

文章编号:1004-9045(2008)04-0289-06

## 资料同化对一次华南暴雨影响的数值试验研究

莫毅<sup>1</sup>, 潘晓滨<sup>1</sup>, 臧增亮<sup>1</sup>, 张兵<sup>2</sup>

(1.解放军理工大学气象学院, 南京 211101; 2.中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074)

**摘要:**针对一次华南暴雨过程,采用 WRF 区域中尺度模式进行了控制试验和同化试验。利用 WRF-3DVAR 同化系统同化了常规探空和地面观测资料,分析了两种资料对初值场的影响,以及对降水和各物理量预报效果的影响。结果表明:同化能改进初始场,并可改进暴雨落区和强度预报;同化可提高 WRF 模式对风场、温度场、高度场以及水汽场的预报能力,但有一定的时效性;同时同化探空和地面资料,比仅同化探空资料对大气低层物理量的预报能力要提高较多。

**关键词:**资料同化;WRF 模式;华南暴雨;初值场

中图分类号:P456.7 文献标识码:A

### 1 引言

数值天气预报在很大程度上是一个初值问题。资料同化作为解决初值问题的一个重要手段,是数值模式开发的重点和难点之一,气象学家们提出了多种同化技术,如牛顿张弛逼近<sup>[1-2]</sup>,多元最优插值法 OI 分析<sup>[3]</sup>,卡尔曼滤波<sup>[4]</sup>等。20 世纪 80 年代 Lorenc<sup>[5]</sup>将变分方法引入到气象资料同化,三维与四维变分<sup>[6-7]</sup>资料同化在数值天气预报中发挥出重要的作用。相对其它同化方法,三维变分同化方法效果好,计算量小,目前在世界各国的气象研究业务预报中得到广泛应用<sup>[8-12]</sup>。

本文采用的 WRF-3DVAR 资料同化系统是由美国国家中小尺度气象处、美国国家环境预报中心、预报研究处和奥克拉荷马大学风暴分析预报中心等多个部门共同开发的,它是在 MM5-3DVAR 系统的基础上发展的,能与 WRF 中尺度模式配合使用,自从其被

开发以来,就受到了气象学者的广泛关注,如范水勇等<sup>[13-14]</sup>采用 WRF-3DVAR 同化多种气象监测资料,指出常规探空和高空测风监测资料对改进预报结果的影响最大,地面常规观测和地面自动气象站观测资料作用次之,地基 GPS 大气柱水汽含量资料在与其他大气监测资料相互优势互补后,可很好地改善模式大气的分析质量。徐枝芳等<sup>[15-16]</sup>对地面资料同化时,在观测误差中加入地形代表性误差,较好地解决了地面资料同化中模式与观测站地形高度差异问题。本文通过对 2007 年 4 月 28 日 20 时至 30 日 08 时发生的华南暴雨用常规探空和地面观测资料进行同化模拟,检验 WRF-3DVAR 同化对初始场及其预报效果的影响。

### 2 天气过程及背景场

2007 年 4 月 28 日 20 时至 30 日 08 时在江西东北部、福建西南部和广东东南部发生了一次暴雨过

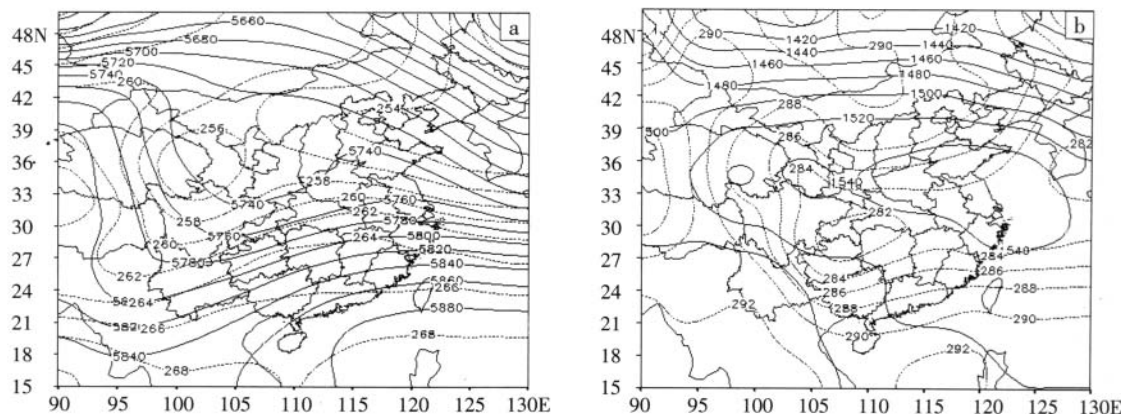


图 1 2007 年 4 月 28 日 20 时 500 hPa 温压场(a)和 850 hPa 温压场(b)实况图  
(实线:高度场,单位:位势米;虚线:温度场,单位:K)

收稿日期:2007-09-18;定稿日期:2008-02-12

基金项目:国家自然科学基金项目(40705020)资助

作者简介:莫毅,男,1983 年生,硕士,主要从事中尺度数值模拟研究。Email:zllqxy@163.com

程。4月28日20时,500 hPa在成都-昆明一线有一低槽(图1a),并在该槽西北侧有一明显的温度槽,表明槽将加强东移;700 hPa四川东南部有一低涡(图略),低涡东部至长江中下游地区为一暖式切变线,整个华南地区则位于宽广的西南暖湿气流中;850 hPa在贵州、广西东北部有一弱的倒槽(图1b),对应地面的华南准静止锋。随着500 hPa低槽和700 hPa低涡发展东移,850 hPa倒槽北抬,华南地区的西南气流和北面的西北气流汇合,形成有利于降水的天气形势。

### 3 模拟分析

本文使用WRFV2.1.2对此次天气过程进行控制试验和同化试验模拟。水平格距为30 km,水平格点数为116×131,垂直分层31层,起报时间为2007年4月28日20时,积分36 h,积分步长180 s。同化方案:背景误差协方差采用NMC方法,地面资料同化采用Ruggiero方案,最小化方法采用共轭梯度法。控制试验和同化试验的物理方案及初值场见表1。

表 1 控制试验和同化试验的物理方案及初值场

物理方案	控制试验	同化试验 1	同化试验 2
初值场	背景场资料	背景场同化常规探空资料后的分析场	背景场同化常规探空资料和地面资料后的分析场
微物理方案	Lin 方案	Lin 方案	Lin 方案
积云参数化方案	Grell 方案	Grell 方案	Grell 方案
陆面方案	Noah 方案	Noah 方案	Noah 方案
边界层方案	YSU 方案	YSU 方案	YSU 方案
辐射方案	rrtm+Dudhia 方案	rrtm+Dudhia 方案	rrtm+Dudhia 方案

表1中背景场资料为NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,地面观测资料的观测量为2 m温度、湿度,10 m风场以及测站气压。根据背景误差协方差矩阵的定义  $B = \overline{\varepsilon_b \varepsilon_b^T} \equiv \overline{(x_b - x_i)(x_b - x_i)^T}$ ,需要某一时刻的大气状态真实值  $x_i$  来确定背景误差  $\varepsilon_b$ 。一般情况下,只能得到大气物理场的近似值,无法获得大气的真实状态,因此也就不可能得到真实的背景误差。NMC<sup>[13]</sup>方法用模式在每天相同时刻的24 h预报与12 h预报输出之差代替真实值与背景场之差来统计背景误差协方差。本文用2007年4月1—30日WRFV2.1.2模式在每日相同时刻的24 h预报与12 h预报输出,通过NMC计算方案求气候意义上的3DVAR背景场误差协方差矩阵。

#### 3.1 资料同化对初值的影响

变分同化是为了使初值更好的接近实际大气,从而进一步改进模式预报的效果。而通过比较背景场的误差和同化后的分析增量,可以较好地分析同化对初值场的影响。背景场的误差是先通过crassman插值方法将站点上的观测场资料插值到经纬网格点上,再由背景场与常规探空资料的差值得到,而同化后的分析增量由模式输出。以500 hPa为例,图2给出了背景场的误差和两个同化试验的分析增量,图2a、b为背景场减去常规探空资料得到的位势高度场和风场的误差,图2c、d为同化探空资料后位势高度场和风场的分析增量。图2a中在江西沿武夷山一带和四川东部位势高度场都是正误差,对应背景风场误差(图2b)都是辐散风。对照500 hPa形势场(图1a),可以看出,背景场对江西沿武夷山一带高压脊描述偏强,而对四川东部低槽描述偏弱。在图2d上,分析增量在两处都出现辐

合风场。只是同化试验2的分析增量场(图略)比同化试验1的要强,即同化试验2比同化试验1纠正得更多,与实际更接近,但两者的量值都比实际要小。值得注意的是,在内蒙古西部分析增量风场(图2d)与背景误差风场(图2b)是相同的,这是由于背景场的位势高度场(图2a)在内蒙古西部大范围偏低,分析增量场(图2c)相应为正值区,根据地转平衡关系,导致分析增量场的风场出现反气旋性环流,与背景场在该处出现的反气旋性风场误差环流相同,而不是纠正误差的气旋性环流。由此可见分析场中位势高度场和风场的调整受到观测数据和平衡关系的双重约束<sup>[17]</sup>。

由于同化系统中水汽场的调整与其他物理量没有直接关系<sup>[8]</sup>,主要受水汽观测场影响。背景场的水汽(图略)在广东北部,江西,福建三处偏高,分析场的增量场在这三处有对应的负值中心,在江西的负值中心,同化试验2比同化试验1更强,其它两处都相近,即同化试验2分析场的水汽场比同化试验1更接近实际。温度场的调整与高度场的调整有关,背景场的温度误差(图略)在山东和福建沿海大片偏高,两地之间却偏低,两同化试验的分析增量的高度场和温度场也对应在山东半岛和福建有大范围负值区,两地中间为一片正值区。可见,同化试验可减小背景场误差。

#### 3.2 资料同化与模拟效果

##### 3.2.1 资料同化对降水模拟效果的影响分析

图3a为4月29日08时至30日08时实况累计降水分布图,可以看出:雨带在华南地区呈东北—西南向的带状分布,两个超过50 mm的暴雨区分别位于赣浙交界处和闽西南,其中闽西南的降水中心(24.65°N,

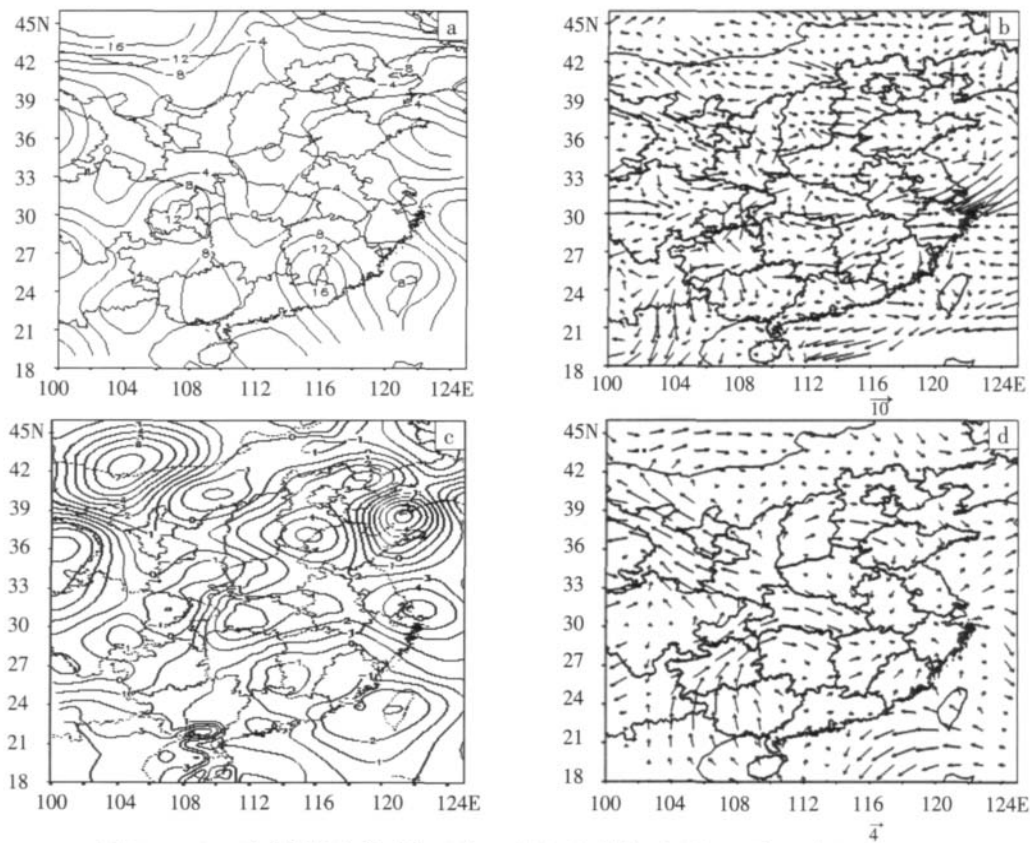


图 2 500 hPa 的背景场的高度场误差(a,单位:位势米)和风场误差(b,单位:m/s)及同化试验 1 高度场的分析增量(c,单位:位势米)和风场的分析增量(d,单位:m/s)

116.16°E)达到 66.3 mm。图 3b、c、d 为三个试验模拟的 24 h 累计降水分布图,由图可见,三个试验都较好地模拟出了雨带的大体走势、范围和强降水中心的位置。三个试验的差别主要表现为,控制试验(3b)对赣

浙交界处的暴雨区模拟范围偏小,雨量偏大,但对于闽西南暴雨区,模拟范围比实况偏大,降水量也偏大。同化探空资料后(3c),赣浙交界处的暴雨区范围比控制试验有所增大,降水量偏小,更接近于实况;闽西南

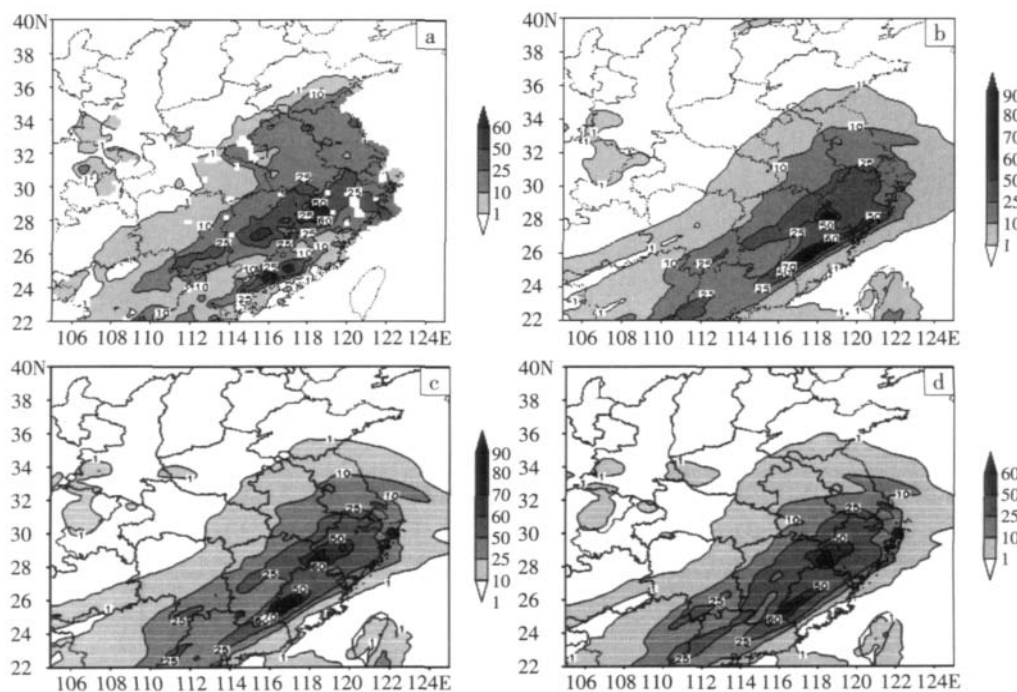


图 3 2007 年 4 月 29 日 08 时至 30 日 08 时 24 h 降水量(单位:mm)图  
(a)实况图;(b)控制试验;(c)同化探空资料;(d)同化探空和地面资料

雨区范围和雨量也更接近实况。同时同化探空和地面资料后(3d),与同化试验 1 相比,两处暴雨区范围基本相同,而雨量都减少 20 mm,与实况的降水量基本相同。可见,同化探空资料可改善暴雨范围和强度的预报,在同化探空资料的基础上再同化地面资料则主要改善暴雨强度预报。

3.2.2 资料同化对各物理量预报效果的影响分析

为检验同化对 WRF 模式预报效果的影响,先定义预报敏感性因子  $S^{[17]}$ :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (T1_i - T2_i)^2}{M}} \quad (1)$$

(1)式中  $M$  为所有网格点,  $T1_i$  为控制试验,  $T2_i$  为同化试验。敏感性因子越大表明同化试验对预报的影响越大,其时间演变曲线可反映出观测资料对预报的影响随时间的变化趋势。

利用(1)式在区域(22°—36°N, 105°—125°E)内,

分别计算各垂直层上风场、位势高度场、温度场和湿度场的敏感性因子  $S$  随时间的变化。图 4 为预报敏感性因子的高度-时间剖面图,可以看出,同化探空资料后,高度场(4a)的预报敏感性因子 6 h 后快速减小,12 h 后,各层接近。温度场(4b)的敏感性因子前 6 h 高空较大,12 h 后各层接近,中低层持续时间长。风场(图略)在高层(400 hPa 以上)和低层(700 hPa 以下)预报敏感性因子较大,且前 6 h 内预报敏感性下降很快,在中层(500 hPa 左右),风场的敏感性因子一直不大。湿度场(4c)低层的敏感性因子比高层大。温度场和湿度场敏感性因子随时间趋于增加,这可能是由于某个时刻触发了降水等物理过程,导致了温度场、湿度场等较大的变化。而同时同化探空和地面资料后,则与前一个同化试验明显不同,各物理量在低层的敏感性都显著增大(图 4d、e、f),同样也是在前 12 h 内下降很快,这表明无论同化探空还是地面资料,其时效性主要体现在模式积分的前 12 h。

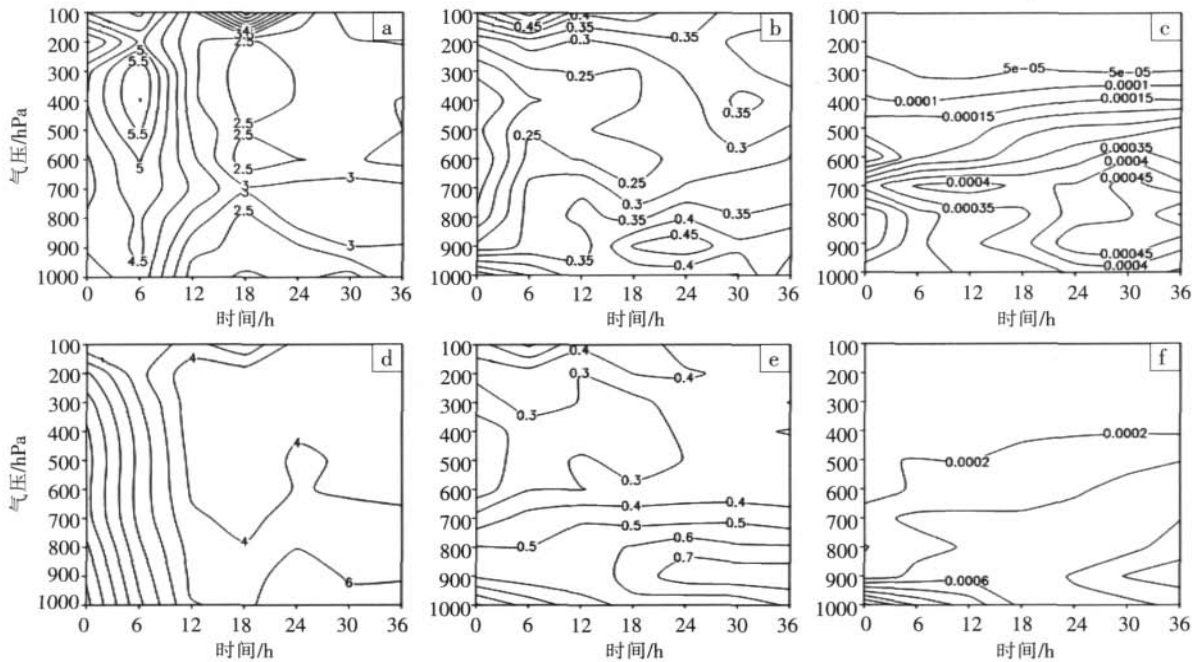


图 4 预报敏感性因子  $S$  的高度-时间剖面图  
(a)同化试验 1 高度场;(b)同化试验 1 温度场;(c)同化试验 1 湿度场;  
(d)同化试验 2 高度场;(e)同化试验 2 温度场;(f)同化试验 2 湿度场

除预报敏感性因子外,还可以用预报能力因子<sup>[17]</sup>考察模式对预报效果的改进,其定义式为:

$$f = \left( \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T1_i - O_i)^2}{N}} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T2_i - O_i)^2}{N}} \right) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T1_i - O_i)^2}{N}} \quad (2)$$

(2)式中  $N$  为所有观测点,  $T1_i$  为控制试验,  $T2_i$  为同化试验,  $O_i$  为观测的物理量。预报能力因子反映了同化试验均方根误差减少程度相对于控制试验的比值。正的预报能力因子表明同化试验更接近实况,对预报

有改进,反之,则表示预报效果更差。其随时间的变化反映了观测资料对预报改进能力的变化趋势。

将间隔为 12 h 的探空资料作为  $O_i$ ,由(2)式可以计算出同化试验 1、2 的预报能力因子,这里取计算区域为 22°—36°N, 105°—125°E。图 5 分别为计算得到的高度场、温度和湿度场的预报能力因子的高度-时间剖面图。由图可见,同化探空资料后,各物理量不同层次的变化趋势相近,都是在开始为正,12 h 内迅速减小,24 h 后几乎都变为负。值得注意的是,湿度场

(图 5b、e)在 700 hPa 附近预报能力提高较大,且维持时间较长,这与图 4c、f 是对应的,是同化试验降水量更接近于实况的重要原因之一。同时同化探空和地面资料后,与只同化探空资料在高层的预报能力变化很相似,但提高了对物理量在低层(850 hPa 以下)的预报

能力(图 5d、e、f)。总之,同化可以提高对风场(图略),高度场、温度场以及水汽场的预报能力,但其有一定的时效性;同化地面资料后,不仅影响地面物理量场的分布,而且对整个低层大气都有影响。这表明同化地面资料后可以有效地弥补高空资料在低层的缺陷。

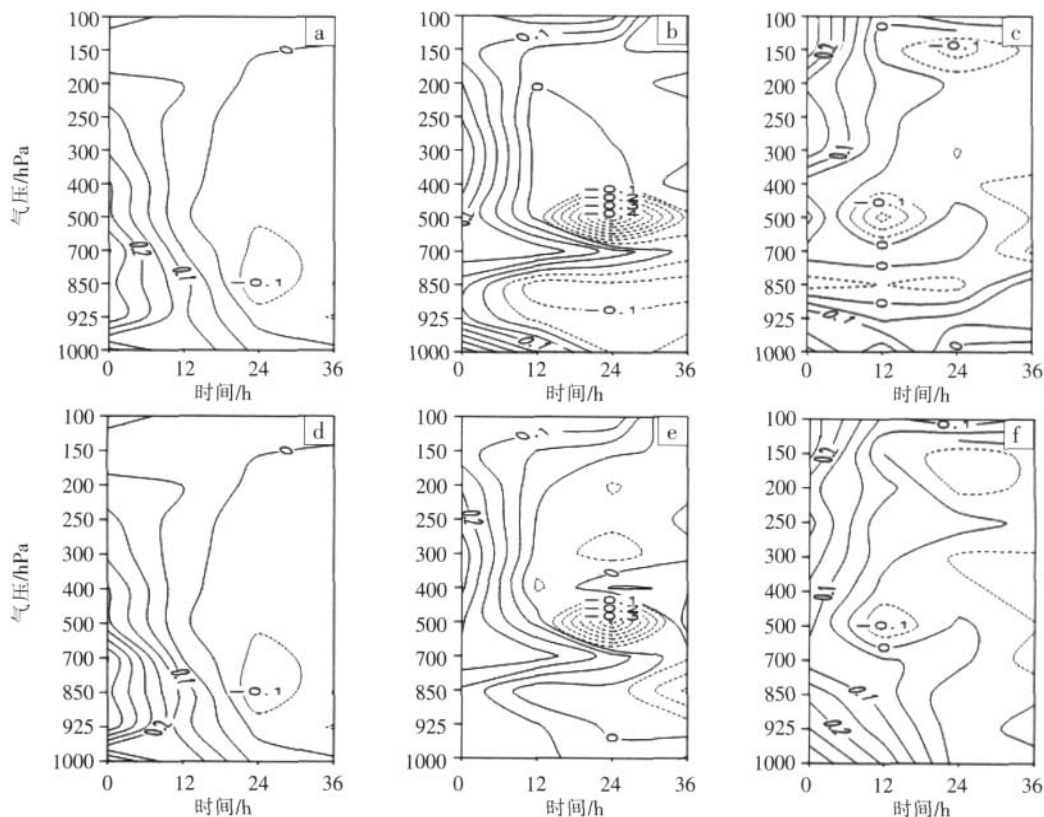


图 5 预报能力因子 f 的高度-时间剖面图

(a)同化试验 1 高度场;(b)同化试验 1 湿度场;(c)同化试验 1 湿度场  
(d)同化试验 2 高度场;(e)同化试验 2 湿度场;(f)同化试验 2 湿度场

#### 4 结论和讨论

针对一次华南暴雨过程,采用 WRF 区域中尺度模式进行了控制试验和同化试验。利用 WRF-3DVAR 同化系统同化探空和地面资料,分析了两种资料对初值场的影响,并对降水和各要素的预报效果进行了分析,结果表明:

(1)同化探空观测和地面资料可以改善暴雨落区和强度的预报,相对于仅同化探空观测资料而言,加入地面资料同化后进一步改善了暴雨强度的预报。

(2)同化探空资料后,各物理量在不同层次上的预报敏感性因子有相近的变化趋势,都在初始时刻较大,在 12 h 附近迅速减小。同时同化探空和地面资料后,各物理量在低层的敏感性都显著增大。

(3)无论同化哪一种资料,对高层大气物理量预报能力的提高均不如低层。同时同化地面和探空资料,比只同化探空资料对大气低层物理量的预报能力

有明显提高。

目前,本文对于 WRF-3DVAR 系统的试验研究仅为个例试验,同化的资料也比较有限。还有待于针对各类天气过程加入更多的非常规观测资料展开试验研究。

#### 参考文献:

- [1] Stauff D R, Seaman N L. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic scale data [J]. Mon Wea Rev, 1990, 118 (6) : 1250-1277.
- [2] Stauff D R, Seaman N L. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part II: Effects of data assimilation with in the planetary boundary layer[J]. Mon Wea Rev, 1991, 119 (3): 734-754.
- [3] Gandin L S. Objective Analysis of Meteorological Fields [M]. Jerusalem: Israel program for scientific Translation,1963: 242.
- [4] Jones R H. Optimal estimation of initial conditions for numerical prediction[J]. J. Atmos Sci, 1965,22 (6) : 658-663.
- [5] Lorenc A C. Analysis methods for numerical weather prediction [J].

- Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1986, 112: 1177-1194.
- [6] 张根生, 黄小刚, 费建芳. 数值天气预报初场的变分同化及其伴随方法简介[J]. 气象科学, 2004, 24(2): 240-245.
- [7] 程小平, 侯志明, 费建芳, 等. 四维变分同化方法在暴雨预报中的应用[J]. 气象科学, 2006, 26(2): 143-148.
- [8] Barker D M, Huang W, Guo Y R, et al. A three-dimensional variational (3DVAR) data assimilation system for use with MM5. NCAR Tech Note[M]. NCAR/TN-453STR., 2003: 68.
- [9] Barker D M, Huang W, Guo Y R, et al. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results[J]. Mon. Wea. Rev., 2004, 132: 897-914.
- [10] 张华, 薛纪善, 庄世宇, 等. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验[J]. 气象学报, 2004, 62(1): 31-41.
- [11] Zhang Hua, Chou Jifan, Qiu ChonNian. Assimilation analysis of Rammasun typhoon structure over Northwest Pacific using satellite data[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(4): 389-395.
- [12] 曾智华, 马雷鸣, 梁旭东, 等. MM5 数值预报引入 GRAPES 三维变分同化技术在上海地区的预报和检验[J]. 应用气象学报, 2004, 15(5): 534-542.
- [13] 范水勇, 张朝林, 仲跻芹, 等. MM5 三维变分系统在北京地区冷暖气背景场误差的对比分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 855-861.
- [14] 张朝林, 陈敏, 范水勇, 等. “00. 7”北京特大暴雨模拟中气象资料同化作用的评估[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 922-932.
- [15] 徐枝芳, 龚建东, 王建捷, 等. 复杂地形下地面观测资料同化 I. 模式地形与观测站地形高度差异对地面资料同化的影响研究[J]. 大气科学, 2007, 31: 222-232.
- [16] 徐枝芳, 龚建东, 王建捷, 等. 复杂地形下地面观测资料同化 II. 模式地形与观测站地形高度差异代表性误差[J]. 大气科学, 2007, 31: 222-232.
- [17] 丁伟钰, 万齐林, 闫敬华, 等. 华南地区中尺度模式预报的初值影响分析[J]. 热带气象学报, 2006, 22(1): 10-17.

## Effect of Data Assimilation on a Numerical Simulation of a Heavy Rain in South China

MO Yi<sup>1</sup>, PAN Xiao-bin<sup>1</sup>, ZANG Zeng-liang<sup>1</sup>, ZHANG Bing<sup>2</sup>

(1. Institute of Meteorology in PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101;

2. Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074)

**Abstract:** In this paper, the control and assimilation experiments of WRF regional mesoscale model prediction are verified in the South China during a course of heavy rain. Based on the WRF-3DVAR system, the sounding data and surface observations are assimilated into WRF model. The effect of the two kinds data on the initialization and the prediction of rain and physical variables are analyzed. Results show that the assimilation of the either data can well improve the initialization, and has positive impact on prediction of the area and intensity of heavy rain. The assimilation can make great improvement on the forecast of physical variables, such as wind, temperature, height, vapor with the the time limitation. For forecasting physical variables in the lower levels, the assimilation both of sounding data and surface observations will be better than the assimilation of the sounding data.

**Key words:** WRF-3DVAR; WRF; Initialization