

2002~2003 渤海海冰数值预报

刘钦政¹, 刘 煜¹, 白 珊¹,
张启文¹, 李宝辉¹, 李春花¹

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要: 海冰数值预报是海冰业务预报的主要方法之一。国家海洋环境预报中心建立了业务化的渤海海冰数值预报系统, 并进行了多年的业务化运行。随着我国卫星遥感事业和数值天气预报技术的发展, 海冰预报系统也在不断发展中。本文介绍了 2002~2003 冬季应用 HY-1 卫星海冰遥感和 T213 数值天气预报模式产品对该海冰数值预报系统的改进, 对 2002~2003 冬季海冰数值预报的结果进行了分析和比较。

关键词: 渤海; 海冰; 数值预报; T213 数值天气预报模式; HY-1 卫星海冰遥感

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2003)03 - 0060 - 08

1 引言

渤海是我国的半封闭内海, 沿岸分布着许多大中城市, 航运繁忙, 油气资源丰富, 已经有几个大油田在该海域进行油气资源的勘探开发, 是我国重要的经济开发区。但渤海每年冬季都有海冰出现, 为季节性冰区。海冰对渤海航运, 海上油气开发和生产等都有不同程度的影响。严重冰情(如 1969 年)曾造成航运中断、轮船损毁、石油平台倒塌等海冰灾害。即使在一般和较轻冰情的年份, 海冰依然会在个别海区造成灾害。海冰已成为渤海海域海上工程设计、航运和开发生产中必须考虑的重要环境要素之一。

自 1969 年我国开展海上冰情调查和观测以来, 逐渐形成了包括岸站、飞机航测、船舶调查、卫星遥感和雷达监测的海冰立体观测网。海冰预报已成为海洋环境预报的日常业务内容, 预报方法也由初期的经验预报方法发展到目前包括经验、统计和数值预报等多种方法并用的预报体系, 为预防和减轻海冰灾害发挥了重要作用。

海冰经验统计预报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。但是随着近十几年来环渤海经济迅速发展, 上述仅局限于定性、经验、主观性的预报在预报时效、精度和定量化等方面已不能满足要求^[1]。20 世纪 90 年代以来, 随着海冰监测, 特别是海冰卫星监测技术和数值天气预报

收稿日期: 2003-06-02; 修订日期: 2003-06-16

基金项目: 国家十五科技攻关项目(2001BA603B - 03); 海洋灾害发生机理及与预报减灾技术研究(2001CB711006); 南大洋海冰变化及其对全球和中国气候影响的研究(2001DIA50040 - 03); 国家自然科学基金项目(40233032)。

作者简介: 刘钦政 (1966-), 男, 博士, 副研究员。

技术的发展, 国家海洋环境预报中心在海冰数值模式研究和试验的基础上, 逐步开展了海冰的数值预报, 并于 1992 年开始业务化的海冰数值预报, 预报时效为 3d, 到 2000 年, 海冰数值预报时效已由 3d 提高到 5d, 预报精度稳定提高, 在定量化预报方面迈出了坚实的一步。

2002 年 5 月, 我国发射了第一颗海洋卫星 HY-1, 并于 2002~2003 冬季开始卫星遥感海冰资料反演的业务化试验, 我们结合 MODIS 等卫星资料, 获得了更高分辨率的海冰初始场。我国 T213 数值预报模式也于 2002 年开始业务化运行, T213 数值预报能够提供更高分辨率和更高精度的大气强迫场。这些进展都成为业务化海冰数值预报系统新的支撑, 使海冰数值预报有了新的提高。

2 业务化海冰数值预报模式和预报系统

业务化海冰数值预报系统由资料收集处理、数值天气预报、海洋预报、海冰数值模式、以及预报产品制作和分发等模块组成。预报系统的流程如图 1 所示。

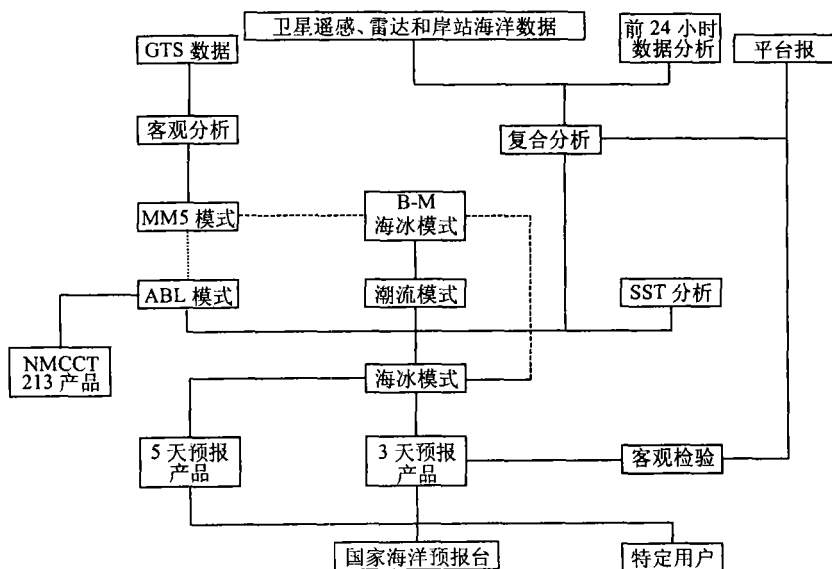


图 1 渤海海冰数值预报流程图

资料收集处理工作包括收集由卫星、雷达和沿岸海洋站的海冰观测资料, 还包括飞机航测海冰资料, 将卫星遥感资料反演获得海冰厚度和密集度等, 并与前 24h 的分析资料或预报资料、雷达和岸站资料等进行复合分析, 获得海冰预报模式的初值场。海洋模式 (包括潮流计算) 和大气模式向海冰模式提供各时刻的大气风、气温、湿度和海温 (SST)、表层海流等强迫场。将分析获得的初始海冰场和各时刻的大气、海洋强迫场作为海冰模式的输入场, 计算各时刻海冰密集度、海冰厚度和海冰速度等。然后将计算结果依据需要加以释用, 制作不同形式不同时效的预报产品。主要的预报产品包括 1、3、

5d 的厚度、密集度、速度、轨迹、抗压强度等预报产品;并分发给各有关部门和特定用户。所有的资料,包括原始资料、分析初始场、强迫场资料和预报结果全部进入海冰数值预报资料库,供预报检验和进一步研究之用。

业务化海冰数值模式采用国家海洋环境预报中心根据海冰热力学、动力学和流变学原理,结合渤海的水文、气象和冰情特点,研制的适用于渤海的海冰数值预报模式^[2~4]。其热力学部分根据热量守恒原理,决定海水冻结和海冰融化;模式中海冰动力学部分采用粘塑性海冰流变学关系计算海冰内部的相互作用^[3,5],根据质量守恒原理决定冰的漂移和形变。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。

在业务化海冰数值预报系统中,必须把海冰模式与数值天气预报模式联接起来,由大气模式提供风应力、气温、湿度、感热和潜热通量的预报场,作为海冰模式的强迫场,才能预报海冰冰厚、密集度和冰速等数值预报产品。

2002~2003 冬季的渤海海冰数值预报系统采用了更高分辨率(最高达 250m)的 HY-1 卫星和 MODIS 遥感资料反演海冰,用于海冰初始场的复合分析。大气强迫采用了更高分辨率更高精度的 T213 数值天气预报模式与海冰数值模式联接,取代已经沿用了 7 年的 T106 数值天气预报模式。T106 大气模式空间分辨率为 $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$,时间步长:12h;T213 大气模式空间分辨率为 $0.5625^{\circ} \times 0.5625^{\circ}$,时间步长:3h (0~3d),12h (3~5d)。T213 大气模式提供了更高空间分辨率和更短时间间隔的大气强迫场,预报精度方面也有显著的提高。大气模式提供渤海海冰数值预报所需大气强迫场,在大气模式与海冰模式之间,嵌入大气边界层模式预报风应力和大气热通量。由 T213 大气模式提供逐日 1~5d 的数值天气预报产品作为大气边界层模式外参数,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,计算湍流热通量。

3 2002~2003 冬季渤海冰情

渤海海冰的生消和发展主要受渤海区域的冷空气活动影响,与渤海气温的变化同步相关很好^[6~7]。2002~2003 冬季,渤海海冰随 2002 年 12 月初爆发第一次较强冷空气而出现在。2002 年 12 月 30 日至 01 月 05 日的强冷空气过程使渤海冰情迅速发展,渤海进入盛冰期。2 月 5 日达到本年度海冰最大范围,辽东湾流冰外缘线为 58n mile。2003 年 2 月 6 日以后,渤海气温开始缓慢回升,2 月下旬,大连气温从 2003 年 02 月 22 日的 -0.1°C 回升到 2003 年 02 月 25 日的 2.6°C ,渤海湾的海冰和辽东湾底及其西岸的海冰都融化了,仅在辽东湾东岸残留不到 10n mile 的狭长的松散流冰带。3 月初,渤海海冰完全融化。

图 2 显示了 2002~2003 冬季渤海海冰范围及气温的逐日演变情况。渤海冰情演变和气温变化之间具有较好的对应关系,气温下降对应海冰范围扩大,气温回升对应海冰范围缩小。表明渤海海冰与局地天气气候有很好的相关关系^[7],因此海冰数值预报在很大程度上依赖于数值天气预报提供的强迫场的精度。

本年度辽东湾海冰属于偏轻冰年,初冰晚,终冰早,冰期比常年短,盛冰期持续时间接近常年,但结冰范围比常年明显偏小。渤海湾和莱州湾无论从冰期、冰厚和冰边缘

线及范围来看, 均属轻冰年。但本年度海冰有明显的特点, 多年未结冰的莱州湾的沿岸浅滩相继出现 5cm 左右厚度的流冰; 辽东湾海冰的分布异于常年, 西部冰情很轻, 东部冰情较重。

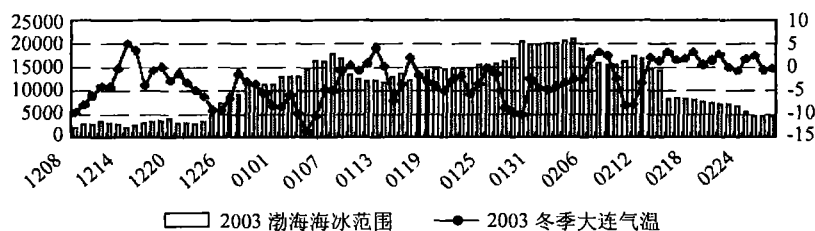
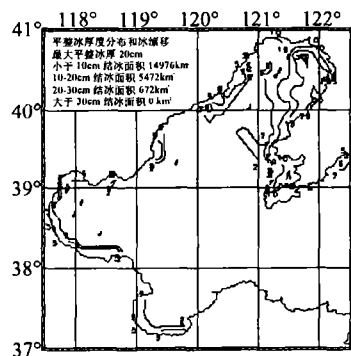


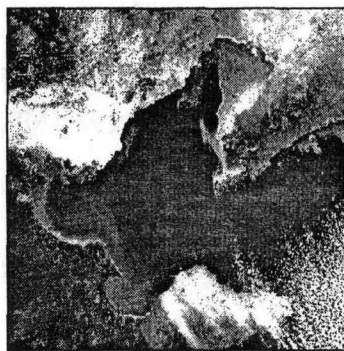
图2 2002~2003 冬季渤海海冰范围(km^2)和气温($^{\circ}\text{C}$)演变

4 预报结果分析

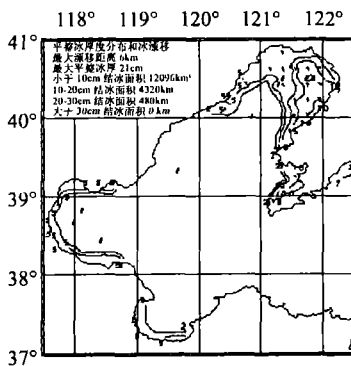
本年度海冰数值预报自 2002 年 12 月 8 日开始, 到 2003 年 2 月 26 日结束, 逐日发布 1~5d 的业务化预报, 总计发布数值预报 83d, 期间进行了时效 7d 的预报试验。图 3 显示了预报的盛冰期 2003 年 1 月 29 日 1~7d 的数值预报结果, 并与同日的综合分析场和卫星遥感图象进行了对比。



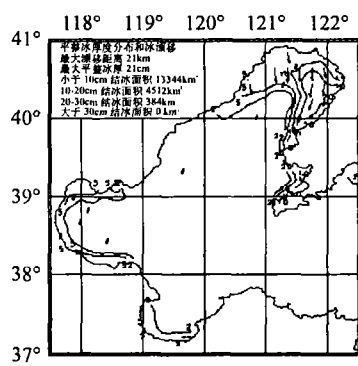
(a) 2003/01/29 的海冰分析场



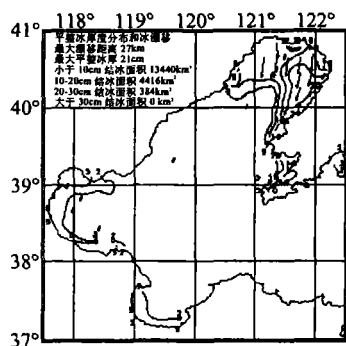
(b) Aqua 卫星遥感 2003/01/29 海冰实况



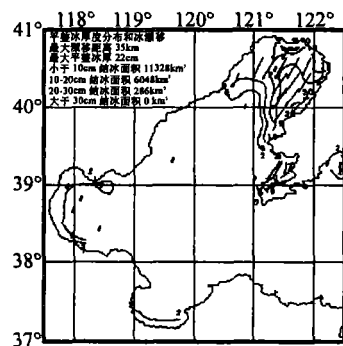
(c) 1d 数值预报 2003/01/29 冰情



(d) 3d 数值预报 2003/01/29 冰情



(e) 5d 数值预报 2003/01/29 冰情



(f) 7d 数值预报 2003/01/29 冰情

图 3 盛冰期 1~7d 的渤海海冰数值预报与实况的对比

为了从整体上了解本年度海冰数值预报的能力,为将来进一步改进和完善海冰数值预报系统,提高海冰预报精度提供依据,本文就海冰厚度、边缘线的预报精度和预报保证率进行了分析。各检验量定义如下:

(1) 冰厚预报均方误差 (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (HF_{ij} - HO_{ij})^2}{N}} \quad (1)$$

式中, N 为海冰覆盖格点总数, HO_{ij} 和 HF_{ij} 分别表示冰厚的观测、预报值。

(2) 外缘线平均预报误差 (ME)

$$ME = \frac{d \cdot \sum |sgn(HF_{ij}) - sgn(HO_{ij})|}{N_E} \quad (2)$$

式中, N_E 表示冰—水边界的格点总数, d 为计算格点的面积平方根。

$$sgn(X) = \begin{cases} 1 & X > 0 \\ 0 & X \leq 0 \end{cases}$$

(3) 冰厚、冰外缘线预报平均保证率 GR(η)

设预报误差标准为 F_c (冰厚 RMSE 的 F_c : 5cm; 冰边缘线 ME 的 F_c : 5n mile (9.3km)), 如果预报误差 F 低于它, 即 $F \leq F_c$, 即认为预报结果满足预报标准, 于是定义预报保证率为:

$$GR = \frac{\sum P(F \leq F_c)}{N} \quad (3)$$

式中, N 为预报个例总数, 即样本数。

本冬季逐日海冰预报在不同预报时效的厚度误差和冰边缘线误差如图 4~5 所示。海冰厚度误差随预报时效的延长而增加, 24h 的预报一般在 2cm 左右, 而 120h 的误差达 3~7cm, 从各预报时效厚度误差的逐日演变情况来看, 初冰期和融冰期的厚度误差略大。

海冰边缘线的误差表现出相类似的特征, 初冰期边缘线的误差最大。

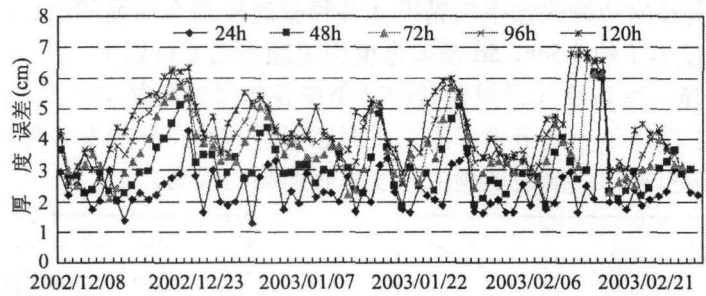


图 4 各预报时效海冰预报厚度误差的逐日演变

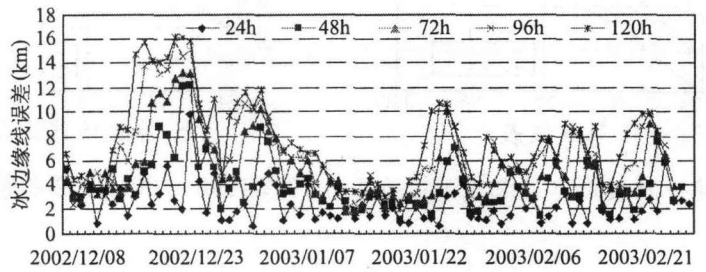


图 5 各预报时效海冰预报边缘线误差的逐日演变

整个冬季海冰厚度和冰边缘线各预报时效的误差及保证率检验结果如表 1 所示。5d 之内厚度误差小于 5cm, 误差随着预报时效的增加而增加, 预报精度逐步降低。冰边缘线的误差也表现出同样的趋势, 3d 以内的厚度和冰边缘线预报保证率都在 90% 以上, 3~5d 厚度保证率仍然保持在 90% 以上, 但冰边缘线的保证率只能达到 80%。其原因可能在于影响冰边缘线变化的因素复杂, 在海洋、大气不同的动力、热力作用下, 冰边缘线附近海域冰情变化最大, 冰水交界线位置很容易变动, 这种情况多出现于冰情转折期。

表 1 2002~2003 冬季 1~5d 海冰数值预报客观检验结果

预报时效	检验样本个数	外缘线平均 预报误差(km)	冰厚均方 误差 (cm)	外缘线预报 保证率 (误差≤9.3km)	冰厚预报 保证率 (均方差≤5cm)
24h	81	1.86	1.60	97%	97%
48h	80	3.97	2.29	96%	95%
72h	79	5.34	2.72	90%	94%
96h	78	6.44	3.06	86%	92%
120h	77	7.61	3.34	82%	92%

为了解采用新的卫星遥感资料和 T213 高分辨率数值天气预报产品对海冰预报精度的影响, 本文就本冬季海冰预报和前几年的预报精度和保证率(见图 6)进行了比较。前

几年海冰预报精度取 1997/1998~2001/2002 冬季的厚度和冰边缘线预报精度的平均值,由图可见,海冰厚度和冰边缘线预报的精度在各预报时段都有明显的改进.本冬季 24h 预报厚度误差平均减小了约 0.5cm, 5d 预报厚度误差减小达 1cm 以上,厚度误差随预报时间延长的改进更明显.冰边缘线预报误差的减小在各预报时段基本一致,约 1km.总的来看,预报系统由于采用了更高分辨率的卫星遥感资料和更高分辨率更高精度的数值预报产品,海冰厚度预报和冰边缘线的预报精度都有明显的提高。

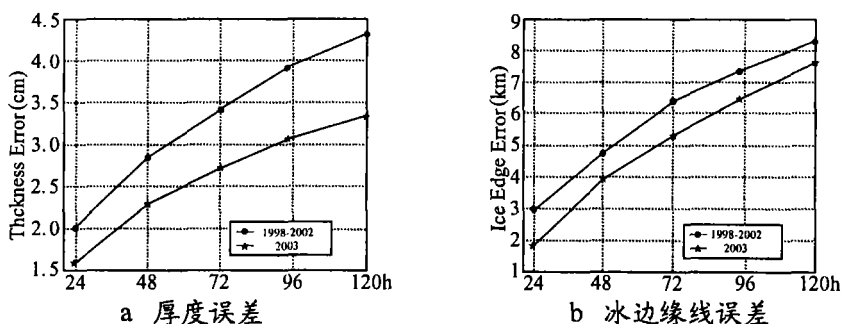


图 6 本冬季海冰厚度和冰边缘线预报精度与 1997/1998~2001/2002 冬季预报的比较

5 结语

(1) 2002~2003 冬季,渤海冰情为偏轻冰年。初冰期推后,终冰期略提前,冰期偏短。12 月冰情较常年同期偏重,1 月冰情接近常年,2 月冰情明显偏轻,没有返冻现象。辽东湾东部冰情比西部明显偏重,海冰的分布异于常年。

(2) 本冬季渤海海冰数值预报系统首次应用我国 HY-1 卫星的海冰遥感图像和数据产品为海冰监测和预报服务,采用了性能更为优越的 T213 数值天气预报产品与我们的业务海冰模式联接,对海冰数值预报的精度有所改进。

(3) 海冰数值预报的精度随预报时效的延长而降低,初冰期和融冰期预报精度略低。

(4) 2002~2003 冬季渤海逐日 1~5d 海冰厚度数值预报均方根误差不大于 5cm 的平均保证率 90% 以上;海冰外缘线预报误差不大于 9.3km 的平均保证率 1~3d 达 90% 以上,4~5d 为 80% 以上,达到海冰数值预报业务化指标。

参考文献:

- [1] 刘钦政, 余家艾, 陈伟斌, 等. 海冰预报及其应用研究[C]. 海洋监测文集, 北京: 海洋出版社, 1995, 540~543.
- [2] 吴辉碇. 海冰的动力-热力过程的数学处理[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22 (4): 221~228
- [3] 吴辉碇, 白 珊, 张占海. 海冰动力学过程的数值模拟[J]. 海洋学报, 1998, 20 (2): 149~162.
- [4] 白 珊, 吴辉碇. 渤海的海冰数值预报[J]. 气象学报, 1998, 56 (2): 139~153.
- [5] 吴辉碇, 白 珊, 张占海. 海冰流变学[M]. 高科技研究中的数值计算(蒋伯城, 张锁寿主编), 长沙: 国防科技大学出版社, 1995, 40~49.
- [6] 张方俭. 我国的海冰[M]. 北京: 海洋出版社, 1986, 165.
- [7] BAI Shan, LIU Qin-zheng, WU Hui-ding. Relation of ice conditions to climate change in the Bohai Sea of China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 20(3): 331~342.

NUMERICAL SEA ICE FORECAST FOR THE BOHAI SEA IN THE WINTER OF 2002~2003

LIU Qin-zheng¹, LIU Yu¹, BAI Shan¹, ZHANG Qi-wen¹, LI Bao-hui¹, LI Chun-hua¹

(1. National Marine Environment Forecast Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Numerical sea ice forecast is one main approach of the operational sea ice forecasts. The operational numerical forecasting system for sea ice has been set up and run for about ten years in NMEFC. With the development of satellite remote sensing and improvement of numerical weather forecast technique, the operational sea ice forecast system is also in progress. This paper introduces the improvement of numerical sea ice forecast system in the winter of 2002/2003 by using the products of HY-1 Satellite sea ice remote sensing and T213 numerical weather forecast model. The operational numerical sea ice forecast is evaluated by analysis and comparison of thickness and ice edge in the winter of 2002/2003 with those during 1997/1998~2001/2002.

Key words: the Bohai Sea; Sea ice; Numerical forecast; T213 numerical weather forecast model; HY-1 satellite sea ice remote sensing