降水量的直接同化对初始场的影响

邵明轩[1,2] 陈 敏[2] 陶祖钰[3] 仲跻芹[2]

1 国家气象中心，北京 100081
2 中国气象局北京城市气象研究所，北京 100089
3 北京大学物理学院大气科学系，北京 100871

摘 要 四维变分法用严格的数学方法、合乎逻辑的物理过程根据观测资料和模式本身来获得一个最优的初始场，是当前最先进的四维资料同化方法之一。作者用四维变分法对自动站降水量作直接同化，对初始场增量进行了分析。结果表明降水量的同化对初始场中热力性质的量影响相对较大，对低层的影响大于高层，大部分增量在 925 hPa 至 850 hPa 层间达最大。通过同化，北京地区对流不稳定性明显增加。对风场的增量分析表明，同化增加了一些中尺度信息。对于散度场和水汽通量散度场，同化有使低层辐合加强的趋势。通过同化，在 MM5 初始场上增加了原先没有的云水、雨水含量，但同化对初始时刻的垂直环流改变不明显。

关键词 四维变分 降水量同化 暴雨模拟 初始场增量分析
文章编号 1006－9895(2006)02－0268－09 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Effect of Direct Assimilation of Precipitation on Initial Field

SHAO Ming-Xuan[1, 2], CHEN Min[2], TAO Zu-Yu[3], and ZHONG Ji-Qin[2]

1 *National Meteorological Center, Beijing* 100081
2 *Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing* 100089
3 *Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing* 100871

Abstract Four-dimensional variational data assimilation (4D-VAR) is a logical and rigorous mathematical method to obtain the "best" estimate of the model initial conditions from observations and model itself. It is one of the most advanced data assimilation methods today. Automation weather station (AWS) precipitation data are assimilated by 4D-VAR directly, and the increment of initial field is analyzed. The effect of precipitation assimilation on the moisture field and temperature field is more obvious than on other element fields, and the effect on low levels is more evident than on high levels. Most of the maximum increments appear between 925 hPa and 850 hPa. Because of precipitation assimilation, the convective instability is enhanced in Beijing area. Analysis of wind field increments shows that some mesoscale information is added to the initial field. The increments of divergence and moisture flux divergence show the tendency that convergence is enhanced in low levels. By assimilating precipitation, the cloud water and rainwater appear in the initial field while there is not any cloud water and rainwater in the original initial field of MM5. But the effect of assimilation on the vertical circulation of the initial field is not evident.

In the experiment, the increment of test II in which 6-hour accumulative rainfall is assimilated is more obvious in most situations than that of test I in which 6-hour hourly precipitation is assimilated. This is because the test I contains more information of rain time than test II and the test II has less limitation than test I. By the increments of test II, effect of precipitation assimilation on the initial field is more evident. However, test II also shows that if on-

收稿日期 2004－09－16，2005－06－06 收修定稿
资助项目 北京市自然科学基金项目 8032009，北京市科委奥运项目 H020620190091，国家自然科学基金重点项目 40233036
作者简介 邵明轩，男，1959 年出生，高级工程师，主要从事数值预报及其应用研究。E-mail：shaomx10@sina.com

ly precipitation data are assimilated, effect of assimilation is not always good. The rain structure in test I is simulated better than that in test II.

Experiment results show that, due to addition of information of AWS precipitation data, the initial fields of test I and test II are enhanced in mesoscale information, which are more consistent with the model in thermo-dynamical mechanism. After assimilating, the simulation of torrential rain is improved. The precipitation during the early period of simulation is increased, and the position of simulated precipitation is more consistent with real situation. The "spin-up" problem of the model is weakened.

Key words Four-dimensional variational data assimilation, precipitation assimilation, torrential rain simulation, increment analysis of initial field

1 引言

影响数值天气预报和数值天气模拟准确度的问题主要有两个：(1)模式本身对大气运动客观规律描述的准确度；(2)初始场和边界条件(对区域模式而言)的准确度。因此，初始场的准确程度对数值天气预报和数值天气模拟的准确度至关重要。现在，一方面随着计算条件的不断改善以及模式本身的发展，模式的分辨率不断提高，需要提供分辨率越来越高的初始场；另一方面随着探测手段的提高，有越来越多的资料可供使用。因此，如何将越来越多的常规、非常规资料加进数值模式，即数值模式的数据同化问题，是数值天气预报进一步发展的关键问题，也是当前国内外的一个前沿性研究课题。在各种资料同化方法中，四维变分法用严格的数学方法、合乎逻辑的物理过程根据观测资料和模式本身来获得一个最优的初始场，是当前最先进的四维资料同化方法之一。

1974 年，Marchuk[1] 首次将伴随方程法引进气象领域。Penenko 和 Obraztsov[2] 于 1976 年首先将切线方程作为伴随方程用到数据变分同化法后，产生了一个以数值预报模式为约束条件的四维资料变分同化方法，因为用到了伴随方程，所以这种方法也称伴随模式法。早期，由于数值模式的复杂性和当时的计算条件，以及直接求解作为约束条件的控制欧拉方程的困难性，四维变分同化方法只是一个理想方法。自 1982 年 Le Dimet[3] 在变分法中引进最优控制论的思想和方法，经过诸多学者[4~8] 的发展，使我们可用经典的数学方法而不是用更为复杂的估计理论中的随机计算方法来处理这个问题，通过寻找相应于初始状态的梯度信息来降低目标函数值的方法，使伴随模式法有了长足的进展。由于这几年计算条件的极大改善，以及四维变分方法本身的改进，终于使其在 20 世纪末在实际业务中得到了应用，欧洲中期数值预报中心首先在业务中实现用四维变分法同化资料[9]。但总的来说，四维变分方法现还处于研究发展阶段，至今全球只有二三个数值预报中心在业务中采用这种同化方法。

在各种资料中，降水量是一个常规观测量，几乎每个地面观测点都对它进行观测，也可以由卫星、雷达等非常规资料反演出高时空分辨率的降水量，降水量的资料很丰富。降水量又是一个牵涉到众多天气过程，且与天气、动力、热力过程密切相关的量。因此，如能把降水量同化进数值模式，意义一定很大。但降水量是个非模式变量，且降水量的时空分布差别极大，因此，降水量的同化一直较为困难。

同化降水量以往使用较多的方法是牛顿张弛法(nudging 法)[10~12]，其他还有用物理初始化法[13]、积云初始化法[14] 等同化降水资料。研究表明，降水资料的同化，减弱了模式降水"spin-up"问题，对模式预报准确率的提高，特别对降水量的正确预报是非常有意义的。由于牛顿张弛法只能直接同化模式变量，因此降水量的同化是先由其反演出潜热加热场，再进行同化。而降水场是个二维场，潜热加热场却是个三维场，因此这种方法存在一定的缺陷，后面两种同化法也含有一定的人为性。同时，上述方法还隐含一个问题，改变后的初始场是否在热力、动力上和模式一定配合，且只是间接同化方法，所以需要发展新的降水量同化方法。

四维变分法同化降水量克服了上述问题，是一个值得发展的方法。因为这方法要涉及到湿物理过程和非线性问题，直到近阶段才有学者[15~21] 对这问题作了一些探讨。国内至今仅张昕等[22] 用四维变分法对这问题作了探讨，他们发现降水量资料的同化对初始场中水汽分布的改进、降水的正确预报有很大的作用，具有很大的研究价值。由于用四维

变分法同化降水量方法较复杂，且计算代价很高，所以用四维变分法同化降水资料还不是很多，降水资料同化后的详细分析也较少，特别在降水量的直接同化对初始场的影响上还没有较详细的分析，因此，本文做了一个降水量同化后的增量分析。

2 试验方法

预报模式使用的是美国宾州大学和美国国家大气科学研究中心开发的非静力平衡中尺度模式 MM5。模式以(40.0°N，116.0°E)为中心，网格格距 30 km，格点数 53×53；垂直方向采用 σ 坐标，不等距分为 23 层，顶层 100 hPa。物理过程中采用了云辐射参数化方案、Grell 积云参数化方案和 Dudhia 微物理水汽方案。

同化模式使用美国国家大气科学研究中心为配合 MM5 而开发的 MM5 伴随模式(即 MM5 四维变分模式)[23, 24]。

试验中所用的目标函数为

$$J(\boldsymbol{x}_0)=\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}_0-\boldsymbol{x}_\mathrm{b})^\mathrm{T}\boldsymbol{W}(\boldsymbol{x}_0-\boldsymbol{x}_\mathrm{b})+\frac{1}{2}\sum_{t=0}^{t_r}\sum_{i=1}^{n_i}\sum_{j=1}^{n_j}\beta(P_{ijt}-R_{ijt})^2, \quad (1)$$

式中，$\boldsymbol{x}_0$ 为模式初始场，$\boldsymbol{x}_\mathrm{b}$ 为背景场(这里使用的是和控制试验一样的初始场)，$\boldsymbol{W}$ 为背景场权重函数，对于各变量取各自最大方差的倒数，β 为观测降水权重参数，试验中取为 $1.11\times10^2\ \mathrm{cm}^{-2}$，$P_{ijt}$ 为第 t 小时模式降水量，R_{ijt} 为第 t 小时观测降水量，t_r 为同化时间窗终点，n_i 和 n_j 分别为模式 i 方向和 j 方向格点数，同化中没有考虑惩罚项。

为了方便分析直接同化降水量对初始场的影响，在试验中仅同化了北京地区的自动站降水资料。为了解决同化资料范围仅占试验运算范围一小部分这个问题，以及降水量空间分布的不均匀性问题，在试验中经多次试验分析后，设计了较为特殊的三次插值方法，插值公式如下：

$$R_t(I,J)=P_{0t}(I,J)+\left\{\sum_{k=1}^{n}W_k[R_{kt}-H_k(P_t)]^3\Big/\sum_{k=1}^{n}W_k\right\}^{1/3}, \quad (2)$$

式中，$R_t(I,J)$ 为插值后网格(I,J)点第 t 小时降水量值，$P_{0t}(I,J)$ 为同化前模式(I,J)点第 t 小时降水量值，式中 W_k 只对测站周围四个网格点有效，对其余网格均为零，W_k 和测站到网格(I,J)点相对距离(和网格距相比)的平方成反比，H_k 为用模式第 t 小时降水量 P_t 计算第 k 测站降水量的算子，R_{kt} 为第 k 自动站第 t 小时实测降水量，n 为测站数。

3 资料和同化方案

北京地区从 2002 年 6 月 24 日 20 时至 25 日 20 时(北京时，下同) 在其西部山前地区、市区均出现了暴雨，局地出现了大暴雨，最大雨量出现在门头沟达 200.4 mm。门头沟的单站逐时降水主要集中在 24 日 23 时到 25 日凌晨，22 时开始降水 1 小时后，降水猛增到 26.2 mm/h、41.9 mm/h、46.1 mm/h 的降水强度，24 日 23 时～25 日 02 时这 3 小时中

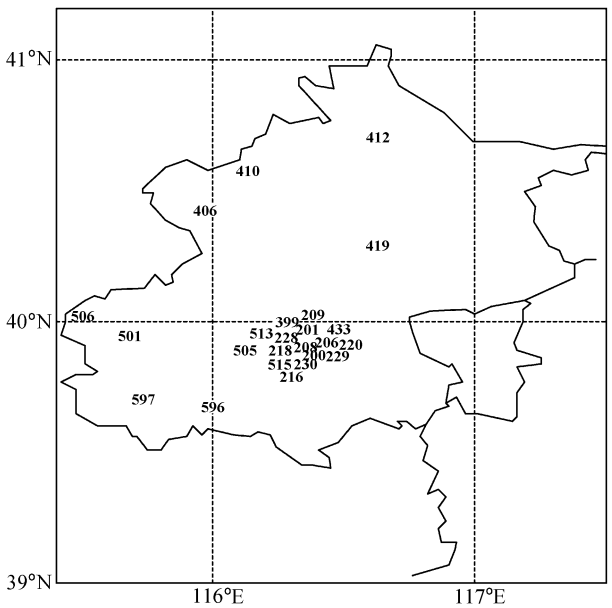

图 1 四维变分同化试验所用的 25 个自动站位置分布图。其中 200 代表天安门站，201 青年湖公园，206 东直门，208 西直门，209 国家奥林匹克体育中心，212 十八里店，216 丽泽桥，218 公主坟，220 白家庄，228 紫竹院公园，230 大观园，229 古观象台，399 海淀，406 延庆，410 佛爷顶，412 汤河口，419 怀柔，433 朝阳，501 斋堂，505 门头沟，506 灵山，513 石景山，514 丰台，596 房山，597 霞云岭

Fig. 1 The distribution of 25 auto-stations in four-dimensional variational assimilation of precipitation data. 200 represents Tian'anmen station, 201 Qingnianhu park, 206 Dongzhimen, 208 Xizhimen, 209 National Olympic Sports Centre, 212 Shibalidian, 216 Lize Qiao, 218 Gongzhufen, 220 Baijiazhuang, 228 Zizhuyuan Park, 230 Grand View Garden, 229 Ancient Observatory, 399 Haidian, 406 Yanqing, 410 Foyeding, 412 Tanghekou, 419 Huairou, 433 Chaoyang, 501 Zhaitang, 505 Mentougou, 506 Lingshan, 513 Shijingshan, 514 Fengtai, 596 Fangshan, and 597 Xiayunling

降水量达 114.2 mm。同化试验中使用北京地区 25 个自动站的逐时降水量资料(见图 1)，在这 25 个站中，有 12 站 24 小时雨量超过 50 mm。

模式的初始场由常规资料和 T213 格点资料经客观分析后插值到中尺度网格点上构成。为了对比同化效果，模式用没经同化的初始场以及经过同化的初始场分别作摸拟计算。同化时段为模拟开始 6 小时，所有模拟试验起始时间均为 2002 年 6 月 24 日 20 时，积分 24 小时至 6 月 25 日 20 时。其中控制试验用的初始场没有经过同化，6 小时同化试验 I 同化的是自动站逐时降水量(简称试验 I)，为了对比试验，6 小时同化试验 II 同化的是自动站 6 小时累积降水量(简称试验 II)。以下主要对试验 I 的初始场进行分析。

4 同化对初始场的影响

在四维变分同化中，对模式初始场的改进是由加入适当强迫项的伴随模式向后积分所得的梯度信息计算而来，在降水量的同化中伴随湿物理过程的强迫即是模式的模拟降水量和实际降水量的差，它首先改变水汽辐合的垂直积分量，然后通过对流运动加热增加湿度(或冷却减少湿度)来改变温度和湿度场，再通过模式的动力过程影响模式的其他变量，这种改变是以数值模式为约束条件进行的，使得初始场和模式在动力和物理性上更为一致。

4.1 对温湿场的影响

在试验 I 中，湿度场的改变最显著。比湿最大改变处在 850 hPa 层北京南部与河北交界处附近，增加了 2.0 g/kg；温度最大改变处也在 850 hPa 层附近，最大改变值 1.9℃。图 2a 为 850 hPa 层比湿增量分布(与控制试验相比，以下所说的试验 I 增量为试验 I 值减去控制试验值，试验 II 增量为试验 II 值减去控制试验值)，图 2b 为 850 hPa 层温度增量分布图。由图 2 可见，由于同化的自动站资料都在北京地区，所以由四维变分带来的温湿变化也主要在北京地区附近，变化最大处在暴雨中心的南面，且温度增量分布和比湿增量较一致。

图 3 是温湿增量在其最大改变处随高度变化。试验 II 在同化后，温湿的变化趋势和试验 I 类似，且增量值更大一些，位置靠近最大暴雨模拟中心，比湿最大改变处也在 850 hPa 层附近，最大增量值 3.6 g/kg；850 hPa 温度最大增量值 2.3℃，925 hPa 温度增量值达最大 3.7℃。试验中比湿最大增量与 Zhang 等[25]的三维变分同化中初始场的最大比湿增量相当，最大温度增量小于后者的最大温度增量。

总的来说，降水量直接同化后改变最大的是低层温湿场，两者关系相当一致，增温、增湿，在 850 hPa 层附近达到最大；在暴雨区低层湿度增加，温度相应增加，最大增温增湿中心在最大模拟降水中心的南面，在 500 hPa 层附近温湿略微减少。这种变化有利于暴雨区的不稳定能量的增加，

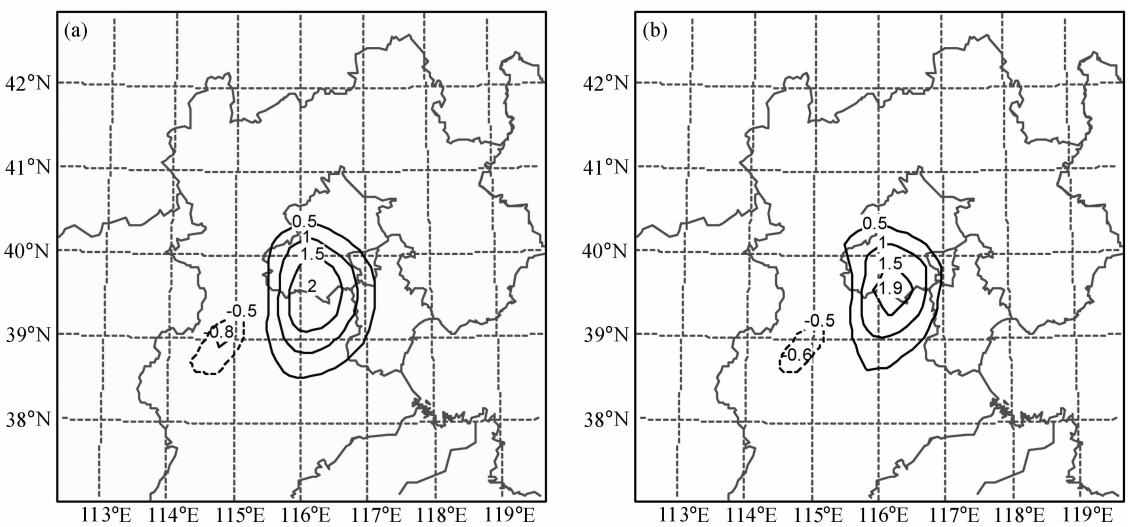

图 2 $t=0$ 时，试验 I 中 850 hPa 比湿增量(a，单位：g/kg)和温度增量(b，单位：K)

Fig. 2 850 hPa specific humidity increment (a, units: g/kg) and 850 hPa temperature increment (b, units: K) in 6-h assimilation test I when time $t=0$

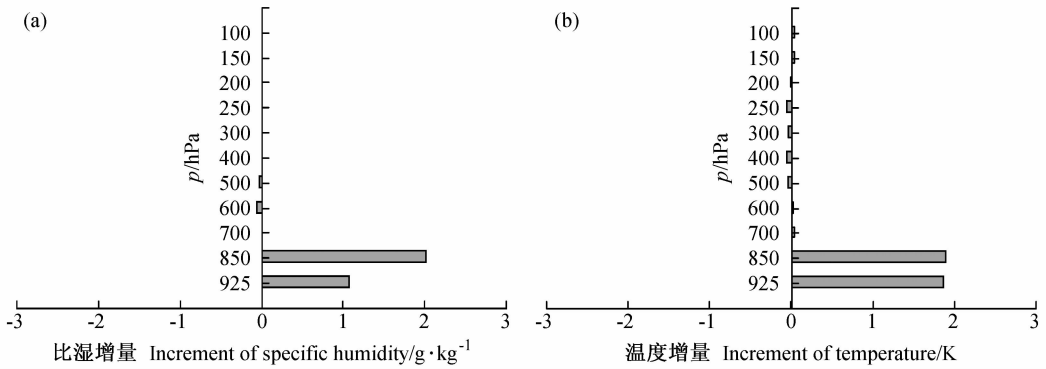

图 3 $t=0$ 时，试验 I 中(39.6°N，116.2°E)处比湿增量(a，单位：g/kg)和温度增量(b，单位：K)随高度变化

Fig. 3 Height change of specific humidity increment (a, units: g/kg) and temperature increment (b, units: K) at (39.6°N, 116.2°E) in 6-h assimilation test I, when time $t=0$

且在试验 II 中这种同化作用大于试验 I。

4.2 对风场的影响

图 4 为试验 I 和试验 II 中 850 hPa 和 500 hPa 风场增量分布。对于试验 I，在 850 hPa 和 500 hPa 上北京地区增量值均较小，在该地区同化作用不明显；而对于试验 II，可以明显看出 850 hPa 在北京地区为一辐合中心，在 500 hPa 为一明显辐散区，这对北京地区上空上升运动的产生和加强非常有利。从试验 I、II 不同的风矢量增量以及不同的温湿条件可以推出，试验 II 的初始场更有利于降水的产生。试验中，试验 II 在模式运行 1 小时后即产生大于每小时 20 mm 的强降水，而试验 I 在模式运行 3 小时后才产生每小时 20 mm 左右的强降水。控制试验在初始场中没有这种小系统，所以在模式运行中迟至 $t=7$ 时后，才产生每小时 10 mm 左右的较大降水。因此，通过同化增加了一些初始场中的中尺度信息，但同化试验中风矢量增量值较小，试验 I 中最大增量值小于 2 m/s，试验 II 中最大增量值小于 3 m/s。

4.3 对相当位温场的影响

通过同化，在北京地区低层湿度增加，温度增加，在其上空 500 hPa 层附近，湿度和温度均有所减少，因此，相当位温 θ_e 的垂直分布应该是低层增加，在 500 hPa 层附近有所减少。图 5 为试验 I 中 θ_e 增量在其最大值点(39.6°N，116.2°E)上随高度的分布，以及 θ_e 随高度的分布。从图 5 可以得知，通过同化增加了北京地区上空不稳定能量。在该点上，850 hPa θ_e 减 500 hPa θ_e 的差值为 8.4 K，而没经过同化的初始场中在这一点上 850 hPa θ_e 减 500 hPa θ_e 的差值仅为 1.5 K。对于试验 II，这种效应更为明显(图略)，在同一点上 850 hPa θ_e 减 500 hPa θ_e 的差值为 13.1 K，这表明通过同化北京地区对流不稳定性得到增加。

4.4 对涡度场和散度场的影响

通过同化，在北京地区涡度增量有正有负，作用不明显，这与降水量同化对初始场基本环流要素改变不大(如对风场的改变不大)有关。

散度增量在北京地区下层为负值区，在500 hPa 附近为正值区，有使暴雨区低层辐合加强、中高层辐散加强的趋势，且这种趋势在试验 II 比试验 I 更为明显。

4.5 对水汽通量场的影响

通过同化，在北京地区水汽通量增量为正值，增量在 925 hPa 至 850 hPa 间达最大，试验 I 增量最大值在 925 hPa 为 1.4 g/s，试验 II 增量最大值在 850 hPa 为 2.8 g/s，试验 II 中同化影响大于试验 I。

4.6 对水汽通量散度场的影响

与降水关系较大的水汽通量散度增量分布见图 6。通过同化，北京地区低层在试验 I 中水汽通量散度辐散程度有所减弱，在试验 II 中水汽通量散度由辐散转为辐合，有利于降水的产生。在中高层增量绝对值减少，作用不明显。

4.7 对垂直速度场的影响

与降水大小有直接关系的垂直速度，通过同化，在初始时刻对其改变作用不明显，除了在北京地区上空略有不同，三个试验的初始场垂直环流基本一致。这与降水量同化对初始基本环流形势改变

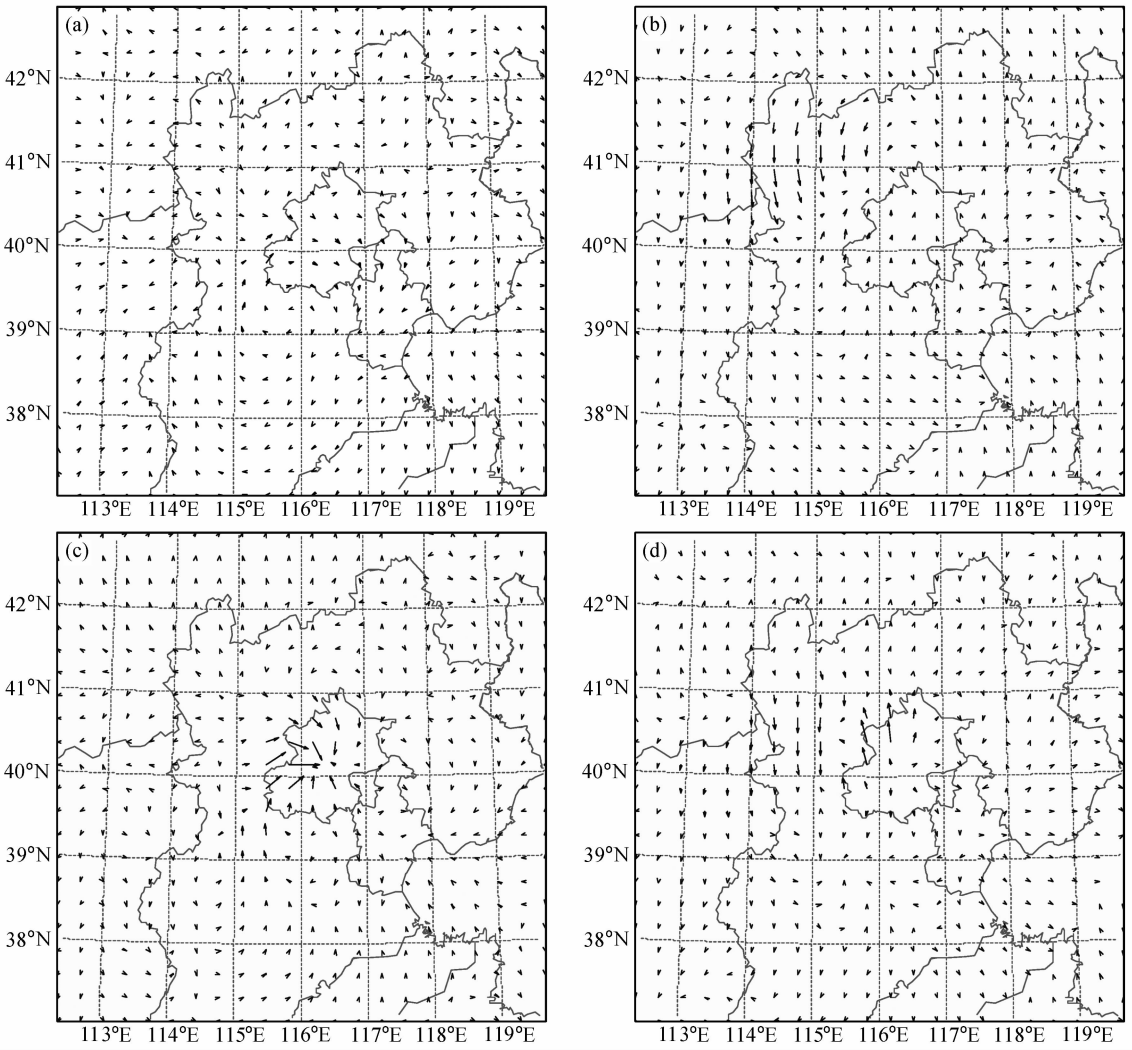

图 4 $t=0$ 时，风矢量增量分布：(a) 试验 I 850 hPa；(b) 试验 I 500 hPa；(c) 试验 II 850 hPa；(d) 试验 II 500 hPa

Fig. 4 Distribution of wind vector increment in 6-h assimilation test when time $t=0$: (a) Test I, 850 hPa; (b) test I, 500 hPa; (c) test II, 850 hPa; (d) test II, 500 hPa

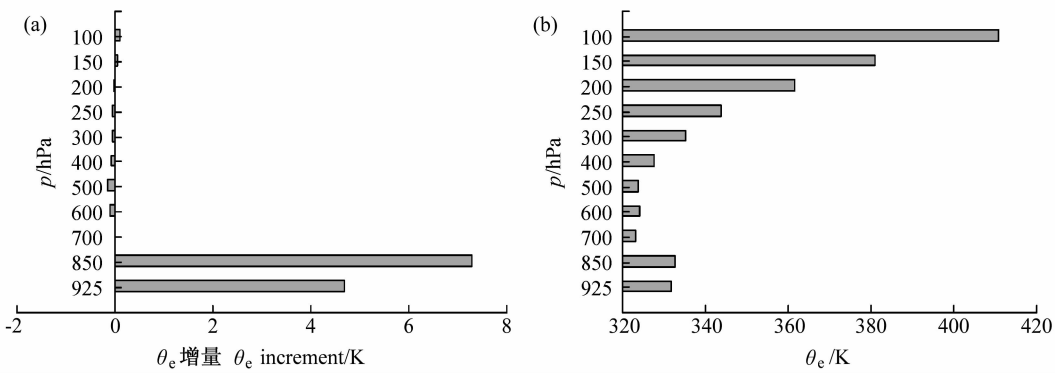

图 5 $t=0$ 时，试验 I 中(39.6°N，116.2°E)处 θ_e 增量(a，单位：K)和 θ_e(b，单位：K)随高度变化

Fig. 5 Height change of θ_e increment (a, units: K) and θ_e(b, units: K) in 6-h assimilation test I at (39.6°N, 116.2°E) when time $t=0$

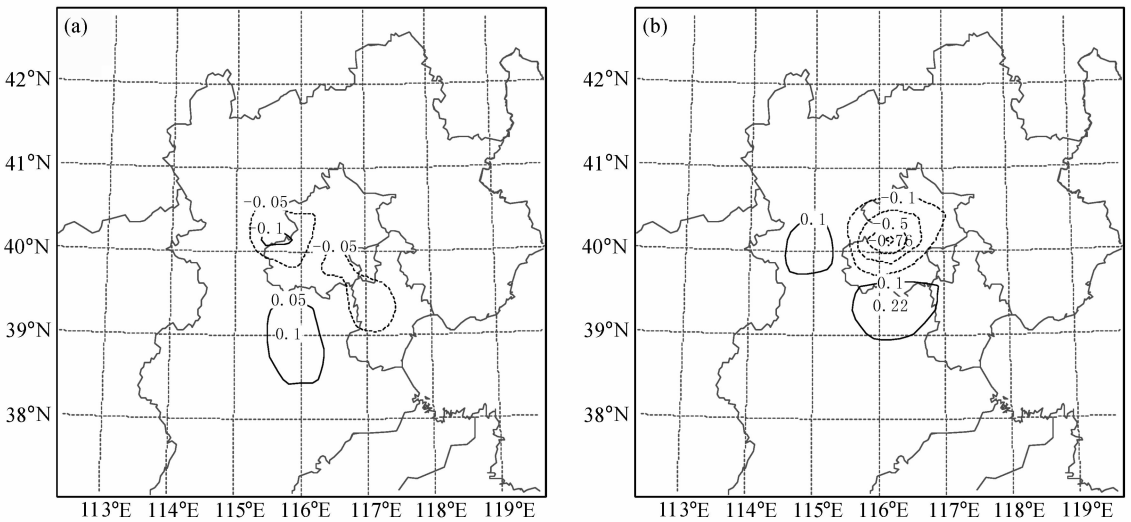

图 6 $t=0$ 时，850 hPa 水汽通量散度增量分布(单位：10^{-7}g·s^{-1}·hPa^{-1}·cm^{-2})：(a) 试验 I；(b) 试验 II

Fig. 6 Increment distribution of 850 hPa moisture flux divergence in 6-h assimilation test (units: 10^{-7} g·s^{-1}·hPa^{-1}·cm^{-2}) when time $t=0$: (a) Test I; (b) test II

不大有关。因此，控制试验、试验 I 和试验 II 这三个试验中模拟降水过程有较大的差异并不是由于初始场的垂直速度差异直接引起的。

4.8 增加云水和雨水场

MM5 模式原来的初始场中并不含有云水和雨水，通过同化，在其初始场中已经含有云水和雨水。产生的云水和雨水主要高值区在降水同化区域上方和附近。

5 试验结果

控制试验在北京地区附近模拟出暴雨，但降水最强处位置向西偏移到北京和河北交界处，主要降水时段在 $t=6$ 至 $t=18$ 时，与实际相比主要降水期向后推迟，降水强度小于实际强度。

试验 I 和控制试验相比，北京地区的降水模拟有了明显提高，特别是最初 6 小时的降水强度得到了较大的加强，最大降水中心值达到了 67.7 mm，前 12 小时的强降水区域靠近实际分布。在 $t=18$ 至 $t=24$ 时段，降水预报类似控制试验。这表明由于自动站逐时降水量资料的加入，增加了初始场中的中尺度信息，增强模拟开始阶段的降水量，改进降水量的落区预报，减弱模式开始阶段的“spin-up”现象。因此，前 6 小时的逐时降水量同化对降水量结构的正确模拟改进作用明显。

试验 II，从其 6 小时累积降水量分布情况看，与试验 I 模拟情况大体类似，强降水位置就在北京地区，且前 6 小时模拟的降水强度更大，更接近实际。但从逐时降水量的分布情况看，同化累积降水量和同化逐时降水量的差别还是明显的，图 7 给出这次暴雨事件中最大降水量处门头沟自动站，以及控制试验、试验 I 和 II 最大模拟降水处逐时降水量分布。从对强降水的模拟来说，试验 I 模拟情况最好(试验结果的详细分析参阅文献[26])。对于试验 I 和 II 的差异，主要在于试验 II 中同化的是 6 小时累积雨量(即 6 小时中一共下了多少雨量的资料)，试验 II 在前 6 小时产生的雨量比试验 I 在前 6 小时产生的雨量更多，与前 6 小时实际累积雨量更靠近，但由于没有其他条件限制，使得同化作用有过度的倾向，强降水提前出现，同时其后没有更多的水汽支持，因此在整个模拟过程中并没有试验 I 的模拟好。而在试验 I 中，由于同化的是逐时降水量，中间包含了一定的时间信息，所以试验 I 在整个模拟过程中比试验 II 模拟的更好。

6 结论

从通过降水量的直接同化对其初始场改变量的分析来看，试验中初始场的改变主要体现在热力性质的量上，且底层的改变程度大于高层，大部分增量在 925 hPa 至 850 hPa 层之间达到最大。从同化中各个量的改变，可以看出代表湿度的量——比湿

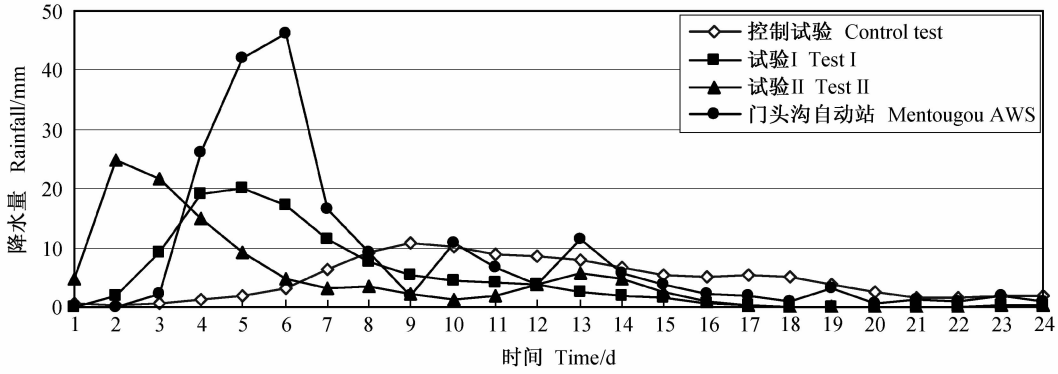

图 7 2002 年 6 月 24 日 20 时～25 日 20 时门头沟自动站(39.9°N，116.1°E)、控制试验(39.9°N，115.5°E)、试验 I(39.9°N，116.2°E)和试验 II(39.9°N，116.2°E)逐时降水量

Fig. 8 Hourly rainfall observed at the Mentougou Automation Weather Station (AWS) (39.9°N, 116.1°E) and simulated in control test (39.9°N, 115.5°E), 6-h assimilation test I (39.9°N, 116.2°E) and 6-h assimilation test II (39.9°N, 116.2°E) from 1200 UTC 24 Jun to 1200 UTC 25 Jun 2002

相对改变最大，与此对应，温度的改变也较大。由于这两个量的改变较大，与此相应 θ_e 的改变也较大，使得在北京地区对流层低层 θ_e 增加，高层略有减少，对流不稳定性增加。从对高度场和风场的改变看，增加了一些中尺度信息，但总的来说改变不大。从对散度场和水汽通量散度场的改变看，低层有辐合加强的趋势。通过同化，在 MM5 初始场上增加了原先没有的云水、雨水含量。但同化对模拟中与降水量关系最大的垂直环流在模拟初始时刻改变不明显。

三个试验初始时垂直速度场差别很小，但控制试验、试验 I 和 II 模拟的降水过程很不相同，这表明不同的降水过程并不是由于初始时刻的垂直环流差异直接引起的，而是由于通过同化改变了初始场中的一些其他量，特别是热力性质(如对流不稳定性)引起的。由于初始场中热力场的不同，引起随后的垂直环流有所不同，再由垂直环流的不同引起热力场的更大差异，最终导致较大的垂直环流差异，这是三个试验中降水过程有较大差异的一个重要原因。因此，初始场中不同的中尺度信息对数值预报(模拟)影响很大，对随后的模拟中由同化带来的中尺度信息差异以及由这差异带来的演变差别作进一步的分析，将有助于进一步提高数值预报和数值模拟的准确度。

试验 I 和 II 对初始场各要素改变量的绝对值均不大，改变量的方向基本一致(即正值区大体上对正值区，负值区大体上对负值区)，且试验 II 对初始场的改变量比试验 I 更明显一些。因此，对试验 II 的增量分析有助于更清楚地分析降水的同化作用，同时，它也表明仅仅同化降水量是不够的，有可能出现过度同化现象(例如试验 II 中强降水的提前出现)，所以，同化资料中的时间信息是相当重要的。时间信息可以弥补一些资料不足问题，对预报(模拟)起重要作用，也因此使得试验 I 对本次暴雨过程的模拟在几个试验中是最好的。这个试验也表明，由于有自动站资料的区域有限，且仅同化了降水量资料，对初始场的改进范围有限，主要是北京地区及其临近地区，模拟的改进有限，主要是前 18 小时的模拟。

致谢 本文插图绘制采用北京大学物理学院郑永光等研制的“客观分析诊断图形系统”，在此谨表谢意。

参考文献 (References)

[1] Marchuk G I. *Numerical Solution of the Problems of the Dynamics of the Atmosphere and the Ocean* (in Russian). Leningrad (Russia): Gidrometeoizdat, 1974

[2] Penenko V V, Obraztsov N N. A variational initialization method for the fields of the meteorological elements. *Soviet Meteor. Hydrol.*, 1976, (11): 1～11

[3] Le Dimet F X. A general formalism of variational analysis. CIMMS report 22, Cooperative Institute for Mesoscale Meteorological Studies, 815 Jenkins Street, Norman, OK, 73019, 1982. 34pp

[4] Lewis J M, Derber J C. The use of adjoint equations to solve a variational adjustment problem with advective constraints. *Tellus*, 1985, **37A**(4): 309～322

[5] Le Dimet F X, Talagrand O. Variational algorithms for anal-

ysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects. *Tellus*, 1986, **38A**(2): 97～110

[6] Talagrand O, Courtier P. Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation I: Theory. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1987, **113**: 1311～1328

[7] Courtier P, Talagrand O. Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation II: Numerical results. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1987, **113**: 1329～1347

[8] Deber J C. A variational continuous assimilation technique. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**(11): 2437～2446

[9] Rabier F, J rvinen H, Klinker E, et al. The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. I: Experimental results with simplified physics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2000, **126**: 1143～1170

[10] Fiorino M, Warner T T. Incorporating surface-winds and rainfall rates into the initialization of a mesoscale hurricane model. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**(9): 1914～1929

[11] Wang W, Warner T T. Use of four-dimensional data assimilation by Newtonian relaxation and latent-heat forcing to improve a mesoscale-model precipitation forecast: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**(12): 2593～2613

[12] Jones C D, MacPherson B. A latent heat nudging scheme for the assimilation of precipitation data into an operational mesoscale model. *Meteor. Appl.*, 1997, **4**(3): 269～277

[13] Krishnamurti T N, Bedi H S, Ingles K. Physical initialization using SSM/I rain rates. *Tellus*, 1993, **45A**: 247～269

[14] Donner L J. An initialization for cumulus convection in numerical weather prediction models. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**(2): 377～385

[15] Županski D, Mesinger F. Four-dimensional variational assimilation of precipitation data. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**(4): 1112～1127

[16] Tsuyuki T. Variational data assimilation in the tropics using precipitation data. Part II: 3D model. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**(11): 2545～2561

[17] 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**(12): 2859～2882

[18] Tsuyuki T. Variational data assimilation in the tropics using precipitation data. Part III: Assimilation of SSM/I precipitation rates. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**(7): 1447～1464

[19] Guo Y R, Kuo YH, Dudhia J, et al. Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**(3): 619～643

[20] Fillion L. Variational assimilation of precipitation data and gravity wave excitation. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**(2): 357～371

[21] Zupanski M, Zupanski D, Parrish D F, et al. Four-dimensional variational data assimilation for the blizzard of 2000. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**(8): 1967～1988

[22] 张昕, 刘月巍, 王斌, 等. "98·7"特大暴雨降水资料的四维变分同化研究. 自然科学进展, 2003, **13**(12): 1329～1332
Zhang X, Liu Y W, Wang B, et al. Four-dimensional variational assimilation of precipitation data for "98.7". *Progress in Natural Sciences* (in Chinese), 2003, **13**(12): 1329～1332

[23] Zou X, Vandenberghe F, Pondeca M, et al. Introduction to adjoint techniques and the MM5 adjoint modeling system. NCAR Tech. Note. NCAR/TN-435-STR, 1997, 107pp

[24] Zou X, Huang W, Xiao Q. A user's guide to the MM5 adjoint modeling system. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-437+IA, 1998

[25] Zhang Xin, Wang Bin, Ji Zhongzhen, et al. Three-dimensional variational data assimilation implemented in numerical modeling for "98.7" Wuhan torrential rain. *Progress in Natural Sciences*, 2002, **12**(6): 445～448

[26] 邵明轩, 陈敏, 陶祖钰, 等. 用四维变分法同化自动站降水资料. 北京大学学报(自然科学版). 2005, **41**(5): 701～709
Shao M X, Chen M, Tao Z Y, et al. Four-dimensional variational assimilation of precipitation. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2005, **41**(5): 701～709