

# 西北地区一次层状云降水云物理结构和云微物理过程的数值模拟研究

赵震<sup>1, 2</sup> 雷恒池<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘 要** 利用 MM5 中增加的双参数显式云物理方案模拟了西北地区一次层状云降水过程, 模拟结果显示对小雨的预报评分较高, 对中雨以上评分低而且位置有一定偏差, 即对层状云降水模拟效果较好。模式中增加了雷达反射率的计算, 与延安站雷达 RHI 回波相比较, 模拟的回波结构基本符合层状云回波特征, 存在 0°C 层亮带。采用三层模型解释模拟的层状云降水形成机制和过程: 第一层为冰晶区, 无过冷水; 第二层存在过冷水, 为各种冰相粒子增长区, 第一层和第二层的分界不固定; 第三层和第二层的分界在 0°C, 为暖云。第一层对第二层播种冰晶, 第二层为第一层播种下的冰晶供给过冷水, 使冰晶快速增长; 第二层对第三层播种雪和霰, 使其在第三层融化成雨, 第三层同时消耗云水。模拟给出了三层模型层状云场的空间结构, 延安站不同时刻微物理量垂直分布和各种水凝物粒子的生成源项分析揭示了三层模型降水形成机制和主要微物理过程。三层模型可以完整和全面地解释层状云降水形成机制和过程。

**关键词** 双参数谱演变方案 三层模型 微物理过程 雷达反射率

**文章编号** 1006-9895 (2008) 02-0323-12

**中图分类号** P426.5

**文献标识码** A

## A Numerical Simulation of Cloud Physical Structure and Microphysical Processes Associated with Stratiform Precipitation in Northwest China

ZHAO Zhen<sup>1, 2</sup> and LEI Heng-Chi<sup>1</sup>

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

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

**Abstract** A stratiform precipitation in Northwest China is simulated by using the PSU/NCAR mesoscale model (MM5) with a new double-moment explicit microphysics scheme. The simulation results show that the threat score of 24-h precipitation forecasting at the categories 0, 1-9.9 mm is high while the threat scores of threshold greater than 10 mm are low and the predicted precipitation locations have bias error compared with observation. The results indicate that the model has certain prediction ability for stratiform precipitation. The output result of new added radar reflectivity calculation in the model agrees with the radar echo on the Range-Height Indicator (RHI) display at Yan'an station, which has the characteristic of stratiform radar echo and 0°C isotherm bright band exists.

To explain the physical mechanism and processes of the simulated stratiform precipitation formation, a three-layer model is proposed. The first layer contains ice crystals and has no supercooled liquid water. The second layer contains supercooled liquid water and is the region for different ice phase particles growth. The boundary deck between the first and second layers is not fixed. Below the 0°C isotherm is the third layer which contains warm cloud

water. The first layer precipitating ice crystals to the second layer clouds is called “seeder” zone and the second layer supplying supercooled liquid water is called “feeder” zone, in which ice crystals can grow and multiply very rapidly. Once the snow and graupel which produced in the second layer fall below the freezing-level, melting occurs, and precipitation is formed in the third layer. At the same time, rain water continuously grows at the cloud water droplet’s expense for the warm cloud processes. The second layer is called “seeder” zone with respect to the third layer. The output of the model could provide the stratiform cloud field spatial structure of three-layer model, the microphysical values profile and the different hydrometeor particles sources analysis reveal the main precipitation formation processes and explain the precipitation formation mechanism of three-layer model at Yan’an station. The three-layer model illustrates the entire mechanism and processes of the stratiform precipitation formation completely and comprehensively.

**Key words** two-moment scheme, three-layer model, microphysical process, radar reflectivity

## 1 引言

层状云是一种主要的大范围降水云系，尤其是层状冷云，是为缓解我国北方干旱开展人工增雨的主要作业对象，准确认识和掌握层状云降水形成的机制和演变特征无疑具有重要的科学和现实意义。1950年，Bergeron在研究地形云时提出高层云对下层云进行冰晶自然播散的“播种-供给”机制对降水的产生和增大十分有利<sup>[1]</sup>。20世纪70年代以来，国内外对层状云进行了大量的外场探测和模拟研究。典型工作有Hobbs等<sup>[2]</sup>和Herzogh等<sup>[3]</sup>对中纬度气旋云系和降水的中尺度和微尺度结构做了系统探测，发现冷锋雨带和暖锋雨带的“播种-供给”机制可以提高降水效率。Rutledge和Hobbs<sup>[4, 5]</sup>采用二维时变层状冷云模式、微物理过程参数化对这种机制进行了数值模拟。模拟结果表明，播种云和供给云的结合，有利于降水的产生和加大。胡志晋和严采繁<sup>[6, 7]</sup>利用一维时变框架下比较完整的层状云参数化模式模拟了中纬度气旋云系和降水的微物理特征，模拟得出了同实测比较一致的层状云“播种-供给”机制、高空发生泡的自然播种作用和暖云中的降雨过程等。洪延超和周非非<sup>[8, 9]</sup>利用一维层状云模式模拟研究了降水性层状云系中“催化-供给”云的微物理结构、降水粒子形成环节和微物理过程，并利用MM5模拟研究了层状云系人工增雨潜力的要素。20世纪80年代，我国开展北方层状云人工降水试验研究，游来光等通过大量个例分析给出了我国云和降水的微观结构特征<sup>[10]</sup>；通过对新疆冬季降雪云的微结构及雪粒子增长过程的观测和分析发现，锋上云系起重要的引晶作用，其降水质粒在锋下云系中进一步增长<sup>[11]</sup>。顾震潮<sup>[12]</sup>认为层状云中冰晶在下降过程中经过三个阶段，

即：上部冰晶区域，这个阶段起作用的主要是冰晶凝华增长和冰晶在下落过程中相互碰并增长；冰晶落入过冷水区后进入生长的第二阶段，最主要是冰晶的凝华增长（Bergeron过程），在过冷水层也能出现冰晶之间的碰并和冰晶与过冷水滴碰并相粘；冰晶落入0℃层就进入第三阶段，冰相粒子很快融化成水滴，水滴增长主要靠与小云滴的碰并过程。可以将之称为层状云降水形成的三层模型。

为了进一步开发云水资源，缓解西北干旱缺水状况，有必要加深对西北地区降水性层状云系的微物理结构特征和降水形成机制的认识。本文利用MM5中增加的双参数显式云物理方案对西北地区秋季一次层状云降水进行数值模拟分析，重点是根据模拟结果来考察三层模型，并分析此次降水不同时刻的微物理机制和过程，通过模式验证三层模型并加以发展。

## 2 MM5 新显式云物理方案简介和等效雷达反射率因子计算

在非静力平衡中尺度模式MM5动力框架内，在其中的Reisner 2方案<sup>[13]</sup>基础上采用双参数谱演变方案，已建立一个新显式云物理方案。该方案对雨滴和冰相粒子谱引入 $\Gamma$ 分布，根据预报的比含水量和数浓度确定 $\Gamma$ 分布中的两个谱参数，可以预报出云水、雨水、冰晶、雪和霰的比含水量和数浓度，比较详细地考虑了微物理过程<sup>[14]</sup>。实现了3.5版到3.7版的升级和新方案的并行化运算，节省计算时间和便于业务化实时预报。为了方便地与雷达观测结果进行对比分析，模式中更细微地考虑了等效雷达反射率因子的计算<sup>[15]</sup>。

粒子服从瑞利散射定律时，总的等效雷达反射率因子 $Z_{\text{ei}} = Z_{\text{er}} + Z_{\text{ei}} + Z_{\text{es}} + Z_{\text{eg}}$  (单位： $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ) 或

$Z_{\text{et}} = 10 \lg(Z_{\text{er}} + Z_{\text{ei}} + Z_{\text{es}} + Z_{\text{eg}})$  (单位: dBZ), 粒子  $x$  服从如下谱分布函数:

$$n_x = N_{0x} D^{e_x} \exp(-\lambda_x D), \quad (1)$$

$x \in [r \text{ (雨)}, i \text{ (冰晶)}, s \text{ (雪)}, g \text{ (霰)}]$ ,  $N_{0x}$  为分布截距,  $\alpha_x$  为谱形参数,  $\lambda_x$  为分布斜率,  $N_{0x}$ 、 $\lambda_x$  与  $D$  无关。

$$Z_{\text{ex}} = 10^{18} \int_0^{\infty} \frac{|K|_x^2}{|K|_w^2} D_{\text{xm}}^6 n_x dD_x, \quad (2)$$

其中,  $|K|_x^2$  和  $|K|_w^2$  是粒子  $x$  和水的介电因子。对雨:  $|K|_x^2 = |K|_w^2$ ,

$$Z_{\text{er}} = 10^{18} \frac{N_{0r} \Gamma(7 + \alpha_r)}{\lambda_r^{7 + \alpha_r}}. \quad (3)$$

对干的冰相粒子冰晶、雪、霰, 应用冰的介电因子  $|K|_i^2$  值, 可以使用冰粒子的融化直径来计算雷达反射率, 而不考虑它的密度。

$$Z_{\text{ex}} = 10^{18} \int_0^{\infty} \frac{|K|_i^2}{|K|_w^2} D_{\text{xm}}^6 n_{\text{xm}} dD_{\text{xm}} = 10^{18} \frac{|K|_i^2}{|K|_w^2} \frac{N_{0\text{xm}} \Gamma(7 + \alpha_x)}{\lambda_{\text{xm}}^{7 + \alpha_x}}, \quad (4)$$

其中,  $D_{\text{xm}}$  是粒子的融化直径,  $N_{0\text{xm}}$ 、 $\lambda_{\text{xm}}$  是融化后的等效粒子分布函数参数,  $|K|_i^2 = 0.224 |K|_w^2$  [16]。

由融化粒子的数浓度 ( $\text{m}^{-3}$ ) 和比含水量 ( $\text{kg}/\text{kg}$ ) 可得:

$$N_x = \frac{N_{0\text{xm}} \Gamma(1 + \alpha_x)}{\lambda_{\text{xm}}^{1 + \alpha_x}}, \quad (5)$$

$$\rho q_x = \frac{\pi \rho_w N_{0\text{xm}} \Gamma(4 + \alpha_x)}{6 \lambda_{\text{xm}}^{4 + \alpha_x}}, \quad (6)$$

$\rho_w$  为水的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。由 (4)、(5)、(6) 三式可推出:

$$Z_{\text{ex}} = C_x \frac{(\rho q_x)^2}{N_x},$$

其中,

$$C_x = 0.224 \times 10^{18} \left( \frac{6}{\pi \rho_w} \right)^2 \frac{\Gamma(7 + \alpha_x) \Gamma(1 + \alpha_x)}{[\Gamma(4 + \alpha_x)]^2}.$$

同理

$$Z_{\text{er}} = 10^{18} \left( \frac{6}{\pi \rho_w} \right)^2 \frac{\Gamma(7 + \alpha_r) \Gamma(1 + \alpha_r)}{[\Gamma(4 + \alpha_r)]^2} \frac{(\rho q_r)^2}{N_r}.$$

### 3 模拟个例

2003 年 9 月 17 日, 受西太平洋副热带高压外围西南暖湿气流和新疆南下冷空气共同影响, 我国西北地区东部出现了一次较大范围的层状云降水天气。过程持续 12 小时左右, 降雨强度属于小到中雨。9 月 16~17 日, 500 hPa 图上欧亚上空环流形势呈纬向型。9 月 17 日 08 时 (北京时, 下同) 西太平洋副热带高压强盛 (见图 1a), 5880 位势高度线西脊点在  $90^\circ\text{E}$  附近, 脊线在  $27^\circ\text{N}$ , 亚洲中纬度地区为平直西风气流, 在副高北侧民勤-兰州-合作有一低槽。

模拟以延安 ( $36.6^\circ\text{N}$ ,  $109.5^\circ\text{E}$ ) 为中心, 起止时间为 2003 年 9 月 16 日 20 时~18 日 08 时, 使用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  分析资料作为初始场。采用非静力、二重双向嵌套方案, 格距分别为 30 km 和 10 km, 区域地形都采用 2 min 地形资料。整层  $\sigma$  坐标垂直分 32 层, 可以较细致地研究空中各层结构。区域一使用混合相 (Reisner 1) 显式云物理方案和 Grell 对流参数化方案, 区域二使用双参数显式云物理方案和 Grell 对流参数化方案。模拟区域都采用了

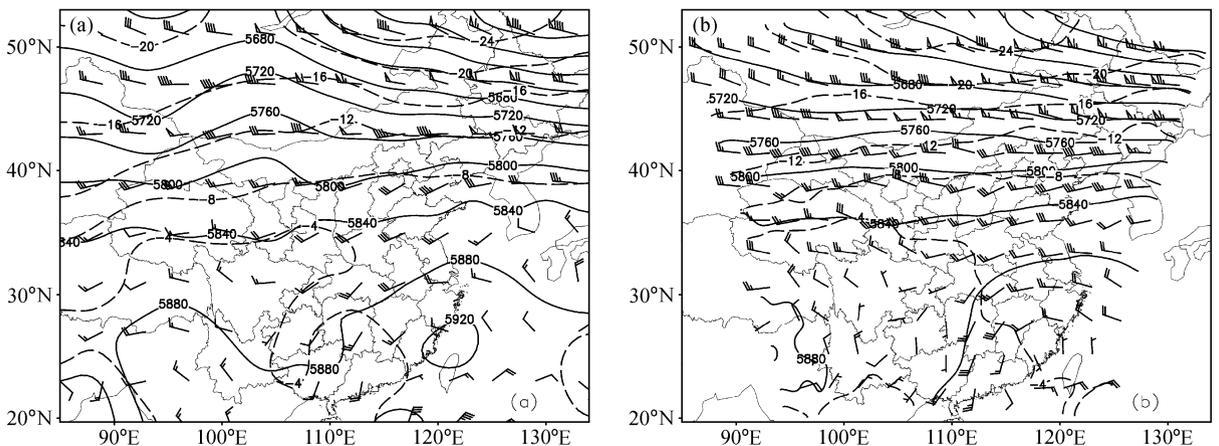


图 1 9 月 17 日 08 时 500 hPa 位势高度场 [实线 (单位: gpm)]、温度场 [虚线 (单位:  $^\circ\text{C}$ )] 和风场: (a) 实况; (b) 模拟

Fig. 1 Geopotential height (solid line, gpm), temperature (dashed line,  $^\circ\text{C}$ ) and wind vector at 500 hPa at 0800 LST 17 Sep: (a) Synoptic analysis; (b) model simulation

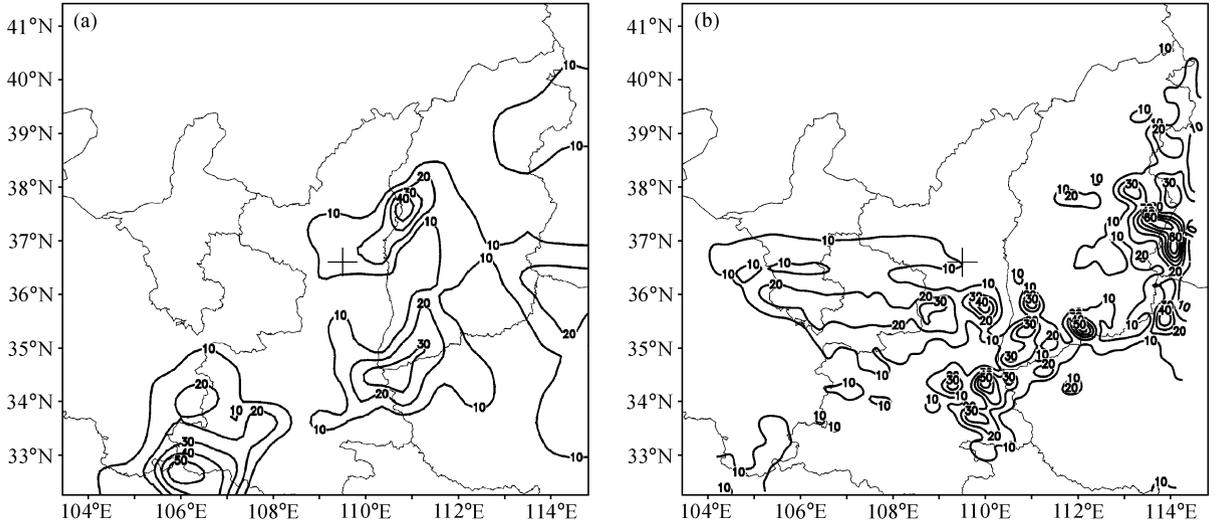


图 2 24 小时降水 (单位: mm): (a) 实况; (b) 模拟。+ 表示延安

Fig. 2 (a) Observed and (b) simulated 24-h surface precipitation (mm). “+” stands for Yan’an station

Blackadar 高分辨率 PBL 方案和 Dudhia 云辐射方案, 每 1 小时输出一次结果。

模拟的 500 hPa 天气形势 (图 1b) 与实况相比, 在亚洲中纬度地区也为平直西风气流, 但副高北侧低槽偏浅, 副高强度偏弱, 位置也有偏差并出现断裂。对我国西北地区而言, 本次过程降水主要集中在 9 月 17 日 08 时至 18 日 08 时内, 模拟结果也揭示了这一点, 因双参数方案能更好地分析云和降水的微观结构和过程, 下面主要分析这段时间内区域二的模拟结果。

### 4 模拟试验结果与比较分析

单站降水预报检验标准: 规定 24 小时降水量 0.1~9.9 mm 为小雨, 10.0~24.9 mm 为中雨, 25.0~49.9 mm 为大雨, 50.0~99.9 mm 为暴雨。

模拟效果可借用预报准确率的  $T_s$  评分:

$$T_s = \frac{N_c}{N_o + N_f - N_c}$$

式中,  $T_s$  为某一量级的模拟准确率,  $N_o$  表示观测到的该降水量级站点数,  $N_f$  表示模拟出的该降水量级站次数,  $N_c$  表示正确预报的该降水量级站次数<sup>[17]</sup>。  $T_s$  值的范围为 0~1, 其值愈大愈好。

观测和模拟结果分析表明小雨、中雨、大雨和暴雨的预报评分分别为 0.43、0.10、0.08 和 0.0, 说明模式对小雨有一定的预报能力, 即对层状云降水模拟效果较好。中雨以上预报评分较低, 且评分随降水等级的增加而减小, 模拟准确率较差。

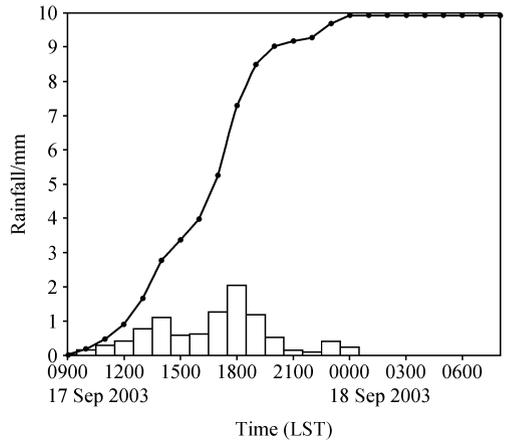


图 3 模拟的延安 1 小时降雨直方图和累计降雨曲线

Fig. 3 Simulated 1-h surface precipitation histogram and accumulated rainfall curve at Yan’an

值得一提的是, 人们已经意识到  $T_s$  评分不能全面反映预报能力。这里借用单站降水预报检验的  $T_s$  评分方法, 是为了说明模式对本例降水预报的总体能力和水平。

图 2 中实况和模拟的降水分布在中雨以上位置有偏差, 西部存在空报区, 导致中雨以上预报评分较低。相比之下, 中部和东部部分地区的降雨位置模拟结果较好些。

西北地区有代表性的延安站 24 小时降水实况值是 9.7 mm, 近于中雨, 降水时间集中在前 12 小时, 模式输出的延安 24 小时逐时降雨和累计降雨 (见图 3) 很接近实况, 并且也主要集中在前 12 小时。模拟的雨量在最初 6 小时比实况弱, 模拟的降

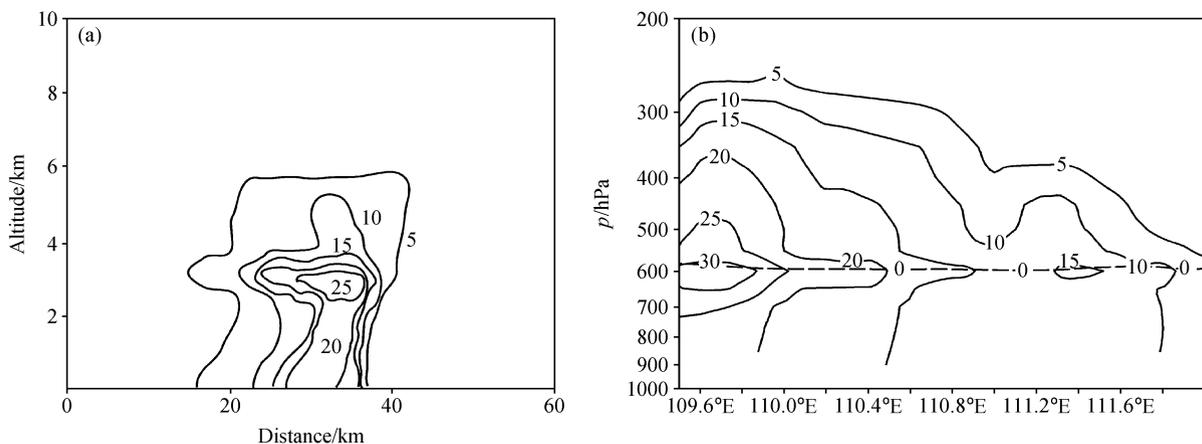


图4 (a) 9月17日延安雷达站15:43 RHI回波(方位 $92^\circ$ , 单位: dBZ); (b) 模拟的9月17日17时沿延安方向、方位 $90^\circ$ 雷达反射率(单位: dBZ, 长虚线表示 $0^\circ\text{C}$ 线)

Fig. 4 (a) Radar echo on the Range-Height Indicator (RHI) at Yan'an station at 1543 LST 17 Sep (azimuth  $92^\circ$ , units: dBZ); (b) vertical cross section of simulated radar reflectivity (azimuth  $90^\circ$ , units: dBZ) along  $36.6^\circ\text{N}$  at 1700 LST 17 Sep (dashed line:  $0^\circ\text{C}$  isotherm)

水滞后于实况可能是初值进行协调需要一些时间。同时, 显式方案要求网格饱和时才发生凝结, 所以降水有推迟, 这是由于网格尺度上升气流比局地实况值偏弱, 不足以及时达到网格饱和<sup>[18]</sup>。

延安站711雷达距离-高度显示器(RHI)回波占满对流层中下部, 结构比较均匀, 顶部比较平坦(图4a); 回波水平尺度大于垂直尺度, 有一条平展的 $0^\circ\text{C}$ 层亮带, 这是典型的层状云降水回波特征。模式输出的雷达反射率最大强度为30 dBZ, 接近实况(图4b); 有强回波中心, 存在 $0^\circ\text{C}$ 层亮带, 符合层状云降水回波特征, 说明模式输出的雷达反射率具有一定参考意义。模拟的回波范围大于实际观测, 一方面是雷达本身探测距离受限, 模拟云体范围大; 另一方面是观测回波和模式计算的雷达反射率存在区别, 不能完全等同, 因此在应用模拟结果时需注意。

## 5 模拟结果分析与层状云降水三层模型

### 5.1 模拟的云场结构与降水形成机制

为了显示层状云降水垂直三层模型的直观图像, 同时也为了反映降雨期间云场的分布、性质和外形特征, 云中各种水凝物粒子的数量和分布结构, 以及与动力场之间的配置关系, 有必要给出模拟云场的二维垂直剖面图。图5~7给出了模拟的9月17日14时云水、冰晶、雨水、雪和霰的微物理

量和垂直速度、雷达反射率沿延安站 $36.6^\circ\text{N}$ 作的垂直剖面图。

图5显示模拟云场外形成带状, 为层状云, 个别地方为柱状暖积云。层状云的主体为冷云, 云中有一定数量的过冷水。云滴数浓度分布比较均匀, 主要在 $100\sim 200$ 个/ $\text{cm}^3$ 之间。云的含水量和数浓度有一些中心区, 说明层状云结构有其不均匀性。暖层很薄, 对降水增强不利。冰晶主要分布在高层, 中低层数浓度小于20个/L。从图5可以看出层状云降水的三层模型图像: 第一层冰晶区域, 无过冷水, 故将第一层与第二层的分界定在 $-30^\circ\text{C}$ (约300 hPa), 其分界温度随不同时刻和不同云场微物理结构发生变化;  $-30^\circ\text{C}$ 到 $0^\circ\text{C}$ 层之间为第二层, 存在一定数量的过冷水和少量冰晶;  $0^\circ\text{C}$ 层以下为第三层, 为暖云, 存在少量云滴。

图6层状云中雨水的比含水量最大 $0.3$  g/kg; 雨滴数浓度最大为7个/L。雨水分布存在不均匀结构, 有下挂带存在。雪的比含水量较大, 最大 $0.5$  g/kg, 其数浓度最大为14个/L。雪的比含水量和数浓度高值区域对应雨的比含水量和数浓度高值区域, 表明雪的融化对降雨形成起重要贡献。

图7给出的层状云中霰的比含水量最大 $0.15$  g/kg, 数浓度也很小, 最大2.5个/L。霰的比含水量和数浓度高值区对应的区域也是雨的比含水量和数浓度高值区, 霰的融化对降水形成也有贡献。垂直上升运动弱, 最大上升速度为 $0.35$  m/s, 有一些上升运

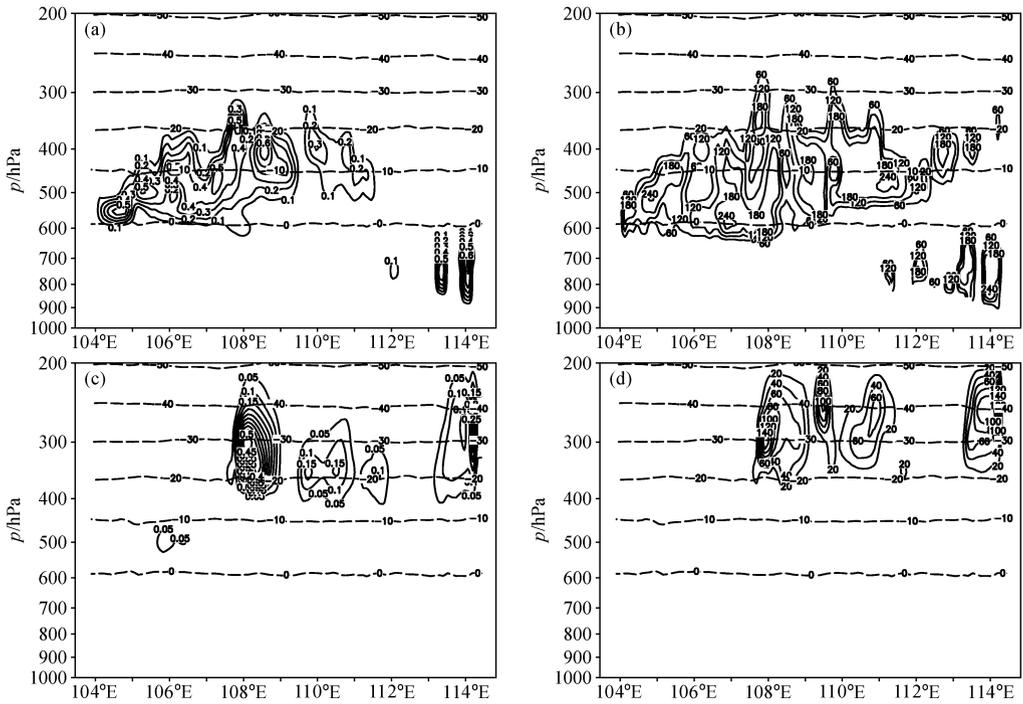


图5 模拟的9月17日14时沿36.6°N垂直剖面:(a)云水比含水量(单位:g/kg);(b)云滴数浓度(单位: $\text{cm}^{-3}$ );(c)冰晶比含水量(单位:g/kg);(d)冰晶数浓度(单位: $\text{L}^{-1}$ )。长虚线表示温度(单位: $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 5 Vertical cross sections along 36.6°N of model simulation at 1400 LST 17 Sep: (a) Cloud water mixing ratio (g/kg); (b) cloud water number concentration ( $\text{cm}^{-3}$ ); (c) ice mixing ratio (g/kg); (d) ice number concentration ( $\text{L}^{-1}$ ). Dashed lines; temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

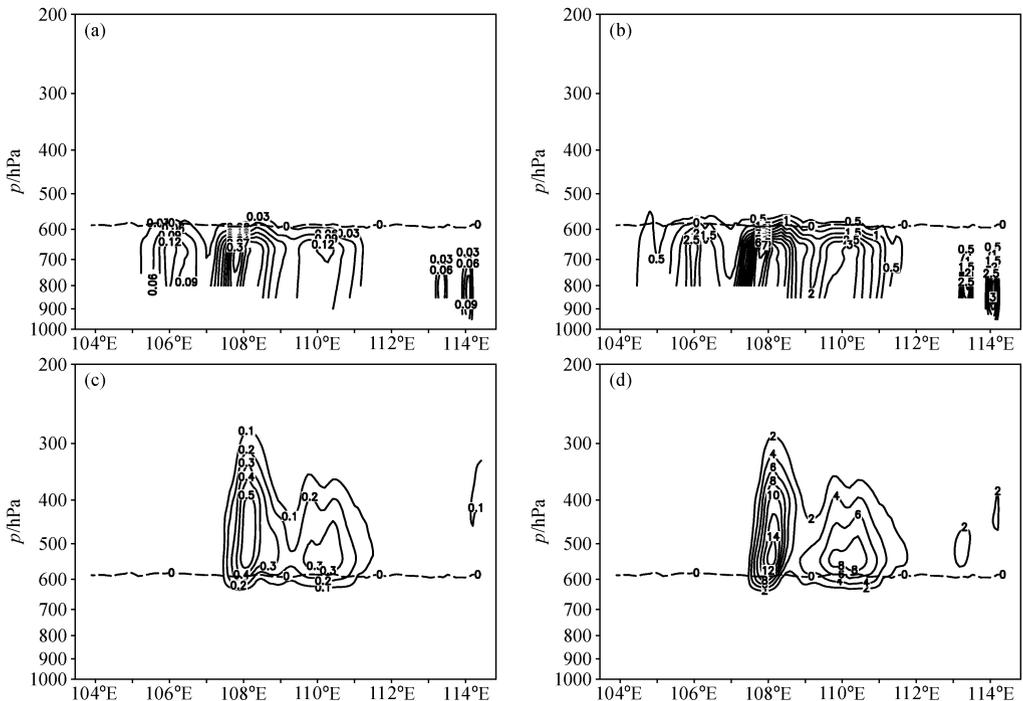


图6 模拟的9月17日14时沿36.6°N垂直剖面:(a)雨水比含水量(单位:g/kg);(b)雨滴数浓度(单位: $\text{L}^{-1}$ );(c)雪比含水量(单位:g/kg);(d)雪数浓度(单位: $\text{L}^{-1}$ )。长虚线表示0°C线

Fig. 6 Vertical cross sections along 36.6°N of model simulation at 1400 LST 17 Sep: (a) Rain water mixing ratio (g/kg); (b) rain water number concentration ( $\text{L}^{-1}$ ); (c) snow mixing ratio (g/kg); (d) snow number concentration ( $\text{L}^{-1}$ ). Dashed lines; 0°C isotherm ( $^{\circ}\text{C}$ )

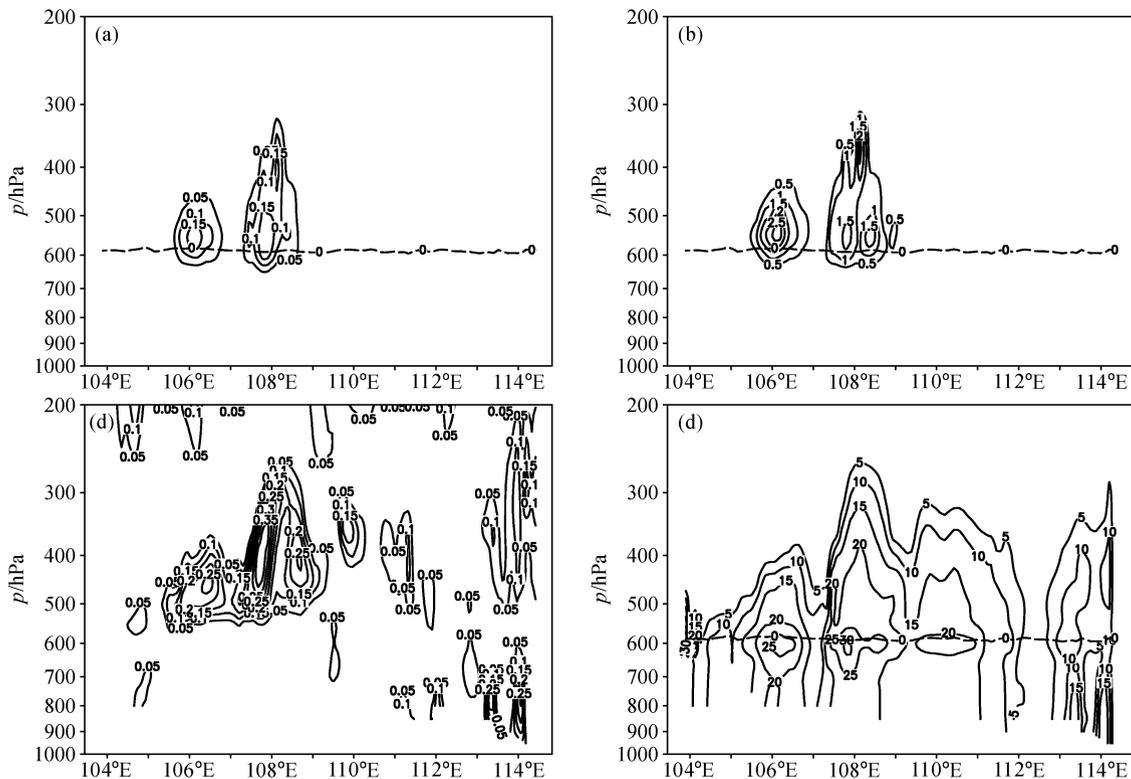


图7 同图6, 但为: (a) 霰比含水量 (单位: g/kg); (b) 霰数浓度 (单位: L<sup>-1</sup>); (c) 垂直上升速度 (单位: m/s); (d) 雷达反射率 (单位: dBZ)  
 Fig. 7 Same as Fig. 6, but for (a) graupel water mixing ratio (g/kg), (b) graupel number concentration (L<sup>-1</sup>), (c) updraft vertical velocity (m/s), (d) radar reflectivity factor (dBZ)

动中心。雪和霰的高值区与较强上升速度区对应, 说明雪和霰的形成需要有相对较强上升气流配合。雷达反射率分布呈带状, 有下挂带存在, 0°C层亮带明显。其高值区对应粒子比含水量和数浓度高值区, 雷达反射率的计算基本合理。

结合图6和图7可以看出, 雨的比含水量和数浓度大的区域对应于第二层雪和霰的高值区, 说明第三层的雨主要是通过第二层产生和长大的雪和霰落到第三层后融化形成。雪和霰的比含水量和数浓度大的区域对应于第二层冰晶和过冷水含水量高值区, 并且垂直上升速度大的区域有利于雪和霰的形成。图5~7层状云中各种水凝物粒子的空间分布存在一些大值中心, 揭示层状云空间分布具有不均匀性。

**5.2 延安站降水形成机制与微物理过程的模拟分析**

延安上空各种水凝物粒子的时间演变显示三层模型各层有无和厚度不是固定不变的 (图8), 引起地面降水发生变化, 层状云降水也存在不均匀性。冰晶落入第二层过冷水区通过贝吉隆过程长大继而

再形成雪, 雪的高值区对应雨滴数浓度高值区, 雪的融化作用对雨的形成贡献很大。霰的融化对雨的形成也有贡献。在仅有第二层或第一层并且第三层暖云很薄时, 雨滴数浓度很小甚至没有, 显示出各层有无和相互配置不同会造成不同大小的降雨。

下面分析延安站11时和14时微物理量和动力、热力学量的垂直廓线, 从而揭示其降水形成机制和过程。图9和图10延安站垂直廓线显示了冰晶、云水、雨水和雪的分层分布, 霰几乎没有。根据第一层只有冰晶无过冷水的条件, 将11时第一层和第二层的分界定在300 hPa (-30°C), 云底位于600 hPa; 而14时第一层和第二层的分界定在350 hPa (-20°C), 云底位于600 hPa。可见随着时间的演变, 第一层和第二层的分界也在变化, 第一层和第二层的边界可以下移。11时0°C位于600 hPa, 14时0°C位于585 hPa。从而第一层在11时比14时薄, 第二层在11时比14时厚, 第三层在11时几乎无而14时很薄。

第一层冰晶数浓度较大, 到第二层冰晶数浓度

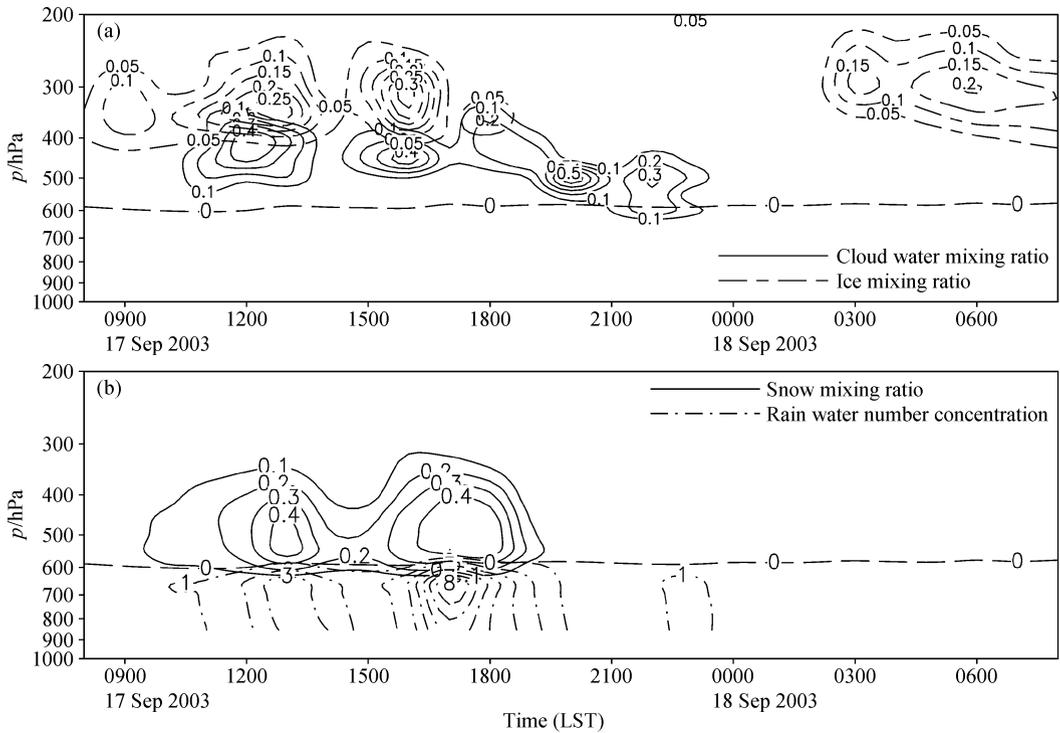


图8 模拟的9月17日08时~18日08时延安站 (a) 云水比含水量、冰晶比含水量和 (b) 雪比含水量 (单位:  $\text{g}/\text{kg}$ )、雨滴数浓度 (单位:  $\text{L}^{-1}$ ) 的垂直分布。长虚线:  $0^\circ\text{C}$  等温线

Fig. 8 Time-height distributions of (a) cloud water mixing ratio ( $\text{g}/\text{kg}$ ), ice mixing ratio ( $\text{g}/\text{kg}$ ), (b) snow mixing ratio ( $\text{g}/\text{kg}$ ), rain water number concentration ( $\text{L}^{-1}$ ) from 0800 LST 17 Sep to 0800 LST 18 Sep at Yan'an station. Long dashed line;  $0^\circ\text{C}$  isotherm

很快减少, 不超过 20 个/L, 有利于冰晶和过冷水共存时通过贝吉隆过程长大继而形成雪。在第二层云顶之上, 有较大浓度的冰晶, 说明第一层冰晶落入第二层, 上层云对下层云有播撒作用。第三层的云水很少, 暖层很薄。在雪完全融化的高度, 雨的比含水量和数浓度出现大值, 雨的形成主要通过雪的融化。第三层暖层始终很薄导致碰并过程弱, 暖云降水机制不能充分发动, 地面降雨仅为小雨。

从 11 时到 14 时, 第二层顶上冰晶比含水量和数浓度减小, 第二层的过冷水含量减少, 第一层和第二层的边界下移, 第二层的厚度变小, 说明第一层和第二层的界限不是固定的。第一层冰晶比含水量和数浓度减小, 分析相对湿度的垂直廓线发现, 11 时第一层过饱和度大于 14 时, 利于冰晶凝华增长, 使 11 时第一层冰晶多。第二层云水的比含水量和数浓度减小, 说明贝吉隆过程消耗了过冷水; 而第二层 11 时过饱和度低于 14 时, 使 11 时冰晶通过贝吉隆过程增加的少, 消耗的过冷水少, 转化形成的雪也少, 从而降雨小。

延安站垂直运动的上升和下降速度在 11 时和

14 时反相, 其值都很小, 垂直运动弱。11 时中低层为下沉运动, 不利于云和降水形成; 14 时中低层为上升运动, 对云和降水粒子的形成更有利, 使 14 时地面降雨比 11 时大。相当位温的垂直分布 11 时和 14 时同相, 高层相当位温随气压增加而减少, 为对流稳定层; 中低层相当位温随气压增加而增加, 为对流不稳定层。如此弱的垂直上升运动不利于空气抬升达到饱和成云, 使低层暖云很薄, 对降雨增强不利。

下面, 定量分析延安站在 11 时和 14 时各种水凝物粒子在不同高度层形成的主要源项, 因为几乎没有霰, 所以不予考虑。11 时,  $T = -33.4^\circ\text{C}$ ,  $p = 280.9 \text{ hPa}$ ; 对冰晶, 凝华增长占 100%。  $T = -8.3^\circ\text{C}$ ,  $p = 466.2 \text{ hPa}$ ; 对冰晶, 凝华增长占 50.0%, 值为  $2.74 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 冰晶碰并云水 (淞附) 增长占 50.0%, 值为  $2.74 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对雪, 凝华增长占 60.1%, 值为  $2.64 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 雪碰并云水占 33.3%, 值为  $1.46 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 冰晶向雪的自动转换占 6.2%, 值为  $2.74 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。  $T = -1.7^\circ\text{C}$ ,

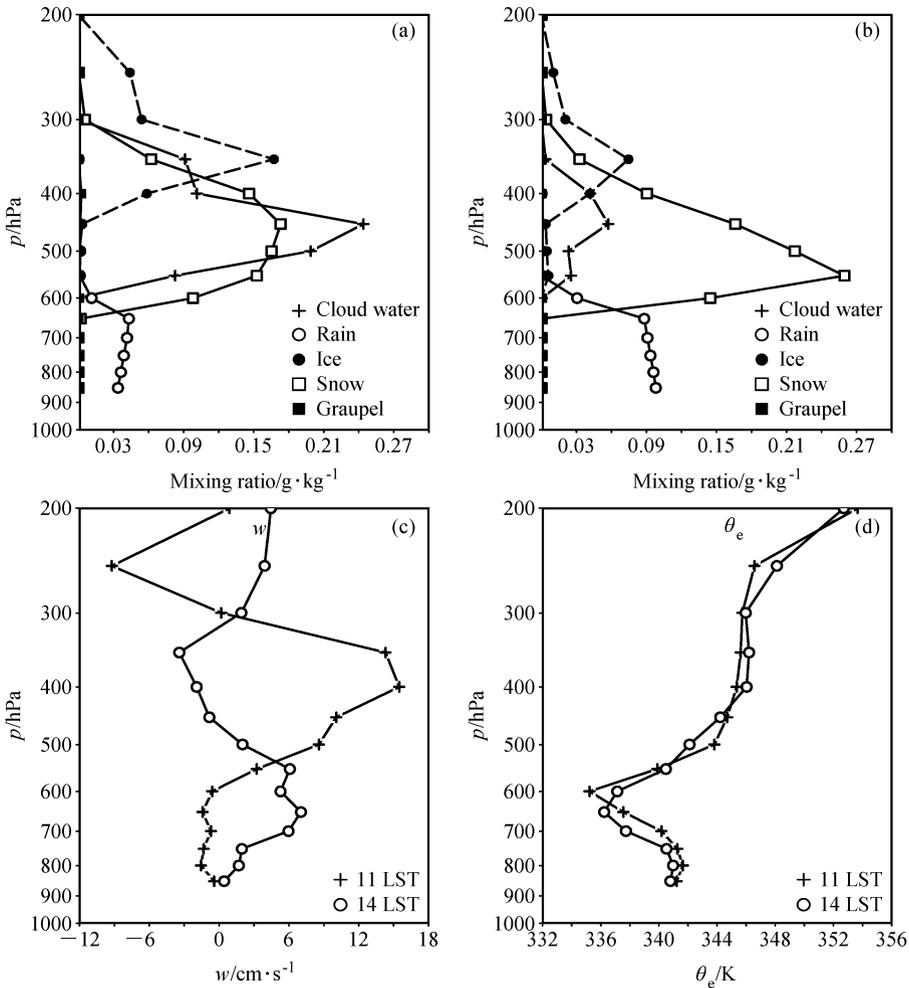


图9 9月17日模拟的延安站分布廓线: (a) 11时和 (b) 14时云水、雨水、冰晶、雪、霰比含水量; 11时、14时 (c) 垂直速度和 (d) 相当位温

Fig. 9 Model simulated profiles at Yan'an station; (a) Mixing ratios of cloud water, rain water, ice, snow and graupel at 1100 LST 17 Sep; (b) mixing ratios of cloud water, rain water, ice, snow and graupel at 1400 LST 17 Sep; (c) vertical velocity at 1100 LST and 1400 LST 17 Sep; (d) equivalent potential temperature at 1100 LST and 1400 LST 17 Sep

$p=576.9$  hPa; 此时已无冰晶, 对雪, 凝华增长占 99.0%, 值为  $1.03 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。  $T=0.7^\circ\text{C}$ ,  $p=613.8$  hPa; 雨的源项中, 雪的融化占 99.2%, 值为  $3.05 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

14时,  $T=-41.6^\circ\text{C}$ ,  $p=241.7$  hPa; 对冰晶, 凝华增长占 100%。  $T=-8.6^\circ\text{C}$ ,  $p=466.0$  hPa; 对冰晶, 凝华增长占 100%, 值为  $3.66 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对雪, 凝华增长占 88.0%, 值为  $2.67 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 冰晶向雪的自动转换占 11.6%, 值为  $3.53 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。  $T=-2.0^\circ\text{C}$ ,  $p=554.6$  hPa; 对冰晶, 凝华增长占 100%, 值为  $1.27 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对雪, 凝华增长占 68.2%, 值为  $7.53 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 冰晶向雪

的自动转换占 27.1%, 值为  $2.99 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 雪碰并冰晶占 3.7%, 值为  $4.08 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。  $T=1.2^\circ\text{C}$ ,  $p=613.4$  hPa; 雨的源项中, 雪的融化占 99.4%, 值为  $4.24 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

第一层冰晶的形成靠凝华增长。到了第二层, 11时冰晶的凝华增长率小于14时, 说明14时冰面过饱和度大于11时, 14时消耗的过冷水也比11时多; 而14时雪的凝华增长和冰晶向雪的自动转换率都大于11时, 造成14时形成的雪比11时多。在第二层下部, 11时无冰晶凝华过程消耗过冷水, 使11时空中过冷水比14时多; 而14时不仅雪的凝华增长大于11时, 而且雪还通过冰晶向雪的自

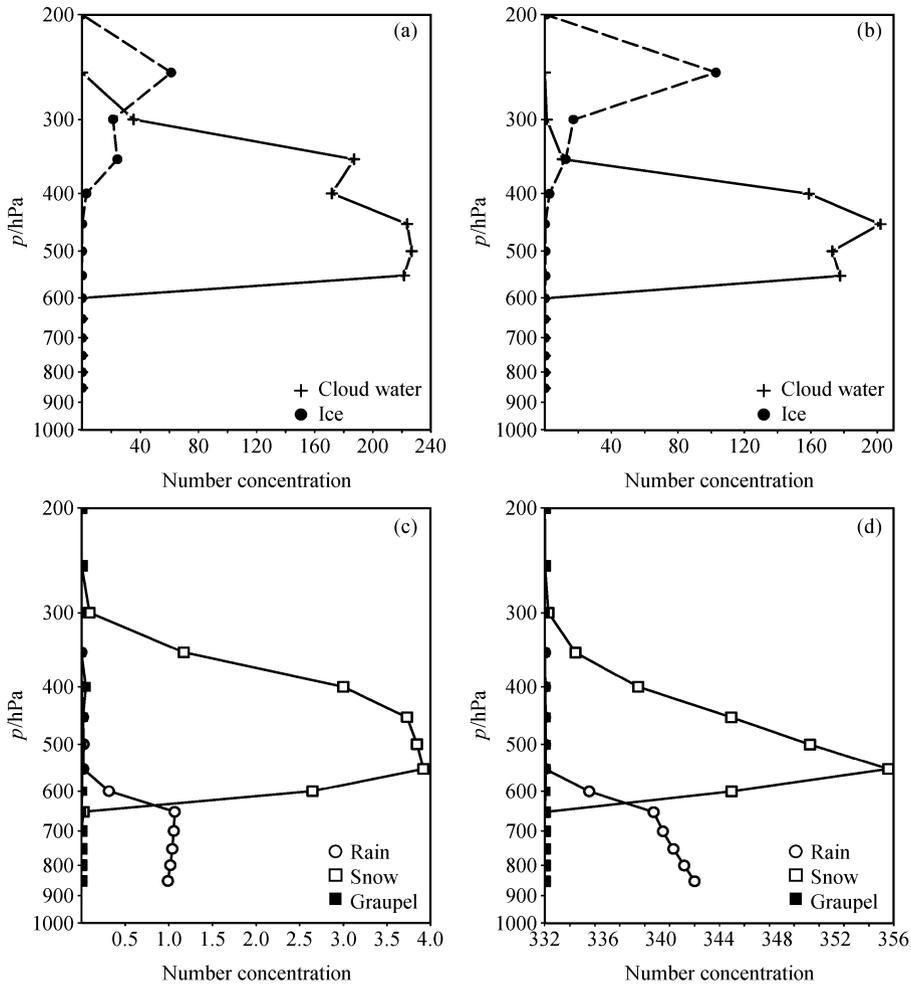


图 10 9月17日11时(a、c)和14时(b、d)模拟的延安站分布廓线:(a、b)云滴数浓度(单位:  $\text{cm}^{-3}$ )、冰晶数浓度(单位:  $\text{L}^{-1}$ );(c、d)雪、霰、雨滴数浓度(单位:  $\text{L}^{-1}$ )

Fig. 10 Model simulated profiles at 1100 LST (a, c) and 1400 LST (b, d) on 17 Sep at Yan'an station; (a, b) Number concentration of cloud water ( $\text{cm}^{-3}$ ) and ice ( $\text{L}^{-1}$ ); (c, d) number concentration of snow, graupel and rain ( $\text{L}^{-1}$ )

动转换和雪碰并冰晶形成,结果空中雪的数量比11时大很多。 $0^{\circ}\text{C}$ 附近雪的融化率14时大于11时,形成的雨也多,从而地面降雨量也大于11时。

分析三层模型各层对整层瞬时雨强的贡献可得:在11时,第一层占1%,第二层占99%,第三层占0%;14时,第一层占3%,第二层占84%,第三层占13%。可见第二层的贡献最大,第三层存在时其贡献次之,第一层的贡献最小,不同时刻各层的厚薄不同会使各层在整层雨强所占的百分比发生变化。在第三层很薄,雨的形成主要以融化为主的云中,降雨量取决于第二层过冷水、雪和霰的含量及其厚度。

### 5.3 层状云降水三层模型综述

综上所述,三层模型可以完整而全面地解释层

状云降水形成过程。第一层和第二层的分界不固定,只要满足该层为冰晶无过冷水即可,此层冰晶主要通过凝华增长。第二层内冰晶主要通过贝吉隆过程快速长大,并伴有与过冷水滴的碰并增长(淞附,要有一定数量的过冷水存在),第二层雪的形成主要通过凝华增长、冰晶向雪的自动转换、雪碰并云水等。 $0^{\circ}\text{C}$ 层以下的第三层在消耗云水的同时通过雪和霰的融化形成雨滴降落到地面,根据暖层厚薄决定暖云降水机制强弱。三层模型依云中宏观条件的不同使各层厚薄变化形成不同大小的降雨,显现层状云降水的均匀性。

第一层对第二层播种冰晶,第二层为第一层播种下来的冰晶供给过冷水;第二层对第三层播种雪和霰,使其在第三层融化成雨,第三层同时消耗云

水。可见, 第一层对第二层来说是播种云; 第二层既是第一层的供给云, 又是第三层的播种云。在三层模型中第二层既是播种云又是供给云, 相比“播种-供给”机制的两层模型, 三层模型可以更完整和全面地解释层状云降水形成机制和过程。

## 6 结论

本文采用中尺度数值模式 MM5 增加的双参数显式云物理方案模拟了西北地区一次层状云降水过程, 用三层模型对模拟的云场结构和延安站降水形成的微物理机制和过程进行了深入分析。结果表明:

(1) 模拟的云场分布和延安站不同时刻微物理量垂直分布符合三层模型, 延安站各种水凝物粒子的生成源项分析揭示了三层模型中降水形成的主要微物理过程, 模拟显示出层状云及其降水具有不均匀性。

(2) 在三层模型中: 第一层对第二层播种冰晶, 第二层为第一层播种下来的冰晶供给过冷水; 第二层对第三层播种雪和霰, 使其在第三层融化成雨, 第三层同时消耗云水。在三层模型中第二层既是播种云又是供给云, 三层模型可以完整和全面地解释层状云降水形成机制和过程。

(3) 层状云降水三层模型中各层的相互配置很重要, 模拟结果说明不同时间宏观条件和微物理过程的不同、各层有无和厚薄变化, 会造成有差别的降雨量。因暖层始终较薄, 碰并过程弱, 暖云降水机制不能充分发动, 故地面降雨仅为小雨。

(4) 对小雨的模拟效果较好, 即对层状云降水模拟效果较好, 但对中雨以上的评分低而且位置有偏差。延安站降水模拟结果接近实际, 但也存在开始降水偏弱, 结束时间延迟。增加的雷达反射率的模拟结果对比延安站雷达回波发现存在零度层亮带, 符合层状云降水回波特征, 模式输出的雷达回波具有一定参考意义。

## 参考文献 (References)

[1] 黄美元, 徐华英. 云和降水物理. 北京: 科学出版社, 1999. 227 pp  
Huang Meiyuan, Xu Huaying. *The Physics of Clouds and Precipitation*. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 227 pp

[2] Hobbs P V, Matejka T J, Herzegh P H, et al. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. I: A case study of a cold front. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**: 568~596

[3] Herzegh P H, Hobbs P V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. II: Warm-frontal clouds. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**: 597~611

[4] Rutledge S A, Hobbs P V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. Part VIII: A model for the “seeder - feeder” process in warm - frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 1185~1206

[5] Rutledge S A, Hobbs P V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. Part XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 2949~2972

[6] 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. 气象科学研究院院刊, 1986, **1** (1): 37~52  
Hu Zhijin, Yan Caifan. Numerical simulation of microphysical processes in stratiform clouds (I)—Microphysical model. *Journal of Academy of Meteorological Science (in Chinese)*, 1986, **1** (1): 37~52

[7] 胡志晋, 严采繁. 层状云微物理过程的数值模拟(二)——中纬度气旋云系的微物理过程. 气象科学研究院院刊, 1987, **2** (2): 133~142  
Hu Zhijin, Yan Caifan. Numerical simulation of microphysical processes of stratiform clouds (II) —Microphysical processes in middle-latitude cyclone cloud systems. *Journal of Academy of Meteorological Science (in Chinese)*, 1987, **2** (2): 133~142

[8] 洪延超, 周非非. “催化-供给”云降水形成机理的数值模拟研究. 大气科学, 2005, **29**: 885~896  
Hong Yanchao, Zhou Feifei. A numerical simulation study of precipitation formation mechanism of “seeding-feeding” cloud system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2005, **29**: 885~896

[9] 洪延超, 周非非. 层状云系人工增雨潜力评估研究. 大气科学, 2006, **30**: 913~926  
Hong Yanchao, Zhou Feifei. The study of evaluation of potential of artificial precipitation enhancement in stratiform cloud system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2006, **30**: 913~926

[10] You Laiguang, Liu Yangang. Some microphysical characteristics of cloud and precipitation over China. *Atmos. Res.*, 1995, **35**: 271~281

[11] 游来光, 王守荣, 王鼎丰, 等. 新疆冬季降雪微结构及其增长过程的初步研究. 气象学报, 1989, **47**: 73~81  
You Laiguang, Wang Shourong, Wang Dingfeng, et al. The

- microphysical structure of snow cloud and the growth process of snow in winter in Xinjiang. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1989, **47**: 73~81
- [12] 顾震潮. 云雾降水物理基础. 北京: 科学出版社, 1980. 173~177  
Gu Zhenchao. *The Basic Physics of Clouds and Precipitation* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1980. 173~177
- [13] Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1998, **124**: 1071~1107
- [14] 赵震, 雷恒池, 吴玉霞. MM5 中新显式云物理方案的建立和数值模拟. 大气科学, 2005, **29**: 609~619  
Zhao Zhen, Lei Hengchi, Wu Yuxia. A new explicit micro-physical scheme in MM5 and numerical simulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 609~619
- [15] Ferrier B S. A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51**: 249~280
- [16] Smith P L Jr. Equivalent radar reflectivity factors for snow and ice particles. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1984, **23**: 1258~1260
- [17] Bermowitz R J, Zurndorfer E A. Automated guidance for predicting quantitative precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 1979, **107**: 122~128
- [18] Molinari J, Dudek M. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**: 326~344