

垂直分层加密和预报区域扩大对 GRAPES_TYM 台风预报的影响*

麻素红 张进 瞿安祥 王大鹏 沈学顺

MA Suhong ZHANG Jin QU Anxiang WANG Dapeng SHEN Xueshun

国家气象中心, 北京, 100081

National Meteorological Centre, Beijing 100081, Beijing

2020-04-01 收稿, 2020-08-08 改回.

麻素红, 张进, 瞿安祥, 王大鹏, 沈学顺, 2021. 垂直分层加密和预报区域扩大对 GRAPES_TYM 台风预报的影响. 气象学报, 79(1): 94-103

Ma Suhong, Zhang Jin, Qu Anxiang, Wang Dapeng, Shen Xueshun. 2021. Impacts to tropical cyclone prediction of GRAPES_TYM from increasing of model vertical levels and enlargement of model forecast domain. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(1):94-103

Abstract In order to improve the model performance for the forecast of tropical cyclone (TC) intensity and track in the western North Pacific and South China Sea and provide TC forecasts in the northern Indian Ocean, the GRAPES_TYM has been upgraded to version 3.0 in August 2019. The vertical levels are increased from 50 to 68, and the model domain is enlarged to cover the northern Indian Ocean. The results show that the increase in vertical resolution can reduce the mean track error of 72—120 h TC forecasts and remarkably reduce the mean intensity error of 24—96 h forecasts by decreasing the negative bias in the forecast of severe typhoons and super typhoons. There is no significant difference in the mean track and intensity errors when the model domain is expended to the northern Indian Ocean, except that the simulated TC track to the north of 20°N is more sensitive to the model domain. The comparative analysis of the retrospective results from 2016 to 2018 and the predictions of NCEP-GFS and ECMWF shows that the average track error simulated by the GRAPES_TYM-v3.0 is close to that by NCEP-GFS, and the error is larger than that simulated by ECMWF. The intensity error is obviously smaller than that by NCEP-GFS and ECMWF. NCEP-GFS and ECMWF both have larger negative biases. In summary, the intensity error in the forecast of GRAPES_TYM is reduced remarkably through increasing the vertical levels from 50 to 68, and long term track forecast is more sensitive to the enlarged domain which covers the northern Indian Ocean.

Key words Tropical cyclone, Forecast domain, Vertical resolution, Intensity forecast

摘要 为提升 GRAPES_TYM 对西北太平洋和中国南海热带气旋路径及强度的预报能力、增加对北印度洋热带气旋的预报, 2019年8月 GRAPES_TYM 3.0版投入业务运行。GRAPES_TYM 3.0版的模式垂直分层由 GRAPES_TYM 2.2版的50层增加到68层; 预报区域由覆盖西北太平洋、中国南海扩展到覆盖北印度洋。试验结果显示: 模式垂直分层增加可以改进模式对强台风及超强台风的预报能力, 减小平均路径预报误差、显著减小平均强度预报误差以及强度预报负偏差; 模式预报区域扩大到覆盖北印度洋对平均路径误差和平均强度误差影响不显著, 但长时效预报比较敏感, 如 20°N 以北热带气旋 120 h 预报路径。2016—2018年的回算结果与 NCEP-GFS 和 ECMWF 的预报结果对比分析表明: GRAPES_TYM 3.0版的平均路径误差与 NCEP-GFS 接近, 同 ECMWF 相比误差较大; 但 24—96 h 强度预报误差明显小于 NCEP-GFS 和 ECMWF, NCEP-GFS 和 ECMWF 对热带气旋强度预报存在明显的负偏差。综上所述, 模式垂直分层由 50 层增加到 68 层对热带气旋强度预报至关重要, 而长时效路径预报对模式预报区域扩大到覆盖北印度洋更为敏感。

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFC1506406、2017YFC1501904)、广东省科技计划省直部门协同创新重点项目(2018B020208004)。

作者简介: 麻素红, 主要从事台风数值预报, E-mail: mash@cma.gov.cn

关键词 热带气旋, 预报区域, 垂直分辨率, 强度预报

中图法分类号 P457.8

1 引言

国家气象中心于 2010 年基于 GRAPES-MESO (陈德辉等, 2006) 开始研发区域模式台风数值预报系统 (GRAPES_TYM), 该系统于 2012 年投入业务运行并得到持续改进, 包括模式对流参数化方案 (张进等, 2017 年)、模式参考大气廓线和涡旋初始化 (麻素红等, 2018; 麻素红, 2019; Wang, et al, 2020) 等, GRAPES_TYM 热带气旋路径及强度预报能力不断提升。但是, 该系统仍然存在较明显的系统偏差, 如对超强台风 (最大风速 > 51.0 m/s) 的强度极值预报偏低, 导致强度预报存在较明显的负偏差 (麻素红等, 2018)。

热带气旋强度预报很具有挑战性 (DeMaria, et al, 2005; Rogers, et al, 2006), 其中模式分辨率、模式物理过程以及模式初始场对热带气旋的描述是影响热带气旋强度预报的关键因素 (Cha, et al, 2013; Gopalakrishnan, et al, 2012; Liu, et al, 2000, 2012; 梁旭东等, 2010)。而高分辨率模式是开展热带气旋强度及结构变化研究以及业务预报的基本条件 (Gopalakrishnan, et al, 2012; Tallapragada, et al, 2012; Wang, 2001, 2002; Yau, et al, 2004; Zhang, et al, 2011)。研究 (Zhang, et al, 2003, 2015; Kimball, et al, 2006) 表明, 模式垂直分辨率的提升对热带气旋强度预报至关重要。在模式不同高度层加密, 对热带气旋强度预报的作用会有明显不同, 具体表现为: 对模式中低层加密, 模式预报的热带气旋较强; 对模式高层加密, 模式预报的热带气旋较弱。如 2017 年 NCEP (National Center for Environment Prediction) 区域模式热带气旋数值预报系统 HWRF (Hurricane Weather and Research Forecast) 的垂直分辨率由 61 层提高到 75 层后, 模式对热带气旋路径及强度预报误差明显减少 (Zhang B L, et al, 2016)。

随着热带气旋预报业务的不断拓展, GRAPES_TYM 需要为北印度洋热带气旋业务预报提供参考产品。这就需要将该系统的预报范围由覆盖西北太平洋和中国南海扩大到覆盖北印度洋。目前基于区域模式开展不同海域热带气旋数值预报的主

要策略是分区运行, 如美国 NCEP 的 HWRF 模式针对大西洋、东北太平洋、西北太平洋 3 个海域的热带气旋预报分别独立运行 3 个区域模式 (Tallapragada, et al, 2012, 2014a, 2014b, 2015, 2016)。但 Zhang X J 等 (2016) 基于 HWRF 建立了覆盖大西洋、东北太平洋的大区域热带气旋数值预报试验系统 (简称 HWRF-B)。试验结果显示: 当洋面上 2 个及以上热带气旋同时存在时, HWRF-B 的平均路径误差比 HWRF 相应的平均路径误差小 (Ghassan, et al, 2017)。

2019 年针对上述两个问题, 国家气象中心对 GRAPES_TYM 进行了如下改进: (1) 在模式层顶不变的条件下, 模式垂直分辨率由 50 层增加到 68 层; (2) 预报区域由覆盖西北太平洋、中国南海扩大到覆盖北印度洋。改进后的系统于 2019 年 8 月投入业务运行。

文中分析了模式垂直分辨率提升以及预报区域扩大对 GRAPES_TYM 路径及强度预报的影响, 并与 NCEP-GFS 和 ECMWF 进行了对比。其结果将为 GRAPES_TYM 3.0 版在业务预报中更好地发挥作用提供重要参考。

2 GRAPES_TYM 概况

GRAPES_TYM 是等经纬度格点模式, 水平方向采用 Arakawa-C 网格, 垂直方向上采用地形追随高度坐标, 模式层顶在 35 km 左右。试验所采用的模式物理过程包括 WSM6 微物理过程、Meso-SAS 对流参数化、YSU 边界层过程、Noah 陆面过程、莫宁-奥布霍夫相似理论表面层参数化以及 Goddard 短波辐射和 RRTM 长波辐射参数化。

为了改善模式初始场对热带气旋的描述能力, GRAPES_TYM 采用了初始涡旋强度调整技术, 使模式初始场中涡旋的初始强度接近观测 (麻素红等, 2018)。

3 模式垂直分层加密及对热带气旋路径和强度预报的影响

3.1 垂直分层加密方案

模式中低层加密对热带气旋强度预报至关重

要。为此在水平分辨率 0.09° 、模式层顶不变的条件
下,采用相同的模式积分区域,将 GRAPES_TYM
的垂直分层由 50 层提升到 68 层,其中 900 hPa 以
下垂直层次由原来的 10 层加密到 19 层,模式最低
层由原来的 52.26 m 降低至 20.68 m。图 1 为 50 层
和 68 层垂直分层 dz 随高度的变化。

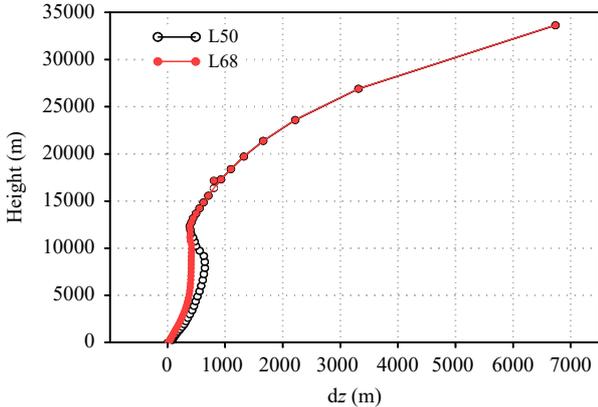


图 1 模式垂直分层

(红色为 68 层,黑色为 50 层, dz 为两个垂直层次间的距离)

Fig. 1 Model vertical levels (Red is for 68 levels and black is for 50 levels; dz indicates the depth of each layer)

3.2 统计分析

为了评估垂直分层加密对 GRAPES_TYM 热
带气旋路径、强度预报的影响,利用 2018 年
1807—1826 号共计 20 个热带气旋进行了批量试
验。预报试验每天 2 次 (00 和 12 时,世界时,下
同),总样本数为 98 个,预报时效 120 h。以下路径
及强度误差计算均采用中国气象局上海台风研究
所提供的最佳路径。

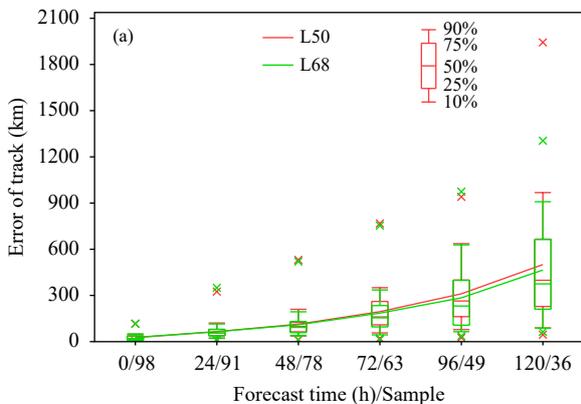


图 2 为批量试验平均误差分布。图中包括了
最大误差 (\times 所示)、平均误差 (曲线)、误差百分比
分布 (10%、25%、50%、75%、90%)。结果显示:垂
直分层加密对 72 h 前路径预报影响不明显,72—
120 h 平均路径误差分别减小 5.1%、8.4% 和 7.1%,
120 h 最大路径预报误差由 1943 km 减小到 1304 km
(图 2a)。垂直分层加密对强度预报影响更为显著
(图 2b): 24—120 h 最大风速平均误差分别减小
14.1% (24 h)、17.1% (48 h)、29.1% (72 h)、30.9%
(96 h) 和 9.1% (120 h); 90%、75%、50% 的样本中
小误差样本明显增多,72 h 和 96 h 的最大误差明显
减小,其中 72 h 最大误差由 26.4 m/s 减小到 14.4 m/s,
96 h 的最大误差由 19.9 m/s 减小到 15.5 m/s。

由于模式垂直分层加密主要集中在模式中下
层,可以改善模式对强台风的预报 (Zhang, et al,
2015),减小强度预报的负偏差,但强度预报正偏差
有所增大 (图 3)。当垂直分层由 50 层增加到 68 层
时,24、48、120 h 强度预报正偏差最大值增大 (图
中 \times 所示),72、96、120 h 最大负偏差减小。在
24—120 h 预报区间,从 90% 和 75% 强度偏差分布
来看,68 层模式的正偏差均大于 50 层模式,而从
25% 和 10% 的偏差分布来看,68 层模式的负偏差
均小于 50 层模式。从模式积分开始,50 层模式的
平均强度预报负偏差快速增大,到 60 h 增加到最大
(-5.23 m/s)。60—96 h 强度偏差稳定在 -4.72
— -5.23 m/s,96 h 后负偏差有所减小。

68 层模式预报的平均强度误差以及强度预报
负偏差的减小主要源于其对强台风以及超强台风
预报能力的提高。以 48 h (图 4a) 和 96 h (图 4b) 为

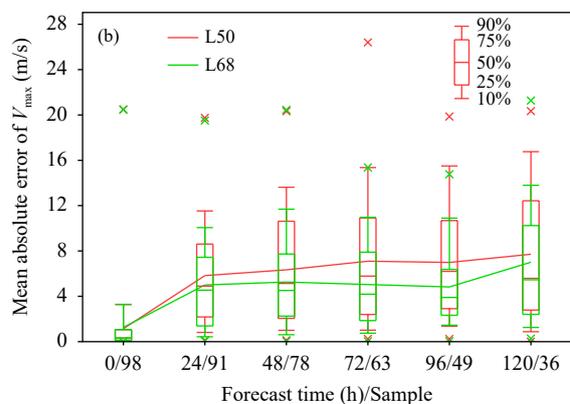


图 2 平均路径误差 (a) 和平均绝对强度误差 (b) (\times 代表最大误差)

Fig. 2 Mean track errors (a) and Mean absolute intensity errors (b) (\times indicates the maximum error)

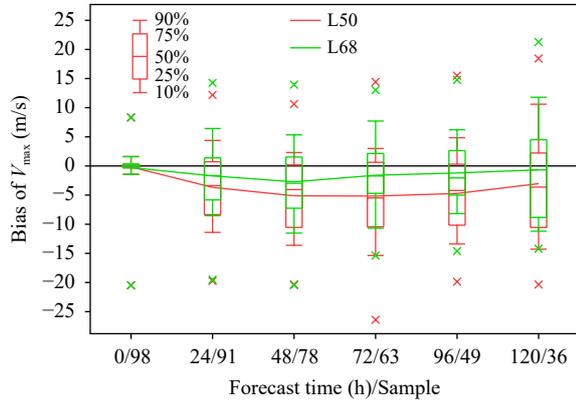


图3 强度偏差(单位: m/s, ×代表最大偏差)

Fig. 3 Biases of intensity
(unit: m/s, × indicates the maximum bias)

例分析 68 层和 50 层模式强度预报误差的差值 (68 层误差-50 层误差) 随风速的变化, 图中正值表示 68 层模式的预报误差大于 50 层模式, 负值表示 68 层模式的预报误差小于 50 层模式。可以发现: 无论是 48 h 预报还是 96 h 预报, 除个别样本外, 68 层模式对最大风速大于 50 m/s 的超强台风强度预报误差小于 50 层模式; 对最大风速大于 40 m/s 的强台风, 68 层模式的强度预报误差大部分要小于 50 层模式; 而对小于 40 m/s 的热带气旋的强度预报, 二者预报差异不明显。

由于 68 层模式对强台风以及超强台风强度预报能力的提升, 预报的风压关系也明显好于 50 层模式 (图 5)。48 h 预报中, 50 层模式预报的最大风速为 55 m/s 左右, 中心气压 915 hPa 左右 (图 5a), 而 68 层模式预报的最大风速可以达到 62 m/s 左

右、中心气压 910 hPa 左右 (图 5b); 96 h 预报中, 50 层模式预报的最大风速为 50 m/s 左右, 中心气压 915 hPa 左右 (图 5c), 68 层模式预报的最大风速可以达到 60 m/s、中心气压 910 hPa 左右 (图 5d)。68 层模式预报的风压关系更接近观测。

3.3 典型个例分析——超强台风“山竹”

2018 年 9 月 7 日 12 时, 台风“山竹”在西北太平洋生成, 11 日 08 时加强为超强台风, 并且维持超强台风级别达 96 h, 最强风力超过 17 级 (65 m/s)。15 日, 台风“山竹”在菲律宾北部登陆, 16 日 17 时在广东台山海宴镇登陆, 登陆时中心附近最大风力 14 级 (45 m/s), 中心最低气压 955 hPa。

图 6 为 50 层及 68 层模式对“山竹”的路径和强度预报。初始时刻为 2018 年 9 月 8 日 00 时到 9 月 12 日 00 时, 预报时效为 120 h, 初时时间间隔为 24 h。从预报路径 (图 6) 来看, 50 层和 68 层模式的结果比较接近, 而平均路径预报误差显示, 68 层模式 24 和 120 h 的结果略大于 50 层模式, 48、72 和 96 h 的结果略小于 50 层模式 (图略)。除了 72 h 误差差值超过 30 km 外, 其他时刻平均误差差异均小于 10 km。从 10 m 最大风速来看, 50 层模式所有时次预报的极值在 50 m/s 上下, 相比于观测最大值 65 m/s 显著偏低; 68 层模式预报的最大风速可以超过 60 m/s, 更接近观测。68 层模式 24—120 h 的平均强度误差均小于 50 层模式, 技巧最低为 9.7% (48 h)、最高可达 25.7% (96 h) (图略)。由此可见, 垂直分辨率提高可以显著减小 GRAPES_TYM 对“山竹”的强度极值的预报误差, 从而减小强度预报的平均误差。

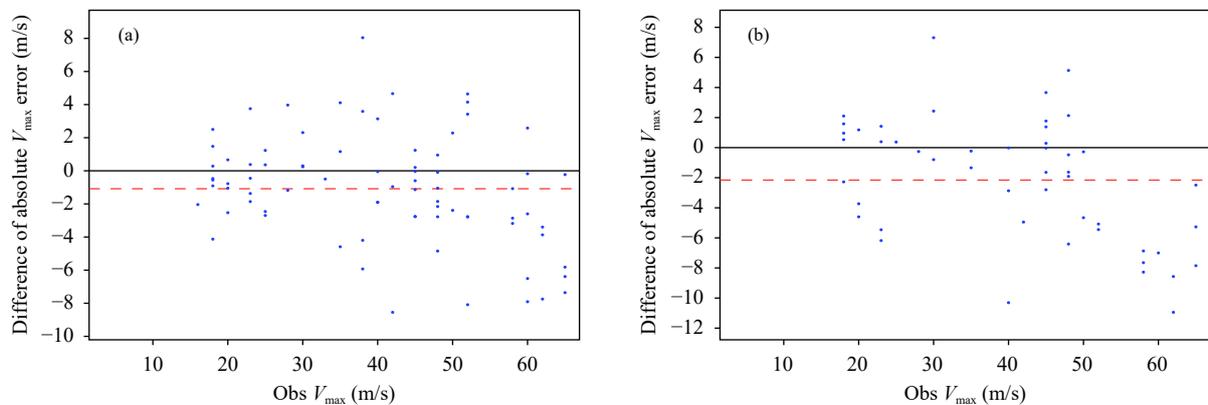


图4 48 h (a) 和 96 h (b) 预报 68 层和 50 层模式最大风速误差绝对值差 (蓝色点) (红色虚线为平均值)

Fig. 4 Differences (errors of L68 minus errors of L50) in absolute error of 10 m maximum wind between L68 and L50 model (blue dots) at (a) 48 h and (b) 96 h forecast (The red dashed lines show averaged values)

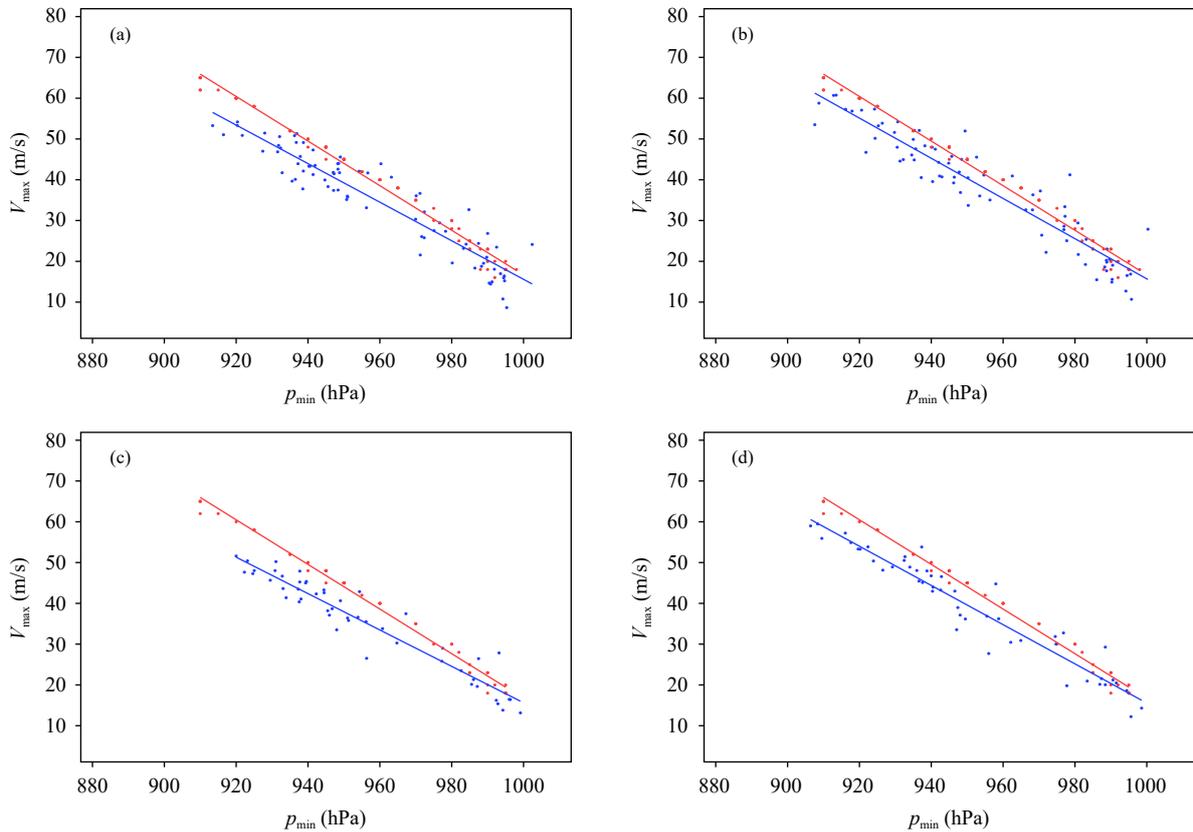


图5 模式预报的风压关系 (a. 50层模式的48 h预报, b. 68层模式的48 h预报, c. 50层模式的96 h预报, d. 68层模式的96 h预报; 红色是观测数据, 蓝色是预报数据)

Fig. 5 Relationship between V_{\max} and central pressure (a. 48 h for L50 model, b. 48 h for L68 model, c. 96 h for L50 model, d. 96 h for L68 model; red dots and lines are observed central pressure and V_{\max} , blue dots and lines are forecasted central pressure and V_{\max})

4 预报区域扩大对热带气旋路径及强度预报的影响

采用水平分辨率 0.09° 、垂直分层为 68 层的 GRAPES_TYM 模式, 在相同物理过程条件下, 对比分析模式预报区域扩大对热带气旋路径及强度预报的影响。将覆盖西北太平洋、中国南海 (0° — 50.25°N , 90° — 171°E) 的预报区域标注为 D1, 覆盖西北太平洋、中国南海及北印度洋 (15°S — 60°N , 40° — 180°E) 的预报区域标注为 D2 (图 7)。D2 包括了整个青藏高原, 地形更加复杂。

预报区域扩大到 D2, 除了包含更复杂的地形外, 将会有更多的天气系统进入区域模式预报范围。图 8 为 2018 年 9 月 7 日 12 时 D2 的初始场, 图中红色矩形区域为 D1。可以看到 D1 预报区域向北扩展到 60°N 、向西扩展到 40°E 时, 将有更大范围的西风槽系统和大陆高压进入预报范围; 预报区

域南扩到 15°S , 会将位于 40° — 60°E 和 110° — 120°E 的两支越赤道气流以及赤道辐合带纳入预报范围。一方面区域模式对上述天气系统的预报能力会影响其对热带气旋路径及强度的预报, 另一方面预报区域扩大会减小侧边界对位于边界附近热带气旋预报的影响, 如图中所示 2018 年超强台风“山竹”, 9 月 7 日 12 时位于 (12.9°N , 165.3°E), 而 D1 的东边界为 170°E , 两者仅相距不到 5° 。

利用 2016—2018 年生命期超过 3 d 的热带气旋对预报区域扩大进行试验, 预报时效为 120 h, 预报间隔为 12 h (00 和 12 时)。

试验结果统计分析显示, 区域扩大对西北太平洋及中国南海热带气旋平均路径误差及强度预报误差无明显影响, 0—120 h 平均路径预报误差改变未超过 2%、强度预报平均误差改变未超过 5% (图略), 平均路径预报误差和强度预报误差改变最大值均出现在 120 h, 说明预报区域扩大对预报后期

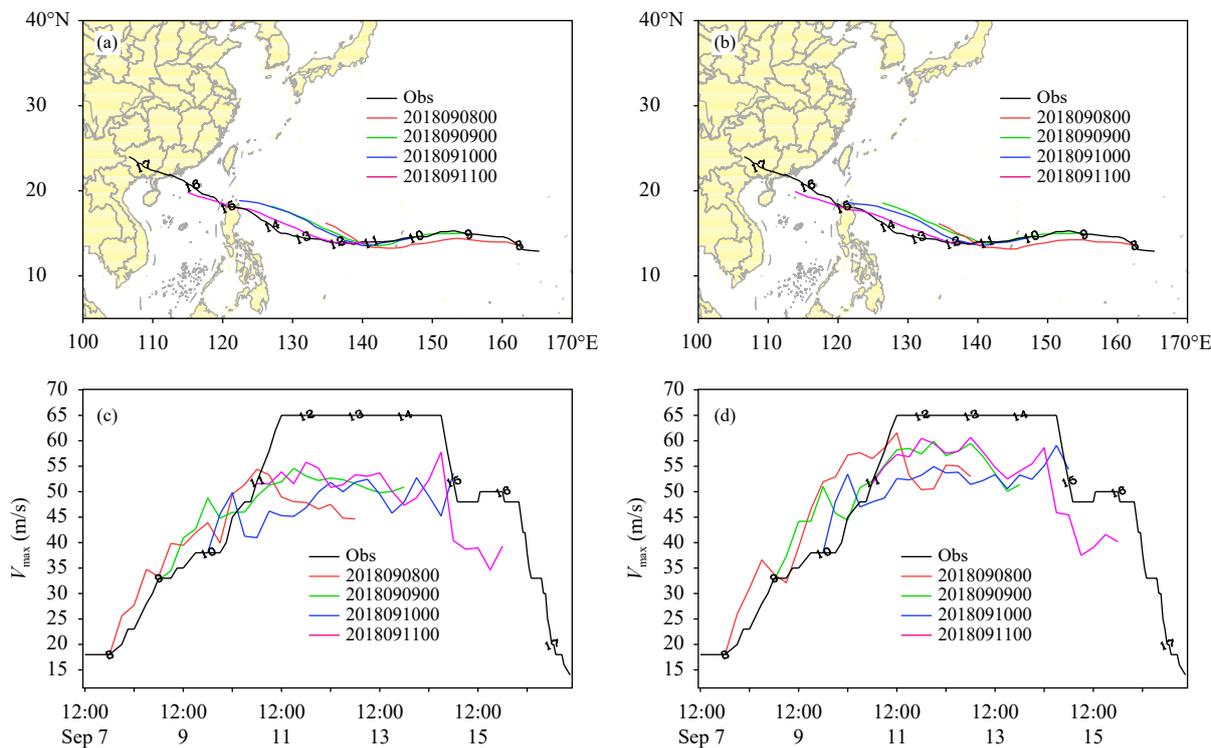


图 6 2018 年超强台风“山竹”路径 (a. 50 层, b. 68 层) 及 10 m 最大风速 (c. 50 层, d. 68 层)
(黑色线代表观测路径, 其他彩色线代表不同初始时间的预报)

Fig. 6 Forecast tracks of super typhoon Mangkhut (a. 50 levels, b. 68 levels) and 10 m maximum wind (c. 50 levels, d. 68 levels)
(Black line: best track data, colored lines: forecasts with different initial time as indicated in (c) and (d),
such as the red is the forecast initiated at 00:00 UTC 8 September 2018)

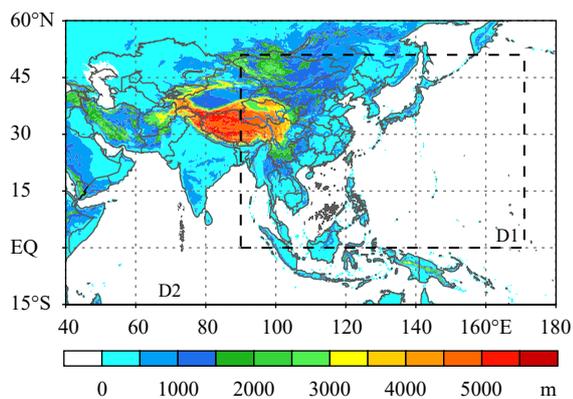


图 7 积分区域 D1 和 D2

Fig. 7 Model domains of D1 and D2

影响相对明显。

D2 和 D1 区域预报路径误差和强度误差相对较小的样本数比较接近; 24—120 h 路径预报误差 D2 小于 D1 的样本数百分比分别是 47.8%、51.33%、51.3%、47% 和 43.7%。强度预报误差 D2 小于 D1 的样本数百分比分别是 50.2%、52.3%、48.3%、51.6% 和 51%。由此可见, 预报区域扩大对路径预

报影响略多, 对强度预报正影响略多。

从 120 h 路径预报误差地理分布可以看出, D1 和 D2 预报误差较大的区域均在 20°N 以北, 这个区域有较多的转向热带气旋 (图 9a、b)。而预报误差差值(D2 的路径误差 - D1 的路径误差)较大的区域和 D1、D2 大误差区域相近 (图 9c)。预报区域扩大对 20°N 以北的热带气旋路径预报影响相对明显, 对 20°N 以南的预报路径影响不明显。20°N 以北的转向热带气旋, 影响其移动路径的天气系统比较复杂, 除了副热带高压的影响外, 还包括西风槽等天气系统的影响。模式预报区域越大, 其所覆盖的天气系统越多, 由区域模式自身特征所导致的不确定性就会增大, 大区域和小区域的路径预报就会存在较大的差异。

5 与 NCEP-GFS 和 ECMWF 台风路径及强度预报对比分析

将 GRAPES_TYM 3.0 版回算的 2016—2018 年结果与美国 NCEP-GFS 和欧洲中期天气预报中

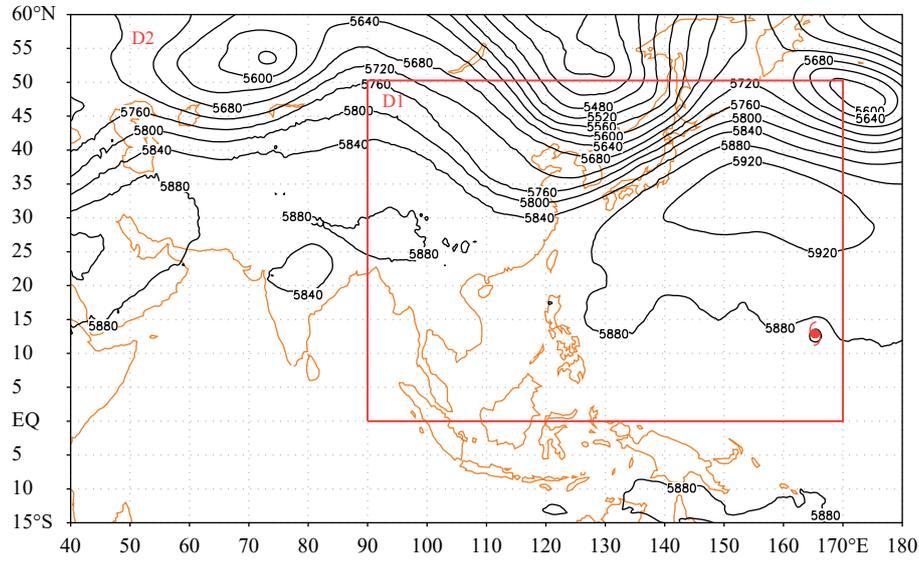


图8 2018年9月7日12时500 hPa位势高度
(台风符号为超强台风“山竹”的位置;红色矩形所示区域为D1,外面黑色区域为D2)

Fig. 8 Geopotential height at 500 hPa at 12:00 UTC 7 September 2018 (The TC symbol shows the location of the super typhoon Mongkhut; The red rectangle shows D1 and the outer domain is D2)

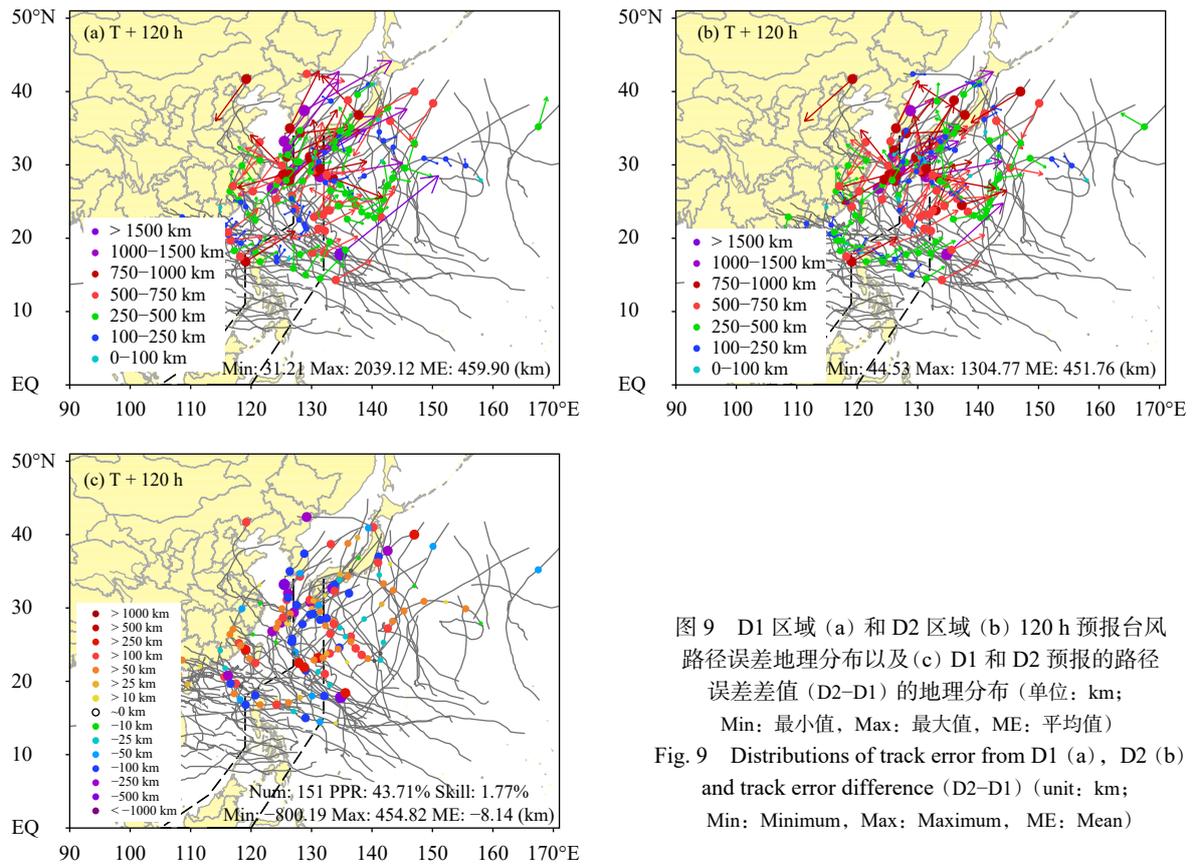


图9 D1区域(a)和D2区域(b)120 h预报台风路径误差地理分布以及(c) D1和D2预报的路径误差差值(D2-D1)的地理分布(单位: km; Min: 最小值, Max: 最大值, ME: 平均值)

Fig. 9 Distributions of track error from D1 (a), D2 (b) and track error difference (D2-D1) (unit: km; Min: Minimum, Max: Maximum, ME: Mean)

心全球模式ECMWF的预报结果进行同样本比较(图10), 24—120 h的样本数分别为576、499、393、

296、215和150。

试验结果显示, ECMWF的平均路径误差显著

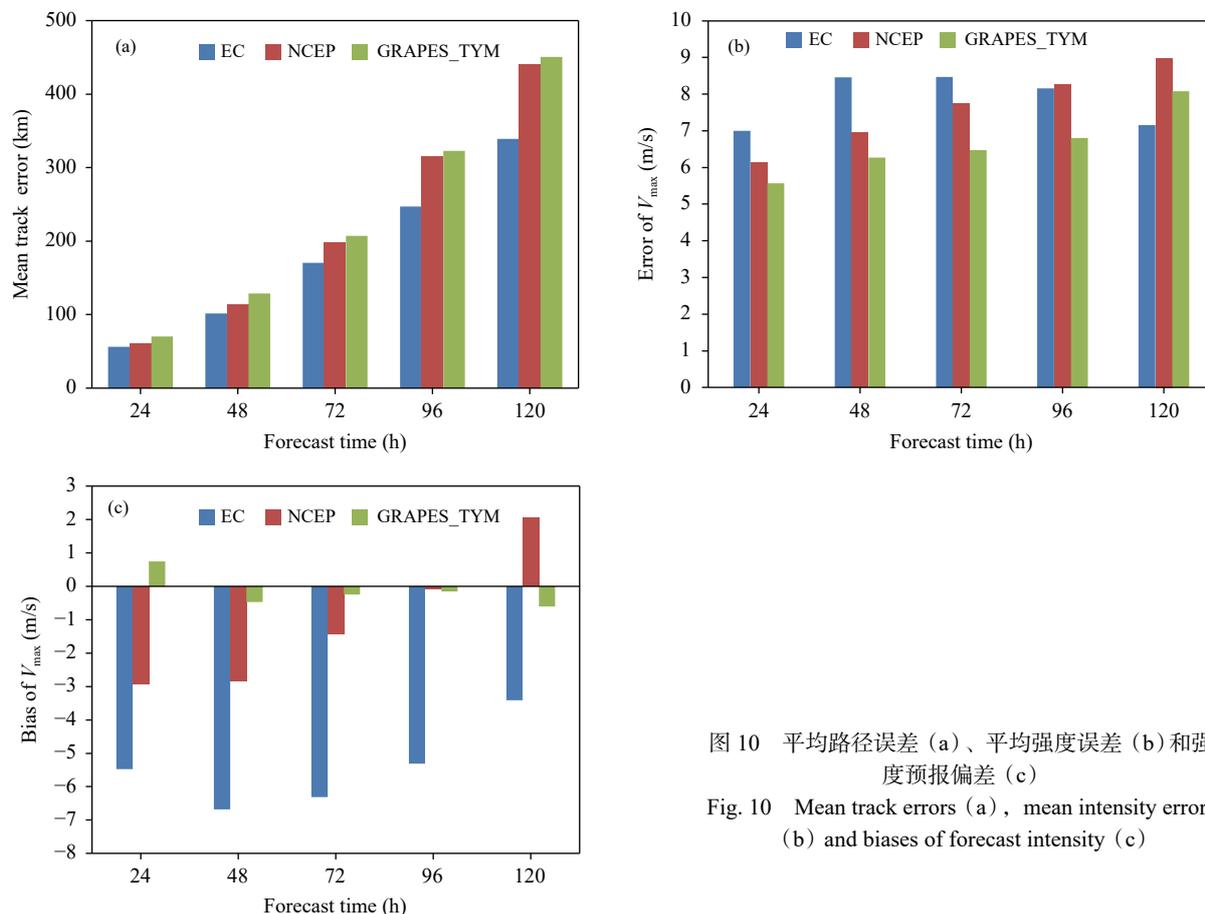


图 10 平均路径误差 (a)、平均强度误差 (b) 和强度预报偏差 (c)

Fig. 10 Mean track errors (a), mean intensity errors (b) and biases of forecast intensity (c)

小于 NCEP-GFS 和 GRAPES_TYM, 而 NCEP-GFS 和 GRAPES_TYM 的平均路径误差比较接近(图 10a), 其中 ECMWF 24—120 h 的平均路径误差分别为 56.23、101.51、170.2、246.97 和 339 km, NCEP-GFS 预报的结果分别为 60.97、114.13、197.94、315.58 和 439.58 km, GRAPES_TYM 预报的结果分别为 70.13、128.65、207、322.72 和 450.54 km。GRAPES_TYM 24—96 h 平均强度预报的平均误差明显小于 NCEP-GFS 和 ECMWF (图 10b), 120 h 平均强度预报误差大于 ECMWF 的预报, 小于 NCEP-GFS 的预报, 其中 ECMWF 预报的结果分别为 7.0、8.46、8.47、8.16 和 7.15 m/s, NCEP-GFS 分别为 6.13、6.95、7.75、8.25 和 8.98 m/s, GRAPES_TYM 分别为 5.57、6.27、6.47、6.8 和 8.08 m/s。ECMWF 和 NCEP-GFS 强度预报误差偏大的一个主要原因是两个全球模式均未对分析场中的涡旋强度进行调整使其接近观测强度。从强度预报偏差来看, 相比于 GRAPES_TYM, ECMWF 模式 24—120 h、NCEP-GFS 的 24—72 h 强度预报存在明显负偏差即强度预报偏

弱(图 10c): ECMWF 的 24—120 h 强度预报负偏差分别为 -5.47、-6.68、-6.31、-5.31 和 -3.41 m/s, NCEP-GFS 的 24—72 h 强度预报负偏差分别为 -2.91、-2.83 和 -1.43 m/s。

路径预报也就是热带气旋中心位置预报, 即中心的经度和纬度预报。ECMWF 预报路径的经度(图 11a)存在负偏差, 即相对于观测路径位置偏西, 但 24—120 h 最大偏差均未超过 0.5°; NCEP-GFS 和 GRAPES_TYM 预报路径的经度存在明显的正偏差, 即相对于观测路径位置偏东, 尤其是在 96—120 h, NCEP-GFS 模式的 120 h 预报路径经度偏差可达 1.65°、GRAPES_TYM 模式的经度偏差可达 1.53°。ECMWF 预报的 24—120 h 纬度偏差较小, 且均为正偏差, 即预报路径存在微小的北偏; NCEP-GFS 预报路径北偏趋势比 ECMWF 大, 在 120 h 可达 0.38°; 相比于上述 2 个全球模式, GRAPES_TYM 预报路径在纬度方向的正偏差显著偏大, 24—120 h 台风中心位置纬度预报偏差分别为 0.28°、0.45°、0.69°、0.97° 和 1.31°(图 11b)。

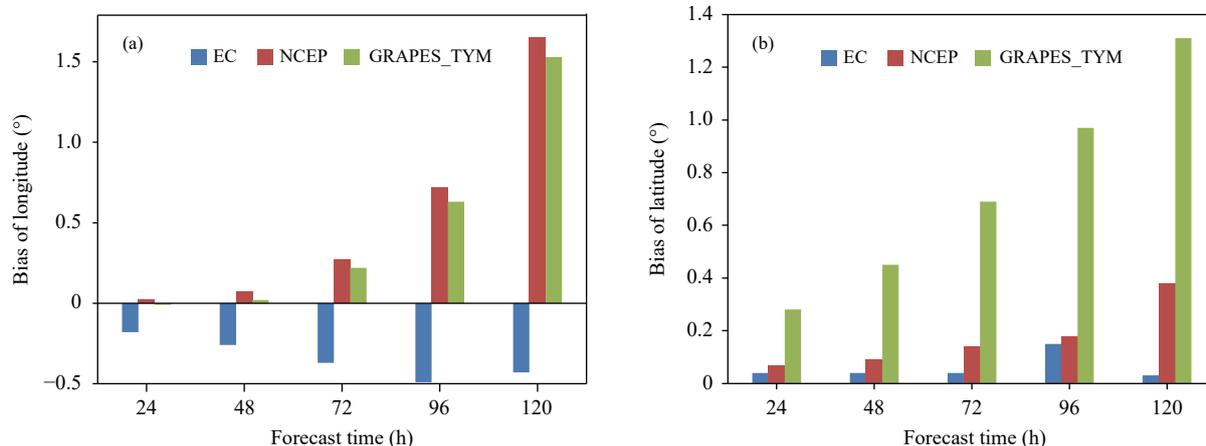


图 11 台风中心位置经度偏差 (a) 和纬度偏差 (b)

Fig. 11 Longitude deviation of typhoon center position (a) and latitude deviation of typhoon center position (b)

6 结 论

为了改进 GRAPES_TYM 对西北太平洋及中国南海热带气旋的预报能力、为北印度洋热带气旋业务预报提供产品支持, 2019 年 8 月 GRAPES_TYM 升级为 3.0 版, 包括水平分辨率由 0.12° 提升到 0.09° , 垂直分辨率由 50 层增加到 68 层, 预报区域由 $(0^\circ-50.25^\circ\text{N}, 90^\circ-171^\circ\text{E})$ 扩大到 $(15^\circ\text{S}-60^\circ\text{N}, 40^\circ-180^\circ\text{E})$ 。扩大后的预报区域覆盖了西北太平洋、中国南海、北印度洋以及亚洲大部分区域。本文分析了模式垂直分辨率由 50 层增加到 68 层以及预报区域扩大对 GRAPES_TYM 热带气旋路径及强度预报的影响。

结果显示, 模式垂直分辨率提高对改善 GRAPES_TYM 路径及强度预报至关重要。当模式垂直分辨率由 50 层增加到 68 层时, 96—120 h 的平均路径误差可以减小 8.4%—7.1%。提高模式垂直分辨率可以显著提高 GRAPES_TYM 对强台风以及超强台风强度极值的预报能力, 减小强度预报负偏差、改善模式预报的风压关系。相对于垂直分辨率 50 层的预报, 68 层预报的 24—120 h 平均强度误差可减小 13.2%、16.0%、29.1%、30.9% 和 9.1%。

模式预报区域扩大对平均路径和强度预报误差影响不显著。预报区域扩大后, 大区域的路径及强度预报误差小于小区域的次数比率在 50% 附近 (120 h 除外, 为 43.7%)。20°N 以北的预报路径对预报区域扩大更为敏感, 这主要是由于 20°N 以北的热带气旋影响其路径预报的天气系统比较复杂,

除了副热带高压, 还有西风槽、大陆高压等天气系统。模式预报区域扩大会带来更多的预报不确定性。

与 NCEP-GFS 和 ECMWF 模式对 2016—2018 年热带气旋路径及强度预报相比, GRAPES_TYM 3.0 版的平均路径预报误差与 NCEP-GFS 接近, 同 ECMWF 相比误差较大; 24—96 h 强度预报误差明显小于 NCEP-GFS 和 ECMWF, NCEP-GFS 和 ECMWF 对热带气旋强度预报存在明显的负偏差。

参考文献

- 陈德辉, 沈学顺. 2006. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展. *应用气象学报*, 17(6): 773-777. Chen D H, Shen X S. 2006. Recent progress on GRAPES research and application. *J Appl Meteor Sci*, 17(6): 773-777 (in Chinese)
- 梁旭东, 王斌. 2010. 基于模式约束三维变分技术的连续循环同化试验研究. *气象学报*, 68(2): 153-161. Liang X D, Wang B. 2010. Data assimilation cycle experiments in typhoon numerical prediction using the model-constrained 3DVar. *Acta Meteor Sinica*, 68(2): 153-161 (in Chinese)
- 麻素红, 张进, 沈学顺等. 2018. 2016 年 GRAPES_TYM 改进及对台风预报影响. *应用气象学报*, 29(3): 257-269. Ma S H, Zhang J, Shen X S, et al. 2018. The upgrade of GRAPE_TYM in 2016 and its impacts on tropical cyclone prediction. *J Appl Meteor Sci*, 29(3): 257-269 (in Chinese)
- 麻素红. 2019. 涡旋强度调整半径对 2016 年第 18 号热带气旋路径预报的影响. *气象学报*, 77(4): 662-673. Ma S H. 2019. Impact of radius of TC intensity correction on No.1618 TC track prediction. *Acta Meteor Sinica*, 77(4): 662-673 (in Chinese)
- 张进, 麻素红, 陈德辉等. 2017. GRAPES_TYM 改进及其在 2013 年西北太平洋和南海台风预报的表现. *热带气象学报*, 33(1): 64-73. Zhang J, Ma S H, Chen D H, et al. 2017. The improvements of GRAPES_TYM

- and its performance in Northwest Pacific Ocean and South China Sea in 2013. *J Trop Meteor*, 33(1): 64-73 (in Chinese)
- Cha D H, Wang Y Q. 2013. A dynamical initialization scheme for real-time forecasts of tropical cyclones using the WRF model. *Mon Wea Rev*, 141(3): 964-986
- DeMaria M, Mainelli M, Shay L K, et al. 2005. Further improvements to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS). *Wea Forecasting*, 20: 531-543
- Ghassan J A Jr, Zhang X J, Gopalakrishnan S G, et al. 2017. Performance of basin-scale HWRf tropical cyclone track forecasts. *Wea Forecasting*, 32(3): 1253-1271
- Gopalakrishnan S G, Goldenberg S, Quirino T, et al. 2012. Toward improving high-resolution numerical hurricane forecasting: Influence of model horizontal grid resolution, initialization, and physics. *Wea Forecasting*, 27(3): 647-666
- Kimball S K, Dougherty F C. 2006. The sensitivity of idealized hurricane structure and development to the distribution of vertical levels in MM5. *Mon Wea Rev*, 134(7): 1987-2008
- Liu Q F, Marchok T, Pan H L, et al. 2000. Improvements in Hurricane Initialization and Forecasting at NCEP with Global and Regional (GFDL) model. East-West Highway, Silver Spring: NOAA/NWS
- Liu Q F, Zhang X, Trahan S, et al. 2012. Extending operational HWRf initialization to triple-nest HWRf system//Proceedings of the 30th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Ponte Vedra Beach, FL: Amer Meteor Soc
- Rogers R F, Aberson S, Black M, et al. 2006. The intensity forecasting experiment: A NOAA multiyear field program for improving tropical cyclone intensity forecasts. *Bull Amer Meteor Soc*, 87: 1523-1537
- Tallapragada V, Kwon Y C, Liu S, et al. 2012. Operational implementation of high-resolution triple-nested HWRf at NCEP/EMC: A major step towards addressing intensity forecast problem//Proceedings of the 30th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Ponte Vedra Beach, FL: Amer Meteor Soc
- Tallapragada V, Kieu C, Kwon Y, et al. 2014a. Evaluation of storm structure from the operational HWRf during 2012 implementation. *Mon Wea Rev*, 142(11): 4308-4325
- Tallapragada V, Trahan S, Kwon Y C, et al. 2014b. Significant advances to the NCEP operational HWRf modeling system for improved hurricane forecasts. *Proc. 30th Conf. on Hurricane and Tropical Meteorology*, San Diego, CA, Amer Meteor Soc, 14D.1
- Tallapragada V, Kieu C, Trahan S, et al. 2015. Forecasting tropical cyclones in the Western North Pacific basin using the NCEP operational HWRf: Real-time implementation in 2012. *Wea Forecasting*, 30(5): 1355-1373
- Tallapragada V, Kieu C, Trahan S, et al. 2016. Forecasting tropical cyclones in the Western North Pacific Basin using the NCEP operational HWRf model: Model upgrades and evaluation of real-time performance in 2013. *Wea Forecasting*, 31(3): 877-894
- Wang L W, Ma S H. 2020. Effect of initial vortex intensity correction on tropical cyclone intensity prediction: A study based on GRAPES_TYM. *J Meteor Res*, 34(2): 387-399
- Wang Y Q. 2001. An explicit simulation of tropical cyclones with a triply nested movable mesh primitive equation model: TCM3. Part I: Model description and control experiment. *Mon Wea Rev*, 129(6): 1370-1394
- Wang Y Q. 2002. An explicit simulation of tropical cyclones with a triply nested movable mesh primitive equation model: TCM3. Part II: Model refinements and sensitivity to cloud microphysics parameterization. *Mon Wea Rev*, 130(12): 3022-3036
- Yau M K, Liu Y B, Zhang D L, et al. 2004. A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part VI: Small-scale inner-core structures and wind streaks. *Mon Wea Rev*, 132(6): 1410-1433
- Zhang B L, Lindzen R S, Tallapragada V, et al. 2016. Increasing vertical resolution in US models to improve track forecasts of Hurricane Joaquin with HWRf as an example. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113(42): 11765-11769
- Zhang D L, Wang X X. 2003. Dependence of hurricane intensity and structures on vertical resolution and time-step size. *Adv Atmos Sci*, 20(5): 711-725
- Zhang D L, Zhu L, Zhang X J, et al. 2015. Sensitivity of idealized hurricane intensity and structures under varying background flows and initial vortex intensities to different vertical resolutions in HWRf. *Mon Wea Rev*, 143(3): 914-932
- Zhang X J, Quirino T, Yeh K S, et al. 2011. HWRfX: Improving hurricane forecasts with high-resolution modeling. *Comput Sci Eng*, 13(1): 13-21
- Zhang X J, Gopalakrishnan S G, Trahan S, et al. 2016. Representing multiple scales in the Hurricane Weather Research and Forecasting modeling system: Design of multiple sets of movable multilevel nesting and the basin-scale HWRf forecast application. *Wea Forecasting*, 31(6): 2019-2034