

多普勒雷达基数据在短时对流天气数值预报中的应用

祝 婷^{1,2} 钟 青¹

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴试验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 ARPS 模式中原本有处理多普勒雷达 Lev-III 资料的模块, 但在一个雷达测站只处理 4 个仰角的径向风和反射率的资料。在此基础上, 进行修改扩充将我国 20 世纪末、21 世纪初全国布网的新一代多普勒雷达基数据 Lev-II 全部 14 个仰角的原始径向风和反射率资料应用于 ARPS 模式。对我国 2003 年 7 月一次特大暴雨过程的个例研究表明, 初始时刻加入多普勒雷达基数据的数值模拟, 能改善短时 0~12 h 的降水范围、强度和降水中心的预报结果。即使在目前雷达初始化数值模式预报低谷区的 3~4 h 处, 仍表现出较好的预报水平。因此, 本文认为使用多普勒雷达资料初始化中尺度数值模式, 能够弥补“spin-up (起转)”带来的副作用, 表现在开始预报的第 1 h, 就预报出雷达估计回波的强中心和大致分布, 并且预报出与实况接近的降水; 改变了由“spin-up”引起的回波估计预报延迟和预报前期没有降水的现象。且试验表明提高数值模式分辨率, 可以使多普勒雷达资料弥补“spin-up”副作用的能力更明显。多普勒雷达资料应用于数值模式之所以有这种能力, 是由于从多普勒雷达资料可以得到云和降水场的信息, 一方面为模式微物理变量提供初值, 填补了初始时刻云微物理量的空白, 使随后的微物理量演变进程更加合理化, 从而对降水预报产生正面影响; 另一方面, 为中尺度模式的非绝热初始化提供对流尺度数据源, 对潜热、动力场和湿度进行调整, 有效地实现模式的“hot-start (热启动)”, 缩短了“预热”时间。

关键词 多普勒雷达基数据同化 ARPS 模式 起转 初值化 对流天气

文章编号 1006-9585 (2008) 02-0281-10 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

Application of Doppler Raw Radar Data on Meso-scale Model for Convection Nowcasting and Short-Range Forecast

ZHU Ting^{1,2} and ZHONG Qing¹

1 *Laboratory of Cloud-precipitation Physics and Severe Storm, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract After some modification, the authors can apply China New Generation Doppler raw radar data which contains all 14 levels reflectivity and radial velocities to ARPS model. Using this method, the authors can study the efforts on weather prediction when applying raw radar data in ARPS model. The authors chose a case study, which is a China meso-scale characteristics of the heavy rainfall happened on 4–5 July 2003 in the Huaihe Rivor valley. The results show that the 0–12 h precipitation forecast is greatly improved in precipitation range, intensity, the location of precipitation center and radar echo estimate; even the 3–4 h forecast which is the most difficult part in meso-scale NWP model nowadays also shows better. The forecast of radar reflectivity and rainfall in the beginning hour is similar to the observation, which proved that assimilating Doppler raw radar data in this case have alleviated the

收稿日期 2007-06-05 收到, 2008-03-15 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40775067 和 40475026

作者简介 祝婷, 女, 1982 年出生, 硕士生, 主要从事气象学研究。E-mail: zhuting@cma.gov.cn

effort of “spin-up”. The reasons are that the model can obtain the information of cloud and precipitation when applying raw radar data to the model. On one hand, this information can provide the initials to microphysical variable in the model, which can speed up microphysical processes and shorten the adjustment time of the model. On the other hand, the cloud and precipitation analysis can provide data source for moisture and diabatic initialization of convective scale numerical model, and then the model has the conditions for “hot start”, which also can alleviate the effort of “spin-up”.

Key words Doppler raw radar data assimilation, ARPS model, spin-up, initial field, convection

1 引言

目前的研究表明,使用雷达资料初始化中尺度数值模式在 0~2 h 的预报水平有可能超过平均外推法;而 2~6 h 的预报水平提高不多,仍是中尺度预报的难点。Crook^[1]曾指出解决此问题的办法是通过更好的对流尺度初始化。由于雷达是目前唯一可能准确描述大气中对流尺度天气现象的观测系统,如何充分利用多普勒雷达探测资料,从中提取、利用有意义的气象信息,改善数值模式初始场,提高模式预报能力,成为越来越关注的中心问题。

近年来,气象学家们致力于利用高分辨率的雷达资料,通过反演、同化和非绝热初始化方法,将雷达观测信息带入高分辨率模式的初始场中,提高数值预报水平。雷达资料四维变分同化和集合卡门滤波技术均在理论和个例实验中得到较好结果。如 Sun 和 Crook^[2]使用云模式和它的伴随的反演技术从 WSR-88D 雷达得到初始风场和热力场,从试验中的模式变量分析来看,在 60 min 时间处,数值预报能力超过外推结果。Warner 等^[3]在一个暴洪的个例研究中,采用云模式及其伴随模式,从多普勒雷达资料反演得到云模式的初值,包括三维风场、热力场和云的微物理场,云模式 48 min 处预报的反射率与验证资料的比较分析发现,模式预报明显地好于简单的外推预报。1 h 预报的降水评分,模式预报质量显著地好于持续性预报和外推预报。Tong 和 Xue^[4]使用可压缩的非静力模式用卡门滤波法同化多普勒雷达资料。这两种方法是目前较为理想的同化方法,然而太耗机时。通过反演和同化手段从雷达资料反演出风场等,为数值模式提供高

分辨率的初始场,也取得了较好效果。如 Qiu 和 Xu^[5]提出 SA(简单伴随)反演方法,采用反射率或径向速度的守恒方程及伴随方程反演风场。Hu 等^[6]使用 3DVAR 和云分析技术处理 WSR-88D Level-II 雷达资料,用于龙卷风暴的降水预报。不少直接利用雷达资料进行初始场调整的工作,如 Rogers 等^[7]利用数字雷达反射率直接调整初始场,个例试验表明雷达资料能改进 24 h 降水预报。Xue 等^[8]用 WSR-88D 多普勒雷达资料进行云分析和初始场调整,能模拟出初始时刻雷暴。

国内将雷达资料应用于数值模拟也取得相当进展。如徐枝芳等^[9]将雷达回波资料加入中尺度模式 MM5,调整水汽场,对暴雨模拟预报取得很好效果。托亚等^[10]利用多普勒雷达资料反演降水对模式进行动力和非绝热初始化调整,通过 MM5 模式实验发现,雷达资料能提高 0~6 h 的降水落区和强度预报。盛春岩等^[11]利用中尺度 ARPS 模式,将多普勒雷达反射率和径向风资料直接用于改进初始场,模拟发现雷达资料应用可以明显增强 3 h 内的降水强度和落区预报。

我国广泛使用的雷达数据是由雷达基数据(Lev-II)通过一系列水文气象算法生成的雷达产品(Lev-III)。雷达基数据包含更多精细信息,将其直接应用到数值模式是否能进一步提高预报水平呢?由此本文在 ARPS 模式原本只处理 4 个仰角径向风和反射率的 Lev-II 雷达资料模块基础上,进行修改扩充将我国多普勒雷达基数据 14 个仰角径向风和反射率资料应用于 ARPS 模式,通过 2003 年我国江淮流域一次强降水过程的个例研究,初步探讨使用多普勒雷达基数据原始因子初始化中尺度数值模式对强对流短期预报的影响。

2 ARPS 模式简介

ARPS (Advanced Regional Prediction System) 由美国 Oklahoma 大学风暴分析和预报中心 (CAPS) 研发, 主要针对风暴尺度的非静力高分辨率区域预报系统。ARPS 模式网格和坐标系分别采用 Arakawa-C 跳点网格和地形追随高度坐标系。控制方程为全弹性、可压缩、非静力大气动力方程, 它包括动量、热量、质量、水物质和能量等预报方程和状态方程。含有云微物理过程、次网格尺度湍流等物理过程。适用于时空尺度很小的中、小尺度和风暴尺度的天气系统。

数值方法短时预报需要从有限的观测资料初始出对流系统完整的动力、热力和微物理场, 目前主要是通过模式将反射率观测转化为微物理场。减少“spin-up”时间的主要技术是非绝热初始化以及与之匹配的湿度、云水等初始化。本文使用的 ARPS 模式即包含将雷达资料用于数值短期预报所需要的合理平台。

ARPS 资料同化系统 (ADAS) 的云分析过程从地面站观测、卫星红外云图、可见光图像数据和雷达反射率等数据源得到云和降水的三维格点分析, 分析产品包括: 三维云分析, 云水和冰水混合比, 云和降水类型, 云中垂直速度和雨水、雪、冰雹混合比, 也可反演出云底、云顶和云幕。

在云和降水分析中, 雷达资料是及其重要的数据源, 为对流中层结构提供重要信息。例如, 如果雷达回波在地面观测的云底之上且反射率值超过阈值, 则在雷达回波区插入云; 在云水和冰水混合比分析中, 由雷达反射率可以得到降水物的移出量; 在降水类型和降水混合比分析中, 使用分析的雷达反射率和温度场可以诊断三维降水场。三维降水场的诊断程序开始于每个格点柱的回波顶, 如果回波顶的温度在 0°C 以下, 降水物从雪开始; 如果在 0°C 以上, 降水物从雨开始。当雪降至温度高于 1.3°C 的环境时, 雪融化成雨。当雨降至环境温度低于 0°C 时, 雨转化成过冷雨, 当它通过压力层 p_1 、 p_2 , 且 $\int_{p_1}^{p_2} T |dp| < -250 \text{ hPa} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 时变成冻雨。当雷达反射率高于阈值时, 开始诊断冰雹。

云和降水分析产品以及 ADAS 温度和风场分析可以提供对天气系统直接且较全面的描述。ADAS 在云和降水分析的基础上, 发展了温度的非绝热初始化和湿度初始化。初始热力场根据云中的潜热释放得到了调整; 相对湿度场得到调整以弥补局地湿度分布观测的不足。对模式的非绝热的初始化, 以及热力动力平衡条件的约束, 使模式实现“hot-start (热启动)”成为可能。

3 多普勒雷达基数据资料应用于中尺度 ARPS 模式

3.1 个例选取及背景介绍

本文选取的个例是我国 2003 年 7 月 4~5 日 (北京时, 下同) 淮河流域特大暴雨过程。这次降水过程范围广、强度大, 贵州、湖北、安徽、江苏等地均出现暴雨过程。特别是安徽滁县 7 月 4 日 20 时起 24 h 降水量达 357 mm。这次暴雨发生前, 500 hPa 乌拉尔山和雅库茨克上空各一个的阻塞高压虽有所衰减, 但仍维持两脊一槽形势。两脊之间的贝加尔湖及东北是一个宽阔的低压槽, 不断引导冷空气南下。西太平洋副高脊线在 25°N 附近。与此同时, 对流层低层来源于孟加拉湾的西南气流经中南半岛北部进入华南后到达淮河流域。另有一支来自于西太平洋副高南侧偏南气流也到达江淮流域一带。如图 1 (根据 $1^{\circ} \times 1^{\circ}\text{NCEP}$ 再分析资料绘制), 淮河下游流域低空 850 hPa 维持急流, 4 月 20 时 850 hPa 急流中心值达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在对流层高层, 副热带高空急流维持在 40°N 附近, 淮河流域处于高空急流出口处的右下方, 200 hPa 的风速极值中心达到了 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。暴雨期间, 500 hPa 西太平洋副热带高压明显东移南撤。700 hPa 暖式切变线随副高的减弱南下, 将暖湿气流输送到江淮流域, 长江下游处于冷暖气流交汇处。在这种高低空系统配置下, 形成了非常有利于暴雨发生的大尺度环流背景, 即冷暖空气频繁交汇于淮河流域, 东西向的梅雨锋在 32°N 附近维持, 锋区南侧有大量水汽输送且低层辐合、高层辐散。

由合肥站雷达观测 (图略), 7 月 4~5 日安徽滁州地区 (32.05°N , 118°E) 的强暴雨在有利于暴雨发生的大尺度环流背景下, 由梅雨带上强烈发展的中 β (γ) 尺度对流活动造成。

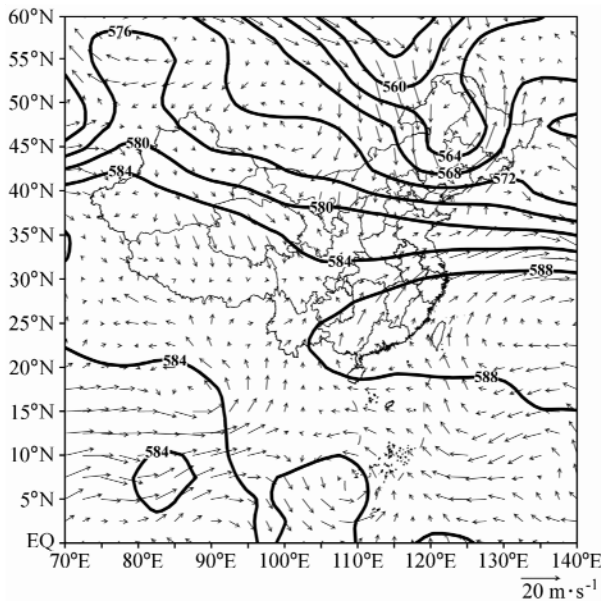


图1 7月4日20时500 hPa等位势高度线(单位: dagpm)和850 hPa风场

Fig. 1 500 hPa geopotential height field (units: gpm) and 850 hPa wind field at 2000 LST 4 Jul 2003

3.2 试验设计及资料

3.2.1 试验设计

试验采用D1、D2两层单向嵌套(图2),水平格距分别为9 km、3 km。格点数为D1 (183×163)、D2 (163×163)。中心位置在合肥雷达所在位置(31.87°N, 117.26°E),垂直方向53层,垂直平均分辨率400 m。

外层9 km试验(9kmnorad)选择冰微物理方案和Kain-Fritsch积云参数化方案。背景场资料采用6 h间隔的NCEP 1°×1°再分析资料。为了包含更多的实况信息,用MICAPS常规探空和地面测站资料在背景场的基础上作再分析,形成初始场和侧边界条件。模式积分时段为2003年7月4日20时~5日8时。

内层3 km试验(3kmrad)采用外层9 km初始场作为背景场,加进了合肥CINRAD-SA多普勒雷达全部仰角(14个)体扫径向风和反射率原始观测资料对初始场进行调整。内层3 km分辨率的模拟以9 km分辨率模拟的3 h间隔的模式输出结果作为侧边界条件。选择冰微物理方案,无积云参数化方案。模式积分时段为2003年7月4日20时~5日8时。

为了对比,我们设计了使用雷达资料调整初

始场的参照试验(9kmrad)。在D1区9 km模拟初始场上加入雷达资料对初始场进行调整。其他设置与外层9 km模拟相同。见表1,为本试验中的对比方案设计。

3.2.2 试验结果

(1) 在甚短期降水预报方面,首先将内层3 km初始场加入原始雷达资料的模拟对2003年7月4日20时~5日8时累积12 h降水预报与MICAPS地面实况观测12 h累积降水做对比。实况(图3a)12 h累积降水主要分布于安徽中部,降水中心在安徽与江苏交界处。数值模式模拟的结果(图3b)较好的反映了此次降水的范围和中心位置。因此,通过修改模式,应用合肥多普勒雷达基数据全部(14个)仰角体扫径向风和反射率资料于ARPS模式的模拟是成功的。

(2) 对于临近(0~3 h)的预报,我国业务上使用外推和主观分析的方法。在外层D1区域应用“交叉相关法外推”^[12],在预报前1 h(2003年7月4日19时)和预报时刻(2003年7月4日20时)2 200 m高度处的两个雷达回波图之间,一边移动位置,一边计算相关系数,在所有可能的位移中,逐点计算交叉相关系数,把取得最大值时所需的位移看作回波图形移动速度,然后以此速度进行外推预报,得到预报1 h后的回波分布,所得结果见图4c。在2 200 m高度处,这个结果与外层9 km数值模拟1 h预报量计算的反射率(图4d),外层9 km加雷达数值模拟1 h预报量计算的反射率(图4b)以及实况(图4a)进行对比后有以下结果。

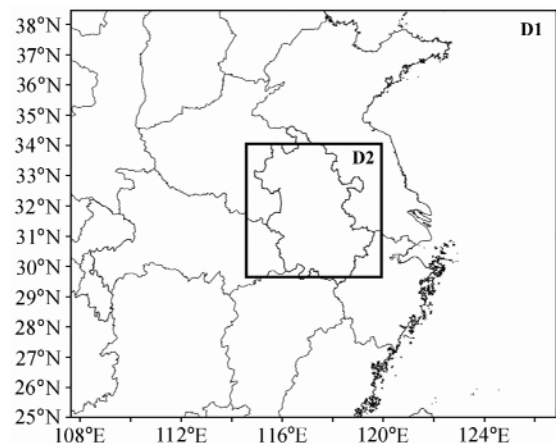


图2 D1、D2两层区域

Fig. 2 Two domains D1, D2

表 1 对比试验设计
Table 1 Simulation designs for contrast

试验	加 MICAPS 资料	加 RAD 资料	区域
9kmnorad	✓	×	D1
9km	✓	✓	D1
3kmrad	✓	✓	D2

实况观测雷达强回波区主要在安徽的中东部和中西部。外层 9 km 分辨率不加雷达模拟预报 1 h 后的反射率较小，在安徽中东部无反射率值，表现出预报延迟。外推法预报的回波比实况对应时刻观测回波偏南一个纬度的距离。9 km 加雷达试验模拟出 1 h 后在安徽中东部及中西部的反射率分布。本试验中，在主要强雷达回波的预报方面，加雷达初始化的数值模拟比外推预报要好。但 9 km 加雷达的模拟未能预报出滁州附近的强回波中心。分析可能原因，1) 模式自身问题；2) 由于雷达资料的分辨率为 1 km，进入 ARPS 模式中，首先采用格点平均的方法插值到 9 km 分辨率的格点上，没能很好反映中小尺度的信息。

(3) 在 2 200 m 高度处，将内层 3 km 加雷达模拟 1 h 预报量计算的反射率 (图 5b)、实况雷达

观测对应时刻反射率插值到 3 km 分辨率 (图 5a) 和外层 9 km 加雷达模拟 1 h 预报量计算的反射率 (图 5c) 作对比。

实况雷达观测 7 月 4 日 21 时滁州附近的反射率达 50 dBZ，内层 3 km 加原始雷达资料的模拟在滁州附近预报的回波已发展旺盛，且图中区域内回波较强的地方大部分与实况分布一致。而仅 9 km 粗网格加雷达资料的模拟在滁州附近的预报回波发展较弱。

将合肥地面自动站观测 7 月 4 日 20 时至 7 月 4 日 21 时 1 h 累积降水 (图 6a)，与对应时段 3 km 加原始雷达资料模拟第一小时降水 (图 6b) 做对比。可以看到，3 km 加雷达试验模拟出滁州为中心的降水区及安徽南部的降水，与实况观测一致。

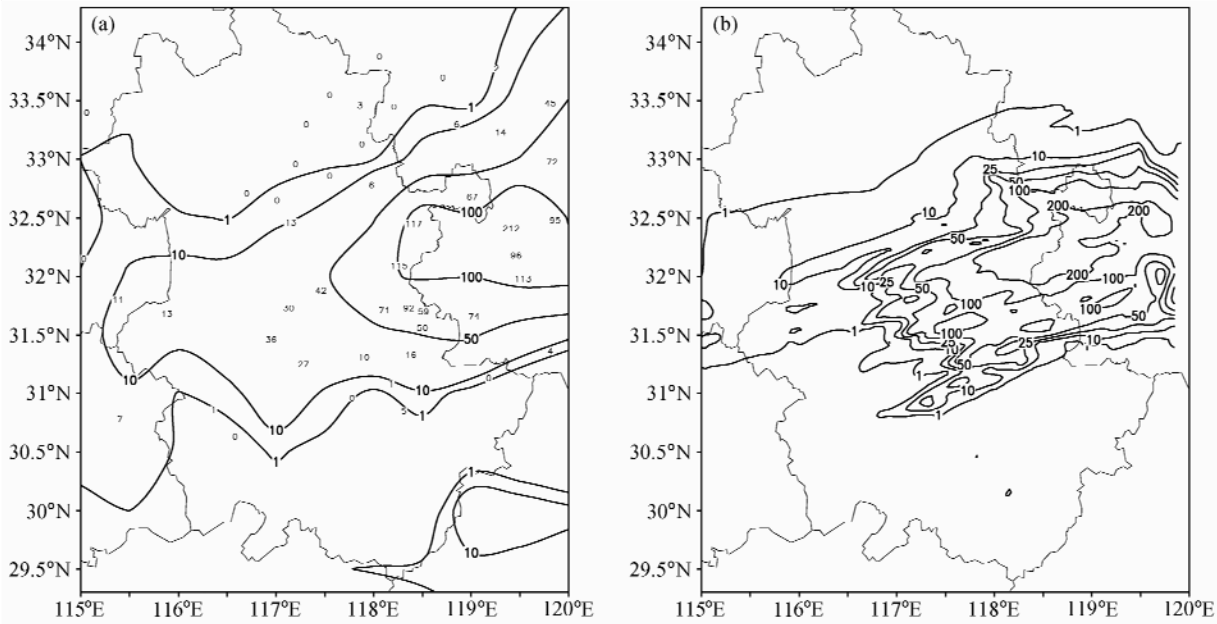


图 3 7 月 4 日 20 时~5 日 8 时 12 h 累积降水 (单位: mm): (a) MICAPS 实况观测; (b) 内层 3 km 加雷达模拟降水
Fig. 3 Observed and simulated rainfall form 2000 LST 4 Jul 2003 to 0800 LST 5 Jul 2003 (units ; mm): (a) Observed rainfall; (b) simulated rainfall at 3 km grid with radar data assimilation

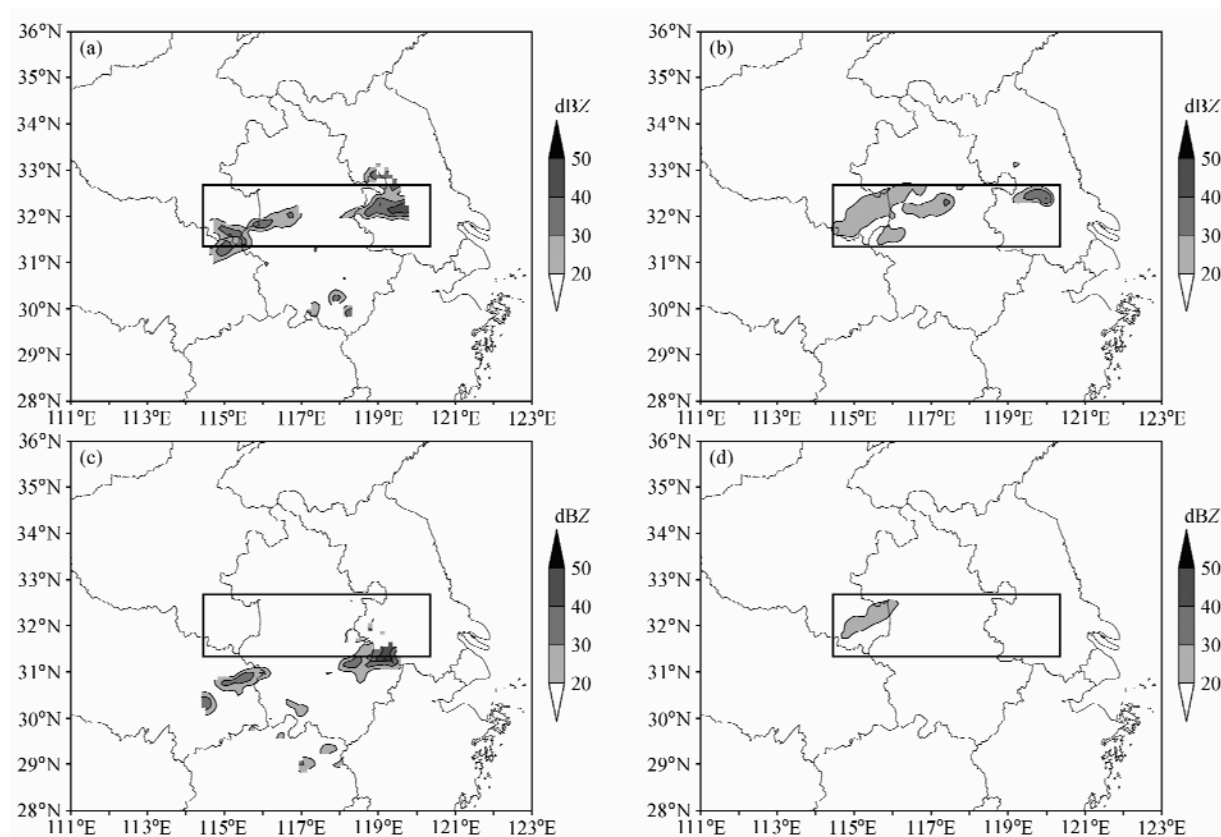


图4 4日21时2 200 m高度处9 km分辨率的反射率回波: (a) 实况雷达观测; (b) 加入雷达资料模拟预报; (c) 最大系数相关外推预报; (d) 不加雷达资料模拟预报

Fig. 4 Observed and simulated echo of reflection at the height of 2 200 m, 2100 LST 4 Jul 2003; (a) Observed reflection; (b) at 9 km grid with radar data assimilation; (c) extrapolation forecast; (d) at 9 km grid without radar data assimilation

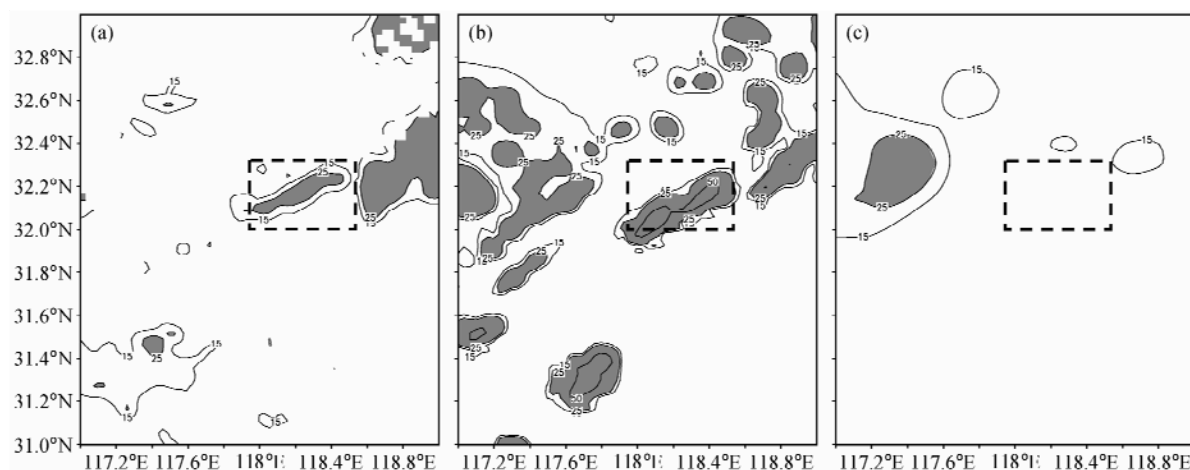


图5 2 200 m高度处观测和预报的7月4日21时(1 h后)反射率分布(单位: dBZ): (a) 插值到3 km分辨率的雷达观测实况; (b) 内层3 km分辨率加雷达模拟的预报值计算回波估计; (c) 9 km分辨率加雷达模拟的预报值计算回波估计。阴影区反射率大于25 dBZ, 虚线方框内为滁州附近地区

Fig. 5 Observed and simulated echo of reflection at the height of 2 200 m, 2100 LST 4 Jul 2003 (units: dBZ): (a) Observed reflection; (b) at 3 km grid with radar data assimilation; (c) at 9 km grid with radar data assimilation. The reflection in the shaded area is over 25 dBZ, The region in the dashed line square is the locus of Chuzhou

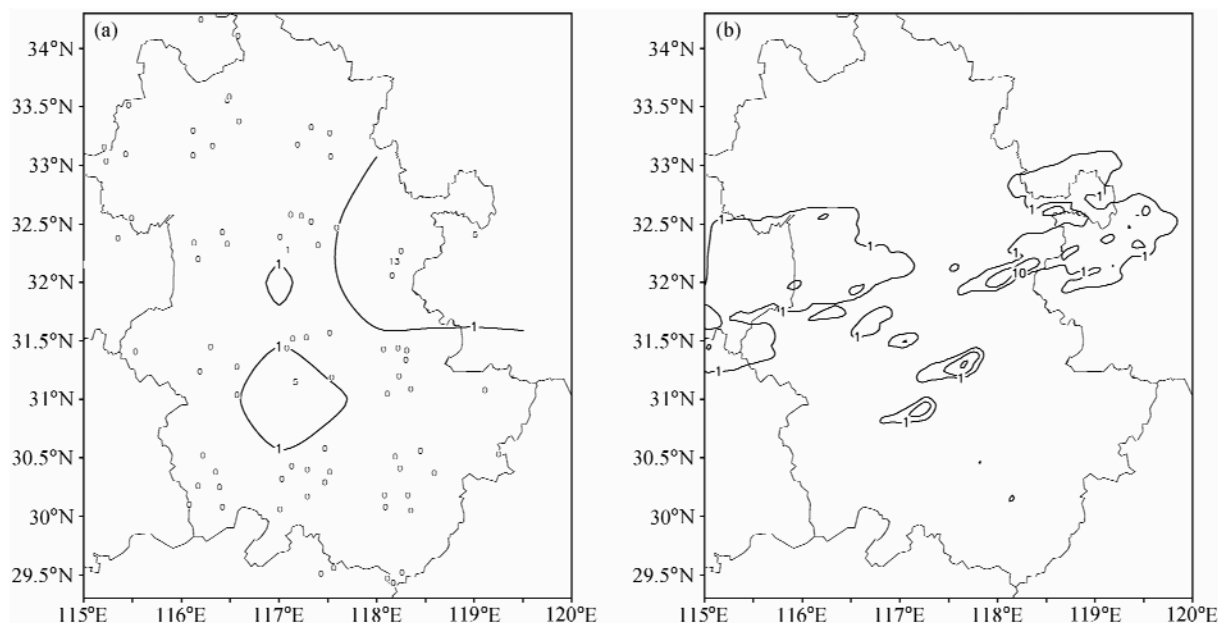


图6 4日20~21时1 h内累积降水(单位:mm): (a) 安徽省内地面自动观测站观测; (b) 加入原始雷达资料3 km分辨率模拟
Fig. 6 Observed and simulated rainfall form 2000 to 2100 LST 4 Jul 2003 (units: mm): (a) Observed rainfall; (b) simulated rainfall at 3 km grid with radar data assimilation

以上实验表明,加入多普勒雷达资料可以弥补中尺度数值模式“spin-up”带来的副作用。表现在开始预报的第一个小时,中尺度数值模式就预报出雷达估计回波的强中心和大致分布,并且预报降水与实况接近;改变了中尺度数值模式由于“spin-up”问题引起的预报延迟及预报前期没有降水的现象。而且通过提高中尺度数值模式的分辨率,使多普勒雷达资料弥补“spin-up”副作用的能力更明显。

(4) Crook^[1]曾研究比较了不同方法0~6 h的预报准确度(图7)。不使用雷达初始化的中尺度模式,由于“spin-up”的影响,0~6 h预报准确率很低。外推预报在0~2 h的预报水平较好,但由于没有考虑系统的发展,其预报准确度随时间下降。而使用雷达初始化的数值模式预报比没有使用雷达初始化的预报准确率高,而且在0~2 h有超过外推预报的潜力;但在2~6 h的预报水平提高不多,是目前中尺度预报的难点;3~4 h为雷达初始化数值模式预报准确率曲线的低谷。

因此,对比本次内层3 km加雷达原始资料模拟3~4 h(即4日23~24时)的降水(图8b)与安徽地面自动站观测对应时间段1 h累积降水(图8a)。由观测可见,4日23~24时的降水主要

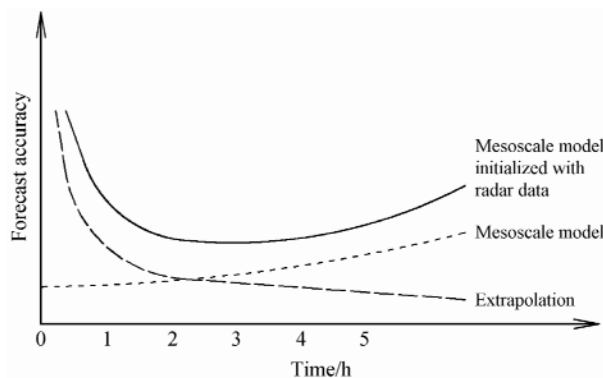


图7 预报准确度随时间变化的示意图^[1]
Fig. 7 Scheme of the forecast accuracy against time^[1]

集中与安徽省中东部,降水中心滁州的1 h累积降水量为45 mm。3 km模拟的降水落区位置与实况比较接近,在滁州的降水为50 mm,在3~4 h表现出较强的预报水平。

3.3 加入多普勒雷达基数据影响预报结果的原因

在本次模拟试验中,无论是9 km的区域,还是9 km和3 km双层区域,通过加入多普勒雷达基数据资料改进初始场,在降水范围、强度、降水中心以及回波估计皆达到改善0~12 h的预报。以下分析了多普勒雷达资料在本次过程中的应用过程及其影响。

传统的地面观测不能提供云水、雨水、冰、

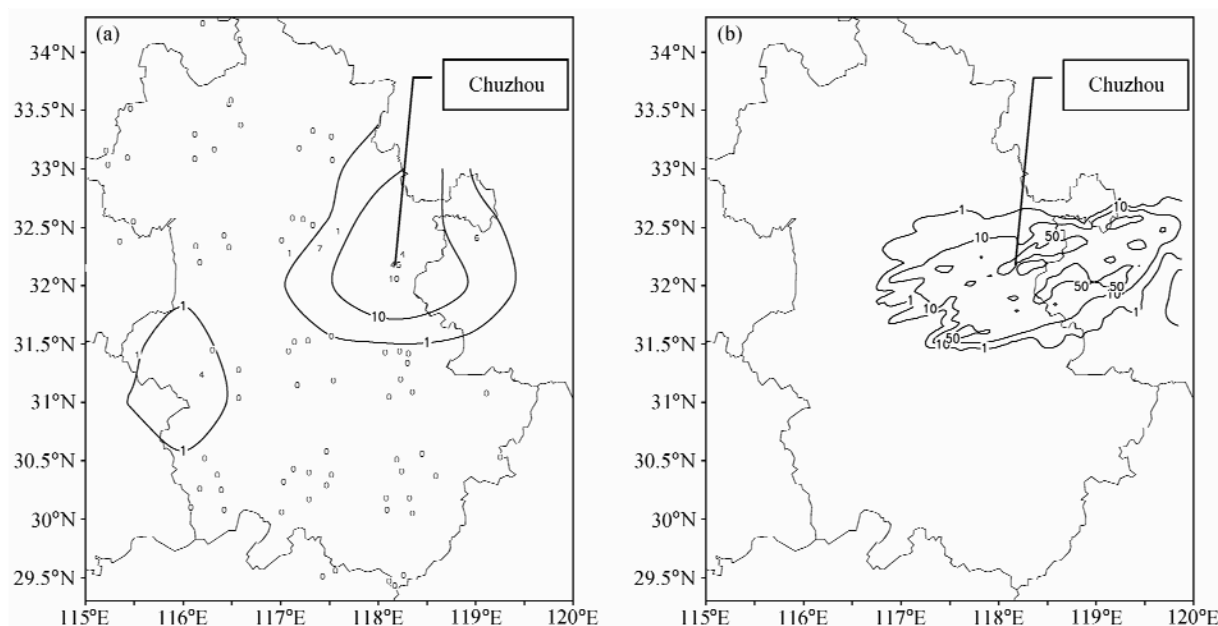


图 8 4 日 23~24 时 1 h 内累积降水 (单位: mm): (a) 安徽省内地面自动观测站观测; (b) 加入雷达资料 3 km 分辨率模拟降水

Fig. 8 Observed and simulated rainfall from 2300 to 2400 LST 4 Jul 2003 (units: mm): (a) Observed rainfall; (b) simulated rainfall at 3 km grid with radar data assimilation

雪等冷凝场的信息, 当它们被用作在云、降水条件下初始数值模式时, 就可能引起降水形式预报的延迟。而高分辨率的雷达资料可以提供中尺度对流的重要信息, 将其应用于中尺度 ARPS 模式中可以得到云水、雨水、冰、雪和雹的三维分析。图 9a 为加入内层 3 km 试验中的多普勒雷达基数据中的原始反射率沿 32.05°N (滁州所在) 的垂直分布, 最大反射率达 50 dBZ。图 9b 为由雷达反射率得到的初始云水、雨水、冰和雪沿 32.05°N 的垂直分布, 这些量都是 ARPS 的预报变量, 可以用于初始化 ARPS 模式。因此, 多普勒雷达观测可以为中尺度数值模式提供云与降水信息, 填补了初始时刻云微物理量的空白, 使随后的微物理演变进程更加合理化, 从而对降水预报产生正面影响。

过去大部分实时数据的非绝热初始化的研究是使用格点分辨率从 30 km 到几百公里的中尺度或大尺度数值模式。很少使用中 β 和更小尺度的模式, 主要是受对流大气观测系统分辨率的限制。而现在高分辨率的雷达观测可以提供对流尺度的云和降水三维分布, 为对流尺度非绝热初始化提供必要的数据源。如图 9c 为由非绝热初始化得到的温度调整, 非绝热加热中心温度达 4 K; 并使用非绝热强迫来产生降水过程所需的散度, 如图

9d, 散度中心值达 $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。散度的调整带来对风场的进一步调整。Wolcott 和 Warner^[13]指出如果环境湿度不充分, 伴随初始散度场的上升运动由于无水汽和无潜热释放将不能维持。Turpeinen 等^[14,15]表明除非湿度场得到加强, 否则非绝热 NNMI 在改善预报上几乎不起作用, 将湿度调整与非绝热初始化联合使用是至关重要的。因此, 根据雷达提供云中凝结信息, 及非绝热初始化得到的垂直环流, 进行湿度调整, 为云中凝结提供源, 并维持垂直环流, 这弥补了常规湿度观测信息的不足。在数据稀缺的地区, 雷达提供湿度调整对模拟出真实的降水格外重要。在雷达资料提供云和降水信息的基础上, 可以进行中尺度模式的非绝热初始化和湿度调整, 使中尺度数值模式实现热启动 (hot start)。所谓热启动, 即初始场更接近于自然状态, 缩短了把“冷”的、与自然有距离的初始场“预热”到接近自然的时间。由此可以有效模拟积分初期的降水。

4 结论

(1) 将多普勒雷达基数据中原始反射率和径向风观测资料应用到高分辨率 ARPS 模式中, 在降

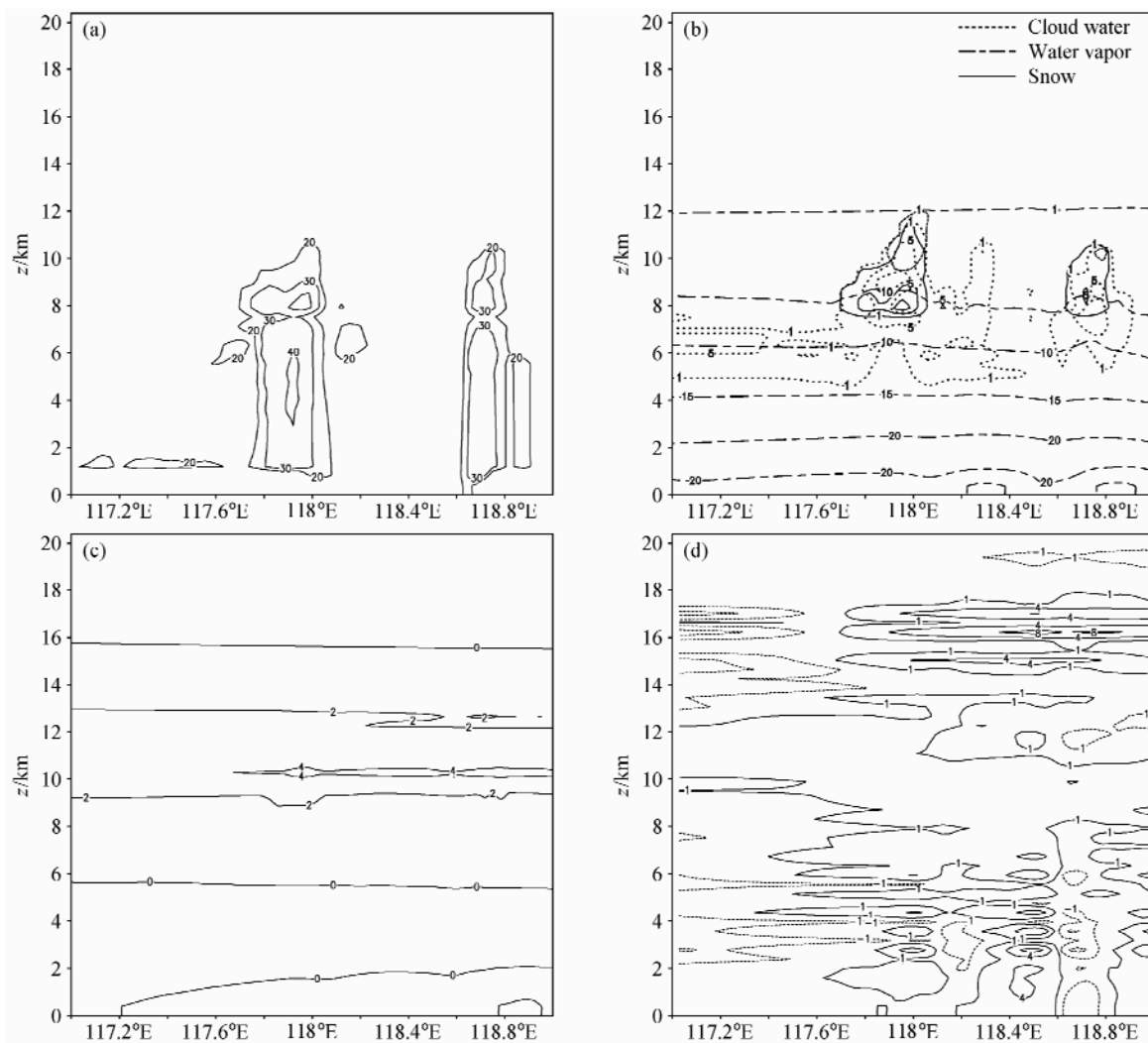


图9 7月4日20时沿32.05°N, $x-z$ 分布: (a) 雷达观测反射率(单位: dBZ); (b) 由雷达反射率得到的初始云水混合比(单位: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、水汽混合比(单位: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和雪混合比(单位: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); (c) 来自于非绝热加热引起的初始时刻温度扰动(单位: K); (d) 与非绝热加热相适应的初始时刻散度场分布(单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig. 9 Cross-section of initial variable along 32.05°N at 2000 BT 4 Jul 2003: (a) Observed reflection (units: dBZ); (b) cloud water mixing ratio (dotted line, units: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), water vapor mixing ratio (long dotted line, units: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), snow mixing ratio (real line, units: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); (c) perturbation potential temperature (units: K); (d) horizontal divergence (units: 10^{-5} s^{-1})

水范围、强度、降水中心以及回波估计皆有达到改善0~12 h的预报。即使是在雷达初始化数值预报低谷区的3~4 h, 仍表现出较好的预报水平。使用多普勒雷达资料初始化中尺度数值模式, 能够弥补“spin-up”带来的副作用, 表现在开始预报的第一个小时, 就预报出雷达估计回波的强中心和大致分布, 并且预报降水与实况接近; 改变了由于“spin-up”引起的回波预报延迟及预报前期没有降水的现象。在此基础上, 通过提高数值

模式分辨率, 可以使多普勒雷达资料弥补“spin-up”副作用的能力更明显, 使数值方法有效用于临近预报成为可能。

(2) 将雷达观测资料应用于数值模式之所以有这种能力, 是因为从多普勒雷达资料可以得到的云和降水信息, 一方面为模式微物理变量提供初值, 这些信息填补了初始时刻云微物理量的空白, 使随后的微物理演变进程更加合理化, 从而对降水预报产生正面影响。另一方面, 为中尺度

模式的非绝热初始化提供对流尺度数据源, 对潜热、动力场和湿度进行调整, 实现模式的“hot-start (热启动)”, 缩短了“预热”时间。

(3) 修改了 ARPS 原有助于处理多普勒雷达 Lev-III 的模块, 可以使我国新一代多普勒雷达数据的原始径向风和反射率应用其中, 并把仰角处理层由原本的 4 个扩充到 14 个, 为更充分地利用多普勒雷达资料提供有利的工具。

致 谢 感谢中国科学院大气物理研究所雷霆老师和王秀明博士在修改模式时给予的帮助, 及中国气象科学研究院周海光老师提供的合肥多普勒雷达基数据资料。

参考文献 (References)

- [1] Crook A (MMM/RAP (NCAR)). Numerical prediction of Thunderstorms, where are we now? IAMAS. 2005 Aug 2—11, Beijing, China
- [2] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 1642~1661
- [3] Yates D N, Warner T T, Leavesley G H. Prediction of a flash flood in complex terrain. Part II: A comparison of flood discharge simulations using rainfall input from radar, a dynamic model and an automated algorithmic system. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39**: 815~825
- [4] Tong M, Xue M. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSSE experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, **133**: 1789~1807
- [5] Qiu C J, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single Doppler radar data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1992, **9**: 588~598
- [6] Hu M, Xue M, Gao J D, et al. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of fort worth tornadic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR. *Mon. Wea. Rev.*, **134** (2): 699~721
- [7] Rogers R F, Fritsch J M, Lambert W C. A simple technique for using radar data in the dynamic initialization of a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 2560~2574
- [8] Xue M, Wang D H, Gao J D, et al. The advanced regional prediction system storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2003, **82**: 139~170
- [9] 徐枝芳, 徐玉貌, 葛文忠. 雷达和卫星资料在中尺度模式中的初步应用. *气象科学*, 2002, **22** (2): 167~173
Xu Zhifang, Xu Yumao, Ge Wenzhong. The impact of using radar and satellite data on meso-scale model numerical simulation. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **22** (2): 167~173
- [10] 托亚, 梁海河, 马淑芬等. 用雷达观测资料改进 MM5 初始场的初步试验研究. *南京气象学院学报*, 2003, **26** (5): 661~667
Tuo Ya, Liang Haihe, Ma Shufen, et al. A preliminary research on improving MM5 initial field using radar data. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26** (5): 661~667
- [11] 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), 93~106
Sheng Chunyan, Pu Yifen, Gao Shouting. The effect of Chinese Doppler radar data on nowcasting of mesoscale model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (1), 93~106
- [12] 张杰. 中小尺度天气学. 北京: 气象出版社, 2006. 199~201
Zhang Jie. *Mesoscale Meteorology*. Beijing: China Meteorological Press, 2006. 199~201
- [13] Wolcott S W Warner T T. A humidity initialization scheme utilizing surface and satellite data. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 1989~1998
- [14] Turpeinen O M, Garand L, Benoit R, et al. Diabatic initialization of the Canadian Regional Finite-Element (RFE) Model Using Satellite Data. Part I: Methodology and Application to a Winter Storm. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 1381~1395
- [15] Turpeinen O M. Diabatic initialization of the Canadian Regional Finite Element (REF) model using satellite data. Part II: Sensitivity to Humidity Enhancement, Latent-Heating Profile and Rain Rates. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 1396~1407