

主流海表风场资料在舟山群岛近海的性能评估*

刘紫薇¹ 赵帅康¹ 魏笑然¹ 白晔斐^{1, 2}

(1. 浙江大学海洋学院 浙江舟山 316021; 2. 海南浙江大学研究院 海南三亚 572024)

摘要 再分析风场资料已广泛应用于我国舟山群岛海域可再生能源评估、海洋灾害预防决策以及港口运维和船舶运输等涉海发展领域,然而不同业务机构所提供的再分析数据在舟山近海的性能表现不一,严重阻碍了此类数据的有效应用。基于 2018 年全年单点浮标观测资料,综合评价了舟山群岛近海面(10 m)风场的长期变化趋势,并利用误差分析和风玫瑰图等统计工具对 6 种主流海表风场再分析资料,包括:ECMWF 第五代全球大气再分析数据(the 5th generation ECMWF atmospheric reanalysis, ERA5)、NECP 第二版全球高分辨率再分析数据(climate forecast system version 2, CFSv2)、美国宇航局物理海洋学分布存档中心的多卫星融合资料(cross-calibrated multi-platform, CCMP)、日本 55 年再分析数据(Japanese 55-year reanalysis, JRA-55)、第二版现代研究与应用回顾性分析数据(modern-era retrospective analysis for research and applications version 2, MERRA-2)和 ECMWF 哥白尼大气监测服务再分析数据(the Copernicus Atmosphere Monitoring Service, CAMS)在时间变化特征上进行了对比与评估。研究表明:在综合性能方面,ERA5 对风场的再现能力最优,其次为 JRA-55;在要素可信度方面,ERA5 对风速的再现情况相对较优,而 CFSv2 的风向再现情况较好;风场产品在不同季节的模拟能力有所差异;不同风场产品在不同风速区间的重构能力也有所不同;在全年风向分布方面,各再分析资料都存在显著的东向偏差。研究结果为不同应用场景下风场资料的选取提供评估依据,并为进一步开发适用于舟山群岛近海的高精度长周期风场数据产品奠定基础。

关键词 ECMWF 第五代全球大气再分析数据;国家环境预测中心第二版全球高分辨率再分析数据;美国宇航局物理海洋学分布存档中心的多卫星融合资料;日本 55 年再分析数据;第二版现代研究与应用回顾性分析数据;哥白尼大气监测服务再分析数据;风场;舟山群岛

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20211100305

全球近海面风场是影响人类海上活动的重要因素之一。在能源领域,风能作为世界上发展最快的能源技术(Huang *et al*, 2015),具有分布广泛、可持续利用的特点(Leung *et al*, 2012)。在全球变暖严重威胁人类可持续发展的背景下(徐冠华等, 2013),风能是应对资源危机的最佳选择(Kumar *et al*, 2016)。在交通领域,海上强风不仅会降低船速,加剧燃油消耗,从而增加温室气体排放量(吴力川等, 2012),还会导致碰撞、倾覆、搁浅等船运事故(程宏林等, 1996)。在安全领域,近 40 年来台风强度逐渐增强(Guan *et al*,

2018),东南沿海台风、风暴潮、寒潮等灾害频发(李敏等, 2009),严重影响人民生命财产安全(Xu *et al*, 2015)。因此,准确描述近海面风场对发展清洁能源、保障海上运输、有效防灾减灾等具有重要意义。

随着计算机技术、数据同化技术和天气预报模型的快速发展,全球再分析风场数据集融合陆基气象观测数据、海基船载或浮标数据和天基卫星遥感数据,已成为海上风场研究的主流工具(Ramon *et al*, 2019)。再分析数据被广泛应用于风能资源分布和评估(王国松等, 2014)、风电场规划设计(叶小岭等, 2019)、灾害

* 海南省财政科技计划资助的海南省重大科技计划项目, ZDKJ202019 号。刘紫薇, 硕士研究生, E-mail: 21934019@zju.edu.cn

通信作者: 白晔斐, 博士生导师, 教授, E-mail: yfbai@zju.edu.cn

收稿日期: 2021-11-30, 收修改稿日期: 2022-03-03

天气时空变化特征(李爱莲等, 2021)和船运安全航行(Sato *et al.*, 2020)。在应用中一些学者逐步发现各种风场产品在不同海域的性能并不相同(李正泉等, 2016)。Alvarez 等(2014)对比研究比斯开湾南部 5 种风场数据, 包括: ECMWF 全球大气临时再分析数据(ECMWF atmospheric reanalysis Interim, ERA-Interim)、现代研究与应用回顾性分析数据(modern-era retrospective analysis for research and applications, MERRA)、NECP 全球高分辨率再分析数据(climate forecast system reanalysis, CFSR)、快速散射计(quick scatterometer, QuikSCAT)和美国宇航局物理海洋学分布存档中心的多卫星融合资料(cross-calibrated multi-platform, CCMP), 发现 CCMP 数据集的误差值最低; 刘解明等(2020)对比北半球海域 4 种表层风场资料, 包括: CFSR/CFSv2(国家环境预测中心第二版全球高分辨率再分析数据, climate forecast system version 2)、ERA-Interim、全球业务最终分析资料(final operational global analysis, FNL)和 CCMP, 也得到相同的结论; Peng 等(2011)在比较不同类型风场资料在赤道海域的适用性时发现 CFSR 再分析资料相关性始终最高, 且总均方根误差最小。

为找到适合于我国各海域的近海表风场再分析产品, 国内学者也开展了一定的研究。旷芳芳等(2015)就 2011 年台湾海峡处的 3 个浮标观测资料与 3 种海面风场资料进行对比后发现, CCMP 和 NCEP 资料比 ERA 资料更接近观测。敖雪等(2018)对 1981~2015 年辽宁省海岸带 3 种再分析资料进行了对比分析, 认为 CFSR 资料的可信度较好, 日本 55 年再分析数据(Japanese 55-year reanalysis, JRA-55)资料次之, ERA 资料误差较大。然而, 侯敏等(2017)、Wang 等(2020)的结果却与之不同, 他们均在中国海域得出 JRA-55 和 ERA-Interim 的风速比 CCMP 和 CFSR 更接近实测值。其中, CCMP 数据与实测数据具有很好的一致性, 可有效弥补实地观测数据的不足(张鹏等, 2011; 郑崇伟, 2011)。我国东海海域虽有相关研究, 但工作多集中在争议较少的远海区域(毛科峰等, 2012), 在近海海域的认识仍有待提高; 同时 ECMWF 发布的哥白尼大气监测服务(the Copernicus atmosphere monitoring Service, CAMS)资料也尚未在近海与其他广泛使用的产品进行性能比较。综上所述, 各再分析数据集在描述近海表风场时呈现一定共性, 但在不同海域和时间尺度上存在显著差异, 因此应分区域、分要素、分季节地评估和选择合适的资料。

随着我国“一带一路”战略的提出, 舟山港成为港口内外条件和航线网络中竞争力很强的重要枢纽(陈芙蓉等, 2021), 随之而来的风电、桥梁、石化、船运等产业对群岛海域高精度风场的需求剧增(王琼等, 2020)。鉴于此, 本研究基于 2018 年全年单点浮标观测资料, 分析舟山群岛近海面风场的季节变化规律, 综合评估 ERA5、CFSv2、CCMP、JRA-55、第二版现代研究与应用回顾性分析数据(modern-era retrospective analysis for research and applications version 2, MERRA-2)和 CAMS 这 6 种全球再分析风场资料的性能, 以期发现适合于描述舟山群岛近海面风场的再分析数据集, 为开发适用于舟山群岛近海的高精度长周期风场数据产品奠定基础。

1 数据与方法

1.1 数据集

1.1.1 观测数据 现阶段卫星数据仍存在同步轨道位置有限、覆盖范围不足、空间分辨率较低、近海岸反演的精度较差、传输时延大以及自身误差等问题(常蕊等, 2014; 姚日升等, 2016), 因此, 实地长期观测数据相比卫星数据而言, 更适合为风场的研究提供参考。本研究采用位于舟山东南部开阔海域的虾峙门外锚地观测点(图 1)所提供的 2018 年全年风速和风向记录作为基准数据。舟山近海春夏季以东南风为主, 秋冬季则以西北风为盛, 2018 年该海域共受到 7 次台风影响(轨迹如图 1), 因而, 风场演变复杂, 有利于验证各风场产品在复杂海洋环境下的可靠性。

1.1.2 ERA5 ERA5 数据集是在欧盟资助下由 ECMWF 打造, 继 ERA-15, ERA-40 和 ERA-Interim 之后的第五代全球大气再分析数据(Hersbach *et al.*, 2020)。该数据集利用 ECMWF 综合预报系统(integrated forecasting system, IFS)中的四维变分数据同化(four-dimensional variational data assimilation, 4D-Var)技术和模型预报产生, 包含了 1950 年以后全球大气、陆地表面和海浪的详细记录, 垂向包含从地表至 0.01 hPa (距地面约 80 km)共 137 个模式层。

1.1.3 JRA-55 JRA-55 数据集是由日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)提供的第二个全球大气再分析项目(Kobayashi *et al.*, 2015), 是前序 JRA-25 数据集的升级版。该再分析数据集涵盖了 55 a, 可以追溯到 1958 年全球无线电探空仪观测系统建立的时期, 是自欧洲中期天气预报中心 ERA-40 再分析数据以来覆盖过去半个世纪的首个全面再分析数据, 也是首个在这一时期应用 4D-Var 分析的再分析数据。

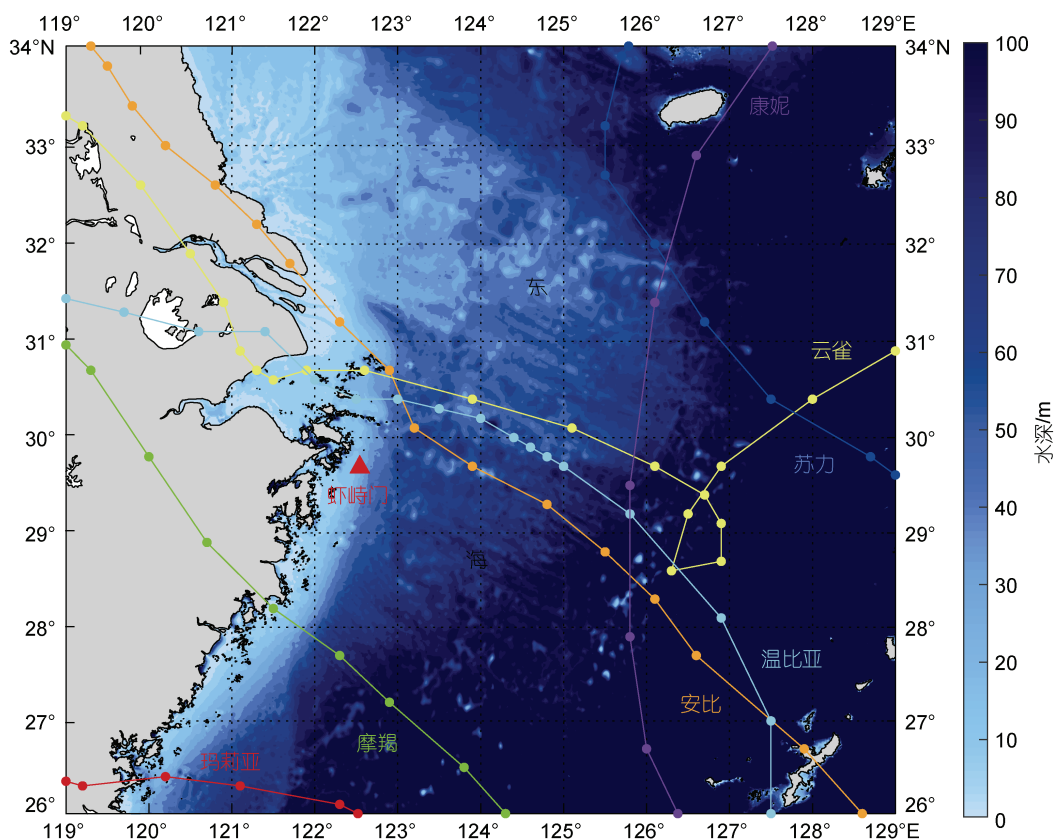


图 1 虾峙门观测站点地理位置与台风路径图

Fig.1 Location of Xiazhimen observation station and typhoon trajectories

1.1.4 CFSv2 CFSv2数据集是NCEP发布的第二版全球高分辨率的再分析产品,该版本在前序CFSR的基础上对系统的同化和预报模型组件进行了升级(Saha *et al.*, 2014),是第三个利用全球高分辨率大气-海洋-陆地表面-海冰耦合系统的再分析数据,垂向包含64层,对32 a时间(1979~2010年)进行过耦合再分析,为29 a时间(1982~2010年)综合再预测提供初始条件。

1.1.5 CCMP CCMP风场资料是以ECMWF的再分析和业务资料作为背景场,利用(变分分析方法(variational analysis method, VAM),融合第二代高级地球观测卫星(advanced earth observing satellite 2nd generation, ADEOS-),QuikSCAT、热带降雨测量任务微波成像仪(tropical rainfall measuring mission microwave imager, TRMM TMI)、特殊传感器微波成像仪(special sensor microwave imager, SSM/I)、高级微波扫描辐射计-地球观测系统(advanced microwave scanning radiometer-earth observing system, AMSR-E)等多种卫星探测海面风产品以及部分船舶、浮标观测资料,再经海洋系泊浮标对辐射计和散射计数据验

证而得到的一种高时空分辨率多卫星融合资料,目前在国内外得到广泛应用(Atlas *et al.*, 2011)。

1.1.6 MERRA-2 MERRA-2数据集(Molod *et al.*, 2015)是NASA全球模拟和同化办公室(the global modeling and assimilation office, GMAO)制作的卫星时代全球大气再分析的最新版本,是使用第5版Goddard地球观测系统模型(the goddard earth observing system model version 5, GEOS-5)及其大气数据同化系统(atmospheric data assimilation system, ADAS)得到的大气再分析数据集。该再分析数据集是MERRA再分析数据集的高级版本,涵盖了1980年至今的时期,最高水平精度7 km。

1.1.7 CAMS CAMS全球再分析EAC4(ECMWF atmospheric composition reanalysis 4)数据集(Inness *et al.*, 2019)是基于早期大气成分和气候再分析(the monitoring atmospheric composition and climate, MACC)基础上的第四代ECMWF大气成分全球再分析数据集,使用ECMWF综合预报系统(IFS)中的4D-Var数据同化得到,垂向60层,时间范围从2003年起至2020年,还可提供臭氧、一氧化碳、二氧化

氮和气溶胶光学深度等数据,被广泛应用于计算气候学、研究趋势、评估模式等。

1.2 研究方法

由于各再分析资料在全年和不同季节时间尺度的表现情况存在差异(谢潇等, 2011), 且不同季节所蕴含的大气动力过程特征不一, 故本文将 2018 年按季节分为春(3~5月)夏(6~8月)秋(9~11月)冬(12~2月)4个部分, 将各再分析资料进行时空插值从而得到与

观测点相同位置和相同时间精度的时间序列, 在全年尺度和季节尺度分别进行 6 种统计指标的误差分析, 从而评估各再分析资料在舟山群岛海域的适用性。

1.2.1 数据匹配 各再分析资料在空间和时间的分辨率不尽相同(表 1), 为与观测资料进行匹配比较, 本研究采用三次样条插值方案将所有再分析资料的时间精度统一至 1 h, 空间精度统一至 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。

表 1 表层 10 m 风场资料产品的数据特征
Tab.1 Characteristics of surface 10 m wind field data products

产品类型	产品	时间范围	同化方案	时间分辨率/h	空间分辨率
再分析风场	ERA5	1979 年至今	四维变分数据同化	1	$0.250^\circ \times 0.250^\circ$
	CFSv2	1979 年至今	三维变分数据同化	6	$0.204^\circ \times 0.205^\circ$
	JRA-55	1958 年至今	四维变分数据同化	6	$1.250^\circ \times 1.250^\circ$
	MERRA-2	1979 年至今	第 5 版 Goddard 地球观测系统模型及其大气同化系统	1	$0.500^\circ \times 0.625^\circ$
	CAMS	2003~2020 年	四维变分数据同化	3	$0.750^\circ \times 0.750^\circ$
合成风场	CCMP	1987 年至今	变分法	6	$0.250^\circ \times 0.250^\circ$

1.2.2 计算方法 本研究共选取 5 种通用指标来衡量再分析风场产品与实测数据之间的差异, 包括平均绝对误差(E_M)、均方根误差(E_{RMS})、偏差率(B)、离散指数(I_S)和相关系数(R), 其计算公式如下:

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

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}, \quad (2)$$

$$B = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})}{\bar{x}} \times 100\%, \quad (3)$$

$$I_S = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y}) - (x_i - \bar{x})]^2}, \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (5)$$

同时, 我们将上述五种指标中指向性一致的 E_M 、 E_{RMS} 、 B 和 I_S 通过加权平均的方法(Zhao *et al.*, 2021)统一为一个综合性指标($\bar{E}$)以方便综合评估, 具体表达式为:

$$\bar{E} = \frac{|E_M| + |E_{RMS}| + k_1 \times |B| + k_2 \times |I_S|}{4}, \quad (6)$$

其中, 权重系数 k_1 和 k_2 在风速误差分析中分别为 10^3 和 10, 在风向误差分析中分别为 10^4 和 10^2 。给定相应的倍数可增加该指标在整体中的权重, 使其与其他指标在同一量级。

2 结果与分析

2.1 风速对比与误差分析

根据图 2a~2f 中各再分析风场产品与实测数据在 2018 年的风速时间序列对比, 我们开展误差分析, 在全年和 4 个季节时间尺度分别计算 E_M 、 E_{RMS} 、 B 、 I_S 、 R 和 $\bar{E}$ 指标, 统计结果如表 2。

结合图表结果可知, 各风场数据在全年整体趋势上与实测资料基本吻合, 但普遍存在高风速无法准确刻画的问题(毛科峰等, 2012), 如 ERA5、CCMP、JRA-55、MERRA-2 和 CAMS 均会对部分高风速的估值偏低; 而较为特殊的, CFSv2 可较好地刻画高风速极值, 但对中低风速的拟合不理想。从各季节来看, CCMP、CAMS、MERRA-2 在春夏季的拟合效果相对较好, 而 CFSv2 欠佳, 这主要由于春夏季风速整体较低。ERA5 在秋季的性能最好, 而 CCMP、JRA-55 和 ERA5 在冬季表现较优。因而, 我们推荐在春冬两季使用 CCMP; 夏季建议使用 MERRA-2; 秋季台风多发, ERA5 受台风影响的程度较小, 性能较好。

2.2 风向对比与误差分析

根据图 3a~3f 中各再分析风场产品与实测数据在 2018 年的风向时间序列对比, 我们开展同风速类似的误差分析, 其统计结果如表 3。

结合图表结果可知, 在全年时间尺度各风场数据在整体趋势上与实测资料基本吻合, 但误差量级

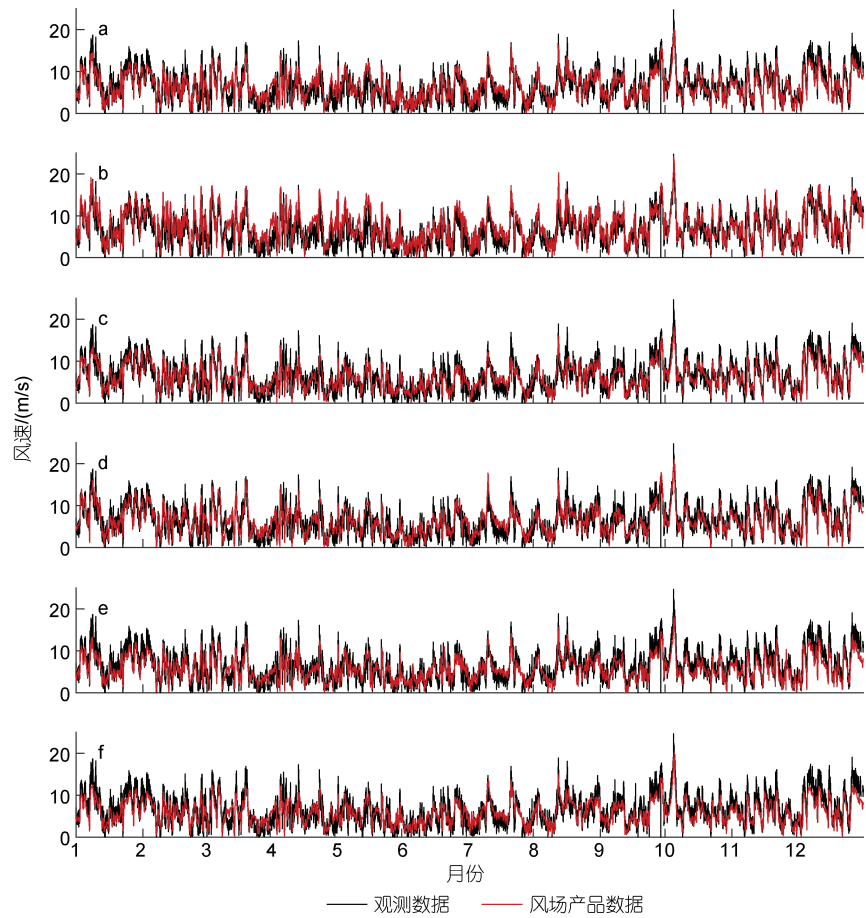


图 2 虾峙门站点处实测数据分别与 ERA5 (a)、CFSv2 (b)、CCMP (c)、JRA-55 (d)、MERRA-2 (e)、CAMS (f)数据的风速时间序列对比图

Fig.2 Comparison in wind speed time series of the measured data to those of ERA5 (a), CFSv2 (b), CCMP (c), JRA-55 (d), MERRA-2 (e), and CAMS (f) data at Xianzhimen station

注: ERA5 (the 5th generation ECMWF atmospheric reanalysis)为欧洲中期天气预报中心第五代全球大气再分析数据, CFSv2 (climate forecast system version 2)为国家环境预测中心第二版全球高分辨率再分析数据, CCMP (cross-calibrated multi-platform)为美国宇航局物理海洋学分布存档中心的多卫星融合资料, JRA-55 (Japanese 55-year reanalysis)为日本 55 年再分析数据, MERRA-2 (modern-era retrospective analysis for research and applications version 2)为第二版现代研究与应用回顾性分析数据, CAMS (the copernicus atmosphere monitoring service)为欧洲中期天气预报中心哥白尼大气监测服务再分析数据

表 2 虾峙门站点处风速误差表
Tab. 2 Errors of wind speed in different datasets at Xianzhimen station

时间段	平均绝对误差 $E_M/(m/s)$						均方根误差 $E_{RMS}/(m/s)$					
	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS
全年	0.04	1.16	-0.23	-0.11	-0.65	-0.52	1.95	2.49	1.97	2.03	2.14	2.11
春季	0.79	1.98	-0.07	0.25	-0.17	0.11	2.23	3.11	1.97	2.14	2.11	2.10
夏季	0.52	1.18	0.08	0.33	-0.00	0.13	1.83	2.38	1.96	2.01	1.84	1.86
秋季	-0.54	0.48	-0.53	-0.68	-1.21	-1.09	1.68	1.94	1.88	1.84	2.20	2.02
冬季	-0.65	0.97	-0.39	-0.37	-1.24	-1.27	2.01	2.39	2.08	2.12	2.39	2.44
时间段	偏差率 B						离散指数 I_s					
	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS
全年	0.01%	0.18%	-0.03%	-0.02%	-0.10%	-0.08%	0.30	0.34	0.30	0.31	0.31	0.32
春季	0.14%	0.36%	-0.01%	0.05%	-0.03%	0.02%	0.38	0.43	0.35	0.38	0.38	0.38
夏季	0.09%	0.21%	0.01%	0.06%	-0.00%	0.02%	0.32	0.37	0.35	0.36	0.33	0.34
秋季	-0.08%	0.07%	-0.08%	-0.10%	-0.17%	-0.16%	0.23	0.27	0.26	0.24	0.26	0.25
冬季	-0.08%	0.12%	-0.05%	-0.05%	-0.16%	-0.16%	0.24	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26

续表

时间段	相关系数 R						综合性指标 $\bar{E}$					
	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS
全年	0.85	0.82	0.85	0.83	0.83	0.83	1.27	2.21	1.38	1.36	1.72	1.66
春季	0.78	0.76	0.81	0.77	0.78	0.78	2.06	3.25	1.41	1.67	1.60	1.55
夏季	0.84	0.81	0.79	0.79	0.82	0.82	1.61	2.34	1.41	1.64	1.29	1.40
秋季	0.89	0.86	0.86	0.88	0.86	0.88	1.33	1.46	1.45	1.48	1.93	1.80
冬季	0.88	0.84	0.86	0.85	0.86	0.86	1.47	1.82	1.39	1.40	1.96	1.98

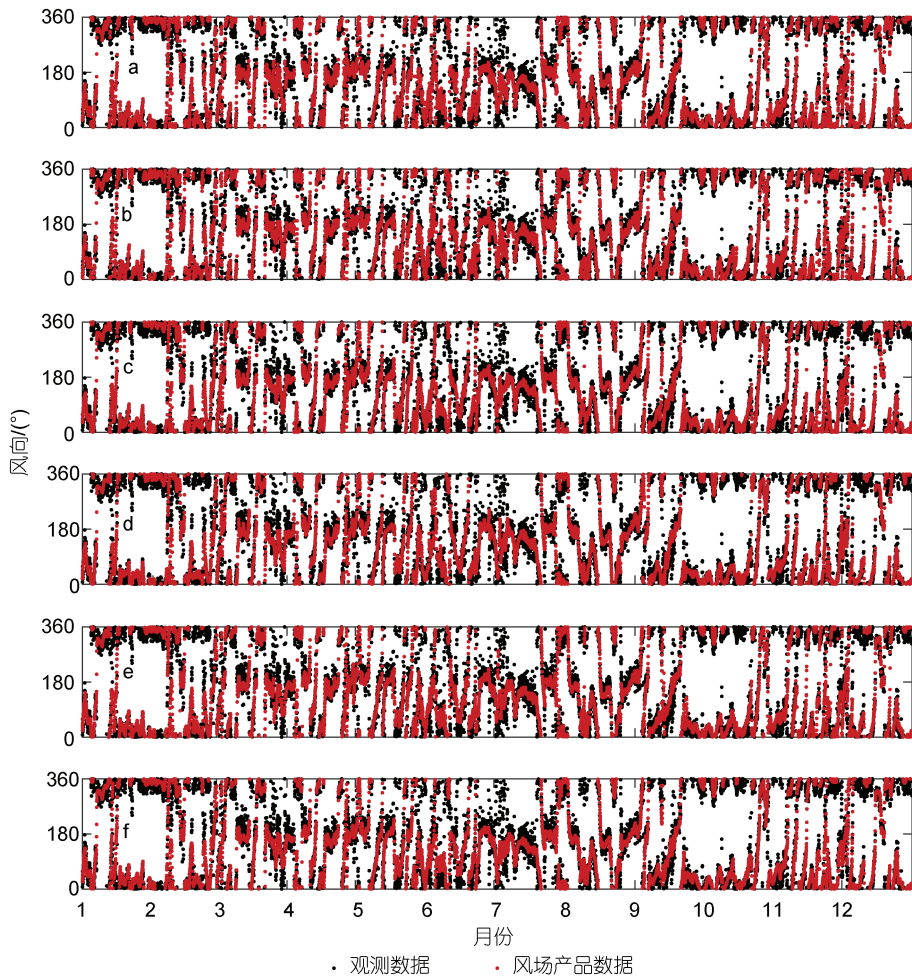


图 3 虾峙门站点处实测数据分别与 ERA5 (a)、CFSv2 (b)、CCMP (c)、JRA-55 (d)、MERRA-2 (e)、CAMS (f)数据的风向时间序列对比图

Fig. 3 Comparison in wind direction time series of the measured data to those of ERA5 (a), CFSv2 (b), CCMP (c), JRA-55 (d), MERRA-2 (e), and CAMS (f) data at Xianzhimen station
注: 0°为北风(N), 90°为东风(E), 180°为南风(S), 270°为西风(W)

相对较大, 如 4 月初、6 月和 7 月等都存在 15°~30°的偏差, 而 8 月上旬和 11 月下旬也存在 20°~60°的偏差。风速拟合性能不佳的 CFSv2 再分析数据在全年风向拟合的结果优于其他风场产品, 其次是 ERA5。从各季节来看, 由于秋冬季 30°N 附近的大气运动较为剧烈, 因此各项误差指标较春夏季普遍偏高。CFSv2

在各季节的综合指标均为最小。除 CFSv2 外, ERA5 在春夏季的性能较好, CAMS 在秋冬季的性能略优。CCMP、JRA-55 和 MERRA-2 在风向上的综合指标与上述 3 种风场产品的差距较大。综上所述, CFSv2 适合应用在舟山群岛近海的风向研究中, 其次是 ERA5。

表 3 虾峙门风向误差表
Tab.3 Errors of wind direction in different datasets at Xianzhimen station

时间段	平均绝对误差 $E_M/(^{\circ})$						均方根误差 $E_{RMS}/(^{\circ})$					
	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS
全年	-23.94	-14.75	-33.90	-34.12	-32.33	-23.68	118.24	112.48	127.18	126.38	124.89	119.94
春季	-7.48	-3.71	-18.28	-21.87	-15.83	-8.49	87.93	86.49	94.44	97.28	93.55	90.00
夏季	-8.73	-5.44	-13.30	-16.15	-15.41	-14.12	86.75	87.15	93.83	92.88	91.86	91.58
秋季	-39.64	-30.36	-44.90	-42.57	-48.10	-33.20	134.76	130.11	140.05	139.16	141.30	135.29
冬季	-40.51	-19.83	-59.84	-56.47	-50.62	-39.44	150.87	137.10	166.33	163.46	159.74	151.68
时间段	偏差率 B						离散指数 I_S					
	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS
全年	-0.14%	-0.08%	-0.19%	-0.19%	-0.18%	-0.13%	0.65	0.63	0.69	0.69	0.68	0.66
春季	-0.04%	-0.02%	-0.10%	-0.12%	-0.09%	-0.05%	0.48	0.48	0.51	0.52	0.51	0.49
夏季	-0.06%	-0.04%	-0.09%	-0.10%	-0.10%	-0.09%	0.56	0.56	0.60	0.59	0.59	0.59
秋季	-0.24%	-0.19%	-0.28%	-0.26%	-0.30%	-0.20%	0.79	0.78	0.81	0.81	0.82	0.81
冬季	-0.19%	-0.10%	-0.29%	-0.27%	-0.24%	-0.19%	0.70	0.65	0.74	0.74	0.73	0.70
时间段	相关系数 R						综合性指标 $\bar{E}$					
	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS	ERA5	CFSv2	CCMP	JRA-55	MERRA-2	CAMS
全年	0.50	0.54	0.43	0.45	0.45	0.49	55.30	49.56	62.27	62.13	60.81	55.70
春季	0.60	0.61	0.56	0.55	0.56	0.59	36.85	35.05	43.43	45.79	42.35	38.12
夏季	0.51	0.52	0.42	0.46	0.45	0.44	39.37	38.15	44.03	44.51	44.07	43.43
秋季	0.49	0.51	0.44	0.46	0.43	0.48	69.35	64.37	73.49	72.18	75.35	67.37
冬季	0.45	0.51	0.36	0.38	0.40	0.44	70.10	57.98	82.29	80.23	76.84	70.03

3 讨论

为进一步研究舟山群岛近海表风场的风速与风向分布特征,我们以风玫瑰图的形式展示虾峙门站点处实测数据和各再分析风场产品在 2018 年全年的比例分布(图 4),其中风速以 5 m/s 为一个区间,共分为低、中低、中高和高速共 4 个量级,而风向罗盘以 22.5°为一个区间,共分 16 个方位。如图 4a 所示,虾峙门海域风场整体呈南北走向,北向风场比重大于南向风场:北向风场以北向和北西北向为盛,风速可高于 15 m/s;南向风场以南风和南西南风为主,风速都在 15 m/s 以下。在全年 8 671 组实测风速数据中,低速、中低速、中高速和高速的占比分别为 39%、43%、16%和 2%。在低风速区间, JRA-55 的风速占比与实测最为接近,为 43%。在中低风速区间,各再分析产品的占比类似,均处于 48%~52%内。在中高速风速区间, ERA5 的风速占比为 13%,与实测较为接近。对于高风速, CFSv2 的占比偏高,而其余各资料的占比又偏低,与实测资料的差距较大。在全年 8 671 组实测风向数据中,第一象限(0°~90°)、第二象限(90°~180°)、第三象限(180°~270°)和第四象限

(270°~360°)内风向的占比分别为 32%、30%、18%和 20%。在第一象限中,各再分析资料普遍占比偏高, CFSv2 (34%)最为接近实测数据占比。在第二象限中,各再分析资料普遍占比偏低, CFSv2 (24%)最为接近实测数据占比。在第三象限中,各再分析资料普遍占比偏低, ERA5 (14%)最为接近实测数据占比。在第四象限中,各再分析资料普遍占比偏高, JRA-55 (27%)最为接近实测数据占比。综合风速和风向分布,我们发现各再分析资料在中低风速比重偏多;在风向分布上呈现整体偏东的趋势,特别在 90°~135°和 270°~315°区间最为明显,这与韩玉康等(2019)在吕宋海峡处对 3 种海面风场资料(ERA-Interim、CCMP、CFSR)的比较与评估发现相同。

4 结论

本文基于 2018 年全年单点浮标观测数据,利用 E_M 、 E_{RMS} 、 I_S 、 B 、 $\bar{E}$ 和 R 在内的 6 个统计指标,在舟山群岛近海对 ERA5、CFSv2、CCMP、JRA-55、MERRA-2 和 CAMS 六种风场资料进行误差分析与评估,并通过线性趋势检验和风玫瑰图研究了各风场产品全年分布及季节变化特征,主要结论如下:

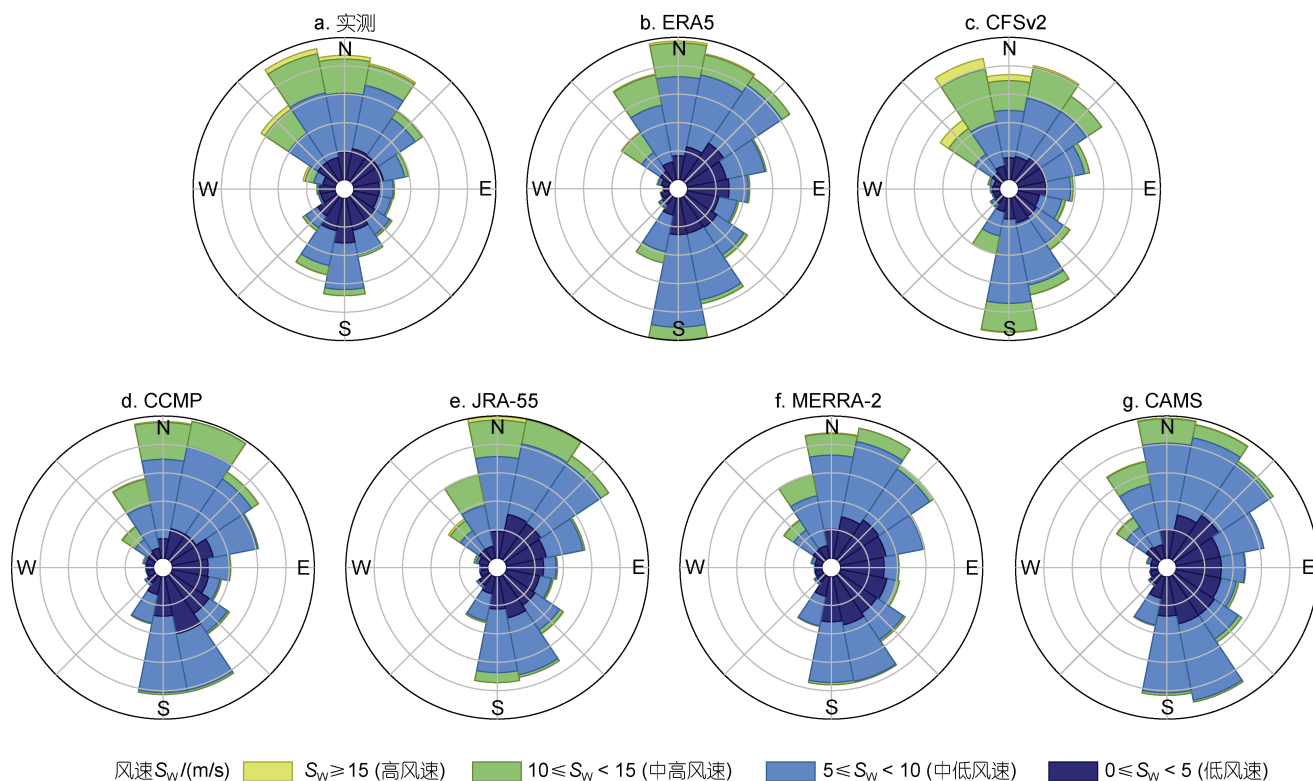


图 4 虾峙门站点处实测数据(a)、ERA5 (b)、CFSv2 (c)、CCMP (d)、JRA-55 (e)、MERRA-2 (f)、CAMS (g)数据集的风玫瑰图

Fig.4 The wind rose diagram of measured data (a), ERA5 (b), CFSv2 (c), CCMP (d), JRA-55 (e), MERRA-2 (f), and CAMS (g) at Xiazhimen station

(1) 不同风场产品的同化系统差异使得这些风场产品的模拟能力有所不同, 根据线性趋势及对全年的误差分析可知, ERA5 对风速的再现能力最优, 其次为 JRA-55。

(2) 不同风场产品中不同要素间的可信度有所差别, 在风速方面, ERA5 的再现情况较优, 其次为 JRA-55。在风向方面, CFSv2 的拟合情况较好, 其次是 ERA5。

(3) 不同风场产品在不同季节的模拟能力也有所差异, 对于风速, CCMP 在春冬两季的再现能力较好, CAMS 在夏季的再现情况较优, ERA5 在秋季的模拟效果最佳; 对于风向, CFSv2 在各季节的模拟能力均为最好。

(4) 同一种风场产品的风速在不同大小区间的模拟能力也有所不同, JRA-55 再分析数据对低风速、中低风速和高风速的模拟情况较好, ERA5 对中高速风速的模拟情况较优。

(5) 从风玫瑰图发现实测站点处北风和南风分布最多, 西风和东风分布较少, 高速集中在北向和西北向。对于风向的模拟情况来说, 各风场资料都有着向东的偏差, CFSv2 与 ERA5 再分析数据的模拟程度较好。

参 考 文 献

- 王国松, 高山红, 吴彬贵, 等, 2014. 我国近海风能资源分布特征分析[J]. 海洋科学进展, 32(1): 21-29.
- 王琼, 马恩点, 范其平, 等, 2020. 影响舟山的台风风力精细化预报[J]. 现代农业科技(17): 178-180, 183.
- 毛科峰, 陈希, 李妍, 等, 2012. 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, 38(12): 1456-1463.
- 叶小岭, 支兴亮, 邓华, 2019. 基于 WRF 模式的风电场短期风速集成预报方法研究[J]. 气象, 45(1): 88-98.
- 刘解明, 熊学军, 宫庆龙, 等, 2020. 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, 38(1): 38-50.
- 李正泉, 肖晶晶, 张育慧, 等, 2016. 基于全球风场产品中国海表面风速变化分析[J]. 海洋环境科学, 35(4): 587-593, 640.
- 李爱莲, 刘泽, 洪新, 等, 2021. 台风条件下 ERA5 再分析数据对中国近海适用性评估[J]. 海洋科学, 45(10): 71-80.
- 李敏, 王辉, 金敬华, 2009. 中国近海海面风场预报方法综述[J]. 海洋预报, 26(3): 114-120.
- 吴力川, 鲁世刚, 杜珊珊, 等, 2012. 长江中游通航环境风场气候变化特征及其航运影响分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 36(2): 403-406, 410.
- 旷芳芳, 张友权, 张俊鹏, 等, 2015. 3 种海面风场资料在台湾海峡的比较和评估[J]. 海洋学报, 37(5): 44-53.
- 张鹏, 陈晓玲, 陆建忠, 等, 2011. 基于 CCMP 卫星遥感海面

- 风场数据的渤海风浪模拟研究[J]. 海洋通报, 30(3): 266-271.
- 陈芙英, 张建同, 2021. “一带一路”战略下我国沿海港口竞争力评价与比较研究[J]. 工业工程与管理, 26(3): 1-7.
- 郑崇伟, 2011. 基于CCMP风场的近22年中国海海面风场特征分析[J]. 气象与减灾研究, 34(3): 41-46.
- 侯敏, 王国松, 卜清军, 2017. 基于4种再分析资料的中国近海风速特征分析[J]. 天津科技, 44(10): 109-113.
- 姚日升, 涂小萍, 蒋璐璐, 等, 2016. 浙江近海冬季大风风速推算和ASCAT风速订正方法探讨[J]. 气象, 42(5): 621-627.
- 敖雪, 翟晴飞, 崔妍, 等, 2018. 三种风场再分析资料在辽宁省海岸带的比较与评估[J]. 高原气象, 37(1): 275-285.
- 徐冠华, 葛全胜, 宫鹏, 等, 2013. 全球变化和人类可持续发展: 挑战与对策[J]. 科学通报, 58(21): 2100-2106.
- 常蕊, 朱蓉, 周荣卫, 等, 2014. 高分辨率合成孔径雷达卫星反演风场资料在中国近海风能资源评估中的应用研究[J]. 气象学报, 72(3): 606-613.
- 韩玉康, 周林, 赵艳玲, 等, 2019. 3种海面风场资料在吕宋海峡的比较与评估[J]. 海洋预报, 36(6): 44-52.
- 程宏林, 王才宝, 洪贞铨, 等, 1996. 江苏内河航运交通事故气象条件分析[J]. 气象, 22(12): 51-53.
- 谢潇, 何金海, 祁莉, 2011. 4种再分析资料在中国区域的适用性研究进展[J]. 气象与环境学报, 27(5): 58-65.
- ALVAREZ I, GOMEZ-GESTEIRA M, DECASTRO M, *et al*, 2014. Comparison of different wind products and buoy wind data with seasonality and interannual climate variability in the southern bay of Biscay (2000–2009) [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 106: 38-48.
- ATLAS R, HOFFMAN R N, ARDIZZONE J, *et al*, 2011. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 92(2): 157-174.
- GUAN S D, LI S Q, HOU Y J, *et al*, 2018. Increasing threat of landfalling typhoons in the western North Pacific between 1974 and 2013 [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 68: 279-286.
- HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, *et al*, 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730): 1999-2049.
- HUANG J L, MCELROY M B, 2015. A 32-year perspective on the origin of wind energy in a warming climate [J]. Renewable Energy, 77: 482-492.
- INNESS A, ADES M, AGUSTÍ-PANAREDA A, *et al*, 2019. The CAMS reanalysis of atmospheric composition [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 19(6): 3515-3556.
- KOBAYASHI S, OTA Y, HARADA Y, *et al*, 2015. The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 93(1): 5-48.
- KUMAR Y, RINGENBERG J, DEPURU S S, *et al*, 2016. Wind energy: trends and enabling technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53: 209-224.
- LEUNG D Y C, YANG Y, 2012. Wind energy development and its environmental impact: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1): 1031-1039.
- MOLOD A, TAKACS L, SUAREZ M, *et al*, 2015. Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: evolution from MERRA to MERRA2 [J]. Geoscientific Model Development, 8(5): 1339-1356.
- PENG G, ZHANG H M, FRANK H P, *et al*, 2011. A comparison of various equatorial pacific surface wind products [C] // Proceedings of 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver, Canada: IEEE: 2049-2052.
- RAMON J, LLEDÓ L, TORRALBA V, *et al*, 2019. What global reanalysis best represents near-surface winds? [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 145(724): 3236-3251.
- SAHA S, MOORTHY S, WU X R, *et al*, 2014. The NCEP climate forecast system version 2 [J]. Journal of Climate, 27(6): 2185-2208.
- SATO K, INOUE J, YAMAZAKI A, *et al*, 2020. Antarctic radiosonde observations reduce uncertainties and errors in reanalyses and forecasts over the southern ocean: an extreme cyclone case [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 37(5): 431-440.
- WANG G S, WANG X D, WANG H, *et al*, 2020. Evaluation on monthly sea surface wind speed of four reanalysis data sets over the China seas after 1988 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 39(1): 83-90.
- XU X L, SUN D W, GUO T J, 2015. A systemic analysis of typhoon risk across China [J]. Natural Hazards, 77(1): 461-477.
- ZHAO S K, LIU Z W, WEI X R, *et al*, 2021. Intercomparison of empirical formulations of maximum wind radius in parametric tropical storm modeling over Zhoushan archipelago [J]. Sustainability, 13(21): 11673.

PERFORMANCE EVALUATION OF MAINSTREAM SEA SURFACE WIND FIELD DATA IN ZHOUSHAN ARCHIPELAGO

LIU Zi-Wei¹, ZHAO Shuai-Kang¹, WEI Xiao-Ran¹, BAI Ye-Fei^{1, 2}

(1. *Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China*; 2. *Hainan Institute of Zhejiang University, Zhejiang University, Sanya 572024, China*)

Abstract Reanalysis wind field data are and have been widely used in evaluation of renewable energy resources, marine disaster prevention, port operation, and ship transportation in Zhoushan archipelago, East China Sea, Zhejiang, East China. However, performance of the reanalysis data from different agencies varies in Zhoushan area, which greatly impedes the effective application of these data. Based on full time series of wind field data recorded at nearshore buoy in 2018, we investigated the long-term variation trend of the near-surface wind field in Zhoushan archipelago and conducted comprehensive evaluation on the performance of six reanalysis datasets (ERA5, CFSv2, CCMP, JRA-55, MERRA-2, and CAMS) through error analysis and wind rose chart. Results show that ERA5 performs overall the best in reproducing the wind field and followed by JRA-55. In terms of single factor of wind field, ERA5 reproduces the wind speed relatively well, while CFSv2 reproduces the wind direction better. Performance of each reanalysis data also varies seasonally. In terms of wind direction distribution of the whole year, the reanalysis data have a significant eastward deviation, which was observed in most of the reanalysis datasets. The findings provide baseline for selection of proper wind field reanalysis dataset in different application scenarios and serve as the first step towards development of high-precision and long-span wind field data products for Zhoushan archipelago.

Key words ERA5 (the 5th Generation ECMWF Atmospheric Reanalysis); CFSv2 (Climate Forecast System version 2); CCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform); JRA-55 (Japanese 55-year Reanalysis); MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications version 2); CAMS (the Copernicus Atmosphere Monitoring Service); wind field; Zhoushan archipelago