

多普勒雷达风廓线的反演及变分同化试验^{* 1}

李华宏¹⁾²⁾ 薛纪善²⁾ 王 曼³⁾ 杨 明¹⁾

¹⁾(云南省气象台,昆明 650034) ²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

³⁾(云南省气象科学研究所,昆明 650034)

摘 要

为了将雷达风场资料更好地应用到数值预报模式中,使用 VAD 方法反演多普勒雷达风廓线并处理成标准的探空资料进行变分同化试验。结果表明:VAD 方法反演的风廓线与探空实况对应较好,验证了用 VAD 技术反演风廓线的可行性。用 GRAPES-Meso 模式的三维变分同化系统对雷达风廓线资料进行同化后,风场的初始场明显改善,降水强度和落区预报也有不同程度的改善。其中,对 6 h 降水预报的改善明显优于对 24 h 的预报改善。另外,在短时强降水预报中,雷达风场资料的同化频率和同化窗口的不同,对降水预报的改善情况也有所差异。在个例研究中,同化间隔为 1 h 的方案 6 h 降水预报要优于同化间隔为 3 h 和 6 h 的方案,同化窗口为 3 h 的试验方案 6 h 降水预报要好于同化窗口为 6 h 的试验方案。

关键词: 多普勒雷达; 风廓线反演; 变分同化; GRAPES-Meso 模式

引 言

风场信息是天气预报中的一个重要参量。由于多普勒天气雷达观测具有较高的时空分辨率,因此多普勒雷达风场信息的应用越来越受到国内外专家的关注。单多普勒雷达风场信息的应用主要分两类,第一类是风场反演,主要用于中、小尺度天气系统的结构分析和预报。从 20 世纪 60 年代至今,从单多普勒雷达观测估计矢量风场已经取得了相当多的研究成果,先后提出了 VAD (Velocity Azimuth Display), VVP (Volume Velocity Processing), VPP (Velocity Plan Processing) 等方法^[1-6]。第二类是风场资料同化,将雷达观测风场信息通过各种途径同化到数值预报模式中,改善初始场。近年来,随着三维变分同化技术的发展,国外已将雷达风场资料应用到业务中。美国 NECP 在 ETA 预报系统中用 3D-VAR 方法同化多普勒雷达的风廓线资料,并将 VAD 风廓线资料处理成为标准探空观测资料进行同化。后来 NCEP 又进行了多普勒雷达的径向速度资料的同化,还进行了 VAD 资料同化与径向速度资料同化的比较。结果表

明:对于模式格距为 10~20 km 的中尺度模式,同化效果相近,但对于几公里或更高分辨率的中尺度模式,直接同化径向速度的效果更好^[7]。马清云等^[8]利用局部 VAD 方法将径向风反演成水平风同化到 MM5 模式中,结果表明有助于分析和预报时空尺度较小的中尺度系统。李柏^[9]将 VAD 风作为单站探空同化到 MM5 模式中,发现 VAD 风场资料的同化有利于改善初始场,其预报结果还能反映出边界层风场的演变特征。万齐林等^[10]假设回波强度变化为零,通过 GRAPES-3Dvar 直接将多普勒雷达径向风速同化到 GRAPES-Meso 模式中,结果表明有利于获取模式初始场、预报和分析中尺度天气系统。但该方案中的回波强度守恒只能局限于短时,而且没有考虑云回波和降水回波的区别,在降水预报中存在错误估计降水的情况。

总的来说,国内有关多普勒雷达风场信息在数值模式中应用的研究还很少,我国新一代天气雷达网观测的许多有用信息还未在数值预报业务中得到真正的利用。另一方面,由中国气象科学院数值预报研究中心研制开发的 GRAPES-3Dvar 系统为我国大量应用雷达等非常规资料打造一个平台,这使

* 国家自然科学基金项目(40233036)、国家重点基础研究发展计划项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”和云南省气象局青年基金项目“多普勒雷达风场反演及同化应用研究”共同资助。

2005-12-29 收到,2006-06-16 收到再改稿。

得雷达风场资料同化的业务化成为可能。因此,本文利用较为成熟的 VAD 技术反演雷达风廓线,处理成标准探空观测资料弥补探空资料在时空上的不足,并应用 GRAPES-3Dvar 进行循环同化试验。

1 VAD 风廓线反演结果分析

VAD 技术就是速度-方位显示方法,即雷达天线以某一固定仰角作方位扫描,将探测到的降水粒子在某一距离和方位上的径向速度记录并显示出来。对于均匀流场,当仰角固定不变时雷达测得某一固定距离上的径向速度分布(即 VAD 曲线)为余弦曲线。当水平风场不均匀时,VAD 曲线将不是余弦曲线。此时 VAD 曲线的非简谐振荡形式提供了水平风场的很多信息。对 VAD 曲线作简谐波分析,应用傅氏级数的零次、一次和二次谐波展开,可以得到水平辐合、水平风向和风速以及水平风场的形变等信息^[11]。

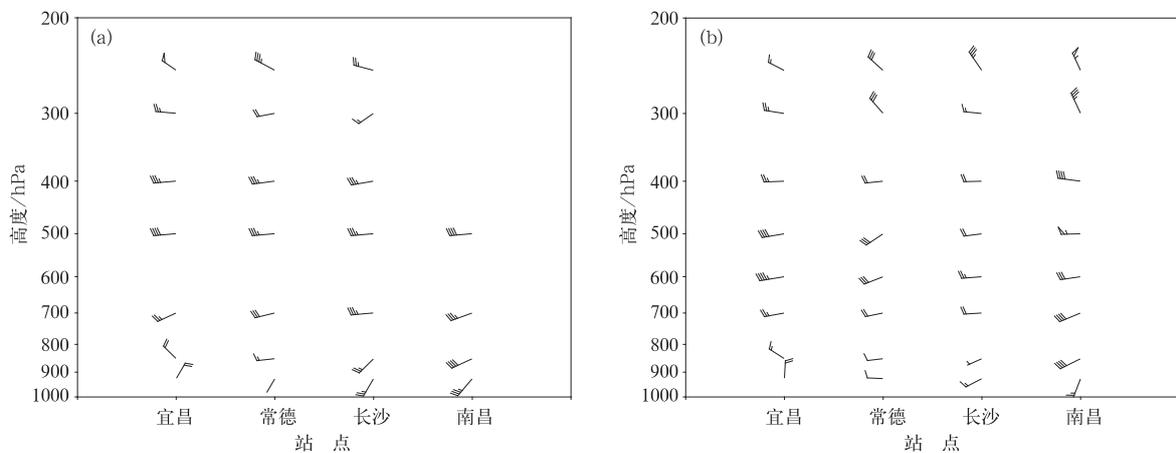


图 1 2002 年 6 月 27 日 12:00 探空实况图(a)与 VAD 风廓线(b)(单位:m/s)

Fig. 1 Sounding image (a) and VAD wind profile (b) at 12:00 on June 27, 2002 (unit: m/s)

2 同化试验

2.1 模式简介

本研究所用模式是中国气象科学研究院数值预报中心开发研制的 GRAPES-Meso(2.1 版本)。在 GRAPES 三维变分同化系统中,将变分同化归结为如下目标泛函的极小化问题:

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

本文使用的资料为 973 项目“长江流域梅雨锋暴雨外场科学试验”的雷达观测资料,共有宜昌、常德、长沙、南昌 4 个雷达站。所选的个例为 2002 年 6 月 27 日 12:00(世界时,下同)至 28 日 12:00 发生在长江流域的一次暴雨过程。图 1a、图 1b 分别为 2002 年 6 月 27 日 12:00 宜昌、常德、长沙、南昌的探空实况图和反演的 VAD 风廓线图。由图可以看出,在高层为一致的西北风,中层为西风。低层的风向切变和切变线位置也很好地反映出来。切变线位于常德站附近,长沙、南昌处于切变线前为西南风,宜昌处于切变线后为偏北风。另外 VAD 风廓线除了具有较高的时间分辨率外,在空间分辨率上可以是任意高度层(如 600 hPa),不像探空资料只有常规的等压面层。从图 1b 还可以看出,VAD 风廓线很好地弥补了南昌站高层缺测的情况。通过探空实况图和反演的 VAD 风廓线图对比可以看出,VAD 风廓线资料具有很好的可靠性和较高的时空分辨率。

式(1)中, x 是分析变量, x_b 是背景场, $H(x)$ 是观测相当量, y_o 是观测量, B^{-1} 是背景协方差矩阵的逆, O^{-1} 是观测误差协方差矩阵的逆,上标 T 表示矩阵转置。在本文的数值试验中,雷达反演风廓线被处理成标准的探空资料,同化的变量只是 u, v 风场变量。

模式试验采用非静力方案,长波辐射过程采用 RRTM 方案,短波辐射过程采用 Dudhia 方案,地面层采用 Monin-Obukhov 方案,陆面过程采用热扩散方案,边界层采用 MRF 方案,微物理过程采用简单冰相方案,积云参数化方案采用 Kain-Fritsch 方案。

模式范围为 $18^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 。水平格距为 $0.273^{\circ}\times 0.273^{\circ}$, 格点数为 89×110 。

2.2 理想试验

为了检验 GRAPES 三维变分同化系统对 VAD 风廓线同化的合理性, 在进行实际天气个例数值试验之前设计了一个理想试验, 在简单的背景场下加入单站的 VAD 风廓线进行同化。试验时取背景场各层均为均匀的西风流场, 且风速均为 10 m/s (图 2a 所示), 将图 1b 中南昌雷达站的 VAD 风廓线资料加入到 GRAPES 三维变分同化系统中进行同化。

图 2 给出了理想试验风场背景场及同化后高、中、低层风矢量增量场。对比图 1b 和图 2 各图可以看出, 南昌站的 VAD 风廓线分布在高层为西北风、

中层为西风、低层为西南风。在背景场为西风的情况下, 高层由于 VAD 风的西风分量和背景场的西风分量相当, 加入 VAD 风的北风分量很大而背景场北风分量为零。因此, 同化后南昌站附近的风场增量主要是北风分量(图 2b 所示)。在中层, 背景场和加入的 VAD 风均无南北分量的风, 但 VAD 风的西风分量要比背景场的西风分量大得多。因此, 同化后南昌站附近的风场增量主要是西风分量(图 2c 所示)。在低层, 由于 VAD 风的西风分量和背景场的西风分量相当, VAD 风的南风分量很大而背景场南风分量为零。因此, 同化后南昌站附近的风场增量主要是南风分量(图 2d 所示)。在南昌站附近, 高、中、低各层风矢量增量都较为合理。另外, 各层

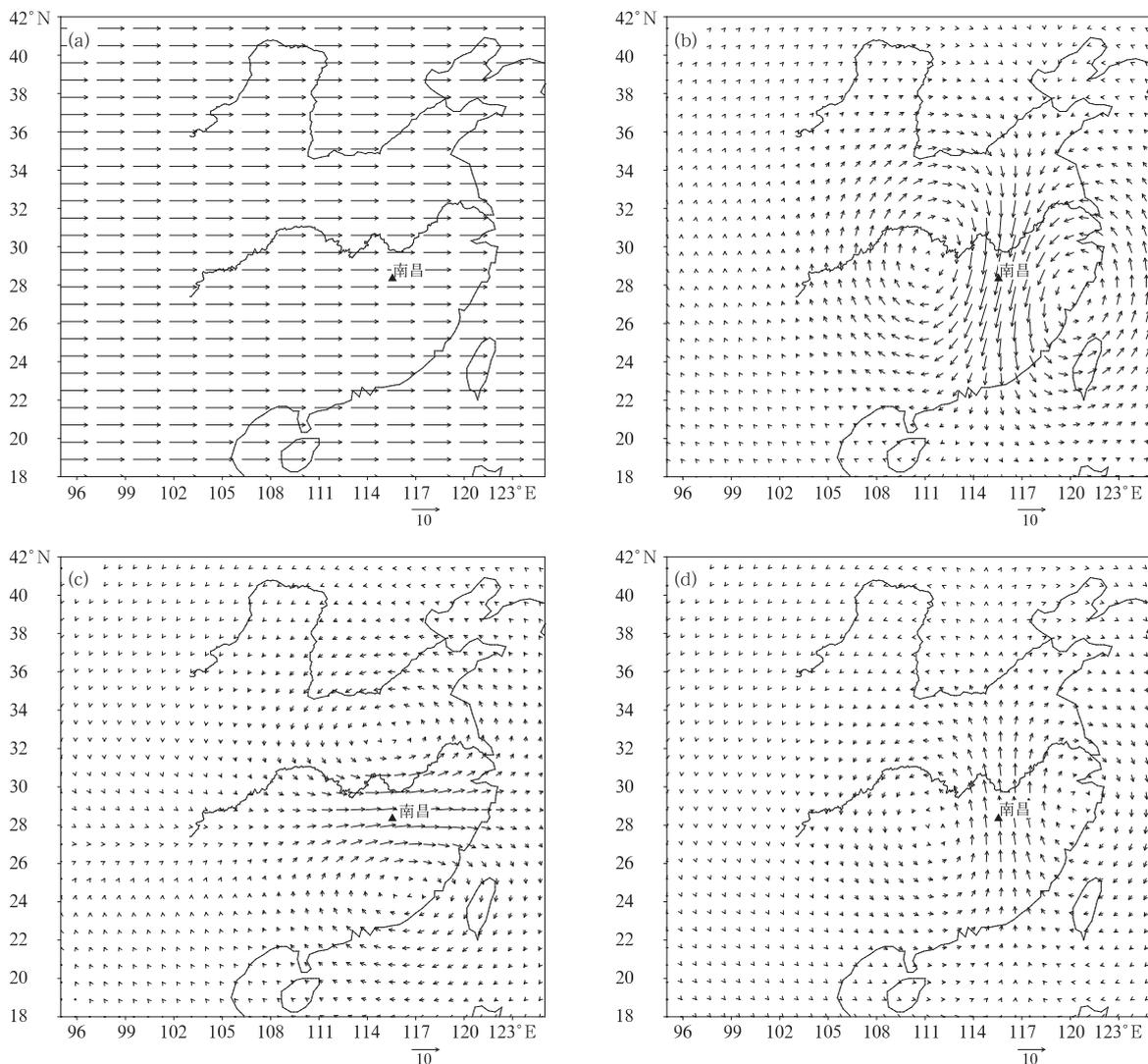


图 2 理想试验风场背景场及同化后各层风矢量增量场(单位: m/s)

(a) 背景场, (b) 250 hPa 同化分析增量场, (c) 500 hPa 同化分析增量场, (d) 850 hPa 同化分析增量场

Fig. 2 Wind background field and the increment wind vector field at all levels by assimilation in ideal test (unit: m/s)

(a) background field, (b) increment field by assimilation on 250 hPa, (c) increment field by assimilation on 500 hPa, (d) increment field by assimilation on 850 hPa

风矢量增量的分布均为在南昌附近最大,在最大风矢量两侧分别形成一个气旋和反气旋式的增量场。风矢量增量场的分布形态与 GRAPES 三维变分同化系统的回归相关模型非常吻合。综上所述,从理想试验的结果可以看出 GRAPES 三维变分同化系统能合理地对 VAD 风廓线资料进行同化。

2.3 方案设计

在未来雷达风场资料同化的业务化过程中,如何使预报效果和预报时效达到最佳,雷达资料同化间隔和同化窗口的选择显得尤为重要。因此,为了检验雷达资料对数值模式预报场的改善作用以及不同同化时间窗口和同化频率的预报情况,一共设计了以下 7 个试验方案(如表 1 所示)。数值试验时选取 T213 资料 2002 年 6 月 27 日 00:00 的 12 h 预报场为背景场,边界也由 T213 预报场提供。所有同化试验均采用相同的动力、物理过程选项和相同的积分步长,只是同化雷达资料的间隔和次数有区别。方案 1 为控制试验,即不同化任何资料,直接以背景

场为初始场进行数值积分。方案 2 只同化初始时刻一个时次的雷达资料,然后进行预报。方案 3~7 为连续同化试验,其中方案 3 和方案 4 为每 3 h 同化一次,分别同化 3 h 和 6 h;方案 5 为每 6 h 同化一次,同化 6 h,即同化两个时次的雷达资料后开始预报;方案 6 和方案 7 为每 1 h 同化一次,分别同化 3 h 和 6 h。

表 1 数值试验方案

Table 1 The schemes of numerical simulations

试验方案	同化间隔/h	同化窗口/h
1	无	无
2	同化初始时刻	无
3	3	3
4	3	6
5	6	6
6	1	3
7	1	6

2.4 结果分析

图 3 分别给出了初始时刻(2002 年 6 月 27 日 12:00)500 hPa 的 T213 背景场、探空实况场和同化

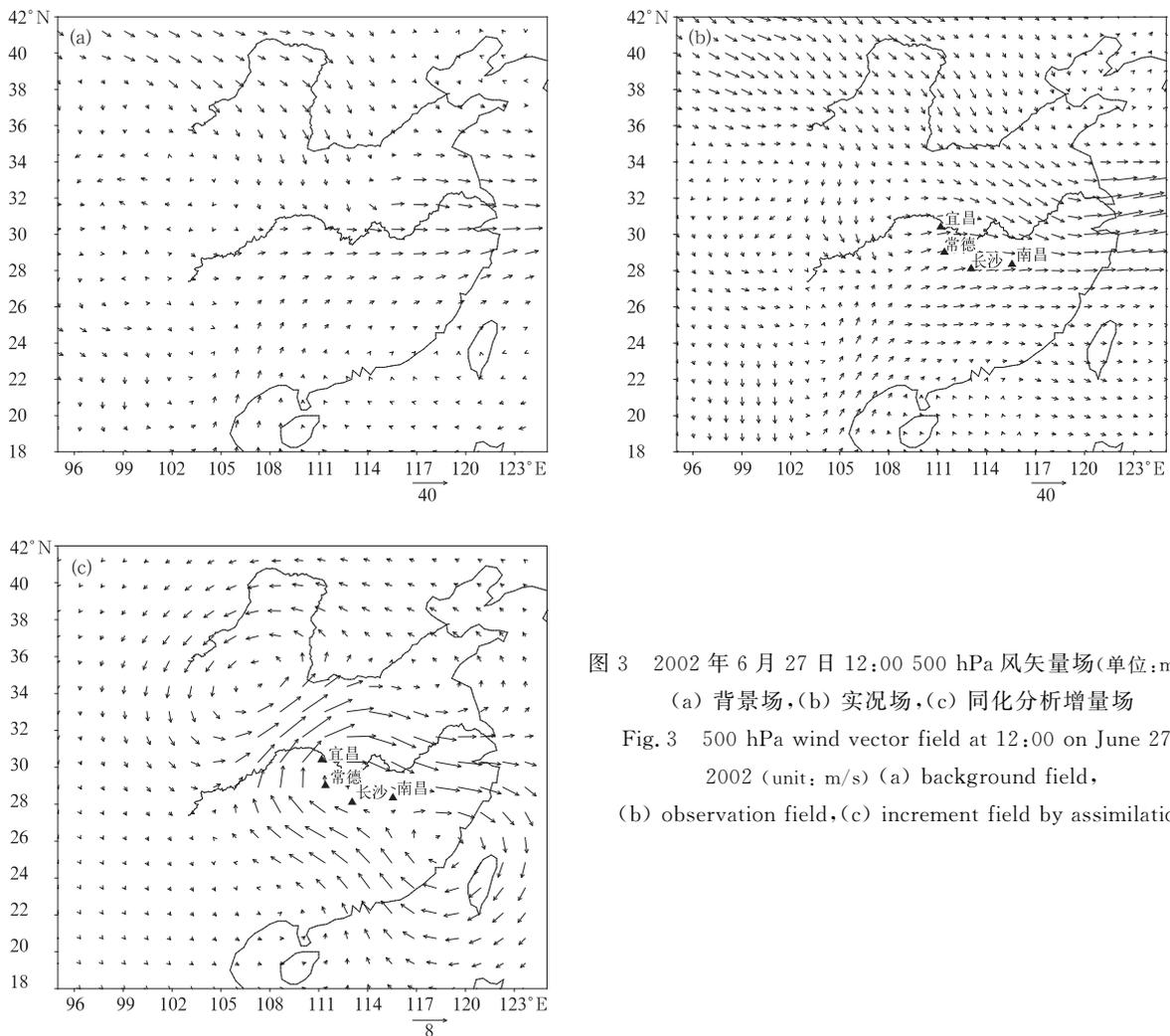


图 3 2002 年 6 月 27 日 12:00 500 hPa 风矢量场(单位:m/s)

(a) 背景场,(b) 实况场,(c) 同化分析增量场

Fig. 3 500 hPa wind vector field at 12:00 on June 27, 2002 (unit: m/s) (a) background field, (b) observation field, (c) increment field by assimilation

分析增量场风矢量图。对比图 3a 和图 3b 可以看出,长江中下游南侧为副热带高压外围西偏南气流和北方南下的西北气流汇合带。但 T213 背景场汇合带的强度较实况弱,副热带高压西侧的偏南气流也偏弱。经过同化雷达资料反演的风廓线后,副热带高压所处位置的反气旋环流增强(图 3c 所示)。在副热带高压西侧有正的西南风增量,长江中下游南北气流汇合带有正的西风增量,有利于增强西南暖湿气流的输送和长江中下游的水汽辐合。从其他层次上同化初时刻后的分析场(图略)也可以看出,其他层次的风场在经过同化后均有不同程度的改善,与实况场接近。这充分说明同化 VAD 风廓线资料有利于改善数值模式初始场。

图 4a 给出了 2002 年 6 月 27 日 18:00—28 日 00:00 的 6 h 降水量实况图。从图上可以看出,在

湖南北部至江西北部有一个强降水区域,本次同化的雷达站中常德和南昌 6 h 降水分别为 80.0 mm 和 27.0 mm。对比各数值试验方案的结果可以发现,在未加入雷达风廓线资料时这一强降水区域的降水几乎没有预报出来。加入雷达风廓线资料同化后,湖南北部的强暴雨区预报得到明显改善。同化了 VAD 风廓线资料后各方案都报出了 10 mm 以上的降水中心,其中以方案 6 和方案 7 的改善最为显著,基本上预报出了 10~25 mm 的暴雨区域。不足的是,暴雨区域的位置稍偏西一些,雨量较实况略偏小。总体来看,同化 VAD 风廓线后对 6 h 强降水预报的改善较为明显。

另外,通过对比各试验方案的 6 h 降水预报结果还可以发现,同化间隔为 1 h 的方案要比同化间隔分别为 3 h 和 6 h 的效果要明显。在图 4 中,同化

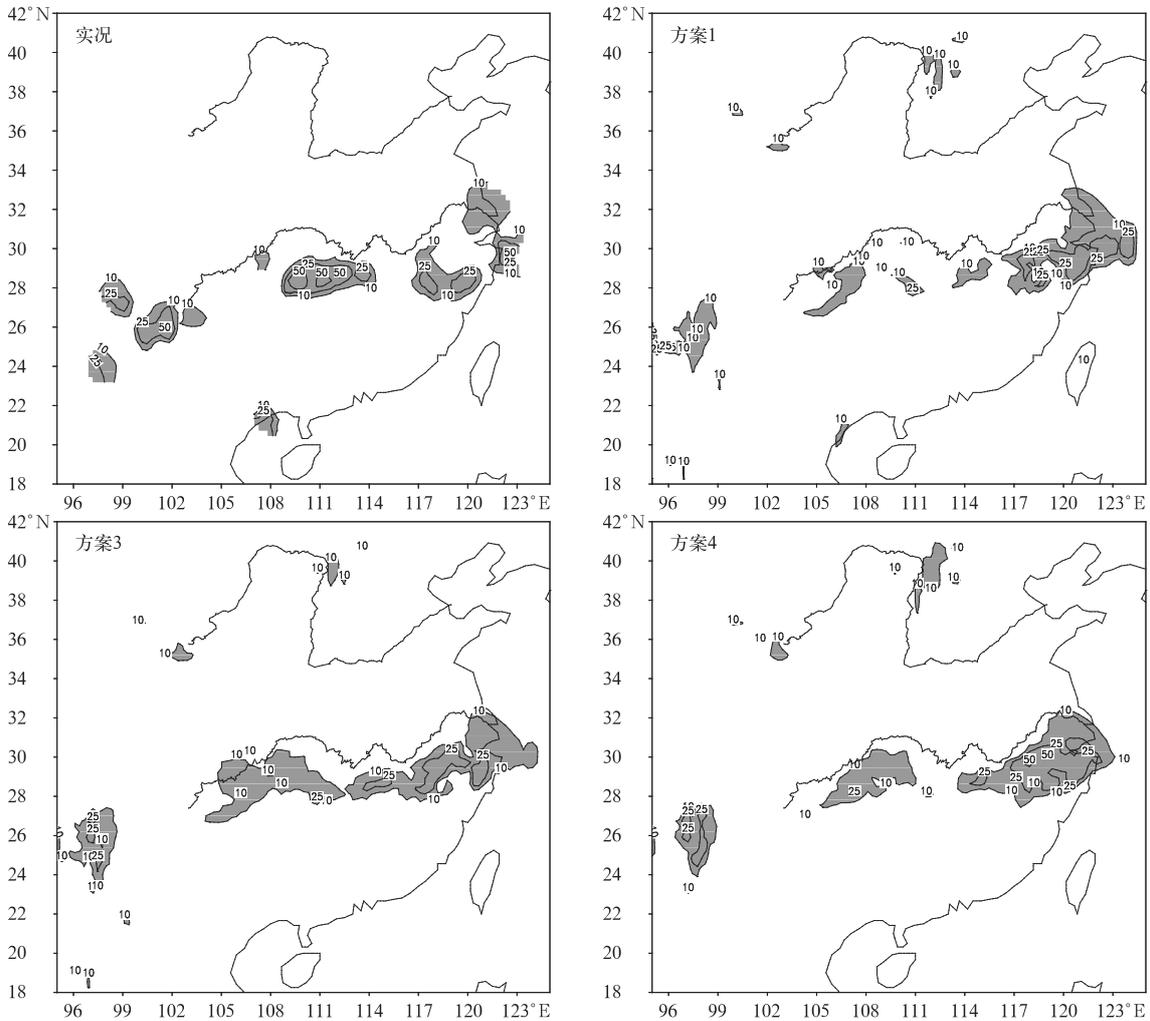
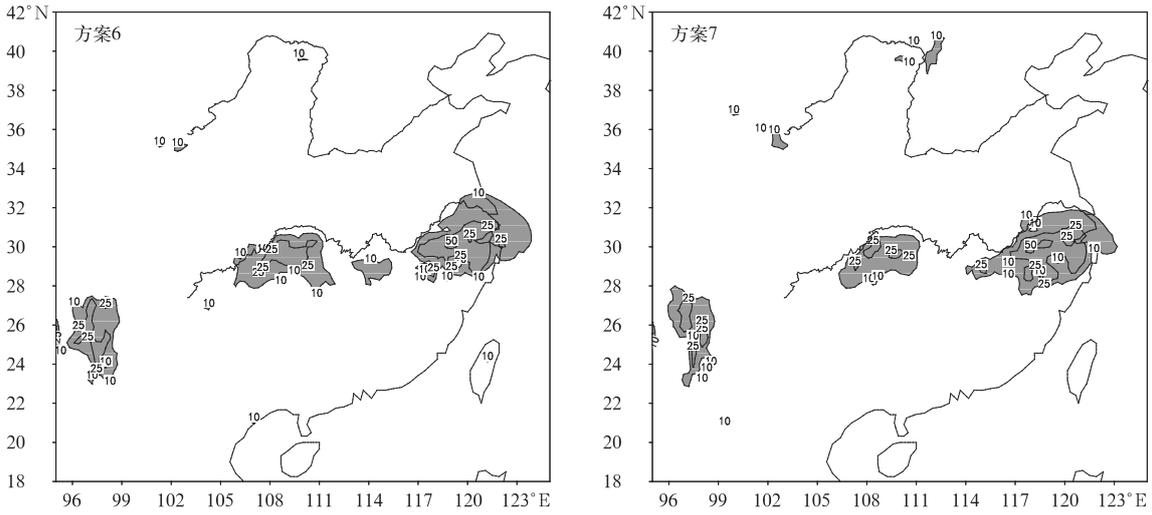


图 4 2002 年 6 月 27 日 18:00—28 日 00:00 降水量实况与预报结果(单位:mm)

Fig. 4 The observed and predicted rainfall from 18:00 on June 27 to 00:00 on June 28, 2002 (unit: mm)



续图 4

间隔为 1 h 的方案(方案 6 和方案 7)对短时强降水预报的改善明显优于同化间隔为 3 h 的方案(方案 3 和方案 4)。同化间隔为 3 h 的方案只报出了 10 mm 的雨区且位置较实况偏西。同化间隔为 1 h 的方案预报出了 25 mm 的暴雨中心,且暴雨区域的位置和分布与实况更接近。对于不同的同化窗口,3 h 同化窗口的方案要优于 6 h 同化窗口的方案。对比方案 3 和方案 4 可以看出,6 h 同化窗口的方案(方案 4)预报的雨区较实况略偏西。虽然 3 h 同化窗口的方案(方案 3)雨区范围较大,有部分空报,但在实况发生强降水的区域都报了 10 mm 以上的降水,要略好于 6 h 同化窗口的方案。对比方案 6 和方案 7 也可以看出,虽然 6 h 预报两者都报出了 10~25

mm 的暴雨区域。但对大于 25 mm 的预报区域 3 h 同化窗口的方案(方案 6)要优于 6 h 同化窗口的方案(方案 7)。

图 5 分别给出了 24 h 降水实况(图 5a)、不同同化雷达资料的 24 h 降水预报(图 5b)和同化初始时刻雷达资料的 24 h 降水预报(图 5c)。从 24 h 降水实况图上可以看出,此次降水主要发生在长江以南,从贵州中部到浙江沿海为一条准东西向的大雨带。由于实况观测是一个离散场,所以在图形上表现得不是很连续。从 24 h 降水预报看,同化后预报的方案(图 5c)要好于直接用 T213 预报场作为初始场的方案(图 5b)。直接用 T213 预报场作为初始场的方案预报的雨带很短,预报出了江西、浙江的大、暴雨,但

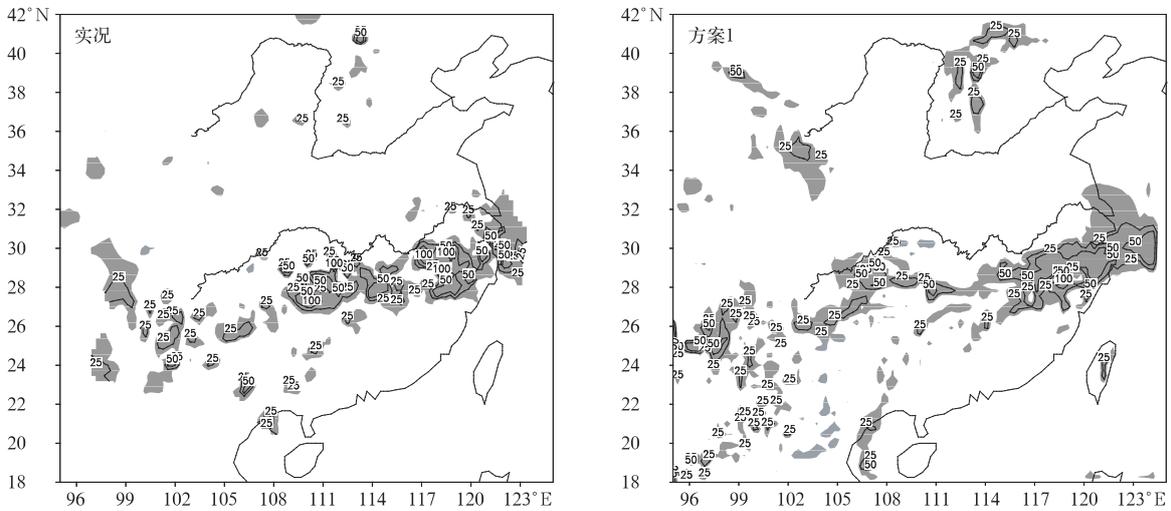
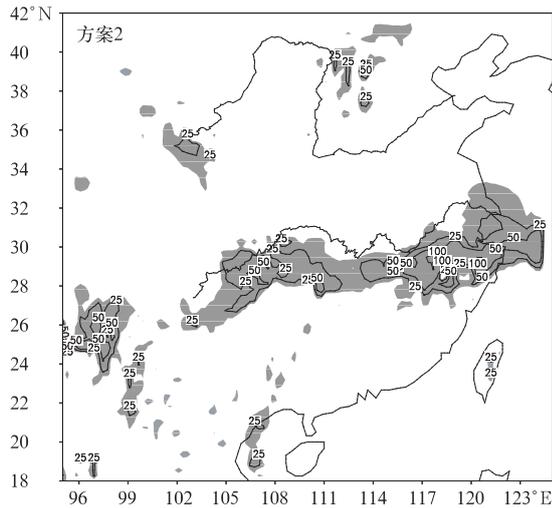


图 5 2002 年 6 月 27 日 12:00—28 日 12:00 降水量实况与预报结果(单位:mm)

Fig. 5 The observed and predicted rainfall from 12:00 on June 27 to 12:00 on June 28, 2002 (unit: mm)



续图 5

湖南以西的大、暴雨几乎没有预报出来。同化后的预报方案(图 5c)预报出了整条雨带,雨带的位置和实况比较接近,基本预报出湖南以西的大、暴雨中心。不足的是雨带较实况偏强,在四川东南部和重庆一带有空报。另外,无论同化与否,24 h 降水预报在华东地区均偏强,有一定的空报情况。总体而言,同化初始时刻雷达资料 24 h 降水预报对雨带的位置和强度均有改善。

3 结 论

1) VAD 方法反演的风廓线与探空实况对应较好,再次验证了用 VAD 技术反演风廓线的可行性。由于雷达观测具有较高的时间分辨率,因此 VAD 风廓线资料具有广泛的应用前景。

2) 同化雷达风廓线有助于改善数值模式的初始风场,对降水预报也有不同程度的改善。其中对 6 h 降水预报的改善明显优于对 24 h 降水预报。

3) 对于 6 h 的强降水预报来说,同化间隔为 1 h

的方案降水预报要优于同化间隔为 3 h 和 6 h 的方案,同化窗口为 3 h 的试验方案要好于同化窗口为 6 h 的试验方案。也就是说,对于短时强降水预报同化频率高的预报效果较好,但同化窗口却不宜过长,并不是同化窗口越长预报效果越好。这对雷达风场资料同化的业务化有一定的指导意义。

致 谢: 本文完成过程中得到了中国气象科学研究院张沛源、庄世宇、朱国富等老师的指导和帮助,中国气象科学研究院阮征老师提供了雷达观测资料,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Lhermitte R M, Atlas D. Precipitation Motion by Pulse Doppler radar. Preprints, Ninth Weather Radar Conf, Kansas City, MO, Amer Meteor Soc, 1961: 218-223.
- [2] Browning K A, Wexler R. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J Appl Meteor*, 1968, 7: 105-113.
- [3] 陶祖钰. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAD 方法. *气象学报*, 1992, 50(1): 81-90.
- [4] 陶祖钰. 关于 Doppler 雷达 VAD 技术的讨论. *应用气象学报*, 1995, 6(1): 109-113.
- [5] 姜海燕, 葛润生. 一种新的单多普勒雷达天气反演技术. *应用气象学报*, 1997, 8(2): 219-223.
- [6] 万蓉, 汤达章, 张鹏, 等. 非线性风场的 VAD 分析初探. *气象科学*, 2003, 23(3): 314-323.
- [7] Lindskog M. Development of Doppler Radar Wind Data Assimilation for the HIRLAM 3D-VAR. HIRLAM Technical Report 52, HIRLAM-5 Project, 2002.
- [8] 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数值试验. *应用气象学报*, 2001, 12(4): 489-493.
- [9] 李柏. 多普勒天气雷达资料分析及同化在暴雨中尺度天气系统数值模拟中的应用研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2005.
- [10] 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. *气象学报*, 2005, 63(2): 130-144.
- [11] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2001: 243-247.

The Retrieval and Variational Assimilation Experiment on Wind Profile of Doppler Radar

Li Huahong¹⁾²⁾ Xue Jishan²⁾ Wang Man³⁾ Yang Ming¹⁾

¹⁾ (*Yunan Provincial Meteorological Observatory, Kunming 650034*)

²⁾ (*The State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

³⁾ (*Yunnan Institute of Meteorological Science, Kunming 650034*)

Abstract

The information of wind fields is an important parameter in weather forecast. At present, a great deal of information from CINRAD is not really applied to numerical weather prediction (NWP), domestic studies on the application of wind information from Doppler radar in NWP are not many. In order to apply observational wind data of Doppler radar to numerical weather prediction models better, wind profiles are retrieved from single Doppler radar observation by using VAD method (Velocity Azimuth Display), the VAD method has developed for thirty years and now becomes mature. Further more the wind profile data are processed as the normal form of radiosonde observation to make up the deficiency of radiosonde observation in space-time resolution. And then the retrieved wind data are assimilated by the 3D-VAR system of GRAPES-Meso (Global and Regional Assimilation and Prediction System-Meso) model. With different initial fields a torrential rain occurring in the Changjiang River valley from 1200UTC on June 27, 2005 to 1200UTC on June 28, 2005 is numerically simulated and comparatively analyzed. The results indicate that the retrieved wind profile corresponds to the radiosonde observation profile very closely and accurately reflects the status and location of the wind shears at low levels. The retrieved wind profile not only has higher space-time resolution but also remedies the lack of radiosonde observation in this case. It reflects that using VAD method to retrieve wind profile from single Doppler radar is viable and of advantages. With the assimilation of the retrieved wind profile the initial wind fields of numerical experiments are remarkably improved. In the improved initial wind fields vapor transportation becomes stronger where the observed torrential rain occurs. Moreover, the intensity and areas of forecasted precipitation are improved in some ways. As a whole the amendment of the 6-hour precipitation forecast is better than that of the 24-hour. With assimilated initial fields the numerical experiments successfully simulate a rainfall center of 10—25 mm in the 6-hour forecast, which indicates that using VAD method to retrieve wind profile from single Doppler radar has a prospective future in NWP once more. On the other hand, the contrast analysis of the numerical results indicates that a difference of assimilation frequency and assimilation time window will have a different influence on a short time torrential rain forecast in the numerical assimilation experiments. In this case, the 6-hour rain forecast by assimilating the retrieved wind profile once an hour is better than the forecasts once three hours or once six hours; the 6-hour rain forecast by assimilating the retrieved wind profile for three hours is better than the forecast assimilating for six hours. That is to say, a higher assimilation frequency of retrieved wind data will lead to a better forecast, but a longer assimilation time not always leads to a better simulated result in NWP, which has a valuable guidance effect on the assimilation operation of wind data from Doppler radar.

Key words: Doppler radar; retrieval of wind profile; variational assimilation; GRAPES-Meso model