

渤海结冰海区溢油行为数值模拟*

余加艾 张波 刘钦政[†] 陈伟斌 王仁树

(国家海洋环境监测中心 大连 116023)

[†](青岛海洋大学海洋环境学院 青岛 266003)

提要 基于溢油与海冰、水、大气的相互作用原理,建立了渤海结冰海区溢油行为数值模式。该模式模拟了结冰海区中油膜的输运过程,与国外有关模式相比更加重视冰场和冰速场的作用。海冰及潮流模式采用被实况检验过的渤海海冰数值预报模式。数值试验结果表明,本数值模式正确地描述了冰区溢油在扩展、漂移过程中对风场、潮流场、冰场、尤其对冰密集度的敏感性。该模式为及时清除溢油、进行溢油灾害评估及保护海洋环境等提供了可靠的依据。

关键词 结冰海区 溢油行为 数值试验

学科分类号 P731.15

近20年来,冰区溢油行为的研究已成为国际上海冰界关注的热点。如 Martin(1979)首次在实验室研究了油与莲叶冰之间的相互关系,Free等(1982)¹⁾研究了冰区中油的扩展和扩散过程,Ross等(1987)于加拿大海域进行了三次可控溢油试验。他们的研究工作主要集中在冰与油的相互作用及冰区中溢油行为的数值模拟等,与无冰水域中溢油行为的研究相比,在理论上还有一定距离。近年来,有关研究人员在首次开展了渤海有冰海区溢油行为的关键性技术研究工作(余加艾等,1997),初步建立了为海洋管理服务为目的的渤海冰区溢油行为数值模式,该模式的计算结果为清除溢油、进行灾害评估和保护海洋环境提供了可靠的依据。

1 冰区溢油的特点

无冰海区的油污染范围是指油膜覆盖的海面。有冰海区的油污染范围也是油膜覆盖的海面,但其中还有冰块存在,这表明其污染范围与冰密集度有关。溢油在海水中的扩展过程按照 Fay(1969)的三阶段(惯性力/重力,重力/粘性力,粘性力/表面张力)理论描述。有冰海区海水温度接近海水的冰点,Schultze(1984)²⁾指出:此时上述的第三个阶段可以略去,而且冰块之间的水中油膜的平衡厚度大于 Fay(1969)的理论计算厚度,达到平衡厚度的时间也比 Fay(1969)的理论计算的短。Venkatesh等(1990)的研究表明:在冷水中油膜

* 国家海洋局资助项目,海管发 1995-262。余加艾,女,出生于 1941 年,副教授, Fax:0086-0411-4672396

1) Free A P, Cox J C, Schultze L A, 1982. Laboratory studies of oil spill behaviour in broken ice fields, Proc. Fifth Arctic Marine Oilspill Program Technical Seminar, Edmonton, Alta

2) Schultze R, 1984. A field guide for Arctic oil spill behaviour. Arctec Inc. Columbia, Md

收稿日期:1997-12-23,收修改稿日期:1998-04-13

的厚度是油的粘度的线性函数,初生冰中油膜平衡厚度是冷水中的 4 倍。

油膜在有冰海区的漂移过程不但受到风场和表面海流的影响,还与冰的密集度和冰速有关。一般来说,存在于冰上或冰下的油膜随冰块漂移,但当冰下的海水流速和冰速之差达到一定数值时,油膜则离冰随水而去(Cox *et al.*, 1981)。在冰块之间水域中的油膜还受到冰块的阻挡和推移作用。

在有冰海区中,油膜的蒸发、乳化等风化过程与无冰海区一样进行,只是由于温度低,过程较缓慢。

2 渤海冰区溢油行为数值计算模式

为了模拟有冰海区溢油行为,视冰区的溢油行为是由油、水、冰组成的多相流动系统,将油膜在冰区的扩展、漂移过程看作其在多相流动系统中的一部分,因而更加重视海流速度、冰速及冰密集度在计算中的作用,从而改进模拟计算公式。

2.1 扩展过程模拟

结冰海区中溢油扩展范围是冰密集度的函数,因此,在计算溢油扩展面积时要考虑冰上油、冰下油及冰密集度等因素的影响。

设 A_c 为溢油扩展的最大面积,它由油膜平衡厚度 h_0 、冰密集度 C 、冰厚 h_i 、油粘度 v_0 以及油与海水的比重 ρ_0 、 ρ_w 等因素确定。

如果 $C < 80\%$,此时一部分油被冰块底部吸附,记为 V_{ui} ,还有一部分油量被碎冰或半融冰吸附,记为 V_s 。若总溢油量为 V ,则海水中油的剩余量 V_r 和溢油扩展面积 A_c 的计算公式为:

$$V_r = V - V_{ui} - V_s \tag{1}$$

$$A_c = \frac{V_r}{h_0(1 - C)} \tag{2}$$

上述公式中的 V_{ui} 和 V_s 的计算可参考 Venkatesh 等(1990)。

如果 $C \geq 80\%$,即为高的冰密集度情形。由于冰块间相互碰撞,油在冰块之间不能扩展则厚度较大。此时不仅要考虑冰块间的油膜厚度,还要兼顾浮在冰上或吸附在冰下的油膜厚度。为此,将 Venkatesh 等(1990)公式修正如下:

$$A_c = V/h_0 \tag{3}$$

$$\text{其中, } h_0 = \begin{cases} \left(\frac{\rho_i}{\rho_0}\right)h_i(1 - C) + (0.0167 - 8.5 \times 10^{-5}(\rho_w - \rho_0)) \cdot C & \text{当 } \rho_0 \geq \rho_i \\ \left(\frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w - \rho_0}\right)h_i(1 - C) + 0.00316v_0 \cdot C & \text{当 } \rho_0 < \rho_i \end{cases}$$

2.2 漂移过程模拟

2.2.1 平流过程 油膜在冰区的平流过程必须考虑冰场(冰密集度、冰厚等)和冰速场的影响,当冰密集度小于 80% 时,油膜的平流速度由海表面流速的冰速合成,冰密集度越大时,冰速起的作用越大。当冰密集度大于或等于 80% 时,油膜随冰漂移。冰块间油膜的平流运动速度 v_0 可近似地按以下公式计算:

$$v_0 = \begin{cases} ((0.8 - C)v_\omega + C_i) / 0.8 & \text{当 } C \leq 80\% \\ v_i & \text{当 } C > 80\% \end{cases} \quad (4)$$

其中, v_ω 为无冰时海表面流速; v_i 为冰块速度。

2.2.2 弥散过程 油膜在冰区漂移过程中产生的弥散过程是湍流过程, 可表现为围绕着平流运动的起伏, 具有随机性质。从 t 时刻到 $t + \Delta t$ 时刻的漂移距离 Δx 、 Δy 可看作是油膜经平流作用后再附加一弥散的结果, 计算公式为

$$\Delta x = v_{0x} \cdot \Delta t + \Delta x' \quad (6)$$

$$\Delta y = v_{0y} \cdot \Delta t + \Delta y' \quad (7)$$

其中 v_{0x} 、 v_{0y} 分别为油膜在 x 、 y 方向上的平流速度, $\Delta x'$ 、 $\Delta y'$ 为 Δt 时段内油膜的随机游动距离, 与平流速度有关。按照弥散现象的理论模型, 结合冰区的特点, 计算公式为

$$\Delta x' = a \sqrt{2\alpha_L v_{0x} \Delta t} + b \sqrt{2\alpha_T v_{0y} \Delta t} \quad (8)$$

$$\Delta y' = c \sqrt{2\alpha_L v_{0y} \Delta t} + d \sqrt{2\alpha_T v_{0x} \Delta t} \quad (9)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 为正态分布的伪随机数, α_L 、 α_T 分别为纵向、横向弥散度, 其值与冰密集度相关, 即冰密集度越大, 弥散度越小, 反之亦然。

2.3 跟踪粒子流方法

将整个溢油团看作若干个体积很小的“油质点”组成, 利用油质点群的扩展、漂移过程模拟溢油油膜的扩展和漂移。对所有的质点按拉格朗日方法进行跟踪, 就可以计算出每一时间步长油质点漂移的位置, 从而确定溢油的污染范围和轻重程度。溢油在漂移过程中的风化过程也通过油质点的质量损失来表征, 即每个时间步长可计算在蒸发过程中体积的减少和乳化过程中密度的变化。与无冰海区不同的是, 在计算冰区蒸发面积时, 应除去污染区内冰块所占的面积。

2.4 渤海海冰与海流预报模式

渤海冰区溢油行为数值模式建立在渤海海冰(包括潮流)数值预报模式的基础上¹⁾。模式由海冰运动方程、海冰厚度方程、海冰密集度方程及潮流预报方程联合建模, 采用差分格式计算。该模式将渤海海区划分为 48×39 个矩形网格点, 可预报渤海有冰海区内任何地点每小时的冰厚、冰密集度、冰速及潮流速度等, 时效为 3—7d, 已投入业务预报。

渤海海流预报模式将潮流预报和风海流预报结合起来建立, 预报的内容是渤海的海流速度, 其格式与冰场预报各要素的格式是一致的。

3 数值试验及结果讨论

对本模式进行溢油漂移过程及敏感性数值试验, 目的是考察渤海结冰海区中不同冰密集度, 不同风场对溢油行为的影响。

在下面的数值试验中, 均采用以下参数: 溢油地点为 $121^\circ 10' E$, $40^\circ 20' N$; 溢油比重为 900 kg/m^3 ; 溢油粘度为 100 mPas 。

1) 王仁树等, 1995. 业务化海冰数值预报研究(1991—1995). 国家海洋环境监测中心

3.1 溢油的漂移过程模拟

假设冰密集度(C)为 50%,溢油体积(V)为 5 000m³,风场:东南风 10m/s,试验过程漂移时间为 12h。从图 1 可以看出油漂移在 4h、8h、12h 时刻的溢油范围、污染程度和油膜质心轨迹。

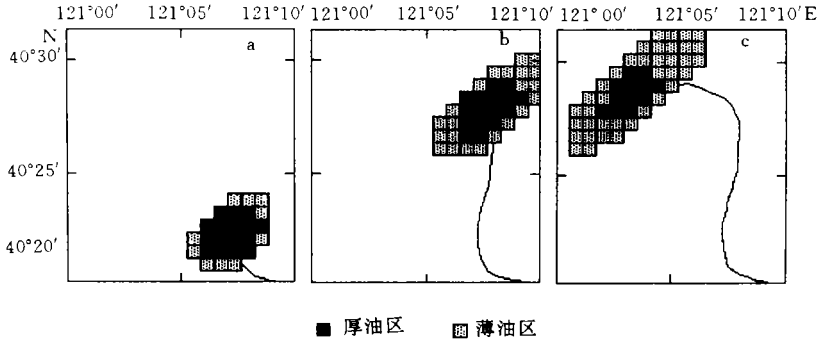


图1 溢油过程模拟

Fig.1 Simulation for the oil-spill processes
a. 4h; b. 8h; c. 12h

3.2 关于冰密集度的敏感性数值试验

在相同的风场(东南风 10m/s)、油量(500m³)、漂移时间(12h)及相同的初始溢油位置条件下,对不同冰密集度(10%、60%、85%)的溢油行为进行对比,结果见表 1。

对上述试验结果讨论如下。

3.2.1 在相同的时间、地点、风场前提下,中等密集度情形溢油扩展半径为最大(表 1),高的冰密集度情形为最小。这是因为中等冰密集度时,溢油扩展范围中包含大量的海冰区,冰下油量不大。

表1 不同冰密集度溢油行为对比(12h)

Tab.1 Behaviours of oil spill for different ice distribution patterns (12h)

冰密集度(%)	扩展半径(m)	质心终点位置	质心起点至终点距离(km)	污染面积(km ²)
1	446	40° 30' N 121° 04' E	21.2	25
60	704	40° 28' N 121° 05' E	17.1	28
85	94.2	40° 26' N 121° 06' E	14.1	6.7

3.2.2 表 1 列出的油膜经 12h 漂移后,质心轨迹的终点至起点的距离大小可看出:冰密集

度越小,漂移距离及影响范围越大;从 12h 时刻的污染面积看,中等冰密集度情形为最大,高的冰密集度情形为最小。

3.3 关于风场的敏感性数值试验

在相同的初始溢油地点,溢油量(5 000m³)、冰密集度(50%)的条件下,考察不同风向对溢油路径、污染范围的影响。数值试验中分别采用四种风向进行比较,风速均为 10m/s。溢油的初始时间为 1995 年 1 月 15 日 14 时。图 2 显示了不同风向的风场条件下经 24h 漂移后,油膜的质心轨迹和分布范围。图 2 以辽东湾为背景输出可以便于比较。

由图2可看出,不论风向如何,油膜的漂移路径与潮流的周期性起落及冰速大小均有关,风场的不同对油膜的漂移方向起着重要作用。尤其是经24h漂移后,油膜的质心位置更是与风向、风速有着直接关系。

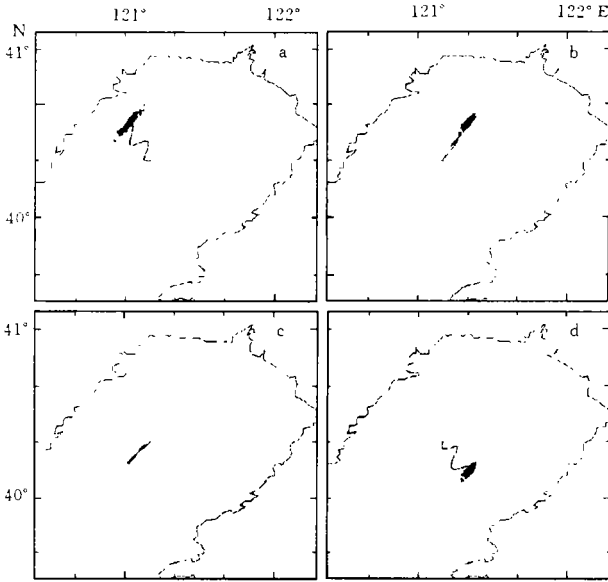


图2 不同风向溢油范围及质心轨迹

Fig.2 Contaminated area and trajectory of the center of oil mass for different wind direction

a. 东南风 10m/s; b. 西南风 10m/s; c. 东北风 10m/s; d. 西北风 10m/s

4 结语

综上所述,本文讨论的溢油行为数值模式是在国外有关资料的基础上,充分考虑冰场(冰密集度、冰速等)影响并对原模式进行了若干改进而建立的。尤其重要的是,本模式建立在已投入业务预报的渤海海冰数值预报模式的基础上,充分地结合了渤海结冰海区的特点。数值试验结果表明,本模式能正确描述溢油在扩展、漂移过程中对于风场、潮流场、冰场,特别是对于冰密集度的敏感性。该模式为进一步建立渤海冰区溢油管理系统打下了重要的基础。

参 考 文 献

- 余加艾, 王仁树, 陈伟斌等, 1997. 有冰海区中的溢油行为. 海洋环境科学, 16(1): 72—78
- Cox J C, Schultze L A, 1981. The Containment of Oil Spilled Under Rough Ice, Proceedings of the 1981 Oil Spill Conference. Washington, D C: American Petroleum Inst, 203—208
- Fay J A, 1969. The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea. In: Oil on the Sea (D P Houled Ed.). New York: Plenum Press, 53—63
- Martin S, 1979. A field study of brine drainage and oil entrainment in first-year sea ice. J Glaciol, 22: 473—502
- Ross S L, Dickins D F, 1987. Oil Spill in Leads: Tank Tests and Modelling. Report Submitted

to Environment Canada, Ottawa, Ont: Environmental Emergencies Technology, 55

Venkatesh S, H El-Tahan, G Comfort, 1990. Modelling the behaviour of oil spill in ice-infested waters. *Atmosphere-Ocean*, 28(33):303—329

NUMERICAL EXPERIMENT ON THE BEHAVIOUR OF OIL SPILLS IN ICE-INFESTED WATERS IN THE BOHAI SEA

YU Jia-ai, ZHANG Bo, [†]LIU Qin-zheng, CHEN Wei-bin, WANG Ren-shu

(*National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian, 116023*)

[†](*College of Marine Environment, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003*)

Abstract The numerical model on the behaviour of oil spill in ice-infested waters in the Bohai Sea described here consists of an oil slick transformation model, a surface current model, and a sea ice model. The oil slick transformation model simulates the spilled slick transformation process, including drifting, spreading, evaporation, emulsification. A Lagrangian discrete-parcel algorithm is adopted. The sea ice and surface current modelling were undertaken using the sea ice forecast model of the Bohai Sea developed by Wang Renshu (1995), verified by observation data.

The input data required by the computer model include location of spill, spill volume or flow rate, oil physical-chemical properties, wind field and initial sea ice field. The output information of the computer model includes time-dependent oil contaminated area, trajectory of center of oil mass and time-dependent oil physical-chemical properties. A numerical experiment on the behaviour of oil spills in ice-infested waters in the Bohai Sea was carried out and discussed. The numerical experiment showed that the model correctly describes sensitivity to wind field and ice field. The model can be used to develop cleanup measures in the case of an actual spill and to assess likely environmental impacts of spills.

Key words Ice-infested waters Behaviour of oil spill Numerical experiment

Subject classification number P731.15