

# Research Summary of Oil Transport and Numerical Simulation Methods of Oil Spill in Ice Covered Water

Mengran Song<sup>1</sup>, Guangqi Yuan<sup>2</sup>, Yan Huang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin

<sup>2</sup>Dalian Shipbuilding Industry Engineering and Research Institute CO., LTD, Dalian Liaoning

Email: 819062705@qq.com

Received: Mar. 5<sup>th</sup>, 2016; accepted: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2016; published: Mar. 28<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In recent years, with the rapid development of offshore oil exploration activities, oil spill accident can occur in the process of oil extraction, storage and transportation, which is seriously harm to marine species and environment and causes economic losses. In addition, oil will experience complex physical and chemical changes, including evaporation, dissolution, emulsification, and spreading, oxidation and biological degradation. These progresses change the nature of the oil spill, and influence oil spill drift pattern. Especially in sea with ice existing, oil spill drifting is affected by the restrictions of ice, which make it more difficult to predict oil drift trajectory. Therefore, it is more difficult for oil spill recovery processing. In this paper, oil spill drift rule and numerical simulation method in water with ice covered were studied.

## Keywords

Oil Spill in Ice Region, Oil Drift, Numerical Simulation

---

# 冰区溢油漂移及数值模拟方法研究综述

宋梦然<sup>1</sup>, 袁光奇<sup>2</sup>, 黄焱<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津大学建筑工程学院, 天津

<sup>2</sup>大连船舶重工集团设计研究所有限公司, 辽宁 大连

Email: 819062705@qq.com

收稿日期：2016年3月5日；录用日期：2016年3月22日；发布日期：2016年3月28日

## 摘要

近年来，海上石油勘探和开发活动迅速发展，在石油的开采、储藏、运输过程中，都有可能发生溢油事故，给海洋生物和环境带来严重的危害，同时引起一定的经济损失。另外，海上溢油会经历复杂的物理化学变化，包括蒸发、溶解、乳化、扩散、光学氧化和生物降解等，使溢油性质发生改变，从而影响溢油漂移规律。尤其是在有冰海域，溢油漂移受到冰的限制与影响，溢油漂移范围更难预测，使得对溢油事故的回收处理更为困难。本文针对冰区溢油漂移规律和数值模拟方法进行研究。

## 关键词

冰区溢油，油膜漂移，数值模拟

## 1. 引言

近年来，随着全球海上石油开发、储运的日益增长，发生重大海上溢油事故的风险随之增加。2010年美国墨西哥湾漏油事件在国际上影响深远，时至今日，依然让人历历在目。2011年渤海蓬莱19-3油田的持续性溢油事故(如图1)，对我国的经济和环境都造成了不同程度的损害。

溢油的风化过程和漂移运动本就是十分复杂的过程，海冰的存在使其更加复杂。溢油发生后溢油受到扩散、蒸发、溶解、乳化、光学氧化和生物降解等风化过程的控制，已在另一篇文章进行了讨论。对溢油风化过程和漂移运动的理解是建立溢油模型和溢油应急响应模型的关键[1]。这些模型的建立可以用来预测溢油的走向，理解溢油如何进行风化，因此对于预测溢油对环境的影响和选择合理有效的溢油事故响应处理十分重要。

二十世纪开始，国内外研究学者对冰区溢油问题进行了实验室试验和现场试验来观察溢油的漂移过程。Abascal *et al.* (2010) [2]进行了溢油统计模型和其有效性的研究，通过对Prestige事故中溢油油膜的观察总结油膜漂移规律并将其应用到Biscay湾的溢油响应计划中。Faksnes *et al.* (2011) [3]在巴伦支海进行了大规模油-冰相互作用现场实验：冰覆盖率70%~80%条件下，对浮冰漂移进行检测。具体方法是把加速器和浮标安置在浮冰上，观测浮标的运动了解浮冰的运动，发现浮冰水平方向运动显著。从定位系统监测数据看，浮冰在实验期间漂移近80 km，海上油膜发生风化过程，并在冰、水表面进行扩散，油膜同时随浮冰漂移但仍保持被浮冰包含的情况。溢油漂移轨迹的预测是建立溢油应急处置预案基本依据。目前对溢油漂移轨迹均以溢油风化模式和当下主流溢油模式为基础，但这两种模式在油-冰漂移进程中均不存在，因此，通过将试验结果与数值模拟结果结合的方法进行整合，研究冰区溢油的漂移规律。

## 2. 溢油模型

溢油模型的作用是预测溢油发生后油向哪里漂移，这需要通过洋流信息、风、波浪和其他环境数据作为输入条件而完成[4]。基于海洋和环境模型建立的轨迹分析模型用来统计分析溢油轨迹模型的输出结果[5]。当溢油发生在有冰海域时，油膜漂移主要受到浮冰漂移的影响。因此需要首先把握浮冰的漂移规律，再对溢油随浮冰的漂移进行预测。

### 2.1. 浮冰漂移预测模型

我国虽地处热带、亚热带和温带，但我国的渤海和黄海北部，因地理位置偏北，冬季受西伯利亚南下冷空气的直接影响，每年都有不同程度的结冰现象，并会发生大面积浮冰漂移现象，如图2所示。



Figure 1. Oil spill accident of Penglai 19-3 in Bohai  
图 1. 渤海蓬莱 19-3 油田溢油事故现场



Figure 2. Drift phenomenon of ice floes  
图 2. 浮冰漂移现象

海冰漂移模式由动量方程、连续方程和热力增长函数组成。动量方程根据能量守恒原理决定冰的漂移和形变[6]。用有限差分方法求解方程组，并将计算结果与遥感监测进行比对。发现海冰的漂移取决于潮流、风和冰内力的共同作用。当潮流和风速较大时，潮流对海冰的漂流速度和方向影响很大，呈现周期性变化，但由于风的作用不是有规律的，这种周期性变化也是不规律的。海冰漂移的净位移主要受风的作用。当风力较大且风向和流向接近时，冰速非常接近表面流速。而当风和流速较小时，内力对海冰的漂移起决定作用。

## 2.2. 溢油随浮冰的漂移

通过对实验室试验和现场试验的观察，发现冰的存在显著影响溢油漂移轨迹。连续冰排下的溢油漂移轨迹与冰盖下表面的粗糙度、溢油的物理性质和水流与冰的相对速度有关。一般来说，粗糙度较大的冰盖下的油膜相对于冰静止；对于粗糙度较小的冰盖下的油膜，当相对流速达到 15~20 cm/s 时，油膜会产生一个顺流向相对于冰盖的速度[7]。有冰海域发生溢油后大部分油膜浮于水面，只有少量在冰盖下面。油膜在漂移时所受的作用力为表面风力、流的拖曳力、冰侧壁的摩擦力和推力。由于浮冰与油膜表面粗糙的不同，风和流的曳力不同，油表面光滑，曳力比冰小。油膜要与冰一起运动，其所需的作用力要由

冰的推力和摩擦力来提供，当作用力足够大时，油膜与冰一起运动。冰的密集度越大，推力和摩擦力也越大；当密集度小于某一临界值时，冰的作用力不足以带动油膜一起运动，这时油膜就会产生相对于冰的运动。低密集度时，由于冰很少，对油的漂移不起作用，与开敞水面的相类似；中、高等密集度时，由于冰侧壁的推力和摩擦力的作用，油随冰一起运动[8]。

### 3. 数值模拟

#### 3.1. 多相流模型

溢油发生在有冰海域时，使得溢油问题更加复杂的另一个原因是比开阔水域增加了冰这一相，成为油、冰、水三相混合多相流流动。目前有两种数值计算的方法处理多相流：欧拉-拉格朗日方法和欧拉-欧拉方法。

- 欧拉-拉格朗日方法

在 Fluent 中的拉格朗日离散相模型遵循欧拉-拉格朗日方法。流体相被处理为连续相，直接求解纳维-斯托克斯方程，而离散相是通过计算流场中大量的粒子，气泡或是液滴的运动得到的。离散相和流体相之间可以有动量、质量和能量的交换。该模型的一个基本假设是，作为离散的第二相的体积比率应很低，粒子或液滴运行轨迹的计算是独立的，它们被安排在流相计算的指定的间隙完成。

- 欧拉-欧拉方法

在欧拉-欧拉方法中，不同的相被处理成互相贯穿的连续介质。由于一种相所占的体积无法再被其他相占有，故此引入相体积率(phasic volume fraction)的概念。体积率是时间和空间的连续函数，各相的体积率之和等于 1。从各相的守恒方程可以推导出一组方程，这些方程对于所有的相都具有类似的形式。从实验得到的数据可以建立一些特定的关系，从而能使上述方程封闭，另外，对于小颗粒流(granular flows)，则可以通过应用分子运动论的理论使方程封闭。

#### 3.2. 油膜漂移模型

溢油漂移模型需要模拟油膜在冰表面扩散、平流运动、传播过程，同时还要考虑蒸发、分解，乳化等风化过程对油膜特性的影响。对于输入信息需要提前在数据库保存地理数据和油特性数据。溢油发生后，将溢油位置，持续时间，油量，气象信息输入到模型中。另外运用水动力子模型在计算溢油漂移前进行为其提供需要的数据信息。风场信息可以从确定的资料获得，或者从风玫瑰图获得。水流的信息基于自由表面水动力模型获得，可以得到平均流速场和湍流模型中垂直分散率。

溢油分为五个相互作用的部分：表面油滴，表面连续油膜，水中油滴，水中油膜，海岸线油。油膜运动被风和流引起的水平流动和湍流扩散控制，溢油漂移同时发生风化过程。因此油膜漂移速度是表面流速和风速的组合[9]。

### 4. 结论与展望

发生在冰覆盖海域的溢油事故，溢油会发生复杂的物理化学性质变化和漂移轨迹。目前对溢油漂移轨迹均以溢油风化模式和当下主流溢油模式为基础，但这两种模式在油-冰漂移进程中均不存在。国内外已经进行的相关研究，对溢油在冰区的漂移过程进行了试验观测，并根据数据库信息预测溢油漂移轨迹，但是很少有完全把溢油在冰区中由于风化过程发生的性质变化作为漂移模型的输入信息。然而，溢油发生的物理化学性质十分复杂，因此，需要通过对油-冰相互作用机理的研究，把握溢油特性，在进行油-冰-水多相态流体理论分析研究的基础上，结合水动力模型建立溢油漂移轨迹模型，预测油膜在冰场中的流动情况。

## 参考文献 (References)

- [1] Anon (2003) Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. National Research Council, Division on Earth and Life Studies, Transportation Research Board, Marine Board, Ocean Studies Board, Prepared for National Research Council, Washington DC, 2003.
- [2] Abascal, A., Castanedo, S., Medina, R. and Liste, M. (2010) Analysis of the Reliability of a Statistical Oil Spill Response Model. *Marine Pollution Bulletin*, **60**, 2099-2110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.008>
- [3] Faksness, L.G., Brandvik, P.J., Daae, R.L., *et al.* (2011) Large-Scale Oil-In-Ice Experiment in the Barents Sea: Monitoring of Oil in Water and MetOcean Interactions. *Marine Pollution Bulletin*, **62**, 976-984. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.02.039>
- [4] Drozdowski, D., Nudds, S., Hannah, C.G., Niu, H., Peterson, I. and Perrie, W. (2011) Review of Oil Spill Trajectory Modelling in the Presence of Ice, Canadian Technical Report of Hydrographic and Ocean Sciences. Fisheries and Ocean, Canada, 274.
- [5] Hänninen, S. and Sassi, J. (2010) Acute Oil Spills in Arctic Waters—Oil Combating in Ice. VTT Research Report VTT-R-03638-09.
- [6] 夏定武, 徐继祖. 渤海海冰漂移模型[J]. 中国海上油气: 工程, 1997(2): 21-27.
- [7] 夏定武, 徐继祖. 有冰海域溢油运动数值模型研究[J]. 海洋学报: 中文版, 1998(1): 113-112.
- [8] Free, A.P., Cox, J.C. and Schultz, L.A. (1981) Laboratory Studies of Oil Spill Behavior in Broken Ice Fields. Laboratory Tests.
- [9] Chen, H.Z., Liu, D.M., *et al.* (2007) Mathematical Modeling of Oil Spill on the Sea and Application of the Modeling in Daya Bay. *Journal of Hydrodynamics*, **19**, 282-291. [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6058\(07\)60060-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6058(07)60060-2)