

微波遥感产品对南极普里兹湾海冰密集度准确性的评估

李若晗¹, 夏瑞彬¹, 张晓爽², 晁国芳², 陈忠彪¹, 王志勇³

1. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 南京 210044;

2. 国家海洋信息中心自然资源部海洋环境信息保障技术重点实验室, 天津 300171;

3. 自然资源部北海预报减灾中心, 青岛 266100

摘要: 基于两种船测数据集, 本文采用点对点 and Beitsch 共定位比较法, 对被动微波遥感观测海冰密集度产品在南极普里兹湾区域适用性展开了一系列评估。首先, 根据2012年—2021年中国第29、31、37次南极科考走航船测数据, 依据SIC大小的不同, 对8种遥感SIC产品进行了分类定量比较, 结果表明NSIDC/NT2算法产品在各情况比较中均体现出最高相关性 with 最佳稳定性, 在共定位比较结果中相关系数可达0.926, 均方根差12%, 平均偏差仅2%。其次, 为弥补基于AMSR-2传感器系列产品历史数据缺乏难以分析长期变化的缺陷, 本文同时应用1992年—2000年ASPeCt船测数据集, 以相同的对比方式对4种遥感数据产品的季节循环和长期变化信号进行了评估。结果表明, 该时间段反演准确度较2012年—2021年的个例比较结果有所降低, 且反映出较大的季节差异, 4种产品的偏差均出现从融冰期到结冰期的增长。该时间段内, 基于SSM/I传感器的CDR与Bootstrap算法整体反演较好, 相关系数均达到0.8以上, 均方根差16%, 偏差约为8%, 但是在低SIC区域的反演仍然存在较大的偏差。本研究表明, 目前微波遥感SIC产品在较小范围海区的精确度存在一定的不足, 且随着SIC类型、季节、算法差异出现较大的波动。因此提高分辨率, 尽量使用多源数据, 结合冰况进行分类分析, 对改善遥感SIC产品的准确性十分必要。

关键词: 南极普里兹湾, 海冰密集度, 被动微波遥感, 走航观测, 数据质量评估

中图分类号: P2

引用格式: 李若晗, 夏瑞彬, 张晓爽, 晁国芳, 陈忠彪, 王志勇. 2023. 微波遥感产品对南极普里兹湾海冰密集度准确性的评估. 遥感学报, 27(11): 2499-2515

Li R H, Xia R B, Zhang X S, Chao G F, Chen Z B and Wang Z Y. 2023. Accuracy of microwave remote sensing products in evaluating sea ice concentration in Prydz Bay, Antarctica. National Remote Sensing Bulletin, 27(11): 2499-2515 [DOI: 10.11834/jrs.20232464]

1 引言

海冰密集度 SIC (Sea Ice Concentration) 被定义为海冰覆盖面积与海区总面积之比 (苏洁等, 2013), 常用于理解海冰的空间覆盖特征, 是描述海冰状态的重要参数之一。因其在海冰研究中的重要性, 自20世纪以来, 各种SIC产品不断出世并迭代更新, 其中主要是基于被动微波遥感PM (Passive microwave remote sensing) 反演的SIC数据 (PM SIC)。与其他数据相比, 微波遥感资料受天气的影响较小, 具有优良的时间连续性与较高的

空间分辨率 (王晓雨等, 2018), 但数据的准确程度也因各研究机构使用的卫星传感器和算法不同而存在差异。

自1972年12月发射Nimbus-5电扫描微波辐射计 (ESMR) 以来, 被动微波辐射计一直在改进换代, 提供良好的数据来源。如今极地分析常用的卫星数据就有来自美国国家冰雪数据中心NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 的PM SIC数据集, 该数据集在不同时间段使用了SMMR、SSM/I、SSMIS等多种传感器, 为保证数据的一致性, 上述各传感器数据已经过相互校准整合成数据集 (Yan

收稿日期: 2022-09-26; 预印本: 2023-06-25

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2021YFC2803301); 自然资源部海洋环境信息保障技术重点实验室开放基金

第一作者简介: 李若晗, 研究方向为物理海洋。E-mail: 201983450046@nuist.edu.cn

通信作者简介: 夏瑞彬, 研究方向为物理海洋学、海气相互作用。E-mail: xiarb@nuist.edu.cn

和Wang, 2008), 对于这一数据集, 可以从NSIDC官网上找到多种算法处理的产品, 包括有NASA Team (NT) 算法, Bootstrap (BT) 算法, CDR (Climate Data Record) 结合算法, 以及Hamburg大学提供的Hamburg/ASI (<https://www.cen.uni-hamburg.de/en/icdc/data/cryosphere/seaiceconcentration-asi-ssmi.html>[2022-09-26])。另一常用微波辐射计数据主要来自传感器AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) 和AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2), 德国不莱梅大学环境物理研究所IUP (Institute of Environmental Physics) 基于此数据提供由2002年开始的, 使用ASI算法处理得到的SIC反演数据, 此外还有基于NT2算法的NSIDC/NT2数据可供比较, EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) 也推出了多种卫星传感器数据基础上, 经OSI-SAF处理的海冰产品。

基于微波遥感数据的反演算法正在不断升级中, 目前运用于遥感观测数据最为广泛的算法有美国宇航局戈达德太空飞行中心(GSFC)的BT算法(Comiso, 1986, 1995)和NT算法(Cavalieri等, 1984), 后续许多新算法的产生都基于对两者的改进: 如NASA Team2 (NT2) 算法即是NT算法的优化, 它使用的89 GHz频段降低了水平极化数据受表面条件影响的大小, 同时解决该频段易受大气影响的问题; 在BT和NT的反演分析结果基础上, NSIDC通过综合两者优点与整体低估低浓度海冰的缺陷, 推出了CDR (Climate Data Record) 算法(Peng等, 2013); 目前可获得的结合算法产品也来自欧洲气象卫星应用组织EUMETSAT海洋海冰应用中心(OSISAF), 它结合两种受大气影响最小的算法, 基于BT和Bristol在高低密集度区域的表现分配权重; 使用卫星高频段数据的算法除NT2外还包括有ASI (arctic radiation and turbulence interaction study sea ice algorithm), 这种算法产生于1998年的北极辐射与湍流相互作用研究, 主要基于89 GHz的各向辐射亮温差反演得到SIC(Spreen等, 2008), 与其他数据相比, 它拥有最优秀的空间分辨率, 可以达到6.25 km, 是许多研究者优先使用的数据产品。

近40年来, 随着全球气候变暖, 两极海冰变化也逐渐成为全球热点问题。北极海冰范围, 厚度与多年冰的比例呈现出显著减少的趋势(薛彦

广等, 2014)。南极海冰范围则在继2014年刷新最高值记录后, 随后迅速减少, 于2017年降到历史最低值(王今菲等, 2021), 仅在5年后, 这个最低值记录就被2022年2月25日再次打破(1.9百万 km^2) (NSIDC, 2022)。为探明这一系列变化的潜在原因与其对未来气候的影响, 不同时空尺度的研究对高精度数据的需求依然存在。遥感数据虽然有着一系列优点, 但其在反演准确性与分辨率上的缺陷也较为突出, 故开展遥感数据反演海冰分布精度的评估对研究气候变化具有重要的意义(Belchansky和Douglas, 2002)。为针对数据产品算法与传感器的差异, 国内外对其反演效果开展了多方面的比对, 其中参考数据主要来自于科考船观测SIC(本文中简称OBS SIC)以及高分辨率PM SIC数据产品的对比。

北极海冰的快速变化加速了极地航道区的开发, 促进了该地区科考与商业航运的发展, 船测数据得以进一步丰富, 并作为重要的参考数据参与PM SIC产品的数据比较。同样基于中国第五次北极科学考察走航观测数据, 赵杰臣等(2014)对7种PM SIC数据进行评价, 认为AMSR2/ASI数据较为精确; 季青和庞小平(2018)则针对高分辨率产品, 探讨IUP不同传感器观测数据的SIC反演效果, 发现AMSR2的原始高分辨率相比SSMIS更适宜冰情分析; 李钊等(2018)利用该数据对比了NT/SSMIS与ASI/AMSR2在夏季北极东北航道和高纬航道的准确性和适用性, 结果表明AMSR2数据和走航观测数据符合较好, 同时, 他们结合过往基于雪龙号走航数据对相同产品在南半球夏季罗斯海西侧浮冰区的对比结果, 认为高分辨率传感器在南北极地区的反演都更为准确, 但AMSR2等高分辨率传感器产品的时间覆盖范围较短, 当进行全球气候变化研究时, 需要长时间序列且高适用性的海冰产品加以辅助。

而在南极方面, Worby和Comiso(2004)根据1989年—2000年南极海冰过程与气候项目ASPeCt (Antarctic Sea ice Processes and Climate) 船测数据对NT2与BT算法在南极冰缘位置的反演精度进行了评估, 认为两种算法在海冰成长季节(3月份—10月份)可以准确反演冰缘, 而在融化季节(11月份—2月份)海冰变湿令两种算法和真实值相关性降低。Beitsch等(2012)通过对比2006年—2009年南极海冰船测数据与基于AMSRE传感器的ASI、

BT和NT2等3种产品,认为BT算法与ASI算法反演相对较好,而NT2算法在比较中表现出较大的偏差。此后,Beitsch等(2015)继续完成了大范围,多种类的数据比较,他们整合了多年船测数据,以南极洲周围获得的超过21600个船舶SIC观测值为参考,对来自1991年—2009年的ASI、BST、OSI和NT算法的SSM/I-SSMIS数据,以及2002年—2010年ASI、BT和NT2算法的AMSR-E数据分别评估,结果显示,BT算法在比较中呈现出相对较高的相关性、最小的RMSE(Root Mean Square Error)和非常低的负偏差。对于小范围区域比较研究尚较少,赵杰臣等(2017)以2012年中国第南极科考赴罗斯海区域获得的OBS SIC数据为基础,对Bremen/ASI与NSIDC/NT产品进行评价,认为Bremen/ASI产品在该区域的精度更高。

通过以上历史对比可以看出,目前针对SIC评估一般使用航测数据,且不同时空航测对比结果存在差异,在北极一般认为ASI算法模拟结果更好,Beitsch的研究则证明BT算法更适用于环南极区域。但目前针对于南极小范围区域的PM SIC对比还较少,且由于遥感分辨率等限制,小区域的反演准确度更值得商榷。南极附近可划分为威德尔海、印度洋、太平洋、罗斯海和别林斯高晋/阿蒙森海五个海冰区(Gloersen等,1992),各海区海冰也受到不同气候特性的影响呈现出不同的特性(Ozsoy-Cicek等,2011)。Beitsch等人在环南极比较中提及了分区进行比较的设想,认为具有不同特性的海域有助于理解不同的算法在哪些方面具有优势或局限性(Beitsch等,2012)。而作为南极第一、二大冰架,同时是海冰与南极底层水重要产地的威德尔海、罗斯海,已有若干针对两区域PM产品精度的评估研究:在威德尔海,Burns(1993)对SSM/I传感器的4种算法适用性进行了评价,结果显示各点的SIC差异高达45%,判断这种差异与海区迥异的冰类型和表面条件相关;Knuth等(2007)针对夏季罗斯海大面积残余海冰的特点,对基于SSM/I传感器应用BT和NT获得PM SIC进行比较,认为PM SIC在夏季只能解释不到50%的真实数据,而在秋季转冷时有所改善;针对罗斯冰架冰间湖区域,Kern等(2007)将冰间湖信号仿真法PSSM(Polynya Signature Simulation Method)应用数据产品与Bremen/ASI进行对比,结果表明ASI算法SIC所示与PSSM的冰间湖区域分布相似。

普里兹湾位于印度洋扇区,是南极第三大海湾,该区形成的达恩利角底层水约占南极底层水绕极总量的6%—13%(Ohshima等,2013),是当前南极海洋研究的重点区域。SIC是海冰—海洋—大气—生态多圈层耦合系统的关键变量,也是计算冰间湖产冰量、影响区域生物初级生产力等必不可少的重要参数。准确描述普里兹湾SIC的变化,对于该区域物理海洋、生态化学等方面的研究都至关重要。此外,普里兹湾涵盖许多种类的表面类型,包括冰原、冰架、固定冰、浮冰、冰沼和开阔水域,这使该地区SIC成为验证微波遥感产品的理想实验场所(Shi等,2021)。且由于其科研意义,中国在内的世界多国都在普里兹湾定期开展科考活动,SIC测量准确性对航行安全保障也具有十分重要的现实意义。但与威德尔海、罗斯海不同,对普里兹湾PM SIC产品精度的评估研究目前尚十分匮乏,迫切需要开展研究。

本文在整合现有数据后,发现普里兹湾拥有较为丰富的历史船测数据(图1)。故本文以普里兹湾海域为例,聚焦于探究各PM SIC产品在较小范围区域的适用性。综合点对点、共定位两种比较方法,结合OBS SIC数据,对不同时间尺度的多源PM SIC产品进行了详细的评估。在减小两种数据集时空误差的同时保留了科考船的航行信息以供参考;发现冰情、季节、算法的差异均会对PM SIC产品的精确性产生不可忽视的影响。因此,本研究期待能为后续算法精确度提升与选择提供支持和参考。

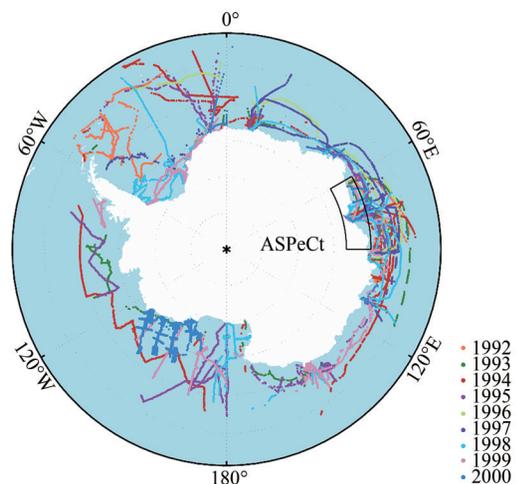


图1 环南极 ASPeCt数据集船测点分布(黑框标记为普里兹湾区域,66°S—70°S,60°E—90°E)

Fig. 1 Distribution of ship-based observation points of ASPeCt data set around Antarctica (black box marked as Prydz Bay area, 66°S—70°S, 60°E—90°E)

2 数据介绍

将2012年—2014年中国南极科考在普里兹湾区域范围内的SIC数据与1992年—2000年ASPeCt船测数据作为真实数据,与多种PM SIC算法产品开展比较,定量评价这些数据在普里兹湾区域的准确性。

2.1 船基观测数据

本文引用来自国家极地科学数据中心的中国南极科考CHINARE (Chinese Antarctic Research Expedition) 数据与ASPeCt的船基观测数据,前

者观测时间在2012年后,作为真实值评估包括AMSR2遥感产品在内的8种PM SIC数据集;ASPeCt数据档案时间覆盖范围在1980年—2005年间,作为后续长时间序列数据产品在普里兹湾区域适用性的依据。比较期间的航行轨迹如图2所示,其中图2(a)表示2012年—2014年中国第29、30次南极考察普里兹湾区域航行轨迹,图2(b)图表示2020年—2021年中国第37次南极科考普里兹湾区域船测轨迹,两张图中不同航线颜色用于区分航行日期;图2(c)表示1992年—2000年间ASPeCt数据集记录的普里兹湾区域内航行轨迹,此图中不同颜色用于区分考察年份。

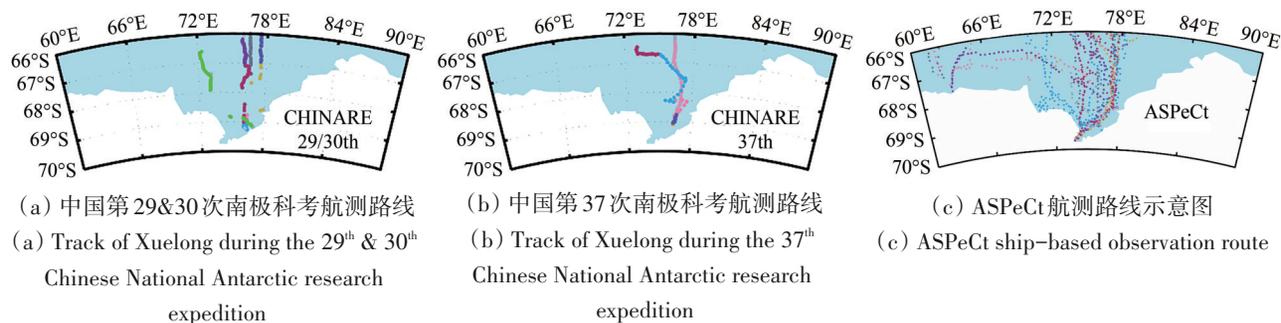


图2 中国第29&30、37次南极科考航测路线及ASPeCt航测路线示意

Fig. 2 Track of Xuelong during the 29th & 30th, 37th Chinese National Antarctic research expedition and ASPeCt ship-based observation route

两种船测数据集均以ASPeCt协议(Worby等, 1999)为记录数据的标准,观测期间观测员以科考船为中心,每半小时对周边海域观测,按协议标准记录各海冰要素,包括海冰总密集度、冰厚、不同冰层类型和雪盖的特征。该标准目前已经成为SIC船基目测的量化方法,亦有许多评估结果证实ASPeCt SIC观测的平均精度优于10%(Weissling等, 2009; Knuth和Ackley, 2006)。

2.1.1 CHINARE

用于8种数据对比的船基观测数据源于中国分别在2012年—2014年、2020年—2021年期间开展的第29、30,第37次南极科考,本文针对普里兹湾区域,对雪龙号船测数据(以下简称CHINARE OBS SIC)进行筛选,共获得为期17天,总计355个有效数据。

2.1.2 ASPeCt data

ASPeCt是一个多学科的南极海冰区域研究专家小组,隶属于南极研究科学委员会SCAR (Scientific

Committee on Antarctic Research) 物理科学计划,它成立于1996年,旨在补充和促进其他国际南极科学项目以及国家南极项目中现有和拟议的研究项目。为探索适用于普里兹湾区域长时间序列研究的产品,选取与PM SIC长期数据产品时间重合的1992年—2000年时间段ASPeCt船测数据,剔除每天观测样本少于5个的日期,共计64日,605个OBS数据点作为真实值(以下简称ASPeCt OBS SIC),用于4种长期数据产品的20世纪历史数据比对。

2.2 PM SIC 产品

本文选用了国际上8种PM SIC数据集,涵盖多种传感器与算法,包括有基于AMSR2传感器的2种算法数据与基于SSMIS的6种产品。所有产品都为日平均数据;最高空间分辨率来自Bremen大学提供的Bremen/ASI,为6.25 km,其次是EUMETSAT的OSI401算法产品(EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, 2011)与Hamburg大学提供的Hamburg/ASI,其余数据产品均为

25 km分辨率。需要标明的是, EUMETSAT/OSI430 产品为续接 EUMETSAT/OSI450 产品 2015 年 12 月

后的补充数据, 为方便表示, 在此将两种数据产品名称统一为 EUMETSAT/OSI450。

表1 8种PM遥感SIC数据资料
Table 1 Eight kinds of PM SIC data

| 序号 | 数据集名称 | 发布机构 | 传感器 | 算法 | 产品分辨率/km | 时间范围 |
|----|-----------------|------------|-------|---------|----------|----------|
| 1 | Bremen/ASI | Bremen | AMSR2 | ASI | 6.25 | 2012-07— |
| 2 | NSIDC/NT2 | NSIDC | AMSR2 | NT2 | 25 | 2012-07— |
| 3 | EUMETSAT/OSI401 | EUMETSAT | SSMIS | OSHD | 10 | 2015-03— |
| 4 | EUMETSAT/OSI450 | EUMETSAT | SSMIS | Bow&BeI | 25 | 1979-01— |
| 5 | Hamburg/ASI | Hamburg | SSMIS | ASI | 12.5 | 1991-12— |
| 6 | NSIDC/BT | NSIDC | SSMIS | BT | 25 | 1978-10— |
| 7 | NSIDC/NT | NSIDC | SSMIS | NT | 25 | 1978-10— |
| 8 | NSIDC/CDR | NSIDC/NOAA | SSMIS | CDR | 25 | 1978-10— |

3 数据处理

在参考了国际上主流的SIC产品比较方法后(赵杰臣等, 2014; Beitsch等, 2015; Xiu等, 2020), 本文采用了点对点 and 共定位比较方法(Colocation and Comparison Method)两种。两种方法的简介和选择理由如下:

3.1 点对点对比

以船测经纬度为依据, 将OBS SIC各时间点数据与同日地理位置最近PM SIC网格数据进行匹配, 该方法最大程度上保留了科考船的航行信息, 也为研究各数据集在不同密集度情况下的表现提供参考。

3.2 共定位比较法(Beitsch等, 2015)

Beitsch等人假设船基目测范围为1 km, 可通航条件下, 科考船的平均速度约为7 km/h, 如此船一日可行进相当于12—16个12.5 km分辨率的网格单元, 这一前提引出了可能影响OBS SIC与PM SIC数据对比的两个关键问题:

首先在单个时间点观测时, 观测点近似看作是椭圆形, 该目测范围相对于PM SIC经纬度网格尺寸差异太大, 所以当以OBS SIC为真实数据开展单个时间点对比时, 要求被对比的PM SIC数据集提供距离该时间点地理位置最近的网格数据; 其次, PM SIC产品均为日平均数据资料, 如果以此与同天内不同时间点OBS SIC数据进行对比, 不能保证去除海冰漂移等因素带来的误差, 故当开展日数据对比时, 需要将OBS SIC统一日平均处理。

综上所述, 共定位比较法即对OBS SIC, PM SIC数据均进行每日沿轨平均, 以降低两者时空尺

度不等带来的误差。

OBS SIC与PM SIC的共定位处理具体方法如下:

- (1) 转换PM SIC为笛卡尔网格数据;
- (2) 将OBS SIC与PM SIC格点数据进行配对。通过计算第N天最后一个船位与周围格点中心的距离, 选取与该OBS SIC位置最相近的PM SIC格点数据进行比较;
- (3) 计算一天所有观测值的平均与该日沿船行轨道配对的所有PM SIC平均, 保证单个时间点处理后的两种数据集均提供一个值, 如果其中一个数据集缺少值, 则不使用特定时间点进行比较;
- (4) 使用处理后两个数据集提供的数值开展比较。

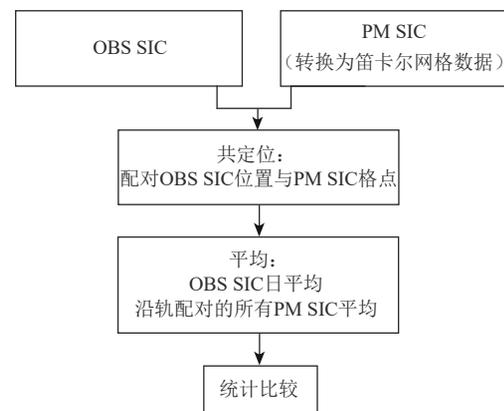


图3 共定位方法流程示意(参考Beitsch等, 2015)

Fig. 3 Flow chart of co-location method
(Refer to Beitsch et al., 2015)

3.3 评价指标

SIC比较时, 采用相关系数CC, 平均偏差Bias和均方根差RMSE作为产品评价指标, 各指标公式如下:

$$CC(P,B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i - \mu_P}{\sigma_P} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (1)$$

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - B_i)}{N} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - B_i)^2}{N}} \quad (3)$$

式中, P 为卫星 PM SIC 数据, B 为 OBS SIC 数据, i 为网格点编号, N 为地理匹配网格点总数, 等同于船测数据总量; μ_P 和 μ_B 分别是 PM SIC 的均值和标准差, μ_B 和 σ_B 是 OBS SIC 的均值和标准差。

4 结果分析

4.1 PM SIC 在南极普里兹湾的基本表现

图 4, 5 分别为 8 种 PM SIC 产品反演普里兹湾月平均 SIC 的多年平均分布情况以及滑动平均时间序列。从图 4 可以看出, 几种 PM SIC 产品除数值大小与分辨率存在差异外, 对应 SIC 的空间分布较

为一致, 高 SIC 冰区主要分布于艾默里冰架前端 (73°E—77°E), 西冰架以北 (82°E—84°E), 达利恩角以东 (72°E, 68°S) 以及四女士浅滩附近 (78°E, 67°S), 而在四女士浅滩以南, 达利恩角以北沿艾默里冰架边缘出现大面积低 SIC 区域, 上述反演 SIC 分布均与前人研究结果相一致: 位于达利恩角以东与四女士浅滩以北的冰舌, 被认为是由地形因素影响下的海冰堆积产生 (解思梅等, 2003a; Shi 等, 2002; 乐肯堂和史久新, 1997), 冰舌间产生低 SIC 区域的主要原因可能是从湾口深水道侵入湾内的暖水 (蒲书箴等, 2002), 而达利恩角沿艾默里冰架的低 SIC 分布则受到该区域强烈南极下降风影响 (郑少军, 2011)。在 8 种数据中, NSIDC/NT2 反演 SIC 数值明显偏高, NSIDC/NT 产品空间分布数值低于其他 7 种数据结果, 图 4 的时间序列也印证了这一结论, NSIDC/NT2 产品 SIC 于 2014 年后的数值区间为 72%—92%, 高出其余 7 种数据约 10%—20%, NSIDC/NT 整体最小, 所示 2014 年后滑动平均处理所得数据范围为 54%—77%。

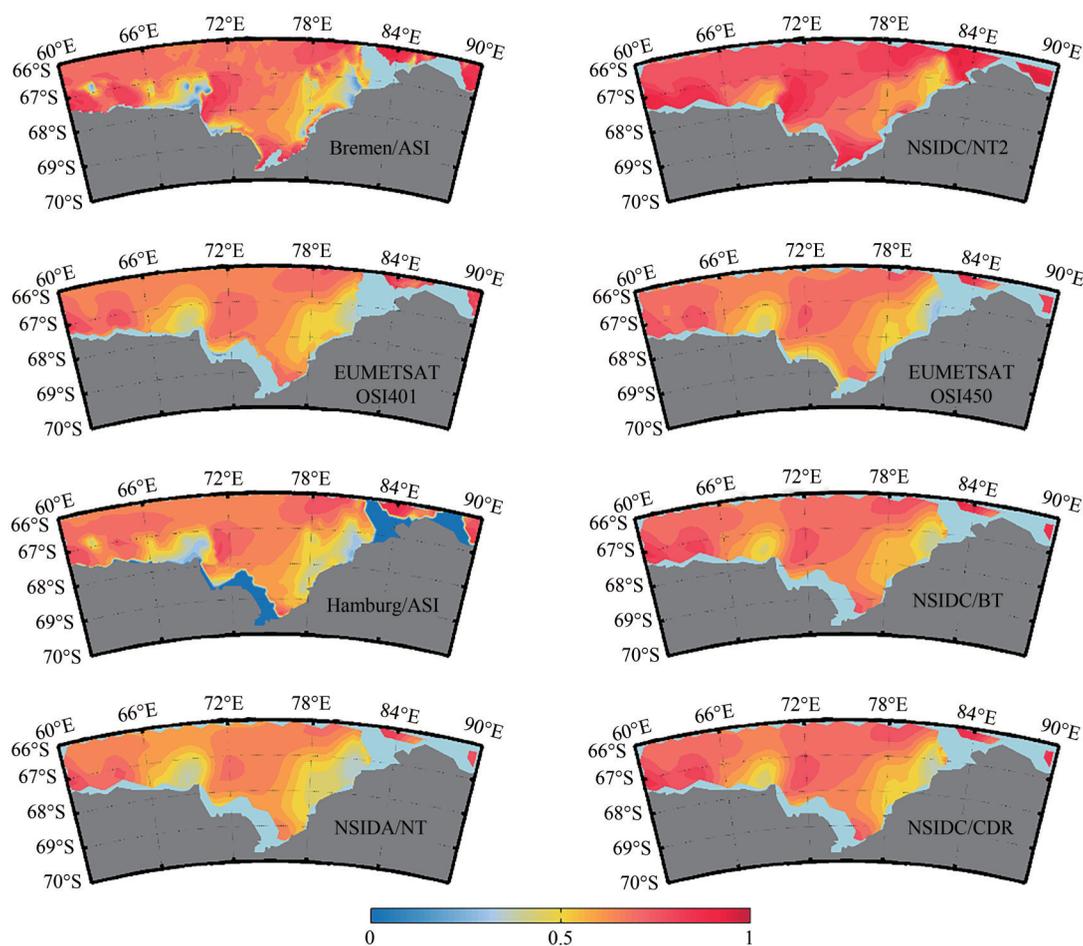


图 4 8 种 PM SIC 数据气候态平均 (2012-12—2021-12) 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of climate state average (2012-12—2021-12) of eight kinds of PM SIC data

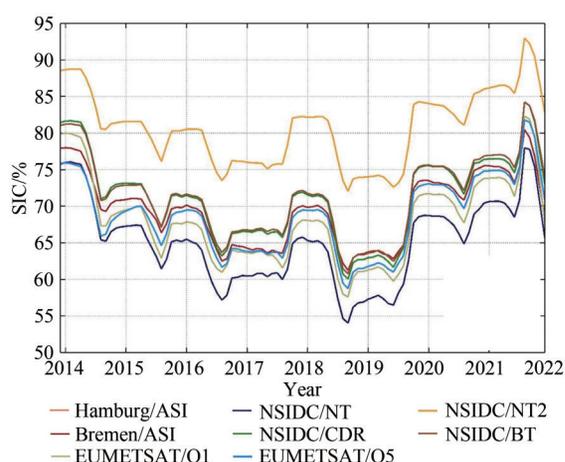


图5 8种PM SIC数据滑动平均(扣除季节变化)时间序列
Fig. 5 Moving average (excluding seasonal changes) time series of eight kinds of PM SIC data

4.2 PM SIC与CHINARE OBS SIC对比

为探讨包括以AMSR2卫星基础的2种数据产品在内的总计8种PM SIC数据在普里兹湾区域的适用性, 本文采用中国3次南极科考途径普里兹湾的走航船测结果作为真实数据开展评估, 所选取日期及其基础信息如表2所示。

表2 3次南极科考途径普利兹湾日期、经纬度范围及每日观测数据点数

Table 2 The date, longitude, latitude range, and daily observation data points of the 29th, 30th, and 37th Chinese National Antarctic research expedition passes through the Prydz Bay

| 序号 | 日期 | 纬度范围/°S | 经度范围/°E | 数据点 |
|----|------------|-------------|-------------|-----|
| 1 | 2012-11-27 | 61.63—63.52 | 87.57—83.66 | 18 |
| 2 | 2012-11-28 | 63.68—65.78 | 83.50—76.71 | 47 |
| 3 | 2012-11-29 | 65.86—69.04 | 76.65—76.15 | 19 |
| 4 | 2012-12-17 | 69.01—66.86 | 76.32—77.51 | 15 |
| 5 | 2012-12-18 | 66.76—64.50 | 77.55—80.43 | 40 |
| 6 | 2013-02-03 | 68.77—69.26 | 76.38—76.42 | 7 |
| 7 | 2013-03-08 | 69.22—68.32 | 76.27—76.13 | 11 |
| 8 | 2013-12-19 | 67.84—66.87 | 75.91—76.06 | 32 |
| 9 | 201-12-20 | 66.84—65.36 | 76.12—76.24 | 33 |
| 10 | 2014-02-28 | 67.34—67.91 | 73.13—72.99 | 12 |
| 11 | 2014-03-01 | 67.87—66.31 | 73.01—72.13 | 35 |
| 12 | 2020-12-19 | 66.27—68.99 | 72.27—77.00 | 39 |
| 13 | 2020-12-29 | 69.00—69.08 | 76.28—76.43 | 7 |
| 14 | 2020-12-30 | 68.30—68.08 | 76.47—77.53 | 9 |
| 15 | 2020-12-31 | 68.17—68.32 | 76.37—77.12 | 7 |
| 16 | 2021-01-01 | 66.68—68.07 | 74.08—77.35 | 25 |
| 17 | 2021-01-02 | 66.00—66.70 | 72.90—73.93 | 19 |

4.2.1 点对点对比

以所有CHINAREOBS SIC点为真实值对遥感产品进行定量分析, 得到结果如表3所示。从全部数据点的对比来看, 所有PM SIC产品与OBS SIC的相关系数均在0.65及以上, 均方根误差平均为26%, 偏差均在10.5%以下, 整体上均有较好的相关性。

表3 8种PM SIC数据与CHINARE OBS SIC的相关系数(CC)、均方根差(RMSE)及偏差(Bias)

Table 3 CC, RMSE, and Bias between PM SIC and CHINARE OBS SIC

| 类别 | 数据集名称 | CC | RMSE/% | Bias/% |
|-----|-----------------|------|--------|--------|
| 点对点 | Bremen/ASI | 0.75 | 27.14 | -3.21 |
| | NSIDC/NT2 | 0.77 | 24.14 | +4.12 |
| | EUMETSAT/OSI401 | 0.69 | 27.30 | -9.79 |
| | EUMETSAT/OSI450 | 0.67 | 26.28 | -7.40 |
| | Hamburg/ASI | 0.71 | 26.58 | -6.69 |
| | NSIDC/BT | 0.71 | 24.37 | -3.01 |
| | NSIDC/NT | 0.70 | 26.77 | -10.43 |
| | NSIDC/CDR | 0.72 | 25.10 | -4.39 |

该表就CC而言, 以AMSR2卫星传感器为基础的两种数据产品(Bremen/ASI与NSIDC/NT2)均达到了0.75以上, 且同时具有全部数据中的最小偏差, 这一结果可能与这两种算法选取84 GHz高频通道得到的高分辨率相关(苏洁等, 2013), 但Bremen/ASI数据较高的RMSE值说明该算法产品在普里兹湾区域拟合精度存在较高的不稳定性; 对于RMSE统计值, 低于平均值26%, 即相对更稳定的3种数据分别是NSIDC/NT2, NSIDC/BT与NSIDC/CDR; 从Bias统计值判断, NSIDC/NT数据在8种数据中与真实数据偏差最大, 两个OSI数据集也有相对较大的偏差值。综合所有指标来看, 3种指标下相对表现较好的数据为NSIDC/NT2和SSMIS/BT数据, 均满足 $R>0.7$, $RMSE<25%$, $|Bias|<5%$ 。

为更深入地分析OBS SIC与8种PM SIC的偏差, 也为探明Bremen/ASI与NSIDC/NT、两种OSI算法产品在该区域模拟指标异常的原因, 本文根据1970年WMO对SIC与冰况之间关系的描述, 并参考Shibata等(2013)对海冰覆盖与船舶航行困难之间关系的定义, 将OBS SIC数据分为低($OBS SIC \leq 30%$), 中($30% < OBS SIC \leq 70%$), 高($OBS SIC > 70%$) 3种密集度情况, 对应于易于导航的轻度(mild), 正常(normal)以及难以导航的严重

冰况 (severe); 图6所示即为3种冰况下8种PM SIC与CHINARE OBS SIC间的RMSE与Bias (CHINARE

OBS SIC PM SIC) 结果。

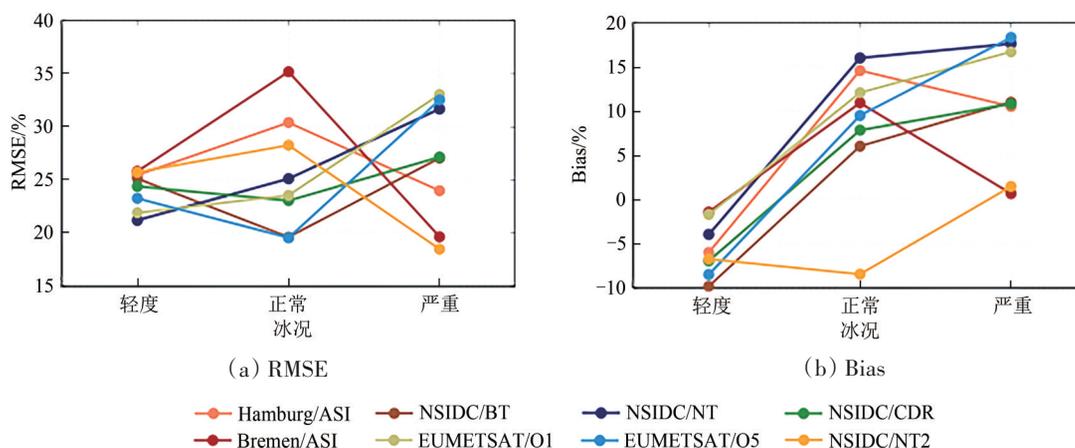


图6 3种SIC情况下8种PM SIC与CHINARE OBS SIC之间的RMSE和Bias统计结果

Fig. 6 RMSE and Bias between PM SIC and CHINARE OBS SIC under three kinds of SIC conditions

图6 (a) 所示, 在轻度冰况下, 所有PM SIC产品的RMSE最为相近, 范围在21.2% (NSIDC/NT) 到25.8% (Bremen/ASI) 之间; 正常冰况下, PM SIC产品间的RMSE差值最大, 范围为19.57% (EUMETSAT/O5) 至35.20% (Bremen/ASI); 最后, 在严重冰况条件下, RMSE范围在18.49% (NSIDC/NT2) 至33.0663% (EUMETSAT/O1), 此时NSIDC/NT2产品对应RMSE值达到各PM SIC产品所有情况下的最小值。图6中表明, Bremen/ASI, Hamburg/ASI与NSIDC/NT2等3种PM SIC产品随SIC增加引起的RMSE数值变化存在相似的趋势, 正常冰况反演精确度不稳定, 而在严重冰况条件下的反演具有优势, 这一特性反映了AMSRE传感器与ASI算法在过渡冰区反演的缺陷; 而NSIDC/CDR, EUMETSAT/OSI450与NSIDC/BT的RMSE值与前3种产品趋势相反。图6 (b) 表明, 在轻度冰况条件下, 所有PM SIC与OBS SIC的偏差均为正值, 即所有PM SIC产品都高估了轻度冰况真实值; 正常冰况下, 除NSIDC/NT2 (8.45%) 外, 各PM SIC产品对应偏差分布在-16.09% (NSIDC/NT) 至-6.04% (NSIDC/BT) 范围内, 即除了NSIDC/NT2, 其余产品均在正常冰况下低估真实值; 对于严重冰况, Bremen/ASI与NSIDC/NT2反演结果与真实值Bias均趋近于0, 其余产品Bias相对更大, 此外, 与图6 (a) 相同, Hamburg/ASI与Bremen/ASI产品Bias随SIC增加也呈现出相似的变化趋势。

综上所述, 在全数据表格中拟合结果较好的

NSIDC/NT2数据在所有情况下的两个评估标准都稳定在较低的数值; 具有最高分辨率的Bremen/ASI数据虽然同样有较高的CC, 但其在正常冰况下的反演精度较差; NSIDC/BT, NSIDC/CDR长期数据产品反演结果虽然与真实值有较强相关性, 但两者均在低密集度区域拟合不佳, RMSE值与Bias值均较高, 如果需要弥补NSIDC/NT2数据在时间长度上的缺陷, 仍需对基于SSMIS传感器的算法产品展开进一步对比。

4.2.2 共定位方法对比及异常日期的个例分析

为减小时空误差, 对两种数据分别进行共定位处理, 所得PM SIC与CHINARE OBS SIC偏差时间序列如图7所示, 两者对比结果总结在表4中。

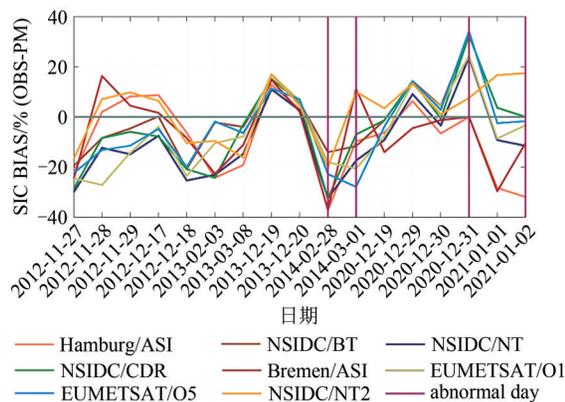


图7 8种PM SIC各产品反演的普里兹湾SIC与CHINARE OBS SIC差值的长期变化

Fig. 7 Long-term variation of SIC difference between PM SIC and CHINARE OBS SIC in Prydz Bay

表4 共定位处理后CHINARE OBS SIC与8种PM SIC数据的相关系数(CC)、均方根差(RMSE)及偏差(Bias)

Table 4 CC, RMSE, and Bias between CHINARE OBS SIC and PM SIC after Co-location processing

| 类别 | 数据集名称 | CC | RMSE/% | Bias/% |
|-----|-----------------|------|--------|--------|
| 共定位 | Bremen/ASI | 0.89 | 16.34 | -6.68 |
| | NSIDC/NT2 | 0.93 | 12.30 | +2.43 |
| | EUMETSAT/OSI401 | 0.84 | 15.92 | -6.16 |
| | EUMETSAT/OSI450 | 0.80 | 15.64 | -4.07 |
| | Hamburg/ASI | 0.88 | 17.58 | -8.91 |
| | NSIDC/BT | 0.86 | 12.87 | -0.63 |
| | NSIDC/NT | 0.85 | 17.45 | -9.69 |
| | NSIDC/CDR | 0.83 | 16.56 | -4.07 |

图7所示为PM SIC与CHINARE OBS SIC偏差的17日时间序列,可以发现2012年—2021年观测日期普里兹湾区域的PM SIC与CHINARE OBS SIC的差值较为均衡地分布在 $\pm 40\%$ 之间,除2014年2月28日、2014年3月1日、2020年12月31日、2021年1月2日外各PM SIC产品之间的偏差差异均小于30%。

表4各统计值表明,共定位处理后的数据有效地降低了误差,与点对点比较相比,CC均提升了0.1以上,其范围在0.80(EUMETSAT/OSI450)与0.93(NSIDC/NT2)间,RMSE值减少了10%左右,区间为12.30%(NSIDC/NT2)至17.58%(Hamburg/ASI);共定位比较所得Bias较前文点对点比较改变较小,且除NSIDC/NT2产品外各PM SIC产品Bias均为负值,即在比较范围内,多数PM SIC产品反演结果整体低估真实数据。

在共定位比较中,NSIDC/NT2产品具有最优越的CC与RMSE值,分别为0.93与12.30%;|Bias|仅次于NSIDC/BT数据,即认为该产品在普里兹湾区域反演结果与真实值具有极强相关性、精确反演的稳定性。而在所有基于SSMIS卫星传感器数据的算法产品中,综合3个评估数值,BT算法有最好的适用性,这也与Beitsch所得的全南极范围对比结果一致。

本文于普里兹湾区域选取共定位方法的一个重要理由是有助于更精确地确认数据的异常日期(图7,异常日对应红线标注日期)。经对比,除2012年11月28日异常点处于普里兹湾区域以外,本文不做详细分析,剩余异常点可分成两类:(1)相对OBS SIC偏差超过30%的日期,2014年2月28日与2020-12-31;(2)各PM SIC数据间反

演差距大于30%的日期2014年3月1日与2021年1月2日。因此选以上4个异常日期进行航测路线绘制与沿航线SIC数据对比。

首先,对第一类异常点,即各PM SIC数据普遍出现较大偏差的日期进行针对性研究,以探究PM算法反演普遍存在的缺陷。由图8(a)(c)航线图中可看出,2014年2月28日与2020年12月31日多数航测点均分布于 75°E 海冰边缘处,其中2014年2月28日科考船自北向南由 73°E 高密度冰区驶入薄冰区,再回转向北驶入严重冰况区域,而各PM SIC数据对较薄冰区($\text{SIC} < 50\%$)内SIC变化并不敏感,考虑到此时为海冰融化季节,认为PM算法产品将湿海冰认为开阔水域的倾向是这一误差产生的主要原因,且除NSIDC/NT2、Bremen/ASI两种基于高频通道传感器的数据产品外,其余PM SIC产品不能反映沿途小于40%的SIC波动情况,说明这一结果可能也受到仪器分辨率的影响;2020年12月31日航测点沿 68°S 纬向分布于 75°E — 77°E 之间,该日沿线CHINARE OBS SIC均为0成,仅有Bremen/ASI与Hamburg/ASI反演结果与真实值相吻合,其余各PM SIC产品均高估CHINARE OBS SIC,但此二数据同样在2014年2月28日将低密集度区域海冰判别为0成的开阔水域,结合ASI“对融池具有较低的辨识度,会将融池判别为开阔水”这一算法评价(王剑等,2020),认为ASI算法在冰缘的运用存在争议。

其次,对第二类异常点,即对PM SIC产品反演结果差距较大的日期展开分析,研究导致PM SIC数据间差异的原因。由图8(e)(g)可看出,两日科考船航行均由南向北沿 73°E 经向驶离冰区,2014年3月1日各数据集SIC时间序列显示,海冰自高密度向低密度的过程是各PM SIC产品反演产生差异的主要区域,在第24个时间点前,真实SIC均在6成及以上,NSIDC/CDR, Bremen/ASI, NSIDC/NT2反演结果与真实数据相近,而在24—30时间点间,船行至薄冰区,NSIDC/CDR, NSIDC/BT, EUMETSAT/OSI401, EUMETSAT/OSI450反演精度更佳,整体上CDR与BT算法反演沿线SIC更符合真实值,各产品在不同SIC区间的反演精度差异导致了高偏差;2021年1月2日SIC均在5成左右,所有PM SIC产品均错误地高估了第7个时刻点的SIC,且除Bremen/ASI产品外均未反映出第5个时刻点的SIC高值。

综上所述, PM SIC 与 OBS SIC 共定位比较大于 30% 异常偏差出现的区域均位于海冰冰缘区域, 且两个时刻均发生在海冰融化季节, 这与 Worby 等 (2008) 得出的 11—2 月份南极海冰融化季节冰沿区域 PM SIC 算法反演误差较大这一结论相仿; 除此之外, 在该区域 SIC 时间序列中, ASI 算法倾向于低估真实值, 认为这受到算法本身特

性的影响, 即易将融池区域定义成开阔水域; 而 PM SIC 产品之间较大偏差的发生主要来源于正常冰况以及各产品对不同程度 SIC 反演精度的差异, 结果表明 Bremen/ASI, NSIDC/NT2 在严重冰况下的反演精度更高, EUMETSAT/OSI401, EUMETSAT/OSI450 则更适用于薄冰区反演。

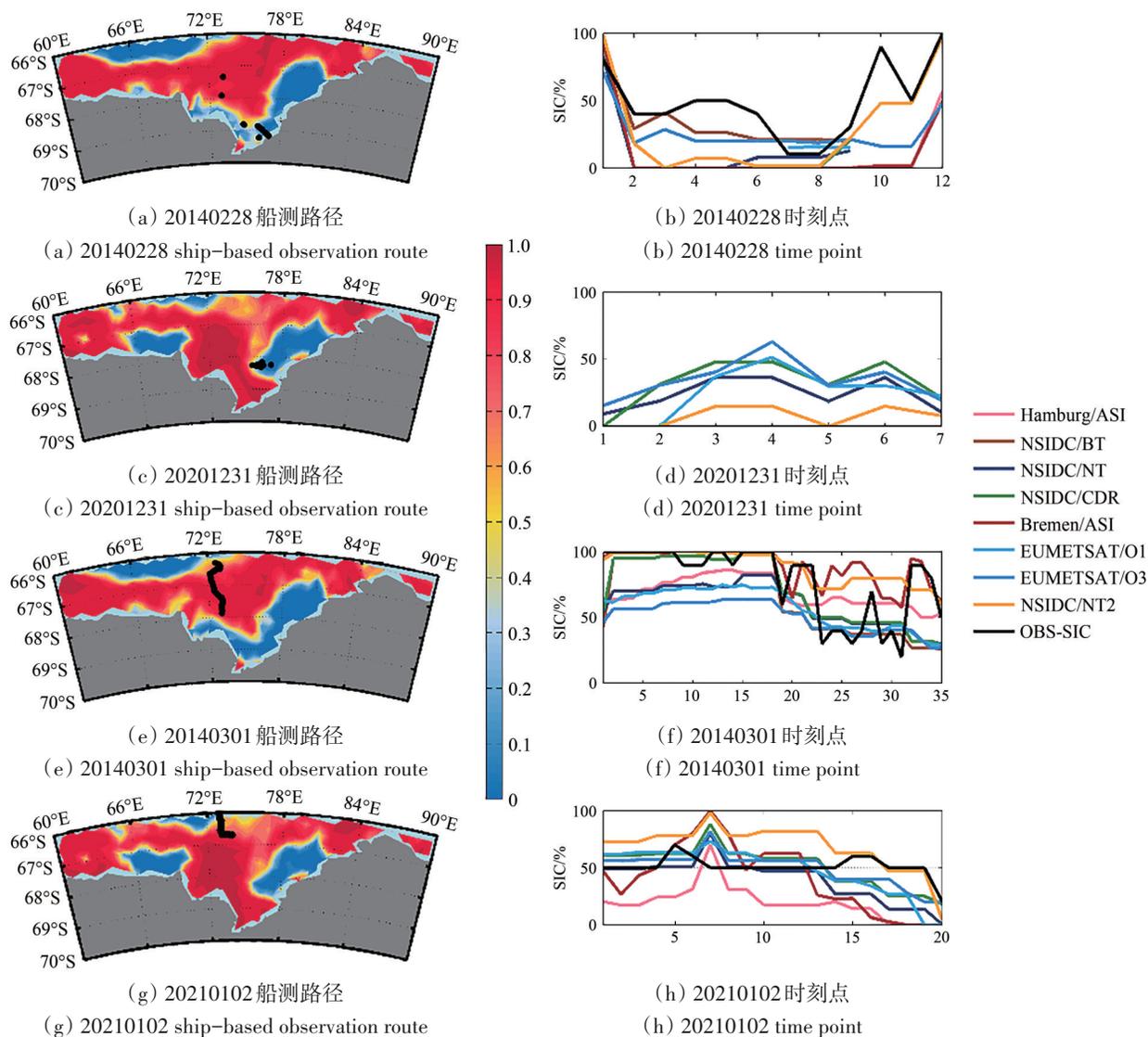


图8 8种PM SIC与CHINARE OBS SIC异常Bias出现日期船测路线((a)、(c)、(e)、(g)中黑色路线), 填色为当日NSIDC/NT2产品反演的SIC, 与沿航线各数据时间序列((b)、(d)、(f)、(h))示意, 横轴表示第 n 个观测时间点

Fig. 8 Ship-based observation route of the occurrence date of the abnormal Bias between PM SIC and CHINARE OBS SIC (black route in (a), (c), (e), and (g)). The color shows the SIC inverted by NSIDC / NT2 products on that day, which is schematic with the data time series along the route ((b), (d), (f), and (h)). The horizontal axis represents the number of observation time point

4.3 PM SIC 长期变化与 ASPeCt OBS SIC 的对比

虽然在上一节中 NSIDC/NT2 从对比结果上表现出了在普里兹湾区域极高的适配性, 但此产品对应的传感器 AMSR2 在 2012 年 7 月前并未启动观

测任务, 同时也考虑到上述 CHINARE 船测产品长度较短, 不适于评估 PM SIC 长期变化的准确性。为补充选取适合的历史数据, 该节使用 ASPeCt OBS SIC 与包含实测对应时间段, 且在上轮比较中统计

指标较好的4种PM SIC (Hamburg/ASI, NSIDC/BT, NSIDC/NT, NSIDC/CDR) 展开对比。

4.3.1 点对点对比

以1992年—2000年所有ASPeCt OBS SIC点为真实值对4种长期数据产品展开定量分析, 结果如表5所示。

表5 与ASPeCt OBS SIC相比较下的4种PM SIC数据的相关系数(CC)、均方根差(RMSE)及偏差(Bias)

Table 5 CC, RMSE and Bias between PM SIC and ASPeCt OBS SIC

| 类别 | 数据集名称 | CC | RMSE/% | Bias/% |
|-----|-------------|-------|--------|---------|
| 点对点 | Hamburg/ASI | 0.657 | 28.163 | -11.367 |
| | NSIDC/BT | 0.665 | 25.276 | -7.973 |
| | NSIDC/NT | 0.625 | 31.690 | -19.316 |
| | NSIDC/CDR | 0.667 | 25.252 | -8.020 |

整体来看, CDR数据在CC与RMSE方面表现是该轮比较的所有PM SIC产品中最佳, 分别为

0.667与25.252%, |Bias|也相对很小, 其值为8.02%, 仅略大于7.97% (NSIDC/BT)。基于其结合BT与NT算法取相对小值的算法原理, 考虑到前人认为该算法在大面积新冰区拟合精度有限的评价(王剑等, 2020), 仍有必要对不同密集度区域情况展开进一步分析。

如图9(a)3种情况比较所得RMSE结果显示, 因NSIDC/CDR与NSIDC/BT产品相似的取值, 两者曲线存在重合现象。在轻度冰况区域, 4种PM SIC产品反演精确性最不稳定, 其范围在31.71% (NSIDC/NT)至38.80% (NSIDC/CDR); 正常冰况下, RMSE区间位于25.39% (NSIDC/CDR)与33.86% (Hamburg/ASI)之间, 在该区域, NSIDC/CDR、NSIDC/BT产品稳定性较轻度冰况大幅提升; 严重冰况下, 除NSIDC/NT外, 其余3种产品的RMSE值进一步降低, 数值范围在21.36% (NSIDC/CDR)与32.00% (NSIDC/NT)间。

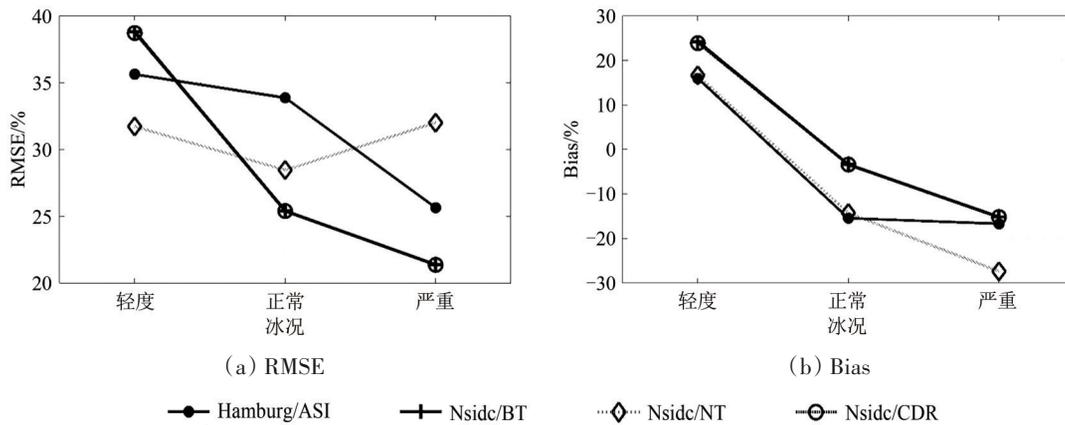


图9 3种SIC情况下4种PM SIC与ASPeCt OBS SIC之间的RMSE和Bias统计结果

Fig. 9 RMSE and Bias between PM SIC and ASPeCt OBS SIC under 3 kinds of SIC conditions

图9(b)表明, 4种PM SIC产品反演偏差随SIC变化趋势较为一致, 在轻度冰况条件下PM SIC普遍高估真实值; 正常冰况下各产品偏差相对较低, 为-15.45% (Hamburg/ASI)至-3.39% (NSIDC/BT, NSIDC/CDR); 而在严重冰况下, |Bias|再次大幅增加, 即PM SIC产品普遍高估ASPeCt OBS SIC, 数值范围为-27.36% (NSIDC/NT)至-15.18% (NSIDC/BT)。

CDR算法在各密集度区间的数值和BT算法相近, 原因在于前者在研究日期内算法所选取的数值多为BT算法产品数据, 正常冰况区间两者的数值相同, 在其他情况下CDR结果要优于BT, 综合

来看, 四种数据对轻度冰况区域的拟合不稳定性依然严重, 其中CDR与BT的偏离程度最大, 倾向于高估真实值。

NT算法对普里兹湾区域拟合的|Bias|随密集度的提高而增大, 而在严重冰况区域出现了比较严重的低估真实值的现象, 可以认为其在严重冰况区域的高|Bias|是表5中其整体拟合效果不佳的主要原因。

4.3.2 共定位方法对比及异常日期的个例分析

为降低时空误差, 对两类数据做平均化处理, 所得结果如图9、表6所示。

表6 共定位处理后OBS SIC与4种PM SIC数据的相关系数(CC)、均方根差(RMSE)及偏差(Bias)

Table 6 CC, RMSE, and Bias between PM SIC and ASPeCt OBS SIC after Co-location processing

| 类别 | 数据集名称 | CC | RMSE/% | Bias/% |
|-----|-------------|------|--------|--------|
| 共定位 | Hamburg/ASI | 0.78 | 21.74 | -12.75 |
| | NSIDC/BT | 0.81 | 16.69 | -8.00 |
| | NSIDC/NT | 0.77 | 25.23 | -19.40 |
| | NSIDC/CDR | 0.81 | 16.72 | -8.06 |

从图10共计52天共定位处理后的PM SIC与ASPeCt OBS SIC偏差的时间序列图中,可以发现PM SIC整体小于ASPeCt OBS SIC,即4种PM SIC产品在选取日期内整体低估真实值。出现大幅正偏差的日期仅有1992年11月13日,1998年11月17日,1999年12月28日,1999年3月20日各产品均出现高于60%的大幅负偏差。

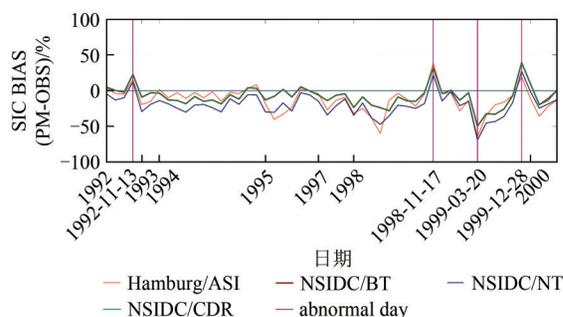


图10 4种PM SIC产品反演的普里兹湾SIC与ASPeCt OBS SIC差值的长期变化

Fig. 10 Long-term variation of SIC difference between PM SIC and ASPeCt OBS SIC in Prydz Bay

与CHINARE船测数据集相似,平均化后各数据集与ASPeCt船测数据的CC与RMSE均有较程度的优化,其中各产品的相关性系数均高于0.75,较点对点比较来看均提升了0.1以上;均方根差值均降低了5%—8%。但就ASPeCt与CHINARE船测数据集比较中,这两种统计值表明这四种PM SIC在CHINARE船测数据集时间段的反演结果更为精确。

在共定位比较对比中,BT算法与CDR算法的3类指标都优于其他产品,而两者的各指标数据都极为相近,这是CDR作为BT与NT的结合算法在此区域选择了更大比例NSIDC/BT产品数值的缘故,整体来看BT算法在该比较各指标值略微优于CDR算法。

现对出现异常偏差的日期航线情况与沿线各

产品SIC与真实值展开针对性分析。

图11为4种PM SIC数据于普里兹湾区域与ASPeCt OBS SIC产生偏差异常日期的船测航线图与该日各时刻数据比较时间序列,航线轨迹图中SIC空间分布来自于NSIDC/CDR产品。其中,图11(a)、(c)、(e)对应出现大幅正偏差的日期:1992年11月13日船行路线自77.4°E,66.8°S开始沿经向自南向北航行至77.4°E,66°S,共计7个观测点,前5个时间点,各PM SIC数据与ASPeCt OBS SIC的偏差小于10%,这也再次印证了各算法产品在高密集度冰区反演较好的特点,PM SIC在第6个时间点对无冰区域的高估是该日20%正偏差的来源;1998年11月17日船测路线为自北向南沿78°E经向航行,共计11个观测点,前九个时间点记录的ASPeCt OBS SIC均少于4成,但沿线SIC低密集度的情况没有在各PM SIC产品的反演中得到准确的体现,同时,第10个时间点中,除Hamburg/ASI表现出小幅增长趋势,其他算法产品都忽略了ASPeCt OBS SIC的骤增;1999年12月28日路线所示为船只靠近冰架的过程,沿线SIC自8成下降到0成,最后冰况稳定在5成,但NSIDC/CDR,NSIDC/NT,NSIDC/BT反演高估了真实值且错误估计了沿线SIC的变化趋势,Hamburg/ASI虽然反演出与真实值相近的趋势,但变化较真实值提前一个点位;图11(g)图对应1999年3月20日航测情况,处于融冰期末尾,该日出现最大负偏差,科考船只自64.65°E,-66.22°S向北驶出普里兹湾海区,沿线海冰均有7—9成,时间序列所示各PM SIC,特别是NSIDC机构的3种算法产品虽然很好地反映了沿线SIC在各时刻点的变化趋势,但均较大程度低估ASPeCt OBS SIC,反演SIC为0—5成。

综上所述,4种PM SIC产品在高密集度冰区的反演相对符合船测真实值与其沿线变化趋势,对ASPeCt OBS SIC低于8成的观测点拟合程度较差,同在严重冰况区域观测的日期1992年11月13日与1999年3月20日对比表明,11月较之3月准确性更高;受到算法与分辨率的种种限制,PM SIC不能够很好地反映出沿线ASPeCt OBS SIC的骤变情况。而在所示所有不同时间范围的时间序列中,NSIDC/NT在所有PM SIC产品中反演结果均为最小值,这也可能是其在低密集度区域反演精确程度较好而高密集度区域不佳的原因。

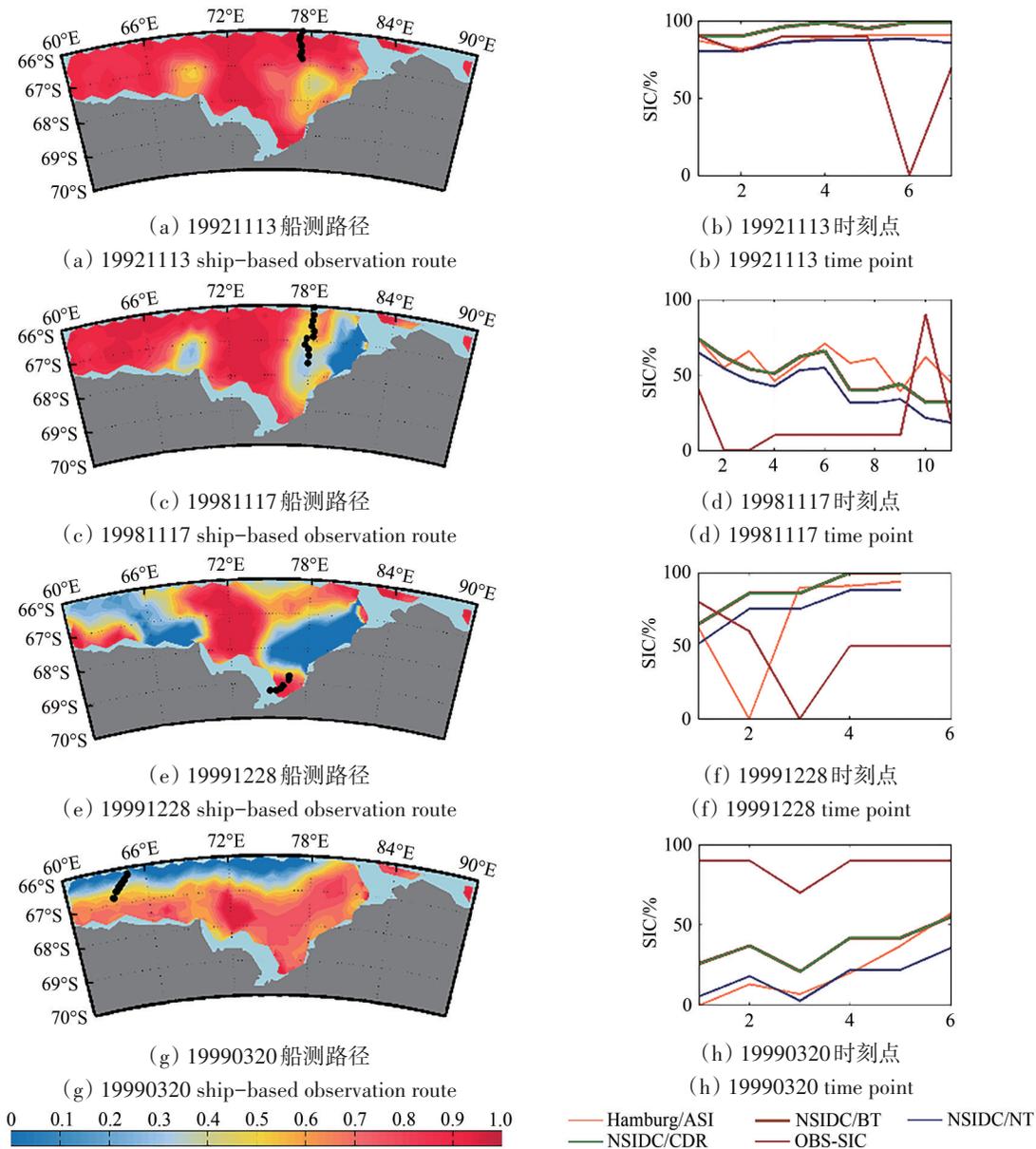


图 11 4 种 PM SIC 与 ASPeCt OBS SIC 异常 Bias 出现日期的船测路线((a)、(c)、(e)、(g)中黑色路线), 填色为当日 NSIDC/CDR 产品反演的 SIC, 与沿航线各数据时间序列((b)、(d)、(f)、(h))示意, 横轴表示第 n 个观测时间点

Fig. 11 Ship-based observation route of the occurrence date of the abnormal Bias between PM SIC and ASPeCt OBS SIC (black route in (a), (c), (e), and (g)). The color shows the SIC inverted by NSIDC/CDR products on that day, which is schematic with the data time series along the route ((b), (d), (f), and (h)). The horizontal axis represents the number of observation time point

4.3.3 结冰、融冰期 PM SIC 产品反演精度比较

为了进一步探明不同时间段反演较好的产品, 也为后续优化数据提供参考, 以南半球融冰期(11月—次年2月)、结冰期(3月—10月)为依据(Worby 和 Comiso, 2004)划分日平均数据开展对比。

融冰期总计172个数据点, 结冰期总计318个, 两者CC统计指标结果均通过P检验。从表7中能够发现, 4种数据产品均存在季节差异, 各数据集结冰期对应的|Bias|值均高于融冰期, 融冰期对应

CC值较之结冰期约高出0.2; 其中|Bias|最大变化幅度来自NT算法产品从6.20%到26.33%的增长, 其余产品的|Bias|浮动范围也在12%—17%, 这体现了4种PM SIC产品在普里兹湾区域结冰期反演的缺陷; 两季RMSE值差异较小, 均都处于20%以上。

CDR与BT算法的Bias、RMSE值在两季比较中均维持在最低值, 相关性指标CC在结冰期比较中低于其他两类产品, 综上所述, CDR与BT算法在低密集度区域、结冰期精度有限, 但从整体数

据与密集度程度划分数据来看, 在以 1992 年—2000 年以 ASPeCt 为真实值的各比较案例中都有最优的结果。

表 7 结冰、融冰期 4 种 PM SIC 与 ASPeCt OBS SIC 比较下的均方根差 (RMSE) 与偏差 (Bias)

Table 7 RMSE and Bias between PM SIC and OBS SIC during freezing and thawing periods

| 类别 | 数据集名称 | CC | RMSE/% | Bias/% |
|-----|-------------|------|--------|--------|
| 结冰期 | Hamburg/ASI | 0.43 | 26.24 | -15.60 |
| | NSIDC/BT | 0.38 | 23.29 | -14.14 |
| | NSIDC/NT | 0.42 | 33.01 | -26.33 |
| | NSIDC/CDR | 0.38 | 23.28 | -14.14 |
| 融冰期 | Hamburg/ASI | 0.61 | 31.43 | -3.46 |
| | NSIDC/BT | 0.65 | 28.63 | +3.57 |
| | NSIDC/NT | 0.62 | 29.06 | -6.20 |
| | NSIDC/CDR | 0.65 | 28.57 | +3.43 |

5 结论

综上所述, 8 种产品 2012 年 12 月至 2021 年 12 月多年平均空间分布图与滑动平均时间序列结果均体现了各 PM SIC 数据在时空分布上的相对一致性, 其中, NSIDC/NT2 反演 SIC 数值显著更高, 而 NSIDC/NT SIC 整体结果偏小。总体而言, 相较于 1992 年—2000 年 ASPeCt 数据集, 4 种遥感产品与 2012 年后 CHINARE 数据集相似程度更高, 就相关系数 CC 而言, 前者在 0.77—0.82, 而后者除 OSI450 产品外均在 0.83 以上; 同时, 前一数据集各产品对比得到的均方根差 RMSE 与偏差 Bias 统计值, 均高于后者 (即偏差更大)。上述结果可能源于遥感数据产品参数的调整改善与仪器更新。

在 2012 年后 CHINARE 提供的 OBS SIC 数据与 8 种 PM SIC 产品数据的比对中, 我们得到了如下主要结论。(1) 所有产品均存在轻度冰况下高估, 严重冰区低估的特征。以 AMSR2 传感器为基础的两种 PM SIC 产品在 3 种指标中表现最好, 其中 NSIDC/NT2 反演精度最高。NSIDC/BT、NSIDC/CDR 两种长期数据产品虽然表现出与真实值较高的相似性, 但在不同冰况条件对比中暴露了低密集度区域反演的不足。(2) 在共定位对比中, 通过对各 PM SIC 产品及 CHINARE-OBS-SIC 进行时空平均处理去除误差, 两者比较相关性与精确度稳定性均有不同程度的提高, NSIDC/NT2 产品 CC 达到 0.93, RMSE 下降至 12.30%, Bias 为 2.43%, 是

第一轮比较中综合指标评价最高的产品。(3) 在异常日期航线及沿线 SIC 比对过程中, 发现各产品高偏差值发生在融冰期海冰冰缘区域, 两种 ASI 算法产品在该区域对 CHINARE-OBS-SIC 的低估较为严重。

引入 ASPeCt 船测数据集与四种长期遥感数据产品对比后, 我们得到的新结论主要包括: (1) CDR 与 BT 算法数据呈现相似且最佳的适配性, 这是 CDR 作为 NT 与 BT 的结合算法所决定的, 在此时间段与区域内 CDR 算法选取了较高比例 NSIDC/BT 数据作为数据源; 而 BT 拟合最佳的这一结论与 Beitsch 等对 1991 年—2010 年的环南极船测数据比较结果相符。(2) CDR 与 BT 两种算法产品在低密集度区域与结冰期存在反演误差, 趋于高估低密度冰真实值, 对结冰期冰况整体存在较大程度的低估; NSIDC/NT 产品总是低估严重冰况真实值, 但其在低密度冰区的反演与船测真实值较为吻合, 这可能与整体偏小的 SIC 数值 (图 3, 4) 有关, 同时 NSIDC/NT 也是结冰期反演误差最大 (-26.33%) 的产品。(3) 4 种 PM SIC 产品均在正常冰况取得相对偏低的 Bias 值, 除 NSIDC/NT 外其他 3 种产品则在严重冰况条件下取得 RMSE 最小值; 而在共定位比较中, 各产品在大部分日期低估真实值, 异常高估值日期源于产品对少冰区域的高估以及对沿线 SIC 骤变的忽视, 极大低估值可能来源于融冰期算法对冰水的误判; 结冰期, 融冰期反演精度比较中, 可以发现各产品在普里兹湾区域结冰期反演精度关于 CC、Bias 两种统计指标的评价低于融冰期, 但两季各 PM SIC 产品的 RMSE 值均偏高。

总之, 本文参考了 Beitsch 对南极进行分区比较以进一步获得不同冰情下遥感产品精确度的设想, 且加入了中国科考数据增加对比组数量, 对涵盖丰富表面类型的普里兹湾区域开展研究。结果表明基于 AMSR2 传感器的 NSIDC-NT2 产品在 2012 年—2021 年期间的数据比较中精度最高, 而长期数据产品 NSIDC/CDR 与 NSIDC/BT 可作为历史数据的补充数据源, 但在实际运用过程中仍需考虑两者在低密集度冰区的反演误差。此外, 考虑到船舶观测与卫星观测空间网格尺度差异较大, 时空窗口匹配性影响很大。其中, 点对点对比因上述问题导致了在海冰冰缘区以及低海冰密集度区域误差明显。时间平均只能在一定程度上减轻时间窗口不一致的问题, 本文采用的共定位方法

只能提供相对准确的结果,与实际情况相比仍然存在一定的误差,正如前人研究结果所示(如Beitsch等,2015;Xiu等,2020),在未来的数据评估中,应当通过加密数据,增加样本数量,改善评估技术等多种方法尽可能地减小误差。本研究为理解PM SIC产品在小区反演局限性提供了数据参考,也为冰情预测,航行安全提供保障。近年南极海冰范围迅速减少,2022年2月达近40年极小值,为探明海冰异常原因,模拟未来海冰变化,高精度实时PM SIC产品的开发势在必行,而了解各种PM SIC产品在不同情况下的反演准确性将有助于后续产品的改良与融合算法的开发。未来应考虑更多可能影响PM反演精度的因子,如冰厚,冰型等要素,对南极其他区域的PM SIC产品进行更系统详细地评估。

志 谢 真诚地感谢苏洁老师在文章修改过程中提出的宝贵建议,通过老师的精心指导与有益讨论,文章内容得以进一步充实;感谢此前所有中国极地科考与ASPeCt工作人员和科学团队辛苦细致的工作及无私的数据支持,感谢美国国家冰雪数据中心、不莱梅大学、汉堡大学与欧洲气象卫星应用组织提供的PM SIC产品。

参考文献(References)

- Beitsch A, Kern S and Kaleschke L. 2012. Comparison of AMSR-E sea ice concentrations with aspect ship observations around Antarctica//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich: IEEE: 3257-3260 [DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6350609]
- Beitsch A, Kern S and Kaleschke L. 2015. Comparison of SSM/I and AMSR-E sea ice concentrations with ASPeCt ship observations around Antarctica. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(4): 1985-1996 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2351497]
- Belchansky G I and Douglas D C. 2002. Seasonal comparisons of sea ice concentration estimates derived from SSM/I, OKEAN, and RADARSAT data. *Remote Sensing of Environment*, 81(1): 67-81 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00333-9]
- Burns B A. 1993. Comparison of SSM/I ice-concentration algorithms for the Weddell Sea. *Annals of Glaciology*, 17: 344-350 [DOI: 10.3189/S0260305500013082]
- Cavalieri D J, Gloersen P and Campbell W J. 1984. Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89(D4): 5355-5369 [DOI: 10.1029/JD089iD04p05355]
- Comiso J C. 1986. Characteristics of arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C1): 975-994 [DOI: 10.1029/JC091iC01p00975]
- Comiso J C. 1995. SSM/I sea ice concentrations using the bootstrap algorithm. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center: 1380
- EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. 2011. Global Sea Ice Concentration Reprocessing Dataset 1978-2009 (v2, 2011), Norwegian and Danish Meteorological Institutes. [DOI: 10.15770/EUM_SAF_OSI_0008].
- Gloersen P, Campbell W J, Cavalieri D J, Comiso J C, Parkinson C L and Zwally H J. 1992. Arctic and Antarctic sea ice, 1978-1987: satellite passive-microwave observations and analysis. Washington DC: Scientific and Technical Information Program, National Aeronautics and Space Administration
- Ji Q and Pang X P. 2016. Comparison and analysis of Arctic sea ice concentration products during the fifth Chinese Arctic expedition. *Journal of East China Jiaotong University*, 33(5): 33-38 (季青, 庞小平. 2016. 北极海冰密集度产品的走航比较与冰情分析. *华东交通大学学报*, 33(5): 33-38) [DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.05.006]
- Kern S, Spreen G, Kaleschke L, De La Rosa S and Heygster G. 2007. Polynya Signature Simulation Method polynya area in comparison to AMSR-E 89GHz sea-ice concentrations in the Ross Sea and off the Adélie Coast, Antarctica, for 2002-05: first results. *Annals of Glaciology*, 46: 409-418 [DOI: 10.3189/172756407782871585]
- Knuth M A and Ackley S F. 2006. Summer and early-fall sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates. *Annals of Glaciology*, 44: 303-309 [DOI: 10.3189/172756406781811466]
- Le K T and Shi J X. 1997. A study of circulation and mixing in the region of Prydz Bay, Antarctica. *Studia Marina Sinica*, 38(1): 39-52 (乐肯堂, 史久新. 1997. 南极普里兹湾区环流与混合的研究. *海洋科学集刊*, 38(1): 39-52)
- Li Z, Yan M, Liu K, Hui F M and Zhao J C. 2018. The assessment of the applicability of AMSR2 and SSMIS near real time satellite sea ice concentration during 5th CHINARE arctic cruise. *Marine Forecasts*, 35(3): 8-16 (李钊, 严明, 刘凯, 惠凤鸣, 赵杰臣. 2018. 两种准实时遥感海冰密集度产品在中国第五次北极考察期间的适用性评估. *海洋预报*, 35(3): 8-16) [DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2018.03.002]
- NSIDC. 2022. Arctic Sea Ice News and Analysis. <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2022/03/>
- Ohshima K I, Fukamachi Y, Williams G D, Nihashi S, Roquet F, Kitade Y, Tamura T, Hirano D, Herraiz-Borreguero L, Field I, Hindell M, Aoki S and Wakatsuchi M. 2013. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nature Geoscience*, 6(3): 235-240 [DOI: 10.1038/NNGEO1738]
- Ozsoy-Cicek B, Ackley S F, Worby A, Xie H J and Lieser J. 2011. Antarctic sea-ice extents and concentrations: comparison of satellite and ship measurements from International Polar Year cruises. *Annals of Glaciology*, 52(57): 318-326 [DOI: 10.3189/172756411795931877]
- Peng G, Meier W N, Scott D J and Savoie M H. 2013. A long-term and

- reproducible passive microwave sea ice concentration data record for climate studies and monitoring. *Earth System Science Data*, 5(2): 311-318 [DOI: 10.5194/essd-5-311-2013]
- Pu S Z, Hu X M, Dong Z Q, Yu F and Chen X R. 2002. Features of circumpolar deep water, Antarctic bottom water and their movement near the Prydz Bay. *Acta Oceanologica Sinica*, 24(3): 1-8 (蒲书箴, 胡筱敏, 董兆乾, 于非, 陈幸荣. 2002. 普里兹湾附近绕极深层水和底层水及其运动特征. *海洋学报*, 24(3): 1-8) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-4193.2002.03.001]
- Shi J X, Le K T, Choi B H. 2002. Circulation and its seasonal variability in region around the Kerguelen Plateau. *Acta Oceanologica Sinica*, 21(1): 1-17
- Shi Q, Su J, Heygster G, Shi J X, Wang L Z, Zhu L Z, Lou Q L and Ludwig V. 2021. Step-by-step validation of Antarctic ASI AMSR-E sea-ice concentrations by MODIS and an aerial image. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(1): 392-403 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.2989037]
- Shibata H, Izumiyama K, Tateyama K, Enomoto H and Takahashi S. 2013. Sea-ice coverage variability on the Northern Sea Routes, 1980-2011. *Annals of Glaciology*, 54(62): 139-148 [DOI: 10.3189/2013AoG62A123]
- Spreen G, Kaleschke L and Heygster G. 2008. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C2): C02S03 [DOI: 10.1029/2005JC003384]
- Su J, Hao G H, Ye X X and Wang W B. 2013. The experiment and validation of sea ice concentration AMSR-E retrieval algorithm in polar region. *Journal of Remote Sensing*, 17(3): 495-513 (苏洁, 郝光华, 叶鑫欣, 王维波. 2013. 极区海冰密集度 AMSR-E 数据反演算法的试验与验证. *遥感学报*, 17(3): 495-513) [DOI: 10.11834/jrs.20132043]
- Wang J, Qu Y B, Xiong Z H, Yuan X P, Zhou J T, Huang L and Shi L J. 2020. Comparison and verification of remote sensing sea ice concentration products for Arctic shipping regions. *Chinese Journal of Polar Research*, 32(3): 301-313 (王剑, 邱玉宝, 熊振华, 袁希平, 周静恬, 黄琳, 石利娟. 2020. 北极海冰密集度遥感数据产品对比及航道关键区验证研究. *极地研究*, 32(3): 301-313) [DOI: 10.13679/j.jdyj.20190054]
- Wang J F, Yang Q H, Yu L J, Song M R, Luo H, Shi Q, Li X W, Min C and Liu J P. 2021. A review on Antarctic sea ice change and its climate effects. *Acta Oceanologica Sinica*, 43(7): 11-22 (王今菲, 杨清华, 于乐江, 宋米荣, 罗昊, 施骞, 李雪薇, 闵超, 刘骥平. 2021. 南极海冰变化及其气候效应研究述评. *海洋学报*, 43(7): 11-22) [DOI: 10.12284/hyxb2021151]
- Wang X Y, Guan L and Li L L. 2018. Comparison and validation of sea ice concentration from FY-3B/MWRI and Aqua/AMSR-E observations. *Journal of Remote Sensing*, 22(5): 723-736 (王晓雨, 管磊, 李乐乐. 2018. FY-3B/MWRI 和 Aqua/AMSR-E 海冰密集度比较及印证. *遥感学报*, 22(5): 723-736) [DOI: 10.11834/jrs.20187419]
- Weissling B, Ackley S, Wagner P and Xie H. 2009. EISCAM—Digital image acquisition and processing for sea ice parameters from ships. *Cold Regions Science and Technology*, 57(1): 49-60 [DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.01.001]
- Worby A P, Allison I, Diritia V. 1999. A technique for making ship-based observations of Antarctic sea ice thickness and characteristics. *Antarctic: Antarctic CRC*
- Worby A P and Comiso J C. 2004. Studies of the Antarctic sea ice edge and ice extent from satellite and ship observations. *Remote Sensing of Environment*, 92(1): 98-111 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.05.007]
- Worby A P, Geiger C A, Paget M J, Van Woert M L, Ackley S F and Deliberty T L. 2008. Thickness distribution of Antarctic sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C5): C05S92 [DOI: 10.1029/2007JC004254]
- Xie S M, Wei L X, Hao C J, Zhang H Y and Mei S. 2003a. Change variation of the Antarctic sea ice and shelf ice. *Acta Oceanologica Sinica*, 25(3): 32-46 (解思梅, 魏立新, 郝春江, 张海英, 梅山. 2003a. 南极海冰和陆架冰的变化特征. *海洋学报*, 25(3): 32-46) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-4193.2003.03.004]
- Xie S M, Wei L X, Zhang Z H, Mei S and Hao C J. 2003b. Variation trends of the Antarctic sea ice and shelf ice. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(Z2): 234-240 (解思梅, 魏立新, 张占海, 梅山, 郝春江. 2003b. 南极海冰和陆架冰的时空变化动态. *冰川冻土*, 25(Z2): 234-240) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2003.z2.006]
- Xiu Y, Li Z J, Lei R B, Wang Q K, Lu P and Leppäranta M. 2020. Comparisons of passive microwave remote sensing sea ice concentrations with ship-based visual observations during the CHINARE Arctic summer cruises of 2010-2018. *Acta Oceanologica Sinica*, 39(9): 38-49 [DOI: 10.1007/s13131-020-1646-5]
- Xue Y G, Guan H, Dong X J and Chen F. 2014. Analysis of changes of Arctic sea ice extents in recent 40 years. *Marine Forecasts*, 31(4): 85-91 (薛彦广, 关皓, 董兆俊, 陈飞. 2014. 近40年北极海冰范围变化特征分析. *海洋预报*, 31(4): 85-91) [DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2014.04.012]
- Yan B H and Weng F Z. 2008. Intercalibration between special sensor microwave imager/sounder and special sensor microwave imager. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(4): 984-995 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.915752]
- Zhao J C, Zhang L, Tian Z X, Li M, Hui F M, Li C H and Han H W. 2014. Sea ice distribution in the Ross Sea, Antarctica, during the austral summer of 2012. *Chinese Journal of Polar Research*, 26(3): 342-351 (赵杰臣, 张林, 田忠翔, 李明, 惠凤鸣, 李春花, 韩红卫. 2014. 南极罗斯海2012年夏季海冰特征分析. *极地研究*, 26(3): 342-351) [DOI: 10.13679/j.jdyj.2014.3.342]
- Zhao J C, Zhou X, Sun X Y, Cheng J J, Hu B and Li C H. 2017. The inter comparison and assessment of satellite sea-ice concentration datasets from the Arctic. *Journal of Remote Sensing*, 21(3): 351-364 (赵杰臣, 周翔, 孙晓宇, 程净净, 胡波, 李春花. 2017. 北极遥感海冰密集度数据的比较和评估. *遥感学报*, 21(3): 351-364) [DOI: 10.11834/jrs.20176136]
- Zheng S J. 2011. Effects of Sea Ice and Ice Shelf on the Ocean Processes in Prydz Bay, Antarctica. Qingdao: Ocean University of China (郑少军. 2011. 海冰和冰架对南极普里兹湾海洋过程的影响研究. 青岛: 中国海洋大学) [DOI: 10.7666/d.d169404]

Accuracy of microwave remote sensing products in evaluating sea ice concentration in Prydz Bay, Antarctica

LI Ruohan¹, XIA Ruibin¹, ZHANG Xiaoshuang², CHAO Guofang², CHEN Zhongbiao¹, WANG Zhiyong³

1. Department of Marine Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Natural Resource for Marine Environmental Information Technology, National Marine Data and Information Service, Ministry of Natural Resource, Tianjin 300171, China;

3. North China Sea Marine Forecasting Center of Ministry of Natural Resources of PRC, Qingdao 266100, China

Abstract: We use the point-to-point method and Beitsch's co-location comparison method to conduct a series of evaluations on the passive microwave remote sensing products (PM) for observing sea ice concentration (SIC) in the Prydz Bay, Antarctica by using two kinds of ship-based observation datasets. Considering the difference in ship-based observation data, we divide the comparison into two parts. First, according to the ship-based observation data of China's 29th, 31st, and 37th Antarctic scientific expedition in the period of 2012–2021, eight remote sensing SIC products are classified and quantitatively compared according to the size of SIC. Results show that NSIDC/NT2 product assesses the highest correlation and the best stability in all cases. In the co-location comparison, the correlation coefficient can reach 0.926, the Root Mean Square Error (RMSE) is 12%, and the average bias is only 2%. Second, to make up for the lack of historical data of AMSR2 sensor series products, we evaluate the seasonal cycle and long-term variation signals of four remote sensing data products by using the ASPeCt ship-based observation dataset from 1992 to 2000 in the same way. The inversion accuracy of this period is lower than the case-by-case comparison result from 2012 to 2021, and a tremendous seasonal difference is observed. The bias of the four products increases from the melting period to the freezing period. During this period, the overall inversion results of CDR and bootstrap algorithms based on SSM/I sensors are better, with correlation coefficients of more than 0.8, RMSE of 16%, and bias of approximately 8%. However, a large bias remains in the low SIC region. This study shows that the accuracy of PM SIC products in a small sea area is insufficient, and it fluctuates greatly with the difference in SIC type, season, and algorithm. Therefore, the necessary considerations are to modify the resolution, use multisource data as much as possible, and classify data according to the ice conditions. Referring to Beitsch's idea of Antarctica partitioning and comparison, we further obtain the accuracy of remote sensing products under different ice conditions in a local region. We add China's scientific research ship-based observation data to increase the sample numbers for investigating the Prydz Bay area, which covers rich surface ice types. The regional comparison provides a reference for understanding the limitations of PM SIC products in micro-area inversion and also guarantees ice prediction and navigation safety. Considering the rapid reduction in Antarctic sea ice in recent years and the appearance of a 40-year minimum Antarctic sea ice range in February 2022, high-precision real-time PM SIC products need to be developed to determine the causes of sea ice anomalies and simulate sea ice changes in the future. Knowing the inversion accuracy of various PM SIC products under different conditions will help improve the subsequent PM SIC products and fusion algorithms. In the future, more factors that affect the accuracy of PM inversions, such as ice thickness, ice type, and other factors, should be considered to evaluate PM SIC products in other regions of the Antarctic in detail.

Key words: Prydz Bay, sea ice concentration, passive microwave remote sensing, ship-based observation, data quality assessment

Supported by Open Fund Project of Key Laboratory of Marine Environmental Information Technology, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China