

三维变分和物理初始化方法相结合同化 多普勒雷达资料的试验研究^{* 1}

杨 毅¹ 邱崇践¹ 龚建东² 黄 静²

YANG Yi¹ QIU Chongjian¹ GONG Jiandong² HUANG Jing²

1. 兰州大学大气科学学院, 兰州, 730000

2. 国家气象中心, 北京, 100081

1. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

2. *National Meteorological Center of China, Beijing 100081, China*

2006-09-28 收稿, 2007-10-30 改回.

Yang Yi, Qiu Chongjian, Gong Jiandong, Huang Jing. 2008. Three-dimensional variational combined with physical initialization for assimilation of Doppler radar data. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(4):479–488

Abstract The three-dimensional variational (3D-Var) data assimilation system of the weather research and forecasting (WRF) model (WRF-Var) is further developed with physical initialization (PI) to assimilate Doppler radar radial velocity and reflectivity observations. In this new 3D-Var assimilation scheme, specific humidity, cloud water content and vertical velocity are first derived from reflectivity observations with PI, then the model fields of specific humidity and cloud water content are replaced by the modified ones, and finally, the estimated vertical velocity is added into the cost-function of the existing WRF-Var (version 2.0) as a new type of observation, and radial velocity observations are assimilated directly by the method afforded by WRF-Var. The new assimilation scheme is tested with a heavy convective precipitation event in the middle reach of the Yangtze River on 19 June 2002 and a meiyu front torrential rain event in the Huaihe river basin on 5 July 2003. Assimilation results show that the increments of analyzed variables correspond well with the horizontal distribution of the observed reflectivity. There are positive increments of cloud water content, specific humidity and vertical velocity in the echo region and negative increments of vertical velocity in the echo-free region where the increments of horizontal winds present an anticlockwise transition. Results of forecast experiments show that the effects of adjusting cloud water content or vertical velocity directly with PI on precipitation forecasts are not obvious. Adjusting specific humidity shows a better performance in forecasting the precipitation than directly adjusting cloud water content or vertical velocity. Significant improvements in predicting the precipitation as well as in reducing model's spin-up time are observed when radial velocity and reflectivity observations are assimilated with the new scheme. Therefore, it is an effective way to improve the short-range prediction of precipitation.

Key words 3D-Var, Physical initialization, Data assimilation, Doppler radar

摘 要 以美国新近研发的天气研究预报模式(WRF)配置的三维变分(3D-Var)同化系统 WRF 3D-Var 为平台, 结合物理初始化方法(Physical Initialization, 简称 PI)来同化多普勒雷达径向风和回波强度观测资料。其基本做法是首先用物理初始化方法由雷达回波资料估计出比湿、云水混合比和垂直速度, 然后用估计的比湿和云水混合比对模式的相应变量进行调整, 最后再将估计出的垂直速度作为一种新的观测类型添加到现有的 WRF 3D-Var 目标函数中, 同时以 WRF 3D-Var 提供的方法直接同化径向风。针对 2002 年 6 月 19 日的一次强对流性降水过程和 2003 年 7 月 5 日的一次梅雨锋暴雨过程进行了一组同化多普勒雷达径向风和回波资料的试验研究。同化结果表明: 分析变量的增量场和观测的雷达回波有很好的对应关系。在雷达回波区, 有正的比湿增量、云水含量增量和垂直速度增量, 并且水平风增量在此辐合; 在没有雷达回波的地方有负的垂直

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金(40505022, 40305779)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(2004CB418305)。

作者简介: 杨毅, 主要从事大气资料同化和多普勒雷达资料反演等方面的研究。E-mail: yangyi@lzu.edu.cn

速度增量。预报结果表明,调整云水含量对降水预报改善不明显,调整比湿对降水预报改进明显,直接用物理初始化估计出的垂直速度替代模式的初始垂直速度,对降水预报改进不明显,但以新的方案同化雷达资料能有效地缩短模式的起转时间(spin-up time),明显改进短时降水预报。

关键词 三维变分,物理初始化,同化,多普勒雷达

中图法分类号 P435 P456.7 P412.25

1 引言

由于多普勒雷达资料具有常规资料无可比拟的高时间、空间分辨率,多年来人们一直希望利用它来改善中尺度模式初始场,提高临近预报和短期天气预报的准确率。雷达资料四维变分同化(顾建峰等,2004;许小永等,2004;杨艳蓉等,2004;张林等,2006)和集合卡尔曼滤波技术(许小永等,2006)均在理论和实际个例试验中得到了较好的结果,是目前较为理想的同化方法,但其缺点是太耗机时,阻碍了其广泛运用,使得三维变分(3D-Var)成为当今业务运用的主流方式。

近年来,有不少直接利用雷达资料进行初始场调整的工作,如盛春岩等(2006a,2006b)利用中尺度模式 ARPS 及其资料分析系统 ADAS,将中国新一代多普勒雷达反射率及径向风资料直接用于中尺度数值模拟,其结果表明能改善中尺度数值模式短时定量降水预报。李永平等(2004a,2004b)用回波资料调整大气的云微物理量对一次降水过程作 1 h 临近预报的试验也说明调整后能够得到合理的中小尺度流场辐散辐合结构。另外 Haase 等(2000)利用一种叫做物理初始化(PI)的方法将由雷达回波反演得到的降水强度同化到 Lokal Model 中,在预报前的张弛阶段对湿度场和垂直速度进行修订。他们的试验结果显示同化试验预报的降水和观测的降水比较一致,同化降水强度能明显缩短模式的起转时间(spin-up time),使临近预报变为可能。PI 是将雷达资料和降水强度建立一种半经验的关系,对降水预报有一定的正作用,但它给出的降水预报对降水强度反演算法比较敏感(Krishnamurti, et al, 1994);而且这种方法根据雷达观测资料将模式中几个水分变量和垂直速度直接替换,可能导致这些变量和模式的其他变量不协调。

变分方法,上述方法不同,是将模式和观测作为一个有机整体考虑,通过求解表征分析场与观测及背景场之间偏差的目标函数极小化问题,力求得到

一个动力上与模式协调的初始场。通过反演、三维变分同化手段从雷达资料中反演出风场等,为模式提供一个分辨率较高的初始场,这方面的工作也得到了较好的结果(Lindskog, et al, 2004; 邱崇践等,2000;万齐林等,2005;王叶红等,2006)。可是这些方法在风场反演的过程中不可避免地会产生误差,将这些误差带入模式中必然影响同化效果。最近 Xiao 等(2005)以 MM5 3D-Var 为平台,通过 Richardson 方程将垂直速度增量包含在 3D-Var 中来直接同化雷达径向风观测,基于此方法,能同化雷达径向风的 WRF 3D-Var2.0 版本已于 2004 年 5 月对公众开放。他们的试验结果表明,以这种方式同化雷达径向风,对 6 h 降水预报的准确率明显优于不同化雷达资料的预报。但是由于天气雷达扫描的仰角通常不够高,径向速度观测给出的垂直速度的信息较少,他们的方法对垂直速度改进不明显。而 PI 可以从雷达回波估计出垂直速度,如果将 PI 估计的垂直速度也进行同化,可望较好地解决这一问题(Yang, et al, 2006)。基于这一想法,本文试图将 3D-Var 和 PI 结合来同化多普勒雷达观测资料(以下将新的方案简称为 PI3DVAR)。此外, Bielli 等(1999)研究还认为在中尺度模式初始化中给出一个湿度场的近似描述是非常重要的。为此我们新的同化系统中,先用 PI 方案由雷达回波观测资料估计出比湿、云水含量和垂直速度;然后对模式的比湿和云水含量进行调整,最大可能地协调动力场与水汽场,快速响应降水;最后再将估计出的垂直速度作为一种新的观测资料添加到已有的 WRF 3D-Var2.0 目标函数上,同时将径向风以 WRF 3D-Var2.0 提供的方法直接同化。这样由 PI 估计得到的垂直速度将与背景场、径向风观测资料和其他动力约束关系互相制约、相互影响。本文选择 2002 年 6 月 19 日一次强对流性降水过程和 2003 年 7 月 5 日的一次梅雨锋暴雨过程利用这一方法进行了一系列同化雷达资料的试验,重点是考察以这种方法同化回波强度对降水预报的影响。

2 方法

2.1 物理初始化

物理初始化是由 Krishnamurti 等(1984,1991)提出并加以发展的,它是基于物理解析过程对某些或几个相关的模式变量进行调整,是最早的将“观测”降水强度同化到数值模式中的方法之一。

首先由回波反射率因子(Z_{obs} ,单位: mm^6/m^3)通过以下 Z - R 关系(Watson, et al, 1988)求出降水强度(R'_{obs} ,单位: mm/h)

$$R'_{\text{obs}} = \left(\frac{Z_{\text{obs}}}{55}\right)^{\frac{1}{1.6}} \quad (1)$$

再把降水强度转化成地面的降水通量形式(R_{obs} ,单位: $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。然后对在降水强度大于 $0.1 \text{ mm}/\text{h}$ 处的垂直速度(w_{pi} ,单位: m/s)、比湿(q_v ,单位: kg/kg)和云水含量(q_c ,单位: kg/kg)进行估计。首先将云顶高度(z_{ct} ,单位: m)设为最大雷达回波高度,云底高度(z_{cb} ,单位: m)则由背景场计算得到的抬升凝结高度近似代替。云体内的垂直速度基于简单的降水机制被估计出来。这种机制是基于饱和水汽密度(ρ_v^* ,单位: kg/m^3)和可降水密度(ρ_l ,单位: kg/m^3)的连续方程

$$\partial \rho_v^* / \partial t = -\nabla(\rho_v^* \mathbf{v}) - K \quad (2)$$

$$\partial \rho_l / \partial t = -\nabla(\rho_l \mathbf{v}_l) - K \quad (3)$$

式中 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{v}_l$ 分别表示空气和液态水的三维速度矢量, K 是由凝结和蒸发造成的转换项。

将方程(2)、(3)分开写成水平和垂直项,并且将两方程相加得到

$$\begin{aligned} \nabla_h(\rho_v^* \mathbf{v}_h) + \frac{\partial(\rho_v^* w)}{\partial z} + \nabla_h(\rho_l \mathbf{v}_{h,l}) + \\ \frac{\partial(\rho_l w_l)}{\partial z} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\rho_l w_l$ 是降水通量(R ,单位: $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),忽略可降水量的水平传输,则式(4)可写成

$$\nabla_h(\rho_v^* \mathbf{v}_h) + \frac{\partial(\rho_v^* w)}{\partial z} = -\frac{\partial R}{\partial z} \quad (5)$$

地表的降水通量由式(1)计算得到。这儿假定降水通量的廓线有着简单的形式:在云下忽略蒸发;在云内从云底到云顶降水通量呈线性递减

$$R(z) = R(z_{\text{cb}}) \frac{z_{\text{ct}} - z}{z_{\text{ct}} - z_{\text{cb}}} \quad (6)$$

同时也假定垂直运动在云顶消失。为了得到估计的垂直速度,式(5)中的饱和水汽水平散度近似为

正弦曲线形式

$$\nabla_h(\rho_v^* \mathbf{v}_h) = \bar{c} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{z - z_{\text{cb}}}{z_{\text{ct}} - z_{\text{cb}}}\right) \quad (7)$$

其中

$$\bar{c} = \frac{R(z_{\text{cb}})}{z_{\text{ct}} - z_{\text{cb}}} \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\rho_v^*(z_{\text{cb}})w(z_{\text{cb}})}{R(z_{\text{cb}})}\right) \quad (8)$$

这样饱和水汽水平散度在云底消失,在云顶达到最大。将式(6)和(8)代入式(5)得

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_v^* w)}{\partial z} = \frac{R(z_{\text{cb}})}{z_{\text{ct}} - z_{\text{cb}}} \left[1 - \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\rho_v^*(z_{\text{cb}})w(z_{\text{cb}})}{R(z_{\text{cb}})}\right) \cdot \right. \\ \left. \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{z - z_{\text{cb}}}{z_{\text{ct}} - z_{\text{cb}}}\right)\right] \end{aligned} \quad (9)$$

对式(9)离散化得到在云体内($z_{\text{cb}} \leq z \leq z_{\text{ct}}$)模式每层的垂直速度可以表达成

$$\begin{aligned} w_k = (\rho_{v,k}^*)^{-1} \left\{ \rho_{v,k+1}^* w_{k+1} - (z_{k+1} - z_k) \frac{R(z_{\text{cb}})}{z_{\text{ct}} - z_{\text{cb}}} \cdot \right. \\ \left. \left[1 - \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{1}{c}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{z_{k+1/2} - z_{\text{cb}}}{z_{\text{ct}} - z_{\text{cb}}}\right)\right] \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$c = \frac{R}{\rho_v^* w} \Big|_{z=z_{\text{cb}}} \in [0, 1] \quad (11)$$

c 是唯一可调参数,它表示在云底处饱和水汽转化成雨水的转化效率(本文设为 0.4)。假设从云底到地表,垂直速度线性递减到 0 。这样根据雷达回波就可以估计出垂直速度。

认为云体内的水汽已达到饱和,云底以下的比湿设为云底高度处的饱和比湿(q_v^*),云顶以上最大相对湿度设为 75% ,云上和云下的云水含量为 0 ,如果在云内温度低于 253.16 K ,根据 Karstens 等(1994)公式可计算绝热液态水含量

$$q_{c,\text{ad}}(z) = \int_{z_{\text{cb}}}^z \rho_{\text{air}}(z') \frac{c_p}{L} (\Gamma_d - \Gamma_s) dz' \quad (12)$$

其中 ρ_{air} 为空气密度, c_p 为定压比热, L 为汽化潜热, Γ_d 和 Γ_s 分别为干绝热和假绝热减温率。

观测资料表明,云大多存在于 253.16 K 以上的过冷水中(Rogers, et al, 1989),考虑由于不饱和空气、降水凝结夹卷造成云水的减小(Warner, et al, 1955)

$$q_c(z) = q_{c,\text{ad}}[-0.145 \ln(z - z_{\text{cb}}) + 1.239] \quad (13)$$

对于“观测”的降水强度小于 $0.1 \text{ mm}/\text{h}$ 的地方,垂直速度不变,云水含量设为 0 ,相对湿度不超过 75% 。

在物理初始化方案中,在云上、云中、云下,可以按照表 1 订正比湿、云水含量和垂直速度。

表 1 垂直速度、比湿和云水含量按照物理初始化
方案调整后的情况

Table 1 Vertical velocity, specific humidity and specific
cloud water content estimated using PI scheme

Height	$R'_{\text{obs}} > 0.1$	$R'_{\text{obs}} < 0.1$
$z > z_{\text{ct}}$	$w_{\text{pi}} = 0$ $f_{\text{max}} = 75\%$ $q_c = 0$	$w_{\text{pi}} = w_b$ $f_{\text{max}} = 75\%$ $q_c = 0$
$z_{\text{cb}} \leq z \leq z_{\text{ct}}$	$w_{\text{pi}} = \text{公式}(10)$ $q_v = q_v^*$ $q_c = \text{公式}(13)$	$w_{\text{pi}} = w_b$ $f_{\text{max}} = 75\%$ $q_c = 0$
$z < z_{\text{cb}}$	$w_{\text{pi}} = w(z_{\text{cb}}) \frac{z - z_{\text{surf}}}{z_{\text{cb}} - z_{\text{surf}}}$ $q_v = q_v^*(z_{\text{cb}})$ $q_c = 0$	$w_{\text{pi}} = w_b$ $f_{\text{max}} = 75\%$ $q_c = 0$

注: z_{surf} 是地形高度, f 是相对湿度 (z_{surf} : height of topography, f : relative humidity)。

2.2 PI3DVAR

在新的同化系统(PI3DVAR)中,首先将初猜场的比湿和云水含量用由物理初始化估计出来的值替换,然后再将由物理初始化估计出的垂直速度作为一种新的观测添加到已有的 WRF 3D-Var 目标函数中,同时径向风以 WRF 3D-Var 提供的方法直接同化。

这样 PI3DVAR 的目标函数可以简单表示为:

$$J = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(H(\mathbf{x}) - \mathbf{v}_r^o)^T \mathbf{R}^{-1}(H(\mathbf{x}) - \mathbf{v}_r^o) + J_{\text{wpi}} \quad (14)$$

目标函数中的前 2 项是 WRF 3D-Var2.0 直接同化雷达径向风的目标函数基本项。第 1 项表示分析量 $\mathbf{x}$ 偏离背景场 $\mathbf{x}_b$ 的程度,权重由背景误差协方差矩阵 $\mathbf{B}$ 的逆决定,本文所用的背景场是 WRF 模式的 6 h 预报。第 2 项表示由模式计算的径向风 $\mathbf{v}_r$ 偏离观测的径向风 $\mathbf{v}_r^o$ 的程度, $\mathbf{R}$ 是观测误差协方差矩阵。计算径向风的观测算子为

$$v_r \equiv u(x - x_r) + v(y - y_r) + (w - w_T)(z - z_r) \cdot [(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2]^{-\frac{1}{2}} \quad (15)$$

其中 (x, y, z) 和 (x_r, y_r, z_r) 分别为雷达资料点和雷达天线的坐标, w_T 是雨滴下降末速度,可由 Sun 和 Crook 的算法(1998)计算得到

$$w_T = 5.40\alpha \cdot q_r^{0.125} \quad (16)$$

其中

$$\alpha = (p_0/\bar{p})^{0.4} \quad (17)$$

其中 $\bar{p}$ 是气压的基本态, p_0 是地面气压。

由于径向风资料也包含了大气垂直运动的信息,为此在直接同化径向风资料时,通过 Richardson 方程将垂直速度分析包含在 WRF 3D-Var 之中。Richardson 方程包含了连续方程、绝热热力学方程和流体静力学方程,它可以表示为

$$\gamma p \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial z} = -\gamma p \left[\frac{Q}{T c_p} \nabla \cdot \mathbf{v}_h \right] - \mathbf{v}_h \cdot \nabla p + g \int_z^\infty \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_h) dz \quad (18)$$

其中 $\mathbf{w}$ 是垂直速度, $\mathbf{v}_h$ 是水平风(u, v 部分), γ 是空气定压比热和定容比热的比, p 是气压, ρ 是密度, T 是温度, z 是高度, g 是重力加速度, Q 为非绝热项。假设绝热 $Q=0$, 通过将每个变量写成基本态(上标为 $-$)加上扰动态(上标为 $'$)的形式,可以将方程(18)线性化为

$$\gamma \bar{p} \frac{\partial \bar{\mathbf{w}}'}{\partial z} = -\gamma \bar{p} \frac{\partial \bar{\mathbf{w}}}{\partial z} - \gamma \bar{p} \nabla \cdot \mathbf{v}_h' - \gamma p' \nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}_h - \bar{\mathbf{v}}_h \cdot \nabla p' - \mathbf{v}_h' \nabla \bar{p} + g \int_z^\infty \nabla \cdot (\bar{\rho} \mathbf{v}_h') dz + g \int_z^\infty \nabla \cdot (\rho' \bar{\mathbf{v}}_h) dz \quad (19)$$

其中基本态(上标为 $-$ 的变量)满足方程(18),同时也满足连续方程、绝热方程和流体静力学方程。Richardson 方程架起了联系 WRF 3D-Var 分析变量和雷达径向风观测中的垂直速度分量之间的桥梁。

目标函数中的第 3 项表示分析的垂直速度偏离由雷达回波强度用 PI 估计出来的垂直速度的程度,这一项作为弱约束项,可写为

$$J_{\text{wpi}} = \frac{1}{2} \sum \eta_w^{-2} (\mathbf{w} - \mathbf{w}_{\text{pi}})^2 \quad (2)$$

其中 η_w^{-2} 是决定这项约束的相对权重系数, $\mathbf{w}_{\text{pi}}$ 是由雷达回波强度观测用 PI 估计出的垂直速度(表 1)。 η_w 设为 $\mathbf{w}_{\text{pi}} - \mathbf{w}_b$ 是模式每层标准差的 2 倍。

3 强对流性降水个例试验及结果分析

3.1 多普勒雷达资料

2002 年 6 月 19 日在湖北省发生的一次暴雨过程被位于宜昌的一部 S 波段多普勒雷达(30.7°N、111.297°E, 型号: S 波段 CINRAD/SA)捕捉到。该雷达采用 14 个仰角的 VCP11 观测模式进行连续体

积扫描观测,体扫的时间间隔平均为 5—6 min,仰角为 0.5° — 19.5° 。径向速度和回波的最大观测半径分别是 230 km 和 460 km,相应库距分别是 250 m 和 1000 m。在雷达资料同化前需要进行预处理,包括纠正或剔除一些虚假的观测,例如地物回波、距离折叠、速度模糊等以及其他噪音;以及考虑了地球曲率订正后将雷达资料插值到模式格点上。

6 月 19 日 08 时(北京时,下同),在分析区域内有几个回波单体(图 1a)。在分析区域的东部回波

单体 A 呈南北向分布;在宜昌雷达南部,有一大片层云,其中嵌着两个强的回波单体 B 和 C;弱的单体 D 散乱的分布在宜昌雷达东北面。回波单体在缓慢的向东北移动,09 时,回波单体 A 已减弱,到 10 时(图 3a),A 和 D 已经连成一条线;到 11 时,观测的回波和 10 时的情况类似,只是 B 在减弱,到 12 时,观测的回波单体还相对稳定,只是 B 的范围减小了。此后两小时,观测的回波单体继续缓慢向东北移动,B 的范围继续减小。

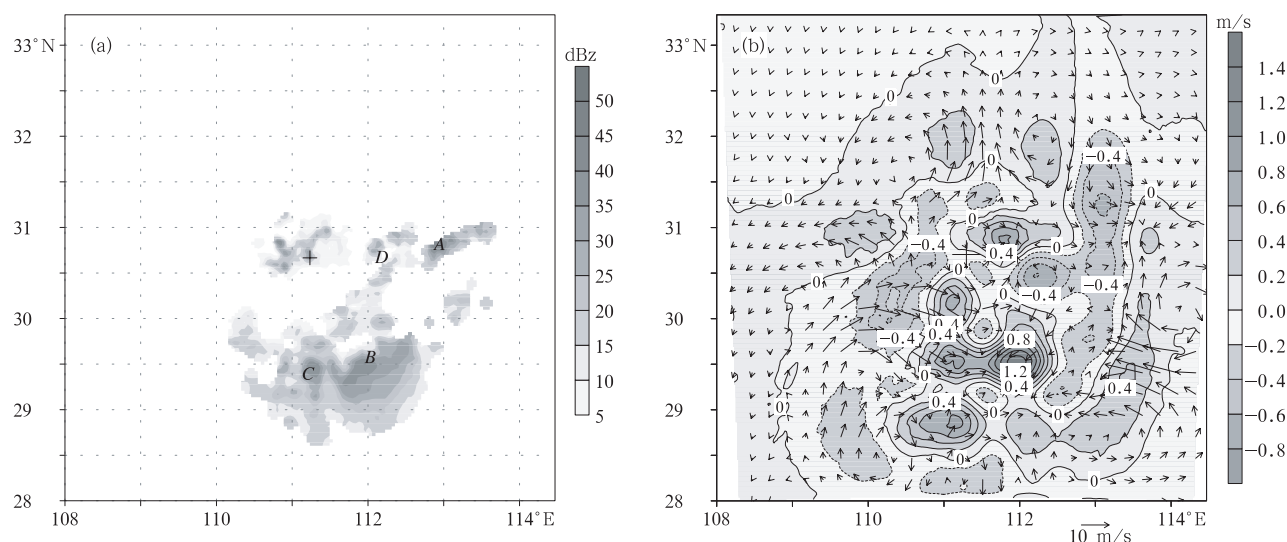


图 1 2002 年 6 月 19 日 08 时 (a) 宜昌雷达 1.5° 仰角观测的回波场(单位: dBZ, 其中主要回波单体已用字母标出, “+”是宜昌雷达的位置) 以及 (b) 试验 Vrwqvqc 相对于试验 Vr 在 700 hPa 上的水平风和垂直速度的增量 (其中箭头表示水平风增量, 阴影和等值线为垂直速度增量, 等值线间隔 0.2 m/s)

Fig. 1 (a) Observed reflectivity (dBZ) field at elevation 1.5° of Yichang radar (marked as +) at 08:00 BST 19 June 2002 (Major convective cells are marked with capital letters). (b) The wind and vertical velocity differences of Vrwqvqc minus V_r experiment at 700 hPa at 08:00 BST 19 June 2002 (Isolines at an interval of 0.2 m/s with shadings are vertical velocities, and arrows are horizontal wind increments)

3.2 试验设计

同化模拟试验分析区域是以宜昌雷达 (30.7°N , 111.297°E) 所处的位置为中心, 水平格点数为 151×151 , 水平格距为 4 km。垂直方向分为不等距的 31 层, 模式顶层气压为 50 hPa, 时间积分步长为 24 s; 模式主要物理过程包括: Noah 陆面过程方案、WSM6 微物理过程方案、MRF 边界层方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波方案、Melior-Yamada-Janjic 湍流动能方案、MYJ Monin-Obukhov 近地面层方案等。由于所取的网格分辨率比较高, 故不采用积云参数化方案。

为了考察在直接同化径向风基础上同化由雷达

回波强度用物理初始化方案估计出的垂直速度、比湿和云水含量对降水预报的效果, 共设计了 9 组试验(表 2)。

3.3 同化结果

图 1b 显示的是试验 Vrwqvqc 相对于试验 Vr 在 700 hPa 上水平风和垂直速度的增量。可以发现增量非常明显, 并且和回波的水平分布有很好的对应关系。在回波区, 有正的垂直速度增量, 在没有回波的地方, 垂直速度增量为负。而且在垂直速度增加的地方, 水平风的增量在此辐合, 这正是 Richardson 方程中的连续方程起的约束作用。在试验 Vr 中仅仅同化径向风对垂直速度的改进不大(图略),

这和 Xiao 等(2005)的发现一致。图 2 显示的是试验 Vr 和 Vrwqvqc 沿 29.4°N 一线分析的垂直速度的剖面情况。从图 2a 可以看出在 350 hPa 以下从 110°E 到 113.7°E(这一带是强回波区)有很大一片下沉区(负的垂直速度)。主要有 3 个负的中心。另外在从 111.5°E 到 113°E 在 300 hPa 处有个很强上升气流,最大值达 1.5 m/s,所有这些都显示这样的垂直

速度似乎不合实际。但是把用 PI 估计出的垂直速度以一种新的观测类型同化后,垂直速度就更加合乎实际了。图 2b 是试验 Vrwqvqc 分析的垂直速度剖面图,从中可以看出,在回波区(110°—112.5°E)有明显的上升气流,原先高层上升运动减小了。即使在没有回波的地方(<109.5°E 和 >112.5°E),垂直速度也被改变了,这是 PI 方法没有能力做到的。

表 2 试验设计方案
Table 2 Experimental schemes

试验名称	是否同化 Vr	同化还是直接替换 w	是否调整 qv	是否调整 qc
Vr	Y	/	/	/
Vrqc	Y	/	/	Y
Vrqv	Y	/	Y	/
Vrqvqc	Y	/	Y	Y
Vrwd	Y	直接替换	/	/
Vrw	Y	同化	/	/
Vrwqc	Y	同化	/	Y
Vrwqv	Y	同化	Y	/
Vrwqvqc	Y	同化	Y	Y

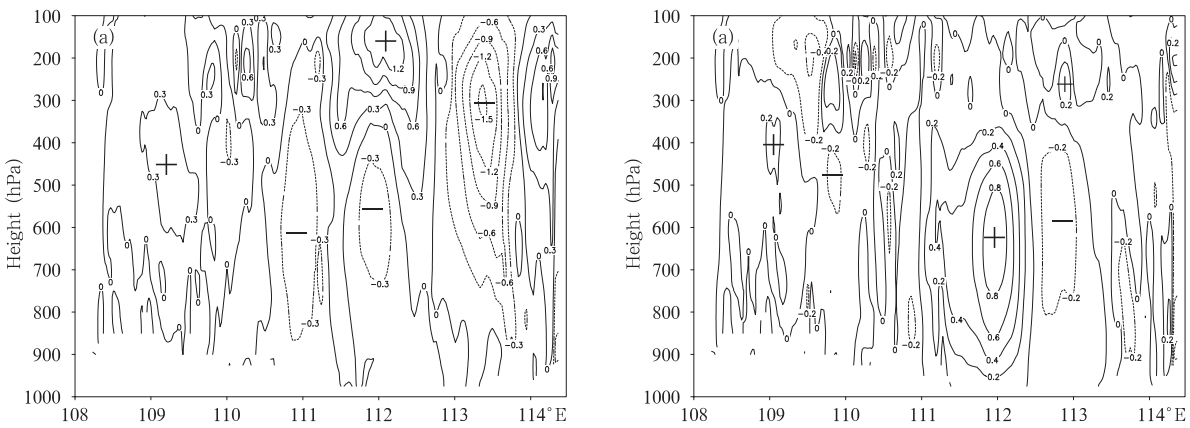


图 2 试验 Vr(a)和试验 Vrwqvqc (b)在 2002 年 6 月 19 日 08:00 沿 29.4°N 一线分析的垂直速度(单位:m/s)的剖面

Fig. 2 Height-longitude cross sections of vertical velocity (unit: m/s) along 29.4°N in experiments Vr (a) and Vrwqvqc (b) at 08:00 BST 19 June 2002

试验 Vrwqvqc 相对于试验 Vr 比湿的增量和云水含量的增量在“观测”的降水强度大于 0.1 mm/h 的地方为正。另外试验 Vrwqvqc 相对于试验 Vr 位温和位势高度增量很小,但形状和观测的回波也有很好的对应关系。

3.4 预报结果

为了评估同化后的初始场对降水预报的影响,表 3 给出了各组试验逐时预报的回波强度和观测回波的相关系数。

从表 3 可以看出在同化径向风基础上(试验 Vr),再同化由雷达回波用 PI 方法估计出的物理量后,预报的雷达回波和观测的回波相关性都有所提高。其中调整云水含量对预报的改进效果不明显(例如试验 Vrqc 相对于 Vr, Vrwqc 相对于 Vrw,试验 Vrwqvqc 相对于 Vrwqv),但调整云水含量后,预报的回波场包含了更多的中尺度信息。如果直接用 PI 估计出的垂直速度代替原有的值(试验 Vrwd),这样即使垂直速度有所改进,但它改变了原有各变

表3 各组同化试验预报的回波强度和观测回波的相关系数
Table 3 Correlation coefficients of the hourly forecasted reflectivity in various
assimilation experiments with the observed reflectivity

试验名称	09 时	10 时	11 时	12 时	13 时	14 时
Vr	-0.320	-0.052	-0.094	-0.087	-0.081	-0.176
Vrqc	-0.220	-0.040	-0.041	-0.059	-0.044	-0.001
Vrqv	-0.003	0.424	0.168	0.006	0.119	0.029
Vrqvqc	0.049	0.444	0.180	0.097	0.121	0.031
Vrwd	-0.244	-0.019	-0.059	-0.039	0.123	-0.205
Vrw	0.103	0.219	0.162	-0.011	0.029	0.061
Vrwqc	0.111	0.223	0.170	-0.007	0.034	0.067
Vrwqv	0.428	0.540	0.421	0.286	0.046	0.056
Vrwqvqc	0.432	0.544	0.423	0.289	0.053	0.059

量之间的相互协调(或平衡)的状态,对降水预报改进很小。而将估计出的垂直速度以一种新的观测资料类型被同化(试验 Vr_w、Vr_{wqv}、Vr_{wqc}、Vr_{wqvqc})时,这样 PI 估计出的垂直速度与背景场、径向风观测以及其他模式动力关系相互约束、相互影响,从而得到一个在物理上和动力上与模式相协调的初始场。在同化径向风的基础上,再同化 PI 估计出来的垂直速度(试验 Vr_w),对降水预报的正影响就能持续 3 h。其中调整比湿对降水预报影响也很大,但主要集中在第 2—3 小时,对第 1 小时预报改进不明显,但是再同化 PI 估计出的垂直速度效果就改进明显了,第 1 个小时的预报就能达到很大的相关,这种正作用能持续 4 h 左右(试验 Vr_{wqv}、Vr_{wqvqc}),这说明同化垂直速度能有效地缩短 spin-up 的时间。比较各组试验发现 Vr_{wqvqc} 的效果最佳。

从表 3 还可以发现在 10 时的相关最大,为了更清楚描述此时回波的结构,图 3 给出了此时观测的回波和 Vr、Vr_w、Vr_{wqvqc} 试验预报的回波。此时试验 Vr 能较好地预报出 A 和 D,只是 A 预报出的位置有些偏北、范围偏大和强度偏强;Vr 仅仅预报出 B 的部分特征并漏报了回波单体 C;另外 Vr 预报出一大片虚假的回波 G(图 3b)。在试验 Vr_w 预报中(图 3c),观测的雷达回波单体大部分特征都能被预报出,特别是 B 和 C,只是位置有点偏东偏北和强度偏强,另外虚假的回波强度明显减弱。而试验 Vr_{wqvqc} 预报的效果好(图 3d),B 和 C 能被准确的预报出,除了强度有点强和位置有点偏北,虚假回波强度和范围明显变小。

另外,所有试验预报的回波比观测的都强一些,而且同化物理初始化估计出来的物理量后预报的回

波比观测的移动速度快一点。

4 梅雨锋暴雨个例试验

2003 年 7 月,中国江淮地区出现了严重的大范围暴雨和洪涝,从 7 月 4 日 18 时到 7 月 5 日 14 时滁州市累积降水量为 379.3 mm,全椒为 209 mm,来安为 155 mm。此次暴雨过程是一次高层冷空气和低层中尺度低涡与地面静止锋共同影响造成的较为典型的梅雨锋暴雨。

合肥的一部 S 波段多普勒雷达(331.867°N、117.258°E,型号:CINRAD/SA)捕捉到了此次降水过程。

7 月 4 日 20 时,雷达回波图像显示有 3 个分散的回波带(>20 dBz):其中 1 个位于合肥以西;另 2 个平行排列在合肥的东北方,长度在 60 km 左右,它们之间分布着块状的强回波核,最大回波强度在 45 dBz 左右。在西南气流的引导下,强回波缓慢东移南压,并且强回波范围不断扩大,在雷达的西北部不断有新的对流单体生成。到了 7 月 5 日 02 时,分散的回波带已经发展成为东北—西南走向的强回波带(图略)。该回波带不断发展加强,随后主回波带继续缓慢东移南压。到 05 时,主回波带开始分裂,在合肥、滁州、南京和马鞍山之间出现一个很大范围的低值区。至 06 时,主回波带已经彻底断裂成两条回波带,一条位于合肥、滁州一线的西北方,另一条位于合肥的西南端。至 08 时,雷达回波已开始减弱,合肥西南端的回波带范围已变小,先前的低值区范围在扩大。伴随着雷达回波东移南压,到了 13 时,强回波已移到分析区域的东南角,并且强度很弱,范围变小。到 15 时,降水基本结束。

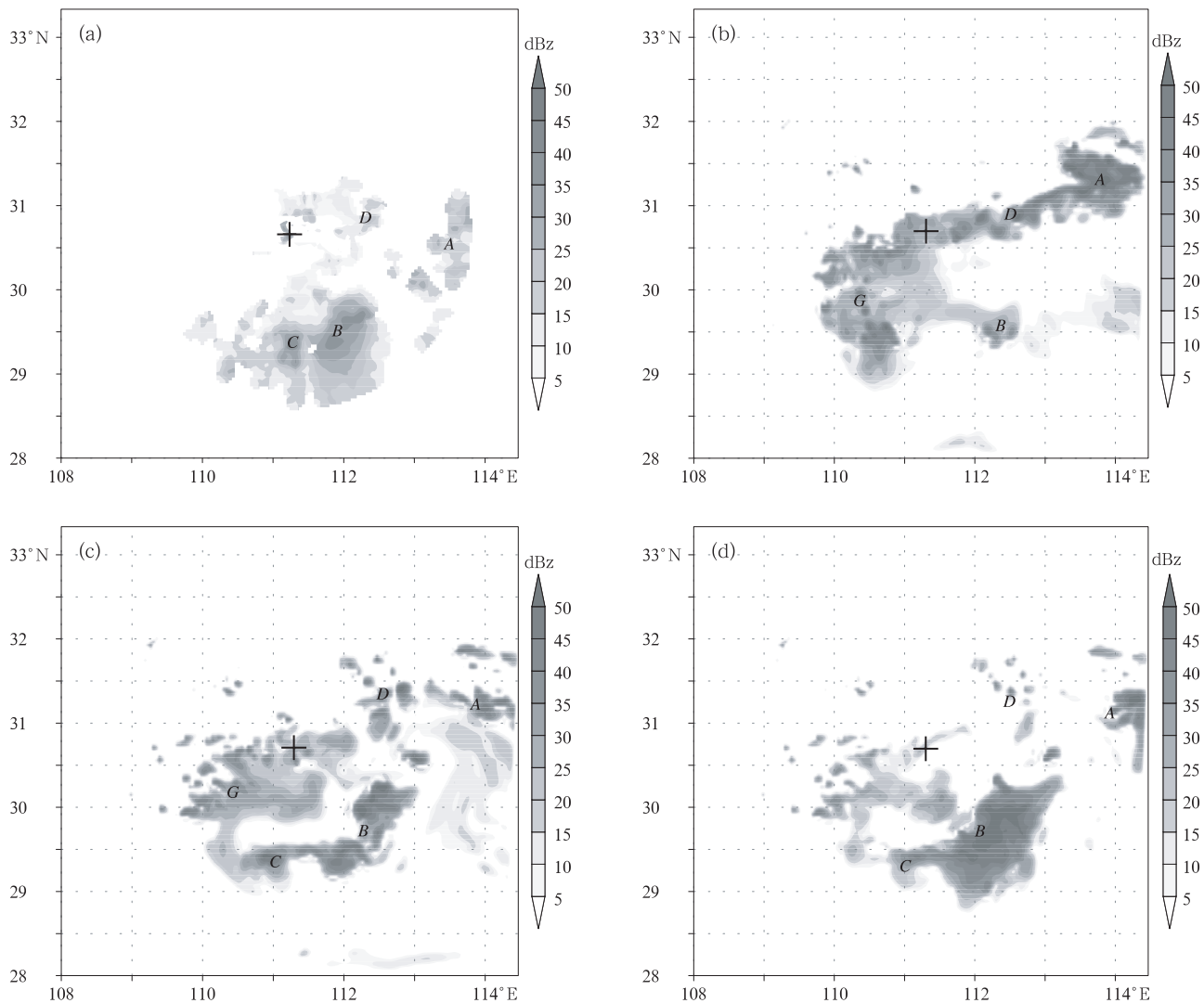


图3 2002年6月19日10时观测的回波(a)和3组试验(b. 试验 Vr, c. 试验 Vrww, d. 试验 Vrwwqvqc)预报(第2小时的预报)的回波(单位:dBz,其中主要回波单体已用字母标出)

Fig. 3 Observed reflectivity field (a) at elevation 1.5° of Yichang radar (marked as +) and predicted reflectivity at the same elevation from experiments Vr (b), Vrww(c), and Vrwwqvqc (d) at 10:00 19 June 2002, respectively (Major convective cells are marked by capital letters; unit: dBz)

为了比较 PI3DVAR 方法对此次降水预报改进的情况,我们设计了如下 3 组实验:(1)控制试验 CTL:不同化雷达资料;(2)同化试验 VRD:用 WRF 3D-Var2.0 直接同化径向风观测;(3)同化试验 PIVR:用 PI3DVAR 方案同化雷达径向风和回波强度。

这次试验分析区域大小和模式的参数选择与上个例子都是一致的,只不过是分析区域的中心为合肥雷达所在的位置,这 3 组试验同化时刻是 2003 年 7 月 5 日 02 时。利用 NCEP 再分析资料作为初始场从 2003 年 7 月 4 日 20 时开始,积分 WRF 模式 6

h,将预报场(2003 年 7 月 5 日 02 时)作为同化试验分析的初猜场。然后再将 3 组试验同化的分析场分别作为 WRF 模式的初始场,再预报 6 h。

图 4 显示的是以 2003 年夏季 973 中国暴雨项目(CHeRES)外场试验获取的降水资料为检验标准得到的 3 组试验每隔 3 h 累积降水预报检验的 TS 评分,可以看出同化试验 VRD 和 PIVR 相对于控制试验 CTL 的 TS 评分都大大地提高了。在对大于 1 mm 的降水评分中(图 4a),在第 1 个 3 h 累计降水预报中,同化试验 PIVR 相对于 VRD 的评分明显提高;在第 2 个 3 h 累计降水预报中,PIVR 的评分略

高些。在对大于 10 mm 的降水评分中(图 4b),同化试验 VRD 相对于控制试验 CTL 的 TS 评分提高的很少,但是 PIVR 的评分非常显著高于另两组试

验。图 4 说明了同化雷达资料后有可能提高降水预报的检验评分,而用 PI3DVAR 同化径向风和回波的效果明显优于仅仅同化径向风的效果。

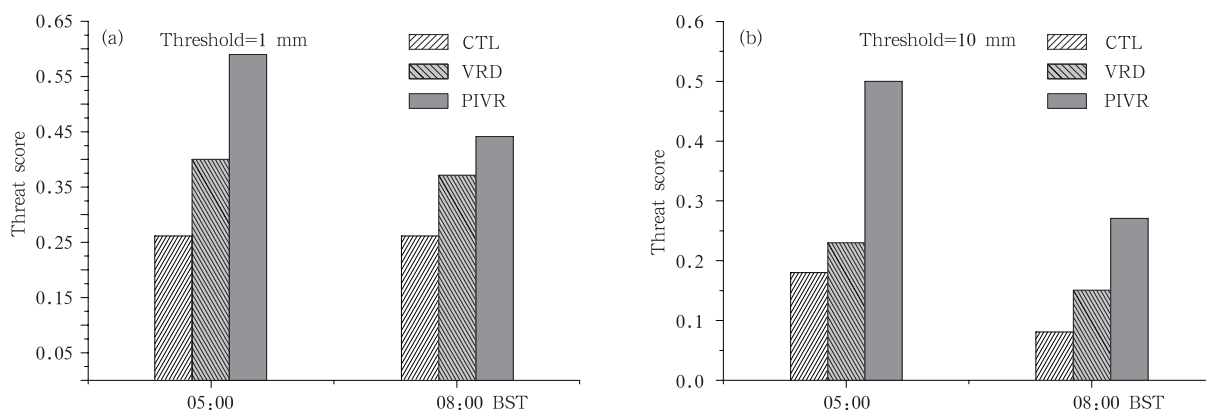


图 4 2003 年 7 月 5 日 3 组实验得到的 3 h 累积降水预报的检验评分比较

(a. 大于 1 mm 的降水评分, b. 大于 10 mm 的降水评分)

Fig. 4 Threat scores of 3-h rainfall simulations for (a) threshold=1 mm and (b) threshold=10 mm at 5 July 2003

4 结 论

本文将三维变分和物理初始化结合来同化多普勒雷达资料。首先用物理初始化方法由雷达回波估计出模式的比湿、云水含量和垂直速度;然后用估计的比湿和云水含量替换背景值;最后再将估计的垂直速度作为一种新的观测类型添加到已有的 WRF 3D-Var 的目标函数中,同时直接同化雷达径向风观测。针对 2002 年 6 月 19 日发生在长江中游一次强对流性暴雨过程和 2003 年 7 月 5 日淮河流域的一次梅雨锋暴雨进行了一系列同化模拟试验。同化结果表明:在雷达回波区,有正的垂直速度增量、比湿增量和云水含量增量,并且水平风增量在此辐合。预报结果表明,调整云水含量对降水预报改善不明显,调整比湿对降水预报改进明显,但将估计的垂直速度以新的观测类型同化就能和背景场、径向风观测以及其他约束条件相约束,能有效地缩短 spin-up 时间,对降水预报改进显著。

References

Bielli S, Roux F. 1999. Initialization of a cloud-resolving model with airborne Doppler radar observations of an oceanic tropical convective system. *Mon Wea Rev*, 127:1038-1055

Gu Jianfeng, Xue Jishan, Yan Hong. 2004. A summarization of the four-dimension variational Doppler radar analysis system. *J Tropical Meteor* (in Chinese), 20(1):1-13

Haase G, Crewell S, Simmer C, et al. 2000. Assimilation of radar data in mesoscale models: Physical initialization and latent heat nudging. *Physics and Chemistry of the Earth*, 25: 1237-1242

Karstens U C, Simmer C, Ruprecht E. 1994. Remote sensing of cloud liquid water. *Meteor Atmos Physics*, 54:157-171

Krishnamurti T N, Ingles K, Cocke S, et al. 1984. Details of low latitude medium range numerical weather prediction using a global spectral model, Part II: Effects of orography and physical initialization. *J Meteor Soc Japan*, 62: 613-649

Krishnamurti T N, Rohaly G D, Bedi H S. 1994. On the improvement of precipitation forecast skill from physical initialization. *Tellus*, 46A: 598-614

Krishnamurti T N, Xue J, Bedi H, et al. 1991. Physical initialization for numerical weather prediction over the tropics. *Tellus*, 43:53-81

Li Yongping, Yuan zhaohong, Wang Xiaofeng. 2004a. Microphysical adjustments using reflectivity of Doppler radar for meso-scale model. *J Appl Meteor Sci* (in Chinese), 15(6): 658-666

Li Yongping, Zhu Guofu, Xue jishan. 2004b. Microphysical retrieval from Doppler radar reflectivity using variational data assimilation. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 62(4): 814-820

Lindskog M, Salonen K, Järvinen H, et al. 2004. Doppler radar wind data assimilation with HIRLAM 3DVAR. *Mon Wea Rev*, 132: 1081-1092

Qiu Chongjian, Yu Jinxiang, Qin Xu. 2000. Use of Doppler-radar data in improving short-term prediction of mesoscale weather. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 58(2):244-249

Rogers R R, Yau M K. 1989. *A Short Course in Cloud Physics*. New York: Pergamon Press, 293pp

- Sheng Chunyan, Pu Yifen, GaoShou-Ting. 2006a. Effect of Chinese Doppler radar data on nowcasting output of mesoscale model. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 30(1):108-118
- 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. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 64(3):293-307.
- 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 convective storm. J Atmos Sci, 55:835-852
- Wan Qilin, Xue Jishan, Zhuang Shiyu. 2005. Study on the variation assimilation technique for the retrieval of wind fields from Doppler radar data. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 63(2):129-145
- Wang Yehong, Zhao Yuchun, Cui Chunguang. 2006. Numerical research on effects upon precipitation forecast of Doppler-radar estimated precipitation and retrieved wind field under different model initial schemes. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 64(4):485-499
- Warner J. 1955. The water content of cumuliform cloud. Tellus, 7:449-457
- Watson A I, Meitin J G, Cuning J B. 1988. Evolution of the kinematic structure and precipitation characteristics of a mesoscale convective system on 20 May 1979. Mon Wea Rev, 116(8):1555-1567
- Xiao Q N, Kuo Y H, Sun J, et al. 2005. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3D-Var system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. J Appl Meteor, 44(6):768-788
- Xu Xiaoyong, Liu Liping, Zheng Guoguang. 2006. Numerical experiment of assimilation of Doppler radar data with an ensemble Kalman filter. Chinese J Atmos Sci(in Chinese), 30(4):712-728
- Xu Xiaoyong, Zheng Guoguang, Liu Liping. 2004. Dynamical and microphysical retrieval from simulated Doppler radar observations using the 4DVAR assimilation technique. Acta Meteor Sinica(in Chinese), 62(4):410-422
- Yang Y, Qiu C, Gong J. 2006. Physical initialization applied in WRF-Var for assimilation of Doppler radar data. Geophys Res Lett, 33:L22807, doi: 10.1029/2006GL027656
- Yang Yanrong, Li Bai, Zhangpeiyuan. 2004. Doppler radar data's four dimensional variational assimilation. J Appl Meteor Sci(in Chinese), 15(1):95-110
- Zhang Lin, Ni Yunqi. 2006. Four-dimensional variational data assimilation of radar radial velocity observations. Chinese J Atmos Sci(in Chinese), 30(3):433-440

附中文参考文献

- 顾建峰, 薛纪善, 颜宏. 2004. 多普勒雷达四维变分分析系统概述. 热带气象报, 20(1):1-13
- 李永平, 袁招洪, 王晓峰. 2004a. 用多普勒雷达反射率调整模式大气的云微物理量. 应用气象学报, 15(6):658-666
- 李永平, 朱国富, 薛纪善. 2004b. 应用雷达回波强度资料反演大气云微物理量. 气象学报, 62(4):814-820
- 邱崇践, 余金香, Qin Xu. 2000. 多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进. 气象学报, 58(2):244-249
- 盛春岩, 浦一芬, 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. 大气科学, 30(1):108-118
- 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. 气象学报, 64(3):293-307
- 万齐林, 薛纪善, 庄世宇. 2005. 多普勒雷达风场信息变分同化的试验研究. 气象学报, 63(2):129-145
- 王叶红, 赵玉春, 崔春光. 2006. 多普勒雷达估算降水和反演风在不同初值方案下对降水预报影响的数值研究. 气象学报, 64(4):485-499
- 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. 大气科学, 30(4):712-728
- 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. 气象学报, 62(4):410-422
- 杨艳蓉, 李柏, 张沛源. 2004. 多普勒雷达资料四维变分同化. 应用气象学报, 15(1):95-110
- 张林, 倪允琪. 2006. 雷达径向风资料的四维变分同化试验. 大气科学, 30(3):433-440