

# 雷达径向风资料的四维变分同化试验

张 林<sup>1</sup> 倪允琪<sup>2</sup>

1 中国气象科学研究院数值预报研究中心, 北京 100081

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

**摘 要** 在 MM5 四维变分同化系统 (MM5 4D-Var) 的基础上开发出雷达径向风资料的同化模块, 利用改进后的同化系统对 2002 年 7 月 22 日湖北宜昌多普勒雷达的径向风观测资料进行四维变分同化试验, 分析雷达径向风资料的同化对中尺度数值模式初始场的调整以及对中尺度强降水模拟的影响。研究表明, 同化雷达径向风资料加强了中尺度对流系统低层 100 km 左右范围内的风场辐合。调整后的风场具有更明显的  $\beta$  中尺度特征。利用 14 min 的雷达径向风资料可以改进 3 h 之内的强降水模拟, 尤其是对雷达站东南侧强降水的模拟。

**关键词** 声雨滴谱仪 雨滴谱 层状云 对流云

**文章编号** 1006-9895(2006)03-0433-08

**中图分类号** P413

**文献标识码** A

## Four-Dimensional Variational Data Assimilation of Radar Radial Velocity Observations

ZHANG Lin<sup>1</sup> and NI Yun-Qi<sup>2</sup>

1 *Research Center of Numerical Prediction, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

2 *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

**Abstract** Assimilation of Doppler radar radial velocity data has recently received an increased interest to improve the numerical weather forecasts all over the world. But it is still facing many challenging issues, including how to process the radar data with appropriate data quality control, how to specify the spatial interpolation and discretization errors, how to extract the meteorological information from radar observations with the accuracy needed by numerical models. Four-dimensional variational data assimilation (4D-Var) allows observations to be assimilated into the model initial fields directly, which employ the non-linear model as a dynamic constraint. And the multi-time-level information, instead of one-time-level information, is used to improve the analysis. MM5 4D-Var system, which is based on the nonhydrostatic mesoscale model MM5, is a famous four-dimensional variational data assimilation system. In this study, the observation operator for Doppler radial velocity has been developed and incorporated into MM5 4D-Var system. The testing results of the gradient calculation tend to confirm that the modified MM5 4D-Var system are working correctly. The modified MM5 4D-Var system is used to perform the assimilation of Doppler radar radial velocity data. The radar radial velocity data used in this study were collected from the Doppler radar at Yichang in Hubei Province on 22 July 2002. The preprocessing of the Doppler radar data includes generation of super-observations in model grid points as well as data quality control. To assess the impact of radar data on the mesoscale heavy rainfall forecast, the MM5 model is used to perform the simulation experiments. The model domains consist of a 45-km grid (D01, grid size of  $81 \times 81$ ), and a 15-km grid (D02, grid size of  $61 \times 61$ ). There are a total of 23 layers in the vertical. First, a control simulation experiment (CTRL) is performed prior assimilation of

Doppler radar data. The National Center for Environmental Prediction (NCEP) re-analysis data are used as the initial fields in the two model domains in the CTRL experiment. Then the assimilation experiment is conducted in domain D02. The Doppler radar radial velocity data at 1203 UTC, 1208 UTC and 1214 UTC on 22 July 2002 are assimilated using a 14-minute assimilation windows. The assimilated results are used as the initial fields in domain D02 in the second simulation experiment. After the assimilation of radar radial velocity data, the wind fields from the assimilated results reproduce the mesoscale feature around the mesoscale convective system. The low-level convergence in the wind fields at the range of 100 km is enhanced. But the impact of radar radial velocity data on the thermodynamic fields is limit. The reason is maybe that the background error variance matrix used in MM5 4D-Var system contains only the diagonal elements and the assimilation windows is only 14 minutes which is not enough for the adjustment in a dynamically consistent way. Generally speaking, the rainfall forecast in the first 3 hours from 4D-Var analysis with Doppler velocity data is better than the forecast without radar data. The precipitation pattern and amount are close to the observed, especially in the southeast of the radar observation station.

**Key words** radar radial velocity data, four-dimensional variational data assimilation

## 1 引言

作为提高数值天气预报水平的重要手段之一,非常规资料的同化已经得到越来越广泛的重视。因为在目前的观测条件下,只有非常规观测获取的资料才有可能揭示中小尺度天气系统内部细致的三维结构,从而为数值预报模式提供高质量的初始场。而在众多的非常规资料中,高时空分辨的雷达资料无疑包含了最丰富的中小尺度天气系统发生发展的信息,所以雷达资料的同化在全世界范围内都是气象科学家们关注的热点。

雷达观测资料包括反射率资料和径向风资料。已有的雷达径向风资料的同化工作大致可以分为两类,(1)先进行雷达径向风场反演,然后同化反演结果<sup>[1~5]</sup>; (2)利用 Kalman 滤波方法或变分方法对雷达径向风资料进行直接同化<sup>[6~12]</sup>。

雷达径向风资料的同化不仅要求处理好雷达资料的质量控制,而且涉及到很多方面的工作,包括(1)雷达资料的误差如何确定?(2)如何处理空间插值、坐标转换等带来的误差?(3)如何协调雷达资料与数值模式的尺度差异?(4)如何利用雷达观测信息调整模式变量,并使同化结果中的动力场和热力场协调一致。

本文的工作是利用 MM5 4D-Var 系统和 MM5 模式进行雷达径向风资料的四维变分同化试验和数值模拟试验,分析了同化雷达资料对中尺度数值模式初始场的调整以及对中尺度强降水系统数值模拟的影响。很多研究工作的结果都表明 MM5 4D-Var 系统形成的同化场能够有效提高对中尺度强降水的

模拟,尤其是对强降水分布和中心强度的模拟<sup>[13~16]</sup>。Martinelli 等<sup>[17]</sup>还利用 MM5 4DAVR 系统进行了 WSR-88D 雷达资料的同化试验。利用四维变分方法进行雷达径向风资料同化的优点在于能够对多时刻的观测资料进行直接同化,更重要的是,它能够通过伴随模式的反向积分,反映出不同物理量之间的联系,将雷达风场的信息尽可能地传播到其他物理量场上去,从而得到物理上更加协调的同化结果。

本文的第 2 节将介绍雷达径向风资料四维变分同化模块的设计及其正确性检验。四维变分同化试验及其结果分析放在第 3 节。第 4 节给出了本文的结论。

## 2 雷达资料四维变分同化模块的设计以及正确性检验

### 2.1 同化模块的设计

MM5 4D-Var 系统是基于非静力中尺度模式 MM5V1 开发的四维变分同化系统,它包括 MM5V1 模式、MM5V1 的切线性模式和伴随模式。有关 MM5 4D-Var 系统的详细说明参阅文献<sup>[18]</sup>。我们在 MM5 4D-Var 系统的基础上开发出雷达径向风资料的观测变换算子及其伴随算子,使之可以直接同化雷达径向风资料。

在四维变分同化试验中,目标泛函的设计如下式所示:

$$J(\mathbf{X}) = (\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_b)^T \mathbf{W}_b (\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_b) + \sum_{i=1}^n [\mathbf{V}_r(t_i) - \mathbf{R}(\mathbf{V}(t_i))]^T \mathbf{W} [\mathbf{V}_r(t_i) - \mathbf{R}(\mathbf{V}(t_i))],$$

其中,  $\mathbf{X}_0$  代表模式初始场;  $\mathbf{X}_b$  代表同化试验的背景

场； $\mathbf{W}_b$ 代表背景场的权重； $\mathbf{V}_r(t_i)$ 代表 $t_i$ 时刻观测的雷达径向风场； $\mathbf{V}(t_i)$ 代表 $t_i$ 时刻模式模拟的风场； $\mathbf{R}$ 是由模式风场到雷达径向风场的观测转换算子； $\mathbf{W}$ 代表雷达资料的权重。

目标泛函中的权重 $\mathbf{W}_b$ 和 $\mathbf{W}$ 是根据背景场误差和观测误差确定的，它们直接关系到同化结果的质量。在本文的同化试验中，各模式层的背景场误差由背景场和1小时的模式预报场之间的最大差值决定，而雷达径向风资料的观测误差被经验性地取为2 m/s，而且没有考虑不同高度上的差异。需要指出的是，背景场误差和观测误差的取值是一个很复杂的问题，超过了本文的研究范围，本文采用的方法只是试验性的，并不是非常严格。

下面，我们简单介绍雷达径向风资料和模式风场之间的变换算子 $\mathbf{R}$ 及其伴随算子 $\mathbf{R}^*$ 的设计。因为多普勒雷达观测到的径向风速 $v_r$ 和大气风场 $u$ 、 $v$ 、 $w$ 之间的关系为

$$v_r = \frac{x-x_0}{r}u + \frac{y-y_0}{r}v + \frac{z-z_0}{r}(w-w_d),$$

其中， $v_r$ 是雷达径向风观测， $r$ 是观测点 $(x, y, z)$ 到雷达站 $(x_0, y_0, z_0)$ 的距离， $w_d$ 为被观测粒子的末速度。如果垂直速度远小于水平速度，或者雷达扫描仰角较低，雷达径向风和大气风场关系式右端第三项可以忽略，同时，令

$$r_x = \frac{x-x_0}{r},$$

$$r_y = \frac{y-y_0}{r},$$

就可以得到 $v_r = r_x u + r_y v$ ，也就是

$$[v_r] = [r_x r_y] \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix},$$

$[r_x r_y]$ 就是观测变换算子 $\mathbf{R}$ ， $\mathbf{R}$ 是线性算子，它的伴随算子 $\mathbf{R}^*$ 就是它本身的转置算子

$$\mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \end{bmatrix}.$$

### 2.2 梯度检验以及极小化收敛过程

在雷达径向风资料同化之前，我们对改进后的MM5 4D-Var系统进行了目标泛函梯度计算的正确性检验，检验判据如下：

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} F(\alpha) = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{J(\mathbf{X} - \alpha \mathbf{H}) - J(\mathbf{X})}{\alpha \langle \nabla J(\mathbf{X}), \mathbf{H} \rangle} = 1, \quad (1)$$

其中， $J$ 是目标泛函； $\nabla J(\mathbf{X})$ 表示 $J$ 的梯度； $\mathbf{H}$ 表示 $\mathbf{X}$ 矢量扰动的方向； $\alpha$ 表示扰动的大小。理论上认为，当扰动 $\alpha$ 趋近于无穷小时，(1)式中的 $F(\alpha)$ 的值是趋近于1的。

表1给出了我们的检验结果。从表1中可以看到， $\alpha$ 的值由 $1 \times 10^{-5}$ 逐渐减小到 $1 \times 10^{-14}$ ， $F(\alpha)$ 的值都是正常的，这说明接入雷达资料同化模块后MM5 4D-Var系统计算的目标泛函的梯度是正确可靠的。

表1 同化试验梯度检验结果

Table 1 The testing results of the gradient calculation

$\alpha$	$F(\alpha)$
$1 \times 10^{-5}$	1.003790491
$1 \times 10^{-6}$	0.999759794
$1 \times 10^{-7}$	1.000137212
$1 \times 10^{-8}$	1.000000808
$1 \times 10^{-9}$	1.000000127
$1 \times 10^{-10}$	1.000000018
$1 \times 10^{-11}$	0.999943965
$1 \times 10^{-12}$	1.000005844
$1 \times 10^{-13}$	1.000214748
$1 \times 10^{-14}$	1.001518665

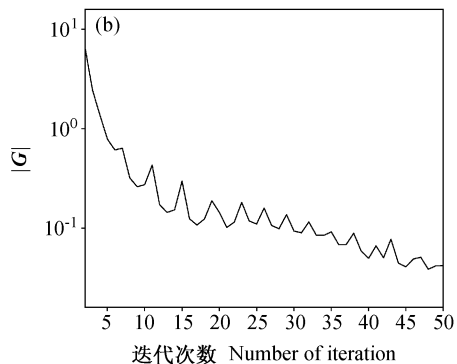
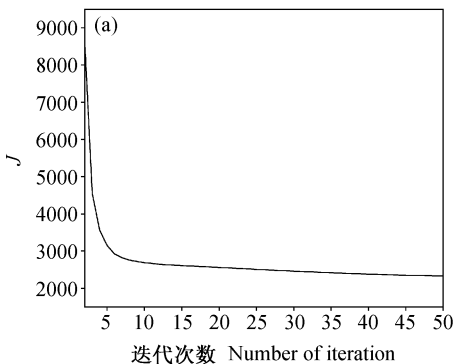


图1 雷达径向风资料同化试验的极小化收敛过程中目标泛函 $J$  (a)及其梯度 $\mathbf{G}$ 的模 (b)的变化情况

Fig. 1 (a) Cost function  $J$  and (b) norm of the gradient  $\mathbf{G}$  with respect to the number of iterations for the assimilation experiment

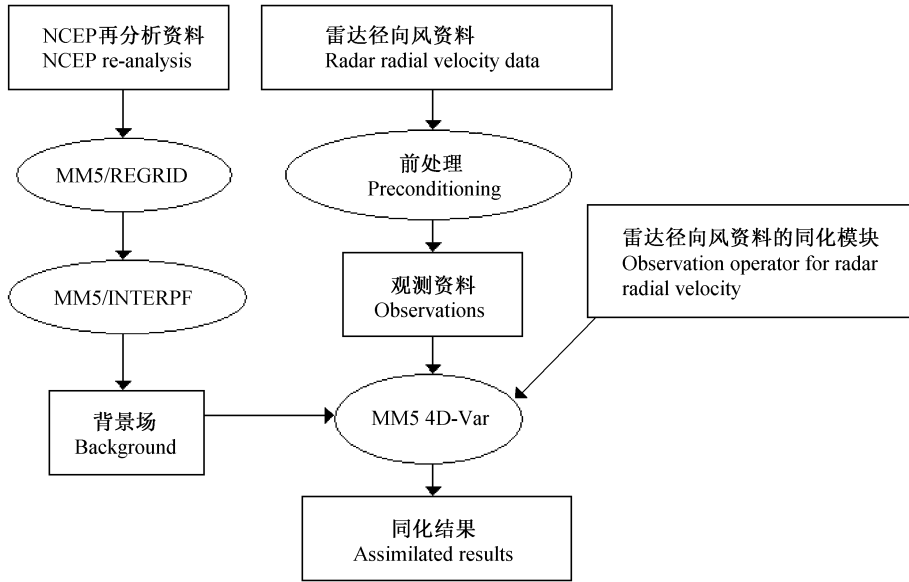


图2 雷达径向风资料同化试验的流程示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the assimilation experiment

同化试验的极小化过程是否收敛也是影响同化结果的一个很重要因素。如图1所示,在本文的同化试验中,目标泛函 $J$ 和梯度 $G$ 的模在迭代过程中都迅速收敛,这也从另一个角度说明改进后MM5 4D-Var系统的是可靠的。

### 3 雷达径向风资料的四维变分同化试验

#### 3.1 试验方案设计

本文使用的雷达资料是国家重点基础研究规划项目“我国重大气候和天气灾害形成机理与预测理论研究”(973项目)提供的2002年7月22日湖北宜昌多普勒雷达径向风资料。973项目组完成了雷达资料的质量控制,并通过双线性插值方案将原始雷达资料插值到等距网格上。等距网格上的雷达径向风资料的水平格点数是 $301 \times 301$ ,垂直方向是14层,水平和垂直分辨率都是1 km。

雷达径向风资料四维变分同化试验的流程如图2所示。因为MM5模式以及MM5 4D-Var系统是在等 $\sigma$ 面上进行计算的,所以在同化前要将等高度面上的等距网格雷达资料插值到模式面上。等距网格雷达资料的前处理工作主要包括两部分,首先,利用参考大气各等高度面上的气压计算等高度面上的 $\sigma$ 值,然后,利用各高度层上的 $\sigma$ 值将雷达资料线性插值到模式面上。

取参考海平面温度 $T_{s0}$ 为275.0 K,参考海平面气压 $p_{s0}$ 为1000.0 hPa,则地面和各高度层上参考大气的气压可以根据下面的公式计算:

$$p_s = p_{s0} \exp \left\{ -\frac{T_{s0}}{A} + \left[ \left( \frac{T_{s0}}{A} \right)^2 - \frac{2gZ_a}{AR} \right]^{\frac{1}{2}} \right\},$$

$$p = p_{s0} \exp \left\{ -\frac{T_{s0}}{A} + \left[ \left( \frac{T_{s0}}{A} \right)^2 - \frac{2gZ}{AR} \right]^{\frac{1}{2}} \right\},$$

其中, $p_s$ 是地面参考气压(单位:hPa); $p$ 是各高

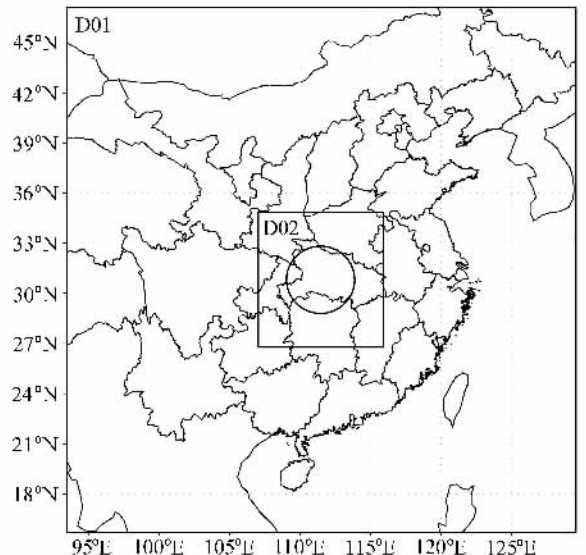


图3 数值模拟的积分区域(圆圈代表宜昌多普勒雷达的观测范围)

Fig. 3 The model domains, open circle indicates the observing area of Doppler radar at Yichang

度层参考气压(单位: hPa);  $A$  是参考温度垂直递减率, 取值为 50.0;  $R$  是干空气的比气体常数, 取值为 287.04;  $g$  是重力加速度, 取值为 9.81 m/s<sup>2</sup>;  $Z_0$  是地面海拔高度(单位: m);  $Z$  是高度层的高度(单位: m)。

我们利用 2002 年 7 月 22 日 12 时(国际协调时, 下同)的 NCEP 再分析资料作为同化试验的背景场, 采用 14 min 的同化时间窗, 同化了 22 日 12:03、12:08 和 12:14 三个时刻的雷达径向风资料。同化试验中的收敛过程迭代计算了 50 步。

为了分析雷达资料同化对中尺度数值模拟的影响, 我们用 MM5V3 模式进行了两次数值模拟试验。在下文中我们将用 CTRL 表示同化前的控制试验, 用 ASSIM 表示利用雷达径向风资料同化场作为初始场的数值试验。同化前后的数值试验均以 2002 年 7 月 22 日 12 时为起始时刻。数值积分区域如图 3 所示, 积分区域的中心点定在(30.7°N, 111.3°E), 对应于宜昌多普勒雷达站的位置。数值试验采用双向嵌套网格技术, 外层网格 D01 的水平格点数为 81×81, 格距 45 km, 内层网格 D02 的水

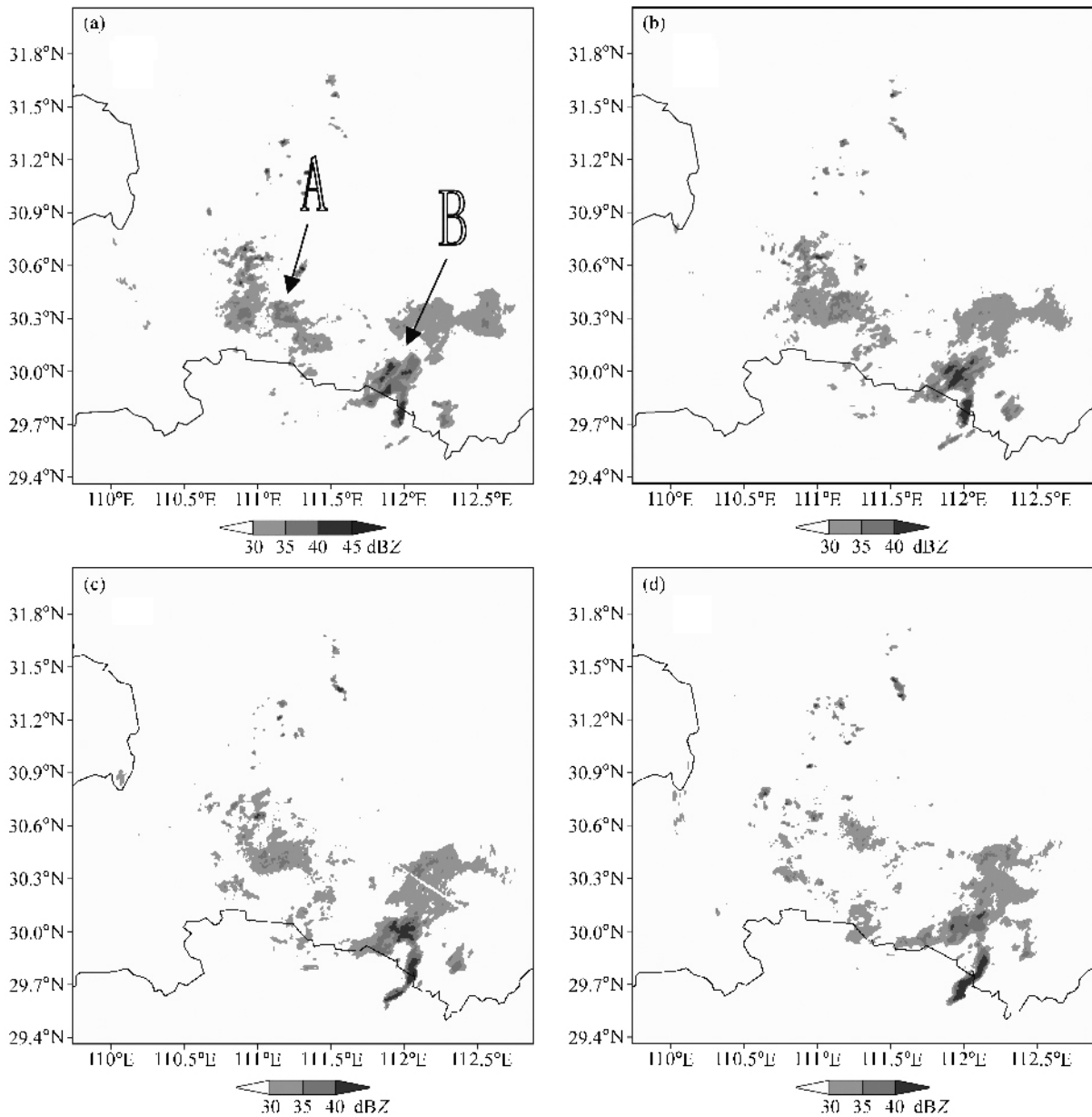


图 4 2002 年 7 月 22 日实况 3 km 高度上的雷达回波: (a) 12:03; (b) 12:14; (c) 12:25; (d) 12:42

Fig. 4 The observed radar reflectivity at the 3 km level at (a) 1203 UTC, (b) 1214 UTC, (c) 1225 UTC, and (d) 1242 UTC on 22 Jul 2002

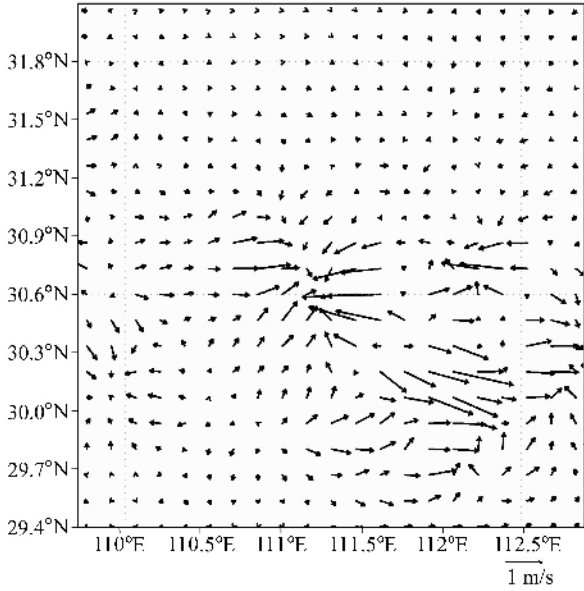


图 5 925 hPa 同化前后的差值流场  
Fig. 5 The difference between wind fields at 925 hPa before and after assimilation

平格点数为  $61 \times 61$ , 格距 15 km。内外层网格在垂直方向上都是 23 层。同化试验在数值试验的内层网格 D02 上进行。CTRL 试验的内外层区域的初始场都由 NCEP 再分析资料提供, 而 ASSIM 试验的内层区域的初始场则被雷达径向风资料同化场替代。

本文同化试验同化的是 15 km 水平分辨率的雷达径向风场, 它由 1 km 水平分辨率的雷达径向风资料经过跳点取值得到。之所以只对 15 km 水平分辨率的雷达资料进行同化, 主要是考虑到模式分辨率与雷达资料分辨率的差异, 同时希望绕开同化试验中巨大的计算量等技术上的困难, 至于该方案对同化结果的影响还需要做进一步的深入研究。

### 3.2 实况雷达回波

从 2002 年 7 月 22 日 12 时的实况雷达回波图(图 4)上可以看到, 在宜昌多普勒雷达的观测区域内有两个强回波系统, 一个位于雷达站的西南部 ( $30.3^{\circ}\text{N}$ ,  $111.0^{\circ}\text{E}$ ) 附近, 如图 4a 所示的强回波区 A, 一个位于雷达站的东南部 ( $30.0^{\circ}\text{N}$ ,  $112.0^{\circ}\text{E}$ ), 如图 4a 所示的强回波区 B。

A 区域强回波的演变情况比较清晰。7 月 22 日 12:03, 在宜昌多普勒雷达站的西南部 ( $30.3^{\circ}\text{N}$ ,  $110.9^{\circ}\text{E}$ ) 和 ( $30.3^{\circ}\text{N}$ ,  $111.2^{\circ}\text{E}$ ) 附近各有一小块强回波中心。在 3 km 高度上, 雷达回波的中心强度超过 40 dBZ(图 4a)。12:14, 这两小块强回波中心

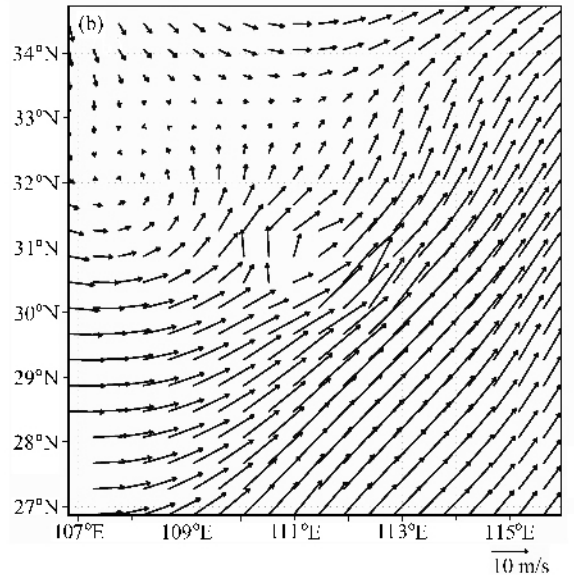
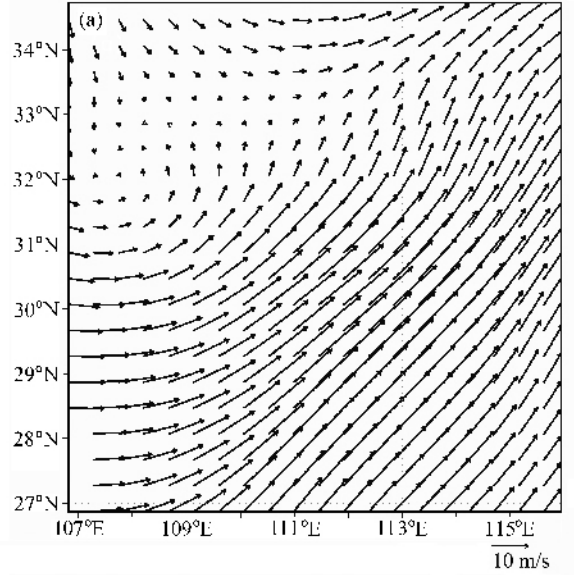


图 6 500 hPa 流场: (a)同化前; (b)同化后  
Fig. 6 The wind fields at 500 hPa before (a) and after (b) assimilation

合并成一个东西方向的强回波团并逐渐向靠近雷达站的东北方向移动(图 4b)。12 时 31 分, 强回波团移动到宜昌雷达站附近, 并开始减弱(图 4c)。到 12:42, 这个强回波团基本上已经消散(图 4d)。

与此同时, 位于雷达站东南部 ( $30.0^{\circ}\text{N}$ ,  $112.0^{\circ}\text{E}$ ), 附近 B 区域的强回波团一直维持在原地, 中心强度比 A 区域的更强, 超过 45 dBZ。

### 3.3 雷达径向风资料同化试验对初始场的调整

由 NCEP 再分析资料提供的初始场能够反应出流场的  $\alpha$  中尺度特征, 包括低层  $30^{\circ}\text{N} \sim 31^{\circ}\text{N}$  区

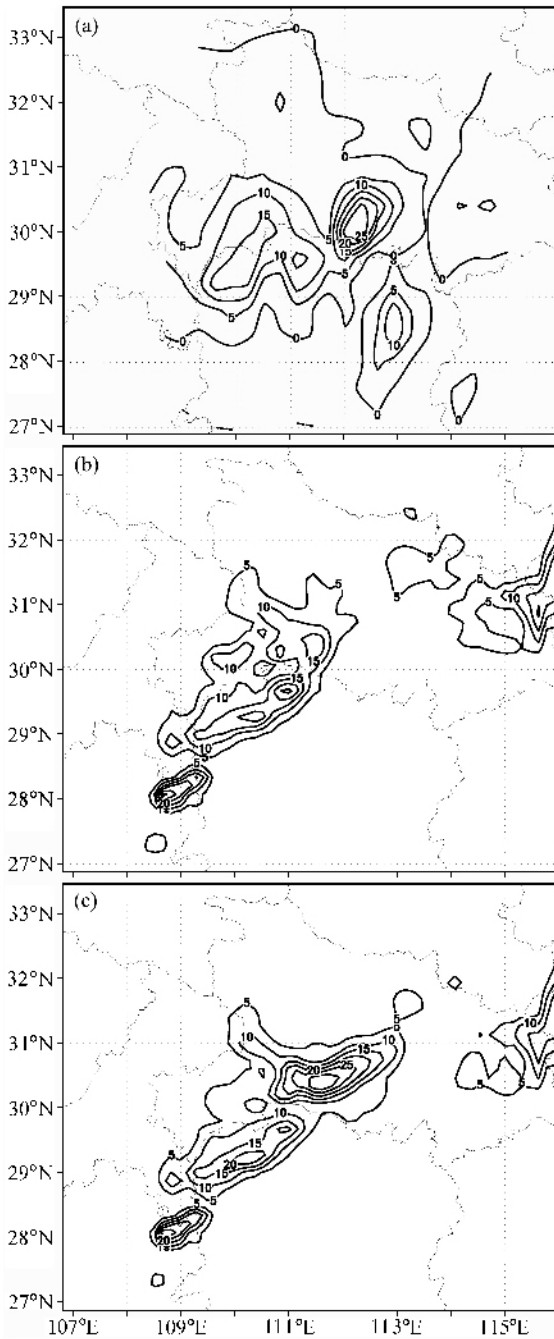


图7 2002年7月22日12时~15时的3小时降水(等值线间隔:5 mm):(a)实况;(b)同化前的模拟结果;(c)同化后的模拟结果

Fig. 7 The 3-h rainfall during 1200 UTC - 1500 UTC 22 Jul 2002 from (a) observations and the simulation results (b) before and (c) after assimilation (contour interval is 5 mm)

域存在一条切变线,切变线的南侧为偏南风,北侧为偏东风(图略),中层为槽前一致的西南气流(图6a),高层为一致的偏西气流。但是,同化前的流场上很难看到更小尺度的强对流系统的痕迹。雷

达径向风资料的同化主要调整了强对流系统发展区域附近的风场,体现出更明显的 $\beta$ 中尺度流场特征。

如图5所示,同化试验调整了强对流系统低层100 km左右范围内的风场辐合,在925 hPa高度上,对应于强回波区A和B的位置,同化前后的差值风场的辐合中心在(30.6°N, 111.2°E)和(30°N, 112.3°E)附近,其中A区域附近差值流场的最大辐合强度达到 $-7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图略)。

在500 hPa高度上,同化前的流场是一致的偏西南气流(图6a),同化后的流场则明显反映了 $\alpha$ 中尺度的背景流场受强对流系统发展的影响调整了水平结构的情形。如图6b所示,在强对流系统的后部,流场是分流辐散的,而在绕过强对流系统后,流场重新辐合,恢复为一致的偏西南气流。

300 hPa高度上的情况和500 hPa高度上的类似。一致的偏西气流遇到 $\beta$ 中尺度的强对流系统后调整为先分流辐散再在对流系统前部辐合的结构,但是调整幅度较小(图略)。

雷达径向风资料的同化对热力场的调整较小(图略),这可能与背景场权重的设计比较简单以及同化时间窗只有14 min有关。

### 3.4 同化前后模拟的降水分析

2002年7月22日12时~15时实况3小时的强降水中心位于宜昌多普勒雷达站的西南侧和东南侧,其中位于雷达东南侧(112.2°N, 30.2°E)附近的强降水中心强度超过25 mm/3 h(图7a)。同化前的控制试验模拟出了雷达站西南侧的强降水区,但是对雷达站东南侧更强的降水模拟得比较失败(图7b)。同化了雷达径向风资料后,由于同化场调整了对流系统周围中尺度的风场结构,雷达站东南侧的强降水的模拟得到了改进,模拟的降水中心强度由15 mm/3 h提高到30 mm/3 h,而且中心位置也更接近于实况(图7c)。

## 4 结论

本文在MM5 4D-Var系统的基础上开发出雷达径向风资料的同化模块并进行了正确性检验,然后利用2002年7月22日12时湖北宜昌多普勒雷达观测资料和改进后的MM5 4D-Var系统,研究了雷达径向风资料四维变分同化试验对初始场的调整以及同化场对梅雨锋中尺度强降水模拟的影响。

雷达径向风同化模块的正确性检验结果表明,改进后 MM5 4D-Var 系统的改进是正确可靠的,可以用于进行雷达径向风资料的四维变分同化试验。

从本文的个例试验结果来看,雷达径向风资料同化加强了中尺度对流系统低层 100 km 左右范围内的风场辐合。同化后的风场具有更明显的  $\beta$  中尺度特征。利用 14 min 的雷达径向风资料的四维变分同化结果可以改进 3 h 之内的强降水模拟,尤其是对雷达站东南侧强降水的模拟。

雷达径向风资料四维变分同化工作的困难很多。本文使用的雷达资料是经过质量控制处理后的等距网格资料,在将等距网格资料插值到模式坐标网格时使用的方案还比较粗糙,不可避免地存在一定的误差,而且在本文的雷达资料同化试验中,观测误差的设计比较简单,有很强的经验性,也没有考虑不同高度雷达观测资料的精度差异,这些因素对同化结果的影响都有待于进一步的研究。

### 参考文献 (References)

- [1] 邱崇践, 余金香, Xu Qin. 多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进. 气象学报, 2000, **58** (2): 244~249  
Qiu Chongjian, Yu Jinxiang, Xu Qin, Use of Doppler-radar data in improving short-term prediction of mesoscale weather. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (2): 244~249
- [2] Gao J, Xue M, Shapiro A A, et al. Three-dimensional simple adjoint velocity retrievals from single-Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2001, **18**: 26~38
- [3] Weygandt S S, Shapiro A, Droegemeier K K. Retrieval of model initial fields from single-Doppler observations of a supercell thunderstorm. Part II: Thermodynamic retrieval and numerical prediction. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**: 454~476
- [4] Shapiro A, Robinson P, Wurman J, et al. Single-Doppler velocity retrieval with rapid-scan radar data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2003, **20**: 1758~1775
- [5] Liu Shun, Qiu Chongjian, Xu Qin, et al. An improved method for Doppler wind and thermodynamic retrievals. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22** (1): 90~102
- [6] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I. Model development and simulated data experiments. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 1642~1661
- [7] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**: 835~852
- [8] Parrish D F, Purser J. Anisotropic covariances in 3D-Var: Application to hurricane Doppler radar observations. HIRLAM4 workshop on Variational analysis in limited area models, Meteo-France, Toulouse, 1998
- [9] Crook N A, Sun J. Assimilating radar, surface and profiler data for the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2002, **19**: 888~898
- [10] Snyder C, Zhang F. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an Ensemble Kalman Filter. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131**: 1663~1677
- [11] Gao J, Xue M, Brewster K, et al. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2004, **21**: 457~469
- [12] Tong M, Xue M. Ensemble Kalman Filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, **133**: 1789~1807
- [13] Zupanski D, Mesinger F. Four-dimensional variational assimilation of precipitation data. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**: 1112~1127
- [14] Zou X, Kuo Y H. Rainfall assimilation through an optimal control of initial and boundary conditions in a limited-area mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**: 2859~2882
- [15] Guo Y R, Kuo Y H, Dudhia J, et al. Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 619~643
- [16] Zhang Lin, Ni Yunqi. Four-dimensional variational data assimilation experiments for a heavy rain case during the 2002 IOP in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22** (2): 300~312
- [17] Martinelli J T, Pasken R W, Lin Y J, et al. A high resolution numerical simulation of a linear mesoscale convective system utilizing the MM5-4D-Var system and single WSR-88D data. 31st International Conference on Radar Meteorology American Meteorology Society, 2003, PIC. 3, Abstract and paper
- [18] Zou X, Vandenberghe F, Pondecia M, et al. Introduction to adjoint techniques and the MM5 adjoint modeling system. NCAR Technical Note, NCAR/TN-435+STR, 1997, 110pp [Available from National Center for Atmospheric Research, P. O. Box 3000, Boulder, CO 80307-3000.]