

文章编号: 1000-2022(2001) 04-0545-08

雷达和卫星资料对江淮暴雨数值模拟的影响*

徐玉貌¹, 江敦春¹, 夏文梅²

(1. 南京大学大气科学系, 南京 210093; 2. 江苏省气象台, 南京 210008)

摘要: 将“713”测雨雷达和 GMS 卫星云图资料引入 PSU/NCAR 中尺度模式, 以改变初始湿度场, 对两个不同类型的江淮暴雨过程进行了数值模拟敏感试验, 并与控制试验作了比较分析。结果表明: 加入雷达和卫星资料, 能通过水汽和辐合上升运动的调整有效地提高 24 h 降水预报的模拟效果——雨区范围和雨量更接近实况; 对于不同类型的降水过程, 引入雷达和(或)卫星资料所产生的影响有所不同。

关键词: 雷达回波, 卫星云图, 暴雨, 数值模拟

中图分类号: P423.34 **文献标识码:** A

暴雨是我国最重要的灾害性天气之一。江淮暴雨大多发生在 6、7 月份, 通常由准静止锋和江淮气旋所造成。暴雨具有明显的中尺度特征, 而中尺度资料的缺乏给暴雨研究和预报带来很大困难。目前我国数值天气预报仍以常规探空资料作为初始资料, 这样既不能提高降水预报的精度, 又不能反映中尺度特征。水汽是形成暴雨的重要条件, 雷达回波和卫星云图资料能直接提供水汽信息, 其空间分辨率又比常规探空资料要高得多。因此, 自 80 年代以来, 国内外学者就努力寻找将卫星和雷达资料引进数值模式以提高预报精度的方法。

Perkey^[1]很早就注意到高分辨率卫星云图资料完全有可能作为湿度场探测的补充和替代, 强化湿度场分析, 改善模式预报效果。Wolcott 等^[2]发现, 如果没有足够水汽的湿度场环境, 与初始散度场相应的上升运动将得不到潜热释放的支持; 并指出, 在数值模拟中采用地面雨量观测和卫星红外云图资料对初始湿度场作补充修正后, 能提高模拟效果。Wang 等^[3]用牛顿松弛和潜热强迫将雷达资料四维同化来提高中尺度降水模式的预报效果。Turpeinen 等^[4]利用卫星资料实现加拿大区域模式的湿度场初始化。在我国, 江敦春等^[5]首先将卫星云图资料应用于台风暴雨的数值模拟。郭霞等^[6]以雷达资料应用于江淮暴雨的中尺度数值模拟。朱明等^[7]将卫星反演湿度场的方案用于改进暴雨模式的初始场。这些研究都表明, 利用卫星或雷达资料对暴雨数值模拟效果有不同程度的改善。

众所周知, 雷达和卫星所提供的信息具有不同的特征。测雨雷达探测到的是降水云体的回波, 而红外卫星云图反映的是云(不一定有降水)顶温度; 另一方面, 卫星的观测范围远大于雷达。因此, 如果将它们同时引入模式, 可望得到更好的效果。基于这种思路, 本文通过对两种不同类型的暴雨(静止锋暴雨和中尺度气旋暴雨)过程的数值模拟, 分析比较利用雷达和(或)卫

* “江苏省社会发展”资助项目(BS97121)

收稿日期: 2000-04-26; 改回日期: 2000-08-05

第一作者简介: 徐玉貌, 女, 1940 年 6 月生, 教授。

星资料改进初始湿度场对模拟效果的影响。

1 模式和试验方案

本文采用美国 PSU/NCAR 的三维流体静力平衡中尺度模式(MM4)^[8]作为预报模式。模式的水平网格为 40×41 , 水平格距为 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$, 网格中心位于(115 E, 35 N)。垂直坐标为 $\sigma = (p - p_t)/(p_s - p_t)$ 。其中 p 为模式各层的气压, p_s 为地面气压, p_t 是模式顶部气压(等于 100 hPa), 共取 10 层, 间隔不均匀, 即 $\sigma = 0.0, 0.15, 0.30, 0.45, 0.66, 0.75, 0.85, 0.93, 0.97, 0.99$ 和 1.0。模式考虑了大尺度凝结, 长、短波辐射, 地面感热和潜热通量以及边界层摩擦效应等物理过程; 采用改进了的 Anthes-Kuo 积云对流参数化方案, 整体边界层方案和海绵边界条件; 地形高度由 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球地形高度场内插求得。

本文作了两种试验。一种是仅用常规探空资料作为模式的初始场, 称为控制试验(简称 CTE); 另一种是引进雷达和(或)卫星资料, 对原有初始湿度场或模式运行初期的湿度场进行补充修正后的数值模拟, 称为敏感试验(简称 STE)。

2 暴雨个例、资料及其处理方法

2.1 暴雨个例

本文模拟分析了两个暴雨个例。例 1 是 1999-06-27T08 ~ 1999-06-28T08 发生在长江中下游地区的准静止锋暴雨过程(简称“990627”暴雨)。从 6 月 27 日 08 时卫星红外云图(图 1)可清楚地看到一条近似东西走向的锋面云带。根据国家发报站地面降水资料绘制的该过程 24 h 降水实况(图 2a)表明, 50 mm 的带状暴雨区宽度为 3 个纬距, 长度达 10 个经度; 雨带内部有 3 个 100 mm 的强中心, 其中西边的一个最强, 在(118 E, 31 N)附近出现 125 mm 的闭

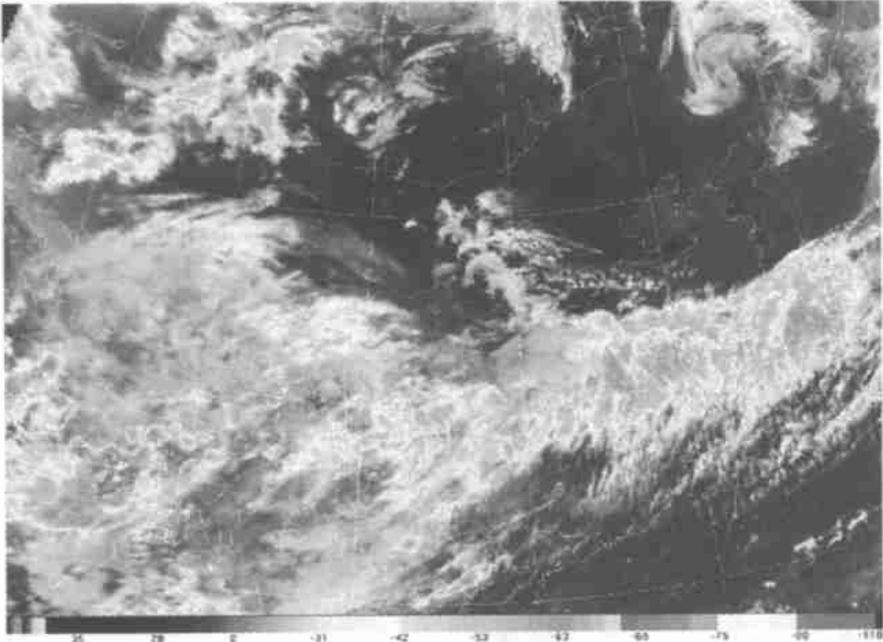


图 1 1999-06-27T08 的卫星红外云图

Fig. 1 GMS Satellite image(IR) at 0800 UTC on June 27, 1999

合等值线。然而, 根据江苏和安徽两省加密雨量站资料绘制的降水实况(图 2b), 100 mm 的雨带从 116 °E 一直伸展到海上, 并在 116.5 ~ 118.7 °E 以及 120 °E 附近形成两个 150 mm 的大暴雨区, 最大降水出现在安徽铜陵, 雨量达 244.5 mm。

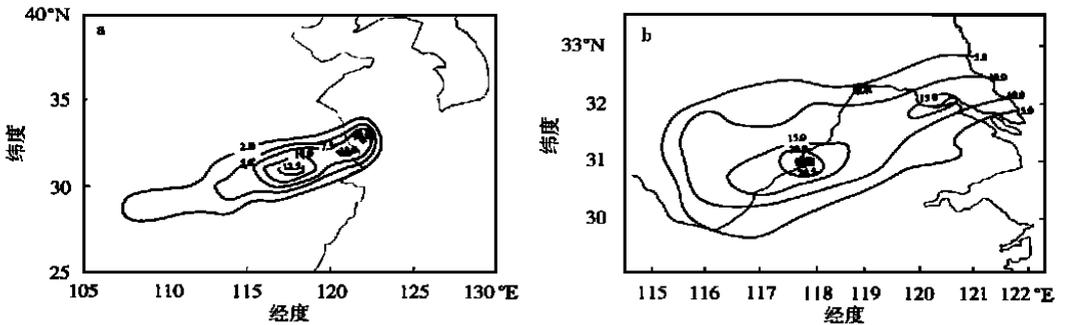


图 2 国家发报站(a)和江苏、安徽加密雨量站(b)测得的“990627”暴雨 24 h 降水实况(单位: 10 mm)

Fig. 2 Observed 24-hour precipitation for “990627” rainstorm (units: 10 mm)

The data are from national telegraphy stations (a), and from densified stations in Jiangsu and Anhui provinces (b)

例 2 是 1997-07-17T 08 ~ 1997-07-18T 08 发生在淮河流域的特大暴雨过程(简称“970717”暴雨), 它由减弱冷锋尾部形成的中尺度气旋(图 3)所造成。该暴雨过程具有来势凶猛、雨量大、降水集中的特点, 其降水主要发生在 17 日 10 时至 22 时, 最大 1 h 降水量高达 98 mm。24 h 降水实况如图 4 所示, 50 mm 的暴雨区在南北方向跨越不到 2 个纬距, 东西方向宽约 4.5 个经度; 100 mm 的雨区宽 1 个纬距, 长 3 个经度; 其中出现 3 个 200 mm 的强中心, 最大降水发生在徐州, 雨量高达 332 mm。



图 3 1997-07-17T08 的卫星红外云图

Fig. 3 GMS Satellite image(IR) at 0800 UTC on July 17, 1997

2. 2 资料及处理方法

模式所用资料包括常规探空资料以及雷达回波和卫星云图资料。常规资料来自 TTAA 报

文, 经解报、资料检误和客观分析, 将各等压面高度、温度、湿度和风内插到模式各层网格点, 作为模式控制试验的初始场。

雷达资料取自江苏省和徐州市气象台的 713 测雨雷达, 包括 PPT 和 RHI(图 5) 以及 LLPPI(也称 ZPPI) 图像(图略)。其中 PPI 称为平面位置显示, 是某一固定仰角下的圆锥扫描探测到的回波在平面上的投影; LLPPI 是由三个不同仰角的 PPI 所合成(通常近距离用高仰角以避免地物回波, 远距离用低仰角, 确保远距离回波的显示)。RHI 为距离高度显示, 它显示某个固定方位垂直剖面上的回波分布。通过 PPI、LLPPI 及其对应的几个不同方位上的 RHI 的结合可以确定回波的空间结构(如有三维立体扫描资料则更好)。由于雷达观测到的是降水云体, 可以将回波所在区的相对湿度视为 100 %。

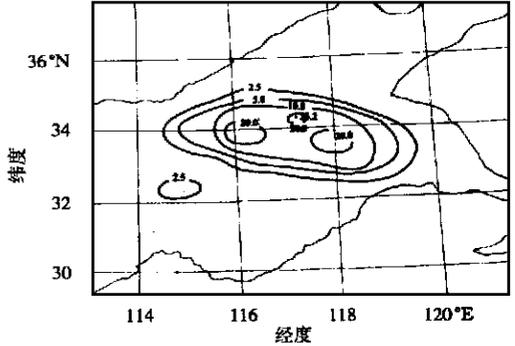


图 4 “970717”暴雨 24 h 降水实况
(单位: 10 mm)

Fig. 4 Observed 24-hour precipitation for “970717” rainstorm (units: 10 mm)

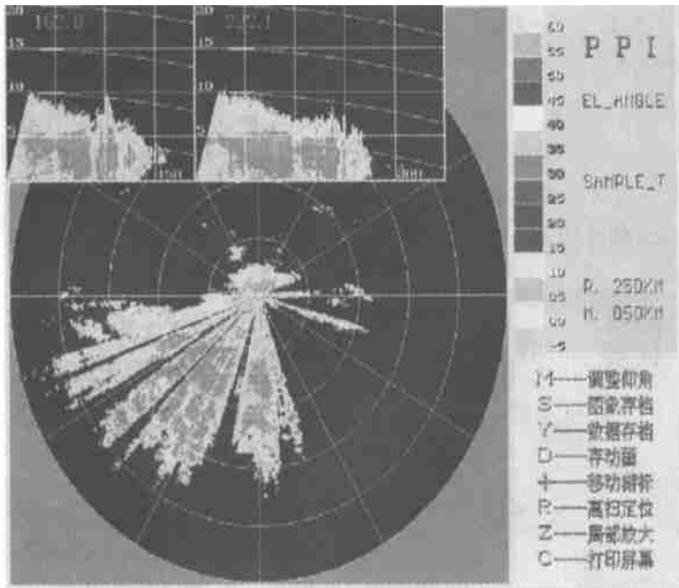


图 5 1999-06-27T 08 的 PPI 和 RHI 显示的雷达回波

Fig. 5 Radar echoes shown on the PPI and PHI at 0800 UTC on June 27, 1999

卫星资料用的是 GMS 卫星红外云图(图 1 和图 3)。从卫星资料提取湿度场信息的方法^[2, 5]是根据增强红外云图的灰度等级估计相应的云顶温度, 再结合探空资料、云特征(云形、色调等)和地面雨区估算云高和云厚。若云区某格点位置观测到降水, 则假定从模式最低层到顶的相对湿度均为 100 %, 因为造成暴雨的降水通常或主要由发展强烈的对流云产生, 其云底高度较低, 雨滴较大, 雨滴从云底降到地面时通常因蒸发而使空气达到或接近饱和。而在没有降水发生的格点, 只假定云存在的高度为饱和状态。文献[2]指出, 用该方法修正湿度场来改进降水预报的效果比用细网格地面湿度场修正法更好。

必须指出, 本文引入雷达和卫星资料是对常规探空资料提供的湿度场进行补充修正, 在修正区以外的湿度场仍由 T T A A 报确定。今后可以通过采用较大范围的雷达回波拼图资料 and 更精细的卫星资料反演湿度场的方法来进行进一步改善湿度场修正效果。

3 结果分析

通过两个过程的模拟分析发现, 利用雷达和卫星资料对湿度场进行修正后, 模拟效果有明显改善, 而且对于不同类型的暴雨过程, 雷达和(或)卫星资料对模拟效果的影响有所不同。

3.1 “990627”暴雨——大尺度锋面降水过程

3.1.1 初始湿度场修正

对该过程进行了控制试验(CTE)和两种敏感试验(STE1 和 STE2)。STE1 是在初始时刻(08 时)仅引入雷达资料, STE2 是同时引入雷达和卫星资料来修正初始湿度场。CTE、STE1 和 STE2 的初始湿度场(相对湿度 f) 分布(图略)指出, 在整个试验区内控制试验的初始相对湿度不超过 80%; 加入南京气象台 07: 53 观测到的雷达回波资料(图 5)后, STE1 在长江下游及其南侧形成 $f = 90\% \sim 100\%$ 的高湿区; 同时加入雷达和卫星资料(图 1)后, STE2 初始场比只加入雷达资料时高湿度区的范围有明显扩大。

3.1.2 24 h 模拟雨量比较

不同的初始湿度场必然会产生不同的 24 h 降水模拟结果。分析与上述 3 种初始湿度场对应的 24 h 积分雨量(图 6a, b, c), 可以看到, CTE 试验的 24 h 积分雨量最大值只有 90 mm, 50 mm 的暴雨区为东西走向的狭长条(图 6a); 加入雷达资料后(即 STE1), 50 mm 的雨区

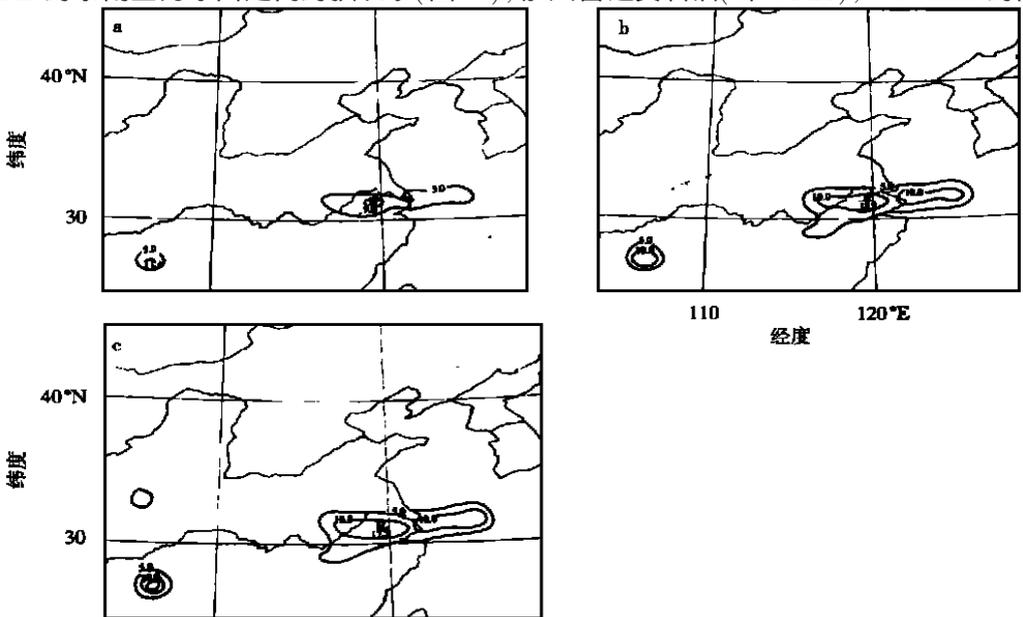


图 6 “990627”暴雨 24 h 模拟雨量分布(单位: 10 mm)

a. CTE; b. STE1; c. STE2

Fig. 6 Simulated 24-hour precipitation for “990627” rainstorm (units: 10 mm)

a. CTE; b. STE1; c. STE2

明显扩大,雨量增加,形成 100 mm 的大暴雨带,最大雨量出现的位置(120 E, 31~32 N 附近)虽无明显变化,但其数值增至 152 mm(图 6b),比 CTE 结果增加了 2/3,整个雨区大小、形状和强中心位置(除海上以外)均与国家发报站得出的降水实况(图 2a)很接近;同时加入雷达和卫星资料后,100 mm 等值线的南北范围增宽,雨量进一步增大,最大降水达 172 mm(图 6c),而且在 118 E 附近出现一个 125 mm 闭合等值线(图中未标出),其位置与江苏、安徽加密雨量站所得实况(图 2b)中的 200 mm 闭合等值线位置相对应,与实况更接近了。如果能引进合肥和池州雷达站资料,很有可能在 118 E 附近模拟出 200 mm 的强中心。

以上结果表明,对于降水数值预报,由于初始几小时积分中没有足够的潜热加热而存在的模拟增强(Spin-up)问题,使控制试验所模拟的雨量与实况相差较大^[4,9],而雷达和卫星资料的加入,能通过初始湿度场的修正,使散度场和垂直速度场等得以调整(图略),从而有效地提高了模拟效果。对于以混合型降水为特征的大范围静止锋降水,雷达回波能较好地反映强降水位置和强度,而卫星云图资料有利于反映云的范围,配合雷达回波(尤其是拼图回波),能更好地反映降水范围。

3.2 '970717'暴雨——中尺度气旋降水过程

3.2.1 湿度场调整

该过程的降水主要集中在 17 日 10 时至 22 时这段时间,因此,对它做的敏感试验与个例 1 有所不同。这里,第 1 个敏感试验(STE1)是在模式运行 1 h 45 min 以后,即在 09:45 加入徐州气象台测雨雷达观测到的降水回波(图略)进行湿度场调整;第 2 个敏感试验(STE2)是在初始时刻引入卫星资料(图 3)进行湿度场调整。结果发现,控制试验在暴雨落区所在地的初始相对湿度最大为 90%,而 STE1 与 STE2 的湿度分布很相似——在(113~121 E, 32~37 N)附近形成中心湿度为 100%的多条闭合等值线构成的椭圆形高湿度区,只是 STE1 的高湿度区比 STE2 略偏东一些(图略),这是雷达探测范围有限所致。

3.2.2 24 h 模拟雨量

图 7 为 CTE、STE1 和 STE2 的 24 h 雨量分布。控制试验给出一条 50 mm 椭圆形闭合等值线,虽然其位置和形状与实况(图 4)相差不多,然而暴雨区的范围和雨量都比实况小,最大雨量仅 100 mm,不到实况的 1/3。引进雷达资料与引进卫星资料后所得结果(图 7b 与图 7c)很相似,50 mm 等值线的范围比控制试验都扩大了,更重要的是 STE1 和 STE2 的最大雨量分别达 201 mm 和 210 mm,比 CTE 增加了两倍多,其中 STE1 得到的 100 mm 和 200 mm 等雨量线范围与实况很相似。然而 STE1 和 STE2 都没有模拟出 3 个 200 mm 强中心,分析其原因,可能是模式分辨率不够所造成。3 个强中心尺度以及它们之间的距离均小于或近似一个纬距,而本模式的格距为 60 km,难以分辨。若采用分辨率和精度更高的模式(如格距小于 50 km 的 MM5),再配合更精细的雷达和卫星资料反演湿度场的方法,可望模拟出细微的中尺度结构。

为何本例中两个敏感试验所模拟的 24 h 降水结果那么相似?分析其原因,在于产生该暴雨过程的天气系统是一个强对流中尺度气旋,这在卫星云图和雷达回波特征上都反映得很清楚。卫星云图显示一个强对流云团(图 3),在雷达回波图(图略)上,对流回波顶的高度达 10~15 km,而以混合型降水为特征的'990627'暴雨,其回波顶高度大多为 7~8 km。由于该气旋及其尺度比静止锋尺度小,基本上在一部雷达的探测范围内,因此由雷达反演的湿度场与卫星反演的相差不大,从而产生相似的暴雨分布。

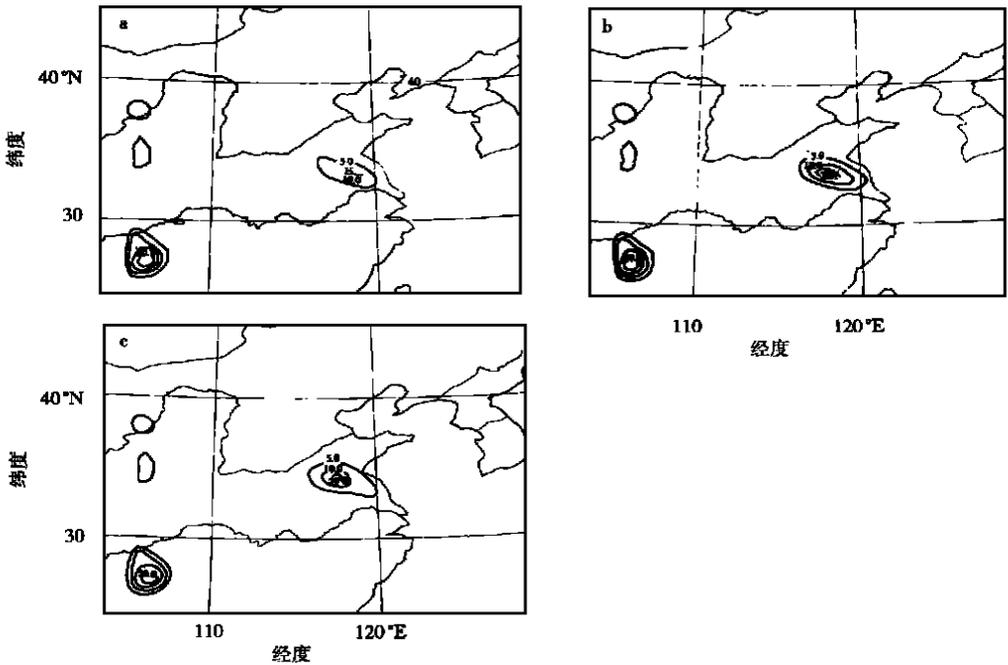


图7 “970717”暴雨 24 h 模拟雨量分布(单位: 10 mm)

a. CTE; b. ST E1; c. ST E2

Fig. 7 Simulated 24-hour precipitation for “970717” rainstorm (units: 10 mm)

a. CTE; b. ST E1; c. ST E2

4 结 语

(1) 在中尺度暴雨数值模拟中引入雷达和卫星资料对湿度场进行修正, 能通过散度和垂直速度场等的调整, 有效地提高模拟效果: 雨区范围和雨量更接近实况。

(2) 由于雷达和卫星所探测的对象和范围不同, 雷达和卫星资料的引用对不同类型降水过程的模拟所产生的影响也不完全一样。对中小尺度强降水, 两者的效果差不多, 在实际应用中如条件有限, 可选择其中的一种(雷达或卫星)资料加入模式, 也能达到较好的效果; 对于大尺度降水系统, 尤其是混合型降水, 同时引用雷达和卫星资料比只引用其中的一种要好得多。

致谢: 江苏省气象台为本文提供“990627”暴雨过程的加密雨量站资料以及卫星和雷达资料, 安徽省气象台提供安徽省加密雨量资料, 水利部淮河委员会水情信息中心和徐州气象台分别为“970717”暴雨提供雨量实况和雷达资料, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Perkey D J. A description and preliminary results from a fine-mesh model for forecasting quantitative precipitation[J]. Mon Wea Rev, 1976, 104(12): 1513 ~ 1526
- [2] Walcott S W, Warner T T. A humidity initialization utilizing surface and satellite data[J]. Mon Wea Rev, 1981, 109(9): 1989 ~ 1998
- [3] Wang W, Warner T T. Use of four-dimensional data assimilation by newtonian relaxation and latent-heat forcing to im-

prove a mesoscale-model precipitation forecast: a case study[J]. *Mon Wea Rev*, 1988, 116(12): 2593 ~ 2613

- [4] Turpeinen O M, Garand L, Benoit R, et al. Diabatic initialization of the Canadian regional finite-element (RFE) model using satellite data[J]. *Mon Wea Rev*, 1990, 118(7): 1381 ~ 1407
- [5] 江敦春, 党人庆, 陈联寿. 卫星资料在台风暴雨数值模拟中的应用[J]. *热带气象学报*, 1994, 10(4): 318 ~ 324
- [6] 郭 霞, 党人庆, 葛文忠. 雷达资料在江淮流域数值模拟中的应用[J]. *热带气象学报*, 1999, 15(4): 356 ~ 362
- [7] 朱 明, 郁 凡, 郑维忠, 等. 卫星反演湿度场及其在暴雨预报中的初步应用分析[J]. *气象学报*, 2000, 58(4): 470 ~ 478
- [8] 郑维忠, 苏炳凯, 潘益农. 中尺度数值模式 MM4 模拟系统介绍[M]. 南京: 南京大学出版社, 1992
- [9] Mohanty U C, Kasahara A, Errico R. The impact of diabatic heating on the initialization of a global forecast model[J]. *J Meteorol Soc Japan*, 1986, 64(6): 805 ~ 817

IMPACT OF RADAR/SATELLITE DATA ON THE SIMULATION OF HEAVY RAINFALLS

Xu Yumao¹, Jiang Dunchun¹, Xia Wenmei²

(1. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093;

2. Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008)

Abstract: The sensitivity experiments (STE) of numerical simulation, in which the radar and/or satellite data were incorporated into the PSU/NCAR mesoscale model to modify the initial moisture field, for two kinds of heavy rainfall processes over the Changjiang-Huaihe river basin have been performed and compared with the control experiment (CTE) without using radar and satellite data. The results show that there is a great improvement in the simulation for 24-hour precipitation forecasts through the adjustment of water vapour and ascending motion by incorporating of radar and satellite data into the mesoscale model. The area and amount of rainfall obtained by STE are more in agreement with the obtained fact than those from CTE. The impact of radar and/or satellite data on simulation result is different for different types of rainfall process.

Key words: radar echo, satellite image, heavy rainfall, numerical simulation