1	基于全球模式检验结果的海上台风初始场重建技术研
2	制和应用*
3	
4	邱金晶 陈锋 董美莹
5	浙江省气象科学研究所,杭州 310008
6	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
7	的评估结果表明: ECMWF 对路径预报总体优于 GFS, 而 GFS 对强度预报更具优
8	势。为提高台风数值预报性能,本文基于该评估结论提出了一种业务可行的合风
9	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
10	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,
11	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
12	初始场重建。针对近年14个影响浙江台风个例,应用了台风初始场重建技术的
13	中尺度数值天气预报业务模式的回报试验表明:(1)经过初始场重建后,模式预报
14	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
15	了台风路径和强度预报性能。(2)新方法的路径预报绝对误差较 GFS 驱动的中尺度
16	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
17	ECMWF 驱动的中尺度模式预报结果减少 1.7 m s ⁻¹ ,标准差降低 2.3 m s ⁻¹ 。对超强
18	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
19	台风暖心结构模拟均有较好的修正能力。
20	关键词: 台风初始场重建, 涡旋分离, 业务应用
21	中图分类号: P457.8

- 22
- 23

Development and Application of Typhoon Initial Field Reconstruction

*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

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

25

Technology over Sea Based on Evaluation Results of Global Models

QIU Jinjing CHEN Feng DONG Meiying

Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

27

26

28 Abstract: The evaluation results of ECMWF and GFS on the track and intensity 29 forecasts of typhoons affecting Zhejiang from 2016 to 2019 show that ECMWF is 30 better than GFS for track forecasting, and GFS has more advantages for intensity forecasting. On this basis, the paper proposes a feasible typhoon initialization scheme 31 to improve the performance of typhoon forecasting skill. Based on ECMWF and GFS 32 33 analysis fields and oceanic typhoon observation data, using typhoon vortex separation, the vortex field is obtained by separating the GFS analysis field, and after vortex 34 relocation and maximum wind speed adjustment procedure, it is superimposed with 35 the large-scale environmental field separated from the ECMWF analysis field to 36 37 realize the reconstruction of typhoon initial field. For 14 typhoons affecting Zhejiang in recent years, the hindcasting results of the mesoscale numerical weather forecast 38 model which use the new reconstruction scheme demonstrate that the new scheme 39 gives full play to the ECMWF's advantages in track forecasts and GFS's advantages 40 in intensity forecasts and improves the forecast accuracy of typhoon track and 41 intensity effectively. The absolute error of track forecast is reduced by 21 km and the 42 standard deviation is reduced by 26.6 km compared with the prediction of the 43 44 GFS-driven mesoscale model. Compared with the forecast result of the EC-driven mesoscale model, the absolute error of intensity forecast is reduced by 1.7 m s⁻¹ and 45 the standard deviation is reduced by 2.3 m s⁻¹. The analysis of the typical case of 46 Super Typhoon Lekima (2019) further indicates that the initial field reconstruction 47 48 technology has a better forecasting ability for atmospheric circulation characteristics 49 and typhoon's warm core structure.

50 Key words: typhoon initial field reconstruction, vortex separation, operational51 application

53 引言

54 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 55 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 56 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 57 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 58 报性能的一个关键所在(Lorenz,1965,2004)。能否在初始场中合理描述合风所处的 59 大气环流背景,并且较为准确地描述出台风的结构(这一过程称为合风涡旋初始 60 化),对台风路径和强度预报都显得尤为重要(Hendricks et al, 2013)。 61

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 62 通过动力和热力约束形成数值模式初始场的过程。由于合风生命史中绝大部分时 63 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。 64 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) 65 实现台风初始化(Kurihara et al, 1990; Lord, 1991; 王国民等, 1996)。Kurihara et 66 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 67 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 68 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 69 Xiao(2000)提出了 BDA(Bogus Data Assimilation)方案,把四维变分同化与 Bogus 相 70 71 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 72 73 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 74 75 小了初始场与模式不协调的问题(Hsiao et al,2010)。瞿安祥等(2009a, b)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 76 数值方案,该方案更多地是依靠数值模式自身的动力和物理过程来协调约束产生 77 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 78

79 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。

浙江是我国深受台风灾害影响的省份之一,提升台风数值预报精细化水平是 80 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 81 82 业务系统(Zhe-Jiang WRF ADAS Real time Modeling System, 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 83 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 84 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、2017 85 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 86 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 87 式资料各有优势的情形, Wang and Yang(2008)融合了 NECP/DOE R2 和 ERA40 两种 88 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。 89 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 90 (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 91 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 92 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。 93

94 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
95 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
96 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
97 预报性能,为精细化台风数值预报提供科技支撑。论文的结构安排如下:首先是
98 评估了两个全球模式对影响浙江台风的路径和强度预报结果,其次是介绍了台风
99 初始场重建方法与试验设计,第三节分析了模拟结果,最后是结论与讨论。

100 1 全球数值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 鲶鱼、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 模式每日 00 时和 12 时(世界时,下同)起报,产品垂直

106 层数为 19 层,空间分辨率为 0.125°×0.125°,时间分辨率为 3 h。GFS 模式起报
107 时间和产品时间分辨率与 ECMWF 模式相同,但垂直层数为 34 层,空间分辨率
108 为 0.5°×0.5°。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
109 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
110 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
111 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
112 心最低气压、2 分钟平均近中心最大风速。



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
4.0						

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 120 行定强,对全球数值模式 ECMWF、GFS 开展上述 14 个台风个例的路径和强度预 121 报性能评估。从路径上来看,对比近 4 年影响浙江台风的逐 6h 预报累计误差,, 122 有 64.3%(9 个)的个例, ECMWF 预报的台风路径优于 GFS 模式; 有 28.6%(4 个)的 123 个例, ECMWF 与 GFS 预报的台风路径相当; 仅有 7.1%(1 个)的个例, GFS 预报的 124 台风路径优于 ECMWF。图 2 给出了两个模式 0-72 h 台风路径和强度预报的误差 125 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 126 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 127 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 128 对 24-72 h 的台风路径预报, ECMWF 要明显优于 GFS, 平均误差值分别为 157 km 129 和 187 km。图 2b 显示 ECMWF 预报误差的标准差在 24-72 h 期间明显低于 GFS, 130 说明 ECMWF 的预报误差比 GFS 更为稳定(离散度更小)。从强度的逐 6h 预报累计 131 绝对误差来看,14个台风个例中有 64.3%(9个)的个例,GFS 预报的台风强度优 132 于 ECMWF; 有 7.1%(1 个)的个例, GFS 与 ECMWF 预报的台风强度相当; 仅有 133 28.6%(4 个)的个例, ECMWF 模式预报的台风强度优于 GFS。由图 2c 可知, GFS 134 和 ECMWF 对台风强度预报均存在低估, 0-72 h 平均误差分别为-4.4 m s⁻¹和-6.3 135

m s⁻¹,结合平均绝对误差(图 2d)可知,GFS 对 0-42 h 的台风强度预报要明显
优于 ECMWF。图 2e 表明 GFS 0-42 h 的强度预报离散度较 ECMWF 明显偏低,预
报更稳定。

139 综上所述, ECMWF 模式对影响浙江台风的路径预报总体优于 GFS,其原因
140 可能和 ECMWF 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
141 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
142 式进行了台风初始化处理(Liu et al,2006), ECMWF 未作相关处理,因此 GFS 对台
143 风强度预报把握更好,但仍存在初始强度估计偏低的问题。



150 2 重建方案与试验设计

151 2.1 台风初始场重建方案

152 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

153 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
154 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,
155 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、



172

$$a = \frac{1}{2} (1 - \cos^2 \frac{x}{n})^{-1}$$
 (2)

 173
 式中, 取m = 2,3,4,2,5,6,7,2,8,9,2, 先沿华向百沿经向做滤波,得到扰动场H₀

 174
 (3)对扰动场H₀做社形滤波分离出涡旋环流,公式如下:

 175
 $H_V(r, \theta) = [1 - E(r)][H_D(r, \theta) - H_D(r_0)]$ (3)

 176
 式中, $\overline{H_D(r_0)}$ 是H₀在台风尺度半径r₀处的角度下均,柱形滤波函数E(r)由会

 177
 式(4)计算得到。

 178
 $E(r) = \frac{exp[-(r_0 - r)^2/t^2] - exp[-r_0^2/t^2]}{1 - exp[-r_0^2/t^2]}$ (4)

 179
 式中, r为距离涡旋中心的半径, l为控制E(r)形状的参数, 4 × vpl = r_0 %.

 180
 (4)进一步计算科到大尺度环境场H_E

 181
 $H_E = H - H_V$ (5)

 182
 郑科到的涡旋环流场H_V的环流中心平移移动列入舰的音风中心位置, 社动

 183
 重定位后的涡旋环流场H_V的东流中心平移移动列入舰的音风中心位置, 社动

 184
 场H'.

 185
 2.1.2 最大风速调整技术

 186
 根据徐道生等(2019)提出的某大风速调整技术内案, 得到公式(6), 重新定位

 187
 以后的背景水平风场可写成

 188
 $(u' = u_E + u'_L)$ (6)

 189
 式中, n'和v提重定位后的消量场升的水平风场, u_E和v_E是大尺度环境场H_E

 190
 前水平风场, u'_2和v'_2 重定位后的消量成环流H'_0 h水平风场.

 191
 通过对涡旋为旱乘以系数身实现最大风速调整后的风场分量, 调整以后的最大风速

 192
 $(u'_c = u_E + \beta \times u'_c)$ (7)

 193
 式中, u'_c和v'_2 是重定位后的高旗车, u'_2 + (v_E + \beta × v'_V)^2 = V_{obs} (8)

 194
 等于观测风速v_c
 (1)

$$\beta = \frac{-(u_E u_V' + v_E v_V') + \sqrt{(u_E u_V' + v_E v_V')^2 - (u_V'^2 + v_V'^2)(u_E^2 + v_E^2 - V_{obs}^2)}}{(u_V'^2 + v_V'^2)}$$
(9)

198 值得注意的是,这里计算的是地面层的β,在实际应用时,需要对其乘以一199 个权重系数使得低层的风速做较大订正,而高层较小。

200 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 和图 4b 分别 201 为 8 月 8 日 12 时 ECMWF 和 GFS 的 850 hPa 全风场,经过涡旋分离,得到大尺度 202 环境场(图 4d、4e)和涡旋场(图 4g、图 4h),由图可知,两个模式的大尺度环境场 203 在台风中心附近主要为南风和东南风,而在涡旋场展示出了完整的气旋式环流, 204 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 205 是可行的。进一步对比得到, ECMWF 分离得到的大尺度环境场其南侧的西南季 206 风和北侧的偏东风气流较 GFS 更为强盛, 而 GFS 分离得到的涡旋场表征的台风中 207 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) 208 209 和近中心最大风速(62 m s⁻¹),将 GFS 的涡旋场进行重定位和最大风速调整,然后 叠加到 ECMWF 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 210 球模式全风场差值分布(图 4f 和图 4i)可知,经过最大风速调整后的重建初始 211 场对台风中心附近的气旋式环流明显强于 ECMWF, 略强于 GFS。同时, 重建初 212 始场对大尺度环流场较 GFS 有所调整。基于上述方法,对本文研究的 14 个台风 213 均进行了初始场重建 214



229 2.2 模式介绍和试验设计

230 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 10-55 °N, 80-130 °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(Jim énez et al,2012),长波、短波辐射选用 RRTMG

237 快速辐射传输方案(lacono et al,2008),不采用积云参数化方案。238 2.2.2 试验设计

239 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
240 风,开展如下三组回报试验: (1)TESTEC:利用 ECMWF 预报数据提供初、边界条
241 件,驱动 ZJWARMS; (2)TESTGFS:利用 GFS 预报数据提供初、边界条件,驱动
242 ZJWARMS; (3)TESTCOM:利用重建的 14 个台风初始场,结合 ECMWF 预报场作
243 为边界条件,驱动 ZJWARMS。

244 3 结果分析

245 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 246 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。 247 248 从路径上来看,对比近4年14个影响浙江台风的逐6h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) 249 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 0-72 250 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、图 5d 和图 5g 可知, 251 252 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 253 在第 60-72 h 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 254 组试验(TESTEC、TESTGFS 和 TESTCOM)所有预报时刻平均的路径误差分别为 122 255

km、148 km 和 127 km,标准差分别为 141.9 km、177.1 km 和 150.5 km。可见, 256 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 257 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), 258 259 对 TESTGFS 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 260 261 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 262 累计绝对误差小于 TESTEC 试验,另有 50%(7 个)的个例, TESTCOM 试验小于 263 TESTGFS 试验。由图 5b、图 5e 和图 5h 可知,经过最大风速调整后,TESTCOM 试 264 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 265 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 h 的台 266 风强度预报, TESTCOM 试验绝对误差改进 4 m s⁻¹ 以上, 标准差改进 6 m s⁻¹ 以上。 267 进一步计算得到,所有预报时刻平均的 TESTEC、TESTGFS 和 TESTCOM 试验预报 268 近中心最大风速平均绝对误差分别为 7.2 m s⁻¹、5.6 m s⁻¹和 5.5 m s⁻¹, 平均标准 269 差分别为 9.5 m s⁻¹、7.7 m s⁻¹和 7.2 m s⁻¹。可见, TESTCOM 试验预报近中心最大 270 风速平均绝对误差较 TESTEC 试验减少 1.7 m s¹,平均标准差较 TESTEC 试验降低 271 2.3 m s⁻¹。从中心最低海平面气压来看(图 5c、图 5f 和图 5i), TESTCOM 试验 0-72 272 h 预报较 TESTEC 试验更接近实况,预报更稳定。平均来看, TESTEC、TESTGFS 273 和 TESTCOM 预报最低气压平均绝对误差分别为 12.3 hPa、10.5 hPa 和 10.6 hPa, 274 平均标准差分别为 16.9 hPa、14.1 hPa 和 14.1 hPa。计算得到, TESTCOM 试验预 275 276 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 和图 277 5c),对 TESTEC 强度预报误差较大的台风个例,TESTCOM 试验得到有效改进。 278

279 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
280 TESTEC 试验相当,较 TESTGFS 试验有了较大改进; TESTCOM 试验的强度预报能
281 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
282 的模式预报结果兼顾了 ECMWF 的路径预报优势以及 GFS 的强度预报优势,有效
283 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。



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) the typhoon track, (b, e, h) the maximum wind speed near the center and (c, f, i) the minimum sea level pressure at the center under 0-72 h forecast time of three experiments.

292 3.2 台风 "利奇马" 个例分析

风"利奇马"2019年8月8日12时起报的三组试验结果为例,进 293 继续以 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 294 场重建的模式预报路径与实况最为接近,尤其是对 48-72 h 的预报结果, TESTCOM 295 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 296 297 差可知(图 6b 和图 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 m s⁻¹左 298 299 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。 300



309 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
310 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 588 dagpm 等
311 值线西伸脊点位置位于 124 °E, 33 °N 附近,与再分析资料得到的结果基本一致。
312 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
313 置较 8 日 12 时有所东退北抬,脊点位于 128 °E, 36 °N 附近, TESTEC 和 TESTCOM
314 两组试验准确预报出了副高的位置变化(图 7b、d), 588 dagpm 等值线西伸脊点

315 与图 7d 所示的位置接近,但图 7c 表明,TESTGFS 试验预报副热带高压整体偏弱,
316 副高西伸脊点大幅东撤至 135 ℃ 以东,正是从该时刻开始,TESTGFS 试验的路径
317 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
318 重建的中尺度模式预报对环流形势把握较好。



319

320 图 7 2019 年 8 月 10 日 00 时 500 hPa 位势高度: (a)再分析场、(b)TESTEC 预报场与分析场差
 321 值、(c)TESTGFS 预报场与分析场差值、(d)TESTCOM 预报场与分析场差值(红线,单位: dagpm,
 322 其中黑色加粗线为西太平洋副热带高压标志线 588 dagpm 线、红色加粗线为台风标志线 570
 323 dagpm 线,图中黑点为台风中心位置)

324 Fig.7 500 hPa geopotential height at 0000 UTC 10 August 2019 : (a) the reanalysis field,

- 326 TESTGFS forecast field and the reanalysis field, (d)difference between TESTCOM forecast field and
- 327 the reanalysis field (red lines, unit: dagpm, the balck bold line (588 dagpm) represents the mark
- 328 line of the western Pacific subtropical high, the red bold line (570 dagpm) and the black dot
- 329 indicate the mark line and the center of typhoon respectively in each panel)

^{325 (}b)difference between TESTEC forecast field and the reanalysis field, (c)difference between

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、 330 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 331 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-c 可知,经 332 333 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 m s⁻¹,大 风速区在垂向深厚发展,较TESTGFS试验(45.8 m s⁻¹)和TSETEC试验(38.8 m s⁻¹), 334 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 335 当,都达到了10K。从第6h的预报结果看(图8d-f),TESTCOM试验的最大风速 336 (43.3 m s⁻¹)及暖心结构(9.6 K)预报结果较 TESTEC 试验(35.1 m s⁻¹和 8.8 K)要强, 与 337 TESTGFS 试验(45.6 m s⁻¹ 和 9.4 K)接近。再对第 12 h 的结果进行分析(图 8g-i), 338 TESTCOM 试验的最大台风风速预报降至 42.2 m s⁻¹,温度距平为 8.1 K,同时 339 TESTGFS 试验为 41.1 m s⁻¹ 和 8.2 K,TESTEC 为 32.1 m s⁻¹ 和 6.6 K,TESTCOM 试验 340 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 341 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 342 构预报的改进相匹配。从12h以后的预报结果来看(图略), TESTCOM 试验对台风 343 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 344 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。 345



356 4 结论与讨论

357 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
358 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
359 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
360 要结论如下:

361 (1)ECMWF 模式对影响浙江台风的路径预报总体优于 GFS, 而 GFS 模式对台362 风强度预报更具优势。

363 (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
364 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
365 技术。

366 (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
367 初始化处理过的模式预报结果兼顾了 ECMWF 的路径预报优势和 GFS 的强度预报
368 优势,有效改进了台风的路径和强度预报性能。相较于 GFS 驱动的中尺度模式预
369 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
370 较于 ECMWF 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
371 1.7 m s⁻¹,标准差降低 2.3 m s⁻¹。对典型个例超强台风"利奇马"进一步分析表
372 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 373 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 374 还存在一定的不足,首先, 初始化方案依赖于 ECMWF 路径预报优于 GFS, GFS 375 强度预报优于 ECMWF 这一检验结论,因此对于不支持该结论的台风个例预报, 376 377 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, 目模式资料不局限于 ECMWF 和 GFS 全球模式 378 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 379 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 380 381 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 382 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 383 al,2018),改进台风业务数值预报准确率。 384

386 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 387 388 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 389 390 Zhejiang during 2011 with WRF and analysis of sensitivity to wet process[J]. J Zheijang Meteor, 33(3): 3-12 (in Chinese). (查阅所有网上资料, 未找 391 到本条文献英文翻译,请联系作者确认) 392 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 393 评定[J]. 气象, 44(4): 582-589. Chen G M, Zhang X P, Bai L N, et al, 2018. 394 Verification on forecasts of tropical cyclones over Western North Pacific in 395 2016[J]. Meteor Mon, 44(4): 582-589 (in Chinese). 396 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 397 评定[J]. 气象, 45(4): 577-586. Chen GM, Zhang X P, Bai L N, et al, 2019. 398

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: 401 20-40. Chen L S, Duan Y H, Song L L, et al, 2012. Typhoon Forecast and its 402 Disaster[M]. Beijing: Meteorological Press: 20-40 (in Chinese). (查阅所有 403 网上资料,未找到本条文献英文翻译,请联系作者确认) 404 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 405 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. 406 Duan Y H, Fang J, Cheng Z Q, et al, 2020. Advances and trends in tropical 407 cyclone research and forecasting: An overview of the ninth World 408 Meteorological Organization International Workshop on Tropical Cyclones 409 (IWTC-9)[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 537-550 (in Chinese). 410

- 411 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
- \$412 象, 42(11): 1410-1417. Guan Y, 2016. Performance verification of medium-range
- 413 forecast by T639, ECMWF and Japan Models from June to August 2016[J].
 414 Meteor Mon, 42(11): 1410-1417 (in Chinese).
- 415 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].
- 416 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).
- 420 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
 421 展, 29(3): 1013-1022. Ma L M, 2014. Research progress on China typhoon
 422 numerical prediction models and associated major techniques[J]. Prog Geophy,
 423 29(3): 1013-1022 (in Chinese).
- 424 瞿安祥, 麻素红, Liu Q F, 等, 2009a. 全球数值模式中的台风初始化 I :方案设计
 425 [J]. 气象学报, 67(5): 716-726. Qu A X, Ma S H, Liu Q F, et al, 2009a. The
- 426 initialization of tropical cyclones in the NMC global model Part I : Scheme
 427 design[J]. Acta Meteor Sin, 67(5): 716-726 (in Chinese).
- 428 瞿安祥, 麻素红, 李娟, 等, 2009b. 全球数值模式中的台风初始化 II :业务应用[J].
 429 气象学报, 67(5): 727-735. Qu A X, Ma S H, Li J, et al, 2009b. The initialization
- 430 of tropical cyclones in the NMC global model Part II : Implementation[J]. Acta
 431 Meteor Sin, 67(5): 727-735 (in Chinese).
- 432 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
- 433 象, 43(11): 1439-1445. Ren H C, 2017. Performance verification of
 434 medium-range forecasts by T639, ECMWF and Japan Models from June to
 435 August 2017[J]. Meteor Mon, 43(11): 1439-1445 (in Chinese).
- 436 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
 437 应用[J]. 热带气象学报,12(1): 9-17. Wang G M, Wang S W, Li J J, 1996. A
 438 bogus typhoon scheme and its application to a movable nested mesh model[J]. J

- 439 Trop Meteor, 12(1): 9-17 (in Chinese).
- 440 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
 441 案[J]. 气象学报,77(6): 1053-1061. Xu D S, Zhang B L, Zeng Q C, et al, 2019.
 442 A typhoon initialization scheme based on incremental analysis updates
- technology[J]. Acta Meteor Sin, 77(6): 1053-1061 (in Chinese).
- 444 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).
- 449 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,
 450 44(12): 1628-1634. Zhang D Y, Tian X Y, Jia P Q, 2018. Review on
 451 performance and index of tropical cyclone forecast[J]. Meteor Mon, 44(12):
 452 1628-1634 (in Chinese).
- 453 Cha D H, Wang Y Q, 2013. A dynamical initialization scheme for real-time forecasts
 454 of tropical cyclones using the WRF Model[J]. Mon Wea Rev, 141(3): 964-986.
- 455 Chen F, Dudhia J, 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with
 456 the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and
 457 sensitivity[J]. Mon Wea Rev, 129(4): 569-585.
- Hendricks E A, Peng M S, Li T, 2013. Evaluation of multiple dynamic initialization
 schemes for tropical cyclone prediction[J]. Mon Wea Rev, 141(11): 4028-4048.
- 460 Hong S Y, Pan H L, 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a
 461 medium-range forecast model[J]. Mon Wea Rev, 124(10): 2322-2339.
- 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.
- 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):

467 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.
- Jim énez 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.
- 473 Kurihara Y, Bender M A, Tuleya R E, et al, 1990. Prediction experiments of hurricane
- 474 Gloria (1985) using a multiply nested movable mesh model[J]. Mon Wea Rev,
 475 118(10): 2185-2198.
- 476 Kurihara Y, Bender M A, Ross R J, 1993. An initialization scheme of hurricane
 477 models by Vortex specification[J]. Mon Wea Rev, 121(7): 2030-2045.
- 478 Kurihara Y, Bender M A, Tuleya R E, et al, 1995. Improvements in the GFDL
 479 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.
- 482 Liu Q F, Surgi N, Lord S, et al, 2006. Hurricane initialization in HWRF model[R].
- 483 NCEP/EMC office note. (查阅所有网上资料,未找到本条文献信
 484 息,请联系作者确认)
- 485 Lord S J, 1991. A bogussing system for vortex circulations in the National
 486 meteorological center global forecast model[C]//Preprints, 19th Conference on
 487 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].
- 489 Tellus, 17(3): 321-333.
- 490 Lorenz E N, 2004. Deterministic nonperiodic flow[M]//Hunt B R, Li T Y, Kennedy J
 491 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].

- 494 Climate Dyn, 31(4): 477-490.
- 495 Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological
 496 Administration tropical cyclone database[J]. J Atmos Ocean Technol, 31(2):
 497 287-301.
- 498 Zou X L, Xiao Q N, 2000. Studies on the initialization and simulation of a mature
- 499 hurricane using a variational bogus data assimilation scheme[J]. J Atmos Sci,
 500 57(6): 836-860.