

新一代天气雷达资料在 2003 年江淮流域暴雨模拟中的初步应用：模拟降水和风场的对比

李柏¹ 周玉淑² 张沛源³

1 中国气象局, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 利用时间尺度密集的长沙、常德、合肥、南昌、南京、武汉和宜昌共 7 个站的新一代天气雷达 (CINRAD-SA 雷达) 观测反演资料、TBB 资料、常规的探空和地面观测资料、NCEP 分析资料, 与中尺度 MM5 模式相结合, 以 NCEP 格点资料作为大尺度背景场, 加入 12 h 间隔的探空、3 h 间隔的常规地面观测资料及 1 h 间隔的雷达反演风廓线资料, 进行全程四维同化模拟, 考察中尺度数值模式 MM5 对 2003 年梅雨期间发生在湖南、安徽和江苏的暴雨过程 (7 月 8~9 日) 的模拟能力。分析表明: 除了模拟降水与实况接近以外 (雨量和雨区), MM5 模式输出的风廓线和从雷达观测反演得到的风廓线结果有很好的相似性, 加入雷达反演风廓线资料后对模拟结果有一定改进, 为进一步利用模式输出结果研究造成 2003 年江淮流域暴雨洪涝的中尺度对流系统的结构和机理提供了可能。

关键词 雷达资料 中尺度对流系统 数值模拟

文章编号 1006-9895 (2007) 05-0826-13

中图分类号 P406

文献标识码 A

Application of the China New Generation Weather Radar Data to the Torrential Rain Simulation over the Yangtze River-Huaihe River Basin in 2003: Contrast of Precipitation and Wind

LI Bai¹, ZHOU Yu-Shu², and ZHANG Pei-Yuan³

1 *China Meteorological Administration, Beijing 100081*

2 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract China new generation weather radar (CINRAD-SA radar) takes on volume scan model (VCP31 OR VCP21), which can observe weather systems successively and obtain four-dimensional data. Therefore, the wind profile retrieved from the radar data can be got continuously, namely, the space distribution of the wind and its temporal variation can be known. It makes up the insufficiency of the general observation on temporal and spatial distribution. Once these wind data were merged into the meso-scale model, it would provide more information of the atmosphere and improve the simulation results.

Utilizing the retrieving observation data of CINRAD-SA radar at Changsha, Changde, Hefei, Nanchang, Nanjing, Wuhan, and Yichang, the black body temperature (TBB) data, the general sounding and surface observational data, the National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) $1^\circ \times 1^\circ$ grid data, linked with the meso-scale model MM5, taking the NCEP/NCAR data as the first guess field, a-

adopting the wind-profile data retrieved from the above seven radars with 1-h interval, the sounding data with 12-h interval, the surface observational data with 3-h interval into nudging four-dimensional data assimilation process of MM5, the torrential rain occurred at Hunan, Anhui and Jiangsu provinces during 8-9 July 2003 was simulated.

Two simulation schemes were done in this study. One included the general observed data from meteorological station, but no retrieved wind data of the seven radars, which was called control scheme, the other was the same as the control scheme but adopted the wind profile retrieved from the radar observation with 1-h interval, which was called test scheme. Both the two schemes simulated weather pattern correctly, and the distributions of total precipitation during simulated time (from 1200 UTC 8 July to 1200 UTC 9 July 2003) took on southwest-northeast direction, which is similar to the 24 h observed rainfall distribution. There were several rainfall centers located at this belt, which cannot be found in the observed data. The precipitation of the test scheme was little more than that of control scheme in coarse domain. The temporal variation of the wind direction from the two schemes at the radar station were almost like to the retrieved, but wind speed of test scheme at lower levels was less stronger than that of control scheme sometimes, which reflected the effect of the radar data on the model simulation. The results from the simulation manifested that besides the rainfall value and rain region are similar to the fact, the wind profiles from the simulation are also similar to that from the retrieved radar data, which provided the possibility to study the meso-scale convective system caused the torrential rain over the Yangtze River-Huaihe River basin in 2003.

Key words radar data, meso-scale convective systems, numerical simulation

1 引言

暴雨是一种中尺度现象, 它的形成与中尺度对流系统的发生发展有着密切关系。因此, 在研究暴雨过程时, 不仅要研究暴雨发生环境的大尺度天气系统, 更要研究直接形成暴雨的中尺度对流系统。在研究造成暴雨的这些对流系统时, 由于常规气象资料的时空密度无法分辨中小尺度对流系统(特别是 β 中尺度或更小), 而数值模式可以输出高时空分辨率的各种变量, 因此中尺度数值模式 MM5 在华南暴雨模拟^[1, 2]、登陆热带气旋模拟^[3]以及长江流域暴雨系统(低涡)等的模拟和诊断分析中^[4-13]得到了广泛的应用。这些研究揭示了部分造成暴雨的 α 中尺度、 β 中尺度系统的结构和发生发展机理, 但用的资料除了大尺度的格点资料作为背景场以外, 大多数能收集到的观测资料只是一天两次 [00 时和 12 时(国际协调时, 下同)]的探空和 3 h 一次的地面常规观测。野外加密观测资料中的高空观测的时间间隔是 6 h 一次^[14-16], 目前, 地面加密观测站点的空间尺度仍然达不到捕捉中小尺度系统的要求。若仅用这些观测资料, 就可能漏掉中小尺度系统, 而雷达资料的应用则可部分弥补这一缺陷。20 世纪 90 年代以来, 随着美国 NEXRAD WSR288D 雷达网的建设, 气象学家们开始关心如何利用高分辨率的雷达资料, 通过反演、同化以及各种非绝热

初始化等有效手段来改进初始场, 进行高分辨率的数值天气预报。雷达资料四维变分同化^[17-19]和集合卡尔曼滤波技术^[20-22]在理论和实际个例试验中均得到了较好的结果。此外, 通过反演、三维变分等从雷达资料中反演出风场, 为模式提供一个分辨率较高的初始场方面的工作也取得了很好的进展^[23-25], 这种方法由于省机时, 还很适合业务运行。国内在多普勒雷达反演及各种外推临近预报应用技术方面已有不少研究^[26-28], 在将雷达资料加到中尺度模式方面, Sheng 等^[29]将国内新一代多普勒雷达(CINRAD)反射率及径向风资料直接用于中尺度数值模式 ARPS 进行模拟, 通过一次华北地区暴雨过程的模拟对比试验, 分析了雷达资料对初始场的改进效果及其对模拟结果的影响。这些工作对雷达资料及产品应用到数值模式中已经作出了有意义的探索。

在以往暴雨系统的模拟研究中, 模式输出的大尺度环流形势和总雨量分布与实况比较接近, 但由于与实况的对比都是建立在常规观测资料的基础上, 且降水的对比都是模拟时间段内总降水量的对比, 结果的一致性并不能代表中间过程也是一致的, 对于能不能准确模拟强降水发生的时间, 以及用此模拟结果来分析暴雨系统的发生发展和结构特征, 能否相对真实地代表实际大气中的暴雨系统等仍存在问题。在国内, 由于中国气象局新一代天气

$$v_x = v_{x0} + v'_x, \quad v'_x = \frac{\partial v_x}{\partial x}x + \frac{\partial v_x}{\partial y}y,$$

$$v_y = v_{y0} + v'_y, \quad v'_y = \frac{\partial v_y}{\partial x}x + \frac{\partial v_y}{\partial y}y,$$

其中, v_{x0} 、 v_{y0} 分别是 $(0, 0, z)$ 水平风速在 x 、 y 轴的分量。 v_{z0} 为垂直速度, R 为距离, α 为仰角, φ 为方位角, 并可以写成傅氏级数形式。在以上假定下, 多普勒速度和水平风向量之间的关系可简化为

$$V(\varphi) = \frac{1}{2}R\cos^2\alpha\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y}\right) + v_{z0}\sin\alpha +$$

$$v_{x0}\cos\alpha\sin\varphi + v_{y0}\cos\alpha\cos\varphi +$$

$$\frac{1}{2}R\cos^2\alpha\left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y}\right)\sin 2\varphi +$$

$$\frac{1}{2}R\cos^2\alpha\left(\frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_x}{\partial x}\right)\cos 2\varphi.$$

若将 $V(\varphi)$ 按方位角 φ 转成傅氏级数, 有

$$V(\varphi) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^2 (a_n \sin n\varphi + b_n \cos n\varphi).$$

比较上两式, 有

$$a_0 = R\cos\alpha\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y}\right) + 2v_{z0}\sin\alpha,$$

$$a_1 = v_{x0}\cos\alpha,$$

$$b_1 = v_{y0}\cos\alpha,$$

$$a_2 = \frac{1}{2}R\left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y}\right)\cos^2\alpha,$$

$$b_2 = \frac{1}{2}R\left(\frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_x}{\partial x}\right)\cos^2\alpha,$$

$$a_n = 0, \quad n \neq 0, 1, 2,$$

$$b_n = 0, \quad n \neq 0, 1, 2.$$

现用正弦波曲线拟合方法求解系数。当只有一个 PPI 扫描时, 随着距离圈的增加, 雷达探测高度也增加。在距离为 R 的地方, 其高度可以用测高公式计算得到, 那么, 就可以取同一距离圈上的径向速度来反演该高度上的平均风速风向。当用立体扫描资料反演垂直风廓线时, 可保雷达反演的水平距离不变 (一般取 30 km), 利用水平距离和待反演的高度层两个参数来确定用哪个径向圈上的径向速度反演垂直风廓线。

归纳起来, VAD 反演方法具有以下优点: (1) 在晴空大气或降水条件下均可得到风廓线的估计值; (2) 反演时不需要 360° 的资料, 只要资料点数超过 25 点即可; (3) 可检验丢失或有怀疑的风资料; (4) VAD 技术反演的风可用于更新环境风资料表, 并放入雷达代码信息中。

在雷达观测反演逐时雨量时使用的 $Z-R$ 关系中, 本文采用 $a=300$, $b=1.4$ 。有关 Z 值的取法, 则采用构造一个复合平面的方法, 即在近距离范围, 采用高仰角探测的 Z 值, $0\sim 20$ km 范围, 采用 3.5° 仰角, 这样可以避免地物杂波的影响; $20\sim 40$ km 范围, 采用 2.4° 仰角, 大于 40 km 范围则采用 0.5° 或 1.5° 仰角, 主要视雷达资料的质量而定。采用复合平面取法主要是尽量采用低层的 Z 值进行定量估测。

2.3 模式

本文研究所用模式为非静力中尺度数值模式 MM5V3, 水平方向为 Arakawa B 交错网格, 采用 2 层嵌套。粗网格格距为 36 km, 110×120 个格点; 细网格格距为 12 km, 151×163 个格点; 垂直为 23 个 σ 层; 显式微物理过程粗网格采用混合冰相方案, 细网格采用 graupel 方案, 积云参数化方案粗网格采用 Grell 方案, 细网格采用 KF (Kain-Fritsch) 方案; 边界层方案粗细网格均采用 Blackadar 方案。使用 NCEP $1^\circ\times 1^\circ$ 的格点分析资料作为背景场, 再用雷达反演风场和地面常规观测资料进行客观分析订正, 同时, 在全物理过程的模拟中, 采用牛顿张弛逼近法的四维资料同化方案来同化分析雷达反演风廓线及常规探空和地面观测资料。模拟初始时刻为 2003 年 7 月 8 日 12 时, 共积分 24 h。

2.4 牛顿张弛逼近法的四维资料同化方案简介

牛顿张弛逼近法是一种连续性的动力同化方法, 它通过对模式控制方程的强迫使模式值逐步逼近观测值, 通过在一个或几个预报方程中增加一个与预报和实况的差值成正比的虚假倾向项, 在可使用观测资料的时间内, 使模式解逼近实况资料, 并使变量之间得到动力协调, 这种修正过程中每一时间步长模式都保持各要素之间的平衡。前人的研究表明^[30~32], 牛顿张弛逼近法可用来同化任何时空分布的与模式变量相对应的资料。常用的牛顿张弛逼近法有两种: 格点分析场的逼近和站点资料的逼近。本文用的是站点资料的牛顿张弛逼近法, 它不仅可同化非常规资料, 还能提供平衡较好的模式初值而减小模式的 spin-up 效应, 可改进模拟结果。

3 实况与模拟结果对比

本文做了两个模拟试验, 都用 NCEP/NCAR

$1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的格点分析资料作为第一猜值场, 试验 1 中有常规探空和地面观测资料的同化, 但没有加雷达反演风廓线资料, 以下称为控制试验; 试验 2 除了加入雷达反演风廓线资料外, 其余都与试验 1 相同, 以便考察加入雷达反演风廓线资料是否改进了模拟结果, 以下称为敏感性试验。

3.1 降水

2003 年 7 月 8 日 12 时~9 日 12 时对应的 24

小时降水实况分布如图 1a 所示(实况雨量图用了 1994 个雨量计资料绘制, 在绘图时省略了降水量小于 20 mm 的区域), 雨区呈西南-东北走向, 除了湖南西北部的降水中心外, 24 小时雨量大于 50 mm 的地区集中在安徽和江苏, 而安徽南部的降水中心则在 60 mm 以上。控制试验和敏感性试验模拟的雨区都呈现出一条西南-东北走向的雨带(图 1b~e), 在中国陆地上的位置与实况是基本一致的。

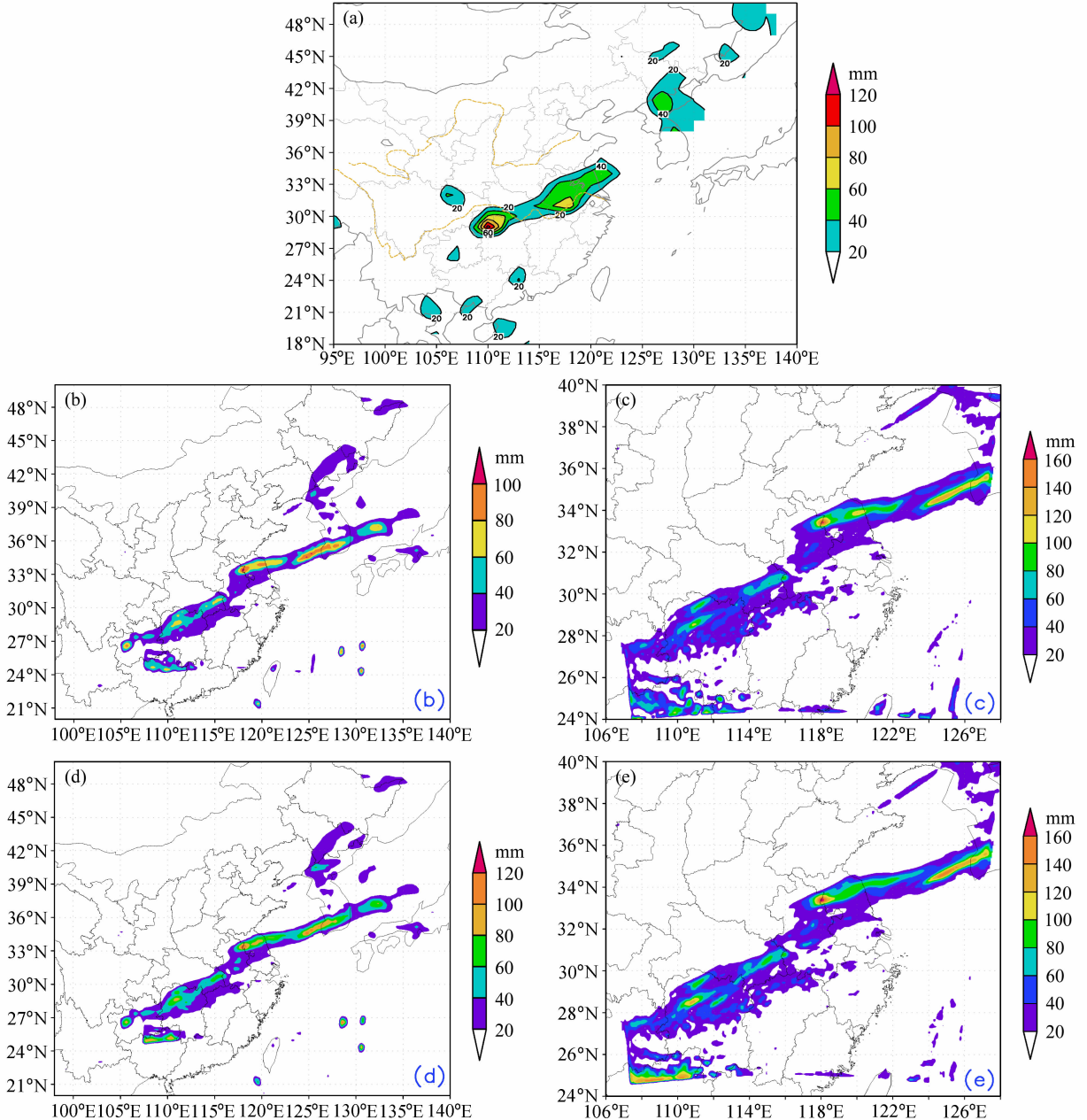


图 1 2003 年 7 月 8 日 12 时~9 日 12 时降水分布: (a) 实况; (b) 控制试验区域 1; (c) 控制试验区域 2; (d) 敏感性试验区域 1; (e) 敏感性试验区域 2

Fig. 1 Distributions of precipitation from 1200 UTC 8 Jul to 1200 UTC 9 Jul 2003; (a) Observation; (b) control scheme for domain 1; (c) control scheme for domain 2; (d) test scheme for domain 1; (e) test scheme for domain 2

就雨带中心位置而言, 两个试验模拟的结果基本一致, 都有 3 个中心: 分别位于 (26°N , 106°E)、(28.5°N , 110.5°E) 和 (33°N , 118°E)。除了 (26°N , 106°E) 的中心比实况明显偏大以外, 其他两个中心都基本与实况相对应。由于没有观测资料, 洋面上的降水中心不能对照, 但是从环流和雨带的分布形势, 这儿可能也会有降水。从降水量值来看, 两个试验在细网格区域上是差不多的 (图 1c、e), 但在粗网格区域, 敏感性试验的最大降水值比控制试验要高出 20 mm 左右 (图 1b、d), 同时, 由于分辨率的提高, 两个试验模拟的雨带中都出现了实况观测难以体现的中尺度雨团结构, 主要体现在安徽中南部和江苏附近的降水区中 (尤其是图 1c 细网格的模拟结果)。虽然雨团中心位置与实况有一些出入, 从模拟雨量来看, 除了局地的大暴雨中心 (如: 无为、张家界等地的降水) 没有模拟出来以外, 敏感性试验粗网格模拟的雨区最大值与实况基本一致, 比控制试验粗网格模拟的雨区量值更接近实况一些。而细网格模拟雨区的雨量都比实况偏高, 这也是目前 MM5 模拟中普遍存在的一个问题。总体来说, 两个试验的降水模拟结果 (雨量和雨区) 都还是比较理想的, 但加入高时间分辨的雷达资料后, 在粗网格模拟雨量上还是稍微有所改进。

在整个 24 小时降水模拟还较好的情况下, 我们再来看中间过程是否也与实况接近。由于模拟时段的降水过程主要发生在前 12 小时, 即 9 日 00 时以前, 同时, 考虑到模式启动时有一个调整适应 (spin-up) 过程, 我们从积分 6 小时以后开始分析, 即取 8 日 18 时~9 日 00 时内逐时的模拟雨量与雷达观测反演的逐时雨量进行对比。

在以下雷达降水图中, 受雷达观测范围的影响, 合肥雷达的有效扫描半径大约为 150~200 km, 除了与安徽交界的苏西地区, 江苏大部份地区观测不到, 长沙的雷达观测不到湘西北地区, 因此作为实况图的图 2a、3a 和 4a 上对雨带的西端和东端部分反映不出来。从以上逐时的降水分布可见, 模式对湖南北部、湖北南部、安徽中南部和江苏南部的降水带都模拟出来了。

具体来说, 在 18~19 时的时间里, 两个模拟试验的降水分布与雷达反演的降水分布形势是类似的, 都表现为一条西南-东北走向的雨带 (图 2)。

加入雷达反演风廓线后, 江苏中西部大于 35 mm 降水区域的分布明显大于控制试验的结果 (图 2b、c)。再来看 19~20 时的情况, 从图 3 可见, 对雷达反演中出现在安徽东南部的雨带, 两个试验模拟的结果都偏北。而在江苏界内的降水区中, 敏感性试验中大于 35 mm 的雨区区域小于控制试验的结果, 且中心也稍偏东, 而在东海上, 控制试验的降水中心只有 15 mm, 但敏感性试验中则出现了 20 mm 的降水中心。在 20~21 时的时间里, 控制试验在江苏东部的降水中心范围比敏感性试验大, 但降雨量小 (图 4b、c), 表明敏感性试验中江苏境内的降雨在区域和量值上都更集中一些。此后的几个小时中 (图略), 模拟的降水分布也都有类似的情况, 即安徽南部的雨带比雷达反演结果偏北, 敏感性试验中江苏东部的降水中心大于控制试验的结果, 且中心稍偏东。由于这一区域没有雷达观测, 很难说控制试验和敏感性试验的结果哪个更接近实况, 但至少表明加入雷达反演风廓线资料后, 对局部地区的降水还是有一定的影响。

由图 1 可知, 模拟时段中的 24 小时累积降水的雨区位置与实况比较接近, 整体降水的区域和量值差别并不大, 但从逐时的降水位置与雷达反演降水的对比来看, 模拟雨团位置较雷达反演降水偏北, 尤其是安徽和江苏境内的降水。从模拟的形势场来看, 虽然模拟结果基本再现了此次锋面南压, 低涡系统沿锋面从西南方向向东北方向移动的过程, 但降水系统还是比实况要稍微偏北一些, 这可能是造成模拟雨团位置较雷达反演降水偏北的原因之一。另外, 雷达反演降水也存在误差, 不一定与实况完全一致。因此, 为了进一步验证逐时降水模拟的正确与否, 我们又分析了逐时的 TBB 资料, 以期通过对流发展旺盛的地区与雨区的对比来更好地确定模拟雨区分布的合理性。从 7 月 8 日 22 时 (图 5a) 和 23 时 (图 5b) 的 TBB 分布可见, 与强对流发展对应的 $\text{TBB} \leq -70^{\circ}\text{C}$ 区域在湖南北部、湖北南部、安徽和江苏交界的南部区域以及江苏东部沿海地区, 而在这些区域模拟有降水出现。尤其是江苏中东部的雨带, 有 $\text{TBB} \leq -65^{\circ}\text{C}$ 的情况, 表明这儿对流活跃, 也有可能发生强的降水。对 TBB 分布的分析也说明虽然在某些地区模拟降水结果与雷达观测反演降水不一定重合, 但模拟的结果还是有一定的可信度。

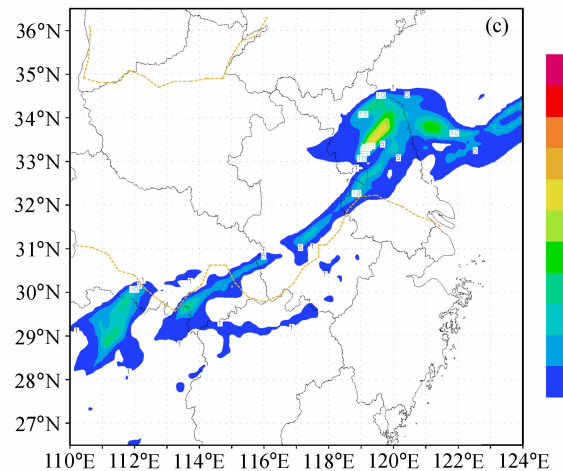
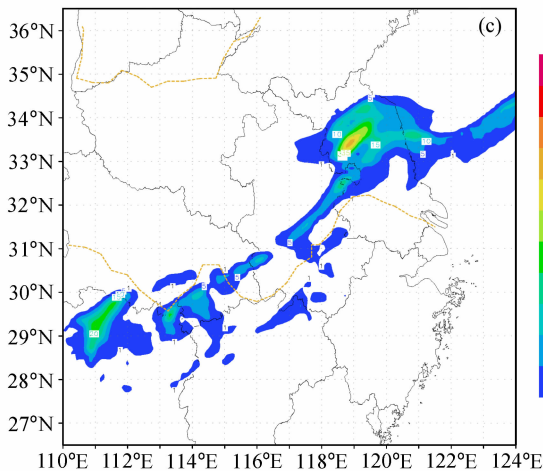
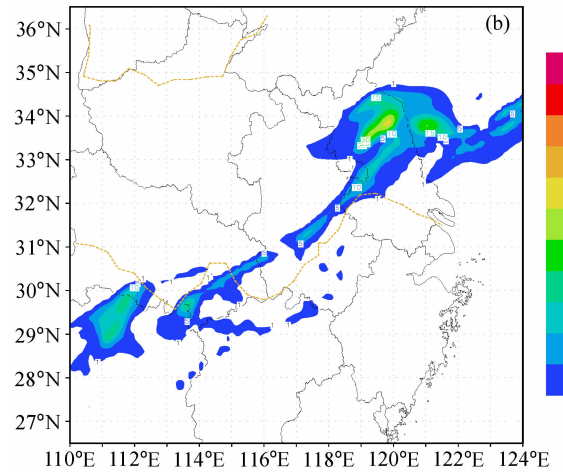
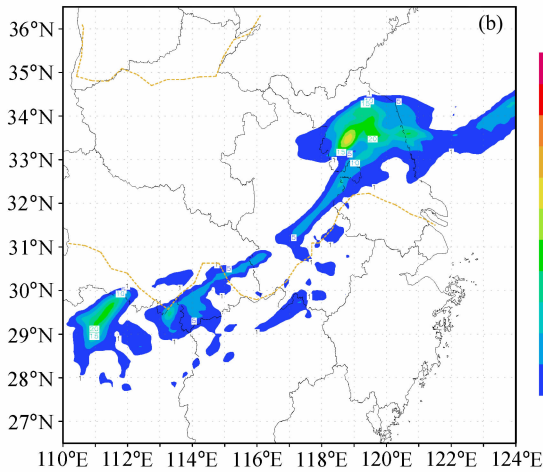
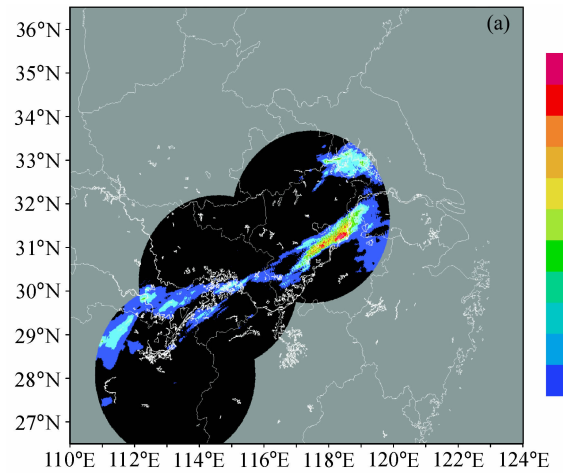
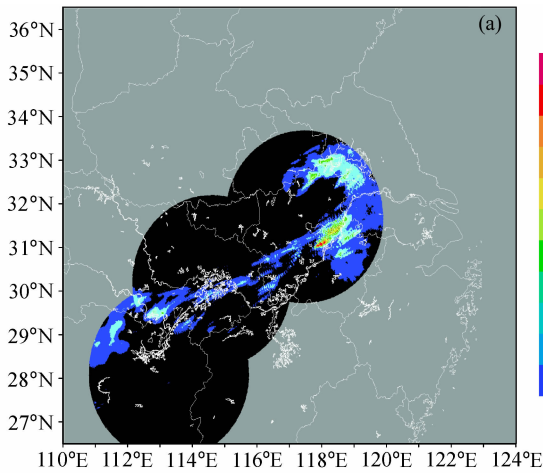


图2 2003年7月8日18~19时降水分布:(a)雷达反演降水;(b)控制试验;(c)敏感性试验

Fig. 2 Distributions of precipitation from 1800 UTC to 1900 UTC 8 Jul 2003: (a) Retrieved rainfall from radar observation; (b) control scheme; (c) test scheme

3.2 形势场和风场

2003年7月8日12时~9日12时期间,梅雨锋呈西南东北走向维持在淮河流域,梅雨锋雨带有

图3 同图2,但为19~20时

Fig. 3 The same as Fig. 2, but from 1900 UTC to 2000 UTC

一个由西北向东南移的过程,对应的中尺度降水系统沿梅雨锋南部边缘从西南向东北方向移动。从实况图(图6a)上可见,850 hPa上,西太平洋副热带高压(图中由148 dagpm线代表)已经西伸北进到105°E以西和30°N,基本控制了我国的华南地区和

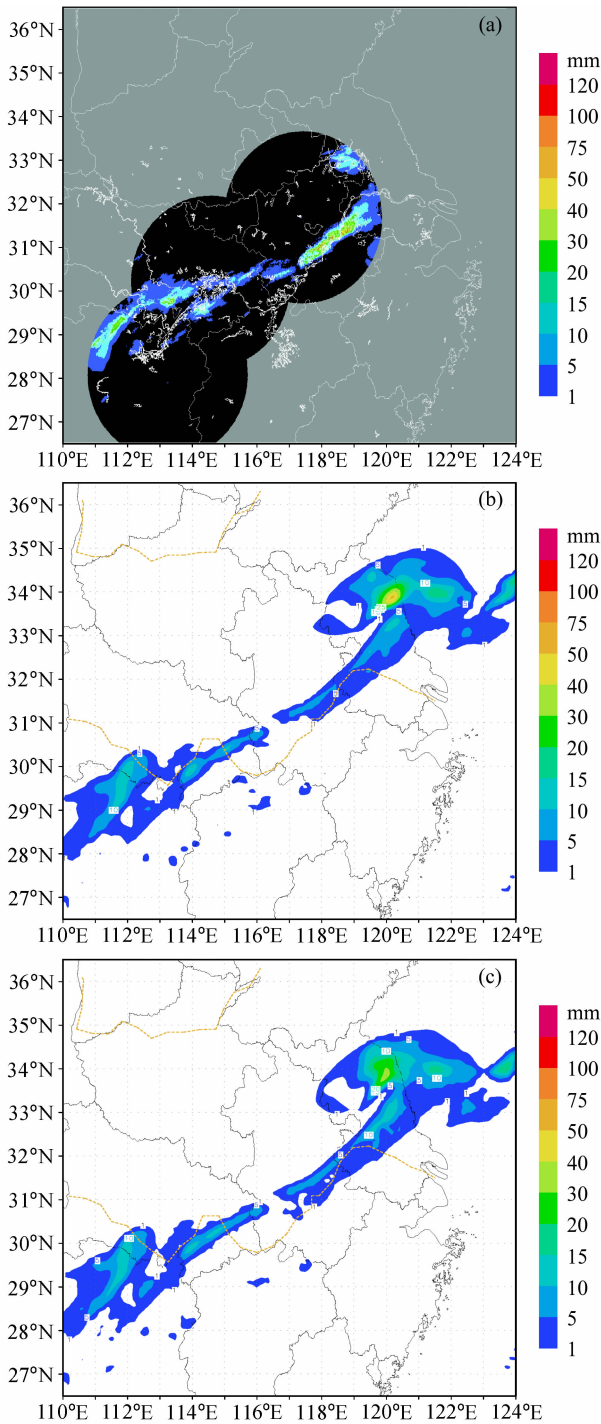


图 4 同图 2, 但为 20~21 时
 Fig. 4 The same as Fig. 2, but from 2000 UTC to 2100 UTC

华东大部分地区。一条西南东北走向的切变线从青藏高原东南角向东北方向延伸, 在湖南北部、湖北、安徽和江苏有明显的西南风和东北风的交汇, 是对流容易发生的地区。长江中下游地区有一支较强的西南风急流, 急流在安徽和江苏南部有极大值。

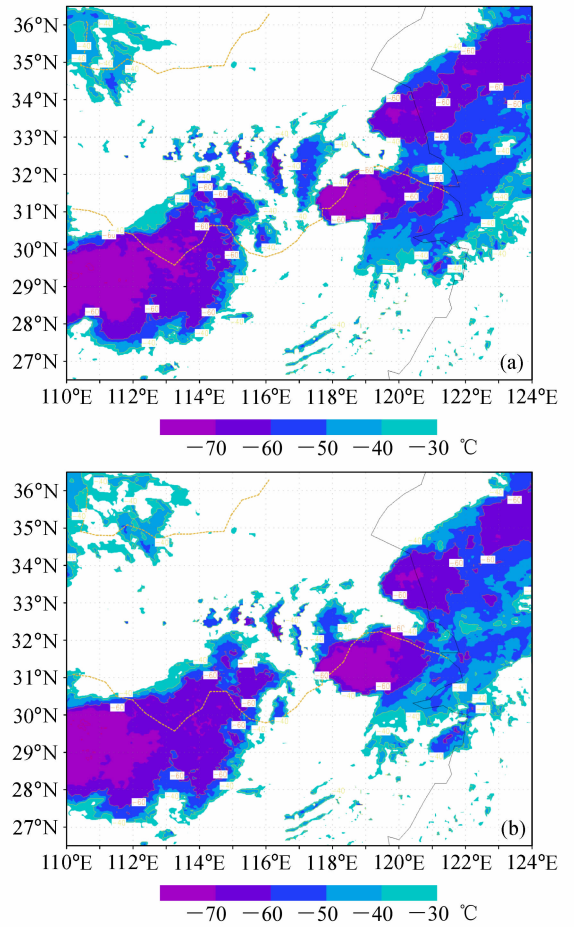


图 5 2003 年 7 月 8 日的 TBB 分布: (a) 22 时; (b) 23 时
 Fig. 5 Distributions of the black body temperature (TBB) at 2200 UTC (a) and 2300 UTC (b) on 8 Jul 2003

对比 7 月 9 日 00 时 850 hPa 的风场形势和位势高度分布可以看到, 控制试验(图 6b)和敏感性试验模拟的风场(图 6c)都较好地模拟出了副高以及西南低空急流, 由于分辨率的提高, 除了切变线比实况更明显外, 河套东部地区的环流也比实况要显著。模拟出的西南低空急流在安徽和江苏达到最大值, 与实况是一致的。由其他气压面层的分析(图略)也表明模拟结果与实况比较接近, 可见无论是否加入雷达反演风廓线资料, 模式的模拟结果从总体天气形势和风场来看都还是较好的。

3.3 风廓线演变分析

本小节的分析是从模拟结果中提取各个雷达站点所在位置处的风向、风速的垂直分布随时间的演变与对应雷达观测反演的风廓线演变进行对比分析。

对武汉雷达 7 月 08 日 12 时~9 日 03 时期间

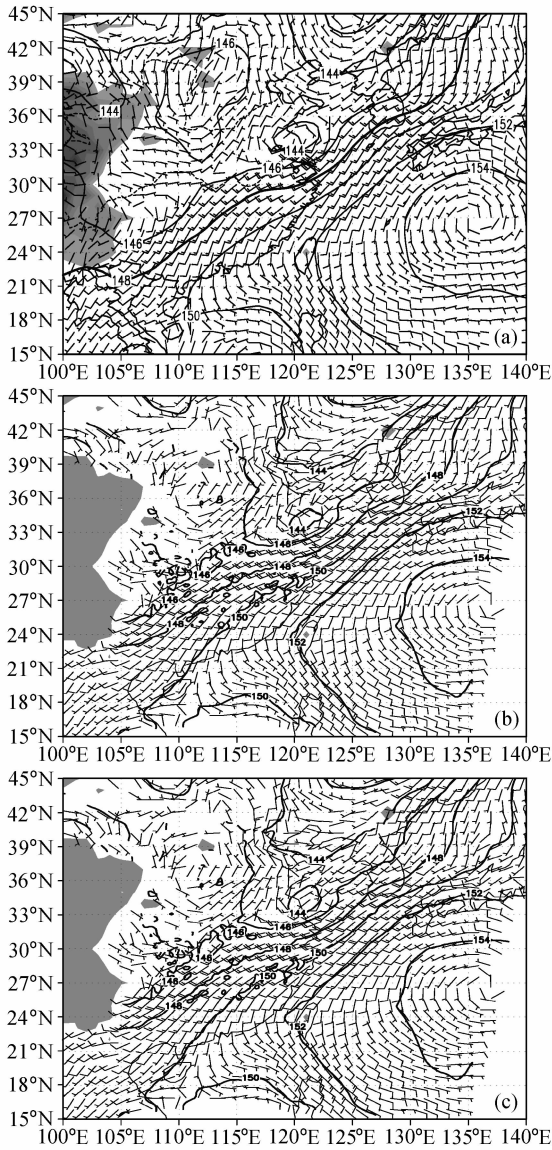


图6 2003年7月9日00时在粗网格区域850 hPa位势高度(单位: dagpm)和风场(单位: m/s)分布: (a) 实况; (b) 控制模拟; (c) 敏感性试验。阴影区为海拔高度超过1500 m区域
Fig. 6 The geopotential height (dagpm) and wind (m/s) in domain 1 on 0000 UTC 9 Jul 2003; (a) Observation; (b) control scheme; (c) test scheme. The shading means the altitude more than 1500 m

每小时的反演风廓线时间演变(图7a)可见: 在此期间, 武汉上空基本维持西南风不变, 中低层的风速维持在4~6 m/s左右, 从8日21时开始, 低层1 km高度的地方出现了很小的偏北风; 从控制试验和敏感性试验的模拟结果(图7b、c)来看, 两个试验的结果在武汉这个点的模拟风速风向的变化基本一致, 低层偏北风都只出现在8日16~18时之间,

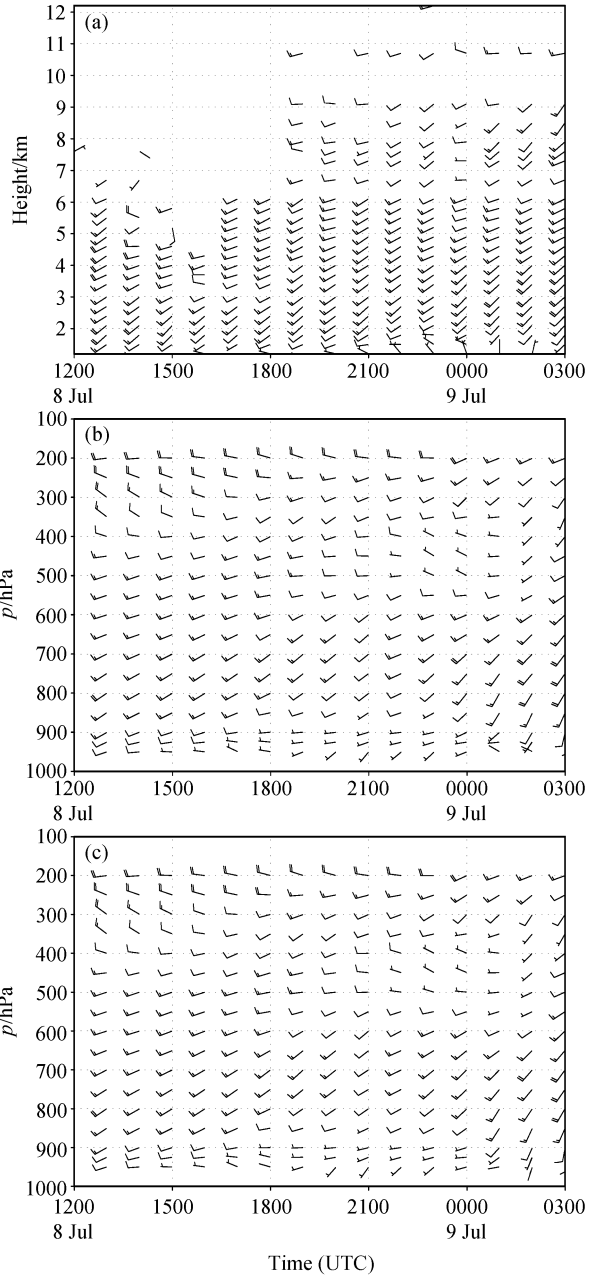


图7 2003年7月8日12时~9日03时武汉站雷达观测反演(a)、控制试验(b)和敏感性试验(c)的风廓线演变。a图空白处表示无观测资料
Fig. 7 The temporal variation of wind profile at Wuhan station from 1200 UTC 8 Jul to 0300 UTC 9 Jul 2003; (a) Retrieved from radar observation; (b) control scheme; (c) test scheme. The blank in (a) means there is no data

但武汉雷达观测反演的低层偏北风出现在21时以后。除了低层的偏北风扰动的模拟与反演结果在时间上有一些出入以外, 在模拟时间段内, 整个武汉上空都是西南风, 风速大小也与雷达反演风廓线的

量值相当, 模拟结果的风速大小还是比较合理的。

从合肥站观测的 7 月 08 日 12 时~9 日 06 时每小时的雷达反演风廓线时间演变中 (图 8a) 可以看到, 在 8 日 12 时, 合肥站低层盛行西南偏南风, 而高层主要为西南风, 风随高度顺转, 表明合肥站上空有暖平流。随着锋面的南压, 到 19 时, 低层风向逐渐转为西南偏西风, 而中层 4~5 km 高度上开始出现北风。到 20 时以后从低层到中层, 风向基本转变为西北偏西风, 表示锋面经过合肥站。从模拟结果 (图 8b、c) 来看, 两个试验的结果都表明: 合肥站上空也有风随高度的顺转, 低层西南风也是在 20 时左右转为偏西风, 但是明显的西北风的出现比雷达反演风场要晚 2 个小时左右。从风速大小来看, 8 日 17 时以前合肥站低层基本为西南偏南风, 风速较小在 4~6 m/s, 而模拟的风速大小与雷达反演风廓线的值基本相当。从风速值的变化

趋势来看, 在 1.5~3 km (700~850 hPa) 高度上, 雷达反演风场和模拟风场在 18 时以前都维持在 10 m/s 左右, 到 19 时以后都减小到 4~8 m/s, 9 日 03 时以后又开始增大, 模拟的风场变化趋势与雷达反演风场是一致的。从模拟风廓线分布来看, 低层西南风转为西北风的时间从 8 日 18 时到 9 日 02 时之间, 遗憾的是, 在锋面过境合肥站的 21~23 时没有相应的雷达观测资料, 无法更细致地对比这一关键时间段内的风速风向变化。从合肥站逐时的观测降水 (图 8d) 可以发现, 合肥站的降水主要出现在 8 日 15 时~9 日 00 时之间 (尤其是在 8 日 15 时和 16 时, 1 小时降水量分别达到了 8 mm 和 16.7 mm)。从降水出现的时间来看, 合肥站的降水发生在锋面过境以前的西南暖湿气流中。从 8 日 18 时开始低层风向逐渐从西南转为偏西风, 到 9 日 00 时以后出现明显的西北风后, 表明锋面经过

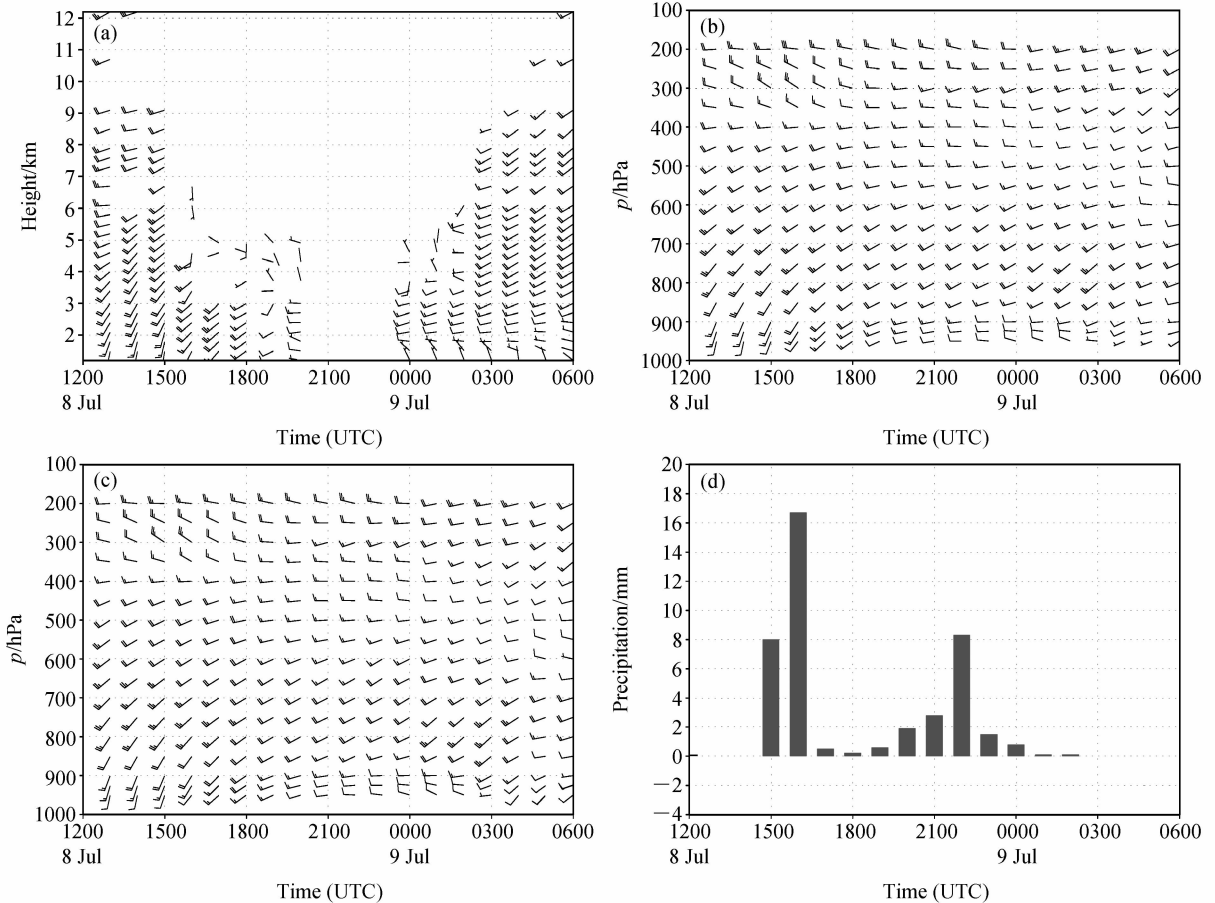


图 8 2003 年 7 月 8 日 12 时~9 日 06 时合肥站雷达观测反演(a)、控制试验(b)和敏感性试验(c)风廓线演变及合肥站逐时观测降水(d)。a 图空白处表示无观测资料
Fig. 8 The temporal variation of wind profile (a) retrieved from radar observation and simulated from (b) the control scheme and (c) the test scheme, and (d) observed precipitation with 1-h interval at Hefei station from 1200 UTC 8 Jul to 0600 UTC 9 Jul 2003. The blank in (a) means there is no data

合肥站,降水也逐渐停止。从合肥站模拟风廓线和观测的逐时降水演变对比分析表明,模拟的风场基本反映了锋面经过合肥站的变化,同时,在降雨前后,低层的风场也出现了风向的明显改变,可以用来分析锋面结构及锋面上的气旋系统的演变和发展。

对控制试验和敏感性试验合肥站上空风速更细致的对比后发现(图 8b、c):在 8 日 18 时,925 hPa 高度上,敏感性试验的风速为 8 m/s,而控制试验则为 6 m/s;8 日 19 时,950 hPa 高度处,敏感性试验的风速为 6 m/s,而控制试验则为 4 m/s;在 8 日 20 时,850 hPa 高度上,敏感性试验的风速为 8 m/s,而控制试验则为 6 m/s;从 9 日 01 时开始,在 700 hPa 以下,敏感性试验的风速基本都比控制试验的风速大,说明加入雷达反演风廓线后对局地风速的变化还是有影响作用的。对合肥站来说,两个试验模拟的风向是一致的,但某些时刻,加入雷达反演资料后模拟的低层风速会有所增强,这可能是因为模拟中加入雷达反演风廓线后,由于加入的反演风速值有时比模式模拟的要偏大一些,模拟过程中,通过牛顿张弛逼近法使模式解逼近观测值后,可能导致低层风速有所增强,进一步表明加入了雷达反演风廓线后对模拟结果有所改变。

4 结论与讨论

从以上对实况和两个试验的模拟降水分析可以看出,降水的模拟虽然还没有模拟出局地的大暴雨,但整个的雨区分布还是可以接受的。对风廓线的比较分析表明:模式大气中的风场随时间和高度变化的基本特征和雷达反演风廓线的结果比较接近,加入雷达反演风廓线资料后,对局地的降水和风速会产生一定影响。在数值模拟中将时间密集的雷达反演风廓线资料同化到模式中有助于提高模拟结果对降水系统的刻画水平,为分析降水系统的结构和发展演变提供必要的基础。

从本文的对比分析可以看到,这次个例的模拟虽然总体上是成功的,具体表现在模拟结果从环流和风场形势及降水落区及大小上来看基本是合理的,但考虑到由于模式使用 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 资料作为背景场,背景场资料分辨率较为粗糙,同时,由于反演方法还有缺陷,对雷达观测风资料的反演也不能完全反映天气实况,且将反演资料同化到模式

中进行订正时,要计算出较细分辨率的结果,模式也需要一定时间的适应,因此模式模拟存在一定的时间滞后。另外,雷达资料从 6 min 间隔变为 1 h,这也在很大程度上模糊了雷达资料反映的短波波动的连续变化。同时,本研究收集到的雷达资料反演风廓线虽然在时间上加密了资料,但在空间分布上只是相当于增加了几个探空站点,这也是加入雷达资料反演风廓线资料后并没有显著改善降水和风场模拟的原因之一,所有这些问题都是以后研究工作中需要改进的。需要指出的是,本文所用方法虽然简单,也没有充分利用到雷达观测资料的高空间分辨率的特点,但是在目前情况下,对台站业务人员利用雷达资料来改进模拟结果和业务预报来说,却还是一个简单可行的方法。

致谢 TBB 资料由国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418301 资料组提供,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 张庆红,刘启汉,王洪庆,等. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟. 科学通报, 2000, **45**: 1988~1992
Zhang Qinghong, Liu Qihan, Wang Hongqing, et al. Numerical simulation of mesoscale convective systems over the Meiyu front in South China. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2000, **45**: 1988~1992
- [2] 孙建华,赵思雄. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I. 引发暴雨的 β 中尺度对流系统的数值模拟研究. 大气科学, 2002, **26**: 541~557
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. A study of mesoscale convective systems and its environment fields during the June 1994 record heavy rainfall of South China. Part I: A numerical simulation study of meso- β convective system inducing heavy rainfall. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2002, **26**: 541~557
- [3] 邓国,周玉淑,李建通. 台风数值模拟中边界层方案的敏感性试验 I. 对台风结构的影响. 大气科学, 2005, **29**: 417~428
Deng Guo, Zhou Yushu, Li Jiantong. The experiments of the boundary layer schemes on simulated typhoon. Part I. The effect on the structure of typhoon. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2005, **29**: 417~428
- [4] Gao S T, Tao S Y, Ding Y H. The generalized E-P flux of wave-meanflow interactions. *Science in China* (Series B), 1990, **33**: 704~715
- [5] 高坤,徐亚梅. 1999 年 6 月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构特征. 大气科学, 2001, **25**: 740~756
Gao Kun, Xu Yamei. A simulation study of structure of mesovortices along Meiyu front during 22 - 30 June 1999.

- Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2001, **25**: 740~756
- [6] 程麟生, 冯伍虎. “987”突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟. *大气科学*, 2001, **25**: 465~478
Cheng Linsheng, Feng Wuhu. Analyses and numerical simulation on an abrupt heavy rainfall and structure of a mesoscale vortex during July 1998. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2001, **25**: 465~478
- [7] 王建捷, 李泽椿. 1998 年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析. *气象学报*, 2002, **60**: 146~155
Wang Jianjie, Li Zechun. Numerical simulation and diagnostic analysis on mesoscale convective systems of a torrential rain case in Meiyu period of 1998. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2002, **60**: 146~155
- [8] 高守亭, 雷霆, 周玉淑, 等. 强暴雨系统中湿位涡异常的诊断分析. *应用气象学报*, 2002, **13**: 662~670
Gao Shouting, Lei Ting, Zhou Yushu, et al. Diagnostic analysis of moist potential vorticity anomaly in torrential rain systems. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13**: 662~670
- [9] Gao Shouting, Zhou Yushu, Lei Ting. Structural features of the Meiyu front system. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **16**: 195~204
- [10] Zhou Y, Gao S, Shen S S P. A diagnostic study of the structural and dynamical features of the Meiyu front system. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, **81**: 1565~1576
- [11] Zhou Yushu, Deng Guo, Lei Ting, et al. The thermodynamic and dynamical features of double front structure during 21-31 July 1998 in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, **22**: 924~935
- [12] 周玉淑, 高守亭, 邓国. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析. *大气科学*, 2005, **29**: 195~204
Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2005, **29**: 195~204
- [13] Zhou Yushu, Deng Guo, Chen Huailiang, et al. Synoptic features of the second Meiyu period in 1998 over China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, **19**: 31~43
- [14] 吴庆丽, 陈敏, 王洪庆, 等. 暴雨雨团中 β 尺度流场结构的数值模拟. *科学通报*, 2002, **47**: 1437~1440
Wu Qingli, Chen Min, Wang Hongqing, et al. Numerical simulation of stream structures of meso- β torrential rain clusters. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2002, **47**: 1437~1440
- [15] 何斌, 高坤, 翟国庆. 野外试验资料在暴雨分析过程中的应用. *浙江大学学报 (理学版)*, 2003, **30**: 461~465
He Bin, Gao Kun, Zhai Guoqing. Application of the observation in the field experiment to the analysis of heavy rainfall processes. *Journal of Zhejiang University* (Science Edition) (in Chinese), 2003, **30**: 461~465
- [16] 翟国庆, 王智, 何斌. 长江中下游梅雨期中小尺度涡旋族发生演变分析. *气象学报*, 2003, **61**: 661~672
Zhai Guoqing, Wang Zhi, He Bin. Formation and evolution analysis of the mesoscale vortex group in the middle and lower reaches during Meiyu of the Yangtze River. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2003, **61**: 661~672
- [17] 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
- [18] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**: 835~852
- [19] Sun J, Crook N A. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR288D data. *Wea. Forecasting*, 2001, **16**: 117~132
- [20] Synder C, Zhang F. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131**: 1663~1677
- [21] Zhang F, Synder C, Sun J. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, **132**: 1238~1253
- [22] Tong M, Xue M. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, **133**: 1789~1807
- [23] Qiu C J, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1992, **9**: 588~598
- [24] Qiu C J, Xu Q. A spectral simple adjoint method for retrieving low-altitude winds from single-Doppler data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1994, **11**: 927~936
- [25] Gao J D, Xue M, Brewster K, et al. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2004, **21**: 457~469
- [26] 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**: 82~93
Tao Zhuyu. The VAP method to retrieve the wind vector field based on single-Doppler velocity field. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 1992, **50**: 82~93
- [27] 邱崇践. 由单个多普勒雷达探测资料反演风矢量场的变分方法. *兰州大学学报*, 1999, **35**: 183~88
Qiu Chongjian. The variational method for retrieval of wind vector field from single Doppler radar. *Journal of Lanzhou University* (in Chinese), 1999, **35**: 183~188
- [28] 邱崇践, 余金香, Xu Qin. 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**: 244~249

Qiu Chongjian, Yu Jinxiang, Xu Qin. Use of Doppler-radar data in improving short-term prediction of mesoscale weather. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58**: 244~249

- [29] 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. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2006, **94**: 167~183

- [30] Kuo Y H, Guo Y R. Dynamic initialization using observa-

tions from a hypothetical network of profiles. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**: 1975~1998

- [31] Stauffer D R, Seaman N L. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 1250~1277

- [32] Davidson N E, Puri K. Tropical prediction using dynamical nudging, satellite-defined convective heat sources, and a cyclone bogus. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**: 2501~2522