

李媛,刘健文,董佩明,等. GRAPES-3Dvar 雷达资料直接同化对江淮暴雨数值预报影响的分析研究[J]. 气象,2011,37(4):403-411.

GRAPES-3Dvar 雷达资料直接同化对 江淮暴雨数值预报影响的分析研究^{*}

李 媛¹ 刘健文² 董佩明² 刘红亚³

1 西安通信学院, 西安 710106

2 北京航空气象研究所, 北京 100085

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

提 要: 使用具备多普勒雷达资料直接同化功能的 GRAPES-3Dvar 同化系统,对 2007 年 7 月江淮流域连续性暴雨过程中 4 个个例进行了数值预报试验,结果表明多普勒径向速度以及基本反射率因子的直接同化可以有效改进中尺度降水数值预报的效果。对 7 月 3 日雷达资料联合同化以及单独同化对分析和预报影响的进一步分析显示,联合同化能够有效改善初始分析场中的风场和湿度信息,激发模式降水,减小 SPIN-UP 现象,中尺度系统降水的发生发展以及强度、走势和落区的预报得到较为准确的表征,显著改善了中尺度强降水数值预报效果。径向速度的直接同化主要贡献表现在风场上,能够在初始场中增加气旋性涡旋等中小尺度风信息,改善三维风场分析。反射率直接同化的主要影响体现在湿度场上,改进了初始场中的湿度参数,对降水预报影响明显。

关键词: 多普勒雷达, 直接同化, GRAPES-3Dvar, 数值预报, 江淮暴雨

Analysis of the Impact of Radar Data Assimilation on the Numerical Forecast of Jianghuai Rainstorm by Using GRAPES-3Dvar

LI Yuan¹ LIU Jianwen² DONG Peiming² LIU Hongya³

1 Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106

2 Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: In this paper, four cases on the Yangtze-Huaihe River Valley (Jianghuai for short) during continuous rainstorm process in July 2007 are chosen for numerical prediction experiments using the GRAPES-3Dvar model with radar direct assimilation function. The results have shown that the direct assimilation of the Doppler radial velocity, as well as the basic reflectivity factor can effectively improve the numerical prediction effects of mesoscale precipitation. The further analysis of the joint and the separate assimilation of radar data assimilation on July 3 shows that: Joint assimilation can improve the initial analysis of the wind field and humidity information, stimulate model precipitation, reduce the spin-up phenomenon. Hence the mesoscale precipitation's occurrence and development as well as the strength, movements and distribution are more accurately forecasted, and the effects of mesoscale numerical forecast of heavy precipitation are significantly improved. The main contribution of radial velocity direct assimilation is in the wind field, which can increase small and medium-scale wind information such as cyclonic vortex in the initial field, improve the analysis of three-dimensional wind field. The main impact of reflectivity's direct assimilation is in the humidity field, which improves the initial humidity field parameters, and impacts significantly the

^{*} 十一五国家科技支撑计划项目(编号:2006BAC02B00)资助

2009 年 8 月 18 日收稿; 2011 年 2 月 21 日收修定稿

第一作者:李媛,主要从事雷达资料同化研究工作. Email:lovely600@sina.com

precipitation forecast.

Key words: Doppler radar observation, direct assimilation, GRAPES-3Dvar model, numerical simulation, Jianghuai rainstorm

引言

随着数值预报技术的日益完善和计算能力的迅速提高,以及人们对大气中各种物理过程更深入的了解,数值天气预报已成为制作客观化、量化与标准化天气预报的一种重要工具。众所周知,数值天气预报精度主要由两个因素决定,一是模式初值场的质量,另一是数值天气预报模式本身的完善程度。气象要素对初值十分敏感,初值存在的微小差异,都可能造成能量转换方向的重大不同,因此初始场的确定性对模拟结果有非常重要的影响作用,成为进一步提高数值预报准确率的关键。对于中小尺度系统的数值预报和模拟来说,多普勒天气雷达几乎是观测风暴尺度气流四维涡动结构的唯一探测工具,是目前能够为我们提供这类高分辨率资料的主要手段。在国外,Wang 和 Warner 将雷达资料用于数值模式,缩短了激发中尺度系统的时间。1998 年 NECP 的 ETA 预报系统中同化了雷达径向速度^[2],雷达径向速度又在 2000 年被应用于 HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) 预报系统的 3DVAR 方案中^[3],国内在多普勒雷达反演同化及各种外推临近预报应用技术方面也已有不少研究^[4-5],但基本都是基于国外的数值模式,盛春岩等^[6]将国内新一代多普勒雷达(CINRAD)反射率及径向风资料直接用于中尺度数值模式 ARPS 进行模拟。顾剑峰等^[7]利用 WRF-3Dvar 将反射率因子转换成雨水混合比后,进行了反射率数据直接同化的研究。而近期,中国气象科学研究院在 GRAPES-3Dvar 基础上开发了雷达资料的同化模块,我们在淮河连续性暴雨天气过程集中期 2007 年 6 月 29 日至 7 月 10 日中选取 7 月 3 日、5 日、8 日、9 日江淮 4 个降水个例,在 GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)模式及其同化系统基础上开展一系列试验,试验 GRAPES 模式中多普勒径向速度以及基本反射率因子直接同化的实现,并检验其对降水预报的效果及普适性和业务化运用的可能性。并选择 3 日的个例进行具体分析,检验联合同化和单独同化对分析场和预报场的

影响,为后期模式业务化应用提供一些参考。

1 同化系统及模式介绍

1.1 GRAPES 三维变分资料同化系统

GRAPES 三维变分资料同化系统^[8]是 GRAPES 模式中的同化部分。该系统对有限区域模式采用格点空间,水平为 Arakawa A 经纬网格,新开发的雷达资料同化模块的垂直坐标不同于以往 GRAPES-3Dvar 版本所采用的标准等压面,而采用既有 σ 坐标光滑的贴地坐标面,又兼有高度性质的“高度地形追随坐标”。目前多普勒雷达资料已经直接接入 GRAPES-3Dvar 并通过调试。雷达资料与其他常规资料的不同主要在于 $y=H(x)$,即观测算子 H 的不同。

参照 Sun 和 Crook^[9-10]的方法,多普勒径向速度直接同化的观测算子为

$$v_r = u \frac{x - x_i}{r_i} + v \frac{y - y_i}{r_i} + (w - v_T) \frac{z - z_i}{r_i}$$

式中, (u, v, w) 为大气三维风场, (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 是雷达半径, v_T 是降水粒子的下落末速度,它的计算采用 $v_T = 5.40\alpha \times (\rho q_r)^{0.125}$, 其中, q_r 是雨水混合比 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), α 是修正因子,定义为 $\alpha = (p_0/\bar{p})^{0.4}$, 这里 $\bar{p}$ 为本底气压, p_0 是地面气压。

在雨滴分布的 Marshal-Palmer 假定下导出的解析解作为多普勒雷达基本反射率因子的直接同化观测算子,即雨水混合比 q_r 与雷达基本反射率因子 $Z(\text{dBZ})$ 之间的 $Z-q_r$ 关系^[9-10]:

$$Z = 43.1 + 17.5 \log(\rho q_r).$$

1.2 GRAPES 中尺度模式

GRAPES 模式系统^[11], 动力框架使用一套完全动力学过程的非静力完全可压的方程组,水平方向上采用经纬度的球面坐标,垂直方向采用高度地形追随坐标,并使用静力平衡的参考廓线,积分方案使用两时间层的半隐式半拉格朗日时间差分方案,经纬度格点的网格设计,水平方向取 Arakawa C 格点,垂直方向采用 Charney-Philips 垂直分层设置,

利用三维矢量质点轨迹计算半拉格朗日轨迹。该模式的一部分成果已经开始进行业务化试验,为中国数值天气预报系统的可持续发展奠定了良好的基础^[12]。

2 天气过程及试验资料

2.1 天气过程

2007年江淮流域从6月19日开始入梅,进入主汛期。6月29日至7月26日出现持续性强降水天气,流域平均降水量465.6 mm,少于1954年(565.1 mm),为1953年以来历史同期第二多。由于降水强度大,持续时间长,淮河干流水位全线上涨,水文检测记录显示,淮河流域发生了仅次于1954年的流域性大洪水^[13]。特别是6月29日至7月10日,淮河流域出现了集中强降水,伴随着强降水的持续,淮河干流(7月8日)全线超警戒水位,安徽省先后启用了10个行蓄洪区分洪,受灾最为严重^[14]。

2.2 资料

选用国家气象中心的T213产品作为背景场,水平分辨率为 $0.5625^{\circ} \times 0.5625^{\circ}$,垂直层次为17层。其中含有风场、位势高度场、温度场、相对湿度场、比湿场、表面气压、海平面气压、表面温度、地表以上10 m的风、地表以上2 m的温度、地表以上2 m的相对湿度等变量^[15]。

雷达资料选取“973”项目外场试验分别布设在合肥(31.867°N 、 117.258°E)、南京(32.191°N 、 118.697°E)、徐州(30.517°N 、 114.378°E)型号为CINRAD/SA的S波段雷达观测资料。采用9个仰角的VCP21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分钟。径向速度和回波的最大观测半径分别是230 km和460 km,距离库长为250 m和1 km^[16]。为了与模式尺度匹配,选取 $\text{dr_v}(9)=(/32,32,32,32,32,32,24,16,12/)$,即分别隔32、32、32、32、32、32、24、16、12个距离库取样来控制资料取样量。基本反射率因子取样点同径向速度取样点,在此不再赘述。

本文雷达资料采用信号处理器生成的二级存档资料,在其生成前已完成了地物杂波抑制和距离退折叠两个重要的质量控制任务,故本文预处理主要包括:通过设置新息向量的阈值来进行多普勒径向

速度资料和基本反射率因子资料的质量控制以及选取扫描半径 r 在20 km到不模糊距离之间、扫描高度 z 在1~10 km、反射率在25~55 dBz的资料,取径向速度绝对值大于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的资料。当资料同时满足以上几项时方可进入同化系统,抑制了距离折叠、速度模糊以及地物杂波、噪声等干扰因子对同化效果的影响。

3 GRAPES 模式中雷达资料同化的数值预报效果

3.1 方案设计

2007年淮河连续性暴雨天气过程集中期为6月29日至7月10日,本文在其中选取7月3、5、8、9日江淮4个降水个例,试验GRAPES模式中多普勒雷达基本观测因子直接同化的实现,并检验其对降水预报的效果及普适性和业务化运用的可能性。每日的试验分为两组——同化雷达资料的同化试验和未同化雷达资料的控制试验,两组试验的同化背景场相同,皆为T213预报再分析资料,资料时间分别为所选各日的00 UTC至06 UTC,间隔为6小时,通过GRAPES-SI (GRAPES Standard Initialization)处理为模式初值和侧边界条件。同化试验分别选取各日00 UTC左右的徐州、合肥、南京站雷达资料经过预处理后进入同化系统;所选取的区域为($25^{\circ} \sim 38^{\circ}\text{N}$ 、 $108^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$),格点数为 171×131 ,格距为 0.1° ,积分时间步长30 s,积分6 h。模式每小时输出一次结果。侧边界条件6小时更新一次。模拟试验应用的预报模式物理过程参数化方案为NECP3-class简单冰相方案,积云对流参数化方案选用Kain-Fritsch方案,雷达影响半径设为80 km。对降水预报比对MICAPS降水实况检验预报效果。

3.2 结果分析

由图1中7月3、5、8、9日各个例的降水实况与控制实验、同化试验的6小时降水预报对比来看,雷达资料的加入引入了中小尺度信息,对降水预报的改进作用十分显著。未同化雷达资料的控制试验经过6小时模式积分后只报出了一些零星降水,而同化雷达资料的同化试验成功模拟出了与实际情况较吻合的雨区形状、走向及降水中心,激发了降水,大大降低了SPIN-UP现象。

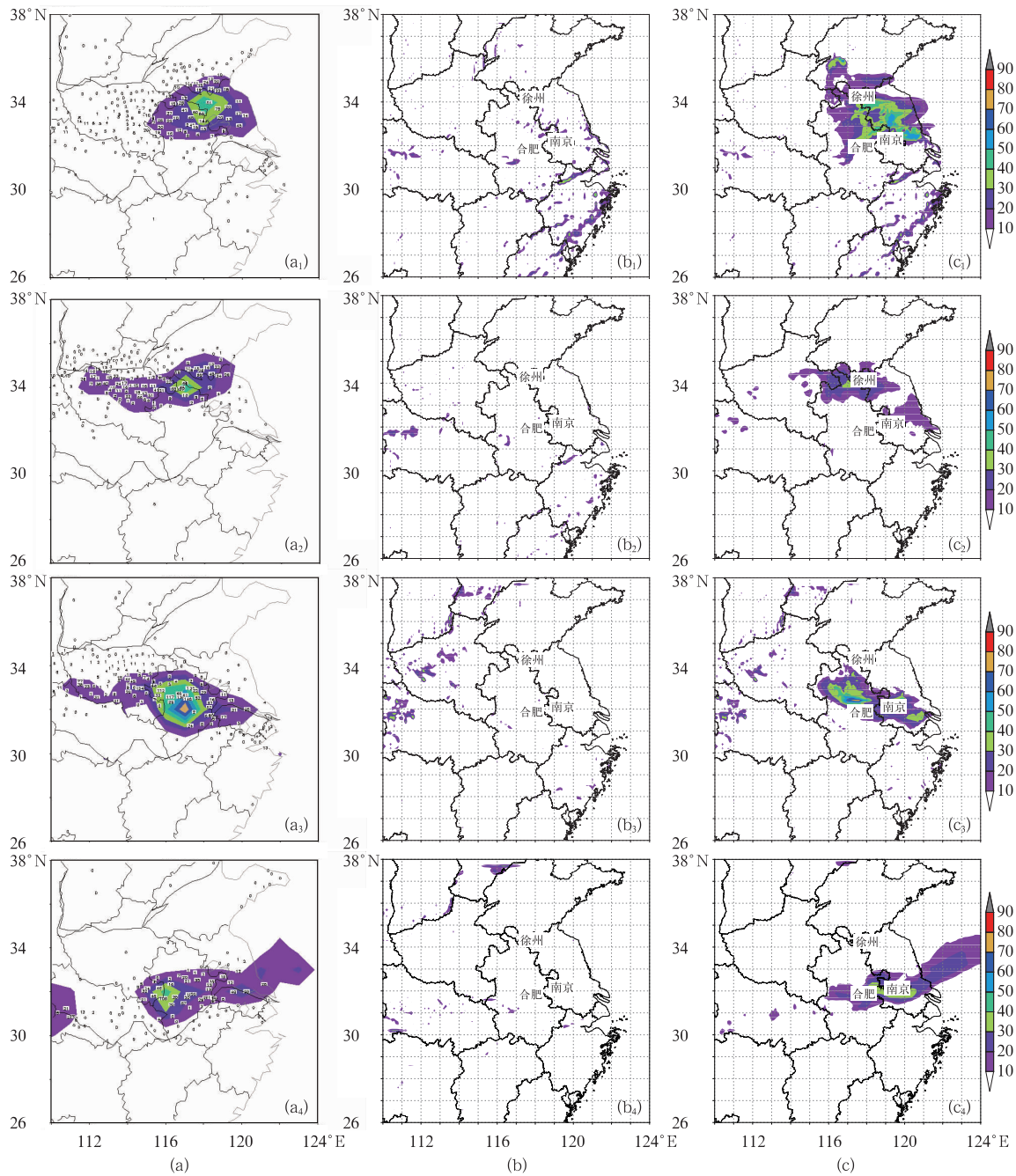


图 1 2007 年 7 月 3(a₁, b₁, c₁)、5(a₂, b₂, c₂)、8(a₃, b₃, c₃)、9(a₄, b₄, c₄) 日 00—06 UTC 累积降水图像
(a) 实况; (b) 控制试验; (c) 同化试验

Fig. 1 The 00—06 UTC 3 (a₁, b₁, c₁), 5 (a₂, b₂, c₂), 8 (a₃, b₃, c₃), and 9 (a₄, b₄, c₄)
July 2007 accumulation precipitation images for
(a) observation, (b) control test, and (c) assimilation test

4 雷达基本观测资料同化对分析场和
预报场的影响

本文多普勒径向速度的直接同化观测算子异于
其他模式惯用将模式初值中垂直速度处理为零值的

做法,尝试在 Richardson 方法的基础上,考虑增加
垂直速度的分析变量,使得模式能够直接同化多普
勒径向速度资料。另外,在一般的模式初值中,云物
理过程中除了水汽之外,各类水物质混合比的初值
都被处理为零,本文中引入了水汽混合比、云水混合
比等云微物理量,采用雨水混合比与雷达基本反射

率因子之间的 $Z=43.1+17.5\log(\zeta q_r)$ 关系,建立了雷达基本反射率因子的观测算子,从而可以将雨水混合比直接同化到 GRAPES-3Dvar 系统中。

在上文基础上进而选择 7 月 3 日暴雨两个例具体分析多普勒径向速度和反射率因子直接同化的实现并检验其联合同化以及单独同化对分析场和预报场的影响,试验方案设计及参数选取同上。进行分析场分析时,由于其为高度地形追随坐标、等 σ 面,故分别选取 $Z=5$ (1100~1200 m 左右)、 9 (5000 m 左右)、 14 (12000 m 左右)来代表低层、中层和高层进

行同化分析增量场的对比分析。

4.1 径向速度、反射率因子的联合同化

4.1.1 对风场的影响

对比图 2 中初始场和分析场可以看出,多普勒雷达径向速度和反射率因子在 GRAPES 模式中的联合直接同化得以实现,并对风场的高中低层都产生了影响。在低层,图 2 中可以发现,同化增量场中徐州站以西出现了一气旋性增量中心,西南侧出现明显的气旋性切变,反映到分析场上使徐州站附近

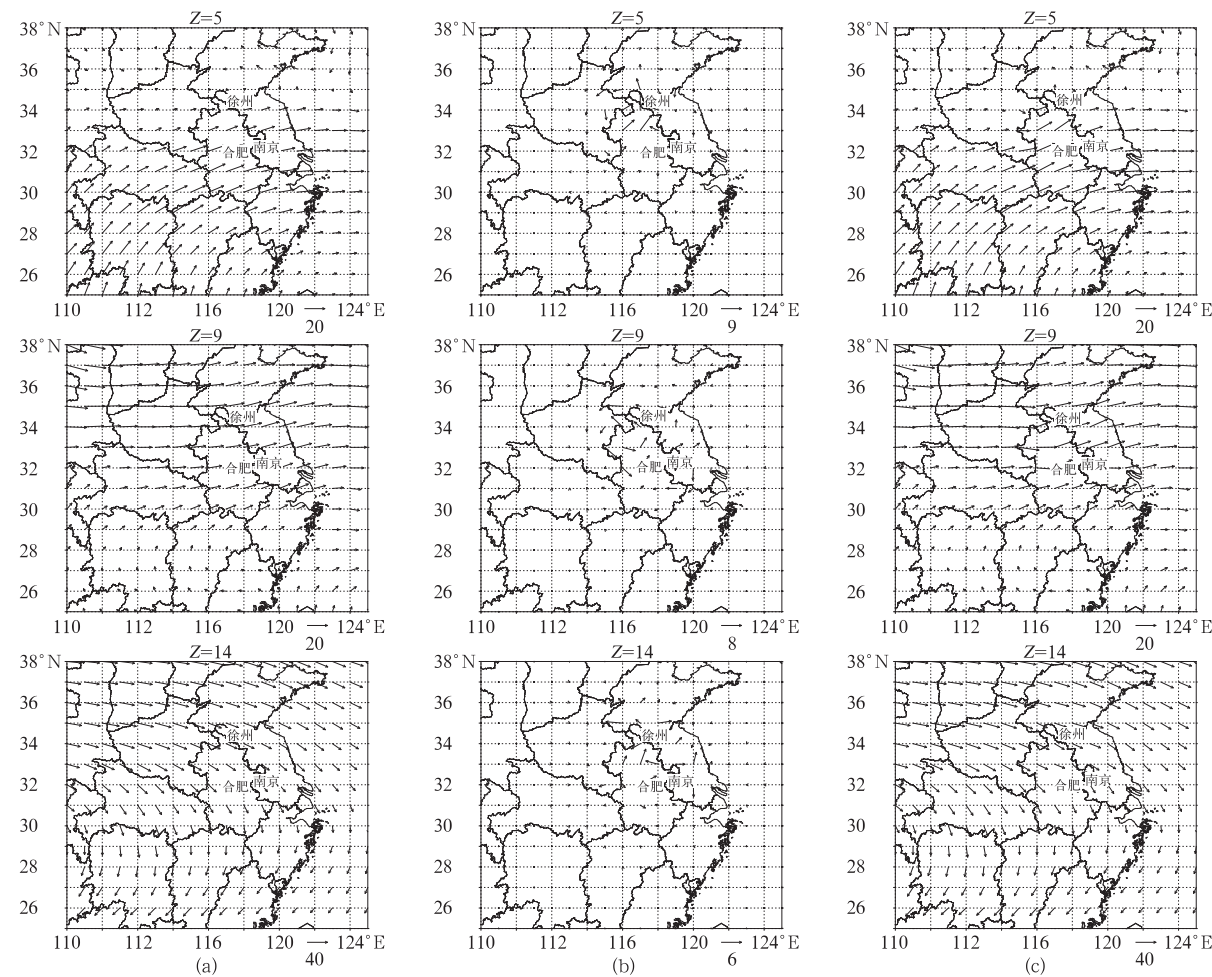


图 2 同化雷达资料前后的风场对比
(a) 初始场; (b) 增量场; (c) 分析场

Fig. 2 The wind field contrasts before and after assimilation radar data;
(a) initial field, (b) incremental field, and (c) analysis field

风场出现了一气旋式环流。在高层,图 2b 中可以看出,同化径向速度后,也受到一定的影响,但相对高层的较大量级风场,其对风场形势的改变在分析场中不明显。图 3 中可以看出,同化试验预报出的垂直速度在观测的强回波区出现了强的上升气流,与

观测的回波有很好的对应关系。

根据以上分析可以得到结论:雷达观测信息的联合同化可以改善模式分析场,引入了中小尺度信息,产生更接近实况的中尺度结构,能够改善几乎整个三维风场分析。在雷达影响半径范围内,风场明

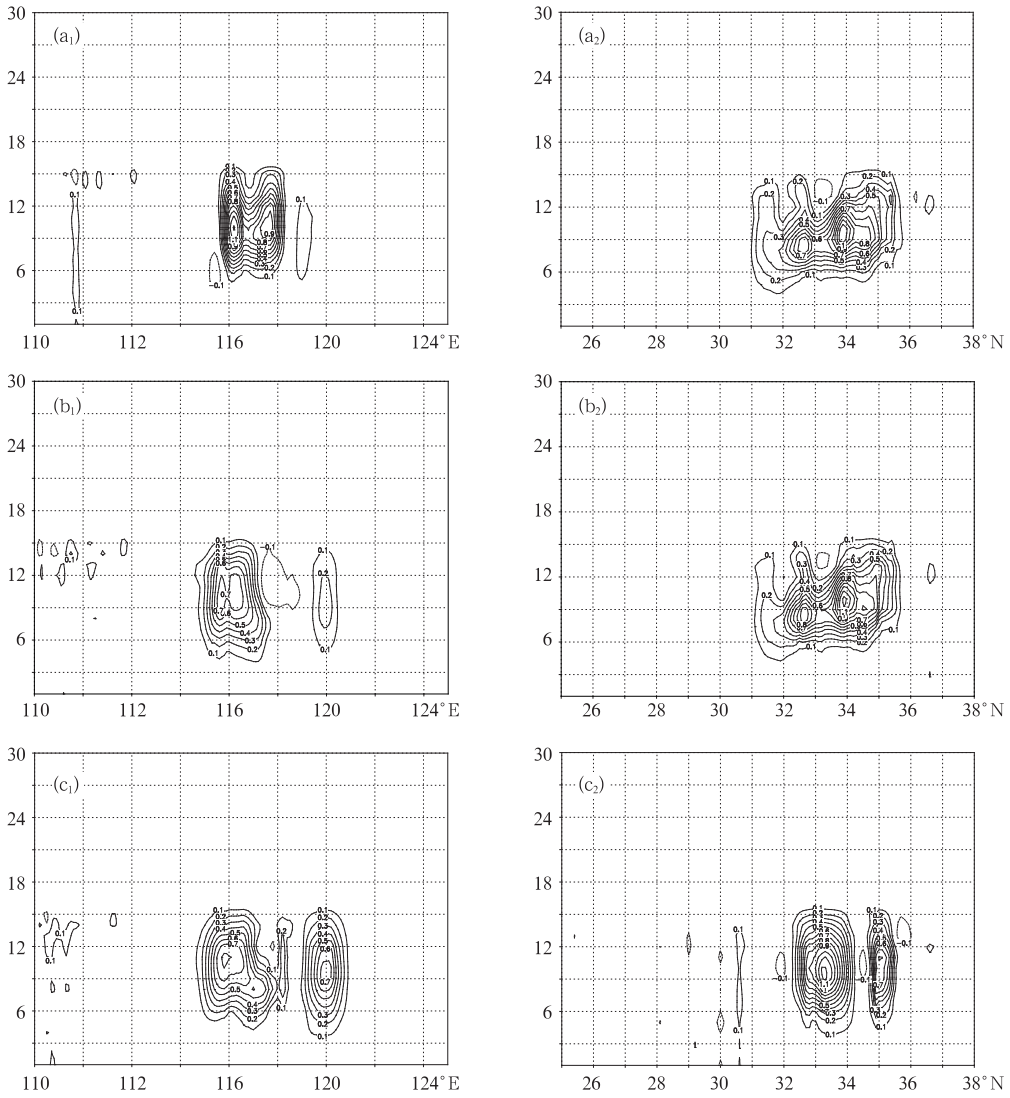


图 3 沿固定纬度(a_1, b_1, c_1)和纬度(a_2, b_2, c_2)分析场垂直速度的垂直剖面图

(a) 徐州站; (b) 合肥站; (c) 南京站

Fig. 3 The vertical speed cross sections of analysis field along a fixed latitude(a_1, b_1, c_1) and longitude (a_2, b_2, c_2) at stations:

(a) Xuzhou, (b) Hefei, and (c) Nanjing

显得到加强,系统高低层配置被合理模拟。

4.1.2 对湿度场的影响

由 $Z-q_r$ 关系,把对湿度场的考察重点放在对雨水混合比的改进上。由图 4 可以看出,同化雷达资料后,高中低层都出现了相应的雨水混合比增量和云水混合比增量,由于这些物理量在初始背景场 T213 资料中没有相应量(即初值为 0),故其出现为雷达资料同化的结果,同化增加了中小尺度信息。多普勒雷达观测资料在时间和空间上均有较高分辨率,这对于生成中尺度模式的初始场是有用的。以上分析说明同化雷达资料以后,可以增加水汽含量,改进模式对湿度场的模拟。

4.1.3 对预报降水结果的影响

上文中对 6 小时累积降水场已做出了分析,故下面针对逐小时降水进行分析。图 5 中可以看到,同化雷达资料后,模式的降水被激发,减小了 SPIN-UP 现象,降水从第一小时开始出现并且最大值一直维持在 12~18 mm 之间。降水中心的东北走向,走势和落区的预报大体上比较准确。

4.2 多普勒径向速度和反射率的分别直接同化

4.2.1 对风场的影响

单独同化径向风时与径向风、反射率二者联合同化时对整个风场流场形势的改变是相同的,但单

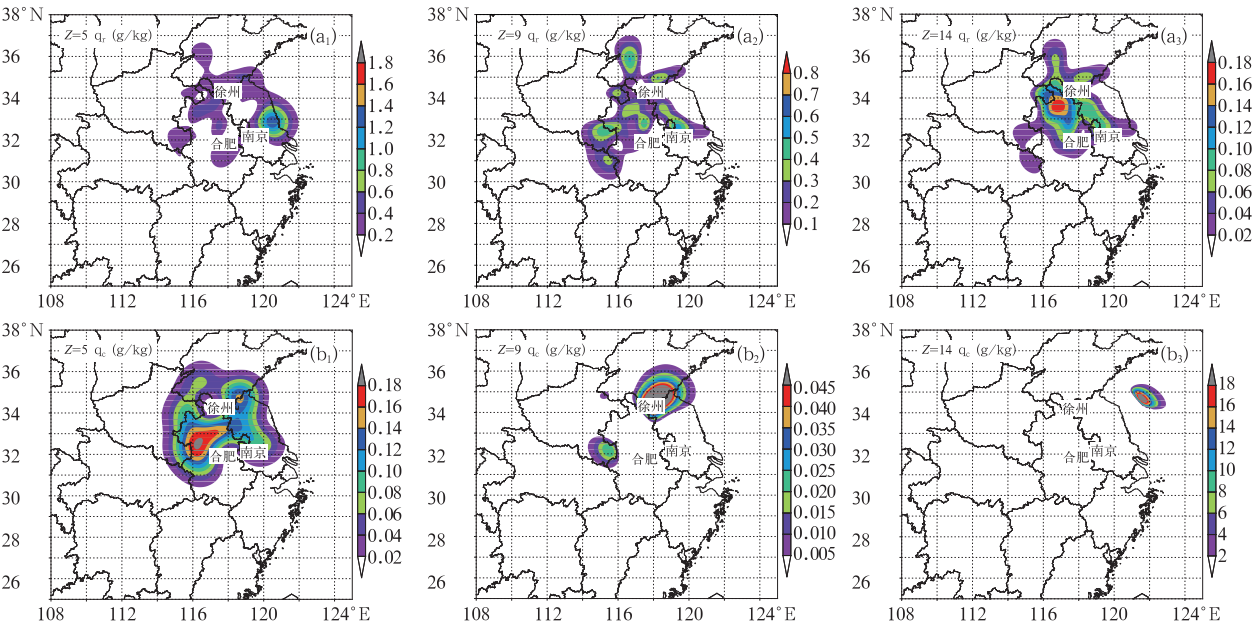


图 4 雨水混合比(a)和云水混合比(b)分析场

Fig. 4 The analysis field of rainwater mixing ratio (a) and cloudwater mixing ratio (b)

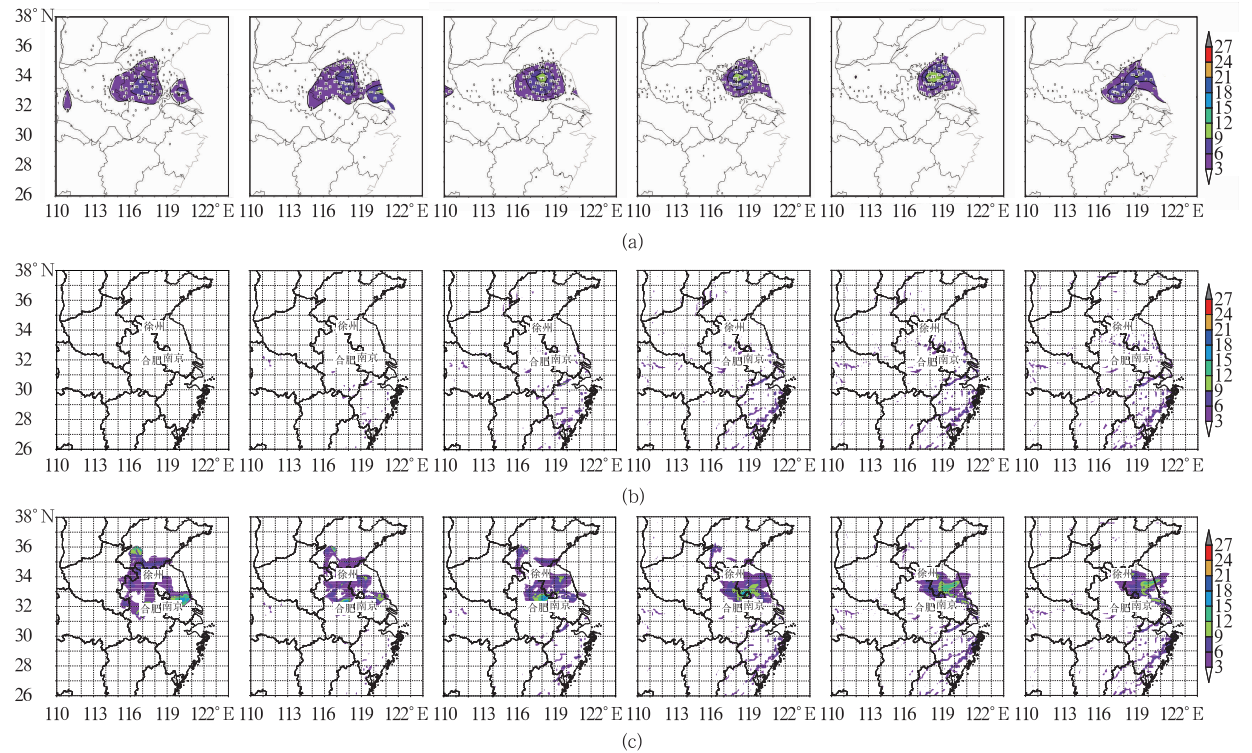


图 5 2007 年 7 月 3 日 00—06 UTC 逐小时降水预报场及实况 (单位:mm)

(a) 实况, (b) 控制试验(NO 3DVAR), (c) 同化试验(RADAR 3DVAR)

Fig. 5 The hourly precipitation forecast field during 00—06 UTC 3 July 2007 for

(a) observation (first row), (b) control test (NO 3DVAR middle row),

(c) assimilation tests (RADAR 3DVAR the final row, unit:mm)

独同化时改变的量级更大。对垂直速度的影响也与此相同,不再赘述。而雷达反射率因子的直接同化可以使风场整体微弱增强,但影响不大,也没有出现中小尺度系统信息(图略)。

4.2.2 对湿度场的影响

对比控制试验和单独同化径向速度的同化试验的结果可以发现,同化所得各层雨水混合比增量场皆为 0,即只同化雷达径向速度时,对湿度场几乎没有影响。而单独同化反射率时与径向风、反射率二者联合同化时对整个湿度场形势的改变是相同的,但单独同化时的改变的量级更大。对云水混合比的影响也与此相同,不再赘述。

4.2.3 对预报降水结果的影响

图 6 可以看出,单独同化径向速度时,只模拟出了小部分的降水。而且由逐小时降水图(图略)可以看出,前 3 小时预报降水区降水几乎为 0,SPIN-UP 问题没有得到根本解决,但比控制试验还是有些许改进。单独同化反射率时,对比未加雷达同化的控制试验,对预报降水的改进十分显著,出现了大范围的降水,并且降水中心强度达到了 60~70 mm。SPIN-UP 问题得到解决。对比与径向速度联合同化时,单独同化反射率因子时降水范围缩小、强度增大,但降水中心位置与实际相比偏南。

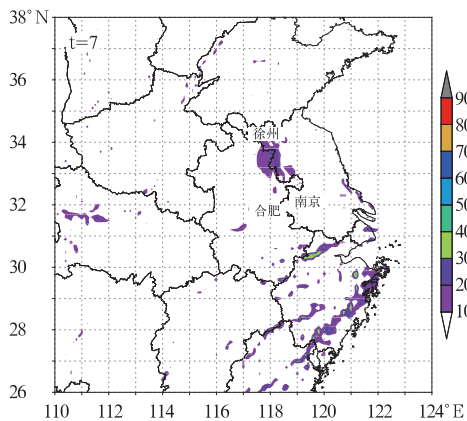


图 6 2007 年 7 月 3 日 00—06 UTC

6 小时累积降水(单位: mm)

Fig. 6 The 6 h accumulation precipitation during 00—06 UTC 3 July 2007 (unit: mm)

5 小结与讨论

本文在 2007 年淮河连续性暴雨集中期中选择了 4 个个例,实现了多普勒雷达基本观测因子——径向速度和反射率在 GRAPES-3Dvar 中的直接同化,通过分析对比控制试验和同化试验对江淮降水的预报效果来检验 GRAPES 模式中多普勒雷达资

料的引入对背景场资料的修正并进而优化数值预报的效果。接着以 7 月 3 日为例,检验其联合同化以及单独同化对分析场和预报场的影响,得到以下结论:

(1) 雷达观测信息的同化可以引入更多的中小尺度信息,改善模式初始场,进而改进数值预报的效果。

(2) 实现了雷达反射率因子和径向速度的联合同化。雷达观测信息的联合同化可以改善模式分析场,产生更接近实况的中尺度结构。水汽含量增加,改进了对湿度场的模拟,增加了初始场中云水等的含量。模式的降水被激发,减小了 SPIN-UP 现象,降水强度、走势和落区的预报大体上比较准确,对中尺度强降水数值预报的贡献是显著的。

(3) 多普勒径向速度的直接同化的主要影响表现在风场上,能够在初始场中增加气旋性涡旋等中小尺度风信息,能够改善几乎整个三维风场分析,但对湿度场影响不大。

(4) 反射率的直接同化的主要影响表现在湿度场上,主要是改进初始场中的湿度参数,增加初始场中云水等的含量。对定量降水预报改进效果显著,其亦可使整个风场增强,但影响甚微。

(5) 垂直速度的引入加强了上升下沉运动,使雷达作用于系统的效果迅速凸显,有利于对流的发展和预报,激发了降水,大大减轻了 SPIN-UP 现象;同化单部雷达资料同样可以改进降水场的预报,但天气系统被人为截断,模拟的降水范围比多部雷达同时同化时较小;可能由于常规资料的大尺度特性和雷达资料的中小尺度特性匹配不佳,导致联合同化两者的效果不如单独同化雷达资料;同化不同径向分辨率的多普勒雷达资料得到结论同化雷达资料并不是多多益善的;质量场影响半径相对湿度场影响半径的改变对同化结果的影响较大,两者同时增大时,对降水预报的模拟较正确。

对于多普勒天气雷达基本探测资料的直接同化和分析,本文的研究工作只是一个初步的尝试,虽然在中尺度暴雨的同化分析和数值模拟取得了一些令人鼓舞的结果,但依然存在着诸多的问题,仍然期待着更加深入的研究和应用。

参考文献

- [1] 程麟生,丑纪范. 大气数值模拟[M]. 北京:气象出版社,1991.

[2] Parrish D F, Purser J. Anisotropic covariances in 3D-VAR : Application to hurricane Doppler radar observations[C]. HIRLAM 4 workshop on variational analysis in limited area models, Meteor-France, Toulouse 1998.

[3] Lindskog M. Assimilation of radar radial wind in the HIRLAM 3D-VAR[J]. Phys Chem Earth (B), 2000, 25:1243-1250.

[4] 陈力强, 杨森, 肖庆农. 多普勒雷达资料在冷涡强对流天气中的同化应用试验[J]. 气象, 2009, 35(12):12-20.

[5] 张利红, 杜钦, 陈静, 等. 地面观测资料在西南地区数值预报中的敏感性试验[J]. 气象, 2009, 35(6):26-35.

[6] 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):94-107.

[7] 顾剑峰, 颜宏. 多普勒雷达资料三维变分直接同化方法研究[D]. 博士论文, 中国气象科学研究院, 2006.

[8] 朱国富. GRAPES 三维变分同化系统(3Dvar)ver1875 版使用指南[R].

[9] Sun J, 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]. J Atmos Sci, 1997, 54:1642-1661.

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

[11] 陈德辉, 沈学顺. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6):773-777.

[12] 叶成志, 欧阳里程, 李象玉, 等. GRAPES 中尺度模式对 2005 年长江流域重大灾害性降水天气过程预报性能的检验分析[J]. 热带气象学报, 2006, 22(4):393-399.

[13] 宗志平. 淮河流域出现流域性大洪水 江南华南等地持续高温干旱[J]. 气象, 2007, 33(10):118-123.

[14] 廖要明. 淮河流域发生流域性大洪水 江南华南大范围高温干旱[J]. 气象, 2007, 33(10):124-125.

[15] 陈起英, 姚明明, 王雨. 国家气象中心新一代业务中期预报模式 T213L31 的主要特点[J]. 气象, 2004, 30(10):16-21.

[16] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社, 2006.