

黄燕燕,陈子通,冯业荣,等,2024.南海台风模式对台风利奇马快速增强预报能力研究[J].气象,50(5):532-546. Huang Y Y, Chen Z T, Feng Y R, et al, 2024. Research on the forecasting capability of CMA-TRAMS model for rapid intensification of Typhoon Lekima[J]. Meteor Mon, 50(5):532-546(in Chinese).

南海台风模式对台风利奇马快速增强预报能力研究*

黄燕燕¹ 陈子通¹ 冯业荣¹ 张艳霞¹ 徐道生¹ 郑彬¹ 靳卫卫²

1 中国气象局广州热带海洋气象研究所/区域数值天气预报重点实验室,广州 510640

2 中海油能源发展股份有限公司安全环保分公司,天津 300452

提 要: 针对台风利奇马(1909),分析中国气象局南海台风模式(CMA-TRAMS)和欧洲中期天气预报中心高分辨率模式(HRES)对台风快速增强的业务预报情况,并基于CMA-TRAMS,从水平分辨率、初始场和边界条件、物理参数化方案等角度设计并开展数值敏感性试验。CMA-TRAMS和HRES对“利奇马”增强具有一定预报能力,但对快速增强的速度预报明显低于实况,均不能满足24 h和12 h快速增强标准,可达到6 h快速增强标准。CMA-TRAMS采用3 km分辨率对“利奇马”移动路径和强度变化的预报效果优于9 km分辨率,但未改进快速增强预报效果;采用3 km嵌套9 km的方案,模式对台风快速增强的预报效果明显提升。采用MRF边界层参数化方案对台风路径、强度、快速增强的预报效果总体优于YSU方案。海温参数化结合32层垂直分辨率的初始场和边界条件的方案明显提高了快速增强预报效果,预报快速增强的频次、增强的最大速度更接近实况。分析表明,海温参数化方案使海气温差增大,在短时间内对大气、海洋之间的热量输送和交换有明显影响,海洋向大气输送的感热通量和台风内核区的潜热通量加强使内核更暖湿、气压负倾向增大,是预报效果改进的主要原因。

关键词: 台风,快速增强,可预报性,CMA-TRAMS,数值模拟,海温参数化方案

中图分类号: P456, P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.061601

Research on the Forecasting Capability of CMA-TRAMS Model for Rapid Intensification of Typhoon Lekima

HUANG Yanyan¹ CHEN Zitong¹ FENG Yerong¹ ZHANG Yanxia¹
XU Daosheng¹ ZHENG Bin¹ JIN Weiwei²

1 Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction/Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510640

2 Safety and Environmental Protection Branch, CNOOC Energy Technology and Services Ltd., Co., Tianjin 300452

Abstract: In this paper, the operational forecasts of the rapid intensification (RI) of Typhoon Lekima (1909) by the Tropical Regional Atmosphere Model for the South China Sea of China Meteorological Administration (CMA-TRAMS) and the high-resolution products of the ECMWF atmospheric model (HRES) are analyzed. Numerical sensitivity experiments are designed and carried out from the perspectives of horizontal resolution, initial and boundary conditions, and physical parameterization schemes. It is found that CMA-TRAMS and HRES both can predict the strengthening of Typhoon Lekima to some extent, but the predicted strengthening speed is obviously lower than observation. The two models both fail

* 广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515011870)、国家自然科学基金项目(42275123、U2142213)、广东省水利厅科技创新项目(2022-01)、广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2021M01)和中国海洋石油集团有限公司科技项目(CNOOC-KJ135ZDXM35HFAQ 2019-04)共同资助

2023年2月1日收稿; 2024年2月8日收修定稿

第一作者:黄燕燕,主要从事数值预报、台风、暴雨研究. E-mail: yyhuang@gd121.cn

通讯作者:陈子通,主要从事数值预报、模式动力框架、物理过程研究. E-mail: ztchen@gd121.cn

to meet the 24 h and 12 h RI standards, but can reach the 6 h RI standard. The experiment using 3 km horizontal resolution produces better forecasts of track and intensity of Lekima than that using 9 km resolution based on CMA-TRAMS, but it cannot improve the RI forecast. Nevertheless, the prediction of typhoon RI is significantly improved if the scheme has 3 km resolution nested to 9 km resolution. The experiment using the MRF boundary layer parameterization scheme generally performs better in forecasting typhoon track, intensity and RI than that using the YSU scheme. When the initial and boundary conditions with higher vertical resolution are used, combined with the sea surface temperature (SST) parameterization scheme, the RI forecast is obviously improved in the frequency and maximum speed. Analyses indicate that the SST parameterization scheme increases the difference between sea and air temperature, affecting the heat transport and exchange significantly. The enhancement of sensible heat flux from the ocean to the atmosphere and the enhancement of latent heat flux in the inner-core section of typhoon increase the temperature and humidity and magnify the negative tendency of pressure.

Key words: tropical cyclone, rapid intensification (RI), predictability, CMA-TRAMS, numerical simulation, SST parameterization scheme

引言

台风是影响我国的主要灾害之一,其伴随的狂风、暴雨、风暴潮对我国影响巨大(陈联寿和丁一汇,1979)。近20年来台风的路径预报进步明显,但强度预报进展缓慢,仍然是大气科学领域尚未解决的重要科学问题之一(端义宏等,2005;雷小途等,2019;钱奇峰等,2021)。Titley and Elsberry(2000)的研究指出,24 h强度误差很多是由于快速增强过程的预报误差导致的。吕心艳等(2021)指出,业务工作中对台风快速增强预报能力有限,不能准确预报出快速增强过程。台风快速增强一般用最大风速和中心气压的变率来表示(Holliday and Thompson,1979;Kaplan and DeMaria,2003;梅耀和余锦华,2016)。台风快速增强一直是业务预报的难点(许映龙和黄奕武,2017;龚俊强,2022;李泽椿等,2020;董林等,2020;周冠博等,2022),尤其是近海快速增强。我国近海海域主要包括南海、东海、黄海及沿岸(郑峰等,2016)。台风移近沿海后强度往往减弱,但有一部分台风却突然增强,由于其距离登陆时间短,不仅容易造成低估强度而防御不足的情况,强度突增还可能带来移动路径的突然变化,给预报带来巨大挑战。

出于台风预报预警和防灾减灾的需要,科学家从不同角度针对台风强度变化和近海快速增强开展了研究,并得到很多有益的结论。很多研究表明,模式分辨率对台风强度的影响较大,提高水平和垂直

分辨率能改善强度预报效果(Sun et al,2013;麻素红等,2021)。边界层的感热、潜热与动力的垂直输送对台风发生发展起重要作用,不同的边界层参数化方案对台风结构、强度的模拟有显著差异(Wang and Ying,2020)。王科和吴立广(2019)构造不同高度的初始涡旋暖心进行数值试验,结果表明初始涡旋垂直结构对强度发展有重要影响。徐祥德(1991)认为台风系统强度突变不仅与对流加热、耗散因子相关,还与系统外界热量、动量平流、下垫面潜热、感热输送结构相关。夏友龙等(1995)研究指出,非绝热加热是影响台风强度突变的重要因子。观测表明,海面温度(SST)是洋面上台风强度的关键决定因子(曾智华等,2009)。于玉斌和姚秀萍(2006)通过统计给出了台风快速增强的标准,分析西北太平洋发生快速增强台风的气候特征。余晖等(2002)指出,对流层上部的环境流场和台风外流之间的相互作用可能对我国台风近海快速增强至关重要。一些学者基于模式针对台风个例进行数值模拟,如郑秀丽等(2020)基于WRF模式采用多重网格嵌套模拟个例台风与飓风的快速增强过程,董美莹等(2021)探讨了ECMWF驱动场水平风场谱逼近技术对浙江台风精细化预报性能的影响,Huo et al(2020)针对台风天鸽研究了暖水及其负反馈在快速增强过程中的作用。陈颖珺等(2009)和赖巧珍等(2013)的研究表明台风强度对SST变化十分敏感,台风中心小的SST变化会引起台风潜热的大改变,直接影响强度。王坚红等(2012)采用随时间变化的海温场(卫星反演观测),改善对台风路径和强度的模拟。

Zeng and Beljaars(2005)建立海温参数化方案并应用到欧洲中期天气预报中心模式,模拟的 SST 可以反映静止卫星观测到的 SST 日变化特征。Zhang et al(2022)将前人提出的海温参数化方案与中国气象局南海台风数值预报系统(CMA-TRAMS)耦合,发现虽然二者预报的 SST 存在一定差异,但台风强度预报误差的差异并不显著。不少学者开始尝试用海-气或海-气-浪耦合模式来预报台风(Braun et al, 2016;雷小途等,2019),结果显示,由于耦合作用引起的 SST 降低使得强度预报偏弱。由于海气耦合模式的计算量巨大,业务模式中采用的不多。

以往研究对台风快速增强的影响因子、特征、机理等有一定认识,明确 SST、非绝热加热等是影响台风强度突变的重要因素,但对目前业务数值模式预报台风快速增强的能力水平还不甚了解,对影响数值模式台风增强预报能力的敏感因子尚不确定。因此,选取 2019 年台风利奇马为例,分析 CMA-TRAMS 对“利奇马”快速增强的业务预报水平,并针对不同水平分辨率、边界层物理方案、垂直分辨率的初始场和边界条件(以下简称初边条件),以及有无海温参数化方案等开展敏感性试验,尝试找出影响数值模式强度预报(尤其快速增强预报)的敏感因素和提高台风强度预报能力的模式配置方案,为模式技术改进提供线索。

1 模式和资料

1.1 中国气象局南海台风模式

中国气象局南海台风模式(CMA-TRAMS;陈德辉和沈学顺,2006;陈子通等,2020;黄燕燕等,2018;徐道生等,2019)是基于原 GRAPES 区域模式发展起来的非静力经纬度网格模式,采用半隐式半拉格朗日的时间积分方案,经纬度网格点的设计采用 Arakawa-C 网格,垂直方向采用 Charney-Philips 分层设置,垂直坐标为高度地形追随坐标;模式采用 MRF 边界层方案、NSAS 积云参数化方案(徐道生等,2015)、WSM6 微物理参数化方案、SLAB 陆面过程方案、SWRAD 短波辐射方案以及 RRTMG 长短波辐射方案,侧边界采用松弛边界条件来处理;模式采用气候态的 SST,在预报时效中 SST 不变。

CMA-TRAMS 为区域模式,覆盖范围为 $0.8^{\circ}\sim 50.5^{\circ}\text{N}$ 、 $81.6^{\circ}\sim 160.8^{\circ}\text{E}$,分辨率为 9 km,垂直方向

为 65 层,每天在 00 时和 12 时(世界时,下同)提供未来 7 d 的预报产品。

1.2 欧洲中期天气预报中心大气高分辨率模式

欧洲中期天气预报中心大气高分辨率模式(HRES)是静力全球模式,采用半隐式半拉格朗日的时间积分方案,在垂直方向使用有限元格式,在水平方向使用简化高斯网格。积云对流方案是基于 Tiedtke(1989)描述的一种整体质量通量方案,考虑了深层、浅层和 中层对流(Bechtold et al, 2008; Bechtold et al, 2014)。云参数化方案基于 Tiedtke(1993)方案,但增强了混合相云和预测降水的考虑,包含 6 个水物质相关的预测变量(Forbes and Tompkins, 2011; Forbes et al, 2011)。HRES 使用了快速辐射传输模型 RRTM 方案(Mlawer et al, 1997; Iacono et al, 2008)和 TESSEL 陆地表面交换方案(Balsamo et al, 2009)。此外,采用了 SST 诊断方案(Zeng and Beljaars, 2005)在模式积分过程预报 SST。

HRES 为全球模式,分辨率约为 10 km,垂直方向为 137 层,每天在 00 时、06 时、12 时和 18 时提供未来 10 d 的高分辨率预报。

1.3 资 料

本文采用中国气象局业务定位台风报文资料来研究台风利奇马,台风报文包含定位信息、海平面气压、最大风速等。HRES 的分析数据和预报数据(水平分辨率都为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$,垂直方向为 17 层标准等压面)分别作为数值试验的初始场和边界条件。

2 台风利奇马快速增强与预报分析

2.1 台风利奇马快速增强

台风利奇马于 2019 年 8 月 4 日 09 时正式编号,5 日 18 时加强为强热带风暴,6 日 18 时、7 日 09 时、7 日 14 时分别加强为台风、强台风、超强台风,在 48 h 内由强热带风暴级快速增强至超强台风级,8 日强度达最大,随后缓慢减弱。5—8 日和 6—7 日分别为其加强期和快速加强期,快速增强过程台风中心最大 24 h 降压达 50 hPa,最大风速 24 h 增速达 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2 CMA-TRAMS 和 HRES 的业务预报

为了更好了解 CMA-TRAMS 目前的预报水平及其与 HRES 的差距,图 1 给出台风利奇马发展期间海平面气压演变及 HRES、CMA-TRAMS 不同时次预报情况。从“利奇马”生成(4 日 12 时)到最大强度(8 日 18 时)期间共有 9 次预报,HRES 和 CMA-TRAMS 不同时次预报分别记为 H1~H9、T1~T9。由图 1 可知,2 个模式均报出“利奇马”前期持续降压、后期增压的过程,但 2 个模式对其强度预报均偏弱,CMA-TRAMS 在 5 日 12 时、6 日 00 时 2 个时次的预报(T3、T4)优于 HRES,气压增强较快;HRES 在 7 日 00 时的预报(H6)为前期增强、后期减弱的演变,达最大强度的时间与观测接近,而 CMA-TRAMS 的 T6 预报“利奇马”持续增

强,虽然最大强度达 928 hPa,更接近观测最大强度,但增强较慢,最大强度时间比观测迟约 24 h。总体而言,中期 HRES 预报快速增强、减弱的转折时间更接近观测,而 CMA-TRAMS 预报快速增强开始的时间偏早、转为减弱的时间则比观测稍有延迟。

以下基于台风快速增强的标准进一步对比评估模式的预报效果。目前台风快速增强的标准一般都是用最大风速和中心气压的变率来表示,不同标准的差异主要在于各标准评判时段的长短。如 Holli-day and Thompson(1979)把 24 h 降压 42 hPa 作为评判标准(记为 RIP-24 h);Kaplan and DeMaria (2003)则定义为最大风速在 24 h 内增加 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (记为 RIV-24 h);阎俊岳等(1995)用 12 h 风速变化 $\Delta V \geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 来定义近海台风快速增强(记为

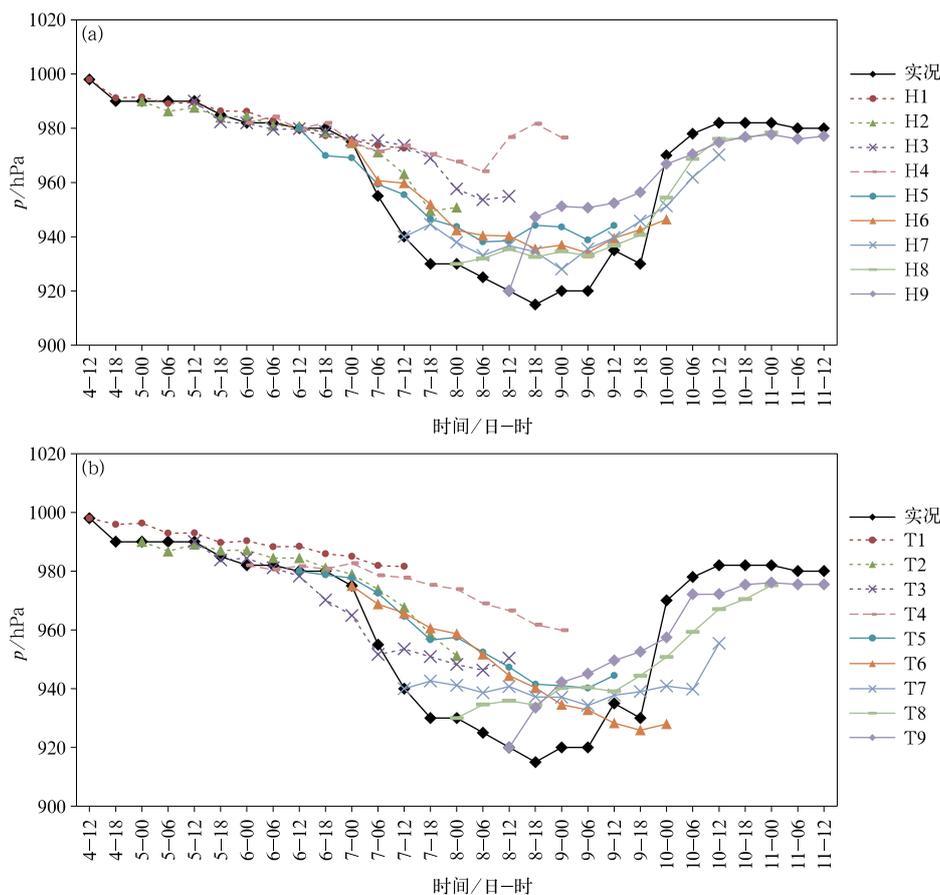


图 1 2019 年 8 月 4 日 12 时至 11 日 12 时(a)HRES、(b)CMA-TRAMS 不同时次预报和实况的海平面气压演变

Fig. 1 Evolution of sea level pressure predicted by (a) HRES and (b) CMA-TRAMS during the development of Typhoon Lekima and the observation

RIV-12 h);于玉斌(2007)定义 TC 6 h 变压 $\Delta p \leq -1.77$ hPa 为台风快速增强标准(记为 RIP-6 h)。9 次预报(72 h 时效、逐 6 h 统计,下同)共 81 个样本,均未达到 RIP-24 h、RIV-24 h 标准,HRES 的 24 h 最大降压 32.6 hPa、最大增速 $14.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,CMA-TRAMS 的 24 h 最大降压 29.5 hPa、最大增速 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。以 RIV-12 h 为标准,HRES 和 CMA-TRAMS 的 12 h ΔV 最大值分别为 $9.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $8.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (实况为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),均未达到阈值。以 RIP-6 h 为标准,HRES 有 7 次达到该标准,最大增强速度为 $-2.38 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$,CMA-TRAMS 有 5 次达到该标准,最大增强速度为 $-2.22 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$ (同样本统计,实况有 20 次达到该标准,最大增强速度为 $-3.33 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$)。2 个模式最早均提前 36 h(5 日 00 时的预报)报出“利奇马”将发生快速增强(实况是在 6 日 12 时发生快速增强)。

由上可知,相比于 CMA-TRAMS,HRES 对“利奇马”快速增强预报表现出一定优势。CMA-TRAMS 目前无海温参数化方案,而是采用气候态海温,模式积分过程中海温不变,而 HRES 采用了 SST 诊断方案,模式积分过程海温是变化的,有利于促进台风强度的动态响应,因此将考虑在 CMA-

TRAMS 中引入海温参数化方案。

综上所述,CMA-TRAMS 和 HRES 均不能在长时段内(尤其 24 h)保持快的增强速度,不能达到对应标准阈值,造成快速增强过程漏报。采用 RIP-6 h 标准,可以较好识别出快速增强过程,建议在业务预报中采用该标准,以更好地为台风快速增强预报预警服务。同时,不论是 CMA-TRAMS,还是 HRES,目前对“利奇马”快速增强预报能力都较低,台风最大强度和快速增强的速度均远低于实况。那么是否有可能通过提高分辨率、改善模式初边条件、完善物理过程等途径提高模式对快速增强过程的预报能力?下文将通过敏感性数值试验,分析不同因素对快速增强预报的影响,为模式技术改进提供线索和依据,对敏感试验快速增强预报的评估将主要基于 RIP-6 h 标准。

3 数值试验与结果分析

3.1 数值试验设计

不同模式方案数值试验相关参数设计见表 1。

由于控制试验 C 的初边条件由 HRES 分析和

表 1 不同模式方案数值试验设计

Table 1 Design of numerical experiments for different model schemes

| 试验简称 | 分辨率 | 物理方案 | 初始场 | 边界条件 |
|------|--------------|------------|---------------|---------------|
| C | 9 km | MRF | HRES 分析数据 | HRES 预报数据 |
| R1 | 3 km | MRF | HRES 分析数据 | HRES 预报数据 |
| R2 | 3 km 嵌套 9 km | MRF | 试验 C 17 层分析数据 | 试验 C 17 层预报数据 |
| R3 | 3 km 嵌套 9 km | YSU | 试验 C 17 层分析数据 | 试验 C 17 层预报数据 |
| R4 | 3 km 嵌套 9 km | MRF | 试验 C 32 层分析数据 | 试验 C 32 层预报数据 |
| R5 | 3 km 嵌套 9 km | YSU | 试验 C 32 层分析数据 | 试验 C 32 层预报数据 |
| R9 | 3 km | MRF,有海温参数化 | HRES 分析数据 | HRES 预报数据 |
| R10 | 3 km 嵌套 9 km | MRF,有海温参数化 | 试验 C 32 层分析数据 | 试验 C 32 层预报数据 |
| R11 | 3 km 嵌套 9 km | YSU,有海温参数化 | 试验 C 32 层分析数据 | 试验 C 32 层预报数据 |

预报数据提供,考虑到试验 C 与试验 R1 都是采用 CMA-TRAMS,采用试验 C 的分析数据和预报数据作为初边条件可能与预报模式更协调,故设计试验 R2 分析嵌套方案是否能改善预报效果。

台风初始结构对台风强度发展有显著影响,中低层大气具有更高垂直分辨率的初边条件有利于更好描述台风初始结构和背景信息。设计垂直 17 层和 32 层初边条件的对比试验,前者包含 17 层标准等压面(1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa)数据;后者主要

增加了中低层的垂直分辨率,300 hPa 以下包含 22 层等压面(1000、975、950、925、900、875、850、825、800、775、750、725、700、675、650、625、600、550、500、450、400、350 hPa)数据。R2 和 R4、R3 和 R5 对比可反映初边条件垂直分辨率的影响。

由于现有不同边界层方案对台风强度预报差异显著,对快速增强预报孰优孰劣尚不清楚。CMA-TRAMS 采用较多的是 MRF 和 YSU 方案。YSU 方案与 MRF 方案的主要区别是增加了显式处理的夹卷过程,从而增加了热力自由对流的湍流混合,降

低了动力强迫的对流混合,同时考虑了动量的非局地混合(王晨稀,2013)。在业务应用中 MRF 方案一般对降水的形态分布模拟较好,YSU 方案对流强度较强、降水量级较大,那么在台风快速增强这种强对流发展过程是否采用 YSU 方案更有利?因此,设计不同边界层方案的对比试验,R2 和 R3、R4 和 R5、R10 和 R11,可反映 MRF 和 YSU 两种边界层方案的差异。

台风快速增强的能量主要来自海洋,SST 的变化对台风强度变化有重要影响,而 CMA-TRAMS 采用气候态 SST,不利于描述快速增强过程。在此针对台风利奇马,结合提高初边条件的垂直分辨率,对比有、无海温参数方案对快速增强预报效果的影响。所采用的海温参数化方案考虑海气界面感热、潜热交换、太阳辐射、海洋热容量、海面摩擦速度等影响,通过积分一维热传导方程预报 SST(Zhang et al,2022)。R1 和 R9、R4 和 R10、R5 和 R11 对比可反映海温参数化方案的影响。

选取 2019 年 8 月 6 日 12 时为起报时次进行数值模拟,积分时长为 72 h。选择该时次是因为此时次“利奇马”开始快速增强,模式边界和初始场可能包含更多有利于快速增强的环境条件和台风结构的信息,更有可能报出其快速增强。

3.2 敏感试验结果分析

因为在台风业务预报中,强度预报的改进不能以路径预报大幅降低为代价,所以本部分试验分析同时关注强度和路径的预报情况。

3.2.1 不同水平分辨率对比试验

由图 2a 可见,3 个试验均预报出台风利奇马持续增强后减弱的趋势,但最大强度均明显偏弱,45 h 之前 R2 预报强度比 C、R1 接近实况,后期强度误差大于 C 和 R1。C、R1 和 R2 的最大 24 h 变压分别为 -28.9 、 -23.9 、 -30.7 hPa,均不满足 RIP-24 h 判据,且远小于实况(-50.0 hPa)。对比各试验预报的 6 h 强度变化和实况(图 2b),R2 在 15、18、21、24 h 的 4 个时次 6 h 变压均满足 RIP-6 h 判据,预报出其持续快速增强,试验 C 在 12 h 和 15 h 的 2 个时次满足 RIP-6 h 判据,R1 则在 9 h 报出快速增强,C、R1、R2 最大 6 h 变压分别为 -10.1 、 -10.9 、 -9.7 hPa(实况为 -20.0 hPa),明显小于实况。48 h 之前持续增强时段 C、R1、R2 平均强度误差分别为 12.7、13.6、11.3 hPa,54 h 后减弱时段

R2 减弱速度最快、更接近实况,但由于前期三者最大强度均偏弱,后期减弱快反而导致强度偏弱更明显、后期强度误差较大。由图 2c 可知,无论 3 km 还是 9 km 分辨率,CMA-TRAMS 预报“利奇马”路径均与实况误差不大,36 h 后 R1 预报路径最接近实况。3 个试验的 72 h 路径误差分别为 118.1、54.2、160.4 km。总体强度演变的趋势、增强时段强度预报 R2 最好,后期 R2 路径预报误差较大。

综上所述,相比于 RIP-24 h 判据,采用 RIP-6 h 判据 CMA-TRAMS 可报出快速增强,但增强幅度远低于实况。在快速增强预报上,3 km 分辨率并未表现出明显优势,3 km 嵌套 9 km 的方案效果较好。嵌套方案 R2 效果较好的原因在于其初边条件(试验

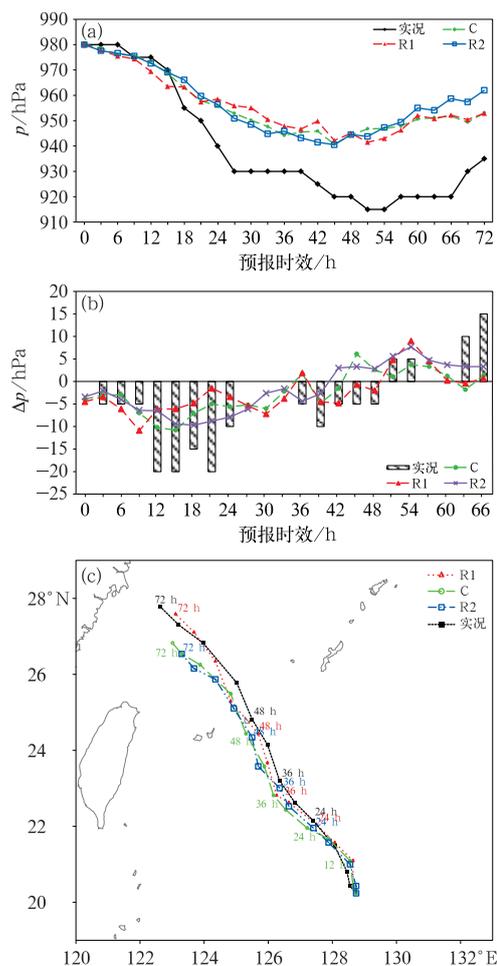


图 2 观测与试验 C、R1 和 R2 预报的 2019 年 8 月 6 日 12 时至 9 日 12 时台风利奇马 (a)中心气压,(b)6 h 中心变压和(c)路径
Fig. 2 Observed and simulated (a) central pressure, (b) 6 h central pressure change and (c) track of Typhoon Lekima in experiments C, R1 and R2 from 1200 UTC 6 to 1200 UTC 9 August 2019

C 提供)与 CMA-TRAMS 更协调,其热动力条件更有利于促进台风的增强;另外,因 CMA-TRAMS 长时效的形势预报精度不及 HRES,R2 边界条件形势的偏差使得受引导气流影响较大的路径预报误差增大。

3.2.2 不同边界层方案对比试验

前期 R2 和 R3 预报的中心气压基本相当,快速增强过程 R2 中心气压更接近实况(图 3a),有 4 个时次(15、18、21、24 h)6 h 变压满足 RIP-6 h 判据,6 h 最大降压为 -9.7 hPa(图 3b),预报出 7 日“利奇马”持续快速增强过程,24 h 最大降压为 -23.9 hPa; R3 有 3 个时次(15、18、24 h)满足 RIP-6 h 判据,6 h 最大降压为 -12.5 hPa(15 h),24 h 最大降压为 -28.9 hPa。2 个试验增强速度均慢于实况,YSU 方案台风的最大增强速度比 MRF 方案稍快,并且 2 个试验预报路径相差不大(图略)。此外,R4 和 R5、R10 和 R11 模拟结果的对比,均可反映 MRF 和 YSU 两种边界层方案的预报差异。其中,对快速增强过程和台风强度的预报,R5 略好于 R4(图 4),R10 优于 R11(图 5)。

由上可知,总体上 MRF 方案对“利奇马”持续快速增强和 6 h 变压演变趋势的预报优于 YSU 方案,

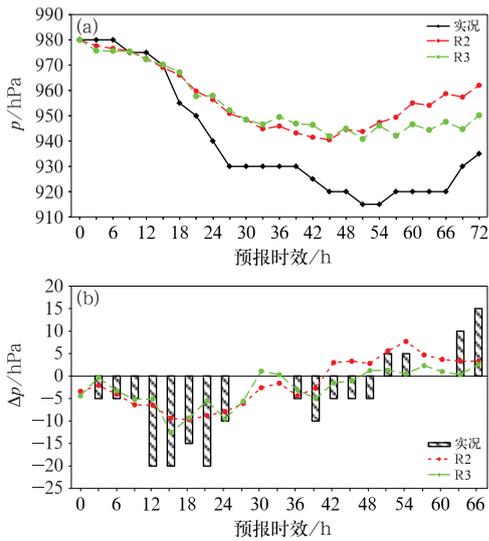


图 3 观测与试验 R2 和 R3 预报的 2019 年 8 月 6 日 12 时至 9 日 12 时台风利奇马 (a)中心气压,(b)6 h 中心变压

Fig. 3 Observed and simulated (a) central pressure and (b) 6 h central pressure change of Typhoon Lekima in experiments R2 and R3 from 1200 UTC 6 to 1200 UTC 9 August 2019

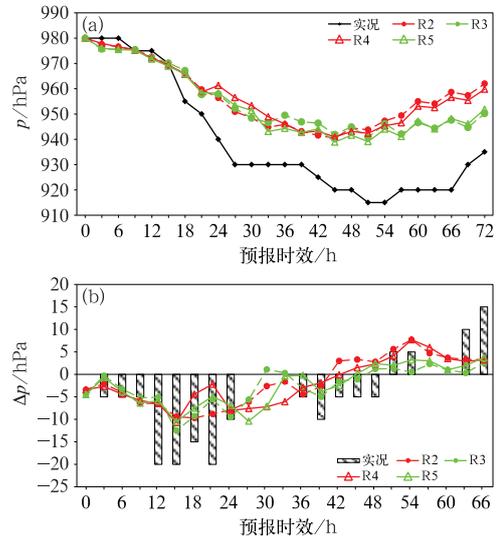


图 4 观测与试验 R2、R3、R4 和 R5 预报的 2019 年 8 月 6 日 12 时至 9 日 12 时台风利奇马 (a)中心气压,(b)6 h 中心变压

Fig. 4 Observed and simulated (a) central pressure and (b) 6 h central pressure change of Typhoon Lekima in experiments R2, R3, R4 and R5 from 1200 UTC 6 to 1200 UTC 9 August 2019

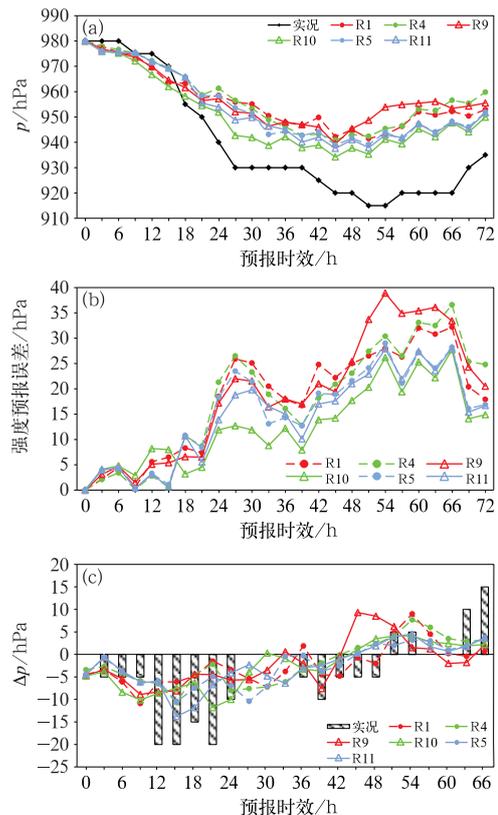


图 5 观测与各试验预报的 2019 年 8 月 6 日 12 时至 9 日 12 时台风利奇马 (a)中心气压, (b)强度预报误差和(c)6 h 中心变压

Fig. 5 Observed and simulated (a) central pressure, (b) intensity error and (c) 6 h central pressure change of Typhoon Lekima in each experiment from 1200 UTC 6 to 1200 UTC 9 August 2019

但YSU方案可以达到更大的降压幅度和增强速度。YSU方案由于增加了热力自由对流的湍流混合,使台风区域感热通量增多(因感热通量远大于潜热通量,潜热通量差异忽略不计),一定时段内为台风增强提供的能量更多,因而可达到的降压幅度更大。试验结果亦表明,CMA-TRAMS对台风发展的整体预报不及MRF方案,与上文提及的对降水系统的预报性能相似,这与模式中对流参数化等其他物理方案匹配有关。在集合预报系统中可考虑将其作为成员之一,为台风增强速度的预报提供参考。

3.2.3 不同垂直分辨率的初边条件对比试验

相较于R2和R3,R4和R5台风中心最低气压较接近实况(图4a)。在台风利奇马持续快速增强—维持—再次快速增强—减弱的强度变化过程中(图4),R2报出15~24 h持续快速增强,但未报出第二阶段快速增强过程,R3、R4和R5报出2次快速增强,但第一阶段快速增强维持的时间偏短,第二阶段快速增强起始时间偏早。R4和R5预报的台风最大强度较接近实况。2组对比试验中,R2和R4预报路径接近,试验R5中后期路径比R3稍接近实况(图略)。综上所述,仅提高初始场和侧边界场的垂直分辨率,模式对台风强度和快速增强预报的改进不显著。徐道生等(2020)提高初边条件的垂直分辨率改进了模式对台风内部中小尺度对流系统引起的降水预报,由于台风快速加强需要台风环流内较大尺度的能量输送,增加初边条件中低层垂直分辨率,虽然提高了中低层大气初始状态和后续强迫的描述精度,使台风最大强度更接近实况,但不足以支撑快速增强过程短时段、较大尺度的能量供给,因而对快速增强预报改进不明显。

3.2.4 有无采用海温参数化方案对比试验

前期工作曾分别在采用17层初边条件的试验

C、R2和R3基础上采用了海温参数化方案加以对比,3组试验两两之间的强度演变趋势大体一致,采用海温参数化方案后对快速增强过程台风强度和增强速度的预报没有明显改进(图略),故在此不赘述。

以下对比R9和R1(3 km分辨率、HRES初边条件)、R10和R4(MRF方案,32层初边条件)、R11和R5(YSU方案,32层初边条件)3组试验有/无采用海温参数化方案的预报差异。快速增强期间R9、R10和R11降压更快,台风强度比未采用海温参数化的R1、R4和R5更接近实况(图5a),强度预报误差明显减小(图5b),尤其是R10。由图5c可见,R10报出第一阶段持续快速增强,第二阶段短暂快速增强的2次过程,对台风持续快速增强模拟较好,但快速增强的起始时间稍偏早,R11预报的6 h降压幅度最大,达 $-2.3 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$,与3.2.2小节“YSU方案降压幅度大于MRF方案”的结论一致。R9、R10分别有3次、5次满足RIP-6 h标准(实况有6次),比R1、R4(均1次)明显增多,R11、R5均为2次满足RIP-6 h标准。

表2给出各试验预报的路径误差和强度误差。采用海温参数化后,R9路径误差比R1增大,强度误差前期减小、后期增大;R10路径误差和强度误差都比R4明显减小,24 h、72 h强度误差分别减小约13 hPa、10 hPa;R11强度误差比R5减小,尤其前期快速增强阶段,路径误差前期减小,后期有所增大。此外,R10的72 h路径误差虽然相比于R4明显减小,与HRES为初边条件的R1和R9相比,48 h路径误差也减小,但72 h路径误差比R1和R9增大,这在9 km模式为初边条件的R2(72 h路径误差为160.4 km)和采用32层初边条件的R5、R11也表现明显(主要为后期移速偏慢),此与9 km模式提供的“利奇马”初边条件精度有关,在3.2.1小节也提及。

表2 各试验24、48、72 h预报时效台风利奇马路径误差和强度误差
Table 2 Track error and intensity error of Typhoon Lekima in each experiment
with lead time of 24 h, 48 h and 72 h

| 试验 | 路径误差/km | | | 强度误差/hPa | | |
|-----|---------|------|-------|----------|------|------|
| | 24 h | 48 h | 72 h | 24 h | 48 h | 72 h |
| R1 | 15.8 | 48.9 | 54.2 | 18.5 | 25.0 | 17.9 |
| R9 | 20.6 | 51.8 | 74.4 | 17.2 | 25.4 | 20.5 |
| R4 | 30.4 | 45.7 | 174.7 | 21.3 | 18.2 | 24.8 |
| R10 | 24.5 | 44.5 | 132.0 | 8.8 | 17.7 | 14.9 |
| R5 | 39.2 | 48.9 | 128.6 | 21.4 | 21.6 | 16.9 |
| R11 | 24.5 | 45.7 | 155.2 | 13.9 | 21.0 | 16.7 |

从 R10 和 R4、R11 和 R5 的对比分析可看出,采用海温参数化方案结合垂直 32 层初边条件可以明显提高台风利奇马快速增强预报效果,快速增强的频次、增强的幅度更接近实况,因而快速增强过程的强度演变更接近实况,明显减小了快速增强过程的强度预报误差。其中,R10 对快速增强的预报效果最好、强度误差最小,下文将详细讨论预报改进的原因。

3.2.5 快速增强预报改进的原因分析

根据以上分析,R10 对台风利奇马两次快速增

强的预报相比于其他各试验改进明显、效果最好,由于篇幅所限,本部分重点对比 R10、R4 和 R9 的预报差异,探讨分析 R10 预报改进的原因。R10 和 R4 的区别在于有、无采用海温参数化,R10 和 R9 区别在于初边条件不同,分别采用 CMA-TRAMS 32 层数据和 HRES 17 层数据。

图 6a,6b 分别给出了 R10、R9 初始水汽混合比和温度场的垂直剖面图(R4 和 R10 初始场一致,不再给出),可知 R10 台风中心附近 950 hPa 以下的低层大气水汽混合比高于 R9,气温明显低于 R9,但台

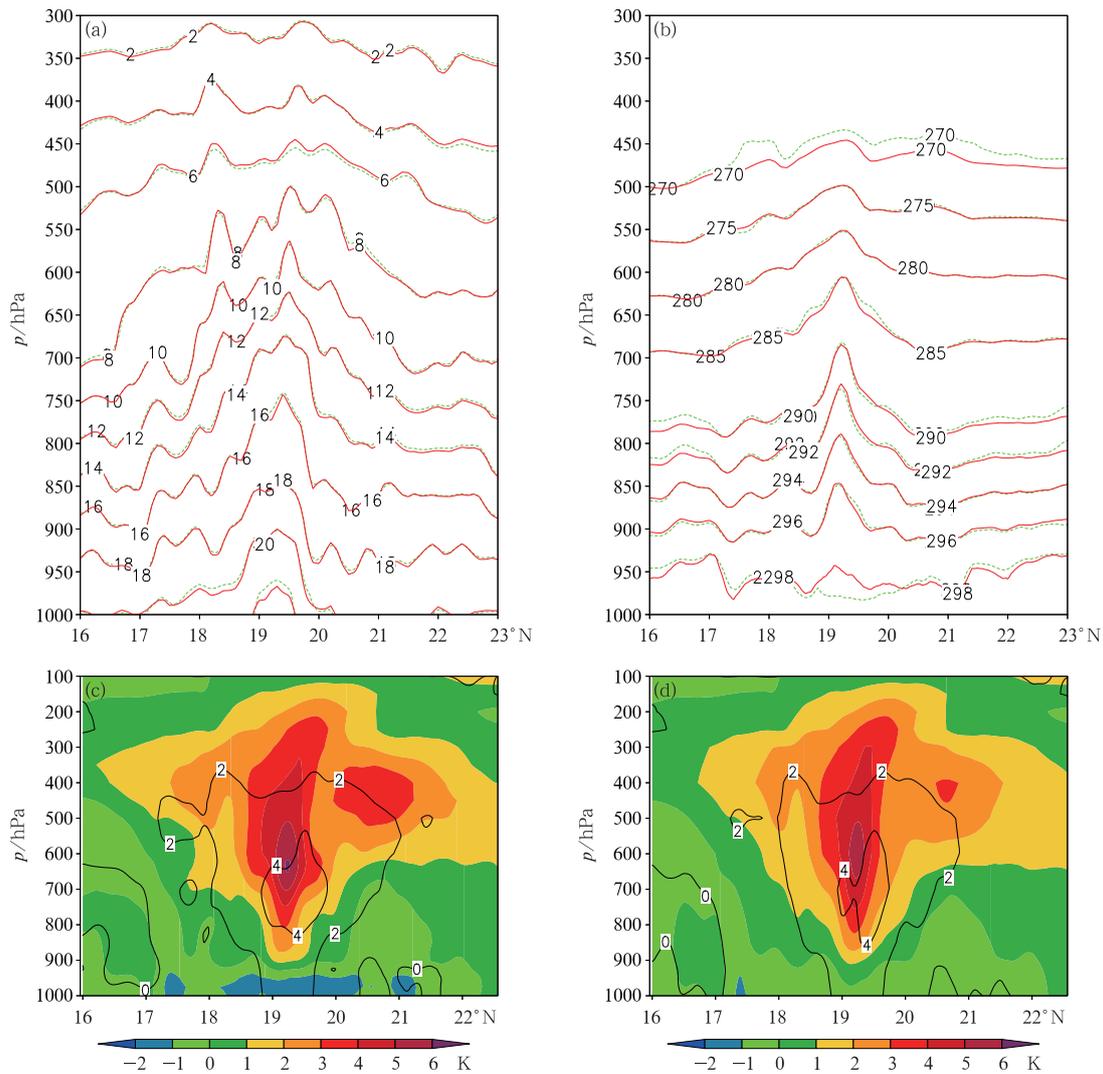


图 6 2019 年 8 月 6 日 12 时(a,b)试验 R9(红色实线)和 R10(绿色虚线)(a)初始水汽混合比(单位: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), (b)温度场(单位:K),以及试验(c)R10 和(d)R9 台风中心相对于环境的水汽混合比距平(等值线,单位: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、温度距平(填色)沿 128.6°E 高度-纬度剖面

Fig. 6 The height-latitude cross-section along 128.6°E of (a) initial water vapor mixing ratio (unit: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and (b) temperature (unit: K) of experiments R9 (red solid line) and R10 (green dotted line), and (c, d) the water vapor mixing ratio anomaly (contour, unit: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and temperature anomaly (colored, unit: K) between the typhoon center and the environment in experiments of (c) R10 and (d) R9 at 1200 UTC 6 August 2019

风中心以北(即台风未来移向)950~450 hPa 的中低层大气气温高于 R9,即在 R10 中台风移动到了更暖的大气环境中,为台风增强提供更有利条件。2 个试验初始台风中心相对于环境的水汽混合比和气温距平垂直剖面(图 6c、6d)也反映出 R10、R9 的暖心位于 700~500 hPa,暖心的气温距平最大值分别达 6 K、5 K,R10 模拟的台风暖心更强、范围稍大,中层(500~400 hPa)台风中心以北暖区范围更大,同时台风中心低层大气存在一个冷区,有利于海洋和周围大气向台风中心传输热量。

由图 7 可知,预报 1 h 后采用海温参数化方案的 R10 和 R9 台风活动区域的区域平均 SST 由初始约 29.8 °C 下降到 29.6 °C 左右,之后随时间略有波动,R10 表面温度稳定高于 R9;R4(未采用海温参数化)各时次区域内表面平均温度基本不变,维持在 29.8 °C 左右,为 3 个试验中最高(图 7a)。在各试验预报中,1~48 h 各试验的海气温差总体上 R10 最大,6~24 h 台风快速增强期间最大温差约为 0.65 K,R4 约为 0.55 K,R9 最小(图 7b),但 6~36 h 期间每隔 6 h,R9 温差突增为最大,说明 R9 预报的 2 m 气温每隔 6 h 变化最为剧烈。

由于 R10 和 R9 差异在于初边条件,故主要对比其初期预报差异。R10 第二次持续快速增强过程 21~27 h 的增强速度达最大值 $-1.9 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$,此时与 R4 增强速度的差异最大,故重点对比 R10 和 R4 试验 24 h 时效的预报差异。

图 8 给出各试验预报的感热通量和潜热通量差值。由于初始表面温度和大气湿状况的差异,预报 1 h 后,R10 和 R9 台风范围内感热通量差值为正,超过 $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 8a),说明 R10 海洋传输给大气的感热明显大于 R9,预报 4 h 后台风中心附近(约 50 km 半径内)潜热通量差值超过 $8 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,潜热输送也强于 R9,50 km 以外较大范围潜热通量差值为负,达 $-4 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 8b)。由于感热通量的量级远大于潜热通量,因此预报初期 R10 从海洋获得的热量远大于 R9,加上内核区潜热输送较强,有利于台风快速增强。类似地,预报 24 h 后,相对于 R4,R10 台风内核区域(距中心 200 km 内)感热通量为正差值、超过 $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 8c),说明 R10 中海洋向大气传输的感热通量明显多于 R4,大部分近中心区域(距中心 100 km 内)潜热通量差值也为正,达 $8 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 8d),R10 输送更多的热量给台风为其迅速增强提供能量,因而比 R4 增强快、强度更强。

对比 3 个试验预报 24 h 台风中心相对于环境的气温距平和比湿距平垂直剖面(图 9),3 个试验湿度距平最大值都超过 $6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,R10、R9、R4 模拟的湿度中心的水平范围分别约为 100、40、20 km,垂直方向分别分布于 850~500、850~500、800~650 hPa。R10、R9、R4 暖心分别位于 500~150、700~350、400~200 hPa,台风中心温度距平大于 6 K 的水平范围分别约为 66、40、40 km。CMA-TRAMS

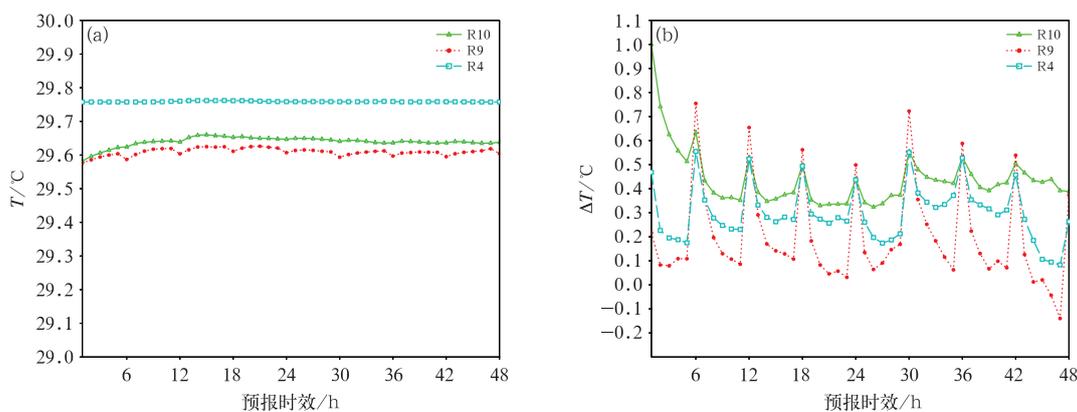
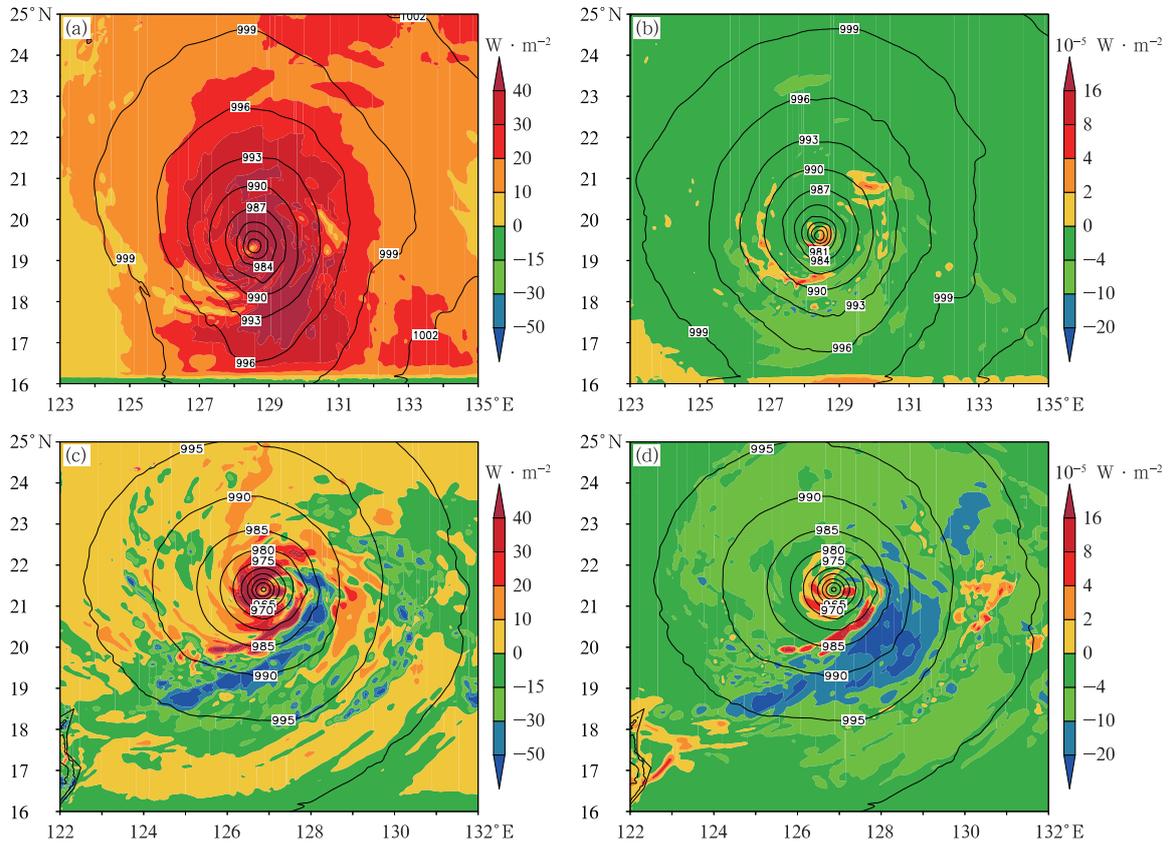


图 7 试验 R4、R9 和 R10 于 2019 年 8 月 6 日 12 时起报的 0~48 h 预报时效台风利奇马活动区域的(a)平均 SST,(b)海气温差

Fig. 7 Variation curves of (a) mean SST and (b) difference between SST and air temperature at 2 m height in typhoon area in experiments of R4, R9 and R10 with 0-48 h lead time initiated at 1200 UTC 6 August 2019



注：等值线为海平面气压(单位:hPa)。

图 8 2019 年 8 月 6 日 12 时起报的 (a, b) 试验 R10 和 R9 (R10-R9) (a) 1 h, (b) 4 h, (c, d) 试验 R10 和 R4 (R10-R4) 24 h 的 (a, c) 感热通量 (填色) 和 (b, d) 潜热通量 (填色) 差值

Fig. 8 Difference between (a, c) sensible heat flux (colored) and (b, d) latent heat flux (colored) predicted with leadtime of (a) 1 h, (b) 4 h and (c, d) 24 h in experiments of (a, b) R10 and R9 and (c, d) R10 and R4 initiated at 1200 UTC 6 August 2019

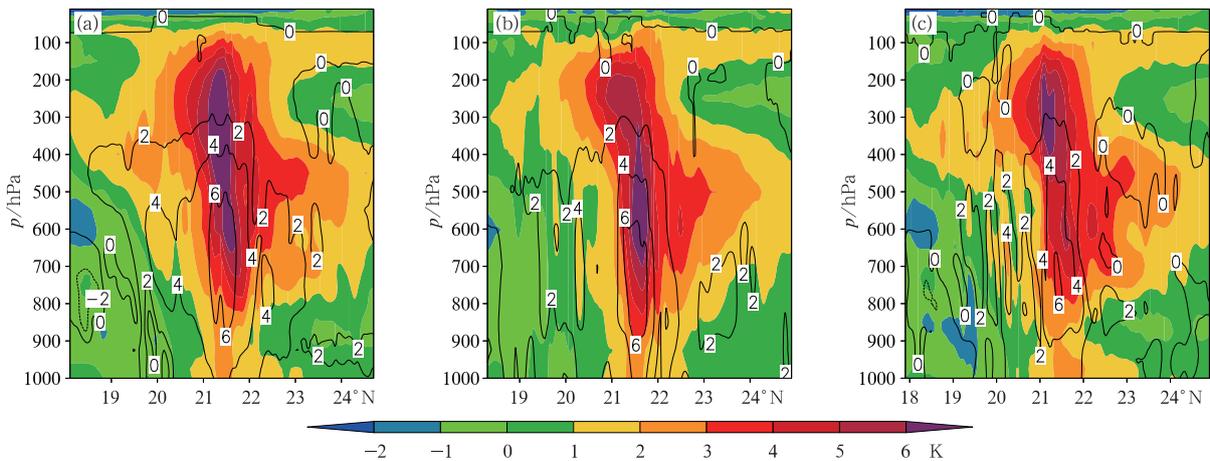


图 9 试验 (a) R10, (b) R4 和 (c) R9 2019 年 8 月 6 日 12 时起报的 24 h 台风利奇马中心相对于环境的水汽混合比距平 (等值线, 单位: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、温度距平 (填色) 的高度-纬度剖面

Fig. 9 Height-latitude cross-section of water vapor mixing ratio anomaly (contour, unit: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and temperature anomaly (colored) between the typhoon center and the environment in the experiments of (a) R10, (b) R4 and (c) R9 with 24 h lead time initiated at 1200 UTC 6 August 2019

未采用海温参数化时,具有预报过程海温恒定的特点,虽然海温较高,但缺乏大气的反馈,海气相互作用不足,海气温差较小,海洋向台风输送的热量和水汽较少,台风暖心和湿核均较弱;采用海温参数化方案结合增加初边条件垂直分辨率的技术方案后,CMA-TRAMS 反映出预报过程海温随时间演变的特点,在台风快速增强时段海气温差明显增大,台风内核区域海洋传输给大气的热通量和水汽明显增加,海气相互作用加强,台风内核区域中低层大气更暖湿、暖心范围较大、暖层更深厚,更有利于台风快速增强。

台风的快速发展与台风途经区域的海洋状况及海气交换密切相关,因此求取台风利奇马增强期间台风移动区域内各试验感热通量区域平均值和台风中心气压倾向,因潜热通量的量级远小于感热通量,在此不再对比分析。各试验中,1~48 h 感热通量均为正值(图 10a),说明台风所在海面温度较高,海洋持续向大气输送热量。6~39 h“利奇马”增强期间,R10、R9、R4 的感热通量分别介于 17~50、15~33、8~55 $W \cdot m^{-2}$,该时段内 R10 感热通量总体上显著大于 R9 和 R4,R9 虽然感热通量极值达 55 $W \cdot m^{-2}$,但大多数时次低于 20 $W \cdot m^{-2}$,因此总体输送的感热较少。R10、R4 采用相同初边条件,但预报 1 h 后,二者的感热通量分别为 29 $W \cdot m^{-2}$ 和 14 $W \cdot m^{-2}$,差异明显,说明海温参数化方案在短时间内对大气、海洋之间的热量输送和交换就有明显影响。图 10a 同时反映出采用海温参数化方案后,R10 在 48 h 内台风增强时段,海洋向大气输送的感热持续显著大于 R4,为台风发展提供的能量显著多于 R4。此外,3 个试验感热通量达峰值的时间一致,不同峰值间隔 6 h,可能与间隔 6 h 边界条件的强迫促使海气温差增大有关。对比各试验和观测的气压倾向(图 10b),48 h 内各试验总体为负倾向,R10 的气压负倾向及其演变总体最接近观测,R10、R9 和 R4 的最大负倾向分别约为 -0.001、-0.0006、-0.0006 $hPa \cdot s^{-1}$,实况最大负倾向接近 -0.0015 $hPa \cdot s^{-1}$,说明 R10 模拟的台风降压最快,增强速度最接近观测。

综上所述,R10 对台风利奇马强度演变和快速增强的预报效果最好,主要是因为初期海洋传输给大气的感热通量和内核区域潜热通量明显增加,使台风暖心和“湿核”更强,形成更有利于台风发展增强的结构,内核对流上升增强,促使台风中心气压负

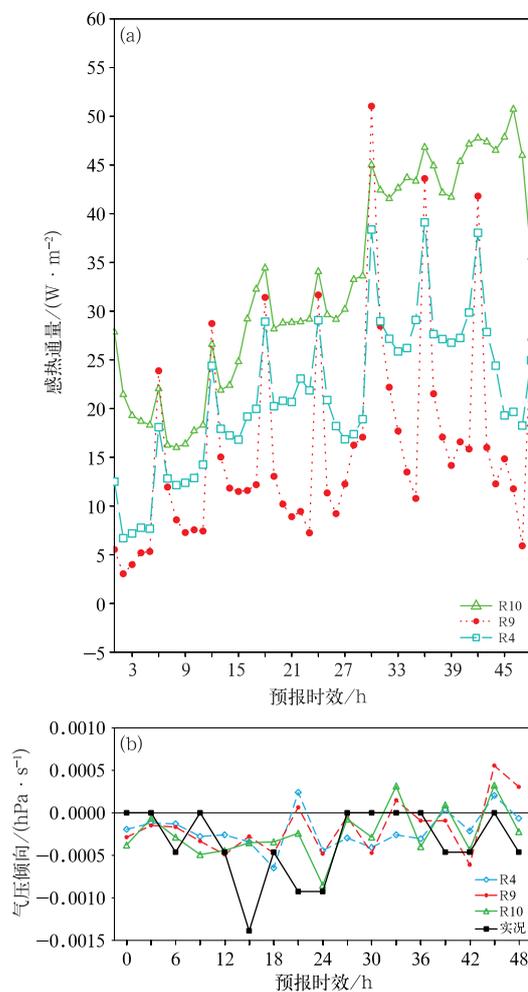


图 10 试验 R10、R9、R4 2019 年 8 月 6 日 12 时起报的台风区域下垫面 1~48 h 预报时效(a)感热通量和(b)气压倾向区域平均值

Fig. 10 Regional averages of (a) sensible heat flux and (b) air pressure tendency in experiments R10, R9 and R4 with 1-48 h lead time initiated at 1200 UTC 6 August 2019

倾向增大、降压增快。

4 结论与讨论

本文针对台风利奇马,分析了 CMA-TRAMS 和 HRES 对“利奇马”快速增强的业务预报情况,并从模式水平分辨率、边界层物理方案、模式初边条件垂直分辨率、海温参数化方案等角度设计开展数值试验模拟对比,对导致预报差异的可能原因进行分析,得到以下结论。

(1) CMA-TRAMS 和 HRES 对“利奇马”增强具有一定预报能力,但预报的增强速度明显低于实

况,不能达到 RIP-24 h、RIV-24 h 和 RIV-12 h 标准,可达到 RIP-6 h 标准。

(2) 2 个模式预报的快速增强次数和速度明显小于实况,以 RIP-6 h 为标准,HRES 和 TRAMS 最早都提前 36 h 报出台风快速增强,对“利奇马”快速增强的报出率分别为 35%、25%(不考虑时间上偏差),快速增强预报能力较低。HRES 对快速增强预报有一定优势。

(3) 试验 R1 采用 3 km 分辨率对“利奇马”移动路径和强度变化的预报效果优于试验 C(9 km 分辨率),但未改进快速增强预报效果;试验 R2 采用 3 km 嵌套 9 km 的方案,CMA-TRAMS 对快速增强的预报效果明显提升。

(4) 多组试验结果表明,采用 MRF 边界层参数化方案对“利奇马”路径、强度、快速增强过程的预报效果总体优于 YSU 方案。

(5) 试验 R4 和 R10、R5 和 R11 模拟结果表明,R10 采用海温参数化方案结合 32 层垂直分辨率的初边条件明显提高了“利奇马”快速增强的预报效果,预报快速增强的频次、增强的最大速度更接近实况。分析表明,试验 R10 中海洋传输给大气的感热通量和内核区域潜热通量明显增加使台风内部更暖湿、暖心更强,是改善快速增强预报的主要原因。

由于 HRES 是全球静力模式,CMA-TRAMS 是区域非静力模式,2 个模式动力框架、物理过程等也有所不同,HRES 业务预报相比 CMA-TRAMS 对快速增强预报表现出优势的原因是各方面因素综合影响的结果。在“利奇马”业务预报中 CMA-TRAMS 采用 HRES 分析场和预报场作为模式初边条件,其预报结果一定程度上受 HRES 的影响,二者预报结果的差异反映出 CMA-TRAMS 仍有待改进,考虑业务模式引入海温参数化方案,提高垂直分辨率,以促进台风强度的动态响应。关于 CMA-TRAMS 对水平分辨率、边界层物理方案、初边条件的敏感性的结论是针对“利奇马”的几组对比试验模拟得到,虽具有一定代表性,但需要更多典型个例的模拟和验证。本文提出结合海温参数化方案和提高初边条件垂直分辨率的方案,明显改进了“利奇马”快速增强的预报效果,同样需要更多个例的模拟和分析,后续的工作将分析该方案对其他个例的应用效果,从而为进一步改进模式方案提供线索,为提高数值模式台风快速增强预报能力奠定基础。

致谢:感谢陈德辉教授和蒙伟光博士对本文研究提出

的宝贵建议。

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[J]. 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]. J Appl Meteor Sci, 17(6):773-777(in Chinese).
- 陈联寿,丁一汇,1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社. Chen L S, Ding Y H, 1979. Introduction of Tropical Cyclones over the Western Pacific[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 陈颖珺,谢强,蒙伟光,等,2009. 不同海表面温度对南海台风“杜鹃”的影响试验[J]. 热带气象学报,25(4):401-406. Chen Y J, Xie Q, Meng W G, et al, 2009. An experiment study on the influence of different sea surface temperature on Typhoon Dujuan over the South China Sea[J]. J Trop Meteor, 25(4):401-406(in Chinese).
- 陈子通,徐道生,戴光丰,等,2020. 热带高分辨率模式(TRAMS-V3.0)技术方案及其系统预报性能[J]. 热带气象学报,36(4):444-454. Chen Z T, Xu D S, Dai G F, et al, 2020. Technical scheme and operational system of tropical high-resolution model (TRAMS-V3.0)[J]. J Trop Meteor, 36(4):444-454(in Chinese).
- 董林,许映龙,吕心艳,等,2020. 台风纳沙和海棠的预报着眼点分析[J]. 气象,46(1):29-36. Dong L, Xu Y L, Lyu X Y, et al, 2020. Analysis of forecast focuses of binary Typhoons Nesat and Haitang[J]. Meteor Mon, 46(1):29-36(in Chinese).
- 董美莹,陈锋,邱金晶,等,2021. ECMWF 驱动场谱逼近对浙江超强台风“利奇马”(2019)精细化数值预报的影响[J]. 大气科学,45(5):1071-1086. Dong M Y, Chen F, Qiu J J, et al, 2021. Impact of spectral nudging technique driven with ECMWF data on the fine numerical prediction of super Typhoon Lekima (2019) in Zhejiang Province[J]. Chin J Atmos Sci, 45(5):1071-1086 (in Chinese).
- 端义宏,余晖,伍荣生,2005. 热带气旋强度变化研究进展[J]. 气象学报,63(5):636-645. Duan Y H, Yu H, Wu R S, 2005. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone[J]. Acta Meteor Sin, 63(5):636-645(in Chinese).
- 龚俊强,2022. 台风“黑格比”(2004)近海急剧增强特征及成因分析[J]. 浙江气象,43(1):17-23. Gong J Q, 2022. Characteristics and member analysis of near-coast rapid intensification of Typhoon Hagupi(2004)[J]. J Zhejiang Meteor, 43(1):17-23 (in Chinese).
- 黄燕燕,薛纪善,冯业荣,等,2018. 采用预报涡旋的初始化方案对 2015 年台风“莲花”、“灿鸿”的试验研究[J]. 热带气象学报,34(5):598-609. Huang Y Y, Xue J S, Feng Y R, et al, 2018. An initialization scheme using forecast vortexes and its application in simulation of Typhoons Linfa and Chan-Hom in 2015[J]. J Trop Meteor, 34(5):598-609(in Chinese).
- 赖巧珍,吴立广,Shie C L, 2013. 0908 号台风“莫拉克”登陆过程中海表温度变化特点及其对“莫拉克”的影响[J]. 热带气象学报,29(2):221-234. Lai Q Z, Wu L G, Shie C L, 2013. Sea surface temperature response to Typhoon Morakot(2009) and the influence

- on its activity[J]. *J Trop Meteor*, 29(2):221-234(in Chinese).
- 雷小途,李永平,于润玲,等,2019. 新一代区域海-气-浪耦合台风预报系统[J]. *海洋学报*, 41(6):123-134. Lei X T, Li Y P, Yu R L, et al, 2019. A new generation of regional air-sea-wave coupled typhoon prediction system[J]. *Acta Oceanol Sin*, 41(6):123-134(in Chinese).
- 李泽椿,张玲,钱奇峰,等,2020. 中央气象台台风预报业务的发展及思考[J]. *大气科学学报*, 43(1):10-19. Li Z C, Zhang L, Qian Q F, et al, 2020. The development and consideration of typhoon forecast operation of National Meteorological Center[J]. *Trans Atmos Sci*, 43(1):10-19(in Chinese).
- 吕心艳,许映龙,黄焕卿,2021. 台风“威马逊”(1409)在南海北部急剧增强的环境因子分析[J]. *海洋预报*, 38(3):1-10. Lyu X Y, Xu Y L, Huang H Q, 2021. Analysis on environmental factors of the extremely rapid intensification of Typhoon “Rammasun” (1409) in the northern South China Sea[J]. *Marine For*, 38(3):1-10(in Chinese).
- 麻素红,张进,瞿安祥,等,2021. 垂直分层加密和预报区域扩大对GRAPES_TYM台风预报的影响[J]. *气象学报*, 79(1):94-103. Ma S H, Zhang J, Qu A X, et al, 2021. Impacts to tropical cyclone prediction of GRAPES_TYM from increasing of model vertical levels and enlargement of model forecast domain[J]. *Acta Meteor Sin*, 79(1):94-103(in Chinese).
- 梅耀,余锦华,2016. 环境场对西北太平洋热带气旋快速增强过程的影响[J]. *气象科学*, 36(6):770-778. Mei Y, Yu J H, 2016. Effect of environment field on rapid intensification process of tropical cyclones over the western North Pacific[J]. *J Meteor Sci*, 36(6):770-778(in Chinese).
- 钱奇峰,王川,徐雅静,等,2021. 一种基于深度学习的台风强度估测技术[J]. *气象*, 47(5):601-608. Qian Q F, Wang C, Xu Y J, et al, 2021. A deep learning technique of typhoon intensity estimation[J]. *Meteor Mon*, 47(5):601-608(in Chinese).
- 王晨稀,2013. 边界层参数化影响“梅花”台风的敏感性试验[J]. *地球科学进展*, 28(2):197-208. Wang C X, 2013. Experiments of influence of planetary boundary layer parameterization on Muifa typhoon prediction[J]. *Adv Earth Sci*, 28(2):197-208(in Chinese).
- 王科,吴立广,2019. 初始涡旋结构对热带气旋强度变化影响的数值研究[J]. *气象科学*, 39(3):285-294. Wang K, Wu L G, 2019. Numerical study of the influence of initial vortex structure on the intensification of tropical cyclones[J]. *J Meteor Sci*, 39(3):285-294(in Chinese).
- 王坚红,邵彩霞,苗春生,等,2012. 近海海温对再入海台风数值模拟影响的研究[J]. *热带海洋学报*, 31(5):106-115. Wang J H, Shao C X, Miao C S, et al, 2012. Near-shore SST's impact on typhoon return to the sea in numerical simulation[J]. *J Trop Oceanography*, 31(5):106-115(in Chinese).
- 夏友龙,郑祖光,刘式达,1995. 台风内核与外围加热对其强度突变的影响[J]. *气象学报*, 53(4):423-430. Xia Y L, Zheng Z G, Liu S D, 1995. The effects of heating in the inner core and the external part of typhoon on their intensity abrupt changes [J]. *Acta Meteor Sin*, 53(4):423-430(in Chinese).
- 徐道生,陈德辉,张邦林,等,2020. TRAMS_RUC_1 km 模式初始场和侧边界方案的改进研究[J]. *大气科学*, 44(3):625-638. Xu D S, Chen D H, Zhang B L, et al, 2020. Revised initial field and lateral boundary condition scheme for the TRAMS_RUC_1 km model[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(3):625-638(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).
- 徐道生,张艳霞,王刚,等,2015. meso-SAS 对流参数化方案的改进及其在 9 km 分辨率模式中的应用[J]. *热带气象学报*, 31(5):608-618. Xu D S, Zhang Y X, Wang G, et al, 2015. Improvement of meso-SAS cumulus parameterization scheme and its application in a model of 9 km resolution[J]. *J Trop Meteor*, 31(5):608-618(in Chinese).
- 徐祥德,1991. 轴对称涡旋非线性运动平衡态、失稳和突变影响因子的研究[J]. *大气科学*, 15(2):63-72. Xu X D, 1991. Study on influence factors of equilibria, destabilization and catastrophe of nonlinear movement of axisymmetric vortex[J]. *Chin J Atmos Sci*, 15(2):63-72(in Chinese).
- 许映龙,黄奕武,2017. 2015 年西北太平洋和南海台风活动特征及主要预报技术难点[J]. *海洋气象学报*, 37(1):31-41. Xu Y L, Huang Y W, 2017. The activity characteristics and forecasting difficulties of tropical cyclones over Western North Pacific and South China Sea in 2015[J]. *J Marine Meteor*, 37(1):31-41(in Chinese).
- 阎俊岳,张秀芝,陈乾金,等,1995. 热带气旋迅速加强标准的研究[J]. *气象*, 21(5):9-13. Yan J Y, Zhang X Z, Chen Q J, et al, 1995. The standard of rapidly intensified tropical cyclones[J]. *Meteor Mon*, 21(5):9-13(in Chinese).
- 于玉斌,2007. 我国近海热带气旋强度突变的机理研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Yu Y B, 2007. The theoretical study on tropical cyclone intensity sudden change over the coastal waters of China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 于玉斌,姚秀萍,2006. 西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征[J]. *热带气象学报*, 22(6):521-526. Yu Y B, Yao X P, 2006. A statistical analysis on intensity change of tropical cyclone over the Western North Pacific[J]. *J Trop Meteor*, 22(6):521-526(in Chinese).
- 余晖,费亮,端义宏,2002. 8807 和 0008 登陆前的大尺度环境特征与强度变化[J]. *气象学报*, 60(S1):78-87. Yu H, Fei L, Duan Y H, 2002. Favorable large-scale conditions for rapid in tensification of Typhoons “Bill” and “Jelawat” before their landfall[J]. *Acta Meteor Sin*, 60(S1):78-87(in Chinese).
- 曾智华,陈联寿,王玉清,等,2009. 2006 年超级台风“桑美”强度与结构变化的数值模拟研究[J]. *气象学报*, 67(5):750-763. Zeng Z H, Chen L S, Wang Y Q, et al, 2009. A numerical simulation study of super Typhoon Saomei(2006) intensity and structure

- changes[J]. *Acta Meteor Sin*, 67(5):750-763(in Chinese).
- 郑峰,曾智华,雷小途,等,2016. 中国近海突然增强台风统计分析[J]. *高原气象*, 35(1):198-210. Zheng F, Zeng Z H, Lei X T, et al, 2016. A statistical study of rapid intensification of typhoons over coastal water of China[J]. *Plateau Meteor*, 35(1):198-210(in Chinese).
- 郑秀丽,吴立广,周星阳,等,2020. 台风 Rammasun(2014)与飓风 Wilma(2005)快速增强过程的内核结构变化比较[J]. *热带气象学报*, 36(2):219-231. Zheng X L, Wu L G, Zhou X Y, et al, 2020. Comparison of inner-core structure changes during rapid intensification between Typhoon Rammasun(2014) and Hurricane Wilma(2005)[J]. *J Trop Meteor*, 36(2):219-231(in Chinese).
- 周冠博,柳龙生,董林,等,2022. 2020年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. *气象*, 48(4):504-515. Zhou G B, Liu L S, Dong L, et al, 2022. The analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs in Western North Pacific in 2020[J]. *Meteor Mon*, 48(4):504-515(in Chinese).
- Balsamo G, Viterbo P, Beljaars A, et al, 2009. A revised hydrology for the ECMWF model: verification from field site to terrestrial water storage and impact in the integrated forecast system[J]. *J Hydrometeorol*, 10(3):623-643.
- Bechtold P, Koehler M, Jung T, et al, 2008. Advances in predicting atmospheric variability with the ECMWF model: from synoptic to decadal time-scales [J]. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 134(634):1337-1351.
- Bechtold P, Semane N, Lopez P, et al, 2014. Representing equilibrium and non-equilibrium convection in large-scale models[J]. *J Atmos Sci*, 71(2):734-753.
- Braun S A, Newman P A, Heysfield G M, 2016. NASA's hurricane and severe storm sentinel (HS3) investigation[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 97(11):2085-2102.
- Forbes R M, Tompkins A M, 2011. An improved representation of cloud and precipitation[J]. *ECMWF Newsletter*, (129):13-18.
- Forbes R M, Tompkins A M, Untch A, 2011. A new prognostic bulk microphysics scheme for the IFS[J]. *ECMWF Tech Memo*, (649):30. doi:10.21957/bf6vjvxxk.
- Holliday R, Thompson H, 1979. Climatological characteristics of rapidly intensifying typhoons[J]. *Mon Wea Rev*, 107(8):1022-1034.
- Huo Z M, Duan Y H, Liu X, 2020. The effect of warm water and its weak negative feedback on the rapid intensification of Typhoon Hato(2017)[J]. *J Trop Meteor*, 26(4):402-416.
- Iacono M, Delamere J, Mlawer E, et al, 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. *J Geophys Res*, 113(D13). doi:10.1029/2008JD009944.
- Kaplan J, DeMaria M, 2003. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin[J]. *Wea Forecasting*, 18(6):1093-1108.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al, 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated- k model for the longwave[J]. *J Geophys Res*, 102(D14):16663-16682.
- Sun Y, Yi L, Zhong Z, et al, 2013. Dependence of model convergence on horizontal resolution and convective parameterization in simulations of a tropical cyclone at gray-zone resolutions[J]. *J Geophys Res*, 118(14):7715-7732.
- Tiedtke M, 1989. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models [J]. *Mon Wea Rev*, 117(8):1779-1800.
- Tiedtke M, 1993. Representation of clouds in large-scale models[J]. *Mon Wea Rev*, 121(11):3040-3061.
- Titley D W, Elsberry R L, 2000. Large intensity changes in tropical cyclones: a case study of Supertyphoon Flo during TCM-90[J]. *Mon Wea Rev*, 128(10):3556-3573.
- Wang C X, Ying M, 2020. The uncertainty of tropical cyclone intensity and structure based on different parameterization schemes of planetary boundary layer[J]. *J Trop Meteor*, 26(4):377-389.
- Zeng X B, Beljaars A, 2005. A prognostic scheme of sea surface skin temperature for modeling and data assimilation[J]. *Geophys Res Lett*, 32(14):L14605.
- Zhang Y X, Xu D S, Chen Z T, et al, 2022. Offline diagnostics of skin sea surface temperature from a prognostic scheme and its application in typhoon forecasting using the CMA-TRAMS model over South China[J]. *Atmosphere*, 13(8):1324.

(本文责编:何晓欢)