

几种台风初始化方法及其对比实验

王益柏 费建芳 张根生

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

提 要: 利用中尺度 MM5V3 模式及其伴随系统, 运用四维变分同化方法, 将 Bogus 台风作为观测资料进而优化台风初始场, 对 0422 号台风个例进行了数值模拟和试验, 并与传统 Bogus 方法和 Nudging 方法进行比较。结果表明, 经过 BDA 方案优化的台风初始场更加接近实际台风的结构, 有效地提高了台风路径和强度预报的准确率。

关键词: 四维变分资料同化 台风数值模拟 牛顿松弛法 BDA 方案

Three Typhoon Initialization Schemes and Comparison Experiments

Wang Yibai Fei Jianfang Zhang Gensheng

(Institute of Meteorology, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101)

Abstract: With MM5V3 and its adjoint system, the bogus vortex and the method of 4DVAR are used to generate an optimal initial condition of the typhoon Ma-on, compared with the initialization schemes of traditional Bogussing and Nudging. The results show that the optimal initial field produced by BDA scheme is closer to the observations and the forecast accuracy for both track and intensity is improved effectively.

Key Words: four-dimensional data assimilation typhoon numerical simulation Nudging BDA scheme

引 言

由于台风通常发生在海洋上,而海洋上观测资料稀少,因此如何确定合理的台风初始场结构是台风数值预报最具挑战性的问题之一^[1]。为了弥补初始场的不足,通常在大尺度环境场中加上一个能够描述出台风主要结构特征的人造台风涡旋(Bogus 涡旋)。国内外在这方面做了很多有意义的工作。如 Kurihara^[2] (1993 年)提出台风滤波方案,首先在大尺度分析场中消除质量较差的台风,然后加入一个 Bogus 涡旋。结果表明,此方法能够明显改进台风数值预报初始场,进而提高台风强度和路径预报准确率。Zou 和 Xiao^[3] (1999 年)提出一种基于四维变分资料同化技术的 Bogus 方案。万齐林等^[4] (2002 年)利用 TOVS 资料中获取的台风结构信息,来修订台风数值预报模式系统中人造台风模型结构,发现修订后的台风 Bogus 能够更好地与环境场协调,并且能对台风路径预报取得较好的效果。然而,虽然当前所用的台风 Bogus 技术通过解平衡方程或多或少地解决了一些动力问题,但涡度平流方程和静力方程没有得到解决,不同变量之间的耦合,尤其是水汽场同其它变量之间的耦合,没有真正做到。

四维变分资料同化^[5]是一种全新的四维同化方法。这种方法将动力学约束与热力学约束以及不同时刻的一切观测资料作为一个整体同时考虑,最终求解出一个最优初始条件,其台风初始场中各场变量之间相互协调并同模式协调一致,又能最大限度地接近实际情况。本文在 Bogus 技术的基础之上,引入四维变分同化方法(BDA 方法^[3]),重塑初始台风的内部结构,进而提高数值预报效果。通过同传统 Bogus 方法和 Nudging 方法的比较,分析了四维变分同化在台风路

径和强度预报中的优越性。

1 台风 Bogus 涡旋的构造

人造台风风场方案采用 Christopher 和 Simon^[6]提出的 Rankine 涡旋风场,通过泊松方程求解位势高度,然后由平衡方程得到温度场,而湿度场是单独构造。具体的构造方法可参考文献[6]。

海平面气压场(PMSL)则采用经验公式(1),通过 1000hPa 的高度场得到:

$$PMSL = \frac{Z_{1000}}{8.0} + 1000 \quad (1)$$

其中 Z_{1000} 是 1000hPa 气压层的高度场。

2 几种台风 Bogus 方案

如何将构造的 Bogus 台风加入到背景场中,现在用得比较多的有三种方法。一是传统的 Bogus 方案,二是 Nudging 方案,三是 BDA 方案。下面对这三种方法分别作简要介绍。

2.1 传统 Bogus 方案

通过距离权重,将人造台风平滑地加入到背景场中,从而得到台风初始场,公式如下:

$$f = (1 - w_{i,k})f^b + w_{i,k}f^o \quad (2)$$

其中, f 为加入台风 Bogus 涡旋后分析场, f^b 为背景场中滤去分析台风后的分析场, f^o 为台风 Bogus 涡旋, $w_{i,k}$ 为距离权重系数:

$$w_{i,k}^2 = \begin{cases} \frac{R_n^2 - r_k^2}{R_n^2 + r_k^2} & r_k^2 \leq R_n^2 \\ 0 & r_k^2 \geq R_n^2 \end{cases} \quad (3)$$

R_n 为台风影响半径, r_k 为第 k 个格点距台风中心的距离。

2.2 Nudging 方案

Nudging 方法 (Hoke 与 Anthes, 1976 年) 通过在预报方程中增加一个附加项 (松弛项) 使方程的解逼近观测值 (被内插到模式格点上), 水平方向控制方程如下 (其它方程类似):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla u + f_v - \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{u_{obs} - u}{\tau_a} \quad (4)$$

其中, u_{obs} 为观测值, τ_a 为松弛时间尺度。

2.3 BDA 方案介绍

BDA 方法将 Bogus 涡旋作为观测资料, 用四维变分资料同化方法将 Bogus 涡旋加入到背景场中, 得到动力和热力学上协调一致的台风初始场。定义距离函数为:

$$J(x_0) = J_b + J_p + J_v \quad (5)$$

其中, J_b 表示与背景场相关的代价函数, J_p 和 J_v 观测资料分别表示与海平面气场、三维风场相关的代价函数。

本文用 BDA 方法同化台风 Bogus 涡旋的海平面气压和风场。虽然只同化海平面气压和风场, 但在模式的约束下, 其它场变量也可以被强迫出, 许多研究^[1,3]已经证实了此结论。本文以 MM5 伴随系统 (Zou et al, 1997) 作为工具使距离函数达到最小, 从而得到最优的台风初始场。

四维变分同化过程中设定同化窗口为 30 分钟, 时间窗口内每 6 分钟读取一次“观测”资料 (Bogus 台风), 这也相当于假设^[3]在 30 分钟内台风海平面气压时间趋势接近于 0, 迭代步数设定为 30 步。

3 0422 号台风的数值试验

采用 PSU/NCAR 非静力中尺度有限区

域 MM5V3 作为台风预报模式, 使用三种不同的台风 Bogus 方案获取的初始场, 对 0422 号台风进行数值试验和模拟, 以此来比较三种台风 Bogus 方案的优越性。

方案 1: 传统 Bogus 方法, 通过距离函数加权调整, 产生最终的初始场;

方案 2: Nudging 牛顿松弛法产生最终的初始场;

方案 3: 用 BDA 方案将 Bogus 台风同化到初始场, 优化台风初始结构。

模式中所选参数及物理参数化方案如下: 水平网格点是 91×91 , 分辨率为 30km, 垂直分辨率为 23 层, 这里 23 层的 σ 值分别是: 0.025、0.075、0.125、0.175、0.225、0.275、0.325、0.375、0.425、0.475、0.525、0.575、0.625、0.675、0.725、0.775、0.825、0.870、0.910、0.945、0.970、0.985、0.995; 积云参数化方案为 GRELL 方案, 降水方案为显式方案, 行星边界层方案为 BLACKADAR 高分辨率方案, 侧边界条件为张弛边界条件, 上边界条件为辐射上边界条件。

4 结果分析

4.1 初始台风结构

与其它两种方案相比, BDA 方案得到的台风初始场不仅在强度和初始定位上与观测资料 (台风报) 更加接近, 而且其垂直结构更加合理。使用 Nudging 方法得到的初始时刻台风中心气压为 994hPa, 与台风报的 950hPa 相差 44hPa, 这可能是由于 Nudging 方法经过平滑, 使得台风中心海平面气压偏高。而经过传统的 Bogus 方法和 BDA 的调整后, 初始时刻中心气压大幅降低至 973hPa 和 976hPa, 而且台风中心初始位置更趋准确 (图 1)。

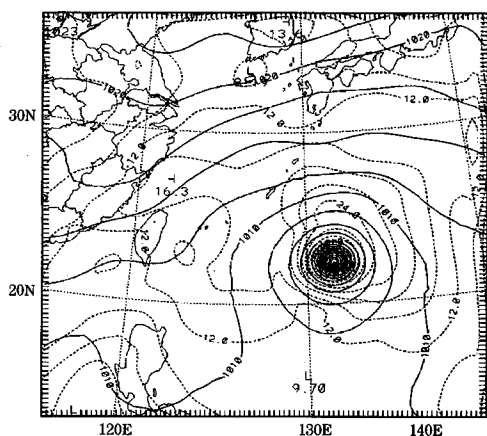


图1 BDA方案海平面气压(实线间隔: 2.5hPa)和850hPa风速场(虚线间隔: $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)分布图

图2是沿台风中心三种方案比湿差别的

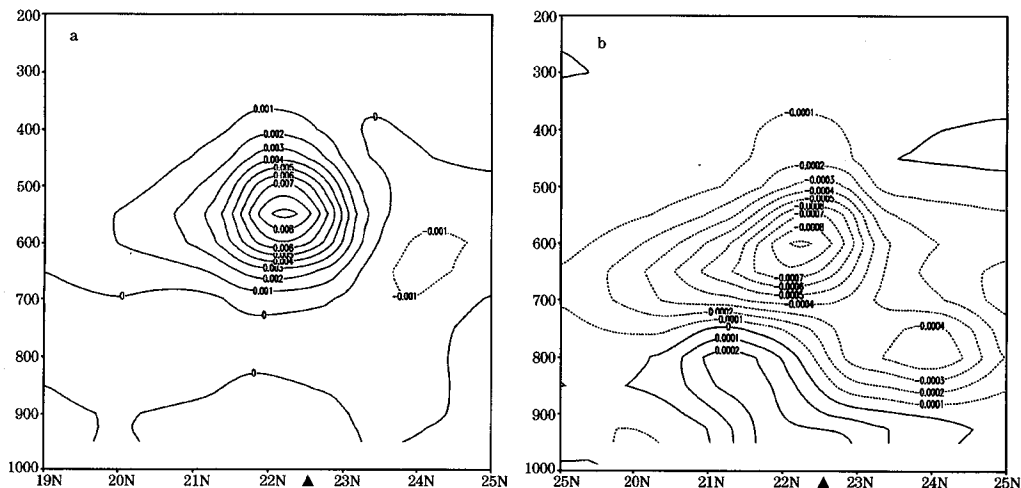


图2 沿台风中心(22.2°N, 131.9°E)两种方案比湿差(单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)南北向垂直剖面图
(a) BDA与Nudging方案的比湿差, (b) BDA与传统Bogus比湿差

4.2 台风路径

图3是三种不同的初始化方案对0422号台风路径预报的情况。从图中可以看出,三种方法都能大致模拟出台风的位置和移动,而且台风的转向得到了很好的体现。在前期预报中(12小时内),三种方法预报位

南北向垂直分布情况。比较BDA与Nudging方案可知(图2a),BDA方案在对流层中层的台风区域,产生了比Nudging方法更明显的湿中心,而且湿中心范围较广,两者差异在600~500hPa之间达到最大。而与传统Bogus相比(图2b),两者的显著差异在于,湿中心经过BDA过程之后被重新塑造,模式低层800hPa以下的台风中心附近的湿中心更加明显,改进了一贯的边界层平直湿度场的结构。这是因为在四维变分资料同化中,模式是作为约束条件,因此在模式的动力和热力强迫作用下,台风应有的暖湿结构被重塑,场变量之间能达到协调一致,并与模式相耦合。这是BDA方案优于其它两种方案的一个重要方面。

置非常接近,预报误差较小。但在随后各时段预报中,BDA方案对台风路径预报效果的改进要明显优于其它两种方法(图4),48~66h预报误差在40km以内,72小时误差为82.53km,远低于传统Bogus方法的189.71km和Nudging方案的100.73km。传统Bogus方案的预报结果在后期偏离台

风实际位置较大(54~72h)。传统 Bogus 方法的初始场存在一个预报扭曲(spin-up)的过程。因此,中后期预报的 0422 号台风的移动比观测资料要慢。而 Nudging 方法的预报效果在 BDA 和传统 Bogus 方案之间,这是因为, Nudging 是通过在预报方程中增加了一个附加项,可以使产生的初始场逼近观测值。图 4 是 72 小时内三种方法预报误差的变化趋势。BDA 方案在路径预报(42~72h)效果上的提高是明显的。对业务台风预报中心来说,36~48h 的预报误差的降低是尤其重要的^[2]。这可能是由于 Nudging 方法和 BDA 方案构造的台风能较好的同背景场耦合。

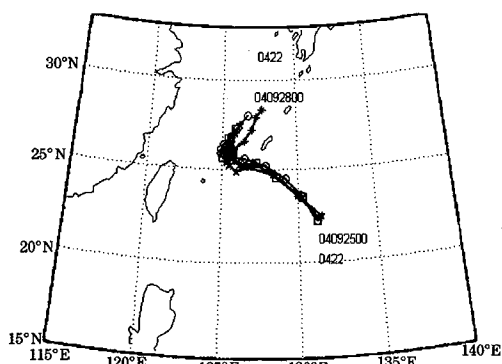


图 3 0422 号台风路径预报

* 为 Bogus 方案预报结果 ☆ 为 BDA 方案预报结果
□ 为 Nudging 方案预报结果 ○ 为台风实际位置

4.3 台风强度

图 5 是三种不同台风初始化方案 72 小时预报的台风强度变化情况。由图可知, BDA 和传统 Bogus 方法对强度的预报比 Nudging 要好, 这是因为 Nudging 在构造初始台风时使用了平滑, 使得台风初始场的中心气压偏高, 以至随后的强度预报误差较大。其中, BDA 方案强度预报效果最好, 尤其是 48~72h 预报结果与实测资料不断接

近。另外 BDA 和 Bogus 方法模拟了预报初期的台风强度的减弱过程, 值得注意的是, 预报中期(36h) BDA 预报结果有一个突然加强的过程, 与观测资料是吻合的。这在其它方法中没有得到体现。因此, BDA 方案较好地模拟了台风强度的变化情况。

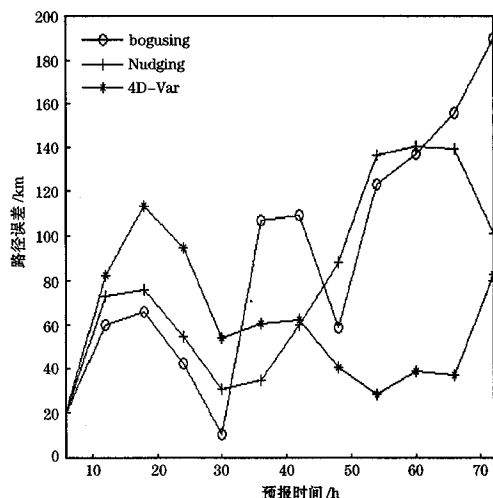


图 4 路径预报误差随时间变化图

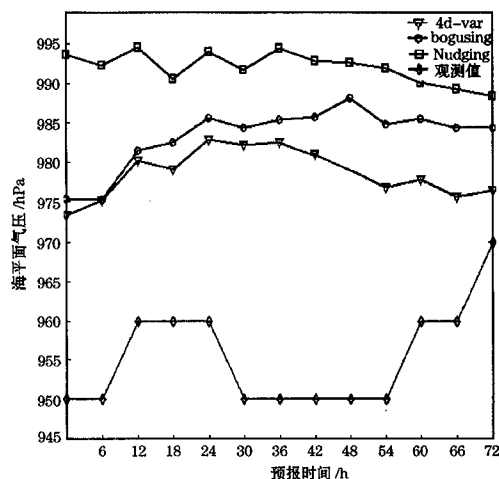


图 5 台风中心气压随时间变化趋势图

当然, 图 5 显示出三种台风初始化方案强度预报误差都比较大。这可能是由于在构造台风对称环流的过程中, 需要做极坐标与

经纬网格的插值转换,而且在提供给 MM5 做初始场的时候,还要进行经纬网格和格点网格之间的插值。插值过程必然会损失部分峰值,从而使得根据台风报构造出来的台风 Bogus 资料,其中心强度要偏弱。事实上,如果再将网格距给得非常小,则插值过程所造成的损失就变得非常小,那么最后构造出来的台风 Bogus 资料中心强度将会与台风报进一步接近。

5 结 论

通过三种台风初始化方案的对比实验可以得出如下结论:

(1) 台风不论是路径预报还是强度预报对初值都比较敏感,构造一个合理的初始场是台风预报的关键;

(2) BDA 方案可以构造动力热力都连续并且与大尺度环境背景场相协调的初始涡旋场,并且能够体现台风内部结构所具有的主要特征,如台风的暖湿中心。BDA 方案提供了更加合理的初始场,这对于研究和预报在严重缺乏观测资料的热带洋面上发生发展的台风涡旋是十分有现实意义的;

(3) BDA 较好地模拟了台风突然减弱和加强的过程,具有重要的实际意义。

当然文中还有许多不足之外,如 BDA

方案中权重系数的选取, Nudging 方法中松弛系数的选取也是根据经验确定,还有如何构造一个合理的背景误差协方差矩阵,这些都有待于下一步工作。

参考文献

- 1 Qingnong Xiao, Ying-Hwa Kuo, Ying Zhang, et al. Experiments of a Typhoon Bogussing Scheme in the MM5 3D-Var Cycling System. 26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, FL, 3—7 May 2004.
- 2 Kurihara Y, Bender M A, Tuleya R E, et al. An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon Wea Rev*, 1993, 121 (6): 2030—2045.
- 3 Zou Xiaolei, Xiao Qingnong. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *J Atmos Sci*, 1999, 57 (7): 836—960.
- 4 万齐林, 何溪澄. TOVS 中热带气旋结构及其在数值预报中的应用. *热带气象学报*, 2002, 18 (2): 97—103.
- 5 周毅, 刘宇迪, 桂祁奎等. 现代数值天气预报. 北京: 气象出版社, 2002: 195.
- 6 Christopher A. Davis and Simon Low-Nam. The NCAR-AFWA Tropical Cyclone Bogussing Scheme, A report Prepared for the AFWA, May 22, 2001.
- 7 Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1985, 111 (2): 877—946.