

多普勒雷达估算降水和反演风在不同初值方案下对降水预报影响的数值研究^{*}

王叶红¹ 赵玉春² 崔春光¹

1 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉, 430074

2 武汉中心气象台, 武汉, 430074

摘 要

基于有限区域中尺度暴雨预报模式 AREM, 利用常德、荆州、宜昌 3 部多普勒雷达及武汉数字化天气雷达联合反演的 1 h 降水量资料和宜昌、荆州多普勒雷达反演的水平风场资料, 采用 3 种不同的初值方案: Grapes-3DVAR 同化方案、Barnes 客观分析及 Barnes-3DVAR 同化方案, 对 2002 年 7 月 22 日 20:00—23 日 20:00 发生在长江流域的一次大暴雨过程进行了多普勒雷达估算降水和反演风场在不同初值方案下对降水预报影响的数值试验, 结果表明: (1) 采用相同资料源(探空 + T213L31 分析场), 3 种初值方案降水模拟效果差别显著。整体而言, 融合了 Barnes 和 3DVAR 两种方案的 Barnes-3DVAR 初值方案降水模拟效果最好: 雨带模拟完整, 位置与实况完全一致; 降水中心中尺度结构清晰, 位置、强度与实况接近。(2) Barnes-3DVAR 同化方案与 Grapes-3DVAR 同化方案都能同化雷达降水和风场资料, 但两者降水预报结果相差很大。Barnes-3DVAR 方案下的降水模拟结果明显好于 Grapes-3DVAR 同化方案。(3) Grapes-3DVAR 同化方案下, 在控制试验的基础上增加雷达降水资料的同化, 24 h 降水模拟效果有所改善; 增加雷达风场资料的同化, 仅部分改善模拟效果, 某些地方效果反而变差; 同时增加雷达降水和风场资料的同化, 降水模拟效果反而明显变差。Barnes-3DVAR 同化方案则不然, 无论雷达降水资料和风场资料单独同化还是两种资料同时同化, 降水模拟效果都有不同程度的改进, 特别是对雷达降水和风场资料同时同化的模拟结果是各种试验中效果最好的。(4) 融合 Barnes 客观分析方法和 Grapes-3DVAR 同化方案的 Barnes-3DVAR 同化方案, 是同化雷达降水和风场资料的一种新的、有效的初值方案。

关键词: 雷达, 估算降水量, 反演风场, 同化, 降水预报。

1 引 言

暴雨是中国主要气象灾害之一, 通常由一系列 β - γ 中尺度的强对流系统所引发^[1]。暴雨预报的手段之一是应用中尺度数值天气预报模式, 而初始场中是否包含正确的中尺度信息是暴雨预报成败的关键。目前用于形成中尺度数值天气预报模式初始场的资料主要是大尺度大气模式提供的背景场和台站探空资料, 由于资料空间分辨率原因, 难以捕捉暴雨系统中的中尺度信息, 也就难以准确预报暴雨。近年来, 随着探测手段的不断丰富和探测技术的不断完善, 我们能够获取的资料源也越来越多, 比如中国

建立的多普勒天气雷达网就已成为重要的中尺度观测网, 除了提供定量降水监测和短时灾害性天气预警之外, 多普勒天气雷达资料以其高密度的时、空分辨率和所包含的丰富的云、降水及风场等的中尺度信息的特性正逐步成为中尺度数值模式的重要资料来源, 而如何充分、有效地将这类资料应用于中尺度数值模式就成了亟待解决的问题。

从 1978 年 Gal-Chen^[2]首次提出将多普勒雷达资料应用到滞弹性模式, 采用热力反演技术由风场产生初始气压场开始, 多普勒雷达资料同化研究在较短的时间内取得了很大进展。国内外的气象学家们发展了一系列技术由单多普勒雷达观测资料反演

^{*} 初稿时间: 2005 年 5 月 19 日; 修改稿时间: 2005 年 8 月 1 日。

资助课题: 湖北省自然科学基金项目(2003ABA009), “十五”国家重点科技攻关计划项目(2001BA607B), 国家 973 项目(2004CB418307)。

作者简介: 王叶红, 女, 1974 年生, 副研究员。主要从事资料同化和中尺度数值模拟研究。E-mail: yehongw@whihr.com.cn

风矢量和温度场^[3-6],这些方法为在数值模式中使用多普勒雷达资料奠定了基础。Shapiro 等^[7]以反演风矢量场的方法为基础,利用多普勒雷达观测资料形成的初始场进行了预报试验,Sun 等^[8-11]利用四维变分方法,结合云模式及其伴随模式,提出了多普勒雷达 4DVAR 同化反演方法,并于 1994 年改良了多普勒雷达四维变分分析系统(4D-VDRAS:four-dimensional variational Doppler radar analysis system),用阵风锋观测资料进行了检验,得到了比较好的效果;Weygandt 等^[12-13]应用单多普勒雷达资料的反演数据对中尺度数值模式初始化,也得到了令人鼓舞的结果。邱崇践等^[14]提出了一种由单多普勒雷达资料反演风矢量的准四维变分分析方法,然后利用 Gal-Chen^[2]提出的热力反演技术由风场产生初始气压场,运用美国风暴分析预报中心(CAPS)的 ARPS 模式对移经美国俄克拉何马州的一个强雷暴系统进行了数值预报试验,结果表明,初始场中引入多普勒雷达观测资料后明显地改进了预报。马清云等^[15]进行了单部多普勒雷达风场反演及其在数值预报中的应用试验,结果表明反演后的水平风应用到中尺度数值模式中,有助于分析和预报时空尺度较小的中尺度系统。王叶红等^[16-17]利用雷达降水资料来调整模式湿度廓线的一维变分同化研究,表明雷达降水资料在数值模式中的应用对强降水预报有明显的改善作用。万齐林等^[18]提出了一个在变分同化系统中直接同化多普勒雷达径向风速和回波强度变化探测信息的方法,并进行了暴雨个例数值试验,取得了良好的效果。

最近几年,在数值预报模式初值形成过程中,同化多普勒雷达信息的研究越来越成为人们关注的焦点,但到目前为止,多普勒雷达观测资料并没有在数值天气预报中得到充分、有效地利用,因此,进行进一步的研究是非常必要的。

2002 年 7 月 22—25 日,在中高纬“两槽一脊”天气尺度系统持续稳定、高空冷槽反复摆动、地面有弱冷空气不断南扩的环流背景下^[19],长江流域出现了一次范围广、强度大、持续时间长的连续性暴雨过程。宜昌、常德 S 波段和荆州车载式 C 波段多普勒天气雷达对这次暴雨过程进行了每 6 min 一次立体扫描的跟踪观测,取得了大量的探测数据。肖艳姣等^[20]对上述 3 部多普勒天气雷达和武汉 WSR-81S 测雨雷达的反射率进行拼图并反演出 1 h 地面降水

量,另外,有人^[21]应用 VVP 方法进行了单多普勒雷达三维风场反演,研究结果表明这次暴雨过程是在有利的大尺度环流背景下,由 α 中尺度切变线上的几个 β 中尺度系统直接导致的。本文利用这些反演的雷达降水和风场资料,对 2002 年 7 月 22 日 20 时—23 日 20 时(北京时,下同)的这场暴雨过程进行了三维变分同化研究,并探讨了雷达估算降水和反演风场在 3 种不同初值方案下对降水数值预报的不同影响。

2 7 月 22 日暴雨过程概况

2002 年 7 月 22 日 20 时,500 hPa 欧亚中高纬大气环流呈稳定的“两槽一脊”型,即乌拉尔山东侧和华北地区各有一低压槽,贝加尔湖地区高压脊呈明显的阻塞形势,西太平洋副热带高压(副高)表现为东北—西南向且稳定少动,副高主体偏东偏北,长江中下游处于两高之间的宽阔槽区,贝加尔湖高压脊前不断有短波槽东移影响长江中下游地区(图 1)^[22]。暴雨是在上述有利的大尺度环流背景下,由各种天气系统相互作用而造成的^[1]。

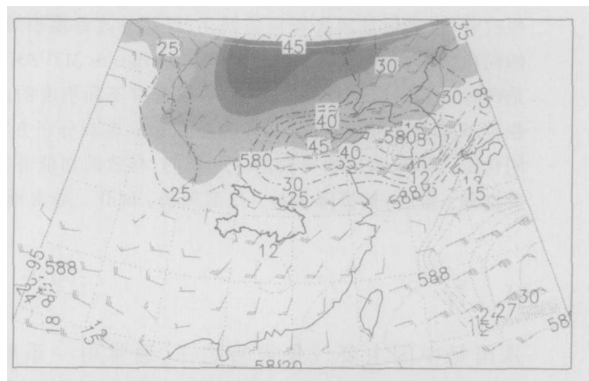


图 1 2002 年 7 月 22 日 20 时天气尺度系统与物理量的综合示意图

(图中阴影区为 500 hPa $T \leq -6$ 区域,虚线为 200 hPa $|V| \geq 25$ m/s 全风速,点线为 850 hPa $|V| \geq 12$ m/s 全风速,实线 588 为副高特征线,580 表示 500 hPa 槽的位置,风标表示 700 hPa 风场)

Fig. 1 Synoptic scale systems and overlaid physical variables at 20:00BST 22 July 2002

(the shading denotes the $T \leq -6$ area at 500 hPa, the dashed line the absolute velocity $|V| \geq 25$ m/s at 200 hPa, the dotted line the absolute velocity $|V| \geq 12$ m/s at 850 hPa, the solid 588 line the characteristic line of the subtropical high, the 580 line the position of 500 hPa troughs and the barbed arrow the wind at 700 hPa)

在上述有利的大尺度环流背景下,7月22日20时—23日20时湘-黔交界地带、湘-鄂交界地带、鄂-豫-皖交界地带及苏-皖交界地带普降暴雨,其中大悟等20多个观测站24 h降水量超过100 mm(图2),大悟24 h雨量为192.4 mm,最大雨强为23.2 mm/h。从降水分布来看,整个雨带在思南-沅陵-荆州-大悟-颖上-蚌埠-淮阴县一带,雨带表现为狭长的东北—西南走向,雨带上分布有十几个强降水中心,中心位于思南、沅陵、澧县、荆州、广水、大悟、颖上、蚌埠、淮阴县、射阳等测站附近。整个雨带上最强降水集中分布在中段,大暴雨主要集中在鄂-豫-皖交界地带,其次在湘-鄂交界地带,分布有6个大暴雨中心,分别位于大悟、颖上、广水、蚌埠、沅陵、荆州,雨团空间尺度很小,表现出典型的 β 中尺度结构。此外,在东北—西南向狭长主雨带之外,在河南省中部地区有零散的降水中心存在,其降水范围不大,中心强度为45 mm。

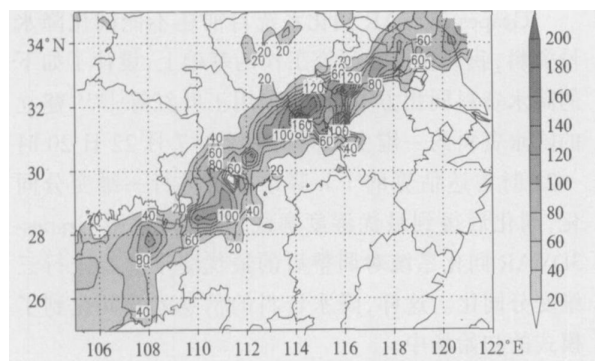


图2 2002年7月22日20时—23日20时24 h降水(等值线间隔为20 mm)

Fig. 2 24 h rainfall observed at 20:00BST 23 July 2002(the contour interval is 20 mm)

雨带上的7个大暴雨中心,仅获取到大悟、荆州和沅陵3个观测站的加密雨量资料,分析逐小时雨量演变(图3)可见,3个降水中心表现出不同的降水特征:大悟站呈3个雨峰分布形态,降水持续时间长;荆州站呈单雨峰分布,降水集中在23日00时—08时,其最大雨强为39.8 mm/h,出现在23日03时;与荆州站相反,沅陵站发生降水的时段恰在荆州站降水间歇的时段,即沅陵站降水主要发生在23日00时之前和23日08时之后这两个时段内。

3 中尺度数值模式和初值分析系统

3.1 中尺度数值模式

文中采用中国科学院大气物理研究所宇如

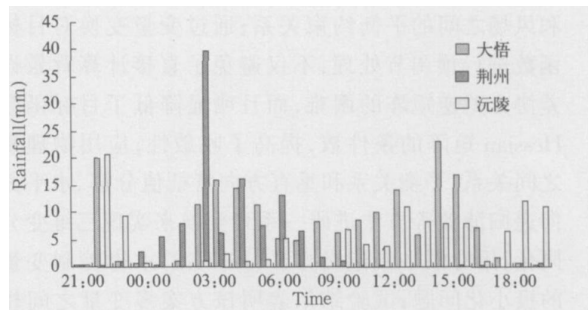


图3 2002年7月22日20时—23日20时大悟、荆州、沅陵逐小时雨量演变

Fig. 3 Hourly rainfall observed at Dawu, Jingzhou and Yuanling in the 24 h started from 20:00 BST 22 July 2002

聪等^[23-24]设计并经过改进的中尺度有限区域数值模式(AREM)。模式垂直为 η 坐标,变量的水平分布采用E网格,水平分辨率平均约37 km,垂直方向等距分为28层,模式顶为50 hPa。模式的物理过程包括非局地边界层、水平扩散、大尺度凝结降水及Betts对流参数化调整方案,用地面热平衡方程预报地面温度,考虑了地面对长、短波辐射的能量收支以及地面的感热、潜热通量输送。水汽平流计算采用保形正定平流差分。侧边界为固定边界。积分范围为15°—55°N, 85°—135°E,经纬度格距为0.5°×0.25°,积分步长设为150 s。

3.2 模式初值分析系统

3.2.1 三维变分同化系统

三维变分同化分析系统采用中国气象科学研究院数值预报研究中心研究开发的Grapes3dvar^[25]同化系统,它把同化归结为如下目标函数的极小化问题:

$$J(X) = \frac{1}{2}(X - X^b)^T B^{-1}(X - X^b) + \frac{1}{2}(H(X) - y^o)^T O^{-1}(H(X) - y^o)$$

其中, X 是分析变量, X^b 是背景场, y^o 是观测场, H 是观测算子,它代表模式空间向观测空间的一种映射; B^{-1} 是背景误差协方差矩阵的逆, O^{-1} 是观测误差协方差矩阵的逆,上标T表示矩阵转置。

Grapes3dvar同化系统是一个水平面上为A格点,垂直方向上为p面的分析系统,其主要特点为^[25]:目标函数采用增量形式;模式变量和分析变量分离,采用相互独立的流函数、非平衡速度势函数、非平衡位势和水汽作为分析变量,考虑了质量场

和风场之间的平衡约束关系;通过变量变换对目标函数进行预调节处理,不仅避免了直接计算背景误差协方差逆矩阵的困难,而且明显降低了目标函数 Hessian 矩阵的条件数,提高了收敛性;应用物理量之间关系、平衡关系和垂直方向特征值分解、水平方向递归滤波等方法进行一系列变换来实现三维变分同化;用有限牛顿记忆方法(LBFGS)求得控制变量的极小化问题;试验结果表明该方案多变量之间相互作用关系合理,收敛迅速。

3.2.2 Barnes 客观分析系统

徐幼平等^[24]从逐步订正方法的基本原理出发,设计了一套气象场客观分析方案:改进的 Barnes 客观分析方案。该方案的特点主要为:以全球中期数值预报场为背景场,充分利用全球四维同化和模式预报所提供的气象场信息;采用 Gauss 距离权重函数作为客观分析的权重函数,使分析场能较好地反映气象系统的中尺度特征;考虑风场和位势高度场的相互制约关系,使风场和位势高度场的分析更为协调;采用以测站为中心的扫描方法,提高客观分析的计算速度等等。Barnes 方法的优点在于,权重函数与临界扫描半径无关,而仅由尺度响应参数 K 决定;它的基本特性可通过对其响应函数分析确定;分析的迭代次数可减小到两步,并且分析过程中不需对气象场进行平滑,方法本身具有低通滤波性质;这种方法可适用于对不同类型资料的客观分析。

3.2.3 Barnes-3DVAR 同化系统

根据 Barnes 客观分析方法和 Grapes-3DVAR 同化系统的特点,设计了一种融合两种方案的新的初值方案:Barnes-3DVAR 初值分析方案。该方案是以 Grapes-3DVAR 三维变分同化系统进行同化后得到的分析场作为背景场,以探空资料为观测场,采用 Barnes 方法进行初始化得到最优的分析场作为模式的初始场。

4 资料及预处理

研究中使用的观测资料包括 2002 年 7 月 22 日 20 时地面资料、无线电探空资料,宜昌、常德、荆州多普勒雷达和武汉数字化天气雷达反射率资料以及荆州和宜昌多普勒雷达径向风场资料。此外,还用到国家气象中心全球中期模式 T213L31 的 2002 年 7 月 22 日 20 时分析场资料,作为三维变分同化分析的初始背景场。T213L31 资料的水平分辨率为

$1^\circ \times 1^\circ$,垂直方向分 14 层,为 1000,925,850,700,600,500,400,300,250,200,150,100,70,50 hPa 标准气压层。研究中使用的雨量实况资料包括 7 月 22 日 20 时—23 日 20 时常规地面雨量站观测的每 6 h 降水量资料及“973”(中国暴雨)项目在湖北、湖南每 1 h 的加密观测雨量资料。

4.1 多普勒雷达估算 1 h 降水量

宜昌、常德 S 波段和荆州车载式 C 波段多普勒天气雷达对这次暴雨过程进行了每 6 min 一次立体扫描的跟踪观测,取得了大量的探测数据。首先对比分析上述 3 部多普勒天气雷达以及武汉 WSR-81S 测雨雷达在观测同一降水云体时,其回波强度存在的差异;然后在对上述 4 部雷达反射率因子进行拼图时加以订正,并反演出 1 h 地面降水量;最后经湖北、湖南两省逐时加密观测雨量站采用变分法^[26]进行校准,得到 4 部雷达联合反演并经校准的 1 h 地面降水量。

Grapes-3DVAR 同化系统目前还不能同化降水量资料,我们在前期研究工作的基础上,设计了如下的降水资料同化方案:首先采用王叶红等^[16-17]建立的降水资料的一维变分同化系统对 7 月 22 日 20 时—21 时雷达估算的 1 h 降水量场进行一维变分同化,同化后得到最优湿度廓线,然后再采用 Grapes-3DVAR 同化系统对调整后的最优湿度廓线进行三维变分同化。这样,降水资料的信息就被同化到了模式的初始场中。

4.2 多普勒雷达反演三维风场

我们只获取到了荆州和宜昌多普勒天气雷达对此次暴雨过程探测的径向风场资料。在进行三维变分同化前,首先将 2002 年 7 月 22 日 20 时荆州、宜昌多普勒雷达径向风资料采用改进的 VVP 方法^[27]进行三维风场反演,扫描半径为 120 km,水平和垂直分辨率均为 1 km。得到不同高度上的三维风场。将不同高度上的反演风与径向风速度分布进行了对比分析(图略),结果表明两者是非常协调的,说明应用 VVP 方法反演的水平风场基本上能反映实际环境风场的平均特征^[21]。文献[21]用 2002 年 7 月 22 日宜昌和荆州的双多普勒雷达反演的风场结果对 2 种单多普勒雷达反演方法:VVP 方法和简单共轭方法进行了对比,结果表明几种反演方法虽有不同,但均能揭示出风场的基本结构及其演变规律。

采用 VVP 方法进行三维风场反演后,得到的

是等高面上雷达直角坐标下的 u, v, w , 而 Grapes-3dvar 同化系统同化的是等压面上经纬度坐标下的水平风, 因此, 需对反演后的风场资料进行坐标转换: 首先将雷达直角坐标转换为经纬度坐标^[28], 然后, 根据探空观测的高度、气压以及反演风的高度,

采用双线性插值得到等压面上经纬度坐标下的水平风场值。图 4a, b 风矢所示分别为宜昌和荆州多普勒雷达反演的 700 hPa 水平风矢量图, 绘图时, 为清楚起见将资料的空间密度进行了粗化。风标所示为探空风, 在图 4 给定的范围内, 仅有两个探空测站:

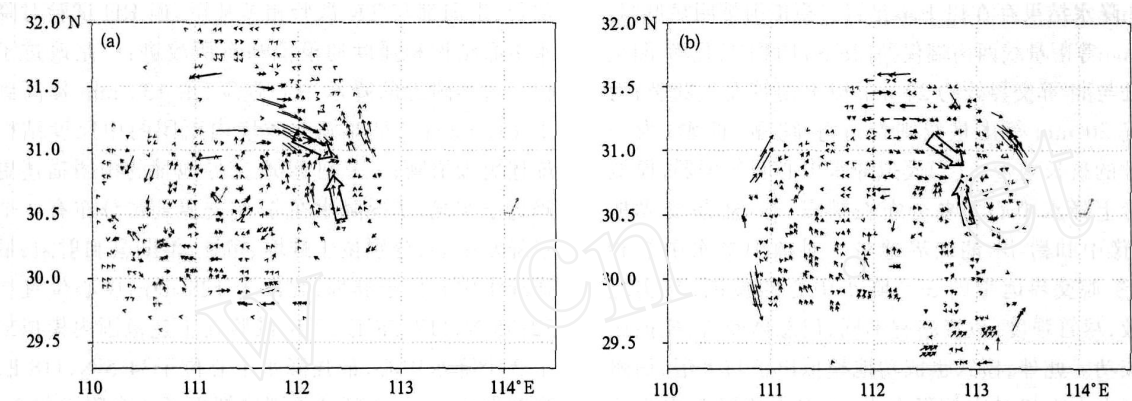


图 4 宜昌(a)和荆州(b)多普勒雷达反演 700 hPa 水平风场(风矢)和探空测风(风标)
Fig. 4 700 hPa winds retrieved from the Yichang (a) and Jingzhou (b) Doppler radar data (vectors) and observed by radiosoundings (barbed arrows) at 20:00 BST 22 July 2002

宜昌站和武汉站。由图 4 可见, 两部雷达反演的水平风(风矢)均与探空观测的 700 hPa 风(风标)的风向、风速非常协调, 并且在两部雷达的覆盖区域, 分别用两部雷达资料反演出来的风向、风速也基本一致, 说明应用 VVP 方法反演的水平风场能揭示出风场的基本结构。而雷达反演的水平风场更提供了探空观测所无法提供的精细的中尺度结构风场信息, 如宜昌和荆州雷达均在湖北省江汉平原地区反演了一

条明显的近于东西向的风速不连续线——切变线。

5 三维变分同化数值试验

5.1 试验设计

低层辐合和水汽对降水的发生、发展有重要影响, 为了考察多普勒雷达降水和风场资料同化的单独影响及其相互作用, 三维变分资料同化试验设计如下(表 1)。

表 1 多普勒雷达降水和风场资料同化数值试验方案
Table 1 Assimilation schemes for Doppler radar-estimated precipitation and retrieved winds

初值方案	试验名称	观测场	背景场
Grapes-3DVAR	TK	探空资料	T213L31 分析场
	RH	探空资料+雷达估算降水	
	RW	探空资料+雷达风场	
	RH&RW	探空资料+雷达估算降水+雷达风场	
Barnes	B-T213	探空资料	T213L31 分析场
Barnes-3DVAR	B-TK	探空资料	TK 试验分析场
	B-RH		RH 试验分析场
	B-RW		RW 试验分析场
	B-RH&RW		RH&RW 试验分析场

三维变分同化试验采用的初值方案为 Grapes-3DVAR 同化系统, 试验因同化观测资料种类的不同而分为 4 种方案: (1) 观测场为 7 月 22 日 20:00 探空资料(TK 试验); (2) 观测场为 7 月 22 日 20 时探空和多普勒雷达估算降水(RH 试验); (3) 观测场为 7 月 22 日 20 时探空和多普勒雷达反演水平风(RW 试验); (4) 观测场

为 7 月 22 日 20 时探空、多普勒雷达估算降水和反演水平风(RH&RW 试验)。4 种方案的背景场均为 7 月 22 日 20 时 T213L31 模式分析场资料。

5.2 24 h 降水预报结果分析

图 5 是对不同类型的观测资料进行三维变分同化, 得到的分析场作为 22 日 20:00 初始场模拟的 7

月 22 日 20:00—23 日 20:00 24 h 降水量,可见仅对探空资料进行三维变分同化的 TK 试验,在湖北、河南、安徽及江苏与山东交界处模拟出了一条东北—西南走向的狭窄雨带,模拟的强降水主要集中在鄂东及鲁南(图 5a)。与实况相比,TK 试验模拟的 24 h 降水结果存在以下不足:(1)模拟雨带明显偏弱,20 mm 等雨量线西南端仅到(28°N,108°E),且黔-湘交界处与湘-鄂交界处的 20 mm 以上雨带发生断裂;而实况 20 mm 等雨量线则经过苏-皖-鄂-湘-黔,为一连续的狭长雨带。(2)模拟降水中心明显偏弱,模拟雨带上降水中心主要分布在鄂东、苏-豫-皖交界地带、豫中和黔-川-湘交界地带。对豫中降水中心和苏-豫-皖交界地带的 3 个降水中心的模拟,与实况相比,尽管强度、位置略有不同,但总体而言,模拟比较成功。此外,模式也成功地模拟出了与大悟、荆州强降水中心相对应的降水中心,对大悟降水中心位置模拟得很好,但强度略偏弱,为 132 mm(实况为 192.4 mm)。模式模拟最不成功之处在于对湘-鄂交界地带和贵州境内雨带的刻画。(3)模拟雨带位置与实况有所差异,雨带位置比实况偏向东北方,也即模拟的雨带经向度比实况大。

图 5b 是对探空资料和雷达降水资料同时进行三维变分同化的降水模拟结果(RH 试验),也即在 TK 试验的基础上增加了对雷达降水资料的同化。对比 TK 试验和 RH 试验,可见在初始场中增加了雷达降水资料的信息后,RH 试验模拟的雨带形态、位置、走向都与 TK 试验相差甚微,但 RH 试验对降水中心结构和强度的模拟却有所改进:一是改进了位于大悟附近的降水中心强度,由 132 mm 提高到了 151 mm;二是对湖北省境内雨团的中尺度结构描述更加清晰;三是对苏-皖交界地带的雨团描述更趋近于实况,实况降水在苏-皖交界地带分布有 4 个强降水中心,分别位于蚌埠、宿迁、淮阴县和射阳,最强降水中心位于蚌埠,强度为 128 mm,中心位置在 32.95°N,117.38°E。TK 试验在上述范围内模拟出了 3 个降水中心,最强降水中心位于 34.5°N,118°E,强度为 148 mm;RH 试验则模拟出了 4 个降水中心,最强降水中心位于 34°N,117.5°E,强度为 112 mm,降水中心强度、位置都更接近于实况。从以上分析可见,RH 试验在 TK 试验的基础上增加了对雷达降水资料的同化后,对 24 h 降水模拟结果产生了重要的积极影响。

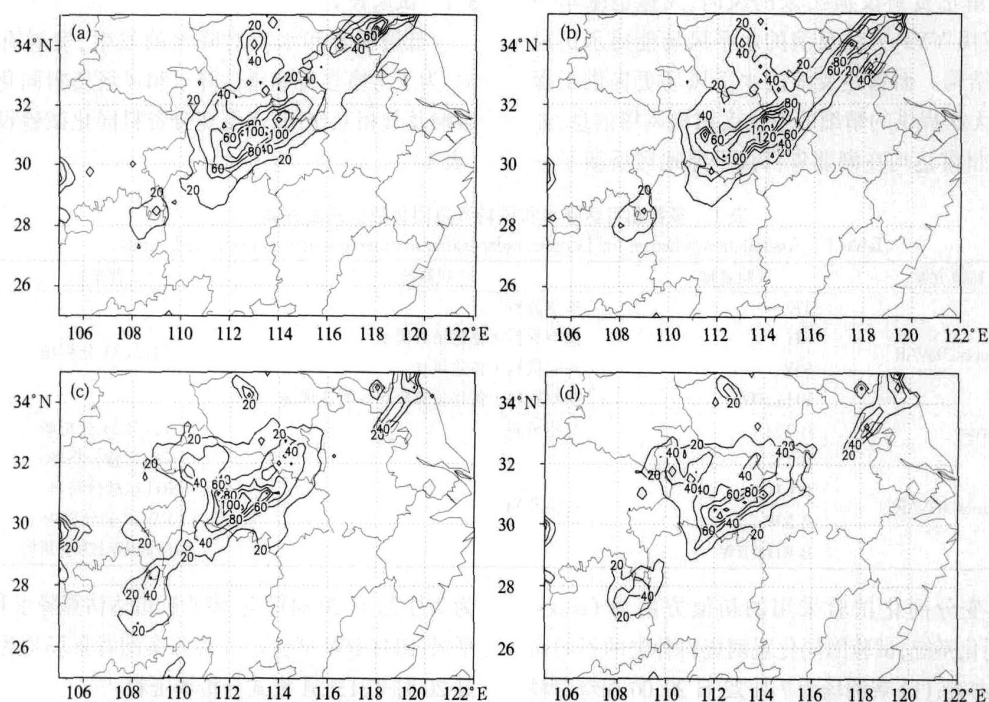


图 5 三维变分同化试验模拟的 2002 年 7 月 22 日 20 时—23 日 20 时降水

(a. TK 试验, b. RH 试验, c. RW 试验, d. RH&RW 试验, 单位: mm)

Fig. 5 Rainfall (units: mm) simulated in the three dimensional variational assimilation experiments of TK (a), RH (b), RW (c) and RH&RW (d) in the 24 hour started from 20:00BST 22 July 2002

图 5c 是对探空资料和雷达风场资料同时进行三维变分同化的降水模拟结果(RW 试验),也即在 TK 试验的基础上增加了对雷达风场资料的同化,对比 TK 试验与 RW 试验,可见在初始场中增加了雷达风场资料的信息后,雨带形态发生了变化,雨带已不呈明显的带状分布,其对湖北省内的降水和苏皖交界处的降水模拟效果明显变差了。注意到,尽管把雷达风场资料同化到初始场中后对雨带的模拟效果总体而言变差了,但也有部分地方得到了改善:其一是豫中的降水是一个强度较弱的孤立雨团,而在 TK 和 RH 试验中,对此处降水的模拟都与主雨带连在了一起,强度也偏强,但在 RW 试验中,模拟出了豫中的孤立雨团结构;其二是改进了对于黔湘交界处的降水模拟,降水有所增强。

图 5d 是对探空资料、雷达降水资料和雷达风场资料同时进行三维变分同化的降水模拟结果(RH & RW 试验),也即在 TK 试验的基础上增加了对雷达降水和风场资料的同化,对比 RH & RW 与上述 3 个试验,可见该试验模拟效果最差,主雨带断裂成 3 部分,强度明显偏弱。

5.3 6 h 降水预报差值结果分析

以 TK 试验为控制试验,分别考察不同时段 RH, RW 以及 RH & RW 试验减 TK 试验的降水预报差值场,可以了解增加雷达降水场和风场同化后对降水预报的影响。

考察了各试验与 TK 试验在模式积分 0—6 小时,6—12 小时,12—18 小时及 18—24 小时这 4 个时段内的降水差值场(图略)后,发现:

(1) 在 Grapes-3DVAR 三维变分同化方案中,单独增加雷达降水场、风场或同时增加雷达降水场和风场的同化,都对每 6 h 的降水预报场产生了显著影响。RH, RW 以及 RH & RW 试验 18—24 小时降水差值范围分别为: - 50—60 mm, - 80—30 mm 及 - 90—40 mm,说明雷达降水场和风场三维变分同化后对 18—24 小时的降水场仍有显著影响;

(2) 在 Grapes-3DVAR 三维变分同化方案中,降水模拟初期 RH 试验与 RW 试验对 6 h 降水场影响不一致;随着模式积分时间的增长,两者影响逐渐一致。

6 Barnes 客观分析数值试验

6.1 试验设计

设计的 B-T213 试验方案如下(表 1),初值方案

为 Barnes 客观分析方法,观测场为 22 日 20 小时探空资料,背景场为 22 日 20 小时 T213L31 分析场。对比 B-T213 试验和 TK 试验可见,两个试验采用的资料源完全相同,所不同的仅在于 B-T213 试验选用的初值方案为 Barnes 客观分析法,而 TK 试验的初值方案为 Grapes-3DVAR 同化方案。

6.2 24 h 降水预报结果分析

图 6 是 B-T213 试验模拟的 24 h 雨量分布。可见试验模拟出了经过苏-皖-鄂-湘-黔的一条东北—西南走向的狭长雨带,模拟的最强降水中心位于大悟附近,强度为 225 mm,与实况非常接近。总体而言,Barnes 方案成功地模拟出了整条雨带,其整体雨带的形状、位置、强度均与实况比较接近。仔细分析雨带的细节,可以发现,Barnes 方案对雨带的模拟也存在着以下不足:(1) 整条雨带略偏北;(2) 苏-皖交界处降水中心的模拟与实况有差别,有些降水中心未能模拟出来;(3) 豫中的雨团没有模拟出来。对比分析 TK 试验,可见三维变分同化方案恰在以上几个方面模拟得较好:TK 试验模拟的雨带位置与实况一致,并且模拟出了豫中的降水中心,对苏-皖交界处的几个降水中心的描述也较成功,模拟出了雨团的中尺度结构。但 TK 试验明显不足之处是没能模拟出完整的雨带。

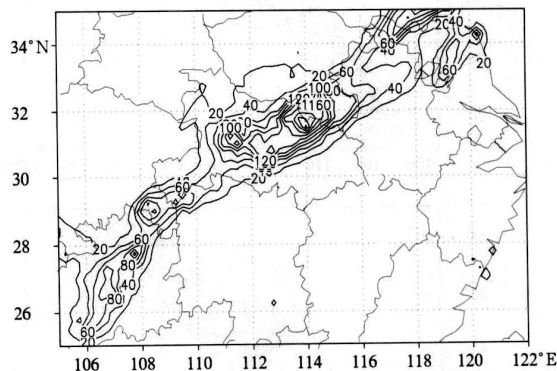


图 6 B-T213 试验模拟的 2002 年 7 月 22 日 20:00—23 日 20:00 降水(单位:mm)

Fig. 6 Rainfall (units: mm) simulated in the 24 h started from 20:00 BST 22 July 2002 in the B-T213 experiment

对比分析后可见,Barnes 方案和三维变分同化方案各有优缺,对该个例从整体而言,Barnes 方案的模拟效果更好些,这也从侧面反映了 AREM 模式是

有能力预报出这类大范围的强降水的。既然两个方案各有优缺,我们能否设计出一个新的初值试验方案,融合 Barnes 方案和三维变分同化方案呢?

7 Barnes-3DVAR 方案数值试验

7.1 试验设计

这里定义的 Barnes-3DVAR 初值分析方案,就是以 Grapes-3DVAR 三维变分同化系统进行同化后得到的分析场作为背景场,以探空资料为观测场,采用 Barnes 方法进行初始化得到最优的分析场作为模式的初始场。

Barnes-3DVAR 同化试验采用的初值方案为改进的 Barnes 客观分析方法,试验因背景场不同而分为 4 种方案(表 1):(1)背景场为 TK 试验的分析场(B-TK 试验);(2)背景场为 RH 试验的分析场(B-RH 试验);(3)背景场为 RW 试验的分析场(B-RW 试验);(4)背景场为 RH&RW 试验的分析场(B-RH&RW 试验)。4 种方案的观测场均为 7 月 22 日 20 时探空资料。可见,Barnes-3DVAR 方案较 Barnes 方案最

大的优点在于借助于 Grapes-3DVAR 同化系统,可以将雷达等非常规观测资料信息融合到初始场中。

7.2 24 h 降水预报结果分析

图 7 是对不同类型的观测资料进行 Barnes-3DVAR 同化得到的分析场作为 22 日 20 时初始场模拟的 7 月 22 日 20 时—23 日 20 时 24 h 降水量,可见仅对探空资料进行了 Barnes-3DVAR 同化的试验(图 7a)与 B-T213 试验相比(图 6),尽管两者使用的资料源完全相同,但由于采用的初值方案不同,雨带的模拟已发生了变化。比较而言,Barnes-3DVAR 方案对雨带的改善在于比较明显地修正了雨带的位置,使整条雨带略微南落,与实况一致。对比 TK(图 5a)、B-T213(图 6)和 B-TK(图 7a)试验,可见采用了相同资料源(探空 + T213L31 分析场)的 3 种不同初值方案,模式对雨带的模拟有很大差异:三维变分同化方案下,雨带模拟不完整,但某些中尺度细节能够反映出来;Barnes 方案下,雨带模拟完整,但位置略偏北;Barnes-3DVAR 方案下,雨带模拟完整,且位置与实况一致。

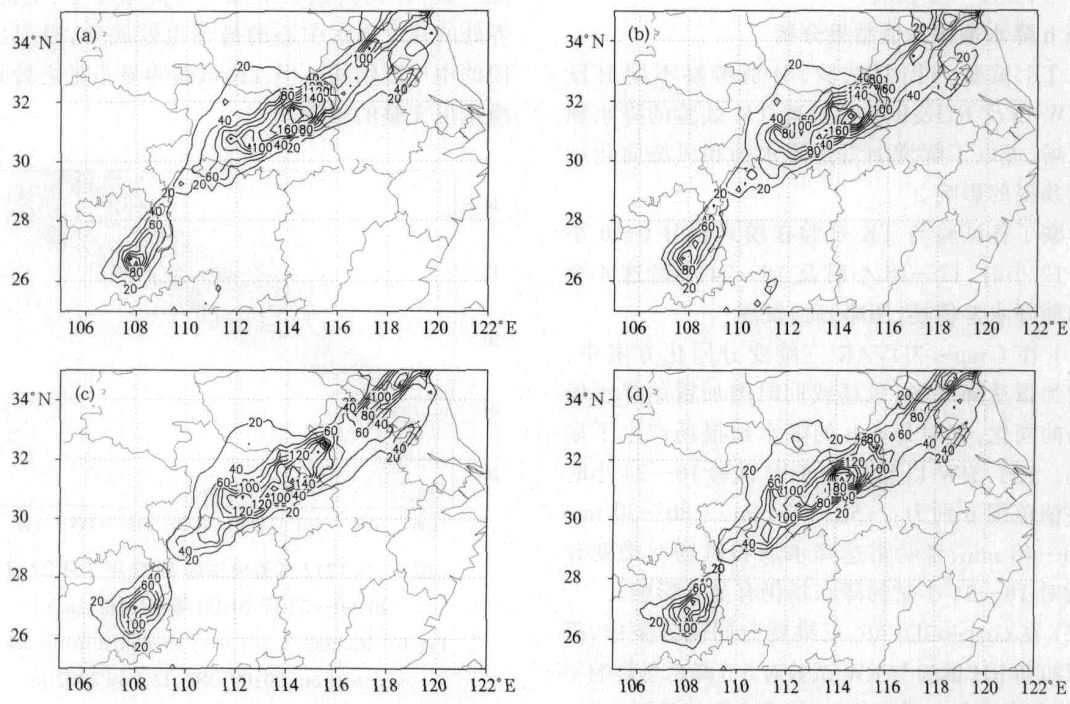


图 7 Barnes-3DVAR 同化试验模式模拟的 2002 年 7 月 22 日 20 时—23 日 20 时降水量

(a. B-TK 试验, b. B-RH 试验, c. B-RW 试验, d. B-RH&RW 试验, 单位:mm)

Fig. 7 Rainfall (units: mm) simulated in the 24 hour started from 20:00BST 22 July 2002 in the Barnes-3DVAR assimilation experiments of B-TK (a), B-RH (b), B-RW (c) and B-RH&RW (d)

采用 Barnes-3DVAR 方案将雷达降水信息与探空资料同时同化到初始场中的 B-RH 试验降水模拟结果(图 7b)表明,加入雷达降水信息后,雨带刻画依然完整,位置与实况一致,同时对雨带改善效果也非常明显,雨带的中尺度结构更加明显,且与实况对应,比如苏-皖交界处模拟出了 3 个降水中心,蚌埠降水中心、湘西北降水中心都模拟出来了。

与 Grapes-3DVAR 变分同化中的 RW 试验和 RW & RH 试验不同,采用 Barnes-3DVAR 方案将雷达风场信息加入到初始场中的 B-RW 试验以及将雷达降水和风场信息都加入到初始场中的 B-RW & RH 试验对整个雨带的描述仍然是比较成功的。同时,与仅同化探空资料相比,对降水中心强度的模拟更接近实况,特别是 B-RW & RH 试验的模拟结果,是所有试验中效果最好的,不仅模拟出与实况走向、位置一致的雨带,而且雨带上仅除未能模拟出沅陵附近的降水中心外,其余几个降水中心均被成功地模拟出来,位置与强度也与实况有较好的对应。

7.3 6 h 降水预报差值结果分析

以 B-TK 试验为控制试验,分别考察 B-RH, B-RW 以及 B-RH & RW 试验减 B-TK 试验的每 6 h 降水预报差值场,了解在 Barnes-3DVAR 方案下,加入雷达降水场和风场同化后对降水场的影响。考察后发现:

(1) 在 Barnes-3DVAR 同化方案中,单独增加

雷达降水场、风场或同时增加雷达降水场和风场的同化,也都能对每 6 h 降水场产生显著影响。B-RH, B-RW 以及 B-RH & RW 试验 18—24 小时降水量差值范围分别为: -40—15 mm, -30—60 mm 及 -25—40 mm,说明雷达降水场和风场同化后对 18—24 小时的降水场仍有显著影响。

(2) 在 Barnes-3DVAR 同化方案中,雷达风场的同化对降水场的影响要明显强于雷达降水场的同化,表现在: B-RW 试验 6 h 降水差值场中正的或负的降水差值中心都多于 B-RH 试验的,且其强度也比 B-RH 试验的大得多(图 8a, b)。0—6 小时, 6—12 小时, 12—18 小时及 18—24 小时降水量差值场均是如此。

(3) 与 Grapes-3DVAR 三维变分同化方案不同,在 Barnes-3DVAR 同化方案中,雷达降水场和风场单独同化或同时同化后对降水场的影响一致,也即如图 8 所示,在 B-RH 试验中是正的或负的降水差值中心(图 8a),那么在 B-RW 试验和 B-RH & RW 试验中相同位置也是相同符号的差值中心(图 8a, b),而不会相反。考察后发现 0—6 小时, 6—12 小时, 12—18 小时及 18—24 小时降水量差值场均是如此,这是非常有意义的。这也从另一个侧面反映了 Barnes-3DVAR 同化方案较 Grapes-3DVAR 方案优越。

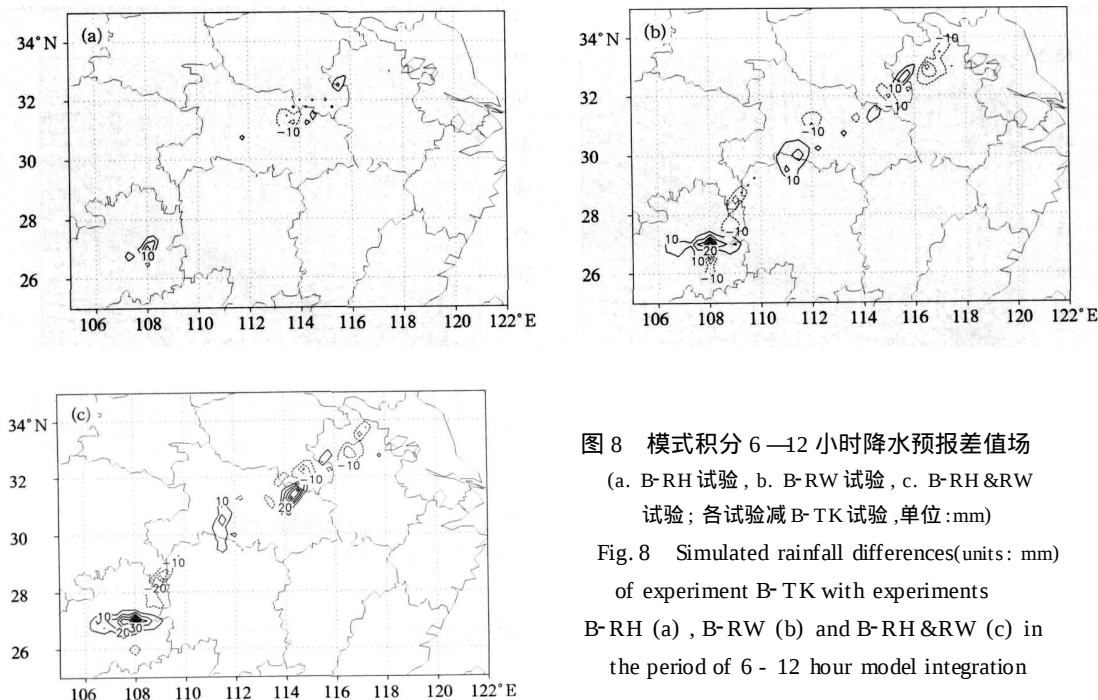


图 8 模式积分 6—12 小时降水预报差值场
(a. B-RH 试验, b. B-RW 试验, c. B-RH & RW 试验; 各试验减 B-TK 试验, 单位: mm)

Fig. 8 Simulated rainfall differences(units: mm) of experiment B-TK with experiments B-RH (a), B-RW (b) and B-RH & RW (c) in the period of 6 - 12 hour model integration

(4) 雷达降水场和风场同时同化,其对降水场的影响不是将两个场单独同化的效果简单线性迭加。如图 8a,b 所示在模式积分 6—12 小时降水差值场中,降水场和风场同化均在大悟附近产生了正的差值中心,但其范围不大,强度也很弱,仅 10 mm。而降水场和风场同时同化则在大悟附近产生了 50 mm 的差值中心(图 8c)。由大悟站逐小时实况雨量演变(图 3)可见,在模式积分 6—12 小时,也即在 2002 年 7 月 23 日 02 时—23 日 08 时期间,大悟站恰好处于第 2 个雨峰。

文中提出和设计的融合了 Grapes-3DVAR 三维变分同化方案及 Barnes 客观分析方法的 Barnes-3DVAR 同化方案,是一种能够同化雷达降水和风场资料的新的初值方案,从降水模拟来看,其效果明显优于 Grapes-3DVAR 三维变分同化方案。我们对 2003 年 7 月 8 日 08 时至 9 日 08 时发生在长江中游的一次特大暴雨过程,进行了同样的试验,结果表明,采用 Grapes-3DVAR 三维变分同化方案对武汉和宜昌多普勒雷达风场进行同化后,模式模拟 24 h 降水结果较好,而采用 Barnes-3DVAR 同化方案对雷达风场进行同化后,24 h 降水模拟效果比前者又有很大改进。说明 Barnes-3DVAR 同化方案对 Grapes-3DVAR 方案的分析场进行修正后,降水预报效果更好。

8 Grapes-3DVAR 与 Barnes-3DVAR 方案对要素场的影响

TK 试验和 B-TK 试验,采用的资料源均为探空资料和 T213L31 模式分析场资料,前者采用的是 Grapes-3DVAR 三维变分同化方案,后者是 Barnes-3DVAR 同化方案,B-TK 试验 24 h 降水模拟明显优于 TK 试验。那么在要素场上,两个试验的差异到底在哪里?

首先对比考察了初始时刻(2002 年 7 月 22 日 20 时)风场、高度场、温度场和水汽场在不同等压面的分布形势。从 700 hPa 风场分布来看(图略),两者差异并不大,具有类似的流场结构:沿着雨带北侧是 3 个闭合的气旋性环流,雨带南侧是范围广、强度大的反气旋性环流。雨带就位于 700 hPa 切变线南侧的西南暖湿气流中。从 500 hPa 形势场分布(图 9)来看,两个试验 500 hPa 欧亚中高纬大气环流呈“两槽一脊”型,乌拉尔山东侧和华北地区各有一低压槽,贝加尔湖地区高压脊呈明显阻塞形势,西太平洋副热带高压呈东北—西南向。对比分析可见,两个试验 500 hPa 形势分析场的差异主要表现在:B-TK 试验里贝加尔湖地区高压有所加强,东北低涡有所加深,此外,对西太平洋副热带高压的分析有所不同,特别是在西太平洋副热带高压南侧,在 TK 试

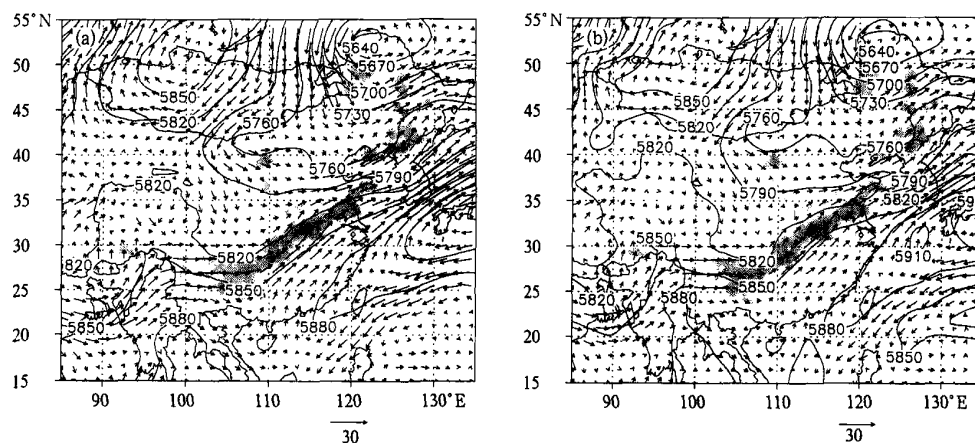


图 9 2002 年 7 月 22 日 20 时 500 hPa 高度场(单位:gpm)和风场(单位:m/s)

(a. TK 试验, b. B-TK 试验; 阴影为 24 h 实况雨量)

Fig. 9 Geopotential height (units: gpm) and wind fields (unit: m/s) at 500 hPa in experiments B-TK (a) and B-TK (b) at 20:00BST 22 July 2002, with the shading indicating the observed 24 hour rainfall

验里,从风场上看,那里是一个气旋性环流,但在高度场上却没有反映(图 9a);而在 B-TK 试验里,则在西太平洋副热带高压南侧与风场相对应的地区分析出了一个低压(图 9b)。从 850 hPa 比湿差值和温度差值(B-TK 试验减 TK 试验)分布来看,沿着实况雨带出现了正的比湿差值中心和正的温度差值场,其最大比湿增量为 1.5 g/kg,最大温度增量为 1.5 (图 10a)。沿 114°E (大悟暴雨中心) 的剖面图(图 10b)上,正的比湿差值场集中分布在暴雨区内,从底层一直到 600 hPa;正的温度差值场则从 900 hPa 到 200 hPa。以上分析表明由 Grapes-3DVAR 方案得到的分析场(TK 试验),再经过 Barnes 客观分析后

(B-TK 试验),初始场已发生了变化,比较显著的变化在于使雨带上空变得更温暖,同时使 500 hPa 中高纬的阻塞高压更强。

接下来考察了 TK 试验及 B-TK 试验要素场的逐时演变,发现东亚 500 hPa 阻塞高压、华北冷涡、副热带高压持续稳定。为分析降水模拟差异的原因,给出了两个试验 500 hPa 平均风场和平均高度场分布(图 11)。可见,两个试验差异比较显著,主要表现在:在 B-TK 试验里,贝加尔湖地区阻塞高压较 TK 试验的强度大、范围广;西太平洋副热带高压较 TK 试验的位置偏西,副高脊线西伸至 115°E 附近,而在 TK 试验里,副高脊线的西端在 120.5°E 附

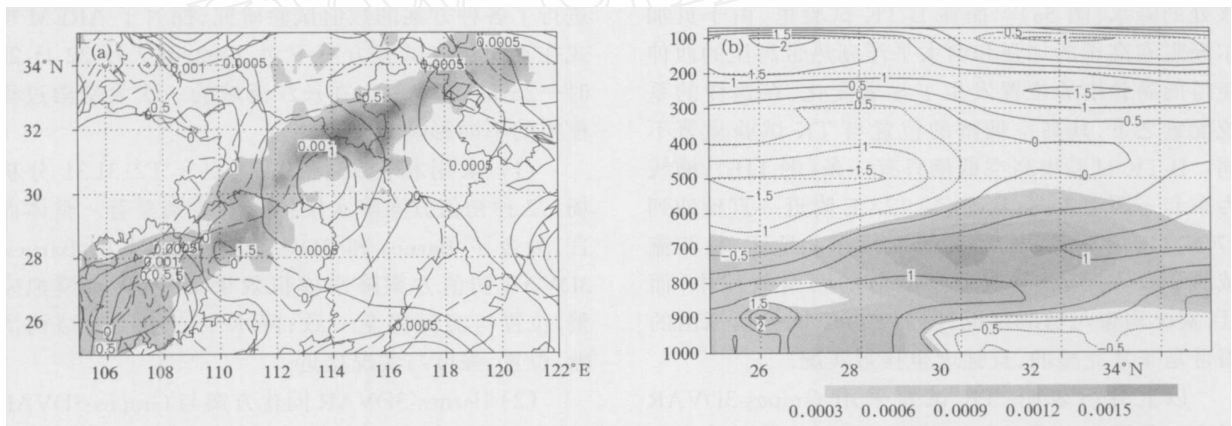


图 10 2002 年 7 月 22 日 20:00 850 hPa 比湿(实线,单位:kg/kg)、温度(虚线,单位:°C)差值分布(a, 阴影区为 24 h 实况降水量)及沿 114°E 比湿(阴影区,单位:kg/kg)、温度(实线,单位:°C)差值场(B-TK 试验减 TK 试验)剖面图(b)

Fig. 10 Differences of specific humidity (solid line, units: kg/kg) and temperature (dashed line, units: °C) between experiment B-TK and TK (experiment B-TK minus experiment TK) at 850 hPa at 20:00BST 22 July 2002 (a, the shading indicates the observed 24 h rainfall), and their vertical cross section along 114°E (b)

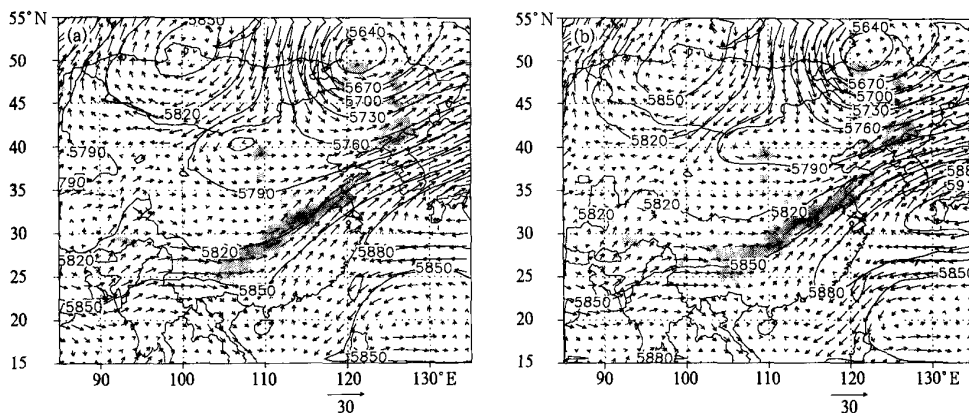


图 11 2002 年 7 月 22 日 20:00—23 日 20:00 500 hPa 平均位势高度场(单位:gpm)和平均风场(单位:m/s)(a. TK 试验, b. B-TK 试验; 阴影为 24 h 实况雨量)

Fig. 11 Mean geopotential height (units: gpm) and wind (units: m/s) fields at 500 hPa over the 24 hour started from 20:00BST 22 July 2002 simulated in experiment TK (a) and B-TK (b) (the shading indicates the observed 24 hour rainfall)

近。贝加尔湖阻塞高压的加强和副热带高压的西伸使得两高之间的低涡和槽的位置、强度发生了显著的变化。在 TK 试验里(图 11a), 中国东部地区 500 hPa 有两条高空槽线, 一条是华北低槽, 其槽底位于 35°N, 110°E 附近, 110°E 以东的长江中下游地区就位于华北槽前, 因此 TK 试验较好地模拟出了 110°E 以东的雨带, 但由于与槽线位置相距较远, 因而降水中心强度模拟得不是很强(图 5a)。第二条槽线位于 108°E 附近, 近于南北向, 因此, 在这样的形势场配置下, 模式模拟出了位于 108°E 与 110°E 之间的降水, 但强度不强; 而对位于 108°E 以西的贵州等省, 由于位于南支槽后, 因而模式就未能模拟出该处的降水(图 5a)。而在 B-TK 试验里, 由于贝加尔湖阻塞高压的加强和西太平洋副热带高压的西伸使得低涡和槽的位置发生了显著变化, 在这样的系统配置之下, 其高空低槽的位置与 TK 试验显著不同。B-TK 试验里高空低槽只有一条(图 11b), 槽线为东北—西南走向, 从 50°N, 122°E 附近一直延伸到 27°N, 110°E 附近, 长约 3000 km, 东北地区、长江流域的 24 h 实况雨带就位于槽前的西南气流中, 而且, 实况雨带与槽线很近, 因而 B-TK 试验模拟出的雨带是非常完整的, 且强度也接近实况。

以上分析表明, TK 试验采用 Grapes-3DVAR 三维变分同化方案对探空资料进行同化得到的分析场作为模式初始场, 由于初始的温、压、湿、风场与真实大气存在差异, 模式积分过程中, 这种差异变得更加显著, 出现了与真实大气相差较大的天气系统的配置, 最终导致模拟降水与实况出现较大偏差。而在 B-TK 试验中, 把 TK 试验的分析场作为背景场, 采用 Barnes 客观分析法对探空资料和 TK 试验的分析场再次进行融合, 实际上也就是采用 Barnes 客观分析法对 Grapes-3DVAR 方案的分析场进行修正后再作为模式的初始场进行预报。分析结果表明, 由于在初始时刻对 Grapes-3DVAR 方案分析场中的贝加尔湖阻塞高压、西太平洋副热带高压以及其他一些要素场进行了修正, 最终使得对 Grapes-3DVAR 方案的分析场的修正效果十分显著, 其天气系统的配置非常利于实况降水的产生。

对比分析采用相同资料源(探空 + 雷达估算降水 + 雷达反演风 + T213L31 分析场)的另一组试验: RH&RW 试验和 B-RH&RW 试验, 其结果与 TK 试验和 B-TK 试验的对比分析结果类似。同样

地, 在采用 Grapes-3DVAR 方案的 RH&RW 试验里, 由于贝加尔湖阻塞高压范围小、强度弱, 西太平洋副热带高压位置偏东(123°E 附近), 而使高空槽线位置不利于实况降水的产生; 而采用 Barnes 客观分析方法对 Grapes-3DVAR 方案的分析场进行修正后(B-RH&RW 试验), 贝加尔湖阻塞高压加强, 副高西伸, 高空槽线的位置非常利于实况降水的产生。

9 结论和讨论

利用 3 种不同的初值方案: Grapes-3DVAR 同化方案、Barnes 客观分析法及 Barnes-3DVAR 同化方案, 分别对探空资料、雷达反演的降水和风场资料进行了各种方案的数值试验研究, 探讨了 AREM 模式在不同初值试验方案下对 2002 年 7 月 22 日 20 时—23 日 20 时发生在长江流域的一次大暴雨过程模拟的不同影响, 结果表明:

(1) 采用相同资料源(探空 + T213L31 分析场), 3 种初值方案降水模拟效果差别显著。整体而言, 融合了 Barnes 和 3DVAR 两种方案的 Barnes-3DVAR 初值方案降水模拟效果最好: 雨带模拟完整, 位置与实况完全一致; 降水中心尺度结构清晰, 位置、强度与实况接近。

(2) Barnes-3DVAR 同化方案与 Grapes-3DVAR 同化方案都能同化雷达降水和风场资料, 但两者降水预报结果相差很大。Barnes-3DVAR 方案下的降水模拟结果明显好于 Grapes-3DVAR 同化方案。

(3) Grapes-3DVAR 同化方案下, 在控制试验的基础上增加雷达降水资料的同化, 24 h 降水模拟效果有所改善; 增加雷达风场资料的同化, 仅部分改善模拟效果, 某些地方效果反而变差; 同时增加雷达降水和风场资料的同化, 降水模拟效果反而明显变差。Barnes-3DVAR 同化方案则不然, 无论雷达降水资料和风场资料单独同化还是两种资料同时同化, 降水模拟效果都有不同程度的改进, 特别是对雷达降水和风场资料同时同化的模拟结果是各种试验中效果最好的: 模拟的雨带完整, 走向、位置与实况一致, 雨带上仅除未模拟出沅陵附近的降水中心之外, 其余降水中心基本都模拟出来了, 均与实况有较好的对应, 降水强度也与实况大致相同。

(4) 雷达降水场和风场同化对 18—24 小时降水场仍有显著影响。在 Barnes-3DVAR 方案下, 无论降水场和风场单独同化还是同时同化, 对降水场

影响都一致,对降水场影响最显著的是风场和降水场同时同化,其次是风场同化,降水场同化的影响最弱。

(5) 在对本次暴雨过程模拟中,Grapes-3DVAR 方案模拟的贝加尔湖阻塞高压偏弱、西太平洋副热带高压位置偏东、暴雨区上空水汽不充足是该方案下降水模拟不够理想的原因;在 Barnes-3DVAR 方案下,对 Grapes-3DVAR 方案的分析场进行修正后,使得贝加尔湖阻塞高压增强、西太平洋副热带高压西伸、暴雨区上空变暖变湿,从而使雨带模拟与实况非常接近。

(6) Grapes-3DVAR 同化方案中,雷达降水和风场资料单独同化都能对降水模拟有所改善,但两者同时加入初始场中,预报效果却显著变差,其原因是因为两种资料的兼容性太差,Grapes-3DVAR 同化系统同时融合两种资料时出现了某些不协调的地方?还是采用 VVP 方法反演后得到的高密度的风场信息对于背景场而言过于“零乱”而被认为是“噪声”,同时对整个分析场产生了消极的作用?这是一个值得深入探讨的问题,还有待于进一步的研究,但是将由 Grapes-3DVAR 同化系统同化雷达降水和风场资料后得到的场作为背景场,再采用 Barnes 客观分析方法对探空资料进行客观分析,这样得到的场作为初始场进行预报,效果却非常好。这给我们一个启示:雷达降水和风场资料的信息对于中尺度结构特征的描述应该是具有非常重要的意义的,关键是怎样以合理的方式加入到初始场中去,文中提出和设计的 Barnes-3DVAR 方案无疑提供了应用这类资料的一种新的途径。

参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 225pp
Tao Shiyan. Torrential Rain in China. Beijing: Science Press, 1980. 225pp
- [2] Gal-Chen T. A method for the initialization of the anelastic equations: Implication for matching models with observations. *Mon Wea Rev*, 1978, 106:587-606
- [3] Sun J, Flicher D, Lilly D. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data. *J Atmos Sci*, 1991, 48:876-890
- [4] Qiu C, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler radar data. *J Atmos Oceanic Tech*, 1992, 9:588-598
- [5] 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 Atmos Sci*, 1995, 52:1265-1287
- [6] 陶祖钰. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法. *气象学报*, 1992, 50(1):81-90
Tao Zuyu. The VAP method to retrieve the wind vector field based on single-Doppler velocity field. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 1992, 50(1):81-90
- [7] Shapiro A, et al. Initial forecast fields created from single-Doppler wind retrieval, thermodynamic retrieval and ADAS. Preprint. 11th Conf on NWP American Meteorological Society. 1996, 5A.7
- [8] Sun J, et al. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data. *J Atmos Sci*, 1991, 48:876-890
- [9] Sun J, Crook N. Wind and thermodynamic retrieval from single-Doppler measurements of a gust front observed during Phoenix II. *Mon Wea Rev*, 1994, 122:1075-1091
- [10] Sun J, Crook N. 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, 54:1642-1661
- [11] Sun J, Crook N. 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, 55:835-852
- [12] Weygandt S. The retrieval of initial forecast fields from single-Doppler observations of a supercell thunderstorm. [Ph. D. dissertation]: University of Oklahoma, 1998. 257pp
- [13] Gao J, Xue M, Wang Z, et al. The initial condition and explicit prediction of convection using ARPS adjoint and other retrieval methods with WSR-88D data. *AZ, Amer Meteor Soc*, 1998. 176-178
- [14] 邱崇践, 余金香, Qin Xu. 多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进. *气象学报*, 2000, 58(2):244-249
Qiu Chongjian, Yu Jinxiang, Qin Xu. Use of Doppler-radar data in improving short-term prediction of mesoscale weather. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 2000, 58(2):244-249
- [15] 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. *应用气象学报*, 2001, 12(4):488-493
Ma Qingyun, Li Zechun, Tao Shiwei. Wind-field retrieval through single Doppler weather radar and its application to NWP. *Quart J Appl Meteor* (in Chinese), 2001, 12(4):488-493
- [16] 王叶红, 赵玉春, 崔春光. 雷达降水资料一维变分同化的敏感性研究. *气象*, 2004, 30(4):6-10
Wang Yehong, Zhao Yuchun, Cui Chunguang. Sensitivity research on one-dimensional variational assimilation of radar-de-

- rived precipitation. Meteorological Monthly (in Chinese), 2004, 30(4): 6-10
- [17] 王叶红, 崔春光, 赵玉春. 雷达降水资料一维变分同化研究—湿度廓线调整. 气象科技, 2004, 32(5): 322-328
Wang Yehong, Cui Chunguang, Zhao Yuchun. One-dimensional variational assimilation of radar-derived precipitation data: retrieving of humidity. Meteor Sci Tech (in Chinese), 2004, 32(5): 322-328
- [18] 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): 129-145
Wan Qilin, Xue Jishan, Zhuang Shiyu. Study on the variational assimilation technique for the retrieval of wind fields from Doppler radar data. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2005, 63(2): 129-145
- [19] 施望芝, 金琪, 郭施. 湖北境内一次连续性暴雨天气过程的诊断分析. 湖北气象, 2003, (4): 7-9
Shi Wangzhi, Jin Qi, Guo Shi. Diagnostic analysis of a continuous heavy rain event in Hubei. Meteor J Hubei (in Chinese), 2003, (4): 7-9
- [20] 肖艳皎, 张家国, 万蓉等. 切变线暴雨中尺度系统的多普勒雷达资料分析. 气象, 2005, 31(2): 35-37
Xiao Yanjiao, Zhang Jianguo, Wan Rong, et al. Meso-scale analysis of shear line heavy rain with Doppler radar observations. Meteorological Monthly (in Chinese), 2005, 31(2): 35-37
- [21] 程明虎, 刘黎平, 张沛源等. 暴雨系统的多普勒雷达反演理论和方法. 北京: 气象出版社, 2004. 254pp
Cheng Minghu, Liu Liping, Zhang Peiyuan, et al. Principle and Techniques of Heavy Rainfall Retrieval Using Doppler Radar Data. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 254pp
- [22] 赵玉春, 王仁乔, 郑启松等. 长江中游一次暴雨中尺度天气系统的观测分析. 气象, 2003, 29(11): 14-19
Zhao Yuchun, Wang Renqiao, Zheng Qisong, et al. Meso-scale analysis of a heavy rainfall over the middle valleys of Changjiang river. Meteorological Monthly (in Chinese), 2003, 29(11): 14-19
- [23] 宇如聪. 一个 η 坐标有限区域数值预报模式对 1993 年中国汛期降水的实时预报试验. 大气科学, 1994, 18(3): 284-292
Yu Rucong. A test for numerical weather prediction of real-time for China flood season precipitation in 1993 by a regional η -coordinate model. Scientia Meteor Sinica (in Chinese), 1994, 18(3): 284-292
- [24] 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平等. AREMS 中尺度暴雨数值预报模式系统. 北京: 气象出版社, 2004. 233pp
Yu Rucong, Xue Jishan, Xu Youping, et al. An advanced Regional Eta-coordinate Numerical Heavy-rain Prediction Model (AREM) System (AREMS). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 233pp
- [25] 张华, 薛纪善, 庄世宇等. GRAPeS 三维变分同化系统的理想试验. 气象学报, 2004, 62(1): 31-41
Zhang Hua, Xue Jishan, Zhuang Shiyu, et al. Ideal experiments of GRAPES three-dimensional variational data assimilation system. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2004, 62(1): 31-41
- [26] 张培昌, 戴铁丕, 傅德胜等. 用变分方法校准数字化天气雷达测定区域降水量基本原理和精度. 大气科学, 1992, 16(2): 248-256
Zhang Peichang, Dai Tiepi, Fu Desheng, et al. Principle and accuracy of adjusting the area precipitation from digital weather radar through variational method. Scientia Meteor Sinica (in Chinese), 1992, 16(2): 248-256
- [27] 魏鸣. 单多普勒雷达资料的 VVP 方法三维风场反演: [学位论文]. 南京: 南京大学, 1998
Wei Ming. Three dimensional wind field retrieval from a single Doppler radar data with VVP method: [dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 1998
- [28] 王玉发, 陈少林, 罗建国等. 雷达和卫星图像的坐标同化及其实现. 南京气象学院学报, 1990, 13(4): 638-643
Wan Yufa, Chen Shaolin, Luo Jianguo, et al. Coordinate assimilation of radar and satellite imagery and its implementation. J Nanjing Inst Meteor (in Chinese), 1990, 13(4): 638-643

NUMERICAL RESEARCH ON EFFECTS UPON PRECIPITATION FORECAST OF DOPPLER RADAR ESTIMATED PRECIPITATION AND RETRIEVED WIND FIELD UNDER DIFFERENT MODEL INITIAL SCHEMES

Wang Yehong¹ Zhao Yuchun² Cui Chunguang¹

1 Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074

2 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract

On the basis of the joint estimated 1 h precipitations from Changde, Jingzhou and Yichang Doppler radar and Wuhan digital radar, and the retrieved wind fields from Yichang and Jingzhou Doppler radar, a series of numerical experiments of the advanced regional η -coordinate model (AREM) under different model initial schemes, i. e. Grapes-3DVAR, Barnes and Barnes-3DVAR, are carried out for a torrential rain process occurring along the Yangtze river in the 24 hour period started from 20:00 BST 22 July 2002 to investigate the effects of the Doppler-radar estimated rainfall and retrieved winds on the rainfall forecast. The main results are as follows: (1) the simulations are obviously different under three initial schemes with the same data source (the radiosoundings and T213L31 analysis). On the whole, Barnes-3DVAR, which combines the advantages of the Barnes objective analysis, and the Grapes-3DVAR method, gives the best simulations: well-simulated rain band and clear meso-scale structures, as well as their location and intensity close to observations. (2) Both Barnes-3DVAR and Grapes-3DVAR schemes are both able to assimilate the Doppler-radar estimated rainfall and retrieved winds, but differences in simulation results are very large, with Barnes-3DVAR's simulation much better than Grapes-3DVAR's. (3) Under Grapes-3DVAR scheme, the simulation of the 24 hour rainfall is improved a lot obviously when assimilating the Doppler-radar estimated precipitation into the model in comparison with the control experiment; but it becomes a little worse, when assimilating the Doppler-radar retrieved winds into the model, and it becomes worse obviously when assimilating the Doppler-radar estimated precipitation as well as retrieved winds into the model. However, the situation is different under Barnes-3DVAR scheme. The simulation is improved to a certain degree no matter assimilating the estimated precipitation or retrieved winds, respectively, or both of them. The result is the best when assimilating both of them into the model. And therefore (4) Barnes-3DVAR is a new and efficient initial scheme for assimilating the radar estimated rainfall and retrieved winds.

Key words: Doppler-radar, Estimated precipitation, Retrieved winds, Assimilation, Rainfall forecast.