

水上事故溢油运动轨迹与环境归宿预测模型的研究进展

李彤¹, 向运荣¹, 张恒²

(1. 广东省环境监测中心, 广东 广州 510308; 2. 加拿大达尔豪斯大学海洋学院, 新斯科舍 哈利法克斯 B3H 4J1)

摘要: 以事故溢油在水面上的运动轨迹和环境归宿为研究对象, 重点对溢油水下分散过程、岸边黏附及受水流冲刷下油膜质量衰减过程、水体悬浮物对石油黏附/吸附量的预测模型研究成果, 以及目前日益受到关注的河流溢油模型的研究进展进行归纳总结。对比分析了不同预测模型结构功能差异和适用性问题, 为不同环境条件下溢油事故的后预警、后预测提供模型选择依据和技术支持。最后就溢油模型尚存的一些问题及未来发展的方向进行了探讨。

关键词: 溢油; 运动轨迹; 环境归宿; 预测模型

中图分类号: X508

文献标识码: A

文章编号: 1674-6732(2013)-03-0005-07

A Review on Predictive Modeling for Accidental Oil Spilling Trajectory and Environmental Fate in Water

LI Tong¹, XIANG Yun-rong, ZHANG Heng²

(1. Guangdong Provincial Environmental Monitoring Center, Guangzhou, Guangdong 510308, China; 2. Department of Oceanography, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia B3H 4J1, Canada)

ABSTRACT: Targeting on accidental oil spilling trajectory and environmental fate, we focused primarily on vertical dispersion of oil spilling in water, land adhesion and re-floatation, adsorption/adhesion by suspended sediment, conducted a wide range of academic collection and discussion on oil spill trajectory and its fate in the environment. By comparing the model structure and functionality differences, also shed some light on the models selection and technical support for post-prediction under different case scenarios. Finally, some discussions about spill model deficiencies and the directions for future development were made.

KEY WORDS: oil spill, trajectory, fate, predictive models

0 前言

20世纪六七十年代, 欧洲和北美地区相继发生了数次规模巨大的海洋溢油事故, 给事故海域及周边沿岸生态造成了沉重、持久的环境影响^[1]。较为典型的案例如1978年发生在法国附近海域的Acomoz溢油事故, 在时隔30年后, 人们依然能在事发点附近沙滩上找到当时溢出原油的痕迹^[2]。时至21世纪, 随着陆地石油资源日益紧缺, 海上原油开采活动逐步加速。虽能一定程度上缓解世界能源稀缺的局面, 但也大大增加了海上事故漏油风险。2010和2011年, 美国墨西哥湾和中国渤海湾先后发生了海上油田漏油事故, 导致大量原油持续溢出, 给周边水域及沿岸陆地生态系统构成巨大威胁, 渔业及水产养殖业更是损失惨重^[3,4]。因此,

如何有效预测事故后溢油在水面上的运动轨迹及扩散范围及性质变化; 如何科学预测、评估溢油可能造成的水面、水体污染及岸边侵袭程度成为溢油问题研究中的首要问题。

溢油在环境中的行为与归宿问题受多个物理、化学及生物等机制共同作用, 内在机理十分复杂, 而构建科学高效、适用性强的数学模型则更是复杂精密的系统工程。然而, 经过多年的累积发展, 溢油建模的理论和应用研究均取得了长足的进步。其中, 尤以溢油的风化过程、乳化过程及蒸发过程的研究最为迅速。严志宇等人分别就溢油在海洋

收稿日期: 2013-02-17

作者简介: 李彤(1981—), 男, 博士, 主要从事水环境质量评价与水质预警预报方面的研究。

中的风化过程,尤其是蒸发和乳化过程的研究进展进行广泛的归纳和总结^[5-7]。此外,牟林等就几种代表性的海洋溢油模型及其应用进行了综述^[8]。

但总的来看,现有的进展综述主要以室内实验相对可控的溢油风化过程或当下主流溢油模式的应用现状为主。关于溢油环境行为与归宿的深化研究,尤其是溢油垂向分散、岸边黏附与冲刷过程等制约溢油模型发展的局部问题研究以及近些年来日益关注的河流溢油问题的研究进展总结还不多见。鉴于此,笔者对水上事故溢油运动轨迹与环境归宿预测模型进行归纳,重点对水上溢油水下分散过程、溢油在岸边黏附及受水流冲刷下的质量衰减过程、水体悬浮物对石油的黏附/吸附过程的模型研究成果进行总结,为不同环境条件下溢油事故的后预警、后预测提供选择依据和技术支持。

1 溢油轨迹模型研究进展

早期溢油模型将油膜视为一个整体,通过受力分析建立油膜形变方程,进而推导溢油的扩延速度与范围的解析解。FAY 最早提出平静海面条件下,溢油扩展的三阶段模型,即重力-惯性力阶段、惯性力-黏滞力阶段以及黏滞力-表面张力阶段^[9]。在 FAY 的研究基础上,许多学者又相应地进行了改进,提出了不同的扩展模型,以更加精确地反映不同环境条件下油膜扩展、扩散过程。如元朗模型将初始油膜假设为近似圆柱体,认为扩展是油所具有的位能转变为黏性逸散能和表面张力能的结果,进而推导出油膜的扩展半径公式^[10];布洛克(Blokker)模型则只考虑重力和溢油体积的影响,并忽略表面张力和黏性力作用,进而推导出新的油膜扩展直径公式^[11];武周虎、赵文谦公式在考虑油膜扩展和各项异性扩散作用的同时,采用拟分子扩散法模拟紊动水流导致的油膜分散,从而能够反映出油膜在实际流场下的不均等扩展过程^[12]。姜安刚等也基于该思想构建了近岸溢油事故的快速预报方法,并通过水面投油实验,对比计算和实测油膜中心点位置、油膜长短轴长度变化,证实了模型的可靠性^[13]。ARAVAMUDAN 等认为在稳定的紊流条件下,油膜的质量分布方差与时间呈近似线性变化,表面扩散受大尺度涡流支配而形成高斯分布,其扩散尺度可用时间的函数表达: $A_s = 4\pi\sigma^2$,式中: $\sigma^2 \approx 5 \times 10^{-6}t^{2.3}$ ^[14]。

然而,尽管溢油整体模型是由严格的力学分析

推导而来,具有模型结构简单、快速预测的优点。但是由于它们大多将油膜看作完整的圆形或椭圆形的整体。当水面条件复杂,各种动力因素(如风、波浪等)并存时,该方法不能很好地反映出油膜可能发生的复杂形变以及特殊条件下油膜撕裂、破碎情况,因此在模拟油膜的微观形态变化和岸边行为时困难较大。

近 20 年来,基于拉格朗日“油粒子”概念的溢油模型发展迅速,在海洋及河流溢油事故模拟中得到广泛的应用。不同于传统溢油整体模型,“油粒子”模型将水面油膜视为大量的独立运动的粒子群。同时,油膜的运动轨迹及性质变化可以看作是粒子运动及性质变化的综合。油粒子运动模拟一般采用欧拉-拉格朗日法,即通过计算外部动力因素(如水流、风以及波浪等)欧拉场,通过矢量合成,得到油粒子所处位置的合成速度;采用拉格朗日法计算粒子运动的累积位移。目前国内外基于油粒算法的溢油模型、模式有很多,具有代表性的有张存智等的渤海三维动态预测模型^[15]、姜安刚等的蒙特卡罗油粒子模型^[13]、汪守东等的双层油粒模型^[16]、SHEN 和 YAPA 等人的 ROSS 河流溢油模型以及 MIKE-SA 模型、DELFT-PART、NOAA 的 GNOME 模型,ASA 公司的 OILMAP、COZOIL 等^[17-23]。可以说,目前在溢油轨迹模拟方面,拉格朗日油粒子模型已经成为主流方法。

2 溢油归宿研究进展

2.1 油膜水下分散过程

油膜的水下分散过程(Vertical Dispersion)是指破碎油膜以细微油滴的形式进入水体,并随流输移和扩散的过程^[24]。水下分散量及其稳定性与油滴粒径、湍流能量的大小有关。然而,目前针对油向水下分散的理论和实验研究开展的并不如其他溢油风化过程,正如 SEBASTIAO 等总结的那样,人们对油膜此过程的认识是“少/很少(Poor/Very poor)”^[25]。从研究历程上看,HINZE 和 FRIEDLANDER 最早对湍流能量与油膜水下分散油滴粒径的相关关系进行了研究^[26,27]。但过去很长时间里,在估算溢油水下扩散通量上,人们大多采用主观估算或将其设为参数化的特征值,缺乏严谨推导过程。

通过总结以往研究的成果,笔者认为目前国内外具有代表性的研究成果有三类:一是从水流紊动

出发,建立基于油滴垂向运动方程的水下分散模型,如赵文谦等人推导了油滴在水下扩散过程的一维、二维和三维对流扩散微分方程,并在特定的定解条件下给出了模型解析解^[28]。通过与FORRESTER的现场实测数据的对比,证明模型计算的理论值能与实测值较好吻合。二是针对海面存在破碎波条件的油膜水下分散模型。这类模型中以DELVIGNE和SWEENEY提出的基于破碎波理论的海上溢油卷吸模型最具代表性^[29]。该法从波浪能量耗散过程出发,通过模拟风生不平静海面的波浪状况(波数、浪高、波浪周期等),进而对油膜卷吸量大小进行计算。三是以MACKAY等人根据野外实验确定的水下分散经验模型。1980年MACKAY等人对不同风况条件下油膜向水下分散的过程进行实验,发现油水界面处的分散通量与水面状况和当地风速相关,通常以风速的二次方成正比;此外,进入水体的油滴形成永久弥散的量与油膜的表面张力、黏度以及油膜的厚度有关^[30]。

对比可以发现:如果将溢油水下分散过程分解为溢油破碎入水和水体扩散两个过程,那么赵文谦等人的研究更偏重于后者,尤其是乳化油在水下输移扩散的过程,而没有针对溢油入水过程进行研究;而DELVIGNE和MACKAY等主要侧重于油膜入水过程以及水体悬浮油质量的变化。同时,DELVIGNE的模型还重点反映了悬浮油的粒径组成以及不同粒度油滴的运动差异性,因此他的方法更能反映出油滴在水体分布的实际情况;MACKAY等人的经验模型得到的是水面油膜的持久性分散量,没有考虑非持久性分散(较大的分散油滴)的入水过程及其在水体中的运动行为。

1997年美国土木工程师协会水资源工程溢油模拟委员会在对溢油模型研究进展的总结文章中这样对MACKAY模型进行了评价——“MACKAY和ZAGORSKI构建的基于风速、油-水表面张力、黏度以及油膜厚度的扩散模型能够在一定情形下给出合理的模拟结果,并能区分开不同厚度油膜的(水下)扩散量”^[24]。笔者认为赵文谦和DELVIGNE等人的研究都是以海洋溢油为前提,波浪是导致油滴入水的主要因素,这与MACKAY等人的前提假设不同,后者是以不平风场作为油膜入水驱动,因此在模型的原动力上存在较大差异。对比DELVIGNE和MACKAY模型而见:在海洋环境条件下,特别是存在明显风生波浪条件(通常以

5 m/s 风速为阈值)时,油膜自身性质在破碎波能量面前显得微不足道,且无碍于油膜随浪垂向卷吸;而波浪卷吸现象较少的水环境中,如内河河流,由于物理边界的限制以及风场条件不足,显著波浪的形成条件遇到瓶颈。油膜只是漂浮在不平静水面上,呈波浪式起伏(当然也要排除河道近岸以及其他特殊水域可能出现的破碎波情形),此时油膜向水下分散理当考虑油膜自身性质的变化。

2.2 溢油岸边黏附与冲刷过程

岸边黏附与冲刷过程是溢油归宿模拟的重要组成部分。不同类型的岸边介质具有不同的滞纳油膜容量及滞留时间,这不仅能改变溢油在不同环境介质中的分布,同时还能一定程度上影响到溢油的运动轨迹^[31]。大量研究表明,溢油的性质(主要为黏度)、岸边界类型以及水动力环境是影响黏附总量及冲刷量变化的主要因素^[32]。溢油抵岸后与岸边介质的交互过程的研究大致可以分为岸边黏附油膜过程以及黏附油膜受波浪或水流冲刷而导致的油膜释放过程两个方面。

溢油岸边黏附模型研究方面,最简单的方法莫过于“一刀切”地认为油膜抵岸则被完全黏附并至此终止运动,这在早期溢油模型中曾广泛采纳。但由于没有考虑岸边介质黏附容量(尤其是最大黏附量, Holding Capacity)、溢油的自身特点(如溢油类型及黏度大小等)与风化程度(如油膜蒸发过程导致的质量衰减、黏度变化等)以及黏附油膜在不同类型岸界上再释放潜力的差异性(例如溢油在礁石、沙滩、植物滩等介质上的再释放能力就相差迥异)等因素,因此这一假设与实际情况相差较大^[32]。计算黏附量的另外一种方法是通过岸边介质分类,分别计算各类型岸界的最大黏附量,累积计算最大黏附量。该法由于更加贴近实际,相应的研究和应用也更为广泛^[33-37]。GUNDLACH等人 Amoco Cadiz、Urquiola 和 Ixtoc 1 溢油事故的调查研究中,针对岸边最大黏附量进行了分类研究^[33]。对于7种不同性质的海岸类型,他给出了重油、轻油以及中黏度油的最大表面黏附厚度以及最大下渗深度,提出了用于计算最大黏附量公式。CHENG等人则进一步完善了GUNDLACH等人定义的海岸类型的最大黏附量计算方法,不仅明确了重油、轻油以及中黏度油各自取值范围;同时基于油膜下渗深度以及下渗深度内的含油率给出了油膜下渗量计算公式^[38]。REED等人在其构建的

COZOIL 模型中,将可能受油膜影响的海岸边界分为前岸 (Fore-shore) 和后岸 (Back-shore) 两种类型,并基于油膜性质、岸边坡降、介质类型及油膜下渗深度计算最大黏附油量^[23]。与 GUNDLACH 和 CHENG 等人不同, REED 在计算油膜下渗深度是基于 Darcy 定理推导而得。此外, OWENS 通过沙滩实验也提出了沙滩黏附油膜的计算公式: $C_{\max} = L(m) \times W(m) \times D(m) \times \eta_{\text{eff}}$ 。式中: L 、 W 和 D 分别为沙滩的长、宽和厚度, η_{eff} 为有效孔隙度,但下渗深度则是基于经验法^[39]。

比较发现, COZOIL 模型结构相对复杂,对岸边地形地貌的基础资料要求较高。在对未知区域或资料相对匮乏的地区进行岸边黏附量计算时困难较大; CHENG 等人的计算方法实际上是 GUNDLACH 工作的延伸,没有过多参数化指标,实用性较强。

油膜与岸边交互作用的另外一个方面是黏附油膜冲刷模型。该模型主要用于描述岸边黏附油膜在水流或波浪冲刷下脱落或再悬浮过程。OWENS 等最早通过现场观察发现波浪对于沙滩黏附油膜的洗脱率有直接的关系^[40]。MANCINI 等对 1985 年 Arco Anchorage 溢油事故后油膜质量变化过程的研究中发现,受潮汐水流冲刷较为频繁的沙滩潮间带上的油膜质量减少为原来的 1/14,说明冲刷过程对于油膜的消失过程具有重要意义^[41]。HAYES 等和 JAHNS 等也通过实地考察得出类似结论^[42,43]。目前应用最为广泛的油膜黏附与冲刷(或称“衰减”)过程的模型当属 TORGRIMSON 提出的基于“半生命周期”(Half Life)的概念模型,其描述陆地黏附油膜的质量衰减过程方程为: $\Delta V_b / V_b = 1 - 0.5 \Delta t / \lambda$ 。式中: ΔV_b 为水流冲刷入水量, V_b 为岸边吸附量, Δt 为计算时间步长, λ 为冲刷半衰期。同时他还将不同岸界类型(如礁石、沙滩、沙砾滩及植物滩等)按冲刷衰减速率高低依次定义了半生命周期,时间尺度从小时至年不等^[44]。

2.3 溢油黏附/吸附过程

水体悬浮物对溶解态石油烃(Dissolved Hydrocarbon, DHC)以及水体悬浮态的细微油滴具有吸附或黏附作用,并能通过自身沉降过程将其带入底泥环境。某种程度上说,悬浮物对油污水体具有一定的“净化”功能;但从另一角度看,该过程也是导致底泥环境石油烃浓度增值过程的主要原因之

一^[45,46]。这里笔者主要针对 DHC 和水体悬浮油滴与悬浮物的黏附/吸附过程导致的底泥石油烃累积过程的模型研究成果进行归纳总结;而溢油中,特别是重油中比重较大的杂质成分,如碳球(Tar Ball)、沥青质(Resins)和蜡质(Wax)等,由于自身沉降过程导致的底泥石油污染暂不在讨论之列。

溢油经悬浮物吸附/黏附进而导致的底泥累积过程研究始于国内外多次的现场调查和模拟实验,尔后方出现了相关的数学模型。BOEHM 较早地通过对海上及近岸悬浮物与石油烃相互作用的实验发现,当悬浮物浓度在 1~10 mg/L 时,海底的石油烃累积量很小;而当悬浮物浓度在 10~100 mg/L 时,石油烃沉积通量增幅较大;而当悬浮物浓度大于 100 mg/L 时,大量的石油烃通过悬浮物的沉积过程进入底泥,造成较高的底泥石油烃增值浓度^[47]。JOHANSSON 等在对 Tsesis 溢油事故(溢油量约 300 t)的底泥环境调查中发现,约有 10%~15% 的石油累积进入底泥环境^[48];而 ESG 组织(The Ecological Steering Group on the Oil Spill in Shetland)在对 Braer 溢油事故(溢油量约 30 000 t)的调查中发现,约有 30% 的溢油沉积到表层沉积物中^[49]。PAYNE 和 KIRSTEIN 等建立了石油烃在底

泥中的累积经验公式: $Q_{\text{sed}} = k_a \sqrt{\frac{D_e f_{\text{bw}}}{H_{\text{rms}} \rho_w \nu_w}} C_{\text{oil}} C_{\text{sed}}$ 。

式中: k_a 为黏附/吸附系数, D_e 为能量耗散系数, f_{bw} 为单位面积白浪数, H_{rms} 为有效浪高的开方, ν_w 为水体黏滞系数^[50]。目前该公式已经应用于 NOAA 的 ADIOS1 及 ADIOS2 溢油风化模型中^[51]。1989 年, PAYNE 等人对上述公式进行了更深入的研究,并完善了水体石油浓度变化的动力方程: $dC/dt = -1.3\alpha (\varepsilon/\nu) 1/2C \cdot S$; 对于悬浮物浓度较高时: $dC/dt = -1.3\alpha (\varepsilon/\nu) 1/2S$ 。式中: α 为悬浮物形状及黏附参数, ε 为能量耗散系数, ν 为水体黏滞系数^[52]。REED 等人在其假设溢油事故模拟中采用一个累积经验公式: $F_c = K_c C_{\text{ss}} F_{\text{oil}}$ 。其中, F_c 为沉积到底泥层的油浓度, K_c 为黏附分配系数(Adhesion Partition Coefficient), C_{ss} 为悬浮物浓度, F_{oil} 为水体石油浓度^[53]。

总结前人研究的工作可以发现,无论是 PAYNE 还是 REED 等人的数学模型都是以经验表达式为主,模型的参数(如 α , ε)取值复杂,主观成分较重,计算结果的敏感性和准确性将受到一定程度的影响;同时,由于大多数预测模型没有将溢油轨迹、

水质变化、泥沙运动与沉积动力学过程纳入模型体系,因此还只能对事故可能造成的底泥累积总量进行估算,而不能合理预测底泥石油累积污染的空间分布特征及其变化趋势。

3 河流溢油模型研究进展

与海洋溢油模型研究相比,河流溢油模型的研究起步相对较晚。但凭借着海洋溢油问题研究水平的提升,尤其是在溢油轨迹、风化过程研究丰富成果基础上,河流溢油模型通过借鉴和改进而迅速发展。SHEN和YAPA等人较早开启了河流溢油模型研究的先河,并为河流溢油事故条件下的油膜轨迹与归宿预测展开了卓有成效的理论探索^[17,18]。在溢油轨迹模拟方法上,他们沿用了拉格朗日油粒子算法;在溢油风化过程综合考虑了油膜蒸发、溶解以及岸边黏附与冲刷过程。随后,在原有模型的基础上,又相继开发了能考虑覆冰条件下河流溢油双层数学模型——ROSS1及其改进版ROSS2(River Oil Spill Simulator),并在St. Lawrence河和Ohio-Monongahela-Allegheny河流溢油事故中得到应用,成功预测了溢油前锋位置及其性质变化过程^[54-56]。HIBBS等人建立了可用于预测溢油事故后河流水体石油烃浓度变化的一维河流溢油模型,推导了油膜纵向的一维扩展方程,并结合水流流速和风速条件构建了一维溢油轨迹模型^[57]。在油膜质量变化模拟上,HIBBS等人将溢油整体质量变化过程分解为各组分的蒸发、溶解以及水体溶解态石油烃的挥发过程,并最终加以综合^[58]。然而,该模型并没有考虑溢油乳化、岸边吸附与冲刷过程以及悬浮物吸附、沉积过程,油膜在湍流作用下的水下分散过程亦未考虑。SAMANTHA等通过改进NOAA的GNOME溢油模型,对溢油在密西西比河中的运动轨迹进行了模拟和预测,以考察不同径流条件下,各种类型的河岸边界对溢油的滞纳量与滞留时间以及对不同流量水平条件下溢油在河流体系的时空分布特征^[31]。黄廷林等人建立了一维多沙河流石油类污染物的吸附和解吸模型^[58,59]。尽管该模型不是以溢油作为研究对象,但其对溢油事故后水体石油烃向底泥迁移过程的研究具有重要的参考价值。模型以水相、悬浮泥沙及底泥上石油类污染物的吸附平衡关系为出发点,基于质量守恒构建了一维河流石油烃迁移转化的基本方程,通过拉普拉斯变化定解推导出模型解

析解,进而预测水体、悬沙以及底泥上的石油分布。通过与实测资料对比,证实模型的计算结果基本合理。

此外丹麦的DHI(Danish Hydraulic Institute)公司开发的MIKE-SA模型和荷兰Delft Hydraulics公司开发的DLEFT-PART模型也是目前较为先进的可用于河流溢油问题研究的商业软件。MIKE-SA模型以Mackay重力-黏滞力公式推导溢油的扩展过程^[30],采用拟组分法计算溢油蒸发量和溶解量,垂向油膜水下扩散通量采用了MACKAY经验公式^[30],同时软件还集成了油膜乳化及热传导过程^[19]。李飞鹏等人运用MIKE-SA模型对2003年发生在上海黄浦江上的一次溢油事故进行了数值模拟,其预测的水体石油烃浓度变化过程与实测值十分吻合^[60]。DELFT-PART模型采用了Fay和Hoult公式预测油膜延展尺度;采用DELVIGNE和SWEENEY等人波浪卷吸模型计算油膜入水量;但在预测油膜蒸发过程时,其采用的是一阶衰减公式,油膜质量的衰减系数由用户提供^[29]。同时在预测油滴沉降过程时,DELFT-PART采用黏附概率(Sticking Probability)法模拟,即当油滴运动至河岸边界(河岸或河床)时,若计算机产生的随机数大于用户给定的黏附概率时则被黏附,反之则保持自由状态。

4 问题与展望

通过对前人研究工作总结发现,目前溢油轨迹与环境归宿问题的模型研究已相当广泛和深入,并取得了丰硕的研究成果。河流溢油模型在海洋溢油模型的基础上,通过借鉴现有成功经验,发展了适合河流水力特征和物理边界特征的河流溢油轨迹和环境归宿模型。然而这些模型仍存在一定程度的不足,值得进一步深入研究。例如,目前溢油模型没有考虑水位变动情况下油膜可能污染岸边介质范围,并未将其纳入岸边黏附总量计算,这对于感潮河流显然是不够的;其次,多数河流溢油模型,在模拟预测底泥石油烃累积过程中,往往采用了经验或半经验公式,这不仅增加了模拟预测结果的人为主观性,以此进行的溢油归宿研究也有失客观性和准确性。笔者认为,在模型硬件平台的计算效率能得到充分保障的条件下,河流溢油模型若能针对动水位条件河流的水动力特点,在模型设计和结构中进一步细化油膜在岸边的微观行为过程,

更加客观地反映油膜与岸边介质的黏附-冲刷过程,将有助于提高溢油运动的模拟精度;同时将吸附理论、泥沙输移及沉积动力学纳入溢油归宿模型体系中,有利于更加真实、客观地反映水体悬沙的载体和中间传质角色,完善溢油归宿理论,提高复杂水环境下,石油向底泥迁移过程的模拟精度。

[参考文献]

- [1] PAUL f, KINGSTON F. Long-term environmental impact of oil spills[J]. *Spill science and technology*, 2002,7(1-2):53-61.
- [2] REED M, GUNDLACH E R. Hindcast of the Amoco Cadiz oil spill[J]. *OCEANS*, 1988;847-852.
- [3] 贝少军,董艳. 墨西哥湾溢油启示录[J]. *中国海事*, 2010(6):4-6.
- [4] 江淮. 蓝色的呼唤:渤海漏油再敲警钟[J]. *世界知识*, 2011(21).
- [5] 严志宇,殷佩海. 溢油风化过程研究进展[J]. *海洋环境科学*, 2000,19(1):75-80.
- [6] 严志宇,许海梁. 溢油乳化过程的研究进展[J]. *交通环保*, 2002,23(2):1-5.
- [7] 严志宇,殷佩海. 海上溢油蒸发过程的研究进展[J]. *海洋环境科学*, 2000,19(2):74-79.
- [8] 牟林,邹和平,武双全,等. 海上溢油数值模型研究进展[J]. *海洋通报*, 2011,30(4):473-480.
- [9] FAY J A. The spread of oil slicks on a calm sea[M]. M. I. T. Fluid Mechanics Laboratory, 1969.
- [10] 近藤五郎. 流出油的特性[J]. *交通环保, 国外科技(增刊)*. 1983(1):1-28.
- [11] BLOKKER P C. Spreading and Evaporation of Petroleum Products on Water[D]. *Proceedings of the Fourth International Harbour Conference*, Antwerp, 1964.
- [12] 武周虎,赵文谦. 海面溢油扩展、离散和迁移的组合模型[J]. *海洋环境科学*, 1992,11(3):33-40.
- [13] 娄安刚,王学昌,于宜法,等. 蒙特卡罗法在海洋溢油扩展预测中的应用研究[J]. *海洋科学*, 2000,24(5):7-10.
- [14] ARAVAMUDAN K S, RAJ P K, MARSH L G. Simplified models to predict the breakup of oil on rough seas [Z]. *Proceedings of the 1981 Oil Spill Conference*, Atlanta, USA, 1981.
- [15] 张存智,窦振兴,韩康,等. 三维溢油动态预报模式[J]. *海洋环境科学*, 1997,16(1):22-39.
- [16] 汪守东,沈永明,郑永红. 海上溢油迁移转化的双层数学模型[J]. *力学学报*, 2006,38(7):452-461.
- [17] SHEN H T, YAPA P D. Oil slick transport in rivers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988,114(5):529-543.
- [18] YAPA P D, SHEN H T, WANG D S, et al. An integrated computer model for simulating oil spills in the upper St. Lawrence River [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1992,18(2):340-351.
- [19] DHI. MIKE 21 SPILL ANALYSER User's Manual, DHI water & Environment[M]. 2007.
- [20] Delft. DELFT-3D-PART, Simulation of mid-field waterquality and oil spills, using particle tracking[Z]. User's manual, 2005.
- [21] Office of Response and Restoration, NOAA. General NOAA Operational modeling Environment (GNOME) Technical Documentation[R]. NOAA Technical Memorandum NOS OR & R 40, Seattle, Washington, 2012.
- [22] Applied Science Associatesinc. OILMAP user's manual, Version 2.5 [R]. 1998
- [23] REED M, KANA T, GUNDLACH E. Development, Testing and verification of an oil spill surf-zone mass-transport model [R]. Final report to: Mineral Management Service, Alaska OCS Region, Contract No. 14-12-0001-30130; By Applied Science Associates, Inc. (ASA), Coastal Science & Engineering, Inc. (CSE), and E-Tech, Inc., 1988.
- [24] ASCE task committee on modeling of oil spills of the water resources engineering division. State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills [J]. *Journal of hydraulic engineering*, 1996, 122(11): 609-618.
- [25] SEBASTIAN P C G S. Modeling the fate of oil spills at sea [J]. *Spill Science and Technology Bulletin*, 1995,2(3):121-131.
- [26] HIENZ J O. Fundamentals of hydrodynamic mechanisms of splitting in dispersion processes [J]. *AICHE J*, 1955(1): 289-295.
- [27] FRIEDLANDER S K. Behavior of suspended oil particles in a turbulent fluid[J]. *AICHE J*, 1957(3):1-34.
- [28] 赵文谦,江郁. 石油以油滴形式向水下扩散的研究[J]. *环境科学学报*, 1990,10(2):173-182.
- [29] DELVIGNE G A L, SWEENEY C E. Natural dispersion of oil [J]. *Oil & Chemical pollution*, 1988(4):281-310.
- [30] MACKAY D, BUIST I M. Oil spill processes and models [R]. Environmental Canada Report EE-8, 1980.
- [31] SAMANTHA D, CLINTON S W. Effects of shoreline sensitivity on oil spill trajectory modeling of the Lower Mississippi river [J]. *Environmental science pollution research*, 2010(17): 331-340.
- [32] Minerals Management Service, Review of the state-of-the-art on modeling interactions between spilled oil and shorelines for the development of algorithms for oil spill risk analysis modeling [R]. U. S. department of the interior, Final Report, 2007.
- [33] GUNDLACH E R. Oil-holding capacities and removal coefficients for different shoreline types to computer simulate spills in coastal waters [Z]. *Proceeding of the 1987 international oil spill conference*, 1987: 451-457.
- [34] GUNDLACH E R, REED M. Quantification of oil deposition and removal rates for a shoreline/oil spill interaction model [Z]. *Proceedings of the 14th Arctic and marine oil spill pro-*