

多普勒天气雷达资料同化对暴雨模拟的影响*

徐广阔¹⁾²⁾ 孙建华¹⁾ 雷霆¹⁾ 赵思雄¹⁾

¹⁾ (中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

²⁾ (中国科学院研究生院,北京 100049)

摘 要

利用我国 CINRAD/SA 多普勒天气雷达资料与 ARPS 模式 (Advanced Regional Prediction System) 的资料分析系统 ADAS (ARPS Data Analysis System) 对初始场进行调整,并应用于 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 模式,对 2003 年梅雨期淮河流域两次典型致洪暴雨过程进行模拟试验。对模拟结果的对比分析和检验结果表明:引入雷达资料后,在雷达观测区的整层风场和水汽场都随之调整,雷达径向风和反射率因子资料对初始场调整有不同影响,径向风资料侧重于对风场的调整,而反射率因子资料侧重于对温、湿量场的调整,使降雨落区和强度预报都有所提高;在 ADAS 系统中,雷达径向风和反射率因子资料对初始场调整有不同影响,径向风资料侧重于对风场的调整,而反射率因子资料侧重于对温、湿量场的调整,两个个例的试验表明,加入雷达径向风资料的模拟试验能够得到较好评分,加入雷达反射率因子资料或同时加入这两种雷达资料也能够一定程度上提高模拟的准确性。

关键词:中尺度模式;复杂云分析;多普勒天气雷达;中尺度系统

引 言

高分辨率中尺度模式的发展,对中尺度系统的模拟能力及对降水的预报能力有了很大提高。但是由于受到常规观测资料时空分辨率的限制,用于改进模式初始场的中尺度信息包含较少,特别是在中尺度对流系统发生时,初始状态不能很好地包含中尺度的湿度、云、潜热及环流等信息,使得模式出现预报起转延迟问题^[1];同时,也为提高定量降水预报 (quantitative precipitation forecast, QPF) 带来一定难度。随着大气探测技术的发展,人们开始探索从某些特殊资料 (如卫星资料、雷达资料等) 中提取更多有用的初始信息以改进中尺度数值预报的结果。这些高时空分辨率非常规资料的引入,有可能在中尺度数值预报的应用中对改进模式初始场、减少模式起转延迟时间、提高预报准确度起到一定作用。

雷达资料在中尺度模式中的应用已有了一系列研究,例如, Hu 等^[2-3] 分别利用 ADAS 和变分同化

系统 (3DVAR) 研究了美国 WSR-88D 多普勒天气雷达资料对初始场调整改进的效果; Xue 等^[4-5] 利用 ARPS 模式及其同化系统,采用美国 WSR-88D 多普勒天气雷达资料对中尺度飑线、飓风等中尺度对流系统进行了研究; 邱崇践等^[6] 提出单多普勒雷达资料反演风矢量场的准四维变分分析方法; 王令等^[7] 利用多普勒天气雷达径向风速度对雹云特征进行了研究,表明利用雷达径向风资料可以使冰雹的短时预报有效时间得到提前; 吴翠红等^[8] 对雷达回波垂直廓线 (VPR) 的生成方法进行研究,表明利用 VPR 订正雷达估算地面降水,对进一步提高雷达定量测量降水有积极意义。盛春岩等^[9-10] 利用 ARPS 模式及 ADAS 将我国的多普勒天气雷达资料直接应用于中尺度数值模拟,对我国北方秋季的一次降雨过程进行了试验,结果表明,经改进后的初始场可明显增强 3 h 内的降水强度,并改善暴雨落区的预报,从而提高中尺度数值模式的短时定量降水预报水平。

以上研究工作为多普勒天气雷达资料在中尺度数值模式中应用进行了很好的探索,但仍有一些工作需要进一步试验与研究,例如在对持续时间较长

* 国家自然科学基金项目 (40620120437, 40405008) 和国家重点基础研究发展规划项目 (2004CB418301) 共同资助。

2008-01-24 收到, 2008-08-15 收到再改稿。

的强降水过程的数值模拟中,多普勒天气雷达资料产生的效果如何?雷达径向风和反射率因子资料对强降水过程的模拟有何影响?不同的雷达资料调整方案对模式初始场和中尺度对流系统及降水预报结果有何影响?

本文采用 ADAS 系统和 WRF 模式,对 2003 年梅雨期淮河流域两次典型强暴雨过程(6 月 29—30 日、7 月 4—5 日)进行模拟,检验多普勒天气雷达资料在改进模式初始场及提高暴雨预报准确度等方面的应用效果及意义。

1 ADAS 及 WRF 模式简介

1.1 ADAS 及复杂云分析方案

作为 ARPS 模式的资料分析系统,ADAS 是一个能同化常规资料和一些非常规资料的中尺度分析系统。它采用 Bratseth 提出的连续迭代方法^[11],将观测资料中的物理量(如温度、气压、湿度和风场等)直接同化到模式三维网格空间,形成模式初始场。

ADAS 包含微物理调整系统和复杂云分析系统,其中复杂云分析系统是基于局地分析和预报系统(Local Analysis and Prediction System, LAPS)^[12]的云分析方案构造的。它可以利用多普勒天气雷达资料、卫星资料及地面云观测资料进行三维云分析,构建一个具有高分辨率的三维初始云场和降水场,再通过基于湿绝热或非绝热初始化的方法对温、湿量和风分量等进行调整,使得雷达观测信息在初始场形成中得到应用,从而改进初始场。ADAS 在处理雷达资料时,首先将雷达资料插值到模式网格坐标上,对于反射率因子的调整,是在雷达扫描范围内将网格点上的反射率因子值与阈值相比较,如果反射率因子低于阈值,则视为晴空,高于阈值,则对该点调整,再通过客观分析将这种局地调整进行空间上的传播,对三维空间上湿度、云水、雨水、冰以及雪、霰等湿度量进行调整;对于风场的调整,是根据常规观测资料的缺失,将径向风场资料转换为 u, v 分量,得到常规观测的风场 u, v 分量的增量,然后利用所得增量对初始场进行调整。

1.2 WRF 模式简介

WRF 模式为非静力模式(提供静力框架),水平方向采用 Arakawa C 网格,垂直方向为质量追随坐标,其分辨率可随高度变化。若采用时间分裂方案,

声波和重力波采用小步长,可使用 Runge Kutta 3 阶或 2 阶方案。若采用平流方案,可选择 2~6 阶的方案。此外,WRF 还提供单向和双向嵌套,嵌套区域可移动,包含的物理过程有辐射、边界层参数化、对流参数化、次网格湍流扩散以及微物理等。WRF 模式为中尺度研究和业务数值天气预报提供了共同框架,同时也适合高分辨率的数值模拟。该模式系统已广泛应用于业务和研究工作^[13-14]。

2 降水过程、试验方案及检验方法

2.1 降水过程和试验方案

2003 年梅雨期淮河流域发生严重洪涝,主要由几次强降水过程造成,本文选择在安徽合肥雷达观测范围内的两次典型暴雨过程进行试验和分析。2003 年 6 月 29—30 日,河南东部、安徽沿淮淮北和沿江东部、江苏北部普降暴雨,局部地区出现大暴雨,其中芜湖达 159 mm,颖上达 155 mm;7 月 4—5 日,暴雨区主要位于江苏省中南部,大暴雨区位于安徽、江苏两省中部交界处,最大降水量在滁州达 273.7 mm,其次是扬州市,达 212.0 mm。

为了与加入雷达资料后的模拟结果进行比较,同时检验雷达径向风场、反射率因子资料对降水模拟效果的不同影响,本文针对初始场的形成设计了 4 个试验(见表 1)。试验中背景场均采用美国国家环境预报中心(NCEP)的 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。在此基础上,利用 ADAS 及复杂云分析方案对常规资料和雷达资料的分析结果形成初始场。在对照试验 CNTL 中,只加入常规地面观测、探空资料;试验 RADAR-V 分析常规地面观测、探空资料和多普勒雷达径向风资料;试验 RADAR-R 分析常规地面、探空资料和雷达反射率因子资料;试验 RADAR-RV 分析常规地面、探空资料和雷达径向风、反射率因子资料。雷达资料由安徽省合肥市的 CINRAD/SA 多普勒天气雷达观测得到,并对其去噪声、补缺测点、退模糊和平滑滤波等质量控制。

采用三重单向嵌套网格,区域一(即外层区域)格距为 36 km,中心位置为 $31.0^\circ \text{N}, 112.0^\circ \text{E}$;区域二和区域三的格距分别为 12 km 和 4 km,中心位置均为 $31.9^\circ \text{N}, 117.3^\circ \text{E}$;垂直方向分为 31 层。模式积分初始时刻分别为 2003 年 6 月 29 日 00:00(世界时,下同)和 7 月 4 日 12:00,均积分 24 h。

表1 试验设计

Table 1 The configuration of experiments

试验名称	CNTL	RADAR-V	RADAR-R	RADAR-RV
常规资料	有	有	有	有
雷达径向风资料	无	有	无	有
雷达反射率因子资料	无	无	有	有

2.2 检验方法

为了对模拟结果进行定量的检验,对4组试验均采用了ETS(equitable threat score)评分、BS(bias score)评分和HSS(Heidke skill score)评分^[15]。它们的计算方法如下:首先利用Cressman方法将实际观测资料插值到模式水平网格上;然后选取不同的阈值 X 。如果模式模拟和实际观测均大于 X ,格点数目为 A ;如果模式模拟大于 X 而实际观测小于或等于 X ,格点数目为 B ;如果模式模拟小于或等于 X 而实际观测大于 X ,格点数目为 C ;如果模式模拟和实际观测均小于或等于 X ,格点数目为 D 。于是有

$$\text{ETS 评分: } S_{\text{ET}} = \frac{A - E}{A + B + C - E} \quad (1)$$

$$\text{BS 评分: } S_{\text{B}} = \frac{A + E}{A + C} \quad (2)$$

HSS 评分:

$$S_{\text{HS}} = \frac{2(A \times D - E \times C)}{(A + C)(C + D) + (A + B)(B + D)} \quad (3)$$

其中

$$E = \frac{F \times O}{N} = \frac{(A + B)(A + C)}{A + B + C + D}$$

综合以上3种检验方法,可以对降水的模拟结果进行一个较全面的评估,即一个好的模拟结果应该具有较高的ETS和HSS评分,而其BS评分最接近1。

3 模拟结果的分析及检验

由于获得的实际观测资料分辨率较低,不宜与细网格的模拟结果对比,本章中使用区域一(即36 km 格距)的降水模拟结果与实况进行比较。

3.1 降水过程一(2003年6月29—30日)

从6月29日00:00—06:00降水模拟结果与实况(图略)可以看出,试验CNTL和试验RADAR-V

均模拟出雨带形状、位置,但在降水量的模拟上,试验CNTL偏小,试验RADAR-V与实况更为接近,说明加入雷达径向风资料以后,对降水量的模拟有了较明显的改进;对于试验RADAR-R,降水量的模拟有一些改进,但降水范围相对实况偏大;试验RADAR-RV模拟的降水范围与试验RADAR-R相近,降水中心则有所增大,也更接近实况。

4个试验对24 h累积降水量的模拟结果也进行了对比(图略),对照试验和RADAR-V试验均模拟出与实况较为接近的24 h雨带形状与位置,两者明显的差别是前者模拟的降水强度偏弱,而后者则与实际的降水强度更为一致;试验RADAR-R, RADAR-RV模拟的雨带位置和降水强度与实况也较为相近,但对降雨中心的模拟较试验RADAR-V差。

为了更客观地对比4个试验的模拟结果,计算了2.2节中的各种评分,图1是24 h累积降水量模拟结果的检验。从图1a中可以看出,对于较低阈值(10 mm),4组试验中RADAR-V的ETS评分最高,其次为试验RADAR-RV,试验RADAR-R和试验CNTL的ETS评分最低,当阈值增大为20 mm时,4组试验ETS评分均有所增加,试验RADAR-V的评分仍最高。当阈值超过20 mm时,4组试验的ETS评分均有不同程度减小,其中对照试验CNTL在4个试验中的ETS评分最低,而对于加入雷达资料的其他3组试验,无论对于低阈值还是高阈值,都具有相对较高的ETS评分,尤其是试验RADAR-V,在阈值大于50 mm时,仍具有较高的评分,说明对于强度较大的降水,要好于试验RADAR-R和RADAR-RV的模拟结果。对于BS评分(图1b)、HSS评分(图1c)也有类似的情况,相对于对照试验CNTL,加入雷达资料的3组试验具有较好的评分结果,而其中又以试验RADAR-V的评分结果最好。

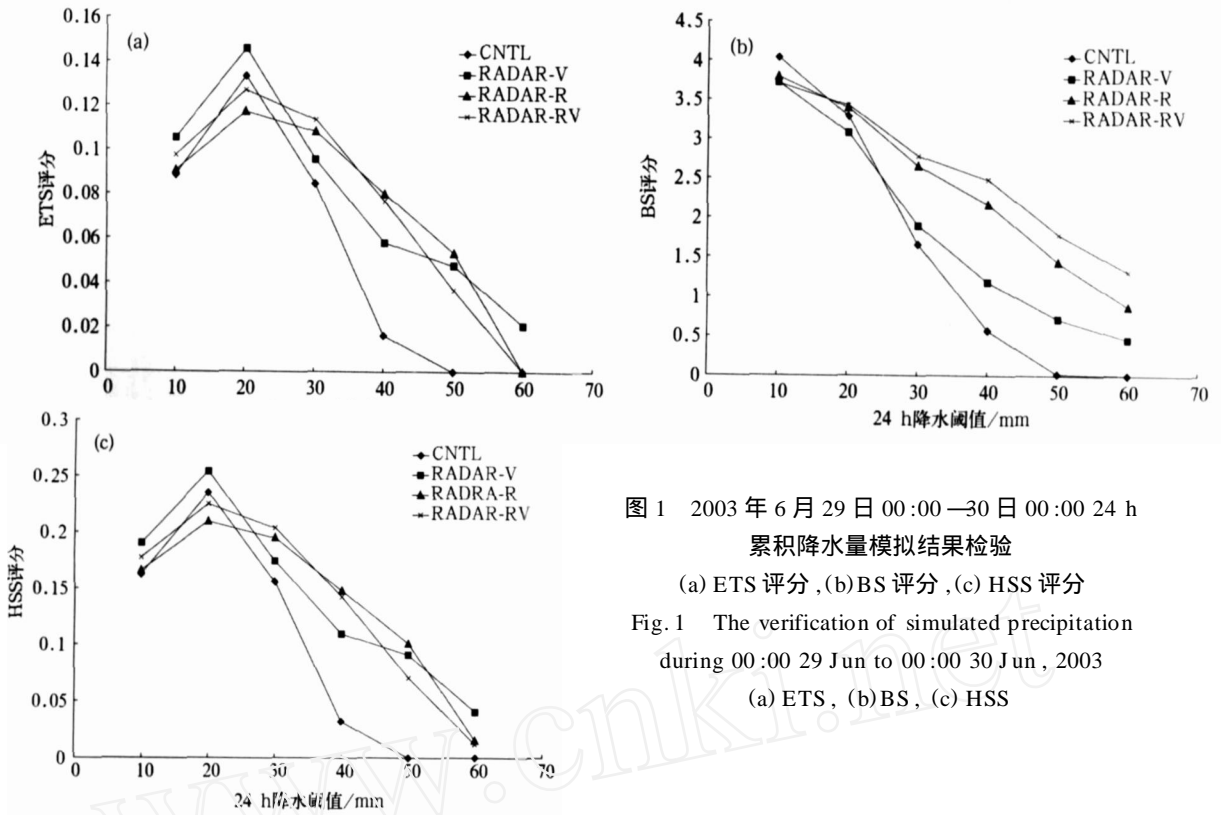


图 1 2003 年 6 月 29 日 00:00—30 日 00:00 24 h 累积降水量模拟结果检验

(a) ETS 评分, (b) BS 评分, (c) HSS 评分

Fig. 1 The verification of simulated precipitation during 00:00 29 Jun to 00:00 30 Jun, 2003

(a) ETS, (b) BS, (c) HSS

3.2 降水过程二(2003 年 7 月 4—5 日)

试验 CN TL 在降水强度和落区上均与实际观测相差较大(图 2a),范围明显较小,降水强度也较弱。这表明,在模拟开始的第 1 个 6 h 内,由于初始场中不包含导致降水的中尺度信息,从而对模拟结果有较大的影响。加入雷达资料后(图 2b~d)可看出,模拟结果相对试验 CN TL 均有明显的改进。3 组试验的降水强度和落区与实况都较为接近,表明了初始场中中尺度信息的重要性。此外, RADAR-R 和 RADAR-RV 较为相像,均模拟出一个范围较大的降水中心,但对更为细致的降水中心的模拟略有不足;而加入雷达径向风资料的试验 RADAR-V 则在 32.0°N, 117°E 和 32.0°N, 119°E 附近模拟出两个降水中心,与实际观测的滁州、南京两个站的降水实况更为接近。与个例一相比,个例二对前 6 h 降水量的改进则更加明显,主要原因可能是第 2 个个例降水更强,雷达对初始场中中尺度信息改进作用更显著。

对比 24 h 降水量,对照试验和 RADAR-V 均模拟出与实况较为接近的雨带(图略),但是前者模拟的降水强度偏弱,而后者则与实际的降水强度更为一致。另外,在试验 RADAR-V 模拟的降水大值中

心的位置与实况也更为相符。而试验 RADAR-R, RADAR-RV 模拟的雨带位置和降水强度与实况也较为相近,但对降水中心的模拟不如试验 RADAR-V。以上结果进一步表明,多普勒天气雷达资料对于提高定量降水预报的精确度有着重要作用。

图 3 为 2003 年 7 月 4 日 12:00 至 5 日 12:00 累积降水量模拟结果的检验。从图中可以看出,当阈值为 20~40 mm 时,4 组试验 ETS 评分(图 3a)从高到低依次为试验 RADAR-RV, RADAR-V, RADAR-R, CN TL; 当阈值大于 40 mm 时,试验 RADAR-V 就具有了明显高于其他 3 组试验的评分值(在 0.3~0.45 之间),在阈值为 100 mm 处试验 RADAR-V 评分减小,在阈值 120 mm 处,试验 RADAR-RV 与 CN TL 评分减小;综合对不同阈值的评分情况,可以发现试验 RADAR-V 具有相对较高 ETS 评分。对于 BS 评分(图 3b),无论对于较大阈值还是较小阈值,BS 评分最接近 1 的为试验 RADAR-V,当阈值小于 120 mm 时,试验 CN TL 的 BS 评分最接近 1,而当阈值大于 120 mm 时,试验 RADAR-R 最接近 1。对于 HSS 评分(图 3c),4 组试验中,试验 RADAR-V 的 HSS 评分明显高于其他 3 组试验。综合以上 3 种检验结果可以看出,相对

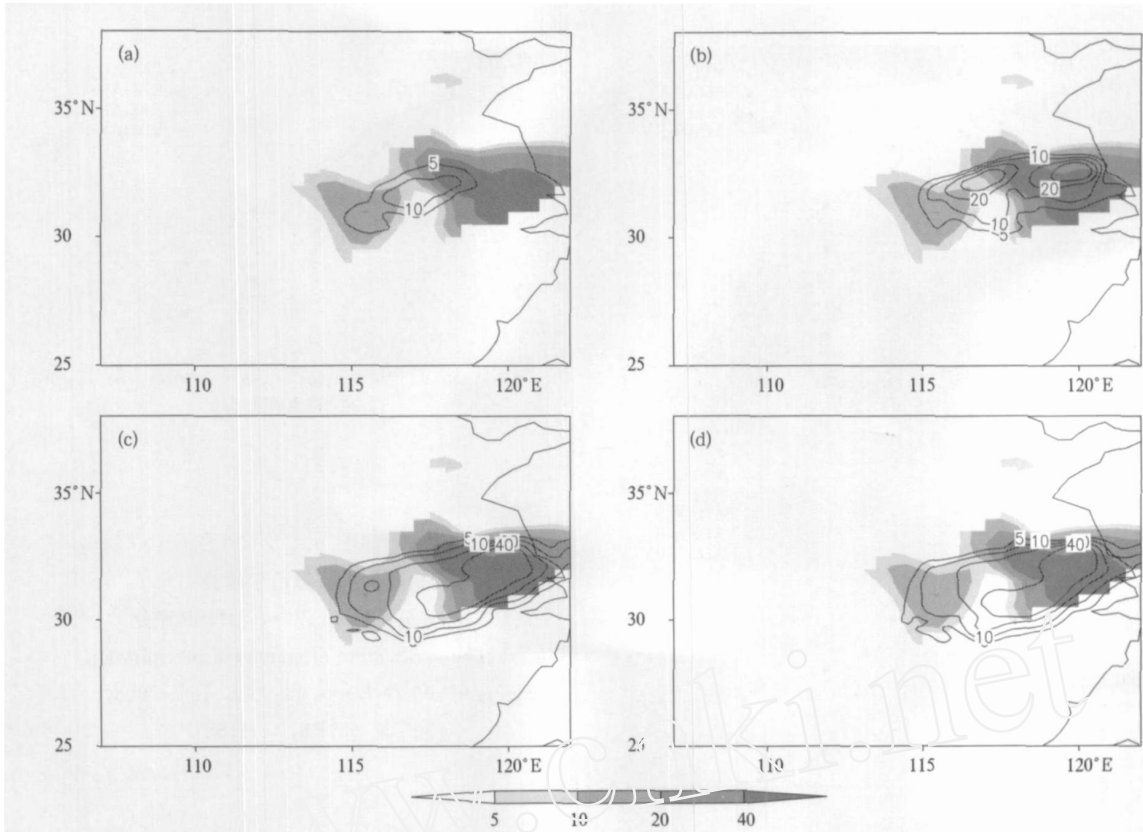


图2 2008年7月4日12:00—18:00降水量模拟结果(实线)与实况(阴影)(单位:mm)

(a) 试验 CNTL , (b) 试验 RADAR-V , (c) 试验 RADAR-R , (d) 试验 RADAR-RV

Fig. 2 The simulated precipitation(solid line) and observation(shaded) during 12:00 to 18:00 on Jul 4, 2003(unit :mm) (a) Exp CNTL , (b) Exp RADAR-V , (c) Exp RADAR-R , (d) Exp RADAR-RV

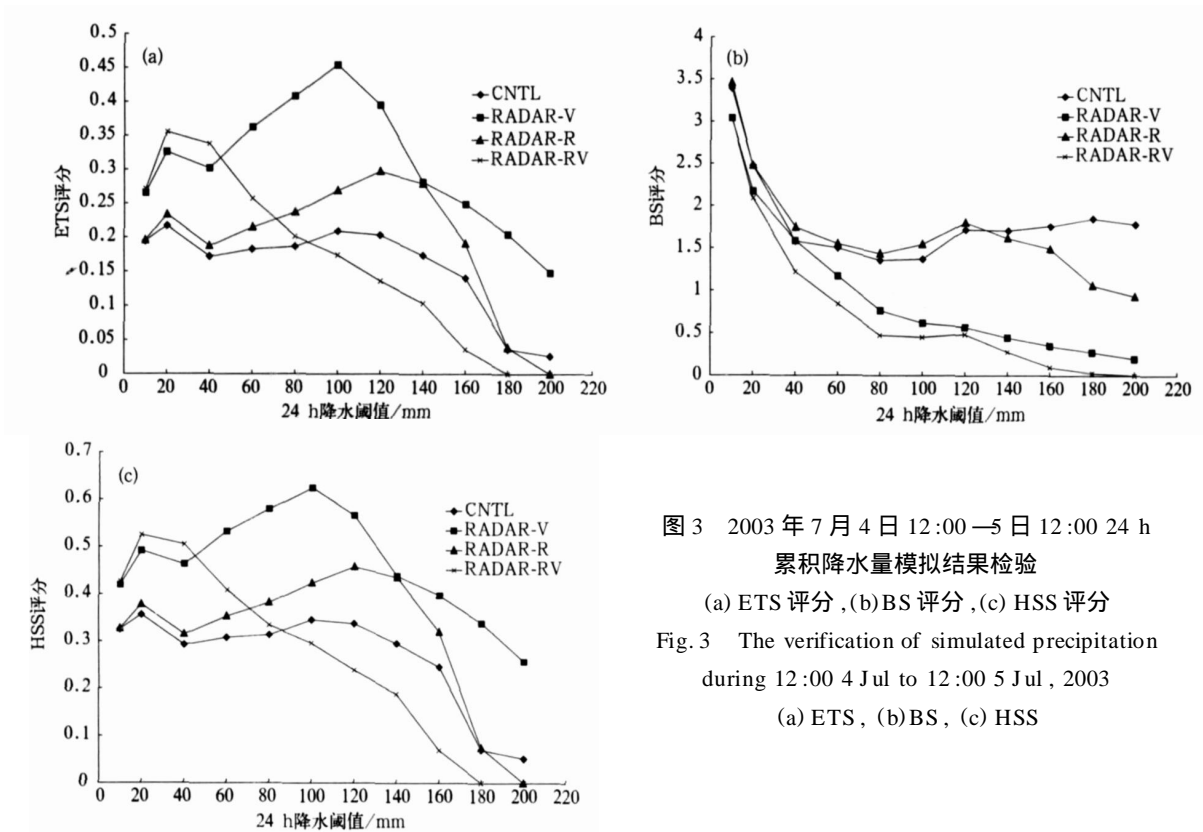


图3 2003年7月4日12:00—5日12:00 24 h 累积降水量模拟结果检验

(a) ETS 评分 , (b) BS 评分 , (c) HSS 评分

Fig. 3 The verification of simulated precipitation during 12:00 4 Jul to 12:00 5 Jul, 2003

(a) ETS , (b) BS , (c) HSS

于其他 3 组试验,试验 RADAR-V 具有较好的模拟结果。

4 雷达资料对暴雨模拟的影响

由两次暴雨过程模拟结果分析可以看出,加入雷达径向风场和反射率因子资料对预报结果的影响有较大差异,下面将不同雷达资料对暴雨预报影响的原因及复杂云分析方案同化雷达资料对初始场的调整进行分析。为了考察更为细致的结构差异,从细节的方面分析雷达资料对初始场的影响。

4.1 雷达资料对温、湿量场的调整

温、湿量场在暴雨过程中有很重要的作用,因此更为精细的温、湿量场分布对改进暴雨预报的结果会很有帮助。从加入雷达资料的 3 组试验与试验 CNTL 的初始场云水、雨水之差沿 31.9°N 的纬向-高度剖面图可以看出,对于个例一(图 4),在雷达观测区云水和雨水都得到不同程度的调整,3 组试验调整中心最大分别为 0.8 g/kg , 1.6 g/kg 和

1.6 g/kg ,3 组试验中雨水均为 0.3 g/kg ,其中,试验 RADAR-V(图 4a)对云水调整的空间范围要小于试验 RADAR-R(图 4c)和试验 RADAR-RV(图 4e),试验 RADAR-R 和试验 RADAR-RV 差别不大。对于个例二(图略),试验 RADAR-V 在 $5\sim 10\text{ km}$ 的高空都有明显增加,大值中心出现在 8 km 处,其值为 1.6 g/kg ,表明初始时刻对流已经比较旺盛;雨水调整的大值中心达 0.8 g/kg ,位于 6 km 处(即对流层中层)。试验 RADAR-R 和试验 RADAR-RV 对云水的调整大值中心达 2.0 g/kg ,调整的区域范围也大于试验 RADAR-V。

以上分析表明,加入雷达反射率因子资料后对云水和雨水的调整比加入雷达径向风场资料大。这可能与 ADAS 系统中雷达径向风场侧重改进风场,而雷达反射率因子侧重改进湿度场,增加初始场中云水等的含量,调整温度场有关。此外,个例二对云水、雨水的调整明显大于个例一,表明在个例二中对流较强,雷达资料的优越性得到充分体现,这也是对个例二降水模拟改进较大的原因之一。

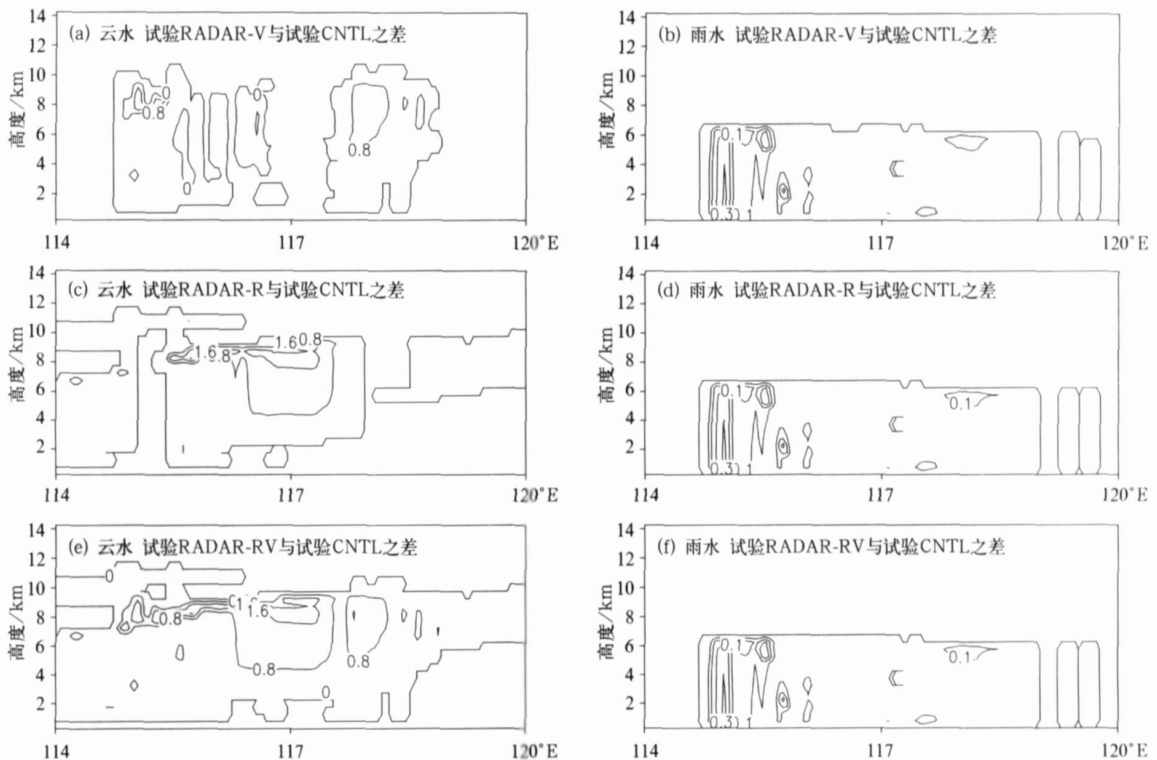


图 4 个例一中加入雷达资料后初始场云水、雨水差异沿 31.9°N 的纬向-高度剖面图(单位: g/kg)

Fig. 4 The cross section along 31.9°N of the difference of cloud water, rain water between experiments which radar data is used and unused of Case one(unit: g/kg)

4.2 雷达资料对初始场风场的调整

从试验 RADAR-V 与试验 CN TL 的初始风场之差沿 31.9°N 的纬向-高度剖面图(图 5)可以看出,加入雷达径向风资料以后, *u* 分量主要调整区域在 114°~119°E 之间,两个例均在 118°E 附近的地面至 12 km 之间出现 3 个负中心;个例一(图略)在 118°E 附近的 6.5 km 和 9.5 km 出现两个正中心,增加了西风分量;个例二(图 5)在 116°E 附近的 3.5 km 和 8 km 出现两个正中心,在 118°E 附近的 12~14 km 有一个正中心,说明在这 3 处增加了西风分量。*v* 分量的调整区域与 *u* 分量相同,但正、负中心在高空的分布则有所差别,个例一在距地面

1 km 高空有一个正中心,在 6 km 以上的高空也为正值区域;个例二在地面至 9 km 之间的范围内出现负、正、负中心,而在 9~12 km 之间出现正、负中心并列存在的分布形式。

从两个例风场 *u*, *v* 分量的调整情况可以看出,经过雷达径向风场调整后,在对流层两个个例都增强了气旋性,个例一在对流层高层增强了反气旋性,个例二在对流层中高层(约 7 km 和 9 km 处)增加了反气旋性风,也就是说调整后的风场表现出了更强的低层辐合、高层辐散的中尺度特征,从而经雷达径向风调整后试验更好地模拟出了对流发生发展过程,得到更为准确的降水模拟结果。

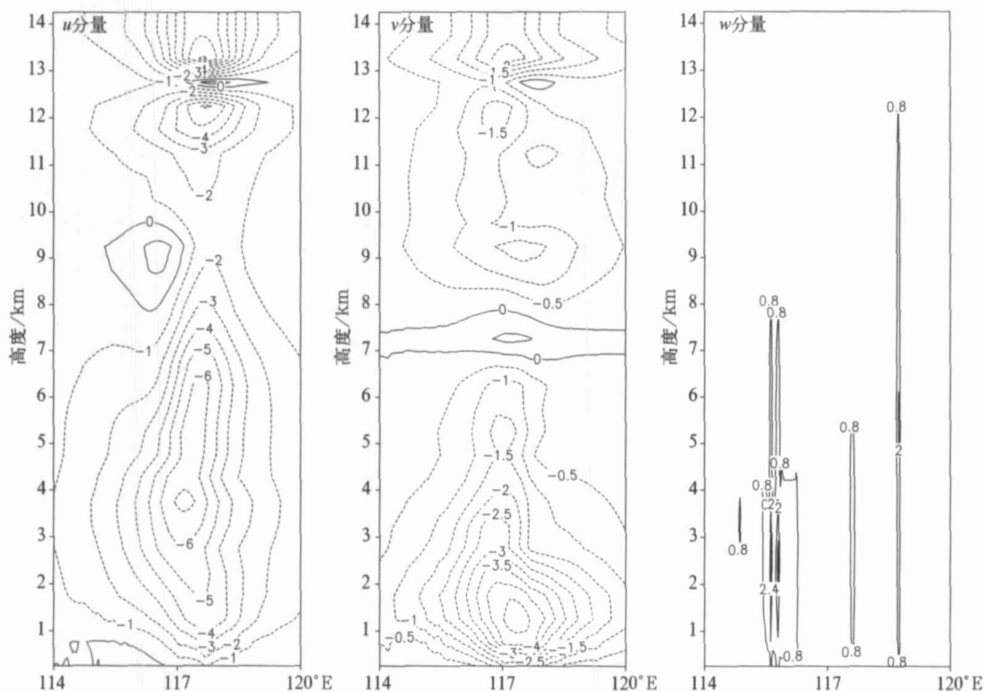


图 5 个例二试验 RADAR-V 与试验 CN TL 的初始风场之差沿 31.9°N 的纬向-高度剖面图(单位:m/s)

Fig. 5 The difference of initial wind between Exp RADAR-V and Exp CN TL along 31.9°N of Case two(unit: m/s)

垂直运动的分布与暴雨或强对流区有明显的关系,暴雨一般位于上升运动区,个例一在 118°E 附近的地面至 5 km 范围内出现了正中心,个例二则在 116°E 和 119°E 附近的上空得到调整,分别表现为两个正中心,说明个例一在 118°E 附近的中低层上升速度得到增强,个例二在两处(116°E 附近的地面至 6 km 之间和 119°E 附近的整层)的上升运动增强,即经调整后的风场垂直运动得到增强,使初始场增加了具有中尺度特征的物理信息,更有利于模式

较快地捕捉到对流系统的发生发展,模拟出更为准确的降水过程。

在中尺度对流系统的发展过程中,低层大气的辐合运动起到关键的作用。图 6 是个例二在不同高度上雷达径向风资料对初始风场影响的矢量图。可以看出,加入雷达径向风资料后,雷达观测区风场得到明显的调整,在低层(图 6a~b)出现了一个范围约为 200 km ×200 km 的风场辐合区,在中高层(图 6c~d)风场也有较明显的变化,加强了辐散,相对于对照试

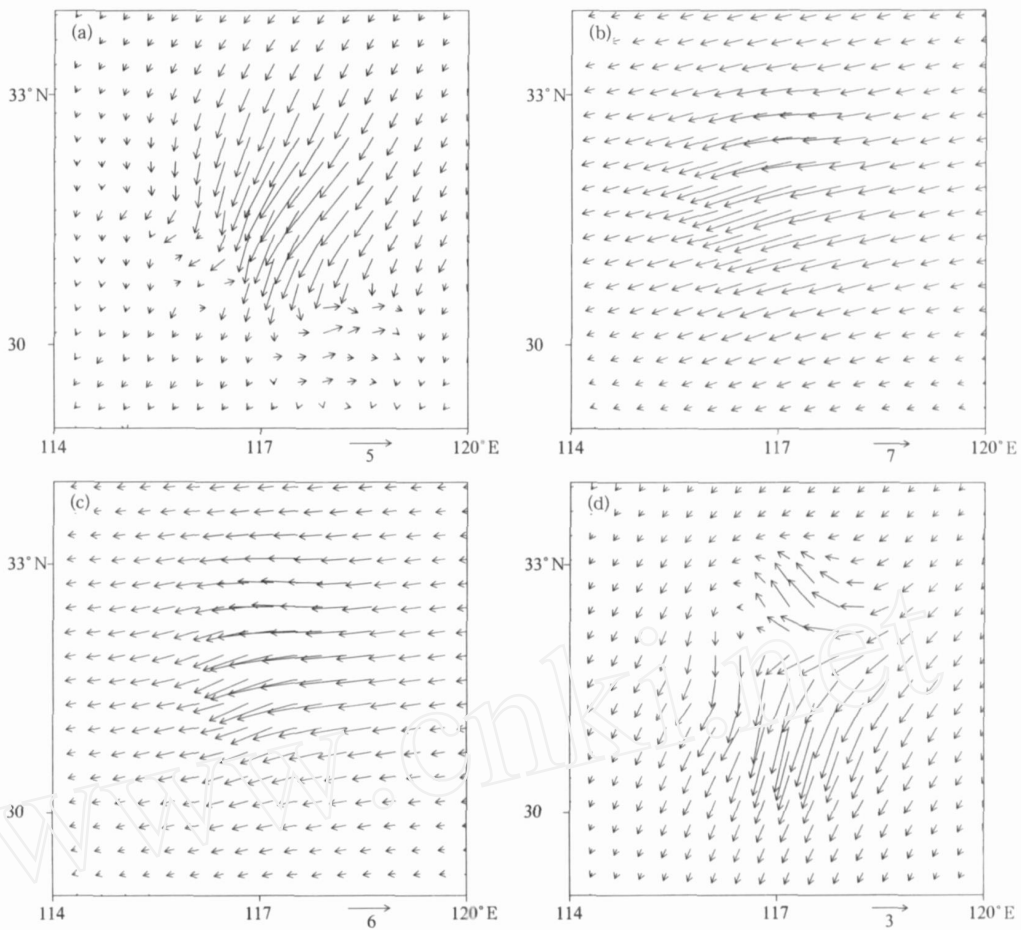


图6 个例二不同高度上试验 RADAR-V 与试验 CNTL 初始风场差异(单位:m/s)

(a) 750 m, (b) 3750 m, (c) 5750 m, (d) 9750 m

Fig. 6 The difference of initial wind between Exp RADAR-V and Exp CNTL at different height of Case two(unit:m/s) (a) 750 m, (b) 3750 m, (c) 5750 m, (d) 9750 m

验增加了风场的中尺度特征。个例一(图略)产生的低层风场辐合比个例二偏弱,但也有类似的中尺度辐合风场出现。这说明,经雷达径向风资料调整后,低空出现了中尺度辐合区,从而对气块产生抬升作用,有利于对流系统的发展和降水的形成。

4.3 中尺度环流差异及对降水的影响

从前面的分析可以知道,加入雷达资料后对前6 h 降水的模拟改进最大。图7是个例二850 hPa高度上试验 RADAR-V 与试验 CNTL 模拟的环流差异和试验 RADAR-V 模拟的逐小时降水量。从图7可以看出,在7月4日13:00—15:00, RADAR-V 和 CNTL 试验的环流差异表现为两个中尺度辐合区,其水平范围约在200 km左右,这说明了试验 RADAR-V 能在模式积分开始后,迅速模拟出中尺

度环流,这也是试验 RADAR-V 能较好模拟出暴雨过程的原因之一,这一点也可从降水的模拟结果得到证实,对应为两个小范围的降水中心。到4日16:00,在辐合区及其周围出现了气旋性环流,说明相对于试验 CNTL,试验 RADAR-V 的结果更有利于低层上升运动的发展,从而促进对流系统的发展。从16:00开始,降水结果则表现为降水量增加,雨区范围扩大,逐渐形成强的雨带。个例一的 CNTL 和 RADAR-V 试验也有类似的环流差异(图略)。这进一步表明加入雷达径向风场资料后,其提供的中尺度环流信息较好地补充了常规资料中中尺度信息的缺失,从而更准确地模拟出中尺度对流系统的发生发展情况以及中尺度暴雨过程。

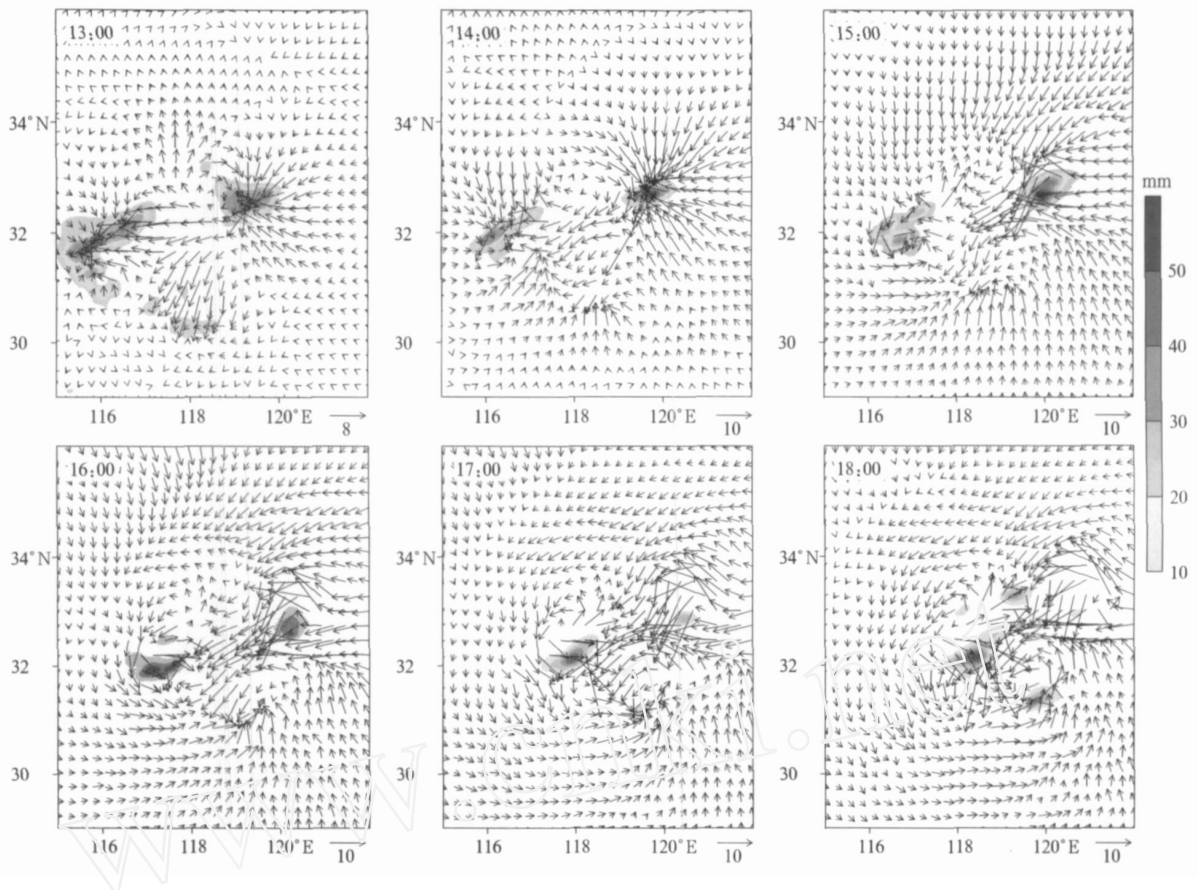


图7 2003年7月4日850 hPa高度上试验RADAR-V与试验CN TL的环流差异(矢量,单位:m/s)与试验RADAR-V逐小时降水量模拟(阴影,单位:mm)

Fig. 7 The difference of circulation at 850 hPa between Exp RADAR-V and Exp CN TL (vectors, unit: m/s) and hourly rainfall simulated by Exp RADAR-V (shaded, unit: mm) on 4 Jul 2003 of Case two

以上分析表明,采用复杂云分析方案引入雷达径向风场资料后,对初始场的调整主要出现在雷达观测区,并且能在观测区内分析出一些中尺度的特征,通过加入雷达资料的调整,在初始场中分析出了中尺度辐合区。

5 结论与讨论

针对中尺度模式初始场中尺度的信息分析以及提高定量降水预报问题,本文通过应用中尺度模式资料分析系统 ADAS 及其复杂云分析方案,在常规观测资料基础上加入 CINRAD/SA 多普勒天气雷达资料,然后利用高分辨率 WRF 模式对 2003 年淮河流域的两次暴雨过程(6月29—30日和7月4—5日)进行了模拟试验。通过对模拟结果的检验分析和雷达资料对暴雨模拟的影响分析,主要结论如下:

1) 采用 ADAS 及其复杂云分析方案,利用多

普勒天气雷达资料对初始场进行调整,可以把雷达资料中具有高时空分辨率的湿度、云、潜热及环流等信息更好地加入到初始场中,从而得到一个能够包含更完整动力、热力信息的且更符合实际情况的初始场,减小了由于中尺度观测资料不足而造成的模式初始场中中尺度信息缺乏的问题。

2) 多普勒天气雷达资料的引入,能够使中尺度模式在积分开始后较快地模拟出局地对流系统的发生、发展,进而及时模拟出暴雨的发生与发展。通过对两次较完整的降水过程的数值模拟及其结果检验,发现利用多普勒天气雷达资料对初始场调整后,初始场中出现了中尺度风场辐合、上升运动以及相应的温、湿分布,改进后的初始场对雨带的形状、落区及降水量的模拟结果与实况更为接近,并且具有较好的评分。

3) 在 ADAS 系统中,雷达径向风场资料侧重于对初始场风场的调整,而雷达反射率因子资料侧

重于对初始场温、湿量场的调整,两者对暴雨模拟结果有着不同的影响。因此,关于常规观测资料统计与雷达资料对初始场误差改进的定量分析是非常重要的,将在今后工作中进一步的研究。

应该指出的是,本文只是个例研究,考虑到不同天气过程中影响要素作用的不同以及初值误差的差异,结论有一定局限性,需要今后对更多个例进行试验,同时,对观测资料误差进行统计与定量分析,利用雷达观测的径向风场和反射率因子资料最大限度地补充初始场所缺失的中尺度信息,也是需要继续深入研究的问题。

致 谢:本文研究的多普勒天气雷达资料由中国气象科学研究院周海光博士提供,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Kasahara A, Balgovind R C, Katz B. Use of satellite radiometric imagery data for improvement in the analysis of divergent wind in the tropics. *Mon Wea Rev*, 1988, 116:866-883.
- [2] Hu M, Xue M, Bratseth K. 3DVAR and cloud analysis with WSP-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact. *Mon Wea Rev*, 2006, 134:675-698.
- [3] Hu M, Xue M, Cao J D. 3DVAR and cloud analysis with WSP-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR. *Mon Wea Rev*, 2006, 134:699-721.
- [4] Xue M, Martin W J. A high-resolution modeling study of the 24 May 2002 dryline case during IHOP. Part I: Numerical simulation and general evolution of the dryline and convection. *Mon Wea Rev*, 2006, 134:149-171.
- [5] Xue M, Wang D H, Gao J D. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteorol Atmos Phys*, 2003, 82:139-170.
- [6] 邱崇践,余金香, Xu Q. 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.
- [7] 王令,郑国光,康玉霞,等. 多普勒天气雷达径向速度图上的暴雨特征. *应用气象学报*, 2006, 17(3):281-287.
- [8] 吴翠红,万玉发,吴涛,等. 雷达回波垂直廓线及其生成方法. *应用气象学报*, 2006, 17(2):232-239.
- [9] 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. *Meteorol Atmos Phys*, 2006, 94:167-183.
- [10] 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. *大气科学*, 2006, 30(1):93-107.
- [11] Bratseth A. Statistical interpolation by means of successive corrections. *Tellus*, 1986, 38A:439-447.
- [12] Zhang J. Moisture and Diabatic Initialization Based on Radar and Satellite Observations. University of Oklahoma, 1999.
- [13] Jankov I, Gallus W A Jr, Segal M, et al. The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall. *Wea Forecasting*, 2005, 20:1048-1060.
- [14] Gallus W A Jr, Bresch J F. Comparison of impacts of WRF dynamic core, physics package, and initial conditions on warm season rainfall forecasts. *Mon Wea Rev*, 2006, 134:2632-2641.
- [15] Papadopoulou A, Themis G C, Emmanouil N A. Improving convective precipitation forecasting through assimilation of regional lightning measurements in a mesoscale model. *Mon Wea Rev*, 2005, 133:1961-1977.

Impacts of Chinese Doppler Radar on the Severe Heavy Rainfall Forecast During Meiyu Season

Xu Guangkuo¹⁾²⁾ Sun Jianhua¹⁾ Lei Ting¹⁾ Zhao Sixiong¹⁾

¹⁾ (Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029)

²⁾ (Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049)

Abstract

CINRAD/SA Doppler radar data and ARPS data analysis system (ADAS) are used to adjust the initial field, then the adjusted initial field is inputted into the mesoscale model WRF (The Weather Research and Forecasting Model) to simulate two rainstorm processes. The two rainstorm processes produce a flash flooding over Huaihe River Basin during Meiyu of 2003. According to the difference of initial data to be used in the numerical simulation, four experiments are designed and conducted in the study. The initial field obtained without use of radar data in control run (Exp CN TL), with use of radial velocity in Exp RADAR-V, with use of radar reflectivity in Exp RADAR-R, with both radar reflectivity and radial velocity in Exp RADAR-RV. The simulated outputs of these four experiments are compared and verified. The results show that after the adjustment of initial field using radar data through the ARPS complex cloud analysis scheme, both wind field and moisture field are adjusted at the region of radar observation, and the initial fields carries more information about moisture, cloud, latent heat, meso-scale circulation, and so on. At the same time, the simulation results also show that the spin-up time of meso-scale model is shortened and accuracy of rainstorm simulation is improved. Through the quantitative verification of the simulation results, both the ETS and the HSS of experiments simulating the radar data in initial fields are proved higher than those of experiments not simulating the radar data in initial fields, and the BS verification score for the former experiments is more closer to 1. Based on the comparing of the results of these four experiments, it can concluded that the impacts of Doppler radar data assimilation on initial field are different between Exp RADAR-V and RADAR-R. In ADAS system, radar radial velocity observations are used to adjust the wind field, but radar reflectivity observations are used to adjust the thermal and moisture fields. The significant differences exist between simulation results of four experiments. On the basis of the quantitative verification, the Exp RADAR-V, which uses radar radial velocity, gets the highest score and is able to simulate meso-scale convective system and its rainfall more accurately. However, it is noticed that the other experiment, such as Exp RADAR-R and Exp RADAR-RV, also can improve the accuracy of rainfall simulation at a certain extent, though not as good as the results of Exp RADAR-V. In addition, the improvements of precipitation prediction are notable in the first six-hour simulation.

Key words: meso-scale numerical model; complex cloud analysis scheme; Doppler radar; meso-scale convective system