

文章编号: 1005-0523(2016)05-0033-06

## 北极海冰密集度产品的走航比较与冰情分析

季青<sup>1,2</sup>, 庞小平<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉 430079; 2. 极地测绘科学国家测绘地理信息局重点实验室, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 基于我国第五次北极科学考察“雪龙船”航迹资料, 比较德国不莱梅大学发布的海冰密集度被动微波遥感数据产品, 在此基础上分析我国第五次北极考察期间东北航线和高纬航线的海冰冰情。结果表明, 对应“雪龙船”走航海冰观测的样本点, SSMIS 平均海冰密集度高于 AMSR2 海冰密集度, 整体偏差为 9.2%; AMSR2 海冰密集度产品在陆地边缘处相对于 SSMIS 信息缺失较少, 质量更优; 对时序 AMSR2 海冰密集度数据的分析表明, 2012 年北极东北航道的完全开通在 8 月中旬, 8 月下旬至 9 月初形成北极高纬航线。不同数据产品的比较分析可为更好地应用海冰密集度数据进行海冰变化研究和航线冰情监测提供依据和参考。

**关键词:** 海冰密集度; 冰情分析; SSMIS; AMSR2

**中图分类号:** P237      **文献标志码:** A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.05.006

全球气候环境变化与可持续发展成为举世瞩目的研究课题。作为气候系统的重要因子和冰冻圈的有机组成部分, 覆盖于海洋表面的海冰对全球热平衡、大气环流、海洋温盐与水循环起到至关重要的作用, 对生态系统和人类生产、生活产生重要的影响<sup>[1]</sup>。

近年来, 北冰洋海冰经历了快速减少的过程。北极海冰的退缩和变薄使得北极航道, 尤其是东北航道的适航性显著提高。从东亚至西欧, 相对于途径苏伊士运河的传统黄金水道, 经北极东北航道的里程可缩短 30%~40%<sup>[2]</sup>。东北航道的商业利用潜力和前景, 要求更加快速、准确地获取航道海冰冰情信息<sup>[3]</sup>。

自 1978 年开始, 不受极夜和天气影响的被动微波遥感数据被广泛应用于反演海冰密集度、监测海冰的冰清。作为描述海冰特征的重要参数之一, 海冰密集度是指一定范围内海冰所占的面积百分比, 反映了海冰的空间密集程度。目前国际上主要有美国冰雪数据中心(NSIDC)和德国不莱梅大学(Bremen University)每日实时发布海冰密集度数据产品。不莱梅大学的海冰密集度数据产品因其采用高频(89 GHz 或 91 GHz)的 ASI 反演算法(arctic radiation and turbulence interaction study sea ice algorithm, ASI), 相对于 NSIDC 产品采用低频(19 GHz 和 37 GHz)的 NT 算法(NASA Team algorithm), 大大提高了海冰密集度反演结果的空间分辨率, 被广泛应用于海冰变化研究和冰情监测与预报服务<sup>[4]</sup>。我国国家海洋环境预报中心(<http://www.nmefc.gov.cn/jdhj/beijizhuanti.aspx>)及国家海洋局极地考察办公室(<http://polar.chinare.gov.cn/foto/>)即采用不莱梅大学的海冰密集度数据产品提供极地冰情保障服务。

不莱梅大学提供的海冰密集度数据产品包括 AMSR-E (advanced microwave scanning radiometer-earth observation system, AMSR-E)、SSMIS (special sensor microwave imager sounder, SSMIS) 及 AMSR2 (advanced microwave scanning radiometer-enhanced 2, AMSR-E) 传感器反演得的海冰密集度。Spreen 等<sup>[5]</sup>曾对 AMSR-E 数据精度进行了验证研究, 结果表明反演的 AMSR-E 海冰密集度产品精度 < 5%; 赵羲等<sup>[6]</sup>利用 ASPeCt (antarctic sea ice processes and climate, ASPeCt) 船测资料验证了南极 AMSR-E 海冰密集度数据。SSMIS 数

收稿日期: 2016-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41576188); 国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室开放基金项目(GC-MAC1504); 国家海洋局极地科学重点实验室项目(KLPS1502)

作者简介: 季青(1984—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为极地海冰遥感。

据(2008年至今)用来填充 ASMSR-E(2002—2011年)与其后续星传感器 AMSR2(2012年至今)之间的数据空缺,但目前还缺乏 SSMIS 与 AMSR2 海冰密集度数据间的比较研究<sup>[7]</sup>。

本文即联合我国第五次北极科学考察期间“雪龙船”航迹信息以及德国不莱梅大学海冰密集度被动微波遥感产品,比较 SSMIS 和 AMSR2 海冰密集度产品的差异,在此基础上分析我国第五次北极科学考察期间东北航线和高纬航线上的冰情变化。

## 1 数据与方法

### 1.1 我国第五次北极科学考察“雪龙船”航迹资料

我国第五次北极科学考察自 2012 年 6 月底持续到 9 月下旬,其中,北极东北航道的适航性调查与评估是该航次重要的科学目标之一<sup>[8]</sup>。本文所使用的“雪龙船”航迹资料即为我国第五次北极科学考察期间“雪龙船”走航 GPS 数据(<http://www.chinare.org.cn/index/>),如图 1 所示,包括去程时的东北航道航线和返程时的高纬航线,其中海冰观测记录信息来源于《2012 年北极海域物理海域和海洋气象考察工作报告》(<http://0301.peris.org.cn/default.aspx>)。

### 1.2 AMSR2 和 SSMIS 海冰密集度产品

本文用以比较的海冰密集度数据为德国不莱梅大学发布的数据产品(<http://www.iup.uni-bremen.de/iuppage/psa/2001/amsrop.html>),包括 SSMIS 和 AMSR2 两种被动微波传感器反演得到的海冰密集度数据。数据的时间分辨率为逐日,空间分辨率为  $6.25 \text{ km} \times 6.25 \text{ km}$ ,其中 SSMIS 海冰密集度数据是通过  $13.2 \text{ km} \times 15.5 \text{ km}$  的原始格网数据内插得到,数据的投影方式均为极方位立体投影。

德国不莱梅大学发布的 AMSR2 和 SSMIS 海冰密集度数据产品采用 ASI 算法反演得到。ASI 海冰密集度算法的基本原理是利用高频通道上海冰在不同极化方式的亮度温度差来反演海冰密集度。根据辐射亮温值的两种极化方式,定义的极化亮温差  $P$  为

$$P = T_{\text{BV}} - T_{\text{BH}} \quad (1)$$

其中,  $T_{\text{BV}}$  表示垂直极化亮温,  $T_{\text{BH}}$  表示水平极化亮温;而海冰密集度  $C$  与  $P$  的关系可通过三次多项式拟合:

$$C = d_3 P^3 + d_2 P^2 + d_1 P + d_0 \quad (2)$$

假设纯水和纯冰的系数值是已知的,分别表示为  $P_0$  和  $P_1$ ,代入式(2)可以得到纯水和纯冰的两个方程,再对式(2)求导,得到求解式(2)系数的四元一次线性方程组式(3),具体推导过程见文献[6]。

$$\begin{bmatrix} P_0^3 & P_0^2 & P_0 & 1 \\ P_1^3 & P_1^2 & P_1 & 1 \\ 3P_0^3 & 2P_0^2 & P_0 & 0 \\ 3P_1^3 & 2P_1^2 & P_1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_3 \\ d_2 \\ d_1 \\ d_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1.14 \\ -0.14 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据式(3)可求解  $d_0, d_1, d_2, d_3$ ,代入式(2)即可计算海冰密集度  $C$ 。ASI 海冰密集度算法采用高频被动微波遥感数据反演海冰密集度,相对于其他低频海冰密集度算法,提高了空间分辨率,因而,被广泛应用于海冰冰情监测和变化研究<sup>[5,7]</sup>。

### 1.3 数据预处理与统计分析方法

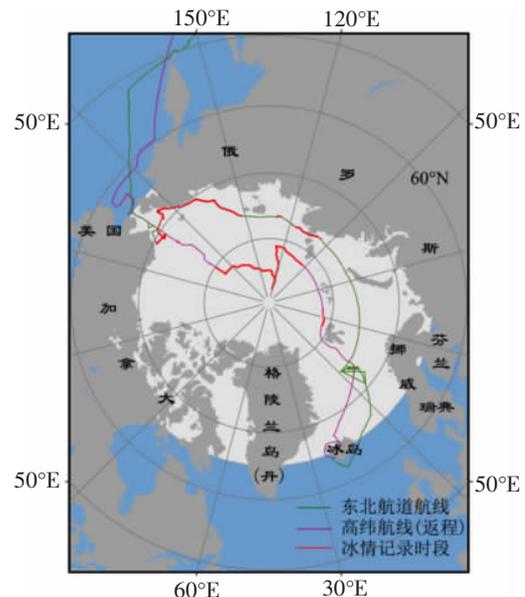


图 1 我国第五次北极科学考察“雪龙”船航迹  
Fig.1 The R/V Xuelong tracks of the fifth Chinese arctic expedition

对收集的“雪龙船”航迹资料和海冰密集度数据,首先进行数据匹配和筛选处理。由表 1 可见,在我国第五次北极科学考察期间,不同数据间的时间记录范围和观测样本数有所不同,其中,SSMIS 海冰密集度数据在靠近陆地边缘处相对于 AMSR2 海冰密集度数据存在更多空值(见图 2),因而对应走航海冰观测记录,SSMIS 海冰密集度样本数要少于 AMSR2 样本数。

表 1 我国第五次北极科学考察“雪龙船”走航观测及其对应的海冰密集度产品信息

Tab.1 The information of the fifth Chinese arctic expedition based on Xuelong and its corresponding sea ice concentration products

数据名称	时间范围		样本数	
	去程	返程	去程	返程
“雪龙船”走航 GPS 数据	2012.6.29~2012.8.14	2012.8.15~2012.9.27	2 120	2 098
SSMIS 海冰密集度数据	2012.7.20~2012.7.30	2012.8.25~2012.9.7	297	299
AMSR2 海冰密集度数据	2012.7.24~2012.7.30	2012.8.25~2012.9.7	203	369

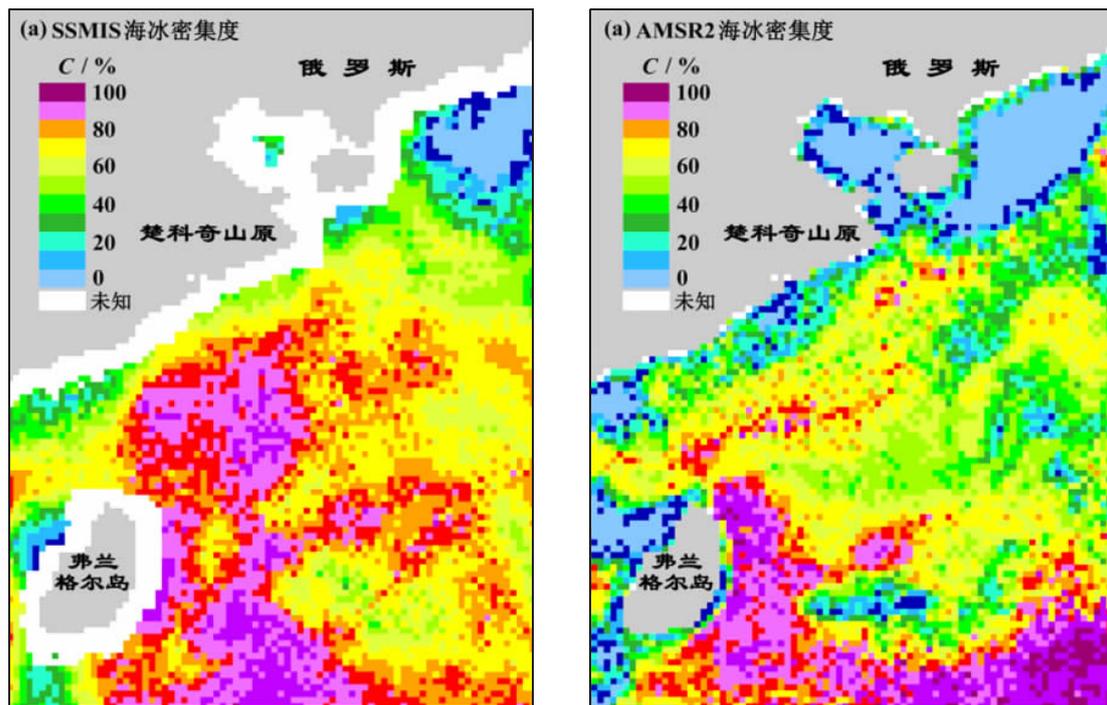


图 2 2012 年 7 月 24 日北极弗兰格尔岛附近 SSMIS、AMSR2 海冰密集度

Fig.2 Sea ice concentration retrieved from SSMIS and AMSR2 around Wrangel Island on July 24, 2012

基于多源数据重叠时段筛选出的 502 个公有海冰观测样本,按照时间和空间一致的原则,逐日提取研究期内观测样本对应的 SSMIS 及 AMSR2 像元海冰密集度。在此基础上,从“雪龙船”去程海冰观测时段、返程观测时段及整体观测时段,分别统计分析 SSMIS 与 AMSR2 海冰密集度的平均偏差(Bias)、均方根偏差(RMSE)和相关系数( $R$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同传感器海冰密集度数据产品的比较

对于选定研究期的公有样本点,SSMIS 和 AMSR2 产品的海冰密集度的相关关系如图 3 所示。其中,图 3a、图 3b 和图 3c 分别表示“雪龙船”去程、返程及整体观测时段海冰密集度的相关关系,图中虚线代表线性回归趋势线,实线表示横纵坐标相等的直线  $y=x$ 。

图3中SSMIS与AMSR2海冰密集度的相关系数均超过0.8,表明两种传感器的海冰密集度产品具有较好的一致性,也在一定程度上反映不莱梅大学ASI算法针对不同传感器观测数据的海冰密集度反演结果的稳定性。图3中样本点较多分布在 $y=x$ 右下方,表明对应“雪龙船”观测样本点,SSMIS海冰密集度要高于AMSR2海冰密集度。去程观测时段(图3a)与返程观测时段(图3b)相比,SSMIS与AMSR2海冰密集度的平均偏差分别为10.8%和8.2%,说明在靠近陆地边缘处(去程船测平均海冰密集度为27.3%)相对于高纬海冰密集处(返程船测平均海冰密集度为46.7%),SSMIS与AMSR2海冰密集度偏差更大,两者的相关系数也表现为返程( $R=0.936$ )要高于去程( $R=0.810$ ),因此,在进行SSMIS与AMSR2数据传感器交叉定标时,应根据海冰密集程度的不同,采用不同的定标模型,以便更好地减小传感器之间的系统差异。由于原始分辨率6.25 km的AMSR2海冰密集度产品相对于原始12.5 km分辨率的SSMIS数据更能准确反映海冰尤其是边缘处的细节变化,因而更适宜作为海冰冰情分析的数据产品。

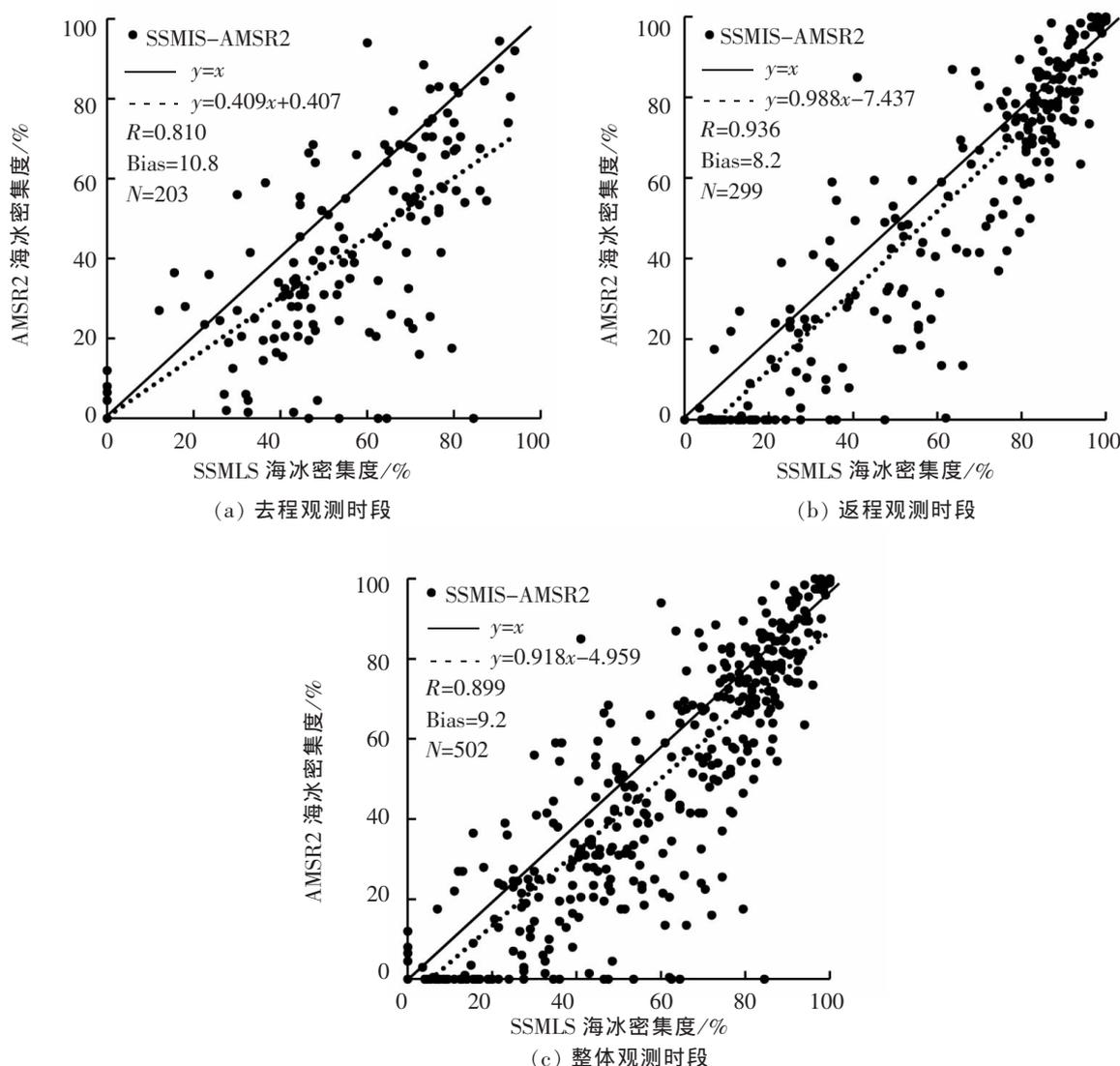


图3 研究期SSMIS与AMSR2海冰密集度比较

Fig.3 Comparison of sea ice concentration between SSMIS and AMSR2 during study period

## 2.2 2012年北极东北航线和高纬航线海冰冰情分析

2012年7月至1012年9月正值我国第五次北极科学考察,北极海冰冰情变化对“雪龙”考察船航行

安全意义重大<sup>[9]</sup>。基于 AMSR2 海冰密集度数据,根据海冰与通航状态对应关系<sup>[7,10]</sup>,将海冰密集度划分为 0%~30%,30%~70%以及 70%~100%三类,对应通航畅通、困难和非常困难。其中,2012 年 7 月 24 日、8 月 15 日及 9 月 7 日的海冰密集度类结果如图 4 所示。

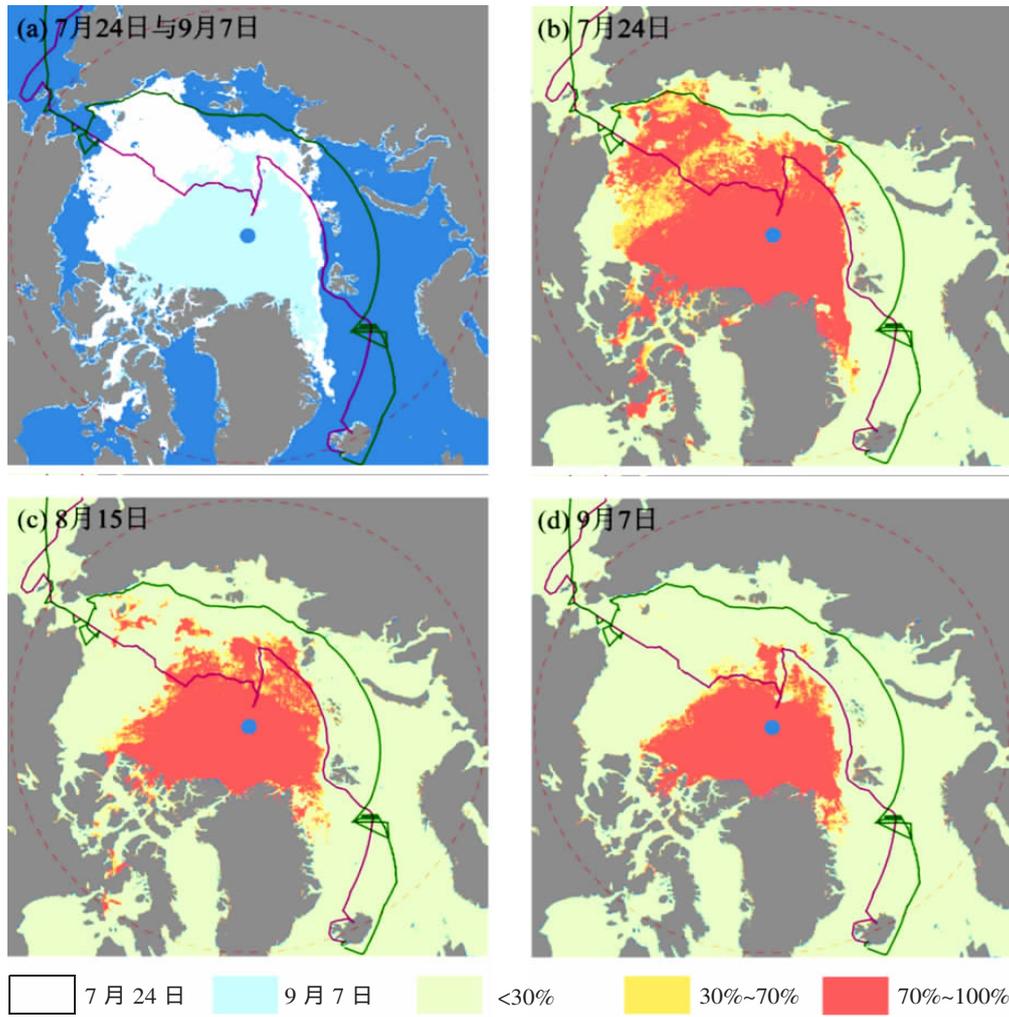


图 4 2012 年第五次北极考察期间 AMSR2 海冰密集度分类  
Fig.4 AMSR2 sea ice concentration during the Chinese fifth arctic expedition of 2012

通过分析时序 AMSR2 海冰密集度数据可以发现,2012 年 7 月底楚科奇海和东西伯利亚海的海冰偏多,东北航道的完全开通在 8 月中旬。夏季北极海冰边缘线退缩主要发生在波弗特海、楚科奇海和东西伯利亚海。东北航道的开通主要取决于楚科奇海西侧以及东西伯利亚海东侧,尤其是弗兰格尔岛海域冰情的变化。8 月中、下旬,拉普捷夫海扇区的海冰迅速向北退缩,8 月下旬至 9 月初北冰洋欧亚扇区在 80°~82°N 出现了几乎无冰的水道,形成北极高纬航线。

北极海冰较大的年际和季节变化,对北极航道的开通与使用带来了较大的挑战。AMSR2 海冰密集度卫星遥感观测资料能为决策大方向的航线选择提供重要信息,为考察船或商船冰区航行提供必要的安全保障。

### 3 结论

基于我国第五次北极考察“雪龙船”航迹资料,对德国不莱梅大学 SSMIS 与 AMSR2 海冰密集度数据进行比较,分析了我国第五次北极考察期间的海冰冰情,主要结论如下:

1) SSMIS 海冰密集度数据相对于 AMSR2 海冰密集度数据在靠近陆地周围存在更多的数据空缺,数据信息量较 AMSR2 数据要小;

2) SSMIS 与 AMSR2 海冰密集度数据具有较好的一致性,整体而言,SSMIS 海冰密集度要高于 AMSR2 海冰密集度,平均偏差为 9.2%;“雪龙船”走航去程和返程海冰观测时段对比分析表明,AMSR2 与 SSMIS 数据在去程低密集海冰区差异更大;

3) 2012 年北极东北航道的完全开通在 8 月中旬,8 月下旬至 9 月初北冰洋欧亚扇区在  $80^{\circ}\sim 82^{\circ}\text{N}$  出现了几乎无冰的水道,形成北极高纬航线。AMSR2 海冰密集度数据可为北极冰区航行提供重要的安全保障信息。

致谢:感谢中国南北极环境综合考察与评估专项与中国南北极数据中心提供了“雪龙船”航迹资料、德国不莱梅大学提供了海冰密集度数据,同时非常感谢审稿专家给出的宝贵意见和建议。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis, contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK and New York, USA, Cambridge University Press, 2013.
- [2] LASSERRE F, PELLETIER S. Polar super seaways? Maritime transport in the Arctic: an analysis of shipowners' intentions [J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19(6): 1465–1473.
- [3] ROGERS T S, WALSH J E, RUPP T S, et al. Future Arctic marine access: analysis and evaluation of observations, models, and projections of sea ice [J]. The Cryosphere, 2013, 7(1): 321–332.
- [4] 苏洁, 郝光华, 叶鑫欣, 等. 极区 AMSR-E 数据反演算法的实验与验证[J]. 遥感学报, 2013, 17(3): 505–513.
- [5] SPREEN G, KALESCHKE L, HEYGSTER, G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz Channels [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, 113(C2): C02S03.
- [6] 赵羲, 苏昊月, 石中玉, 等. 南极海冰密集度多源数据的交叉检验[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2015, 40(11): 1460–1466.
- [7] 李新情, 慈天宇, 罗斯瀚, 等. 北极东北航道维利基茨基海峡海冰时空变化及适航性分析[J]. 极地研究, 2015, 27(3): 282–288.
- [8] LEI RUIBO, XIE HONGJIE, WANG JIA, et al. Changes in sea ice conditions along the Arctic Northeast Passage from 1979 to 2012 [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 119: 132–144.
- [9] 孟上, 李明, 田忠翔, 等. 北极东北航道海冰变化特征分析研究[J]. 海洋学报, 2013, 30(2): 8–13.
- [10] SHIBATA H, IZUMIYAMA K, TATEYAMA K, et al. Sea-ice coverage variability on the Northern Sea Routes, 1998–2011 [J]. Annals of Glaciology, 2013, 54(62): 139–148.

## Comparison and Analysis of Arctic Sea Ice Concentration Products during the Fifth Chinese Arctic Expedition

Ji Qing<sup>1,2</sup>, Pang Xiaoping<sup>1,2</sup>

(1. Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079;

2. Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** This study made comparison of sea ice concentration derived from SSMIS and AMSR2 passive microwave images from Bremen University during the fifth Chinese arctic expedition. Results show that the value of SSMIS sea ice concentration is higher than that of AMSR2 at the sample points according to sea ice record observed aboard on the R/V Xulong, and the average bias between SSMIS and AMSR2 sea ice concentration is 9.2%. AMSR2 has a relative higher quality than SSMIS near the land. It finds that the Arctic Northeast Passage opened in the mid-August by analyzing the AMSR2 data, while the Arctic High-latitude Sea Route emerged in the latter August and early September. These results can be helpful for better using Bremen sea ice concentration product, and providing some reference for the research of sea ice change and ship routing in the future.

**Key words:** sea ice concentration; sea ice situation analysis; SSMIS; AMSR2

(责任编辑 王建华)