

北极遥感海冰密集度数据的比较和评估

赵杰臣^{1,2}, 周翔³, 孙晓宇¹, 程净净⁴, 胡波⁵, 李春花¹

1. 国家海洋环境预报中心 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081;

2. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 青岛 266100;

3. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101;

4. 海洋出版社, 北京 100081;

5. 国家海洋标准计量中心, 天津 300112

摘要: 本文利用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走航观测的海冰密集度数据(OBS-SIC), 初步评估了7种基于被动微波遥感的海冰密集度产品(PM-SIC)。7种PM-SIC因传感器和反演方法不同, 分辨率差异较大(4—25 km)。在海盆尺度的海冰范围反演上7种PM-SIC基本相同, 但对小范围浮冰区的反演差异较大。与MODIS可见光图像对比发现, MASAM数据(4 km)对局部小区域海冰刻画较好, 是研究近岸区域或海峡岛屿海冰覆盖范围或面积时的首选产品; 7种PM-SIC纬向平均后对比分析显示, 不同PM-SIC对网格内是否存在海冰的判断基本一致, 但对网格内海冰所占的比例(密集度)判断差异较大。结合OBS-SIC按航线、区域、密集度大小3种不同情况对7种PM-SIC进行分类定量评估, 结果表明基于AMSR2传感器的AMSR2/ASI和AMSR2/Bootstrap数据与OBS-SIC偏差较小, 平均偏差约±1%, 均方根偏差仅11%和12%; 而SSMIS/NT数据的偏差最大, 平均偏差约-15%, 均方根偏差为21%, 其严重低估了网格内的海冰密集度值; 因此具有更高分辨率的AMSR2/ASI数据(6.25 km)是关注海冰密集度大小时的首选产品。

关键词: 北极东北航道, 被动微波遥感, 海冰密集度, 走航观测, 数据质量评估

中图分类号: P731.32 **文献标志码:** A

引用格式: 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
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 [DOI:10.11834/jrs.20176136]

1 引言

自1978年有卫星观测数据以来, 北极海冰的范围、厚度和多年冰的比例呈现显著减少趋势(Comiso等, 2008; Haas等, 2008; Nghiem等, 2007; Lei等, 2012; Xie等2013; Rodrigues, 2008)。特别是在北半球的夏季, 北极海冰范围减少的趋势在不断加剧, 以九月为例, 海冰范围的减少速率在1979年—1998年间为 $(0.032 \pm 0.017) \times 10^6 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$, 而在1999年—2010年间达到 $(0.154 \pm 0.038) \times 10^6 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ (Cavalieri和Parkinson, 2012; Stroeve等, 2012)。海盆尺度上海冰厚度的减小在

2003年—2008年间达到 0.17 m a^{-1} (Kwok等, 2009)。而融冰季节的时间长度1979年—2007年间增加了20天(Markus等, 2009)。多年冰的覆盖范围2005年—2007年两年间从 $4.69 \times 10^6 \text{ km}^2$ 减少到 $3.61 \times 10^6 \text{ km}^2$, 减少比例高达23%(Nghiem等, 2007)。

北极海冰的快速变化, 特别是夏季海冰范围的持续减小和融冰季节时长的增加, 加速了北极地区科学考察和商业航运的发展。2012年7月—9月中国第五次北极科学考察队(“五北”)乘坐雪龙船, 穿过北极东北航道到达冰岛, 完成中国船舶首次穿越北极航道的航行。2013年起中远集团“永

收稿日期: 2016-05-30; 修订日期: 2016-11-29; 优先数字出版日期: 2016-12-06

基金项目: 南北极环境综合考察与评估专项(编号: CHINARE-03-01); 国家自然科学基金(编号: 41376188, 41206184); 海洋公益性行业科研专项(编号: 201205007)

第一作者简介: 赵杰臣(1984—), 男, 工程师, 研究方向为极地海冰观测和数值模拟。E-mail: zhaojc@nmefc.gov.cn

盛轮”等多次往返东北航道开展航运业务,标志着中国商船在北极东北航道的商业航行正步入常态。在北极冰区航行日趋频繁的背景下,无论抗冰能力强的科考船,还是抗冰能力较差的商船,都亟需准确和及时的极地海冰服务信息。而基于被动微波遥感的卫星海冰密集度数据是目前获取海冰实际状况和利用数值模式进行预报预测最重要的数据基础。

基于被动微波遥感(PM)反演的海冰密集度(SIC)数据种类繁多,不同科研机构采用不同的卫星传感器和不同的反演算法,因此得到的海冰密集度数据结果也不尽相同。美国冰雪中心(NSIDC)的PM-SIC数据集起始时间为1978年10月26日,早期使用的是搭载在Nimbus-7卫星上的SMMR传感器,之后使用的传感器包括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(SSM/I),搭载在DMSP-F11卫星上的SSM/I和搭载在DMSP-F13卫星上的SSM/I,目前使用的是搭载在DMSP-F17卫星上的SSMIS传感器。另外2002年5月4日发射的NASA EOS-Aqua卫星上搭载的改进型微波辐射扫描仪(AMSR-E),可以反演得到更高分辨率的海冰密集度,2011年10月4日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,重新提供高分辨率的PM-SIC数据。

被动微波遥感海冰密集度的早期反演算法是基于辐射传输模型,这些模型普遍使用大气探空观测数据来进行算法的大气校正,因此这些模型在可以获取探空数据的情况下是比较成功的,但应用于全球范围时就会出现(Svendsen 等, 1987; Swift 等, 1985)。目前使用较多的算法是利用卫星的多传感器获取到的多种变量进行SIC反演,其中比较著名的是美国宇航局戈达德太空飞行中心发展的Bootstrap算法和Nimbus-7 Team算法(后更名为NASA Team算法,简称NT算法)(Cavalieri 等, 1984; Comiso, 1986)。由于考虑海冰温度、发射率以及不同波段参数对密集度反演的影响,NT算法和Bootstrap算法采用不同方式,导致了两种算法的结果差异(Comiso 等, 1997; Comiso和Steffen, 2001)。后来NT算法应用在89 GHz频段上来进行SIC反演,被命名为NT2算法(Markus和Cavalieri, 2000)。NT2算法同样使用辐

射传输模型来纠正89 GHz频段对大气效应的高度敏感性。NT2算法反演的SIC比NT算法反演的SIC有很大改进,同时也更接近Bootstrap算法反演的结果(Comiso 等, 2008; Parkinson和Comiso, 2008)。欧洲气象卫星应用组织(EUMETSAT)发布的准实时SIC数据名称为OSI-SAF,其使用了基于Bristol算法和Bootstrap算法的一种结合算法;研究发现在开阔水域Bootstrap算法对大气噪声的敏感度最低,而当频率低于85 GHz时,Bristol算法效果更好,因此在结合算法中Bristol算法在低密集度区域给予低权重,在高密集度区域给予高权重(Eastwood, 2014)。

和中等分辨率成像仪(MODIS)等可见光卫星数据相比,基于被动微波遥感的卫星海冰密集度资料受云量等天气情况影响小,可以准实时地获取大范围的海冰情况,是规划航线和数值预报的重要数据来源。而由于传感器、算法等不同,以及夏季海冰表面融化导致的不确定性,目前SIC反演结果还存在一定问题,需要大量的现场观测来进行验证。在南极海冰过程和气候计划(ASPeCt)的支持下,南极地区已经收集到大量现场观测数据,并进行了一系列对比验证(Worby 等, 1999)。在北极地区由于环境恶劣,现场观测难以大规模开展,目前尚缺乏统一的国际计划来协调观测标准,提供客观的船基海冰密集度观测来对卫星SIC数据进行验证(Beitsch 等, 2014)。2012年7至9月“五北”期间雪龙船沿北极东北航道低纬航线从白令海峡到达冰岛,后又沿高纬航线从冰岛回到白令海峡,期间在冰区进行了不间断的海冰密集度走航观测,这是迄今为止中国在东北航道进行的唯一的海冰观测航次,获得的走航海冰密集度观测资料(OBS-SIC)对验证PM-SIC具有十分重要的价值。本文比较了7种PM-SIC数据在海冰密集度反演上的差异,并利用“五北”期间雪龙船OBS-SIC资料来评估7种PM-SIC数据在北极东北航道的准确性和适用性,为今后应用PM-SIC进行北极航道航线规划和数值模式资料同化提供一定的参考。

2 数据和方法

2.1 PM-SIC数据

本文用来评估的7种PM-SIC产品如表1所示,其中(1)德国不莱梅大学发布的基于GCOM-W1上搭

载的AMSR2(89 GHz), 采用ARTIST Sea Ice(ASI)算法, 空间分辨率为6.25 km(Spreen 等, 2008); (2)德国不莱梅大学发布的基于AMSR2传感器利用Bootstrap算法得到的另一种SIC产品, 空间分辨率为12.5 km(Spreen 等, 2008); (3)德国不莱梅大学为延续2011年10月停止工作的AMSR-E传感器, 将ASI算法应用到DMSP卫星搭载的SSMIS传感器的91 GHz频段, 得到分辨率为13.2 km×15.5 km的SIC产品, 并将其插值成与AMSR-E一致的空间分辨率6.25 km, 该数据集的可用时间段为2011年10月—2014年10月(Spreen 等, 2008); (4)美国冰雪中心发布的基于传感器SMMR, SSM/I-SSMIS利用Bootstrap算法得到的SIC产品, 涵盖1978年10月26日至2014年12月31日, 空间分辨率为25 km(Comiso, 2000); (5)美国雪冰中心发布的基于DMSP-F17上

搭载的SSMIS传感器(19 GHz and 37 GHz), 采用NT算法生成的分辨率为25 km的SIC产品(Cavalieri 等, 1996); (6)美国冰雪中心发布的MASAM2数据是基于4 km分辨率的多传感器海冰范围产品MASIE和10 km分辨率的海冰密集度产品AMSR2融合而成, 空间分辨率为4 km, 时间跨度为2012年7月至今(Fetterer 等, 2015); (7)EUMETSAT发布的基于DMSP-F17上的SSMIS传感器, 采用Bristol和Bootstrap结合算法, 并使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)数值模式结果进行大气校正, 得到分辨率为10 km的OSI-SAF产品, 自2005年业务化运行至今(Eastwood, 2014)。需要指出的是, 表1中列出的产品分辨率并非卫星原始数据的分辨率, 而是各PM-SIC产品发布时的分辨率, 是各发布机构在卫星原始数据基础上经过技术处理得到的。

表1 本文评估的7种被动微波遥感海冰密集度资料

Table 1 Seven PM-SIC used in this paper

序号	数据集名称	发布机构	传感器	算法	产品分辨率/km
1	AMSR2/ASI	德国不莱梅大学	AMSR2	ASI	6.25
2	AMSR2/Bootstrap	德国不莱梅大学	AMSR2	Bootstrap	12.5
3	SSMIS/ASI	德国不莱梅大学	SSMIS	ASI	6.25
4	SSMIS/Bootstrap	美国冰雪中心	SMMR, SSM/I, SSMIS	Bootstrap	25
5	SSMIS/NASATEAM	美国冰雪中心	SSMIS	NASATEAM	25
6	MASAM	美国冰雪中心	多传感器	MASIE & AMSR2	4
7	OSI-SAF	欧洲气象卫星应用组织	SSMIS	Bristol & Bootstrap	10

2.2 OBS-SIC数据

本文用来作为独立评估数据的是“五北”期间雪龙船走航观测的OBS-SIC数据。雪龙船去程是2012年7月23日在楚科奇海进入浮冰区, 沿东北航道向西航行, 于8月2日进入挪威海离开浮冰区。返程时雪龙船自8月25日沿高纬航线海冰边缘向东航行, 27日到达拉普捷夫海后向北挺进, 8月30日到达最北点, 随后又向东南航行, 于9月4日离开浮冰区(图1)。本文将去程的7月23日—30日低纬区域的航线定义为第一航段, 将返程的8月25日—9月4日高纬区域的航线定义为第2航段。船基走航观测主要参考ASPeCt的船基海冰观测标准进行(Worby 等, 1999), 人工海冰密集度观测方式是观测员站在驾驶台高处目测视线范围内海冰覆盖区

域所占的比例, 根据经验判断当前位置的海冰密集度值(图2), 频率为约半小时一次。第一航段有244组观测数据, 第二航段有360组观测数据, 共计604组。

2.3 可见光图像

本文使用的可见光图像是搭载在地球观测系统(EOS)卫星Terra和Aqua上的MODIS传感器拍摄到的真彩色图像, 分辨率为250 m。美国航空航天局的地球数据网站([2016-05-30] <https://earthdata.nasa.gov/>)每天更新当天全北极MODIS可见光图像, 但由于北极夏季气旋活动较多, 大量的云系对利用MODIS图像分辨海冰分布造成较大影响。本文选取2012年7月25日和9月1日的MODIS可见光图像作为个例进行研究。



图1 “五北”雪龙船航迹图(马德毅, 2013)和本文使用的OBS-SIC数据的时间段(黑线), 蓝色和绿色背景分别是7月22日和8月24日海冰覆盖区域

Fig. 1 Track of Xuelong during the 5th Chinese National Arctic Research Expedition and the period of ship-based sea ice concentration observations was used in this paper (black lines). The blue area showed the sea ice extent on 22 July and the green area showed the sea ice extent on 24 August

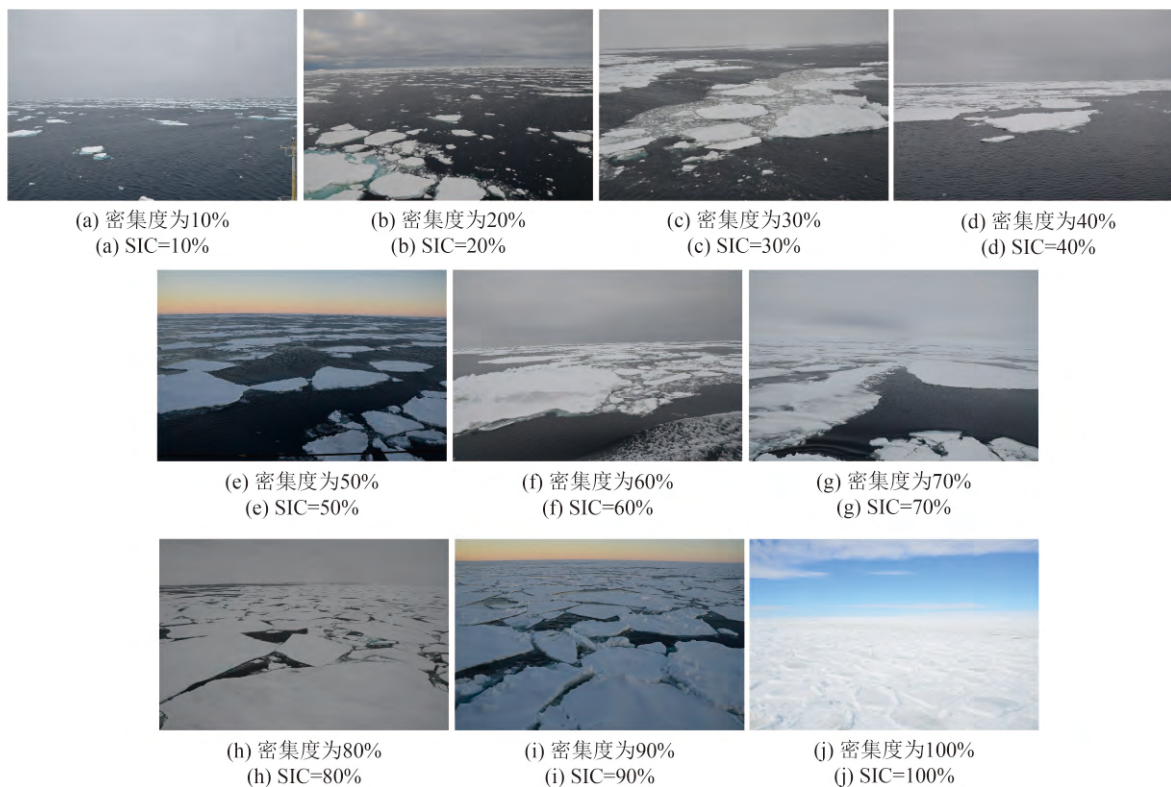


图2 雪龙船走航观测的样例

Fig. 2 Examples of OBS-SIC based on R/V Xuelong

2.4 数据处理方法

本文中7种PM-SIC数据基于不同的传感器、频段和反演算法, 产品分辨率不尽相同。雪龙船在冰区航行的速度约6—10节(约10—18 km/h), 根据半小时一次的OBS-SIC观测频率推算, 其航线路径上的观测点间距约为5—9 km。OBS-SIC为当下位置瞬时的海冰密集度情况, 而PM-SIC为当天日平均值。鉴于OBS-SIC和PM-SIC在时间维度和空间维度上的差异, 本文采用Beitsch等人(2015)在南极地区利用ASPeCt船基走航观测数据比较SSM/I和AMSR-E海冰密集度数据时的方法(Beitsch等, 2015), 根据每个OBS-SIC的经纬度坐标点, 找到当日PM-SIC数据中距离该坐标点最近的网格点, 将该网格点的PM-SIC值作为对应OBS-SIC时刻的卫星海冰密集度反演值。在第一航段期间, 当距离OBS-SIC坐标最近的点为陆地时, 取该点周围非陆地点的PM-SIC平均值作为对应OBS-SIC时刻的卫星海冰密集度反演值。然后沿雪龙船航线方向将每天的OBS-SIC数据求日平均值, 同时将对应的PM-SIC值求平均值, 这样进行比较的OBS-SIC和PM-SIC为沿航线每天的日平均海冰密集度值, 以尽可能减小由于时空维度差异造成的误差。

另外为验证7种PM-SIC在海冰密集度反演上的差异, 特别是对海冰范围反演的差异, 本文使用MODIS可见光图像对PM-SIC反演的岛屿和海峡附近的海冰情况进行验证。MODIS图像上海冰的范围通过目视解译得到。

3 结果分析

3.1 PM-SIC空间分布的比较

不同的PM-SIC数据对同一时刻的海冰反演存在差异。本文分别选取第1航段中的7月25日和第2航段中的9月1日为例对7种PM-SIC的空间分布差异进行比较分析。从7月25日PM-SIC空间分布图(图3)可以看出, 雪龙船去程穿越北极航道期间, 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。7种PM-SIC计算得到的7月25日的海冰范围基本相同, 平均值为 5.73 ± 0.59 百万平方公里, 但在岛屿海峡等狭窄区域仍然存在较大偏差(图3)。以泰梅尔半岛为例, 其北侧为维利基茨基海峡, 是联通拉普捷夫海和喀拉海的重要通道, MODIS图中清楚可见小范围浮冰(图3(h)), 而只有MASAM数据反演出该区域两处小范围的浮冰区。这种狭窄海峡处的低密集度浮冰区的识别与反演对于船只的航线规划和航行安全却意义重大, 特别是对于“永盛轮”这样低抗冰能力的北极商业航行船只, 一旦错误的海冰分布信息将其引入浮冰区, 可能引发严重的船舶安全隐患。

图4是第2航段中9月1日不同PM-SIC数据的空间分布图。此时海冰外缘线退缩到82°N圈以北, 7种PM-SIC反演得到的海冰范围基本相同, 平均值为 2.68 ± 0.68 百万平方公里。高纬度区域反演的海冰密集度大约一致, 在80%以上; SSMIS/NT反演的SIC在82°N以北普遍比其他6种PM-SIC低10%(图5(b))。80°N以南各纬度上偏差值是由于分辨率不同导致对个别岛屿和狭小海峡、海湾海冰密集度的反演能力不同而产生的, 其中分辨率最高的MASAM纬向平均的SIC在80°N以南明显比其他PM-SIC高(图5(b)), 此差异主要来自弗兰格尔岛区域的海冰密集度反演的差异。从弗兰格尔岛附近海域的MODIS图像(图4(h))可以发现, 该区域存在小范围浮冰区, 但7种PM-SIC中只有MASAM数据较好地反演出这种状况, 虽然SSMIS/Bootstrap和AMSR2/Bootstrap数据也反演出该浮冰区的存在, 但密集度偏低。

不同PM-SIC反演的海冰密集度沿纬度分布的差异较大(图5)。7月25日在80°N以北的高纬度区域, SSMIS/NT和OSI-SAF数据反演的SIC比较接近, 为60%—80%; 而其他5种PM-SIC数据反演的SIC比较接近, 为80%—100%。偏差较大的区域集中在70°N—80°N之间的太平扇区, 最低值为OSI-SAF, 最高值为MASAM, 二者的差异可达50%, SSMIS/NT和OSI-SAF数据反演的SIC差异最小, AMSR2/ASI、AMSR2/Bootstrap、SSMIS/ASI、SSMIS/Bootstrap数据反演的SIC在70°N—80°N之间比较接近, MASAM数据反演的SIC普遍比其他6种PM-SIC高(图5(a))。9月1日MASAM数据计算的纬向平均的SIC分布与其他6种数据在低纬区域差别较大, 除MASAM数据外的其他6种数据表现出一致的变化趋势, 但数量值仍有差别(图5(b))。

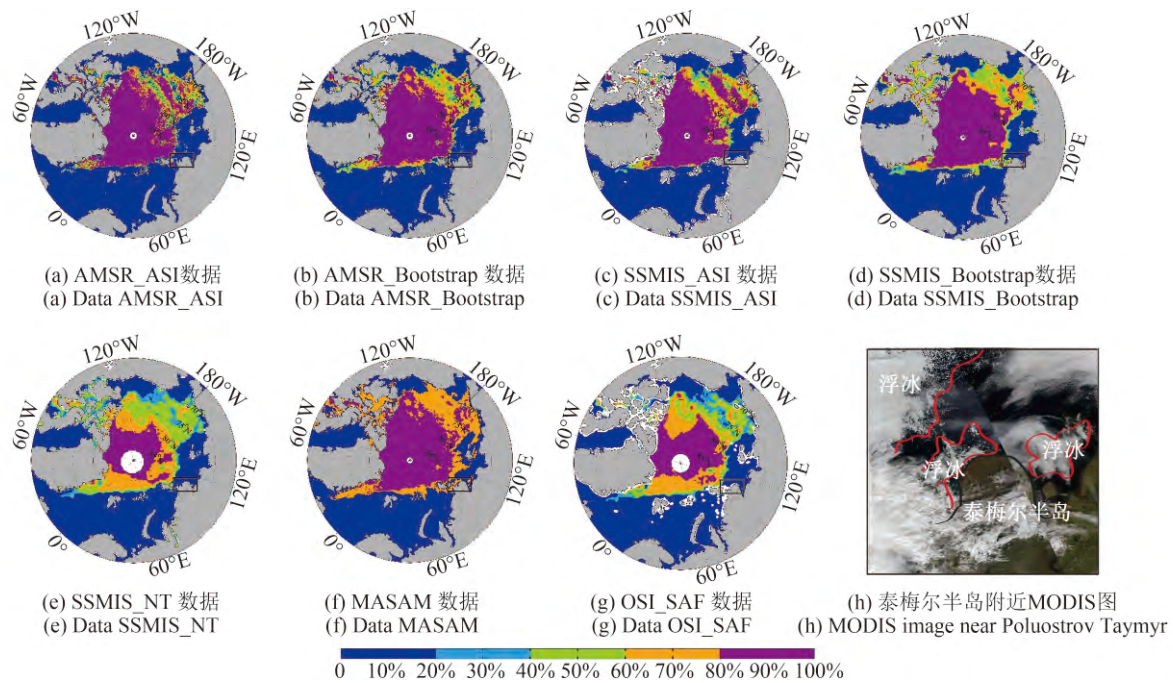


图3 第一航段7月25日的PM-SIC空间分布以及泰梅尔半岛附近MODIS图(黑色方框表示MODIS图在全北极的位置)

Fig. 3 The distributions of seven PM-SIC on July 25, 2012 and MODIS image near Poluostrov Taymyr (The black square represent the location of Poluostrov Taymyr in Arctic)

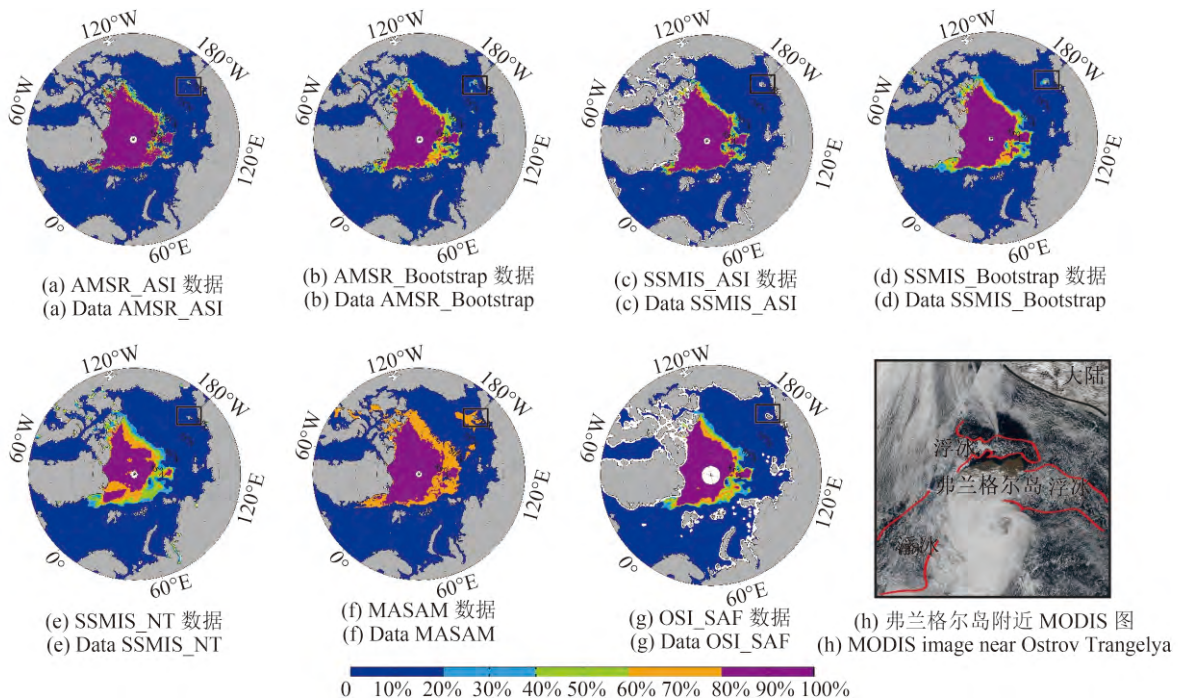


图4 第2航段9月1日的PM-SIC空间分布以及弗兰格尔岛附近MODIS图(黑色方框表示MODIS图在全北极的位置)

Fig. 4 Distributions of seven PM-SIC on September 1, 2012 and MODIS image near Ostrov Vrangelya (black square represent the location of Ostrov Vrangelya in Arctic)

7种PM-SIC的海冰格点比例沿纬度分布图如图5(c)和5(d)。绝大部分情况下,不同PM-SIC在不同纬度的海冰格点比例是一致的,这说明不同算法在判断网格内有无海冰存在时结果一致,但对判断有海冰存在的网格内有多少比例海冰存在时存

在差异。OSI-SAF数据在80°N附近的海冰格点比例比其他数据高约10%—20%,在9月1日尤为明显,考虑到当日80°N是海冰外缘线的大致位置,因此OSI-SAF数据在海冰外缘线附近判断网格点是海水还是海冰时误差较大。

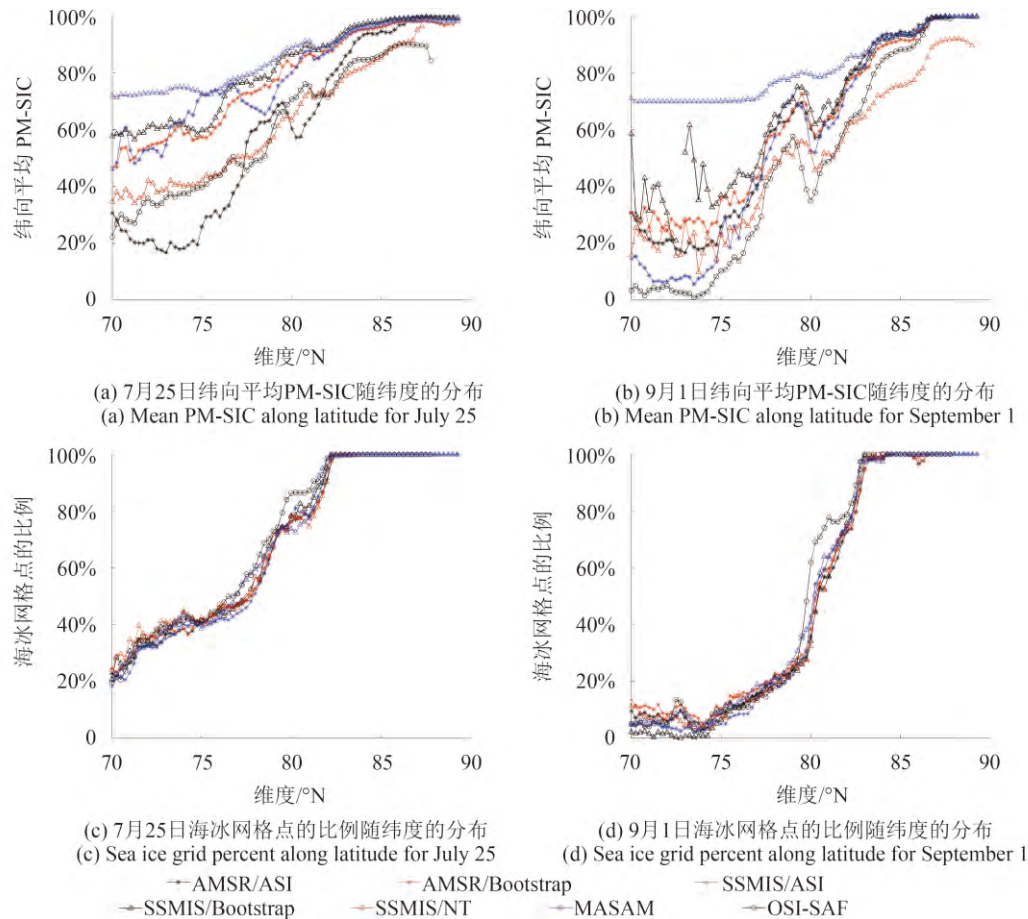


图5 第1航段7月25日和第2航段9月1日纬向平均PM-SIC以及海冰网格点的比例随纬度的分布

Fig. 5 Mean PM-SIC and sea ice grid percent along latitude for July 25 and September 1

3.2 PM-SIC和OBS-SIC的比较

为进一步评估7种PM-SIC数据在北极东北航道的准确性和适用性,利用“五北”期间雪龙船走航观测的OBS-SIC数据作为独立数据进行比较研究。图6(a)(b)是第一航段中雪龙船所在位置的纬度和经度随时间的变化。雪龙船从白令海峡穿过东北航道到达冰岛,跨越9个纬度(68°N — 77°N)和85个经度(-176°E — 99°E),耗时8天,其中有7天进行了走航海冰观测。该航段的特点是大部分时间靠近大陆岸线区域,岛屿较多,且该区域浮冰多呈带状分布,因此PM-SIC与OBS-SIC之间的偏差较大,在 $\pm 40\%$ 之间,且不同PM-SIC与观测的偏差差异较大(图6(c)和6(d))。AMSR/ASI、AMSR/Bootstrap、SSMIS/ASI数据除7月25日外,具有相同的偏差趋向,即在7月23日、24日、27日和29日偏差均为负值,而在26日和30日均为正值。MASAM数据的偏差除7月23日在楚科奇海靠近陆地航行时为负偏差外,其余日期均为正偏差。OSI-SAF数据除7月

26日为正偏差外,其余日期均为负偏差。第一航段中偏差最大值为MASAM数据在7月29日的41%。从第一航段7天平均的偏差来看,AMSR/ASI、AMSR/Bootstrap、SSMIS/ASI和SSMIS/Bootstrap数据的平均偏差较小,低于10%,其中SSMIS/ASI最小,为-1%;而其他3种PM-SIC数据平均偏差较大,其中SSMIS/NT最大,为-17%。

第2航段8月25日至9月4日期间,由于北极海冰范围急剧减小,雪龙船从冰岛出发沿北极高纬航线航行(图1),8月25日至27日雪龙船处于海冰边缘区域,约 80°N 左右,28日雪龙船调整航线向北进入密集冰区,至30日抵达本航次最北点 87.6°N 附近,然后再折向南航行,9月4日到达 80°N 附近,期间跨越170个经度(20°E — 170°E ,图7(a)和7(b)),历时11天。8月25至26日雪龙船航行在海冰边缘区域期间,7种PM-SIC数据均呈现负误差,日平均误差最大不超过13%(图7(d)),这说明7种数据在此区域的海冰边缘线即覆盖面积方面均具有较高的准确性,并且对海冰密集度值反演准确。8月

27—28日, 雪龙船向北航行期间利用了一段密集冰区内部的低密集度区域(图7(c))。8月29日—9月3日雪龙船进入浮冰区内部的密集冰区后, 7种PM-SIC数据的平均偏差呈现明显的规律: 除SSMIS/NT数据是负偏差外, 其他6种PM-SIC数据呈现正偏差。由于雪龙船在航行过程中, 会自主的选择目视范围内海冰较少的区域航行, 因此船基走航海

冰密集度观测通常会比实际情况偏小。第2航段有11天的走航观测记录, 其中10天SSMIS/NT数据是负偏差; 11天平均误差为-16%, 且最大偏差高达-31%, 由此判断SSMIS/NT数据严重低估了真实的海冰密集度状况。MASAM数据除在8月25至26日海冰边缘区为负偏差外, 其他9天均为正偏差, 且最大值达32%, 11天平均偏差为15%。

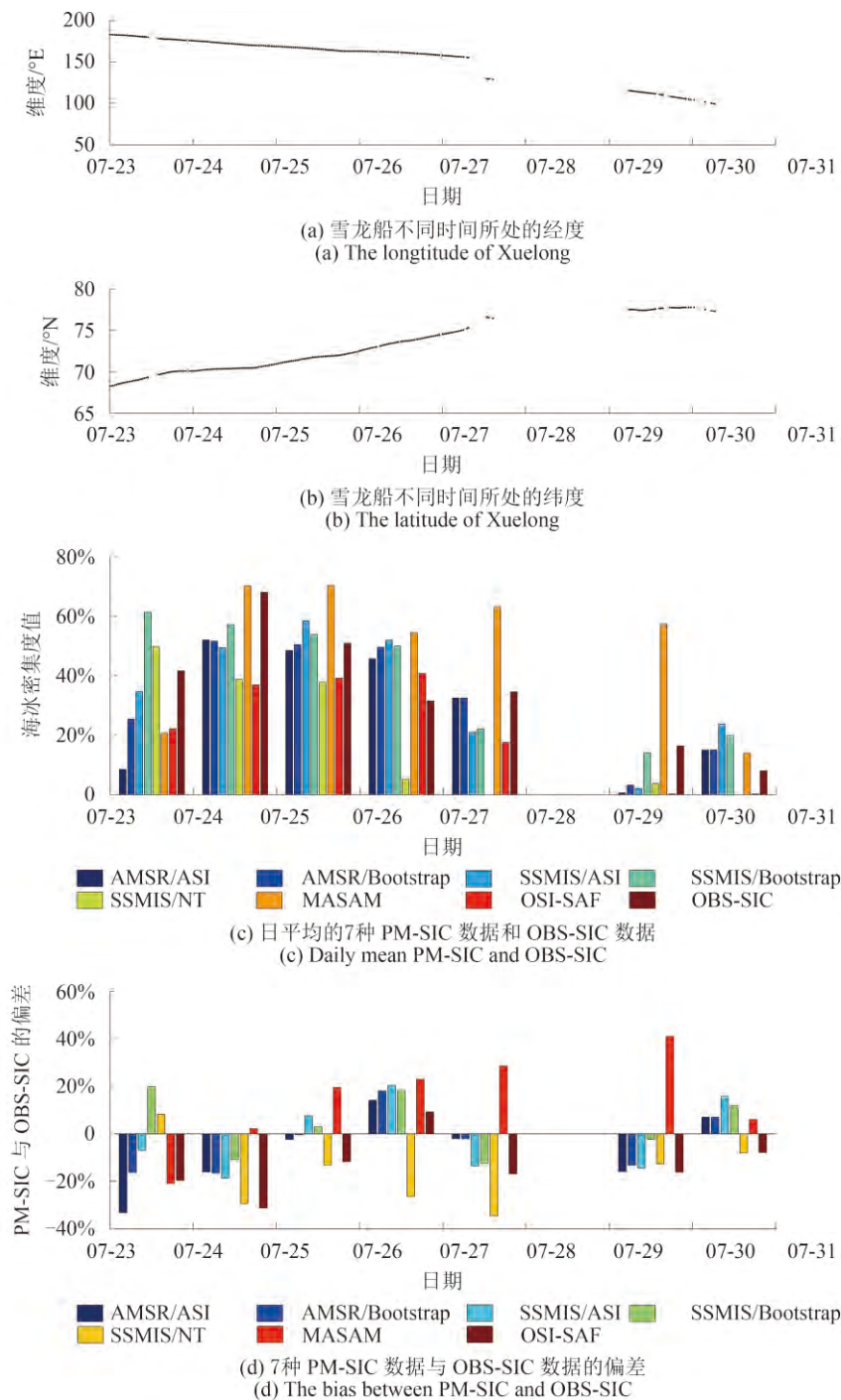


图6 第一航段PM-SIC数据与OBS-SIC数据的比较

Fig. 6 Comparison between PM-SIC and OBS-SIC during the first route

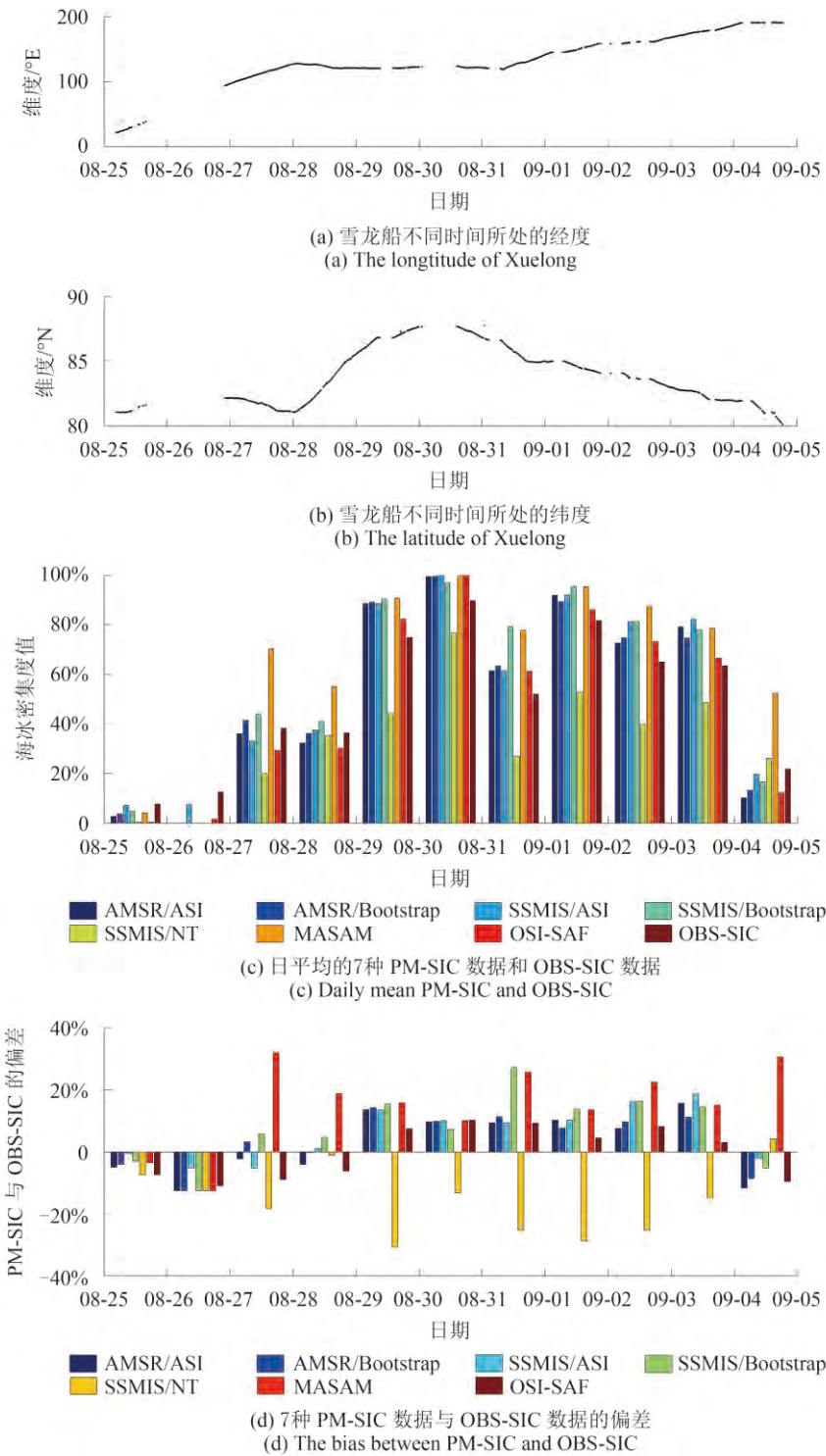


图7 第2航段PM-SIC数据与OBS-SIC数据的比较

Fig. 7 Comparison between PM-SIC and OBS-SIC during the second route

3.3 分类比较

为进一步分析7种PM-SIC与OBS-SIC的偏差, 以及不同PM-SIC之间的差异, 本文将OBS-SIC按照不同航段、不同区域和不同的海冰密集度状况划分进行对比分析研究。

3.3.1 按航段分类

图8(a)和8(b)分析发现, AMSR2/ASI数据在第1航段平均偏差为负, 第2航段平均偏差为正, 但总体来看, 偏差在 $\pm 10\%$ 左右, 与OBS-SIC符合较好。AMSR2/Bootstrap数据在两个航段的平均偏差

都低于 $\pm 5\%$ ，总的均方根误差在10%左右，与OBS-SIC符合最好。SSMIS/ASI数据在第1航段的平均偏差最小，但其均方根偏差为15%左右，综合看与OBS-SIC的符合程度和AMSR/ASI相当。SSMIS/Bootstrap数据在两个航段的平均偏差都是正值，说明其整体上高估了海冰密集度状况。从不同航段来看，SSMIS/NT数据均低估了海冰密集度，量值约15%—20%，与OBS-SIC符合较差。MASAM数据在两个航段高估了海冰密集度约10%—20%，由于雪龙船冰区航行时存在“趋向低密集度”的特性，因此MASAM数据与OBS-SIC符合程度比SSMIS/NT稍好。OSI-SAF数据低估了海冰密集度状况，与OBS-SIC的符合程度和SSMIS/Bootstrap相当，平均

偏差约为 -5% ，均方根误差约为12%。综上分析7种PM-SIC与OBS-SIC的符合程度，第1航段中AMSR2/Bootstrap和SSMIS/Bootstrap数据偏差最小，平均偏差在 $\pm 2\%$ 以内，均方根偏差约为12%；SSMIS/NT数据偏差最大，平均偏差约为 -15% ，均方根偏差约为25%；第2航段中AMSR2/ASI和OSI-SAF数据偏差最小，平均偏差约为 $\pm 2\%$ ，均方根偏差约为10%；SSMIS/NT和MASAM数据偏差最大，平均偏差约为 $\pm 15\%$ ，均方根偏差约为21%；两个航段综合看，AMSR2/Bootstrap数据偏差最小，平均偏差约为1%，均方根偏差约为10%，而SSMIS/NT和MASAM数据偏差最大，平均偏差约为 $\pm 15\%$ ，均方根偏差约为21%。

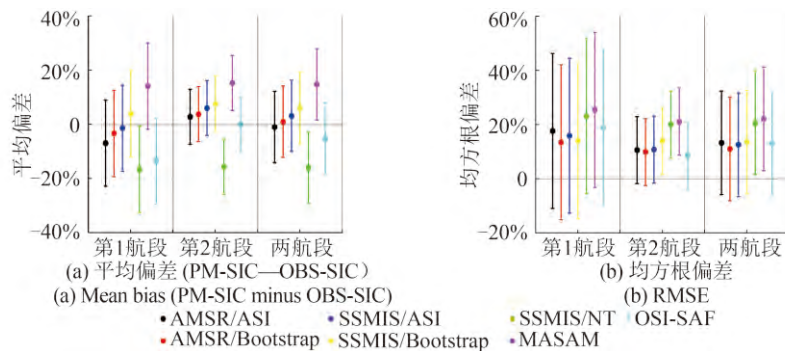


图8 PM-SIC与OBS-SIC在不同航段的分类比较

Fig. 8 Bias and RMSE between PM-SIC and OBS-SIC in different routes

3.3.2 按区域分类

图9(a)和9(b)对比了PM-SIC在近岸区域、浮冰边缘区域、浮冰内部区域与OBS-SIC的符合程度。其中近岸区域是指第1航段中靠近海岸或者穿过海峡时的航段，SSMIS/Bootstrap数据偏差最小，平均偏差约为1%，均方根偏差约为15%；MASAM和OSI-SAF数据偏差最大，平均偏差大于 -10% ，均方根偏差大于20%。浮冰边缘区域是指第2航段

中浮冰区外缘线附近的走航观测航段，SSMIS/ASI数据偏差最小，平均偏差约为 -2% ，均方根偏差约为5%；MASAM数据偏差最大，平均偏差约为12%，均方根偏差约为28%；浮冰内部区域是指第2航段中在海冰内部高密度区域的走航观测航段，AMSR2/ASI数据偏差最小，平均偏差约为1%，均方根偏差约为10%；SSMIS/NT数据偏差最大，平均偏差约为 -20% ，均方根偏差约为22%。

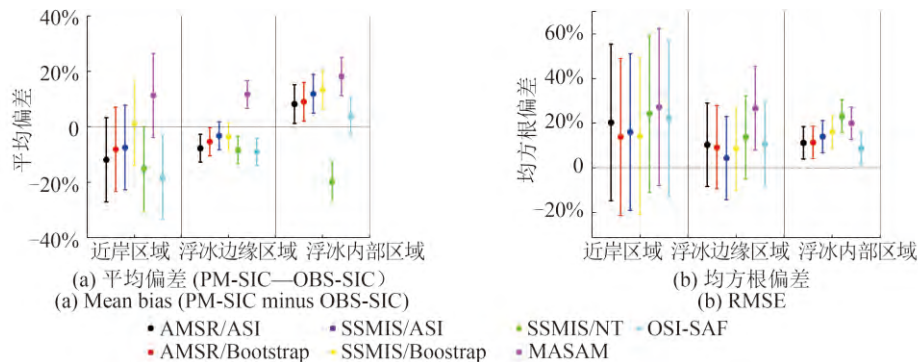


图9 PM-SIC与OBS-SIC在不同区域的分类比较

Fig. 9 Bias and RMSE between PM-SIC and OBS-SIC in different regions

3.3.3 按密集度分类

图10(a)和10(b)对比了不同密集度状况下7种PM-SIC数据与OBS-SIC的符合程度。在低密集度($OBS-SIC < 0.3$)的情况下, SSMIS/ASI和SSMIS/Bootstrap数据偏差最小, 平均偏差约为-2%, 均方根偏差约为10%; MASAM数据偏差最大, 平均偏差约为10%, 均方根偏差约为12%。在中等密集度($0.3 < OBS-SIC < 0.6$)的情况下, AMSR2/

Bootstrap和SSMIS/ASI数据偏差最小, 平均偏差约为2%, 均方根偏差约为12%; 而MASAM数据偏差最大, 平均偏差约为5%, 均方根偏差约为15%。在高密集度($OBS-SIC > 0.6$)的情况下, AMSR2/Bootstrap数据偏差最小, 平均偏差约为8%, 均方根偏差约为12%; 而SSMIS/NT数据偏差最大, 平均偏差约为-22%, 均方根偏差约为28%。

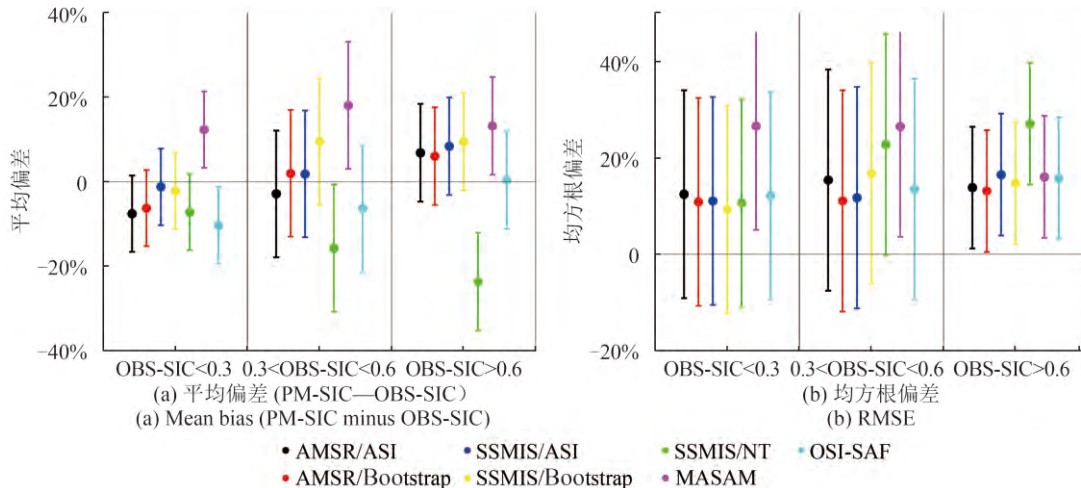


图 10 PM-SIC与OBS-SIC在不同密集度的分类比较

Fig. 10 Bias and RMSE between PM-SIC and OBS-SIC in different SICs

4 结 论

日益减少的北极海冰范围为北极科考和商业航行提供了前所未有的契机, 区别于其他大洋, 北冰洋的海冰是船舶航行的重大安全威胁, 因此获取及时准确的海冰覆盖信息对于航行安全至关重要。目前基于被动微波遥感的卫星海冰密集度资料是极地船舶规划航线和海冰数值模拟预报研究的重要手段, 而受制于现场观测资料的匮乏, 不同卫星和不同传感器反演的PM-SIC数据在北极不同区域的准确性和适用性还有待进一步验证。本文利用“五北”期间雪龙船在东北航道往返航行期间的走航观测OBS-SIC数据对7种PM-SIC数据的准确性进行了初步的对比评估。

7种PM-SIC数据的分辨率介于4—25 km。对海冰覆盖范围的反演, 分辨率最高的MASAM数据表现最好, 成功反演出2012年7月25日在泰梅尔半岛附近的两处小范围浮冰区和2012年9月1日在弗兰格尔岛附近的高密集度浮冰区, 而其他6种PM-

SIC数据在与MODIS图像的比较中结果较差。这和其他6种PM-SIC分辨率较低有关, 分辨率较低时, 网格较粗, 同样区域内网格数量少, 因此卫星对该区域的刻画更粗糙, 会丢失某些小范围的海冰信息, 因此在关注近岸或者狭窄水域海冰覆盖范围或面积时, 应优先考虑MASAM数据。

7种PM-SIC数据沿纬度方向的海冰网格点比例基本一致, 但纬向平均的SIC数值差异较大, 这说明不同的算法在判断网格内是海水或是海冰时结果相近, 但对于反演海冰网格内海冰所占的比例(密集度)时却差异明显。

由于船舶在冰区航行时, 会主动避开高密集度浮冰区而选择低密集度的区域航行, 即存在“趋向低密集度”的特性, 因此基于雪龙船的船基走航观测海冰密集度会略微低估该区域真实的海冰密集度状况。与OBS-SIC定量比较的结果表明, 按照航段来分类的话, 第1航段是低纬航线, AMSR2/Bootstrap和SSMIS/Bootstrap数据偏差最小, SSMIS/NT数据偏差最大; 第2航段是高纬航线,

AMSR2/ASI和OSI-SAF数据偏差最小,SSMIS/NT和MASAM数据偏差最大。按区域分类评估时,在近岸区域,SSMIS/Bootstrap数据偏差最小,MASAM和OSI-SAF数据偏差最大;在浮冰边缘区域,SSMIS/ASI数据偏差最小,MASAM数据偏差最大;在浮冰内部区域,AMSR2/ASI数据偏差最小,SSMIS/NT数据偏差最大。按密集度来分类评估时,在低密集度($OBS-SIC < 0.3$)的情况下,SSMIS/ASI和SSMIS/Bootstrap数据偏差最小,MASAM数据偏差最大;在中等密集度($0.3 < OBS-SIC < 0.6$)的情况下,AMSR2/Bootstrap和SSMIS/ASI数据偏差最小,而MASAM数据偏差最大;在高密集度($OBS-SIC > 0.6$)的情况下,AMSR2/Bootstrap数据偏差最小,而SSMIS/NT数据偏差最大。

两个航段综合看,AMSR2/Bootstrap和AMSR2/ASI数据偏差最小,平均偏差约为1%,均方根偏差为10%左右,这说明基于AMSR2传感器的两种算法产品的偏差有正有负,在计算平均偏差时互相抵消。SSMIS/NT数据的平均偏差约-15%,均方根偏差约为21%,说明该数据低估了所在位置的SIC值;MASAM数据的平均偏差约15%,均方根偏差约为22%,说明该数据高估了所在位置的SIC值。考虑到雪龙船航行时存在“趋向低密集度”的特性,因此SSMIS/NT数据的偏差最大,严重低估了真实的SIC值。

2013年2月波弗特海出现1000 km长海冰裂隙,研究发现AMSR2/ASI算法比AMSR2/Bootstrap算法更精确的识别出该裂隙(Beitsch等,2014)。2012年度在南极罗斯海的雪龙船走航OBS-SIC数据曾用来评估AMSR2/ASI和SSMIS/NT数据在南半球夏季的准确性,结果也表明AMSR2/ASI数据和OBS-SIC符合较好,SSMIS/NT数据的偏差为20%左右,与本文结果相近(赵杰臣等,2014)。这说明无论在南极还是北极,基于AMSR2传感器的较高分辨率的PM-SIC数据对海冰密集度大小的反演更准确。

7种PM-SIC数据对海冰密集度的反演出现较大差异主要是由于传感器、算法和分辨率均不相同,另外7月—9月正处在北半球的夏季,海冰上出现大量融池,会影响到不同算法对海冰密集度的反演。海冰表面出现融池后,其反照率、亮温等特征和海水很接近,不利于区分,因此易造成对海冰密集度的低估。

船基走航海冰密集度观测存在观测主观性、经验性等问题,因此需要更多航次的走航观测数据来对卫星反演数据进行更细致的评估。在使用PM-SIC时,了解其适用性和准确性可以有效的帮助北极科考和商业航行船舶获取更准确的海冰情况,找到最佳的航行路线,提高航行的安全性,特别是对于抗冰能力很低的商业船只,这一点尤为重要。

志 谢 感谢中国第五次北极科学考察队走航海冰观测队员辛苦细致的工作以及雪龙船全体科考队员对海冰观测工作的支持。

参考文献(References)

- Beitsch A, Kaleschke L and Kern S. 2014. Investigating high-resolution AMSR2 sea ice concentrations during the February 2013 fracture event in the Beaufort sea. *Remote Sensing*, 6(5): 3841–3856 [DOI: 10.3390/rs6053841]
- 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]
- Cavalieri D, Parkinson C, Gloersen P and Zwally H J. 1996. Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center
- Cavalieri D J, Gloersen P and Campbell W J. 1984. Determination of sea ice parameters with the Nimbus7 SMMR. *Journal of Geophysical Research*, 89(D4): 5355–5369 [DOI: 10.1029/JD089iD04p05355]
- Cavalieri D J and Parkinson C L. 2012. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *The Cryosphere*, 6(4): 881–889 [DOI: 10.5194/tc-6-881-2012]
- Comiso J. 2000. Bootstrap Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS, Version 2. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center
- Comiso J C. 1986. Characteristics of arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations. *Journal of Geophysical Research*, 91(C1): 975–994 [DOI: 10.1029/JC091iC01p00975]
- Comiso J C, Cavalieri D J, Parkinson C and Gloersen P. 1997. Passive microwave algorithms for sea ice concentration: a comparison of two techniques. *Remote Sensing of Environment*, 60(3): 357–384 [DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00220-9]
- Comiso J C and Steffen K. 2001. Studies of Antarctic sea ice concentrations from satellite data and their applications. *Journal of Geo-*

- physical Research, 106(C12): 31361–31385 [DOI: 10.1029/2001JC000823]
- Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R and Stock L. 2008. Accelerated-decline in the Arctic sea ice cover. *Geophysical Research Letter*, 35(1): L01703 [DOI: 10.1029/2007GL031972]
- Eastwood S. 2014. Sea Ice Product User's Manual OSI-401-a, OSI-402-a, OSI-403-a, Version 3.11. EUMETSAT
- Fetterer F, Stewart J S and Meier W N. 2015. MASAM2: Daily 4-km Arctic Sea Ice Concentration, 2012–2014. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center [DOI: 10.7265/N5ZS2TFT]
- Haas C, Pfaffling A, Hendricks S, Rabenstein L, Etienne J L and Rigor I. 2008. Reduced ice thickness in arctic transpolar drift favors rapid ice retreat. *Geophysical Research Letters*, 35(17): L17501 [DOI: 10.1029/2008GL034457]
- Kwok R, Cunningham G F, Wensnahan M, Rigor I, Zwally H J and Yi D. 2009. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008. *Journal of Geophysical Research*, 114(C7): C07005 [DOI: 10.1029/2009JC005312]
- Lei R B, Xie H J, Wang J, Leppäranta M, Jónsdóttir I and Zhang Z H. 2015. Changes in sea ice conditions along the arctic northeast passage from 1979 to 2012. *Cold Regions Science and Technology*, 119: 132–144 [DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.08.004]
- Ma D Y. 2013. The Report of 2012 Chinese Arctic Research Expedition. Beijing: China Ocean Press (马德毅. 2013. 中国第五次北极科学考察报告. 北京: 海洋出版社)
- Markus T and Cavalieri D J. 2000. An enhancement of the NASA team sea ice algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(3): 1387–1398 [DOI: 10.1109/36.843033]
- Markus T, Stroeve J C and Miller J. 2009. Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length. *Journal of Geophysical Research*, 114(C12): C12024 [DOI: 10.1029/2009JC005436]
- Nghiem S V, Rigor I G, Perovich D K, Clemente-Colón P, Weatherly J W and Neumann G. 2007. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice. *Geophysical Research Letter*, 34(19): L19504 [DOI: 10.1029/2007GL031138]
- Parkinson C L and Comiso J C. 2008. Antarctic sea ice parameters from AMSR-E data using two techniques and comparisons with sea ice from SSM/I. *Journal of Geophysical Research*, 113(C2): C02S06 [DOI: 10.1029/2007JC004253]
- Rodrigues J. 2008. The rapid decline of the sea ice in the Russian Arctic. *Cold Regions Science and Technology*, 54(2): 124–142 [DOI: 10.1016/j.coldregions.2008.03.008]
- Spren G, Kaleschke L and Heygster G. 2008. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels. *Journal of Geophysical Research*, 113(C2): C02S03 [DOI: 10.1029/2005JC003384]
- Stroeve J C, Serreze M C, Holland M M, Kay J E, Malanik J and Barrett A P. 2012. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climatic Change*, 110(3): 1005–1027 [DOI: 10.1007/s10584-011-0101-1]
- Svendsen E, Matzler C and Grenfell T C. 1987. A model for retrieving total sea ice concentration from a spaceborne dual-polarized passive microwave instrument operating near 90 GHz. *International Journal of Remote Sensing*, 8(10): 1479–1487 [DOI: 10.1080/01431168708954790]
- Swift C T, Fedor L S and Ramseier R O. 1985. An algorithm to measure sea ice concentration with microwave radiometers. *Journal of Geophysical Research*, 90(C1): 1087–1099 [DOI: 10.1029/JC090iC01p01087]
- Worby A, Ian A and Vito D. 1999. A Technique for Making Ship-Based Observations of Antarctic Sea Ice Thickness and Characteristics. Hobart: Australia Antarctic Division
- Xie H, Lei R, Ke C, Wang H, Li Z, Zhao J and Ackley S F. 2013. Summer sea ice characteristics and morphology in the Pacific Arctic sector as observed during the CHINARE 2010 cruise. *The Cryosphere*, 7(4): 1057–1072 [DOI: 10.5194/tc-7-1057-2013]
- 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]

The inter comparison and assessment of satellite sea-ice concentration datasets from the arctic

ZHAO Jiechen^{1,2}, ZHOU Xiang³, SUN Xiaoyu¹, CHENG Jingjing⁴, HU Bo⁵, LI Chunhua¹

1. Key laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting (SOA), National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China;

2. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. China Ocean Press, Beijing 100081, China;

5. National Center of Ocean Standards and Metrology, Tianjin 300112, China

Abstract: The rapid decrease in Arctic sea ice makes normalized commercial shipping through Arctic passages possible. The accuracy of Sea-Ice Concentration (SIC) data is a crucial basis for Arctic shipping. Filed SIC data, however, is difficult to acquire. Passive microwave (PM) satellite is an efficient tool for obtaining large-scale SIC. Unfortunately, satellite SIC in the Arctic can only be evaluated with limited field observation data. Ship-based sea ice concentration observations (OBS-SIC) have been collected in the Antarctic to evaluate PM satellite sea-ice concentration (PM-SIC) (Worby, et al., 1999). In this paper, seven PM-SIC datasets that were released by Bremen University, NSIDC, and EUMETSAT were compared and assessed using ship-based OBS-SIC during the 5th CHINARE Arctic Northeast Passage cruise from July to September 2012. A total of 604 OBS-SIC pairs that were obtained from approximately 20 days of the cruise is evaluated. We selected another 604 SIC pairs from PM-SIC datasets based on the same OBS-SIC latitude and longitude. To avoid bias from daily sea ice changes and different spatial resolutions, the daily mean PM-SIC and OBS-SIC for comparison is calculated using a method that is based on a similar evaluation work in Antarctica (Beitsch, et al., 2015). MODIS images are also used to evaluate the sea ice distribution near the continent, narrow strait, and island.

Results show that the seven satellite datasets have a similar pattern of large sea ice distribution, but have dissimilar patterns near the continent, island, and strait. MASAM successfully detected the small ice floe area near Poluostrov Taymyr on July 25, 2012, and near Ostrov Vrangelya on September 1, 2012, whereas other methods failed to do so. Latitude mean comparisons demonstrate that the seven PM-SIC have highly similar abilities to detect that the grid was completely water or sea ice, but highly differed in the detected percentage of sea ice in the ice grid. Quantitative evaluation via OBS-SIC comparison indicates that AMSR2/ASI, AMSR2/Bootstrap, SSMIS/ASI, and SSMIS/Bootstrap performed well, whereas SSMIS/NT and MASAM performed badly. AMSR2/ASI has the lowest bias of 1% and root-mean-square error (RMSE) of 11%. However, SSMIS/NT largely underestimates the SIC with a mean bias of -15% and RMSE of 21%. AMSR2/ASI has a higher spatial resolution than the well-performing group. More importantly, it is updated near real time with only a delay of one day. High resolution and timely updates are the most important factors for operational ice service, which make AMSR2/ASI the best choice as areal-time shipping guide. High-resolution MASAM (4 km) can detect small sea ice distribution near the continent and narrow strait. Therefore, it is the most suitable for sea ice area and should be used for further studies in special regions. However, near-real-time higher-resolution AMSR2/ASI (6.25 km) has a smaller bias and RMSE with OBS-SIC. Hence, it is the best dataset for SIC quantity studies and real-time shipping guide.

Key words: arctic northeast passage, passive microwave, sea ice concentration, ship-based observation, data assessment

Supported by Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation and Assessment Program (CHINARE-03-01); National Natural Science Foundation of China (No. 41376188, 41206184); Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean (No. 201205007)