

ECMWF 细网格 10 m 风预报在象山港海域的评估与订正

杨怡曼¹, 邓琪², 张晟宁³, 朱晓翠³, 郑健^{3*}

(1. 武警海警学院航海系, 浙江 宁波 315801; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 3. 宁波市奉化区气象局, 浙江 宁波 315500)

摘 要: 系统评估了欧洲中期天气预报中心 EC 细网格 10 m 风 24 h 预报产品在象山港海域的准确性, 选取 2016—2020 年 1 月、4 月、7 月、10 月的 EC 预报资料, 与象山港不同区域 3 个代表站点的实测风速和风向资料进行对比分析, 探讨概率密度匹配法及长短期记忆神经网络模型对预报的订正效能。结果表明: 相比于平均风速, 极大风速的 EC 预报结果与象山港海域的实测结果更接近。具体而言, EC 对内港 6 级风的预报效果最好, 外港预报效果的季节差异明显, 春夏季对 4 级风的预报效果较好, 秋冬季对 7 级风的预报效果较好。EC 在外港极大风速预报上的优势明显, 各站点风速预报偏差中位数 (0.15~2.50 m/s) 维持在较低水平, 且春夏季偏差离散性小, 秋冬季增大; 相反, 在内港区域的秋冬季表现出较低的偏差离散性。在风向预报上, EC 对偏北、东南及西南风向的预报误差偏小, 但对偏南风向的预报能力较差。特别地, 对外港区域的风向预报整体表现更为稳定和准确。与概率密度匹配法相比, 长短期记忆神经网络模型在风速预报订正上展现出全面优势, 尤其在大风速等级下的订正效果明显更优, 更有利于提升沿海及近海区域大风速预报的准确性。

关键词: 象山港; 欧洲中期天气预报中心; 10 m 风; 评估; 订正

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)03-0045-11

0 引言

在现代气象业务中, 海面风场的预报能力直接关系到海上大风的预报准确度, 使用模式预报产品对大风过程进行预报和分析是当前气象部门的重点工作, 因此, 检验数值模式在不同地区风预报的效果具有重要意义^[1-5]。欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium - Range Weather Forecasts, ECMWF, 简称 EC) 的大气模式确定性预报产品是高时空分辨率的气象数值预报资料, 该模式使用了先进的四维变分同化系统, 其产品具有较高的预报准确度, 对全球中短期天气预报具有重要的指示意义^[6-7]。目前, EC 10 m 风场预报产品在风向和风速预报上均有较好表现^[8-9], 但对于不同区域和站点^[2-5, 10]、不同季节^[8, 11]和不同等级的风速^[12-13], EC

的预报效果也会有一定差异。因此, 为了评估 EC 模式预报与实况结果, 更加准确地开展风场预报, 许多学者针对实际需求, 对 EC 模式的风产品开展对比分析^[2-5, 7-13]。例如, 杨景泰等^[3]针对大连地区 8 个国家气象观测站的实测风速资料和 EC 细网格 10 m 风预报产品进行了对比研究, 得出 EC 10 m 风速预报与最大风速最为接近, 与极大风速的相关性最好, 但整体预报平均偏大; 方艳莹等^[9]针对不同天气系统下 EC 细网格模式对浙江沿海 10 m 风的预报性能进行了评估, 指出预报结果和观测值的相关性与站点的地理位置、海拔高度和地形等都有较大关系。

许多学者根据实际情况, 利用各种订正方法对 EC 10 m 风场预报进行了修正^[14-22]。钱磊等^[19]通过对比不同极大风力以及不同地形条件下的订正效果, 证明概率密度匹配法 (Probability Density

收稿日期: 2024-03-09。

基金项目: 浙江省气象科技计划重点项目(2022ZD30); 宁波市气象局科技项目(NBQX2020012B)。

作者简介: 杨怡曼(1994-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事气象预报、海洋气象方面研究。E-mail: 398045609@qq.com

*通信作者: 郑健(1990-), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事气象预报、生态气象服务方面研究。E-mail: zjweiwu@qq.com

Function Matching Method, PDF)可以有效提升天气研究预报模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)对逐日极大风速的预报效果。随着机器学习算法的不断深入发展,方楠等^[14]基于长短期记忆神经网络(Long Short-Term Memory, LSTM)模型,设计了一套适用于风电场的风速超短期快速滚动预报方案,结果表明,该方案在未来2 h内的风速均方根误差均小于2 m/s,有效减小了预报误差。刘志杰等^[18]对比了3种传统集成方法和LSTM方法,发现LSTM在大风集成预报中的性能最优。

象山港位于浙江省北部沿海,内港自然环境优良、水产资源丰富。该地区不仅在渔业捕捞、海水养殖等传统产业上维持庞大规模,而且在滨海运动、旅游休闲等新兴产业上也实现高速发展^[23-24]。然而,象山港地处浙北沿海区域,大风过程频发且对其影响较大。目前国内针对浙北象山港一带EC细网格10 m风场预报效果的评估及订正研究较少,因此,对EC细网格10 m风预报在象山港海域进行检验,并采取多种方式进行订正以减小预报误差,是目前亟待解决的实际问题,也是实现精细化预报所需进行的基础性工作。

1 资料与方法

1.1 资料来源

选取2016—2020年1月、4月、7月和10月的EC细网格10 m风逐日预报资料,空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$,时间分辨率为3 h。考虑到数据的准确性、连续性和站点的代表性,本文选取白石山和小东屿海岛自动气象站分别代表象山港的内港和外港,同时将位于相邻陆地的金钟塔站(原奉化国家气象观测站)加入对比,以进一步分析象山港与周边陆地模式结果评估中的差异。气象观测资料来源于上述站点2016—2020年的10 m风向和风速数据,其中风速资料选取EC预报数据对应整点的2 min和10 min的实况平均风速值和极大风速值。观测设备为航天新气象科技有限公司生产的ZQZ—TF型测风传感器,资料的观测标准和精度符合《地面气象观测规范风向和风速》(GB/T 35227—2017)的要求,所有数据均经过质量控制。

1.2 研究方法

利用双线性插值法将EC细网格数据插值到白石山站、金钟塔站和小东屿站,计算相对误差(RE)、平均偏差(BIAS)和均方根误差(RMSE),对4个代表月的风向、风速预报性能进行评估。误差统计公式为:

相对误差:

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{d_{fi} - d_{oi}}{d_{oi}} \right|}{N} \quad (1)$$

平均偏差:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (d_{fi} - d_{oi})}{N} \quad (2)$$

均方根误差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_{fi} - d_{oi})^2}{N}} \quad (3)$$

式中: d_{oi} 为站点实测的风速; d_{fi} 为该站点EC预报的风速。

由于EC模式对中小尺度天气特别是局地性强天气的预报能力较弱^[25],且本文主要研究大尺度天气系统影响背景下EC模式对象山港海域的风向、风速预报能力,因此在对比分析时已剔除了强对流天气。

风速预报订正采取PDF^[19]和LSTM^[14]方法。PDF的主要思想在于通过调整资料气象要素值,使其和地面观测气象要素的概率密度分布一致,从而达到订正资料系统误差的目的^[19]。LSTM网络模型是一种递归神经网络(Recurrent Neural Network, RNN),在长时间序列数据学习训练中能克服梯度消失和梯度爆炸问题,因此展现出超强的长系列数据的学习能力^[21]。

对于PDF方法,本文对2016—2019年3站点的逐日实况极大风速和EC模式预报的10 m极大风速进行统计,建立实况和模式数据的联合概率密度分布函数,以模式输出的逐日10 m极大风速作为自变量,对比概率密度分布函数中模式风速所对应的概率密度值,选其最大值所对应的实况风速值作为该站点的逐日极大风速预报数据,通过2020年的实例验证PDF对EC模式预报的改进程度。

神经网络模型需要先输入历史数据来训练模

型,通过反向传播机制不断更新模型权重系数,最终得到稳定的模型^[21]。考虑到风速等气象要素具有明显的季节性变化特征,本研究在划分训练集和测试集时,选取2016—2019年3站点的逐日实况极大风速数据作为训练集,2020年实况极大风速作为测试集,进行数据插值后输入模型参数,使用训练集对LSTM风速预测模型进行训练,模型学习率设为0.001,训练批次设置为32次,迭代次数为30次,直至满足预测精度要求,后输入测试集EC预报结果,进而通过对比得到模式的订正结果。

2 EC在象山港不同风速、不同风向下的预报性能评估

2.1 不同风速下的对比分析

图1、2为各站点不同风速等级下EC预报风速

与实况平均/最大风速的均方根误差和平均偏差图。由图2可以看出,EC预报风速与2 min平均风速的均方根误差和平均误差比10 min的更小,表明EC预报风速更接近2 min平均风速。从均方根误差看(见图1a、1c),白石山站和金钟塔站的EC预报风速与实况风速的误差随风速的增大而增大;小东屿站在4~5级风时的均方根误差最小,为2 m/s左右,而在风力<4级和风力>5级时的误差均偏大。从平均偏差看(见图1b、1d),当各站点的实况风级偏小、风速偏低时,EC预报风速较实况偏大;反之同理。总体上看,小东屿站各月份预报的平均偏差大于白石山站和金钟塔站。白石山站和金钟塔站在3~4级风时的平均偏差最小;小东屿站在5~6级风时的平均偏差最小。通过对比发现,对于象山港外海的小东屿站来说,EC数值预报风速和平均风速间的误差较大,因此后续继续对比EC预报风速和实况极

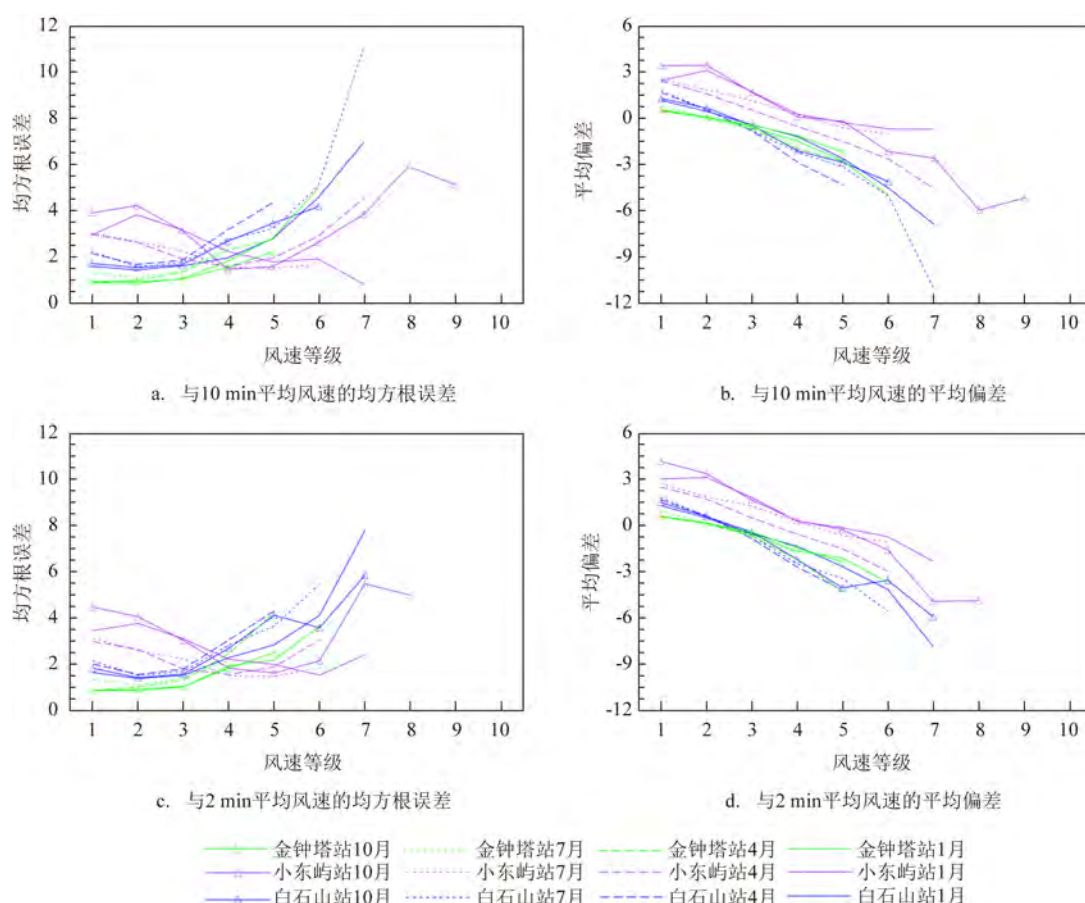


图1 不同站点1月、4月、7月、10月不同风速等级下EC细网格10 m风速24 h预报结果与实况平均风速的误差统计(单位:m/s)

Fig.1 The error chart between the actual average wind speed and the 24-hour ECMWF 10 m wind speed forecasts at different stations in January, April, July and October (unit:m/s)

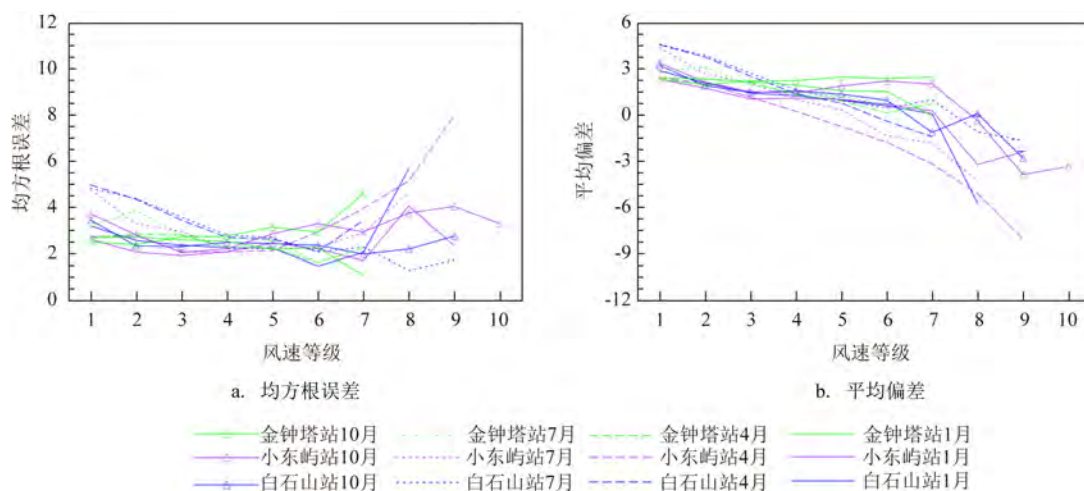


图2 不同站点1月、4月、7月、10月在不同风速等级下EC细网格10 m风速24 h预报结果和实况极大风速的误差统计(单位:m/s)

Fig.2 The error chart between the actual extreme wind speed and the 24-hour ECMWF 10 m wind speed forecasts at different stations in January, April, July and October (unit: m/s)

大风速的相关关系。

从图1和图2可以看出,EC预报风速与极大风速的均方根误差和平均偏差稳定且集中,除小东屿站4月EC预报风速与极大风速的均方根误差较大外,其他站点不同月份下两者的均方根误差均在5 m/s以下(见图2a)。平均偏差方面,除小东屿站4月、7月风级偏大时的平均偏差较大外,其余站点和月份的平均偏差都保持在 ± 3 m/s范围内(见图2b),相较于平均风,EC预报风速和极大风速的平均偏差在风级偏大时异常偏小。

通过不同站点极大风速与EC细网格10 m风速24 h预报结果的偏差箱线图(图略)可知,各站的预报偏差中位数在0.15~2.50 m/s之间,预报风速大于极大风速,其中小东屿站4月预报风速的偏差离散度最小,且偏差中位数接近0,白石山站的总体预报偏差离散度较大。同时,白石山站和金钟塔站2016—2020年4月、7月的预报偏差离散度较大,1月、10月则较小,而小东屿站则相反。

图3为EC细网格10 m风速24 h预报和实测极大风速的散点图、相关系数(r)、相对误差(RE)和均方根误差(RMSE)。由图中可以看出,除小东屿站1月(见图3c)外,EC细网格预报风速和实测极大风速的相关系数均达到0.5以上,相关性较好。金钟塔1月和10月预报风速与极大风速的相关系数最大,分别为0.86和0.85,均通过了95%的显著性 t 检

验(见图3a、3j)。总体上看,相较于白石山站和金钟塔站,小东屿站EC细网格10 m风速24 h预报与极大风速的相对误差和均方根误差最小、预报效果最好,这可能与该站位于远离岸线的开阔海域、无地形遮挡有关。总体而言,EC细网格数值预报对小东屿站极大风速的预报效果优于白石山站和金钟塔站。

2.2 不同风向下的对比分析

为了评估EC细网格10 m风向24 h预报在象山港不同区域的预报性能,图4为不同站点预报和观测风向的频率分布。从图中可以看出,金钟塔站1月与小东屿站7月、10月的EC预报风向与实测风向基本一致;金钟塔站4月、7月的预报与实测主导风向略有差异,预报主导风向为SSE,实测主导风向为S,10月预报主导风向为NNW,实测主导风向为S;白石山站预报与实测风向有明显的季节性差异,其中1月、10月的预报主导风向为NNW,实测风向为NW,预报一致性较高;4月、7月预报主导风向为SSE,而实测为ENE,但其余两站表现为与预报风向一致的偏南风,这很可能与象山港东北—西南向深入内陆的狭长半封闭喇叭口地形有关。从以上分析可以看出,小东屿站的EC预报风向和实测风向概率分布虽然在数值上存在一定的差异,但分布形式基本一致,表明EC细网格10 m风向24 h预报可以反映出实际风向的分布情况。

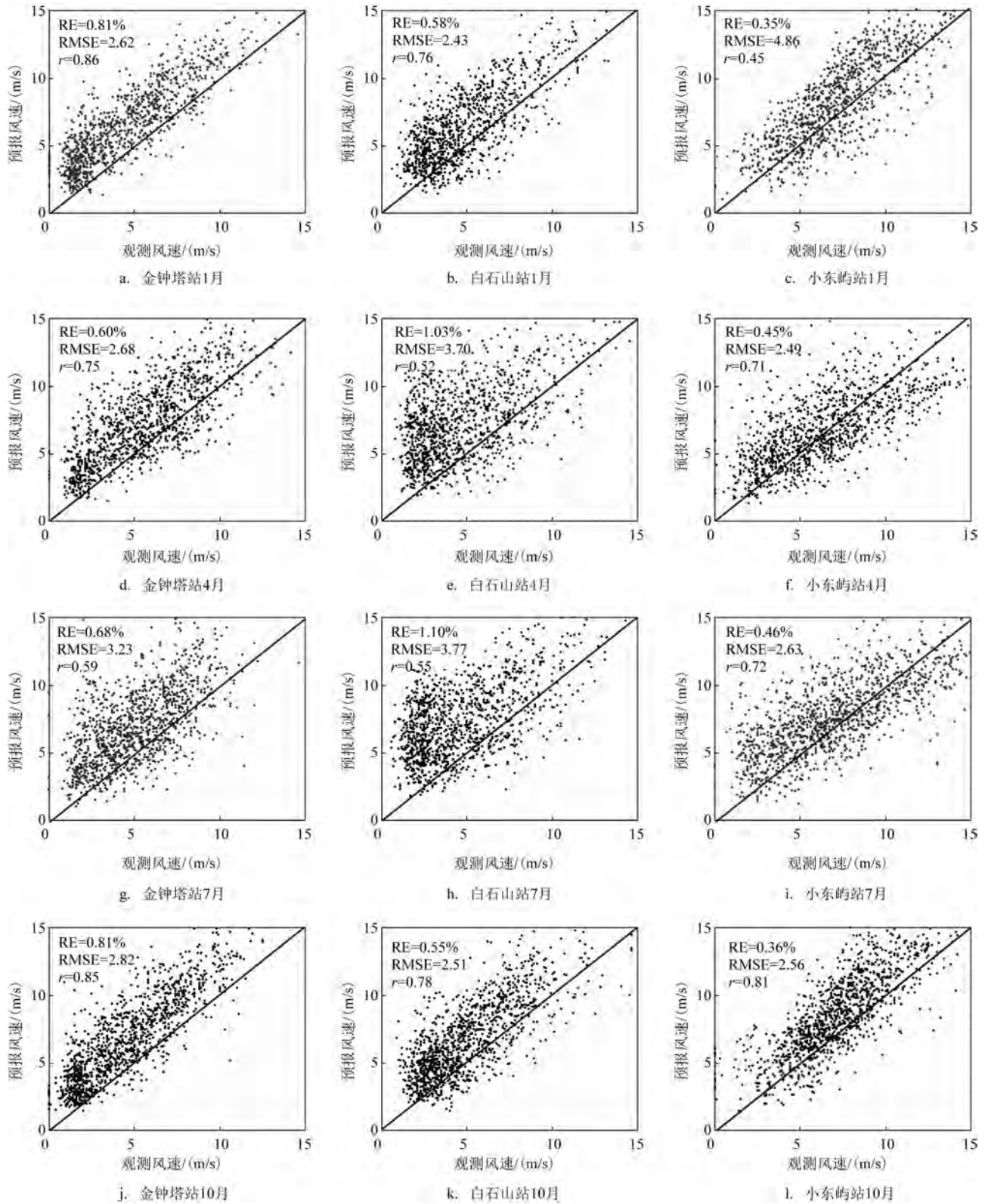


图3 EC细网格10 m风速24 h预报结果与代表站点实测极大风速散点图、相对误差、均方根误差和相关系数

Fig.3 Scatter plot, relative error, root mean square error, and correlation coefficient between the 24-hour ECMWF 10 m wind speed forecasts and the observed maximum wind speed at representative sites

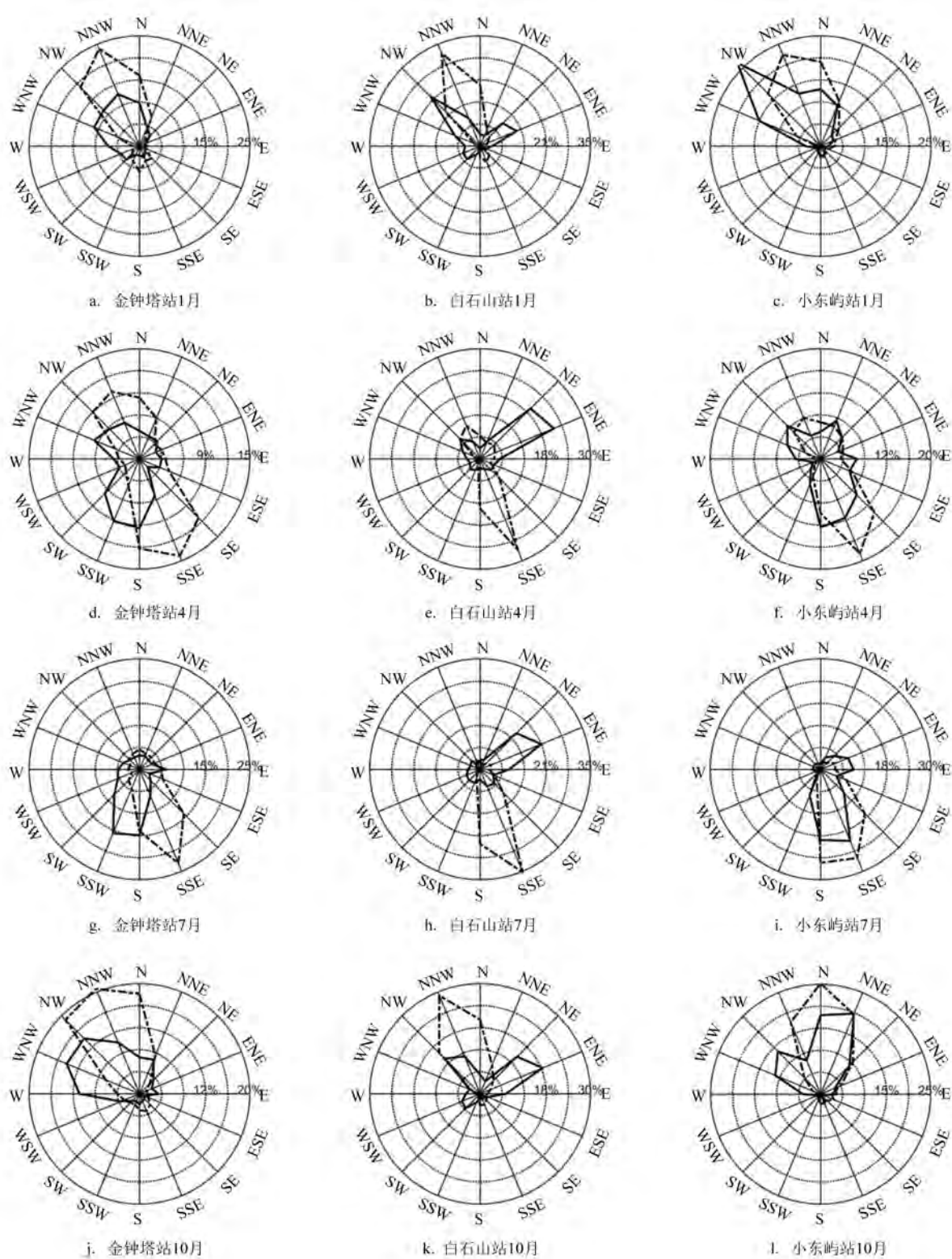


图4 EC细网格10 m风向24 h预报结果(虚线)与代表站点实测风向(实线)频率分布

Fig.4 Frequency distribution of the 24-hour ECMWF 10 m wind direction forecasts (dotted line) and the observed wind direction at representative sites (solid line)

通过对比不同风速下EC细网格24 h预报风向和实测风向的平均偏差分布(图略),平均偏差基本集中在 $-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间,风速越小,偏差样本的离散度越大。相较其他两站,小东屿站各月平均偏差集中在 $-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间的散点最多,表明该站EC预报风向偏差离散度最小,与实际风向更为接近。风向平均偏差统计方法参考吴俞等^[13],即以不同风速下的风向作为起点 0° ,偏向该风向左边(逆时针方向)的为负值,变化范围为 $-180^{\circ}\sim 0^{\circ}$,偏向右边(顺时针方向)的为正值,变化范围为 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 。

图5为不同风向条件下的风向预报平均偏差。3个站点均表现出当EC预报风向为南风时,预报偏差较大,即风向为S、SE和SW的预报平均偏差的误差条较长,表明EC对南风的预报能力较差,1月、10月体现的最为明显。相比于南风,EC模式对各站点北风的预报能力则较强,表现在各站点不同月份对于风向为N的预报平均偏差条较短。EC预报对东/西风的预报结果则没有显著偏差。总体上可以得出与上文一致的结论,即EC数值预报风向与小东屿站各月实况风向的平均偏差较其他两个站偏小,表明该模式对小东屿站的风向预报能力较高。

3 模式预报订正方法对比

本文利用2016—2019年数据作为训练集,2020年数据作为测试集,分别运用PDF、LSTM对风速预报结果进行订正,以评估两种算法在象山港区域的适用性。图6、7分别是两种方法在不同风速等级下订正前后的平均偏差和均方根误差对比。结果显示:相较于LSTM,PDF更适用于金钟塔站,其在所有风级下的订正效果均好于LSTM,有效降低了预报误差。对于白石山站和小东屿站,LSTM的整体订正效果更好,预报误差降低50%左右,但在小风速等级下的订正效果不如PDF。不论是平均偏差还是均方根误差,LSTM在大风速等级(7级及以上)下的订正能力更优,能更有效地减少预报误差。

总体而言,PDF适用于受到城市下垫面影响较小(如金钟塔站)和风速等级较小(≤ 3 级)的情况;而LSTM对于白石山和小东屿站的预报结果有更明显的改进,且在大风速等级(7级及以上)下的作用更为突出,可用于沿海和近海海面大风速的预报订正。

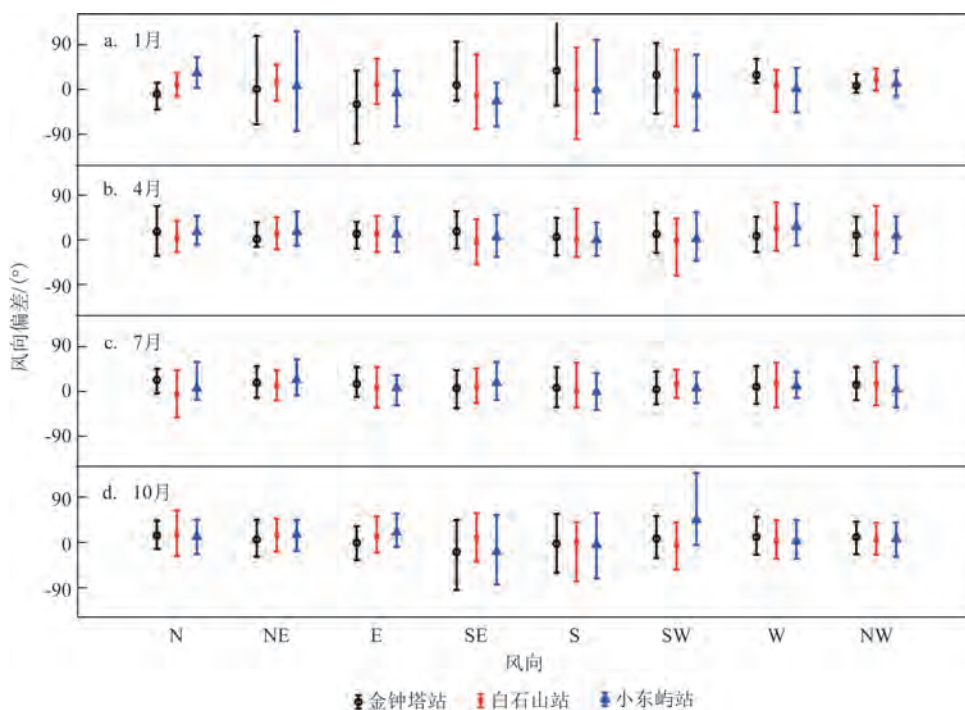


图5 不同风向条件下的风向预报平均偏差

Fig.5 Mean deviation of wind direction forecasts under different wind direction conditions

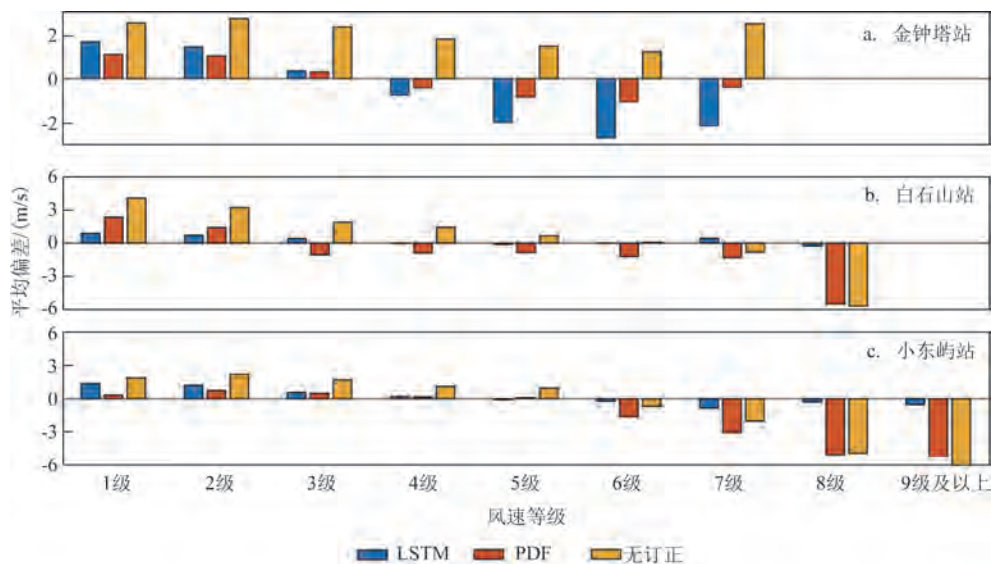


图6 2020年EC细网格10 m风速预报产品订正前后平均偏差对比

Fig.6 Comparison of mean deviation of wind speed forecasts before and after correction

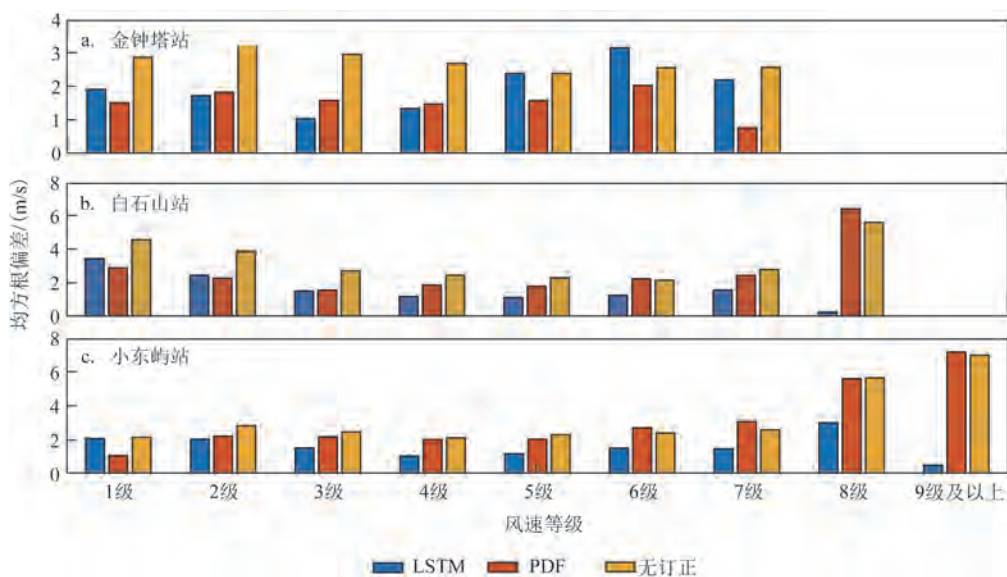


图7 2020年EC细网格10 m风速预报产品订正前后均方根偏差对比

Fig.7 Comparison of root mean square error of wind speed forecasts before and after correction

4 结论

①对于陆地和内港而言,EC预报风速总体大于实况极大风速,外港区域则存在对小量级风速预报偏大、大量级风速预报偏小的误差特点;其中EC对陆地和内港6级风的预报效果最好,对外港呈现明显的季节性变化,春夏季对4级风的预报效果较好,

秋冬季则对7级风的预报最优。

②EC对外港的风速预报优于内港和陆地,各站的EC预报与实况的偏差中位数在0.15~2.50 m/s之间,对内港和陆地春夏季的预报偏差离散度较大,秋冬季较小,而外港则相反。

③EC预报风向偏差多集中于 $\pm 45^\circ$,风速越小,风向预报偏差样本的离散度越大;EC对偏北、东南

和西南风向预报的误差较小,而对偏南风向的预报效果较差。

④与LSTM相比,PDF更适用于内港和陆地,其在所有风级下的订正效果均更优,且有效降低了预报误差;LSTM对海上风速预报的整体订正效果更好,但对小风速等级(3级及以下)的订正效果不如PDF,而在大风等级(7级及以上)下的订正能力明显更优,因此LSTM可用于沿海和近海海面大风速的预报订正。

本文仅仅选取4个月份代表不同季节,此方法具有一定的局限性,应增大数据量做进一步研究。此外,除PDF和LSTM外还应采取更多方法开展模式风速订正效果的对比,这将是未来需要开展的工作。

参考文献:

- [1] 李敏,王辉,金敏华. 中国近海海面风场预报方法综述[J]. 海洋预报, 2009, 26(3): 114-120.
LI M, WANG H, JIN Q H. A review on the forecast method of China offshore wind[J]. Marine Forecasts, 2009, 26(3): 114-120.
- [2] 毛绍荣,林镇国,梁健,等. 广东沿海强东北季风的概率预报方法[J]. 热带气象学报, 2003, 19(1): 94-100.
MAO S R, LIN Z G, LIANG J, et al. The probability forecast technique on strong northeast monsoon along the coast of Guangdong[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2003, 19(1): 94-100.
- [3] 杨景泰,隋玉秀,肖剑,等. 大连地区ECMWF细网格10 m风场与观测实况对比与检验[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(1): 73-81.
YANG J T, SUI Y X, XIAO J, et al. Comparison and verification of 10 m wind field based on ECMWF fine grid and observations in Dalian[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021, 37(1): 73-81.
- [4] 连喜虎,刘桂艳,高松,等. EC细网格10 m风场产品在渤、黄、东海海域的预报能力检验与评估[J]. 海洋预报, 2020, 37(6): 74-82.
LIAN X H, LIU G Y, GAO S, et al. Evaluation of the ECMWF forecast skills for the 10 m wind field in the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(6): 74-82.
- [5] 薄文波,高山红,王永明. 基于WRF模式的渤海海面风的预报与订正[J]. 海洋湖沼通报, 2013(3): 37-44.
BO W B, GAO S H, WANG Y M. Forecast and correction of the Bohai sea surface wind based on WRF model[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2013(3): 37-44.
- [6] ISAKSEN L, JANSSEN P A E M. Impact of ERS scatterometer winds in ECMWF's assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2004, 130(600): 1793-1814.
- [7] LEUTBECHER M, LOCK S J, OLLINAHO P, et al. Stochastic representations of model uncertainties at ECMWF: state of the art and future vision[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2017, 143(707): 2315-2339.
- [8] 曾瑾瑜,韩美,吴幸毓,等. WRF、EC和T639模式在福建沿海冬半年大风预报中的检验与应用[J]. 海洋科学, 2015, 39(7): 75-85.
ZENG J Y, HAN M, WU X Y, et al. Test and application of WRF, EC and T639 Models in strong wind forecasting in Fujian coast in winter half year[J]. Marine Sciences, 2015, 39(7): 75-85.
- [9] 方艳莹,申华羽,涂小萍,等. ECMWF细网格对浙江沿海10 m风预报性能评估[J]. 中国农学通报, 2019, 35(13): 119-125.
FANG Y Y, SHEN H Y, TU X P, et al. ECMWF fine mesh: forecast performance evaluation of 10 m wind in Zhejiang coastal area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(13): 119-125.
- [10] 万瑜,曹兴,窦新英,等. ECMWF细网格数值预报产品在乌鲁木齐东南大风预报中的释用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(1): 32-38.
WAN Y, CAO X, DOU X Y, et al. The application of ECMWF refined net numerical forecast data in the southeast gale in Urumqi[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, 8(1): 32-38.
- [11] 杨亦萍,史珩瑜,刘力源,等. 冬春季动量下传引发浙江沿海灾害大风过程分析[J]. 海洋预报, 2022, 39(3): 66-74.
YANG Y P, SHI H Y, LIU L Y, et al. Analysis of the disastrous gale caused by downward transportation of momentum in the coastal areas of Zhejiang province in winter and spring[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(3): 66-74.
- [12] 刘彬贤,陈宏,左涛,等. 基于EC集合预报的渤海灾害性大风风速预报方法研究[J]. 海洋预报, 2018, 35(2): 19-26.
LIU B X, CHEN H, ZUO T, et al. EC ensemble forecast on severe gale speed in the Bohai Sea[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(2): 19-26.
- [13] 吴俞,冯文,李勋,等. ECMWF细网格10 m风场产品在南海海域的预报检验[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(9): 204-212.
WU Y, FENG W, LI X, et al. On forecast test of ECMWF 10 m wind field products in South China Sea[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 40(9): 204-212.
- [14] 方楠,姜舒婕,闫晓敏,等. 基于长短期记忆神经网络的风速超短期快速滚动预报技术[J]. 气象科技, 2022, 50(6): 842-850.
FANG N, JIANG S J, YAN X M, et al. Research on ultra short-term fast rolling prediction technology of wind speed based on LSTM neural network[J]. Meteorological Science and Technology, 2022, 50(6): 842-850.
- [15] 吴迪,田宏强,刘辉,等. 基于相似卡尔曼滤波的安徽省WRF模式风速预报订正[J]. 气象与环境学报, 2023, 39(4): 31-37.
WU D, TIAN H Q, LIU H, et al. Bias correction of wind speed forecasts for the WRF model in Anhui province based on the analog Kalman filter method[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2023, 39(4): 31-37.

- [16] MONAHAN A H. The Gaussian statistical predictability of wind speeds[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(15): 5563-5577.
- [17] 王洁, 郭鹏, 何晓凤, 等. 基于测风塔观测资料的近地层风速平面订正[J]. *气象与环境学报*, 2020, 36(6): 115-121.
WANG J, GUO P, HE X F, et al. Research on the correction method of gridded wind speed data based on wind tower observation[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2020, 36(6): 115-121.
- [18] 刘志杰, 刘彬贤, 王锐, 等. 基于传统和深度学习技术的黄渤海大风预报方法研究[J]. *海洋预报*, 2022, 39(6): 34-43.
LIU Z J, LIU B X, WANG R, et al. Research on the gale prediction methods in the Yellow Sea and Bohai Sea based on traditional and deep learning technologies[J]. *Marine Forecasts*, 2022, 39(6): 34-43.
- [19] 钱磊, 邱学兴, 郑淋淋. 基于概率密度匹配方法的 WRF 模式阵风风速误差订正[J]. *气象科技*, 2019, 47(6): 916-926.
QIAN L, QIU X X, ZHENG L L. Error correction of WRF model gust speed based on probability density function matching method[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(6): 916-926.
- [20] 曹萍萍, 肖递祥, 徐栋夫, 等. 基于概率匹配的西南区域模式定量降水订正试验[J]. *气象科技*, 2018, 46(1): 102-111.
CAO P P, XIAO D X, XU D F, et al. Calibration of SWC-WARMS quantitative precipitation based on probability matching method[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2018, 46(1): 102-111.
- [21] 方楠, 谢国权, 阮小建, 等. 长短期记忆神经网络(LSTM)模型在低能见度预报中的应用[J]. *气象与环境学报*, 2022, 38(5): 34-41.
FANG N, XIE G Q, RUAN X J, et al. Application of long short-term memory neural network (LSTM) model in low visibility forecast[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2022, 38(5): 34-41.
- [22] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [23] 张丽旭, 赵敏, 付旭强, 等. 近 22 年来象山港海域水环境变化趋势及 R/S 预测研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2010(1): 115-120.
ZHANG L X, ZHAO M, FU X Q, et al. The variation trend of seawater environment of Xiangshan harbor and study of their R/S forecasting in recent 22 years[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2010(1): 115-120.
- [24] 李婷, 黄秀清, 黄晓琛. 基于遥感技术的海岸带的生态综合评价——以象山港为例[J]. *海洋湖沼通报*, 2023, 45(1): 90-97.
LI T, HUANG X Q, HUANG X C. Integrative assessment of ecosystem based on remote sensing——Xiangshan Bay as a case[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2023, 45(1): 90-97.
- [25] 曹蕾, 乔馨慧. 两次强降雪过程 EC 预报能力检验[J]. *黑龙江气象*, 2020, 37(2): 16-18.
CAO L, QIAO X H. Examination of EC forecasting ability during two heavy snowfalls[J]. *Heilongjiang Meteorology*, 2020, 37(2): 16-18.

Evaluation and correction of ECMWF fine-grid 10 m wind forecasts in Xiangshan Port area

YANG Yiman¹, DENG Qi², ZHANG Shengning³, ZHU Xiaocui³, ZHENG Jian^{3*}

(1. Navigation Department of the China Coast Guard Academy, Ningbo 315801, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Ningbo Fenghua Meteorological Bureau, Ningbo 315500, China)

Abstract: This paper systematically evaluates the accuracy of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) fine-grid 10 m wind forecasts at lead time of 24 hours in the Xiangshan Port area. The 2016–2020 forecasts of January, April, July, and October are validated against the observed wind speed and direction from three representative stations in the Xiangshan Port area. The paper also explores correction effort introduced by probability density matching method and Long Short-Term Memory (LSTM) neural network model. The results show that the peak wind speed forecasts are more accurate than the average wind speed forecasts. The ECMWF forecasts have the best quality for Beaufort scale 6 winds in the inner port area, and exhibit significant seasonal dependence for the outer port area, which shows a better quality for Beaufort scale 4 winds during spring–summer and Beaufort scale 7 winds during autumn–winter. The ECMWF forecasts perform well for maximum

wind speeds in the outer port area, with median errors at all sites remaining at a low level (0.15~2.50 m/s), and the error discreteness is small during spring–summer. The error discreteness is small during autumn–winter in the inner port area. The ECMWF forecasts perform well for northerly, southeasterly, and southwesterly winds, while bad for southerly. The wind direction forecasts are generally accurate in the outer port area. Compared to the probability density matching method, the LSTM algorithm demonstrates a comprehensive advantage in correcting wind speed forecasts, particularly for higher wind speeds, which suggests that the LSTM algorithm is suitable for correcting high wind speed forecasts in coastal and nearshore areas.

Key words: Xiangshan Port; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; 10 m wind; evaluation; correction