

# Assessment of AMSR-E Sea Ice Concentration in Ice Margin Zone Using MODIS data

Xinxin Ye<sup>1,2</sup>, Jie Su<sup>1</sup>, Yang Wang<sup>1,3</sup>, Guanghua Hao<sup>1</sup>, Jiaqiang Hou<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Physical Oceanography of State Education Ministry, Key Lab of Polar Oceanography and Global Ocean Change, Ocean University of China, Qingdao, China

2. Department of Atmospheric and Oceanic Science, School of Physics, Beijing University, Beijing, China  
3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave Chinese Academy of Science, Qingdao, China

**Abstract**—The AMSR-E sea ice concentration product with the spatial resolution of 6.25km is the finest published dataset of passive microwave in present. Based on the ice-water discrimination algorithm on visible image and data statistics, a method for AMSR-E sea ice concentration validation was given in this paper. To assess the AMSR-E ASI sea ice concentration product in ice margin zone, 12 clear sky samples were selected in Bering-Chukchi Seas to compare with the results come from MODIS images bases on channel 2 with 250m resolution during May and June, 2009. It shows that the average difference between the AMSR-E ASI and MODIS sea ice concentration is 0.672% with the RMS error of 16.838%. Accordingly, the ASI product is generally effectual and objective for mean state, while the uncertainty tends to be obvious in the ice margin zone. It is necessary to enhance the accuracy of product in sea ice margin zone by merging the passive microwave remote sensing data with higher resolution data, such as visible light remote sensing data.

**Key words**- Sea ice concentration; MODIS; AMSR-E; ASI; validation

## I. 引言

海冰是全球气候系统中冰雪圈的重要组成部分,影响着全球和区域气候及海上生产和航运条件。卫星遥感能够提供时空连续的海冰信息,已逐步成为海冰监测的重要手段。与可见光和红外遥感相比,微波遥感不受昼夜限制,受云雾影响较小,且具有全天候的优势<sup>[1]</sup>。AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System, 地球观测计划先进的微波扫描辐射计)在 89GHz 频段的分辨率为 (4km×6km),显著高于 SSM/I 在 85GHz 频段的分辨率 (13km×15km)。基于 AMSR-E 的 ARTIST (Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study) SEA ICE 海冰密集度反演算法(简称 ASI 算法)<sup>[2]</sup>能够提供极区 6.25km 分辨率的被动微波遥感海冰密集度产品。

海冰密集度是描述海冰特征的主要参数之一,是指一定范围内海冰所占的面积百分比,用于描述海冰的空间密集程度。ASI 算法反演海冰密集度的误差来源主要有以下几个方面。首先,海冰密集度由 AMSR-E 各频段亮温的极化差异计算,从原始数据到亮温的计算存在误差,89GHz

亮温精度为 1K 左右,对海冰密集度反演结果的影响低于 3.7%<sup>[3]</sup>;第二,89GHz 频段与低频段相比容易受到大气中的水汽如云滴、雨滴等干扰,ASI 算法在厚冰区准确性在 7%~30%,在薄冰区当云中液态水含量高或有气旋经过时,反演结果误差更大,且显著偏高,同时对海冰表面积雪颗粒密度的大小十分敏感<sup>[4]</sup>;第三,ASI 算法参数的确定受数据的统计样本代表性、反演结果的时空连续性制约,不完全适用于任何天气和地理条件;第四,大气光学厚度和地表微波辐射极化差异的日变化也使反演结果存在误差<sup>[2]</sup>。因此,对 ASI 算法的反演结果进行充分的准确性验证十分必要。

国外学者在这方面已有一定研究成果,分析指出 SSM/I 数据的 ASI 与 NASA Team<sup>[5]</sup>海冰密集度平均差异为 (1 ± 4)%<sup>[6]</sup>;AMSR-E 数据的 ASI、NASA-Team 2<sup>[7]</sup>、Bootstrap<sup>[8]</sup>结果与 2003 年 3-4 月 ARK-XIX/1 考察和 2004 年 7-8 月 ARK-XX/2 考察期间船舶观测数据的相关系数分别为 0.80, 0.79 和 0.81,2002-2006 年期间 ASI (6.25km) 与 NASA-Team 2 结果 (12.5km) 偏差为 -2 ± 8.8%,与 Bootstrap (12.5km) 结果偏差为 1.7 ± 10.8%<sup>[2]</sup>,较全面地反映了 ASI 算法有效性。但以上研究所选择的参考数据的空间分辨率均低于 AMSR-E 数据的空间分辨率。利用更高分辨率的数据来验证遥感反演海冰密集度才更符合验证的要求,例如 Emery 等<sup>[9]</sup>、Zibordi 等<sup>[10]</sup>和 Cavalieri 等<sup>[11]</sup>的工作。本文将针对白令海和楚科奇海区域海冰边缘区,利用与 AMSR-E 共同搭载在 AQUA 卫星上的 MODIS (中等分辨率成像光谱仪, MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 提供的 250m 分辨率可见光通道数据,采用网格化和统计方法验证 AMSR-E ASI 算法海冰密集度反演结果。与文献[9]-[11]不同的是,本文并没有对 MODIS 数据直接进行海冰密集度反演,而是基于冰水识别的结果进行统计,这样做的理由详见本文第四部分。

## II. ASI 算法简介

AMSR-E 是搭载在 AQUA 卫星平台、于 2002 年 5 月发射的被动微波辐射计,能够测量下垫面在 89.0 GHz, 36.5

Corresponding Author: SU Jie, Ocean University of China ([sujie@ouc.edu.cn](mailto:sujie@ouc.edu.cn))

Support Fund: National High Technology Research and Development Program 863 of China (contract No. 2008AA121701) and the National Natural Sciences Foundation of China (contract No. 40876003)

GHz, 23.8 GHz, 18.7 GHz, 10.7 GHz 和 6.9 GHz 频段水平和垂直极化通道的微波辐射。ASI 算法利用了 89GHz 亮温的水平和垂直极化差异对海冰密集度进行反演, 并采用低频频段亮温作为天气过滤器, 去除被误判为海冰的水点。基于 AMSR-E 89GHz 数据的 ASI 海冰密集度算法<sup>[2]</sup>产生于 1998 年 ARTIST 研究项目, 最初目的是将 SSM/I 传感器 85GHz 数据应用到极地海冰边缘区的大气边界层中尺度模拟当中<sup>[6]</sup>, 是对 Svendsen 等<sup>[12]</sup>提出的近 90GHz 频段数据的海冰密集度反演算法的改进。ASI 算法首先要计算 89GHz 的极化差异  $P$ :

$$P = T_{bv} - T_{bh} \quad (1)$$

其中,  $T_{bv}$  表示垂直极化的亮温,  $T_{bh}$  表示水平极化的亮温。已知冰面的极化差异显著小于开阔水面的极化差异。用一个关于  $P$  的三次多项式拟合从 0% 到 100% 的海冰密集度:

$$C = d_3 P^3 + d_2 P^2 + d_1 P + d_0 \quad (2)$$

考虑大气影响、海冰密集度  $C$  趋近 0 和 1 时与极化差异  $P$  的关系以及北极地区纯水面和纯冰面亮温的极化差异 ( $P_0$  和  $P_1$ ), 即可通过求解关于  $d_0, d_1, d_2, d_3$  的四元一次线性方程组得到多项式 (2) 的各项系数, 计算海冰密集度:  $C = 1.640 \times 10^{-5} P^3 - 0.001618 P^2 + 0.01916 P + 0.9710$  (3)

其中规定如果  $P > P_0$ , 令  $C=0$ ; 如果  $P < P_1$ , 令  $C=1$ 。Spreen<sup>[5]</sup>通过对比 ASI 算法与 AMSR-E Bootstrap 算法的冰密集度结果, 将极化差异特征点值固定为  $P_0 = 47 \text{ K}$ ,  $P_1 = 11.7 \text{ K}$ 。虽然 Spreen<sup>[2]</sup>指出  $P_0$  和  $P_1$  的值具有季节性变化, 而且北极的季节变化比南极大, 出于海冰反演结果的时间连续性考虑, 在目前 Bremen 大学发布的 AMSR-E 产品算法中,  $P_0$  和  $P_1$  采用上述常数。

AMSR-E 89GHz 频段的亮温受大气现象影响显著, 大气中水蒸气、云中液态水、降水粒子及风引起的海面粗糙常会使开阔海面和海冰的边缘出现错误的计算结果, 导致在无冰海面计算出海冰。Spreen<sup>[2]</sup>采用天气过滤器过滤大气影响:

第一, 利用 36.5GHz 和 18.7GHz 垂直极化亮温 ( $T_b(37V)$  和  $T_b(19V)$ ) 的光谱梯度率 (GR, Gradient Ratio) 记为 GR (37/19), 滤去云中冰晶和液态水的影响:

$$GR(37/19) \geq 0.045 \Rightarrow C = 0 \quad (4)$$

第二, 利用利用 23.8GHz 和 18.7GHz 垂直极化亮温 ( $T_b(23V)$  和  $T_b(19V)$ ) 的光谱梯度率 GR (23/19) 滤去开阔水面上水蒸气的影响:

$$GR(23/19) \geq 0.04 \Rightarrow C = 0 \quad (5)$$

第三, 将 Bootstrap 算法冰密集度为 0 处的 ASI 算法结果赋值为 0。

可见, 天气滤波器只是去除了那些被误判为海冰的水点, 并未改变冰点的海冰密集度计算值。滤波器的阈值实际上也应该是随时空变化的, 但经试验证明通过统计确定的上述固定阈值适用于大部分情况。

### III. 资料来源

本文采用 Bremen 大学发布的 AMSR-E ASI 算法海冰密集度产品<sup>[2]</sup>作为被检验的对象。产品数据的地图投影方式为极地立体投影, 坐标原点位于北极点, 标准纬线为 70° N, 网格分辨率 6.25km。

本文的验证数据为 MODIS 可见光遥感数据。选取 AQUA-MODIS 传感器 250m 分辨率 L1B 反射率数据进行冰水识别, 并对识别结果进行地图投影和网格化统计, 作为评价 ASI 算法准确性的参考数据。

### IV. ASI 海冰密集度与 MODIS 可见光图像比方法

AMSR-E ASI 海冰密集度数据与 MODIS 图像的比对的基本方法与前人做统计比对的思路类似<sup>[9-11]</sup>, 都需要将二者统一到相同的网格坐标下, 通常的做法是分别计算两种数据源各像素的海冰密集度, 再把高分辨率的数据投影到低分辨率数据的网格中, 计算在一个网格中的平均海冰密集度, 然后进行统计比较。这里, 我们并没有对每个 MODIS 像素点进行海冰密集度的反演, 主要因为以下原因: 1) 按照传统方法进行冰密集度反演, 需要通过实测数据或大量统计确定纯冰和纯水像元的辐射特性, 它们的取值将影响到反演结果; 2) 只要每个 AMSR-E 网格对应的 MODIS 像素点个数足够多, 直接进行每个 AMSR-E 网格内的冰点和水点的统计, 求得的统计意义上的海冰密集度与反演冰密集度的网格点平均值差别很小, 在 10<sup>-2</sup>%—10<sup>-3</sup>% 的量级。因此, 我们利用 MODIS 高分辨率可见光数据直接进行冰水识别, 对识别结果做网格化统计得到海冰密集度, 下面做详细说明。

#### A. MODIS 冰水识别

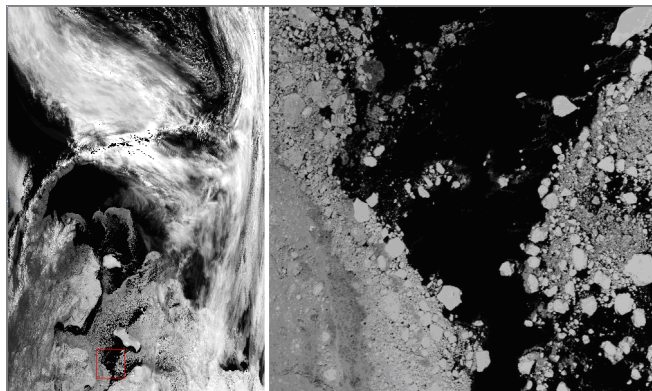
采用阈值法<sup>[13]</sup>对 MODIS 的 2 波段数据进行冰水识别。该方法最初是在处理北极航空数字影像的过程中开发的, 可以用于分析海冰边缘、密集度、冰水比例等常规参数。其基本原理是海冰和海水的可见光波段反射率不同, 而且在一幅灰度图像中, 海冰和海水交界处灰度差异最大。如果统计图像中各灰度值对应的像元数量, 记为  $\varepsilon(k)$ , 计算每个像元与相邻像元的灰度差, 统计差值大于临界值  $p$  的像元数量, 记为  $\delta(k)$ , 其中  $k \in [0, 255]$ , 计算比值:

$$\lambda(k) = \delta(k) / \varepsilon(k) \quad k \in [0, 255] \quad (6)$$

称  $\lambda$  为强度比, 则  $\lambda$  的峰值对应的灰度  $k$  即为图像中最大灰度反差处对应的灰度, 该值最接近区分海冰和海水的阈值, 故  $k$  即为冰水识别的阈值。临界值  $p$  的选择对曲线峰值的大小有影响, 而对峰值对应的灰度值没有影响<sup>[13]</sup>。但在 MODIS 可见光图像中云的色调亮白, 与海面的色调反差也较大, 容易被误判为海冰, 故该识别方法主要适合于晴空条件下的 MODIS 图像。

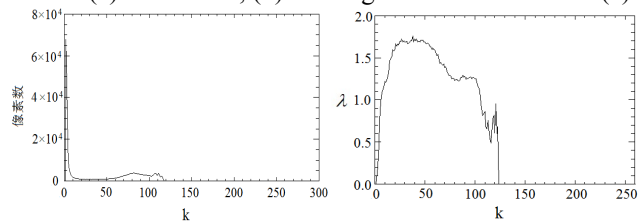
图 1a 为 2009 年 5 月 1 日 23:55 (UT) MODIS/AQUA 波段 2 的 250m 分辨率灰度图像 (未做地理订正)。其中红色方框部分无云覆盖, 且图像清晰, 选为进行冰水识别的子区域, 其灰度图见图 1b, 图像尺寸为 (600×600) 像素。选取晴空条件下子区域进行研究的目的是避免云误判为冰所

引起的冰密集度误差。按照上述方法，计算该幅图像的强度比并绘出图像灰度分布图和灰度-强度比曲线，见图2。灰度分布图有三个峰（图2a），分别对应灰度接近0的无冰水面、灰度约在45-103的薄冰和灰度约在103以上的较厚海冰；灰度-强度比曲线（图2b）显示左侧峰的峰值为1.758，灰度38，对应无冰水面与薄冰、厚冰的阈值；中间峰的峰值为1.293，灰度88，对应较厚海冰与薄冰、无冰水面的阈值；右侧峰的峰值为0.956，灰度121，结合灰度分布图可以看出，出现该峰是由于图像中亮度高的像素点数量较少，并不能作为区分不同性质下垫面的阈值。选择最左侧的峰作为冰水识别的灰度阈值，判别结果如图3所示。



(a) 全景图像 (b) 子区域图像(对应 a 图的红方框内)

图 1 20090501 23:55 (UT) 的 MODIS 波段 2 灰度图  
Fig.1 MODIS band 2 grayscale image in 23:55 (UT) May 1, 2009 (a) Panoramic; (b) Sub-regional in red frame of (a)



(a) 灰度值分布图 (b) 灰度-强度比曲线

图 2 选定区域灰度图分析

Fig. 2 Grayscale analysis of selected regions  
(a) Histogram (b) Gray - intensity ratio curve

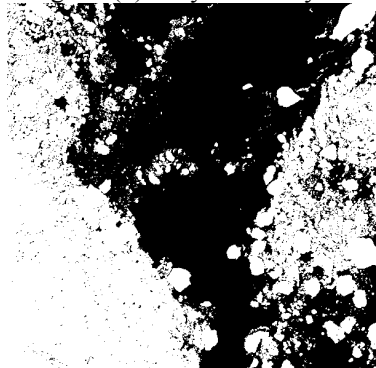


图 3 选定区域的冰水识别结果

Fig. 3 Ice water discrimination results of the selected area

### B. MODIS 海冰密集度计算

冰水识别是对MODIS轨道分景数据进行的，这里尚未经过地理订正。为了与极地立体坐标投影下的AMSR-E冰密集度结果进行对比，需要将分景数据的冰水识别结果与

相应的地理信息结合，得到各像元在极地立体投影坐标下的冰水分布情况。MODIS数据地理信息中提供了1km分辨率的采样点经纬度，用双线性插值可得到250m分辨率的采样点经纬度，根据该地理信息将MODIS冰水识别结果图像校正到极地立体投影坐标。MODIS可见光图像的空间分辨率(250m)是AMSR-E 89GHz频段空间分辨率(4km×6km)的380倍左右，即每个AMSR-E极地立体坐标投影网格内有380个左右的MODIS像元点，计算落到AMSR-E单个网格内的MODIS冰像元个数与总像元个数的比值，即可得到该格点范围内的海冰覆盖率。

将图1b所示子区域在AMSR-E网格坐标(极地立体坐标)投影，具体地理位置见图4a的方框。对MODIS波段2数据进行冰水识别，统计每个网格内冰像元和总像元个数的比例，得到的海冰密集度，统计结果见图4b，其中图4b中的红色方框部分对应着图4a中的阴影部分，该区域的MODIS冰水识别结果在极地立体投影坐标下的分布见图5。该图非常清晰地显示了MODIS像元的空间分布，由于每个AMSR-E网格包含的MODIS像素点太多(380个左右)，在图5中每4个点显示一次。

需要说明的是，统计过程中MODIS像元覆盖目标网格不足半格的，冰密集度设为缺省。这样，经过地理订正和冰水像元统计的MODIS海冰密集度数据可以用于验证ASI算法产品的准确性。

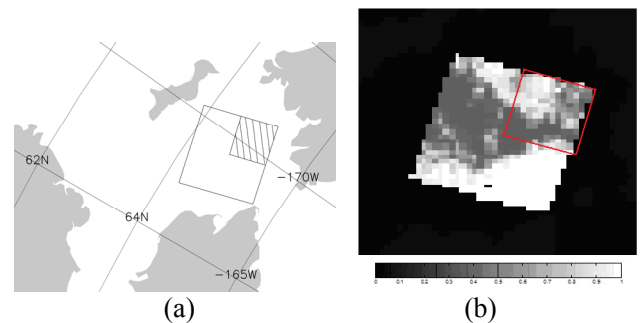


图 4 MODIS 2 通道可见光图像统计

(a) 子区域的极地立体投影坐标位置；(b) 子区域的海冰密集度统计结果；图 a 的阴影部分对应着图 b 的红色方框部分

Fig. 4 MODIS channel 2 statistics of visible light images  
(a)The promoter region of the polar stereographic projection coordinates; (b) sea ice concentration results; Shaded area in Fig. (a) corresponds to red frame area of Fig. (b)

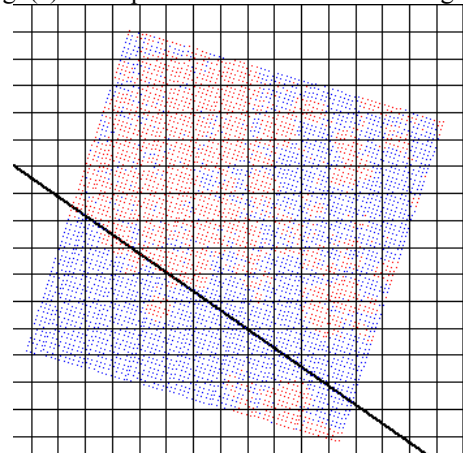


图 5 图 4 的阴影(红框)区域内的冰水识别结果

(其中水点为蓝色，冰点为红色，黑方框为 AMSR-E 数据网格的网格线)

Fig. 5 Ice water discrimination results in shadow (red frame) area in Fig. 4

(Red dot is the ice point, blue dot is the water point, square grid is the polar stereographic projection grid)

### V. 海冰密集度结果对比验证

在白令海和楚科奇海的海冰外缘区，选取 2009 年 5-6 月可见光数据良好、晴空条件较多的 12 个 MODIS 2 通道 250m 分辨率样本，所选验证样本子区域(尺寸 1000×1000 像素)具体位置如图 6 所示，其中位于楚科奇海的有 10 个，位于白令海的有 2 个。这两个海区经常被云覆盖，晴空个例较难筛选，故某些子区域包含了部分陆地。在计算 MODIS 海冰密集度时未对这部分像元做单独处理，这是因为 MODIS 图像上的陆地像元经过地理校正后仍在陆地格点内，而 AMSR-E ASI 产品数据中陆地格点为缺省，故陆地像元不会对海冰密集度对比结果产生影响。每个子区域对应的观测时间见图 6 注释。



图 6 选取验证子区域地理位置

Fig. 6 Location of sub-regional chosen to validate

- (1) - (3): 23:55 (UT), May 1, 2009
- (4): 23:30 (UT), May 21, 2009
- (5) - (6): 23:35 (UT), May 21, 2009
- (7) - (8): 00:15 (UT), May 23, 2009
- (9) - (11): 23:20 (UT), May 23, 2009
- (12): 23:45 (UT), June 4, 2009

按照第四部分提到的 MODIS 数据处理方法对样本子区域可见光图像做冰水识别，每张图分别计算冰水识别的灰度阈值，由于各图中下垫面性质不同，12 幅图的阈值范围为 31-62。各图像区域的灰度图和相应的冰水识别结果如图 7 所示，其中白色像元为海冰，黑色像元为无冰海面。用网格化统计方法处理每幅图像的冰水识别结果，得到与 AMSR-E 海冰密集度产品同一网格的海冰密集度格点数据。选取同期 Bremen 大学 AMSR-E ASI 产品与 MODIS 图像冰水识别后的网格化统计结果做比较，计算各样本子区域的平均误差、标准差和均方根误差，统计结果如表 1 所示。

统计结果显示，AMSR-E ASI 产品和 MODIS 海冰密集度样本数据的差异为  $(0.672 \pm 16.648)\%$ 。首先，从平均误差来看，ASI 算法海冰密集度比 MODIS 可见光图像统计得到的海冰密集度偏高不到 1%，其中大部分样本子区域平均偏差均为正，即 ASI 算法偏高，只有第 2、5 和 7

区域偏低，最大平均偏差为 -4.298%，是第 7 幅图像。平均偏差的绝对值较大的图像包括第 4、5、6 和 7 幅，其中第 4 幅对应区域的冰情状况是冰密集度小、碎冰多；另外三幅图像中冰区内部有融化现象，冰外缘线复杂。这表明在平均意义上 ASI 算法能够反映薄冰区实际海冰分布状况，但对一些特殊的冰情状况，如碎冰多和外缘线复杂的情况 ASI 反演结果与更高精度的遥感数据统计结果之间的平均偏差明显增大。

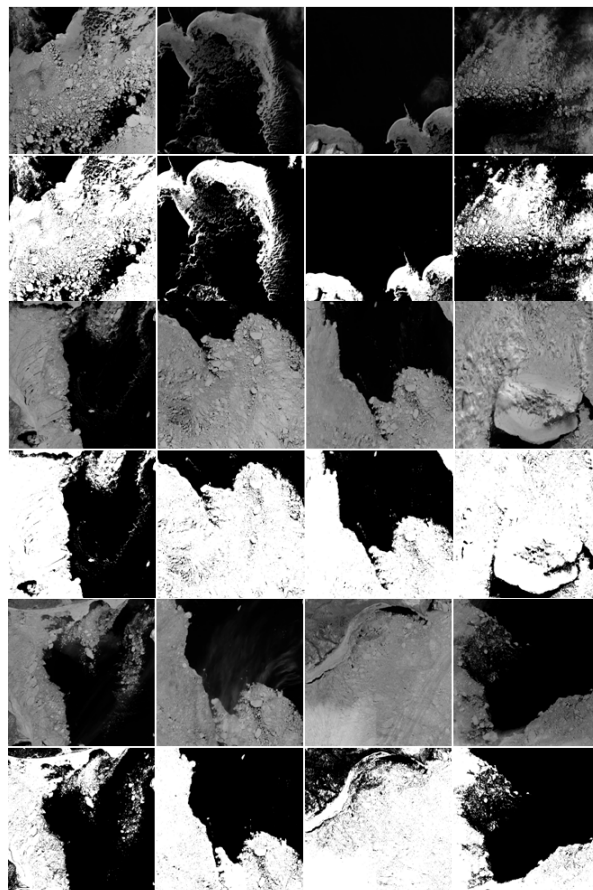


图 7 MODIS 子区域灰度图(单排)及冰水识别结果(双排)  
Fig.7 MODIS sub-regional grayscale (single row) and the ice water discrimination results (double row)

表 1 AMSR-E 与 MODIS 海冰密集度对比

Table 1. AMSR-E sea ice density compared with the MODIS

序号	均值/% MEAN (ASI-MODIS)	标准差/% SD (ASI-MODIS)	均方根/% RMS (ASI-MODIS)
1	1.911	26.889	26.949
2	-1.589	23.591	23.639
3	0.722	19.462	19.471
4	3.328	17.980	18.282
5	-3.246	13.095	13.488
6	3.125	13.178	13.539
7	-4.298	18.071	18.571
8	1.448	12.235	12.316
9	2.346	14.856	15.036
10	2.046	14.610	14.749
11	2.177	11.369	11.572
12	0.097	14.445	14.441
平均	0.672	16.648	16.838

从差异值的离散程度来看, 样本数据偏差量的标准差为 10%以上, 均方根误差与标准差的数值很接近。第 1 幅图像的差异离散度最大, 接近 27%, 该图像的冰情为较厚碎冰和较薄融冰同时存在, 说明在冰外缘区, ASI 算法反演结果的不确定性较大, 特别是在厚冰和薄冰共存的冰情条件下。另外, 本文 ASI 算法与 MODIS 统计结果的平均偏差标准差也高于 Spreen 统计的 ASI 算法与 NASA Team 2、Bootstrap 算法的偏差标准差<sup>[2]</sup>, 这实际上很好理解, Spreen 统计是针对同类产品的不同算法, 而本文的比较则基于不同产品、不同算法。

## VI. 结论与讨论

本文结合冰水识别的阈值法和网格化统计方法, 提出了一种利用 MODIS 可见光通道图像数据对 AMSR-E ASI 算法海冰密集度产品进行准确度验证的方法。选取 2009 年 5-6 月白令海和楚科奇海区域 12 个 MODIS 2 通道 250m 分辨率晴空区域图像验证同期 AMSR-E ASI 算法海冰密集度产品, 得到以下主要结论:

1) 本文提出的验证方法有效可行, 且较传统的方法具有更高的计算效率。每个 AMSR-E 网格对应的 MODIS 像素点个数为 380 个左右, 直接进行每个 AMSR-E 网格内的冰点和水点的统计, 求得统计意义上的海冰密集度与通过反演冰密集度进行统计的该网格平均海冰密集度差别仅为  $10^{-3}\%$ — $10^{-2}\%$  的量级, 远小于海冰密集度检验的平均误差, 不会对验证结果 ( $10^{-1}\%$ — $1\%$  的量级) 产生影响。由于不必进行冰密集度反演, 一方面节省了计算量, 另一方面避免了由纯冰和纯水辐射特征统计不准确带来的反演误差。

2) 在冰边缘区, AMSR-E ASI 海冰密集度产品和 MODIS 可见光图像统计数据的区域平均误差为 0.672%、标准差为 16.648%、均方根误差为 16.838%。结果分析表明 ASI 算法能客观反映薄冰区的平均海冰分布状况, 但对冰密集度小、碎冰多, 或冰区内部有融化、外缘线复杂的海冰区域, ASI 反演结果平均误差会达到 3%以上。

3) 样本数据偏差量的标准差和均方根误差均为 10% 以上, 结果分析表明 ASI 算法反演结果在冰边缘区的不确定性较大, 尤其在较厚碎冰和较薄融冰同时存在的海冰区域, 在监测海冰外缘线变化方面存在明显不足。

ASI 算法反演结果在冰边缘区更容易受到空气中的水汽、强风造成的海面粗糙、下垫面微波辐射和极化差异的随机涨落等因素的影响, 海冰密集度反演结果的不确定性较大。要改进海冰密集度的反演效果, 一方面需要提高连续性, 充分发挥微波传感器全天候、受云雾干扰小的优势, 实现持续和大面积的海冰监测; 另一方面需要提高反演结果的稳定性及空间分辨率。通过 AMSR-E ASI 海冰密集度产品与 MODIS 可见光图像统计的对比验证可以看出, 要同时达到两方面要求, 将 AMSR-E 数据与更高分辨率的遥感产品进行数据融合是十分必要的。例如可以利用微波辐射计数据与 MODIS 等可见光辐射计数据进行融合, 从而改进海冰密集度的反演效果、提高卫星遥感海冰密集度的连续性、稳定性和空间分辨率。

## 致谢

资助项目: 863 计划重点项目课题 2008AA121701 和自然科学基金面上基金 40876003。

## References

- [1] Cao Meisheng, Jin Rui, Remote sensing technology to monitor the sea ice concentration. Remote Sensing Technology and Application, Vol 21, pp.259-264, 2006 (in Chinese).
- [2] G. Spreen, L. Kaleschke, and G. Heygster, Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels. J. Geophys. Res., Vol 113, pp.3481-3484, 2008.
- [3] G. Spreen, Meereisferkundung mit dem satellitengestützten Mikrowellenradiometer AMSR-E Bestimmung der Eiskonzentration und Eiskante unter Verwendung der 89 GHz-Kanäle, Diplomarbeit (master's thesis), Universit of Hamburg, Hamburg, Germany, 2004.
- [4] R. Tonboe, S. Andersen, L. Toudal, and G. Heygster, Sea ice emission modelling. Thermal Microwave Radiation-Applications for Remote Sensing, ITE Electromagn Wave Ser. London: Inst. of Eng. and Technol, 2006, pp.382-400.
- [5] D. Cavalieri, P. Gloersen, and W. Campbell. Determination of sea ice parameters with the Nimbus 7 SMMR. J. Geophys. Res., Vol 89, pp.5355-5369, 1984.
- [6] L. Kaleschke, G. Heygster, C. Lüpkes, et al., SSM/I sea ice remote sensing for mesoscale ocean-atmosphere interaction analysis: Ice and icebergs. Canadian journal of remote sensing, Vol 27, pp.526-537, 2001.
- [7] T. Markus, D. Cavalieri. An enhancement of the NASA Team algorithm. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol 38, pp. 1387-1398, 2000.
- [8] J. Comiso, D. Cavalieri, C. Parkinson, et al., Passive microwave algorithms for sea ice concentration: A comparison of two techniques 1. Remote Sensing of Environment, Vol 60, pp.357-384, 1997.
- [9] W. J. Emery, C. Fowler, and J. A. Maslanik, Arctic sea ice concentrations from special sensor microwave imager and anced very high resolution radiometer satellite data. J. Geophys. Res., Vol 99, pp.18329-18342, 1994.
- [10] G. Zibordi, M. Van Woert, G. P. Meloni, and I. Canossi, Intercomparisons of sea ice concentration from SSM/I and AVHRR data of the Ross sea. Remote Sens. Environ., Vol 53, pp.145-152, 1995.
- [11] D. J. Cavalieri, T. Markus, D. K. Hall, et al., Assessment of EOS Aqua AMSR-E Arctic Sea Ice Concentrations Using Landsat-7 and Airborne Microwave Imagery. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol 44, pp.3057-3069, 2006.
- [12] E. Svendsen, C. Matzler, and T. Grenfell, 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, Vol 8, pp.1479-1487, 1987.
- [13] Jinping Zhao, Jingping Ren, From airlines digital image extraction method of arctic sea ice form parameters. Journal of Remote Sensing, Vol 4, pp. 271-278, 2000 (in Chinese).