

袁炳, 费建芳, 王云峰, 等. 应用 ATOVS 资料和非对称 Bogus 资料对登陆台风韦帕的 4DVAR 数值模拟分析[J]. 气象, 2010, 36(5): 13-20.

# 应用 ATOVS 资料和非对称 Bogus 资料对 登陆台风韦帕的 4DVAR 数值模拟分析<sup>\*</sup>

袁 炳 费建芳 王云峰 卢 强

解放军理工大学气象学院, 南京 211101

**提 要:** 前人研究中 BDA 方法采用的轴对称 Bogus 台风不能反映个别台风具体特征并弃掉了背景场的合理成分, 也没有考虑大环境场的影响及湿热要素的同化。因此, 提出一种充分融合分析场信息和实际观测信息并考虑副高影响的精细非对称台风 Bogus 方法, 并在 MM5 的伴随同化系统中引入快速辐射传输模式 RTTOV8, 通过四维变分同化(4DVAR)技术, 加入海面风场和气压场 Bogus 资料及多颗卫星多条轨道上的 ATOVS 红外和微波卫星辐射亮温资料并考虑 Noah 陆面过程方案来对登陆台风韦帕进行数值模拟, 结果表明, 单独同化海面 Bogus 资料的 BDA 方案可间接产生初始场非对称三维环流结构和暖心结构, 但对湿度场及台风周围大环境场的调整不足, 台风登陆后的路径预报改善也不明显; 引入陆面过程方案弥补了 Bogus 资料对台风登陆后路径预报的不足; 加入 ATOVS 资料能对湿度场及台风周围环境场做出调整, 重构了大量中尺度结构信息, 取得更为精细的初始台风环流和温压湿场结构, 保持 BDA 方案路径及强度预报的优势的同时, 使预报的降水强度增加, 降水落区发生改变。

**关键词:** 数值天气预报, 台风初值化, 4DVAR, 非对称台风, ATOVS 资料, 台风模拟

## 4DVAR Numerical Simulation Analysis Using ATOVS Data and Asymmetrical Bogus Data on Landing Typhoon Weipha

YUAN Bing FEI Jianfang WANG Yunfeng LU Qiang

Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

**Abstract:** An axisymmetric Bogus vortex at sea level was used in the traditional bogus data assimilation (BDA) scheme. This vortex could not accurately describe the specific characteristics of the typhoon. The reasonable elements of the background field were discarded. And, the assimilation of thermal and humidity elements, and the impact of the large-scale environment, were not taken into account. Thus, an asymmetrical typhoon bogus method with blend information from the analysis and the observation is brought forward while the impact of the subtropical anticyclone is considered as well. Then the fast radiative transfer model RTTOV8 is planted into the adjoint model of the fifth generation NCAR/Penn State Mesoscale Model (MM5) to assimilate the brightness temperature and Bogus data based on the four-dimensional variational data assimilation (4DVAR) technique. A group of BDA experiments on landing typhoon "Weipha" for 48-hour simulation are studied. The Bogus sea level wind and pressure, and the multi-satellite and multi-orbital ATOVS data are assimilated. The Noah land surface model is employed in simulation. The results show that, the BDA scheme which assimilates Bogus data alone transmits the Bogus information from the sea surface to high layers, and an asymmetrical three-dimensional circulation assorted with the

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目 10871099、40805046、40830958, 公益性行业(气象)专项课题(GYH(QX)2007-6-15), 国家重点基础研究发展规划项目(973)课题(2009CB421502)共同资助

2009 年 5 月 23 日收稿; 2009 年 11 月 19 日收修定稿

第一作者: 袁炳, 主要从事海气数值模拟及资料同化. Email: yuanbing@163.com

model is brought out, the temperature is indirectly adjusted in whole layers, and a warm-core structure is strengthened. Whereas, the adjusting of humidity is deficient, the environmental fields outside the typhoon area cannot be adjusted well, and the improvement of track forecast is not obvious while the intensity forecast is greatly improved; The employment of Noah land surface model can improve the track forecast after landing; When ATOVS data are assimilated, significant adjustments are made on the humidity condition and environmental fields, lots of mesoscale information is reconfigured, more precise typhoon circulation and more precise thermal and humidity structure in the initial field is obtained. And the advantage of BDA scheme in track and intensity forecast is maintained, the precipitation intensity in forecast is increasing, and the precipitation location is changed.

**Key words:** numerical weather prediction, typhoon initialization scheme, 4DVAR, asymmetrical typhoon, ATOVS data, typhoon simulation

## 引言

Zou 等<sup>[1]</sup>提出的 BDA (Bogus Data Assimilation) 方法使台风路径预报得到了改善, 之后不少学者对 BDA 方案作了进一步研究并取得了较好结果<sup>[2-5]</sup>。这种传统 BDA 方案构造的是一个轴对称台风, 不能反映个别台风具体特征, 有必要改用更为精细的非对称台风 Bogus 模型来做出改进。BDA 方法一般只考虑体现动力性质的风场和气压场约束, 但台风的温湿场非对称结构同等重要的影响着台风的演变趋势<sup>[6]</sup>。BDA 方法也不能调整台风周围大环境场, 但台风与周围的环境场相互作用对台风的演变也有明显影响<sup>[7]</sup>。而 ATOVS 卫星辐射亮温资料与温湿廓线有关, 同时具有空间覆盖广的特点。国外一些研究及应用表明<sup>[8-10]</sup>, 利用三维或四维变分方法对 NOAA 极轨卫星 TOVS/ATOVS 特别是 AMSU 微波辐射率资料进行直接同化, 对数值预报水平的提高有较大贡献, 对模式预报水平的影响已经达到或超过传统的探空观测资料。毕宝贵等<sup>[11]</sup>对 TOVS 和云导风反演资料进行变分同化得到合成分析场也表明比仅用常规探空资料更接近实况, 弥补了实况资料的不足。万齐林<sup>[12]</sup>用 Grapes 三维变分同化系统对校准后的 ATOVS 反演产品进行同化分析也表明了 ATOVS 反演资料的价值。潘宁等<sup>[13-14]</sup>对 ATOVS 资料直接变分同化技术做了详细介绍, 并用 MM5-3DVAR 系统进行同化实验得到一些极具参考意义的结论。张华等<sup>[15-16]</sup>对西北太平洋台风威马逊作 AMSU 微波资料 3DVAR 直接同化试验, 对台风环流及湿热场产生了正面影响。任强等<sup>[17]</sup>则更为精细地考虑了台风数值预报中

AMSU 微波资料同化时云雨区的资料处理问题。从这些工作所启示, 对 ATOVS 资料进行同化正好能弥补 BDA 方法中温湿场及台风周围大环境场调整上的不足。另一方面, 台风降水的预报也是一大难点, 一些工作表明了台风降水的复杂性<sup>[18-20, 33-34]</sup>, 而对与大气湿度廓线密切相关的 ATOVS 资料进行同化正好可以为台风降水预报提供必要参考。

文中针对登陆台风韦帕, 在 BDA 方案中同化一种非对称海面风压场 Bogus 资料的同时, 引进快速辐射传输模式 RTTOV8, 利用四维变分同化技术, 把多星多轨道 ATOVS 卫星辐射亮温资料同化到模式中去, 优化初始场台风湿热结构及台风外围环境场, 以获取更精细的初始台风环流和温压湿场结构, 提高台风预报效果。考虑到韦帕台风陆面移行特性, 试验中引入了 Noah 陆面过程方案。

## 1 使用资料介绍

### 1.1 非对称 Bogus 资料

在以台风中心为原点的极坐标中, 考虑海面摩擦作用, 假定成熟台风呈稳定状态, 并在惯性项中考虑台风移动对曲率半径的影响, 从台风域内海面任意空气质点的水平运动方程可导出切向风和径向风的表达式:

$$v_{\theta}^3 + a_1 v_{\theta}^2 + a_2 v_{\theta} + a_3 = 0 \quad (1)$$

$$v_r = (-d\partial p / \partial \theta + rk v_{\theta} \cos \varphi) / (v_{\theta} + v_s \sin \alpha + fr + rk \sin \varphi) \quad (2)$$

式中  $k$  为摩擦系数,  $a_1 = 2(v_s \sin \alpha + fr + rk \sin \varphi)$ ,  $a_2 = (a_1/2)^2 + r^2 k^2 \cos^2 \varphi - rd\partial p / \partial r$ ,  $a_3 = -fr^2 d\partial p / \partial r - (v_s r d\partial p / \partial r) \sin \alpha - (kr^2 d\partial p / \partial r) \sin \varphi -$

$(rkd\partial p/\partial\theta)\cos\varphi$ 。 $\varphi$  为摩擦阻力偏离实际风矢量反方向的夹角,  $d$  为比容。式(1)求解可采用邢富冲<sup>[21]</sup>的卡当方程求解方法。 $v_\theta, v_r$  的求算关键是  $\partial p/\partial r$  和  $\partial p/\partial\theta$  的求取。引入藤田公式<sup>[22]</sup>, 考虑移动台风的非对称性质, 并进行风廓线约束推广, 得出如下形式:

$$p(r, \theta) = p_m(\theta) - \Delta p(\theta)/(1 + a[r/r_0(\theta)]^b)^{1/2} \quad (3)$$

其中  $p_m$  为台风外围环境气压,  $p_c$  为观测的台风中心海平面气压,  $\Delta p = p_m - p_c$ ,  $a$  为表征最大风速半径位置的参数, 其与方向有关。 $b$  为最大梯度风控制参数。 $p_m$  为环境气压, 其受到赤道高压或副热带高压等大尺度系统的影响时具有明显的方向性, 若台风只受副高引导沿高压边沿移动, 此时靠近副高一侧  $p_m$  比远离副高一侧大, 因此对  $p_m$  估算如下:

$$p_m(\theta) = p_\infty - p_a \sin(\theta - \alpha_0 - \beta_1) \quad (4)$$

$p_\infty$  为平均环境气压, 取其经典值 1010 hPa<sup>[23]</sup>。 $\alpha_0$  为台风移向,  $\beta_1 = \arcsin(\delta \sin\beta_0)$ ,  $\beta_0$  为实际移向与内力方向的夹角, 逆时针方向为正。内力方向取为西北偏北向<sup>[24]</sup>, 取  $\delta = 1/8$ <sup>[25]</sup>。而后采用 Kuyhara 等<sup>[26]</sup>的方法确定出分析台风中心位置及半径, 此半径上的最大气压和最小气压之差即为  $p_a$ , 再利用改进的 MM5 滤除方案<sup>[27]</sup>, 得出消去分析台风的基本风场。

为了得到台风常数  $r_0$ , 选取原分析场台风外围的一条既能反映台风系统又能反映周围天气系统影响的闭合等压线  $L(\theta)$ , 进行傅里叶级数插值拟合后并代入式(3)有

$$r_0(\theta) = L(\theta) \left\{ \left[ \left( \frac{\Delta p(\theta)}{p_m(\theta) - p_L} \right)^2 - 1 \right] / a \right\}^{-1/b} \quad (5)$$

$p_L$  为  $L(\theta)$  对应的气压。结合式(3)即可得出  $\partial p/\partial r$  和  $\partial p/\partial\theta$ , 代入式(1)和(2)即可求出台风域内风场, 然后将此风场与扣除移速后的基本场叠加得到最终风场, 这样, 基本场风速中的非对称成分得以部分地保留下来。气压场则由式(3)提供。文中不考虑海面非线性耗散作用, 取  $a = 1.2$ ,  $k = 1.7 \times 10^{-4}$ <sup>[23]</sup>,  $\varphi = 38^\circ$ <sup>[28]</sup>,  $p_c = 948$  hPa,  $p_a = 3.5$  hPa, 调整参数使台风域内最大风速等于观测得到的近地面最大风速即可。

## 1.2 ATOVS 卫星辐射亮温资料处理

卫星观测资料为 ATOVS-L1C 资料。同化时前需做一些预处理, 包括 AMSU-B 观测资料稀疏、临边检查和海岸检查、极值检查等<sup>[20]</sup>。同化通道 HIRS 为 5~7、11~16 通道, AMSUA 为 4~8 通道、AMSUB 为 3~4 通道。HIRS 资料剔除云量大

于 7 成的廓线<sup>[29]</sup>, AMSUA 资料的云检测使用降水概率率法<sup>[30]</sup>, AMSUB 资料的云检测采用 Bennartz 散射因子法<sup>[31]</sup>。

## 2 数值试验的设计

### 2.1 同化系统的设计

在 MM5 4D-Var 系统的基础上, 引入了快速辐射传输模式 RTTOV8, 使之能够直接同化卫星辐射亮温探测资料。目标泛函可以定义为:

$$J = J_B + J_{\text{Bogus}} + J_{\text{BT}} \quad (6)$$

其中  $J_B$  表示模式控制变量  $X$  与背景场  $X_B$  的偏差,  $J_{\text{Bogus}}$  表示模式模拟量与 Bogus 资料的偏差,  $J_{\text{BT}}$  表示模式模拟的卫星辐射亮温值与实际观测的卫星辐射值之间的偏差。 $J_{\text{BT}}$ 、 $J_{\text{Bogus}}$  具体表达式可参见文献[1]。 $J_B$  具体表达式可参见文献[13-14], 其中观测算子即应用 RTTOV-8 正演计算亮温资料的过程, 其主体是 RTTOV-8 模式, 但还包括了一些水平插值算子、垂直插值算子、通道选择算子和质量控制算子等。文中 ATOVS 资料的各通道权重系数给定的原则是使各个通道对代价函数的贡献大致均等。

同化卫星资料时, 首先给定初始迭代值  $y_0^0$ , 在预先设定的同化时间窗  $[t_0, t_N]$  内正向积分 MM5 预报模式, 每 6 个时步存储一次预报模式的状态矢量。同时在有卫星观测的时刻, 在卫星观测点正演模拟 ATOVS 参与变分同化通道的辐射值, 计算目标函数中背景场项与卫星资料强迫项的值; 当预报结束, 从同化窗的截止时刻开始, 在同化时间窗  $[t_0, t_N]$  内反向积分 MM5 伴随模式, 这里伴随模式的初值取为:  $\delta^* y(t_N) = W_N(y_N^0 - \hat{y}_N)$ ,  $\hat{y}_N$  为观测量。在此积分过程中, 伴随模式的基本状态量由 MM5 预报模式正向积分时存储的状态矢量  $y_N^0$  提供。而卫星强迫项的梯度则在具有卫星观测的时刻, 带入相应的 RTTOV-8 正演模拟值与 NOAA 卫星实际观测的偏差  $W_N(y_N^0 - \hat{y}_N)$  反向积分 RTTOV-8 的伴随模式得到。当反向积分到  $t_0$  时刻得到的值  $\delta^* y(t_0)$  即为目标函数相对于初始控制变量的梯度  $\nabla J(y_0)$ 。随后, 按照共轭梯度法确定的目标函数的下降方向, 用单向搜索法确定目标函数沿共轭方向充分下降的最优步长, 同时利用有限记忆拟 Newton 方法确定新的初始值  $y_0^1$ 。重复以上步骤, 就可以得到一系列的  $y_0^k$ , 直到按照预先给定的精度逼近最优的  $(y_0)_p$ 。最

后以  $(y_0)_p$  作为 MM5 预报模式的初始场进行预报, 检验卫星资料对模式预报精度的改进。

RTTOV8 的 43 个等压面的温度、水汽以及地表温度、地面附近风速和气压、云顶气压和云量等要素, 主要由 MM5 模式提供。对于温湿廓线中 MM5 模式层顶以上部分, 利用 NESDIS 标准气候廓线库合成不同纬度带、不同季节的气候参考廓线来填补<sup>[29]</sup>。臭氧取自模式本身提供的参考廓线。

## 2.2 试验方案的设计

选取 0713 号台风韦帕个例, 以 2007 年 9 月 17 日 18 时(UTC)作为初始时刻进行四维变分同化试验并作 48 小时模拟预报。模拟采用的数值模式为非静力版本的 MM5 模式及其伴随模式和 RTTOV8 模式及其伴随模式。分析资料为 6 小时间隔的  $1^\circ \times 1^\circ$  的 NCEP 分析资料、台风实测资料来自中国气象中心的分析实况。试验区域以  $25.5^\circ\text{N}, 124.5^\circ\text{E}$  为中心, 水平网格为  $75 \times 91$ , 网格距为 54 km, 垂直方向为分布不均匀的 23 层。同化窗口为 172 分钟, 同化迭代次数为 25, 优化算法采用有限内存准牛顿算法<sup>[32]</sup>, 积云参数化为 GRELL 方案, 边界层参数化为 MRF 方案。4 种数值试验方案如表 1 所示。

表 1 数值试验方案设计  
Table 1 The experiment schemes

序号	试验方案
方案 1	直接用 NCEP 分析资料作模拟预报(控制试验)
方案 2	加入非对称 Bogus 资料进行同化并作模拟预报
方案 3	方案 2 基础上考虑 Noah 陆面过程作模拟预报
方案 4	方案 3 基础上同时同化 ATOVS 资料并作模拟预报

ATOVS 资料轨道只覆盖约十几个纬度的区域, 而同一卫星经过同一地点的时间间隔较长不宜同时同化。为了扩大可用资料量, 采用多星多轨道的同化方案, 在 0 时刻加入 17 日 17 时 44 分的 NOAA-18 卫星 ATOVS 资料, 73 分钟和 171 分钟分别加入 19 时 13 分和 20 时 51 分的 NOAA-16 卫星的 ATOVS 资料, ATOVS 卫星资料近乎覆盖了整个模式计算区域。另外, 重点考察同化 ATOVS 资料的效果, 下文只涉及方案 1, 3, 4 的初始场和预报场试验结果分析。

## 3 数值试验结果分析

图 1 给出了初始时刻沿台风中心的温度场和经向水平速度场纬向剖面图。从图中看到, 方案 1 的温度线几乎东西向平直, 而方案 3 和方案 4 皆出现了暖心结构, 其中方案 4 因为加入卫星资料, 等温线出现了东西非对称性及一些中尺度扰动, 由于台风中心附近的 ATOVS 资料因云检测原因被剔除了, 故卫星资料所携带的信息是从外围向中心传播的。从水平风场分布来看, 后两种方案最大风速比方案 1 高, 东西两侧数值差异增大, 出现更明显的非对称性。而方案 4 的风场与方案 3 相比在高低层都变弱了, 原因为 ATOVS 辐射亮温资料与模式变量的高度非线性制约了目标泛函的总体下降程度使风场的调整达不到单独同化 Bogus 资料时的程度, 而非 ATOVS 资料本身的影响作用。同样可以看出卫星资料是从外围影响台风环流结构的。

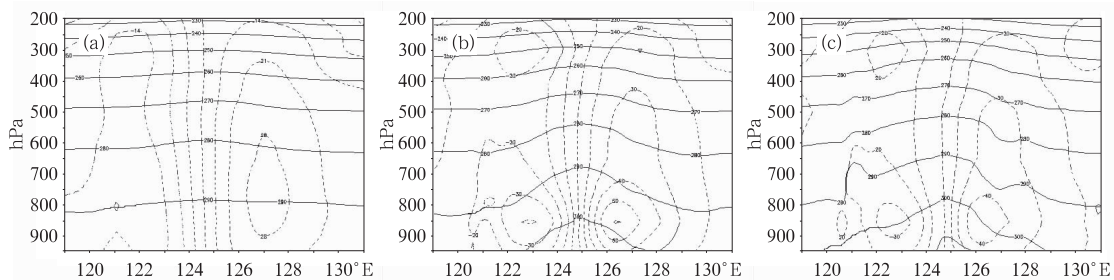


图 1 初始时刻沿台风中心的温度场(实线)和水平风场(虚线)纬向剖面

温度单位: K; 风速单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (a), (b), (c) 对应方案 1, 3, 4

Fig. 1 Latitudinal vertical profile of temperature (solid) and horizontal wind (dotted) along the typhoon center in initial field

Temperature Unit: K; wind unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . (a), (b) and (c) correspond to Schemes 1, 3 and 4

图 2 给出了方案 3, 4 初始时刻 600 hPa 等压面上的云雨水含量。加入了大量 ATOVS 卫星资料的方案 4 云雨水含量远大于方案 3。从图中也看出在

卫星资料覆盖了整个模式区域情况下, 优化得出的云雨水也只出现在台风周围的局部区域, 在南边尤其台风西南侧出现了大片的水汽输送带。这说明多

星多轨道同化方式能较好地优化出云雨水含量的合理分布。再与 2007 年 9 月 18 日 02 时(北京时)的风云二号气象卫星云图(图略)相比较来看,云雨水分布与云图分布具有一定的对应性。从云雨水分布图中还看到,选取多星多轨道的卫星资料进行同化,

对整个大环境场结构都有所调整,也反映出了大尺度云系结构及中小尺度云雨水分布及水汽输送状况。因 Bogus 资料的抑制和云检测等原因,方案 4 中台风中心附近区域上空的云雨水含量没有得到调整。

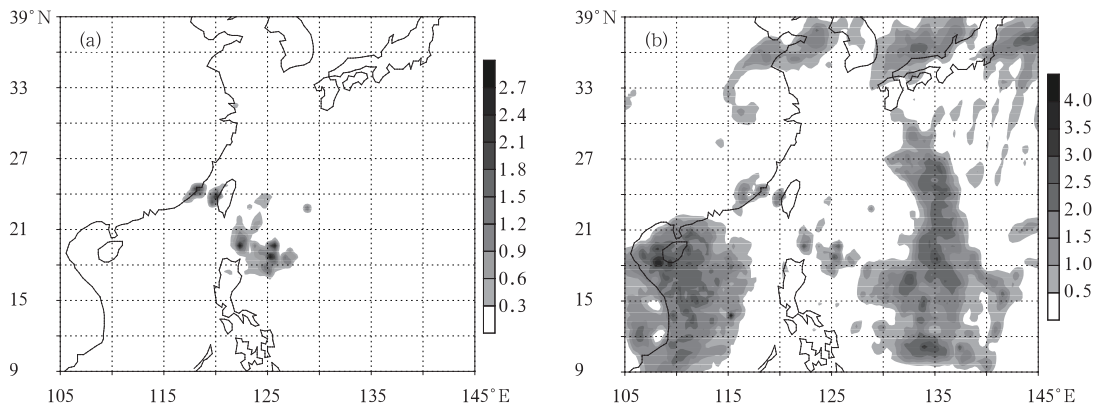


图 2 方案 3(a)和方案 4(b)初始时刻 600 hPa 等压面上的云雨水混合比(单位:0.001 kg/kg)

Fig. 2 Cloud water and rain water of Scheme 3 (a) and Scheme 4 (b) at 600 hPa in initial field (unit: 0.001 kg/kg)

图 3 给出了试验模拟 12 小时得到的经过台风中心的位涡纬向垂直剖面。3 个方案模拟 12 小时后在台风中心附近都维持一个涡柱结构。而方案 1 中位涡结构散乱,不能较好体现台风结构;方案 3 则是分别在中层和低层存在两个高中心,低层中心数值达到 9,且高于上层;方案 4 由于大量卫星资料的引入,其结构与方案 3 有所不同,其结构细腻,体现出更多的中尺度信息,且在高层、中层和低层都分别出现了高值中心,而高层中心数值大于低层。位涡作为一个综合反映大气动力学和热力学性质的物理

量,可定性地反映出台风的发展趋势<sup>[35-37]</sup>。当对流层中高层存在一个位涡高值中心时将会有利于对流层低层气旋性涡度的发展即有利于台风的发展。因此方案 3 不利于台风的发展。实际情况中台风仍处加强时期,因而方案 4 的位涡分布相对合理。然而方案 4 中的位涡峰值小于方案 3,其原因与图 1 风场的差异相对应。另外,不同于初始时刻 ATOVS 资料只影响台风外围的情况,模拟 12 小时后卫星资料信息已经从台风外围传播到了台风内部。

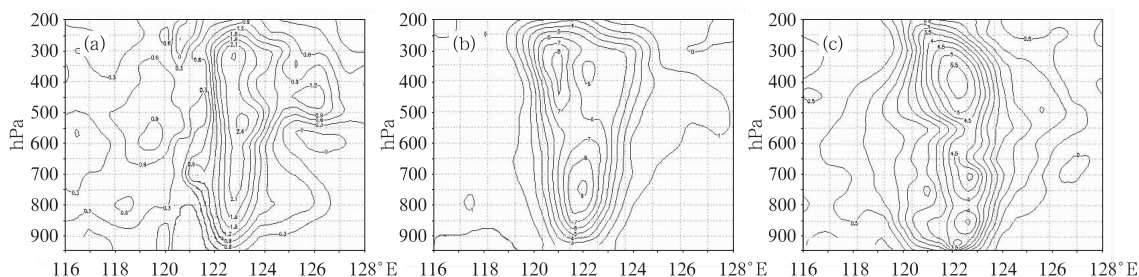


图 3 模拟 12 小时得到的经过台风中心的位涡纬向垂直分布

单位:PVU;(a),(b),(c)对应方案 1,3,4

Fig. 3 Latitudinal vertical distribution of potential vorticity (PV) along the typhoon center after 12 hours of simulation

unit: PVU. (a), (b) and (c) correspond to Schemes 1, 3 and 4

图 4 是 4 种方案间隔 6 小时的路径预报误差及强度演变误差。几种同化方案的路径预报效果都优于控制试验。前 12 小时内方案 2、3、4 的路径基本一致,之后经台湾岛时产生分离,24 小时前后登陆,

之后 3 个同化方案预报路径都继续偏离实况,没有深入内陆,而是在海岸附近擦边而过。然而方案 3 因为考虑了 Noah 陆面过程方案,其误差小于方案 2。方案 4 加入 ATOVS 资料后台风的路径预报改



善不明显,说明表征动力学变量的 Bogus 资料一定程度上控制着路径预报模拟效果。强度误差图中,由 NCEP 分析资料得到的强度预报效果较差;方案 2 的结果有了相当大的改善,整个过程预报误差较为平稳;考虑 Noah 陆面过程之后,方案 3 的预报强度稍比方案 2 弱,这恰好与实况更为接近。方案 4

加入大量 ATOVS 卫星资料后,基本能保持 BDA 方法的强度控制优势。同化方案试验中,初始时刻台风处于成熟期,于是模拟试验都存在预报中后期台风过度发展的现象,这是台风后期路径预报不准确的原因之一。

图5是方案1、3、4模拟得到的24小时降水量

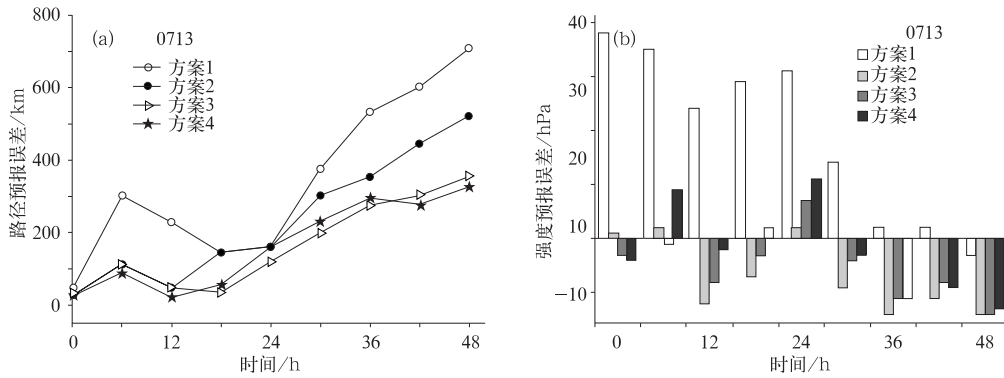


图 4 间隔 6 小时的路径预报误差(a)及强度预报误差(b)  
Fig. 4 Distance error of track simulation (a) and central sea level pressure error of intensity simulation (b) at 6-hour interval

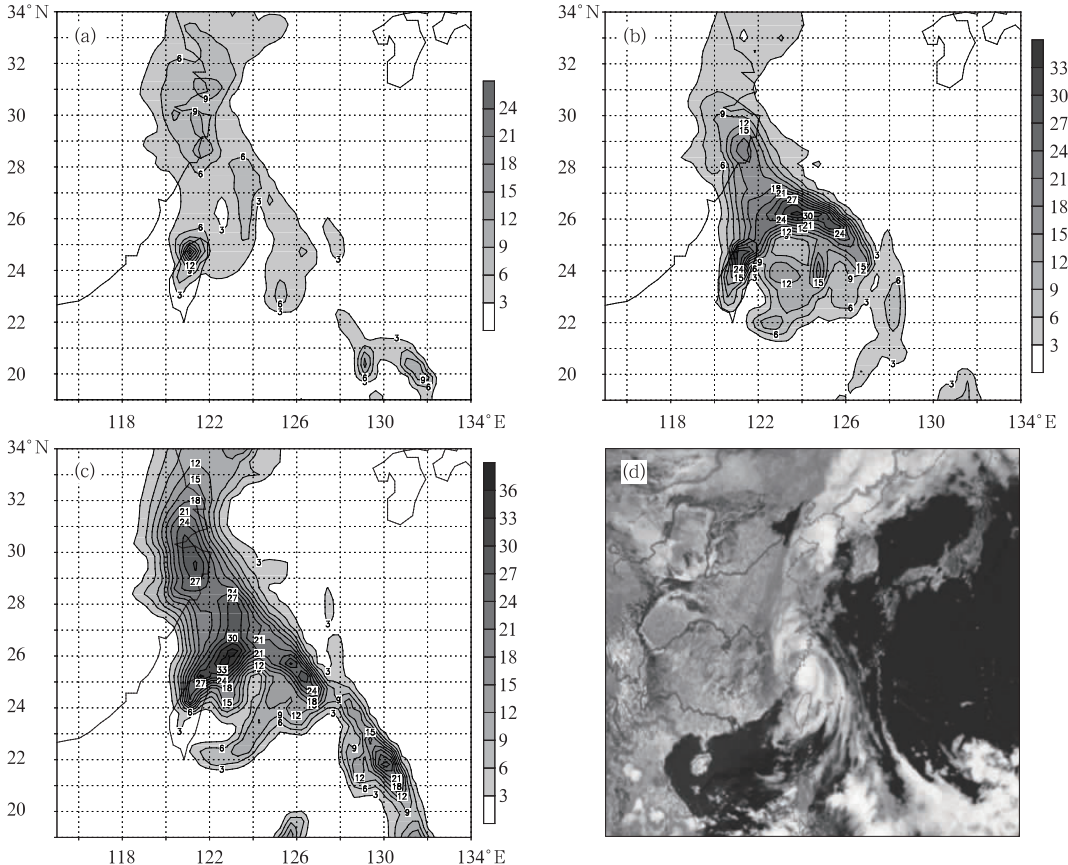


图 5 模拟得到的 24 小时降水量分布和风云二号卫星云图  
降水:cm; (a) 方案 1; (b) 方案 3; (c) 方案 4; (d) 卫星云图  
Fig. 5 The 24-hour simulated precipitation and FY-2C satellite cloud image precipitation unit: cm. (a) scheme 1, (b) scheme 3, (c) scheme 4; (d) satellite cloud image

(大于 3 cm)。方案 1 降水分布零散且雨量偏小;方案 3 的降水强度比方案 1 增大,降水落区与 Bogus 资料相对应;方案 4 的降水范围比方案 3 扩大,降水落区发生改变,降水强度进一步加大。与 2007 年 9 月 19 日 02 时(北京时)的风云二号气象卫星云图(图 5d)比较得知,方案 4 的雨带分布较好地符合了卫星云图的云带分布,且降水落区与方案 1 较为相似,原因为 NCEP 分析资料事实上已经过众多观测资料的大尺度同化、分析及订正,Bogus 资料的加入使这种订正失效,而在中尺度区域模式中同化 ATOVS 又使得大尺度背景场的订正得以部分恢复,同时降水强度较方案 3 稍有增加,降水落区发生改变。由于海上降水观测资料的缺乏及篇幅有限,此处不再探讨 ATOVS 资料同化对降水状况的影响。

## 5 结 论

(1) 提出的非对称 Bogus 方法包括:从考虑摩擦的水平运动方程导出卡当方程形式的风速公式并求解;对台风外围闭合等压线进行傅里叶级数插值拟合;计算副高影响下各个方向的环境气压;对藤田公式作非对称推广和风廓线约束;Bogus 风场吸收滤除弱涡旋并扣除台风移速后的基本场成分。该方法全程以非对称形式计算,避免了假定台风轴对称时引入非对称量的难题,也避免了假定台风呈椭圆时所带来的难以确定风场长短轴方向的难题,还避免了给定最大风速半径时的不确定性。该方法考虑非对称性质并吸收基本场信息及估算副高影响,只针对台风初值化设计,其他场合未必适用。

(2) BDA 方法对台风韦帕临近登陆及登陆后的路径预报误差较大,而考虑 Noah 陆面过程后路径预报效果有很大提高。

(3) 同化 ATOVS 资料对台风韦帕动力场影响较小,能保持 BDA 的强度控制特性和路径预报效果;同化 ATOVS 资料能有效调整台风韦帕初始场湿热场结构,并加入中尺度结构信息,对台风韦帕的模拟降水强度及降水落区产生较大影响。

(4) 成熟台风在模拟后期往往过度发展,这是 BDA 方法延长预报时效需要解决的问题之一。

(5) 怎样有效地把 ATOVS 资料尤其 HIRS 红外资料应用到台风数值预报中的云雨区中,这仍是一个需要解决的难题。

## 参考文献

- [1] Zou Xiaolei, Xiao Qingnong. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme[J]. *J Atmos Sci*, 1999, 57(6): 836-860.
- [2] Xiao Qingnong, Zou Xiaolei, Wang Bin. Initialization and simulation of a landfalling hurricane using a variational bogus data assimilation scheme[J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(7): 2252-2269.
- [3] Zhang Xiaoyan, Wang Bin, Ji Zhongzhen, et al. Initializations and simulation of a typhoon using 4-dimensional variational data assimilation—Research on Typhoon Herb (1996) [J]. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20(4): 612-622.
- [4] Wang D L, Liang X D, Zhao Ying, et al. A comparison of two tropical cyclone bogussing scheme. *Weather and Forecasting*[J]. 2008, 23(1): 194-204.
- [5] 王益柏,费建芳,张根生. 几种台风初始化方法及其对比实验[J]. *气象*, 2006, 32(2): 3-8.
- [6] Chen Lianshou, Xu Xiangde, Xie Yiyang, et al. The effect of tropical cyclone asymmetric thermodynamic structure on its unusual motion[J]. *Sci Atmos Sin*, 1997, 21(1): 83-90.
- [7] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京,气象出版社,1991.
- [8] Kelly G. Impact of observations on the operational ECMWF system. *Tech. Proc. 9th International TOVS Study Conference, Igls, Austria, Feb. 1997*, 20-26.
- [9] English S J, Renshaw R J, Dibben P C, et al. A comparison of the impact of TOVS and ATOVS satellite sounding data on the accuracy of numerical weather forecasts[J]. *Q J Roy Meteor Soc*, 2000, 126: 2911-2931.
- [10] Bouttier F, Kelly G. Observing-system experiments in the ECMWF 4D-Var data assimilation system[J]. *Q J Roy Meteorol Soc*, 2001, 127: 1469-1488.
- [11] 毕宝贵,林建,徐晶. 气象卫星资料在天气预报分析业务中的应用[J]. *气象*, 2004, 30(11): 19-23.
- [12] 万齐林. 气象遥感资料变分校准方案改进及应用试验[J]. *气象*, 2006, 32(11): 19-24.
- [13] 潘宁,董超华,张文建,等. 变分同化及卫星资料同化[J]. *气象科技*, 2001, 2: 29-36.
- [14] 潘宁,董超华,张文建. ATOVS 辐射率资料的直接变分同化试验研究[J]. *气象学报*, 2003, 61(2): 226-236.
- [15] 张华,丑纪范,邱崇践. 西北太平洋威马逊台风结构的卫星观测同化分析[J]. *科学通报*, 2004, 49(5): 493-498.
- [16] Zhang Hua, Xue Jishan, Zhu Guofu, et al. Application of direct assimilation of ATOVS microwave radiances to typhoon track prediction[J]. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21(2): 283-290.
- [17] 任强,董佩明,薛纪善. 台风数值预报中受云影响微波卫星资料的同化试验[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(2): 137-146.
- [18] 钱传海,路秀娟,陈涛. 引起“碧利斯”强降水的 MCS 数值模拟研究[J]. *气象*, 2009, 35(4): 11-19.
- [19] 黄忠,张东,蔡安安,等. 台风远外围大范围强对流天气成因

- 综合分析[J]. 气象, 2007, 33(1): 24-31.
- [20] 林毅, 刘铭, 刘爱鸣, 等. 台风龙王中尺度暴雨成因分析[J]. 气象, 2007, 32(2): 22-28.
- [21] 邢富冲. 一元三次方程求解新探[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2003, 12(3): 207-218.
- [22] Fajita T. Pressure distribution in typhoon[J]. Geophys Mag, 1952, 23: 437.
- [23] 房文鸾, 徐启明, 章家琳, 等. 东海台风域内的风速分布[J]. 海洋预报, 1987, 4(3): 1-14.
- [24] 胡邦辉, 谭言科, 张学敏. 海面热带气旋域内风速分布[J]. 大气科学, 1999, 23(3): 316-322.
- [25] 钮学新. 台风的内力[J]. 大气科学, 1983, 7(1): 42-49.
- [26] Kurihara Y, Bender M A, Ross R J. An initialization scheme of hurricane models by vortex specification [J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2030-2045.
- [27] 黄小刚, 费建芳, 陆汉城. 消去分析台风方法的对比研究[J]. 应用气象学报. 2006, 17(1): 81-86.
- [28] 章家琳, 隋世峰. 台风波浪数值预报的 CHGS 法 II: 台风风场中梯度风摩擦修正系数和风向内偏角的计算[J]. 热带海洋, 1989, 8(1): 58-66.
- [29] 马刚, 方宗义, 张凤英. 云参数对 RTTOV5 模式模拟误差的影响分析[J]. 应用气象学报, 2001, 12(4): 385-391.
- [30] Crosby P S, et al. Estimating the probability of rain in an SSM/I FOV using logistic regression[J]. J Applied Meteorology, 1995, 34(11): 2476-2480.
- [31] Bennartz R, Thoss A, Dybbroe A, et al. Pre analysis using the advanced microwave sounding unit in support of nowcasting applications[J]. Meteorological Applications, 2002, 9: 177-189.
- [32] Liu D C, Nocedal J. On the limited memory BFGS method for large scale optimization[J]. Math Programm, 1989, 45(3): 503-528.
- [33] 李勋, 李泽椿, 赵声蓉, 等. “浣熊”强度变化的环境背景和卫星观测分析[J]. 气象, 2009, 35(12): 21-29.
- [34] 梁卫芳, 耿敏, 李庆宝. 台风韦帕全区性大暴雨过程分析[J]. 气象, 2009, 35(1): 74-79.
- [35] 寿绍文. 位涡理论及其应用[J]. 气象, 2010, 36(3): 9-18.
- [36] 黄亿, 寿绍文, 傅灵艳. 对一次台风暴雨的位涡与湿位涡诊断分析[J]. 气象, 2009, 35(1): 65-73.
- [37] 季亮, 费建芳. 登陆台风等熵面位涡演变的数值模拟研究[J]. 气象, 2009, 35(3): 66-72.