

# 祁连山云系云微物理结构和人工增雨 催化个例模拟研究

陈小敏<sup>1</sup> 刘奇俊<sup>2</sup> 章建成<sup>2</sup>

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 国家气象中心)

**提 要:** 改进了胡志晋、刘奇俊的云物理方案, 并实现了与 GRAPES 模式的耦合; 利用包括了新云物理方案的 GRAPES 模式对祁连山地区一次山区云降水过程进行了数值模拟, 研究了祁连山地区云系的微物理结构, 并开展了人工催化的数值试验研究。结果表明: (1) 耦合的双参数方案能够较好的模拟此次降水范围、强度及云场分布的特点和规律; (2) 新方案给出了祁连山云系的合理微观结构和它的特征; (3) 播撒冰晶可以增加降雨, 在云初始阶段播撒增雨范围较广, 在云发展阶段播撒增雨范围较集中; (4) 播撒冰晶后, 云的动力结构发生了改变。

**关键词:** GRAPES 模式 双参数云物理方案 云物理过程 催化模拟

## A Numerical Simulation Study on Microphysical Structure and Cloud Seeding in Cloud System of Qilian Mountain Region

Chen Xiaomin<sup>1</sup> Liu Qijun<sup>2</sup> Zhang Jiancheng<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 2. National Meteorological Center)

**Abstract:** Based on the Hu Zhijin and Liu Qijun's cloud physics scheme, a new two-moment microphysical scheme is developed and incorporated in the GRAPES model. Using the mode which contains the new cloud physics scheme, a mountainous area cloud and precipitation process in the Qilian Mountain region is simulated. The microstructure of mountainous area cloud is studied and a numerical simulation on cloud seeding is conducted. The main analysis results are as follows: (1) The GRAPES model with two-moment scheme is able to reveal the distribution of precipitation, intensity and cloud field; (2) The new scheme can give reasonable microstructure of cloud system in the Qilian Mountain region and indicate its some characteristics; (3) The artificial ice

资助项目: 国家气象中心科研开发课题“基于 GRAPES 的人工增雨云系模式研发和试验”和“西北地形云结构及降水机理研究(40533015)”的资助。

收稿日期: 2006 年 12 月 26 日; 修定稿日期: 2007 年 3 月 24 日

crystals seeding can lead to the increasing of precipitation, and the distribution of rain enhancement in the initial stage of cloud is wider than that in the development stage of cloud;  
(4) Dynamical structure of the cloud has some changes after seeding.

**Key Words:** GRAPES model two-moment scheme microphysics structure seeding simulation

## 引 言

祁连山山脉呈东西走向,地形高大,过境空气容易受地形作用抬升,使得云中液态水含量丰富,有较大的人工增雨潜力。但山区观测站点稀少,人工增雨外场试验难度较大,数值模拟具有较大优势,特别是有详细微物理过程的高分辨率中尺度模式能够较好的研究在大地形效应下云降水系统生成发展演变特征。目前,很多中尺度模式如 MESONH<sup>[1]</sup>、MM5<sup>[2-4]</sup>、RAMS<sup>[5]</sup>、WRF<sup>[6]</sup>、ARPS<sup>[7]</sup> 等均已建立或正在发展更为详细的云物理方案,利用这些详细的云物理方案开展了一系列的云微物理结构和人工增雨方面的研究,并取得了较好的结果。

GRAPES 模式作为中国气象科学研究院自主开发的新一代高分辨率中尺度数值预报模式,原模式中云物理方案主要是采用 WRF 模式的云物理方案,而且这些方案都是只用水凝物比含水量描述云微物理过程的单参数方案,随着模式的不断完善和发展,含有水凝物比含水量和数浓度两个预报量的双参数方案能更详细描述云微物理过程变化,特别是在人工增雨条件及作业原理等方面有较大的优势。因此,我们在 GRAPES 模式动力框架内,采用双参数方案,增加了雨水、冰晶、雪晶、霰的数浓度预报方程和相应的微物理过程。利用包括了新云物理方案的 GRAPES 模式对祁连山地区一次山区云降水过程进行了数值模拟,并开展了人工催化的数值试验探究。

文章第一部分介绍新的双参数方案;第

二部分介绍对祁连山地区云系的降水及云宏微观结构模拟;第三部分介绍云的催化及结果。

## 1 GRAPES 的混合云降水双参数化方案

### 1.1 基本预报方程

引入显式方案后,水凝物比含水量、比浓度和滴谱拓宽函数的连续方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_x(m)}{\partial t} = & -\nabla \cdot (UF_x(m)) + \\ & \nabla \cdot (K_m \nabla \cdot F_x(m)) + \\ & \frac{\partial}{\partial z}(U_x F_x(m)) + \frac{\delta F_x(m)}{\delta t} \end{aligned}$$

式中  $F_x(m)$  为  $Q_v, Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g, N_r, N_i, N_s, N_g, F_i, F_s$ , 其中  $F_i, F_s$  分别为冰晶谱拓宽函数和雪晶谱拓宽函数。

### 1.2 微物理过程

GRAPES 新云降水物理方案是在胡志晋、刘奇俊<sup>[8-11]</sup> 等双参数方案的基础上,考虑的云微物理过程有云滴凝结和蒸发  $S_{cr}$ 、雨滴凝结和蒸发  $S_{cr}$ 、冰晶、雪晶和霰的凝华蒸发  $S_{ci}, S_{cs}, S_{sg}$ ; 云滴向雨滴、冰晶向雪晶、冰晶向霰、雪晶向霰的自动转化  $A_{cr}, A_{is}, A_{ig}, A_{sg}$ ; 云滴和雨滴、云滴和冰晶、云滴和雪晶、云滴和霰、冰晶和冰晶、雨滴和冰晶、雨滴和雪晶、雨滴和雨滴、冰晶和霰、冰晶和雪晶、雪晶和霰、雪晶和雪晶的碰并  $C_{cr}, C_{ci}, C_{cs}, C_{cg}, C_{ii}, C_{ri}, C_{ir}, C_{rs}, C_{or}, NC_{rr}, C_{ig}, C_{is}, C_{sg}, NC_{ss}$ ; 冰晶的核化  $P_{ci}$ ; 冰晶的繁生  $P_{ci}$ ; 冰晶、雪晶和霰的融化  $M_{ic}, M_{or}, M_{gr}$ ; 雨滴的冻结  $F_{rg}$ ; 某些微物理过程不但有含水量间的相互转化,同

时还有比浓度间的相互转化  $NS_{cr}$ 、 $NS_{ci}$ 、 $NS_{cs}$ 、 $NS_{cg}$ 、 $NP_{ci}$ 、 $NP_{ci}$ 、 $NA_{is}$ 、 $NA_{sg}$ 、 $NA_{ig}$ 、 $NM_{ic}$ 、 $NM_{sr}$ 、 $NM_{gr}$ 、 $NF_{rg}$ 、 $NA_{cr}$ 、 $NC_{ii}$ 、 $NC_{is}$ 、 $NC_{sg}$ 、 $NC_{ig}$ 、 $NC_{ri}$ 、 $NC_{ir}$ 、 $NC_{rs}$ 、 $NC_{so}$ 。除特别指出外,下文中微物理过程、水凝物粒子尺度分布、落速、碰并系数和特征量等表达式及符号与文献[8]、[9]相同。

(I) 云-雨自动转化  $A_{cr}$ 、 $NA_{cr}$ :

采用 Grabowski<sup>[12]</sup> 的云-雨转化参数化公式:

$$A_{cr} = 1.67 \times 10^{-5} (10^3 \rho Q_c)^2 / (5.0 + (3.6 \times 10^{-5} n_b) / (Q_c \rho d_c))$$

云滴的相对离散度:

$$d_c = 0.146 - 5.964 \times 10^{-2} \ln(n_b / 2000)$$

其中,  $n_b$  为云滴的初始浓度,取  $n_b = 300 \text{ c} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

$NA_{cr} = A_{cr} / Q_{r0}$ ,  $Q_{r0}$  为初生雨滴的平均质量,取  $Q_{r0} = 4.19 \times 10^{-9} \text{ kg}$ ,该自动转化公式考虑了云-雨转化过程与云滴数浓度、直径以及含水量等关系。

(II) 冰晶核化  $P_{ci}$ 、 $NP_{ci}$ :

采用 Cotton<sup>[13]</sup> 等(1986)组合 Fletcher 公式和 Huffman 公式得到了冰核浓度的混合公式:

$$N_{id} = N_0 [(S_i - 1)(S_0 - 1)^{-1}]^b \exp(\alpha(T_0 - T))$$

由于 Fletcher 公式被外推到一定的温度(如 246.15K),会过高的预测冰晶浓度,产生较大的偏差,所以对上述公式进行修订,得到云中冰晶核化率:

$$N_{id} = \begin{cases} N_0 [(S_i - 1)(S_0 - 1)^{-1}]^b \exp(\alpha(T_0 - T)), T > 246.15\text{K} \\ N_0 [(S_i - 1)(S_0 - 1)^{-1}]^b \exp(\alpha(T_0 - 246.15)), T \leq 246.15\text{K} \end{cases}$$

$$P_{ci} = \begin{cases} \frac{N_{id} - N_i}{\rho dt}, \text{当 } N_{id} > N_i \\ 0, \text{当 } N_{id} \leq N_i \end{cases}$$

$$NP_{ci} = P_{ci} \times Q_{r0}$$

其中  $N_0 = 0.01 \text{ m}^{-3}$ ,  $S_i = Q_v / Q_{si}$ ,  $S_0 = Q_{sw} / Q_{sr}$ ,  $Q_{sw}$  为水面饱和混合比,  $Q_{si}$  为冰面饱和混合比。  $b = 4.5$ ,  $\alpha = 0.6$ ,  $T_0 = 273.15 \text{ K}$ ,  $Q_{r0}$  为初生冰晶的平均质量,取  $Q_{r0} = 10^{-13} \text{ kg}$ 。

(III) 冰晶转化为雪晶  $A_{is}$ 、 $NA_{is}$ :

$$A_{is} = Q_i \exp(-B_{is})(1 + B_{is} + B_{is}^2 / 2 + B_{is}^3 / 6) / t_{ais}$$

$$NA_{is} = N_i \exp(-B_{is})(1 + B_{is}) / t_{ais}$$

其中  $B_{is} = \lambda_s \times D_i$ ,  $D_i = 300 \mu\text{m}$ ,  $t_{ais} = 1000 \text{ s}$ 。

(IV) 雨滴的冻结  $F_{rg}$ 、 $NF_{rg}$ :

雨滴冻结的参数化公式:

$$F_{rg} = B' \{ \exp[A'(T_0 - T)] - 1 \} (\rho Q_r^2 / \rho_w N_r)$$

$$NF_{rg} = B' \{ \exp[A'(T_0 - T)] - 1 \} (\rho Q_r / \rho_w)$$

其中  $A' = 0.66 \text{ K}^{-1}$ ,  $B' = 100 \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\rho_w = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  为水的密度。

(V) 云滴的凝结和蒸发  $S_{cr}$ :

$$S_{cr} = r_1 \times (Q_v - Q_{sw}) / dt$$

其中  $r_1$  为凝结系数,其计算公式如下:

$$r_1 = \frac{1}{1 + \frac{L_v Q_{sw}}{R_v C_p T^2}}$$

式中  $L_v$  为蒸发潜热,  $R_v$  为湿空气比气体常数,  $C_p$  为定压比热,当  $S_{cr} \geq 0$  时,水汽凝结成云滴;当  $S_{cr} \leq 0$  时,云滴蒸发。

### 1.3 云微物理量源汇项方程

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} = -S_{cr} - S_{ci} - S_{cs} - S_{ir} - S_{ig} - P_{ci}$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} = S_{cr} - C_{cr} - C_{ci} - C_{cs} -$$

$$\frac{\partial Q_r}{\partial t} = \begin{cases} C_{cg} - A_{cr} - P_{ci} + M_k \\ S_{ir} + C_{cr} + A_{cr} + M_{gr} + M_{sr} - F_{rg} + \\ C_{ir} + C_{sr}, T \geq 273.15\text{K} \\ S_{ir} + C_{cr} + A_{cr} + M_{gr} + M_{sr} - F_{rg} - \\ C_{ri} + C_{rs}, T < 273.15\text{K} \end{cases}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} = S_{ci} + C_{ci} - C_{ii} - A_{is} - A_{ig} -$$

$$\begin{aligned}
 & C_{is} - C_{ig} - C_{ir} - M_k + P_{ii} + P_{ci} \\
 \frac{\delta Q_s}{\delta t} &= S_{is} + C_{cs} + C_{is} + C_{ii} - A_{sg} - \\
 & C_{sg} + A_{is} - C_{sr} - M_{sr} \\
 \frac{\delta Q_g}{\delta t} &= S_{ig} + C_{cg} + C_{ig} + C_{sg} + A_{ig} + \\
 A_{sg} - M_{gr} + F_{rg} + C_{rs} + C_{sr} + C_{ir} + C_{ri} \\
 \frac{\delta N_r}{\delta t} &= \begin{cases} NS_{ir} + NC_{rr} + NA_{cr} + NM_{gr} + \\ NM_{sr} - NF_{rg}, T \geq 273.15K \\ NS_{ir} + NC_{rr} + NA_{cr} + NM_{gr} + \\ NM_{sr} - NF_{rg} - NC_{ri} - NC_{rg} - NC_{rs}, \\ T < 273.15K \end{cases} \\
 \frac{\delta N_i}{\delta t} &= NS_{ii} - NC_{ii} - NC_{is} - NA_{ig} - \\
 NC_{ig} - NA_{is} - NC_{ir} - NM_{ik} + NP_{ii} + NP_{ci} \\
 \frac{\delta N_s}{\delta t} &= NS_{is} - NC_{ss} + \frac{1}{2} NC_{ii} - NA_{sg} - \\
 NC_{sg} + NA_{is} - NC_{sr} + NM_{sr} + NC_{ir} \\
 \frac{\delta N_g}{\delta t} &= NS_{ig} + NA_{ig} + NA_{sg} - NM_{gr} + \\
 NF_{rg} + NC_{sr} + NC_{ir}
 \end{aligned}$$

1.4 云降水过程对温度的反馈

$$\begin{aligned}
 \frac{\delta T}{\delta t} &= -L_v \cdot C_p^{-1} \cdot (S_{ir} + S_{sr}) + L_f \cdot C_p^{-1} \cdot \\
 & (P_{ci} + C_{ci} + C_{cs} + C_{cg} + C_{rs} - C_{sr} + C_{ri} - \\
 & C_{ir} - M_k - M_{sr} - M_{gr} + F_{rg}) + L_s \cdot \\
 & C_p^{-1} \cdot (P_{ii} + S_{ii} + S_{is} + S_{ig})
 \end{aligned}$$

其中,  $L_f$ : 冰的融解潜热,  $L_s$ : 冰的升华潜热,  $L_v$ : 水的蒸发潜热。

2 个例介绍及模拟结果

本文选择 2006 年 8 月 7 日 08 点(北京时,下同)到 8 月 8 日 08 点祁连山地区一次山区降水过程进行模拟分析。从 7 日 08 点 500hPa 高空图可以看出,青藏高原上有一个弱高压中心,祁连山地区处于弱高压的北部,

山区上空有稳定的西南暖湿气流输送,在山区下方,祁连山北部和西部以西风气流为主,东部为绕山北风气流,在山区的南部,从高原上下来的西南气流穿山而过(可参见图 1 流场分布),降水主要集中于祁连山东部山顶附近。采用新的双参数混合云物理方案对该个例进行了模拟,取模式水平格距为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ,垂直 31 层,时间步长为 60 秒,模拟的区间是  $33^\circ \sim 43^\circ N, 92^\circ \sim 107^\circ E$ ,模式的初始场采用 T213 预报场资料,侧边界每 6 小时更新一次。

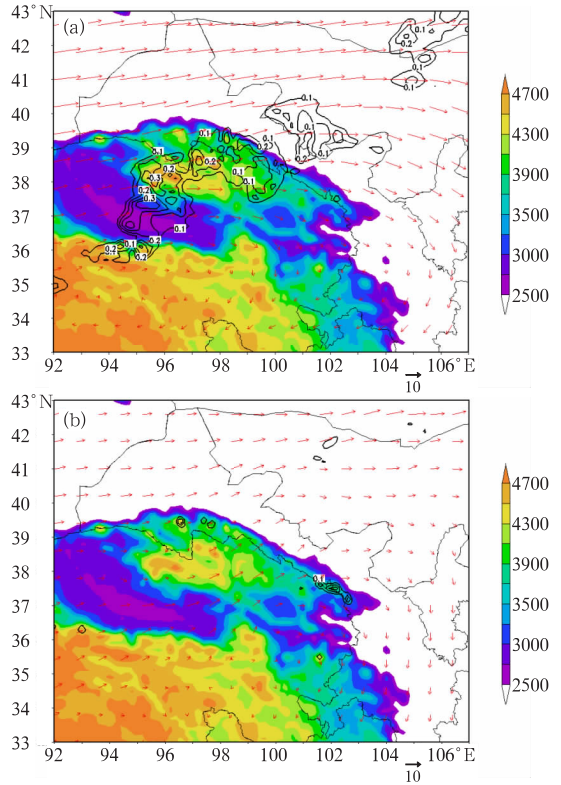


图 1 2006 年 8 月 7 日 11 时模拟区域云水含水量 (a)300hPa 处  $Q_c$  水平分布(等值线依次为 0.1, 0.2, 0.3 和 0.4, 单位:  $g \cdot kg^{-1}$ )和地形场分布(单位: m); (b)450hPa 处  $Q_c$  水平分布(等值线依次为 0.1, 0.2, 0.3 和 0.4, 单位:  $g \cdot kg^{-1}$ )和地形场分布(单位: m)

## 2.1 雨量和雨区模拟

图2为24小时实况和模拟的降水分布和雨量,从实况中可以看出,雨区呈东西偏南走向,强度属中雨,模拟的降水范围比较符合实况,而且雨区走向和强度基本相符。

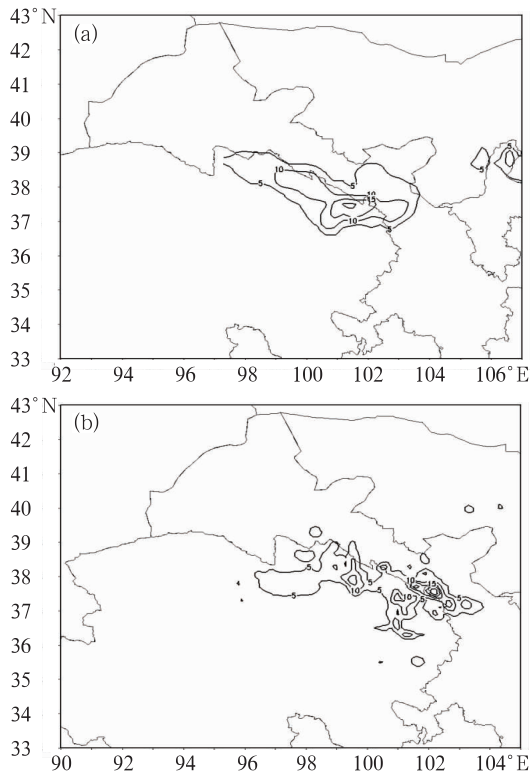


图2 2006年8月7日08时至8日08时实况雨量(a)与模式预报雨量(b)分布(单位:mm)

## 2.2 云场的模拟

图1给出了7日11时云水比含水量在300hPa和450hPa处的水平分布。在祁连山的上空有一条狭长的云带,呈东西偏北走向,整个山区上空有弱的上升气流,平均速度为 $0.1\sim 0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从高层300hPa(图1a)和中层450hPa(图1b)云水比含水量的对比中可以看出,云水主要分布于高层300hPa处,云水比含水量分布比较均匀并有一定的起伏

变化,云带的层状云特征明显。在山的西部,由于地势较高且处于迎风面,气流上升凝结,使得云水比含水量较高为 $0.4\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;在山的北部,地势较低且处于背风面,云水比含水量较低为 $0.1\sim 0.2\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在山的东部地势较高处,由于风切变较大,水汽堆积,伴随着较强的上升运动,有小云团出现,云团的积云特征明显。云团中云水主要集中于中层450hPa左右,云水比含水量为 $0.3\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。整个祁连山地区的云系由这两种云组成。

## 2.3 垂直方向上云中微物理量的模拟

图3a、b、c、d分别给出了垂直方向上云中雨滴、冰晶、雪晶和霰的比含水量和数浓度分布,可以看出,雨区基本上位于云区的正下方,在山的西部层状云云带中,各微物理量分层明显,过冷水云与冰晶处于上层,雪晶处于中上层,霰处于中下层,雨水处于下层。其中冰晶主要分布于200~300hPa左右,比含水量最大为 $0.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,对应最大数浓度为 $25\text{L}^{-1}$ ;雪晶含量丰富,主要分布于300~500hPa左右,比含水量最大为 $0.4\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,对应最大数浓度为 $14\text{L}^{-1}$ ,霰主要分布于400~600hPa左右。比含水量最大为 $0.3\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,对应最大数浓度为 $1\text{L}^{-1}$ ;雨水主要是由雪晶和霰的融化产生,因此主要集中于 $0^\circ\text{C}$ 层以下,比含水量在 $0.01\sim 0.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,对应的雨滴数浓度为 $0.3\sim 0.5\text{L}^{-1}$ 。在山的东部积云云团中,各微物理量分层不明显,在300~500hPa左右,过冷水云、冰晶、雪晶、霰和过冷雨滴都混合存在。其中冰晶最大比含水量为 $0.05\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,对应最大数浓度为 $15\text{L}^{-1}$ ;雪晶最大比含水量为 $0.4\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,对应最大数浓度为 $12\text{L}^{-1}$ ;霰最大比含水量为 $0.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,对应最大数浓度为 $0.3\text{L}^{-1}$ ;雨水比含水量最大区位于 $0^\circ\text{C}$ 层以下,最大值为 $0.3\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而雨滴数浓度最大区位于 $0^\circ\text{C}$ 层以上,最大值为 $7\text{L}^{-1}$ ,这主要是

由于小云团中不仅有雪和霰融化为雨滴,还有大量过冷小雨滴在下落过程中长大成大雨滴粒子。这种各相混合的积云云团由于上升运

动较周围强,垂直方向上的水汽通量较大,水汽凝结率高,有较大的冰面过饱和水汽量,增雨潜力大,因此主要对它进行催化试验。

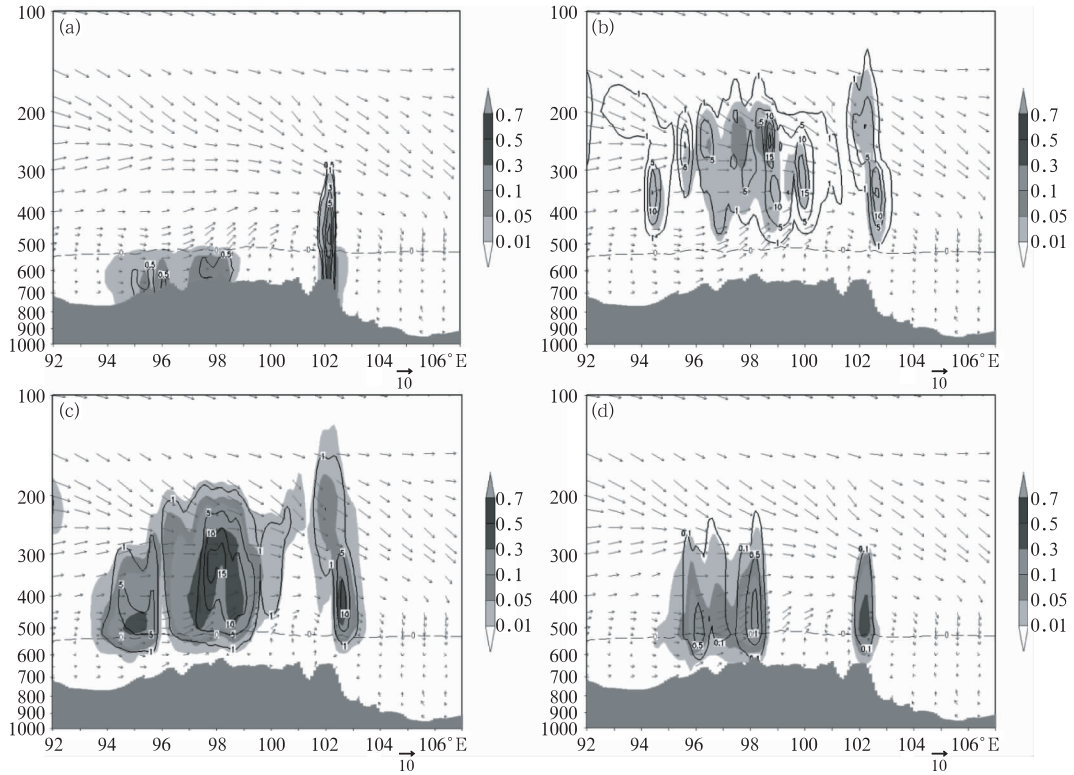


图 3 模拟的 2006 年 8 月 7 日 11 时沿 37.5°N 垂直剖面雨滴、冰晶、雪晶、霰的比含水量和比数浓度 (a)  $Q_r$  (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ) 和  $N_r$  (等值线, 单位:  $L^{-1}$ ); (b)  $Q_i$  (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ) 和  $N_i$  (等值线, 单位:  $L^{-1}$ ); (c)  $Q_s$  (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ) 和  $N_s$  (等值线, 单位:  $L^{-1}$ ); (d)  $Q_g$  (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ) 和  $N_g$  (等值线, 单位:  $L^{-1}$ ); (图中虚线表示 0°C 层, 下同)

### 3 催化试验及效果分析

以 37.5°N、102.2°E 为中心,在水平方向沿 30km×30km 的区域(37.35~37.65°N、102.05~102.35°E)内引进 100 个/升剂量的

人工冰晶,进行催化播撒试验。设计了四个敏感性试验来分析在云的不同阶段和不同位置进行播撒后对降水和云中微物理过程以及动力过程的影响。不同试验设计及模拟结果见表 1。

表 1 8 月 7 日催化试验设计方案及模拟结果

序号	播撒起始时刻(北京时)	剂量(个/L)	X 轴格点	Y 轴格点	Z 轴格点	播撒持续时间(min)	催化后格点总降水量改变
1	10:00	100	176,178	94,96	13	3	-0.5~1.5mm
2	10:00	100	176,178	94,96	10	3	-0.5~2.5mm
3	11:30	100	176,178	94,96	13	3	-1.0~1.5mm
4	11:30	100	176,178	94,96	10	3	-1.0~3.0mm



### 3.1 人工催化对地面降水的影响

方案 1、2 是在云团的初生阶段(取 10 时),高度分别为 400hPa 和 500hPa 处播撒冰晶;方案 3、4 是在云团发展到一定阶段(取 11:30 时),高度分别为 400hPa 和 500hPa 处播撒冰晶。4 个数值试验结果均表明,播撒冰晶达到了增雨的效果,但增雨的程度和范围各不相同。

图 4 和图 5 分别给出了在播撒后 1 至 2 小时和 3 至 4 小时内雨强的变化情况,可以看出,播撒后 1 至 2 个小时雨强改变比较明显,在这段时间内方案 1、2 中雨强正变化区的范围在 80km×80km 左右,方案 3、4 雨强正变化区的范围在 60km×50km 左右,雨强增加区的西部有部分雨强负变化区。方案 1、2 雨强增加的中心区位于播撒区的东南,这是由于方案 1、2 是在云的初始阶段播撒,

播撒 1 小时后,受西风气流和地形的影响,水凝物含量丰富区向东南移动,播撒区东南有明显的温度和垂直速度变化(可参见图 7a、b),降水中心区也随之移动,造成在播撒中心点东南 15km 左右雨强改变最大;方案 3、4 是在云发展到一定阶段后播撒,播撒后云水大量消耗,并很快转化为较大的降水粒子,从而使得降水粒子在空中受西风气流和地形影响时间变少,因此雨强正变化最大区在播撒中心点偏北。在播撒后 3 至 4 小时内,人工播撒冰晶的催化效果基本结束,雨强改变也应当逐渐减小。在方案 2 中,播撒区附近有较大的雨强变化负区,这主要是由于播撒冰晶造成的水凝物含量丰富区向东南移动,使得自然云后期本该在播撒区附近的降水在催化后降在了播撒区的西南部,造成雨强变化的负增长。

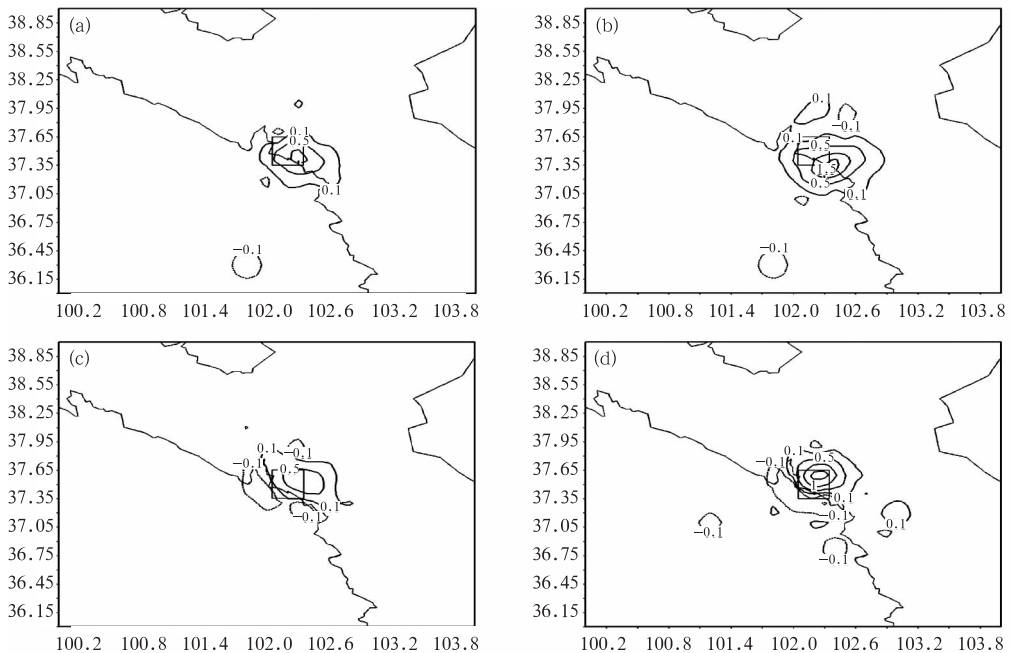


图 4 四个方案在播撒后 1 至 2 小时内雨强(单位:mm/h)变化( $\Delta R_h = R_{h( seeding )} - R_{h( nature )}$ )  
 (a)方案 1;(b)方案 2;(c)方案 3;(d)方案 4;(图中方框为播撒区)

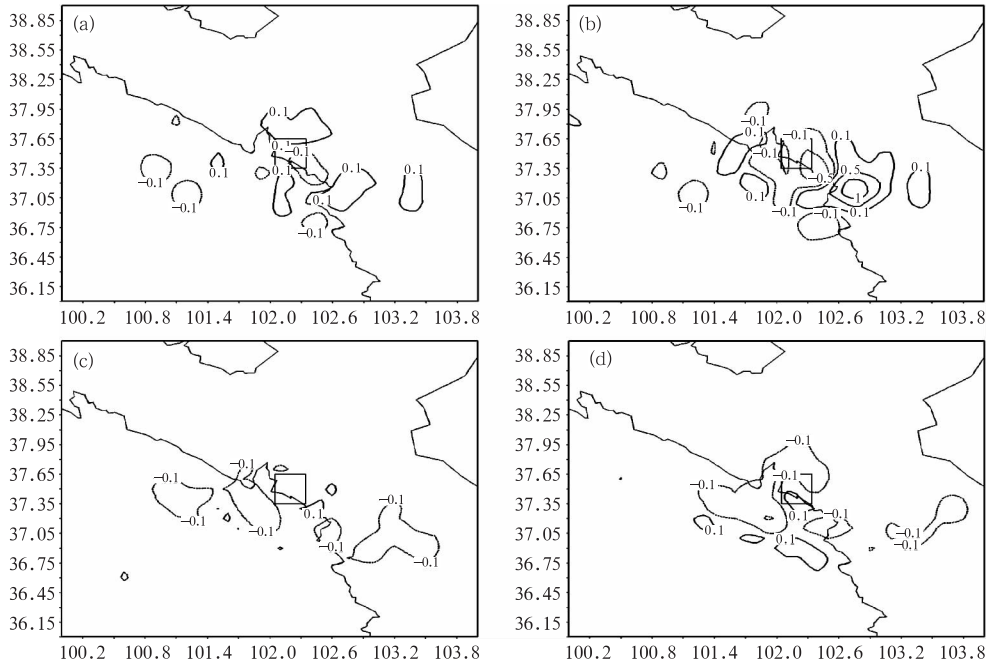


图 5 四个方案在播撒后 3 至 4 小时内雨强(单位:mm/h)变化( $\Delta R_h = R_{h(\text{seeding})} - R_{h(\text{nature})}$ )  
(a)方案 1;(b)方案 2;(c)方案 3;(d)方案 4;(图中方框为播撒区)

### 3.2 人工催化对云中微物理量的影响

播撒后播撒处冰晶含量都有明显增加,冰霰转化( $A_{ig}$ )增大了 1 个量级,使冰晶之间碰撞并( $C_{ii}$ )增加了 2 个量级,冰晶碰冻雨滴( $C_{ri}$ )速率加快。在播撒后 30min 内,云水和雨水被消耗,冰晶转化为雪晶和霰,使霰的数浓度增加了 4 倍,在播撒后 60min 内,霰的数浓度增加了约 5 倍,比含水量增加了 0.5 倍。

图 6 给出了自然云和催化云内一些微物理量的分布剖面,由图可见,播撒后云水和过冷雨水被转化成雪晶和霰粒子,这些大粒子在降落过程中融化变成雨水,使得下层雨水比含水量增加。比较而言,在云的发展阶段播撒后,霰粒子向雨水转化率要高,雨水比含水量从  $0.2\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  增至  $0.4 \sim 0.6\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而在云的初始阶段播撒,由于上升速度的影响,霰粒子在空中停留的时间较长,使得其向雨水的转化率较低,雨水比含水量从  $0.2\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  增至  $0.4\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;不同高度的播

撒也使得雪晶和霰这些大粒子在空中位置有所不同,500hPa 播撒后(图 6e、f),雪晶和霰比含水量增加更明显,释放大量潜热,提高了垂直运动速度(可参见图 7b、d)。同时由于 500hPa 距离  $0^\circ\text{C}$  层较近,能使更多的雪晶和霰融化,使雨水比含水量增加更多;而 400hPa 播撒后(图 6c、d),雪晶和霰距离  $0^\circ\text{C}$  层较远,不能快速融化,使得雨水比含水量增加。

### 3.3 人工催化对垂直速度场和温度场的影响

图 7 给出了四个方案在各自播撒后 1 小时的温度和垂直速度变化,可以看出,播撒后都有温度和垂直速度的增加。由于 500hPa 处于  $0^\circ\text{C}$  层附近,在 500hPa 处播撒后(图 7b、d),冰晶转化为霰粒子,下落融化成雨滴,释放潜热,使得播撒面温度的增加值在  $0.4^\circ\text{C}$  以上;400hPa 处的温度为  $-15^\circ\text{C}$  左右,播撒



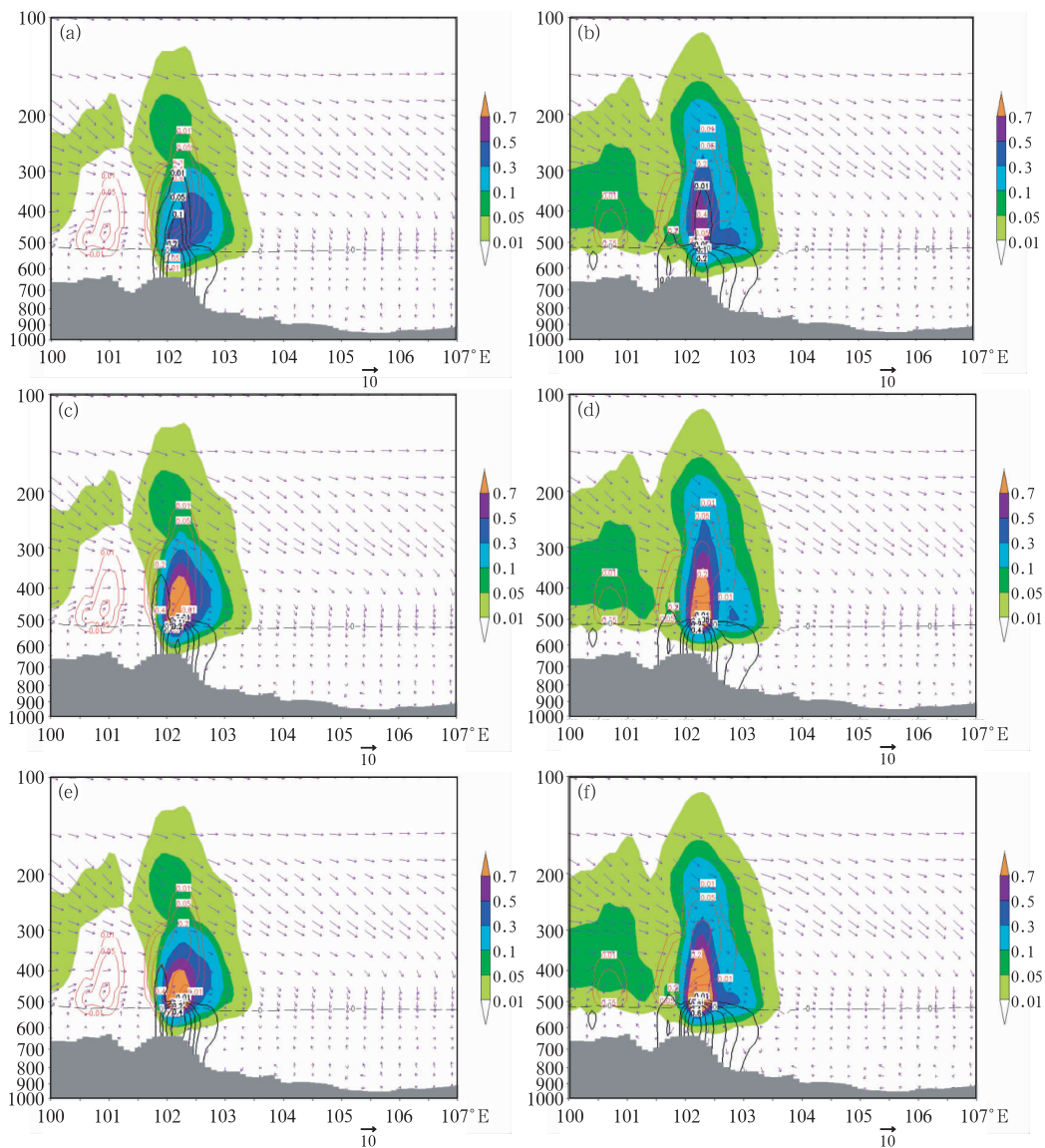


图 6 模拟的 2006 年 8 月 7 日自然云与催化云沿  $37.5^{\circ}\text{N}$  垂直面云水比含水量( $Q$ , 单位  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、雨水比含水量( $Q_r$ , 单位  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和雪晶与霰的比含水量之和( $Q_i + Q_g$ , 单位  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) (a)自然云 11 时;(b)自然云 12:30 时;(c)方案 1 催化云 11 时;(d)方案 3 催化云 12:30 时;(e)方案 2 催化云 11 时;(f)方案 4 催化云 12:30 时

后(图 7a、c),主要是云水和过冷雨水凝结释放潜热,温度升高  $0.1 \sim 0.2^{\circ}\text{C}$ 。垂直速度由于温度改变而改变,在  $400\text{hPa}$  处播撒后,垂

直速度增加了  $0.1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;在  $500\text{hPa}$  处播撒后,温度有较大升高,但由于下落粒子的拖曳作用影响,垂直速度只增加  $0.1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

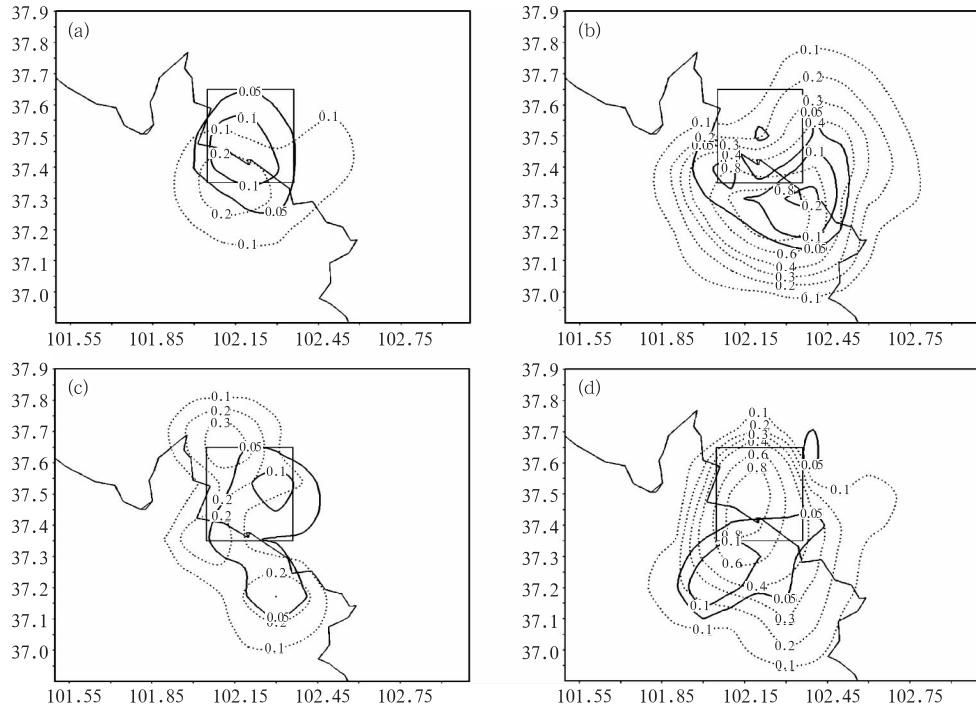


图 7 四个方案在播撒后 1 小时的温度变化(点线,依次为 0.1,0.2,0.3,0.4,0.6 和 0.8,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )和垂直速度变化(实线,单位  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 (a)方案 1(11 时,400hPa 处);(b)方案 2(11 时,500hPa 处);(c)方案 3(12:30 时,400hPa 处);  
 (d)方案 4(12:30 时,500hPa 处);(图中方框为播撒区)

#### 4 小结和结论

本文以 GRAPES 动力框架为动力基础,研制并耦合一种新的显式云物理方案,成为 GRAPES 中一种新的可选显式云物理方案。该方案是双参数方案,增加了雨水、冰晶、雪、霰的数浓度预报方程和相应的微物理过程。

通过使用新方案对祁连山地区的山区云降水进行模拟,并设计不同的催化方案进行催化试验,可以得出以下结论:

(1) 新方案能够较好的模拟本次降水过程,模拟的降水区域和降水强度与实况比较吻合,模拟的云的宏观结构能与卫星资料相符。

(2) 新方案能提供详细的云的微观结构

及其随时间的演变,而且配置基本合理,增加了 GRAPES 模式研究微观云物理的能力。

(3) 催化试验表明播撒冰晶可以增加降雨。其中,在云初始阶段播撒增雨范围较广,在云发展阶段播撒增雨范围较集中;在 500hPa 处播撒冰晶增雨效果好于 400hPa 处播撒。主要是因为积云团云中各相粒子在一定高度上混合存在,且云水和过冷雨水离  $0^{\circ}\text{C}$  层很近,在 500hPa 播撒后,冰晶转化为大的冰相粒子——雪晶和霰(以霰为主),并迅速下落融化,释放大量潜热,增强垂直运动速度,从而加快了上层大粒子的融化和小粒子向大粒子的转化,形成良性循环,提高了降水效率,增雨效果明显;而在 400hPa 处播撒后,潜热释放主要靠云水和过冷雨水的凝结,形成的冰相粒子在空中停留时间较长,降水

效率低,增雨效果弱。

(4) 个例模拟虽然显示了新方案有较好的功能,但仍需实测微观资料检验,并进行更多的数值试验,寻找不足,以便进一步完善。

### 参考文献

- [1] Cohard J M, Pinty J P. A comprehensive two-moment warm microphysical bulk scheme. I: Description and test[J]. Q. J. R. Meteor. Soc., 2000, 126: 1815-1842.
- [2] Reisner J R, Rasmussen M, Bruintjes R T. Explicit forecasting of super cooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model[J]. Q. J. R. Meteor. Soc., 1998, 124: 1071-1107.
- [3] Lou Xiaofeng, Hu Zhijin, Shi Yueqin. Numerical simulations of a heavy rainfall case in south China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 01: 128-138.
- [4] 赵震,雷恒池,吴玉霞. MM5 中新显示云物理方案的建立和数值模拟[J]. 大气科学, 2005, 4: 609-619.
- [5] Meyers M P. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme [J]. Atmospheric Research, 1997, 45: 3-39.
- [6] Xue M. Advanced regional prediction system (ARPES) version 4.0 user's guide [J]. Univer. of Oklahoma, 1995. 380.
- [7] Hong S Y, Dudhia J, Chen S Y. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of cloud and precipitation [J]. Monthly Weather Review, 2004, 132: 103-120.
- [8] 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]. 中国气象科学研究院院刊, 1986, 1(1): 37-52.
- [9] Hu Zhijin, He Guanfang. Numerical simulation of microphysical processes in cumulonimbus—Part I: microphysical Model [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1989, 41(A): 132-147.
- [10] 刘奇俊,胡志晋,周秀骥. HLAFS 云降水方案及其对暴雨和云的模拟(I)—云降水显式方案 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(增刊): 60-67.
- [11] 刘奇俊,胡志晋,周秀骥. HLAFS 云降水方案及其对暴雨和云的模拟(II)—暴雨和云的模拟 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(增刊): 68-77.
- [12] Grabowski W W. A parameterization of cloud microphysics for long-term cloud-resolving modeling of tropical convection [J]. Atmos. Res., 1999, 52: 17-41.
- [13] Michael P. Meyers, Paul J. Demott, William R. Cotton. New primary ice-nucleation parameterizations in an explicit cloud model [J]. Journal of Applied Meteorology. 1992, 31, 708-721.
- [14] Berry, K. X.: Modification of the warm rain process proc. First National Conf. On Weather Modification, Albany [J]. Amer. Meteor. Soc., 1968, 81-88.