

刘建强, 刘思琦, 林文明, 等. 基于 CFOSAT 散射计的海冰识别方法研究[J]. 海洋学报, 2023, 45(6): 134–140, doi:10.12284/hyxb2023069  
Liu Jianqiang, Liu Siqi, Lin Wenming, et al. Sea ice identification based on CFOSAT scatterometer[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(6): 134–140, doi:10.12284/hyxb2023069

# 基于 CFOSAT 散射计的海冰识别方法研究

刘建强<sup>1</sup>, 刘思琦<sup>2</sup>, 林文明<sup>2,3\*</sup>, 郎姝燕<sup>1</sup>, 何宜军<sup>2,3</sup>

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 3. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 中法海洋卫星散射计 (CSCAT) 丰富的观测几何信息为极地海冰遥感提供了新的机遇。本文提出一种适用于 CSCAT 的贝叶斯海冰识别算法, 不需要构建海冰地球物理模式函数和计算后向散射系数离海冰地球物理模型函数 (GMF) 的距离, 仅利用海面风场反演伴随的最小残差即可构建 CSCAT 海冰识别模型。研究结果与欧洲气象卫星组织的海冰边缘线产品进行了比较, 表明 2021 年 9 月南极和北极区域逐日的海冰覆盖面积估计标准差分别为 1% 和 7%, 与其他卫星散射计的海冰识别结果基本一致。这种新的海冰识别方法具有模型参数少、处理速度快、检测结果可靠的优点, 对卫星地面系统的业务化处理具有重要的借鉴意义。

**关键词:** 中法海洋卫星; 散射计; 海冰检测; 贝叶斯原理; 最大似然估计

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)06-0134-07

## 1 引言

海冰对船舶航行、海洋工程作业、海洋环流以及海洋水文要素的垂直分布有着重要影响, 并通过调制海洋与大气之间的能量交换, 影响底层大气的运动、区域天气过程和全球气候系统<sup>[1-2]</sup>。全球气候变化反过来会影响海冰的演化和分布, 近年来两极地区的海冰覆盖面积在全球变暖和“极地放大效应”<sup>[3]</sup>的双重作用下不断减少<sup>[4]</sup>。因此, 当前各个海洋大国积极发展海冰监测技术, 为船只走航、全球气候变化和海气相互作用研究提供有力支撑。

卫星遥感是目前全球海冰监测最主要的技术手段, 常见的遥感仪器包括可见光和红外传感器<sup>[5]</sup>、微波辐射计<sup>[6]</sup>、合成孔径雷达<sup>[7]</sup>以及微波散射计<sup>[8]</sup>等。这些遥感器的观测原理、时空分辨率和观测刈幅不尽相同, 共同构成了多尺度、多要素的海冰遥感监测

体系。其中, 星载微波散射计具有宽刈幅、全天时、全天候的观测优势, 是当前海冰覆盖范围监测的主要技术手段之一, 单颗卫星散射计基本上可以对两极全球每天重访一次。特别地, 随着我国海洋动力环境卫星的迅猛发展, 国内外在轨运行卫星散射计的数量迅速增加, 多星组网为全球海冰高频次的观测提供了前所未有的机遇。

基于卫星散射计的海冰识别方法大致可以分为 4 种。第一种是基于图像重构技术的高分辨率海冰识别。Long 等<sup>[9]</sup>开发了一种散射计图像重构技术, 将卫星散射计后向散射系数 ( $\sigma^0$ ) 的空间分辨率从数十千米提高至 2.5~5 km。在此基础上, 针对美国航空航天局散射计 (NSCAT)、快速散射计 (QuikSCAT)、先进散射计 (ASCAT) 等多个卫星散射计开展了高分辨率海冰覆盖信息提取, 其反演的海冰面积与微波辐射计的海冰密集度具有良好的一致性<sup>[10]</sup>。但是, 图像

收稿日期: 2022-08-18; 修订日期: 2022-12-03。

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC2803300)。

作者简介: 刘建强 (1964—2023 年), 男, 湖南省益阳市人, 研究员, 研究方向为卫星海洋遥感。E-mail: jqliu@mail.nsoas.org.cn

\* 通信作者: 林文明, 男, 福建省仙游县人, 教授, 研究方向为卫星海洋遥感。E-mail: wenminglin@nuist.edu.cn

重构计算复杂、时效性不高,通常需要2~6 d的观测数据才能形成一幅高分辨率冰情图<sup>[11]</sup>。第二种是基于贝叶斯原理的中等分辨率海冰识别。Rivas等<sup>[12-13]</sup>首先分别计算散射计测量的一组后向散射系数与开阔洋面和海冰表面雷达后向散射模型的“距离”,然后利用最大似然估计判断相应的网格单元是否为海冰。与第一种方法相比,该方法原理简单、计算便捷,可用于生产散射计沿轨海冰产品,在海冰监测的时效性方面具有明显的优势。同时,该方法可以为散射计的海面风场反演提供近实时的海冰辅助信息,有助于减少散射计风场反演所需要的辅助数据种类。第三种是基于机器学习(如支持向量机、神经网络)的海冰识别,首先利用训练样本得到合适的核函数或神经网络,然后使用训练之后的模型对散射计测量的一组数据进行分类。例如,赵朝方等<sup>[14]</sup>利用神经网络算法对极地海冰进行识别,得到的海冰边界介于微波辐射计0%~30%海冰密集度边界之间;Zhai等<sup>[15]</sup>利用随机森林分类法开展了中法海洋卫星(CFOSAT)散射计海冰观测研究,海冰识别的准确率优于93%。第四种是基于线性判别法的海冰识别,即寻找一组散射计相关的海冰敏感参数,通过确定合适的分类阈值实现冰水判别。例如,Zou等<sup>[16]</sup>利用后向散射系数阈值和极化比进行海冰识别,其海冰面积估计的准确率(与微波辐射计相比)优于91%。

上述海冰识别方法大多应用于传统的固定扇形波束散射计和笔形波束圆锥扫描散射计。这两类散射计具有固定的观测方位角或入射角,因此海冰模型构建及反演原理都比较直观。中法海洋卫星散射计(CSCAT)采用扇形波束圆锥扫描体制,能够从多角度对同一海面网格单元进行观测,且独立观测的视数远大于前两类散射计,为海冰监测带来了新的机遇和挑战。本文针对CSCAT开展基于贝叶斯原理的海冰识别方法研究,旨在开发一种时效性高、适用于CSCAT沿轨数据近实时处理的海冰监测算法,为船只走航、全球气候变化和海气相互作用研究提供新的支撑。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据及基本流程

本文基于CSCAT L1B级(3.3版本)数据产品开展极地海冰识别研究,该处理流程与CSCAT海面风场反演的流程基本一致。首先,把CSCAT的观测刈幅沿着顺轨方向和垂直于星下点地面轨迹(交轨)方向划分为空间分辨率一致的规则网格;其次,将入射角和方位角相近的高分辨率条带(slice)组合平均至

规则网格单元;然后,对组合平均之后的 $\sigma^0$ 进行定标处理,并利用贝叶斯原理估计每个网格单元的海冰概率;最后,寻找合适的阈值进行冰水区分,并利用极射赤平投影得到两极海冰分布的投影图,进而与海冰参考数据进行对比验证。

CSCAT海冰识别结果验证使用的是欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)海洋与海冰卫星应用设施(OSISAF)提供的海冰边缘数据。该数据产品是利用多源卫星遥感数据融合处理得到的,时间分辨率为1 d、空间分辨率为10 km,提供了3种类型的海洋表面信息:水面或极稀疏海冰(海冰密集度SIC < 40%)、稀疏海冰(open ice; 40% < SIC < 70%)以及密集海冰(close ice; SIC > 70%)。图1展示了2021年9月1日南北极海冰边缘数据的分布情况。

### 2.2 研究方法

考虑CSCAT独特的观测几何以及海冰快速监测的需求,本文拟使用海面风场反演伴随的残差进行海冰识别。海面风场反演算法为最大似然估计(Maximum Likelihood Estimator, MLE)方法,其代价函数如下:

$$\text{MLE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\sigma_{m,i}^0 - \sigma_{s,i}^0)^2}{\text{var}(\sigma_i^0)}, \quad (1)$$

式中, $N$ 表示观测视角的个数, $N$ 的值为4~16; $\sigma_{m,i}^0$ 是第*i*个视角测量的雷达后向散射系数, $\sigma_{s,i}^0$ 是通过NSCAT-4地球物理模式函数(GMF)仿真的第*i*个视角的后向散射系数; $\text{var}(\sigma_i^0)$ 表示第*i*个视角雷达后向散射系数的测量方差。风场反演就是要寻找使公式(1)取得局部最小值的风矢量(通常有2~4个局部最小值),这些风矢量称为模糊解,其对应的最大似然估计值即为模糊解的残差值。实际上,海冰识别仅使用风场反演伴随的最小残差值(以下简称残差最大似然估计,即MLE)。本文取残差的对数值使其概率分布近似为高斯分布,方便后续的海冰监测处理。具体而言,海表面类型 $s_i$ ( $i=1, 2, 3$ 分别对应海水、稀疏海冰、密集海冰)的概率为

$$p(s_i | \text{MLE}) = \frac{p(\text{MLE} | s_i) \cdot p(s_i)}{\sum_{i=1}^3 p(\text{MLE} | s_i) \cdot p(s_i)}, \quad (2)$$

式中, $p(s_i)$ 表示不同海表类型的先验概率; $p(\text{MLE} | s_i)$ 表示第*i*种海表类型对应的MLE先验概率,两者皆可通过分析CSCAT与OSISAF海冰边缘产品匹配的数据得到。对于海冰覆盖范围监测,仅需要给 $p(s_i | \text{MLE})$ 或MLE设定一个合适的阈值,就可以进行冰水区分。

实际上,海冰遥感监测还须考虑以下两点。首先,海冰覆盖范围是动态变化的,故式(2)右边的先验

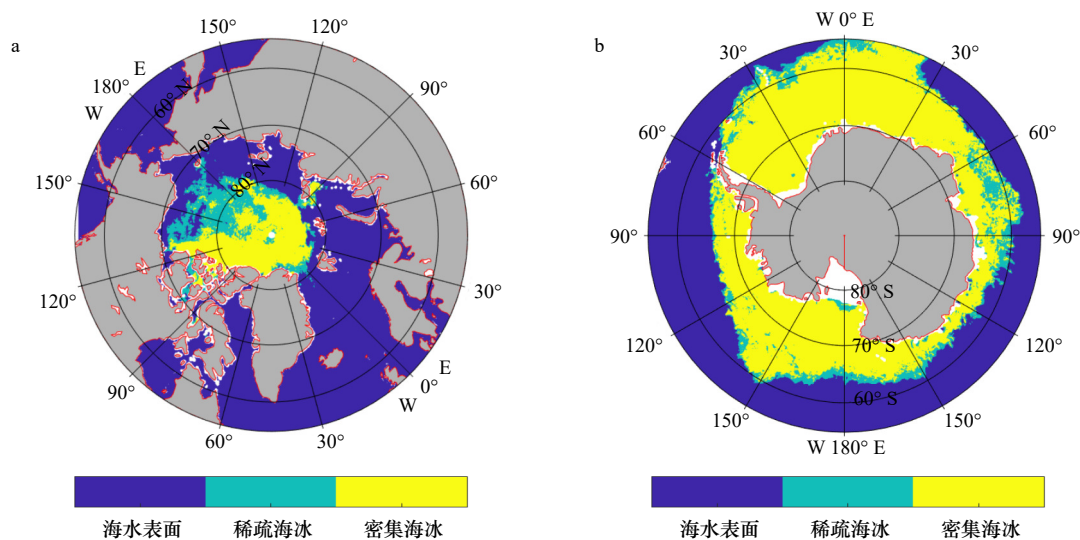


图1 2021年9月1日 OSI SAF 海冰冰缘数据示意图

Fig. 1 Illustration of OSI SAF sea ice edge on September 1, 2021

a. 北极, b. 南极

a. Arctic, b. Antarctic

概率也是动态变化的, 须定时更新海表面及其 MLE 先验概率分布。具体做法为: 海冰识别当日零时, 基于前 10 天的结果生成两极海域的海表面类型及 MLE 先验概率分布查找表, 进而基于动态更新先验概率进行当日的海冰识别。其次, MLE 分布特性与网格单元在观测刈幅交轨方向的位置息息相关<sup>[7]</sup>, 因此若直接使用 MLE 进行冰水区分, 其阈值应随网格序号的变化而变化。本文为了方便处理, 首先根据式(2)估计海冰的后验概率, 然后设置唯一的  $p(s_i | \text{MLE})$  阈值进行冰水判别。

### 3 结果分析

#### 3.1 海冰后向散射特征分析

海冰覆盖的海洋表面与开阔大洋表面的雷达后向散射特征明显不同<sup>[3]</sup>, 这是散射计海冰识别的基础。C 波段固定扇形波束散射计和 Ku 波段笔形波束扫描散射计的海冰散射模型已得到了较为充分的研究, 并成功地应用于各类海冰识别方法。然而自 NSCAT 失效以后, Ku 波段扇形波束散射计的海冰散射特征尚未得到进一步的研究和应用。图 2 展示了不同海表类型下 CSCAT 测量的垂直极化平均  $\sigma^0$  随入射角和风速 [即匹配的欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 预报风速] 变化的二维等值图 (2021 年 9 月)。上下两行分别表示南北极海域的统计结果。图 2e 至图 2f 的空白部分表示数据缺失, 说明该时间段内北极海域基本不存在高风速的情况。

由图 2 可以看出, 南北两极开阔海域的雷达后向

散射特征基本一致,  $\sigma^0$  等值线与观测入射角近似呈线性关系; 等值线不完全重合主要是因为图 2 没有考虑  $\sigma^0$  随风向变化的情况, 也就是 CSCAT 在两极海域不完全相同的相对方位角分布可能造成不尽相同的平均  $\sigma^0$  分布。两极稀疏冰面或密集冰面的后向散射特征明显不同: 北极海冰的后向散射系数显著大于南极海冰, 这可能与该月份北极海冰处于增长期, 而南极海冰处于消融期有关。当海冰密集度较低时, 散射计观测面元内既有海冰又有大面积的裸露海水, 其测量的后向散射系数受海水布拉格散射和海冰表面的双重调制, 因此图 2b 和图 2e 明显呈现出风速的调制效应; 随着海冰密集度的增大, 散射计观测面元内裸露海水的占比减小, 因此其  $\sigma^0$  的风速调制效应变小 (如图 2c、图 2f 所示)。

图 3 展示了 CSCAT 在南极海域海水表面、稀疏冰面和密集冰面获取的垂直极化  $\sigma^0$  的二维密度图。该图对应的 ECMWF 预报风速为 6~7 m/s、观测入射角为 40°~41°。可见, 当 CSCAT 观测面元的海冰密集度大于 40% 时, 风向对 CSCAT 后向散射的调制作用并不明显。稀疏海冰的表面通常具有良好的一致性, 而密集海冰的表面粗糙度受冰龄、积雪等因素的影响更为复杂, 因此前者的  $\sigma^0$  分布比后者更为集中。

总之, CSCAT 后向散射系数与观测几何、海面风速、海冰密集度等因素息息相关, 呈现复杂的依赖关系。由于 CSCAT 的观测几何信息十分丰富, 从上述复杂的  $\sigma^0$  分布特征中梳理出一种最有效的海冰识别方法并不是一件容易的事。但总体而言, 海水和海冰

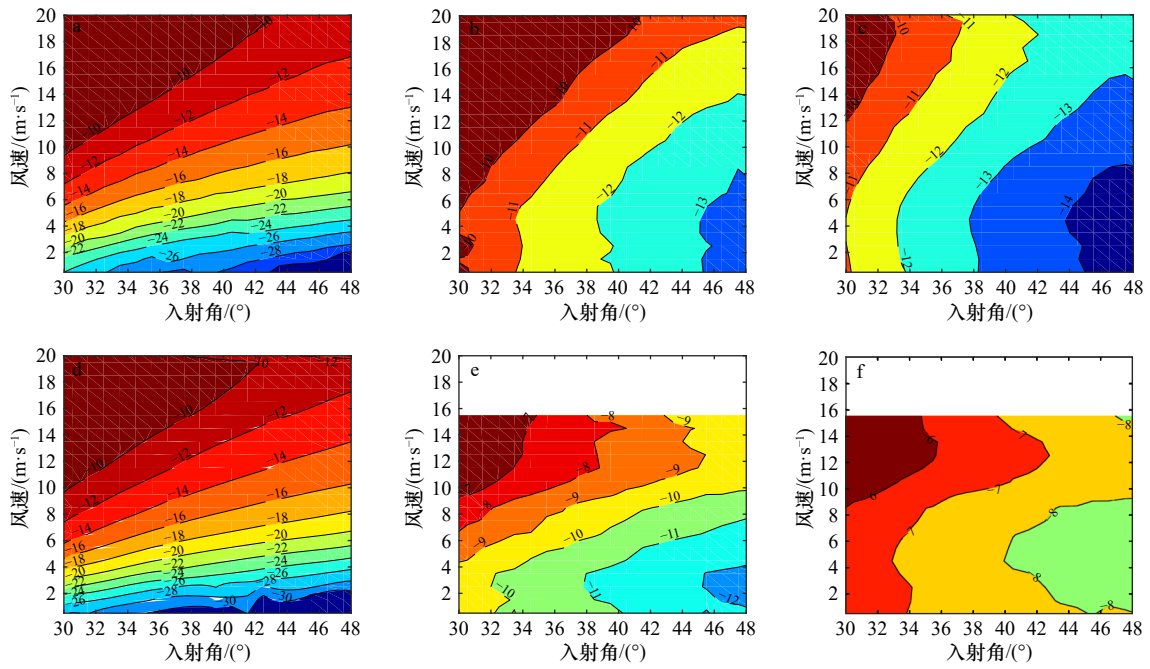


图2 中法海洋卫星散射计垂直极化  $\sigma^0$  (dB) 的二维等值线图

Fig. 2 Two-dimensional contour plots of CSCAT vertically-polarized  $\sigma^0$  (dB)

- a. 南极海域, 海水表面; b. 南极海域, 稀疏冰面; c. 南极海域, 密集冰面; d. 北极海域, 海水表面; e. 北极海域, 稀疏冰面; f. 北极海域, 密集冰面  
 a. Antarctic, open water; b. Antarctic, open ice; c. Antarctic, close ice; d. Arctic, open water; e. Arctic, open ice; f. Arctic, close ice

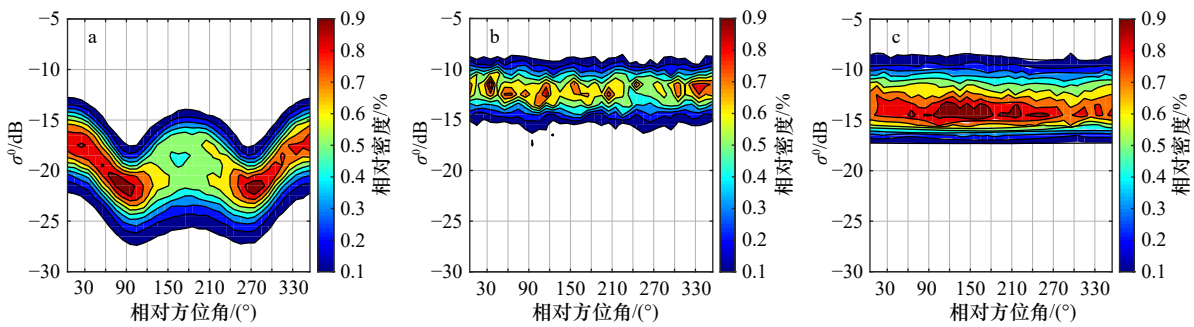


图3 南极海域中法海洋卫星散射计垂直极化  $\sigma^0$  的二维密度图

Fig. 3 Two-dimensional density plots of the CSCAT vertically-polarized  $\sigma^0$  at Antarctic

- a. 海水表面; b. 稀疏海冰; c. 密集海冰。图中对应的风速为 6~7 m/s, 入射角为 40°~41°  
 a. Open water; b. open ice; c. close ice. Here the wind speed is 6~7 m/s, and the incidence angle is 40°~41°

表面的  $\sigma^0$  显著不同, 这为本文仅利用风场反演的最小残差进行海冰识别带来了机遇。

### 3.2 海冰识别结果

本节首先分析风场反演伴随的最小残差用于海冰识别的可行性。图4展示了2021年9月份南极海域(图1b)不同海表面的MLE先验概率分布。这些曲线对应的网格单元离星下点轨迹的距离约290 km。由图可见, 稀疏海冰和密集海冰对应的MLE先验概率分布明显不同, 但是由于该时段密集海冰的数量是稀疏海冰的7倍多, 图中黑色虚线更接近密集海冰对应的MLE分布(红色曲线)。若将黑色实线和虚线的交点设置为冰水区分的阈值, 那么黑色阴影面积表示

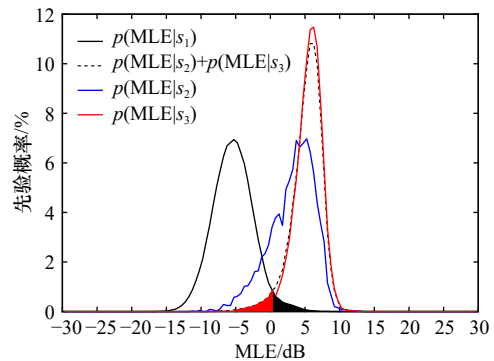


图4 南极海域不同海表面的MLE先验概率分布  
 Fig. 4 A priori probability of MLE over different sea surface in Antarctica

水误判为冰的概率(3.0%),红色阴影面积表示冰误判水的概率(3.9%)。这个值与参考文献[14]的结果(1%~7%)已然十分接近了,但本方法仅使用了风场反演伴随的最小残差,既不需要构建海冰后向散射模型,也不需要计算 CSCAT 测量的一组  $\sigma^0$  与海冰模型之间的欧式距离,更加适用于对处理时效性要求较高的业务化系统。

如 2.2 节所述,原理上人们可以直接利用 MLE 阈值进行冰水判别,但这种判别方法的阈值应随交轨方向网格序号的变化而变化。为了方便处理,本节首先根据式(2)估计海冰的后验概率,然后设置唯一的  $p(s_i|\text{MLE})$  阈值进行冰水判别。以 CFOSAT 在 2021 年

9 月 1 日的观测数据为例,图 5 给出了两极海域海冰的后验概率。图外侧空白部分表示当日没有被 CSCAT 观测的区域。虽然 CSCAT 的观测刈幅(1 000 km)小于 Ku 波段笔形波束扫描散射计的幅宽(1 800 km),但基本上也可以实现每天都对两极区域进行一次全覆盖。总体而言,图中红色区域与图 1 的密集冰分布具有较好的一致性,而青色区域则与图 1 的稀疏冰分布较为一致。将阈值  $p_{th} = p(s_2|\text{MLE}) + p(s_3|\text{MLE})$  设置为 30%~50%,即可较好地区分冰水(图 6)。需要注意的是,上述区间范围内不同的  $p_{th}$  值主要影响海冰边缘区和高风速海域(图 6b 中 70°S、20°E 附近的区域)的冰水判别。

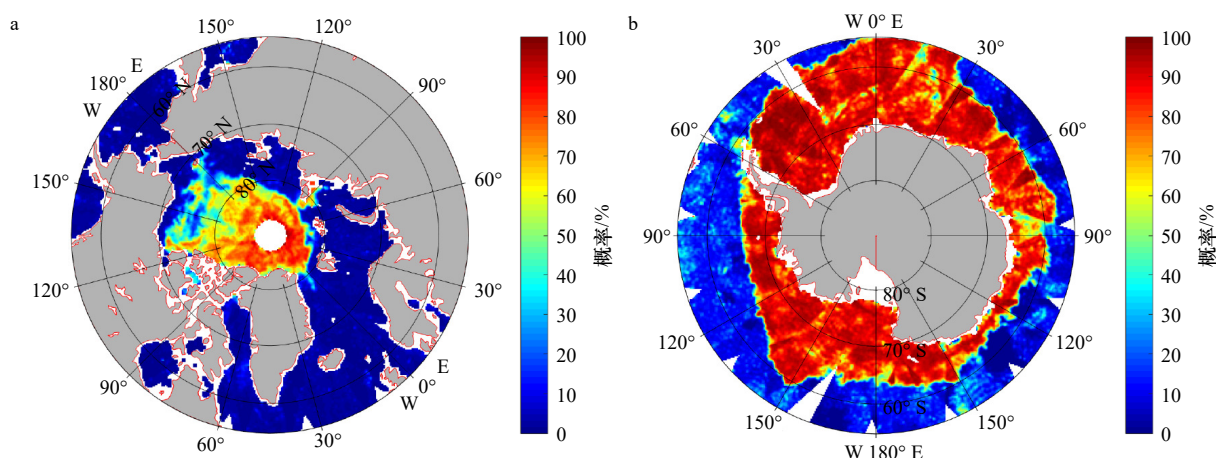


图 5 2021 年 9 月 1 日中法海洋卫星散射计反演的两极海冰概率  
Fig. 5 Sea ice probability derived from CSCAT on September 1, 2021

a. 北极, b. 南极  
a. Arctic, b. Antarctic

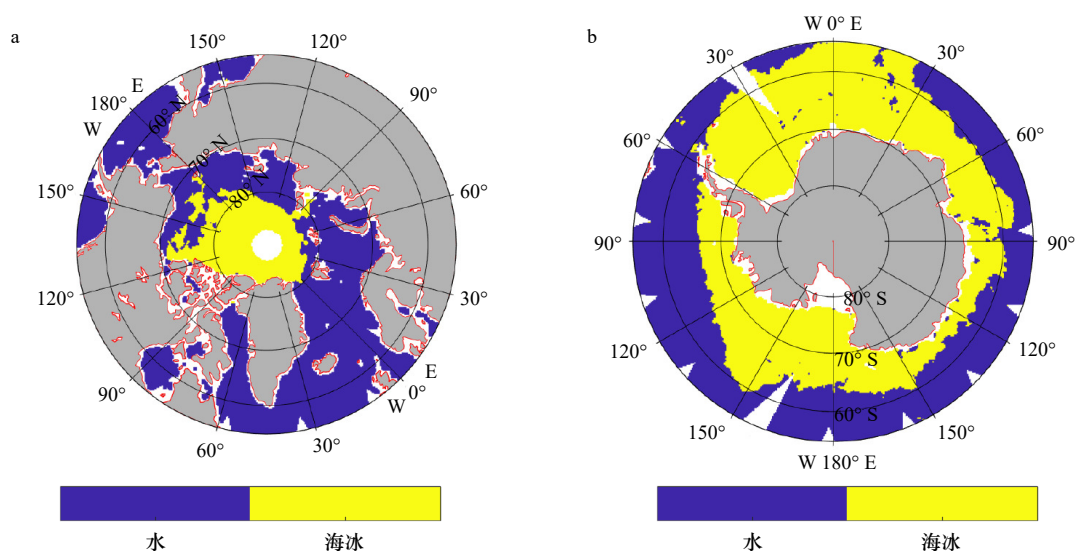


图 6 2021 年 9 月 1 日中法海洋卫星散射计获取的海冰覆盖范围图  
Fig. 6 Sea ice extents derived from CSCAT on September 1, 2021

a. 北极, b. 南极  
a. Arctic, b. Antarctic

通过对比  $p_{th}$  值对海冰判别的影响, 我们发现 2021 年 9 月南极和北极海冰检测的最佳  $p_{th}$  值分别为 31% 和 51%。图 7 展示了 CSCAT 在该时间段逐日的海冰覆盖面积(圆圈标记曲线), 并与 OSI SAF 海冰边缘线数据指示的海冰覆盖面积作了对比(粗实线)。由于 CSCAT 在极区的观测可能存在空白的情况(图 5b), 对比之前需要将 OSI SAF 的海冰数据重采样至 CSCAT 网格, 并只对比存在 CSCAT 观测数据的覆盖区域。总体而言, CSCAT 在南极区域的海冰识别结果与参考数据具有良好的 consistency, 逐日的海冰覆盖面积估计标准差约为 1%; 在北极区域的海冰检测结果则较差, 逐日的海冰覆盖面积估计标准差约为 7%。这是因为该时间段北极海域稀疏海冰的覆盖面积较大(图 1a), 由图 4 蓝色曲线可知, 稀疏海冰的 MLE 先验概率与海水的 MLE 先验概率重叠面积较大, 更容易出现冰误判为水或水误判为冰的情况。

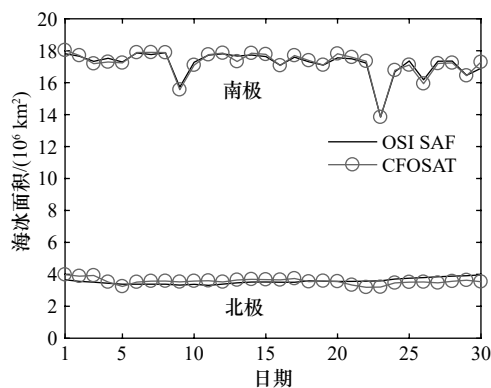


图 7 2021 年 9 月中法海洋卫星散射计逐日海冰覆盖面积检测结果

Fig. 7 The CSCAT-derived daily sea ice coverage in September, 2019

## 4 结论和展望

本文首先研究了 CSCAT 在海水、稀疏海冰和密集海冰表面的后向散射系数特征, 发现 CSCAT 在不

同类型的海洋表面获取的  $\sigma^0$  具有显著的差异, 且这种差异随观测入射角、海面风速等因素的变化而变化。考虑 CSCAT 独特的观测几何特征, 上述后向散射系数差异将导致海面风场反演伴随的最小残差(MLE)在不同类型的海洋表面具有显著的区别。以 2021 年 9 月南极海域为例, 分析表明基于 MLE 的海冰线性判别把海水误判为海冰的概率约为 3%, 而把海冰误判为水的概率约为 3.9%, 与传统散射计的检测结果精度相当。

由此, 我们提出一种仅利用风场反演的最小残差进行海冰识别的贝叶斯算法, 极大地简化了 CSCAT 海冰识别处理流程。然后, 利用 CSCAT 开展了 2021 年 9 月两极海冰识别研究, 逐日估计的海冰面积与 OSI SAF 海冰边缘数据指示的结果具有良好的 consistency, 南北两极海冰面积估计标准差分别为 1% 和 7%。当稀疏海冰的分布较广时, 海冰覆盖面积的估计精度较差。

本文提出的海冰识别算法模型变量少、处理速度快, 不需要构建海冰散射模型并计算 CSCAT 测量的  $\sigma^0$  与海冰 GMF 之间的距离, 因此便于与当前卫星地面系统运行的海面风场反演组件集成, 进而实现基于 CSCAT 观测的海冰和海面风场一体化监测。本方法可减少对外海冰辅助数据的依赖, 具有十分重要的意义。下一步我们将在目前研究的基础上, 一方面进一步挖掘 CSCAT 其他的海冰敏感因子, 改进 CSCAT 海冰识别的正确率, 特别是对稀疏海冰的正确判别率; 另一方面, 着重分析不同季节的海冰监测结果, 全面评估 CSCAT 在海冰遥感观测中的应用价值。

**致谢:** 本文使用的海冰边缘线数据由 EUMETSAT 海洋与海冰卫星应用设施 (OSI SAF) 提供, 该数据可通过网站 (<https://osi-saf.eumetsat.int/products/sea-ice-products>) 获取。ECMWF 风场数据由 ECMWF 气象存档与检索系统 (MARS) 提供, 已通过时空匹配处理存储在 CSCAT L2B 数据产品中。

### 参考文献:

- [1] Liu Zheng, Schweiger A. Low-level and surface wind jets near sea ice edge in the Beaufort Sea in late autumn[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(13): 6873–6891.
- [2] Wu Lichuan. Effect of atmosphere-wave-ocean/ice interactions on a polar low simulation over the Barents Sea[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 248: 105183.
- [3] Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7: 627–637.
- [4] Parkinson C L. A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(29): 14414–14423.
- [5] 李彦青. 渤海海冰可见光遥感数据的反演、同化和候平均时间序列的构建分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.  
Li Yanqing. The retrieval, assimilation, pentadly averaged time series building and analysis of sea ice in the Bohai Sea using the visible

- remote sensing data[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [6] 石立坚, 王其茂, 邹斌, 等. 利用海洋(HY-2)卫星微波辐射计数据反演北极区域海冰密集度[J]. *极地研究*, 2014, 26(4): 410–417.  
Shi Lijian, Wang Qimao, Zou Bin, et al. Arctic sea ice concentration retrieval using HY-2 radiometer data[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 26(4): 410–417.
- [7] Johansson A M, Brekke C, Spreen G, et al. X-, C-, and L-band SAR signatures of newly formed sea ice in Arctic leads during winter and spring[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 162–180.
- [8] Cartwright J, Fraser A D, Porter-Smith R. Polar maps of C-band backscatter parameters from the Advanced Scatterometer[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(2): 479–490.
- [9] Long D G, Hardin P J, Whiting P T. Resolution enhancement of spaceborne scatterometer data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(3): 700–715.
- [10] Remund Q P, Long D G. Sea ice extent mapping using Ku band scatterometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C5): 11515–11527.
- [11] Remund Q P, Long D G. Sea ice mapping algorithm for QuikScat and seawinds[C]//IGARSS '98. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. (Cat. No. 98CH36174). Seattle: IEEE, 1998: 1686–1688.
- [12] Rivas M B, Stoffelen A. New Bayesian algorithm for sea ice detection with QuikSCAT[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 1894–1901.
- [13] Rivas M B, Verspeek J, Verhoef A, et al. Bayesian sea ice detection with the advanced scatterometer ASCAT[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2649–2657.
- [14] 赵朝方, 徐锐, 赵可. 基于HY-2A/SCAT数据极地海冰检测方法研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(10): 140–149.  
Zhao Chaofang, Xu Rui, Zhao Ke. Research of Polar sea ice detection methods based on HY-2A/SCAT[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(10): 140–149.
- [15] Zhai Xiaochun, Wang Zhixiong, Zheng Zhaojun, et al. Sea ice monitoring with CFOSAT scatterometer measurements using random forest classifier[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(22): 4686.
- [16] Zou Juhong, Zeng Tao, Guo Maohua, et al. The study on an Antarctic sea ice identification algorithm of the HY-2A microwave scatterometer data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(9): 74–79.
- [17] Lin Wenming, Dong Xiaolong, Portabella M, et al. A perspective on the performance of the CFOSAT rotating fan-beam scatterometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(2): 627–639.

## Sea ice identification based on CFOSAT scatterometer

Liu Jianqiang<sup>1</sup>, Liu Siqi<sup>2</sup>, Lin Wenming<sup>2,3</sup>, Lang Shuyan<sup>1</sup>, He Yijun<sup>2,3</sup>

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The scatterometer onboard China-France Oceanography Satellite (CFOSAT) observes sea surface with abundant viewing geometries, opening up new opportunities for sea ice detection. This paper proposes a Bayesian sea ice detection method for the CFOSAT satellite scatterometer (CSCAT), which only uses the minimal inversion residual derived from the wind inversion procedure, hence it does not need to develop a sea ice geophysical model function (GMF) and to calculate the distance between CSCAT backscatters and sea ice GMF. The results are compared with the sea ice edge data from European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, which shows that the normalized standard deviation error of CSCAT daily sea ice extent is about 1% and 7% in the Antarctic and the Arctic, respectively, agreeing well with the prior scatterometers. In summary, the proposed method is advanced in terms of model input parameters, processing speed and detection accuracy, so it is of great significance to the operational ice detection in the satellite ground segment.

**Key words:** China-France Oceanography Satellite (CFOSAT); scatterometer; sea ice detection; Bayesian theory; maximum likelihood estimator