

# 暴雨模拟中多普勒雷达径向速度 变分同化的应用

赵文斌<sup>1,2</sup> 齐琳琳<sup>2,3</sup> 何宏让<sup>4</sup> 孙建华<sup>3</sup>

(1 61936 部队,海口 517001; 2 空军装备研究院航空气象防化研究所,北京 100085; 3 中国科学院大气物理研究所,北京 100029; 4 解放军理工大学气象学院,南京 211101)

**摘要** 针对 2008 年 6 月广东地区的一次强降雨过程,利用 WRF 中尺度数值模式及其三维变分同化系统(WRF-3DVAR),进行了多普勒雷达径向速度变分同化对暴雨过程模拟效果影响研究。结果表明:WRF-3DVAR 能够有效地同化多普勒雷达径向速度,同化后的主要影响在于改进了初始动力场,使得初始场包含有更详尽的中尺度特征信息,进而显著提高模式对广东局地暴雨过程的模拟效果。在高分辨率中尺度数值模式中有效地利用多普勒天气雷达资料,是提高中尺度降雨预报的关键。

**关键词** 暴雨 多普勒雷达 径向速度 中尺度模式 三维变分同化

## 引言

多普勒天气雷达通过相干发射和接收定量估算回波强度、径向速度、谱宽等信息,用以探测和测量降水、热带气旋、雷暴、中尺度气旋、湍流、龙卷、冰雹、冻雨等,是灾害性天气监测、预警的有力工具<sup>[1~2]</sup>。比较而言,多普勒雷达资料在时间、空间上均具有较高分辨率,这为改进中尺度数值模式初始场提供了可能。

多普勒天气雷达资料在数值天气预报中应用时,由于其基本观测量只有径向速度和反射率因子,而且绝大多数地区一般只有单部雷达观测数据,因此,为获得三维风场、气压场、浮力场、水汽场等非观测的气象要素场,通常是先对单多普勒雷达观测的径向速度和反射率因子进行反演<sup>[3~9]</sup>,在得到模式变量估值后,再将其与常规观测一起应用于数值天气预报。例如,马清云等<sup>[10]</sup>利用局部 VAD 方法反演风场后,将其与常规观测资料一起应用到降水预报中,改进了降水过程的模拟。王红艳等<sup>[11]</sup>将垂直方向的涡度方程适当简化,结合涡度和散度的定义,再以连续方程为约束,反演得到三维风矢量场,初步检验结果表明,涡度-散度方法反演得到的三维风场

是合理的。Krishnamurti 等<sup>[12~13]</sup>、杨毅等<sup>[14]</sup>在多普勒雷达资料同化中引入了物理初始化概念,通过雷达反射率反演来调整模式初始水汽场、辐散场,改进了降水预报效果。然而由于雷达风场和云微物理参数反演一般假定风场是平滑的、线性的,或云是静止的,因此将其应用于模式初始场容易产生动力、热力约束和参数等方面难以与模式协调一致等问题。

为有效解决雷达资料在数值模式中的应用,近年来雷达资料直接同化技术得到较快发展。Sun 等<sup>[15]</sup>利用云模式及其伴随方法,将观测资料综合考虑,通过目标泛函的极值求解得到最佳初始场。杨艳蓉等<sup>[16]</sup>和盛春岩等<sup>[17~18]</sup>利用 ARPS 模式及其同化系统 ADAS,将多普勒雷达资料直接应用于中尺度数值模拟,发现同化试验能较好地改进模拟初始场,提高了中尺度数值模式的短时定量降水预报。Xiao 等<sup>[19]</sup>利用 MM5-3DVAR 系统考察多普勒径向速度直接同化对一次暴雨个例的影响,研究结果表明,同化试验能较好地提高雨带走向和降水强度。

以上的研究工作为多普勒天气雷达资料在中尺度数值模式中的应用做了很好的探索,但国内对多普勒雷达资料在中尺度数值模式中的应用才刚刚起步,还有许多问题有待研究和解决。目前我国新一

国家自然科学基金项目(40605016)资助

作者简介:赵文斌,男,1984 年生,硕士,主要从事中尺度数值模拟研究,Email:19848790@163.com.cn

收稿日期:2009 年 1 月 5 日;定稿日期:2009 年 3 月 26 日

代天气雷达组网成功并已投入业务应用,加强多普勒雷达观测资料在数值天气预报中的有效应用是非常必要的。本文针对 2008 年 6 月 6~7 日广东一次暴雨过程,利用 WRF 中尺度模式及其同化系统 WRF-3DVAR,开展了多普勒雷达径向速度在暴雨模拟中的同化应用研究,以期了解多普勒雷达径向速度直接同化对暴雨模拟初始场及模拟效果的影响程度。

## 1 华南强暴雨过程概述

2008 年 6 月 6~7 日,受暖湿气流和弱冷空气的共同作用,广西东部、广东东南部、海南普降中到大雨,而广东阳江、台山、深圳、珠海 24 h 降雨量分别达到 206、237、187、273 mm,为大暴雨。暴雨集中出现在 6 月 6 日 00:00~06:00 UTC,最强降水区主要位于珠江口以西沿海地区,逐时最大降雨量达  $55 \text{ mm h}^{-1}$ ,为局地强暴雨。

利用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料进行天气形势分析表明,这次降水过程主要受低涡系统和西南急流扰动的共同影响。500 hPa 上 6 日 00:00 UTC 中高纬地区不断有冷空气南下,两广地区处于弱低槽控制区内,有利于引导弱冷空气入侵(图 1)。而 850 hPa 上,广西、广东交界处存在一明显的低涡系统,且有一强盛的西南低空急流与其相伴。强盛的西南低空急流与高能舌走向基本一致,中心强度可达  $22 \text{ m s}^{-1}$  以上,有利于将海上暖湿气流源源不断地输送到广东沿海地区(图 2)。由此可以说,南侵的弱冷空气与来自洋面的暖湿气流在华南沿海地区交

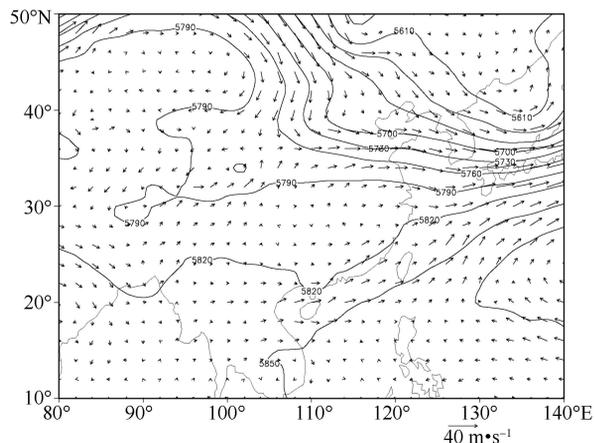


图 1 2008 年 6 月 6 日 00:00 UTC 500 hPa 高度场 (gp m) 和 wind 场

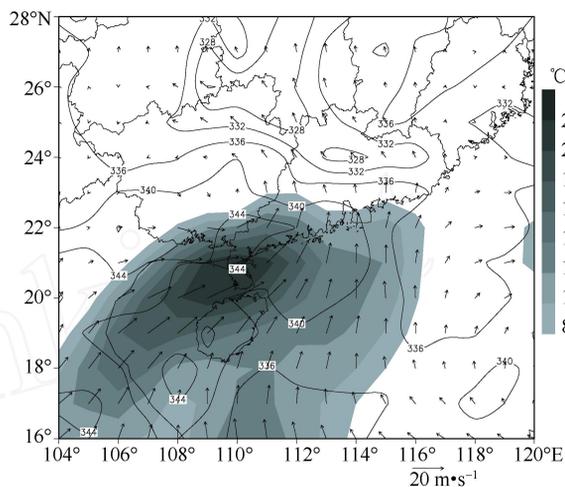


图 2 2008 年 6 月 6 日 00:00 UTC 850 hPa 绝对风速和假相当位温场

汇,珠江口地区低层明显辐合,利于暴雨的产生。此外,阳江多普勒雷达 6 日 00:00 UTC 径向速度观测表明(图 3),华南地区低层主要受偏南风影响,零速度带分布和雷达回波(图略)都显示雷达站东北方向有对流活动存在,这说明此次强暴雨与中尺度对流系统有关,仅靠常规资料难以判断。

## 2 暴雨过程的数值模拟

### 2.1 WRF 模式及 WRF-3DVAR 系统简介

WRF 模式是美国 NCAR 和 NOAA 等多个科研机构联合开发的新一代中尺度数值模式。模式在中尺度系统的研究和预报方面得到加强,具有十分广泛用途。WRF 模式是一个完全可压非静力模式。其控制方程组都为通量形式。模式的动力框架采用时间显示分离方案来解动力方程组,即模式中垂直高频波的求解采用隐式方案,其他的波动则采用显式方案。模式水平方向采用 Arakawa C 网格形式,垂直方向提供了两种选择,一种为高度坐标,一种为质量坐标。模式具有双向嵌套能力,微物理、积云参数化、行星边界层参数化、大气辐射参数化等物理过程均有多项方案可供选择。

WRF-3DVAR 系统动力框架和热力框架都是在 WRF 中尺度模式框架基础上建立的,其动力学方程与 WRF 模式的一致,热力学方程则做了一些相应的处理和变换。系统的基本目标是通过迭代特定价值函数的方法,得到分析时段内的大气真实状态,以达到提供最优初始场的目的。其价值函数可

表示为:

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(y - y_o)^T O^{-1}(y - y_o)$$

其中,  $x$  是分析变量,  $x_b$  是背景场,  $y_o$  是观测值,  $y = H(x)$  是由分析变量导出的观测值。  $H$  是观测算子,  $B$  是背景误差协方差,  $O$  是观测误差协方差。由分析可知, 3DVAR 同化系统是通过观测预处理把已知的观测资料读入系统中, 并利用预报模式变量, 通过观测算子计算出与观测量相对应的模拟量, 依据对模拟与观测之差附加的某种约束条件, 利用优化方法得出给定时刻大气真实状态的最优估计, 即模式最优初始场。本文中雷达径向速度同化就是借助 WRF-3DVAR 系统实现的。目的是利用其时空精度较高的特点, 结合常规资料, 为暴雨模拟提供一个动力协调的最优初始场。

## 2.2 模拟方案设计

考虑到风场对于中尺度系统发展演变的影响更为明显, 本文模拟中着重考虑了雷达径向速度的同化。为了检验雷达径向速度同化对模拟结果的影响, 本文设计了两组试验: 控制试验(CTL): 不同化任何观测资料; 雷达径向速度同化试验(VEL): 同化多普勒雷达径向速度资料。

模式水平分辨率取 10 km, 垂直方向 28 层, 模式层顶取 100 hPa, 微物理过程采用新 Thompson 方案, 积云参数化方案采用 Grell-Devenyi 方案, 行星边界层参数化采用 YSU 方案, 辐射参数化采用 Dudhia 方案。

考虑到此次暴雨过程尤以 00:00 ~ 05:00 UTC 降雨最为集中, 为此, 两试验的模拟时段均为 6 月 6 日 00:00 ~ 12:00 UTC。其中, CTL 试验的初始场和边界场均采用  $1^\circ \times 1^\circ$  NCEP 再分析资料, 且不加任何观测资料。而 VEL 试验中, 虽然背景场同样采用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  NCEP 再分析资料, 但初始场中同化了 6 日 00:00 UTC 阳江 CINRAD/SA 多普勒雷达体扫数据 9 层仰角的径向速度资料。需指出的是, 用于同化的雷达数据已进行了去噪声、补缺测、退模糊和平滑滤波等质量控制。

## 2.3 雷达径向速度同化对模拟初始场的影响

考虑到初始场中的各个变量在同化前后会发生变化, 采用同化前后某格点的变量变化, 即分析增量

来说明同化对模拟初始场的影响。表 1 给出了 VEL 试验得到的同化前后初始场各变量的变化特征。可以看出, 同化雷达径向速度场后, 改变最为显著的是动力场。热力场和水汽场虽有一定改变, 但相对不明显。这种调整说明风场信息对于中尺度系统的重要性。

表 1 同化雷达径向速度后各变量的变化特征

变量	最小分析增量	最大分析增量	平均均方根误差
$U/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	- 41.9	20.7	3.84
$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	- 21.2	22.7	2.87
$T/$	- 0.9	0.8	0.12
$Q/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	- $3.3 \times 10^{-7}$	$6.2 \times 10^{-7}$	$1.05 \times 10^{-8}$

这种调整是否合理? 鉴于雷达径向速度同化对动力场影响显著, 而动力场对中尺度系统的发生发展有重要意义, 接下来将主要针对初始场的分布和结构进行分析。对比分析两个试验得到的 6 月 6 日 00:00 UTC 850 hPa 模拟初始风场可以看出(图 4), 850 hPa 上, 无论是 CTL 试验还是 VEL 试验, 均较好地反映出初始场中广东沿海地区强盛的西南低空急流分布和强度, 但 VEL 试验得到的强度明显强于 CTL 试验, 且很好地反映出阳江附近存在相对小尺度的大风速区。对比图 3(见图版)可以知道, 阳江雷达站正北方向约 100 km 的确存在一强正速度中心, 而雷达东南方向水平风场与雷达切向平行, 出现了零速度带, 因此, 可以认为 VEL 试验对风场的表述是可信的。此外, 对于与暴雨发生密切相关的广东、广西交界处低涡, CTL 试验初始风场中低涡位置偏西, 强度较弱, 而 VEL 试验不仅很好地反映出低涡位置和强度, 而且还很好地描述出低涡内有相对小尺度涡旋存在。分析发现, 小涡旋所在位置与未来暴雨区基本一致。这说明, 同化雷达径向速度后, 风场可以表现出明显的中尺度特征, 而模拟初始场中丰富的中尺度信息, 对于提高中尺度强对流系统的模拟效果具有重要意义。

此外, 同化雷达径向速度, 不仅对对流层低层风场有明显改进, 而且对对流层中层风场也有了一定改进。500 hPa 上, CTL 试验中广东沿海地区西南暖湿气流分布与 850 hPa 的相似, 但强度减弱。广西、广东地区以相对平直西风气流为主。而 VEL 试验中不仅同样较好地再现出广东沿海地区的西南暖湿气流分布, 而且广西、广东交界处的低涡, 以及

低涡内相对小尺度涡旋仍清楚可见(图 5)。这进一步说明,同化雷达径向速度对于各层初始风场均具

有一定改进,使得模拟初始场含有丰富的中尺度信息,有利于中尺度对流系统的发生、发展。

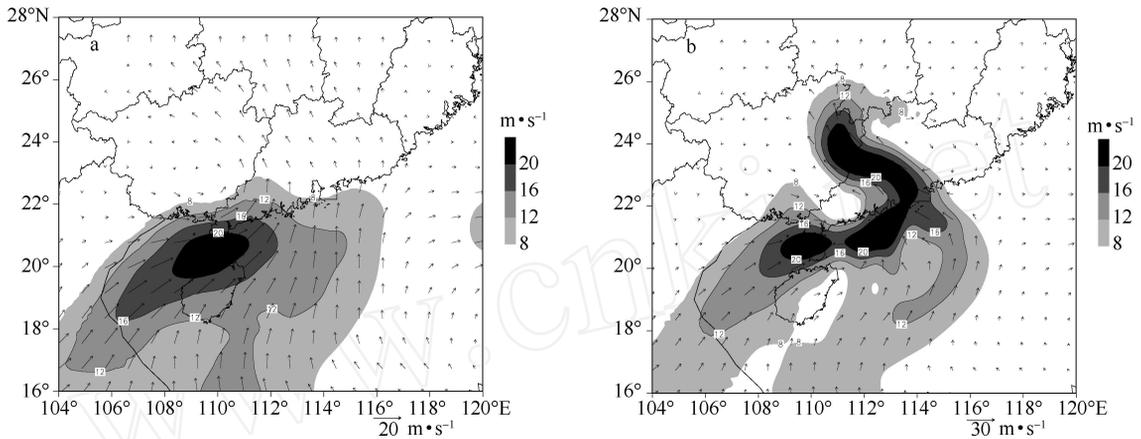


图 4 2008 年 6 月 6 日 00:00 UTC 850 hPa 模拟初始风场(阴影:绝对风速):(a) CTL 试验,(b) VEL 试验

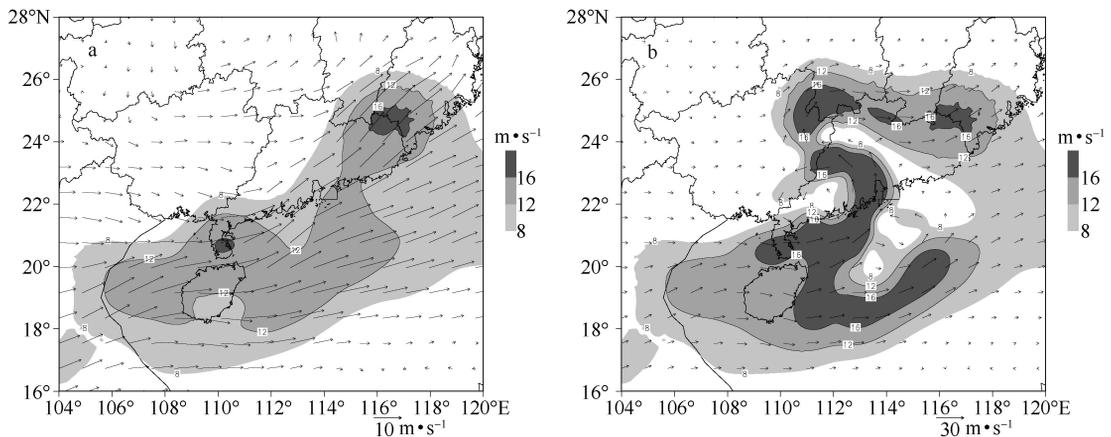


图 5 2008 年 6 月 6 日 00:00 UTC 500 hPa 模拟初始风场(阴影:绝对风速):(a) CTL 试验,(b) VEL 试验

以上分析表明,雷达径向速度同化对暴雨区附近的水平风场均有一定改进,那么对于垂直方向上的风场影响程度又如何呢?为此,针对垂直向上动力场进行了分析。图 6 给出的是两个试验沿 22°N 散度增量和垂直速度增量垂直分布。可以看到,直接同化多普勒径向速度对于散度和垂直速度的影响是明显的。雨区上空,对流层中低层大气辐合得以增强,而在对流层中层 600 hPa 以上,气流辐散得以增强,这种从对流层低层至高层的散度场增量分布的直接贡献是加强了上升运动,上升运动最大增量位于 500 hPa 附近,中心值可达到  $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右。

通过上述两个试验对此次暴雨初始场的对比可以知道,多普勒雷达径向速度直接同化的主要作用在于调节初始动力场。通过调节暴雨及其邻近区域

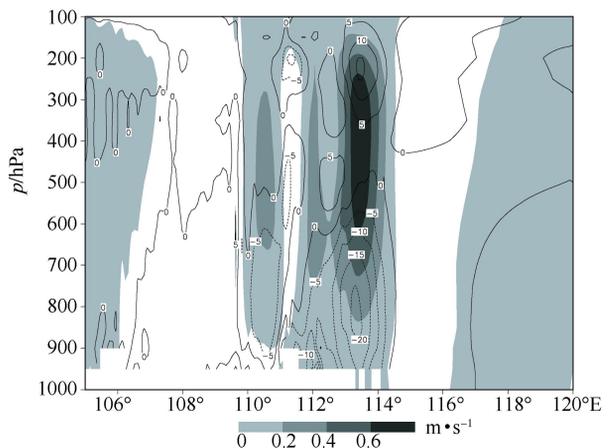


图 6 VEL 试验与 CTL 试验沿 22°N 垂直速度和散度增量(差值)垂直剖面(阴影是垂直速度增量;等值线是散度增量,单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

风矢量场、垂直速度场等的描述,有效地将局地动力场演变特征反映到中尺度模式初始场中,从而提高中尺度模式初始中尺度信息,使其分布更趋于真实。

### 2.4 雷达径向速度同化对模拟效果的影响

将 CTL 试验和 VEL 试验模拟 6 日 12:00 UTC 预报场中对流层高中低位势高度和水平风场与相应时刻的客观分析场对比分析可以看到,两个试验不仅能较好地模拟出 200 hPa 高空辐散区以及 500 hPa 弱低槽形势(图略),而且对 850 hPa 上近似东西向的横槽及其上的低涡以及强盛的西南低空急流都有很好的反映,特别是 850 hPa 低涡系统,两个试验都较好地模拟出其位置和强度(图 7)。这表明 WRF 中尺度模式不仅具有较好地再现降雨系统分布、演变的能力,而且具有刻画降雨期间对流层各层相互配合、稳定的环流背景特征的能力。

对比分析 CTL 试验和 VEL 试验模拟的 3 h 降

水分布(图 8)可以看出,尽管 VEL 试验对于降雨落区的模拟存在一定偏差,但其较好地模拟了珠江口以西的暴雨中心位置和强度,与实况更相符。而 CTL 试验模拟的降雨强度、位置则与实况相差较大,特别是在降水强度的模拟上,远小于实际降水强度。这说明多普勒天气雷达径向速度同化对于提高起始时段降水模拟的精确度有着重要的作用。

CTL 试验和 VEL 试验模拟的 12 h 降水分布(图 9),CTL 试验虽能很好地模拟出广东南部大部分地区的降雨过程,但模拟的降雨强度与实况存在较大偏差,特别是对于珠江口以西的强降雨中心基本没有体现出来。而 VEL 试验虽然模拟的降雨区域偏小,但对于降雨区域,尤其是强降雨中心位置和强度均有很好的反映,这进一步表明,采用同化多普勒天气雷达径向速度后的初始场,模拟的强降雨落区和强度均与实况更为接近。

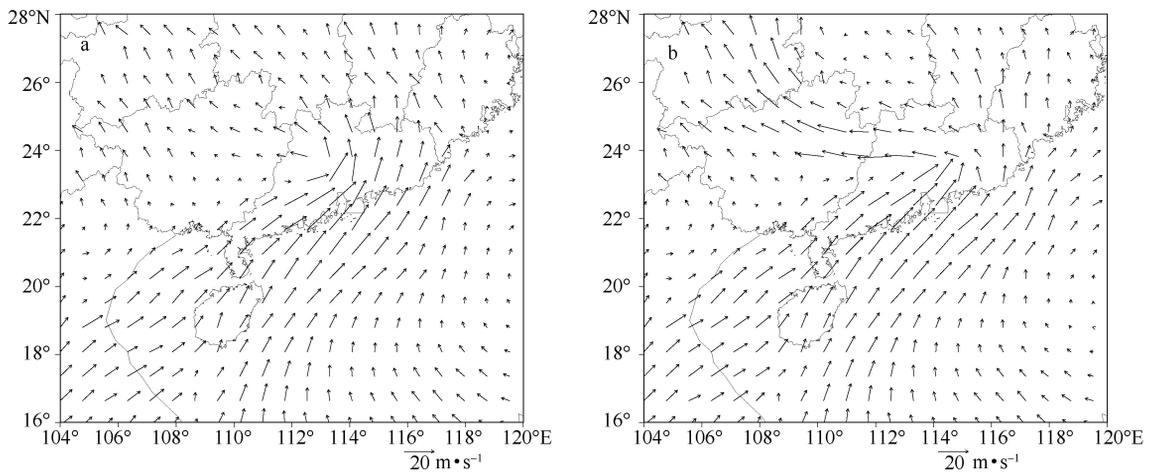


图 7 模式模拟的 2008 年 6 月 6 日 12:00 UTC 850 hPa 水平风场:(a) CTL 试验,(b) VEL 试验

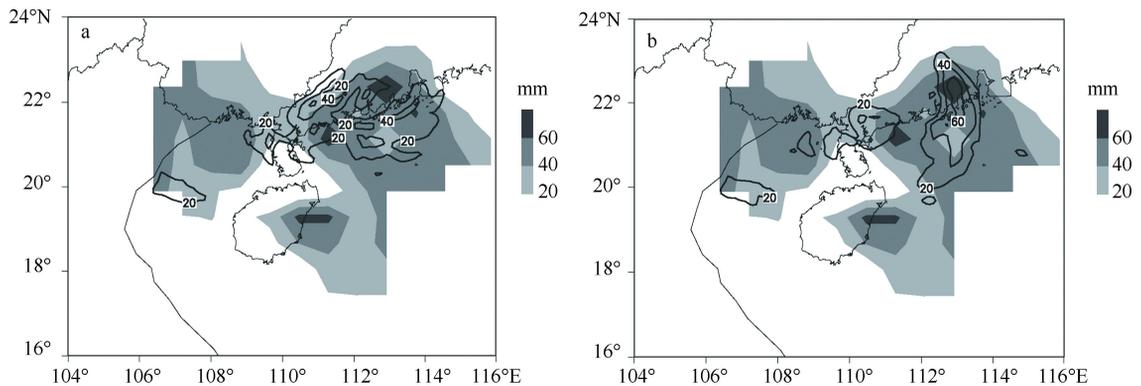


图 8 2008 年 6 月 6 日 00:00~03:00 UTC 降水分布:(a) CTL 试验,(b) VEL 试验  
(阴影是实况降水,等值线是模拟降水)

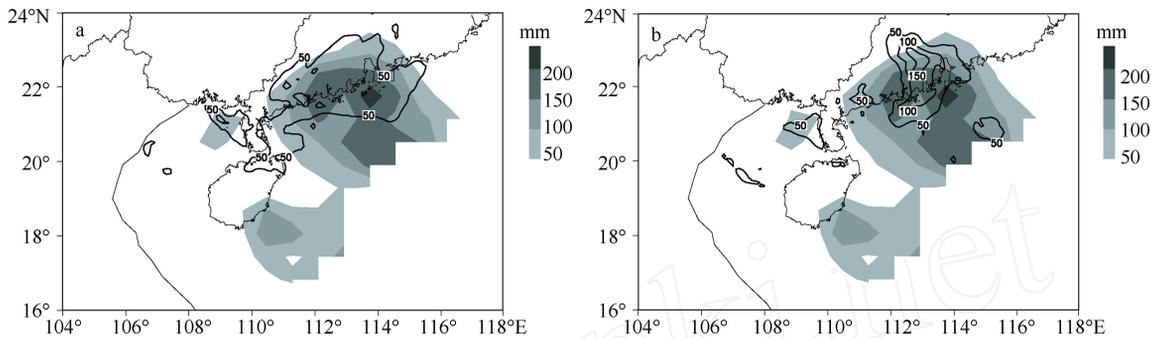


图 9 2008 年 6 月 6 日 00:00 ~ 12:00 UTC 观测和模拟的降水分布:(a) CTL 试验,(b) VEL 试验  
(阴影是实况降水,等值线是模拟降水)

此外,判断模式模拟降雨是否成功,在分析降雨落区和雨量模拟结果的同时,还应注意模拟雨区内雨量的时序变化。为此分析了此降水中心广东台山站(112.8°E,22.3°N)两个试验模拟的附近雨量的时序变化(图 10),并与观测到的雨量分布进行了比较分析。可以看出,VEL 试验对降雨前期雨量的模拟能力远强于 CTL 试验,模拟的局地最强雨出现时刻和降雨量级均与观测有很好的对应。由此可以说,将高分辨率的雷达风场资料应用于中尺度数值模式中,对改进模拟降水强度具有重要和积极的影响。

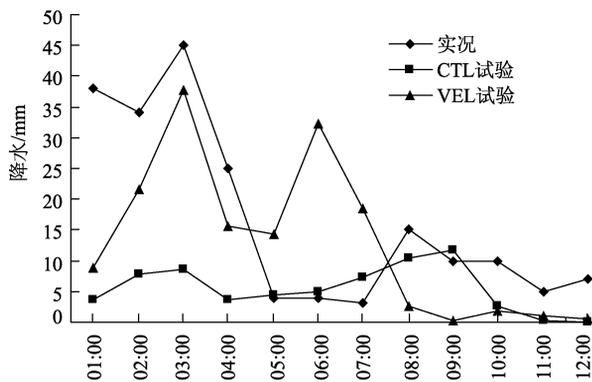


图 10 2008 年 6 月 6 日 00:00 ~ 12:00 UTC 观测和模拟的降水时间分布(112.8°E,22.3°N)

### 3 结论

以 2008 年 6 月 6 日 00:00 ~ 12:00 UTC 广东强暴雨为个例的多普勒雷达径向速度直接同化试验结果表明:

(1) WRF-3DVAR 同化能够有效地同化雷达径向速度资料,多普勒雷达径向速度的主要作用

在于调节暴雨初始动力场,通过调节暴雨及其邻近区域风场、垂直速度场等的描述,产生一个动力上和物理上都与模式协调的初始场,从而提高中尺度模式初始场特征,能够将控制试验所没有包含的中尺度系统反映出来,为模拟试验提供较为真实的初始场。

(2) WRF 模式可以很好地模拟出暴雨期间的环流形势、降雨分布和强降雨中心,模拟结果可以作为进一步深入分析暴雨中尺度系统结构和演变机制的基础。多普勒雷达观测具有较高的观测精度,可以通过同化雷达资料调整暴雨的动力结构,改善暴雨模拟效果。

(3) 随着我国新一代天气雷达网的建成,如何有效地将多普勒雷达观测资料用于中尺度数值预报,进行准确、及时的暴雨预报,尽量减少其危害,仍是当前乃至未来的一个重要研究课题。

### 参考文献

- [1] 胡明宝,高太长,汤达章.多普勒天气雷达资料分析和应用[M].北京:解放军出版社,2000.
- [2] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2002.
- [3] 雷茂生.单多普勒风场反演若干技术和进展[J].气象科技,2000,28(1):19-21.
- [4] Lhermitte R M, Atlas D. Precipitation motion by pulse Doppler radar [G]. Proc. Ninth Weather Radar Conf, Kansas City, MO, 1961, Amer Meteor Soc:218-223.
- [5] Browning K A, Wexler R. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar [J]. J Appl Meteor, 1968, 7:105-113.
- [6] 陶祖钰.从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法[J].气象学报,1992,50:82-93.
- [7] Gal-Chen T. A method for the initialization of the anelastic

- equations: Implications for matching models with observation [J]. *Mon Wea Rev*, 1978, 106:587-606.
- [8] Verlinde J, Cotton W R. Fitting microphysical observations of no steady convective clouds to a numerical model: An application of the adjoint technique of data assimilation to a kinematic model [J]. *Mon Wea Rev*, 1993, 121:2776-2793.
- [9] 王叶红,赵玉春,张兵.“7·8”特大暴雨过程雷达风场资料的三维变分同化研究[J]. *气象科学*, 2008, 28(3):301-307.
- [10] 马清云,李泽椿,陶士伟.单部多普勒天气雷达风场反演及其在数值预报中的应用试验[J]. *应用气象学报*, 2001, 12(14):488-493.
- [11] 红艳,葛润生,徐宝祥.单部多普勒雷达反演三维风场湍度散度方法的初步研究[J]. *气象科技*, 2001, 3(1):22-25.
- [12] Krishnamurti T N. Physical initialization for numerical weather prediction over the tropics [J]. *Tellus*, 1991, 43A:53-81.
- [13] Krishnamurti T N. Physical initialization using SSM/I rain rates [J]. *Tellus*, 1993, 45A:2474-269.
- [14] 杨毅. Doppler 雷达资料同化技术研究[D]. 兰州:兰州大学, 2007.
- [15] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observation using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiment [J]. *J Atmos Sci*, 1997, 54:1642-1661.
- [16] 杨艳蓉,王振会,杨洪平,等.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[J]. *气象*, 2008, 34(6):26-34.
- [17] Sheng C, Gao S, Xue M. Short-range prediction of a heavy precipitation event by assimilating Chinese CINRAD-SA radar reflectivity data using complex cloud analysis [J]. *Meteorol Atmos Phys*, 2006, 94:167-183.
- [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] Xiao Q, Kuo Y-H, Sun J, et al. Assimilation of Doppler radar observation with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case [J]. *J Appl Meteor*, 2005, 44:768-788.

## Application of Doppler Radar Radial Velocity Assimilation to Numerical Simulation of Heavy Rainfall

Zhao Wenbin<sup>1,2</sup> Qi Linlin<sup>2,3</sup> He Hongrang<sup>4</sup> Sun Jianhua<sup>3</sup>

(1 PLA Unite 61936, Haikou 517001; 2 Institute of Aviation Weather, Air Force Academy of Arming, Beijing 100085;

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;

4 Institute of Meteorology, PLA University of Sciences & Technology, Nanjing 211101)

**Abstract:** In order to study the influence of Doppler radar radial velocity assimilation on the numerical simulation of heavy rainfall, the roles played by WRF and WRF-3DVAR in improving the initial fields and simulation results are analyzed. A investigation is conducted on a heavy rainfall event occurred in Guangdong Province on 6 June 2008, and the results indicate that radial velocity, which can be assimilated effectively by WRF-3DVAR, affected the initial dynamical field. By adjusting horizontal wind and vertical velocity around the radar station, the mesoscale characteristics of the initial wind field are improved. Moreover, for rainfall simulation, the radial velocity assimilation experiment is better than those without assimilation.

**Key words:** heavy rainfall, Doppler radar radial velocity, mesoscale model, three-dimensional variational assimilation