

# “深水地平线”事故深海溢油输移扩散的数值模拟

廖国祥<sup>1,2</sup>

(1.国家海洋环境监测中心 大连 116023;2.国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室 大连 116023)

**摘要:**为深入认识深海溢油输运过程和提高深海溢油事故的应急响应能力,文章以2010年墨西哥湾“深水地平线”事故为例,采用深海溢油输移扩散模型,以三维流场和海面风场为主要环境动力,数值模拟溢油深海泄漏后的浮射扩散、水体中输移扩散以及在风场和流场共同作用下在海面上输移扩散的全过程,同时模拟实施海底消油剂喷注处理措施后溢油输移轨迹和扩散范围的变化。研究表明:数值模拟结果与相关报道的悬浮油带实际观测结果以及美国国家海洋与大气管理局的海水异常遥感监测结果总体相符,可为更加全面和精细的深海溢油输移扩散数值模拟研究奠定良好的基础。

**关键词:**深海溢油;输移扩散;数值模拟;悬浮油带;海底消油剂处理

中图分类号:X55;P76

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2022)04-0089-08

## Numerical Simulation of the Transport and Diffusion of Spilled Oil Released from ‘Deepwater Horizon’ Accident in the Gulf of Mexico

LIAO Guoxiang<sup>1,2</sup>

(1.National Marine Environment Monitoring Center,Dalian 116023,China;

2.State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem,Dalian 116023,China)

**Abstract:** To better understand the processes of spilled oil being transported in deepwater and increase the emergency response capacity for deepwater oil spill accidents, the Deepwater Horizon oil spill accident happened in the Gulf of Mexico was selected as a case study. Using the environmental data of three-dimensional current fields and sea surface wind fields as model input, an integrated deepwater oil spill trajectory and fate model was applied to simulate the transport and diffusion of spilled oil in marine environment, including the buoyant jets initially released from deep water and the following passive transport of both the oil droplets in water column and the oil slicks on sea surface. In addition, the application of subsea dispersant injection treatment and the resulting changes of trajectories of oil droplets and pollution extents were simulated as well. The numerical simulation results were generally in good agreement with the field monitoring data of suspended oil plume in deep water environment and the remote sensing monitoring data of seawater anomalies on sea surface, which were reported in literature or published by NOAA of United

收稿日期:2021-06-23;修订日期:2022-04-09

基金项目:国家自然科学基金项目(42076215、41306099);国家重点研发计划项目(2018YFD0900606)。

作者简介:廖国祥,正高级工程师,博士,研究方向为海洋溢油数值模拟和风险评估、海洋自然保护地和滨海湿地监测评估

States of America. The results had laid a good foundation for more comprehensive and fine numerical simulations of deepwater oil spill accidents.

**Keywords:** Deepwater oil spill, Transport and diffusion, Numerical simulation, Suspended oil plume, Subsea dispersant treatment

## 0 引言

2010年4月20日晚,位于墨西哥湾的“深水地平线”钻井平台发生爆炸并引起大火,该平台于2 d后沉没并在1 500 m水深的深海泄漏原油。该事故共持续87 d,至7月15日油井被成功封顶后才停止溢油,约有490万桶(约78万 $m^3$ )原油泄漏进入墨西哥湾<sup>[1]</sup>,对海洋生态环境造成巨大损害。随着全球深海油气资源勘探开发规模的不断扩大,以墨西哥湾“深水地平线”事故为例开展深海溢油输移扩散的理论方法和数值模拟技术研究,对于加深对深海溢油输运过程的科学认识以及提高深海溢油事故的风险防范和应急响应能力具有重要的现实意义。

在“深水地平线”事故发生初期,美国政府和相关科研机构重点关注海面溢油输移扩散问题,主要通过卫星和航空遥感监测等方式获取海面溢油的时空分布变化情况,并结合墨西哥湾海洋环流动力模型预测未来2~3 d的海面溢油输移扩散趋势。其中,美国国家海洋与大气管理局(NOAA)每天发布海面溢油输移扩散范围的预测结果,此外事故期间共有6种海洋环流动力模型用于支持海面溢油输移扩散预测<sup>[2]</sup>。由于溢油量巨大,为减少海面溢油对近岸敏感资源的损害,经过数天试验后,美国政府批准英国石油公司(BP)自2010年5月10日起实施海底消油剂喷注处理措施<sup>[1]</sup>。

无论是事故发生期间还是事故结束后,2010年6月现场调查发现的深海悬浮油带均受到高度关注,众多学者积极通过数值模拟研究深海悬浮油带的形成原因。Adcroft等<sup>[3]</sup>首次报道溶解态石油烃在水下输移的数值模拟研究结果;Socolofsky等<sup>[4]</sup>根据多相流理论研究事故发生后深海悬浮油带的形成机制;North等<sup>[5]</sup>模拟粒径小于300  $\mu m$ 的油滴在墨西哥湾的水下输移轨迹,并与深海悬浮油带的分布进行比较;Paris等<sup>[6]</sup>通过数值模拟研究海洋环

流和消油剂对海底溢油输移的影响。我国学者从不同领域和不同角度对“深水地平线”事故进行大量研究分析,但数值模拟的研究报道较少。张敏慧<sup>[7]</sup>基于卫星遥感监测数据和NOAA的GNOME模型模拟墨西哥湾的溢油轨迹;杨毅等<sup>[8]</sup>基于GNOME模型和ADIOS模型开展溢油污染数值模拟;韩树宗等<sup>[9]</sup>应用GNOME模型模拟2010年5月8—11日墨西哥湾的溢油输移扩散情况。

与国外研究相比,国内研究主要集中在“深水地平线”事故结束后短期(数天)内的海面溢油输移扩散模拟预测,尚未对水下尤其是深海溢油或溢油在海洋环境中的长时间和全过程输移扩散进行模拟研究。基于此,本研究以“深水地平线”事故为例,通过数值模拟研究溢油从深海到浅海乃至海面的输移扩散过程,并研究海底消油剂喷注处理后深海悬浮油带的时空分布特征,以期加深对复杂海洋环境中溢油输移扩散规律的科学认识。

## 1 模型与方法

### 1.1 溢油输移扩散模型

本研究采用笔者建立的深海溢油输移扩散模型<sup>[10-12]</sup>,数值模拟深海事故溢油在海洋环境中的输移扩散过程(包括近区浮射扩散和远区输移扩散),同时模拟预测海底消油剂喷注处理后溢油的运动轨迹<sup>[13]</sup>。

#### 1.1.1 近区浮射扩散模拟

采用基于拉格朗日积分方法的水下溢油浮射流子模型,数值模拟深海事故溢油的水下近区浮射扩散过程。将沿轨迹中心线的溢油视为一系列互不影响的控制单元体,根据质量守恒、动量守恒和能量守恒等控制方程计算确定每个控制单元体在水流环境中的运动情况,综合所有控制单元体的运动情况即可获得溢油输移轨迹。本研究仅给出数值模型的质量守恒方程和动量守恒方程,相关详细介绍可参见文献[10]和文献[12]。

(1)质量守恒方程。溢油在水下输移的过程中,周围水体的卷吸、湍流分散和溶解等作用引起控制单元体质量的动态变化:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_a Q_e - \sum_i \frac{dm_i}{dt} - \frac{dm_d}{dt} \quad (1)$$

式中: $dm/dt$  表示控制单元体的质量变化; $\rho_a$  表示环境水体的密度; $Q_e$  表示水体卷吸作用引起的水流体积通量; $dm_i/dt$  表示单位时间内水体溶解作用引起的溢油质量损失; $dm_d/dt$  表示单位时间内水体湍流分散作用引起的溢油质量损失。

(2)动量守恒方程。控制单元体在水流环境中的运动满足动量守恒定律:

$$\frac{d(m\vec{V})}{dt} = \vec{V}_a \frac{dm}{dt} + m \frac{\Delta\rho}{\rho} g \vec{k} - \rho 2bhC_D (|\vec{V}| - V_a')^2 \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} \quad (2)$$

式中: $d(m\vec{V})/dt$  表示控制单元体的动量变化; $\vec{V}$  表示控制单元体的输移速度矢量; $\vec{V}_a$  表示水流的速度矢量; $m$  表示控制单元体的质量; $\rho$  和  $\Delta\rho$  分别表示控制单元体的密度以及环境水体与控制单元体的密度差,即  $\Delta\rho = \rho_a - \rho$ ;  $g$  表示重力加速度; $\vec{k}$  表示垂直方向( $z$ )的单位矢量; $b$  和  $h$  分别表示控制单元体的半径和厚度; $C_D$  表示拖曳系数; $V_a'$  表示水平方向( $x$ - $y$ )的投影。

### 1.1.1.2 近区转变为远区的计算

当溢油浮升至一定高度或受到横向水流的影响后,将由浮射扩散阶段转变为输移扩散阶段。本研究采用油滴粒径平均值对应的浮升速度作为判断溢油浮射扩散阶段结束的依据,即当溢油浮射流控制单元体的垂向速度小于油滴平均浮升速度时,模型认为溢油进入远区输移扩散阶段。

### 1.1.1.3 远区输移扩散模拟

溢油进入远区后(包括水体中和海面上),主要在海流和风等环境动力作用下输移扩散。模型主要采用油粒子追踪法模拟计算每个油粒子的运动轨迹:

$$X_N = X_O + (U_C + f \cdot D \cdot U_w) \cdot \Delta t + R \sqrt{6k_h \Delta t} \quad (3)$$

式中: $X_N$  和  $X_O$  分别表示单个油粒子在当前时刻和上一时刻的位置; $U_C$  表示海流的流速; $f$  表示风的拖曳系数,当油粒子在海面上和水中时分别取值为 0.03 和 0; $D$  表示考虑风偏效应的变换矩阵; $U_w$  表示距海面 10 m 高处的风速; $\Delta t$  表示时间步长; $R$  表示服从  $[-1, 1]$  正态分布的随机数; $k_h$  表示水平方向的湍流分散系数。

## 1.2 环境动力数据

本研究采用美国夏威夷大学公开发布的海岸线数据 (<http://www.soest.hawaii.edu/wessel/gshhg/>) 绘制底图。所有时刻均采用协调世界时(UTC)。

### 1.2.1 三维流场

采用美国 HYCOM 模型官方网站 (<http://www.hycom.org>) 提供的墨西哥湾区域海洋环流模型(GOM HYCOM)的再预报分析数据。模型生成的三维流场数据的时间分辨率为 1 h,水平方向的空间分辨率为  $1/25^\circ (0.04^\circ)$ ,垂直方向将 0 ~ 5 000 m 深度划分为 36 层。为满足“深水地平线”事故 87 d 输移扩散过程数值模拟的需求,从上述官方网站下载 2010 年 4 月 20 日至 7 月 31 日的流场数据,并提取不同水深的流速和流向数据(图 1)。

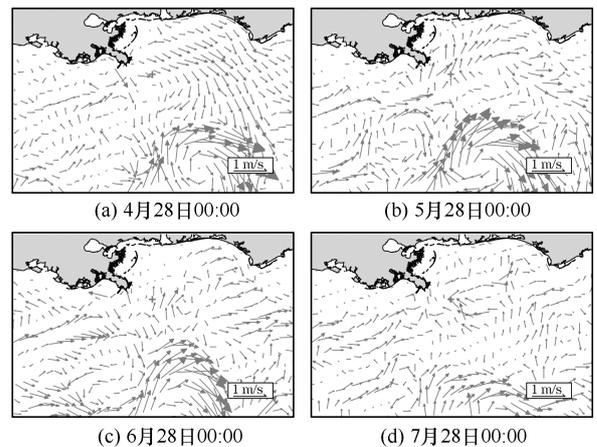


图 1 “深水地平线”事故附近海域 4 个时刻的表层流场

### 1.2.2 海面风场

采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的北美区域大气预报模型的再分析风场数据。模型生成的海面风场数据的时间分辨率为 1 h,水平方向的空间分辨率为  $0.30^\circ$ 。为满足“深水地平线”事故

87 d 输移扩散过程数值模拟的需求,从 NCEP 官方网站 (<https://www.emc.ncep.noaa.gov>) 下载 2010 年 4 月 20 日至 7 月 31 日的风场数据,并提取距海面 10 m 高处的风速和风向数据(图 2)。

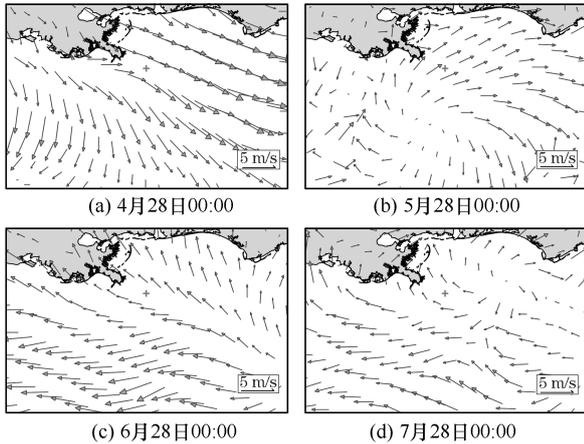


图 2 “深水地平线”事故附近海域 4 个时刻的海面风场

### 1.3 数值模拟

考虑到深海溢油的复杂性(如实施海底消油剂喷注处理等应急措施),现有数值模拟研究大多简化溢油事故的模拟参数,如设置固定的油滴粒径以及仅模拟水体中的输移过程或海面上的短期输移扩散过程<sup>[2,5-6]</sup>。与现有研究的简化数值模拟相比,本研究尝试 2 个方面的改进。

(1)对溢油从水深 1 522 m 处泄漏进入水体后经历的水下近区浮射扩散、水体中远区输移扩散和海面上远区输移扩散的全过程进行数值模拟。参考相关文献报道的“深水地平线”事故的溢油信息设定数值模拟参数:假设溢油从 2010 年 4 月 22 日开始至 7 月 15 日结束,溢油仅在 1 个地点泄漏(28.738°N、88.366°W)<sup>[6]</sup>且以均匀速度泄漏(0.088 m<sup>3</sup>/s),溢油密度为 854.8 kg/m<sup>3</sup><sup>[4]</sup>,泄漏喷口直径为 0.5 m<sup>[14]</sup>。

(2)对 2010 年 5 月实施海底消油剂喷注处理措施前后油滴粒径的变化进行数值模拟。据报道,美国政府在 2010 年 5 月 10 日正式批准实施海底消油剂喷注处理措施数天前就已开展相关试验,因此假设自 2010 年 5 月 5 日起开始实施海底消油剂喷注处理措施。相关研究认为溢油事故后深海中存在的微小粒径油滴主要是海底消油剂分散形成的,未

经海底消油剂喷注处理的油滴粒径可能为 800~10 000 μm<sup>[14-16]</sup>。Li 等<sup>[15]</sup>通过模型估算未经海底消油剂喷注处理的油滴体积中值粒径为 3 321 μm,而完全经海底消油剂喷注处理的油滴体积中值粒径为 173 μm;通过比较模型估算结果和水下环境观测数据,认为剂油比为 1:40 且 22% 的溢油经海底消油剂分散处理时比较符合事故实际情况。因此,本研究采用 2010 年 6 月的水下环境观测数据(图 3)<sup>[17]</sup>以及海底消油剂喷注处理前后的油滴粒径分布数据(图 4)<sup>[15]</sup>作为数值模拟参数。

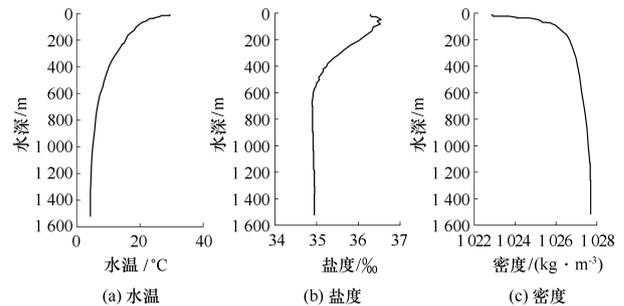


图 3 2010 年 6 月“深水地平线”事故附近海域的水下环境

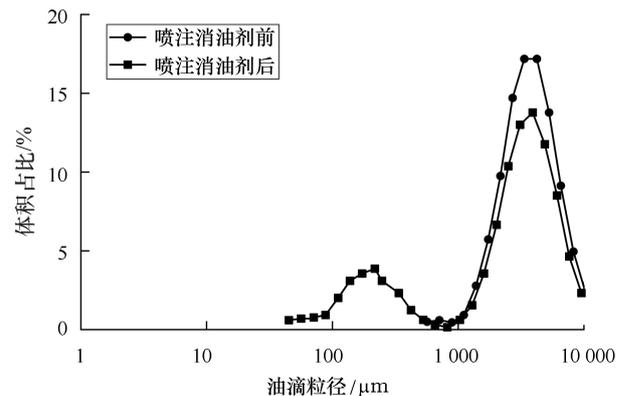


图 4 海底消油剂喷注处理前后的油滴粒径分布曲线

基于上述参数,应用深海溢油输移扩散模型和可视化软件 SIMPACT<sup>[11]</sup>进行数值模拟计算,获得“深水地平线”事故后溢油在水体中和海面上动态时空分布的数值模拟结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 溢油输移扩散的模拟结果

“深水地平线”事故附近海域 4 个时刻和不同水深的溢油输移扩散数值模拟结果如图 5 至图 8 所示。

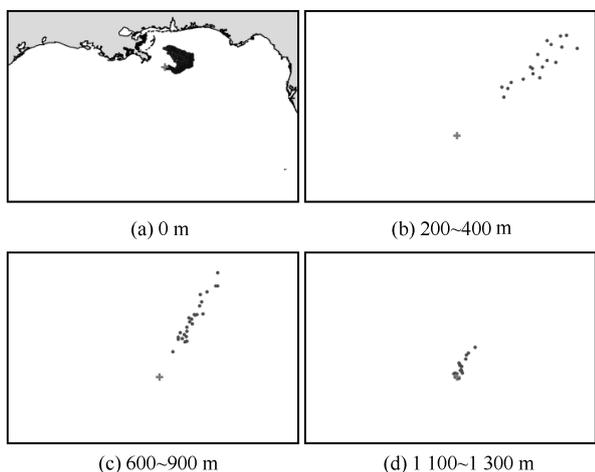


图 5 4 月 28 日 00:00 溢油输移扩散数值模拟结果

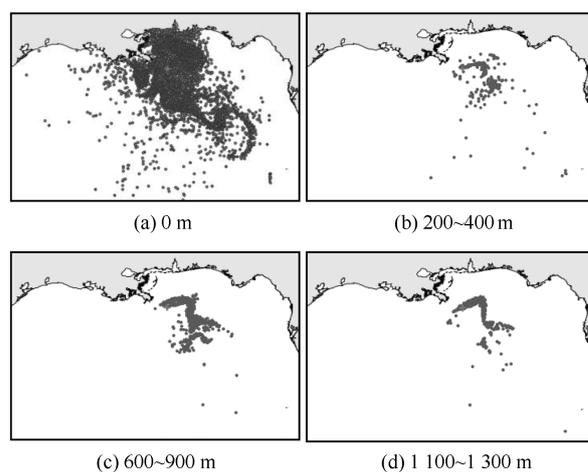


图 8 7 月 28 日 00:00 溢油输移扩散数值模拟结果

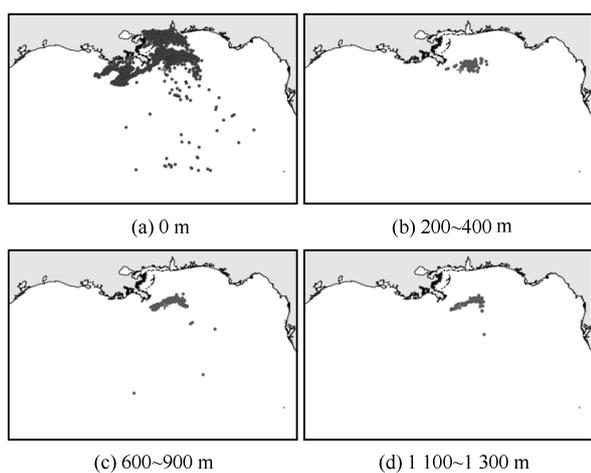


图 6 5 月 28 日 00:00 溢油输移扩散数值模拟结果

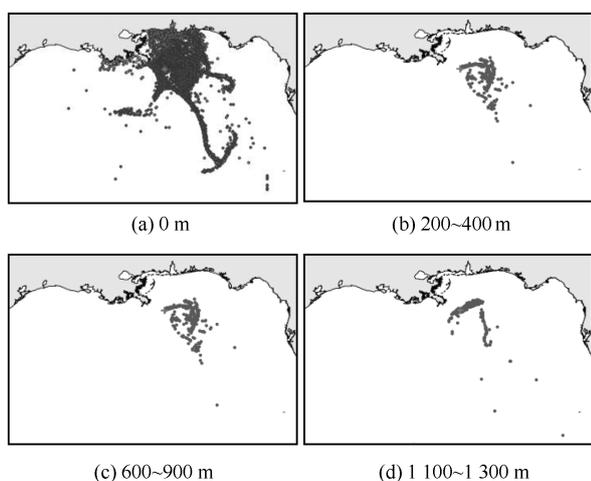


图 7 6 月 28 日 00:00 溢油输移扩散数值模拟结果

数值模拟结果显示,大量油滴自井口喷出进入水体后经历水下近区浮射扩散、水体中远区输移扩散和海面上远区输移扩散的运动过程。由于墨西哥湾不同水深的流速和流向会随时间发生变化,位于不同水深的油滴在水平方向的运动轨迹存在显著差异。不同粒径的油滴在水体中水平输移扩散的同时逐步浮升至海面上,其中粒径较大的油滴浮升至海面上后在重力作用下扩展为油膜,之后在表层流场和海面风场的共同作用下输移扩散。对比溢油在海面上和水体中的数值模拟结果可知,油滴在水体中的输移动力主要是海流,而海面上的油膜在海流和风的共同作用下输移距离更远且扩散范围更大。值得注意的是,在风和海流的共同作用下,事故期间海面上的溢油主要造成墨西哥湾北侧和西北侧海岸线的污染。

### 2.2 深海悬浮油带的模拟验证

在 2010 年 5 月 5 日实施海底消油剂喷注处理措施后,海底溢油的分散情况及其去向受到广泛关注。Camilli 等<sup>[17]</sup>报道在 2010 年 6 月 19—28 日的航次中观测到 1 100~1 300 m 的深海中存在向井口 SW 方向延伸的长约 35 km、宽约 2 km、厚约 200 m 的悬浮油带;Reddy 等<sup>[18]</sup>分析悬浮油带的组分,认为主要是 C<sub>1</sub>~C<sub>3</sub> 烃类和大比例水溶性芳烃被限制在深海环境中;Li 等<sup>[15]</sup>报道无人潜航器在 700~1 100 m 水深处发现 70~250 μm 的小粒径油滴,并认为 1 200 m 以深的深海环境中可能存在粒

径小于  $100\ \mu\text{m}$  的油滴。

海底消油剂喷注处理前后溢油输移扩散的对比如图 9 所示。

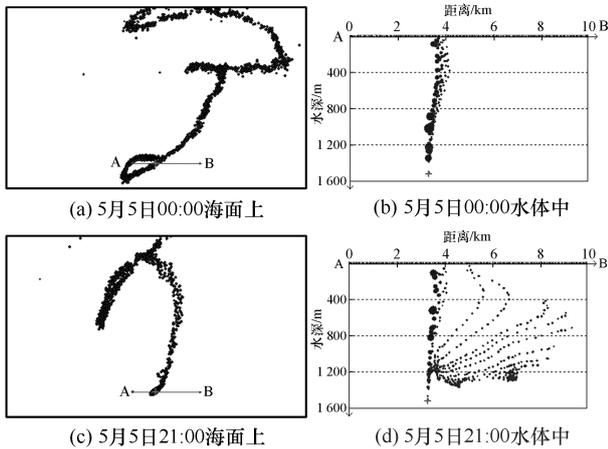


图 9 海底消油剂喷注处理前后溢油输移扩散的对比

模拟结果显示,溢油从  $1\ 522\ \text{m}$  浮升至  $1\ 100\sim 1\ 300\ \text{m}$  时受到横向水流的影响,由近区浮射扩散阶段转变为远区输移扩散阶段。其中,大粒径油滴快速向海面浮升,而小粒径油滴则长时间停留在水体中或缓慢浮升。在海底消油剂喷注前,油滴粒径总体较大( $0.8\sim 10.0\ \text{mm}$ ),且在水体中的浮升速度较快;在海底消油剂喷注后,约有 22% 的油滴被分散,油滴粒径总体变小且粒径小于  $300\ \mu\text{m}$  的油滴增加,其中粒径小于  $70\ \mu\text{m}$  (尤其是小于  $30\ \mu\text{m}$ ) 的油滴浮升速度较慢,即形成悬浮油带。

2010年6月25日00:00位于  $1\ 100\sim 1\ 300\ \text{m}$  水深悬浮油带的数值模拟结果与 Camilli 等<sup>[17]</sup>于6月19—28日在井口 SW 方向观测到的悬浮油带基本吻合,表明本研究的数值模拟结果与实际观测结果符合较好(图 10)。

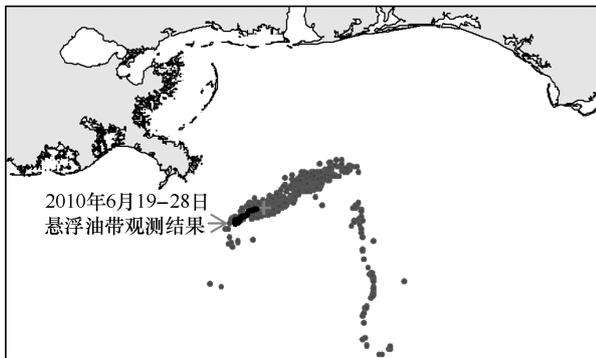
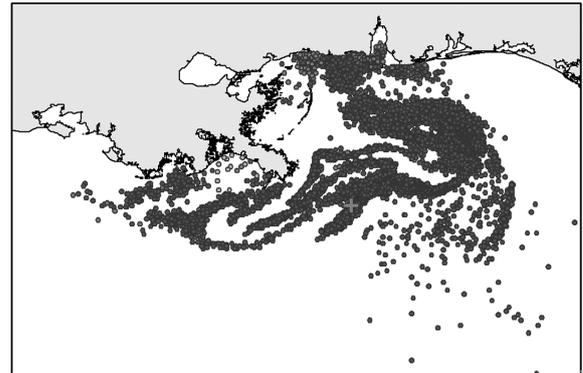


图 10 悬浮油带的数值模拟结果和实际观测结果

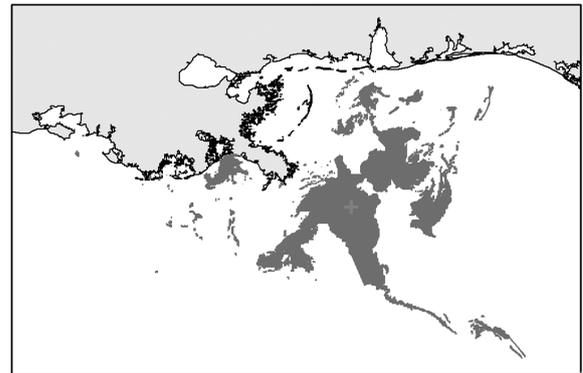
值得一提的是,本研究的数值模拟结果显示井口 NE 方向  $1\ 100\sim 1\ 300\ \text{m}$  深海存在悬浮油滴,与 North 等<sup>[5]</sup>和 Paris 等<sup>[6]</sup>的数值模拟结果较相似。

### 2.3 海面溢油输移扩散范围的模拟验证

2010年6月2日15:00海面溢油输移扩散数值模拟结果与 NOAA 发布的海水异常遥感监测结果的对比如图 11 所示。



(a) 海面溢油输移扩散数值模拟结果

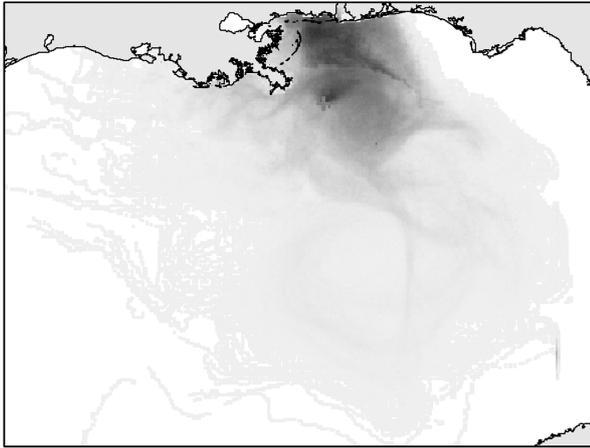


(b) 海水异常遥感监测结果

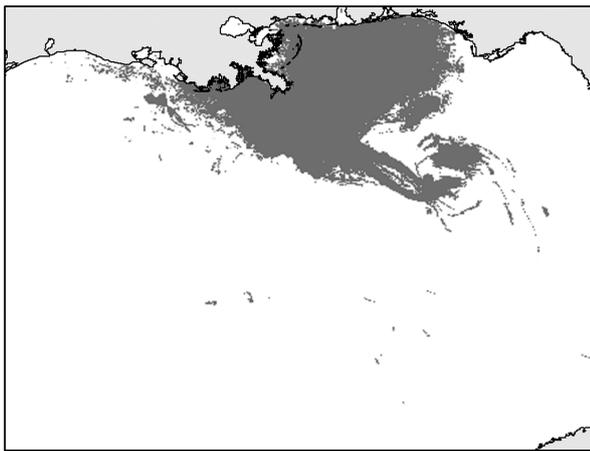
图 11 海面溢油输移扩散数值模拟结果和海水异常遥感监测结果

2010年4月22日至7月30日海面溢油累积污染范围数值模拟结果与 NOAA 发布的 2010年5月17日至7月25日海水异常遥感监测结果的对比如图 12 所示。

从总体溢油污染范围来看,海面溢油累积污染范围数值模拟结果与遥感监测结果较为符合(图 12);此外,遥感监测到墨西哥湾中部和南部出现零星分布的海水异常区域,而数值模拟结果也显示小部分溢油对墨西哥湾中部和南部造成影响,但持续



(a) 海面溢油累积污染范围数值模拟结果  
(颜色由浅至深表示溢油持续影响时间为 0~100 d)



(b) 海水异常遥感监测结果

图 12 海面溢油累积污染范围数值模拟结果  
和海水异常遥感监测结果

影响时间较短(图 12(a))。从某时刻溢油污染范围来看,海面溢油输移扩散数值模拟结果与遥感监测结果较为符合(图 11)。

对比图 11 和图 12 可以看出,数值模拟结果与遥感监测结果仍存在一定的差异。数值模拟的误差或不确定性包括 3 个方面:①假设溢油在固定地点匀速泄漏,这与实际事故中溢油在多个地点泄漏且泄漏速度动态变化的情况存在差异;②事故应急处置过程中在海面喷洒大量消油剂来分散油膜,但由于缺乏具体喷洒区域和喷洒量的数据,无法对此进行数值模拟;③流场和风场等海洋环境动力数据本身存在误差,影响数值模拟的准确性。遥感监测的误差或不确定性包括 2 个方面:①无法逐小时跟

踪溢油输移扩散过程,且难以同时覆盖整个墨西哥湾;②受传感器、天气和海况等因素的影响,不同类型的遥感影像对溢油尤其是薄油膜的分布区域判定存在误差。须指出的是,本研究设置一系列参数进行数值模拟,而未利用遥感监测结果对海面溢油输移扩散过程进行干预校正。总体而言,综合考虑“深水地平线”事故溢油方式和应急处置的复杂性以及影响数值模拟和遥感监测的不确定因素,本研究的数值模拟结果与遥感监测结果较为符合。

### 3 结语

本研究以 2010 年墨西哥湾“深水地平线”事故为例,模拟溢油自 1 522 m 水深泄漏后的浮射扩散、水体中输移扩散以及在风场和流场共同作用下在海面上输移扩散的全过程,同时模拟实施海底消油剂喷注处理措施后溢油输移轨迹和扩散范围的变化,数值模拟结果与悬浮油带实际观测结果和海水异常遥感监测结果总体相符。

鉴于“深水地平线”事故溢油方式和应急处置的复杂性,本研究对泄漏地点、泄漏速度和消油剂处理等模拟参数进行一定的简化,同时未对事故期间的不同时段采取不同应急处置措施等情况进行数值模拟,但仍可为更加全面和精细的深海溢油输移扩散数值模拟研究奠定良好的基础。未来可继续加强物理模拟实验和数值模拟分析的综合研究<sup>[19-20]</sup>,为我国深海溢油事故的风险防范和应急响应提供有益参考。

### 参考文献

- [1] The Federal Interagency Solutions Group: Oil Budget Calculator Science and Engineering Team. Oil budget calculator Deepwater Horizon: technical documentation [EB/OL]. [https://www.restorethegulf.gov/sites/default/files/documents/pdf/OilBudgetCalc\\_Full\\_HQ-Print\\_111110.pdf](https://www.restorethegulf.gov/sites/default/files/documents/pdf/OilBudgetCalc_Full_HQ-Print_111110.pdf), 2021-05-05.
- [2] LIU Y, WEISBERG R H, HU C, et al. Trajectory forecasts based on numerical ocean circulation models and satellite observations: a rapid response to Deepwater Horizon oil spill [A]. LIU Y, MACFADYEN A, JI Z G, et al. Monitoring and modeling the Deepwater Horizon oil spill: a record breaking enterprise[M]. American Geophysical Union, 2011.
- [3] ADCROFT A, HALLBERG R, DUNNE J P, et al. Simulations of underwater plumes of dissolved oil in the Gulf of Mexico

- [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(18): L18605.
- [4] SOCOLOFSKY S A, ADAMS E E, SHERWOOD C R. Formation dynamics of subsurface hydrocarbon intrusions following the Deepwater Horizon blowout[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(9): L09602.
- [5] NORTH E W, ADAMS E E, SCHLAG Z, et al. Simulating oil droplet dispersal from the Deepwater Horizon spill with a Lagrangian approach[J]. *Geophysical Monograph Series*, 2011, 195: 217–226.
- [6] PARIS C B, HÉNAFF M L, AMAN Z M, et al. Evolution of the macondo well blowout; simulating the effects of the circulation and synthetic dispersants on the subsea oil transport[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(24): 13293–13302.
- [7] 张敏慧. 基于卫星遥感与 GNOME 系统的溢油轨迹模拟研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [8] 杨毅, 陈志莉, 李颖, 等. 基于 GNOME 和 ADIOS 的墨西哥湾溢油污染数值模拟[J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(4): 599–604.
- [9] 韩树宗, 张彩霞. 墨西哥湾溢油事故模拟研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2014(2): 1–8.
- [10] 廖国祥, 高振会, 熊德琪. 水下油气溢漏事故污染物输移预测模型[J]. *大连海事大学学报*, 2010, 36(4): 115–120.
- [11] 廖国祥, 杨建强, 高振会. 海底溢油输移扩散的可视化数值模拟系统[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2011, 35(4): 748–751.
- [12] 廖国祥, 高振会, 杨建强. 深海溢油输移扩散模型研究[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(5): 718–723.
- [13] 廖国祥, 杨建强, 高振会, 等. 深海中喷洒分散剂后溢油运动轨迹预测[J]. *大连海事大学学报*, 2013, 39(2): 103–107.
- [14] ZHAO L, BOUFADEL M C, ADAMS E, et al. Simulation of scenarios of oil droplet formation from the Deepwater Horizon blowout[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(1): 304–319.
- [15] LI Z, SPAULDING M, FRENCH M D, et al. Development of a unified oil droplet size distribution model with application to surface breaking waves and subsea blowout releases considering dispersant effects[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(1): 247–257.
- [16] FRENCH M D F, LI Z, HORN M, et al. Modeling oil fate and subsurface exposure concentrations from the Deepwater Horizon oil spill[A]. *Environment and Climate Change Canada. Proceedings of the thirty-ninth AMOP technical seminar*[C]. Ottawa: Environment and Climate Change Canada, 2016: 115–150.
- [17] CAMILLI R, REDDY C M, YOERGER D R, et al. Tracking hydrocarbon plume transport and biodegradation at Deepwater Horizon[J]. *Science*, 2010, 330(6001): 201–204.
- [18] REDDY C M, AREY J S, SEEWALD J S, et al. Composition and fate of gas and oil released to the water column during the Deepwater Horizon oil spill[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(50): 20229–20234.
- [19] 廖国祥, 李艳妮. 静水和动水环境中水下溢油浮射流初步实验及数值模拟[J]. *海洋开发与管理*, 2020, 37(12): 71–77.
- [20] 廖国祥, 李艳妮. 横流环境中水下溢油输移扩散的实验研究[J]. *海洋开发与管理*, 2021, 38(6): 70–75.