

文章编号:1004-9045(2007)03-0211-06

单多普勒雷达资料在伴随模式同化系统中的应用研究

李红莉, 王叶红

(中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074)

摘要:利用变分方法反演单多普勒雷达资料, 得到风矢量场。同时, 利用 MM5 伴随模式同化系统, 结合一次暴雨过程, 设计四种方案, 进行数值模拟试验。结果表明, 通过变分方法反演的雷达资料的应用对于暴雨的分布预报有明显的改善作用; 运用伴随方法同化雷达资料后可改善对暴雨中心的预报; 对于各个物理量误差的减少, 雷达资料的应用也起到重要作用, 尤其是对于风场作用较为明显; 雷达资料的应用可加快伴随模式同化系统目标函数的收敛, 得到最优初始场。

关键词:多普勒雷达; 伴随模式; 同化; 数值模拟

中图分类号: TN959.4 文献标识码: A

1 引言

对于暴雨这类中尺度天气系统的数值预报和模拟, 需要足够的观测资料作为初始场。在预报业务中所能获取的定时观测资料非常有限, 常规无线电探空网、地面测站网以及卫星探测等手段对于中小尺度天气系统的观测还比较困难。多普勒雷达观测资料在时间和空间上均具有较高分辨率, 对于生成中尺度模式的初始场是有用的。它能进行回波强度和径向风速的测量, 且具有较高时空解析能力, 但不足以构成预报所需的初始场, 因为它不能直接测量到三维风场, 必须通过对多普勒雷达观测资料的反演才能获得可供分析的风场。

Rutledge 等^[1]和 Ziegler^[2]用双多普勒雷达观测资料合成风场, 在静止态假定下, 从热力守恒和水汽守恒方程出发, 诊断热力场和云的微物理场。变分资料同化技术在单多普勒三维风场反演中得到广泛应用, 有人已经利用向前同化或伴随公式的方法, 解完全运动方程。Liou 等^[3]提出的向前同化的过程是由径向速度插值、统计风订正、热动力变量的动态反演或模式预测组成。运动方程用于前向的时间积分, 而不是用于调整初始的波束且向上的速度分量。Sun 等^[4]和 Kapitza^[5]提出了非流体静力的数值模式逼近反演方法, 利用最优控制理论的方法, 调整初始状态的变量使得观测值与模式预测值的差异最小, 从动量方程和热动力方程中解出三维风和热力场, 边界层资料和未知的强迫项也被处理为控制变量。基于简单预测方程(不是整个数值模式的方程组)的单多普勒反演伴随公式也在研究

之中^[6-8]。大多数这类伴随方法的工作集中在从反射率和径向速度守恒方程反演连续的平均水平速度场上。与上述方法相反的某些非伴随反演技术也有一些研究^[9]。平流反演方案在反射率 Lagrangian 守恒假定和风场中涡旋的不变性假定下, 利用多个时次的单多普勒雷达资料反演得到三维风场。Shapiro 等^[10]在流体不可压缩条件和 Taylor 冻结湍流假定下, 提出的双标量算法从反射率守恒方程反演得到了行星边界层的三维风场, 并用双多普勒雷达的实际观测结果进行了检验。Zhang 等^[11]在平流反演方案的基础上, 进一步完善并提出了参考运动坐标的单多普勒风场反演方案。国内也逐步开展了单多普勒雷达风场反演的研究工作。汤达章等^[12]率先讨论了 VAD、VARD 和 VVP 技术获取风场信息的方法。陶祖钰^[13]在假定相邻方位角风矢量相等的前提下, 提出了一种反演风场信息的速度方位处理(VAP)的新技术。姜海燕等^[14]从动力学角度出发, 应用中尺度涡度方程, 经过简化导出风速的径向分量、切向分量和涡度、散度的关系, 表明涡度-散度方程反演出的水平风场能够较好地解释回波单体的分裂和演变机制。彭红等^[15]在局地二维假设的前提下, 利用连续性方程和雨滴下降末速度的经验公式, 对多普勒雷达的 RHI 探测资料进行了反演, 反演的垂直流场结构能较好地解释回波强度的垂直分布结构。邱崇践^[16]介绍了由单个多普勒雷达探测资料反演风矢量场的变分方法。陈列等^[17]介绍了单多普勒雷达观测资料反演风矢量和温度场的方法。这些方法为在数值预报初始场中使用多普勒雷达观测资料奠定了基础。对于将多普勒雷达观测资料用于形成数值预报初始场的研

收稿日期: 2007-02-06; 定稿日期: 2007-08-01

基金项目: 暴雨开放基金项目(IHR2005G06)、国家 973 项目专题“长江中游暴雨观测系统的试验与研究”共同资助

作者简介: 李红莉, 女, 1979 年生, 工程师, 主要从事资料同化、模式开发研究。E-mail: maxiyoyou@yahoo.com.cn

究,近些年来才开始。陈列等^[10]通过应用单多普勒雷达资料反演风场作暴雨中尺度分析,指出有效地利用多普勒雷达资料有助于研究细致的中小尺度天气系统结构,而且也可作为中小尺度数值预报模式提供准确的初始场。

为了进一步研究非常规资料应用于中尺度模式中对于改善中尺度降水预报的情况,本文使用变分方法反演了多普勒雷达资料,并利用 MM5 伴随同化模式来同化以改善初始场,结果表明,融合雷达信息后的初始场对于中尺度暴雨预报有改善作用。

2 多普勒雷达资料的反演方法

邱崇践等^[13]提出的由单多普勒雷达资料反演风矢量场的简单伴随函数方法用于二维风场效果较好,但用于三维风场时存在很多问题。首先,雷达资料通常有很多缺测区,给动量方程及其伴随方程的积分带来困难;其次,雷达资料一般在球坐标网格上给出,必须插值到直角坐标网格。在远离雷达的地区,相邻两个观测点的法向距离较大,但径向速度不是一个标量,插值间距较大不合适。但受此次模拟的模式分辨率不高及资料的时次较少等条件的制约,本文在插值时的格距仍较大,目的是通过一些尝试试验来研究同化雷达资料方法,以便更好地为中尺度预报服务。另外,当实际风与径向方向垂直时,雷达不能测量到实际风的大小,为此加入了背景风场,以弥补雷达资料的不足。

设待反演的直角坐标网格上的 3 个风分量为 u 、 v 、 w , 目标函数定义如下:

$$J(u,v,w) = \sum_{m=1}^M p_1 [R(u,v,w) - u_r^{\text{obs}}]_m^2 + \sum_{i,j,k} [p_2 B_{i,j,k}^2 + p_3 C_{i,j,k}^2 + p_4 E_{i,j,k}^2 + p_5 (\nabla \cdot V)_{i,j,k}^2 + p_6 S_{i,j,k}^2 + p_7 S_w^2] \quad (1)$$

式中, v_r^{obs} 是雷达观测径向速度, $R(u,v,w)$ 是总风速沿径向的分量, 通过一个观测算子计算得到, 它由两个过程组成: (1) 由直角坐标网格点上的 u 、 v 、 w 用线性内插计算该网格体包含的测点 m 处的 u_m 、 v_m 、 w_m , 具体算法是找到第 m 个雷达测点所处的网格体, 利用该网格体的 8 个格点的 u 、 v 、 w 作线性内插; (2) 利用 $R(u,v,w) = (xu_m + yv_m + zw_m) / r$ 得到 $R(u,v,w)$ 。显然, 目标函数第一部分的含义是要求由反演处的风矢量场插值计算的径向速度与观测尽量接近, 这一插值是由直角坐标网格点向球坐标网格作内插, 避开了将观测资料由球坐标网格向直角坐标网格插值分析过程及由此产生的问题。所用的背景场是由 NCEP 资料插值到中尺度网格上后形成的。

分析场和预先给出的背景场(下标为 b 的量)的距

离表示为(μ 是权重系数)

$$B^2 = (u - u_b)^2 + (v - v_b)^2 + \mu(w - w_b)^2 \quad (2)$$

质量守恒方程为

$$C = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - qw \quad (3)$$

其中 $q = -\frac{\partial \ln p}{\partial x}$ 。

径向分量的动量守恒方程为

$$E = \left(\frac{\partial u_r}{\partial x} \right)^{\text{obs}} + \frac{\partial uv_r}{\partial x} + \frac{\partial vw_r}{\partial y} + \frac{\partial ww_r}{\partial z} - \frac{v^2 + w^2}{\partial x} \quad (4)$$

其中时间倾向项是由相邻两次时间的观测计算的, 其它项均由分析值计算。在方程中运用了三维无辐散的假设, 并略去了源项。

水平散度和涡度的垂直分量分别为

$$\nabla \cdot V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5)$$

$$= \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (6)$$

S 是对 u 、 v 、 w 的三维平滑量

$$S^2 = S_u^2 + S_v^2 + S_w^2 \quad (7)$$

其中 $S_u = u_{i+1,j,k} + u_{i-1,j,k} + u_{i,j-1,k} + u_{i,j,k+1} + u_{i,j,k-1} - 6u_{i,j,k}$, S_v 和 S_w 有类似的公式。

在目标函数中加入后三项约束是为了减轻观测误差对分析结果的影响。 p 是权重系数, 按各项的方差估计值的倒数给出。

根据以上各式可以求出 J 相对于各网格点的梯度, 然后利用这些梯度值用极小化算法即可找出极小值点。

3 模式与资料

文中所有的数值试验都是基于 MM5v1 版, 所使用的同化系统为伴随模式同化系统。试验时模式的主要物理过程和参数设置如下: 动力学过程采用流体非静力平衡方案, 采用 Grell 积云参数化方案, Blackadar 高分辨率行星边界层方案, 简单冰相显式水汽方案, 简单冷却大气辐射方案时变流入/流出侧边界条件。以 2004 年 6 月 23 日 00 时到 24 日 00 时(世界时)的一次暴雨过程为例, 采用的资料包括每隔 6 h 共 5 个时次的 NCEP 资料(水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$) 和每隔 12 h 的常规探测资料, 以及单多普勒雷达资料。用 2004 年 6 月 23 日 00 时(世界时)的初始资料积分 24 h, 时间步长为 120 s, 模拟中心取 113°E 、 29°N , 水平格点数取 61×61 , 格距 15 km。

根据选取的中尺度范围, 定义如下直角坐标系内网格体: 原点位于武汉雷达站(114.37°E 、 30.52°N), 水平

方向格距为 15 km, 水平方向分别向四个方向取 20 个格点, 垂直方向格距为 500 m, 向上取 11 层。背景场为将 NCEP 资料插值到中尺度网格后形成的资料场, 该中尺度网格中心取在武汉雷达站, 格距与格点数目及垂直层数与上述一致。

4 试验方案设计

试验的暴雨过程发生在 2004 年 6 月 23 日 00 时至 24 日 00 时。从 24 h 降水实况图上可以看出(图 1), 暴雨区域较大, 呈东北-西南走向的带状分布。在所研究的区域内主要有 3 个暴雨中心, 一是位于沅陵 (110.24 E、28.28 N), 雨量达到 166 mm; 二是岳阳 (113.05 E、29.23 N), 雨量达到 131 mm; 三是嘉鱼 (113.55 E、29.59 N), 雨量达到 96 mm。梅雨锋暴雨是在一定的大尺度环流背景下发生的。23 日 00 时, 所研究区域处于 500 hPa 高空槽前, 700 hPa 在该区域偏北地区存在一条切变线, 850 hPa 在偏南地区同样存在一低空切变线, 这种高低空的有利配置, 容易造成水汽辐合上升, 形成暴雨。这是湖北省当年入梅的首场暴雨, 因此这是选择该过程进行雷达资料同化试验的原因之一。

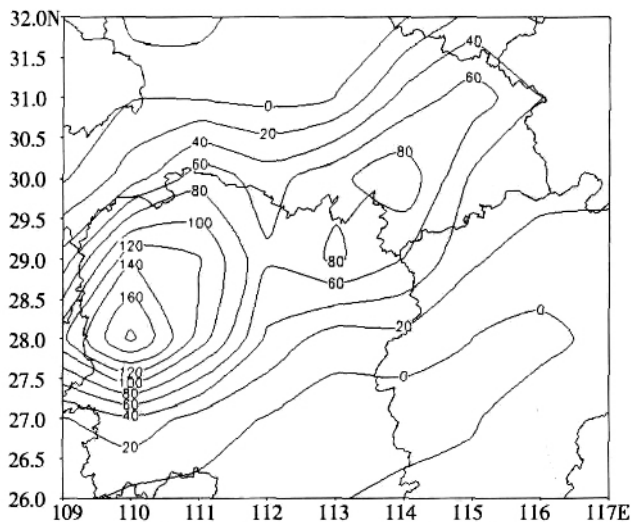


图 1 2004 年 6 月 23 日 00~24 日 00 时(世界时)
24 h 降水实况(单位:mm)

为了检验 MM5 伴随模式同化系统对于雷达资料同化的效果, 设计出如下 4 种试验方案。

方案一。以 6 月 23 日 00 时起每隔 6 h 共 5 个时次的 NCEP 资料和常规观测资料通过模式的前几个模块处理后生成的初始场记为 A 场, 由预报模式直接进行 24 h 积分。

方案二。将初始时刻的模式分析场作为模式的初估场, 然后再将 06 时的常规观测资料输入同化模式, 通过约束条件, 调整初估场, 得到包含时间演变信息的最优初始场 B 场, 再运用预报模式对此次过程进行

模拟。同化时间选为 6 h, 同化时间步长选取 120 s, 迭代步数为 15 步。

方案三。用上述变分方法反演获得的雷达资料场来替换 A 场中相应的三维空间场上的值, 形成模式需要的包含雷达资料的 C 场, 再进行 24 h 积分。

方案四。将初始时刻的分析场作为模式的初估场, 然后再将 06 时的常规观测资料以及反演后的雷达资料输入同化模式, 通过约束条件, 调整初估场, 得到包含时间演变信息的最优初始场 D 场, 再运用预报模式对此次过程进行模拟。同化时间选为 6 h, 同化时间步长选取 120 s, 迭代步数为 15 步。

5 数值试验模拟结果的对比分析

5.1 24 h 降水场和初始要素场

5.1.1 24 h 降水场的对比分析

从各方案模拟的 24 h (6 月 23 日 00 时至 24 日 00 时)降水分布图上可见(图 2), 四种方案均模拟出偏西的暴雨中心, 只是在强度和位置上有差异。

方案一模拟的降水场不呈带状分布, 其形态与实况有很大差异, 但该方案模拟出了位于 110 E、29 N 的一个暴雨中心, 中心值达到 90 mm, 但比实况偏北, 强度也小得多。

方案二是在方案一的基础上增加了对常规探空资料的四维变分同化, 尽管方案二模拟的雨带仍与实况有较大差异, 但在方案一的基础上已有所改善。即: 雨带上模拟出了 4 个强降水中心, 特别是模拟出的位于 110 E、28 N 的强降水中心的强度达 100 mm, 其位置和强度都较方案一有所改善。因此, 比较方案一、二, 说明增加了观测资料的历史信息, 有助于提高对暴雨中心强度的模拟。

方案三是在方案一的基础上初始场中融合了反演后的雷达资料, 包含了非常规探测手段的时空信息, 模拟的降水场呈带状分布, 且模拟出了三个暴雨中心, 与实况相似, 特别是模拟出的位于 110 E、28 N 和 114 E、30 N 的两个暴雨中心, 位置与实况一致, 只是强度偏小。比较方案一、三, 方案三的降水分布形式有明显改善, 说明增加了雷达信息后, 对于中尺度降水的预报有明显提高。

方案四是在方案三的基础上增加了对多普勒雷达反演资料的四维变分同化, 在降水场形态上同样呈带状分布, 模拟出的位于 110 E、28 N 和 114 E、30 N 的两个暴雨中心位置与实况一致, 且前者较方案三强度更大, 更接近于实况。比较方案二、四, 无论是在降水场形态及强降水中心位置和强度上, 方案四明显优于方案二的模拟, 说明增加雷达反演资料的历史信

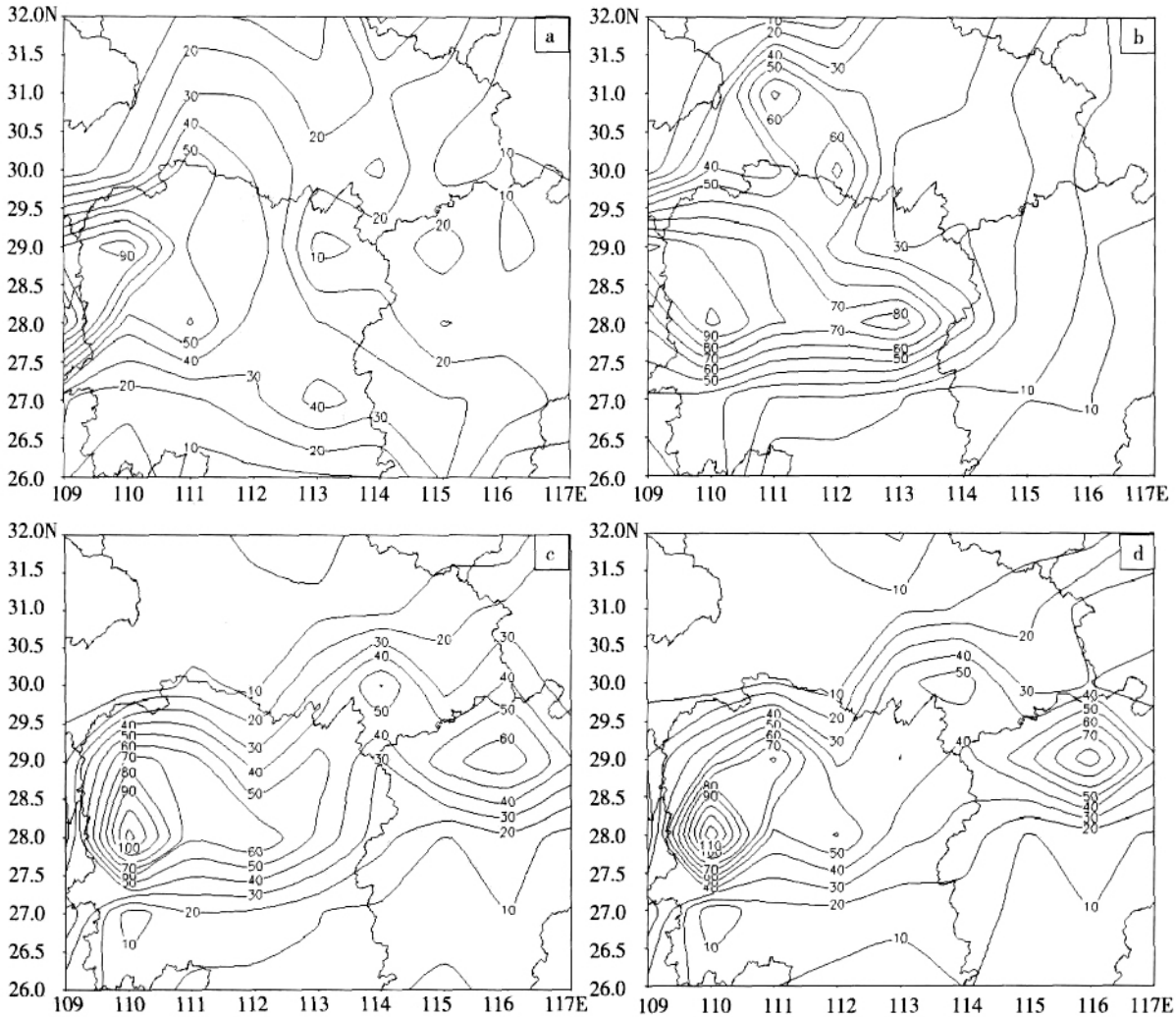


图 2 方案一(a)、方案二(b)、方案三(c)、方案四(d)模拟的 24 h 降水场(单位:mm)

息，有助于提高对中尺度暴雨的预报。比较方案三、四，方案四模拟出的降水场在 113 E、29 N 处出现一降水极值，位置与实况一致，说明同化了雷达资料后，虽然在降水的形态分布及强降水中心位置和强度上，与未同化的模拟相比改善优势并不明显，但仍反映出一个降水中心，因而伴随同化模式仍优越于直接预报模式。

另外，需要指出的是，方案三、四模拟的区域右侧出现了一个虚假的降水中心，这可能与融合雷达反演资料的方法以及预报模式的性能有关。但总的来说，融合雷达资料后，对于此次暴雨的模拟还是成功的。

5.1.2 四种方案的初始要素场的对比分析

通过对比分析四种方案的 23 日 00 时各要素场发现，500 hPa 高度上(图略)，四种方案的高度场降水区域位于高空槽前，温度场温度槽落后于高度槽，有利于系统的发展，只是方案三、方案四的温度线分布较方案一、二的更密集，降水区域主要受暖区控制；850 hPa 高度上，方案三、四降水区域上空存在一低压，对应流场上，有一闭合气旋性涡旋系统形成，而方案一、二没有闭合低压存在，对应流场上，气旋性涡旋

未闭合；湿度场上，从低层到中层，暴雨区域上空存在一条湿舌，范围较大，几乎覆盖了整个降水区域，方案三、四的湿舌呈东北-西南向，且强度均比方案一、二的大。由此可知，方案三、四初始场中各要素的配置更有利于暴雨的发生发展，说明融合了雷达反演资料后，能使初始场中包含更丰富的信息，改善初始场。

5.2 误差比较

选取靠近武汉雷达站的出现降水极值的一个测站(嘉鱼站)，给出其(113.55 E、29.59 N)逐小时雨量分布(图 3)。

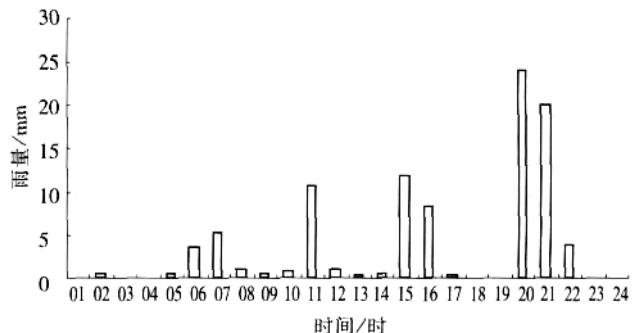


图 3 嘉鱼站 2004 年 6 月 23 日 00 时至 24 日 00 时 24 h 逐小时降水分布图

从图 3 中可见, 该站降水主要集中在 23 日 18 时到 24 日 00 时, 尤其是 19~20 时的降水量最大, 理应选取该时段作误差分析, 但由于高空观测资料不可得, 因而选取最接近于该时段且存在高空观测资料的时段, 即 23 日 23 时至 24 日 00 时, 也是模式积分的第 24 小时。因此, 本文主要分析了四种方案模拟 24 小时以后的结果与实况之间的误差。本文设计的计算误差的公式为

$$Q_y = \left(\frac{\sum_{ij}^{m \times n} (y - y_0)^2}{m \times n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

其中, Q_y 指某一要素模拟与实况之间的均方差, m, n 分别指各个层次上水平网格点数, y 是某一种方案的要素模拟值, y_0 是相应的实况值。需要特别指出的是, 当计算风场时, 使用的是分量的平方和, 所用的计算公式则为

$$Q_v = \left(\frac{\sum_{ij}^{m \times n} (u - u_0)^2 + (v - v_0)^2}{m \times n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

各方案积分 24 h 后 850、700、500 hPa 嘉鱼站位势高度、相对湿度、温度、风速与其实况间的误差详见表 1。

表 1 各方案积分 24 h 后 850、700、500 hPa 嘉鱼站位势高度、相对湿度、温度、风速与其实况间的误差

方案	高度 / gpm			相对湿度 / %			温度 /			风速 / (m·s ⁻¹)		
	850hPa	700hPa	500hPa	850hPa	700hPa	500hPa	850hPa	700hPa	500hPa	850hPa	700hPa	500hPa
方案 1	15.37	16.93	15.37	12.92	21.08	14.86	1.13	0.59	0.69	9.26	9.74	9.85
方案 2	14.36	16.19	14.48	13.36	20.73	13.90	1.18	0.57	0.63	8.79	9.43	9.43
方案 3	12.68	11.96	9.13	11.72	14.66	9.59	0.79	0.64	0.52	4.81	4.40	4.64
方案 4	12.09	11.58	9.05	11.82	15.09	9.58	0.81	0.64	0.54	4.68	4.36	4.54

从表 1 中可以看出, 加入了雷达信息后的方案三、方案四, 各层的高度、温度、相对湿度以及风等要素的误差均比方案一、方案二的误差小, 这表明不论是同化后预报还是直接预报, 包含了雷达信息后的预报均优于仅使用常规观测资料后的预报; 尤其是方案三、方案四的风场误差几乎只有方案一、方案二的一半, 这表明变分方法反演的雷达资料运用于模式后对于风场的预报有明显的改善作用; 不过, 使用伴随同化方法同化了雷达资料后对于各物理量的误差的改善效果仍不明显。

5.3 两种同化方案的比较

图 4 给出的是方案二和方案四在同化过程中随着迭代步数的增加, 标准化的目标函数的变化趋势。

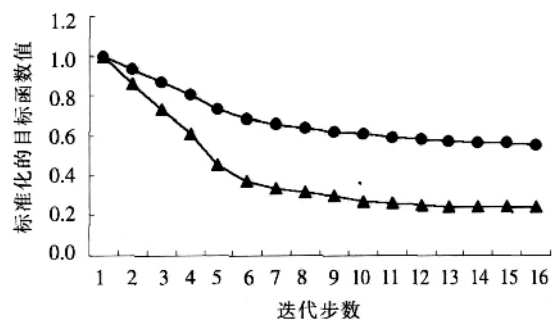


图 4 两种同化方案标准化目标函数 J_k/J_0 随迭代步数的变化
—●— 方案二 —▲— 方案四

从图 4 中可以看出, 这两种方案的目标函数的下降趋势基本一致, 目标函数迭代 15 步后都已收敛; 方案四在迭代 5 步后目标函数就降为原来的一半, 下降

速度远远优于方案二, 这说明雷达资料的使用对于最优初始场的形成有一定作用。

6 结论与讨论

本文利用 NCEP 插值到中尺度网格上的背景场, 通过变分分析方法反演了多普勒雷达资料, 获得了中小尺度三维风场, 并将其运用于 MM5 伴随模式同化系统中, 结合一次暴雨过程, 设计了几种数值试验方案, 对比研究了多普勒雷达资料在中尺度暴雨模拟中的作用, 得到如下几点结论。

(1) 通过变分分析方法反演的多普勒雷达资料的应用对于暴雨的分布预报有明显的改善作用, 在模式中加入雷达信息后对于暴雨位置和强度的预报比未加入时效果好, 能模拟出后者没有模拟出的暴雨中心, 更接近于实况降水分布。

(2) 利用伴随方法同化雷达资料后也可改善暴雨中心的预报, 但优势不明显。雷达资料的应用对于数值模拟出的各个物理量和实况之间的误差, 也起到重要的作用, 尤其是对于风场作用显著。

(3) 雷达资料的应用可加快伴随模式同化系统目标函数的收敛, 得到最优初始场。

本文所做的雷达资料在中尺度暴雨预报中的应用取得了较好的结果, 然而同样存在很多问题。首先, 虽然使用了变分方法反演雷达资料, 但是由于受资料和模式等条件的限制, 反演插值的格距偏大, 这对于雷达资料的精度存在影响; 其次, 雷达资料的时间分

分辨率很高,而模式的时间和空间分辨率却相对较低,将雷达资料应用到模式中时,势必影响雷达资料时间上的连续性,对于雷达资料的应用并不全面,没有包含雷达资料的完整信息。尽管还存在这些问题,但在气象预报中有效地应用多普勒雷达资料,则有助于研究更为细致的中小尺度天气系统结构,也可为中小尺度数值预报模式提供准确的初始场。因此,对于寻找如何有效地应用雷达资料的方法,仍需要在今后的研究中进行深入探讨。

武汉中心气象台为本研究提供了武汉多普勒雷达径向风场资料。在此,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] Rutledge S A, Hobbs P V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in mid-latitude cyclone (): A model for the "seeder-feeder" process in warm-frontal rainbands [J]. *J Atmos Sci*, 1983,40:1185-1206.
- [2] Ziegler C L. Retrieval of thermal and microphysical variables in observed convective storms. Part I: Model development and preliminary testing [J]. *J Atmos Sci*, 1985,42:1487-1509.
- [3] Liou Y C, Cal-Chen T, Lilly D K. Retrievals of wind, temperature and pressure from single-doppler radar and a numerical model [C]. Preprints 25th Int Conf on Radar Meteor. 1995:151-166.
- [4] Sun J Z, Flicker D W, Lilly D K. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated single-doppler radar data [J]. *J Atmos Sci*, 1991,48(6):876-890.
- [5] Kapitza H. Numerical experiments with the adjoint of a nonhydrostatic mesoscale model [J]. *Mon Wea Rev*, 1991,119:2993-3011.
- [6] Qiu C J, Xu Q A. Simple adjoints methods of wind analysis for single-doppler data [J]. *J Atmos Oceanic Tech*, 1992, 9:588-598.
- [7] Chong J Q, Qin X. Least squares retrieval of microburst winds from single-doppler data [J]. *Mon Wea Rev*, 1996,124(6):1132-1144.
- [8] Xu Q, Qiu C J, Yu J X. Adjoint-method retrievals of low-altitude wind fields from single-doppler reflectivity measured during phonex [J]. *J Atmos Oceanic Tech*, 1994,11:275-288.
- [9] Gal-Chen T, Zhang J. On the optimal use of reflectivities and single-doppler velocities to deduce 3D motions [C]. Preprints 25th Int Conf on Radar Meteor. 1993,414-416.
- [10] 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.
- [11] Zhang J, Gal-Chen T. Single-doppler wind retrieval in the moving frame of reference [J]. *J Atmos Sci*, 1996, 53:2609-2623.
- [12] 汤达章.由 VVP 探测技术提取风场信息的方法[J].*气象科学*,1990,10(4):401-408.
- [13] 陶祖钰.从单 Doppler 速度场反演风矢量的 VAP 方法[J].*气象学报*, 1992,50:81-90.
- [14] 姜海燕,葛润生.一种新的单部多普勒天气雷达反演技术[J].*应用气象学报*,1997,8(2):219-223.
- [15] 彭红,葛润生.单部多普勒天气雷达对降水中垂直流场结构的探测研究[J].*应用气象学报*,1995,6(4):422-427.
- [16] 邱崇践.由单个多普勒雷达探测资料反演风矢量场的变分方法[J].*兰州大学学报(自然科学版)*,1999,35(3):183-188.
- [17] 陈列,寿绍文.单多普勒雷达观测资料反演风矢量和温度场的方法[J].*气象教育与科技*, 2002,24(2):6-10.
- [18] 陈列,寿绍文,林开平等.应用单多普勒雷达资料反演风场作暴雨中尺度分析[J].*南京气象学院学报*,2003,26(3):358-363.

A Study of Single-Doppler Data Assimilation in Adjoint-model Assimilation System

LI Hong-li, WANG Ye-hong

(Wuhan Institute of heavy rain, CMA, WuHan 430074)

Abstract: In this context conventional and non-conventional observations (Single-Doppler Data) are assimilated by MM5 adjoint-model assimilation system so as to do research on the role of Single-Doppler Data in improving the prediction. A variational method for retrieving wind vector from Single-Doppler wind measurements is introduced and the initial forecast fields are created from the retrieved winds. Data assimilation experiments are conducted with MM5 adjoint-model assimilation system made by adjoint codes. With a case of heavy rainfall taking place from 00 h June 23 to 00 h June 24, 2004, several numerical simulation experiments of different schemes are performed. The results are as follows. The utilizing of Single-Doppler data retrieved by the variational method can obviously improve the prediction of rainfall distribution. When using the adjoint-model assimilation system, the experiment adding Radar data has an improvement in predicting the rainfall centers. Furthermore, the utilizing of Single-Doppler Data plays an important role in reducing the errors of the elements, especially of winds. Besides, the use of Doppler radar data can also fasten the contraction velocity of objective function of Adjoint-model Assimilation System and the optimal initial field can be obtained.

Key words: Doppler radar; Adjoint model; Assimilation; Numerical simulation