

多普勒雷达资料在冷涡强对流 天气中的同化应用试验

陈力强¹ 杨 森¹ 肖庆农²

(1. 中国气象局 沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016;

2. National Center for Atmospheric Research, Boulder, USA)

提 要: 应用 WRF 模式的三维变分同化系统(WRF-3DVAR),对沈阳多普勒天气雷达资料在东北冷涡暴雨两个例中的同化应用进行了试验。研制了多普勒雷达资料质量控制系,实现了对径向风和反射率因子的直接同化,不但可以反演中尺度三维气象要素场,而且可以为模式提供初始场。以天气尺度资料为背景场同化多普勒雷达资料,WRF-3DVAR 可以较好地反演冷涡中尺度对流系统的三维结构,反演的地面强对流辐散气流及在对流层中层涡旋都符合中尺度系统概念模型,通过与实际地面探测资料进行了对比,风场环流基本接近,同化了雷达资料的气象要素场可为预报业务提供较好的包含中小尺度系统的实时三维分析场。通过冷涡个例同化试验,应用 WRF-3DVAR 同化雷达资料后,中尺度模式对对流降水的预报总体有正的影响,对强对流中的一些中小尺度雨团的预报也略有改善。

关键词: 多普勒雷达 三维变分资料同化 模式预报 冷涡对流

Experiment of Doppler Radar Data Assimilation for Convection in Cold Vortex

Chen Liqiang¹ Yang Sen¹ Xiao Qingnong²

(1. Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110016;

2. National Center for Atmospheric Research, Boulder USA)

Abstract: The experiment of Shenyang Doppler radar data assimilation was made using WRF-3DVAR system. The quality control system of Doppler radar data was developed. The 3DVAR system is able to assimilate both radial winds and reflectivity directly, not only can retrieve meso-scale 3-D meteorological element fields but also can offer initial fields to model. The

WRF-3DVAR can retrieve the mesoscale 3-D structure of convective system in cold vortex well using synoptic scale data as background field. The surface strong convective divergent flow and vortex in the middle troposphere retrieved were in accord with conceptual model and the wind fields retrieved were closed to surface observations. The meteorological element fields which have assimilated Doppler radar data can be offered to forecasting operation as real time analysis for they include mesoscale weather system. After assimilating radar case data of cold vortex over Northeast China, the model forecasts improved slightly for mesoscale and small scale convective system. Assimilating radar data made positive effects on model forecasts in general.

Key Words: Doppler radar 3DVAR model forecast convection in cold vortex

引 言

近些年来,虽然中尺度数值模式得到很大改进,但其对强对流天气定量降水的预报水平仍然有限。模式初值质量直接影响数值模式的预报精度,特别是对越精细的数值模式影响越大,所以资料同化在数值预报系统中非常重要。雷达资料以其高时空分辨率和站网密度在改善模式初值和临近预报中显示了很大潜力。Sun 等^[1]以云模式为基础应用四维变分方法同化雷达径向风和反射率因子,在临近预报中显示了预报潜力,但云模式依赖于对模式过程的简化,且其应用限制在孤立的对流系统,天气尺度强迫相对较弱。Benjamin 等^[2]将雷达径向风以 VAD(Velocity Azimuth Display)的形式同化到模式中,不能充分利用观测信息。万齐林等^[3]应用雷达回波的时空变化特征得到“视风速”,应用三维变分同化方法联合同化“视风速”和径向风,反演三维气象场,但不能应用雷达反射率因子中的水信息,且在模式的应用效果还不明确。Zhang^[4]应用集合卡尔曼滤波方法同化雷达资料,但其离业务应用还有很大距离。杨毅等^[5]对直接同化雷达径向风和同化反演风场的结果进行了对比,没有对雷达反射率因子进行同化。其他更多的研究是关于多普勒雷达资料的反演和分析^[6-9]。本文应用

NCAR 等发展的 WRF-3DVAR 系统,对多普勒天气雷达径向风和反射率因子资料在东北冷涡强对流天气个例中的应用进行了同化试验。WRF-3DVAR 可以直接同化径向风和反射率因子资料,不但能反演中尺度三维气象场,而且可以为模式提供初始场。

1 WRF-3DVAR 同化多普勒雷达资料原理

WRF-VAR 系统中引入的控制变量为流函数、速度势不平衡部分、温度不平衡部分、相对湿度和地面气压不平衡部分 5 个变量。由于多普勒雷达资料径向风包含垂直速度分量,所以它的同化需要垂直速度的增量,因此需要建立垂直速度(w)与控制变量的关系。

使用 Richardson 方程建立模式变量与 w 的关系:

$$\gamma p \frac{\partial w}{\partial z} = -\gamma p \nabla \cdot \mathbf{v}_h - \mathbf{v}_h \cdot \nabla p + g \int_z^\infty \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_h) dz' \quad (1)$$

式中, $\gamma = c_p/c_v$, 为比热比; p 为气压; w 为垂直速度; \mathbf{v}_h 为水平风矢; g 为重力加速度; ρ 为空气密度; z 为高度。该方程综合应用了连续方程、绝热热力方程和静力方程。

多普勒雷达径向风观测算子:

$$V_r = u \frac{x - x_i}{r_i} + v \frac{y - y_i}{r_i} +$$

$$(\omega - v_T) \frac{z - z_i}{r_i} \quad (2)$$

其中

$$v_T = 5.40a \cdot q_r^{0.125}$$

$$a = (p_0 / \bar{p})^{0.4}$$

其中: V_r 为径向风, r_i 为观测点 (x, y, z) 到雷达 (x_i, y_i, z_i) 的距离, v_T 为云滴末速度。

反射率因子的同化至少需要雨水的增量, 所以原控制变量 q_v 由 q_t ($q_t = q_v + q_c + q_r$) 代替, q_v, q_c, q_r 分别为水汽混合比、云水混合比和雨水混合比, 其他控制变量不变。用一个直接湿方案的暖云过程^[10]描述水汽、云水和雨水的相互转化关系, 包括云水和水汽间的凝聚和蒸发; 雨水和水汽间的蒸发和沉积, 云水向雨水的转化及增长过程。云物理过程的应用不但建立了同化反射率因子所需分析变量增量与控制变量的联系, 而且提供了相关分析变量增量之间的约束条件, 使其变化更为合理。

反射率因子观测算子:

$$\text{dBz} = 43.1 + 17.5 \log(\rho q_r) [\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3)$$

其中 ρ 为空气密度。

2 多普勒雷达资料及质量控制

多普勒天气雷达资料的质量对同化效果有很大影响, 在使用前需要进行质量控制。包括地物杂波的消除、褪速度模糊、噪音剔除等。

2.1 速度模糊消除

我国多普勒雷达一般具有双脉冲重复频率 ($600\text{s}^{-1}, 400\text{s}^{-1}$), 通过双频褪模糊最大不模糊速度增大到 $31.2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 可以满足一般天气系统探测的需求, 但对于台风、急流及一些高层风完全可能出现速度折叠。为此开发了基于模式背景场和雷达探测径向风的差值

褪速度模糊的方法。若背景场径向风速和雷达探测径向风速的差值的绝对值超过 $50\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 则认为出现了速度模糊, 探测值加 $31.2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 便为褪模糊后的径向速度值。同理根据需要可以多次褪模糊。

2.2 孤立奇异点的消除

奇异点包括孤立的有值点、孤立的缺测点和孤立的跳跃点。孤立的有值点的判别: 给定一个标准整数 K , 在一个具有有效值的点周围 8 个邻近点中 (平面网格中 1 个点周围有 8 个点), 有多于 K 个点没有有效值的情况下, 将此点判别为孤立的有值点。本文取 K 为 3。对孤立的有值点的处理方法为视其为缺测点。孤立的缺测点的判别: 在一个缺测点的周围 8 个点中有大于 K 个点为有效值, 则视其为孤立的缺测点。本文取 K 为 5。将周围点的平均值作为孤立缺测点的值。孤立的跳跃点: 设定相邻点的最大差值, 超过最大差值则以周围点的平均来代替。本文取最大差值为 $10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 脉动的消除

使用 Shuman-Shapiro 的二维 9 点平滑滤波方案消除风场的脉动。其具体算法为:

$$\bar{v} = v_{i,j} + \frac{s(1-s)}{2} (v_{i+1,j} + v_{i,j+1} + v_{i-1,j} + v_{i,j-1} - 4v_{i,j}) + \frac{s^2}{2} (v_{i+1,j+1} + v_{i-1,j-1} + v_{i+1,j-1} + v_{i-1,j+1} - 4v_{i,j}) \quad (4)$$

式中 v 为下标位置点的观测径向风, s 为滤波系数。根据需要还可进一步再作 5 点滤波处理。

2.4 模式可用雷达资料的转换

将雷达极坐标数据插值为 WRF 数值模式空间数据, 生成同化系统要求数据格式的

多普勒雷达数据文件,以供同化试验使用。

图 1 为 100km 距离圈回波区质量控制前后径向速度对比,可以看出一些奇异点被恢复,湍流脉动被平滑。

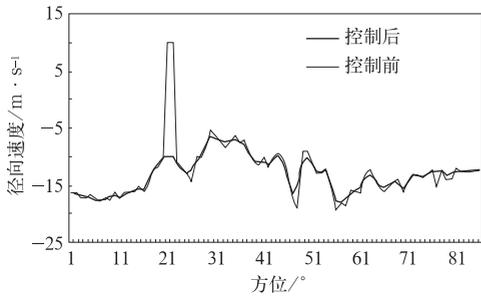


图 1 2004 年 7 月 5 日 08 时沈阳雷达回波区 100km 距离质量控制前后对比

3 用 WRF-3DVAR 同化多普勒雷达资料

为检验 WRF-3DVAR 同化雷达资料中小尺度系统的能力,选取影响东北地区强对流的主要影响系统——东北冷涡个例进行检验。所选个例均应用 AVN 资料($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)通

过 WPS(WRF 背景场处理系统)生成背景场。背景场水平分辨率为 $5\text{km} \times 5\text{km}$,以 42°N 、 123°E 为中心,格点数为 200×200 。

3.1 2004 年 7 月 5 日局地暴雨个例

2004 年 7 月 5 日,受东北冷涡影响,辽宁省中西部地区出现强对流天气,强对流带来强的短时暴雨,冰雹及短时大风天气。本次过程特点为强的中小尺度系统分布及发生比较分散,辽宁对应 3 个强对流中心,移动性不强,很适合检验对中小尺度系统的同化能力。图 2 (见彩页)为沈阳雷达 2004 年 7 月 5 日 14 时径向速度图,回波主要在沈阳西北部和西西南部地区,南部和东南部有一些零散回波。

同化效果的检验需要有对应的实况,由于地面观测网较密,而探空资料不能分辨中小尺度系统,所以重点对比地面的反演情况。虽然雷达直接探测地面的范围很小,但 WRF-3DVAR 的约束条件可以保持气象要素垂直的一致性。

图 3 为 2004 年 7 月 5 日 14 时地面背景

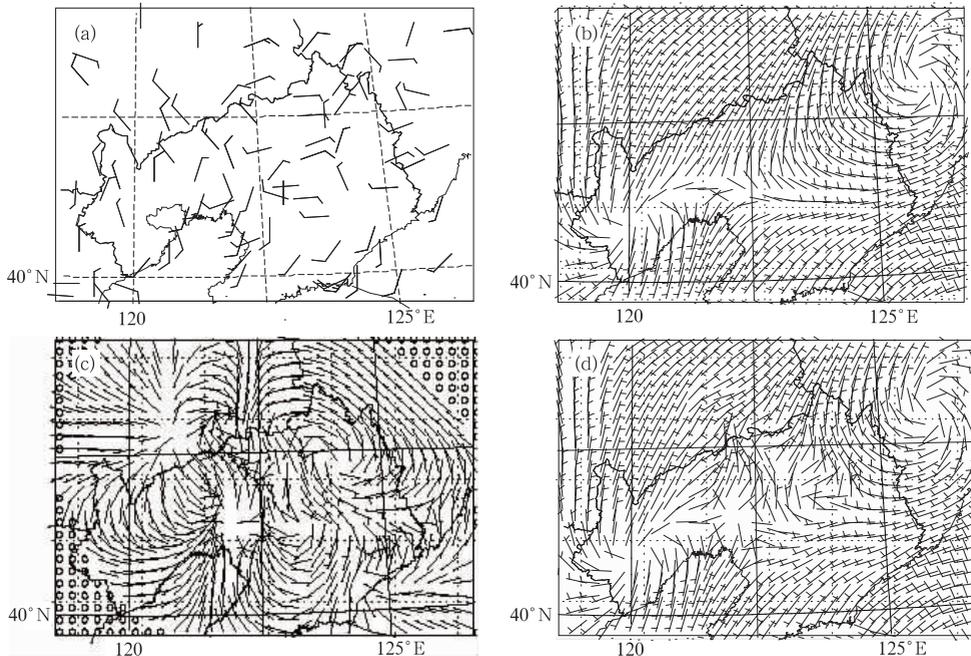


图 3 2004 年 7 月 5 日 14 时地面实况风场(a)、背景场(b)、增量场(c)、同化场(d)

场、同化场、实况场、增量场。该时刻主要对应辽宁西部的对流性降水,背景场主要表现为东北部的的气旋环流及贯穿辽宁中部的东西向切变线,对比同化场最明显的差别在于沈阳西北部东北—西北风切变、沈阳附近东北—西北风辐合及沈阳西南部的辐合,而这些正是地面实况场表现出的中尺度环流,特别是沈阳西北部的强对流回波对应的中尺度环流很好地反演出来,而背景场并没有中尺度系统,所以同化场更逼近地面实况反映的中尺度环流。

3.2 2004年6月25日局地暴雨个例

3.2.1 地面风场

本次过程是典型的东北冷涡强对流个

例,受其影响辽宁省中西部地区出现局部暴雨。图4(见彩页)为2004年6月25日08时沈阳雷达径向风观测,回波主要位于沈阳西部到西南部,具有明显的风向辐合线。从2004年6月25日08时背景场来看(图5),沈阳附近200km均为东南风,没有中尺度系统,与地面实况场差别很大。从同化增量场来看,主要订正区位于强回波区对应的地面辐散外流及其前部(东部)的辐合区,还有沈阳东部的辐合区。对比同化场和实况场,由于回波区测站较少,所以辐散外流不太明显,但沈阳西部的辐合区、沈阳附近的反气旋环流及沈阳南部的偏东风都比较一致。所以经过同化雷达资料,虽然背景场只有天气尺度系统,但同化场表现出明显的中小尺度环流,

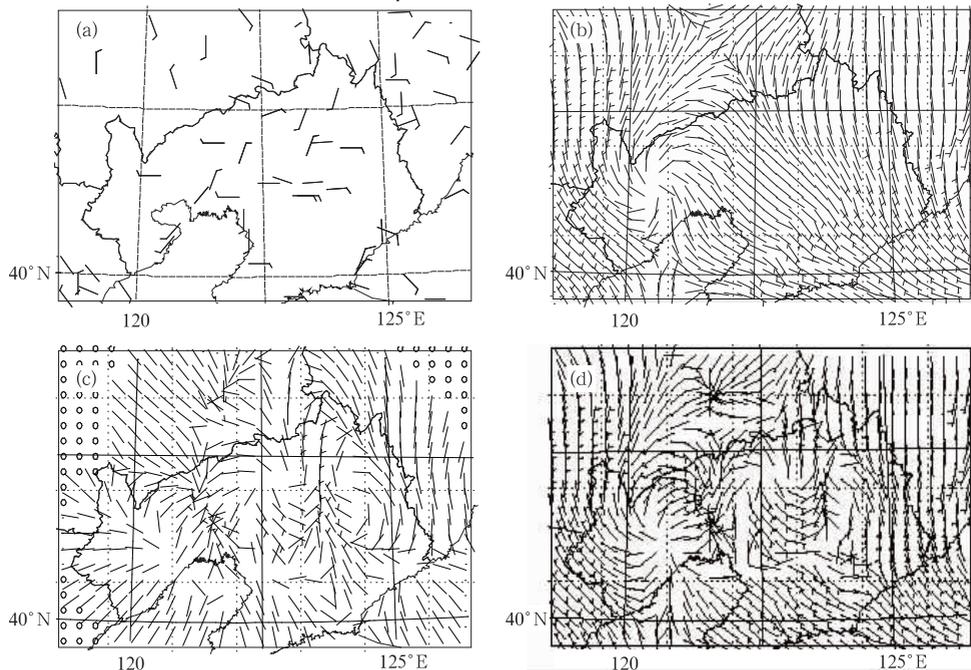


图5 2004年6月25日08时实况风场(a)、背景场(b)、增量场(c)、同化场(d)

且与实况场接近,但分辨率更高。

3.2.2 中层涡旋

中层涡旋是中尺度对流系统的普遍特征,然而由于常规探测不能分辨高层中尺度

系统,我国很少有中层涡旋的探测实例。由于本时段降水回波主要位于距离雷达站100~250km范围,所以从 0.5° 仰角到 4.3° 仰角共5层观测可以很好探测对流层中层5~

6km 附近的风场分布。500hPa 的背景场可以反映天气尺度平均流,所以同化分析增量场可以反映中尺度相对流。从图 6 可以看出对流层中层强对流系统非常明显的相对气旋性环流,水平尺度约 100km,这种尺度的系统常规探测不能分辨。强对流系统对应应有 2 个地面站 1 小时降水超过 60mm,属于短时特大暴雨。所以以天气尺度资料为背景场同化多普勒雷达资料,可以清晰地分辨地面辐散外流、中层涡旋等中尺度对流系统,同化结果是可信的。

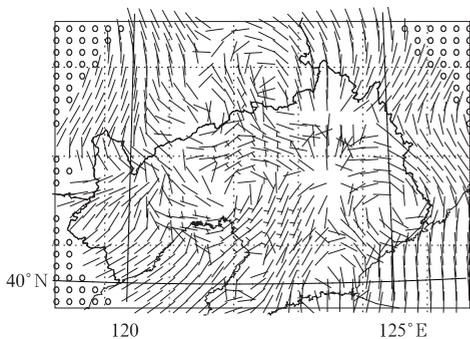


图 6 2004 年 6 月 25 日 08 时
500hPa 相对风速场

3.2.3 垂直环流

背景场中垂直速度为 0,同化雷达资料后,出现明显的垂直环流,图 7 为 2004 年 6 月 25 日 08 时强回波区西南—东北向剖面垂直环流和散度剖面图,可以明显看出中尺度

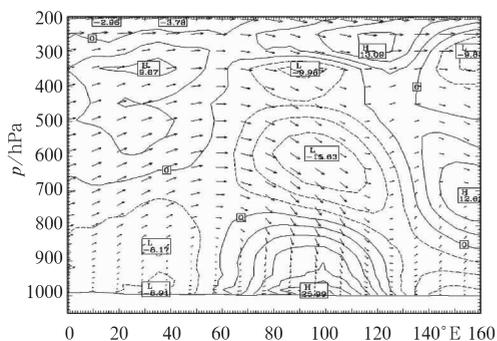


图 7 2004 年 6 月 25 日 08 时垂直
环流和散度剖面

对流系统低层的辐散下沉气流及其西南部的辐合上升气流,但与经典的对流系统垂直环流还是有些差异,例如强回波区辐散下沉气流上层的上升运动在本同化场中是下沉运动,即在强对流系统中出现了整层上升和整层下沉运动,其真实性有待进一步检验。

4 WRF-3DVAR 同化多普勒雷达资料模式 预报效果检验

4.1 WRF 模式参数

选用 WRF 模式 2.0 版本,模式水平分辨率为 5km,格点数为 200×200 ,垂直分层 35 层,侧边界选用 AVN 资料生成,3 小时一更新,分别以前面生成的背景场和同化场作为初始场,对上面 2 次过程(2004 年 7 月 5 日、2004 年 6 月 25 日)积分 24 小时。云物理方案为 NCEP 三级简单冰相方案;长波辐射方案为 rrtm 方案;短波辐射方案为 Dudhia 方案;陆面过程取 5 层热力扩散方案;积云参数化方案取 Eta Kain-Fritsch 方案;边界层参数化方案采用 MRF 方案。

4.2 2004 年 6 月 25 日局地暴雨个例降水预 报总体检验

东北冷涡诱发的中尺度系统由于突发性、局地性强,其降水落区和强度的预报难度很大。选取 2004 年夏季 10 次东北冷涡降水个例,进行有无同化雷达资料的对比试验(AR, NAR),分别计算了 0~6 小时,6~12 小时,12~24 小时雨量预报不同量级($> 1\text{mm}$ 、 $> 10\text{mm}$ 、 $> 25\text{mm}$ 、 $> 50\text{mm}$)的平均 TS 评分(图 8)。从图 8 可以看出,同化雷达资料后,除了 12~24 小时 25mm 以上降水预报的 TS 评分略低于未同化雷达资料外,其他量级的 TS 评分都接近或高于未同化雷达资料,所以总体来讲,同化雷达资料对降水的预报有正的影响。分析同化雷达回波对不同

预报时段的影响可以看出,同化雷达回波对 0~6 小时大于 10mm 降水预报有一定改善,但对大于 25mm 以上的降水没有改善;同化雷达回波对 6~12 小时大于 10mm、25mm、50mm 降水预报均有一定改善;同化雷达回

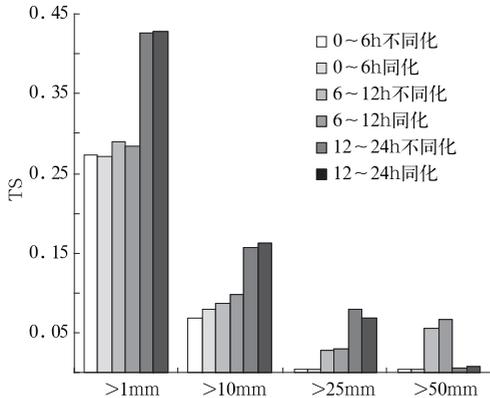


图 8 东北冷涡个例不同预报时段同化与不同化雷达资料 TS 评分

波对 12~24 小时大于 1mm、10mm、50mm 降水预报有一定改善,但对大于 25mm 降水负影响较大;所以用 WRF-3DVAR 同化雷达回波对 6~12 小时降水预报改进相对更明显一些。

4.3 2004 年 6 月 25 日局地暴雨个例

4.3.1 降水预报检验

从 24 小时降水预报的对比来看,同化雷达资料(AR)与未同化雷达资料(NAR)模式对强对流降水分布不均匀的趋势均作出预报,但对强降雨团个体的预报都存在较大偏差,总体预报水平相当,二者在强降水分布的细节上有差异,AR 对一些中小尺度雨团作出了更好的预报。分析 3 小时降水预报(图 9),积分刚开始的 3 小时,二者的降水预报基本一致,预报雨区均较实况雨区偏西,但

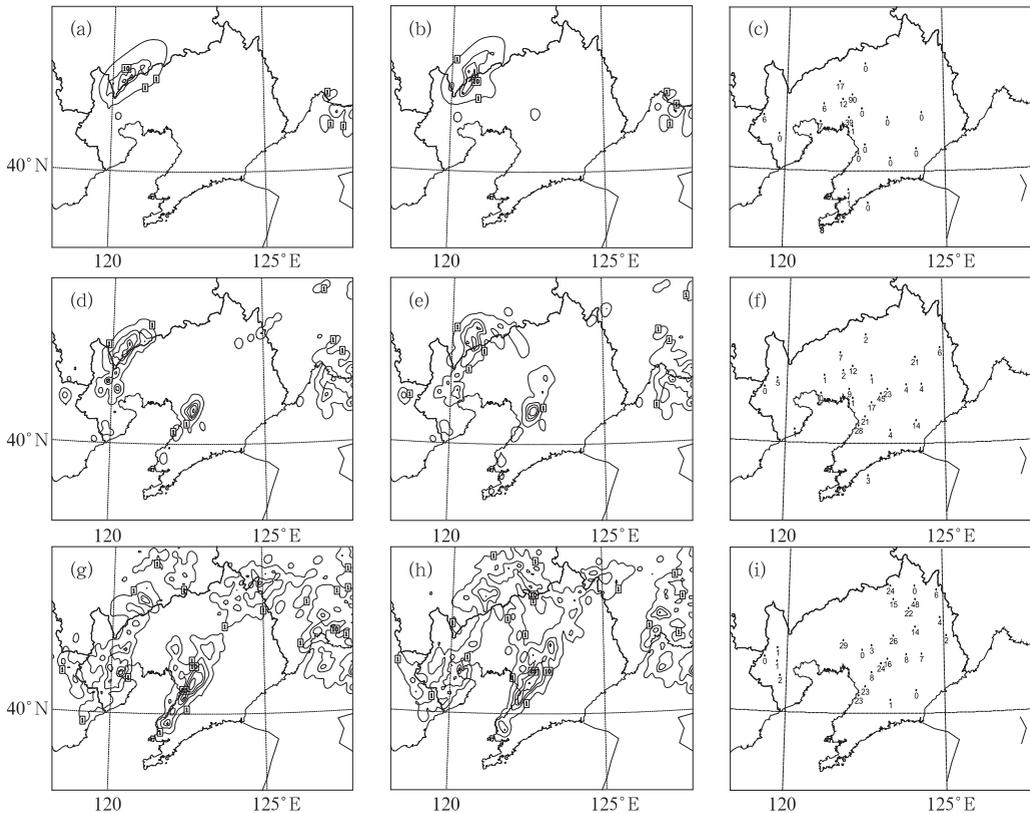


图 9 未同化(a,d,g)、同化(b,e,h)雷达资料 3 小时累计降水预报与对应观测降水(c,f,i)对比 (a),(b),(c):3 小时预报;(d),(e),(f):5 小时预报;(g),(h),(i):8 小时预报;等值线:1mm,10mm,25mm,50mm,100mm

在降水强度上,AR 的降水中心与实况更为接近。随着预报时效的延长,二者的差异逐渐加大,积分 5 小时 AR 在辽宁西北部、中部预报强降雨团,实况在辽宁中部出现强降水,而 NAR 在辽宁中部预报的雨区较实况更为偏小,偏差更大一些。积分 6 小时实况在铁岭到营口出现中尺度雨带,3 小时雨量 16~52mm,AR 预报出了带状雨带,而 NAR 仅预报了 2 个雨团,降水强度预报二者接近,预报的降水中心都在 50mm 以上。积分 8 小时实况仍为辽宁中部的雨带,但中心在铁岭为 48mm,而预报的中心均在营口附近,但 AR 预报的雨带与实况更为接近一些。以后 AR 对小尺度强对流降水的要稍优于 NAR。

为检验连续同化雷达资料的预报效果,设计了 3 小时间歇同化试验。以 2004 年 6 月 25 日 08 时的同化场作为初始场,每积分 3 小时,同化一次雷达资料,这样以 2004 年 6 月 25 日 14 时为初始场积分 24 小时检验其预报效果。从降水预报来看,前 3 小时由于仍然存在 spin-up 问题,降水预报偏小,4~6 小时连续同化雷达资料有略优于其他方案的

预报能力,6 小时以后预报水平相当。

4.3.2 风场预报的演变

从前面分析可知,同化雷达资料后较好地反映了三维中尺度风场,然而它对预报的改善在很大程度上还取决于其与模式的协调性,不然随着模式向前积分,AR 与 NAR 预报的环流将很快趋于一致。为此分析了地面和 500hPa 风场的演变。地面风场预报积分 2 小时后除雷达中心附近仍维持中尺度反气旋外,其他区域只有小尺度系统的差异,环流基本趋于一致;500hPa 的影响更为持久一些,中层气旋环流及较强的西南气流一直维持 6 小时,积分到 9 小时二者都激发出新的中层涡旋,但位置有些差异。由此可见,同化雷达资料对模式预报的高低层系统的影响是有差异的,在本次过程中其影响持续 6 小时。

4.4 2004 年 7 月 5 日局地暴雨个案

积分开始前 6 小时 AR 与 NAR 的降水预报基本一致,辽宁西北部逐渐有对流发展;积分 8 小时(图 10),观测在辽宁中西部对流增强,降水分布不均,出现了 3 小时雨量大于

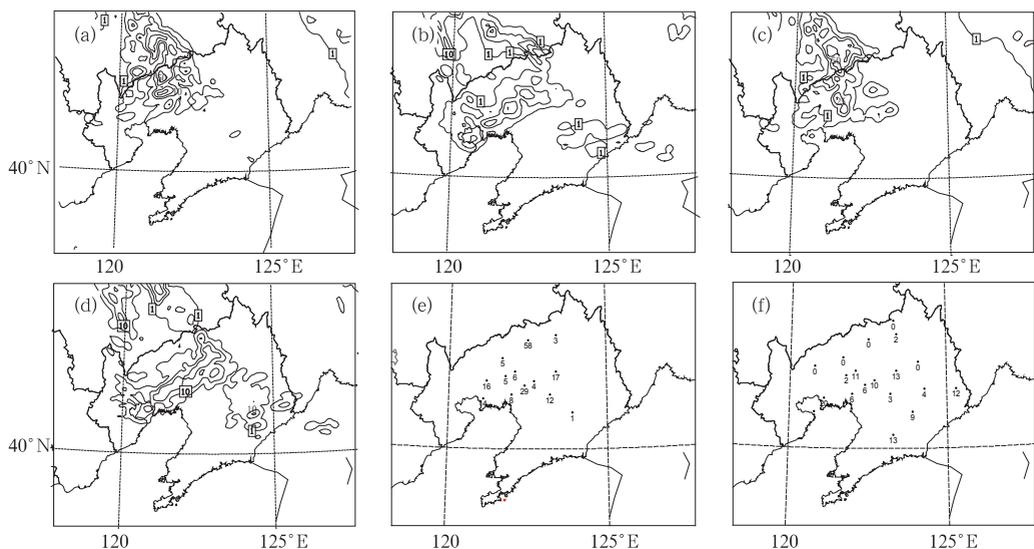


图 10 未同化(a、b)、同化(c、d)雷达资料 3 小时累计降水预报与对应观测降水(e、f)对比

(a),(c),(e):8 小时预报;(b),(d),(f):11 小时预报,等值线:1mm,10mm,25mm,50mm,100mm

50mm 和 25mm 的降水中心;AR 与 NAR 均较好预报了降水的落区和分布不均的特点,但在 NAR 预报的大于 50mm 的区域范围偏大,而 AR 预报辽宁西北部大于 50mm 中心与大于 25mm 中心与观测更为接近。积分 11 时,降水区范围扩大、东移并减弱,3 小时降水量一般在 10mm 左右,NAR 预报的东部雨区偏小、偏弱,而 AR 预报的雨区与观测基本接近,特别是东部大于 10mm 降水区的预报优于 NAR 的预报,与观测更为接近。

5 结语

(1) 应用 WRF-3DVAR 系统,对沈阳多普勒天气雷达资料在冷涡强对流天气的同化应用进行了试验。对雷达径向风和反射率因子的直接同化,不但可以反演中尺度三维气象场,而且可以为模式提供初始场。

(2) 建立了可用于 WRF-3DVAR 系统的多普勒雷达资料质量控制系统,其中包括基于模式背景场和雷达探测径向风的差值褪速度模糊的方法等。

(3) 以天气尺度资料为背景场同化多普勒雷达资料,WRF-3DVAR 可以较好地反演中尺度对流系统的三维结构。在本文的个例中,反演的强对流系统中地面中尺度辐散气流及中层涡旋都符合中尺度系统概念模型,并与实际地面探测资料对比,风场环流基本接近。

(4) 在东北冷涡强对流个例试验中,同化雷达资料对模式预报总体有正的影响,对 6~12 小时降水预报改进更明显,对强对流中的一些中小尺度雨团的预报总体有改善。

(5) 同化雷达资料后模式初始场与观测

更为接近,但对模式预报的改善不是实质性的,WRF-3DVAR 需要解决同化场中不同气象要素间的三维平衡性及其与模式的平衡性,这可能需要 4DVAR 来解决。

参考文献

- [1] 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 observed Florida convective system [J]. *J Atmos Sci*, 1998,55:835-852.
- [2] Benjamin S G, and Coauthors. An hourly assimilation - forecast cycle: The RUC [J]. *Mon Wea Rev*, 2004,132:495-518.
- [3] 万齐林,薛纪善,庄世宇. 多普勒雷达风场信息变分同化的试验研究[J]. *气象学报*, 2005, 63(2): 129-145.
- [4] Zhang F, Snyder C, and Sun J. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter[J]. *Mon Wea Rev*, 2004,132:1238-1253.
- [5] 杨毅,邱崇践,龚建东,等. 同化多普勒雷达风资料的两种方法比较[J]. *高原气象*, 2007, 26(03): 547-555.
- [6] 万蓉,郑国光,王斌,等. 利用多普勒雷达速度资料检验三维中小尺度模式流场[J]. *气象*, 2009, 35(01): 3-8.
- [7] 牟容,刘黎平,许小永,等. 四维变分方法反演低层风场能力研究[J]. *气象*, 2007, 33(01): 11-18.
- [8] 吕江津,刘一玮,王彦. 多普勒雷达对三次强对流天气的短时预报对比分析[J]. *气象*, 2009, 35(01): 48-54.
- [9] 毕旭,罗慧,刘勇. 陕西中部一次下击暴流的多普勒雷达回波特征[J]. *气象*, 2007, 33(01): 70-73.
- [10] Dudhia J. Numerical study of convection observed during winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 3077-3107.

陈力强等:多普勒雷达资料在冷涡强对流天气中的同化应用试验

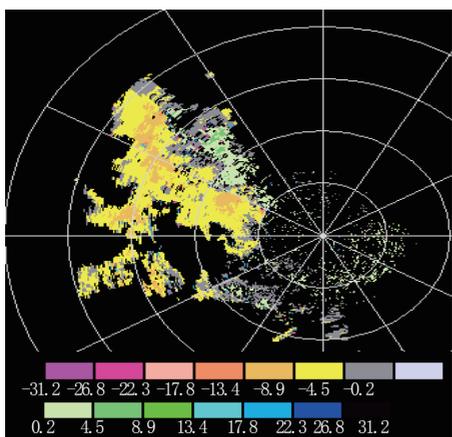


图 2 2004年7月5日14时沈阳雷达径向风回波
0.5°仰角, 每圈60km

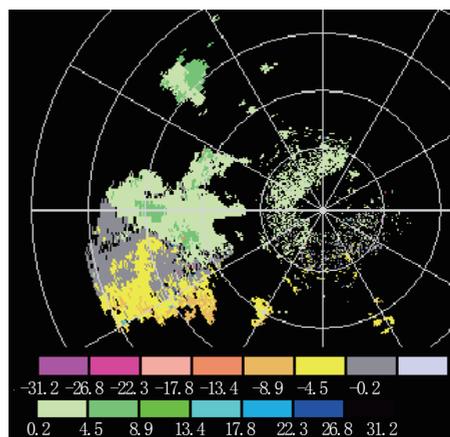


图 4 2004年6月25日08时沈阳雷达径向风回波
0.5°仰角, 每圈60km