

深水区水下溢油行为及归宿研究^{*}

仝俊良¹，李建伟^{2,3}，安伟^{2,3}，赵宇鹏^{2,3}，陈海波^{2,3}，于顺^{3,4}

(1. 中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司 天津 300452; 2. 中海石油环保服务(天津)有限公司 天津 300452; 3. 海洋石油安全环保技术研发中心 青岛 266061; 4. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061;)

摘 要：深水区水下溢油在上升过程中，受潮流、温度和压强等因素的影响，其溢油行为和归宿与海面溢油明显不同。文章主要在资料分析的基础上研究深水区水下溢油行为和归宿，其行为过程主要包括油气粒径分布、上升速度、油气分离和卷吸等，归宿主要包括水合物、溶解和悬浮羽流等；同时进一步探讨了各行为归宿的影响因素及机制。另外，通过建立深水溢油模型模拟油气上升过程中各行为过程，并在南海荔湾油气田中得到了应用。因此，通过本研究可以深入了解深水区水下溢油复杂的行为过程，为建立深水区溢油应急体系奠定基础，且对深水区溢油损害评估、环境评价具有重要的指导意义。

关 键 词：深水区；水下溢油；行为归宿；溢油模型

近年来，随着海洋油气工业的蓬勃发展，尤其是我国正推进南海深水区油气勘探开发，我们面临的水下溢油风险越来越大^[1]。墨西哥湾溢油事故发生以后，深水区水下溢油引起了社会各界的广泛关注。目前，关于溢油行为归宿的研究主要集中在海面溢油，而对于深水区水下溢油知之甚少。汪守东等^[2]建立了水下管线溢油数学模型来模拟水下溢油形成的辐射流；王晶等^[3]提出渤海水下管线溢油污染预测模型，用于预测水下管道蠕虫漏油后小油滴的浮生行为；廖国祥等^[1]建立一个水下油气溢漏污染源输移预测模型，能够模拟油气混合物在水下近区中的共同输运和分离输运过程。欧美国家自 20 世纪 70 年代开始水下溢油问题研究，美国克拉克森大学 Yapa 等^[4-6]建立了 CDOG 模型并研究了水下溢油行为及归宿，挪威 Johansen 等^[7-8]建立了 DEEPFLOW 水下溢油模型，并在挪威附近海域利用实地实验对模型进行了验证。

深水区水下溢油相对海面溢油复杂很多，并常伴随着大量气体的溢出，极大地增加了深水区水下溢油的复杂性，其复杂度主要体现在：① 在高压低温的环境下，天然气与海水在上升过程中易形成冰状水合物，上升至低压高温的环境时水

合物又会重新分解成天然气和水；② 高压的环境下，天然气以非理想气体存在；③ 油气上升运移过程中，发生卷吸、油气溶解等复杂过程，且粒径分布和上升速度是在不断变化。

1 深水区水下溢油

根据溢油在上升过程中油滴和气泡的行为状态，将深水区水下溢油分成 3 个阶段：浮射流阶段、浮力羽流阶段和对流扩散阶段，其中浮射流和浮力羽流阶段合称为近场阶段，对流扩散阶段称为远场阶段。近场阶段可以将沿轨迹中心线的污染物视为一系列互不影响的控制单元体，每一个控制单元体可以用质量、浓度、温度和盐度等属性来描述。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；远场阶段是污染物到达中性浮力层后的阶段，本阶段羽流完全失去了初始动量，油气可视为不同粒径大小的油滴和气泡，仅在自身浮力和横流的作用下运动。深水区水下溢油阶段见图 1。

深水溢油事故发生以后，溢油在初始动量的作用下进入水体，并伴随大量天然气的溢出，与水体发生相互作用后破碎成油滴和气泡，在

^{*} 基金项目：中国海洋石油总公司十二五科技项目“深水区水下溢油数值模拟技术研究”。

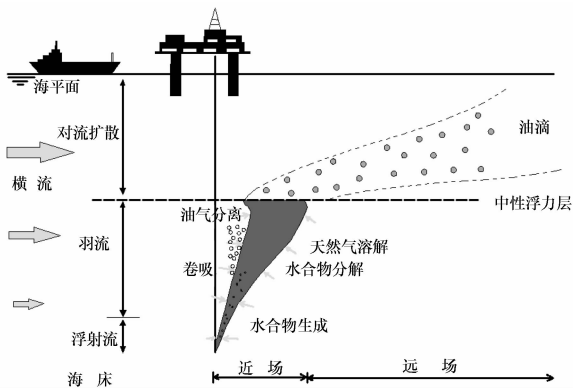


图1 深水区水下溢油阶段

自身浮力的作用下形成浮射流；油气在上升的过程中处在高压低温的环境下，天然气与海水形成冰状水合物，但上升至相对低压高温的环境下水合物重新分解成天然气和水；由于油滴和气泡的上升速度差异较大，并在横流的作用下羽流发生弯曲导致油气分离，慢慢脱离羽流，这样不仅减小羽流动量，而且直接降低羽流抬升高度；溢油初始浮射动量在上升的过程中衰减较快，到中性浮力层后油滴和气泡在对流扩散作用下输运，粒径大的油滴上升至海面，粒径小的油滴可能悬浮在水体中，而气体在上升的过程中大部分发生溶解。

2 深水溢油行为

深水溢油行为主要包括油气粒径分布、上

升速度、油气分离及卷吸过程等，其行为研究是溢油建模、溢油应急和损害评估的基础。

2.1 粒径分布

油气在初始动量的作用下喷射到密度大的环境流体中，由于油气自身密度小，在溢出点产生较强的湍流，由湍流造成的不稳定性使油气极其容易分散成小颗粒。油滴和气泡粒径分布决定了溶解率、水合物生长速率等，进一步影响溶解和水合物等归宿；另一方面，油气上升到中性浮力层后，粒径分布决定着运移轨迹，粒径大的粒子较快上升到海面，粒径小的粒子需几天甚至几周的时间上升至海面，更小粒径会悬浮在水体中，从而影响油气上升到海面的位置和时间。在 1 000 m 水深处，粒径大的油粒子在数十分钟时间内可上升至海面，水平扩散距离几十米；然而粒径小的油粒子（约 100 μm ）需 15 d 的时间上升到海面，上升速度约为 $6.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ，水平扩散距离达到 10 km 以上。

粒径分布对油气运移和浓度分布具有重要的作用，很多学者已开始对粒径分布进行研究。Johansen^[8]通过“deepspill”实验发现 95% 的油滴粒径小于 7.5 mm，中值粒径为 5 mm；Yarpa^[9]认为油气粒径分布主要介于 1~10 mm 之间。经过实验研究，油滴粒径主要位于 1~8 cm 之间，气泡粒径主要位于 1~9 cm 之间，油滴和气泡粒径分布见图 2。

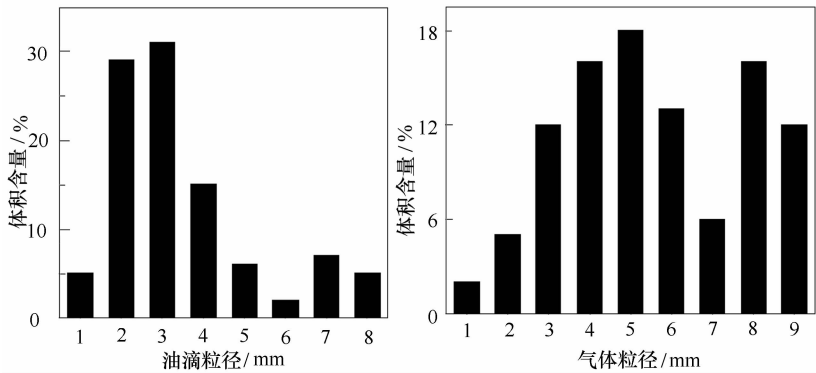


图2 油气粒径分布图

影响油气粒径分布的影响因素较多，主要有粒子破碎与合成^[10]、水合物^[11]，压强^[12]、溶解^[13]和分散剂^[14]。油气受湍流、剪切力以及浮力等作用，粒子会发生破碎，相反也会由于这

些作用粒子之间碰撞发生粒子合成，经过粒子破碎和合成作用后粒径分布逐渐趋于动态平衡；此因素主要发生在近场阶段的初期，但决定了粒子在整个运动过程中粒径分布格局。数量平

衡模型可成功模拟粒子破碎与合成对粒径的影响机制, 并与水槽实验数据进行了对比验证, 可较好地模拟粒子在上升过程中粒径变化趋势, 模拟值与实测粒径对比见图 3。

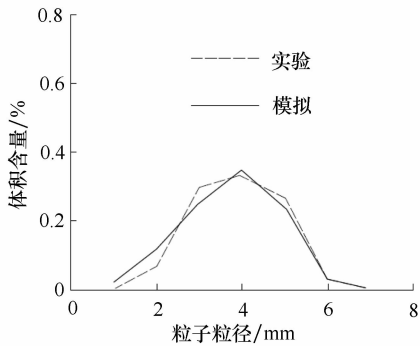


图 3 数量平衡模型粒径对比

压强和溶解对气泡粒径的影响相对较大, 但对于油滴粒径影响可忽略不计。气泡在上升过程中所受到的压强减小导致粒径变大, 但气体在海水中的溶解度较高会导致气泡粒径减小。综合以上两种因素考虑, 由于溶解大于压强对粒径的影响, 最终导致粒径会减小, 压强和溶解对气泡粒径影响见图 4。

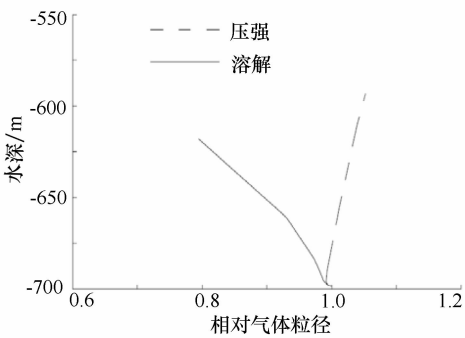


图 4 压强和溶解对气体粒径影响图

气泡粒径和水合物也有一定的关系。在高压低温的环境下, 气体转化成水合物, 水合物的密度大于气泡密度, 被水合物包裹的气泡由于受到压力影响粒径减小, 并受水合物溶解的影响, 气泡粒径进一步减小^[11]。当气泡完全转化水合物后, 水合物仅在溶解的条件下气泡粒径减小速率变慢。在“deepspill”实验中以初始粒径 5 mm 的气泡为研究对象, 研究了水合物对粒径的影响, 粒径变化趋势见图 5。

消油剂是溢油应急过程中的重要手段, 大

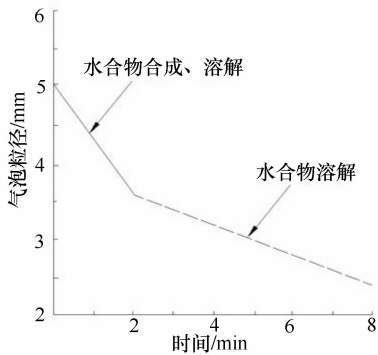


图 5 水合物对粒径的影响

量的消油剂成功应用在墨西哥湾溢油事故中。消油剂的使用会使油滴发生破碎导致油滴粒径减小, 图 1 所示的油滴粒径使用消油剂后粒径分布见图 6, 粒径范围在 100~900 μm 的油滴含量占 40%。

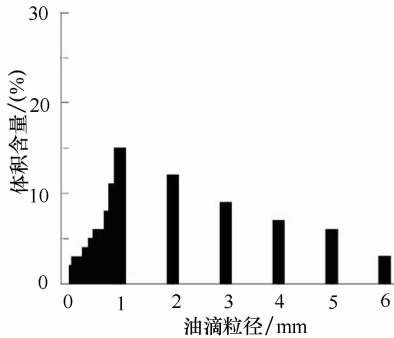


图 6 消油剂作用后粒径分布

2.2 上升速度

油气上升速度影响粒子上升时间, 进而影响了其运移路径和水平扩散范围, 因此上升速度对模拟油气行为及归宿具有重要的作用。很多学者利用斯托克斯定律或雷诺定律研究粒子在液体中的上浮速度, 但此公式仅适用于球形粒子, 并且深水區油滴和气泡在上升过程中多以球形、椭球形、球帽形存在, 此公式不适合于深水區油滴气泡上升速度的计算。Li zheng 等^[15]在斯托克斯定律的基础上对公式进行了改进, 并利用实验数据与计算公式进行了对比, 验证结果吻合较好。

粒子上升速度的影响因素较多, 主要包括粒子粒径、海水特性等。由前文可知, 消油剂作用后的油滴粒径分布主要在 100 μm ~8 cm 之

间，不同粒径的粒子上浮速度见表 1 和图 7。由图 7 和表 1 可知：粒径是影响粒子上升速度的主要因素，粒径大的粒子受到的浮力越大，上升

速度越大，但由于粒子倾向于非球形以及受到粒子拖拽力影响，上升速度不会无限制增加，上升速度与粒径分布不呈线性关系。

表 1 不同粒径对应上浮速度

序号 (<i>i</i>)	粒径/ μm	上浮速度/ (V , (m/s))	V_{i+1}/V_i
1	100	0.000 649 6	—
2	200	0.002 22	3.42
3	300	0.005 21	2.35
4	400	0.008 16	1.57
5	500	0.011 67	1.43
6	600	0.015 15	1.30
7	700	0.018 44	1.22
8	800	0.021 48	1.16
9	900	0.025 24	1.18
10	1 000	0.029 06	1.15
11	2 000	0.065 84	2.27
12	3 000	0.092 16	1.40
13	4 000	0.108 99	1.18
14	5 000	0.124 83	1.15
15	6 000	0.132 76	1.06
16	7 000	0.131 04	0.99
17	8 000	0.129 48	0.99

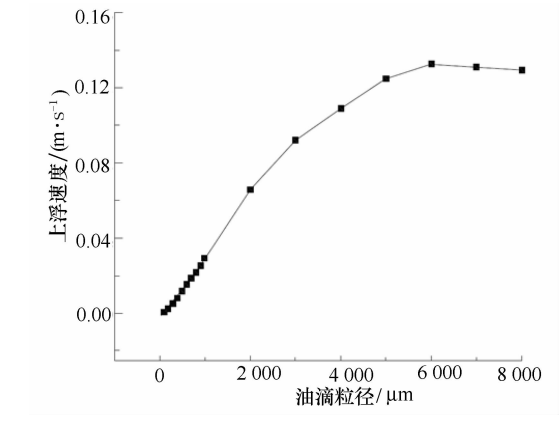


图 7 油滴粒径分布对上升速度影响图

2.3 油气分离

粒子在上升过程中由于上升速度不同，与环境流体之间产生一个滑脱速度，且在横流的作用下羽流发生弯曲而导致油气分离。油气分

离不仅改变了羽流的动量和浮力大小^[16]，而且改变了羽流中性浮力层的高度，进而影响粒子的上升轨迹。图 8 是油气分离对粒子轨迹影响图。从图中可以看出，油气分离对粒子轨迹影响特别大，是否考虑羽油气分离对粒子的中心轨迹及边界线影响大不相同，如考虑油气分离中性浮力层位置在水深 347 m，上升需要的时间为 318 s；相反不考虑油气分离情况下中性浮力层位置在水深 266 m，上升需要的时间为 278 s。此外，油气分离还会降低羽流的上升速度，因此考虑油气分离的情况下上升至中性浮力层需要的时间相对较长。

油气分离的影响因素主要包括相邻粒径粒子间的速度比 (V_{i+1}/V_i)、横流和初始动量等。由表 1 可知，粒径小的油滴之间具有较大的速度比，粒径大的油滴之间速度比相对较小，并

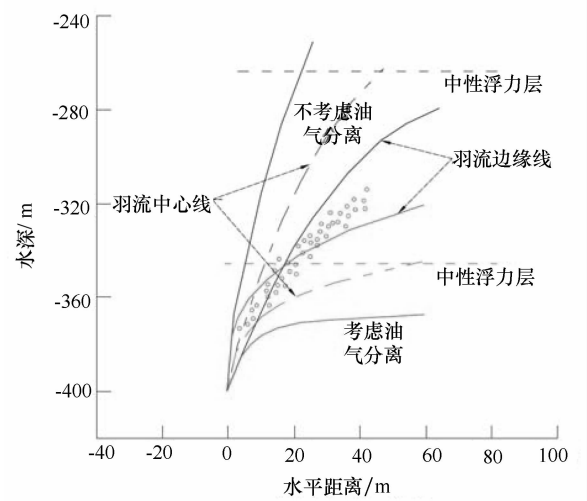


图 8 油气分离对粒子轨迹的影响

且相邻粒径粒子速度比越大, 油气分离越易产生。横流可以使羽流发生弯曲, 是粒子发生水平运动的主要驱动力, 横流越大时水平位移量相对越大, 油气分离越容易发生。

2.4 卷吸过程

当喷出的油气以羽流的形式在水中上升时, 羽流将和水体发生作用, 导致水体进入羽流体内, 这一过程称为卷吸, 主要包括剪切卷吸和对流卷吸。剪切卷吸是由溢油和水流之间的剪切应力引起, 即使在静止的水体中仍然存在; 对流卷吸是由水流的对流作用进入羽流体内引起的。卷吸对羽流的行为和过程, 尤其是羽流的体积、浓度和速度有着重要影响。卷吸过程的直接后果是将周围密度较大的海水裹入羽流中, 从而增加羽流的密度和体积, 会减小羽流的动量小, 从而降低羽流的上升速度。

如果不考虑卷吸作用, 羽流的体积及其污染物的浓度变化将主要由污染物的溶解和扩散导致, 这样羽流在上升过程中体积和浓度的变化也会非常小, 与实际观测结果不相符。研究结果表明, 卷吸作用可以使羽流半径增加约 100 倍, 如果忽略卷吸过程, 羽流体积将会减是考虑卷吸情况的 1/3 000 倍, 羽流中的污染物浓度将增大到考虑卷吸情况的 1 万倍, 而羽流的最终上升速度将会增大 100 倍。因此, 不考虑卷吸过程油气将不会进入远场阶段而直接上升至海面, 这与实验数据不相符。

3 深水溢油归宿

3.1 水合物

深水区的水下溢油过程中, 在高压低温的环境下, 天然气与水容易结合成一种固态的冰状物——水合物。当水合物上升到达相对低压、高温的环境下会分解成气体, 并同时伴随着水合物的溶解过程。水合物的形成、分解和溶解过程能直接影响到粒子粒径分布、中性浮力层以及扩散范围。

水合物合成时, 气体的体积会大幅度减小, 粒径减小, 密度增加, 这使羽流几乎完全失去原有气体浮力的驱动, 从而大大降低了羽流的上升速度, 以致粒子只能在自身浮力的作用下缓慢上升。由前文可知水合物溶解影响气泡的粒径大小, 近而影响溢油漂移轨迹。

图 9 表明水合物过程也会影响中性浮力层的高度, 考虑水合物过程会抬升中性浮力层的高度, 不考虑水合物过程中性浮力层的高度相对较低。水合物的合成和分解与压强、温度紧密相关, 研究学者^[17-18]在蒙特里湾对甲烷合成水合物的条件进行了研究, 图 10 为甲烷的相态平衡曲线和温度变化曲线, 在大于水深 520 m 的海域可形成水合物, 上升到 520 m 以浅的水域水合物又会分解成甲烷和水。

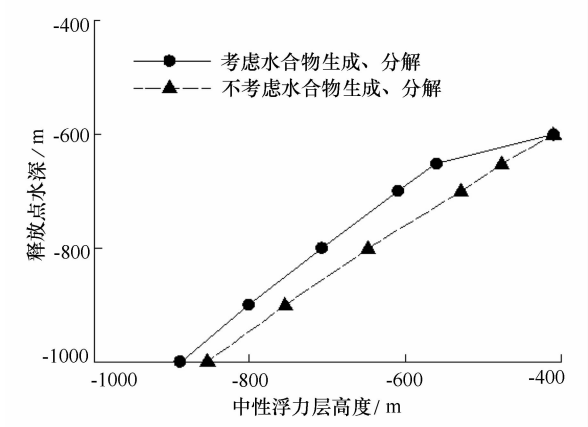


图 9 水合物对中性浮力层影响图

3.2 油气溶解

一般认为油不溶于水, 实际上是溶解度极低。国内外对石油烷烃类成分的溶解度做过一些研究工作, 发现其溶解度与烷烃的含

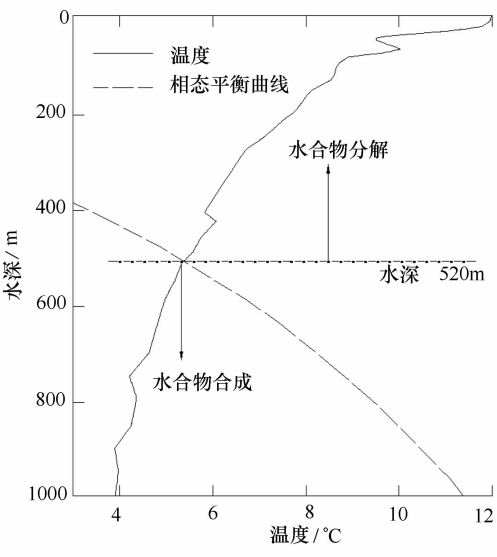


图 10 甲烷相态平衡曲线

碳量有关（表 2）。溢油在上浮过程中，大部分低分子芳香烃组分溶解在水中，其中以苯类烃最明显。溢油中单个组分的溶解度受控于油水分配系数，而不单纯受纯组分溶解度的制约。由于溢油的溶解度很低，一般情况下可不予考虑。

在深水区水下溢油过程中有大量的气体溶解于水中，气体的溶解对羽流的归宿有重要影响。气体的溶解性要受压强、温度和盐度的影响，研究气体溶解过程有利于准确预测油气溢出海面的位置和时间。图 11 为 5 MPa 和 4 MPa 压强下甲烷溶解量，从图中可以看出，压强有助于气体的溶解，压强越大，溶解量越高。从表 2 中可以看出盐度抑制气体的溶解，在淡水中的溶解度较高，而在海水中的溶解度相对较低。温度对溶解度有一定的影响，但影响程度不是很大。

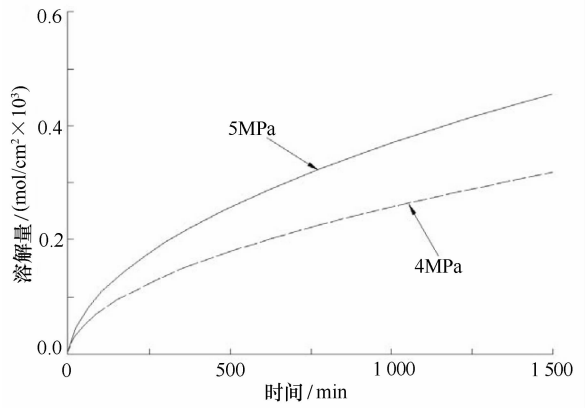


图 11 压强对甲烷溶解影响

表 2 烷烃在淡水和海水中的溶解度（25℃）×10⁻⁹

烷烃	在淡水中的溶解度	在海水中的溶解度
十二烷烃	3.7	2.9
十四烷烃	2.2	1.7
十六烷烃	0.9	0.4
十八烷烃	2.1	0.8
二十烷烃	1.9	0.8
二十六烷烃	1.7	0.1

3.3 悬浮羽流

深水溢油时，粒径小的粒子长期悬浮在水体中，在横流的条件下做水平运动，这一浑浊的条带称之为悬浮羽流。粒子粒径越细，形成悬浮羽流的概率就会越大，消油剂的使用会导致油滴破碎粒径减小，也有利于悬浮羽流的发生^[16-19]，图 12 为悬浮羽流示意图。2010 年墨西哥湾溢油事故中研究学者在水深 1 065~1 300 m 处用水下机器人发现浑浊乳化带；同时在事故现

场水平和垂向上取样，结果发现在这一水深范围内烃类浓度很高，也证实了悬浮羽流的存在。目前悬浮羽流形成机制尚不清楚，需要通过数值模拟或者实验的方法进一步研究。

4 深水溢油模型

海上溢油事故产生主要是井喷井涌、管线破损和海底沉船等原因造成的^[20]。当水下溢油发生以后最为关心的核心问题是：① 水下溢油

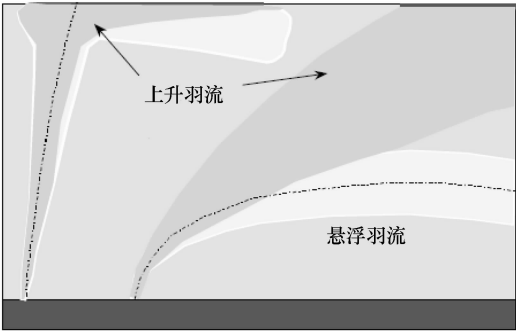


图 12 悬浮羽流示意图

发生后，油膜首次上升到海面的时间和位置；② 油气浓度在时间和空间上的分布；③ 油膜上升轨迹和扩散范围。为解决以上核心问题首先需要在深水区水下溢油行为及归宿研究基础上，通过数值模拟的方法建立深水溢油模型。根据油气在上升过程中的行为研究，深水溢油模型分为羽流动力模型和对流扩散模型。

羽流动力模型即在每一时刻把溢油沿轨迹中心线视为一个控制单元体，每一个控制元可以用它的质量、位置、宽度、长度、平均速度、污染物浓度、温度和盐度来描述，并且这些特征可以随着控制元的移动而改变。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，在这一变化过程中不仅考虑了控制单元体的物理对流扩散作用，还考虑了它的化学变化过程，如溢油的溶解和乳化作用，模型还考虑了溢油的卷吸过程。对流扩散模型利用拉格朗日方法计算污染物的输运。本深水溢油模型的建立基本上已经完成，并在南海荔湾油气田中得到了应用，模型参数选择见表 3。

表 3 深水溢油模型参数设置

参数	说明
地理坐标	115°24′54.449″E 19°54′43.423″N
水深	1 500 m
时间	2012 年 11 月 7 日 12 时至 2012 年 11 月 9 日 12 时
油气比	11 150 : 1
井口半径	1 m
油温	90 ℃
密度	755~811 kg/m ³
喷射速度	2 m/s

图 13 为 3.5 h 溢油模拟轨迹图，大粒径油滴上浮速度较快，将会在溢油发生 3.5 h 后首先到达海面，但大部分小粒径油滴仍然处于水下。在 1 500 m 深的低温高压的海底，甲烷气体（红色）很容易溶解，甲烷气泡在上升至 1 230 m 左右深度后就已经完全溶解从而无法到达海面。另外，1 500 m 深水环境已经满足甲烷水合物的形成条件，降低了气体的上升高度。由于水平海流存在一定的垂向分布结构，当溢油刚进入水体时，粒子的漂移方向是东偏北，随后在 840 m 左右水深处转向西北方向移动，最终大油滴在溢油点的西北方露出海面。

图 14 为 24 h 溢油模拟轨迹图，油的分布范围较之前有了明显增大，向东、西、北 3 个方向都有了不同程度的延伸，油污总体上仍然处于溢油点的北侧，到达海面后的油粒子在潮流和风场的作用下漂移扩散。

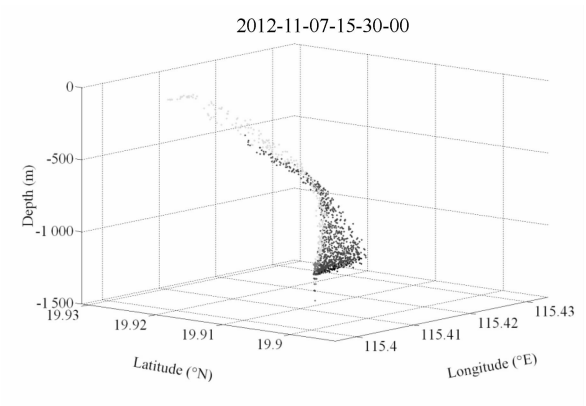


图 13 3.5 h 溢油模拟轨迹

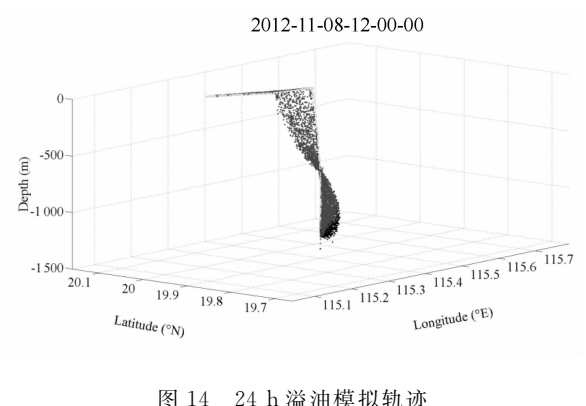


图 14 24 h 溢油模拟轨迹

5 结论

深水区溢油相对海面溢油甚至浅水溢油是

一个相对复杂的过程，并常伴随着气体的溢出，很大程度上增加了深水溢油模拟和深水溢油应急的难度。本文主要研究了深水区水下溢油行为和归宿，探讨了行为和归宿的主要影响因素，进一步论证了各因素的影响机制，并建立深水溢油模型在南海荔湾油气田模拟了油气漂移轨迹。因此通过本研究可以深入了解深水区水下溢油复杂的行为过程，为我国深水溢油防治管理和海洋环境保护提供科学支持，为建立深水区溢油应急体系、损害评估和环境评价具有重要的指导意义。

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 王晶,李志军,GONCHAROV V K,等. 渤海海底管线溢油污染预测模型[J]. 海洋环境科学,2007,26(1): 10—13.

[4] YAPA P D,LI Z. Simulation of oil spills from underwater accidents I: Model development [J]. J Hydraul Res,1997,35:673—688.

[5] ZHENG L,YAPA P D. Simulation of oil spills from underwater accidents II: Model verification [J]. J Hydraul Res,1998, 36:117—134.

[6] YAPA P D,XIE H. Modeling underwater Oil/Gas jets and plumes: comparison with field data[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002, 128:855—860.

[7] JOHANSEN Ø. Development and verification of deep-water blowout models [J]. Mar Pollut Bull, 2003,47:360—368.

[8] JOHANSEN Ø. RYE H, COOPER C. Deep Spill-field study of a simulated oil and gas blowout in deep water[J]. Spill Sci Technol B,2003(8):433—443.

[9] YAPA P D,DISSANAYAKE A L. Bubble plume modelling with new functional relationships[J]. J Hydraul Res,2012,50:646—648.

[10] BANDARA U C,YAPA P D. Bubble Sizes,Break-up,and Coalescence in Deepwater Gas/Oil Plumes [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2011,137: 729—738.

[11] CHEN F,YAPA P D. Estimating hydrate formation and decomposition of gases released in a deep-water ocean plume[J]. J Marine Syst,2001, 30:21—32.

[12] 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]. J Hydraul Res,2010, 48:559—572.

[13] ZHENG L,YAPA P D. Modeling gas dissolution in deepwater oil/gas spills[J]. J Marine Syst, 2002,31:299—309.

[14] DALING P S, MACKAY D, MACKAY N, et al. Droplet Size Distributions in Chemical Dispersion of Oil Spills: Towards a Mathematical Model [J]. Oil & Chemical Pollution,1990(7):173—198.

[15] ZHENG L,YAPA P D. Buoyant velocity of spherical and nonspherical bubbles/droplets[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000,126:852—854.

[16] YAPA P D,WIMALARATNE M R,DISSANAYAKE A L, et al. How does oil and gas behave when released in deepwater[J]. Journal of Hydro-environment Research,2012(6):275—285.

[17] 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,2010,36(4):115—120.

[18] DISSANAYAKE A L,DEGRAFF J A,YAPA P D,et al. Modeling the impact of CO₂ releases in Kagoshima Bay[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2012(6):195—208.

[19] DASANAYAKA L K,YAPA P D. Role of plume dynamics phase in a deepwater oil and gas release model [J]. Journal of Hydro-environment Research,2009(2):243—253.

[20] 安伟,杨勇,吕妍. 深水溢油事故防范与应急处置措施探讨[J]. 中国造船,2012,53:458—463.