

积雨云微物理过程的数值模拟

(一) 微物理模式*

胡志晋 何观芳

(国家气象局气象科学研究所)

提 要

本文提出了一个比较完整的积雨云参数化微物理模式, 推导了26种主要微物理过程中水汽、云滴比水量和冰晶、雨滴、霰、雹的群体比水量和比浓度的转化率, 它们包括凝结(凝华)、蒸发、粒子间的碰并(撞冻)、冰晶核化、繁生、冻结、融化、云-雨、冰-霰、霰-雹的自动转化以及雹的干湿增长等。

一、引 言

积雨云是我国的主要降水云, 有时伴有暴雨、冰雹。它的动力过程很剧烈, 微物理过程也十分复杂。过去曾认为积雨云的降水主要由冰晶过程形成^[10], 五十年代以来发现暖雨过程也很重要^[2-4]。为了研究积雨云的降水机制和催化的可能性, 必须建立一个微物理学比较完整但又简单易算的模式。Cotton(1972)的一维定常模式^[5]中虽有相当复杂的冰相过程方程, 但基本上不适用时变模式。而且未考虑下落、融化、繁生等过程。Wisner(1972)和Orville(1977)的雹云时变模式中实际上没有对冰晶作定量描述^[6,7]。Cotton(1982)的CSU三维模式中包括了冰晶, 但他们所用方法不能正确预报冰粒子的浓度, 致使地形云的计算结果欠佳, 该模式也没有专门考虑冰雹的生长下落^[8]。最近许焕斌(1985)考虑了雨和雹的数浓度演变, 在冰雹融化速率等方面对Wisner(1972)模式有了明显的改进, 但是有关冰晶的过程仍未考虑^[9]。

本文在作者过去工作基础上^[10-12]提出了云滴、冰晶、霰、雹、雨的比质量和比浓度的预报方程(即双参数模式), 包括了积雨云中主要的26种微物理过程。模式直接计算贝吉隆过程(冰晶凝华增长), 冰晶长大成霰和雨滴碰并冰晶成霰的过程。专门计算了具有特大落速和危害的雹的形成、干湿增长、在强上升气流中的落出及其伴随的动力热力效应以及地面降雹特征。模式考虑了冰晶和降水粒子的浓度, 能够直接计算冰晶核化、繁生等过程, 并且更精确地计算各种过程的速率和降水粒子谱分布特征。因此, 利用这一模式可以

* 本文于1986年1月13日收到, 1986年6月27日收到修改稿。

分析具体条件下各种降水过程的相对重要性,提出其主导的降水机制。目前,人工影响天气主要是人工增加冰晶或降水胚胎的浓度,以期增加降水量,减少大雹块数量,或者促进相变潜热的释放改变云的动力过程。利用这一模式就能比较逼真地模拟人工催化过程及其引起的变化。下面各节我们详细介绍这一模式对云和降水微物理特征所采用的双参数模拟方法,云物理特征量的计算方程组,凝结(华)蒸发(升华)过程的方程组,碰并(撞冻)过程的方程组,冰晶核化、繁生和各种粒子间自动转化过程方程组以及冻结、融化过程的方程组。在本文第二部分将介绍模式在实例中的试用情况。

二、微物理特征的参数化

云中各种水粒子的形状特性和大小有很大差别,我们根据积云中水粒子的物理特性,考虑到它们增长和下落的不同,将它们分成云滴、雨滴(直径 $D > 0.02$ cm的水滴)、冰晶(包括雪团)、霰(包括冻雨滴)、雹(直径 $D > 0.5$ cm的冰球)等五种。用它们的比水量和比浓度(单位质量空气中所含该粒子的质量和个数)来描述它们,即 $Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_h, N_c, N_r, N_i, N_s, N_h$,云滴浓度 N_0 。根据实测变化较小而取为常数,其余均为计算预报量。同作者的层状云模式^[12]一致,各种粒子都假定有一定的谱分布,根据实测采用下式

$$N(D) = N_0 D^\alpha \exp(-\lambda D) \quad (1)$$

式中 D 为直径, N_0, λ 为参数。

1. 云滴谱

取 $\alpha = 2$,即为Хргин-Мазин分布,

$$N_0 = \int_0^\infty N_0 D^2 \exp(-\lambda D) dD = \Gamma(3) N_0 \lambda^{-3} \quad (2)$$

$$Q_c = \int_0^\infty N_0 D^2 \exp(-\lambda D) \frac{\pi}{6} D^3 \rho_w dD = \Gamma(6) \frac{\pi}{6} \rho_w N_0 \lambda^{-6} = 10 \pi \rho_w N_0 \lambda^{-6} \quad (3)$$

$$\bar{D}_c \approx \frac{6}{\pi \rho_w} \left(\frac{Q_c}{N_0} \right)^{1/3} \quad (4)$$

式中 \bar{D}_c 为平均立方直径, ρ_w 为液水密度, $\Gamma(x)$ 为伽马函数,云滴的落速略去为0。

2. 雨滴谱、霰谱

取 $\alpha = 0$,即Marshall-Palmer分布,但 N_0 据实测取为变量。

$$N_{r,(t)} = \int_0^\infty N_0 \exp(-\lambda D) dD = N_{0,r,(t)} \lambda_{r,(t)}^{-1} \quad (5)$$

$$Q_{r,(t)} = \int_0^\infty N_0 \exp(-\lambda D) A_m D^3 dD = 6 A_{m,r,(t)} N_{0,r,(t)} \lambda_{r,(t)}^{-4} \quad (6)$$

$$\bar{D}_{r,(t)} = \left(\frac{Q_{r,(t)}}{A_m N_{r,(t)}} \right)^{1/3} \quad (7)$$

$$V_{r,(t)} = A_{r,(t)} D_{r,(t)}^{0.8} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\alpha_1} \quad (8)$$

$$M_{r,(t)} = A_{m,r,(t)} D_{r,(t)}^3 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_{r,(t)} &= \frac{1}{Q} \int_0^\infty N_0 \exp(-\lambda D) A_m D^{3.8} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\alpha_1} dD \\ &= \frac{\Gamma(4.8)}{\Gamma(4)} A_{r,(t)} \lambda_{r,(t)}^{-3.8} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\alpha_1} \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $V_{r(e)}$, $M_{r(e)}$ 为单个雨滴 (或霰) 的落速和质量, $A_{mr} = \frac{\pi}{6} \rho_w = 0.524 \text{ gcm}^{-3}$, $A_{me} = 0.065 \text{ gcm}^{-3}$ [16], $\bar{V}_{r(e)}$ 为雨滴 (霰) 的群体平均落速。雨滴落速 [8] 用 Lin & Orville 的近似式 [6], 但限定标准状况下的雨滴落速小于 9.7 m/s 。霰粒落速是根据 Locatelli & Hobbs 的观测结果 [13a] 建立的经验近似式。粒子落速受空气的压力和温度影响, 在实际大气中主要受气压影响。根据理论计算结果 [13f] 归纳成 $\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\alpha_1}$ 的经验近似式。式中 $A_{vr} = 2100 \text{ cm}^{0.2} \text{ s}^{-1}$, $A_{vg} = 500 \text{ cm}^{0.2} \text{ s}^{-1}$, $\alpha_1 = 0.286$ 。

3. 冰晶谱

取 $\alpha = 1$,

$$N_i = \int_0^\infty N_0 D \exp(-\lambda D) dD = N_{0i} \lambda_i^{-2} \quad (12)$$

$$Q_i = \int_0^\infty N_0 D \exp(-\lambda D) dD A_{mi} D^2 dD = 6 N_{0i} A_{mi} \lambda_i^{-4} \quad (13)$$

$$\bar{D}_i = \left(\frac{Q_i}{A_{mi} N_i}\right)^{1/2} = 2.88 \lambda_i^{-1} \quad (14)$$

$$V_i = A_{vi} D_i^{1/3} \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\alpha_2} \quad (15)$$

$$M_i = A_{mi} D_i^3 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_i &= \frac{1}{Q} \int_0^\infty N_0 D_i \exp(-\lambda D_i) A_{mi} D_i^2 A_{vi} D_i^{1/3} \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\alpha_2} dD_i \\ &= \frac{\Gamma(4.33)}{\Gamma(4)} A_{vi} \lambda_i^{-1/3} \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\alpha_2} \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $A_{mi} = 0.001 \text{ gcm}^{-2}$, $A_{vi} = 70 \text{ cm}^{2/3} \text{ s}^{-1}$, $\alpha_2 = 0.3$ 。式(15)和(16)是根据实测结果归纳得出的 [12]。

4. 霰谱

取截断的指数谱, 即

$$\begin{cases} N(D) = N_0 \exp(-\lambda D), & \text{当 } D \geq D_* \\ N(D) = 0, & \text{当 } D < D_* \end{cases} \quad (18)$$

式中 D_* 为冰霰的最小直径, 根据观测规范取 $D_* = 0.5 \text{ cm}$ 。

霰块质量同直径立方成正比, 落速按 Auer(1972)的经验公式 [13a], 加上空气密度订正, 即

$$M_\lambda = A_{m\lambda} D_\lambda^3 \quad (19)$$

$$V_\lambda = A_{v\lambda} D_\lambda^{1.3} \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{1/2} \quad (20)$$

$$N_\lambda = \int_{D_*}^\infty N_{0\lambda} \exp(-\lambda_\lambda D) dD = N_{0\lambda} \exp(-\lambda_\lambda D_*) \lambda_\lambda^{-1} \quad (21a)$$

$$\begin{aligned} Q_\lambda &= \int_{D_*}^\infty N_{0\lambda} \exp(-\lambda_\lambda D) A_{m\lambda} D^3 dD \\ &= 6 N_\lambda \lambda_\lambda^{-2} A_{m\lambda} \left[1 + \lambda_\lambda D_* + \frac{1}{2} (\lambda_\lambda D_*)^2 + \frac{1}{6} (\lambda_\lambda D_*)^3 \right] \end{aligned} \quad (21b)$$

解(21b)得:

$$\lambda_1^{-1} = \sqrt[3]{\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + p^3}} + \sqrt[3]{\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + p^3}} - \frac{D_*}{3} \quad (22)$$

$$\text{式中} \quad q = -\frac{2D_*^3}{27} + \frac{Q_1}{6A_{m1}N_1}, \quad p = \frac{D_*^3}{18}$$

因为 $\frac{Q_1}{6A_{m1}N_1} > D_*^3$ 所以 $\frac{1}{4}q^2 \gg p^3$, 因此

$$\lambda_1^{-1} \approx \sqrt[3]{q} + p \frac{1}{\sqrt[3]{q}} - \frac{D_*}{3} = \sqrt[3]{q} + \frac{D_*^3}{18\sqrt[3]{q}} - \frac{D_*}{3} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= \int_{D_*}^{\infty} A_{v1} \exp(-\lambda_1 D) D^{3.5} dD / \int_{D_*}^{\infty} \exp(-\lambda_1 D) D^3 dD \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \\ &= \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} A_{v1} \lambda_1^{-0.5} \left[\beta_1^{3.5} + 3.8 \beta_1^{2.5} + 10.64 \beta_1^{1.5} + 19.5 \int_{D_*}^{\infty} \exp(-\lambda D) D^{3.5} dD \right] / \\ &\quad [\beta_1^3 + 3 \beta_1^2 + 6 \beta_1 + 6] \\ &\approx \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} A_{v1} \lambda_1^{-0.5} [\beta_1^{3.5} + 3.8 \beta_1^{2.5} + 10.64 \beta_1^{1.5} + 17.84 (0.8 \beta_1 + 1)] / [\beta_1^3 + 3 \beta_1^2 + 6 \beta_1 + 6] \quad (24) \end{aligned}$$

从近似式同相应的数值积分计算结果对比来看, 近似式的误差小于 2%。

$$\bar{D}_1 = \left(\frac{Q_1}{A_{m1}N_1} \right)^{1/3} = [\beta_1^3 + 3 \beta_1^2 + 6 \beta_1 + 6]^{1/3} \lambda_1^{-1} \quad (25)$$

式中 $\beta_1 = \lambda_1 D_*$, $D_* = 0.5 \text{ cm}$, $A_{m1} = 0.471 \text{ g cm}^{-3}$, $A_{v1} = 810 \text{ cm}^{0.2} \text{ s}^{-1}$ (已订正到标准状况)。

在上述各种粒子谱分布的假定下, N_0 和 λ 两个参数是待定的, 它们是粒子比质量和比浓度的函数, 反之亦然。这种方法我们最初在层状云模式^[10]中提出的, 称为“双参数模式”。国外的云模式一般都假定 N_0 不变, λ 是唯一的参数。实测表明^[13]雨滴谱的 N_0 变化很大, 有时在一次降水中就可改变 3 个数量级。在单参数模式中粒子浓度同平均直径成正比, 但实际上两者不一定是正相关的。这就影响了它们描述粒子微物理特征和演变速率的能力。许焕斌^[9]曾指出描述冰雹融化过程速率时单参数模式的缺点。对于其它过程也有类似情况。

三、微物理方程组

模式中考虑了 10 个微物理变量, 即 $Q_0, Q_c, Q_r, Q_i, Q_g, Q_s, N_r, N_i, N_g, N_s$ 。根据第二节的方程组可以推出它们的谱分布 (λ, N_0) 和特征量 (\bar{D}, \bar{V})。这 10 个变量 (M) 的预报方程中考虑了它们的平流、湍流、夹卷、自身下落和源汇项即

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -(W - V_m) \frac{\partial M}{\partial z} + k \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} - E(M - M_e) + \frac{M}{\rho} \frac{\partial \rho V_m}{\partial z} + \frac{\delta M}{\delta t} \quad (26)$$

式中 W 为气流升速, k 为湍流交换系数, E 为夹卷率, M_e 为云外 M 值, \bar{V}_m 为 M 的平均落速, 向下为正。 $\frac{\delta M}{\delta t}$ 为源汇项, 即微物理转化项。除了这 10 个变量外, 为了计算云雨自动转化过程而引入了云滴谱宽度 F_0 。由于云滴自身落速 $\bar{V}_m = 0$, 而且云内外混合只会使云滴全部减少而不影响云滴谱的宽度, 所以预报方程为

$$\frac{\partial F_c}{\partial t} = -W \frac{\partial F_c}{\partial z} + k \frac{\partial^2 F_c}{\partial z^2} + \frac{\delta F_c}{\delta t} \quad (27)$$

模式考虑了积雨云中 26 种主要微物理过程, 即冰、雨、云、霰的凝结(华)和蒸发 (S_{oi} , S_{or} , S_{oc} , S_{og}); 冰、霰、雹、雨对云滴的碰并 (C_{ci} , C_{cg} , C_{ch} , C_{cr}); 雨和冰碰并 (C_{ri} , C_{ir}); 霰、雹碰并雨 (C_{rg} , C_{rh}); 霰、雹碰并冰晶 (C_{ig} , C_{ih}); 冰晶核化、繁生 (P_{oi} , P_{ci}); 云雨转化 (A_{cr}); 冰霰转化 (A_{ig}); 霰雹转化 (A_{gh}); 雨冻结成霰 (M_{rg}); 霰、雹、冰融化成雨 (M_{gr} , M_{hr} , M_{ir}); 冰晶相并 (C_{ii}); 雨滴相并 (C_{rr}); 雹的湿增长极限 (C_{wh})。这些过程都用三个英文字母表示, 第一个指过程名称, 第二个是被消耗的相, 第三个是生成相或作用相。它们同时用来表达过程中的比质量变化速率。在该符号前加 N 表示过程中的比浓度变化率。如 C_{ir} 表示冰晶被雨滴碰并的过程和冰晶被雨滴碰并的速率, N_{ci} 表示冰晶浓度被碰并的速率。当 $T > T_0$ 时, 冰晶被碰并融化在雨滴中, 它对冰晶和雨滴的比质量和比浓度的作用为:

$$C_{ir} = -\frac{\delta Q_i}{\delta t} = \frac{\delta Q_r}{\delta t}, \quad N_{ci} = -\frac{\delta N_i}{\delta t}, \quad \frac{\delta N_r}{\delta t} = 0$$

$$\text{当 } T < T_0 \text{ 时, 冰晶碰并雨滴后雨滴冻结成霰, } \frac{\delta Q_i}{\delta t} = -C_{ir}, \quad \frac{\delta Q_r}{\delta t} = -C_{ri}, \quad \frac{\delta Q_g}{\delta t} = C_{ir} + C_{ri}, \quad \frac{\delta N_g}{\delta t} = -\frac{\delta N_i}{\delta t} = -\frac{\delta N_r}{\delta t} = N_{ci}$$

考虑 26 种过程后, 各个物理量的源汇项为:

$$\frac{\delta Q_r}{\delta t} = -S_{rc} - S_{rr} - S_{ri} - S_{rg} - S_{rh} - NP_{ri}Q_{co} \quad (28)$$

$$\frac{\delta Q_c}{\delta t} = S_{vc} - C_{ci} - C_{cr} - C_{cg} - C_{ch} - A_{cr} - NP_{ci}Q_{co} \quad (29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta Q_r}{\delta t} = S_{rr} + C_{rr} + A_{cr} + M_{gr} + M_{hr} + M_{ir} - M_{rg} \\ \text{当 } T \geq 273 \text{ K, } +C_{ch} + C_{ir} \\ \text{当 } T < 273 \text{ K, } -C_{rh} - C_{rg} - C_{ri} \quad (kk=0) \\ \quad -C_{wh} + C_{oh} - C_{rg} - C_{ri} \quad (kk=1) \end{array} \right. \quad (30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta N_r}{\delta t} = NS_{vr} + A_{cr}/Q_{co} + NM_{gr} + NM_{ir} - NM_{rg} + NC_{rr} \\ \text{当 } T \geq 273 \text{ K, } (M_{hr} + C_{ch})/Q_{ho}; \\ \text{当 } T < 273 \text{ K, } -NC_{rh} - NC_{rg} - NC_{ri} \quad (kk=0) \\ \quad -NC_{rh} - NC_{rg} - NC_{ri} - (C_{oh} + C_{rh} - C_{wh})/Q_{ho} \quad (kk=1) \end{array} \right. \quad (31)$$

$$\frac{\delta Q_i}{\delta t} = S_{vi} + C_{ci} - C_{ir} - M_{ir} - C_{ig} - C_{ih} - A_{ig} + NP_{oi}Q_{co} + NP_{ci}Q_{co} \quad (32)$$

$$\frac{\delta N_i}{\delta t} = NS_{vi} - NC_{ir} - NM_{ir} - NC_{ig} - NC_{ih} - NA_{ig} + NP_{oi} + NP_{ci} + NC_{ii} \quad (33)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta Q_g}{\delta t} = S_{vg} + C_{og} + C_{ig} - C_{gh} + A_{ig} + M_{gr} - M_{rg} - A_{gh} \\ \text{当 } T < 273 \text{ K, } \quad +C_{rg} + C_{ir} + C_{ri} \end{array} \right. \quad (34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta N_g}{\delta t} = NS_{vg} + NA_{ig} - NA_{gh} + NM_{gr} - NM_{rg} - NC_{gh} \\ \text{当 } T < 273 \text{ K} \quad +N_{ci} \end{array} \right. \quad (35)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta \theta_h}{\delta t} = S_{vh} + C_{oh} + C_{gh} - M_{hr} + A_{gh} \\ \text{当 } T < 273 \text{ K} \quad +C_{ch} + C_{rh} \quad (kk=0) \\ \quad +C_{wh} \quad (kk=1) \end{array} \right. \quad (36)$$

$$\frac{\delta N_h}{\delta t} = N A_{r,h} - N M_{h,r} \quad (37)$$

式中当 $T \geq 273 \text{ K}$ 时, 雹碰并的云滴将不能冻结而同雹块上融化的水一起从雹上“流散”成次生雨滴, 雨碰并的冰晶将使雨滴长大。当 $T < 273 \text{ K}$ 时, 雨滴碰并冰晶后将冻结成雹, 雨滴碰到雹使雹长大。 kk 是冰雹增长状态指示, 当 $C_{c,h} + C_{r,h} \leq C_{w,h}$ 时, 冰雹处于干增长, $kk = 0$, 被碰并的云滴和雨滴冻结成雹; 当 $C_{c,h} + C_{r,h} > C_{w,h}$ 时, 冰雹处于湿增长状态, $kk = 1$, 被碰并的云雨滴中只有一部分 ($C_{w,h}$) 冻结, 其余的成为水膜。我们假定这些水膜将从雹上流散成为次生雨滴, 其平均质量为 $Q_{h,o}$, 这一过程中雨滴质量的收支为 $-C_{r,h} + [(C_{c,h} + C_{r,h}) - C_{w,h}] - C_{c,h} - C_{w,h}$; 雨滴浓度收支则为 $-N C_{r,h} + [(C_{c,h} + C_{r,h}) - C_{w,h}] / Q_{h,o}$ 。据 Joe 和 List (1980) 实验得出, 湿增长时流散雨滴的体积平均直径为 1.4 mm [14], 即 $Q_{h,o} = 1.47 \cdot 10^{-3} \text{ g}$ 。雨滴最小直径一般取 0.2 mm , 即 $Q_{r,o} = 4.19 \cdot 10^{-6} \text{ g}$ 。冰晶最小直径取 $3 \mu\text{m}$, 即 $Q_{i,o} = 10^{-10} \text{ g}$ 。次生冰晶的平均直径取 $10 \mu\text{m}$, 即 $Q_{o,o} = 10^{-9} \text{ g}$ 。

四、凝结(华)蒸发过程的参数化方程

1. 云滴和冰晶的蒸发凝结率(升华凝华率)

在一般的积云模式中采用过饱和度为 0 的假定, 使凝结率的计算简化。这种假定不能正确描述三相并存时的贝吉隆过程和强烈上升气流中高过饱和度下的凝结过程。本模式用过饱和度来计算凝结率和冰晶凝华率:

$$\begin{aligned} S_{r,c} &= \int_0^\infty N_c D^3 \exp(-\lambda D) 2 \pi k_d \rho D \left[1 + \frac{L_r k_d \rho Q_{s,w}}{k_r T} \left(\frac{L_r}{RT} - 1 \right) \right]^{-1} (Q_r - Q_{s,w}) dD \\ &= A_{r,c} (Q_r - Q_{s,w}) \\ A_{r,c} &= 6 \pi k_d \rho \left[1 + \frac{L_r k_d \rho Q_{s,w}}{k_r T} \left(\frac{L_r}{RT} - 1 \right) \right]^{-1} N_c (10 \pi N_o / Q_o)^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (38)$$

Koenig (1972) 给出各种温度下冰晶在水面饱和条件下的增长率为 $\frac{\delta m_i}{\delta t} = a_1 \cdot m_i^{a_2}$,

式中 a_1, a_2 为温度的函数 [15]。我们把它推广到任意湿度下:

$$\begin{aligned} S_{r,i} &= \int_0^\infty N_i D \exp(-\lambda D) a_1 (A_{m,i} D^2)^{a_2} \frac{(Q_r - Q_{s,i})}{(Q_{s,w} - Q_{s,i})} dD = A_{r,i} (Q_r - Q_{s,i}) \\ A_{r,i} &= 2 a_1 N_i (6 N_i / Q_i)^{-a_2} (Q_{s,w} - Q_{s,i})^{-1} \\ N S_{r,i} &\begin{cases} = 0 & , \text{ 当 } S_{r,i} \geq 0 \\ = S_{r,i} \cdot N_i / Q_i & , \text{ 当 } S_{r,i} < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (39 \text{ a})$$

凝结(蒸发)过程对水汽量有很大的负反馈作用。 $\frac{\delta Q_r}{\delta t} = -S_{r,c} = -A_{r,c} (Q_r - Q_{s,w})$,

凝结潜热对空气温度有很大影响, 从而对饱和比湿值有很大作用。考虑潜热对饱和比湿的作用后, 可得

$$\frac{\delta(Q_r - Q_{s,w})}{\delta t} = \frac{\delta Q_r}{\delta t} \left(1 + \frac{\epsilon L^2 Q_{s,w}}{C_p R T^2} \right) = -A_{r,c} (Q_r - Q_{s,w}) \left(1 + \frac{\epsilon L^2 Q_{s,w}}{C_p R T^2} \right) \quad (40)$$

从(40)式可得凝结过程对 $(Q_r - Q_{s,w})$ 作用的弛豫时间为

$$t_* = \left[A_{r,c} \left(1 + \frac{\epsilon L^2 Q_{s,w}}{C_p R T^2} \right) \right]^{-1} \quad (40 \text{ a})$$

