

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

徐枝芳 龚建东 王建捷 李泽椿

国家气象中心, 北京 100081

摘 要 中国地形复杂, 模式地形与实际观测地形存在一定高度差异, 因此设计合理的复杂地形下地面观测资料的同化方案有利于使我国目前仅用作探测手段的地面观测资料(常规地面观测站和地面自动站)在中尺度数值模式中得到充分利用。作者在 MM5_3DVAR 同化系统中利用近地层相似理论将地面观测资料进行直接三维变分同化分析, 并对地面资料同化方案设计中是否需要考虑模式与实际观测站地形高度差异进行探讨研究。研究结果表明: 通过近地层相似理论将地面观测资料同化到数值模式能起到一定的作用, 并且地面观测资料(温度、湿度、风场、地面气压)中各物理量同化到数值模式都能影响 24 小时降水数值结果, 但各物理量起的作用大小不一样, 其中影响最大的是温度, 其次为湿度; 地面观测资料同化方案设计有必要考虑模式地形与实际观测站地形高度差异, 适当考虑这种高度差异能取得较好的结果。

关键词 地面观测资料 同化分析 近地层相似理论 模式地形与观测站地形高度差异

文章编号 1006-9895(2007)02-0222-11 **中图分类号** P413 **文献标识码** A

A Study of Assimilation of Surface Observational Data in Complex Terrain

Part I: Influence of the Elevation Difference Between Model Surface and Observation Site

XU Zhi-Fang, GONG Jian-Dong, WANG Jian-Jie, and LI Ze-Chun

National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract Since the topography distribution of China is very complex, there exists elevation difference between surface observation station measurement and numerical model surface. The surface observation data are currently only used as backup or process analysis, but not used in numerical models sufficiently. Reasonable assimilation schemes of surface observation data will put these data into numerical models sufficiently. In this paper, surface observation data are assimilated into Meso-scale model MM5 based on the similarity theory, using MM5_3DVAR (MM5 three-dimensional variational) system. In order to make clear whether the actual elevation difference between observation site and numerical model surface should be put into consideration in directly assimilating surface observation data, some experiments are performed with surface observation data and radiosonde data. Results show that 3DVAR assimilation of surface observation data can impact mesoscale model analysis and forecast. 3DVAR assimilation of each observed surface meteorological parameter can influence the numerical forecast of 24 h rainfall and the effects of different observed surface meteorological parameter assimilation are different. The surface temperature assimilation

收稿日期 2005-07-05, 2006-05-21 收修定稿

资助项目 国家科技攻关计划 2002BA904B05, 国家自然科学基金资助项目 40505021, 中国博士后科学基金资助项目 2004036284

作者简介 徐枝芳, 女, 1977 年出生, 副研究员, 现主要从事地面资料同化应用研究. E-mail: zhifang@cma.gov.cn

brings the maximum contribution to the rainfall forecast, followed by the surface moisture. The surface temperature assimilation brings much more contribution to temperature and pressure analysis. The actual difference in elevation between the observation site and the model surface must be put into consideration in the surface observation data assimilation scheme. Better results will be obtained when surface observation data are assimilated into the numerical model where the difference in elevation between observation site and numerical model surface is put into consideration.

Key words surface observational data, assimilation, similarity theory, elevation difference between numerical model surface and observation site

1 引言

随着计算机计算能力及数值计算水平不断提高,数值模式的分辨率越来越高,数值预报和模拟研究有较大幅度的提高。同时,数值预报(模拟)中凝结降水的旋转加强(Spin-up)问题也越来越受气象研究者的关注。Turpeinen 等^[1]认为有如下三个因素造成了该问题的存在:(1)初始的散度分布;(2)初始的水汽场和热力场;(3)物理参数化不完善。其中前两个原因可归结为资料问题。中尺度数值模式空间分辨率的提高使得常规探空(高空温、压、湿、风场)资料已经越来越不能满足其需要。因为 300 km 间距或以上探空网站的探测点稀疏,用于客观分析的常规观测资料密度不够,使物理量场分析往往过于平滑,不能提供有足够精度的水平物理量梯度,从而导致了辐散场、非绝热加热和湿度场之间的初始场缺少一致性,因而在资料客观分析中往往丧失掉一些很重要的中尺度特征。因此若仅用常规探空资料,则可能漏掉一些中小尺度系统。张大林等^[2]认为若在中尺度数值模式的初始场中同化进更多的中尺度信息,则能够在一定程度上克服上述缺陷。

地面观测(常规地面观测站与地面自动站)资料相对于其他非常规资料而言具有自身独特特点,其观测量均为模式变量,时空分辨率相对比常规探空资料高。近些年,我国为全面加强观测系统工作在全国布了许多地面自动观测站点。目前,我国有约 2000 个人工地面观测站(常规探空站不超过 300 个),近些年又布了大量的地面自动站(仅广东省就有 600 多个地面自动观测站),且还将不断继续建设。其观测量为 10 m 风速、2 m 温度和湿度、降水以及气压等模式变量。而当前我国地面观测站(包括地面自动站)仅仅是作为一种观测手段,其观测资料没能有效地进入数值模式改善数值结果,

在很大程度上造成资源浪费。如何充分有效地利用地面观测资料,从中提取有价值的模式信息,并把它们和其他资料融合为数值天气预报所需要的初始资料,改善数值模式预报水平,是当今国内外不少气象工作者正在努力解决的问题。

由于地面观测资料受地形、地貌的影响较大^[3],且一般模式地形与实际观测站地形存在一定的高度差异,因此将地面观测资料应用到数值模式中的研究工作^[4~9]相对雷达卫星等其他非常规资料的同化工作少许多,进展也不大。1996 年, Ruggiero 等^[5]考虑到模式地形与实际观测站地形高度有一定的差异(图 1),利用近地层相似理论同化地面观测资料时,分三种情况进行处理:(1)当测站地形高度大于模式最低层高度,则将地面观测资料作为高空资料进入模式;(2)当模式最低层高度高出测站地形的高度超过 100 m,该站点资料则剔除不用;(3)当模式最低层高度比测站地形高度高,且模式最低层高度高出测站地形的高度小于 100 m 时,该站点资料则利用背景场信息将观测资料反演到模式最低层。2002 年 UCAR 与 Korea 合作开展地面观测资料同化研究工作^[8],发现上述方案虽然考虑了模式地形与观测地形的差异,但没有采用直接变分同化,同时将许多观测资料剔除了,资料没有充分利用,并且将地面观测资料当做高空资料进入模式时,会造成不协调。为了解决 Ruggiero 方案^[5]中的不足,郭永润等^[8]设计的新方案没有考虑实际观测站地形与模式地形高度的差异,而是假定所有测站的资料(除地面气压)都是位于模式面,然后利用相似理论建立 10 m 高度风场(u_{10} , v_{10})和 2 m 高度温度(T_2)、湿度(q_2)的观测算子及相应的切线和伴随模式,同时在进行极小化运算前将地面气压(p_{sf})折算到模式最低层。实现该方案采用的同化分析模式是 MM5-3DVAR,每 3 小时作一次同化分析,直接将地面观测物理量同化到

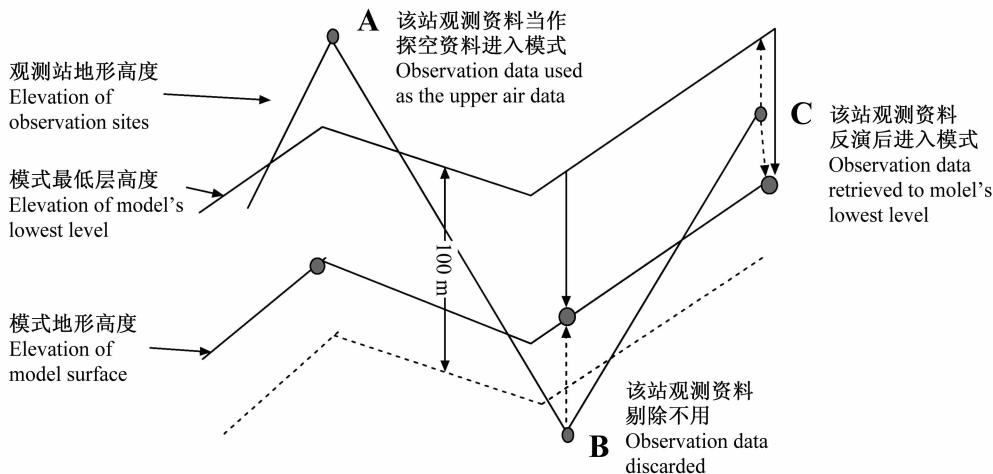


图1 Ruggiero 地面观测资料同化方案设计示意图

Fig. 1 Sketch map of Ruggiero's surface observation assimilation scheme

数值模式,地面观测资料得到了充分利用,并取得了一定的效果。这种方案比前一种方案更充分地利用观测资料,但却没有考虑模式地形与实际测站地形的高度差异,当地面观测资料与其他资料同时进行同化分析时,两种地形高度差异就会造成模式中各物理量梯度不协调。实际观测地形与模式地形的高度差异对于地面观测资料同化分析有多大的影响,对数值模拟(预报)又有多大的影响?国内外地形分布差异很大,郭永润等^[8]地面观测资料同化方案在我国是否适用?本文就这些问题展开了研究。

2 试验方案设计

2.1 MM5 三维变分资料同化系统简介^[10]

本文所使用的 MM5 三维变分同化系统是 NCAR 的 MM5 三维变分同化系统。系统概况介绍如下:

目标函数:

$$J = \frac{1}{2} [\mathbf{x} - \mathbf{x}^b]^T \mathbf{B}^{-1} [\mathbf{x} - \mathbf{x}^b] + \frac{1}{2} [\mathbf{y}^o - \mathbf{H}(\mathbf{x})]^T (\mathbf{E} + \mathbf{F})^{-1} [\mathbf{y}^o - \mathbf{H}(\mathbf{x})], \quad (1)$$

目标函数的梯度:

$$\mathbf{G} = \nabla J = \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + \mathbf{H}'^T (\mathbf{E} + \mathbf{F})^{-1} (\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^o), \quad (2)$$

Hessian 矩阵:

$$\nabla^2 J = \mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}'^T (\mathbf{E} + \mathbf{F})^{-1} \mathbf{H}', \quad (3)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为所求的数值天气预报模式初始状态最优解,它包括 8 个三维基本变量: 风场 u, v , 温度 T ,

比湿 q , 气压扰动 p' , 垂直速度 w , 云水 q_c , 雨水 q_r ; $\mathbf{x}^b$ 为背景场,也包括如上的 8 个基本变量; $\mathbf{B}$ 为背景场误差协方差矩阵; $\mathbf{y}^o$ 为观测向量; $\mathbf{H}$ 为观测算子, $\mathbf{H}'$ 为 $\mathbf{H}$ 的切线性算子,将模式变量由模式空间投影到观测空间; $\mathbf{E}$ 为仪器观测误差协方差矩阵; $\mathbf{F}$ 为观测代表性误差协方差矩阵。

在最小化过程中,为了减少计算量和迭代次数,同化系统使用了增量方法 (Incremental Approach)^[11],即将背景协方差矩阵分解为

$$\mathbf{B} = \sqrt{\mathbf{B}} \sqrt{\mathbf{B}}^T, \quad (4)$$

$\sqrt{\mathbf{B}}$ 分解为一个对角矩阵 $\mathbf{D}$ (由预报误差方差构成) 和一个非对角矩阵 $\mathbf{F}$ (定义为一个回归滤波) 的乘积,

$$\sqrt{\mathbf{B}} = \mathbf{D} \mathbf{F}, \quad (5)$$

$\sqrt{\mathbf{B}}$ 为预条件因子,引入无量纲控制向量 $\mathbf{v}$,

$$\mathbf{v} = \delta \mathbf{x} / \sqrt{\mathbf{B}}, \quad (6)$$

其中, $\delta \mathbf{x}$ 为分析增量,

$$\delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^b, \quad (7)$$

因此,目标函数 (1) 变为

$$J_{\text{inc}} = \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} + \frac{1}{2} [\mathbf{H}' \sqrt{\mathbf{B}} \mathbf{v} - \mathbf{d}]^T (\mathbf{E} + \mathbf{F})^{-1} [\mathbf{H}' \sqrt{\mathbf{B}} \mathbf{v} - \mathbf{d}], \quad (8)$$

其中,

$$\mathbf{d} = \mathbf{y}^o - \mathbf{H}(\mathbf{x}^b), \quad (9)$$

目标函数的梯度为

$$\nabla_{\mathbf{v}} J_{\text{inc}} = \mathbf{v} + \sqrt{\mathbf{B}}^T \mathbf{H}'^T (\mathbf{E} + \mathbf{F})^{-1} (\mathbf{H}' \sqrt{\mathbf{B}} \mathbf{v} - \mathbf{d}), \quad (10)$$

Hessian 矩阵为

$$\nabla^2_{\mathbf{v}} J_{inc} = \mathbf{I} + \sqrt{\mathbf{B}}^T \mathbf{H}'^T (\mathbf{E} + \mathbf{F})^{-1} \mathbf{H}' \sqrt{\mathbf{B}}, \quad (11)$$

其中 $\mathbf{I}$ 为单位矩阵,显然,新的 Hessian 矩阵比原 Hessian 矩阵[见式(3)],有更接近于 1 的条件数。

本研究中的背景场所使用资料是 T213 全球资料,观测资料用的是 2004 年 5 月 11 日 08 时(北京时,下同)的全球探空资料 (u 、 v 、 T 、 q 、 p) 和地面观测资料(包括加密观测) (u_{10} 、 v_{10} 、 T_2 、 q_2 、 p_{sfc})。本文所采用的背景场误差协方差通过 NMC 方法^[12]统计分析得到。

2.2 暴雨过程

受冷空气和暖湿气流的影响,2004 年 5 月 11 日 08 时~12 日 08 时,在江淮、江南大部、华南西部和北部等地的部分地区出现大雨或暴雨。图 2 为 24 小时降水实况,由图可见,降水中心量超过 10 cm 的有 5 个,其中有 2 个超过 15 cm。

2.3 试验方案设计

本文研究工作意在发现和解决地面观测资料同化中的问题,为了突出模式与观测站地形高度差异对地面观测资料同化分析的影响,采用的中尺度数值试验模式 MM5 只有一重区域,水平格距为 51 km。试验区中心点取为 (28.5°N, 114°E);格点数为 70×81;垂直方向共有 33 层,σ=1.00, 0.9975, 0.9925, 0.985, 0.975, 0.965, 0.955, 0.945, 0.93, 0.905, 0.87, 0.83, 0.79, 0.75, 0.71,

0.67, 0.63, 0.59, 0.55, 0.51, 0.47, 0.43, 0.39, 0.35, 0.31, 0.27, 0.23, 0.19, 0.15, 0.105, 0.055, 0.015, 0.00。全部试验的物理过程均选取了 Grell 对流参数化过程,Reisner 方案, MRF 高分辨率行星边界层参数化方案,云辐射方案^[13]。所有试验的模拟开始时间为 2004 年 5 月 11 日 08 时,积分 24 小时。

我国国土辽阔,有较多的地面观测站(图 3),且观测站分布很不规则。同时我国地形、地貌相当复杂,模式地形与观测站地形高度存在差异,且差异大小分布很不均匀(图 4),不同高度差异分布内的地面观测站数量也有很大的区别(图 5)。约有 40% 的地面观测站海拔高度与模式地形高度差异在 150 m 以上,约 15% 的地面观测站海拔高度与模式地形高度差异超过 300 m (见图 5)。如果采用 Ruggiero 方案^[5]则会剔除掉近一半的观测资料,部分地区的地面观测资料几乎被全部剔除,而采用郭永润等^[8]地面观测资料同化方案,则能够充分将资料利用起来。但模式与观测站地形高度差异的存在对于地面观测资料同化分析有多大的影响,对数值模拟(预报)结果是否存在影响?带着这样的疑问本文设计了两组试验。第一组试验为表 1 中的 7 个试验,主要是分析研究地面观测各物理量分别同化分析后的作用大小,由地面单物理量的同化效果说明模式地形与观测站地形高度差异对地面观测资料同化效果的影响。第二组试验(试验 8~11)主要是

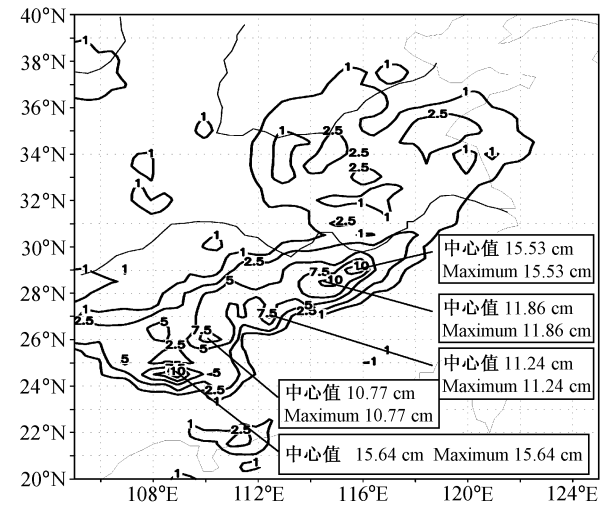


图 2 2004 年 5 月 11 日 08 时~12 日 08 时 24 小时降水观测(单位: cm)

Fig. 2 Observed 24 h accumulated rainfall (cm) for 0800 LST 11 May - 0800 LST 12 May 2004

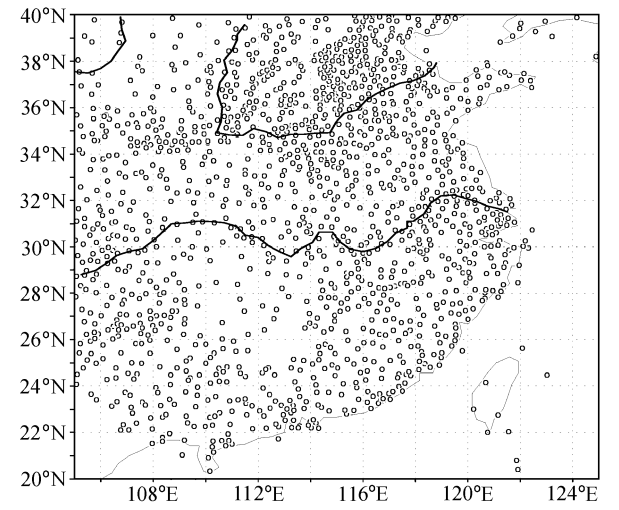


图 3 研究区域内地面观测站点分布图

Fig. 3 Distribution of surface observation sites in the selected area

表 1 第一组试验方案设计
Table 1 Schemes of the first group of experiments

试验 Expt	T213 资料 T213 Data	探空资料 Radiosonde data	地面观测资料 Surface observations	三维变分资料处理 3DVAR
1	是 Yes	否 No	否 No	否 No
2	是 Yes	是 Yes (u, v, T, q, p)	否 No	是 Yes
3	是 Yes	是 Yes (u, v, T, q, p)	是 Yes ($u_{10}, v_{10}, T_2, q_2, p_{sfc}$)	是 Yes
4	是 Yes	是 Yes (u, v, T, q, p)	是 Yes (T_2)	是 Yes
5	是 Yes	是 Yes (u, v, T, q, p)	是 Yes (q_2)	是 Yes
6	是 Yes	是 Yes (u, v, T, q, p)	是 Yes (p_{sfc})	是 Yes
7	是 Yes	是 Yes (u, v, T, q, p)	是 Yes (u_{10}, v_{10})	是 Yes

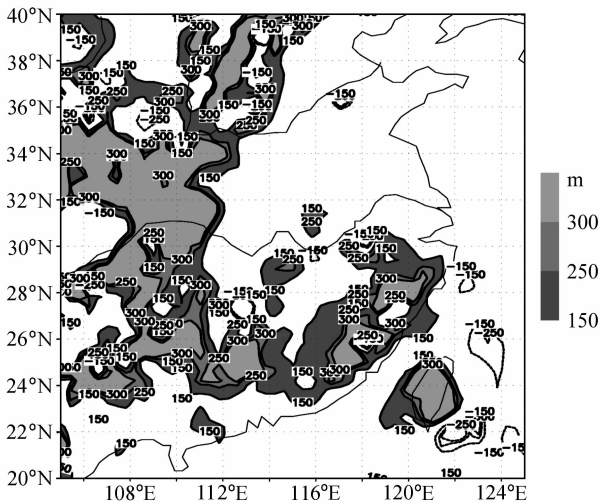


图 4 51 km 格距中尺度模式 MM5 的模式地形与地面观测站地形的差值
Fig. 4 Difference of terrain between model surface and observation sites at a resolution of 51 km

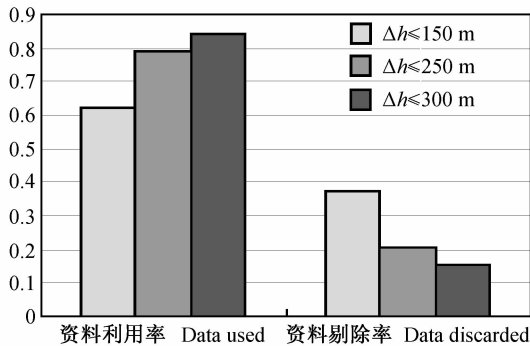


图 5 模式和观测站地形高度差异(Δh)与地面观测资料利用率的关系图
Fig. 5 Relationship between the usability of surface observations and the difference (Δh) of model surface and observation sites

综合分析模式与观测站地形高度差异存在对地面观测资料同化效果的影响。分两个方面进行,首先在

进行同化分析过程中,根据温度递减率($-0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)将地面温度资料由观测站高度订正到模式地形高度,探空观测资料与地面观测资料同时参与同化分析的数值试验(试验 8)。其次采用模式与观测站地形高度差异在 150 m、250 m、300 m 内的地面观测资料和探空资料同时参与同化分析的数值试验(试验 9~11)。

3 三维变分资料同化试验结果

判断 3DVAR 试验成功与否的第一步,首先应检查最小化程序的收敛情况,即目标函数及其梯度的模是否收敛,只有在它们都收敛的情况下,才能开始第二步对同化调整效果的检验(即检验观测信息是否被有效地同化和对初始场的改进是否合理),以及同化结果与实际观测值的对比分析。试验 3 为开展本文研究工作的基础,即通过变分方法同化探空资料和地面观测资料,以改进模式初始场。下面就这个试验的收敛情况进行一些分析。

3.1 最小化程序的收敛情况

本文最小化算法采用的是共轭梯度法(Conjugate gradient method),迭代次数为 100 次。由图 6 我们发现在最小化过程中,目标函数 J 和梯度的模 G 都在不断地减小,最终目标函数 J 趋向一稳定值,梯度 G 趋于 0。在最理想的情况下,当最优解达到时,目标函数梯度的模 G 应该趋近于零。但在用一个复杂模式同化实况资料时,这种理想情况非常难得^[14~18],其原因主要是由于模式的精度和观测资料与模式之间不匹配。由上可知 J 和 G 的收敛情况都很好。其他试验与试验 3 的情况比较类似,目标函数 J 和梯度 G 的收敛情况都很好。下面对同化后模拟降水与实际观测资料对比情况及同化

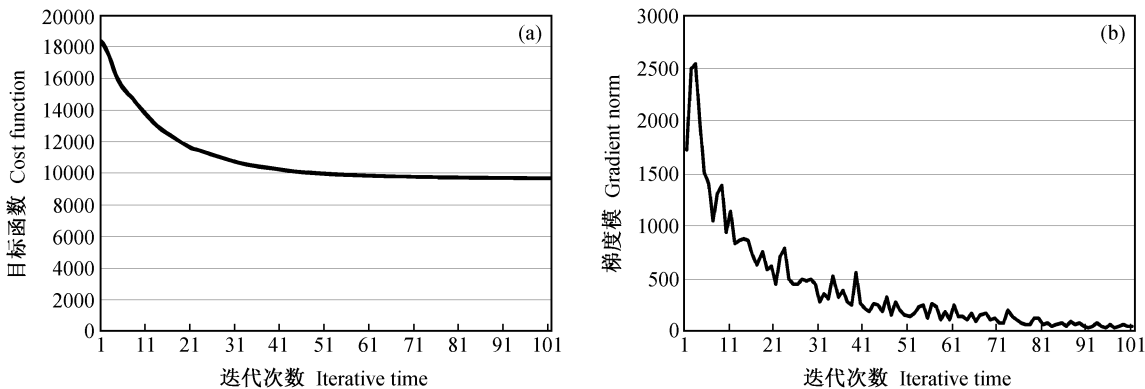


图 6 试验 3 目标函数 (a) 和梯度的模 (b) 随迭代次数的变化
Fig. 6 Changes of cost function (a) and gradient module (b) with iterative time in Expt 3

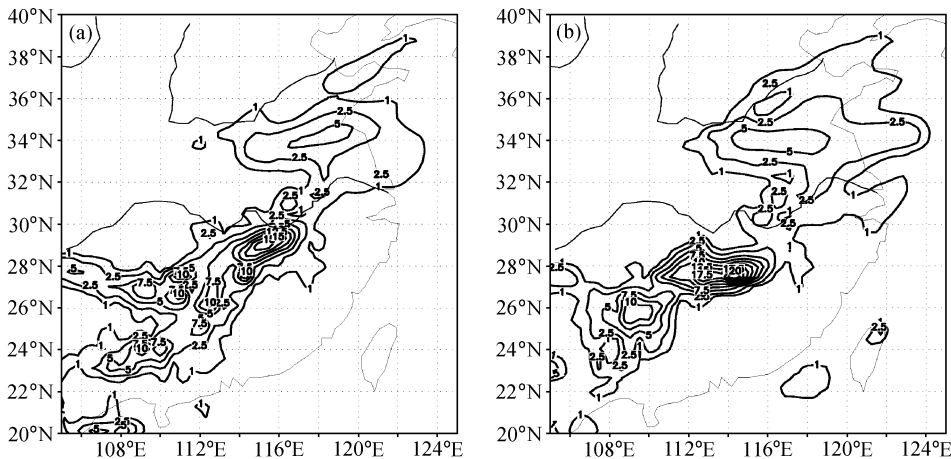


图 7 2004 年 5 月 11 日 08 时~12 日 08 时 24 小时降水数值结果 (单位: cm): (a) 试验 2; (b) 试验 1
Fig. 7 Simulated 24 h accumulated rainfall (cm) for 0800 LST 11 May–0800 LST 12 May 2004: (a) Expt 1; (b) Expt 2

分析场进行分析。

3.2 降水数值结果分析

图 7 给出了试验 1 和试验 2 两个试验 24 小时降水数值结果。由图 7b 可见, 试验 1 降水数值结果并不理想, 24°N~25°N 附近的特大暴雨中心没有模拟出来, 且 28°N~29°N 附近的降雨中心比实况大许多, 同时雨带走向也偏离实况。试验 2 的结果明显较试验 1 更接近实况, 但还存在一些不足, 如 28°N~29°N 附近强降水范围较实况偏大, 广东省沿海的降水偏小。总体而言, 同化分析常规探空资料后的结果与实况非常接近, 说明该同化系统可行, 所采取的背景场误差及观测误差是比较合理的。

图 8 为常规探空资料与地面观测资料同时参与同化分析的数值试验 3~7 与仅常规探空资料参与同化分析的数值试验 2 24 小时降水模拟的差值。

从图 8 的对比可见, 地面观测资料 (温度、湿度、风场、地面气压) 参与同化分析后对 24 小时降水模拟有较大的影响, 试验 3 与试验 2 24 小时降水数值结果差值中心等值线值最大为 12.5 cm, 最小为 -7.5 cm。地面观测的各物理量参与同化分析都能影响 24 小时降水预报, 但各物理量起的作用大小不一样, 其中影响作用最大的是温度 (图 8b 差值最大中心等值线为 10 cm, 最小为 -7.5 cm, 与图 8a 非常接近), 其次为湿度 (图 8c 差值中心等值线最大为 5 cm, 最小为 -7.5 cm)。由上分析可知, 地面温度资料同化分析的好坏直接影响到地面观测资料参与同化分析的初始场好坏, 从而影响 24 小时降水预报 (模拟) 结果。平均而言, 对流层中气温随高度变化是每上升 100 m, 气温就约下降 0.65℃。对模式地形与实际观测站地形的高度差异做简单分析发现, 模式与实际观测站地形的高度差

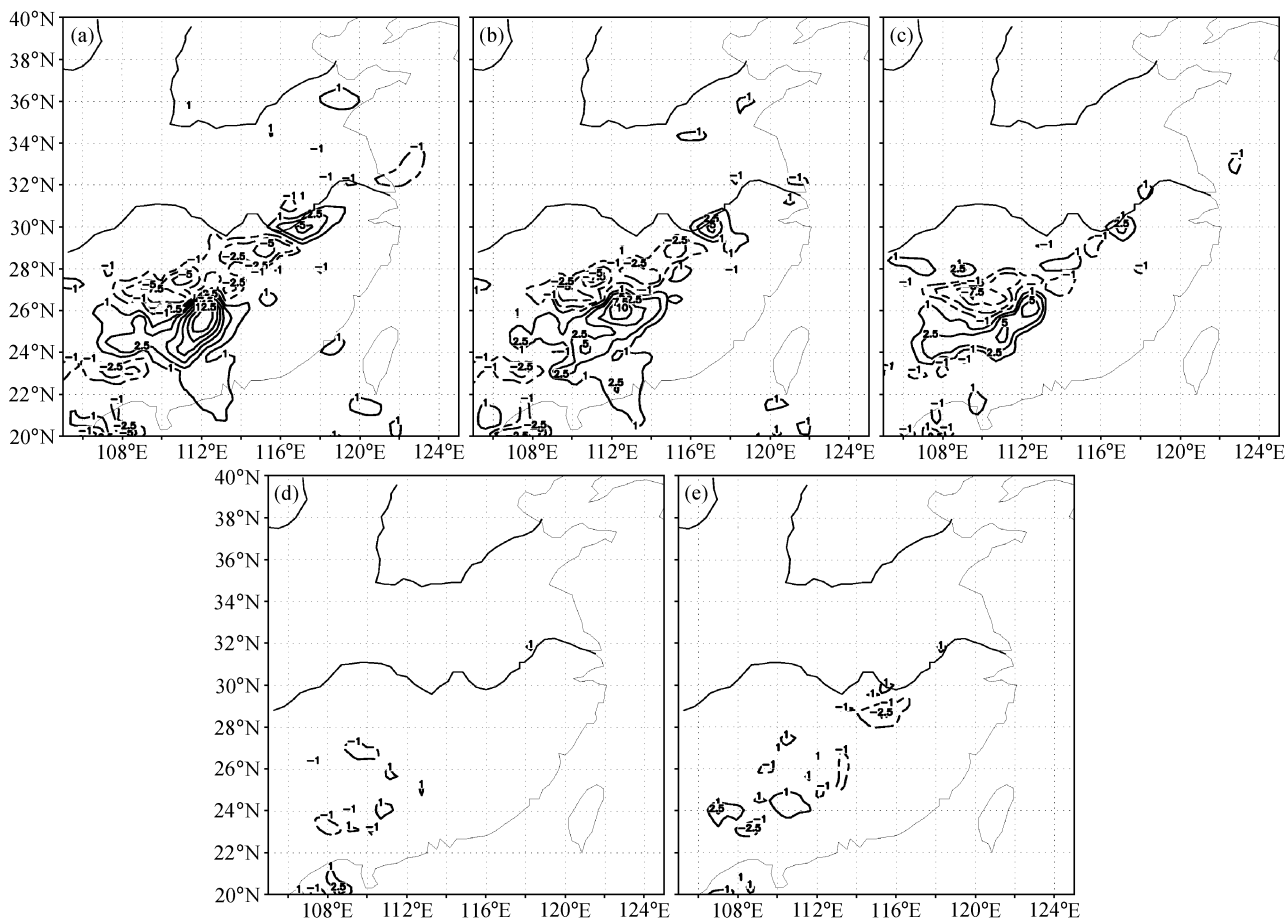


图8 试验3~7与试验2的24小时降水预报差值(单位: cm): (a) 试验3; (b) 试验4; (c) 试验5; (d) 试验6; (e) 试验7

Fig. 8 Differences of simulated 24 h accumulated rainfall (cm) between Expts 3-7 and Expt 2: (a) Expt 3; (b) Expt 4; (c) Expt 5; (d) Expt 6; (e) Expt 7

值平均值为155.6 m, 其中51%的地面观测站与模式地形高度差值在100 m以上, 且有不少地面观测站与模式地形高度差值达到1000 m以上。如果温度递减率按 $-0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 计算, 地面观测资料中温度平均约要减去 1°C 才是模式地形高度的温度。因此, 地面观测资料同化是否要考虑模式与实际观测站两种地形高度差异将会影响到地面观测资料的同化效果。

图9为试验3和试验8模拟的24小时降水。由图9a、图7b以及实况图2的对比发现, 试验3的降水模拟较试验2有一些改善, 将部分地区在试验2中没有模拟出来的中雨模拟出来了, 且 $28^{\circ}\text{N} \sim 29^{\circ}\text{N}$ 附近暴雨区的降水模拟较试验2更加接近实况, 但在 112°E 附近出现了偏离实况较大的降水。试验8中, 这片偏离实况较大的降水区较试验3明显小了许多, 试验8模拟的降水较试验3更接

近实况。降水结果分析再次说明在地面观测资料的同化方案设计中需要考虑模式与实际观测站这两种地形高度差异。

上面分析了将地面观测温度由观测站地形高度简单订正到模式地形高度时的同化结果, 控制模式与观测站地形高度差异在一定范围内的地面观测资料同化结果又如何? 分别将模式与观测站地形高度差异在150 m、250 m、300 m内的地面观测资料通过郭永润等的同化方案^[8]进入数值模式, 发现剔除两种地形高度差异较大观测站资料后的同化效果(图10与实况图2、图9a对比)较剔除资料前好。剔除两种地形高度差异在250 m以上地面观测资料的效果最好, 且剔除的资料只有20%左右。该组试验进一步说明模式与观测站地形高度差异在地面观测资料同化方案中有必要考虑。由于模式与观测站地形高度差异分布非常不均匀(如图4), 剔除资

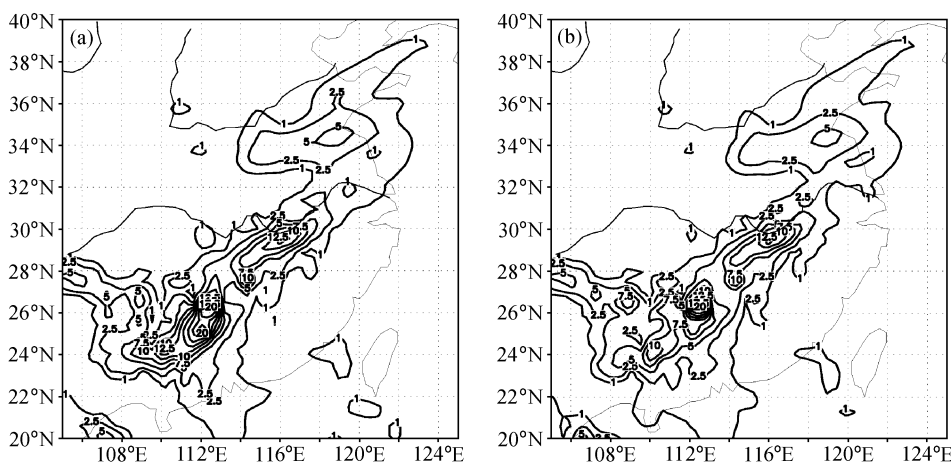


图9 2004年5月11日08时~12日08时24小时降水数值结果(单位: cm); (a) 试验3; (b) 试验8

Fig. 9 Simulated 24 h accumulated rainfall (cm) for 0800 LST 11 May-0800 LST 12 May 2004; (a) Expt 3; (b) Expt 8

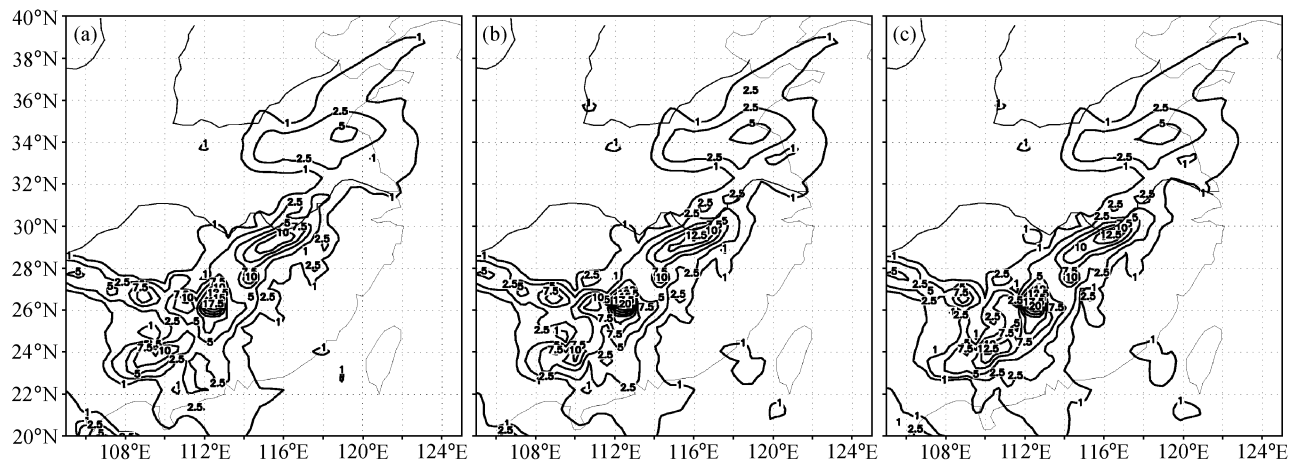


图 10 2004 年 5 月 11 日 08 时~12 日 08 时 24 小时降水数值结果 (单位: cm): (a) 试验 9; (b) 试验 10; (c) 试验 11

Fig. 10 Simulated 24 h accumulated rainfall (cm) for 0800 LST 11 May–0800 LST 12 May 2004; (a) Expt 9; (b) Expt 10; (c) Expt 11

料的方法则会有部分地区的地面观测资料信息几乎全部被剔除,因此剔除资料方法不能从根本上解决模式与观测站地形高度差异对地面资料同化效果的影响,有必要考虑一种新的方法来解决地面观测资料同化方案中模式与观测站地形高度差异问题。

3.3 同化分析增量分析

由图 8 可知地面观测温度与湿度资料同化分析对降水模拟影响较大,下面对模式最低层这两种要素同化分析增量(即同化分析结果减去背景场之差)进行分析,以更深入地了解引起试验 1-3 及试验 8 模拟结果差异的原因。

从图 11a 可看到在 (28°N, 114°E) 附近有一温度分析增量中心, 且温度分析增量大于 1℃ 的区域基本是试验 2 与试验 1 降水分布主要变化区域。同

时由图 11、图 12 可以清楚地发现, 试验 2 与试验 3、试验 8 的温度和湿度分析增量区别较大, 尤其是在 ($20^{\circ}\text{N}\sim 26^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E}\sim 114^{\circ}\text{E}$) 附近, 这也许就是试验 2 与试验 3、试验 8 在这一区域降水模拟产生区别的主要原因。由图 12 可见, 在 ($20^{\circ}\text{N}\sim 27^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\text{E}\sim 114^{\circ}\text{E}$) 区域内的湿度分析增量, 试验 3 和试验 8 比试验 2 大, 这或许是部分中雨区在试验 2 中没有模拟出来, 而在试验 3 与试验 8 中模拟出来的部分原因。图 11c 中的温度分析增量强中心比图 11b 小 0.5°C , 图 12b 与 c 区别很小, 但试验 3 与试验 8 在 112°E 附近降水模拟却有较大区别, 说明初始温度场分析的好坏直接影响到 24 小时降水模拟。由图 13 与图 3 可见, 试验 8 与试验 3 温度分析增量差别较大的地方正是模式与实际观测站地形差异

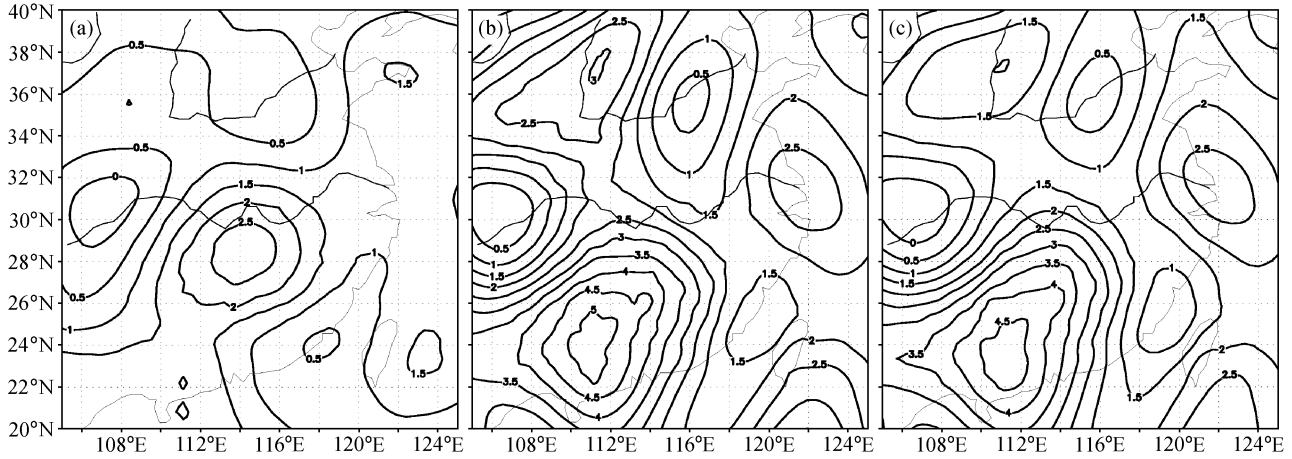


图 11 在 $\sigma = 0.9975$ 层的温度三维变分同化分析增量 (单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 试验 2; (b) 试验 3; (c) 试验 8

Fig. 11 Temperature increments ($^{\circ}\text{C}$) at $\sigma = 0.997$ from 3DVAR: (a) Expt 2; (b) Expt 3; (c) Expt 8

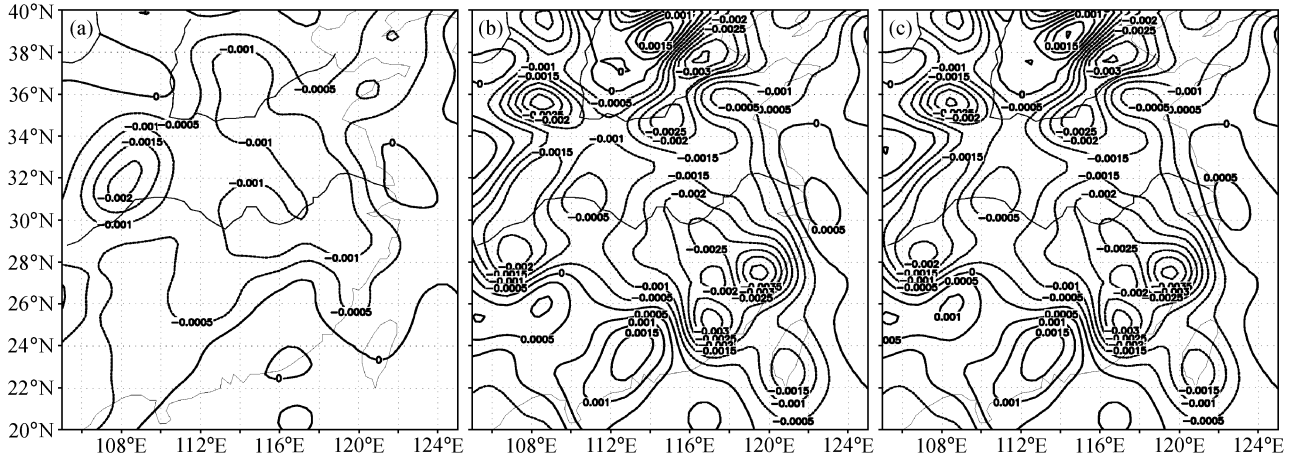


图 12 在 $\sigma = 0.9975$ 层的湿度三维变分同化分析增量 (单位: kg/kg): (a) 试验 2; (b) 试验 3; (c) 试验 8

Fig. 12 Moisture increments (kg/kg) at $\sigma = 0.997$ from 3DVAR: (a) Expt 2; (b) Expt 3; (c) Expt 8

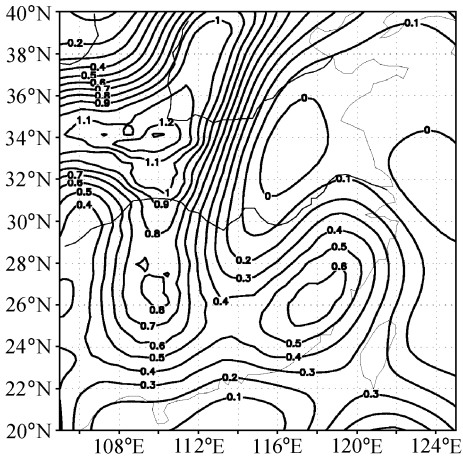


图 13 试验 3 与试验 8 温度分析增量在 $\sigma = 0.9975$ 层上的差值 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 13 Difference of temperature increments between Expt 3 and Expt 8 (units: $^{\circ}\text{C}$)

较大的地方; 并非模式与实际观测站地形差异较大的地方, 温度分析增量差异一定就大, 这是因为地面温度场在同化过程中只做了两种地形高度差异下的温度订正, 而三维变分分析不仅仅与观测场及观测误差有关, 同时与背景场及背景场误差有关, 要求最优的分析场是整体的分析使得目标函数达到最小。

温度、湿度、气压三要素总是紧密联系在一起, 下面对不同试验方案中的气压分析增量分布进行进一步分析。由图 14 可见, 试验 2 与试验 6 模式最低层气压分析增量 (图 14a 和 b) 基本相同, 而试验 3 与试验 4 模式最低层气压分析增量 (图 14d 与 e) 基本相同。由此可见, 该地面观测资料同化方案中地面温度资料的同化分析不仅影响温度的分

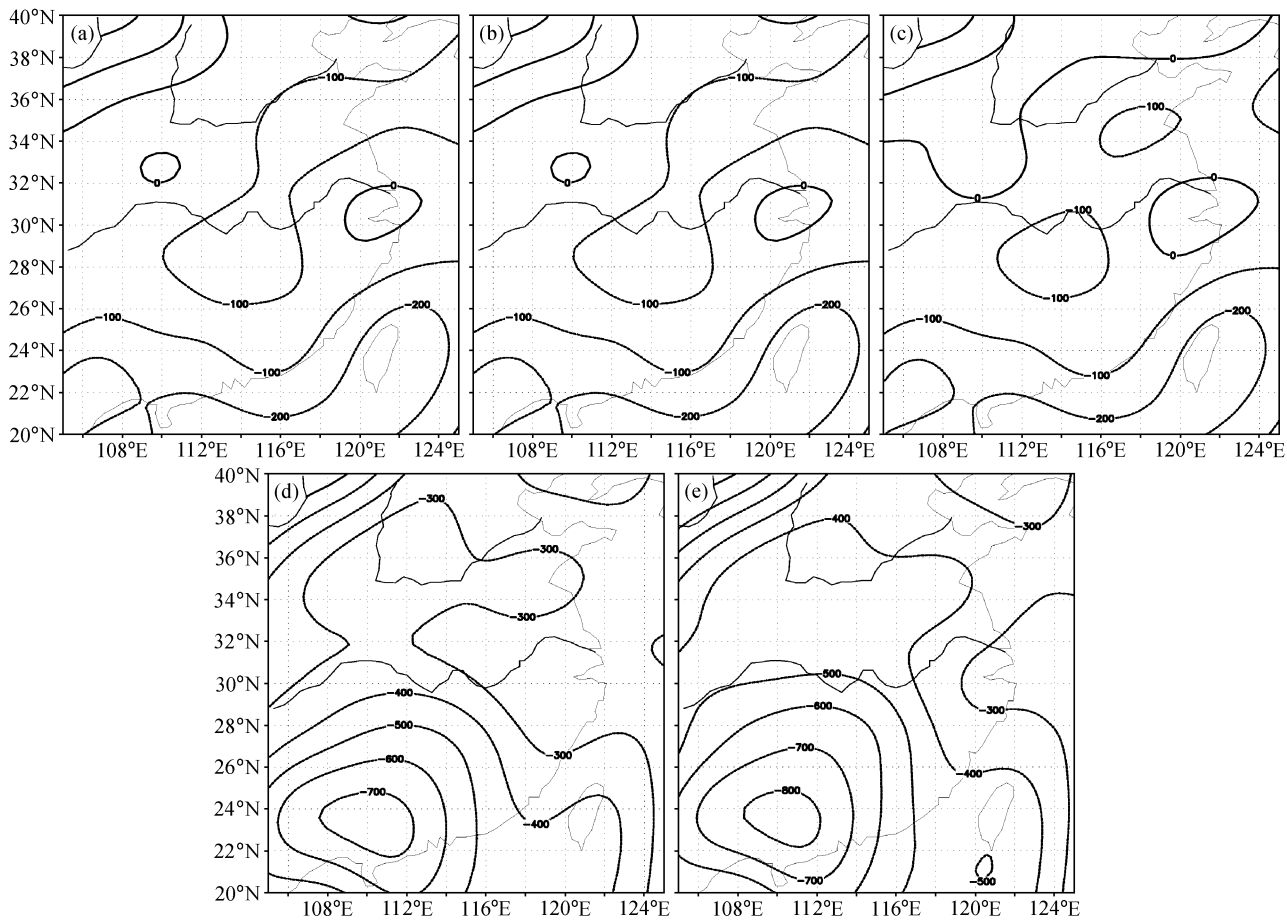


图 14 在 $\sigma = 0.9975$ 层的气压三维变分同化分析增量 (单位: Pa): (a) 试验 2; (b) 试验 6; (c) 试验 5; (d) 试验 3; (e) 试验 4
Fig. 14 Pressure increments (Pa) at $\sigma = 0.997$ from 3DVAR: (a) Expt 2; (b) Expt 6; (c) Expt 5; (d) Expt 3; (e) Expt 4

析场,同时对气压分析场也有较大影响,这可能也是地面温度资料同化到数值模式后对 24 小时降水影响最大的原因之一。地面湿度资料的同化分析对最低层气压分析场也有部分影响(图 14c),但相对地面温度资料同化分析对最低层气压分析场(图 14e)的影响更小。由此可见,地面温度资料同化分析可同时影响温度及气压场的分析,因此地面观测资料同化方案是否考虑模式与实际观测站地形高度差异势必影响地面资料同化效果。如何在地面观测资料同化中合理地考虑模式与实际观测站地形高度差异,合理、有效地将地面观测资料同化到中尺度数值模式。第二部分研究工作将给出合理的解决方案和试验结果。

本文主要研究模式地形和实际观测站地形高度差异对于地面观测资料同化效果的影响,由于 10 m 风场同化分析对 24 小时降水的影响较小,因此本文不对风场分析进行详细分析。

4 总结

本文采用郭永润等^[8]地面观测资料同化方案对发生在我国的一次降水过程进行了地面资料同化初步分析研究。研究表明:

(1) 郭永润等^[8]地面观测资料同化方案具有一定的同化地面观测资料的能力。将地面观测资料同化到数值模式能起到一定作用,与常规探空资料同时同化到数值模式能够部分改善数值结果。

(2) 地面观测资料(温度、湿度、风场、地面气压)中各物理量分别同化到数值模式都能影响 24 小时降水预报,但各物理量所起作用大小不同,其中影响最大的是温度,其次为湿度。地面温度、湿度资料同化分析过程中除影响自身的分析场,同时还影响气压场的分析,其中地面温度资料同化分析对气压场分析影响较大。

(3) 地面观测资料同化方案设计中有必要考虑

模式与实际观测站地形高度差异,适当考虑这种高度差异能取得较好的结果。我国的地形比较复杂,模式地形与实际观测站地形在许多地区存在较大差异,而郭永润等^[8]地面观测资料同化方案没有考虑模式与实际观测站地形高度差异,因此不能将该方案直接应用到我国,需要对其做一定修正,进行更深入的研究。

本文虽然将地面观测资料进行同化分析取得了一定成果,但还存在不足。是否需要建立新的同化算子以及如何解决地面观测资料同化中模式地形与实际观测站地形高度差异问题,有待作进一步的研究。同时,地面观测资料同化分析后 24 小时降水的模拟在(26°N, 112°E)附近偏离实况较大,其原因也有待进一步分析研究。第二部分将就这些问题展开研究。

致谢 国家气象中心郝民在本文工作完成过程中给予了宝贵建议,毕宝贵、王雨提供了降水实况加密资料,《大气科学》编委和不记名审稿专家对本文提出了宝贵意见和建议,在此深表感激。

参考文献 (References)

- [1] Turpeinen O M, Garand L, Benoit R, et al. Diabatic initialization of Canadian Regional Finite Element (RFE) model using satellite data. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 1391~1407
- [2] Zhang D L, Fritsch J M. A case study of the sensitivity of numerical model simulation of mesoscale convective systems to varying initial condition. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**: 2481~2431
- [3] 余兴, 王晓玲, 戴进, 等. 复杂地形边界层结构的数值模拟. 高原气象, 1997, **16** (4): 389~401
Yu X, Wang X-L, Dai J, et al. Numerical simulation of boundary layer structure within complex topography. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1997, **16** (4): 389~401
- [4] Miller P A, Benjamin S G. A system for the hourly assimilation of surface observations in mountainous and flat terrain. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120** (10): 2342~2359
- [5] Ruggiero F H, Sashegyi K D, Madala R V, et al. The use of surface observations in four-dimensional data assimilation using a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124** (5): 1018~1033
- [6] Giard D, Bazile E. Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variable in a global NWP model. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128** (4): 997~1015
- [7] 张昕. 变分资料同化与暴雨数值模拟及模式并行运算. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2002. 149pp
Zhang X. Variational data assimilation, numerical simulation of heavy rain and parallel computing in models. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. 149pp
- [8] Guo Y-R, Shin D-H, Lee J-H, et al. Application of the MM5 3DVAR system for a heavy rain case over the Korean Peninsula. Papers Presented at the Twelfth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop NCAR, June 24 - 25, 2002.
- [9] 丁伟钰, 万齐林, 闫敬华, 等. 对流天气系统自动站雨量资料同化对降水预报的影响. 大气科学, 2006, **30** (2): 317~326
Ding W Y, Wang Q L, Yan J H, et al. Variational assimilation of automatic weather stations rainfall in convective systems and its impact on rain forecast. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (2): 317~326
- [10] 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-453+STR, 2003, 68
- [11] Courtier P, Thépaut J-N, Hollingsworth A. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1994, **120**: 1367~1387
- [12] Parrish D F, Derber J C. The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**: 1747~1763
- [13] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech. Note, NCAR/TN-398+STR, 1994, 138
- [14] Zupanski M. A preconditioning algorithm for large-scale minimization problems. *Tellus*. 1993, **45A**: 478~492
- [15] Zupanski M, Mesinger F. Four-dimensional variational assimilation of precipitation data. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**: 1112~1127
- [16] Zou X, Kuo Y-H, Guo Y-R. Assimilation of atmospheric radio refractivity using a nonhydrostatic adjoint model. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **121**: 272~289
- [17] Zupanski M. A preconditioning algorithm for four-dimensional variational data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**: 2562~2573
- [18] Tsuyuki T. Variational data assimilation in tropic using precipitation data. Part III: Assimilation of SSM/I precipitation rates. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 1447~1463