

渤海溢油三维漂移数值模拟研究

黄娟^{1,2}, 曹丛华^{1,2}, 赵鹏^{1,2}, 高松^{1,2}

(1. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266061)

摘要: 国家海洋局北海预报中心于2011年开发了渤海三维溢油模型, 该模型在分析国内外溢油模型现状的基础上, 借鉴当今流行的数值模拟方法, 使用油粒子模型与油膜扩展模型相结合的方式, 用拉格朗日方法追踪每个带有一定油量的油粒子的轨迹, 针对每一个油粒子则使用油膜扩展理论计算其油膜扩展过程。该模型可实现对溢油油污上升及水平输运过程、海表面油污浓度的预报, 通过三组理想试验和2012年的海上溢油实验数据, 对模型的各项功能、稳定性及模型精度进行了对比验证, 结果较好, 模型可实现对渤海海域海底或水下发生溢油的数值模拟。该模型解决了以往二维溢油模型在模拟钻井平台及海底输油管道泄漏等溢油事故方面的不足, 可更好地为溢油灾害对海洋环境影响的估计提供有效参考信息。

关键词: 渤海; 三维; 溢油; 拉格朗日追踪

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)02-0110-08
doi: 10.11759/hyhx20141011019

20世纪60年代, 欧美等国家已开始对海上溢油进行预测, 并发展了许多溢油模式^[1]。我国对海上溢油的研究始于20世纪80年代, 许多学者曾对溢油模式进行了研究, 也取得较大进展^[2]。而我国渤海海域因其油气平台、海底管线众多, 已经成为我国石油经济开发的重点区域, 因而也成为国内海上溢油数值模拟的重点关注海域。溢油在海面上的运动及变化是一个极其复杂的过程, 受其物理、化学和生物等过程的影响, 且与石油的性质、海洋水动力环境及海洋气象环境等密切相关。这些过程包括漂移、扩散、蒸发、溶解、乳化和沉降以及浮油和海岸线的相互作用等, 其中漂移、扩散等动力学过程是国内外溢油研究的重点。

油膜扩展模式主要采用质心轨迹结合油膜扩展经验公式的方法, 即通过扩展经验公式给出溢油面积的等效圆(或椭圆), 然后迭加到溢油质心漂移位置之上^[3]。对于油膜质心的漂移轨迹的确定, 国内外学者普遍采用欧拉-拉格朗日追踪法, 并考虑风的影响, 油膜质心的漂移速度为表面海流和风所引起的流速的矢量之和^[4]。在溢油扩展模型研究方面, Fay^[5]提出了油膜的三阶段扩展理论, 认为油膜呈圆形扩展。Fay理论对于研究溢油扩展模型起到了很重要的推动作用, 但因其基于静水假定, 没有考虑风和流的影响, 仅适用于静水或恒流条件下的油膜扩

展。Mackay^[6]在Fay的第二阶段公式中加上风的影响并分别建立了厚油膜和薄油膜扩展的计算公式; Lehr, Fraga和Belen^[7]对Fay理论进行了修正, 建立了油膜将在风向上被拉长的椭圆模型, 赵文谦和武周虎^[8]同时考虑了油膜扩展和各向异性扩散作用, 以及油膜边缘消失的过程, 建立了扩散范围的数学模型。还有学者将海上已知的溢油量或者根据环境影响评估得出浓度作为源项加入动力学方程, 然后数值求解对流扩散方程^[9-10]。油粒子方法最早是Johansen和Elliot等提出的^[11-12], 该方法通过把溢油分成许多离散的小油滴来模拟溢油在海水中的漂移扩散过程, 可以直接模拟出扩散方程的实际物理现象。该方法正确解释了溢油在重力扩展停止以后的扩散现象物理学问题, 突破了采用对流扩散方程模拟溢油的传统方法, 可以更确切地表述溢油对各种海洋动力因素的响应过程, 不仅避免了对流扩散模

收稿日期: 2014-10-11; 修回日期: 2014-12-08

基金项目: 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金(2011004); 国家海洋局海洋溢油鉴别与损害评估技术重点实验室开放基金(201210); 海洋公益性科研专项经费项目(201205012-4); 海洋公益性科研专项经费项目(201305026-4)

作者简介: 黄娟(1975-), 女, 山东青岛人, 高级工程师, 主要从事海洋环境预报研究及防灾减灾工作, E-mail: huangjuan@bhj.gov.cn; 赵鹏, 通信作者, E-mail: zhaopeng@bhj.gov.cn

式本身带来的数值扩散问题,同时还可以正确重现海上油膜的破碎分离现象,能够准确地描述溢油的真实扩散过程。因此,它在溢油模拟发展过程中具有划时代的意义,也成为了当今流行的溢油模型,国内外很多学者对其进行了应用和发展,并得到了较理想的结果^[13-16]。但油粒子模型也有其自身的缺点,仅通过水平扩散的方式来模拟油膜自身扩展过程,会出现油粒子扩散速度响应过慢的现象,致使溢油量对扩散面积的影响不直观。目前,国际上较为认可的 SIMAP(Integrated Oil Spill Impact Model System)溢油漂移预测与评估模型是采用将油粒子模式与油膜扩展模型相结合的方式,即在对油粒子的空间位置信息进行追踪时,用拉格朗日方法追踪每个带有一定油量的粒子,但在计算油污扩展时,是针对每一个油粒子使用油膜扩展理论进行计算^[17]。这样不仅可以确切地描述溢油对海洋动力要素的响应过程,还可以更好地解决纯油粒子模型中扩散面积对溢油量响应不明显的缺点。本文采用油粒子模式与油膜扩展模型相结合的方式,使用拉格朗日方法追踪油粒子位置,通过 Fay 等的油膜扩展理论来计算油粒子的浓度分布,从而为溢油灾害对海洋环境影响的估计提供有效的参考信息。

1 数值模式建立

在动力学方面,本模型主要考虑了油粒子受风、流和浮力的作用导致的三维运动、次网格尺度扩散等过程,并通过拉格朗日方法追踪油粒子位置;非动力学过程主要考虑了蒸发及乳化两个主要风化过程,以及由这两个过程引起的密度和黏性变化。下文将对本模型所考虑的物理化学过程作简要介绍。

1.1 动力学过程

油粒子受动力学过程引起的运动,主要是指由于水体的平流运动和湍流运动引起的粒子运动。平流运动是指每个粒子在特定的流场条件下发生的平移,适宜用拉格朗日法模拟,湍流运动是指由于小尺度湍流引起的扩散运动,适宜用随机走动法模拟。湍流可视为随机流场,而每个油粒子在湍流场中的运动则类似于分子的布朗运动。从而形成了整团油污在水体中的扩散过程。这种方法实际上是确定性方法和随机方法的结合,即采用确定性方法模拟平流运动,采用随机性方法模拟扩散过程。

动力学过程主要影响油粒子的输运过程,可分

成三个主要部分:平流过程、垂向运动和扩展过程,溢油在每一瞬时的三维空间位置和分布状态则是各种运动过程的综合作用结果。

1.1.1 水平运动

水平漂移过程是油膜在外界动力场(如风应力,油水界面切应力等)驱动下的水平运动。溢油在风和海流等作用下往往是椭圆形漂移运动。油水界面切应力是与海水运动密切相关的。海面某水体微团,其运动速度由三部分组成(如果不计它们的相互作用的话):一是非风生流,二是风生流,三是风浪余流。前二者是远大于油膜尺度的驱动力(如引潮力,密度场压力梯度和风场海面切应力等)作用下形成的海水运动。实际上它并不因为油膜的存在而有较大的变化。第三类风浪余流则不同,按 Stokes 理论,风浪余流的量级可以达到风速的 2×10^{-2} 量级。

油类漂移的运动速度 U_{oil} 可视为表层海流流速 $U_{current}$ 和风速 U_{wind} 的百分率 α 的矢量和:

$$U_{oil} = U_{current} + \alpha U_{wind}$$

实验表明,在风的作用下,油膜漂移速度的增加量为风速的 2%~3%,所以 α 取 2%~3%。

油粒子受次网格尺度的混合过程引进的扩散运动,可以通过随机走动算法来模拟。考虑随机走动 S_h 后,油粒子在 Δt 时间内的移动距离为:

$$X_{n+1} = X_n + U_{oil} \Delta t + S_h$$

$$S_h = a \sqrt{2k_h \Delta t}$$

其中, a 为 0 到 1 之间的正态随机数, k_h 是水平扩散系数。

1.1.2 垂向运动

油粒子自海底管道溢出后在垂直方向上的运动过程,主要表现为:油粒子在水体内部受水体垂体运动及油滴本身浮力作用导致的运动过程。垂向扩散过程主要由水体中水质点的垂向速度决定,浮力作用下的上浮过程则主要由水体密度、油污密度、油粒子大小及水动力黏性系数决定,其上升的公式为:

$$W_{oil} = W_{current} + W_i$$

其中, $W_{current}$ 为垂向流速, W_i 为油粒子受浮力作用导致的垂向上升速度^[19]:

$$W_i = d_i^2 g (1 - \rho_o / \rho_w) / 18 \nu_w$$

式中, d_i 为油粒子直径, g 为重力加速度, ρ_o 为油污密度, ρ_w 为水体密度, ν_w 为水动力黏性系数。

与水平方向的计算方法类似,油粒子在垂向上 Δt 时间内的移动距离为:

$$Z_{n+1} = Z_n + W_{oil} \Delta t + S_z$$

$$S_z = b \sqrt{2k_z \Delta t}$$

其中, b 为 0 到 1 之间的正态随机数, k_z 是垂向扩散系数。

1.1.3 扩展过程

对实际溢油事件的观察发现, 在溢油的最初数小时里, 扩展过程占支配地位。这种支配地位虽然随时间变弱, 但即使在若干天之后, 它仍然起着重要的作用。Fay^[5] 首先研究了油膜在平静海面上的扩展过程。Fay 认为扩展过程主要受惯性力、重力、黏性力和表面张力控制。它们两两平衡, 形成该过程的三个阶段: 惯性-重力阶段; 重力-黏性阶段和黏性-表面张力阶段。石油溢出到海面上, 受到重力、表面张力、惯性力和黏滞共同作用, 使油与海水产生了不平衡的压力分布面向四周扩散。在扩散的初始阶段重力占优势, 即油膜受重力和惯性力所控制, 称惯性扩散。其次溢油经过一定时间后, 油层厚度减小, 该阶段的油膜势能和海水的黏性抵抗力为主导因素, 即重力黏滞力状态, 称黏性扩散。第三阶段随着油膜扩散范围增大, 势能进一步减小, 表面张力为主要影响因素, 称表面张力扩散。

三个阶段油膜直径的计算公式分别为:

惯性扩展阶段:

$$D = 2k_1 (g\beta V t^2)^{1/4}$$

黏性扩展阶段:

$$D = 2k_2 (g\beta V^2 / \sqrt{\nu_w})^{1/6} t^{1/4}$$

表面张力扩展阶段:

$$D = 2k_3 (\sigma / \rho_w \sqrt{\nu_w})^{1/2} t^{1/4}$$

其中, D 为油膜直径; g 为重力加速度; V 为溢油体积; t 为时间; ρ_w 为海水的密度; $\beta = 1 - \rho_o / \rho_w$, 式中 ρ_o 为油的密度; ν_w 为水的运动黏滞系数; σ 为空气-水表面张力系数与油-空气表面张力系数以及油-水表面张力系数的差值; k_1 、 k_2 、 k_3 分别为惯性扩展阶段、黏性扩展阶段以及表面张力扩展阶段的经验系数。上述各阶段的分界时间可根据两相邻阶段扩展直径相等的条件来确定。

Fay 理论对于研究溢油扩展模型起到了很重要的推动作用, 但因其基于静水假定, 没有考虑风和流的影响, 仅适用于静水或恒流条件下的油膜扩展, 其计算结果存在一定的局限性。

1.2 非动力学过程

1.2.1 蒸发作用

蒸发是由于石油烃类从液态向气态的相变而造

成的油膜与空气之间的物质交换。溢油的组分、表面积及其物理特征、风速、海气温度、海况以及太阳辐射的强度等都影响蒸发的速率。低烃类组分有较高的饱和蒸发压, 因此有较高的蒸发速率。蒸发后溢油中的低沸点烃类迅速减少。实测表明, 含量占 0~50% 的低烃类油溢油后 24 h 内就会被蒸发掉。

目前溢油运动模拟中最为常用的蒸发模型是 Stiver&Mackay 模型^[18], 其对蒸发率 F_v 的计算可表示为:

$$F_v = \ln \left[1 + B' \left(\frac{T_G}{T} \right) \theta' \exp \left(A' - B' \frac{T_0}{T} \right) \right] \frac{T}{B' + T_G}$$

$$\theta' = \frac{k' A t}{V_0}$$

式中, $A' = 6.3$; $B' = 10.3$; T_G 为沸点曲线的梯度; T 为油的温度; T_0 为油在 $F_v=0$ 时的初始沸点温度; θ' 为蒸发系数; $k' = 2.5 \times 10^{-3} U_{wind}^{0.78}$; U_{wind} 为海面上 10 m 处的风速; A 为油膜面积; V_0 为溢油的初始体积, t 为时间。

1.2.2 乳化作用

乳化是一个油包水的过程。研究表明, 乳化发生的内在因素是原油的馏青烯中含有乳化剂, 当含量达到一定程度时, 即发生乳化现象。乳化形成毫米量级的油包水颗粒。海况能影响乳化剂的乳化速度, 但最终的乳化总量与海况无关, 而仅取决于乳化剂的含量。

这种乳化物具有较高的密度和黏性, 因而它可以影响溢油的扩散过程。并为溢油清除带来困难。轻质的易挥发的油很少形成乳化物, 重质燃料油或原油会形成大量的乳化物。当乳化颗粒与碎屑或生物残骸结合而重时, 则将沉降到海底。

一般用含水量 Y_w 来计算乳化程度^[6]:

$$Y_w = \frac{1}{K_B} \left(1 - e^{-K_A K_B (1 + U_{wind}) 2t} \right)$$

其中, Y_w 为乳化物的含水量(%); K_A 受风速的影响, 通常取 4.5×10^{-6} ; U_{wind} 为海面上 10 m 处的风速; $K_B = 1/Y_w^F = 1.25$, Y_w^F 为最终含水量, 通常取 0.8; t 为时间。

1.2.3 密度变化

乳化对油密度的影响表示为^[6]:

$$\rho_e = (1 - Y_w) \rho_0 + Y_w \rho_w$$

其中, ρ_e 为乳化后油的密度, ρ_0 为乳化前油的初始密度, ρ_w 为海水密度, Y_w 为乳化物含水量。

蒸发对油密度的影响表示为:

$$\rho = (0.6\rho_0 - 0.34)F_v + \rho_0$$

综合两者的影响, 油的密度表达为:

$$\rho = (1 - Y_w)[(0.6\rho_0 - 0.34)F_v + \rho_0] + Y_w\rho_w$$

1.2.4 黏性变化

在风化过程中黏性会增加, 主要是由于蒸发和乳化。此外黏性很大程度上与油面温度有关。

用 Hossain 和 Mackay^[19]提出的方程在实际温度和水含量下计算油面黏性。

$$\eta = \eta^{oil} \exp\left(\frac{2.5Y_w}{1 - 0.654Y_w}\right)$$

其中, η 为乳化后油的运动黏性系数, η^{oil} 为乳化前油的运动黏性系数, Y_w 为乳化物含水量。

蒸发也可以引起黏性的增加, 计算为:

$$\eta_0^{oil} = \eta_0^{oil} \exp(C_4 F_v)$$

η_0^{oil} 为蒸发前油的运动黏性系数, C_4 为油中的无量纲量; F_v 为油的蒸发率。

2 模型验证

本模型可用于模拟渤海石油平台海底渗漏或海底(或水体中)管线上孺孔溢油在水体中运移过程, 模拟范围为: 117.5°~122.9° E, 37.0°~41.1° N。溢油模型所使用的水动力场及气象强迫场均来自于国家海洋局北海预报中心业务化运行的水动力及气象模型^[20]。与大量溢油的情况不同, 本模型所考虑的海底渗漏及海底管线孺孔溢油的情况不会形成浮射流,

仅形成一连串上升的油滴, 在模型中将以携带一定油量的油粒子来刻画这些上升的油滴。

2.1 理想试验

为验证本模型可实现的功能, 共设计了三个理想情景来分别验证模型模拟油粒子的垂向运动过程以及点源、面源发生溢油的情况。

2.1.1 油粒子垂向运动

本节主要描述海面、水体中及海底某处发生溢油后, 用本溢油模型对油污在水体中的水平及垂向运动进行模拟, 模拟时间内水体中的海流和海面风均为偏东向, 图1是将所有水体中的粒子投影到经向截面的示意图。由图1可见, 当油粒子在特定深度释放后, 在浮力的作用下向上运动, 同时在流场的作用下发生水平运动, 当粒子上升至海表面后, 则主要在海面进行水平方向的运动; 本模型可实现海面及水下任意深度发生溢油事故时, 油粒子垂向运动的模拟。

2.1.2 点源模拟

本节模拟点源溢油情况下, 在海流和风的共同作用下, 油膜在海表面的扩散及运动过程, 本理想试验可用于模拟海上船只溢油的情形。由图 2 可见模型实现了溢油油污在初期迅速扩散, 而在后期缓慢扩展现象的数值模拟, 并且整个模拟得到的扩展区域可随潮流在海面漂移。从图 2 中可见, 在发生溢油初期, 油膜扩展较快, 而在后期油膜扩展进入第三阶段, 扩展速度明显降低, 这与前人研究成果相吻合^[6]。

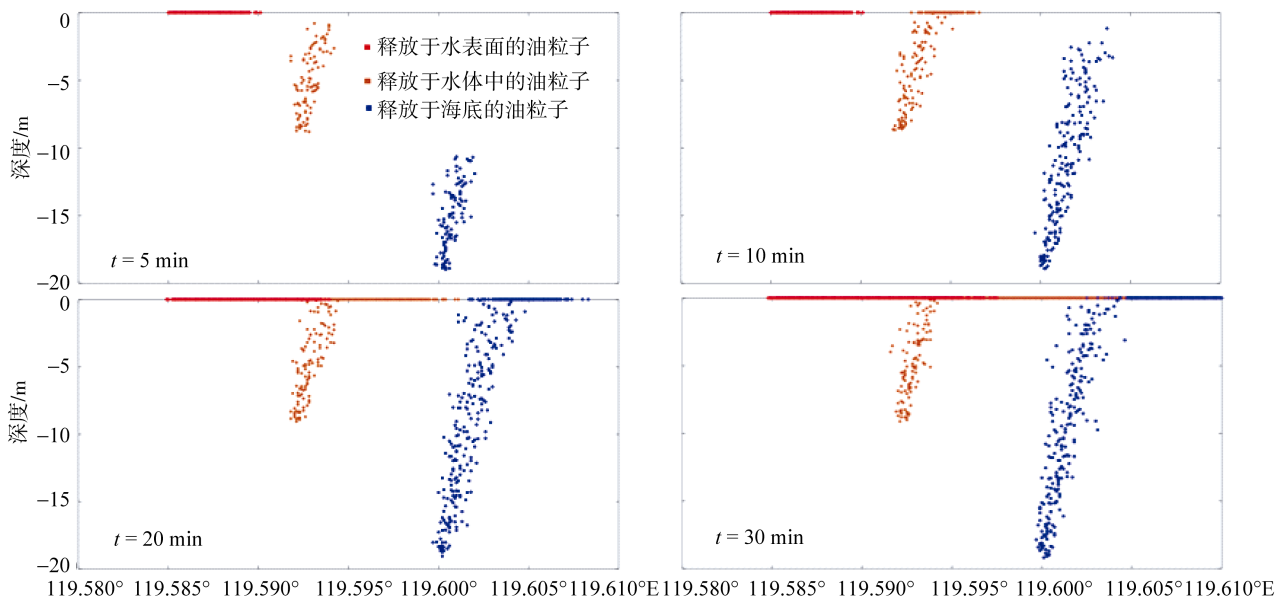


图1 溢油发生 0.5 h 内油粒子的垂向运动过程
Fig.1 Vertical movement of oil particles

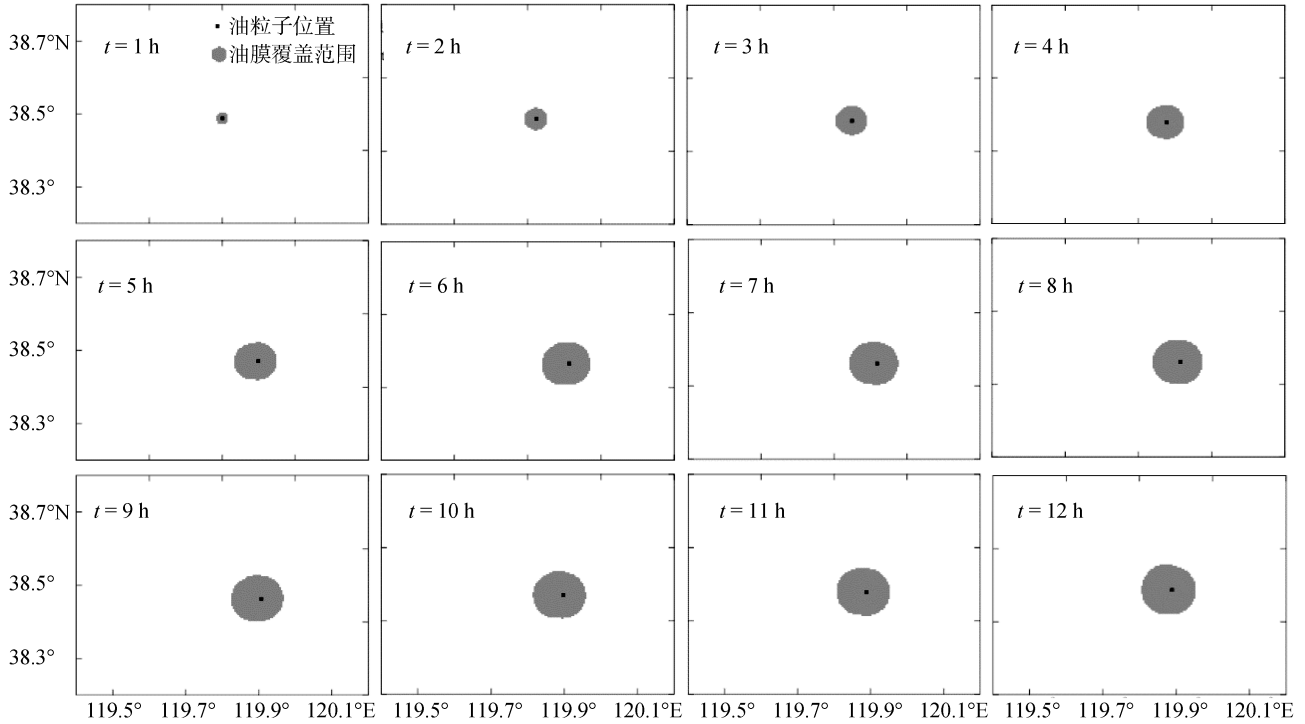


图2 点源溢油发生后油粒子的水平运动及油膜扩展过程
Fig.2 Horizontal movement and spread process of point source

2.1.3 面源模拟

该模型亦可模拟面源溢油情况下，在海流和风的共同作用下，油膜在海表面的扩散及运动过程，

本理想试验可用于模拟由卫星遥感、飞机航拍或海上船舶发现的海上溢油源的漂移预测情况。从图3中可以看出，灰色油膜覆盖的范围比单纯油粒子覆

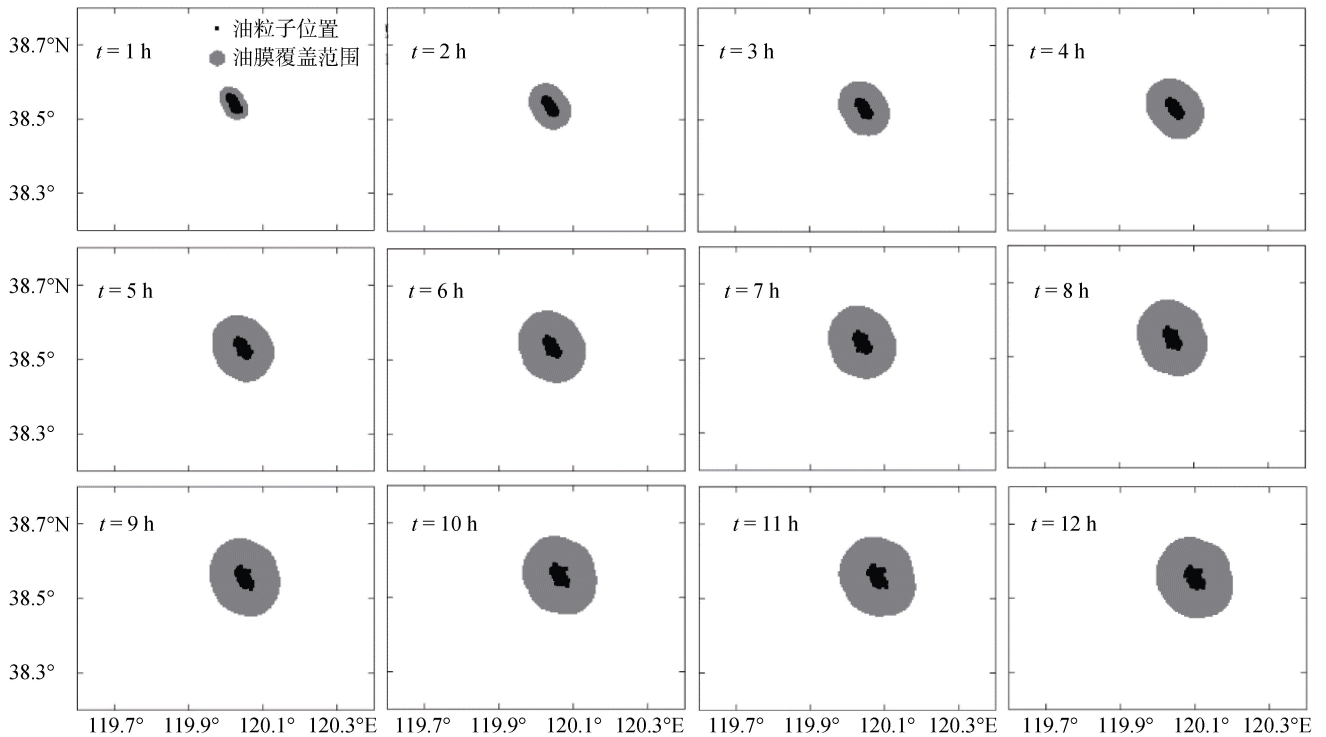


图3 面源溢油发生后油粒子的水平运动及油膜扩展过程
Fig.3 Horizontal movement and spread process of area source

盖的范围要大得多，这便是结合油粒子模型与油膜扩展模型的优势所在，可以更好地刻画油膜扩展的过程，也可以更好地实现油膜覆盖面积对溢油量的响应。

通过以上三组理想实验可知：本模型可实现模型计算海域任一位置水下或海底溢油的数值模拟，不仅可模拟油粒子的水平及垂向运动，还可模拟油污上升到水面后的扩展等过程。

2.2 案例验证

下文利用国家海洋局北海预报中心开展的一次海上溢油实验的观测结果对本模型的模拟结果进行验证。

2.2.1 实验简介

国家海洋局北海预报中心于 2012 年 4 月开展此次实验，主要通过使用示踪物的方式来进行海上溢

油追踪模拟实验，通过船只跟踪、GPS 定位与海监飞机航拍相结合的方式来获取示踪物的位置及分布信息，实验区域为渤海湾湾口海域。本次实验过程共使用三条船只、一架飞机。由 A 船定点定时定间隔进行油污抛放(共3次)，C 船负责跟踪第一团油污，海监飞机负责航拍溢油油污在海面的分布情况。

2.2.2 对比验证

图 4 为 16: 40~17: 40 海上示踪物实验的漂移模拟实验结果图。C 船在本次实验中，负责跟踪第一次抛放示踪物后形成的油膜。数值模拟试验设计参考海上实验真实情况设计，模式在 A 船位置(溢油点)间隔抛放 3 次 10 L 机油，抛放时间分别为 16: 40, 17: 00 和 17: 20。溢油漂移预测模块采用的风场来自现场实测海面风数据，海流采用渤海精细化海流预报模式结果。

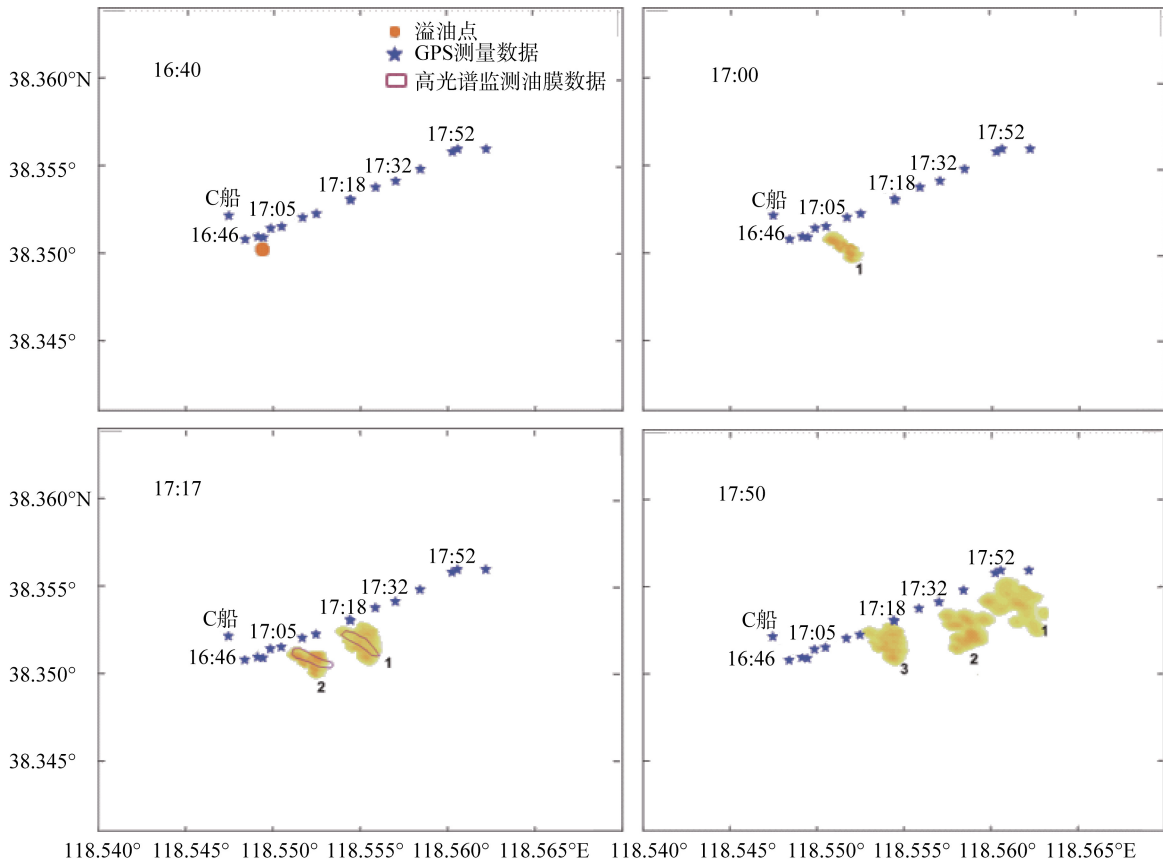


图 4 模型模拟结果与观测结果对比图

Fig.4 Comparison between model result and observation data

从图 4 中可知，溢油模式 16: 40 时抛放的机油形成的油膜 1，向东偏北方向漂移，油膜形状呈西北-东南向条带状。模拟至 17: 00 时，油膜位置与 C 船位

置基本吻合。至 17: 17 时，第二次抛放的机油形成的油膜 2，与油膜 1 平行排列，油膜 1 分布面积有所增大，且大于油膜 2，模拟结果在油膜位置、分布特征

等方面与监测结果非常接近,只是模拟的油膜范围略大。至 17:50 时,油膜 1 的模拟位置与 C 船 17:52 时的观测位置吻合。从图 4 中 3 块油膜的形状可以看出,油膜随时间不断扩散,面积持续增大,浓度逐渐降低。

实验结果表明,本模式能够较好的模拟本次海上示踪物实验的油膜漂移方向、漂移速度和油膜范围。

3 结论

为提升溢油模型对水下溢油的模拟能力,国家海洋局北海预报中心开发了一个三维溢油漂移预测模型,模型可实现对水下溢油三维运动过程的模拟,从而得到溢油油污的轨迹及浓度分布等信息。模型通过引入油粒子的概念来追踪海面溢油的运动轨迹,而在油膜扩展方面则对每个油粒子使用油膜扩展理论来计算,从而得到整团溢油油污在海面的分布情况。本文通过开展一系列的理想试验验证了模型的功能及其稳定性,并使用海上溢油实验数据对模型的精度进行验证,模拟结果与观测数据吻合较好。

参考文献:

- [1] Reed M, Johansen O, Brandvik P J, et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: over view of the state of the art[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1999, 5 (1): 3-16.
- [2] 李冰绯. 海上溢油的行为和归宿数学模型基本理论与建立方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [3] 王长海. 溢油漂移扩散计算模式初步研究[J]. 交通环保, 2000, 21 (2): 7-9.
- [4] 姜安刚, 王学昌, 孙长青, 等. 胶州湾海面溢油轨迹的数值模拟[J]. 黄渤海海洋, 2001, 19 (1): 1-8.
- [5] Fay J A. Oil on the sea[M]. New York: Plenum Press, 1969: 53-63.
- [6] Mackay D, Paterson S, Trudel K. A mathematical model of oil spill behavior[R]. Canada: Environment Canada, 1980.
- [7] Lehr W J, Cekirge H M, Fraga R J, et al. Empirical studies of the spreading of oil spills[J]. Oil and Petro Chemical Pollution, 1984, 2: 7-12.
- [8] 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.
- [9] 金梅兵. 近岸溢油的全动力预测方法研究[J]. 海洋环境科学, 1997, 16 (1): 30-36.
- [10] 尹宝树, 刘浩. 海面溢油对流扩散的反向计算[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(2): 16-19.
- [11] Johansen O. The Halten Bank experiment-Observations and model studies of drift and fate of oil in the marine environment[C]. Environment Canada. Proceedings, 11th Arctic Marine Oil Spill Program Technical Seminar. Ottawa: Environment Canada, 1984: 18-36.
- [12] Elliot A J. Oceanic processes and NW European shelf databases[J]. Marine Pollution Bulletin, 1991, 22 (11): 548-553.
- [13] 张存智, 奚振兴, 韩康, 等. 三维溢油动态预报模型[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(1): 22-29.
- [14] Elhakeem A A, Elshorbagy W, Chebbi R. Oil spill simulation and validation in the Arabian (Persian) Gulf with special reference to the UAE coast[J]. Water Air Soil Pollution, 2007, 184: 243-254.
- [15] Chen Haizhou, Li Daming, Li Xiao. Mathematical modeling of oil spill on the sea and application of the modeling in Daya bay[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19 (3): 282-291.
- [16] Wang Shoudong, Shen Yongming, Guo Yakun, et al. Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spill in seas[J]. Ocean Engineering, 2008, 35: 503-510.
- [17] French D P. Oil spill impact modeling: development and validation[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2004, 23(10): 2441-2456.
- [18] Stiver W, Mackay D. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures[J]. Environmental Science & Technology, 1984, 18(11): 834-840.
- [19] Hossain K, Mackay D. Demoussifier-a new chemical for oil spill countermeasures[J]. Spill Technology Newsletter, 1980, 5(6), 154-156.
- [20] 黄娟, 曹雅静, 高松, 等. 渤海海上溢油漂移扩散数值模拟研究[J]. 海洋科学, 2014, 38(9): 1-8.

Development and application of a three-dimensional oil spill model for the Bohai Sea

HUANG Juan^{1,2}, CAO Cong-hua^{1,2}, ZHAO Peng^{1,2}, GAO Song^{1,2}

(1. North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266061, China)

Received: Oct., 11, 2014

Key words: the Bohai Sea; three-dimensional; oil spill; Lagrange tracking

Abstract: This paper presents the development and application of a three-dimensional oil spill model for predicting the movement and fate of an oil slick in the Bohai Sea. In the model, the oil slick is divided into a number of small particles, the trajectory of the particles can be tracked by Lagrange tracking method and the spreading process of each particle is calculated by Fay's theory. This model is capable of predicting the vertical and horizontal movement of surface oil slick and the oil particle concentration distribution on the sea surface. Compared with the scenarios and observations, the numerical results of the oil spill model show good conformity.

(本文编辑: 刘珊珊)