

徐枝芳, 龚建东, 李泽椿. 2009. 复杂地形下地面观测资料同化 III. 两种解决模式地形与观测站地形高度差异方法的对比分析 [J]. 大气科学, 33 (6): 1137–1147. Xu Zhifang, Gong Jiandong, Li Zechun. 2009. A study of assimilation of surface observational data in complex terrain. Part III: Comparison analysis of two methods on solving the problem of elevation difference between model surface and observation sites [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1137–1147.

复杂地形下地面观测资料同化 III. 两种解决模式 地形与观测站地形高度差异方法的对比分析

徐枝芳 龚建东 李泽椿

国家气象中心, 北京 100081

摘 要 模式地形与观测站地形高度差异是地面资料同化方案设计中的一大难点。本文通过个例和单点试验对第 I 和第 II 部分 (徐枝芳等, 2007a, 2007b) 中涉及的两种解决模式地形与观测站地形高度差异的地面资料同化方法 (即增加温度地形代表性误差和温度订正方法) 进行对比分析, 并将这两种方法应用于 WRF_3DVAR, 进行 3 个月的连续数值试验。研究结果表明: 随着地形高度差异的增加, 采用增加观测误差方法得到的估计值向其它资料同化分析值 (背景场值) 靠近, 在一定的高度差异下则失去了同化分析地面资料的意义; 温度订正方法对温度递减率的取值较为敏感, 在有探空资料参与同化分析时, 温度递减率取值敏感性相对减弱。当采用的订正值较为准确时, 采用温度订正方法较增加观测误差方法能更好地处理两种地形高度差异, 地面资料信息应用更充分, 得到的估计值最有可能接近真实值。当模式地形与观测站地形高度差异较小 (小于 100 m) 时, 两种解决模式地形与观测站地形高度差异的方法达到的效果基本一致。单点及个例试验表明, 有探空资料等高质量观测参与同化分析时, 采用增加观测误差方法得到分析场更接近真实场。三个月连续试验也表明有探空资料参与同化分析时, 采用增加观测误差方法比温度订正法改进的郭永润同化方案 (Guo et al., 2002) 同化地面资料效果好, 且加入地面资料同化对所有量级降水预报都有所改善。当地面资料同化方案没处理好时, 加入地面资料同化的效果反而不如不加地面资料同化。

关键词 地面观测资料 同化分析 地形代表性误差 对比分析

文章编号 1006–9895 (2009) 06–1137–11

中图分类号 P413

文献标识码 A

A Study of Assimilation of Surface Observational Data in Complex Terrain Part III: Comparison Analysis of Two Methods on Solving the Problem of Elevation Difference between Model Surface and Observation Sites

XU Zhifang, GONG Jiandong, and LI Zechun

National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract Elevation difference between surface observation sites and numerical model surface is a big problem of Surface Observation Data Assimilation (SODA). In Part_I (Xu et al, 2007a), results have shown that the elevation difference between observation sites and numerical model surface can impact the results of SODA. And better results

收稿日期 2008–07–28, 2009–04–02 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40505021、40675059, 国际科技合作项目 2006DFA21530, 国家重点基础研究发展计划 2004CB418306, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200806003

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

can be obtained when surface observation data are assimilated into a numerical model with temperature observation reduced from actual station elevation to model terrain height. In Part II (Xu et al, 2007b), better results also can be obtained when surface observation data are assimilated into a numerical model with Terrain Error of Representativeness (TER), which is related to the elevation difference between model surface and observation sites. In this paper, the two methods to solve negative influence of the difference between observation station and model elevation are analyzed and compared, by making three-month experiments in WRF_3DVAR. One is that the TER is added into the surface observation error, another is that temperature observation is reduced, via the temperature lapse rate, from actual station elevation to model terrain height. Results show that, when the difference between observation station and model elevation increases to a certain value, effects of the former method are close to the analysis field of other data assimilation, while the latter method is more robust when the value of temperature lapse rate is accurate. The latter method is sensitive to the value of temperature lapse rate, and the sensitivity decreases when radiosonde data are also assimilated. The effects of the two methods are the same when the model surface is close to observation sites, while the former method is better when radiosonde data are also assimilated. The scheme of Guo Yongrun's surface data assimilation (Guo et al., 2002) with TER is the best scheme in this paper. The SODA scheme can improve the results of rainfall simulation. The surface data assimilation approach without consideration of the difference between observation station and model elevation is not suitable to be used.

Key words surface observation data, assimilation, terrain error of representativeness, comparison analysis

1 引言

变分同化分析经常被称作“最优”，但这是在一一定的假设前提下才成立的 (Daley, 1991; Ghil et al., 1997)。首先，进入同化系统的观测和背景场 (先验信息) 有误差，输出的分析结果质量相当依赖于这两者的误差。观测场和背景场误差的定义本身就是一个值得研究的科学问题。其次，尽管变分同化方法考虑了动力/物理过程，但在反向积分伴随模式时，这些过程已经被线性化，而实际上数值预报系统的误差是高度非线性。因此变分同化分析值达到最优时，统计观测误差与背景场误差协方差质量要高且必须满足无偏假定。由于地面观测资料本身的特点及地面观测站与模式地形一般都存在高度差异，地面资料同化技术的开发具有很大的挑战性，我国前期开展的研究工作主要集中在地面降水资料的同化 (张昕, 2002; 邵明轩等, 2006; 丁伟钰等, 2006)。关于地面资料其它要素的同化工作则相对较少 (张昕, 2002; 徐枝芳等, 2006, 2007a, 2007b)。

第 I 部分 (徐枝芳等, 2007a) 研究结果表明模式地形与观测站地形高度差异是地面观测资料同化方案设计中存在的一个比较难以解决的问题，而模式与实际观测站地形高度差异对地面观测资料同化效果有较大影响。第 II 部分 (徐枝芳等, 2007b)

提出在郭永润地面观测资料同化方案 (Guo et al., 2002) 的地面观测误差中增加地形代表性误差，解决地面观测资料同化中模式地形和观测站地形高度差异问题，其基本思想与 Lazarus et al. (2002) 客观分析复杂地形下的地面观测和探空观测资料时，模式地形和观测站地形高度差异问题的处理思想基本一致。Devenyi et al. (2003) 和 Benjamin et al. (2004a, 2004b) 通过采用局地递减率将地面观测气压、温度和湿度由观测站地形订正到模式地形高度的方法，解决地面观测资料同化中模式地形和观测站地形高度差异问题。这两种方法都能在一定程度上解决地面观测变分同化中模式地形与观测站地形高度差异问题，但也存在一定程度的不足。增加地形代表性误差方法不满足同化分析最优解时的无偏假定，而订正方法很难保证提供订正数值的准确，参与同化分析的数值与观测误差不相匹配，分析场也达不到最优。地面观测资料同化参与同化时，这两种方法哪种方法提供的分析场质量更有保障，更能适用于业务数值模式？本文针对这两种方法的特点进行对比分析，并将两种方法应用于 WRF (Weather Research and Forecasting)_3DVAR (3-Dimensional Variational data assimilation system)，进行 3 个月的数值对比试验。为更好的设计地面资料同化方案以及地面资料的实际应用提供一定的参考。

2 暴雨个例及数值试验

本文试验的暴雨个例及模式参数设置与第 II 部分(徐枝芳等, 2007b) 相同。暴雨个例为 2004 年 5 月 11 日 08 时~12 日 08 时(北京时, 下同), 在江淮、江南大部、华南西部和北部等地的部分地区出现的一次强降水过程, 其 24 小时降水实况见徐枝芳等(2007a)(图 2)。采用的中尺度数值试验模式 MM5 为一重区域, 试验区中心点取为(28.5°N, 114°E), 垂直方向共有 33 层。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, 结束时间为 2004 年 5 月 12 日 08 时。采用的基本试验资料为 2004 年 5 月 11 日 08 时~12 日 08 时每 6 小时一次的 T213 全球资料(背景场)、2004 年 5 月 11 日 08 时的全球探空资料(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_s)。使用的三维变分同化系统是 NCAR 的 MM5 三维变分同化系统(Barker et al., 2003)。

共设计了 6 个试验方案(表 1), 分为无探空资料(试验 1~3)和有探空资料(试验 4~6)参与同化分析两种情况。为了清楚了解两种方法的特点, 个例试验采用的增加地形代表性误差方法仅仅是改善地面温度观测误差, 而没有改变地面湿度观测误差。

2.1 24 小时降水结果分析

徐枝芳等(2007a)图 9 和徐枝芳等(2007b)图 4d 是试验 4~6 的 24 小时降水模拟结果。由这两组图对比分析发现, 试验 4 在(25°N, 112°E)附近偏离实况较大的降水, 在试验 5~6 中明显得到改善, 同时在(26°N~27°N, 110°E~112°E)附近, 试验 5~6 模拟的降水也较试验 4 有所增强, 更接近实况。由此可见, 在同化地面观测资料时, 考虑

了模式地形与观测站地形高度差异的同化方案比没有考虑模式地形与观测站地形高度差异同化方案提供的初始场模拟的 24 小时降水结果好。采用温度订正方法和增加地形代表性误差方法都能改善地面资料同化方案中模式地形与观测站地形高度差异问题。

2.2 分析增量分析

将研究区域分为四个区: A 区(30°N~40°N, 105°E~116°E)、B 区(30°N~40°N, 116°N~125°E)、C 区(20°N~30°N, 105°E~116°E)、D 区(20°N~30°N, 116°E~125°E)。图 1 为试验 1~3 模式最低层的温度分析增量分布。由图 1 可见, 在无探空资料参与同化分析的三个试验中都存在三个分析增量高值中心(大于 3 K), 且三个试验在 C 区的温度分析增量最大等值线分别为 12 K、10 K、10 K。徐枝芳等(2007a)图 11 与徐枝芳等(2007b)图 3 为有探空资料参加同化分析的试验 4、试验 5 和试验 6 的温度分析增量图, 最大温度分析增量中心在 C 区, 与无探空资料参加同化分析试验 1~3 的最大温度分析增量中心所在区域相同, 但 C 区分析增量最大等值线分别为 5.5 K、4 K、5 K, 仅到无探空资料参与同化分析试验中温度分析增量最大值的一半。由此可见, 在地面资料参与同化分析时, 有无探空资料参与同化分析对分析场的影响非常大。

由图 2 可见, 试验 2 与试验 1 的温度分析增量差值大值主要在 A 和 C 区, A 区差值最小值小于-1.5 K, C 区差值最小等值线为-2.0 K; 试验 3 相对试验 1 的温度分析增量变化大值主要在 A、C 以及 D 区, A 区差值小于-2.0 K, C 和 D 区差值最小等值为-2.0 K; 试验 2 与试验 3 的温度分析增量差异较大的区是 A、C 区北和 D 区, A 和 C 区差值最大等值线为 1.0 K, D 区差值最大等值线为 1.5 K。由此可见, 在模式地形与观测站地形高度差异[徐枝芳等(2007a)图 4]较大的地方(A、C 和 D 区), 增加地形代表性误差(试验 2)和温度订正方法(试验 3)试验的温度分析增量较试验 1 小, 而在模式地形与观测站地形高度差异较小的 B 区域, 试验 2 和试验 3 与试验 1 的温度分析差别较小。增加地形代表性误差(试验 2)与温度订正方法(试验 3)试验的温度分析增量差值主要在 A、C 和 D。

试验 5 和试验 6 相对试验 4 的温度分析增量变化(图 3)在 A 区和 B 区比较接近, A 区最小差值

表 1 试验方案设计
Table 1 Experimental schemes

试验	探空资料	地面观测资料	增加地形代表性 误差方法	温度订正方法
1	否	是	否	否
2	否	是	是	否
3	否	是	否	是
4	是	是	否	否
5	是	是	是	否
6	是	是	否	是

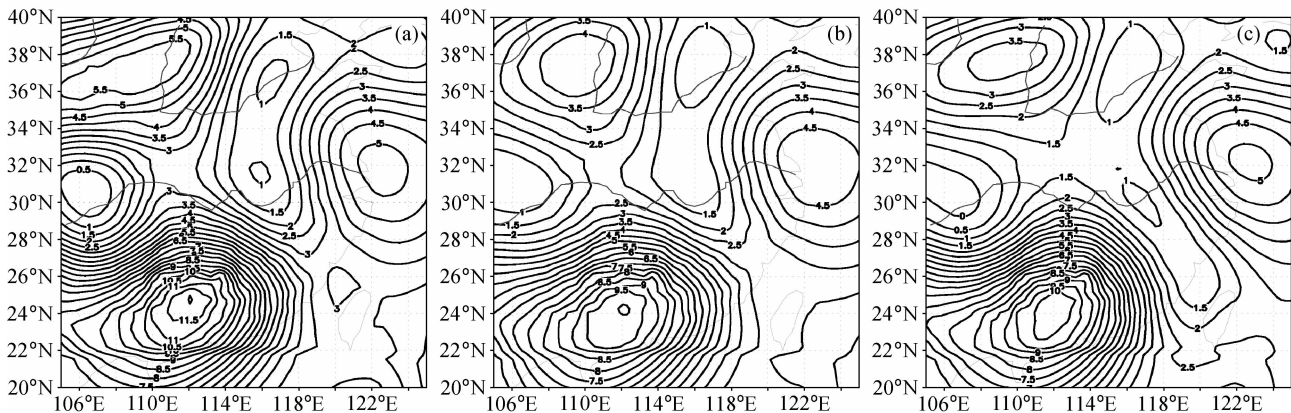


图1 试验1~3温度分析增量分布图(单位: K): (a) 试验1; (b) 试验2; (c) 试验3

Fig. 1 Analysis increments of temperature (K) from (a) Expt 1, (b) Expt 2, and (c) Expt 3

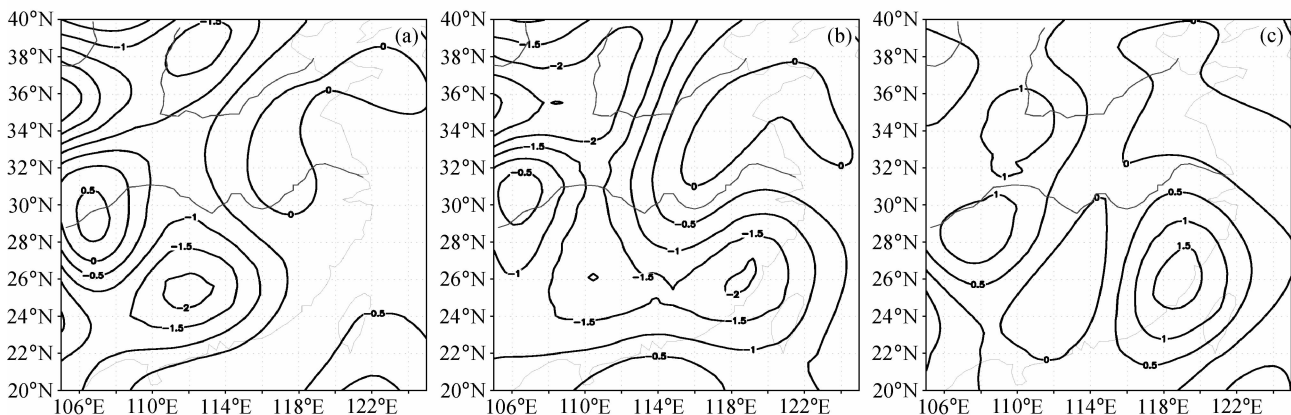


图2 温度分析增量差值(单位: K): (a) 试验2与试验1的差值; (b) 试验3与试验1的差值; (c) 试验2与试验3的差值

Fig. 2 Differences of analysis increments of temperature (K): (a) Difference between Expt 2 and Expt 1; (b) difference between Expt 3 and Expt 1; (c) difference between Expt 2 and Expt 3

等值线为 -1.0 K, B区闭合差值等值线为 0 K; C区分析增量试验5较试验6大, 两者差值最大等值线为 1.0 K; 试验5与试验6分析增量在D区有一些细小差别。总体而言, 试验5与试验4分析增量变化大区主要在A和C区, 试验6与试验4分析增量变化大区主要在A区, 试验5、6与试验4在B区的差别最小, 试验5与试验6分析增量变化大区主要在C区。

由上分析可见, 当模式地形与观测站地形高度差异较小(小于 100 m)时, 两种解决模式地形与观测站地形高度差异的方法达到的效果基本一致; 模式地形与观测站地形高度差异较大(大于 100 m)时, 有无探空资料参与同化分析对地面资料同化分析后的分析场影响很大, 两种方法在有探空资料参与同化分析时取得的分析结果表现也不一致, 增

加地形代表性误差和订正方法都能适当改善模式地形与观测站地形高度差异对分析场的影响, 但改善的温度值与模式地形和观测站地形高度差异大小相关, 在最大温度分析增量值区的温度变化不超过 2.5 K(见图2和图3)。在有探空资料参与同化分析时, 增加地形代表性误差试验(试验5)和温度订正试验(试验6)分析增量最大差别区在C区; 无探空资料参与同化分析时, 增加地形代表性误差试验(试验2)和温度订正试验(试验3)分析增量最大差别区在A区、C区北以及D区。

对同化分析时刻地面观测温度与模式 2 m温度的差值叠加模式地形与观测站地形高度差异进行分析(图4), 发现同化分析时刻地面观测温度与模式 2 m温度的差值大值区(相邻三个或以上站点温度差值超过 7 K)有两个, 一个在A区北部, 该区

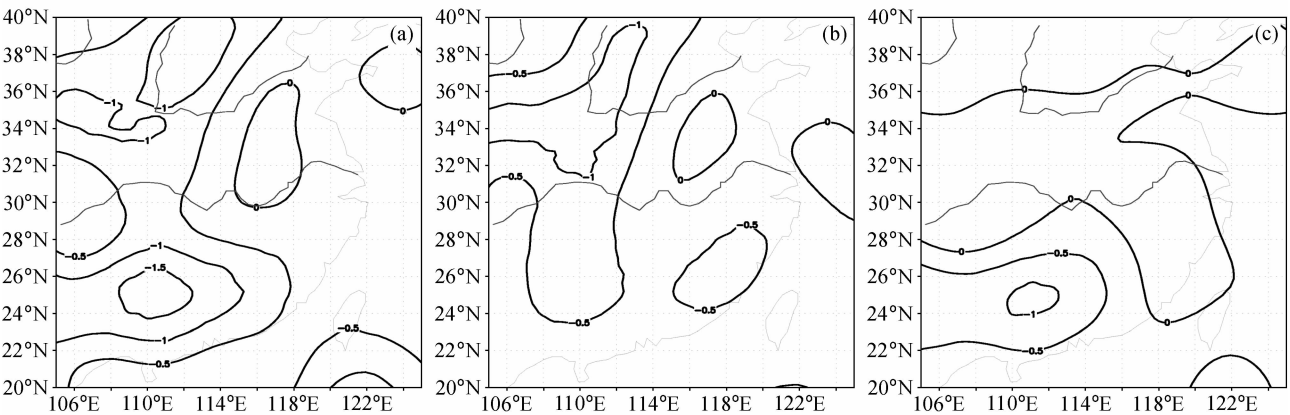


图3 温度分析增量差值(单位: K): (a) 试验5与试验4的差值; (b) 试验6与试验4的差值; (c) 试验5与试验6的差值

Fig. 3 Differences of analysis increments of temperature (K): (a) Difference between Expt 5 and Expt 4; (b) difference between Expt 6 and Expt 4; (c) difference between Expt 5 and Expt 6

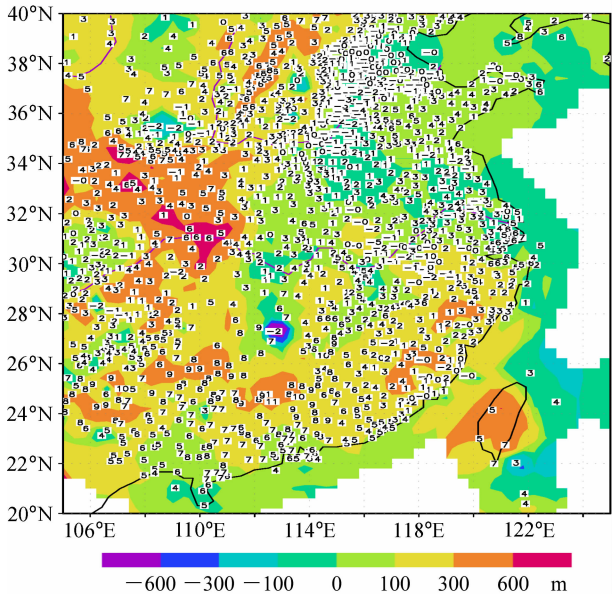


图4 地面观测温度与模式2 m温度的差值(单位: K)。彩色阴影为模式地形与观测站地形高度差异

Fig. 4 Difference between observed surface temperature and simulated 2-m temperature (units: K). The difference of terrain elevation between model surface and observation sites is color shaded

模式地形与观测站地形高度差异不超过 400 m, 另一个大值区在 C 区北纬 28°N 以南, 该区大部分地面观测温度与模式 2 m 温度差值超过 7 K, 且有两个站的地面温度与模式 2 m 温度差值超过 10 K (这两个站模式地形与观测站地形高度差异分别为 442 m 和 376 m, 当温度递减率取值为气候均值或者探空资料求取的均值时, 这两站的温度差值就与周围其它站的差值差不多, 因此这两站观测值不存

在质量问题。)。这两个温度差值高值区与采用增加观测误差方法时温度分析增量变化大区一致(见图 3a、2a), 而采用订正方法时温度分析增量变化大区对应的是模式地形与观测站地形高度差异较大区。试验 5 和试验 6 分析增量最大差别区即是地面温度与模式 2 m 温度差值较大, 观测温度递减率[徐枝芳等, 2007b (图 5)]与气候值 0.65 K/100 m 接近的地区; 试验 2 与试验 3 分析增量最大差别区则主要在模式地形高于观测地形 100 m 以上, 观测温度递减率[徐枝芳等, 2007b (图 5)]与气候值 0.65 K/100 m 差异较大的地区。由此可见, 有无探空资料参与同化分析, 两种不同方法的试验引起的温度分析场变化是不同的, 下面利用单点试验做进一步分析。

3 单点分析

本文采用的单点分析方法与第 II 部分(徐枝芳等, 2007b)一致, 仅对地面温度同化进行分析, 且只讨论温度随高度递减的情况。单点分析分有、无探空资料参与同化分析两种情况, 假定分析点背景误差为 4℃, 探空观测值为 28℃, 探空观测误差为 2℃, 地面观测误差中仪器误差和代表性误差之和为 2℃, 地形高度差异代表性误差为两种地形高度差异乘以温度递减率 LR 的总和, 温度订正值同样为两种地形高度差异乘以温度递减率 LR 的总和。在第 II 部分(徐枝芳等, 2007b)已经对有探空资料参与同化分析情况下增加地形代表性误差的结果进行了分析, 下面首先对有探空资料参与同化分析

情况下温度订正法结果进行分析,随后对增加地形代表性误差与温度订正方法在有、无探空资料参与同化分析的差异进行对比分析。

由图 5 可见,在同一温度递减率下,随着观测站与模式地形高度差异增大,温度订正值逐渐增大,温度估计值随模式地形与观测站地形高度差异增大而逐渐减小,不同地面温度参与同化分析的估计值随地形高度差异变化曲线保持平行。当温度递减率取值基本准确时(即地面观测温度加上温度递减率乘以地形高度差异的值为探空观测值),不同地面观测温度参与同化的估计值与仅采用探空观测值和背景值的估计值基本一致。在同一温度、不同温度递减率下(图 6),采用温度订正方法得到的估计值随着地形高度差异的增大呈发散状,即随着高度差异的增大不同温度递减率下的估计值之间的差值逐渐增大,当两种地形高度差异达到 400 m 以上时,采用温度递减率 $0.8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 与 $0.2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$

的温度估计值相差达 1°C 以上。由分析可见,采用温度订正方法能解决地面观测温度同化中模式地形与观测站地形高度差异问题,但当模式地形与观测站地形高度差异达到一定数值时,订正方法中温度递减率的取值就显得非常敏感。

由徐枝芳等(2007b)图 1、图 2 可知,在有探空资料参与同化分析时,增加地形代表性误差方法时的估计值逐渐向无地面资料参与分析的估计值靠近。在无探空资料参与同化分析时(图略),两种方法下的估计值变化趋势与有探空资料参与同化分析时是一致的,增加地形代表性误差方法的估计值逐渐向无地面资料参与分析的估计值(模式值)靠近,不同地面温度值参与分析的估计值之间的差值随高度差异增加逐渐减小;温度订正方法的估计值是倾斜的直线,不同地面温度值参与分析的估计值之间的差值不变。

下面就这两种方法的差异作进一步的对比分析。

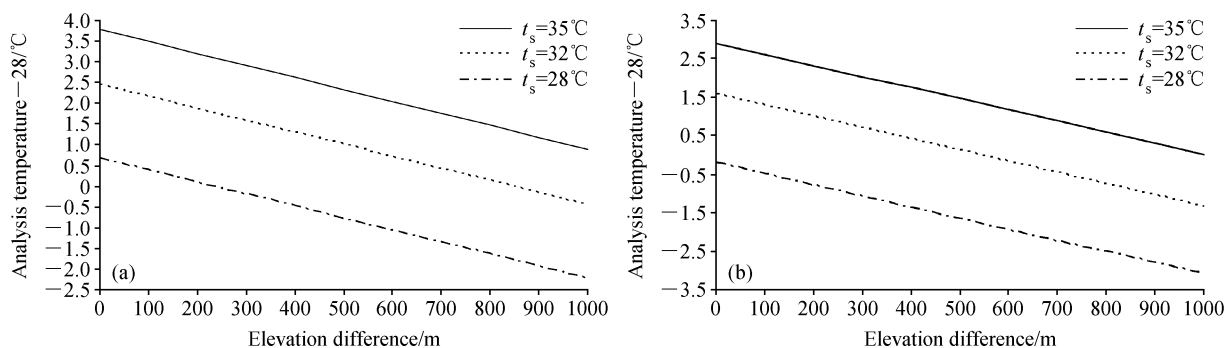


图 5 相同温度递减率($\text{LR}=0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)条件下单点估计值随模式地形和观测站地形高度差异的变化:(a) $t_m=34^{\circ}\text{C}$; (b) $t_m=26^{\circ}\text{C}$ 。
 t_s 指地面温度观测值; t_m 指模式最低层的背景温度值

Fig. 5 Single point estimation change with elevation difference between model surface and observation sites at the same temperature lapse rate ($\text{LR}=0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$): (a) $t_m=34^{\circ}\text{C}$; (b) $t_m=26^{\circ}\text{C}$. t_s : surface observation temperature, t_m : the lowest level model temperature, LR: temperature lapse rate

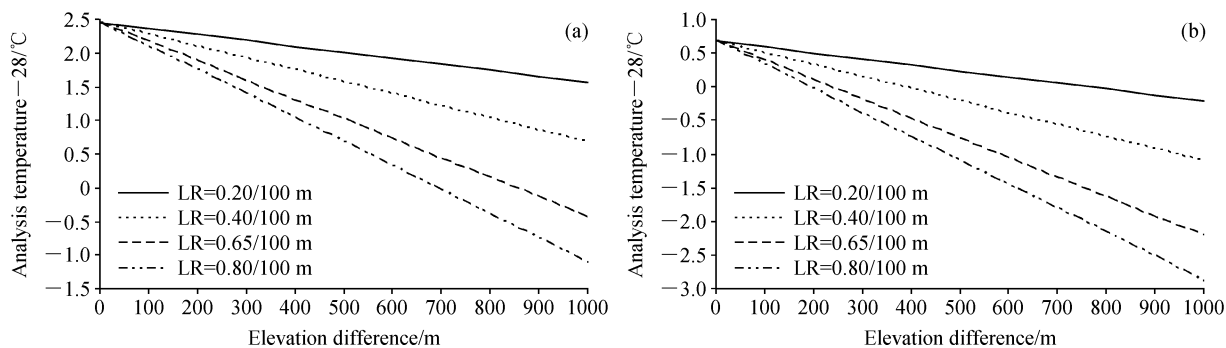


图 6 不同温度递减率、单点估计值随模式地形和观测站地形高度差异的变化($t_s=32^{\circ}\text{C}$): (a) $t_m=34^{\circ}\text{C}$; (b) $t_m=26^{\circ}\text{C}$

Fig. 6 Single point estimation change with elevation difference between model surface and observation sites at different temperature lapse rates ($t_s=32^{\circ}\text{C}$): (a) $t_m=34^{\circ}\text{C}$; (b) $t_m=26^{\circ}\text{C}$

假定温度随高度递减 LR 的真值分别为 $0.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 和 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 探空观测在模式最低层面上, 参与分析的地面温度值为探空观测值 (28°C) 加上温度递减率 LR 乘以地形高度差异 ΔH (即 $28^{\circ}\text{C} + \text{LR} \times \Delta H$), 温度估计分析时采用的温度递减率为 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 即一种情况下温度递减真值与分析采用的气候平均值相差 $0.25^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 而另一种情况则是温度递减值与分析采用递减率的一致, 不存在差异。由图 7 可见, 在有探空资料参与同化分析时, 两种温度递减率下, 采用增加观测误差分析方法得到的两组估计值随高度差异增加变化很小, 与无地面资料参与分析的估计值较为接近; 而温度订正方法得到的两组估计值则随着高度差异增加差异增大, 当温度递减真值为 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 时, 温度估计值随高度差异无变化, 与无地面资料参与分析的估计值较为接近; 对两种高度差异不做任何处理得到的两组估计值随着高度差异增加差异增大, 且两种温度递减率下的估计值与无地面资料参与分析的估计值差异随高度差异增大而增大。由此可见, 当有探空资料参与同化分析, 而不能准确给出温度递减率时, 在地面资料同化方案中增加观测误差方法得到的估计值最有可能接近真实值。

在无探空资料参与同化分析时 (见图 8), 两种温度递减率下, 采用增加观测误差分析方法得到的两组估计值随高度差异增加差异变化很小, 逐步向无地面资料参与分析的估计值 (模式值) 接近, 当模式值接近真值时, 则该方法得到的估计值也就接

近真值, 反之, 则估计值随高度差异增加偏离真值越来越远; 而温度订正方法得到的估计值则随着高度差异增加差异增大, 当温度递减真值为 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 时, 温度估计值随高度差异无变化, 与仅探空资料参与同化分析的估计值一致; 对两种高度差异不做任何处理得到的两组估计值随着高度差异增加差异增大, 且两种温度递减率下的估计值与无地面资料参与分析的估计值差异随高度差异增大而增大, 在模式值偏离真值较大且高度差异较小时, 该方案得到的估计值较增加观测误差方法得到的估计值更接近真值。由此可见, 当仅仅地面资料参与同化分析时, 两种地形高度差异较大情况下, 增加观测误差方法得到的估计值偏离真值较温度订正方法大, 尤其是背景值偏离真值较大的情况下。

由上分析可知, 当模式地形与观测站地形高度差异较小时, 两种解决模式地形与观测站地形高度差异的方法达到的效果基本一致; 随着地形高度差异的增加, 采用增加观测误差方法得到的估计值向其它资料同化分析值 (背景场值) 靠近, 当有质量较高资料 (如探空资料) 参与同化分析, 在地面资料同化方案中采用增加观测误差方法较温度订正方法能更好地处理两种地形高度差异, 得到的估计值最有可能接近真实值。当采用的订正值较为准确时, 采用温度订正方法较增加观测误差方法能更好地处理两种地形高度差异, 地面资料信息应用更充分, 得到的估计值最有可能接近真实值。当模式地形与观测站地形高度差异较大时, 温度订正方法较

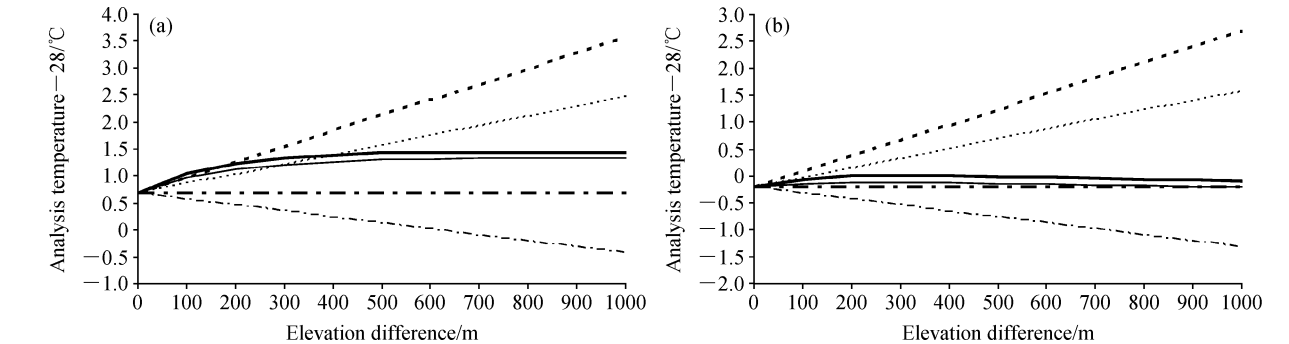


图 7 探空资料、地面资料参与同化时单点估计值随模式地形和观测站地形高度差异的变化 ($t_s = 28^{\circ}\text{C} + \text{LR} \times \Delta H$): (a) $t_m = 34^{\circ}\text{C}$; (b) $t_m = 26^{\circ}\text{C}$ 。实线: 采用增加观测误差方法; 点划线: 采用温度订正方法; 点线: 控制试验。细线: LR 值为 $0.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 粗线: LR 值为 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$

Fig. 7 While sonde observation data and surface observation data are assimilated, single point estimation change with elevation difference (ΔH) between model surface and observation sites: (a) $t_m = 34^{\circ}\text{C}$; (b) $t_m = 26^{\circ}\text{C}$. $t_s = 28^{\circ}\text{C} + \text{LR} \times \Delta H$, solid lines represent the method adding surface observation error, dash-dotted lines represent the method that temperature observation is reduced by temperature lapse rate, dotted lines are for control experiment. Thin lines: $\text{LR} = 0.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, Thick lines: $\text{LR} = 0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$

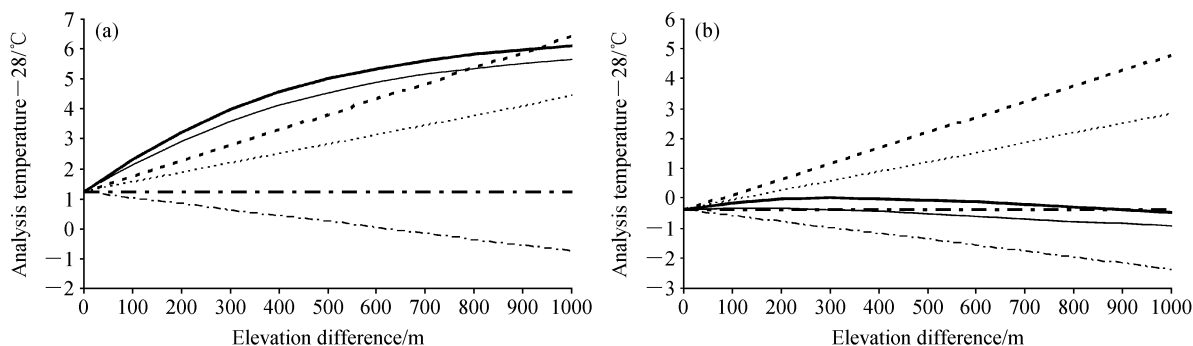


图8 同图7, 但为无探空资料

Fig. 8 Same as Fig. 7, but no sonde observation data are assimilated

增加观测误差法对温度递减率的取值敏感,在有探空资料参与同化分析时,温度递减率取值敏感性相对减弱。仅仅地面资料参与同化分析时,当模式预报(背景值)较接近实况(真实值),在地面资料同化方案中采用增加观测误差方法较温度订正方法能更好地处理两种地形高度差异;反之,在地面资料同化方案中则是采用温度订正方法较增加观测误差方法能更好地处理两种地形高度差异,得到的估计值最有可能接近真实值。

由此可知,引起试验5和试验6分析增量最大差别区与试验2与试验3分析增量最大差别区不同的原因主要是:采用的气候温度递减率与实际观测不同,两种地面资料同化方法对温度递减率的敏感度不同。当地形高度差异较大,且有质量较高资料(如探空资料)参与同化分析,在地面资料同化方案中采用增加观测误差方法较温度订正方法得到的分析场最有可能接近真实场。

4 3个月连续数值试验结果分析

采用的数值模式为WRF2.0(William et al., 2005),模式中心取为(37°N, 102°E),水平分辨率为20 km,格点数为250×210;模式在垂直分层为35层,顶层气压为50 hPa;模式采用的是欧拉质量坐标。模式试验所采用的物理参数化方案分别为:RRTm长波辐射方案、Dudhia短波辐射方案、MYJ Monin-Obukhov近地面层方案、Noah陆面过程方案、Eta Mellor-Yamada-Janjic TKE(湍流动能)边界层方案、Betts-Miller-Janjic积云参数化方案、微物理过程方案为Ferrier(new Eta)微物理方案(水汽、云水)。

试验时间为2005年7月1日~9月30日,所

有试验起始时间为08时(北京时,下同),积分24小时,结束时间为次日08时。采用的基本试验资料为每6小时一次的T213全球预报场资料(背景场)、08时的全球探空资料(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_s)。使用的三维变分同化系统是WRF_3DVAR同化系统。共4组试验:(1)试验1:仅探空资料参与同化分析。除这一组试验外,其它几组试验地面观测资料均参与同化分析。(2)试验2:在试验1的基础上采用没有进行任何改进的郭永润方案(Guo et al., 2002)同化分析地面观测资料;(3)试验3:在试验1的基础上采用徐枝芳等(2007b)改进的郭永润方案(Guo et al., 2002)同化分析地面观测资料;(4)试验4:采用温度订正方法改进的郭永润方案(Guo et al., 2002)同化分析地面观测资料。

采用的检验方法是国家气象中心预报质量评分系统的降水预报累加检验方案,按累加降水检验方案,把降水分为小雨($\geq 0.1\text{mm}$)、中雨($\geq 10\text{mm}$)、大雨($\geq 25\text{mm}$)、暴雨($\geq 50\text{mm}$)及特大暴雨($\geq 100\text{mm}$)五级,同时根据全国降水特点将全国划分8个区域进行统计检验。本文主要分析7~9月四组试验全国以及华北地区TS评分及预报偏差(B)情况。其中TS评分是用来衡量降水预报对观测的降水能够预报有多么准确的指数,TS最高分为1,最低分为0。如果评分较高,说明对降水发生的预报较好,但对降水气候概率较敏感,降水较多的地区评分较高,降水概率差别较大地区的降水TS评分不具有可比性。 B 值一般指预报概率与实际降水概率的比值或预报区域与实际降水区域的比值,为1时最好,大于1表示预报的频率高于实际频率或预报的降水面积大于实际的降水面积,

反之亦然。

由图 9 可见, 所有试验均是小雨预报最好, TS 评分值最高, B 值接近 1。在所有地面资料参与同化分析的三组试验中, 小雨、大雨和暴雨 TS 评分值都有所提高, 试验 3 的 B 值最靠近 1; 只有试验 3 中雨的 TS 评分值接近试验 1, 试验 2 和试验 4 的中雨的 TS 评分值略低于试验 1。特大暴雨情况则是加了地面资料同化的三组试验 TS 评分略低于试验 1。由上分析可知, 有地面资料参与同化分析主要改善的是大雨和暴雨预报, 对小雨预报有一点贡献, 而对特大暴雨预报则是负效果。其中采用增加观测误差方法改进的郭永润同化方案 (Guo et al., 2002) 同化地面资料效果最好。

对华北地区的统计检验结果分析 (图 10) 可发现, 在所有地面资料参与同化分析的三组试验中, 仍是采用增加观测误差方法改进的郭永润同化方案 (Guo et al., 2002) 同化地面资料 (试验 3) 改进效果最好, 小雨、大雨和暴雨 TS 评分值都有所提高, B 值与无地面资料参与同化分析的试验 (试验 1)

接近。而采用温度订正法改进的郭永润同化方案 (Guo et al., 2002) 同化地面资料的试验 4 效果最差, 中雨、大雨、暴雨的 TS 评分值低于无地面资料参与同化分析的试验 1。

从以上 3 个月的连续试验结果可知, 在有探空资料参与同化分析时, 采用增加观测误差方法比温度订正法改进的郭永润同化方案 (Guo et al., 2002) 同化地面资料效果好, 并且加入地面资料同化对小雨、大雨、暴雨都有所改善。其原因主要有两方面: (1) 增加观测误差方法能对温度和湿度的观测误差同时进行订正 (徐枝芳等, 2007b), 而温度订正法则不能对湿度场进行有效订正; (2) 单点和个例试验表明当有质量较高资料 (探空资料) 参与同化分析, 在地面资料同化方案中采用增加观测误差方法较温度订正方法能更好地处理两种地形高度差异, 得到的分析场最可能接近真实场。3 个月的连续试验均为 08 时分析, 然后进行 24 小时预报, 同化分析时探空资料等高质量资料同时参与同化分析, 因此采用增加观测误差方法较温度订正方

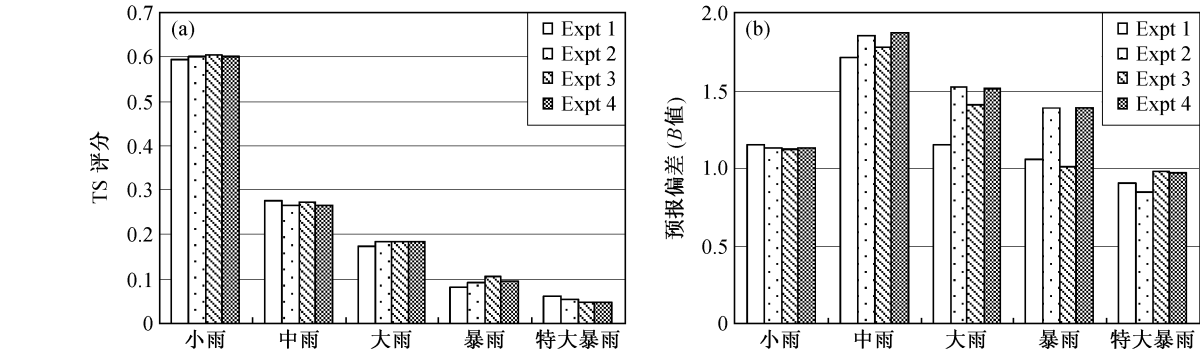


图 9 2005 年 7 月 1 日~9 月 30 日各试验全国地区 24 小时模拟降水累加检验: (a) TS 评分; (b) 预报偏差
Fig. 9 Accumulated 24 h simulated rainfall verification of different experiments in the whole China region from 1 Jul to 30 Sep, 2005: (a) TS score; (b) forecast bias

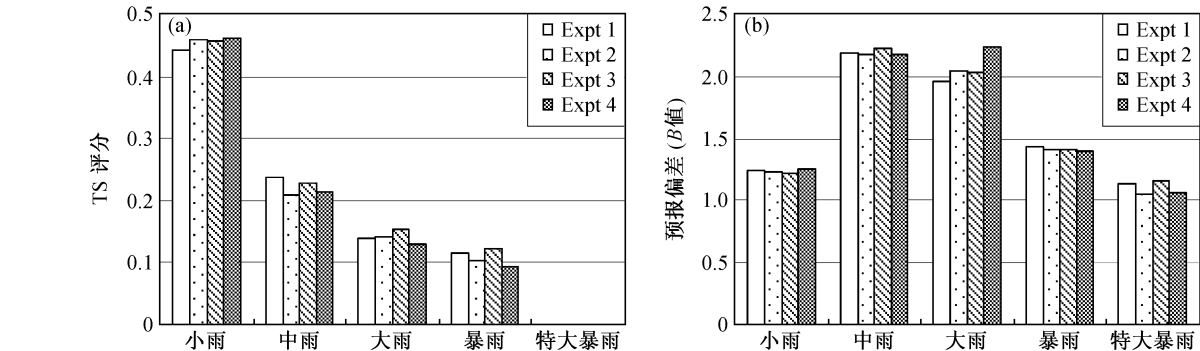


图 10 同图 9, 但为华北地区
Fig. 10 Same as Fig. 9, except for North China region

法得到的分析场接近真实场。由图 9 和图 10 也发现当地面资料同化方案没处理好时,加入地面资料同化不如不加地面资料同化。

5 结论与讨论

本文通过个例以及单点试验,对在观测误差中增加地形代表性误差与对温度进行订正两种解决模式地形与观测站地形高度差异的方法进行对比分析,并将这两种方法应用于 WRF_3DVAR,进行 3 个月的批量数值试验。研究结果表明:

(1) 在模式地形与观测站地形高度差异较小时,两种解决模式地形与观测站地形高度差异的方法达到的效果基本一致;在模式地形与观测站地形高度差异较大的情况下,增加地形代表性误差和订正方法都能适当改善模式地形与观测站地形高度差异对分析场的影响,但改善的温度值大小不一致。

(2) 有无探空资料参与同化分析对地面同化分析后的分析场影响很大,两种方法在有探空资料参与同化分析取得的分析结果表现也不一致。有探空资料参与同化分析时,增加地形代表性误差试验和温度订正试验分析增量最大差别区在地面温度与模式 2 m 温度差值最大区。无探空资料参与同化分析时,增加地形代表性误差试验(第 2 节试验 2)和温度订正试验(第 2 节试验 3)分析增量最大差别区主要在模式地形高于观测地形 100 m 以上,观测温度递减率[徐枝芳等, 2007b (图 5)]与气候值 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 差异较大的地区。

(3) 随着地形高度差异的增加,采用增加观测误差方法得到的估计值向其它资料同化分析值(背景场值)靠近,当有质量较高资料(如探空资料)参与同化分析,在地面资料同化方案中采用增加观测误差方法较温度订正方法能更好地处理两种地形高度差异,得到的估计值最有可能接近真实值。

(4) 当模式地形与观测站地形高度差异较大时,温度订正方法较增加观测误差法对温度递减率的取值敏感,在有探空资料参与同化分析时,温度递减率取值敏感性相对减弱。当采用的订正值较为准确时,采用温度订正方法较增加观测误差方法能更好地处理两种地形高度差异,地面资料信息应用更充分,得到的估计值最有可能接近真实值。

(5) 仅仅地面资料参与同化分析时,当模式预报(背景值)较接近实况(真实值),在地面资料同

化方案中采用增加观测误差方法较温度订正方法能更好地处理两种地形高度差异;反之,在地面资料同化方案中则是采用温度订正方法较增加观测误差方法能更好地处理两种地形高度差异,得到的估计值最有可能接近真实值。

(6) 有探空资料参与同化分析时,采用增加观测误差方法比温度订正法改进的郭永润同化方案(Guo et al., 2002)同化地面资料效果好,且加入地面资料同化对小雨、大雨、暴雨都有所改善。当地面资料同化方案没处理好时,加入地面资料同化的效果反而不如不加地面资料同化。

(7) 由于地面观测资料为二维资料,当地面观测资料质量控制不够好时,仅仅同化地面观测资料得到的分析场就会不理想,因此需要加强地面观测资料质量控制,与其它(如雷达、卫星等非常规资料和常规资料)三维场或高空资料相配合进行同化分析。

致谢 《大气科学》编委和不记名审稿专家对本文修改提出了宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- Barker D M, Huang W, Guo Y-R, et al. 2003. A three-dimensional variational (3DVAR) data assimilation system for use with MM5 [R]. NCAR Tech Note, NCAR/TN-453+STR, 68pp.
- Benjamin S G, Grell G A, Brown J M, et al. 2004a. Mesoscale weather prediction with the RUC hybrid isentropic-terrain-following coordinate model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132: 473-494.
- Benjamin S G, Dévényi D, Weygandt S S, et al. 2004b. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132: 495-518.
- Daley R. 1991. *Atmospheric Data Analysis* [M]. Cambridge University Press, 457pp.
- Devényi D, Benjamin S G. 2003. A variational assimilation technique in a hybrid isentropic-sigma coordinate [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 82: 245-257.
- 丁伟钰, 万齐林, 闫敬华, 等. 2006. 对流天气系统自动站雨量资料同化对降雨预报的影响 [J]. *大气科学*, 30 (2): 317-326.
- Ding Weiyu, Wan Qilin, Yan Jinghua, et al. 2006. Variational assimilation of automatic weather stations rainfall in convective systems and its impact on rain forecast [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (2): 317-326.
- Ghil M, Ide K, Bennett A, et al. 1997. *Data Assimilation in Meteorology and Oceanography: Theory and Practice* [M]. The Meteorological Society of Japan, 496pp.
- Guo Y-R, Shin D-H, Lee J-H, et al. 2002. Application of the MM5 3DVAR system for a heavy rain case over the Korean Peninsula

- [C]. Papers Presented at the Twelfth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, NCAR, June 24 - 25.
- Lazarus S M, Ciliberti C M, Horel J D. 2002. Near-real-time application of a mesoscale analysis system to complex terrain [J]. *Weather and Forecasting*, 17: 971 - 1000.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2005. A description of the advanced research WRF Version 2 [R]. NCAR Tech. Note NCAR/ TN-468+STR, 88
- 邵明轩, 陈敏, 陶祖钰, 等. 2006. 降水量的直接同化对初始场的影响 [J]. *大气科学*, 30 (2): 268 - 276. Shao Mingxuan, Chen Min, Tao Zuyu, et al. 2006. Effect of direct assimilation of precipitation on initial field [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (2): 268 - 276.
- 徐枝芳, 龚建东, 王建捷, 等. 2006. 地面观测资料同化初步研究 [J]. *应用气象学报*, 17: 1 - 10. Xu Z F, Gong J D, Wang J J, et al. 2006. Preliminary study on surface observational data assimilation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17: 1 - 10.
- 徐枝芳, 龚建东, 王建捷, 等. 2007a. 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*, 31: 222 - 232. Xu Z F, Gong J D, Wang J J, et al. 2007a. A study of assimilation of surface observational data in complex terrain. Part I: Influence of the elevation different between model surface and observation site. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 31: 222 - 232.
- 徐枝芳, 龚建东, 王建捷, 等. 2007b. 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*, 31: 449 - 458. Xu Z F, Gong J D, Wang J J, et al. 2007b. A study of assimilation of surface observational data in complex terrain. Part II: Representative error of the elevation difference between model surface and observation site [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 31: 449 - 458.
- 张昕. 2002. 变分资料同化与暴雨数值模拟及模式并行运算 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 149pp. Zhang X. 2002. Variational data assimilation, numerical simulation of heavy rain and parallel computing in models [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 149pp.