

热带气旋风场动力释用技术的检验与评估

周冠博^{1,2} 钱奇峰¹ 胡海川¹ 黄永杰³ 崔晓鹏^{3,4} 陈有龙^{2,5}

(1 国家气象中心, 北京 100081; 2 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 570203; 3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 4 中国科学院大学, 北京 100049; 5 海南省气象信息中心, 海南 570203)

摘要: 我国是受热带气旋, 尤其是登陆热带气旋影响最为严重的国家之一, 热带气旋造成的大风是主要的气象致灾因子和业务预报的主要对象, 而目前数值预报是热带气旋风场预报的重要客观参考产品。当数值预报的热带气旋路径与强度等较主观预报出现较大偏差时, 需要对数值模式预报的风场及时做出修正, 而业务中对风场数值预报产品缺乏合理有效的修正手段, 使得风场数值预报产品的可用性显著降低。本文采用“热带气旋风场动力释用技术”建立了台风精细化大风客观预报系统, 并开展了主、客观的台风个例风场检验以及2020年的台风风场检验。检验评估表明: 基于“热带气旋风场动力释用技术”的台风精细化大风客观预报系统对热带气旋风场数值预报产品表现出良好的释用效果, 提高了预报员对相关数值预报产品的理解 and 应用水平, 提升了风场预报的精细化程度, 为气象预报和决策服务提供了重要参考和依据。

关键词: 热带气旋风场, 动力释用技术, 预报检验与评估

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.06.005

Test and Evaluation of Dynamic Interpretation Technology for Tropical Cyclone Wind Field

Zhou Guanbo^{1,2}, Qian Qifeng¹, Hu Haichuan¹, Huang Yongjie³, Cui Xiaopeng^{3,4}, Chen Youlong⁵

(1 National Meteorological Center, Beijing 100081; 2 Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Hainan 570203; 3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 5 Meteorological Information Center of Hainan Province, Hainan 570203)

Abstract: China is one of the countries that are most seriously affected by tropical cyclones, especially landfall tropical cyclones. The high winds caused by tropical cyclones are the main meteorological disaster-causing factors and the main object of operational forecasting, and the current numerical forecast is an important objective reference product for tropical cyclone wind field forecasting. When the path and intensity of the tropical cyclones forecasted by the numerical model deviate significantly from the subjective forecast, the wind field forecasted by the numerical model needs to be corrected in time. However, due to the lack of reasonable and effective correction means for the operational numerical wind field forecast products, the usability of the products has been reduced significantly. In this paper, the “dynamic interpretation technology for tropical cyclone wind field” is adopted in the establishment of an objective forecast system for the refined forecast of TC wind, and the objective and subjective typhoon wind field tests are carried out, as well as the typhoon wind field tests for 2020. The test and evaluation show that the refined objective typhoon forecast system based on the “dynamic interpretation technology for tropical cyclone wind field” has exhibited good interpretation of the tropical cyclone wind field numerical forecast products. The system has also improved the forecasters’ understanding and application level of the relevant numerical forecast products and therefore has enhanced the refinement degree of wind field forecast. It can provide important reference and basis for meteorological forecast and decision-making services.

Keywords: tropical cyclone wind field, dynamic interpretation technology, forecast test and evaluation

收稿日期: 2021年8月25日; 收稿日期: 2021年12月17日
作者简介: 周冠博, (1983—), Email: zhoubg@cma.gov.cn
通信作者: 崔晓鹏, (1973—), Email: xpcui@mail.iap.ac.cn
资助项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1501604); 海南省南海气象防灾减灾重点实验室开放基金项目 (SCSF202201); 国家自然科学基金面上项目 (41875056, 42075013); 广东省重点领域研发计划重点专项项目 (2019B111101002); 国家自然科学基金青年项目 (41405049)

0 引言

热带气旋致灾因子主要包括大风、暴雨和风暴潮^[1], 其中, 热带气旋暴雨形成机理一直受到气象学者广泛关注^[2-11], 而对热带气旋引起的强风的理论研究却相对较少。数值预报是热带气旋大风业务预报的

重要客观参考,为了改进数值预报效果,学者们开展了大量工作,尽管取得了可喜进展,但距离精细化业务预报需求仍存在较大差距,尤其是,当模式预报的热带气旋路径和强度与预报员主观预报存在较大偏差时,数值预报风场产品的可用性显著降低,急需基于热带气旋主观路径和强度预报的数值预报风场产品客观修正技术。“热带气旋风场动力释用技术”(简称TC-wind)针对这一业务上的预报瓶颈和难题,提出了一种基于热带气旋风场数值预报产品的客观化、量化的订正技术^[12]。基于该技术,可借助路径与强度的主观预报信息,对数值模式预报的热带气旋风场进行合理和有效订正,得到订正后的风场,辅助预报员做出更加准确和精细化的热带气旋近地面风场预报。

基于“热带气旋风场动力释用”(TC-wind)技术,将预报员关于热带气旋路径和强度的主观预报与数值模式预报(CMA-TYM)预报系统和台风与海洋气象预报中心的短临预报系统)风场产品相结合,建立了“台风精细化大风客观预报系统”。业务转化测试和实时业务应用效果评估显示,基于TC-wind技术建立的预报系统明显修正了模式预报的大风分布,有效提高了模式大风预报评分,提升了数值预报风场产品的可用性,提高了热带气旋风场预报的客观化和精细化程度。

1 台风精细化大风客观预报系统

1.1 热带气旋风场动力释用技术(TC-wind)简介

基于极坐标原始方程,假设热带气旋中的气块速度呈线性变化,地面压力场的分布符合Fujita公式,导出了一组描述中心压力扰动、热带气旋位置、热带气旋移动方向和速度对风场影响的方程^[12]。热带气旋数值预报风场的修正方程可表示为如下形式:

$$dv_{\theta} = dA \frac{\partial v_{\theta}}{\partial A} + dr \frac{\partial v_{\theta}}{\partial r} + dv_s \frac{\partial v_{\theta}}{\partial v_s} + d\alpha \frac{\partial v_{\theta}}{\partial \alpha}, \quad (1)$$

$$dv_r = dA \frac{\partial v_r}{\partial A} + dr \frac{\partial v_r}{\partial r} + dv_s \frac{\partial v_r}{\partial v_s} + d\alpha \frac{\partial v_r}{\partial \alpha}. \quad (2)$$

其中,式(1)代表的是切向风速订正量,式(2)代表的是径向风速订正量,公式中的 dA , dr , dv_s , $d\alpha$ 分别表示压力梯度差异、热带气旋中心与订正点之间的距离差异(由热带气旋的中心位置决定)、热带气旋移动速度差异和热带气旋移动方向差异(上述差异由模式预报与预报员主观预报之间的差异所决定)。因此,通过在业务应用中掌握这4个方面的差异,利用公式(1)和公式(2)就很容易实时动态地修正热带气旋风场的数值预报,上述内容详细推导过程可见^[12]。

1.2 台风精细化大风客观预报系统简介

台风精细化大风客观预报系统是基于热带气旋风

场动力释用技术,通过将预报员做出的TC路径与强度的主观预报信息,与CMA-TYM模式热带气旋风场精细化预报产品相结合,利用路径与强度的主观预报信息,对模式预报的TC风场(10 m高度)和海平面气压进行修正(动力释用),得到修正后的高分辨率风场和海平面气压预报产品,并应用于实际业务,取得明显的改进效果。

在精细化大风客观预报系统架构中,热带气旋风场数值预报产品选择了中国气象局CMA-TYM模式预报产品,该预报产品时效为120 h,间隔为1 h,而路径和强度主观预报选用了中央气象台预报员的主观预报,关键技术为TC-wind技术。具体流程框架如图1所示,首先,利用数值模式预报的TC路径和强度信息,结合预报员主观预报的路径和强度信息,得到两者的差值;进一步,应用上述差值,基于TC-wind技术,利用动力学方法,并考虑地形和海陆下垫面影响等,对CMA-TYM数值模式近地面风场预报产品开展客观修正,计算得到相应的TC近地面风场增量,将增量叠加到CMA-TYM模式预报的10 m风场上,得到修正后的热带气旋近地面(10 m)风场预报(图1)。需要注意的是,基于TC-wind技术的“台风精细化大风客观预报系统”对TC近地面风场的修正需要利用预报员做出的路径和强度主观预报信息以及数值模式风场预报产品,因此,其修正效果一定程度上取决于预报员路径和强度主观预报的准确性以及模式TC风场结构预报的好坏,理论上,预报员做出的路径与强度主观预报越准确、模式预报的风场结构越合理,则系统修正效果越好。此外,修正效果还会受到一些系统参数设置(如海陆摩擦系数等)以及地形的影响。

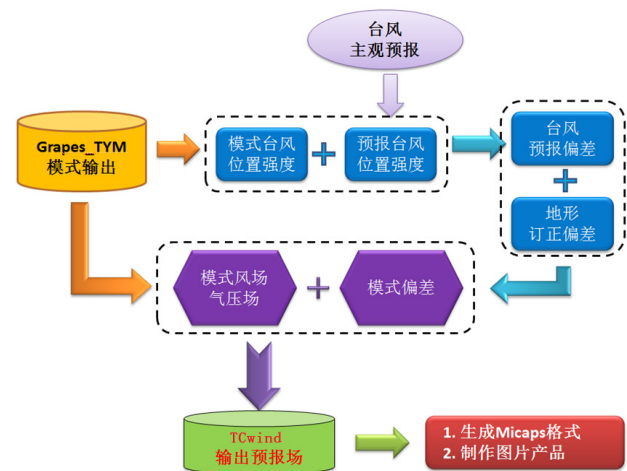


图1 台风精细化大风客观预报业务流程

Fig. 1 The operational process of refined forecast for TC wind

2 资料介绍

本文选取中国气象局CMA-TYM模式预报的10 m 风场、ECMWF确定性模式的10 m 风场预报数据以及TC-wind风场订正预报数据(空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$)作为风场预报资料,预报时效为12~120 h,间隔1 h。使用的TC资料,包括中国气象局(上海台风研究所)整编的最佳路径数据集(http://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_sm.html),包含6 h一次的TC位置、中心最低气压及中心附近最大风速等。国家站的地面实况观测数据以及ASCAT反演的洋面风场作为观测数据用于订正效果的实况检验。

3 台风个例风场预报检验

3.1 2015年“苏迪罗”影响期间主观检验结果

以2015年“苏迪罗”为例,将原始风场(CMA-TYM数值模式预报的10 m风)和采用TC-wind系统修正后的风场相比较,着重从近地面风场分布特征、风场强度变化等方面,结合多种实况观测数据,分析了

基于TC-wind技术构建的预报系统对热带气旋风场的修正效果。

1513号热带气旋“苏迪罗”于2015年8月8日凌晨登陆我国台湾省花莲市,之后于8日晚间登陆福建省莆田。7日09时,“苏迪罗”向西北方向快速移动,靠近台湾,此时刻主观定强为50 m/s,由ASCAT反演的洋面风场(图2a)可见,实况热带气旋中心西南象限风速较小,大风半径也偏小;CMA-TYM模式预报的此时“苏迪罗”强度为40 m/s(图2b),而经TC-wind技术订正后的强度可达45 m/s(图2c),订正对TC强度预报有较明显改进;从风场水平分布特征来看,订正前后没有太大区别,皆呈现东北大、西南小的形势。可见,对于“苏迪罗”登陆台湾之前的超强台风阶段,CMA-TYM模式可以较准确预报风场总体分布,但对TC强度仍缺乏足够的预报能力,而借助TC-wind技术,可以在保持原有较为准确的近地面风场分布形势之外,一定程度上提高TC强度的预报能力。

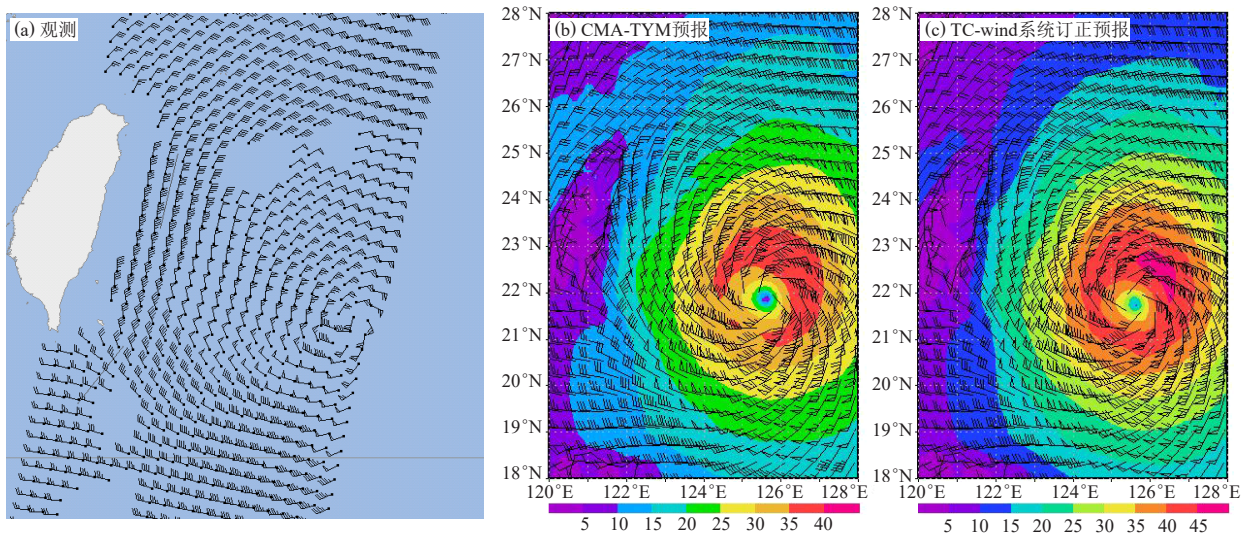


图2 1513号“苏迪罗”的风场分布(2015年8月7日09时)
Fig. 2 The wind field distribution of Super Typhoon Soudelor (No. 1513) (At 09:00 of 7 August 2015)

2015年8月8日22时,“苏迪罗”进入台湾海峡,即将登陆福建,此时,业务定强为38 m/s,沿海自动站实况观测(图3a)很好地验证了业务定强,洋面上,大风区出现在“苏迪罗”中心东侧,订正前(图3b)、后(图3c)近地面风场总体分布依然差异不大,均较为准确地预报了洋面上风场的总体分布特征,但订正后的“苏迪罗”强度与沿海自动站实测值更为接近(见图中黄色圆圈所示)。

综上,对于热带气旋“苏迪罗”,无论是当其处于洋面上的超强台风阶段,还是登陆前的台风强度阶段,CMA-TYM模式均可以较为准确地预报实际近地

面风场总体分布特征,但对其强度的预报均偏弱,而借助TC-wind技术订正后,在保持了较为准确的风场分布之外,还较明显地减小了TC强度的预报误差。

3.2 新的客观评分方法——热带气旋大风风级TS评分

为了更为客观地检验基于TC-wind技术的预报系统的热带气旋大风预报效果,中国科学院大气物理研究所借鉴降水TS客观评分思路,针对热带气旋6级以上不同大风风力等级,建立了新的客观评分方法——热带气旋大风风级TS评分:

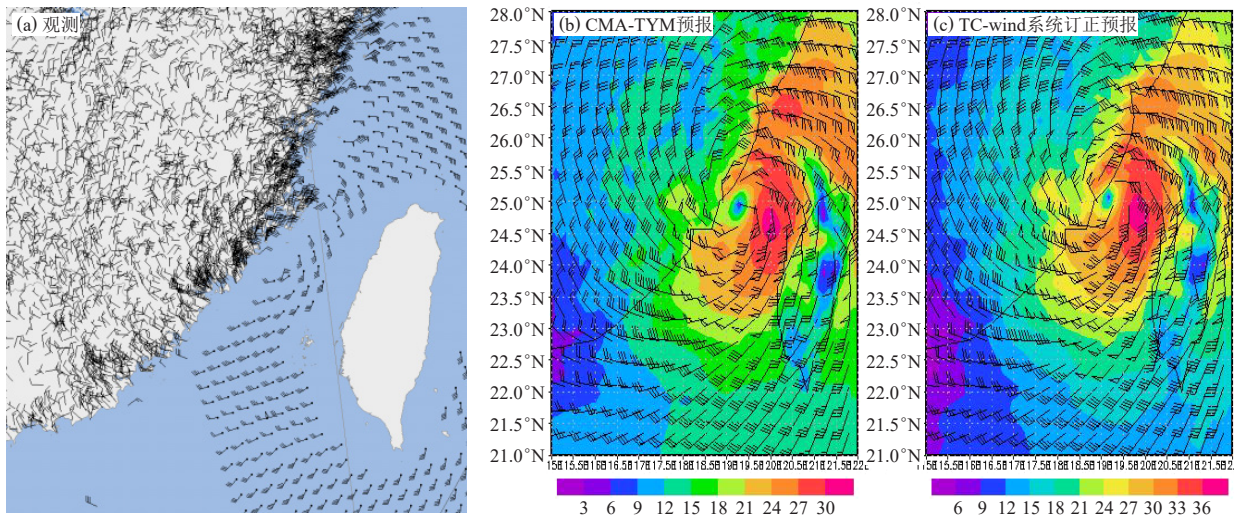


图3 1513号“苏迪罗”的风场分布(2015年8月8日22时)
Fig. 3 The wind field distribution of Super Typhoon Soudelor (No. 1513) (At 22:00 of 8 August 2015)

$$TS_{\text{风级}} = \frac{NR_{\text{预报正确}}}{NO_{\text{观测}} + NM_{\text{模式预报/TC-wind}} - NR_{\text{预报正确}}} \quad (3)$$

式(3)中, TS 为不同风力等级预报的 TS 评分, NR 为预报正确部分的风圈面积, NO 为观测的风圈面积, NM 为数值模式(CMA-TYM)或TC-wind系统预报的相应风圈面积。

3.3 2015年“苏迪罗”影响期间客观检验效果

利用式(3), 针对2015年“苏迪罗”影响期间, CMA-TYM模式风场预报数据和基于TC-wind技术订正的风场预报数据, 开展热带气旋6级以上大风风圈 TS 评分检验(图4)。由图4可以看出, 与CMA-TYM模式预报的大风圈 TS 评分相比, 基于TC-wind技术订正预报的大风圈的 TS 评分在不同大风风力等级6级(图4a)、8级(图4b)和10级(图4c)均明显优于CMA-TYM数值模式预报, 有效提高了热带气旋大风预报订正效果。

客观检验效果显示, CMA-TYM模式对TC大风分布已经显示出较好的预报水准, 而基于TC-wind技术建立的大风客观预报订正系统, 无论是预报的近地面大风水平分布, 还是客观 TS 评分, 均明显优于上述模式预报的结果。

3.4 2018年“山竹”影响期间的检验结果

选取2018年22号台风“山竹”期间的几个单站的风场预报进行检验(图5)。香港单站的TC-wind风场预报整体上还是比较理想的。TC-wind风速预报普遍偏大, 平均偏大5.5 m/s, 最大偏差大13 m/s(16日17时), 对于台风最大风速出现的时间预报准确, 实况和TC-wind预报均出现在16日14时, 但风速预报偏大

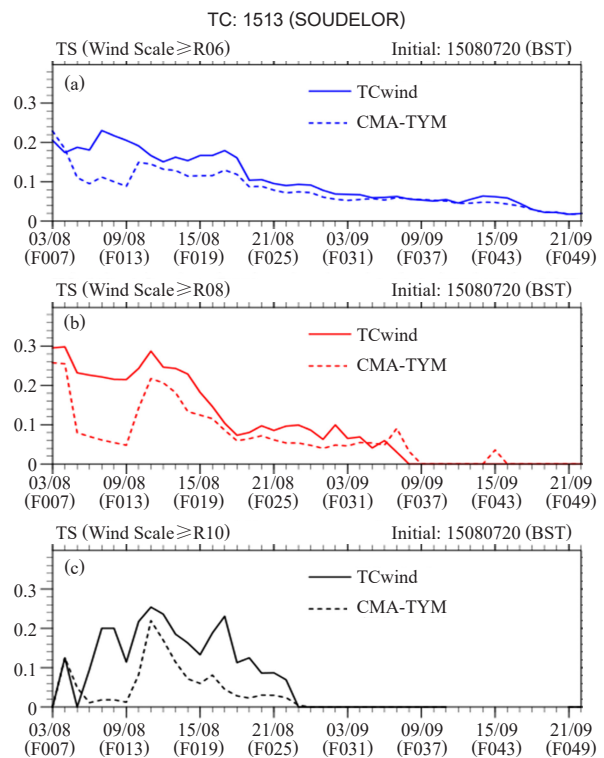


图4 1513号“苏迪罗”大风圈预报 TS 评分6级(a), 8级(b), 10级(c) (横轴为预报时效, 纵轴为 TS 评分, 实线和虚线分别代表TC-wind系统和CMA-TYM数值模式系统预报的大风的 TS 评分曲线)

Fig. 4 TS score for the gale forecast of Soudelor (a) scale 6; (b) scale 8; (c) scale 10 (The horizontal axis is the prediction time, and the vertical axis is the TS score. The solid line and dotted line respectively represent the TS score curve of gale predicted by TC-wind system and CMA-TYM numerical model)

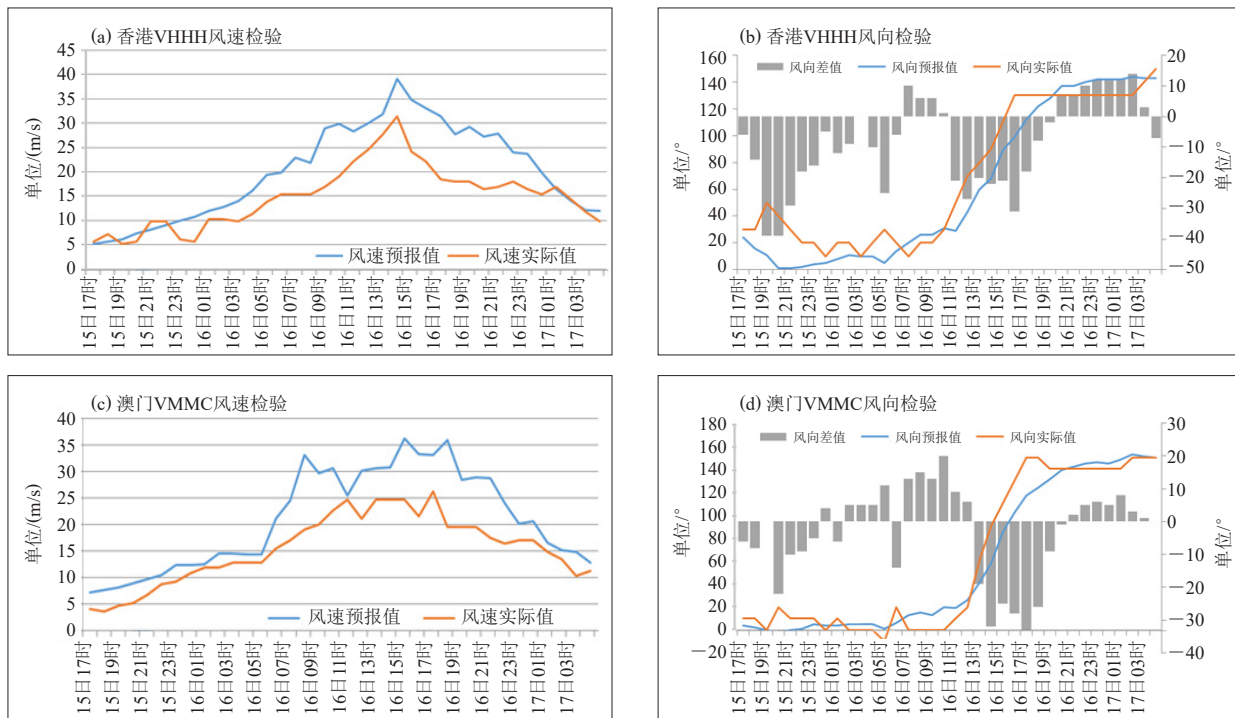


图5 2018年9月15日17时至9月17日03时(北京时)基于站点检验的大风24 h预报的时序图香港(a)和澳门(c)的风速TC-wind预测值(蓝线)与实况(红线)的比较;香港(b)和澳门(d)的风向TC-wind预测值(蓝线)与实况(红线)的比较

Fig. 5 Timing diagrams of 24 h gale forecast based on station verification from 17:00 of 15 September to 03:00 of September 17, 2018 (Beijing Time). (a) and (c) the comparison between the wind speed forecasted by TC-wind system (blue line) and the actual wind speed (red line) in Hong Kong and Macao, respectively; (b) and (d) the comparison between the wind direction forecasted by TC-wind system (blue line) and the actual wind direction (red line) in Hong Kong and Macao, respectively

7.7 m/s。风向偏差在 40° 以内,主要偏差在台风中心之前的15日19—21时和台风风向的转变。台风中心来临之前偏东分量考虑不足,而台风的风向转变预报比实况偏晚2 h左右。澳门单站TC-wind风场预报整体上与香港单站情况相似,TC-wind风速在台风中心来临之前预报较为理性,仅偏大2 m/s左右,但在台风中心来临时,TC-wind风速明显偏大,在16日7—22时时段内平均偏大9 m/s。从风向方面,整体偏差在 40° 以内,主要偏差出现在台风的转向上,风速转向出现的时间TC-wind预报较为准确,但风向转向的速度预报慢于实况。

对于2018年22号台风“山竹”期间的几个单站的风场预报进行检验分析来看,TC-wind风场预报整体上还是比较理想的,无论是风速还是风向在全时段内均与实况较为接近。TC-wind风场预报较数值模式的风场预报来说,可以更好地与预报员的主观预报保持一致,并且TC-wind可以满足业务上精细化和格点化的需求。

3.5 2021年“烟花”影响期间的检验结果

以2021年台风“烟花”为例,将原始风场(EC数

值模式预报的10 m风)和采用TC-wind系统修正后的风场相比较,着重从近地面风场分布特征、风场强度变化等方面,结合多种实况观测数据,分析了基于TC-wind技术构建的预报系统对热带气旋风场的预报效果。

台风“烟花”于2021年7月18日2时在西北太平洋洋面上生成,19日上午加强为强热带风暴级,20日加强为台风级,21日上午加强为强台风级,25日12时30分前后在浙江省舟山普陀沿海登陆(13级,38 m/s,台风级);穿过杭州湾后,于26日9时50分在浙江平湖市沿海再次登陆(10级,强热带风暴级,28 m/s),28日凌晨在安徽减弱为热带低压。选取“烟花”台风登陆前后的一段时间,选取登陆点东侧的观测站点(759737),站点位置如图6所示,来检验订正后的风场与EC模式10 m风场及实况风速的情况。

基于站点(759737站)检验的大风时序图表明(图7),从2021年7月24日20时开始,采用TC-wind系统的订正方法修订之后的10 m风场更接近实况。而EC模式10 m风场较实况风速明显偏弱,并且TC-wind订正后的风速的变化趋势也更接近实况,但较实测风速

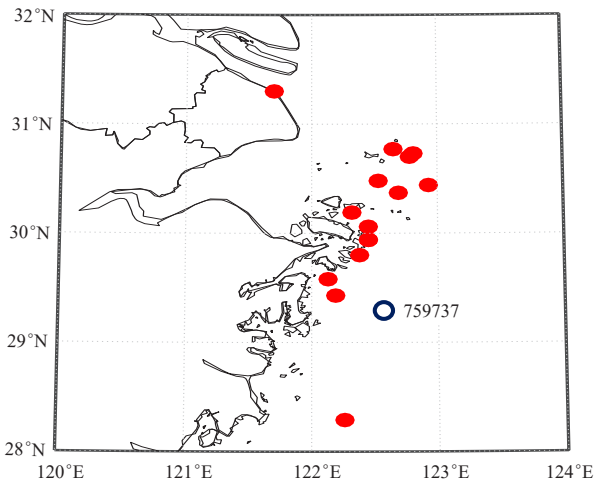


图6 观测站点的示意图(图中圆圈的位置代表站点号759737观测站的位置)

Fig. 6 The sketch map of the observation station (the position of the circle represents the location of No. 759737 observation station)

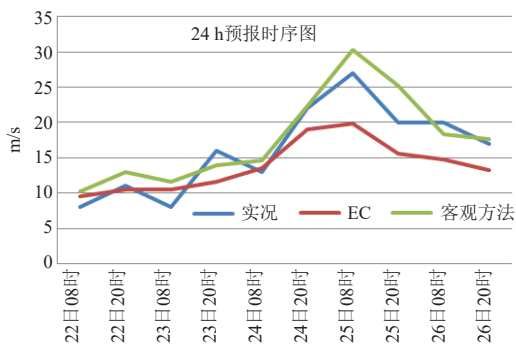


图7 2021年7月22日08时至7月26日20时(北京时间)基于站点检验的大风24 h预报的时序图(蓝线:实况;红线:EC模式10 m风场;绿线:TC-wind修正后的10 m风场)

Fig. 7 Timing diagram of 24 h gale forecast based on station verification from 08:00 of July 22 to 20:00 of 26 July 2021 (Beijing time) (blue line: the actual gale; red line: 10 m wind field forecasted by EC; green line: 10 m wind field revised by TC-wind system)

略有偏强的情况。

进一步将“烟花”台风影响期间的风场分等级进行检验(图8)。由图可知台风精细化大风客观预报在烟花期间6~10级的平均误差在均在1 m/s以内,其中6级和7级风的订正效果较好,但是6级风略有偏强,7级风略有偏弱的情况。整体而言7~10级的大风较EC模式输出的10 m风场有明显的改进效果,虽然二者均较实况偏弱,但是订正方法修订之后的10 m风场更接近实况,并且订正效果随着风速的增大提高的程度也越高。因此在“烟花”影响期间,台风精细化大风客观预报系统较EC模式表现出了明显的优势。

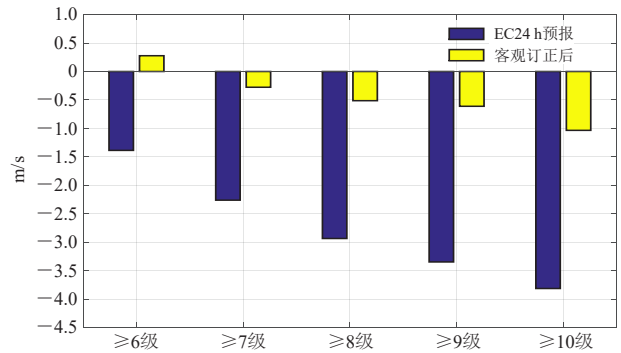


图8 2021年7月22日08时至7月26日20时(北京时间)的风场分等级进行检验(蓝色柱框:代表EC模式24 h的10 m风场预报;黄色柱框:TC-wind修正后24 h的10 m风场预报)

Fig. 8 Scaled test for wind field forecast from 08:00 of July 22 to 20:00 of 26 July 2021 (Beijing time) (blue column: 24 h 10 m wind field forecasted by EC; yellow column: 24 h 10 m wind field forecast revised by TC-wind system)

4 TC-wind方法在2020年台风风场预报整体检验

本文利用2020年5—10月的ECMWF确定性模式的10 m风场预报数据,TC-wind风场订正预报数据(空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)以及国家站的地面实况观测数据用于订正效果的检验,预报时效为12~120 h,间隔1 h。选取我国沿岸及近海88个观测站点作为代表站,文中所选取的代表站点基本覆盖我国近海区域。在计算数值模式10 m风速误差时将所有站点进行统一计算,且所选取站点平均海拔高度为21 m,因此未进行实况风速的高度订正。

对于2020年台风风场预报和EC模式的台风风场预报进行回算和对比检验分析来看(图9),TC-wind风场预报的平均误差为1.026 m/s,绝对误差为1.410 m/s,

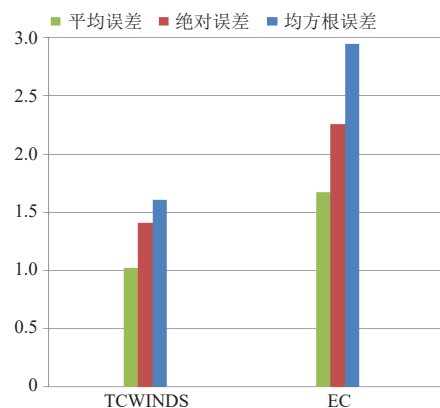


图9 TC-wind和EC的2020年24 h预报检验对比(绿色柱框:平均误差;红色柱框:绝对误差;蓝色柱框:均方根误差)

Fig. 9 The comparison of the 24 h forecast test for 2020 between TC-wind system and EC (green column: the average error; red column: the absolute error; blue column: RMSE)

均方根误差为1.604 m/s。而EC模式的风场预报的平均误差为1.675 m/s,绝对误差为2.258 m/s,均方根误差为2.942 m/s。整体而言TC-wind的风场预报还是比较理想的,无论是平均误差、绝对误差,还是均方根误差均较EC模式有明显的提高,基本上满足目前的业务需求。

同样从2020年TC-wind预报的10 m风场逐24 h预

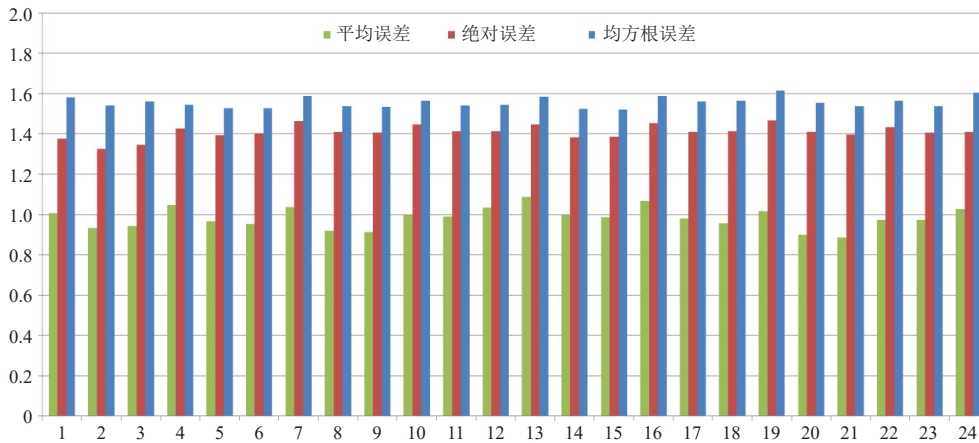


图10 TC-wind预报10 m风2020年逐24 h预报检验 (绿色柱框: 平均误差; 红色柱框: 绝对误差; 蓝色柱框: 均方根误差)
Fig. 10 24 h forecast test for 2020 10 m wind field forecasted by TC-wind system (green column: the average error; red column: the absolute error; blue column: RMSE)

5 结论与展望

本文采用“热带气旋风场动力释用技术”(TC-wind)建立了台风精细化大风客观预报系统,同时在国家气象中心实施了实际业务应用与评估。分别针对2015年台风“苏迪罗”、2018年台风“山竹”、2021年台风“烟花”影响期间的风场订正效果进行了检验,也对2020年的台风风场预报效果进行了回算检验。检验评估表明:基于TC-wind技术建立的“台风精细化大风客观预报系统”对热带气旋风场数值预报产品订正效果显著,明显修正了模式预报的大风分布,有效提高了热带气旋大风预报效果。同时显著提高了预报员对相关数值预报产品的理解和应用水平,提升了风场预报的精细化程度,有利支撑了国家级海洋气象精细化格点预报和台风大风破坏力评估业务等。

未来随着我们国家数值模式的进一步发展,也将进一步拓展目前台风精细化大风客观预报系统的预报范围,逐步研发面向全球台风精细化大风的释用技术。同时,针对海上大风观测资料缺乏的难题,建立新的风场检验方法并开展系统的风场检验对台风大风的风圈产品进行改进和优化。另外,还将基于热带气旋风场动力释用技术对台风风场的智能网格化预报进

报检验来看(图10),逐小时的风场预报的平均误差也基本上维持在1.0 m/s左右,绝对误差维持在1.4 m/s左右,均方根误差维持在1.6 m/s左右。整体而言,TC-wind风场预报整体上还是比较理想的,在全时段内均与实况较为接近。TC-wind风场预报较EC模式风场预报来说,可以更好地与预报员的主观预报保持一致,并且TC-wind可以满足业务上精细化和格点化的需求。

行订正和反馈。

参考文献

- [1] 陈联寿. 登陆台风中的科学问题//香山科学会议第275次学术讨论会会议文集,2006: 8-15.
- [2] 端义宏,陈联寿,梁建茵,等. 台风登陆前后异常变化的研究进展. 气象学报,2014, 72(5): 969-986.
- [3] 刘圣楠,崔晓鹏. “碧利斯”(2006)暴雨过程降水强度和降水效率分析. 大气科学,2018, 42(1): 192-208.
- [4] 刘海军,沈新勇,许变,等. 1011号台风“凡亚比”登陆过程数值模拟及诊断分析. 气候与环境研究,2013, 18(5): 583-594.
- [5] 汪亚萍,崔晓鹏,任晨平,等. “碧利斯”(0604)暴雨过程不同类型降水云微物理特征分析. 大气科学,2015, 39(3): 548-558.
- [6] 汪亚萍,崔晓鹏,冉令坤,等. 动力因子对2006年“碧利斯”台风暴雨的诊断分析. 大气科学,2015, 39(4): 747-756.
- [7] 王晓慧,崔晓鹏,郝世峰. 热带气旋“苏迪罗”(2015)海上活动时降水物理过程模拟诊断研究. 大气科学,2019, 43(2): 417-436.
- [8] 周冠博,崔晓鹏,高守亭. 台风“凤凰”登陆过程的高分辨率数值模拟及其降水的诊断分析. 大气科学,2012, 36(1): 23-34.
- [9] Cui X P, Xu F W. A cloud-resolving modeling study of surface rainfall processes associated with landfalling typhoon Kaemi (2006). J Trop Meteor, 2009, 15(2): 181-191.
- [10] Cui X P, Wang Y P, Yu H. Microphysical differences with rainfall intensity in severe tropical storm Bilis. Atmospheric Science Letters, 2015, 16(1): 27-31.
- [11] Ren C P, Cui X P. The cloud-microphysical cause of torrential rainfall amplification associated with Bilis (0604). Science China: Earth Sciences, 2014, 57(9): 2100-2111.
- [12] Hao S F, Cui X P, Pan J S, et al. A dynamical interpretation of the wind field in tropical cyclones. J Trop Meteor, 2009, 15(2): 210-216.