“油粒子”法, 通过各个过程的数值计算公式进行编程计算, 整个过程缺乏可视化, 计算处理过程也较为复杂。

本文所基于的 GNOME 模型是由美国国家海洋与大气局(NOAA)反应和恢复办公室(OR&R)紧急反应部(ERD)开发的一个免费的溢油模型, 采用国际上常用的欧拉-拉格朗日油粒子法, 操作方便, 模拟效果较好, 已广泛适用于美国的溢油预测, 如李晓峰等<sup>[7]</sup>利用 GNOME 等对墨西哥湾溢油进行了模拟并与 SAR 图像进行了对比。国内的使用仍比较少, 目前只有陈家兴等<sup>[8]</sup>利用 GNOME 模型在内河水域进行了溢油模拟; 赵东波等<sup>[9]</sup>研究了 GNOME 模型在湄洲湾的应用, 在长江口海域仍然没有应用的案例, 而长江口作为我国沿海船舶密集度最高的区域之一, 溢油事故频发, 近期的事故如 2012 年 5 月 18 日“通银 6”加油船在吴淞口沉没漏油, 2012 年 6 月 26 日凌晨荷属安的列斯籍杂货船“密斯姆”轮在长江口九段沙附近的南漕航道与另一散货船发生碰撞,

收稿日期: 2012-11-01 修回日期: 2013-01-06

基金项目: 上海市水务局海洋科研项目(沪海科字[2012]03号)

作者简介: 杨红(1962—), 女, 教授, 研究方向为环境海洋学。E-mail: hyang@shou.edu.cn

船体碰撞,泄漏约 100t 燃料油。基于以上原因,本文选用 GNOME 模型对我国沿海四大溢油风险区之一的长江口进行试验,研究其在中国近海的适用性。

## 1 研究方法

### 1.1 GNOME 模型简介

GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) 模型是 20 世纪 70 年代 NOAA 开发的现场溢油模型 (OSSM) 演化而来的。该模型可以通过输入风场、流场、油品、溢油量等资料来模拟溢油的扩散漂移,其原理基于欧拉-拉格朗日法,模型中的油粒子质点采用“spots”来表示,黑色的“spots”表示最佳分布,红色“spots”代表由于不确定性因素存在下的粒子分布,漂移速度采用流场矢量与风场矢量合成,模型具有快速可视化的优点。可以设置柴油、汽油、煤油/喷气发动机燃油、4#燃料油、6#燃料油、中质原油和无风化油 7 种油品,采用简单化的三相蒸发法计算不同油的挥发性,漂移、乳化、附岸的百分比可直接读取。

模型共分为 3 个模式:标准、GIS 及诊断模式,其中标准和 GIS 模式因为信息的有限,一般用来练习,在真实的溢油过程中,NOAA 反应组在诊断模式下使用 GNOME 模型。模型驱动需要的风场数据和流场数据一般通过观测或者由其他模型提供。在读入实时风场数据时可参见其说明书的格式编写,流场则可以涵盖直角网格、正交曲线网格和三角形网格的数据。模拟结果后处理方便,可以直接输出油粒子扩散的图片和动画,并可估计出特定时刻的漂移、蒸发、乳化、附岸等不同状态的溢油量,可导入 ArcGIS 中与溢油的电子地图(包括栖息地、港口、湿地等敏感地点)进行整合。在进行实时溢油预测时可以配合实时调查数据(包括现场取样、卫星、航拍资料)修改相应参数,使其与实际情况更相符。

### 1.2 FVCOM 模型简介

FVCOM (Finite Volume Coast and Ocean Model) 模型为美国 Massachusetts Dartmouth 州立大学陈长胜教授所领导的研究小组开发的一套三角形网格、有限体积、三维(3D)、预报原始方程组的近岸海洋模式,其控制方程类似于 POM 模型<sup>[10]</sup>。该模式结合了有限元法易拟合边界、局部加密和有限差分法动力学基础明确,计算高效、

差分直观的优点。此外,FVCOM 还采用了干/湿网格技术,使其能更好地模拟滩涂面积较大的海域。非结构化网格使其相比于结构化网格模型在模拟复杂边界时具有明显的优势,这点在日本学者 KAZUHIRO<sup>[11]</sup>研究福港湾时的水动力模型比较中已有论述。目前国内外在模拟近岸海域时多采用类似的非结构化网格模型。

### 1.3 研究海区的选择

深水航道三期工程的竣工使得出入深水航道的船舶流量日益增加,船舶碰撞引起的溢油风险概率不断增大。如果发生溢油事件,势必对上海周边海域的生态环境(如九段沙湿地保护区、中华鲟保护区以及上海岸线等)造成影响。本文选择的溢油点为深水航道外的长江口 1 号锚地附近,模拟其在涨急、涨憩、落急和落憩共 4 个时刻发生溢油时的漂移扩散情况,分析溢油对上海周边海域的生态环境影响,锚地(122.57°E, 31.22°N)的地理位置及周边生态环境敏感区见图 1。

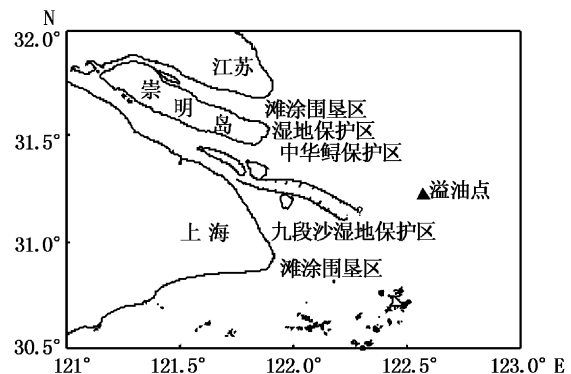


图 1 研究区域  
Fig. 1 Study area

### 1.4 长江口溢油模型的建立

#### 1.4.1 水动力模型的建立与验证

溢油模型的流场由 FVCOM 模式来提供,模型的网格覆盖范围为 121.0°~124.5°E, 28.5°~34.5°N, 包含节点 9 404 个, 三角形单元 17 942 个。开边界节点的时间水位通过 8 个主要分潮 ( $M_2, S_2, K_2, N_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$ ) 调和分析得到, 长江径流取大通六月, 月均径流量 40 000 m<sup>3</sup>/s。模式运行 45 d, 取后 30 d 的数据作为 GNOME 模型的输入流场。

模式的验证时间为 2008 年 7 月, 验证点见图 2, 其中 A、B 为流场验证(大潮期 17~19 日), C

点为潮位验证(1~3日)。从验证结果(图3,图4)来看,模拟的流速、流向以及水位数据与实测的数据吻合较好,说明模拟的流场能够再现长江口外流场特征,可用于提供溢油模型所需要的流场。

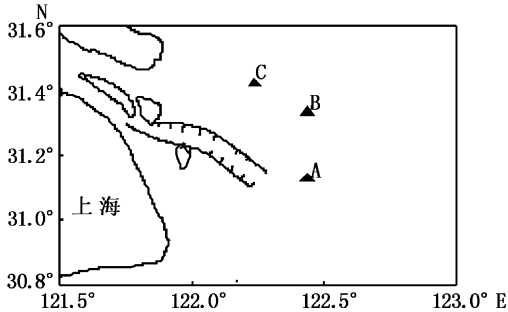


图2 模式验证点  
Fig.2 Measured station

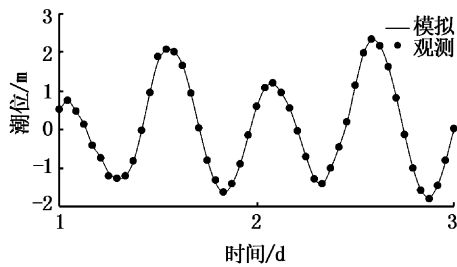


图3 潮位验证(C点)  
Fig.3 Tide validation of station C

1.4.2 溢油模型的参数设置

采用 GNOME 模型的诊断模式,由流场与风

场数据来驱动。具体参数设置如下:溢油点 122.57°E,31.22°N;油种中质原油(假设为船舶溢油);溢油量 100 t(瞬时溢油),在溢油模型中用 1000 个“spots”来表示;风场设置无风,东南风与西北风(均为 7 m/s)3 种情形;溢油时刻设置涨憩、落急、落憩和涨急 4 种情形;流场扩散不确定比例为水平和垂直流向均为 10%;油污扩散系数为  $1 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ <sup>[12]</sup>;附岸油膜再漂浮期(refloat half life)取为 1 h。模式输出的粒子包含最佳分布以及由于流场因素不确定性引起的 90% 置信区间分布,有关不确定因素对溢油分布的影响可参见 SEBASTIAO 和 GUEDES<sup>[13]</sup> 及 LEHR<sup>[14-15]</sup>。在实时预报时,这些不确定系数可以结合现场监测或者遥感图像监测来确定。

2 结果与分析

2.1 模拟结果

2.1.1 无风情形

无风情形下,涨憩、落急和落憩时段的溢油在 4 d 中的运动趋势较为一致(图 5),除涨急时段外均是呈螺旋状向西南扩散,而涨急时段油膜则主要向东南方向扩散。发生于 4 个时段的溢油对上海周边的威胁较小,除落憩段的溢油可能会抵达上海南岸外,其余时段的主要威胁舟山海域。

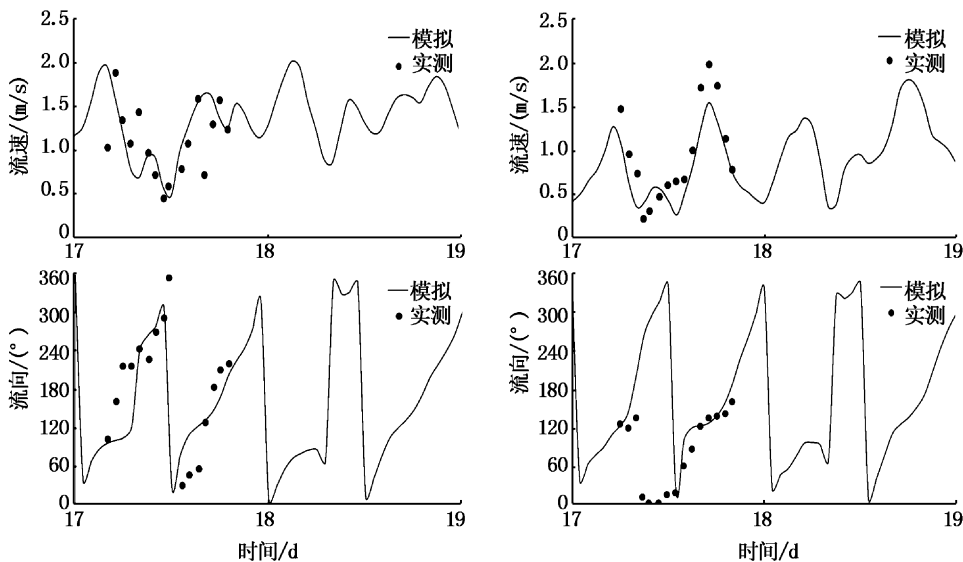


图4 A、B 点表层流速、流向模拟和观测数据对比(左:A点,右:B点)

Fig.4 Model-data comparison for velocity and current direction at surface with observation data at station A and B(Left: station A, Right: station B)

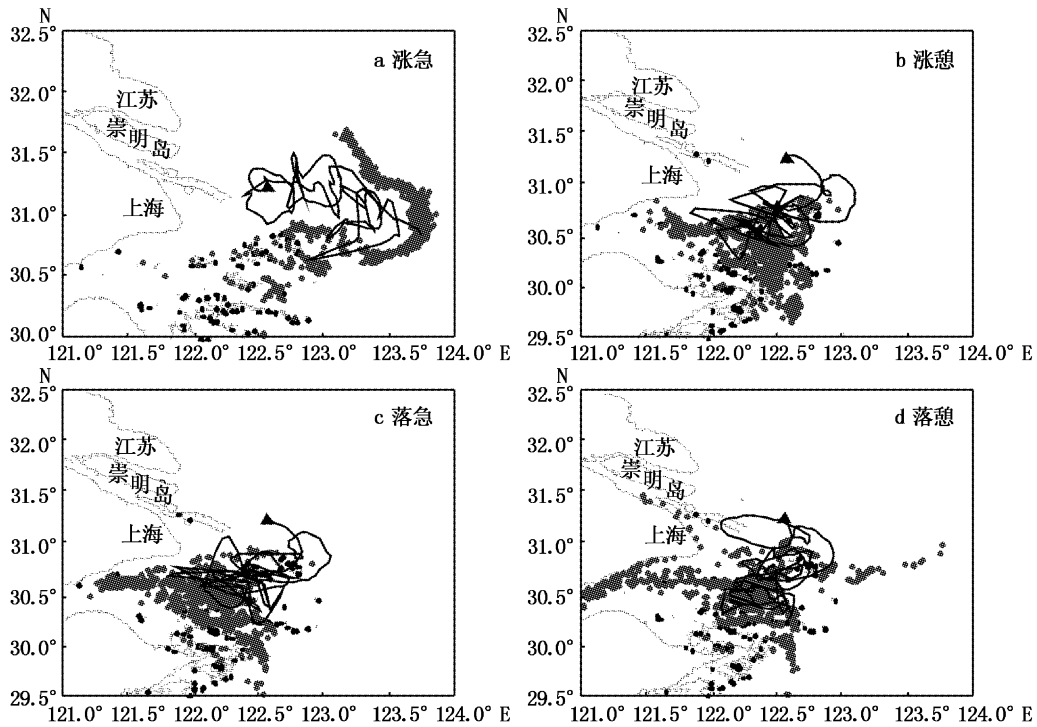


图 5 无风下不同时段 4 d 溢油漂移轨迹及最终分布

Fig. 5 The drift trajectory and final distribution of oil-spill at different time within 4 d windless

### 2.1.2 东南风情形

溢油发生位置的潮流以旋转流为主,溢油随涨落潮旋转振荡,轨迹与流场特征比较吻合。从图 6 中可以看出涨憩(图 6b)、落急(图 6c)、落憩(图 6d)时段的溢油 4 d 中主要在杭州湾近上海岸线的海域振荡,部分油膜在涨潮的作用下会抵达上海岸线,从表 1 中看出 4 d 中涨憩、落急、落憩段的抵岸量分别为 8.3%、13.0% 和 26.8%。而涨急段(图 6a)的溢油则逐渐向北漂移,进入江苏海域,漂移过程中没有接触岸线等主要生态功能区。

### 2.1.3 西北风情形

从图 7 中看出各个时段的溢油轨迹整体趋势比较一致,油膜初始阶段向东南方向扩散,然后向南进入舟山海域,漂移过程中会被岛屿分割成多条带,部分会吸附于岛屿岸线,涨急(图 7a)、涨憩(图 7b)、落急(图 7c)与落憩(图 7d)的抵岸量分别为 5.9%、3.8%、1.6% 和 3.3%。4 个时段中发生于落憩段的溢油由于涨潮的作用会到达九段沙附近水域,总体而言发生于西北风情形下的溢油在风和潮流的作用下会逐渐远离上海岸线,影响比较大的为舟山海域。

无风、东南风和西北风各种情形下溢油量 4

d 后的变化见表 1,由于 GNOME 中蒸发消散的算法比较简单,而模拟中油性质不变和溢油扩散情况相同,因此各种情况下的蒸发消散量均为 41.5%。在油膜抵岸量上,东南风情形下溢油的抵岸量除涨急时段外其余均比较大,而且主要吸附于上海靠杭州湾的岸线。

为分析潮流以及风向对油膜扩散面积及扩散距离的影响,本文计算了溢油 1 d 后的溢油扩散面积(更长时间尺度的还会受到岛屿阻滞的影响),结果见表 2,结果显示东南风情形下的溢油扩散范围普遍比西北风情形下大,油膜质心的迁移距离上基本呈现西北风 > 无风 > 东南风。

## 2.2 结果分析

从模拟结果可以看出发生在长江口外的溢油在海面的漂移情况主要受潮流和风的影响,其中潮流起着主导作用。在无风情形下,油膜整体趋势往南走(除涨急时段外),主要由于长江口外落潮流速普遍大于涨潮流速,而落潮流向主要向东南方向。东南风情形下由于风在西北方向上的顶托作用,油膜会长时间在杭州湾近上海岸线振荡并逐渐吸附于岸线,涨急时段的溢油初始相比于其他时段的溢油向南部区域运动距离较小,受潮流的作用稍弱,加上东南风作用,油膜整体

运动趋势向北。西北风情形下的油膜较无风情形下整体偏向杭州湾外,距离大陆岸线较远,对上海周边海域影响比较小。3 种情形中东南风作

用下的溢油会在近岸海域振荡较长时间,对上海周边的影响是最大的。

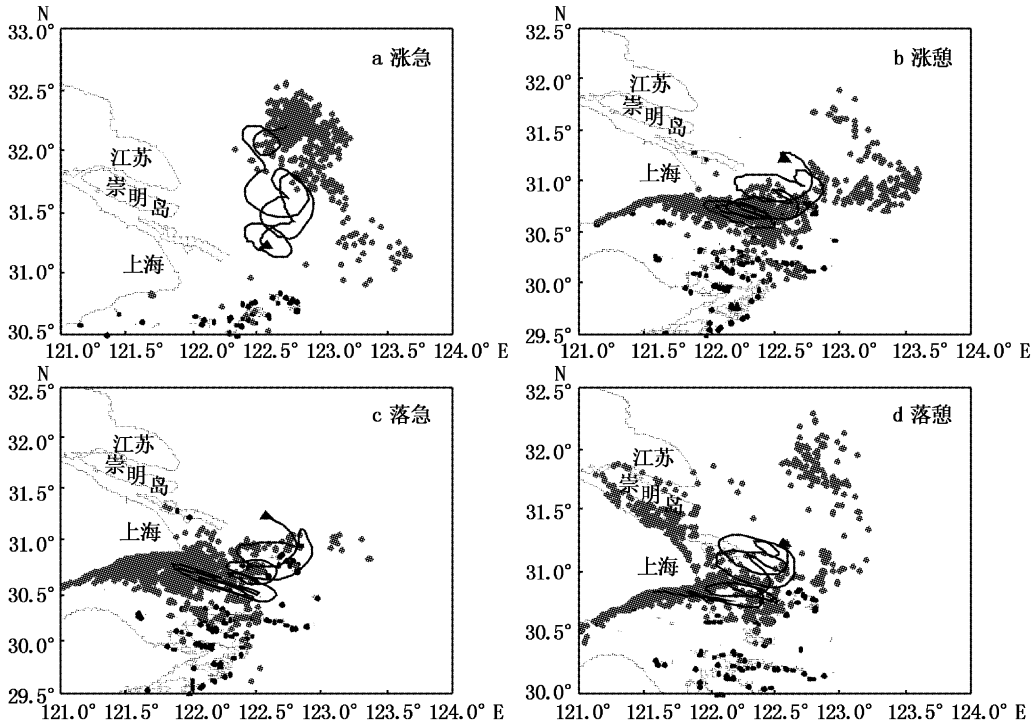


图 6 东南风下不同时段 4 d 溢油漂移轨迹及最终分布

Fig. 6 The drift trajectory and final distribution of oil-spill at different time within 4 d under the southeast wind

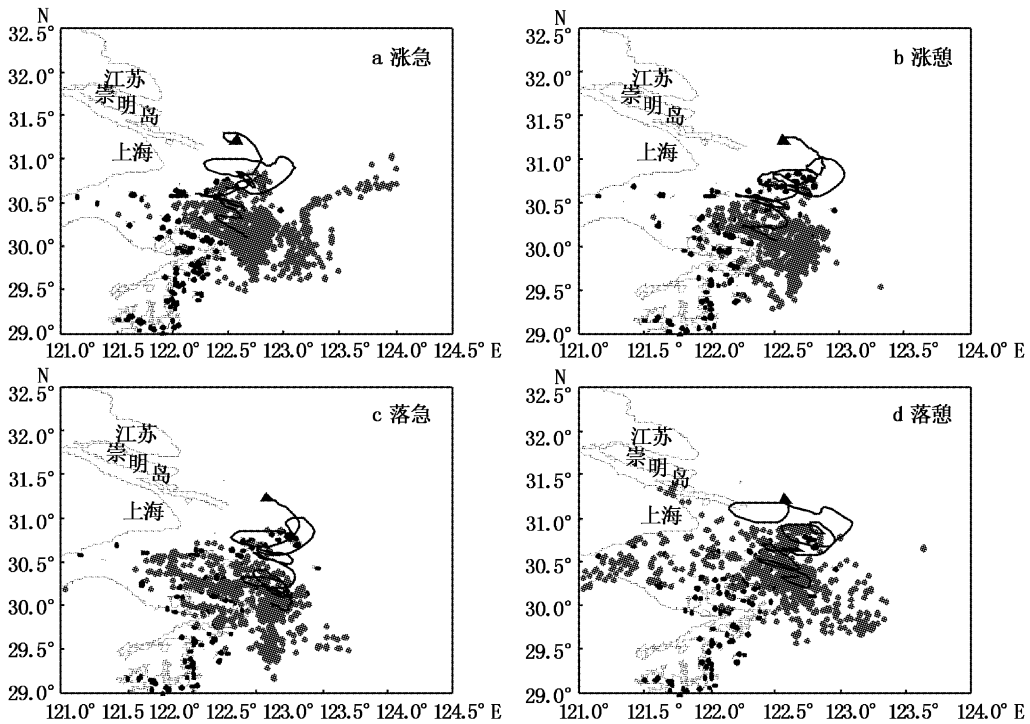


图 7 西北风下不同时段 4 d 溢油漂移轨迹及最终分布

Fig. 7 The drift trajectory and final distribution of oil-spill at different time within 4 d under the northwest wind

表 1 不同情景下溢油第 4 天不同状态的溢油量  
Tab. 1 Predicted oil weight on 4th day after oil spill under different conditions

溢油条件	漂浮量/%	抵岸量/%	蒸发消散溢油量/%
无风涨急	58.5	0.0	41.5
东南风涨急	58.5	0.0	41.5
西北风涨急	52.6	5.9	41.5
无风涨憩	53.6	4.9	41.5
东南风涨憩	50.2	8.3	41.5
西北风涨憩	54.7	3.8	41.5
无风落急	52.7	5.8	41.5
东南风落急	45.5	13.0	41.5
西北风落急	56.9	1.6	41.5
无风落憩	52.2	6.3	41.5
东南风落憩	31.7	26.8	41.5
西北风落憩	55.2	3.3	41.5

表 2 不同情景下溢油后 1 d 的扩散情况  
Tab. 2 Predicted oil weight at 24 h after oil spill under different conditions

溢油条件	残留量/%	扩散范围/km <sup>2</sup>	扩散距离/km
无风涨急	77.7	195.35	27.84
东南风涨急	77.7	26.03	29.37
西北风涨急	77.7	47.20	48.79
无风涨憩	77.7	29.82	37.23
东南风涨憩	77.7	100.35	24.42
西北风涨憩	77.7	22.59	39.18
无风落急	77.7	52.48	28.56
东南风落急	77.7	163.78	29.66
西北风落急	77.7	57.92	32.54
无风落憩	77.7	65.68	38.73
东南风落憩	77.7	173.99	9.07
西北风落憩	77.7	72.76	55.17

注:溢油扩散范围是将溢油点导入 ArcGIS 中计算得出。

通过比较 1 d 中溢油质心漂移距离可以看出溢油质心大都出现在溢油点的西南方向,西北风情形下的溢油质心漂移距离大于无风情形,而无风情形下又大于东南风情形。除落潮时的流速比涨潮时快外,风也起着重要影响,西北风方向与落潮流向大致相同,东南风则相反,因此漂移的距离比东南风情形下较远。从扩散范围来看,东南风情形下的油膜扩散面积普遍比西北风情形下的扩散面积要大些,涨潮时段油膜基本都处于被挤压的状态,研究发现油膜呈现拉长而致扩散范围迅速扩大的时刻基本处于落潮时期,潮流自身对油膜有拉伸的作用,此外,东南风情形下,由于风的方向与落潮流向基本相反,风对油膜的运动也起着延滞的作用,因此溢油的扩散范围与潮流以及风的共同作用息息相关。

有关长江口的溢油模拟研究仍比较少见,目

前只有傅利辉等<sup>[16]</sup>和潘冲等<sup>[17]</sup>分别对长江口北支与深水航道外进行了溢油的数值模拟研究。潘冲的研究地点与本文比较靠近,在本研究中,西北风情形下溢油与潘冲的研究结果比较一致,东南风情形下只与涨急时相同,原因可能为本文细化了各个时刻,而潘冲的文章中并没有表明,另一个可能的原因是水动力模型的参数设置有所不同,这在实际预测的时候可以通过监测资料获得。

### 3 结语

(1) 通过 FVCOM 模式提供的流场数据结合平均风场,输入 GNOME 建立起溢油模型,初步尝试模拟了长江口深水航道外船舶密集的锚地在一个潮周期中涨急、涨憩、落急、落憩时段发生溢油时的溢油扩散情况,给出了溢油 4 d 内的扩散轨迹以及分布情况。

(2) 研究得出近岸主导油膜漂移的为潮流和风,而潮流则起最主要的作用。无风情形下,溢油在潮流的作用下整体偏西南方向扩散;西北风情形下,溢油主要向南方扩散;东南风情形下溢油主要在杭州湾近上海沿岸振荡并逐渐吸附于上海岸线。

(3) 模拟采用的为常量风场,因此所模拟的结果可能仅代表平均意义下的结果,实际预测时应采用实时风场的资料进行计算。GNOME 提供了一个可以快速预测溢油走势的平台,但模型自身也有限制,如目前模拟的溢油轨迹尚未涉及到三维,释放的“spots”并未充分考虑溢油量的不同所引起的初始扩展面积的大小等,关于该方面的改进可见杨红<sup>[18]</sup>等提出的“油粒子”法的改进,这也是模型自身需要完善的地方。

(4) 本文溢油运动的模拟较为简单,目的在于快速预测突发性溢油事故发生后溢油的走势及对沿岸的影响区域,对于用来进行生态环境损害大小评估还是远远不够的。在目前长江口船舶日益密集的形式下,非常有必要加强进一步的研究。未来的溢油模型应与周边的生态敏感区相结合,在实际发生溢油时还应使用遥感技术对模型自身进行参数校正,这样才能为相关部门的应急措施提供更可靠的技术支持。

本文的水动力模型的建立得到了陈长胜团队的支持,作者在此表示衷心地感谢!

## 参考文献:

- [1] 王传远, 杜建国, 等. 海洋溢油的风化过程研究[J]. 海洋湖沼通报, 2008(3): 79-83.
- [2] 庄学强等. 海面溢油数值模拟及其可视化实现技术[J]. 中国航海, 2007(1): 97-100.
- [3] 武周虎, 赵文谦. 海面溢油扩展、离散和迁移组合模型[J]. 海洋环境科学, 1992, 11(3): 33-40.
- [4] 熊德琪, 等. 大连海域溢油应急预报信息系统及其应用[J]. 交通环保, 2002, 23(3): 5-7.
- [5] WANG S D, SHEN Y M, GUO Y K, et al. Three-dimension numerical simulation for transport of oil spills in seas[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(5/6): 503-510.
- [6] 杨红, 韩众, 李曰嵩, 等. 东海西湖凹陷区溢油行为数值模拟[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(2): 216-220.
- [7] CHENG Y C, LI X F, et al. SAR observation and model tracking of an oil spill event in coastal waters[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62: 350-363.
- [8] 陈家兴, 杜娟, 付金锋. 基于 GIS 的三峡库区溢油模型研究[J]. 中国水运, 2010(9): 96-99.
- [9] 赵东波, 姬厚德, 等. NOAA 的 GNOME 溢油模型在湄洲湾的应用[J]. 台湾海峡, 2011, 30(3): 341-348.
- [10] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. three-dimensional coastal ocean models[M]. Washington D. C.: American Geophysical Union, 1987: 1-16.
- [11] KAZUHIRO A, ATSUHIKO I. Application of finite volume coastal ocean model to hindcasting the wind-induced sea-level variation in Fukuoka Bay [J]. Journal of Oceanography, 2007, 3: 333-339.
- [12] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). GNOME workbook of diagnostic mode [M]. Washington: NOAA, 2006.
- [13] SEBASTIAO P, GUEDES S C. Uncertainty in predictions of oil spill trajectories in open sea [J]. Ocean Engineering, 2007, 34, 576-584.
- [14] LEHR W, BAEKER C, SIMECEK B D. New developments in the use of uncertainty in oil spill forecasts [C]// Proceedings of the 22nd Arctic and Marine Oil-spill Program Technical Seminar. Alberta, Canada, 1999: 271-284.
- [15] LEHR W J, SIMECEK B D, HODGES M. Wind uncertainty in long-range trajectory forecasts [C]// Proceedings of the 2003 International Oil Spill Conference. British Columbia, Canada, 2003.
- [16] 傅利辉, 朱建荣, 陈炳睿, 等. 崇启大桥建成后流场变化及溢油的数值模拟[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2008(4): 114-123.
- [17] 潘冲, 王惠群, 管卫兵, 等. 长江口及临近海域溢油实时预测研究[J]. 海洋学研究, 2011, 29(3): 181-186.
- [18] 杨红, 王珂, 胡松, 等. 油粒子体积对扩散的影响及油膜粒子化改进[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(4): 18-22.

## Simulation of oil spill in anchorage out of Yangtze River Estuary based on GNOME

YANG Hong<sup>1</sup>, LIU Cheng-xiu<sup>1</sup>, LI Yue-song<sup>1</sup>, PAN Ling-zhi<sup>2</sup>, DING Li-li<sup>1</sup>

(1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Prediction Center of the East China Sea, Shanghai 200081, China)

**Abstract:** Based on Gnome model, the trajectory and diffusion of oil released from anchorage out of Yangtze River Estuary were simulated. Tidal current field modeled by FVCOM and dominant wind were used to drive GNOME model. The 40t medium crude was chosen to simulate the oil slick drifting track and diffusion area at flood fast tide, transition from flood slack to ebb tide, ebb fast tide and transition from ebb slack to flood tide within 4 d and the final distribution was given. The results show: oil slick drifts spirally toward southwest in 4 d under no wind; oil slick drifts spirally toward south in 4 d under northwest wind; oil slick drifts spirally in Hangzhou Bay (some stuck to the shore of Shanghai) under southeast wind, specially, oil slick drifts northward when oil spill happened at flood fast tide; the drift distance under northwest wind is farther than under southeast wind while the diffusion area under northwest wind is smaller than under southeast wind.

**Key words:** GNOME; Yangtze River Estuary; oil spill; simulation