

积层混合云结构和云微物理的数值模拟

邹 倩¹, 刘奇俊², 刘卫国¹

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 国家气象中心, 北京 100081)

摘 要:对三维非静力中尺度模式 ARPS 的云微物理方案进行了改进, 利用改进后的模式模拟了华北地区的积层混合云降水个例, 通过对模拟结果的分析并结合实况资料研究了积层混合云的降水特征、云物理结构特征和微物理过程。结果表明, 积层混合云降水分布不均匀, 雨区中存在多个强降水中心, 云系中微物理量在水平和垂直方向上分布都不均匀, 积云中的垂直液态水积分含量大大高于层云中含量, 此次降水冰相过程占主导地位, 霰的融化是最主要的雨生成项。

关键词: ARPS; 积层混合云; 云微物理

中图分类号: P435

文献标识码: A

引 言

积层混合云由层状云和积状云组成, 在云系中层状云和对流云特征差异较大, 降水空间尺度和强度较大的云系多为积层混合云。过去对积层混合云已有较多的观测和试验, 如梅雨锋的积层混合云降水^[1], 东北冷涡积层混合云降水等, 都对云系演变特征、降水形成的主要机制和雷达回波特征的研究取得了一些成果。

过去对积层混合云降水发生发展的天气学过程和降水机理研究较多, 对其云微物理结构和微物理过程的研究比较少。随着模式分辨率的提高、云物理过程的改进, 许多中尺度模式均能较好地模拟云降水系统发展的云物理过程^[2]。以雷达为主的观测系统也有较大发展, 雷达和卫星均能提供积层混合云宏观结构特征观测资料。实况资料可以结合模式来研究积层混合云的云微物理结构。本文利用改进的双参数微物理方案的 ARPS 模式^[3], 模拟了 2007 年 5 月 22 日在华北地区产生降水的积层混合云, 通过研究其降水形成过程和机制, 分析积层混合云的降水结构和云微物理过程, 对更好地了解积层混合云宏微观结构和该类云系的中尺度预报降水都将起到积极的作用。

1 模式介绍

ARPS (Advanced Regional Prediction System) 是由美国 Oklahoma 大学的风暴分析和预报中心 (CAPS) 开发的非静力平衡中尺度数值模式, 用于中小尺度天气系统的预报。模式采用完全弹性、可压缩和非静力大气动力学等控制方程, 包括动量、热量、质量、水物质和能量等预报方程和状态方程, 采用 Arakawa C 水平交错网格、时步分离计算方案、广义地形追随和伸展坐标系。

模式采用了 Lin - Tao 冰相微物理方案。该方案是基于 Lin 的体积水方案以及 Tao 和 Simpson 的水汽饱和和调整方案, 包括 2 种液态水 (云水, 雨水) 和 3 种冰相水 (冰、雪、霰或雹), 考虑了详细的微物理过程。微物理过程包括云滴的蒸发凝结、冰晶雪晶的凝华升华、云水自动转化成雨水、冰晶自动转化成雪、雪自动转化成霰、雪霰融化成雨水、冰晶融化成云水、冰晶的核化、冰晶的繁生、雨滴的冻结等过程。刘卫国^[4]在模式中增加了冰晶数浓度、增雨催化剂 (碘化银等) 成冰后的人工冰晶数浓度及其比水量。本文的研究中, 改进为完善的双参混合相微物理方案^[5], 增加了雨、雪、霰 (雹) 的数浓度, 并增加或改进了相应的微物理过程, 如雨滴的相互碰并、

收稿日期: 2008 - 04 - 29; 改回日期: 2008 - 05 - 21

基金项目: “十一五” 科技支撑课题 —— 积层混合云人工增雨技术研究 (2006BAC12B02) 资助

作者简介: 邹倩 (1982 -), 女, 重庆人, 硕士, 主要从事云物理和人工影响天气研究。E - mail: zoulumi@sohu.com

冰晶聚合成雪、雪碰并云水,雪转化成霰等,一些过程只涉及了粒子数量的变化,实现了与模式的动力框架相适应。

ARPS模式采用三维曲线坐标系 (ξ, η, ζ) [11], 根据原模式方程组,建立如下的雨、雪、霰浓度的预报方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{N}_r^*) = - \left[u^* \frac{\partial \bar{N}_r^*}{\partial \xi} + v^* \frac{\partial \bar{N}_r^*}{\partial \eta} + W^{*c} \frac{\partial \bar{N}_r^*}{\partial \zeta} \right] + \sqrt{GD_{nr}} + \sqrt{GS_{nr}}$$

其中 $\bar{N}_r^* = N_r / \bar{\rho}_0$, 单位: kg^{-1} , 为雨水的比浓度, N_r 为雨滴的数浓度, 单位: m^{-3} , $\bar{\rho}_0$ 为基态空气密度, \sqrt{G} 为曲线坐标到直角坐标的变换因子。方程右边各项依次为平流项、湍流混合项和微物理源汇项。同理,用 N_s, N_h 分别替换公式中的 N_r , 即是雪浓度、霰浓度的预报方程。上式中微物理源汇项分别为如下形式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\bar{N}_r)}{\partial t} &= npraut + npgm lt + npsm lt + ncrr \\ &\quad - nprevp - npsacr - npiacr - npgfr \\ \frac{\partial (\bar{N}_s)}{\partial t} &= npgaut + npgfr + npraci \cdot (1 - \alpha_3) \\ &\quad + npiacr(1 - \alpha_3) + npracs \cdot (1 - \alpha_2) \\ &\quad + npsacr \cdot (1 - \alpha_2) - npgm lt - npgsub \\ \frac{\partial (\bar{N}_h)}{\partial t} &= npsaut + \frac{1}{2} nccii - ncss + npraci \cdot \alpha_3 \\ &\quad - npiacr \cdot \alpha_3 + npsacr \cdot \alpha_2 - (1 - \alpha_2) \\ &\quad \cdot npracs - npgaut - npgm lt - npsub \end{aligned}$$

(1)雪碰并云水,暂取同冰晶相似的方程,从现有结果来看,直径小于某一阈值的云滴不能被雪晶碰并,直径小于阈值的雪晶不能碰并云滴,碰并系数一般随着雪晶的尺度增大。

$$psacw = \frac{1}{4} \left[4 \frac{1}{3} \right] Q_c \bar{E}_{cs} (6A_{ms} N_s / Q_s)^{-\frac{2}{6}} N_s \exp(-\lambda) \left[1 + \frac{\lambda}{i-1} \right]$$

(2)冰晶碰撞转化成雪,冰晶聚集率同分布谱有一定关系,越分散,聚集越强。冰晶间的平均碰并系数 E_{ii} 同温度关系密切,在 0 附近最大,随着温

度下降迅速减少,同冰晶形状有关。

$$\begin{aligned} C_{ii} &= \frac{1}{48} A_{vi} \left[\frac{1}{6A_{mi}} \right]^{\frac{2}{6}} \bar{E}_{ii} Q_i^{\frac{43}{6}} N_i^{-\frac{1}{6}} K M_{ii} \\ NC_{ii} &= \frac{1}{4} A_{vi} \left[\frac{1}{6A_{mi}} \right]^{\frac{2}{6}} N_i^{\frac{5}{6}} Q_i^{\frac{2}{6}} K N_{ii} \end{aligned}$$

(3)雪团相互碰并聚合,雪团的相会碰并过程对雪团的比水量没有作用,但是改变雪团的比浓度和大小。

$$NC_{ss} = \frac{1}{8} K N_{ii} \cdot A_{vs} \cdot \bar{E}_{ss} \left[\frac{1}{6A_{ms}} \right]^{\frac{2}{6}} \cdot N_s^{\frac{5}{6}} \cdot Q_s^{\frac{2}{6}}$$

(4)雨滴冻结成霰

$$\begin{aligned} npgfr &= \frac{1}{w} Q_{r,B} \bar{h} \exp(A_b T_s) - \bar{h} \\ pgfr &= 20 \frac{Q_r^2}{w N_r} B \bar{h} \exp(A_b T_s) - \bar{h} \end{aligned}$$

其中参数 $B b = 10^{-4} \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$, $A_b = 0.66 \text{K}^{-1}$ 各符号所代表的微物理过程参见相关文献说明 [3-4]。

2 个例模拟

选取 2007 年 5 月 22 日发生在华北地区的积层混合云降水个例。分别以 21 km 和 7 km 粗细 2 层水平网格分辨率做模拟,粗网格模拟时间从 5 月 22 日 08 时至 22 日 20 时,细网格模拟时间从 5 月 22 日 11 时至 22 日 20 时(北京时,以下同)。2 层网格都以北京(40 N, 116 E)为模拟区域中心,垂直高度分 30 层,格距为 500 m,均采用双曲正切曲线向上伸展,近地面最小距离为 20 m。粗网格读入的初边界资料为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 全球 6 h 实时分析资料和常规及地面探空资料。粗网格模拟生成的逐时预报结果插值到细网格上,为细网格模拟提供初始条件和边界条件。2 层网格的微物理方案都采用了改进的双参混合相云物理方案和 Kain - Fritsch scheme 积云参数化,地形资料都采用了 30 的实际地形资料。

2007 年 5 月 21 日降水出现在河套地区。21 日

08时,500 hPa亚洲中高纬环流表现为 2槽 1脊型,2槽分别位于巴尔喀什湖和我国东北东部地区,21日 20时,高原东侧北支槽与冷空气结合加深,在内蒙古西部形成一低涡,同时东北南部到东部沿海有弱脊维持。

22日 08时(图 1a),500 hPa低槽东移,河北处于槽前暖湿气流中,北京地区高空出现西南急流,并伴有明显的辐合,高压脊在内蒙古东部至山东半岛一线,北京地区处于东高西低的形势当中,有利于降水;700 hPa西南低涡伸出小槽在四川至贵州上空,西南气流输送水汽北上,一大槽在贝加尔湖到河套一带形成;850 hPa,南北低压打通,形成南北向的低槽区;海平面气压场上,黄海海面为高压中心,低压中心移到四川南部。

22日 20时,500 hPa低槽东移过程中减弱为切变线,700 hPa原位于贝加尔湖到河套一带的低槽在河北西北部减弱为不闭合的低压,850 hPa高原

东部低压东移,东东南部有高压脊发展,海平面气压场上黄海高压北移。

可以看到,由于冷空气活动偏北,中纬度平直西风气流受较弱波动东移影响,高低空偏南暖湿气流源源不断输入,在华北地区形成稳定的降水。

这次降水过程可以分为几个阶段:22日 10时,降水系统从山西移到河北,河北上空云系深厚;12~17时降水发展,范围逐渐扩大,其中 14~16时,河北中部地区降水较强,每小时雨量 8 mm;16~17时,北京西南地区降水较强,每小时雨量 6~8 mm;18时降水中心东移到唐山地区,20时之后云系逐渐移出河北,降雨量显著减少,一般在 0.2 mm 左右,华北地区降雨过程结束。

图 1b给出了模拟区域 5月 22日 08时 500 hPa天气形势的模拟结果,与实况相比,基本给出了正确的形势。

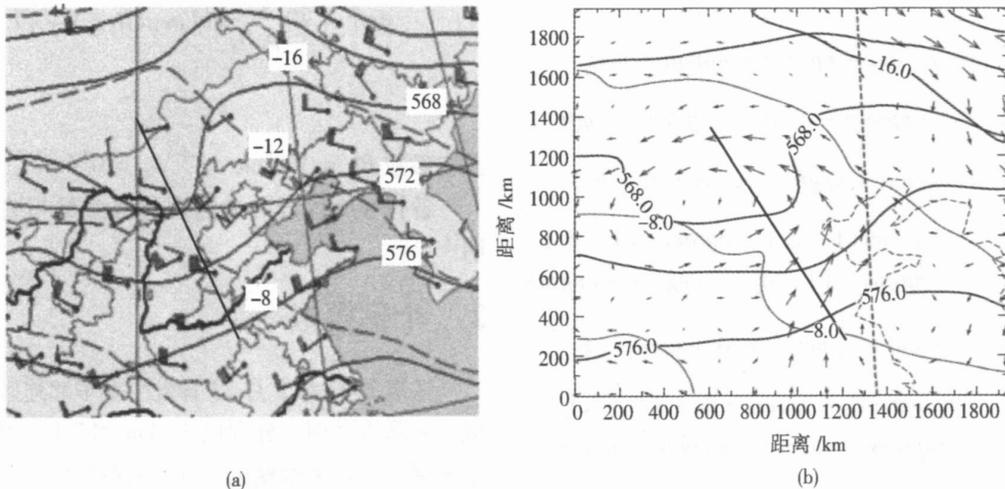


图 1 2007年 5月 22日 08时 500 hPa位势高度、温度场、风场 (a为实况,实线表示位势高度,虚线为温度;b为模拟结果)

Fig 1 The geopotential height, temperature field and wind vector field at the level of 500 hPa at 08: 00 on May 22, 2007 (a for observation and b for simulation)

2.1 地面降水、雷达降水回波、云图与模拟结果对比

图 2是 22日 11~20时河北、北京 9 h实况雨量分布(a)和细网格区域模式预报雨量(b)。由图可见,模式较为准确地预报了河北中部、北京这条西南东北走向雨带分布形势,50 mm强降水中心也模拟得比较好,只是位置比实况稍微偏东,降大雨的范围模拟结果比实况小。从雨带分布形势与强降水落

区位置来说,模式具有较好的模拟能力。

对比强降水时段观测降水与模拟降水的时变特征可以看出,22日 14~16时,河北中部地区有 1个降水中心,与实况接近,但是模拟的强降水时间比实况维持长一些;16~17时,北京西南地区出现 1个降水中心,与实况接近,实况的降水中心范围比模拟稍大,可见模式结果在一定程度上能反映出此次区域性降水的降水中心分布特征。

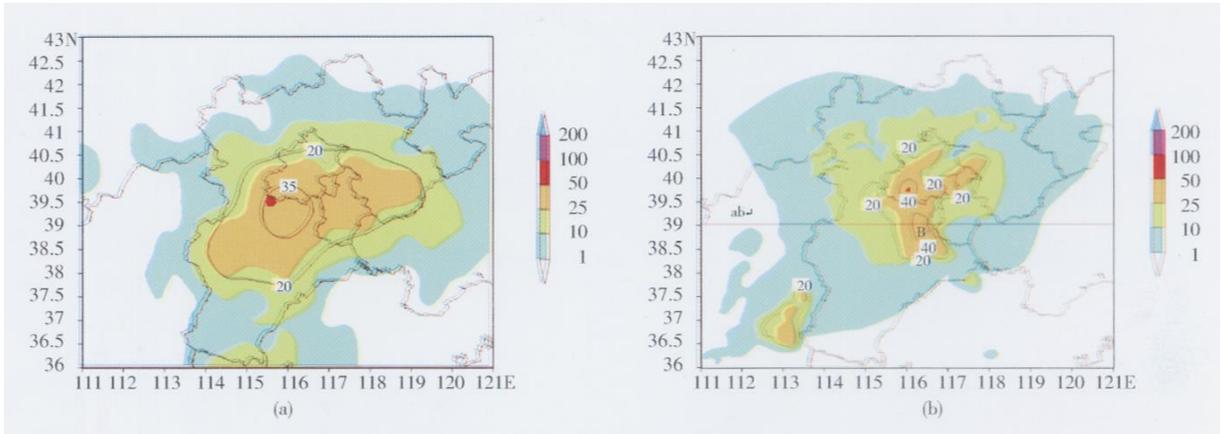


图 2 河北、北京 9 h 地面累积降水 (a 为实况降水, b 为模拟结果)

Fig 2 The nine hours accumulated precipitation in Hebei and Beijing (a for observed and b for simulated results)

从雷达回波上显示,这次降水云系有明显的积层混合云特征,整体回波边缘破碎,没有明显的边界,大范围的稳定降水云中夹杂有多个对流中心,强回波位置随着降水的发展从西往东移动。在 3 km 高度上 CAPP1 雷达回波图 (图 3a) 上可见,站点南面有大片絮状回波,强度为 40 dBz,其中有一些孤立的强对流回波,最大值 50 dBz;模拟的 3 km 高度上雷达回波图 (图 3b) 显示,强回波位置对应实况较好,处于北京东南方

向,最大值为 60 dBz 左右,比实况大 10 dBz。由于所处格距的局限性,模拟结果不能很好地揭示较小尺度的积云单体结构。

从同时刻的 RH 回波强度图上分析 (图略),东南方向距测站 10 km 和 25 km 处的对流云回波呈柱状,强度高达 50 dBz,此混合云的对流云处于发展阶段。此时从 PP 图上看,对应位置上空有大范围强对流。雷达资料得到的回波顶高最大在 8~9 km 之间,模拟结果显示回波顶高在 10 km 左右。

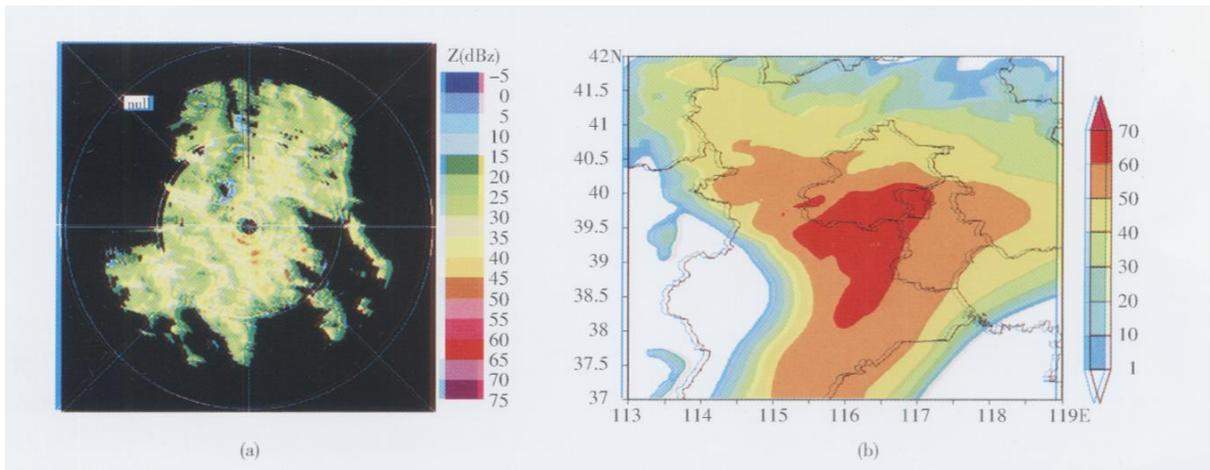


图 3 北京南苑站 s 波段雷达 2007 年 5 月 22 日 13 时 02 分的 CAPP 图 (a) 及 13 时模拟雷达回波图 (b)

Fig 3 The radar echo at 13:02 on May 22, 2007 (a) and simulated result (b)

从 11 时红外云图上可见,对应于高空槽前,华北上空有大片云系,不均匀的分布着许多较强的对流泡^[6];从 12 时 (图 4a) 的红外云图可见,700 hPa 西南气流输送的水汽与 500 hPa 偏北气流中的冷空

气在河北中部、北京上空交汇形成较深厚的云,云色调较亮,云顶温度较低,说明云顶较高,云内有弱对流的积云;模式模拟的 600 hPa 高度上云团的总水凝物含量 (图 4b) 与卫星云图中云场分布一致,最

大值为 0.5 g/kg , 丰水区在河北中部和南部地区, 河北中部地区上空对应的红外云图上色调比较白亮。之后云系缓慢东移, 从 16 时云图 (图略) 看, 云系主体移到北京东侧, 处于云系后部, 上空仍有大片云系; 模拟的总含水量丰水区也向东移动, 最大值减少

到 0.3 g/kg , 云水分布不均匀。

综合以上对积层混合云的位置、雷达回波、累积降水量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, 具有较好的模拟能力。

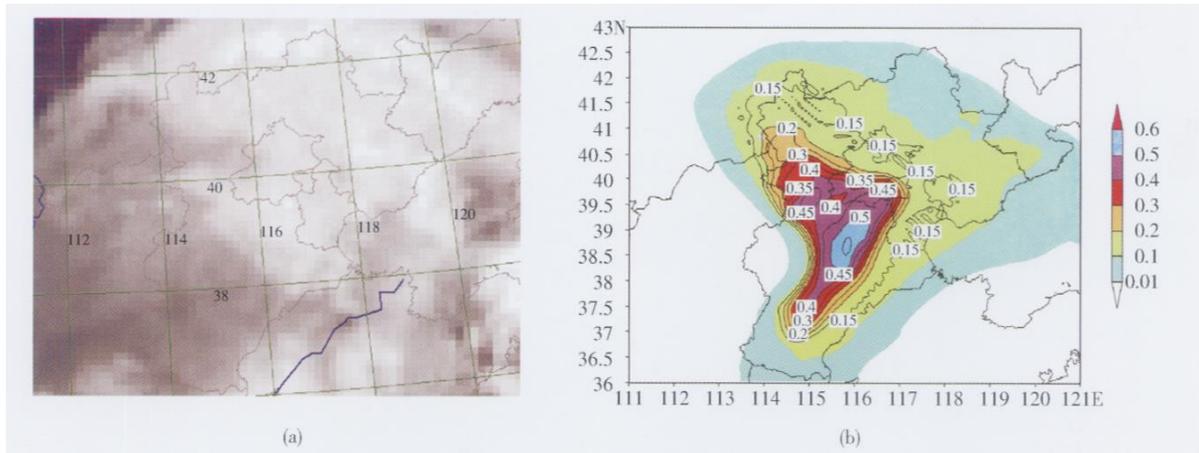


图 4 5月 22日 12时红外云图 (a) 及 600 hPa 云团的总水凝物含量模拟图 (b)

Fig 4 The infrared cloud image at 12:00 on May 22 (a) and the simulated result of the total water mixing ratio at the level of 600 hPa

2.2 云动力场结构

云内存在一定的上升气流, 是云系形成、发展和维持的必要条件。云系的发展强弱和分布与云内气流运动的垂直速度的大小和分布有密切关系^[7]。通过对不同云区垂直速度的分析, 可以看出, 在速度较大的地方, 云系发展旺盛, 有较强的对流降水, 相应的降水速率较大。13~15 时, 在河北廊坊地区, 地面小时降水 $8 \sim 10 \text{ mm/h}$, 1.4 km 高度上, 垂直速度 0.2 m/s , 4 km 高度上垂直速度比较大, 达到 0.4 m/s , 垂直上升风速在 6.5 km 高度上也相对较大, 云水到达 9 km 高度, 可知在该地区对流比较强盛。同时, 垂直风速大值区中心移动速度比降水大值区中心移动速度快; 在北京西南地区 16~18 时, 地面小时降水 $6 \sim 8 \text{ mm/h}$, 强降水区域比较小。 1.4 km 高度上垂直风速相对较大达 0.3 m/s , 在 4 km 高度上风速减小, 对应区域上空云层分层明显, 主要是暖云, 暖云云水大值区在 2 km 高度上, 可见该地区对流较弱, 主要是暖积云产生的降水; 在层云区, 上升速度都很小, 云层比较稳定, 降水维持在 2 mm/h ; 可见积层混合云中积云中上升速度比较大, 层云又为积云提供了充足水汽环境, 使得这些积云生命期延长, 降水强度较大, 且垂直最大风速总是先于最大

降水率出现^[8~9]。

2.3 云系宏观结构

2.3.1 含水量垂直积分的分析

水凝物的发生是水汽向降水转化的必经阶段。水汽含量达到饱和开始凝结成云水, 温度 < 0 时, 过饱和水汽将凝华成冰晶。云水和冰晶通过进一步的凝结、凝华和碰并长大成雨水、雪和霰, 雨水、雪霰融化成雨水降落至地面形成降水。

这次华北地区积层混合云降水过程中, 液态水分布在河北中部上空, 而固态水分布在整个河北地区上空。22 日 13 时 (图 5a), 云系范围较大, 降水处于发展阶段, 大部分地区的垂直液态水积分分布相对比较均匀, 一般在 $0.2 \sim 0.6 \text{ kg/m}^2$ 之间, 大值区在北京西部, 最大值为 1.56 kg/m^2 ; 14 时 (图略), 垂直积分液态水含量分布相对集中, 大值区东移, 最大值为 1.2 kg/m^2 ; 从 16 时开始, 雨带移动顺次通过香河、唐山地区, 对应积分液态水含量大值区继续东移, 含水量增大, 19 时最大值为 1.8 kg/m^2 。通过以往的研究发现北方稳定层状云垂直积分液态水含量在 $0.1 \sim 0.4 \text{ kg/m}^2$ 之间, 可见这次积层混合云垂直积分液态水含量比较大, 大值区是稳定层状云的 4 倍左右。在云的不同发展阶段, 积分液态水含量分

布明显不同;即使在同一阶段,其分布也是不均匀的。

13时固态水含量(图 5b)在大部分地区都为 0.4 kg/m^2 ,大值区在北京西南部和廊坊地区,最大值为 0.8 kg/m^2 ;垂直积分固态水含量分布比较均匀,大值

区在河北中部地区,随着雨带的移动,缓慢向北延伸,往东移动,最大值一直维持在 1.0 kg/m^2 左右;积分液态水大值区基本与积分固态水大值区对应,两者重合的地区是降水较大的区域。低层的供水云为高层落下的冰相粒子提供了有利的增长环境。

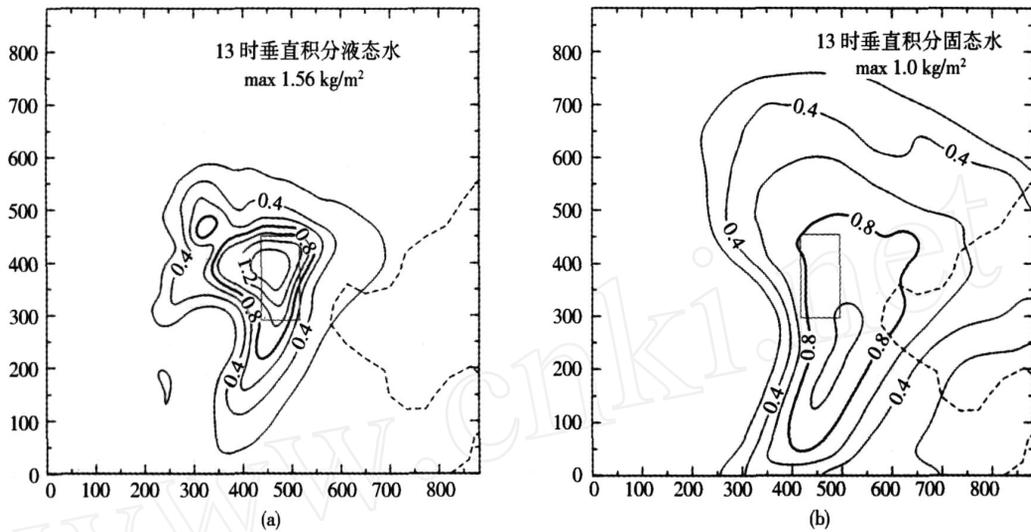


图 5 5月 22日 13时垂直积分液态水含量 (a)及垂直积分固态水含量 (b)

Fig 5 The vertical integrated liquid - water content (a) and solid - water content (b) at 13:00 on May 22, 2007

2.3.2 水平微物理分析

从 5月 22日 13时 850 hPa、600 hPa和 500 hPa 云水分布图上看(图 6),850 hPa高度,河北中部和北京西部地区有一个云带,河北中部上空云水比含水量分布均匀,在 $0.05 \sim 0.2 \text{ g/kg}$ 之间;在山西、河北交界的太行山区,有 2个云团,含水量丰富,1个云团比含水量最大值达到 0.4 g/kg ,另 1个含水量在 0.15 g/kg 左右,整个云带表现为积层混合云特征,云水分布不均匀;在 600 hPa高度上,云系在河北中部、北京上空,大部分云区比较均匀,含水量在 $0.02 \sim 0.15 \text{ g/kg}$ 之间,其中在北京东南地区有 1个云团含水量较大,其值为 0.3 g/kg ;在 500 hPa高度上,有 1个小的云带在北京西南方向,云水含量在 $0.05 \sim 0.1 \text{ g/kg}$ 之间,其中含水量值大的云团,在 $0.15 \sim 0.2 \text{ g/kg}$ 之间。可见云顶起伏不平,积云对流较强,在较高高度上还有丰富云水。

15时 850 hPa高度,暖云云带减弱,断裂成 3个小云带,之前山区中含水量为 0.4 g/kg 的积云云团大大减弱,含水量为 0.1 g/kg ,北京西侧的层云云系也减弱成为 1个小云带,含水量最大值仍为 0.2 g/

kg ;在 600 hPa高度,之前的大片层云受西风影响东移减弱,云系范围减小很多,含水量在 $0.02 \sim 0.1 \text{ g/kg}$ 之间,丰水区也东移到北京、天津交界处上空,云团含水量丰富,最大值为 0.3 g/kg ,云团向上发展;在 500 hPa上,对应位置有小云团存在,含水量为 0.1 g/kg

分析各层云水分布可以发现,云系在西风气流作用下向东移动,局地上升运动较强,对比山区的积云云团和河北中部地区的积云云团各自的发展,结果表明孤立的积云生命史比较短,大片层云中的积云可以持续发展,生命期比较长,因为层云为积云提供了充足水汽环境。

从 13时的雨水、雪、霰和冰晶的含水量水平分布来看(图略),700 hPa上,雨水的含水量在 $0.1 \sim 0.2 \text{ g/kg}$ 之间,数浓度为 6 L^{-1} ,分布比较均匀并有一定起伏;620 hPa上,霰的含水量最大值为 0.07 g/kg ,数浓度为 6 L^{-1} ;400 hPa上,雪的含水量在 $0.1 \sim 0.25 \text{ g/kg}$ 之间,数浓度为 0.04 L^{-1} ;300 hPa上,冰晶的含水量在 $0.04 \sim 0.06 \text{ g/kg}$ 之间,数浓度为 $20 \sim 40 \text{ L}^{-1}$,分布不均匀。

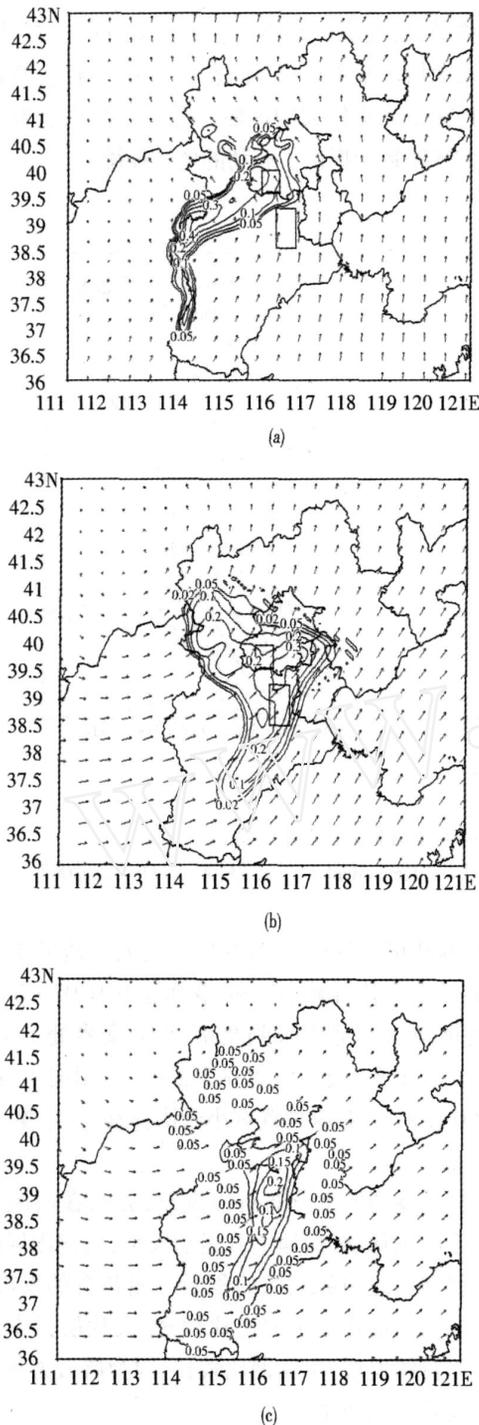


图 6 2007年 5月 22日 13时 850 hPa (a)、600 hPa (b)及 500 hPa (c)的云水含量分布图
Fig 6 The water cloud mixing ratio at the level of 850 hPa (a), 600 hPa (b) and 500 hPa (c) at 13:00 on May 22, 2007

2.3.3 云微物理垂直分布

利用模式细网格区域输出的雪、霰、冰晶、雨水、

云水比含量资料(图 7),分析此次混合云降水过程从降水初生阶段到降水增强阶段,层云和积云的微物理结构特征差异。

降水初生时期云水丰富,大值区域位于零度层附近,最大值为 0.3 g/kg ,低层暖云云底高 1 km 左右,与高层云连在一起;有少量冰晶存在于零度层附近,说明云水对冰晶的生长有重要作用,主要在 9 km 高度附近;霰含量丰富,大值区在零度层上;暖雨降水在这时起到一定作用。

14:00为降水发展时期,在 2 km 高度,有大范围暖层云存在, 116°E 上空有弱的积云单体存在,液态云水伸展到 9 km , 116.5°E 上空积云发展旺盛,各微物理量分层不明显,过冷水云水丰富,大值区在零度层附近,丰沛的过冷水之上有大量的冰晶存在 (0.05 g/kg 左右),在 7 km 高度处和过冷水结合,雪的大值区在 6.5 km 高度上 (0.3 g/kg),冰晶雪晶下落碰冻过冷水,在零度层上形成较多霰粒子 (0.07 g/kg), 0° 层以下区域仍有一些未融化的雪霰粒子存在,雪霰粒子在 0° 层之下融化成雨水,雨水在零度层之下。

15:00(图略)是 116°E 附近地面降水最强盛的时期,降水速率为 10 mm/h ,其上空积云仍然存在,发展变弱有东移趋势,雪霰粒子含量减小,大值区东移,表明前期冰相粒子和云水转化成的雨水全部降落到地面。整个降水表现为冷云降水为主,暖云降水为辅,二者共同作用。由以上分析可知,在丰沛过冷水与冰相粒子共存的积云中,大量冰相粒子与云滴、雨滴碰冻增长,然后落入暖区融化成雨水,由于冰相粒子的加入使得地面雨水增加。之后,云系向东北方向移动,该地区降水逐渐减弱。

3 云微物理转化

从之前的分析可见,河北廊坊地区为一个降水大值区域(简称降水区 B,见图 2a),在其强降水时段,该区域上空积云发展比较旺盛,选择这个降水区做各相粒子的微物理转化过程分析。图 8 是降水区域 B 上空雨水的源项垂直分布,沿着 39.02°N 剖面是 12 时该雨区降水初期的情况。霰的融化对雨水生成的贡献最大,在零度线以下的 700 hPa 上转化率最大值达到 $1.77 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;雨水碰并云水作用也比较大,在高度 850 hPa 上最大值为 $7.0 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,此时云系分层明显,层云大范围分布,雨滴碰并云水是在低层暖云中,云水丰富;

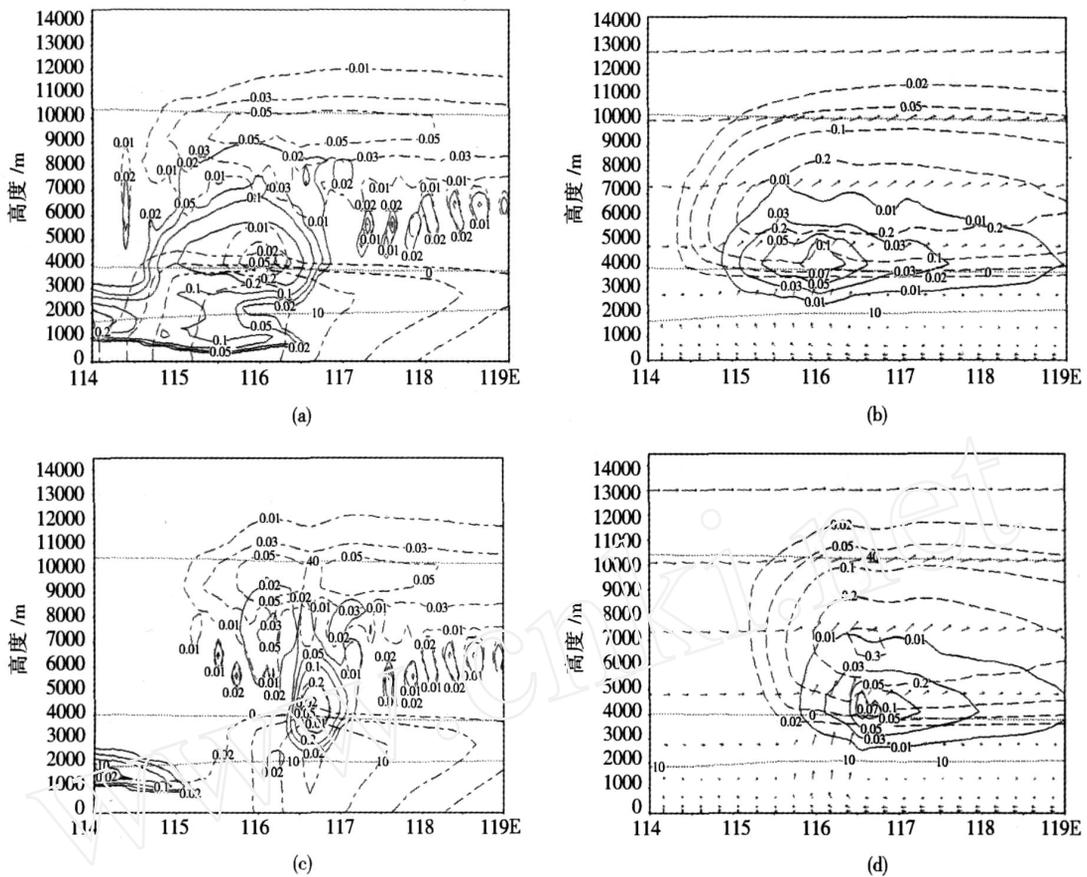


图 7 模式细网格区域输出的雪、霰、冰晶、雨水、云水比含量

(a, c图中,实线为 q_c ,横向点线为温度 (),点虚线为 q_i ,长虚线为 q_r ;

b, d图中虚线为 q_s ,实线为 q_h ; q_s q_r q_c 的等值线为 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, q_h 和 q_i 的等值线为 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.12, 0.15, 0.2, u, w 合成风速中 w 放大 100 倍, 横向点线为温度 ()

Fig 7 The x - z cross - section of cloud, ice, snow, hail, rain mixing ratio and wind vector field

雪的融化最大值在 640 hPa 为 $5.0 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;融化的霰碰并云水生成雨水在 650 hPa 上,最大值 $1.0 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;雨水碰并融化的霰生成雨水也起了很大作用,在 700 hPa 左右,最大值 $2.0 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,雨水碰并融化的雪生成雨水,在 600 hPa 上,最大值 $3.5 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。后面这 3 个过程对雨水的生成也起到重要作用。

15 时是降水强盛时期 (图略),之前发展旺盛的积云减弱,霰的融化对雨水生成的贡献还是最大,在高度 680 hPa 上最大值为 $1.6 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;其次是雪的融化作用也较大,在 640 hPa 最大值达 $5.0 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;另外,雨水碰并云水最大值 $2.0 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,在 650 hPa,此时降水区上空积云发展较强,云水到达 7 km 高度,云水大值区域在 0 层附近,云微物理量分层不明显;融

化的霰碰并云水生成雨水、雨水碰并融化的霰生成雨水对雨水的产生也起到一定作用。

16 时是降水后期 (图略),云系主要为层云,作主要贡献的是雪的融化,最大值 $2.0 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,雪融化一直维持在这个量级,只是稍微有些减弱,在降水后期跟霰融化所起作用一样;其次是霰的融化,明显减弱,最大值 $1.25 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,在 700 hPa 上,比前期减少一个量级;雨水碰并云水、雨水碰并融化的霰生成雨水、雨水碰并融化的雪生成雨水对雨水的产生也起到重要作用。

对模式运算过程中的雨水源汇项的最大值 (图 9)和总量输出 (表 1)分析可以看出,雨区 2 的降水主要是由冰相粒子转化而来,霰和雪起主要作用,雪的融化高度比霰高,尽管霰的含水量比雪小一个量级,但是从转化总量和转化速率上看都是霰对雨水

产生的作用最大;在降水初期是暖云降水占一定比例,之后是冷云降水为主要云物理过程;云系分层明显,积云中含水量明显高于层云中含水量,最大的含水量中心在暖层和过冷水层都存在,达 0.4 g/kg,丰沛的过冷水为冰相粒子生成起到重要作用;对于这次积层混合云降水,雪、霰(霰)的融化和雨滴碰并

云滴是其主要源项,融化的霰(霰)粒子收集暖区云水继续增长对雨水贡献也比较大;雨水的主要汇项为雨滴的蒸发和雪与雨滴的碰并。

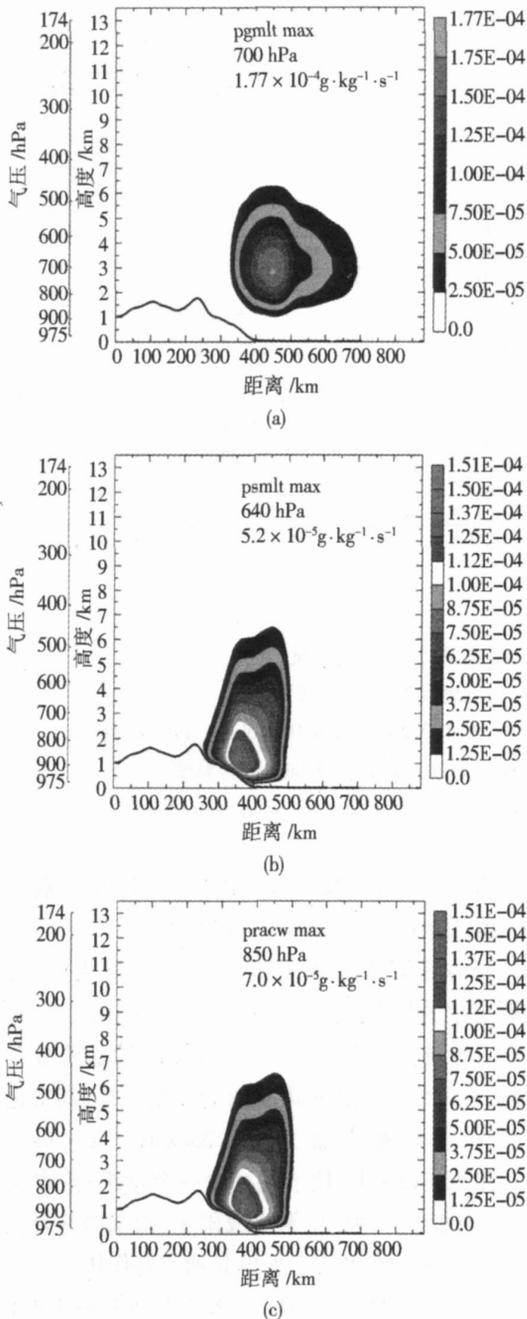


图 8 2007年 5月 22日 12时雨水的主要源项垂直剖面
Fig 8 The x - z cross - section of rain sources at 12: 00 on May 22, 2007

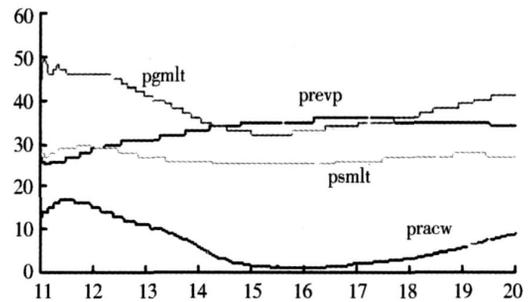


图 9 雨水的主要源汇项总量分布图
Fig 9 The primary source and sink gross of rain

表 1 雨的源汇项对比

Tab 1 Contrast on source and sink of rain

微物理过程	雨的源项		雨的汇项	
	最大值 $/(g \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1})$	总量最大值 $/(kt/s)$	最大值 $/(g \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1})$	总量最大值 $/(kt/s)$
praut	9.10×10^{-5}	2.10×10^{-3}	-	-
pracw	4.70×10^{-4}	1.70×10^1	-	-
psacw(t>0)	1.40×10^{-21}	2.20×10^{-20}	-	-
psmlt	8.40×10^{-4}	3.30×10^1	-	-
pgmlt	9.20×10^{-4}	5.00×10^1	-	-
pgacw(t>0)	9.90×10^{-5}	1.20	-	-
wgacr	-9.40×10^{-5}	-8.10×10^{-2}	1.30×10^{-5}	1.90×10^{-3}
piacr	-	-	2.30×10^{-8}	3.80×10^{-5}
pgacr(dgacr)	-	-	3.20×10^{-5}	3.80×10^{-1}
psacr	-	-	2.60×10^{-4}	3.70
pgfr	-	-	3.00×10^{-6}	9.70×10^{-3}
prevp	-	-	2.70×10^{-4}	3.60×10^1

注:当 wgacr>0时,为雨水冻结成冰霰的数量;当 wgacr<0时,为 pgacr(t<0)中未冻结的云水的数量,这些云水从霰上被甩掉成为次生雨滴。

通过对云水、冰晶、雪、霰的微物理源汇项的最大值和总量的分析得知:云水的主要源项为水汽的凝结,云水的主要汇项是云滴的蒸发,其次为雨滴碰并云滴、霰碰并云滴、云水均匀冻结成冰晶;冰晶的主要源项为冰晶的凝华增长,产生的冰晶总量比第2源项大 2个数量级,其次为云水均匀冻结成冰、冰晶与云滴的碰并;其主要汇项为冰晶的升华、雪与冰晶的聚合,其次为冰晶的融化、霰(霰)与冰晶的碰并;雪的主要源项是雪晶的凝华增长,其次为雪与冰晶的聚合,和雪与雨滴的碰并,其主要汇项是霰与雪

的合并、雪的融化、雪的升华和雨滴与雪的合并;雹的主要源项是雹与雪的合并,其次为雹撞冻云滴和雪撞冻雨滴;雹的主要汇项是雹的融化。

4 结 语

本文利用含有详细微物理过程的 ARPS 中尺度模式和 NCEP 资料模拟了华北地区 2007 年 5 月 22 日积层混合云降水,通过降水过程的中尺度背景和云系微物理及其转化过程的分析,可以得出以下结论:

(1)模式能够较好地模拟本次降水过程,模拟的降水区域和强度与实况比较吻合,从雷达资料和垂直速度上看,这次降水为对流较弱的积层混合降水;

(2)积层混合云降水分布不均匀,雨区中存在强降水中心,一般是周围稳定层状云降水的 3 倍左右。积层混合云中对流云生命期延长,强降水持续时间为 1~2 h;

(3)积层混合云在雷达 PPI 上表现为大片的层状云中有絮状的对流云回波,回波强度在 40 dBz 左右,在 RH 上表现为柱状对流回波;

(4)通过对云微物理量的垂直分布和水平分布的分析,可以看出云中微物理量在水平方向和垂直方向都表现为不均匀分布;积层混合云中积云中上升速度比较大,对应降水较大,层云为积云提供充足水汽环境,使得对流云生命期延长,降水强度大,且垂直最大风速总是先于最大降水率出现;

(5)这次积层混合云垂直积分液态水含量比较大,大值区是稳定层状云的 4 倍左右。在云的不同发展阶段,积分液态水含量分布明显不同。即使在

同一阶段,其分布也是不均匀的;

(6)通过对云中各种粒子源汇项的研究,分析了降水形成机理、降水粒子形成的环节。冰晶通过凝华增长;雪靠水汽凝华、收集冰晶和撞冻云水增长;雹主要来源于雪,通过撞冻过程、收集雪长大成为可以落到云的暖区融化形成雨水;积层混合云的降水有凝结碰并过程、冰相粒子的转化,雹的融化是雨水形成最主要的作用。

本文只是针对一个个例进行了模拟分析,所得结果还需要微物理探测资料做进一步检验,也需要选取多个个例来做进一步研究。

参考文献:

- [1] Reisinger J, Rasmussen R M. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms Using the MM5 mesoscale model[J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1998 (124): 1071 - 1107.
- [2] Lin Y L, Farley R D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. *Climate Appl Meteor*, 1983 (22): 1065 - 1092.
- [3] 黄美元. 梅雨锋云系和降水的若干研究[J]. *大气科学*, 1987, 11 (1): 23 - 30.
- [4] 刘卫国. 祁连山夏季地形云结构和云微物理过程的模拟研究[J]. *高原气象*, 2007, 26 (1): 1 - 30.
- [5] 胡志晋, 严采繁. 层状云微物理过程的数值模拟(一)微物理模式[J]. *气象科学研究院院刊*, 1986, 1 (1): 37 - 52.
- [6] 洪延超. 积层混合云数值模拟研究(一) - 云相互作用及暴雨产生机制[J]. *气象学报*, 1996, 54 (6): 661 - 674.
- [7] 赵震. MM5 中新显式云物理方案的建立和数值模拟[J]. *大气科学*, 2005, 29 (4): 610 - 619.
- [8] 丁永红. 一场大范围强对流天气的成因分析[J]. *干旱气象*, 2006, 24 (1): 28 - 33.
- [9] 李照荣. 春季冷锋天气过程层状云微物理结构个例分析[J]. *干旱气象*, 2004, 22 (4): 41 - 45.

Numerical Simulation of Stratocumulus Cloud Structure and Cloud Microphysical Processes

ZOU Qian¹, LU Qijun², LU Weiguo¹

(1. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China; 2. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: The ARPS mesoscale model is improved by modifying cloud microphysical scheme. Three new predictands and their microphysical processes, including the number concentration of rain (Nr), snow (Ns) and hail (Nh), are introduced into the model. One case of stratocumulus cloud in North China is simulated by the improved ARPS model. The characteristics of cloud development, precipitation, cloud microphysical structure and cloud microphysical process are investigated. The case study suggests that the distribution of stratocumulus precipitation is nonhomogeneous with some precipitation significance regions, and the cloud microphysical structure is nonhomogeneous in space. The vertical accumulating liquid water content in cumulus is higher than that in stratus; the ice phase process leads this precipitation, and the melting of graupel is the main source of rain.

Key words: ARPS model; stratocumulus cloud; cloud microphysics