

# 多普勒雷达资料 4DVAR 同化反演的模拟研究

许小永

郑国光

(南京信息工程学院, 南京, 210044)

(中国气象局, 北京, 100081)

刘黎平

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

## 摘 要

利用 Sun 等建立的同化模式和四维变分同化方法对多普勒雷达资料反演大气风场、热力场和微物理场进行了模拟试验研究。反演的基本思路是: 将 4DVAR 同化方法应用到三维云模式, 定义价值函数表征雷达资料与模式预报结果之间的差别, 通过极小化价值函数得到反演场, 价值函数相对模式控制变量的梯度由伴随模式求取。试验结果表明, 4DVAR 同化技术能够从单(双)多普勒雷达资料反演大气三维风场、热力场和微物理场。各个变量反演精度高低与同化过程中变量受约束的大小程度呈正相关。速度场和雨水场反演精度较高, 温度场、云水和水汽的反演精度次之, 温度场的准确反演需要较长的同化时间。价值函数中加入背景场, 哪怕是单点探空给出的平均场信息也有利于提高反演精度。在采用单部多普勒雷达资料进行反演时, 速度场的反演误差较大。反演区相对雷达站的位置变化对速度场反演结果有一定的影响, 而对其他变量的反演影响很小。两个时次的雷达观测资料基本能够提供反演所需的时间演变信息, 同化更多时次的雷达资料, 反演效果改进很小。雷达观测资料的缺值会显著降低同化效果, 甚至可能导致同化失败, 引入背景场可以改善这一状况。4DVAR 同化技术对于雷达观测资料误差不太敏感。利用双多普勒雷达合成风场提供水平风场边界条件是比较准确可靠的。在反演主体离边界较远时, VAD 风场也基本可用作水平风场边界条件。微物理场的反演对模式中的微物理参数化方案较敏感。

关键词: 多普勒雷达, 4DVAR 同化, 反演, 价值函数。

## 1 引 言

现有的常规气象观测网只能提供大尺度的气象信息, 使得中小尺度数值天气预报面临一个重大问题: 缺乏准确的初始场。多普勒雷达资料具有常规资料无可比拟的时间和空间的高分辨率, 是研究中小尺度天气系统的主要手段之一。然而, 多普勒雷达主要观测径向速度和回波强度信息, 不能直接提供大气模式变量信息。另一方面, 随着中国新一代多普勒天气雷达观测网逐步投入业务运行, 多普勒雷达探测覆盖面、探测能力和探测资料迅速增加。因此, 研究如何将多普勒雷达资料转变成大气模式预报变量显得尤为重要和必要。

顾震潮<sup>[1, 2]</sup>早在 1958 年就指出: 地面温度和气压场的历史演变中已经蕴藏了斜压大气的三维结

构。依据这一思想有理由推论: 借助于大气模式(方程)可以将不同时次观测资料所包含的时间演变信息转化为要素场的空间分布信息。多普勒雷达资料四维变分同化反演实际上就是基于这一原理。到目前为止, 主要出现了两类多普勒雷达资料 4DVAR 同化技术: 一类比较简单, 利用反射率或(和)径向速度时变守恒方程<sup>[3~5]</sup>; 另一类是采用时变动力模式<sup>[6~8]</sup>或者时变微物理模式<sup>[9]</sup>。Sun 和 Crook<sup>[10, 11]</sup>将微物理过程加到动力模式中, 建立了多普勒雷达资料 4DVAR 同化系统, 并表明该系统能够反演风暴云团的热、动力场和微物理场。Wu 等<sup>[12]</sup>将变分同化系统应用于超级单体过程, 结果显示可以得到强风暴的主要特征。Warner 等<sup>[13]</sup>利用变分同化系统分析的初始场对一次强降水过程作了 2 h 预报, 结果也是令人鼓舞的。

多普勒雷达资料 4DVAR 同化反演技术在理论上是先进的, Sun 等进行的一些实际运用试验也被证明是有效的。但是到目前为止, 多普勒雷达资料的 4DVAR 同化仍然处在试验研究阶段, 特别是在国内类似研究还刚刚起步。为了考察多普勒雷达资料 4DVAR 同化技术的反演能力和变分同化中可能存在的问题并针对问题加以改进, 本文利用 Sun 等建立的变分同化系统和模拟雷达资料, 进行了多普勒雷达资料 4DVAR 同化反演的模拟试验研究。所得结果对于实测多普勒雷达资料的 4DVAR 同化反演有重要的参考价值。

## 2 同化模式和变分同化方法简介

本文采用的同化模式和变分同化方法由 Sun 等<sup>[10]</sup>建立, 这里仅对其作一简要介绍, 详细可查阅文献[10]。同化模式为一个三维云模式, 云模式建立在笛卡儿坐标系中, 采用滞弹性近似, 包含 6 个预报方程, 它们是 3 个动量方程、热力方程、雨水方程和总水方程。模式预报变量有三维风场( $u, v, w$ )、液态水位温  $\theta_l$ 、雨水混合比  $q_r$  和总水混合比  $q_t$ , 其他变量水汽混合比  $q_v$ 、云水混合比  $q_c$ 、扰动温度  $T$  和扰动气压  $p$  可从预报变量诊断得到。数值模式以无量纲变量形式编程, 这样可以平衡不同变量量级的差异, 使得在同化过程中每个变量有相似的权重, 从而得到更好的收敛率。模式中微物理过程采用 Kessler 暖雨参数化方案, 没有考虑冰相作用。取云模式的切向线性模式并转置得到伴随模式。为了避免云物理参数化方案中函数不连续性对构造伴随模式的影响, 作了如下处理: 当  $q_r$  很小时, 雨水蒸发率和下降末速度取常数。

4DVAR 资料同化的基本思想就是找模式变量的最优初始场, 使得模式输出结果在一定的时间域和空间域上与相应的观测结果尽可能接近。为此, 定义价值函数  $J$  为

$$J = \sum_{i,j} [v (V_{ri} - V_{ri}^{ob})^2 + z (Z - Z_i^{ob})^2] \quad (1)$$

其中求和是针对空间区域  $\Omega$ , 同化窗(时间域)  $T$ , 雷达数目  $i$  而言,  $v, z$  分别是径向速度和反射率的权重系数。  $V_{ri}^{ob}$  和  $Z_i^{ob}$  分别是第  $i$  部雷达观测到的  $V_r$  速度和反射率,  $V_{ri}$  和  $Z$  表示模式结果, 它们不是模式的直接输出量而是通过模式输出的速度场和雨水混合比计算得到。

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

$$\frac{z - z_i}{r_i} (w - V_{Tm}) \quad (2)$$

$$r_i = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$V_{Tm} = 5.40 (q_r)^{0.125} \quad (4)$$

$$Z = 43.1 + 17.5 \log(q_r) \quad (5)$$

其中  $r_i$  表示任一格点( $x, y, z$ )与第  $i$  部雷达( $x_i, y_i, z_i$ )之间的距离,  $V_{Tm}$  是雨水下落末速度,  $\rho$  是空气密度,  $\alpha$  是修正因子, 其定义为:  $\alpha = (p_0/\bar{p})^{0.4}$ ,  $\bar{p}$  是本底气压,  $p_0$  是地面气压,  $q_r$  的单位是  $g/kg$ , 雷达反射率  $Z$  的单位是  $dBz$ 。在实际应用中, 根据需要, 价值函数中还常常加上背景项和罚项。至此, 四维变分同化问题变为在模式方程的约束下求式(1)的价值函数极小值, 具体算法见文献[10], 在此就不再赘述。

## 3 模拟雷达资料的生成

本文中多普勒雷达观测资料是由同化模式产生的模拟资料, 这样做的好处是可以知道反演场的真实解并排除模式误差因素对反演的影响, 关于模式误差对反演的影响将在本文第 4 节的最后作简单探讨。采用理想的层结和风场, 利用同化模式进行了模拟。初始条件: 速度场设为 0, 温度和湿度场由探空资料提供, 探空曲线取自文献[10], 它是较典型的对流风暴产生环境。模拟区域水平范围为  $18 \text{ km} \times 18 \text{ km}$ , 垂直为  $12 \text{ km}$ ; 模式网格间距:  $x = y = 0.5 \text{ km}$ ,  $z = 0.4 \text{ km}$ ; 时间步长为  $\Delta t = 5 \text{ s}$ 。边界条件: 水平风场的外流边界由内部最靠近的两个格点外推, 入流边界按文献[14]的方法确定, 其他变量的导数为 0。为了启动对流, 初始时刻在模拟区域中心  $2 \text{ km}$  高度插入暖湿泡, 水平半径  $4 \text{ km}$ , 垂直半径  $1.6 \text{ km}$ , 最大温度扰动  $1.5$ , 最大湿度扰动  $1 \text{ g/kg}$ 。模式积分约  $9 \text{ min}$  时, 暖湿泡到达抬升凝结高度, 云开始出现。风暴大约在  $28 \text{ min}$  时完全形成, 最大雨水混合比约为  $1.9 \text{ g/kg}$ , 最大垂直速度约为  $17 \text{ m/s}$ 。图 1 给出了  $22.4 \text{ min}$  时各个变量沿  $Y = 9 \text{ km}$  (风暴中心)的  $X-Z$  剖面。从图 1 可知, 此时风暴正处在发展旺盛阶段, 云呈蘑菇状, 风暴中心以强上升气流为特征, 流场分布和云水、雨水分布有很好的对应, 强上升气流对应着极值分别约为  $4$  和  $1.1 \text{ g/kg}$  的云水和雨水。上升气流中心对应着正的浮力, 正的温度扰动极值达  $3.5$ , 其上的负温度扰动是由

绝热冷却所致。图 1 可用作真实场来检验 4DVAR

同化反演结果的可靠性和准确性。

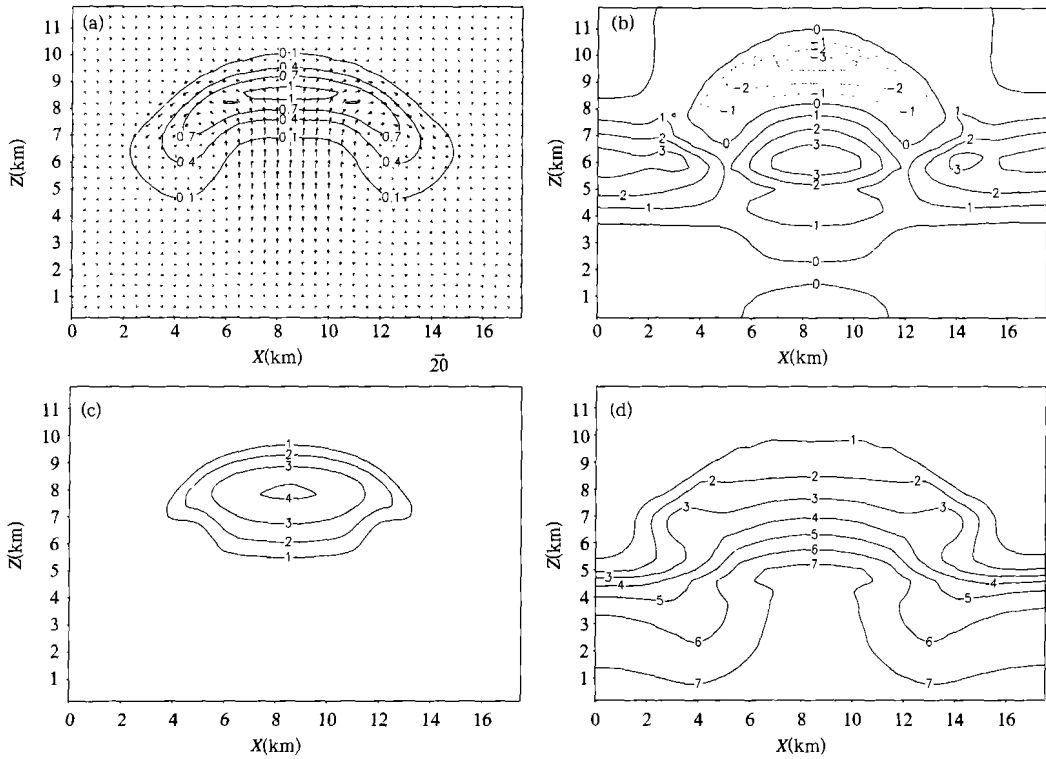


图 1 22.4 分时模拟风暴沿  $Y = 9 \text{ km}$  的垂直剖面

(a. 速度场(m/s)和雨水混合比(g/kg); b. 扰动温度( ); c. 云水混合比(g/kg); d. 水汽混合比(g/kg))

Fig. 1 Vertical cross sections through the center of the storm ( $Y = 9 \text{ km}$ ) at  $t = 22.4 \text{ min}$  in the simulation (a) velocity vector (in m/s) and rainwater mixing ratio (in g/kg); (b) perturbation temperature (in ); (c) cloud water mixing ratio (in g/kg); and (d) water vapor mixing ratio (in g/kg)

将模拟得到的三维风场和雨水混合比代入式 (2)~(5), 生成两部雷达的径向速度和反射率。两部雷达及其相对模拟区域(也就是下面的反演区域)位置见图 2, 两部雷达相距 60 km, 通过模拟区域中心的两部雷达波束间夹角为 90。

### 4 试验设计和结果

设计了 16 组试验, 以研究不同条件下 4DVAR 同化方法的反演效果和存在的问题, 16 组试验的条件见表 1。4DVAR 同化需要给模式变量初始猜值, 在本文的所有试验中, 模式变量初始猜值是这样给定的: 速度场( $u, v, w$ ) 初始猜值取为 0,  $q_r$  初始猜值依据式(5)由同化窗初始时刻雷达反射率得到,  $\rho_1$  及  $q_t$  由探空资料和  $q_r$  初始猜值获得, 具体方法为: 根据在  $q_r$  增加阶段,  $\rho_1$  和  $q_t$  都守恒的条件, 通过计算地面平均值与雨水达极大值层平均值之间差异, 得到  $\rho_1$  和  $q_t$  初始猜值的极大值, 极大值再乘以  $q_r/q_{rmax}$  ( $q_{rmax}$  是雨水混合比的极大值), 就得到  $\rho_1$  和  $q_t$  的初始猜值。反演区域大小、格点间距和时间积分步长同上面的模拟过程。模式的侧边界条件和反演区相对两部雷达的位置除特殊说明外也等同上面的模拟过程。在大部分试验中同化窗为 4 min, 进入

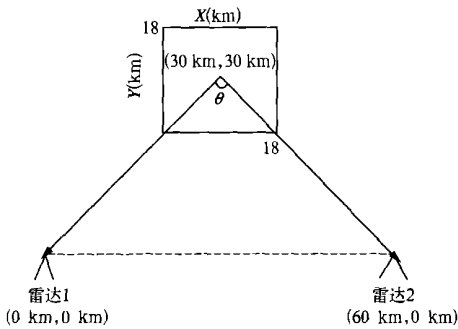


图 2 反演区和雷达站的位置

Fig. 2 Locations of the two assumed radars relative to the assimilation domain

的是 18.4 和 22.4 分两个时次的雷达资料。

表 1 试验条件描述

Table 1 Description of experiments

试验编号	试验条件
1	同化双雷达两个时次资料, 同化窗 4 分, $\Delta t = 90$
2	同试验 1, 但加入背景场, 背景场为同化窗初始时刻前 1 分模拟场
3	同试验 2, 但背景场为平均场
4	同试验 1, 但只同化单雷达资料
5	同试验 4, 但加入背景场, 背景场为同化窗初始时刻前 1 分模拟场
6	同试验 1, 但 $\Delta t = 165$
7	同试验 1, 但 $\Delta t = 30$
8	同试验 1, 但同化窗为 8 分
9	同试验 4, 但同化窗为 8 分
10	同试验 9, 但同化 3 个时次资料
11	同试验 1, 但雷达观测资料有缺值区, 并取平均场为背景场
12	同试验 1, 但雷达径向速度有 20% 随机噪声误差
13	同试验 1, 但雷达反射率增加 5 dBz 的校准误差
14	同试验 1, 但水平风场的侧边界条件由双雷达合成法得到
15	同试验 1, 但水平风场的侧边界条件由 VAD 方法得到
16	同试验 1, 但模拟雷达资料为不同的微物理参数模拟结果

在变分同化过程中, 伴随模式计算价值函数梯度的准确程度至关重要, 为此文中计算了  $\rho$ ,  $\rho$  表征切向线性模式解近似非线性模式解的程度, 表达式见文献[10]。结果显示,  $\rho$  基本在 1 附近, 表明切向线性模式解较好地近似非线性模式解, 伴随模式计算的价值函数梯度是可靠的。一般而言, 迭代次数越多, 价值函数越小, 同化越有效。考虑到计算时间效率问题并依据价值函数迅速下降一般在前 30 次左右迭代完成的事实, 决定下面所有同化反演试验, 经 50 次迭代后终止。本文所用同化模式和 4DVAR 变分同化算法源程序, 由美国 NCAR 的 Sun 提供, 经移植可在 PC 机 Linux 系统上运行。当同化窗为 4 分时, 50 次迭代在配置为 Pentium 4 1.2G/RAM 1G 的 PC 机上约需运行 2 h。

采用反演结果的均方根误差来定量衡量反演效果, 均方根误差定义如下

$$S_{RM} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{0i})^2} \quad (6)$$

其中,  $x$  表示反演场,  $x_0$  表示真实场,  $N$  为格点数。均方根误差的计算结果见表 2。

#### 4.1 控制试验

试验 1 为控制试验, 同化两部多普勒雷达资料, 同化窗为 4 min, 输入资料为 18.4 和 22.4 分两个时次的雷达资料。

图 3 给出了控制试验中归一化价值函数及其梯

度随迭代次数的变化, 两条曲线的变化特征均表现为开始迅速下降, 然后随着迭代次数的增加逐渐趋于平滑。梯度曲线在下降过程中表现出较大的波动, 这是由模式中微物理过程的不连续性引起的。由图可见, 价值函数的主体下降在前 30 次左右迭代完成, 经 50 次迭代后, 价值函数约下降了 2 个量级, 其梯度约下降了 4 个量级。接下来的试验中价值函数及其梯度随迭代次数的变化特征也基本如此。

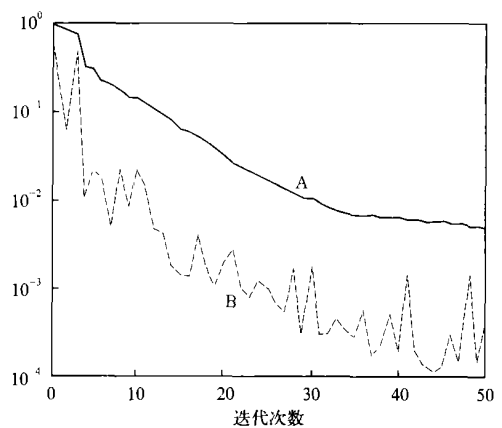


图 3 归一化价值函数(实线 A)及其梯度(虚线 B)随迭代次数的变化

Fig. 3 Normal cost function (curve A) and gradient (curve B) plotted as a function of the number of iterations

图 4 给出了同化窗末端时刻( 22. 4 分) 反演结果, 与图 1 比较发现, 反演结果与真实场大体一致, 风暴特征比较相似, 风暴中心位置吻合较好, 云的水平垂直尺度以及结构比较一致。证明了 4DVAR 同化技术反演云中三维风场、热力场和微物理场结构的能力。通过比较还可看出, 不同变量的反演效果是不同的: 速度场和雨水场的反演结果无论是结构分布还是数值大小都与真实场非常接近, 反演误差较小; 而其他变量(  $T$  ,  $q_c$  和  $q_v$  ) 的反演效果要比速

度场和雨水场的反演效果差, 风暴中心正温度扰动反演值比真实场约减小 1 , 云水的反演值约比真实场低 1 g/ kg, 水汽的反演值则比真实场稍高。其原因是速度场和雨水场比温度场、云水和水汽在价值函数中更直接体现出来了, 这样在同化过程中, 资料对速度场和雨水场的约束要比对温度场、云水和水汽的约束大得多。与真实场相比, 反演的垂直速度微弱减小, 通过模式中浮力项导致温度的降低, 云水凝结作用减小, 云水含量降低, 水汽含量升高。

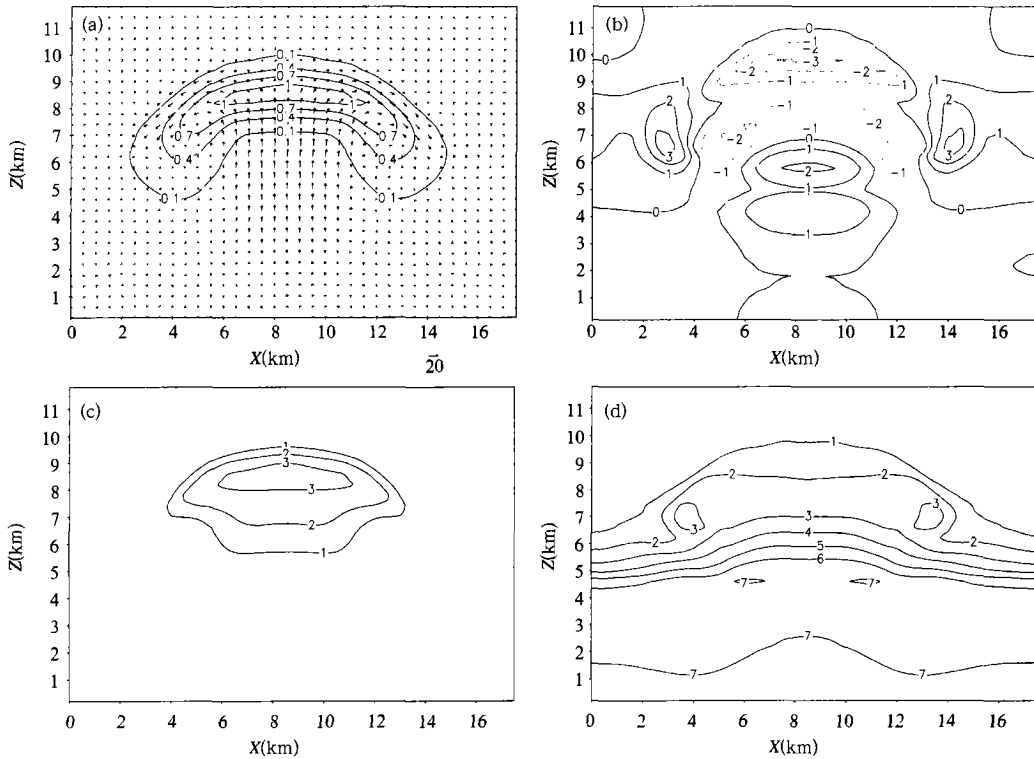


图 4  $t = 22.4$  分时试验 1 反演结果沿  $Y = 9$  km 的垂直剖面  
 (a. 速度场(m/s)和雨水混合比(g/kg); b. 扰动温度( ); c. 云水混合比(g/kg); d. 水汽混合比(g/kg))  
 Fig. 4 Vertical cross sections of retrieved fields through the center of the storm ( $Y = 9$ km) at  $t = 22.4$  min in experiment 1. (a) velocity vector (in m/s) and rainwater mixing ratio (in g/kg); (b) perturbation temperature (in ); (c) cloud water mixing ratio (in g/kg); and (d) water vapor mixing ratio (in g/kg)

### 4. 2 价值函数中增加背景项

4DVAR 同化的目标是使模式结果尽可能地接近观测结果, 然而在实际雷达观测中, 并不能保证模式所有格点都有雷达资料。因此, 常常在价值函数中增加背景项, 利用其他资料(如探空资料)来约束无雷达资料区模式结果。含有背景项的价值函数表达式

$$J = \sum_i [v (V_{ri} - V_{ri}^{ob})^2 + z (Z - Z_i^{ob})^2] + \sum_m m (x_{om} - x_{bm})^2 \quad (7)$$

其中  $x_{om}$  表征模式变量,  $x_{bm}$  表征背景场,  $m$  背景项权重常数,  $m$  表示模式变量个数。

虽然试验 1 的反演区域中不存在无雷达观测资料区, 但我们仍期望能通过价值函数中增加背景项, 利用其他资料来增加约束模式变量的信息, 提高

模式变量反演精度。为此,在试验 2 和 3 中增加了背景场重复了试验 1。在连续同化过程中,一般的做法是将前一次同化的结果作为背景场,如文献 [11, 14],而在冷启动试验中,一般是将分析场作为背景场。这里考虑了两种背景场:试验 2 取第 3 节中  $t$  为 17.4 分时(同化窗初始时刻前 1 分)模拟结果作为背景场,这种背景场比较理想化;试验 3 取大气平均场作为背景场,大气平均场由第 3 节中所提到的探空资料提供,这种背景场比较粗糙。试验 2 的反演结果见图 5。比较图 1, 2 和 5 可以看出,与试验 1 相比,试验 2 由于引入了更多的信息对模式变量进行约束,各个变量反演场在分布结构和数值

大小上都更接近真实场了,特别是温度场、云水场和水汽场反演效果有了较大改善。扰动温度、云水和水汽反演场的均方根误差分别从 1.38, 0.17 g/kg, 0.87 g/kg 减小到 0.11, 0.02 g/kg, 0.15 g/kg, 风场和雨水场的反演误差也有所减小。试验 3 的反演效果虽然不如试验 2,但是比试验 1 有进步。由此可见,模式变量背景信息,哪怕是比较简单的平均场信息的引入也有利于提高反演精度。很显然,在今后的应用中,采用更准确地描述大气环境背景的背景场方案将是提高 4DVAR 同化效果非常有效的途径之一。

### 4.3 同化单雷达资料

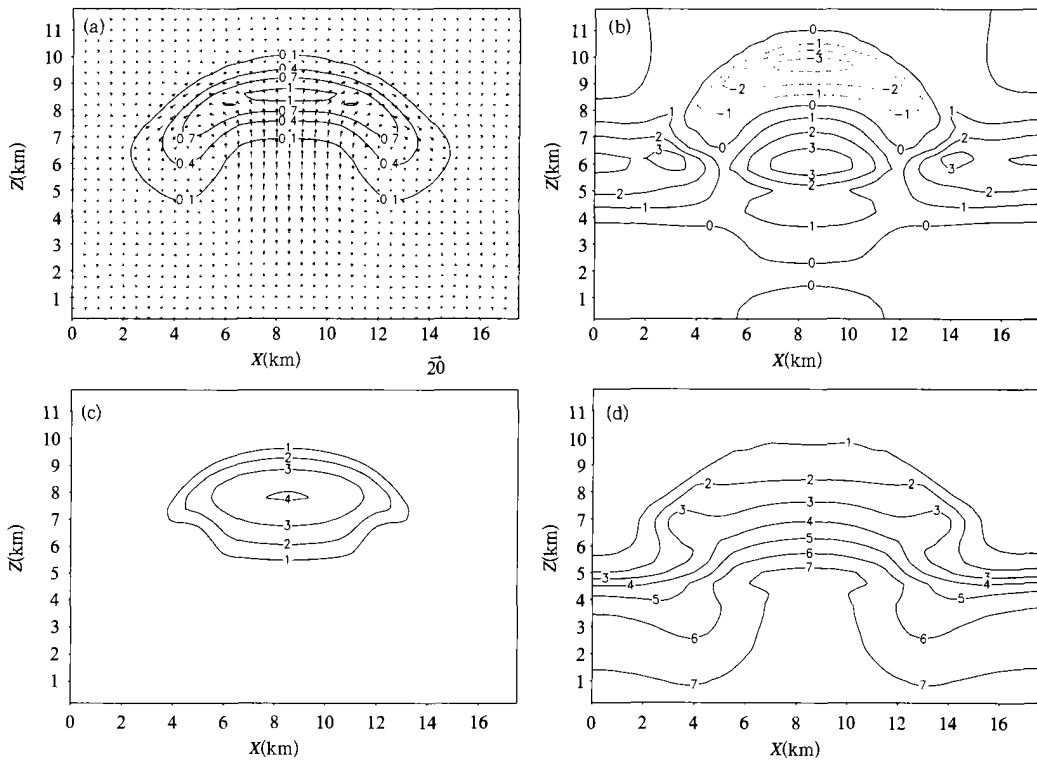


图 5 22.4 分时试验 2 反演结果沿  $Y = 9$  km 的垂直剖面(标注同图 4)

Fig. 5 Similar to Fig. 4, but from experiment 2

在气象业务使用中常常只有单多普勒雷达资料,4DVAR 同化方法到底能从单多普勒雷达资料提取多少有用的气象信息也是人们所关心的。在试验 4 中,只同化单部雷达资料,其余条件同试验 1。从图 6 可见,风暴的主要结构也基本被反演出来了,但在数值大小上反演场与真实场存在较大差异。单雷达反演结果与双雷达反演结果相比,所有变量的反演精度都有所降低,尤其是速度场反演误差显著增

加,水平速度和垂直速度的均方根误差分别增加了 10 和 5 倍左右。其原因是单雷达探测的速度信息要比双雷达探测的速度信息少得多,速度场信息的减少,使得资料对模式变量的约束减小,导致同化反演结果误差增加。为了弥补单部雷达信息不足的缺陷,在试验 5 中同化一部雷达资料并在价值函数中加上背景项,仍取第 3 节中  $t$  为 17.4 分时模拟结果作为背景场。从试验 5 的反演误差(表 2)看,加上

背景场后,单雷达的反演效果显著改善。因此,我们认为在采用4DVAR同化技术进行实测单多普勒雷达资料反演时,要保证反演场,特别是速度场数值大小的精度,应尽可能采取相应的其他观测资料如飞机资料、中尺度网观测资料作为背景场以弥补单部雷达信息不足的缺陷。从表2中可看,在试验4和

5中,水平速度的 $u$ 和 $v$ 分量反演精度总是一样。这是因为据图2中反演区相对雷达站的位置,在只有一部雷达反演时,价值函数中水平速度和分量对径向速度贡献一样大。

4.4 改变反演区相对雷达站的位置

在用双多普勒雷达进行反演时,反演区相对雷

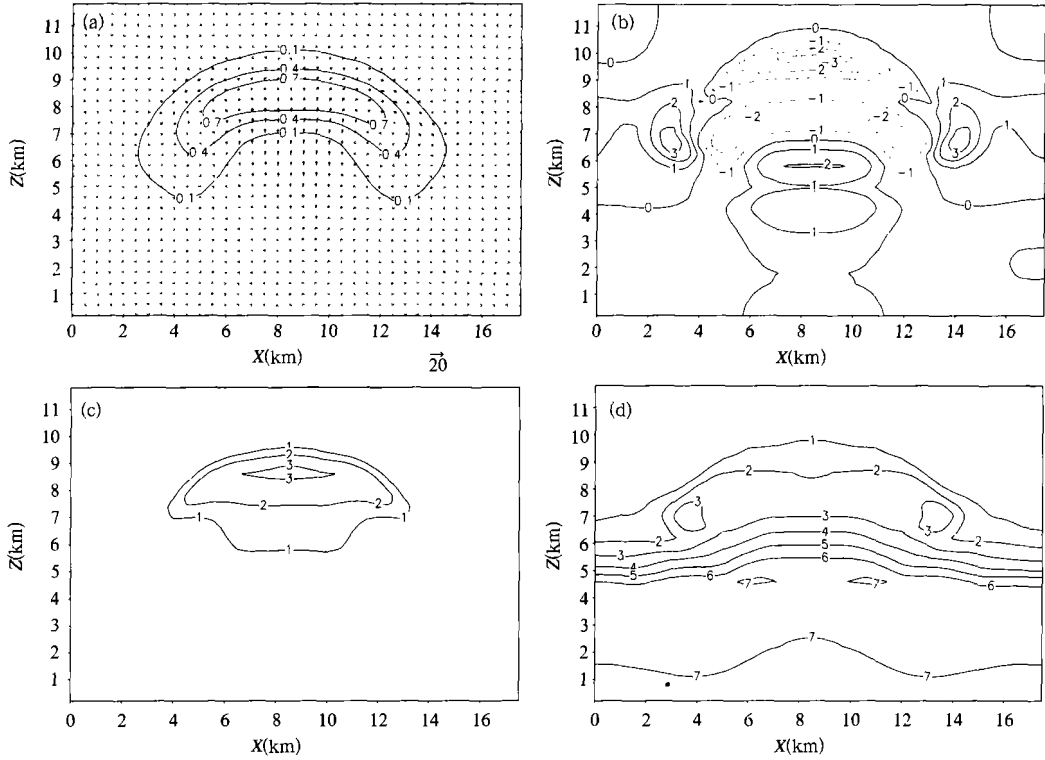


图6 22.4分试验4反演结果沿 $Y=9\text{ km}$ 的垂直剖面,标注同图4

Fig. 6 Similar to Fig 4, but from experiment 4

表2 反演结果的均方根误差

Table 2 Root mean square errors of the retrieval results

试验编号	均方根误差						
	$u$ (m/s)	$v$ (m/s)	$w$ (m/s)	$q_r$ (g/kg)	$T$ ( )	$q_c$ (g/kg)	$q_v$ (g/kg)
1	0.12	0.14	0.32	0.02	1.38	0.17	0.87
2	0.06	0.07	0.13	0.00	0.11	0.02	0.15
3	0.09	0.11	0.25	0.02	1.12	0.13	0.86
4	1.57	1.57	1.87	0.03	1.60	0.43	1.06
5	0.22	0.22	0.27	0.01	0.13	0.02	0.15
6	0.10	0.84	0.60	0.02	1.35	0.21	0.93
7	0.25	0.09	0.44	0.01	1.34	0.18	0.89
8	0.14	0.15	0.37	0.02	0.78	0.11	0.45
9	1.27	1.27	1.33	0.03	0.92	0.18	0.69
10	1.26	1.26	1.29	0.03	0.90	0.16	0.65
11	0.14	0.17	0.40	0.03	1.13	0.31	0.90
12	0.26	0.29	0.57	0.02	1.36	0.16	0.87
13	0.11	0.13	0.32	0.19	1.38	0.15	0.85
14	0.12	0.13	0.30	0.02	1.35	0.18	0.88
15	0.19	0.22	0.45	0.02	1.48	0.23	0.93
16	0.11	0.13	0.33	0.04	1.36	0.36	0.84

达站的位置变化对反演结果有什么影响也是人们非常关心的问题。一些学者研究指出双多普勒雷达风场合成的最佳反演区域是在两部雷达波束夹角 45~135 之间。为了研究 4DVAR 同化反演结果是否受反演区相对雷达站的位置变化影响,进行了试验 6 和 7。在试验 6 和 7 中,保持图 2 中两部雷达之间的距离不变,改变反演区域与它们的相对位置,使得图 2 中的  $\theta$  角分别变成 165 和 30,其余条件同控制试验。由表 2 可见,与控制试验相比,当反演区靠近两部雷达基线时,雨水、扰动温度、云水和水汽反演结果几乎没有变化,  $u$  反演误差减小,  $v$  分量反演误差显著增加(图 7),均方根误差增加了 4 倍多。其原因是当反演区靠近两部雷达基线时,  $u$  在两部雷达径向速度上投影占优,而  $v$  对雷达径向速度贡献较小,价值函数中对  $u$  约束较大,对  $v$  约束较小。

比较试验 7 与 1 的结果可见,雨水、扰动温度、云水和水汽反演结果亦几乎没有差异,而  $u$  和  $v$  反演误差变化正好与试验 6 相反,其原因也是显然的:当反演区远离两部雷达基线时,  $u$  对两部雷达径向速度贡献较小,而  $v$  对雷达径向速度贡献较大,价值函数中对  $u$  约束较小,对  $v$  约束较大。两种情况下垂直速度  $w$  反演误差都有所增加,这是由水平平度场反演误差变化引起的。总之,反演区相对雷达的位置变化对雨水、扰动温度、云水和水汽反演几乎没有影响,对风场反演有一定的影响,尤其是当反演区靠近两部雷达基线时,速度场反演误差较大。因此在将 4DVAR 同化反演技术应用到实测双多普勒雷达资料时,如果两个雷达站的纬度差别很小或经度差别很小,反演区最好不要选择在两部雷达基线附近。

#### 4.6 增加同化窗和雷达观测资料时次

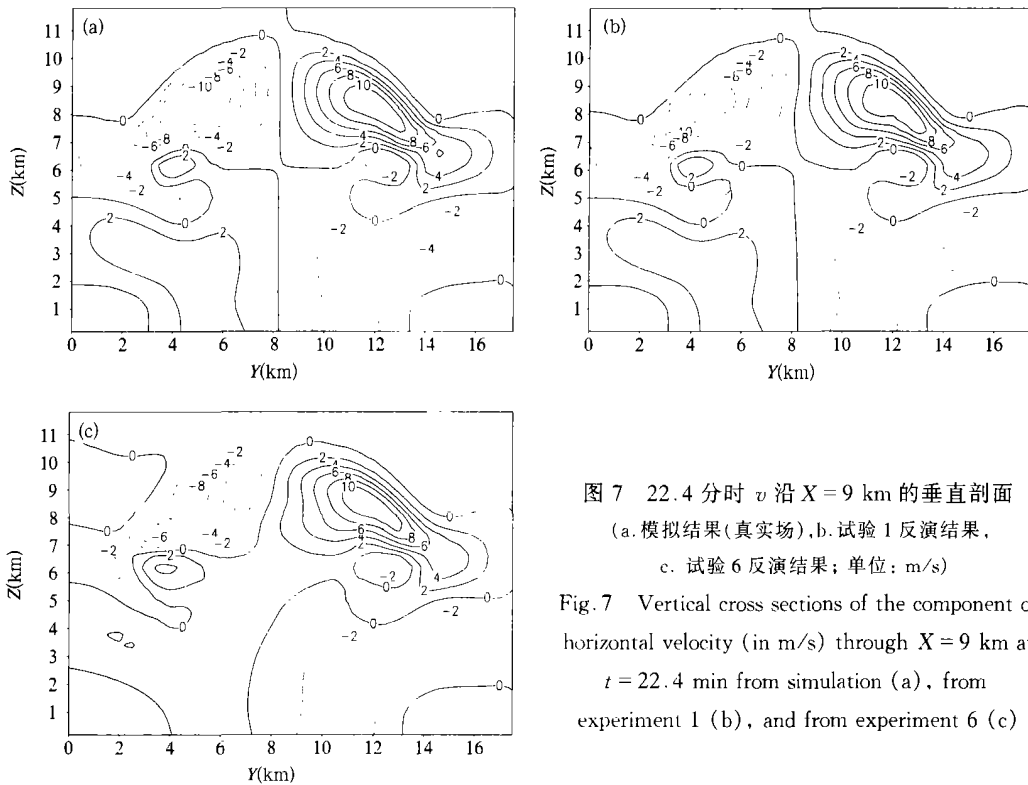


图 7 22.4 分时  $v$  沿  $X = 9$  km 的垂直剖面  
(a. 模拟结果(真实场), b. 试验 1 反演结果,  
c. 试验 6 反演结果; 单位: m/s)

Fig. 7 Vertical cross sections of the component of horizontal velocity (in m/s) through  $X = 9$  km at  $t = 22.4$  min from simulation (a), from experiment 1 (b), and from experiment 6 (c)

试验 8 和 9 用来研究同化窗长度对反演结果的影响。在试验 8 中将同化窗长度增加到 8 min,同化进入的是 14.4 和 22.4 分两个时刻的雷达资料,其余条件同试验 1。试验 9 的条件同试验 8,但只同化单雷达资料。从试验 8 和 9 与试验 1 和 4 的均方根误差比较可以看出,同化窗增加对风场和雨水场的反演结果影响较小,而对温度场的反演结果改变较大,试验 8 和 9 的扰动温度场均方根误差约比试验

1 和 4 减小了 0.6。图 8 给出了扰动温度的真实场(模拟结果)、4 min 同化窗反演结果(试验 1)和 8 min 同化窗反演结果(试验 8)。可见,同化窗增加后反演的温度场更接近实际结果。这是因为,温度场的信息没有直接体现在价值函数中,而是主要通过模式中的浮力项起作用,当同化时间不是很长时,价值函数对温度场的敏感性较小。

为了进一步研究增加进入同化的雷达观测资料



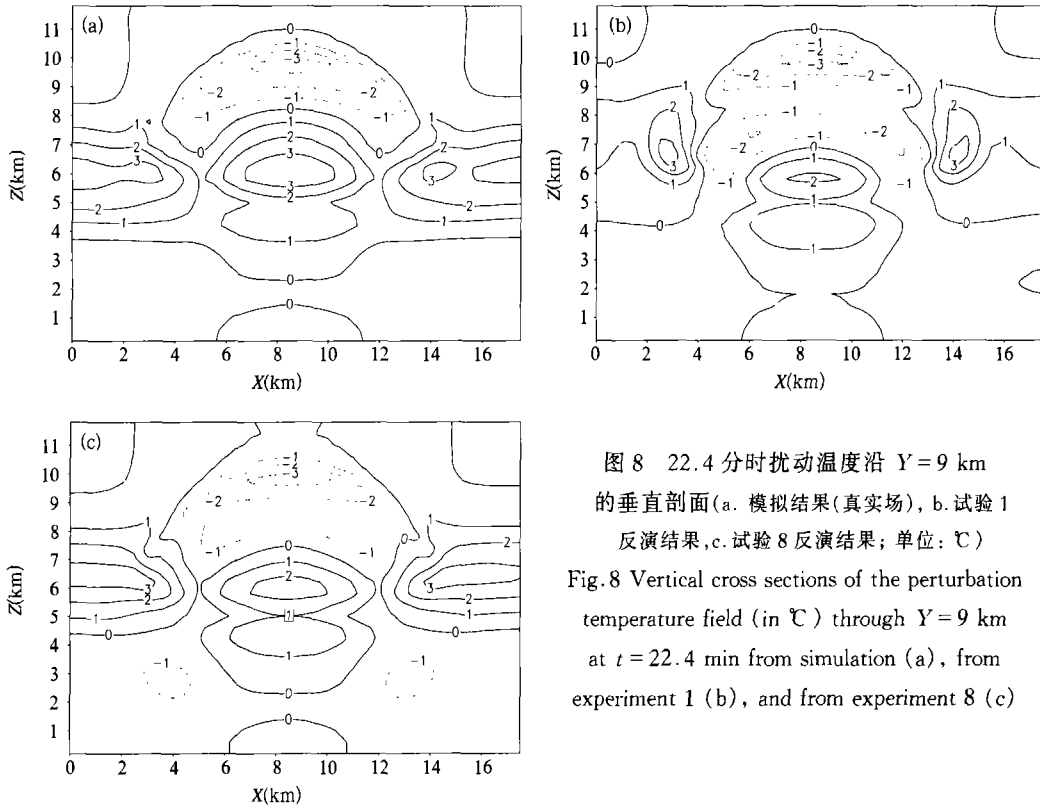


图8 22.4分时扰动温度沿  $Y=9$  km 的垂直剖面(a. 模拟结果(真实场), b. 试验1反演结果, c. 试验8反演结果; 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig.8 Vertical cross sections of the perturbation temperature field (in  $^{\circ}\text{C}$ ) through  $Y=9$  km at  $t=22.4$  min from simulation (a), from experiment 1 (b), and from experiment 8 (c)

时次是否能提高同化效果,进行了试验10,试验10与试验9的条件基本相同,但进入的是14.4,18.4和22.4分3个时次的雷达资料。表2显示试验10的均方根误差比试验9的均方根误差略有减小,表明增加雷达观测资料时次确实可以改善反演效果,但改善程度很小。

#### 4.7 雷达观测资料缺值的影响

由于本文采用的是模拟雷达资料,所以不存在无雷达资料区。然而在实际雷达观测中,并不能保证模式所有格点都有雷达资料。为了研究雷达观测资料缺值对变分同化的影响,我们作了如下试验。首先我们重复了控制试验,并假定每隔2个格点就有1个格点存在资料缺值,结果发现同化迭代10次左右,价值函数就几乎不再下降。其原因是:当观测资料偏少时,问题的解可能是不唯一的,为了使模式输出与观测资料接近,模式控制变量在没有资料的格点作了过多的调整,产生了许多不规则的扰动,导致同化失败。为了增加对无雷达资料区的约束,我们在此试验基础上引入大气平均场为背景场,再进行试验(试验11)。结果显示同化可以顺利进行,风暴的结构也基本反演出来了。这表明采用背景场可以减小资料缺值对同化反演的负面效应。另外,在实际运用中有时对雷达资料缺值进行补点也是有效

的,当然补点需要慎重。

#### 4.8 雷达观测资料误差的影响

在上面的试验中,  $V_{re} = V_r(1 + 0.2e)$  都是认为雷达资料不存在误差。然而,在实际观测中由于噪声和系统等原因雷达资料总存在着误差,下面来研究观测资料误差对变分同化反演的影响。为了模拟实测资料中径向速度的噪声误差,在试验12中给径向速度加20%的随机误差,即  $V_{re} = V_r(1 + 0.2e)$ ,其中  $e$  为  $[-1, 1]$  之间的随机数,由计算机产生。反演结果显示速度场误差有所增加,但增加幅度很小,  $u$ ,  $v$  和  $w$  的均方根误差分别只增加了0.14, 0.15和0.25 m/s,而其他变量反演结果几乎没有变化。

为了模拟实测资料中雷达系统的校准误差,在试验13中给反射率加入5 dBz的校准误差。反演结果表明雨水场的反演误差显著增加,雨水量反演值比实际值偏高约1 g/kg,而其他变量反演结果变化很小。尽管雨水场的反演误差较大,但雨水场的结构还是基本反演出来了。因此总的来说,4DVAR同化反演技术对观测资料误差不太敏感。

#### 4.9 侧边界条件效应

在前面的试验中,都假定同化过程中模式边界条件完全等同于模拟时候的边界条件,也即边界条件是理想的,不存在误差。在接下来的两个试验中,

来考察边界条件, 主要是入流水平速度场边界条件对反演的影响。试验 14 和 15 中分别采用双雷达合成风场和 VAD 风场提供入流水平风场边界条件。双雷达合成法和 VAD 法求风场的方法可参考文献 [15, 16], 在此就不再赘述。试验 14 的结果和控制试验结果基本一致, 表明双雷达合成方法得到的水平风场比较准确, 利用它提供侧边界条件是可行的。试验 15 的反演效果较控制试验反演效果有所下降, 这主要是因为 VAD 风场只能体现边界风场的垂直变化而没有考虑水平变化。但是试验 15 的反演效果下降又不是很大, 可能是因为就本文研究对象而言, 需要反演的风暴主体离边界较远。

#### 4. 10 模式误差的影响

在前面的试验中, 采用的模拟雷达资料也来自同化模式, 因此模式能够准确地表征大气发展演变过程。然而在实际运用中, 模式总是存在误差的, 为了分析模式误差对反演的影响, 设计了如下试验(试

验 16): 将同化模式的原微物理参数化方案中云水自动转换率  $R_a$ 、雨水碰并率  $R_c$  和雨滴蒸发率  $R_e$  全部增大 1 倍, 利用第 3 节的方法, 生成模拟雷达资料, 而同化过程中保持原微物理参数化方案不变。这样相对雷达资料而言, 同化模式是存在误差的。结果表明, 试验 16 中雨水和云水的反演效果与控制试验存在较大差异, 而其他变量的反演效果与控制试验基本相同。图 9 显示当模式存在误差时(试验 16)雨水和云水分别比真实场偏高 1 g/kg, 1.5 g/kg 左右。而控制试验则表明在模式没有误差时, 反演的雨水场与真实场很接近, 反演的云水场比真实场偏低 1 g/kg 左右。这表明雨水和云水的反演对模式中的微物理过程较敏感。为了减小模式中微物理方案的误差, 将微物理过程的参数作为模式控制变量, 同其他控制变量一起进行约束调整理论上应该是可行的。这项工作比较复杂, 还有待研究。

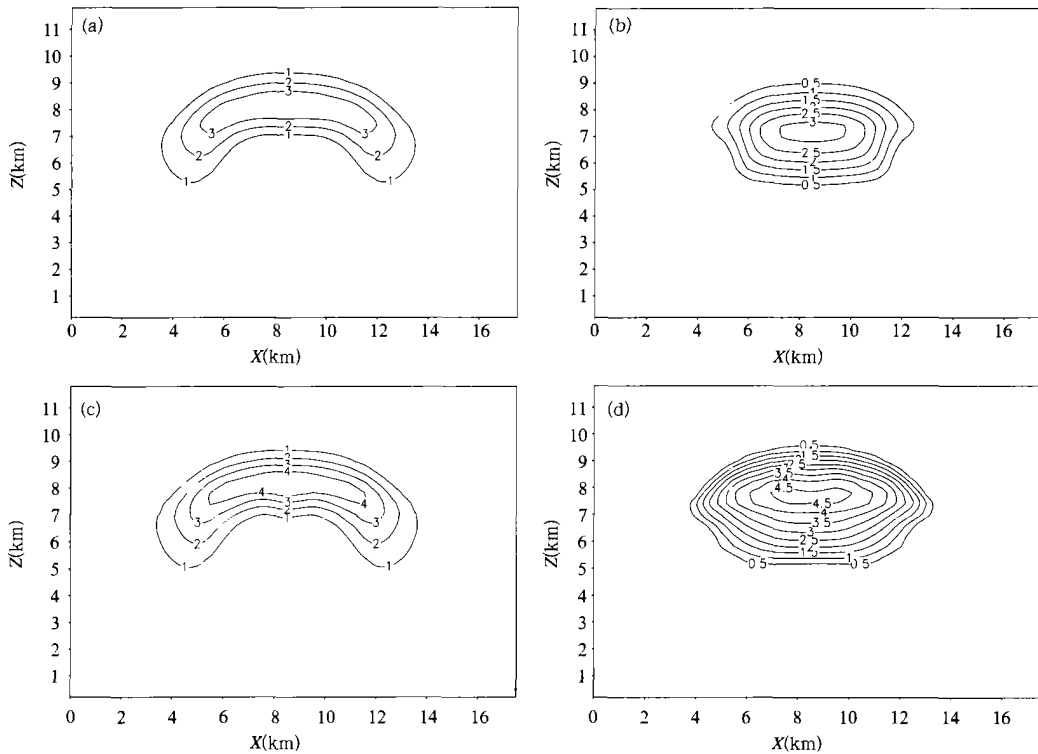


图 9 当模式存在误差时雨水(a, c)和云水(b, d)反演结果与真实场的比较

(a 和 b. 真实场(模拟结果), c 和 d. 反演结果(试验 16); 单位: g/kg)

Fig. 9 Comparison of the retrieved rainwater mixing ratio (c) and cloud water mixing ratio (d) from experiment 16 in which the model can't accurately describe the microphysical processes with their actual fields [(a) and (b)]. Units of g/kg

## 5 总结和讨论

本文利用 Sun 等建立的同化模式和 4DVAR 同化方法,进行了从多普勒雷达资料反演大气热力、动力场和微物理场的模拟研究,以考察多普勒雷达资料 4DVAR 同化技术的反演能力和变分同化中可能存在的问题并针对这些问题加以改进。4DVAR 同化反演技术的基本思想是:尽可能地使模式(方程)预报值与雷达观测资料相符合,通过动力一致的方式,利用不同时次多普勒雷达资料的时间演变信息得到大气要素场的空间分布信息。

试验研究结果表明:4DVAR 同化技术能够从单(双)多普勒雷达资料反演大气三维风场、热力场和微物理场。各个变量反演精度高低与同化过程中变量受约束的大小程度呈正相关。速度场和雨水场反演精度较高,温度场、云水和水汽的反演精度次之,其原因是速度场和雨水场比温度场、云水和水汽在价值函数中更直接体现出来了,这样在同化过程中,资料对速度场和雨水场的约束要比对温度场、云水和水汽的约束大得多。温度场的准确反演需要较长的同化时间,这是因为模式中温度场主要通过浮力项起作用,价值函数中速度信息对温度场进行有效约束需要足够长的时间。价值函数中加入背景场,哪怕是单点探空给出的平均场信息也有利于提高反演精度。很显然,在今后的应用中,采用更准确地描述大气环境背景的背景场方案将是提高 4DVAR 同化效果非常有效的途径之一。在采用单

部多普勒雷达资料进行反演时,由于径向速度信息的减少,反演精度不如双雷达的反演精度,特别是速度场的数值显著偏低,但风暴的结构也基本反演出来了。反演区相对雷达站的位置变化对速度场反演结果有一定的影响,而对其他变量的反演影响很小。当两个雷达站的经纬度差别很小时,靠近两部雷达基线附近的地区速度场反演误差增加。4DVAR 同化技术对于雷达观测资料的误差不太敏感,径向速度误差主要引起速度场反演误差,反射率误差主要引起雨水反演误差。大体上两个时次的雷达观测资料足够提供反演所需的时间演变信息,同化更多时次的雷达资料,反演效果改进很小。雷达观测资料的缺值会显著降低同化效果,甚至可能导致同化失败,其原因是:当观测资料偏少时,问题的解可能是不唯一的,为了使模式输出与观测资料接近,模式控制变量在没有资料的格点作了过多的调整,产生了许多不规则的扰动。背景场可以改善和弥补资料缺值对同化反演的负面效应。反演受边界条件影响,利用双多普勒雷达合成风场提供水平风场边界条件是比较准确可靠的。在风暴主体离边界较远时,VAD 风场也基本可用作水平风场边界条件。来自不同微物理参数的模拟雷达资料反演结果显示,微物理场的反演对模式误差较敏感。为了进一步研究模式误差对变分同化反演的影响,作者将继续利用来自其他模式的模拟资料,进行 4DVAR 同化反演试验。

致谢:本文完成过程中,得到美国 NCAR 孙娟珍博士的指导和帮助,特此致谢。

## 参考文献

- 1 顾震潮. 作为初值问题的天气形势预报与由地面天气历史演变做预报的等值性. 气象学报, 1958, 29(2): 93~ 98
- 2 顾震潮. 天气数值预报中过去资料的使用问题. 气象学报, 1958, 29(3): 176~ 184
- 3 Qiu C J, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler radar data. J Atmos Oceanic Technol, 1992, 9(5): 588~ 598
- 4 Laroche S, Zawadzki I. A variational analysis method for retrieval of three-dimensional wind field from single-Doppler radar data. J Atmos Sci, 1994, 51(18): 2664~ 2684
- 5 Shapiro A, Ellis S, Shaw J. Single-Doppler velocity retrievals with Phoenix II data: Clear air and microburst wind retrievals in the planetary boundary layer. J Atmos Sci, 1995, 52(9): 1265~ 1287
- 6 Wolfsberg D G. Retrieval of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data: [Ph. D. thesis]. University of Oklahoma, 1987. 91pp
- 7 Kapitzka, H. Numerical experiments with the adjoint of a nonhydrostatic mesoscale model. Mon Wea Rev, 1991, 119(12): 2993~ 3011
- 8 Sun J, Flicher D, Lilly D. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data. J Atmos Sci, 1991, 48(6): 876~ 890
- 9 Verlinde J, Cotton W R. Fitting microphysical observations of nonsteady convective clouds to a numerical model: An application of the adjoint technique of data assimilation to a kinematic model. Mon Wea Rev, 1993, 121(10): 2776~ 2793
- 10 Sun J, Crook A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud and its adjoint. Part. I: Model development and simulated data experiments. J Atmos Sci, 1997, 54(12): 1642~ 1661

- 11 Sun J, Crook A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J Atmos Sci*, 1998, 55(5): 835~ 852
- 12 Wu B, Verlinde J, Sun J. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations of a deep convective cloud. *J Atmos Sci*, 2000, 57(2): 262~ 283
- 13 Wamer T T, Brandes E E, Mueller C L, et al. Prediction of a flash flood in complex terrain, Part I: A comparison of rainfall estimates from radar, and very short range rainfall simulations from a dynamic model and an automated algorithmic system, *J Appl Meteor*, 2000, 39(6): 797~ 814
- 14 Sun J, Crook A. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D Data. *Wea Forecasting*. 2001, 16(1): 117~ 132
- 15 Ray P S, Ziegler C L, Bumgarner W, et al. Single and multiple Doppler radar observations of tomadic storms. *Mon Wea Rev*, 1980, 108(10): 1607~ 1625
- 16 Browning K A, Wexler R. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J Appl Meteor*, 1968, 7(1): 105~ 113

# DYNAMICAL AND MICROPHYSICAL RETRIEVAL FROM SIMULATED DOPPLER RADAR OBSERVATIONS USING THE 4DVAR ASSIMILATION TECHNIQUE

Xu Xiaoyong

(*Nanjing University of Information Science & Technology Nanjing 210044*)

Zheng Guoguang

(*China Meteorological Administration, Beijing 100081*)

Liu Liping

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

## Abstract

Based on a cloud model and the four-dimensional variational data assimilation method developed by Sun, et al., simulated experiments of dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar data were performed. The 4DVAR data assimilation technique was applied to a cloud scale model with a warm rain parameterization scheme. The 3D wind, thermodynamical, and microphysical fields were determined by minimizing a cost function, defined by the difference between both radar observed radial velocities reflectivities and their model predictions. The adjoint of the numerical model was used to provide the gradient of the cost function with respect to the control variables. Experiments demonstrated that the 4DVAR assimilation method was able to retrieve the detailed structure of wind, thermodynamics, and microphysics using either dual-Doppler or single-Doppler information. The quality of retrieval depended strongly on the magnitude of constraint with respect to the variables. Retrieving the temperature field, cloud water and water vapor was more difficult than the recovery of the wind field and rainwater. Accurate thermodynamic retrieval requires a longer assimilation period. The inclusion of a background term, even mean fields from a single sounding, could be helpful to reduce the retrieval errors. Less accurate velocity fields were obtained when single-Doppler data were used. It was found that the retrieved velocity was sensitive to the location of the retrieval domain relative to the radars while the other fields had very little change. Two radar volumetric scans are generally adequate to providing the evolution, although the use of additional volumes improves the retrieval. As the amount of the observations decreased, the performance of the retrieval is degraded. However, the missing observations can be compensated by adding a background term to the cost function. The technique is robust to random errors in radial velocity and calibration errors in reflectivity. The boundary conditions from the dual-Doppler synthesized winds were sufficient for the retrieval. When the retrieval was mainly controlled by the observations in the regions away from the boundaries, the simple boundary conditions from VAD analysis were also available. The microphysical retrieval was sensitive to model errors.

**Key words:** Doppler radar, 4DVAR assimilation, Retrieval, The cost function.