

FY-3B/MWRI和Aqua/AMSR-E海冰密集度比较及印证

王晓雨^{1,2}, 管磊^{1,2}, 李乐乐¹

1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院海洋技术系, 青岛 266100;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 青岛 266071

摘要: 本文对2011-07-01—2011-09-30风云三号B星(FY-3B)搭载的微波成像仪MWRI(Microwave Radiometer Imager)和Aqua卫星搭载的微波扫描辐射计AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System)观测数据获取的海冰密集度产品进行比较及印证。首先, 逐日比较FY-3B/MWRI和Aqua/AMSR-E区域平均海冰密集度; 其次, 逐月比较FY-3B/MWRI和Aqua/AMSR-E月平均海冰密集度; 最后, 使用Aqua卫星搭载的中等分辨率成像光谱辐射计MODIS数据进行印证。MWRI和AMSR-E比较结果为(1)MWRI与AMSR-E逐日区域平均海冰密集度变化趋势一致, MWRI海冰密集度均高于AMSR-E, 7—9月MWRI与AMSR-E逐日平均偏差月平均值分别为8.55%、7.67%、2.58%, 逐日标准差月平均值分别为12.16%、12.08%、10.43%, 二者差异逐月减小。(2)MWRI与AMSR-E月平均海冰密集度差呈现逐月递减趋势, 7—9月MWRI与AMSR-E逐月平均偏差分别为7.37%、6.53%、1.51%, 逐月标准差分别为4.61%、4.36%、3.64%, MWRI与AMSR-E差异逐月减小的原因是二者在密集度较低的边缘区域差异较大, 而夏季随着边缘区域海冰的融化, 二者差异逐渐减小。MWRI和AMSR-E海冰密集度与MODIS印证结果为: (1)密集度小于95%情况下, MWRI与AMSR-E海冰密集度均比MODIS偏高, AMSR-E更接近MODIS, MWRI高估, 误差较大。(2)密集度大于等于95%情况下, MWRI与AMSR-E海冰密集度均比MODIS偏低, AMSR-E偏低更多, MWRI结果更好。

关键词: 海冰密集度, FY-3B/MWRI, Aqua/AMSR-E, 比较, 印证, MODIS, 冰水识别

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A

引用格式: 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

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 [DOI:10.11834/jrs.20187419]

1 引言

海冰是全球海洋的重要组成部分, 占全球海洋面积的5%—8%。由于海冰高反照率的特点, 能够反射太阳大部分短波辐射, 尤其有积雪覆盖的海冰, 能够较大程度限制海洋与大气之间的能量与动量交换, 是海洋与大气的有效隔离, 因此成为极区气候变化的重要指示器(Comiso 等, 2003; Rind 等, 1995)。北极正向一个更暖的气候系统过渡, 北极变暖的一个明显特征是海冰范围不断减小, 减小速率比以往预测的大多数数值模式结果都快(Meier 等, 2014)。同时, 北极海冰覆盖对全

球表面的能量流动具有较大影响, 因此北极海冰范围的快速变化引起了更加广泛的关注(Barry 等, 1993)。1979年—2015年, 北极海冰范围最大值和最小值每10年大约变化 $-2.41 \pm 0.56\%$ 和 $-13.5 \pm 2.93\%$, 海冰每10年大约融化 $5.84 \pm 2.4\%$ (Peng和Meier, 2017)。

微波遥感是海冰研究的重要观测手段, 由于微波遥感不受极夜的影响, 受云雾影响也比较小, 因此具有较好的时空连续性。海冰密集度作为海冰被动微波遥感的主要参数, 是描述海冰特征的重要参数之一, 被广泛应用于海冰的空间分

收稿日期: 2017-10-13; 预印本: 2018-03-23

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(编号: 2015CB953901); 国家自然科学基金委员会—山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(编号: U1606405)

第一作者简介: 王晓雨, 1993年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为卫星遥感海冰研究。E-mail: wxy_ouc@qq.com

通信作者简介: 管磊, 1969年生, 女, 教授, 研究方向为海洋遥感。E-mail: leiguan@ouc.edu.cn

布和海冰范围计算(Comiso 等, 2003; Hao和Su, 2015), 对航海、气候研究、天气以及海冰预测都具有重要意义, 尤其是高分辨率的海冰密集度, 在海上作业、海冰模式验证、气候数据同化等方面发挥了重要作用(Karvonen, 2017)。目前, 中国国产卫星提供海冰密集度产品的主要有第2代极轨气象卫星风云3号(FY-3)搭载的微波成像仪MWRI (Microwave Radiometer Imager)等。本文将风云3号B星FY-3B/MWRI海冰密集度与国外同类微波辐射计Aqua/AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System)的密集度产品进行比较并使用更高分辨率的MODIS数据进行验证, 为MWRI海冰密集度精度评价提供参考。

评估不同卫星数据海冰分布的精度对研究气候变化和全球变暖具有重要意义(Belchansky和Douglas, 2002)。赵杰臣等人(2017)对7种基于被动微波遥感的海冰密集度产品(PM-SIC)进行了比较和评估, 包括AMSR2/ASI、AMSR2/Bootstrap、SSMIS/ASI、SSMIS/Bootstrap、SSMIS/NASATEAM、MASAM和OSI-SAF。Heinrichs等人(2006)和Cavaliere等人(2006, 2010)对AMSR-E NT2(Enhanced NASA Team)算法海冰密集度进行了评估。Heinrichs等人(2006)使用SAR(Synthetic Aperture Radar)和MODIS数据对AMSR-E海冰密集度进行评估, 结果表明AMSR-E在判别开阔水和浮冰区域表现良好, 但是在薄冰区有时会低估。基于AMSR-E和Landsat比较结果, Cavaliere等人(2006)指出有新冰生成的区域, AMSR-E结果比Landsat结果偏低5%, 均方根误差为8%。Cavaliere等人(2010)发现MODIS影像对AMSR-E海冰密集度评估结果表明AMSR-E在海冰边缘区域误差最大。Spreen等人(2008)基于AMSR-E 89 GHz亮温数据使用ARTSIST Sea Ice(ASI)算法反演了海冰密集度, 并通过比较发现ASI与其他反演算法效果相近。苏洁等人(2013)、Hao和Su(2015)和席颖等人(2013)对AMSR-E ASI算法进行了评估与印证。苏洁等人(2013)对Spreen等人(2008)ASI算法进行了修正, 采用了新的系点值进行反演, 并使用MODIS数据进行验证, MODIS验证结果表明算法修正后结果有所提高。Hao和Su(2015)分别使用固定系点值和动态系点值ASI算法反演了AMSR-E海冰密集度, 并使用MODIS数据进行印证, 印证结果表明动态系点值法在海冰高密度区域较固定系点值算法的结果

低, 而在低海冰密集度区域较固定系点值算法结果高, 在一定程度上减小了反演误差。席颖等人(2013)发现AMSR-E海冰密集度较Landsat总体趋于低估, 主要原因是ASI算法极化辐射亮温差不适用于新冰, 导致新冰区海冰密集度被严重低估。

国内外已有不少研究, 利用MODIS等较微波辐射计空间分辨率高的卫星数据对不同来源的海冰密集度进行评估与印证, 而自FY-3B/MWRI海冰密集度产品发布以来, 尚无有关MWRI海冰密集度产品印证方面论文发表, 因此本文针对MWRI海冰密集度产品进行了评估。

2 数据

本文使用的数据包括FY-3B/MWRI和Aqua/AMSR-E L3北极海冰密集度日产品以及高分辨率MODIS L1B反射率数据。

FY-3B/MWRI北极海冰密集度产品来源于国家卫星气象中心网站(<http://www.nsmc.org.cn>[2017-10])。FY-3B卫星数据时间从2011-06-27至今。FY-3B卫星搭载的微波成像仪MWRI, 其频段范围为10—89 GHz, 通道数为10, 扫描范围为 $\pm 55.4^\circ$, 地面分辨率为15—85 km。本文使用的MWRI北极海冰密集度空间分辨率是12.5 km, 时间分辨率是1天, 海冰密集度反演算法为NT2算法, 投影方式为极地立体投影。

Aqua/AMSR-E北极海冰密集度产品来源于美国NSIDC网站(<http://nsidc.org>[2017-10])。Aqua卫星在轨时间为2002-05-04—2011-10-04。Aqua卫星搭载的微波辐射计AMSR-E, 其频段范围是6.9—89.0 GHz, 通道数为12, 扫描范围为 $\pm 55^\circ$, 地面分辨率为5.4—56 km。本文使用的Aqua/AMSR-E北极海冰密集度空间分辨率是12.5 km, 时间分辨率是1天, 海冰密集度反演算法为NT2算法, 投影方式为极地立体投影。

FY-3B/MWRI和Aqua/AMSR-E海冰密集度空间分辨率都是12.5 km, 时间分辨率都是1天, 海冰密集度反演算法都是NT2算法, 投影方式都是极地立体投影。因为FY-3B/MWRI与Aqua/AMSR-E的共同数据时间为2011-06-27—2011-10-04, 因此用于比较的FY-3B/MWRI与Aqua/AMSR-E北极海冰密集度日期为2011-07-01—2011-09-30。

Aqua/MODIS数据来源于美国NASA网站

(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>[2017-10-13])。Aqua卫星搭载的MODIS传感器,其光谱范围是0.4—14.4 μm,扫描宽度为2330 km,地面分辨率有3种,分别是250 m、500 m和1 km。本文使用的MODIS数据是250 m分辨率L1B反射率数据,MODIS样本数据日期为2011-07-01—2011-07-05和2011-08-01—2011-08-05。

3 FY-3B/MWRI与Aqua/AMSR-E海冰密集度比较

3.1 FY-3B/MWRI与Aqua/AMSR-E逐日海冰密集度比较

统计并比较2011-07-01—2011-09-30 MWRI和AMSR-E每天海冰密集度区域平均值、平均偏差和标准差。

MWRI与AMSR-E逐日海冰密集度区域平均结果如图1所示。MWRI和AMSR-E变化趋势基本一致,7—9月整体呈现先下降后上升趋势,海冰密集度最低值出现在8月,最高值出现在9月。MWRI海冰密集度每天都比AMSR-E偏高,9月的MWRI与AMSR-E海冰密集度差异比7月和8月小很多。原因是MWRI与AMSR-E海冰密集度在边缘区域差异较大。而由于北极夏季海冰密集度较低的边缘区域逐渐融化,9月融化基本结束,开始结冰,因此9月MWRI与AMSR-E海冰密集度差异最小。在7—9月,密集度最低值出现在8月。其原因是海冰融化中边缘区域海冰密集度明显较低,9月海冰范围最小,边缘处密集度较低的部分融化,区域平均密集度较8月高。

7—9月MWRI和AMSR-E逐日海冰密集度差统计结果如表1所示。7月, MWRI与AMSR-E平均偏

差最小值和最大值分别为6.89%和10.60%,对应日期分别为7月11日和7月23日,逐日平均偏差月平均值和中值分别为8.55%和8.26%,标准差最小值和最大值分别为11.30%和13.04%,对应日期分别为7月24日和7月10日,逐日标准差月平均值和中值分别为12.16%和12.18%;8月, MWRI与AMSR-E平均偏差最小值和最大值分别为3.37%和11.89%,对应日期分别为8月31日和8月11日,逐日平均偏差月平均值和中值分别为7.67%和6.78%,标准差最小值和最大值分别为11.37%和13.09%,对应日期分别为8月3日和8月24日,逐日标准差月平均值和中值分别为12.08%和12.09%;9月, MWRI与AMSR-E平均偏差最小值和最大值分别为1.37%和3.87%,对应日期分别为9月27日和9月5日,逐日平均偏差月平均值和中值分别为2.58%和2.66%,标准差最小值和最大值分别为8.32%和12.34%,对应日期分别为9月29日和9月1日,逐日标准差月平均值和中值分别为10.43%和10.16%。

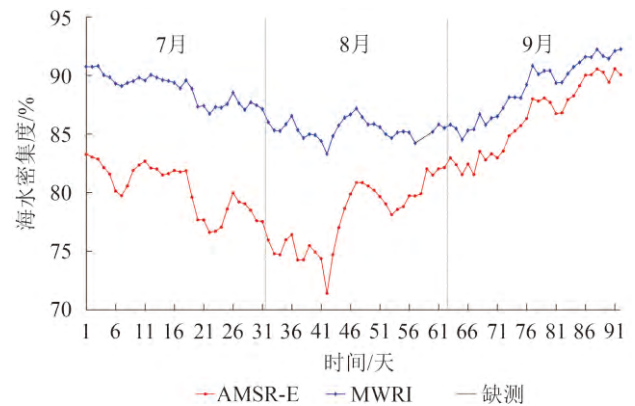


图1 7—9月MWRI与AMSR-E海冰密集度区域平均值
Fig. 1 Regional mean value of MWRI and AMSR-E sea ice concentration from July to September

表1 7—9月MWRI与AMSR-E逐日海冰密集度差的统计值
Table 1 Statistics of MWRI and AMSR-E daily sea ice concentration difference from July to September

月份	参数	最小值/%	最小值对应日期/日	最大值/%	最大值对应日期/日	平均值/%	中值/%
7月	平均偏差	6.89	11	10.60	23	8.55	8.26
	标准差	11.30	24	13.04	10	12.16	12.18
8月	平均偏差	3.37	31	11.89	11	7.67	6.78
	标准差	11.37	3	13.09	24	12.08	12.09
9月	平均偏差	1.37	27	3.87	5	2.58	2.66
	标准差	8.32	29	12.34	1	10.43	10.16

3.2 FY-3B/MWRI和Aqua/AMSR-E月平均海冰密集度比较

7—9月，对FY-3B/MWRI和Aqua/AMSR-E每个像元海冰密集度做时间平均，若像元在该月所有天(缺测天除外)都有数据，则在月平均结果里保留这样的数据点，否则不保留。

图2是7月、8月、9月MWRI与AMSR-E月平均海冰密集度差图。从图2可以看出，MWRI和AMSR-E海冰密集度在边缘区域差异较大，MWRI海冰密集度高于AMSR-E，极地中心区域差异较小；8月MWRI和AMSR-E海冰密集度差异总体小于7月，仍然呈现出边缘区域差异比中心区域大；

9月MWRI与AMSR-E海冰密集度差异明显减小；7—9月，MWRI与AMSR-E月平均海冰密集度差呈现逐月递减趋势，原因是MWRI与AMSR-E海冰密集度在边缘区域差异大于中心区域，而7—9月北极海冰从边缘区域开始大面积融化。总体上MWRI海冰密集度高于AMSR-E，二者7月差异最大，9月差异最小。

图3是7—9月MWRI与AMSR-E月平均海冰密集度差统计直方图，横轴代表两者海冰密集度差，步长为1%，纵轴为统计个数。对7—9月MWRI与AMSR-E月平均海冰密集度差的统计直方图数据分析见表2。

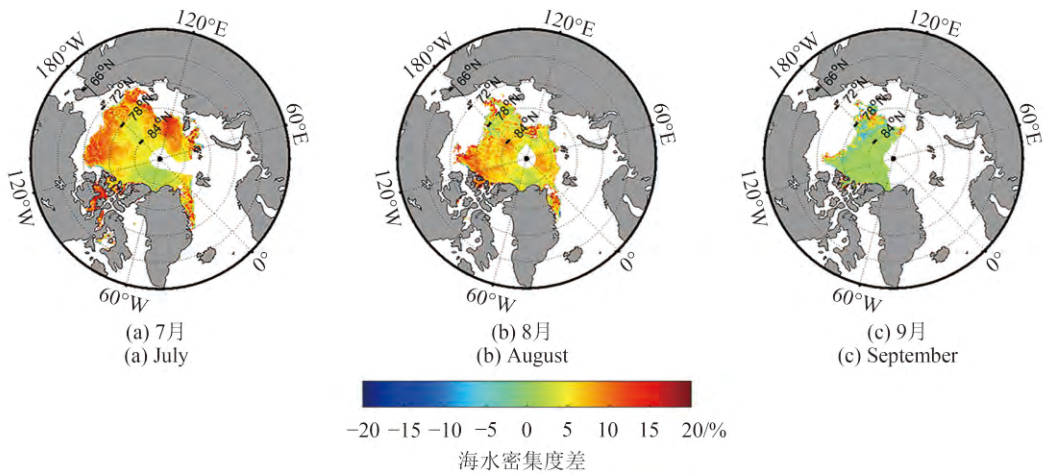


图2 7—9月MWRI与AMSR-E月平均海冰密集度差

Fig. 2 MWRI and AMSR-E monthly sea ice concentration difference from July to September

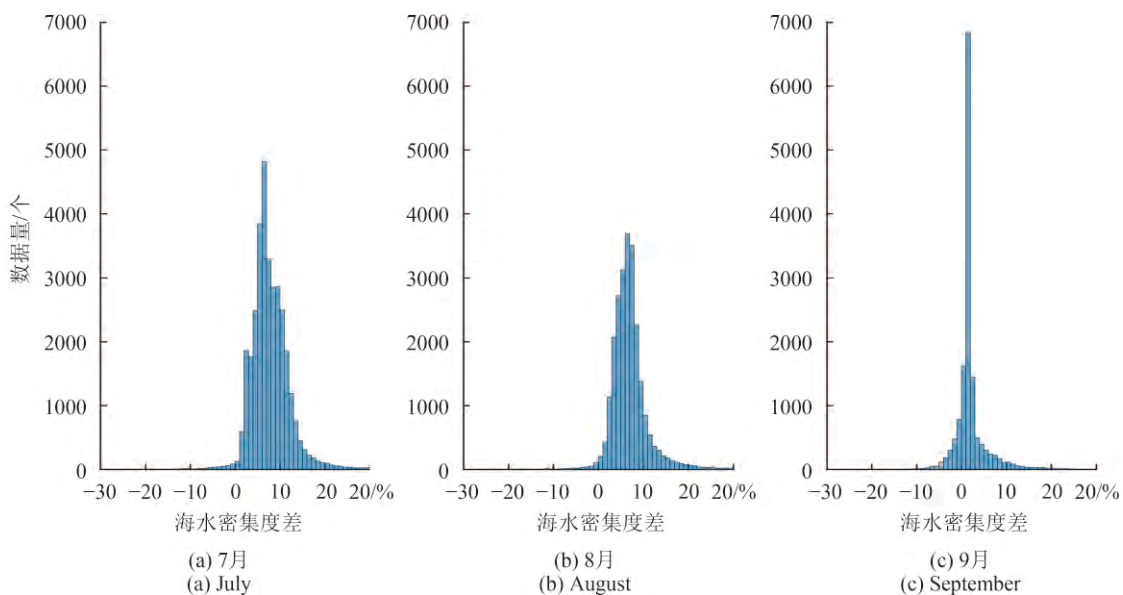


图3 7—9月MWRI与AMSR-E月平均海冰密集度差统计直方图

Fig. 3 Histogram of MWRI and AMSR-E monthly sea ice concentration difference from July to September

表 2 7—9月MWRI与AMSR-E月平均海冰密集度差的统计值
Table 2 Statistics of MWRI and AMSR-E monthly sea ice concentration difference from July to September

月份	数据量	单位步长数据量为5%及以上部分所占百分比/%	分布范围/%	平均偏差/%	标准差/%
7月	33134	85	[2, 11]	7.37	4.61
8月	24104	78	[3, 9]	6.53	4.36
9月	14397	74	[-1, 2]	1.51	3.64

表2是对7—9月每个步长统计个数大于等于总个数5%的部分进行统计分析, 求出这部分占总个数的比例及其分布范围, 并计算7—9月MWRI与AMSR-E月平均海冰密集度平均偏差和标准差。

7—9月, MWRI与AMSR-E月平均海冰密集度比较的数据总量分别是33134、24104和14397, MWRI与AMSR-E月平均海冰密集度之差单位步长数据量为5%及以上部分占数据总量百分比分别是85%、78%和74%, 其对应范围分别是2%—11%、3%—9%和-1%—2%, MWRI与AMSR-E平均偏差分别是7.37%、6.53%和1.51%, 标准差分别是4.61%、4.36%和3.64%。MWRI与AMSR-E海冰密集度产品比较结果表明, MWRI产品整体偏高。

4 FY-3B/MWRI与Aqua/AMSR-E海冰密集度印证

4.1 MODIS数据处理

本文使用MODIS数据印证FY-3B/MWRI与Aqua/AMSR-E海冰密集度, 选用的是MODIS第2通道反射率数据, MODIS数据主要处理过程包括: 太阳天顶角订正、辐射标定、去除Bow-Tie现象、投影, 投影方式为极地立体投影, 与MWRI和AMSR-E投影方式相同。为避免云对冰水识别的误判, 对投影后的图像选取清晰无云、大小为500 × 500 像元的子区域进行冰水识别, 对每景图像的子区域, 结合每个子区域灰度统计直方图设定动态反射率阈值, 得到冰水二值化图像, 统计对应于每个MWRI和AMSR-E粗网格的MODIS总点数与冰点数, 计算MODIS网格化海冰密集度, 用于印证FY-3B/MWRI和Aqua/AMSR-E海冰密集度。

图4为16个MODIS样本地理位置分布示意图, 样本日期和时间信息见表3。

图5、图6、图7、图8为16个MODIS样本的反射率灰度图及对应冰水识别二值化结果图。其中, 白色代表冰, 黑色代表水。

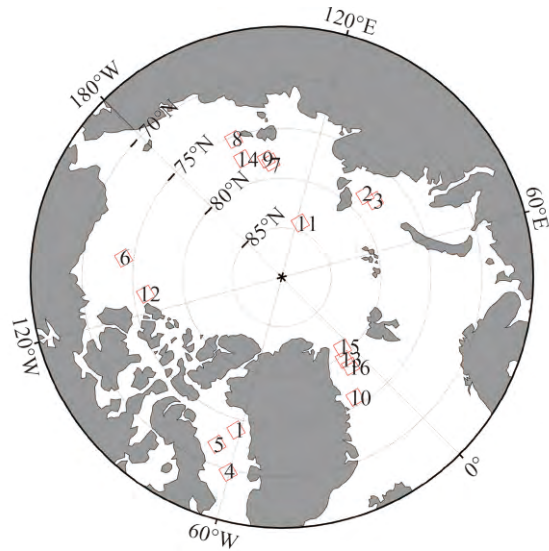


图 4 MODIS样本地理位置分布图

Fig. 4 Locations of MODIS samples

表3给出了16个MODIS样本数据的统计信息, 包括数据日期、影像时间、冰水识别阈值、冰水识别结果水点数及冰点数、MODIS与MWRI及AMSR-E比较的有效值总个数、MODIS海冰密集度小于95%和大于等于95%情况下MODIS与MWRI及AMSR-E比较的有效值个数。由于海冰密集度值95%通常被用于作为多年冰的标记(Maaß 等, 2013), 因此将MODIS海冰密集度划分为95%以下和95%及以上两种情况对MWRI和AMSR-E进行印证与分析。

图9是7月1日、8月1日和9月1日FY-3B/MWRI和Aqua/AMSR-E北极海冰密集度日产品分布图。分析图6发现, MWRI与AMSR-E中心区域海冰密集度整体很高, 边缘区域海冰密集度较低, 8月更为明显。MWRI与AMSR-E海冰密集度整体分布较为接近, 边缘区域差异大于中心区域。整体来看, 8月平均海冰密集度最低, 9月海冰范围最小, 7—9月MWRI海冰密集度均高于AMSR-E, 与前面第3节MWRI和AMSR-E海冰密集度比较结果一致。

表 3 16个MODIS样本观测时间信息及统计值
Table 3 Observation time and statistics of sixteen MODIS samples

序号	日期	时刻	阈值	MODIS水点数	MODIS冰点数	有效值总个数	有效值个数SIC_M<95%	有效值个数SIC_M≥95%
1	2011-07-01	07:40	0.16	72814	177186	110	88	22
2	2011-07-02	00:05	0.16	33723	216277	117	42	75
3	2011-07-02	01:45	0.18	75025	174975	95	30	65
4	2011-07-02	14:50	0.16	42020	207980	122	78	44
5	2011-07-03	17:10	0.18	57157	192843	114	52	62
6	2011-07-03	20:30	0.20	21282	228718	127	82	45
7	2011-07-03	20:35	0.10	39857	210143	120	43	77
8	2011-07-04	22:55	0.12	14298	235702	125	26	99
9	2011-07-05	18:45	0.12	18200	231800	124	24	100
10	2011-08-01	10:10	0.18	54683	195317	115	79	36
11	2011-08-02	01:00	0.14	15730	234270	127	45	82
12	2011-08-02	19:05	0.24	41240	208760	104	36	68
13	2011-08-03	06:40	0.12	28800	221200	119	43	76
14	2011-08-04	02:25	0.16	10165	239835	126	29	97
15	2011-08-04	09:00	0.10	38945	211055	117	45	72
16	2011-08-05	09:45	0.10	29775	220225	127	71	56

注: SIC_M代表MODIS海冰密集度。

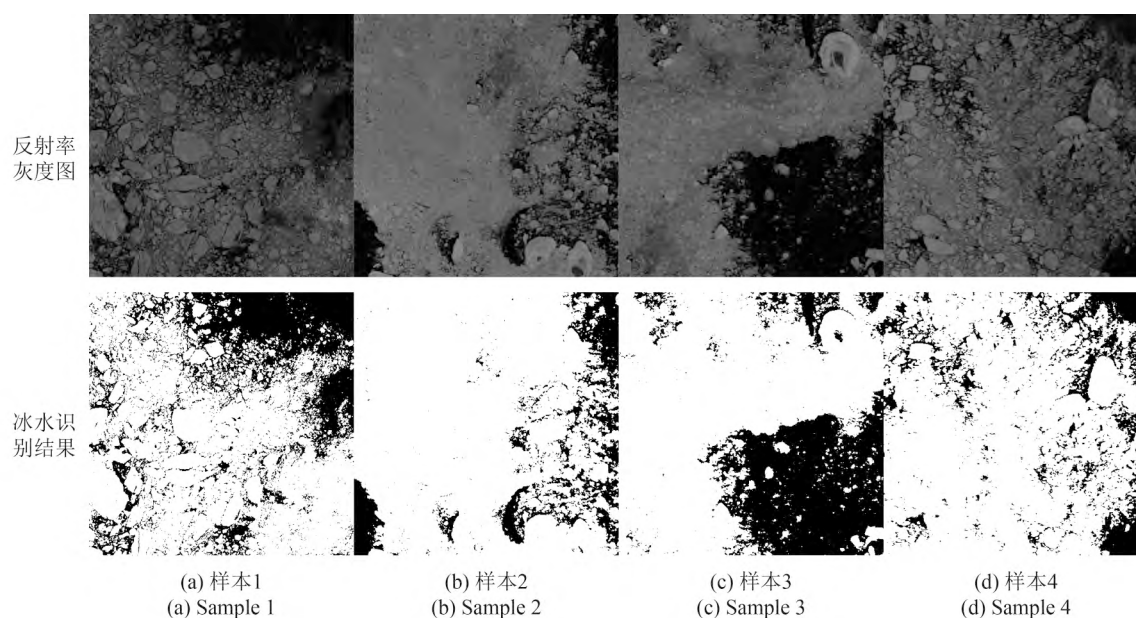


图 5 样本1—4反射率灰度图及冰水识别结果

Fig. 5 Reflectance image and result of ice and water recognition of sample 1 to sample 4

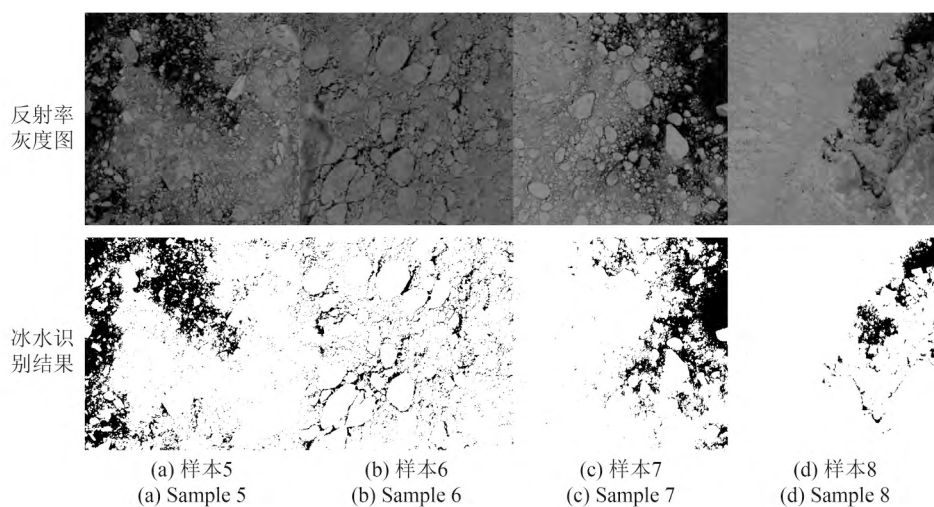


图 6 样本5—8反射率灰度图及冰水识别结果

Fig. 6 Reflectance image and result of ice and water recognition of sample 5 to sample 8

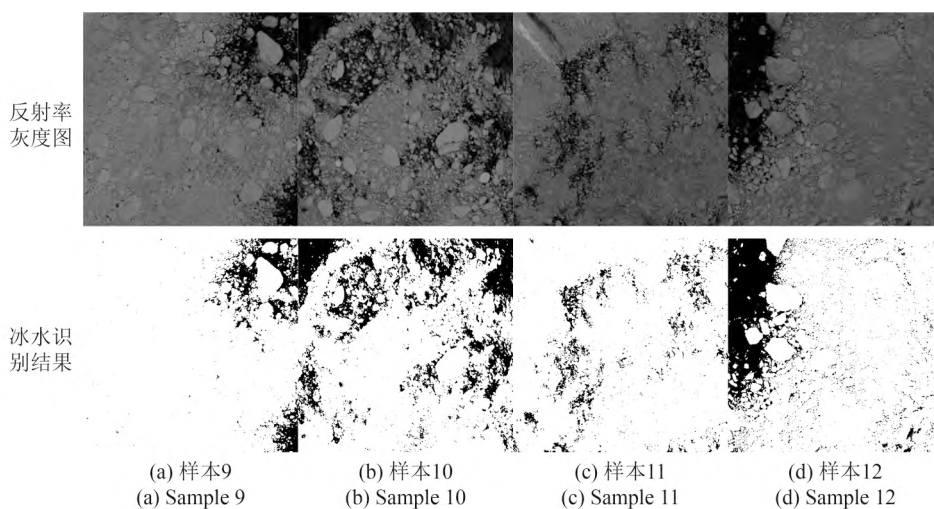


图 7 样本9—12反射率灰度图及冰水识别结果

Fig. 7 Reflectance image and result of ice and water recognition of sample 9 to sample 12

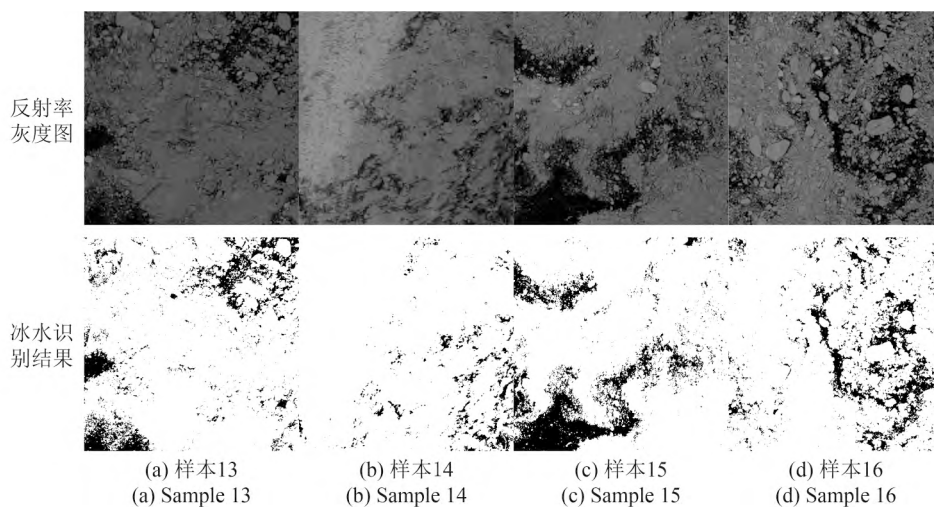


图 8 样本13—16反射率灰度图及冰水识别结果

Fig. 8 Reflectance image and result of ice and water recognition of sample 13 to sample 16

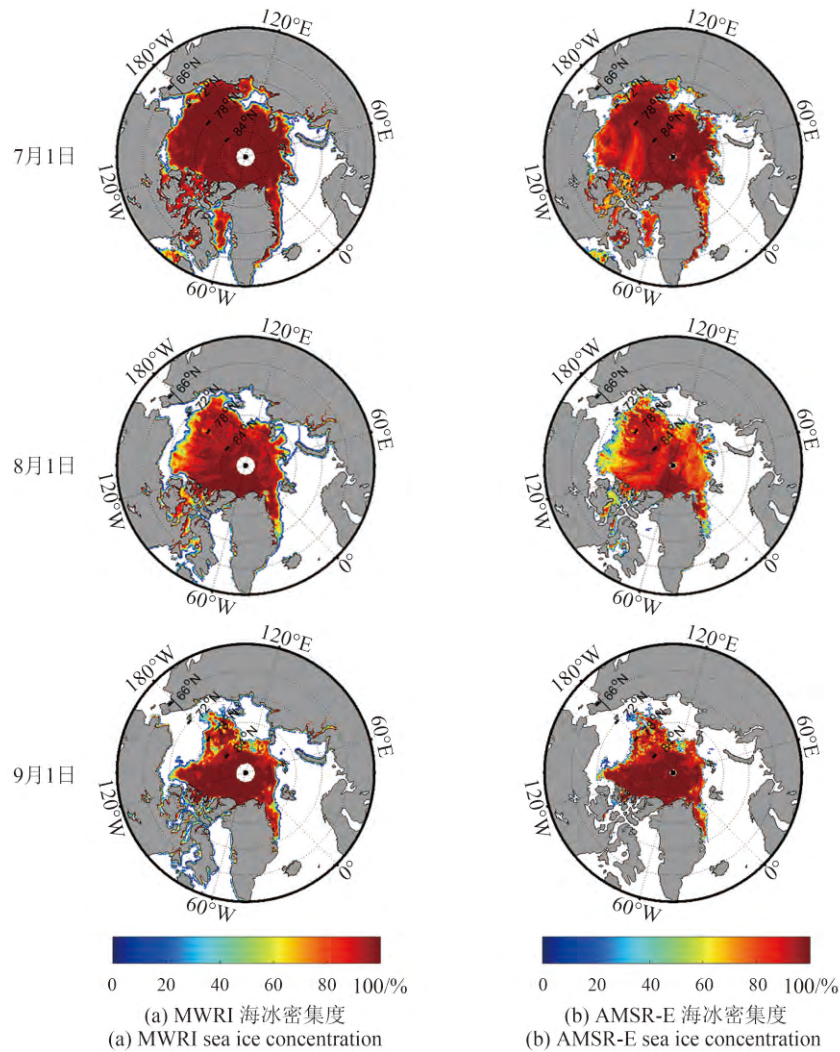


图9 7月1日、8月1日和9月1日MWRI和AMSR-E海冰密集度

Fig. 9 Sea ice concentration of MWRI and AMSR-E on July 1, August 1 and September 1

4.2 MODIS印证结果

图10是密集度小于95%情况下MWRI、AMSR-E和MODIS海冰密集度平均偏差和标准差结果图。整体上，MWRI海冰密集度比AMSR-E偏高，MWRI和AMSR-E海冰密集度都比MODIS偏高，AMSR-E与MODIS海冰密集度差异最小。

表4是密集度小于95%情况下MWRI、AMSR-E和MODIS海冰密集度平均偏差、中值、标准差和均方根误差的统计结果。

AMSR-E与MODIS比较结果中，16个样本中有11个样本AMSR-E比MODIS偏高，其中样本12和16平均偏差大于11%，有8个样本中值为负值，其中只有样本12中值大于10%，有13个样本标准差大于10%，有14个样本均方根误差大于10%。AMSR-E与MODIS所有样本平均偏差、中值、标准差和均方根误差分别是0.90%、-0.76%、13.09%和13.12%。

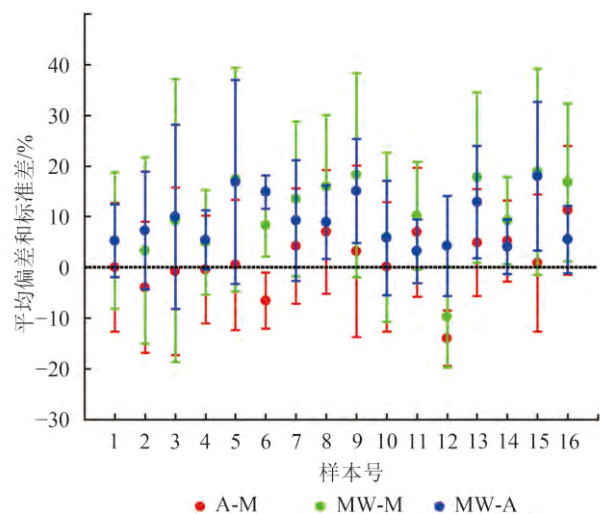


图10 海冰密集度小于95%情况下MWRI/AMSR-E/MODIS海冰密集度平均偏差和标准差

Fig. 10 Bias and standard deviation of MWRI/AMSR-E/MODIS sea ice concentration when sea ice concentration less than 95%

表 4 海冰密集度小于95%情况下MWRI/AMSR-E/MODIS海冰密集度平均偏差、中值、标准差、均方根误差
Table 4 Bias, median, standard deviation, root mean square error of MWRI/AMSR-E/MODIS sea ice concentration when sea ice concentration less than 95%

序号	A-M	MW-M	MW-A	A-M	MW-M	MW-A	A-M	MW-M	MW-A	A-M	MW-M	MW-A
	Bias	Bias	Bias	Median	Median	Median	SD	SD	SD	RMSE	RMSE	RMSE
1	0.02	5.28	5.26	-3.04	2.31	5.00	12.72	13.41	7.14	12.72	14.41	8.87
2	-3.94	3.35	7.29	-5.05	1.24	8.00	12.95	18.37	11.60	13.53	18.67	13.70
3	-0.74	9.26	10.00	-4.71	3.85	11.00	16.55	27.87	18.18	16.57	29.37	20.75
4	-0.43	4.99	5.42	-5.15	2.95	6.00	10.61	10.30	5.88	10.62	11.45	8.00
5	0.52	17.36	16.85	-2.19	12.24	12.00	12.84	22.06	20.10	12.85	28.07	26.23
6	-6.56	8.35	14.91	-7.33	7.37	15.00	5.53	6.14	3.31	8.58	10.37	15.28
7	4.24	13.52	9.28	2.62	12.45	8.00	11.37	15.24	11.93	12.14	20.37	15.11
8	7.03	15.96	8.92	5.80	11.80	6.00	12.22	14.23	7.29	14.10	21.38	11.52
9	3.19	18.27	15.08	0.05	14.31	17.00	16.91	20.12	10.30	17.21	27.18	18.27
10	0.14	5.96	5.82	-2.24	4.19	4.00	12.80	16.62	11.29	12.80	17.66	12.70
11	6.97	10.22	3.24	3.52	8.62	3.00	12.69	10.63	6.30	14.48	14.75	7.09
12	-13.99	-9.74	4.25	-13.13	-7.25	7.50	5.45	9.93	9.83	15.02	13.91	10.71
13	4.89	17.80	12.91	4.27	14.07	10.00	10.55	16.81	11.08	11.63	24.48	17.01
14	5.22	9.29	4.07	3.53	8.47	3.00	7.96	8.63	5.34	9.51	12.68	6.72
15	0.89	18.89	18.00	0.23	15.22	17.00	13.49	20.34	14.61	13.52	27.76	23.18
16	11.29	16.83	5.54	7.09	12.09	4.00	12.76	15.57	6.64	17.04	22.92	8.65
1—16	0.90	9.78	8.88	-0.76	6.63	7.00	13.09	16.90	11.48	13.12	19.53	14.51

注: A代表AMSR-E, M代表MODIS, MW代表MWRI, Bias是平均偏差, Median是中值, SD是标准差, RMSE是均方根误差。

MWRI与MODIS比较结果中,除样本12外,其余样本平均偏差和中值均为正值,因此绝大部分样本MWRI海冰密集度都比MODIS偏高,16个样本中有8个样本平均偏差大于10%,有7个样本中值大于10%,有13个样本标准差大于10%,所有样本均方根误差都大于10%。MWRI与MODIS所有样本平均偏差、中值、标准差和均方根误差分别是9.78%、6.63%、16.90%和19.53%。

MWRI与AMSR-E比较结果中,所有样本平均偏差和中值都为正值,即所有样本MWRI海冰密集度都比AMSR-E偏高,16个样本中有6个样本平均偏差和中值大于等于10%,有8个样本标准差大于10%,有11个样本均方根误差大于10%。MWRI与AMSR-E所有样本平均偏差、中值、标准差和均方根误差分别是8.88%、7.00%、11.48%和14.51%。

图11是密集度大于等于95%情况下MWRI、AMSR-E和MODIS海冰密集度平均偏差和标准差结果图。整体上, MWRI海冰密集度比AMSR-E偏高, MWRI和AMSR-E海冰密集度都比MODIS偏低, MWRI比AMSR-E更接近MODIS。与密集度小于95%情况相比, MWRI、AMSR-E和MODIS在大

于等于95%情况下的标准差显著降低,说明在高密集度区域MWRI、AMSR-E和MODIS海冰密集度差波动较小。

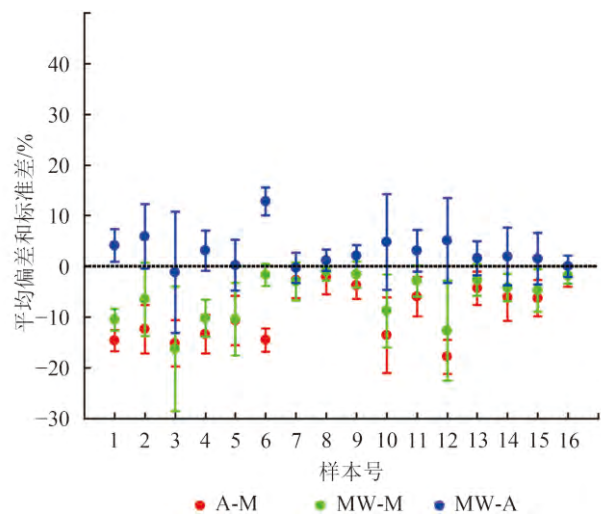


图 11 海冰密集度大于等于95%情况下MWRI/AMSR-E/MODIS海冰密集度平均偏差和标准差

Fig. 11 Bias and standard deviation of MWRI/AMSR-E/MODIS sea ice concentration when sea ice concentration greater than or equal to 95%

表5是密集度大于等于95%情况下MWRI、AMSR-E和MODIS海冰密集度平均偏差、中值、标准差和均方根误差的统计结果。

AMSR-E与MODIS比较结果中,所有样本平均偏差和中值都为负值,即所有样本AMSR-E海冰密集度比MODIS偏低,16个样本中有8个样本平均偏差大于10%,有7个样本中值大于10%,所有样本标准差都较小,标准差最大值不超过8%,平均偏差大于10%的样本,其对应均方根误差都大于11%,而其余样本均方根误差不超过8%。AMSR-E与MODIS所有样本的平均偏差、中值、标准差和均方根误差分别是-7.97%、-5.94%、6.46%和10.26%。

MWRI与MODIS比较结果中,所有样本平均偏差和中值都为负值,即所有样本MWRI海冰密集

度比MODIS偏低,16个样本有5个样本平均偏差大于10%,只有2个样本中值大于10%,大部分样本标准差都比较小,只有样本3标准差超过了10%,有6个样本均方根误差大于10%。MWRI与MODIS所有样本平均偏差、中值、标准差和均方根误差分别是-5.45%、-3.16%、7.05%和8.91%。

MWRI与AMSR-E比较结果中,除样本3和7外,其余样本平均偏差均为正值,即大部分样本MWRI海冰密集度比AMSR-E偏高,只有样本16中值为负值,只有样本6平均偏差和中值超过10%,只有样本3标准差超过10%。除样本3、6和10外,其余样本均方根误差均小于10%。MWRI与AMSR-E所有样本平均偏差、中值、标准差和均方根误差分别是2.51%、2.00%、6.17%和6.67%。

表5 海冰密集度大于等于95%情况下MWRI/AMSR-E/MODIS海冰密集度平均偏差、中值、标准差、均方根误差
Table 5 Bias, median, standard deviation, root mean square error of MWRI/AMSR-E/MODIS sea ice concentration when sea ice concentration greater than or equal to 95%

序号	A-M	MW-M	MW-A	A-M	MW-M	MW-A	A-M SD	MW-M	MW-A	A-M	MW-M	MW-A
	Bias	Bias	Bias	Median	Median	Median		SD	SD	RMSE	RMSE	RMSE
1	-14.62	-10.48	4.14	-14.19	-10.22	4.00	2.15	2.13	3.21	14.78	10.70	5.24
2	-12.35	-6.44	5.91	-11.80	-3.83	7.00	4.76	7.21	6.37	13.23	9.67	8.69
3	-15.15	-16.29	-1.14	-15.61	-13.00	2.00	4.62	12.28	11.93	15.84	20.40	11.99
4	-13.37	-10.21	3.16	-13.08	-9.94	3.00	3.79	3.70	3.96	13.89	10.86	5.07
5	-10.64	-10.40	0.24	-9.27	-8.97	0.50	4.87	7.18	5.01	11.70	12.63	5.01
6	-14.48	-1.64	12.84	-14.21	-1.48	13.00	2.33	2.17	2.71	14.67	2.72	13.13
7	-2.70	-2.96	-0.26	-2.00	-1.83	0.00	3.51	3.71	2.98	4.43	4.74	2.99
8	-2.10	-0.92	1.18	-1.00	-0.83	1.00	3.42	1.87	2.10	4.02	2.08	2.41
9	-3.70	-1.58	2.12	-3.00	-0.86	2.00	2.61	2.55	2.09	4.53	3.00	2.98
10	-13.56	-8.72	4.83	-10.33	-8.19	6.00	7.44	7.19	9.46	15.46	11.31	10.62
11	-5.94	-2.82	3.12	-4.97	-2.72	3.00	3.93	3.07	4.07	7.12	4.17	5.13
12	-17.78	-12.68	5.10	-17.49	-8.92	8.50	3.37	9.89	8.39	18.10	16.08	9.82
13	-4.27	-2.64	1.63	-3.91	-2.86	1.00	3.30	3.16	3.32	5.40	4.12	3.70
14	-6.11	-4.16	1.95	-5.00	-4.00	1.00	4.60	2.65	5.70	7.65	4.94	6.02
15	-6.24	-4.70	1.54	-5.05	-4.00	1.00	3.60	4.18	5.12	7.21	6.29	5.35
16	-1.85	-1.79	0.05	-1.69	-2.00	-1.00	2.11	1.66	2.05	2.81	2.44	2.05
1—16	-7.97	-5.45	2.51	-5.94	-3.16	2.00	6.46	7.05	6.17	10.26	8.91	6.67

注: A代表AMSR-E, M代表MODIS, MW代表MWRI, Bias是平均偏差, Median是中值, SD是标准差, RMSE是均方根误差。

4.3 MODIS印证结果分析

在密集度小于95%情况下高估,在密集度大于等于95%情况下低估。为了分析造成MWRI和AMSR-E

与MODIS海冰密集度相比, MWRI和AMSR-E

海冰密集度产品与MODIS结果不同的原因, 将验证结果平均偏差和均方根误差最大的样本列于表6并总结样本特征。

表6显示验证结果平均偏差和均方根误差最大的样本主要是3、9、12和15。结合样本反射率灰度图来看, 样本3的特点是密集度大的区域和密集度小的区域同时存在, 冰分布不均匀, 有些小区

域存在较厚的碎冰块, 水区和冰水临界区分布有很多细小的碎冰, 冰情复杂。样本9和12特点相似, 整体海冰密集度比较大, 但是海冰间隔有很小的分散的水区, 冰水分界处分布有很多大小和厚度不一的冰块。样本15的特点是冰水分界非常模糊, 水区内密布零星的小碎冰, 冰区间隔有小而分散的水区。

表 6 平均偏差和均方根误差最大值及对应样本统计
Table 6 Statistics of max bias and root mean square error and corresponded sample

参数	SIC_M<95%				SIC_M≥95%			
	A-M		MW-M		A-M		MW-M	
Bias	-13.99%	样本12	18.89%	样本15	-17.78%	样本12	-16.29%	样本3
RMSE	17.21%	样本9	29.37%	样本3	18.10%	样本12	20.40%	样本3

注: SIC_M代表MODIS海冰密集度, A代表AMSR-E, M代表MODIS, MW代表MWRI, Bias是平均偏差, RMSE是均方根误差。

为了进一步分析MWRI和AMSR-E海冰密集度产品与MODIS结果存在差异的原因, 将MWRI与AMSR-E海冰密集度和MODIS差值与MODIS样本反射率图对应比较并分析。

图12和图13分别是样本8和9对应AMSR-E, MWRI和MODIS的海冰密集度, 密集度之差以及MODIS反射率, 分析图12和图13的共同特征, 可

以得出: (1)在密集度高的区域, MWRI与MODIS更接近, 在密集度较低的区域, AMSR-E与MODIS更接近; (2)MWRI和AMSR-E与MODIS海冰密集度差异较大的区域是冰水分界处。结合表6对平均偏差和均方根误差最大的MODIS样本特征的分析, 认为造成MWRI和AMSR-E与MODIS差异的原因之一是三者冰水分界处的密集度差别较大。

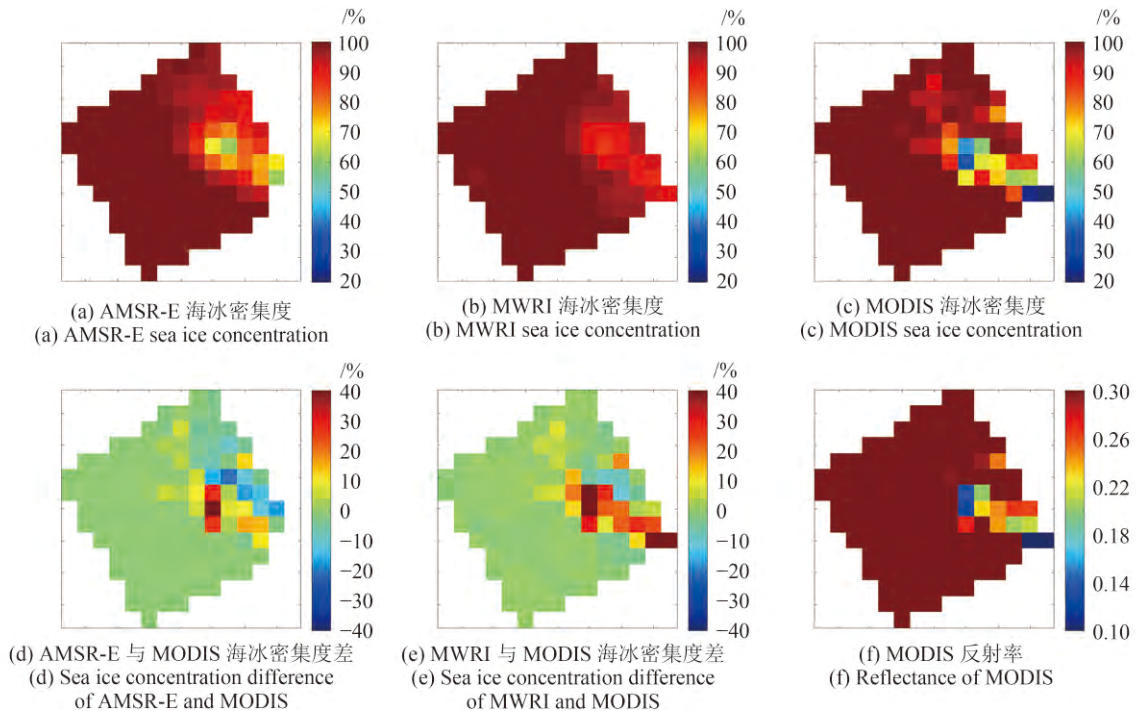


图 12 样本8 AMSR-E/MWRI/MODIS海冰密集度/密集度差/MODIS反射率

Fig. 12 AMSR-E/MWRI/MODIS sea ice concentration/sea ice concentration difference/MODIS reflectance of sample 8

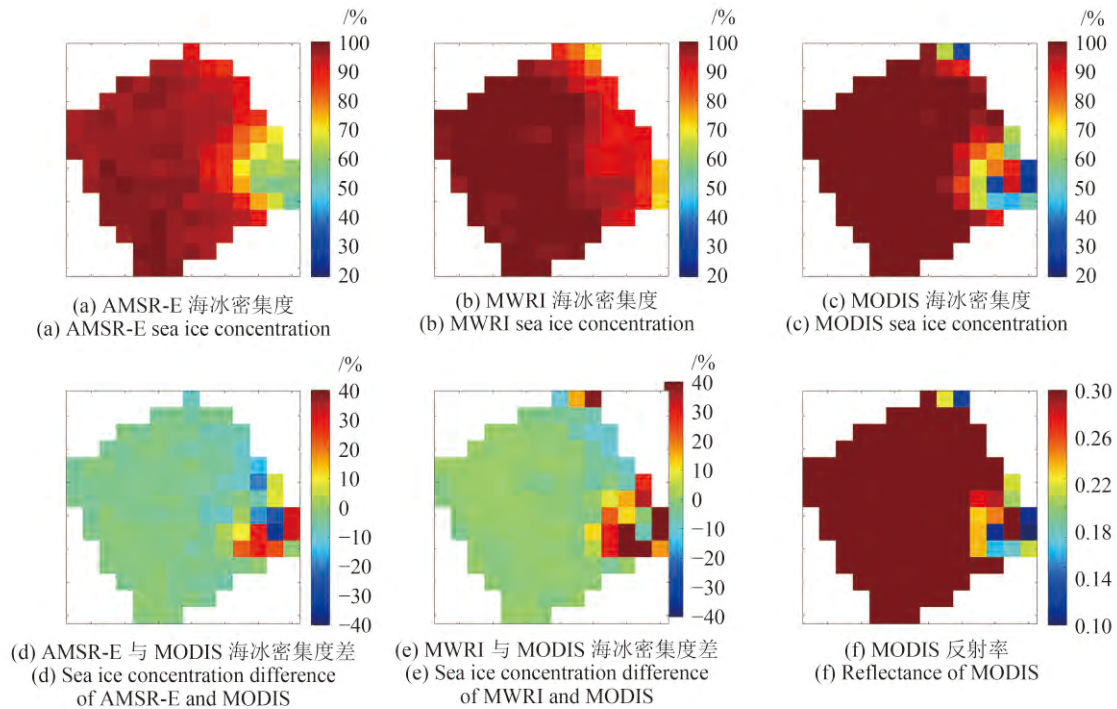


图 13 样本9 AMSR-E/MWRI/MODIS海冰密集度/密集度差/MODIS反射率

Fig. 13 AMSR-E/MWRI/MODIS sea ice concentration/sea ice concentration difference/MODIS reflectance of sample 9

5 结 论

本文对FY-3B/MWRI和Aqua/AMSR-E北极海冰密集度产品进行了比较,并使用MODIS数据进行印证。

2011年7—9月, MWRI海冰密集度整体比AMSR-E偏高, MODIS海冰密集度小于95%情况下, MWRI与AMSR-E的误差统计值均大于密集度大于等于95%的情况,表明二者海冰密集度产品在密集度大的区域更接近。与MODIS相比,密集度小于95%情况下, MWRI和AMSR-E海冰密集度偏高, AMSR-E更接近MODIS, MWRI高估,误差较大;密集度大于等于95%情况下, AMSR-E和MWRI海冰密集度偏低, AMSR-E偏低更多, MWRI结果更好。

分析误差原因主要包括以下几点: (1)MWRI与AMSR-E传感器通道设置和定标精度存在差异,其亮温不同导致反演的海冰密集度可能不同; (2)空间分辨率差异,各种传感器各像元足迹不同导致MWRI, AMSR-E和MODIS差异,尤其是在冰水交界区域处; (3)时间分辨率差异, MODIS海冰密集度是由某个时刻的反射率数据得到,而AMSR-E和MWRI海冰密集度产品是日平均的结果; (4)MODIS

海冰密集度也可能存在一定误差, 北极夏季海冰可能会反复融化又结冰, 海冰表面状况复杂, 造成MODIS反射率数据变化产生误差。

本文结果对MWRI北极海冰密集度产品使用提供参考, 今后将开展多种算法研究提高其精度。

参考文献(References)

- Barry R G, Serreze M C, Maslanik J A and Preller R H. 1993. The Arctic sea ice-climate system: observations and modeling. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 397–422 [DOI: [10.1029/93RG01998](https://doi.org/10.1029/93RG01998)]
- 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](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00333-9)]
- Cavalieri D J, Markus T, Hall D K, Gasiewski A J, Klein M and Ivanoff A. 2006. Assessment of EOS Aqua AMSR-E Arctic sea ice concentrations using Landsat-7 and airborne microwave imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11): 3057–3069 [DOI: [10.1109/TGRS.2006.878445](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.878445)]
- Cavalieri D J, Markus T, Hall D K, Ivanoff A and Glick E. 2010. Assessment of AMSR-E Antarctic winter sea-ice concentrations using Aqua MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(9): 3331–3339 [DOI: [10.1109/TGRS.2010.2046495](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2046495)]
- Comiso J C, Cavalieri D J and Markus T. 2003. Sea ice concentration,

- ice temperature, and snow depth using AMSR-E data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(2): 243–252 [DOI: [10.1109/TGRS.2002.808317](https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.808317)]
- Hao G H and Su J. 2015. A study on the dynamic tie points ASI algorithm in the Arctic ocean. Acta Oceanologica Sinica, 34(11): 126–135 [DOI: [10.1007/s13131-015-0659-y](https://doi.org/10.1007/s13131-015-0659-y)]
- Heinrichs J F, Cavalieri D J and Markus T. 2006. Assessment of the AMSR-E sea ice-concentration product at the ice edge using RADARSAT-1 and MODIS imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(11): 3070–3080 [DOI: [10.1109/TGRS.2006.880622](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.880622)]
- Karvonen J. 2017. Baltic sea ice concentration estimation using SENTINEL-1 SAR and AMSR2 microwave radiometer data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55(5): 2871–2883 [DOI: [10.1109/TGRS.2017.2655567](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2655567)]
- Maaß N, Kaleschke L, Tian-Kunze X and Drusch M. 2013. Snow thickness retrieval over thick Arctic sea ice using SMOS satellite data. Cryosphere, 7(6): 1971–1989 [DOI: [10.5194/tc-7-1971-2013](https://doi.org/10.5194/tc-7-1971-2013)]
- Meier W N, Hovelsrud G K, van Oort B E H, Key J R, Kovacs K M, Michel C, Haas C, Granskog M A, Gerland S, Perovich D K, Makshtas A and Reist J D. 2014. Arctic sea ice in transformation: a review of recent observed changes and impacts on biology and human activity. Reviews of Geophysics, 52(3): 185–217 [DOI: [10.1002/2013RG000431](https://doi.org/10.1002/2013RG000431)]
- Peng G and Meier W N. 2017. Temporal and regional variability of Arctic sea-ice coverage from satellite data. Annals of Glaciology, 1–10 [DOI: [10.1017/aog.2017.32](https://doi.org/10.1017/aog.2017.32)]
- Rind D, Healy R, Parkinson C and Martinson D. 1995. The role of sea ice in $2\times\text{CO}_2$ climate model sensitivity. Part I: the total influence of sea ice thickness and extent. Journal of Climate, 8(3): 449–463 [DOI: [10.1175/1520-0442\(1995\)008<0449:TROSII>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<0449:TROSII>2.0.CO;2)]
- 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.11834/jrs.20132043)]
- Xi Y, Sun B and Li X. 2013. Assessment of AMSR-E ASI sea ice concentration using ship observations and Landsat-7 ETM+ imagery. Journal of Remote Sensing, 17(3): 514–526 (席颖, 孙波, 李鑫. 2013. 利用船测数据以及Landsat-7 ETM+影像评估南极海冰区AMSR-E海冰密集度. 遥感学报, 17(3): 514–526) [DOI: [10.11834/jrs.20132081](https://doi.org/10.11834/jrs.20132081)]
- 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](https://doi.org/10.11834/jrs.20176136)]

Comparison and validation of sea ice concentration from FY-3B/MWRI and Aqua/AMSR-E observations

WANG Xiaoyu^{1,2}, GUAN Lei^{1,2}, LI Lele¹

1. Department of Marine Technology, College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

Abstract: Sea ice concentration, which refers to the percentage of sea ice in an area, is one of the important parameters describing the characteristics of sea ice. Remote sensing monitoring of Arctic sea ice is crucial for understanding the role of the Arctic in the global climate system and in global warming. Therefore, comparing and evaluating the products of sea ice data retrieved from different satellite observations are necessary. In addition, assessing the accuracy of sea ice distribution from satellite observations is significant in studies on climate change and global warming because the extrapolation of global surface energy flows is very sensitive to the estimation of Arctic sea ice cover. To evaluate sea ice concentration from the Microwave Radiometer Imager (MWRI) onboard the FY-3B satellite, we compare the data products with the sea ice concentration from the advanced microwave scanning radiometer for earth observing system (AMSR-E) onboard the Aqua satellite. High-resolution moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data are used to validate MWRI and AMSR-E sea ice

concentration. The comparison of MWRI and AMSR-E includes daily and monthly data. MODIS L1B band 2 channel reflectance is chosen to validate the sea ice concentration of MWRI and AMSR-E. The processing procedure of MODIS mainly consists of solar zenith correction, radiometric calibration, removing bow-tie phenomenon, and map projection. The map projection is the polar stereographic projection, which is the same as the MWRI and AMSR-E products. To avoid the misjudgment of ice and water because of the cloud influence, we choose cloudfree MODIS channel 2 sub-region for ice and water recognition. Different thresholds according to the histogram of the reflectance are used to segment the ice and water pixels. The MODIS sea ice concentration in each MWRI and AMSR-E grid is calculated. The comparison results of MWRI and AMSR-E are as follows. First, MWRI and AMSR-E daily mean sea ice concentrations show a consistent change from July to September, and MWRI sea ice concentration is higher than AMSR-E each day. The monthly mean values of daily biases for July, August, and September are 8.55%, 7.67%, and 2.58%, and the monthly mean of daily standard deviations are 12.16%, 12.08%, and 10.43%, respectively. Second, from July to September, the monthly sea ice concentration difference between MWRI and AMSR-E (MWRI minus AMSR-E) shows a decreasing trend. The monthly biases for July, August, and September are 7.37%, 6.53%, and 1.51%, and the monthly standard deviations are 4.61%, 4.36%, and 3.64%, respectively. The validation results of MWRI and AMSR-E sea ice concentration with MODIS are as follows. First, in the region of MODIS sea ice concentration less than 95%, the sea ice concentration difference between MWRI and MODIS (MWRI minus MODIS) is $9.78\% \pm 16.90\%$, and the difference between AMSR-E and MODIS (AMSR-E minus MODIS) is $0.90\% \pm 13.09\%$. MWRI and AMSR-E tend to overestimate sea ice concentration compared with MODIS, the result of AMSR-E is closer to MODIS, and MWRI has a larger error. Second, when MODIS sea ice concentration is greater than or equal to 95%, the sea ice concentration difference between MWRI and MODIS is $-5.45\% \pm 7.05\%$, and the difference between AMSR-E and MODIS is $-7.97\% \pm 6.46\%$. MWRI and AMSR-E tend to underestimate sea ice concentration compared with MODIS, and the result of MWRI is slightly better.

Key words: sea ice concentration, FY-3B/MWRI, Aqua/AMSR-E, comparison, validation, MODIS, ice and water recognition

Supported by Global Change Research Program of China (No.2015CB953901); National Natural Science Foundation of China-Shandong Joint Fund for Marine Science Research Centers(No.U1606405)