第 56 卷 第 6 期
1998 年 12 月

气 象 学 报
ACTA METEOROLOGICA SINICA

Vol. 56 No. 6
Dec., 1998

三维冰雹云催化数值模式*

洪延超

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘 要

为了研究冰雹形成机制、催化防雹机制和通过数值试验获得冰雹云优化催化技术, 在以前工作的基础上, 发展了一个 3 维弹性冰雹云催化数值模式。模式考虑了冰雹云中详细的微物理过程, 各种粒子采用双变参数谱, 将云中水物质分成水汽、云水、雨水、冰晶、雪、霰、冻滴和雹 8 类, 可以预报粒子的比浓度和比含量, 尤其可以计算以霰或冻滴为胚胎的雹块的数量, 非常适合研究冰雹的形成机制。此外, 建立了催化剂 AgI 的守恒方程, 考虑了人工冰核的凝华核化及与云、雨滴接触的冻结核化过程, 并用地面降雹动能通量检验催化防雹效果, 因此, 也可以研究催化防雹机制和对雹云的催化技术。

关键词: 模式, 微物理过程参数化, 成核机制。

1 引 言

冰雹灾害是中国主要的气象灾害之一, 全国每年有 20 多个省、市、自治区开展人工防雹工作。从目前人工防雹的催化作业看, 催化技术的选择带有很大的盲目性, 有些地方甚至只凭经验, 至于催化云体什么部位、什么时间催化以及催化剂量多少合适, 还没有一套客观定量的标准。因此, 研究最佳人工防雹催化作业技术势在必行。

作为研究这个问题的第一步, 应该弄清楚冰雹形成的物理过程, 亦即形成机制。因此, 文中发展了一个 3 维弹性冰雹云催化模式, 该模式的优点是可以分别计算作为冰雹胚胎的冻滴和霰, 和以冻滴和霰为胚胎的雹块的数量, 并有催化功能。在另文① 中用此模式模拟研究了 1997 年 7 月 8 日在陕西省旬邑县出现的一块雹云, 研究了该地区冰雹形成的物理机制, 在此基础上对雹云进行催化数值试验, 研究催化防雹的物理机制, 希望获得一些指导人工防雹的信息。

2 冰雹云模式

冰雹云模式采用文献[1]中的动力学框架, 初始条件、边界条件、启动云发展的方法及数值计算技术与文献[1]相同。模式的微物理过程参数化采用双变参数谱, 既预报各种粒

* 初稿时间: 1997 年 12 月 20 日; 修改稿时间: 1998 年 6 月 26 日。
资助课题: 国家九五攻关项目 "农业气象灾害防御技术研究 '07 专题。

① 洪延超. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究。气象学报, 待发表。

子的比含量 Q, 也计算比浓度 N ,并设计了用 AgI 催化所发生的物理过程。模式控制方程如下:

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} + c_p\bar{\theta}_V\frac{\partial\pi}{\partial x} = D_u$$

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} + c_p\bar{\theta}_V\frac{\partial\pi}{\partial y} = D_v$$

$$\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t} + c_p\bar{\theta}_V\frac{\partial\pi}{\partial z} = g\left(\frac{\theta'}{\bar{\theta}} + 0.608Q_v' - Q_t\right) + D_w$$

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = D_\theta + S_\theta$$

$$\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial\overline{\rho V}_M M}{\partial Z} + D_M + S_M$$

其中, $M = [Q_x, N_x]$, 下标 $x = [v, c, r, i, s, g, f, h, a]$, 分别代表微物理过程中考虑的 8 种水 物质和催化剂。即将水物质分为 8 类: 水汽(Q_v)、云水(Q_c)、雨水(Q_r)、冰晶(Q_i)、雪(Q_s)、霰(Q_g)、冻滴(Q_f) 和冰雹(Q_h) , a 表示催化剂 AgI。不过 $v_c = v_a = 0$, N_a 不作预报量。D 和 S 分别代表次网格尺度混合项及微物理过程的源汇项。此外, 还有可压缩流体质量连续方程

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} + \rho\nabla\cdot\boldsymbol{V} = 0$$

无量纲气压 Π 的扰动量 π 的预报方程为

$$\frac{\mathrm{d}\pi}{\mathrm{d}t} + \frac{c^2}{c_p\overline{\rho\theta}_V^2}\frac{\partial\overline{\rho\theta}_V U_j}{\partial X_j} = -\frac{R_d}{c_V}\pi\frac{\partial U_j}{\partial X_j} + \frac{c^2}{c_p\theta_V^2}\frac{\mathrm{d}\theta_V}{\mathrm{d}t} + D_\pi$$

式中

$$c^2 = \frac{c_p}{c_V}R_dT_v = \frac{c_pR_d\pi\theta_V}{c_V}$$

$$\bar{c}^2 = \frac{c_pR_d\bar{\pi}\bar{\theta}_V}{c_V}$$

因此此模式的预报量有 20 个, 即 u, v, w, θ, π 及 Q_x 和 N_x, 可以细致地研究冰雹形成的微物理机制和催化防雹的物理机制。

3 微物理过程参数化

作者在文献[2] 中建立了一个积层混合云模式, 模式中考虑了云滴、雨滴、冰晶、雪、霰 5 种粒子, 微物理过程参数化采用双变参数谱, 预报粒子的比含水量及比浓度。在文中发展的 3 维模式中, 仍使用文献[2] 中的参数化公式, 所不同的是增加了冻滴和冰雹两种粒子。此外, 对霰的定义作了修改。一般的冷云或冰雹云数值模式中, 有的将霰雹作为同一类粒子[1] , 也有的将冻滴归于霰一类[2, 3] , 还有的将冻滴和雹作为同类粒子[4]。为了研究冰雹形成机制, 将文献[2] 中霰粒子中包含的冻滴分离出来作为一类粒子, 用 Q_f 和 N_f 表示其比含水量和比浓度, 建立其预报方程; 而霰只由冰晶和雪撞冻增长达到一定尺度转化产

生。这样就可以计算出冰雹胚胎中冻滴和霰的数量。冻滴的密度 $\rho_f = 0.9 \times 10^6\ g/m^3$, $c_D = 0.6$, 而对于霰 $c_D = 0.5$, 密度

$$\rho_g = \begin{cases} 0.12 \times 10^6\ g/m^3 & (\rho Q_g \le 0.5\ g/m^3) \\ 0.4 \times 10^6\ g/m^3 & (\rho Q_g > 0.5\ g/m^3) \end{cases}$$

冰雹是直径大于是 5 mm 的冰球, 它是由霰、冻滴转化产生的。即冰雹云微物理模式中考虑了云滴、雨滴、冰晶、雪、霰、冻滴和冰雹 7 种粒子, 各类粒子的尺度分布用 Gamma 函数表达, 即

$$N_x(D_x) = N_{ox} D_x^{\alpha_x} \exp(-\lambda_x D_x)$$

其中　$\alpha_s = \alpha_i = \alpha_g = \alpha_h = 0,\ \alpha_c = 5,\ \alpha_r = 2,\ \alpha_f = 1$

模式考虑了冰雹云中详细的微物理过程: 水汽凝结(VD_{vc}), 云滴和雨滴的蒸发(VD_{cv}, VD_{rv}); 冰晶、雪、霰、冻滴和雹的凝华(VD_{vi}, VD_{vs}, VD_{vg}, VD_{vf}, VD_{hv})、融化($ML_{ic(r)}$, ML_{sr}, ML_{gr}, ML_{fr}, ML_{hr})、融化蒸发(MVD_{iv}, MVD_{sv}, MVD_{gv}, MVD_{fv}, MVD_{hv}), 及它们和雨滴对云滴的碰并(CL_{ci}, CL_{cs}, CL_{cg}, CL_{cf}, CL_{ch}, CL_{cr}); 冰晶、雪、霰、冻滴和雹对雨滴的碰并(CL_{ri}, CL_{rs}, CL_{rg}, CL_{rf}, CL_{rh}); 冰晶—冰晶、雪—雪聚合(CL_{ii}, CL_{ss}); 雨、雪、霰、冻滴和雹对冰晶的碰并(CL_{ir}, CL_{is}, CL_{ig}, CL_{if}, CL_{ih}); 雨、霰、冻滴和雹对雪碰并(CL_{sr}, CL_{sg}, CL_{sf}, CL_{sh}); 冻滴和雹对霰的碰并(CL_{gf}, CL_{gh}) 以及雹对冻滴的碰并(CL_{fh}); 云滴、冰晶、雪、霰和冻滴的自动转化(CN_{cr}, CN_{is}, CN_{ig}, CN_{sg}, CN_{gh}, CN_{fh}); 冰晶的核化和繁生(NU_{vi}, P_{ci}), 雨滴的核化(NU_{rf}); 冰雹干湿增长过程(CL_{dry}, CL_{wet})。在过程符号前加 N 表示该过程比浓度变化率。代表各类过程符号的第 1 个下标表示消耗项; 有两个下标时, 第 2 个下标表示作用项或生成项, 如 CL_{cr}, 云水 c 是消耗项, 它被雨滴碰并转化成雨水, 这里 r 代表生成项; 而 CL_{ri} 的 r 表示消耗项, 但 i 是作用项, 而不是生成项, 这种情况下, 有时用第 3 个下标表示生成项, 如 CL_{chr}, 即说明消耗的云水转换成雨水。关于云滴、雨滴、冰晶、雪和霰对应的微物理过程的参数化公式见文献[2]。

3.1　冻滴的微物理过程

对于冻滴, 有

$$\rho Q_f = \int_0^\infty N(D)\, m(D)\, dD = \pi N_{of} \rho_f \lambda_f^{-4}$$

$$\rho N_f = \int_0^\infty N(D)\, dD = N_{of} \lambda_f^{-1}$$

$$N_{of} = \rho_f N_f \lambda_f, \qquad \lambda_f = (\pi \rho_f N_f / Q_f)^{1/3}$$

又设单个冻滴下降末速度　$v_f = (4\rho_f G / 3c_D)^{1/2} (D/\rho)^{1/2} = A_{vf} (D/\rho)^{1/2}$

其中　$A_{vf} = (4\rho_f G / 3c_D)^{1/2}$

则其群体质量加权末速度 $\overline{V}_f = \dfrac{1}{\rho Q_f} \displaystyle\int_0^\infty N(D)\, m(D)\, v(D)\, dD = 1.94 A_{vf} (\rho \lambda_f)^{-1/2}$

有关冻滴的微物理过程有, 冻滴收集其他粒子的碰并过程 CL_{xf}, 其中下标 x = [c, r, i, s, g]; 冻滴的融化过程 ML_{fr}、凝华蒸发过程 VD_{vf}, 融化蒸发过程 MVD_{fv}, 除 CL_{gf} 外, 它们的表达式形式上与文献[2] 中霰相同的微物理过程完全相同。

(1) $$VD_{vf} = 2\pi(S_i - 1)N_{of}A_fB_f/(\rho\lambda_f^2)$$

$$A_f = 1 + 0.370(A_{vf}/\gamma)^{1/2}\rho^{-1/4}\lambda_f^{-3/4}$$

$$B_f = 1.0/[\frac{L_s^2}{KR_vT^2} + \frac{R_vT}{D_fe_{si}(T)}]$$

$$NVD_{vf} = -VD_{vf}N_f/Q_f \qquad (VD_{vf} < 0)$$

(2) $$CL_{cf} = \frac{\pi}{4}\Gamma(3.5)A_{vf}E_{cf}N_{of}Q_c\rho^{1/2}\lambda_f^{-3.5} \qquad (E_{cf} = 1.0)$$

(3) 令

$$x_1 = \pi|\overline{V}_f - \overline{V}_r|E_{rf}N_{or}N_{df}\lambda_r^{-6}\lambda_f^{-1}\rho^{-1} \qquad (E_{rf} = 0.8)$$

$$CL_{rf} = 10\pi\rho_L x_1(21\lambda_r^{-2} + 6\lambda_r^{-1}\lambda_f^{-1} + \lambda_f^{-2})$$

$$NCL_{rf} = \lambda_r^3 x_1(\lambda_r^{-2} + 3\lambda_r^{-1}\lambda_f^{-1} + 6\lambda_f^{-2})$$

(4) 令

$$x_2 = \pi|\overline{V}_f - \overline{V}_i|E_{if}N_{oi}N_{of}\lambda_i^{-1}\lambda_f^{-4}\rho^{-1} \qquad (E_{if} = E_{ig})$$

$$CL_{if} = 30x_2(10\lambda_i^{-2} + 4\lambda_i^{-1}\lambda_f^{-1} + \lambda_f^{-2})$$

$$NCL_{if} = 0.5x_2\lambda_i^2(3\lambda_i^{-2} + 2\lambda_i^{-1}\lambda_f^{-1} + \lambda_f^{-2})$$

(5) 令

$$x_3 = \pi|\overline{V}_f - \overline{V}_s|E_{sf}N_{os}N_{of}\lambda_s^{-3}\lambda_f^{-1}\rho^{-1} \qquad (E_{sf} = E_{sg})$$

$$CL_{sf} = 30x_3(6\lambda_s^{-2} + 3\lambda_s^{-1}\lambda_f^{-1} + \lambda_f^{-2})$$

$$NCL_{sf} = 0.5x_3\lambda_s^2(\lambda_s^{-2} + \lambda_f^{-1}\lambda_s^{-1} + \lambda_f^{-2})$$

(6) 令

$$x_4 = \frac{\pi}{\rho}|V_f - V_g|E_{gf}N_{of}N_{og} \qquad (E_{gf} = E_{sf})$$

$$CL_{gf} = \frac{\pi}{2}\rho_g\lambda_g^{-4}\lambda_f^{-1}x_4(\lambda_f^{-2} + 2\lambda_f^{-1}\lambda_g^{-1} + 10\lambda_g^{-2})$$

$$NCL_{gf} = 0.5x_4\lambda_f^{-1}\lambda_g^{-1}(\lambda_f^{-2} + \lambda_f^{-1}\lambda_g^{-1} + \lambda_g^{-2})$$

(7) $$ML_{fr} = \frac{1}{L_f}\{2\pi N_{of}f_jA_f\lambda_f^{-2}\rho^{-1} + c_w(T - T_0)(CL_{cf} + CL_{rf})\}$$

$$NML_{fr} = ML_{fr}N_f/Q_f$$

式中 $f_j = K(T - T_0) + L_vD_f\rho(Q_v - Q_{vs})$

(8) $$MVD_{fv} = 2\pi(1 - S)A_fN_{df}C_x\rho^{-1}\lambda_f^{-2}$$

$$C_x = 1.0/[\frac{L_v^2}{KR_v^2T} + \frac{R_vT}{D_fe_s(T)}] \qquad (令\ T = T_0)$$

(9) 雨滴和冰晶、雪花在过冷区碰并引起的雨滴冻结形成了冻滴而不是霰,因此文献[2]中的 CL_{ri}, CL_{rs}, NCL_{ri} 和 NCL_{rs} 在过冷区是雨滴的汇项、冻滴的源项, CL_{ir}, CL_{sr} 也是冻

滴的源项。

(10) 冻滴另一源项是雨滴的核化, NU_{rf}, 形式上与文献[2] 中 NU_{rg} 相同, 即

$$NU_{rf} = \frac{1}{\rho}\int_0^{\infty} N_r(D_r) \cdot \frac{\pi}{6} B D_r^3 \mathrm{d}D_r = \Gamma(9)\pi^2 \rho_L B N_{or} C_m / (36\rho\lambda_r^9)$$

式中 $C_m = \exp[\beta'(T_o - T)] - 1, B = 10^{-2}, \beta' = 0.66$

3.2　霰的微物理过程

霰粒子通过冰晶、雪的转化 (CN_{ig}, CN_{sg}) 产生, 靠收集云水(CL_{cg})、雨水(CL_{rg})、冰晶(CL_{ig}) 和雪(CL_{sg}) 增长, 还有其融化(ML_{gr}), 凝结蒸发(VD_{vg}) 以及融化蒸发(MVD_{gv}) 过程, 这些参数化公式已在文献[2] 中给出。这里还要考虑霰被冻滴和冰雹收集的过程(CL_{gf} 和 CL_{gh}) 。

3.3　冰雹的微物理过程参数化

冰雹为截断谱, 即

$$N_h(D_h) = N_{oh} e^{-\lambda_h D_h} \qquad (D_h \geq 5 \times 10^{-3}\mathrm{m})$$

在下面公式推导中用到截断谱积分

$$\int_{D_{*h}}^{\infty} D^{n.x} e^{-\lambda D} \mathrm{d}D = \Gamma[(n+1).x]\lambda^{-(n+1).x} e^{-\beta}\left(1 + 0.x\beta + \sum_{i=1.x}^{n.x} \beta^i / i!\right)$$

式中 n 代表小数整数部分数字, x 为小数部分数字。

$$\rho N_h = \int_{D_{*h}}^{\infty} N_{oh} e^{-\lambda_h D_h} \mathrm{d}D_h = N_{oh}\lambda_h^{-1} e^{-\lambda_h D_{*h}} \qquad (D_{*h} = 5 \times 10^{-3}\mathrm{m})$$

$$\rho Q_h = \int_{D_{*h}}^{\infty} N_{oh} e^{-\lambda_h D_h} \frac{\pi}{6}\rho_h D_h^3 \mathrm{d}D_h$$

$$= \pi\rho\rho_h N_h \lambda_h^{-3}\left(1 + \sum_{i=1}^{3} \beta^i / i!\right) \qquad (\beta = \lambda_h D_{*h})$$

$\therefore\quad N_{oh} = \rho N_h \lambda_h e^{\lambda_h D_{*h}}$, 由此求出,

$$\lambda_h^{-1} = \sqrt[3]{q + \sqrt{q^2 + p^3}} - \sqrt[3]{\sqrt{q^2 + p^3} - q} - \frac{1}{3}D_{*h}$$

式中　$q = \frac{1}{2}\left(\frac{Q_h}{\pi\rho_h N_h} - \frac{2}{27}D_{*h}^3\right), \qquad p = \frac{1}{18}D_{*h}^3$

单个冰雹下降末速度为　$v_h = \left(\frac{4G\rho_h D_h}{3c_D\rho}\right)^{1/2} = A_{vh}(D_h/\rho)^{1/2}$

取 $\rho_h = 0.9 \times 10^6 \mathrm{g/m^3}, c_D = 0.6, G = 9.8$, 则 $A_{vh} = 4427.19\mathrm{g}^{1/2}\mathrm{m}^{-1}\mathrm{s}^{-1}$, 冰雹群体质量加权末速度

$$\overline{V}_h = \int_{D_{*h}}^{\infty} N_{oh} e^{-\lambda_h D_h} \frac{\pi}{6}\rho_h D_h^3 v_h(D_h)\mathrm{d}D_h / (\rho Q_h)$$

$$= \frac{A_{vh}\Gamma(4.5)}{(\rho\lambda_h)^{0.5}\Gamma(4)} \frac{1+0.5\beta+\sum_{i=1.5}^{3.5}\beta^i/i!}{1+\sum_{i=1}^{3}\beta^i/i!}$$

(1) 冰雹与各种粒子的碰并过程

$$CL_{xh} = \frac{1}{\rho}\int_0^{\infty}\int_{D_{*h}}^{\infty}\frac{\pi}{4}(D_h+D_x)^2\left|\bar{V}_h-\bar{V}_x\right|E_{xh}m_xN_x(D_x)N_h(D_h)\,dD_x\,dD_h$$

$$NCL_{xh} = \frac{1}{\rho}\int_0^{\infty}\int_{D_{*h}}^{\infty}\frac{\pi}{4}(D_h+D_x)^2\left|\bar{V}_h-\bar{V}_x\right|E_{xh}N_h(D_h)N_x(D_x)\,dD_x\,dD_h$$

式中下标 $x=[c,i,r,s,g,f]$，m 为单个粒子质量，不过不计算 NCL_{ch}。$E_{ch}=E_{rh}=1.0$；当冰雹干增长时 $E_{xh}=0.1$，湿增长时 $E_{xh}=1.0(x=[i,s,f,g])$。当 $T\geq T_0$ 时，CL_{ch} 转化成雨水，从雹上溅落的雨滴质量 $h_{ro}=1.47\times10^{-3}$g，溅落的雨滴浓度 $NCL_{chr}=CL_{ch}/h_{ro}$；CL_{rh} 不作为源汇项，但影响冰雹之融化且将收集的雨水溅散成质量为 h_{ro} 的雨滴。可利用上面给出的截断谱积分公式和 CL_{xn}，CNL_{xh}，两个积分式计算 CL_{ch}，CL_{ih}，CL_{sh}，CL_{gh}，CL_{fh}，CL_{rh} 以及 NCL_{ih}，NCL_{sh}，NCL_{gh}，NCL_{fh}，NCL_{rh}。

(2) 冰雹湿增长过程

通过雹块湿增长热平衡方程可以解出一个雹块对云内过冷水和各种冰粒子的湿收集率为

$$\left(\frac{dm_h}{dt}\right)_{wet} = \frac{2\pi D_h f_h(R_e)\cdot F_h}{C_x} + \left(\frac{dm_h}{dt}\right)_i'\left[1-\frac{C_i(T-T_0)}{C_x}\right]$$

式中

$$F_h = \bar{\rho}L_vD_f(Q_{vs}-Q_v)+K(T_0-T)$$

$$C_x = L_f + c_w(T-T_0)$$

$$f_h(R_e) = 1.0+0.29R_e^{1/2}$$

$\left(\frac{dm_h}{dt}\right)_i'$ 为雹块对各种冰粒子的湿收集率，于是冰雹湿增长极限值为

$$CL_{wet} = \frac{1}{\rho}\int_{D_{*h}}^{\infty}\left(\frac{dm_h}{dt}\right)_{wet}N_{oh}e^{-\lambda_hD_h}dD_h$$

$$\because \quad \int_{D_{*h}}^{\infty}D_hf_h(R_e)N_{oh}e^{-\lambda_hD_h}dD = N_{oh}\lambda_h^{-2}A_h'e^{-\beta}$$

式中 $A_h' = (1+\beta)+0.29\lambda_h^{-0.75}\left(\frac{A_{vh}}{\gamma}\right)^{1/2}\left(\frac{1}{\rho}\right)^{1/4}\cdot\Gamma(2.75)(1+0.75\beta)+\beta^{1.75}$

$$\therefore \quad CL_{wet} = 2\pi F_hN_h\lambda_h^{-1}A_h'/C_x + CL_{xh}'\left[1-\frac{C_i(T-T_0)}{C_x}\right]$$

式中 $CL_{xh}'(x=[i,s,f,g])$ 为湿收集率，即计算中取 $E_{xh}=1.0$。

(3) 增长方式确定 $(T<T_0)$

令冰雹干增长收集率

$$CL_{dry} = CL_{ch} + CL_{rh} + CL_{ih} + CL_{sh} + CL_{fh} + CL_{gh}$$

当 $CL_{wet} > CL_{dry}$ 时冰雹干增长, 此时 $E_{xh} = 0.1(x = [i, s, g, f])$, 否则冰雹湿增长 $CL_{xh} = CL'_{xh}$, 假定湿增长时未冻结的液水脱落为雨水, 则冰雹碰冻过冷雨水速率为

$$R_{rh} = (CL_{wet} - CL'_{ih} - CL'_{sh} - CL'_{gh} - CL'_{fh}) - CL'_{ch}$$

当 $R_{rh} > 0$ 时, 表明有部分雨水被收集并冻结, 此时

$$CL_{rh} = R_{rh}$$

$$NCL_{rh} = R_{rh} \cdot N_r / Q_r$$

当 $R_{rh} \leq 0$ 时, 表明没有雨水被收集, R_{rh} 代表多余的未冻结的云水, 它应脱落转化为雨水

$$CL_{chr} = -R_{rh}$$

$$NCL_{chr} = CL_{chr} / h_{ro}$$

$$CL_{chh} = CL_{ch} - CL_{chr}$$

(4) 冰雹融化

与文献[2] 中霰融化类似, 单个冰雹融化率

$$\left(\frac{dm_h}{dt}\right)_{ml} = \frac{1}{L_f}\left\{2\pi D f_j \cdot f_h(R_e) + \left[\left(\frac{dm_h}{dt}\right)_{ch} + \left(\frac{dm_h}{dt}\right)_{rh}\right] \cdot c_w(T - T_0)\right\}$$

式中 $f_j = K(T - T_0) + L_v D_f \rho(Q_v - Q_{vs})$

$$ML_{hr} = \frac{1}{\rho}\int_{D_{*h}}^{\infty} N_{oh} e^{-\lambda_h D_h}\left(\frac{dm_h}{dt}\right)_{ml} dD_h$$

$$= 2\pi N_h f_j A'_h / (\lambda_h L_f) + (CL_{ch} + CL_{rh}) c_w (T - T_0) / L_f$$

式中 A'_h 与 CL_{wet} 中的相同

$$NML_{hr} = ML_{hr} N_h / Q_h \qquad \text{(作为雹浓度汇项)}$$

$$NML_{hrr} = ML_{hr} / h_{ro} \qquad \text{(作为雨滴浓度源项)}$$

(5) 冰雹融化蒸发

与霰类似

$$MVD_{hv} = \frac{1}{\rho}\int_{D_{*h}}^{\infty} N_{oh} e^{-\lambda_h D_h} \cdot 2\pi D_h (1 - S) f_h(R_e) C_x dD_h = 2\pi(1 - S) N_h A'_h C_x / \lambda_h$$

$$NMVD_{hv} = MVD_{hv} \cdot N_h / Q_h$$

C_x 与 MVD_{fv} 式中的相同。

(6) 冰雹蒸发

$$VD_{hv} = \frac{1}{\rho}\int_{D_{*h}}^{\infty} 2\pi D_h(1 - S_i) f_h(R_e) N_{oh} e^{-\lambda_h D_h} B_f dD_h = 2\pi(1 - S_i) f_h A_h' B_f / \lambda_h$$

$$NVD_{hv} = VD_{hv} \cdot N_h / Q_h$$

式中 B_f 与 VD_{vf} 式中的相同。

(7) 冰粒子向雹转化过程

对于霰有

$$CN_{gh} = \frac{A}{\rho}\int_{D_{*g}}^{\infty} N_{og} e^{-\lambda_g D_g} \frac{\pi}{6}\rho_g D_g^3 dD_g$$

$$= AQ_g e^{-\lambda_g D_{*g}}[1 + \lambda_g D_{*g} + (\lambda_g D_{*g})^2/2 + (\lambda_g D_{*g})^3/6]$$

$$NCN_{gh} = \frac{A}{\rho}\int_{D_{*g}}^{\infty} N_{og} e^{-\lambda_g D_g} dD_g$$

$$= AN_g e^{-\lambda_g D_{*g}}$$

式中取 $A = 0.01$[3]

$$D_{*g} = \sqrt[3]{\frac{\rho_h D_{*h}^3}{\rho_g}} = D_{*h}\sqrt[3]{\frac{\rho_h}{\rho_g}}$$

对于冻滴, 转化公式形式上与霰完全相同

$$CN_{fh} = AQ_f e^{-\lambda_f D_{*f}}[1 + \lambda_f D_{D*f} + (\lambda_f D_{*f})^2/2 + (\lambda_f D_{*f})^3/6]$$

$$NCN_{fh} = AN_f e^{-\lambda_f D_{*f}}$$

而

$$D_{*f} = D_{*h}$$

(8) 碘化银催化过程参数化

AgI 催化过程参数化中, 除雨滴谱不同外, 考虑的核化过程、一些假设和若干参数的确定完全与文献[5]相同, 这里不作重述。人工冰核的活化率曲线为

$$N_a(\triangle T) = \begin{cases} 0 & \triangle T < 5℃ \\ \exp(-0.022T^2 + 0.88\triangle T - 3.8) & 5℃ \le \triangle T \le 20℃ \\ 1.6 \times 10^2 & \triangle T \ge 20℃ \end{cases}$$

其中 $N_a(\triangle T)$ 单位为 $1/L$, $\triangle T = T_0 - T$。考虑 3 种 AgI 粒子成核机制, 即由于布朗运动和惯性碰并而发生在人工冰核和云、雨滴之间的接触冻结核化以及水汽在人工冰核上的凝华核化, 上述过程依次用 S_{BC}, S_{IC}, S_{BR}, S_{IR} 和 S_{DV} 表示, 它们都是 AgI 比含量 Q_a 的汇项, 其源项是均匀分布在一立方体内的 AgI 催化量 Q_{ao}。

$$S_{BC} = 9.657 \times 10^{-17} Q_a \rho N_c T$$

$$S_{IC} = 3.1416 \times 10^{-16} Q_a \rho N_c$$

$$S_{BR} = 4\pi D_a Q_a \int_{\infty}^{0} \frac{1}{2} D_r N_{or} D_r^2 e^{-\lambda_r D_r} dD_r = 12\pi D_a Q_a N_{or} \lambda_R^{-4}$$

$$S_{IR} = Q_a E_{ra} \int_{*h}^{\infty} \frac{\pi}{4} D_r^2 v_r(D_r) N_{or} D_r^2 e^{-\lambda_r D_r} dD_r$$

$$= \frac{\pi}{4} Q_a E_{ra} N_{or} A_{vr} \left(\frac{1}{\rho}\right)^{1/2} \Gamma(5.5) \lambda^{-5.5}$$

式中 $E_{ra} = 0.5 \times 10^{-4}$, D_a 是 AgI 粒子的扩散系数[5], 而 v_r, N_{or}, λ_r 和 A_{vr} 见文献[2]。N_c 是云滴比浓度。

作为凝华核活化的 AgI 粒子数为

$$N_{aD}(\triangle T) = \frac{Q_a}{m_a} \frac{N_a(\triangle T)}{N_a(20℃)} \qquad (Q_v \geq Q_{vs})$$

当 m_a 是 AgI 粒子质量, 当 5℃≤△T≤20℃

$$S_{DV} = m_a \frac{dN_{aD}(\triangle T)}{dt} = w \frac{\partial[Q_a N_a(\triangle T)]}{\partial z} / N_a(20℃)$$

若 $S_{DV} < 0$, 取 $S_{DV} = 0$。当 $\triangle T > 20$ ℃时, AgI 粒子全部活化

$$S_{DV} = Q_a / 2\triangle t$$

这样由于 AgI 粒子成核作用 (用 NU 表示), 云水冻结成冰晶(NU_{cai}), 水汽凝华成冰晶(NU_{vai}), 雨滴成为冻滴(NU_{raf}) 并使冰晶及冻滴浓度产生变化。

$$NNU_{cai} = (S_{BC} + S_{IC}) / m_a \cdot N_a(\triangle T) / N_a(20℃)$$

$$NU_{cai} = NNU_{cai} \cdot Q_c / N_c$$

$$NNU_{raf} = (S_{BR} + S_{IR}) / m_a \cdot N_a(\triangle T) / N_a(20℃)$$

$$NU_{raf} = NNU_{raf} \cdot Q_r / N_r$$

$$NNU_{vai} = S_{DV} / m_a$$

$$NU_{vai} = NNU_{vai} \cdot m_{io}$$

(9) 微物理过程源汇项

令下标 x = [i, s, f, g, h], y = [i, s, f, g], z = [s, f, g, h], 若 F 代表微物理过程速率, 则 F_x 代表 F 过程中 5 种冰粒子量之和, 即 $F_x = (F_i + F_s + F_f + F_g + F_h)$, F_y, F_z 意义相同。

$$S\theta = \frac{L_v}{\pi c_p}(VD_{vc} - VD_{cv} - VD_{rv} - MVD_{xv}) + \frac{L_s}{L_p \pi}(VD_{vy} - VD_{xv} + NU_{vai} +$$

$$NU_{vi}) + \frac{L_f}{\pi c_p}[P_{ci} + NU_{rf} + NU_{cai} + NU_{raf} + (1 - \delta_l)(CL_{cy} +$$

$$CL_{chh} + CL_{rx}) - (ML_{ic} + ML_{xr}) - \delta_l(CL_{ir} + CL_{sr})]$$

$$S_v = VD_{cv} + VD_{rv} + VD_{xv} + MVD_{xv} - (VD_{vc} + VD_{vy} + NU_{vi} + NU_{vai})$$

$$S_c = VD_{vc} + ML_{ic} - (VD_{cv} + CN_{cr} + P_{ci} + CL_{cr} + CL_{chh} + CL_{cy} + NU_{cai})$$

$$S_r = CN_{cr} + CL_{cr} + ML_{xr} + \delta_1(CL_{cx} + CL_{ir} + CL_{sr}) + CL_{chr} - (NU_{rf} + VD_{rv} + NU_{raf}) - (1 - \delta_1) \cdot CL_{rx}$$

$$S_{nr} = NCN_{cr} + NML_{yr} + NML_{hrr} + \delta_1 \cdot CL_{cy}/Q_{ro} + NCL_{chr} - [NNU_{rf} + NNU_{raf} + NVD_{rv} + (1 - \delta_1) \cdot NCL_{rx}] + \delta_1(CL_{rg} + CL_{rf})/g_{ro} + \delta_1 \cdot CL_{rh})/h_{ro}$$

$$S_i = NU_{vi} + P_{ci} + VD_{vi} + NU_{cai} + NU_{vai} + (1 - \delta_1)CL_{ci} - (CN_{ig} + CN_{is} + CL_{ix} + CL_{ir} + ML_i + MVD_{iv})$$

$$S_{ni} = NNU_{vi} + NP_{ci} + NNU_{cai} + NNU_{vai} - (NCN_{ig} + NCN_{is} + NCL_{ix} + NCL_{ir} + NML_i + NMVD_{iv})$$

$$S_s = CL_{ii} + VD_{vs} + CN_{is} - (\delta_2 CL_{sr} + MVD_{sv} + ML_{sr} + CL_{sg} + CL_{sf} + CL_{sh} + CN_{sg}) + (1 - \delta_1)CL_{cs} + (1 - \delta_1)(1 - \delta_2) \cdot CL_{rs} + CL_{is} + (1 - \delta_1)(1 - \delta_3)(CL_{ri} + CL_{ir})$$

$$S_{ns} = \frac{1}{2}NCL_{ii} + NCN_{is} + (1 - \delta_1)(1 - \delta_2)NCL_{rs} - (\delta_2 NCL_{sr} + NCL_{sz} + NMVD_{sv} + NML_{sr} + NCN_{sg}) + (1 - \delta_1)(1 - \delta_3)NCL_{ri}$$

$$S_g = CN_{ig} + CN_{sg} + CL_{ig} + CL_{sg} + (1 - \delta_1)(CL_{rg} + CL_{cg}) - (VD_{gv} + MVD_{gv} + ML_{gr} + CL_{gf} + CL_{gh})$$

$$S_{ng} = NCN_{ig} + NCN_{sg} - (NVD_{gv} + NMVD_{gv} + NML_{gr} + NCL_{gf} + NCL_{gh})$$

$$S_f = NU_{rf} + NU_{raf} + CL_{if} + CL_{sf} + CL_{gf} + (1 - \delta_1)(CL_{rf} + CL_{cf}) + (1 - \delta_1)\delta_3(CL_{ir} + CL_{ri}) + (1 - \delta_1)\delta_2(CL_{rs} + CL_{sr}) - (VD_{fv} + MVD_{fv} + ML_{fr} + CL_{fh} + CN_{fh})$$

$$S_{nf} = NNU_{rf} + NNU_{raf} + (1 - \delta_1)\delta_3 NCL_{ri} + (1 - \delta_1)\delta_2(NCL_{rs} + NCL_{sr}) - (NVD_{fv} + NMVD_{fv} + NML_{fr} + NCL_{fh})$$

$$S_h = CN_{gh} + CN_{fh} + CL_{chh} + CL_{yh} + CL_{rh} - (VD_{hv} + MVD_{hv} + ML_{hr})$$

$$S_{nh} = NCN_{gh} + NCN_{fh} - (NVD_{hv} + NMVD_{hv} + NML_{hr})$$

$$S_a = Q_{ao} - (S_{BR} + S_{IC} + S_{BR} + S_{IR} + S_{DV})$$

式中 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 见文献[2]。

3.4 用碘化银催化雹云的效果检验

地面降雹动能或动能通量大小直接反映了降雹造成的灾害损失程度, 如果通过催化, 能使降雹动能通量 $f\,ev$ (J/(m^2·s)) 减小, 则视为有效果。

$$f\,ev = \int_{D_{*h}}^{\infty} N_{oh} e^{-\lambda_h D_h} \cdot \frac{1}{2} m_h v_h^2 \cdot v_h \mathrm{d}D$$

$$= A_{vh}^3 \pi \rho_h N_{oh} [52.34(1 + 0.5\beta) + 39.38\beta^{1.5} + 15.75\beta^{2.5} + 4.5\beta^{3.5} + \beta^{4.5}] / (12000\rho^{1.5}\lambda_h^{5.5} e^{\beta})$$

4 模式的检验

注文①中利用本文发展的 3 维冰雹云催化模式及实时探空资料模拟了陕西省旬邑地区 1997 年 7 月 8 日观测到的一块雹云, 分析研究了雹云的成雹机制, 用 AgI 作为催化剂做了雹云催化试验, 获得了一些对研究人工防雹技术有意义的结果. 模拟和催化研究证明模式具有良好的模拟能力。叠加风场的含水量剖面图反映了对流云的主要特征, 可以清楚看到风场与云体配置情况(见注文①的图 2)。第 20 分以前, 雹云处于发展阶段, 云内盛行上升气流, 含水量中心位于 5.5～6.0 km 高度。从 24 分起云下即开始出现下沉气流, 以后雹云进入降水阶段, 28～30 分时地面降雹动能通量达最大值, 含水量中心下降至云体低层直至地面。云体在 x 轴方向前部, 存在一支入流—上升气流环流, 而中后部则有一支下沉—出流环流, 下沉气流区与低层含水量区相配合。而高层(6.5 km 高度) 含水量中心位于上升气流区。64 分时, 云体基本消散, 只有在 4～6 km 高度存在含水量最大值为 0.48 g/m^{3}的层状云。此外, 在切变风作用下, 云体上部出现砧部。这些表明云的动力场与物质场配合较好, 模拟出对流云形成过程的一般特征。图 1 是第 24 分通过 y 轴上 18 个格点与 x 轴平行的几种水质的垂直剖面图, 从模拟云的各种水质的含水量和浓度看模式的微物理参数化过程也比较合理, 如水物质含水量一般是 10^0 g/m^3 量级, 对浓度最大值而言, 雨滴浓度为 10^3/m^3 量级, 冰雪的为 10^8/m^3 量级, 冰雹为 10^0/m^3 量级(7 个/m^3)。这些量值都是在常规值范围之内。

参考文献

1 孔凡轴, 黄美元, 徐华英. 对流云中冰相过程的三维数值模拟: (Ⅰ) 模式建立及冷云参数化. 大气科学, 1990, 14(4): 441～453

2 洪延超. 积层混合云的数值模拟研究(Ⅰ)—模式及其微物理过程参数化. 气象学报, 1996, 54(5): 544～557

3 胡志晋, 何观芳. 积云微物理过程的数值模拟(一) 微物理模式. 气象学报, 1987, 45(4): 467～482

4 Ferrier B S. A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. part Ⅰ: description. J Atmos Sci. 1994, 51(2): 249－279

5 黄燕等. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验. 大气科学, 1994, 18(5): 612～622

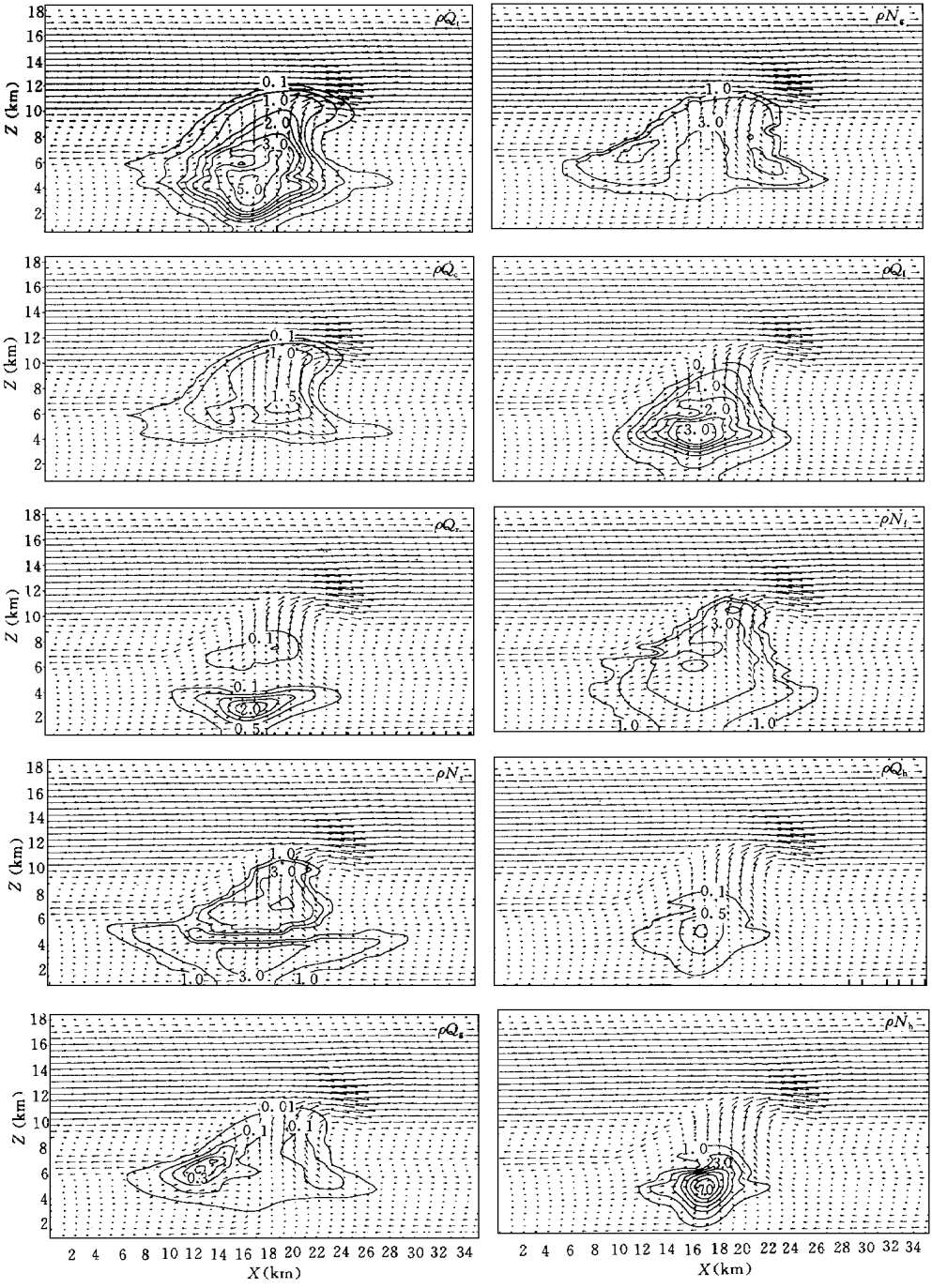

图 1 陕西省旬邑 1997 年 7 月 8 日模拟雹云中各种水质含水量及其浓度在 y = 18 格点上沿 x 轴方向的垂直剖面

(含水量单位为 g/m³, 冰雹浓度 ρN_h 单位为 1/m³, 其余粒子浓度单位为 10^x/m³)

A 3-D HAIL CLOUD NUMERICAL SEEDING MODEL

Hong Yanchao

(*Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing*, 100029)

Abstract

In order to study mechanisms of hailstone formation and hail suppression with seeding and to obtain optimum seeding technique for hail cloud, a 3-D compressive numerical seeding model for hail cloud is developed. The water substance in hail cloud is divided into 8 categories, i. e., water vapor, cloud droplet, rain drop, ice crystal, snow, graupel, frozen drop and hail, and the detail microphysical processes are described in spectrum with two variable parameters and more reasonable particle number/size distributions. Then, the model is able to predict concentration and water content of various particles. Especially, it can calculate number of hailstones which cores are graupel or frozen drop and apply to study mechanisms of hailstone formation. Additionally, a conservative equation of AgI as seeding or glacigenic agent is found and nucleation by condensation of artificial nucleus, nucleation by freezing of cloud droplet or rain drop which contact with AgI particle are considered. The dynamic energy flux of hail shooting on ground is used to verify seeding effect. So that the model is used to study mechanisms of hail suppression with seeding and the seeding technique.

Key words: Numerical model, Parameterization of microphysical processes, Nucleation mechanism.