

积云中云滴谱形成的数值模拟研究(二)

——各种碰并过程、大气层结等的作用

肖辉 徐华英 黄美元

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用已建立的一维非定常积云数值模式¹⁾,分别研究了各种碰并过程、大气层结条件和吸湿性盐核的化学成分对积云中云滴谱形成的影响。计算结果表明,在各种碰并过程对积云发展前期云滴谱展宽的作用中,以重力碰并过程的作用最为显著,小尺度湍流的碰并过程则起到很重要的促进作用,它可以加速大云滴的增长,而电碰并过程的作用并不大。大气层结条件对积云中云滴谱的形成影响较大,而吸湿性盐核的化学成分对积云的宏观特征和微观特征都影响不大。

一、引 言

我们在上一篇论文¹⁾中,利用一维非定常柱状积云模式,考虑云滴的随机重力碰并过程,已经讨论了初始盐核谱和盐核浓度对积云云滴谱形成的影响,得到了一些很有意义的结果。在这里,我们继续利用这个积云模式,讨论各种碰并过程、大气层结条件以及吸湿性盐核中的化学成分对积云云滴谱形成的影响。

关于各种碰并过程对云滴谱形成的影响问题,虽然有过许多研究²⁻⁴⁾,但多数只局限在微物理过程的分析上,然而,云滴谱的形成还受各宏观参量的影响,因此,本文把这个问题放在云动力学模式中去讨论。

二、各种碰并过程对云滴谱形成的影响

de Almeida 在 1979 年对有无湍流存在的情况下,云滴的重力碰并增长问题作了比较完整的讨论,他发现小尺度湍流对云滴的碰并增长有非常明显的作用⁵⁾,然而,de Almeida 是在给定初始云滴谱分布的情况下,单独讨论云滴的碰并增长问题的,由于云滴是在各种微物理过程和宏观过程同时作用下增长的,因此,我们利用积云模式在考虑凝结、云内平流输送以及云内外空气之间的交换等作用下,讨论各种碰并过程对云滴谱形成的影响。

1986年6月7日收到,1986年12月19日收到修改稿。

1) 肖辉、徐华英、黄美元,1988,积云中云滴谱形成的数值模拟研究(一)——盐核谱和浓度的作用,大气科学(待发表)。

在此,我们着重讨论重力碰并、湍流碰并和电磁并在积云发展前期对云中滴谱形成的影响,所用的碰撞效率是:(1)讨论重力碰并和重力与湍流碰并时,用 de Almeida^[5] 给出的不同湍流耗散率($\epsilon = 0, 1, 10 \text{ cm}^2/\text{s}^3$)下的三组碰撞效率;(2)讨论云滴的电磁碰并时,使用大小水滴分别荷电的理论碰撞效率。同时,假定并合系数为1,在这里,不考虑布朗运动引起的云滴碰并,Takahashi^[6] 已指出这种碰并对云滴增长的作用可以忽略不计。下面为了便于叙述,用 C 表示碰并, C 前有 N 表示无重力碰并, C 的下角标数值表示湍能耗散率 ϵ 的值,如 C_0 表示无湍流(即 $\epsilon = 0 \text{ cm}^2/\text{s}^3$)之重力碰并, C_e 表示电磁碰并。 $C_0 C_e$ 表示在 $\epsilon = 0 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ 下的湍流与重力碰并和电磁碰并同时作用。

图1和表1、图2和表2分别给出了在用大陆性盐核谱和用海洋性盐核谱(见我们的上一篇论文^[1]中图1)模拟的积云中,各种碰并过程对积云发展前期云滴谱分布的影响。

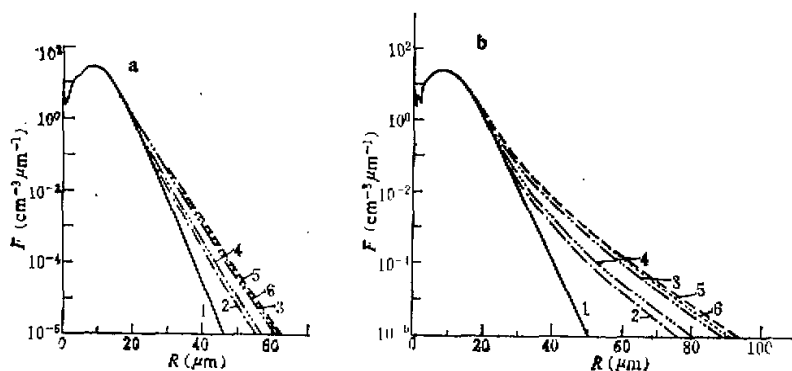


图1 各种碰并过程下大陆性积云的云滴谱 (a) 10min, 2000m 高度; (b) 15min, 2600m 高度
图中曲线 1,2,3,4,5,6 分别表示 NC , C_0 , C_1 , $C_0 C_0$, $C_1 C_0$ 和 $C_0 C_0 C_1$ 六种碰并过程

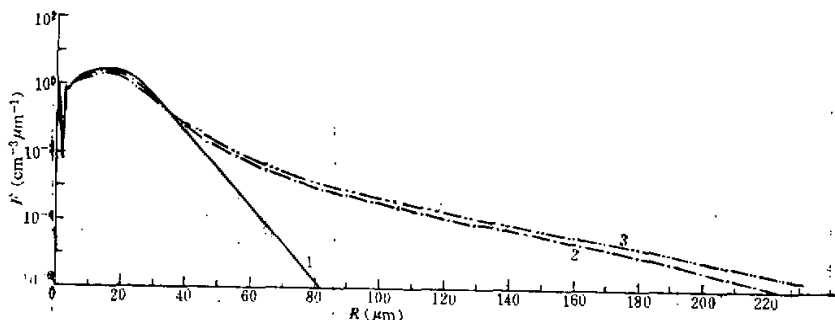


图2 各种碰并过程下海洋性积云的云滴谱 (15min, 2600m 高度)
图中曲线数字表示的碰并过程同图1

由图1和图2可见,各种碰并过程对大陆性积云云滴谱分布的影响,和对海洋性积云云滴谱分布的影响基本相同,因此,下面只详细讨论前一种情况。

1. 重力碰并作用 (C_0)

考虑重力碰并作用 (C_0), 作为对比还计算了没有碰并作

1) 肖辉、徐华英、黄美元, 1988, 积云中云滴谱形成的数值模拟研究(一)——盐核谱和浓度的作用, 大气科学 (待发表)。

表 1 各种砧并过程下大陆性积云中云滴各参量

时间 (min)		5					10					15				
		项目			含水量高度 (g/kg)(m)			云滴浓度 (cm ⁻³)			含水量高度 (g/kg)(m)			云滴浓度 (cm ⁻³)		
		半径 (μm)			20≤R<40			40≤R<100			20≤R<40			40≤R<100		
砧并种类																
1	NC				0.577	1.493×10 ⁻²	7.578×10 ⁻¹⁰	0.774	14002.460	1.113×10 ⁻¹²	4.441×10 ⁻¹²	100≤R	20≤R<40	4.841×10 ⁻⁴	7.616×10 ⁻¹³	1.509 2600
2	C ₀				0.582	4.420×10 ⁻¹	1.475×10 ⁻¹⁵	0.774	14002.474	9.326×10 ⁻¹³	4.203×10 ⁻¹³	100≤R	20≤R<40	6.388×10 ⁻³	1.932×10 ⁻⁷	1.509 2600
3	C ₁				0.834	1.412×10 ⁻⁴	2.137×10 ⁻¹²	0.775	14003.213	4.413×10 ⁻³	2.724×10 ⁻¹¹	100≤R	20≤R<40	1.839×10 ⁻⁴	1.515 2600	
4	C ₀ C ₁				0.760	7.526×10 ⁻⁷	1.664×10 ⁻¹⁵	0.772	14002.932	1.554×10 ⁻³	1.060×10 ⁻¹¹	100≤R	20≤R<40	4.790×10 ⁻⁷	1.504 2600	
5	C ₁ C ₀				1.013	2.377×10 ⁻⁶	2.263×10 ⁻¹⁵	0.773	14003.663	6.625×10 ⁻³	6.921×10 ⁻¹¹	100≤R	20≤R<40	3.995×10 ⁻³	4.053×10 ⁻⁶	1.506 2600
6	C ₁₀				0.697	1.714×10 ⁻⁴	1.404×10 ⁻¹⁷	0.767	14002.917	6.528×10 ⁻³	3.676×10 ⁻¹¹	100≤R	20≤R<40	4.289×10 ⁻³	2.499×10 ⁻⁴	1.496 2600

表 2 各种砧并过程下海洋性积云中云滴各参量

时间 (min)		5					10					15				
		项目			含水量高度 (g/kg)(m)			云滴浓度 (cm ⁻³)			含水量高度 (g/kg)(m)			云滴浓度 (cm ⁻³)		
		半径 (μm)			20≤R<40			40≤R<100			20≤R<40			40≤R<100		
砧并种类																
1	NC				9.253	1.410×10 ⁻²	1.988×10 ⁻¹¹	0.784	140013.908	0.146	3.476×10 ⁻³	100≤R	20≤R<40	0.226	5.439×10 ⁻⁴	1.530 2600
2	C ₀				9.081	3.630×10 ⁻⁴	7.024×10 ⁻³	0.784	140012.534	0.349	3.457×10 ⁻⁴	100≤R	20≤R<40	0.515	8.744×10 ⁻³	1.550 2600
3	C ₁				8.829	5.822×10 ⁻³	8.140×10 ⁻³	0.785	140011.793	0.454	6.485×10 ⁻⁴	100≤R	20≤R<40	0.662	1.188×10 ⁻⁴	1.558 2600

用情况 (NC), 由图 1 可见, 云中在 $R \leq 20 \mu\text{m}$ 段 C_0 的云滴谱虽然与 NC 时相差不大, 但在 $R > 20 \mu\text{m}$ 段的云滴浓度却明显地比 NC 时大。再由表 1 可见, 第 15 分钟时, 云中 $R \geq 40 \mu\text{m}$ 的云滴浓度为 $6.39 \times 10^{-3} \text{cm}^{-3}$, 比 NC 时的相应值大 12.2 倍, 而与 Weickmann 等^[2] 的观测值接近, 在同一时刻, C_0 时 $R \geq 100 \mu\text{m}$ 的云滴浓度为 0.19m^{-3} , 而 NC 时几乎为零。从时间上看, C_0 时在第 9 分钟时就达到了 NC 时要在 15 分钟才能达到的 $R \geq 40 \mu\text{m}$ 的云滴浓度, 即碰并作用使大云滴提早 6 分钟左右出现。上述结果表明, 考虑重力碰并作用时的云滴谱比只有凝结作用时的云滴谱宽得多, 而且, 大云滴的浓度增长率也增大。

2. 湍流碰并作用 (C_1, C_{10}) 大气中有湍流运动, 云中湍流又要比云外环境强得多, 而且湍流运动会改变水滴之间相对运动状况, 因此, 应当考虑湍流运动对云滴碰并的影响。

首先, 选取 de Almeida^[3] 在湍流耗散率 $\varepsilon = 1 \text{cm}^2/\text{s}^3$ 情况下, 重力与湍流共同作用的云滴碰并系数, 计算积云的云滴谱分布 (C_1)。由图 1 和表 1 可见, 考虑湍流作用后, 大云滴浓度的增长速度加快。在第 15 分钟时, C_1 时 $R \geq 40 \mu\text{m}$ 的云滴浓度达到 $2.91 \times 10^{-2} \text{cm}^{-3}$, $R \geq 100 \mu\text{m}$ 的浓度为 1.84m^{-3} , 分别比 C_0 时的相应值增大 3.6 倍和 8.7 倍。从时间上看, C_1 时在约 10 分钟时就达到了 C_0 时要花 15 分钟才能达到的 $R \geq 40 \mu\text{m}$ 的云滴浓度, 湍流作用使大云滴提早 5 分钟左右出现。上述结果表明, 小尺度湍流的碰并在积云云滴谱的展宽中起了很重要的促进作用, 它可以使大云滴的浓度增长率比不考虑湍流作用的重力碰并情况要大三倍以上。

为了比较不同强度的湍流对云滴谱展宽的影响程度, 我们再用 $\varepsilon = 10 \text{cm}^2/\text{s}^3$ 时的重力与湍流共同作用的云滴碰并系数^[3], 作了同样的计算 (C_{10})。由图 1 和表 1 可见, 第 15 分钟时, 云中 $R \geq 40 \mu\text{m}$ 和 $R \geq 100 \mu\text{m}$ 的云滴浓度比 C_1 时的相应值分别增大 0.5 倍和 0.4 倍。这表明, 强的小尺度湍流在对云中云滴谱展宽的作用中并不比弱的小尺度湍流大得多。

分析一下 de Almeida^[3] 给出的三个 ε 值下的碰并系数可知, 湍流主要是对半径小于 $40 \mu\text{m}$ 的大云滴碰并增长有直接影响, 然而, 由于这些大云滴的迅速增长, 将有利于通过碰并过程形成更大的云滴, 即加速了云滴的碰并增长。因此, 小尺度湍流碰并能加快大云滴的增长, 对云滴谱展宽有很重要的促进作用。

3. 电磁碰并作用 (C_0C_e, C_1C_e) 云中的云滴一般都带有电荷, 在库仑力的作用下, 带异号电荷云滴之间的碰并将会加强。在重力场中, 大水滴 (半径为 R) 和小水滴 (半径为 R_s) 分别带有电荷量 e_1 和 e_2 , 则这两个水滴的电磁并捕获系数为^[4]

$$E_e = \frac{4a_1}{1 - \left(\frac{R_s}{R}\right)^2} \quad (1)$$

其中

$$a_1 = - \frac{e_1 e_2}{6\pi R_s \eta_0 V(R) R^2} \quad (2)$$

$V(R)$ 为半径为 R 的水滴降落末速度, η_0 为动力粘性系数。

根据云层中荷电的观测, 云滴荷电量与其半径大小成正比^[4], 即

$$|e_1| = K_* R, |e_2| = K_* R_n \quad (3)$$

其中 R, R_n 以 cm 为单位, $K_* = 10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ e. s. u./cm}$ 一般说, 强的积云 K_* 值大。这里取浓积云中的 K_* 值, 即 $K_* = 5 \times 10^{-4} \text{ e. s. u./cm}$, 并假定 e_1 与 e_2 异号, 即大小水滴分别带异号电荷, 同时假定任意两个相碰的水滴都遵循上述关系和取值。应当指出, 这样假定下的电磁并是一种极端有利的情况。

根据上述电磁并系数, 并结合 de Almeida^[2] 的重力碰并系数, 可以计算在重力碰并和电磁并共同作用下积云云滴谱分布 ($C_0 C_c$)。由图 1 和表 1 可见, $C_0 C_c$ 时的云滴谱比 C_0 时的云滴谱略宽一些。在第 15 分钟时, $C_0 C_c$ 时 $R \geq 40 \mu\text{m}$ 的云滴浓度为 $9.97 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, $R \geq 100 \mu\text{m}$ 的浓度为 0.48 m^{-3} , 比 C_0 时的相应值分别增大 0.56 倍和 1.5 倍。上述结果表明, 虽然电磁并对云滴谱中大云滴的增长有一定的促进作用, 但是, 这种作用比考虑湍流碰并 (如 C_1, C_{10}) 的作用小得多。

图 1 和表 1 中还给出了在 $\varepsilon = 1 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 时的重力与湍流碰并和电磁并共同作用下积云云滴谱的分布情况 ($C_1 C_c$)。比较可见, 在第 15 分钟时, $C_1 C_c$ 时 $R \geq 40 \mu\text{m}$ 和 $R \geq 100 \mu\text{m}$ 的云滴浓度分别比 C_1 时的相应值大 0.37 倍和 1.2 倍。

上述结果表明, 不论是否有湍流过程, 考虑电磁并过程时的积云云滴谱都比不考虑电磁并时形成的云滴谱稍宽一些。然而, 由于上面计算电磁并作用时作了以下三个假定, 即 ①任意两个相碰的水滴分别带异号电荷; ②任意相碰水滴所带电荷量与其半径都满足关系: $|e| = K_* R$; ③ K_* 取浓积云情况的值。因此, 不难看出, 这些假定都会高估电磁并在积云发展前期对云滴增长的作用。然而, 即使取这样有利的电磁并系数, 计算结果也表明电磁并的作用并不大。因此, 可以认为电磁并机制在积云发展前期的小云滴长大过程中作用不大。Mason^[3] 得出的结果也支持这一结论。

三、大气层结条件对云滴谱形成的影响

为了了解不同大气层结条件对云中云滴谱形成的影响, 我们利用表 3 所列的三种层结条件分别作了计算, 以前的计算都是在表 3 中层结 No. 1 的条件下进行的, 在此作为对比例。在表 3 中, F_1, F_2, F_3 和 F_4 分别代表地面 1200m, 3000m 和 4000m 高度上的

表 3 三种大气层结条件

No.	温度递减率 ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)	相对湿度 (%)	讨论的问题
1	$\gamma_1 = 0.9, \gamma_2 = 0.75, \gamma_3 = -0.45$	$F_1 = F_2 = 80, F_3 = 65, F_4 = 35$	对比例
2	同 No. 1	$F_1 = F_2 = 70$, 其余同 No. 1	相对湿度的影响
3	$\gamma_2 = 0.70$, 其余同 No. 1	同 No. 1	温度递减率的影响

相对湿度, 其间各高度上的相对湿度按线性内插求得, γ_1, γ_2 和 γ_3 分别代表地面到 800m, 800—3000m 和 3000—4000m 三层的环境大气温度递减率。所用的初始核谱为上一篇论文^[1]中图 1 曲线 III 所示的海洋性盐核谱。在计算中考虑云滴重力碰并作用, 重力碰并系数取自 de Almeida^[2]。

图 3 给出了上述三种层结下的积云中垂直速度随高度的分布。图 4 给出了在第 5、15 分钟时这三个积云中最高云滴谱, 在图下给出了相应云含水量和出现高度。

1. 相对湿度的影响 把计算区域下层的相对湿度由对比例 No.1 的 80% 改为 70%, 即得层结 No.2 (见表3)。由图 3b 可见, 在层结 No.2 下, 积云在前 5 分钟发展不算慢, 但 10 分钟时就减弱了, 到第 15 分钟时积云已全部消散。积云的消散是由于下层较干燥的空气不断侵入云内所致。从微观上看, 由图 4 可见, 层结 No.2 时云滴谱对比比例 No.1 时窄, 并且, 随着时间的增长, 相差较大。在第 10 分钟时, No.2 云中 $R \geq 40$

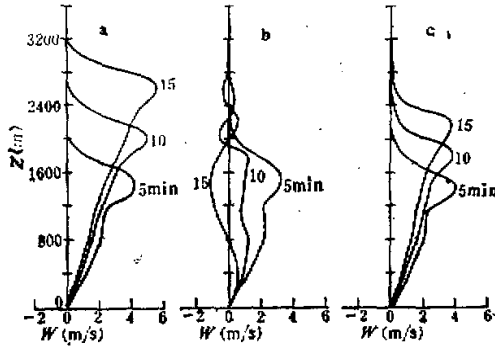


图 3 在不同层结条件下云中垂直速度随高度的分布
图 a, b, c 各为层结 No. 1, No. 2 和 No. 3, 曲线上数字为时间 min

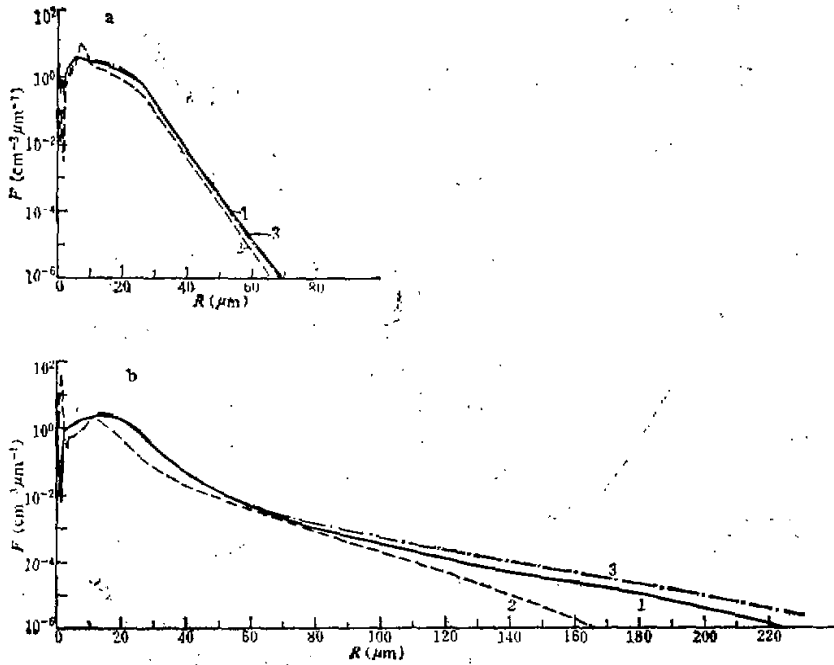


图 4 不同层结条件下的积云云滴谱 (a. 5min; b. 15min)

图 4a 中 1.No. 1, 1400m, 0.784g/kg 2. No. 2, 1600m, 0.500g/kg 3.No. 3, 1400m, 1.272g/kg
图 4b 中 1.No. 1, 2600m, 1.350g/kg 2.No. 2, 1800m, 0.512g/kg 3.No. 3, 2200m, 1.572g/kg

μm 的云滴浓度为 0.21cm^{-3} , 比对比比例小 41%, 在第 15 分钟时, 其浓度为 0.27cm^{-3} , 比对比比例小 49%, 对于 $R \geq 100\mu\text{m}$ 的云滴浓度, No.2 云与对比比例的差别更大。以上结果表明, 低层空气相对湿度小很不利于积云的发展和云中滴谱的展宽。

2. 温度递减率的影响 把计算区域中层温度递减率由对比比例 No.1 的 $0.75^\circ\text{C}/100\text{m}$ 改为 $0.70^\circ\text{C}/100\text{m}$, 即得层结 No.3 (见表 3)。由图 4 可见, 在第 5 分钟时, 层结 No.3 的云中滴谱比对比比例略窄, 随着时间的增长, 两种情况积云中云滴谱的差别减小, 到第 10 分钟时, No.3 的滴谱反而比对比比例宽 (图略), 到第 15 分钟时, 增宽更多。在 5 分钟时, No.3 的 $R \geq 100\mu\text{m}$ 的云滴浓度为 $5.80 \times 10^{-9}\text{cm}^{-3}$, 比对比比例相应值小 17.5%, 而在第 10 分钟时, No.3 的相应浓度为 $4.53 \times 10^{-9}\text{cm}^{-3}$, 第 15 分钟时为 $1.57 \times 10^{-9}\text{cm}^{-3}$, 分别比对比比例相应值大 31.2% 和 79.3%。这些结果表明, No.3 云的滴谱比对比比例云的滴谱展宽要快。从云中含水量上看, 在第 5, 10, 15 分钟时, No.3 分别为 0.86, 1.28, 1.57g/kg, 均比对比比例大。从上述结果看来, 在积云能够发展的前提下, 温度递减率过大并不有利于云中滴谱较快地展宽, 太云滴的增多和云含水量的增加。出现这种情况的原因可能是, 由于温度递减率较大时浮力强, 则云中上升气流随高度增加大, 侧向夹卷率也大, 同时最大上升气流出现的高度较高, 在此高度上空气湿度要比低层小, 这样卷入多而干的空气不利于水滴长大。当然当温度递减率太小时浮力很小只能形成很薄的水平尺度很小的云, 夹卷作用也大, 云滴也不易长大。因此, 只有在适当层结条件下才有利于云滴谱的展宽。

四、吸湿性盐核的化学成分对云滴谱形成的影响

前面所有讨论都假定了吸湿性盐核的化学成分为 NaCl 。大家知道, 大气中的吸湿

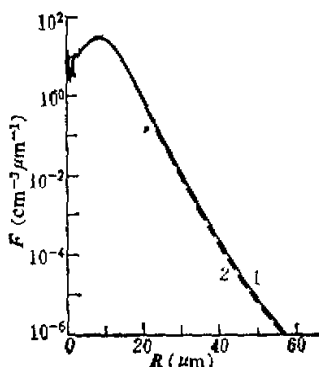


图 5 不同化学成分的盐核谱模拟的积云云滴谱 (10min, 2000m 高度)
图中曲线 1 和 2 分别代表 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 核和 NaCl 核的情况。

性盐核的化学成分除 NaCl 外, 还有 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, MgCl_2 , CuSO_4 , CaCl_2 等。核的化学成分不同, 其凝结增长率也会不同, 因此, 盐核的化学成分有可能影响到云滴谱的形成。为此, 我们再用化学成分为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的吸湿性盐核来计算, 核谱谱型与我们的前一篇论文¹⁾中图 1 曲线 I 和 II 所示的大陆性盐核谱相同。在计算中考虑重力碰并的作用。所用大气层结取表 3 中层结 No.1。计算结果如图 5 所示。 NaCl 核的计算结果作为对比比例给出。

由图 5 可见, 在相同的大气层结条件下, 对于相同的核谱谱型, 用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 盐核计算所得的云中云滴谱与用 NaCl 盐核计算所得的云滴谱差别不大。这两种盐核模拟的积云中宏观特征量的分布也没有明显的差别。因此, 可以认为在相同的大气层

1) 肖 辉, 徐华英, 黄美元, 1988, 积云中云滴谱形成的数值模拟研究(一)——盐核谱和浓度的作用, 大气科学 (待发表)。

结条件下,吸湿性盐核中象 NaCl 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 这样一类化学成分对积云的宏观特征和微观特征都影响不大。这是因为,虽然核的化学成分不同,其凝结增长率也不同,但由 Pruppacher 和 Klett 文中图 13-2 可知^[9],在同样的过饱和度下,质量相同的 NaCl 核和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 核都可在几分钟内凝结长大成大小相差不多的云滴,因此,对于核谱一样的 NaCl 核和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 核,所形成的积云云滴谱显然差别不大。Fitzgerald^[10] 在只考虑凝结作用的情况下,利用上升速度是定常的绝热云泡模式所得的数值研究结果也支持了上述结论。

五、小 结

根据上面的讨论和分析,可以得到以下几点结论:

(1) 在各种碰并过程对积云发展前期云滴谱展宽的作用中,以重力碰并过程的作用最为显著,小尺度湍流的碰并过程则起到很重要的促进作用,它可以加速大云滴的增长,而电碰并过程的作用并不大。

(2) 低层环境空气的相对湿度小很不利于积云的发展和云滴谱的展宽;大气温度递减率过大看来并不利于云中滴谱较快的展宽和云含水量的增加。

(3) 吸湿性盐核的化学成分对积云的宏观特征和微观特征都影响不大。

参 考 文 献

- [1] 顾毓琇, 1980, 云雾降水物理基础, 137—145, 154—161, 科学出版社。
- [2] Barry, E. X., 1967, Cloud droplet growth by collection, *J. Atmos. Sci.*, 24(6), 688—701.
- [3] Ryan, B. F., 1974, Growth of drops by coalescence: The effect of different collection kernels and of additional growth by condensation, *J. Atmos. Sci.*, 31(7), 1942—1948.
- [4] de Almeida, F. C., 1979a, The effects of small-scale turbulent motions on the growth of a cloud droplet spectrum, *J. Atmos. Sci.*, 36(8), 1557—1563.
- [5] de Almeida, F. C., 1979b, The collisional problem of cloud droplets moving in a turbulent environment —Part II. Turbulent collision efficiencies, *J. Atmos. Sci.*, 36(8), 1564—1576.
- [6] Takahashi, T., 1976, Warm rain, giant nuclei and chemical balance—A numerical model, *J. Atmos. Sci.*, 33(2), 269—286.
- [7] Weickmann, H. K. and aufm. Kampe, H. J., 1953, Physical properties of cumulus clouds, *J. Met.*, 10(3), 204—211.
- [8] Mason, B. J., 1971, *The Physics of Clouds*, 2nd ed., Oxford University Press, London, 152—153.
- [9] Pruppacher, H. R. and Klett, J. D., 1978, *Microphysics of Clouds and Precipitation*, 421, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- [10] Fitzgerald, J. W., 1974, Effect of aerosol composition on cloud droplet size distribution. A numerical study, *J. Atmos. Sci.*, 31(5), 1358—1367.