

FY-3E海面风矢量产品质量评估分析

姚爽¹, 姜晓飞^{2,3*}, 张涛¹, 姚燕¹, 牛宁², 付雅芳²

(1. 国家气象信息中心, 北京 100081; 2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 3. 北京市海淀区气象局, 北京 100080)

摘要: 为评估风云三号E星(FY-3E)海面风矢量产品质量, 利用浮标风场观测及海洋二号B星(HY-2B)海面风产品对FY-3E海面风进行验证。结果表明: 相较于浮标观测, FY-3E的C波段、Ku波段及双波段海面风速均呈系统性负偏差, 均方根误差(RMSE)分别为1.85 m/s、1.52 m/s和1.54 m/s, 风向RMSE分别为23.17°、22.47°和22.77°。空间分布上, 热带太平洋地区风速RMSE较大, 近海海域风向RMSE较大。FY-3E海面风产品总体满足风速RMSE小于2 m/s、风向RMSE小于25°的精度设计指标, 且Ku波段产品质量略优于双波段, 明显优于C波段。FY-3E与HY-2B海面风产品的一致性较好, 二者风速、风向线性回归系数均大于0.9, 平均偏差均接近0, RMSE分别为0.48 m/s和10.50°, 其RMSE大值区主要位于赤道附近海域。

关键词: 风云三号E星; 海面风矢量; 质量评估; 海洋二号B星; 浮标

中图分类号: P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)05-0011-11

0 引言

在海洋与大气的相互作用过程中, 海面风扮演着至关重要的角色。它不仅是海洋表层水体运动的主要驱动力, 还通过摩擦作用将动能传递给海洋, 影响海水流动与混合; 同时, 海面风也是大气运动的重要影响因素, 能改变大气的温度和压力分布, 进而引发一系列气象变化。因此, 海面风作为海洋与大气间物质和能量交换的关键因素, 对海洋环境预报、海洋灾害监测、海气相互作用研究以及天气和气候分析预测具有重要意义^[1-2]。

常规观测手段主要通过船舶、浮标等海上观测平台开展海面风监测, 这类观测准确度高, 但存在观测范围有限、数据离散性大、空间分布不均的问题, 难以满足海洋风场整体分布特征的监测需求^[3]。星载微波散射计作为一种非成像卫星雷达传感器, 可通过测量海洋表面后向散射系数反演海面风矢量信息^[4], 具有全天时全天候、覆盖范围广、时空分

辨率高的优势, 能有效弥补海洋常规观测的不足, 实现全球海面风的连续准确观测。

国际上主流的海面风主动遥感仪器包括欧洲气象业务卫星计划搭载的高级散射计(Advanced Scatterometer, ASCAT)、美国快速散射计卫星搭载的海风散射计(Seawinds)、中法海洋卫星搭载的中法海洋卫星散射计(China - France Oceanography Satellite Scatterometer, CSCAT)、中国海洋二号(HY-2)卫星搭载的海洋二号散射计(HY-2 Scatterometer, HSCAT)、印度海洋卫星-2搭载的海洋卫星-2散射计(OceanSAT-2 Scatterometer, OSCAT)等, 这些仪器为全球海面风场信息的持续获取提供了重要支撑^[5], 广泛应用于海洋、大气等研究领域。海面风场产品质量直接决定实际应用效果, 因此在选择和使用海面风资料前, 充分分析资料的质量、性能及优缺点十分必要。国内外学者主要基于浮标风场观测、不同卫星海面风产品间的相互比较开展海面风质量评估。Ebuchi等^[6]利用海上浮标观测评估

收稿日期: 2024-10-16。

基金项目: 国家气象信息中心2025年度重点科技基金项目(NMICZJ202505); 气象能力提升联合研究专项(24NLTSQ021); 中国气象局科技项目“揭榜挂帅”(CMAJBGS202319); 国家自然科学基金(42375019)。

作者简介: 姚爽(1989-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事卫星资料处理、评估及同化研究。E-mail: yaoshuang@cma.gov.cn

*通信作者: 姜晓飞(1989-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事卫星资料应用及人工智能应用研究。E-mail: jiangxiaofei@cma.gov.cn

SeaWinds海面风矢量产品,明确其与浮标数据一致性较好,风速、风向的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)分别为1.01 m/s和 23° ,同时发现风速残差与有效浪高存在弱正相关。Yang等^[7]将OSCAT海面风产品与浮标观测及ASCAT海面风进行对比,指出OSCAT海面风风速、风向平均误差分别为1.2 m/s和 17.7° ,与ASCAT风场评估结果一致,符合设计要求。Wu等^[8]基于浮标数据对ASCAT、OSCAT、HSCAT的3种海面风产品开展对比评估,结果显示ASCAT的风速、风向精度较高,HSCAT满足任务要求,OSCAT性能次于ASCAT和HSCAT。Zheng等^[9]对HY-2A与SeaWinds海面风产品的对比评估表明,二者几乎没有风速偏差,均方根误差为1.13 m/s,风向偏差、RMSE分别为 1.41° 和 20.39° 。此外,陈克海等^[10]利用浮标数据对HY-2B、HY-2C海面风的评估,Wang等^[11]对中国海域内ASCAT-A、ASCAT-B、OSCAT、HSCAT 4种海面风的空间覆盖率、重访时间、风向和风速偏差的评估,以及其他学者针对不同海域对各类海面风产品的评估^[12-14]均表明,海面风质量会随风向、风速的变化而变化,同时存在空间差异与季节变化等特征。

风云三号E星(FY-3E)是全球首颗民用晨昏轨道气象卫星,于2021年成功发射,我国也因此成为国际上唯一同时具备上午、下午、晨昏3条轨道气象卫星组网观测能力的国家^[15]。FY-3E卫星实现了风云系列卫星首次主动遥感探测,其上搭载的风场测量雷达(Wind Radar, WindRAD)是风云系列卫星的首部主动遥感仪器,在国际上首次采用双频段探测技术,可提供气象预测预报亟需的、具有更高风场空间采样密度的全球海面风场(风速和风向)信息,对提升台风及灾害性天气的监测预警能力具有积极作用。本文利用浮标风场观测数据,对FY-3E WindRAD双频段探测反演的海面风产品进行评估,并与我国HY-2B海面风产品开展对比分析,以期进一步了解FY-3E海面风产品的质量及性能,为该产品的应用提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

本文所用海面风场数据包括FY-3E WindRAD

海面风产品,浮标风场观测数据及HY-2B HSCAT海面风产品,数据时段为2023年5月1日—2024年5月1日。

FY-3E WindRAD是一部双频、双极化圆锥扫描雷达,采用C和Ku双波段同时工作,中心频率分别为 5.400 ± 0.010 GHz(C波段)、 13.256 ± 0.006 GHz(Ku波段);每个波段包含水平和垂直两种极化测量方式,同频段的两种极化测量分时间间隔进行,不同频段间的测量相互独立。FY-3E WindRAD海面风矢量产品由WindRAD一级数据经质量控制、最大似然估计反演、模糊解去除等一系列算法处理得到,文中采用的FY-3E WindRAD海面风矢量轨道产品(L2级),为从国家卫星气象中心风云卫星遥感数据服务网(<http://data.nsmc.org.cn/DataPortal/cn/home/index.html>)获取的最新重处理产品。该产品提供C波段、Ku波段和双波段反演的海面10 m高度压力等效风速、风向,以及物理要素的质量标识和地理定位信息等,按升轨、降轨两类文件进行存储。FY-3E WindRAD海面风产品的精度设计要求为风速均方根误差小于2 m/s、风向均方根误差小于 25° (风速范围3~20 m/s)。

HY-2B卫星降交点为6:00AM(地方时),与FY-3E降交点5:30AM(地方时)接近,二者具有较好的时空一致性。同时,已有评估研究表明HY-2B海面风产品质量较好,符合产品设计要求(风速和风向误差分别小于2 m/s和 20°)^[16-18]。因此,文中选取HY-2B海面风产品(L2B级数据)与FY-3E海面风产品开展对比分析。HY-2B海面风产品由国家卫星海洋应用中心提供,通过国家气象信息中心天擎实时获取。

文中采用的浮标数据通过世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)全球通信系统(Global Telecommunications System, GTS)获取,站点集中分布于热带海洋、欧洲和北美附近(见图1),涵盖源自美国国家数据浮标中心(NOAA National Data Buoy Center, NDBC)、加拿大环境与气候变化部(Environment and Climate Change Canada, ECCC)、西班牙国家气象局(State Meteorological Agency of Spain, AEMET)、法国气象局(Météo - France)、韩国气象局(Korea Meteorological Administration, KMA),以及热带大

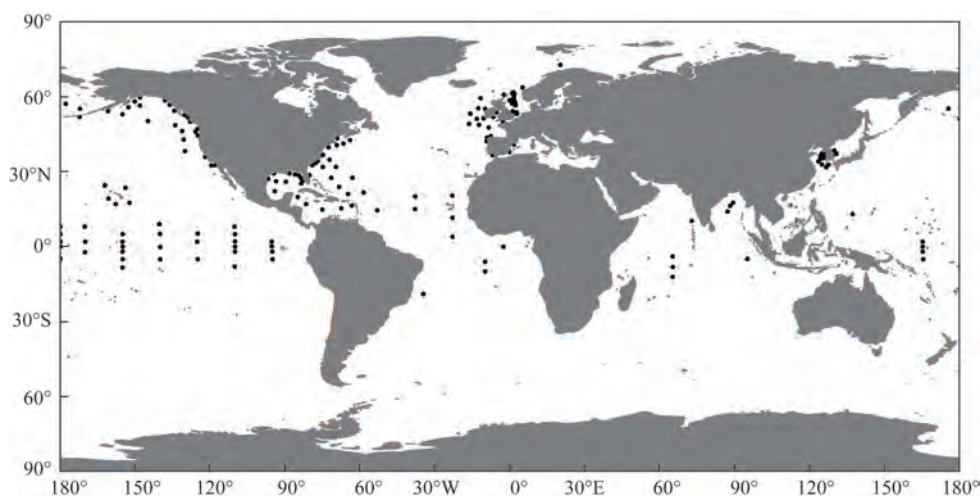


图1 浮标站点分布

Fig.1 Distribution of buoy stations

气海洋观测计划(Tropical Atmosphere Ocean Array, TAO)、大西洋预报与研究锚定浮标阵列(Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic, PIRATA)等的浮标观测数据。该浮标数据提供每10 min一次的风向、风速观测记录,以及相应的观测时间、地理定位、质量标识等信息。

1.2 数据处理

对海面风场数据的处理主要包括以下3步:①为确保数据的准确性和可靠性,通过质量标识码剔除精度、可信度受影响的数据;②对浮标观测数据、FY-3E及HY-2B海面风产品进行时空匹配;③将浮标观测风场转换为10 m压力等效风。

FY-3E海面风产品处理中,利用海陆掩码剔除陆地和近岸20 km以内的风场数据,并根据产品自带质量标识,剔除海冰、厚云、强降水等复杂海况和气象条件下的数据,得到质量精度较好的海面风数据;经筛选后,绝大多数风速值集中分布于3~20 m/s,恰与产品精度设计要求的统计风速范围吻合。对于浮标观测数据和HY-2B海面风产品,同样利用自带质量标识进行数据质量控制,筛选保留质量较优的风场数据参与对比评估。

鉴于浮标观测、FY-3E及HY-2B海面风产品时空采样存在差异,在数据比对前需要将上述海面风场数据进行地理时空匹配。文中结合海面风产品空间分辨率及海面风场的时空变化规律,参考已有

研究的时空匹配方法^[19-20],以10 min为时间匹配窗口、10 km为空间匹配窗口(即当两个观测点空间距离小于10 km且观测时间间隔小于10 min时,认为两者为一组匹配样本),对FY-3E海面风产品与浮标观测数据、HY-2B海面风产品进行时空匹配。由此共得到13 512对FY-3E与浮标海面风的配对样本,以及超过一千万对FY-3E与HY-2B海面风的配对样本。

卫星海面风场产品代表了10 m高度处的压力等效风,因此需要将浮标观测风转换为10 m高度上的等效风进行对比。转换公式为:

$$u_{10} = 8.874\ 03 \times u_z / \left(\ln \frac{z}{0.001\ 6} \right) \quad (1)$$

式中: z 代表浮标风距离海面的高度; u_{10} 和 u_z 分别代表10 m处和 z 高度处的风速。

1.3 检验评估方法

设第 i 对匹配数据中,FY-3E海面风风速为 S_i 、风向为 d_i ,参考(浮标、HY-2B)风速和风向分别为 S_{0i} 和 d_{0i} ,则风速偏差 SPD_i 为:

$$SPD_i = S_i - S_{0i}, \quad (2)$$

采用平均偏差(Mean Error, ME, 记作 E_M)、平均绝对偏差(Mean Absolute Error, MAE, 记作 E_{MA})、RMSE(记作 E_{RMSE})作为评估参数^[21],计算公式分别为:

$$E_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SPD_i \quad (3)$$

$$E_{MA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |SPD_i| \quad (4)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N SPD_i^2}{N}} \quad (5)$$

式中: N 代表总样本数。对于风向,取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,偏差范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 。风向偏差(DIR_i)计算见式(6),同样参照式(3)–(5)计算风向ME、MAE和RMSE进行检验评估。

$$DIR_i = \begin{cases} d_i - d_{oi} + 360, & d_i - d_{oi} < -180^\circ \\ d_i - d_{oi}, & -180^\circ \leq d_i - d_{oi} \leq 180^\circ \\ d_i - d_{oi} - 360, & d_i - d_{oi} > 180^\circ \end{cases} \quad (6)$$

2 FY-3E海面风产品质量评估

2.1 FY-3E海面风产品与浮标风场观测对比分析

图2分别为FY-3E C波段、Ku波段及双波段海面风与浮标风矢观测的散点密度分布,以及ME、MAE、RMSE统计结果。由图可知,参与统计对比的风速样本大多集中于 $5 \sim 15$ m/s,其中FY-3E海面

风经自带质量标识质量控制筛选后,风速基本处于 $3 \sim 20$ m/s。相较于浮标风观测,FY-3E C波段、Ku波段及双波段的海面风速均呈系统性负偏差(即风速偏小),风速ME分别为 -1.18 m/s、 -0.72 m/s和 -0.77 m/s, RMSE分别为 1.85 m/s、 1.52 m/s和 1.54 m/s,产品符合风速误差小于 2 m/s的设计指标,且Ku波段风速质量略优于双波段、明显优于C波段。就风向而言,FY-3E C波段、Ku波段及双波段风向较浮标风向的系统性偏差较小,对角线两侧散点密度分布较为均匀,不同波段反演风向误差差异不大,风向ME均小于 1° ,MAE约为 12° ,RMSE约为 23° ,其中Ku波段略优于双波段,双波段略优于C波段,均满足误差小于 25° 的设计指标。综上评估,FY-3E Ku波段海面风质量相对其他波段产品更优。

FY-3E C波段、Ku波段及双波段海面风与浮标风观测的偏差概率密度分布及绝对偏差累计概率分布见图3。由图可见,FY-3E C波段风速偏差与误差均大于其他波段,3种海面风产品的风速较浮标观测的系统性负偏差显著,且呈弱右偏态分布;经系统偏差订正后(见图3a虚线),其与浮标风速的差

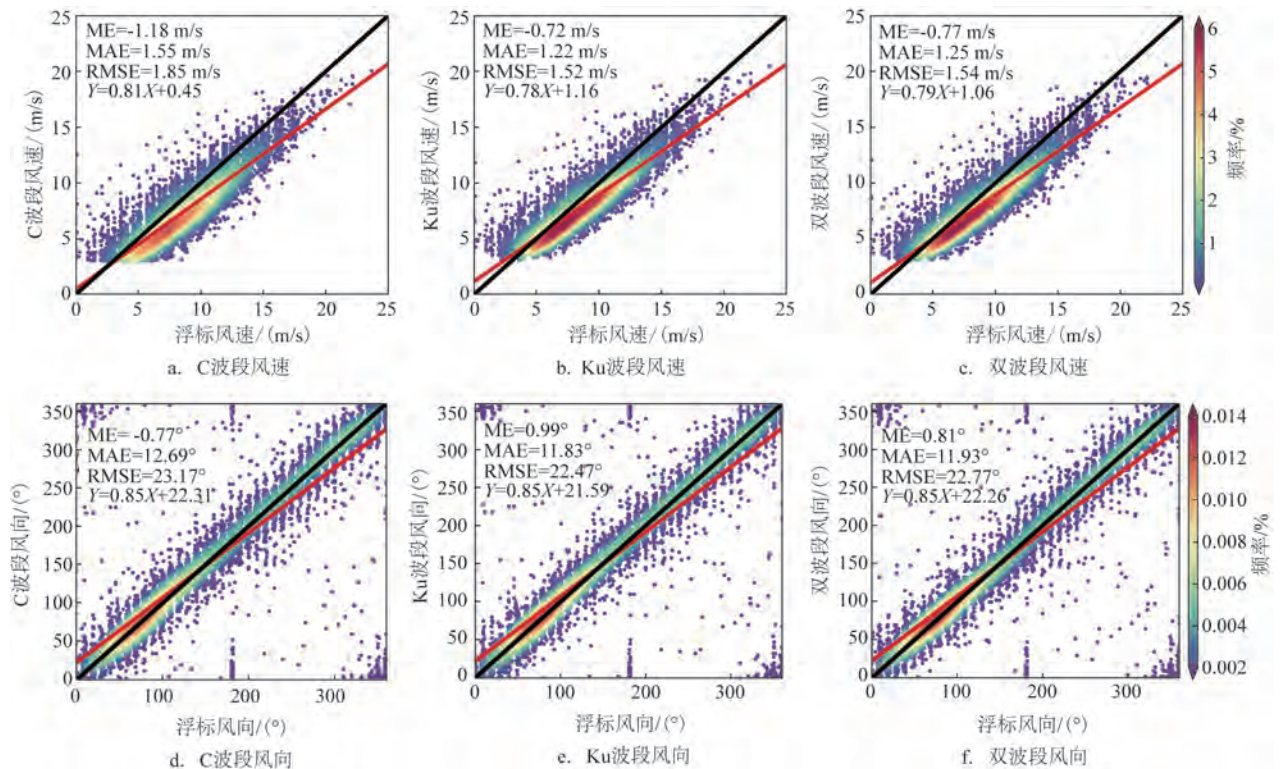


图2 FY-3E海面风与浮标风矢量的散点分布

Fig.2 The scatter diagrams of ocean wind vectors from FY-3E and buoy

值主要集中于 $-2\sim 2$ m/s。基于风速绝对偏差的累计概率统计分析(见图3b)可知, FY-3E C波段、Ku波段及双波段海面风速绝对误差小于2 m/s的概率分别为70%、84%、83%;而经简单系统偏差剔除后, 绝对误差小于2 m/s的概率可分别提升至87%、90%、90%, 绝对误差小于4 m/s的概率均可达99%。FY-3E 3种海面风的风向偏差符合正态分布, 均值接近 0° , 绝对偏差小于 25° 的累积概率分别为91%、92%、92%。

为进一步分析FY-3E海面风相对浮标风观测的ME和RMSE空间分布特征, 图4以Ku波段为例, 给出各浮标站处二者的ME和RMSE统计结果。由图可见, FY-3E海面风风速相对浮标观测以负偏差为主, 正偏差主要分布于朝鲜半岛周边、孟加拉湾及西欧近海一带; 风速RMSE大值区集中于热带太平洋, 部分超过2 m/s, 对应风速绝对偏差相对较大的区域, 其他海域风速RMSE基本小于2 m/s。相较浮标观测, FY-3E海面风风向在赤道西太平洋地区正偏差较大, 在孟加拉湾附近负偏差较大, 仅少数站

点处风向RMSE超过 25° , 且主要位于近海海域, 如赤道西太平洋、亚洲及北美洲近海。

FY-3E海面风相对浮标风场的ME、RMSE随时间变化特征见图5。图中FY-3E C波段、Ku波段及双波段海面风的风向、风速ME和RMSE逐月演变趋势较为一致, 且Ku波段风速质量略优于双波段, 明显优于C波段, 风向同样以Ku波段质量相对更优。风速ME在4—8月波动幅度较大, 其中5月最小(Ku波段约为 -0.4 m/s), 7月较大(Ku波段约为 -0.9 m/s)。风速RMSE在各月均小于2 m/s, 5月最小(Ku波段和双波段RMSE小于1.4 m/s), 11月最大; 风速误差的月变化可能与海洋气象条件变化有关: 上述对比站点主要集中于北半球和热带地区, 北半球冬、夏月份风暴、大风等天气现象频发, 云层遮挡、海面粗糙度等因素可能影响卫星的准确观测, 而浮标作为实地观测设备, 受天气条件影响相对较小, 能更稳定地提供观测数据; 春季或初夏时期, 海洋气象条件相对稳定, 风速、风向等气象要素变化较小, 海洋上空云量可能较少、大气透明度较

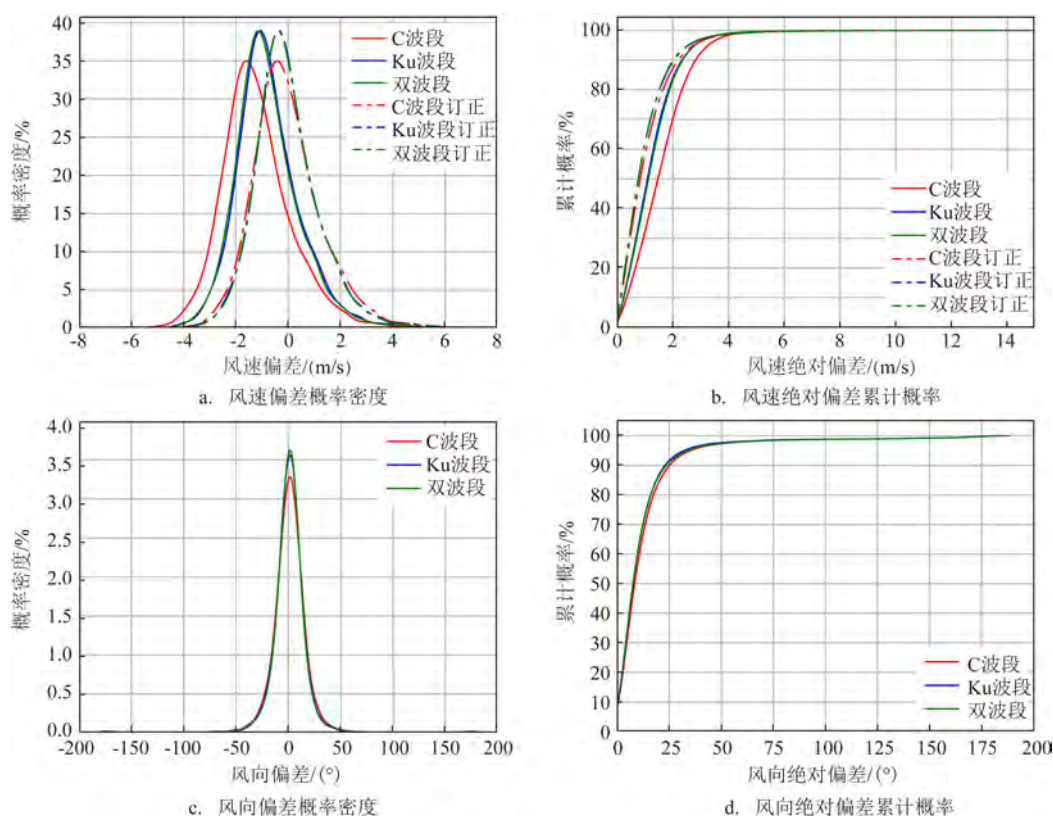


图3 FY-3E与浮标风矢量的偏差概率密度分布与绝对偏差累计概率分布

Fig.3 Probability density and cumulative probability of deviation between FY-3E and buoy wind vector

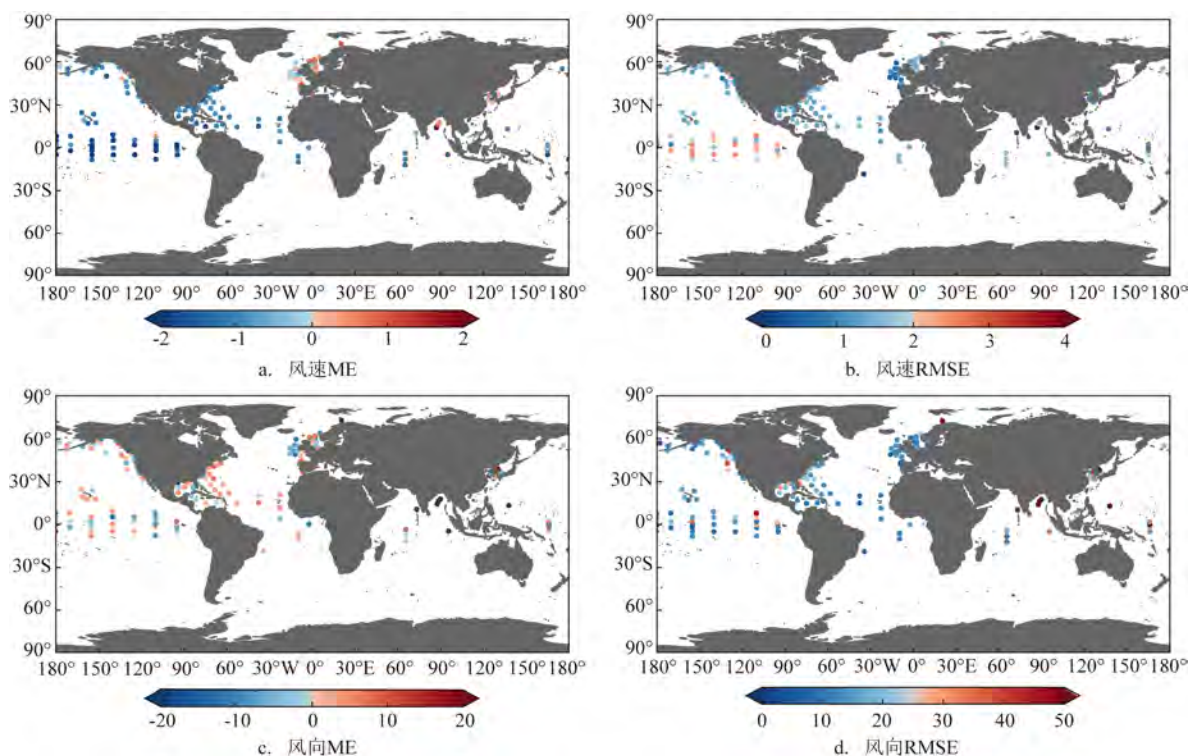


图4 FY-3E与浮标风矢量偏差、均方根误差空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ME and RMSE between FY-3E and buoy wind vector

高,有利于卫星遥感数据的准确获取和解析。FY-3E海面风风向较浮标风向在4月存在逆时针偏差,其他月份基本为顺时针偏差,各月风向ME在 $-1.5^{\circ}\sim 2.0^{\circ}$ 之间。风向RMSE仅3月、6月、8月较大(接近或略大于 25°),其他月份均小于 25° ,总体符合设计指标。

在不同风力等级条件下,海面风观测受实际风速大小影响,其误差可能存在差异。为进一步分析不同风力等级下海面风产品的误差特征,本文依据浮标观测风速,按表1所示风力等级划分标准,对不同风力等级下FY-3E海面风与浮标测风的差异特征进行统计分析(见图6)。如前文所述,FY-3E海面风样本风速主要分布于 $3\sim 20\text{ m/s}$,对应2~8级风范围;其他等级符合质量标准的样本少、误差大,这与海面风遥感探测反演的局限性有关。由图6知,随风力等级增大,FY-3E海面风速相对浮标风速的平均偏差由正转负,ME介于 $-3\sim 3\text{ m/s}$,3级风ME接近0,即总体而言,3级风以下FY-3E海面风速较浮标风速偏大,3级风以上则偏小。FY-3E海面风速与浮标风速的RMSE随风力增大呈先减小后增大趋势,3级风条件下RMSE最小(约 1 m/s),3~6级风

的风速RMSE小于 2 m/s ,2级、7级、8级风的风速RMSE略大于 2 m/s 。同时,FY-3E C波段、Ku波段、双波段海面风的风速ME、RMSE随风力等级变化的趋势一致,当风力大于3级时,Ku波段和双波段的风速ME、RMSE均优于C波段。风向方面,FY-3E海面风相对浮标测风的风向ME在2~8级风范围内均较小(基本在 2° 以内),3级风以上的风向RMSE均未超过 25° 。综上,在FY-3E产品精度指标要求的风速范围($3\sim 20\text{ m/s}$),即3~8级风条件下,Ku波段和双波段风场产品质量优于C波段;仅7~8级风的风速误差略大于 2 m/s ,3级风的风向误差略大于 25° ,其他风力等级下的产品质量均达标且较优。

2.2 FY-3E海面风产品与HY-2B海面风产品对比分析

上文基于浮标风场观测的评估分析表明,FY-3E C波段、Ku波段、双波段海面风产品总体质量均满足产品精度设计指标要求,其中Ku波段产品质量最优,下文主要选取Ku波段产品,开展与HY-2B

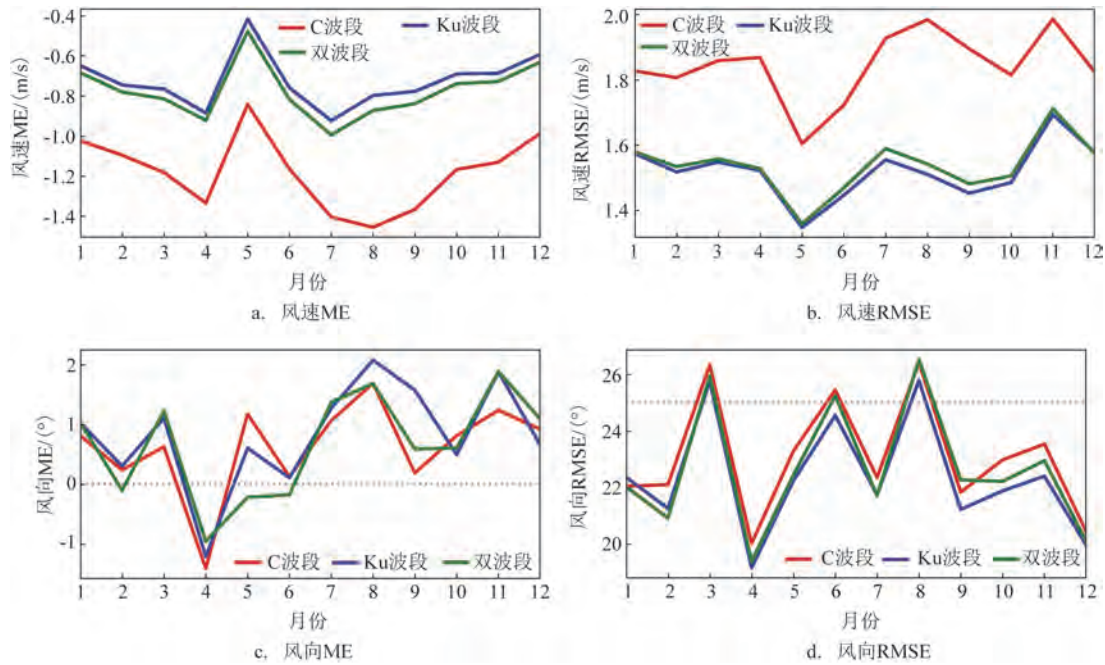


图5 不同月份FY-3E与浮标风矢量偏差及均方根误差

Fig.5 ME and RMSE between FY-3E and buoy wind vector in different months

表1 风力等级划分标准

Tab.1 Wind scale classification standards

风力等级	0	1	2	3	4	5
风速/(m/s)	0~0.2	0.3~1.5	1.6~3.3	3.4~5.4	5.5~7.9	8.0~10.7
风力等级	6	7	8	9	—	—
风速/(m/s)	10.8~13.8	13.9~17.1	17.2~20.7	20.8~24.4	—	—

海面风产品的对比分析。图7为FY-3E Ku波段海面风与HY-2B海面风的散点概率密度分布与偏差统计结果。总体而言,FY-3E和HY-2B海面风的风向、风速一致性均较好。细分风速范围分析,FY-3E Ku波段风速与HY-2B风速在3~10 m/s内的一致性最好,10~15 m/s内的FY-3E风速略低于HY-2B,15~20 m/s内的FY-3E风速略高于HY-2B。FY-3E Ku波段风速与HY-2B风速的ME、MAE和RMSE分别为0.08 m/s、0.37 m/s、0.48 m/s,对二者进行线性回归拟合,回归系数高达0.99。FY-3E和HY-2B配对样本的风向在0°~360°内分布均匀,0°~100°内FY-3E Ku波段风向相对HY-2B风向存在逆时针偏差;总体风向ME、MAE和RMSE分别为0.17°、6.78°、10.50°,拟合线性回归系数为0.92。

为明确FY-3E Ku波段海面风与HY-2B海面风

差异的空间分布特征,本文将全球划分为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 分辨率的均匀网格,依据配对样本的经纬度信息将其分配至相应网格,进而统计每个网格中所有样本的误差评估参数,得到FY-3E与HY-2B风场的ME、RMSE空间分布(见图8)。由图可见,FY-3E和HY-2B的风速ME空间分布较均匀,量值基本介于 $-0.6 \sim 0.6$ m/s,其中在南北纬 60° 之间大多为正偏差,而 60°N 以北和 60°S 以南多为负偏差。这可能与二者反演过程中对海温的处理方式不同有关,即FY-3E Ku波段海面风场反演未考虑海温影响,而HY-2B卫星微波散射计海面风场反演纳入了海温因素,消除了海温引发的风速偏差。风速RMSE在赤道附近及 60°S 以南区域相对较大,其他海域基本小于0.7 m/s。FY-3E与HY-2B的风向ME在北半球和南半球中纬带存在 -6° 以内的负偏差(即FY-3E Ku波段

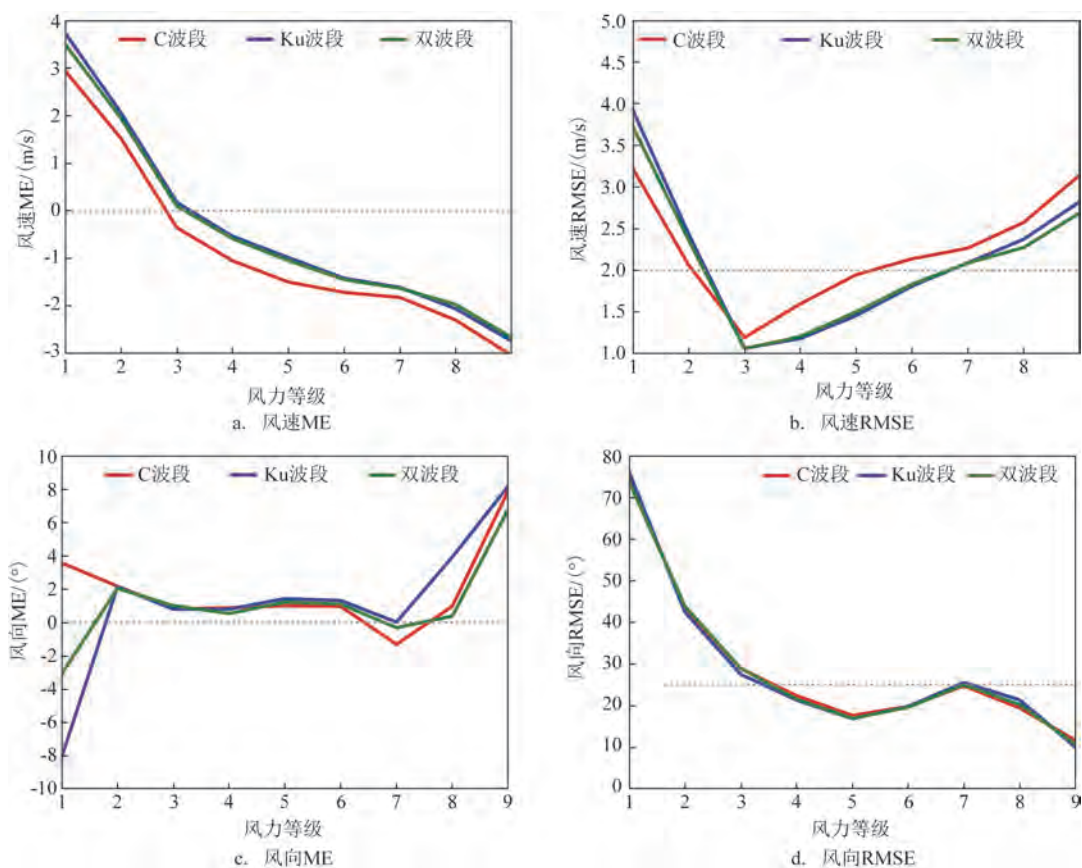


图6 不同风力等级条件下FY-3E与浮标风矢量的偏差、均方根误差

Fig.6 ME and RMSE between FY-3E and buoy wind vector under different wind scales

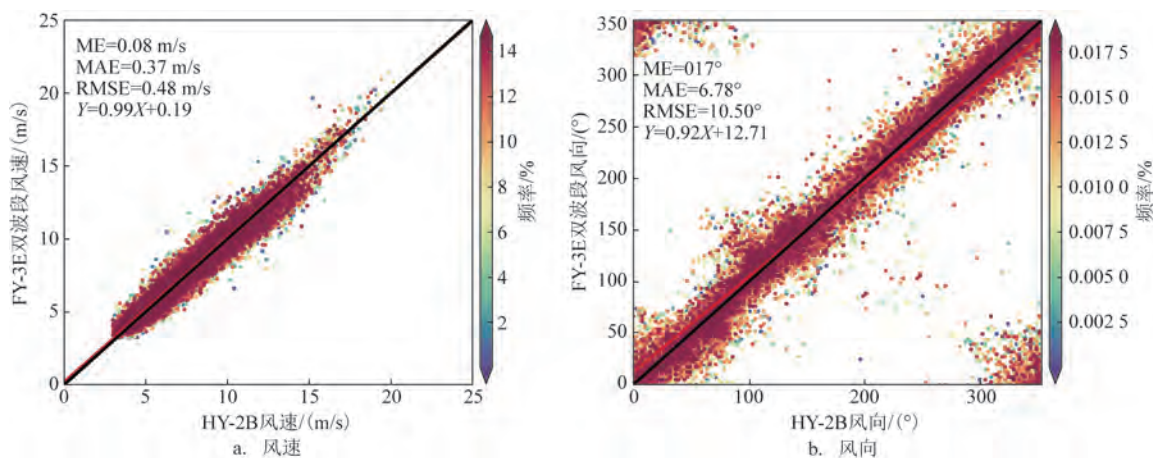


图7 FY-3E与HY-2B风矢量的散点密度分布

Fig.7 The scatter density distribution diagrams of wind vectors from FY-3E and HY-2B

风向相对HY-2B有6°以内的逆时针偏转),其他区域风向ME多为正偏差,其中赤道附近、南北极地区风向平均正偏差较大。风向RMSE的大值区主要集中于赤道地区,其他区域风向RMSE基本在20°以内。

3 结论与讨论

本文利用2023年5月—2024年5月的浮标风场观测数据及HY-2B海面风产品,对FY-3E C波段、

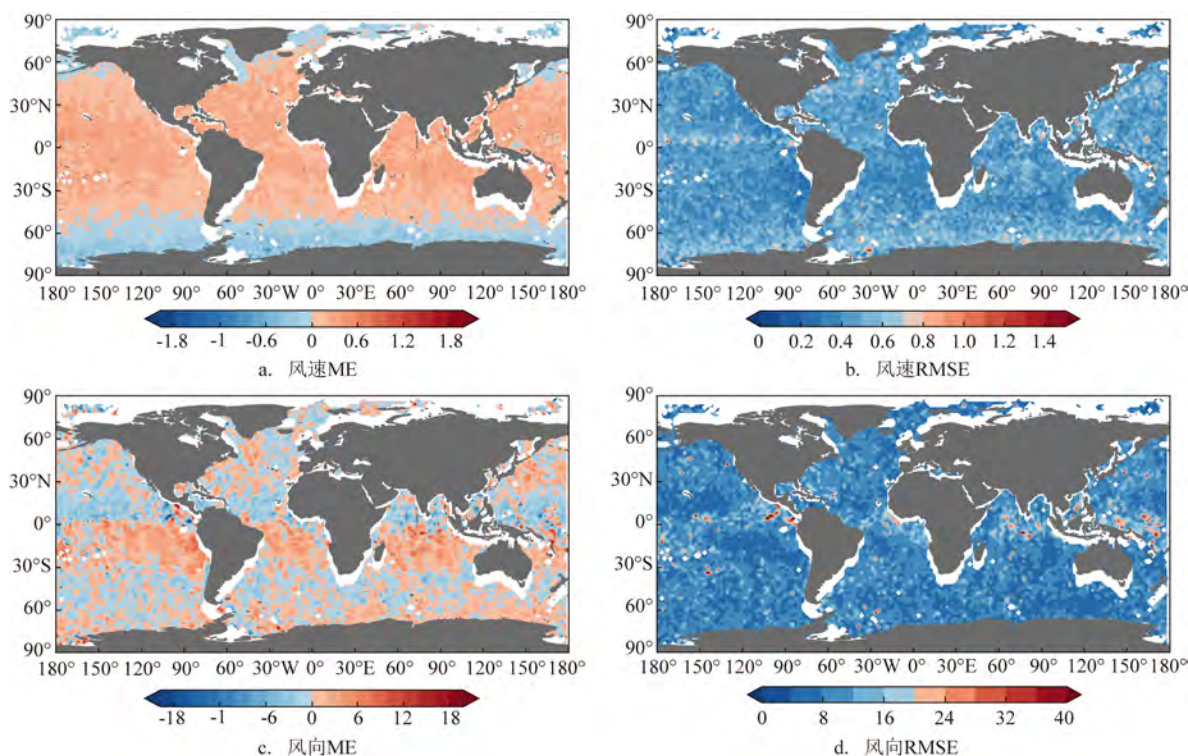


图8 FY-3E与HY-2B风矢量偏差、均方根误差空间分布

Fig.8 Spatial distribution of ME and RMSE between FY-3E and HY-2B wind vector

Ku波段、双波段海面风产品质量开展对比评估分析。结论如下:

①相较于浮标观测, FY-3E C波段、Ku波段及双波段海面风的风速呈一定的系统性负偏差, 风速RMSE分别为1.85 m/s、1.52 m/s和1.54 m/s; 风向ME小于1°, RMSE分别为23.17°、22.47°和22.77°, 均符合产品精度设计指标要求, 且Ku波段海面风质量略优于双波段、明显优于C波段海面风。

②FY-3E海面风较浮标测风的风向、风速ME和RMSE存在时空变化特征。各月风速RMSE均低于2 m/s, 5月最小、11月最大, 风速ME在-1.4~0.4 m/s间; 风向RMSE仅3月、8月略大, 其他月份均不超过25°, 风向ME在-1.5°~2.0°间。风速以负偏差为主, 正偏差分布于朝鲜半岛周边、孟加拉湾及西欧近海, RMSE大值集中于热带太平洋; 风向在赤道西太平洋正偏差较大, 孟加拉湾负偏差较大, RMSE大值主要位于赤道西太平洋、亚洲及北美洲近海。

③FY-3E C波段、Ku波段、双波段海面风较浮

标测风的ME和RMSE随风力等级变化趋势一致。在3~20 m/s风速范围内(3~8级风), 风速ME、RMSE随风力等级增大而增大, 7级风以下风速RMSE均小于2 m/s, 风向ME随风力等级变化相对稳定, 呈约2°的正偏差, 3级风以上RMSE均不超过25°。

④FY-3E Ku波段海面风与HY-2B海面风的一致性较好, 二者的风速、风向线性回归系数均超过0.9, 风速ME、RMSE分别为0.08 m/s和0.48 m/s, 风向ME、RMSE分别为0.17°和10.50°。赤道及60°S以南风向、风速的RMSE相对较大, 南北纬60°之间FY-3E风速相对HY-2B多为正偏差, 其他区域多为负偏差, 这可能与FY-3E Ku波段海面风场反演过程中未考虑海温影响, 而HY-2B纳入海温因素、消除海温引发的风速偏差有关。

总体而言, FY-3E海面风产品满足风速RMSE小于2 m、风向RMSE小于25°(3~20 m/s)的产品精度设计指标, 但FY-3E WindRAD作为全新仪器, 其数据处理、产品制作仍在持续完善, 产品质量具有

一定提升潜力。本文旨在为了解现阶段该产品质量,优化产品质量及科学合理应用提供参考;同时,文中暂未基于高质量模式格点场评估FY-3E海面风产品性能,有待后续补充该方面的比较评估,这对探讨FY-3E海面风在资料同化中的应用、丰富海上观测及提升分析预报质量具有积极意义。

致谢:感谢国家卫星海洋应用中心提供的HY-2B数据,感谢国家卫星气象中心提供的FY-3E数据,感谢国家气象信息中心提供的浮标观测及HY-2B海面风观测下载。感谢国家卫星气象中心窦芳丽老师提供FY-3E海面风产品介绍和数据质量码应用指导,感谢两位审稿专家对文稿提出的宝贵建议!

参考文献

- [1] 渠鸿宇, 黄彬, 赵伟, 等. HRCLDAS-V1.0和ERA5海面风场对比评估分析[J]. 热带气象学报, 2022, 38(4): 569-579.
QU H Y, HUANG B, ZHAO W, et al. Comparison and evaluation of HRCLDAS-V1.0 and ERA5 sea-surface wind fields[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2022, 38(4): 569-579.
- [2] WANG G S, WANG X D, WANG H, et al. Evaluation on monthly sea surface wind speed of four reanalysis data sets over the China seas after 1988[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 39(1): 83-90.
- [3] 张东翔. 多源卫星海面风场产品检验及融合研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
ZHANG D X. Research of multi-source satellite sea surface wind validation and data fusion[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [4] 吕思睿, 林文明, 邹巨洪, 等. 多源卫星遥感海面风速误差分析和交叉标定[J]. 海洋学报, 2023, 45(5): 118-128.
LYU S R, LIN W M, ZOU J H, et al. Error quantification and cross calibration of sea surface wind speeds from multiple remote sensing satellites[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(5): 118-128.
- [5] 窦芳丽, 商建, 郭杨, 等. 卫星遥感海面风技术现状及应用进展[J]. 气象科技进展, 2017, 7(4): 6-11.
DOU F L, SHANG J, GUO Y, et al. Satellite remote sensing of sea surface winds: technique status and application progress[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2017, 7(4): 6-11.
- [6] EBUCHI N, GRABER H C, CARUSO M J. Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(12): 2049-2062.
- [7] YANG J G, ZHANG J. Comparison of Oceansat-2 scatterometer wind data with global moored buoys and ASCAT observation[J]. Advances in Meteorology, 2019, 2019: 1651267.
- [8] WU Q, CHEN G. Validation and intercomparison of HY-2A / MetOp-A / Oceansat-2 scatterometer wind products[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(5): 1181-1190.
- [9] ZHENG M W, LI X M, SHA J. Comparison of sea surface wind field measured by HY-2A scatterometer and WindSat in global oceans[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2019, 37(1): 38-46.
- [10] 陈克海, 解学通, 张金兰, 等. HY-2B卫星散射计海面风场产品质量分析[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(6): 30-40.
CHEN K H, XIE X T, ZHANG J L, et al. Accuracy analysis of the retrieved wind from HY-2B scatterometer[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2020, 39(6): 30-40.
- [11] WANG Z X, ZOU J H, STOFFELEN A, et al. Scatterometer sea surface wind product validation for HY-2C[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 6156-6164.
- [12] WANG Z X, ZHAO C F. Assessment of wind products obtained from multiple microwave scatterometers over the China seas[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(5): 1210-1218.
- [13] 韩玉康, 周林, 赵艳玲, 等. 3种海面风场资料在吕宋海峡的比较与评估[J]. 海洋预报, 2019, 36(6): 44-52.
HAN Y K, ZHOU L, ZHAO Y L, et al. Evaluation of three sea surface wind data sets in Luzon Strait[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(6): 44-52.
- [14] 旷芳芳, 张友权, 张俊鹏, 等. 3种海面风场资料在台湾海峡的比较和评估[J]. 海洋学报, 2015, 37(5): 44-53.
KUANG F F, ZHANG Y Q, ZHANG J P, et al. Comparison and evaluation of three sea surface wind products in Taiwan Strait[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(5): 44-53.
- [15] ZHANG P, HU X Q, LU Q F, et al. FY-3E: the first operational meteorological satellite mission in an early morning orbit[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 39(1): 1-8.
- [16] ZHANG Y, MU B, LIN M S, et al. An evaluation of the Chinese HY-2B satellite's microwave scatterometer instrument[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(6): 4513-4521.
- [17] ZHAO K, ZHAO C F, CHEN G. Evaluation of Chinese scatterometer ocean surface wind data: preliminary analysis[J]. Earth and Space Science, 2021, 8(7): e2020EA001482.
- [18] ZOU J H, ZHANG Y, BAO Q L, et al. The preliminary results of HY-2B microwave scatterometer data[C]//IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama, Japan: IEEE, 2019: 8019-8022.
- [19] 王东良, 姚小海, 孟雷, 等. 海洋二号卫星散射计风场产品真实性检验及分析[J]. 海洋预报, 2014, 31(4): 47-53.
WANG D L, YAO X H, MENG L, et al. Validation and analysis of wind field products of HY-2[J]. Marine Forecasts, 2014, 31(4): 47-53.
- [20] WANG H, ZHU J H, LIN M S, et al. First six months quality

assessment of HY-2A SCAT wind products using in situ measurements[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(11): 27-33.
[21] JIANG X F, WANG Q G, NIU N. Error analysis and correction of

FENGYUN-4A GIIRS temperature profile products in summer over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Remote Sensing, 2024, 16(11): 1881.

Quality assessment and analysis of FY-3E ocean wind vector products

YAO Shuang¹, JIANG Xiaofei^{2,3*}, ZHANG Tao¹, YAO Yan¹, NIU Ning², FU Yafang²

(1. National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China; 2. China Meteorological Administration Meteorological Training Center, Beijing 100081, China; 3. Beijing Haidian District Meteorological Bureau, Beijing 100080, China)

Abstract: In order to understand the quality of the ocean wind vector product (OVW) of Fengyun-3E satellite (FY-3E), buoy observations and the sea surface wind product of HaiYang-2B satellite (HY-2B) were used to evaluate the quality of FY-3E/OVW. The results show that: compared with buoy observations, the root mean square errors (RMSEs) of wind speeds in the C-band, Ku band, and dual band of FY-3E/OVW are 1.85 m/s, 1.52 m/s, and 1.54 m/s, respectively, showing a systematic negative deviation, and the RMSEs of wind directions are 23.17°, 22.47°, and 22.77°, respectively. The wind speed deviation is larger in the tropical Pacific, and the wind direction deviation is larger in the nearshore areas. Overall, FY-3E/OVW meets the design criteria of wind speed and direction with RMSEs less than 2 m/s and 25°. The quality of Ku band products is slightly better than that of dual band products and significantly better than that of C-band products. The consistency between FY-3E and HY-2B ocean wind vector products is good, with linear regression coefficients of wind speed and direction both exceeding 0.9, mean error close to 0 and RMSE of 0.48 m/s and 10.50°. The regions with significant differences locate in the equatorial areas.

Key words: FY-3E; ocean wind vector; quality assessment; HY-2B; buoy