

“中国登陆台风外场科学试验”风廓线仪探测资料 在四维同化中的初步应用研究^{*}

张胜军¹⁾ 徐祥德¹⁾ 吴庆梅²⁾ 孟智勇¹⁾

¹⁾ (中国气象科学研究院, 北京 100081)

²⁾ (北京市气象局, 北京 100089)

摘 要

该文将“中国登陆台风外场科学试验”(CLATEX)中得到的风廓线仪探测资料加入到模式中进行牛顿张弛逼近(nudging)四维同化分析,并讨论在同化过程中不同 nudging 时间间隔以及不同逼近因子对风场及降水数值模拟结果的影响。结果表明:将风廓线仪探测资料通过 nudging 技术同化到模式中,一定程度上改善了对降水的数值模拟结果;单纯应用 nudging 技术及单点的风廓线仪探测资料,通过缩短 nudging 时间间隔以最终改进同化效果有一定局限性;合理的选择逼近因子值($4.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$)得到的同化结果与实况更为接近。

关键词: 风廓线仪 四维同化 数值模拟

引 言

台风的灾害往往是台风登陆造成的。在台风的登陆过程中,由于下垫面发生根本性的变化,导致其结构发生剧烈变化,引起其强度、路径、风雨分布等变化,因此对登陆台风的研究具有重要的理论价值和实用意义。目前,国外关于登陆台风的外场科学试验和研究计划,主要有 TOST、CBLAST、ATCCIP、DOTSTAR 等,这些试验已取得大量研究成果^[1]。中国在这方面也开展了大量工作,2002 年 7~8 月在广东台风登陆高频区阳江海陵岛首次实施了代号为“CLATEX”(China Landfalling Typhoon Experiment)的“中国登陆台风外场科学试验”,试验中首次启用风廓线仪、车载流动型大气剖面仪、多普勒声雷达、风温湿度梯度观测、超声风速仪、光学雨量计、铁塔大气边界层风和温度观测等,对目标台风“黄蜂”进行了追踪观测,获取了大量登陆我国台风内部和环境场的精细资料,并已有一定研究成果^[2]。

由上述众多外场科学试验可以看到,目前风廓线仪探测资料在大气探测中得到广泛的应用^[3],但同时也可看到,这种高分辨率的非常规观测资料在数值模式中的应用研究还比较少,尤其在如何将资料同化到模式中以进一步改进模式的初始场方面。本文尝试将 CLATEX 获取的风廓线仪探测资料,通过牛顿张弛逼近技术同化到数值模式当中以改进模式的初始场,并进一步改进模式的预报效果;同时探讨一些相关问题,例如:是否

* 国家科技基础条件平台工作项目“气象资料共享系统建设”和国家自然科学基金项目“登陆台风结构和强度突变及其影响的机理研究”(40175019)共同资助。

2004-06-16 收到,2004-11-16 收到修改稿。

在同化过程当中资料的时间分辨率越高,同化的效果越好;对于单点的风廓线仪资料,牛顿张弛逼近技术中不同逼近因子对数值模拟结果的影响等。

1 牛顿张弛逼近四维同化方法简介

所谓牛顿张弛逼近技术(nudging)是一种连续性的动力同化方法,在预报开始之前的一段时间内,通过在一个或几个预报方程中增加一个与预报和实况的差值成比例的虚假倾向项,在可使用观测资料的时段内,使模式解逼近实测资料,并使变量之间达到动力协调;然后用这样的模式解作为预报初值,以提高模式预报效果。前人的研究表明^[4~8], nudging 可用来同化任何时空分布的与模式变量相对应的资料,我国学者也在 nudging 技术的应用研究方面进行了一定的探索^[9~12]。常用的 nudging 方法有两种,一种为格点分析场的 nudging,另外一种为站点资料的 nudging。

在分析场的 nudging 方案中,假定分析场资料时间间隔为 Δt ,模式要完成从 t_1 到 t_2 时段内的同化过程,首先是把 t_2 时刻的分析场内插至 t_1 到 t_2 之间每个时间步上得到分析内插值 $\bar{\alpha}_0$,这样在每个时间步的每个格点上都有一个模式积分值 α 和分析场的内插值 $\bar{\alpha}_0$ 。在修正某一格点某一时刻的倾向值时,对于一个给定的预报变量,只要在其预报方程中加入一个分析逼近项,此逼近项与该变量在每个网格点上的模式计算值和分析值的差成正比,即把 $(\bar{\alpha}_0 - \alpha)$ 乘上一个适当的系数,该系数包括逼近因子、四维权重因子及分析场的质量因子。这样,在每个时间步上对每一个格点值进行修正,使模式值逼近分析值。

而站点 nudging 方案与分析场的 nudging 方案类似,只是不需要观测资料在模式格点上的值,而是利用落在以每一时间步为中心点的提前确定的时间窗口内的观测值。模式值与观测值之间的差是在观测点上计算,然后把它分析到观测点周围的格点上去。

对某一变量 α ,倾向方程为

$$\frac{\partial p^* \alpha}{\partial t} = F(\alpha, X, t) + G_a \cdot p^* \frac{\sum_{i=1}^N W_i^2(X, t) \cdot \gamma_i \cdot (\alpha_0 - \hat{\alpha})_i}{\sum_{i=1}^N W_i(X, t)} \quad (1)$$

式(1)中, α 为模式的积分变量, X 为空间变量, t 为时间, p^* 为地表参考气压减去模式顶气压的差值。式(1)右端第 1 项 $F(\alpha, X, t)$ 为物理强迫项(平流、科里奥力、物理过程等),第 2 项为同化项,其中 G_a 代表逼近因子,它决定了模式中同化项相对于物理强迫项中所有模式物理过程的大小, i 为距某一个格点一定距离内的所有观测点数 N 中的第 i 个观测点, α_0 是变量 α 的观测值, $\hat{\alpha}$ 是模式诊断变量在三维空间中插值到观测点位置处的值, γ_i 为观测资料的质量因子,本文中设其为 1。 W 为四维同化权重函数,它决定着同化的空间、时间的变化,

$$W_i(X, t) = W_{xy} \cdot W_z \cdot W_t \quad (2)$$

式(2)中, W_{xy} 是水平权重函数, W_z 是垂直权重函数, W_t 是时间权重函数,其定义见文献[13]。

站点 nudging 方案不仅可同化非常规资料,而且因其提供平衡较好的模式初始场而显著减小模式初始时的 spin-up 效应,本文将采用站点资料的 nudging 同化方案,在对

CLATEX 期间获取的风廓线仪探测资料进行四维同化分析基础上,做进一步的数值模拟。

2 风廓线仪探测资料处理方法及模式简介

风廓线仪探测资料为站点资料,由于其时间分辨率较高,可以作为站点资料同化到模式当中。本文所使用的是“中国登陆台风外场科学试验”在阳江获取的风廓线仪探测资料,该资料在试验期间的分辨率为 2 min 或 3 min,垂直方向 300 m 以下为 50 m 间隔一个记录,300 m 以上为 100 m 间隔一个记录,最高为 3700 m。本文首先将资料的观测时间换算成模式时间,然后把风廓线仪探测系统所在地阳江的经纬度坐标变换得到其在正方形网格中的格点值。由于同化过程是在 σ 面上进行的,而风廓线仪探测系统观测得到的是不同高度上的风向、风速,且高度在 4000 m 以下,因此本文简单认为,对于任意一高度 z ,其对应的气压值为 $p = z/10$ 。在此基础上利用公式

$$\sigma = \frac{p - p_{top}}{1000 - p_{top}} \quad (3)$$

近似得到该高度对应的 σ ,其中 p_{top} 为模式顶气压,本文取为 100 hPa,由此即可插值得到该高度所在的层数 k 。得到风廓线仪探测资料的相应高度以后,即可通过前面介绍的同化方法将该资料用于站点 nudging 四维同化试验,其中四维同化的逼近因子 G_a 取为 $4.0 \times 10^{-4} s^{-1}$ 。

本文利用 PSU/NCAR 开发的非静力中尺度模式 MM5V3 作为系统的同化模式,模拟 2002 年 14 号强热带风暴“黄蜂”(以下简称“黄蜂”)登陆前后的结构变化及风雨分布。模式中采用的主要物理过程包括简单冰相的显式水汽方案、Kuo 积云对流参数化方案、MRF 高分辨率 PBL 方案以及随时间变化的侧边界条件。模拟时段的风廓线仪探测资料为 3 min 一个记录,另外在整个试验设计中均用 T213 资料作为大尺度背景场。

3 个例简介及模式的试验方案设计

2002 年 14 号强热带风暴“黄蜂”8 月 16 日生成于南海,19 日加强为强热带风暴。19 日 12:40(世界时,下同)在广东吴川登陆后北上减弱,其移动路径基本为西北偏北路径(图 1)。本文根据资料重点研究该热带气旋从接近登陆(19 日 00:00)至登陆后(20 日 00:00)这一时段同化风廓线仪探测资料对数值模拟结果的影响。

本文根据资料设计了 3 种试验方案:

试验 1 为对照试验。讨论经过 nudging 同化处理的初始场以及未经过同化处

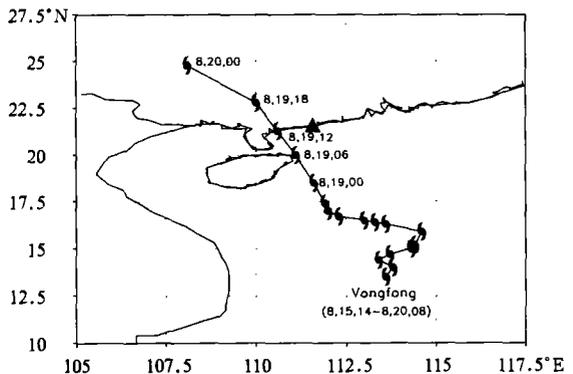


图 1 强热带风暴“黄蜂”实际路径 (▲CLATEX 外场试验位置)

理的初始场对数值模拟结果的影响。同化试验(SNU3)积分时段为8月19日00:00至20日00:00,其中19日00:00~06:00为 nudging 同化时段,每3 min 输入1次风廓线仪探测资料;无同化试验(SNO)积分时段为19日06:00至20日00:00。试验中模式中心为(22.5°N,112.5°E),格距为30 km,格点数为103×103。

试验2为根据资料调节 nudging 同化的时间间隔。设计方案同试验1中的同化试验(SNU3)设计,只是每30 min 输入1次风廓线仪探测资料(SNU30)。此试验是为了探讨对于单站观测资料,在同化过程中通过加密的时间观测资料是否会对模式模拟结果有明显影响。

试验3讨论对于单站观测资料,不同逼近因子(nudging factor)对数值模拟结果的影响。

4 数值模拟结果分析

4.1 试验1数值模拟结果分析

在同化试验(SNU3)中,由 nudging 同化时段结束时(19日06:00)得到的风场可以看到,850 hPa 等压面上“黄蜂”中心位置与实况较为接近(图2a),而T213客观分析场上“黄蜂”中心位于实况“黄蜂”中心的东侧,与实况有一定差异(图2b),这在一定程度上说明将风廓线仪探测资料同化到模式中对“黄蜂”中心位置进行了修正。另外,在850 hPa 温度场上,同化场与T213客观分析场的误差在3℃以内(图略)。总体来说,将风廓线仪探测资料同化到模式当中对初始场有一定的影响,对风场有一定程度的改进。

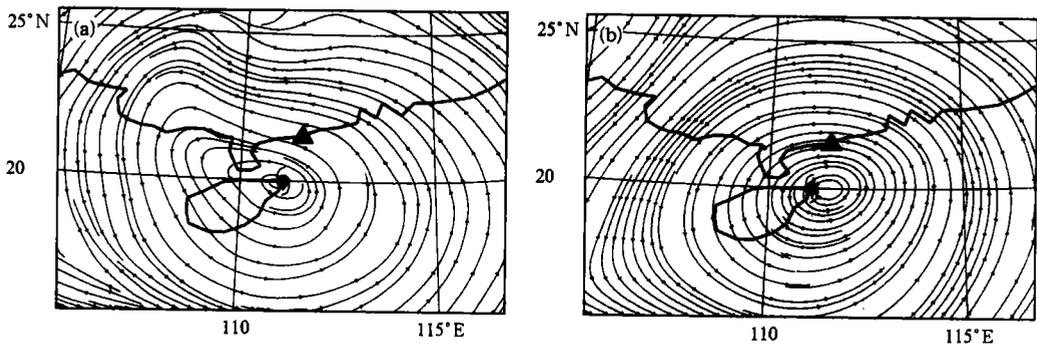


图2 2002年8月19日06:00 850 hPa 流场(a) 同化结果,(b) T213客观分析结果
(▲ CLATEX 外场试验位置, ● 实况台风位置)

分析“黄蜂”登陆时(19日12:00)850 hPa 流线分布我们可以看到,同化方案(SNU3)模拟得到的“黄蜂”中心已基本接近登陆(图3a),与实况台风中心位置比较接近,而无同化方案(SNO)模拟得到“黄蜂”中心基本位于海上(图3b),与实况台风位置有一定的差距。但另一方面,尽管将风廓线仪探测资料同化到模式中模拟得到的19日12:00的“黄蜂”位置与实况较为接近,对于该时段6 h 累计降水的数值模拟结果并不理想,虽然模拟得到的降水量级与实况比较接近,降水中心却与实况相比偏东偏北近300 km(图略),与

无 nudging 方案模拟得到的该时刻 6 h 累计降水分布比较一致(图略),可以认为同化得到的初始场对该时刻的降水模拟并不理想。

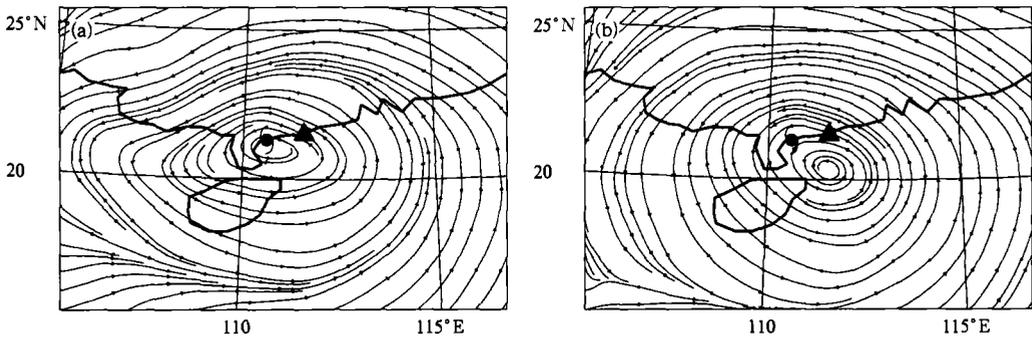


图3 不同初始场模式积分 6 h 得到 2002 年 8 月 19 日 12:00 850 hPa 流场
(a) 同化分析, (b) 无同化分析(说明同图 2)

进一步分析 19 日“黄蜂”登陆后 18:00 的 6 h 累计降水的数值模拟结果。由实况降水可以看到,在 24°N,109°E 及 21.5°N,110°E 附近有强降水中心(图 4a)。同化方案模拟出了该时段 24°N,109°E。附近的强降水中心,对另一强降水中心没有模拟出来,另外局部地区有虚假的强降水中心产生(图略);而无同化方案对该时段的两个强降水中心均没有模拟出来,同时局部地区也有虚假的强降水中心。由实况降水场以及模拟降水场沿 109°E 经向变化可以清楚看到,同化方案(SNU3)模拟得到的 24°N,109°E 附近的降水强度与实况较为接近,而无同化方案模拟结果与实况有较大的差距(图 4b)。

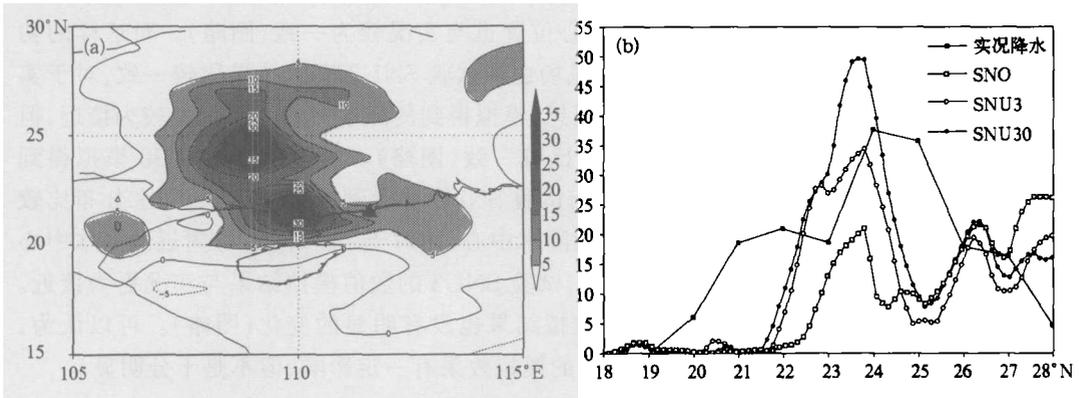


图4 (a)2002 年 8 月 19 日 18:00 观测获得的 6 h 累计降水量(单位:mm)
(b) 不同试验方案得到的 6 h 累计降水沿 109°E 变化曲线(单位:mm)

由 2002 年 8 月 19 日 18:00 试验 SNU3 与 SNO 850 hPa 风场分量偏差可以看到,经同化试验中 24°N,109°E 附近东风加强(图 5a),西北向北风加强,东南向南风加强(图 5b),导致南北向在 24°N,109°E 附近有风场的辐合;从 850 hPa 垂直运动分布可以更清楚看到,将风廓线仪探测资料同化到模式中,24°N,109°E 附近对应一相对强的垂直运动中心(图略),而无同化试验积分得到的同时刻 850 hPa 等压面上 24°N,109°E 附近则无明显

的垂直运动中心(图略)。由此可见,由于风廓线仪探测资料被同化到模式当中使 24°N , 109°E 附近的辐合加强,进一步加强垂直运动,导致强降水中心产生。

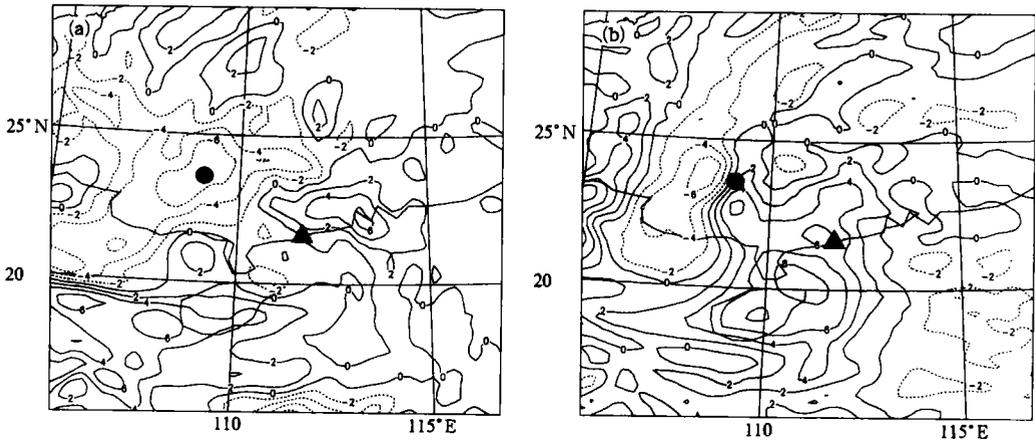


图5 2002年8月19日18:00试验SNU3与SNO 850 hPa风场分量偏差(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
(a) u 分量, (b) v 分量(说明同图2, ●为模拟得到的降水中心位置)

4.2 试验2数值模拟结果分析

丑纪范等^[14~16]的研究系统阐述了空间测站分布对四维变分同化效果的影响,证明可以利用观测资料所包含的时间演变信息确定出方程初值的空间分布状态。试验2(SNU30)想进一步证实时间的加密是否可以转化为空间的加密,并使同化的效果更好。

试验结果表明, nudging 同化时段结束时得到的19日06:00的初始场与试验SNU3得到的该时段初始场比较接近,“黄蜂”中心位置也与实况较为一致(图略)。对这样的初始场进行积分得到19日12:00 850 hPa风场也和试验SNU3模拟结果比较一致,对于实况中的强降水中心的数值模拟结果也不理想,模拟得到的降水强度虽与实况较为接近,但依然偏东偏北,与试验SNU3的模拟结果比较一致(图略)。对比分析SNU30模拟得到的19日18:00 6 h累计降水分布(图略)与试验SNU3可看到,二者得到的降水分布比较一致,但没有模拟出 21.5°N , 110°E 附近的降水中心,而对于 24°N , 109°E 附近的降水中心强度数值模拟结果偏强(图4b),相比之下,试验SNU3的数值模拟结果与实况更为接近。另外二者整个模拟过程中对风场的数值模拟结果也没有明显的变化(图略)。可以认为,通过改变同化 nudging 的时间间隔对模式的模拟效果有一定影响,但不是十分明显。

4.3 试验3数值模拟结果分析

在 nudging 中,逼近因子 G_a (以下简称 G_a) 决定了模式中同化项相对于物理强迫项中所有模式物理过程的大小,但同时由于该因子一般是经验确定的,具有一定的人为性,因此该因子的选取可能会对数值模拟结果产生一定的影响;如果该因子取值偏大,可能导致模式值过分的依赖于观测值;而如果该因子选取的过小,可能导致观测结果对于模式的进程影响很小。本文针对 G_a 变化进行了一组敏感性试验,讨论该因子对单点风廓线仪资料同化效果的影响,重点分析同化结束时(19日06:00)以及台风登陆时(19日12:00) 850 hPa风场的结果, G_a 分别取为 $5.0 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 、 $8.0 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 。

由同化时段结束时得到的 850 hPa 风场模拟结果可以看到,台风中心位置比 T213 客观分析场更为接近实际“黄蜂”中心位置。其中对于 G_a 为 $5.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, 随着 G_a 增大,逐渐从右侧接近实际“黄蜂”中心位置(图略),而对于 G_a 为 $8.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, 同化后得到的台风中心位置位于实际台风中心的左侧(图略),相比之下, G_a 取 $4.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 得到的台风中心位置与实况最为接近。

而进一步分析台风登陆时的同化效果可以看到 G_a 取 $8.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 得到的模拟结果(图 6a)与 G_a 取 $4.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 得到的模拟结果较为一致, G_a 为 $5.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 得到的台风中心位置与实况有一定的差距(6b, c),这也是本文将取 G_a 为 $4.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 的原因。

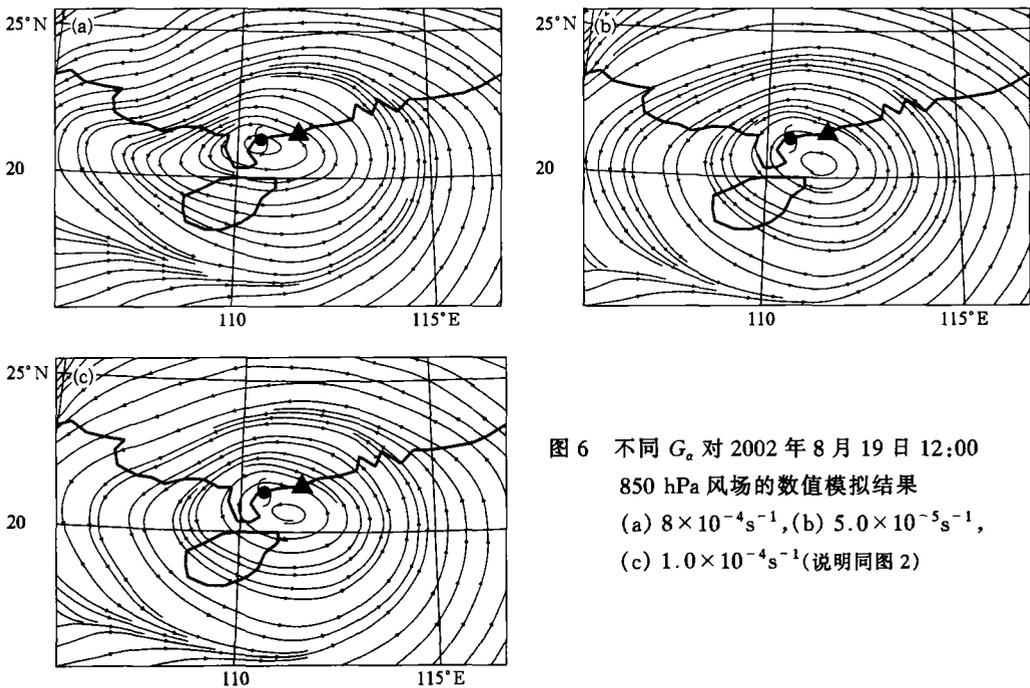


图 6 不同 G_a 对 2002 年 8 月 19 日 12:00 850 hPa 风场的数值模拟结果
(a) $8 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, (b) $5.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$,
(c) $1.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ (说明同图 2)

5 小结与讨论

本文将“中国登陆台风外场科学试验”中获得的风廓线仪探测资料进行数值模式四维同化处理的应用研究。研究结果表明:

(1) 采用中尺度非静力 MM5V3, 将风廓线仪探测资料通过站点 nudging 技术同化到 T213 客观分析场当中, 对于模式初始场有一定的影响, 且同化后的初始场对区域降水的数值模拟比无同化的初始场对区域降水的数值模拟有一定程度的改进;

(2) 采用现场试验的风廓线仪探测资料, nudging 时间间隔分别取 3 min 和 30 min, 两类方案得到的数值模拟结果较为接近, 即单纯的应用站点 nudging 技术及单点的风廓线仪探测资料, nudging 过程通过同化高时间分辨率资料较同化相对低时间分辨率资料对

数值模拟结果有一定改进,但改进不是十分明显;

(3) nudging 同化过程当中,不同的逼近因子值 G_0 对数值模拟结果有一定的影响,在试验中逼近因子取为 $4.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 得到的数值模拟结果与实况更为接近一些;

另外,本文的数值试验以及结论是针对一个个例及单点的廓线仪探测资料得出的,虽然讨论了四维同化的逼近因子 G_0 的取值对模式结果的影响,但同化项中权重因子的确定以及与之相关的时间和空间的影响半径对数值模拟结果的影响,还需进一步探讨。

参考文献

- 1 陈联寿. 国内外登陆热带气旋研究的进展. 第13届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集, 2004, 1:1~4.
- 2 张光智, 徐祥德, 王继志, 等. 国内外登陆热带气旋研究的进展. 第13届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集, 2004, 1:7~9.
- 3 Beran D W, Wilfong T L. U S Wind Profilers:A Review. FCM-R14-1998. Washington D C. 1998.
- 4 Stauffer D R, Seaman N L. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model, Part-I: Experiments with synoptic-scale data. *Mon Wea Rev*, 1990, **118**:1250~1277.
- 5 Stauffer D R, Warner T T, Seaman N I. A Newtonian "nudging" approach to four-dimensional data assimilation: Use of SEAME-IV data in a meso-scale model. Preprints, Seventh Conference on Numerical Weather Prediction, Montreal, *Ame Meteor Soc*, 1985, 77~82.
- 6 Bell R S. The meteorological office fine-mesh data assimilation scheme. *Meteor Mag*, 1986, **115**: 161~177.
- 7 Stauffer D R, Seaman N L. Aal-data numerical study and four-dimensional data assimilation application for mesobeta-scale flow in complex terrain. Proc Symp Mesoscale Analysis and Forecasting. Vancouver, ESA, 1987. 533~538.
- 8 Kuo Y H, Guo Y R. Dynamic initialization using observations from a hypothetical network of profiles. *Mon Wea Rev*, 1989, **117**:1975~1998.
- 9 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 卫星亮温资料四维同化方案及其对“7.20”武汉特大暴雨的模拟试验. *大气科学*, 2002, **26**(5):663~676.
- 10 张立祥, 周小珊, 李用左, 等. 非静力模式预报热带气旋路径个例试验. *南京气象学院学报*, 2000, **23**(1):73~80.
- 11 朱宗申, 马清云, 郝民, 等. HUBEX 区域资料同化系统. *应用气象学报*, 2002, **13**(2):170~178.
- 12 谢红琴, 高山红, 盛立芳, 等. 近岸区域及河口区台风风场动力诊断模型. *青岛海洋大学学报*, 2001, **31**(5):653~658.
- 13 Georg A G, Jimy D, David R S. A Description of the fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model(MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398 + STR. 1994.
- 14 郜吉东, 丑纪范. 数值天气预报中的两类反问题及一种数值解法——理想试验. *气象学报*, 1994, **52**(4):129~137.
- 15 郜吉东, 丑纪范, 李志锦. 一种利用气象要素场时变信息确定其空间分布状态的方法和数值模拟. *大气科学*, 1995, **19**(3): 257~269.
- 16 蒲朝霞, 丑纪范. 对中尺度遥感资料进行四维同化的共轭方法及其数值模拟. *高原气象*, 1994, **13**(4): 419~429.

RESEARCHES ON ATMOSPHERIC PROFILE OBSERVATIONS OF “CLATEX” IN FOUR-DIMENSIONAL DATA ASSIMILATION

Zhang Shengjun¹⁾ Xu Xiangde¹⁾ Wu Qingmei²⁾ Meng Zhiyong¹⁾

¹⁾ (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 10081*)

²⁾ (*Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089*)

Abstract

With strong tropical cyclone “Vongfong” as the target typhoon, and adopting the wind-profiler data gained from “CLATEX” into nudging four-dimensional data assimilation process of meso-scale model MM5V3, the influence of the different nudging-assimilation interval and nudging factor on the simulation were detected. Results demonstrate that the assimilated initial field was changed, the simulation of rainfall with assimilated initial field is better than that with directly objective analyzed field to some extent. Furthermore, the simulation is not changed too much by shortening the nudging time-interval in terms of the nudging method and the data from a single observation station. With nudging factor $4.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, the simulation is closer to the observations.

Key words: Wind-profiler Four-dimensional data assimilation Numerical simulation