

一种基于分析增量更新技术的台风初始化方案^{*}

徐道生¹ 张邦林¹ 曾庆存² 冯业荣¹ 张艳霞¹ 戴光丰¹

XU Daosheng¹ ZHANG Banglin¹ ZENG Qingcun² FENG Yerong¹ ZHANG Yanxia¹ DAI Guangfeng¹

1. 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值预报重点实验室, 广州, 510640

2. 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029

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

2. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2019-03-04 收稿, 2019-07-01 改回.

徐道生, 张邦林, 曾庆存, 冯业荣, 张艳霞, 戴光丰. 2019. 一种基于分析增量更新技术的台风初始化方案. *气象学报*, 77(6): 1053-1061

Xu Daosheng, Zhang Banglin, Zeng Qingcun, Feng Yerong, Zhang Yanxia, Dai Guangfeng. 2019. A typhoon initialization scheme based on incremental analysis updates technology. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(6):1053-1061

Abstract The main difficulty in typhoon initialization lies in how to generate variables that are consistent with the prescribed wind field based on limited observational data (such as the location of typhoon center, the minimum pressure, the maximum wind speed, and the size of typhoon). In this study, the IAU (Incremental Analysis Updates) is introduced into typhoon initialization scheme to solve this problem. The background vortex perturbation is relocated and adjusted first according to observations, other variables are then generated by the model through a strong 6 h nudging to the prescribed wind field. Multiple forecast experiments for typhoon Mangkhut indicate that: (1) The influence of typhoon initialization proposed in the present study on the track forecast is weak, while the forecast of intensity is significantly improved. Especially in the generation stage, the intensity of the typhoon is strengthened after initialization process and becomes more consistent with observation. (2) The IAU technology can make adjustment on other variables according to the prescribed wind field, and produce a more thermally and dynamically consistent vortex structure. The forecast of typhoon track and intensity is further improved after the IAU technology is implemented. (3) Sensitive experiments indicate that the relaxing time of 3–6 h can yield the best result.

Key words Typhoon initialization scheme, IAU, Mangkhut

摘 要 台风初始化方案最大的困难在于其只能根据有限的观测资料(台风中心位置、最低气压、最大风速和大风半径等)来构造一个与模式动力-物理过程协调的涡旋模型。首先根据实际观测资料对背景场中的涡旋扰动进行重定位和风速调整,然后将分析增量更新(Incremental Analysis Update, IAU)技术应用于台风初始化方案中,将调整后的涡旋当作一个强迫项逐渐加入到模式预报过程中,通过模式自身调整来得到一个协调性较好的台风初始结构,从而改善模式对台风的预报性能。对“山竹”台风的多次预报结果表明:(1)台风初始化对于台风路径误差影响较小,对于强度预报改进则比较明显。特别是在台风生成初期,台风初始化技术能够有效地增强全球模式分析场中的涡旋强度,并解决预报过程中强度较弱的问题。(2)根据预先给定的三维风场,IAU技术能通过模式自身预报过程对其他变量进行调整,从而得到一个热力和动力协调的初始涡旋结构。相对于仅对初始风场的调整,它对24 h之后的路径和强度预报误差会有更进一步的改善。(3)对IAU中的松弛时间进行参数敏感性试验,发现该变量取3—6 h效果较好。

^{*} 资助课题:广东省科技计划省直部门协同创新重点项目(2018B020208004)、国家重点研发计划项目(2018YFC1506900)、国家自然科学基金(41705089)。

作者简介:徐道生,主要从事数值预报技术开发研究。E-mail: dsxu@gd121.cn

通信作者:张邦林,主要从事数值预报技术开发研究。E-mail: zhangbl@gd121.cn

关键词 台风初始化,分析增量更新(IAU),山竹
中图法分类号 P457.8

1 引言

目前华南区域气象中心业务运行的南海台风模式使用欧洲预报中心提供的分析场作为初始场。应用中发现,全球分析场的涡旋中心位置和实况总体来说都比较一致,但是当台风强度较强时模式初始场中的台风涡旋强度和实况存在明显的偏弱现象。有必要通过涡旋初始化方案对初始强度偏差进行订正,从而改善模式的预报效果(Tallapragada, et al, 2016; 张进等, 2017; 麻素红等, 2018; 麻素红, 2019; 许晓林等, 2019)。

由于洋面上缺乏大量的实际观测资料,只能根据有限的观测资料(最大风速、最低气压、台风中心位置、大风半径等),利用相关统计经验公式和动力学模型构建一个人造台风虚拟(bogus)涡旋结构嵌入到模式初始场中(黄燕燕等, 2010; 袁金南等, 2010)。这类方法主要的缺点是很少考虑不同情况下的台风结构差异,所以很难和模式自身的动力-物理过程协调,因而在很大程度上限制了其在实际业务中的应用。瞿安祥等(2009a, 2009b)针对这一问题,提出保留模式短时预报的弱台风涡旋作为背景场,通过重定位和强度调整来减少人为因素对涡旋结构的影响。试验表明,相对于传统的bogus方案,该方法大幅度降低了台风路径预报误差,但是对强度预报改进不太明显,这可能和强度调整过程中仅对风场和气压场两个变量进行调整有关。黄燕燕等(2018)利用初始涡旋和预报涡旋加权平均的方法代替bogus模型,发现对“莲花”和“灿鸿”的预报效果有改进,使用预报涡旋的目的是使得涡旋结构和模式动力-物理过程更加协调。梁旭东等(2010)提出了一种基于模式约束的变分同化技术来构造更加协调的涡旋结构,黄伟等(2010)将该方案应用于改善GRAPES-TCM模式。

分析增量更新(Incremental Analysis Updates, IAU)初始化技术的主要思想是将同化分析增量转换为定常强迫项逐渐加入到模式预报方程中,目的是消除同化过程引起的虚假高频噪声,使得模式不同变量更快地达到相互协调(Bloom, et al, 1996; Polavarapu, et al, 2004; Takacs, et al, 2018)。Lee

等(2006)将MM5-3DVAR同化分析增量通过IAU的方式加入到模式预报中,有效地解决了水汽的起转问题,并最终改进了模式降水预报效果。Lei等(2012)将IAU技术应用于集合卡尔曼滤波同化方法,消除动力不协调引起的虚假重力波噪声,发现IAU技术具有很好的滤波性能。在海洋同化研究和业务中IAU技术同样得到了广泛的应用(Ourmières, et al, 2006; Benkiran, et al, 2008)。Kwon等(2010)提出通过四维同化方法构造台风初始涡旋(简称Kwon方案),即首先根据bogus模型构造出一个强度较接近实况的三维台风涡旋风场,然后将其作为实际观测资料,在模式预报中通过张弛逼近方法使模式预报逐步向它逼近。这个方案的主要优势在于使用模式自身作为约束来实现所有预报变量的调整,从而更好地解决初始涡旋与模式的协调问题。文中在借鉴Kwon方案的基础上,针对南海台风模式开发了一套基于IAU技术的台风初始化方案,目的是解决模式初始场中台风强度弱的现象,从而改进模式对台风强度的预报效果。

2 台风初始化方案

2.1 方案介绍

首先根据模式预报场和实际观测的最大风速半径及最大风速构造一个三维涡旋风场,然后按照IAU的方式将其加入到预报模式中,通过模式自身的动力-物理过程来实现对其他要素场的调整,从而使得涡旋扰动与模式具有更好的协调性。具体流程如图1所示:以全球模式分析场作为初始场往前预报6h得到一个背景场,然后通过滤波技术将其中的台风涡旋扰动和大尺度环境场进行分离。结合第6小时的台风观测信息(台风中心经、纬度,最低气压,最大风速和大风半径),对背景涡旋扰动进行重定位和最大风速调整,重新叠加到大尺度环境场中,获得一个强度、位置均和实况比较接近的新背景场。然后将这个新的背景场作为外强迫,在 $T = (6 - \tau)$ 至 $T = 6$ h期间重新将其逐步加入到台风预报模式中

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \dots + \frac{F'_{\text{back}} - F_{\text{back}}}{\tau} \quad (1)$$

式中, F 为初始化需要调整的预报变量, F'_{back} 为经过调整后的背景场, F_{back} 为模式直接用全球分析场作为初值预报得到的原始背景场, τ 为张弛逼近过程

使用的松弛时间, 为 0—6 h, 最终使得模式在第 6 小时预报的台风位置和强度与实况接近。

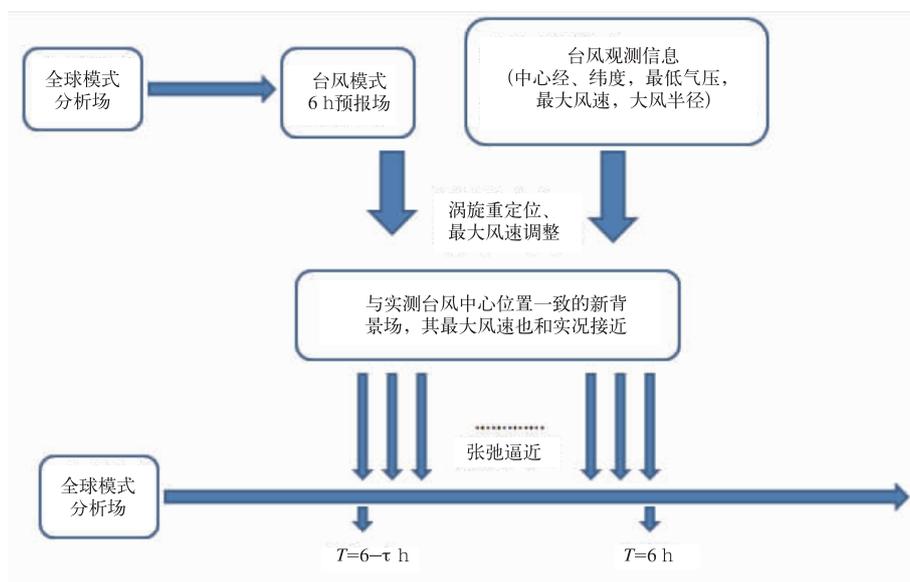


图 1 基于分析增量更新技术的台风初始化方案示意
Fig. 1 Schematic diagram for the typhoon-like vortex initialization scheme based on the IAU technology

2.2 涡旋重定位

使用的涡旋重定位技术主要参考 Kurihara 等 (1995) 的做法。首先对背景场做水平滤波分离出扰动场, 再对扰动场做柱形滤波分离出涡旋环流。水平滤波采用三点平滑方案, 平滑系数为

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

取 $m = 2, 3, 4, 2, 5, 6, 7, 2, 8, 9, 2$ 先沿纬向再沿经向连续做 11 次滤波, 得到扰动场 h_D 。接着对 h_D 做柱形滤波分离出涡旋环流 $h_V(r, \theta)$

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

式中, $\overline{h_D(r_0)}$ 是 h_D 在大风半径 r_0 处的角度平均。柱形滤波函数 $E(r)$

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

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

在得到涡旋扰动环流以后, 可以进一步求出大尺度环境场 h_E

$$h_E = h - h_V \quad (5)$$

式中, h 为模式预报的背景场。

根据实际观测的台风中心经、纬度将涡旋扰动环流中心进行平移, 然后重新叠加到大尺度环境场上, 得到一个重定位以后的背景场 h'

$$h' = h_E + h'_V \quad (6)$$

式中, h'_V 为平移后的涡旋环流。

2.3 最大风速调整技术

根据式(6), 重新定位以后的背景水平风场 (u, v) 可写成

$$\begin{cases} u = u_a + u_p \\ v = v_a + v_p \end{cases} \quad (7)$$

式中, 下标 a 表示背景环境场, 下标 p 表示涡旋扰动场。

根据最大风速观测对风场进行调整, 具体做法是通过对涡旋扰动分量乘以系数 α 实现

$$\begin{cases} u_c = u_a + \alpha \times u_p \\ v_c = v_a + \alpha \times v_p \end{cases} \quad (8)$$

式中, u_c 和 v_c 分别为经过调整的风场分量。调整以后的最大风速等于实测风速 V_{obs}

$$u_c^2 + v_c^2 = (u_a + \alpha \times u_p)^2 + (v_a + \alpha \times v_p)^2 = V_{obs}^2 \quad (9)$$

根据式(9)可得

$$\alpha = \frac{-(u_a u_p + v_a v_p) + \sqrt{(u_a u_p + v_a v_p)^2 - (u_p^2 + v_p^2)(u_a^2 + v_a^2 - V_{obs}^2)}}{u_p^2 + v_p^2} \quad (10)$$

在进行风速调整时,该系数需要乘以一个随高度升高而逐渐减小的权重,这意味着对低层的风速做了较大的订正。

3 模式介绍

使用的南海台风模式是基于 GRAPES(Global/Regional assimilation and prediction model)区域模式(陈德辉等,2006)开发的版本(徐道生等,2014a,2014b;陈子通等,2016)。该模式是一个非静力经纬度网格模式,时间差分格式为半隐式半拉格朗日方案,水平网格为荒川(ARAKAWA)-C 网格,垂直方向使用 Charney-Philips 分层设计,垂直坐标为高度地形追随坐标。使用的物理过程包括:WSM6 云微物理参数化方案,RRTMG 长短波辐射方案,MRF 边界层方案和 SLAB 陆面方案。模式侧边界通过松弛边界条件来处理。

模式的水平分辨率为 0.09° ,垂直层数均为 65 层,模式顶高度为 30 km,使用 0.125° 分辨率的欧洲中期天气预报中心(ECMWF)分析场和预报场提供初、边界条件。模拟范围为 $(0.8^\circ - 50.57^\circ \text{N}, 81.6^\circ - 160.89^\circ \text{E})$ 。

4 试验结果

4.1 “山竹”台风试验

2018 年 9 月 8 日 12 时(世界时,下同),“山竹”台风在西北太平洋生成,之后在副热带高压南侧气流引导下向西移动,并加强为超强台风,最大风速达到 50 m/s。9 月 16 日下午在广东台山登陆,登陆时的最大风力达到 14 级,造成了严重的经济损失。文中选取这次台风过程来开展初始化方案对台风预报的影响研究。

9 月 8 日 12 时—15 日 12 时,每隔 12 h 启动一次预报,每次预报 72 h,一共进行 15 次预报。分别设计了三组试验:(1)test-ctl:不作台风初始化处理,直接用全球分析场做台风预报;(2)test-no IAU:用模式积分至第 6 小时的预报场作为背景场,经过涡

旋重定位的风速调整后,继续向前预报。(3)test-IAU:用模式积分至第 6 小时的预报场作为背景场,进行涡旋重定位和风速调整,得到一个新的背景场。然后按照 IAU 方法将这个新背景场当作外强迫逐渐加入到 $T = (6 - \tau)$ 至 $T = 6 \text{ h}$ 之前的预报模式中,使得模式在第 6 小时预报的涡旋位置和强度调整到与实况接近(根据 4.3 节敏感性测试结果,在 4.2 节的试验中取 $\tau = 3 \text{ h}$)。

Test-no IAU 与 test-IAU 两组试验的本质区别在于:no IAU 试验是将总的更新增量叠加到 6 h 预报背景场,直接作为模式初值应用;而 IAU 试验是将总的增量分解为若干份小的增量,通过多时步张弛逼近,随模式积分而逐渐逼近分析场。前者对模式背景场的一次性“冲击”较大,容易造成初始积分不协调,且只对风场有调整作用;而后者通过“小增量”逼近模式积分,冲击较小,而且模式更容易自我协调。同时在多时步的积分过程中,对模式其他变量会有更好的协调影响作用。

4.2 涡旋初始化对路径、强度预报的影响

首先对不同方案下“山竹”台风 15 次预报的平均误差进行比较。从路径误差(图 2a)来看,经过初始化处理模式第 6 小时的台风中心位置基本和实况一致,但是这种改进影响时间很短,在第 18 小时以后三组试验的路径误差变得非常接近。对于 24 h 以后的路径预报误差,test-IAU 相对来说会比 test-no IAU 略小一些。总的来说,初始化对台风路径预报的影响不大,其原因可能和欧洲中期天气预报中心模式分析场对大尺度环境场(副热带高压系统南侧的引导气流)的刻画已经非常准确有关。涡旋初始化对于强度预报的改进则比较明显(图 2b),不论是 test-no IAU 还是 test-IAU 的最低气压误差都要比对照试验平均降低 2 hPa 左右,而且这种改进在各个预报时刻均比较明显。由于文中的初始化方案仅对背景场中的风速进行调整,所以在 test-no IAU 试验中第 6 小时的最低气压误差仍然和对照试验接近,而在后面的预报中模式逐渐根据风场对气压场

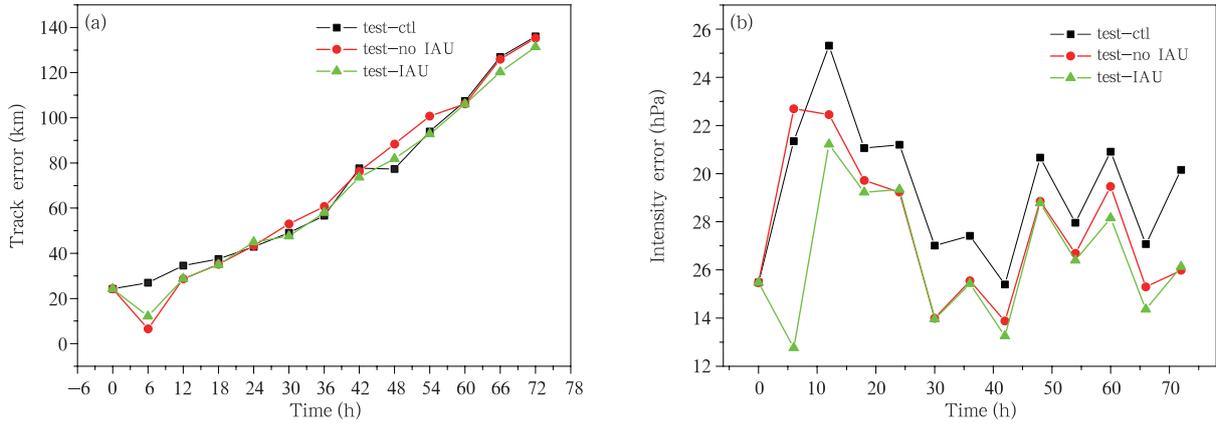


图2 台风初始化对“山竹”预报的影响

(a. 平均路径误差, b. 平均强度误差)

Fig. 2 Influence of initialization on the forecast of Mangkhut

(a. average track error, b. average intensity error)

进行调整,最低气压的误差也随之逐渐降至与 test-IAU 接近。在 test-IAU 试验中,由于提前就通过 IAU 方式将风场的调整信息逐渐加入到预报模式中,所以模式在第 6 小时预报的最低气压明显要比 test-no IAU 和 test-ctl 更接近实况(误差减小 9 hPa 左右)。在第 12 小时之后的预报中, test-IAU 的强度预报误差也要比 test-no IAU 略小一些。总的来说,台风初始化技术对于强度预报有明显改进,对路径预报影响不大,而将 IAU 技术应用于台风初始化之后,可以在一定程度上改进模式对 24 h 以后的路径和强度预报。

对 8 日 12 时—15 日 12 时的强度预报和实况进行比较(图 3),从 test-ctl 对“山竹”各个时次预报的强度来看,模式对前期加强过程的预报明显偏弱,而 test-IAU 对这种偏弱的现象有明显改进。比如从 8 日 12 时起报(红色线)的 72 h 预报结果来看, test-ctl 只能达到 972 hPa(实况为 910 hPa), test-no IAU 的预报能达到 944.3 hPa, test-IAU 的预报能达到 943.4 hPa,经过初始化处理后强度预报误差降低 27 hPa 左右。随着台风的进一步增强,一方面欧洲中期天气预报中心全球分析场中的台风强度已经基本接近实际观测(如 10 日 12 时和 11 日 00 时起报的初始强度),另一方面可能在初始涡旋达到一定强度以后模式自身动力-物理过程对台风强度变化的影响起主导作用,所以台风初始化对强度预报的影响逐渐减弱。总体而言,台风初始化技术对

于“山竹”前期加强过程的预报改进最为明显。

为进一步分析初始化过程对强度变化的影响,选取 8 日 12 时起报的三组试验预报结果进行比较。首先从第 6 小时模式预报场(台风初始化在该时刻完成)的风场来看,经过初始化处理(图 4b、c)台风中心风速均得到了较大幅度的增强,从 test-IAU 试验的温度场能够更加明显地看出台风的暖心结构(图 4e),这是因为 IAU 方法能够通过风场强迫调整模式温度预报,从位势场的比较也可以得到同样的结论(图略),说明将 IAU 技术应用于台风初始化可以通过模式自身调整使得不同要素场达到比较协调。从第 12 小时的预报结果来看,经过初始化以后的预报风速仍然比对照试验强(图 5a—c),但 test-no IAU 试验预报的暖心结构已经接近 test-IAU 的预报(图 5d),说明即使仅加强初始风场,模式也能在后面的预报中比较快地对温度场进行调整,从而使得台风强度的预报接近 test-IAU。这也是 test-IAU 和 test-no IAU 试验对 12 h 以后的台风预报结果比较接近的原因(图 3)。

4.3 test-IAU 试验中松弛时间的敏感性试验

由式(1)可知,当 IAU 中的松弛时间尺度 τ 取值较大时,强迫项的量级变小,但是作用时间变长,有必要测试该参数对模式预报效果的敏感性。分别取 τ 为 1 h(记为 test-IAU-1 h)、3 h(记为 test-IAU-3 h)、6 h(记为 test-IAU-6 h),从 9 月 8 日 12 时—15 日 12 时每隔 12 h 做一次预报,共 15 次预报的平

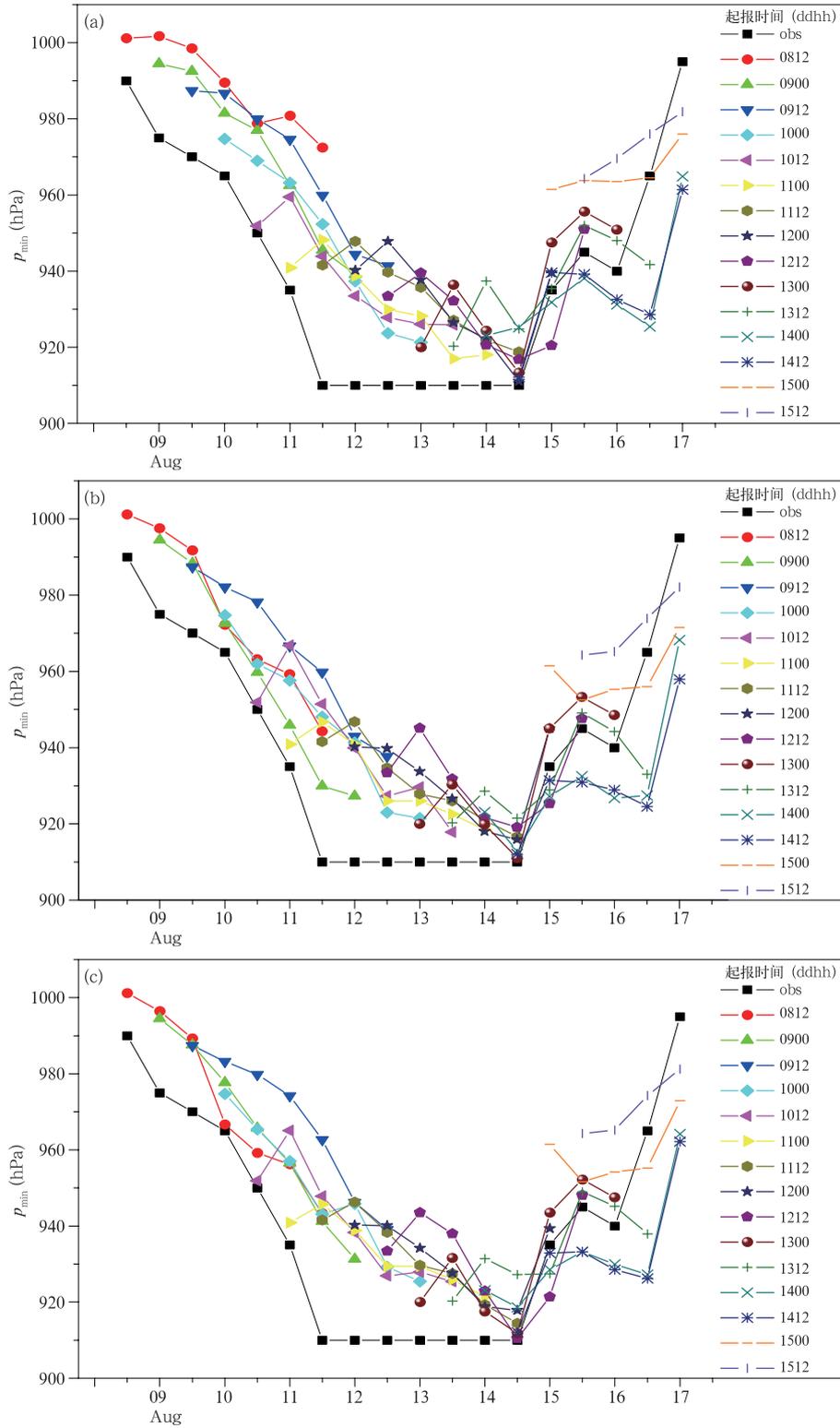


图3 三组试验预报的台风中心最低气压(彩色线)和实况(黑色线)对比
(a. test-ctl, b. test-no IAU, c. test-IAU)

Fig. 3 Comparison of minimum pressure forecasts (color lines) with observations (black lines)
(a. test-ctl, b. test-no IAU, c. test-IAU. The initial times are given in the frame to the left of the panel)

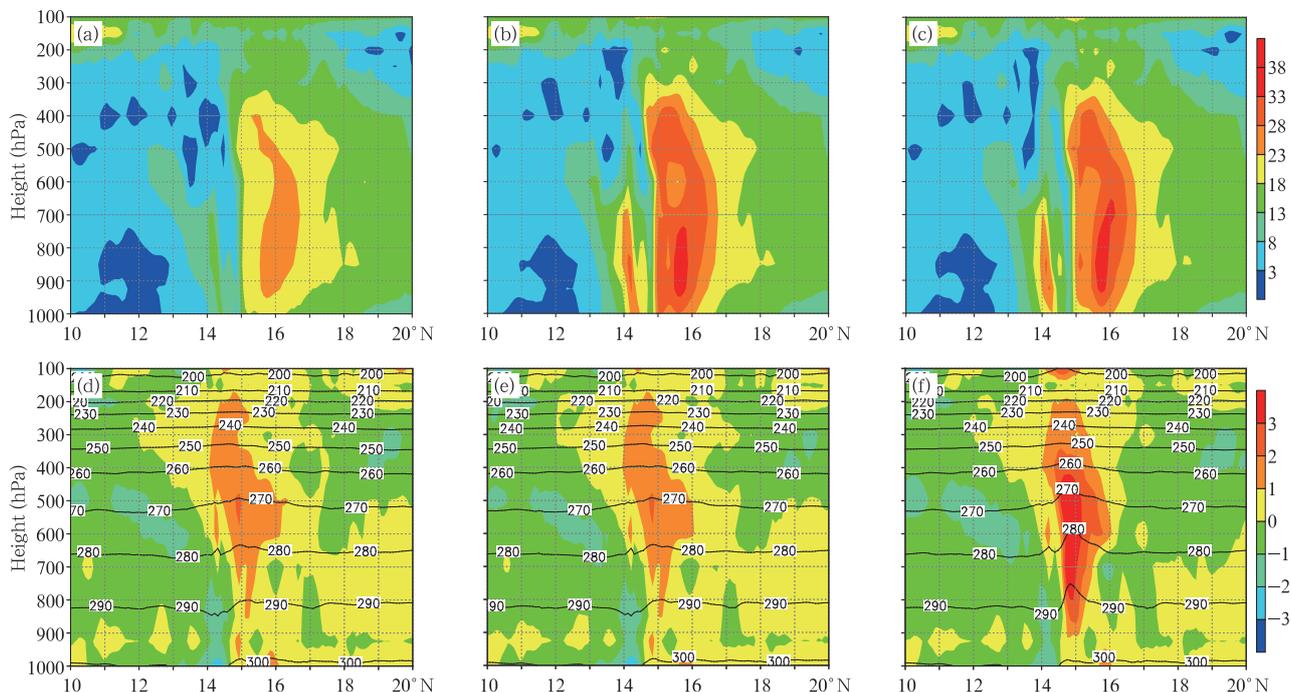


图4 2018年9月8日12时起报的第6小时台风风速(a. test-ctl, b. test-no IAU, c. test-IAU; 单位: m/s)和温度(等值线, 单位: K)与温度距平场(d. test-ctl, e. test-no IAU, f. test-IAU; 色阶, 单位: K)垂直剖面(a, d. 沿 156.9°E, b, e. 沿 157.1°E, c, f. 沿 157.0°E)

Fig. 4 Vertical cross sections of 6 h forecast of wind speed (unit: m/s) and temperature (isoline, unit: K) and temperature deviations (shaded, unit: K). The model is initialized at 12:00 UTC 8 September 2018.

- (a) Wind speed from test-ctl; (b) wind speed from test-no IAU; (c) wind speed from experiment-IAU;
- (d) temperature from test-ctl; (e) temperature from test-no IAU; (f) temperature from test-IAU.
- (a), (d) are along 156.9°E; (b), (e) are along 157.1°E; (c), (f) are along 157.0°E

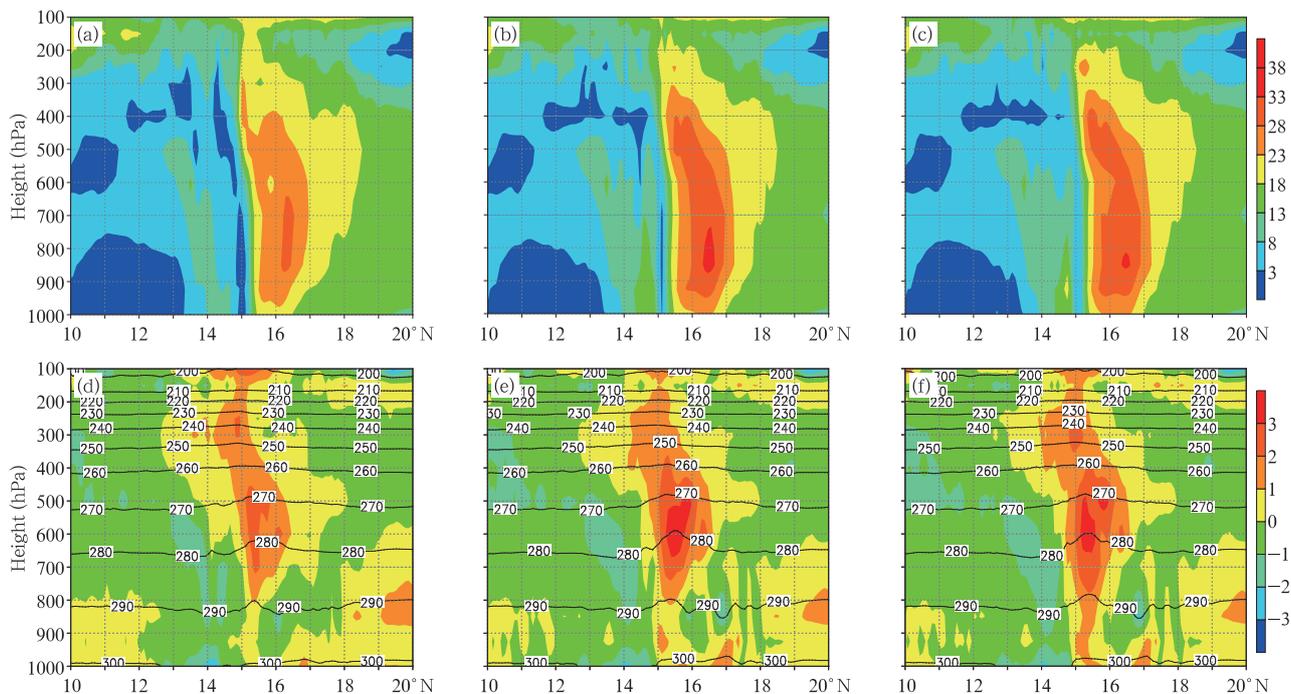


图5 与图4相同, 但为第12小时预报
Fig. 5 Same as Fig. 4 but for 12 h forecast

均结果(图 6)来看, τ 取 3—6 h 效果比较好。test-IAU-1 h 试验使得后期的路径误差大于对照试验, 而且对 24 h 之后的强度预报改进幅度最小, 这说明当松弛调整时间过短时, 模式风场和其他要素之间

的协调程度还不够, 随着预报时间的延长, 这种缺点会在台风路径和强度的预报误差中逐渐体现出来。在试验中选取 $\tau = 3$ h 作为最优调整时间。

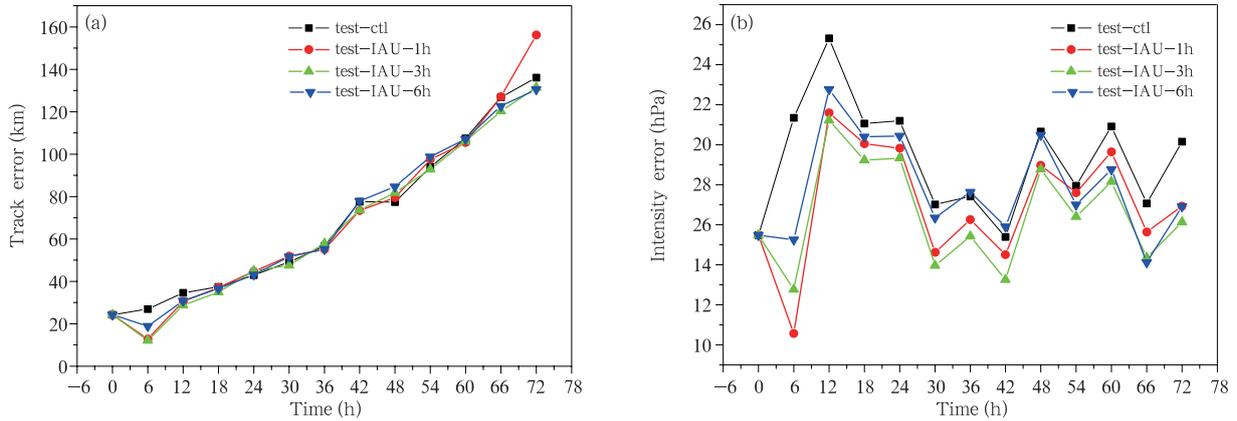


图 6 分析增量更新松弛时间对“山竹”台风预报结果的敏感性

(a. 路径预报误差, b. 强度预报误差)

Fig. 6 Sensitivity of the forecast of typhoon Mangkhut to IAU relaxation time:

(a. track error, b. intensity error)

5 总结

台风初始化方案最大的困难在于只能根据有限的观测资料(台风中心位置, 最低气压, 最大风速和大风半径等)来构造一个与模式动力-物理过程相互协调的涡旋模型。文中首先根据实际观测资料对背景场中的涡旋扰动进行重定位和风速调整, 然后将IAU技术应用于台风初始化方案中, 把调整后的涡旋当做一个强迫项逐渐加入到模式预报过程中, 通过模式自身调整来得到一个协调性较好的台风初始结构, 从而改善模式对台风的预报性能。通过对“山竹”台风的预报结果进行分析, 主要得到以下几点结论:(1)IAU台风初始化方法对于“山竹”台风路径误差影响较小, 但是对于其强度预报改进则比较明显, 72 h之内最低气压误差平均降低约 2 hPa。特别是在台风形成初期阶段, 台风初始化技术能够有效地加强欧洲中期天气预报中心分析场中的涡旋强度, 并解决预报过程中强度偏弱的问题。(2)根据预先给定的三维风场, IAU技术能通过模式自身预报过程来对其他变量进行调整, 从而得到一个热力和动力协调的初始涡旋结构。相对于仅对初始风场调整, 它对 24 h之后的路径和强度预报误差会有更进

一步的改善。(3)对IAU中的松弛时间进行参数敏感性试验, 发现该变量取为 3—6 h 效果较好。

需要指出的是: 随着全球模式分辨率越来越高, 相应的同化系统也在不断完善, 很多业务中心已经选择直接将全球分析场“降尺度”获得区域模式的初始场。但是由于全球模式在动力框架和物理过程方面都会存在较大的差异, 两者之间的这种不协调必然会导致区域模式出现“起转”的现象, 而且由于一些全球模式不进行台风初始化处理(比如欧洲中期天气预报中心全球模式), 在出现强台风时其中心强度明显比实况弱, 这也会在一定程度上影响台风预报效果。通过IAU初始化方法一方面可以将台风强度调整到与实况接近, 另一方面则可以构造出和区域模式协调的初始涡旋结构, 这对于改进台风预报效果有正面意义。

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, 17(6): 773-777 (in Chinese)
- 陈子通, 戴光丰, 钟水新等. 2016. 中国南海台风模式 (TRAMS-v2.0) 技术特点及其预报性能. 热带气象学报, 32(6): 831-

840. Chen Z T, Dai G F, Zhong S X, et al. 2016. Technical features and prediction performance of typhoon model for the South China Sea. *J Trop Meteor*, 32(6): 831-840 (in Chinese)
- 黄伟, 梁旭东. 2010. 台风涡旋循环初始化方法及其在 GRAPES-TCM 中的应用. *气象学报*, 68(3): 365-375. Huang W, Liang X D. 2010. A cycling typhoon-like vortex initialization scheme and its application to GRAPES-TCM. *Acta Meteor Sinica*, 68(3): 365-375 (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. *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. *Acta Meteor Sinica*, 68(1): 102-113 (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. *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 Trop Meteor*, 34(5): 598-609 (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*, 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. Impacts of radius of TC intensity correction to No. 1618 track prediction. *Acta Meteor Sinica*, 77(4): 662-673 (in Chinese)
- 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. *气象学报*, 67(5): 716-726. Qu A X, Ma S H, Liu Q F, et al. 2009a. The initialization of tropical cyclones in the NMC global model Part I: Scheme design. *Acta Meteor Sinica*, 67(5): 716-726 (in Chinese)
- 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. *气象学报*, 67(5): 727-735. Qu A X, Ma S H, Li J, et al. 2009b. The initialization of tropical cyclones in the NMC global model Part II: Implementation. *Acta Meteor Sinica*, 67(5): 727-735 (in Chinese)
- 徐道生, 陈子通, 钟水新等. 2014a. 对流参数化与微物理过程的耦合及其对台风预报的影响研究. *气象学报*, 72(2): 337-349. Xu D S, Chen Z T, Zhong S X, et al. 2014a. Study of the coupling of cumulus convection parameterization with cloud microphysics and its influence on forecast of typhoon. *Acta Meteor Sinica*, 72(2): 337-349 (in Chinese)
- 徐道生, 陈子通, 戴光丰等. 2014b. 对流参数化方案的改进对 GRAPES 模式台风预报的影响研究. *热带气象学报*, 30(2): 210-218. Xu D S, Chen Z T, Dai G F, et al. 2014b. The influence of an improved cumulus parameterization scheme on typhoon forecast from GRAPES model. *J Trop Meteor*, 30(2): 210-218 (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. *大气科学*, 43(5): 975-989. Xu X L, Liu Q F, Chen B D, et al. 2019. A vortex initialization scheme in the GRAPES-TCM: Technical description and implementation. *Chinese J Atmos Sci*, 43(5): 975-989 (in Chinese)
- 袁金南, 宋丽莉, 黄燕燕等. 2010. 一种初始涡旋重定位方法及热带气旋路径数值模拟试验. *热带气象学报*, 26(3): 257-263. Yuan J N, Song L L, Huang Y Y, et al. 2010. A method of initial vortex relocation and numerical simulation experiments on tropical cyclone track. *J Trop Meteor*, 26(3): 257-263 (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)
- Benkiran M, Greiner E. 2008. Impact of the incremental analysis updates on a real-time system of the North Atlantic Ocean. *J Atmos Ocean Technol*, 25(11): 2055-2073
- Bloom S C, Takacs L L, Da Silva A M, et al. 1996. Data assimilation using incremental analysis updates. *Mon Wea Rev*, 124(6): 1256-1271
- Kurihara Y, Bender M A, Tuleya R E, et al. 1995. Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon Wea Rev*, 123(9): 2791-2801
- Kwon H J, Won S H, Ahn M H, et al. 2010. GFDL-type typhoon initialization in MM5. *Mon Wea Rev*, 130(12): 2966-2974
- Lee M S, Kuo Y H, Barkaer D M, et al. 2006. Incremental analysis updates initialization technique applied to 10-km MM5 and MM5 3DVAR. *Mon Wea Rev*, 134: 1389-1404
- Lei L L, Whitaker J S. 2012. A four-dimensional incremental analysis update for the ensemble Kalman filter. *Mon Wea Rev*, 140(7): 2605-2621
- Ourmières Y, Brankart J M, Berline L, et al. 2006. Incremental analysis update implementation into a sequential ocean data assimilation system. *J Atmos Oceanic Technol*, 23(12): 1729-1744
- Polavarapu S, Ren S Z, Clayton A M, et al. 2004. On the relationship between incremental analysis updating and incremental digital filtering. *Mon Wea Rev*, 132(10): 2495-2502
- Takacs L L, Suárez M J, Todling R. 2018. The stability of incremental analysis update. *Mon Wea Rev*, 146(10): 3259-3275
- Tallapragada V, Kieu C, Trahan S, et al. 2016. Forecasting tropical cyclones in the Western North Pacific Basin using the NCEP operational HRRF model: Model upgrades and evaluation of real-time performance in 2013. *Wea Forecasting*, 31(3): 877-894