

渤海海冰漂移过程的数值模拟和试验*

王仁树 刘钦政 陈伟斌 金洪太

(国家海洋环境监测中心, 大连 116023)

刘存厚

(渤海石油公司海洋结构物检测公司, 塘沽 300456)

提要 建立了一个包含潮流作用的准定常海冰动力学模式, 利用实测风资料和计算的潮流场对辽东湾中部的冰块漂移过程进行数值模拟, 模拟的冰块漂移过程和实况基本一致。表明模式具有反映冰漂移过程动力特征的能力。通过对各动力因子的数值试验, 说明引入潮流作用的必要性, 并分析了各动力因子在冰漂移过程中的作用。

关键词 海冰漂移过程 潮流效应

渤海处于中纬度带, 每年冬季都有海冰出现, 严重时(如1969年)可使整个海区冰封。海冰的存在, 特别是大量的浮冰, 给海上建筑物(如石油平台)的安全造成了极大的威胁, 严重的冰害曾造成国民经济的巨大损失(张方俭, 1986)。

为了解浮冰漂移的特性, 金洪太¹⁾等人于1989年冬季在辽东湾中部对冰块的漂移过程进行了观测, 发现冰块的漂移和潮汐的涨落有密切的关系。风和海流对海冰的运动有重要作用, 已为许多研究(Lu, 1988; Liu, 1988; Udin, 1976; Wang, 1985)所证实, 但多数研究由于种种原因仅考虑了常流的作用, 有时甚至假定海水是静止的。而渤海潮流十分旺盛, 远大于常流, 其在冰漂移过程中应有重要作用, 目前这方面的研究尚少, 国内对海冰漂移过程的数值研究也不多见。因此本文建立一个包含潮流作用的海冰动力学模式, 并用实测风资料和模拟的潮流场对辽东湾中部的冰块漂移过程进行数值模拟。

1 模式

一级近似下, 冰动力平衡方程(Udin, 1976)为:

$$\tau_a + \tau_w - f\rho_i HK \times V_i + R = 0 \quad (1)$$

式中, τ_a 为风应力; τ_w 为海水应力; R 为冰内应力; f 为科氏参数; ρ_i 为海冰密度; H 为冰厚度; K 为垂直向上的单位矢量; V_i 为冰速度, $V_i = i u_i + j v_i$, u_i , v_i 分别为冰速度的东向和北向分量。

风应力、海水应力分别由式

$$\tau_a = \rho_a C_{Da} |V_a - V_i| (V_a - V_i) \quad (2)$$

* 自选课题。

收稿日期: 1991年4月6日, 接受日期: 1993年8月25日。

1) 辽东湾JZ-2-20平台测冰资料。

$$\tau_w = \rho_w C_{DW} |V_w - V_i| (V_w - V_i) \tag{3}$$

计算。式中 ρ_a, ρ_w 分别为空气和海水密度； V_a, V_w 分别为风速和海水流速； C_{Da}, C_{DW} 分别为空气和海水的曳力系数。海水流速为潮流速度和余流速度之和。渤海海区潮流速度远大于余流速度，因此本文的计算中，均用潮流速度代替海水流速。

冰内应力可依据不同的计算对象和内容采用不同的本构关系和计算方法 (Norbert, 1981)。本文假设海冰为粘性介质，冰内应力由式

$$R = \alpha \nabla \cdot (N \nabla V_i) \tag{4}$$

计算。此处 N 为海冰密集度； α 为冰内应力系数，它是和冰厚度等因素有关的经验参数。

冰场的生消过程十分复杂，但在短时期内，其生消变化并不大，因此在本文的计算中忽略冰的热力过程，只考虑冰场的动力再分布，则冰质量和冰密集度方程分别为

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -\nabla \cdot (m V_i) \tag{5}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\nabla \cdot (N V_i) - \psi \tag{6}$$

式中， m 为单位面积的海冰质量， $m = \rho_i H N$ ； ψ 为冰变形函数：

$$\psi = \begin{cases} 0 & \text{当 } 0 \leq N < 1 \text{ 时} \\ -\nabla \cdot (N V_i) & \text{当 } N \geq 1 \text{ 时} \end{cases} \tag{7}$$

边界条件是冰动力学模式的重要组成部分，对计算结果的可靠性有很大影响 (Lu, 1988)。鉴于渤海的实际情况，可将边界分为两类：一类为受陆地和浅滩影响较大的海岸边界，在这类边界上向岸的法向速度为零，切向速度的法向导数为零；另一类为冰水开边界，在这类边界上，无冰水域对冰无阻滞作用 (Wang, 1985)。

将海区划分成正方形网格，模式中各物理量交错地分布于网格点上 (见图 1)，其中 u_i, v_i 分布于 B 类点上， m, N 分布于 A 类点上。按照这种分布，利用中央差分格式将各方程改写成相应的差分方程，然后用松弛迭代法求解动力平衡方程得到 u_i 和 v_i ，用松野格式对质量方程和密集度方程积分得到 m 和 N 。

渤海潮流主要由外海传入的潮波在浅海

变形而引起(窦振兴等, 1981)，因此本文用二维全流模式来计算渤海海区的潮流。

2 计算结果及其分析

将渤海海区分成 214 个正方形网格，网格间距 20km，时间步长 15min。在输入必要的资料后求解各差分方程便可得到所需时刻的速度场和冰场。然后由速度场和标识冰

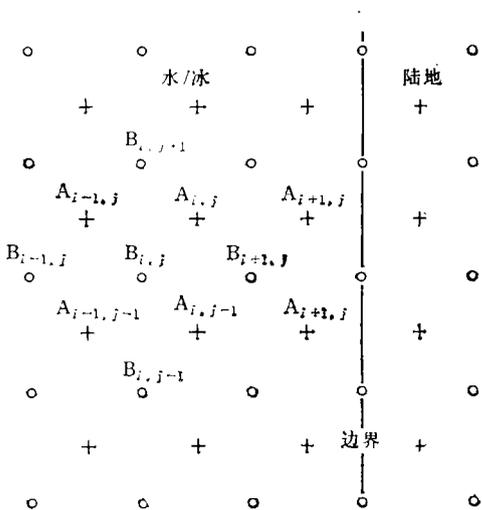


图 1 网格划分及变量分布

Fig. 1 Grids and variables distribution

块的位置可求得该时刻标识冰块的速度, 利用(8)式(张淑珍等,1988)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{X}_n + \frac{\Delta t}{2} \{ & \mathbf{U}_e[\mathbf{X}_n, t_0 + n\Delta t] + \mathbf{U}_e[\mathbf{X}_n, t_0 + (n + 1)\Delta t] \} \\
 & + \frac{\Delta t^2}{2} \{ \mathbf{U}_e[\mathbf{X}_n, t_0 + (n + 1)\Delta t] \cdot \nabla \mathbf{U}_e[\mathbf{X}_n, t_0 + (n + 1)\Delta t] \} \quad (8)
 \end{aligned}$$

确定标识冰块的新位置。式中 \mathbf{X}_{n+1} 表示标识冰块在 $t_0 + (n + 1)\Delta t$ 时刻的位置; \mathbf{X}_n 为 $t_0 + n\Delta t$ 时刻的位置; $\mathbf{U}_e[\mathbf{X}, t]$ 表示 t 时刻 \mathbf{X} 点处的速度; t_0 为初始时刻; Δt 为时间步长。

本文用计算的潮流场和实测风资料¹⁾模拟了一个典型的冰块漂移过程²⁾(见图 2a)。该冰块最初(1月27日22:00—28日03:00)向西南方向移动;之后转向东北方向移动;08:30后折向西南;14:00 又转向东北;22:00 后再转向西南方向,形成了一类似于椭圆的非闭合路径。在 14:00—22:00 这段时间内,西南风较强,冰块的移动速度也较大。由图 2a 可以看到,模拟的冰块漂移过程和实况基本一致,冰块的转向时刻也和实况相同,在 14:00—22:00 这段时间内,冰块的移动速度也较大,表明该模式具有反映冰漂移过程基本特征的能力。

消除潮流的动力作用,则海水静止,海水应力不再取决于潮流速度与冰速之差,而完全由冰速决定,风应力成为唯一的外界主动强迫力。由图 2b 可见,此情况下冰块的漂移过程和模拟结果无论在路径形状还是在移动速度、方向上都有很大的差异,冰块移动路径不再是一类似于椭圆的非闭合路径,路径仍有转向,但转向时刻和模拟结果不同,而与风转向时刻相一致。这表明,潮流在冰块漂移过程中对冰块漂移路径和速度有极为重要的

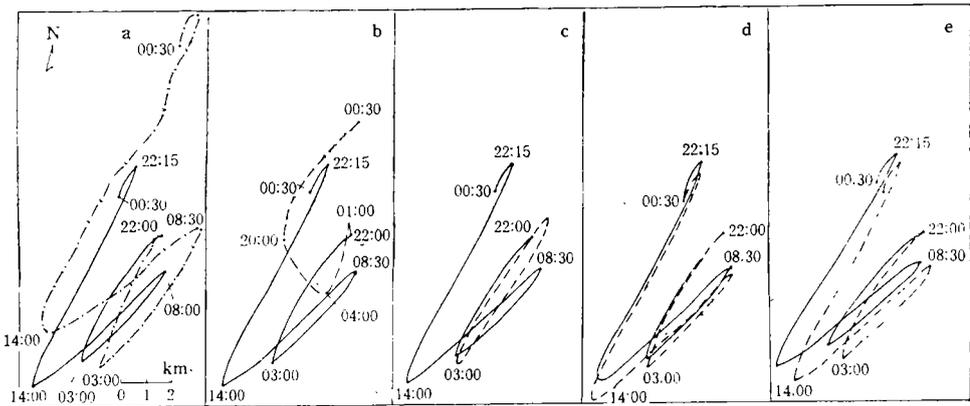


图 2 海冰漂移过程

Fig. 2 Sea ice drift processes

- a. 模拟路径; b. 无潮流作用时; c. 无风作用时; d. 无冰内应力时; e. 无科氏力时。
- 实测路径; ——模拟路径; - - - - -试验路径。

1) 风场是根据沿岸台站测风资料和 JZ-2-20 平台测风资料并结合天气图风速资料而得到的。
 2) 辽东湾 JZ-2-20 平台测冰资料。

影响,是造成该冰块非闭合椭圆型迴旋路径的主要原因。

无风作用时(图 2c),海水应力是模式中唯一的强迫力,潮流的周期性变化使冰速也具有明显的周期性,冰块移动路径更加类似于一个非闭合椭圆,在一个潮周期内冰块的纯位移很小。在模拟试验初期,风速不大,试验的冰速和模拟结果相差不大,后期因忽略了强风的作用,速度显著减小,冰漂移路径的差别十分显著。该试验表明,风的动力作用对冰速、路径形状和位移均有重要的作用,特别是在冰块的长期漂移过程中,其作用更为显著。

忽略冰内应力的作用,冰块漂移路径和模拟路径极为相似,路径转角略有增大,冰速略有增加,但这种差异远不及风应力和海水应力所造成的差异显著。

无科氏力作用时,冰块的移动路径偏向移动方向,移动速率和模拟值相当,路径形状一致。表明科氏效应在冰漂移过程中也有重要影响,但它对冰块移动速率和路径形状影响不大,仅使冰块移动方向发生变化。

3 结语

建立了一个适用于渤海海区的准定常海冰动力学模式,并用实测风资料和计算的潮流场对辽东湾中部一个典型的冰块漂移过程进行了数值模拟和数值试验。模拟的冰块漂移过程和实况基本一致,表明该模式具有反映冰漂移过程基本特征的能力。通过对各动力因子的数值试验,可以得出以下几点结论。

3.1 潮流在冰动力学过程中具有十分重要的作用,对冰速和冰块移动路径均有显著的影响。因此,在处理涉及冰动力学的问题(如冰对平台的撞击、冰区通航等)时,必须考虑到潮流对冰速的影响。潮流是周期性的,由它所造成的冰块在一个潮周期内的纯位移并不显著。

3.2 风动力作用在冰漂移过程中十分重要,特别是在长期漂移过程中,其作用最重要。

3.3 冰内应力使冰速减小,对冰块漂移路径有一定影响,但不如风和潮流的作用显著。

3.4 科氏力使冰块移动方向改变,但对冰块移动速率和路径形状影响不大。

冰漂移过程十分复杂,本模式虽能反映冰漂移过程的基本特征,但模拟结果与实况仍有差别,也未能完全揭示各动力因子的作用机制,还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 张方俭,1986,我国的海冰,海洋出版社(北京),165。
- 张淑珍、余光耀等,1988,二维流体动力学数值方法,山东海洋学院学报,18(2): 32—24。
- 窦振兴、罗远途等,1981,渤海潮流及潮流的数值计算,海洋学报,3(3): 355—369。
- Lu, Q. -M., 1988, On Mesoscale Modelling of the Dynamics and Thermodynamics of Sea Ice, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering Technical University of Denmark Series Paper, 44, 154pp.
- Liu Xushi, Wang R. and Chen W., A Dynamic Model of Sea Ice Forecast in the Bohai Sea, IAHR Proceedings of the 9th International Symposium on Ice, 2: 143—152.
- Nobert Untersteiner, 1981, The Geophysics of Sea Ice, Plenum Press (New York, London), 1 196pp.
- Udin, I. and Omsteiner A., 1976, Sea Ice-75: Dynamical Report, Swedish Administration of Shipping and Finish Board of Navigation Report, 16: 8.
- Wang, R., Liu, X. and Zhang L., 1985, Numerical experiments of sea ice in the Bohai Sea, *Acta Oceanologica*, 4 (3): 349—358.

NUMERICAL SIMULATION AND TESTS OF SEA ICE DRIFT PROCESS IN THE BOHAI SEA

Wang Renshu, Liu Qinzhen, Chen Weibin, Jin Hongtai

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

Liu Cunhou

(*Offshore Structural Inspection Company, Bohai Oil Corporation of CNOOC, Tanggu 300456*)

Abstract

On the basis of the natural geographic condition of the Bohai Sea a dynamic sea ice model is developed that differs from previous dynamic sea ice models in the momentum balance forces that determine the drift process of sea ice. In the model the water stress is considered to be the tidal current force, and tidal current changes periodically in both the speed and the direction. The simulated movement of sea ice floe in the Bohai Sea are agreed with observational data. It has been shown that the model can reconstruct the essential characteristics of sea ice floes movement in the Bohai Sea.

Sensitivity tests carried out to gain understanding of the effects of various forces on sea ice movement showed that the effect of each force on sea ice movement is different. The wind force is one of the driving forces of sea ice movement, so the wind force is very important in the long distance drift of sea ice. Though tidal current is periodic, its effect on the sea ice movement cannot be neglected, specially for determining the speed and direction of sea ice floe at all times in the Bohai Sea. The effect of the internal ice stress and Coriolis force on sea ice movement are less than that of the wind and tidal current. The internal ice stress decreases the speed of sea ice floe movement. The Coriolis force changes the direction of sea ice movement.

Key words Sea ice drift process Effect of tidal current