

中国近海海域多模式海面风速预报评估

张弛¹, 王久珂^{2*}, 魏立新¹, 郭安博宇³, 黄焕卿¹, 刘晓燕¹, 陈剑桥⁴

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 中山大学人工智能学院, 广东 珠海 5190822; 3. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海, 5190822)

摘要: 由于海上观测资料的匮乏, 中国近海海域风场预报研究相对不足。研究评估了南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)自主改进的天气研究和预报模式(WRF)在2023年1—7月对中国近海海域海面风速的预报性能。选取欧洲中期天气预报中心的集成预报系统模式(IFS)和美国国家环境预报中心的全球预报系统模式(GFS)作为对比, 预报时效包括24 h、48 h、72 h、96 h和120 h, 采用中国近海浮标观测实况数据作为对比基准。研究结果表明: WRF模式的预报精度在多个预报时效下均优于GFS, 在部分预报时效内优于IFS模式; 对于高风速区间, WRF模式在24 h和48 h的预报表现尤为突出。

关键词: 数值模式; 海面风; 风速预报; 浮标; 评估

中图分类号: P457.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)01-0081-08

0 引言

海洋经济是中国经济发展的引擎之一, 中国近海海域在国家经济发展中占有至关重要的战略地位。准确的海面风速预报对于区域发展和海洋安全具有重要意义, 尤其在保障区域航运安全、促进渔业生产和推动风能开发等方面发挥着至关重要的作用^[1]。然而, 由于海洋-大气间复杂的相互作用以及海洋观测资料的缺乏, 海面风速预报仍面临着诸多挑战。因此, 针对中国近海海域开展精细化海面风速预报研究具有重要的科学和应用价值。

数值预报(Numerical Weather Prediction, NWP)模式是研究地球系统的重要工具, 有助于加深科学家对大气、海洋、气候和环境等复杂系统之间相互作用和变化过程的理解, 在防灾减灾、气候变化和环境治理等方面发挥着不可或缺的作用^[2]。NWP模型自20世纪中期以来取得了显著进展, 其通过求解大气动力学和热力学的基本方程, 能够提供短期

一长期的天气预报^[3]。随着计算能力的提升和大气科学理论的发展, NWP模型的空间分辨率和预报精度不断提高^[4]。在众多NWP模型中, 欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的集成预报系统模式(Integrated Forecasting System, IFS)和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的全球预报系统模式(Global Forecast System, GFS)的应用最为广泛^[5]。

然而, 全球模式在局地 and 区域性预报中的表现有限, 因而区域性数值模式如天气研究和预报(Weather Research and Forecasting, WRF)模式在近些年得到广泛应用和发展^[6]。例如, 德国的局地模式联合体(Consortium for Small-scale Modeling, COSMO)和日本的非静力模式(Non-Hydrostatic Model, NHM)在各自国家和周边区域的气象预报中表现出色, 显示了区域模式在提高预报精度和捕捉局地气象特征方面的优势^[7-8]。

收稿日期: 2024-07-16。

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)资助项目(SML2023SP212)。

作者简介: 张弛(1991-), 男, 工程师, 硕士在读, 主要从事海洋智能预报技术研究。E-mail: zhangchi@nmefc.cn

*通信作者: 王久珂(1986-), 男, 教授, 博士, 主要从事人工智能海洋学研究。E-mail: wangjk57@mail.sysu.edu.cn

中国的区域数值天气预报模式在过去几十年里也取得了显著进展。中国气象局开发的全球/区域同化与预报系统模式(Global and Regional Assimilation and Prediction System, GRAPES)在全国范围内得到广泛应用,为各种气象预报提供了有力支持^[9-10]。此外,华东师范大学和中科院大气物理研究所联合开发的中国气象局中尺度模式(China Meteorological Administration Mesoscale Numerical Weather Prediction Model, CMA-MESO)在区域天气预报中同样表现出色,尤其在降水和局地风暴预报方面取得了显著成果^[11]。这些区域模式通过引入高分辨率数据和先进的物理参数化方案,提高了对复杂地形和局地气象现象的捕捉能力。

南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)(以下简称南方海洋实验室)作为广东省的重要气象科研机构,致力于提升粤港澳大湾区及周边海域的气象预报能力和海洋安全保障水平。南方海洋实验室自主改进的WRF模式在粤港澳大湾区乃至中国近海海域的海面风速预报中显示出良好的潜力,然而其预报性能仍需进一步评估。

1 数据

1.1 模式数据

本研究选择评估WRF、IFS和GFS这3个不同的数值天气预报模式,主要基于它们在全球和区域尺度天气预报中的广泛应用和成熟性。WRF模式凭借其高分辨率和灵活的物理参数化方案,在局地尺度的精细化预报中更为常用。IFS模式和GFS模式作为全球性数值预报系统,在全球范围内提供了广泛的气象服务,其预报性能和长期积累的资料同样值得深入评估和比较。

IFS模式作为全球和区域气象预报的重要工具,以其先进的数据同化技术和高分辨率的数值网格著称。该模式利用实时同化的全球观测数据,结合物理过程模型进行天气预报,在全球范围内展示了优异的预报能力和稳定的性能^[4]。IFS模式的主要优势之一是其对天气和气候系统的综合模拟能力,尤其在长期气候变化和极端天气事件的预测方面表现出色^[5]。GFS模式能够生成数十种大气和陆地/土壤变量的数据,包括温度、风速、降水、土壤湿

度和大气臭氧浓度等。该系统整合了4个独立模型(大气模型、海洋模型、陆地/土壤模型和海冰模型)来共同精确描述天气条件。本文采用的IFS模式空间分辨率为 0.125° ,GFS模式空间分辨率为 0.25° ,预报区域均为西北太平洋海域($0^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$),涵盖中国近海海域,预报要素均为U10和V10,时间分辨率同为6 h,最长预报时效同为240 h,起报时间为每日00时(世界时,下同)和12时。

本文评估的WRF模式为南方海洋实验室自主改进的高分辨WRF模式数据,其格点预报结果已被应用于各业务平台的日常工作中。该模式为中国近海区域模式,输出9 km等距网格预报数据,含多个预报要素,本文使用的为U10和V10,其时间分辨率为1 h,预报时效为120 h,起报时间为每日18时。需要说明的是,由于WRF模式的起报时间与另外两种模式不同,匹配时间序列的研究方式会导致预报时效存在差异,难以客观评价各模式的优劣,所以本研究的重点在于3个模式相同预报时效的横向评价。

我们收集了3个模式2023年1月1日—7月26日的预报数据,其中WRF模式每天生成预报数据1次(18时),IFS模式和GFS模式每天生成2次(00时和12时)。由于机房停电等原因会导致部分数据不完整,影响评估结果,因此对预报数据进行质量控制,共得到预报数据文件997个。本研究将预报数据同浮标数据进行时空匹配,并按预报时效将3个数值模式的预报数据分为5组,分别是24 h、48 h、72 h、96 h和120 h,以此评估各数值模式在5日内的海面风速预报表现。

1.2 浮标数据

观测数据来自中国近海观测网络的23个水文气象浮标,旨在提供每小时的海洋和大气状态观测。中国近海浮标观测网络数据尚未公开,其对评估我国沿海数值预报效果和再分析数据的准确度具有重要作用,是沿海海面风预报参考的重要实况数据^[12]。观测时间间隔为1 h,可用参数包括风速和风向、阵风、气温、相对湿度、海平面气压、水温、有效波高、平均波高和波周期等。在2011年之前,观测数据的精度普遍较低,如有效波高约为0.5 m、风速约为1 m/s,波周期约为1 s;2011年之后,数据精

度提高,如有效波高约为0.1 m、风速约为0.1 m/s,波周期约为0.1 s^[13]。本研究中海面风速的观测精度为0.1 m/s。此外,必须对观测数据进行质量控制以排除任何错误观测,对每个浮标进行月度记录重建,并进行基本的质量控制。经过质量控制后,共获得2023年1—7月中国近海海域77 182次海面风速观测数据。

2 模式评估

本研究将预报数据按预报时效分为5组进行评估,将3个模式各自输出的U10、V10转换成风速后与浮标风速进行对比。评估的主要参考指标为系统偏差(Bias)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、相对误差(Relative Error, RE)和离散指数(Scatter Index, SI)。具体计算公式为:

$$\text{系统偏差: } \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i) \quad (1)$$

$$\text{均方根误差: } \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2} \quad (2)$$

$$\text{相对误差: } \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|f_i - o_i|}{o_i} \quad (3)$$

$$\text{离散指数: } \frac{RMSE}{\bar{o}} \quad (4)$$

式(1)~(4)中: f_i 代表某预报数据某时刻在相匹配的浮标位置的预报风速; o_i 代表此时刻该浮标的观测值; n 为该组预报数据中的样本总数。前3个参数用于衡量预报与观测之间的偏差;而离散指数是衡量离散程度的相对指标。

2.1 中国近海海域总体评估

本研究首先评估3个数值模式的风速预报在整个中国近海海域的总体表现,结果见图1和表1。从散点分布可见,3个数值模式120 h内的风速预报表现尚可,但都随预报时效的增加而下降。WRF和IFS的表现较GFS更好,前两者的散点分布较对称,而GFS的散点分布多位于45°线以下;系统偏差也证实这点,前两者的Bias均大于0,而GFS模式的Bias在所有预报时效中均小于0。以上说明,相较于WRF和IFS模式,GFS模式有更多时次的预报风速较实际风速偏小。

RMSE最高的为GFS模式120 h预报的3.17 m/s,其余均低于3 m/s,且GFS模式的RMSE明显高于另外两个模式,WRF模式和IFS模式的RMSE接近。WRF模式24 h、48 h和72 h的RMSE甚至略低于IFS模式,而IFS模式96 h和120 h的预报结果占优。另外,WRF模式和IFS模式的RE和SI也相当接近,这显示出该WRF模式的风速预报在中国近海海域具有一定的可靠性。

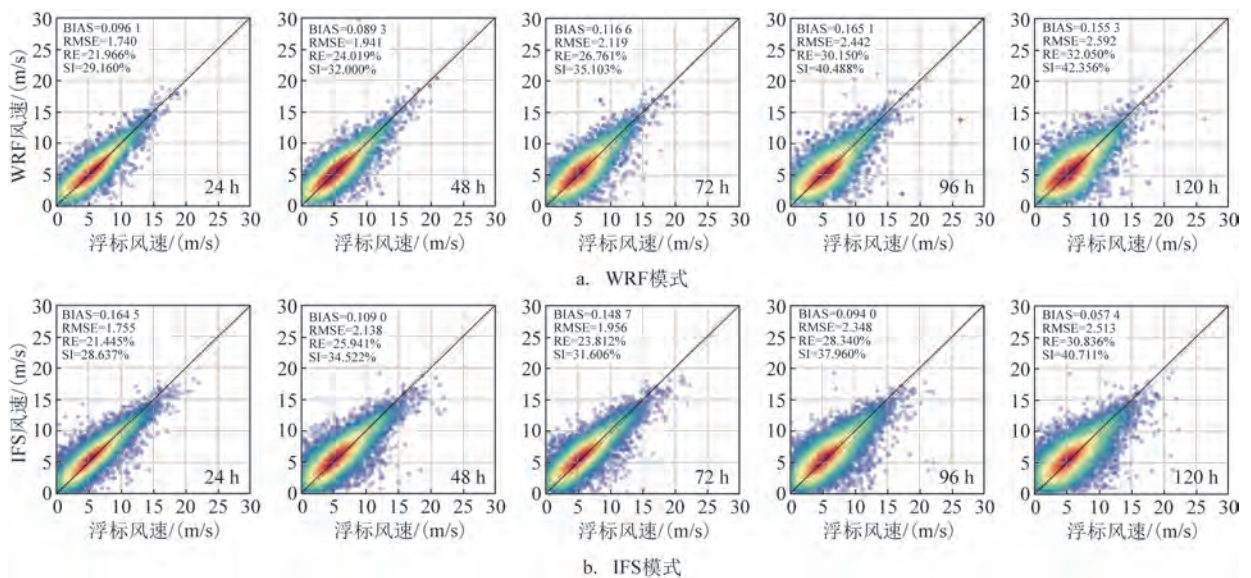


图1 WRF、IFS和GFS模式24~120 h预报风速与实况散点密度图

Fig.1 Scatter density plots of 24~120 hours WRF, IFS and GFS wind speed forecasts vs. observations

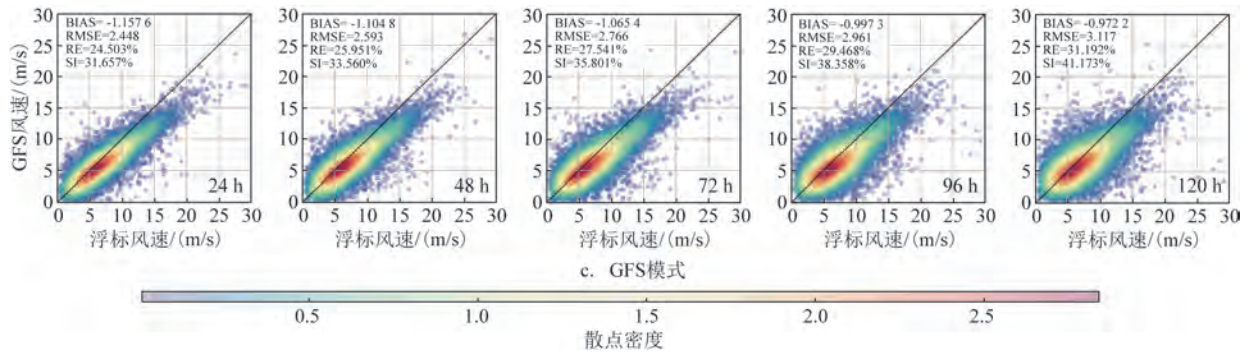


图1 (续)
Fig.1 (Continued)

表1 24~120 h WRF、IFS和GFS预报风速评价指标表
Tab.1 Table of evaluation metrics for 24~120 hour
WRF, IFS, and GFS wind speed forecasts

模式	预报 时效/h	Bias/ (m/s)	RMSE/ (m/s)	RE/%	SI/%
WRF	24	0.09	1.74	21.97	29.16
	48	0.09	1.94	24.02	32.00
	72	0.12	2.12	26.76	35.10
	96	0.17	2.44	30.15	40.49
	120	0.16	2.59	32.05	42.36
IFS	24	0.16	1.76	21.45	28.64
	48	0.15	1.96	23.81	31.60
	72	0.11	2.14	25.94	34.52
	96	0.09	2.35	28.34	37.96
	120	0.05	2.51	30.84	40.71
GFS	24	-1.16	2.44	24.50	31.66
	48	-1.11	2.59	25.95	33.56
	72	-1.07	2.77	27.54	35.80
	96	-0.99	2.96	29.47	38.36
	120	-0.97	3.17	31.19	41.17

2.2 不同风力等级评估

将预报数据按蒲福风级进行划分,可以帮助我们更清晰地评估模型在不同风速区间的预报性能^[14]。这种方法不仅能够展示预报性能,还可以直观体现更加关注的高风速区间。由于高风速通常与极端天气事件相关联,因此其预报表现更值

得关注。

将3个模式5组预报时效的数据进一步按蒲福风级进行划分,每组按0—3级(风速0~5.4 m/s)、4级(风速5.5~7.9 m/s)、5级(风速8.0~10.7 m/s)、6级(风速10.8~13.8 m/s)、7级(风速13.9~17.1 m/s)、8级及以上(风速≥17.2 m/s)分为6组。分别计算3个模式各组的Bias、RMSE、RE和SI,将同一模式5个预报时效的结果绘制于图2进行比较。

如图2所示,3个模式在高低风速区间有部分相同特点。从Bias来看,3个数值模式均表现出低风速区间预报风速偏大而高风速区间偏小的特点。之前也有研究指出,尽管一些数值模式在某些方面表现良好,但在高风速条件下往往表现不足,特别是在复杂地形和极端天气条件下,模型的风速预测偏差较大^[15]。从图中曲线的离散程度可以观察到,GFS模式的风速预报虽然准确率稍逊,却在120 h预报时效内最稳定,由于NCEP在中国近海海域的研究资料较少,如果未来资料充足,其长时效下预报稳定的特点是最大优势。因此可以认为,GFS模式的长时效预报具有较高的提升潜力。

从RMSE和RE指标上来看,在24 h和48 h预报时效上,WRF模式在高风速区间的表现最佳。IFS和GFS模式在所有预报时效上的趋势一致,误差整体随着风速的增加而增加。SI指数反映的是数据的离散程度。由于风速整体上遵从韦伯分布,即低风速时概率密度最大,随着风速的增加概率密度逐渐减小。从SI指数上看,所有模式在低风速时离散度都比较大,且随着风速的增加而减小,但是

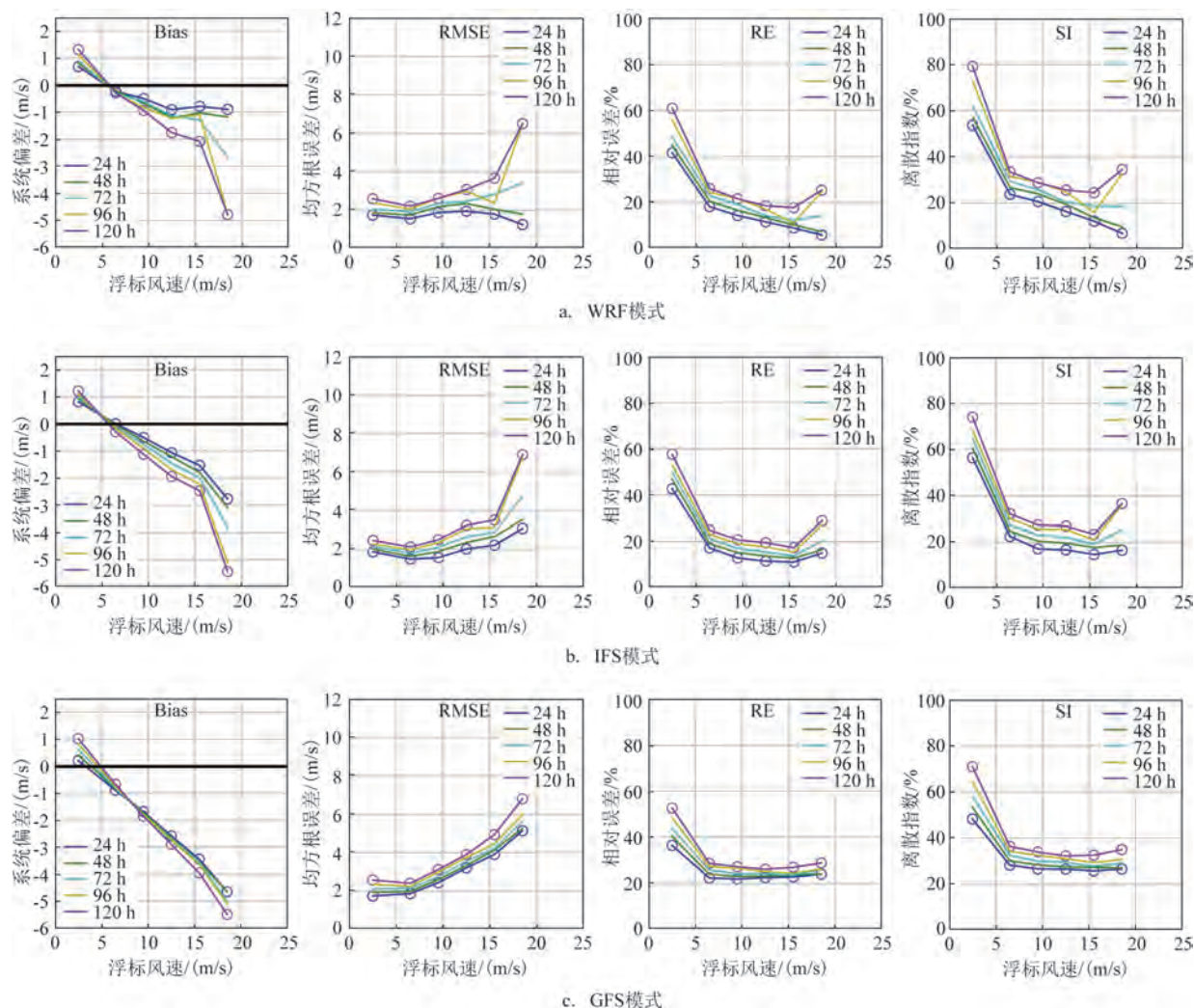


图2 24~120 h WRF、IFS和GFS预报数据按风力分级后各预报指标对比图

Fig.2 Comparison chart of forecast metrics for WRF, IFS and GFS data categorized by wind force levels for 24~120 hours

WRF和IFS模式在长预报时效即96 h和120 h的SI值明显上升。

2.3 粤港澳大湾区及周边海域评估

南方海洋实验室是广东省重要的海洋和气象科研机构,作为一个多学科综合性实验室,其在海洋动力学、大气科学和环境科学等领域开展了广泛的研究,以应对区域性气象和海洋灾害的挑战,并致力于提升粤港澳大湾区及周边海域的海洋环境监测和预报能力。因此我们针对该区域来评估3种模式的预报表现。

粤港澳大湾区及周边海域位于中国南海北部,

中国近海浮标观测网络中有7个浮标位于该区域内。以这7个浮标的实况观测数据为基准,按照上文的评估方法,再次计算3个模式24~120 h 5组预报时效数据的Bias、RMSE、RE和SI并绘制散点密度图。

从图3和表2可以看出,3个模式在此区域的风速预报也较好,RMSE最高为GFS模式120 h预报的3.05 m/s。GFS模式的预报表现仍为3个模式中最差的,而WRF模式和IFS模式的各项评价指标接近。值得注意的是,IFS模式在各预报时效的Bias均优于WRF模式,这是此前在中国近海海域评估中未出现的。这表明在此区域内WRF模式的风速预报可能较IFS模式偏大。

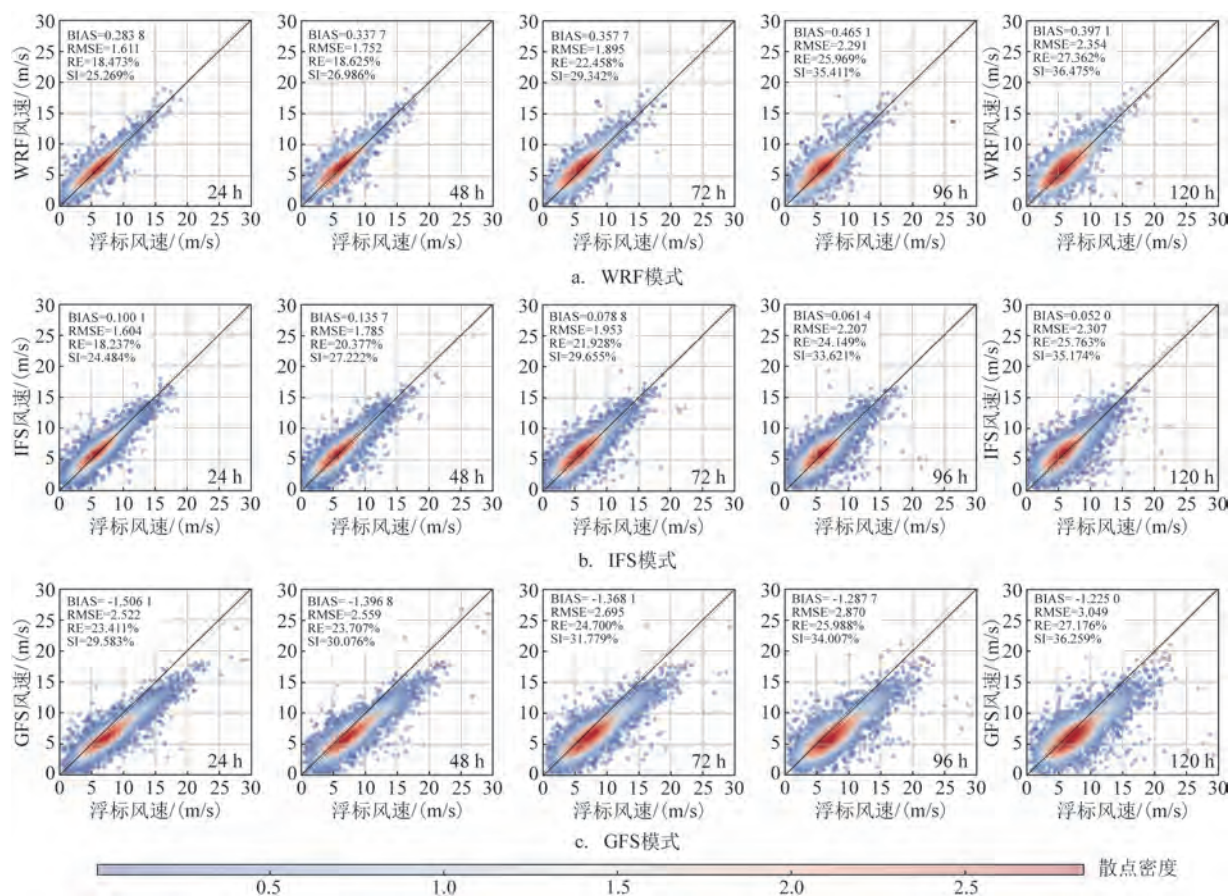


图3 南海北部24~120 h WRF、IFS和GFS预报风速与实况散点密度图

Fig.3 Scatter density plots of 24~120 hours WRF, IFS and GFS wind speeds forecasts vs. observations in the northern South China Sea

表2 南海北部24~120 h WRF、IFS和GFS预报风速评价指标表

Tab.2 Table of evaluation metrics for 24~120 hours WRF, IFS and GFS wind speed forecasts in the northern South China Sea

模式	预报时效/h	Bias/(m/s)	RMSE/(m/s)	RE/%	SI/%
WRF	24	0.28	1.61	18.47	25.27
	48	0.34	1.75	19.62	26.99
	72	0.36	1.90	22.46	29.34
	96	0.46	2.29	25.97	35.41
	120	0.40	2.35	27.36	36.48
IFS	24	0.10	1.60	18.24	24.49
	48	0.14	1.79	20.38	27.22
	72	0.08	1.95	21.93	29.66
	96	0.06	2.21	24.15	33.62
	120	0.05	2.31	25.76	35.17
GFS	24	-1.51	2.52	23.41	29.58
	48	-1.40	2.56	23.71	30.08
	72	-1.37	2.70	24.70	31.78
	96	-1.29	2.87	25.99	34.00
	120	-1.23	3.05	27.18	36.26

3 结论与讨论

本研究评估了南方海洋实验室自主改进的WRF模式在2023年1—7月对中国近海海域海面风速的预报性能。选取ECMWF的IFS模式和NECP的GFS模式作为对比,预报时效包括24 h、48 h、72 h、96 h和120 h,采用中国近海浮标观测实况数据作为对比基准。主要结论如下:

①南方海洋实验室高分辨WRF区域数值模式的海面风速预报在中国近海海域表现较好,其总体表现优于GFS模式预报,与IFS模式预报表现相当。WRF模式在24 h、48 h和72 h预报的RMSE低于IFS模式。研究表明WRF模式风速预报在中国近海海域具有一定的可靠性。

②3个模式在高风速区间都存在风速低估的问题,这也是数值模式普遍存在的问题。在高风速区间,WRF模式在中国近海海域的预报表现略优于IFS模式。

③GFS模式展现出了长时效预报的稳定性。由于NCEP在中国近海海域的研究资料较少,其长时效预报具有较高的提升潜力。

④在粤港澳大湾区及周边海域,IFS模式的预报表现略优于WRF模式,IFS模式在该海域的系统偏差最低,表明在此区域内,WRF模式风速预报可能较IFS模式偏大。

考虑到3个模式的起报时间存在差异,本文着重研究不同模式在相同预报时效的海面风速的预报表现。WRF模式的本身优势在于其超高的时间分辨率,可以提供精细化时间序列的预报产品。本研究展现的其长时效的预报表现亦可圈可点。

目前主流数值模式的预报时效均可达到240 h,而人工智能预报的预报时效更长。在这方面,该WRF模式还有较大的提升空间。该模式自运行以来一直不断向精细化方向发展,未来其空间分辨率可能会进一步提升至5 km或3 km。后续研究计划搜集该模式历史重构的00时和12时的预报数据,以匹配多家主流模式的同时效、同时间的序列数据,以此针对天气系统和重大天气过程进行评估研究。

参考文献:

[1] CHENG Q Y, WANG X T, CHEN D S, et al. Impact of ship emissions on air quality in the Guangdong-Hong Kong-Macao

Greater Bay Area (GBA): with a particular focus on the role of onshore wind[J]. Sustainability, 2023, 15(11): 8820.

[2] 黄小猛, 林岩奎, 熊巍, 等. 数值预报AI气象大模型国际发展动态研究[J]. 大气科学学报, 2024, 47(1): 46-54.

HUANG X M, LIN Y L, XIONG W, et al. Research on international developments of AI large meteorological models in numerical forecasting[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2024, 47(1): 46-54.

[3] KALNAY E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

[4] BAUER P, THORPE A, BRUNET G. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. Nature, 2015, 525(7567): 47-55.

[5] SIMMONS A J, HOLLINGSWORTH A. Some aspects of the improvement in skill of numerical weather prediction[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2002, 128(580): 647-677.

[6] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A description of the advanced research WRF version 3[R]. Boulder: University Corporation for Atmospheric Research, 2008.

[7] BALDAUF M, SEIFERT A, FÖRSTNER J, et al. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(12): 3887-3905.

[8] SAITO K, ISHIDA J I, ARANAMI K, et al. Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2007, 85B: 271-304.

[9] 陈德辉, 沈学顺. 新一代数值预报系统GRAPES研究进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 773-777.

CHEN D H, SHEN X S. Recent progress on GRAPES research and application[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 773-777.

[10] ZHANG R H, SHEN X S. On the development of the GRAPES—a new generation of the national operational NWP system in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(22): 3429-3432.

[11] 黄丽萍, 邓莲堂, 王瑞春, 等. CMA-MESO关键技术集成及应用[J]. 应用气象学报, 2022, 33(6): 641-654.

HUANG L P, DENG L T, WANG R C, et al. Key technologies of CMA-MESO and application to operational forecast[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022, 33(6): 641-654.

[12] 张弛, 蔡靖泽, 吴伦宇, 等. 2019年海面风网格化预报检验[J]. 海洋预报, 2023, 40(4): 56-63.

ZHANG C, CAI J Z, WU L Y, et al. Validation of gridded sea surface wind forecasts in 2019[J]. Marine Forecasts, 2023, 40(4): 56-63.

[13] WANG J J, LI B X, GAO Z Y, et al. Comparison of ECMWF significant wave height forecasts in the China Sea with buoy data [J]. Weather and Forecasting, 2019, 34(6): 1693-1704.

[14] LU H, XIE M, ZHAO W, et al. Comparisons and quality control

of wind observations in a mountainous city using wind profile radar and the Aeolus satellite[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2024, 17(1): 167-179.

[15] PENDLEBURY S F, ADAMS N D, HART T L, et al. Numerical weather prediction model performance over high southern latitudes[J]. Monthly Weather Review, 2003, 131(2): 335-353.

Assessment of multi-model sea surface wind speed forecasts in the nearshore areas of China

ZHANG Chi¹, WANG Jiuke^{2*}, WEI Lixin¹, GUO Anboyu³, HUANG Huanqing¹, LIU Xiaoyan¹, CHEN Jianqiao⁴

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. School of Artificial Intelligence, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 3. National Marine Environmental Forecasting Center, Key Laboratory of Marine Hazard Forecasting Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China;)

Abstract: Due to the scarcity of ocean observational data, researches on wind field forecasting assessment in these areas remains relatively rare. This study assesses the performance of the WRF (Weather Research and Forecasting) model implemented at the Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai) on forecasting sea surface wind speeds at lead times of 24, 48, 72, 96 and 120 hours, in China's nearshore areas from January to July 2023, against the Integrated Forecasting System (IFS) of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, the Global Forecast System (GFS) of the National Centers for Environmental Prediction and real-time buoy data. The results show that the WRF model has higher accuracy than the GFS and IFS models in several forecast periods. In high wind speed range, the WRF model is particularly well at 24 and 48 hours.

Key words: numerical weather prediction; sea surface wind; wind speed forecasting; buoys; evaluation