

引用格式: 黄穗, 蔡彦枫, 王俊, 等. 海面风场资料在广东省阳江海上风电场区域的适用性 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 111-123. HUANG Sui, CAI Yanfeng, WANG Jun, et al. Applicability analysis of sea surface wind field data for Yangjiang offshore wind farm in Guangdong Province [J]. Southern energy construction, 2024, 11(6): 111-123. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.12.

海面风场资料在广东省阳江海上风电场区域的适用性

黄穗^{1,2,✉}, 蔡彦枫^{1,2}, 王俊^{1,2}, 周川^{1,2}

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 广东科诺勘测工程有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 为了检验海面风场资料集在阳江海上风电场区域的适用性, 文章对卫星反演资料 (DASCAT) 和再分析资料 (ERA5、FNL) 的 10 m 风场进行了检验评估。[方法] 基于广东省阳江海上风电区域内 4 个站点实测 10 m 风场开展研究。[结果] 分析表明: (1) 风速相关性达 0.8 以上, ERA5 均最高。风速均方根误差在 2.6 m/s 以内, 浅水区中 DASCAT 最优, 深水区中 ERA5 最优。FNL 和 ERA5 在浅水区中出现显著的风速低估现象, DASCAT 风速平均偏差数值小于 FNL 和 ERA5, 其平均风速与实测更接近; (2) 风向相关性达 0.75 以上, 浅水区中 ERA5 最高, 深水区中 FNL 最高。风向均方根误差在 35° 以内, ERA5 误差均最小, 但 DASCAT 和 FNL 更接近实测主导风向; (3) 各风速段下风速均方根误差统计表明: 浅水区中, FNL 在低风速段最小, DASCAT 在中、高风速段最小; 深水区中, ERA5 在全风速段内均最小。对于风速相关性, 浅水区和深水区中, ERA5 在低、中、高风速段均最高, FNL 在高风速段均最高; (4) 浅水区 DASCAT 和 ERA5 风速逐月误差较小且分布比较接近, 4~5 月和 10 月为峰值; 深水区 ERA5 误差最小, 7 月为峰值, 12 月~次年 1 月为谷值; (5) 10 m 多年平均风速分布特征均表现为风速自北向南、自西向东递增, 在浅水区以内风速梯度较大。[结论] 总体而言, ERA5 的 10 m 海面风场资料集在研究区域内表现较好, 其平均风速系统性偏低的不足可以通过 DASCAT 进行修正。

关键词: 海面风场; 海上风电; DASCAT; ERA5; FNL; 适用性研究

中图分类号: TK89; P413

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)06-0111-13

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.12

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Applicability Analysis of Sea Surface Wind Field Data for Yangjiang Offshore Wind Farm in Guangdong Province

HUANG Sui^{1,2,✉}, CAI Yanfeng^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, ZHOU Chuan^{1,2}

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. Guangdong Kenuo Surveying Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] In order to test the applicability of sea surface wind field data set in Yangjiang offshore wind farm area, this paper tests and evaluates the 10 m wind field of daily gridded advanced scatterometer (DASCAT), European centre for medium-range weather forecasts reanalysis v5 (ERA5) and final reanalysis data (FNL). [Method] The research was based on the 10 m wind fields at four sites in the Yangjiang offshore wind farm area in Guangdong province. [Result] The results demonstrate five points: (1) The wind speed correlations are above 0.8, with ERA5 the highest. The RMSE of wind speed are within 2.6 m/s, with DASCAT being the best in

收稿日期: 2023-09-11 修回日期: 2023-10-23 网络首发日期: 2024-05-17

基金项目: 广东省级促进经济高质量发展海洋专项“海上风电桩基础及海缆稳定性动态监测一体化设备研发”(GDNRC[2021]41); 中国能建广东院科技项目“广东省海上风电海洋水文气象信息预报关键技术研究”(GSKJ2-W01-2021)

SWZ and ERA5 being the best in DWZ. Both FNL and ERA5 show significant underestimation of wind speed in SWZ, while DASCAT has smaller mean wind speed deviation than those of FNL and ERA5, and ERA5 mean wind speed is closer to those of observation. (2) The wind direction correlation reaches more than 0.75, with ERA5 being the highest in SWZ and FNL being the highest in DWZ. The RMSE of wind direction are within 35° , and ERA5 errors are the minimum. However, DASCAT and FNL are both closer to the observed predominant wind direction. (3) The statistics of the RMSE of wind speed in each wind speed period show that FNL is the minimum in the low wind speed period while DASCAT is the minimum in the medium and high wind speed periods in SWZ. ERA5 is the minimum in all wind speed period in DWZ. In both SWZ and DWZ, ERA5 has the highest wind speed correlation in both the low and medium wind speed periods, and FNL has the highest wind speed correlation in the high wind speed period. (4) The monthly wind speed errors of DASCAT and ERA5 are small and distributed relatively close to each other in SWZ, with peaks in April-May and October; ERA5 errors are smallest in DWZ, with a peak in July and a trough in December-January of the following year. (5) The distribution characteristics of the multi-year average wind speed for 10 m show that the wind speed increases from north to south and from west to east, and the wind speed gradient is large in SWZ. [Conclusion] Overall, the 10 m sea surface wind field data set of ERA5 performs better in the study area, and the deficiency of its systematic low mean wind speed can be corrected by DASCAT.

Key words: sea surface wind field; offshore wind farm; DASCAT; ERA5; FNL; applicability research

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着广东省海上风电重点建设基地规划的实施,海上风能资源评估等工作显得日益迫切。由于海上观测站点较为稀疏、历史观测资料较为匮乏,海洋观测能力尚不能完全满足海上风电工程的实际应用。近年来,再分析数据和卫星反演资料逐渐成为了重要的海面风场格点数据,为海上风场分布特征的研究提供了参考。评估再分析数据和卫星反演资料在海上风电工程区域的适用性,对于海上风电工程前期资源普查和规划选址等工作具有重要的现实意义。

再分析数据融合了多种观测资料和过去的短期天气预报结果重新生成天气综合资料集,是对历史的气候和天气的最完整地展示。目前欧洲中期预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的再分析资料集(ERA5^[1])和美国气象环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的再分析资料集(FNL)的数据质量位于全球领先水平^[2-4]。卫星遥感技术起源于 20 世纪 60 年代,随着科技发展,卫星遥感资料因其具备的空间覆盖面大、分布均匀等优势,可以部分代替实测资料,在一定程度上弥补了海洋观测资料不足的缺点^[5-7]。美国微波散射计(Advanced Scatterometer, ASCAT)具有较优的性能,其反演风场较为广泛应用;DASCAT 属于 ASCAT 卫星资料的二级产品,是使

用算法和资料融合形成的 ASCAT 逐日分辨率的格点风场资料。

国内外学者对再分析数据和卫星反演资料在海上的适用性开展了大量检验评估工作。研究表明^[8-10], ERA5 和 FNL 再分析数据在中国近海具有较高可信度,可以较好表现出海面风场的分布特点和变化特征,但存在低估实际风速的系统偏差。国外学者^[11-12]利用海上浮标资料检验了 DASCAT 卫星反演风场集的适用性,研究表明 DASCAT 在热带印度洋具有较好的适用性,可以替代 QuickSCAT 产品,而在朝鲜半岛海域 DASCAT 和 ECMWF 资料准确度较好。国内学者^[13-16]主要利用海上浮标资料检验了 ASCAT 风场产品的适用性,研究表明 ASCAT 在中国近海具有较好适用性,离岸较远的海域效果优于离岸较近的海域。然而,目前 DASCAT 风场资料集在中国近海的适用性检验研究尚不足。国内对再分析数据和卫星反演资料适用性研究工作主要基于海洋局的浮标资料,其布放位置在海上风电场区域内非常稀疏,使得研究区域通常较大以获得足够的统计样本。海上风电规划建设的区域主要在水深 50 m 以内的近海区域,受限于实测资料的不足,目前针对海面风场资料在海上风电区域内的研究工作仍然不足。

为了检验再分析数据和卫星反演的海面风场资料在广东省阳江海上风电场区域的适用性,文章采

用阳江海上风电场区域内4个风电场测站测风资料,对ERA5、FNL再分析数据和DASCAT卫星反演的10 m风场资料开展检验评估工作,为后续实际工程应用提供科学依据。

1 资料和方法

1.1 资料

1.1.1 观测资料

文章选用广东省阳江海上风电场区域内的2座海上测风塔和2个海上漂浮式激光雷达实际测风资料。所选测风点分布情况如图1所示,测风点均位于宽阔的海面上,距离海岸线约60 km范围内,水深在50 m以内。

海上测风塔一共2座(AT1、AT2),位于阳江海域近海浅水区(水深小于35 m,下称“浅水区”)。测风塔类型为桁架式测风塔,塔高均为100 m。测风塔上分别安装了2套德国Ammonit公司的测风设备,2个支臂安装朝向分别为东南向(135°)和西北向(315°)。在2个支臂上离海面不同高度安装了风速、

风向传感器,以达到采集高质量测风数据目的,可实现风场观测的高度层如表1所示。

海上漂浮式激光雷达一共2个(PF1、PF2),分别固定安装在浮标平台上,浮标投放在阳江海域近海深水区(水深35~50 m,下称“深水区”)。激光雷达型号均为英国ZephIR公司的连续波海上激光雷达ZX300M,其风场观测高度可覆盖10~300 m,风速分辨率小于0.1 m/s,风向分辨率小于0.5°。激光雷达可实现风速、风向同层观测,观测的高度层见表1。激光雷达出厂前均经过DNV-G分级认证测试和质检认证。PF2激光雷达由于受到浮标平台供电不稳定因素影响,导致数据完整性相对较低,但可满足国家规范(GB/T 37523—2019)^[17]对测风资料完整率的要求。

1.1.2 格点资料

被检验的格点资料包括DASCAT卫星反演资料,ERA5和FNL再分析资料。卫星反演资料是由法国海洋开发研究院(Bentamy等^[18])制作的ASCAT日平均海面10 m风场资料集(DASCAT),

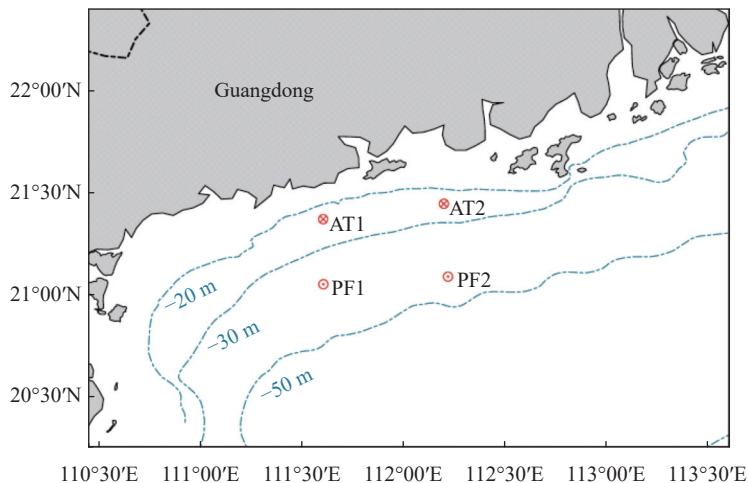


图1 所选测风站点分布示意图(蓝色虚线表示水深,单位:m)

Fig. 1 The distribution schematic of wind measurement stations (blue dash lines indicate the ocean depth, units: meter)

表1 所选测风站点情况

Tab. 1 Information of wind measurement station

类型	站名	风速测量高度/m	风向测量高度/m	测风仪器	测风时段	数据完整率/%	水深/m
海上测风塔	AT1	20/50/60/70/80/90/100	20/50/60/80/100	风速: 德国Ammonit	2016.01 ~ 2016.12	100.0	25
	AT2	20/30/50/70/80/90/100	20/50/70/100	风向: 德国First Class	2016.01 ~ 2017.12	100.0	28
海上漂浮式激光雷达	PF1	13/41/60/80/100/120/130/140/160/180/200		英国ZephIR-ZX300M	2022.01 ~ 2022.12	98.90	40
	PF2	13/30/41/50/70/80/90/100/110/120/200			2020.04 ~ 2021.03	76.44	45

属于 ASCAT 卫星资料的二级产品。该海面风场资料集使用 COARE3.0 算法,融合 ECMWF 逐 6 h 分析资料对 ASCAT L2b 卫星产品进行加工,生成全球格点海面 10 m 高度等效中性稳定层结风场资料,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为逐日,该产品生成时间滞后实际时间 48 h。ASCAT 散射计作为欧洲航天局发射的 Metop 系列极轨卫星上携带的仪器,实质是一种使用垂直极化天线的实测孔径雷达,工作频率为 C 频段(5.3 GHz),该波段的电磁波能穿透云层,受云雨影响小,是全天候遥感器,因此 ASCAT 成为目前观测海洋表面风场的最重要的卫星散射计仪器之一。

ERA5 是 ECMWF 第五代大气再分析资料集,通过 ECMWF 综合预测系统(IFS)的 CY41R2 中的四维变分数据同化产生的,垂直方向具有 137 个混合 sigma/pressure(模型)层次,最高水平为 0.01 hPa。本文所使用的是 ERA5 再分析单层的 10 m 风场资料,数据空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为逐小时。

FNL 是由美国气象环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合制作的再分析资料集,采用先进的全球资料同化系统和完善的数据库,对各种来源(地面、船舶、无线电探空、测风气球、飞机、卫星等)的观测资料进行质量控制和同化处理。文章所使用的是 FNL 再分析数据中海面 10 m 风场资料集,数据空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率为逐 6 h。

采用距离平方反比权重插值方法,将 DASCAT、ERA5 和 FNL 格点风场插值到各测风站点处,并将 ERA5 和 FNL 处理成逐日数据。

1.2 方法

1.2.1 风速推算

在风力发电领域相关的国家标准(GB/T 37523—2019)中推荐使用幂律法对风速资料进行风速推算。使用海面 50 m 高度层及以下的风速样本进行拟合得到实测低层风切变指数,并根据公式(1)外推至海面 10 m 高度:

$$v_{10} = v_z \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中:

v_{10} ——10 m 高度的订正风速(m/s);

v_z ——高度 z 的实测风速(m/s);

z ——距离 10 m 最近的风速测量高度(m);

α ——50 m 高度层及以下的风速样本拟合的整体风切变指数。

在风力发电领域相关的国际标准(IEC 61400-12-1:2022)^[19]中提出采用风向转向率来描述风向随着高度变化的快慢,其中正的风向转向率表示风向随着高度增加出现顺时针旋转。通过统计海面 50 m 高度层及以下的风向转向率来获得海面 10 m 高度风向数据:

$$\theta_{10} = \theta_{z_1} - \phi_{\text{veer}}(z_1 - 10) \quad (2)$$

$$\phi_{\text{veer}} = (\theta_{z_2} - \theta_{z_1}) / (z_2 - z_1) \quad (3)$$

式中:

θ_{10} ——10 m 高度的订正风向($^\circ$);

ϕ_{veer} ——风向转向率($^\circ/\text{m}$);

z_1, z_2 ——距离 10 m 最近的两层风向测量高度且满足 $z_1 < z_2 \leq 50(\text{m})$;

$\theta_{z_1}, \theta_{z_2}$ ——高度 z_1, z_2 的实测风向($^\circ$),其中 $\theta_{z_2} - \theta_{z_1}$ 的计算过程采用 1.2.2 节风向偏差计算方法。

1.2.2 风向偏差

气象上以风的来流方向定义为风向角度,如 0° 表示北风。因风向为矢量,不能简单直接做减法获取风向偏差,以实况下不同风速下的实际风向作为起点:

$$d\theta = \theta_x - \theta_{\text{obs}} \quad (4)$$

$$d\theta' = \begin{cases} 360 - d\theta, d\theta > 180 \\ d\theta, -180 \leq d\theta \leq 180 \\ 360 + d\theta, d\theta < -180 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

θ_x ——不同资料集的风向($^\circ$);

θ_{obs} ——同一时刻的实际风向($^\circ$)。

根据公式(5)计算得到的风向偏差 $d\theta' > 0$ 表示用于对比的风向相对于实际风向偏向右侧(顺时针方向),变化范围为 $(0^\circ, 180^\circ)$;若计算得到的风向偏差 $d\theta' < 0$ 表示用于对比的风向相对于实际风向偏向左侧(逆时针方向),变化范围为 $(-180^\circ, 0^\circ)$ 。

1.3 检验方法

使用相关系数、标准差、均方根误差等统计指

标对各类海面风速资料进行对比检验。各项统计指标的计算公式如下:

相关系数:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

平均偏差:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (7)$$

标准差:

$$\text{std} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

平均绝对误差:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (9)$$

均方根误差:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (10)$$

变异系数:

$$CV_x = \text{std}_x / \bar{x} \quad (11)$$

式中:

x, y ——不同资料集的相同气象要素;

\bar{x} —— x 所有样本的算数平均值;

n ——资料集统计样本数。

2 风场的误差分析

2.1 站点误差分析

为了分析各资料集的海面风场资料与实际观测值之间的误差特征,分别计算各个测风站点的逐日风场误差结果,并通过标准化的泰勒图进行展示,如图 2 所示。在标准化泰勒图中,不同颜色的数据点代表不同的资料集,对应的数字代表不同的测风站点位。图中各数据点的方位角表示资料集与实测风场之间的相关系数,各数据点与坐标原点的径向距离表示资料集与实测风场之间的归一化标准差,各数据点与横坐标“REF”(观测参考值)点之间的距离表示资料集与实际风场之间的归一化均方根误差。

从图 2(a)可以看出,对于风速而言,PF1、PF2 的各颜色数据点相比 AT1、AT2 的数据点更接近“REF”点,表明各资料集与实测风场的相关系数、均方根误差在深水区的站点(PF1、PF2)均优于浅水区的站点(AT1、AT2)。具体表现为在浅水区,各资料集与实测风场的相关系数达到 0.8 以上,对于同一测风站点而言,ERA5 资料集最优,表现为与实测风场相关性最高、均方根误差最小,其次是 DASCAT 资料集,与实测风场的归一化标准差最优,最后为 FNL 资料集。在深水区,各资料集与实测风场的相关系数均达到

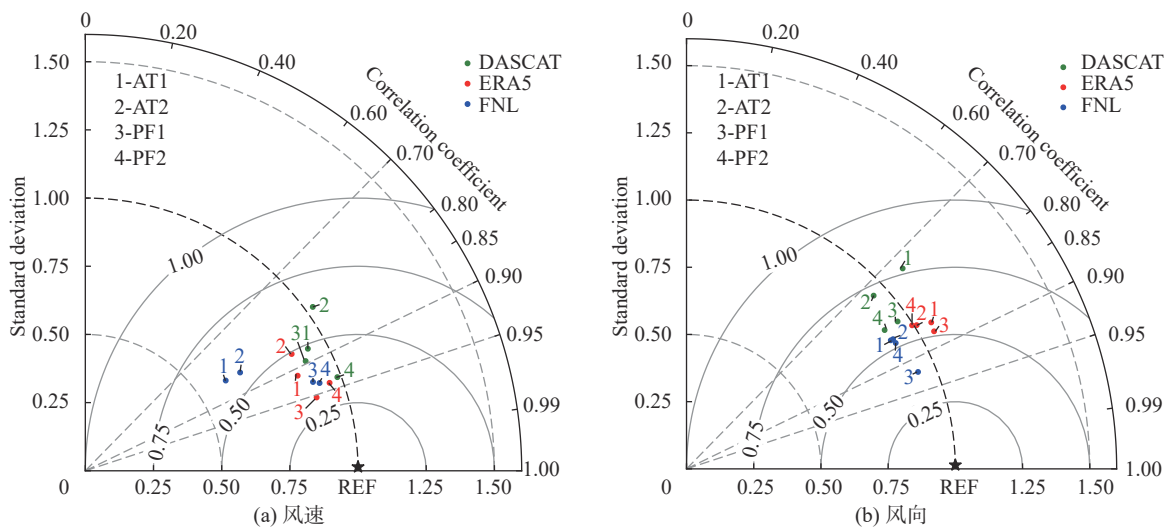


图 2 不同海面风场资料集与实测的风速、风向标准化泰勒图

Fig. 2 Normalized Taylor diagram of actual wind speed and wind direction with data set at different sea surface wind fields

0.85 以上,对于同一测风站点,从与实测风场的相关系数和均方根误差判断,ERA5 资料集最优,其次是 FNL 资料集,然后是 DASCAT 资料集。从图 2(b)可以看出,对于风向而言,风向归一化均方根误差随着水深增大而减小。再分析资料风向的归一化均方根误差和相关系数优于 DASCAT,归一化标准差与 DASCAT 相当。

根据以上分析,风速与风向的统计指标存在较明显的海域差异性,因此将 4 个站点根据水深分为 2 个海区,分别是 AT1、AT2 所在的浅水区和 PF1、PF2 所在的深水区,进一步分析不同水深海区的风场误差特征。

2.2 区域误差分析

2.2.1 整体偏差

从风场相关性及其数值分布区间来看,如图 3 所示,各资料集的风速与实测风速具有较强相关性 ($R>0.8$),相关性随着水深的增加而增加,在浅水区风速相关性在 0.83~0.88,深水区的风速相关性在 0.91~0.95。两个区域内 ERA5 的风速相关性均最高,其次为 FNL 和 DASCAT。在浅水区,实测风速集中在 3~9 m/s, DASCAT 风速集中在 3~8 m/s, ERA5 风速集中在 2.5~7.5 m/s, FNL 风速集中在 2.5~6.5 m/s, FNL 和 ERA5 风速数据拟合线较灰色虚线(实测风速与对比风速相等的线)明显偏低,表明 FNL 和 ERA5 风速存在较为显著的低估现象, FNL 风速主要在实测风速 2 m/s 以上时出现低估, ERA5 主要在实测风速 5 m/s 以上时出现低估,而 DASCAT 风速主要在实测风速 10 m/s 以上时才出现低估。在深水区,各资料集的风速拟合情况均较浅水区有较大提升,再分析资料风速低估现象得到明显改善,体现为实测风速集中在 3~11 m/s, DASCAT 风速集中在 3~10 m/s, ERA5 风速集中在 2.5~10 m/s, FNL 风速集中在 2.5~9 m/s。

各资料集的风向与实测风向具有较强相关性 ($R>0.75$),较同一水域的风速相关性弱。再分析资料在两组风向样本中的相关性均比 DASCAT 高。在浅水区,实测风向集中在 50°~100°, DASCAT 风速集中在 25°~100°, ERA5 风速集中在 25°~80°, FNL 风速集中在 25°~85°。在深水区,实测风向集中在 30°~100°, DASCAT 风速集中在 30°~80°, ERA5 风

速集中在 25°~80°, FNL 风速集中在 25°~80°。

统计风速(表 2)和风向(表 3)的整体偏差情况。各资料集的风速与实测风速的均方根误差随着水深的增加而减小。在浅水区内风速均方根误差在 2.5 m/s 以内,其中 DASCAT 最优,其次为 ERA5 和 FNL;在深水区内风速均方根误差在 1.2 m/s 以内,其中 ERA5 最优,其次为 FNL 和 DASCAT。由此可见,采用日风速序列进行统计的结果表明 ERA5 资料集在浅水区与深水区均具有较好的风速刻画能力。从平均风速数值来看, ERA5 风速较实际值偏低,而 DASCAT 与实测平均风速更接近,相比再分析资料更具有参考意义,尤其位于浅水区。

各资料集的风向与实测风向的均方根误差均在 35°范围内,均方根误差随着水深的增加而减小。ERA5 在两个区域的均方根误差均最小。从各资料集的主导风向分布(16 扇区)来看, DASCAT 和 FNL 相比 ERA5 更接近实测主导风向, ERA5 相比实测主导风向大致有 1~2 个扇区的偏移(22.5°~50°)。阳江地区受广东省海岸线影响,主要以偏东和偏北风为主,各资料集可以大致刻画出风向分布特征。

进一步分析风场偏差的分布特征,如图 4 所示,在浅水区各资料集与实测风速的偏差概率密度分布呈现对称分布。其中, DASCAT 风速偏差为左偏(0.19 m/s),第 5%~95%分位数区间主要集中在 -2.5~2.0 m/s; ERA5 和 FNL 风速偏差分布同样为左偏形态(>0.99 m/s)。在深水区各资料集的表现较浅水区更好,体现在风速偏差概率密度分布更集中,其中 ERA5 和 FNL 为左偏形态(0.34 m/s), DASCAT 为右偏形态(0.09 m/s)。总体而言, DASCAT 风速偏差数值小于再分析资料,与前文 DASCAT 与实测平均风速更接近的结论相一致。

对比不同分组的风向偏差分布,基本以 0°为中心对称分布。从风向平均偏差来看, DASCAT 和 ERA5 在浅水区出现左偏(>4.9°), FNL 则右偏 1.3°;在深水区各资料集的风向较为一致地表现出右偏形态(>2.7°)。

2.2.2 不同风速下的风向偏差

风向偏差样本的离散度在浅水区中随风速增大而明显减小,如图 5 所示,表明各资料集的风向偏差随着实际风速增大而快速减小。在实测风速达 8 m/s

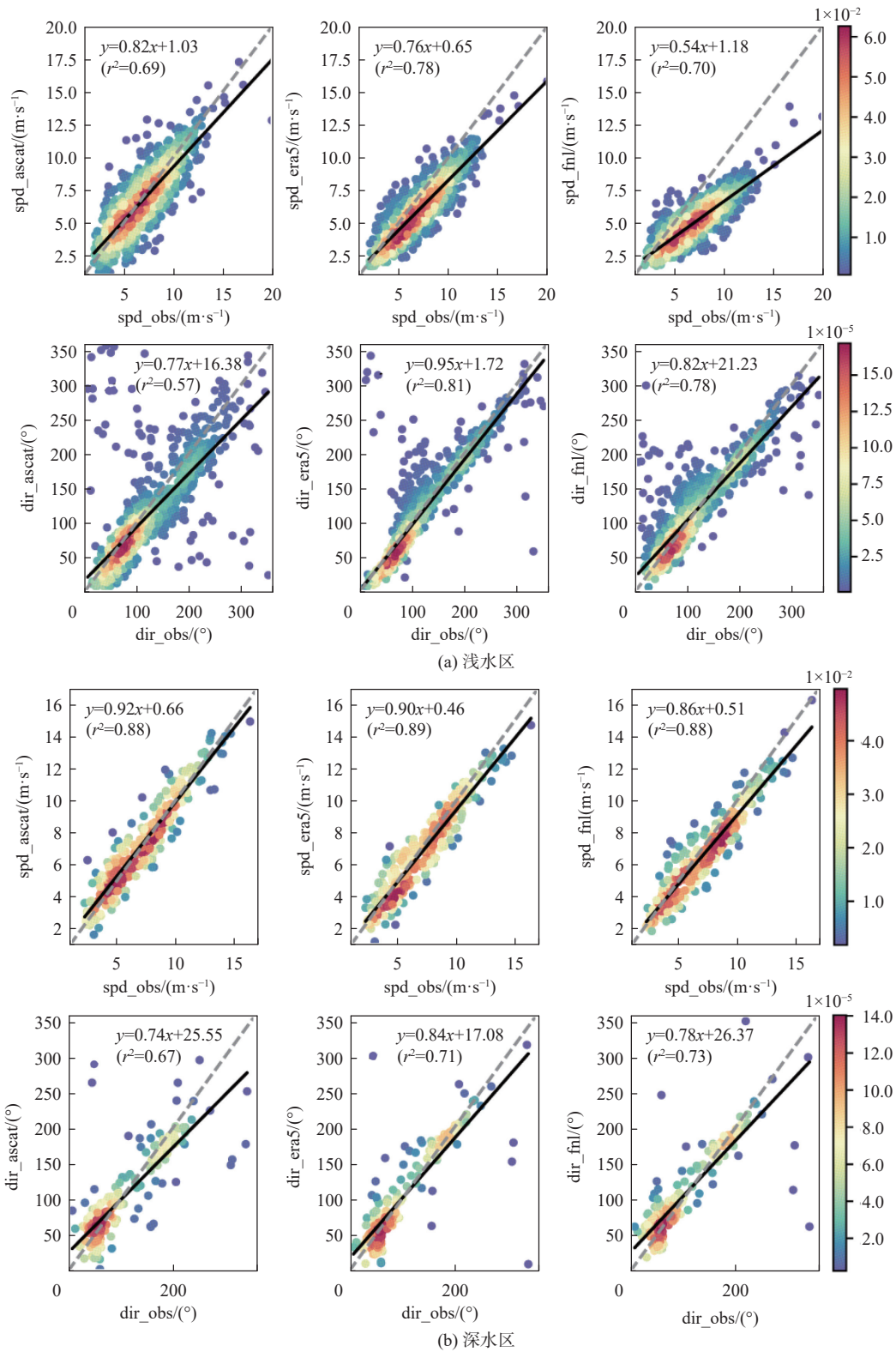


图 3 浅水区、深水区风速、风向散点图

Fig. 3 Scatter plot of wind speed and wind direction samples at SWZ and DWZ

以上的风向偏差分布相对集中,基本分布在第 10% ~ 90% 分位数区间内。DASCAT 风向偏差样本在实测

风速小于 8 m/s 时主要集中在±180°之间,在 8 m/s 以上时主要集中在±30°之间,并且风向偏差样本基

表 2 海面风速资料与实测风速统计结果

Tab. 2 Statistical results of sea surface wind speed data and measured wind speed

分组	测风同期平均风速/(m·s ⁻¹)				相关系数R			平均绝对误差MAE/(m·s ⁻¹)			均方根误差RMSE/(m·s ⁻¹)		
	观测	DASCAT	ERA5	FNL	DASCAT	ERA5	FNL	DASCAT	ERA5	FNL	DASCAT	ERA5	FNL
浅水区	6.83	6.65	5.84	4.89	0.83	0.88	0.84	1.13	1.26	2.06	1.49	1.55	2.43
深水区	7.11	7.19	6.77	6.76	0.91	0.95	0.93	0.90	0.78	0.87	1.17	0.99	1.09

表 3 海面风向资料与实测风向统计结果

Tab. 3 Statistical results of sea surface wind direction data and measured wind direction

分组	测风同期平均风向/(°)				主导风向(16扇区)				相关系数R			均方根误差RMSE/(°)		
	观测	DASCAT	ERA5	FNL	观测	DASCAT	ERA5	FNL	DASCAT	ERA5	FNL	DASCAT	ERA5	FNL
浅水区	84.5	73.6	75.8	90.8	E	ENE	NE	ENE	0.76	0.90	0.88	34.7	23.8	29.9
深水区	71.4	84.0	83.6	92.4	ENE	ENE	NE	ENE	0.82	0.86	0.89	30.9	21.2	25.3

本以 0°为中心对称分布; ERA5 和 FNL 风向偏差样本在实测风速小于 8 m/s 时, 主要集中在 -100° ~ 150°, 在 8 m/s 以上时集中在 ±25° 之间。在深水区, 风向偏差样本离散度和实际风速大小之间没有明显的关系, 在全风速段内风向偏差样本基本分布在第 10% ~ 90% 分位数区间内, 即集中在 ±30° 之间。

2.2.3 不同风速下的风速偏差

根据蒲福风力分级表, 将站点实测风速分为 4 个等级, 即 0 ~ 2 级(低风速, 0 ~ 3.3 m/s)、3 ~ 5 级(中等风速, 3.4 ~ 10.7 m/s)、6 ~ 9 级(高风速, 10.8 ~ 24.4 m/s) 和 10 级以上(强风速, ≥24.5 m/s)。从统计结果来看, 实测海面风速大小范围均分布在 9 级以内, 无 10 级风以上样本。

在 0 ~ 2 级低风速段中, 风速样本量占比 7% ~ 9%。各资料集风速与实测风速相关性较弱, 浅水区 $R < 0.4$, 深水区 $R < 0.5$, 其中浅水区中 FNL 和深水区中 DASCAT 的皮尔逊相关系数显著性水平(p 值) 大于 0.05, 说明此时相关程度不显著。DASCAT 和 ERA5 风速平均偏差在两组分区样本中均为正值, FNL 的风速平均偏差为负值。再分析数据在低风速段中表现优于 DASCAT。

在 3 ~ 5 级中等风速段中, 风速样本量最大, 占比 81% ~ 86%。各资料集风速相关性较高, 浅水区相关系数在 0.75 ~ 0.82, 深水区相关系数在 0.86 ~ 0.89。在浅水区, 风速平均偏差均为负值, 其中 DASCAT 最小(ME = -0.18 m/s), 风速均方根误差 DASCAT < ERA5 < FNL; 在深水区, DASCAT 风速平均偏差均为

正值, ERA5 和 FNL 为负值, 风速均方根误差 ERA5 < DASCAT < FNL。在中等风速段中, DASCAT 和 ERA5 表现接近, 优于 FNL。

在 6 ~ 9 级高风速段中, 风速样本量占比 7% ~ 10%。再分析资料在浅水区和深水区的相关性 ($R > 0.8$) 均明显高于 DASCAT。DASCAT、ERA5 和 FNL 的风速平均偏差均为负值, 说明各风速资料集在高风速段均出现低估现象, 其中 FNL 对风速低估程度最大, 其次是 ERA5, DASCAT 最小。在浅水区中 DASCAT 均方根误差最小, 在深水区中 ERA5 均方根误差最小。在高风速段中, 再分析数据相关性明显优于 DASCAT, 但在浅水区 DASCAT 的误差最小, 如表 4 所示。

2.2.4 风速误差的逐月变化

利用变异系数来表示资料集风速均方根误差逐月分布的离散程度, 变异系数越小表明离散程度越低。统计结果表明, 变异系数在浅水区中为 FNL (10%) < ERA5 (11%) < DASCAT (18%), 在深水区中为 FNL (14%) < DASCAT (16%) < ERA5 (18%), 结合风速均方根误差数据, 说明 FNL 的风速均方根误差逐月变化稳定在一个大值, ERA5 和 DASCAT 在相对 FNL 误差小的数值内波动变化。从误差数值来看, 浅水区整体大于深水区。在浅水区, FNL 的风速均方根误差在 10 月至次年 1 月较大, 逐月平均值为 2.41 m/s, 较另外两套资料集大; DASCAT 和 ERA5 的误差分布比较接近, 平均值分别为 1.46 m/s 和 1.53 m/s, 误差曲线呈现双峰形态, 4 ~ 5 月和 10 月为误差峰值。在深水区, DASCAT 和 ERA5 的

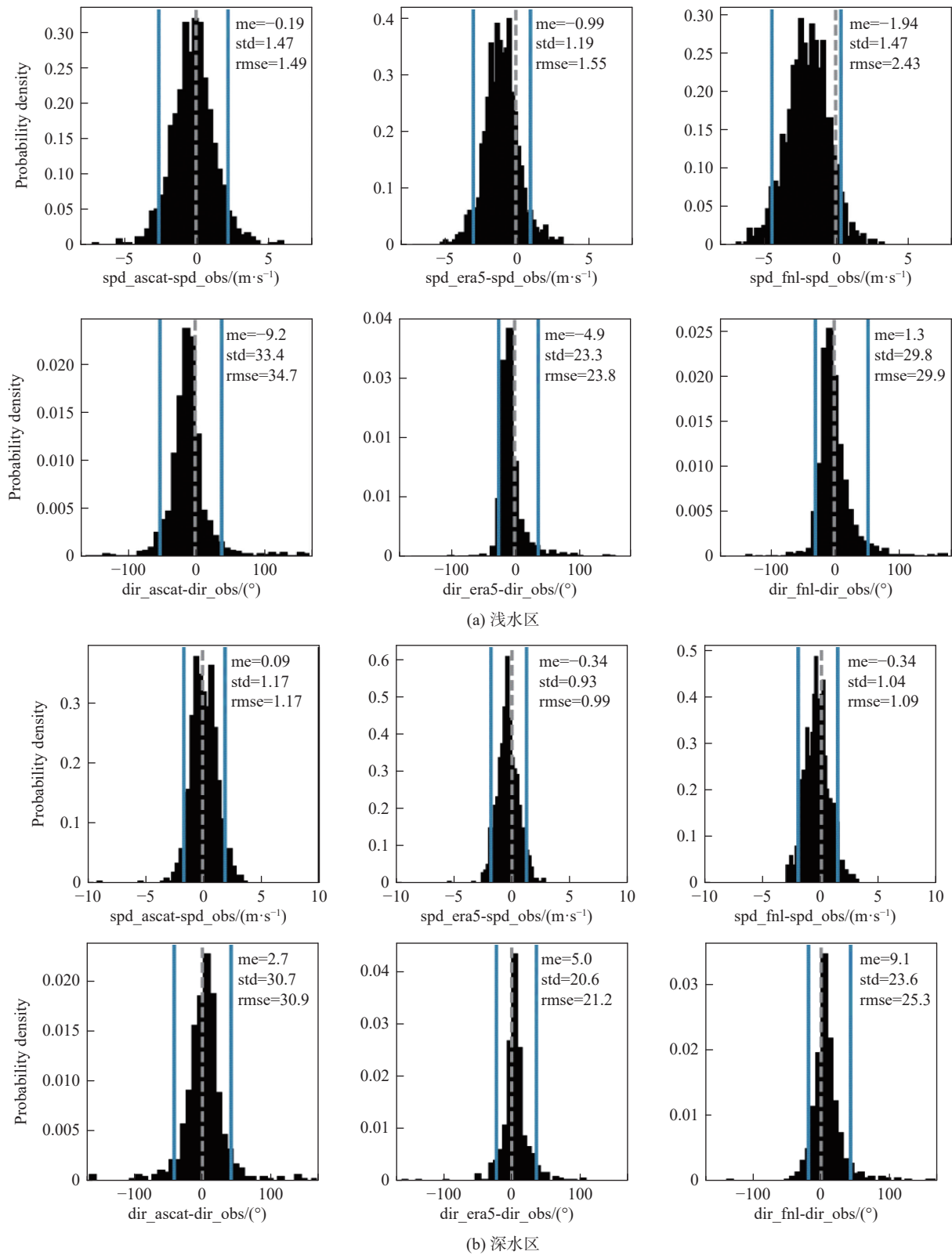


图 4 浅水区、深水区风速、风向偏差概率密度分布直方图(左右蓝色实线分别表示第 5 和第 95 分位数)

Fig. 4 Probability density distribution histogram of wind speed and wind direction deviation at SWZ and DWZ (the blue solid lines on both sides represent the 5th and 95th quantiles respectively)

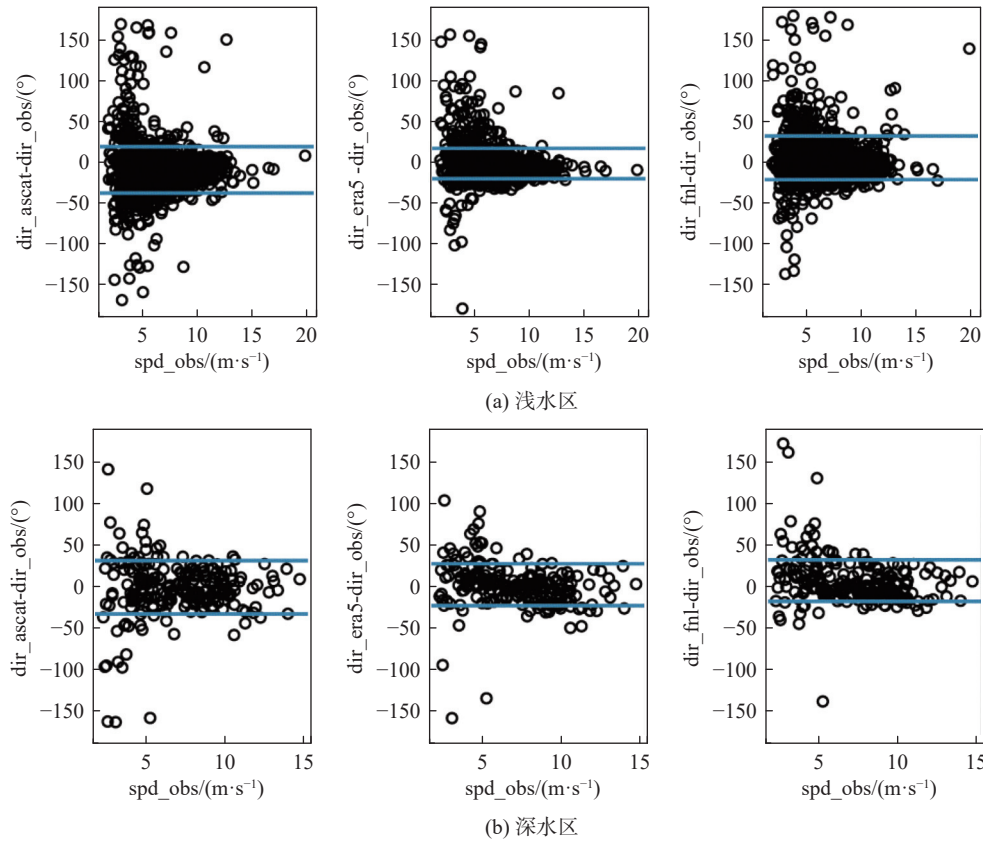


图 5 海面风向资料集在浅水区、深水区与实测风向偏差散点图(上下蓝色实线分别表示第 90 和第 10 分位数)
 Fig. 5 Scatter plot of deviation between sea surface wind direction data set and measured wind direction in SWZ and DWZ
 (the blue solid lines above and below represent the 90th and 10th quantiles respectively)

表 4 海面风速资料与实测风速分段下偏差结果

Tab. 4 Lower deviation of sea surface wind speed data and measured wind speed periods

资料集	风级分组	浅水区					深水区				
		<i>n</i>	<i>R</i>	<i>p</i> 值	ME/(m·s ⁻¹)	RMSE/(m·s ⁻¹)	<i>n</i>	<i>R</i>	<i>p</i> 值	ME/(m·s ⁻¹)	RMSE/(m·s ⁻¹)
DASCAT	0~2级	73	0.25	0.03	0.47	1.27	58	0.23	0.08	0.79	1.35
	3~5级	937	0.75	6.9E-168	-0.18	1.46	519	0.87	6.0E-161	0.09	1.06
	6~9级	76	0.60	1.3E-8	-1.01	1.88	62	0.46	1.6E-4	-0.65	1.75
	>10级	0	—	—	—	—	0	—	—	—	—
ERA5	0~2级	74	0.32	5.9E-3	0.11	0.90	58	0.35	6.4E-3	0.06	0.66
	3~5级	947	0.82	1.3E-234	-0.98	1.49	523	0.89	3.4E-184	-0.31	0.97
	6~9级	76	0.80	8.3E-18	-2.24	2.48	62	0.82	6.3E-16	-1.00	1.35
	>10级	0	—	—	—	—	0	—	—	—	—
FNL	0~2级	74	0.16	0.19	-0.14	0.89	58	0.48	1.2E-4	0.19	0.64
	3~5级	947	0.75	3.1E-171	-1.90	2.30	523	0.86	1.8E-153	-0.32	1.10
	6~9级	76	0.82	1.5E-19	-4.24	4.33	62	0.88	5.44E-21	-1.02	1.38
	>10级	0	—	—	—	—	0	—	—	—	—

误差分布趋势较为接近, 主要表现为 7 月份为误差峰值, 12 月至次年 1 月为误差谷值, 3 种资料集中 ERA5 均方根误差平均值更优(0.97 m/s)。

如图 6 所示, DASCAT 在深水区内 7~8 月出现较大的均方根误差的原因在于热带气旋的影响。阳江海域在 2022 年 7 月受到 2203 号台风“暹巴”影响, PF1 站点于 7 月 2 日出现了最大日平均风速, 而 DASCAT 的峰值出现在前一天; 在 2022 年 8 月受到 2209 号台风“马鞍”影响, PF1 站点于 8 月 25 日出现了最大

日平均风速, 而 DASCAT 的峰值同样出现在前一天, 体现了 DASCAT 资料集在热带气旋影响期间的局限性, 其原因可以解释为卫星观测到的是一种消除了大气层结状态影响的参考风, 表示的是海面 10 m 高的等效中性稳定层结风^[20]。FNL 在均方根误差平均值上介于 ERA5 和 DASCAT 中间, 在春、冬季误差较大, 夏、秋季节误差以波动为主, FNL 在热带气旋影响期间的表现较好, 具体表现为: PF1 站点最大日平均风速实测为 19.51 m/s, FNL 为 20.54 m/s, 出现在 2203 号台风“暹巴”影响过程中, 最大日平均风速实测为 13.32 m/s, FNL 为 12.01 m/s, 出现在 2209 号台风“马鞍”影响过程中; PF2 站点最大日平均风速实测为 16.42 m/s, FNL 为 16.30 m/s, 出现在 2016 号台风“浪卡”影响过程中。

3 风场的空间分布特征

广东省阳江市位于热带和亚热带季风气候区, 夏季盛行西南季风和东南季风, 冬季盛行东北季风。从统计的阳江海域 10 m 多年(2016~2022 年)平均风速分布图来看, 如图 7 所示, 各资料集的 10 m 平均风速分布形态与海岸线近于平行, 基本呈现自北向南、自西向东递增趋势, 在浅水区以内风速梯度较大。从平均风速大小来看, DASCAT>ERA5>FNL, 表现为浅水区 DASCAT、ERA5 和 FNL 风速分布范围分别在 6.4~6.8 m/s、5.6~6.4 m/s 和 4.4~6.2 m/s; 深水区 DASCAT、ERA5 和 FNL 风速分布范围分别在 6.6~7.0 m/s、6.4~6.8 m/s 和 5.4~6.6 m/s。

从 4 个测风站点 10 m 高度平均风速与各资料

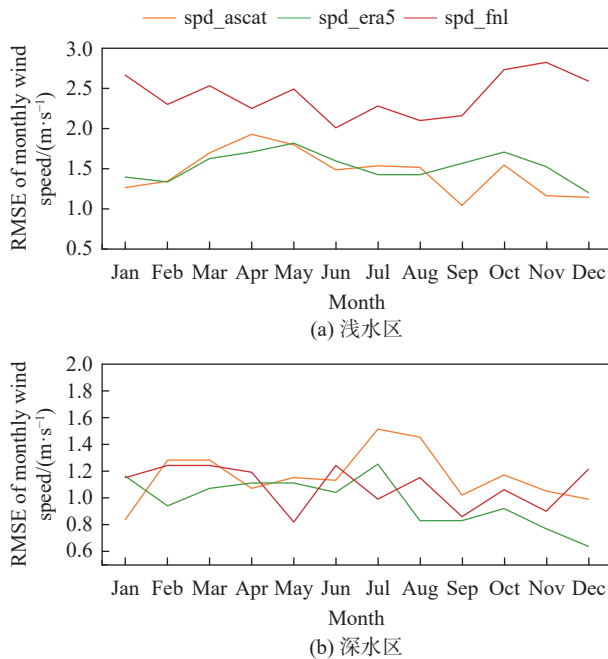


图 6 浅水区、深水区月平均风速均方根误差图
Fig. 6 RMSE of monthly average wind speed at SWZ and DWZ

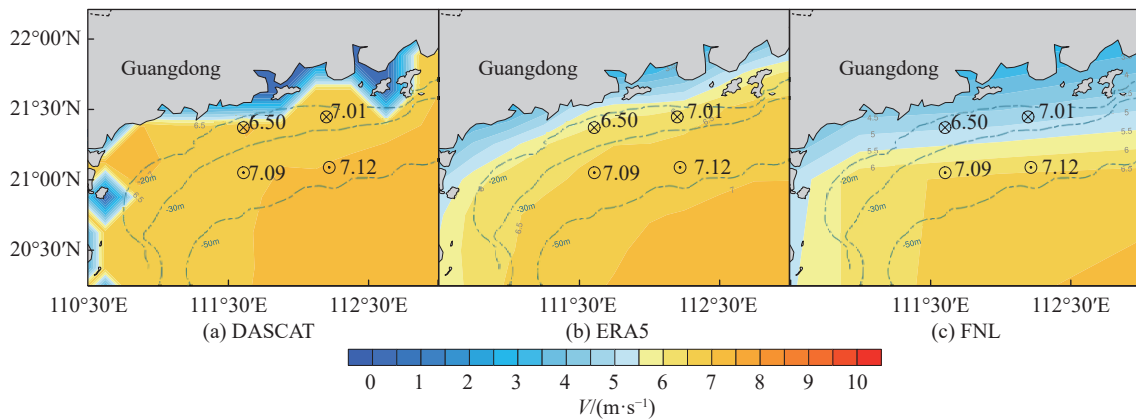


图 7 DASCAT、ERA5、FNL 海面 10 m 多年平均(2016~2022 年)风速空间分布图
Fig. 7 Spatial distribution of 2016~2022 averaged wind speed at 10 m of DASCAT, ERA5 and FNL

集在不同测风点位的多年平均风速的对比,在空间分布上 ERA5 更具优势,即风速自北向南、自西向东增大,且风速梯度方向基本与海岸线平行,与 4 个测风站点风速梯度方向更吻合;在平均风速数值上 DASCAT 具有优势,即 DASCAT 在阳江海上风电区域内的多年平均风速与实际观测的平均风速更接近,而 ERA5 和 FNL 偏小。

4 结论

文章选用广东省阳江海域内海上测风塔和漂浮式激光雷达的现场测风资料,分别对 DASCAT 卫星反演、ERA5 和 FNL 再分析资料的 10 m 风场资料开展了区域适用性评估工作,取得主要的结论如下:

1) 3 种资料集的风速和风向相关性分别达 0.8 和 0.75 以上。风速相关性 ERA5 均最高;风向相关性在浅水区中 ERA5 最高,深水区中 FNL 最高。风速和风向均方根误差分别在 2.6 m/s 和 35° 以内。风速均方根误差在浅水区中 DASCAT 最优,深水区中 ERA5 最优。FNL 和 ERA5 在浅水区中出现显著的风速低估现象;DASCAT 风速平均偏差数值在浅水区和深水区均小于 FNL 和 ERA5,其平均风速与实测更接近。风向均方根误差 ERA5 均最小,且 ERA5 风向平均偏差样本在不同风速下的分布相比 DASCAT 和 FNL 更集中,但 DASCAT 和 FNL 更接近实测主导风向。

2) 各风速段下风速均方根误差统计表明,浅水区中, FNL 在低风速段最小, DASCAT 在中、高风速段最小;深水区中, ERA5 在全风速段内均最小。对于风速相关性,浅水区和深水区中, ERA5 在低、中、高风速段均最高, FNL 在高风速段均最高。风速误差逐月变化的分析发现,浅水区内 DASCAT 和 ERA5 风速逐月误差较小且分布比较接近,4~5 月和 10 月为风速误差峰值;深水区中 ERA5 误差最小,7 月为风速误差峰值,12 月至次年 1 月为风速误差谷值。讨论发现 DASCAT 在深水区 7~8 月出现较大的均方根误差的原因在于热带气旋的影响。

3) 3 种风场资料集的 10 m 多年平均风速分布特征均表现为风速自北向南、自西向东递增,在浅水区以内风速梯度较大。与 4 个测风站点 10 m 高度平均风速的对比发现, ERA5 更好地展示了实测风速梯度的空间变化, DASCAT 更接近实测平均风速数值。

总体而言, ERA5 的 10 m 风场资料在研究区域内相比 DASCAT 和 FNL 适用性更高,但 DASCAT 和 FNL 在不同的场景下也有各自的优势。研究成果可以为格点风场资料在阳江海域的海上风电工程应用提供一定的参考依据。例如,实际工程应用中,当项目离岸较远或国家气象站资料风速相关性较差时,可以考虑采用相关性较优的 ERA5 风速数据对现场短期测风数据进行插补;在风速代表年订正中,可以考虑使用 DASCAT 多年平均风速值先对 ERA5 多年风速序列进行均值订正,再对短期测风资料进行代表年订正处理。文章是基于阳江海域内 4 个风电场的实测风场开展检验工作,随着海上风电项目的进一步发展,日后可以搜集更多风电场区内的实测资料,开展更为细致的研究工作。

参考文献:

- [1] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 2020, 146(730): 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- [2] TAREK M, BRISSETTE F P, ARSENAULT R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America [J]. *Hydrology and earth system sciences*, 2020, 24(5): 2527-2544. DOI: 10.5194/hess-24-2527-2020.
- [3] VANELLA D, LONGO-MINNOLO G, BELFIORE O R, et al. Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy [J]. *Journal of hydrology: regional studies*, 2022, 42: 101182. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101182.
- [4] CARVALHO D, ROCHA A, GÓMEZ-GESTEIRA M, et al. WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: comparison with observed data for Portugal [J]. *Applied energy*, 2014, 117: 116-126. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.001.
- [5] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0827.2009.02.022.
- [5] LI Y B, HUANG S X, ZHAI J Q. A review of satellite wind retrieval technologies [J]. *Journal of the meteorological sciences*, 2009, 29(2): 277-284. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0827.2009.02.022.
- [6] 潘咏, 宇婧婧, 廖捷, 等. 地面和卫星降水产品对台风莫拉克降水监测能力的对比分析 [J]. *气象*, 2011, 37(5): 564-570. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2011.5.007.
- [6] PAN Y, YU J J, LIAO J, et al. Assessment on the rainfall monitoring of typhoon Morakot by ground-gauged and satellite precipitation products [J]. *Meteorological monthly*, 2011, 37(5): 564-570. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2011.5.007.
- [7] 谢小萍, 魏建苏, 黄亮. ASCAT 近岸风场产品与近岸浮标观测风场对比 [J]. *应用气象学报*, 2014, 25(4): 445-453. DOI: 10.

- 3969/j.issn.1001-7313.2014.04.007.
XIE X P, WEI J S, HUANG L. Evaluation of ASCAT coastal wind product using nearshore buoy data [J]. *Journal of applied meteorological science*, 2014, 25(4): 445-453. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2014.04.007.
- [8] 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. DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2022.051.
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. DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2022.051.
- [9] 陈君芝, 施晓晖, 温敏. ERA5 再分析 10 m 风速数据在“两洋一海”的适用性分析 [J]. *气象*, 2023, 49(1): 39-51. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.072301.
CHEN J Z, SHI X H, WEN M. Applicability of ERA5 surface wind speed data in the region of "two oceans and one sea" [J]. *Meteorological monthly*, 2023, 49(1): 39-51. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.072301.
- [10] 刘解明, 熊学军, 宫庆龙, 等. 4 种表层风场资料在北半球海域的适用性评估 [J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(1): 38-50. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.01.005.
LIU X M, XIONG X J, GONG Q L, et al. Applicability evaluation of four surface wind products in the northern hemisphere sea area [J]. *Advances in marine science*, 2020, 38(1): 38-50. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.01.005.
- [11] SIVAREDDY S, RAVICHANDRAN M, GIRISHKUMAR M S. Evaluation of ASCAT-Based daily gridded winds in the tropical Indian ocean [J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 2013, 30(7): 1371-1381. DOI: 10.1175/JTECH-D-12-00227.1.
- [12] PARK J, KIM D W, JO Y H, et al. Accuracy evaluation of daily-gridded ASCAT satellite data around the Korean Peninsula [J]. *Korean journal of remote sensing*, 2018, 34(2-1): 213-225. DOI: 10.7780/kjrs.2018.34.2.1.5.
- [13] 张增海, 曹越男, 刘涛, 等. ASCAT 散射计风场在我国近海的初步检验与应用 [J]. *气象*, 2014, 40(4): 473-481. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.04.010.
ZHANG Z H, CAO Y N, LIU T, et al. Preliminary validation and application of ASCAT scatterometer retrieved winds over China offshore seas [J]. *Meteorological monthly*, 2014, 40(4): 473-481. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.04.010.
- [14] 高留喜, 朱蓉, 常蕊, 等. QuikSCAT 和 ASCAT 卫星反演风场在中国南海北部的适用性研究 [J]. *气象*, 2014, 40(10): 1240-1247. DOI: 10.7519/j.issn.10000526.2014.10.008.
GAO L X, ZHU R, CHANG R, et al. Applicability research using QuikSCAT and ASCAT satellite inversion wind data in the northern part of South China Sea [J]. *Meteorological monthly*, 2014, 40(10): 1240-1247. DOI: 10.7519/j.issn.10000526.2014.10.008.
- [15] 柳婧, 宋晓姜, 王彰贵. 中国近海 ASCAT 和 ERA-Interim 风场资料的评估 [J]. *海洋预报*, 2019, 36(1): 10-19. DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2019.01.002.
LIU J, SONG X J, WANG Z G. Evaluation of ASCAT and ERA-Interim wind data over China offshore seas [J]. *Marine forecasts*, 2019, 36(1): 10-19. DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2019.01.002.
- [16] 郭春迓, 钟水新, 胡亮, 等. ASCAT 反演风场与华南及南海站点观测对比分析 [J]. *热带气象学报*, 2020, 36(4): 508-517. DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2020.047.
GUO C Y, ZHONG S X, HU L, et al. Comparative analysis of ASCAT inversion winds and AWS observations in the South China Sea [J]. *Journal of tropical meteorology*, 2020, 36(4): 508-517. DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2020.047.
- [17] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 风电场气象观测资料审核、插补与订正技术规范: GB/T 37523—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for data inspection and correction of wind power plant meteorological observation: GB/T 37523—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [18] BENTAMY A, FILLON D C. Gridded surface wind fields from Metop/ASCAT measurements [J]. *International journal of remote sensing*, 2012, 33(6): 1729-1754. DOI: 10.1080/01431161.2011.600348.
- [19] International Electrotechnical Commission. Wind energy generation systems-Part 12-1: power performance measurements of electricity producing wind turbines: IEC 61400-12-1: 2022 [S]. Geneva: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022.
- [20] 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. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.001.
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 & technology*, 2017, 7(4): 6-11. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.001.

作者简介:



黄穗

黄穗(第一作者, 通信作者)

1993-, 男, 工程师, 气象学专业硕士, 主要从事电力工程水文气象资源评估工作(e-mail) huangsui@gedi.com.cn。

蔡彦枫

1986-, 男, 高级工程师, 大气物理学与大气环境专业硕士, 主要从事电力工程水文气象资源评估工作(e-mail) caiyanfeng@gedi.com.cn。

王俊

1983-, 男, 高级工程师, 水力学及河流动力学专业硕士, 主要从事电力工程水文气象勘测与资源评估工作(e-mail) wangjun@gedi.com.cn。

周川

1986-, 男, 高级工程师, 水文及水资源专业硕士, 主要从事电力工程水文气象勘测与资源评估工作(e-mail) zhouchuan@gedi.com.cn。

(编辑 徐嘉铨)