

海底溢油的归宿及输移扩散行为

The fate, transport and diffusion behaviors of subsea spilled oil

段丽琴, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李 宁

(中国科学院 海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室, 山东青岛 266071)

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)06-0113-08

随着全球经济发展对石油资源需求的急剧增加, 海洋石油开发业蓬勃发展。海上石油设施增多, 突发性的海底油气管道破损泄露、油气井井喷、平台或钻井装置倾覆等造成的石油泛滥事故与日俱增, 平均每年有 10 万吨以上的石油溢入海洋中, 使得海上石油污染日趋严重, 严重威胁着海洋的生态平衡, 不仅对渔业捕捞、水产养殖和海水综合利用造成了巨大的经济损失, 而且对海洋环境和海洋生物资源造成了严重的危害和影响。研究证实, 海洋石油泛滥对海洋生态环境的破坏所造成的经济损失, 远远超过其直接的经济损失。

无论是海面还是海底, 一旦发生溢油事故, 为确定紧急处理方案和清除措施以及估计已有对环境的污染影响, 需掌握几方面情况: 溢油事故中溢油自身的物理化学特征; 溢油量; 溢油在海面的扩散和漂流速度; 溢油在海底的溢出和扩散速度; 溢油去向; 哪些海区将受到漂油的威胁; 被污染海滨范围及污染程度等。比较准确地了解和获得短时间和较长时间段内海面和海底溢油过程中溢油的输移扩散行为是掌握这些情况的前提和基础, 并且可为事故前风险评估和事故时应急行动提供决策支持。

目前国内外关于海面溢油漂移扩散的研究报道已经很多^[1-8], 海面溢油发生后, 油膜由于自身扩展作用, 迅速向四周扩散开。随着油膜自身扩展的进行, 油膜越来越薄, 在水体紊动作用下开始分散, 紊动扩散成为油膜扩散最主要的方式。目前, 常用的获得海面溢油漂移扩散的方法主要有直接探测方法、遥感法和溢油扩展模型。在所有溢油扩展模型中, 应用最多的是 Fay 模型^[1]及其改进型^[3, 5]。

与海面溢油不同, 海底溢油在水下环境中的输移扩散过程难以有效观测。因此通过研究和发海底溢油模型来获得海底溢油输移扩散行为成为热点。2010 年美国墨西哥湾的“深水地平线”事故和

2011 年“蓬莱 19-3 溢油”事件表明, 准确评估海底溢油在水下及海底的输移扩散及时空分布对采取合理应急处置措施异常必要。国外对水下溢油模型的研究始于 20 世纪 70 年代, McDougall^[9]、Fannelop 和 Sjoen^[10]、Milgram^[11]、Rye^[12]、Yapa 和 Zheng^[13]学者曾建立适用于浅水环境的水下溢油模型。随后, Johansen^[14-15]建立了深海溢油模型 DeepBlow, Zheng 等^[16]和 Yapa 等^[17]建立深海溢油模型 CDOG, 这两个模型都能模拟溢油在深海环境中的复杂行为动态。近年来, 国内的汪守东和沈永明^[18]、管永义等^[19]、廖国祥等^[20-21]研究人员也积极开展水下溢油数值模拟研究。

本文系统总结了当今海底溢油事故中溢油的主要归宿、输移扩散行为及其相应的预测模型, 以期为今后构建有效的溢油量估算方法和评估溢油事故的生态损害奠定基础。

1 海底溢油的主要归宿

海底溢油的发生可能是由于输油管破裂、井喷、海底地层断裂带破裂的油田溢油及沉船溢油。当溢油发生时, 为制定相应的应急反应决策及生态恢复措施, 需估算溢油事故的溢油量及评估其生态损害, 而溢油的去向及其存在形式是溢油量估算及其生态损害评估的重要参考要素。一般情况下, 根据油类性质, 海底溢油事故所产生的溢油中, 高比重的油基泥浆和原油混合物直接沉降到沉积物, 部分与沉积物混合并进入其内部; 低比重的溢油进入到水体中。高比重的油基泥浆主要出现在海底地表破裂溢油中, 而

收稿日期: 2012-12-20; 修回日期: 2013-02-10

基金项目: 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项目(201201)

作者简介: 段丽琴(1984-), 女, 内蒙古包头人, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋环境生物地球化学过程研究, E-mail: duanliqin@qdio.ac.cn; 宋金明, 通信作者: E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

在输油管破裂、井喷及沉船溢油中几乎不会出现。基于溢油量、水流速度和紊流及其他因素,进入到水体中的溢油归宿有三种可能情况:直接溶解或形成悬浊液、乳浊液或被颗粒物吸附而进入海水,在水体中被驱散;溢油上浮于海面形成油膜,油膜被驱散;溢油上浮到海面形成油膜并且油膜抵岸污染海岸线。

海底溢油发生后,石油和天然气在泄漏源的压力作用下连续喷射进入水体中并破碎成为油滴和气泡。其中破碎的油滴大小对其在脱离羽流后进行怎样的迁移及其最终残留在各归宿中的量有着重要的影响。Yapa等^[22]通过比较数学模型和现场试验结果得出油滴的大小对其上浮速度有显著的影响:溢油的释放速度越快,产生的油滴越小,羽流整体的上浮时间就越长。由于较大油滴到达海面较快,而较小油滴在水体中的停滞时间较长且受到水动力和扰动产生的海底水平对流-扩散控制的时间也较长(图1),因此较小油滴在到达海面之前会发生更长距离的迁移。这些油滴在短期时间内主要通过浮射流/羽流,在水动力的影响下进入到水体和到达海面;在长时间(几个月至几十年)上,水体中的油粒子吸附到颗粒物上,最终沉降到沉积物上。

Galagan等^[23]通过研究井喷模型中不同大小油滴在水体中的Rosin-Rammler分布情况得出:不同大小油滴所占比例主要是受泄露源的油气释放速度所决定的,即释放速度越快较小油滴所占比例越大。研究表明粒径为64.5、129.0、193.5、258.0、322.5和387.0 μm 的油滴分别占总油量的16.5%、26.0%、23.6%、17.2%、10.8%和6.0%。持续溢油100~120 d后,海底井喷模拟中的溢油到达海面的量为29%~35%,其远远小于海面溢油;直接进入水体中的量占9%~10%;当溢油释放的持续时间增加,由于自然风化的速率增加,滞留在海面上的溢油会减少,风化的量占总释放量的26%~30%;油的蒸发量达29%~32%。综合分析不同大小油滴比例组成及其在各归宿中的量可知,直径大于322.5 μm 的油滴为较大油滴,其可较快到达海面;直径小于64.5 μm 的油滴为较小油滴,其停滞在水体中的时间较长;直径在129.0~258.0 μm 的油滴为中等大小的油滴。

2 溢油的输移扩散行为

通过研究海底溢油的输移扩散行为可以了解到溢油的去向及存在形态,从而为估算溢油量及评估

溢油事故的污染风险和损害影响提供科学依据。海底溢油发生后,由于溢油源参数(如石油密度、流量、裂孔直径、孔口方向及溢油射流速度)、溢油事故时间、持续泄漏时间及环境动力学参数(如海水密度、水流等)的不同,溢油的输移扩散模式也不尽相同。根据目前的研究可知,海底溢油的输移扩散主要分浅水和深水两大类。海底溢油在水下环境中的输移扩散过程难以有效观测,需要通过结合实验室模拟和海底溢油模型来获得海底溢油输移扩散行为。

综合前人研究可知,对海底溢油输移扩散模型的构建是基于对浮射流和羽流研究上的^[14, 17, 20]。对浮射流和羽流的研究需要通过结合实验室模拟和建立数学模型来完成。常用的数学模型有k-扰动模型^[24]和积分模型。积分模型主要包括欧拉积分模型(Eulerian integral model)和拉格朗日积分模型(Lagrangian integral model)。目前对海底溢油输移扩散模型的建立主要是基于欧拉积分^[9-11]和拉格朗日积分^[14, 16, 22]方法上的。欧拉积分模型是将浮射流看成是一系列在空间中固定位置的控制体。而拉格朗日积分技术的概念是在每一时刻把溢油沿轨迹中心线视为一个控制单元体,控制单元体在空间的运动即为溢油轨迹的变化,控制单元体浓度的变化即为溢油浓度的衰减。该方法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,每个控制单元体在水流环境中的运动则根据质量守恒、动量守恒及能量守恒等控制方程来计算确定,综合所有控制单元体的运动即可获得溢油的输移轨迹。其中,每个控制单元体的厚度 $h = |v| \Delta t$, $|v|$ 是浮力射流的速度(m/s), Δt 是时间步长(s), Lee和Chueng^[25]建议 $\Delta t = 0.1b_0 / |v|$, b_0 是单元体释放点的半径,质量 $m = \rho \pi b^2 h$, b 、 ρ 分别为控制单元体的半径和密度。实际上,这两种模型在本质上是是一致的。当水下环境中没有强横流时,模型假设天然气气泡处于溢油浮射流的内部(图1),气泡分布半径与浮射流横截面半径的比例为0.65~0.80^[13]。当水下环境中存在强横流作用时,溢油浮射流输移轨迹将发生弯曲,一些体积较大的气泡将逐渐离开浮射流(图1)。此时控制单元体中的气泡数量 $N = f \cdot J \cdot \tau = f \cdot J \cdot [h / (v_j + w_b \sin \varphi)]$,其中 f 为油气分离时气泡数量的剩余比例数, J 为气泡的数量通量, τ 为单个气泡穿越控制单元体的时间, v_j 是浮射流速度, w_b 为气泡的滑移速度, φ 是羽流偏离水平方向的角度($^\circ$)。若气泡并未脱离浮射流,则 $f = 1$, $J = J_N = \text{常数}$ 。

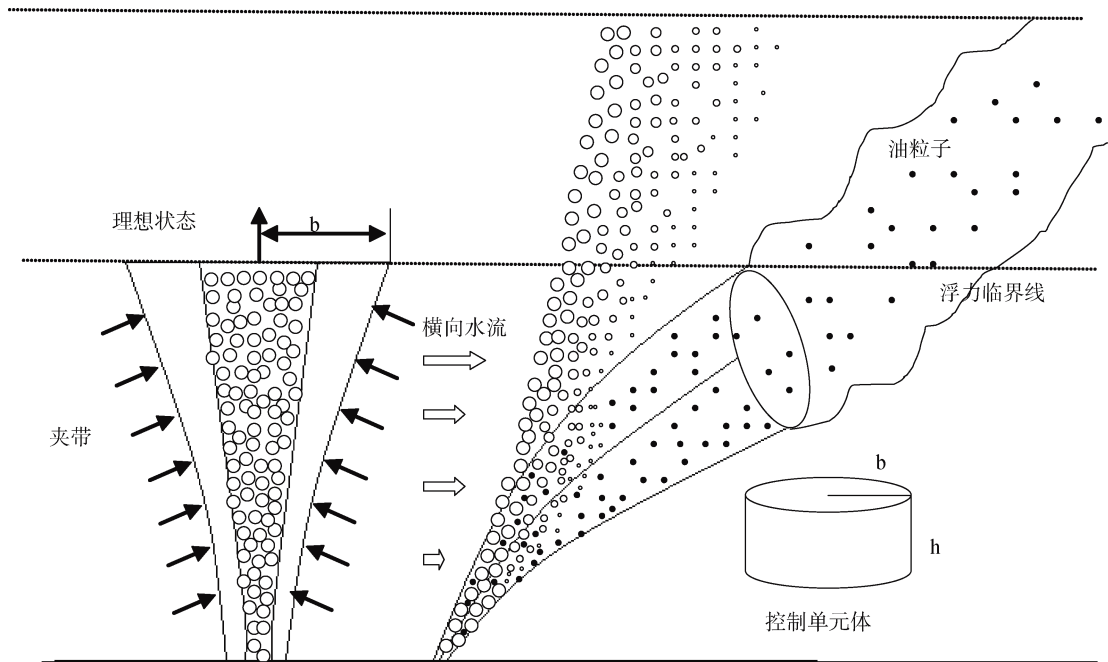


图1 浅水水下油气溢漏事故溢油输移扩散示意图^[13]

3 浅水溢油输移扩散行为

3.1 浅水溢油输移扩散过程

浅水(<200 m)海底油气管道泄漏、油气井井喷等水下事故发生时,当海底溢油源孔径较小时(一般不超过 5 mm),油从孔中溢出后不会形成上升的浮射流,而是一个个油滴,在紊流的作用下油滴扩散开来形成羽流(如烟羽状),当油滴上浮到海面便形成油膜,油膜沿着表面海流的方向扩展。根据管道上蠕孔的位置和溢油量的不同以及当时的海面状况,油膜可能到达海岸线或者在漂移过程中被驱散。

当溢油源孔径较大时,石油和天然气通常在泄漏源的压力作用下连续喷射进入水体中并破碎成为油滴和气泡,它们在初始动量和水体浮力共同作用下形成浮射流并处于主动输移状态。浮射流的范围局限于海底附近,其长度相对较短。在向上迁移过程中,扩张的气泡和夹带的海水之间的密度差产生的浮力会进一步驱动油气向上迁移,形成羽流。其中,气泡的存在导致浮射流和羽流出现两层结构:内部以气泡为核心,外环中大部分为夹带水。羽流上升时,由于其上升速度和夹带水的速度不同,羽流会继续夹带周围环境中的海水;这种夹带会降低羽流的速度和浮力,使得羽流的半径增加,形成一个反向圆锥体(图1)。如果羽流在未达到海面之前,其浮力消失,这些羽流中的油滴只能靠自身的浮力上升到海面。反向圆锥体的羽流是在没有水动力存在下的一

种理想状态。当遇到速度较大的横向水流时,羽流的输移迹线发生弯曲,此时气泡将逐渐脱离羽流。浮升至一定高度的油滴在失去初始射流动量后,在周围海水流动作用下在水平和垂直方向输移和分散,最后,粒径较大的气泡和油滴浮升至水面,其中油滴扩展成为油膜,并在风、浪、流等环境因素作用下经历着漂移、扩散、蒸发、乳化等运动和风化过程。此外,海水环境中的密度分层、流速分层等也会影响浮射流和羽流的迁移轨迹,使得浮射流和羽流的路径变得非常复杂。浅水中,有两个过程会限制羽流的上升:(1)气体溶解到周围海水中;(2)上升的气泡会从羽流中逃逸出来。这两个过程都是自发的,比如当气体在这些过程中消失,羽流上升速度会减慢,其在水体中的迁移时间会增加,从而会有更多的气体溶解于海水中。

3.2 数学模型

浅水水下溢油数值模拟主要是采用拉格朗日积分方法模拟溢油在水下流动环境中的二维及三维扩散输移行为。该模型能够模拟溢油在密度分层、流速分层的真实水下环境中的水流卷吸、湍流分散、溢油溶解、油气共同输移与分离输移等动态行为。

3.2.1 质量守恒方程

溢油在水下环境的输移过程中,周围水流卷吸、溢油溶解及湍流分散等共同作用引起控制单元体质量的动态变化满足质量守恒^[13]:

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

其中: ρ_a 为环境水体密度; $\frac{dm_i}{dt}$ 为单位时间内溶解于水体的溢油质量损失; $\frac{dm_d}{dt}$ 为单位时间内湍流扩散引起的溢油质量损失; Q_c 为水流卷席作用引起的体积通量, $Q_c = Q_s + Q_f$; Q_s 和 Q_f 分别为剪切应力和对流引起的卷吸体积通量(m^3/s); n 为油的组分数。

3.2.2 动量守恒方程

溢油单元体在水体中的运动满足动量守恒^[13]:

$$\frac{d(mv)}{dt} = v_a \rho_a Q_c + m \frac{\Delta\rho}{\rho} gk - \rho_a 2\pi b h C_D (|v| - v'_a)^2 \frac{v}{|v|} \quad (2)$$

其中: v_a 为流水速度矢量; $\Delta\rho$ 为水体与控制单元体的密度差, $\Delta\rho = \rho_a - \rho$; C_D 为拖拽系数; v'_a 为 v_a 在 x - y 水平面上的投影; k 为 z 垂直方向的单位矢量。

3.2.3 温度、盐度和浓度守恒方程

溢油进入水体后, 控制单元体的温度、盐度和质量浓度满足如下守恒方程^[13]:

$$\frac{d(mI)}{dt} = I_a \frac{dm}{dt} - \rho_a K 2\pi b h \frac{I - I_a}{b} \quad (3)$$

其中: I 为量纲参数, 可表示温度、盐度和质量浓度; 下标 a 表示水体; K 为对应的温度、盐度和质量浓度扩散系数。

3.2.4 状态方程

溢油进入水体后, 其质量浓度以及水体的温度和盐度变化会导致其密度发生变化, 其状态方程的具体形式取决于油的类型, 其通用状态方程为^[13]:

$$\rho = \rho(T_a, S_a, \rho_0) \quad (4)$$

其中: T_a 为水体温度; S_a 为水体盐度; ρ_0 为溢油质量浓度。

3.2.5 气体存在下

(1) 油气共同输移

在天然气存在下, 石油和天然气混合连续喷射进入水体后会破碎成为分散的油滴和气泡, 因此要考虑油-气-水混合物的共同输移行为。该混合物在水中输移仍遵循质量守恒定律, 其中液相质量守恒同方程(1); 气相部分假设每个断面的质量流量为恒定值。在动力方程中需加入气泡的浮力动量, 即^[13]:

$$\frac{d}{dt} [m_1 w + m_b (w + w_b)] = w_a \frac{dm_1}{dt} + (\rho_a - \rho_1) g \pi b^2 (1 - \beta^2 \varepsilon) h + (\rho_a - \rho_b) g \pi b^2 \beta^2 h \varepsilon \quad (5)$$

其中, m_1 为控制单元体中的液体质量, $m_1 = \rho_1 \pi b^2 (1 - \beta^2 \varepsilon) h$; w 为控制单元体的垂向速度; w_a 为环境流体的垂向速度; m_b 为控制单元体中气泡质量, $m_b = \rho_b \pi b^2 \beta^2 h \varepsilon$; ε 为气泡所占体积分数, $\varepsilon = \frac{\rho_1 - \rho_c}{\rho_1 - \rho_b}$, ρ_b 、 ρ_1 、 ρ_c 分别为气体、液体、气液混合物密度。方程右边第 1 项为水流卷吸作用增加的垂直方向动量分量, 第 2 项为油水混合物垂直方向动量分量, 第 3 项为气泡垂直方向动量分量。

(2) 油气分离输移

水下环境横流速度较大时, 浮射流到达一定高度后输移轨迹会发生弯曲。由于气体密度小于液体密度, 气泡在垂直方向上的输移速度比液体的大, 因而气泡容易脱离浮射流。Socolofsky 和 Adams^[26] 基于实验建立了估算横流作用下气体分离高度的经验公式:

$$h_s = \frac{5.1B}{(v_a w_b^{2.4})^{0.88}} \quad (6)$$

其中, h_s 为气体分离高度; B 为气泡浮力通量。

脱离浮射流后的气泡运动, 可采用粒子追踪法进行计算, 直至其达到水面或破碎溶解于水体。对于单个气泡, 其运动速度矢量为^[27]:

$$v_g = a v_j + b v_a + w_b k \quad (7)$$

其中, $a = 1$, $b = 0$ 时气泡在浮射流体内; $a = 0$, $b = 1$ 时表示气泡经过分离过程后在浮射流外; v_g 为气泡速度矢量。

4 深海溢油输移扩散行为

4.1 深海溢油输移扩散过程

同浅海一样, 深海油气钻井井喷、海底输油管道破损泄漏等事故发生后, 石油和天然气在泄漏源的压力作用下连续喷射进入水体中并破碎成为油滴和气泡, 其在喷射动量和水体浮力作用下形成浮射流。但与浅水不同的是在浮升过程中, 溢出的一部分或全部天然气气泡在深海的高压低温环境中可能与周围的海水会快速形成固态水合物, 其主要是在天然气气泡的外壳逐渐形成的(图2)。这些水合物在泄漏源附近可以形成气泡, 其比重为 0.92~0.96^[22]。气体转化为水合物在一定程度上削弱了浮射流的浮力, 限制羽流上升, 导致油滴和水合物需要在它们自身的浮力下上升, 从而使得油滴和水合物在最终到达海面之前需在水体中迁移更长的距离(图2)。当水合

物浮升至相对低压和高温的环境中时将会再次分解为气泡和水。此外,当羽流遇到较强的横向水流时,天然气气泡将逐渐脱离羽流。随后,失去浮射动量的油滴将在周围海水流动作用下在水平和垂直方向输

移和分散。最后,粒径小的油滴继续悬浮在海水中,而粒径大的油滴浮升至海面后扩展为油膜,并在风、流、浪等海洋环境因素作用下经历着漂移、扩散、蒸发、乳化等运动和风化过程。

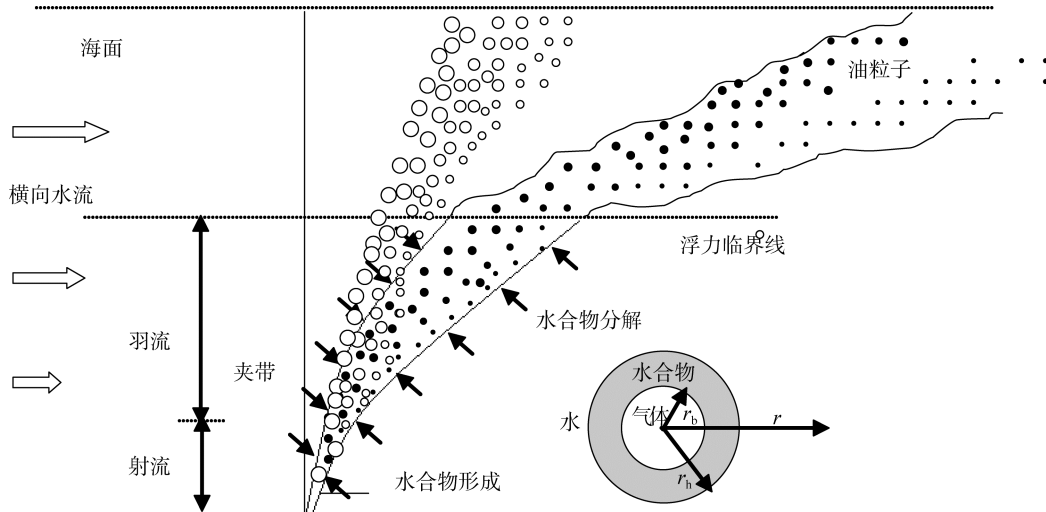


图2 深水水下油气溢漏事故溢油输移扩散示意图^[17]

总的来说,与在浅海环境中相比,溢油在深海环境中的动态行为主要有以下几个特点^[14, 16]: (1)高压低温的深海环境中,溢油中的天然气(主要成分为甲烷)气泡能与周围海水化合成固态的天然气水合物(俗称为可燃冰)。当这些水合物浮升至相对高温低压的水体环境中,天然气水合物将分解为水和气泡;(2)溢油中的天然气气泡在水下浮升过程中会逐渐溶解于海水,这将降低溢油浮射流的浮力;(3)在水下环境的高压条件下,天然气气体的状态变化由非理想状态方程计算比理想状态方程更为合适;(4)由于存在天然气水合物的形成与分解、天然气溶解于水等变化过程,溢油中的天然气气泡的尺寸及其浮升速度会随之发生动态变化。其中,深海溢油输移过程中的最大特点是水合物的形成,其与海水压力和温度存在着密切的关系。Topham^[28]通过模拟实验得出:尽管水合物的生成速率不可能检测到,但是在水深浅于300 m的海水环境中是不能形成水合物的;在水深大于650 m时,无论泄漏源排放的天然气中是否夹带石油,水合物都有生成。Bishnoi和Mainik^[29]通过使用高压设施调节净水压的室内实验来研究水合物的形成。结果表明,当压力超过700 Pa(480 m)时,气体会形成水合物,而当压力低于450 Pa (310 m)时,水合物不再生成;水合物形成所需的压力主要由气体和液态烃的成分所决定,对于轻油或富气,压力甚

至低于450 Pa 时,水合物也会形成。

4.2 数学模型

油气混合物在深海环境中的行为比在浅海环境中的更为复杂,如水合物的形成与分解。目前对深海溢油模型的建立也是基于拉格朗日积分模型,其是以浅海溢油模型为基础,将水合物的动态行为考虑进去来研究的。除在质量守恒、动量守恒及能量守恒等控制方程中增加气体的方程外,还要考虑到水合物的形成和分解动力学方程。

4.2.1 质量守恒

(1)液体质量守恒

溢油控制单元体在深海环境中输移时,周围水流的卷吸、溢油的溶解与湍流分散、水合物的形成与分解等作用将引起的液体质量变化满足质量守恒^[16]:

$$\frac{dm_{hl}}{dt} = \rho_a Q_e - \frac{dm_i}{dt} - \frac{dm_d}{dt} - f \cdot J \cdot \tau \cdot n_w \frac{dm_h}{dt} M_w \quad (8)$$

其中, m_{hl} 为控制单元体中的液体质量(kg), $m_{hl} = \rho_l \pi b^2 (1 - \beta^2 \varepsilon_h) h$; ε_h 为具有水合物外壳的天然气气泡所占的体积分数, $\varepsilon_h = \frac{\rho_l - \rho_c}{\rho_l - \rho_{com}}$,

$\rho_{com} = (\rho_b r_b^3 + \rho_h (r_h^3 - r_b^3)) / r_h^3$, 其中 ρ_{com} 、 ρ_h 分别为控制单元体中的气体与水合物的结合体和水合物的密度; r_b 、 r_h 分别为具有水合物外壳的气泡内部和

外部半径, 没有水合物时 $r_h = r_b$; n_w 为水合数; M_w 为水的摩尔质量(kg/mol); $\frac{dn_h}{dt}$ 为单个气泡的水合物形成速率(mol/s); $\frac{dn_h}{dt} > 0$ 表示水合物的形成, 而 $\frac{dn_h}{dt} < 0$ 表示水合物的分解。

(2) 气体质量守恒

溢油控制单元体在水下环境输移过程中, 因气体形成水合物和溶解于水等变化引起的气体质量变化也满足质量守恒^[16]:

$$\frac{dm_b}{dt} = -f \cdot J \cdot \tau \left(\frac{dn_h}{dt} + \frac{dn_s}{dt} \right) M_g \quad (9)$$

式中: m_b 为控制单元体中的气体质量(kg); M_g 为气体的摩尔质量(kg/mol); $\frac{dn_s}{dt}$ 为气体溶解于水的速率(mol/s)。

(3) 水合物质量守恒

溢油控制单元体在水下环境输移过程中, 因水合物解体、分散和溶解于水等变化引起的水合物质量变化也满足质量守恒^[17]:

$$\frac{dm_h}{dt} = f \cdot J \cdot \tau \left[\frac{dn_h}{dt} - \frac{dn_{dis}}{dt} \right] M_g \quad (10)$$

其中, m_h 是总水合物质量(kg), $\frac{dn_{dis}}{dt}$ 是水合物分解为气泡的速率(mol/s)。

4.2.2 动量守恒

溢油控制单元体在水下环境中的运动满足动量守恒^[17]:

$$\frac{d(mv)}{dt} = v_a \rho_a Q_e - v \rho_{com} Q_g + m \frac{\Delta \rho}{\rho} g k - \rho_a 2\pi b h C_D (|v| - v'_a)^2 \frac{v}{|v|} \quad (11)$$

其中: Q_g 为具有水合物外壳的气泡脱离控制单元体的体积通量。方程(11)右端的第 1 项表示控制单元体卷吸海水后所增加的动量, 第 2 项表示气体分离后所减少的动量, 第 3 项表示控制单元体垂直向上的浮力, 第 4 项表示控制单元体的拖拽力。

4.2.3 热量守恒

溢油控制单元体在水下环境中运动的同时保持热量守恒^[16]:

$$\frac{d}{dt} [(C_{pl} m_l + C_{ph} \cdot f \cdot J \cdot \tau \cdot m_h) \cdot T] = C_{pl} T_a \rho_a Q_e + f \cdot J \cdot \tau \frac{dn_h}{dt} \lambda \quad (12)$$

式中: C_{pl} 、 C_{ph} 分别为液体和水合物的热容

(J/(kg·K)); T 为羽流温度; λ 为水合物形成或分解的潜热能(J/mol)。由于与液体或水合物的热量相比, 气体的热量很小, 因而计算中可忽略方程(12)左边中的气体热量。方程(12)右端第 1 项表示控制单元体卷吸海水后所增加的热量, 第 2 项表示因水合物的形成或分解过程增加或减少的热量。

4.2.4 盐度和浓度守恒

溢油控制单元体的盐度和浓度守恒, 可用下面方程进行描述^[16]:

$$\frac{d(m_l I)}{dt} = I_a \frac{dm_l}{dt} \quad (13)$$

5 数值计算与验证

溢油在水下环境的运动控制方程采用显式差分格式离散, 控制单元体在下一时刻(即 $k+1$ 时刻)的特征变量, 如质量、速度、浓度、温度等是根据当前时刻(即 k 时刻)的特征变量计算获得的。为区分溢油初始时的速度和水流速度的大小关系以及表征水体的

密度分层特性, 引入下列三个参数^[13]: $F_{r0} = \frac{|v_j|}{\sqrt{g'D}}$,

$R_0 = \frac{|v_j|}{v_a}$, $St_0 = \Delta \rho_0 / \left(D \frac{d\rho_a}{dz} \Big|_{z=0} \right)$ 。其中, F_r 为密度弗劳德数; $g' = g(\Delta \rho / \rho)$; D 为溢油孔口直径; R 为溢油射流速度 v_j 与水流速度 v_a 的比值; St 为水体分层数; 下标“0”表示初始值。

采用显式差分法格式离散控制方程进行数值计算, 下面简单介绍一下不含气泡溢油控制方程的具体离散格式^[13]:

$$\Delta m_k = \rho_a Q_e \cdot \Delta t - \sum_i^n \Delta m_i - \Delta m_d \quad (14)$$

$$m_{k+1} = m_k + \Delta m_k \quad (15)$$

$$I_{k+1} = [m_k I_k + \Delta m_k I_a - \rho_a K 2\pi h_k (I_k - I_a) \Delta t] / m_{k+1} \quad (16)$$

$$\rho_{k+1} = \rho(T_{k+1}, S_{k+1}, \rho_{0k+1}) \quad (17)$$

$$v_{k+1} = \left[m_k v_k + (\Delta m_k) v_a + k m_{k+1} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)_{k+1} g \Delta t - \pi 2 b_k h_k C_D (|v_k| - v'_a) \frac{v_k}{|v_k|} \Delta t \right] / m_{k+1} \quad (18)$$

$$h_{k+1} = \frac{|v_{k+1}|}{v_k} h_k \quad (19)$$

$$b_{k+1} = \sqrt{\frac{m_{k+1}}{\rho_{k+1} \pi h_{k+1}}} \quad (20)$$

$$\Delta h_{k+1} = |v_{k+1}| \Delta t \quad (21)$$

式(14)、(15)为溢油质量的计算;式(16)、(17)为温度、盐度、浓度、密度的计算;式(18)为速度的计算,计算水平速度时 $k=0$,垂向速度时 $k=1$;式(19)~(21)分别为溢油控制体的厚度、半径和位移的计算。

国内外研究者通过已知的弗劳德数、分层数和 R_0 验证了不分层流流动和分层流流动环境下不同弗劳德数、分层数和 R_0 的二维和三维溢油轨迹^[13, 18, 20]。根据设定模拟参数,包括试验水深、试验海域的海水温度和盐度、海流速度、溢油密度、持续释放时间、释放速率,应用溢油模型进行数值计算来获得溢油在水下环境中的输移扩散行为。

目前研究较为成熟且应用较多的深海溢油模型有CDOG和DeepBlow模型,其都是基于上述基本方程所建立的。这两个模型都根据“Deepspill”大型深海溢油实验研究项目中的现场试验和监测数据设定了数值模拟参数。“Deepspill”的试验水深为844 m,日期为2000年6月27~29日。CDOG和DeepBlow模型模拟泄漏油品为柴油(密度为 854.8 kg/m^3)和原油(密度为 842.5 kg/m^3),气体为液化天然气,混合物持续释放时间分别为50 min和60 min。其中柴油和原油释放速率为 $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$,气体分别为 0.6 和 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$;混合物释放时的温度为 $-0.77 \text{ }^\circ\text{C}$,释放速率分别为 1.99 和 2.08 m/s 。根据这些模拟参数,Chen和Yapa^[27]和Johansen等^[30]分别应用CDOG和DeepBlow模型进行数值计算,获得溢油在水下环境中的输移扩散模拟结果与现场监测的数据较为吻合。

6 结语

随着海底油气资源勘探开发进程的快速推进,海底溢油事故风险随之不断增高,海底溢油污染防治紧急处置方案和清除措施的确定以及对生态环境的污染损害评估需要较准确地掌握溢油事故中溢油的物理化学特征、溢油量、溢油在海上扩散及污染范围等讯息。准确地了解和获得短时间和较长时间段海底溢油过程中溢油的输移扩散行为是剖析探明以上科学问题的前提和基础。本文主要分析了浅海和深海海底溢油的归宿和其在水下环境中的迁移扩散动态行为,着重剖析了适用于预测海底溢油输移预测的数学模型,主要获得以下几点认识:

(1)海底溢油事故发生后,溢油在压力作用下连续喷射进入水体,其可能的主要归宿包括:直接溶解或形成悬浊液、乳浊液或被颗粒物吸附而进入海水,在水体中被驱散;溢油上浮于海面形成油膜,油

膜被驱散;溢油上浮到海面形成油膜并且油膜抵岸污染海岸线。在溢油上浮过程中,较大油滴到达海面较快,而较小油滴滞留在水体中的时间较长。

(2)海底溢油在压力作用下连续喷射进入水体中并破碎成为油滴和气泡,它们在初始动量和水体浮力共同作用下形成浮射流并处于主动输移状态。当遇到速度较大的横向水流时,浮射流的输移迹线发生弯曲。与浅海不同的是,深海溢油输移过程中会有水合物形成。

(3)目前对海底溢油模型的建立是基于拉格朗日积分方法,其主要考虑质量守恒、动量守恒、能量守恒及盐度和浓度守恒等控制方程。除此之外,在深海溢油模型中,还要考虑到水合物的形成和分解动力学方程。应用以控制方程为基础的溢油模型进行数值计算获得的溢油在水下环境中的输移扩散行为与现场监测的数据符合较好。

参考文献:

- [1] Fay J A. The spread of oil slick on a calm sea[C]//David P. Hoult. Oil on the Sea. New York: Plenum Press, 1969: 53-63.
- [2] 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.
- [3] Lehr W J. Progress in oil spread modeling[R]. Canada, Ottawa: Proceedings of the Nineteenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, 1996: 889-894.
- [4] Lu J. Marine oil spill detection, statistics and mapping with ERS SAR imagery in south-east Asia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(15): 3013-3032.
- [5] Mackay D, Paterson S, Nadeau S. Calculation of the evaporation rate of volatile liquids[R]. Louisville, KY: Proceedings of National Conference on Control of Hazardous Material Spills, 1980: 364-368.
- [6] 龙绍桥. 海上溢油行为与归宿数值模拟及其对环境的影响研究[D]. 青岛, 中国海洋大学, 2006.
- [7] 任鸿翔, 金一丞, 尹勇. 航海模拟器中海面溢油的三维可视化研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(1): 161-165.
- [8] 吴晓丹, 宋金明, 李学刚, 等. 海上溢油油膜厚度实验室模拟和理论模型对比研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(4): 92-96.

- [9] McDougall T J. Bubble plumes in stratified environments [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 85: 655-672.
- [10] Fannelop T K, Sjoen K. Hydrodynamics of underwater blowouts[R]. Pasadena, CA: AIAA 18th Aerospace Sciences Meeting, 1980.
- [11] Milgram J H. Mean flow in round bubble plumes[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 133: 345-376.
- [12] Rye H. Model for calculation of underwater blow-out plume[R]. Canada: Proceedings of 17th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, 1994: 849-865.
- [13] Yapa P D, Zheng L. Simulation of oil spills from under water accidents I: Model development[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1997, 35(5): 673-687.
- [14] Johansen Ø. DeepBlow-a Lagrangian plume model for deep water blowouts[J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2000, 6: 103-111.
- [15] Johansen Ø. Development and verification of deep-water blowout models[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 47: 360-368.
- [16] Zheng L, Yapa P D, Chen F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts-Part I: Theory and model formulation[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2002, 41(4): 339-351.
- [17] Yapa P D, Dasanayaka L K, Bandara U C, et al. A model to simulate the transport and fate of gas and hydrates released in deepwater[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 48(5): 559-572.
- [18] 汪守东, 沈永明. 海底管线溢油数学模型研究[J]. *大连理工大学学报*, 2006, 46(S1): 191-197.
- [19] 管永义, 李巍, 林建国. 水下输油管道溢油运动模拟及应急处理[J]. *大连海事大学学报*, 2010, 36(4): 129-131.
- [20] 廖国祥, 杨建强, 高振会. 深海环境中溢油输移扩散的初步数值模拟[J]. *海洋通报*, 2011, 30(6): 707-712.
- [21] 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.
- [22] Yapa P D, Asce M, Chen F. Behavior of oil and gas from deepwater blowouts[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(6): 540-553.
- [23] Galagan C, Cohn N, Shmookler R. Results from Simulations of oil spills at the Hebron Well Site[R]. South Kingstown: Hebron project, ASA Project 2010-261, 2011.
- [24] Li W, Chen C J. On prediction of characteristics for vertical round buoyant jets in stably linear stratified environment[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1985, 23(2): 115-129.
- [25] Lee J H W, Chueng V. Generalized Lagrangian model for buoyant jets in current[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1990, 116(6): 1085-1106.
- [26] Socolofsky S A, Adams E E. Multi-phase plumes in uniform and stratified crossflow[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2002, 40(6): 661-672.
- [27] Chen F H, Yapa P D. Modeling gas separation from a bent deepwater oil and gas jet plume[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 45: 189-203.
- [28] Topham D R. Observations of the formation of hydrocarbon gas hydrates at depth in seawater[J]. *Spill Technology Newsletter*, 1977, 2(4): 23-28.
- [29] Bishnoi P R, Mainik B B. Laboratory study of behaviour of oil and gas particles in salt water, relating to deepwater blow-outs[J]. *Spill Technology Newsletter*, 1979, 4(1): 24-36.
- [30] Johansen Ø. Deepspill-Field study of a simulated oil and gas blowout in deep water[J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2003, 8(5-6): 433-443.

(本文编辑: 张培新)