

# 河南一次强降水过程云和降水结构 的中尺度数值模拟

雷 蕾<sup>1</sup> 朱伟军<sup>1</sup> 毕宝贵<sup>2</sup> 周毓荃<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学, 210044; 2. 国家气象中心)

**提 要:** 用中尺度数值模式(MM5v3.7)模拟了2005年6月25—26日河南一次强降水天气过程。模式计算的整层积分所有水凝物总含水量、模拟的雷达回波特征、24小时雨量分布、强降水阶段雨量时变特征与实况对比均具有比较好的模拟能力,在此基础上利用模式输出的资料分析了强降水形成的湿热力动力条件、降水区不同位置不稳定指数以及强降水区各种水凝物随时间的变化,并用Reisner霰方案计算出的雪、霰、冰晶、雨水、云水比含量资料,对比分析了降水初生和显著增强两个阶段云中的微物理结构特征的差异。

**关键词:** 云 降水 中尺度数值模拟 MM5 不稳定指数

## Meso-scale Numerical Simulation of Cloud and Precipitation Structure in a Rainstorm in Henan Province

Lei Lei<sup>1</sup> Zhu Weijun<sup>1</sup> Bi Baogui<sup>2</sup> Zhou Yuquan<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Information Science and Technology, 210044;  
2. National Meteorological Center)

**Abstract:** Using the fifth-generation PSU/NCAR Meso-scale Model (MM5V3.7), a rainstorm on June 25 to 26, 2005 in Henan Province is successfully simulated. The output of the model such as integrated hydrometeor, the Doppler Radar echo, and the 24-hour precipitation are very the same like the fact. Based on the good results of the model, the dynamic and thermodynamic conditions, the changes of the instability index in two different areas and the hydrometeor changes are analyzed. Besides, the differences of the microphysical structures characteristics in the different phases of the precipitation process are analyzed by using the quality content of snow ( $Q_s$ ), graupel ( $Q_g$ ), ice ( $Q_i$ ), rain ( $Q_r$ ), and cloud water ( $Q_c$ ) calculated by Reisner micro-

资助项目:国家十一五攻关《人工增雨关键技术和装备的研究》项目《人工增雨信息处理技术研究》(2006BAC12B07)

收稿日期:2006年11月14日; 修定稿日期:2007年3月5日

physical schemes.

**Key Words:** cloud precipitation meso-scale numerical simulation MM5 instability index

## 引 言

中尺度系统引起的局地强对流通常造成比较严重的自然灾害,如暴雨。暴雨系统中动力、热力过程以及与云内微物理过程的相互作用是暴雨形成机制中很重要的部分,已经引起了气象领域的广泛关注。前人利用中尺度数值模式进行了一系列的模拟研究,但是仍主要着眼于对动力热力条件的数值研究<sup>[1-6]</sup>,对云物理过程的数值研究主要是积云尺度的对流风暴,而对于区域性强降水过程中的云物理过程和动力、热力过程的相互作用的数值研究还不是很多。龚佃利等<sup>[7-8]</sup>用 MM5V3.5 中尺度模式成功模拟了山东的两次降水过程,并对降水云系的微结构及其水汽收支进行了分析。王鹏云等<sup>[9]</sup>用 MM5 湿物理显式方案模拟了一次对流云团造成的华南暴雨中的云物理过程,表明由对流形成的具有汽、水、冰三相混合作用的冷云过程是华南暴雨形成发展的主要云物理过程,等等。

本文使用最新的 MM5V3.7 非静力中尺度数值模式比较好地模拟了 2005 年 6 月 25—26 日河南一次强降水天气过程。模拟的对流云团位置、雷达降水回波以及雨区分布与实况有比较好的吻合,在此基础上用 Reisner 霰方案计算出的雪、霰、冰晶、雨水、云水比含量资料分析了对流云团在降水初生和显著增强两个阶段微物理结构特征差异,并且分析了强降水形成的湿热力、动力条件以及降水区不同位置不稳定指数以及各种水凝物随时间的变化规律。

## 1 模式方案设计

本文设计三层双向嵌套网格(27km、9km、3km),模式的中心点位于河南驻马店

(32.98°N、114.02°E),三层嵌套格点数分别为:121×121、103×103、103×103。采用 NCAR 的 60'、30'、10'、5'、2'的地形以及 13 种陆地类型形成模式的地形和下垫面条件;垂直分辨率  $k_{\sigma}=23$  层,模式顶层取 100hPa。

模式选用的物理过程为:以 NCEP  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  再分析资料作为模式的初始大尺度背景场,采用 MRF 和 Blackadar 的行星边界层参数化方案(Hong, Pan, 1996)以及云辐射方案。粗网格使用 Grell 的积云参数化方案;三重嵌套均采用 Reisner 的霰方案,考虑冰晶数浓度预报。粗网格采用张弛流入、流出边界条件,细网格使用时变侧边界条件。

## 2 河南暴雨过程概述及模拟结果对比

### 2.1 天气背景及河南暴雨过程概述

6 月 25 日 08 时(北京时,下同),850hPa 有切变低涡存在于陕西南部、四川东部地区,切变线贯穿河南,位于黄淮流域之间。30°N 以南有大范围低空急流,水汽输送比较明显。25 日 20 时,700hPa 内蒙古及河南与陕西南部的交界处均出现切变低涡;850hPa 切变低涡的范围增大,控制在黄淮流域。25 日 20 时至 26 日 02 时,地面低压加强发展,中心值降低到 995hPa 以下,锋面气旋控制在河南南部地区。25 日 20 时至 26 日 08 时,700hPa 南北两个切变低涡合并达到最强;850hPa 切变低涡沿东北西南轴线移动扫过河南。之后,低层低涡系统逐渐向东北方向移动,从山东入海减弱消亡。

在上述切变低涡天气系统的影响下,配合充足的水汽供应,河南 6 月 25 日 12 时至 26 日 07 时出现了强对流云团,并且位置少动,经过了一系列演变过程,影响长达十几小

时,冷云盖亮温最低可达 $-90^{\circ}\text{C}$ 以下。切变低涡以及其东侧的对流云团的生消演变活动造成了这次大范围的暴雨甚至大暴雨天气过程。这次降水过程可以分为以下几个阶段:25日13时以前是降水发生阶段,13—21时降水发展,范围逐渐扩大,出现大雨、暴雨的站点增多。其中16时,河南中部地区开始产生比较强的降水,雷达回波上表现为大片层状云均匀降水中嵌有比较明显的孤立强回波区(如图1c,见彩页)。17时以后降水已经遍布河南大部分地区,25日23时至26日02时,河南东南部地区受一发展强大的对流云团控制,全省出现暴雨的站数最多可达21个(25日23时),冷云盖亮温可达 $-100^{\circ}\text{C}$ 以下(如图5,见彩页),降水显著增强。桐柏站连续4小时出现大暴雨,并且1小时雨量高达92.5mm,新蔡站也出现1小时雨量达80mm以上的特大暴雨天气;此外正阳、临颖、西华等站也有40mm以上的强降水出现。26日03—06时降水开始减弱,仅局地有大雨;26日06时以后,整个云系逐渐移出河南,降雨量显著减少,一般在0.1mm到几毫米不等,河南地区降雨过程结束。

## 2.2 对流云团及雷达降水回波的模拟对比

图1a(见彩页)是25日16时河南东南部被对流云团覆盖时的云顶亮温分布,冷云盖亮温低于 $-60^{\circ}\text{C}$ (阴影区);模式9km网格模拟的整层积分的水凝物总量(包括云水、降水、冰晶、雪、霰)在其控制范围内出现极大值,并且在 $T_{\text{bb}}$ 梯度比较大的西南以及北侧水凝物总含水量最高达3cm左右。虽然位置略有偏西但是总体来讲还是能够模拟出对流云团的位置的\*(如图1b,见彩页)。图1c是阜阳站25日16时的雷达回波(组合反射

率因子),在阜阳的西北侧出现大范围回波强度在25dBz以上的降水回波,并且嵌有45dBz左右的孤立强回波。9km网格模拟的雷达回波比较好地模拟出这一回波特征(如图1d,见彩页,图中实心三角表示阜阳雷达所在地),在阜阳雷达的西北侧35dBz的回波区内嵌有45dBz左右的强回波中心与实况比较吻合。

## 2.3 降水实况与模拟结果对比

图2a为6月25日08时至26日08时河南省24小时实况雨量分布,图2b为模式27km网格区域预报雨量。由图可见,模式较为准确地预报出了河南中部和南部的两条东北西南走向雨带分布形势,同时也比较准确地模拟出了桐柏、新蔡、正阳、临颖、西华等站的暴雨落区,与实况相比仅向东向北偏移大约0.5~1.0个网格距。虽然强降水中心模拟值较实况偏小,但是从雨带分布形势与暴雨落区位置来说,模式具有比较好的模拟能力。

为了进一步说明模式的实际模拟能力,对比强降水典型时段(25日23时至26日02时)观测降水与模拟降水的时变特征(如图3)。比较可以看出,模拟的降水范围比实况范围稍大,25日23时,26日00时,26日02时模拟结果与实况比较接近,河南中、南部均有一南一北两个比较强的降水中心,偏北边的降水中心稍弱,南边的降水中心比较强,这两个中心均能被模拟出来,位置与实况也比较接近,但是南边比较强的降水中心模拟值较实况略微偏强一些。26日01时的强降水模拟结果与实况存在一定的偏差,实况中南北两个强降水中心相隔较远,但是模拟结果表现为北边的中心偏南,南边的中心偏北,位置比较集中,而且南边强降水中心值也较实况偏大。总的来看,强降水发生时间段内,模

\* 受模式9km网格参数化方案的限制,模拟结果输出的云中信息(如水凝物含量、反演雷达回波等)只能部分反映实际云中情况,并不能完全反映,因此可能出现一定的偏差。

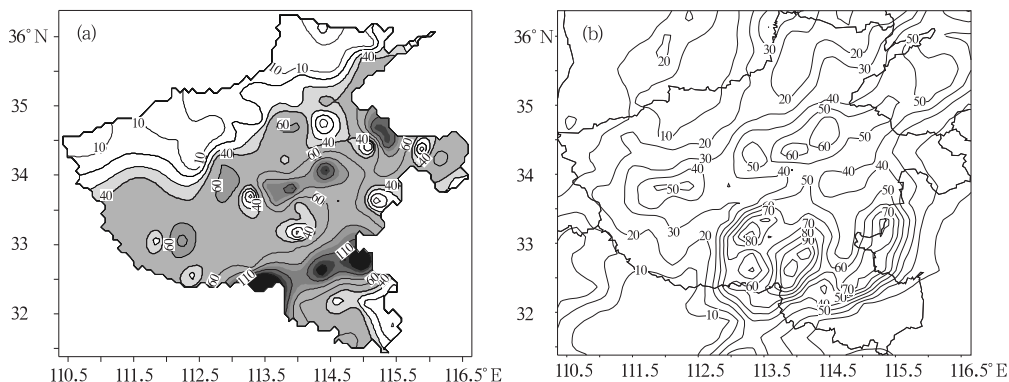


图 2 2005 年 6 月 25 日 08 时至 26 日 08 时 24 小时雨量分布  
(a) 实况 (b) 模式 27km 网格模拟降水(单位:mm)

式结果在一定程度上能反映出此次区域性经向雨带的分布特征,而且多数情况下降水范围、雨强与实况比较接近。

综合以上对对流云团的位置、雷达降水回波、24 小时降水量以及强降水阶段雨量时变特征的模拟结果分析可见,模式对于实况的模拟在时间上没有滞后,落区也比较准确,具有比较好的模拟能力。

### 3 强降水产生的湿热力、动力结构

基于模式比较好的模拟能力,利用模式结果考察在对流云团演变过程中强降水区和降水区外侧的不稳定(热力、动力)的变化以及强降水时刻宏观动力、热力场,水汽和云水含量分布的配置情况。

#### 3.1 降水区不同位置不稳定指数随时间的变化

稳定度指标是强对流天气的重要指标。不稳定指标包括  $A$  指数<sup>[10]</sup>、 $K$  指数等。鉴于  $A$  指数不仅包括各层之间的温度递减率,而且包括高、中、低层的温湿度,而  $K$  指数仅反映出大气的层结稳定情况,因此本文采用  $A$  指数作为考察不稳定程度的指标。

$A$  指数的定义为:  $A = T_{850} - T_{500} - [(T - T_d)_{850} + (T - T_d)_{700} + (T - T_d)_{500}]$ ,  $A$  指数越大,大气越潮湿也越不稳定。选取 25 日

20 时至 26 日 02 时这一阶段河南南部强降水区(32~33°N, 114~115°E)和降水区右侧(32~34°N, 116~119°E)考察模式计算的区域平均的  $A$  指数随时间的变化(如图 4)。由图中可以看出:强降水区的  $A$  指数在 25 日 14 时之后开始迅速增大,17 时增大至 17℃ 左右,之后呈缓慢上升趋势,26 日 01 时达到最大,约为 20℃,而此时河南南部的降水也达到最强。26 日 02 时之后逐渐减小,不稳定度逐渐减弱,降水区逐渐东移。在此过程中,降水区外侧的  $A$  指数均小于强降水区,不稳定程度较弱,但是它也经历了由负值转变为正值后逐渐增大,并且在 26 日 07 时之后已经大于河南南部强降水区,这恰恰说明由于降水区外侧的区域选择在强降水区的右侧,随着切变低涡的东移引起此区域不稳定程度逐渐增强。

#### 3.2 强降水时刻的湿热力、动力配置

图 6a 是 6 月 26 日 00—01 时降水显著增强时的 9km 嵌套网格模拟的风场、比湿、假相当位温  $\theta_{se}$ 、以及云水比含量沿 114.5°E (如图 5 细黑线位置,见彩页)的垂直剖面图。由图可以看出,在 31~35°N 的低层是比湿的大值区,水汽含量丰富,配合风场的辐合,上升运动随高度逐渐增强,并且低层假相当位温随高度递减,表现出很强的不稳定性。随

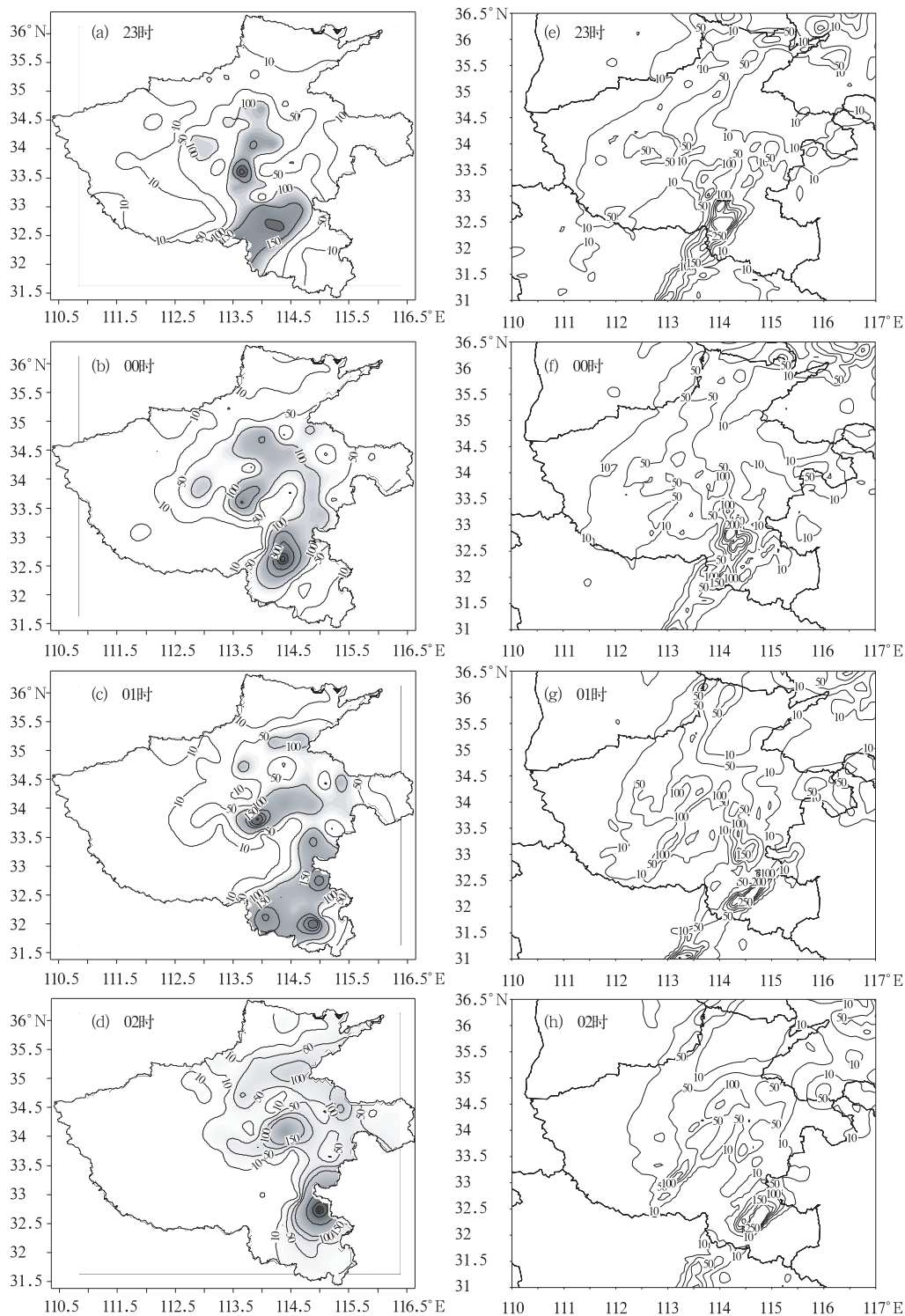


图3 2005年6月25日23时—26日02时每小时雨量分布

(a)~(d) 实况, (e)~(h) 模式9km网格模拟降水(单位:0.1mm)

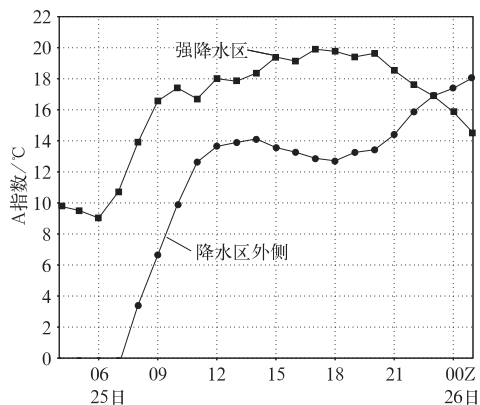


图4 模式计算的A指数随时间的变化(世界时)

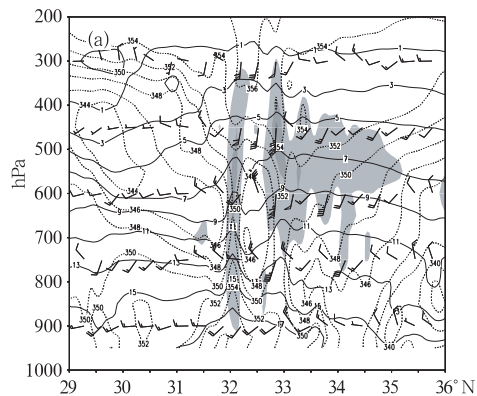


图6a 9km网格模拟的2005年6月26日00时风场(由v、w合成,w扩大100倍)、比湿(细实线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、假相当位温(短虚线,单位:K)、云水比含量(阴影区,单位: $10^{-1} \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )沿 $114.5^\circ\text{E}$ 的垂直剖面

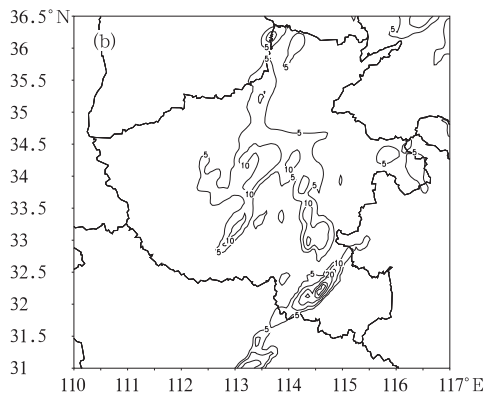


图6b 9km网格模拟的2005年6月26日00—01时1小时雨量(单位:mm)

着上升运动的加强,水汽辐合使等比湿线向上拱起,大量水汽转化为云水,350hPa以下出现云水比含量的大值区,极值中心出现在500hPa高度,对应地面出现覆盖范围很广的强降水,模拟降水中心在 $32^\circ\text{N}$ 附近处,中心值达40mm以上(如图6b)。由以上分析可知,这次降水过程低层很湿,动力场的辐合把水汽向上输送促使了云系的对流发展,这是空中云水向降水转化非常重要的条件。

#### 4 云中微物理结构特征

利用Reisner霰方案计算出的3km网格的雪、霰、冰晶、雨水、云水比含量资料,分析此次强降水过程降水初生阶段到降水增强阶段云中的微物理结构特征差异(如图7)。由图7a可以看出,降水初生时期,大量云水基本位于 $0^\circ\text{C}$ 层以下,过冷水较少。高层微量的冰晶( $0.001 \sim 0.01 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )均在450hPa以上,仅有少量雪和霰存在(如图7b),降水主要表现为弱的暖雨特征;25日14时之后,雪粒子迅速增加,云水、霰、冰晶含量均呈上升趋势,地面降水开始增强,16时达到第一个降水峰值。此后,水凝物的含量迅速减少,降水有所减弱;19时之后,冰晶一直维持在较低的含量,雪、霰、云水含量又开始增加,雪粒子含量增加尤为迅速,降水显著增强。23时之后雪粒子含量开始显著减少,霰粒子的含量变化不大,云水含量有小幅上升并在26日01时达到峰值,此时霰粒子含量已经超过雪粒子。25日23时至26日02时这一阶段由于云水含量丰富,雪、霰含量也比较多,因此河南南部降水达到最强(如图7e)。在26日01时(如图7c), $32^\circ\text{N}$ 附近液态云水一直伸展到250hPa,丰沛的过冷水之上有一定含量的冰晶存在(约为 $0.05 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),并且在300hPa高度处和过冷水结合,冰晶下落通过碰冻过冷水,造成 $0^\circ\text{C}$ 层以上云体中

有大量的霰粒子出现,霰粒子的比含量要多于雪粒子, $0^{\circ}\text{C}$ 层以下的区域仍有一定量的未融化的霰和雪粒子(如图7d)。霰、雪粒子在 $0^{\circ}\text{C}$ 层下方融化从而形成低层雨水大值(约为 $1.9\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),地面降水逐渐加强,表现为冷云降水为主,暖雨过程为辅,两者共同作用的特征。前人的工作也证明了在实际大气中这两种过程是可能同时存在的,何观芳和胡志

晋<sup>[11]</sup>、洪延超<sup>[12-13]</sup>等对中国不同地域和特点的强对流云的模拟研究表明,初始降水元主要由云雨自动转化形成,一旦冰相粒子(霰、雹等)出现,他们和云、雨滴碰冻而迅速长大,待其落入暖区则融化成雨水,因而在过冷水与冰相共存的对流云中由于冰相的加入而使地面降水量大大增加。26日03时之后,雪、霰、冰晶含量都变得非常小,降水逐渐结束。

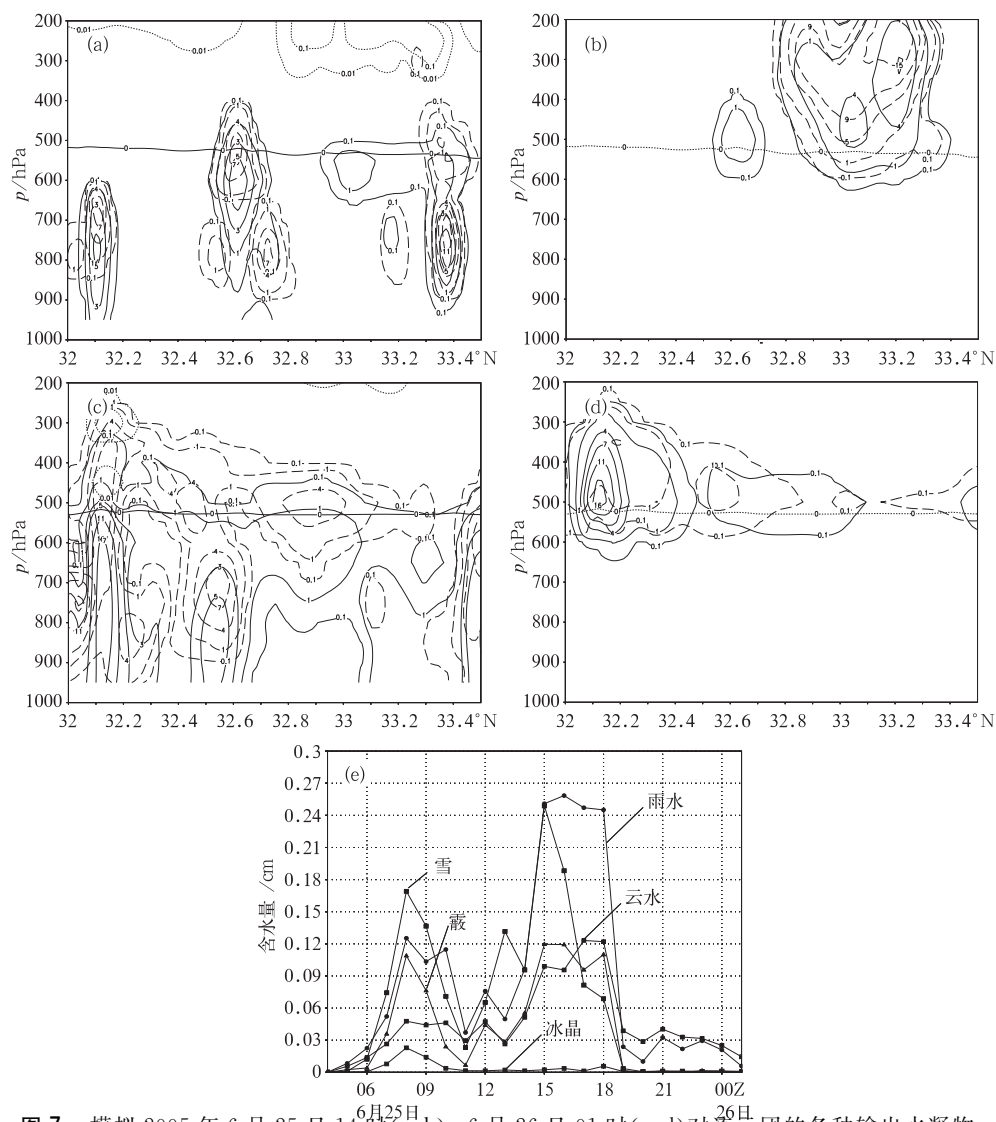


图7 模拟2005年6月25日14时(a,b),6月26日01时(c,d)对流云团的各种输出水凝物比含量的垂直分布(沿 $114.5^{\circ}\text{E}$ )以及模拟各种水凝物整层积分含水量值随时间的变化(e)

(单位:cm,选取区域为3.1节提到的河南南部强降水区,世界时)

(a,c) 细实线为雨水比含量 $Q_r$ ,长虚线为云水比含量 $Q_c$ ,短虚线为冰晶比含量 $Q_i$ (b,d)细实线为霰比含量 $Q_g$ ,长虚线为雪比含量 $Q_s$ (各种比含量的单位均为 $10^{-1}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

通过以上分析可以看出,这一过程云中的水凝物含量发生了很大的变化,整个过程云水含量相对来说比较丰富,但冰晶的含量一直较少,初始时雪、霰的含量非常少,25 日 14 时之后迅速增加,因此初始时刻降水主要表现为暖雨特征,随后由于云体发展,出现大量雪、霰粒子,降水则表现为冷云降水为主,暖云降水为辅,两者共同作用过程。此外,将图 7e 水凝物粒子含水量随时间的变化与图 4 不稳定指数随时间的变化曲线对比还可以看出:在 25 日至 26 日强降水区域不稳定度显著增强的阶段内其对流云团内的水凝物粒子含量变化也异常显著,并且在 25 日 23 时至 26 日 02 时不稳定指数  $A$  趋于最大的时刻降水也出现极值。

## 5 结 论

(1) 选取合适的参数化方案用 MM5v3.7 中尺度数值模式对于 2005 年 6 月 25 日—26 日河南强降水过程具有比较好的模拟能力;9km 网格整层积分水凝物的总含水量的大值区与河南东南部对流云团的位置比较一致;模拟的雷达回波、全省 24 小时雨带分布以及强降水时段雨量的时变特征与实况均有比较好的吻合。

(2) 模式计算的  $A$  指数在降水区不同位置随时间的变化曲线表明:降水区的外侧不稳定指数明显小于强降水区;并且在强降水区不稳定程度显著增强的时刻,对流云团中的各种水凝物粒子含量变化也异常显著,不稳定指数达到最大的阶段( $20^{\circ}\text{C}$  左右)降水也出现极值。

(3) 模式的 Reisner 霰方案结果揭示了此次强降水过程云中微物理过程的变化。降水初生阶段,由于高层缺少冰晶和过冷水,仅有少量云水,表现出弱的暖雨过程;当降水开始显著增强时,云中云水含量丰富,水凝物

(尤其是雪、霰)的含量较多,表现为冷云降水为主、暖雨过程为辅,两者共同作用的特征。

(4) 云降水微物理过程及其动力、湿热力过程之间存在密切的相互作用,本次过程的低涡系统在潜在不稳定层结上的动力辐合,配合充足的水汽供应引起云中相变潜热的释放促使云体强烈发展,这是云中大量云水向降水转化必不可少的宏观背景条件。

## 参考文献

- [1] Christopher A. Davis, B Stanley Trier. Cloud-resolving simulation of mesoscale vortex intensification on its effect on a serial mesoscale convective system[J]. Mon Wea Rev, 2002, 130(12): 2839-2858.
- [2] 黄士松. 华南前汛期暴雨[M]. 广州: 广东科技出版社, 1986: 244.
- [3] 余志豪, 陆汉城. 梅雨锋暴雨的中尺度雨带和雨峰团[J]. 中国科学 B 辑, 1988, 9: 1002-1010.
- [4] 赵思雄. 用 10 层准拉格朗日有限区域模式对高原东侧锋生过程的数值模拟[J]. 大气科学, 1991, 15(3): 40-49.
- [5] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [6] 崔波, 李泽椿, 郭肖蓉, 等. 对北京地区一次局地灾害性暴雨的数值模拟分析[J]. 暴雨·灾害, 1998, (1): 79-88.
- [7] 龚佃利, 王俊, 刘诗军. 山东降水云系微物理结构数值模拟和播云条件分析[J]. 高原气象, 2006, 25(4): 723-730.
- [8] 龚佃利, 王庆, 刘诗军. 山东一次春季暴雨过程的水汽收支和降水转化数值分析[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(1): 109-118.
- [9] 王鹏云, 阮征, 康红文. 华南暴雨中云物理过程的数值研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(1): 78-87.
- [10] 陆忠汉, 陆长荣, 王婉馨. 实用气象手册[M]. 上海: 上海辞书出版社, 1984: 310.
- [11] 何观芳, 胡志晋. 不同云底温度雹云成雹机制及其隐晶催化的数值研究[J]. 气象学报, 1998, 56(1): 31-45.
- [12] 洪延超. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究[J]. 气象学报, 1999, 57(1): 30-44.
- [13] 洪延超. 积层混合云数值模拟研究(II)—云相互作用及暴雨产生机制[J]. 气象学报, 1996, 54(6): 661-674.

雷 蕾等：河南一次强降水过程云和降水结构的中尺度数值模拟

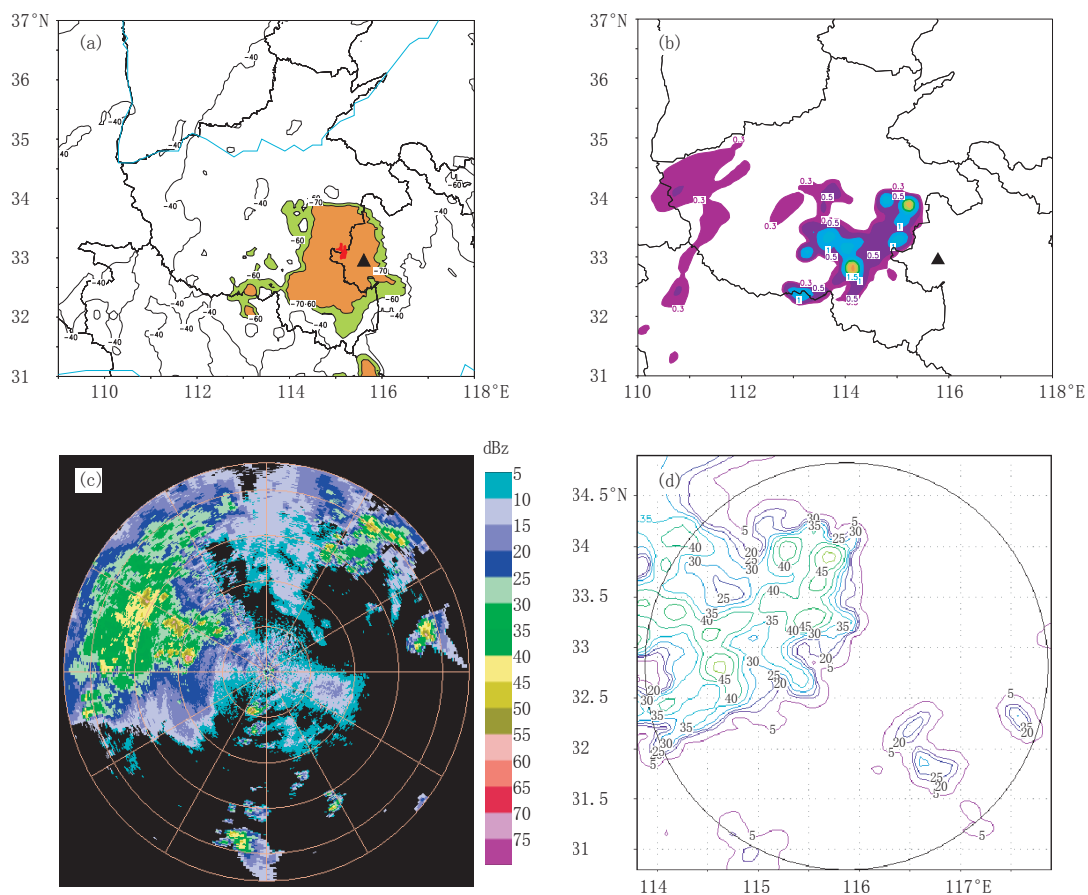


图1 2005年6月25日16时对流云团 $T_{BB}$ 分布(a)、9km网格积分水凝物总含水量(b, 单位: cm)、  
阜阳站多普勒雷达组合反射率因子回波实况(c)及9km网格模拟雷达回波(d)

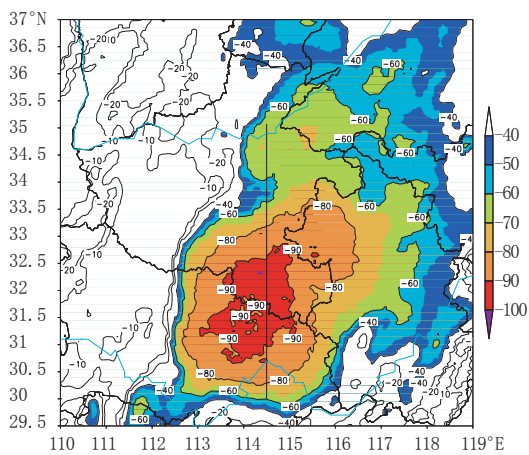


图5 2005年6月26日00时FY-2C  $T_{BB}$ 分布  
(分辨率:  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ )