

区域耦合预报系统的中国近海海面风场预报检验评估

张可睿^{1,2}, 李响^{1*}, 张蕴斐¹, 龙上敏², 陈幸荣¹

(1. 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 河海大学海洋学院, 江苏 南京 210024)

摘 要: 利用中国近海浮标观测数据检验评估了国家海洋环境预报中心开发的西北太平洋区域耦合数值预报系统的海面风场预报结果。结果表明:耦合系统对中国近海海域10 m风场的预报性能较好,预报风速与浮标观测风速具有较高的一致性,24 h风速预报绝对误差小于1.5 m/s,系统的预报性能随着预报时效的延长而降低;系统的预报性能在不同海域存在差异,东海区域的预报风速与观测风速最为接近,南海区域两者的相关性最好,但是随着预报时效延长,预报偏差的离散程度变大,预报性能降低;24 h风场的预报性能在不同风级下存在差异,4~6级风速区间的预报性能较好,风速较大时风向的预报性能较好;耦合系统在不同月份的预报性能也存在差异,其中冬季相对较好,夏季较差。

关键词: 区域耦合预报系统;海面风场;检验评估;中国近海

中图分类号: P732.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)06-0001-12

0 引言

中国地处亚欧大陆东部,东临西太平洋,海域范围十分辽阔,面积约为300万平方公里,近海区域包括渤海、黄海、东海和南海,海洋资源极其丰富,地理条件良好。中国近海处于典型的季风区,冬夏季风转换明显,近海海域台风、寒潮等天气状况频繁出现。海面风场会对海上运输、渔业养殖和海洋工程等人类活动产生影响,是十分重要的海上天气要素。海上大风天气是一种常见的灾害性天气,由于其突发性强、阵性明显、瞬时性突出^[1],严重危害着中国沿海地区居民的生命和财产安全,并造成经济和生活上的巨大损失。因此,中国近海海面风场的准确预报对减少海上大风造成的损失和保障沿海地区的社会生产生活尤为重要。

目前,海面风场预报方法主要包括经验预报、统计预报、数值模式预报^[2]和智能预报等,但是业务化预报依旧以数值模式预报为主。在中国近海区

域,众多学者围绕海面风场数值预报系统展开研究,郭民权等^[3]对比了台湾海峡浮标实测数据与第五代中尺度预报模式(Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model, MM5)风场预报结果,发现MM5模式适用于台湾海峡冬季风场的研究,但预报风速在台湾海峡北部偏大、南部偏小。美国各科研机构合作研发的中尺度天气研究预报模式(Weather Research and Forecast, WRF)也被广泛应用于海面风场的预报及台风模拟。薄文波等^[4]基于WRF对渤海海面风场进行预报并订正,结果表明WRF能够较好地反映真实风场的变化趋势;崔琳琳等^[5]分析了2008年东海海面WRF风场和快速散射计(Quick Scaterometer, QuikSCAT)卫星风场差异,发现6—9月风速偏差波动较大,WRF在台风较强时能较好地反映风场特征;刘桂艳等^[6]对2019年渤海WRF预报风场进行了误差分析,发现该模式对黄海海面风场的预报能力优于渤海。

相较于单一数值模式,耦合数值模式对海气相

收稿日期: 2024-01-02。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3008005);中国长江三峡集团有限公司科研项目(202103460)。

作者简介: 张可睿(2000-),女,硕士在读,主要从事风能资源评估工作。E-mail: zkr_0a@163.com

*通信作者: 李响(1986-),男,副研究员,博士,主要从事海气相互作用和数值预报研究。E-mail: lixiang@nmefc.cn

互作用的考虑更加全面,对准确预报海面风场具有重要作用。柳艳菊等^[7]的研究结果表明澳大利亚大气海洋耦合预报模式对2003年和2004年的南海夏季风具有一定的预报能力;詹思琦等^[8]基于区域海气浪耦合模式对无台风和有台风情形下的海面10 m预报风场进行研究,发现该模式在无台风时的预报效果较好;SUN等^[9]建立了一个适用于南海及邻近海域的高分辨率海气浪耦合模式,该模式的72 h预报风速与海洋站点实测风速近似;ZOU等^[10]利用以海洋-大气-波浪-泥沙耦合数值模式(Coupled Ocean - Atmosphere - Wave - Sediment Transport, COAWST)为基础开发的水文气象预报系统对华南沿海地区进行72 h预报模拟,发现预报风速自西南向东北增大,也因此增加了向陆地的水汽输送;董昌明等^[11]构建了一种面向中国边缘海的风浪流多参数耦合预报系统,该系统预报的海面风场与观测风场的空间分布非常一致,但预报的准确性随着预报时长增加而逐渐下降。欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的耦合模式预报产品应用广泛,我国许多学者在近海区域对ECMWF预报的10 m风进行了评估检验。在南海海域,ECMWF模式的预报效果具有季节性差异,春、秋、冬季风速预报平均偏差的大值中心分布比较相似,但均方根误差和方差的分布有差异^[12],ECMWF模式在南海北部对冷空气影响的强风过程预报效果最好^[13];在浙江沿海,ECMWF的预报风场在远离陆地时与观测数据最接近,而海岸线附近的预报效果则较差,并且不同天气情况下模式预报的效果也不同^[14-15];在渤海海域,ECMWF 10 m风场预报结果总体略偏大,其中黄海中部效果优于渤海和黄海北部^[16]。在进行业务化预报和产品输出过程中,对不同数值预报系统的海面风场预报效果开展对比研究也十分必要^[17-20],它不仅能为提高海面风场预报准确率提供参考,还能推动业务工作中数值预报模式的研究与开发。

20世纪70年代后期,国家海洋环境预报中心开始海面风场数值预报研究,建立了数值预报业务化系统^[21],但由于计算机条件限制,该系统未能进行业务预报^[22];后来凌铁军等^[23]利用MM5模式构建了海面风场预报系统,系统对海面风场预报比较准确,效果较好;2015年,该中心开发的西北太平洋区域

耦合数值预报系统(下文简称“耦合预报系统”)实现业务化运行。但是在上述研究中,对海面风场预报性能的评估大部分针对小范围海域,整个近海区域的研究较少,而且缺乏对西北太平洋区域耦合数值预报系统的检验评估工作。因此,本文针对该预报系统近海区域的海面风场预报数据,从不同海域、风级和月份等角度进行评估检验。在结果分析中与前人对主流预报产品的评估结果进行对比,为该业务化预报系统的改进与预报产品的应用提供参考。

1 数据和方法

1.1 数据

本文所用的数据包括中国近海浮标观测数据和国家海洋环境预报中心业务化的耦合预报系统的海面风场预报数据,利用浮标10 m高度观测风速、风向数据对耦合预报系统的10 m预报风场开展评估检验。

浮标观测数据采用自然资源部中国近海业务化的大浮标观测数据,时段为2020年1月1日—12月31日,观测频次为逐小时,选取变量为10 m高度风场。通过数据质量控制,选用中国近海16个浮标站位(见图1)的数据开展耦合预报系统的海面风场评估检验工作,其中,黄海海区包括4个浮标站位、东海海区4个,南海海区8个。

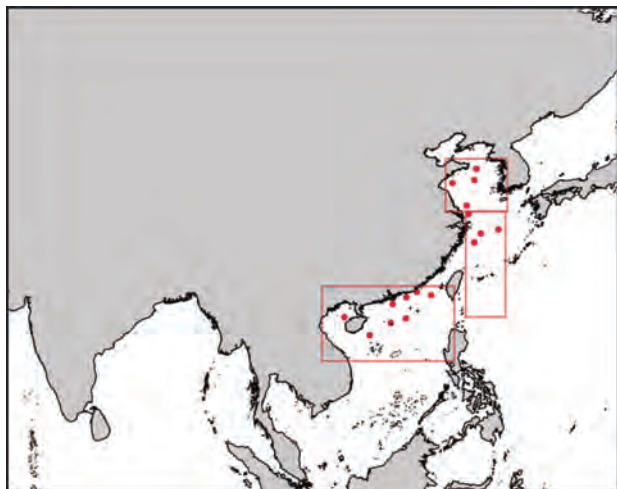


图1 大浮标位置示意图

Fig.1 The location of the buoys

耦合预报系统的各分量模式分别采用区域大气模式 WRF、第三代近岸海浪数值模式(Simulating Waves Nearshore, SWAN)、区域海洋模式系统(Regional Ocean Model-ing Systems, ROMS),耦合器采用 MCT(Model Coupling Toolkit)工具。WRF 分量模式的初边界场来自美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的全球预报系统(Global Forecast System, GFS)的全球预报场,SWAN 分量模式采用热启动方式,初始场由 GFS 分析场的 10 m 风速驱动,通过单独运行 1 天的 SWAN 生成海浪重启场,并作为 SWAN 的初始场,ROMS 分量模式的初边界场来自 NCEP 的气候预报系统(Climae Forecasting System, CFS)的全球海洋预报场^[24]。该预报各分量模式采用一致的 15 km 水平分辨率,开展每天 2 次西北太平洋区域大气、海浪、环流未来 5 天的预报。本文对该系统 2020 年中国近海区域 10 m 高度风场预报进行检验评估。

1.2 评估方法

为了更好地描述耦合预报系统风场的预报效果,本研究计算了各浮标站位观测风场与预报风场之间的相关系数、均方根误差和平均绝对误差等统计量并作为预报指标,在后续数据处理中,计算不同海域范围内各浮标站位评估结果的平均值,作为该海域的预报统计指标。各统计量的计算方式为:

相关系数 r :体现预报数据与观测数据之间的相关性。计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}} \quad (1)$$

式中: b_i 代表预报风场数据; a_i 代表浮标观测数据; n 为数据样本数量。

均方根误差 E_{RMS} :展现预报数据与观测数据之间的偏差,其对异常值更敏感,可以衡量预报数据相较于观测数据的离散程度。计算公式为:

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_i - a_i)^2}{n}} \quad (2)$$

平均绝对误差 E_{MA} :能够反映出预报数据与观测数据之间的误差大小,避免误差相互抵消的问题。计算公式为:

$$E_{\text{MA}} = \frac{\sum_{i=1}^n |b_i - a_i|}{n} \quad (3)$$

2 结果分析

2.1 系统总体预报技巧评估

图2为耦合预报系统预报风速的各评估指标随预报时间的变化图。从图中可以看出,耦合预报系统对中国近海区域的 10 m 风速具有较好的预报技巧,24 h 的平均相关系数超过 0.75,均方根误差为 2 m/s,平均绝对误差小于 1.5 m/s。在中国近海,耦合预报系统的预报风速与观测风速的相关系数为

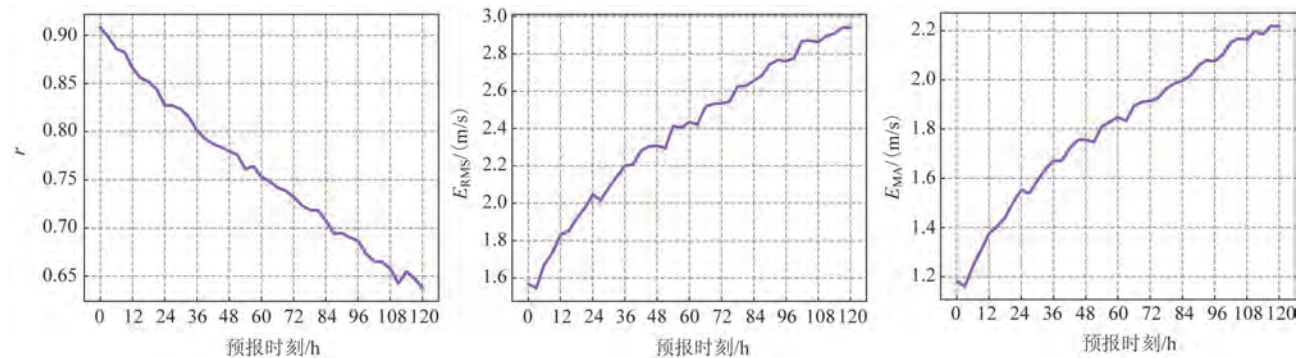


图2 整个近海海域耦合预报系统预报风速与观测风速的相关系数、均方根误差和平均绝对误差随预报时刻的变化图
Fig.2 The diagrams of correlation coefficient, root mean square error and mean absolute error between the predicted and observed wind speed in the whole offshore area with the forecast time

0.64~0.91,均通过了99%的显著性检验,且随预报时效的延长而降低。风速的预报误差随着预报时效的延长而逐渐变大,整个近海海域的均方根误差为1.55~2.94 m/s,平均绝对误差为1.16~2.22 m/s,其中,72 h以内10 m风速的均方根误差均未超过2.53 m/s。

在整个近海海域,风向预报的误差较大,变化范围较广(见图3),均方根误差从36.01°开始增长,到117 h时达到58.61°,120 h稍下降到57.73°,平均绝对误差为25.66°~42.34°,增大趋势与均方根误差相似。总体上,耦合预报系统对中国近海海域10 m风的预报相对准确,但随着预报时刻的延长,系统的准确性逐渐变差,预报误差呈增大趋势,预报系统具有一定的不确定性。

2.2 不同海区预报结果评估

中国近海包含渤海、黄海、东海和南海4个海区,根据浮标位置分布,本文主要对黄海、东海和南海3个海区的预报结果进行评估。如图4所示,不同海区之间10 m风的预报效果存在差异,在风速预报上,南海预报风速与观测风速的相关系数为0.92~0.73且随预报时刻的增加逐渐下降,24 h相关系数为0.86,黄海的相关系数为0.53~0.88,东海的相关系数为0.91~0.56,说明3个海区预报风速与观测风速之间均具有显著的相关关系。整体上,南海的相关系数优于黄海和东海,其中72 h之前东海的相关系数优于黄海,72 h后两个海区的相关系数逐渐接近;在整个预报过程中,南海的相关系数变化趋势

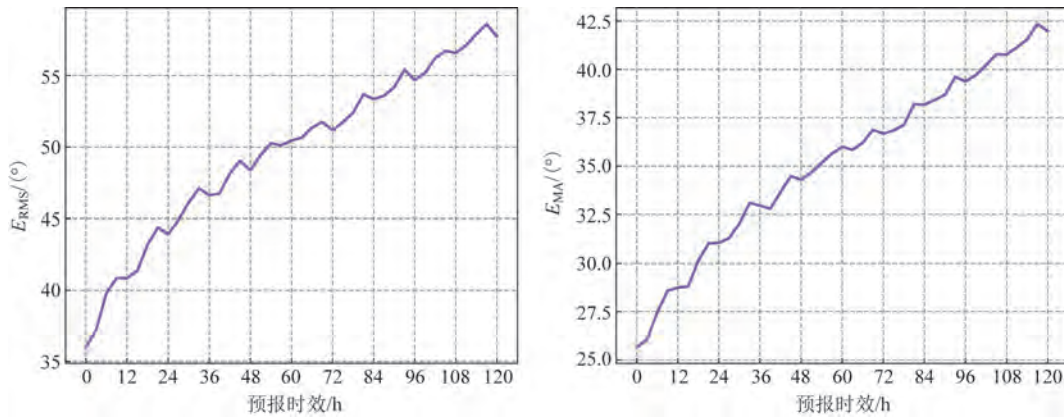


图3 整个近海海域耦合预报系统预报风向与观测风向的均方根误差和平均绝对误差随预报时刻的变化图

Fig.3 The diagrams of root mean square error and mean absolute error between the predicted and observed wind direction in the whole offshore area with the forecast time

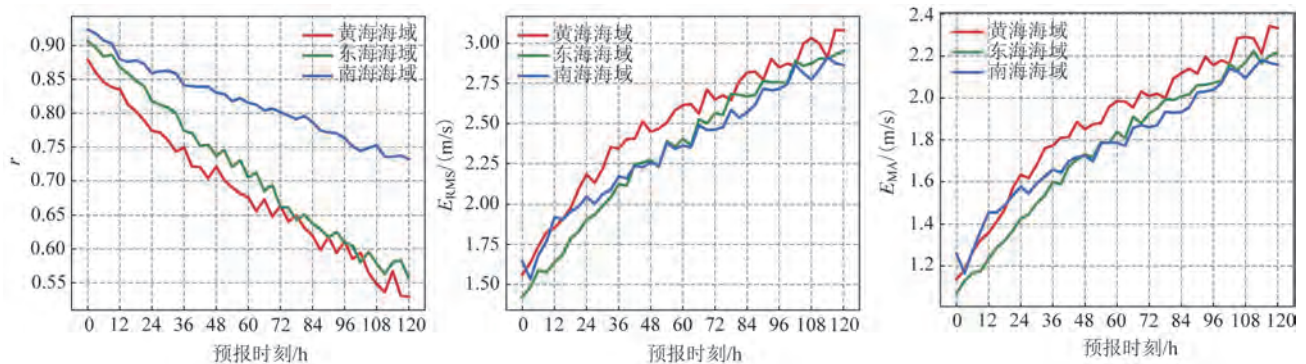


图4 不同海域耦合预报系统预报风速与观测风速的相关系数、均方根误差和平均绝对误差随预报时刻的变化图

Fig.4 The diagrams of correlation coefficient, root mean square error and mean absolute error between the predicted and observed wind speed in different sea areas with the forecast time

相对缓和,东海和黄海的变化趋势相似,下降速度较快,这可能与浮标站位的分布数量有关,本文选取的16个浮标有8个分布在南海,因此南海观测数据较多,样本数量较大,相关性较好。黄海的风速预报误差比南海和东海大,东海和南海的预报误差相近(见图4),黄海的均方根误差从1.56 m/s增大到3.08 m/s,平均绝对误差为1.14~2.33 m/s,24 h后黄海的预报误差变化更加剧烈;东海24 h预报风速的均方根误差为1.90 m/s,小于ECMWF模式浙江沿海与实测风速之间2~3 m/s的均方根误差^[15],42 h前东海的预报误差最小,均方根误差不超过2.25 m/s,平均绝对误差为1.07~1.67 m/s,48 h时两种误差分别达到2.27 m/s和1.73 m/s,此后东海的预报误差一直大于南海;南海的预报误差变动幅度较其他两个海域略小,均方根误差和平均绝对误差分别为1.53~2.91 m/s和1.17~2.18 m/s。根据风速预报误差结果,南海和东海的预报效果相似,黄海的预报效果最差。

耦合预报系统在不同海区的风向预报效果的差异更加明显。根据图5可知,预报风向的误差随着预报时刻的延长逐渐增大,南海的预报误差变化较平缓,黄海和东海的预报误差变化剧烈。最初南海风向的均方根误差最大,东海最小;黄海36 h的均方根误差达到48.22°,超过南海的47.65°,此后随着预报时效的延长误差一直增大;96 h时东海和南海预报风向的均方根误差分别是53.24°和53.06°,此后东海超过南海。从预报风向的平均绝对误差

来看,东海的预报误差(19.40°~40.02°)在任意时刻都小于其他两个海区;与均方根误差相似,南海的平均绝对误差最开始大于黄海,经过48~60 h的交替变化后,黄海的误差超过南海。根据风向预报误差结果,东海的预报效果最好,对风向的预报准确度最高。

图6是24 h、48 h和72 h不同海区预报风速和观测风速的偏差关系箱线图。3个海域预报风速与观测风速的偏差中位数为-0.062~0.606 m/s,在同一预报时刻,东海的风速偏差中位数最接近0,其次是南海,最后是黄海。东海在3个预报时刻的偏差中位数分别是0.008 m/s、0.039 m/s和-0.062 m/s,24 h的预报风速与观测风速最接近;南海24 h、48 h和72 h风速偏差中位数分别是0.335 m/s、0.451 m/s和0.546 m/s,而ECMWF模式的预报偏差为0.7~0.8 m/s^[12],耦合预报系统在南海的预报风速偏差较ECMWF模式小;黄海海区预报偏差中位数分别是0.521 m/s、0.606 m/s和0.561 m/s,ECMWF模式为0.11~0.52 m/s^[16],两个模式的预报水平相当。整体上南海和黄海的预报风速略大于观测风速,3个海区72 h和48 h的风速偏差程度均大于24 h。箱线图能够展现数据的离散程度,东海24 h预报风速偏差的离散程度最小,南海最大,随着预报时效的延长,3个海区的离散程度逐渐变大,72 h预报偏差离散程度最大的是东海,最小的是南海。根据以上分析可知,耦合预报系统10 m风速预报在南海和黄海的的结果偏大,东海海域10 m风速24 h和48 h的预报结

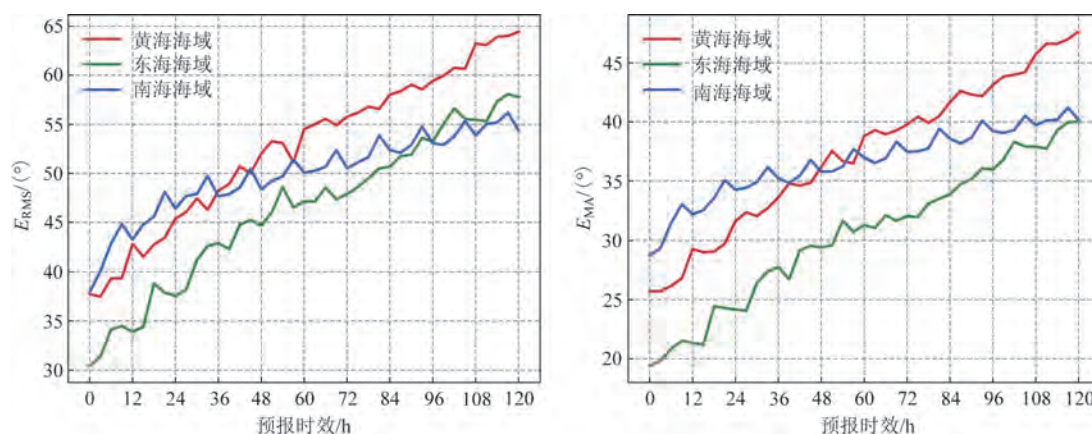


图5 不同海域耦合预报系统预报风向与观测风向的均方根误差和平均绝对误差随预报时刻的变化图

Fig.5 The diagrams of root mean square error and mean absolute error between the predicted and observed wind direction in different sea areas with the forecast time

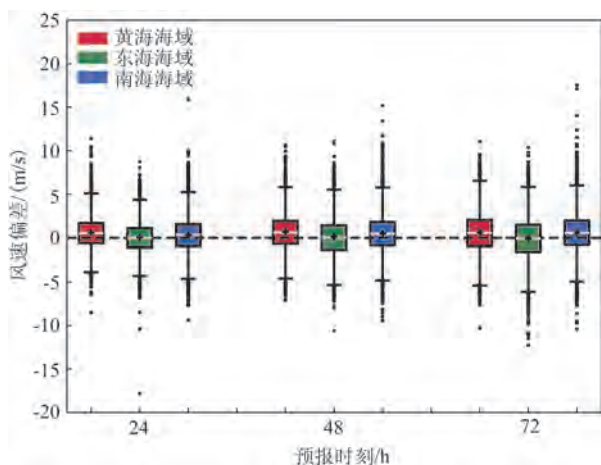


图6 24~72 h不同海域耦合预报系统预报风速与观测风速的偏差箱线图

Fig.6 Box diagram of the 24~72 h deviations between the predicted and observed wind speed in different sea areas

果偏大,72 h的偏小,3个海区中东海的预报效果最好;随着预报时刻的增加,各海区预报偏差的离散程度以及与观测风速的偏离程度逐渐增大,预报结果逐渐变差。

为了更直观地展现预报风速与观测风速的关系,绘制24 h、48 h和72 h预报风速和观测风速的散点分布图。在整个近海海域(见图7a),预报风速略大于观测风速,大部分风速集中在2~10 m/s,随着预报时刻增加,拟合线逐渐靠近预报风速,风速偏差增大,集中程度变得松散并向周围分散。3个海区分别比较来看(见图7b—d),在同一预报时刻,东海与南海风速的预报结果优于黄海,从风速集中程度来看,黄海的风速最小(3~9 m/s),南海的风速最大(3~13 m/s);随着预报时刻增加,3个海域也展现出与整个近海海域相似的变化,风速的集中程度变差,预报偏差增大,但根据拟合线和数据集中程度的结果可看出,南海的风速预报效果最好,东海次

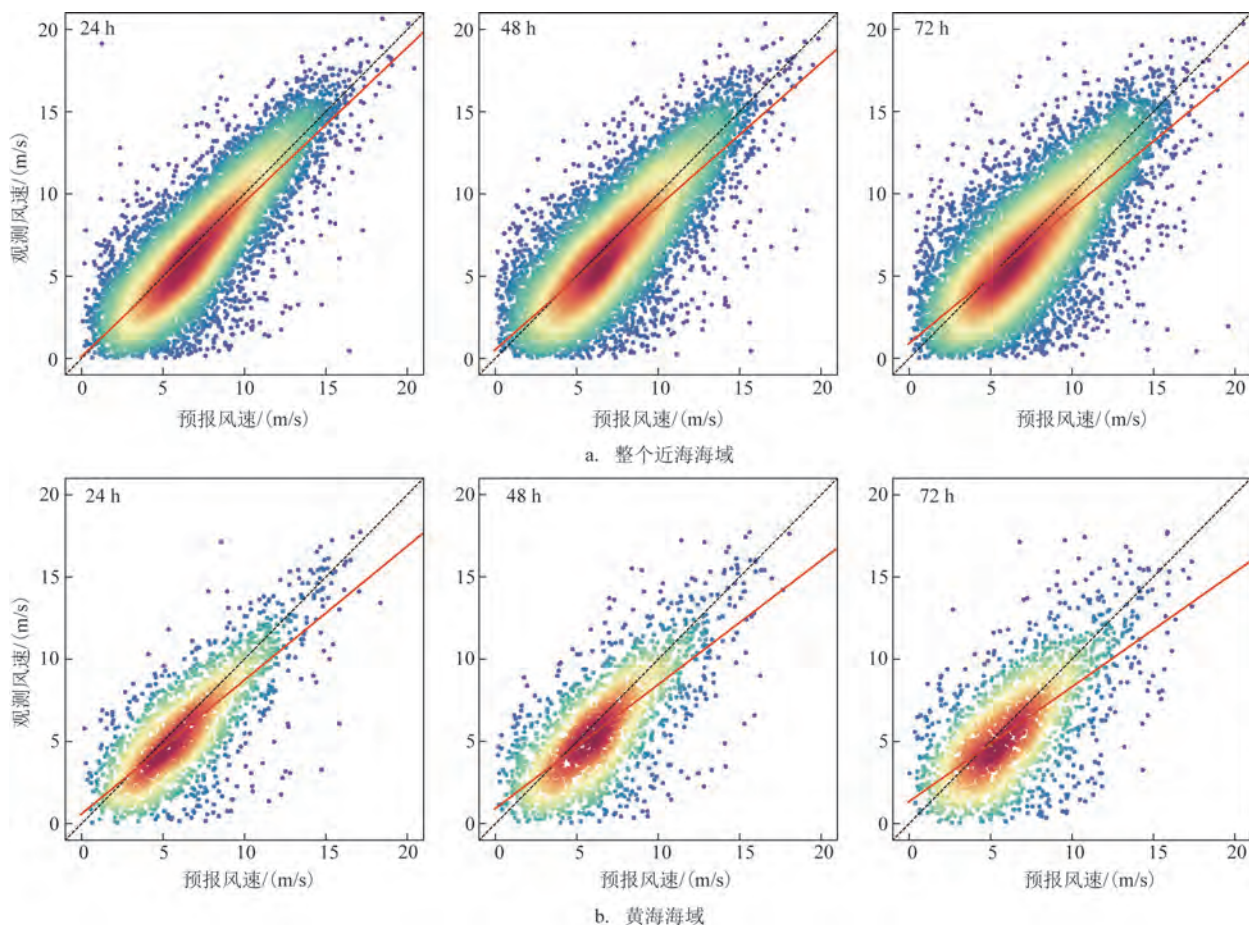


图7 24~72 h耦合预报系统预报风速和观测风速的散点分布图

Fig.7 The scatter diagrams of the predicted and observed wind speed from 24 h to 72 h

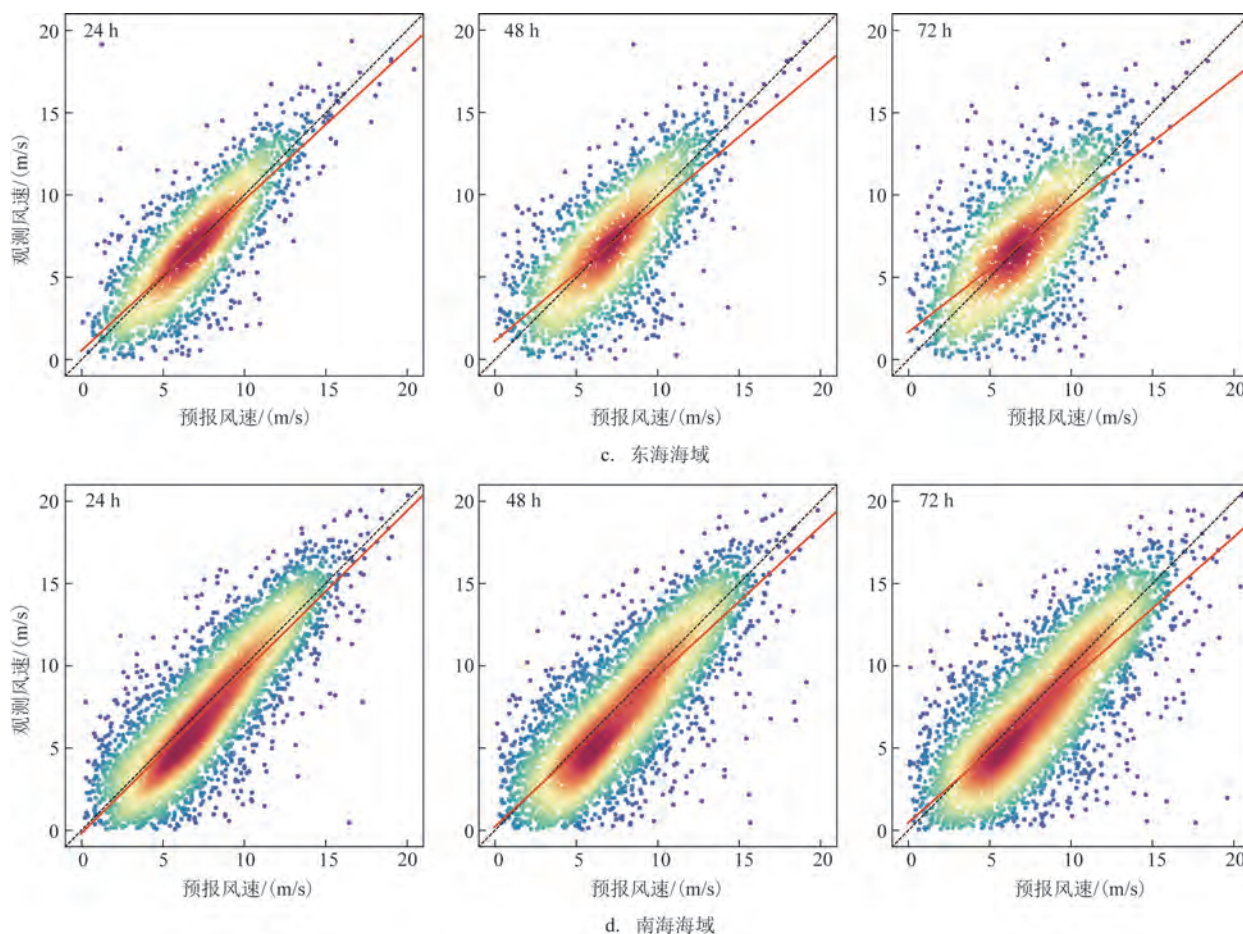


图7 (续)

Fig.7 (Continued)

之,黄海最差。从以上结果可知,南海和东海的10 m风速预报优于黄海,随着预报时刻的增加,预报风速与观测风速的偏离程度增大,风速的集中程度也逐渐分散。

2.3 不同风级的预报结果评估

为了更全面地了解耦合预报系统10 m风场的预报性能,分海区对不同风级下24 h预报风速和预报风向的均方根误差和平均绝对误差进行分析。由图8可知,随着风速等级的增大,24 h预报风速的均方根误差和平均绝对误差呈先减小后增大的变化趋势,3个海区在4~6级风速下的均方根误差均小于2 m/s且达到最小值,说明这个区间内风速预报结果最好。在东海海区,当风速小于4级时,误差最小,预报效果最好,但是当风速达到7级及以上时,风速预报误差最大,预报效果较差。在黄海海区,

当风速达到6级时,预报误差最小,均方根误差和平均绝对误差分别为1.82 m/s和1.39 m/s,ECMWF模式在5级风速下的预报效果最好^[16-17],均方根误差为1.65 m/s,GFS模式则是在4级风速时效果最好,均方根误差为1.86 m/s^[17],耦合预报系统的风速均方根误差与之相似。东海海区在4级风速下的预报效果最好,均方根误差为1.61 m/s,平均绝对误差为1.23 m/s,而南海海区则是在风速达到5级时预报效果最好,均方根误差和平均绝对误差分别为1.73 m/s和1.29 m/s,与ECMWF模式对南海北部5级风速下的预报效果较好的结果^[13]相印证。当风速在2级及以下时,预报效果较差,说明风速较小时,预报难度较高;当风速达到8级以上时,预报风速的误差变大,这与有效样本数量较少有关,所以8级以上风速条件下的预报效果可信用度较低,还需进一步验证。

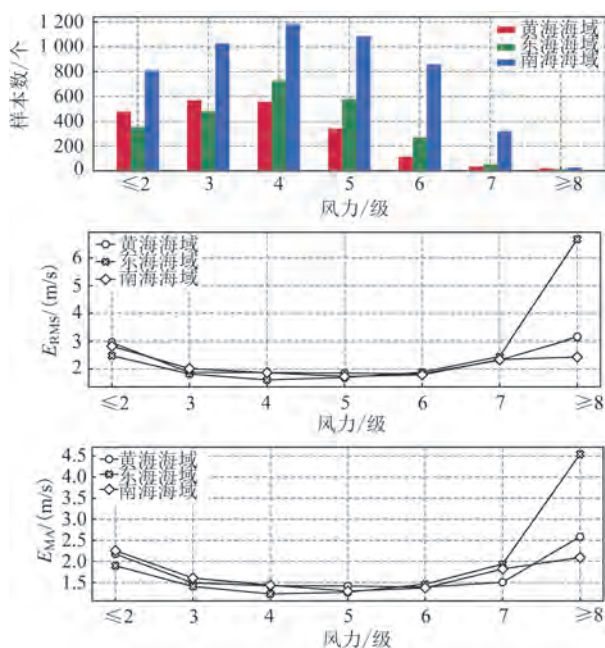


图8 不同风级下不同海域耦合预报系统24 h预报风速与观测风速的有效样本数量柱状图、均方根误差和平均绝对误差的变化图

Fig.8 Histogram of effective sample size, diagrams of root mean square error and mean absolute error between the 24 h predicted and observed wind speed in different sea areas under different wind levels

图9是不同风速级别下风向预报的均方根误差和平均绝对误差。与风速预报结果不同,风向预报误差整体上随着风速等级的变大逐渐变小,风速较大时风向预报效果优于风速较小时。当风速级别在6级及以下时,东海的风向预报误差最小,南海最大,随着风级的增大,东海的风向预报均方根误差从 61.67° 下降到 24.99° ,平均绝对误差为 $16.02^\circ \sim 45.68^\circ$,而南海风向预报的均方根误差为 $38.50^\circ \sim 75.05^\circ$,平均绝对误差为 $25.85^\circ \sim 58.88^\circ$,东海风向预报误差在两者之间,均方根误差最大达到 66.96° ,平均绝对误差最大达到 51.34° ;当风速级别达到7级以上时,黄海风向预报误差最小,南海最大。整体上看,耦合预报系统的风向预报效果在东海表现最好,预报误差较小。

在不同风速等级下,耦合预报系统10 m风场的预报结果在东海海区的效果最优,不论是风速预报误差还是风向预报误差,都是3个海区中较小的;在4~6级风速下,风速预报的效果较好,风向预报的

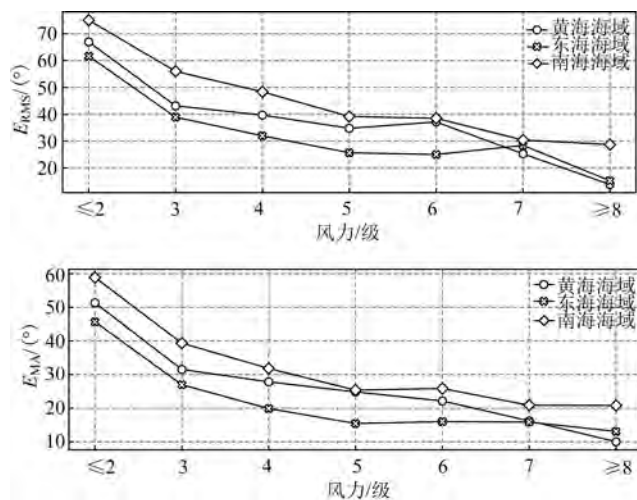


图9 不同风级下不同海域耦合预报系统24 h预报风向与观测风向的均方根误差和平均绝对误差的变化图

Fig.9 Diagrams of root mean square error and mean absolute error between the 24 h predicted and observed wind direction in different sea areas under different wind levels

效果则是随着风速级别的增大逐渐变好。

2.4 不同月份预报结果评估

为了更好地分析耦合预报系统2020年10 m风场数据的变化,分别计算12个月的预报指标。从图10看出,1—12月预报风速和观测风速的相关系数先减小后增大,各预报时刻下夏季的相关系数较小,冬季较大,春季逐渐减小,秋季则是逐渐增大,说明夏季预报系统的效果不如冬季。24 h预报风速和观测风速的相关系数为 $0.63 \sim 0.85$,其中5月最小,11月最大;48 h和72 h两种风速的相关系数同样在5月最小,分别是0.55和0.51,但最大相关系数出现在2月,分别是0.83和0.80;96 h和120 h的两种风速在6月时相关系数最小,96 h为0.38,120 h为0.27,相关性不够显著。随着预报时效增加,相关系数逐渐变小,两种风速24 h、48 h和72 h的相关系数都在0.5以上,但96 h和120 h的相关系数在夏季都低于0.5,而且差距较其他预报时效变大,预报效果较差。预报误差的变化与相关系数相反,夏季的预报误差最大,说明预报效果最差。11月和12月各预报时刻的预报误差较10月明显增大,24 h风速预报的均方根误差在2月最小,12月最大,误差值为 $1.87 \sim 2.37$ m/s;48 h和72 h预报风速的均方根误

差在4月最小,11月最大,最小值分别为1.94 m/s和2.10 m/s,最大值为2.90 m/s和3.14 m/s;96 h和120 h的均方根误差在8月最大,分别是3.40 m/s和3.54 m/s,而且夏季(6—8月)的均方根误差一直大于3 m/s。平均绝对误差的变化与均方根误差的变化相似,但是24 h预报风速的平均绝对误差在10月最小,最小值为1.42 m/s,12月最大,为1.94 m/s;48 h预报风速的平均绝对误差为1.47~2.40 m/s,4月最小,11月最大;72 h平均绝对误差为1.63~2.52 m/s,同样4月最小,11月最大;96 h预报风速的平均绝对误差在8月最大,为2.57 m/s;120 h的平均绝对误差最大值出现在12月,为2.77 m/s。预报误差的变化与相关系数变化相同,夏季预报误差较大,预报效果不如冬季,而且随着预报时效的增加,

除了4月外,24 h的预报误差一直最小,预报效果优于其他预报时效。

图11是预报风向随月份的误差变化。均方根误差和平均绝对误差在风向预报中的表现相似,整体上呈现先增大后减小的趋势,各预报时刻5—9月的误差均较大。随着预报时效的增加,各月份的误差也随之增加,24 h风向预报效果最好,120 h最差。除了96 h风向预报外,其他各预报时效的均方根误差和平均绝对误差出现最大值和最小值的月份相同,都是5月最大,10月最小;24 h预报风向均方根误差的最大和最小值分别是52.57°和31.64°,平均绝对误差的最大和最小值为38.60°和24.63°;24 h与48 h风向预报的均方根误差均不超过60°,平均绝对误差均不超过45°;120 h预报误差的各月变化幅度

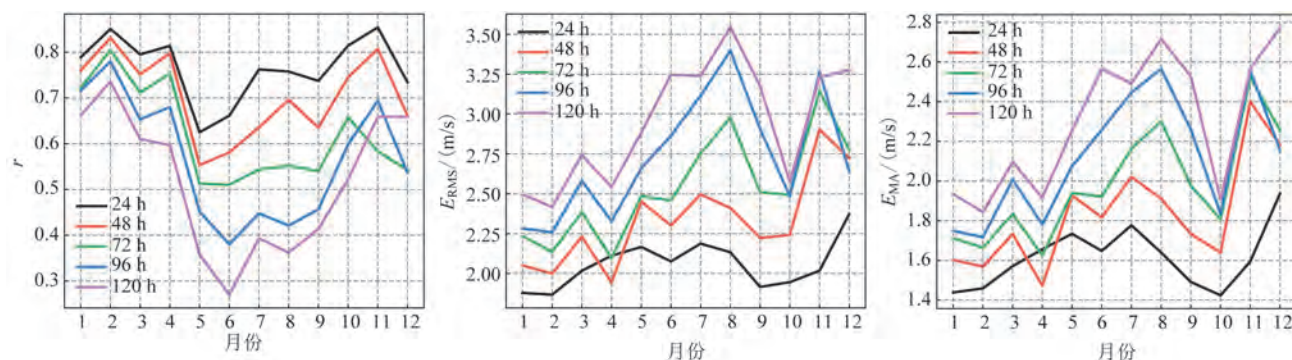


图10 耦合预报系统预报风速与观测风速的相关系数、均方根误差和平均绝对误差随月份变化图

Fig.10 Monthly variation diagrams of correlation coefficient, root mean square error and mean absolute error between the predicted and observed wind speed

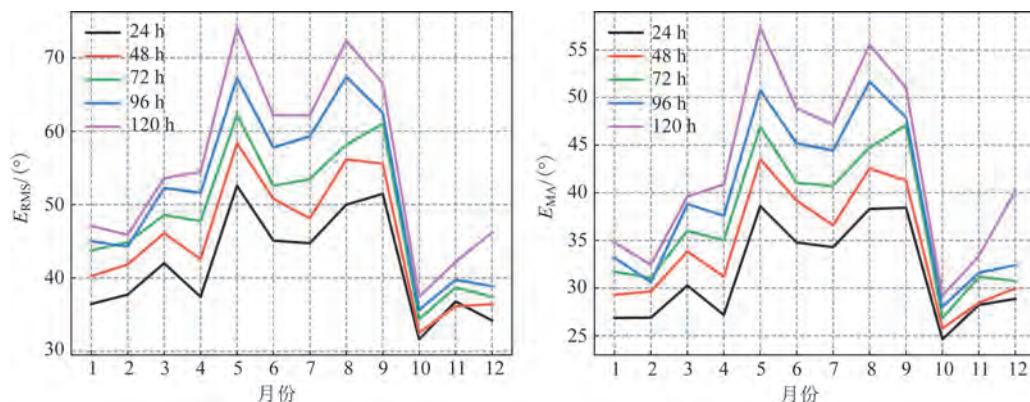


图11 耦合预报系统预报风向与观测风向的均方根误差和平均绝对误差随月份变化图

Fig.11 Monthly variation diagrams of root mean square error and mean absolute error between the predicted and observed wind direction

较大;96 h 风向预报误差在8月达到最大,均方根误差为 67.42° ,平均绝对误差为 51.65° ,5月与8月十分相近,两种误差分别是 67.28° 和 50.75° ,最小值出现在10月,均方根误差和平均绝对误差分别为 35.66° 和 28.03° 。因此可以证明各预报误差随月份的变化趋势十分相近,夏季风向预报误差较大,预报效果较差,这与风速的预报结果相似。

3 结论

本文利用区域耦合预报系统2020年的10 m风场数据和浮标数据计算各项预报统计指标,对中国近海区域10 m风场的预报性能进行评估检验。结论如下:

①耦合预报系统10 m风场数据在整个海域的预报效果较好,与观测风速之间的相关系数为0.64~0.91,具有显著相关性,均方根误差为1.55~2.94 m/s,平均绝对误差为1.16~2.22 m/s,随着预报时效增加,相关系数减小,预报误差逐渐增大,预报效果变差。

②预报系统的性能在不同海区存在差异。东海的预报风速与观测风速最为接近,南海两种风速的相关性最好;随着预报时效增加,两者的离散程度逐渐变大。

③按照风速等级对耦合预报系统24 h的10 m风场预报进行评估,随着风级增大,风速预报误差先减小后增大,4~6级风速下的预报效果良好,均方根误差小于2 m/s,3个海区中东海预报效果最好;与风速预报结果不同,随着风级增大,风向预报误差逐渐减小,预报效果变好;由于8级以上的有效样本量较少,因此8级以上风速的预报效果还需进一步验证。

④依据2020年不同月份预报指标的变化可以得出,耦合预报系统的10 m风场在夏季结果较差,冬季较好,在所有预报时效中,24 h风速的预报性能最好。

本文仅对耦合预报系统10 m风场的预报性能进行初步的研究分析,为了更加全面地对耦合预报系统进行系统性检验,未来应该从物理层面上对系统的性能进行研究,综合考虑各天气要素的相互作用,探究出现误差的具体原因,为耦合预报系统的

改进及产品应用提供参考。

参考文献:

- [1] 吕爱民,杨柳妮,黄彬,等.中国近海大风的天气学分型[J].海洋气象学报,2018,38(1):43-50.
LYU A M, YANG L N, HUANG B, et al. Classification of synoptic patterns for China offshore gales[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1): 43-50.
- [2] 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.
- [3] 郭民权,邢建勇.台湾海峡冬季海面风场数值预报的验证与分析[J].海洋预报,2013,30(3):32-39.
GUO M Q, XING J Y. Analysis of the sea surface wind in winter, 2010 in the Taiwan Strait[J]. Marine Forecasts, 2013, 30(3): 32-39.
- [4] 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.
- [5] 崔琳琳,胡松.2008年东海海面WRF风场和QuikSCAT风场差异分析[J].海洋预报,2012,29(5):39-47.
CUI L L, HU S. Analysis on difference of sea surface wind field between WRF and QuikSCAT over the East China Sea of 2008[J]. Marine Forecasts, 2012, 29(5): 39-47.
- [6] 刘桂艳,连喜虎,高松,等.WRF模式对渤海和黄海海面风预报误差分析[J].防灾科技学院学报,2023,25(1):40-48.
LIU G Y, LIAN X H, GAO S, et al. Analysis of sea surface wind prediction error in the Bohai Sea and the Yellow Sea by WRF model[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2023, 25(1): 40-48.
- [7] 柳艳菊,丁一汇,KEENAN T,等.POAMA海气耦合模式对2003和2004年南海夏季风预报能力的评估[J].热带海洋学报,2005,24(5):19-30.
LIU Y J, DING Y H, KEENAN T, et al. Evaluation on forecast of South China Sea summer monsoon in 2003 and 2004 by air-sea coupled model (POAMA)[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(5): 19-30.
- [8] 詹思琦,齐琳琳,卢伟,等.基于区域海气浪耦合模式的海洋风场预报性能研究[J].海洋预报,2017,34(6):16-26.
ZHAN S Y, QI L L, LU W, et al. Application of a regional ocean-atmosphere-wave coupled model on predicted wind field cases in the Northwest Pacific Ocean[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(6): 16-26.
- [9] SUN J C, WEI Z X, XU T F, et al. Development of a fine-resolution atmosphere-wave-ocean coupled forecasting model for the South China Sea and its adjacent seas[J]. Acta Oceanologica

- Sinica, 2019, 38(4): 154-166.
- [10] ZOU J, ZHAN C S, SONG H Q, et al. Development and evaluation of a hydrometeorological forecasting system using the Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) Model[J]. *Advances in Meteorology*, 2021, 2021(1): 6658722.
- [11] 董昌明, LIM KAM SIAN K T C, 蒋星亮, 等. 一个中国边缘海的风-浪-流预报系统[J]. *海洋科学进展*, 2022, 40(4): 660-683.
- DONG C M, LIM KAM SIAN K T C, JIANG X L, et al. A wind-wave-current forecast system for China's Marginal Seas[J]. *Advances in Marine Science*, 2022, 40(4): 660-683.
- [12] 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.
- [13] 于鑫, 于明洋, 蔡景就. ECMWF细网格10 m风产品在南海北部的检验与评估[J]. *广东气象*, 2021, 43(5): 36-40.
- YU X, YU M Y, CAI J J. Inspection and evaluation of ECMWF fine grid 10 m wind products in the northern South China Sea[J]. *Guangdong Meteorology*, 2021, 43(5): 36-40.
- [14] 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.
- [15] 申华羽, 方艳莹, 涂小萍, 等. ECMWF细网格10 m风预报在浙江沿海的评估与订正[J]. *气象*, 2020, 46(11): 1485-1494.
- SHEN H Y, FANG Y Y, TU X P, et al. Verification of ECMWF 10 m wind forecast for coastal Zhejiang Province[J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(11): 1485-1494.
- [16] 连喜虎, 刘桂艳, 高松, 等. EC细网格10 m风场产品在渤、黄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.
- [17] 王彬, 李文博, 李锐, 等. EC模式和GFS模式对黄渤海10 m风速预报性能对比分析[J]. *海洋预报*, 2023, 40(4): 64-71.
- WANG B, LI W B, LI R, et al. Comparative analysis on 10 m wind forecasts in the Yellow Sea and Bohai Sea from the ECMWF and GFS models[J]. *Marine Forecasts*, 2023, 40(4): 64-71.
- [18] 阎丽凤, 盛春岩, 肖明静, 等. MM5、WRF-RUC及T639模式对山东沿海风力预报分级检验[J]. *气象科学*, 2013, 33(3): 340-346.
- YAN L F, SHENG C Y, XIAO M J, et al. Wind force forecast verification of the MM5, WRF-RUC and T639 models in Shandong coastal areas[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2013, 33(3): 340-346.
- [19] 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.
- [20] JONASSEN M O, NYGÅRD T, VIHMA T. Evaluation of three numerical weather prediction models for the Weddell Sea region for the Austral winter 2013[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(2): e2020JD033389.
- [21] 季晓阳, 陈效先. 海面风场的数值预报业务模式[J]. *海洋预报*, 1995, 12(3): 1-10.
- JI X Y, CHEN X X. A operational numerical forecasting model of marine winds[J]. *Marine Forecasts*, 1995, 12(3): 1-10.
- [22] 季晓阳, 吴辉斌, 杨学联. 海面风场数值预报的历史和现状[J]. *海洋预报*, 2005, 22(S1): 167-171.
- JI X Y, WU H D, YANG X L. A history and current situation on numerical prediction of sea surface wind field[J]. *Marine Forecasts*, 2005, 22(S1): 167-171.
- [23] 凌铁军, 张蕴斐, 杨学联, 等. 中尺度数值预报模式(MM5)在海面风场预报中的应用[J]. *海洋预报*, 2004, 21(4): 1-9.
- LING T J, ZHANG Y F, YANG X L, et al. The application of MM5 model to predict sea surface wind field[J]. *Marine Forecasts*, 2004, 21(4): 1-9.
- [24] LIU N, LING T J, WANG H, et al. Numerical simulation of Typhoon Muifa (2011) using a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) modeling system[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 14(2): 199-209.

Evaluation of sea surface wind field forecasts in offshore China from a regional coupled prediction system

ZHANG Kerui^{1,2}, LI Xiang^{1*}, ZHANG Yunfei¹, LONG Shangmin², CHEN Xingrong¹

(1. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Utilizing observational data from the buoys in China's offshore areas, this work evaluates the forecast results of sea surface wind field from the Northwest Pacific regional coupled numerical prediction system developed by the National Marine Environmental Forecasting Center. The result shows that the 10 m wind field forecasts exhibit high performance across the entire China offshore region. There is a good consistency between the predicted and observed wind speed, with an absolute error in 24-hours forecasts less than 1.5 m/s. The forecast performance of the system decreases along with the prolong of the forecast lead time. The forecast performance of the system varies in different offshore areas. The East China Sea has the closest predicted wind speed and observed wind speed to the observations, whereas the South China Sea has the best fit between the predicted and observed wind speeds. However, as the forecast lead time extends, the dispersion of the forecasting deviation becomes larger, leading to a reduction in forecast skill. The 24-hour wind field forecast performance varies under different wind speeds. The system performance is higher under wind speed range of 4~6 m/s, and the prediction of wind direction is better under conditions of higher wind speeds. The forecast performance of the coupled system differs in different forecast months, with better performance in winter and relatively poor performance in summer.

Key words: regional coupled prediction system; sea surface wind field; evaluation; offshore China