

MM5 中新显式云物理方案的建立和数值模拟

赵 震^{1, 2} 雷恒池¹ 吴玉霞¹

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 100039

摘 要 在 MM5 动力框架内, 在其中 Reisner 2 方案基础上采用双变参数方案, 增加了云水、雨水、雪和霰的数浓度预报方程。云中凝结核 CCN 的数浓度采用超几何函数表示; 云水向雨水的自动转换过程考虑了云滴谱的特征和发展变化对该过程的影响, 而不是采用原方案给定阈值的方法描述该过程; 对连续碰并方程不再将粒子落速差作为常量提出积分号外, 而是直接作为粒子直径函数在积分号内求解, 这样处理可以回避使用粒子群的平均落速带来的误差; 增加了霰和雪、霰和冰晶的碰并微物理过程。粒子引入 Γ 分布谱函数, 对微物理过程采用了与之相适应的计算公式。通过增加新预报量的计算和输出程序, 在 MM5 的显式方案中新增加了一个可选方案, 并称之为新方案。模拟了一次层状云降水过程, 在区域二分别采用了新方案和 Reisner 2 方案以作对比。新旧方案降水模拟结果的对比表明新方案在降水范围和强度的预报效果有所改进。模拟结果给出了层状云的合理微观结构和它的一些特征, 增强了 MM5 研究微观云物理的能力; 通过单站微物理过程分析, 揭示了降水过程的可能形成机制。说明新方案可以为层状云的宏微观结构特征、降水物理过程和人工影响天气研究提供一定依据。

关键词 MM5 双参数谱演变方案 云凝结核 微物理结构

文章编号 1006-9895(2005) 04-0609-11

中图分类号 P426.5

文献标识码 A

A New Explicit Microphysical Scheme in MM5 and Numerical Simulation

ZHAO Zhen^{1, 2}, LEI Heng-Chi¹, and WU Yu-Xia¹

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

2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Abstract Based on the dynamic frame of MM5 and Reisner 2 explicit cloud scheme, a new double-moment microphysical scheme is developed, in which both the mixing ratios and number concentrations of cloud water, rain water, cloud ice, snow and graupel are predicted. The number concentration of the activated cloud condensation nuclei (CCN) is described with the hypergeometric function. The influences of the cloud droplet spectrum character and the spectrum growth and change are considered in course of the collision and coalescence of cloud droplets to form raindrops, which does not use a cut-off value in the conversion from cloud water into rainwater. To the continuous collection equation, the particles terminal fall velocity difference is not taken outside the integral, but is integrated in the inner integral equation as a function of diameter to avoid the error caused by using particles mass weighted mean terminal fall velocity. In the new scheme, generation rate of graupel due to the collection of snow by graupel and the collection of cloud ice by graupel is included. The new scheme uses the more reasonable gamma law as basis functions for the hydrometeor drop size distribution. Corresponding to the gamma size distribution, microphysical equations in the new scheme are rewritten. By adding the calculation and output program for new prognostic variables, the new scheme is incorporated in the three-dimensional non-hydrostatic model MM5 and becomes a new option in its

收稿日期 2004-04-06, 2004-11-11 收修定稿

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-225

作者简介 赵震, 男, 1977 年出生, 在读博士, 主要从事云和降水物理、中尺度数值模式研究。E-mail: yuchenjinri@21cn.com

explicit microphysical scheme, which is called the new scheme in the paper. For comparison, an observed precipitation formed by the stratus cloud system is simulated with the new scheme and the Reisner 2 scheme in domain 2 respectively. By comparing model simulation with an observed precipitation, the new scheme shows some improvement of precipitation location and intensity prediction. The output of the new scheme can give reasonable microstructure of stratus cloud and indicate its some characteristics, which enhance the capability of MM5 to study the cloud microphysical process. The numerical simulation reveals the possible mechanism of the rainfall by single station microphysical processes analysis. These results suggest that the new scheme will provide some valuable information on macro and microstructure characteristic of stratus cloud, physical process of precipitation and weather modification research.

Key words MM5, two-moment scheme, cloud condensation nuclei, microphysical structure

1 引言

中尺度大气数值模式随着模式分辨率的提高,云降水的显式模式受到了日益广泛的重视。模式水平分辨率的提高使显式方案从云模式向中尺度模式发展,或在原有对流参数化的中尺度模式中实现了显式物理过程。目前使用的气象模式中,显式云物理方案存在较大差别,这不仅表现在云降水量的不同,还主要表现在微物理过程的物理描述和处理方法的不同。在数值模式中,采用不同的云降水方案,将得到不同的云物理量场,从而有不同的潜热释放和降水物拖曳,将影响到模拟的动力场和温度场^[1]。许多中尺度模式的微物理过程不如对流云模式的微物理过程完善和详细,在一定程度上会影响中尺度模式的微物理模拟能力并影响到动力过程、降水等的模拟。随着计算机的发展,中尺度模式的分辨率不断提高,有必要将比较完善的云物理过程融合到中尺度模式中,从而增强模式对湿物理过程的模拟能力。

非静力平衡中尺度数值模式 MM5 中的 Reisner 2 方案是一种含霰的复杂混合相显式云物理方案^[2, 3],该方案包含了水汽、云水、雨水、冰晶、雪和霰的混合比预报方程,同时对冰晶数浓度作了预报。但是该方案采用的是单参数谱演变方案,粒子的谱分布采用 M-P 式。单参数的优点是简单,缺点是只能通过斜率的变化反映谱演变,造成只能通过大粒子端的分布变化来反映谱演变,与自然变化相差甚大。而双参数谱演变是通过斜率和截距的变化来反映粒子谱演变,比较接近于自然变化^[4]。因而双参数谱演变方案具有更合理的物理基础。

本文在 MM5(V3-5 版本)动力框架内,在其中的 Reisner 2 方案基础上采用双参数谱演变方案,对粒子谱引入 Γ 分布和采用与之相适应的微物理过程计算公式。增加了云水、雨水、雪和霰的数浓

度预报方程,其中云滴数浓度的预报对辐射传输和云化学有特别重要的意义。在 MM5 的显式方案中新增加了一个可选方案,以下称之为新方案,并利用新方案模拟了一次层状云降水过程。

2 新方案的微物理过程框架和水凝物粒子分布谱

新方案为双参数谱演变方案,粒子谱采用普适 Γ 分布^[5],微物理过程的计算需要在文献[2, 6~8]的工作基础上进行改写。粒子谱分布函数为

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

$x \in [\text{冰晶、雨、雪、霰}]$, N_{0x} 为分布截距, α_x 为谱形参数, λ_x 为分布斜率, N_{0x} 、 λ_x 与 D 无关。

Γ 分布有如下关系式:

$$\int_0^\infty D^p n_x(D) dD = \frac{N_{0x} \Gamma(p + \alpha_x + 1)}{\lambda_x^{p + \alpha_x + 1}}, \quad (2)$$

由比含水量 q_x (单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

$$\rho q_x = \int_0^\infty \frac{\pi}{6} \rho_x D^3 n_x(D) dD,$$

可得:

$$\lambda_x = \left[\frac{\pi \rho_x N_{0x} \Gamma(4 + \alpha_x)}{6 \rho q_x} \right]^{\frac{1}{4 + \alpha_x}}. \quad (3)$$

由数浓度 N_x (单位: m^{-3})

$$N_x = \int_0^\infty n_x dD = N_{0x} \frac{\Gamma(1 + \alpha_x)}{\lambda_x^{1 + \alpha_x}},$$

可得:

$$N_{0x} = \frac{N_x \lambda_x^{1 + \alpha_x}}{\Gamma(1 + \alpha_x)}, \quad (4)$$

由(3)与(4)式,可得:

$$\lambda_x = \left[\frac{\pi \rho_x N_x \Gamma(4 + \alpha_x)}{6 \rho q_x \Gamma(1 + \alpha_x)} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

这样,粒子谱分布的斜率和截距由比含水量和数浓度确定,并且随比含水量和数浓度的变化而改变。

雨滴谱一般采用指数分布 M-P 式,指数分布

对于稳定性降水拟合效果较好,而对于云中起伏性大的降水而言,在小滴和大滴范围偏差较大。而采用 Γ 分布拟合实际谱,通过和指数分布对比分析发现, Γ 分布提高了在小滴和大滴区段的拟合精度^[9]。当 $\alpha_r=2$ 时,对观测值拟合的相关系数和相关显著水平较指数分布拟合的对应值有明显提高^[10]。对冰晶谱,不再采用单分散分布,而是采用 Γ 分布,取 $\alpha_i=1$; 对雪,取 $\alpha_s=1$; 对霰,取 $\alpha_g=0$ 。新方案设定 α_r 为可调参数,可以更好的在以后采用新的观测事实确定的粒子谱分布参数。

3 新方案中微物理过程参数化表达式

新方案改进和增加了某些微物理过程;为了与粒子谱的 Γ 分布相适应,新方案对相应的微物理过程进行了改写。以下用 P 和 N 分别表示粒子比含水量和数浓度的源汇项。

3.1 云中凝结核的核化作用

为了预报云水的数浓度,增加了云中凝结核 (CCN) 的活化作用和云滴的凝结增长是显著影响云形成初期的数浓度和比含水量的决定性过程,它们不仅强烈影响与之相关的云辐射性质,而且能触发云滴间的碰并过程形成降水。CCN 的活化数浓度表达式如下:

$$N_{\text{CCN}} = CS_{\text{vw}}^k F\left(\mu, \frac{k}{2}, \frac{k}{2} + 1; -\beta S_{\text{vw}}^2\right),$$

其中, S_{vw} : 水面过饱和度; $F(a, b, c; x)$: 超几何函数; C, k, μ, β 为可变参数^[11], 对海洋性云: $C=2.01 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$, $k=3.50$, $\mu=3.76$, $\beta=44.1$; 对大陆性云: $C=8.04 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$, $k=3.50$, $\mu=3.76$, $\beta=44.1$ 。

云滴数浓度 N_c 的 CCN 核化作用生成率为

$$N_{\text{cdsn}} = \frac{N_{\text{CCN}} - N_c}{2\Delta t} > 0, \quad (6)$$

云滴比含水量的 CCN 核化作用生成率为

$$P_{\text{cdsn}} = \frac{m_{\text{co}} N_{\text{cdsn}}}{\rho}, \quad (7)$$

其中, Δt : 时间步长(单位: s); ρ : 空气密度(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); m_{co} : 云滴最小质量(单位: kg)。

3.2 云水向雨水的自动转化过程

原方案采用 Kessler 给定阈值的方法描述该过程,认为云水比含水量 $q_c \geq 0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时即发生云水向雨水的自动转化过程,没有考虑云滴谱的特征和发展变化对该过程的影响。新方案采用 Grabowski^[12] 的计算公式:

$$P_{\text{cnnr}} = 1.67 \times 10^{-5} (10^3 \rho q_c^2)^2 / \left[5 + 3.6 \times 10^{-5} \left(\frac{N_b}{D_b} \right) / (\rho q_c) \right], \quad (8)$$

云滴的相对离散度,

$$D_b = 0.146 - 5.964 \times 10^{-2} \ln \frac{N_b}{2000},$$

其中, N_b : 云底的云滴初始数浓度(单位: cm^{-3})。这样,不同的 N_b 就会有相应的 D_b , N_b/D_b 是随 N_b 变化的,就能够通过 N_b 的变化影响云水向雨水的转化率,从而进一步影响云内的其他相关微物理过程。取 $N_b = 100 \text{ cm}^{-3}$ 。

3.3 连续碰并过程

连续碰并过程不再将粒子落速差 $|U_i - U_j|$ 作为常量提出积分符号外,而是直接在积分符号内求解。由于 U_i 和 U_j 都是粒子直径 D 的函数,绝对值符号外的项皆为正值,完全可以在积分符号内求解。这样就可以回避使用粒子群的平均落速带来的误差,而给出较合理的结果^[4]。

粒子 i 碰并粒子 j 的质量变化方程为

$$\frac{dM(D_i)}{dt} = \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2 |U_i - U_j| E_{ij} \frac{\pi}{6} D_j^3 \rho_j n_j, \quad (9)$$

$n_i \times (9)$ 式,从 $0 \rightarrow \infty$ 积分,得

$$\begin{aligned} P_{\text{iacj}} &= \frac{1}{\rho} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2 |U_i - U_j| \cdot \\ &E_{ij} \frac{\pi}{6} D_j^3 \rho_j n_j n_i dD_j dD_i = \frac{\pi^2}{24} E_{ij} \frac{\rho_i}{\rho} N_{0i} N_{0j} \cdot \\ &\left\{ \left| \frac{a_i \Gamma(3 + b_i + \alpha_i) \Gamma(4 + \alpha_j)}{\lambda_i^{3+b_i+\alpha_i} \lambda_j^{4+\alpha_j}} + \frac{2a_i \Gamma(2 + b_i + \alpha_i) \Gamma(5 + \alpha_j)}{\lambda_i^{2+b_i+\alpha_i} \lambda_j^{5+\alpha_j}} + \right. \right. \\ &\frac{a_i \Gamma(1 + b_i + \alpha_i) \Gamma(6 + \alpha_j)}{\lambda_i^{1+b_i+\alpha_i} \lambda_j^{6+\alpha_j}} - \\ &\frac{a_j \Gamma(3 + \alpha_i) \Gamma(4 + b_j + \alpha_j)}{\lambda_i^{3+\alpha_i} \lambda_j^{4+b_j+\alpha_j}} - \\ &\frac{2a_j \Gamma(2 + \alpha_i) \Gamma(5 + b_j + \alpha_j)}{\lambda_i^{2+\alpha_i} \lambda_j^{5+b_j+\alpha_j}} - \\ &\left. \left. \frac{a_j \Gamma(1 + \alpha_i) \Gamma(6 + b_j + \alpha_j)}{\lambda_i^{1+\alpha_i} \lambda_j^{6+b_j+\alpha_j}} \right| \right\} = \\ &\frac{\pi^2}{24} E_{ij} \frac{\rho_i}{\rho} C_P(i, j). \end{aligned} \quad (10)$$

粒子 i 碰并粒子 j 的数浓度变化为

$$N_{\text{iacj}} = \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2 |U_i - U_j| E_{ij} n_j n_i dD_j dD_i =$$

$$\begin{aligned} & \frac{\pi}{4} E_{ij} N_{0i} N_{0j} \left\{ \left| \frac{a_i \Gamma(3+b_i+\alpha_i) \Gamma(1+\alpha_j)}{\lambda_i^{3+b_i+\alpha_i} \lambda_j^{1+\alpha_j}} + \right. \right. \\ & \frac{2a_i \Gamma(2+b_i+\alpha_i) \Gamma(2+\alpha_j)}{\lambda_i^{2+b_i+\alpha_i} \lambda_j^{2+\alpha_j}} + \\ & \frac{a_i \Gamma(1+b_i+\alpha_i) \Gamma(3+\alpha_j)}{\lambda_i^{1+b_i+\alpha_i} \lambda_j^{3+\alpha_j}} - \\ & \frac{a_j \Gamma(3+\alpha_i) \Gamma(1+b_j+\alpha_j)}{\lambda_i^{3+\alpha_i} \lambda_j^{1+b_j+\alpha_j}} - \\ & \frac{2a_j \Gamma(2+\alpha_i) \Gamma(2+b_j+\alpha_j)}{\lambda_i^{2+\alpha_i} \lambda_j^{2+b_j+\alpha_j}} - \\ & \left. \left. \frac{a_j \Gamma(1+\alpha_i) \Gamma(3+b_j+\alpha_j)}{\lambda_i^{1+\alpha_i} \lambda_j^{3+b_j+\alpha_j}} \right| \right\} = \\ & \frac{\pi}{4} E_{ij} C_N(i, j). \end{aligned} \quad (11)$$

3.4 增加微物理过程

增加了原方案中没有的微物理过程: 霰碰并冰晶 P_{gaci} 、 N_{gaci} 和霰碰并雪 P_{gacs} 、 N_{gacs} 。

$$\begin{aligned} P_{gaci} &= \frac{\pi^2}{24} E_{gi} \frac{\rho_i}{\rho} C_P(g, i), \\ N_{gaci} &= \frac{\pi}{4} E_{gi} C_N(g, i), \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} E_{gi} &= \begin{cases} \exp[0.025(T-T_0)], & T < T_0, \\ 1.0, & T \geq T_0. \end{cases} \\ P_{gacs} &= \frac{\pi^2}{24} E_{gs} \frac{\rho_{sr}}{\rho} C_P(g, s), \\ N_{gacs} &= \frac{\pi}{4} E_{gs} C_N(g, s), \end{aligned}$$

其中,

$$E_{gs} = \begin{cases} \exp[0.09(T-T_0)], & T < T_0, \\ 1.0, & T \geq T_0, \end{cases}$$

其中, $T_0 = 273.15 \text{ K}$ 。

3.5 改写微物理过程

新方案对原方案中 19 种微物理过程的计算根据 Γ 分布重新改写^[2, 6~8], 限于篇幅, 不逐一列出。

4 微物理量预报方程

4.1 水汽 q_v 、云水 q_c 、雨水 q_r 、冰晶 q_i 、雪 q_s 和霰 q_g 的比含水量预报方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* q_v}{\partial t} &= -A_{DV}(p^* q_v) + D_{IV}(p^* q_v) + D(q_v) + \\ & p^* (P_{\text{revp}} - P_{\text{idep}} - P_{\text{sdep}} - P_{\text{gdep}} - P_{\text{idsn}} - P_{\text{ccnd}} - P_{\text{cdsn}}), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* q_c}{\partial t} &= -A_{DV}(p^* q_c) + D_{IV}(p^* q_c) + D(q_c) + \\ & p^* (-P_{\text{ccnr}} - P_{\text{racw}} + P_{\text{ccnd}} - P_{\text{ifzc}} - P_{\text{ispl}} - P_{\text{s,scaw}} - \\ & P_{\text{g,scaw}} - P_{\text{gacw}} - P_{\text{i,iacw}} - P_{\text{g,iacw}} + P_{\text{imlt}} + P_{\text{cdsn}}), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* q_r}{\partial t} &= -A_{DV}(p^* q_r) + D_{IV}(p^* q_r) - P_{\text{rprc}} + \\ & p^* (P_{\text{racw}} + P_{\text{ccnr}} - P_{\text{revp}} - P_{\text{gfzr}} - P_{\text{iacr}} - P_{\text{s,sacr}} - \\ & P_{\text{g,sacr}} - P_{\text{gacr}} + P_{\text{smlt}} + P_{\text{gmilt}}), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* q_i}{\partial t} &= -A_{DV}(p^* q_i) + D_{IV}(p^* q_i) + D(q_i) + \\ & p^* (P_{\text{idsn}} + P_{\text{ifzc}} + P_{\text{ispl}} + P_{\text{idep}} + P_{\text{i,iacw}} - P_{\text{icng}} - \\ & P_{\text{raci}} - P_{\text{saci}} - P_{\text{icns}} - P_{\text{imlt}} - P_{\text{gaci}}), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* q_s}{\partial t} &= -A_{DV}(p^* q_s) + D_{IV}(p^* q_s) - P_{\text{sprc}} + \\ & p^* (p_{\text{sdep}} + P_{\text{icns}} + P_{\text{s,scaw}} - P_{\text{scng}} + P_{\text{saci}} - P_{\text{gacs}} + \\ & P_{\text{s,sacr}} - P_{\text{g,racs}} - P_{\text{smlt}}), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* q_g}{\partial t} &= -A_{DV}(p^* q_g) + D_{IV}(p^* q_g) - P_{\text{gprc}} + \\ & p^* (P_{\text{gdep}} + P_{\text{scng}} + P_{\text{g,scaw}} + P_{\text{gacw}} + P_{\text{gacr}} + P_{\text{iacr}} + \\ & P_{\text{gacs}} + P_{\text{raci}} + P_{\text{g,sacr}} + P_{\text{g,racs}} + P_{\text{gfzr}} + P_{\text{icng}} + \\ & P_{\text{g,iacw}} - P_{\text{gmilt}} + P_{\text{gaci}}). \end{aligned} \quad (17)$$

4.2 云水 N_c 、雨水 N_r 、冰晶 N_i 、雪 N_s 和霰 N_g 的数浓度预报方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* N_c}{\partial t} &= -A_{DV}(p^* N_c) + D_{IV}(p^* N_c) + D(N_c) + \\ & p^* [-N_{\text{ifzc}} + N_{\text{cdsn}} - N_{\text{ispl}} - \frac{N_i}{q_i} P_{\text{imlt}} - \frac{N_c}{q_c} (P_{\text{racw}} + \\ & P_{\text{sacw}} + P_{\text{iaw}} + P_{\text{gacw}}) - \frac{\rho}{m_{r0}} P_{\text{ccnr}}], \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* N_r}{\partial t} &= -A_{DV}(p^* N_r) + D_{IV}(p^* N_r) - N_{\text{rprc}} + \\ & p^* \left(\frac{\rho}{m_{r0}} P_{\text{ccnr}} - N_{\text{gfzr}} - N_{\text{sacr}} - N_{\text{gacr}} + \frac{N_s}{q_s} P_{\text{smlt}} + \right. \\ & \left. \frac{N_g}{q_g} P_{\text{gmilt}} - N_{\text{iacr}} - \frac{N_r}{q_r} P_{\text{revp}} \right), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* N_i}{\partial t} &= -A_{DV}(p^* N_i) + D_{IV}(p^* N_i) + D(N_i) + \\ & p^* [-N_{\text{icng}} - N_{\text{iag}} + N_{\text{ifzc}} + \frac{\rho}{m_{i0}} P_{\text{idsn}} + N_{\text{ispl}} - \\ & \frac{N_i}{q_i} P_{\text{imlt}} - (N_{\text{raci}} + N_{\text{saci}} + N_{\text{gaci}}) - \frac{\rho}{m_{s0}} P_{\text{icns}} - N_{\text{ievp}}], \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{\partial p^* N_s}{\partial t} = -A_{DV}(p^* N_s) + D_{IV}(p^* N_s) - N_{\text{sprc}} +$$

$$p^* \left[-N_{g,sacr} - N_{sag} - N_{gacs} - \frac{\rho}{m_{go}} P_{scng} + \frac{\rho}{m_{so}} P_{icns} - \frac{N_s}{q_s} (P_{smlt} - P_{sdep}) \right], \quad (21)$$

$$\frac{\partial p^* N_g}{\partial t} = -A_{DV} (p^* N_g) + D_{IV} (p^* N_g) - N_{gprc} + p^* [N_{icng} + N_{iacr} + N_{raci} + N_{g,sacr} + N_{g,racs} + N_{gfzr} + \frac{\rho}{m_{go}} P_{scng} + \frac{\rho}{m_{go}} P_{g,sacw} - \frac{N_g}{q_g} (P_{gmlt} - P_{gdep})], \quad (22)$$

其中, $p^* = p_s - p_t$, p_s 为地面气压, p_t 为模式顶气压; D 为湍流扩散项, A_{DV} 和 D_{IV} 代表三维平流项和辐散项, 由以下方程给出:

$$A_{DV} (p^* f) = m^2 \left(\frac{\partial p^* u f / m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v f / m}{\partial y} \right) + \frac{\partial p^* f \sigma}{\partial \sigma},$$

$$D_{IV} = m^2 \left(\frac{\partial p^* u / m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v / m}{\partial y} \right) + \frac{\partial p^* \sigma}{\partial \sigma},$$

其中, f 表示水汽、云水、冰晶、雨水、雪、霰中的某一种, m 为地图放大系数^[2]。

4.3 潜热方程

$$\dot{\theta} = -L_v (P_{revp} - P_{cnd} - P_{cdsn}) + L_s (P_{idep} + P_{idsn} + P_{sdep} + P_{gdep}) + L_f (P_{i,iacw} + P_{g,iacw} + P_{s,sacw} + P_{g,sacw} + P_{gacw} + P_{iacr} + P_{ifzc} + P_{gfzr} + P_{sacr} + P_{gacr} - P_{imlt} - P_{smlt} - P_{gmlt}), \quad (23)$$

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。

新方案的潜热方程增加了云中凝结核 (CCN) 的核化作用项, 并且微物理量的计算与原单参数谱演变方案不同, 必然会对动力过程产生反馈作用。

5 新方案的模拟个例和结果

2002 年 9 月 12 日 500 hPa 高空图上, 乌拉尔山到贝加尔湖维持一欧亚大脊, 河套处于东北大槽后部中纬度的平直气流之中, 我国东南大部分地区受副高控制。受其影响, 青藏高原东部上空盛行偏南风, 把孟加拉湾水汽带入河套地区上空, 与副高外围的偏南气流形成两股水汽输送带, 在河套地区上空形成辐合。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, 在我国北部大部分地区形成稳定的降水天气。图 1 给出了 9 月 13 日 00 时 (国际协调时, 下同) 500 hPa 的天气形势。从 9 月 12 日 12 时至 13 日 12 时的 500 hPa 天气形势可以看出, 副高有一次明显的西伸东退过程, 造成

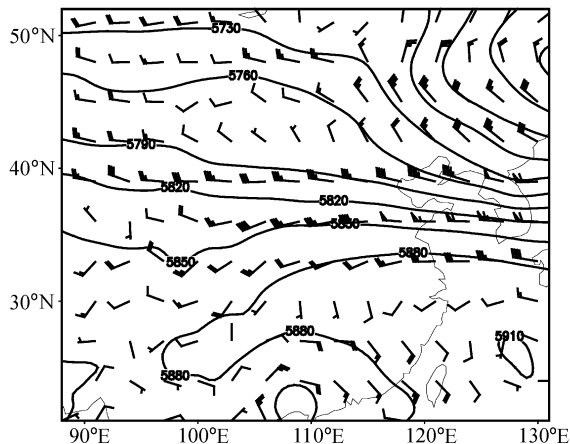


图 1 9 月 13 日 00 时 500 hPa 天气形势

Fig. 1 Observed weather map at 500 hPa at 0000 UTC 13 Sep

北侧的冷空气随西北气流中的短波槽东移进入河套地区上空, 并与南侧西南暖湿气流交汇, 在河套地区中部上空形成大面积降水区。

从 2002 年 9 月 13 日 02 时卫星红外云图 (图 2a) 可见, 降雨云带自西北向东南方向移动, 700 hPa 偏南气流输送的水汽与 500 hPa 西北气流中的冷空气在延安地区上空交汇形成较深厚的云层。从 04 时的云图 (图 2b) 上看, 主体云系仍在延安上空, 05 时以后随着主力云系继续向东南方向移动, 延安地区逐渐处于云系后部, 但延安以南地区仍有大片云系 (图 2c、d)。

为了比较新方案和原方案模拟此次降水的效果, 进行了两次不同的模拟设计, 两者之间的差别在于区域 2 使用了不同的显式云物理方案。模拟以延安 (36.6°N, 109.5°E) 为中心, 使用 NCEP (1° × 1°) 分析资料作为初始场。采用二重双向嵌套, 每 3 小时输出一次结果 (见表 1)。

图 3 给出了模拟区域 1 的 9 月 13 日 00 时 500 hPa 天气形势。和图 1 的实况相比, 图 3 基本给出了正确的形势和风场, 但副热带高压位置偏东, 表明 MM5 能模拟出本次降水过程的动力结构。为了比较新方案和原方案模拟此次降水的差别, 以下只给出区域 2 的模拟结果。本次过程从 9 月 12 日 12 时至 9 月 13 日 12 时的 24 小时降水实况如图 4 所示, 雨区呈东西偏西南走向, 强度属中雨, 局部大雨。数值模拟结果显示, 本次降水过程主要是显式降水, 积云对流参数化仅在西南山区形成少量降

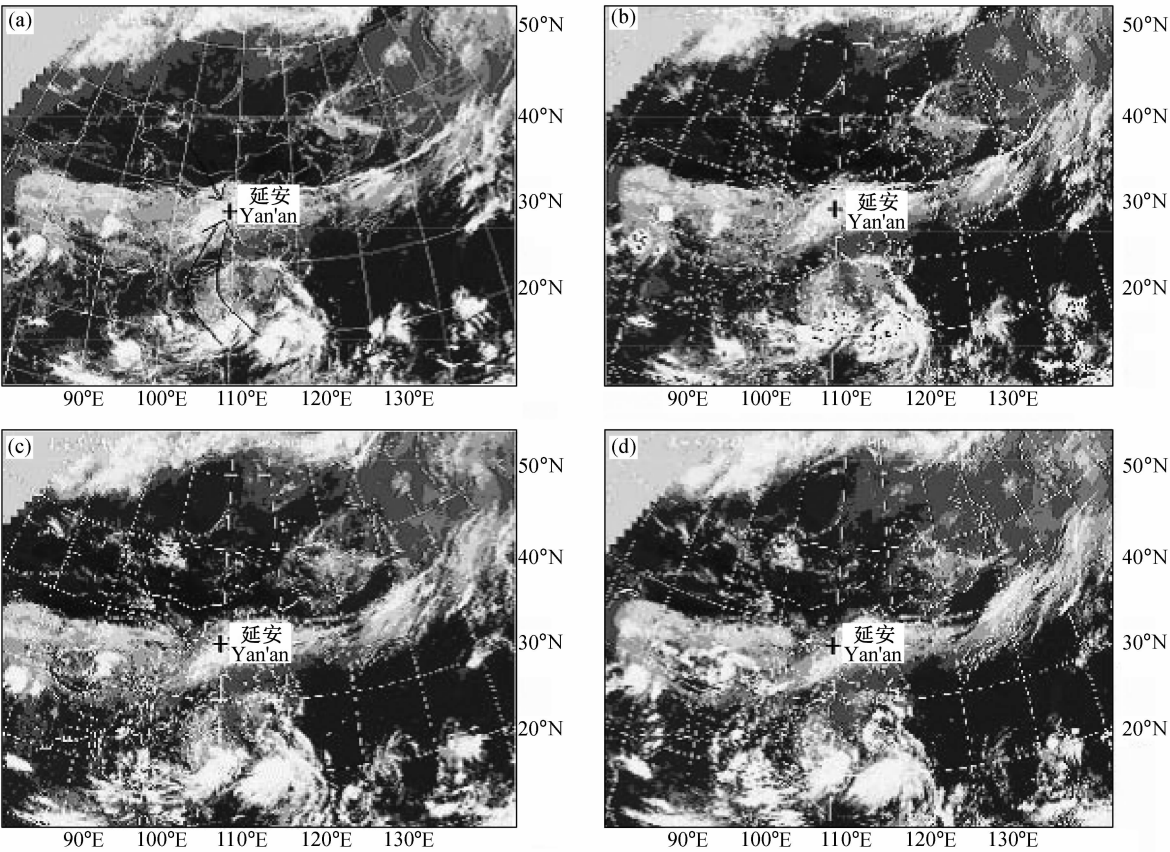


图 2 2002 年 9 月 13 日卫星红外云图: (a) 02 时; (b) 04 时; (c) 06 时; (d) 08 时
Fig. 2 Observed satellite infrared image at 13 Sep 2002: (a) 0200 UTC; (b) 0400 UTC; (c) 0600 UTC; (d) 0800 UTC

表 1 模式模拟设计
Table 1 Setup of the model simulation

	区域 1 Domain 1	区域 2 Domain 2
模拟起止时间	2002 年 9 月 12 日 1200 UTC ~13 日 1200 UTC	2002 年 9 月 12 日 1200 UTC ~13 日 1200 UTC
Simulation period	1200 UTC 12 - 1200 UTC 13 Sep 2002	1200 UTC 12 - 1200 UTC 13 Sep 2002
垂直层数	23	23
Vertical levels		
格点数	109×100	112×109
Grid points		
网格距	30 km	10 km
Grid length		
地形资料	5 min 的 NCAR 全球资料	5 min 的 NCAR 全球资料
Terrain data	NCAR 5 min global data	NCAR 5 min global data
云物理方案	Mixed-Phase (Reisner 1) +Grell	方案 Scheme 1; Reisner 2+ Grell Setup 1
Cloud physics scheme		方案 Scheme 2; 新方案 New scheme+Grell Setup 2
行星边界层物理过程	Blackadar 高分辨率 PBL 方案	Blackadar 高分辨率 PBL 方案
Planetary boundary layer scheme	High-resolution (Blackadar) scheme	High-resolution (Blackadar) scheme
大气辐射方案	Dudhia 的云辐射方案	Dudhia 的云辐射方案
Radiation scheme	Dudhia scheme	Dudhia scheme

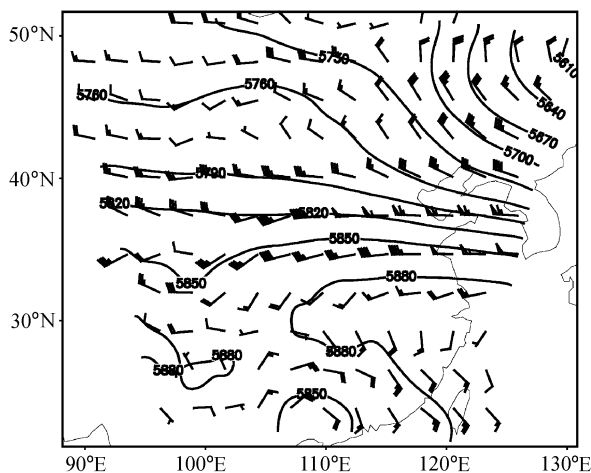


图3 模拟区域1的9月13日00时(UTC)500 hPa天气形势

Fig. 3 Model weather map for domain 1 at 500 hPa at 0000 UTC

13 Sep

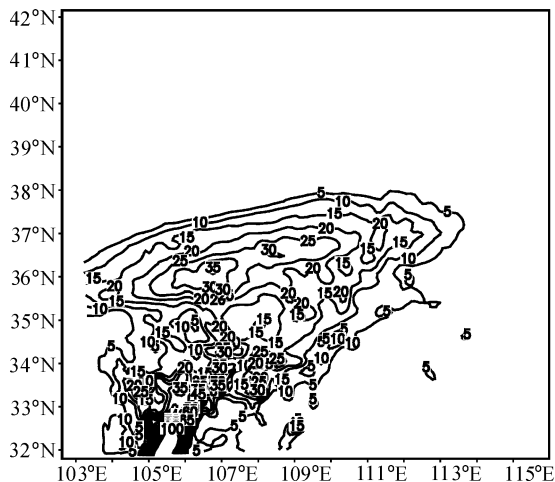


图 5 Reisner 2 方案模拟的 24 小时降水分布 (单位: mm)

Fig. 5 Model surface 24-h precipitation prediction for the Reis-

ner 2 scheme (units: mm)

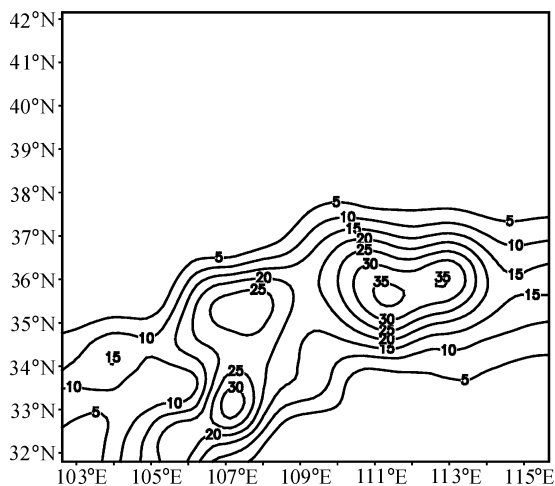


图 4 24 小时降水实况 (单位: mm)

Fig. 4 Observed surface 24-h precipitation (units: mm)

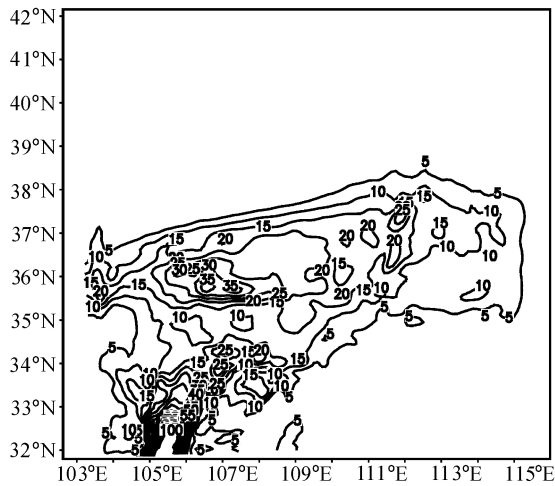


图 6 新方案模拟的 24 小时降水分布(单位: mm)

Fig. 6 Model surface 24-h precipitation prediction for the new

scheme (units: mm)

水。图 5 和图 6 给出了 Reisner 2 方案和新方案模拟的 24 小时降水分布结果。

总体而言,图 5 中 Reisner 2 方案给出的降水范围明显偏小,雨带走向偏南北方向,与实况有所差别。图 6 中新方案给出的降水预报结果更合理,不仅降水范围比较符合实际,而且雨区走向和实况基本相符。对于降水中心数值和范围的预报也比原方案有所提高。说明微物理过程的物理描述和处理方法的不同会使预报的降水量不同,新方案采用的双参数谱演变方案和粒子谱的 Γ 分布描述对本个例的降水预报有所改善。

6 新方案模拟的云微物理结构

云微物理结构包括云粒子群的相态、比含水量、数浓度、形状特征、粒子谱分布等,它反映了云的微物理过程。要了解云的微物理结构,必须使用显式云物理方案,而且要能很好的描述粒子的谱演变。由于新方案采用的是双参数谱演变方案,能预报出云水、冰晶、雨水、雪、霰的比含水量和数浓度,同时粒子的谱描述采用了更为普适的 Γ 分布,这些改进为研究云的微物理结构提供了条件。

对梅雨锋暴雨中云物理结构的摄像探空观测可以给出云中各种粒子的大小、数浓度和质量浓度的垂直分布,结合数值模式可以分析研究梅雨暴雨形成的主要云物理过程^[13, 14]。层状云系是一种主要的大范围降水云系,为了显示本次层状云系降水过程云的直观图像、云中微物理量的数值和分布结构,依据卫星红外云图显示的延安地区上空有较深厚的云层,图7~9给出了模拟的9月13日03时云水、冰晶、雨水、雪、霰的比含水量 q_c 、 q_i 、 q_r 、 q_s 、 q_g 和数浓度 n_c 、 n_i 、 n_r 、 n_s 、 n_g 沿36.6°N的垂直剖面图,同时给出了Reisner 2和新方案模拟出的垂直速度沿36.6°N的垂直剖面图。

从图7可以看出,云型为层状云,云内含水量较均匀并有一定的起伏变化。云中的比含水量一般为0.1~0.3 g·kg⁻¹,并且有一定的过冷水存在。云滴数浓度在接近云底处约为100 cm⁻³,在云中部为100~200 cm⁻³之间,云上部的数浓度为100~200 cm⁻³。模拟给出的云滴数浓度分布基本合

理^[15],新方案给出了云滴数浓度的基本分布情况。冰晶在低空(>-20℃)较少,其数浓度<10 L⁻¹,人工引晶的潜力较大;而高空的冰晶较多。

图8给出的雨水和雪的比含水量和数浓度配合的很好,高比含水量处对应着高数浓度区。雨水的最大比含水量为0.12 g·kg⁻¹,对应的最大雨滴数浓度为3.5 L⁻¹,雨滴基本处于0℃层以下。模拟显示出雨水的均匀分布结构,有下挂带存在。雪的最大数浓度为6 L⁻¹,其对应的最大比含水量为0.2 g·kg⁻¹。在高于0℃处仍有一些雪存在,说明新方案能描述雪在下落中的逐渐融化过程。从图8可以看出,雪的比含水量高的地方对应于高的雨水比含水量处,说明雪的融化对雨水的形成有相当大的贡献。

图9显示空中的霰较少,其最大数浓度为1 L⁻¹。新方案给出了包括比含水量和数浓度在内的云微物理结构,而且配置基本合理。从图9中的垂直上升速度分布知 $w=0.1\sim0.2$ m·s⁻¹,垂直上升运

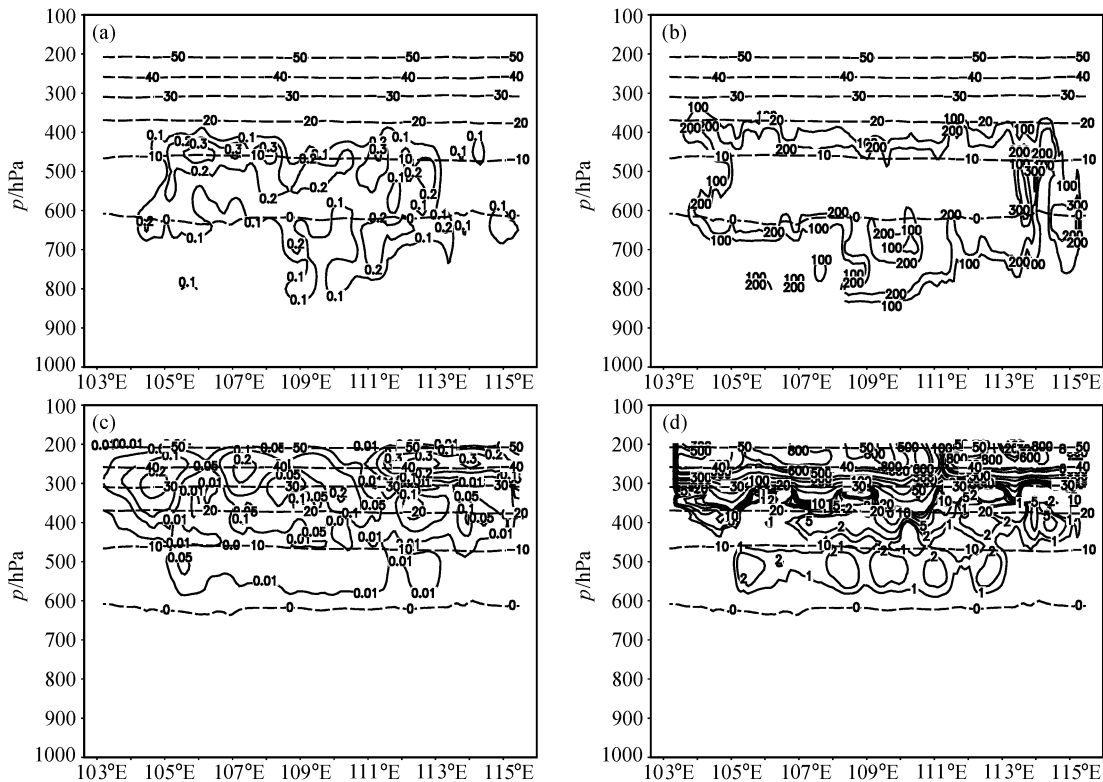


图7 新方案模拟的9月13日03时沿36.6°N垂直剖面云水、冰晶的比含水量和数浓度:(a) q_c (单位: g·kg⁻¹); (b) n_c (单位: cm⁻³); (c) q_i (单位: g·kg⁻¹); (d) n_i (单位: L⁻¹)。虚线表示温度(单位: °C)

Fig. 7 Vertical cross section of mixing ratio and number concentration of cloud water and cloud ice along 36.6°N of model simulation for the new scheme at 0300 UTC 13 Sep: (a) q_c (units: g·kg⁻¹), (b) n_c (units: cm⁻³), (c) q_i (units: g·kg⁻¹), (d) n_i (units: L⁻¹). Dashed lines: temperature (units: °C)

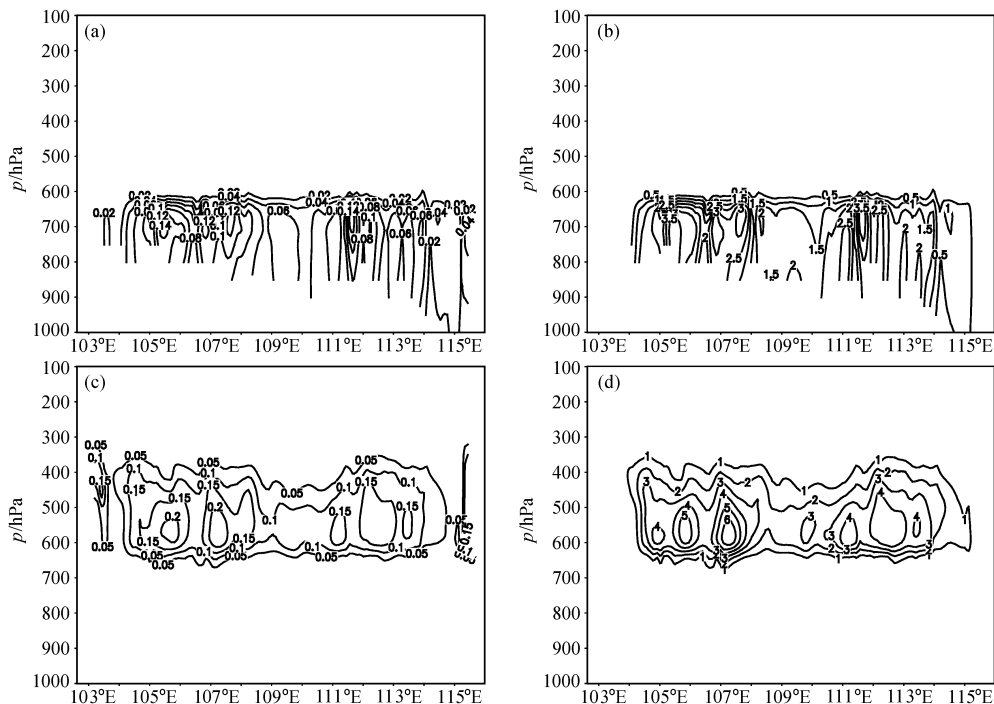


图 8 新方案模拟的 9 月 13 日 03 时沿 36.6°N 垂直剖面雨水、雪的比含水量和数浓度: (a) q_r (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (b) n_r (单位: L^{-1}); (c) q_s (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (d) n_s (单位: L^{-1})

Fig. 8 Vertical cross section of simulated mixing ratio and number concentration of rain water and snow along 36.6°N for the new scheme at 0300 UTC 13 Sep: (a) q_r (units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (b) n_r (units: L^{-1}); (c) q_s (units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (d) n_s (units: L^{-1})

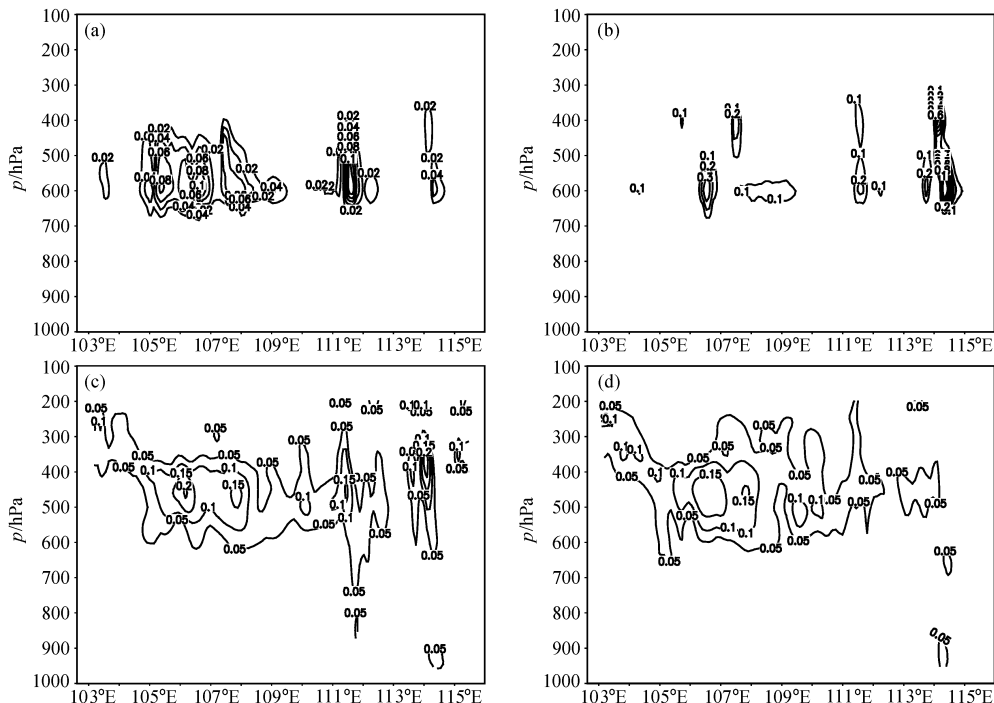


图 9 新方案模拟的 9 月 13 日 03 时沿 36.6°N 垂直剖面霰的比含水量和数浓度: (a) q_g (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (b) n_g (单位: L^{-1}); (c) 新方案 w (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (d) Reisner 2 方案 w (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 9 Vertical cross section of simulated mixing ratio and number concentration of graupel along 36.6°N at 0300 UTC 13 Sep: (a) q_g (units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (b) n_g (units: L^{-1}); (c) vertical velocity for the new scheme (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (d) vertical velocity for the Reisner 2 scheme (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

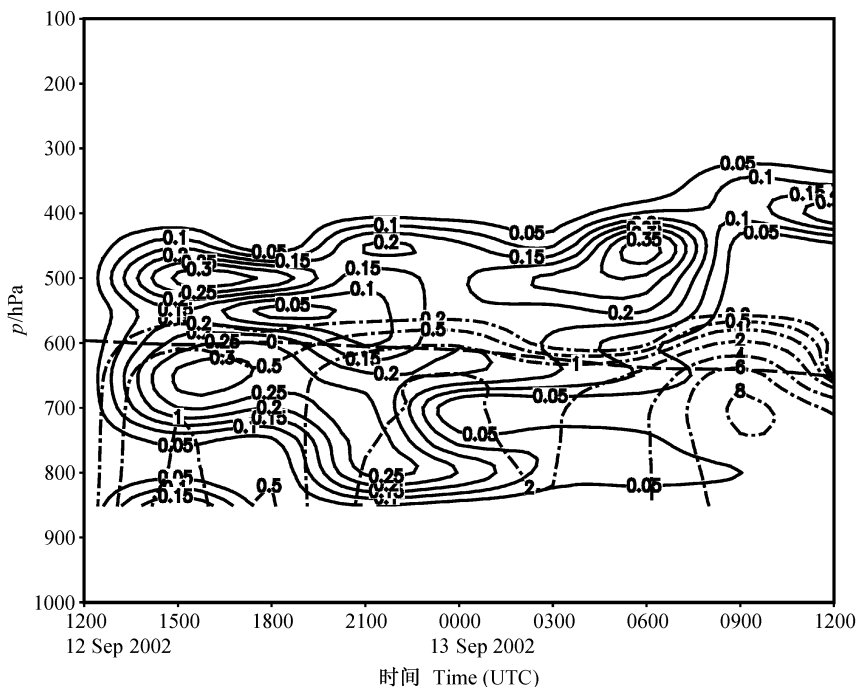


图 10 9 月 12 日 12 时~13 日 12 时延安上空 q_c (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 实线)、 n_r (单位: L^{-1} , 点虚线) 分布。虚线为 0°C 线

Fig. 10 Time-height distributions of q_c (units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, solid lines) and n_r (units: L^{-1} , dot dashed lines) from 1200 UTC 12 Sep to 1200 UTC 13 Sep at Yan'an station. Dashed line: 0°C isotherm

动不强。垂直运动呈现出不均匀性,有一些上升运动中心。对比后发现,新方案模拟的垂直上升运动在数值和范围上都与 Reisner 2 方案有所不同,新方案模拟出了云微物理过程对动力过程的反馈作用。

要了解云的微观结构,有必要知道单站水凝物的高度分布廓线,它与降水强度、辐射传输和航天活动关系密切。图 10 给出了模拟的 24 小时内延安站上空云水比含水量 q_c 和雨滴数浓度 n_r 随时间的分布变化。图 10 中云的比含水量有一定的起伏变化,上空有一定数量的过冷水,而且高过冷水区基本对应的是雨滴数浓度的低值区,这说明延安上空缺少高层云带的引晶作用,其中的降水可能就是在高含水量区内,由供水层自身转化形成的。同时,如果进行人工引晶,则可以提高降水效率。

为了显示延安站上空各种不同微物理过程的作用,下面给出 9 月 13 日 06 时各水凝物粒子主要源项所占百分比。在 $T=266.7\text{ K}$ 高度处,冰晶:凝华增长占 60.41%,冰晶碰并云水(淞附)增长占 39.58%;雪:冰晶自动转化占 35.67%,雪碰并云水占 27.54%,凝华增长占 19.97%,雪碰并冰晶占 6.36%;霰:碰并云水占 80.88%,凝华增长占 4.82%,霰碰并冰晶占 3.55%,霰碰并雪占

1.53%。这说明凝华增长对冰相过程的重要性,其中冰晶的凝华增长稍强于淞附增长,但不占绝对主导作用,表明过冷水的转化效率不是很高。雪的产生源中冰晶自动转化项最大,而霰的产生源中碰并云水项最大,显示了雪和霰的不同增长机制。新方案增加的霰碰并冰晶和霰碰并雪过程对霰的形成有一定贡献。在 $T=276.0\text{ K}$ 高度处雨水的主要生成项几乎是霰的融化,而在 $T=279.2\text{ K}$ 高度处雨水的主要生成项中云水自动转化占 26.65%,碰并云水占 73.35%。说明在 0°C 层附近霰的融化对雨水形成有重要作用,而在暖层碰并过程起重要作用。

7 结论

在 MM5 动力框架和其中原有 Reisner 2 显式云物理方案的基础上加入了一种新的显式云物理方案,成为 MM5 中一种新的可选显式云物理方案。该方案是双参数谱演变方案,增加了云水、雨水、雪和霰的数浓度预报方程;粒子的谱分布由原来的指数分布改为更普适的 Γ 分布,同时微物理过程采用了与之相适应的计算公式。

通过使用 MM5 中新建的显式云物理方案模拟一次大范围层状云降水过程,可以得出如下结论:

(1)与 Reisner 2 方案相比,新方案的降水预报效果有所改善,降水预报的数值和范围更接近实际。说明双参数谱演变方案有更好的物理基础,是对单参数谱演变方案的改进。

(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。特别是对云滴数浓度的预报,可以为辐射传输和云化学提供有用的参数。增加了 MM5 研究微观云物理的能力,也为人工影响天气提供了更多有价值的信息。

(3)新方案模拟出层状云的一些结构特征,计算了各种水凝物粒子的主要源项所占百分比,揭示了此次降水的可能形成机制。

(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(References)

- [1] 楼小凤, 胡志晋, 王鹏云, 等. 中尺度模式云降水方案介绍. 应用气象学报, 2003, **14** (增刊): 49 ~ 59
Lou Xiaofeng, Hu Zhijin, Wang Pengyun, et al. Introduction to microphysical schemes of mesoscale atmospheric models and cloud models. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2003, **14** (Suppl.): 49~59
- [2] 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
- [3] 程麟生. 中尺度大气数值模式发展现状和应用前景. 高原气象, 1999, **18**: 350~360
Cheng Linsheng. The current status of mesoscale numerical model development and its application prospects. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18**: 350~360
- [4] 许焕斌, 段英. 云粒子谱演变研究中的一些问题. 气象学报, 1999, **57**: 450~460
Xu Huanbin, Duan Ying. Some questions in studying the evolution of size distribution spectrum of hydrometeor particles. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57**: 450~460
- [5] Clark T L. A study in cloud phase parameterization using the gamma distribution. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**: 142~155
- [6] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1983, **22**: 1065~1092
- [7] Rutledge S A, Hobbs P V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in mid-latitude cyclones. Part VIII: A model for the 'seeder-feeder' process in warm-frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 1185~1206
- [8] Rutledge S A, Hobbs P V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in mid-latitude cyclones. Part X II: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 2949~2972
- [9] 陈宝君, 李子华, 刘吉成, 等. 三类降水云雨滴谱分布模式. 气象学报, 1998, **56**: 506~512
Chen Baojun, Li Zihua, Liu Jicheng, et al. Model of raindrop size distribution in three types of precipitation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56**: 506~512
- [10] 洪延超. 积层混合云数值模拟研究(I)——模式及其微物理过程参数化. 气象学报, 1996, **54**: 544~557
Hong Yanchao. The numerical simulation study of convective-stratiform mixed cloud, Part (I) —The model and parameterization of microphysical processes. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1996, **54**: 544~557
- [11] Cohard J M, Pinty J P. A comprehensive two-moment warm microphysical bulk scheme. II: 2D experiments with a non-hydrostatic model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2000, **126**: 1843~1859
- [12] Grabowski W W. A parameterization of cloud microphysics for long-term cloud-resolving modeling of tropical convection. *Atmos. Res.*, 1999, **52**: 17~41
- [13] 杨静, 王鹏云, 杨绍忠, 等. 对梅雨锋降水云微物理结构的摄像控空观测和分析. 气象, 2002, **28**: 3~8
Yang Jing, Wang Pengyun, Yang Shaozhong, et al. Video-sonde observations and analyses for cloud microphysical structures in Mei-yu front precipitation system. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2002, **28**(2): 3~8
- [14] Wang P Y, Yang J. Observation and numerical simulation of cloud physical processes associated with torrential rain of the Meiyu front. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**: 77~96
- [15] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京: 气象出版社, 1989. 183~184
Wang Pengfei, Li Zihua. *Microscopic Cloud Physics* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1989. 183~184