

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.1049

YIN Peng, WANG Changying, YANG Jungang. Comparison and assessment of long-time series sea ice concentration remote sensing datasets in the Arctic[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):734-744. [尹鹏, 王常颖, 杨俊钢. 长时间序列北极海冰密集度遥感数据的比较评估[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):734-744.]

长时间序列北极海冰密集度遥感数据的比较评估

尹 鹏^{1,2}, 王常颖¹, 杨俊钢²

(1. 青岛大学 数据科学与软件工程学院, 山东 青岛 266071; 2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要: 基于空间分辨率和精度更高的 BLM 海冰密集度数据集, 评估了两种时间跨度较长、应用广泛的 25 km 分辨率海冰密集度遥感数据集——NSIDC 数据集和 SICCI 数据集。两种数据集与 BLM 数据集的海冰面积变化趋势相同, 但均低于基于 BLM 数据集得到的海冰面积, 其中基于 SICCI 数据集得到的海冰面积更接近 BLM 数据集。相比于 NSIDC 数据集, SICCI 数据集的年、月平均和日海冰面积偏差分别低 81.88%、80.90%、81.44%, 且其海冰密集度平均偏差为-3.28%, 低于 NSIDC 数据的 4.36%, 因此在进行北极地区整体海冰面积及海冰密集度分析时应选用 SICCI 数据集。按纬度、海冰密集度值分情况对两种数据进行比较, 发现 NSIDC 数据集对开阔水域和浮冰区的区分效果较差, 其在低纬度和低密集度区域的平均偏差分别为 10.11% 和 13.13%, 而 SICCI 数据集的平均偏差达到 0.05% 和 0.44%, 是研究低纬度和中低海冰密集度区域的首选数据。与之相对, NSIDC 数据集对中高纬度高海冰密集区域, 特别是近北极点区域的反映能力优于 SICCI 数据集, 平均偏差为 1.08%, 均方根偏差为 7.76%, 因此进行中高纬度高海冰密集度区域分析时首选 NSIDC 数据集。对两类数据集在北极东北航道上的分段评估结果发现, 低纬度海冰边缘地带或中低海冰密集度区域占比较高的航段区, SICCI 数据集更接近 BLM 数据集, 这些航段应使用 SICCI 数据集进行分析; 而在中高纬度高海冰密集度区域占比较高的航段区, NSIDC 数据集更加贴合, 应为首选数据集。

关键词: 海冰密集度; 长时间序列; 北极海冰; 数据评估

中图分类号: P731.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0734-11

0 引言

北极地区作为地球最北端的巨大冷源, 由于地处高纬, 终年气候寒冷, 有条件形成厚实的海冰, 其中包括常年不会融化的多年期海冰。海冰作为热的不良导体, 是大气和海洋热交换的屏障, 直接影响着全球尺度的大气和海洋环流以及气候变异, 是反映全球气候变化的重要因子^[1-3]。随着全球气候变暖, 北极海冰的融化速度越来越快, 自 1978 年有卫星观测数据以来, 近几十年北极海冰无论范围、厚度还是多年冰占比, 均呈加速减少的趋势^[4-7], 其变化对我国甚至整个北半球气候和极端天气事件的重大影响逐渐显现, 同时北极新航线的

开拓也为北方国家摆脱对单一能源通道的依赖、提升国家能源安全提供了机遇, 研究北极海冰变化对我国具有重要的经济价值和战略意义^[8-10]。

海冰密集度 SIC(sea ice concentration)定义为海冰覆盖面积与海区总面积之比, 是描述海冰特征的重要参数, 对海冰的空间分布及范围计算等研究具有重要意义^[11-12]。基于被动微波遥感获取的卫星海冰密集度数据是当前研究海冰情况的重要数据源, 为航海、气候、天气变化及海冰预报等方向的研究提供了重要的数据基础, 尤其是高分辨率的海冰密集度数据, 在海上作业、海冰模式验证、气候数据同化、冰区航行指导等方面更是有不可替代的

收稿日期: 2019-03-20; 修订日期: 2019-09-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1401800); 国家自然科学基金项目(41506198); 全国统计科学研究项目(2017LY14)资助

作者简介: 尹鹏(1996-), 男, 山东泰安人, 2017 年在青岛大学获学士学位, 现为青岛大学在读硕士研究生, 从事机器学习与大数据分析研究. E-mail: yinpengcom@163.com

通信作者: 杨俊钢, 副研究员, 从事海洋微波遥感应用研究. E-mail: yangjg@fio.org.cn.

作用^[13],开展卫星遥感海冰数据的精度评估意义重大^[14]。赵杰臣等^[15]利用2012年夏季中国第五次北极科学考察期间雪龙船在北极东北航道上的走航观测数据,对7种传感器、分辨率、反演算法不尽相同的被动微波遥感海冰密集度产品进行了评估,结果表明基于AMSR2传感器、ASI算法的AMSR2/ASI数据与走航实测数据偏差较小,平均偏差约 $\pm 1\%$,均方根偏差仅11%,是关注海冰密集度大小的首选产品;Heinrichs等^[16]使用SAR和MODIS数据对AMSR-E海冰密集度进行了评估,结果表明AMSR-E在判别开阔水和浮冰区域表现良好,但是在薄冰区有时会低估;王晓雨等^[17]使用高分辨率的MODIS数据验证了国产风云三号卫星B星(FY-3B)搭载的微波成像仪MWRI和Aqua卫星搭载的微波扫描辐射计AMSR-E获取的海冰密集度数据,发现密集度小于95%情况下,AMSR-E更接近MODIS,密集度大于等于95%情况下,MWRI结果更好;武胜利等^[18]对比了中国和美国相应部门业务运行的几种重要的北极海冰覆盖数据集,发现风云三号卫星数据的北极海冰覆盖数据集精度与国外同类型数据集相当。

通过对各种海冰密集度产品进行处理分析,研究人员可以更清楚地了解具体研究区域^[19-21]及北极整体海冰的变化过程^[22-26],研究海冰的年际变化和季节变化规律,更好地分析北极海冰情况。在进行长期变化分析和区域精确预测等长时间序列研究时,需要大量的数据,使用各种大数据方法分析海冰情况同样对数据有较强的依赖性,此时始于1978年左右的各类长时间序列数据集无疑是较佳选择。美国冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)提供的被动微波海冰遥感数据集(NSIDC)及欧洲空间局(European Space Agency, ESA)全球气候变化计划(Climate Change Initiative, CCI)提供的同样基于被动微波的海冰遥感数据集(SICCI)是其中时间跨度较长、应用范围较广的两类数据集,两类数据集分别起始于1978年、1979年,且均采用25 km的空间分辨率,研究人员在进行长时间序列研究时很难对二者进行取舍。德国不莱梅大学(Universität Bremen)提供的被动微波海冰遥感数据集(BLM),使用AMSR-E/AMSR2传感器,ASI反演算法,空间分辨率为6.25 km,精度较高,可作为研究海冰密集度大小的首选产品。本研究分别将NSIDC数据集和SICCI数据集与BLM数

据集进行总体比较、分区域比较,评估两类数据集在不同情况下的准确性,并对比两类数据与BLM数据在东北航道区域内的符合程度,为北极海冰和全球气候变化等需要长时间序列海冰数据的相关研究在数据选取时提供参考。

1 数据与方法

1.1 海冰遥感数据集

本研究使用的海冰遥感数据集包括:美国国家冰雪数据中心的NSIDC数据集,欧空局全球气候变化计划的SICCI数据集和作为比对数据的德国不莱梅大学BLM数据集。

NSIDC数据集来自美国冰雪数据中心(<https://nsidc.org>),该数据集是被动微波海冰密集度的气候数据记录(Climate Data Record, CDR)。完整的NSIDC数据集包括南极地区和北极地区,通过极地赤平投影网格化到25 km \times 25 km的网格单元上。数据集早期主要使用Nimbus-7卫星搭载的扫描式多通道微波辐射计(Scanning Multi-channel Microwave Radiometer, SMMR),该传感器一直工作到1987年7月8日,这就是早期的官方海冰密集度气候数据集。SMMR传感器于1987年停运后,之后使用的传感器包括美国国防卫星计划(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)卫星群搭载的各种传感器——搭载在美国国防气象卫星DMSP-F8上的特殊传感器微波成像仪(Special Sensor Microwave/Imager, SSM/I),搭载在DMSP-F11卫星上的SSM/I传感器以及搭载在DMSP-F13上的SSM/I传感器,目前使用的是搭载在DMSP-F17上的微波成像专用传感器(Special Sensor Microwave Imager Sounder, SSMIS)。CDR所用算法结合了NASA戈达德太空飞行中心(GSFC)开发的两种成熟算法:NASA Team(NT)算法^[27]和Bootstrap(BT)算法^[28]。这两种算法利用SSM/I和SSMIS传感器的网格化亮温数据生成海冰密集度值,CDR算法则通过为每个网格单元选择较高密集度值来混合NT和BT输出^[29]。NSIDC数据集包含每日海冰密集度数据与月平均海冰密集度数据。日海冰密集度数据集与月海冰密集度数据集都包括了1978年10月26日-1987年7月8日部分和1987年7月9日-2015年12月31日两部分的数据集,其中前期部分每两日一个文件,后期部分每日一个文件。本研究使用的海冰密集度数据集为该数据集北极部分的

日海冰密集度数据,时间范围为1978年10月26日-2015年12月31日,分辨率为25 km,数据类型为NetCDF4 CF-1.6,空间网格为304×448。该数据集以双字节整型来表示海冰密集度,缩放比例为0.01,所以在本研究中需要将网格点密集度值乘100,以得到范围为0~100%的海冰密集度值进行进一步比较分析,而<0的值皆为填充值或陆地湖泊等标记非海冰值,不计入研究范围。

SICCI数据集来自欧洲空间局(<ftp://osisaf.met.no/.sicci>)气候变化计划中的海冰基础气候变量项目(Essential Climate Variables, ECV),是基于被动微波辐射计观测的覆盖南北极地区的网格化海冰密集度数据。SICCI数据集只有每日的日文件且整个数据集由SSM/I CDR及AMSR-E CDR组成,一个合并了DMSP-F10、F11、F13、F14、F15上的所有SSM/I设备,另一个覆盖了AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer)设备,这些时间序列有部分重叠。ECV项目比较评估了30种海冰密集度算法,选择最优的OSISAF-2(Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility)算法,并做了适度修正,称为SICCI(Sea Ice CCI)算法。该算法是Bootstrap F(BF)和Bristol(BR)算法的结合。前者BF是基于对三个通道发射率散点图的聚类分析,有极化和频率两种模式。频率模式下运行可以消除开阔水域稀疏海冰带来的大气和海洋影响,以及由降雪和其他表面效应给发射率带来的误差。后者BR通过坐标系转换将极化和频率结合起来,可解决NASA Team和Bootstrap F算法中水平极化通道对积雪分层的异常敏感,以及Bootstrap F切换运行模式时结果的不连续问题。关于网格分辨率,尽管在SICCI项目期间开展调查确认SIC需求分辨率为10 km之下,全球气候观测系统(GCOS)仍要求水平分辨率为10~15 km。这个要求与三十年来19 GHz和37 GHz的PMW通道(SMMR、SSM/I等)的长期数据的均值是相矛盾的。因此,目前的SICCI SIC产品是通过一个25 km的网格空间递送的,同样大小的网格空间还被应用于SSM/I和AMSR-E SIC数据库。另外,该数据库文件插入的海冰密集度的各类插值普遍不能应用于科学研究,尤其是从空间插值得到的值,所以插值单独作为一个变量。本研究使用的海冰密集度数据集主要为SICCI数据集北极部分的日尺度文件,数据时间范围为1987年7月9日-2015年12月31日,空间分辨率

为25 km,数据类型为NetCDF,空间网格为432×432,以双字节整型来存储海冰密集度值。

BLM数据集是德国不莱梅大学提供的海冰密集度数据集。该数据集由两部分组成,首先是基于AMSR-E传感器获取的数据,使用ARTIST Sea Ice(ASI)算法(www.seaice.de),空间分辨率为6.25 km,时间跨度为2002年6月1日-2011年10月4日。之后该传感器因故障停止工作,2012年5月18日发射成功的全球变化观测任务卫星(JAXA GCOM-W1)上搭载的改进型微波辐射扫描仪(AMSR2)作为AMSR-E的替代品开始工作,同样采用ASI算法的6.25 km×6.25 km的网格单元,一直工作至今。两部分数据集的ASI算法版本均为v5。同SICCI数据集一样,BLM数据集同样覆盖北极和南极,按年月建立文件夹并将日数据对应存储在相应文件夹下。BLM数据集中每个日尺度数据均有四个文件:HDF、TIFF、PNG、PDF。海冰密集度是一个浮点值,其中缺省值使用IEEE标准存储为NaN,密集度具体值使用大规模科学数据库模型将数据分层存储在HDF文件中。HDF SDS是存储AMSR数据的标准数据格式,读取这个数据和大量的额外信息的软件,可在“<https://hdf.nsga.uiuc.edu/>”获取。TIFF文件中以二进制形式存储海冰密集度值。数据的可视化文件(PNG)以及最后的可视化PDF文件。本研究使用的数据为北极地区的日海冰密集度数据,时间跨度为2002-2018年,中间因为更换传感器,2011年、2012年有部分缺失,使用的算法为ASI,网格分辨率为6.25 km,数据类型为HDF。由于BLM数据集中海冰密集度网格点对应单元保存在另一HDF文件中,因此使用该数据集的时候还需要读取保存北极地区分辨率为6.25 km网格点对应经纬度值的HDF文件,所用网格单元为1 792×1 216。

1.2 数据处理方法

本文以精度更高但时间线较短的BLM数据集北极数据为参考,分析NSIDC及SICCI两类长时间序列海冰遥感数据集的北极数据,对比两种数据在不同情况下与BLM数据的偏差情况,为科研人员在选取长时间序列数据集时提供参考。研究涉及的数据处理方法主要有数据筛选与匹配、海冰面积计算和比较误差统计分析等。

选取三类数据集重合的时空范围用于数据匹配。首先对比三类数据时空覆盖情况,因为NSIDC

数据和 BLM 数据在北极点附近有空缺值, 因此选取 87°N 以南的北极地区作为研究区域, 时间范围为 2003–2010 年及 2013–2015 年。将选定范围内的 NSIDC 数据和 SICCI 数据与 BLM 数据进行数据匹配, 计算 NSIDC、SICCI 数据网格点到周围 BLM 数据网格点的距离, 选取距离最近的网格点作为两类数据与 BLM 数据的匹配网格点^[30]。

为了更加方便清晰地对 NSIDC 和 SICCI 数据进行比较, 本研究首先开展海冰面积比较, 通过海冰密集度确定海冰范围, 进而计算日海冰面积、月平均海冰面积和年平均海冰面积。对于海冰范围的界定, 国内外研究者大都采用 15% 的海冰密集度值作为阈值来区分有冰区和无冰区^[31], 也有一些研究采用其他阈值, 例如 20%^[32]。本文使用 15% 作为海冰范围界定阈值, 海冰密集度大于该阈值的区域内面积即为海冰面积。用数值 0~100 表示海冰密集度, 海冰面积计算公式为

$$\text{Area} = \sum_{i=1}^g \frac{N_i}{100} \times M_i \quad (1)$$

式中: N_i 为第 i 个网格点的海冰密集度值; g 为网格点总数; M_i 为第 i 个网格单元面积。其中, Polar-Stereo 网格中每个网格的对应面积数据由美国冰雪数据中心提供。

计算三类数据的日海冰面积后, 基于年、月下的日数据计算年平均、月平均海冰面积。

海冰密集度比较时, 采用平均偏差 Bias、均方根偏差 RMSE 和正偏差占比 R 等统计参量进行评价, 计算公式为

$$\text{Bias} = \sum_{j=1}^n (S_j - P_j) / n \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j - P_j)^2 / n} \quad (3)$$

$$R = \sum B / n \quad (4)$$

式中: S 为 NSIDC、SICCI 数据的海冰密集度值; P 为 BLM 数据对应点的海冰密集度值; B 为 $\text{Bias} \geq 0$ 的数据网格点; j 为网格点序号; n 为海冰区域匹配网格点总数。

2 结果与分析

2.1 整体比较

2.1.1 海冰面积比较

基于海冰密集度数据采用 1.2 节介绍的方法计算年平均海冰面积, 绘制三种数据的年平均海冰面积变化图, 如图 1 所示。可以发现基于三种海冰密集

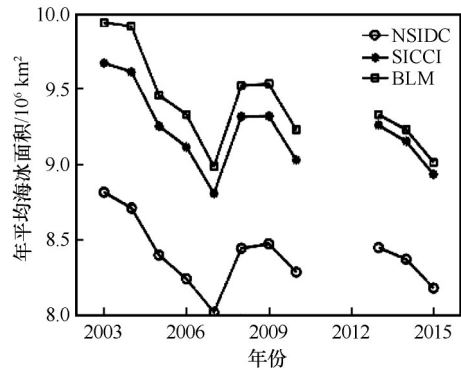


图 1 三种数据的年平均海冰面积变化

Fig. 1 Variations of annual mean sea ice area retrieved from the three datasets

度数据得到的北极海冰面积呈整体递减趋势, 基于两种数据的结果均小于基于 BLM 数据的结果, 且基于 NSIDC 数据的结果小于基于 SICCI 数据的结果。

计算 NSIDC 数据及 SICCI 数据年平均海冰面积与 BLM 数据的差值, 发现 NSIDC 数据最大负偏差为 2004 年的 $-1.20 \times 10^6 \text{ km}^2$, 最小负偏差为 2015 年的 $-8.33 \times 10^5 \text{ km}^2$, 平均偏差为 $-1.01 \times 10^6 \text{ km}^2$, RMSE 为 $1.01 \times 10^6 \text{ km}^2$; SICCI 数据的最大负偏差为 2004 年的 $-3.01 \times 10^5 \text{ km}^2$, 最小负偏差为 2013 年的 $-6.96 \times 10^4 \text{ km}^2$, 平均偏差为 $-1.83 \times 10^5 \text{ km}^2$, RMSE 为 $1.97 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。相比于 NSIDC 数据集, SICCI 数据集的年均海冰面积偏差低 81.88%。如图 2 所示, 与 BLM 数据相比, 基于 NSIDC 数据得到的年平均海冰面积整体偏差较大且波动较为剧烈, 基于 SICCI 数据得到的年平均海冰面积整体偏差更小且波动更加平缓。两种数据与 BLM 数据的偏差均呈逐渐减少的趋势。

分析两种数据月平均海冰面积与 BLM 数据的差值, 发现 NSIDC 数据最大负偏差为 2009 年 3 月的 $-1.88 \times 10^6 \text{ km}^2$, 最小负偏差为 2015 年 8 月的 $-6.17 \times 10^4 \text{ km}^2$, 平均偏差为 $-1.00 \times 10^6 \text{ km}^2$, RMSE 为 $1.10 \times 10^6 \text{ km}^2$, 其偏差均为负; SICCI 数据最大正偏差为 2013 年 1 月的 $2.18 \times 10^5 \text{ km}^2$, 最大负偏差为 2013 年 7 月的 $-5.97 \times 10^5 \text{ km}^2$, 平均偏差为 $-1.91 \times 10^5 \text{ km}^2$, 比 NSIDC 数据集低 80.90%, RMSE 为 $2.55 \times 10^5 \text{ km}^2$, 其中正偏差占比 11%。如图 3 所示, 与 BLM 数据相比, 基于 NSIDC 数据得到的月平均海冰面积整体偏差较大, 其波动较为剧烈且呈下降趋势; 基于 SICCI 数据得到的月平均海冰面积整体偏差较小, 其波动较为平缓且同样呈下降趋势。

计算两种数据与 BLM 数据日海冰面积的偏差,

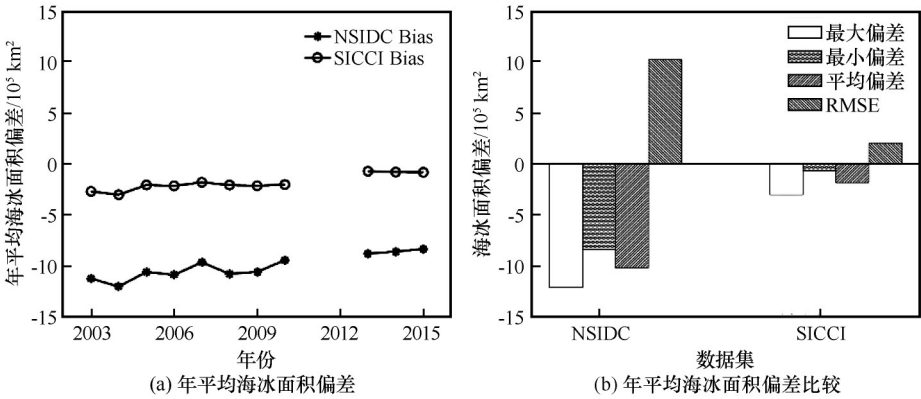


图2 NSIDC、SICCI数据与BLM数据的年平均海冰面积偏差

Fig. 2 The biases of annual mean sea ice area between NSIDC and BLM and between SICCI and BLM: annual mean sea ice area bias (a), and comparison of annual mean sea ice area bias (b)

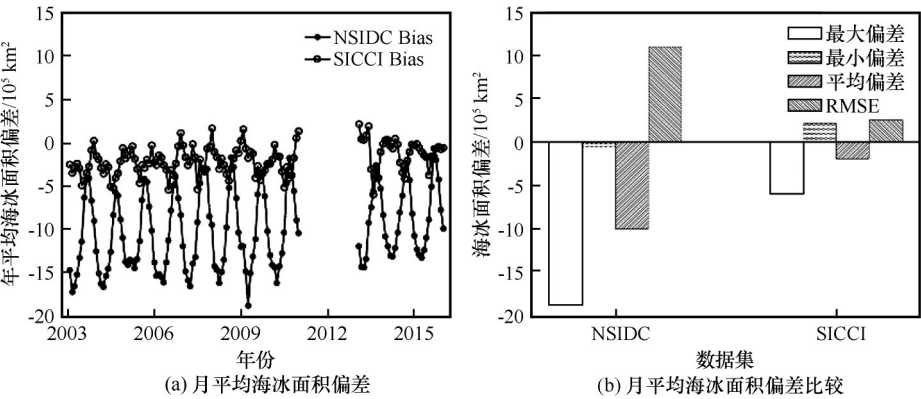


图3 NSIDC、SICCI数据与BLM数据的月平均海冰面积偏差

Fig. 3 The biases of monthly mean sea ice area between NSIDC and BLM and between SICCI and BLM: monthly mean sea ice area bias (a), and comparison of monthly mean sea ice area bias (b)

NSIDC数据的最大负偏差为 $-1.92 \times 10^6 \text{ km}^2$, 最小负偏差为 $-2.11 \times 10^3 \text{ km}^2$, 平均偏差为 $-1.04 \times 10^6 \text{ km}^2$, RMSE为 $1.28 \times 10^6 \text{ km}^2$; SICCI数据的最大正偏差为 $3.54 \times 10^5 \text{ km}^2$, 最大负偏差为 $-1.06 \times 10^6 \text{ km}^2$, 平均偏差为 $-1.93 \times 10^5 \text{ km}^2$, RMSE为 $3.37 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

如图4所示, 基于NSIDC数据得到的日海冰面积均低于基于BLM数据得到的日海冰面积, 且相比于NSIDC数据, 基于SICCI数据得到的日海冰面积偏差低81.44%, 其整体偏差更小且波动较小, 与基于BLM数据得到的日海冰面积更为符合。

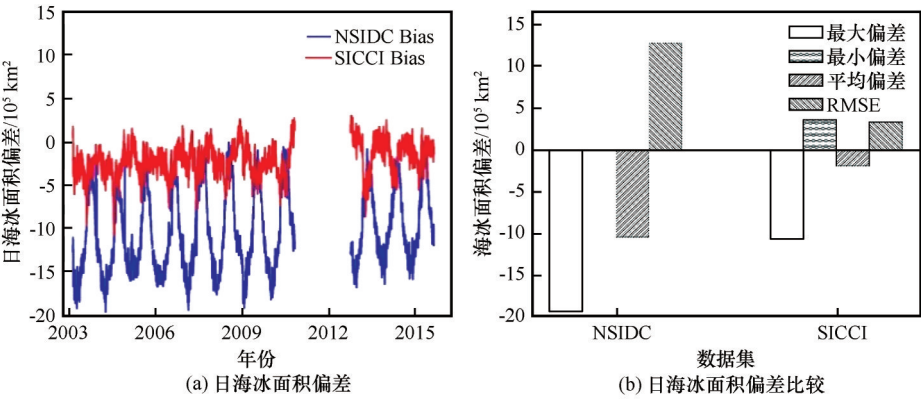


图4 NSIDC、SICCI数据与BLM数据的日海冰面积偏差

Fig. 4 The biases of daily mean sea ice area between NSIDC and BLM and between SICCI and BLM: daily mean sea ice area bias (a), and comparison of daily mean sea ice area bias (b)

由图3及图4可以发现, 基于NSIDC数据得到的海冰面积偏差明显大于SICCI数据, 且周期变化更加明显。NSIDC数据与BLM数据的差值随着进入融化时节逐渐减小, 在海冰面积达到最小时差值达到最小; 随着进入结冰时节差值逐渐增大, 在海冰面积达到最大时差值达到最大。

2.1.2 海冰密集度比较

计算两种数据与BLM数据匹配网格点海冰密集度值的偏差, 绘制得到图5。可以发现, NSIDC数据75%的日海冰密集度值大于BLM数据的日海冰密集度值, 而SICCI数据63%的日海冰密集度值低于BLM数据的日海冰密集度值, 且其偏差的季节变化和年际变化趋势更加明显。SICCI数据与BLM数据日海冰密集度值的差值随着进入融化时

节逐渐增大, 在海冰面积达到最小时差值达到最大; 随着进入结冰时节差值逐渐减小, 在海冰面积达到最大时差值达到最小。

对两种数据所有匹配日数据进行比较, 基于长时间序列匹配数据计算得到NSIDC数据的最大正偏差为11.8%, 最大负偏差为-1.6%, 平均偏差为4.36%, RMSE为16.19%; SICCI数据的最大正偏差为1.33%, 最大负偏差为-14.0%, 平均偏差为-3.28%, RMSE为14.8%。虽然SICCI数据的负偏差占比较高, 但无论是平均偏差还是RMSE, SICCI数据均比NSIDC数据低, 可见SICCI数据的海冰密集度值更接近BLM数据, 因此在需要对北极地区海冰密集度值进行长时间序列分析时, 首选SICCI数据。

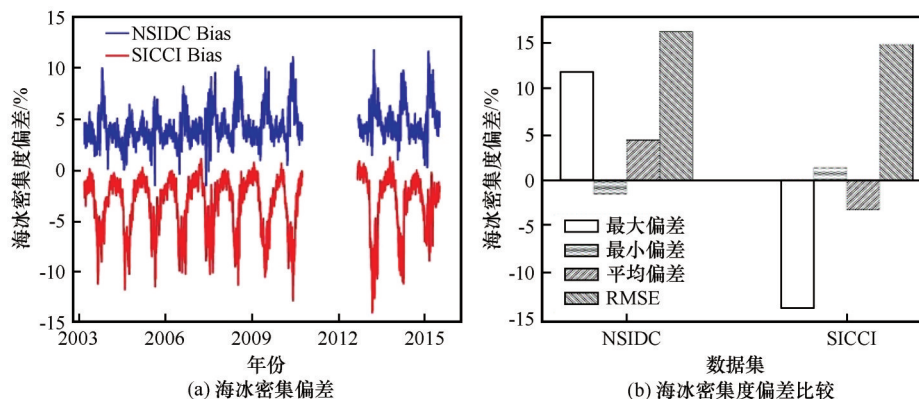


图5 NSIDC、SICCI数据与BLM数据的海冰密集度比较

Fig. 5 The biases of sea ice concentration between NSIDC and BLM and between SICCI and BLM: sea ice concentration bias (a), and comparison of sea ice concentration bias (b)

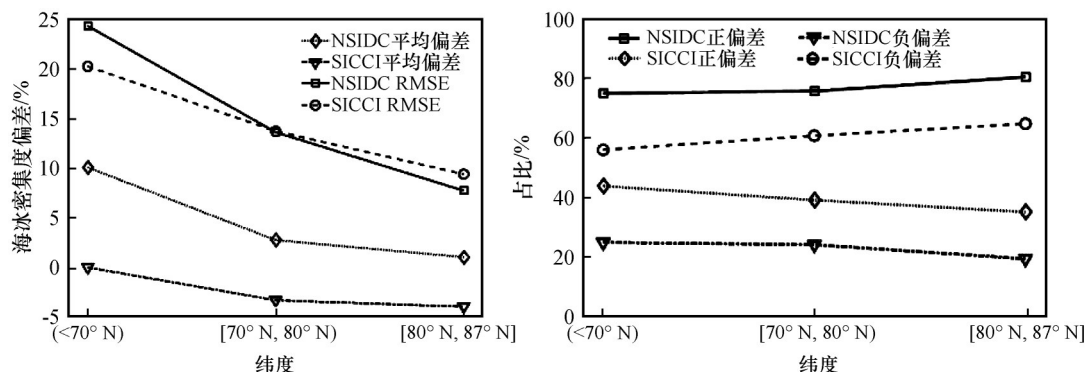
2.2 分类比较

2.2.1 按纬度分区比较

科研人员对雪龙船2012年夏季中国第五次北极科学考察期间的走航路线进行分析, 发现在7月25日去程穿越北极航道期间的海冰空间分布中, 北极太平洋扇区大部被海冰所覆盖, 楚科奇海和东西伯利亚海海冰外缘线接近70°N, 接近大陆边界, 可以通航的航道为贴近大陆边缘海域。新西伯利亚群岛以北和拉普捷夫海海冰外缘线约位于80°N, 存在大面积开阔水域, 航道畅通。北地群岛以北均有海冰覆盖, 此处航道为北地群岛与俄罗斯本土之间的狭窄海峡——维利基茨基海峡。大西洋扇区的海冰外缘线在80°N的斯瓦尔巴群岛以北, 对航行无影响^[15]。因此以70°N与80°N为分界点, 将北极区域分为低纬(70°N以南)、中纬(70°~80°N)和高纬近北极点(80°~87°N)三个区域, 基于

BLM海冰密集度数据开展NSIDC和SICCI海冰密集度数据在不同纬度区间内的比较分析。计算得到NSIDC数据在三个区域的平均偏差分别为10.11%、2.79%和1.08%, RMSE分别为24.34%、13.65%和7.76%, 正偏差占比分别为75%、76%和80%; SICCI海冰密集度数据在三个区域的平均偏差分别为0.05%、-3.26%和-3.90%, RMSE分别为20.27%、13.76%和9.43%, 正偏差占比分别为43.95%、39.24%和35.21%。结果如图6所示。

两种数据与BLM数据偏差的空间分布如图7所示, 参照海冰密集度比较结果将偏差区间设为-10%~10%。由图6、图7可以看出, 两种数据偏差最大的地区均为低纬海冰边缘区, 该区域也是SICCI数据正偏差最集中的区域, 结合两种数据在低纬区域内的整体表现, 可知SICCI数据对低纬区域非边缘海冰分布情况反映良好, 是研究低纬区域

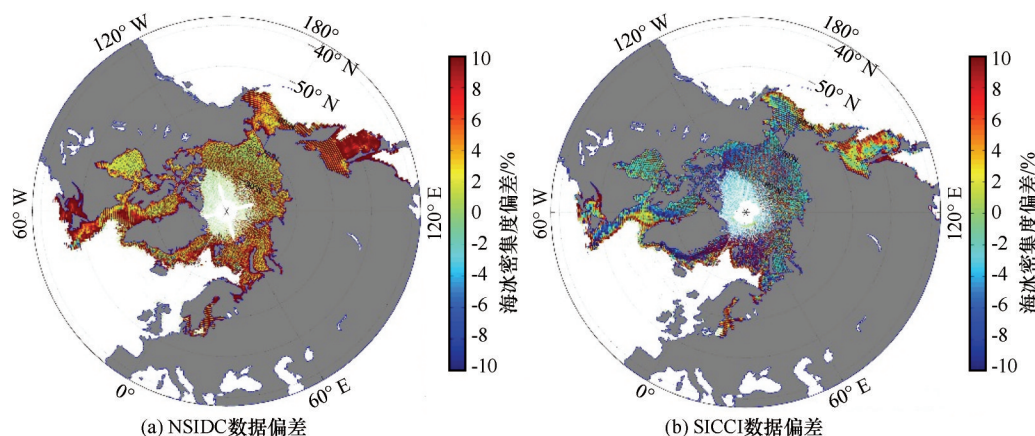


(a) 海冰密集度偏差比较

(b) 正负偏差占比

图6 不同纬度区域NSIDC和SICCI数据与BLM海冰密集度数据比较

Fig. 6 The biases of sea ice concentration between NSIDC and BLM and between SICCI and BLM changing with latitude: biases of sea ice concentration (a), and positive and negative bias ratios (b)



(a) NSIDC数据偏差

(b) SICCI数据偏差

图7 NSIDC数据(a)和SICCI数据(b)与BLM数据偏差的空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of the bias between NSIDC and BLM (a) and between SICCI and BLM (b) along latitude

的首选数据集；中纬区域内，NSIDC数据略优于SICCI数据，且相比低纬区域，NSIDC数据的偏差及RMSE变化明显；高纬近北极点区域内，NSIDC数据的偏差及RMSE达到最小值，优势更加明显。整体上看，随着纬度增加两种数据的离散程度逐渐变小，不同的是NSIDC数据明显正偏差居多，且随纬度增加正偏差占比越来越大，平均偏差越来越小，与BLM数据符合程度越来越高；SICCI数据则是负偏差居多，且随纬度增加负偏差占比越来越大，平均偏差也越来越大，与BLM数据符合程度逐渐变低。

2.2.2 按海冰密集度值分段比较

总体比较三种原始数据在海冰密集度 $SIC \leq 30$ 的低密集度区间、 $30 < SIC \leq 60$ 的中等密集度区间、 $SIC > 60$ 的高密集度区间的海冰密集度值分布情况。NSIDC数据低密集度值占比为2%，中等密集度值占比8%，高密集度值占比90%；SICCI数据低密集

度值占比7%，中等密集度值占比9%，高密集度值占比84%；BLM数据低密集度值占比8%，中等密集度值占比5%，高密集度值占比87%。发现NSIDC数据低密集度值占比明显低于BLM数据，因此对三种数据 $SIC \leq 10$ 的密集度值进行分析，得到NSIDC数据 $SIC \leq 10$ 的密集度值占比为0.001%，远小于SICCI数据的1%及BLM数据的3%。

以匹配数据中BLM数据的海冰密集度值(BLM_SIC)为基础，分段进行NSIDC和SICCI海冰密集度数据与BLM海冰密集度数据的比较分析。计算得到NSIDC数据在 $BLM_SIC \leq 30$ 的低密集度区域平均偏差为13.13%，RMSE为19.25%，正偏差占比87%；在 $30 < BLM_SIC \leq 60$ 的中等密集度区域平均偏差为15.62%，RMSE为29.92%，正偏差占比74%；在 $BLM_SIC > 60$ 的高密集度区域平均偏差为2.98%，RMSE为13.96%，正偏差占比77%。SICCI数据在低密集度、中等密集度、高密集度区

域的平均偏差分别为 0.44%、0.66% 和 -3.21%，RMSE 分别为 21.87%、30% 和 11.09%，正偏差占比分别为 64.54%、52.92% 和 36.22%。

结合密集度值分布情况及图 8 可以发现，低密集度区域由于 NSIDC 数据对浮冰区与开阔水域区分效果较差，使该区域内 SICCI 数据优势明显；中

等密集度区域 SICCI 数据同样优于 NSIDC 数据，且该区域内两种数据离散程度最大；高密集度区域由于 SICCI 数据对海冰表面出现的融池非常敏感，低估了海冰密集度值^[33]，使该区域内 SICCI 数据符合程度较低，且两种数据在高密集度区域内离散程度最小。

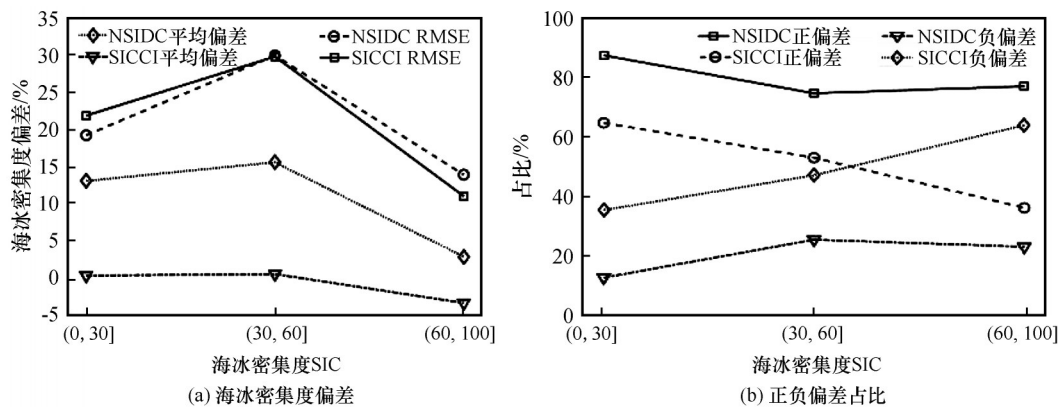


图 8 不同海冰密集度区域 NSIDC 和 SICCI 数据与 BLM 数据比较

Fig. 8 The bias of sea ice concentration between NSIDC and BLM and between SICCI and BLM changing with sea ice concentration: biases of sea ice concentration (a), and positive and negative bias ratios (b)

2.2.3 按东北航道分段比较

北极海冰加速融化，便利的北极航道正成为连接大西洋和太平洋的“新纽带”和“高速路”，科研人员通过研究北极航道行经区域的海冰变化趋势，分析了航道的通航情况，为我国能源、贸易运输决策制定提供一定参考意见^[34-35]。船舶在北极东北航道航行时，所经海域大多为楚科奇海、东西伯利亚海、拉普捷夫海、喀拉海、巴伦支海、挪威海，本研究选取行经六大海域的两条航线，根据两条航线的位置关系将其分别称为低纬航道和高纬航道(图 9)。分析 NSIDC 数据及 SICCI 数据在两条航道区域内与 BLM 数据的符合程度，可为不同纬度区间的北极航道区域海冰变化分析和其他时间序列研究提供参考。因为船舶航行时大都不会沿某条航道一直航

行，所以分析时将每条航道分别划分航段(表 1)，评估两种数据在各个航段上的符合程度，这样具体到每条航段上的评估结果显然更有参考价值。

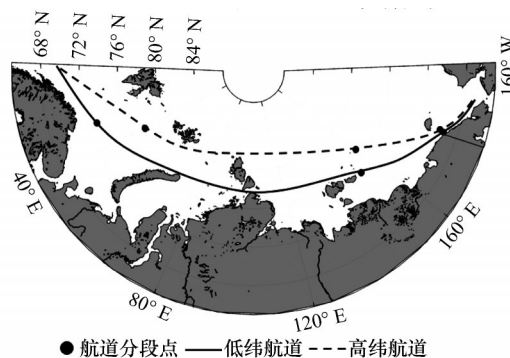


图 9 东北航道

Fig. 9 The two Northeast Passages

表 1 东北航道航段表

Table 1 The segments of the two Northeast Passages

航线	第一航段	第二航段	第三航段	第四航段
低纬航道	66° ~ 70° N, 180° ~ 169° W	70° ~ 75° N, 152° E ~ 180°	75° ~ 78° N, 30° ~ 152° E	69° ~ 75° N, 10° ~ 30° E
高纬航道	66° ~ 70° N, 180° ~ 169° W	70° ~ 77° N, 150° E ~ 180°	77° ~ 82° N, 40° ~ 150° E	69° ~ 77° N, 10° ~ 40° E

分别计算两类数据在每条航段上的平均偏差与均方根偏差，结果如表 2 所示。

结合图 9 及表 1、表 2，低纬航道第一、三、四

航段区域陆地附近中低密集度海冰占比较高，此时 SICCI 数据与 BLM 数据偏差更小，符合程度更高，而第二航段整体行经东西伯利亚海，距离海岸线较

表2 东北航道各航段平均偏差与均方根偏差
Table 2 Bias and RMSE of the segments of the two Northeast Passages

航线	数据	第一航段		第二航段		第三航段		第四航段	
		Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE
低纬航道	NSIDC	2.55	13.65	1.31	10.35	3.05	14.26	16.82	35.48
	SICCI	-2.23	12.67	-3.23	11.73	-2.71	14.47	-1.81	24.59
高纬航道	NSIDC	2.55	13.65	1.22	10.07	2.16	12.27	4.84	23.53
	SICCI	-2.23	12.67	-3.35	11.60	-3.60	13.37	-6.81	24.17

远,海冰密集度较高,在该航段上NSIDC数据更为符合。高纬航道起始位置处的第一航段船舶沿海岸线行驶,此时对浮冰区与开阔水域区分较好的SICCI数据与BLM数据更加符合,第二航段开始进入中高纬度高密集度海冰区域,二、三、四航段成为NSIDC数据的优势航段。两条航道行经区域相近,但高纬航道处于较高纬度较高密集度区域,船舶由低纬航道航行到该区域,已经由SICCI数据的优势区域转变为NSIDC数据的优势区域。此外,SICCI数据普遍低估了海冰密集度值,因此虽然在SICCI数据的优势区域使用该数据进行时间序列研究及长期变化分析时更加合适,但是船只出航时采用该数据将会对安全造成影响,航行时不建议选取。

3 结论

本文利用空间分辨率及精度较高的BLM海冰密集度数据集,对分辨率较低但时间跨度更长的NSIDC和SICCI海冰密集度数据集的准确性进行了比较评估与分析。结果显示三种数据呈现的海冰面积变化趋势相同,但基于两种数据得到的海冰面积均低于基于BLM数据得到的海冰面积,且基于SICCI数据得到的海冰面积高于基于NSIDC数据得到的海冰面积,更接近BLM数据结果,其年、月、日平均偏差分别比NSIDC数据低81.88%、80.90%、81.44%,因此在进行海冰面积相关研究时应选取SICCI数据。对NSIDC和SICCI数据的海冰密集度值与BLM数据进行比较,发现SICCI数据总体低估了网格点内的海冰密集度值,而NSIDC数据则是高估,两种数据的差值在海冰融化期间增大,在最小海冰面积时达到最大;在结冰时期减小,且在海冰面积达到最大时差值达到最小。SICCI数据的平均偏差为-3.28%,RMSE为16.19%,均低于NSIDC数据,因此在进行海冰密集度值的相关分析时同样应选取SICCI数据。此外,对于北极海冰的年际变化和季节变化规律,SICCI数据反映得更为清楚,因此在进行北极海冰年际变化和季

节变化特征研究时,SICCI数据仍是首选数据。由于分辨率和精度的差异,NSIDC和SICCI两种海冰密集度数据在低纬海冰边缘区域内的偏差和均方根偏差均较大,但SICCI数据在整个低纬区域平均偏差为0.05%,远低于NSIDC数据的10.11%,因此进行低纬度区间的海冰分析时应选用SICCI数据;中纬和高纬近北极点区域则是NSIDC数据更加合适,其偏差分别为2.79%、1.08%,特别是高纬近北极点区域,其RMSE达到了7.76%,因此中高纬区域内的海冰分析应使用NSIDC数据。从密集度大小上看,NSIDC数据区分开阔水域与浮冰区的能力较弱,其低密集度(SIC≤30)网格点占比远低于其余两种数据,且平均偏差达到13.13%,而SICCI数据在此区间内平均偏差为0.45%,是对北极海冰进行低密集度相关分析(如海冰边缘线的变化)时的首选数据;中等密集度(30<SIC≤60)区域是两种数据波动最大的区域,此区域内两种数据的RMSE高达30%,但SICCI数据的平均偏差为0.66%,低于NSIDC数据的15.62%,此区间内的相关研究仍需选用SICCI数据;高密集度(SIC>60)区域内由于SICCI数据对融池非常敏感,使该区域内SICCI数据偏差达到-3.22%,高出NSIDC数据的2.98%,因此高海冰密集度相关研究应使用NSIDC数据。此外,NSIDC和SICCI数据在北极东北航道区域内的分段比较结果发现,低纬航道上除经过东西伯利亚海的第二航段NSIDC数据与BLM数据更为符合外,其他航段均是SICCI数据符合程度更高;进入纬度更高的高纬航道后,除了处于海岸线边缘区域的第一航段区,其他航段区都应选用NSIDC数据进行研究分析。

致谢:感谢美国冰雪数据中心、欧洲空间局CCI项目和德国不莱梅大学分发的海冰遥感数据。

参考文献(References):

[1] Lü Zhuozhuo, He Shenping, Li Fei, et al. Impacts of the autumn Arctic sea ice on the intraseasonal reversal of the winter

- Siberian High[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(2): 173 – 188.
- [2] Lin Zhongda, Li Fang. Impact of interannual variations of spring sea ice in the Barents Sea on East Asian rainfall in June[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2018, 11(3): 275 – 281.
 - [3] Han Zhe, Li Shuanglin. Precursor role of winter sea-ice in the Labrador Sea for following-spring precipitation over southeastern North America and western Europe[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(1): 67 – 74.
 - [4] Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J/OL]. *Geophysical Research Letter*, 2008, 35(1) [2019-08-18]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007GL031972>.
 - [5] Haas C, Pfaffling A, Hendricks S, et al. Reduced ice thickness in Arctic Transpolar Drift favors rapid ice retreat[J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(17) [2019-08-18]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008GL034457>.
 - [6] Rodrigues J. The rapid decline of the sea ice in the Russian Arctic[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 54(2): 124 – 142.
 - [7] Nghiem S V, Rigor I G, Perovich D K, et al. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice[J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19) [2019-08-18]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007GL031138>.
 - [8] Liu Na, Lin Lina, Kong Bin, et al. Association between Arctic autumn sea ice concentration and early winter precipitation in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(5): 73 – 78.
 - [9] Wang Huijun, Chen Huopo, Liu Jiping. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015, 8(1): 1 – 9.
 - [10] Li Shuanglin, Han Zhe, Chen Huopo. A comparison of the effects of interannual Arctic sea ice loss and ENSO on winter haze days: observational analyses and AGCM simulations[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(5): 820 – 833.
 - [11] Comiso J C, Cavalieri D J, Markus T. Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 243 – 252.
 - [12] Hao Guanghua, Su Jie. A study on the dynamic tie points ASI algorithm in the Arctic Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(11): 126 – 135.
 - [13] Karvonen J. Baltic sea ice concentration estimation using SENTINEL-1 SAR and AMSR2 microwave radiometer data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(5): 2871 – 2883.
 - [14] Belchansky G I, Douglas D C. Seasonal comparisons of sea ice concentration estimates derived from SSM/I, OKEAN, and RADARSAT data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 67 – 81.
 - [15] Zhao Jiechen, Zhou Xiang, Sun Xiaoyu, et al. The inter comparison and assessment of satellite sea-ice concentration datasets from the Arctic[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(3): 351 – 364. [赵杰臣, 周翔, 孙晓宇, 等. 北极遥感海冰密集度数据的比较和评估[J]. *遥感学报*, 2017, 21(3): 351 – 364.]
 - [16] Heinrichs J F, Cavalieri D J, Markus T. Assessment of the AMSR-E sea ice-concentration product at the ice edge using RADARSAT-1 and MODIS imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3070 – 3080.
 - [17] Wang Xiaoyu, Guan Lei, Li Lele. Comparison and validation of sea ice concentration from FY-3B/MWRI and Aqua/AMSR-E observations[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(5): 723 – 736. [王晓雨, 管磊, 李乐乐. FY-3B/MWRI 和 Aqua/AMSR-E 海冰密集度比较及印证[J]. *遥感学报*, 2018, 22(5): 723 – 736.]
 - [18] Wu Shengli, Liu Jian. Comparison of Arctic sea ice concentration datasets[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(11): 64 – 72. [武胜利, 刘健. 长序列北极海冰遥感覆盖数据集对比分析[J]. *海洋学报*, 2018, 40(11): 64 – 72.]
 - [19] Zhang Zehua, Bi Haibo, Sun Ke, et al. Arctic sea ice volume export through the Fram Strait from combined satellite and model data: 1979 – 2012[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(1): 44 – 55.
 - [20] Bi Haibo, Wang Yunhe, Zhang Wenfeng, et al. Recent satellite-derived sea ice volume flux through the Fram Strait: 2011 – 2015[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(9): 107 – 115.
 - [21] Liu Yue, Pang Xiaoping, Zhao Xi, et al. Analysis of spatio-temporal variability of sea ice in the Beaufort Sea using passive microwave remote sensing data[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2018, 30(2): 161 – 172. [刘玥, 庞小平, 赵羲, 等. 基于海冰密集度遥感数据的波弗特海海冰时空变化研究[J]. *极地研究*, 2018, 30(2): 161 – 172.]
 - [22] Li Yujie, Gao Xiaoqing, Zhang Lujun, et al. Analysis on the characteristics of Arctic sea ice movement in recent 30 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2019, 38(1): 114 – 123. [李瑜洁, 高晓清, 张录军, 等. 近 30 年北极海冰运动特征分析[J]. *高原气象*, 2019, 38(1): 114 – 123.]
 - [23] Wu Mengquan, Jia Lili, Xing Qianguo, et al. Spatio-temporal variation of Arctic sea ice in summer from 2003 to 2013[J]. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(1): 38 – 46.
 - [24] Fan Xieyu, Bi Haibo, Wang Yunhe, et al. Increasing winter conductive heat transfer in the Arctic sea-ice-covered areas: 1979 – 2014[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2017, 16(6): 1061 – 1071.
 - [25] Zhang Lei, Li T. Physical process responsible for the interannual variability of sea ice concentration in Arctic in boreal autumn since 1979[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(3): 468 – 475.
 - [26] Zhang Lei, Xu Bin, Shi Chunxiang, et al. Analysis of sea ice area change in the Arctic and Antarctic based on the satellite climate data during 1989 – 2015[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(6): 1163 – 1171. [张雷, 徐宾, 师春香, 等. 基于卫星气候资料的 1989 – 2015 年南北极海冰面积变化分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(6): 1163 – 1171.]
 - [27] Cavalieri D J, Gloersen P, Campbell W J. Determination of sea ice parameters with the NIMBUS-7 SMMR[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(D4): 5355 – 5369.
 - [28] Comiso J C. Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(C1): 975 – 994.
 - [29] Meier W, Fetterer F, Savoie M, et al. NOAA/NSIDC climate data record of passive microwave sea ice concentration: version 2[DS]. Boulder, Colorado, USA: National Snow and Ice Data Center, 2013.
 - [30] Beitsch A, Kern S, Kaleschke L. Comparison of SSM/I and AMSR-E sea ice concentrations with ASPeCt ship observations around Antarctica[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 1985 – 1996.
 - [31] Pang Xiaoping, Pu Jian, Zhao Xi, et al. Comparison between AMSR2 sea ice concentration products and pseudo-ship observations of the Arctic and Antarctic sea ice edge on cloud-free

- days [J/OL]. Remote Sensing, 2018, 10 (2) [2019-08-18]. <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/2/317>.
- [32] Cao Yajing, Liu Qinyu, Gao Guoping. The interannual variation of the sea ice concentration at the ice edge and the Ekman transport driven by the westerlies in Antarctica [J]. Periodical of Ocean University of China (Science and Technology), 2005, 35(5): 703 – 706. [曹雅静, 刘秦玉, 高郭平. 南极海冰边缘区密集度的年际变化与西风的Ekman输运[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2005, 35(5): 703 – 706.]
- [33] Toudal P L, Dybkjær G, Eastwood S, et al. ESA Sea Ice Climate Change Initiative (Sea_Ice_CCI): Sea Ice Concentration Climate Data Record from the AMSR-E and AMSR-2 instruments at 25 km grid spacing: version 2.1 [DS]. Oxford, UK: Centre for Environmental Data Analysis, 2017.
- [34] Wang Manman. Research on sea ice condition of Arctic Passage in 1979 – 2017 [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018. [王蔓蔓. 1979 – 2017年北极航道冰情变化研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.]
- [35] Su Jie, Xu Dong, Zhao Jinping, et al. Features of Northwest Passage sea ice's distribution and variation under Arctic rapidly warming condition [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2010, 22(2): 104 – 124. [苏洁, 徐栋, 赵进平, 等. 北极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.]

Comparison and assessment of long-time series sea ice concentration remote sensing datasets in the Arctic

YIN Peng^{1,2}, WANG Changying¹, YANG Jungang²

(1. Data Science and Software Engineering College, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, Shandong, China)

Abstract: Arctic sea ice plays a very important role in global climate change and sea-ice concentration (SIC) is a crucial parameter for sea ice monitoring. The accuracy of SIC data is an essential basis for Arctic research. Therefore, comparing and assessing the products of sea ice data retrieved from different satellite observations are necessary. The results of existing research indicate that the AMSR2/ASI is a best dataset for SIC quantity studies and real-time shipping guide. However, the temporal coverage of these datasets is relatively short. There are some limits in the study of long-time series. In this paper, the SICCI dataset released by ESA SICCI and the NSIDC dataset released by NSIDC were compared and assessed using the BLM dataset released by Bremen University. The results showed that sea ice area obtained by the three datasets all had significant trends of reduction during 2003 – 2010 and 2013 – 2015. Sea ice concentration and sea ice area of SICCI are lower than BLM and those of NSIDC are higher than BLM. Compared with the NSIDC dataset, the bias of annual and monthly mean and daily sea ice area of SICCI are lower about 81.88%, 80.90%, 81.44%, respectively. The bias of SIC between SICCI and BLM is –3.28%, which is lower than 4.36% of NSIDC. Hence, the SICCI dataset is the best dataset for SIC quantity studies and Arctic sea ice area study. Latitude mean comparisons demonstrate that the SICCI dataset is able to successfully detect the small ice floe area near the continent. The bias of SIC between SICCI and BLM are 0.05% and 0.44% in the region of low latitude and low SIC, respectively, so the SICCI dataset is the best dataset to study sea ice in the regions of low-mid latitude or low SIC. In contrast, NSIDC has the lowest bias of 1.08% and root-mean-squared error (RMSE) of 7.76% in the regions near North Polar. Therefore, it is the most suitable for study in Arctic Polar and should be used for further study in the regions of middle and high latitudes. In addition, quantitative evaluation via BLM indicates that the SICCI dataset is suitable for study sea ice in the shipping route of low latitude or low SIC areas, and the NSIDC dataset performs well in the shipping route of high latitude or high SIC area.

Key words: sea ice concentration (SIC); long-time series; Arctic sea ice; data assessment

(责任编辑: 杨清华; 编辑: 武俊杰)