

集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的数值试验

许小永¹ 刘黎平¹ 郑国光²

¹ 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

² 中国气象局, 北京 100081

摘要 利用集合卡尔曼滤波(EnKF)在云数值模式中同化模拟多普勒雷达资料,并考察了不同条件下EnKF同化方法的性能。结果显示,经过几个同化周期后,EnKF分析结果非常接近真值。单多普勒雷达资料EnKF同化对雷达位置不太敏感,双雷达资料同化结果在同化的初期阶段比单雷达资料同化结果准确。同化由反射率导出的雨水比直接同化反射率资料更有效,联合同化径向速度和雨水有利于提高同化分析效果。协方差对EnKF同化效果起着非常重要的作用,考虑模式全部预报变量与径向速度协方差的同化效果比仅考虑速度场与径向速度协方差的同化效果好。雷达资料缺值降低了同化效果,此时增加地面常规观测资料的同化可以明显提高同化分析效果。EnKF同化技术对雷达观测资料误差不太敏感。初始集合对同化分析有较大影响。EnKF同化受集合大小和观测资料影响半径。同化对模式误差较敏感。利用EnKF同化双多普勒雷达资料,分析了一次梅雨锋暴雨过程的中尺度结构。结果表明,EnKF同化技术能够从双多普勒雷达资料反演暴雨中尺度系统的动力场、热力场和微物理场,反演的风场是较准确的,反演的热力场和微物理场分布也是基本合理的。中低层切变线是此次暴雨的主要动力特征,对流云表现为低层辐合、高层辐散并有垂直上升运动伴随,其热力特征表现为低层是低压区,高层为高压区,中部为暖区而上、下部为冷区,水汽、云水和雨水分别集中在对流云体内、上升气流区和强回波区。

关键词 多普勒雷达资料 集合卡尔曼滤波同化 均方根误差 中尺度结构

文章编号 1006-9895(2006)04-0712-17

中图分类号 P413

文献标识码 A

Numerical Experiment of Assimilation of Doppler Radar Data with an Ensemble Kalman Filter

XU Xiao-Yong¹, LIU Li-Ping¹, and ZHENG Guo-Guang²

¹ State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The ensemble Kalman filter (EnKF) is applied to assimilation of simulated Doppler radar data in a cloud model and its performances under different conditions are investigated. The results demonstrate that the EnKF assimilation method is able to produce analyses that accurately approximate the true state after several assimilation cycles. The EnKF assimilation of single radar data is slightly influenced by the radar location. More accurate analyses are obtained during the earlier period when dual-Doppler data are assimilated. It is also found that assimilating the rainwater mixing ratio obtained from the reflectivity results in a better performance of EnKF than directly assimilating the reflectivity. When both radial velocity and rainwater mixing ratio are assimilated, the quality of the EnKF analyses is improved. The covariances between the observed variables and the state variables are important to the quality of the analyses. The analysis error increases when only the covariances of radial velocity with velocities are estimated. As the amount of the observations decreases, the performance of the EnKF analyses is degraded. How-

收稿日期 2004-12-06, 2005-09-09 收修定稿

资助项目 国家“十五”科技攻关项目 2001BA610A

作者简介 许小永,男,1978年出生,博士,主要从事雷达气象方向研究。E-mail: xu_xiaoyong@hotmail.com

ever, the EnKF can again provide accurate estimates by adding assimilation of the hypothetical surface wind and temperature observations. The EnKF technique is not especially sensitive to the radar observation errors. The initialization of the ensemble has an effect on the quality of the analyses, as do the ensemble size and the radius of influence for the observations. The assimilation is sensitive to the model errors. The EnKF is applied to dual-Doppler radar data of a Meiyu rainstorm. Results demonstrate that the EnKF assimilation method is able to retrieve the detailed structure of wind, thermodynamics and microphysics from dual-Doppler radar observations. The retrieved wind fields agree with the dual-Doppler synthesized winds and are accurate. The distributions of the retrieved perturbation pressures, perturbation temperature and microphysics are also reasonable through the examination of their physical consistency. The wind shear at middle and lower levels is the primary dynamical characteristics of the Meiyu heavy precipitation. The convective rainfall is often related to lower level convergence and upper level divergence coupled with the updraft. The convective system is characterized by high pressure at lower level and low pressure at upper level, associated with warmer at middle level and colder at lower and upper levels than the environment. The water vapor, cloud water and rainwater are associated with the convective cloud, the updraft and the reflectivity, respectively.

Key words Doppler radar data, ensemble Kalman filter assimilation, root mean square error, mesoscale structure

1 引言

目前,能与中小尺度数值模式分辨率相适应的观测资料主要来自于多普勒天气雷达,然而,多普勒天气雷达主要观测径向速度和回波强度信息,不能直接提供模式变量信息。三维风场、温度和湿度这些重要的模式变量的观测都缺乏足够的分辨率,因此,研究如何利用多普勒雷达观测资料为高分辨率的预报模式提供初始场是非常有意义的。另一方面,随着中国新一代多普勒天气雷达观测网逐步投入业务运行,多普勒雷达探测覆盖面、探测能力和探测资料迅速增加。开展多普勒雷达资料在数值模式中的同化研究也显得尤为重要和必要。

正如 Sun 和 Crook^[1]所指出的那样,对于积云尺度,资料同化的首要任务是给出未观测的变量场。从多普勒雷达资料得到大气状态变量的方法主要有两类:一类是反演算法,比较有代表性的是 Qiu 和 Xu^[2]、Laroche 和 Zawadzki^[3]以及 Shapiro 等^[4]的工作,他们主要利用反射率或(和)径向速度时变守恒方程的约束来反演风场,然后再将反演的风场代入 Navier-Stokes 方程组得到热力场。与此同时,一些学者利用时变动力模式^[5~7]或者时变微物理模式^[8]反演风场、温度场和微物理场。另一类是同化技术, Gao 等^[9]采用多普勒雷达资料 3DVAR 技术反演三维风场。Sun 和 Crook^[1, 10]建立了多普勒雷达资料 4DVAR 同化系统,并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。最近,许小永等^[11, 12]进行了多普勒雷达资料 4DVAR 同化的数值试验,并利用国家重点基础研究发展规划项目“我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究”的外场试验资料,对长江中下游两次暴雨过程的中尺度结构,进行了双多普勒雷达观测资料的 4DVAR 同化反演研究。

多普勒雷达资料 4DVAR 同化技术在理论上是先进的, Sun 等^[1, 7, 10]进行的一些实际运用试验也被证明是有效的。但是到目前为止,多普勒雷达资料的 4DVAR 同化仍然处在试验研究阶段,特别是由于需要模式反向积分,需要预报模式的切线性模式和伴随模式,因此实现起来有较大的困难性。近年来,集合卡尔曼滤波(EnKF)同化技术越来越受到人们的重视和欢迎,它是一种顺序资料同化方法,不需要模式反向积分,不需要预报模式的切线性模式和伴随模式,因此,与 4DVAR 同化方法相比,它比较容易实现,可移植性强。为此,本文将尝试利用集合卡尔曼滤波(EnKF)同化多普勒雷达资料。EnKF 技术是在传统的卡尔曼滤波(KF)同化技术基础上发展起来的,两者的不同之处在于:卡尔曼滤波同化技术通过误差协方差递推方程计算模式预报误差协方差矩阵,这要付出昂贵的计算时间,占用大量的机器内存,而 EnKF 同化技术则利用集合预报思想,通过一组集合预报得到预报误差协方差矩阵,很好地克服了卡尔曼滤波同化技术计算量大的缺点。EnKF 同化技术最早于 1994 年由 Evensen 提出^[13],随后不断发展并在大尺度模式资

料同化应用中取得巨大成功^[14~18]。对流尺度模式的资料同化和大尺度模式的资料同化的基本原理是相同的,但是由于两种尺度天气的观测系统不同,所以资料同化的主要目的也不同。对流尺度的观测系统主要是雷达网,它主要提供径向速度和反射率,它们不是模式变量,因此资料同化的首要任务是如何反演出不能直接观测的模式变量^[1];大尺度的观测系统主要是无线电探空网,它可以提供数值模式初始场所需的除垂直速度外的所有变量。但有些观测资料的空间分辨率常常比数值模式的分辨率低得多,因此,大尺度资料同化的重要目的是最优插值。大尺度和对流尺度资料同化中的另一个不同之处在于大气运动特征不同:对流尺度天气系统有很高的时间变率,高度非线性,不满足简单的平衡关系,而大尺度存在各种平衡关系(如地转平衡)。因此,EnKF 同化方法在两种尺度模式中的表现可能不同,研究 EnKF 资料同化技术在对流尺度系统中的表现非常有必要。

最近,国外已有关于将 EnKF 应用到多普勒雷达资料的同化研究中的报道^[19, 20],但在国内尚属空白。由于多普勒雷达资料同化不同于常规资料同化,而且 EnKF 本身是一个比较新的事物,所以许多问题还有待研究和解决。作为研究的起步,本文将首先利用 Sun 和 Crook 建立的云数值模式^[1]和模拟雷达资料,进行 EnKF 同化多普勒雷达资料的数值试验,以考查 EnKF 同化多普勒雷达资料的能力和同化中可能存在的问题,同时还利用 EnKF 同化双多普勒雷达实测资料,分析一次梅雨锋暴雨过程的中尺度结构。

2 集合卡尔曼滤波同化技术

EnKF 同化方法不同于 4DVAR 同化技术,它是一种顺序资料同化方法,最早由 Evensen^[13]提出,随后得到进一步完善和发展,这里仅对 EnKF 同化方法作简要介绍。EnKF 同化技术的基本思想是:从预报集合估计状态变量与观测变量之间的协方差,再利用观测资料和协方差,通过分析方程更新预报集合。根据文献^[13]和^[15],有如下方程:

$$\mathbf{x}_{an} = \mathbf{x}_{fn} + \mathbf{P}_f \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_f \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{y}_n - \mathbf{H} \mathbf{x}_{fn}), \quad n = 1, \dots, N_e, \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_f \mathbf{H}^T = \frac{1}{N_e - 1} \sum_{n=1}^{N_e} (\mathbf{x}_{fn} - \bar{\mathbf{x}}_f) (\mathbf{H} \mathbf{x}_{fn} - \mathbf{H} \bar{\mathbf{x}}_f)^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{H} \mathbf{P}_f \mathbf{H}^T = \frac{1}{N_e - 1} \sum_{n=1}^{N_e} (\mathbf{H} \mathbf{x}_{fn} - \mathbf{H} \bar{\mathbf{x}}_f) (\mathbf{H} \mathbf{x}_{fn} - \mathbf{H} \bar{\mathbf{x}}_f)^T, \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{x}}_f = \frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} \mathbf{x}_{fn}, \quad (4)$$

$$\bar{\mathbf{x}}_a = \frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} \mathbf{x}_{an}, \quad (5)$$

其中, \mathbf{x}_a 表示分析值, \mathbf{x}_f 表示预报值, \mathbf{y}_n 表示观测值, \mathbf{H} 是观测算子, \mathbf{P}_f 是预报(背景)误差协方差矩阵, \mathbf{R} 是观测误差协方差矩阵,上标 T 表示矩阵的转置, $\mathbf{P}_f \mathbf{H}^T$ 表征状态变量与观测变量之间的预报协方差, N_e 表示集合成员的个数,称为集合的大小。预报集合平均 $\bar{\mathbf{x}}_f$ 和分析集合平均 $\bar{\mathbf{x}}_a$ 分别作为预报结果和同化分析结果。

EnKF 同化算法包含两步:第 1 步是分析阶段:给定预报集合(在第一个同化时刻称为初始集合),联合(1)~(5)式得到分析集合 \mathbf{x}_{an} ($n=1, \dots, N_e$) 和分析集合平均 $\bar{\mathbf{x}}_a$;第 2 步是预报阶段:模式将分析阶段得到的分析集合作为初始场向前预报至下一个同化时刻,得到预报集合 \mathbf{x}_{fn} ($n=1, \dots, N_e$) 和预报集合平均 $\bar{\mathbf{x}}_f$ 。不断重复第 1 步和第 2 步,得到一系列同化时刻的预报场和分析场。通常情况下,当状态变量位置与观测资料位置相距较远时,两者的协方差很小。为简单起见,本文设定观测资料的影响范围是以观测资料位置为中心,以某一长度 r 为半径(称为影响半径 r)的球形区域。

3 同化模式和模拟雷达资料

采用的同化模式为 Sun 和 Crook 建立的三维云模式^[1],云模式建立在笛卡儿坐标系中,采用滞弹性近似,包含 6 个预报方程,它们是 3 个动量方程、热力方程、雨水方程和总水方程。模式预报变量 6 个:三维风场(u, v, w)、扰动液态水位温 θ'_l 、雨水混合比 q_r 和总水混合比 q_t 。其他变量水汽混合比 q_v 、云水混合比 q_c 、扰动温度 T' 和扰动气压 p' 可从预报变量诊断得到。模式中微物理过程采用 Kessler 暖雨参数化方案,没有考虑冰相作用。有关云模式的详细介绍可查阅文献^[1]。

作为研究的起步,本文中先同化模拟雷达资料,这样做的好处是可以知道同化分析结果的真实解并排除模式误差对同化的影响,使问题得以简化(关于模式误差对同化的影响将在 4.8 节中作简单

探讨)。采用理想层结和风场, 利用同化模式进行了模拟。模拟区域水平范围为 $58 \text{ km} \times 58 \text{ km}$, 垂直为 15 km ; 模式网格间距 $\Delta x = \Delta y = 2 \text{ km}$, $\Delta z = 0.5 \text{ km}$; 时间步长 10 s 。模式采用辐射边界条件。初始的水平速度、温度和湿度场由探空资料提供, 探空曲线取自文献[1], 它是较典型的对流风暴产生环境。热湿泡启动, 模式积分约 15 min 时, 开始下雨, 55 min 单体开始分裂。

将模拟得到的三维风场和雨水混合比代入下面的公式, 生成雷达的径向速度和反射率^[1]:

$$V_r = \frac{x-x_0}{s}u + \frac{y-y_0}{s}v + \frac{z-z_0}{s}(\omega - V_{Tm}), \quad (6)$$

$$V_{Tm} = 5.40 \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{0.4} (\rho q_r)^{0.125}, \quad (7)$$

$$Z = 2.04 \times 10^4 (\rho q_r)^{1.75}, \quad (8)$$

或

$$Z = 43.1 + 17.5 \lg(\rho q_r), \quad (9)$$

其中, s 表示任一格点 (x, y, z) 与雷达位置 (x_0, y_0, z_0) 之间的距离, V_{Tm} 是雨水下落末速度, ρ 是空气密度, \bar{p} 是基本态气压, p_0 是地面气压, (8) 和 (9) 式中雷达反射率 Z 的单位分别是 mm^6/m^3 和 dBZ 。(6)~(9) 式就是观测算子 H 的表达式。

4 试验设计和结果分析

4.1 控制试验

试验 1 为控制试验, 只同化多普勒雷达径向速度, 并假定模式所有格点都有径向速度资料。在雷达实际观测中, 一般来说有回波强度的地方, 才能探测到径向速度。以我国新一代 S 波段多普勒天气雷达为例, 它可探测的最小回波强度不大于 -7 dBZ ^①。根据式 (9), 并考虑密度变化的影响, 可知它可探测的最小雨水值不高于 $0.001 \sim 0.003 \text{ g/kg}$ 。而本研究区域所有格点上都有雨水, 且雨水值都不低于 0.01 g/kg , 因此从理论上讲, 可基本保证每个格点上都有回波强度和径向速度资料。

假定研究区域中心的水平坐标为 $(30 \text{ km}, 30 \text{ km})$, 雷达位置为 $(-30 \text{ km}, 30 \text{ km}, 0 \text{ km})$, 径向速度观测误差 1 m/s , 观测资料的时间间隔是 5 min 。集合大小 N_e 取 64 (为便于利用傅里叶变换法产生初始集合随机噪声误差, 集合大小常取为

2^n , n 为正整数), 雷达观测资料影响半径 r 取 4 km 。初始集合是这样给定的: 利用 Evensen^[13] 提出傅里叶变换方法产生随机噪声误差, 模式从探空曲线加上随机噪声误差积分 20 min , 得到初始集合。实践表明, 这样得到的初始集合比文献 [19, 20] 中简单地假定随机噪声误差是独立的同化效果要好。速度场误差标准差为 3 m/s , 液态水位温的误差标准差为 3 K , 误差平均值均为 0。同化开始时间 $t=20 \text{ min}$, 同化中更新全部的 6 个模式预报变量 $(u, v, w, \theta'_1, q_r, q_i)$ 。

图 1 和 2 给出了 $t=30 \text{ min}$ 、 45 min 和 60 min 时 5 km 高度上的模拟结果 (作为“真值”) 和 EnKF 同化结果, 由图可见, 随着积分时间的增加, 孤立的雷暴单体逐渐发展, 然后开始分裂。云中上升气流中心对应着云水中心和正的扰动温度中心, 体现了上升气流携带水汽, 水汽凝结释放潜热的过程。比较控制试验分析结果与真实结果, 在 $t=30 \text{ min}$ 时, EnKF 分析结果大体与真实场一致, 但是分析的上升气流、扰动温度和云水比真实场要弱, 分析的雨水场结构存在较大误差, 在上升气流中心的东北边, 速度场结构也存在较大误差。 $t=45 \text{ min}$ 时, 分析结果与真实场在尺度、结构和强度上比较接近, 与 $t=30 \text{ min}$ 相比, 分析效果有了明显提高。此后, 随着更多时次的资料同化到模式, 分析结果与真实场的差异越来越小, 至 $t=60 \text{ min}$, 分析结果几乎与真实场完全一致, 此时雨水场的结构明显比前面时刻更接近真实场了。可以看出, 虽然热力变量和微物理量没有直接对径向速度产生贡献, 但是在同化过程中, 它们同速度场一样被很好地分析出来, 证明了 EnKF 同化技术分析云中风场、热力场和微物理场的能力。

为了更定量地分析 EnKF 同化效果, 我们计算了 EnKF 分析结果的均方根误差 (RMSE)。在回波强度较小的格点, 由于变量值本身较小, 分析误差可能很小。所以为了更能体现分析效果的质量, 均方根误差的计算只针对所有反射率 $Z \geq 10 \text{ dBZ}$ 的格点。图 3 给出了控制试验中垂直风场、扰动温度以及雨水的集合平均 (包括预报和分析的) 的 RMSE 随时间的变化 (在本文所有试验中, 水平速度和云水的 RMSE 曲线分别同垂直速度和雨水的

① 新一代天气雷达原理与应用讲义. 中国气象局培训中心科学技术培训部编. 2000. 33pp

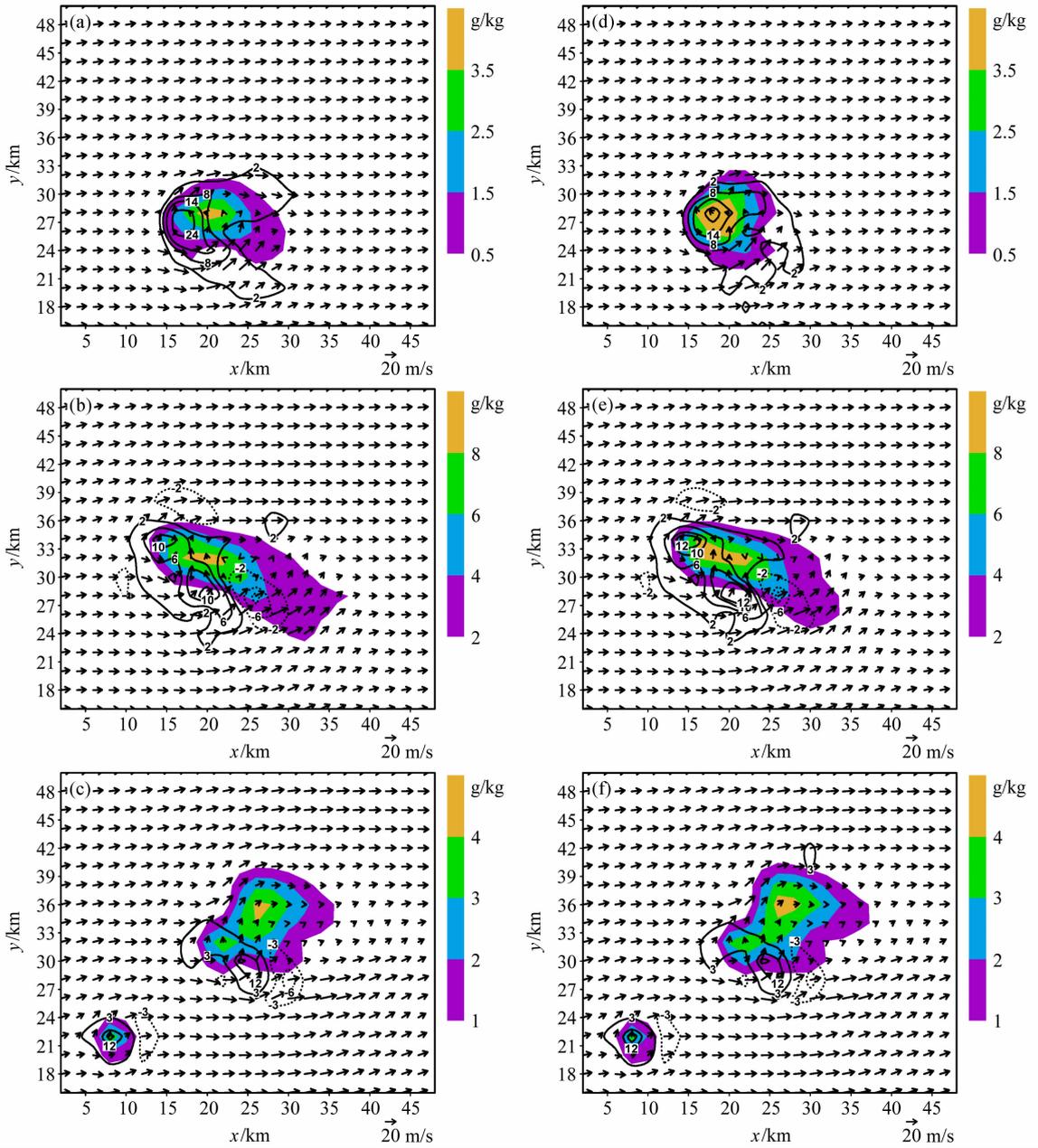


图1 5 km高度上的三维风场(箭头:水平风速;等值线:垂直风速,单位:m/s)和雨水混合比(阴影):(a)~(c)为 $t=30$ min、45 min和60 min的模拟结果(作为“真值”);(d)~(f)为对应时刻的EnKF同化分析结果

Fig. 1 The simulations (a, b, c) and the EnKF analyses (d, e, f) for three-dimensional wind fields (arrows: horizontal wind velocity; contours: vertical wind velocity in m/s) and rainwater mixing ratio (shaded) at 5 km height at $t=30$ min (a, d), 45 min (b, e) and 60 min (c, f)

RMSE 曲线大体一致, 所以就不给出了)。正如前面所分析的那样, 图 3 也表明, 在同化开始后的 40 min 内 ($t=20 \sim 60$ min), RMSE 随着时间的增加迅速减小, 分析效果迅速提高, $t=60$ min 后 RMSE 曲线逐渐趋于平缓, 垂直速度、扰动温度和雨水的均方根误差分别仅为 0.5 m/s、0.2 K 和 0.2 g/kg 左右。图 3 中 RMSE 曲线呈锯齿状, 每

次分析结果的 RMSE 都比预报结果的 RMSE 要小, 这表明, 每次同化多普勒雷达资料后的结果都比同化前的结果更接近真实场, 体现了 EnKF 同化的有效性。

下面, 从机理上分析上述结果的合理性和可靠性。EnKF 方法的核心是预报集合估计协方差。首先讨论预报集合, 准确的 EnKF 分析要求集合的发

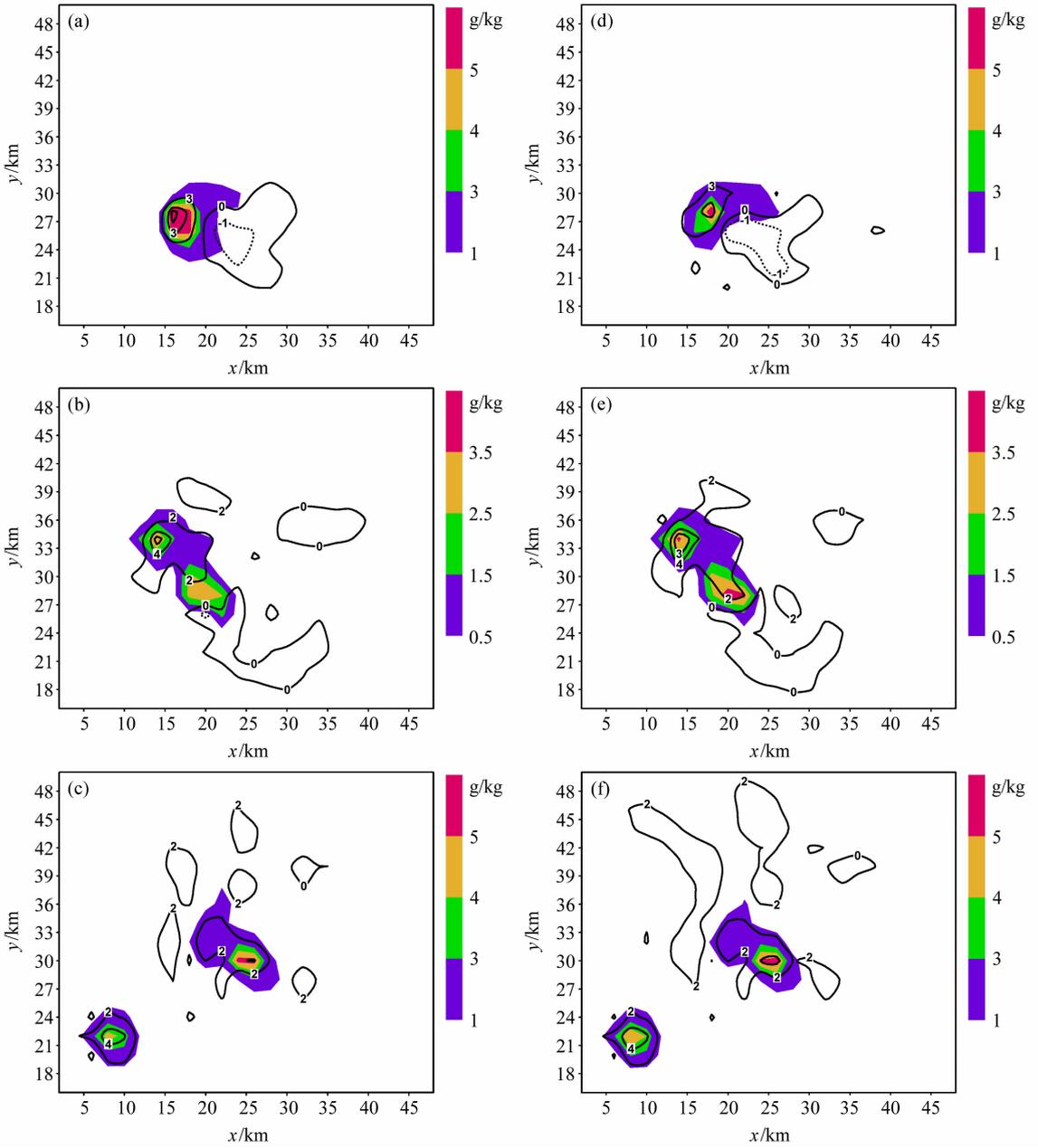


图2 5 km 高度上的扰动温度(等值线, 单位: K)和云水混合比(阴影), 其他同图 1

Fig. 2 Similar to Fig. 1, but for temperature perturbation (contours in K) and cloud water mixing ratio (shaded)

散度能够表征集合平均的误差^[15], 即在统计上满足如下一致性关系: 集合方差的数学期望

$$E\left[(N_e - 1)^{-1} \sum_{n=1}^{N_e} |\mathbf{x}_{fn} - \bar{\mathbf{x}}_f|^2\right]$$

与集合平均的误差平方的数学期望

$$E(|\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_f|^2) (\mathbf{x}_t \text{ 表示真值})$$

的比值等于 $N_e / (N_e + 1)$ 。图 4 给出控制试验中垂直速度、扰动温度和雨水三个量的集合方差与集合

平均的误差平方的比值。可以看出在同化的初期阶段这个比值较小, 随着时间的增加, 比值逐渐增加, 在 $t=60 \text{ min}$ 后, 比值大体上维持在 $N_e / (N_e + 1)$ 附近。这与同化分析结果是吻合的: 初期阶段集合平均的误差较大, 集合方差比集合平均的误差平方要小 5 倍以上。随着时间的增加, 集合方差增加, 集合平均的误差下降, 至 $t=60 \text{ min}$ 后, 两者接近, 比值维持在 $N_e / (N_e + 1)$ 左右, 同化结果接近

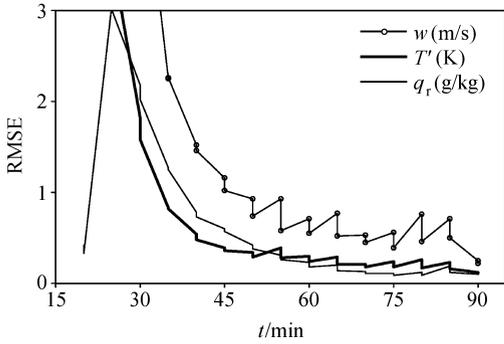


图3 EnKF 同化控制试验预报和分析的集合平均的均方根误差
Fig. 3 Root-mean-square errors (RMSEs) of the forecasted and analysed ensemble means from the EnKF control experiment. w is vertical velocity, T' temperature perturbation, q_r rainwater mixing ratio

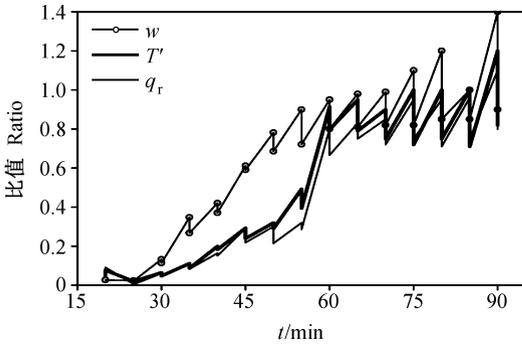


图4 EnKF 同化控制试验预报和分析的集合方差与集合平均的误差平方比值
Fig. 4 Similar to Fig. 3, but for the ratio of the ensemble variance to the error of the ensemble mean

真值。进一步分析集合方差相对集合平均的误差随同化时间增加而增加的原因是：带有随机噪声的初始集合，经模式积分导致一些集合成员产生了虚假单体，在预报过程中，虚假单体与“观测单体”（模拟结果）相互作用增加了每个集合成员相对集合平均的偏离，即增加了集合方差。但这些虚假单体经平均后几乎消失，所以集合平均相对真值的偏离并不大，导致集合方差相对集合平均的误差增长。虽然图4只是集合方差与集合平均的误差平方的比值，但也可大体代表两者数学期望的比值关系。图4也为提高EnKF同化效果提供了依据，例如，针对初期阶段集合方差与集合平均的误差平方的比值较小的问题，我们增加初始集合的方差，重复了控制试验。结果表明，增加初始集合方差，可以增加同化初期阶段集合方差与集合平均的误差平方的比值，并

改进初期阶段EnKF同化效果，具体结果见4.6节。

其次，讨论协方差的分布特征。图5给出模式状态变量与径向速度之间相关系数的垂直分布，与文献[19]中的图8大致类似，这说明了本文结果的可靠性。图5表明，协方差有着复杂的结构，它的分布是高度不均匀的。首先，协方差的分布与模式变量的分布关系密切，对水平速度 u 分量而言，强相关（正值）主要分布在上升气流区所对应的弱水平气流区，垂直速度的强相关（负值）主要分布在上升气流区，扰动液态水位温的强相关（正值）和雨水的强相关（负值）则分布在上升气流区中下部所对应的弱扰动液态水位温区和弱雨水区；其次，协方差的分布与格点的位置关系密切，大体上每个格点的径向速度预报值与其附近格点上的模式变量相关性较大，而与远处格点上的模式变量的相关性较小。这就是我们可以将观测资料的影响限制在某一距离范围内的依据。这表明预报集合估计的协方差分布是大致合理的，从而进一步说明分析结果的可靠性。

前面提到EnKF预报和分析的集合平均的RMSE随时间逐渐减小（图3）。现在就存在这样一个问题：分析误差随时间的逐渐减小是否主要由预报误差的减小引起，观测资料的进入究竟起到了什么样的作用？为此进行了下面的分析。首先分析5 min的预报误差，从图3可见，当 t 较大时，RMSE曲线呈锯齿状，大体上，每一次预报误差都比前一个5 min时刻的分析误差大，表明集合预报误差是增加的，每一次5 min的集合预报，使得集合平均都比前一个5 min时刻分析结果更偏离真值，同化了观测资料以后，又将预报结果调整到更接近真值。这说明如果不同化观测资料，预报误差是继续增加的。其次分析更长时间的预报误差，图6给出了没有同化多普勒雷达资料预报的集合平均RMSE和以控制试验中 $t=20$ min时刻同化分析结果作为初始场预报的集合平均RMSE（即只同化 $t=20$ min一个时次的资料）。为了对比，图6中也给出了控制试验的预报和分析的集合平均RMSE，由图可见，没有同化多普勒雷达资料集合预报结果误差最大，EnKF同化控制试验结果误差最小，它们两个均方根误差的相对差别随时间增加而增大。在 $t=40$ min以后，没有同化多普勒雷达资料预报的水平速度、垂直速度、扰动温度和雨水，RMSE分别高达6 m/s、3 m/s、1.2 K和1.5 g/kg左右，

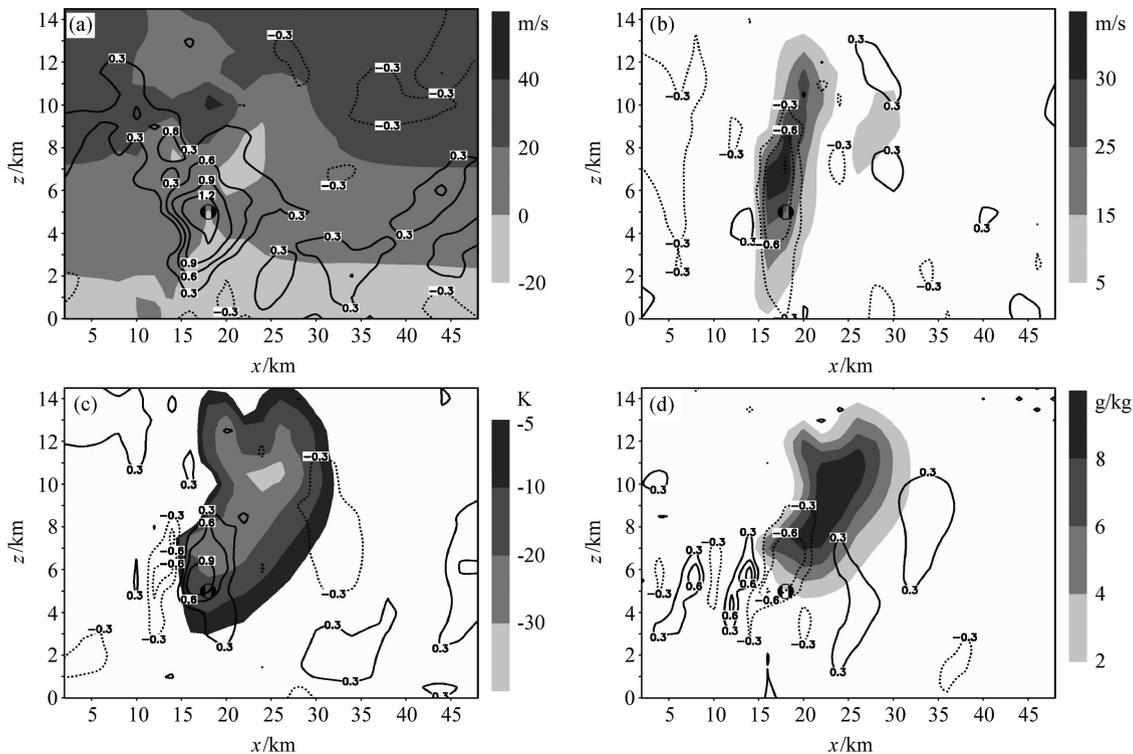


图 5 $t = 30 \text{ min}$ 时沿 $y = 26 \text{ km}$ 垂直剖面上的水平速度 u 分量 (a)、垂直速度 (b)、扰动液态水位温 (c)、雨水混合比 (d) 以及这些量分别与坐标为 (18 km, 26 km, 5 km) 格点处 (黑圆圈表示) 的径向速度的相关系数。阴影: 变量本身; 等值线: 相关系数

Fig. 5 u component of the horizontal velocity (a, shading), vertical velocity (b, shading), temperature perturbation (c, shading), rainwater mixing ratio (d, shading) at $t = 30 \text{ min}$ in the $x-z$ plane along $y = 26 \text{ km}$ and the correlation coefficients (contours with 0.3 interval) of these variables and the radial velocity at point (18 km, 26 km, 5 km) (indicated by a black circle)

而 EnKF 同化控制试验分析的则只有 0.5 m/s、0.5 m/s、0.2 K 和 0.2 g/kg 左右, 前者约为后者的 6~10 倍。以 $t = 20 \text{ min}$ 同化分析结果作为初始场预报的集合平均的误差, 开始时比没有同化多普勒雷达资料预报结果误差要小, 体现了观测资料同化的效果, 但是随着时间的增加, 两者又逐渐接近, 表明同化一个时次的资料其影响时效是有限的。从以上分析不难看出, 如果仅仅依靠集合预报, 而不同化资料, 是不能得到准确结果的。资料的同化对分析结果的准确性起着至关重要的作用, 这充分体现了 EnKF 同化方法的有效性。

4.2 雷达位置和个数对同化的影响

针对同一个观测对象, 不同位置 (观测角度) 的多普勒雷达探测的径向速度所包含的信息可能不同, 因而其同化反演的结果也可能不同。Sun 和 Crook^[21] 曾研究指出, 雷达位置的不同可能会对单雷达径向速度资料 4DVAR 同化反演结果影响很大。为了考察雷达位置对 EnKF 同化结果的影响,

试验 2 中假定雷达的位置在 (30 km, -30 km, 0 km), 其余条件同试验 1。图 7a 给出了试验 2 预报和分析结果的均方根误差, 显示的 RMSE 曲线同控制试验预报和分析结果的 RMSE 曲线 (图 3) 大致类似, 只是在同化的初期阶段 ($t = 20 \sim 50 \text{ min}$), 试验 2 的均方根误差略大些。随着同化时间的增加, 试验 2 和试验 1 的结果差异逐渐减小, 表明 EnKF 同化结果对雷达位置不太敏感。当然, 由于观测对象不同, 对雷达位置要求也就不同, 因此这一结论还需其他个例, 特别是实测资料的进一步验证, 但此研究至少说明, 由于有多个时刻观测资料的进入, 时间演变信息增加了单雷达探测的空间信息, 从而单多普勒雷达径向速度资料 EnKF 同化对雷达位置的依赖性得以减小。

试验 3 中同化两部多普勒雷达的径向速度资料, 两部假想雷达的位置分别在 (-30 km, 30 km, 0 km) 和 (30 km, -30 km, 0 km), 其余条件同控制试验。图 7b 给出了试验 3 预报和分析结果的均

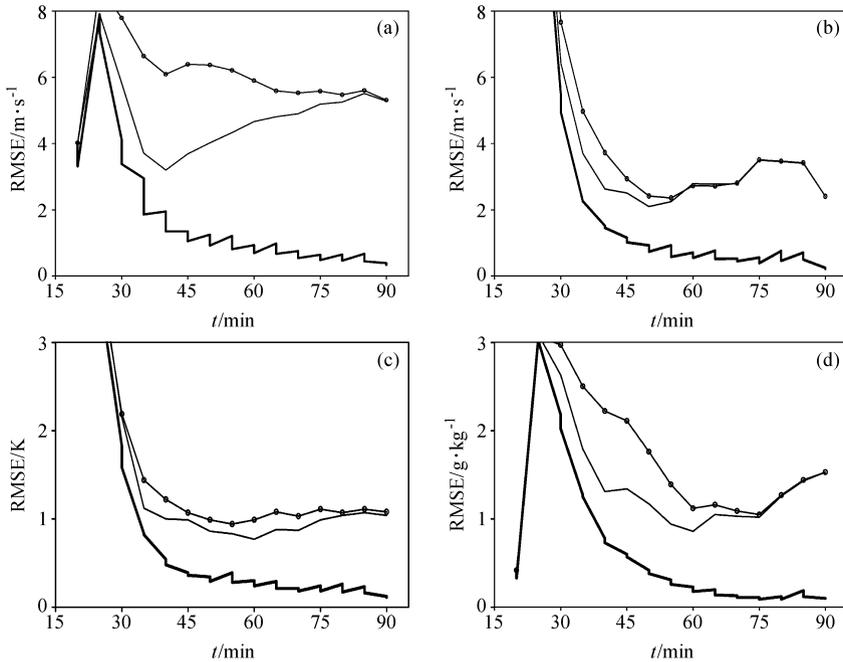


图6 集合平均的均方根误差: (a) 水平速度; (b) 垂直速度; (c) 扰动温度; (d) 雨水混合比。粗线表示 EnKF 同化控制试验结果, 带有“o”标志的实线表示没有同化多普勒雷达资料的预报结果, 细线表示利用 $t=20$ min 时刻 EnKF 同化分析结果作为初始场的预报结果

Fig. 6 Root-mean-square errors of the ensemble mean: (a) Horizontal velocity; (b) vertical velocity; (c) temperature perturbation; (d) rainwater mixing ratio. The thick solid lines represent the results from the EnKF control experiment, the solid lines marked with “o” and thin solid lines are for the forecast results starting from the initial ensemble at $t=0$ min (when radar data are not assimilated) and the analysis at $t=20$ min, respectively

方根误差, 显示随着同化时间的增加, 同化结果的 RMSE 变化趋势是减小的。与单雷达资料同化结果相比 (图 3 和图 7a), 双雷达资料同化结果 RMSE 曲线在同化的初期阶段 ($t=20\sim 50$ min) 下降得更快, 表明在同化初期阶段双雷达资料同化结果更准确, 这主要是因为初期阶段进入模式的雷达资料时次较少, 双雷达提供的信息明显比单雷达提供的信息多。试验 3 中 $t=30$ min 时同化分析结果 (图略) 显示, 无论是变量的分布结构还是数值大小, 同化双雷达径向速度的分析结果比控制试验中同化单雷达径向速度的分析结果更接近真值。随着同化时间进一步增加, 由于有更多时刻的资料信息进入, 双雷达资料的优势逐渐丧失, $t=50$ min 后, 双雷达资料的同化效果基本等同于单雷达资料的同化效果。可见, 利用多时次的单多普勒雷达径向速度资料分析 (反演) 大气的状态, 可以减小雷达位置 (观测角度) 以及单雷达信息不足对分析结果的影响, 表明发展多普勒雷达资料四维同化技术很有必要。

4.3 反射率资料的同化

雷达反射率资料的同化一直是个难点, 其主要

原因是反射率与模式变量的关系是高度非线性的。另外, 反射率与模式变量的关系是个经验公式, 它受到雨滴谱型、雨滴下落速度等因素的影响。不同的雨滴谱型, $Z-q_r$ 关系是不一样的, 本文采用的 $Z-q_r$ 关系主要适合 M-P 谱分布。接下来研究反射率资料的同化, 首先, 我们在模式中只同化反射率资料, 不同化径向速度资料, 观测算子分别采用式 (8) (当反射率的单位是 mm^6/m^3 时) 和式 (9) (当反射率的单位是 dBZ 时), 结果发现同化结果与真实场差别很大, 同化效果很差。接着我们又联合同化径向速度资料和反射率资料, 结果发现虽然同化结果能够反映真实场的基本特征, 但效果比控制试验单独同化径向速度的效果差。上述两组试验, 效果不理想的主要原因有以下几点: 反射率与模式变量的协方差信息不足以调整所有模式变量; 观测算子的线性化程度对 EnKF 同化技术影响较大, 对于线性观测算子 EnKF 同化技术表现最优, 而反射率观测算子是高度非线性的; 由于径向速度和反射率的量级、单位以及观测误差不一致, 所以在同化过程中权重是不同的, 可能我们的权重系数选择不合适。

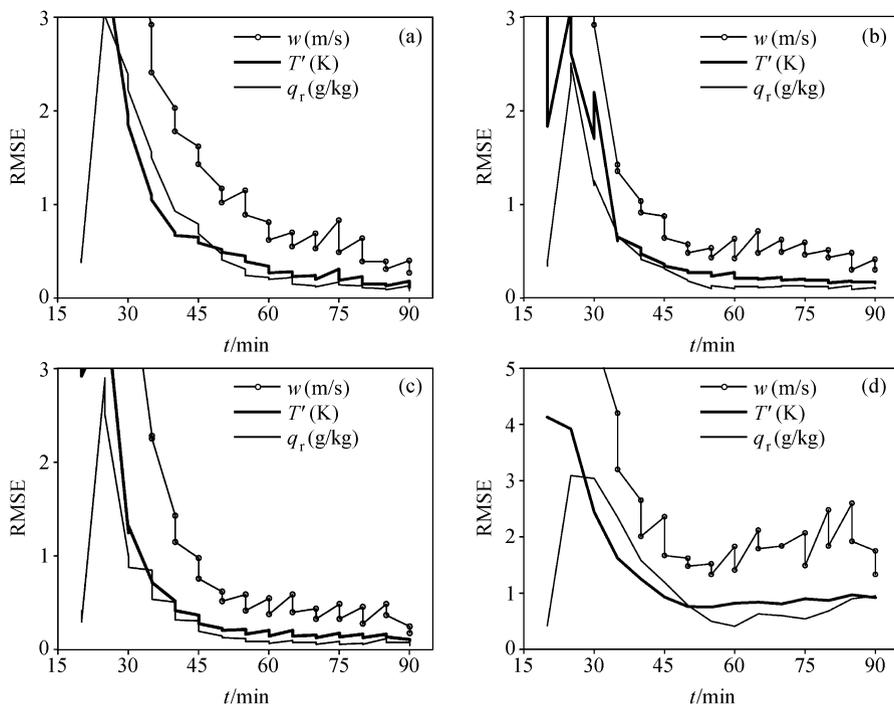


图7 预报和分析的集合平均的均方根误差: (a) 雷达位置在 (30 km, -30 km, 0 km) (试验 2); (b) 同化双雷达的径向速度 (试验 3); (c) 联合同化径向速度和雨水混合比 (试验 4); (d) 同化中只更新三维风场 (试验 5)

Fig. 7 Similar to Fig. 3, but for (a) experiment 2 in which the radar location is at point (30 km, -30 km, 0 km); (b) experiment 3 in which dual-Doppler radial velocity is assimilated; (c) experiment 4 in which both radial velocity and rainwater mixing ratio are assimilated; (d) experiment 5 in which only the three-dimensional wind field is updated in the analysis

Sun 和 Crook^[1]在多普勒雷达资料的 4DVAR 同化研究中, 曾指出同化由反射率导出的雨水比直接同化反射率资料更有效。下面我们沿用这一思想, 联合同化径向速度资料和雨水混合比 (试验 4), 雨水混合比由雷达反射率导出。图 7c 给出了试验 4 预报和分析结果的均方根误差。与控制试验均方根误差结果 (图 3) 比较可以发现, 试验 4 分析的雨水场的效果有明显改进, 速度场和温度场的误差也有所减小。这表明增加雨水的同化有利于提高同化分析效果, 而且同化由反射率导出的雨水比直接同化反射率资料更有效。增加雨水的同化, 实际上就是增加了雨水观测与状态变量之间的协方差, 通过此协方差, 雨水观测值对状态变量, 特别是雨水进行了有效的调整, 从而改进了分析效果。

4.4 协方差的重要性

EnKF 同化技术主要通过预报协方差来分析状态变量。为了检验协方差的重要性, 试验 5 中只考虑径向速度与三维风场的协方差, 不考虑径向速度与其他三个预报变量 (θ'_1 、 q_r 和 q_t) 的协方差, 即同

化过程中只更新三维风场, 不更新其他三个预报变量。图 7d 给出了试验 5 预报和分析结果的 RMSE。尽管试验 5 中更新了三维风场, 但是由于没有更新其他三个预报变量, 观测资料只是通过风场对它们起作用, 这是非常有限的, 导致这三个预报变量误差增加, 它们再通过模式方程影响三维风场和温度场。所以, 与图 3 比较可以看出, 图 7d 中不仅温度场和雨水场的 RMSE 增大了, 而且风场 RMSE 也增大了。在 $t=45$ min 后, 试验 5 分析的垂直速度、扰动温度和雨水 RMSE 分别在 2 m/s、0.9 K 和 0.8 g/kg 左右, 而 EnKF 同化控制试验分析的垂直速度、扰动温度和雨水 RMSE 分别仅有 0.5 m/s、0.2 K 和 0.2 g/kg 左右, 试验 5 的 RMSE 明显偏大。如果在同化中仅仅更新水平风场的 u 分量, 则显示分析结果的 RMSE 比试验 5 的 RMSE 还要大, 同化效果更差。再进一步, 如果没有更新任何变量, 仅仅依赖集合预报, 结果是很差的 (图 6 虚线)。这表明协方差含有状态变量与观测变量之间关系的重要信息, 它对于分析效果非常重要, 考虑所有模式预报变量与

观测变量之间的协方差有利于提高分析效果。试验 5 中由于没有更新 θ'_r 、 q_r 和 q_r ，所以扰动温度和雨水混合比的预报误差和分析误差相同，图 7d 中它们的 RMSE 曲线没有锯齿状。

4.5 观测资料质量的影响

前面试验中假定模式所有格点都存在雷达观测资料，而在实际雷达观测中，并不能保证研究区域所有格点都有雷达资料。例如，受雷达探测精度和灵敏度的影响，只有回波达到一定强度区域的观测资料才是有效的。再比如，由于雷达实际观测总有一定的仰角，所以当云体离雷达较远时，云体的底部就可能观测不到。为了使模拟雷达资料更接近实际情况，我们作了如下试验。试验 6 中假定只有 $Z > 20$ dBZ 的格点有径向速度资料，试验 7 中假定 2 km 以下没有径向速度资料，两个试验的其余条件同控制试验。图 8a 和 b 分别给出了试验 6 和试验 7 预报和分析结果的均方根误差。与控制试验相比，试验 6 和试验 7 的同化效果明显恶化，它们的 RMSE 比控制试验的 RMSE 高出 4 倍左右， $t = 50$ min 后，垂直速度 RMSE 曲线起伏较大。另外，

还可看出图 8a 和 b 显示的 RMSE 曲线多处呈倒锯齿状，这表明有时分析结果的 RMSE 反而比预报结果的要大，同化后的结果比同化前的结果更偏离真实场，同化是负效应。上述分析表明，雷达资料缺值对 EnKF 同化结果和表现影响很大，常常是负效应。其可能原因是：当观测资料偏少时，问题的解可能不唯一，模式预报变量在没有观测资料影响的点产生了许多不规则扰动，严重影响了同化效果。为了改善试验 6 和试验 7 的结果，必须在模式中还吸收其他观测资料。

许小永等^[11]曾研究指出，雷达资料缺值对多普勒雷达资料的 4DVAR 同化反演效果起负效应，通过采用探空曲线作为背景场，可以改善同化效果。这里，假定存在一个规则的、理想的地面观测网，可以提供模式底层的水平速度和温度。试验 8 和试验 9 分别重复了试验 6 和试验 7，并增加了地面观测资料的同化。地面观测网的分辨率是 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 。观测网的资料由模拟结果提供，水平速度观测误差为 1 m/s ，液态水位温是观测误差为 1 K ，影响半径是 4 km 。图 8c 和 d 分别给出了试验 8 和

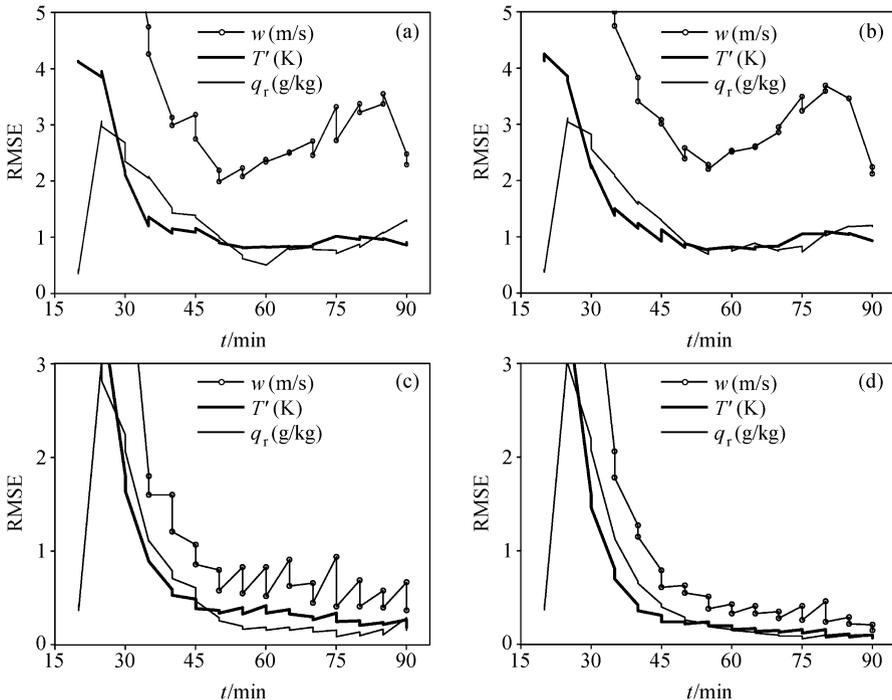


图 8 预报和分析的集合平均的均方根误差：(a) 只同化 $Z > 20$ dBZ 格点的径向速度（试验 6）；(b) 只同化 2 km 以上的径向速度（试验 7）；(c) 同化 $Z > 20$ dBZ 格点的径向速度和地面观测资料（试验 8）；(d) 同化 2 km 以上的径向速度和地面观测资料（试验 9）

Fig. 8 Similar to Fig. 3, but for (a) experiment 6 in which the radial velocities are available when $Z > 20$ dBZ; (b) experiment 7 in which there are no radial velocities below 2 km; (c) experiment 8 and (d) experiment 9 that are similar to experiment 6 and experiment 7, respectively, but contain assimilation of the hypothetical surface wind and temperature observations

试验 9 预报和分析结果的均方根误差。增加地面观测资料后, 同化效果有了明显提高。 $t=50$ min 后, 试验 8 同化分析的垂直速度场、扰动温度和雨水的 RMSE 分别约为 0.5 m/s、0.3 K 和 0.2 g/kg, 与控制试验结果相当。而试验 9 同化分析的垂直速度场、扰动温度和雨水的 RMSE 分别仅有 0.3 m/s、0.2 K 和 0.1 g/kg, 甚至比控制试验同化效果还好。主要原因可能是地面观测资料直接提供了模式底层的温度场信息, 这是雷达观测资料所不能直接提供的。上述研究表明, 地面观测资料的同化对减小资料缺值对同化的负面效应, 提高同化分析效果非常有用。

控制试验中假定雷达径向速度资料的观测误差是 1 m/s。为了检验 EnKF 同化技术对观测误差的敏感性, 试验 10 中假定雷达径向速度资料的观测误差是 2 m/s。图 9a 给出了试验 10 预报和分析结果的均方根误差。图 9a 显示的 RMSE 曲线变化特

征与控制试验的 RMSE 曲线(图 3)变化特征比较一致, 试验 10 的 RMSE 比控制试验略有增加, 垂直速度、扰动温度和雨水的 RMSE 分别只增加了 0.3 m/s、0.1 K 和 0.1 g/kg。表明同化分析结果对观测资料误差是不敏感的, 这是利用 EnKF 同化技术从多普勒雷达资料分析状态变量的一个优点。

4.6 初始集合的影响

下面, 研究初始集合对 EnKF 同化的影响。前文提到, 在控制试验中可能由于初始集合的方差偏小, 导致初期阶段集合方差与集合平均误差平方的比值较小, 从而影响初期阶段的分析效果。试验 11 重复了控制试验, 但速度场和温度场初始集合的标准差增加了 1 倍, 分别为 6 m/s 和 6 K。图 9b 给出了此次试验的 RMSE 结果, 由图可见, 在初期阶段($t=20\sim 50$ min), 试验 11 的同化效果比控制试验同化效果有了一定的提高, $t=35$ min 时, 垂直速度、扰动温度和雨水的 RMSE 分别比控制试验大致减小

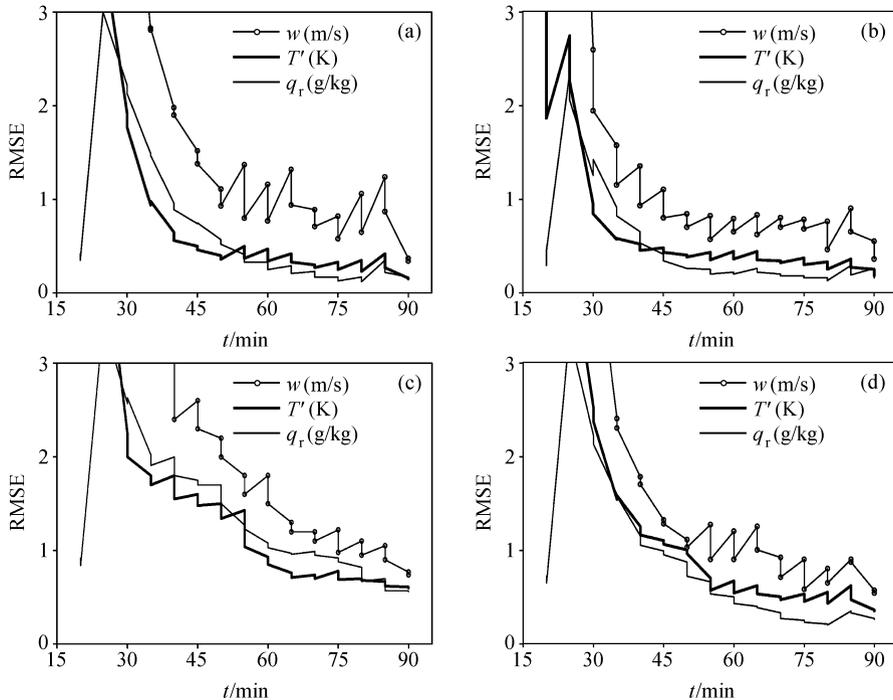


图 9 预报和分析的集合平均的均方根误差: (a) 径向速度观测误差为 2 m/s (试验 10); (b) 初始集合标准差比控制试验增加一倍, 速度场和雨水场的标准差分别为 6 m/s 和 6 K (试验 11); (c) 初始集合为 $t=15$ min 时模拟结果加上随机扰动, 其中模拟的单体位置人为地水平移动了 5 km (试验 13); (d) 探空采用 2002 年 7 月 22 日 08 时 (北京时) 宜昌站探空资料

Fig. 9 Similar to Fig. 3, but for (a) experiment 10 in which the observational error of the radial velocity is doubled to 2 m/s; (b) experiment 11 in which the standard variances of velocity and rainwater are double to 6 m/s and 6 K, respectively; (c) experiment 13 in which the initial ensemble is formed by adding random errors to the simulations at $t=15$ min, but the cell at $t=15$ min is displaced for 5 km so that it is in the wrong location; (d) the sounding data used in the control experiment are replaced by that at Yichang station at 0800 BT (Beijing time) 22 Jul 2002

1.2 m/s、0.4 K 和 0.2 g/kg。这是因为增加初始集合方差，也就增加了同化初期阶段集合方差与集合平均的误差平方的比值，从而改进了初期阶段 EnKF 同化效果。表明在 EnKF 同化中，保持集合足够发散，集合方差能表征集合平均的误差很重要。这与 Houtekamer 和 Mitchell^[15] 的观点一致。

控制试验中，我们利用探空曲线加上随机扰动再积分 20 min 产生初始集合，下面讨论另外两种不同的初始集合对同化的影响。试验 12 用模拟试验中 $t=15$ min 时的模拟结果加上随机扰动生成初始集合。试验 13 先将 $t=15$ min 时模拟的单体位置人为地水平移动 5 km，再加上随机扰动生成初始集合。试验 12 的结果（图略）表明，整个同化阶段，同化结果的误差很小，同化效果极好。这主要因为初始集合是理想化的，误差较小。图 9c 显示，试验 13 的同化结果误差较大，即使在同化了 9 个时次的观测资料 ($t=60$ min) 后，垂直速度、扰动温度和雨水均方根误差仍分别高达 1.5 m/s、1 K 和 1.2 g/kg 左右。但是从其误差曲线变化趋势来看，随着更多时次的资料进入同化，同化结果仍可能逼近真值。试验 13 中给出的初始集合误差较大，它给出了一个位置不正确的风暴单体（虚假单体），同化过程中模式逐渐压制虚假单体，并生成新的风暴单体。当新生单体与逐渐减弱的虚假单体共存时，同化结果误差较大。随着更多时次资料进入同化，虚假单体逐渐消失，位置正确的新生风暴单体逐渐接近实际结果，分析误差逐渐减小。

上面几组初始集合都是基于获取模拟雷达资料时的探空资料加上随机扰动再积分形成。下面选取第 5 节采用的 2002 年 7 月 22 日 08 时（北京时，下同）宜昌站探空资料来进行同化试验。同化结果（图 9d）显示，RMSE 曲线随时间的变化特征与控制试验（图 3）相似，RMSE 值比控制试验有所增大，但增加量不显著。不同的探空曲线所得的同化结果之间的差异主要在于初始集合不同。由于控制试验中采用了获取模拟雷达资料时的探空资料，其对初始集合的描述更合理些，所以同化效果好于采用其他探空资料得到的同化效果。另外，两组探空曲线所得到的同化结果差异不显著的可能原因是：同化中探空曲线本身作为背景场（隐含在初始集合中）在无雷达资料区影响较大，而这里所有格点上都有观测资料，所以其对同化影响小。

4.7 集合大小 N_e 和影响半径 r 的影响

采用 EnKF 同化多普勒雷达资料时，必须选择集合大小 N_e 和观测资料影响半径 r 。目前，还没有很好的方法来确定最合适的 N_e 和 r 。图 10 给出不同 N_e 和 r 下， $t=60$ min 时垂直速度分析结果的均方根误差（其他变量的误差变化特征基本与之类似，不再给出）。图 10 显示，EnKF 同化结果依赖于 N_e 和 r 的取值。当 N_e 从 64 减小到 16 时，分析场误差增加。当 N_e 从 64 增加到 128 时，分析场误差减小，分析效果增加，但不明显。当 r 取值范围在 2~4 km 时，分析的集合平均的误差变化很小，但当 r 取 8 km 或更大时，分析误差迅速增加，同化效果明显恶化。Houtekamer 和 Mitchell^[15] 指出，当观测资料影响半径取值较大时，为了较准确地估计那些弱的协方差需要很多集合成员。

4.8 模式误差的影响

上述试验中，采用的模拟雷达资料也来自同化模式，因此模式是完美的，不存在误差。然而，在实际运用中，模式总是存在误差的。为了考察模式误差对同化的影响，设计了试验 14（同化时，将模式原微物理参数化方案中云水自动转换率、雨水碰并率和雨滴蒸发率全部增大 1 倍）。这样相对模拟雷达资料而言，同化模式是存在误差的。试验 14 的 RMSE 结果（图略）显示，当模式存在误差时同化结果误差较大， $t>45$ min 时，垂直速度、扰动温度和雨水分析值的 RMSE 仍分别有 2 m/s、1 K 和 1 g/kg 左右。这表明同化对模式误差是敏感的。其主要原因是：当模式存在误差时，模式误差协方差对于预报

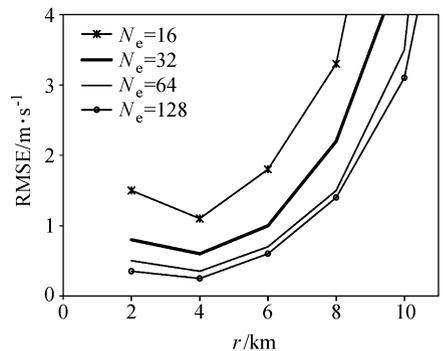


图 10 $t=60$ min 时不同集合大小 N_e 和影响半径 r 下分析的垂直速度均方根误差

Fig. 10 Root-mean-square error of analyzed vertical velocity as a function of the influence radius (r) for different values of the ensemble sizes (N_e) at $t=60$ min

集合的分析也是非常重要的。试验 14 只考虑了预报误差协方差，没有考虑模式误差协方差，导致估计的协方差不准确，从而影响了分析结果。

5 EnKF 同化双多普勒雷达资料分析 一次梅雨锋暴雨中尺度结构

下面，利用“我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究”项目外场试验中宜昌—荆州双多普勒雷达观测系统获得的长江中游一次梅雨锋暴雨过程的观测资料，通过 EnKF 同化，反演分析了暴雨的中尺度结构。

5.1 多普勒雷达观测资料

所用资料为宜昌—荆州双多普勒雷达获取的 2002 年 7 月 22 日梅雨锋暴雨过程的探测资料。刘黎平等^[22]已经利用双多普勒雷达风场合成法对这次暴雨过程风场中尺度结构作了较为详细的研究(有关暴雨过程描述、双多普勒雷达探测系统、有关雷达参数以及雷达资料处理检验的方法等可参看

文献[22]，此处不再赘述)。这里，我们仅选择 7 月 22 日 11: 01、11: 07、11: 13、11: 19、11: 25 和 11: 31 共 6 个连续时次的双多普勒雷达资料进行同化，反演区域水平范围 90 km×60 km，垂直高度 9 km。分辨率为 $\Delta x = \Delta y = 2$ km, $\Delta z = 0.5$ km。

集合大小 N_e 取 32，雷达观测资料影响半径 r 取 3 km。取径向速度观测误差 1 m/s，雨水混合比观测误差 0.01g/kg，观测资料的时间间隔是 6 min。初始集合的产生方法同上一节同化模拟雷达资料时一样(其中采用 22 日 08 时宜昌站探空资料)。联合同化径向速度和由反射率导出的雨水。

5.2 EnKF 同化结果

图 11 和 12 给出了这次暴雨过程中尺度结构在 11: 31 时刻的 EnKF 同化分析结果，图中以宜昌雷达为坐标原点， x 轴正方向指向正东， y 轴正方向指向正北。

从图 11 来看，2 km 高度上存在一条西南东北走向的气旋式切变线，风切变线东南侧为西南风，

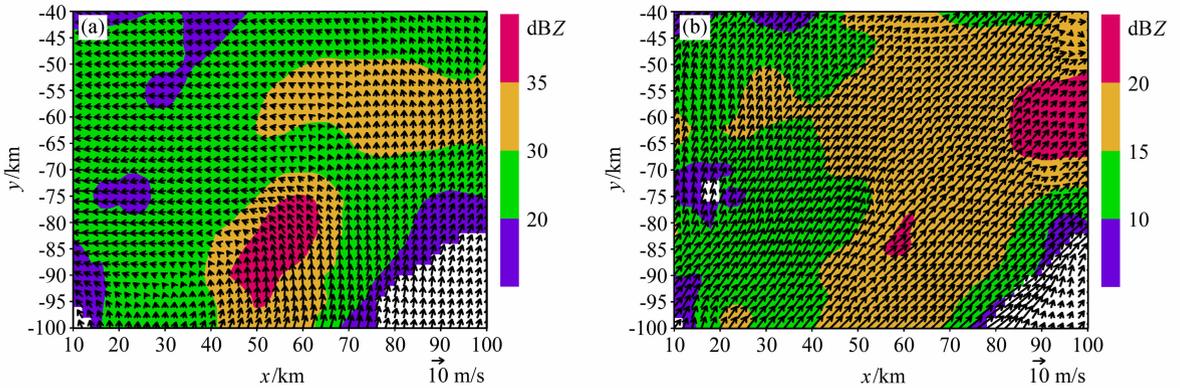


图 11 EnKF 分析的 2 km (a) 和 7 km (b) 高度上水平风场。阴影表示雷达回波强度

Fig. 11 EnKF retrieval horizontal wind and the reflectivity (shading) at 5 km (a) and 7 km (b) heights

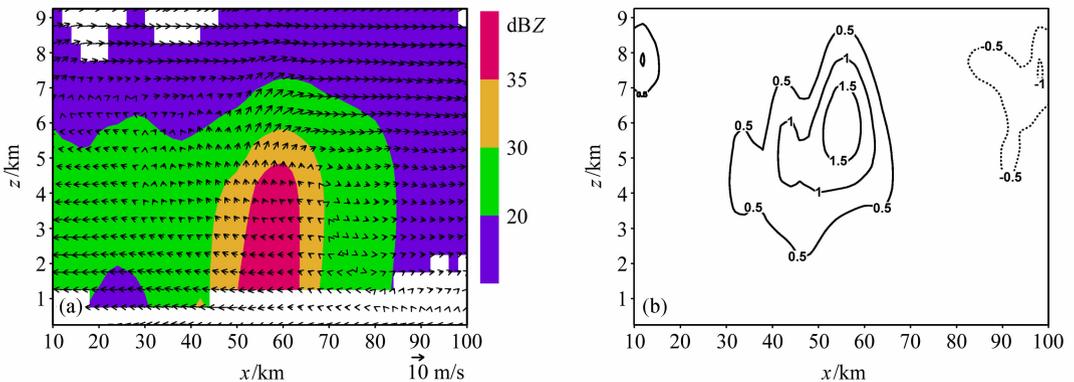


图 12 EnKF 分析结果沿 $y = -80$ km 的东西向垂直剖面结构：(a) 回波强度和风场；(b) 垂直速度(单位: m/s)

Fig. 12 Vertical cross sections of EnKF retrieval fields along $y = -80$ km: (a) Reflectivity and wind field; (b) vertical velocity (units: m/s)

西北侧为偏东气流。切变线主要发生在低 4~5 km 以下, 强回波带正好处在切变线上, 切变线在强回波区产生辐合。7 km 高度上水平风场比较均匀, 基本为西南气流, 风速为 15 m/s 左右, 但在强回波区存在一个明显的辐散区。从图 12a 和 b 给出的风场垂直结构来看, 对流云回波底部是入流区, 而高层则是出流区, 对流云强回波对应一上升气流, 上升气流不强。风的垂直切变明显, 在对流云体西面, 5 km 以下为东风, 5 km 以上为西风, 对流云体东面, 低层西风风速小于高层西风风速。EnKF 分析的风场与双多普勒雷达合成风场^[22]相一致, 其所揭示的梅雨锋暴雨中尺度对流系统动力特征表现为低层辐合、高层辐散, 并伴随垂直运动。这与文献^[23, 24]利用模式模拟结果所揭示的梅雨锋暴

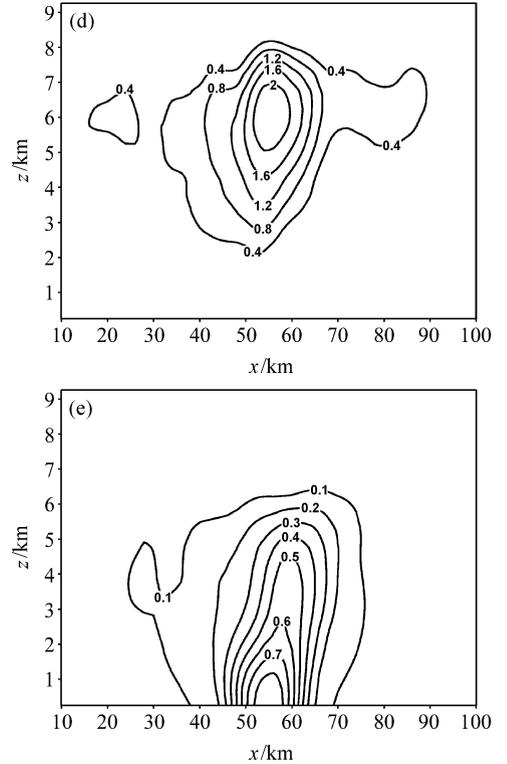
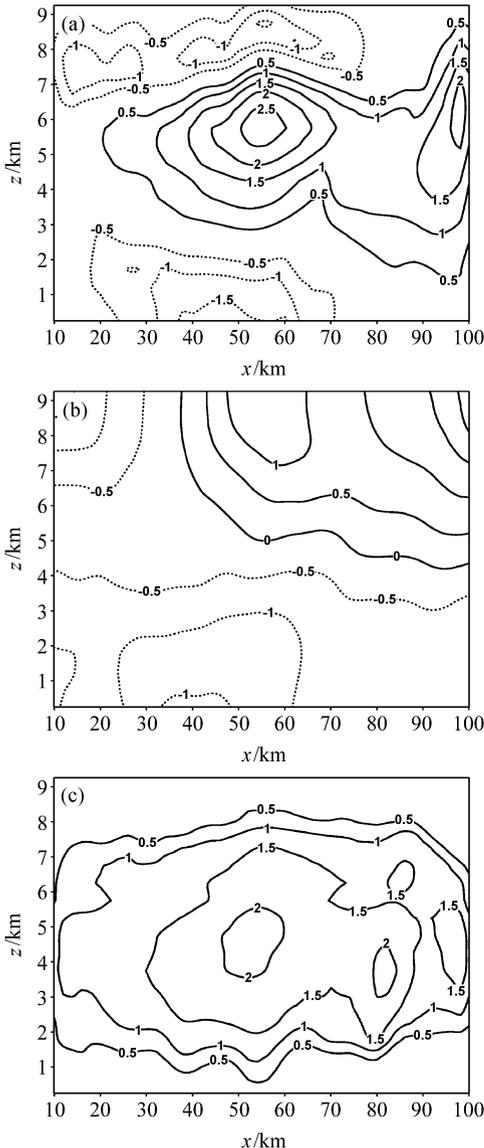


图 13 EnKF 分析结果沿 $y = -80$ km 的东西向垂直剖面结构: (a) 扰动温度 (单位: K); (b) 扰动气压 (单位: hPa); (c) 扰动水汽 (单位: g/kg); (d) 云水混合比 (单位: g/kg); (e) 雨水混合比 (单位: g/kg)

雨中尺度对流系统动力特征非常一致。

雨中尺度对流系统动力特征非常一致。

从图 13a 给出的扰动温度的垂直结构来看, 对流云 3~7 km 高度上为正扰动温度, 正扰动温度区基本以对流云强回波区为中心向东西方向扩展, 向东可扩展到反演区边界。3 km 以下和 7 km 以上为负扰动温度区, 即对流云温度结构相对环境表现出中部暖而上、下部冷的特点。这与王建捷和李泽椿^[23]对一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统模拟的结果是一致的。中层正扰动温度区可能与凝结释放潜热有关, 而低层和高层负扰动温度区可能分别与低层蒸发冷却和高层绝热冷却有关。这一时刻的扰动气压和风场的垂直分布 (图 13b 和图 12a) 可看出: 对流强回波低部为负扰动气压区, 并有气流的流入; 其上部是正扰动气压区, 有气流的流出, 高压位于上层西风带上, 气压梯度力使得高压前部 (东

侧) 的西风强, 高压后部(西侧)的西风弱。气压结构与张庆红等^[24]所描述的华南梅雨锋上中尺度对流系统概念模型中气压结构较为一致。

由于云模式中没有考虑冰相过程, 所以这里只能给出水汽、云水和雨水三个微物理分布。扰动水汽以对流云强回波区为中心向东西方向扩展(图 13c), 表明在对流云回波区集中了大量的水汽, 对流云中层为暖湿柱。王建捷和李泽椿^[23]认为暴雨 β 中尺度对流系统(降水云塔)所在区域是一个强水汽辐合区。云水分布主要与上升速度有关, 云水主要分布在 3~7 km 高度上(图 13d), 云水分布以对流云强回波区为中心向东西方向扩展, 云水中心与上升速度、正扰动温度中心对应。三者之间的对应关系, 体现了上升气流携带水汽上升累积并凝结释放潜热增温, 增温又使得上升气流得以维持和发展这样一个循环过程。雨水的分布与回波强度的分布几乎完全一致的。从垂直分布(图 13e)来看, 雨水主要集中在 6 km 高度以下。据雨水与回波强度之间的关系这一结果很容易理解。

从上述分析来看, EnKF 分析的暴雨中尺度对流系统的风场结构是准确可靠的, 反演的热力场和微物理场分布也基本是合理的。

6 总结和讨论

通过采用集合卡尔曼滤波(EnKF)技术, 实现了模拟多普勒雷达资料在云数值模式中的同化, 考察了不同条件下 EnKF 同化能力和同化中可能存在的问题, 并利用 EnKF 同化双多普勒雷达实测资料, 分析了一次梅雨锋暴雨过程的中尺度结构。主要结论如下:

(1) 同化几个时次的观测资料后, EnKF 分析结果非常接近真值, 证明 EnKF 同化多普勒雷达资料的能力和可行性。如果不同化观测资料, 而仅仅通过集合预报, 所得结果误差显著增加, 这就进一步证明了 EnKF 同化技术的有效性。

(2) 单多普勒雷达资料 EnKF 同化对雷达位置(观测角度)不太敏感。与单雷达资料同化结果相比, 双雷达资料同化结果在同化的初期阶段更准确些。直接同化雷达反射率的结果不理想, 同化由反射率导出的雨水比直接同化反射率资料更有效, 联合同化径向速度和雨水有利于提高同化分析效果。

(3) 协方差对 EnKF 同化起着非常重要的作

用, 考虑所有变量与径向速度协方差的同化效果比仅考虑速度场与径向速度协方差的同化效果要好。雷达资料缺值降低了多普勒雷达资料 EnKF 同化效果, 此时, 增加地面观测资料的同化可以明显提高同化分析效果。EnKF 同化技术对观测资料误差不太敏感。

(4) 同化中保持集合足够发散, 集合方差能表征集合平均的误差很重要。初始集合对同化分析有较大的影响, 从理想的初始集合可以很快收敛到真实解, 而对于非常不好的初始集合, 要得到准确的分析结果, 需要更多时次的观测资料进入同化。

(5) 同化受集合大小 N_e 和观测资料影响半径 r 的影响。同化误差随 N_e 的增大而减小。当 r 取值较大时, 同化误差迅速增加。同化对模式误差是敏感的。

(6) EnKF 同化技术能够从双多普勒雷达资料反演暴雨中尺度系统的动力场、热力场和微物理场, 反演的风场是较准确的, 反演的热力场和微物理场分布也基本是合理的。

(7) 中低层切变线是此次暴雨的主要动力特征; 对流云表现为低层辐合、高层辐散并有垂直上升运动伴随; 其热力特征表现为低层是低压区, 高层为高压区, 中部为暖区而上、下部为冷区; 水汽集中在对流云体内; 云水的分布与上升气流的分布较为一致; 雨水的分布与雷达回波强度分布一致。

虽然, 多普勒雷达资料在云模式中的同化具有自身的特点: 观测变量不是模式变量、运动不满足地转平衡关系、伴有高度非线性微物理过程等等, 但是 EnKF 同化技术仍初显成效, 其结果是令人鼓舞的。当然, 本文的研究工作是基于一个完美的预报模式和已知的观测误差, 所以要将 EnKF 进一步应用到实测资料同化中, 一些问题还有待研究和解决, 比如: 预报模式误差(主要是微物理方案误差)、侧边界条件以及雷达资料质量控制等对同化的影响。我们将继续利用 EnKF 方法同化实测资料, 并将结果与 4DVAR 同化结果进行对比, 进一步考察 EnKF 技术的能力。

致谢 美国 NCAR 孙娟珍博士提供了云数值模式, “我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究”项目提供了外场试验资料, 在此一并致谢。

参考文献 (References)

[1] Sun J Z, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval

- from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54** (12): 1642~1661
- [2] Qiu C J, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler data. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 1992, **9** (5): 588~598
- [3] Laroche S, Zawadzki I. A variational analysis method for retrieval of three-dimensional wind field from single-Doppler radar data. *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51** (18): 2664~2682
- [4] Shapiro A, Ellis S, Shaw J. Single-Doppler velocity retrievals with Phoenix II data: Clear air and microburst wind retrievals in the planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52** (9): 1265~1287
- [5] Wolfsberg D G. Retrieval of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data. Ph. D. dissertation, University of Oklahoma, 1987. 91pp
- [6] Kapitza H. Numerical experiments with the adjoint of a non-hydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119** (12): 2993~3011
- [7] Sun J Z, Flicher D W, Lilly D K. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated single-Doppler radar data. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48** (6): 876~890
- [8] Verlinde J, Cotton W R. Fitting microphysical observations of nonsteady convective clouds to a numerical model: An application of the adjoint technique of data assimilation to a kinematic model. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121** (10): 2776~2793
- [9] Gao J D, Xue M, Shapiro A, et al. A variational method for the analysis of three-dimensional wind fields from two Doppler radars. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127** (9): 2128~2142
- [10] Sun J Z, Crook A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55** (5): 835~852
- [11] 许小永, 郑国光, 刘黎平. 多普勒雷达资料 4DVAR 同化反演的模拟研究. *气象学报*, 2004, **62** (4): 410~422
Xu Xiaoyong, Zheng Guoguang, Liu Liping. Dynamical and microphysical retrieval from simulated Doppler radar observations using the 4DVAR assimilation technique. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (4): 410~422
- [12] Xu Xiaoyong, Liu Liping, Zheng Guoguang. Mesoscale structures of rainstorm retrieved from dual-Doppler radar observations using the 4DVAR assimilation technique. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, **19** (2): 160~173
- [13] Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99** (C5): 10143~10142
- [14] Evensen G, van Leeuwen P J. Assimilation of Geosat altimeter data for the Agulhas Current using the Ensemble Kalman Filter with a quasigeostrophic model. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**: 85~96
- [15] Houtekamer P L, Mitchell H L. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, **126**: 796~811
- [16] Houtekamer P L, Mitchell H L. A sequential ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129**: 123~137
- [17] Keppenne C L, Rienecker M. Assimilation of temperature into an isopycnal ocean general circulation model using a parallel Ensemble Kalman Filter. *J. Mar. Syst.*, 2003, **40**: 363~380
- [18] Crow W T, Wood E F. The assimilation of remotely sensed soil brightness temperature imagery into a land surface model using Ensemble Kalman Filtering: A case study based on ESTAR measurements during SGP97. *Adv. Water Resources*, 2003, **26**: 137~149
- [19] Snyder C, Zhang F Q. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131**: 1663~1677
- [20] Zhang F, Snyder C, Sun J. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, **132**: 1238~1253
- [21] Sun J, Crook A. Wind and thermodynamic retrieval from single-Doppler measurements of a gust front observed during Phoenix II. *Mon Wea Rev.*, 1994, **122**: 1075~1091
- [22] 刘黎平, 邵爱梅, 葛润生, 等. 一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒雷达观测研究. *大气科学*, 2004, **28** (2): 278~284
Liu Liping, Shao Aimei, Ge Runsheng, et al. A study of mesoscale wind structures in heavy rainfall system of merging cloud with dual-Doppler radar. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (2): 278~284
- [23] 王建捷, 李泽椿. 1998 年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析. *气象学报*, 2002, **60** (2): 146~155
Wang Jianjie, Li Zechun. Numerical simulation and diagnostic analysis on mesoscale convective systems of a torrential rain case in Meiyu period of 1998. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (2): 146~155
- [24] 张庆红, 刘启汉, 王洪庆, 等. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟. *科学通报*, 2000, **45** (18): 1988~1992
Zhang Qinghong, Liu Qihan, Wang Hongqing, et al. Numerical simulation of mesoscale convective systems in South China Meiyu front. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2000, **45** (18): 1988~1992