

# 南极海冰边界 AMSR-E 密集度产品精度检验

苏昊月<sup>1</sup> 庞小平<sup>1</sup> 赵 羲<sup>1</sup>

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

**摘 要:**根据海冰船测目视观测标准在 MODIS 影像上提取模拟的海冰边界,并利用相应的 MODIS 海冰密集度验证 AMSR-E 海冰密集度产品在冰海冰边界的精度。研究结果表明,海冰边界像素上,AMSR-E 海冰密集度的平均值与 15% 阈值存在显著差异,且 AMSR-E 与 MODIS 海冰密集度的相关性很弱( $R^2 \leq 0.2$ ),基于 ASI 的海冰反演算法在夏季低估边界海冰密集度。考虑整个冰区(包括多年冰、一年冰、新冰和开阔海域)的截线分析显示,AMSR-E 与 MODIS 海冰密集度存在较好的线性关系(夏季  $R^2 = 0.82$ ,冬季  $R^2 = 0.81$ ),AMSR-E 海冰密集度在 20%~30% 区间的误差最大。

**关键词:**海冰边界;海冰密集度;遥感影像;AMSR-E;MODIS

**中图法分类号:**P407.8

**文献标志码:**A

极区海冰对温度变化极为敏感,是全球气候变化的指示器。准确计算海冰边界的空间位置是精确估算整个南极海冰范围和冰盖物质平衡的必要前提<sup>[1]</sup>。自 1978 年卫星搭载多通道微波扫描辐射计(scanning multichannel microwave radiometer, SMMR)获取数据以来,不受天气和昼夜影响的被动微波遥感数据已经成为长时间、大范围研究海冰密集度(sea ice concentration, SIC)和海冰边界的主要数据源。为了评估各种被动微波遥感数据产品质量和验证海冰密集度反演算法精度,国内外学者展开大量对比试验,利用中高分辨率的光学遥感影像、雷达影像以及船测数据等作为地面验证依据<sup>[2-4]</sup>。例如,Heinrichs 等<sup>[1]</sup>用覆盖面广、获取相对容易的中高分辨率卫星影像定性分析北极海冰边界位置。Cavalieri 等<sup>[2]</sup>用 10 景 MODIS 影像评估了基于 TEAM 算法的 AMSR-E(advanced microwave scanning radiometer for the earth observing system)海冰密集度产品在冰海冰区的精度,发现两者在高密集度冰区有较高的一致性,在边缘冰区误差较大,但该研究没有单独对海冰边界的精度进行详细评估。

基于被动微波遥感影像提取海冰范围时,通常 15% 的 SIC 为国际上公认的标准阈值<sup>[5-7]</sup>。事

实上,很多区域的海冰-海水交分界线是模糊的,存在不同尺度的碎冰,从密集冰区到开阔海域存在逐渐过渡<sup>[8]</sup>。船测数据作为实测数据,是检验阈值合理性与否的较准确的地面验证数据。Worby 和 Comiso 最早对 15% 阈值的合理性提出了质疑,并比较了船测海冰边界与 SSM/I(special sensor microwave imager)海冰密集度产品 15% SIC 阈值确定的边界在纬度位置上的差异,发现两者在海冰增长期的一致性高于融化期<sup>[5]</sup>。然而船测数据受到考察船航次在时间和空间上的制约,也受到观测者视野局限和主观判断的影响,因此船测数据的数量有限,能在航行过程中记录下穿过海冰边界的实测样点非常少,导致通过船测样点定量验证海冰密集度产品在冰海冰边界的误差非常困难。

从高分辨率遥感影像上提取海冰边界没有统一的标准,由于 ASPeCt(Antarctic Sea Ice Processes and Climate)船测海冰目视观测准则在国际上被广泛认可,本文提出一种将遥感影像与船测采样标准相结合生成模拟样点的方法,从具有高空俯瞰效果的 MODIS 光学影像上,根据船测方法获取大量的海冰边界验证样点。本文将利用大量的模拟实测样点,定量分析落在边界上的 AMSR-E 海冰密集度产品的 SIC(以下简称 AM-

收稿日期:2014-07-27

项目资助:国家自然科学基金(41301463);高等学校博士学科点专项科研新教师类基金(20130141120009);南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2014-04-07)。

第一作者:苏昊月,硕士,研究方向为极地海冰遥感。haoyue.su@whu.edu.cn

通讯作者:赵羲,博士。xi.zhao@whu.edu.cn

SRE-SIC)与15%阈值是否一致,并统计与对应范围中MODIS的SIC(以下简称MODIS-SIC)的差异,针对海冰边界处的样点,分析误差原因。

## 1 数据

本研究涉及中高分辨率的光学遥感影像和被动微波遥感影像反演的海冰密集度产品两部分数据。根据高分辨率美国陆地资源卫星 Landsat TM 的无云情况(用作对结果的辅助分析),选用了4幅覆盖范围更广的500 m分辨率 Terra MODIS L1B 级影像数据。影像获取时间分别为2004年2月25日、2005年12月8日、2009年12

月1日和2010年3月3日,位置分布在环南极洲大陆的海冰区边缘,如图1所示。被动微波遥感影像选用的是目前空间分辨率最高(6.25 km)的全南极海冰密集度日平均数据。上述4d的AMSR-E海冰密集度产品下载自美国冰雪数据中心网站。该产品采用的ASI算法(arctic radiation and turbulence interaction study sea ice algorithm)是基于89 GHz垂直与水平极化辐射亮温差来反演海冰密集度的。本文选择了应用更广泛的AMSR-E海冰密集度日平均产品,对MODIS影像在一天中的获取时刻没有严格限制,目的是为了结论对更多的日平均标准产品用户有借鉴意义。

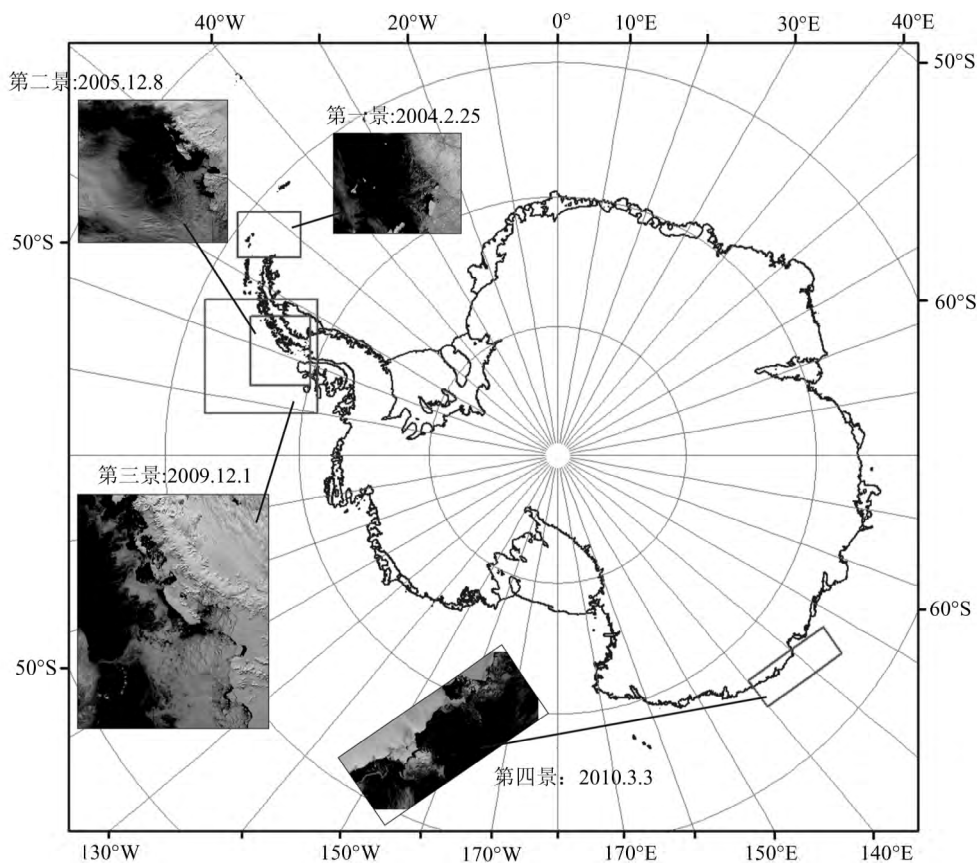


图1 4景MODIS影像在南极大陆的位置及时间

Fig. 1 Acquisition Time and Position of 4 MODIS Scenes in Antarctic

## 2 研究方法

本文根据海冰分类方法,生成250 m分辨率的海冰-非海冰二值图,再基于ASPeCt海冰船测目视观测标准确定海冰边界,并计算边界样点上AMSRE-SIC与MODIS-SIC相关的一系列统计值,用于误差分析。

### 2.1 MODIS影像海冰识别

多光谱阈值法是常用的光学影像识别海冰方法。根据冰雪与云、裸地、水体、植被等其他地物在不同波段范围的反射率差异,对多个波段设置阈值来实现覆盖类型的分类。本文采用美国国家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)公布的标准海冰算法对晴空下的MODIS影像进行海冰识别。当

MODIS 像素满足条件式:  
 $(\text{NDSI} > 0.4) \cap (\text{Ref}_1 > 0.1) \cap (\text{Ref}_2 > 0.11)$   
(1)

时,即被识别为海冰,否则为海水、陆地等非海冰类型。式(1)中  $\text{Ref}_1$ 、 $\text{Ref}_2$  分别为 MODIS 的 1、2 波段反射率,归一化雪被指数<sup>[6]</sup> (NDSI)用于区分海冰和云,计算公式为:

$$\text{NDSI} = (\text{Ref}_4 - \text{Ref}_6) / (\text{Ref}_4 + \text{Ref}_6)$$
 (2)  
式中, $\text{Ref}_4$ 、 $\text{Ref}_6$  分别为 MODIS 的 4、6 波段反射率。通过判别条件式(1),将 MODIS 像素判别为海冰和非海冰两种类型,生成 250 m 分辨率的海冰-非海冰二值图。

2.2 模拟海冰边界提取

ASPeCt 海冰船测目视观测标准是以破冰船为中心,对周围 1 km 内的海域每小时观测一次,记录海冰密集度、海冰类型、海冰厚度、浮冰尺寸、边界位置等信息,在最北出现的海冰密集度大于等于 10% 的位置被记录为海冰边界。为了利用 ASPeCt 船测标准从 MODIS 影像上提取海冰边界样点,首先将 MODIS 250 m 分辨率的海冰-非海冰二值图重采样到 2 km 分辨率,与船测标准中的半径为 1 km 的观测范围相匹配。再计算每个 2 km 分辨率格网对应的 8×8 个 250 m 分辨率二值图中海冰所占的比例作为“船上观测的”SIC。最后在 2 km 格网上提取 10% 的 SIC 等值

线作为模拟船测海冰边界。为了比较模拟船测海冰边界位置和 15% AMSRE-SIC 的关系,我们对模拟船测海冰边界(10% 等值线)通过的 AMSRE-SIC 像素进行了采样,共确定了 917 个落在海冰边界上的样点。每景影像中分布的采样点个数记录在表 1 中。

2.3 统计分析

本文对 917 个边界样点做了统计分析,分别计算每景影像上样点的 AMSRE-SIC 平均值与标准差,并采用单样本 *T* 检验分析平均值与 15% 阈值的差异。然后计算了 MODIS-SIC,即为每一个 AMSRE-SIC 采样点对应的 25×25 个 MODIS 像素中海冰所占的比例,作为对应 MODIS 像素重采样到 6.25 km 分辨率后的海冰密集度。统计了 AMSRE-SIC 与 MODIS-SIC 的关系,包括偏差(AMSRE-SIC - MODIS-SIC)、均方根误差和线性相关系数等,进一步分析 ASI 算法反演的海冰密集度与中高分辨率光学影像上提取值的差异。此外,我们还在每景 ASI 影像上选取了两条截线,截线由密集度高的多年冰穿过海冰边界延伸至开阔海域,以便更好地分析对比在不同密集度海冰区域的误差分布情况。四景影像上的共 8 条截线穿越了 236 个样点,比较了截线样点上的 AMSRE-SIC 和 MODIS-SIC 关系。

表 1 海冰边界验证结果的统计指数  
Tab. 1 Validation Statistic Results of Sea Ice Edge

影像	日期	采样点 个数	AMSR-E-SIC			AMSR-E-SIC 与 MODIS-SIC 关系			
			平均值 /%	标准差 /%	与 15% 差异 <i>T</i> 检验	与 MODIS-SIC 偏差/%	均方根误 差/%	相关系数 <i>R</i> <sup>2</sup>	相关关系显 著性 <i>F</i> 检验
第 1 景	2004-2-25	98	0.8	2.9	-48.376*	-15.1	19.2	0.2	24.278*
第 2 景	2005-12-8	364	10.6	21.4	-3.051*	-12.3	30.5	0.03	11.499*
第 3 景	2009-12-1	182	12	17.9	-2.301*	-12.8	28	0.1	19.11*
第 4 景	2010-3-3	273	19.9	24.1	13.648*	0.5	26.2	0.05	13.551*
第 1-4 景		917	13	21.2	-2.903*	-8.9	27.7	0.04	39.582*

\* 表示 0.05 的显著水平。

3 结果与讨论

3.1 边界验证与分析

4 景影像的海冰边界样点统计结果见表 1。AMSR-E-SIC 与 15% 阈值进行单样本 *T* 检验的结果表明,这 4 景影像中,位于模拟船测海冰边界的 AMSRE-SIC 平均值与 15% 阈值有显著性差异。处在海冰融化期(11 月~2 月)的 1~3 景,AMSR-E-SIC 平均值低于 15%。查看当天无云的 30 m 分辨率 Landsat TM 影像发现,在 Antarctic 夏

季,海冰边缘区域经常出现被大片开阔海域分隔出来的高密集度海冰带,这些地方在 MODIS 影像上被认为是边界,但对应到 6.25 km 分辨率的 AMSRE-SIC 像素,SIC 就可能小于 15%。处在海冰增长期(3~10 月)的第 4 景,AMSR-E-SIC 在平均值统计上显著高于 15%。

虽然同一像素位置上,来自 AMSR-E 的海冰密集度值和 15% 有显著差异,但海冰并不一定在每一个密集度值上都有分布,因此还需要比较 15% 阈值所在格网位置与模拟海冰边界位置的空间距离。结果发现,两者间最大距离不超过 3 个

AMSR-E 格网大小(18 km), 58% 的距离在 1~2 个 AMSR-E 格网以内, 平均距离为 10.2 km。图 2 展示了第二景影像中部分区域的 15% 等值线与模拟船测边界的空间位置, 图 2(a) 为 MODIS 第二波段原始影像, 图 2(b) 为 ASI 海冰密集度产品, 区域 A 中两条边界间距在半个格网以内的小差异可能是 AMSR-E 较粗的空间分辨率造成的, 区域 B 中较大的间距一般出现在低密集度的薄冰区。Heinrichs 等<sup>[1]</sup>在研究中也发现, AMSR-E 的 15% 阈值与 SAR 影像上目视解译出的边界位置距离在 12.5 km 左右, 这一结论与本文的结果相近似。鉴于 AMSR-E 海冰密集度系列产品的空间分辨率在 6.25~25 km 之间, 15% 阈值的空间位置较为准确, 离边界的平均差距 10 km 可视为正常范围之内。

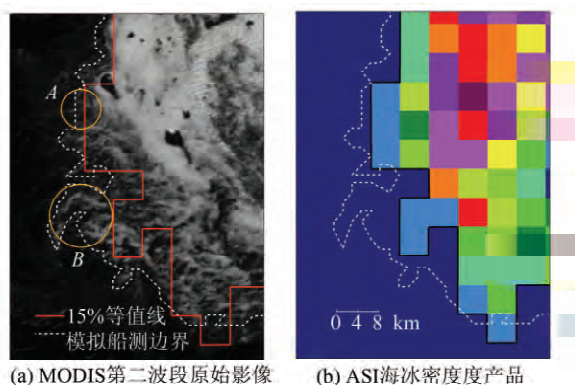


图 2 模拟船测边界与 15% 等值线的空间位置示意图

Fig. 2 Spatial Distance between Simulated Ship Ice Edge and 15% Contour Line

从 AMSRE-SIC 相对 MODIS-SIC 的偏差和均方根误差(表 1)可以看出, 1~3 景的偏差较大, 均为负值, 只有第 4 景的偏差稍小且为正值, 说明 AMSRE-SIC 比同一位置的 MODIS-SIC 值普遍偏小。4 景影像的均方根误差都在 20%~30% 之间。F 检验结果表明, 4 景影像的 AMSRE-SIC 与 MODIS-SIC 相关系数  $R^2$  值与 0 有显著差异, 但值较小, 所以 AMSRE-SIC 与 MODIS-SIC 在海冰边界位置的相关关系很弱。

4 景影像边界样点的 AMSRE-SIC 与 MODIS-SIC 散点图见图 3, 其中实线代表线性回归趋势线, 虚线代表横纵坐标轴相等的直线  $Y=X$ 。由于采样的是边界像素, 海冰密集度低, 所以样点集中分布在散点图的左下角。1~3 景影像中有较多样点在  $Y=X$  直线左上方, 较多 AMSRE-SIC 为 0 的样点对应的 MODIS-SIC 大于 0, 说明 ASI 算法通常低估了边界的海冰密集度。结合 Landsat TM 影像分析, 可能是由于夏季积雪融化, 边界的海冰表面被湿雪、融水池覆盖, 使其温

度与海水接近, 导致 AMSR-E 垂直和水平极化辐射亮温差太小, 无法区分这类海冰与海水<sup>[9]</sup>。第 4 景有较多的样点在  $Y=X$  直线右下方, 且偏差大于 0, 说明 ASI 算法高估了边界的海冰密集度, 此景影像的获取日期是 3 月 3 日, 南极大陆开始进入冬季, 边界海冰逐渐增加, 新生成的尼罗冰、小的莲叶冰等表面黑暗无光泽, 反射率接近海水, 导致 MODIS 传感器无法识别, 这也可能是冬季边界 ASI 海冰密集度平均高于 15% 的原因。

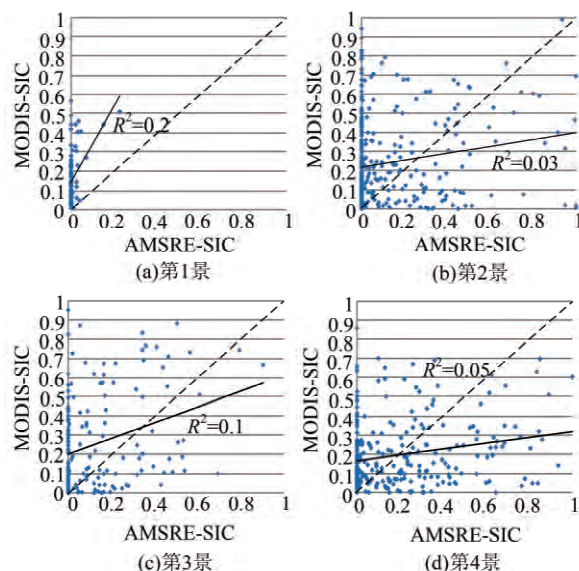


图 3 海冰边界 AMSRE-SIC 与 MODIS-SIC 散点图

Fig. 3 Scatterplots of AMSRE-SIC and MODIS-SIC at Sea Ice Edges

### 3.2 冰区截线分析

虽然在海冰边界, AMSRE-SIC 与 MODIS-SIC 相关性很弱, 误差较大, 但是考虑整个冰区(包括多年冰、一年冰、新冰和开阔海域), 通过对所有截线采样点分析发现, AMSRE-SIC 与 MODIS-SIC 的相关性较强, 散点图见图 4, 实线代表线性回归趋势线, 虚线代表  $Y=X$ , 相关系数  $R^2$  在海冰融化期为 0.82, 增长期为 0.81。夏季和冬季的截线采样点都集中分布在各自回归线的两端, 其余点分布离散, 说明 AMSRE-SIC 与 MODIS-SIC 在多年冰和开阔海域的一致性较高, 在多年冰向海水过渡的边缘冰区误差较大。AMSRE-SIC 相对 MODIS-SIC 的偏差在夏季为 -0.106, 夏季的截线采样点集中分布在  $Y=X$  直线左上方, 说明 ASI 算法低估了夏季南极冰区的密集度。冬季的截线采样点分布较均匀, 偏差较小, 为 -0.015, 且 AMSRE-SIC 相对 MODIS-SIC 的均方根误差在夏季为 0.214, 冬季为 0.18, 说明 ASI 算法对冬季海冰密集度的反演精度高于夏季。



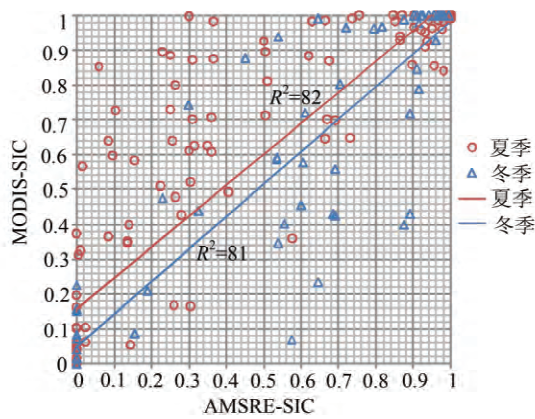


图 4 截线采样点 AMSRE-SIC 与 MODIS-SIC 散点图

Fig. 4 Scatterplot of AMSRE-SIC and MODIS-SIC at Transection Lines

为了进一步比较在不同密集度海冰区的 AMSRE-SIC 与 MODIS-SIC 的误差,将截线采样点的 AMSRE-SIC 从 0~100% 平均分为 11 个区间,统计每个区间 AMSRE-SIC 与 MODIS-SIC 之差的绝对值之和,即累计绝对误差,结果见图 5。AMSR-E SIC 在高海冰密集度区域相对 MODIS-SIC 的误差较小,在低海冰密集度区域误差较大,在 20%~30% 之间的误差最大,该密集度区间邻近 15% 的海冰边界阈值。

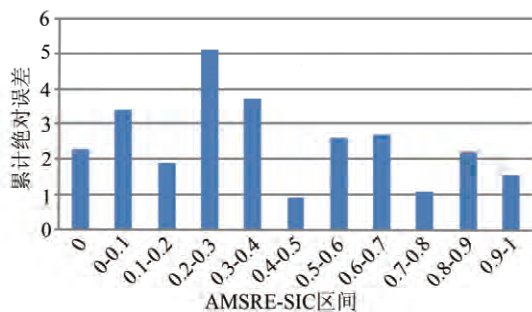


图 5 截线采样点 AMSRE-SIC 误差分布图

Fig. 5 Error Distribution Diagram of AMSRE-SIC at Transection Lines

## 4 结 语

本文依据 ASPeCt 海冰目视观测标准,在中高分辨率光学遥感影像上采样模拟船测海冰边界,该方法避免了从影像上人工判断边界的主观性和船测采样的时空局限性,能获取大量的地面验证数据,用于海冰密集度产品的精度评定与分析。模拟边界样点的 AMSR-E 的 SIC 平均值与 15% 阈值有显著差异,但 15% 阈值的空间位置较为准确,与模拟海冰边界的平均距离为 10 km,需结合其他高分辨率影像综合分析,才能得出更准

确的边界位置。AMSR-E-SIC 与 MODIS-SIC 在海冰边界位置的相关关系很弱。相对 MODIS-SIC,ASI 反演算法在夏季低估边界 SIC,在冬季高估边界 SIC。考虑了各海冰密集度的截线分析表明,AMSR-E-SIC 与 MODIS-SIC 存在较强的线性关系,在多年冰和开阔海域误差较小,AMSR-E-SIC 在 20%~30% 之间的误差最大,且 ASI 算法对冬季海冰密集度的反演精度高于夏季。总体来看,ASI 算法反演整个冰区海冰密集度的精度较高,但是对海冰边界的反演精度与 MODIS 相比平均差在 -8.9% 左右,标准差 27.7%。整个检验过程也受到一些不确定因素的影响,如 ASI 日平均数据与 MODIS 影像获取时间的差异,MODIS 海冰解译、影像重采样等。

## 参 考 文 献

- [1] Heinrichs J F, Cavalieri D J, Markus T. Assessment of the AMSR-E Sea-ice Concentration Product at the Ice Edge Using RADARSAT-1 and MODIS Imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3 070-3 080
- [2] 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): 3 331-3 339
- [3] Xi Ying, Sun Bo, Li Xin. Assessment of AMSR-E ASI Sea Ice Concentration and Landsat-7 ETM+ Imagery[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(3): 520-526(席颖, 孙波, 李鑫. 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[J]. *遥感学报*, 2013, 17(3): 520-526)
- [4] Wiebe H, Heygster G, Markus T. Comparison of the ASI Ice Concentration Algorithm with Landsat-7 ETM+ and SAR Imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(9): 3 008-3 015
- [5] Worby A P, Comiso J C. Studies of the Antarctic Sea Ice Edge and Ice Extent from Satellite and Ship Observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92: 98-111
- [6] Zhang Xin, Zhou Chunxia, E Dongchen, et al. Monitoring of Antarctic Sea Ice Based on the Multichannel MODIS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(10): 1 194-1 198(张辛, 周春霞, 鄂栋臣, 等. MODIS 多波段数据对南极海冰变化的监测研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2014, 39(10): 1 194-1 198)
- [7] Mu Longjiang, Zhao Jinping. Variability of the

- Greenland Sea Ice Edge[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(6): 709-717 (牟龙江, 赵进平. 格陵兰海海冰外缘线变化特征分析[J]. 地球科学进展, 2013, 28(6): 709-717)
- [8] Liu Chenglong, Zhao Jinping. Pack Ice Extent and Its Spatiotemporal Variation in Summer Arctic[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(4): 36-46 (刘成龙, 赵进平. 夏季北极密集冰区范围确定及其时空变化研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(4): 36-46)
- [9] Ozsoy-Cicek B, Xie H, Ackley S F, et al. Antarctic Summer Sea Ice Concentration and Extent: Comparison of ODEN 2006 Ship Observations, Satellite Passive Microwave and NIC Sea Ice Chart[J]. *The Cryosphere*, 2009, 3: 1-9

## Assessment of AMSR-E Sea Ice Concentration Products at Ice Edges in Antarctic

SU Haoyue<sup>1</sup> PANG Xiaoping<sup>1</sup> ZHAO Xi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** According to the ASPeCt sea ice visual observation protocol, we extracted the sea ice edge from MODIS images and assessed the quality of AMSR-E SIC product using a corresponding MODIS Sea Ice Concentration (MODIS SIC). Results show that AMSR-E pixels located at the ice edges have a significantly different mean SIC value from the well-established 15% threshold. The correlation between AMSR-E and MODIS SIC is rather low with coefficients  $R^2 \leq 0.2$  and the ASI algorithm underestimates sea ice edge concentrations in summer. Then transect analysis, applied on all the ice areas (including multi-year ice, one-year ice, new ice and open water), however, show that AMSR-E SIC and MODIS SIC have a good linear relationship with  $R^2$  of 0.82 in summer and 0.81 in winter. When AMSR-E SIC value falls between 20% and 30%, it has larger errors compared with the other range of SIC values.

**Key words:** sea ice edge; sea ice concentration; remote sensing image; AMSR-E; MODIS

**First author:** SU Haoyue, master, specializes in polar sea ice remote sensing. E-mail: haoyue.su@whu.edu.cn

**Corresponding author:** ZHAO Xi, PhD. E-mail: xi.zhao@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41301463; the Specialize Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China, No. 20130141120009; the Fund of Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, SOA, No. CHINARE2014-04-07.