

渤海的海冰数值预报^{*}

白 珊 吴辉璇

(国家海洋环境预报中心, 北京, 100081)

摘 要

根据渤海气候和冰情特点, 在已有海冰模式研究基础上, 提出模拟海冰增长、消融和漂移的动力-热力学模式。模式冰厚分布由开阔水、平整冰和堆积冰三要素表示。该模式已与数值天气预报模式、大气边界层模式、潮流模式联结, 并于 1990 年到 1996 年在国家海洋环境预报中心进行渤海和北黄海冰情预报。其数值预报产品包括冰厚、密度集、冰速、冰外缘线、冰脊参数、局地冰厚以及接近石油平台的冰漂移轨迹等, 传送到国家海洋预报台和渤海石油公司等有关用户。为了客观评价模式和检验预报结果, 在逐日预报后进行统计检验。本文概述渤海冰情、卫星遥感应用、冰模式及其预报结果和检验。

关键词: 海冰, 动力-热力学, 数值预报, 渤海。

1 引 言

渤海海域及其沿海地区是中国重要的经济开发区。环渤海沿岸自北向南分布着中国三个大油田: 辽河油田, 大港油田和胜利油田。渤海海域业已发现丰富的油气资源, 展现了渤海油气勘探开发的广阔前景。然而每年冬季渤海的冻结及海冰漂移对渤海航运, 海上油气勘探和生产等有不同程度的影响。中国近几十年来几次严重冰情, 例如 1969 年冬季整个渤海几乎完全被封冻, 造成航运和石油平台倒塌的严重灾害^[1]。

1969 年以来, 中国开始了初步的海上冰情调查和观测, 海冰研究和预报引起人们的重视。经验统计方法已被用于日常预报。例如, 利用海洋、水文和气象要素场与冰情之间的统计关系, 气象场的环流指数变化与冰情之间的经验关系等, 进行海水冻结与海冰消融的趋势预报, 并用一些经验公式预报初冰日、冰厚及冰外缘线^[2, 3]。海冰动力学和热力学的数值模拟也随之开展起来^[4~6]。随着渤海冬季油气勘探开发和海上运输的发展, 迫切需求定量化、客观化的海冰预报, 于是在海冰热力学、动力学、流变学和已发展的一些模式^[7~9]研究基础上, 考虑渤海的水文、气象和冰情特点, 提出适合于渤海的海冰动力-热力学模式, 成功地模拟了渤海海冰增长、消融和漂移^[10]。并与大气模式联结, 利用卫星遥感实时资料进行渤海和北黄海海冰业务数值预报^[11, 12], 将定量的海冰数值预报产品: 冰厚场, 冰密集度场, 冰速场, 冰外缘线, 冰脊参数以及钻井平台附近海

* 初稿时间: 1996 年 9 月 25 日; 修改稿时间: 1997 年 1 月 9 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目 49576272 和 85-903-03-03 专题。

域的单点冰厚、冰块漂移轨迹等，实时传送给国家海洋预报台和渤海石油公司等有关用户。本文分别介绍渤海冰情、卫星遥感在海冰预报中的应用、海冰模式及其预报结果和服务。

2 渤海冰情

渤海和北黄海海域位于中纬度季风气候区，冬季寒冷少雪。1 月的平均气温为 -20°C ，盛行偏北风，平均风速为 8.5 m/s ，有时可高达 $25\sim 28\text{ m/s}$ 。

渤海的水文状况受气候和地理条件影响，具有典型的浅海水文特征。渤海潮流盛行，流速通常为 $1\sim 2$ 节。在老铁山水道附近，最强潮流达 $3\sim 4$ 节。非潮流较弱，通常比潮流速度小 1 个量级。它们最大流速约为 0.1 m/s 。非潮流包括风海流、沿岸流和黄海暖流的分支，其中风海流最强。在冬季，渤海海水垂直方向充分混合，海温垂直分布均匀。渤海海水盐度是 $26\text{‰}\sim 31\text{‰}$ 。

每年冬季，渤海和北黄海部分海域都被海冰覆盖。在渤海，每年从 11 月中旬至 12 月初由北开始冻结，然后向南扩展。融冰期一般从 2 月中旬至 3 月中旬开始，冰区自南向北收缩。冰期一般超过 3 个月。在过去的 60 a 中，渤海发生过 3 次大冰封(1936 年 1~2 月，1947 年 1~2 月和 1969 年 2~3 月)。尤其 1969 年严冬，除老铁山水道外，整个渤海几乎全部被海冰覆盖，出现大范围堆积冰、重叠冰和冰脊。表 1 列出渤海和北黄海海域的冰期以及初冰日和终冰日，根据观测资料和历史记载，渤海和北黄海冰情划分 5 个等级^[1]。利用机载侧视雷达(SLAR)照片拼接成的 1989 年 2 月 3 日辽东湾海冰分布，清晰地展现该海域冰厚及水道的分布实况^[13]。通常，冰上没有雪覆盖，容易辨别海冰类型。

渤海流冰主要受潮流和风的影响。从辽东湾观测的海冰漂移轨迹清楚地表明海冰沿着潮流椭圆长轴作往复运动。

表 1 渤海和北黄海海域的初冰日、终冰日及冰期

海 域	测 站	初冰日(日/月)	终冰日(日/月)	冰期(d)
		平均(最早—最晚)	平均(最早—最晚)	平均(最长;最短)
北黄海	大鹿岛	28/11(9/11~18/12)	19/3(8/3~4/4)	112(147;95)
	小长山	3/1(28/12~)	27/2(~9/3)	56(64;0)
辽东湾	长兴岛	31/12(11/12~26/1)	18/3(6/3~5/4)	79(112;40)
	葫芦岛	1/12(17/11~18/12)	16/3(6/3~30/3)	107(124;82)
	鲅鱼圈	17/11(3/11~1/12)	24/3(10/3~7/3)	129(149;114)
	秦皇岛	26/11(10/11~13/12)	10/3(1/3~24/3)	105(124;85)
渤海湾	塘 沽	20/12(8/12~2/1)	22/2(16/1~4/4)	63(109;34)
莱洲湾	龙 口	27/12(7/12~)	27/2(~17/3)	62(97;0)

对于海冰动力-热力过程的数值模拟来说，渤海冰情的主要特征可归纳为：

- (1) 渤海海冰是 1 年冰，比较薄(平均厚度约 25 cm)。
- (2) 冰面上通常无雪覆盖或少雪；
- (3) 海冰的增长和消融受寒潮和暖流影响；

(4) 冰漂移主要受风和潮流控制。
根据上述渤海气候、水文和冰情特点提出渤海海冰动力-热力学模式。

3 NOAA 卫星海冰遥感资料的应用

卫星遥感对海冰进行大尺度监测和预报非常有用。业务气象卫星上的红外和可见光的扫描辐射计, 虽然分辨率低且易受云层干扰, 但仍可用来监测地球表面特征。从这种卫星资料中可有效地获取客观的海冰资料。得到渤海和北黄海的数字化遥感图象资料。

要校准和订正太阳高度角后, 可以从改进的甚高分辨率辐射计 (AVHRR) 的可见和红外通道测得海面反照率。根据反照率的强弱很易区分冰与水, 分辨海冰类型。海冰光学性质的理论研究和观测指出海冰反照率随冰厚增加而增大。根据中国海冰观测规范将所获得的卫星遥感图象的海冰分布划分为 3 类: 厚度小于 10 cm 的薄冰, 10 ~ 20 cm 和比 20 cm 厚的冰, 它们分别对应为皮冰, 灰冰和灰白冰^[14, 15]。这种定量的资料对海冰的分析和预报很有用。

计算海冰密集度时需要考虑遥感图象的分辨率。对 Mercator 投影的渤海遥感图象的分辨率是 1.5 km × 1.5 km。图 1 是 1996 年 1 月 27 日渤海 NOAA 卫星遥感图象的冰厚分布的分类图。

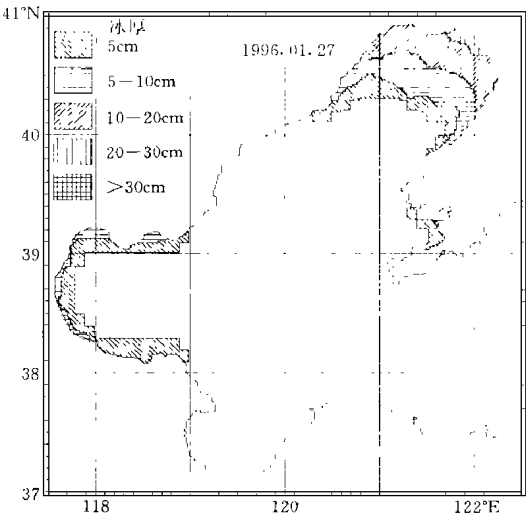


图 1 1996 年 1 月 27 日渤海海冰冰厚分类

4 海冰模式

模式同时考虑了海冰的动力过程和热力过程^[16, 5]。热力学部分根据热量守恒原理, 决定水的冻结和冰的融化以及冰内温度结构^[17]。模式中海冰动力学部分根据质量和动量守恒原理决定冰的漂移和形变^[18, 10]。两者共同决定冰覆盖海域的冰厚变化以及开阔水或水道面积。

模拟海冰动力过程的基本方程组是动量平衡方程和连续方程:

$$\tau_a + \tau_w - mf\mathbf{k} \times \mathbf{V}_i + \mathbf{F} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V}_i m) = \Phi \tag{2}$$

式中 m 是单位面积海冰质量, $\mathbf{V}_i$ 是冰速, $\mathbf{k}$ 是与海面垂直向上的单位矢量, f 是科氏参数, Φ 是热源或热汇项。式 (1) 中冰内应力 $\mathbf{F}$ 分量表示为:

$$F_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中 σ_{ij} 是冰内二维应力张量。通常, 应力和应变率、冰厚分布, 特别与冰内开阔水所占面积有关。在模式中, 海冰被假定为可压缩的粘-塑性物质。冰应力表示为:

$$\sigma_{ij} = 2\eta \dot{\epsilon}_{ij} + [(\zeta - \eta) \dot{\epsilon}_{kk} - \frac{p}{2}] \delta_{ij} \quad (4)$$

式中 $\dot{\epsilon}$ 是应变率张量, $\dot{\epsilon}_{kk} = \text{tr} \dot{\epsilon}$, δ_{ij} 是 Kronecker 算子。 ζ 和 η 是非线性块体粘性系数和切变粘性系数, 它们依赖于 $\dot{\epsilon}_{ij}$, p 和椭圆屈服曲线。压力项 $\frac{p}{2}$ 是冰厚和密集度的函数, 可表示为:

$$p = p_0 \exp [C(1 - A)] \quad (5)$$

p_0 和 C 是经验常数。上述应力和应变率的本构关系以及所采用的参数, 对于渤海海域冰情还有待于进一步研究和试验^[18]。

式(1)中风应力 τ_a , τ_w 分别表示冰与大气、海洋相互作用所受的动力强迫, 它不仅依赖于海面风速和表面流速强弱, 而且还取决于复杂的冰表面和底部。分别采用下面简单的非线性关系:

$$\begin{aligned} \tau_a &= \rho_a C_a |V_a| (V_a \cos \varphi + k \times V_a \sin \varphi) \\ \tau_w &= \rho_w C_w |V_w - V_i| [(V_w - V_i) \cos \theta + k \times (V_w - V_i) \sin \theta] \end{aligned}$$

式中 ρ_a 和 ρ_w 分别是海面空气密度和海水密度。 C_a 和 C_w 分别是空气拖曳系数和水拖曳系数, 它们分别依赖于冰上大气边界层和冰下海洋边界层的物理特性以及冰面和冰底的形状和粗糙度。 V_a 和 V_w 分别为海面风速和表面流速。如 V_a 和 V_w 采用地转风和地转流, φ 和 θ 分别是大气和海洋边界层地转偏角, 如果 V_a 和 V_w 采用实测值或大气和海洋模式预报值, 令 φ 和 θ 为零。

海冰的空间分布是非常复杂的, 不同类型的结构差别很大, 有的堆积挤压成大的冰脊, 有的呈大面积固定冰, 有的冰水相间, 出现细长的水道和广阔的冰间湖, 其尺度通常比模式格距小。即在一个模式网格内既包括不同厚度的冰, 也包括开阔水域。图 2a 是经纬网格内海冰航空摄影照片, 它清楚地表示了这种特点。而在一个模式网格内通常不可能完全显式表示这种性质。

根据图 2a 所示的海冰分布特点, 所提出的模式考虑在某一网格内, 平整冰(冰厚为 h_i , 密集度为 A_i)、包括冰脊在内的堆积冰(冰厚为 h_r , 密集度为 A_r) 和开阔水可能同时出现。以密集度区分各成分所占比例。平均冰厚 $\bar{h} = \bar{h}_i + \bar{h}_r = A_i h_i / A + A_r h_r / A$, $A = A_i + A_r$ 。开阔水占该网格面积为 $1 - A$ 。因此冰速 V_i , 冰厚 $\bar{h}_i$ 和 $\bar{h}_r$ 以及密集度 A 是该模式的主要变量, 它们在模式网格中的配置如图 2b 所示。因此,

$$m = \rho_i (h_i + h_r) A \quad (6)$$

为了方便, 此式及以后各式中省略了平均符号, ρ_i 是海冰密度。实际上, 开阔水部分代表

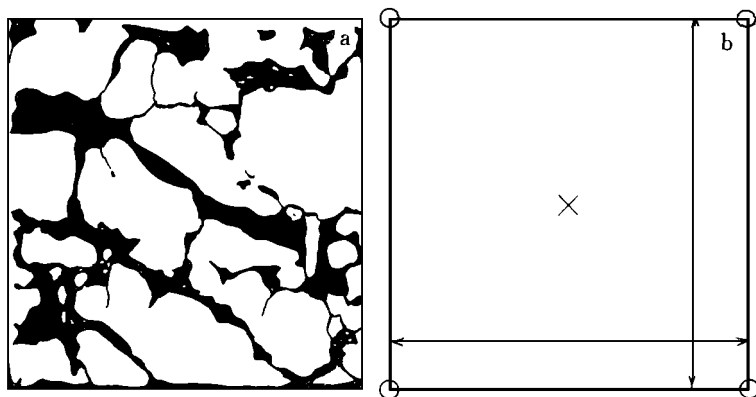


图2 海冰分布和模式网格

(a. 辽东湾 0.1° 经度 $\times 0.1^\circ$ 纬度海域海冰分布, 黑色为开阔水;

b. 海冰模式网格变量配置: $\circ$ V ; $\times$ $h_l, h_r, A, \zeta, \eta, \rho, \epsilon, \sigma$)

开阔水和比厚度临界值 h_0 小的薄冰。根据渤海冰情, 模式中 h_0 取为 2 cm 。假定 ρ_i 为常数, 则式(2)可转化为上述3个变量的预报方程组:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -V_i \cdot \nabla A + \Psi_A + \Phi_A \quad (7)$$

$$\frac{\partial h_l}{\partial t} = -V_i \cdot \nabla h_l + \Psi_l + \Phi_l \quad (8)$$

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} = -V_i \cdot \nabla h_r + \Psi_r + \Phi_r \quad (9)$$

右边第2项形变函数 Ψ_A, Ψ_l 和 Ψ_r 是为了使方程组(7)~(9)和连续方程(2)一致。用以确定在非均匀强迫场作用下, 产生冰内应力不均匀, 引起冰厚变化, 造成冰的堆积, 甚至形成冰脊和水道。它们必须满足:

$$h\Psi_A + A(\Psi_l + \Psi_r) = -hA \nabla \cdot V_i \quad (10)$$

式中 $h = h_r + h_l$, 函数 (Ψ_A, Ψ_l, Ψ_r) 取决于冰速散度的符号和密集度^[16, 17, 19]。

右式第3项密集度、平整冰和堆积冰的热力学增长率 Φ_l, Φ_r 和 Φ 描述热力学作用, 满足下列关系:

$$\rho_i(h\Phi_A + \Phi_l + \Phi_r) = \Phi \quad (11)$$

根据气-冰、气-水和冰-水界面的热量收支进行热力学计算。热通量包括太阳短波辐射、入射及放射的长波辐射、感热和潜热、通过冰层的热传导, 以及由于相变造成的能量吸收和发射^[16, 17, 19]。开阔水(或水道)表面及冰盖表面的海冰增长率分别为 $f(0)$ 和 $f(h)$, 由下式计算

$$f(0) = -Q_{ws}/Q_1 \quad (12)$$

式中 Q_{ws} 是开阔水面热通量总和, Q_I 是海冰融解热。

$$f(h) = f_1(h) + f_2(h) \quad (13)$$

式中 f_1 和 f_2 分别表示海冰表层和底层的增长率。

$$f_1(h) = -Q_{is}/Q_I \quad (14)$$

$$f_2(h) = -Q_{ib}/Q_I \quad (15)$$

其中 Q_{is} 和 Q_{ib} 分别表示海冰上表面热通量和底面热通量。由于热力过程引起的总冰厚变化为

$$\Phi_h = f(h)A + f(0)(1 - A) \quad (16)$$

采用经验参数 R 可以得到平整冰和堆积冰的冰厚增长率 Φ 和 Φ ,

$$\Phi = (1 - R)\Phi_h, \quad \Phi = R\Phi_h \quad (17)$$

方程(7)中的 Φ_h 项表示开阔水(包括厚度小于 h_0 的薄冰)和冰(包括平整冰和堆积冰)的相对面积变化特性。由 Φ_h 项引起海冰密集度增加或减少, 定性地表示了开阔水和冰盖的相对热力作用。它的基本物理性质是: 当海水冻结时开阔水(或水道)的面积迅速缩小, 冰融解时该面积缓慢增加。采用 Hibler^[7] 方法计算海冰密集度增长率, 即

$$\Phi_h = \Phi_{h1} + \Phi_{h2} \quad (18)$$

$$\text{式中, } \Phi_{h1} = \begin{cases} f(0)(1 - A)/h_0, & \text{当 } f(0) > 0 \\ 0, & \text{当 } f(0) < 0 \end{cases}$$

$$\Phi_{h2} = \begin{cases} 0, & \text{当 } \Phi_h > 0 \\ A\Phi_h/2(2h), & \text{当 } \Phi_h < 0 \end{cases}$$

每一步分别计算开阔水和冰的热量收支, 从而得到 $f(0)$ 和 $f(h)$ 。模拟结果指出计算热量收支对得到 Φ , Φ 和 Φ 是非常重要的。图 3 是根据 1989 年 1 月 27 ~ 28 日辽东湾 JZ-20-2 石油钻井平台(40°27'N, 121°17'E)附近海冰观测资料计算的 Φ_h , Φ , Q_{ws} 和 Q_{is} ^[17], 夜间的冰厚增长率 Φ 约为 4 cm/d, Hibler^[7] 进行北极海冰季节变化模拟时, 根据气候资料经验地给出北极海冰热力增长率, 1 月份厚度小于 50 cm 的增长率为 3 ~ 12 cm/d。上述计算方案还应用于辽东湾北部一些单点冰厚模拟。并在整个渤海第 6 和第 7 天海冰模拟试验中显示热力因子的重要性^[17]。

海冰模式的变量分布采用 Arakawa B-网格如图 2b 所示。网格距为 8.64 km × 11.11 km, 数值积分的时间步长为 3 h。采用连续近似和松弛方法解动量方程(1)得到冰速, 用修正的 Lax-Wendroff 方法解连续方程, 即冰厚和冰密集度的预报方程(7) ~ (9), 得到平整冰厚、堆积冰厚和密集度^[7, 10, 20]。

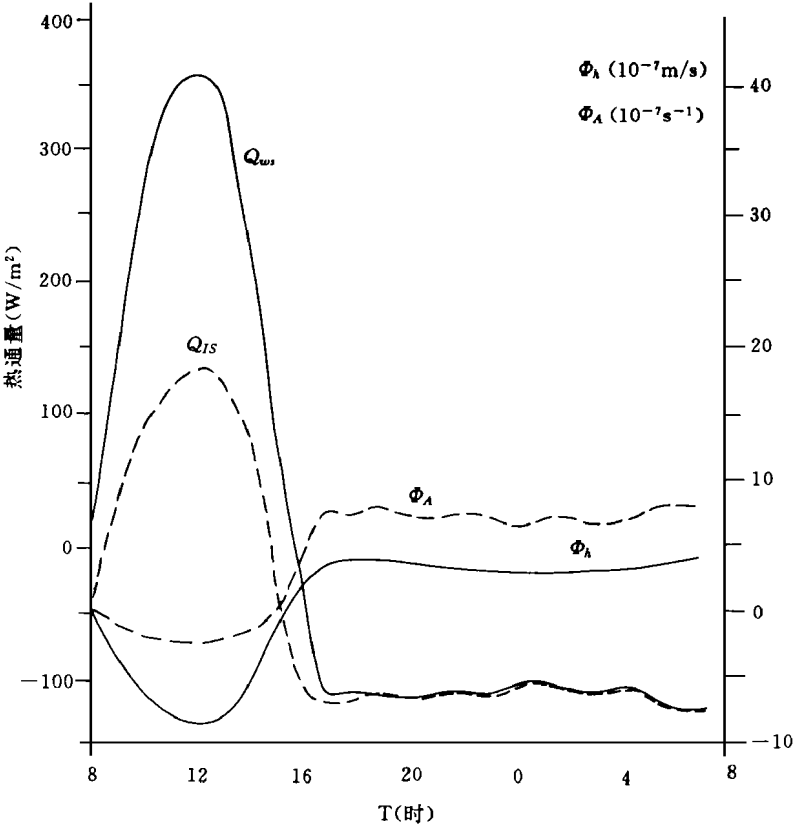


图 3 海面净热通量 Q_{ws} 和 Q_{is} 以及总冰厚和密集度的增长率 Φ_h 和 Φ_A

5 海冰数值预报

5.1 初始场

卫星遥感是海冰进行大范围监测和预报的有效手段。由 NOAA 卫星遥感资料可以获得连续的、定量的海冰信息, 得到渤海和北黄海数字化海冰遥感图象资料^[12]。由 NOAA 遥感图象提取的海冰信息作为初始场的基础, 补充飞机航测、船舶观测及沿岸海洋站的日常观测资料然后进行综合分析, 得到冰厚和密集度的初始场, 并假定初始冰速为零。位于辽东湾的 JZ-20-3 石油钻井平台(40°30' N, 121°21' E) 提供的实时海冰观测资料用以检验和订正海冰初始场。

5.2 海冰模式与大气模式联结

为了发展渤海海冰数值预报业务系统, 必须联结海冰模式与大气模式。由大气模式提供风应力、感热通量和潜热通量的预报场。采用 5 层原始方程 σ 坐标的大气模式与海冰模式联结, 在两者之间还联结一个大气边界层模式预报风应力和大气热通量。由大气模式得到边界层外参数, 根据表面层的 Monin-Obukhov 原理和 Ekman 层的 Rossby 相似性理论得到的阻尼定律方程组, 用来计算湍流热通量^[22]。

表 2 预报变量和输出产品

预报产品	预报时效 (h)	运行期间 (年度冬季)
海冰漂移	24, 48, 72	1989/ 1990 ~ 1991/ 1992
	24, 48, 72, 96, 120	1992/ 1993 ~ 1995/ 1996
海冰厚度	24, 48, 72	1989/ 1990 ~ 1991/ 1992
平整冰厚	24, 48, 72, 96, 120	1992/ 1993 ~ 1995/ 1996
堆积冰厚	24, 48, 72, 96, 120	1992/ 1993 ~ 1995/ 1996
冰密集度	24, 48, 72	1989/ 1990 ~ 1991/ 1992
	24, 48, 72, 96, 120	1992/ 1993 ~ 1995/ 1996
冰厚差	72	1991/ 1992 ~ 1995/ 1996
	72, 120	1992/ 1993 ~ 1995/ 1996
冰密集度差	72	1991/ 1992
	72, 120	1992/ 1993 ~ 1995/ 1996
海面风	24, 48, 72	1989/ 1990 ~ 1991/ 1992
	24, 48, 72, 96, 120	1992/ 1993 ~ 1995/ 1996
局地冰厚	24, 48, 72	1991/ 1992
	24, 48, 72, 96, 120	1992/ 1993 ~ 1993/ 1994
冰漂移轨迹	72	1991/ 1992
	120	1992/ 1993 ~ 1995/ 1996
海冰外缘线	24, 48, 72	1989/ 1990 ~ 1991/ 1992
	24, 48, 72, 96, 120	1992/ 1993 ~ 1995/ 1996

卫星遥感图象分析的总覆盖面积为 11328 km², 5 d 预报的冰覆盖面积为 18240 km², 1 月 18 日卫星遥感图象分析的冰覆盖面积为 18623 km²。图 5c 堆积冰厚的数值预报结果清楚地反映了 1993 年 1 月中旬沿辽东湾西北岸的堆积冰和冰脊的发展。图 6 给出的渤海 1996 年 1 月 27 日的 3 d 预报结果指出, 在辽东湾底双台子河和大凌河口外一带沿海海域明显出现水道(开阔水)。1996 年 1 月 30 日 NOAA 卫星遥感图象在辽东湾底大凌河和小凌河口外一带沿海海域明显显示为开阔水, 比预报的水道位置略偏西。1995/ 1996 年冬季渤海的冰情是正常偏轻。图 7 给出的渤海冰覆盖范围的 3 d 预报结果与 NOAA 海冰遥感图象分析结果。图中的虚线表示自 1996 年 1 月 5 日至 1996 年 2 月 22 日预报的渤海海冰覆盖面积, 它与图中实线表示的同一时段内由海冰遥感图象分析的实况值相当逼近。但是在 1 月底至 2 月中, 预报值比实况值偏大。

为了检验预报结果和客观评价模式, 每次预报之后要对上次预报进行客观检验。计算冰厚预报场的均方根误差(RMSE)和冰外缘线位置的 平均误差(ME)。由 NOAA 卫星遥

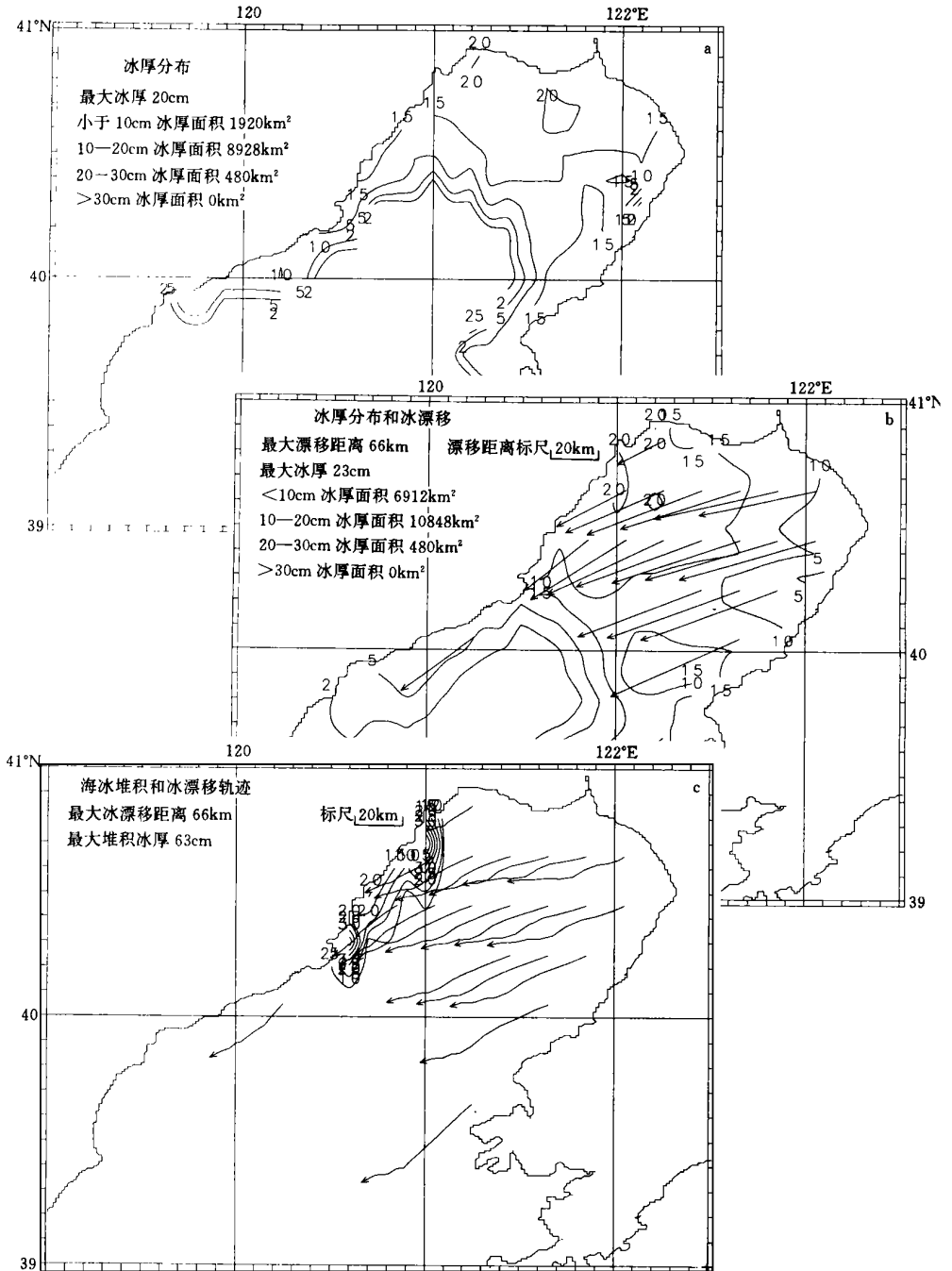


图5 辽东湾 1993 年 1 月 13 日的 5 d 海冰数值预报

(a. 通过合成分析的 1993 年 1 月 13 日初始冰厚场; b. 平整冰厚(等值线)和冰漂移(带箭头直线)的 5 d 预报; c. 堆积冰厚(等值线)和冰轨迹(带箭头曲线)的 5 d 预报)

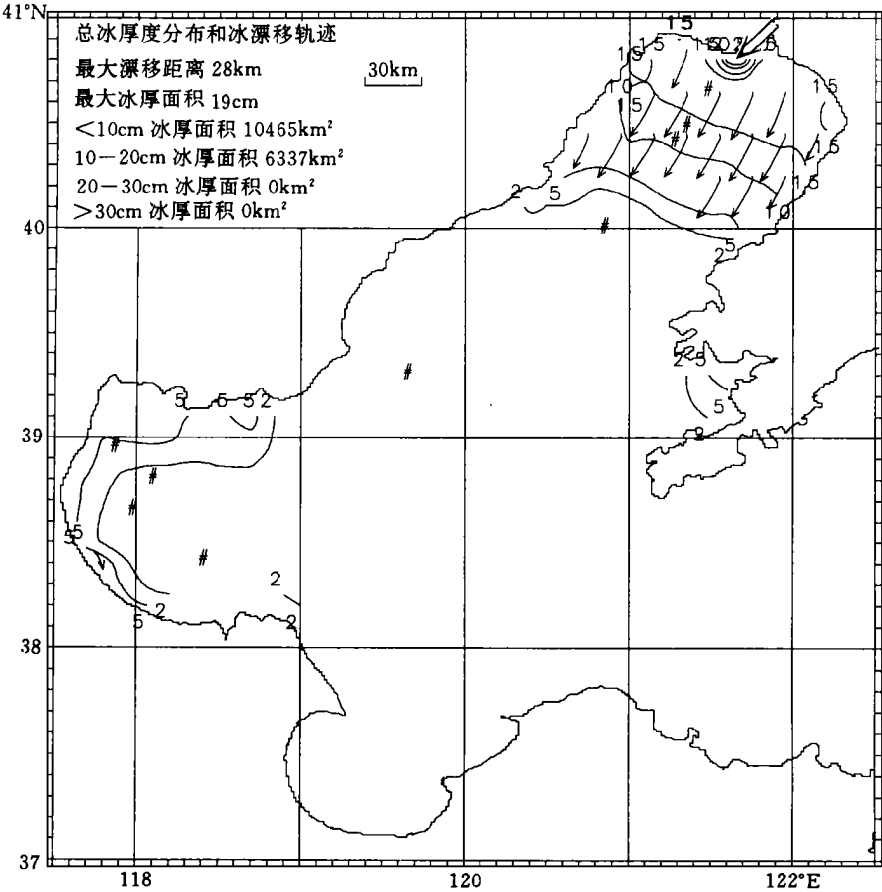


图 6 1996 年 1 月 27 日渤海冰漂移(带箭头直线)和冰厚(等值线)的 3 d 预报
(图中双线箭头指向预报的水道)

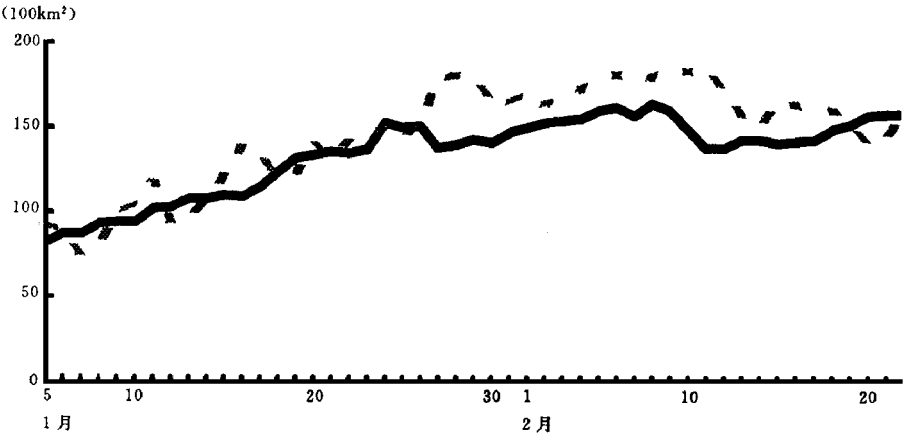


图 7 1996 年 1 月 5 日至 2 月 22 日期间渤海冰覆盖面积 3 d 预报
的逐日变化(虚线)和对应日期的卫星图象分析结果

表 3 1990/ 1991 ~ 1995/ 1996 年冬季渤海海冰数值预报结果客观检验*

冬季(年度)	预报时效(h)	样本(d)	冰厚预报均	外缘线预报	冰厚预报	外缘线预报
			方根误差(cm)	平均误差()	保证率(%)	保证率(%)
1990/ 1991	24	28	1. 77	1. 96	94	100
	48	28	2. 53	3. 61	93	94
	72	28	3. 23	6. 99	87	88
1991/ 1992	24	34	2. 61	4. 13	88	91
	48	34	3. 48	6. 24	80	82
	72	34	3. 90	7. 90	68	68
1992/ 1993	24	57	3. 10	4. 00	88	96
	48	57	4. 10	5. 60	84	91
	72	57	4. 50	6. 70	77	86
	96	26	5. 00	8. 60	60	65
	120	26	5. 50	11. 60	50	45
1993/ 1994	24	71	2. 48	2. 79	92	99
	48	71	3. 48	4. 23	83	94
	72	70	4. 43	5. 53	81	86
	96	9	4. 67	5. 90	78	78
	120	9	4. 91	5. 95	78	80
1994/ 1995	24	66	1. 68	3. 22	100	100
	48	65	2. 39	4. 63	96	95
	72	64	2. 78	5. 51	93	90
	96	12	3. 17	6. 40	91	83
	120	12	3. 65	8. 59	87	75
1995/ 1996	24	74	1. 59	2. 56	100	99
	48	73	2. 59	3. 90	96	94
	72	72	3. 26	5. 31	89	91
	96	14	3. 66	5. 37	79	93
	120	14	4. 41	8. 11	71	71

* 保证率: 冰外缘线的预报保证率定义为海冰外缘线的平均误差小于 9. 25 km(5 n mile) 的预报准确率; 冰厚的预报保证率定义为冰厚的均方根误差(RMSE) 小于 5 cm 的预报准确率。

感图象确定冰外缘线的实际位置, 预报的海冰外缘线定义为 2 cm 的冰厚等值线。表 3 给出连续 6 个冬季海冰数值预报的统计检验结果, 数值预报的 3 d 冰厚均方根误差(RMSE) 约为 5 cm, 预报的 3 d 冰外缘线平均误差(ME) 小于 8 km。客观检验结果也表明, 在冰情发生重大变化时, 数值预报的精度明显高于惯性预报和经验预报的精度。自 1990/ 1991 年冬季以来, 还应用辽东湾海域上的 ZJ-20-3 钻井平台的实时海冰观测资料作

为检验数值预报结果的重要依据。上述比较与检验显示海冰数值预报结果是令人满意的。

6 总 结

最近几年的逐日业务预报表明所使用的海冰动力-热力学模式适于渤海海冰漂移、增长和消融预报。预报结果与冰情演变实况接近, 统计检验结果定量地指出该模式的可靠性和应用于业务预报可行性。

为了不断提高海冰数值预报精度, 除了需要改善大气、海洋和海冰模式外, 还要提高冰初始场的精度。卫星遥感资料是提供冰模式所需海冰初始场的主要来源。不过, 还需要进一步根据渤海和北黄海海域海冰野外观测资料对海冰遥感图象进行订正和分析。除卫星遥感外, 更需提高岸站和航测的观测质量。渤海石油钻井平台的实时资料还被用于检验模式, 确定合理参数和订正海冰初值并检验预报结果。值得指出的是, 在海冰数值预报中资料同化技术将会使海冰模式的初值和预报得到明显的改善, 冰-海洋耦合模式的应用将进一步提高海冰数值预报结果的精度^[23~28]。

通过模拟和预报结果的对比, 发现大气模式预报精度的提高对海冰数值预报的发展起着重要作用。为了进一步提高预报精度, 1996/1997 冬将开始采用国家气象中心 T 106 数值预报产品进行 7 d 海冰数值预报试验。另外, 高分辨率的卫星遥感资料将能显著提高业务化海冰数值预报的精度。

致谢: 衷心感谢芬兰海洋研究所 Prof. P. Malkki, Prof. J. Launiainen, Dr. H. Gronvall, Helsinki 大学 Prof. M. Lepparanta 和加拿大 Bedford 海洋研究所 Dr. C. Tang 的热情讨论并提供有关资料。尤其感谢中国海洋石油总公司和渤海石油公司为发展和改进渤海海冰数值预报, 提供长期的支持和帮助。

参考文献

- 1 张方俭. 中国的海冰. 北京: 海洋出版社, 1986. 163
- 2 臧恒范, 王绍武. 海温韵律与海冰的长期预报. 海洋学报, 1983, 5(2): 163~171
- 3 张启文. 渤海海冰变化与气象条件的关系. 海洋预报, 1986, 3(1): 49~54
- 4 王仁树等. 渤海海冰漂移过程的数值模拟和试验. 海洋与湖沼, 1994, 25: 301~305
- 5 王志联, 吴辉碇. 海冰的热力过程及其与动力过程的耦合模拟. 海洋与湖沼, 1994, 25: 408~415
- 6 Zhang Zhanhai and Wu Huiding. Numerical study on tides and tidal drift of sea ice in the icecovered Bohai Sea. In: Yu Zhouwen, et al. Sea Ice: observation & modelling. Beijing: China Ocean Press, 1994, 34~46
- 7 Hibler W D. A dynamic-thermodynamic sea ice model. J Phys Oceanogr. 1979, 9: 815~846
- 8 Lepparanta M. An ice drift model for the Baltic Sea. Tellus, 1981, 33: 583~596
- 9 WMO/TD. Summary report on national sea-ice forecasting techniques. Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities. Report No23, WMO, Geneva, Switzerland. 1989. 91pp
- 10 吴辉碇, 白珊, 张占海. 海冰动力学过程的数值模拟. 海洋学报, 1998, 20(2): 149~162
- 11 Wu Huiding and Lepparanta M. Experiments on numerical sea ice forecasting in the Bohai Sea. IAHR 90 Proceeding of the 10th International Symposium on Sea Ice, Aug. 20-23, Espoo, Finland. 1990. 3: 173~186
- 12 Wu Huiding, Zhang Zhanhai and Bai Shan. On the operational numerical forecasting of sea ice in the Bohai Sea of China. In: Yu Zhouwen, et al. Sea Ice: Observation & Modelling. Beijing: China Ocean Press, 1994. 134~146
- 13 杜碧兰等. 渤海航空遥感冰情图集. 北京: 海洋出版社, 1990. 102
- 14 Huang Runheng, Wang Qiang and Jin Zhengang. Extraction of the sea-ice information from NOAA satellite im-

- agery. Proceedings of the 11th Asian Conference on Remote Sensing, Nov. 15 ~ 21, Guangzhou, China. 1990. F-2-1- F-2-5
- 15 Huang Runheng, Wang Qiang and Jin Zhengang. Satellite remote sensing of sea ice in China. PRC/CEC Workshop on contribution to Global Change, Oct. 26 ~ 30, Beijing. 1992. 1 ~ 6
- 16 吴辉碇. 海冰的动力-热力过程的数学处理. 海洋与湖沼, 1991, 22: 321 ~ 328
- 17 吴辉碇, 王志联. 海冰热力过程及其数值模拟. 见: 冯士筭, 孙文心. 科学与工程计算丛书《物理海洋数值计算》. 郑州: 河南科技出版社, 1992. 361 ~ 428
- 18 吴辉碇, 白珊, 张占海. 海冰流变学. 见: 蒋伯诚, 张锁春. 高科技研究中的数值计算. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995. 40 ~ 49
- 19 Parkinson C L and Wansington W M. A large-scale numerical model of sea ice. J Geophys Res. 1979, 84: 311 ~ 337
- 20 Wu Huiding and Lepparanta M. On the modelling of ice drift in the Bohai Sea. FIMR Internal Report, Helsinki, Finland. 1988. 1: 40
- 21 Huang Runheng, Wang Qiang and Jin Zhengang. Application of satellite imagery to monitoring of sea ice motion in North China Sea. Adv Space Res, 1992, 12(7): 163 ~ 167
- 22 Wu Huiding. An atmospheric boundary layer model and its application. Modelling, Simulation & Control, C. France: AMSE Press. 1986. 4(3): 1 ~ 19
- 23 Hibler W D and Bryan K. A diagnostic ice-ocean model. J Phys Oceanogr, 1987, 17: 987 ~ 1015
- 24 Ikeda M. A three-dimensional coupled ice-ocean model of coastal circulation. J Geophys Res, 1988, 93: 10731 ~ 10748
- 25 Mellor G L and Kantha L. An ice-ocean coupled model. J Geophys Res, 1989, 94: 10937-10954
- 26 Lemke P, Owens W B and Hibler W D. A coupled sea ice-mixed layer-pycnocline model for the Weddell Sea. J Geophys Res, 1990, 95(C6): 9513 ~ 9525
- 27 Cheng A and Preller R H. An ice-ocean coupled model for the Northern Hemisphere. In: Yu Zhouwen, et al. Sea Ice: Observation & Modelling. Beijing: China Ocean Press, 1994. 78 ~ 87
- 28 Fichefet Th, et al. A global sea-ice/upper ocean model: some preliminary results. In: Yu Zhouwen, et al. Sea Ice: Observation & Modelling. Beijing: China Ocean Press, 1994. 64 ~ 77

NUMERICAL SEA ICE FORECAST FOR THE BOHAI SEA

Bai Shan Wu Huiding

(*National Research Center for Marine Environmental Forecasts, Beijing, 100081*)

Abstract

A dynamic-thermodynamic ice model with three levels for simulation the ice growth, decay and drift in the Bohai Sea is presented on the basis of review of the climate and ice conditions in the Bohai Sea and the existing sea ice models. This model was linked to a numerical weather prediction model with an atmospheric boundary layer model and tidal current model for forecasting ice conditions in the Bohai Sea and the northern Yellow Sea during the winters from 1990 to 1996 at National Research Center for Marine Environmental Forecasts. The numerical sea ice forecasting products, such as fields of ice thickness, compactness and velocity, ice edge, parameters of ice ridge and local estimate of ice thickness and tracks of ice floes near drilling platforms were produced and sent to the National Marine Forecasting Station, and the Bohai Oil Corporation and other users. Statistical verification has been used for making objective assessment of the model and the forecast system. this paper outlines the climate and ice conditions in the Bohai Sea, application of satellite imagery, ice model and its forecasting results and verification.

Key words: Sea ice, Dynamic-thermodynamics, Numerical weather prediction, Bohai Sea.