

薛文博,余晖,汤胜茗,等,2020.上海快速更新同化数值预报系统(SMS-WARR)的近地面风速预报检验评估[J].气象,46(12):1529-1542. Xue W B, Yu H, Tang S M, et al, 2020. Verification on surface wind speed forecast of Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System (SMS-WARR)[J]. Meteor Mon, 46(12):1529-1542(in Chinese).

上海快速更新同化数值预报系统(SMS-WARR) 的近地面风速预报检验评估*

薛文博¹ 余晖² 汤胜茗² 黄伟² 姜文东³ 周象贤⁴ 陆逸²

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 中国气象局上海台风研究所,上海 200030

3 国网浙江省电力有限公司,杭州 310007

4 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,杭州 310014

提 要: 对上海快速更新同化数值预报系统(Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System, SMS-WARR)的 10 m 预报风速进行分级检验评估,在此基础上进一步研究了台风影响期间的风速预报误差特征,并探讨了误差的可能成因。结果表明:SMS-WARR 在各预报时效都存在对实测小于 6 级的风预报偏大,对 6 级及以上的风预报偏小的特点;随着预报时效的增长,小于 6 级风的预报评分降低,6 级及以上风的评分增大;预报风速与实测风速在 5%~90%分位数之间的分布呈明显的线性相关。在台风影响期间,SMS-WARR 预报的强风区域与实际位置基本符合,但范围明显偏大,预报偏差大值区主要集中在预报强风区域。这些误差特征与模式冷、热启动方案的设置、模式对台风快速增强的预报能力较弱等有关。

关键词: 风速预报,检验,台风

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.001

Verification on Surface Wind Speed Forecast of Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System (SMS-WARR)

XUE Wenbo¹ YU Hui² TANG Shengming² HUANG Wei²

JIANG Wendong³ ZHOU Xiangxian⁴ LU Yi²

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

3 State Grid Zhejiang Electric Power Co. LTD, Hangzhou 310007

4 Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co. LTD, Hangzhou 310014

Abstract: In order to evaluate the wind speed forecast ability of Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System (SMS-WARR), the 10 m wind was divided into three levels to analyze the error characteristics and corresponding causes of formation, especially during the period of typhoon influence. The results show that the SMS-WARR model overestimates the wind weaker than Grade 6 and underestimates the wind stronger than or equal to Grade 6 in each lead time. The wind speed forecast score decreases for the wind weaker than Grade 6 and increases for the wind stronger than or equal to Grade 6

* 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS18002P)、国家重点研发计划(2018YFB1501104)、国家重点基础研究发展计划(2015CB452806)、国家自然科学基金项目(41805088)和上海市自然科学基金(18ZR1449100)共同资助

2019 年 9 月 23 日收稿; 2020 年 10 月 19 日收修定稿

第一作者:薛文博,主要从事热带气旋研究工作. E-mail: xuewb@typhoon.org.cn

通讯作者:余晖,主要从事热带气旋研究工作. E-mail: yuh@typhoon.org.cn

with the increase of lead time. The forecast and observed wind speeds are obviously linearly correlated between 5%–90% quartiles. During the period of typhoon influence, the area of strong wind (Grade 6) is much larger than the area where the strong wind was actually measured. The area of large deviation is mainly distributed in the area of forecast strong wind. These error characteristics may be related to the scheme setting of the cold and hot starting of the model and the model's weak predictability to the wind field during the rapid strengthening phase of typhoons.

Key words: wind speed forecast, verification, typhoon

引 言

针对强对流天气短时临近预报的主要技术有基于雷达回波和卫星图像的外推、数值预报技术和基于观测资料建立概念模型等(Wilson et al, 1998)。由于缺乏对天气系统物理机制的描述,基于雷达回波和卫星图像外推技术的预报能力会随预报时效的增长而迅速降低(Wilson et al, 2010)。相比之下,利用高频资料同化,即快速更新同化技术来调整初始场,再利用数值模式进行预报的方法既弥补了传统预报模式中初始场更新较慢的缺点,也包含了对天气系统物理机制的描述。虽然目前模式对大气中动力和物理过程的描述还不够完善,但这依然是针对强对流天气短时临近预报的重要方向之一(陈葆德等, 2013)。除此之外,近年来回波外推和高分辨率数值模式预报相结合的方法也在不断发展并应用到实际业务(Wang et al, 2015; 薛峰等, 2017)。

美国国家环境预报中心(NCEP)的快速更新同化系统(Rapid Update Cycle, RUC)在 1994 年正式业务化(Benjamin et al, 2004),新一代的快速更新同化预报系统(Rapid Refresh, RR)在 2012 年正式业务化,更高分辨率的 RR 系统(High-Resolution Rapid Refresh, HRRR)于 2014 年实现业务化(James et al, 2017)。我国的快速更新同化和预报技术研究起步较晚,但近几年也不断地快速发展(张小玲等, 2018),具代表性的有:北京基于 WRF 模式和三维变分同化技术,建立了北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)(魏东等, 2011);广州在 GRAPES 区域中尺度数值预报系统(GRAPES_meso)及三维变分同化技术的基础上建立逐时同化分析与模式预报循环系统(CHAF)(陈子通等, 2010; 黄燕燕等, 2011);上海在 2009 年基于 WRF 模式和 ADAS

(ARPS Data Analysis System)同化系统,建立了第一代上海快速更新同化数值预报系统(Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System, Version 1.0, SMS-WARR V1.0)(陈葆德等, 2013)。

检验评估是增强对模式预报能力的认知,合理使用预报产品的重要环节(Chakraborty, 2010; Gofa et al, 2018)。Chen(2013)对国内 8 个区域模式(沈阳、北京、上海、武汉、成都、广州、兰州和乌鲁木齐)和数值天气预报中心的 GRAPES_meso 做了比较评估,结果表明各区域模式的误差特点各不相同,上海、北京、广州和沈阳区域模式的预报误差相对较低,表现更稳定。目前, SMS-WARR 已经是华东区域气象中心主要的数值预报业务模式系统之一,针对 SMS-WARR 的检验评估也已经有了不少研究工作,例如王晓峰等(2015)对一次上海局地强对流过程的试验结果表明,采用 WRF 和资料同化系统 ADAS 能够较好地模拟降水的发生时间、落区和随时间的演变。李佳等(2017)利用 SMS-WARR 在江苏阜宁附近模拟出了类似龙卷母体的涡旋结构,发展过程与实况基本吻合,逐小时的观测资料循环同化对此次龙卷天气的模拟起着关键作用。

随着人们对精细化风场预报需求的提高,模式对风场预报能力的检验也愈加重要,但已有关于 SMS-WARR 的检验评估大多关注模式在降水以及强对流天气的预报表现,缺乏对模式风场预报结果的检验评估。本研究就将针对这一不足,对 SMS-WARR 在 2018 年 8 月至 2019 年 2 月期间的近地面风速预报能力进行评估,特别地将对研究期间内台风近地面风场的预报能力进行分析,以期对 SMS-WARR 的近地面风速预报能力有更清晰的认识,为该模式风速预报产品的应用和模式本身的进一步改进提供参考。

1 模式、资料以及检验方法

1.1 SMS-WARR 模式简介

基于美国俄克拉何马大学开发的 ADAS 资料同化系统和尺度数值预报模式(WRF),上海在 2009 年建立了 SMS-WARR V1.0,并在同年年底实现业务运行(陈葆德等,2013)。2014 年升级研发得到 SMS-WARR V2.0,进一步经过优化后的 SMS-WARR V2.1 在 2018 年 8 月开始业务测试,12 月正式业务化。针对开始业务测试之后的 SMS-WARR V2.1 系统,本研究对其近地面风速的预报进行检验评估。

SMS-WARR V2.1 模式每小时启动一次,每次进行 24 h 的逐小时预报。在 02 时(北京时,下同),系统进行冷启动:背景场由华东区域中尺度模式 SMS-WARMS V2.0(Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Real-Time Modeling System, Version 2.0)前一日 20 时起报的 6 h 预报场提供,水平分辨率为 9 km。其他预报时刻均为热启动,背景场由循环系统上一时次的 1 h 预报场提供。在背景场的基础上同化各种观测资料之后得到 WRF 模式的预报初始场(图 1)。该系统对观测资料采用逐小时循环同化,同化的观测资料主要包括地面自动气象站观测、探空观测、雷达资料和 FY-2G 卫星资料等。SMS-WARR V2.1 系统的水平分辨率为 3 km,垂

直方向为 51 层,模式层高约为 30 km,未采用积云对流参数化方案,预报的区域范围主要是我国华东区域(王晓峰等,2015;李佳等,2017)。

1.2 资料及检验方法

用于模式检验评估的观测资料是由上海市气象信息与技术支撑中心提供的约 5 500 个自动观测站点资料,区域范围是江苏省、上海市、浙江省和福建省(图 2),时间范围是 2018 年 8 月 1 日至 2019 年 2 月 28 日,包含的风场信息有逐小时地面 10 m 高度的 2 min 平均风向和平均风速。其中静风(取小于 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;严婧等,2017)和低风速(取小于 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;唐敬等,2011)的样本数分别为 600 万和 1 400 万个,小于 6 级风的总样本数大于 2 700 万个,6~8 级风的样本数约为 14 万个,大于 8 级风的样本数约为 1 200 万个。用于个例分析的台风资料来源于中国气象局上海台风研究所整编的热带气旋最佳路径数据集(<http://tcdata.typhoon.org.cn/>;Ying et al,2014)。

对模式的检验评估方法是将模式格点数据通过双线性插值到挑选出的站点,然后进行所选区域的整体统计检验以及台风个例分析。评估模式风速预报能力主要的检验指标有预报风速的偏差(Bias)、均方根误差(RMSE)(Pinson and Hagedorn,2012;Chen et al,2013;何晓凤等,2014;曾瑾瑜等,2015;卢冰等,2017)以及准确率等检验评分。参考《全国智能网格气象预报业务规定(2017)》*,本研究将使用 Bias、RMSE 及以下评分指标:

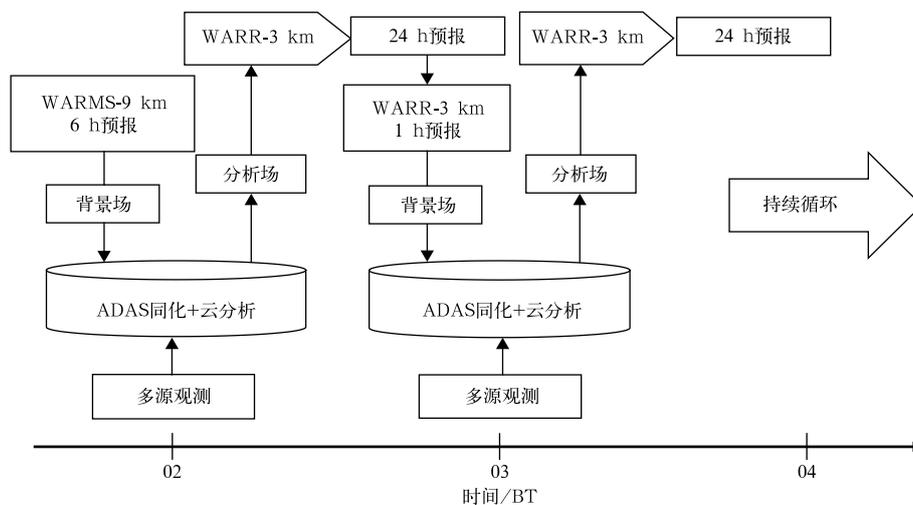


图 1 SMS-WARR V2.1 模式循环同化设置框架图

Fig. 1 Flow chart of the assimilation cycle in SMS-WARR V2.1

*《全国智能网络气象预报业务产品陆面基本要素预报检验办法》(气预函[2017]36号)。

$$\text{风速预报准确率: } AC = \frac{\sum_{i=1}^K NR_i}{NF}$$

$$\text{风速预报偏强率: } FS = \frac{\sum_{i=1}^K NS_i}{NF}$$

$$\text{风速预报偏弱率: } FW = \frac{\sum_{i=1}^K NW_i}{NF}$$

$$\text{风速预报评分: } SC = \frac{\sum_{i=1}^K SC_i}{NF}$$

式中: NR_i 为第 i 级风力预报正确的站(次)数, 表示预报风速和实况风速在同一等级; NS_i 为第 i 级风力预报偏强的站(次)数, 表示预报风速大于实况风速等级; NW_i 为第 i 级风力预报偏弱的站(次)数, 表示预报风速小于实况风速等级; SC_i 来自业务规定中的风速预报评分对照表(表略); NF 为预报总站(次)数。 K 为风速预报等级, 取 1~13。

2 风速预报误差的总体特征

2.1 均方根误差和偏差检验

分析 SMS-WARR 在不同等级风力下的偏差

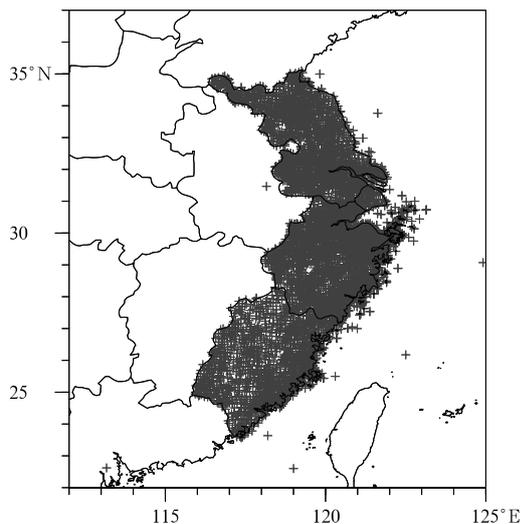


图 2 研究区域内的自动观测站点分布
(+号表示站点位置)

Fig. 2 Distribution of automatic surface observation stations in verification region
(Asterisks show the locations of the automatic surface observation stations)

(Bias)和均方根误差(RMSE)(图 3)可以看出,随着风速增大,Bias 逐渐减小。当风力较小时,模式存在正的 Bias,即预报风速偏强,且随着风力等级加大,Bias 逐渐减小。对于静风和低风速,Bias 分别为 2.2 和 1.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当风力超过 5 级之后 Bias 变为负值,即在强风条件下预报风速偏弱。这些预报偏差随风速的变化特征与已有研究一致(Cheng and Steenburgh, 2015; Henckes et al, 2018),究其原因可能和模式对地形的平滑处理有关。模式对次网格地形拖曳作用的考虑不足,会使得小风速被高估;而在复杂地形区域,模式中的山顶会比实际山顶更加平滑,使得大风速被低估(Jiménez and Dudhia, 2012; 2013; 刘郁珏等, 2019)。风力小于 6 级时,模式预报风速的 RMSE 维持在 2~3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此后 RMSE 随着风力的增大而明显增大,当风力大于 8 级时, RMSE 可达 8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。根据上述误差特征,同时参考《全国智能网格气象预报业务规定(2017)》和业务中灾害大风的标准,以下将观测资料按照风速分为三个等级进行统计检验:小于 10.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (小于 6 级)、10.7~20.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (6~8 级)和大于 20.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (大于 8 级)。

对 7 个月的总体误差进行分析(图 4a, 4b),可以发现,随着预报时效的增长,小于 6 级的风速预报 RMSE 从 1 h 预报时效的 2.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 24 h 的 3.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,增幅约为 1.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。但对 6 级及以上的风速预报,不同预报时效的 RMSE 基本相当。其中 6~8 级风的 RMSE 约为 4.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,大于 8 级风的 RMSE 约为 9.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。风速预报 Bias 的统计结果如下:对于实测小于 6 级的风,模式的正 Bias 从 1 h 的 1.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 24 h 的 2.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;实

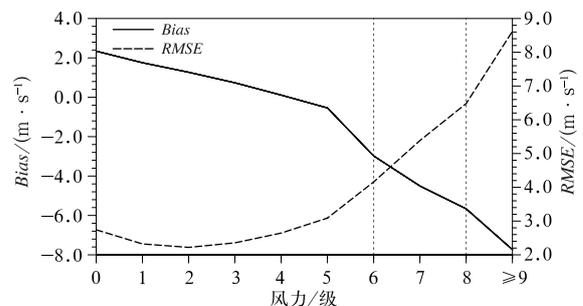


图 3 SMS-WARR 模式在不同等级风力下的偏差和均方根误差

Fig. 3 Bias and RMSE of 10 m wind speed forecast by SMS-WARR under different wind forces

测 6~8 级的风速,模式的负 Bias 绝对值从 1 h 的 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小到 24 h 的 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;实测 8 级以上的风速,模式的负 Bias 绝对值从 1 h 的 $7.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小到 24 h 的 $7.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见,模式预报对于实测小于 6 级的风存在系统性的高估,且预报时效越长,正偏差越大,即高估越明显;对于实测 6 级及以上的风存在系统性的低估,且预报时效越长,负偏差越小,即低估会改善。

由于 8 月受台风影响较多,大风速样本占比较

大,将其单独统计分析。图 4c 表明,8 月 6 级及以上风速预报的 RMSE 随预报时效的增长有明显增大,尤其是大于 8 级的风速预报, RMSE 在第 11 小时达 $13.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,之后趋于平稳。8 月 Bias 随预报时效的变化趋势则与 7 个月总体的变化趋势相反,即随着预报时效的增长,小风速的正偏差略微减小,而大风速的负偏差绝对值则明显增大,其中对于实测 6~8 级和 8 级以上的风速,24 h 的 Bias 绝对值比 1 h 预报时效分别增大了 2.1 和 $3.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4d)。

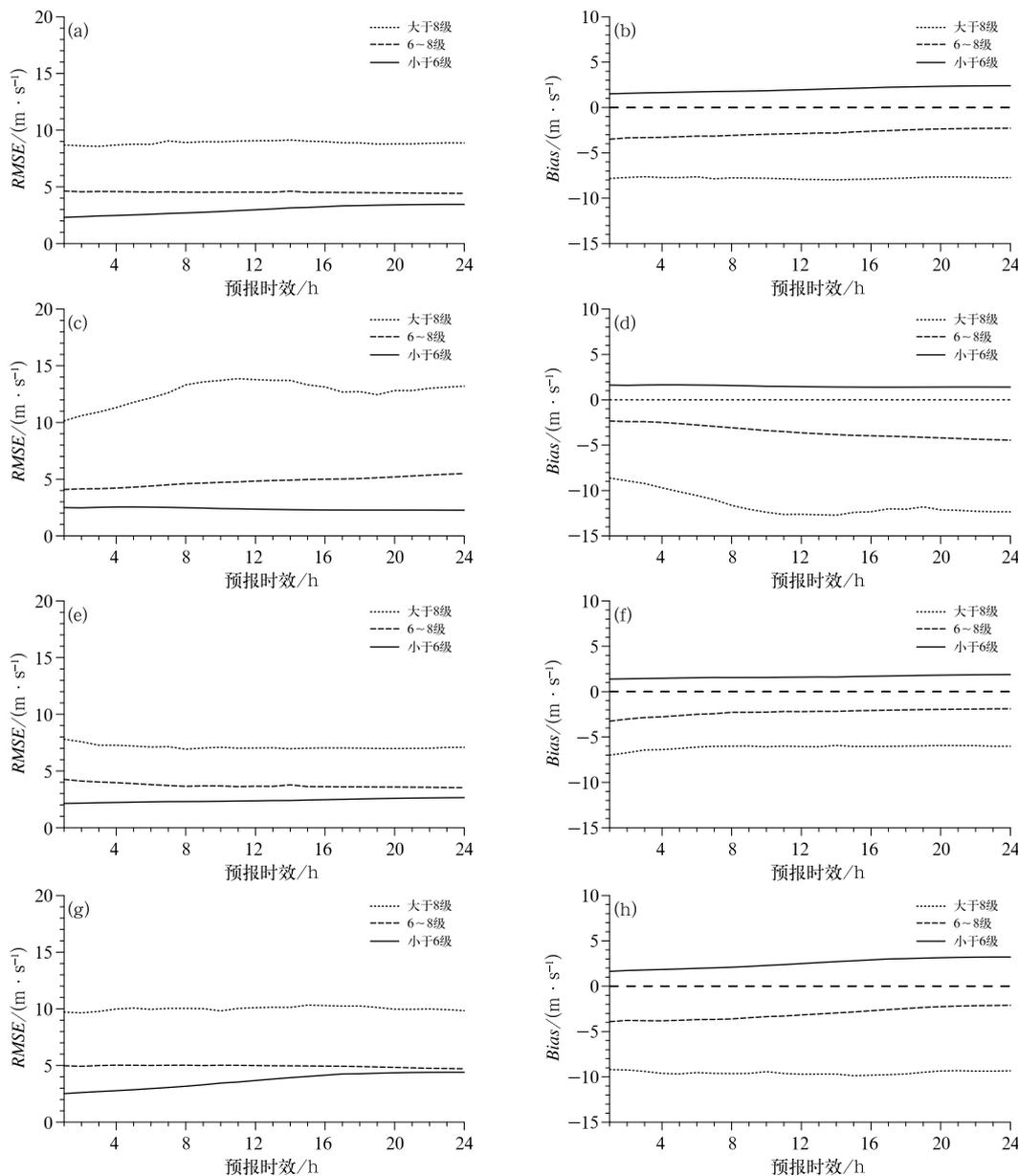


图 4 SMS-WARR 模式 10 m 风速各预报时效的 RMSE(a,c,e,g)和 Bias(b,d,f,h)检验结果

(a,b)全体样本,(c,d)2018 年 8 月,(e,f)秋季(2018 年 9—11 月),(g,h)冬季(2018 年 12 月至 2019 年 2 月)

Fig. 4 Lead time series of RMSE (a, c, e, g) and Bias (b, d, f, h) of 10 m wind speed forecast by SMS-WARR

(a, b) seven months, (c, d) August 2018, (e, f) autumn (September,

October and November 2018, the same below), (g, h) winter (from December 2018 to February 2019)

秋季(2018年9—11月)三个等级的风速预报误差在各预报时效都比较稳定,其中6~8级和8级以上风速的24 h预报偏差绝对值比1 h分别减小了约0.7和0.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图4e,4f)。冬季(2018年12月至2019年2月)小于6级风的预报正偏差从1 h的1.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到24 h的3.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,6~8级的预报负偏差绝对值则从1 h的3.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小到24 h的2.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,大于8级风的偏差稳定在-10~-9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图4g,4h)。对比秋季和冬季统计结果可以看出,SMS-WARR模式在秋季的近地面风速预报能力较为稳定,且风速的整体预报效果比冬季更好。

在对24个预报时效进行整体分析的基础上,挑选12 h预报时效进行误差箱型图的逐旬时序分析(图5)。从图中可以看出,除12月、1月中下旬和2月上旬之外,其他时间段内的风速偏差中位数都维持在1~2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;各下四分位数都为正值,即各时间段内至少有75%的模式风速预报比实况偏大;上四分位数的差距则较大,尤其是进入冬季,即12月起,各上四分位数大都大于4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,2月上旬风速偏差的上四分位数达6.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

各旬风速误差的最值也相差较大。8月中旬预报风速的最大负偏差达25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,这是因为受1814号台风摩羯和1818号台风温比亚的影响,8月中旬出现了较多大风天气,而模式存在大风预报整体偏弱的特点,所以该时间段内出现了较大的负偏

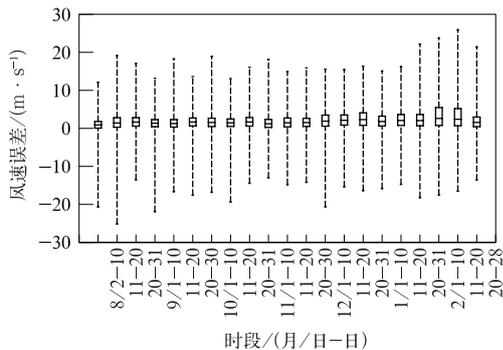


图5 12 h预报时效的逐旬风速误差箱型图
(箱体的顶部及底部分别代表误差分布的上、下四分位数,中心标记表示中位数,虚线的顶端分别为误差的最大及最小值)

Fig. 5 Wind speed error of 12 h lead time in every ten days
(Central box area represents the 0.25th to 0.75th quantile values of a distribution, horizontal line inside box is the median value, and whisker ends represent the largest and smallest values)

差。同样8月上旬受1812号台风云雀的影响、9月上旬受1823号台风百里嘉的影响、12月上旬受一次寒潮天气的影响,模式的预报风速都出现了大于20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的负偏差。各时间段内风速预报偏差的最大值大部分都小于20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,1月下旬起开始出现大于20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的正偏差。结合上述模式在冬季的风速预报特点可知,模式在冬季,尤其是2月的正偏差显著增大。

2.2 评分检验

图6是模式在1、6、12和24 h预报时效的评分(SC)、准确率(AC)、偏强率(FS)和偏弱率(FW)。可以看出,小于6级风的预报误差随时效的增长而增大,预报评分从1 h的0.6下降至24 h的0.5,准确率从1 h的27.6%下降至24 h的20.8%;6~8级风的预报误差随时效的增长而略微减小,预报评分提高了0.05,准确率提高了7.6%;大于8级风的预报效果整体较差,预报评分维持在0.3;整体样本的预报能力变化与小于6级风的变化趋势相似,预报评分和准确率分别下降了0.05、6.7%,这应与小于6级风的样本数占绝大多数有关。

对比图6c和6d可以看出,随着预报时效的增长,模式在三个等级的风速预报偏强率都明显增大,偏弱率相应地减小。与1 h预报时效相比,模式整体预报风速在24 h的偏强率增加了8.9%,偏弱率减小了2.3%。这些变化表明,预报时效越长,SMS-WARR模式预报中的近地面风速越大。这就会造成2.1节中讨论的总体误差特征,即随着预报时效变长,小于6级风的正偏差会增大,6~8级和8级以上风的负偏差绝对值会减小。

2.3 分布检验

在统计量和评分检验的基础上,进一步进行分布检验。图7是实测风速-预报风速的分位数图(QQ图)。QQ图是一种通过画出两组数据的百分位数来比较这两组数据分布情况的一种统计方法。若两组数据分布相似,QQ图上的点会近似分布在某一直线附近。图7中的红色菱形点分别为5%和90%分位点;5%分位点对应实测风速0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、预报风速0.76 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,90%分位点对应实测风速3.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、预报风速7.03 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从图中可以

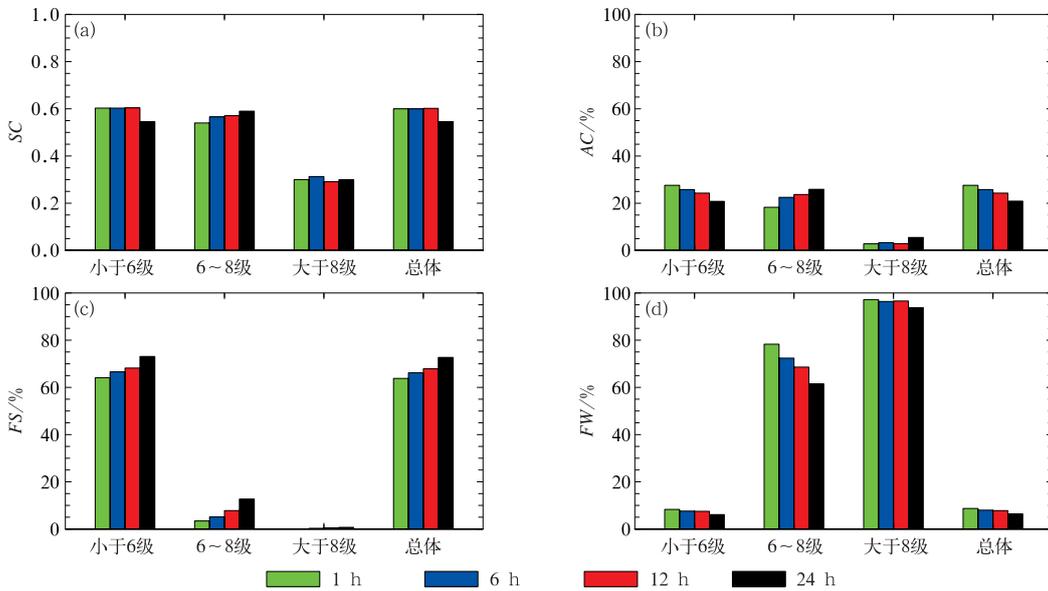


图 6 SMS-WARR 模式在不同预报时效的风速预报评分检验

(a) 风速预报的评分(SC), (b) 准确率(AC), (c) 偏强率(FS), (d) 偏弱率(FW)

Fig. 6 Evaluation scores of 10 m wind speed forecast by SMS-WARR in different lead times

(a) score (SC), (b) accuracy (AC), (c) forecast strong rate (FS), (d) forecast weak rate (FW)

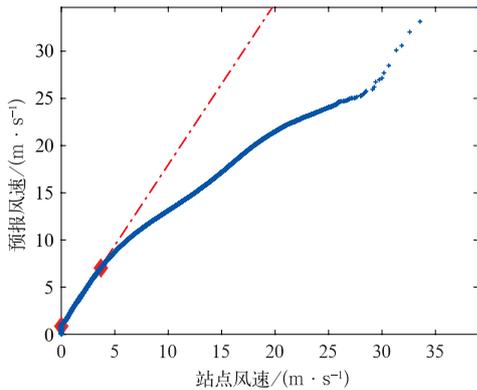


图 7 实测风速-预报风速的分位数图

(红色菱形点分别为 5%、90% 分位点, 红色虚线为两组数据各分位数拟合出的线性关系)

Fig. 7 Quantile-quantile plot of observed wind speed and forecast wind speed

(Red rhombuses represent the 0.05th and 0.9th quantile values of the distribution, the red dashed line is the linear relationship between the quantiles of the two groups of data)

看出, 5%分位点至 90%分位数的点都近似分布在一条直线(图 7 中红色虚线)附近, 即实测风速和预报风速这两组数据中 5%~90%分位数之间分布相似, 相同分位数对应的值存在较为明显的线性关系。

90%分位数以上和 5%分位数以下的点偏离参考线较多, 即两组数据在该区间内的分布差异较大。

这样的分布特征也可以在实测风速与预报风速的频率直方图中得到验证(图 8), 两组数据的频率分布虽然在数值上相差较大, 但变化趋势相似。随实测风速与预报风速的增大, 二者的频率分布均呈单峰特点, 峰值分别出现在 1 级(0.3~1.5 $m \cdot s^{-1}$) 和 2 级(1.6~3.3 $m \cdot s^{-1}$)。据此后期可以考虑基于概率匹配的订正方法(曹萍萍等, 2019)。

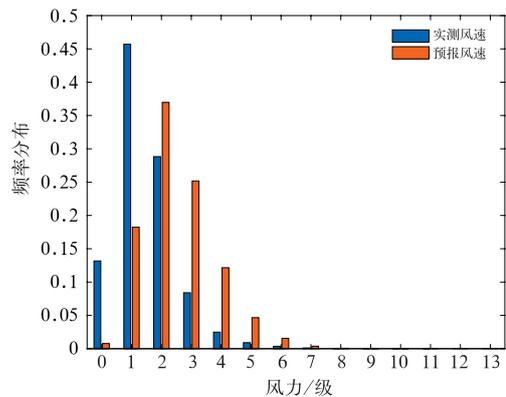


图 8 实测风速与预报风速的频率直方图

Fig. 8 Frequency histogram of observed wind speed and forecast wind speed

3 台风影响期间模式风速预报的误差特征

3.1 台风个例

2018年8月3日至2019年2月28日,对华东区域影响较大的台风有四个:1814号台风摩羯、1818号台风温比亚、1824号台风潭美和1825号台风康妮。其中,台风摩羯和台风温比亚均在华东沿海登陆,且都有近海加强的特点(王晴和张玲,2018)。台风潭美和台风康妮则均是在东海东南部转向东北行,在影响华东区域时处于稳定或缓慢减弱的状态(柳龙生和高拴柱,2018)。本研究分别选取1818号台风温比亚和1825号台风康妮作为登陆台风和转向台风的代表来进行台风影响期间模式预报风速的误差分析(图9)。

1818号台风温比亚是由8月15日上午东海南部海域的一个热带低压发展形成,形成后低压中心在副热带高压的东南引导气流作用下向西北移动。17日04:05前后,“温比亚”在上海浦东新区南部沿海以热带风暴的级别登陆,登陆时台风中心最低气压约为985 hPa,中心附近最大风力达9级($23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。台风登陆后继续向西偏北方向移动,强度逐

渐减弱。“温比亚”登陆后由于台风倒槽以及北方冷空气的影响,给华东多地带来了强降雨和大风天气(郑怡等,2019)。1825号台风康妮在9月29日下午生成,在不到48 h内从热带低压加强为强台风级。10月4日夜间,台风康妮以台风级别进入东海,5日夜间转向东北方向移动并于6日08:40左右以强热带风暴级别登陆韩国庆尚南道沿海,登陆时的最大风速达 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中心附近最低气压为975 hPa。台风康妮主要是在10月4—6日期间影响我国华东地区,部分沿海城市出现了8级以上的大风(曹越男和高拴柱,2019)。

3.2 台风影响期间的模式预报风速误差分析

3.2.1 随时间的演变特征

1818号台风温比亚影响我国的主要时间段是8月16日14时至19日14时(图9,红色实线段)。分析模式风速预报Bias随时间的变化可以看到,对小于6级的风(图10a),模式预报在这3 d里一直偏强,即Bias为正值,且有随着预报时效的延长而减小的趋势,1、6、12和24 h预报时效的3 d平均Bias分别为 2.5 、 2.4 、 2.0 和 $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对6~8级的风(图10b),除17日03—14时的1和6 h预报外,模式预报都偏弱,即Bias为负值,且有随着预报时效延长而偏弱更为明显的趋势,1、6、12和24 h预报时效的3 d平均Bias分别为 -1.6 、 -1.9 、 -2.5 和 $-3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这些特点和第2节分析的模式在8月的预报误差特征基本一致。

图10还表明,模式在这3 d的预报表现是有起伏的。其中,在16日14时至17日04时,“温比亚”强度快速增强且影响范围逐渐变大,模式对小于6级的风的正偏差有减小趋势,对6~8级风的负偏差则有绝对值增大趋势,说明模式对该时间段台风强风区风速的快速增强特点反映不足。值得注意的是,无论是对小于6级的风还是6~8级风,模式预报的Bias在17日02时这一起报点都有一个明显的突变,而且预报时效越短,突变越明显。需要注意的是,图10的横坐标是观测时间,而不是模式起报时间,例如17日02时起报的6 h预报Bias是图中17日08时对应蓝线的数值。下文将对该突变现象出现的原因进行专门讨论。在该突变点之后,小于6级风的Bias逐渐减小并恢复至突变前水平,预报时效越长,这一恢复期越短。6~8级风的Bias在该突变点之后并未回到之前的水平,而是在约6~12 h

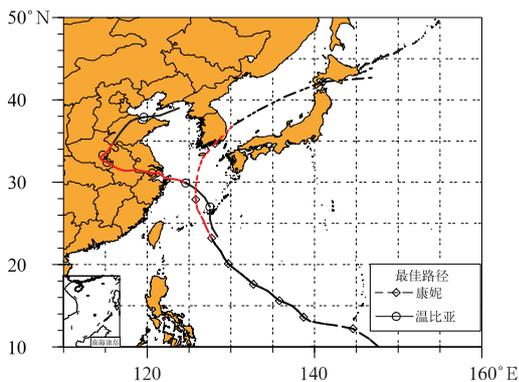


图9 2018年1818号台风温比亚和1825号台风康妮的最佳路径图

(红色线段为本文研究时段,即两个台风影响我国的主要时间段;○和◇表示台风在08时的位置)

Fig. 9 Best tracks of Typhoon Rumbia and Typhoon Kong-Rey in 2018

(Red line segments represent the period of typhoon influence, ○ and ◇ represent the locations of typhoon at 08:00 BT)

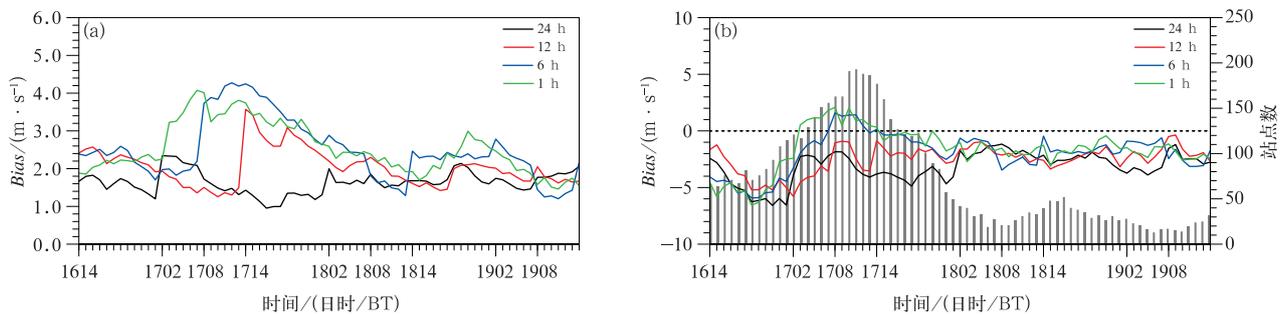


图 10 2018 年 8 月 16—19 日 1818 号台风温比亚影响期间风速预报 Bias 的时间序列

(a) 小于 6 级风, (b) 6~8 级风

(绿、蓝、红、黑色线条分别表示 1, 6, 12 和 24 h 不同的预报时效; 1614 对应绿线的数值表示 16:13 起报的 1 h 预报误差, 蓝线的数值表示 16:08 起报的 6 h 预报误差, 红线的数值表示 16:02 起报的 12 h 预报误差, 黑线的数值表示 15:14 起报的 24 h 预报误差, 以次类推; 图 10b 中的柱状表示每个时刻出现实测 6~8 级风的站点数, 下同)

Fig. 10 Time series of Bias of forecast wind speed during the influence period of Typhoon Rumbia in 16–19 August 2018

(a) weaker than Grade 6, (b) Grade 6–8

(Green, blue, red and black lines represent 1 h, 6 h, 12 h and 24 h lead time; green line value at 1614 means wind speed Bias of 1 h lead time initialized at 13:00 BT 16, blue line value means wind speed bias of 6 h lead time initialized at 08:00 BT 16, red line value means wind speed bias of 12 h lead time initialized at 02:00 BT 16, black line value means wind speed bias of 24 h lead time initialized at 14:00 BT 15 and so on, columns denote the number of surface observation stations with wind observed in Grade 6–8 at each time point, the same below)

之后基本稳定在一个更好的水平上。在 17 日 14 时至 19 日 24 时的 2 天里, 模式 1、6、12 和 24 h 预报时效的平均 Bias 分别为 -1.4 、 -1.5 、 -2.1 和 $-2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。说明模式对“温比亚”登陆后的强风区预报要优于登陆前的预报, 这可能与登陆前观测资料缺乏、模式台风的初始场质量较差有关。

为探寻 17 日 02 时起报的模式预报 Bias 发生突变的可能原因, 对各时次模式初始场进行了分析, 发现这一突变和模式背景场的来源(图 1)关系密切。根据 SMS-WARR 的循环同化设置, 17 日 02 时的背景场来自 SMS-WARMS 2.0 在 16 日 20 时起报的 6 h 预报场(冷启动), 之前及之后各时次的背景场则来自 SMS-WARR 的 1 h 预报场(热启动)。对比 17 日 02 时与之前一个时次(01 时)的海平面气压背景场, 发现台风中心附近的海平面气压差异显著(图 11), 最低海平面气压值分别为 984 和 990 hPa。02 时的模式冷启动背景场中台风强度显著加强, 台风中心附近的低气压范围也明显增大。进一步分析两个时次背景场的 10 m 风场差值(图 12), 发现 02 时台风中心附近的风速也较前一时次明显增强, 其中差异最明显的区域位于江苏东南部, 最大风速差值达 $22.64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见, 17 日

02 时模式冷启动调整预报背景场之后, 台风强度加强, 结构更加紧凑, 台风影响区域内的预报风速整体提高, 使模式预报的小风速在原有正偏差的基础上误差明显增大, 大风速在原有负偏差的基础上误差明显减小。模式背景场的这一调整对预报的影响随着预报时效的延长而逐渐减弱, 因此前述 Bias 的突变现象在 12 h 以内表现得比 24 h 预报明显很多。此外, 随着登陆后台风强度的减弱, 每日 02 时的冷启动对台风结构及强度调整所带来的影响也逐渐减小, 因此在 18 日 02 时和 19 日 02 时观察不到类似 17 日 02 时那么明显的误差突变现象。

1825 号台风康妮在影响我国华东区域时(10 月 4 日 08 时至 6 日 07 时)处于缓慢减弱的时期, 各等级的预报风速 Bias 比较稳定(图 13)。随着台风的西北行靠近我国, 实测风速在 6~8 级的样本数不断增加, 模式预报风速的负偏差绝对值在该等级内略有减小, 在 5 日 10 时左右变为正偏差, 24 h 预报时效的正偏差在 5 日 17 时达 $1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在台风影响范围不断扩大期间, 小于 6 级风速的预报正偏差逐渐增大。台风转向东北行后(5 日夜), 6 级及以上大风的样本数开始减小, 对应该等级内的风速负偏差明显增大, 小于 6 级风速的正偏差明显减小。

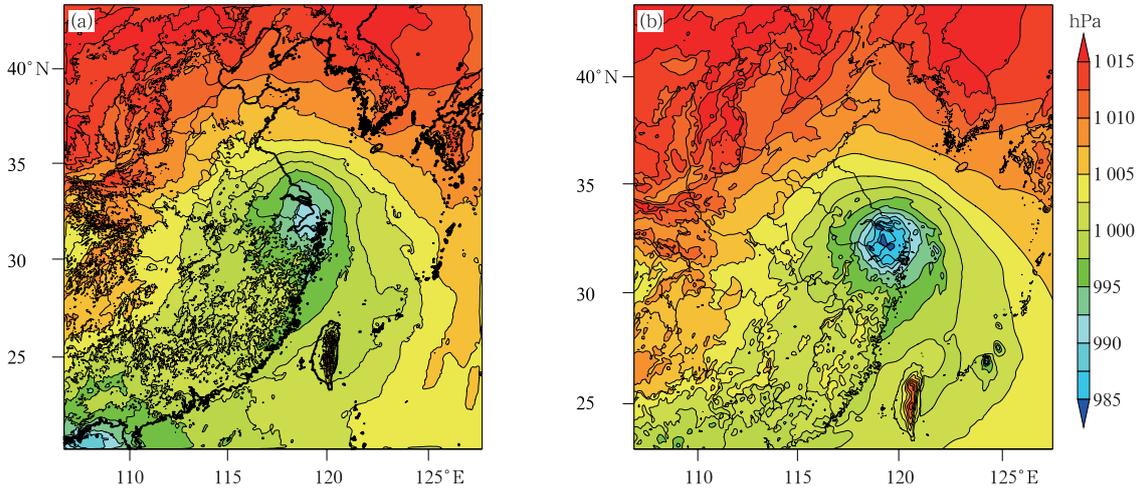


图 11 2018 年 8 月 17 日 01 时(a)和 02 时(b)的海平面气压背景场

Fig. 11 Background field of sea level pressure at 01:00 BT (a) and 02:00 BT (b) 17 August 2018

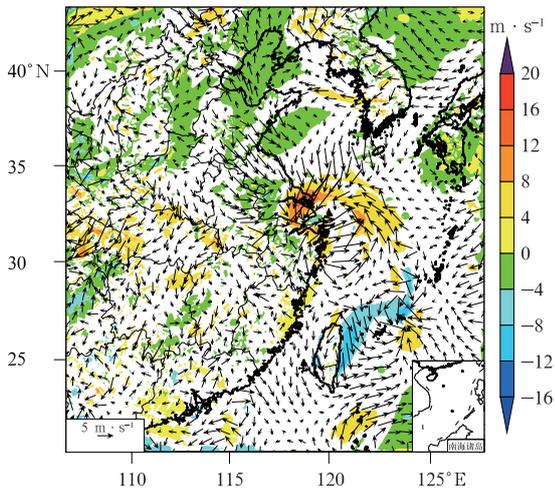


图 12 2018 年 8 月 17 日 02 时与 01 时模式背景场的 10 m 高度风场差值

Fig. 12 The 10 m wind speed difference of background field between 02:00 BT and 01:00 BT 17 August 2018

3.2.2 模式预报风速偏差的空间分布特征

根据上述的分析,分别选取 1818 台风温比亚临近登陆时刻和 1825 台风康妮影响期间,大于 8 级风的站点最多的时刻作为代表性时次,分析模式预报风速偏差的空间分布特征。图 14 是台风温比亚临近登陆前(8 月 17 日 04 时)的站点风速、模式 1 h 预报时效预报风速以及预报风速的偏差。从站点资料可以看到(图 14a),该时刻主要是位于台风西北侧的江苏省东南部、上海市和浙江北部地区受到台风影响,出现 6 级及 6 级以上大风的区域集中在江苏中部至南部的沿海地区,在上海东南部的舟山群岛等地有大于 8 级的大风出现,最大风速达 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。此时模式 1 h 预报时效的预报结果中(图 14b),大风区域的位置与实际相符,但大风影响范围明显比实际大,江苏中部和东南部的大部分地区的风力都达到了 6 级以上,南通市沿海和上海市崇明岛附近的风力达 8 级以上,最大风速为 $22.69 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相比之

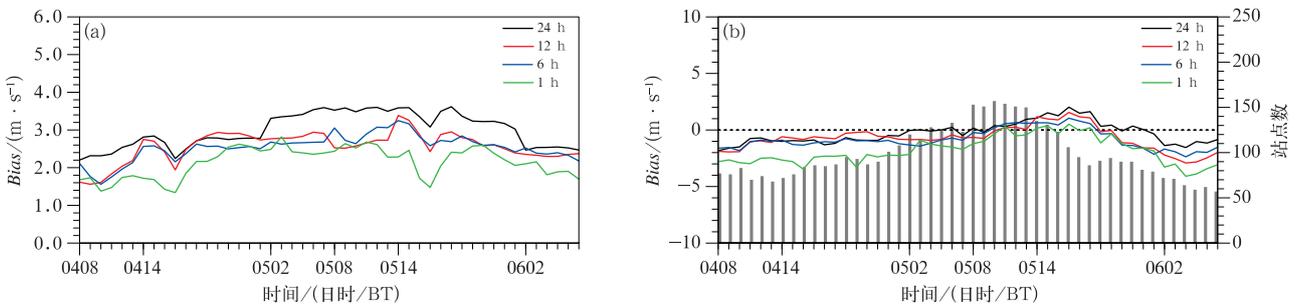


图 13 同图 10, 但为 10 月 4—6 日 1825 号台风康妮

Fig. 13 Same as Fig. 10, but for Typhoon Kong-Rey 4—6 October

下,上海西南部、嘉兴附近的预报风速则较小,这是由于此时模式预报的台风中心已经在嘉兴附近。除此之外,模式在洪泽湖、高邮湖和太湖三个水体处的预报风速均明显比水体周围的风速大。

从该时刻 SMS-WARR 模式预报风速与站点风速的偏差分布来看(图 14c),除了预报的台风中心位置附近,模式的偏差在研究区域内大部分为正值,即模式预报风速在绝大部分区域都比实测风速要大,这与 3.2.1 节中讨论的台风加强期间,模式冷启

动后使得台风大风范围影响增大有关。在福建省和浙江省的大部分地区,风速偏差在 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,偏差大值区与模式预报风速的大值区相对应,尤其是在模式预报风速大于 8 级的区域和一些面积较大的水体附近,会出现大于 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速正偏差。

图 15 是 10 月 5 日 12 时的站点风速、模式 1 h 预报时效预报风速以及预报风速的偏差。此时影响我国华东区域的是 1825 台风康妮,台风中心在该时刻位于浙江省宁波市的东南部。实际观测中大于 6 级

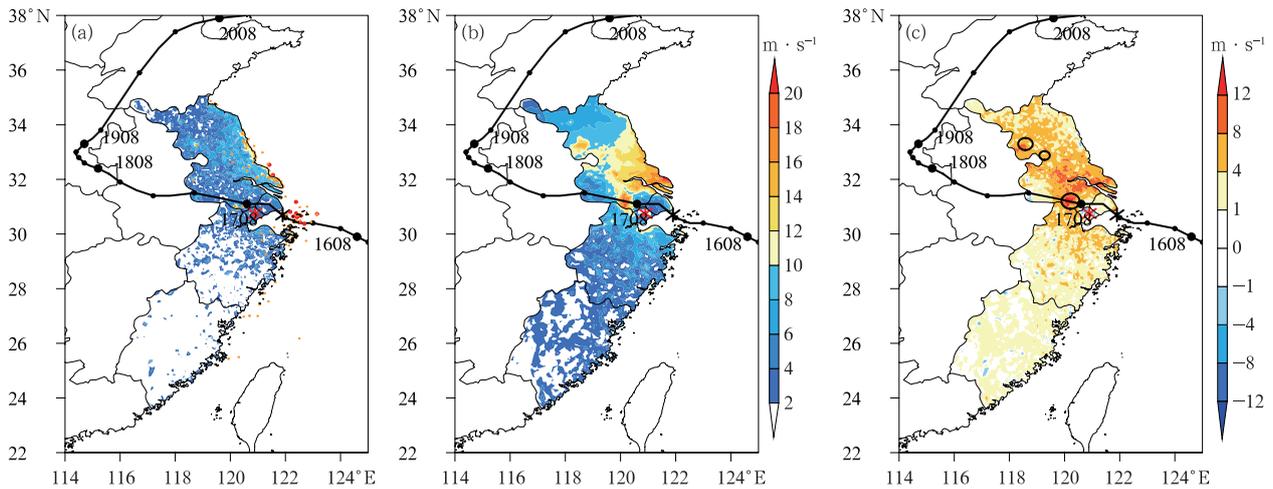


图 14 2018 年 8 月 17 日 04 时台风温比亚的实测风速(a)、模式预报风速(b,1 h 预报时效)和预报风速的偏差(c)
(黑色实线表示台风最佳路径,黑色和红色 * 号分别表示观测和预报的台风中心位置;图 14a 中的红色圆点为
实测大于 8 级风的站点,橙色圆点为实测 6~8 级风的站点;图 14c 中黑色圆圈自北向南分别代表洪泽湖、高邮湖和太湖,下同)

Fig. 14 Observed wind speed (a), forecast wind speed of 1 h lead time (b)
and Bias (c) at 04:00 BT 17 August 2018

(Black solid line indicates the best track of Typhoon Rumbia, black and red asterisks show the observed and predicted locations of typhoon center respectively; red dots in Fig. 14a show stations with wind observed stronger than Grade 8, and orange dots show stations with wind observed in Grade 6-8; black circles represent Hongze Lake, Gaoyou Lake and Taihu Lake respectively from north to south in Fig. 14c, the same below)

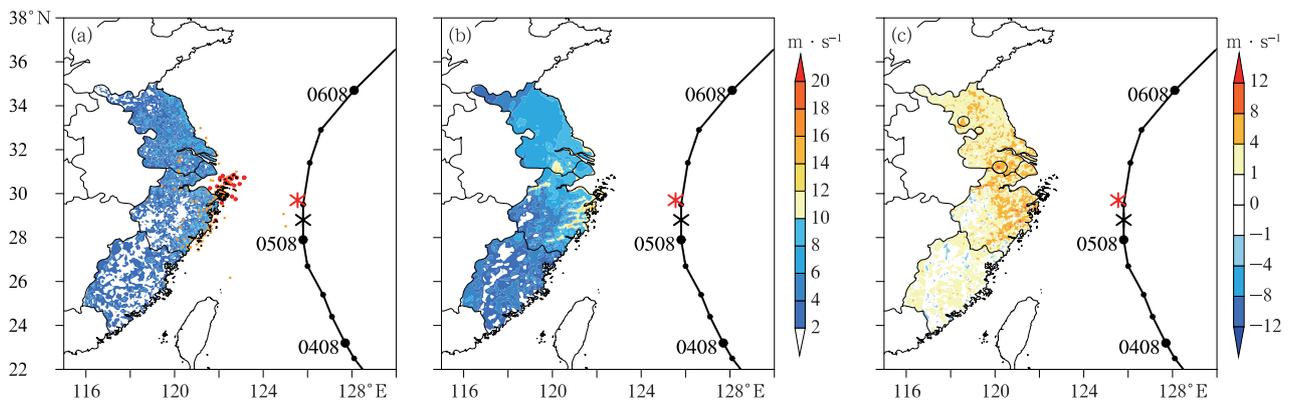


图 15 同图 14, 但为 2018 年 10 月 5 日 12 时台风康妮

Fig. 15 Same as Fig. 14, but for Typhoon Kong-Rey at 12:00 BT 5 August 2018

的强风区主要集中在浙江东部沿海和舟山附近的岛屿区域,且与上述“温比亚”台风的分析结果相似,该时刻 SMS-WARR 模式 1 h 预报时效中的强风区域的位置与实际相符合,但是强风影响范围也明显比较大。江苏省和浙江省大部分地区的风速都大于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,6 级及以上大风主要出现在浙江东北部、江苏南部沿海和太湖流域。预报风速的偏差集中在 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大值区同样与模式风速预报的大值区相符合,偏差最大值为 $14.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从上述台风影响期间偏差的空间分布特征可以看出,SMS-WARR 模式在水体及周围的预报风速都明显比较大,相应的偏差也比较大,这也与 2.1 节中对模式误差原因的推测相符,说明复杂的下垫面状况对模式近地面风场的预报会有很大影响。

4 结论与讨论

本文利用 2018 年 8 月至 2019 年 2 月的江苏、浙江、上海和福建共约 5 500 个国家自动观测站点的 10 m 高度处风速资料对 SMS-WARR 模式地面 10 m 高度处的预报风速进行了检验评估,在此基础上进一步研究了台风影响期间内模式预报风速的误差特征并讨论了模式预报风速误差的成因,得到了以下主要结论:

(1)模式预报对于实测小于 6 级的风存在系统性的高估,且预报时效越长,正偏差越大,即高估会越来越明显;对于实测 6 级及以上的风存在系统性的低估,且预报时效越长,负偏差绝对值越小,即低估会改善。

(2)通过逐旬时序分析发现,各时间段内风速偏差的上下四分位数及中位数都比较稳定,最值相差较大。在强天气系统,如台风或寒潮影响时,模式会出现大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的负偏差。

(3)7 个月总体的评分检验结果表明,随着预报时效的增长,模式在各等级的风速预报偏差率都明显增大,偏弱率相应地减小,说明预报时效越长,SMS-WARR 模式预报中的近地面风速越大。

(4)从预报风速和站点风速的分布检验结果看出,两组数据在 5%~90% 分位数的分布相似,且相同分位数对应的值存在线性关系。随实测风速与预报风速的增大,二者的频率分布均呈单峰特点,峰值

分别出现在 1 级($0.3 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 2 级($1.6 \sim 3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

(5)从模式对两个台风影响期间的风速预报偏差分析中可知,模式预报的强风区域位置与实际基本符合,但范围会比实际中大很多,偏差大值区大部分集中在预报风速 6 级及 6 级以上的区域以及大面积水体附近。

(6)台风影响期间,SMS-WARR 模式预报风速的误差可能与模式对台风快速加强的预报能力较弱,以及模式对不同下垫面影响的处理有关,模式冷、热启动方式的不同也会使之出现不同的误差表现。

本研究中用于模式检验评估的观测资料只有 7 个月,而检验样本时间越短,偶然性越强(赵琳娜等,2015),所以有关模式在不同季节预报效果的结论有待于更多观测资料的验证。由于本文的重点是在于对 SMS-WARR 模式近地面风速预报效果的评估,所以对于模式预报风速的误差成因只根据台风影响期间的误差特征做了简单的讨论,后期还需要对模式预报风速误差的成因,比如复杂地形等做进一步的分析讨论。

参考文献

- 曹萍萍,肖递祥,徐栋夫,等,2019. 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,46(1):102-111. Cao P P, Xiao D X, Xu D F, et al, 2019. Calibration of SWC-WARMS quantitative precipitation based on probability matching method[J]. Meteor Sci Technol, 46(1):102-111(in Chinese).
- 曹越男,高拴柱,2019. 2018 年 10 月大气环流和天气分析[J]. 气象,45(1):135-140. Cao Y N, Gao S Z, 2019. Analysis of the October 2018 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 45(1):135-140(in Chinese).
- 陈葆德,王晓峰,李泓,等,2013. 快速更新同化预报的关键技术综述[J]. 气象科技进展,3(2):29-35. Chen B D, Wang X F, Li H, et al, 2013. An overview of the key techniques in rapid refresh assimilation and forecast[J]. Adv Meteor Sci Technol, 3(2):29-35(in Chinese).
- 陈子通,黄燕燕,万齐林,等,2010. 快速更新循环同化预报系统的汛期试验与分析[J]. 热带气象学报,26(1):49-54. Chen Z T, Huang Y Y, Wan Q L, et al, 2010. Rapid updating cycle assimilation and forecasting system and its experiments and analysis in flood seasons[J]. J Trop Meteor, 26(1):49-54(in Chinese).
- 何晓凤,周荣卫,孙逸涵,2014. 3 个全球模式对近地层风场预报能力的对比检验[J]. 高原气象,33(5):1315-1322. He X F, Zhou R W, Sun Y H, 2014. Verification on surface wind speed of three

- global circulation models in China[J]. Plateau Meteor, 33(5): 1315-1322(in Chinese).
- 黄燕燕,万齐林,陈子通,等,2011. 加密探空资料在华南暴雨数值预报的应用试验[J]. 热带气象学报,27(2):179-188. Huang Y Y, Wan Q L, Chen Z T, et al, 2011. Experiments of using dense observation data of sounding balloon in rainstorm forecast over South China[J]. J Trop Meteor, 27(2):179-188(in Chinese).
- 李佳,陈葆德,张旭,等,2017. 2016年6月23日江苏阜宁龙卷的高分辨率快速更新同化预报与分析[J]. 大气科学,41(6):1221-1233. Li J, Chen B D, Zhang X, et al, 2017. High-resolution rapid refresh analysis and prediction of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6):1221-1233(in Chinese).
- 柳龙生,高拴柱,2018. 2018年9月大气环流和天气分析[J]. 气象,44(12):1635-1640. Liu L S, Gao S Z, 2018. Analysis of the September 2018 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 44(12):1635-1640(in Chinese).
- 刘郁珏,苗世光,刘磊,等,2019. 修正 WRF 次网格地形方案及其对风速模拟的影响[J]. 应用气象学报,30(1):70-81. Liu Y J, Miao S G, Liu L, et al, 2019. Effects of a modified sub-grid-scale terrain parameterization scheme on the simulation of low-layer wind over complex terrain[J]. J Appl Meteor Sci, 30(1):70-81(in Chinese).
- 卢冰,孙继松,仲跻芹,等,2017. 区域数值预报系统在北京地区的降水日变化预报偏差特征及成因分析[J]. 气象学报,75(2):248-259. Lu B, Sun J S, Zhong J Q, et al, 2017. Analysis of characteristic bias in diurnal precipitation variation forecasts and possible reasons in a regional forecast system over Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 75(2):248-259(in Chinese).
- 唐敬,蔡旭晖,康庆,等,2011. 复杂地形低风速气象特征分析[J]. 气象科学,31(4):542-547. Tang J, Cai X H, Kang L, et al, 2011. Characteristics of low-wind speed meteorology over complex terrain in north-central Hunan Province[J]. J Meteor Sci, 31(4):542-547(in Chinese).
- 王靖,张玲,2018. 2018年8月大气环流和天气分析[J]. 气象,44(11):1501-1508. Wang Q, Zhang L, 2018. Analysis of the August 2018 atmosphere circulation and weather[J]. Meteor Mon, 44(11):1501-1508(in Chinese).
- 王晓峰,王平,张蕾,等,2015. 上海“7·31”局地强对流快速更新同化数值模拟研究[J]. 高原气象,34(1):124-136. Wang X F, Wang P, Zhang L, et al, 2015. Numerical simulation of ‘7·31’ severe convection event in Shanghai using rapid refresh technique[J]. Plateau Meteor, 34(1):124-136(in Chinese).
- 魏东,尤凤春,杨波,等,2011. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)要素预报质量评估[J]. 气象,37(12):1489-1497. Wei D, You F C, Yang B, et al, 2011. Assessment and analysis of meteorological elements forecasted by Beijing Rapid Update Cycle Forecast System[J]. Meteor Mon, 37(12):1489-1497(in Chinese).
- 薛峰,王兴,吴双,等,2017. 雷达外推与数值模式动态融合降水概率预报方法[J]. 气象科技,45(6):1036-1042. Xue F, Wang X, Wu S, et al, 2017. Dynamic blending probabilistic precipitation forecast method based on radar extrapolation and numerical weather prediction[J]. Meteor Sci Technol, 45(6):1036-1042(in Chinese).
- 严婧,王海军,程亚平,等,2017. 人工与自动观测静风的差异分析与应用[J]. 气象,43(2):232-239. Yan J, Wang H J, Cheng Y P, et al, 2017. Analysis and application of calm records between manual and automatic observations[J]. Meteor Mon, 43(2):232-239(in Chinese).
- 曾瑾瑜,韩美,吴幸毓,等,2015. 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,39(7):75-85. Zeng J Y, Han M, Wu X Y, et al, 2015. Test and application of WRF, EC and T639 models in strong wind forecasting in Fujian coast in winter half year[J]. Mar Sci, 39(7):75-85(in Chinese).
- 张小玲,杨波,盛杰,等,2018. 中国强对流天气预报业务发展[J]. 气象科技进展,8(3):8-18. Zhang X L, Yang B, Sheng J, et al, 2018. Development of operations on forecasting severe convective weather in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(3):8-18(in Chinese).
- 赵琳娜,董航宇,吴亮,等,2015. 黄淮地区夏季日降水分区概率预报方法研究[J]. 气象,41(12):1503-1513. Zhao L N, Dong H Y, Wu L, et al, 2015. Daily precipitation probability forecast based on climatic region over Huang-Huai Region in summer[J]. Meteor Mon, 41(12):1503-1513(in Chinese).
- 郑怡,杨晓霞,孙晶,2019. 台风温比亚(1818)造成山东极端强降水的成因分析[J]. 海洋气象学报,39(1):106-115. Zheng Y, Yang X X, Sun J, 2019. Causal analysis of extremely heavy precipitation in Shandong Province caused by Typhoon Rumbia(1818)[J]. J Mar Meteor, 39(1):106-115(in Chinese).
- Benjamin S G, Dévényi D, Weygandt S S, et al, 2004. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC[J]. Mon Wea Rev, 132(2):495-518.
- Chakraborty A, 2010. The skill of ECMWF medium-range forecasts during the year of tropical convection 2008[J]. Mon Wea Rev, 138(10):3787-3805.
- Chen J, Wang Y, Li L, et al, 2013. A unified verification system for operational models from regional meteorological centres of China Meteorological Administration[J]. Meteor Appl, 20(2):140-149.
- Cheng W Y Y, Steenburgh W J, 2015. Evaluation of surface sensible weather forecasts by the WRF and the eta models over the Western United States[J]. Wea Forecasting, 20(5):812-821.
- Gofa F, Boucouvala D, Louka P, et al, 2018. Spatial verification approaches as a tool to evaluate the performance of high resolution precipitation forecasts[J]. Atmos Res, 208:78-87.
- Henckes P, Knaut A, Obermüller F, et al, 2018. The benefit of long-term high resolution wind data for electricity system analysis [J]. Energy, 143:934-942.
- James E P, Benjamin S G, Marquis M, 2017. A unified high-resolution

- wind and solar dataset from a rapidly updating numerical weather prediction model[J]. *Renew Energy*, 102:390-405.
- Jiménez P, Dudhia J, 2012. Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 51(2):300-316.
- Jiménez P, Dudhia J, 2013. On the ability of the WRF model to reproduce the surface wind direction over complex terrain[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 52(7):1610-1617.
- Pinson P, Hagedorn R, 2012. Verification of the ECMWF ensemble forecasts of wind speed against analyses and observations[J]. *Meteor Appl*, 19(4):484-500.
- Wang G, Wong W K, Hong Y, et al, 2015. Improvement of forecast skill for severe weather by merging radar-based extrapolation and storm-scale NWP corrected forecast[J]. *Atmos Res*, 154:14-24.
- Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al, 1998. Nowcasting thunderstorms: a status report[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 79(10):2079-2100.
- Wilson J W, Feng Y R, Chen M, et al, 2010. Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: successes, failures, and implications for future nowcasting systems[J]. *Wea Forecasting*, 25(6):1691-1714.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 31(2):287-301.