

梅雨锋暴雨研究中的四维变分同化试验

程小平 王云峰 侯志明 费建芳 韩月琪

解放军理工大学气象学院, 南京 211101

摘 要 作者利用 PSU/NCAR 的 MM5 数值预报模式及其伴随模式, 以中国 1999 年 6 月 23 日~24 日的一次梅雨锋暴雨过程为例, 根据气象要素与同化窗口之间的配置差异, 作了 3 组变分同化试验。试验结果表明: 4DVAR 方法在提高梅雨锋暴雨的数值预报水平上具有重要的作用。

关键词 梅雨锋 伴随模式 四维变分资料同化

文章编号 1006-9895(2005)03-0491-05

中图分类号 P442

文献标识码 A

Four-Dimensional Variational Assimilation Experiments of Meiyu Front Rainstorm

CHENG Xiao-Ping, WANG Yun-Feng, HOU Zhi-Ming, FEI Jian-Fang, and HAN Yue-Qi

Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

Abstract By using a nonhydrostatic version of the Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model (MM5) and its adjoint model, three sets of four-dimensional variational data assimilation experiments for the Meiyu front rainstorm from 23 to 24 June 1999 are performed according to different assimilation data and different assimilation windows. The result shows that 4DVAR plays an important role in improving the Meiyu front rainstorm forecast.

Key words Meiyu front, adjoint model, four-dimensional variational data assimilation

1 引言

梅雨锋暴雨的数值预报一直是我国气象工作者关注的前沿课题之一。梅雨锋暴雨具有强度大、骤发性强、时空分布不均匀等特点, 使梅雨锋暴雨的预报成为一个难点问题。陶诗言等^[1]认为, 构成有利于暴雨发生的大尺度环流背景的行星尺度系统(阻塞高压、副热带高压)和天气尺度系统(高空槽)并不能直接造成暴雨, 它们只能起着制约和孕育梅雨锋中尺度暴雨系统发生发展的作用。梅雨锋暴雨是由多种时、空尺度天气系统相互作用的结果, 如果运用常规的大尺度观测资料进行客观分析, 则会因初始场中没有足够中尺度信息, 导致数值预报结果偏差很大。所以, 如何从现有的各种观测资料中提取有用的中尺度信息来增加模式初始场中的中尺

度信息含量, 这就要借助于四维变分资料同化方法。四维变分资料同化方法(简称 4DVAR)最初是由 Lewis 等^[2]、Le Dimet 等^[3]以及 Talagrand 和 Courtier^[4]等引入气象界, 经过国内外气象工作者的长期研究, 此方法得到了迅速发展和广泛应用。

2 四维变分资料同化原理

4DVAR 方法是利用已有的随时间演变的观测资料, 以预报方程作为约束条件, 为数值预报模式寻找一个最优的初始条件(简称 IC), 使模式预报值与观测资料之间的偏差最小。或者说, 4DVAR 方法就是以预报方程为约束条件, 将观测资料的时间演变信息, 转化为模式初值的空间变化信息。

本文中代价函数定义如下:

$$J = J_M + J_R + J_S, \quad (1)$$

收稿日期 2003-11-24, 2004-04-12 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40105012

作者简介 程小平, 男, 1977 年出生, 博士在读, 助教, 研究方向: 资料变分同化应用等。E-mail: expcat@sina.com

它表示模式预报值同观测值之间的距离, 决定使该函数达到最小的解成为最优初值。 $\mathbf{J}_M$ 表示模式变量观测资料的代价函数, $\mathbf{J}_R$ 和 $\mathbf{J}_S$ 分别表示台站累积降水量资料和台站地面观测资料的代价函数。其中:

$$\mathbf{J}_M = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^K [\mathbf{X}(t_k) - \mathbf{X}_{\text{obs}}(t_k)]^T \cdot \mathbf{W}_X(t_k) [\mathbf{X}(t_k) - \mathbf{X}_{\text{obs}}(t_k)], \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_R = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M [\mathbf{R}_m - \mathbf{R}_{m, \text{obs}}]^T \mathbf{W}_R [\mathbf{R}_m - \mathbf{R}_{m, \text{obs}}], \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_S = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N [\mathbf{S}_n - \mathbf{S}_{n, \text{obs}}]^T \mathbf{W}_S [\mathbf{S}_n - \mathbf{S}_{n, \text{obs}}], \quad (4)$$

$k=1, 2, \dots, K$ 表示模式变量在同化时段内的观测次数。上标 T 表示矩阵的转置(下同)。向量 $\mathbf{X}(t_0)$ 表示模式的初始场, $\mathbf{X}(t_k)$ 表示 t_k 时刻的模式预报值, 其中可以包括风场(u, v, w)、温度场(T)、比湿场(q_v)等资料, $\mathbf{X}_{\text{obs}}(t_k)$ (下标 obs 表示物理量的观测值, 下同)表示 t_k 时刻的观测资料, $\mathbf{W}_X(t_k)$ 表示 t_k 时刻模式变量的权重矩阵。 $m=1, 2, \dots, M$ 和 $n=1, 2, \dots, N$ 分别表示同化时段内累积降水量和台站地面报的观测次数, $\mathbf{R}_{m, \text{obs}}$ 和 $\mathbf{S}_{n, \text{obs}}$ 分别表示第 m 次台站累积降水观测值和第 n 次台站地面观测值(包括地面气压和地面温度), $\mathbf{R}_m$ 表示第 m 次同化时段内预报的台站累积降水量, 令 $\mathbf{R}_m = O[\mathbf{X}(t_0)]$, O 称为降水观测算子, 表示在数值预报模式中利用各种参数化方案, 由温、压、湿、风等模式变量来计算观测台站点的累积降水量的计算过程, $\mathbf{W}_R$ 为同化时段内降水量权重矩阵, $\mathbf{S}_n$ 是第 n 次由模式预报的台站地面值(包括地面气压和地面温度), $\mathbf{S}_n = \mathbf{P}[\mathbf{X}(t_0)]$, $\mathbf{P}$ 表示在数值预报模式中, 由格点空间映射到台站观测空间的线性算子(对于计算地面气

压和地面温度的算子应该是不同的, 但为了书写方便统一写成 $\mathbf{P}$)。 $\mathbf{W}_S$ 为同化时段内不同台站地面观测资料要素(地面气压和地面温度的权重是不同的, 为了书写方便统一用 $\mathbf{W}_S$ 表示)的权重矩阵。

上述方法对台站降水量和台站地面观测资料同化是直接在台站上进行的, 这样避免了由不均匀台站资料插值到模式网格点上造成的误差。

3 同化试验及结果分析

本文选取的个例为 1999 年 6 月 23 日 12 时~24 日 12 时(国际协调时, 下同)的一次降水过程, 这是一次典型的梅雨锋暴雨过程。利用的模式为 PSU/NCAR 的 MM5 数值预报模式及其伴随模式。试验区域以(32.0°N, 118.0°E)为中心, 采用单重固定网格, 网格距为 45 km, 区域格点为 61×61, 垂直方向上取 11 层, 同化时间步长和预报时间步长都取为 90 s。对流参数化方案采用 Kuo 积云对流参数化方案, 侧边界条件采用时变一流入流出松弛边界, 大气辐射方案采用云方案, 试验使用的资料为 T106 资料、台站累积降水量资料和台站地面观测资料。降水资料和地面观测资料经过区域(20°N~35°N, 105°E~125°E)选择和质量控制之后, 降水资料在 12 小时同化窗口内的 06 时和 12 时的有效台站数分别为 155 和 342, 地面资料在 00 时、06 时和 12 时的有效台站数分别为 166、166 和 236, 在同化地面资料时, 将其作为模式底层观测资料进行同化。将模式积分 24 小时分为四个时间段: 23 日 12 时~18 时, 23 日 18 时~24 日 00 时, 24 日 00 时~06 时, 24 日 06 时~12 时, 分组试验(表 1)。这四组试验在计算过程中都未出现溢出现象。

表 1 试验分组表
Table 1 Numerical experiment design

试验 Experiment	初值形成方式(试验方案) Method used in producing the initial field (scheme of experiment)
控制试验(CTRL) The control experiment	运用 MM5 预处理对 T106 资料插值 Standard MM5 analysis based on T106
同化试验 1 (ASM1) The first assimilation experiment	同化 12 时模式变量资料(T106 资料) Assimilate 12 h T106 data
同化试验 2 (ASM2) The second assimilation experiment	同化 12 时模式变量和 06 时、12 时降水量资料 Assimilate 12 h T106 and 6 h accumulated precipitation
同化试验 3(ASM3) The third assimilation experiment	同化 12 时模式变量, 06 时、12 时降水量资料和 00 时、06 时、12 时地面观测资料 Assimilate 12 h T106, 6 h accumulated precipitation and 6 h surface station observation

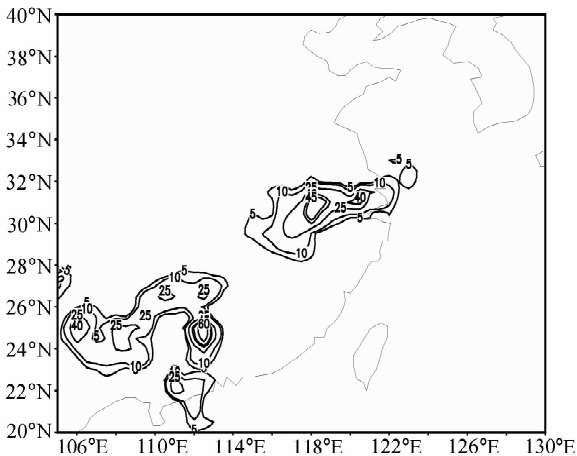


图 1 1999 年 6 月 23 日 18 时~24 日 00 时实测地面降水量(单位:mm)

Fig. 1 Observed 6 h accumulated precipitation from 1800 UTC 23 June to 0000 UTC 24 June 1999

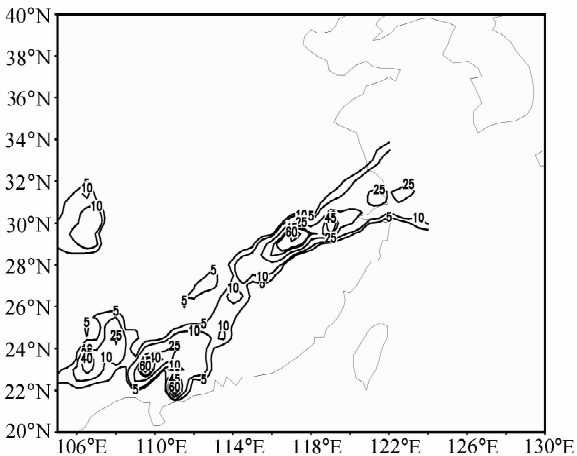


图 2 1999 年 6 月 24 日 00 时~06 时实测地面降水量(单位:mm)

Fig. 2 Observed 6 h accumulated precipitation from 0000 to 0600 UTC 24 June 1999

3.1 控制试验

图 1、2 为 23 日 18 时~24 日 00 时和 24 日 00 时~06 时实测降水量图。

此试验预报的 23 日 18 时~24 日 00 时的累积降水量(图略)和实测降水量相比,实况图中(25°N, 112.5°E)和(22°N, 111°E)的降水中心没有预报出来,(30°N, 118°E)处的降水中心预报出来,值为 10.0 mm,较实测值 45.0 mm 小很多。预报的 24 日 00 时~06 时降水量与实况图相比,降水雨带整体形状比较相符,呈东北西南走向,但总体雨量偏小,而且(25°N, 110°E)附近降水中心位置比实况位置偏北,(27°N, 117°E)处降水中心位置比实况位置偏南。从上面结果来看,MM5 模式直接利用 T106 资料进行预报,对此次降水过程具有一定的模拟能力,但是由于 T106 资料是大尺度资料,当它作为中尺度数值模式的初始场时,虽然可以为暴雨系统的发展提供适宜的大尺度形势,但是由于缺乏足够丰富的中尺度信息,所以预报结果与实况之间还有很大差距。

3.2 同化试验 1

试验中预报的 23 日 18 时~24 日 00 时和 24 日 00 时~06 时降水量图如图 3、4 所示。从降水预报的效果来看,此试验中预报的 23 日 18 时~24 日 00 时累积降水量(图 3)较控制试验预报出的两个降水中心,降水量明显增大,与实况值更为接近,但相对于实况值仍偏小。预报的 24 日 00 时~06 时

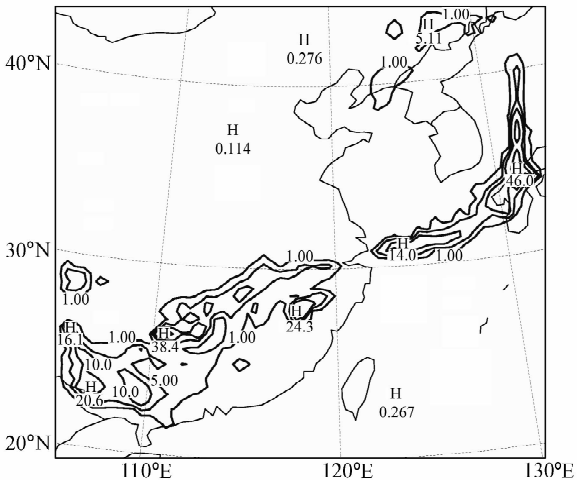


图 3 ASM1 中预报的 6 月 23 日 18 时~24 日 00 时降水量(单位:mm)

Fig. 3 6 h accumulated precipitation from 1800 UTC 23 June to 0000 UTC 24 June 1999 predicted by ASM1

累积降水量(图 4)与实际观测降水量(图 2)相比,东北西南向的雨带形状很明显,与实况图很相符,在实况图(30°N, 115°E)附近的降水中心预报出来,位置也与实况位置接近,而在控制试验中预报的此中心位置偏南。从上面结果来看,此试验的降水预报效果有一定的改善,且部分降水中心在控制试验没有预报出来的情况下,经过同化也预报出来。但总体来说,此试验中降水预报效果的提高不是很大,这可能是由于 T106 资料是大尺度的,把它作为实际观测资料进行同化,不可避免地存在一些误差。

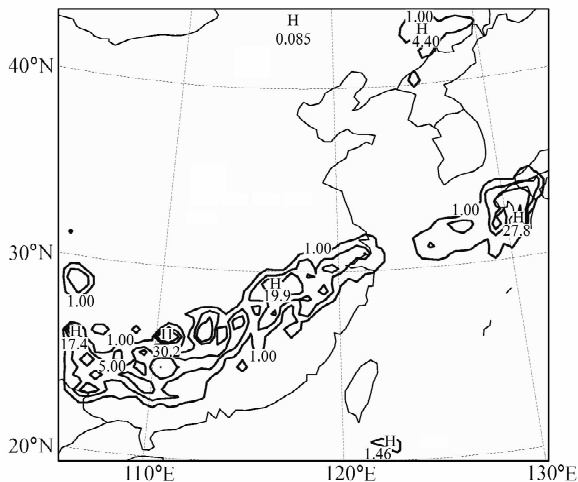


图4 ASM1中预报的6月24日00时~06时地面降水量(单位:mm)

Fig. 4 6 h accumulated precipitation from 0000 to 0600 UTC 24 June 1999 predicted by ASM1

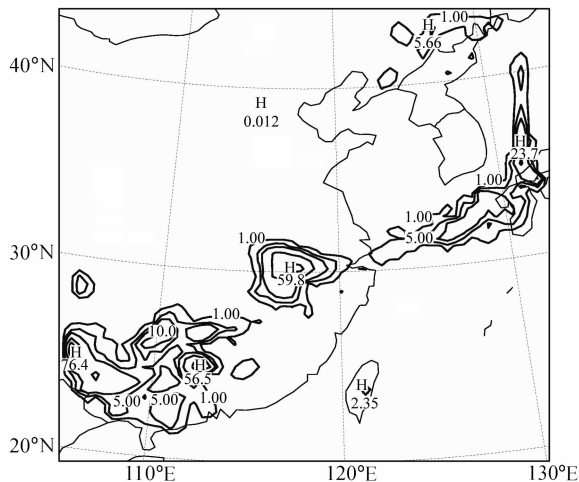


图5 ASM3预报的6月23日18时~24日00时地面降水量(单位:mm)

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the ASM3 forecast from 1800 UTC 23 June to 0000 UTC 24 June

3.3 同化试验2

通过分析此试验每隔6小时累积降水量预报图(图略)可知,此试验与同化试验1相比,在降水范围、降水强度以及强降水中心位置的预报都有很大提高,尤其是在雨带分布与形状上,与实测值非常接近,但部分降水中心的强度较实测值偏高。

3.4 同化试验3

此试验中预报的23日18时~24日00时累积降水量(图5)与控制试验比较,降水雨带的形状、降水中心位置及强度的预报有很大提高,同时与同化试验2相比可知,预报出的降水中心强度都减弱,比如,在 $(30^{\circ}\text{N}, 119^{\circ}\text{E})$ 处的降水中心值由75.1 mm减少为59.8 mm,在 $(25^{\circ}\text{N}, 112.5^{\circ}\text{E})$ 处的中心值由74.0 mm降到56.5 mm,更加接近实际观测值。24日00时~06时累积降水量(图6)与控制试验相比,东北西南向的降水雨带很相近,但降水强度比控制试验大很多,与实况更加相符。与同化试验2相比,在 $(30^{\circ}\text{N}, 119^{\circ}\text{E})$ 处的降水中心强度由19.0 mm增大到41.5 mm,更加接近实测值。

3.5 不同试验方案形成初始场的对比分析

3.5.1 可降水量场

从表2可以看出,经过同化后初始场中可降水量都有不同程度提高,这说明经过同化后大气中的水汽含量在未来预报有降水的地方明显比分析初始场增大,由于客观分析平滑或资料短缺造成的水汽

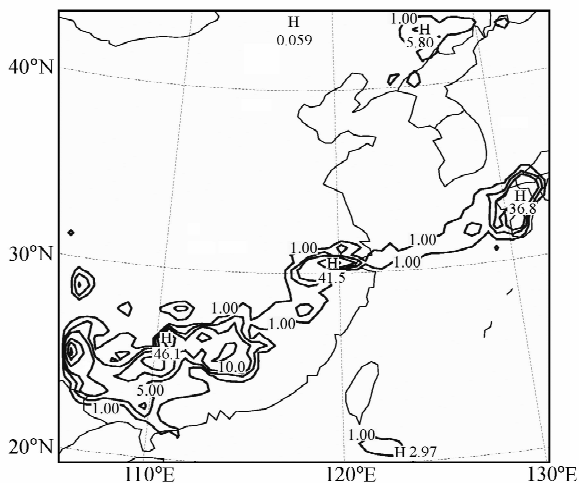


图6 ASM3预报的6月24日00时~06时地面降水量(单位:mm)

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for the ASM3 forecast from 0000 to 0600 UTC 24 June

场信息失真得到了一定程度的恢复。

3.5.2 水汽场

从900 hPa的水汽散度场(图略)的对比分析中可以看出,同化试验3中形成的初始场,在 $(30^{\circ}\text{N}, 118^{\circ}\text{E})$ 和 $(22^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E})$ 附近出现很强的水汽辐合辐散中心,与风场辐合辐散场(图略)结合起来看,在有强的水汽辐合辐散中心的地方,也有较强的风场辐合辐散中心,这种水汽场和散度场的配合方式,为未来地面降水提供了良好的条件。而在控制

表 2 不同试验方案形成初始场中可降水量中心位置及强度
Table 2 Position and intension of precipitable water center in different initial fields

试验 Experiment	可降水量中心位置及强度 Position and intensity of precipitable water center	
控制试验(CTRL) The control experiment	(30°N, 117°E), 68.0 mm	(23°N, 110°E), 65.0 mm
同化试验 1(ASM1) The first assimilation experiment	(30°N, 117°E), 65.8 mm	(23°N, 110°E), 65.0 mm
同化试验 2(ASM2) The second assimilation experiment	(30°N, 117°E), 82.3 mm	(23°N, 110°E), 90.8 mm
同化试验 3(ASM3) The third assimilation experiment	(30°N, 117°E), 78.6 mm	(23°N, 110°E), 97.4 mm

试验中, 这些水汽辐合辐散中心非常弱。

4 结论

通过上述试验, 可以得出本文的一些结论:
将 T106 再分析资料插值到模式网格点作为观测资料进行同化, 可以使预报的降水中心位置和降水量有所改善, 但降水量较实测值弱很多。同时, 同化模式变量资料和累积降水量观测资料得到的初始场, 能较好地反映出大气的中尺度动力场和湿度场的特征, 合理地增强了对降水有重要影响的高湿区的湿度, 从而提高降水预报效果。由于地面台站观测资料是实时的, 其准确度较高, 将其与模式变量资料和累积降水量观测资料同时同化, 可以使降水量与其他物理量场相协调, 对降水预报起到一定的修正作用, 使预报的降水量更接近实际观测值。
本文经过同化后形成的初始场, 虽然能在一定

程度上反映出梅雨锋的中尺度特征, 但文中并没有从动力学等方面对其进行深入细致的分析, 这是下一步需研究的工作。

参考文献

[1] 陶诗言, 等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1982. 25~51
Tao Shiyan, et al. *Rainstorm of China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1982. 25~51
[2] Lewis J M, Derber J C. The use of adjoint equation to solve a variational adjustment problem with advective constraints. *Tellus*, 1985, **37A**: 309~322
[3] LeDimet F, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations; Theoretical aspects. *Tellus*, 1986, **38A**: 97~110
[4] Talagrand O, Curtier P. Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. Part I: Theory. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1987, **113**: 1311~1328