

邱金晶,陈锋,董美莹,2021. 基于全球模式检验结果的海上台风初始场重建技术研制和应用[J]. 气象,47(12):1444-1456. Qiu J J, Chen F, Dong M Y, 2021. Development and application of typhoon initial field reconstruction technology over sea based on evaluation results of global models[J]. Meteor Mon, 47(12):1444-1456(in Chinese).

基于全球模式检验结果的海上台风 初始场重建技术研制和应用*

邱金晶 陈 锋 董美莹

浙江省气象科学研究所, 杭州 310008

提 要: ECMWF 和 GFS 全球模式对 2016—2019 年影响浙江台风路径和强度预报的评估结果表明: ECMWF 模式对路径预报总体优于 GFS 模式, 而 GFS 模式对强度预报更具优势。为提高台风数值预报性能, 基于该评估结论提出了一种业务可行的台风初始化方案。该方案基于 ECMWF 和 GFS 分析场及洋面台风观测资料, 利用台风涡旋分离技术, 将从 GFS 分析场分离得到的涡旋场进行重定位和最大风速调整, 然后与从 ECMWF 分析场中分离得到的大尺度环境场重新叠加融合, 实现了台风初始场重建。针对近年 14 个影响浙江台风个例, 应用台风初始场重建技术的中尺度数值天气预报业务模式的回报试验表明: 经过初始场重建后, 模式预报结果能兼顾 ECMWF 模式的路径预报优势和 GFS 模式的强度预报优势, 有效改进了台风路径和强度预报性能。新方法的路径预报绝对误差较 GFS 模式驱动的中尺度模式预报结果减少 21 km, 标准差降低 26.6 km; 新方法的强度预报绝对误差较 ECMWF 模式驱动的中尺度模式预报结果减少 $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 标准差降低 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对超强台风利奇马典型个例的进一步分析得到, 初始场重建技术对大气环流特征和台风暖心结构模拟均有较好的修正能力。

关键词: 台风初始场重建, 涡旋分离, 业务应用

中图分类号: P457.8

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.12.002

Development and Application of Typhoon Initial Field Reconstruction Technology over Sea Based on Evaluation Results of Global Models

QIU Jinjing CHEN Feng DONG Meiyang

Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

Abstract: The evaluation results of ECMWF and GFS on the track and strength forecasts of typhoons affecting Zhejiang from 2016 to 2019 show that ECMWF is better than GFS for track forecasting, and GFS has more advantages for strength forecasting. On this basis, the paper proposes a feasible typhoon initialization scheme to improve the performance of typhoon forecasting skill. Based on ECMWF and GFS analysis fields and oceanic typhoon observation data, as well as typhoon vortex separation, the vortex field is obtained by separating the GFS analysis field, and after vortex relocation and maximum wind speed adjustment procedure, it is superimposed with the large-scale environmental field separated from the ECMWF analysis field, realizing the reconstruction of typhoon initial field. For 14 typhoons affecting Zhejiang in

* 华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201805)、浙江省科技计划项目(LGF20D050001)、浙江省气象科技计划项目(2017ZD04、2020YB10)共同资助

2020 年 9 月 3 日收稿; 2021 年 5 月 7 日收修定稿

第一作者: 邱金晶, 主要从事数值预报技术研究和应用. E-mail: jinjing_qiu@163.com

通讯作者: 陈锋, 主要从事数值模式及资料同化研究. E-mail: fchen_zj@163.com

recent years, the hindcasting results of the mesoscale numerical weather forecast model which uses the new reconstruction scheme demonstrate that the new scheme gives full play to the ECMWF's advantages in track forecasting and GFS's advantages in strength forecasting, improving the forecast accuracy of typhoon track and strength effectively. The absolute error of track forecast is reduced by 21 km and the standard deviation by 26.6 km compared with the prediction of the GFS-driven mesoscale model. Compared with the forecast result of the ECMWF driven mesoscale model, the absolute error of strength forecast is reduced by $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and the standard deviation by $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The analysis of the typical case of Super Typhoon Lekima (2019) further indicates that the initial field reconstruction technology has a better forecasting ability for atmospheric circulation characteristics and typhoon's warm core structure.

Key words: typhoon initial field reconstruction, vortex separation, operational application

引 言

台风带来的狂风暴雨、洪涝、城市积涝等气象灾害和泥石流、山体滑坡等次生灾害严重威胁着人民的生命和财产安全。台风路径和强度预报的准确性直接影响到台风的总体预报效果,是台风预报中最受关注的预报内容,也是难点问题(陈联寿等,2012;张定媛等,2018)。台风数值预报技术是提高台风预报水平的一个有效途径(马雷鸣,2014;端义宏等,2020),而初始场的准确性是提升数值预报性能的一个关键所在(Lorenz,1965;2004)。能否在初始场中合理描述台风所处的大气环流背景,并且较为准确地描述出台风的结构(这一过程被称为台风涡旋初始化),对台风路径和强度预报都显得尤为重要(Hendricks et al,2013)。

数值模式初始化(包括资料同化、台风涡旋初始化)是基于观测和背景场资料通过动力和热力约束形成数值模式初始场的过程。由于台风生命史中绝大部分时间处于海上,而洋面上缺乏观测资料,普通的资料同化对台风涡旋的改进有限。早期的研究直接剔除模式背景场中的初始涡旋,加入人造台风涡旋(简称 bogus)实现台风初始化(Kurihara et al,1990;Lord,1991;王国民等,1996)。Kurihara et al (1993;1995)利用滤波方法将台风背景场分解为环境场、对称涡旋场和非对称涡旋场,利用 bogus 技术对对称涡旋场进行替换,最后合成新的初始场。针对上述方法存在台风初始条件和模式的物理过程以及动力学不平衡的问题,Zou and Xiao(2000)提出了 BDA(bogus data assimilation)方案,把四维变分同化与 bogus 相结合,有效改进了初始台风结构。黄燕燕等(2010)验证了 BDA 方案可以更好地预报

台风海棠的路径和中心强度变化。此外,涡旋重定位技术在近些年得到了发展并在 GFS 预报系统中进行了应用(Kurihara et al,1995;Liu et al,2006)。涡旋重定位技术将模式预报的涡旋移动到观测的位置而不是植入一个人造涡旋,该方法减小了初始场与模式不协调的问题(Hsiao et al,2010)。瞿安祥等(2009a;2009b)利用模式自身产生的台风涡旋,通过重定位和强度调整发展了一套完整可行的台风初始化数值方案,该方案更多的是依靠数值模式自身的动力和物理过程来协调约束产生三维空间的涡旋结构,预报效果较好。但这些研究或基于 bogus 涡旋及其衍生技术,或基于模式自身预报的涡旋,业务上实现的技术难度较大。

浙江是我国受台风灾害影响较大的省份之一,提升台风数值预报精细化水平是浙江现代气象业务面临的迫切任务。目前浙江业务运行的浙江省中尺度数值预报业务系统(ZJWARMS)使用 GFS 模式预报产品作为初始场和背景场,在台风影响期间提供 0~72 h 的逐小时路径和强度预报(陈锋等,2012)。实际应用表明,ZJWARMS 由于缺乏有效的台风初始化方案,对台风路径和强度预报存在较大的误差。陈国民等(2018;2019)对 2016 年和 2017 年台风业务预报评估发现,美国 GFS 全球预报系统对台风路径的预报总体不如欧洲中期天气预报中心 ECMWF 模式,但在强度预报上优于 ECMWF 模式。针对模式资料各有优势的情形,Wang and Yang(2008)融合了 NECP/DOE R2 和 ERA40 两种再分析资料作为侧边界条件驱动 WRF 模式,对减小模式不确定性有较大的作用。受此类工作启发,结合前述台风涡旋初始化技术的进展,充分利用不同模式资料(如 GFS 模式和 ECMWF 模式)各自优势、吸收有限的观测资料,尝试从基于全球模式评

估结果的角度开展台风初始场重建技术研究,通过为中尺度数值天气预报模式提供更优的台风初始场来提升其预报性能是值得探索的一个可行的途径。

综上所述,本文从实际应用需求出发,基于 GFS 和 ECMWF 两个全球模式台风预报优势,结合台风观测资料,利用台风涡旋分离、涡旋重定位以及最大风速调整等方法研制台风初始场重建技术,试图改进浙江省中尺度数值预报系统台风预报性能,为精细化台风数值预报提供科技支撑。

1 全球模式对影响浙江台风路径和强度的预报评估

本文选取 2016—2019 年期间 14 个影响浙江的台风个例(1614 莫兰蒂、1616 马勒卡、1617 鲑鱼、1618 暹芭、1703 南玛都、1718 泰利、1808 玛莉亚、

1810 安比、1812 云雀、1814 摩羯、1818 温比亚、1909 利奇马、1913 玲玲、1918 米娜),并收集中国气象局下发的全球数值预报模式 ECMWF 和 GFS 对上述台风的 0~72 h 预报数据。ECMWF 模式在每日 00 时和 12 时(世界时,下同)起报,产品垂直层数为 19 层,空间分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$,时间分辨率为 3 h。GFS 模式起报时间和产品时间分辨率与 ECMWF 模式相同,但其垂直层数为 34 层,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。结合台风影响浙江时段,提前 24~36 h,选定 14 个台风个例的模式起报时间,将模式起报时间开始的 0~72 h 作为研究时段。图 1 是研究时段内的逐 6 h 台风路径实况,台风强度实况见表 1,数据来源于中国气象局热带气旋最佳路径数据集(Ying et al, 2014),该数据集提供了台风强度标记、纬度、经度、中心最低气压、2 分钟平均近中心最大风速。

表 1 研究时段内 14 个台风的开始、结束强度实况

Table 1 The start and ending strength records of 14 typhoons during the study period

台风编号 (名称)	开始时间/ (年月日世界时)	开始强度		结束时间/ (年月日世界时)	结束强度	
		近中心最大 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最低海平面 气压/hPa		近中心最大 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最低海平面 气压/hPa
1614(莫兰蒂)	2016091400	62	915	2016091700	13	1004
1616(马勒卡)	2016091612	48	945	2016091912	45	950
1617(鲑鱼)	2016092612	45	950	2016092912	10	1006
1618(暹芭)	2016100300	55	930	2016100600	20	995
1703(南玛都)	2017070200	18	998	2017070500	18	998
1718(泰利)	2017091312	45	950	2017091612	30	980
1808(玛莉亚)	2018071000	50	940	2018071300	10	1002
1810(安比)	2018072100	25	982	2018072400	18	992
1812(云雀)	2018080112	20	990	2018080412	10	1000
1814(摩羯)	2018081112	20	990	2018081412	13	998
1818(温比亚)	2018081512	18	996	2018081812	15	992
1909(利奇马)	2019080812	62	915	2019081112	23	982
1913(玲玲)	2019090500	48	945	2019090800	18	984
1918(米娜)	2019093000	33	975	2019100300	20	990

选用中心最低海平面气压进行数值预报台风的定位,使用近中心最大风速进行定强,对全球模式 ECMWF、GFS 开展上述 14 个台风个例的路径和强度预报性能评估。从路径上来看,对比近 4 年影响浙江台风的逐 6 h 预报累积误差,有 64.3%(9 个)的个例,ECMWF 模式预报的台风路径优于 GFS 模式;有 28.6%(4 个)的个例,ECMWF 与 GFS 模式预报的台风路径相当;仅有 7.1%(1 个)的个例,GFS 模式预报的台风路径优于 ECMWF 模式。图 2 给出了两个模式 0~72 h 台风路径和强度预报的

误差分析,标准差的大小反映了模式预报误差的离散度。由图 2a 可知,两个模式的路径预报误差均随着预报时效的延长而增大,尤其是在 48 h 以后,误差明显加大。两个模式对 0~24 h 以内的台风路径预报较好,平均误差均在 50 km 左右,而对 24~72 h 的台风路径预报,ECMWF 模式要明显优于 GFS 模式,平均误差值分别为 157 km 和 187 km。图 2b 显示 ECMWF 模式预报误差的标准差在 24~72 h 期间明显低于 GFS 模式,说明 ECMWF 模式的预报误差比 GFS 模式更为稳定(离散度更小)。

从强度的逐 6 h 预报累计绝对误差来看,14 个台风个例中有 64.3%(9 个)的个例,GFS 模式预报的台风强度优于 ECMWF 模式;有 7.1%(1 个)的个例,GFS 与 ECMWF 模式预报的台风强度相当;仅有 28.6%(4 个)的个例,ECMWF 模式预报的台风强度优于 GFS 模式。由图 2c 可知,GFS 和 ECMWF 模式对台风强度预报均存在低估,0~72 h 平均误差分别为 $-4.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-6.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,结合平均绝对误差(图 2d)可知,GFS 模式对 0~42 h 的台风强度预报要明显优于 ECMWF 模式。图 2e 表明 GFS 模式 0~42 h 的强度预报离散度较 ECMWF 模式明显偏低,预报更稳定。

综上所述,ECMWF 模式对影响浙江台风的路径预报总体优于 GFS 模式,其原因可能和 ECMWF 模式对 500 hPa 高度场的形势预报具有较高的预报准确率,且对副热带高压系统南侧的引导气流刻画较准有关(关月,2016;任宏昌,2017)。GFS 模式进行了台风初始化处理(Liu et al, 2006),ECMWF 模

式未做相关处理,因此 GFS 模式对台风强度预报把握更好,但仍存在初始强度估计偏低的问题。

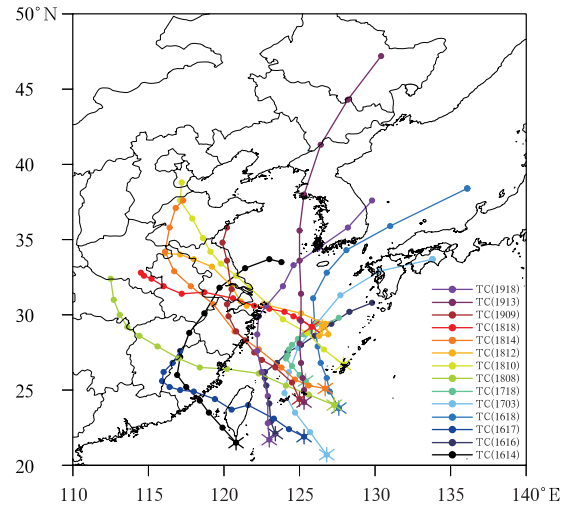


图 1 研究时段内 14 个台风的逐 6 h 路径实况
Fig. 1 The 6 h track records of 14 typhoons during the study period

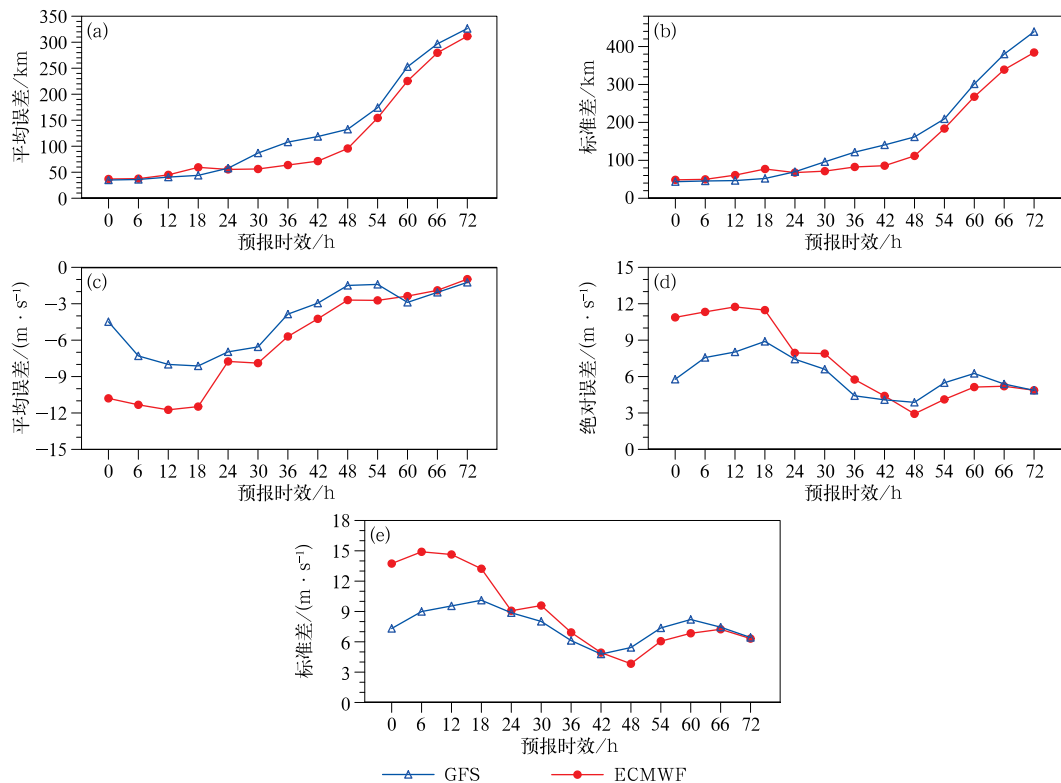


图 2 研究时段内 14 个台风的 ECMWF 和 GFS 模式预报 0~72 h 台风路径的平均误差(a)及其标准差(b)和台风强度的平均误差(c)、绝对误差(d)及其标准差(e)

Fig. 2 The average errors (a) and standard deviations (b) of typhoon tracks and the average errors (c), absolute errors (d), standard deviations (e) of typhoon strength with 0-72 h lead time by ECMWF and GFS of 14 typhoons during the study period

2 重建方案与试验设计

2.1 台风初始场重建方案

根据全球模式的评估结果,制定台风初始场重建方案,主要思路为:充分发挥 ECMWF 模式对大尺度环境场和 GFS 模式对台风涡旋场刻画的优势,利用涡旋分离技术,将从 GFS 分析场中分离得到的涡旋场经过重定位和最大风速调整后,与从 ECMWF 分析场中分离得到的大尺度环境场重新叠加融合,重建一个强度、位置均和实况比较接近的新的台风初始场(具体流程如图 3 所示)。

2.1.1 涡旋分离及重定位技术

本文采用 Kurihara et al(1995)提出的涡旋分离技术,表征如下

$$H' = H_E + H'_V = H - H_V + H'_V \quad (1)$$

式中: H' 为重定位以后的模式背景场, H 为模式预报的背景场, H_E 为大尺度环境场, H_V 为涡旋场, H'_V 为重定位后的涡旋场。

相应计算过程简述如下:

(1) 确定台风涡旋环流范围。首先,利用 850 hPa 位势高度场确定台风中心位置,并在极坐标下计算得到切向平均风速;其次,自台风中心开始随着半径增长,取切向平均风速在减弱过程中第一次小于等于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时对应的半径(Kurihara et al, 1995),即为台风尺度半径 r_0 ,从而确定台风涡旋环

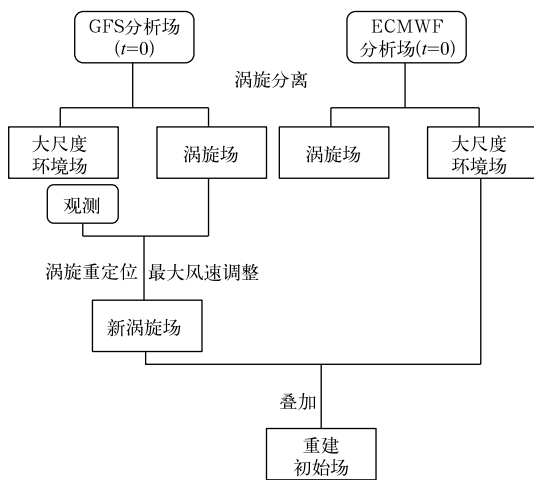


图 3 台风初始场重建方案流程

Fig. 3 Schematic diagram for typhoon initial field reconstruction

流范围。

(2)利用变化平滑系数的 3 点平滑算子将背景场 H 分离为基本场和扰动场,平滑系数为

$$a = \frac{1}{2} (1 - \cos \frac{2\pi}{m})^{-1} \quad (2)$$

式中:取 $m=2,3,4,2,5,6,7,2,8,9,2$,先沿纬向再沿经向做滤波,得到扰动场 H_D 。

(3)对扰动场 H_D 做柱形滤波分离出涡旋环流,公式如下

$$H_V(r, \theta) = [1 - E(r)][H_D(r, \theta) - \overline{H_D(r_0)}] \quad (3)$$

式中: $\overline{H_D(r_0)}$ 是 H_D 在台风尺度半径 r_0 处的角度平均,柱形滤波函数 $E(r)$ 由式(4)计算而得。

$$E(r) = \frac{\exp[-(r_0 - r)^2/l^2] - \exp[-r_0^2/l^2]}{1 - \exp[-r_0^2/l^2]} \quad (4)$$

式中: r 为距离涡旋中心的半径, l 为控制 $E(r)$ 形状的参数,本文取 $l=r_0/5$ 。

(4)进一步计算得到大尺度环境场 H_E

$$H_E = H - H_V \quad (5)$$

将得到的涡旋环流场 H_V 的环流中心平移移动到观测的台风中心位置,得到重定位后的涡旋环流 H'_V ,然后与大尺度环境场 H_E 进行叠加,得到新的台风初始场 H' 。

2.1.2 最大风速调整技术

根据徐道生等(2019)提出的最大风速调整技术方案,得到式(6),重新定位以后的背景水平风场可写成

$$\begin{cases} u' = u_E + u'_V \\ v' = v_E + v'_V \end{cases} \quad (6)$$

式中: u' 和 v' 是重定位后的背景场 H' 的水平风场, u_E 和 v_E 是大尺度环境场 H_E 的水平风场, u'_V 和 v'_V 是重定位后的涡旋环流 H'_V 的水平风场。

通过对涡旋分量乘以系数 β 实现最大风速调整

$$\begin{cases} u'_c = u_E + \beta u'_V \\ v'_c = v_E + \beta v'_V \end{cases} \quad (7)$$

式中: u'_c 和 v'_c 分别为经过最大风速调整后的风场分量,调整以后的最大风速等于观测风速 V_{obs}

$$\begin{aligned} u'_{c,r_0}{}^2 + v'_{c,r_0}{}^2 &= (u_E + \beta u'_V)^2 + (v_E + \beta v'_V)^2 \\ &= V_{obs}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式中: u'_{c,r_0} 和 v'_{c,r_0} 是最大风速所在点的水平风场分量,根据式(9)计算得到 β

$$\beta = \frac{-(u_E u'_v + v_E v'_v) + \sqrt{(u_E u'_v + v_E v'_v)^2 - (u'^2_v + v'^2_v)(u_E^2 + v_E^2 - V_{obs}^2)}}{(u'^2_v + v'^2_v)} \quad (9)$$

值得注意的是,这里计算的是地面层的 β ,在实际应用时,需要对其乘以一个权重系数使得低层的风速做较大订正,而高层较小。

2.1.3 台风初始场重建

以 1909 号超强台风利奇马为例,进行初始场重

建。图 4a 和 4b 分别为 2019 年 8 月 8 日 12 时 ECMWF 和 GFS 分析场的 850 hPa 全风场,经过涡旋分离,得到大尺度环境场(图 4d,4e)和涡旋场(图 4g,4h),由图可知,两个模式的大尺度环境场在台风中心附近主要为南风 and 东南风,而在涡旋场展

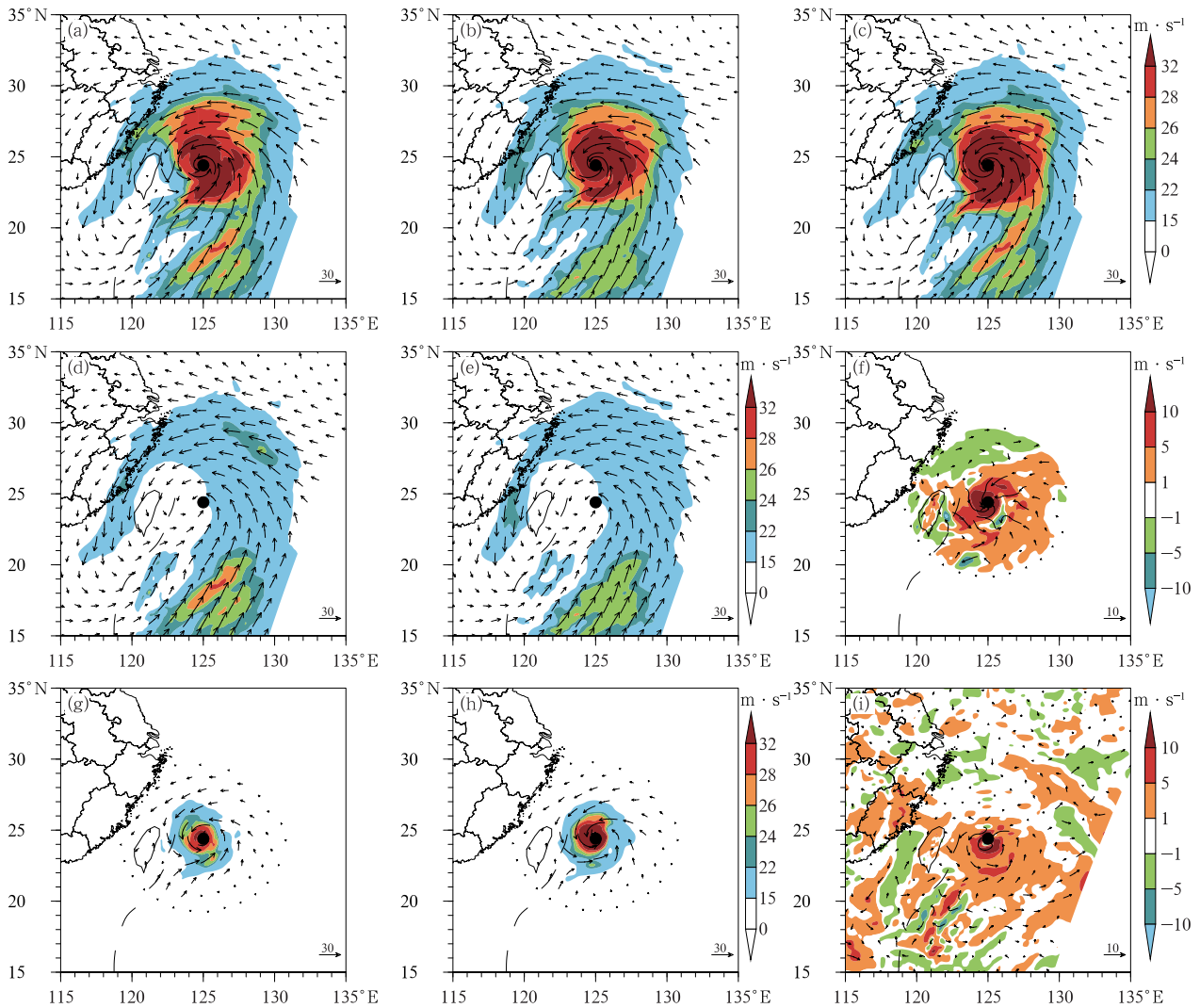


图 4 2019 年 8 月 8 日 12 时台风利奇马 850 hPa(a)ECMWF 全风场,(b)GFS 全风场,(c)重建初始场,(d)ECMWF 大尺度环境场,(e)GFS 大尺度环境场,(f)重建初始场与 ECMWF 全风场差值场,(g)ECMWF 涡旋场,(h)GFS 涡旋场,(i)重建初始场与 GFS 全风场差值场
(矢量:风场,单位: $m \cdot s^{-1}$;填色:风速;黑点为观测到的台风中心位置: $24.4^{\circ}N, 125^{\circ}E$)

Fig. 4 (a) Full wind field of ECMWF, (b) full wind field of GFS, (c) reconstructed initial field, (d) large-scale ambient field of ECMWF, (e) large-scale ambient field of GFS, (f) difference between reconstructed initial field and full wind field of ECMWF, (g) vortex field of ECMWF, (h) vortex field of GFS and (i) difference between reconstructed initial field and full wind field of GFS at 850 hPa for Typhoon Likema at 1200 UTC 8 August 2019

[vector: wind field, unit: $m \cdot s^{-1}$; colored: wind speed; black dot: typhoon center ($24.4^{\circ}N, 125^{\circ}E$)]

示出了完整的气旋式环流,可见中心附近的气旋式环流均被较好地分离出来,这表明采用上述涡旋分离技术是可行的。进一步对比得到,ECMWF 分析场分离得到的大尺度环境场其南侧的西南风和北侧的偏东风气流较 GFS 更为强盛,而 GFS 分析场分离得到的涡旋场表征的台风中心附近环流风速较 ECMWF 偏强。根据观测得到的台风中心位置(24.4°N 、 125°E)和近中心最大风速($62\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),将 GFS 分析场分离得到的涡旋场进行重定位和最大风速调整,然后叠加到 ECMWF 分析场分离得到的大尺度环境场,即得到重建初始场(图 4c)。由重建初始场与全球模式全风场差值分布(图 4f,4i)可知,经过最大风速调整后的重建初始场对台风中心附近的气旋式环流明显强于 ECMWF 分析场,略强于 GFS 分析场。同时,重建初始场对大尺度环流场较 GFS 分析场有所调整。基于上述方法,对本文研究的 14 个台风均进行了初始场重建。

2.2 模式介绍和试验设计

2.2.1 模式介绍

浙江省中尺度数值预报业务系统框架(ZJWARMS)采用 WRF 3.7.1 为预报模式,选用单层嵌套,区域大致范围为 $10^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$,水平分辨率为 9 km,垂直层数为 51 层。模式使用的物理过程包括:微物理方案采用 WSM 6-Class 方案(Hong et al,2004),陆面过程使用 Noah 方案(Chen and Dudhia,2001),行星边界层采用 Yonsei University(YSU)参数化方案(Hong and Pan,1996),表面层使用基于 Monin-Obukhov 的 MM5 相似理论(Jiménez et al,2012),长波、短波辐射选用 RRT-MG 快速辐射传输方案(Iacono et al,2008),不采用积云参数化方案。

2.2.2 试验设计

为了探讨台风初始场重建对路径、强度预报的影响,对本文研究的 14 个台风,开展如下三组回报试验:(1)TESTEC:利用 ECMWF 模式预报数据提供初、边界条件,驱动 ZJWARMS;(2)TESTGFS:利用 GFS 模式预报数据提供初、边界条件,驱动 ZJWARMS;(3)TESTCOM:利用重建的 14 个台风初始场,结合 ECMWF 模式预报场作为边界条件,驱动 ZJWARMS。

3 结果分析

3.1 台风初始场重建对路径、强度的影响

选用海平面最低气压进行数值预报台风的定位,选用中心最低海平面气压和近中心最大风速分别进行定强,对三组试验开展台风路径和强度预报的检验评估。从路径上来看,对比近 4 年 14 个影响浙江台风的逐 6 h 预报累计误差,有 64.3%(9 个)的个例,TESTCOM 试验预报的台风路径优于 TESTGFS 试验,另有 57.1%(8 个)的个例,TESTCOM 试验优于 TESTEC 试验。图 5 给出了三组试验对 14 个台风 0~72 h 路径和强度预报的误差散点分布及平均误差分析。由图 5a、5d 和 5g 可知,经过涡旋重定位后,TESTCOM 试验在初始时刻的台风中心位置基本和实况一致,在 24 h 以后 TESTCOM 试验的路径预报较 TESTGFS 试验的优势开始体现,尤其是在第 60~72 小时的预报明显占优,平均误差减少 65.3 km,标准差降低 72.5 km。三组试验(TESTEC、TESTGFS 和 TESTCOM)所有预报时刻平均的路径误差分别为 122、148 和 127 km,标准差分别为 141.9、177.1 和 150.5 km。可见,TESTCOM 试验预报路径平均误差较 TESTGFS 试验减少 21 km,平均标准差较 TESTGFS 试验降低 26.6 km。14 个台风个例的误差散点分布进一步表明(图 5a),对 TESTGFS 试验路径预报误差较大的台风个例,TESTCOM 试验得到有效改进。从强度预报累计绝对误差来看,有 78.6%(11 个)的个例,TESTCOM 试验预报的近中心最大风速较 TESTEC 试验有改进,另有 50%(7 个)的个例,TESTCOM 试验较 TESTGFS 试验有改进;有 64.3%(9 个)的个例,TESTCOM 试验预报的中心最低海平面气压累计绝对误差小于 TESTEC 试验,另有 50%(7 个)的个例,TESTCOM 试验小于 TESTGFS 试验。由图 5b、5e 和 5h 可知,经过最大风速调整后,TESTCOM 试验初始时刻的近中心最大风速误差接近于 0。除个别时刻外,TESTCOM 试验的平均误差、绝对误差和误差离散度均明显小于 TESTEC 试验,尤其在第 0~18 小时的台风强度预报,TESTCOM 试验绝对误差改进 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,

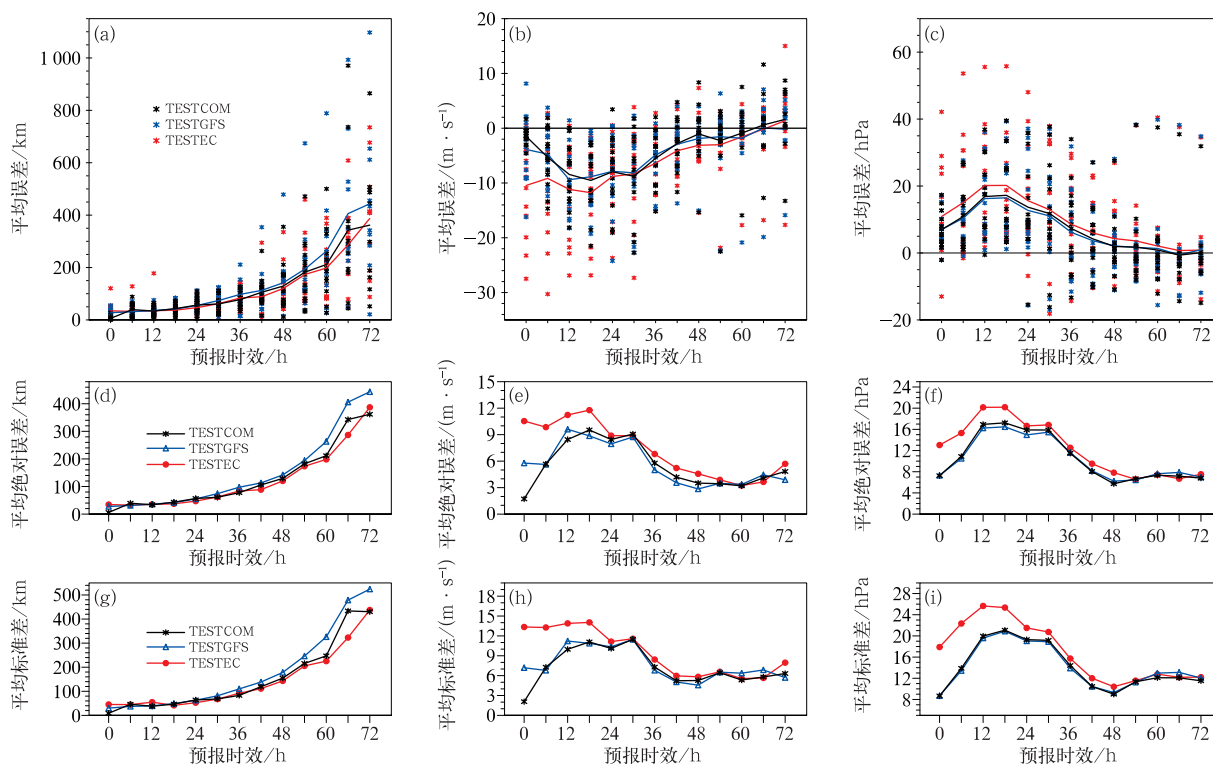


图 5 研究时段内 14 个台风的三组试验预报的 0~72 h 的(a,d,g)台风路径、(b,e,h)近中心最大风速及(c,f,i)中心最低海平面气压的(a,b,c)误差散点分布及其平均误差、(d,e,f)平均绝对误差和(g,h,i)平均标准差

Fig. 5 (a, b, c) The scatter plots of errors with average values, (d, e, f) average absolute errors and (g, h, i) average standard deviations of (a, d, g) typhoon tracks, (b, e, h) maximum wind speed near typhoon centers and (c, f, i) minimum sea level pressure in typhoon centers with 0–72 h forecast lead time of three experiments of 14 typhoons during the study period

标准差改进 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。进一步计算得到,所有预报时刻平均的 TESTEC、TESTGFS 和 TESTCOM 试验预报近中心最大风速平均绝对误差分别为 7.2、5.6 和 $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均标准差分别为 9.5、7.7 和 $7.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见,TESTCOM 试验预报近中心最大风速平均绝对误差较 TESTEC 试验减少 $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均标准差较 TESTEC 试验降低 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从中心最低海平面气压来看(图 5c、5f 和 5i),TESTCOM 试验 0~72 h 预报较 TESTEC 试验更接近实况,预报更稳定。平均来看,TESTEC、TESTGFS 和 TESTCOM 试验预报最低气压平均绝对误差分别为 12.3、10.5 和 10.6 hPa,平均标准差分别为 16.9、14.1 和 14.1 hPa。计算得到,TESTCOM 试验预报中心最低海平面气压平均绝对误差较 TESTEC 试验减少 1.7 hPa,平均标准差较 TESTEC 试验降低 2.8 hPa。14 个台风个例的误差散点分布进一步表明(图 5b 和 5c),对 TESTEC

试验强度预报误差较大的台风个例,TESTCOM 试验得到有效改进。

上述结果表明,经过初始场重建的 TESTCOM 试验的台风路径预报能力与 TESTEC 试验相当,较 TESTGFS 试验有了较大改进;TESTCOM 试验的强度预报能力与 TESTGFS 试验相当,较 TESTEC 试验有明显优势。可见,重建台风初始场后的模式预报结果兼顾了 ECMWF 模式的路径预报优势以及 GFS 模式的强度预报优势,有效改进了台风的路径和强度预报,本文提出的初始场重建方案可投入实际业务使用。

3.2 台风利奇马个例分析

继续以台风利奇马 2019 年 8 月 8 日 12 时起报的三组试验结果为例,进一步探讨不同初始化方案对台风预报的影响。从路径误差来看(图 6a),经过初始场重建的模式预报路径与实况最为接近,尤其

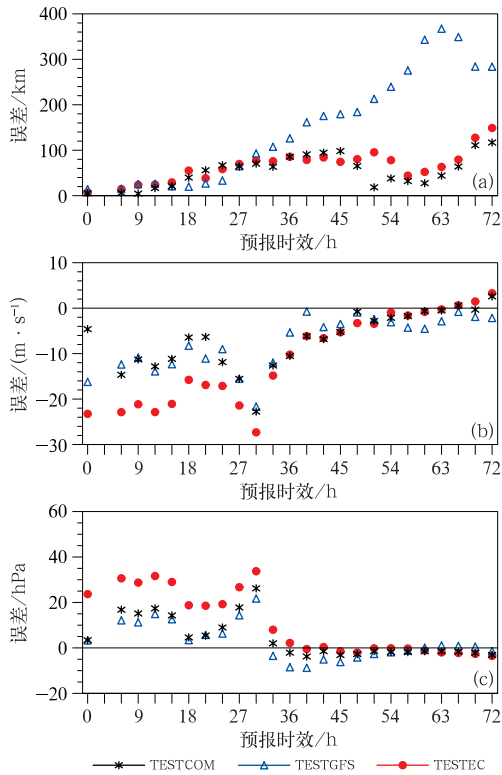


图 6 三组试验预报台风利奇马 0~72 h 的(a)路径、(b)近中心最大风速及 (c)中心最低海平面气压的误差
Fig. 6 The errors of (a) typhoon tracks, (b) maximum wind speed near typhoon centers and (c) the minimum sea level pressure in the center with 0–72 h forecast lead time of three experiments for Typhoon Likema

是对 48~72 h 的预报结果, TESTCOM 试验改进最为显著, 平均预报误差较 TESTGFS 试验降低 200 km 以上。由强度误差可知(图 6b 和 6c), TESTCOM 试验较 TESTEC 试验占优, 尤其对 0~33 h 的预报改进较明显, TESTCOM 试验最大风速预报误差较 TESTEC 试验平均降低 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 最低气压预报误差较 TESTEC 试验平均降低 12 hPa 左右。总的来说, 台风初始场重建技术对台风利奇马的路径和强度预报具有显著的正效应。

本文拟从三组试验预报的大气环流特征来分析初始场重建后的模式预报台风路径占优的原因。利用 NCEP/NCAR FNL(每日 4 次, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$)再分析资料作为实况。从 8 日 12 时的大气环流分布来看(图略), 三组试验初始时刻 500 hPa 等

压面中纬度是两槽两脊的形势, 西太平洋副热带高压(以下简称副高)588 dagpm 等值线西伸脊点位置位于 33°N 、 124°E 附近, 与再分析资料得到的结果基本一致。从 10 日 00 时(模式起报后 36 h)再分析资料的结果来看(图 7a), 副高西伸脊点位置较 8 日 12 时有所东退北抬, 脊点位于 36°N 、 128°E 附近, TESTEC 和 TESTCOM 两组试验准确预报出了副高的位置变化(图 7b, 7d), 588 dagpm 等值线西伸脊点与图 7d 所示的位置接近, 但图 7c 表明, TESTGFS 试验预报副高整体偏弱, 副高西伸脊点大幅东撤至 135°E 以东, 正是从该时刻开始, TESTGFS 试验的路径误差逐渐加大, 而 TESTEC 和 TESTCOM 试验的误差相对较小。可见, 经过初始场重建的中尺度模式预报对环流形势把握较好。

为分析初始化方案对台风结构的影响, 给出三组试验第 0 小时、第 6 小时、和第 12 小时预报的沿台风中心的风速和温度距平垂直剖面(温度距平为当前格点温度值与同一高度层台风环流区域平均温度值之差, 图 8)。由图 8a~8c 可知, 经过初始场重建的 TESTCOM 试验初始时刻的台风近中心最大风速为 $57.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 大风速区在垂直方向深厚发展, 较 TESTGFS 试验($45.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 TESTEC 试验($38.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 风速得到明显增强。此外, 三组试验在初始时刻台风暖心结构的温度距平数值相当, 都达到了 10 K。从第 6 小时的预报结果看(图 8d~8f), TESTCOM 试验的最大风速($43.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)及暖心结构(9.6 K)预报结果较 TESTEC 试验($35.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 8.8 K)要强, 与 TESTGFS 试验($45.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 9.4 K)接近。再对第 12 小时的结果进行分析(图 8g~8i), TESTCOM 试验的最大台风风速预报降至 $42.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 温度距平为 8.1 K, 同时 TESTGFS 试验为 $41.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 8.2 K, TESTEC 试验为 $32.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 6.6 K, TESTCOM 试验的预报结果仍占优。上述分析可知, 模式预报台风暖心结构和台风强度变化趋势一致, TESTCOM 试验对台风强度预报较 TESTEC 试验有了明显改进, 这与暖心结构预报的改进相匹配。从 12 h 以后的预报结果来看(图略), TESTCOM 试验对台风结构预报较 TESTEC 试验仍有明显优势, 与 TESTGFS 试验水平相当。可见, 初始场重建后的模式预报对台风垂向风场和暖心结构预报把握较好。

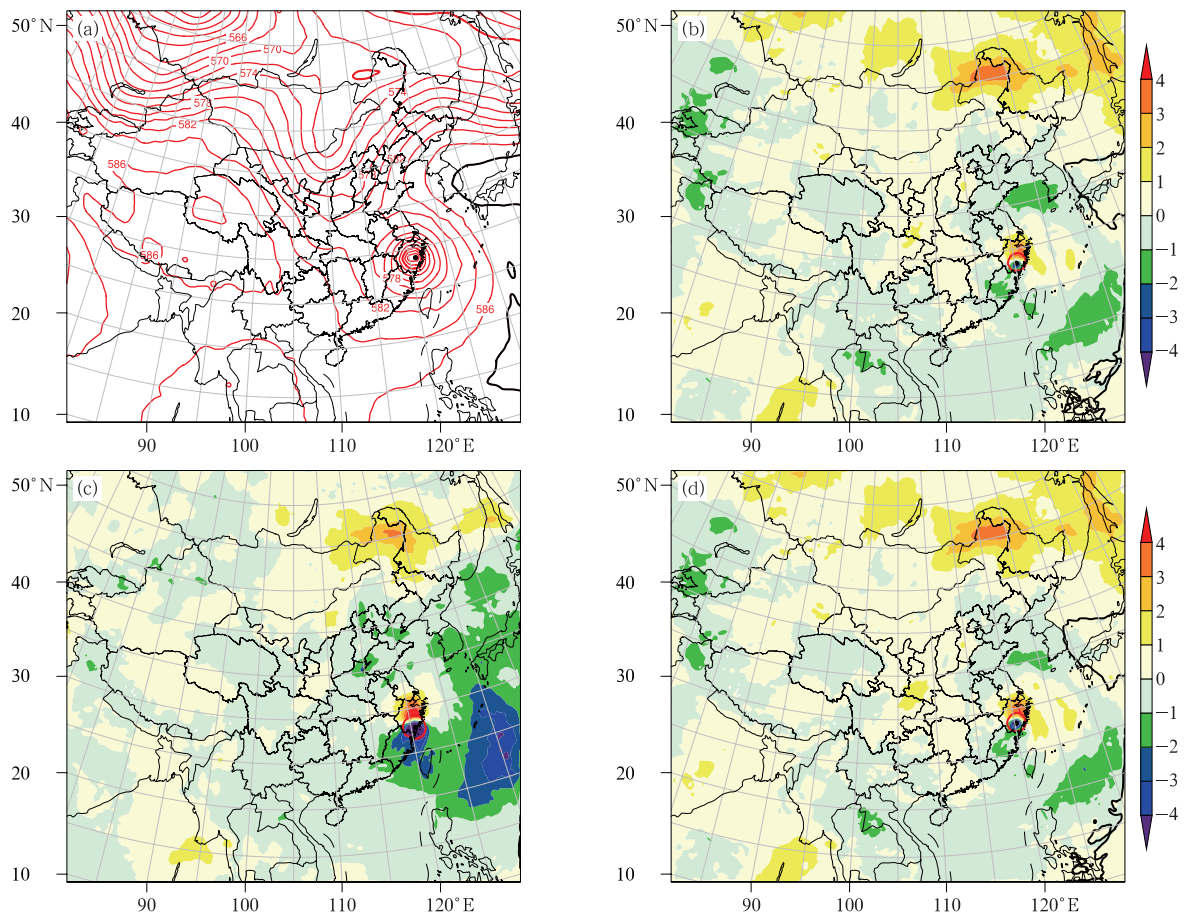


图 7 2019 年 8 月 10 日 00 时 500 hPa 位势高度(单位:dagpm)

(a)再分析场,(b)TESTEC 试验预报场与分析场差值,(c)TESTGFS 试验预报场与分析场差值,(d)TESTCOM 试验预报场与分析场差值

(图 7a 中,黑色加粗线为副高标志线 588 dagpm 线;

红色加粗线为台风标志线 570 dagpm 线;黑点为台风中心位置)

Fig. 7 The 500 hPa geopotential height (unit: dagpm) at 0000 UTC 10 August 2019

(a) reanalysis field, (b) difference between TESTEC forecast field and the reanalysis field, (c) difference between TESTGFS forecast field and the reanalysis field, (d) difference between TESTCOM forecast field and the reanalysis field

[Black bold line (588 dagpm) represents the mark line of the western Pacific subtropical high in Fig. 7a; red bold line (570 dagpm) and black dot indicate the mark line and the center of typhoon respectively]

4 结论与讨论

为提升区域中尺度数值模式台风预报性能,本文基于 ECMWF 和 GFS 两个全球模式对 2016—2019 年影响浙江台风的路径和强度预报的评估结果,提出了一种新的台风初始化方案,并开展了在 14 个台风个例回报试验中的应用和评估,主要结论

如下:

(1)ECMWF 模式对影响浙江台风的路径预报总体优于 GFS 模式,而 GFS 模式对台风强度预报更具优势。

(2)基于 ECMWF 和 GFS 分析场及洋面台风观测资料,利用台风涡旋分离、涡旋重定位以及最大风速调整等方法研制了可吸收各模式优势的台风初始场重建技术。

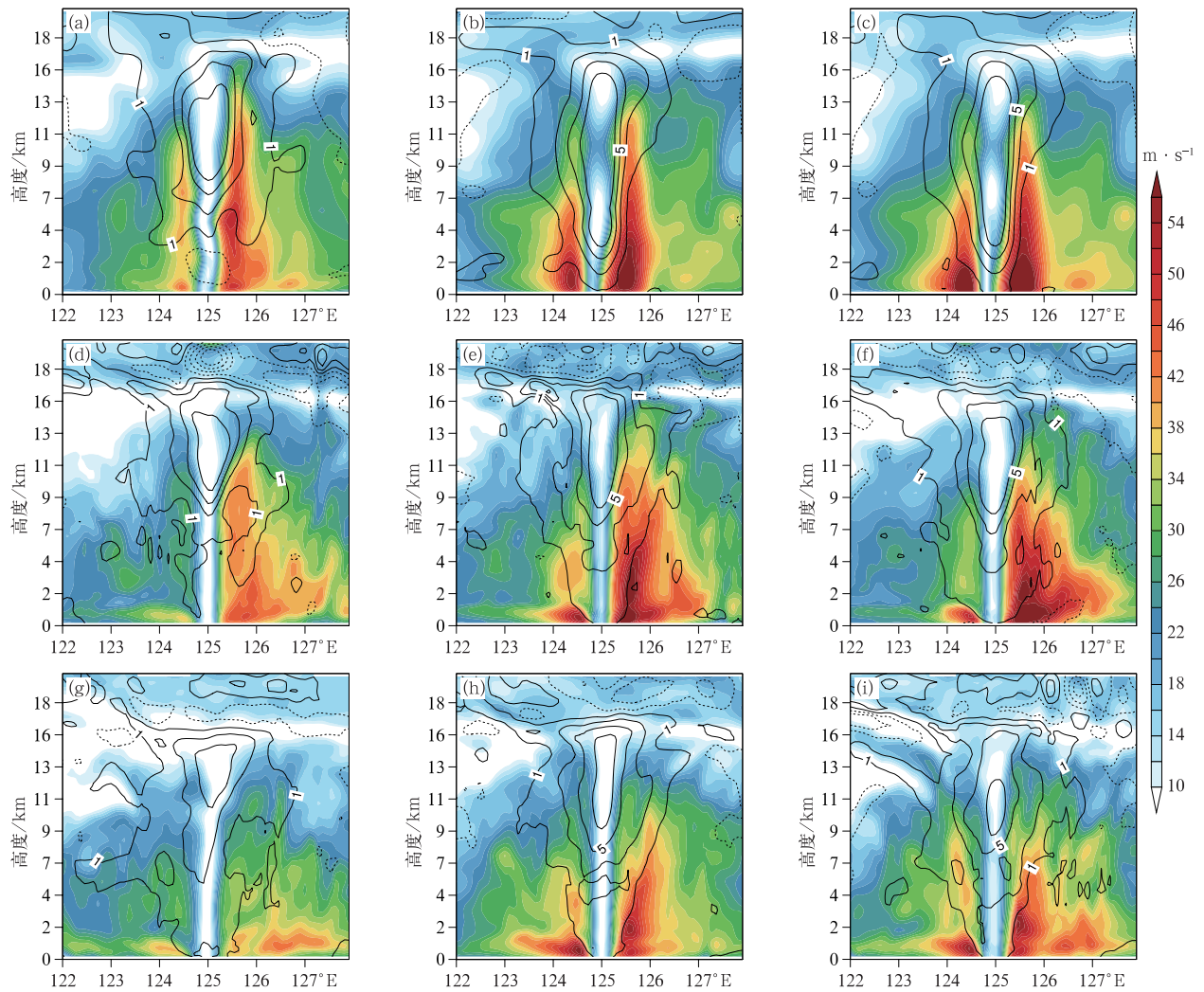


图 8 (a,d,g)TESTEC、(b,e,h)TESTGFS 和 (c,f,i)TESTCOM 试验 2019 年 8 月 8 日 12 时起报的 (a,b,c)第 0 小时、(d,e,f)第 6 小时、(g,h,i)第 12 小时沿台风中心的风速(填色)与温度距平(等值线,单位:K)的纬向垂直剖面

Fig. 8 Zonal vertical cross-sections along wind speed (colored) of typhoon center and temperature anomalies (isoline, unit: K)

of (a, d, g) TESTEC, (b, e, h) TESTGFS and (c, f, i) TESTCOM initialized at 1200 UTC 8 August 2019

(a, b, c) 0 h forecast, (d, e, f) 6 h forecast, (g, h, i) 12 h forecast

(3) 台风初始场重建技术在浙江省中尺度数值天气预报模式的应用表明,经过初始化处理过的模式预报结果兼顾了 ECMWF 模式的路径预报优势和 GFS 模式的强度预报优势,有效改进了台风的路径和强度预报性能。相较于 GFS 模式驱动的中尺度模式预报结果,新方法的模式路径预报绝对误差减少 21 km,标准差降低 26.6 km。相较于 ECMWF 模式驱动的中尺度模式预报结果,新方法的模式强度预报绝对误差减少 $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,标准差降低

$2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对典型个例超强台风利奇马进一步分析表明初始场重建技术对大气环流特征和台风暖心结构模拟均有较好的修正能力。

经过对 14 个影响浙江的台风个例的业务试验表明,本方法在实际业务中具有较强的实践可行性,对提高台风路径和强度的预报有较好作用。诚然,本方案还存在一定的不足,首先,初始化方案依赖于 ECMWF 模式路径预报优于 GFS 模式,GFS 模式强度预报优于 ECMWF 模式这一检验结论,因此对

于不支持该结论的台风个例预报,进行初始场重建后预报效果可能会更差,今后在实时业务中可以考虑在初始场重建之前对模式资料进行动态评估,且模式资料不局限于 ECMWF 和 GFS 全球模式资料,也可以利用如区域模式自身的预报资料,动态选择适合该台风个例的模式资料进行融合。其次,本方案仅对涡旋场的风速进行调整,并未考虑调整后对其他要素场的影响,重建的初始场可能会造成动力-物理过程相互不协调。下一步,我们将进一步加强这方面的改进研究,借鉴考虑模式动力和热力平衡、多种地形条件影响等台风动力初始化方案(许晓林等,2019;Cha and Wang,2013;Liu et al,2018),改进台风业务数值预报准确率。

参考文献

- 陈锋,董美莹,冀春晓,等,2012. WRF 模式对浙江 2011 年夏季降水和温度预报评估及其湿过程敏感性分析[J]. 浙江气象,33(3):3-12. Chen F, Dong M Y, Ji C X, et al, 2012. Evaluation of summer precipitation and temperature forecasts in Zhejiang during 2011 with WRF and analysis of sensitivity to wet process[J]. J Zhejiang Meteor, 33(3):3-12(in Chinese).
- 陈国民,张喜平,白莉娜,等,2018. 2016 年西北太平洋和南海热带气旋预报精度评定[J]. 气象,44(4):582-589. Chen G M, Zhang X P, Bai L N, et al, 2018. Verification on forecasts of tropical cyclones over Western North Pacific in 2016[J]. Meteor Mon, 44(4):582-589(in Chinese).
- 陈国民,张喜平,白莉娜,等,2019. 2017 年西北太平洋和南海热带气旋预报精度评定[J]. 气象,45(4):577-586. Chen G M, Zhang X P, Bai L N, et al, 2019. Verification on forecasts of tropical cyclones over Western North Pacific and South China Sea in 2017[J]. Meteor Mon, 45(4):577-586(in Chinese).
- 陈联寿,端义宏,宋丽莉,等,2012. 台风预报及其灾害[M]. 北京:气象出版社:20-40. Chen L S, Duan Y H, Song L L, et al, 2012. Typhoon Forecast and Its Disaster[M]. Beijing:China Meteorological Press:20-40(in Chinese).
- 端义宏,方娟,程正泉,等,2020. 热带气旋研究和业务预报进展—第九届世界气象组织热带气旋国际研讨会(IWTC-9)综述[J]. 气象学报,78(3):537-550. Duan Y H, Fang J, Cheng Z Q, et al, 2020. Advances and trends in tropical cyclone research and forecasting: an overview of the Ninth World Meteorological Organization International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-9)[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):537-550(in Chinese).
- 关月,2016. 2016 年 6—8 月 T639、ECMWF 及日本模式中期预报性能检验[J]. 气象,42(11):1410-1417. Guan Y, 2016. Performance verification of medium-range forecast by T639, ECMWF and Japan models from June to August 2016[J]. Meteor Mon, 42(11):1410-1417(in Chinese).
- 黄燕燕,闫敬华,蒙伟光,等,2010. BDA 方案对台风背景高温天气预报的改进[J]. 气象学报,68(1):102-113. Huang Y Y, Yan J H, Meng W G, et al, 2010. Improvement of summer high temperature forecasting in Guangzhou during the typhoon period using a BDA scheme[J]. Acta Meteor Sin, 68(1):102-113(in Chinese).
- 马雷鸣,2014. 国内台风数值预报模式及其关键技术研究进展[J]. 地球物理学进展,29(3):1013-1022. Ma L M, 2014. Research progress on China typhoon numerical prediction models and associated major techniques[J]. Prog Geophy, 29(3):1013-1022(in Chinese).
- 瞿安祥,麻素红,李娟,等,2009a. 全球数值模式中的台风初始化 II:业务应用[J]. 气象学报,67(5):727-735. Qu A X, Ma S H, Li J, et al, 2009a. The initialization of tropical cyclones in the NMC global model Part II: implementation[J]. Acta Meteor Sin, 67(5):727-735(in Chinese).
- 瞿安祥,麻素红, Liu Q F, 等,2009b. 全球数值模式中的台风初始化 I:方案设计[J]. 气象学报,67(5):716-726. Qu A X, Ma S H, Liu Q F, et al, 2009b. The initialization of tropical cyclones in the NMC global model Part I: scheme design[J]. Acta Meteor Sin, 67(5):716-726(in Chinese).
- 任宏昌,2017. 2017 年 6—8 月 T639、ECMWF 及日本模式中期预报性能检验[J]. 气象,43(11):1439-1445. Ren H C, 2017. Performance verification of medium-range forecasts by T639, ECMWF and Japan models from June to August 2017[J]. Meteor Mon, 43(11):1439-1445(in Chinese).
- 王国民,王诗文,李建军,1996. 一个人造台风方案及其在移动套网格模式中的应用[J]. 热带气象学报,12(1):9-17. Wang G M, Wang S W, Li J J, 1996. A bogus typhoon scheme and its application to a movable nested mesh model[J]. J Trop Meteor, 12(1):9-17(in Chinese).
- 徐道生,张邦林,曾庆存,等,2019. 一种基于分析增量更新技术的台风初始化方案[J]. 气象学报,77(6):1053-1061. Xu D S, Zhang B L, Zeng Q C, et al, 2019. A typhoon initialization scheme based on incremental analysis updates technology[J]. Acta Meteor Sin, 77(6):1053-1061(in Chinese).
- 许晓林, Liu Q F, 陈葆德,等,2019. GRAPES-TCM 台风模式的新涡旋初始化方案——原理和实施[J]. 大气科学,43(5):975-989. Xu X L, Liu Q F, Chen B D, et al, 2019. Vortex initialization scheme in GRAPES-TCM model: technical description and implementation[J]. Chin J Atmos Sci, 43(5):975-989(in Chinese).
- 张定媛,田晓阳,贾朋群,2018. 热带气旋预报性能及指标综合评述[J]. 气象,44(12):1628-1634. Zhang D Y, Tian X Y, Jia P Q, 2018. Review on performance and index of tropical cyclone forecast[J]. Meteor Mon, 44(12):1628-1634(in Chinese).
- Cha D H, Wang Y Q, 2013. A dynamical initialization scheme for real-time forecasts of tropical cyclones using the WRF model[J]. Mon Wea Rev, 141(3):964-986.
- Chen F, Dudhia J, 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity[J]. Mon Wea Rev, 129(4):569-585.

- Hendricks E A, Peng M S, Li T, 2013. Evaluation of multiple dynamical initialization schemes for tropical cyclone prediction[J]. *Mon Wea Rev*, 141(11):4028-4048.
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H, 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation[J]. *Mon Wea Rev*, 132(1):103-120.
- Hong S Y, Pan H L, 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model[J]. *Mon Wea Rev*, 124(10):2322-2339.
- Hsiao L F, Liou C S, Yeh T C, et al, 2010. A vortex relocation scheme for tropical cyclone initialization in advanced research WRF[J]. *Mon Wea Rev*, 138(8):3298-3315.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al, 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. *J Geophys Res*, 113(D13):D13103.
- Jiménez P A, Dudhia J, González-Rouco J F, et al, 2012. A revised scheme for the WRF surface layer formulation[J]. *Mon Wea Rev*, 140(3):898-918.
- Kurihara Y, Bender M A, Ross R J, 1993. An initialization scheme of hurricane models by vortex specification[J]. *Mon Wea Rev*, 121(7):2030-2045.
- Kurihara Y, Bender M A, Tuleya R E, et al, 1990. Prediction experiments of Hurricane Gloria (1985) using a multiply nested movable mesh model[J]. *Mon Wea Rev*, 118(10):2185-2198.
- Kurihara Y, Bender M A, Tuleya R E, et al, 1995. Improvements in the GFDL hurricane prediction system[J]. *Mon Wea Rev*, 123(9):2791-2801.
- Liu H Y, Wang Y Q, Xu J, et al, 2018. A dynamical initialization scheme for tropical cyclones under the influence of terrain[J]. *Wea Forecasting*, 33(3):641-659.
- Liu Q F, Surgi N, Lord S, et al, 2006. Hurricane initialization in HWRf model[R]. NCEP/EMC office note.
- Lord S J, 1991. A bogussing system for vortex circulations in the National Meteorological Center global forecast model[C]//Preprints, 19th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Miami: Amer Meteor Soc:328-330.
- Lorenz E N, 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model[J]. *Tellus*, 17(3):321-333.
- Lorenz E N, 2004. Deterministic nonperiodic flow[M]//Hunt B R, Li T Y, Kennedy J A, et al. *The Theory of Chaotic Attractors*. New York: Springer.
- Wang B, Yang H W, 2008. Hydrological issues in lateral boundary conditions for regional climate modeling: simulation of East Asian summer monsoon in 1998[J]. *Climate Dyn*, 31(4):477-490.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 31(2):287-301.
- Zou X L, Xiao Q N, 2000. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme[J]. *J Atmos Sci*, 57(6):836-860.