

三维变分系统在我国夏季降雨预测中的应用试验

孙建华¹ 齐琳琳² 朱江¹ 赵思雄¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 采用 MM5 模式及其三维变分系统 (MM5/3DVAR) 对我国夏季降雨进行了一个月的连续预测试验, 并对试验结果进行评估。试验中首先采用“National Meteorological Center (NMC)”方法, 将 2005 年 8 月的 MM5 模式的预测结果形成与试验区域和水平分辨率相匹配的背景误差场, 并将其与全球背景误差场进行了对比分析, 结果表明, 采用 2005 年 8 月 MM5 模式预报结果生成的背景误差场的基本特征与系统提供的全球背景误差场相似, 且长度尺度随着水平分辨率的提高而减小。之后, 分别利用 NCEP 再分析资料 (NCEP 试验)、NCEP 再分析资料基础上采用 CRESSMAN 方法分析观测资料 (LITT 试验) 和 NCEP 再分析资料基础上采用 3DVAR 系统同化观测资料 (3DVAR 试验) 形成模式预报初始场, 再次对 2005 年 8 月降雨进行逐日连续预报。逐日降雨预报结果表明, 相对 NCEP 试验, LITT 试验中 1 和 10 mm 的预报评分有明显提高, 但 25 和 50 mm 的预报评分却有所下降, 而 3DVAR 试验的预报评分在 10 mm 以上均有明显提高。对于降雨期间的形势场预报, 3 个试验中, 除温度场和湿度场外, 其他变量场的均方根误差随高度增加而增加, 但相比而言, 3DVAR 试验的均方根误差小于其他 2 个试验。3DVAR 试验对降雨的明显改进, 可能是由于其对与背景场信息差别比较大的反应中尺度系统的观测资料的分析结果比较靠近观测资料。

关键词 三维变分同化 背景误差 降雨预测 均方根误差

文章编号 1006-9585 (2007) 03-0413-13 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

The 3DVAR Application Experiments on Rainfall Prediction in the Summer in China

SUN Jian-Hua¹, QI Lin-Lin², ZHU Jiang¹, and ZHAO Si-Xiong

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

2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract The MM5 modeling system and its three dimensional variation assimilation system (MM5/3DVAR) are employed to prediction rainfall during August 2005 in China, and then, the prediction results are analyzed. The background error used by 3DVAR system was reproduced by using “National Meteorological Center (NMC)” method and the prediction results of August 2005, which adapt to the prediction domains and horizontal, vertical resolution in the following experiments. The characteristics of reproduced background error are very similar to the global background error, and the length-scale of background error decreases with horizontal resolution. Three experiments (NCEP, LITT, 3DVAR Experiments) are designed to analyze the impacts of 3DVAR system. NCEP Exp. only uses NCEP data to form initial field. The initial field of LITT and 3DVAR Experiments utilize CRESSMAN and 3DVAR method to analyze surface and sounding data on the base of NCEP data. Compare to the results of NCEP

收稿日期 2007-02-28 收到, 2007-03-16 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40405008、中国科学院方向性项目 KZCX2-YW-202 和国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418300

作者简介 孙建华, 女, 1972 年出生, 博士, 研究员, 主要从事中尺度天气分析和数值模拟研究。E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn

Exp., the LITT Exp. improves the 1 mm and 10 mm rainfall prediction, but 25 mm and 50 mm rainfall prediction is not improved. 3DVAR Exp. improves 10 mm, 25 mm and 50 mm rainfall prediction significantly. The RMSE (Root Mean Square Error) of synoptic field prediction, except for temperature and relative humidity, in three experiments increase with height generally. All of the prediction of 3DVAR Exp. is the best among the three experiments. The significant improvement of 3DVAR Exp. maybe caused by that the analysis of mesoscale information by 3DVAR is more similar to observational data.

Key words three dimensional variation assimilation, background error, prediction of rainfall, root mean square error

1 引言

过去的几十年中,数值天气预报水平随着预报模式的改进、物理过程的完善及计算能力的提高取得了长足的进步,在制作客观化、量化与标准化暴雨预报中具有重要作用和指导意义。然而迄今为止,我国对暴雨预报的准确率仍然较低,究其原因主要有以下两点:1)目前用于暴雨预报的数值模式无论是其结构设计还是物理过程方案均已趋近完善,通过改进模式本身,从而显著地提高暴雨预报的有效性并不是很大。2)暴雨预报效果直接依赖于模式初始场,正确、充分的初始大气状态是准确预报暴雨的必要条件。研究表明,随着数值预报模式的日趋完善,模式初值质量的改进已成为提高暴雨预报水平的关键。因此,充分、有效地利用各种常规、非常规观测资料来形成正确和高精度的模式初始大气状态,已成为当前暴雨预报研究的一个热点。

随着数值分析技术和计算条件的快速发展,资料同化无论是在进一步理解大气理论方面,还是在进一步完善天气预报业务化制作方面都将起着越来越重要的作用。建立在控制理论或估计理论基础上的现代资料同化方法中^[1],变分法和滤波法是最有代表性的两种方法。变分法是强调通过最小化模式和观测值之间的距离(目标泛函)来优化初值条件,包括三维变分(3DVAR)和四维变分(4DVAR)。三维变分中背景误差协方差矩阵不随时间变化而改变,而四维变分可以在模拟结果和观测资料间获取到内部动力协调的分析估值^[2]。滤波法则是通过获得一个(或一组)最大可能状态来实现最优化,即通过模拟值和观测资料所服从的概率来分别求出最大或然状态。传

统的 Kalman 滤波法(KF)是在线性动力学假定下得到分析状态,而目前较为流行的集合 Kalman 滤波则是应用 Kalman 滤波原理得到系统的一组集合样本,从而体现出系统状态的非线性特征^[3, 4]。

目前,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)等都已经实现了四维/三维变分(4D/3D VAR)同化的业务化^[5],但由于四维变分中目标泛函最小化和伴随模式的逆向积分计算量和所需存储空间巨大,集合 Kalman 滤波法的主要问题是计算量、存储空间和怎样获得模式状态误差协方差矩阵的精确初值等,其存储问题仍是主要的限制。而三维变分是一种对计算机资源要求相对较低,容易业务化的资料同化方法,因此,各国气象业务系统中仍以此作为资料同化的主要途径。中国气象局目前发展的三维变分同化系统 GRAPeS-3DVAR^[6]已经在科学研究和业务预报中得到广泛应用^[7, 8]。相对而言,MM5/3DVAR 系统是目前发展较为完善的中尺度模式及其 3DVAR 同化系统,目前美国空军气象局(Air Force Weather Agency)和韩国气象局等都在业务中应用了该系统,并在业务应用中取得了明显效果^[9, 10]。我国也有一些业务部门采用 MM5 模式做区域的数值天气预报,中国科学院大气物理研究所近几年夏季也采用 MM5 模式做实时预测^[11, 12],但我国目前对于 MM5 模式的 3DVAR 系统的应用结果分析多集中在个例研究^[13],缺乏对系统性试验结果及效果的分析,因此,本文采用 NMC(National Meteorological Center)方法产生预报区域的背景误差场,并对背景误差场的特征进行分析,之后,采用该系统对我国 2005 年 8 月夏季降雨进行一个月的连续预测试验,并对试验结果进行评估分析。

2 MM5/3DVAR 同化系统简介

尽管 NCAR 先期发展了 MM5 模式的四维变分系统 (MM5/4DVAR)^[14], 但 MM5 三维变分系统 (MM5/3DVAR) 后期的发展表明, 在计算机资源相对有限的业务单位, 一个相对简单的变分同化系统更具有实用价值。MM5/3DVAR 系统由观测算子、最小化模块、观测资料处理、平衡约束、背景误差协方差和资料同化诊断等组成, 只是没有四维变分同化中所需要的伴随模式, 因此, MM5/3DVAR 系统也可以研究变分同化中的重要特征。其主要特征为: 采用增量法和准牛顿的最小化算子; 增量分析采用 Arakawa-A 网格, 而 MM5 模式本身采用 Arakawa-B 网格; 垂直坐标仍采用 MM5 的 σ 坐标; 控制变量采用流函数、速度势、非平衡的气压场和比湿 (相对湿度); 可用地转平衡或旋衡平衡。背景误差协方差的计算有两种方法, 一种是采用 NCEP 全球模式计算的分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的全球背景误差场插值的方法, 另一种是采用 NMC (National Meteorological Center) 方法, 其核心是用同一时刻不同时效的预报值之间的差作为预报误差的近似, 此方法计算得到的背景误差场分辨率与模式的一致。

按照 Lorenc 方法^[15], 三维变分的基本思想是将资料同化归结为一个表征分析场与观测场和分析场与背景场偏差的二次泛函极小值问题, 因此, MM5/3DVAR 系统是通过目标函数 $J(x)$ 来获

得大气真实状态的最优估计^[16], 即

$$J(x) = J_a + J_b = \frac{1}{2} \left[(x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + \frac{1}{2} (y - y_o)^T (E + F)^{-1} (y - y_o) \right], \quad (1)$$

其中, x_b 是背景场, y_o 是观测, x 是待分析的模式变量, B 是背景误差协方差矩阵, E 是观测误差 (仪器) 协方差矩阵, F 是代表性误差协方差矩阵。 F 是将格点分析值转换到观测空间 ($y = Hx$) 时所带来的不确切估计, 主要与模式分辨率和一些近似有关。目标函数假定观测和背景协方差满足平均误差为 0 的高斯概率密度函数 (Gaussian probability density functions, PDFs), 并且忽略观测和背景误差的相关性。

MM5/3DVAR 系统的主要流程见图 1。系统包括 3 个模块: 观测资料预处理、背景误差的计算和变分同化计算, 其中, 变分同化计算模块是系统的主模块。观测资料的预处理模块是将观测资料进行质量控制后形成系统所需格式。在 MM5/3DVAR 系统中, 假设观测误差与时间和空间无关, 因而是一个对角矩阵, 矩阵中各元素的值与 NCEP 的业务谱模式一致^[17]。由于观测资料在测量、传输和解码等过程可能存在误差, 因此, 在资料预处理模块的质量控制中将剔除分析区域 (水平和垂直方向) 之外和分析时间窗之外的资料, 重新排序和合并重复的资料, 并进行垂直方向一致性检查。在 3DVAR 系统中还会进行一次资料的质量检查, 即针对各种不同性质的观测资料, 设置最大观测误差, 通过计算观测资料与背

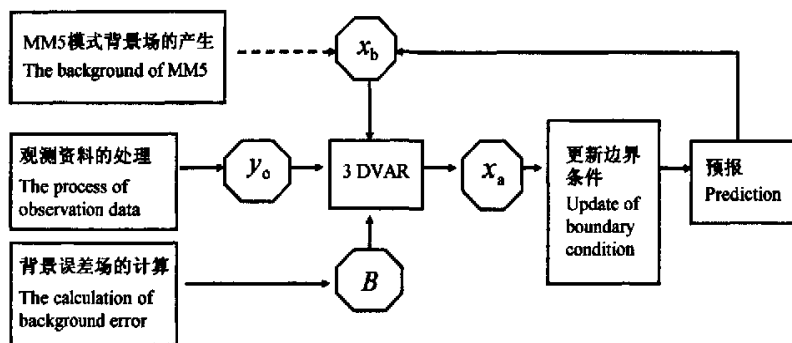


图 1 MM5/3DVAR 的流程及其与 MM5 模式的关系

Fig. 1 The flow chart of MM5/3DVAR and its relationship with MM5 model

景场的差距,剔除大于 5 倍观测误差标准偏差的观测资料。

系统的背景误差计算模块就是采用 NMC 方法产生系统背景误差场。虽然背景场误差依赖于具体的天气系统,但目前由于计算资源的限制,大多数业务单位在 3DVAR 同化系统中采用气候态的背景误差。NMC 方法^[17]就是目前使用较普遍且实用的估计气候态背景场误差方法,此方法假设在一定预报时效内模式预报误差的统计结构变化很小,背景误差近似于同一时刻不同预报时效的预报场差值的统计。因此,在 MM5/3DVAR 系统中,NMC 方法就是采用预报时效为 24 和 12 h 的预报场差值来构建背景误差场,计算公式如下:

$$B = \overline{(x_b - x_t)(x_b - x_t)^T} = \overline{\epsilon_b \epsilon_b^T} \approx \overline{(x^{T+24} - x^{T+12})(x^{T+24} - x^{T+12})^T}, \quad (2)$$

其中, B 是背景误差场协方差, x_b 是背景场, x_t 是大气的真实状态, ϵ_b 是背景场误差, x^{T+24} 是 24 h 预测结果, x^{T+12} 是 12 h 预测结果。由此可见,模式分辨率、物理过程等均是影响背景误差的因素。在 MM5/3DVAR 系统中,NMC 方法计算的背景场误差协方差由 3 部分组成:垂直背景场误差矩阵通过经验正交函数 (EOF) 方法分解为特征值和特征向量;采用递归滤波器表示水平背景场误差协方差,统计递归滤波所用的特征尺度;采用统计回归方程实现平衡气压增量的过滤,将平衡方程限制在适用地区。

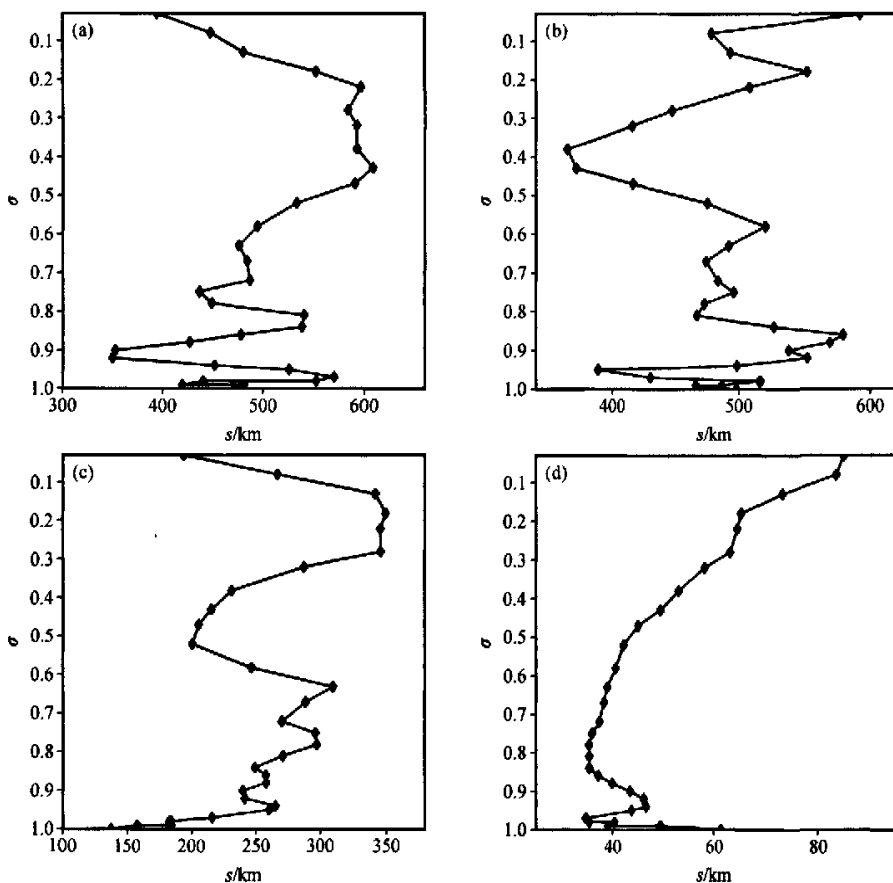


图 2 45 km 模拟区域背景误差场的长度尺度 s : (a) 流函数; (b) 速度势; (c) 非平衡气压; (d) 比湿

Fig. 2 Model space climatological estimates of background error length scale for 45 km domain; (a) stream function; (b) velocity potential; (c) unbalance pressure; (d) specific humidity

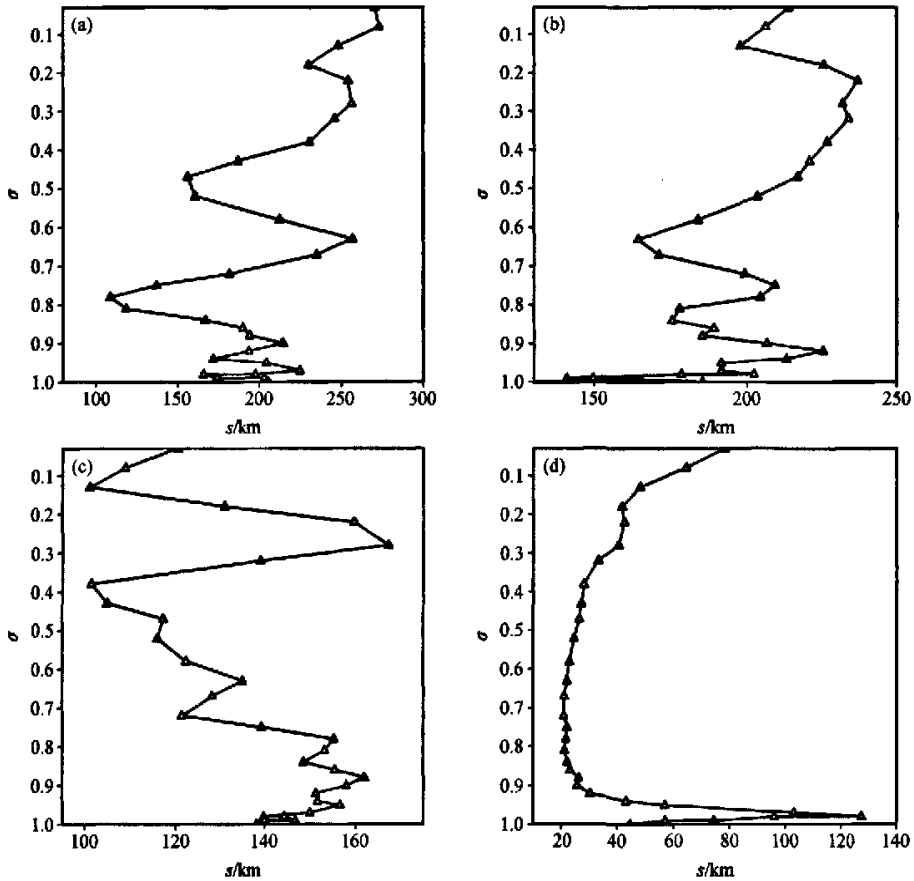


图3 同图2, 但为 15 km 模拟区域的长度尺度

Fig. 3 The same as Fig. 2, but for length scale of 15 km domain

MM5/3DVAR 系统的输入资料为背景场资料、观测资料和背景场误差, 输出资料就是 MM5 模式的初始场。此外, MM5/3DVAR 系统的运行可分为冷启动和热启动, 冷启动就是直接采用 MM5 模式的前处理模块产生背景场; 而热启动则是采用 MM5 模式的预测结果作为背景场。

3 试验方案设计

试验研究的模式采用 MM5V3.7^[18], 该模式对于夏季华南、长江流域梅雨的降水过程具有较好的模拟能力^[19, 20]。试验中采用非静力、双重双向嵌套方案。考虑到我国 8 月降雨主要出现北方地区, 因此模拟区域以华北地区为中心, 两个模拟区域的水平分辨率分别为 45、15 km, 格点数

为 120×140 、 163×142 。整层 σ 坐标垂直分 32 层, 各为: 1.00, 0.995, 0.99, 0.985, 0.98, 0.97, 0.96, 0.95, 0.93, 0.91, 0.89, 0.87, 0.85, 0.83, 0.80, 0.77, 0.74, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50, 0.45, 0.40, 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10, 0.05, 0.00。积云对流参数化采用 GRELL 方案, 云物理过程采用混合冰相方案, 行星边界层计算采用 MRF (NCEP Medium-Range Forecast model) 高分辨方案, Noah 陆面过程模拟土壤的湿度和温度, 该方案是在 OSU (Oregon State University) 陆面过程的基础上发展的陆面模式。Noah (NCEP-OSU-AF-GL-OHD 联合发展) 模式在 OSU 陆面模式的基础上考虑了一些新的陆面物理过程, 并对原先考虑较为简单的一些物理过程进行改进^[21]。

由于相对合理的背景误差场对于同化效果至关重要,而背景误差场中的长度尺度与水平分辨率有关,因此,我们首先对两种方法形成的背景误差场进行了对比分析。在采用 NMC 方法形成预报区域背景误差场时,以 2005 年 8 月 1~31 日每日 0000 UTC 为初始时刻,仅采用 6 h 间隔的 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 分析资料做模式初始场和侧边界场进行 24 h 预报,利用逐日 12 h 和 24 h 的预报结果生成预报区域的背景误差场。

图 2 和 3 是水平分辨率为 45 和 15 km 的预报区域背景误差场的长度尺度 (Length scale) 分布,图 4 则给出了模式提供的 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 分辨率全球背景误差场的长度尺度分布。从图中可以看出,采用 2005 年 8 月预报结果生成的背景误差场长度尺度的基本特征与模式提供的全球背景误差场相似,即高层和低层的背景误差场长度尺度相

对较大;背景误差场中流函数和速度势的长度尺度相当,而非平衡气压场和比湿的长度尺度相对较小,特别是比湿的长度尺度在一些层次比流函数和速度势的长度尺度小一个量级,这可能是由于比湿是一个局地变化比较剧烈的量,与较远距离的湿度相关性小造成的。此外,3 种不同水平分辨率的长度尺度分布还表明,随着水平分辨率的提高,背景误差场中各变量的长度尺度明显减小。

图 5 是水平分辨率为 45 和 15 km 的预报区域背景误差协方差矩阵的区域平均第 1 特征向量分布。由图可见, NMC 方法生成的与模式水平分辨率一致的背景误差场中各变量第 1 特征向量与模式提供的全球背景误差场 (图略) 及 Ingleby^[22] 的结果相似。这表明特征向量与水平分辨率无关,且第 1 特征向量对背景误差场的贡献很大。流函

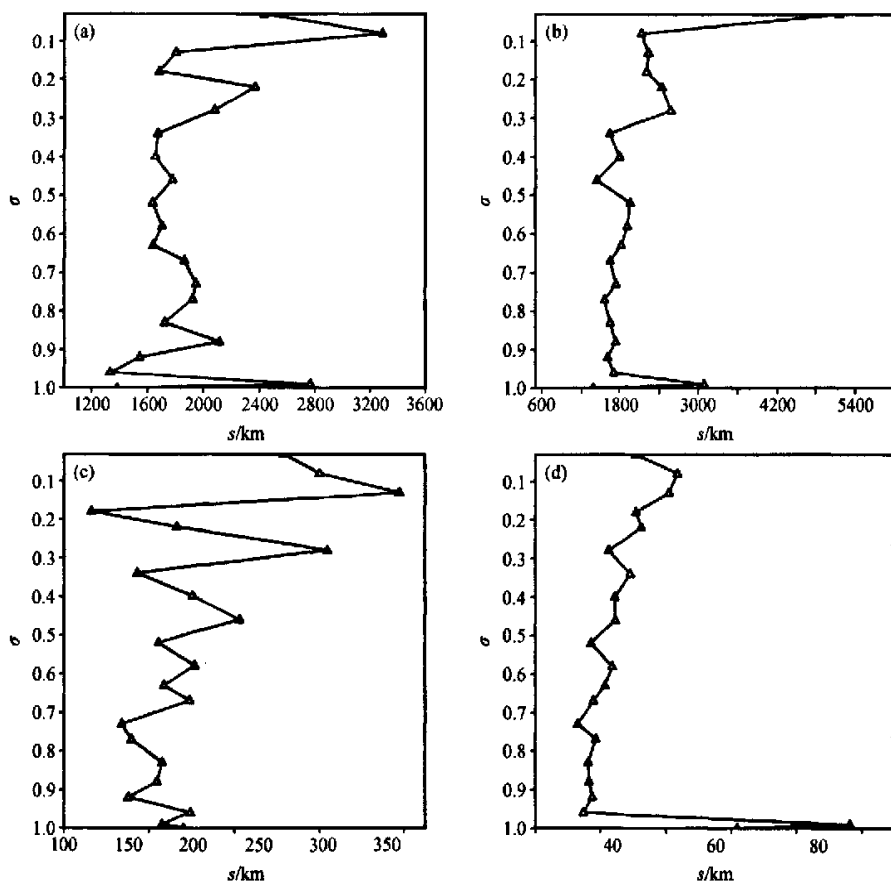


图 4 同图 2, 但为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 分辨率全球背景误差场的长度尺度

Fig. 4 The same as Fig. 2, but for length scale of $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ resolution of global background error

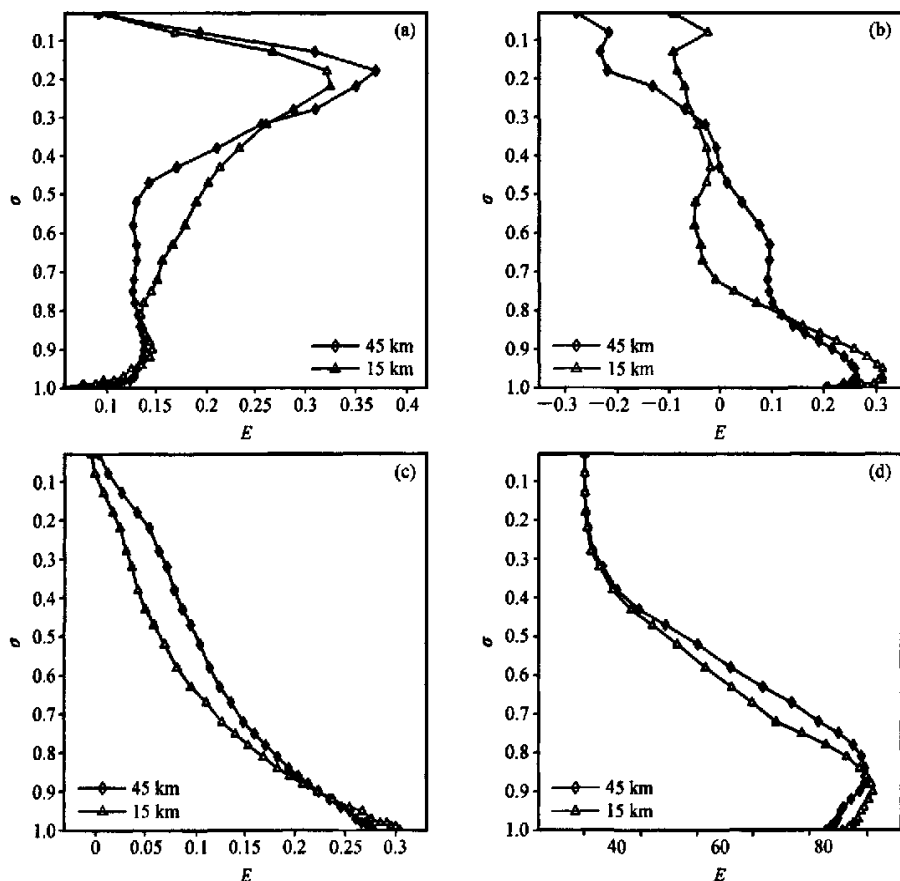


图5 模拟区域1和2的背景误差协方差矩阵的区域平均第1特征向量 E : (a) 流函数; (b) 速度势; (c) 非平衡气压; (d) 比湿

Fig. 5 The first eigenvector of the vertical component of domain-averaged background error covariance matrix for (a) stream function, (b) velocity potential, (c) unbalance pressure, and (d) specific humidity

数的第1特征向量的峰值在高层(大约200 hPa),而速度势的峰值出现在边界层,表明速度势的误差强信号在边界层,而流函数在对流层中高层。气压场的第1特征向量从低层到高层逐渐减小,而比湿在边界层出现峰值,在边界层以上随高度逐渐减小。

在以上分析的基础上,采用两种不同的背景误差场,MM5/3DVAR系统同化探空和地面观测资料形成了2005年8月1~31日每日0000 UTC的初始场,并将形成的初始场与站点探空资料做了均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)分析(表1)。采用MM5预测结果的背景误差场形成的初始场(简称MM5初始场),其均方根误差与采用全球背景误差场形成的初始场(简称GLOBAL初始

场)相似,对不同的层次和不同的变量有的是MM5初始场均方根误差稍小,有的是GLOBAL初始场的均方根误差稍小。对相对湿度场,MM5初始场有明显的改进。从站点均方根误差的分析看,MM5初始场相对GLOBAL初始场的改进并不大,这可能是由于站点探空的空间分辨率一般在200 km以上,垂直方向上的标准层有10层左右,与全球背景误差场的分辨率一致,采用MM5预测结果形成的背景误差场虽然提高了水平和垂直分辨率,在与站点探空做均方根误差时,体现不出提高分辨率的优势。

上述分析表明,在3DVAR中应用与模式预报区域和分辨率相一致的背景误差场有利于系统的分析同化及其数值预报。

表 1 采用两种背景误差场形成的初始场与站点探空的均方根误差
Table 1 The RMSE between sounding and initial field formed by two different background error

<i>p</i> /hPa	高度场		温度场		风场- <i>u</i>		风场- <i>v</i>		相对湿度场	
	GLOBAL	MM5	GLOBAL	MM5	GLOBAL	MM5	GLOBAL	MM5	GLOBAL	MM5
1000	5.9447	5.9464	1.0703	1.0706	1.5558	1.5554	1.6613	1.6621	16.3397	16.3337
925	8.5031	8.5073	1.0084	1.0084	1.8595	1.8593	1.8757	1.8757	12.2566	12.2589
850	9.0642	9.0678	0.9932	0.9932	2.0796	2.0798	1.9205	1.9204	12.5350	12.5301
700	12.4766	12.4789	1.0256	1.0255	1.9531	1.9537	1.9609	1.9609	13.4543	13.4421
500	16.9145	16.9153	1.3289	1.3289	2.1513	2.1520	2.1565	2.1566	16.6858	16.6792
400	58.3805	58.3797	1.0571	1.0569	2.3763	2.3759	2.3908	2.3912	22.7784	22.7661
300	50.2050	50.2024	1.8051	1.8051	2.7327	2.7329	2.7033	2.7036	35.2209	35.1961
250	47.7401	47.7366	1.9461	1.9461	2.9768	2.9768	2.9451	2.9451	40.8799	40.8293
200	36.7017	36.6987	2.0070	2.0069	3.1366	3.1372	3.0374	3.0372	40.4685	40.4195
150	47.9088	47.9083	1.5890	1.5888	3.1420	3.1425	2.9768	2.9764	22.5436	22.5322

在背景误差生成的基础上，针对模式初始场我们进行了 3 种试验：NCEP 试验仅采用 NCEP 资料形成初始场；LITT 试验在利用 NCEP 资料形成模式初估场基础上，再采用 CRESSMAN 插值方法（LITTLE_R 模块）分析地面和探空观测资料形成初始场；3DVAR 试验在 NCEP 资料形成的模式初估场基础上，再利用 MM5/3DVAR 同化地面和探空资料形成初始场。3 个试验均以 2005 年 8 月 1~31 日每日的 0000 UTC 为初始时刻，做 24 h 预报，即所有试验的初值背景场均采用 NCEP 的分析场，不采用预报结果。下面将分别针对 3 种试验形成的初始场和预报结果进行分析。

4 试验结果分析

首先将 3 种试验的 24 h 预报结果与相应时刻

的观测资料进行降雨量的 TS（Threat score）评分分析，然后再将试验的预报场与相应时刻的探空观测做站点均方根误差分析。

4.1 24 h 降雨预报的检验分析

图 6 给出了 3 个试验逐 24 h 的 1 个月预报的 4 个雨强：1、10、25 和 50 mm 的平均 TS 评分。从预报区域 1 和 2 的评分来看，区域 1 的 TS 评分略高于区域 2 的。水平分辨率高了，评分却有所降低，原因可能是与观测站点的密度比区域 2 的模式分辨率粗，致使空报和漏报点增多有关。对于区域 1 来讲（图 6a），除 1 mm 雨强的评分是 LITT 试验的最高，其余雨强的评分都以 3DVAR 的最高。尤其值得指出的是，对于大雨和暴雨的评分，3DVAR 试验比 LITT 试验高出许多。3DVAR 和 LITT 的大雨评分分别为 20.29 和 19.26，

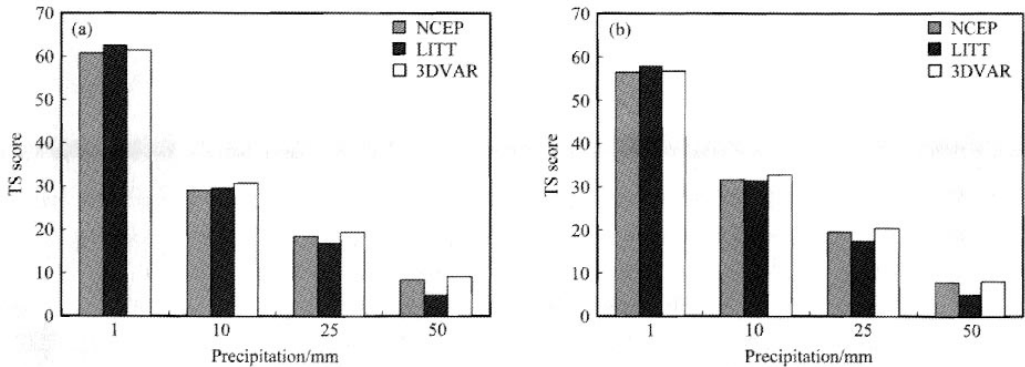


图 6 2005 年 8 月 1~31 日试验月平均的降雨量 TS 评分：(a) 区域 1 (45 km)；(b) 区域 2 (15 km)
Fig. 6 The monthly mean TS score of 24 h precipitation of 1–31 Aug 2005, (a) domain 1 (45 km)；(b) domain 2 (15 km)

而暴雨分别为 8.18 和 4.92。对于模拟区域 2 (图 6b), 4 个雨强等级的评分分布与区域 1 的相似, 且在 10、25 和 50 mm 的评分都是 3DVAR 试验的最高。

由此可见, 3DVAR 试验的降雨模拟效果总体上是 3 个试验中最好的, 而 LITT 试验除在 1 和 10 mm 的预报效果上有明显提高外 (对比 NCEP 试验), 对于大雨 (25 mm) 和暴雨 (50 mm) 的预报效果较差。结合对初始场分析发现, NCEP

和 LITT 试验的初始场差别不太大, LITT 试验初始场形成中, 由于是采用 CRESSMAN 方法来订正背景场, 因此对于一些与背景场差别比较大的反应中尺度系统的观测资料平滑较多, 而 3DVAR 试验中, 对与背景场信息差别比较大的反应中尺度系统的观测资料的分析, 其分析结果比较靠近观测资料, 这将更有利于模式对于较小的中小尺度天气系统和强降雨的预报。

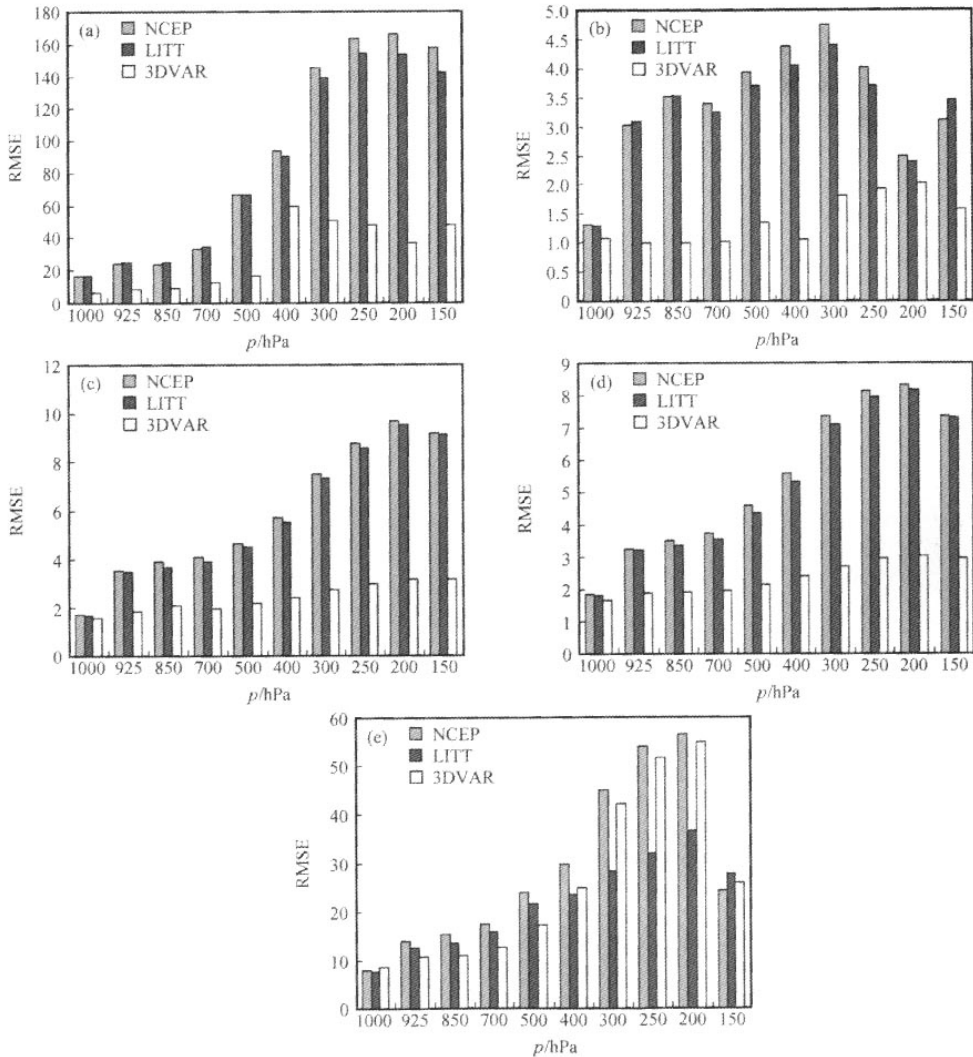


图 7 3 个试验形势场的 24 h 预报结果与站点探空的均方根误差分布, (a) 高度场 (单位: gpm); (b) 温度场 (单位: $^{\circ}\text{C}$); (c) 纬向风 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (d) 经向风 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (e) 相对湿度 (%)

Fig. 7 The RMSE distribution between the 24 h prediction fields of three experiments and sounding observation; (a) geopotential height (gpm); (b) temperature ($^{\circ}\text{C}$); (c) u -wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (d) v -wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (e) relative humidity (%)

4.2 24 h 形势场预报的检验分析

数值预报结果好坏的评估,除了对降雨预报进行评估外,形势场预报结果与实况观测的相关性分析也十分重要,因此,利用探空观测,分别对 3 个试验的 24 h 形势场预报结果进行了均方根误差分析。可以看到(图 7),3 个试验中,高度预报场的均方根误差在低层较小(图 7a),而在中高层较大。各个层次上的高度预报场均方根误差均以 3DVAR 试验的最小,且 3DVAR 试验的均方根误差在高层增加不是很明显。LITT 试验的高度预报场均方根误差在低层与 NCEP 试验的相近,而高层的则相对低一些。3 个试验的温度预报场均方根误差在垂直分布上变化不大(图 7b),特别是 3DVAR 试验,不仅在各层变化较小,而且在各个层次相对其他两个试验也都是最小的。相比来看,NCEP 和 LITT 试验的温度预报场均方根误差分布相似,有的层次以 LITT 试验的小,有的层次是 NCEP 试验的小。

预报的风场均方根误差在垂直方向也基本是随高度增加而增大(图 7c 和 7d),但 3DVAR 试验在高层增加不明显,且比其他两个试验要小很多。LITT 试验的均方根误差在低层略大于 NCEP 的,中层则相反。NCEP 和 LITT 试验经向风和纬向风的均方根误差在中上层一般都在 $5 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而 3DVAR 试验在 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。相对湿度预报场的均方根误差在 3 个试验中差异比较

小,且还是以 3DVAR 试验的最小(图 7e)。

综上所述,预报结果中除了温度场和湿度场外,其他变量的均方根误差一般是随高度增加而增加的,误差在中低层较小,高层较大,但 3DVAR 试验的均方根误差在高层增加相对较小。总体而言,3DVAR 试验的预报结果好于其他 2 个试验。

4.3 暴雨两个例分析

通过对 3 个试验的初始场和预报结果 1 个月的统计分析可以看出,整体效果均以 3DVAR 试验为最好。但就具体个例来讲,试验效果会存在个体差异,并不是所有的 3DVAR 试验均为最好。在此,以 2 次降雨过程为例进行具体分析(8 月 8 日和 19 日)。8 月 8 日的强降雨区在渤海湾地区(图 8a),8 日登陆台风“麦莎”的中心已经到达山东,而在蒙古有高压脊,高压脊东侧的西北气流的侵入(图略)加强了“麦莎”外围云系的降雨。8 月 19 日的降雨区主要有 2 个(图 8b),一个在华南海岸地区,达到暴雨量级,一个在河套南侧的长江和黄河之间,雨强比华南弱。这两个雨区是由两个低压系统造成的(图略)。

2 个个例的降雨预报评分见表 2。个例 1(8 月 8 日)3DVAR 试验改进的效果不显著,只在暴雨的预报上改进明显,其他降雨量级改进不明显,甚至有所下降;个例 2(8 月 19 日)3DVAR 试验

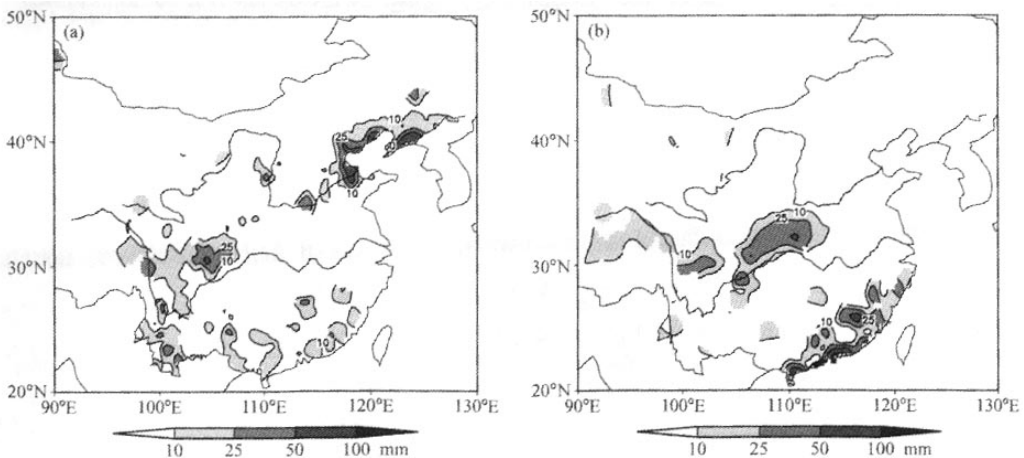


图 8 2005 年 (a) 8 月 8 日 0000 UTC~9 日 0000 UTC 和 (b) 19 日 0000 UTC~20 日 0000 UTC 观测的降雨量

Fig. 8 The observation precipitation of (a) 0000 UTC 8—0000 UTC 9 Aug 2005 and (b) 0000 UTC 19—0000 UTC 20 Aug 2005

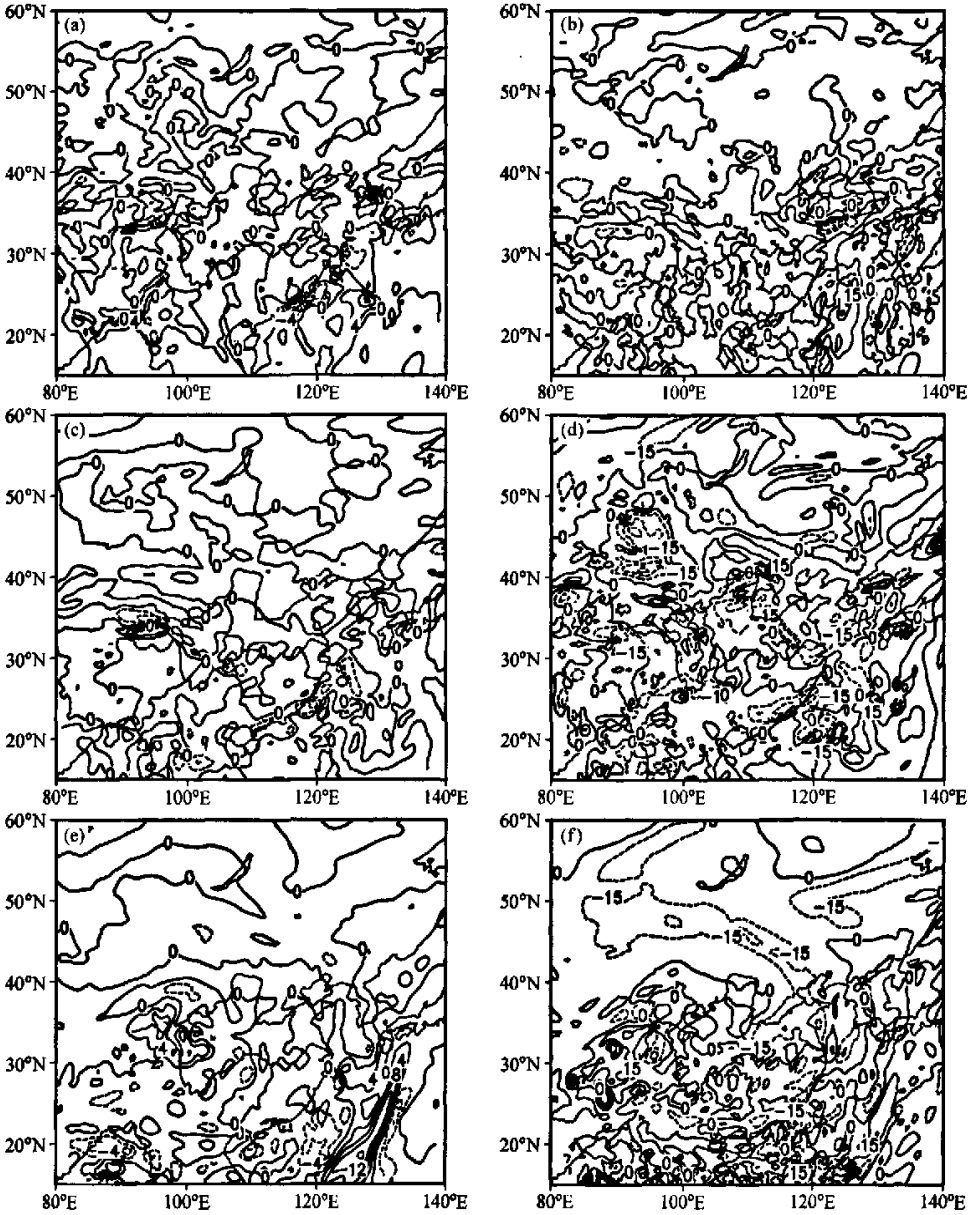


图9 2005年8月19日的24 h预报风场(左侧,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和相对湿度场(右侧,%) 3DVAR试验与LITT试验的差值: (a)、(b) 850 hPa; (c)、(d) 500 hPa; (e)、(f) 200 hPa

Fig. 9 The differences of 24 h prediction wind (left panels, units, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and relative humidity (right panels, %) between 3DVAR Exp. and LITT Exp. at 19 Aug 2005; (a), (b) 850 hPa; (c), (d) 500 hPa; (e), (f) 200 hPa

改进的效果特别显著,在降雨的各个量级上改进都特别显著,尤其3DVAR试验预报出了在NCEP和LITT试验中都漏报的大雨和暴雨,尤其是长江和黄河之间的雨区只有3DVAR试验成功预报出来(图略)。

对3个试验的24 h预报结果的温度场、湿度场和风场进行了对比,即8月8日和19日的预报场对比显示,温度场3个试验的差别较小(图略),且低层差别稍大,而高层差别很小,3DVAR试验和LITT试验的温度差别大部分在

表 2 24 h 降雨 TS 评分

Table 2 The TS score of 24 h rainfall prediction

个例	试验	降雨量/mm			
		1	10	25	50
8 月 8 日	NCEP	68.34	35.5	28.49	15.91
	LITT	71.07	33.6	26.92	6.06
	3DVAR	68.48	34.03	28.74	18.18
8 月 19 日	NCEP	33.58	3.19	0	0
	LITT	33.73	4.26	0	0
	3DVAR	60.78	31.28	11.86	3.23

1℃以下。图 9 只给出了 8 月 19 日 3DVAR 试验与 LITT 试验的差值。风场的差别与温度场不同,各试验的差别随高度逐渐增加,对流层高层最大(图 9)。湿度场的差值有与风场差值相似的分布。8 月 8 日个例与 8 月 19 日个例的分析结果一致。从预报结果的分析可以看出,两种初始化方法(LITT 和 3DVAR)形势场的预报结果差异还是比较大的。进一步的分析发现 3DVAR 方法对与背景场差异较大的观测资料能更合理地分析,因而能更好地预报中尺度系统。

5 结论与讨论

本文采用 MM5 模式及其三维变分系统(MM5/3DVAR)对我国 2005 年 8 月夏季降雨进行 1 个月的连续预测试验,并对试验结果进行了统计评估。得出以下主要结果:

(1) 利用 NMC 方法,采用 2005 年 8 月的模式预测结果形成与预报区域和水平、垂直分辨率相匹配的背景误差场,并将其与模式本身提供的 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 全球背景误差场做对比分析。结果显示,与模式预报区域和分辨率相一致的背景误差场的长度尺度的基本特征,以及各变量的第 1 特征向量均与全球背景误差场的相似,各变量的长度尺度随着水平分辨率的提高而明显减小,而特征向量则与水平分辨率无关,且第 1 特征向量对背景误差场的贡献很大。因此,在 3DVAR 中应用与模式预报区域和分辨率相一致的背景误差场有利于系统的分析同化及其数值预报。

(2) 3 种试验 24 h 预报降雨量的 TS 评分分析表明,LITT 试验在 1 和 10 mm 的预报效果有

明显提高,但对于 25 和 50 mm(大雨和暴雨)的预报评分却有所下降。3DVAR 试验的预报降雨评分在各级均有明显的提高。对于形势预报场的均方根误差分析发现,除了温度场和湿度场外,其他变量场的均方根误差一般均随高度增加而增加,3DVAR 试验的均方根误差相对小于其他 2 个试验的。

(3) 3DVAR 试验对降雨,特别是强降雨预报的明显改进,主要是因为 3DVAR 试验中,对与背景场信息差别比较大且反应中尺度系统的观测资料的分析,其分析结果比较靠近观测资料,这将更有利于模式对于较小的中小尺度天气系统和强降雨的预报。

目前,本文对于 MM5/3DVAR 系统的应用试验研究主要是针对常规观测资料进行的,得到的结论也只是统计意义上的,今后还将有针对性地开展各类非常规观测资料同化效果的试验研究。

参考文献 (References)

- [1] Gelb A. *Applied Optimal Estimation*. Cambridge: The MIT Press, 1974. 382pp
- [2] Le Dimet FX, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretical aspects. *Tellus*, 1986, **38A**: 97~110
- [3] Kalman R. A new approach to linear filtering and prediction problems. *J. Basic Eng.*, 1960, **82**: 35~45
- [4] Anderson J. An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129**: 2884~2903
- [5] Rabier F, Jarvinen H, Klinker E, et al. The ECMWF implementation of four-dimensional variational assimilation I: Experimental results with simplified physics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2000, **126**: 1143~1170
- [6] 张华, 薛纪善, 庄世宇, 等. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验. *气象学报*, 2004, **62** (1): 31~41
Zhang Hua, Xue Jishan, Zhuang Shiyu, et al. Idea experiments of GRAPES three-dimensional variational data assimilation system. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (1): 31~41
- [7] Zhang Hua, Chou Jifan, Qiu Chongjian. Assimilation analysis of Rammasun typhoon structure over Northwest Pacific using satellite data. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49** (4): 389~395
- [8] 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. *应用气象学报*, 2004, **15** (5): 534~542

- Zeng Zhihua, Ma Leiming, Liang Xudong, et al. Forecasting and evaluation of MM5 numerical prediction in Shanghai with GRAPES 3DVAR scheme. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, 15 (5), 534~542
- [9] 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. NCAR/TN-453STR, 2003, 68pp
- [10] Barker D M, Huang W, Guo Y R, et al. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5; Implementation and initial results. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, 132: 897~914
- [11] 孙建华, 卫捷, 张小玲, 等. 2003 年夏季的异常天气及预测试验. *气候与环境研究*, 2004, 9 (1): 203~217
Sun Jianhua, Wei Jie, Zhang Xiaoling, et al. The abnormal weather in the summer 2003 and its real-time prediction. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, 9 (1): 203~217
- [12] 孙建华, 卫捷, 张小玲, 等. 2004 年夏季的天气及预测试验. *气候与环境研究*, 2005, 10 (1): 1~18
Sun Jianhua, Wei Jie, Zhang Xiaoling, et al. Weather system analysis and its real-time prediction in summer 2004. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, 10 (1): 1~18
- [13] Zeng Zhihua, Duan Yihong, Liang Xudong, et al. The effect of three-dimensional variational data assimilation of QuickSCAT data on the numerical simulation of typhoon tract and intensity. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22 (4): 534~544
- [14] Zou X, Vandenbergh F, Pondeva M, et al. Introduction to adjoint techniques and the MM5 adjoint modeling system. NCAR Tech. Note NCAR/TN-435 + STR, 1997, 110pp
- [15] Lorenc A C. Analysis methods for numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1986, 112: 1177~1194
- [16] Ide K, Courtier P, Ghil M, et al. Unified notation for data assimilation; Operational, sequential and variational. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1997, 75: 181~189
- [17] Parrish D F, Derber J C. The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, 120: 1747~1763
- [18] Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model; Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 121: 1493~1513
- [19] 孙建华, 赵思雄. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I. 引发暴雨的 β 中尺度对流系统的数值模拟研究. *大气科学*, 2002, 26 (4): 541~557
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall of South China. Part I: A numerical simulation of meso- β convective system inducing heavy rainfall. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, 26 (4): 541~557
- [20] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究. *大气科学*, 2004, 28 (5): 675~691
Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. A study on vortex and its mesoscale convective system during China Heavy Rainfall Experiment and Study in 2002. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, 28 (5): 675~691
- [21] Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108 (D22), 8851, doi: 10.1029/2002JD003296
- [22] Ingleby N B. The statistical structure of forecast errors and its representation in the Met. Office Global 3-D Variational Data Assimilation Scheme. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2001, 127: 209~232