

魏蕾, 雷恒池. 2012. 加密探空资料同化对一次降水预报能力改进研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 809–820, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.18.  
Wei Lei, Lei Hengchi. 2012. Improvement of precipitation forecasts by the assimilation of encrypted sounding data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 809–820.

## 加密探空资料同化对一次降水预报 能力改进研究

魏蕾<sup>1,2</sup> 雷恒池<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 通过设计不同的试验方案, 将加密探空资料同化到 WRF 模式中, 对一次层状云系的降水过程进行了数值模拟。采用实时四维资料同化的方法, 使得背景场和观测资料相协调, 在一定程度上解决了模式的 spin up 问题。将温度同化到模式里, 改变了模式原有的热力场, 使得模式动力场随之改变, 模式模拟的结果更接近实际观测。经过松弛 (nudging) 之后, 得到的雷达回波、高度场、温度和实况很像, 降水也要比不加探空资料的降水更接近实况。鉴于只有两个地方的探空资料, 并不能覆盖整个模式区域, 以及同化过程还需要改进, 模式模拟的结果和实际观测之间还有一定的差异, 有待更深入的研究。

**关键词** 观测松弛法 四维资料同化 WRF

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0809-12

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.18

## Improvement of Precipitation Forecasts by the Assimilation of Encrypted Sounding Data

WEI Lei<sup>1,2</sup> and LEI Hengchi<sup>1</sup>

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** Different experiments were designed to assimilate encrypted sounding data into the WRF model, and a numerical simulation was conducted to investigate one precipitation event from a stratiform cloud system. Real-time four-dimensional data assimilation yielded good coordination of the background field and observational data, solving the problem of the spin-up mode to a certain extent. Assimilating the temperature into the model changed the original thermal field model and then the dynamic field, and the results of the model simulation became closer to the actual observation. After being processed by the nudging technique, the radar echo, height field, temperature, and precipitation were in reasonable agreement with the observations. However, because the sounding data were obtained from only two places, the results cannot cover the entire model domain. Moreover, the assimilation process also needs to be improved, and further studies are needed because some differences still appear between the simulated results and the actual observation data.

**Keywords** Nudging, Real-time four-dimensional data assimilation (RTFDDA), WRF

## 1 引言

目前我国的中尺度数值天气预报仍以常规探空资料或者大尺度背景场作为初始场, 由于气象站点较稀疏, 不能很好地反映天气系统的中小尺度特征, 因此很难提高预报准确率, 需要在数值模式中, 加入更高分辨率的实测资料, 使得模式预报量实时的向观测资料靠近, 来改善预报准确率。

四维资料同化的概念是由 Charney et al. (1969) 提出来的, 即把当前的和过去的资料结合放进模式中。连续四维资料同化方法可以在其有效的时间内把观测资料同化进去, 包括四维变分方法和牛顿松弛法。在 20 世纪 70 到 80 年代, 大部分四维资料同化都应用在全球尺度模式中。松弛法广泛应用于全球尺度的同化 (Lyne et al., 1982; Stern and Ploshay, 1983), 同时也应用在区域模式中 (Anthes, 1974; Bell, 1986)。最初的松弛法是连续的动力同化, 通过调整模式方程使得模式的状态逐渐向观测值接近 (Anthes, 1974; Kistler, 1974; Hoke and Anthes, 1976; Davies and Turner, 1977)。在 20 世纪 80 年代末 90 年代初, 国外进行了很多关于区域尺度松弛法的研究实验 (Stauffer et al., 1985; Bell, 1986; Aune et al., 1987; Ramamurthy and Carr, 1987; Stauffer and Seaman, 1987; Wang and Warner, 1988; Kuo and Guo, 1989; Stauffer and Seaman, 1990; Stauffer et al., 1991)。通过这些实验证明了该方法的灵活性, 松弛的数据可以是任何类型, 测量的或者推断的, 既可以根据网格分析加到模式中同化, 又可以当作个别观测插值到模式中。松弛法是一个有效的经济的实现四维资料同化的方法。在 Stauffer and Seaman (1990, 1994)、Stauffer et al. (1991) 和 Seaman et al. (1995) 松弛法实验中, 分为分析松弛法 (analysis nudging, 即把天气尺度观测值插值到模式当前时间步长为基础的趋向网格分析法) 和观测松弛法 (observation nudging, 直接将时空分布不均匀的个别观测值同化到模式中)。研究发现分析松弛法更适合天气尺度, 观测频率大约 3~12 h; 观测松弛法更适合于中尺度。Leslie et al. (1998) 发现同化相同的资料, 观测松弛法和四维变分方法的作用一样, 但四维变分方法计算代价较高而观测松弛法更为可行。

实时四维资料同化系统(NCAR/ATEC RTFDDA) (Cram et al., 2001a, 2001b; Liu et al., 2002, 2004, 2005) 是以 MM5 模式为基础 (Stauffer and Seaman, 1994), 多尺度、快速循环、实时、四维资料同化和预报系统。通过采用松弛法, 无论稀疏还是密集的观测资料都可以很好的同化到模式中, 得到四维分析及短期天气预报。经过不断发展, 该系统的核心已从 MM5 转移到 WRF 模式中 (Liu et al., 2005; Rostkier-Edelstein et al., 2006; Yu et al., 2006; Liu et al., 2006)。

以经验为基础的观测权重函数受到背景误差估计的影响较少, 尽管大多数中尺度过程发展迅速, 松弛法使模式可以随时间逐步接近观测, 减小了短期内改变引起的误差。非常规观测数据的利用途径一般是通过松弛逼近法、变分约束法、卡尔曼滤波等进行同化。松弛逼近法由于其简单易行、稳定有效而得到较广泛的应用。

我国中尺度模式中大部分都用变分法或卡尔曼滤波法来做同化, 很少通过松弛法来同化资料 (孟智勇等, 2002; 黄嘉宏等, 2006; 刘红亚等, 2007)。只是简单地将一些资料用松弛方法进行同化, 没有很好地利用这个方法做中尺度天气预报。对于观测松弛法只是简单的了解, 没有深入研究。我们可以通过观测松弛法, 先将一些非常规观测资料加到模式中来改进中尺度预报的准确率。将来我们可以把其他方法的优点结合起来, 加到观测松弛法中。研究无论以高度或是气压为基础的高空观测都可直接加到模式中, 制订全面的数据质量控制计划去掉没有代表性或差的观测值, 用高影响天气和不同地方天气的实例来继续研究并改良观测松弛法。

## 2 试验原理与设想

观测松弛法就是在模式积分的时间窗口  $\delta t$  内, 在预报方程中增加一个线性强迫项, 该项与模式预报值和实测值之差成正比, 其作用是使模式预报逐渐向观测逼近。

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

$$W(\mathbf{x}, t) = \omega_{xy} \cdot \omega_\sigma \cdot \omega_t, \quad (2)$$

其中,  $p^* = p_s - p_t$ ,  $p_s$  为地面气压,  $p_t$  为顶部气压,  $x, y$  为离格点的距离,  $\alpha$  为模式预报变量,  $\hat{\alpha}$  为模式预报变量插值到三维空间中的观测位置,  $F$  代表模式中的所有物理过程变率,  $G_\alpha$  为张弛逼近系数,  $\gamma$  为观测质量因素,  $\alpha_0$  为对应时刻的观测值。 $W(\mathbf{x}, t)$  为经松弛调整后的第  $t$  步预报值。松弛系数控制逼近快慢和程度, 适当地取值可以使观测资料连续地、实时地与模式结合, 得到的同化资料用作初值时它与模式的内在协调性强。

$$\omega_{xy} = \frac{R^2 - D^2}{R^2 + D^2}, \quad 0 \leq D \leq R, \quad (3)$$

$$\omega_{xy} = 0, \quad D > R, \quad (4)$$

其中,  $R$  为影响半径,  $D$  为离观测点的距离。

$$\omega_t = 1, \quad |t - t_0| < \tau/2 \quad (5)$$

$$\omega_t = \frac{\tau - |t - t_0|}{\tau/2}, \quad \tau/2 \leq |t - t_0| \leq \tau, \quad (6)$$

$\tau$  是为观测值指定的时间窗口。

基于 RTFDAA 系统的观测松弛法使用 3 h 循环的方法, 在每 3 h 有 3 个不同的阶段。系统实时的每 3 h 都会完成 3 h 最后四维资料同化分析模拟, 3 h 初步四维资料同化分析模拟, 然后 6~12 h 的纯预测模拟。尽管两个资料同化阶段(最后四维资料同化分析模拟和初步四维资料同化分析模拟)在不同的时间数据窗, 要尽可能同化所有可能的数据。最后阶段模拟从前面阶段的模拟来初始化, 重新启动下个阶段, 它是延续了上一个周期的最后模拟, 因此不会有非绝热或动力过程的自旋问题。随着时间的推移, 最后四维资料同化分析模拟在每个周期连接起来形成一个长期连续的模拟。初步四维资料同化分析模拟是从最后四维资料同化分析模拟重新启动, 进行连续的模式运行, 同样没有非绝热或动力过程的自旋问题。初步阶段在其同化窗口内(大约 2 h 以前到目前的时间) 使用任何可以加入的数据。短期预测阶段从初步四维资料同化分析模拟结果重新启动或者继续进行。

先利用 2009 年张家口和北京加密探空资料对过去的一次实例进行模拟分析, 来看观测松弛法是否可以改善中尺度模式。本次实验资料是 2009 年 4 月 30 日到 5 月 1 日张家口和北京地区进行了加密探空观测(见表 1), 每 2~3 h 放一个探空气球探测, 观测春季层状云降水云系。

对于已经发生的实例, 在其模拟过程中, 所有要模拟的天气过程实时的观测资料都可以得到, 加

到模式中来运行, 得到模拟结果。这个模拟的过程可以把观测资料实时的加进模式中。对已经发生的实例模拟, 可以得到很好的预报来证实观测松弛法的可行性。

表 1 外场加密探空资料时次

Table 1 External field encryption sounding data

北京	张家口
4月30日07:00	4月30日14:00
4月30日10:00	4月30日16:00
4月30日13:00	4月30日20:00
4月30日16:00	5月1日01:00
4月30日19:00	5月1日05:00
5月1日07:00	5月1日08:00
5月1日10:00	
5月1日13:00	

由于在短期天气预报阶段开始模式模拟时, 已经过了实时的时间没有更多的观测值可以加进去, 对于短期实时天气预报仍然要改进, 希望在以后尽可能的加入更多的实时观测资料, 使得模式向着更准确的方向发展, 以改善中尺度预报模式。

### 3 天气形势和雷达回波

#### 3.1 天气形势

该次降水过程是在西风槽系统和地面冷锋的共同影响下形成的 2009 年 4 月 30 日冷空气从新疆地区东移, 在冷暖空气的共同作用下, 2009 年 4 月 30 日至 5 月 2 日我国中东部大部分地区先后出现明显降水。由图 1 地面天气图可知, 4 月 30 日 08:00(图 1a), 我国西北地区甘肃东部、宁夏、陕西以及内蒙古存在明显的低压带, 河北北部, 张家口地区(图 2 中蓝色实心圆 A 为模式模拟的中心点位置)还处于稳定的高压下, 此时冷空气还没有移到河北地区。此后, 云系继续东移, 到 30 日 20:00(图 1b), 冷锋已经移到河北北部, 张家口地区基本位于锋线前。云系继续东移, 直到 5 月 1 日 08:00(图 1c)地面冷锋全部移过河北北部地区。对于河北北部, 地面冷锋过境时间为 4 月 30 日 20:00 至 5 月 1 日 08:00。

#### 3.2 雷达回波

由 2009 年 4 月 30 日 16:00 张家口地区布网雷达平面回波显示(PPI)图(图 2a)可知, 云系已经开始

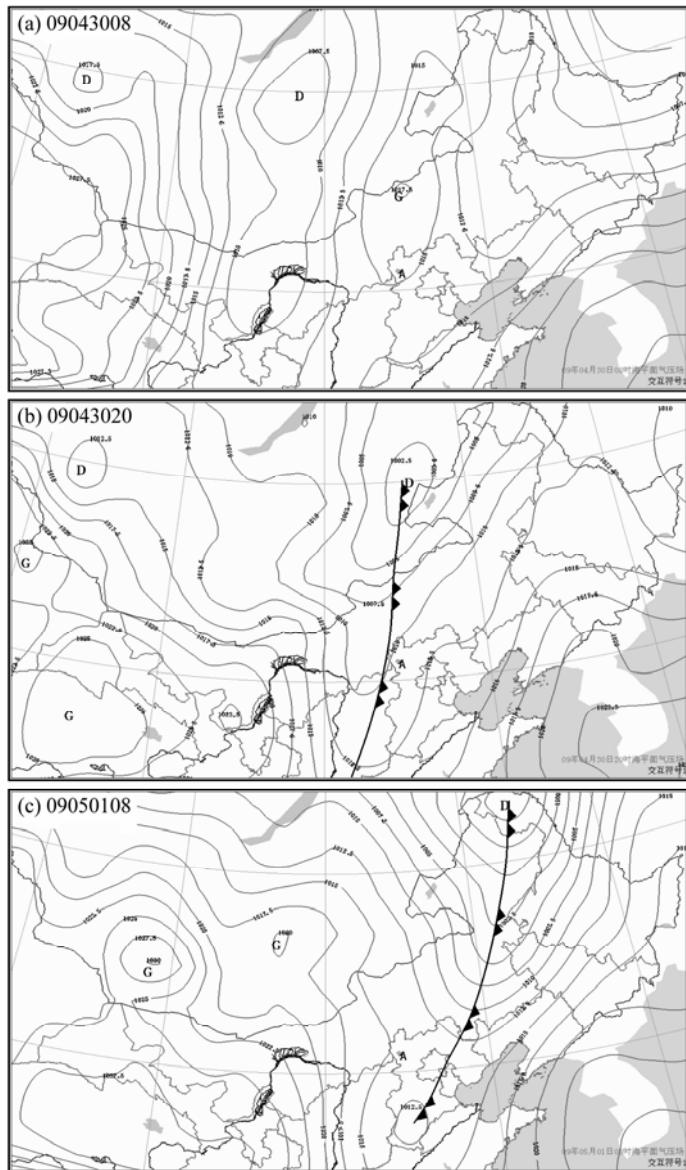


图1 (a) 4月30日08:00、(b) 4月30日20:00和(c) 5月1日08:00地面天气图

Fig. 1 Surface weather chart at (a) 0800 LST 30 Apr, (b) 2000 LST 30 Apr, and (c) 0800 LST 1 May

由西进入河北境内，此后云系迅速向东南方向移动，该层状云系逐渐进入张家口境内，到21:00（图2b），该层状云系已经覆盖张家口地区，云系主体发展到张家口东部，其回波较强，张家口北部偏东部分地区回波最大可达到45 dBZ，回波继续向东南方向移动。到5月1日04:00（图2c），云系基本移到北京地区，此时回波强度已经很弱，张家口云系基本消散，降水基本就结束了。

#### 4 模拟试验设计

运用 WRF 模式，直接把 NCEP 再分析资料作为

初始场，将 2009 年 4 月 30 日和 5 月 1 日的张家口和北京加密探空资料以及通过观测松弛法加入到模式中来分析云的结构、主要物理过程并分析其降水条件。NCEP 再分析资料分辨率为  $1^{\circ}$  (纬度)  $\times 1^{\circ}$  (经度) 大约为  $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ ，经过处理之后 NCEP 把很多中小尺度的天气扰动、湍流等略去，平滑到天气尺度中，这样就导致了很多中小尺度天气现象无法预报出。本次试验采用双层双向嵌套网格进行模拟，模拟区域中心点为张家口，图 3 给出了这两层嵌套的模拟区域。

表 2 中给出了对比试验设计方案，试验 1 为控制试验，以 NCEP 再分析资料作为初始场，不加任

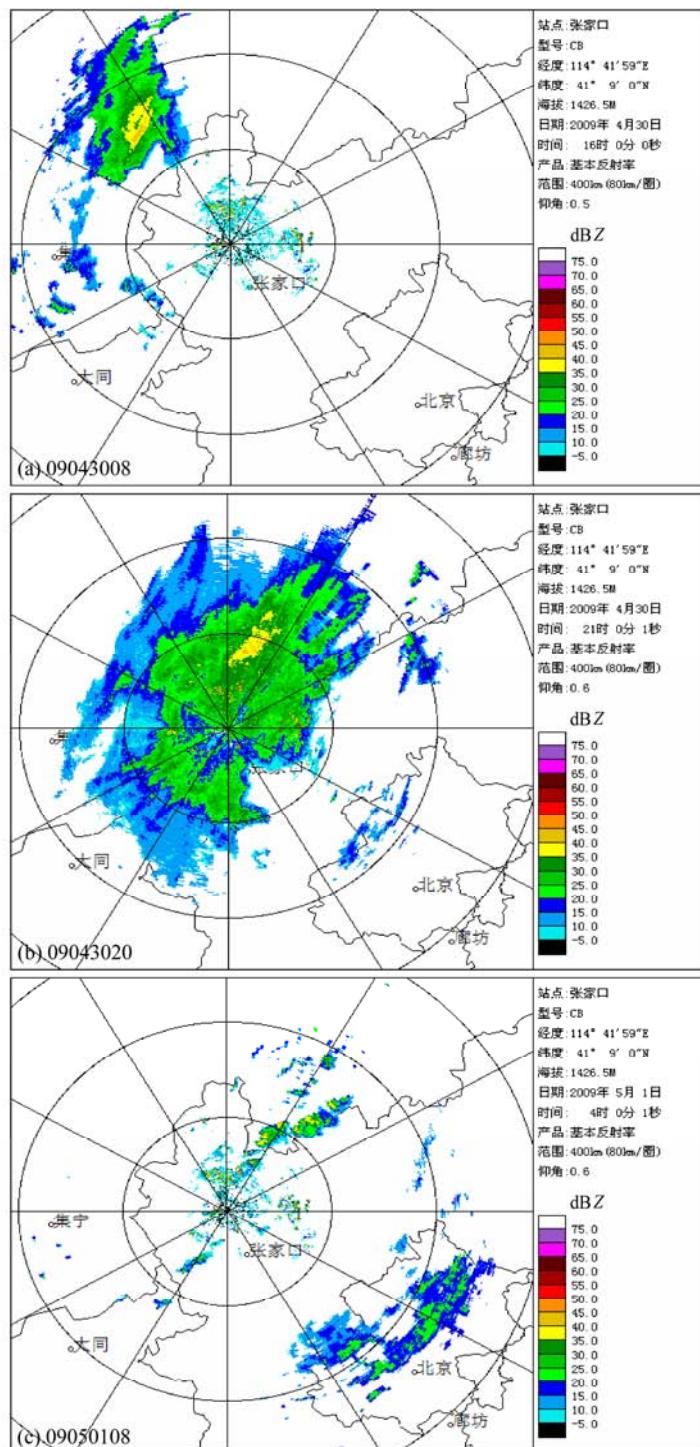


图2 (a) 4月30日16:00、(b) 4月30日21:00和(c) 5月1日04:00张家口雷达回波

Fig. 2 Zhangjiakou radar echo at (a) 1600 LST 30 Apr, (b) 2100 LST 30 Apr, and (c) 0400 LST 1 May

何实测资料, 直接进行数值预报。试验 2、3、4 使用观测松弛法分别将不同时刻的加密探空资料温度同化到模式里, 观测松弛法使得模式值慢慢逼近观测值, 使得到的预报结果更符合观测到的结果。试验 1、2、3、4 模式参数的设定, 区域中心及大小的选择都一样, 试验 2、3、4 比试验 1 增加了 RTFDDA

(Real-Time Four-Dimensional Data Assimilation) 系统, 网格 D01 观测影响半径为 120 km, 网格 D02 观测影响半径为 60 km,  $t$  的松弛系数设置均为  $6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , 时间窗口是观测的有效时间  $\pm 40 \text{ min}$  左右。观测松弛法是对以观测为中心在其周围一定空间 (即观测影响区域) 之内的模式格点进行松弛

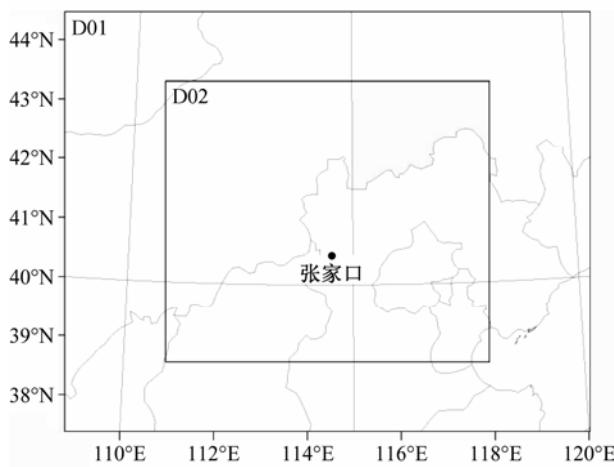


图 3 两层嵌套的模拟区域

Fig. 3 Nested model domain

表 2 对比试验设计方案

Table 2 Experimental schemes

试验	是否	D01、D02	
方案	松弛	是否加同化	备注
试验1	否	否	控制试验, 用背景场直接进行预报
试验2	是	是	对温度进行同化, 将北京地区和张家口地区2009年4月30日到5月1日所有观测的加密探空资料同化到WRF模式里
试验3	是	是	对温度进行同化, 只加北京地区2009年4月30日08:00到09:00的加密探空资料到WRF模式里
试验4	是	是	对温度进行同化, 加北京地区2009年4月30日08:00到11:00, 13:00到14:00的加密探空资料到WRF模式里

调整, 而在观测影响区域之外不进行松弛调整。

## 5 模式结果分析

### 5.1 模式雷达回波

张家口地区实际观测的雷达 PPI 图见图 2b, 4 月 30 日 21:00 实测雷达回波在雷达中心点以北偏东的地区, 有一个雷达回波强区, 最大回波强度可达到 45 dBZ, 其他大部分雷达回波强度在 20~35 dBZ 之间, 只有零星的回波强度达到 35 dBZ。图 2b 中, 黑色圆圈, 每圈距离为 80 km, 可看到张家口西南部雷达回波基本就在 20~35 dBZ, 没有雷达回波强区。图 4 中, 所画的是 D02 的结果, 虚线围成的圈是以实际雷达中心位置为圆心, 每圈距离也大约是 80 km, 虚线内基本就是张家口雷达所探测的区域。

控制试验试验 1 没有加探空资料, 直接利用

NCEP 再分析资料作为背景场, 背景场与中国实际观测资料存在一定的差异, 再加上模式的 spin up 问题, 试验 2、3、4 中通过 nudging 方法把探空资料加进去后, 改进了模式的结果, 由图 4 可看出试验 1 模拟的雷达回波没有加探空资料同化的结果好。

试验 1 模拟得到的雷达回波(图 4a), 呈现东西走向的回波区, 大体上和实际观测雷达回波相似, 但在中心点东北方向并没有回波强区, 只有零星的回波强值, 在张家口西南方向出现了雷达回波较强区, 雷达回波强度可达到 40 dBZ 和实际雷达观测所得有一定的差异。而试验 2、3、4 模拟得到的雷达回波(图 4b、4c、4d), 也呈现东西走向, 相比试验 1 模拟的雷达回波更接近实际观测的雷达回波。试验 2、3、4 都在中心点偏东北方向有一个小的雷达回波强区, 张家口西南地区的回波强度基本就在 20~35 dBZ 之间, 没有试验 1 模拟出来一个小的雷达回波强区, 模拟效果较好。试验 2 是加了所以探测资料同化到模式里, 而试验 3、4 都只是加了部分资料同化到模式里, 由图 4b、4c、4d 可知在中心点偏东北方向试验 2 的雷达回波强区比试验 3、4 覆盖范围大, 张家口西南方向的雷达回波区也明显比试验 3、4 值要小些, 试验 2 比试验 3、4 更接近实测雷达资料, 实时地同化进去更多探空资料使得模式结果向观测靠近, 预报结果更精准。

### 5.2 地面降水分析

由雨量站记录的降水可知, 雨带自西向东的移动, 降水主要在内蒙古的东部、山西的北部和河北的北部, 雨带呈西南—东北走向, 最大降水量大约 10.0 mm, 降水中心值在河北北部与内蒙古接壤一带。图 5a、5b 分别为 09 年 5 月 1 日 02:00 和 05:00 的 1 h 区域加密雨量站累计降水量, 即实际观测降水量值, 02:00 降水主要在内蒙古东部, 河北北部刚刚开始降水, 直到 05:00 张家口地区大部分都有降水, 最大降水量大约 4.0 mm。图 5c-5j 分别为试验 1、2、3、4 试验模拟得到 2009 年 5 月 1 日 02:00 和 05:00 模式结果得到的 1 h 累计降水量。模式得到的雨带走向与观测基本一致, 试验 1 未加同化得到的雨带(图 5c)比实际观测偏东, 02:00 河北北部的降水并不多, 试验 1 模拟得到的降水值却已经达到 2.7 mm 以上, 05:00 实际观测的雨带主要在张家口地区, 有较大降水量, 而试验 1 的结果张家口地区基本没有降水, 雨带已经过了张家口地区, 和实际观测出入较大。试验 2、3、4 加入了探空资料,

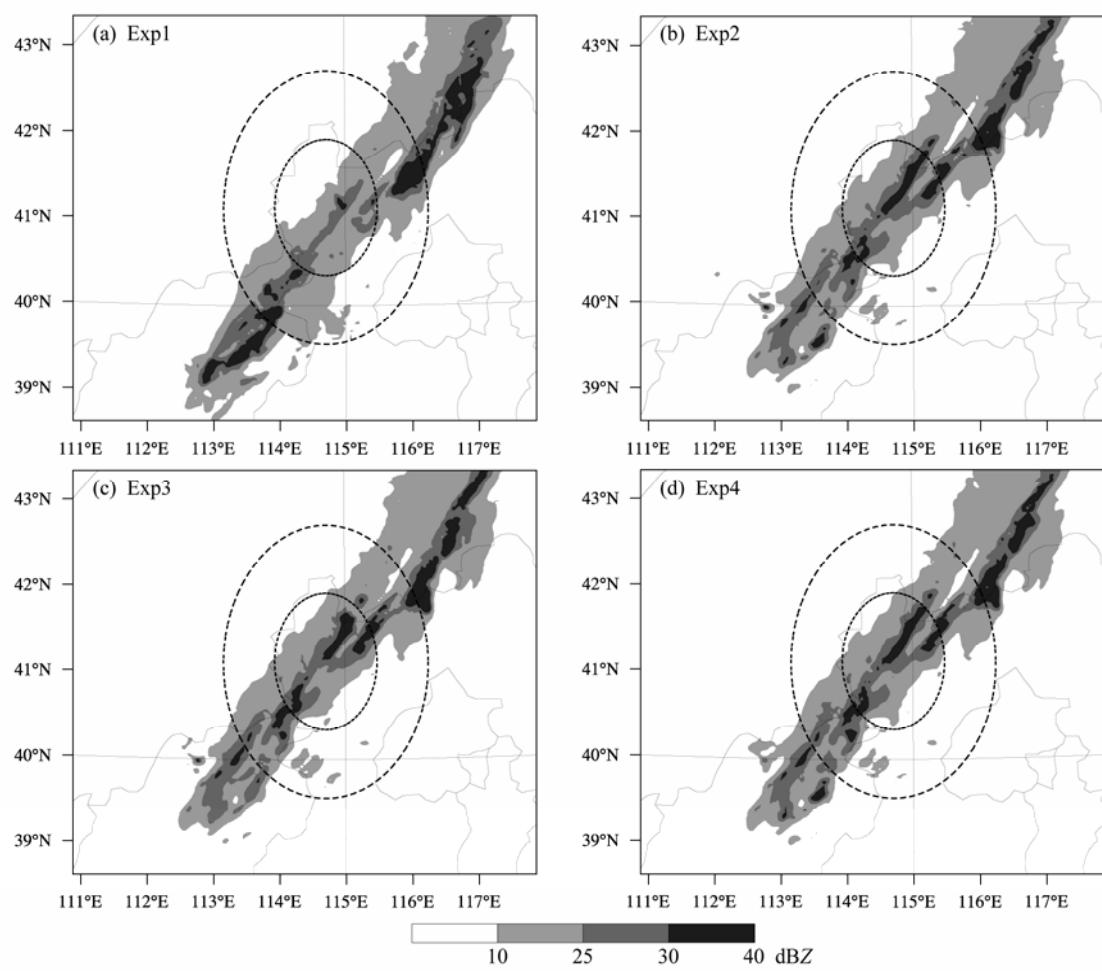


图 4 2009 年 04 月 30 日 21:00WRF 模拟雷达回波: (a) 试验 1; (b) 试验 2; (c) 试验 3; (d) 试验 4

Fig. 4 WRF simulated radar echo at 2100 LST 30 Apr 2009: (a) Expt 1; (b) expt 2; (c) expt 3; (d) expt 4

模拟得到的结果 02:00 (图 5e、5g、5i) 可见模拟的得到雨带都比试验 1 偏西, 和实际接近。降水强中心都在内蒙古东部, 河北北部只有较小的降水。05:00 (图 5h、5j) 试验 3、4 模拟的结果可见张家口地区是有降水的, 但是模拟得到的结果比实际观测值 (图 5b) 小很多, 图 5f 试验 2 模拟的结果, 张家口明显处于降水区, 虽然降水最大值比实际观测要小, 但大部分值和实际差不多。可见把所有实时的探空资料都加到模式中, 使得模式的预报结果向实际观测逼近, 预报更精准。

### 5.3 天气形势

模式模拟的海平面气压高度场见图 6, 4 月 30 日 20:00 试验 1、2、3、4 都大致模拟出了内蒙古东部低压中心, 冷锋移到了河北北部, 张家口地区位于冷锋前。试验 2、3、4 模拟得到的等值线和实际地面天气图 (图 1b) 都很接近。冷空气继续东移, 直到 5 月 1 日 08:00 (图 6e-6h) 地面冷锋全部移过

河北北部地区。对于河北北部, 地面冷锋过境时间为 4 月 30 日 20:00 至 5 月 1 日 08:00, 这和实际观测也基本一致。对比实际和模式结果发现, 只要加了探空资料后得到的地面天气图都要比没加同化模拟结果更接近实际天气图。

### 5.4 温度对比

把 NCEP 再分析资料当作实测资料, 试验 1, 2, 3, 4 的结果和 NCEP 对比温度 (见图 7)。图 7a-7d 是 500 hPa 上温度的不同, 试验 1 的结果明显比实际温度普遍偏低, 一些地区甚至最多可比实际小 2.5 K 以上, 试验 2、3、4 的结果在河北北部、内蒙古中部比试验 1 要高一点, 经过同化后使得大部分温度更接近实测资料。图 7e-7h 是 700 hPa 上温度的不同, 和 500 hPa 一样, 试验 2、3、4 比试验 1 温度都要高一些, 加了张家口和北京加密探空资料后, 试验 2、3、4 在河北北部、北京、内蒙古等地的温度的不同比试验 1 要小, 只是在山西一部分地

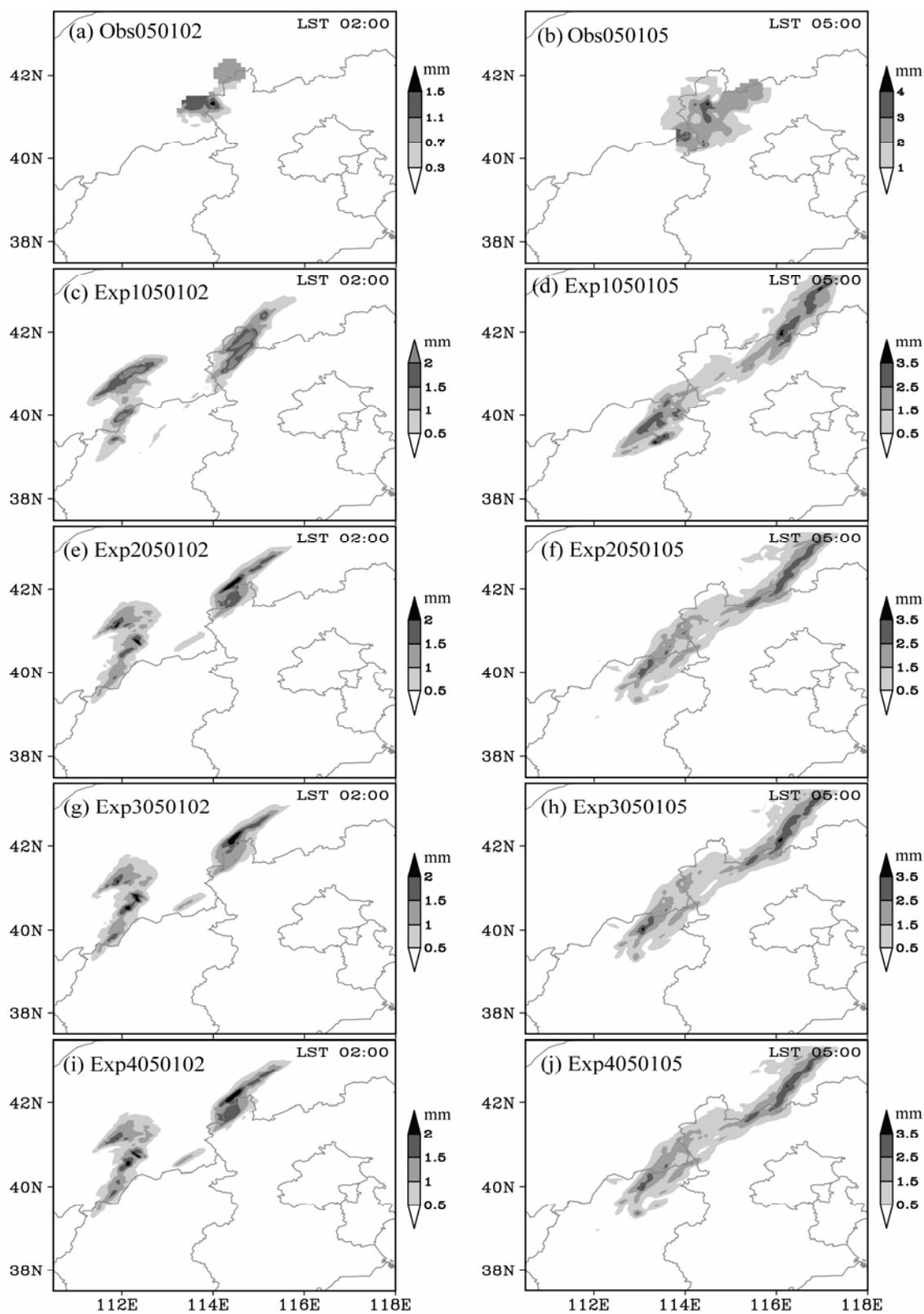


图 5 2009 年 5 月 1 日 (a、b) 区域加密观测雨量和 (c、d) 试验 1、(e、f) 试验 2、(g、h) 试验 3、(i、j) 试验 4 的 1 h 累计降水量: (a、c、e、g、i) 02:00; (b、d、f、h、j) 05:00

Fig. 5 1-hour cumulative precipitation of (a, b) regional encryption, (c, d) expt 1, (e, f) expt 2, (g,h) expt 3, (i, j) expt 4 on 1 May 2009: (a, c, e, g, i) 0200 LST; (b, d, f, h, j) 0500 LST

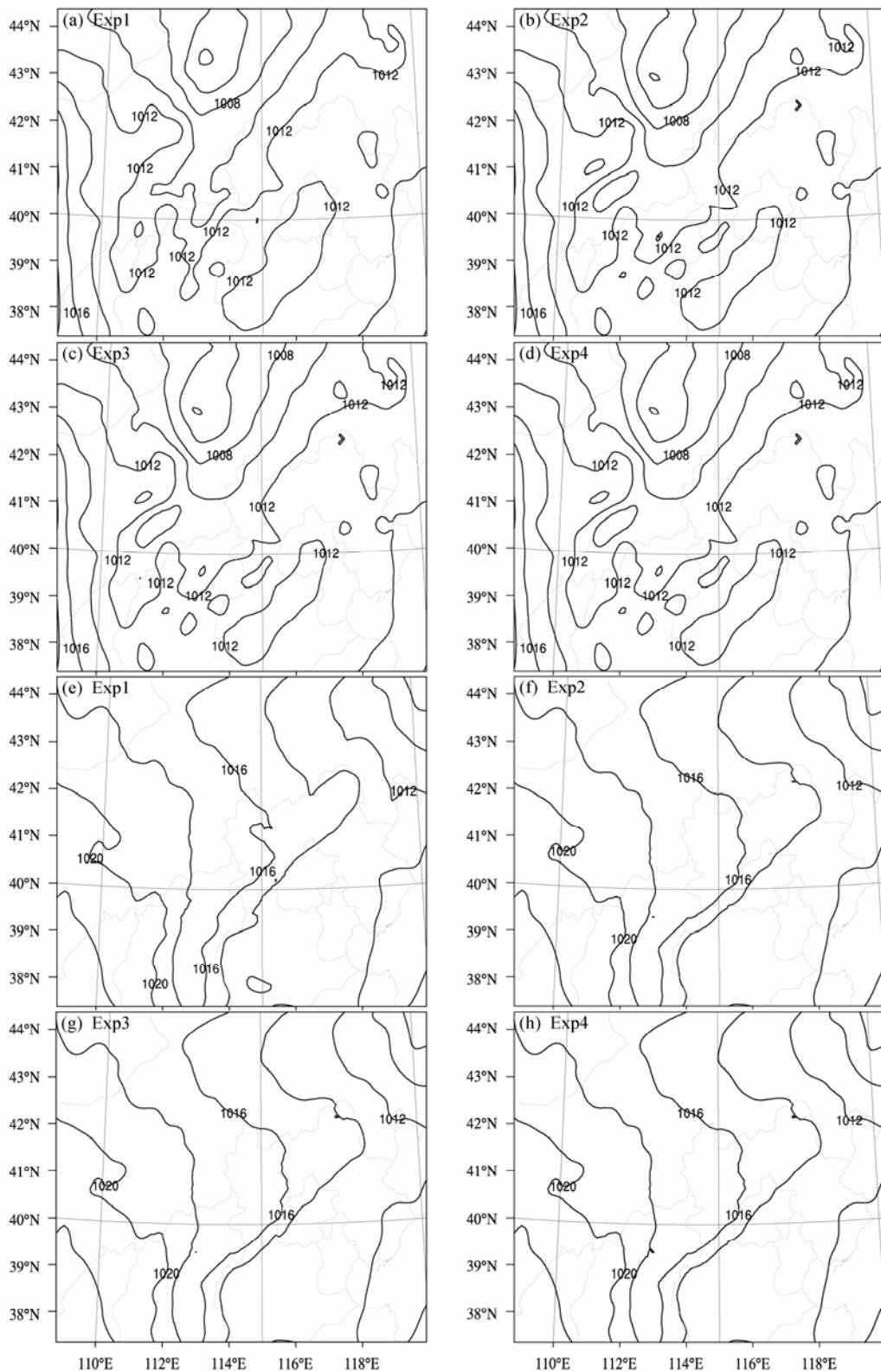


图 6 2009 年 (a、b、c、d) 4 月 30 日 20:00、(e、f、g、h) 5 月 1 日 08:00 海平面气压高度场 (单位: m): (a、e) 试验 1; (b、f) 试验 2; (c、g) 试验 3; (d、h) 试验 4

Fig. 6 Sea level pressure height field at (a, b, c, d) 2000 LST 30 Apr and (e, f, g, h) 0800 LST 1 May 2009: (a, e) Expt 1; (b, f) expt 2; (c, g) expt 3; (d, h) expt 4

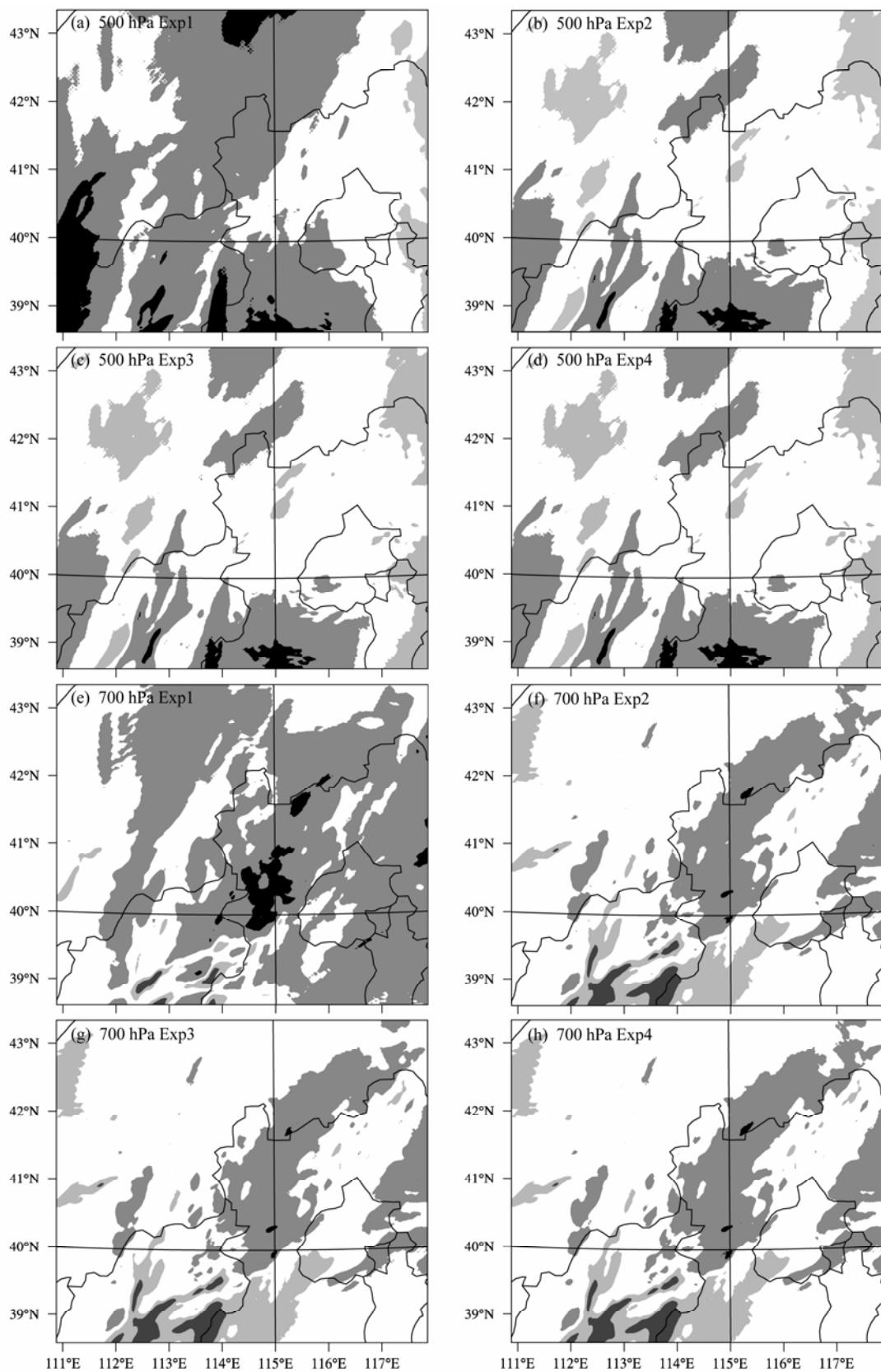


图 7 2009 年 5 月 1 日 08:00 (a, e, i) 试验 1、(b, f, j) 试验 2、(c, g, k) 试验 3、(d, h, l) 试验 4 与实际观测温度 (NCEP 资料) 的差值 (单位: K): (a, b, c, d) 500 hPa; (e, f, g, h) 700 hPa; (i, j, k, l) 850 hPa

Fig. 7 Temperature differences (K) between NCEP forecasts and the run of (a, e, i) expt 1, (b, f, j) expt 2, (c, g, k) expt 3, (d, h, l) expt 4: (a, b, c, d) 500 hPa; (e, f, g, h) 700 hPa; (i, j, k, l) 850 hPa

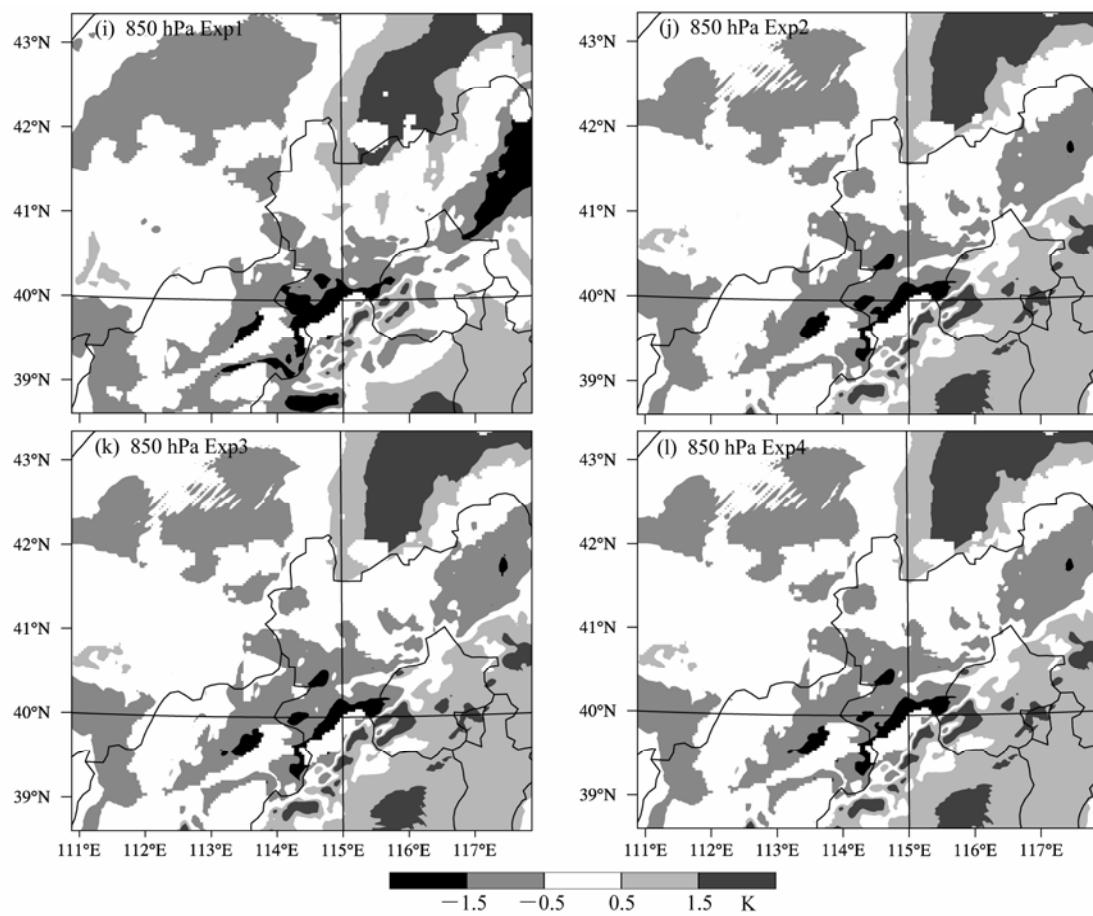


图 7 (续)

Fig. 7 (Continued)

区比试验 1 的差异大些,但是大部分地区经过 nudging 改进后,和实测资料更接近。图 7i–7l 和前 8 幅图一样,是 850 hPa 上的温度的不同,试验 2、3、4 比试验 1 温度差要小些,在 850 hPa 上对于温度还是有所改善。通过对比分析,基本加了探空资料同化的模式结果均比没同化的结果要好,加了不同时刻的探空得到的结果基本类似,仔细对比还是试验 2 得到的温度差最小,可知加入的实时资料越多,模拟结果更好。通过对于温度场的分析,RTFDDA 系统对于模式有很好的改进。

## 6 结论与讨论

本文用加密探空资料,设计了同化方案,对张家口地区一次层状云降水过程模拟试验,从模拟结果和实况对比可以得到以下结论:(1)背景场和实况存在一定差异时,采用 nudging 方法可以使预报量向实际观测值逼近,在一定程度上解决了模式的 spin up 问题。(2)试验只是加了温度进模式里调整,

改变了模式原有的热力场,使得模式动力场随之改变,模式模拟的结果更接近实际观测。经过 nudging 之后,得到的雷达回波、高度场、温度和实况很像,降水也要比不加探空资料的降水更接近实况。(3)在大的背景场中没有较好中小尺度特征量,把中小尺度湍流小扰动等都平滑掉了,经过加入高分辨率的观测资料,通过观测松弛法逼近实际观测,中小尺度的天气现象就更好的模拟出来了。(4)通过加入不同时刻的实时探空资料的同化试验可知,在模式中加入越多的实时资料使得模式结果,更接近实际观测。如果在中小尺度预报中,我们能够很好描述中小尺度特征的观测资料例如雷达资料,探空资料, AMDAR 等高时空分辨率都加入到模式中,这样中小尺度模式预报结果会更精准。

## 参考文献 (References)

- Anthes R A. 1974. Data assimilation and initialization of hurricane prediction models[J]. J. Atmos. Sci., 31: 702–719.

- Aune R M, Tuccillo J J, Uccellini L W, et al. 1987. A VAS-numerical model impact study using the Gal-Chen's variational approach [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 1009–1035.
- Bell R S. 1986. The meteorological office fine-mesh data assimilation scheme [J]. *Meteor. Mag.*, 115: 161–177.
- Charney J, Hale M, Jastrow R. 1969. Use of incomplete historical data to infer the present state of the atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 26: 1160–1163.
- Cram J M, Liu Y, Low-Nam S, et al. 2001a. An operational mesoscale RTFDDA analysis and forecasting system [C]// Preprints 18th WAF and 14th Conference on Numerical Weather Prediction. Ft. Lauderdale, FL: AMS.
- Cram J M, Daniels J, Bresky W, et al. 2001b. Use/impact of NESDIS GOES wind data within an operational mesoscale RT-FDDA system [C]// Preprints 18th WAF and 14th NWP Conf.. Ft. Lauderdale: AMS, 5pp.
- Davies H C, Turner R E. 1977. Updating prediction models by dynamical relaxation: an examination of the technique [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 103: 225–245.
- Hoke J E, Anthes R A. 1976. The initialization of numerical models by a dynamic-initialization technique [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 104: 1551–1556.
- 黄嘉宏, 李江南, 魏晓琳, 等. 2006. 同化 QuikSCAT 资料对台风 Vongfong (2002) 数值模拟的影响 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 45 (4): 116–120. Huang Hongjia, Li Jiangnan, Wei Xiaolin, et al. 2006. Assimilation of QuikScat data and its impact on prediction of typhoon Vongfong (2002) [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* (in Chinese), 45 (4): 116–120.
- Kistler R E. 1974. A study of data assimilation techniques in an autobarotropic primitive equation, channel model [D]. M. S. Thesis, The Pennsylvania State University, 84pp.
- Kuo Y H, Guo Y R. 1989. Dynamic initialization using observations from a hypothetical network of profilers [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117: 1975–1998.
- Leslie L M, LeMarshall J F, Morrison R P, et al. 1998. Improved hurricane track forecasting from the continuous assimilation of high quality satellite wind data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126: 1248–1258.
- 刘红亚, 徐海明, 薛纪善, 等. 2007. 雷达反射率因子在中尺度云分辨模式初始化中的应用 II: 数值模拟试验 [J]. 气象学报, 65 (6): 906–918. Liu Hongya, Xu Haiping, Xue Jishan, et al. 2007. Application of radar reflectivity to initialization of cloud resolving mesoscale model. Part II: numerical simulation experiments [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65(6): 906–918.
- Liu Y B, Low-Nam S, Sheu R S, et al. 2002. Performance and enhancements of the NCAR/ATEC RT-FDDA system [C]// Preprints, 15th Conference on Numerical Weather Prediction. San Antonio, 2002.
- Liu Y B, Warner T, Swerdrup S, et al. 2004. Meso-beta and gamma scale analyses, forecasts and climatologies over complex terrain using the NCAR/ATEC Real-Time FDDA and Forecast (RT-FDDA) system [C]// 11th Conference on Mountain Meteorology & Annual Mesoscale Alpine Program (MAP). Mt. Washington Valley, 2004.
- Liu Y B, Bourgeois A, Warner T, et al. 2005. Implementation of observation-nudging based FDDA into WRF for supporting ATEC test operations [C]. 2005 WRF Users Workshop, Boulder, Colorado, 2005.
- Liu Y B, Bourgeois A, Warner T, et al. 2006. An update on “observa-tion-nudging”- based FDDA for WRF-ARW: Verification using OSSEs and evaluation of the statistical performance of real-time forecasts [C]. 7th WRF Users' Workshop, Boulder CO, 2006.
- Lyne W H, Swinbank R, Birch N T. 1982. A data assimilation experiment and the global circulation during the FGGE special observing periods[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 108: 575–594.
- 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 2002. 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 [J]. 大气科学, 26 (5): 663–676. Meng Zhiyong, Xu Xiangde, Chen Lianshou. 2002. TBB-Nudging Four-Dimensional data assimilation method and simulations on heavy rain process in Wuhan on 20 July, 1998 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 26 (5): 663–676.
- Ramamurthy M K, Carr F H. 1987. Four-dimensional data assimilation in the monsoon region. Part I: Experiments with wind data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 1678–1706.
- Rostkier-Edelstein D, Liu Y B, Ge M, et al. 2006. Simulation of a high impact weather event over Israel with the WRF-RTFDDA system – a case study [C]. 2006 WRF Workshop, Boulder, CO., 2006.
- Seaman N L, Stauffer D R, Lario-Gibbs A M. 1995. A multiscale four-dimensional data assimilation system applied in the San Joaquin valley during SARMAP. Part I: Modeling design and basic performance characteristics [J]. *J. Appl. Meteor.*, 34: 1739–1761.
- Stauffer D R, Seaman N L. 1987. A real-data numerical study and four-dimensional data assimilation application for mesobeta-scale flow in complex terrain [C]// Proc. Symp. Mesoscale Analysis & Forecasting. Vancouver, Canada, ESA, 533–538.
- Stauffer D R, Seaman N L. 1990. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 118: 1250–1277.
- Stauffer D R, Seaman N L. 1994. Multi-scale four-dimensional data assimilation [J]. *J. Appl. Meteor.*, 33: 416–434.
- Stauffer D R, Warner T T, Seaman N L. 1985. A Newtonian “nudging” approach to four-dimensional data assimilation: Use of SESAME-IV data in a meso-scale model [C]// Preprinted at Seventh Conference on Numerical Weather Prediction. Montreal, Canada: American Meteorological Society, 77–82.
- Stauffer D R, Seaman N L, Binkowski F S. 1991. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part II: Effects of data assimilation within the planetary boundary layer [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 734–754.
- Stern W F, Ploshay J J. 1983. An assessment of GFDL's continuous data assimilation system used for processing FGGE data Preprints [C]// Proceedings of the Sixth Conference on Numerical Weather Prediction. Omaha: American Meteorological Society, 90–95.
- Wang W, Warner T T. 1988. Use of four-dimensional data assimilation by Newtonian relaxation and latent-heat forcing to improve a mesoscale-model precipitation forecast: A case study [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116: 2593–2613.
- Yu W, Liu Y B, Warner T, et al. 2006. A comparison of very-short-term QPF's for summer convection over complex terrain areas with the NCAR/ATEC WRF and MM5-based RTFDDA system[C]. 2006 WRF Workshop, Boulder, CO., 2006.