

# 一个简化的混合相云降水显式方案\*

胡志晋 楼小凤 包绍武 汪晓滨

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

## 提 要

该文提出一个新的混合相云降水显式方案, 它预报 2 个云物理量, 即云水(冷区为过冷云水)和降水(冷区为冰雪, 暖区为雨), 考虑了 7 种云物理过程. 文中给出了详细的方程组, 可以作为—个子程序供大、中尺度天气模式使用. 该方案还与详细微物理显式方案和暖云方案作了实例模拟比较.

关键词: 混合相云降水 显式方案 中尺度天气模式

## 引 言

在中尺度天气数值模式中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. 它在明确的物理基础上描述以大范围空气辐合抬升为主的层状云降水及其对大气的热力、动力反馈作用. 简单常用的是 Kessler 的暖云方案, Kuo<sup>[1]</sup>曾在 MM4 模式中采用这一方案与其他的对流参数化等云降水方案作了比较, 表明它在模拟层状云降水及其相伴的天气系统发展方面具有优点. 自然云系上部一般在 0℃ 以下, 它不是暖云, 而是混合云, 冰相过程起着—定的作用, 在中高纬度更是如此. 分析表明, 混合层状云中降水往往起源于冰相粒子, 冰相凝华和冻结潜热是对凝结潜热的主要补充, 溶化潜热的作用集中于 0℃ 附近, 也是不容忽视的. 所以, 在云降水显式模式中考虑混合相方案是很必要的. Zhang<sup>[2]</sup>提出了一个简单的方案, 仍采用两个预报量  $Q_c$ 、 $Q_r$ , 它们在温度高于 0℃ 时理解为云滴比质量和雨滴比质量, 而在温度低于 0℃ 时理解为冰晶和雪晶. 在通过 0℃ 时云、冰和雨、雪相互转化(即冻结或融化). 这一方案在模拟美国 Johnstown 洪水天气过程中和暖云方案相比, 降水提早并迅速加大, 与实例更为接近, 但在后期低温发展较弱, 位置偏高.

上述混合云模式的最大缺点在于没有考虑过冷水的存在, 它让液态水全部在 0℃ 以下时冻结, 但实际上只有在 -40℃ 以下云滴才会全部自发冻结. 过冷水的存在使水汽接近于水面饱和值而不是冰面饱和值, 冰晶不仅能凝华增长而且能碰并过冷云滴增长, 这些都会影响潜热的释放量和部位. 此外, 云滴具有很高的数浓度( $10^8 \sim 10^9 \text{m}^{-3}$ ), 其辐射

\* 本文由国家自然科学基金 49475248 项目和国家“八五”攻关 85-906-03 项目资助.  
1997-04-23 收到, 1997-08-15 收到修改稿.

特性与冰晶有很大差异,在化学过程中液滴的作用远大于冰晶的作用,所以对于比较通用的模式来说,必须考虑过冷云滴.刘公波<sup>[3]</sup>曾提出一个混合相层状云模式,包含了云滴、雨滴、冰晶、雪(霰)的比质量和比浓度共7个预报量.作为云物理模式有其独到之处,但作为通用模式,云物理的比重太大了.我们在这里提出一个简化的三相混合云模式,作为一个子程序,可供大、中尺度大气通用模式使用.

## 1 简化的三相混合云模式

### 1.1 模式预报量

除一般模式已有的水汽( $Q_v$ )等预报量以外,云降水过程只增加云水和降水比质量( $Q_c$ 、 $Q_p$ )两个预报量,假定降水在暖区( $T > 0^\circ\text{C}$ )为雨滴,在冷区( $T < 0^\circ\text{C}$ )为冰晶.这一假定基于如下事实:(a)水滴冻结概率与体积成正比,雨滴冻结概率远大于云滴;(b)雨滴碰并冰晶冻结的概率远高于云滴;(c)数值模拟表明混合相层状云中降水粒子一般由上层冰粒子长大形成,下落溶化成雨,在稳定发展阶段过冷云滴比较少见;(d)根据飞机用PMS测量的结果,冰晶一般远大于云滴,其浓度峰值约在直径80~100  $\mu\text{m}$ 处,同一般所取冰雪晶的分界直径300  $\mu\text{m}$ 相差不大,而云滴浓度峰值约在直径10  $\mu\text{m}$ 处,同一般所取云雨滴分界直径200  $\mu\text{m}$ 相差很大,所以将冰雪晶作为统一的相态来处理是可行的.

### 1.2 模式方程组

参考胡志晋等<sup>[4]</sup>的层状云模式建立下列方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_v}{\partial t} &= -u \frac{\partial Q_v}{\partial x} - v \frac{\partial Q_v}{\partial y} - w \frac{\partial Q_v}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial Q_v}{\partial z} - S_{vc} - S_{vp} - P_{vp} \\ \frac{\partial Q_c}{\partial t} &= -u \frac{\partial Q_c}{\partial x} - v \frac{\partial Q_c}{\partial y} - w \frac{\partial Q_c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial Q_c}{\partial z} + S_{vc} - A_{cp} - P_{cp} - C_{cp} \\ \frac{\partial Q_p}{\partial t} &= -u \frac{\partial Q_p}{\partial x} - v \frac{\partial Q_p}{\partial y} - w \frac{\partial Q_p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial Q_p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho V_p Q_p}{\partial z} + \\ &S_{vp} + P_{vp} + P_{cp} + C_{cp} + A_{cp} \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $S_{vc}$  为云滴凝结蒸发率,  $S_{vp}$  为降水蒸发率,  $P_{vp}$  为冰晶核化率,  $P_{cp}$  为冰晶繁生率,  $C_{cp}$  为降水碰并云水速率,  $A_{cp}$  为云降水转化率.文中除解析式外列有可直接编程的含常参数的方程式.

模式假定降水粒子的尺度分布为

$$N(D) = N_0 \cdot \exp(-\lambda D) \quad (2)$$

单个粒子质量为

$$m(D) = A_m \cdot D^b \quad (3)$$

单个粒子落速为

$$V(D) = A_v \cdot D^{b_v} \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{F_v} \quad (4)$$

暖区降水粒子为雨滴,据观测和实验,  $N_0 = N_{0r} = 0.8 \times 10^7 (\text{m}^{-4})$ ,  $A_m = A_{mr} = \frac{\pi \rho_w}{6} (\text{kg}/\text{m}^3)$ ,  $b_m = b_{mr} = 3$ ,  $A_v = A_{vr} = 836 (\text{m}^{0.2}/\text{s})$ ,  $b_v = b_{vr} = 0.8$ ,  $\rho_w = 1000 (\text{kg}/\text{m}^3)$ ,  $F_v = 0.286$ .

冷区降水粒子为冰雪晶,  $N_0 = N_{0i} = 10^8 (\text{m}^{-4})$ ,  $A_m = A_{mi} = 0.01 (\text{kg}/\text{m}^2)$ ,  $b_m = b_{mi} = 2$ ,

$$A_v = A_w = 3.86(\text{m}^{0.67}/\text{s}), b_v = b_w = 0.33.$$

降水总体比质量为

$$Q_p = \frac{1}{\rho} \int_0^{\infty} N(D) A_m \cdot D^b \cdot dD = \Gamma(b_m + 1) N_0 A_m \lambda^{-(b_m+1)} \rho^{-1} \quad (5)$$

降水总体落速为

$$V_p = \frac{\int_0^{\infty} N(D) A_m A_v D^{(b_m+b_v)} dD}{\rho} = \frac{\Gamma(b_m + b_v + 1) A_v (\frac{p_0}{p})^{F_v}}{\Gamma(b_m + 1) \lambda^{b_v}} \quad (6)$$

暖区：

$$V_p = RVR \cdot (\rho \cdot Q_p)^{0.2} \cdot F_{pv}$$

$$\text{式中, } RVR = 2.97 \cdot A_{vR} / (\pi \cdot \rho_w \cdot N_{0r})^{0.2} = 20.67(\text{m}^{0.6} \text{s}^{-1} \text{kg}^{-0.2}), F_{pv} = (\frac{p_0}{p})^{F_v}.$$

冷区：

$$V_p = R_{vi} \cdot (\rho \cdot Q_p)^{0.111} \cdot F_{pv}$$

$$\text{式中, } R_{vi} = 1.384 \cdot A_{vi} / (2 \cdot N_{0i} \cdot A_{mi})^{0.111} = 1.066(\text{m}^{1.333} \text{s}^{-1} \text{kg}^{-0.111}).$$

(a) 降水碰并云水  $C_{cp}$

$$\text{暖区: } C_{cp} = R_{crr} \cdot (\rho \cdot Q_p)^{0.95} \cdot F_{pv} \cdot Q_c \quad (7)$$

$$\text{式中, } R_{crr} = \frac{\Gamma(3.8)}{4} \cdot (\rho_w \cdot \pi \cdot N_{0r})^{0.05} \cdot A_{vR} \cdot E_{cr} \cdot \rho_w^{-1} = 2.593(\text{kg}^{-0.95} \text{m}^{2.85} \text{s}^{-1}), E_{cr} = 0.8 \text{ 为雨滴对云滴的碰并系数.}$$

$$\text{冷区: } C_{cp} = R_{cvi} \cdot (\rho \cdot Q_p)^{1.11} \cdot F_{pv} \cdot \exp(-B_{cvi}) \cdot (1 + \sum_{n=1}^5 \frac{B_{cvi}^n}{n}) \cdot Q_c \quad (8)$$

$$\text{式中, } R_{cvi} = \Gamma(3.34) / 4 \cdot \pi \cdot A_{vi} \cdot E_{ci} \cdot (2A_{vi})^{-1.11} \cdot N_{0i}^{-0.11} = 49.84(\text{kg}^{-1.11} \text{m}^{3.33} \text{s}^{-1}), B_{cvi} = A_{cvi} \cdot Q_c^{-0.333}, A_{cvi} = A_{pci} \cdot D_{cvi} / D_{pci} = (10 \cdot \rho_w \cdot \pi \cdot N_c)^{0.333} \cdot D_{cvi} = 0.3137, A_{pci} = (10 \cdot \rho_w \cdot \pi \cdot N_c)^{0.333} \cdot D_{pci} = 0.502, D_{cvi} = 1.5 \times 10^{-5}(\text{m}), \text{为云滴被冰晶碰并最小直径; } D_{pci} = 2.4 \times 10^{-5}(\text{m}), \text{为云滴被碰并产生次生冰晶的最小直径; } N_c = 3 \times 10^8(\text{kg}^{-1}), \text{为云滴数浓度; } E_{ci} = 0.6, \text{为冰晶碰并大云滴的平均碰并系数.}$$

(b) 云雨转化  $A_{cp}$  在暖区和冷区, 云雨转化

$$A_{cp} = F_{ACR} \cdot (Q_c - Q_{CTH} / \rho) \quad Q_c > Q_{CTH} / \rho \quad (9)$$

$$A_{cp} = 0 \quad Q_c \leq Q_{CTH} / \rho \quad (10)$$

式中  $Q_{CTH}$  为云雨转化阈值, 层状云取  $0.0005(\text{kg}/\text{m}^3)$ ; 云雨转换系数  $F_{ACR} = 0.001(\text{s}^{-1})$ .

(c) 冰晶繁生率  $P_{cp}$

$$\text{冷区: } P_{cp} = R_{pci} \exp(-B_{pci}) (1 + B_{pci} + \frac{B_{pci}^2}{2}) \cdot F_{pci} \cdot C_{cp} / Q_c \quad (11)$$

$$R_{pci} = \frac{1}{250} N_c \cdot Q_{cio} = 1.2 \times 10^{-6}, Q_{cio} = 10^{-12}(\text{kg}), \text{为繁生冰晶单个质量, } B_{pci} = A_{pci} / Q_c^{0.333}.$$

$$F_{pci} = \begin{cases} 0 & TT > -3^\circ\text{C} \text{ 或 } TT < -9^\circ\text{C} \\ 1 - (TT + 5)^2 / 4 & -3^\circ\text{C} > TT > -5^\circ\text{C} \\ 1 - (TT + 5)^2 / 9 & -5^\circ\text{C} > TT > -9^\circ\text{C} \end{cases}$$

式中,  $TT = T - T_0, T_0 = 273.15(\text{K})$ .

(d) 冰晶核化  $P_{vp}$ 

$$P_{vp} = 0 \quad T \geq T_i \text{ 或 } \frac{dT}{dt} \geq 0 \text{ 或 } Q_v \leq Q_{si} \quad (12)$$

$$P_{vp} = -R_{pvi} \cdot \exp(B_{in} \cdot TT) \cdot \left(\frac{Q_v - Q_{si}}{Q_{sv} - Q_{si}}\right)^{F_{in}} \cdot \frac{dT}{dt}$$

式中  $R_{pvi} = N_{in} B_{in} Q_{v0}$ ,  $N_{in}$  和  $B_{in}$  为冰核活化率  $\frac{dN_i}{dT}$  的系数, 据北京观测:  $N_{in} = 6.33(\text{kg}^{-1})$ ,  $B_{in} = 0.342(\text{K}^{-1})$ .  $\frac{dN_i}{dT} = N_{in} \cdot \exp(-B_{in} \cdot TT)$ ,  $Q_{v0} = 10^{-13}(\text{kg})$ , 为初生冰晶的单个质量,  $F_{in} = 5$ ,  $R_{pvi} = 2.23 \times 10^{-13}(\text{K}^{-1})$ , 云中主导的湿绝热变温率为:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{L_v \cdot Q_{sv} + R_d T}{C_p + \frac{L_v^2 Q_{sv}}{R_d T^2}} \cdot \frac{1}{P} \frac{dP}{dt}$$

(e) 降水凝结蒸发  $S_{vp}$  在暖区不计凝结, 只考虑降水蒸发:

$$S_{vp} = R_{SVRA} \cdot F_{FD} \cdot [1 + R_{SVRB} \cdot (1 - 0.0014TT) \sqrt{\rho} \cdot (\rho Q_p)^{0.225}] \cdot [1 + R_{SVRC} \cdot Q_{sv} \cdot (0.95 - 0.0050TT)]^{-1} \cdot (Q_v - Q_{sv}) \cdot (\rho Q_p)^{0.5} \quad (13)$$

式中  $Q_{sv}$  和  $Q_{si}$  为相对水面和冰面的饱和比湿,  $R_{SVRA} = 2F_D \cdot \left(\frac{N_{or} \cdot \pi}{\rho_w}\right)^{0.5} = 0.001$ ,  $R_{SVRB} = 0.23 \cdot \Gamma(2.9) \cdot \sqrt{\frac{A_{vR}}{F_{mv}}} \cdot (N_{or} \cdot \rho_w \cdot \pi)^{0.225} = 13.54$ ,  $F_{mv}$  为空气粘滞系数;  $R_{SVRC} = \frac{L_v^2 \cdot \rho_0 \cdot F_D}{F_i \cdot R_v \cdot T_0^2} = 0.202$ ;  $F_{FD} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.94} \cdot \frac{p_0}{p}$ .

在冷区:  $S_{vp} = R_{SVIA} \cdot F_{FD} \cdot [1 + R_{SVIB} \cdot Q_{si} \cdot (1 - 0.0071 \cdot TT)]^{-1} \cdot (Q_v - Q_{si}) \cdot (\rho \cdot Q_p)^{0.667} \quad (14)$

式中,  $R_{SVIA} = 4 \cdot F_D \cdot F_i \cdot N_{or}^{0.333} / (2 \cdot A_{mi})^{0.667} = 0.780$ ,  $F_i$  为冰晶吹风系数, 取  $F_i = 1.4^{[5]}$ ;  $R_{SVIB} = \frac{L_v^2 \cdot \rho_0 \cdot F_D}{F_b \cdot R_v \cdot T_0^2} = R_{SVRC} \cdot \frac{L_v^2}{I_v^2} = 260.7$ ;  $F_b$  为空气导热系数.

(f) 云水凝结蒸发  $S_{vc}$ 

$$S_{vc} = \frac{(Q_v^* - Q_{sv}^*)}{[1 + R_{vc} \cdot (1 - 0.0054TT) \cdot Q_{sv}]} \quad (15)$$

式中,  $Q_v^*$  和  $Q_{sv}^*$  为除  $S_{vc}$  外其他各种过程都已经计算后得出的  $Q_v$  和  $Q_{sv}$  的预报量, 其中  $Q_{sv}^*$  是  $T^*$  的函数,  $R_{vc} = 180.8$ .

(g) 降水粒子下落、垂直平流和融化、冻结 降水粒子垂直平流和下落为

$$-W \frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho V_p Q_p}{\partial z} \quad (16)$$

采用迎风格式得:

$$-W(k+m) \cdot Q_p(k+m)/DZ + \frac{1}{\rho} \cdot \rho(k+1)V_p(k+1)Q_p(k+1)/DZ + W(k+m) \cdot Q_p(k+m-1)/DZ - \frac{1}{\rho} \cdot \rho(k)V_p(k)Q_p(k)/DZ$$

式中, 当  $W < 0$  时,  $m=1$ ; 当  $W > 0$  时,  $m=0$ ;  $DZ$  为垂直格距. 当  $T(k) > T_0$  时, 而且

$T(k+1) < T_0$  时, 则降水粒子融化率为

$$Gir(k) = -m \cdot W(k+m) \cdot Q_p(k+m)/DZ + \frac{1}{\rho} \rho(k+1) \cdot V_p(k+1) \cdot Q_p(k+1)/DZ \quad (17)$$

降水粒子冻结率为

$$Gri(k+1) = -(m-1) \cdot W(k+m) \cdot Q_p(k+m)/DZ \quad (18)$$

在静力平衡模式中采用  $p-\sigma$  坐标系,  $\frac{\partial p}{\partial Z} = -\rho g$  转化为  $\delta Z = -\frac{p^*}{\rho g} \delta \sigma$ , 则降水粒子垂

直平流和下落项为 
$$-\frac{\partial Q_p \dot{\sigma}}{\partial \sigma} - \frac{g}{p^*} \frac{\partial \rho V_p Q_p}{\partial \sigma} \quad (19)$$

差分格式为

$$-Q_p(k + \frac{1}{2}) \cdot \dot{\sigma}(k + \frac{1}{2})/D\sigma(k) - \frac{g}{p^*} \rho(k+1) V_p(k+1) Q_p(k+1)/D\sigma(k) + Q_p(k - \frac{1}{2}) \cdot \dot{\sigma}(k - \frac{1}{2})/D\sigma(k) + \frac{g}{p^*} \rho(k) V_p(k) Q_p(k)/D\sigma(k)$$

当  $T(k) > T_0$  且  $T(k-1) < T_0$ , 则降水粒子融化率为

$$Gir(k) = m_1 Q_p(k - \frac{1}{2}) \cdot \dot{\sigma}(k - \frac{1}{2})/D\sigma(k) + \frac{g}{p^*} \rho(k-1) \cdot k_p(k-1) Q_p(k-1)/D\sigma(k) \quad (20)$$

式中, 当  $\dot{\sigma}(k - \frac{1}{2}) \leq 0$  时,  $m_1 = 0$ ; 当  $\dot{\sigma}(k - \frac{1}{2}) > 0$  时,  $m_1 = 1$ .  $D\sigma(k)$  为  $k$  层  $\sigma$  厚度.

降水粒子的冻结率为

$$Gri(k-1) = m_2 Q_p(k - \frac{1}{2}) \cdot \dot{\sigma}(k - \frac{1}{2})/D\sigma(k) \quad (21)$$

式中, 当  $\dot{\sigma}(k - \frac{1}{2}) \geq 0$  时,  $m_2 = 0$ ; 当  $\dot{\sigma}(k - \frac{1}{2}) < 0$  时,  $m_2 = 1$ .

(h) 云降水过程对温度的作用

暖区: 
$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_c = \frac{L_v}{C_p} (S_{vp} + S_{vc}) - \frac{L_f}{C_p} Gir \quad (22)$$

冷区: 
$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_c = \frac{L_f}{C_p} S_{vp} + \frac{L_v}{C_p} S_{vc} + \frac{L_f}{C_p} (Gri + C_{cp}) \quad (23)$$

## 2 计算格式

由于降水粒子落速较大,  $S_{vc}$ 、 $S_{vp}$  的温度反馈较强, 故采用时间分裂法计算, 即对平流湍流、 $P_{vp}$ 、 $A_{cp}$ 、 $P_{cp}$  用一般步长 ( $\Delta t$ ) 计算其变化速率; 对  $C_{cp}$ 、 $S_{vc}$ 、 $S_{vp}$ 、 $\frac{\partial \rho V Q_p}{\partial Z}$  采用小步长 ( $\Delta t_s$ ),  $\Delta t = 3\Delta t_s$ , 以保证其精度和稳定性. 一般步长用蛙跃格式, 小步长用前差.

## 3 在层状云模式中的试用

将简化的微物理方案置于刘公波的层状云模式进行计算, 为了与详细微物理的显式

方案进行对比,共同模拟了1991年5月24日08时~25日08时的一次锋面过程.详细微物理过程中引入8个微物理特征——水汽、云水、雨水、冰晶、雪晶的比质量( $Q_v, Q_c, Q_r, Q_i, Q_s$ )和雨水、冰晶、雪晶的数浓度( $N_r, N_i, N_s$ ),考虑12种微物理过程——冰核活化产生初始冰晶 $P_w$ 、冰晶凝华(蒸发) $S_w$ 、云水凝结(蒸发) $S_{wc}$ 、雪晶凝华(蒸发) $S_{ws}$ 、雨滴蒸发 $S_{rw}$ 、冰晶自动转化为雪晶 $A_{wi}$ 、云水自动转化为雨水 $A_{wc}$ 、冰晶溶化为云水 $M_{wi}$ 、雪晶溶化为云水和雨水 $M_{ws}, M_{wr}$ 、雪晶碰并云水 $C_{wi}$ 、雨滴碰并云水 $C_{wc}$ .

5月24日08时地面图(图略)上与锢囚锋云系及低涡云团对应的河套地区、四川盆地和江汉平原有大范围雨区,雨区随系统东移.5月24日08时~25日08时的降水分布(图1a)在河套地区、华北大部、辽东、汉水流域、淮河流域、渭河流域及山东省全境.太行山及河套东部有一降水中心(太原49mm,保定45mm),汉水也有一降水中心,黄河以南、淮河以北的许昌、亳县有一强降水中心.

利用刘公波的详细混合云、暖云和本文的简化混合云3种方案对该例进行了模拟对比.3种方案计算的速度场和温度场相当接近说明动力进程是主导的,图1给出24日08时~25日08时的24h雨量的实况(图1a)以及详细混合云(图1b)、本文的简化混合云(图1c)和暖云(图1d)方案的结果.3种方案均模拟了降水的大致位置,但未能得出3个分裂的雨量中心,这与模式的动力学模拟能力和初始化较弱有关.相对而言,简化混合云模式得出的雨区范围较大、雨强较强,但与实况仍有差距.它得出的云场水平分布变化比详细混合云模式大,不太连续.3种方案在486微机上所用的时间分别为136min(图1b),108min(图1c)和96min(图1d).简化方案的微物理子程序比详细方案减少计算时间28min,相当于全部计算时间的20%.由于云物理预报量从8个减少到2个,占用的计算机内存也大为减少.

#### 4 在MM4模式中的试用

上述简化显式混合云方案编成的子程序可以用于任一中尺度或区域大气数值模式.我们将其放在MM4中尺度大气模式中进行计算,并和MM4原有的显式暖云子程序和对流参数化子程序进行了对比计算.计算个例为1993年8月4日08时的一次天气过程,该过程造成华中、华东地区的大范围降水.图2给出1993年8月4日08时~5日08时实测24h降水量和MM4暖云显式方案、对流参数化方案、简化混合云方案的计算结果.实况的最大降水中心为邢台170mm、临沂141.5mm.由图2可以看出简化混合云方案与暖云方案的降水分布相似,与实况也比较接近;对流参数化方案的降水范围偏大,降水区域与实况也有出入.3个方案得出的强降水中心位置都偏于实况的西北.中心降水强度差异较大:简化混合云方案为182.9mm,与实况170.0mm最接近;暖云显式方案为220.4mm,比实况偏大;对流参数化方案最大,为410.3mm,比实况大得多.就降水强度和分布而言,简化混合云方案在本例计算中显示了一定的优点,所用计算机资源不多而模拟略好.

综上所述,我们建立的适用于区域或中尺度大气数值预报模式的简化混合云显式方案,经初步试验表明,它可适用于不同的动力学模式,具有一定的模拟能力,所需计算

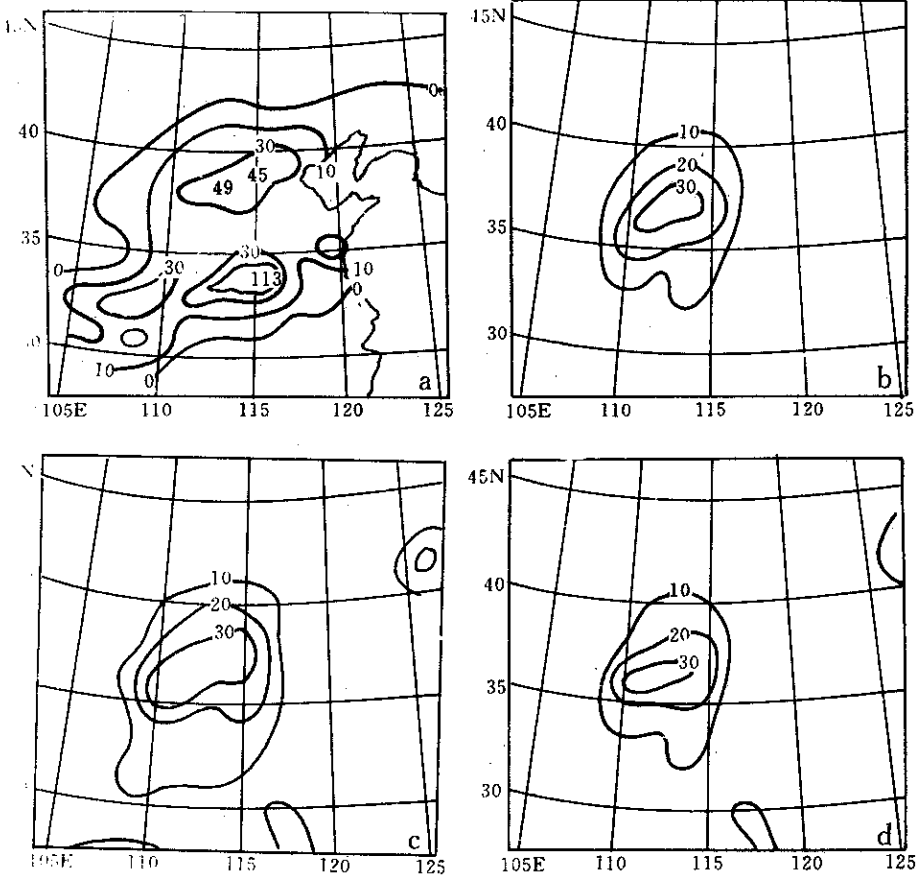


图 1 1991 年 5 月 24 日 08 时~25 日 08 时 24 h 降水量(单位: mm) (a) 降水实况 (b) 详细混合云方案(max: 34 mm) (c) 简化混合云方案(max: 41 mm) (d) 详细暖云方案(max: 31.7 mm)

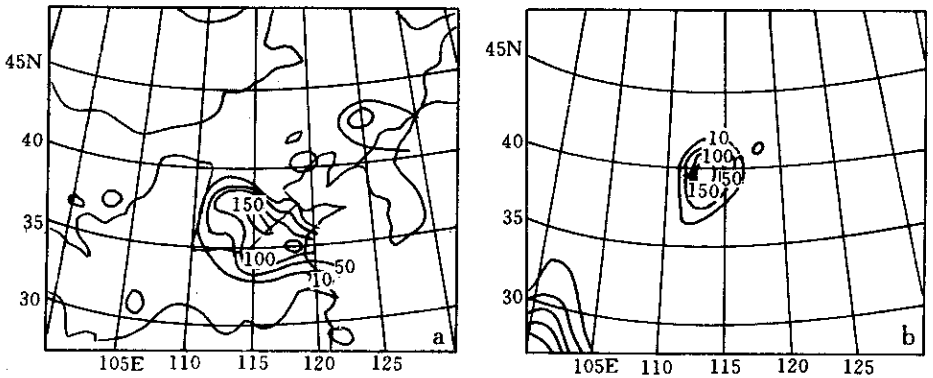
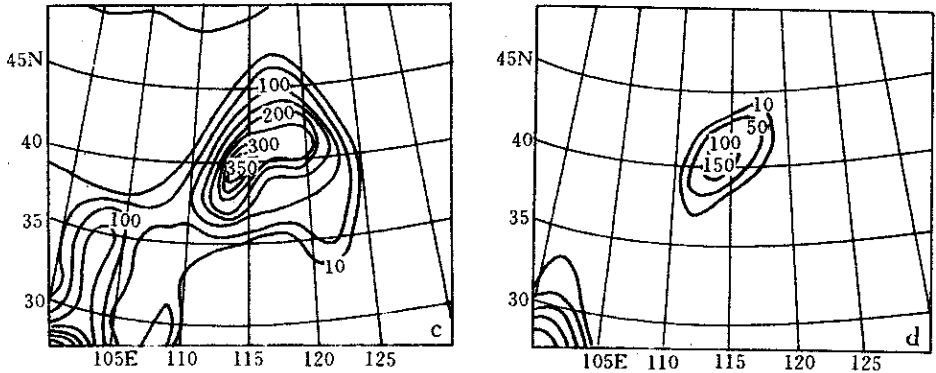


图 2 1993 年 8 月 4 日 08 时~5 日 08 时 24 h 降水量(单位: mm) (a) 降水实况 (b) 暖云显式方案(max: 220.4 mm) (c) 对流参数化方案(max: 410.3 mm) (d) 简化混合云方案(max: 182.9 mm)



(续图 2)

机资源较少, 只增加 2 个变量和少量机时, 对发展中尺度天气预报模式的云降水显式方案和综合方案有一定应用前景。

### 参考文献

- 1 Kuo Y H, Simon L N. Prediction of nine explosive cyclones over the western Atlantic Ocean with a regional model. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, 118(1): 3~25.
- 2 Zhang D L. The effect of parameterized ice micro-physics on the simulation of vortex circulation with a mesoscale hydrostatic model. *Tellus*, 1989, 41 A: 132~147.
- 3 刘公波, 胡志晋, 游来光. 混合相层状云系模式和中尺度低涡云系的实例模拟. *气象学报*, 1994, 52(1): 77~86.
- 4 胡志晋, 严采蒙. 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.
- 5 Pruppacher H R, Klett J D. *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Reidel D. Publishing Company, 1978. 452~453.

## A SIMPLIFIED EXPLICIT SCHEME OF PHASE-MIXED CLOUD AND PRECIPITATION

Hu Zhijin Lou Xiaofeng Bao Shaowu Wang Xiaobin  
(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

A simplified explicit scheme of phase mixed cloud and precipitation for weather forecast model is described, in which two variables, cloud water content and precipitation content (rain in warm region and ice in cold region) are calculated, respectively, and 7 kinds of microphysical processes are considered. The detailed system of equations is given, which can be used as a subroutine for macro and mesoscale weather model. The case studies of the new explicit scheme are made for comparison with warm cloud scheme and comprehensive phase mixed cloud scheme.

**Key words:** Phase-mixed cloud and precipitation    Explicit scheme    Mesoscale model