

郭昊, 季青, 庞小平, 等. 国内外 7 种常用南极被动微波海冰密集度产品的比较与评估[J]. 海洋学报, 2023, 45(6): 141–159, doi:10.12284/hyxb2023083

Guo Hao, Ji Qing, Pang Xiaoping, et al. Comparison and evaluation of seven commonly used Antarctic passive microwave sea ice concentration products[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(6): 141–159, doi:10.12284/hyxb2023083

国内外 7 种常用南极被动微波海冰密集度产品的比较与评估

郭昊¹, 季青^{1,2}, 庞小平^{1,2*}, 石立坚³, 闫忠男¹, 罗重鑫¹

(1. 武汉大学 中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉 430079; 2. 自然资源部极地测绘科学重点实验室, 湖北 武汉 430079; 3. 自然资源部国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要: 围绕国内外机构发布的南极被动微波海冰密集度产品 (PM-SIC) 的差异和精度问题, 应用 MODIS 和 Sentinel-1 反演的海冰密集度, 对德国不莱梅大学 (产品 UB-AMSR2/ASI)、美国冰雪数据中心 (产品 NSIDC-SSMIS/NT、NSIDC-SSMIS/CDR、NSIDC-AMSR2/NT2)、欧洲气象卫星应用组织海洋与海冰卫星应用中心 (产品 OSI-SAF/BR-BST)、国家卫星海洋应用中心 (产品 NSOAS-SMR/NT) 和国家卫星气象中心 (产品 NSMC-MWRI/NT2) 发布的 7 种南极海冰密集度产品进行比较与评估。结果表明: (1) NSIDC-SSMIS/NT 与 NSIDC-SSMIS/CDR 海冰密集度具有较高的一致性 (平均偏差为-0.08%, 相关系数为 0.99), NSOAS-SMR/NT 与 NSIDC-AMSR2/NT2 间的差异最大 (平均偏差为-14.41%, 相关系数为 0.81); (2) 7 种 PM-SIC 的变化趋势一致, NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 的偏差具有明显的季节性差异; (3) NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 均在印度洋扇区、别林斯高晋海和阿蒙森海扇区绝对偏差较大, 在罗斯海扇区差异最小。偏差较大的区域主要分布在海冰边缘区及近陆地海域, 在高密集度区域差异较小; (4) 应用 MODIS 与 Sentinel-1 反演的海冰密集度对 7 种 PM-SIC 验证表明, NSMC-MWRI/NT2 与验证数据的一致性最高。NSOAS-SMR/NT、UB-AMSR2/ASI 和 OSI-SAF/BR-BST 海冰密集度偏低, 而 NSMC-MWRI/NT2、NSIDC-AMSR2/NT2、NSIDC-SSMIS/CDR 和 NSIDC-SSMIS/NT 海冰密集度偏高。不同海冰密集度产品的比较与评估可为发展遥感反演算法、研制和应用高质量的海冰密集度产品, 更好地监测南极海冰动态变化提供依据和参考。

关键词: 海冰密集度; 被动微波; 遥感产品; MODIS; 南极

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)06-0141-19

1 引言

南极海冰区是全球气候环境变化的重要区域和敏感区^[1]。南极海冰覆盖范围及季节和年际变化规律是研究全球气候变化的重要依据。海冰密集度 (Sea Ice Concentration, SIC) 既是估算海冰面积和范围

的关键指标, 也是确定海冰前缘线位置的基础参数^[2], 因而精准估算海冰密集度、监测海冰范围的时空变化对于气候变化相关研究至关重要^[3]。

遥感卫星观测是定量分析海冰范围和变化不可替代的手段^[4]。其中, 被动微波 (Passive Microwave, PM) 遥感是长时序、大尺度研究南极海冰的重要途径^[5]。

收稿日期: 2022-09-27; 修订日期: 2023-01-13。

基金项目: 国家自然科学基金 (42076235); 中央高校基本科研业务费专项 (2042022kf0018)。

作者简介: 郭昊 (1998—), 男, 湖北省宜昌市人, 主要研究方向为海冰遥感。E-mail: guo_hao@whu.edu.cn

* 通信作者: 庞小平, 教授, 主要研究方向为遥感制图与应用、地理信息可视化以及极地冰雪环境动态模拟研究等。E-mail: pxx@whu.edu.cn

相比于可见光遥感,被动微波遥感具有全天时全天候的特点,在南极海冰密集度的动态监测上有诸多优势^[6-7]。被动微波遥感具有较高的时间分辨率,扫描幅宽大,能够实现一天内全极区海冰监测^[8]。基于被动微波遥感反演的海冰密集度数据种类诸多,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也不尽相同^[9-11]。

针对海冰密集度的被动微波遥感反演,国内外发展了多种业务化算法并发布了相应的遥感产品。遥感产品在应用前要保证其精度的可靠性,但目前海冰密集度产品精度受到多种因素影响还存在较大的不确定性^[12],为了发展更高精度的海冰密集度反演算法,需要对国内外常用的海冰密集度产品进行验证评估。针对被动微波海冰密集度产品的对比验证,Andersen 等^[13]归纳了针对 SSM/I 数据的 7 种海冰密集度的反演算法,发现使用不同的算法计算得到的海冰范围和面积之间的变化趋势上具有较高的一致性;Ivanova 等^[14]分析了 11 种海冰密集度算法,认为 Bristol 算法在密集冰区具有较好的反演结果。苏昊月等^[15]应用 MODIS 海冰密集度验证了 AMSR-E 海冰密集度产品在海冰边界的精度,发现基于 ASI 算法的海冰密集度在夏季低估了边界海冰密集度;赵杰臣等^[16]评估了 7 种基于被动微波遥感的北极海冰密集度产品,发现基于 AMSR2 传感器和 ASI 算法的海冰密集度较走航观测的海冰密集度偏差较小;王晓雨等^[17]和 Andersen 等^[18]使用 MODIS 数据对 FY-3B/MWRI 和 Aqua/AMSR-E 北极海冰密集度产品进行了对比印证,结果表明在密集度小于 95% 情况下,AMSR-E 更接近 MODIS, MWRI 存在过高估计,在密集度大于等于 95% 情况下, MWRI 与 MODIS 的偏差更小;李钊等^[19]比较了 AMSR2 和 SSMIS 的差异,结果显示 SSMIS 数据在高值区明显的低估了海冰密集度;刘婷婷等^[20]围绕 MWRI 数据的北极 SIC 精度开展研究,认为 MWRI 数据在 12.5 km 和 25 km 空间分辨率下均获得较优的 SIC 估算精度;郑杨龙等^[21]利用北极夏季 SAR 影像验证 HY-2 与 SSMIS 海冰密集度,发现在冰边缘区 HY-2 与 SSMIS 海冰密集度存在低估现象。虽然目前国内外相关学者已开展了一定的被动微波海冰密集度产品验证工作,但这些评估主要集中在北极,对南极海冰密集度产品的比较与验证工作较少,特别是缺乏对我国 FY-3 和 HY-2B 南极海冰密集度产品的比较与评估。

为此,本文围绕上述问题,尝试比较来自德国不

莱梅大学(University of Bremen, UB)、美国冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Centre, NSIDC)、欧洲气象卫星应用组织海洋与海冰卫星应用中心(European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT)、国家卫星海洋应用中心(National Satellite Ocean Application Service, NSOAS)以及国家卫星气象中心(National Satellite Meteorological Center, NSMC)发布的 7 种常用的海冰密集度产品,并将其与 MODIS 和 Sentinel-1 反演得到的海冰密集度进行对比,分析不同海冰密集度产品间的差异,评估不同产品的精度,以便更好地应用海冰密集度遥感产品,为南极海冰与气候变化等相关科学研究提供参考。

2 数据与方法

2.1 国内外常用海冰密集度产品

目前,国外发布海冰密集度产品的机构主要有德国不莱梅大学、美国冰雪数据中心、欧洲气象卫星应用组织海洋与海冰卫星应用中心。UB 使用 AMSR-E/2 卫星传感器观测的亮温数据生产 SIC 产品, NSIDC 和 OSI-SAF 主要使用 SSM/I-SSMIS 传感器数据生产 SIC 产品。我国国产卫星海冰密集度产品主要有国家卫星海洋应用中心发布的海洋二号(HY-2B)微波成像仪(SMR)海冰密集度产品和国家卫星气象中心发布的风云 3 号系列(FY-3A、B、C、D)微波成像仪(MWRI)海冰密集度产品^[22]。本文用来评估的 7 种国内外常用南极海冰密集度产品如表 1 所示。

上述 7 种 PM-SIC 产品所使用的海冰密集度算法有 NT、CDR、NT2、Bristol & BST 以及 ASI。NT 算法能够很好地区分多年冰和一年冰,但是对新生冰辨识不足,在新冰区低估实际的 SIC^[23]。CDR 算法为 NT 与 BST 的合成算法,虽减小了低估影响,但在大范围新冰覆盖区反演精度仍较低^[24]。NT2 算法是对 NT 算法的改进,通过利用极化比降低了海冰表面温度变化产生的影响^[25]。Bristol & BST 算法对水汽等敏感性低,在高密集区域,反演精度更高^[26]。ASI 算法因仅利用高频微波波段数据,具有较高的空间分辨率,可以有效减小近岸范围混合像元的误差,但是容易受到大气水汽、云层含水量等影响^[27],对此,有学者进行了插值算法、系点值和天气滤波器等一系列试验,提出了动态系点的方法对 ASI 算法进行改进^[28-29]。Chen 等^[30]基于动态系点的改进 ASI 算法,生成了新的北极 FY-3D MWRI SIC 产品。

表1 国内外主流机构发布的7种被动微波遥感海冰密集度产品

Table 1 Seven PM-SIC products of sea ice concentration released by mainstream institutions at home and abroad

序号	数据集名称	发布机构	传感器	算法	采用的亮温波段	分辨率/km
1	UB-AMSR2/ASI	德国不莱梅大学	AMSR-E/2	ASI	85V, 85H	6.25
2	NSIDC-SSMIS/NT	美国冰雪数据中心	SSM/I-SSMIS	NT	19V, 37V, 37H	25
3	NSIDC-SSMIS/CDR	美国冰雪数据中心	SSM/I-SSMIS	CDR	19V, 19H, 37V, 37H	25
4	NSIDC-AMSR2/NT2	美国冰雪数据中心	AMSR-E/2	NT2	19V, 19H, 37V, 85V, 85H	12.5
5	OSI-SAF/BR-BST	欧洲气象卫星应用组织海洋与海冰卫星应用中心	SSMIS	Bristol & BST	19V, 37H, 37V	10
6	NSOAS-SMR/NT	国家卫星海洋应用中心	SMR	NT	19V, 19H, 37V	25
7	NSMC-MWRI/NT2	国家卫星气象中心	MWRI	NT2	19V, 19H, 37V, 85V, 85H	12.5

2.2 MODIS 和 Sentinel-1 数据

MODIS 是 Terra(EOS-AM) 和 Aqua(EOS-PM) 系列卫星的主要探测仪器, 包含 36 个波段。MODIS 影像具有宽刈幅、光谱范围广的优势, 广泛应用于被动微波海冰密集度产品的验证。Sentinel-1 卫星是欧洲航天局设计研发的载有 C 波段的雷达观测卫星, 其 SAR 数据不受天气和极夜的影响, 可用于验证南极冬季海冰密集度产品。本研究使用 500 m 空间分辨率、天气状况良好的 MODIS L1B 级数据反演海冰密集度, 以及 Sentinel-1 EW 模式下的 40 m 分辨率 GRD 数据反演海冰密集度, 用以比较和验证不同被动微波海冰密集度数据产品的差异。本文所使用 MODIS 验证数据和 Sentinel-1 验证数据分布于南极各个海域, 位置如图 1 所示。

本文使用 MODIS L1B 级产品的 1、3、4 波段的反射率数据反演的海冰密集度评估 7 种海冰密集度产品。MODIS 数据主要预处理过程包括: 太阳天顶角订正、辐射定标、去除 Bow-Tie 现象、重投影等预处理步骤, 最后通过目视筛选裁剪出严格无云的子区域^[30-31]。

利用 MODIS 数据进行海冰密集度反演, 首先根据预处理后的 MODIS 反射率数据计算反照率(A)^[31-32], 见式(1)。其中, A_1 、 A_3 、 A_4 分别为 MODIS 第 1(0.620~0.670 μm)、3(0.459~0.479 μm)、4(0.545~0.565 μm) 波段相应的反射率值。

$$A = A_1 \times 0.3265 + A_3 \times 0.4364 + A_4 \times 0.2366. \quad (1)$$

由于极区的遥感影像主要分布为冰和水, 地物类别简单, 并且冰水特征差异明显, 因此根据影像中的灰度差异通过 Otsu 算法进行海冰像元的提取^[25], 再采用阈值法^[29,33] 计算最佳动态分类阈值, 得到冰水二值化图像, 再利用冰水二值化图像采用均值法计算得

到 25 km 的海冰密集度, 用以评估被动微波海冰密集度的产品精度。

对 Sentinel-1 SAR 影像的预处理主要包括影像裁剪、多视处理、辐射校正、滤波去噪及分贝化处理^[34]。再采用 K-means 聚类方法进行影像分割^[21-35], 最后通过均值法计算得到 25 km 的海冰密集度。

表 2 给出了分布于南大洋各海域的 22 个 MODIS 和 9 个 Sentinel-1 验证数据的信息(位置见图 1), 包括影像日期、时间、MODIS 分类后的海水像元数、海冰像元数以及采用的冰水分类阈值或极化方式。

2.3 统计与比较分析方法

为了比较不同海冰密集度产品的差异, 并根据 MODIS 和 Sentinel-1 计算得到的海冰密集度对其进行评估, 本文采用 4 种统计参数, 分别是偏差 bias、平均绝对偏差 MAD、均方根偏差 RMSD 和相关系数 r , 分别如式(2)、(3)、(4)和(5)所示。

$$\text{bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n}, \quad (2)$$

$$\text{MAD} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n}, \quad (3)$$

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}, \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (5)$$

式中, X_i 为某一产品海冰密集度; Y_i 为另一产品海冰密集度或 MODIS 和 Sentinel-1 估算得到的海冰密集度;

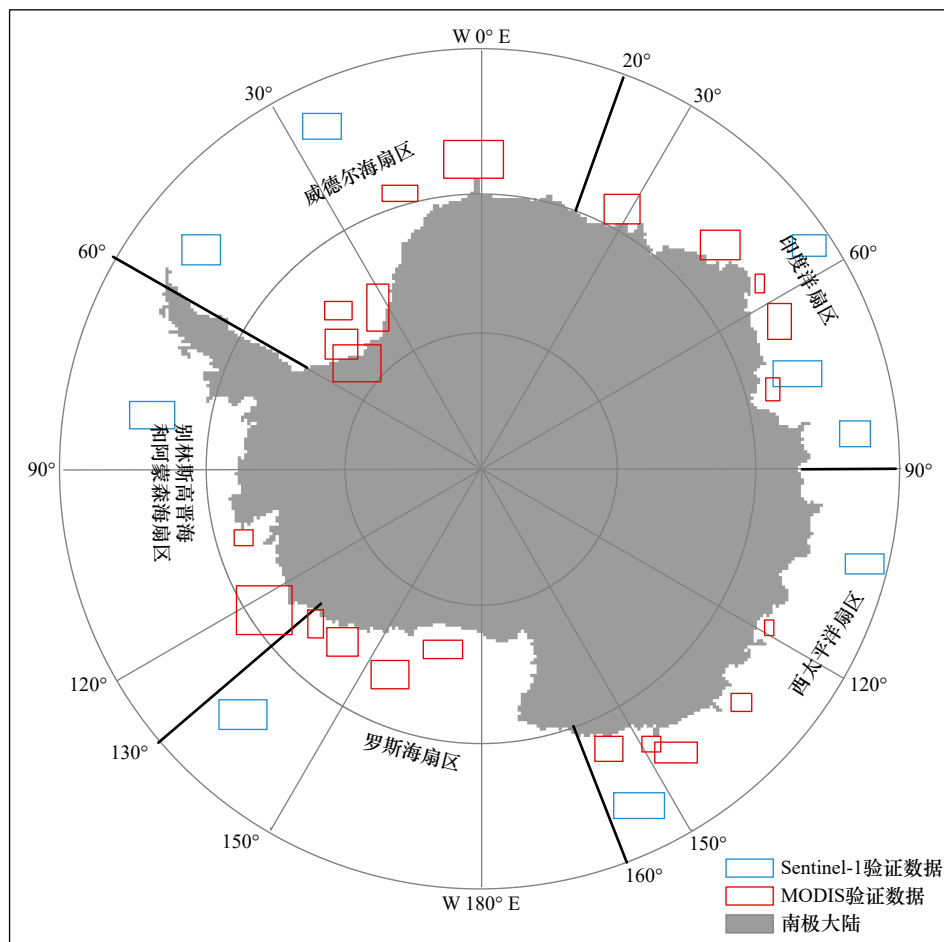


图1 本文使用的 MODIS 验证数据和 Sentinel-1 验证数据在南大洋的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of MODIS validation data and Sentinel-1 validation data used in this study

粗黑线表示不同海域的分界线

Thick black lines rearsent the dividing line between different seas

\bar{X} 、 \bar{Y} 分别为 X_i 、 Y_i 的均值; n 为样本数量。

3 南极被动微波海冰密集度产品比较

3.1 国内外 7 种 PM-SIC 整体差异分析

为了比较 7 种 PM-SIC 的整体差异,本文统计了公共时段 2019 年 5 月 31 日至 2020 年 12 月 31 日间 7 种 PM-SIC 的相关系数和平均偏差,结果如表 3 和表 4 所示。7 种 PM-SIC 两两间的相关系数均大于 0.8,其中,NSIDC-SSMIS/NT 与 NSIDC-SSMIS/CDR 的相关系数最大,为 0.99;NSIDC-AMSR2/NT2 与 NSOAS-SMR/NT、NSIDC-SSMIS/NT 和 NSIDC-SSMIS/CDR 的相关系数最小,为 0.81。NSOAS-SMR/NT 与 NSIDC-AMSR2/NT2 的偏差最大,为 14.41%,NSIDC-SSMIS/CDR 与 NSIDC-SSMIS/NT 的偏差最小,为 0.08%。NSOAS-SMR/NT 与 NSIDC-AMSR2/NT2 相关系数最小同时偏差最大,而 NSIDC-SSMIS/NT 与 NSIDC-SSMIS/CDR 相关系数最大同时偏差最小,因此整体差

异最大的两种 PM-SIC 是 NSOAS-SMR/NT 和 NSIDC-AMSR2/NT2,差异最小的两种 PM-SIC 是 NSIDC-SSMIS/NT 和 NSIDC-SSMIS/CDR。此外,具有相同算法的 NSOAS-SMR/NT 与 NSIDC-SSMIS/NT、NSMC-MWRI/NT2 与 NSIDC-AMSR2/NT2 均具有较高的相关系数,这表明海冰密集度反演算法是造成 SIC 差异的重要原因。

7 种 PM-SIC 逐日平均海冰密集度海冰范围如图 2 和图 3 所示。7 种海冰密集度的变化趋势基本一致,6-8 月各产品的海冰密集度均出现最大值;9-11 月,海冰密集度逐月减小;12-2 月海冰密集度有最小值;3-5 月海冰密集度逐渐增加。7 种海冰密集度产品整体由大到小依次为 NSIDC-AMSR2/NT2、NSMC-MWRI/NT2、UB-AMSR2/ASI、NSIDC-SSMIS/CDR、NSIDC-SSMIS/NT、OSI-SAF/BR-BST、NSOAS-SMR/NT。由 7 种 PM-SIC 计算得到的海冰范围大小与海冰密集度一致,变化趋势与文献 [13] 中的结论较为一致,南极

表2 31个验证数据信息及其冰水像元统计
Table 2 31 validation datas and its ice-water pixel statistics

影像序号	日期	时间(UTC)	海水像元数	海冰像元数	阈值/极化方式
1	2019年12月4日	04:05	4 191	29 909	0.10
2	2020年1月1日	19:15	9 307	58 643	0.14
3	2020年1月2日	10:10	9 671	24 455	0.12
4	2020年1月2日	11:50	27 749	28 751	0.13
5	2020年1月3日	09:15	6 914	8 586	0.13
6	2020年1月4日	10:00	10 429	4 293	0.14
7	2020年1月5日	02:25	10 160	18 090	0.12
8	2020年1月7日	15:20	324	18 576	0.15
9	2020年1月17日	07:40	26 465	50 512	0.16
10	2020年2月6日	10:35	16 369	45 532	0.10
11	2020年3月15日	11:35	12 865	18 597	0.15
12	2020年2月1日	08:35	19 388	17 068	0.12
13	2020年2月2日	07:40	1 019	9 129	0.13
14	2020年2月3日	05:05	763	6 637	0.16
15	2020年2月6日	05:35	1 424	10 204	0.12
16	2020年2月9日	06:05	3 362	6 736	0.12
17	2020年2月10日	05:10	2 209	8 960	0.13
18	2020年3月2日	00:35	4 397	4 844	0.12
19	2020年3月4日	23:25	8 736	9 988	0.10
20	2020年3月8日	23:00	6 554	38 237	0.14
21	2020年3月8日	10:35	7 531	37 160	0.11
22	2020年3月9日	23:45	2 051	7 948	0.18
23	2020年4月29日	22:46	4 274 358	807 944	HH
24	2020年5月24日	15:12	1 047 201	7 515 182	HV
25	2020年6月5日	14:24	772 900	6 115 240	HH
26	2020年7月4日	12:53	9 984 758	1 771 155	HH
27	2020年8月27日	04:40	2 649 462	8 128 382	HH
28	2020年9月29日	00:57	6 275 747	3 355 105	HH
29	2020年10月30日	21:24	3 357 233	4 605 976	HH
30	2020年11月30日	15:30	7 930 413	2 891 746	HV
31	2020年12月24日	17:29	4 465 685	5 690 823	HH

注: HH表示水平极化, HV表示交叉极化。

海冰范围均在9月达到最大值,在2月达到最小值。

3.2 国内两种 PM-SIC 与其他 PM-SIC 时序差异分析

图4和图5分别为国内两种海冰密集度产品

(NSOAS-SMR/NT、NSMC-MWRI/NT2)与其他 PM-SIC 的逐月相关系数和偏差。整体上看, NSOAS-SMR/NT、NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 的逐月相关系数波

表 3 7 种 PM-SIC 整体差异——相关系数

Table 3 Seven PM-SIC overall difference: correlation coefficient

	相关系数						
	NSOAS-SMR/NT	UB-AMSR2/ASI	OSI-SAF/BR-BST	NSMC-MWRI/NT2	NSIDC-AMSR2/NT2	NSIDC-SSMIS/CDR	NSIDC-SSMIS/NT
NSOAS-SMR/NT	1	0.82	0.97	0.92	0.81	0.95	0.95
UB-AMSR2/ASI	0.82	1	0.83	0.91	0.88	0.82	0.82
OSI-SAF/BR-BST	0.97	0.83	1	0.93	0.83	0.95	0.95
NSMC-MWRI/NT2	0.92	0.91	0.93	1	0.91	0.93	0.93
NSIDC-AMSR2/NT2	0.81	0.88	0.83	0.91	1	0.81	0.81
NSIDC-SSMIS/CDR	0.95	0.82	0.95	0.93	0.81	1	0.99
NSIDC-SSMIS/NT	0.95	0.82	0.95	0.93	0.81	0.99	1

表 4 7 种 PM-SIC 整体差异——平均偏差

Table 4 Seven PM-SIC overall difference: Mean Bias

	平均偏差/%						
	NSOAS-SMR/NT	UB-AMSR2/ASI	OSI-SAF/BR-BST	NSMC-MWRI/NT2	NSIDC-AMSR2/NT2	NSIDC-SSMIS/CDR	NSIDC-SSMIS/NT
NSOAS-SMR/NT	0	-9.32	-1.08	-11.06	-14.41	-5.56	-5.57
UB-AMSR2/ASI	9.32	0	8.24	-1.74	-5.09	3.66	3.74
OSI-SAF/BR-BST	1.08	-8.24	0	-9.97	-13.32	-4.57	-4.49
NSMC-MWRI/NT2	11.06	1.74	9.97	0	-3.35	5.40	5.48
NSIDC-AMSR2/NT2	14.41	5.09	13.32	3.35	0	8.75	8.83
NSIDC-SSMIS/CDR	5.65	-3.66	4.57	-5.40	-8.75	0	0.08
NSIDC-SSMIS/NT	5.57	-3.47	4.49	-5.48	-8.83	-0.08	0

动较小。NSOAS-SMR/NT 与其他 PM-SIC 的逐月相关系数在 0.75~1.0 之间, NSOAS-SMR/NT 与 OSI-SAF/BR-BST 在 2020 年 12 月的相关系数最大, 为 0.98; 与 UB-AMSR2/ASI 在 2020 年 9 月的相关系数最小, 为 0.75。NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 的逐月相关系数在 0.85~0.95 之间, NSMC-MWRI/NT2 与 NSIDC-SSMIS/CDR 和 NSIDC-SSMIS/NT 在 2020 年 12 月的相关系数最大, 为 0.94; 与 NSOAS-SMR/NT 在 2019 年 8 月的相关系数最小, 为 0.86。NSMC-MWRI/NT2 相对 NSOAS-SMR/NT 与其他 PM-SIC 的整体相关性更高。NSOAS-SMR/NT 与 OSI-SAF/BR-BST 在 2020 年 4 月的偏差最小, 为 0.48%; 与 NSIDC-AMSR2/NT2 在 2020 年 12 月的偏差最大, 为 -22.72%。NSMC-MWRI/NT2 与 NSIDC-AMSR2/NT2 在 2020 年 8 月的偏差最小, 为 -1.74%; 与 OSI-SAF/BR-BST 在 2020 年 3 月的偏差最大, 为 17.30%。国内两种 PM-SIC 与其他 PM-SIC 产品的逐月偏差在 6-11 月较为稳定, 在 12 月至

次年 5 月波动较大, 并且在 1-3 月的月均偏差高于其他月份, 原因是该时间段为南极地区的夏季消融季, 海冰处于融化阶段, 夏季海冰表面易形成积雪融池, 从而影响到微波传感器接收的辐射信号^[25-26]。

3.3 国内两种 PM-SIC 与其他 PM-SIC 空间差异分析

为了分析 NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 在南大洋各海域的差异, 分别计算了 NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 在南大洋各扇区的偏差、绝对偏差、均方根差异和相关系数(见附录 1 和附录 2)。图 6 和图 7 为国内两种 PM-SIC 与其他 PM-SIC 的相关系数在南大洋各海域的空间分布。NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 在罗斯海扇区偏差最小的同时相关系数最大, 因此, NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 在罗斯海扇区的差异最小。NSOAS-SMR/NT 与 OSI-SAF/BR-BST 和 NSIDC-AMSR2/NT2 在印度洋扇区的偏差较大, 与其他 4 种 PM-SIC

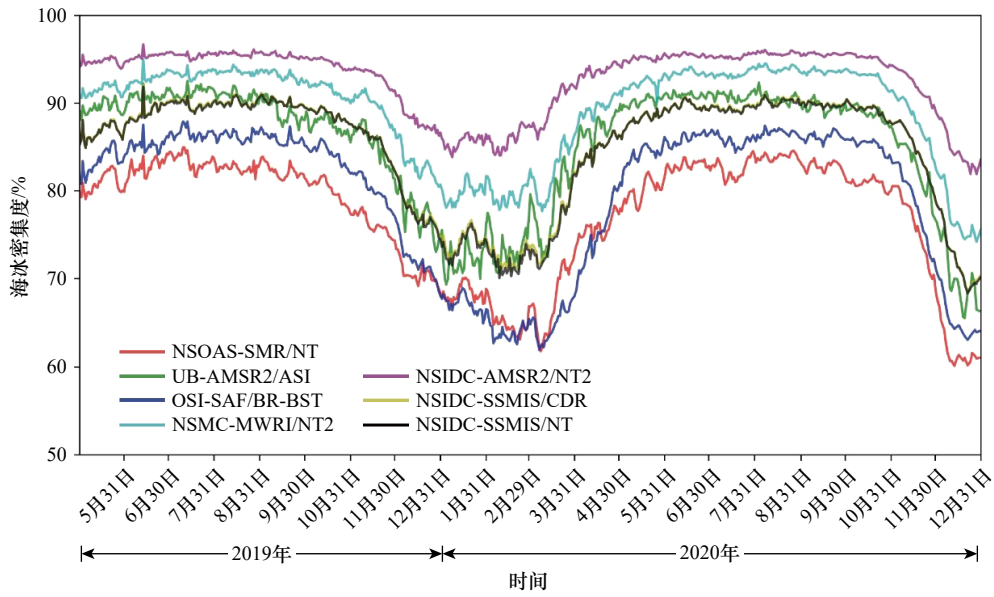


图2 7种PM-SIC逐日平均海冰密集度时间序列

Fig. 2 Time series of seven PM-SIC daily average sea ice concentration

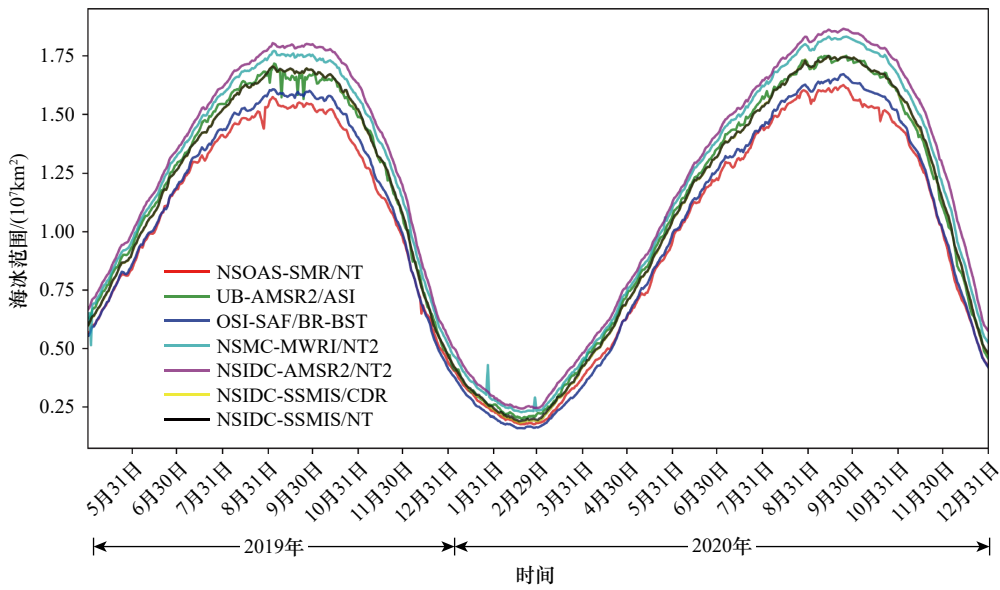


图3 7种PM-SIC逐日海冰范围时间序列

Fig. 3 Time series of daily sea ice extent calculated based on seven PM-SIC

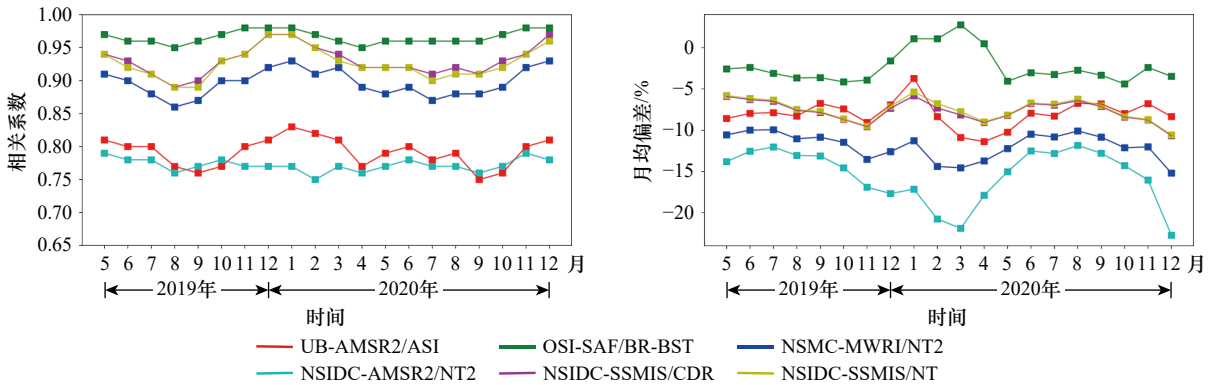


图4 NSOAS-SMR/NT与其他海冰密集度产品的相关系数及月均偏差

Fig. 4 Monthly correlation coefficient and mean deviation between NSOAS-SMR/NT and other sea ice concentration products

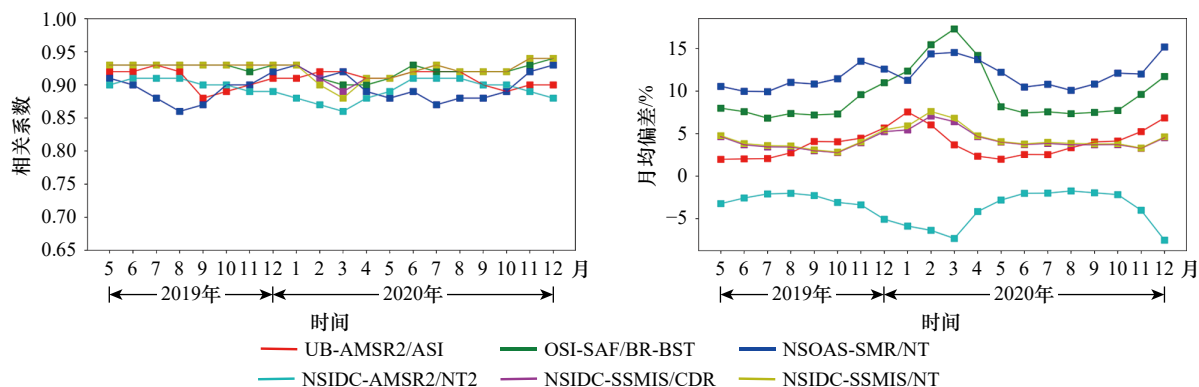


图 5 NSMC-MWRI/NT2 与其他海冰密集度产品的相关系数及月均偏差

Fig. 5 Monthly correlation coefficient and mean deviation between NSMC-MWRI/NT2 and other sea ice concentration products

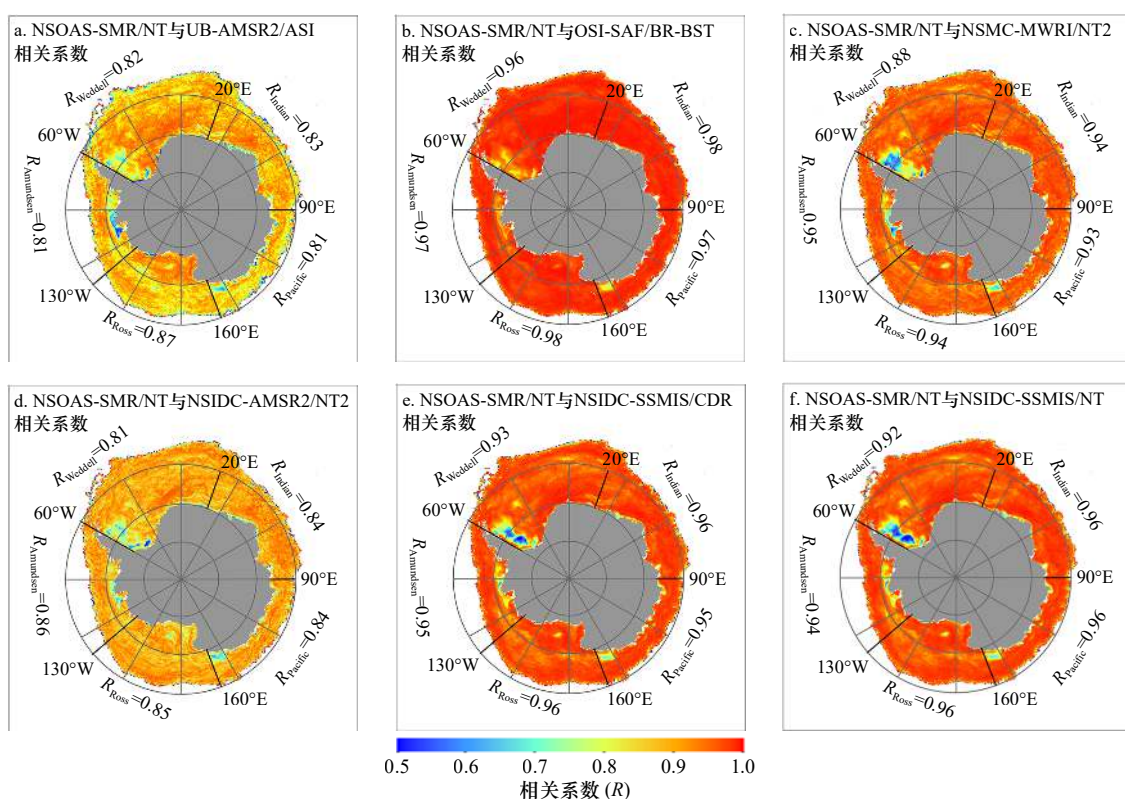


图 6 NSOAS-SMR/NT 与其他被动微波海冰密集度产品相关系数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of correlation coefficients between NSOAS-SMR/NT and other passive microwave sea ice concentration products

在别林斯高晋海和阿蒙森海扇区的偏差较大; NSMC-MWRI/NT2 与 OSI-SAF/BR-BST 和 NSOAS-SMR/NT 在别林斯高晋海和阿蒙森海扇区的差异较大, 与其他 4 种 PM-SIC 在印度洋扇区的差异较大。此外, NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 在威德尔海西部靠近南极半岛附近都相对较低, 原因是此海域多为多年冰, 且易受流涡和风场的影响^[36]。

图 8 和图 9 为 NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 年均偏差的空间分布。在海冰边缘区和近陆地海域, NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/

NT2 与其他 PM-SIC 偏差较大, 且越靠近边缘区偏差越大。其中 NSOAS-SMR/NT 与其他 PM-SIC 偏差为 -15% ~ -20%, NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 偏差为 18% ~ 20%。高密度区域偏差较小, 其中 NSOAS-SMR/NT 与其他 PM-SIC 偏差为 -5% ~ 3%, NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 偏差为 0 ~ 5%。

通过上述分析可知, NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 平均偏差分布具有一定的空间差异。偏差较大的区域主要分布在海冰边缘区及近陆地海域, 而在高密度区域则差异较小。在近陆

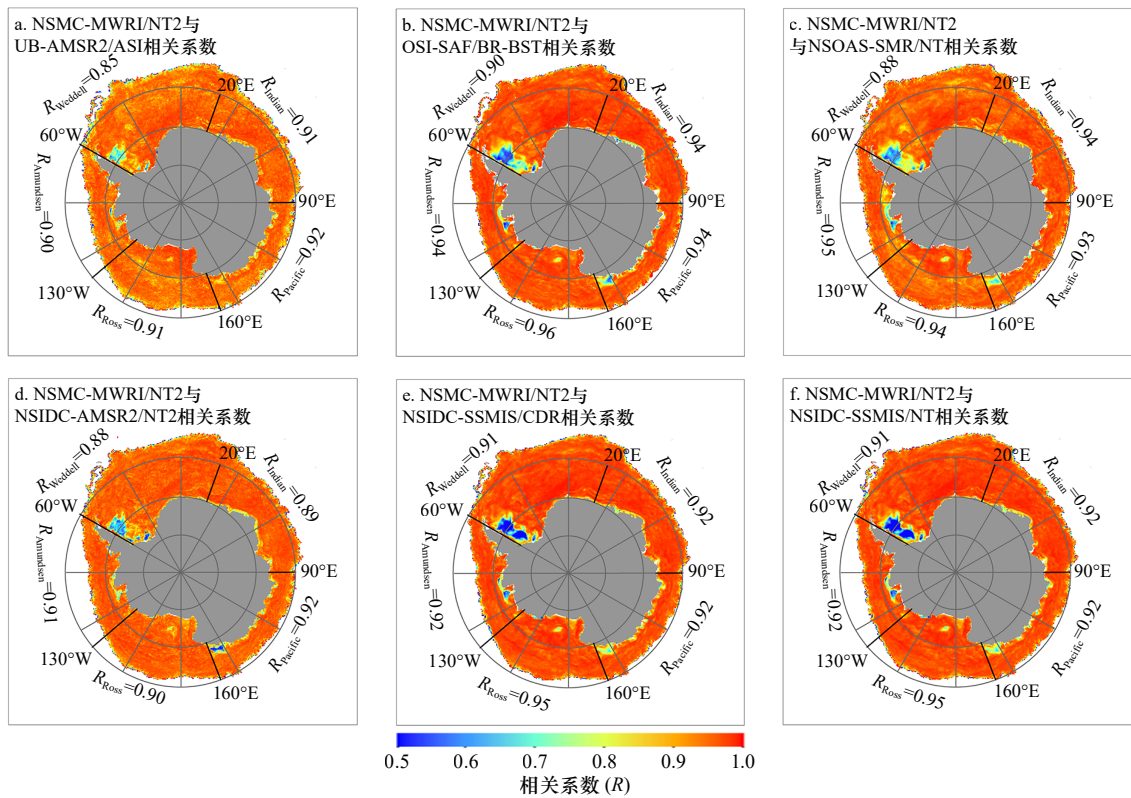


图7 NSMC-MWRI/NT2与其他被动微波海冰密集度产品相关系数空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of correlation coefficients between NSMC-MWRI/NT2 and other passive microwave sea ice concentration products

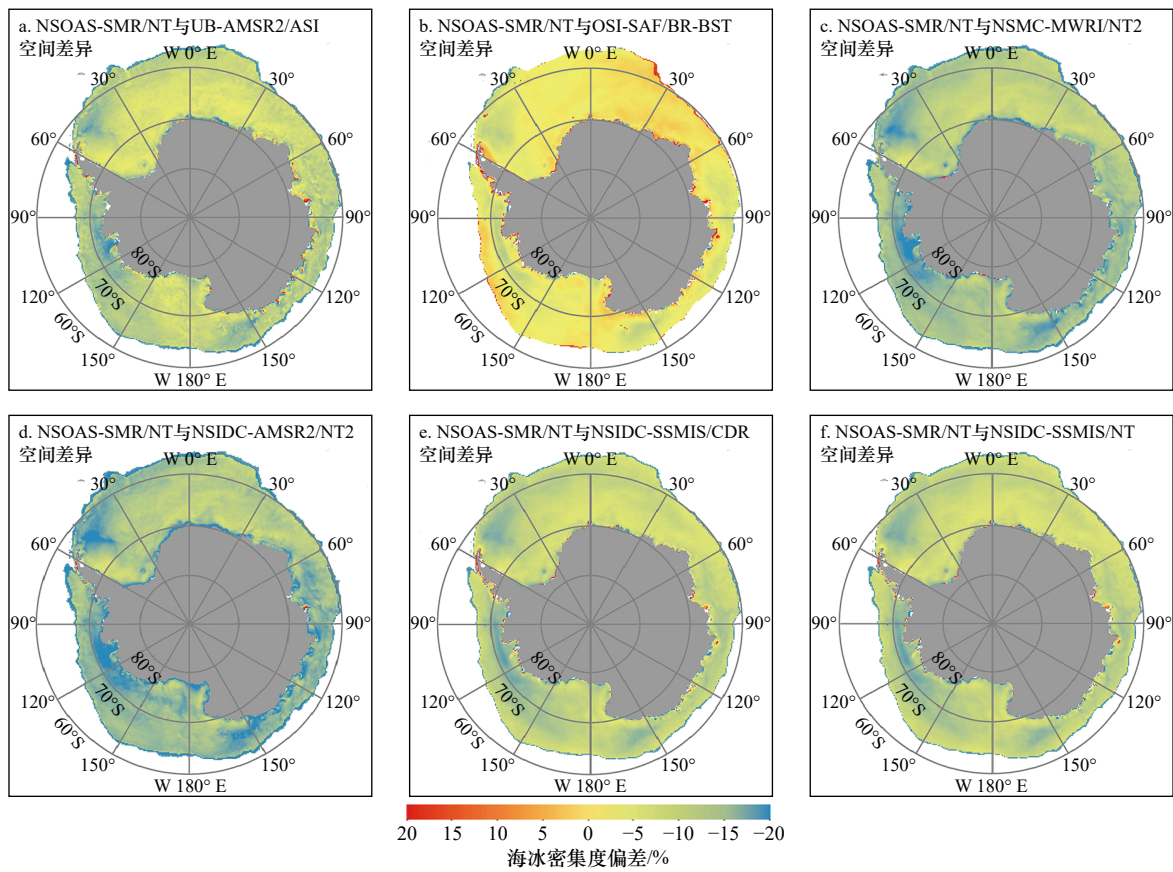


图8 2020年NSOAS-SMR/NT与其他被动微波海冰密集度产品年均偏差空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of mean annual deviations between NSOAS-SMR/NT and other PM-SIC products in 2020

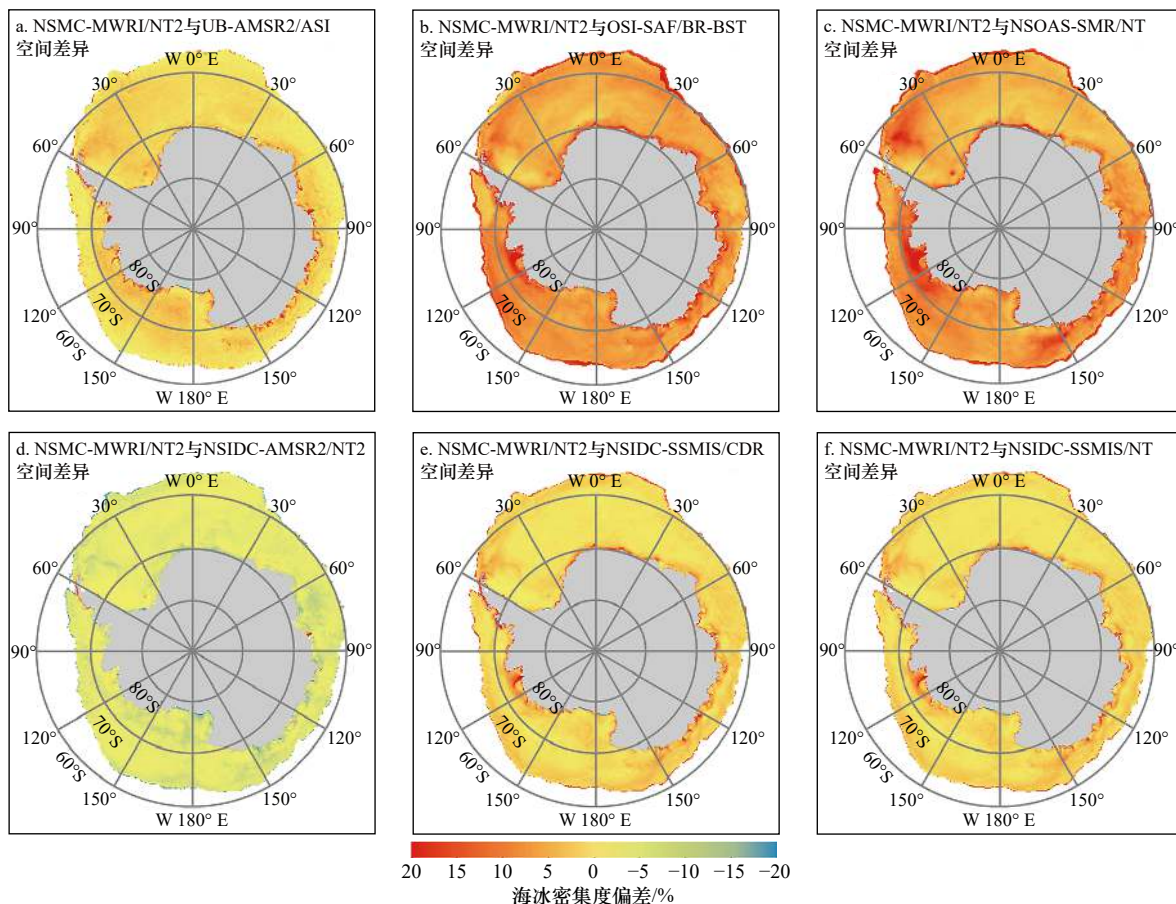


图9 2020年NSMC-MWRI/NT2与其他被动海冰密集度产品年均偏差空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of annual average deviation between NSMC-MWRI/NT2 and other PM-SIC products in 2020

地海域偏差较大的原因一是混合像元效应导致由不同传感器和算法反演得到的海冰密集度具有较大差异；二是陆地效应导致近岸区域陆地比海洋亮温高得多而产生模糊，不同传感器的足迹大小和访问时间不同，进而导致不同的陆地到海洋的溢出效应结果^[37]。由于不同产品基于不同的频段采用不同的原理和反演算法，因此，在海冰边缘区具有较大的差异，如NSOAS-SMR/NT产品采用的NT算法能够较好地地区分多年冰和一年冰，但因对新生冰辨识不足，在新冰区会低估实际的SIC^[23]。不同的算法对积雪或海冰融化引起的冰雪物理特性变化的探测差异大，不同传感器之间的数据采集时间存在差异，再加之低空间分辨率对融池和水道的识别不准确，共同导致不同的产品之间存在较大差异^[26]。

4 基于MODIS和Sentinel-1数据的南极PM-SIC产品的评估

4.1 MODIS和Sentinel-1海冰密集度与PM-SIC产品的相关性分析

通过对22个MODIS数据的预处理和海冰密集

度反演，得到数据的反照率(Albedo)、冰水二值化图(Binarization)和MODIS 25 km分辨率的海冰密集度(MODIS-SIC)。对9个Sentinel-1数据的预处理和海冰密集度反演，得到数据分贝化后的后向散射(Decibelization)、冰水二值化图和Sentinel-1 25 km分辨率的海冰密集度(Sentinel-1-SIC)。图10和图11分别展示了其中的无明显海冰边界碎冰区域、低海冰密集度区域、有明显海冰边界区域和高海冰密集度区域的样本及其时空对应的PM-SIC。在无明显海冰边界的碎冰区，NSIDC-AMSR2/NT2与MODIS-SIC、Sentinel-1-SIC的差异最小；在低海冰密集度区域，NSMC-MWRI/NT2与MODIS-SIC的差异最小，NSIDC-AMSR2/NT2与Sentinel-1-SIC差异最小；在有明显海冰边界区域，NSOAS-SMR/NT与MODIS-SIC的差异最小，NSMC-MWRI/NT2与Sentinel-1-SIC差异最小；在高海冰密集度区域，OSI-SAF/BR-BST与MODIS-SIC差异最小，UB-AMSR2/ASI与Sentinel-1-SIC差异最小。

MODIS和Sentinel-1海冰密集度与各SIC的线性关系能够反映不同SIC数据产品与更高分辨率的验证数据的相关性。表5为7种PM-SIC与对应区域验

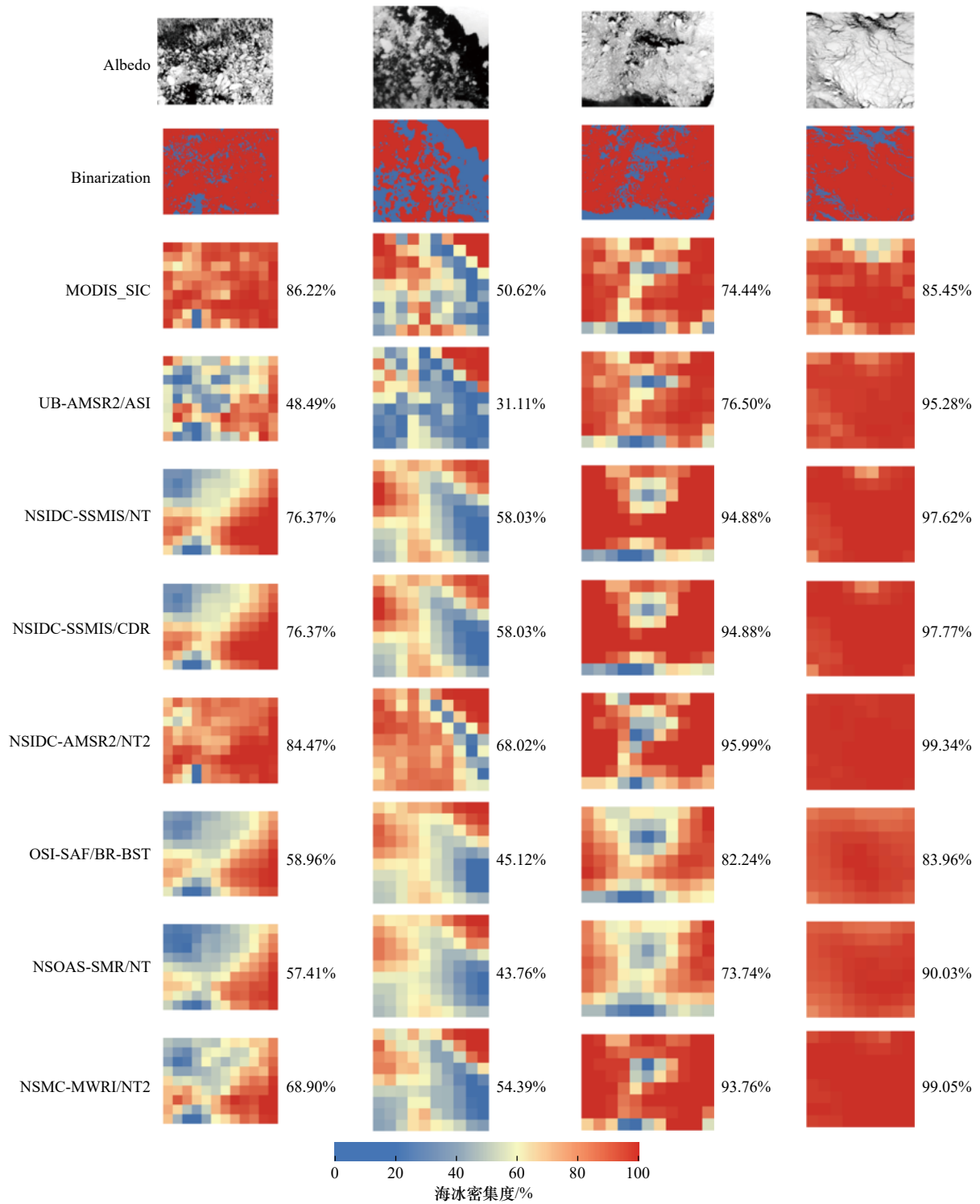


图 10 MODIS 海冰密集度示例及对应区域海冰密集度
 Fig. 10 Example of MODIS derived SIC and PM-SIC at corresponding region

数据获取的 SIC 值间的相关系数。可以发现, 7 种 PM-SIC 中, UB-AMSR2/ASI 与验证数据海冰密集度整体相关性最高, 达到 0.83; NSMC-MWRI/NT2 次之 (0.82); NSIDC 发布的 3 种 PM-SIC 与验证数据海冰密集度的相关系数分别为 0.79(NSIDC-AMSR2/NT2)、0.71(NSIDC-SSMIS/CDR)、0.70(NSIDC-SSMIS/NT);

NSOAS-SMR/NT 和 OSI-SAF/BR-BST 与验证数据海冰密集度的相关系数相同, 均为 0.75。7 种 PM-SIC 中 UB-AMSR/NT2 空间分辨率最高, 而 NSIDC-SSMIS/CDR、NSIDC-SSMIS/NT 和 NSOAS-SMR/NT 空间分辨率较低, 因此, 空间分辨率是不同 PM-SIC 产品差异的另一个重要原因。

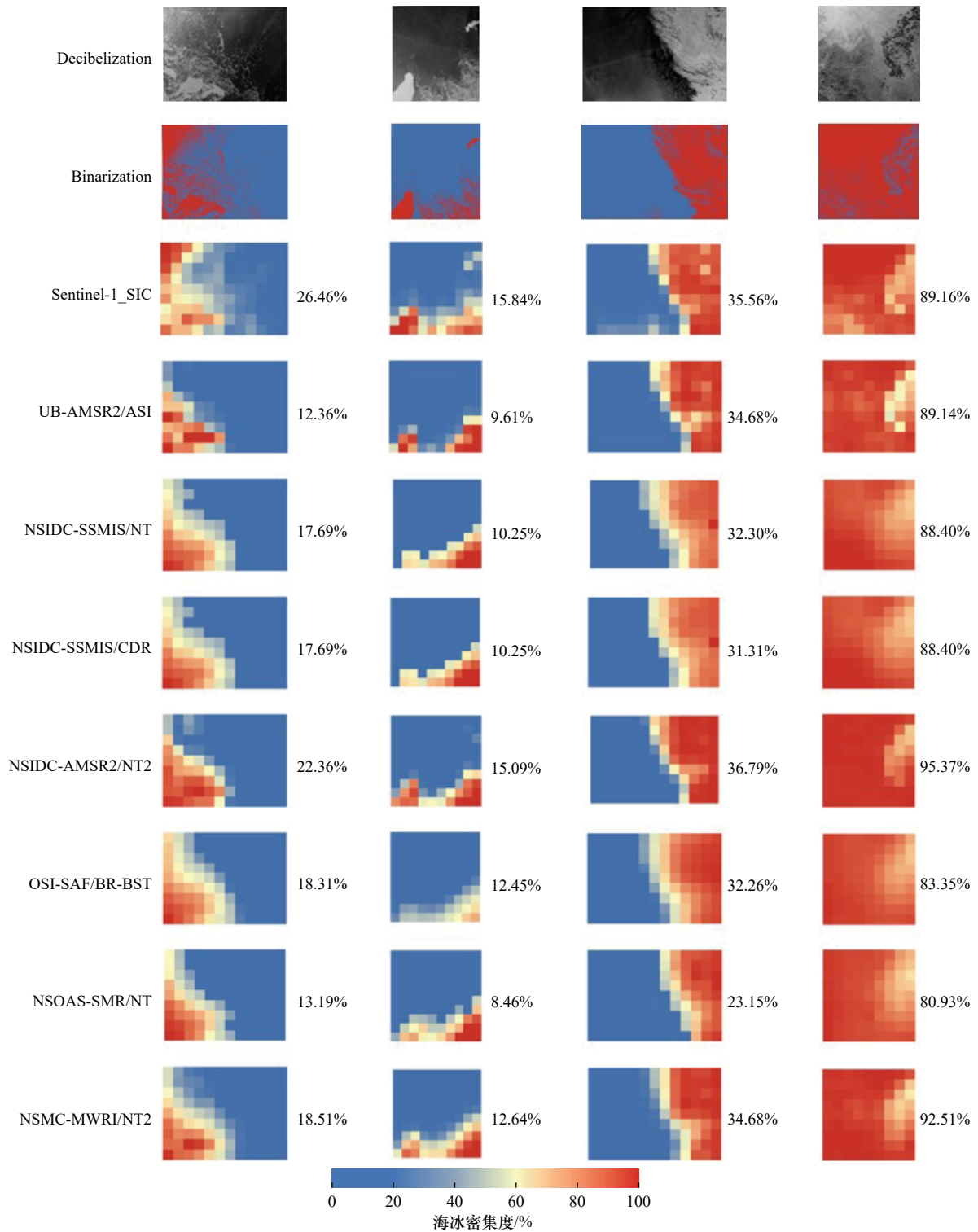


图 11 Sentinel-1 海冰密集度示例及对应区域海冰密集度
 Fig. 11 Example of Sentinel-1 derived SIC and PM-SIC at corresponding region

4.2 MODIS 和 Sentinel-1 海冰密集度与 PM-SIC 产品的一致性分析

通过比较验证数据海冰密集度与各 PM-SIC 间的偏差、绝对偏差及均方根误差, 可进一步验证分析各 SIC 产品与较高分辨率光学遥感数据和 SAR 数据反演的 SIC 间的一致性。

表 6 为各 PM-SIC 产品与验证数据海冰密集度间的偏差、绝对偏差、均方根误差和相关系数, 其中 UB-AMSR2/ASI 和 NSMC-MWRI/NT2 与验证数据海冰密集度相关系数较高, NSIDC-AMSR2/NT2 次之, NSOAS-SMR/NT、OSI-SAF/BR-BST 和 NSIDC-SSMIS/CDR 相关系数较低, NSIDC-SSMIS/NT 相关系数最

表5 7种 PM-SIC 与验证数据海冰密集度的相关系数
Table 5 Correlation coefficient between seven PM-SIC and validation derived SIC

影像序号	相关系数						
	NSOAS-SMR/NT	UB-AMSR2/ASI	OSI-SAF/BR-BST	NSMC-MWRI/NT2	NSIDC-AMSR2/NT2	NSIDC-SSMIS/CDR	NSIDC-SSMIS/NT
1	0.54	0.76	0.61	0.68	0.89	0.61	0.61
2	0.67	0.84	0.65	0.84	0.83	0.64	0.64
3	0.89	0.87	0.90	0.91	0.92	0.89	0.90
4	0.75	0.67	0.72	0.80	0.74	0.75	0.75
5	0.70	0.86	0.77	0.83	0.82	0.76	0.78
6	0.70	0.73	0.62	0.79	0.73	0.65	0.65
7	0.65	0.74	0.57	0.64	0.66	0.45	0.43
8	0.81	0.94	0.80	0.89	0.76	0.79	0.79
9	0.74	0.92	0.82	0.75	0.77	0.82	0.82
10	0.71	0.84	0.63	0.74	0.51	0.77	0.77
11	0.58	0.87	0.66	0.71	0.49	0.57	0.56
12	0.77	0.93	0.84	0.91	0.92	0.79	0.78
13	0.74	0.79	0.80	0.73	0.84	0.76	0.71
14	0.69	0.91	0.67	0.89	0.92	0.65	0.56
15	0.71	0.84	0.67	0.87	0.79	0.64	0.62
16	0.62	0.97	0.71	0.84	0.88	0.68	0.68
17	0.89	0.95	0.94	0.97	0.89	0.90	0.86
18	0.90	0.92	0.84	0.92	0.92	0.90	0.93
19	0.87	0.91	0.80	0.93	0.46	0.49	0.32
20	0.72	0.74	0.74	0.70	0.73	0.61	0.59
21	0.81	0.87	0.81	0.85	0.66	0.85	0.85
22	0.87	0.93	0.44	0.77	0.87	0.26	0.24
23	0.77	0.84	0.77	0.87	0.92	0.74	0.74
24	0.71	0.53	0.79	0.82	0.86	0.77	0.77
25	0.55	0.75	0.52	0.68	0.73	0.41	0.41
26	0.91	0.91	0.91	0.92	0.93	0.90	0.91
27	0.97	0.96	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98
28	0.95	0.99	0.95	0.98	0.99	0.97	0.96
29	0.59	0.61	0.63	0.56	0.60	0.63	0.63
30	0.79	0.70	0.84	0.78	0.74	0.79	0.79
31	0.71	0.69	0.72	0.75	0.71	0.73	0.73
平均	0.75	0.83	0.75	0.82	0.79	0.71	0.70

低, 仅为 0.70。通过分析偏差可见, NSOAS-SMR/NT、UB-AMSR2/ASI 和 OSI-SAF/BR-BST 比验证数据海冰

密集度偏低, NSMC-MWRI/NT2、NSIDC-AMSR2/NT2、NSIDC-SSMIS/CDR 和 NSIDC-SSMIS/NT 比验证数据

表 6 7 种 PM-SIC 与验证数据海冰密集度间的偏差、绝对偏差、均方根误差和相关系数

Table 6 Deviation, absolute deviation, root mean square error and correlation coefficient between seven PM-SIC and validation derived SIC

	NSOAS-SMR/NT	UB-AMSR2/ASI	OSI-SAF/BR-BST	NSMC-MWRI/NT2	NSIDC-AMSR2/NT2	NSIDC-SSMIS/CDR	NSIDC-SSMIS/NT
偏差/%	-7.41	-6.88	-7.40	5.00	11.74	1.68	1.61
绝对偏差/%	17.23	15.22	17.90	13.40	15.29	15.70	16.05
均方根误差/%	21.56	19.50	21.71	18.23	21.55	20.60	20.80
相关系数	0.75	0.83	0.75	0.82	0.79	0.71	0.70

海冰密集度偏高,这与文献 [15] 和 [19] 中的结果一致。其中, NSIDC-SSMIS/NT 的偏差最小,为 1.61%, NSIDC-AMSR2/NT2 的偏差最大,为 11.74%。验证数据较高的空间分辨率可以观测到小尺度细节的 SIC 变化,而 ASI 算法和 Bristol & BST 算法对新生冰和融池的识别度较低^[26-27],因此相较验证数据海冰密集度有所偏低。通过分析绝对偏差和均方根误差可见, OSI-SAF/BR-BST 的绝对偏差和均方根误差均最大,分别为 17.90% 和 21.71%, NSMC-MWRI/NT2 绝对偏差和均方根误差均最小,分别为 13.40% 和 18.23%,其余 5 种 PM-SIC 绝对偏差分布在 15%~18%,均方根误差分布在 19%~22%。

7 种 PM-SIC 中, NSMC-MWRI/NT2 相关系数较高但绝对偏差和均方根误差值最小,与验证数据的一致性较高, NT2 算法较 NT 算法利用极化比降低了海冰表面变化的影响,此外,相比于 25 km 空间分辨率的产品, NSMC-MWRI/NT2 能观测到更小尺度的 SIC 变化。OSI-SAF/BR-BST 数据有较高的绝对偏差和均方根误差,表明该数据的反演易受到其他因素影响。7 种 PM-SIC 数据间的偏差、绝对偏差之间存在较大差异,影响因素包含不同产品间获取亮温数据的传感器差异、卫星观测时间差异、算法差异、空间分辨率差异、后处理方法差异及对气候环境等因素的敏感性差异^[26]。

5 结论

针对南极海冰密集度产品的比较与验证研究较少,同时也缺乏对我国 FY-3 和 HY-2B 海冰密集度产品的比较与评估问题,本研究应用分布南极各海域的 MODIS 和 Sentinel-1 数据反演的海冰密集度,对国内外常用的 7 种被动微波海冰密集度数据产品进行对比与验证,得到如下结论。

NSIDC-SSMIS/NT 与 NSIDC-SSMIS/CDR 具有较高的一致性(平均偏差 - 0.08%, 相关系数 0.99),而

NSOAS-SMR/NT 与 NSIDC-AMSR2/NT2 间的差异最大(平均偏差 -14.41%, 相关系数 0.81)。具有相同算法的 NSOAS-SMR/NT 与 NSIDC-SSMIS/NT, NSMC-MWRI/NT2 与 NSIDC-AMSR2/NT2 均具有较高的相关系数,反映出不同海冰密集度反演算法是造成 SIC 差异的重要原因。

7 种 PM-SIC 产品的变化趋势一致。NSOAS-SMR/NT 与其他数据的逐月相关系数在 0.75~1.0 之间, NSMC-MWRI/NT2 与其他数据的逐月相关系数在 0.85~0.95 之间, NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 产品的整体相关性更高。NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 的偏差具有明显的季节差异, 1-3 月的偏差高于其他月份, 6-8 月的月均偏差较小。对 NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 产品进行了在南大洋各海域空间差异分析,发现 NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 与其他 PM-SIC 均在印度洋扇区、别林斯高晋海和阿蒙森海扇区绝对偏差较大,在罗斯海扇区差异最小。南极偏差较大的区域主要分布在海冰边缘区及近陆海域,在高密集度海域差异较小。

通过与 MODIS 和 Sentinel-1 海冰密集度对比,在无明显海冰边界的碎冰区, NSIDC-AMSR2/NT2 精度较高;在低海冰密集度区域, NSMC-MWRI/NT2 和 NSIDC-AMSR2/NT2 精度较高;在有明显海冰边界区域, NSOAS-SMR/NT 和 NSMC-MWRI/NT2 精度较高;在高海冰密集度区域, OSI-SAF/BR-BST 和 UB-AMSR2/ASI 精度较高。NSOAS-SMR/NT、BU-AMSR2/ASI 和 OSI-SAF/BR-BST 比验证数据海冰密集度偏低,而 NSMC-MWRI/NT2、NSIDC-AMSR2/NT2、NSIDC-SSMIS/CDR 和 NSIDC-SSMIS/NT 比验证数据海冰密集度偏高。其中, NSMC-MWRI/NT2 数据相关性较高且绝对偏差和均方根误差值最小,与验证数据的一致性较高。OSI-SAF/BR-BST 数据受到其他因素影响较

大,有较大的绝对偏差和均方根误差。空间分辨率越高的PM-SIC产品,与验证数据海冰密集度的相关性越高。不同PM-SIC产品差异的原因主要包括传感器波段差异、数据采集时间不一致、空间分辨率差异等因素。分析不同海冰密集度产品间的差异,评估不同产品的精度,可为更好地应用海冰密集度遥感产品,以及南极海冰与气候变化等相关科学研究提供参考。

参考文献:

- [1] Turner J, Bindshadler R A, Convey P, et al. Antarctic Climate Change and the Environment[M]. Cambridge: SCAR, 2009.
- [2] Parkinson C L, Cavalieri D J. A 21 year record of Arctic sea-ice extents and their regional, seasonal and monthly variability and trends[J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34: 441-446.
- [3] 王今菲, 杨清华, 于乐江, 等. 南极海冰变化及其气候效应研究述评[J]. 海洋学报, 2021, 43(7): 11-22.
Wang Jinfei, Yang Qinghua, Yu Lejiang, et al. A review on Antarctic sea ice change and its climate effects[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(7): 11-22.
- [4] 赵羲, 苏昊月, 石中玉, 等. 南极海冰密集度多源数据的交叉检验[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(11): 1460-1466.
Zhao Xi, Su Haoyue, Shi Zhongyu, et al. Intercomparison of multi-sources sea ice concentration data in Antarctic[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(11): 1460-1466.
- [5] 解思梅, 邹斌, 王毅. 南极海冰的长期变化趋势[J]. 海洋预报, 1996(3): 21-29.
Xie Simei, Zou Bin, Wang Yi. Long-range variation trend of the Antarctic sea ice[J]. *Marine Forecasts*, 1996(3): 21-29.
- [6] Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 881-889.
- [7] Cavalieri D J, Gloersen P, Campbell W J. Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1984, 89(D4): 5355-5369.
- [8] Comiso J C, Cavalieri D J, Parkinson C L, et al. Passive microwave algorithms for sea ice concentration: a comparison of two techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 60(3): 357-384.
- [9] Markus T, Cavalieri D J. An enhancement of the NASA Team sea ice algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(3): 1387-1398.
- [10] Kern S, Laverne T, Notz D, et al. Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: closed ice and ship-based observations[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(12): 3261-3307.
- [11] Spreen G, Kaleschke L, Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C2): C02S03.
- [12] Ivanova N, Johannessen O M, Pedersen L T, et al. Retrieval of Arctic sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: a comparison of eleven sea ice concentration algorithms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(11): 7233-7246.
- [13] Andersen S, Tonboe R, Kaleschke L, et al. Intercomparison of passive microwave sea ice concentration retrievals over the high-concentration Arctic sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C8): C08004.
- [14] Ivanova N, Pedersen L T, Tonboe R T, et al. Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(5): 1797-1817.
- [15] 苏昊月, 庞小平, 赵羲. 南极海冰边界AMSR-E密集度产品精度检验[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(4): 559-564.
Su Haoyue, Pang Xiaoping, Zhao Xi. Assessment of AMSR-E sea ice concentration products at ice edges in Antarctic[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(4): 559-564.
- [16] 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.
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.
- [17] 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.
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.
- [18] Andersen S, Tonboe R, Kern S, et al. Improved retrieval of sea ice total concentration from spaceborne passive microwave observations using numerical weather prediction model fields: an intercomparison of nine algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(4): 374-392.
- [19] 李钊, 严明, 刘凯, 等. 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[J]. 海洋预报, 2018, 35(3): 8-16.
Li Zhao, Yan Ming, Liu Kai, et al. The assessment of the applicability of AMSR2 and SSMIS near real time satellite sea ice concentration during 5th CHINARE Arctic cruise[J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(3): 8-16.
- [20] 刘婷婷, 杨子健, 王泽民, 等. 利用风云3D微波成像仪数据估算北极海冰密集度的精度评价[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(12): 1843-1851.
Liu Tingting, Yang Zijian, Wang Zemin, et al. Evaluation of Arctic sea ice concentration estimated by Fengyun-3D microwave radiation imager[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(12): 1843-1851.
- [21] 郑杨龙, 卢鹏, 李志军, 等. 基于Radarsat-2 SAR图像分类与HY-2微波辐射计反演获取北极海冰密集度的比较研究[J]. 极地研究,

- 2016, 28(3): 413–423.
- Zheng Yanglong, Lu Peng, Li Zhijun, et al. Comparisons of Arctic sea ice concentrations obtained by classification of radarsat-2 synthetic aperture radar imagery and retrievals from HY-2 scanning microwave radiometer[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2016, 28(3): 413–423.
- [22] 谢涛, 赵立. 海冰密集度卫星遥感反演研究进展[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 351–366.
- Xie Tiao, Zhao Li. Advances in sea ice concentration retrieval based on satellite remote sensing[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 351–366.
- [23] 赵进平, 任敬萍. 从航空数字影像提取北极海冰形态参数的方法研究[J]. 遥感学报, 2000, 21(4): 271–278.
- Zhao Jinping, Ren Jingping. Study on the method to analyze parameters of Arctic sea ice from airborne digital imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 21(4): 271–278.
- [24] Partington K, Flynn T, Lamb D, et al. Late twentieth century northern Hemisphere sea-ice record from U. S. National Ice Center ice charts[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003, 108(C11): 3343.
- [25] 梁爽. 极地海冰密集度和厚度遥感反演方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- Liang Shuang. Research on polar sea ice concentration and thickness retrieval using remote sensing observations[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [26] 王剑, 邱玉宝, 熊振华, 等. 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[J]. 极地研究, 2020, 32(3): 301–313.
- Wang Jian, Qiu Yubao, Xiong Zhenhua, et al. Comparison and verification of remote sensing sea ice concentration products for Arctic shipping regions[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2020, 32(3): 301–313.
- [27] 苏洁, 郝光华, 叶鑫欣, 等. 极区海冰密集度 AMSR-E 数据反演算法的试验与验证[J]. 遥感学报, 2013, 17(3): 495–513.
- Su Jie, Hao Guanghua, Ye Xinxin, et al. The experiment and validation of sea ice concentration AMSR-E retrieval algorithm in polar region[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(3): 495–513.
- [28] Hao Hairui, Su Jie, Shi Qian, et al. Arctic sea ice concentration retrieval using the DT-ASI algorithm based on FY-3B/MWRI data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2021, 40(11): 176–188.
- [29] 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.
- [30] Chen Ying, Zhao Xi, Pang Xiaoping, et al. Daily sea ice concentration product based on brightness temperature data of FY-3D MWRI in the Arctic[J]. Big Earth Data, 2022, 6(2): 164–178.
- [31] Cavalieri D J, Markus T, Hall D K, et al. Assessment of AMSR-E Antarctic winter sea-ice concentrations using Aqua MODIS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(9): 3331–3339.
- [32] Liang Shunlin, Strahler A H, Walthall C. Retrieval of land surface albedo from satellite observations: a simulation study[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38(6): 712–725.
- [33] Shi Qian, Su Jie, Heygster G, et al. Step-by-step validation of Antarctic ASI AMSR-E Sea-Ice concentrations by MODIS and an Aerial Image[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 59(1): 392–403.
- [34] 杨魁, 杨建兵, 江冰茹. Sentinel-1 卫星综述[J]. 城市勘测, 2015(2): 24–27.
- Yang Kui, Yang Jianbing, Jiang Bingru. Sentinel-1 satellite overview[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2015(2): 24–27.
- [35] 朱婷婷. 南北极典型场景 SAR 海冰解译研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- Zhu Tingting. Interpretation of sea ice geophysical parameters from SAR in selected regions of the Antarctic and the Arctic[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [36] 刘境舟, 赵亮, 王圣, 等. 威德尔海海冰年际变化特征[J]. 极地研究, 2021, 33(4): 518–528.
- Liu Jingzhou, Zhao Liang, Wang Sheng, et al. Interannual variation characteristics of sea ice in the Weddell Sea[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2021, 33(4): 518–528.
- [37] 刘森, 邹斌, 石立坚, 等. 基于 FY-3C 微波辐射计数据的极区海冰密集度反演方法研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(1): 113–122.
- Liu Sen, Zou Bin, Shi Lijian, et al. Polar sea ice concentration retrieval based on FY-3C microwave radiation imager data[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(1): 113–122.

附录

附录 1 NSOAS-SMR/NT 与其他被动微波海冰密集度产品在南极各海域的差异

Appendix 1 Differences between NSOAS-SMR/NT and other PM-SIC products in different Antarctic seas

海域	对比海冰密集度产品	偏差/%	绝对偏差/%	均方根差异/%	相关系数
威德尔海扇区	UB-AMSR2/ASI	-10.23	11.34	15.34	0.79
	OSI-SAF/BR-BST	-1.71	3.76	4.86	0.97

续附录 1

海域	对比海冰密集度产品	偏差/%	绝对偏差/%	均方根差异/%	相关系数
威德尔海扇区	NSMC-MWRI/NT2	-11.41	11.53	14.12	0.89
	NSIDC-AMSR2/NT2	-13.67	13.88	17.84	0.79
	NSIDC-SSMIS/CDR	-7.12	7.60	9.88	0.93
	NSIDC-SSMIS/NT	-6.97	7.70	9.91	0.93
印度洋扇区	UB-AMSR2/ASI	-9.25	13.43	16.51	0.81
	OSI-SAF/BR-BST	-3.13	4.49	5.88	0.98
	NSMC-MWRI/NT2	-12.00	12.1	13.79	0.94
	NSIDC-AMSR2/NT2	-19.02	19.35	21.95	0.82
	NSIDC-SSMIS/CDR	-4.20	5.23	6.70	0.96
	NSIDC-SSMIS/NT	-4.15	5.28	6.76	0.96
西太平洋扇区	UB-AMSR2/ASI	-9.38	12.63	16.11	0.82
	OSI-SAF/BR-BST	0.66	3.74	4.96	0.97
	NSMC-MWRI/NT2	-11.39	11.50	13.59	0.93
	NSIDC-AMSR2/NT2	-15.36	16.28	19.51	0.82
	NSIDC-SSMIS/CDR	-3.03	5.35	6.78	0.95
	NSIDC-SSMIS/NT	-2.84	5.52	7.00	0.95
罗斯海扇区	UB-AMSR2/ASI	-6.34	7.70	10.37	0.88
	OSI-SAF/BR-BST	-0.21	2.24	3.20	0.98
	NSMC-MWRI/NT2	-8.98	9.00	10.45	0.95
	NSIDC-AMSR2/NT2	-11.58	11.75	14.85	0.83
	NSIDC-SSMIS/CDR	-4.73	5.16	6.47	0.96
	NSIDC-SSMIS/NT	-4.72	5.18	6.48	0.96
别林斯高晋海和阿蒙森海扇区	UB-AMSR2/ASI	-14.24	15.56	17.88	0.83
	OSI-SAF/BR-BST	-1.33	3.44	4.39	0.97
	NSMC-MWRI/NT2	-13.99	14.25	15.30	0.95
	NSIDC-AMSR2/NT2	-17.87	18.32	20.18	0.85
	NSIDC-SSMIS/CDR	-7.99	8.09	9.72	0.95
	NSIDC-SSMIS/NT	-7.99	8.09	9.72	0.95

附录 2 NSMC-MWRI/NT2 与其他被动微波海冰密集度产品在南极各海域的差异

Appendix 2 Differences between NSMC-MWRI/NT2 and other PM-SIC products in different Antarctic seas

海域	海冰密集度产品	偏差/%	绝对偏差/%	均方根差异/%	相关系数
威德尔海扇区	UB-AMSR2/ASI	1.18	4.58	8.37	0.87
	OSI-SAF/BR-BST	9.70	9.86	12.13	0.91
	NSOAS-SMR/NT	11.41	11.53	14.12	0.89

续附录 2

海域	海冰密集度产品	偏差/%	绝对偏差/%	均方根差异/%	相关系数
威德尔海扇区	NSIDC-AMSR2/NT2	-2.26	3.19	7.09	0.92
	NSIDC-SSMIS/CDR	4.29	4.99	7.84	0.93
	NSIDC-SSMIS/NT	4.44	5.14	7.93	0.93
印度洋扇区	UB-AMSR2/ASI	2.76	6.06	9.81	0.92
	OSI-SAF/BR-BST	8.88	9.37	10.73	0.95
	NSOAS-SMR/NT	12.00	12.10	13.79	0.94
	NSIDC-AMSR2/NT2	-7.01	7.81	11.10	0.89
	NSIDC-SSMIS/CDR	7.81	8.60	10.64	0.92
	NSIDC-SSMIS/NT	7.86	8.66	10.72	0.92
西太平洋扇区	UB-AMSR2/ASI	2.01	5.63	8.86	0.93
	OSI-SAF/BR-BST	12.05	12.23	13.56	0.94
	NSOAS-SMR/NT	11.39	11.5	13.59	0.93
	NSIDC-AMSR2/NT2	-3.97	5.66	8.81	0.92
	NSIDC-SSMIS/CDR	8.36	8.89	11.59	0.92
	NSIDC-SSMIS/NT	8.55	9.06	11.85	0.91
罗斯海扇区	UB-AMSR2/ASI	2.64	4.02	6.67	0.93
	OSI-SAF/BR-BST	8.78	8.86	9.84	0.96
	NSOAS-SMR/NT	8.98	9.00	10.45	0.95
	NSIDC-AMSR2/NT2	-2.60	3.34	6.91	0.91
	NSIDC-SSMIS/CDR	4.25	4.63	6.45	0.95
	NSIDC-SSMIS/NT	4.26	4.64	6.49	0.95
别林斯高晋海和阿蒙森海扇区	UB-AMSR2/ASI	-0.24	5.33	8.54	0.90
	OSI-SAF/BR-BST	12.66	13.16	14.3	0.94
	NSOAS-SMR/NT	13.99	14.25	15.3	0.95
	NSIDC-AMSR2/NT2	-3.87	5.02	8.66	0.92
	NSIDC-SSMIS/CDR	6.00	8.07	9.72	0.92
	NSIDC-SSMIS/NT	6.00	8.07	9.73	0.92

Comparison and evaluation of seven commonly used Antarctic passive microwave sea ice concentration products

Guo Hao¹, Ji Qing^{1,2}, Pang Xiaoping^{1,2}, Shi Lijian³, Yan Zhongnan¹, Luo Chongxin¹

(1. Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping, Ministry of Nature Resources of the People's Republic of China, Wuhan 430079, China; 3. National Satellite Ocean Application Service, Ministry of Nature Resources of the People's Republic of China, Beijing 100081, China)

Abstract: Focused on the differences and accuracy of passive microwave sea ice concentration products (PM-SIC) released by domestic and foreign institutions, the sea ice concentration retrieved by MODIS and Sentinel-1 is analyzed. The products of University of Bremen (UB-AMSR2/ASI), National Snow and Ice Data Centre (NSIDC-SSMIS/NT, NSIDC-SSMIS/CDR, NSIDC-AMSR2/NT2), European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (OSI-SAF/BR-BST), National Satellite Ocean Application Service (NSOAS-SMR/NT) and the National Satellite Meteorological Center (NSMC-MWRI/NT2) were conducted. The results show that: (1) The sea ice concentration of NSIDC-SSMIS/NT and NSIDC-SSMIS/CDR has a high consistency (mean deviation of -0.08% , correlation coefficient of 0.99), and the difference between NSOAS-SMR/NT and NSIDC-AMSR2/NT2 is the largest (mean deviation of -14.41% , correlation coefficient of 0.99); (2) The variation trends of the seven PM-SIC are consistent, and the deviations of NSOAS-SMR/NT and NSMC-MWRI/NT2 show obvious seasonal differences with other PM-SIC; (3) The absolute deviation between NSOAS-SMR/NT, NSMC-MWRI/NT2 and other PM-SIC sectors is large in the Indian Ocean sector, Bellingshausen Sea and Amundsen Sea sector, and the difference is the smallest in the Ross Sea sector. The area with large deviation is mainly distributed in the sea ice margin area and near the land sea, and the difference is small in the high sea ice concentration area; (4) Seven PM-SIC are validated by the MODIS and Sentinel-1 retrieved sea ice concentration, and the consistency between NSMC-MWRI/NT2 and validation data is the highest. sea ice concentration of NSOAS-SMR/NT, UB-AMSR2/ASI and OSI-SAF/BR-BST was low, while the sea ice concentration of NSMC-MWRI/NT2, NSIDC-AMSR2/NT2, NSIDC-SSMIS/CDR and NSIDC-SSMIS/NT is high. The comparison and evaluation of different sea ice intensity products can provide the basis and reference for the development of remote sensing inversion algorithm, the development and application of high-quality sea ice intensity products, and the better monitoring of Antarctic sea ice changes.

Key words: sea ice concentration; passive microwave; remote sensing products; MODIS; Antarctic