

刘安琪, 窦芳丽, 刘可, 等. 基于多源数据和三重匹配方法的风云三号风场测量雷达海面风场精度分析[J]. 海洋气象学报, 2025, 45(3): 62-71.

LIU Anqi, DOU Fangli, LIU Ke, et al. Evaluation of FY-3E WindRAD sea surface wind field products based on multi-source data and triple collocation method[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(3): 62-71. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20241206001. (in Chinese)

基于多源数据和三重匹配方法的风云三号 风场测量雷达海面风场精度分析

刘安琪^{1,2}, 窦芳丽³, 刘可^{1,2}, 谷山青^{1,2}, 张鹏^{1,2}

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 滨州市气象局, 山东 滨州 256612; 3. 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081)

摘要 面向风云三号E星(FY-3E)风场测量雷达(wind radar, WindRAD)海面风场数据精度分析的需求, 此文利用浮标站实地观测、数值预报模式和同类卫星观测多源数据, 多维度评估全风速情况下的FY-3E WindRAD风场产品质量。利用三重匹配(triple collocation, TC)分析方法, 同时分析4个风速独立观测源的加性、乘性和随机误差。从综合分析结果来看, 以浮标作为无偏观测源, 加性误差方面FY-3E WindRAD的C波段风速产品存在略高的负偏差, Ku和双波段产品偏差水平近似, C波段乘性误差最优, 3个产品随机误差相近。各独立观测源相比, 浮标的均方根误差(root mean square error, RMSE)最小, 数值预报模式的RMSE最大, 2种卫星产品介于其中, 且二者精度相近。综上, FY-3E WindRAD产品能够提供较高精度的风场观测, 目前存在的问题主要是需继续优化3个产品数据集的一致性。此文基于多源数据的卫星产品精度分析, 能够为卫星产品用户提供较为全面的可靠性信息, 并为数值模式预报海上风场的客观订正方法提供依据。

关键词 风场测量雷达; 卫星观测; 海面风; 三重匹配方法

中图分类号: P412.6 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2025)03-0062-10

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20241206001

Evaluation of FY-3E WindRAD sea surface wind field products based on multi-source data and triple collocation method

LIU Anqi^{1,2}, DOU Fangli³, LIU Ke^{1,2}, GU Shanqing^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Binzhou Meteorological Service, Binzhou 256612, China; 3. National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), Beijing 100081, China)

Abstract Based on the needs for accurate analysis of the wind field data of the wind radar (WindRAD) onboard Fengyun-3E (FY-3E), this paper uses multi-source data from buoy stations, numerical prediction model and satellites to evaluate the quality of FY-3E WindRAD wind field products with all wind speeds in multiple dimensions. The additive, multiplicative and random errors of 4 independent observation sources are analyzed by using the triple collocation (TC) method. Taking the buoys as an

收稿日期: 2024-12-06; 修回日期: 2025-04-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2021YFB3900405)

第一作者: 刘安琪, nxd_dalaq@163.com。

通信作者: 刘可, liuke_54734@163.com。

unbiased observation source, it can be found from the error analysis of multi-source data that the negative deviation of the additive error of FY-3E WindRAD C-band wind speed is larger, the deviation of Ku-band and dual-band wind speed is similar, the multiplicative error of C-band is the smallest, and their random errors are similar. Among the independent sources, the root mean square errors (RMSEs) of the buoys are the smallest, the two satellite products are similar and larger than those of the buoys, and the RMSEs of the model are the largest. In summary, FY-3E WindRAD can provide high-precision wind field products, but the main problem is that the consistency of products in different datasets needs to be optimized. The research results of the accuracy of satellite products based on multi-source data in this paper can provide more comprehensive and reliable information for satellite product users, and provide a basis for objective calibration methods for predicting sea surface wind field by numerical models.

Keywords wind radar (WindRAD); satellite observation; sea surface wind; triple collocation (TC) method

0 引言

海面风场对于海洋气象灾害(包括台风、温带气旋与风暴潮等)的发生有直接或间接联系,且海上大风往往会给船舶运输、港口作业与海洋平台生产带来较大经济损失。因此对海面风场实现实时监测和及时准确的预报具有重要意义。

目前观测海面风场的2类方法主要是常规观测与非常规观测。其中,常规观测一般是通过浮标、船舶、沿岸及岛屿自动气象站等传统手段获取观测资料^[1]。中国的常规观测设备多位于沿海一带,且分布稀疏,很难获得长时间序列、大面积同步的观测资料,缺乏对海面风场的系统性认知^[2]。20世纪以来,雷达探测与卫星遥感等非常规观测资料开始增多,并成为观测全球风场最为有效的技术手段。目前可以观测海面风的卫星传感器有微波散射计、微波辐射计与微波高度计^[3]。与传统观测手段对比,卫星遥感有大面积、全天候与准同步的观测能力。但卫星资料由于其采样特点,会产生数据空白区,无法提供时间、空间上连续的海面风场数据^[4]。

国外对于运用卫星遥感技术研究海风开展得较早,自1978年美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射全球第一个星载散射计Seasat-A卫星散射计(Seasat-A Scatterometer System, SASS)以来,经过欧洲遥感卫星(European Remote Sensing Satellite, ERS)的主动微波装置(Active Microwave Instrument, AMI)、NSCAT(NASA SCATterometer)、SeaWinds、ASCAT(Advanced SCATterometer)、海洋卫星2号(OceanSat-2)、海洋二号卫星(HY-2)以及中法

海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)搭载的散射计等的发展,散射计测风技术逐渐成熟,在为海洋与气象等研究领域提供高精度、高分辨率全球海面风场信息方面发挥着越来越重要的作用^[5-8]。2021年7月5日,中国第二代极轨业务气象卫星风云三号E星(FY-3E)发射成功,实现了晨昏轨道上对全球、全天候、全谱段和高精度的大气观测。FY-3E搭载了11个遥感仪器,包括中国气象卫星首次搭载的主动雷达设备风场测量雷达(wind radar, WindRAD),实现对全球海面风场的高精度高时效观测^[9-11]。

卫星观测数据的精度是制约用户应用的重要因素。由于浮标和数值预报模式等资料有各自的特点和误差特征,并且多源数据之间时空分辨率不统一,海风测量的误差一般较大,为了对观测的风速与风向进行偏差订正,Stoffelen^[12]提出了三重匹配(triple collocation, TC)方法并引入卫星海面风数据的检验,利用ERS散射计反演风、数值预报模式风和美国浮标站观测风的海风数据,通过TC方法,对近海风的风向和风速进行偏差分析,提出了一种改进ERS散射计风反演的方法,指出TC方法是一种同时估计3个相互独立的测量系统的未知误差或标准偏差的技术,可以同时实现误差的建模和校准。Zwieback等^[13]指出TC方法经常用于研究和比较水文学和海洋学方面的遥感、现场观测和模式数据,以前的研究几乎完全集中在3个数据源的验证上。Crow等^[14]用TC方法估计卫星反演土壤湿度的误差,将TC方法应用于数据的同化,使得土壤湿度观测中自相关观测误差得到最佳处理。Portabella等^[15]将TC方法应用于海洋学中,利用散射计反演、浮标观测和数值天气预报

(Numerical Weather Prediction, NWP)模式数据的 TC 数据集以及 2 种常用的近地层 (surface layer, SL) 模式来表征海洋风应力,估算海面风应力测量的误差。Massari 等^[16]通过使用 TC 数据集来估计降水误差,结果表明,在南北美洲东部、南非、南亚和东亚、东澳大利亚以及南欧,卫星降水估算的精度相对较高。Fang 等^[17]提出了一种新的方法来验证现有的全球叶面积指数 (leaf area index, LAI) 产品,该方法基于三重匹配误差模型 (triple-collocation error model, TCEM),该模型假设 LAI 产品之间的误差不相关,MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、CYCLOPES 和 GLOBCARBON LAI 产品在空间格局和生物群落类型方面具有合理的一致性。综上,TC 方法在不同领域均获得了相对客观准确的精度评价结论。

此文利用 FY-3E WindRAD 反演产品、浮标站实地观测、数值预报模式和同类卫星观测风速数据,通过 TC 分析方法,对 WindRAD 的风速和风向进行客观精度分析,基于 TC 方法分析多个风速独立观测源的加性、乘性和随机误差。由于风向反演过程中通过二维变分模糊解去除 (two dimensional variational ambiguity removal, 以下简称“2DVAR”) 引入了数值预报模式背景场,不满足 TC 相互独立的假设,所以此文仅对海风风速进行 TC 的分析。同时研究结论能够辅助探究订正海上大风数值模式预报的方法,为海上大风短时临近预报预警工作提供经验。

1 数据与方法

1.1 FY-3E WindRAD 风场产品数据

风云三号 (FY-3) 系列气象卫星是中国第二代极轨气象卫星,目标是实现在全球大气和地球物理要素的全天候、多光谱和三维观测。FY-3E 是 FY-3 系列气象卫星的首颗卫星,目标是在晨昏轨道上实现对全球大气和地表要素的准确观测,为数值天气预报提供高精度观测信息。其上装载的 WindRAD 是中国气象卫星上首次搭载的主动微波测量仪器,目标是对海面 10 m 风矢量实现精准观测。WindRAD 是气象卫星上装载的首台具有全球海面风矢量检测能力的星载双波段 (5.40 GHz 的 C 波段和 13.256 GHz 的 Ku 波段)、双极化 (HH 和 VV 极化) 旋转扇形波束散射计设备^[11],旋转扇形波束设

计结合了旋转笔形束和固定扇形束散射计的特性,增加了更多和更多样化的入射角和方位角观测,能够大幅提高风矢量单元的重复观测数,降低天线旋转扫描速率,从而提高产品的精度、稳定性和可靠性,双波段探测为全球海面风场提供了重要而独特的数据来源。

卫星散射计观测与海表面粗糙度直接相关,因此 WindRAD 海面风场产品代表着 10 m 高度的压力等效风,压力等效风传递了海面粗糙度测量到 10 m 高度处去除了大气层结效应的风场。使用的 FY-3E WindRAD 海面风场产品来自于国家卫星气象中心业务产品,经 WindRAD L1 级后向散射系数海洋定标、最大似然估计反演、模糊解去除和质量控制等关键反演步骤获得,包含 C 波段、Ku 波段和双波段产品,风矢量单元网格空间分辨率为 20 km,风速测量范围为 3~30 m·s⁻¹,风速测量精度设计值为 2 m·s⁻¹,风向精度设计值为 20°。选取 2023 年 4 月 15 日—2024 年 4 月 15 日共 1 年的数据用于真实性检验。图 1 给出了 C、Ku 波段单波段反演和双波段联合反演 3 个产品数据集的风速概率密度分布,可见风速基本呈现高斯性分布,该特征符合进行 TC 方法的基本要求,TC 方法在第 1.3 节中会进一步展开介绍。

1.2 检验源数据

(1) 浮标数据。浮标数据来自于美国国家数据浮标中心 (National Data Buoy Center, NDBC) 的浮标数据集,包括美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 热带大气和海洋 (Tropical Atmosphere Ocean, TAO)、日本海洋地球科学技术厅 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC) 的三角跨洋浮标网络 (TRIangle Trans-Ocean Buoy Network, TRITON) 阵列共 65 个浮标,时间分辨率为 10 min~1 h,经过浮标质量码质控筛选。浮标一般为 3 m 或 4 m 高度的 10 min 平均风,需要通过边界层模式转成中性稳定层结风,此文使用的边界层模式为 LKB (Liu-Katsaros-Businger) 模式^[18]。

(2) 数值预报模式数据。WindRAD L2 级产品中同时包含用于 2DVAR 反演的欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 数值天气预报模式的预报场数据,此文利用该数值预报模式数据作为 TC 分析的

独立源。ECMWF 预报场数据为高分辨率大气模式确定性预报产品的全球地面层预报场数据,分辨率

为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, 10 m 中性风同样利用 LKB 边界层模型进行转换。

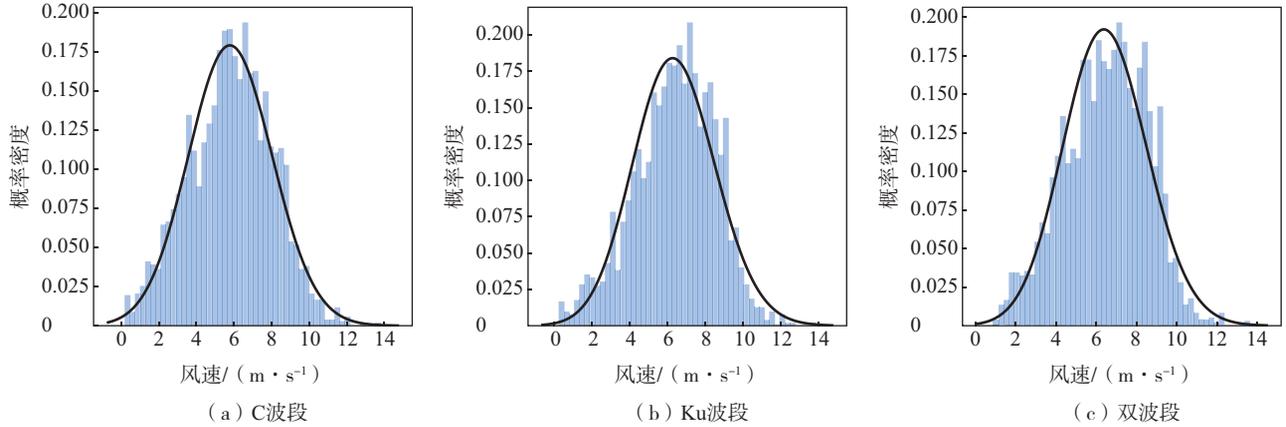


图1 FY-3E WindRAD 的3个产品风速概率密度分布

Fig.1 Probability density distribution of FY-3E WindRAD wind speed products

(3) 同类卫星观测数据。此文使用的同类卫星观测数据为中国海洋二号 B 星 (HY-2B) 散射计海面风数据,轨道过境时间与 FY-3E 接近,能够提供大量的匹配数据。HY-2B 于 2018 年 10 月 25 日发射,目前已连续稳定提供了 6 年的高精度风场观测数据^[19]。选取 2023 年 4 月 15 日—2024 年 4 月 15 日共 1 年的 HY-2B 数据,与 FY-3E WindRAD 的海面风速数据进行时空匹配,匹配时间阈值为 30 min。

(4) 时空匹配策略。在浮标-WindRAD-数值预报模式的 TC 中,由于数值预报数据已通过线性插值方法插值到 WindRAD 观测时空点位,因此主要涉及到 WindRAD 与浮标站和同类卫星 (HY-2B) 数据进行匹配。首先,对 WindRAD 和 HY-2B 散射计风场产品进行最邻近时空匹配,时间阈值为 30 min,空间阈值为 $20/\sqrt{2}$ km;其次,基于匹配数据集,再与浮标站数据进行最邻近时空匹配,选择同时满足在 2 类卫星产品时间和空间间隔内的浮标数据点作为匹配样本。最终匹配到样本 C 波段、Ku 波段、双波段产品与浮标站和 HY-2B 观测的有效点数量均为 22 535 个。匹配结果最后使用 WindRAD 质量码进行筛选,该质量码基于最大似然函数方法计算,能够识别由降水、海冰等污染导致的像元。

1.3 三重匹配方法

风是一种非常重要的地球物理变量,需要精确测量。然而,对于风的验证或校准来说,现有观测或模式模拟数据源均存在一定的误差。TC 技术是一

种统计方法,主要用于在没有可用的真实参考数据集时,估算 3 个独立测量系统的误差,这种方法通过利用与每个数据集相关的误差的统计特性来量化每个数据集的精确性。Stoffelen^[12]最早提出了 TC 方法用于校准散射计得出的海风并估计误差,该方法随后被用作海风不确定性评估的根据,是此文研究的基础。TC 方法中均方根误差 (root mean square error, RMSE) 的推导过程如下。

$$x_i = a_i + b_i t + \delta_i \quad (i=0, 1, 2) \quad (1)$$

其中: a_i 为截距, b_i 为斜率, δ_i 为加性随机误差, t 为真实值, i 为检验源序号,当 $i=0, 1, 2$ 时,分别代表浮标站、卫星和数值预报模式。当 $i=0$ 时,选用浮标站数据作为参考值,认为其无偏,故 $a_i=0$ 且 $b_i=1$ 。根据 Stoffelen^[12]的研究,假设真实值 t 的误差方差 $t^2 = \sigma^2$, 故 $(t-x_i)^2 = \varepsilon_i^2$ 。且根据 McColl 等^[20]的研究,可推得不同测量系统间的协方差为

$$\text{Cov}(x_i, x_j) = \begin{cases} b_i b_j \sigma^2, & i \neq j \\ b_i^2 \sigma^2 + \varepsilon_i^2, & i = j \end{cases} \quad (2)$$

由此,进一步推得误差方差为

$$\varepsilon_i^2 = \text{Cov}(x_i, x_j) - b_i^2 \sigma^2 \quad (3)$$

最终实现的误差方差为

$$\begin{cases} \varepsilon_0^2 = \text{Cov}(x_0, x_0) - \frac{\text{Cov}(x_0, x_1) \text{Cov}(x_0, x_2)}{\text{Cov}(x_1, x_2)} \\ \varepsilon_1^2 = \text{Cov}(x_1, x_1) - \frac{\text{Cov}(x_0, x_1) \text{Cov}(x_1, x_2)}{\text{Cov}(x_0, x_2)} \\ \varepsilon_2^2 = \text{Cov}(x_2, x_2) - \frac{\text{Cov}(x_0, x_2) \text{Cov}(x_1, x_2)}{\text{Cov}(x_0, x_1)} \end{cases} \quad (4)$$

以上为一阶的 TC 方法,该方法的前提是以浮标站作为散射计校准的参考,则通常需假设浮标站提供散射计测距面积平均风矢量的无偏估计,特别是风速较低的情况。由公式(4)看出,TC 解决的主要是 3 个独立源的随机误差方差问题,这是传统两两匹配方法所无法直接定量给出的,独立源的随机误差方差与该数据本身的方差正相关,同时与该数据源和其他 2 个数据源的协方差负相关以及其他 2 个数据源的协方差正相关,从物理上解释,公式(4)右侧第一项表征随机误差较大导致数据本身离散度高,第二项表征与其他数据源的协同性越高,象征该数据与真实值越接近。

2 结果与讨论

2.1 多源数据直接比对结果

图 2 给出了 FY-3E WindRAD 的 3 个产品数据集风速与浮标站观测风速的对比密度散点图和误差统计结果。从图中可以看到,与浮标相比,在风速较

低(小于 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)时, WindRAD 对风速的估计误差相对更大,这与卫星对小信号观测的灵敏度较低有关。卫星散射计反演的精度在 $5\sim 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 相对更高,在小风速和超过 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速区间精度偏低。由于浮标观测的局限性,基于浮标的真实性检验一般均针对中低区间,此文主要针对 $0\sim 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间段进行分析。总的来说,3 个产品数据集风速存在负偏差,C 波段偏差为 $-0.867 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Ku 波段和双波段偏差区间为 $-0.3\sim -0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从 RMSE 水平上看, Ku 波段和双波段产品均优于 C 波段,三者标准差水平相当, Ku 波段略优,为 $1.182 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,受目标响应、天线增益、系统信噪比影响,越高频段的散射计往往具有更高的灵敏度。图 3 给出了 3 个产品数据集的偏差、标准差和 RMSE 随平均风速的变化,可以进一步看到误差分布特征,从偏差上看, C 波段在 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下风速区间均表现为明显的负偏差,而 Ku 波段和双波段产品的偏差特征较为相似,三者标准差水平接近。

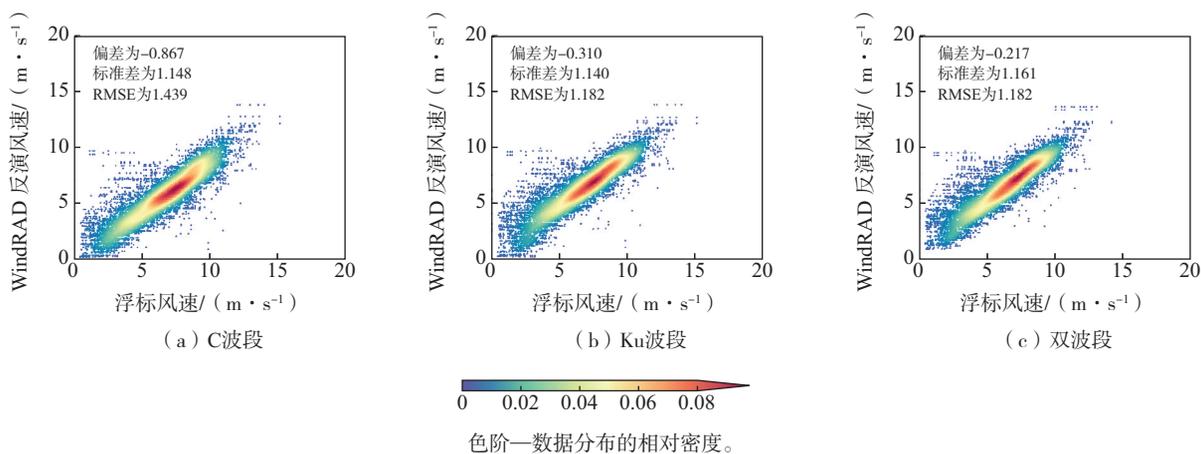


图 2 FY-3E WindRAD 风速与浮标风速的密度散点图和统计结果

Fig.2 Density scatter plot and statistical results of wind speed of FY-3E WindRAD and buoy station

所有数据与模式比对的皮尔逊相关系数均能达到 0.8 以上,具有强相关性;3 个产品数据集与模式相比的 RMSE 类似(图 4)。值得补充的是,文中虽未专门进行分析,模式与浮标比对也存在负偏差,为 $-0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在低风速条件下二者方差也较大,这与卫星、模式与浮标的代表性有关,浮标为点观测,卫星空间分辨率为 20 km ,模式网格空间分辨率为 12.5 km 。由图 5 来看,C 波段反演表现为负偏差, Ku 波段和双波段为正偏差,由于偏差量级和标准差相近,从 RMSE 值上发现 3 个产品精度相当。

图 6 给出了 FY-3E WindRAD 风速与同类卫星(HY-2B)的对比密度散点图和误差统计结果,可见 WindRAD 风速与 HY-2B 散射计风速的相关性较数值预报模式和浮标结果更高,双波段反演产品相关性最高,相关系数达到 0.974, RMSE 为 $0.499 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,偏差为 $0.173 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这与同为卫星观测源有关,即使 WindRAD 与 HY-2B 散射计风速观测相互独立,但同为卫星观测,对于目标的响应是高度一致的,尤其是当二者频点相同时这种一致性达到最高, Ku 波段和双波段与 HY-2B 的 RMSE 均较 C 波段更小。从偏差

角度看,Ku波段与双波段产品的偏差很小,而C波段和双波段产品与HY-2B风场产品具有高一致性,尤其在风速为 $2\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,二者RMSE达到最小。

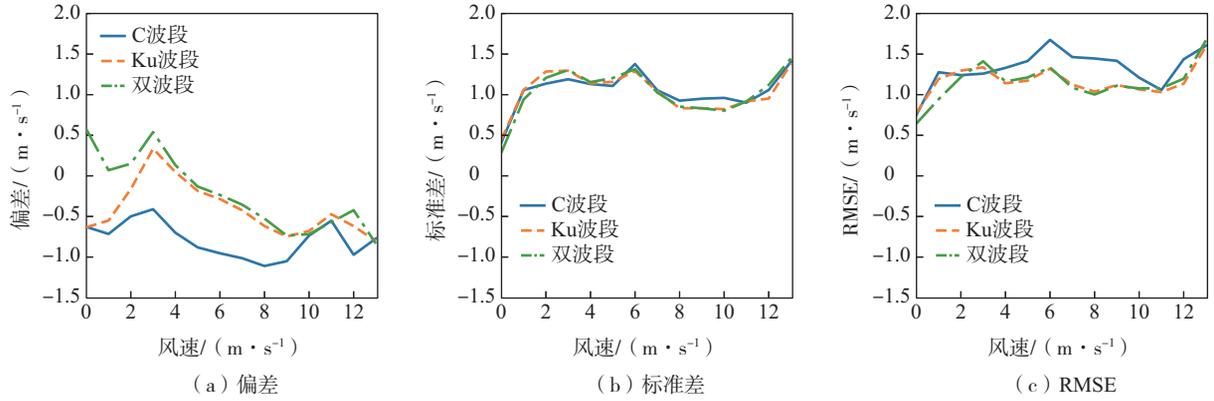


图3 FY-3E WindRAD与浮标风速的偏差、标准差和RMSE随平均风速的分布
Fig.3 Distribution of bias, standard deviation and RMSE of wind speed of FY-3E WindRAD and buoy station with the average wind speed

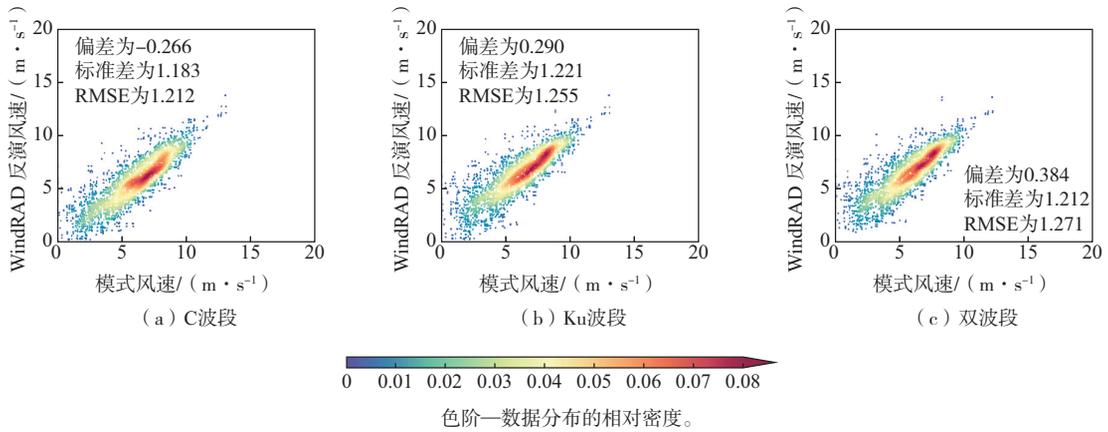


图4 FY-3E WindRAD风速与模式数据风速的密度散点图和统计结果
Fig.4 Density scatter plot and statistical results of wind speed of FY-3E WindRAD and model data

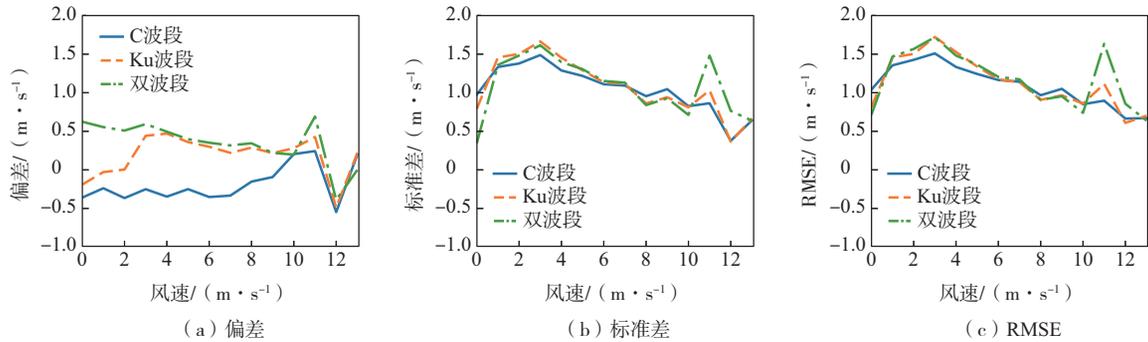


图5 FY-3E WindRAD与模式数据风速的偏差、标准差和RMSE随平均风速的分布
Fig.5 Distribution of bias, standard deviation and RMSE of wind speed of FY-3E WindRAD and model data with the average wind speed

图8—10是在风速大于 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 情况下,FY-3E WindRAD的3个产品数据集的风向分别与浮标站、数值预报模式和HY-2B数据相比的密度散点图和误差统计结果。可见,FY-3E WindRAD的3个产品风

向与浮标站风向的RMSE区间为 $16^\circ\sim 17^\circ$ (图8),与模式数据风向的RMSE区间为 $13^\circ\sim 14^\circ$ (图9),与同类卫星(HY-2B)风向的RMSE区间为 $9^\circ\sim 11^\circ$ (图10)。与模式和HY-2B风向数据更相近是因为FY-3E

WindRAD 风向反演时使用了数值预报模式的背景风向进行 2DVAR, 在 FY-3E 风向产品中融合了数值预报模式风向信息, 使得散射计风向在代表性和精度上都与模式更一致, 而 HY-2B 反演时也采用了相同数

值预报模式背景场。与浮标站风向相比 3 个波段的卫星数据表现较为接近(图 8), 与数值预报模式相比 Ku 波段结果略优(图 9), 与同类卫星(HY-2B)相比 Ku 波段和双波段结果优于 C 波段(图 10)。

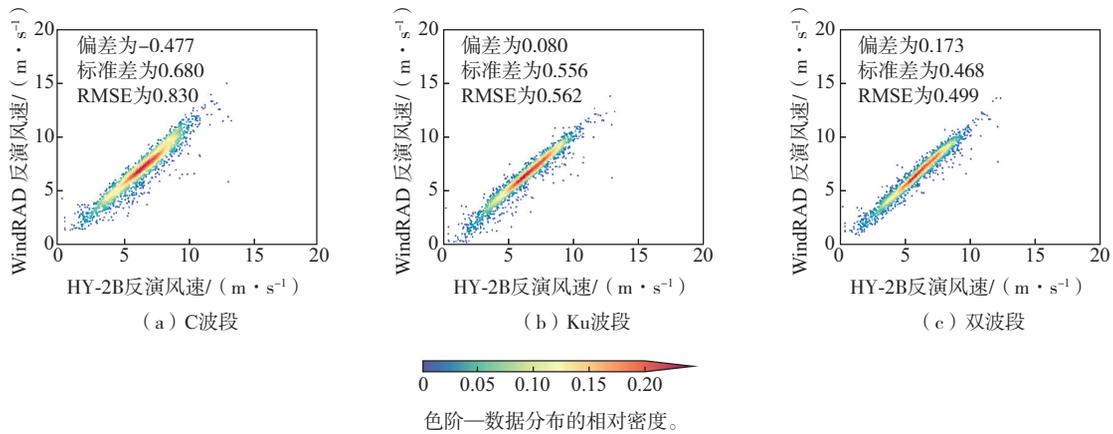


图 6 FY-3E WindRAD 风速与 HY-2B 风速的密度散点图和统计结果

Fig.6 Density scatter plot and statistical results of wind speed of FY-3E WindRAD and HY-2B

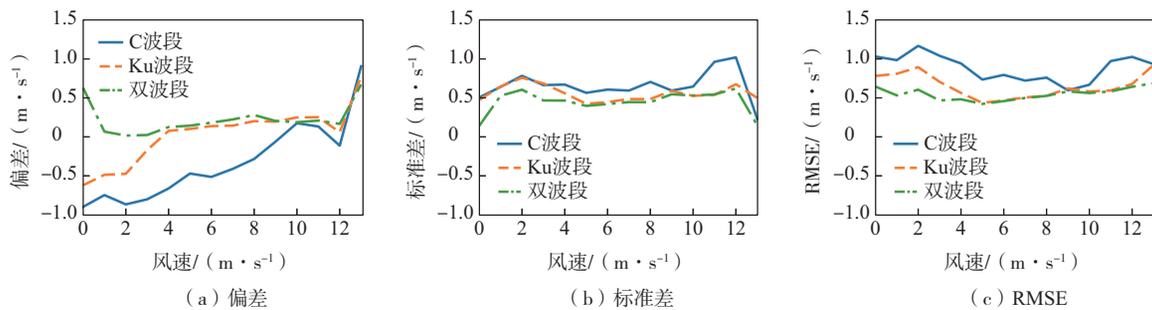


图 7 FY-3E WindRAD 与 HY-2B 风速的偏差、标准差和 RMSE 随平均风速的分布

Fig.7 Distribution of bias, standard deviation and RMSE of wind speed of FY-3E WindRAD and HY-2B with the average wind speed

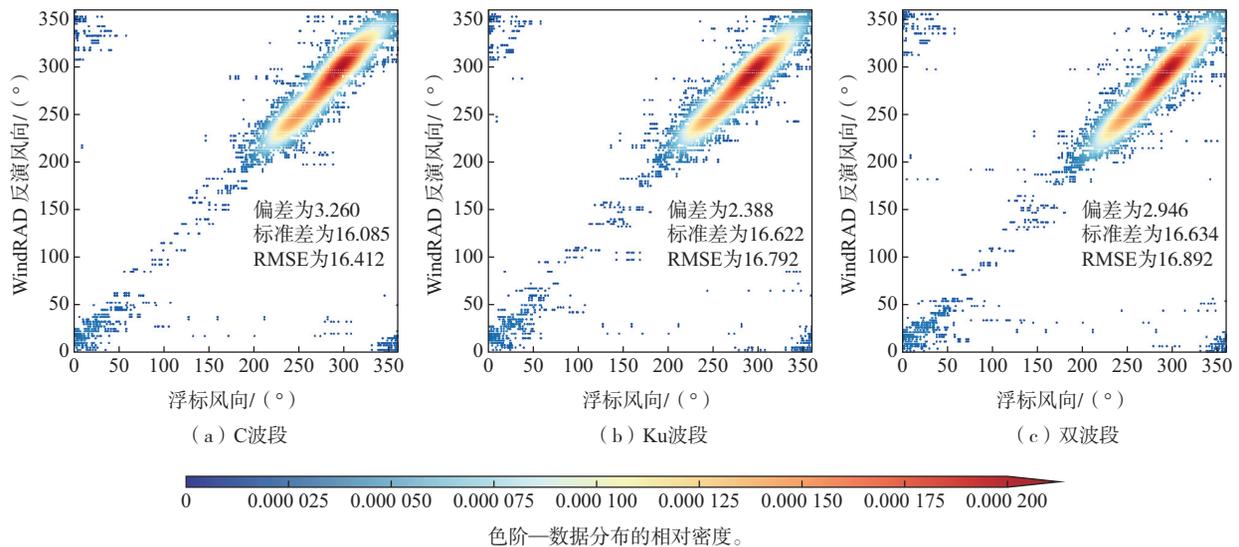


图 8 FY-3E WindRAD 风向与浮标风向的密度散点图和统计结果

Fig.8 Density scatter plot and statistical results of wind direction of FY-3E WindRAD and buoy station

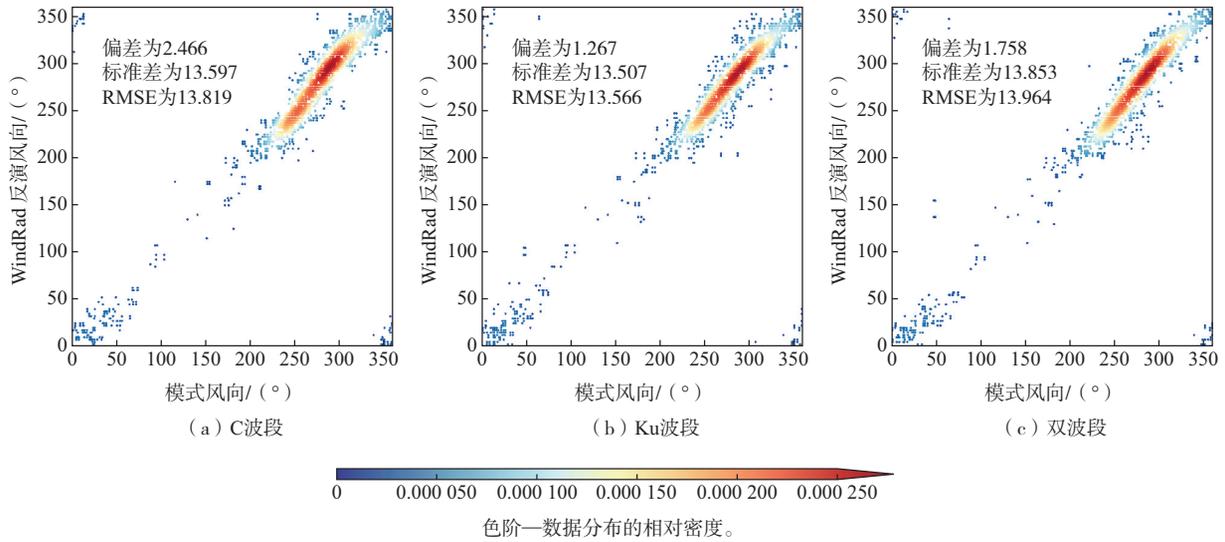


图 9 FY-3E WindRAD 风向与模式风向的密度散点图和统计结果

Fig.9 Density scatter plot and statistical results of wind direction of FY-3E WindRAD and model data

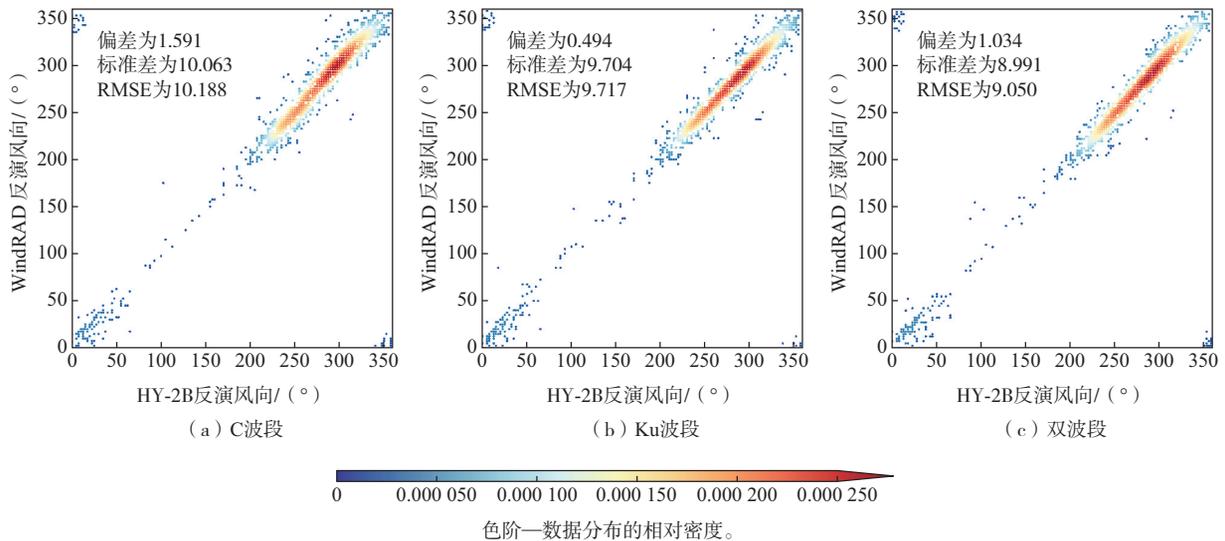


图 10 FY-3E WindRAD 风向与 HY-2B 风向的密度散点图和统计结果

Fig.10 Density scatter plot and statistical results of wind direction of FY-3E WindRAD and HY-2B

2.2 浮标-WindRAD-模式三重匹配结果

TC 是基于线性误差模型假设,实现 3 个不同源系统数据之间的偏差分析,它建立在若干假设的基础之上,其中最重要的是:(1)数据系统之间使用线性校准误差,(2)各数据系统间的测量误差不相关^[12]。FY-3E 风速反演过程中没有使用数值预报模式背景场,因此浮标观测风速、FY-3E 反演风速与数值模式预报风速组成的 3 个数据系统相互独立、互相不存在依赖关系,这 3 个系统满足两两之间的测量误差互不相关,假设(2)成立;在第 2.1 节中,已经分析了两两风速测量系统的密度散点图,密度散点图中的大部分

点位于一条直线上,或比较均匀地分布在这条直线两侧,所以假设(1)亦成立;综上,可用 TC 的算法实现这 3 个数据系统间的偏差分析。由于 FY-3E 风向反演过程中通过 2DVAR 引入了数值预报模式背景场,所以仅选用海风风速进行 TC 的分析。

TC 程序建议使用最高分辨率的测量系统作为系统 0,使用最粗分辨率的测量系统作为系统 2,故浮标观测数据系统为系统 0, WindRAD 反演数据系统为系统 1,模式预报数据系统为系统 2。

表 1 给出了浮标观测风速、FY-3E WindRAD 观测风速的 3 个产品数据集与数值模式预报风速的 TC

结果,除了公式(4)的随机误差方差 ε_i ,同时给出了以浮标数据为准(基于浮标数据仅有随机误差的假设)线性回归得到的公式(1)中的加性和乘性误差参数 a_i 与 b_i ,总的来说,C波段存在显著负偏差,这与第2.1节分析结论一致,C波段反演的风速与浮标的回归斜率更接近1,但存在明显负偏差,Ku波段产品斜率更大,

表明乘性误差大,双波段产品的偏差最小。从TC计算得到的随机方差看到,Ku波段在3个产品数据集产品中最小,三者水平相当。纵观3个观测源中的随机误差方差可知,浮标的随机误差是最小的,3个产品数据集中模式数据的标准误差均为最大,且明显高于卫星数据和浮标数据的标准误差值。

表1 浮标风速、WindRAD风速与模式预报风速的三重匹配结果
Table 1 Triple collocation results of wind speed of buoy station, WindRAD and model forecast

波段	浮标			WindRAD			模式		
	a_0	b_0	ε_0	a_1	b_1	ε_1	a_2	b_2	ε_2
C波段	0	1.000	0.859	-0.826	0.977	1.253	0.048	0.896	1.555
Ku波段	0	1.000	0.806	0.338	0.911	1.208	0.126	0.888	1.548
双波段	0	1.000	0.817	0.090	0.938	1.264	0.193	0.876	1.549

2.3 浮标-WindRAD-同类卫星观测三重匹配结果

表2给出了浮标观测风速、FY-3E WindRAD的3个产品数据集观测风速与同类卫星(HY-2B)风速的TC结果,可见与模式的TC相比,WindRAD产品的偏差和误差方差的特征类似,Ku波段产品乘性误差大,但偏差和随机误差最小,C波段负偏差特征和随机误差明显,但乘性误差小,双波段的结果介于二者

之间。与浮标-卫星-模式TC相比,浮标的随机误差略大,而FY-3E和同类卫星(HY-2B)2个卫星的观测误差均较小。由FY-3E WindRAD与HY-2B散射计风产品的对比来看,FY-3E WindRAD的Ku波段、双波段产品和HY-2B散射计风产品的加性偏差相当,C波段偏差较差,FY-3E WindRAD的3个产品乘性误差优于HY-2B散射计,随机误差方差水平相当。

表2 浮标风速、WindRAD风速与同类卫星观测风速的三重匹配结果
Table 2 Triple collocation results of wind speed of buoy station, WindRAD and similar satellite observation

波段	浮标			WindRAD			同类卫星		
	a_0	b_0	ε_0	a_1	b_1	ε_1	a_2	b_2	ε_2
C波段	0	1.000	0.913	-0.813	0.983	1.106	0.301	0.883	1.081
Ku波段	0	1.000	0.945	0.178	0.924	1.064	0.334	0.880	1.013
双波段	0	1.000	0.973	0.273	0.919	1.079	0.337	0.881	1.004

3 总结与讨论

利用时间跨度为1年的FY-3E WindRAD海面风场产品、数值预报模式、浮标站实地观测和同类卫星(HY-2B)风速数据,通过直接比对和TC分析方法,对卫星产品进行精度分析,得到结论如下。

(1)多源资料直接比对结果显示,FY-3E WindRAD 3个产品数据集的精度均达到设计指标。风速产品在不同风速情况下具有不同响应,并存在频点依赖,C波段具有更明显的负偏差,Ku和双波段产品偏差水平近似,三者标准差水平相当,从RMSE水平上看,Ku波段和双波段产品均优于C波段,Ku波段略优。风向产品总体表现为3个产品数据集相当,Ku波段和双波段联合反演结果略优。所有数据与模式、浮标和同类卫星比对的皮尔逊相关系数均能超过0.8,具有强相关性。FY-3E与HY-2B的一致性较模式和浮标结果更高,这与同为卫星观

测源的代表性相似有关。

(2)由TC分析结果来看,以浮标作为无偏观测源,Ku波段产品乘性误差大,但偏差和随机误差小,C波段负偏差特征和随机误差明显,但乘性误差小,双波段的结果介于二者之间,浮标-WindRAD-模式与浮标-WindRAD-同类卫星观测的分析结论类似。模式数据的误差明显高于卫星数据和浮标数据的标准误差值。WindRAD的Ku波段、双波段产品与HY-2B散射计风产品的加性偏差相当,C波段偏差较差,随机误差方差均与HY-2B散射计风产品水平相当。

文中使用多源观测数据和TC误差估计方法从多个维度评估了FY-3E WindRAD业务海面风场产品的误差特征,对全面分析各独立观测源的误差特征以及独立源的客观订正有较为重要的参考价值。未来考虑将再分析资料以及更多浮标站点数据纳入比对源。此外,后续可根据采取延长匹配时间、增加站点数量、使用多源数据的方式开展更全面的评估工作。

参考文献:

- [1] 邓婉月,项杰,杜华栋.南海海面风场融合研究[C]//第32届中国气象学会年会论文集.天津:中国气象学会,2015:147-148.
- [2] 刘付前,骆永军,王超.应用卫星散射计资料研究中国海面风场时空特征[J].环境保护与循环经济,2009,29(10):37-38,44.
- [3] 蒋兴伟,宋清涛.海洋卫星微波遥感技术发展现状与展望[J].科技导报,2010,28(3):105-111.
- [4] 柳婧,宋晓姜,王彰贵.海面风场融合技术综述[J].海洋预报,2018,35(3):81-87.
- [5] SCHROEDER L C, BOGGS D H, DOME G, et al. The relationship between wind vector and normalized radar cross section used to derive SEASAT-A satellite scatterometer winds[J]. J Geophys Res:Oceans,1982,87(C5):3318-3336.
- [6] NADERI F M, FREILICH M H, LONG D G. Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean: an overview of the NSCAT scatterometer system[J]. Proc IEEE,1991,79(6):850-866.
- [7] FIGA-SALDAÑA J, WILSON J J W, ATTEMA E, et al. The advanced scatterometer (ASCAT) on the meteorological operational (MetOp) platform: a follow on for European wind scatterometers [J]. Can J Remote Sens,2002,28(3):404-412.
- [8] WURTELE M G, WOICESHYN P M, PETEHERYCH S, et al. Wind direction alias removal studies of SEASAT scatterometer-derived wind fields [J]. J Geophys Res:Oceans,1982,87(C5):3365-3377.
- [9] 商建,窦芳丽,刘丽霞,等.风云三号气象卫星风场测量雷达在轨性能初步评价[J].遥感学报,2025,29(3):610-620.
- [10] 窦芳丽,卢乃锰,谷松岩.星载双频风场雷达热带气旋降雨区测风模拟[J].应用气象学报,2012,23(4):467-477.
- [11] SHANG J, WANG Z X, DOU F L, et al. Preliminary performance of the WindRAD scatterometer onboard the FY-3E meteorological satellite [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens,2023,62:5100813.
- [12] STOFFELEN A. Toward the true near-surface wind speed: error modeling and calibration using triple collocation [J]. J Geophys Res:Oceans,1998,103(C4):7755-7766.
- [13] ZWIEBACK S, SCIPAL K, DORIGO W, et al. Structural and statistical properties of the collocation technique for error characterization [J]. Nonlin Processes Geophys,2012,19(1):69-80.
- [14] CROW W T, VAN DEN BERG M J. An improved approach for estimating observation and model error parameters in soil moisture data assimilation [J]. Water Resour Res,2010,46(12):W12519.
- [15] PORTABELLA M, STOFFELEN A. On scatterometer ocean stress[J]. J Atmos Ocean Technol,2009,26(2):368-382.
- [16] MASSARI C, CROW W, BROCCA L. An assessment of the performance of global rainfall estimates without ground-based observations [J]. Hydrol Earth Syst Sci,2017,21(9):4347-4361.
- [17] FANG H L, WEI S S, JIANG C Y, et al. Theoretical uncertainty analysis of global MODIS, CYCLOPES, and GLOBCARBON LAI products using a triple collocation method[J]. Remote Sens Environ,2012,124:610-621.
- [18] LIU W T, KATSAROS K B, BUSINGER J A. Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface [J]. J Atmos Sci,1979,36(9):1722-1735.
- [19] WANG Z X, STOFFELEN A, ZOU J H, et al. Validation of new sea surface wind products from scatterometers onboard the HY-2B and MetOp-C satellites [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens,2020,58(6):4387-4394.
- [20] McCOLL K A, VOGELZANG J, KONINGS A G, et al. Extended triple collocation: estimating errors and correlation coefficients with respect to an unknown target [J]. Geophys Res Lett,2014,41(17):6229-6236.