

穆博, 郎姝燕, 卫然, 等. 中法海洋卫星微波散射计风场产品精度评价[J]. 海洋气象学报, 2024, 44(4): 22-29.
MU Bo, LANG Shuyan, WEI Ran, et al. Evaluation of accuracy of CSCAT wind vector data[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(4): 22-29. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240516002. (in Chinese)

中法海洋卫星微波散射计风场产品精度评价

穆博^{1,2}, 郎姝燕^{1,2}, 卫然^{1,2}, 孙从容^{1,2}, 杨晟^{1,2}

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 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(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)搭载的微波散射计(SCATterometer, 简记为“CSCAT”)首次采用扇形波束旋转扫描观测体制, 相比笔形波束旋转扫描体制, 可以实现海表同一面元的多入射角观测, 具备更高精度海面风场的观测能力。CSCAT的原始空间分辨率可达 $10.0\text{ km}\times 12.5\text{ km}$, 生产了两种空间分辨率产品: 25.0 km 标准产品和 12.5 km 近岸产品。文中给出了CSCAT两种空间分辨率产品业务化真实性检验评估结果, 研究表明采用美国国家数据浮标中心(National Data Buoy Center, NDBC)浮标得到CSCAT风速均方根误差小于 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向均方根误差小于 17° 。采用ERA5再分析资料对CSCAT两种空间分辨率的风场产品在不同风速、交轨方向不同位置条件下的精度特征进行了分析, 同时也对CSCAT数据处理中风向去模糊解的能力进行了分析。结果显示, 标准产品的精度要高于近岸产品, 对于产品精度需求更高的用户, 建议使用 25.0 km 标准产品。因此, 业务化真实性检验评估对CSCAT在轨运行期间的性能监测具有非常重要的价值, 也有助于用户更全面地了解CSCAT风场产品的精度特性, 促进CSCAT海面风场产品的定量化应用。

关键词 中法海洋卫星(CFOSAT); 微波散射计; 中法散射计(CSCAT); 海面风场; 真实性检验

中图分类号: V474; P732.1 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2024)04-0022-08

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240516002

Evaluation of accuracy of CSCAT wind vector data

MU Bo^{1,2}, LANG Shuyan^{1,2}, WEI Ran^{1,2}, SUN Congrong^{1,2}, YANG Sheng^{1,2}

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract The China-France Oceanography SATellite (CFOSAT) SCATterometer, namely CSCAT, firstly adopts a new observing scheme of Ku-band fan-beam rotary scanning system, measures the same wind vector cell from more incidence angles, and thus improves the accuracy of sea surface wind observations in contrast with the pencil-beam rotary scanning system. Based on the raw spatial resolution of $10.0\text{ km}\times 12.5\text{ km}$, the standard product of 25.0 km and coast product of 12.5 km are processed. Referencing the validation technology system, this paper presents the validation results of the two CSCAT products. The validation results show that compared with the data of NDBC (National Data Buoy Center) buoys, the root mean square error of CSCAT wind speed and wind direction is less than $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and 17° , respectively. ERA5 reanalysis data is used to analyze the accuracy characteristics of the two different

收稿日期: 2024-05-16; 修回日期: 2024-06-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3101502)

第一作者简介: 穆博, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋微波遥感辐射定标及真实性检验工作, mubo@mail.nsoas.org.cn。

通信作者简介: 郎姝燕, 女, 硕士, 副研究员, 主要从事海面风场反演与应用工作, langshuyan@mail.nsoas.org.cn。

resolution products with different wind speeds and cross-track locations of the wind vector cells. At the same time, the ambiguity removal ability of CSCAT wind field products is analyzed. The comparison of accuracy characteristics shows that the accuracy of the standard product is better than that of the coast product. If users are more concerned about product accuracy, the standard product is recommended. So, the evaluations by the validation technology system are important for the performance monitoring of CSCAT during on-orbit operation, help users to fully understand the accuracy characteristics of CSCAT wind products, and promote the quantitative application of CSCAT wind products.

Keywords China-France Oceanography SATellite (CFOSAT); microwave scatterometer; CFOSAT SCATterometer (CSCAT); sea surface wind field; validation

引言

星载微波散射计海面风场数据已经成为台风灾害监测、数值天气预报、气候预报、海气相互作用、风能评价等^[1]海洋气象研究领域不可或缺的重要数据源之一。自1978年以来,美国、欧洲、日本、印度和中国都相继发射了搭载微波散射计的系列观测卫星^[2]。为提高微波散射计反演海面风场的精度,中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)在国际上首次搭载了一种新型观测体制的微波散射计(CFOSAT SCATterometer, CSCAT),即扇形波束旋转扫描观测体制。相比传统的笔形波束扫描体制和固定扇形波束体制,新体制散射计可以获取更多入射角的后向散射信息,且同一风矢量单元(wind vector cell, WVC)的样本数也更多,这些增加的入射角差异化信息以及更多的样本数,使得CSCAT有能力反演更高精度的海面风场^[3-5]。

近年来,国内外研究学者已经开展了CSCAT的测量性能评估,除了给出风场的整体精度之外^[3-5], He等^[6]评估了风云三号E星(FY-3E)搭载风场雷达(WindRAD)反演风场的整体精度,分析了7个月时长的风场精度时变特征,给出了风场精度的全球空间分布特征。Yang等^[7]评估了海洋二号D星(HY-2D)搭载HSCAT-D散射计风场精度,除对风场产品进行整体精度评估与星星交叉验证之外,还采用扩展三重并置(extended triple collocation, ETC)技术,分析了风场产品的固有误差。Ye等^[8]对CSCAT 25.0 km标准产品的精度进行了详细评估,对比了降雨条件和非降雨条件下反演风场的整体精度,同时分析了有效波高、海面温度与气温差、海面温度、气压、海表流对风场的影响。文中将在现有研究技术的基础上,面向卫星管理部门对CSCAT的业

务化、工程化、系统性评价需求,并参考CSCAT业务化真实性检验技术体系,开展CSCAT 25.0 km标准产品和12.5 km近岸产品的真实性检验评价,给出CSCAT风场产品的整体精度、风速依赖特征精度、刈幅方位向特征精度、模糊解除精度等检验评估结果,该结果有助于系统性地评价与监测CSCAT载荷的测量性能,帮助用户更全面地了解CSCAT风场产品的精度特性,促进CSCAT海面风场产品的定量化应用。

1 风场产品与检验源数据

1.1 CSCAT简介

CSCAT采用扇形波束旋转扫描观测体制,其原始测量后向散射系数的空间分辨率约为10.0 km×12.5 km,通过条带组合的方式,分别将后向散射系数组合至空间分辨率为12.5 km和25.0 km的风矢量单元中,生产两种海面风场产品^[9-10]:25.0 km标准产品和12.5 km近岸产品。这两种空间分辨率的风场反演数据处理流程基本相同;不同的是,在后向散射系数预处理过程中,近岸产品尽可能地保留了近海岸区域的海洋表面观测信息,使得反演风场产品能够更接近海岸线。由CSCAT两种分辨率产品的生产过程可以看出:近岸产品和标准产品是在数据精度和应用范围方面相互权衡的两种产品;近岸产品风矢量面元的数据样本数要明显少于标准产品的样本数,因而近岸产品的噪声理论上要大于标准产品。但从数据应用的角度看,近岸产品可以提高卫星在接近海岸线海域的风场获取能力,实际应用价值更高。文中第3节检验评价中使用的CSCAT标准产品和近岸产品的数据版本均为V3.3,其中基于美国国家数据浮标中心(National Data Buoy Center, NDBC)浮标的检验评价使用2021年全年观

测数据,基于欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析数据的检验评价使用 2021 年 8 月观测数据。

1.2 检验源数据

NDBC 浮标数据是国际上公认的星载微波散射计风场产品检验的实测参考基准数据^[11],为了更加准确地评价 CSCAT 风场的精度,降低陆地信号污染对风场反演精度评估的影响,选取离岸 50 km 以外的 NDBC 浮标站位,所选取的 56 个站点分布如图 1 所示。由于浮标站位的样本数还是很少,在 CSCAT 业务评价体系中主要用于整体风场精度的检验评价。

模式资料具有非常好的全球覆盖特性和规则的时空分辨率,可以实现散射计在全球任意时刻、任意地理位置观测风场的精度评价。参考 CSCAT 业务化真实性检验技术体系,选用 ERA5 再分析资料,该数据的时间分辨率为 1 h,水平格点空间分辨率为 0.25° ,它还有一个突出优点是同化系统输出了海面 10 m 高度的中性稳定风速^[12],已经广泛应用于相关产品质量评价^[13-15]。

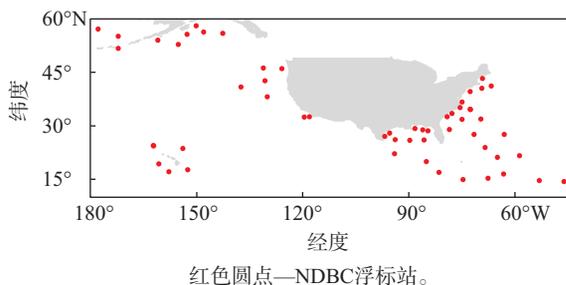


图 1 选用 NDBC 浮标的站点分布

Fig.1 Location of the selected NDBC buoys

2 数据处理流程

数据处理流程如图 2 所示。首先,读取 CSCAT 风场产品与检验源数据,根据相应的质量标识参数,剔除标识为异常的观测数据,包括:(1)反演质量控制结果不好,(2)没有背景场的反演数据,(3)降雨标识数据。其次,在时空地理匹配、降雨条件标识、现场测量中性稳定风速校正的基础上,获得后续真实性检验评估的匹配数据集。最后,依据平均偏差(Bias)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、标准差(standard deviation, STD)、相关系数(R)等统计参量,完成 CSCAT 不同精度特性的评价分析,实现散射计风场产品的业务化真实性检验精度评估。

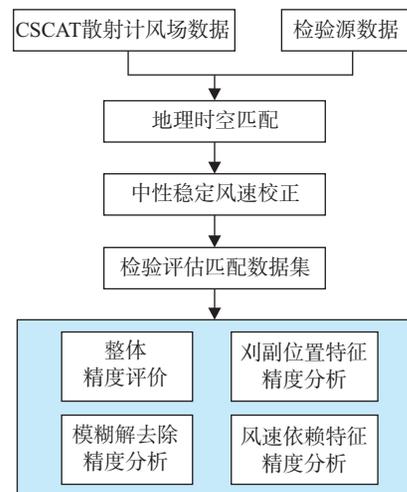


图 2 CSCAT 风场产品业务化真实性检验数据处理流程

Fig.2 Processing flow of validation data for CSCAT wind products

2.1 地理时空匹配

对于现场站位的浮标与卫星观测之间的时空匹配,采用距离阈值和时间阈值的匹配策略,距离阈值设置为空间分辨率 $\sqrt{2}$,时间阈值设置为 30 min。在满足阈值条件的所有匹配数据中,选取空间距离最接近的匹配数据进入后续检验评价匹配数据集。

对于 ERA5 再分析资料,采用国际上常用的二维空间和时间的三维线性插值,将 ERA5 格点数据插值到 CSCAT 观测的时间和地理位置。

2.2 中性稳定风速校正

微波散射计定量反演的海面风场是物理尺度空间瞬时平均的、假定表层大气层结稳定条件下的、海面 10 m 高度处的风速和风向。然而,现场测量的风速通常都是空间单点的、时间平均的、海面某一具体高度处的、具体大气条件下的实际风速^[7]。因此,这两种测量方式获得风速的物理意义并不相同,在真实性检验数据比对分析前,必须实现散射计测量与现场测量风速之间物理尺度的一致性校正。文中采用 Liu 等^[16]的方法,将现场浮标测量海面风速转换为海面 10 m 高度处的中性稳定风速。ERA5 再分析资料已经输出了中性稳定风速参数,无需校正。

2.3 业务化真实性检验评价

参考 CSCAT 海面风场产品真实性检验业务化评价体系,选用 NDBC 浮标和 ERA5 再分析资料开展 CSCAT 风场产品业务化检验评估。其中,在进行

风速依赖特征等精度分析时,NDBC 浮标的匹配样本数少,容易在高风速条件下产生错误的计算误差特征,因此主要用于 CSCAT 风场的整体精度评估。在风速依赖特征精度、轨方向刈幅位置特征精度、模糊解去除能力等业务化检验评价分析中,选用 ERA5 再分析资料,月匹配样本数约在 2 000 万以上,样本数非常大,在低风速和高风速条件下不易产生错误的误差特征现象,有利于不同周期的特征分析相互比对。在检验精度分析中,平均偏差值(V_{Bias})、均方根误差值(V_{RMSE})、标准差值(V_{STD})、相关系数(R)等 4 个统计参量被分别计算,公式如下:

$$V_{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i), \quad (1)$$

$$V_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}, \quad (2)$$

$$V_{STD} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i - V_{Bias})^2}, \quad (3)$$

$$R = \frac{\text{cov}(M, O)}{\sqrt{\text{cov}(M) \text{cov}(O)}} \circ \quad (4)$$

其中: M_i 表示第 i 个检验源数据测量值, O_i 表示第 i 个 CSCAT 测量值, N 为匹配的样本个数, $\text{cov}(M, O)$ 表示检验源数据和 CSCAT 数据之间的协方差, $\text{cov}(M)$ 和 $\text{cov}(O)$ 分别表示检验源数据和 CSCAT 数据的方差。

3 CSCAT 风场产品评估结果

3.1 载荷整体精度评价

CSCAT 测量风速范围的研制指标为 $[4, 24] \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此风场检验整体精度的风速范围同样设置为 $[4, 24] \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。采用 NDBC 水文气象浮标数据,对 2021 年 CSCAT 进行整体精度检验,剔除降雨条件的数据后,分别得到 25.0 km 标准产品和 12.5 km 近岸产品风速和风向整体精度的检验结果,如图 3、4 所示。可以看出:标准产品和近岸产品的风速 RMSE 精度基本一致,相比 25.0 km 标准产品的风向 RMSE 精度要优于 12.5 km 近岸产品;这与前面的理论分析结果一致,由于每个风矢量单元的样本数减少,造成 12.5 km 近岸产品的反演噪声可能会增大。

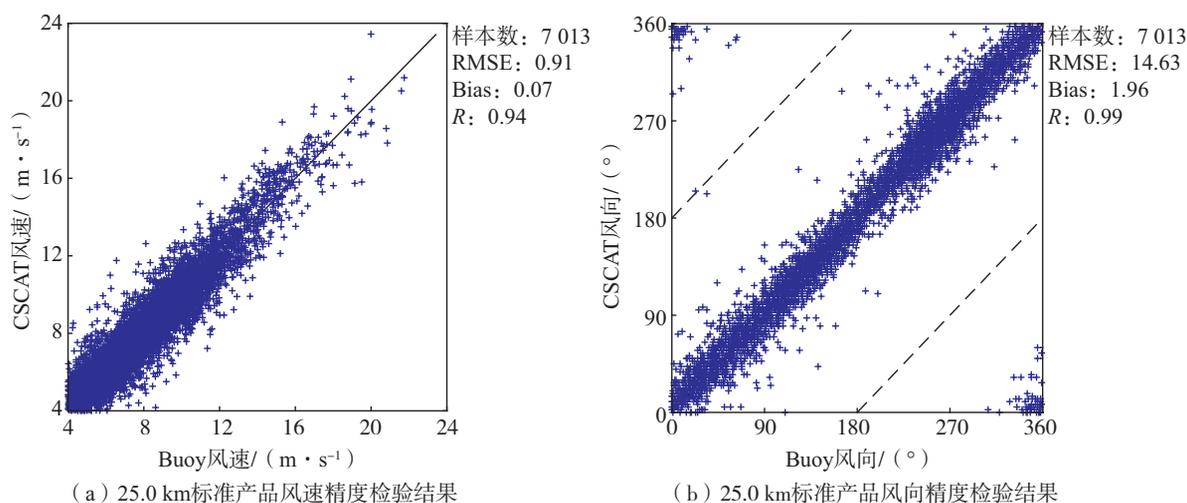


图3 CSCAT 标准产品风场的 NDBC 浮标整体精度检验结果

Fig.3 Validation results of CSCAT standard product by NDBC buoys

3.2 风速依赖特征精度评价

由于散射计的测量机理原因,造成散射计在不同风速条件下的反演风矢量精度不同。采用 ERA5 再分析资料,对 2021 年 8 月 CSCAT 数据进行风速依赖特征精度分析,依据 ERA5 再分析资料的风速,将匹配数据划分为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的检验区间,分别得到 25.0 km 标准产品和 12.5 km 近岸产品各个风速区

间范围匹配数据的平均偏差和标准差,检验结果如图 5、6 所示,可以看出:(1)在 $5 \sim 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速范围内,CSCAT 标准产品和近岸产品的精度最好,风速和风向均没有明显的系统偏差,标准差也基本一致。(2)在小于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低风速条件下,CSCAT 标准产品和近岸产品的风速均明显高于 ERA5 风速,且风速越小,CSCAT 测量的风速越大;在风速大于

17 m·s⁻¹时,风速平均偏差存在一定的偏离,且 STD 相比中等风速条件有所增大。(3)在海面风速小于 24 m·s⁻¹时,CSCAT 标准产品和近岸产品风向均有明显的系统偏差,但风向 STD 呈现出风速越小,STD

越大的现象;在风速大于 5 m·s⁻¹时,风向 STD 应该能达到 20°以内;在风速小于 4 m·s⁻¹时,近岸产品的风向 STD 要明显大于标准产品的风向 STD,近岸产品的风向精度要差一些。

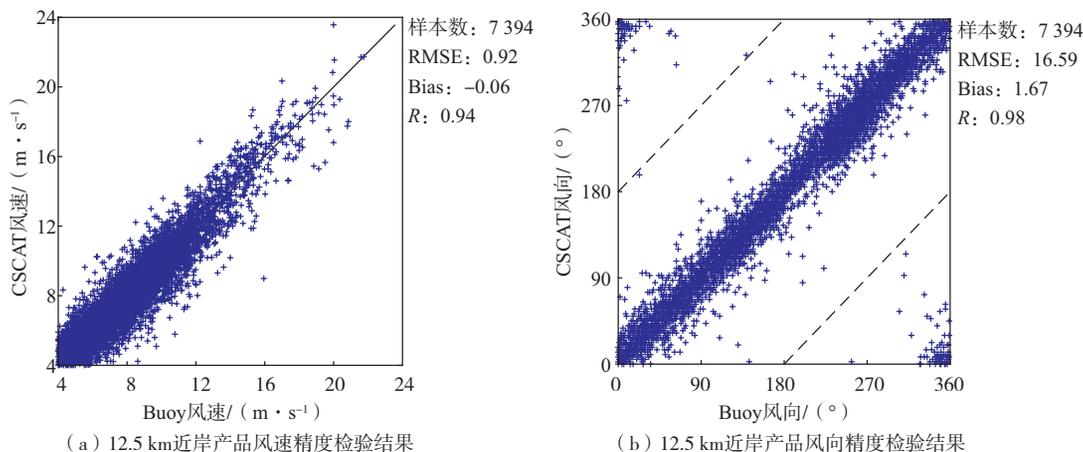


图4 CSCAT 近岸产品风场的 NDBC 浮标整体精度检验结果
Fig.4 Validation results of CSCAT coast product by NDBC buoys

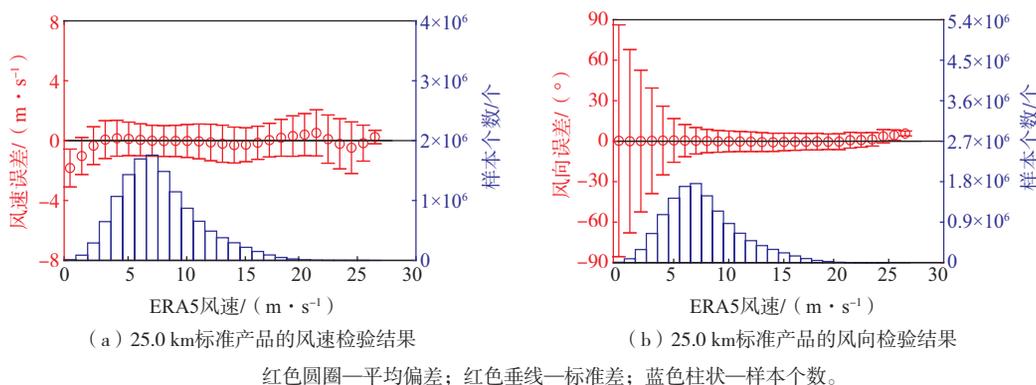


图5 CSCAT 标准产品在不同风速条件下风场误差(ERA5 与 CSCAT 之差)的平均偏差和标准差
Fig.5 Mean bias and STD of wind field error (ERA5 minus CSCAT) of CSCAT standard product under different wind speed conditions

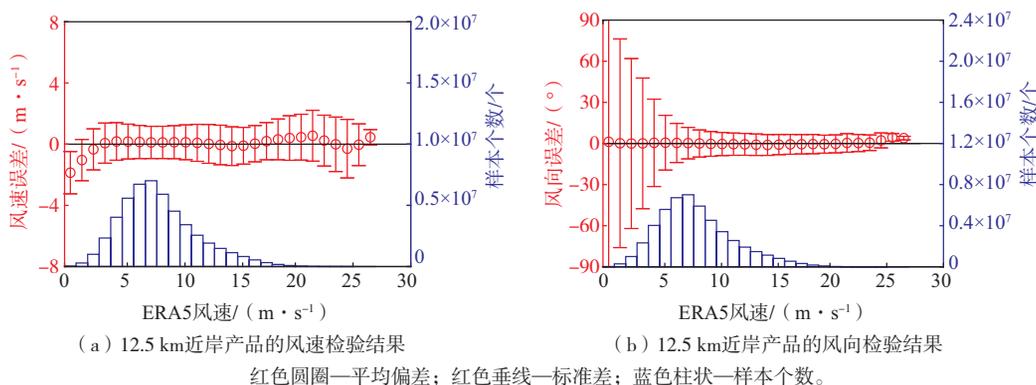


图6 CSCAT 近岸产品在不同风速条件下风场误差(ERA5 与 CSCAT 之差)的平均偏差和标准差
Fig.6 Mean bias and STD of wind field error (ERA5 minus CSCAT) of CSCAT coast product under different wind speed conditions

3.3 刈幅方位向特征精度评价

CSCAT 采用旋转扫描波束体制,沿交轨方向从左至右依次划分为 42 个风矢量单元(25.0 km 标准产品)、84 个风矢量单元(12.5 km 近岸产品)。为了评估旋转关节增益变化,以及不同交轨刈幅位置观测特性对风场精度的影响,按照从左至右且每 2 个连续风矢量观测刈幅位置单元划分为 1 个统计区间的方式,分别针对标准产品和近岸产品得到 21 个和 42 个交轨方向刈幅位置的风场精度检验结果。

对于交轨方向的不同刈幅观测位置,风速和风向都是在刈幅中间位置精度最高,在星下点和刈幅边缘位置的精度稍差(图 7),这与理论上星下点和刈幅边缘位置的观测方位向差异较小,造成反演风场产品略有下降的特点是一致的。标准产品交轨方向不同刈幅位置之间的精度差异要明显小于近岸产品之间的精度差异;且在刈幅边缘和星下点区域,近岸产品的风速 STD 和风向 STD 均明显大于标准产品的 STD(图 8)。

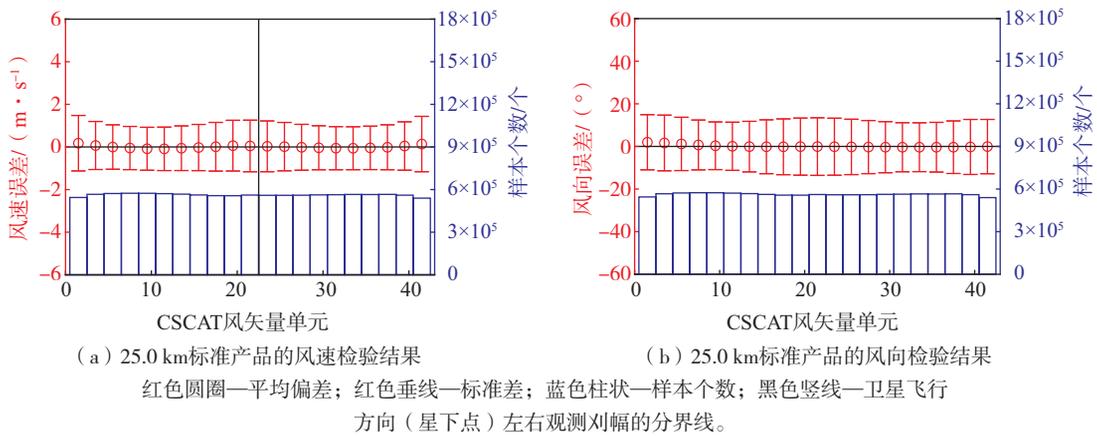


图7 CSCAT 标准产品在不同交轨刈幅位置风场误差(ERA5 与 CSCAT 之差)的平均偏差和标准差
 Fig.7 Mean bias and STD of wind field error (ERA5 minus CSCAT) of CSCAT standard product at different cross-track locations of WVCs

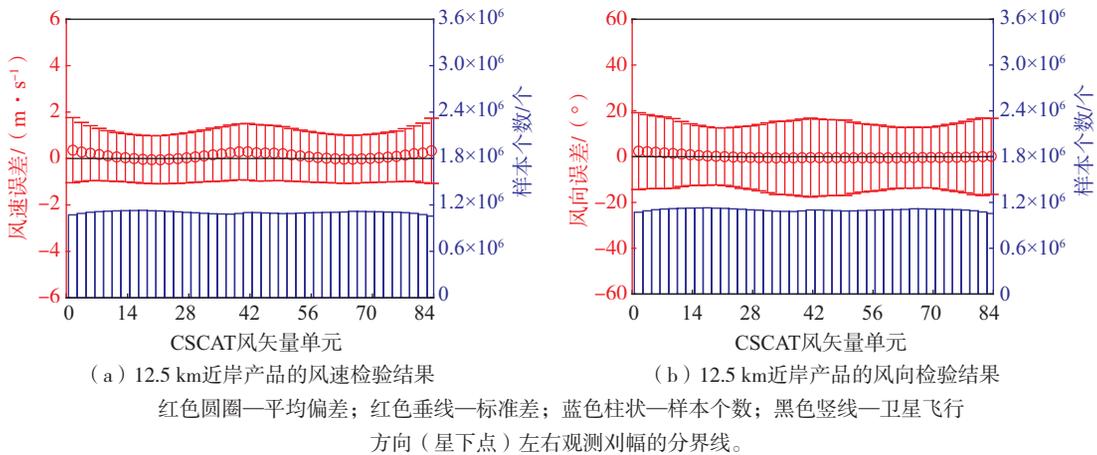


图8 CSCAT 近岸产品在不同交轨刈幅观测风场误差(ERA5 与 CSCAT 之差)的平均偏差和标准差
 Fig.8 Mean bias and STD of wind field error (ERA5 minus CSCAT) of CSCAT coast product at different cross-track locations of WVCs

3.4 模糊解去除精度评价

模糊解去除精度定义为最接近检验源风向(风向偏差小于 90°)的匹配数据,占总匹配数据的百分

比。利用 2021 年 8 月 ERA5 再分析资料,计算得到 25.0 km 标准产品和 12.5 km 近岸产品在不同风速条件下的模糊解去除精度的检验结果,如图 9 所示。

可以看出:(1)在低风速条件下,由于信噪比低导致后向散射系数的测量精度低,进而导致反演风场的精度差,模糊解去除的精度也最差,这与现有笔形波束体制微波散射计的模糊解去除精度特性是一致的^[17]。(2)在风速小于 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,近岸产品的模糊

解去除能力要明显弱于标准产品,将导致近岸产品的风向 RMSE 精度变化,这与前面 NDBC 浮标检验得到近岸产品风向 RMSE 的精度较差现象一致。(3)在风速大于 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,标准产品和近岸产品的模糊解去除能力基本一致。

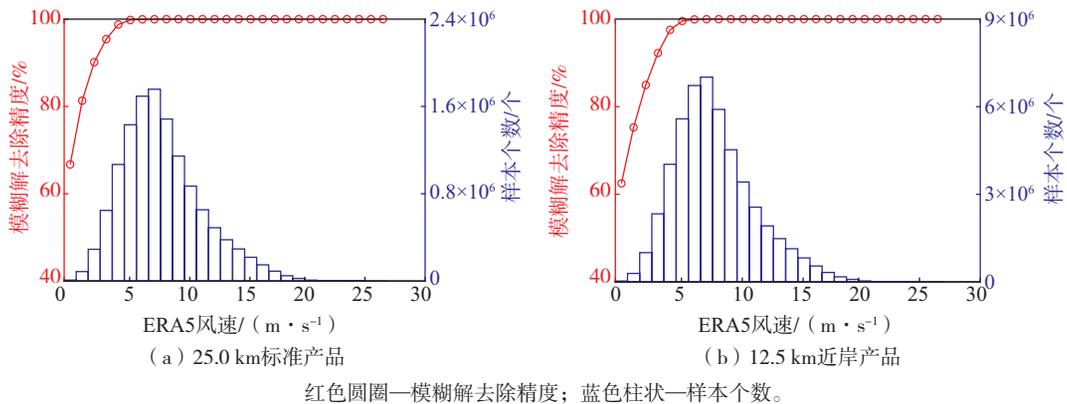


图9 CSCAT 标准产品和近岸产品的模糊解去除精度对比分析

Fig.9 Comparison of ambiguity removal ability between CSCAT standard product and coast product

4 小结与讨论

参考 CSCAT 业务化真实性检验体系,利用 NDBC 浮标和 ERA5 再分析资料,开展了 CSCAT 25.0 km 标准产品和 12.5 km 近岸产品的系统性精度评估。依据 NDBC 浮标数据,实现了 CSCAT 在风速有效测量范围内($4\sim 24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)标准产品和近岸产品的整体精度评估,风速 RMSE 均优于 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向 RMSE 均优于 17° 。对不同风速条件下 CSCAT 风速和风向的精度差异特征进行评估后发现:在小于 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 低风速条件下,风速和风向的精度都明显地变差,这与 CSCAT 有效风速范围下限 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的设置是一致的;在风速有效测量范围内,不同风速条件下的 CSCAT 风速和风向精度差异均比较小,也基本可以满足研制指标“风速 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、风向 20° ”的要求。

对不同交轨方向刈幅位置的风速和风向精度差异进行评估,未发现非常明显的精度异常现象。另外,通过全面系统的 25.0 km 标准产品和 12.5 km 近岸产品之间的精度特征比较分析,发现标准产品的精度要好于近岸产品,特别是风向的精度。因此,对于产品精度需求更高的用户,建议

使用 25.0 km 标准产品。以上系统性、业务化的评估对 CSCAT 在轨运行期间的性能监测具有非常重要的价值,有助于用户更全面地了解 CSCAT 风场产品的精度特性,能够促进 CSCAT 海面风场产品的量化应用,以及提升应用的效果。

致谢:使用的 CSCAT 标准产品与近岸产品由国家卫星海洋应用中心提供,NDBC 水文气象浮标数据由美国国家数据浮标中心提供,ERA5 再分析资料由欧洲中期天气预报中心提供,向上述数据共享机构表示诚挚的感谢。

参考文献:

- [1] 周钰淇,崔佳乐,孙博雯,等.“21 世纪海上丝绸之路”风能资源时空变化评估[J].海洋气象学报,2022,42(4):11-21.
- [2] SEELYE M.海洋遥感导论[M].蒋兴伟,林明森,刘建强,等译.北京:海洋出版社,2008:246-265.
- [3] 董晓龙,朱迪,林文明,等.中法海洋卫星微波散射计在轨性能验证[J].空间科学学报,2020,40(3):425-431.
- [4] LIU J Q, LIN W M, DONG X L, et al. First results from the rotating fan beam scatterometer onboard CFOSAT[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2020, 58 (12):

- 8793-8806.
- [5] LIN W M, DONG X L, PORTABELLA M, et al. A perspective on the performance of the CFOSAT rotating fan-beam scatterometer[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2018, 57(2):627-639.
- [6] HE Y, FANG H, LI X H, et al. Assessment of spatiotemporal variations in wind field measurements by the Chinese FengYun-3E wind radar scatterometer[J]. *IEEE Access*, 2023, 11:128224-128234.
- [7] YANG S, ZHANG L, LIN M S, et al. Evaluation of sea surface wind products from scatterometer onboard the Chinese HY-2D satellite[J]. *Remote Sens*, 2023, 15(3):852-863.
- [8] YE H J, LI J M, LI B, et al. Evaluation of CFOSAT scatterometer wind data in global oceans[J]. *Remote Sens*, 2021, 13(10):1926-1943.
- [9] 林文明, 郎姝燕, 赵晓康, 等. 中法海洋卫星散射计近海岸海面风场反演研究[J]. *海洋学报*, 2021, 43(10):115-123.
- [10] 郎姝燕, 孙从容, 鲁云飞, 等. 中法海洋卫星微波散射计近海岸产品在台风遥感监测中的应用[J]. *海洋气象学报*, 2022, 42(2):74-80.
- [11] FREILICH M H, DUNBAR R S. The accuracy of the NSCAT 1 vector winds: comparisons with National Data Buoy Center buoys[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104(C5):11231-11246.
- [12] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present[EB/OL]. (2018-06-14) [2024-05-13]. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>.
- [13] CHELTON D B, FREILICH M H. Scatterometer-based assessment of 10-m wind analyses from the operational ECMWF and NCEP numerical weather prediction models[J]. *Mon Wea Rev*, 2005, 133(2):409-429.
- [14] 邹双泽, 白爱娟, 何科, 等. ERA5 资料在蓟州复杂地形下的检验与应用[J]. *海洋气象学报*, 2024, 44(1):118-128.
- [15] 沈学顺, 李兴良, 陈春刚, 等. 下一代大气模式中的数值方法综述[J]. *海洋气象学报*, 2022, 42(3):1-12.
- [16] LIU W T, TANG W Q. Equivalent neutral wind[R]. Pasadena, CA: California Institute of Technology, 1996.
- [17] 穆博, 林明森, 彭海龙, 等. HY-2A 卫星微波散射计反演风矢量产品真实性检验方法研究[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(6):39-45.