

可服务于北极航道的海冰与气象预报信息综合分析

姜珊 杨清华 梁颖祺 滕骏华 张林

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

提要 全球气候变暖和北极海冰快速减少背景下, 北极航道正在开通, 提高海冰和气象预报能力是北极地区船只航行的重要保障。通过获取不同国家的北极高纬共享信息(包括观测数据、预报产品和历史分析资料), 分析国际北极地区海冰和气象预报信息特点及存在的问题, 能够为我国北极观测预报的常态化、业务化发展提供参考。通过对 7 个环北极国家、3 个非北极国家以及 3 个信息发布平台共 23 家机构海冰和气象预报信息的对比, 发现近年来各国北极预报水平提升, 合作交流扩大, 但是仍存在问题, 如观测数据没有充分应用于预报、北极中央区的预报能力偏弱、预报信息共享度不够、信息应用时需要加以选择、仍需提升信息发布技术。通过上述分析, 建议我国持续增加北极科考、国际合作、冰区安全航行预报保障技术研究等的投入, 以系统提升我国的极地预报能力, 为我国北极科考和极地航运事业提供更加及时有效的预报保障。

关键词 海冰预报 气象预报 观测 数据 北极

doi: 10. 13679/j. jdyj. 2017. 3. 399

0 引言

20 世纪中叶以来, 随着全球气候变暖, 北极气候系统发生了一系列剧烈变化, 最近的几十年, 北极表层气温的升温幅度是全球升温幅度的 2 倍^[1]。1979 年以来的卫星观测数据表明, 北极海冰在最近几十年显著减少, 且各月均呈现出下降趋势^[2-4], 海冰范围在每年 9 月份达到最低。根据最新气候模式预测, 到 21 世纪 40 年代, 北极九月的海冰面积将降至 $1.7 \times 10^6 \text{ km}^2$, 而到 21 世纪中叶将出现无冰的情况^[5]。北极海冰面积不断缩减^[6-8], 2011—2015 年, 北极 9 月份海冰覆盖范围 (470 万 km^2) 较 1981—2010 年减少了 28%, 2011—2015 年北极冰雪覆盖面积也低于往年平均水平^[9]。了解海冰状况及其变化对于研究气候变化、开展海洋活动和运输十分重要^[10]。北极航道地区的海冰环境在最近 40 年也发生了明显变化。多源遥感

数据分析结果表明, 北极东北航道 10 月份的海冰厚度从 2003—2006 年的 1.2—1.3 m 下降到 2011—2012 年的 0.2—0.6 m; 随着多年海冰减少、冰层变薄和冰冻期延迟, 水域开放期(冰密集度 < 50%) 从 20 世纪 80 年代的 84 d 增长到 21 世纪初的 114 d, 更在 2012 年达到 146 d。海冰变化对海洋环境和适航性产生重要影响, 船舶更容易到达喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海等原先不易进入的地区^[11]。

随着北极航道适航性的逐渐提高^[12-13], 世界将迎来北极交通和资源大开发时代, 这一变化对海上航道和整个北极航运都会产生重大影响^[13]。我国是对外贸易大国, 北冰洋航道为我国的海上贸易提供了新的选择。我国通过北冰洋航道通往欧洲和北美洲进行的商业航运具有一定的商业价值, 更重要的是借此可以加强与环北极国家的沟通和交流, 逐步在经济上开展深入合作, 提高相互依存度, 实现和平、互惠、互利、多赢的发展

[收稿日期] 2016 年 11 月收到来稿, 2017 年 6 月收到修改稿

[基金项目] 国家重点研发计划课题(2016YFC1402705, 2016YFC1402707)和中国极地科学战略研究青年基金(20140402)资助

[作者简介] 姜珊, 女, 1985 年生。助理研究员, 博士, 主要从事海洋预报信息研究。E-mail: js95429453@163.com

之路。因此,从这个角度来看,北冰洋航道运输与我国的经济、国家安全关系重大^[14]。大幅提升我国在北冰洋地区航运的安全保障能力,尤其对海冰和气象的监测和预报能力,不但可以减少对破冰船领航服务的依赖性,同时也为北极航道的商业利用提供必不可少的安全保障条件。截止 2016 年,我国商船已成功实现 9 船次东北航道的商业航行。北极航道的开通不但对于我国,而且对于所有北极航道利用国和航道所属国都将是一个互利共赢的新局面。

随着北极海冰在夏季的减少,更多的船只能够进入开放水域,并且持续工作更长的时间^[15]。但海冰有时会发生快速变化,给现场作业带来危害。例如,2012 年夏季楚科奇海域的海冰快速入侵威胁到了石油钻探活动人员和船只的安全。随着北极海上活动的增加和海冰变化的不确定性,未来这些事件发生的可能性将增加^[16]。在迅速变化的北极地区,海冰的实时预报对于北冰洋的各种海上活动非常重要^[7]。开展北极地区海冰融化、冻结和漂流预报是一项重要工作^[4]。需要将海冰数据与海洋和气象参数有机结合开展预报,为船舶提供航道参考。目前,海冰预报时效一般为未来 24—144 h,预报准确度不仅取决于海冰观测数据的多少,也与天气和气象预报的质量相关。利用气候学和统计方法,可开展未来 7—10 d、30 d 甚至季节性的海冰预报^[17]。

北极地区预报活动的主要参与者是环北极国家,以及近北极的欧洲和北美洲国家。美国、加拿大、俄罗斯、德国等国家的观测历史较长、观测手段丰富、技术先进,获取的数据较多,因此能够通过国内的冰雪机构发布实时海冰产品;而其他环北极国家也因为地理优势,对北极的海冰和气象具有一定的观测能力。近几年,美国、挪威等国的数值预报系统不断发展,很多机构都开展了北极海冰和气象预报,有的已经实现了业务化。而我国对北极地区的海冰和冰况信息的研究还相对不足。我国作为北极理事会的正式观察员,为充分利用北极航道出现的战略机遇,亟需获取北极海冰和气象的相关信息,服务于我国的预报能力建设。这些信息包括可获取的观测数据、预报产品和历史分析资料等。其中,沿海观测站点、浮标、卫星遥感等获取的实时/近实时观测数据,

是我国预报机构开展数值预报的基础。

随着科技发展和网络的应用,通过网络共享的高纬地区冰况和气象信息越来越完善。研究和这些信息,对在北极地区开展海冰预报、保障船只航行等活动起到重要作用。本文梳理了可以获得的部分国家和机构的北极海冰和气象预报信息,包括可获取的观测数据、预报产品和历史分析资料等。通过研究不同国家和机构的产品,分析国际北极地区海冰和气象预报信息分布特点及存在的问题,希望为我国的北极航行预报提供所需要的气象、海冰、海洋数据,同时,也为我国北极观测预报的常态化、业务化发展提供支持,为我国参与和建立北极地区预报规划提供参考。

1 北极海冰和气象预报信息现状

海冰和气象信息通常包括与海冰相关的冰面积、密集度、厚度、冰龄和漂流轨迹信息,风场、气压场和气温等气象信息,以及海温、海流等海洋信息。冰信息通常由冰图(如每日冰图、区域冰图)、冰厚度报告和冰山信息等构成。目前,许多国家都开展了北极海冰和气象预报工作,尤其是环北极和欧洲一些国家的北极预报信息相对全面,包括实时遥感数据、观测数据和预报产品。

本文将介绍美国、俄罗斯、加拿大和其他北极国家的预报信息(图 1),以及有代表性的欧洲和亚洲国家的北极预报能力。另外,北美冰服务中心等 3 个跨国家/机构的信息发布平台也可以为我国的北极预报提供信息参考。

1.1 美国

美国政府一直高度重视北极地区研究。2011 年发布的《美国海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)北极远景和战略》^[18]中确立了预测海冰、加强北极气候和生态系统变化的基础研究、改善北极天气预报和预警、加强北极地区海洋和海岸资源的协调和管理等 6 项重点工作。美国《2013—2017 年北极研究计划》^[19]也提出收集北极地区多尺度的数据与信息,建立并加强国家与国际北极综合观测系统,并要求重点加强季节至年尺度海冰范围变化的预测,加强对波弗特海、楚科奇海以及北冰洋海域气候反馈活跃地点的研究。美国依靠强大的卫星

观测、浮标观测、实地观测等能力, 获取了北极地区大量的观测数据。例如, 有关北极地区的观测数据库, 美国国家雪冰数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)有 523 个, 国家海洋学数据中心(National Oceanographic Data Center, NODC)有 9 767 个, 极地数据目录(Polar Data Catalogue, PDC)有 2 440 个(来源: <http://nsidc.org/acadis/search/>)。

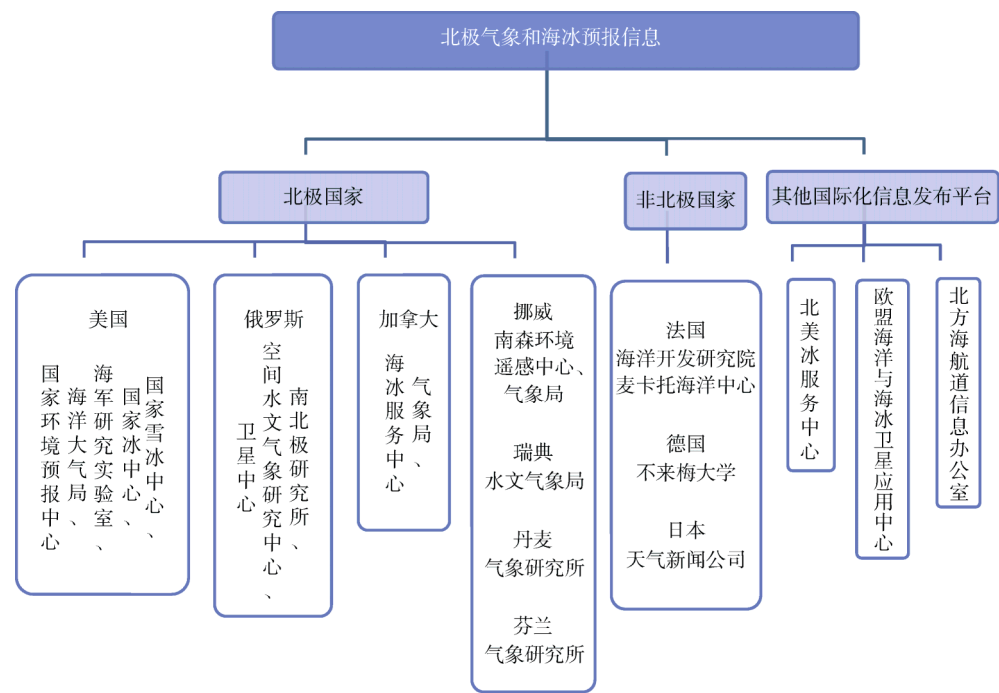


图 1 本文分析的北极预报信息及提供机构
Fig.1. Forecasting information and organization of Arctic referred in this paper

海冰预报网 (Sea Ice Prediction Network, SIPN)是由 NSIDC 开发的为科学家和用户改进和交流海冰预报知识和技术的网站。其汇集的数据库主要包括北极全境数据和区域数据。其中, 北
极全境数据包括海冰密集度/面积、冰厚/雪深、冰型/冰龄、海冰漂流、海冰融化/冻结数据; 北极区域数据包括海冰数据、船舶观测数据和社区观测数据。具体产品见表 1。

表 1 海冰预报网汇集的海冰观测产品(来源: <http://nsidc.org/data/sipn/data-sets.html>)
Table 1. Sea ice production of SIPN

范围	类型	实时/近实时数据		历史/分析数据		主要用途
		数据名称	起止时间和时空分辨率	数据名称	起止时间和时空分辨率	
北极全境	海冰密集度/面积	NSIDC-0678全球海冰密集度、冰型、冰缘线	2005年起	AMSR-E/Aqua观测数据	2002—2011年每日和每5日一次, 12.5 km	快速查看北极地区的海冰及变化情况, 进一步用于海冰范围和密集度图像和数据的加工处理
		NSIDC-0679海冰冰分析和冰面积	1994年起	Nimbus-7 SMMR 和 DMSP SSM/I-SSMIS数据	1978—2005年日数据和月数据	
		IMS每日雪厚和海冰厚度	1997年起, 1 km	EUMETSAT OSI SAF海冰变化再分析数据	1978—2009年每2天	
		MASAM2海冰密集度	2012年起, 4 km	HadISST海冰月变化	1870年起	
		MODIS/Aqua海冰面积	2002年起, 1 km	CryoSat-2海冰监测数据	2011—2015年	
		MODIS/Terra海冰面积	2000年起, 1 km	NOAA/NSIDC被动微波海冰密集度每日记录	1978—2015年, 25 km	

续表

范围	类型	实时/近实时数据		历史/分析数据		主要用途
		数据名称	起止时间和时空分辨率	数据名称	起止时间和时空分辨率	
北极全境	海冰密集度/面积	多传感器每日海冰分析	2006年起, 4 km	HadISST海冰密集度	1870—2012年	
		DMSP SSMIS 每日海冰分析	2005年起, 25 km	NOAA OI海冰密集度	1981—2012年	
		NOAA高分辨每日SST和海冰分析	1981年起, 0.25 °	SSMR和SSM/I海冰密集度再分析	1979—2009年	
		SSMIS海冰密集度	2005年起, 10 km	Nimbus-7 SSMR 和 DMSP SSM/I-SSMIS被动微波海冰密集度	1978—2015年, 25 km, 每日和每月	
		NSIDC-0677极地海冰密集度	1979年起			
	冰厚/雪深	NSIDC-0671北极浮标探测数据	2016年起	北极冰厚	2003—2008每年有冰期每日观测, 70 m	气候变化监测和气候模式验证
		AWI CryoSat-2冰厚数据	2011年起	CryoSat-2冰厚	2014年3月	
				海冰厚度	1993—2014年	
				L3C SMOS海冰厚度	2010—2011年	
	冰型/冰龄			海冰厚度长期数据	1948年至今	区分一年冰和多年冰
		冰龄	1978—2015年, 12.5 km, 7天一次			
		全球海冰冰型				
	海冰漂流	北极海冰漂流	1992年起	AMSR-E/Aqua 海冰漂流	2011年6—10月, 每日, 6.25 km	计算出的海冰漂移速度和方向可以帮助我们了解海冰在未来的运动趋势, 为船舶航行预报提供参考
		24 h极射投影海冰漂移图	2005年起, 20 km	EASE网格极地海冰漂流	1978—2015年, 25 km, 每日/周/月	
				48 h极射投影海冰漂移图	2006—2009年, 62.5 km	
	冻结融化	北极海冰融化状况	1979年起	北极海冰融池统计	1999—2001年	为开展长期北极气候和海冰研究提供参考
				北极海冰融池分布	2000—2011年	
北极区域	海冰数据	SIGRID-3格式的北极区域海冰图	2006年起	加拿大冰服务中心冰况图集(包括天气档案和季节性总结、冰面积图、北极海冰年度图集)	1999年起	数字化的海冰图可用于海洋导航和气候研究, 冰厚等数据可以进行海洋和气候变化监测和气候模式检验
		CRREL北极海冰质量平衡浮标数据	1993年起	加拿大渔业和海洋局海冰研究	1983年起	
		USIABP快速海冰浮标数据	2016年起	海冰冰缘区(MIZ)产品	2014年起	
		冰系探测器水文数据	2004年起	ULS潜艇、锚系浮标和耦合模式下的海冰厚度和漂移统计	1979—2004年	
		雪厚和雪深	2009年起	巴罗海冰厚度调查	2007—2015年	
	船舶观测			海冰厚度长期观测	1948年起	海冰状况分析和船舶导航
				海冰观测和归档数据(由阿拉斯加费尔班克斯大学、国际北极研究中心、阿拉斯加地理信息网络联合提供)	2006—2013年	
				海冰、天气和野生动物观测(由阿拉斯加周边、白令海峡和楚科奇海地区的相关观测者提供)	2006年起	
	社区观测					冰况分析

从表1可以看出,海冰预报网的海冰观测产品比较全面,数据基本涵盖了20世纪80年代以来的观测结果,既包含了近实时观测数据,也包含了1年内、5年内甚至十年以上的历史数据。这些数据可以作为预报模式和算法的初始化值,也可以用来评估后报结果,随着数据的完善可以为海冰变量和综合数据库的建立提供参考框架。

隶属于NOAA的美国国家冰中心(The U.S. National Ice Center, NIC)的北极圈内海冰的实时预报及监测主要通过卫星影像和浮标信息进行。NIC的海冰和气象观测数据包括:海冰密集度和冰缘线每日观测、北极主要地区(波弗特海、白令海东部、白令海西部、楚科奇海)海冰参数(海冰密集度、冰缘线、冰型、海冰发展阶段)的周观测图像和海冰面积的月变化、SAR获取的最近30 d海洋表面风速。这些数据来源广泛,质量较高,为正确认识冰缘轮廓范围提供信息。数据可以用于北极航道区域海冰预报模式的检验以及中期冰情分析等。同时,其高分辨率的海冰产品可以直接为东北航道、西北航道的船舶提供航行参考。季节/长期观测产品,如2006年至今北极全境每月同期海冰范围对比、1972年至今北极全境每隔两个星期的海冰面积对比、2010年至今每日海冰冰缘线档案等资料,不仅能让我们直观地看出海冰退缩的情况,同时也提供了长期的对比资料,为北极海冰中长期变化研究和全球气候变化以及模式预测提供了宝贵的基础观测资料。

在观测资料进一步充实及数值手段迅速发展的基础上,美国极区海冰数值预报工作在近年来有了突飞猛进的发展。美国的众多机构和科学研究中心都开展了北极地区海冰和气象预报。本文选择美国海军研究实验室(Naval Research Laboratory, NRL)、美国国家冰中心、美国海洋大气局、美国气象局(National Weather Service, NWS)和国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)的相关产品进行介绍。

NRL于1987年提供海军关心的海域(例如巴伦支海和格陵兰岛海域)的海冰实时预报。最初NRL使用极地海冰预报系统(Polar Ice Prediction System, PIPS)开展预报,三代版本将预报的分辨率从127 km提高到9 km。从2012年开始,NRL和NIC运用北极海冰临近预报/预测系统(Arctic

Cap Nowcast / Forecast System, ACNFS)监测并预报海冰的实时状况,北极圈内和北纬40°以北地区的分辨率分别3.5 km和6.5 km。预报区域分波弗特地区(Beaufort)和全北极境内。预报要素包括海平面高度、海冰密集度、海表温度、冰厚、海表盐度、冰速和海冰漂流。除了提供每日和过去3 d的近实时/实时观测结果外,更重要的是可以提供各要素的临近预报、以及未来5 d(全北极地区)或7 d(波弗特地区)的每日预报。

NIC利用ACNFS获取每日数据,比NRL提供更多的预报产品。预报要素包括气象预报(大气温度、降雪速率、降雨速率)和海冰预报(海冰漂流速率、海冰厚度、海水盐度、海冰面积百分比、海冰反照率、表层雪厚、海冰表面温度、海水温度、底/顶层冰融化速率、海冰抗压强度、冰增长/融化速率、开放海域增长速率)。按预报时效可分为临近(廓线)预报、24 h(廓线)预报和48 h(廓线)预报。

NOAA目前提供6—10 d和8—14 d两种不用时间尺度的500 hPa位势高度场预报,区域包括整个北极海域,涵盖了整个西北航道和绝大部分的东北航道。大范围的500 hPa位势高度场预报可以和海平面气压场的预报结果配合使用,从而在宏观上更好地把握西北航道一周、两周的系统配置情况,了解天气形势,帮助船只选择合理的航道,避开恶劣天气海域。

NWS提供部分北极海域24—120 h的海洋气象预报,包括风向、风速、海浪浪高、天气情况、雨雪预报。这种小区域的精细化预报可以帮助商船和科研船只详细了解不同海域的天气情况和海况,减小航行风险。3—6 d的中尺度预报区域包括整个北美和西伯利亚,涵盖了整个西北航道。大范围的气压场和锋面预报可以帮助我们从宏观上把握西北航道在120 h内的天气形势,可以帮助船只选择合理的航道,避开恶劣天气海域,对于在该航道上船只的航行安全有重要意义。

NCEP利用全球预报系统(Global Forecast System, GFS)、北美中尺度预报模式(North America Mesoscale Model)、阿拉斯加高分辨率预报(High Resolution Window—Alaska)、北极海冰漂移预报(Polar Ice Drift Forecast System),高空探空观测(Upper Air Plots)等模式开展北极地区预

报工作。预报产品包括: 3—384 h(3 h 一次)的 250 hPa、500 hPa、850 hPa 气压场、风场、温度场预报, 24—384 h(24 h 一次)的海冰流向、流速预报, 以及每天 4 次 11 个不同高度(100 hPa、150 hPa……1 000 hPa)的温度、风速、风向观测。气象预报范围包括整个北极海域, 涵盖了西北航道和东北航道, 海冰预报更是聚焦在白令海、白令海峡、波弗特海、西伯利亚海等重点海域。大范围的气压场预报从宏观上把握东北航道、西北航道 1—2 周的天形势, 阿拉斯加高分辨预报还能让我们获取白令海峡周边海域 48 h 内的天形势。高频率高分布密度的高空观测信息能反映西北航道等北极海域真实的气象情况, 提高预报的准确度。

1.2 俄罗斯

众所周知, 北极气候变化对俄罗斯在北极地区的国际合作有重要影响。北极气候变暖导致北极海冰融化, 使得北极资源开发和北方海航道的商业运行成为可能。俄罗斯一直重视对北极的科学考察研究工作。由于离北极地区最近, 并有着研究北极的传统, 俄罗斯在北极研究上处于重要地位。俄罗斯南北极研究所(Arctic and Antarctic Research Institute, AARI)、俄罗斯空间水文气象研究中心(Scientific-Research Center of Space Hydrometeorology, Planeta)、俄罗斯卫星中心(Sputnik)等机构都针对北极地区的海冰和气象开展预报。

AARI 主要负责为北方海航路近岸、港口和船舶活动提供观测和预报服务。AARI 的海冰和气象观测包括近实时观测、北极海冰周/月分析、长期统计分析。近实时观测信息包括每日甚至更短时间的俄罗斯沿海和开放水域的海冰和气象信息(需向 AARI 申请获取)。周/月分析提供整个北极海域尤其是俄罗斯附近东北航道的冰厚和冰龄详细情况, 冰图是在综合了卫星信息、沿岸观测站及船只的反馈报告基础上自动生成。数据可反映当前北极海冰尤其是东北航道区域海冰分布情况。沿海区域长期月平均海冰统计基于世界气象组织“全球数字化海冰数据库”(Global Digital Sea Ice Data Bank)的海冰密集度数据, 区域包括北极全境、巴伦支海, 白令海峡, 波弗特海, 东西伯利亚海, 哈德逊-戴维斯海峡, 加拿大北极海盆, 喀拉海, 拉普捷夫海, 楚科奇海地区。数据分辨率到

月, 总密集度相对精度为 5%。统计精度达到 1%。混合冰图可用于这些地区长期以来的海冰状况获取, 对预报提供参考和背景值。AARI 还为船舶公司、船务人员、当地机构提供北极海域更短时间尺度(一周内)海冰变化图, 产品以动画/图片格式提供。

AARI 的预报产品需向 AARI 申请获取。目前的预报产品包括 4 种: 基于动态 AARI 海冰模式下未来 6 d 内每日一次的北冰洋地区海冰漂流和海流诊断和预报; 基于热力学动态 AARI 模式下巴伦支海、喀拉海地区的海冰周诊断和预报(包括海冰密集度、冰厚、冰型等); 基于 AARI 浪模式下未来 72 h 内每 6 h 一次北极西部和东部海域风、浪高、浪向和开放水域结冰趋势的日诊断和预报; 基于欧洲北极地区沿海站点的未来 6 d 水位数值预报。

Planeta 提供俄罗斯不同沿海区域(白令海峡、楚科奇海、格陵兰海、喀拉海、巴伦支海、鄂霍次克海、挪威海等相关海域)基于 NOAA 极轨卫星数据获取的海冰和气象信息(表 2)。近实时/实时观测包括风速和风向、海表面温度、冰覆盖面积和雪覆盖面积, 时效为过去 3—5 d。同时, 还提供历史时期(1978—2015 年、1983—2015 年、2002—2015 年)海冰面积月/年变化。

Sputnik 能够同时提供北极地区海冰和气象的观测和预报。其中, 海表面温度和云量的近实时观测主要在巴伦支海和白海区域开展, 观测数据每日提供 3—5 次, 时效为过去 3 d 和 1 d。在没有大量云层覆盖的情况下, Sputnik 的海冰观测每天发布 4 次, 区域涵盖了部分俄罗斯北极海域, 这些观测数据帮助我们获得东北航道详细的及时的高频率的海冰近实况情况, 能够帮助我们提高海冰预报水平。

从俄罗斯提供的海冰和气象预报信息来看, 主要集中在 AARI、Planeta 和 Sputnik 三家机构, 包括近实时和历史观测数据, 以及预报产品。其中, 观测数据以 Planeta 提供的最为详尽, 卫星数据来自 NOAA 极轨卫星、TERRA/MODIS 卫星、AQUA 卫星和“Meteor-M”N1 卫星, 数据较为全面。从观测区域来看, 巴伦支海和白令海附近获取的观测数据较多, 其他区域观测工作开展得较缓慢。这些数据可以用于获得北极地区尤其是东北航道详细的及时的高频率的海冰近实况情况,

很大程度提高海冰预报水平。

但是, 俄罗斯预报信息的开放性相对较弱, 许多数据需要申请获取。AARI 和 Planeta 的国内俄语版网站上发布了较全面的观测数据和预报产品, 但在英文版网站上却只公开了少量信息, 对于我国大多数科研工作者来说, 使用起来不够方便。

1.3 加拿大

加拿大海冰和气象信息工作主要由加拿大气象局 (Weather Office) 和加拿大海冰服务中心 (Canadian Ice Service, CIS) 承担。

加拿大气象局发布的北极海洋天气预报基本覆盖整个西北航道, 按照不同的天气情况用不同的颜色标示出来。加拿大半岛海域预报细化到很小的网格, 基本每个海峡、海湾都会有专门的精细化预报 (http://weather.gc.ca/marine/region_e.html?mapID=06), 这样有利于了解不同航段的具体天气情况。通过不同颜色可以直观地了解不同海域的警报级别。每个区域的天气预报内容包括: 预报发布的时间、风速、风向、天气情况、能见度、气温等。除了有 24 h 的预报, 还有 48 h、72 h、120 h 的预报, 以及 24 h 的海冰预报。

CIS 是加拿大气象服务中心的一个部门, 旨在为加拿大通航水域提供最及时、准确的信息。CIS、加拿大海岸警卫队和美国国家冰中心还开展合作, 联合向渔民、科研工作者、政府决策人员提供每日的海冰信息和海冰警报。加拿大北极海域的海冰预报信息发布, 分为每日、30 d、季节等不同时间尺度 (表 2)。

表 2 加拿大海冰服务中心产品
Table 2. Production from CIS

分类	要素	时效性	区域	说明
观测 / 分析	海冰	每日 1 次	楚科奇海、加拿大海盆、北冰洋中心区域、哈德逊湾、巴芬湾、北极点	
	海冰	每周 1—2 次	加拿大东部海域、北冰洋东部和西部	
	航拍冰图	不定时		由加拿大海岸警卫队提供, 分辨率 1—2 km
	RADARSAT Mosaics 高分辨卫星图像	每周三发布	北极西部、东部和哈德逊湾	分辨率 100 m
	MODIS 合成图像	每周三发布	北极海盆	
预报 / 预警	海冰	过去 10/20 d	加拿大周边海域	
	冰山报告	长期	加拿大东部沿海	35 个监测点
	海冰 (冰缘线、海冰密集度、冰型分布、老年冰密集度)	未来 24—48 h, 每日一次	加拿大周边海域 (北极中部、西部、东部和北部)	包括冰缘线、海冰密集度、冰型分布、老年冰密集度
预测	海冰 (结冰警报、冰压预警)	必要时	沿海地区	
	海冰月/年展望未来 30 天海冰展望	月展望每月上旬和中旬各发布一次	加拿大部分海域	与 NIC 和北美冰服务中心联合发布
	年度冰情和天气总结	每年一次		
历史资料	海冰气候学分析 (海冰密集度平均、主要冰型、陈年冰平均密集度、陈年冰出现频率、结冰/融冰时间)	1981—2010 年		
	冰厚分析	1947—2002 年; 2002—2015 年		

数据来源: <http://www.ec.gc.ca/glaces-ice/?lang=En>

加拿大海域的卫星可见光图像可以帮助我们了解大尺度海冰分布情况, 宏观反映北极海域海冰分布, 对西北航道和东北航道的总体冰情有所了解; 清晰影像图能够帮助商船和科考船选择合

理的航道,避开冰情严重的海域,航运公司和相关利益者可以用来开展冰区导航,为船员和航运部门提供所需的冰情信息,及时调整在大洋中的航道,以及制定长期海洋运营战略规划。同时也有利于研究人员开展冰情长期研究。

1.4 其他环北极国家

1.4.1 挪威

挪威的海冰和气象服务主要由南森环境遥感中心(Nansen Environmental and Remote Sensing Center, NERSC)和挪威气象局负责开展。其中,南森中心基于 SSMIS 和 AMSR2 能获取 1—2 d 前的北极海冰密集度、海冰面积、范围和厚度数据,MODIS-AQUA 能获取 6 d 前的海洋水色和 SST 数据。而 1978 起开展的北极区域海冰面积和范围观测覆盖了巴伦支海、喀拉海、格陵兰海、加拿大北极海域、巴芬湾、波弗特海、楚科奇海、白

令海、东西伯利亚海和拉普捷夫海地区。挪威气象局主要提供气象、海洋和海冰预报。在其网站提供的地图上(http://www.yr.no/hav_og_kyst/, 图 2)点击任何一个位置均可以弹出该位置的气象预报信息,预报区域覆盖巴伦支海和挪威沿岸海域,可提供天气情况、风速、风向、降水量等预报信息,可直观反映该区域的气象情况。此系统的制作值得我国预报单位借鉴。北极海域和斯瓦尔巴地区的海洋和海冰预报包括海平面信息(潮高和风暴潮预报)、海流、水文学(盐度和温度)、有效波高和波向,以及海冰密集度和冰缘线。预报基于一系列耦合海洋/海冰和波模式,产品直观地反映挪威以北极海域的海冰情况,包括挪威北部港口和作为东北航道重要部分的巴伦支海的海冰情况,为在挪威附近海域航行的船只提供预报参考。

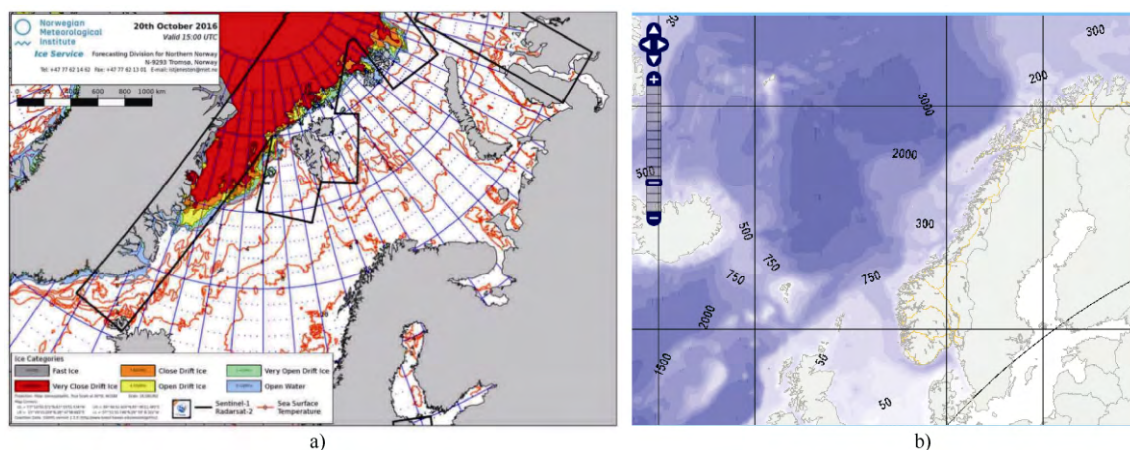


图 2 挪威气象局提供的北极海域和斯瓦尔巴地区每日预报. a) 挪威北极海域海冰实况例图(来源: [http:// polarview. met.no/regs/c_map1.jpg](http://polarview.met.no/regs/c_map1.jpg)); b) 挪威周边海域气象预报图(来源: http://www.yr.no/hav_og_kyst/)

Fig.2. Daily forecasting of Arctic Ocean and Svalbard from NMI

1.4.2 瑞典

瑞典的海冰和气象服务主要由瑞典水文气象局(Swedish Meteorological and Hydrological Institute, SMHI)负责。近实时观测数据涵盖海洋气象(风向、风速、阵风、气压、气温)、海洋(海平面高度、海温、海浪、海流)和海冰各要素。在预报方面,水文气象局发布波罗的海海域的气象预报,每天一次,包括风速、风向、降水量等预报信息,可帮助我们非常直观地了解该区域的气象情况。同时,水文气象局还利用海洋网(Ocean Web)

发布挪威周边海冰不同高分辨数值模式的业务化运行结果。其中,海洋模式 HIROMB 可提供海表面温度、海冰密集度和海冰漂移 0—48 h 预报,波罗的海分辨率 1 海里,北海地区分辨率 3 海里;有限区域气象模式 HIRLAM 提供 48 h 风场预报;第三代海浪模式 SWAN 提供海浪预报。这些预报可帮助我们长时间尺度上了解北极海冰的变化,为商船公司提供中长期规划参考资料。

1.4.3 丹麦

丹麦的海洋海冰和气象预报机构主要是丹麦

气象研究所(Danish Meteorological Institute, DMI), 负责丹麦附近水域、波罗的海、北海、北大西洋和格陵兰重点海域的海洋业务化预报服务。DMI 提供北极区域尺度的卫星云图, 大范围的预估预报能够帮助我们更好地了解系统的现状, 预报未来系统的走向。它运行天气、气候和海洋模式, 为预报部门每日发布预报提供基础的数据支持。DMI 的数值天气模式为高分辨区域模式 DMI-HIRLAM, 其结果用于业务预报的其他模式中,

包括空气质量模式、海洋水动力模式(风暴潮预报)、海浪模式等。预报产品包括各重点海域未来 5 d 每小时的基本海洋预报(海表面温度、盐度、海流、浪高等)、漂流场预报和海冰预报(冰密集度、厚度、覆盖范围、海冰漂移、冰温度等, 图 3a—图 3c)和气象风场预报(图 3d), 发布频率为 6 h 一次, 是难得的高频率大尺度海洋和气象预报产品, 对于了解海冰分布情况有很大帮助, 有助于我们选择航道和制定航道, 保障船只的航行安全。

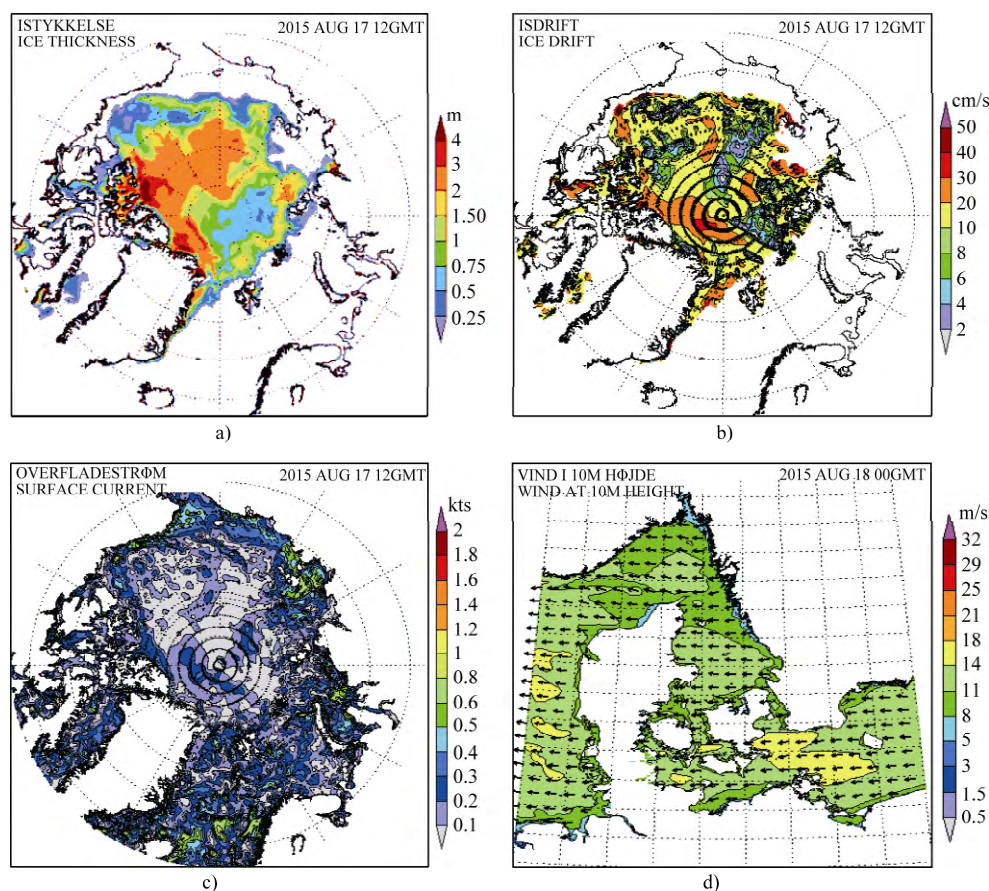


图3 DMI 北极预报(来源: <http://ocean.dmi.dk/anim/index.uk.php>). a)海冰密集度; b)海冰漂流; c)海流; d)丹麦海域风场预报

Fig.3. Arctic forecast from DMI(source: <http://ocean.dmi.dk/anim/index.uk.php>)

1.4.4 芬兰

芬兰的海冰和气象预报机构主要是芬兰气象研究所(Finish Meteorological Institute, FMI)。FMI 能提供芬兰周边海区和波罗的海的海冰和气象实况¹及预报²。预报包括未来两日的风场预报、海平面预

报、海浪预报和冰情预报, 必要时发布警报。其中, 波罗的海海冰预报服务中, 包括海冰冰图制作、海冰数值预报流程、卫星遥感数据的应用以及气象预报等方面都具有特色, 其预报结果能够与船舶在途观测信息实现互补, 因此在全球范围内也比较先进。

1.5 其他国家

气候变化引起的北极海冰融化为其自然资源

1 <http://cdn.fmi.fi/marine-observations/products/ice-charts/latest-full-color-ice-chart.pdf>

2 <http://en.ilmatiiteenlaitos.fi/weather-and-sea>

的开发与利用带来了机遇,除北极八国外,其他国家与北极的地缘经济和政治的联系也逐渐紧密,北极地区的经济潜力对这些国家也会产生巨大影响。

以法国为例,法国海洋开发研究院(French Research Institute for the Sustainable Exploitation of the Sea, Ifremer, <http://cersat.ifremer.fr/>)和麦卡托海洋中心(Mercator Ocean)都开展了北极地区海冰和气象预报工作。Ifremer 利用 AMSR2 和 SSM/I 获取了北极海冰漂流、海冰密集度、海冰面积的近实时观测数据(过去 2 d、3 d、6 d),同时,还基于 ASCAT 和 SSM/I 开展北极海冰漂流轨迹长期对比研究(过去 15 d 和 30 d)。麦卡托海洋中心自 2013 年起对全球包括北极地区的观测系统进行了升级,新产品的分辨率为 $1/12^\circ$, 北极海洋海冰密度、海表面温度等数据的精度都得到了较大提升。

德国不来梅大学(Bremen University)环境物理研究所(Institute of Environmental Physics of the University of Bremen, UB-IUP)开展了大量海冰遥感工作¹。研究区域包括西北航道、格陵兰海、斯瓦尔巴德、拉普捷夫海等地区,数据来自 SSMIS 和 AMSR2 反演得到的逐日北极海冰密集度、北极海冰厚度和雪深。该海冰密集度数据采用了高频(89 GHz 或 91 GHz)反演算法,相对于 NSIDC 采用的低频(19 GHz 和 37 GHz)算法,能显著提高海冰密集度繁衍结果的空间分辨率(6.25 km)^[20],因此被广泛应用于海冰变化监测和预报中。我国的国家海洋环境预报中心目前正在利用不来梅大学的海冰密集度数据产品提供极地冰情保障服务。

随着北极航道和资源引发关注,日本政府明确表示“日本将作为主要参与者之一参加北极相关的国际事务”。天气新闻公司(Weathernews Inc., WNI)是位于日本的全球最大的民间气象公司。WNI 公司于 2013 年出资发射卫星,观测温室效应下的北冰洋海冰状况,并利用预报数据向海运公司等提供可航行航道等高精度信息。WNI 的“全球海冰中心”计划利用获取的全球海洋海冰数据,对海冰状态进行预测。其中,目前提供的高纬度北极地区信息服务包括每日气象和海洋信息。区域包括北冰洋、东北航道东/西部、西北航

道东/西部、巴伦支海、鄂霍次克海和白令海峡等。预报产品要素包括海冰密集度、气压、风、浪高、海流,预报时效为未来 1—14 d。

1.6 其他国际化信息发布平台

1.6.1 北美冰服务中心

北美冰服务中心(North American Ice Service, NAIS)是由加拿大海冰服务中心、美国国家冰中心和国际冰情巡逻队(International Ice Patrol)组成的综合机构,旨在综合利用各机构的力量提供更高质量、及时和准确的海冰信息和服务。NAIS 目前能够提供北美和加拿大部分北极海域全年的冰山和海冰状况的海事安全信息(来源: <http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=iipProducts>),海冰外缘线和冰山外缘线的实况数据和每日预报结果采用国际通用编码,向所需船只提供详细资料。同时,NAIS 还提供北美、加拿大北极海域的月/年冰情展望,以及 1998 年至今的每日冰山信息。

1.6.2 欧盟海洋与海冰卫星应用中心

欧盟海洋与海冰卫星应用中心(Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, OSI SAF, <http://saf.met.no/>)网站对 EUMETSAT 卫星提供的信息进行加工,提供了海洋-气象综合信息的发布平台。目前 OSI SAF 发布北极地区近实时/实时海洋(SST 和盐度,每日两次)和海冰(密集度、冰缘线、冰型、反照率)数据,以及过去 1 d 和 3 d 的海冰漂流实况。同时,还提供了 1978—2005 年北极海冰密集度再分析数据,并对多年的北极海冰面积的年变化和月变化开展了对比。

1.6.3 北方海航道信息办公室

北方海航道信息办公室(Northern Sea Route Information Office)由北方高纬度物流中心(Centre for High North Logistics)运营并管理,2011 年 6 月成立,挪威巴伦支海秘书处提供额外的财政支持,总部位于挪威北部的希尔克内斯,分部位于俄罗斯的摩尔曼斯克。该机构旨在为企业和组织提供在东北航道区域航行的相关的实用信息。大部分信息来源于俄罗斯。办公室主页提供航道地区立法、冰级标准、港口税等信息,并据此提供破冰船支持、冰引航、搜索与营救等服务。

NSR 官网上除提供 Weathernews 公司的每日北极气象和海洋信息外,还提供冰区领航和破冰协助服务,北极 16 个港口的引航信息:包括各港

1 <http://www.iup.uni-bremen.de:8084/databrowser.html>

口的地理位置、引航区域信息、引航服务条款和条件、港口设施、费用等。我国仍需要依靠俄罗斯开展东北航道及附近区域的破冰服务,这些港口信息可以提供参考。

2 北极海冰和气象预报信息分布特点

国际上开展北极地区海冰和气象预报的国家及机构有很多,我们只是从中选取有代表性的进行分析,这些国家目前都能够通过本国机构发布环北极地区近实时/实时观测结果,提供各自关心海域的资料和预报产品。为了加强北极地区的海洋监测,评估海洋环境的变化趋势,许多国家也强调加强北极观测平台和网络建设,获得进行科学分析的基础数据。例如,美国、俄罗斯凭借自身的地域和经济优势,在北极地区开展了多项立体观测,并与其他国家开展广泛合作,领导并推进建立起有效的环北极观测网络。同时还利用船舶和浮标调查,获取了大量海冰、海洋、气象数据。在卫星遥感、航空遥感和现场观测资料的基础上,进一步获得海冰密集度和海冰外缘线等信息。这些数据特别是其中的海冰密集度、海冰漂移等信息,提供了东北航道、西北航道等地区及时的高频率海冰近实时状况,对于研究北极航道海冰变化趋势,进行北极航道适航性评估和改进预报模式有着重要作用,在很大程度上为预报提供参考和背景值,提高海冰预报水平。

近几年来,各国的北极预报除了各自发展外,各国间的联系也逐渐紧密。例如,俄罗斯空间水文气象研究中心(Planeta)利用 NOAA 的极轨卫星获取了大量海洋气象(风速、风向)、海洋和海冰观测数据。加拿大和美国更是积极合作,综合了加拿大海冰服务中心、美国国家冰中心和国际冰情巡逻队的优势,建立了北美冰服务中心,为两国提供了更及时、高质量的海冰信息和服务。

但是综合以上收集到的各国的北极海冰和气象预报信息,发现存在以下几个特点:

1. 从产品数量看,利用卫星遥感、航空遥感和现场观测获取了大量近实时/实时数据。观测数据是北极预报的关键,但是,目前突出的一个问题是获取的数据没有得到充分的应用。例如,美国在楚科奇海和波弗特海地区开展了 45 项海洋

观测计划,但是获取的大量海冰和海洋学数据仅有约一半的数据得到了应用。这些数据和产品没有公开发布,因此计划外的国家和机构都难以获取和使用^[7]。相较观测数据而言,北极海冰和气象预报产品的开发却不够充分。在预报产品中,大气产品相对成熟,海洋-海冰数值预报多在试验阶段,以研究为主,时间、空间分辨率还不能满足精细化预报的要求。部分海冰产品仅能提供历史及当前海冰信息,对海冰变化的高质量预报产品较少。

2. 从预报区域看,由于观测数据是数值预报开展的基础,因此,在北极不同区域获取观测数据的多少也决定了该地区预报的准确度和精确度。目前针对大气和海冰的长期观测集中在环北极国家沿岸和沿海海域,主要基于水文气象观测站点和高空气象观测站。海洋锚系潜标多数布放于白令海峡、弗拉姆海峡、楚科奇海、波弗特海、东西伯利亚海、拉普捷夫海和加拿大海盆内。北极中心区海域的大气、海洋和海冰长期观测难度较大,主要通过布放抛弃式浮标进行相关观测,由于该区域环境条件较为恶劣,较难抵达,目前布放的浮标数量还比较有限。

3. 从信息共享度看,北极八国合作计划众多,整体实力较强,各成员间的观测信息和预报产品大多可以实现共享。20 世纪 80 年代以前,大多数国家的冰服务机构仅为本国的沿海船只或机构提供海冰预报。但随着近几年全球气候变化成为研究热点,气象和海洋工作者间需要更多的数据交换。例如 WMO 的“全球数字化海冰数据库”(Global Digital Sea Ice Data Bank)自 1989 年开展以来,在许多国家的机构和数据中心(来自阿根廷、中国、加拿大、丹麦、芬兰、日本、俄罗斯、瑞典和美国)的协作下已经实现 20 世纪以来历史海冰信息的电子化。美国、加拿大等国家在国内有众多的部门、大学和学术研究机构关注北冰洋的环境变化,除了能提供本国相关的北极海冰和气象预报服务外,他们与欧盟一些国家也有很多合作研究和数据资料共享。但对于我国预报和研究机构来说,不仅许多资料和数据难以下载获取,部分机构(例如俄罗斯的 AARI 和 Planeta)的英文网站信息量不足。

4. 从信息应用方面看,由于发布海冰和气象

服务的机构较多,其在时效性、分辨率等方面都存在差异,即使针对同一海区同一时间段,预报结果也不尽相同。因此,在应用这些信息的时候,需要从数据来源、同化方法、覆盖范围等方面加以对比,并参考相应的实测资料加以选择。例如,根据邵晨等的分析^[20],美国国家冰中心利用雷达、可见光和红外成像技术获取源数据,并综合浮标数据、监测船资料,利用海冰模式实现对喀拉海中部和西南部海冰覆盖范围的预报;而雪冰数据中心则是利用其他海冰服务机构制作同一地区的预报产品,因此从数据时效和准确度上来说,冰中心的预报结果更优,而雪冰中心的结果可以作为校验参考。

5. 从信息发布技术看,海冰信息应当以更多可视化的方式向研究人员提供^[21]。近年来,GIS 技术被应用于海冰信息服务,例如美国冰中心和加拿大冰服务中心都提供了基于 GIS 的海冰信息查询。美国国家冰雪中心就利用“谷歌地球”的 KML 格式,发布逐日海冰密集度以及过去 30/60/90 d 的冰缘线信息,“谷歌地球”将北极海冰密度和漂流信息与动物追踪数据相结合,以可视化的方式展现了海冰运动与动物活动和行为的联系^[22]。在海冰信息系统中应用网络 GIS 和地图技术仍在起步阶段,需要进一步的设计、研发和测试。现有的在线系统仍需要更多的数据输入和分析功能。

3 我国在北极地区预报现状与展望

极地预报是极地科学考察的重要组成部分。我国的极地预报工作在探索实践中,初步实现了客观定量预报。北极对于快速转型发展中的我国极为重要,我国应充分利用国际条约赋予的权利,加强北极地区的科学和研究,加强与北极/近北极国家的合作,积极介入北极事务,拓展我国在北极地区的影响力。

20 世纪 80 年代起,我国利用野外观测和实验、资料分析和数值模拟等手段,对海冰动力学、热力学进行了一系列研究,开发了海冰数值模式的研究。近年来,随着渤海海冰数值模式的应用,区域海冰-海洋耦合模式不断发展。目前黏-塑性海冰模式、质点-网格海冰模式、黏弹-塑性海冰

模式已投入业务化应用,正在开发高分辨率、长时效、高精度、多种类的海冰数值预报技术,同时,也根据海洋工程开发、海上运输对防冰抗灾的迫切需求,研发了适用于港口等小区域高精度海冰数值模式^[23-24]。

我国近年来初步建立了北极大气和海冰数值预报系统^[25-29],补充并研发了基于集合卡曼滤波的海冰资料同化技术^[30-31]。国家海洋环境预报中心从 2010 年开始为我国北极科考队提供海冰预报保障服务,目前提供北极海冰 24—120 h 数值预报;同时,还在 2013 年、2015 年、2016 年成功为我国商船北极航行开展预报服务,结合气象、海浪、海冰等要素预报结果提供北极航道夏季综合预报保障。这是我国极地预报领域将业务科研成果向实际应用领域转化的成果,北极商业航行常态化运营为今后我国的北极预报保障工作也提出了更高的要求。

1. 增加北极科考投入。观测数据是预报的基础,通过加强观测收集更多有关气象、水文环境、海底地形等基础数据,提高北极科学研究水平,提升国际话语权。我国气象局和国家海洋局分别发射了风云系列和海洋系列的卫星遥感,我国应当充分利用国内卫星资源,加强我国自主卫星对北极的监测能力,以保证资料获取的实时性和自主性。我国的北极现场观测由极地科学考察船、极地科考站(黄河站)承担。目前,每 1—2 年开展一次北极科学考察,黄河站也初步具备了气象综合观测能力。从 1999 年起,我国已经开展了 7 次北极科学考察,考察以“雪龙”船为支撑平台,主要在传统的北冰洋-太平洋扇区开展。第 1—4 次北极科学考察主要对白令海、楚科奇海、波弗特海、加拿大海盆和马卡诺夫海盆区域进行了大气、海洋、海冰等方面的调查^[32-35]。第 5—7 次北极考察分别完成了穿越东北航道并对北大西洋和冰岛海域进行的科学考察,并在北大西洋海域成功布放我国首套极地海气耦合观测浮标;成功布放具有我国自主知识产权的拖曳式冰浮标及冰漂移浮标阵,为后续大冰站立体作业奠定了重要基础;首次实现在东西伯利亚海、楚科奇海西侧和门捷列夫海岭等海域的海洋观测^[36-38]。浮标是观测北极中心区海域的有效手段,且该区域不受别国限制,建议基于国际北极冰浮标计划,在北极公海

区域长期持续布放浮标,以自主获取该区域实时海冰、海洋和大气观测数据。在黄河站地区,开展了高空大气物理、气象等方面的考察,沿岸气象站的数据也是资料同化的主要数据源之一。

2. 加强国际合作。我国北极观测工作起步晚、基础弱,参与国际观测计划的力度相对不够,除了政府间国际组织项目以外能够获得的资料信息不多,特别是北极海冰和气象信息来源有限,对深入开展航行预报保障尚有不足。我国在北极的调查区域主要集中在白令海和楚科奇海等传统考察区域。依靠雪龙船开展的北冰洋考察由于观测区域范围有限,观测持续性不强,不能满足预报模式特别是精细化预报对观测数据的需求。通过参与更多国际合作和北冰洋的国际科学活动,能够直接或间接获得北冰洋海洋环境信息资料,并通过共享方式获得更多观测数据和成果。我国派遣科学家参加了美国和加拿大的多个北极航次,开展北冰洋大气、海冰、物理海洋等方向的合作研究。但总体而言,我国与北极各国在北冰洋地区的合作还很有限,存在着较大的提升空间。在亚洲,日本、韩国等国家也开展了一系列北极观测科学活动,日本与美国和挪威等国有合作研究,在阿拉斯加设有北极办公室,韩国也经常参与国际极地科学考察和联合考察活动。在当前情况下,我国可以在东北航道区域加强与俄罗斯合作,如合作建立观测站,共享必要的沿岸环境数据;在西北航道区域加强与加拿大合作,如依托加拿大未来北极平台开展相关环境监测,获得更多数据。同时加强与冰岛、丹麦、挪威、芬兰、德国等国家的合作,提高我国在北冰洋地区的观测预

报研究水平。

3. 加大冰区安全航行预报保障技术研究。我国目前的北极预报系统主要包括北极大气和海冰-海洋数值预报系统。虽然已具有一定的数值预报基础,但与北极航道的精细化预报保障的业务化需求还有差距,需要在未来发展中继续改进。例如,可以从三方面入手提高数值模式预报精度:一是进行敏感性试验,选取和改进最优边界层参数化方案;二是改善地形和冰雪等下垫面数据;三是将遥感、探空、地面及船舶观测等多种实测数据准实时同化到数值模式中。按需为北极航道提供数值要素(场)预报,提供极端天气预警报服务(雾、气旋等)。建立北极大气和海冰-海洋数值预报系统网站,开发相应客户端软件,以便预报人员在极地地区能够实时方便地获取数值预报结果。此外,在北极航道通航日益增多的现状下,我国需要根据预报业务的数据需求,建立完善的针对北极航道的观测系统和数据库,为我国北极观测预报的常态化、业务化发展提供支持。

世界气象组织(WMO)于2013年正式启动了长达10年的重点项目极地预报计划(Polar Prediction Project, PPP),以促进国际协作研究,提高从小时到季节时间尺度上的极地地区天气和环境预报服务。在这个契机下,我国应当加强PPP框架下的国际合作,为建设极地预报强国争取外部力量,并利用此平台,系统提升我国的极地预报能力,并加强相关观测系统建设,持续提高现有的海冰、海洋和气象预报分辨率和精度,为我国北极科考和海上活动提供更加及时有效的预报保障。

参考文献

- 1 Gao Y Q, Sun J Q, Li F, et al. Arctic sea ice and Eurasian climate: a review[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(1): 92—114.
- 2 Serreze M, Holland M, Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover[J]. *Science*, 2007, 315(5818): 1533—1536.
- 3 Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(1): L01703, doi: 10.1029/2007GL031972.
- 4 Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification[J]. *Nature*, 2010, 464(7293): 1334—1337.
- 5 Liu J P, Song M R, Horton R M, et al. Reducing spread in climate model projections of a September ice-free Arctic[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(31): 12571—12576.
- 6 Bi H B, Huang H J, Su Q, et al. An Arctic sea ice thickness variability revealed from satellite altimetric measurements[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(11): 134—140.

- 7 Eicken H. Arctic sea ice needs better forecasts[J]. *Nature*, 2013, 497(7450): 431—435.
- 8 张璐, 张占海, 李群, 等. 近 30 年来北极海冰异常变化趋势[J]. *极地研究*, 2009, 21(4): 344—352.
- 9 WMO. The Global Climate in 2011—2015[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2016.
- 10 Li S N, Xiong C F, Ou Z Q. A web GIS for sea ice information and an ice service archive[J]. *Transactions in GIS*, 2011, 15(2): 189—211.
- 11 Lei R B, Xie H J, Wang J, et al. Changes in sea ice conditions along the Arctic Northeast Passage from 1979 to 2012[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2015, 119: 132—144.
- 12 Liu X T, Li S N, Wei H, et al. Designing sea ice web APIs for ice information services[J]. *Earth Science Informatics*, 2015, 8(3): 483—497.
- 13 苏洁, 徐栋, 赵进平, 等. 北京加速变暖条件下西北航道的海冰分布变化特征[J]. *极地研究*, 2010, 22(2): 104—124.
- 14 夏立平. 北极环境变化对全球安全和中国国家安全的影响[J]. *世界经济与政治*, 2011, (1): 122—133.
- 15 何剑锋, 吴荣荣, 张芳, 等. 北极航道相关海域科学考察研究进展[J]. *极地研究*, 2012, 24(2): 187—196.
- 16 Eicken H. Ocean science: Arctic sea ice needs better forecasts[J]. *Nature*, 2013, 497(7450): 431—433.
- 17 WMO. Sea-ice information services in the world[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2010.
- 18 National Oceanic & Atmospheric Administration. NOAA's Arctic Vision and Strategy[R/OL]. Washington, DC: NOAA, 2011-02 [2013-06-05]. <http://www.arctic.noaa.gov/Arctic-News/ArtMID/5556/ArticleID/320/NOAAs-Arctic-Vision-and-Strategy>.
- 19 Executive Office of the President, National Science and Technology Council. Arctic Research Plan: FY 2013—2017[R/OL]. Washington, DC: Office of Science and Technology Policy, 2013-02 [2013-05-10]. https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/2013_arctic_research_plan_0.pdf.
- 20 邵晨, 蒋雪中, 恽才兴. 基于多源共享数据的北极航道海域冰情分析[J]. *上海国土资源*, 2015, 36(1): 90—94.
- 21 苏洁, 郝光华, 叶鑫欣, 等. 极区海冰密集度 AMSR-E 数据反演算法的试验与验证[J]. *遥感学报*, 2013, 17(3): 505—513.
- 22 Ballagh L M, Parsons M A, Swick R. Visualising cryospheric images in a virtual environment: Present challenges and future implications[J]. *Polar Record*, 2007, 43(4): 305—310.
- 23 刘煜. 渤海海冰数值预报关键技术研究及应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- 24 赵倩, 刘煜, 唐茂宁, 等. 2012—2013 年冬季渤海海冰数值预报[J]. *海洋预报*, 2014, 31(2): 73—79.
- 25 杨清华, 刘骥平, 张占海, 等. 北极海冰数值预报的初步研究——基于海冰-海洋耦合模式 MITgcm 的模拟试验[J]. *大气科学*, 2011, 35(3): 473—482.
- 26 杨清华, 李春花, 邢建勇, 等. 2010 年夏季北极海冰数值预报试验[J]. *极地研究*, 2012, 24(1): 90—97.
- 27 Yang Q H, Liu J P, Zhang Z H, et al. Sensitivity of the Arctic sea ice concentration forecasts to different atmospheric forcing: a case study[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(12): 15—23.
- 28 孙启振, 丁卓铭, 沈辉, 等. 我国极地数值天气预报系统的初步建立与应用[J]. *海洋预报*, 2017, 34(4).
- 29 Yang Q H, Losa S N, Losch M, et al. The role of atmospheric uncertainty in Arctic summer sea ice data assimilation and prediction[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(691): 2314—2323, doi: 10.1002/qj.2523.
- 30 Yang Q H, Losa S N, Losch M, et al. Assimilating SMOS sea ice thickness into a coupled ice-ocean model using a local SEIK filter[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(10): 6680—6692, doi: 10.1002/2014JC009963.
- 31 赵杰臣, 杨清华, 李明, 等. Nudging 资料同化对北极海冰密集度预报的改进[J]. *海洋学报*, 2016, 38(5): 70—82.
- 32 中国首次北极科学考察队. 中国首次北极科学考察报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2000.
- 33 张占海. 中国第二次北极科学考察报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.
- 34 张海生. 中国第三次北极科学考察报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- 35 余兴光. 中国第四次北极科学考察报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.
- 36 马德毅. 中国第五次北极科学考察报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
- 37 潘增弟. 中国第六次北极科学考察报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- 38 黄辛, 汪南. 中国第七次北极科学考察队凯旋[EB/OL]. (2016-09-26). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/9/357171.shtml>.

SEA ICE AND WEATHER FORECASTING INFORMATION FOR ARCTIC SEA ROUTES: A SYNTHETIC ANALYSIS

Jiang Shan, Yang Qinghua, Liang Yingqi, Teng Junhua, Zhang Lin

(National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China)

Abstract

The reduction in the extent of summer sea ice, associated with global climate change, offers the possibility of new sea routes through the Arctic Ocean. Improving the skill of forecasting sea ice and weather would strongly support Arctic navigation. Collecting international online information (including observational data, forecast products, and historical analysis) of the high Arctic, and analyzing the characteristics of sea ice extent and weather forecast information, could support the development of operational Arctic forecasting by China. By comparing the information supplied by seven Arctic countries, three non-Arctic countries, and three international information suppliers, it was found that sea ice and meteorological forecasting capabilities have improved considerably, although further improvements could be made. For example, observational data have not been applied fully, the prediction ability in the Central Arctic remains weak, sharing of forecast information is insufficient, and comparison is needed when using online information. Furthermore, the development of new information technologies is urgently required. To provide improved and reliable protection in relation to sea ice and weather for Chinese Arctic expeditions and shipping activities, it is strongly suggested that investment in Arctic scientific expeditions be increased, and that international cooperation be sought for the development of forecasting technologies in relation to areas affected by Arctic sea ice.

Key words sea ice forecast, weather forecast, observation, data, Arctic