

徐道生, 邵爱梅, 邱崇践. 2011. SVD-En3DVar 方法同化多普勒雷达速度观测资料 I. 模拟资料试验 [J]. 大气科学, 35 (4): 753-766. Xu Daosheng, Shao Aimei, Qiu Chongjian, 2011. Assimilation of Doppler radar velocity observations with SVD-En3DVar method. Part I: Simulated data experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 753-766.

SVD-En3DVar 方法同化多普勒雷达速度观测资料 I. 模拟资料试验

徐道生 邵爱梅 邱崇践

半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

摘 要 利用 WRF 模式及模式模拟的资料, 开展了利用 SVD-En3DVar (基于集合和 SVD 技术的三维变分同化方法) 方法同化雷达径向速度资料的试验。由于雷达观测经常出现大面积空缺, 同化时引入了一种局地化方法避免远距离虚假相关的影响。试验着重研究了不同的初始扰动样本产生方法以及不同的样本积分时间对同化结果的影响。提出了一种为预报集合提供初始扰动场的新方法, 这一方法将温度和比湿的伪随机扰动场当作观测增量, 通过 3DVar (three-dimensional variational technique) 系统生成所有变量的初始扰动场。试验表明, 用这种方法给出的初始扰动样本各个变量间有较好的协调性, 积分后扰动不会快速衰减, 可以减少模式调整的时间, 达到缩短同化循环时间窗的目的。同化雷达径向风资料后对 12 小时内的温度, 湿度和水平风的预报都有所改进, 对降水的预报也有一定改进。

关键词 多普勒雷达 集合 资料同化 3DVar SVD

文章编号 1006-9895 (2011) 04-0753-14

中图分类号 P413

文献标识码 A

Assimilation of Doppler Radar Velocity Observations with SVD-En3DVar Method Part I: Simulated Data Experiments

XU Daosheng, SHAO Aimei, and QIU Chongjian

Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract The ensemble-based 3DVar (three-dimensional variational technique) method with SVD (singular value decomposition) technique (SVD-En3DVar) is used to assimilate simulated Doppler radial velocity observations. A localization scheme is introduced to the method to reduce spurious error covariance among distant points. The impact of different methods of producing initial perturbation and integration time lengths for forecast samples on the assimilation is emphatically investigated. A new scheme producing initial perturbation samples is proposed. This scheme takes the pseudo-random perturbation fields of temperature and specific humidity as the observation innovation and a 3DVar system is utilized to yield the initial perturbation fields of all variables from the observation innovation. Experiments using the simulated observations by WRF (weather research forecasting) model demonstrate that in the initial perturbation fields produced by using the new scheme the compatibility between different variables is better and the perturbation will not decay quickly in the forecast, so the spin-up time is cut down and the time interval of as-

收稿日期 2010-08-31, 2011-03-04 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40875063, 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 lzujbky-2010-9

作者简介 徐道生, 男, 1985 年出生, 在读博士生, 研究方向为资料同化。E-mail: david85xu@sohu.com

simulation cycle can be shortened. The forecasts of temperature, humidity, horizontal wind, and rainfall within 12 hours are improved after assimilating the radar velocity data.

Key words Doppler radar, ensemble, data assimilation, 3DVar, SVD

1 引言

变分同化方法 (3DVar 和 4DVar) 和集合同化方法 (EnKF、EnSRF 等) 这两类目前流行的同化方法都已用于同化雷达速度资料的试验研究。在变分方法方面, 美国的 ARPS 模式、WRF 模式以及我国的 GRAPES 模式的 3DVar 同化系统都包含有同化雷达观测的径向速度的功能, 利用这些同化系统进行过不少同化试验 (Gao et al., 2004; Gao et al., 2005; Hu et al., 2006a, 2006b; 盛春岩等, 2006a, 2006b, 2009; 杨艳蓉等, 2008)。Wan and Xue (2006) 还将雷达回波的移动速度作为“视速度”进行同化, 发现同化以后对模拟的效果有改进。Xiao et al. (2005) 开发了一个同化多普勒雷达径向风的 3DVAR 方案, 并用于改进对台风降水和路径的预报。Sun and Crook (1997, 1998) 建立了多普勒雷达资料 4DVAR 同化系统, 并进行了一系列的同化试验, 证明该系统能够很好地反演风暴云团的热动力场和微物理场。许小永等 (2004) 也利用这一系统, 针对长江中下游两次暴雨过程进行了双多普勒雷达观测资料的同化和反演研究。在集合同化方面, Snyder and Zhang (2004) 利用模拟的雷达资料在对流尺度的云模式中进行了同化。Xue et al. (2006) 基于可压缩, 非静力模式发展了同化单雷达径向风和回波强度的 EnKF 系统, 其预报模式采用复杂的微物理过程而不是前期研究的简单的暖雨微物理过程。许小永等 (2006) 利用云数值模式同化模拟的多普勒雷达资料, 并考察了不同条件下 EnKF 的性能。兰伟仁等 (2010a, 2010b) 也开展了风暴尺度天气下利用 EnKF 同化模拟的多普勒雷达资料的试验, 特别研究了模式误差的影响。总的来说, 用 3DVar 同化雷达速度观测的效果并不是很理想, 这是因为现有的 3DVar 同化系统采用的背景误差协方差基本上是定常的, 也无法正确反映风场的三个分量之间的关系, 所采用的水平风场和质量场的平衡关系运用于中尺度系统也有问题。4DVar 在一定程度上解决了这些问题, 不过它要求积分伴随模式也是一个不小的负担。集合同化

方法根据预报集合估计流依赖的背景误差协方差, 现有的一些对模拟观测资料所进行的同化试验表明, 同化后能够较好地重现中尺度过程的所有状态, 包括风、温度和气压场, 同时所有的水和冰等微物理量场都能描述得相当好。不过在模式存在系统性误差时, 集合同化方法表现不够好 (Snyder and Zhang, 2004; 兰伟仁等 2010b), 因此用这类方法同化实际的雷达速度资料的研究报告不多。

Lorenz (2003) 对以上两种方法进行分析和比较后提出, 应该将集合方法与变分方法互相结合起来, 发挥两种方法的优势, 弥补单独使用一种方法的不足。主要思想是将预报集合估计的背景误差协方差矩阵用于变分同化。Liu et al. (2008) 提出的基于集合的 4DVar 方法 (简称 En4DVar), 就是将预报集合估计的背景误差协方差用于 4DVar。Zhang et al. (2009), 张蕾等 (2009) 的试验表明这样做可以得到比 EnKF 或 4DVar 更好的同化效果。Qiu et al. (2007) 提出了利用 SVD (singular value decomposition) 技术的基于集合的 4DVar 方法 (简称 SVD-En4DVar)。这一方法是从 Qiu and Chou (2006) 提出的基于 SVD 的同化方法发展而来的, 该方法通过对扰动预报集合作奇异值分解得到一组正交基向量, 分析增量被表示为按照这组正交基向量展开的形式。Tian et al. (2008) 也提出了类似的基于本征正交分解 (POD) 的四维变分同化方法。Wang et al. (2009) 提出了一种基于降维投影技术的四维变分同化方法 (DRP-4DVar)。不过, 迄今为止采用这类方法所作的试验大多采用比较简单的模式, 也还没有用于同化雷达资料。本文将 SVD-En4DVar 简化为一个三维方案 (SVD-En3DVar), 将它和 WRF 模式结合, 开展同化雷达径向风资料的试验。我们注意到与一般的 EnKF 不同, SVD-En3DVar 在每个同化循环开始都要重新扰动初始场, 这虽然减少了连续同化过程中模式系统误差带来的影响, 但是同化结果对初始扰动场的结构以及扰动预报的积分时间会有很大的依赖关系。如果扰动预报的积分时间不够长, 得到的预报集合不能很好地反映预报误差的结构和不同变量间的关系。对

于像雷达这种时间分辨率很高的观测资料, 如果同化循环的间隔时间太长, 会不利于充分利用实测信息来对预报场进行调整。为了解决这一问题, 我们提出利用 3DVar 对初始扰动进行预处理, 让叠加的扰动场有较好的协调性, 滤除掉一些高频扰动, 这样有可能缩短预报样本的 Spin-up 时间, 从而达到缩短同化循环的时间间隔的目的, 使 SVD-En3DVar 方法更适用于同化雷达观测资料。由于雷达观测往往有很大的资料空缺区, 我们在 SVD-En3DVar 中引入了一种局地化方法来避免在资料大片空缺的地区产生错误的分析增量。本文将利用 WRF 模式模拟的观测资料进行一系列同化试验, 重点在于检验不同的样本积分时间和利用 3DVar 技术对初始扰动场进行处理的同化效果, 为将这一方法用于同化实际的雷达速度观测资料奠定基础。在本项研究的第 II 部分将进一步将这一方法用于同化实际观测。

2 SVD-En3DVar 方法

本文采用的 SVD-En3DVar 方法是由 Shao et al. (2009) 提出的混合空间的 En4DVar 方案简化到三维(一个时刻)得到。具体做法叙述如下。

设同化时刻为 t_0 , 在 $t_0 - \tau$ 时刻的背景场上叠加 M 个初始扰动场, 由这些初始场出发积分模式至 t_0 时刻得到 M 个预报样本 $(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_M)$ 。 τ 即为样本的积分时间长度。将预报样本和同一时刻的背景场 \mathbf{u}_b 相减得到预报扰动场 $(\Delta\mathbf{u}_1, \Delta\mathbf{u}_2, \dots, \Delta\mathbf{u}_M)$, 这里 $\Delta\mathbf{u}_m = \mathbf{u}_m - \mathbf{u}_b$, $(m=1, 2, \dots, M)$ 。根据观测算子 H 计算对应的观测扰动场 $(\Delta\mathbf{d}_1, \Delta\mathbf{d}_2, \dots, \Delta\mathbf{d}_M)$ 。将第 m 个预报扰动场和观测扰动场组合为列向量

$$\mathbf{a}_m = (\Delta\mathbf{u}_m^T, \Delta\mathbf{d}_m^T)^T, \quad (1)$$

这些列向量组成矩阵 $\mathbf{A} = (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_M)$ 。对 \mathbf{A} 作奇异值分解

$$\mathbf{A} = \mathbf{B}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T, \quad (2)$$

这里, $\mathbf{\Lambda}$ 是由 \mathbf{A} 的特征值 $(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M \geq 0)$ 组成的对角矩阵, 按照由大到小的顺序排列。根据 (1) 式, \mathbf{A} 的左特征向量构成的矩阵 \mathbf{B} 的每个非零特征值对应的向量 \mathbf{b}_m 可以分为两部分:

$$\mathbf{b}_m = (\mathbf{b}_m^u, \mathbf{b}_m^d)^T, \quad (3)$$

\mathbf{b}_m^u 和 \mathbf{b}_m^d 分别属于模式变量空间和观测变量空间。

将向量 $\mathbf{x} = (\Delta\mathbf{u}^T, \mathbf{d}^T)^T$ 按照特征向量展开:

$$\mathbf{x} = \sum_{r=1}^P \alpha_r \mathbf{b}_r = \mathbf{b}\boldsymbol{\alpha}, \quad (4)$$

P 是截断阶数。显然有

$$\Delta\mathbf{u} = \sum_{r=1}^P \alpha_r \mathbf{b}_r^u = \mathbf{b}^u \boldsymbol{\alpha} \quad (5)$$

和

$$\Delta\mathbf{d} = \sum_{r=1}^P \alpha_r \mathbf{b}_r^d = \mathbf{b}^d \boldsymbol{\alpha}. \quad (6)$$

增量形式的 3DVar 的目标函数是

$$J(\Delta\mathbf{u}) = \Delta\mathbf{u}^T \mathbf{P}^{-1} \Delta\mathbf{u} + (\mathbf{H}\Delta\mathbf{u} - \Delta\mathbf{y})^T \mathbf{O}^{-1} (\mathbf{H}\Delta\mathbf{u} - \Delta\mathbf{y}), \quad (7)$$

这里, \mathbf{P} 是背景误差协方差矩阵, 类似于集合同化方法, 可以近似表示为 $\mathbf{P} \approx \mathbf{b}^u \boldsymbol{\Lambda}_P^2 (\mathbf{b}^u)^T / (M-1)$; \mathbf{O} 是预报误差协方差, 试验中取为对角矩阵; \mathbf{y} 是观测, $\Delta\mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{u}_b$ 。利用 (5) 式和 (6) 式, 目标函数 (7) 可以写为

$$J(\boldsymbol{\alpha}) = (M-1) \boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\Lambda}_P^{-2} \boldsymbol{\alpha} + \sum_{r=1}^P (\alpha_r \mathbf{b}_r^d - \Delta\mathbf{y})^T \mathbf{O}^{-1} (\alpha_r \mathbf{b}_r^d - \Delta\mathbf{y}), \quad (8)$$

极小化目标函数得到系数 $\boldsymbol{\alpha}$, 根据 (5) 式可以得到所需要的分析增量 $\Delta\mathbf{u}$ 。

先前利用 SVD-En3DVar 方法进行的同化试验都没有进行局地化处理, 其结果是任一个点的观测都会对全局的分析产生影响, 这在观测点分布比较均匀的情况不会造成太大的影响, 但是在同化雷达资料时, 往往有很大的资料空缺地区, 这时候如果不进行局地化处理就很容易在资料大片空缺的地区产生错误的分析增量。为了避免这一现象, 本文采用了与 Miyoshi and Yamane (2007) 在 LETKF 中使用的类似的局地化方法。具体做法是: 以任一个网格点为中心, 选取一个包含 $l_h \times l_h \times l_v$ 个格点的区域, 这里 l_h 与 l_v 分别为区域包含的水平格点数和垂直格点数, 利用该区域内的观测经同化得到区域中心点的分析值。对每个网格点依次进行这样的同化过程得到全场的分析。根据我们先前进行的相关的试验研究结果 (Xu et al. 2010), 这里取 $l_h = 11$, $l_v = 20$ 。

3 模式和资料

采用 WRF 模式和模式资料进行同化试验。模

拟区域中心是 (22.8°N, 112.8°E), 水平格点数为 180×180, 格距 7 km, 垂直方向分为不等距的 28 层, 层顶气压为 50 hPa。由 1°分辨率的 NCEP 再分析资料提供初边界条件, 微物理方案采用 Ferrier 方案。

选定 2008 年 6 月 7 日 00 时 (协调世界时, 下同) 作为分析时刻。以 6 日 00 时 NCEP 再分析资料为初始场积分模式 24 小时得到背景场, “真实场”则是在再分析资料上叠加一个扰动作用同样的积分产生, 所叠加的扰动是由 6 日 00 时开始的 24 小时预报和由 6 日 12 时开始的 12 小时预报的差。得到的“真实场”, 背景场以及两者的差别如图 1 所示。

径向风观测资料的位置与 2008 年 6 月 7 日 00 时海口、广州、韶关、梅州、汕头、阳江、柳州、南宁、桂林和龙岩共 10 部 S 波段多普勒雷达实际观测的径向风资料位置相同, 不过观测资料的值是在“真实的”径向速度上加入均值为 0、标准差为 1.0 m/s 的随机误差得到。雷达体扫包括 9 个仰角, 分别为 0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°、19.5°。径向速度的库长为 250 m。采用的插值方案是 88D2ARPS 软件中的雷达资料格点化方案 (Xue et al. 1996)。“真实的”径向速度根据下面的观测算子由三个风分量的“真实值”计算:

$$V_r = u \frac{x - x_i}{r_i} + v \frac{y - y_i}{r_i} + (\omega - v_T) \frac{z - z_i}{r_i}, \quad (9)$$

式中, (u, v, ω) 为风的三个分量, (x, y, z) 是雷达位置, (x_i, y_i, z_i) 是雷达的观测目标位置, r_i 是观测点与雷达站之间的距离, v_T (单位: m/s) 是下落末速度。每一部雷达观测资料都已经插值到模式网格点上, 如果在一个点有多部雷达观测资料, 同化时这些资料会同时使用。图 2a 为 10 部雷达站的位置和 $\sigma=0.86$ 平面有效的径向风观测资料分布。观测资料覆盖的范围主要在模拟区域南半部的陆上地区, 包括广东和海南的大部以及广西中部。图 2b 为雷达资料在垂直方向上的分布, 可以看到观测资料在模式中层比较密集, 在 $\sigma=0.860 \sim 0.507$ 之间, 有效资料覆盖率在 30% 以上。在高层和低层资料都较少。

同化的分析变量有 8 个, 包括水平风速 u, v ,

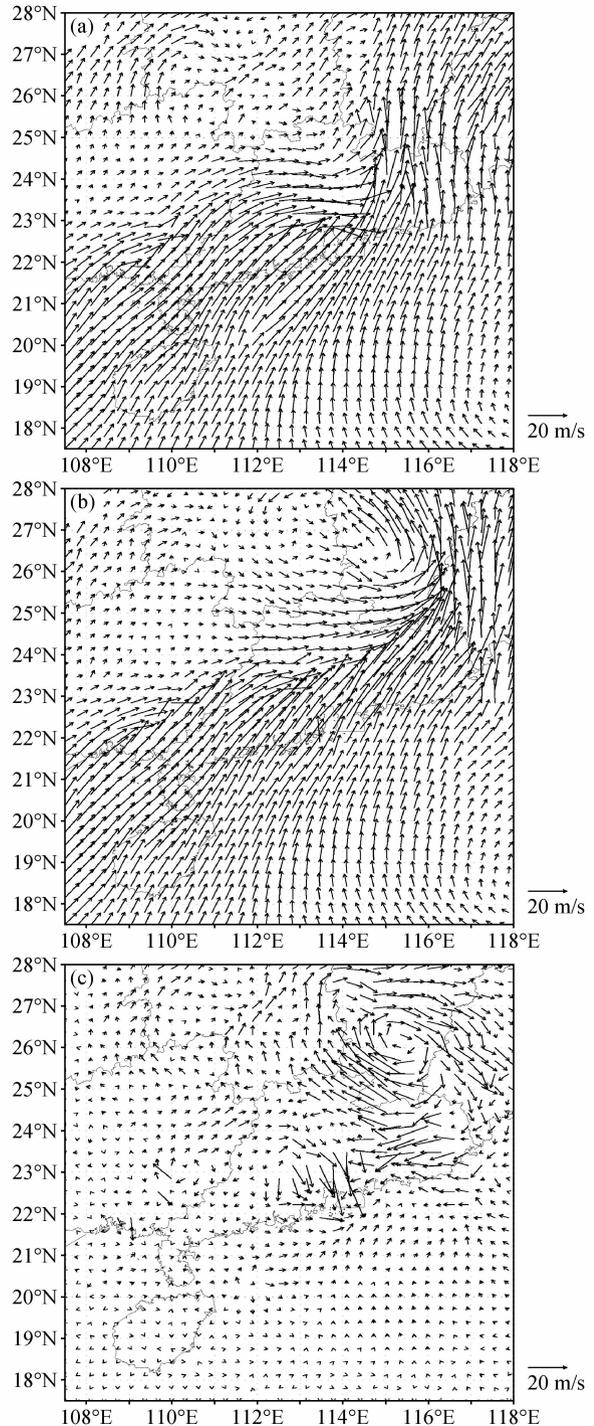


图 1 分析时刻 (2008 年 6 月 7 日 00 时) $\sigma=0.86$ 平面上的水平风场: (a) 背景场; (b) 真实场; (c) 背景场误差

Fig. 1 Horizontal wind field on level $\sigma=0.86$ at the analysis time (0000 UTC 7 Jun 2008): (a) Background field; (b) true field; (c) background field error

垂直风速 ω , 扰动位温 T , 扰动位势高度 H_p , 水汽混合比 q_v , 雨水混合比 q_r , 云水混合比 q_c 。

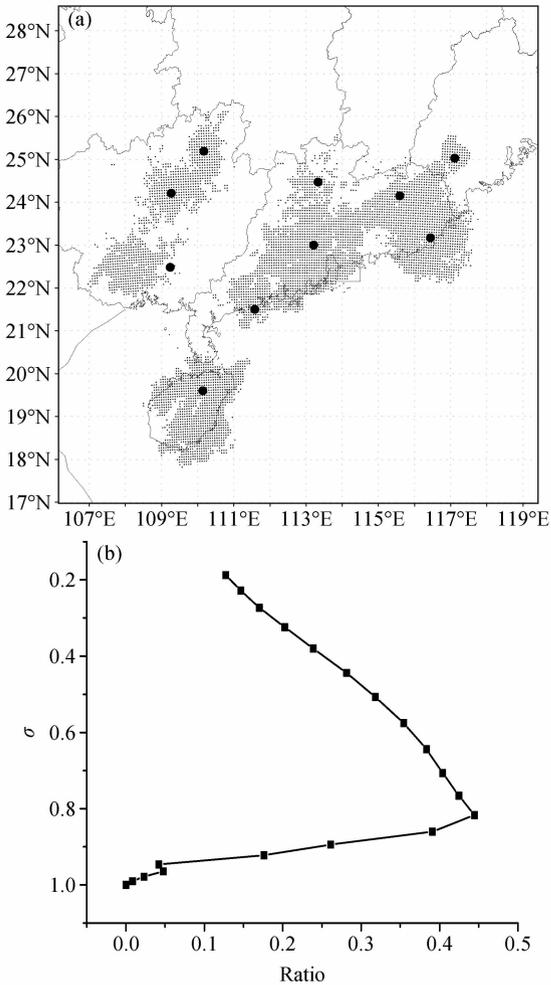


图2 (a) 雷达站位置(黑色圆点)及 $\sigma=0.86$ 平面上有效的径向风观测分布; (b) 观测资料点与计算网格点之比随高度变化
Fig. 2 (a) Location of the radars (black dots) and distribution of available observation data on level $\sigma=0.86$; (b) the ratio of number of observation points to analysis grid points on each model level

4 试验设计

如引言所述, SVD-En3DVar 对预报样本的产生方法有较大的依赖性, 这包括初始扰动的结构以及样本积分的时间长度两方面。本文的一个重要目的就是通过试验来考察不同样本产生方法对同化结果的影响, 找到比较合适的方法。试验中我们采用两种生成初始扰动场的方法, 一种是对 u 、 v 、 T 、 H_p 和 q_v 几个变量独立加入伪随机扰动, 这些伪随机扰动具体是根据 Evensen (1994) 提出的方法得到, 该方法通过傅里叶变换方法可以产生具有指定的降相关长度的均值为 0、方差为 1 的二维随机扰

动场。在得到每层扰动场后通过上下相邻两层加权平均来构造三维扰动场。我们的试验中二维随机扰动场的水平降相关长度为 10 倍格距, 垂直方向加权平均时取为等权重。这种产生初始扰动场的方法也是目前集合同化中一般采用的方法, 以下将这种方法产生的样本称为随机扰动样本(或者简称 R 样本)。由于这种随机扰动方法得到的各个变量的扰动场之间是独立的, 积分模式时会产生明显的高频振荡, 如果样本积分时间不够长, 得到的预报样本很难反映各个变量之间应有的关系。为了缩短对扰动初始场积分的 Spin-up 时间, 本文提出用 3DVar 对初始扰动场作预处理。具体做法是只对温度和比湿两个变量生成独立的伪随机扰动, 然后将其作为探空观测资料, 通过 WRF-3DVar 系统进行一次同化, 将得到的分析增量作为初始扰动。这样得到的扰动各个变量之间应该有较好的协调关系。以下将这种方法产生的样本称为 3DVar 生成的扰动样本(或者简称 V 样本)。选取不同的积分时间长度 τ , 分别用两种方法产生初始扰动, 利用所得的 8 种扰动预报样本进行同化对比试验。8 个试验的具体情况如表 1 所示。

表 1 试验方案设计

Table 1 Design of test scheme

试验编号	试验简称	初始扰动方法	积分时间 τ/h
1	R1	随机扰动	1
2	V1	3DVar	1
3	R3	随机扰动	3
4	V3	3DVar	3
5	R6	随机扰动	6
6	V6	3DVar	6
7	R12	随机扰动	12
8	V12	3DVar	12

5 结果分析

5.1 初始扰动场的比较分析

图 3 为 $\sigma=0.86$ 平面上两种方法产生的第一个样本的初始扰动场, 其中图 3a 和 3b 分别为随机方法和 3DVar 方法生成的温度场初始扰动场, 图 3c 和 3b 则是水平风扰动场。可以看到, 经过 3DVar 同化后得到的温度扰动比原来平滑, 但主要的结构大体保持。直接叠加的水平风的随机扰动场结构零乱, 由 3DVAR 得到的水平风扰动场结构比较清

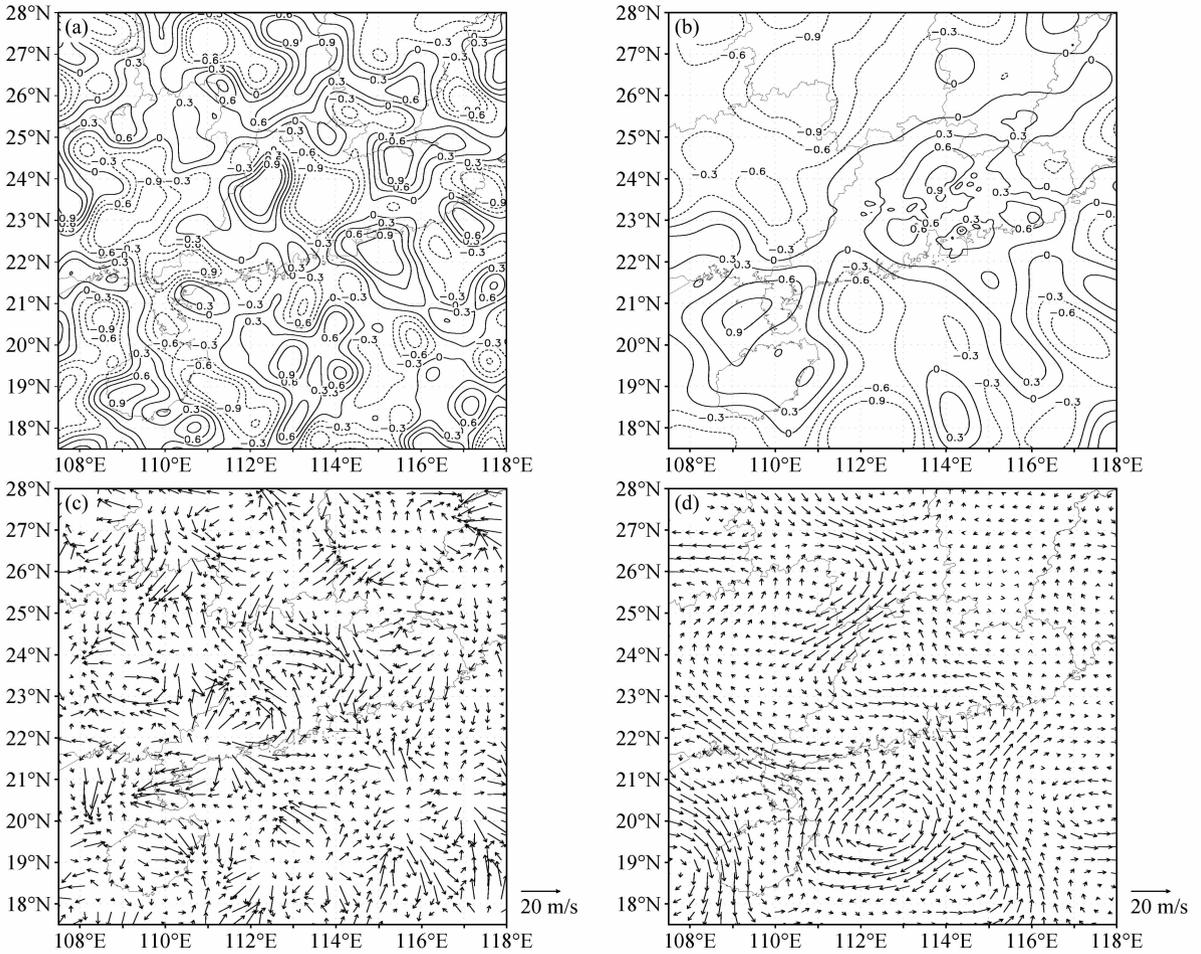


图3 (a、c) 随机方法和 (b、d) 3DVar 方法产生的 $\sigma=0.86$ 平面上的第一个初始扰动样本: (a、b) 温度扰动场; (c、d) 水平风扰动场
Fig. 3 The first initial perturbation sample produced by (a, c) random method and (b, d) 3DVar method on level $\sigma=0.86$; (a, b) temperature perturbation field; (b, d) horizontal wind perturbation field

晰, 流场较为光滑。

进一步考察两种不同的初始扰动在预报中的变化情况。图4是在 $\sigma=0.86$ 平面上两种方法产生的第一个扰动样本经过1小时、3小时、6小时和12小时预报后的水平风扰动场。通过对四个不同积分时段的两种扰动进行比较, 可以看出直接叠加的随机扰动预报后迅速衰减, 在头3个小时内保留的成分很少, 不过经过大约6小时的预报后在暴雨区附近出现了较明显的扰动, 和背景场的误差在尺度上比较接近。而经过3DVAR生成的风的扰动在预报中较少衰减, 预报时间较短时, 能够大致上保持初始叠加的扰动, 随着预报时间的增加, 在远离暴雨区的地方扰动逐渐衰减, 从而和直接叠加随机扰动的预报逐渐变得接近起来。这与我们的预期一致: 直接叠加的随机扰动相互不协调, 在开始预报时大

部分扰动都会被滤除, 而通过3DVar生成的扰动场各变量之间较为协调, 在预报过程中扰动不容易衰减。但是随着预报时间的增加, 两种扰动都会被暴雨区增长的预报误差所控制, 二者会逐渐变得相似。

5.2 同化场的比较分析

表2给出了背景场以及表1列出的8个同化试验得到的分析场主要变量的均方根误差比较。可以看出, 对于与观测变量(径向风)直接相关的水平风分量 u 和 v , 无论使用哪种样本进行同化, 其均方根误差都比同化前减小了。随着 τ 增加, 同化效果会有一定改进。在预报时间长度相同的情况下, 利用3DVar产生的样本(V样本)得到的分析误差都要比利用随机扰动样本(R样本)得到的分析误差小。而对于温度和比湿, 当 τ 较小时, 两种样本

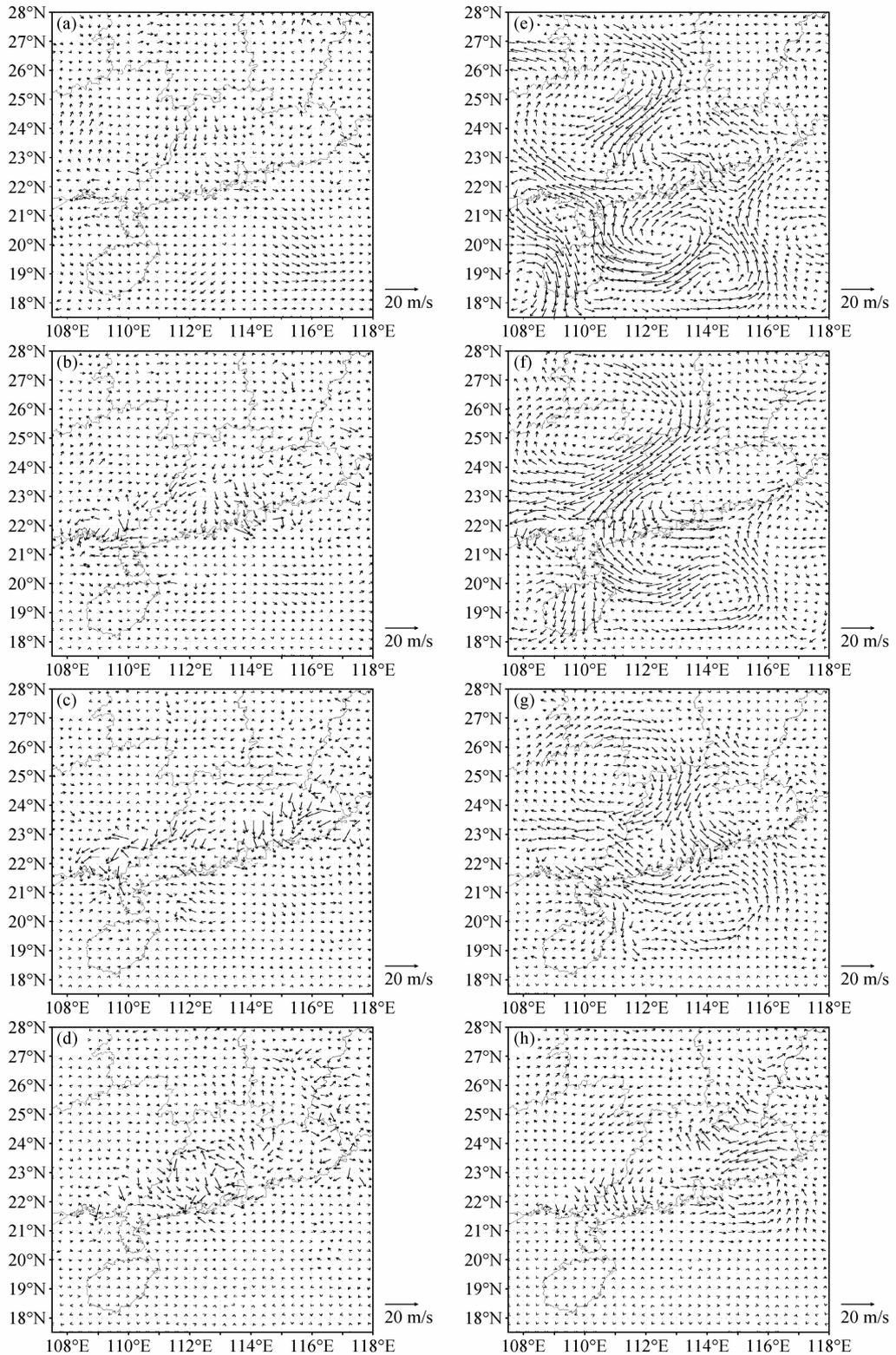


图 4 在 $\sigma=0.86$ 平面上 (a-d) 随机方法和 (e-h) 3DVar 方法得到的第 1 个扰动样本的水平风扰动场在积分过程中的演变: (a, e) 积分 1 小时; (b, f) 积分 3 小时; (c, g) 积分 6 小时; (d, h) 积分 12 小时

Fig. 4 Evolution of horizontal wind perturbations of the first sample produced by (a-d) the random method and (e-h) the 3DVar method on level $\sigma=0.86$. (a, e), (b, f), (c, g), and (d, h) are the perturbations integrated for 1, 3, 6, and 12 hours, respectively

同化得到的分析场对背景场几乎没有改进, 增加后改进效果才逐渐显现起来, 采用 V 样本和 R 样

表 2 背景场和利用 8 组样本同化得到的分析场均方根误差

Table 2 The rms errors of background fields and analysis fields assimilated with eight kinds of samples

	分析变量的均方根误差			
	$u/m \cdot s^{-1}$	$v/m \cdot s^{-1}$	T/K	$q_v/kg \cdot kg^{-1}$
背景场	3.28	3.27	0.723	8.42×10^{-4}
R1	3.11	3.14	0.725	8.41×10^{-4}
V1	2.97	3.02	0.725	8.04×10^{-4}
R3	2.99	3.02	0.711	8.09×10^{-4}
V3	2.92	2.97	0.709	8.02×10^{-4}
R6	2.92	2.89	0.689	7.98×10^{-4}
V6	2.75	2.83	0.707	7.99×10^{-4}
R12	2.91	2.87	0.675	7.79×10^{-4}
V12	2.73	2.79	0.684	7.74×10^{-4}

本的结果差别不大。这是因为 SVD-En3DVar 方法是从扰动预报样本集合中得到径向风扰动量和所有控制变量的扰动量之间的统计关系, 所有变量的分析增量 (包括 u 、 v 、 w) 实际上都是在拟合径向风观测时通过这种相关关系得到的。不过, 由于径向风直接和风的 3 个分量 (u 、 v 、 w) 相联系, 同化径向风资料后对风场的改进较明显, 而其他变量和径向风的关系是利用 3DVar 系统 (对 V 样本而言) 以及通过积分模式后才得到的, 样本积分时间 τ 过短, 这种相关关系还无法正确体现。

选取 R1、V1、R6 和 V6 这 4 组试验, 比较各个高度的分析场均方更误差和背景场误差 (图 5) 可以看出, 对于 u 和 v , 几乎在所有高度上同化后的误差都小于背景误差, 特别在观测资料较多的中层这种改进更明显。对于 T 和 q_v , 当 τ 为 1 小时, 利用 V 样本的同化在模式中高层使温度误差明显变大了, 采用 R 样本会有所改善。当 τ 为 6 小时,

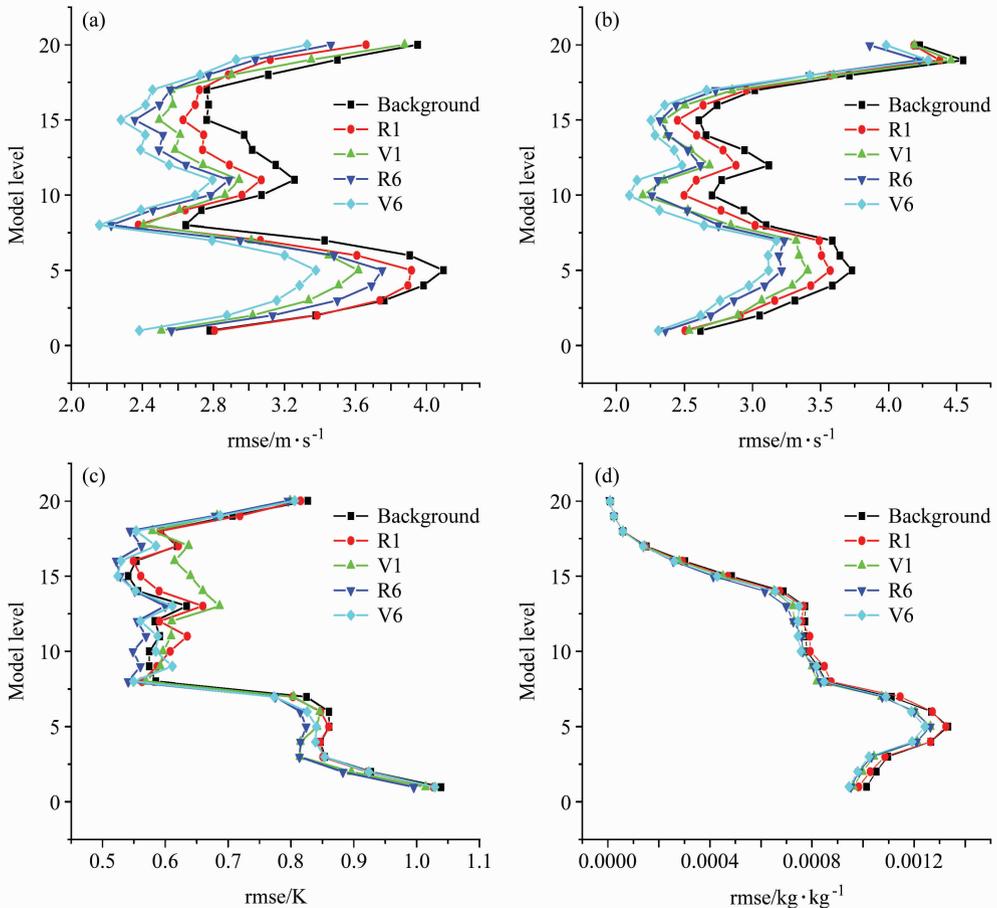


图 5 背景场以及样本 R1、V1、R6、V6 用于同化试验得到的各变量均方根误差的比较: (a) u ; (b) v ; (c) T ; (d) q_v .

Fig. 5 Vertical profiles of rms errors of background fields and analysis fields assimilated with R1, V1, R6, V6 samples for variables (a) u , (b) v , (c) T , and (d) q_v .

各高度上的温度和湿度均方根误差都要比同化前稍微小一些,但是很不明显。

从图 5 还可以看到, τ 为 1 小时的 V 样本的同化效果大致上与 τ 为 6 小时的 R 样本同化效果相当。这表明采用 V 样本可以在缩短样本预报时间的同时保证较好的同化效果,从而使得 SVD-En3DVar 方法可以更好地用来同化观测时间频率较高的雷达资料。比如可以将同化循环的时间间隔缩短到 1 小时来及时地根据实测资料对预报结果进行修正,从而更好地对中小尺度天气系统进行预报。

5.3 预报结果的比较分析

下面来比较同化前后预报误差的发展变化情况,同化所用预报集合是由 3DVar 方法产生的 30 个扰动样本,采用每 1 小时同化 1 次,连续同化 3 次的方式,每次同化样本的积分时间就是 $\tau=1$ h,将第 3 次同化得到的分析场作为初始场预报 12 小

时。图 6 为同化前后几个变量的全场的均方根误差在 12 小时预报中的变化情况。从结果来看,在前 3 小时内,无论是和观测变量直接联系的 u 、 v ,还是和观测变量间接联系的温度 T 、比湿 q_v ,同化后的预报误差也都要比同化前要小,这说明 SVD-En3DVar 同化径向风资料不但会改进风的预报,对温度和湿度的预报也有正面的影响。不过,因为对初始温度的改进不大,这种改进持续时间不长,在 3 小时后,同化后温度场的预报误差与同化前很接近,有时候还不如同化前。而其它几个变量的预报误差也随预报时间延长逐渐靠近未同化时,不过到 12 小时预报误差仍然低于同化前。

最后,我们考察同化对降水预报的改进。图 7 和图 8 为 6 月 7 日 02 时~14 时同化前后每 3 小时一次的累积降水预报与真实降水的比较,可以看到从 7 日 02 时到 7 日 05 时真实的 3 小时累计降水主要分布在广东沿海,在福建与江西省的交界地区以

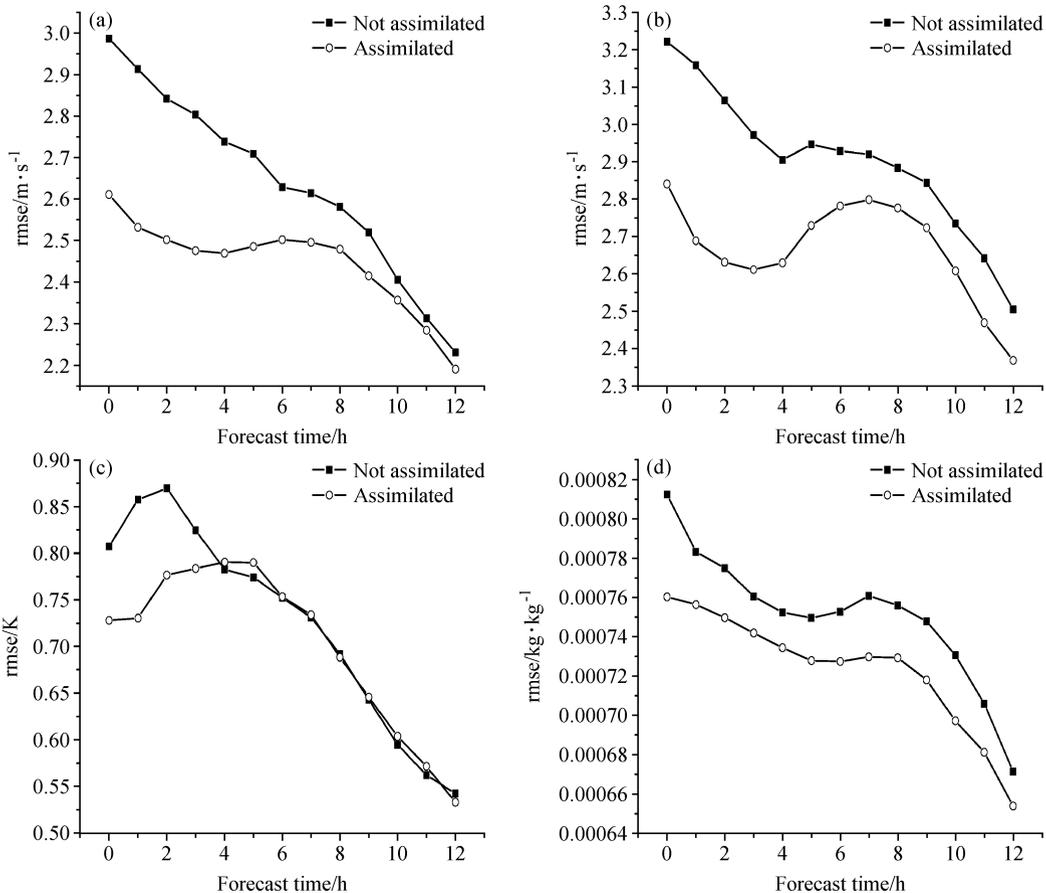


图 6 同化前 (实心方块) 和同化后 (空心圆) 的均方根预报误差比较: (a) u ; (b) v ; (c) T ; (d) q_v .

Fig. 6 Comparison of rms forecast errors before assimilation (solid square) and after assimilation (hollow cycle) for variables (a) u , (b) v , (c) T , and (d) q_v .

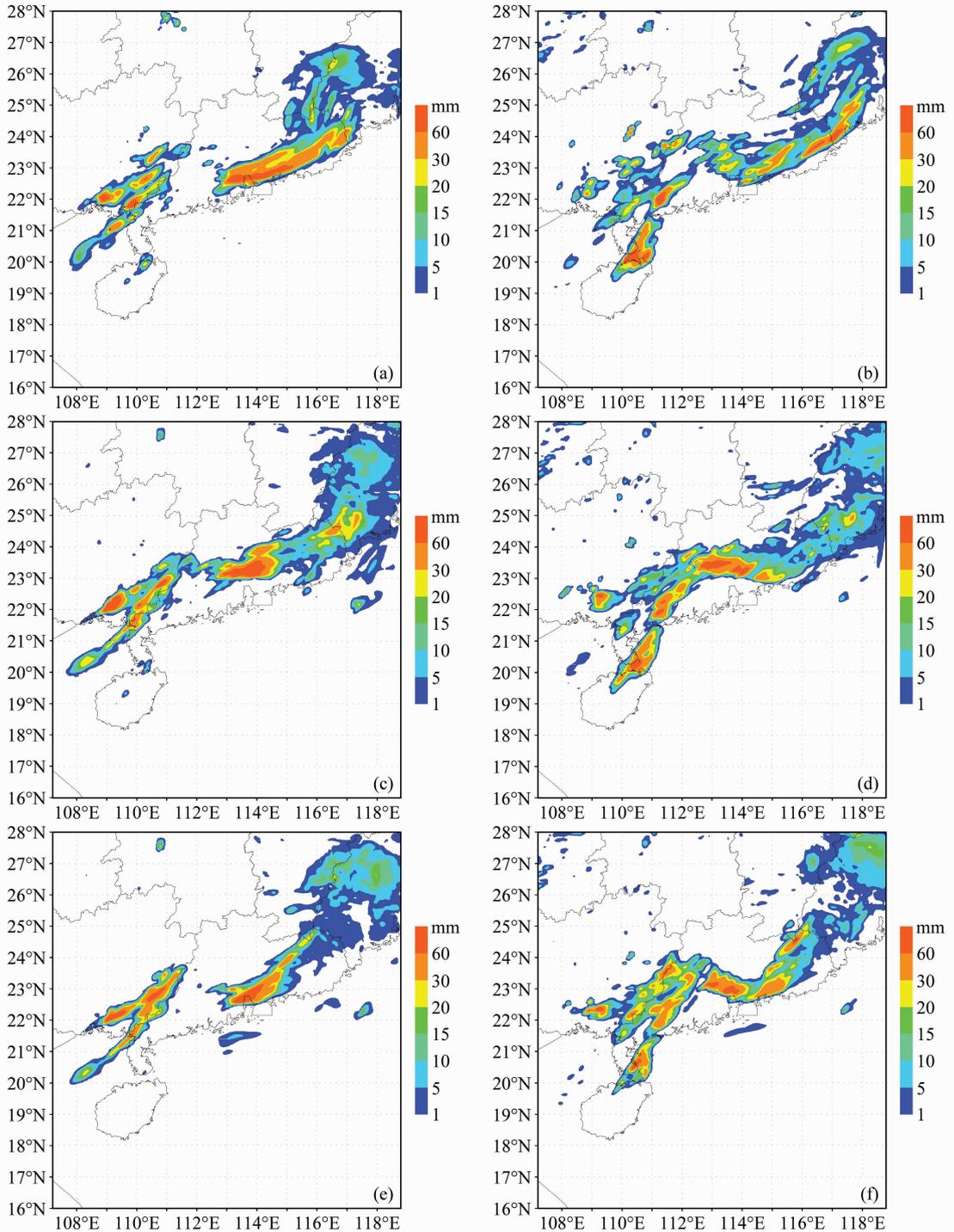


图7 6月7日(a、c、e) 02~05时和(b、d、f) 05~08时的3小时累计降水量比较:(a、b)真实场;(c、d)同化前预报;(e、f)同化后预报
Fig. 7 Comparison of 3-h precipitation during (a, c, e) 0200–0500 UTC and (b, d, f) 0500–0800 UTC on 7 Jun 2008; (a, b) true field; (c, d) forecast before assimilation; (e, f) forecast after assimilation

及广西南部靠近广东的地区也有小片降水,而同化前预报的降水则主要分布在广东中部,福建与江西省的交界地区的降水偏移到了福建的中部,和真实情况差别较大,广西地区的降水差别不大。同化

后降水中心靠近了广东沿海,但范围明显缩小了,从图1中背景场、真实场以及两者的差别中可以看出,真实场在广东沿海附近有一个很明显的气旋性弯曲,而背景场则是在广东中部地区有一条辐合

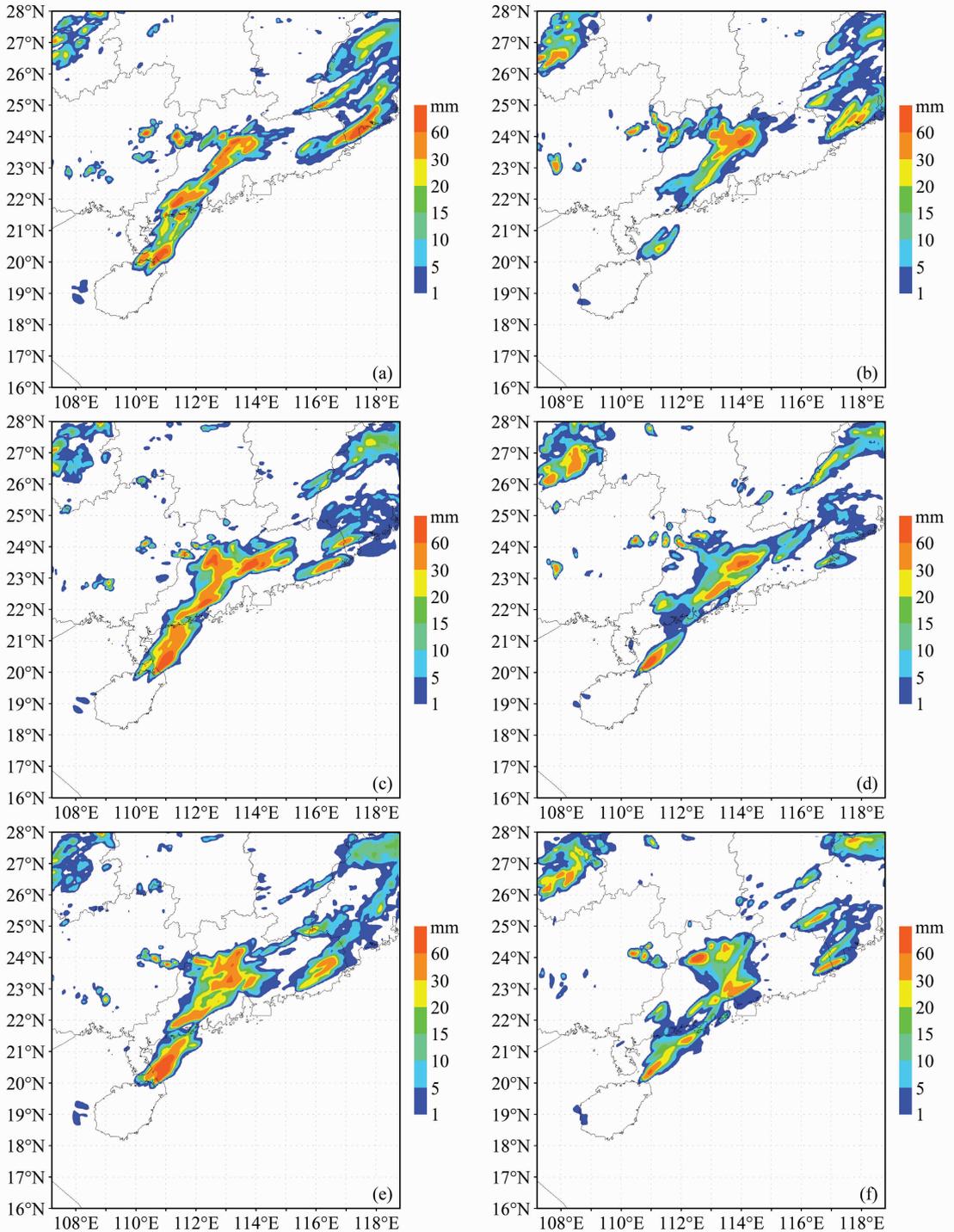


图 8 同图 7, 但为 6 月 7 日 (a、c、e) 08 ~ 11 时和 (b、d、f) 11 ~ 14 时
Fig. 8 Same as Fig. 7, but for (a, c, e) 0800 - 1100 UTC and (b, d, f) 1100 - 1400 UTC on 7 Jun 2008

线。在这部分区域内观测资料比较多, 同化以后对降水改进比较好, 所以同化后降水中心靠近了广东沿海, 更加接近真实场了。但是在江西南部地区, 背景场是一个明显的气旋性辐合, 而真实场则是很强的南风。而这个地区的观测资料比较少, 分析场

中仍然存在这个气旋性辐合, 它会从南面的广东地区带走一部分水汽并在这个地区形成降水, 这就使得广东地区的降水范围偏小了。福建的降水也主要停留在和江西的交界处, 但强度减弱了, 范围有所扩大。以后几个时间段的降水同化后在广东中部地

区有一定改进,但其它地方也出现了部分虚假的降水。这是由于观测资料主要分布在广东地区,同化以后初始场主要在有观测资料的区域改进较大,而其它区域改进很少,所以可能会在没有资料或资料较少的区域出现一些虚假的降水。

图 9 为 3 小时累积降水预报的 TS 评分结果比较,从中可以看出,对于前 3 小时累计降水的预报,5 mm 以上和 20 mm 以上的降水在同化以后评分都有提高,特别是 20 mm 以上的降水评分改进很明显。对于第 3~6 小时的降水,同化以后降水的评分比同化前有所下降,结合图 7、图 8 可以看到,虽然在广东中部地区降水有改进,但是其它地区的降水反而不如同化前的预报,这对于评分的结果有很大影响。对于 6~9 小时、9~12 小时期间的累计降水,大于 5 mm 的降水评分和同化前相差不多,因为雷达资料同化主要改进了初始风场,但是对温度场和湿度场的改进较小,因此改进的作用持续时间不长,6 小时以后的预报改进不大,而大于 20 mm 以上的降水评分在同化后有所提高,这说明

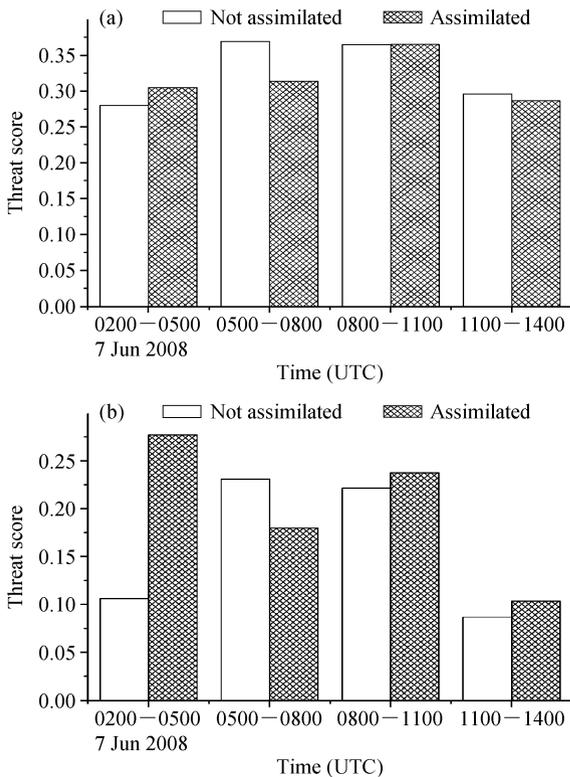


图 9 同化前后得到的每 3 小时累积降水预报的 TS 评分结果:
(a) 5 mm 以上降水评分; (b) 20 mm 以上降水评分

Fig. 9 Threat score of 3-h rainfall forecast before and after assimilation; (a) rainfall over 5 mm; (b) rainfall over 15 mm

同化以后对主要雨带(大于 20 mm)的预报有改进,这可能是因为风场的改进对主要雨带的预报影响较大一些。总的来说,同化以后降水预报得到了一定提高,特别是主要雨带的预报改进更加明显。

6 总结讨论

本文是第一次尝试将 SVD-En3DVar 方法用于对雷达径向风资料的同化,利用模式资料进行的试验着重比较了两种不同方法产生的初始扰动样本以及不同的预报样本积分时间长度的同化效果。一种初始扰动是用随机方法得到的,另一种是通过 3DVar 生成的。对试验结果的分析得到以下结论:

(1) 通过 3DVar 对初始随机扰动进行处理后可以滤除一些高频扰动,使得扰动的尺度增大变得较为光滑。在预报过程中基本能保持与初始时刻相同的尺度和量级。而未经 3DVar 处理的随机扰动在预报初期迅速衰减,但是随着预报时间的变长,两种方法得到的扰动会逐渐接近。

(2) 不管是随机扰动样本还是通过 3DVar 产生的扰动样本,对样本积分的时间 τ 越长,同化效果越好。在 τ 相同的情况下,利用 3DVar 产生的样本同化得到的分析场误差一般都要小于用随机样本同化得到的分析场误差,不过两者的差别随着 τ 的延长而逐渐变小。

(3) 用积分 1 小时的 3DVar 样本同化可以得到和用积分 6 小时的随机样本同化大体相当的效果,这就较好地解决了用随机样本需要积分较长时间才能用于同化而引起的同化循环时间间隔太长的问題,使得该方法可以更好地适用于同化像雷达这样观测时间频率较高的资料。

(4) 只进行一次同化时,对于和观测变量(径向风)关系比较密切的分析变量 u 和 v 改进比较明显,而对于和观测变量关系不是很密切的变量 T 和 q_v 则改进不大,但是经过几次同化循环以后,对所有变量都有改进,并且在预报过程中同化效果能够保持较长的时间。

(5) 同化雷达速度资料后,对头 3 小时降水预报有明显改进,特别是对 20 mm 以上的降水 TS 评分有明显提高。对于第 3~6 小时的降水,在部分地区的预报有所改进,但同时也出现了一些虚假的降水,效果不明显。对于第 6~9 小时和第 9~12 小时的降水预报同化后也有一定改进。

本文利用模式资料进行的试验说明, 将 SVD-En3DVar 用于同化雷达观测的径向速度资料对短期预报有一定作用。将这一方法进一步用于实测雷达资料的同化试验将在这组论文的第 II 部分叙述。

参考文献 (References)

Evenen G. 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics [J]. *J. Geophys. Res.*, 99(C5): 10143–10162.

Gao J D, Xue M, Brewster K, et al. 2004. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21(3): 457–469.

Gao J D, Nuttall C, Gilreath C, et al. 2005. Multiple Doppler wind analysis and assimilation via 3DVAR using simulated observations of the Planned case network and WSR-88D radars [C]. // 32nd Conf. Radar Meteor.

Hu M, Xue M, Brewster K. 2006a. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134: 675–698.

Hu M, Xue M, Gao J D, et al. 2006b. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134: 699–721.

兰伟仁, 朱江, Xue Ming, 等. 2010a. 风暴尺度下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 I. 不考虑模式误差的情形 [J]. *大气科学*, 34(3): 640–652. Lan Weiren, Zhu Jiang, Xue Ming, et al. 2010a. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part I: Perfect model tests [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34(3): 640–652.

兰伟仁, 朱江, Xue Ming, 等. 2010b. 风暴尺度下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 II. 考虑模式误差的情形 [J]. *大气科学*, 34(4): 737–753. Lan Weiren, Zhu Jiang, Xue Ming, et al. 2010b. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part II: Imperfect model tests [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34(4): 737–753.

Liu C S, Xiao Q N, Wang B. 2008. An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme. Part I: Technical formulation and preliminary test [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136: 3363–3373.

Lorenc A C. 2003. The potential of the ensemble Kalman filter for NWP—A comparison with 4D-Var [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129: 3183–3203, doi: 10.1256/qj.02.132.

Miyoshi Takemasa, Yamane Shozo. 2007. Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135: 3841–3861.

Qiu C J, Shao A M, Xu Q, et al. 2007. Fitting model fields to ob-

servations by using singular value decomposition: An ensemble-based 4DVar approach [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D11105, doi: 10.1029/2006JD007994.

Qiu C J, Chou J F. 2006. Four-dimensional data assimilation method based on SVD: Theoretical aspect [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 83: 51–57.

Qiu C J, Zhang L, Shao A M. 2007. An explicit four-dimensional variational data assimilation method [J]. *Sci. China (D)*, 50: 1232–1240.

Shao A M, Xi S, Qiu C J, et al. 2009. A hybrid space approach for ensemble-based 4-D variational data assimilation [J]. *J. Geophys. Res.*, 114, D17114, doi: 10.1029/2009JD12032.

盛春岩, 蒲一芬, 高守亭. 2006a. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响 [J]. *大气科学*, 30(1): 94–106. Sheng Chunyan, Pu Yifen, Gao Shouting. 2006a. Effect of Chinese Doppler radar data on nowcasting output of mesoscale model [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 30(1): 94–106.

盛春岩, 薛德强, 雷霆, 等. 2006b. 雷达资料同化与提高模式水平分辨率对短时预报影响的数值对比试验 [J]. *气象学报*, 64(3): 293–307. Sheng Chunyan, Xue Deqiang, Lei Ting, et al. 2006b. Comparative experiments between effects of Doppler radar data assimilation and increasing horizontal resolution on short range prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64(3): 293–307.

盛春岩, 房岩松, 黄磊, 等. 2009. 多普勒雷达资料同化对山东“4.28”飑线过程的数值模拟 [J]. *安徽农业科学*, 37(26): 12641–12649. Sheng Chunyan, Pang Yansong, Huang Lei, et al. 2009. Numerical simulation of “4.28” squall line process in Shangdong Province by assimilating Doppler reflectivity data [J]. *Journal of Anhui Agri. Sci. (in Chinese)*, 37(26): 12641–12649.

Snyder C, Zhang F Q. 2003. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131: 1663–1677.

Sun J, Crook N A. 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments [J]. *J. Atmos. Sci.*, 54: 1642–1661.

Sun J, Crook N A. 1998. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convection storm [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55: 835–852.

Tian X J, Xie Z H, Dai A G. 2008. An ensemble-based explicit four-dimensional variational assimilation method [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, D21124, doi: 10.1029/2008JD010358.

Wang B, Liu Juanjuan, Wang Shudong, et al. 2009. An economical approach to four-dimensional variational data assimilation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27: 715–727, doi: 10.1007/s00376-009-9122-3.

Wan Q L, Xue J S, Zhuang S Y. 2006. Study on the variational assimilation technique for the retrieval of wind fields from Doppler

- radar data [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 20(1): 1-19.
- Xiao Q N, Kuo Y H, Sun J Z, et al. 2005. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system; Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case [J]. *J. Appl. Meteor.*, 44: 768-788.
- Xu Daosheng, Shao Aimei, Qiu Chongjian. 2010. Using SVD-En3DVAR for radar data assimilation; Comparing local and global scheme [C]//The International Conference on Multimedia Technology 2010, Oct. 29-31, 2010 in Ningbo, China.
- 许小永, 郑国光, 刘黎平. 2004. 多普勒雷达资料4DVAR同化反演的模拟研究 [J]. *气象学报*, 62(4): 410-422. Xu Xiaoyong, Zheng Guoguang, Liu Liping. 2004. Dynamical and microphysical retrieval from simulated Doppler radar observations using the 4DVAR assimilation technique [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62(4): 410-422.
- 许小永, 刘黎平, 郑国光. 2006. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的数值试验 [J]. *大气科学*, 30(4): 712-728. Xu Xiaoyong, Liu Liping, Zheng Guoguang. 2006. Numerical experiment of assimilation of Doppler radar data with an ensemble Kalman filter [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 30(4): 712-728.
- Xue M, Brewster K, Droegemeier K, et al. 1996. The 1996 CAPS spring operational forecasting period; Real-time stormscale NWP, Part I: Goals and methodology [C]//Preprint, 11th Conf. on Num. Wea. Prediction, 19-23, August 1996, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., 19-23.
- Xue M, Tong M J, Droegemeier K K. 2006. An OSSE framework based on the ensemble square-root Kalman filter for evaluating the impact of data from radar networks on thunderstorm analysis and forecast [J]. *J. Atmos. Ocean Tech.*, 23(1): 46-66.
- 杨艳蓉, 王振会, 张沛源. 2008. 利用多普勒天气雷达资料对一次暴雨过程的同化模拟 [J]. *南京气象学院学报*, 31(5): 633-639. Yang Yanrong, Wang Zhenhui, Zhang Peiyuan. 2008. A rainstorm simulation with assimilated Doppler radar observations [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 31(5): 633-639.
- Zhang F Q, Zhang M, Hansen J A, et al. 2009. Coupling ensemble Kalman filter with four-dimensional variational data assimilation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26: 1-8.
- 张蕾, 邱崇践, 张述文. 2009. 在四维变分同化中运用集合协方差的试验 [J]. *气象学报*, 67(6): 1124-1132. Zhang Lei, Qiu Chongjian, Zhang Shuwen. 2009. Experiments on the 4D-variation with ensemble covariances [J]. *Acta Meteorologica Sinica(in Chinese)*, 67(6): 1124-1132.