

三类降水云雨滴谱特征研究

官福久

(辽宁省人工降雨办公室, 沈阳 110015)

刘吉成

李子华

(南京气象学院, 南京 210044)

摘要 利用 GBPP-100 型地面雨滴谱仪在沈阳夏季测得的积云、层状云和积层混合云的降水资料, 分析了三类云降水雨滴谱的谱型、微结构参量及其短时变化特征。

关键词 沈阳 夏季 雨滴谱

1 引言

不同云状降水雨滴谱的研究, 对于云内成雨机制的探索、人工增雨效果的检验、雷达定量测量降水等都具有重大的理论意义和实用价值。我国从 60 年代开始就重视这方面的观测和研究^[1~3], 80 年代以来, 这项工作不断深入^[4~6]。但大多数研究者对单一降水类型进行分析, 而且由于条件的限制, 对地面雨滴谱未能进行连续不间断的观测。

1994 年 7~8 月, 采用美国 PMS 公司生产的 GBPP-100 型地面雨滴谱仪, 对沈阳几次降水过程做了观测。由于计算机记录, 观测可以不间断地进行。

本文利用 3 个降水日的积雨云、层状云和积层混合云降水的雨滴谱资料, 研究了三类降水云雨滴谱特征; 对其微结构的演变, 进行了详细的分析。

2 仪器与观测

GBPP-100 是利用光阵排列法对雨滴谱进行全谱观测。当粒子通过探测器观测区域时, 就会留下阴影, 并通过光学二极管感应而被探测出来。仪器共有 62 个通道, 每个通道探测范围为 0.2 mm, 第 1 通道可测直径为 0.14~0.34 mm 的粒子, 第二通道可测 0.34~0.53 mm 范围的粒子……, 第 62 通道可测 12.3~12.5 mm 的粒子。刘延刚和游来光^[7]曾使用滤纸法和 GBPP-100 同时观测雨滴尺度谱, 对比分析结果表明, 两种方法所得的雨滴总数密度差别不明显, 雨强随时间变化形式相似, 滴谱分布图形相似, 但在大滴一端由 GBPP-100 所测的雨滴数偏大, 因而雨强也偏大。分析认为, GBPP-100 过高估计了大雨滴的贡献, 是由雨滴形变和重叠造成的。

关于空中水滴大小与形状的关系, Pruppacher 和 Pitter^[8]做过实验和理论研究, 以 (b/a) 代表形变雨滴的短长半径比, a_0 代表相应于圆球形水滴半径, 则有

$$(b/a) = 1.05 - 0.131a_0.$$

由于

1995-11-27 收到, 1996-10-21 收到修改稿

$$\frac{4}{3}\pi a^2 b = \frac{4}{3}\pi a_0^3,$$

可以求得

$$a = (1.05 - 0.131a_0)^{-1/3} a_0.$$

用上述公式对大于 3 mm 雨滴进行了形变误差订正。重叠误差是由 GBPP-100 工作原理造成的, 由于本文是研究降水微结构变化特征, 比较三类云降水的相对差异, 因而这种误差对其影响不大。

一般在降水整个过程中, GBPP-100 连续取样。一次采样时间视雨强大小取 10 s 和 30 s 不等。每 30 min 存盘一次, 探头稍作休息, 再行开机观测。与此同时, 沈阳中心气象台还进行卫星云图接收和雷达观测。三类降水云, 即积雨云、层状云和积层混合云主要是根据雷达观测和卫星云图确定的。

1994 年 7 月 13 日, 沈阳处于高空槽前和西南风低空急流轴上, 地面有冷锋过境。自 20 时至 14 日凌晨, 沈阳降暴雨, 总雨量达 75 mm。本文取了冷锋过境时积雨云降水雨滴谱资料。8 月 15 日, 受 15 号台风影响, 沈阳处于台风倒槽北部切变线上, 选取了台风外围连续稳定的层状云降水雨滴谱。8 月 16 日, 台风在大连庄河登陆北上, 沈阳位于台风中心西北部, 积层混合云雨滴谱资料就是在此时段取得。随着台风北上, 风力增强, 沈阳逐渐转为台风中心附近的强积云降水。这次过程沈阳降雨量达 138 mm。三次降雨过程共获得 1541 个样本, 其中积雨云降水 893 份, 层状云降水 283 份, 积层混合云降水 365 份。

3 雨滴谱分析

3.1 平均雨滴谱图

图 1 为三种云降水的平均雨滴谱。可以看出, 层状云降水雨滴谱分布比较窄, 最大雨

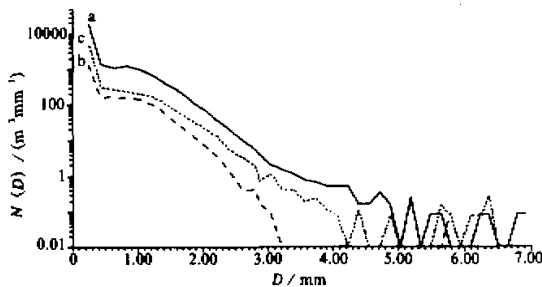


图 1 三类降水云平均雨滴谱

(a) 积雨云; (b) 层状云; (c) 积层混合云

滴直径为 3 mm; 积雨云和积层混合云降水谱宽, 最大雨滴分别达到 8 mm、7 mm。这种特大雨滴, 何珍珍^[2]、阮忠家^[1]等早在 1962 年夏季在泰山已观测到。在我们观测的冷锋和台风积云降水中, 出现大于 6 mm 雨滴的样本有 111 个, 其中 7~8 mm 的有 44 个。积层混合云降水中, 出现 6 mm 以上的样本也有 10 个。这里可能有一些是重

叠所致, 但从后面的图 3、图 4 看, 其指示性较好, 特大滴的出现符合雨滴谱演变的客观规律。图中积雨云和积层混合云在直径大于 4 mm 的一侧起伏大, 具有多峰结构, 这

与层状云降水有着明显的差异。三种谱分布曲线以积雨云在上, 层状云在下, 积层混合云居中。说明各尺度档的雨滴数密度以积雨云为最多, 层状云最少, 积层混合云介于其中。从谱形来看, 除层状云降水外, 积雨云和积层混合云降水的谱形与指数分布有很大差异, 不仅大水滴多得多, 小于 0.4 mm 的雨滴也很多。这表明 M-P 分布不完全适合积雨云和积层混合云降水。

大水滴方面的多峰结构及大水滴的偏多现象, 阮忠家^[1]早有观测。不同的是, 在我们的积雨云降水平均谱中, 不仅大水滴偏多, 而且也出现相当多的小于 0.4 mm 的雨滴。我们观测的积雨云, 雷达回波顶高度超过 12 km, 负温区厚度超过 7 km, 云中垂直气流强、含水量大。在这样的云中形成特大雨滴是必然的。这种大雨滴一部分落地被我们测出, 但还有相当数量的特大雨滴在下落途中破碎, 这不仅可造成较大滴的增多和多峰结构, 也会使特小雨滴大量增加。

3.2 微物理特征参量平均值

计算的微物理特征参量有空间数密度 N 、雨强 I 、平均直径 D_1 、均方根直径 D_2 、体积中值直径 D_0 及最大直径 $D_{\max}$ 等。体积中值直径 D_0 由下式确定:

$$2 \int_{D_{\min}}^{D_0} D^3 N(D) dD = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 N(D) dD.$$

D_0 的物理意义是: 从小滴起累积雨水量达总雨水量的 50% 处的雨滴直径。为了研究小滴对雨强的贡献, 还计算了小于 1 mm 的雨滴占总数密度的比例 (N_1/N) 和对雨强的贡献率 (I_1/I)。表 1 给出了三类云降水的微物理参量的平均值。由表可见, 雨滴数密度 N 以层状云为最小, 积雨云 (特别是靠近台风中心的强积雨云) 为最大, 积层混合云介于其中。就雨滴尺度来说, 积雨云平均尺度小, 而层状云平均尺度大。这是由于积雨云雨滴数密度大, 主要是小滴特别多, 表 1 中指出, 小于 1 mm 的雨滴积雨云占 88% 以上, 而层状云仅占 78%。平均雨强以积雨云降水为最大, 主要是由于谱宽, 大滴多。积雨云中小于 1 mm 雨滴数密度虽很大, 但对雨强的贡献不超过 10%, 而层状云却占了 33%。由表 1 中 D_0 和 $D_{\max}$ 值也可以看出, 积雨云降水强度大, 主要是大滴和较大滴的贡献, 层状云降水强度小, 则是由于 $D_{\max}$ 和 N 都很小。积层混合云降水平均数密度较大, 谱比较宽, 其降水强度虽比积雨云小, 但远大于层状云。由于这类云范围大, 降水时间长, 对某地来说, 往往可造成大暴雨。

为了分析积雨云和积层混合云雨滴数密度大的原因, 计算了各类云第 1 通道的雨滴

表 1 三类云降水微物理特征参数平均值

降雨云类型	I mm/h	D_1 mm	D_2 mm	D_0 mm	$D_{\max}$ mm	N m^{-3}	N_1/N	I_1/I	样本数
层状云	2.1	0.61	0.81	1.23	2.00	455	78%	33%	283
积层混合云	12.7	0.49	0.75	1.47	2.73	2440	85%	17%	365
积雨云	18.8	0.46	0.69	1.54	4.25	5004	88%	9%	427
台风中心附近 积雨云	21.7	0.30	0.53	2.18	3.93	15307	98%	7%	466

数密度 n 及占总数密度 N 的比例, 结果如表 2 所示。由表可见, 积雨云雨滴数密度大, 主要是第 1 通道, 即直径为 $0.14 \sim 0.34 \text{ mm}$ 的特小雨滴很多, 尤其是靠近台风中心的强积雨云, 其特小雨滴占 92%。过去采用吸水纸法观测雨滴谱, 一般测量大于 0.2 mm 的雨滴, 对大量特小的雨滴很难测出, 而且有许多小雨滴常常淹没在大雨滴斑迹之中, 故而测得的雨滴数密度偏小。积雨云降水小滴数密度如此之多, 很可能与大滴破碎有关。梅森^[9]指出, 雷暴雨云很大和很小的雨滴数密度通常比 Marshall-Palmer 公式预计的要高出很多, 小滴的超出部分是由于很大的雨滴在接近地面时溅散与破碎的缘故。

表 2 第 1 通道雨滴数密度 n 占总数密度 N 的比例

降雨云类型	N / m^{-3}	n / m^{-3}	n / N	$(N - n) / \text{m}^{-3}$
层状云	455	275	60	180
积层混合云	2440	1840	75	600
积雨云	5004	3653	73	1351
台风积雨云	15307	14136	92	1171

3.3 微结构参量的演变

图 2 为三类云降水的雨强 I 、雨滴数密度 N 、最大直径 $D_{\max}$ 随时间变化曲线。其中层状云和积雨云一次取样时间为 30 s , 积层混合云降水采样时间为 10 s 。图中给出了近 30 min 的连续变化情况。可以看出, 三类云降水都是不均匀的, 其微结构参量都有起伏变化。如果令 $\sigma(x)$ 为变量 x 的均方差, $\mu(x)$ 为其数学期望, 用 $\delta(x) = \sigma(x) / \mu(x)$ 表示其参量的起伏量^[10], 则可以计算出层状云、积云和积层混合云降水平均 $\delta(I)$ 分别为 50% 、 55% 和 60% , 平均 $\delta(N)$ 分别为 56% 、 59% 和 61% 。可见积层混合云雨强起伏最大, 这是由于其内含有层状云的小雨强和积云的大雨强。就数密度而言, 积云起伏量最大。在我们给出的 30 min 演变图 (图 2b) 中, 较大的起伏就有 10 次之多。如果作细微分析, 还可看到图中有一个明显的特点, 即 N 和 I 的变化一般是同相的, 它们的峰值位置基本是一致的, 但 $D_{\max}$ 和 I 的变化有时一致, 有时则不相同, $D_{\max}$ 有超前趋势。例如图 2b 中 630 、 780 、 900 s 处, $D_{\max}$ 出现峰值, 紧接着 N 、 I 出现峰值, $D_{\max}$ 出现低谷, 这就是说, 在 N 、 I 增大之前往往有特大滴下落。这种现象阮忠家^[11]、徐华英^[8]早在 1962 年就已发现, 那时他们根据吸水纸法观测的记录, 认为大滴超前时间一般为 2 min 。在我们的连续观测中发现, 积雨云降水大滴超前时间仅为 $30 \sim 60 \text{ s}$ 。在图 2b 中还可以看到, 从 $330 \sim 840 \text{ s}$, $D_{\max}$ 及随之而来的 N 和 I 是起伏增大的, I 由 10.8 mm/h 增大到 35.5 mm/h 。这次起伏增大的最早特征是 $D_{\max}$ 由 2.4 mm 突增到 5.9 mm 。可以说雨滴的突然增大是强降水中心到来的前兆。关于大滴超前现象, 徐华英^[8]曾作理论探讨, 认为是重力分选与风切变造成。

图 2c 是积层混合云降水近 30 min 的连续记录。大片深厚的层状云中嵌有对流云 (或对流泡) 称积层混合云。图中自 $400 \sim 900 \text{ s}$ 的时间段内, 为明显的对流云降水, 降水强度超过 6 mm/h , 此时雷达回波顶高度为 9 km 。自 900 s 以后, 转为层状云降水, 降水强度都在 3 mm/h 以下。不管在哪个降水时段, 图中的每条曲线都是不停地起伏变化, 这说明积层混合云降水很不均匀。在对流云降水时段, I 与 N 、 $D_{\max}$ 的峰值位置基本一致, 就是说雨强的增大是由雨滴数密度的增多和滴谱的变宽两者决定的。就

随时间的变化趋势来看, I 的变化似与 N 的变化更为一致, 先随着 N 起伏增大而增大, 后随着 N 起伏减小而减小, 在 610 s 至 850 s 的 4 min 时间内, 降水强度比较大, 是对流降水强中心, 此时雨滴数密度也很大, 超过了 $2000/\text{m}^3$, 而在层状云降水时段, N 值量级为 $10^2/\text{m}^3$ 。图中可以看到, 积层混合云降水 $D_{\max}$ 多在 2.5~3.5 mm 之间, 但在强降水中心区, 出现过两次特大滴, 第 1 次特大滴出现 (580 s) 后, 紧接着出现了 4 min 的强降水, 这与积雨云降水类似。在对流云降水时段之前, 即 250 s 处也出现 1 个特大滴, 或许是积层混合云降水中对流云降水到来之前 (2.5 min) 的先兆。

3.4 雨滴谱分布的演变

图 3 是 7 月 13 日 20:32 开始观测的积雨云降水第 15~22 个样本, 每个样本采样时间为 30 s。由图可见, 第 15 个滴谱图基本单调指数下降, 没有明显的峰值, 瞬时雨强为 18.4 mm/h。第 16 图在大滴一方出现了明显的起伏, 而且出现了零散的较大水滴。第 17 图大水滴直径达到 5 mm, 此后出现了两个变化, 一是

滴谱图主体 (指连续不间断部分) 向大水滴方向移动, 而且在大水滴一方出现多峰结构; 二是小于 0.4 mm 的小滴成倍增加, 结果使第 19 个样本的雨强增大到 36.8 mm/h。此后谱宽变窄, 第 20 图基本回到第 15 图的情形。这一周期仅 3 min, 由测出最大滴到雨强出现峰值仅 1 min。在第 21 图上又出现了零散大水滴, 最大滴直径为 5.8 mm, 同时 1~3 mm 间隔水滴数明显减少。紧接着滴谱曲线主体又往大滴方向移动, 出现了多峰结构, 且小滴一端增大了 3 倍, 结果雨强达到了 33.2 mm/h。如此周期变化多次出现。出现大滴的同时, 1~3 mm 间隔的水滴数明显减少, 这说明大滴是由较大滴碰并较小滴而形成的。零星大滴之后, 滴谱曲线大水滴一方出现多峰结构和小滴数的增多, 这不仅有碰并效应, 还有大雨滴的破碎作用。计算了各档大小雨滴对雨强的贡献。尽管积雨云谱比较宽, 但大滴毕竟很少, 对降水强度贡献最大的仍然是 1~2 mm 大小的雨滴, 约占总雨强的 54%, 其次是 2~3 mm 间隔档的雨滴, 贡献率为 17%, 大

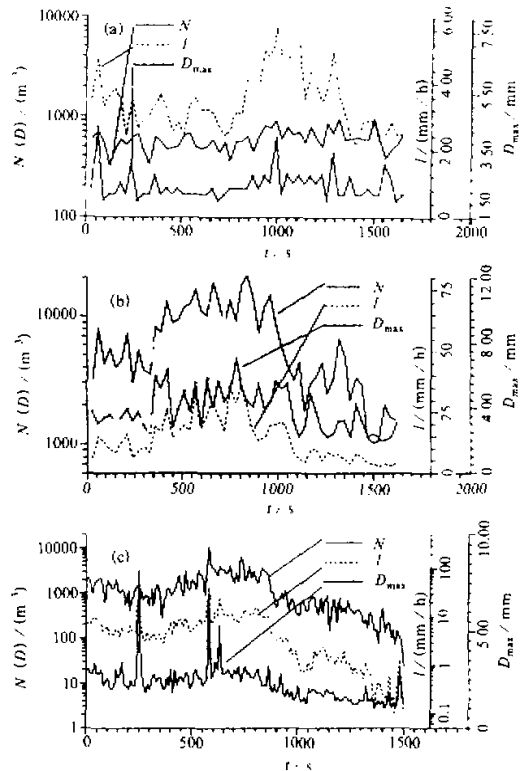


图 2 三类云降水的 I 、 N 和 $D_{\max}$ 随时间的变化

(a) 层状云降水 (8 月 15 日 22:31 开始),

(b) 积雨云降水 (7 月 13 日 20:32 开始),

(c) 积层混合云降水 (8 月 16 日 01:27 开始)

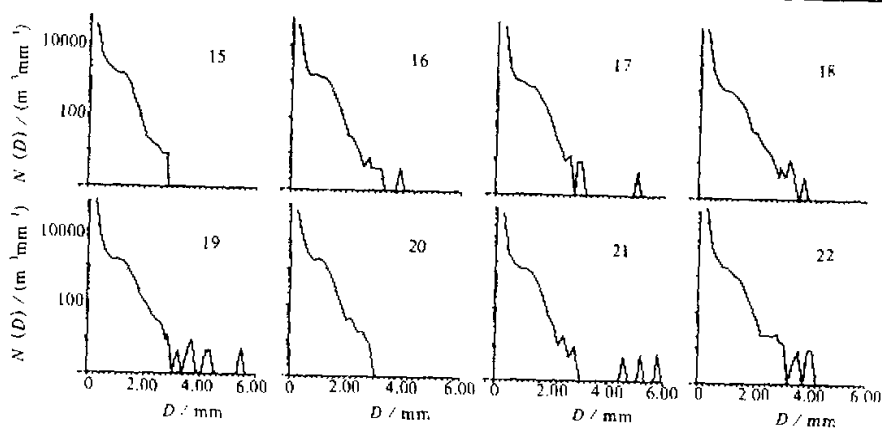


图3 积雨云降水雨滴谱的演变

于 4 mm 的大雨滴约占总雨强的 14%。

积层混合云降水雨滴谱图演变如图 4 所示。这是 8 月 16 日 01:27 开始观测的, 每个样本采样时间是 10 s, 这一时次共观测得 150 个样本, 图中选用了其中的 8 个滴谱图, 用来说明强降水前后雨滴谱的演变。第 49 图在 0.8~1.0 mm 处有一峰值, 最大直径为 2 mm, 这是层状云降水类型谱。以后在 1.7 mm 处又出现一个峰, 同时滴谱曲线向大水滴方向移动, 降水强度逐渐增大。到第 58 图, 出现了 6.9 mm 的特大滴, 此时两个峰值分别移到 1.6 mm 和 2.2 mm 处, 瞬时雨强增大到 41.4 mm/h。随着大滴的出现, 雨滴数密度增大了 2 倍, 达到 $10^4/\text{m}^3$ 。50 s 以后 (第 63、64 图), 又出现了 5.2 mm 大滴, 滴谱曲线主体拓宽到 3 mm, 第 2 个峰值右移到 2.6 mm。图中可以看到, 大滴出现或滴谱曲线拓宽时, 较小水滴明显减少, 这可能是雨滴捕获、碰并所致。此后几分钟降水强度都比较大, 在 11~18 mm/h 之间, 滴谱图基本如第 63 或 64 形式。由此可见, 积层混合云降水强度的增大, 主要是由于雨滴数密度明显增大, 谱宽由 2 mm 拓宽

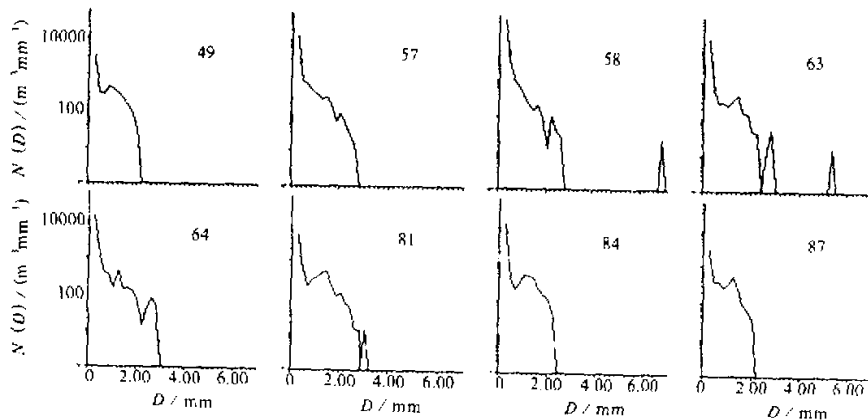


图4 积层混合云降水雨滴谱的演变

到 3 mm, 而且在这个粒子段出现峰值。这可能是积层混合云中对流泡自然播种和碰并的结果。当雨滴数密度很大时, 通过较大水滴对较小水滴的碰并, 也可能出现个别特大水滴。从第 81 图开始, 雨强逐渐减小。滴谱图显示出, 先是谱逐渐变窄, 第 2 峰消失, 而后雨滴数密度明显减少, 到第 87 图又回到了第 49 图的样子。比较降水前后的第 57 图和第 84 图, 两个样本雨强相同 (分别为 11.7 mm/h 和 11.8 mm/h), 但第 57 图比第 84 图要宽。这与阮忠家^[1]的观测结果一致。由于降水增强时碰并过程使谱不断加宽, 而降水减弱时, 大水滴消失, 但 0.8~2.0 mm 的水滴有所增多。

为了研究雨滴谱演变过程中各档雨滴相互关系, 计算了各档雨滴对雨强贡献的大小。计算结果表明, 积层混合云中对流云降水时, 对雨强贡献最大的仍然是 1~2 mm 间隔的雨滴, 约占总雨强的 58%, 其次是 2~3 mm 间隔的雨滴, 对总雨强的贡献约为 30%, 大于 3 mm 雨滴出现机会少, 贡献率不到 5%。

图 5 给出了由 1~2 mm 和 2~3 mm 雨滴计算的雨强随时间的变化。图中只给出了 01:27 开始观测的第 45~90 个样本的演变, 最上面曲线为总雨强。由图可见, 1~2 mm 雨滴所产生的雨强起伏变化幅度较小, 而 2~3 mm 雨滴的雨强起伏幅度较大, 而且与总雨强的起伏相当一致。计算结果表明, 1~2 mm 和 2~3 mm 雨滴的雨强与总雨强的相关系数分别为 0.69 和 0.86。说明总雨强的起伏, 主要是由 2~3 mm 雨滴的起伏变化决定的。图上还可以看到, 1~2 mm 雨强曲线常与 2~3 mm 雨强曲线位相相反 (如样本 47、50、55、60、64、75、77 等处)。这说明云雨碰并增长显著时, 较大雨滴数就会增多, 同时较小雨滴数就会减少, 而云雨碰并作用减小时, 较大雨滴数就会减小, 较小雨滴就会显著增多。也就是说, 总雨强的起伏, 反应了云中碰并过程的起伏。当然 1~2 mm 雨强与 2~3 mm 雨强曲线位相也有一致的时候, 如图 5 中 65~73 样本, 在这 80 s 内, 雨强处于低谷, 可能是对流较弱的部位, 不管是 1~2 mm, 还是 2~3 mm 间隔的雨滴, 总体讲都明显减少。

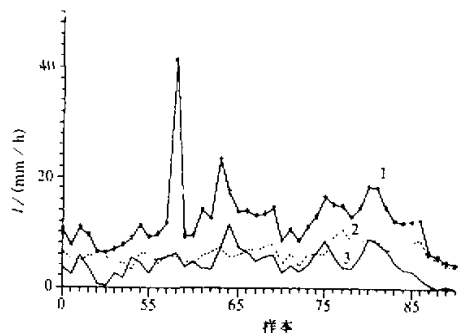


图 5 积层混合云中由 1~2 mm 和 2~3 mm 雨滴计算的雨强随时间的变化
2 代表 1~2 mm, 3 代表 2~3 mm

4 结论

(1) 三类降水云平均雨滴谱不同, 层状云雨滴谱比较窄, 呈指数分布, 积雨云和积层混合云降水谱宽, 且在大水滴一方呈多峰结构。

(2) 层状云、积层混合云和积雨云雨滴数密度的量级分别为 10^2 、 10^3 和 $10^3 \sim 10^4 \text{ m}^{-3}$ 。积雨云雨滴数密度大, 主要是小雨滴比例大, 尤其是特小雨滴 (0.14~0.34 mm), 约占 67% 以上。

(3) 积雨云降水在雨强数密度和雨强增大之前, 常有特大滴下落, 大滴超前时间仅

为 30~60 s。

(4) 三类降水云降水微结构参量起伏变化都比较大,说明云内结构不均匀。积雨云降水雨强大时,谱增宽,出现多峰结构,且 1~3 mm 间隔雨滴减少;雨强小时,谱变窄。这反映了碰并过程有起伏。

(5) 积层混合云降水强度与雨滴数密度成正比,而雨强的起伏,又直接决定于 2~3 mm 雨滴的多少。

参 考 文 献

- 1 阮忠家, 1965, 泰山两次雷雨云降水微结构的一些特征, 我国云雾降水微物理特征的研究, 北京: 科学出版社, 49~61.
- 2 何珍珍, 1965, 泰山一次雷雨雨滴谱观测结果, 我国云雾降水微物理特征的研究, 北京: 科学出版社, 69~71.
- 3 徐华英、李正洪, 1965, 南岳一次阵性降水的演变特征, 我国云雾降水微物理特征的研究, 北京: 科学出版社, 41~48.
- 4 陈万奎、严采馨, 1988, 雨滴谱及其特征值水平分布的个例分析, 气象, 14(1), 8~11.
- 5 陈德林、谷淑芳, 1989, 大暴雨雨滴平均谱的研究, 气象学报, 47(1), 124~127.
- 6 王伟东, 1991, 一次降水过程雨滴谱及其特征值的个例分析, 人工影响天气技术体系的研究, 北京: 气象出版社, 237~246.
- 7 Liu Yanggang and You Laiguang, 1994, Error analysis of GBPP probe, *Atmos. Res.*, 34, 379~387.
- 8 王鹏飞、李子华, 1989, 微观云物理学, 北京: 气象出版社, 406~408.
- 9 B. J. 梅森, 1978, 云物理学, 中国科学院大气物理研究所译, 北京: 科学出版社, 624~628.
- 10 寇丽珊、陈万奎、黄美元, 1965, 南岳和泰山云中微结构起伏资料的初步分析, 我国云雾降水微物理特征的研究, 北京: 科学出版社, 30~40.

Study of the Raindrop Size Distributions for Three Types of Precipitation

Gong Fujiu

(The Weather Modification Office of Liaoning Province, Shenyang 110015)

Liu Jicheng and Li Zihua

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Abstract Using the cumulus, stratus and merging cloud precipitation raindrop size distribution data observed with GBPP-100 (produced by PMS Co. in the U.S.) over Shenyang in summer, features of the size distributions and the evolution are analyzed. The results obtained are of high value to the study of raindrop size distribution.

Key words Shenyang summer raindrop spectrum