

蓬莱 19-3 油田事故溢油数值模拟

李怀明^{1,2}, 娄安刚¹, 王 璟¹, 孙学娟¹

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 天津市环境保护科学研究院, 天津 300191)

摘要: 利用 FVCOM (Finite-volume coastal ocean numerical model) 数值模型和 MM5 风场预报模式, 在对渤海海域水动力场进行数值模拟的基础上, 基于“油粒子”的欧拉-拉格朗日跟踪法和随机走动原理, 并考虑风对溢油油膜漂移扩散的直接作用, 建立了海洋溢油油膜漂移轨迹和扩散的数值预测模型。利用建立的模型对 2011 年 6 月蓬莱 19-3 油田事故溢油进行了数值模拟, 模拟结果与 RADARSAT 卫星遥感监测数据相吻合。研究结果表明: 在渤海中部地区夏季事故溢油模拟预测中, 风漂移因子取 0.024 最为合理, 模型可用于渤海蓬莱 19-3 油田附近事故溢油轨迹和扩散的快速预报, 从而为该区域的溢油事故应急响应提供科学依据。

关键词: 渤海; FVCOM(Finite-volume coastal ocean numerical model); 蓬莱 19-3; 溢油; 数值模拟; 风漂移因子

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)06-0070-08
doi: 10.11759/hyxx20120624002

近年来, 随着海洋石油开采业和海洋运输业的高速发展, 海洋溢油事故发生频率越来越高, 造成的损失也越来越大, 2011 年 6 月, 我国渤海湾蓬莱 19-3 油田发生溢油事故, 对周边环境和经济影响巨大^[1], 在社会各界引起强烈反响。科学准确预测溢油漂移及扩散范围是评价海上溢油影响的重要基础和先决条件^[2], 而由于监测手段的不断提高, 利用监测雷达和卫星图片结果来验证预测模型的准确性已经在国内外的研究中越来越普遍^[3-4]。本文建立的模拟渤海事故溢油漂移轨迹和扩散的数值模型, 就是利用 RADARSAT 卫星遥感图片资料对蓬莱 19-3 油田事故溢油油膜轨迹和扩散的数值模拟结果与监测数据进行了比较, 使模型能更加科学准确地预测渤海的事事故溢油行为。

1 风场预测模型

海上风场为渤海海域流场的计算和溢油漂移提供风动力场, 采用 MM5 大气预测模式, 模拟蓬莱 19-3 事故溢油期间渤海的逐时风场。MM5 模式是美国国家大气研究中心(NCAR)和美国宾州大学(PSU)在原有的流体静力模式 MM4 基础上发展的中尺度非流体静力模式, 该模式广泛地被应用于一些重要天气过程的模拟以及资源环境科学的研究^[5-6]。

为了验证建立的 MM5 模式对渤海海域气象模拟的准确性, 选取了天津(2011-06-13)、秦皇岛

(2011-06-19)、长岛(2011-06-25)、大连(2011-06-16)、营口(2011-06-15)等地的实测风场资料进行验证, 并对计算值与实测值的差值进行了统计分析(表 1), 模拟验证结果见图 1。由验证结果可以看出, 计算风速与实测风速的最大平均差值为 0.55 m/s, 差值的最大均方差为 0.30 m/s, 计算风向与实测风向的最大平均差值为 9.59°, 差值的最大均方差为 6.30°, 验证结果说明本次模拟采用的大气预测模式是准确的。图 2 给出了采用 MM5 大气模式预测的在溢油模拟期间(2011-06-14~17)渤海蓬莱 19-3 平台附近的模拟风场。

2 流场预测模型

FVCOM 模型是非结构化有限元框架下建立的河口、海湾、陆架和海洋模型^[7], 结合了有限差分计算效率高和有限元的几何灵活性的特点, 现已广泛地应用于各种河口、海湾水动力过程的模拟^[8-10]。相关公式及理论见参考文献^[7]。

渤海海域计算范围如图 3 所示(37°07'~41°0'N, 117°35'~122°E), 采用三角网格共分 4 586 个节点, 8 794 个网格, 平均网格大小约 5 000 m; 垂向 σ 坐标

收稿日期: 2012-06-24; 修回日期: 2012-10-10

基金项目: 海洋公益项目(201205001-4)

作者简介: 李怀明(1988-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事海上污物质输移扩散及溢油预报研究, 电话: 18322412261, E-mail: lihuaiming7080@hotmail.com

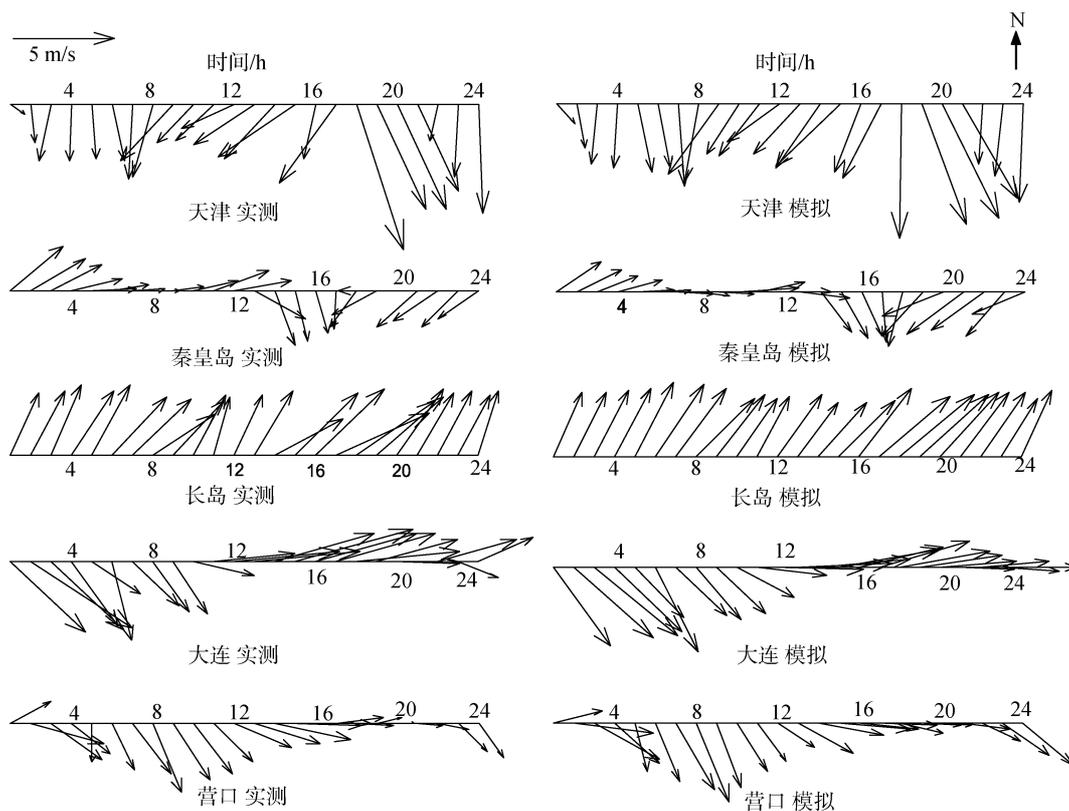


图 1 不同验证城市的风速风向验证图

Fig.1 Comparison of observed and calculated meteorological data for different cities

表 1 不同验证城市模拟值与实测值差值对比的统计分析结果

Tab.1 The statistical analysis of observed and calculated meteorological data for different cities

| 城市 | 日期(年-月-日) | 风速(m/s) | | 风向(°) | |
|-----|------------|---------|-------|-------|-------|
| | | 差值均值 | 差值均方差 | 差值均值 | 差值均方差 |
| 天津 | 2011-06-13 | 0.48 | 0.27 | 7.35 | 4.09 |
| 秦皇岛 | 2011-06-19 | 0.41 | 0.21 | 9.59 | 6.21 |
| 长岛 | 2011-06-25 | 0.24 | 0.15 | 7.45 | 6.01 |
| 大连 | 2011-06-16 | 0.55 | 0.25 | 8.87 | 6.30 |
| 营口 | 2011-06-15 | 0.53 | 0.30 | 8.14 | 4.64 |

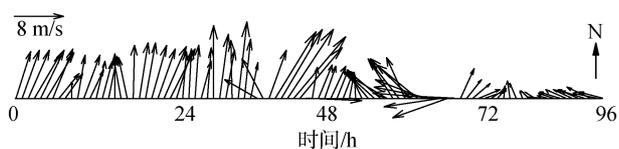


图 2 溢油平台点的预测风场(2011-06-14~17)

Fig.2 Calculated time history of wind speed in the oil field area (June 14~17, 2011)

分为 6 层, 内外模的时间步长分别取 2 s 和 5 s。陆地边界和水深取自中国人民解放军海军司令部航海保证部编制的海图, 速度及潮位初值为 0, 温度取 20℃, 盐度取 35, 利用开边界两端的潮位观测资料调和与分析得到 M₂、S₂、K₁、O₁ 四个分潮的调和常数作为开

边界调和常数, 并输入下列开边界调和方程:

$$\zeta = \sum f_C H_C \cos[\omega_C + (V_0 + u)_C - g_C]$$

式中, H 和 g 分别是调和常数的振幅和迟角; 下标 C 代表着 M₂、S₂、K₁、O₁ 四个分潮中的一个; ω 代表着分潮频率, f 为交点因子, u 为交点订正角, V_0 是天文潮的初位相。

为了验证流场预测模型的可靠性和精度, 分别利用渤中(C1, 2011-06-10)、渤西(C2, 2011-05-18)两点的实测潮位资料进行潮位验证, 利用渤西(C2, 2011-05-18)、秦皇岛(C3, 2007-08-01)、金县(C4, 2008-03-17)3 个验证点的实测资料进行潮流验证。渤海地形水深及溢油点和验证点的地理位置见图 4, 验

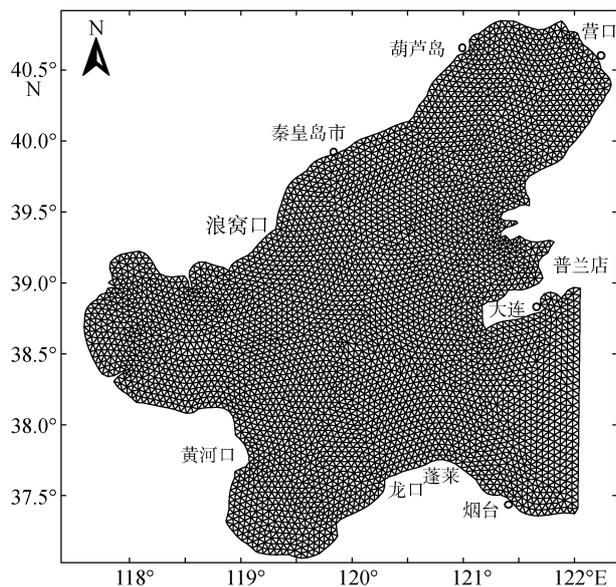


图3 计算域网格分布图

Fig.3 Grid distribution of the computed domain

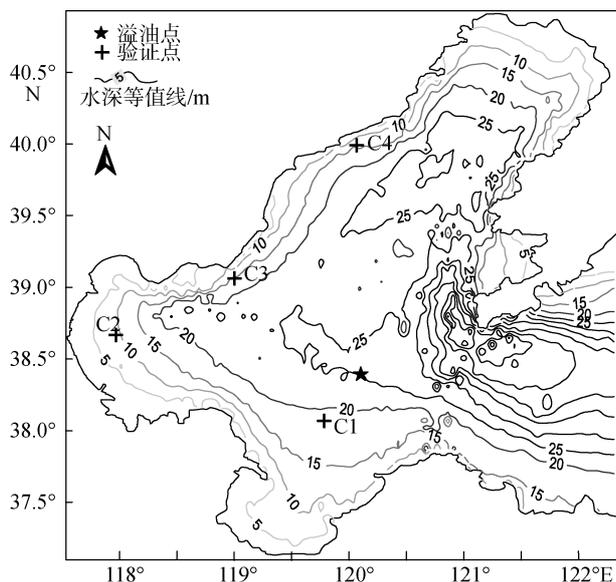


图4 渤海水深地形及溢油点、验证点位置

Fig.4 Topography of the Bohai Sea and locations of oil field and tidal stations

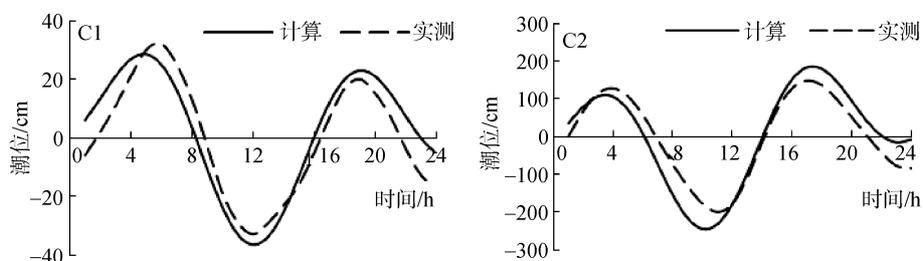


图5 渤中、渤西潮位点验证结果

Fig.5 Comparison of observed and calculated tidal elevations at Bozhong and Boxi tidal station

证结果如图 5、图 6 所示，图 7 给出了 2011-06-15 渤海涨潮中间时和落潮中间时的表层流场图。

由图 5 和图 6 可以看出，模拟的潮位、流速和流向与实测潮位、流速流向值基本吻合，说明建立的基于 FVCOM 的渤海流预测模型的正确性。

3 溢油预测模型

3.1 溢油扩展

采用 Lehr 等^[11]对 Fay 理论的修正方程来计算油膜的扩展范围：

$$A = 2270 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right)^{2/3} V^{2/3} t^{1/2} + 40 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right)^{1/3} V^{1/3} U_{wind}^{4/3} t \quad (1)$$

式中， A 为油膜扩展面积(m^2)； $\Delta\rho = \rho_w - \rho_0$ ， ρ_w 为海水密度， ρ_0 为溢油密度； V 为溢油总体积； U_{wind} 为风速(m/min)； t 为时间(min)，当油膜厚度减少到 $10^{-5} V^{1/4} m$ 时，扩展停止^[12]。

3.2 溢油的漂移

油粒子模型方法将溢油的漂移分为平流和扩散两部分，每个步长下油粒子的位置和分布都是平流、扩散和风共同作用的结果，某个油粒子在 Δt 时间内的水平位移可表示为：

$$S = S_l + S_\alpha \quad (2)$$

其中， S_l 是平流过程的位移； S_α 是扩散过程的位移。

3.2.1 溢油的平流

油粒子漂移轨迹计算公式为：

$$S_l = S_0 + \int_t^{t+\Delta t} V_l(x(t), y(t), t) dt \quad (3)$$

其中： S_0 为初始时刻位置， S_l 为油膜中心点所在位置， $V_l(x(t), y(t), t)$ 为拉格朗日追踪速度。决定海上溢油运动的主要因素是风和表层流，油粒子漂移是表层流和风拽力共同作用的结果，其速度可表示为：

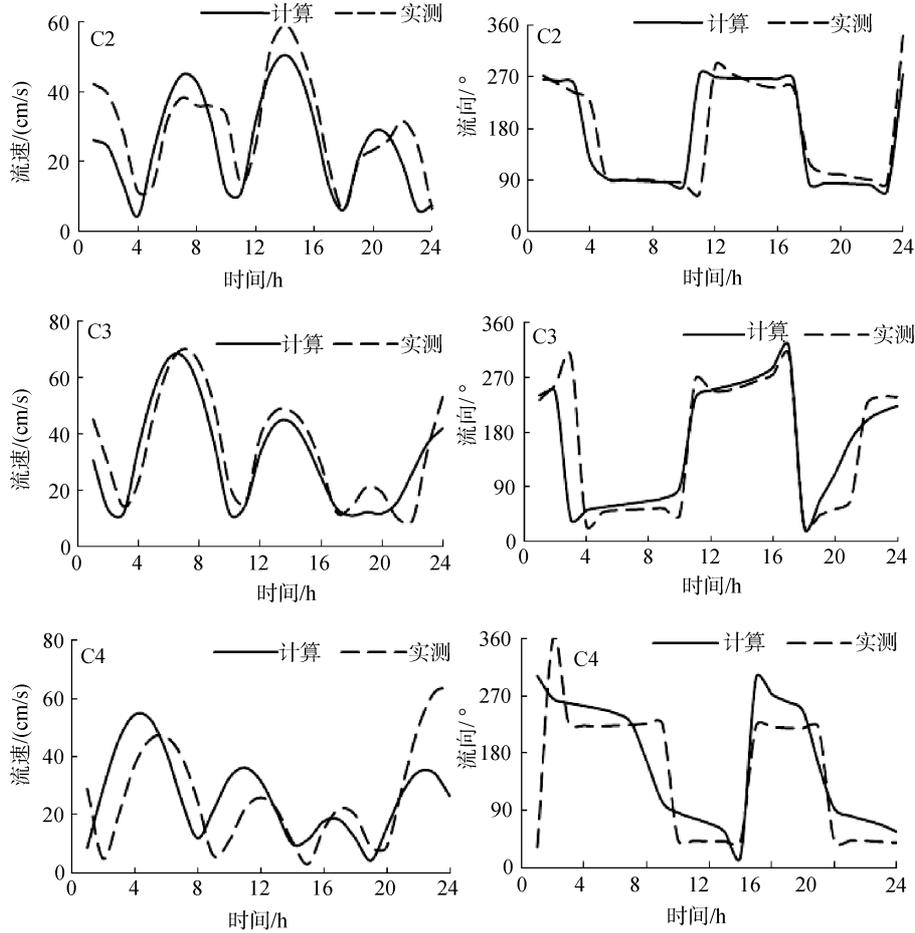


图 6 渤西、秦皇岛、金县验证点潮流流速流向验证图

Fig.6 Comparison of observed and calculated tidal currents at Boxi, Qinhuangdao and Jinxian tidal station

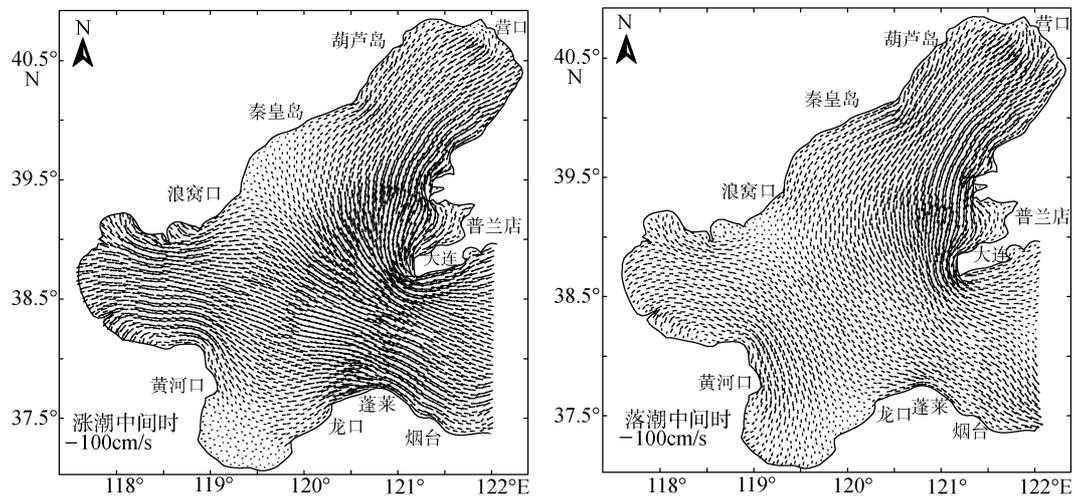


图 7 渤海涨潮、落潮中间时表层流场图(2011-06-15)

Fig.7 Tidal currents of the maximum flood and ebb in surface layer of the Bohai Sea (June 15, 2011)

$$V = V_c + \alpha_w DV_w \quad (4)$$

其中 V_c 为 FVCOM 模式计算的 c 方向($c=x, y$)的表层流流速, V_w 为 MM5 模式计算的风速, α_w 为风漂移因子^[13]; D 为风向转化矩阵:

$$D = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中 θ 的取值与 V_w 的大小有关: 当 $0 < V_w < 25\text{m/s}$ 时, $\theta = 40^\circ - 8\sqrt{V_w}$; 当 $V_w > 25\text{m/s}$ 时, $\theta = 0$.

3.2.2 溢油的扩散

油粒子在水体表面随机扩散过程可用下式描述:

$$S_{\alpha} = [R]_{-1}^1 \sqrt{6k_{\alpha}\Delta t} \quad (6)$$

其中 S_{α} 为 $\alpha=(x, y, z)$ 方向的湍动扩散距离, $[R]_{-1}^1$ 为 $-1\sim 1$ 之间均匀分布随机数, k_{α} 为 α 方向的湍流扩散系数, Δt 为时间步长。

4 蓬莱 19-3 事故溢油数值模拟

2011-06-04 和 2011-06-17 渤海蓬莱 19-3 油田 B 平台、C 平台分别发生溢油事故, 利用上述建立的溢油预测模型对蓬莱 19-3 油田溢油进行了模拟。

为了将数值模拟结果与实测卫星图片资料进行对比, 选取 RADARSAT 卫星遥感数据在 2011-06-14T06: 00: 00 的卫星监测油膜位置作为模拟溢油起点, 在该位置选取若干模拟示意点(图 8), 模拟 2011-06-14T06: 00: 00~2011-06-17T06: 00: 00 的溢油漂移轨迹和扩散, 与实时卫星监测数据进行了对比。

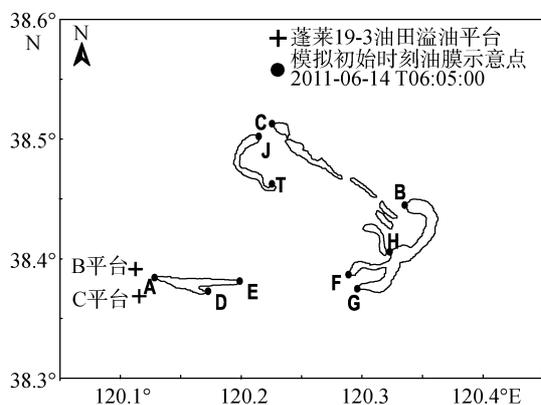


图 8 溢油模拟点位置分布图

Fig.8 Distribution of the chosen simulation points

4.1 模拟结果验证与分析

图 8 是根据 RADARSAT 卫星遥感数据得到的 2011-06-14T06: 05: 00 的溢油位置图, 该图所示的监测油膜位置即为图 9~图 11 中的初始油膜位置, 在图 8 所示的初始油膜位置选取了 A~J 共 10 个示意点进行模拟。图 9 为数值模拟 A、B、C 三点从 2011-06-14T06: 00: 00~2011-06-17T06: 00: 00 共 3 d 的轨迹, 其中 A'、B'、C' 分别为 A、B、C 三点在 2011-06-15T18: 00: 00 的模拟位置, a'、b'、c' 为该时刻的实际监测位置; 而 A''、B''、C'' 分别为 2011-06-17T06: 00: 00 时模拟结束时的预测位置, a''、b''、c'' 为同时间的实际

监测位置; 其他示意点 D~J 分别给出了 2011-06-14T06: 00: 00、2011-06-15T18: 00: 00 和 2011-06-17T06: 00: 00 对应的 3 个时刻的模拟位置, 对比计算不同时刻预测位置与监测位置的偏差。对比结果显示, 模拟位置与监测位置基本吻合: 数值模拟 36 h 后, 即 2011-06-15T18: 00: 00, A'、B'、C' 在 a'、b'、c' 西侧方向偏差距离约 800~1 300 m; 数值模拟 72 h 后, 即 2011-06-17T06: 00: 00, A''、B''、C'' 在 a''、b''、c'' 西北方向偏差距离约为 700~1 200 m。

为验证溢油预测模式在预测油膜扩散时的正确性, 选择图 8 中 ADE 连线油膜区域内均匀分布的粒子进行扩散预测, 并与实测油膜区域对比。从图 10 可以看出, 在 2011-06-14 T06: 00: 00、2011-06-15T18: 00: 00 和 2011-06-17T06: 00: 00 对应的 3 个时刻, 其预测的扩散范围与实测的范围基本一致。图 11 为油膜在上述 72 h 内影响的海域范围(即油膜扫海面积), 在溢油的 72 h 内油膜的漂移距离为 75.864 km, 漂移速度 1.054 km/h, 扫海面积为 507.95 km²。

4.2 风漂移因子

溢油预测时风漂移因子取值, 影响着溢油轨迹和扩散预测的精度, 不同海域风漂移因子的取值是不同的, 为了确定渤海中部海域正确的风漂移因子的取值, 以 6 月 14 日 06 时 ADE 连线油膜区域内 A 示意点为例(图 8), 在风漂移因子 α_w 可取值范围内, 对不同的 α_w 取值在 72h 内的数值模拟的轨迹与在不同时刻实际监测的油膜位置进行了比对(图 12)。经计算, α_w 在取 0.023、0.024、0.025 时, 6 月 15、16、17 日 06 时数值模拟位置与实际监测位置的偏差见表 2, 由计算结果可见, 风因子取 0.024 最为接近实际情况。

表 2 不同 α_w 取值下模拟轨迹与实测位置对比

Tab. 2 Comparison between the calculated and observed data with different α_w

| α_w | 与实测值的偏差(m) | | |
|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 2014-06-15T 06: 00: 00 | 2014-06-16T 06: 00: 00 | 2014-06-17T 06: 00: 00 |
| 0.023 | 1284 | 746 | 1152 |
| 0.024 | 1076 | 713 | 897 |
| 0.025 | 1227 | 2157 | 2044 |

5 结语

基于 MM5 大气模式和 FVCOM 模型, 在准确模

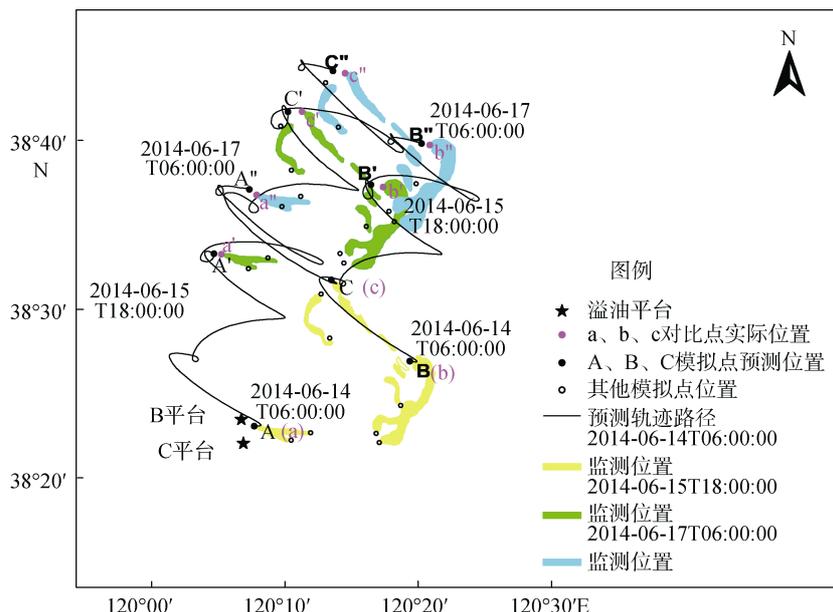


图9 溢油轨迹模拟对比图

Fig.9 Comparison of predicted trajectory and observed data

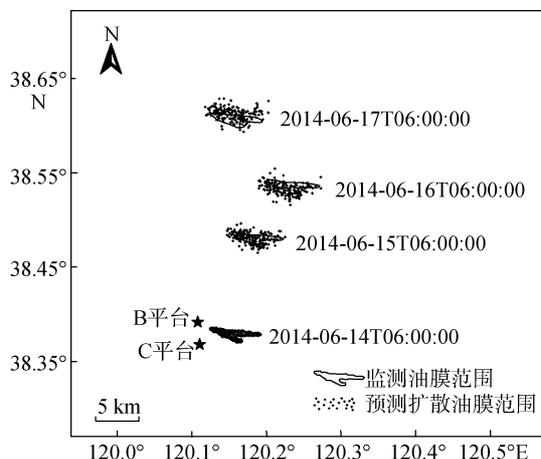


图10 溢油扩散模拟对比图

Fig.10 Comparison of predicted diffusion and observed data

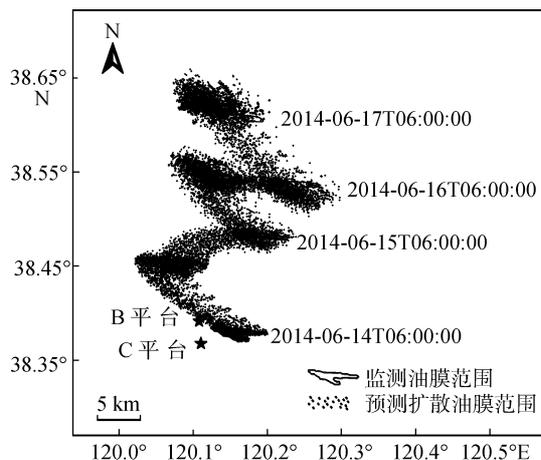


图11 油膜扩散扫海图

Fig.11 The predicted sweeping scope of oil film

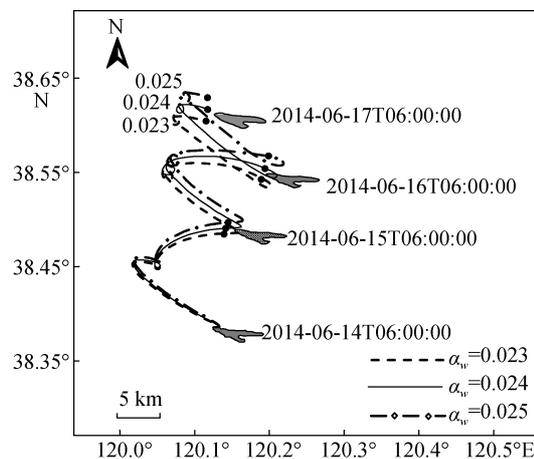


图12 不同风漂移因子的溢油轨迹对比图

Fig.12 Comparison of oil spill trajectory with different wind drift factors

拟渤海气象动力场和海洋水动力场的基础上，建立了海上溢油模拟的数值模型，模型预测结果与卫星遥感图片的对比显示模拟较好地吻合了实际溢油运动状态，说明所建立模型的正确性。

模型应用于蓬莱 19-3 油田事故溢油的轨迹和扩散预测，在数值模拟的 72 h 内，油膜的漂移距离为 75.864 km，漂移速度 1.054 km/h，油膜影响的海域面积为 507.95 km²；在溢油漂移预测时渤海中部海域风因子取 0.024 时，预测结果最接近实际情况。

模型适用于在渤海海域溢油的轨迹和扩散预测。但由于相关信息和卫星遥感图片等资料的局限性，仅对渤海中部蓬莱 19-3 油田溢油进行了 72 h 的

短期模拟, 更准确和全面的预测有待于在详实资料的基础上进一步完善。风因子取值 0.024 只适宜对渤海中部蓬莱 19-3 油田周围海域的溢油预测, 渤海其他海域这个取值会有变化, 应注意。

致谢: 本文所用溢油信息来自国家海洋局北海分局提供的卫星、飞机、船舶综合监测情况, 溢油解译图来自 RADARSAT 卫星遥感数据, 由国家海洋局北海预报中心制作, 中国科学院遥感应用研究所提供技术支持, 在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 陈安, 刘霞. 蓬莱 19-3 油田溢油事件及其应急管理综述[J]. 科技促进发展, 2011, 7: 23-28 .
- [2] Hackett B, Comerma E, Daniel P, et al . Marine oil pollution prediction [J]. Oceanography, 2009, 22(3) : 168-175 .
- [3] Carracedo P, Torres-López S, Barreiro M, et al. Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain): Development of an operational system [J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, 53: 350-360.
- [4] Cheng Yongcun, Li Xiaofeng, Xu Qing, et al . SAR observation and model tracking of an oil spill event in coastal waters[J] . Marine Pollution Bulletin, 2011, 62: 350-363.
- [5] 龚强, 袁国恩, 张云秋, 等 .MM5 模式在风能资源普查中的应用试验[J] . 资源科学, 2006, 28(1): 145-150 .
- [6] Gao Yanhong, Chen Yuchun, Lü Shihua . Numerical simulation of the critical scale of oasis maintenance and development in the acid regions of Northwest China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(1): 113-124 .
- [7] Chen Changsheng, Liu Hedong, Beardsley R C . An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20: 159-186 .
- [8] Aoki K, Isobe A . Application of finite volume coastal ocean model to hindcasting the wind-induced sea-level variation in Fukuoka Bay[J] . Journal of Oceanography, 2007, 63(2) : 333-339 .
- [9] Yang Zhaoqing, Khangaonkar T, Calvi M, et al. Simulation of cumulative effects of nearshore restoration projects on estuarine hydrodynamics[J]. Ecological Modelling 2010, 221(7): 969-977 .
- [10] Khangaonkar T, Yang Zhaoqing . A high resolution hydrodynamic model of Puget Sound to support nearshore restoration feasibility analysis and design[J]. Ecological Restoration, 2011, 29(1-2) : 173-184 .
- [11] Lehr W J, Cekirge H M, Fraga R J, et al . Empirical studies of the spreading of oil spills[J] . Oil and Petrochemical Pollution, 1984, 2(1) : 7-11 .
- [12] Wang S D, Shen Y M, Zheng Y H . Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas[J] . Ocean Engineering, 2005(32): 1556-1571 .
- [13] Stolzenbach K D, Madsen O S , Adams, E E, et al. A review and evaluation of basic techniques for predicting the behavior of surface oil slicks[R]. Massachusetts Avenue Cambridge, MA 02139 USA: Massachusetts Institute of Technology, 1977.

A numerical simulation of the oil spill accident at Penglai 19-3 oil field

LI Huai-ming^{1,2}, LOU An-gang¹, WANG Jing¹, SUN Xue-juan¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. Tianjin Academy of Environmental Sciences, Tianjin 300191, China)

Received: Jun., 24, 2012

Key words: the Bohai Sea; FVCOM (Finite-volume coastal ocean numerical model); Penglai 19-3; oil spill; numerical simulation; wind drift factor

Abstract: Using the finite-volume coastal ocean numerical model (FVCOM) and the mesoscale atmospheric model MM5, the hydrodynamic field of the Bohai Sea is simulated. A numerical prediction model of oil spill is developed based on the particle approach to simulate the spilled oil behavior under the direct action of the wind. This paper predicts the oil trajectory and its diffusion combined with the Euler-Lagrangian method and random walk theory. The model has been applied to the oil spill accident at Penglai 19-3 oil field in June 2011, and the results show good agreement between the simulated trajectory of the oil spill and the remote sensing observations from the RADARSAT images. All these analyses have shown that the wind drift factor takes 0.024 is most reasonable for the simulation of the summer oil spill accident in the middle Bohai Sea. This model is applicable to the rapid prediction of the oil spill accident at Penglai 19-3 oil field area and it could provide a scientific basis for the emergency response of the oil spill accidents in this area.

(本文编辑: 刘珊珊)