

文章编号: 1672-8785(2025)05-0031-07

FY-3E/WindRAD 风场产品检验及 台风适应性评估

崔林丽¹ 郭 巍¹ 史 军¹ 陈旻豪²

(1. 上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200030;

2. 上海市海洋气象台, 上海 200030)

摘 要: 卫星反演的洋面风场对全球台风灾害监测具有重要的指示意义和实用价值。利用上海市气象局3个海洋浮标站海面风场观测资料以及国内外同类卫星产品, 对风云三号E星(FY-3E)的风场测量雷达(WindRAD)产品进行了精度检验, 并结合2022年6月至2023年9月影响上海地区的3个台风个例进行了风场产品应用能力评估。结果表明, FY-3E/WindRAD能够较好地刻画台风的基本风圈结构特征; 与浮标站实测结果相比, FY-3E/WindRAD风速反演结果基本达到业务化应用的精度要求。与国际同类风场反演结果相比, 其台风风圈结构信息和最大风速信息随时间的变化规律具有较好的一致性。研究结果对FY-3E/WindRAD风场产品应用和分析具有重要的参考价值。

关键词: FY-3E/WindRAD; 洋面风场; 产品检验; 台风应用; 浮标站

中图分类号: P405 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.05.005

FY-3E/WindRAD Wind Field Products Inspection and Typhoon Adaptability Evaluation

CUI Lin-li¹, GUO Wei¹, SHI Jun¹, CHEN Min-hao²

(1. Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Marine Meteorological Observatory, Shanghai 200030, China)

Abstract: The satellite-derived ocean surface wind field has important indicative significance and practical value for global typhoon disaster monitoring. The wind field observation data of three ocean buoy stations of the Shanghai Meteorological Bureau and similar satellite products at home and abroad are used to test the accuracy of the wind field measurement radar (WindRAD) product of Fengyun-3E (FY-3E), and the application capability of the wind field product is evaluated in combination with three typhoons that have affected the Shanghai area during June 2022 and September 2023. The results show that FY-3E/WindRAD can better describe the basic wind circle structure characteristics of typhoons, and compared with the measured results of the buoy stations, the wind speed inversion results of FY-3E/WindRAD basically meet the accuracy requirements of op-

收稿日期: 2024-11-25

基金项目: 中国气象局风云卫星应用先行计划项目(FY-APP-2021.0106); 上海市自然科学基金项目(23ZR1456900)

作者简介: 崔林丽(1975-), 女, 山西长治人, 正高级工程师, 主要从事卫星遥感气象应用研究。
E-mail: cllcontact@163.com

erational applications. Compared with the international similar wind field inversion results, the change law of the typhoon wind circle structure information and maximum wind speed information over time has a good consistency. The research results have important reference value for the application and analysis of FY-3E/WindRAD wind field products.

Key words: FY-3E/WindRAD; ocean surface wind field; product inspection; typhoon application; buoy station

0 引言

海面风场是地球科学领域的重要参数。它通过驱动海洋环流影响全球及局地气候,并对提高全球大气、海洋动力学预报模式的准确性以及开展航线优化、航路保证、避免台风、搜索与救援工作等具有重要的价值^[1]。因此,海面风场监测对于气象、海洋部门的日常业务服务以及海-气相互作用科学机理研究都至关重要。然而,以往对海面风场的观测主要依赖于岛屿台站、船舶和浮标等,无法保证观测的时空连续性。极轨卫星遥感设备(尤其是微波遥感设备)具有全球覆盖、全天候观测等优势,能够有效实现对全球海面风场的连续准确观测^[2]。

作为一种可以同时测量海面风速和风向的卫星传感器系统,星载微波散射计为全球高时空分辨率、高精度的海面风场监测提供了有力的支撑。近 50 年来,全球已有多个星载微波散射计先后投入业务化运行,比如 SeaSat/SASS^[3]以及搭载在 ERS-1/2^[4]、NSCAT^[5]、QuikSCAT 与 ADEOS II^[6]、Metop^[7]、Ocean-sat-2^[8-9]、HY-2A/2B^[10-11]、CFOSAT^[12-13]上的微波散射计。2021 年 7 月 5 日,我国第二代极轨气象卫星的第五颗卫星——风云三号 E 星(FY-3E)在酒泉卫星发射中心成功发射,其搭载的风场测量雷达(WindRAD)能够提供 Ku 波段(13.256 GHz)和 C 波段(5.4 GHz)双频测量(刈幅为 1800 km),为自主获取全球特别是我国东部远洋海面风场信息提供了可能。因此,在卫星观测仪器性能日益提升和新型卫星不断发射的背景下,如何科学地分析其探测资料的适用性并在日常业务服务中得以应用成为一项

十分有价值的工作^[14]。

鉴于此,本研究选取 2022 年 6 月至 2023 年 9 月影响上海地区的 3 个台风个例——“2211 轩岚诺(Hinnamnor)”、“2212 梅花(Muifa)”和“2306 卡努(Khanun)”,利用上海市气象局 3 个沿海浮标站以及国内外同类卫星风场产品,对台风影响期间的 FY-3E 风场资料开展了产品精度分析和交叉检验^[15],以便明确 FY-3E/WindRAD 产品的精度,并评估其在沿海台风监测中的适应性及可靠性,从而为台风灾害性天气监测与预警提供科学依据。

1 资料和方法

1.1 FY-3E 卫星风场产品

FY-3E/WindRAD 风场产品来自于中国气象局风云卫星遥感数据服务网。研究表明^[16],与 Ku 波段相比,C 波段具有较长的波长,对云和降水的穿透性更好,同时对较大风速的敏感性高,因此更适合于台风天气监测。在 FY-3E/WindRAD 的 C 波段数据经过质量控制和海洋定标后,利用最大似然估计(Maximum Likelihood Estimation, MLE)算法进行风场反演,并通过模糊解去除法得到轨道风速、风向产品。该产品的空间分辨率为 20 km×20 km,有效值范围为 0~50 m/s;过境时间分别为北京时间 5 时和 16 时左右。

1.2 浮标站观测数据

本研究使用的风场实况资料来自于上海市气象局业务维护、运行良好的 3 个浮标站,包括东海浮标站(31°00′00″N, 124°00′00″E)、海礁浮标站(30°43′2″N, 123°8′2″E)和黄泽洋灯船浮标站(30°30′11″N, 122°32′52″E),其空间分布如图 1 所示。资料包含气温、气压、瞬时风速和风向、

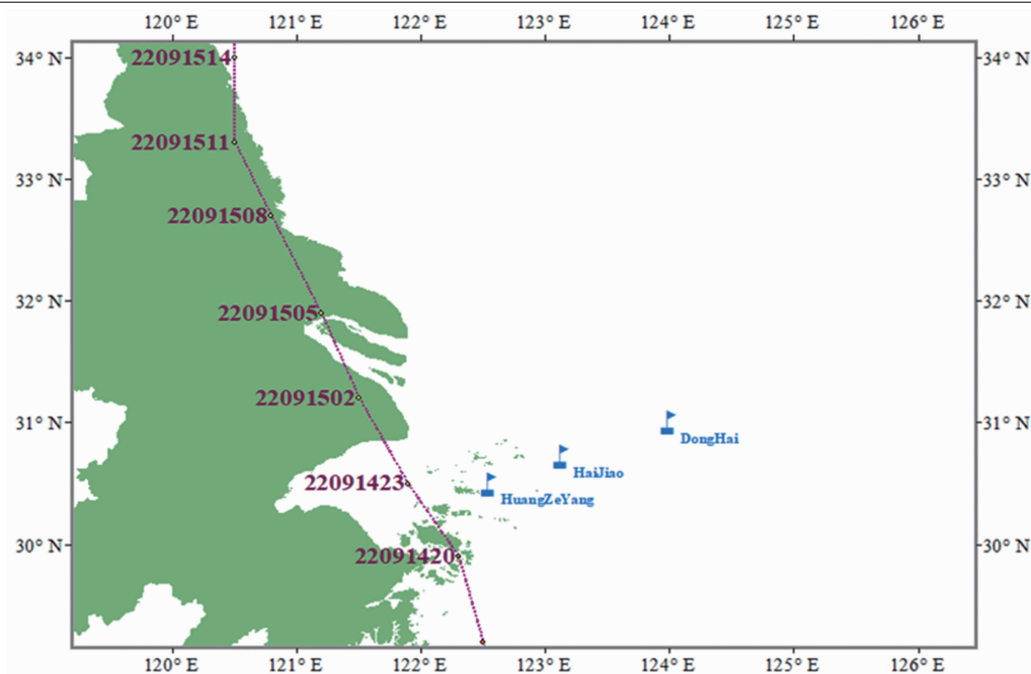


图 1 3 个海洋浮标站点的布设位置示意图(从左到右依次是黄泽洋、海礁和东海浮标站)

最大风速和风向、极大风速和风向等信息, 数据都经过了严格的质控筛选, 时间分辨率为 10 min。

1.3 其他风场资料

为了与国内外同类数据相比, 本文还引进了我国自主发射的海洋卫星(HY-2)的融合风场产品^[17]和美国交叉定标多平台合成洋面(Cross-Calibrated Multi-Platform, CCMP)风场资料。CCMP 海表风速规则格点资料是以欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的全球大气再分析资料和业务资料为背景场, 基于变分方法同化 SeaWind TMI、AMSR-E、SSM/I 等卫星洋面风资料和浮标、船舶观测资料获得的长序列数据, 是目前时空分辨率最高的全球海表风场数据之一^[18]。文中应用其逐日产品, 共包含 4 个时次, 分别为世界时 00:00、06:00、12:00 和 18:00, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。该产品在近海具有较高的精度。

1.4 星地资料的时空匹配

在空间匹配上, 利用浮标站位置信息通过 ArcGIS 软件直接进行点对点选取; 在时间上, 考虑到浮标数据 10 min 更新一次, 因此尽量

选取与卫星过境时间接近的观测数据, 将时间偏差控制在 10 min 内, 并根据与卫星的时间差进行线性插值处理。两个台风期间匹配到的数据共有 21 个时次, 具体见表 1。

1.5 产品质量评估

根据我国气象行业标准 QX/T 127-2011^[19], 选取偏差(BIAS)、绝对偏差均值(MAE)、均方根误差(RMSE)和相关系数(Corr)四个指标来评价 FY-3E/WindRAD 风场产品的质量。其中, BIAS 反映了系统偏差程度; MAE 反映了测量值偏离真值的平均值; RMSE 反映了测量值与真值之间的偏差, 是衡量仪器测量精度的主要参考指标^[11]; Corr 是衡量观测数据之间相关程度的一个指标。一般情况下, Corr 越大, 表明相关程度就越高。但 Corr 只有相对意义, 没有绝对意义。各参数的计算公式如下^[20]:

偏差(BIAS)的计算公式为

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i) \quad (1)$$

绝对偏差均值(MAE)的计算公式为

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i - Y_i| \quad (2)$$

均方根误差(RMSE)的计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2} \quad (3)$$

相关系数(Corr)的计算公式为

$$Corr = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

式中, N 表示匹配样本数量; X 表示 FY-3E/WindRAD 卫星反演风速; Y 表示检验源数据浮标实际观测到的风速; $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别表示被检验数据、检验源数据的均值。

2 结果分析

2.1 风场结构对比

利用 MATLAB 软件分别读取 FY-3E/WindRAD 风速产品和相近时刻的 HY-2 风速产品, 然后进行插值制图, 以 2022 年 9 月 5 日 8 时 9 分(UTC)的 FY-3E/WindRAD 和 2022 年 9 月 5 日 6 时(UTC)的 HY-2 多资料融合观

测(HY-2/Fusion)结果为例进行对比分析。可以发现, 空间上 FY-3E/WindRAD 能够较好地刻画台风所具有的外围风速小、内核区风速大的风圈结构特征, 其中最大风速(30~40 m/s)都分布在东南和东北两个象限(见图 2), 但由于两类数据时间相差 2 h, 台风整体风圈结构仍存在一定的差异。

2.2 风速定量对比

在确定星地时空最佳匹配方案的基础上, 计算 FY-3E/WindRAD 风速反演结果与 3 个浮标站观测瞬时风速的差异。从图 3(a)中可以看出, FY-3E/WindRAD 反演的风速与地面浮标观测值的线性相关性较好, $Corr$ 在 0.68 以上, 通过 $P < 0.01$ 的显著性($r = 0.549$)检验; $BIAS$ 均值约为 -1.95 m/s, MAE 约为 3.18 m/s, $RMSE$ 为 4.2 m/s。进一步将海洋二号融合产品与浮标观测结果进行同样的对比分析。从图 3(b)中可以看出, $Corr$ 同样在 0.68 以上, 通过 $P < 0.01$ 的显著性($r = 0.641$)检验; 其他

表 1 台风影响期间 FY-3E 的过境时间

卫星过境时间		
FY_3E_09150820	FY_3E_09032129	FY_3E_09040829
FY_3E_09140839	FY_3E_09150820	FY_3E_09032129
FY_3E_09142121	FY_3E_09140839	FY_3E_09150820
FY_3E_09132140	FY_3E_09142121	FY_3E_09140839
FY_3E_09050809	FY_3E_09132140	FY_3E_09142121
FY_3E_09042110	FY_3E_09050809	FY_3E_09050809
FY_3E_09040829	FY_3E_09042110	FY_3E_09032129

注: FY_3E_MMDDHHSS 中, MM 代表月; DD 代表日; HH 代表时(UTC); SS 代表分

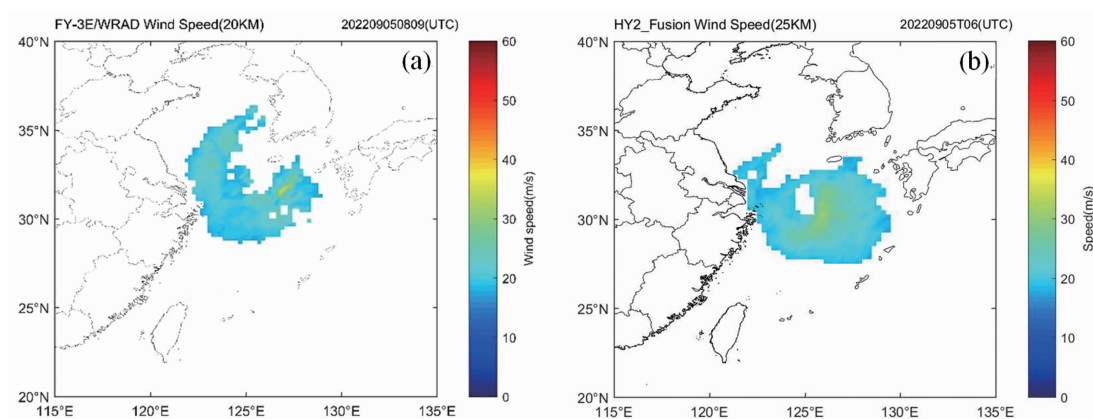


图 2 台风风场结构图: (a) FY-3E/WindRAD; (b) HY-2/Fusion

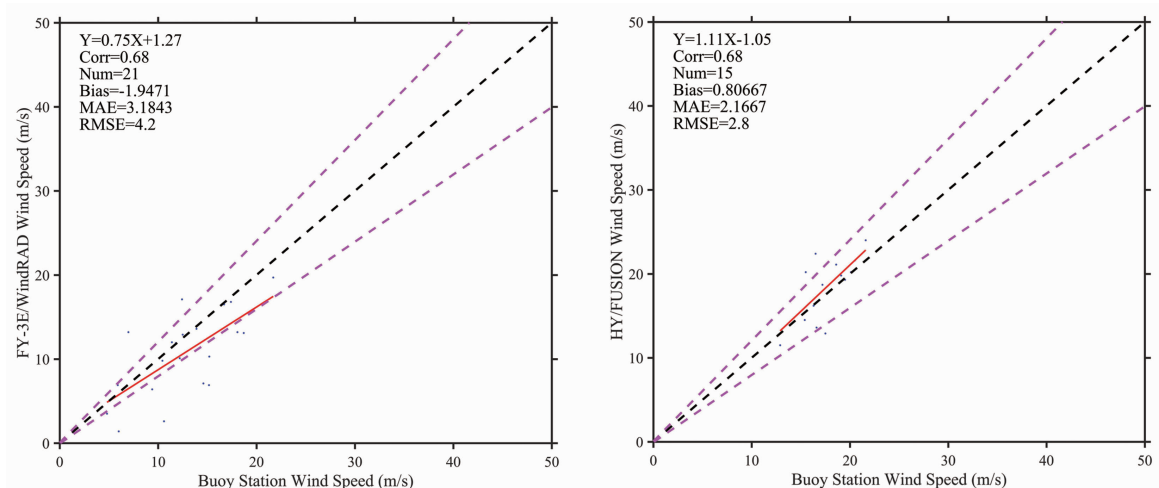


图 3 不同卫星反演风速与浮标实测风速误差对比结果图: (a) FY-3E/WindRAD; (b) HY-2/Fusion

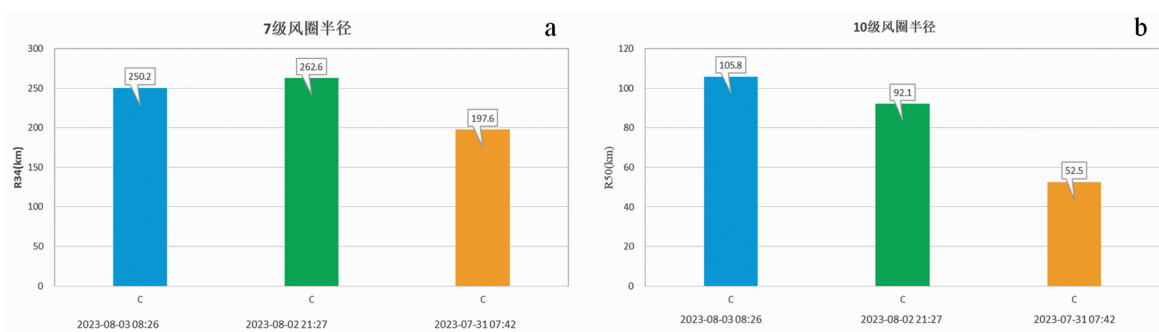


图 4 台风风圈结构提取图: (a) 7 级风圈半径; (b) 10 级风圈半径

指标明显偏小, 如 *BIAS* 均值约为 0.81 m/s, *MAE* 约为 2.17 m/s, *RMSE* 为 2.8 m/s。由此可见, FY-3E/WindRAD 风速反演结果基本达到业务化应用的精度要求(风速优于 2 m/s)。

2.3 大风半径对比

大风半径是衡量台风可能的影响范围和破坏程度的依据, 是气象预报员非常关心的参数^[21]。通常用不同强度的风圈半径作为台风风场结构的参考指标。不同强度的风圈具有不同的指示意义。在我国台风业务预报中, 一般以 7 级风圈作为衡量台风尺度的物理量。7 级风圈(34 kt)是台风的最外围环流, 可以反映台风主体环流所带来的大风的影响范围; 以 10 级风圈作为台风防御的重要参考指标, 10 级风圈(50 kt)半径代表了台风强风暴的影响范围; 一般出现 12 级风圈(65 kt)时都达到了台风级别^[22]。基于 FY-3E/WindRAD 风场资料, 利用 MATLAB 软件分别提取“2306 卡努

(Khanun)”风圈半径。从图 4 中可以看出, 随着台风强度从 7 月 31 日的台风级别增强到 8 月 2 日的超强台风级别, 其 7 级、10 级风圈半径均存在明显的增大趋势; 随后至 8 月 3 日前后台风强度再次回落至台风级别, 外围 7 级风圈半径略微减小, 但 10 级风圈半径仍维持增大态势, 增幅明显减缓。

通过对比 FY-3E/WindRAD 与国际同类产品的风圈结构参数可以发现, 对于 7 级风圈来说, CCMP 和 HY-2 的资料提取结果相近, 两者之间的偏差小于 20 km; 相对而言, FY-3E/WindRAD 的 7 级风圈大小变化与其他两类数据相似, 量值总体偏小, 与 CCMP 和 HY-2 的结果偏差在 30~80 km 之间, 但基于卫星的 7 级风圈普遍大于中央台报文(Babj)结果(见图 5(a))。如图 5(b)所示, 对于 10 级风圈而言, 基于卫星结果的变化趋势总体一致, 其中 CCMP 的结果与中央台报文结果最相近, HY-2

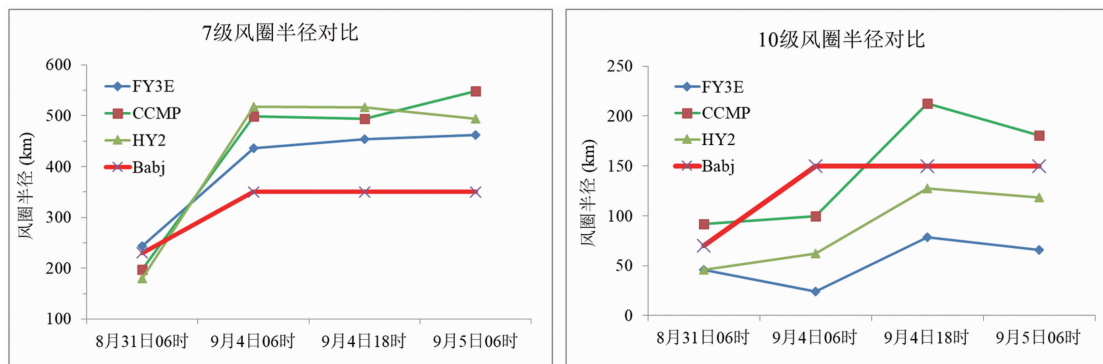


图5 利用不同风场资料提取的“2211 轩岚诺(Hinnamnor)”风圈结果图：(a) 7级风圈半径；
(b) 10级风圈结构

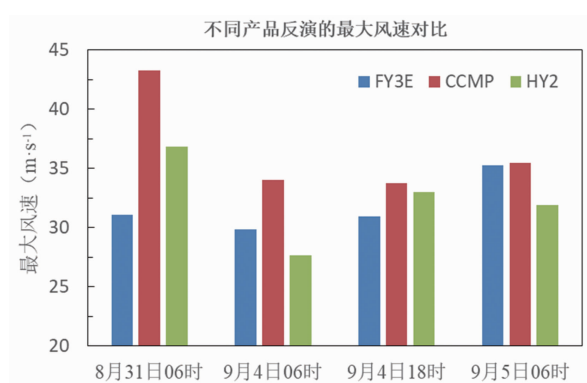


图6 利用不同风场资料提取的“2211 轩岚诺(Hinnamnor)”最大风速结果

和 FY-3E/WindRAD 的结果相对较小, FY-3E/WindRAD 的结果与 7 级风圈相似, 量值总体偏小, 最大风速相似(见图 6)。

3 结束语

本研究基于上海市气象局海洋台站观测数据和国内外基于卫星的风场观测数据, 对 FY-3E/WindRAD 的风场反演能力以及台风监测应用潜力进行了评估。在空间上, FY-3E/WindRAD 能够较好地刻画台风的基本风圈结构特征; 与浮标站实测结果相比, FY-3E/WindRAD 风速反演结果基本可达到业务化应用的精度。与国际同类的风场反演结果相比, FY-3E/WindRAD 台风风圈结构信息和最大风速信息随时间的变化规律具有较好的一致性, 但量级上相对偏小, 主要原因是其他两类资料是基于多种观测资料融合而来, 但 FY-3E/WindRAD 目前只有单一来源产品。因此, FY-3E/

WindRAD 在精度方面还有待进一步提升, 开展多资料融合的风场反演是提升我国风云气象卫星量化应用能力的关键。

参考文献

- [1] 林明森, 邹巨洪, 解学通, 等. HY-2A 微波散射计风场反演算法 [J]. 中国工程科学, 2013, 15 (7): 68-74.
- [2] 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.
- [3] Grantham W, Bracalente E, Jones W, et al. The SeaSat-A satellite scatterometer [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1977, 22(2): 200-206.
- [4] Attema E P W. The active microwave instrument onboard the ERS-1 satellite [C]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(6): 791-799.
- [5] Naderi F M, Freilich M H, Long G D. Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean-An overview of the NSCAT scatterometer system [C]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79 (6): 850-866.
- [6] Wu C L, Liu Y, Kellogg K H. Design and calibration of the seawind scatterometer [C]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 94-109.
- [7] Figa-Saldana 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]. Cana-

- dian Journal of Remote Sensing*, 2002, **28**(3): 404–412.
- [8] Sudha A K, Prasada Rao C V K. Comparison of oceansat-2 scatterometer winds with buoy observations over the Indian Ocean and the Pacific Ocean [J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, **4**(2): 171–179.
- [9] Gadad S, Deka P C. Comparison of Oceansat-2 Scatterometer-to Buoy-Recorded winds and spatial distribution over the arabian sea during the monsoon period [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, **36**(18): 4632–4651.
- [10] Wang H, Zhu J, Lin M, 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.
- [11] 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.
- [12] Xu Y, Liu J, Xie L, et al. China-France Oceanography Satellite (CFOSAT) simultaneously observes the typhoon-induced wind and wave fields [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, **38**(11): 158–161.
- [13] 孙伟伟, 杨刚, 陈超, 等. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析 [J]. *遥感学报*, 2020, **24**(5): 479–510.
- [14] 李艳兵, 黄思训, 翟景秋. 卫星反演风场进展概述 [J]. *气象科学*, 2009, **29**(2): 277–284.
- [15] 崔林丽, 郭巍, 葛伟强, 等. FY-4A 卫星云顶参数精度检验及台风应用研究 [J]. *高原气象*, 2020, **39**(1): 196–203.
- [16] 张毅, 蒋兴伟, 林明森, 等. 星载微波散射计的研究现状及发展趋势 [J]. *遥感信息*, 2009, **24**(6): 87–94.
- [17] 冷洪泽, 曹航, 胡瑞生, 等. 中法海洋卫星散射计风场资料融合与检验 [J]. *大气科学*, 2024, **48**(3): 1233–1246.
- [18] 宋超辉, 王楠, 王阔, 等. 基于 1988–2017 年 CCMP 数据的浙江沿海海表风速变化及成因 [J]. *大气科学学报*, 2019, **42**(4): 562–570.
- [19] 中国气象局. 气象卫星定量产品质量评价指标和评估报告要求(QX/T 127–2011) [S]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [20] 毛科峰, 陈希, 李妍, 等. 东中国海域交叉定标多平台合成洋面风场资料的初步评估 [J]. *气象*, 2012, **38**(12): 1456–1463.
- [21] 邹巨洪, 林明森, 潘德炉, 等. QuikSCAT 在台风监测中的应用 [J]. *遥感学报*, 2009, **13**(5): 847–853.
- [22] 陈可鑫, 陈光华, 向纯怡, 等. 基于 MTCSWA 风场资料对西北太平洋热带气旋风场结构的气候统计特征研究 [J]. *气候与环境研究*, 2020, **25**(6): 588–600.