

NCEP/NOAA 全球预报产品在江苏近岸及长江口外的精度评估

袁祖晴¹, 高寒旭¹, 胡翌哲¹, 燕俊羽², 张国胜¹, 王晓春^{1*}, 徐淑雯³,
陈智强⁴, 陈旻豪⁴

(1. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044; 3. 自然资源部南通海洋中心, 江苏 南通 226000; 4. 上海海洋中心气象台, 上海 200000)

摘要: 利用2021年1—7月江苏近岸和长江口外13个测风站、3个波浪浮标的观测数据, 与美国国家环境预报中心/美国国家海洋和大气管理局(NCEP/NOAA)全球预报系统的风场、波浪预报数据进行对比。结果表明: 与上一代预报产品相比, 目前全球业务预报产品在风场预报方面的准确度明显提高, 江苏近岸地区的风速预报误差明显小于长江口外地区, 24 h风速和风向预报的均方根误差分别为2 m/s和45°。对大风天、大浪天环境下全球预报产品精度的评估表明: 大风天风速预报精度在长江口外降低, 在江苏近岸无明显变化, 风向预报精度在长江口外无明显变化, 在江苏近岸提高; 大浪天波高、浪向的预报精度分别降低、提高。在台风极端天气条件下, 全球预报产品对长江口的风场仍有一定的预报能力, 但预报的最大风速的出现时间滞后6~9 h, 且无法预报出风速剧烈变化的情况。尝试基于长短期记忆网络方法利用NCEP/NOAA预报及观测改进业务预报, 可以改善短期单站预报水平。

关键词: 江苏近岸及长江口外; 预报评估; 风场; 有效波高; 长短期记忆网络; 海上风电业

中图分类号: P731.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)04-0032-11

0 引言

近年来, 海上风电技术在国内迅速发展^[1-3], 江苏近岸及长江口地区建设了大量海上风电场^[2], 这对当地的风场和波浪预报提出了更高的要求。海上风电场在施工及运营的不同阶段需要不同时效和精度的风场和波浪预报, 同时对预报准确度也有严格要求。因此, 江苏近岸及长江口外风电场的发展需要针对性更强的预报。

已有学者针对长江口外地区的风场和波浪预报进行了研究。邓心怡等^[4]利用2019年美国国家环境预报中心/美国国家海洋和大气管理局(National Centers for Environmental Prediction / National Oceanic and

Atmospheric Administration, NCEP/NOAA)的全球业务预报产品, 针对风电场的需求评估了该产品对长江口外风速和有效波高的预报精度。结果表明: 大于6 m/s风速的24 h预报准确率达到46.3%, 长江口灯船站48 h预报的有效波高均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)在0.25 m以下。2020年9月NCEP/NOAA更新了全球业务预报系统, 因此, 有必要评估更新后的系统对风场及波浪预报的精度。另外, 在将全球业务预报产品用于某一特定区域时, 其精度往往不能满足实际应用的要求。我们尝试用长短期记忆网络方法(Long Short-Term Memory, LSTM)对预报产品进行订正, 以提高该产品在江苏近岸及长江口外的精度。

收稿日期: 2023-03-18。

基金项目: 南京信息工程大学大学生创新创业训练计划项目(XJDC202210300134)。

作者简介: 袁祖晴(2002-), 女, 本科在读, 主要从事海洋气象预报方面研究。E-mail: 1743623117@qq.com

*通信作者: 王晓春(1966-), 男, 教授, 博士, 主要从事大尺度海气相互作用、海洋模式研发及应用和区域海洋动力过程研究。E-mail: xcwang@nuist.edu.cn

为了更好地在江苏近岸及长江口外地区使用2020年更新后的NCEP/NOAA全球预报产品,本研究利用2021年1—7月该区域13个测风站和3个波浪浮标的观测数据,对新一代NCEP/NOAA全球预报系统的风场及波浪预报结果进行评估,特别评估了极端天气下气象、海洋要素(大风天风场、大浪天波浪及台风“烟花”过境前后风场)的预报精度,并比较全球预报系统更新前后风速预报的精度。另外,我们基于LSTM方法对长江口灯船站点的预报风速进行订正,以提高产品的精度,该方法可以在业务预报中使用,研究结果可以为江苏近岸和长江口外地区的海上风电行业及业务预报提供参考。

1 资料与方法

1.1 预报产品及观测资料

风场预报来自2020年全方位更新后的NCEP/NOAA全球预报系统的全球集合天气预报系统(Global Ensemble Forecast System v12, GEFSv12)。这个系统的动力学使用有限体积网格(Finite-Volume Cubed-Sphere, FV3)的动力学框架^[5]。系统的水平分辨率为全球25 km,垂直方向为64层,每天在06时(世界时,下同)、12时和18时进行16 d预报,在00时进行35 d预报,结果为31个成员的集合预报。输出结果前10 d的时间分辨率为3 h,10 d后的时间分辨率为6 h。在正式使用前,这一系统经过了全面的检验^[6],包括500 hPa高度场、台风个例、强影响天气等,但这些检验主要针对北美地区进行。

有效波高和浪向预报来自NCEP/NOAA的全球波浪集合预报系统(Global Wave Ensemble System v3.0.9, GWESv3.0.9)。空间分辨率为25 km,集合预报的成员数量为31,每天提供3次全球16 d波浪预报(06时、12时、18时)以及1次35 d预报(00时)。波浪预报的风场强迫场来自于NCEP/NOAA的全球集合天气预报系统。

选取2021年1—7月江苏近岸和长江口外13个测风站和3个波浪浮标的观测数据来评估全球预报产品。13个测风站遍布江苏—上海的海岸线,可以代表苏北、苏南、长江口等不同地区的状况(见图1)。实测数据的时间分辨率为10 min。

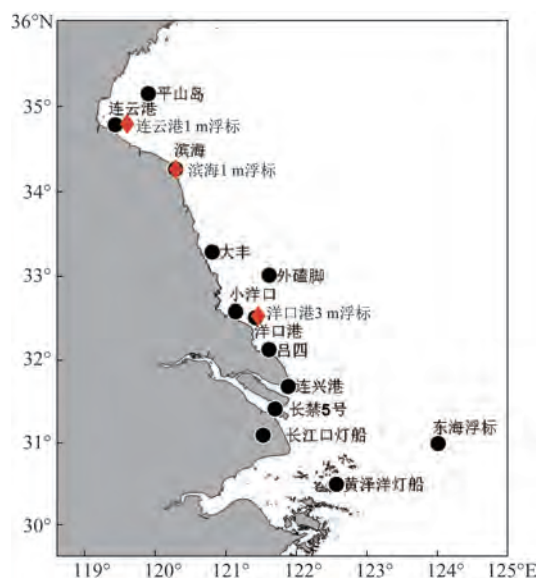


图1 验证全球风场及波浪预报的江苏近岸、长江口外站点分布

Fig.1 Distribution of nearshore stations in Jiangsu coastal region and Yangtze River estuary used to verify NCEP/NOAA global wind and wave forecasting

1.2 资料处理

为了比较NCEP/NOAA预报产品与观测资料的差异,对时间分辨率为10 min的观测资料进行3 h平均,在空间上使用双线性插值,将预报风场和波浪场分别插值到13个风观测站和3个波浪浮标站的观测结果中。长禁5号站的测风高度为海拔3 m,江苏近岸9个测风站的海拔均高于10 m(见表1)。在中性层结假定下,将各站点的实测风速订正到10 m高度,订正公式为:

$$|V_{10}| = \left[\frac{\log(10/z_0)}{\log(z/z_0)} \right] |V| \quad (1)$$

式中: V_{10} 为10 m高度的风速; V 为高度 z 处的风速;粗糙度 z_0 的计算公式为:

$$z_0 = z \exp \left[-c_0 + c_1 \log \left(\frac{ak^2 V^2}{gz} \right) \right] \quad (2)$$

式中: c_1 为0.165; a 为0.032; k 为0.4;重力常数 g 为9.81 m/s²^[7]。

在计算风场、浪向预测的RMSE之前,将两者统一为去向。当预报与观测的方向差别大于180°时,对二者进行订正,使其差别小于180°。订正方法为先计算预报与观测方向的差值,即:

表 1 验证全球风场及波浪预报的江苏近岸、长江口外站点

Tab.1 Nearshore stations in Jiangsu coastal region and Yangtze River estuary for verification of global wind and wave forecasts

| 序号 | 站点名称 | 站点经度/E | 站点纬度/N | 观测要素 | 风仪或浮标高度/m |
|----|------------|------------|-----------|------|-----------|
| 1 | 东海浮标 | 124°00' | 31°00' | 风 | 10.0 |
| 2 | 黄泽洋灯船 | 122°33'50" | 30°30'13" | 风 | 10.0 |
| 3 | 长江口灯船 | 121°31'48" | 31°06' | 风 | 10.0 |
| 4 | 长禁 5 号 | 121°41'55" | 31°25'03" | 风 | 3.0 |
| 5 | 连云港 | 119°26'32" | 34°46'40" | 风 | 37.6 |
| 6 | 平山岛 | 119°54'31" | 35°08'20" | 风 | 62.0 |
| 7 | 滨海 | 120°17'38" | 34°15'38" | 风 | 19.5 |
| 8 | 大丰 | 120°48'37" | 33°17'06" | 风 | 20.0 |
| 9 | 外礁脚 | 121°36'57" | 33°00'39" | 风 | 20.1 |
| 10 | 小洋口 | 121°8'30" | 32°35'00" | 风 | 19.5 |
| 11 | 洋口港 | 121°25'23" | 32°30'51" | 风 | 32.3 |
| 12 | 吕四 | 121°36'44" | 32°07'53" | 风 | 22.1 |
| 13 | 连兴港 | 121°53'03" | 31°41'19" | 风 | 22.0 |
| 14 | 连云港 1 m 浮标 | 119°36'34" | 34°47'20" | 浪 | — |
| 15 | 滨海 1 m 浮标 | 120°17'48" | 34°15'30" | 浪 | — |
| 16 | 洋口港 3 m 浮标 | 121°27'26" | 32°32'13" | 浪 | — |

$$\Delta\alpha = \alpha_m - \alpha \quad (3)$$

式中： α_m 是模式预报方向； α 是观测方向。当差值大于 180° 时，进行以下订正：

$$\alpha_m = \begin{cases} \alpha_m - 360^\circ, & \Delta\alpha > 180^\circ \\ \alpha_m + 360^\circ, & \Delta\alpha < -180^\circ \end{cases} \quad (4)$$

基于空间、时间插值及订正后的预报和观测数据，计算各站点的相关系数 (Correlation Coefficient, Corr)、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、均方根误差、偏差 (Bias)，定量评估全球预报系统对风场和波浪预报的精度。

1.3 评估极端天气下 NCEP/NOAA 全球预报系统的精度

当施工人员进行高空作业、吊装等海上风电维修活动时，风速强、浪高大等极端天气状况会导致施工难度较高，容易发生安全问题。有关部门规定在风速大于 8 m/s 时停止作业（有些公司采用 6 m/s 或 10 m/s ），基于此标准和其他行业规定，依据实际

观测资料，将一天中有两个及以上时次出现观测风速大于 8 m/s 、有效波高大于 1 m 的天分别定义为大风天、大浪天。

针对江苏近岸和长江口外地区的 13 个测风站和 3 个波浪浮标站点，根据观测数据选取各站的大风天、大浪天，分别评估大风天和所有天的风场，大浪天和所有天的波浪预报。在本文的研究时间段内，各站点大风天、大浪天分别为 $30 \sim 77 \text{ d}$ 、 $10 \sim 50 \text{ d}$ 。

在台风等极端天气发生时，全球预报系统在特定区域的精度尤其值得关注。台风“烟花”于 2021 年 7 月 25 日登陆舟山普陀区，强度为台风级，并于 7 月 26 日上午 9 点 50 分（北京时）在浙江省平湖市沿海再次登陆，登陆时强度为强热带风暴级，然后经过江浙沪及长江口外地区，引起局地的极端天气^[8]。在途经长江口地区时，台风“烟花”对附近的风电基础设施、风机运维活动造成很大影响。本研究也评估了台风“烟花”期间风场及波浪的预报精度。

1.4 LSTM方法

LSTM方法通过长期得到的数据来预报未来短期的结果,具有计算效率高、可迁移性强、协同性好和灵活性优的特点^[9],既可用于海洋环境预报,又可用于海洋数值预报结果的订正^[10]。最近几年,LSTM方法已经被应用在短期风速预报研究中。王国松等^[11]、JASEENA等^[12]分别建立并提出各自用于短期风速预报的LSTM模型并与其他模式、模型进行对比,研究结果均表明,使用LSTM方法可以提高短期风速预报的精度。

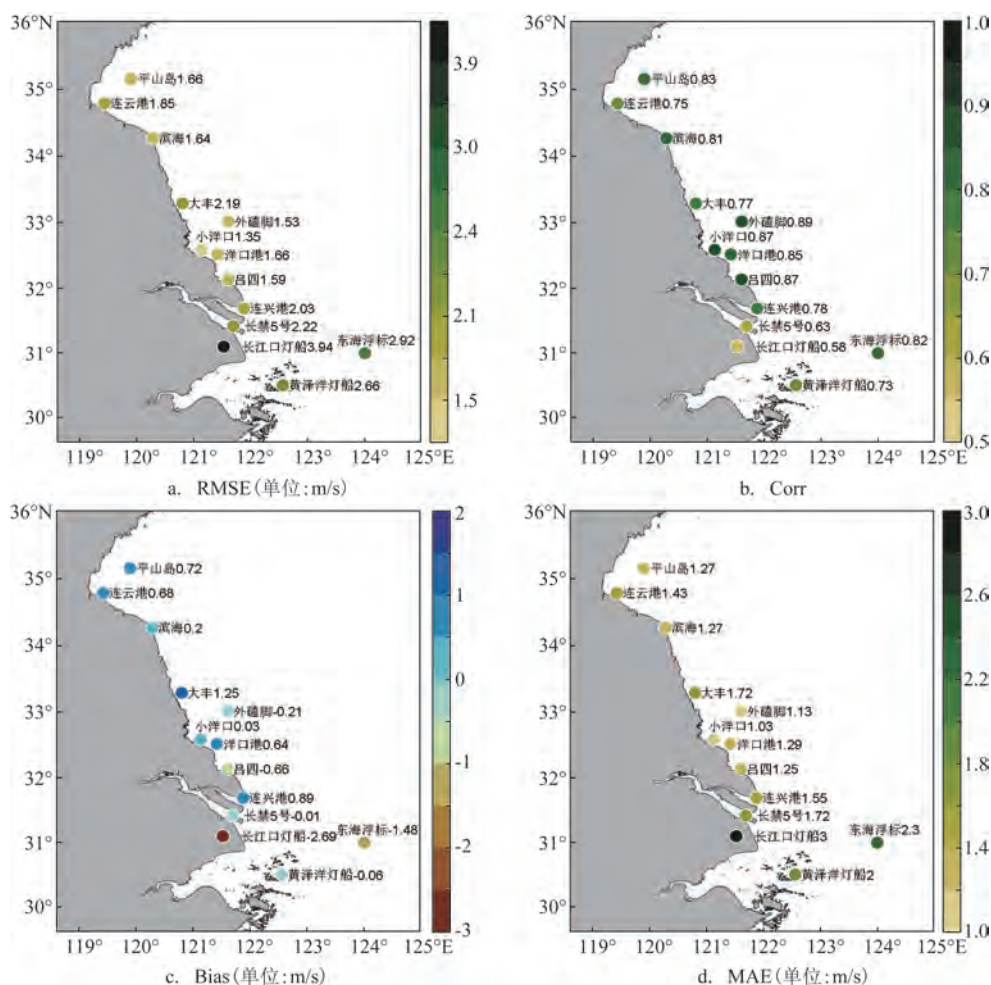
考虑到实际业务需要,本研究使用LSTM方法制定两种方案来订正预报精度较差站点的风速预报。方案1只基于预报数据建立LSTM模型,应用场景为只有预报数据,模型的输入、输出均为某一

预报时效下的预报数据。方案2基于观测和预报数据建立LSTM模型,应用场景为既有预报数据又有实时观测数据,输入某一预报时效下的两种数据后,可输出该预报时效下的预报数据。模型的预报时效为10 d,时间分辨率为3 h。使用以上两个模型分别预报风速,比较预报结果和对应观测数据的RMSE。在实际业务中,可以依据资料获取情况和均方根误差采纳合适的预报方案,从而得到更准确的预报。

2 结果

2.1 风场预报

图2是13个测风站24 h风速预报的相关系数、平均绝对误差、均方根误差、偏差的空间分布图。



注: 站点位置处的标注为站点名称和数值

图2 24 h风速预报评估指标的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of evaluation indicators of 24 hours wind speed forecasts

江苏沿海及长江口近岸 24 h 风速预报的 RMSE 在 1.3~3.9 m/s 之间, MAE 在 1.0~3.0 m/s 之间,但长江口外站点(东海浮标、黄泽洋灯船、长江口灯船、长禁 5 号)24 h 风速预报的 RMSE、MAE 均在 2.5~3.0 m/s 之间(见图 2a、2d)。比较不同站点预报的 RMSE 和 MAE 可知,长江口外站点 24 h 风速预报的误差比江苏近岸大,站点间的风速预报精度差异在

更长的预报时效内也存在(见图 3)。由偏差的空间分布来看,长江口外 4 个站点的偏差均为负值,说明预报风速比实测风速偏小,其中长江口灯船、东海浮标站最明显,而江苏近岸站点的偏差基本为正值,预报风速整体比实测风速大(见图 2c)。图 3a、3b 是风速、风向的 RMSE 随时间的变化情况,其中,平均 RMSE 指某个预报时效内所有站点预报 RMSE

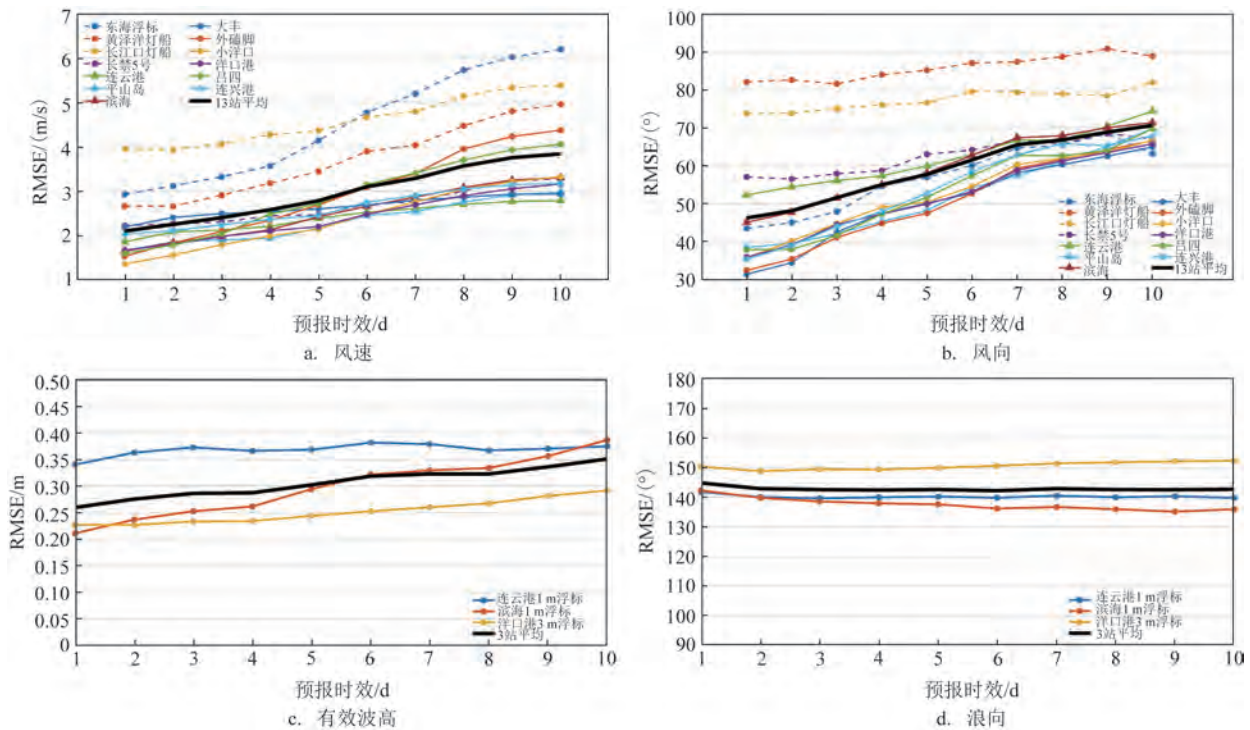


图3 风场、波浪预报的均方根误差随时间的变化

Fig.3 Evolution of the RMSE of wind and wave forecasts

的平均值。第 1~3 d 风速、风向的平均 RMSE 分别在 2.0~2.5 m/s, 45°~55° 之间(见图 3a、3b)。

邓心怡等^[4]对 2019 年 8—10 月上一代 NCEP/NOAA 全球预报系统在长江口外的风速预报进行了评估,结果显示东海浮标、长江口灯船、长禁 5 号站点第 1 d 风速预报的 RMSE 分别为 5.80 m/s、4.78 m/s、4.57 m/s。与邓心怡等^[4]的结果相比,更新后的 NCEP/NOAA 预报系统的风速预报精度明显提高(见图 4),其中长禁 5 号、长江口灯船 24 h 风速预报的 RMSE 分别减小 51.42%、17.57%。

2.2 波浪预报

图 5 为 3 个波浪浮标站点 24 h 有效波高预报的

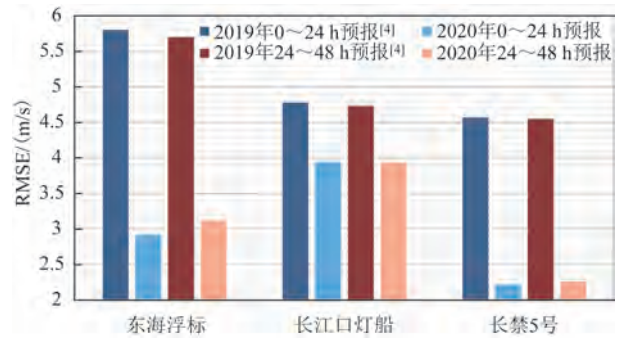


图4 全球预报系统更新前后长江口外站点风速预报精度对比

Fig.4 Comparison of wind speed forecasting RMSE at stations outside the Yangtze River estuary between the previous and current versions of the NCEP/NOAA Global Forecast System

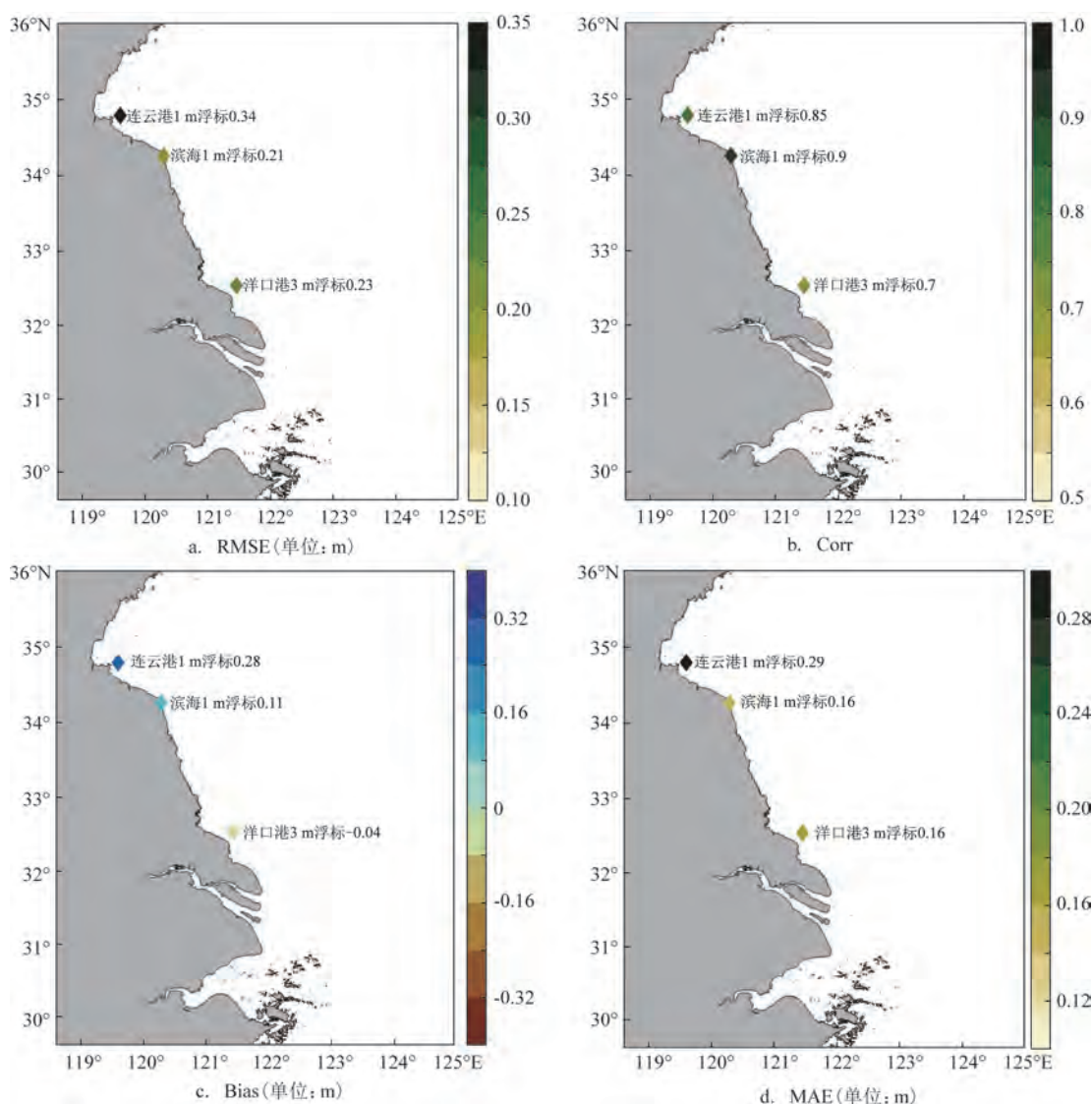
相关系数、平均绝对误差、均方根误差、偏差的空间分布。比较图5中不同站点的预报误差评估指标可知,站点位置越偏北,有效波高的RMSE越大,偏差的绝对值越大,平均绝对误差也越大,即站点的有效波高预报误差越大。图3c、3d分别是有效波高、浪向预报误差随时间的变化。由图3c可知第1~3 d有效波高的平均RMSE在0.26~0.29 m之间,误差随预报时效的增加而增大。连云港站点有效波高的RMSE整体最大,第1~3 d的RMSE均大于0.34 m,高于所有站点的平均值;洋口港站点有效波高的RMSE整体最小,第1~3 d的RMSE在0.20~

0.25 m内,低于所有站点的平均值。第1~10 d浪向预报的平均RMSE在142.5°~145.0°之间(见图3d)。

2.3 极端天气时的风场、波浪预报

2.3.1 大风天风场预报精度

图6a、6b是13个测风站大风天风速预报与观测的相关系数和均方根误差随预报时效的变化情况。从图中可以看出,长江口外4个站点(东海浮标、黄泽洋灯船、长江口灯船、长禁5号)预报与观测的相关系数都小于江苏近岸站点,而RMSE则相反,即长江口外的4个站点风速预报的精度比江苏近岸站



注:站点位置处的标注为站点名称和数值

图5 24 h有效波高预报评估指标的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of evaluation indicators of 24 hours significant wave height forecasts

点略差。

对比大风天(见图6b)与所有天(见图3a)风速预报的RMSE可知,大风天长江口外4个站点的风速RMSE增加,最大增幅在2 m/s以上,江苏近岸9个站点前3 d的RMSE有所增加但不明显。因此,与所有天相比,大风天长江口外站点的风速预报精度明显降低,江苏近岸站点的风速预报精度几乎不变。

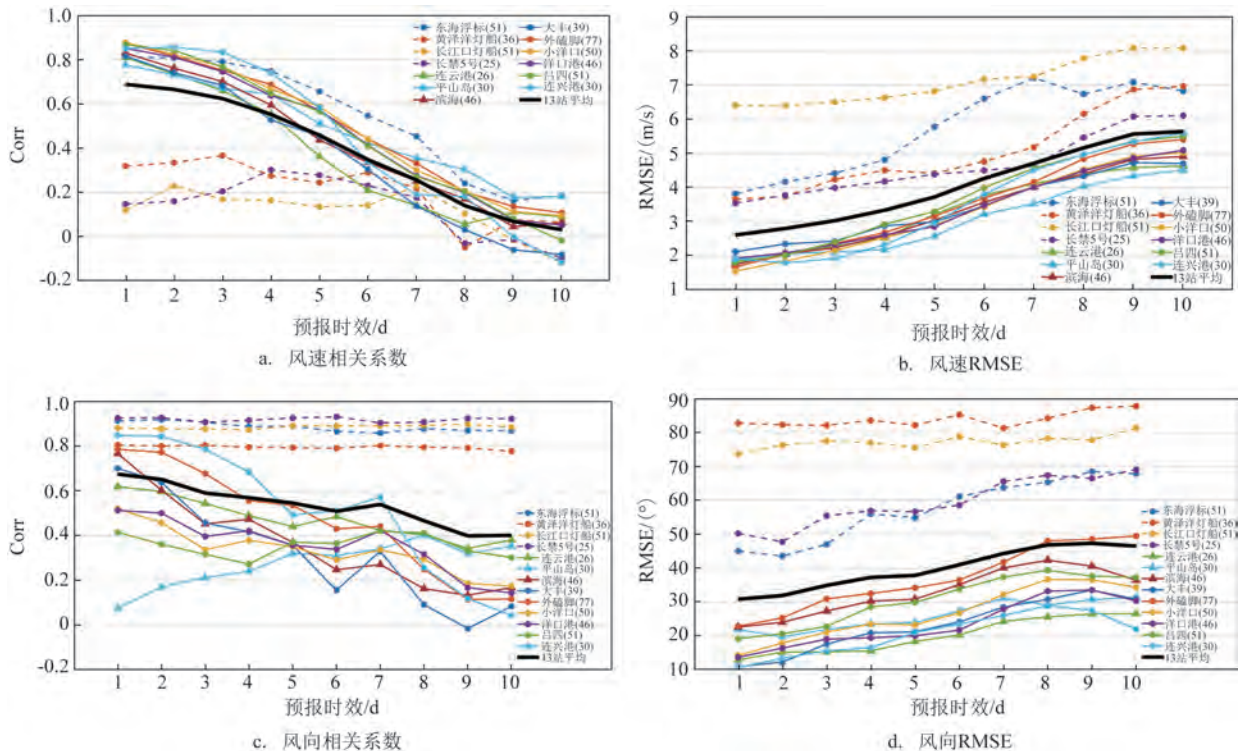
图6c、6d是大风天风向预报与观测的相关系数和均方根误差随预报时效的变化情况。从图中可以看出,长江口外4个站点的风向RMSE远大于江苏近岸站点,所以大风天长江口外站点的风向预报效果比江苏近岸略差。

对比大风天(见图6d)与所有天(见图3b)风向预报的RMSE可知,大风天长江口外4个站点的风向RMSE略微减小,江苏近岸9个站点的风向RMSE明显减小。因此,相对于所有天来说,大风天长江口外站点的风向预报精度无明显变化,江苏近岸站点的风向预报精度提高。

2.3.2 大浪天波浪预报精度

图7a是3个波浪浮标站点大浪天有效波高预报的RMSE随预报时效的变化情况。由图可知,随着预报时效的延长,有效波高预报的RMSE整体增大。在各站点中,连云港浮标的波高预报精度最低,第1~3 d的RMSE为0.41~0.52 m,波高的RMSE在各站点中最大;滨海浮标的波高预报精度最高,第1~3 d的RMSE在0.3 m以下,波高的RMSE在各站点中最小。对比大浪天(见图7a)与所有天(见图3c)波高预报的RMSE可知,大浪天波高的RMSE整体上增加1 m左右,预报精度降低,但是滨海浮标第1~3 d的RMSE几乎不变,预报精度没有变化。

图7b是大浪天浪向预报的RMSE随预报时效的变化情况。由图可知,各站点浪向预报的RMSE均在 $30^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间,几乎不随预报时效变化。对比大浪天(见图7b)与所有天(见图3d)浪向预报的RMSE可知,大浪天预报的RMSE普遍减小,各站点平均RMSE由原来的 140° 降至 60° ,即大浪天浪向



注:括号里为该站点的大风天、大浪天天数

图6 大风天预报与观测的评估指标随预报时效的变化

Fig.6 Evaluation indicators of wind speed and direction between forecast and observation on windy days with different lead time

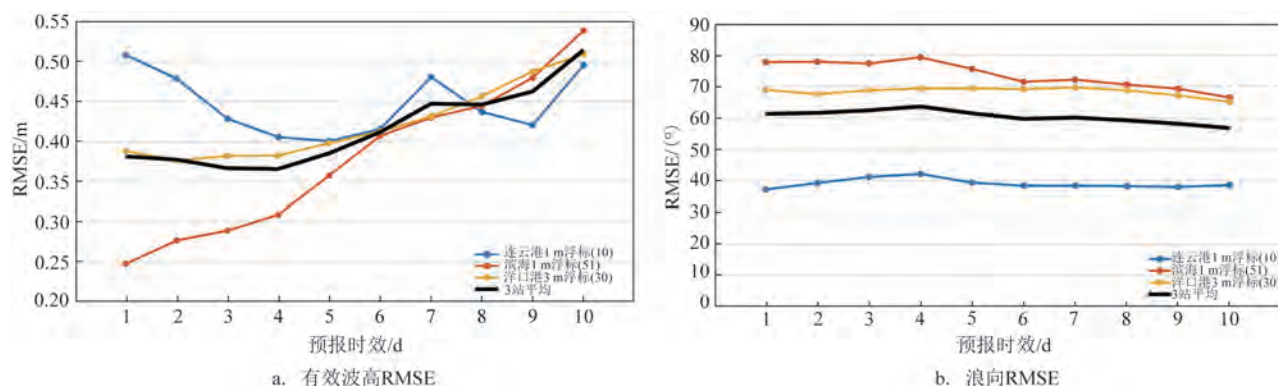


图7 大浪天有效波高、浪向预报与观测的均方根误差随预报时效的变化

Fig.7 RMSE of significant wave height and direction forecasts on large wave days with different lead time

预报精度增加。

2.4 台风“烟花”过境时风场的预报精度

在高影响天气状况下,预报精度对于业务化应用更加重要。本文特别分析了研究时间段内台风过境前后的预报精度变化。台风“烟花”在2021年7月25—26日经过长江口时,附近黄泽洋灯船、长江口灯船站点的风场、波浪都有所响应。由于缺少以上站点的波浪观测数据,所以只评估风场预报的精度。江苏近岸站点、东海浮标和长禁5号站距离台风相对较远,受其影响较小,因此不对这些站点的预报精度进行分析。

图8a、8b为台风“烟花”过境前后长江口外站点风场24 h预报和实测的对比。由图可知,在台风极端天气下,全球预报产品对风速极大值出现时间的预报存在6~9 h的误差。在黄泽洋灯船站点,风速预报和实测值的相关系数为0.73, RMSE为2.66 m/s,台风经过前(25日08—16时)后(25日16时—26日00时)的风速预报误差比台风经过时(25日16时)小。长江口灯船站点风速的预报值整体偏小,预报和实测值的相关系数为0.58, RMSE为3.94 m/s。邓心怡等^[4]分析了台风“米娜”在长江口区域过境时更新前的NCEP/NOAA全球风场预报产品在东海浮标处的风速预报精度,发现预报的最大风速的出现时间较实况滞后6 h左右,这与本研究的结果类似。但由于风速大小、站点位置和台风本身的差异,在风速频繁变化的情况下(见图8a、8b),全球预报产品对风速的预报效果比邓心怡的分析结果略差。风向预报与实测结果的吻合程度较高(见图

8c、8d),且变化趋势在时间上高度一致,两个站点的相关系数均达到0.8以上,黄泽洋灯船和长江口灯船站点预报与实测的RMSE分别为82.10°、73.81°,比所有天风向的预报误差更小。这一结果与大浪天和所有天的浪向预报评估以及大风天和所有天的风向预报评估结果类似,说明在极端天气下,风向和浪向的预报精度比所有天更高,这可能是因为全球预报系统能预报出高影响大尺度天气过程的环流形势。

2.5 使用LSTM方法订正风速预报

风场和波浪全球预报产品的精度往往不能满足特定区域社会应用的需要,对于局地站点,可以利用观测结果对预报结果进行订正^[4]。本文使用LSTM方法,利用全球预报产品和观测结果对预报精度偏低的站点进行订正,以提高预报精度。在实际的应用场景下,本文的方法可以直接用于台站预报的订正。以预报精度相对较低的长江口灯船站点为例,使用LSTM方法对风速预报进行订正。将该站点2021年1—7月风速的观测、预报数据按8:2比例划分为训练集和测试集,分别采用1.4中的方案1和方案2预报风速。

考虑到预报时效越长,预报精度越低,选取第1~3 d(0~72 h)的风速预报结果进行LSTM方法试验。在不同的预报时效下,第1 d风速预报的RMSE降低最明显,为0.63 m/s,相较于订正前的RMSE减小了16.04%,风速订正效果显著。对比使用两种预报方案的风速RMSE可知(见图9),方案2比方案1的预报精度更高,当预报时效为1~3 d时,方案2较

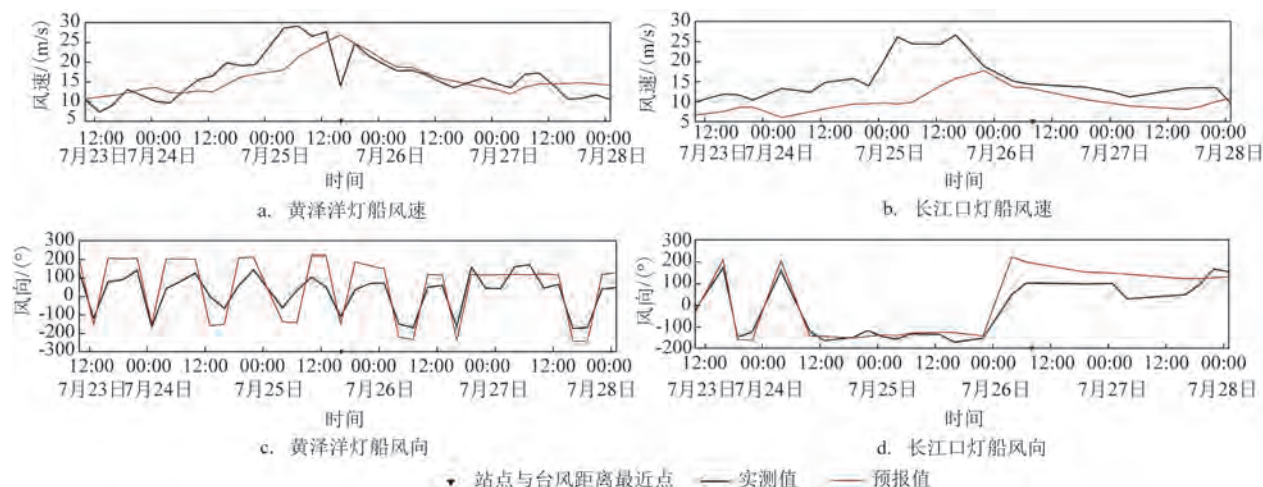


图8 台风“烟花”过境前后长江口外站点风场24 h预报和实测的对比

Fig.8 Comparison of 24 hours wind between forecast and observation at stations around the Yangtze River estuary before and after the passing of Typhoon "In-Fa"

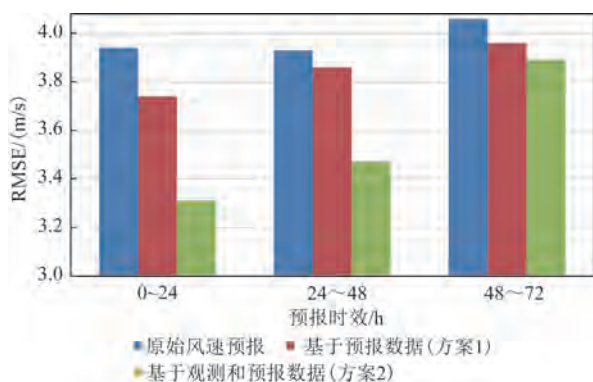


图9 采用不同LSTM预报方案的风速RMSE对比

Fig.9 Comparison of wind speed RMSE among different LSTM forecast schemes

方案1的预报RMSE可减小0.1~1.0 m/s。

3 结论

本研究评估了2020年9月更新后的NCEP/NOAA全球预报系统产品在江苏近岸和长江口外的预报精度,观测数据来源于近岸的13个测风站和3个波浪浮标站。利用邓心怡等的研究结果,对比了NCEP/NOAA预报系统更新前后的预报精度。就风场预报误差的空间分布而言,江苏近岸站点比长江口外4个站点的预报精度高。相较于更新前的系统,目前的全球预报系统在风速预报方面的准确

程度明显提高。

对大风天的风场、大浪天的波浪和台风“烟花”过境前后风场的预报精度进行分析。结果表明:与所有天相比,大风天的风速预报精度在长江口外降低,在江苏近岸几乎不变;风向预报精度在长江口外无明显变化,在江苏近岸提高。大浪天有效波高预报精度降低,浪向预报精度提高。在台风极端天气下,风场预报结果可以反映整体形势,但无法预报出几小时内风速频繁变化的情况,且预报出的最大风速的出现时间滞后,而风向预报精度与无台风情况下差别不大。

使用LSTM方法采用两种预报方案对长江口灯船站点的风速预报进行订正。在两种方案中,方案2(基于观测和预报数据)的预报精度更高,与订正前相比,24 h内风速预报的RMSE降低约16%。

目前的全球预报产品对于江苏沿岸及长江口近岸地区海上风电场的运维活动具有一定的参考价值。更高精度的预报将依赖于更高分辨率的全球产品或区域预报系统。利用一些统计方法和观测资料对全球预报产品进行订正也可以提高预报精度。

参考文献:

- [1] 李英,王森.我国海上风电发展面临的挑战与法律建议[J].大众用电,2019(6): 6-7.
LI Y, WANG M. Challenges and legal suggestions for development of offshore wind power in China[J]. Popular Utilization of

- Electricity, 2019(6): 6-7.
- [2] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2021 年中国海上风电装机容量统计[J]. 风能, 2022(8): 46-49.
- Wind Energy Professional Committee of China Renewable Energy Society. Statistics of Chinese offshore wind power installed capacity in 2021[J]. Wind Energy, 2022(8): 46-49.
- [3] 夏云峰. 2021 年全球新增风电装机 93.6 GW[J]. 风能, 2022(6): 38-43.
- XIA Y F. 93.6 GW of new wind power installed capacity in 2021 [J]. Wind Energy, 2022(6): 38-43.
- [4] 邓心怡, 黎北梅, 王晓春, 等. 2019 年 8—10 月长江口近岸海上风电场风浪预报[J]. 海洋预报, 2021, 38(4): 45-52.
- DENG X Y, LI B M, WANG X C, et al. Wind and ocean wave forecasts for the offshore wind farms near the Changjiang River estuary from August to October 2019[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(4): 45-52.
- [5] LIN S J. A "Vertically Lagrangian" finite-volume dynamical core for global models[J]. Monthly Weather Review, 2004, 132(10): 2293-2307.
- [6] GUAN H, ZHU Y, SINSKY E, et al. The NCEP GEFS-v12 reforecasts to support subseasonal and hydrometeorological applications[R]. STI Climate Bulletin, 2020: 79-82.
- [7] ATLAS R, HOFFMAN R N, ARDIZZONE J, et al. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(2): 157-174.
- [8] 唐飞, 陈凤娇, 诸葛小勇, 等. 利用卫星遥感资料分析台风“烟花”(202106)的影响过程[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 703-716.
- TANG F, CHEN F J, ZHUGE X Y, et al. Analysis of influence process of Typhoon In-Fa (202106) based on satellite remote sensing data[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 703-716.
- [9] 李扬, 刘玉宝, 许小峰. 基于深度学习改进数值天气预报模式和预报的研究及挑战[J]. 气象科技进展, 2021, 11(3): 103-112.
- LI Y, LIU Y B, XU X F. Advances and challenges for improving numerical weather prediction models and forecasting using deep learning[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2021, 11(3): 103-112.
- [10] SCHULTZ M G, BETANCOURT C, GONG B, et al. Can deep learning beat numerical weather prediction? [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2021, 379(2194): 20200097.
- [11] 王国松, 王喜冬, 侯敏, 等. 基于观测和再分析数据的 LSTM 深度神经网络沿海风速预报应用研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(1): 67-77.
- WANG G S, WANG X D, HOU M, et al. Research on application of LSTM deep neural network on historical observation data and reanalysis data for sea surface wind speed forecasting[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(1): 67-77.
- [12] JASEENA K U, KOVOOR B C. Deep learning based multi-step short term wind speed forecasts with LSTM[C]//Proceedings of the Second International Conference on Data Science, E-Learning and Information Systems (DATA'19). Dubai: Association for Computing Machinery, 2019: 7.

Accuracy assessment of the NCEP/NOAA global forecasting product around Jiangsu coastal region and Yangtze River estuary

YUAN Zuqing¹, GAO Hanxu¹, HU Yizhe¹, YAN Junyu², ZHANG Guosheng¹, WANG Xiaochun^{1*}, XU Shuwen³, CHEN Zhiqiang⁴, CHEN Minhao⁴

(1. School of Marine Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Nantong Ocean Centre, Ministry of Natural Resources, Nantong 226000, China; 4. Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 200000, China)

Abstract: The observation data of 13 wind stations and 3 wave buoys around Jiangsu coastal region and Yangtze River estuary from January to July 2021 are used to compare with the wind and wave forecasts from the National Centers for Environmental Prediction/National Oceanic and Atmospheric Administration (NCEP/NOAA) global forecasting system. The results show that compared with the previous generation version of the NCEP/NOAA global forecasting system, the current version improves significantly in wind forecasts. The wind speed forecast error outside the Yangtze River estuary is greater than that in the Jiangsu coastal region, where the root mean squared errors of 24 h wind speed and direction forecasts are 2 m/s and 45 degrees, respectively. Wind speed forecasting accuracy on windy days decreases outside the Yangtze River estuary, but does not change obviously

in the Jiangsu coastal region. Wind direction forecasting accuracy does not change obviously outside the Yangtze River estuary, but increases in the Jiangsu coastal region. The accuracy of wave height and direction forecasts on high wave days decreases and increases, respectively. Under extreme weather conditions, the global forecasting system also demonstrates capability to forecast wind around the Yangtze River estuary, but the timing of maximum wind speed is delayed by 6~9 h, and the drastic wind speed change cannot be predicted. Combining the Long Short-Term Memory method and the NCEP/NOAA data can improve the short-term single-station forecast.

Key words: Jiangsu coastal region and Yangtze River estuary; forecast evaluation; wind; significant wave height; Long Short-Term Memory; off-shore wind power industry