

多普勒雷达反射率与径向风资料在 数值模式中的应用试验

杨艳蓉^{1,2} 王振会^{1,2} 杨洪平³ 张沛源³ 李 柏⁴

(1. 江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学遥感学院;
3. 中国气象科学研究院; 4. 中国气象局大气探测技术中心)

提 要: 利用 CAPS (Center for Analysis and Prediction of Storm) 研发的 ARPS (The Advanced Regional Prediction System) 模式及数据处理系统 ADAS (ARPS Data Analysis System) 和 3DVar (3-D Variation) 系统分别同化多普勒雷达反射率与径向风资料, 分析二者在改进模式初始场和预报效果中的作用。通过模拟 2003 年 7 月安徽省一次强降水过程, 得到如下结论: 径向风资料调整初始风场, 在积分进行后, 对水汽场也有所调整; 反射率资料调整初始水汽场, 积分开始后, 对风场也有调整, 其中后者较显著。从预报的 3 小时降水来看, 两个同化试验得到的落区位置与实况都有出入, 反射率同化试验得到的预报面积比实况偏大, 但二者都比非同化试验效果好。
关键词: 反射率 径向风 同化

Doppler Radar Reflectivity and Radial Velocity Data Assimilation in Numerical Model

Yang Yanrong^{1,2} Wang Zhenhui^{1,2}
Yang Hongping³ Zhang Peiyuan³ Li Bai⁴

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing 210044;
2. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology;
3. Chinese Academy of Meteorological Science;
4. Atmospheric Observation Technology Center, CMA)

Abstract: Herein Doppler radar reflectivity and radial velocity data assimilation experiments are carried by means of ARPS ADAS (ARPS Data Analysis System) and 3Dvar (3-D Variation System) respectively. Roles played by ADAS and 3Dvar in improving initial fields and forecast results

本文得到江苏省气象灾害重点实验室(南京信息工程大学)项目(KLME050101)和国家自然科学基金面上项目(40375006)资助。

收稿日期: 2008 年 1 月 16 日; 修定稿日期: 2008 年 3 月 13 日

are analyzed. Through investigating one rainstorm process occurred in Anhui Province, July 2003, it indicates that radial velocity data affects initial wind field, along with integral beginning, water vapor field is adjusted too. Reflectivity data impacts initial water vapor field, and after integration, the wind field is improved. The effect of reflectivity is more evident than that of radial velocity. Moreover, for the 3h rainfall simulation, reflectivity and radial velocity assimilation experiments are both different with observations in situ, the former one is greater than the observation. While the both results of assimilation experiments are better than those of the non-assimilation ones.

Key Words: reflectivity radial velocity assimilation

引 言

目前,我国新一代天气雷达网已经布网成功并投入业务应用。相较于常规气象观测资料而言,多普勒雷达资料在时间、空间上均具有较高分辨率,这对于改进和生成中尺度数值模式初始场是非常有用的,可以改善常规资料初始场信息不足造成的预报起转延迟(spinner)问题。雷达资料同化成为焦点之一。

将雷达资料带入数值模式进行预报主要有两种方法。一种是先通过雷达资料径向风和反射率资料反演,得到三维风场及水汽场、降水场,然后将反演资料用于模式预报。Shapiro 等^[1]以反演风矢量场的方法为得到风场反演资料,进行数值预报试验;邱崇践等^[2-3]基于其提出的简单伴随函数法,利用准四维变分分析方法和 Gal-Chen^[4]的热力反演技术反演得到风场,改进中尺度数值模式 ARPS 的初始场;马清云等^[5]利用局部 VAD 方法将反演得到的风场信息同化进 MM5 模式,改进降水模拟;王叶红等^[6]利用雷达估测降水资料做一维变分同化试验;托亚^[7]、杨艳蓉等^[8]分别利用多普勒雷达反演降水和湿度场资料改进 MM5 初始场,提高预报效果。还有一种是直接同化雷达资料。Chris S. 等^[9]使用 EnKF,估计出雷达观测变量与大气状态之间的协方差矩阵,将雷达资料同化到云模式;Sun 等^[10-11]利用云模式及其伴随

构成 4DVAR 系统,将观测资料综合考虑,求目标泛函的最小值,得到最佳初始场;Xu 等^[12]在此基础上运用云模式的 4DVAR 系统,从多普勒雷达数据得出动力及微物理场;Ming 等^[13-14]分别利用 ARPS 的云分析和 3DVAR 直接同化多普勒雷达的反射率和径向速度资料;M. Lindsong^[15]用 HIRLAM-3DVAR 系统同化多普勒雷达风场数据;余贞寿等^[16]在 ARPS 模式中引入多普勒雷达数据,模拟“云娜”台风;Xiao 等^[17]利用 MM5-3DVAR 系统同化韩国雷达资料,模拟台风 RUSA,试验表明,雷达径向速度资料对试验的敏感性强于反射率资料;盛春岩等^[18]通过 ARPS 模式同化多普勒雷达的反射率及径向速度资料,试验表明,加入雷达资料后可以改进降水模拟的效果。

本文利用 ARPS 模式的数据处理系统 ADAS 和 3DVAR 直接同化合肥多普勒天气雷达反射率和径向风资料,通过安徽省 2003 年 7 月 9 日一次暴雨过程模拟,分析多普勒雷达速度场和强度场资料在改进数值模式初始场和提高预报效果方面的作用,为更好的使用雷达资料提出个例分析。

1 多普勒雷达反射率和径向风资料同化

1.1 反射率资料同化

本文通过 ADAS 直接将反射率资料加

入 ARPS 模式中。

ADAS 是 ARPS 的数据处理模块,可对地面、高空、无线电探空仪、风廓线、WSR-88D 雷达资料、GOES 卫星、船舶等各类可利用的中尺度气象数据进行客观分析并插值到 ARPS 模式,同时保持和模式的协调。它在垂直坐标方向是完全弹性的,可处理单层或多层数据,含有质量控制。可以在不产生虚假梯度的情况下处理不同密度的数据。以最优插值为宗旨,采用 Bratseth(1986)的连续迭代方案^[19]。使用 ADAS 的资料分析不需要进行大矩阵求解,可以节省计算时间。

在该步骤进行时,关掉多普勒雷达径向速度处理项,启动云分析,单独同化反射率资料。

1.2 径向风资料同化

Ming 等^[13-14]指出,目前的 ARPS 模式中,雷达径向风资料通过 3DVAR 方案分析。ADAS 虽然也可以用来分析径向速度资料,但较 3DVAR 来说不够细致。

ARPS-3DVAR 目标泛函的标准形式如下(1)式:

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}[H(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^0]^T \mathbf{R}^{-1} [H(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^0] + J_r(\mathbf{x}) \quad (1)$$

其中,右边第一项用来估计分析变量 \mathbf{x} 和分析变量背景场 \mathbf{x}_b 之间的差异,权重由背景场误差协方差矩阵 \mathbf{B} 决定。目前的版本中, \mathbf{x} 包括三维风分量(u, v, w)、潜热 θ 、气压 p 和雨水混合比 q_v ;第二项用来表述分析结果和观测变量 \mathbf{y}^0 之间的差异,由观测误差协方差矩阵 \mathbf{R} 决定, H 是前向算子,其误差忽略不计。第三项代表质量守恒约束项。

就方程(1)中的前向算子 H 来说,径向速度与风速的三维变量的关系为式(2):

$$V_r = \frac{(x - x_0)u + (y - y_0)v + (z - z_0)w}{r} \quad (2)$$

其中, (u, v, w) 是直角坐标 (x, y, z) 下的风速分量, (x_0, y_0, z_0) 代表雷达方位, r 是雷达位置到观测点间的径向距离。在 ARPS-3DVAR 系统中,观测的径向速度资料由前处理插值到分析格点上,这种方案的前向算子就不需要进行空间插值了。

2 试验方案

文中出现的时间均为世界时(UTC)。

试验选用安徽省 2003 年 7 月 9 日 00—03 时的暴雨过程,该 3 小时时段中,降水量最大值超过 120.0mm,位置在铜陵(30.97°N、117.78°E)。从合肥雷达回波图上看,00 时回波加强,强的回波区域开始形成。

背景场资料为同时间的 NCEP1°×1°再分析资料。模式初始时间是 00 时,共积分 3 小时。

模式取 2 重嵌套,中心位置在合肥雷达站(31.87°N、117.26°E),外层格距 18km,内层 6km,水平格点数均为 102×102,内外层都取暖雨微物理方案,外层使用 Kain-Fritsch 积云对流参数化,内层不使用积云对流参数化。内、外层垂直均为 40 层,格距分别是 400m 和 500m。以粗网格每小时的输出结果作为内层的侧边界。多普勒雷达反射率和径向风资料均在细网格加入。最终分析内层的模拟结果。本次模拟所用的数据只有 NCEP 资料和多普勒雷达反射率、径向风资料。

为了方便起见,同化反射率资料的试验称为 ref,同化径向风资料的试验称为 vel,非同化试验称为 con。

3 试验结果

3.1 ref、vel、con 试验的水汽场分析

先分析各试验的初始场。图 1 是加入反射率资料后,ref 试验得到的初始水汽条件模

拟结果和对应的雷达反射率因子图像。由图可见,同化反射率资料得到的 2km 处雨水混合比模拟结果(图 1a)共有 A、B、C、D 4 个高值分布中心(有箭头指向),分别和该时雷达反射率因子图像(图 1b)上的 4 个回波较强的位置对应。而且由两幅图 B、C 位置及箭头指向可见,ref 试验的初始水汽场的细致结构和同时的雷达观测一致。说明加入雷达反射率资料同化后,对模式的初始水汽场有了明显改善。6km 处的情况与此雷同,图略。而对应的 con、vel 试验得到的初始雨水混合比为 0。图中黑点代表合肥雷达站,下同。

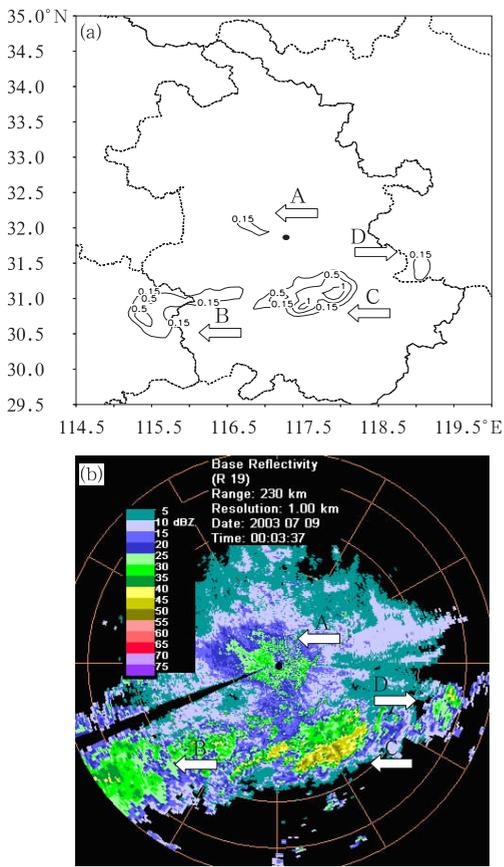


图 1 ref 试验初始雨水混合比(a 2km, 单位:1000g/kg) 00 时反射率因子(b 单位: dBz)

再来分析各试验预报的水汽场。图 2 是 ref、vel、con 试验积分 1 小时后预报得到的

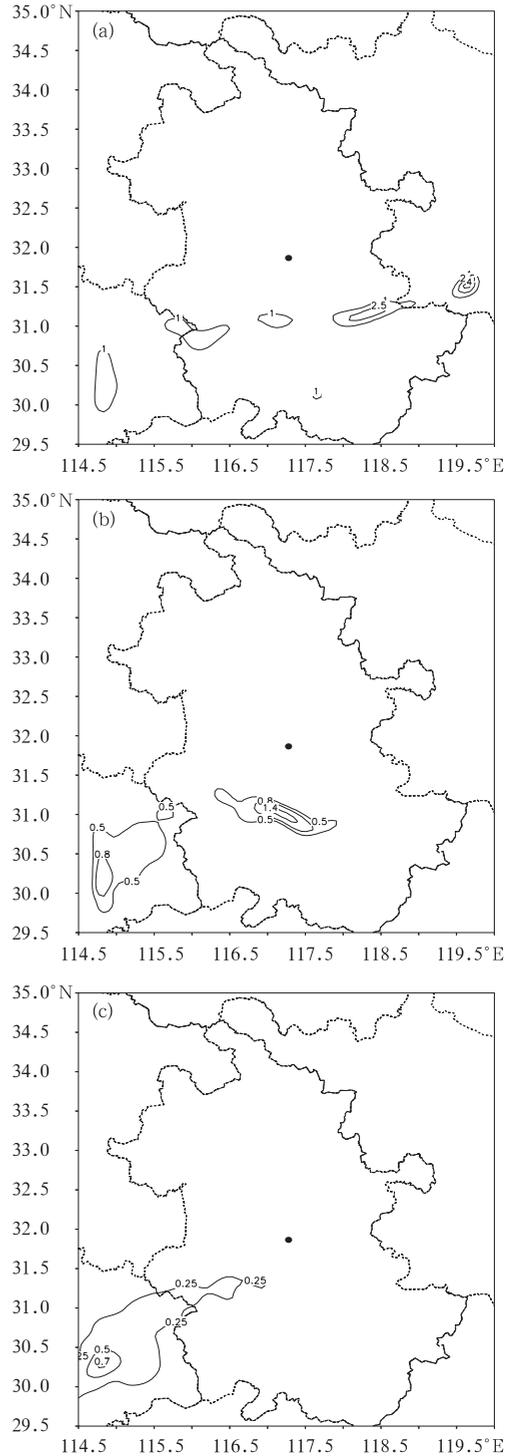


图 2 三个试验积分 1h 后预报雨水混合比 (2km, 单位:1000g/kg) (a) ref 试验, (b) vel 试验, (c) con 试验

2km 处雨水混合比及雷达观测。和 01 时雷达观测的反射率因子图像(图略)比较,ref 试验的预报结果与雷达观测最接近(图 2a)。从位置上来看,虽然 vel 和 con 试验经过模式运算(图 2b、c),此时的雨水混合比不为 0,且在 30°N 、 115°E 附近预报出大值中心,但和 ref 试验相比,对于 31°N 附近的长水汽带,并没有预报出来;而相应雷达反射率因子图上该位置有强回波带(图略)。从数量上来看,ref 试验的雨水混合比量值比 ref 和 con 试验大 0.5~1 个单位。6km 处的情况与此类似。02 时、03 时三个试验的情况与 01 时类似,图略。

雷达观测的回波强度实际上反映的是大气中尚未降落到地面的雨水分布结构,ref 试验能够在初始同化反射率资料后完整地体现出这种结构并做出预报,且这种作用在 3 小时内一直维持,表明 ref 试验对水汽空间结构调整具有很大影响。vel 试验和 con 试验由于在初始时刻就没有可靠且充分的水汽补给,所以在积分开始后虽然水汽环境从无到有,但和实际雷达观测并不对应。

3.2 ref、vel、con 试验的风场分析

图 3 给出了 6km 处 ref、vel、con 试验的初始风场。

由图 3 可见,ref 试验(图 3a)和 con 试验(图 3c)类似,初始风场结构都比较平整均匀。而 vel 试验(图 3b)则出现明显的风的中尺度特征,在合肥以南 31°N 处有风的辐合带,该区域正好和此时的回波强度带(图 1b)及 ref 试验的初始水汽位置对应(图 1a),说明此处有中尺度活动,vel 试验的初始风结果与实际相符。

为进一步说明 vel 试验对风场的作用,图 4 给出了沿初始回波最强位置(31.05°N 、 117.88°E)的垂直风纬向剖面。

由图可见,只有 vel 试验的 ω 剖面结果

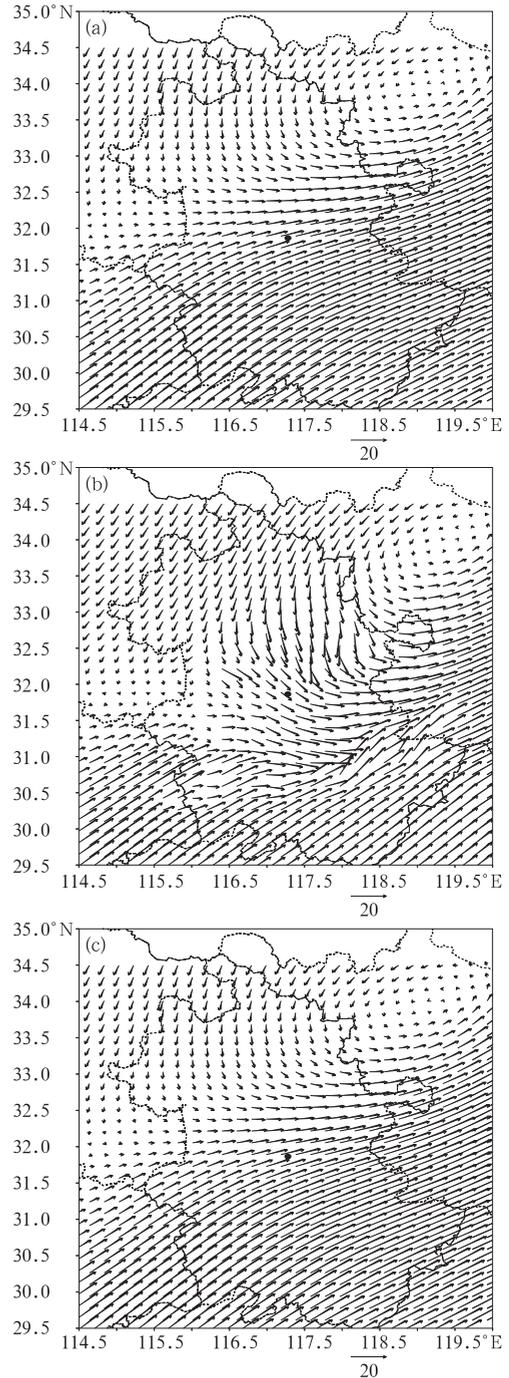


图 3 三个试验初始风场(6km,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) ref 试验, (b) vel 试验, (c) con 试验

(图 4b)在 117.88°E 附近有强上升运动,与图 1b 的反射率因子图对应,说明风暴正在上

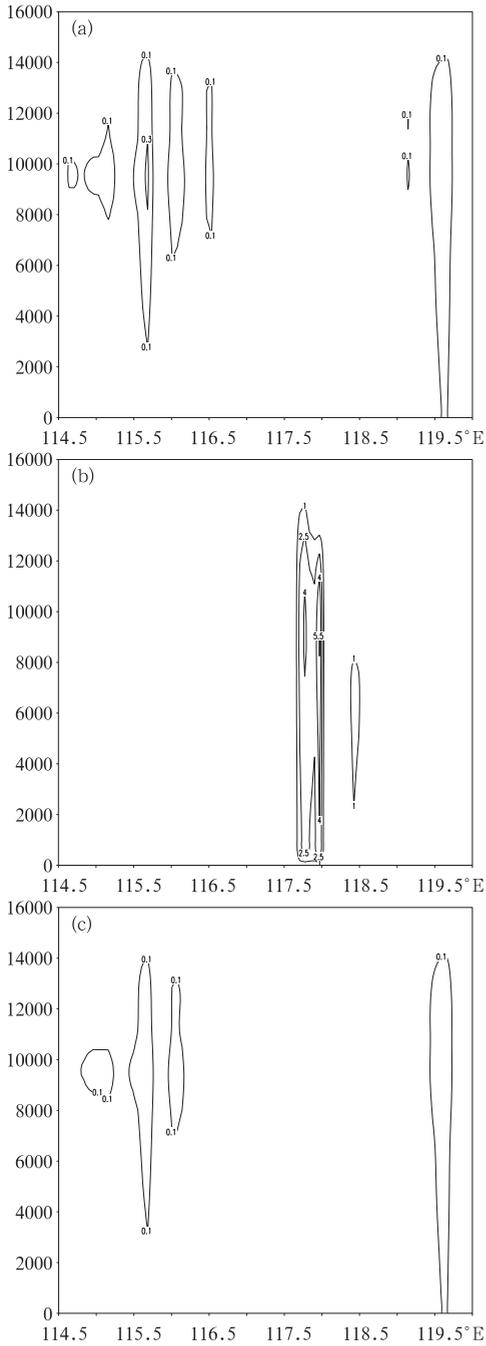
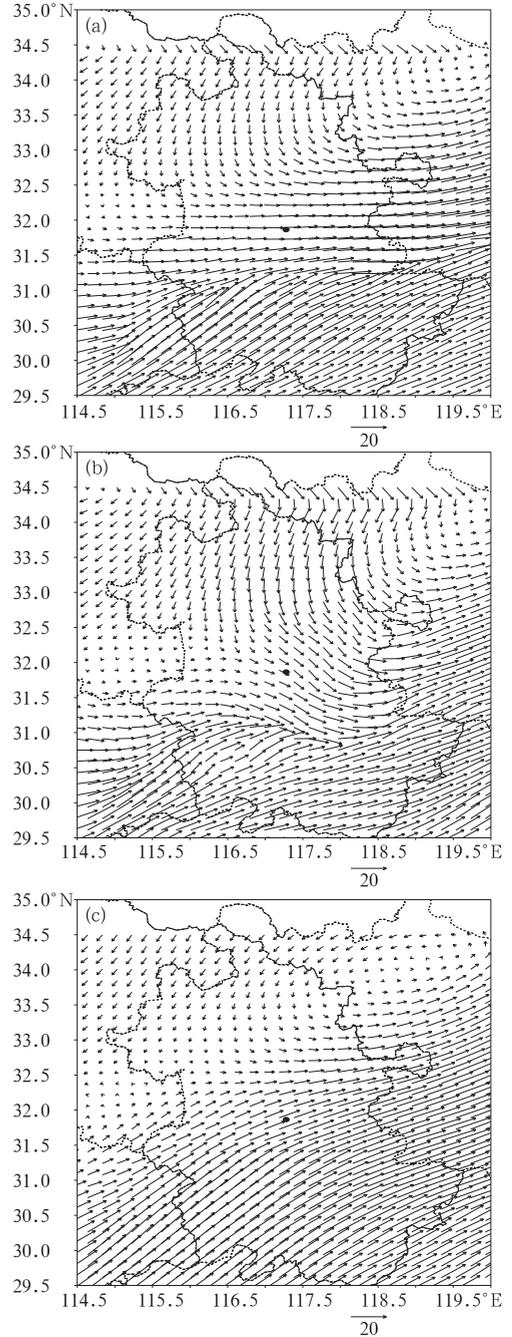


图 4 三个试验沿 31.05°N 的初始 w 剖面(单位: $m \cdot s^{-1}$)
(a) ref 试验, (b) vel 试验, (c) con 试验

升加强, vel 试验对初始风场调整显著, 这种调整主要出现在 6~9km。

随着积分进行, ref 试验和 con 试验的风

场调整也出现了中尺度结构。值得注意的是, 积分 1 小时后, ref 试验的风场即出现了和 vel 试验类似的中尺度风辐合带, 在 31°N 附近, 而 con 试验则没有。如图 5 所示。



5 三个试验 1h 后预报风场(6km, 单位: $m \cdot s^{-1}$)
(a) ref 试验, (b) vel 试验, (c) con 试验

虽然 vel 试验的中尺度结构更为细致, 32°N 附近以北风为主, 但 ref 试验在 31°N 附近的辐合带已经很明显, 这种结构一直维持至 03 时。

3.3 综合结果分析

由雷达回波图像和实况降水来看, 00—03 时回波最强、降水最强位置一直维持在 31°N、118°E 附近区域。为了进一步分析 ref、vel 试验的同化预报效果, 图 6 分别给出了 01 时 ref 试验、02 时 vel 试验沿 118°E 的剖面图。图中散度、雨水混合比单位均扩大 1000 倍, 阴影为雨水混合比。

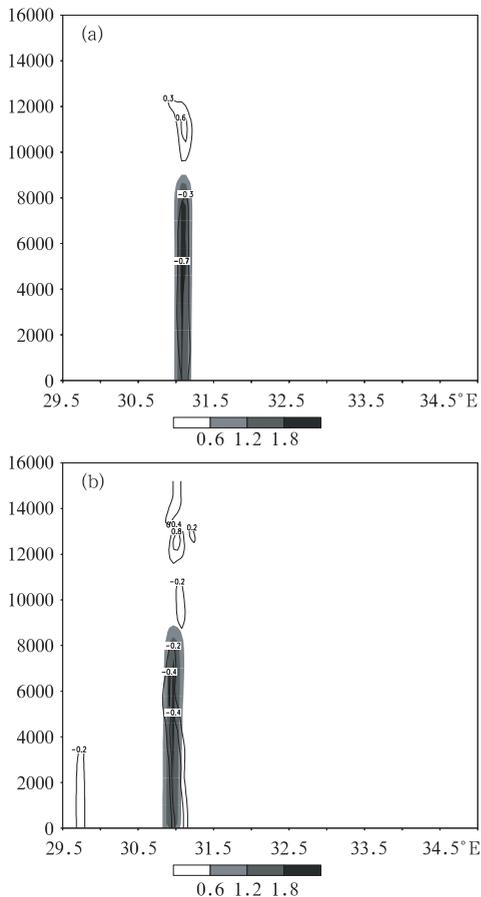


图 6 同化试验沿 118°E 的辐射散场和雨水混合比(阴影部分, 单位: 1000g/kg)分布剖面
(a) 01 时的 ref 试验, (b) 02 时的 vel 试验

由图可见, 01 时 ref 试验和 02 时 vel 试验的预报场在 31°N 附近的辐散场均呈现出低层辐合为主、高层辐散为主的垂直结构, 且对应都配合有雨水混合比的高值中心, 极有利于降水的形成和发生。另外可见, 雨水混合比一般都位于 9km 以下, 这与雷达测量高度基本吻合, 说明随着模式积分进行至 2 小时, 初始雷达反射率资料带来的水汽条件并未能被积极有效地运送到 10km 以上。但与非同化试验相比, con 的对应位置剖面没有出现任何有利于降水发生的结构特征。

图 7 给出了 00—03 时 ref、vel、con 试验的降水模拟结果和实况。

由图 7 可见, 实况降水最大位置在铜陵 (30.97°N、117.78°E), 量值超过 120.0mm (图 7d)。而 ref、vel、con 试验模拟的最大降水中心位置均与之不甚相符: ref 试验偏东 0.5 度 (图 7a), vel 试验偏西 1 度 (图 7b), con 试验偏西 3 度、偏南 0.5 度 (图 7c) 且量值偏小。

明显可以看出, ref 试验的降水区域比实况大, 包含了实况降水区域。但 vel、con 试验均无此现象, 说明这一模拟降水范围比实况变大的情况不是模式本身引起的, 而是由初始反射率资料同化带来的。

另外, 三个试验在实验区域西南位置都有强降水中心出现 (图 7, a、b、c), 这与实况完全不符 (图 7d)。但由于 con 试验亦如此, 可见这一区域的降水并非由雷达资料同化引起, 而是模式本身的作用。正是由于雷达反射率资料、径向风资料的同化, 才使得模拟结果与实况更加接近。

ref、vel、con 试验的 00—01 时, 01—02 时, 02—03 时的逐时降水情况与以上分析的 3 小时降水情况一致 (图略)。

4 结 论

本文通过分析多普勒雷达反射率、径向风资料同化个例, 得到如下结论:

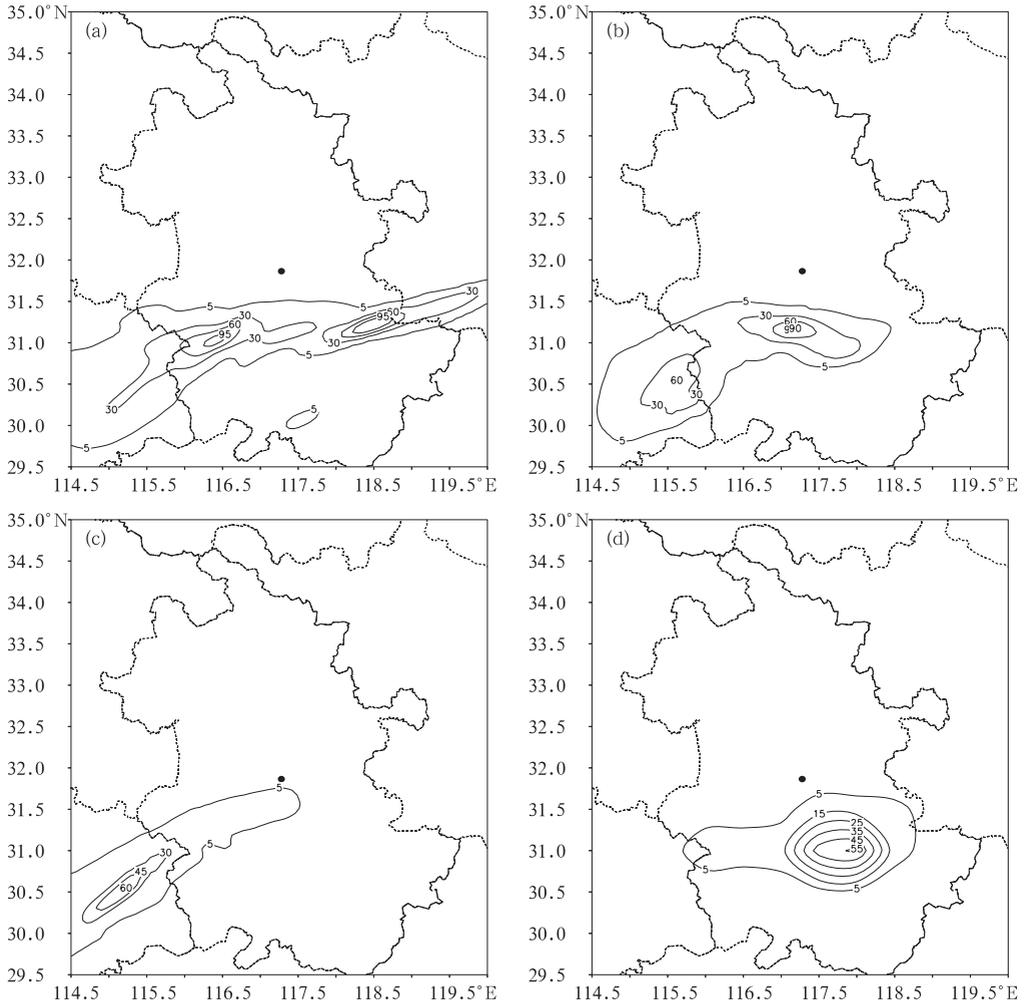


图 7 三个试验预报的 3h 降水(单位:mm)

(a) ref 试验, (b) vel 试验, (c) con 试验, (d) 实况

(1) 径向风资料对初始风场调整显著,使出现明显中尺度特征;当积分开始进行后(如 1 小时),径向风资料同化试验的水汽场出现大值中心,但这种水汽条件与实际不符。

(2) 反射率资料对初始水汽场调整明显,在风暴发生处产生清晰的水汽中心;当积分进行 1 小时后,反射率资料同化试验对风场的调整已经相对清晰,与此时的径向风同化试验类似,基本可以模拟出风暴的中尺度风特征,并且保持。

(3) 从降水模拟来看,单独同化径向风、

反射率资料得到的最大降水中心位置与实况有出入。同化反射率资料试验的位置偏差最小。但该试验预报的降水比实况范围偏大(包含实况范围)。而两个同化试验的降水模拟结果都比非同化试验好。

综上所述,雷达资料对于改进中尺度数值模式的初始场、预报场的效果明显。从试验结果分析来看,同时同化雷达反射率、径向风资料的结果应该会更好。

本试验仅是一次天气过程的同化分析,其代表性有待于收集更多天气过程资料,进

行更多的研究来验证。

参考文献

- [1] Shapiro A, Ellis S, Shaw J. Single-Doppler velocity retrievals with Phoenix data: Clear air and microburst wind retrievals in the planetary boundary layer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1995, 52: 1265-1287.
- [2] Qiu C, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler radar data[J]. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 1992, 9: 588-598.
- [3] 邱崇践,余金香, Qin Xu. 多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进[J]. *气象学报*, 2000, 58(2): 244-249.
- [4] Gal-Chen T. A method for the initialization of the anelastic equations; Implications for matching models with observations[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1978, 106: 587-606.
- [5] 马清云,李泽椿,陶士伟. 单部多普勒雷达风场反演及其在数值模式预报中的应用试验[J]. *应用气象学报*, 2001, 12(4): 488-493.
- [6] 王叶红,赵玉春,崔春光. 雷达降水资料一维变分同化的敏感性试验[J]. *气象*, 2004, 30(4): 6-10.
- [7] 托亚,梁海河,马淑芬. 用雷达观测资料改进 MM5 初始场的初步试验研究[J]. *南京气象学院学报*, 2003, 26(5): 661-667.
- [8] 杨艳蓉,张沛源,胡绍萍. 多普勒雷达 PPI 资料在垂直模式 MM5 中的应用[J]. *气象*, 2005, 31(4): 44-47.
- [9] Chris Snyder, Fuqing Zhang. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an Ensemble Kalman Filter[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, 131(8): 1663-1677.
- [10] Sun J., N. A. Crook. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observation using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1997, 54: 1642-1661.
- [11] Sun J., N. A. Crook. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observation using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1998, 55: 835-852.
- [12] Xu Xiaoyong, Liu Liping, Zheng Guoguang. Dynamical and Microphysical Retrieval from Simulated Doppler Radar Observations Using the 4DVAR Assimilation Technique[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 19(2): 160-173.
- [13] Ming Hu, Ming Xue. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth Tornadoic thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, Accepted.
- [14] Ming Hu, Ming Xue. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth Tornadoic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, Accepted.
- [15] M. Lindskog. Doppler radar wind data assimilation with HIRLAM 3DVAR[J]. *Ame. Met. Soc.*, 2004, 132(5): 1081-1092.
- [16] 余贞寿,廖胜石,黄克慧. 0414 号台风“云娜”的数值模拟[J]. *气象学报*, 2005, 63(6): 903-914.
- [17] Qingnong Xiao, Y-H Kuo, J. Sun, et al. Assimilation of Doppler radar observations and its impacts on forecasting of the landfalling typhoon Rusa (2002) [C]. *Proceeding of the Third European Conference on Radar Meteorology (ERAD) together with the COST 717 Final Seminar*, 2004, 178-182.
- [18] 盛春岩,浦一芬,高守亭. 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*, 2006, 30(1): 93-107.
- [19] Bratseth A. M. Statistical interpolation by means of successive corrections[J]. *Tellus*, 1986, 38A: 439-447.