

## 哈尔滨地区雨滴直径分布函数

张云峰<sup>1,2</sup>, 黄建平<sup>3</sup>, 朱彬<sup>3</sup>

(1. 南京气象学院研究生部, 南京 210044; 2. 黑龙江省人工影响天气中心, 哈尔滨 150036;

3. 南京气象学院环境科学系, 南京 210044)

**摘要:**采用美国 PMS 公司生产的 GBPP-100 型地面雨滴谱仪, 对 1999 年 5~7 月哈尔滨地区几次降水过程进行了观测。根据雷达资料和宏观观测, 把降水云分为层状云、积层混合云和积雨云, 分析了 3 类云降水微物理结构, 重点研究了不同类型降水的雨滴谱分布特征, 拟合了雨滴直径分布函数。

**关键词:** 哈尔滨, 降水微结构, 雨滴谱, 直径分布函数

**中图分类号:** P426.611 **文献标识码:** A

雨滴谱观测是云和降水物理的重要项目之一, 而研究雨滴谱的分布可以分析自然降水的微物理结构及其演变特征, 对人工影响天气的研究有很重要的意义。以往雨滴谱的观测通常采用滤纸色斑法、面粉法<sup>[1]</sup>等。利用美国 PMS 公司生产的 GBPP-100 型地面雨滴谱仪具有可以连续观测、反应灵敏、精度高、资料样本多等特点。

雨滴谱一般呈指数分布, Marshall 等<sup>[2]</sup>得出表达式为  $n = n_0 e^{-\lambda D}$ 。其中,  $n$  为雨滴密度分布函数,  $n_0, \lambda$  为拟合参数,  $D$  为雨滴直径。在许多观测研究中发现  $M-P$  分布对于稳定性降水拟合效果好, 但是对于波动性较大的阵性降水偏差较大。用  $\Gamma$  分布进行拟合, 提高了拟合的精度, 能够较好地反映雨滴谱的分布, 其表达式为  $n = n_0 D^\mu e^{-\lambda D}$ 。其中,  $\mu$  是新增的形状因子。

我国从 60 年代开始进行了雨滴谱的观测分析工作, 并在 80 年代得到发展。起初是对单一降水类型的云系进行观测分析, 并未对降水云系进行具体分类研究, 后来陈宝君等<sup>[3]</sup>利用 GBPP-100 型地面雨滴谱仪对地面雨滴谱进行观测, 分析了 3 类降水云雨滴谱特征。

1999 年 5~7 月, 采用 GBPP-100 型地面雨滴谱仪对哈尔滨地区的 27 次降水过程进行观测, 并对所取资料进行整理、分析, 研究了该地区的雨滴谱分布特征, 给出了 3 类云雨滴直径分布函数。

### 1 观测与仪器

GBPP-100 型地面雨滴谱仪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时, 留下阴影, 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, ..., 第 62 道可测 12.3~12.5 mm 的粒子, 但由于雨滴的形变和重叠会导致过高地估计大雨滴的贡献。刘延刚等<sup>[4]</sup>采用吸水纸和

GBPP-100 型地面雨滴谱仪同时观测并进行对比观测,结果也发现在大滴一端由 GBPP-100 型地面雨滴谱仪所测的雨滴偏大。为解决这一系统误差,需对所测结果进行订正。Pruppacher 等<sup>[5]</sup>研究发现,若以  $(b/a)$  代表形变后雨滴的短长半径比,  $a_0$  代表相应圆球形水滴半径,则

$$(b/a) = 1.05 - 0.131a_0. \quad (1)$$

由于

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

所以

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

利用公式(3)对直径大于 3 mm 雨滴谱进行订正。在取样时雨滴重叠会造成大滴增多,这是由 GBPP-100 型地面雨滴谱仪工作原理所致,目前尚无较好的解决办法。本文暂不考虑这种误差的影响。

## 2 资料概况

在观测过程中,GBPP-100 型地面雨滴谱仪连续取样,一次采样时间视雨强大小而定,一般为 10 s 或 30 s。结合卫星云图、雷达回波和地面观测,确定降水云的类型,把降水云分成层状云、积层混合云和积雨云 3 类。

观测资料共取降水过程 27 次,其中层状云 9 次,积层混合云 11 次,积雨云 7 次(表 1)。

表 1 资料概况

Table 1 Survey of sample observation

观测时间	观测时段	采样时间	降雨类型	样本数
19990505	11: 54 ~ 12: 01	30 s	层状云	13
19990507	08: 03 ~ 08: 35	30 s	层状云	61
19990509	10: 22 ~ 11: 46	30 s	层状云	69
19990517	07: 58 ~ 19: 18	10 s	层状云	2 409
19990523	06: 35 ~ 09: 08	30 s	层状云	864
19990618	08: 07 ~ 11: 54	10 s	层状云	1 157
19990619	09: 44 ~ 17: 24	10 s	层状云	197
19990709	13: 11 ~ 03: 40	10 s 和 30 s	层状云	1 663
19990721	09: 06 ~ 14: 03	30 s	层状云	233
19990503	09: 04 ~ 11: 47	10 s	积层混合云	311
19990525	10: 19 ~ 11: 41	10 s	积层混合云	424
19990526	12: 19 ~ 15: 12	30 s	积层混合云	238
19990530	16: 23 ~ 20: 59	10 s	积层混合云	246
19990531	06: 31 ~ 09: 20	10 s	积层混合云	302
19990601	04: 52 ~ 15: 12	10 s 和 30 s	积层混合云	1 560
19990614	08: 31 ~ 22: 44	30 s	积层混合云	2 794
19990622	21: 48 ~ 03: 53	30 s	积层混合云	2 080
19990627	05: 52 ~ 10: 28	10 s 和 30 s	积层混合云	672
19990706	09: 22 ~ 11: 24	10 s	积层混合云	185
19990708	19: 38 ~ 00: 55	10 s	积层混合云	1 353
19990527	07: 52 ~ 09: 09	30 s	积雨云	441
19990607	15: 04 ~ 16: 03	10 s	积雨云	335
19990623	07: 06 ~ 08: 18	10 s	积雨云	418
19990624	17: 05 ~ 18: 20	10 s	积雨云	322
19990626	23: 05 ~ 24: 00	10 s	积雨云	236
19990707	15: 58 ~ 16: 09	30 s	积雨云	19
19990724	08: 00 ~ 08: 25	10 s	积雨云	127

### 3 微物理结构的一般特征

表 2 为微物理参量平均值, 其中  $N$  为空间数密度,  $R$  为雨强,  $Q$  为含水量,  $D_1$  为雨滴的平均直径,  $D_2$  为雨滴的均方根直径,  $D_3$  为雨滴的立方根直径,  $D_{\max}$  为雨滴的最大直径,  $D_0$  为体积中值直径, 即从小滴起累积雨水量达到总雨水量的 50% 处的雨滴直径。其计算公式为

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

由表 2 可以看出, 层状云的雨滴数密度  $N$  最小, 为  $951 \text{ m}^{-3}$ , 积雨云的雨滴数密度最大, 平均值为  $9795 \text{ m}^{-3}$ , 积层混合云的雨滴数密度居中。雨强  $R$  和含水量  $Q$  也有同样的规律:  $R_{\text{层状云}} < R_{\text{积层混合云}} < R_{\text{积雨云}}$ ,  $Q_{\text{层状云}} < Q_{\text{积层混合云}} < Q_{\text{积雨云}}$ 。积雨云的降水强度比层状云降水大得多, 主要是由于积雨云的大滴多, 滴谱宽, 含水量大。比较平均直径  $D_1$  可知, 层状云的平均尺度大, 积雨云的平均尺度小。这是因为积雨云的大滴虽然很多, 但小滴更多, 这样得到的平均直径会小一些。就雨滴的立方根直径  $D_3$  和体积中值直径  $D_0$  而言, 仍然是积雨云最大, 层状云最小, 积层混合云居中。表 3 给出了小于 1 mm 雨滴占总雨滴数的百分比  $N/N_1$  及小于 1 mm 雨滴, 1~2 mm 雨滴, 2~3 mm 雨滴, 大于 3 mm 雨滴对雨强的贡献  $R_0/R$ ,  $R_1/R$ ,  $R_2/R$ ,  $R_3/R$ 。由表可见, 小于 1 mm 的雨滴对雨强的贡献, 层状云表现得最明显, 为 35%, 积层混合云其次, 为 26%, 积雨云最小, 为 11%, 而大于 3 mm 的雨滴对雨强的贡献, 却呈相反的趋势, 即积雨云最大(21%), 层状云最小(4%), 积层混合云居中(7%)。可见, 积雨云的降水强度大是由于相对数目较少的大滴造成的。

表 2 3 类云降水微物理特征参数的平均值

Table 2 Average values of the micro-physical feature parameters for three sorts of cloud precipitation

类别	$N/\text{m}^{-3}$	$R/\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	$Q/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$D_1/\text{mm}$	$D_2/\text{mm}$	$D_3/\text{mm}$	$D_{\max}/\text{mm}$	$D_0/\text{mm}$
层状云	951	0.77	0.05	0.37	0.43	0.50	1.34	0.93
积层混合云	8143	2.41	0.16	0.34	0.42	0.52	1.73	1.11
积雨云	9795	10.59	0.50	0.32	0.42	0.57	2.62	1.72

表 3 各档雨滴对雨强的贡献

Table 3 The contribution to the rainfall intensity of every grades of raindrop

类别	$N_1/N/\%$	$R_0/R/\%$	$R_1/R/\%$	$R_2/R/\%$	$R_3/R/\%$
层状云	98.28	35	49	12	4
积层混合云	97.67	26	50	17	7
积雨云	97.90	11	38	31	21

为比较不同类型降水云的雨滴谱, 图 1 给出 3 类降水云的平均雨滴谱分布曲线。从图中可以看出, 层状云的谱分布曲线在下方, 积雨云的谱分布曲线在上方, 积层混合云居中; 层状云的降水谱比较窄, 最大直径只有 3.9 mm, 积雨云、积层混合云的降水谱比较宽, 最大直径可达 8.8 mm; 3 类降水云降雨  $n$  值都有随雨滴尺度增大而呈指数下降趋势, 对积雨云和积层混合云降水在大滴一侧有明显起伏, 呈多峰结构。

### 4 雨滴谱分布函数

Mashall 和 Palmer 给出的雨滴谱表达式中,  $n_0 = 0.08 \text{ cm}^{-4}$ ,  $\lambda = 41R^{-0.21} \text{ cm}^{-1}$ 。在实际的观测研究中发现  $M-P$  分布对于稳定性降水拟合效果好, 但是对于积雨云等波动性大的降水则在小滴和大滴区段偏差较大, 而且  $n_0$  并非常数。后来 Takeuchi<sup>[6]</sup> 和 Ulbrich<sup>[7]</sup> 分别改用  $\Gamma$  分布进行拟合, 提高了在小滴和大滴区段的拟合精度。比较两个表达式可以看出,  $\Gamma$  分布的表达式比  $M-P$  分布多一项  $D^\mu$ ,  $M-P$  分布是  $\Gamma$  分布当  $\mu = 0$  时的特例。

对 27 次降水过程的观测资料进行分类, 然后利用最小二乘法对每类降水过程的雨滴谱进行拟合, 得出参数, 并求出 3 类降水云拟合参数平均值, 其结果见图 2 和表 4。由图 2 可以看出,  $M-P$  分布和  $\Gamma$  分布的曲线趋势基本相同, 但在雨滴直径偏小和偏大一端出现差异。由图 2a 可以看出, 对层状云降雨  $M-P$  分布和  $\Gamma$  分布拟合值相差都比较小; 图 2b 中积层混合云降雨在  $1.0 \text{ mm} < D < 6.0 \text{ mm}$  段  $M-P$  分布和  $\Gamma$  分布相差比较小, 在雨滴直径小于  $1.0 \text{ mm}$  和大于  $6.0 \text{ mm}$  时,  $M-P$  分布拟合值与观测的真实值相差比较大, 而  $\Gamma$  分布在整个范围内与观测的真实值相差比较小; 图 2c 中  $M-P$  分布拟合积雨云降水雨滴谱曲线明显偏离观测的真实值, 而  $\Gamma$  分布却与观测值符合得相当好。表 5 给出  $M-P$  分布和  $\Gamma$  分布对各类降水云  $N$ 、 $R$  的

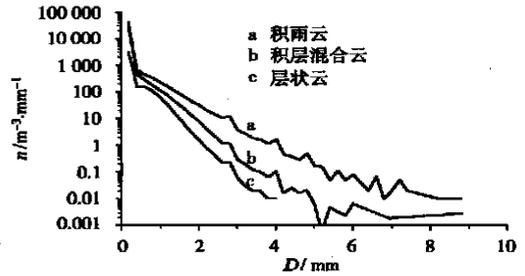


图 1 3 类降水云的平均雨滴谱  
Fig. 1 Average rain-drop spectrum of three sorts of precipitation cloud

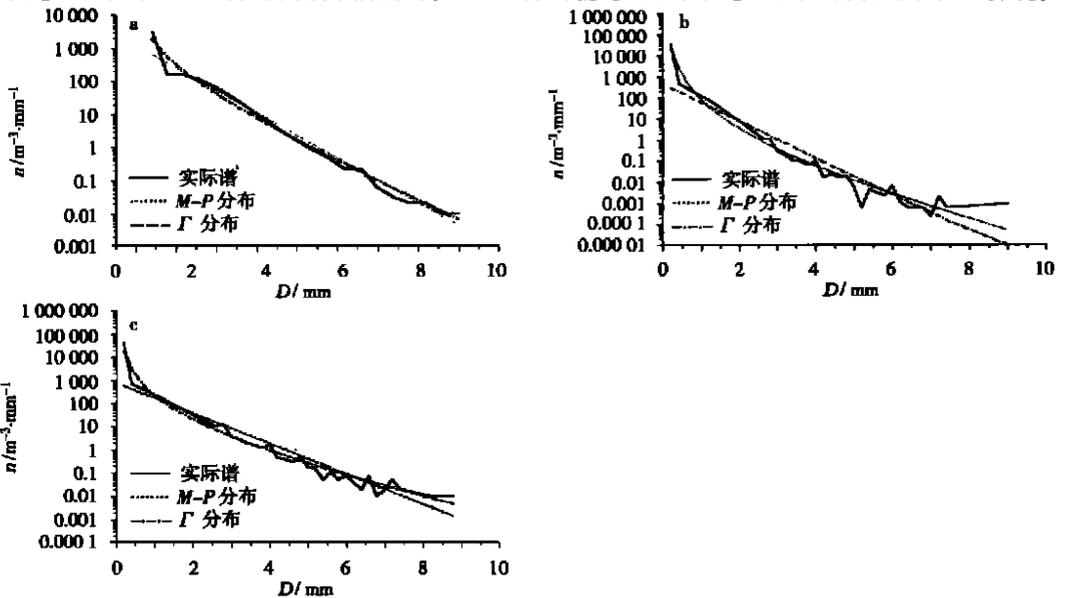


图 2 3 类降水云雨滴谱的实际谱和拟合谱  
a. 层状云降水; b. 积层混合云降水; c. 积雨云降水

Fig. 2 Real and fitting spectrums of three sorts of cloud-rain drop  
a. the precipitation of stratus; b. the precipitation of stratocumulus;  
c. the precipitation of cumulus

平均相对误差。可以看出,用  $M-P$  分布拟合积层混合云和积雨云雨滴数密度出现了很大误差,说明  $M-P$  分布不适合拟合积层混合云和积雨云降水;而用  $\Gamma$  分布拟合则数密度  $N$  相对误差比较小,拟合效果较好。表 5 中还可以看出,利用拟合公式计算雨强时, $M-P$  分布都偏大,而  $\Gamma$  公式都偏小。总的看,对于层状云降水, $M-P$  分布拟合的效果比较好,但  $M-P$  分布不适合积层混合云和积雨云降水,而  $\Gamma$  分布对于层状云、积层混合云和积雨云拟合效果都比较好。

表 4 3 类降水云拟合参数平均值

Table 4 Fitting parameters for three sorts of precipitation cloud

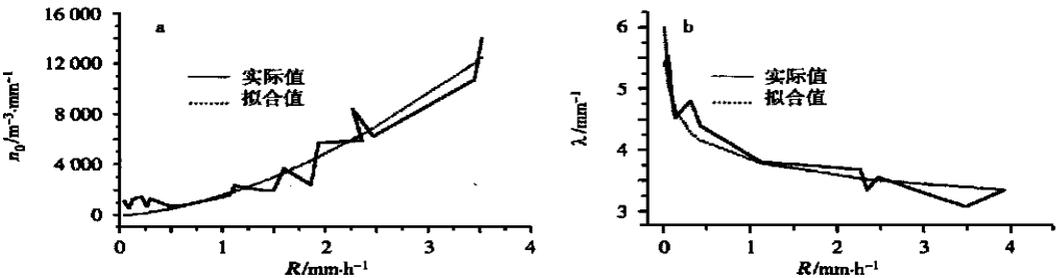
	$M-P$ 分布		$\Gamma$ 分布		
	$n_0/m^{-3} \cdot mm^{-1}$	$N/mm^{-1}$	$n_0/m^{-3} \cdot mm^{-1}$	$N/mm^{-1}$	$\mu$
层状云	1 222.94	3.13	456.33	2.38	- 1.18
积层混合云	446.79	2.01	191.82	0.88	- 3.26
积雨云	759.91	1.51	454.52	0.72	- 2.40

表 5  $M-P$  分布和  $\Gamma$  分布对各类降水云  $N$ 、 $R$  的平均相对误差Table 5 The average relative error of the  $N$  and  $R$  of every sort precipitation in  $M-P$  and  $\Gamma$  distributions

	$M-P$ 分布		$\Gamma$ 分布	
	$N$ 相对误差/%	$R$ 相对误差/%	$N$ 相对误差/%	$R$ 相对误差/%
层状云	- 62.29	5.20	- 25.18	- 14.49
积层混合云	- 98.03	77.57	- 25.31	- 83.59
积雨云	- 95.30	20.50	- 47.98	- 25.20

$M-P$  分布式中的参数  $n_0$ 、 $\lambda$  和雨强  $R$  的关系。陈宝君等<sup>[3]</sup> 得出  $n_0 = 517.9R^{0.368} (m^{-3} \cdot mm^{-1})$ ,  $\lambda = 2.841R^{-0.274} (mm^{-1})$ 。本文利用层状云资料分析的结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,  $n_0$  随着  $R$  的增大而增大,  $\lambda$  随着  $R$  的增大而减小。根据实际的曲线走向,利用 Nonlinear 回归模式,采用 Gauss-Newton 迭代法,得出关系式:  $n_0 = 1533.32R^{1.66} (m^{-3} \cdot mm^{-1})$ ,  $\lambda = 3.82R^{-0.096} (mm^{-1})$ 。由此看来,  $n_0$  并非常数,它随着雨强变化而变化。

利用积雨云降水资料分析了  $\Gamma$  分布参数  $n_0$ 、 $\lambda$ 、 $\mu$  和雨强  $R$  的关系。由图 4 可以看出,  $n_0$ 、 $\lambda$ 、 $\mu$  都随雨强  $R$  的增大而减小,  $n_0$  随雨强  $R$  的变化符合  $n_0 = 8078.693R^{-0.623} (m^{-3} \cdot mm^{-1})$ ,  $\lambda$ 、

图 3  $M-P$  分布拟合的参数  $n_0$ 、 $\lambda$  和雨强  $R$  的关系Fig. 3 The relation between the rain intensity ( $R$ ) and fitting parameters  $n_0$ (a),  $\lambda$ (b) in  $M-P$  distribution

$\mu$  随雨强  $R$  的变化符合  $\lambda = -0.114R + 1.764(\text{mm}^{-1})$ ,  $\mu = -0.102R - 0.663$ 。

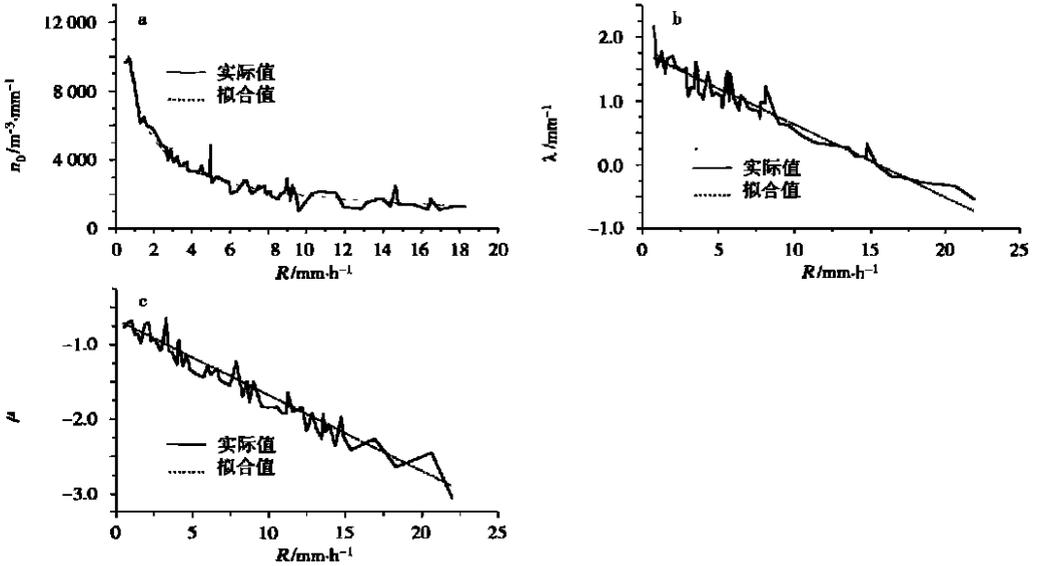


图 4  $\Gamma$  分布拟合的参数  $n_0$ 、 $\lambda$ 、 $\mu$  和雨强  $R$  的关系

Fig. 4 The relation between the rain intensity( $R$ ) and fitting parameters  $n_0$ (a),  $\lambda$ (b),  $\mu$ (c) in  $\Gamma$  distribution

图 5 和图 6 分别为 6 月 18 日层状云降水和 6 月 7 日积雨云降水的雨强以及  $M-P$  分布和  $\Gamma$  分布参数随时间的变化。由图可以看出, 两种分布参数都不是固定不变的, 它们都随雨强的起伏而起伏变化。对于层状云降水(图 5)来说,  $M-P$  分布参数  $n_0$  随时间的变化曲线与雨强  $R$  的变化曲线形态相近, 步调基本一致, 但  $\lambda$  随时间的变化趋势与之相反; 对于积雨云降水(图 6)来说,  $\Gamma$  分布参数的变化与雨强呈相反趋势。这与前面分析得到的分布参数与雨强的关系是一致的。由图 6 还可以看到, 积雨云降水分布参数  $\mu$  值始终保持负值, 这正反映了云内碰并增长和大滴在下降过程中破碎的真实特征。

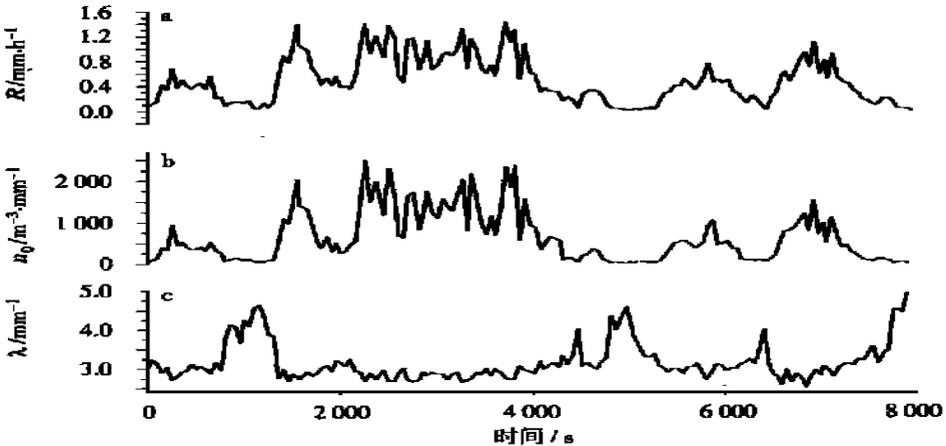
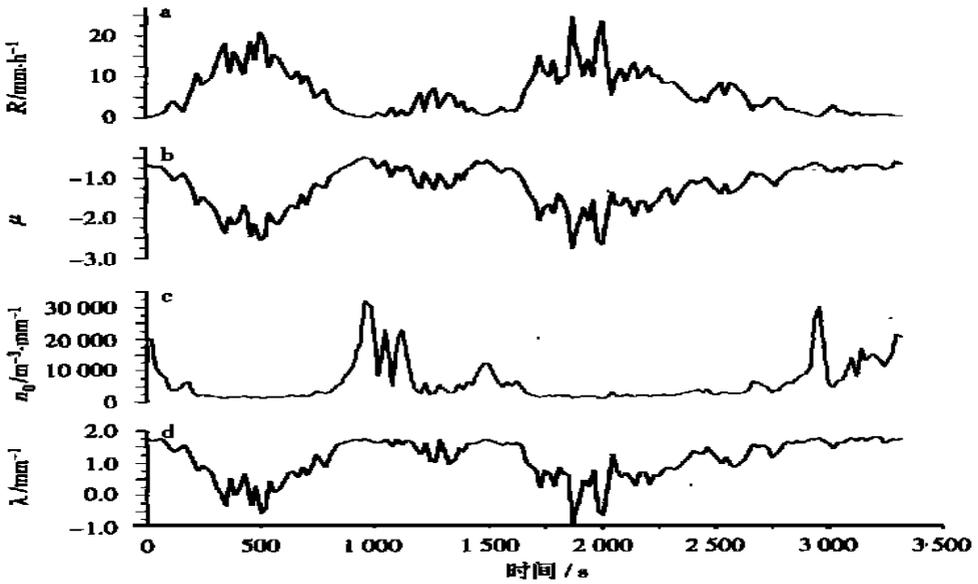


图 5  $M-P$  分布拟合参数随时间的变化

Fig. 5 Variation of fitting parameters with time in  $M-P$  distribution

图 6  $\Gamma$  分布拟合参数随时间的变化Fig. 6 Variation of fitting parameters with time in  $\Gamma$  distribution

## 5 结 论

(1) 层状云的降水谱比较窄, 积雨云的降水谱最宽, 积层混合云居中。

(2) 用  $M-P$  分布拟合层状云降水比较好, 而拟合积层混合云和积雨云则偏差较大, 用  $\Gamma$  分布拟合层状云、积层混合云和积雨云效果都比较理想。

(3)  $M-P$  分布式中  $n_0$  并非为常数,  $n_0$  随着  $R$  的增大而增大,  $\lambda$  随着  $R$  的增大而减小;  $\Gamma$  分布拟合积雨云的参数  $n_0$ 、 $\lambda$ 、 $\mu$  都随雨强  $R$  的增大而减小, 且有起伏,  $\lambda$ 、 $\mu$  随雨强  $R$  的变化符合线性关系。

## 参考文献:

- [1] 李大山. 人工影响天气技术体系的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1991. 263 ~ 266
- [2] Marshall J S, Palmer W M. The distribution of raindrops with size[J]. J Meteor, 1948, 5: 165 ~ 166
- [3] 陈宝君, 李子华, 刘吉成. 三类降水云雨滴谱分布模式[J]. 气象学报, 1998, 56(4): 506 ~ 512
- [4] Liu Yangang, You Laiguang. Error analysis of GBPP probe[J]. Atmos Res, 1994, 34: 370 ~ 387
- [5] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1989. 624 ~ 628
- [6] Takeuchi D M. Characterization of raindrop size distributions[R]. Preprints of Conf. Cloud Physics and Atmospheric Electricity. Issaquah: Amer Meteor Soc, 1978. 154 ~ 161
- [7] Ulbrich C W. Effect of size distribution variations on precipitation parameters determined by dual-measurement techniques. Preprints of 20th Conf. Radar Meteorology[J]. Boston: Amer Meteor Soc, 1981. 276 ~ 281

# RAINDROPS SPECTRUM IN HARBIN

Zhang Yunfeng<sup>1,2</sup> Huang Jianping<sup>3</sup> Zhu Bin<sup>3</sup>

(1. Graduate School, NIM, Nanjing 210044; 2. Weather Modification Center of Heilongjiang Province, Harbin 150036;

3. Department of Environmental Sciences, NIM, Nanjing 210044)

**Abstract:** Observations are made on several precipitation processes in Harbin, with the aid of GBPP-100 ground raindrops spectrometer made in USA. According to the radar data and synoptic observations, the paper divides precipitation cloud into three kinds: status, stratocumulus and cumulus, analyzes the micro-physical structures of three kinds of precipitations, with focus on the distribution characteristics of raindrops spectrum.  $M-P$  and  $\Gamma$  distributions are also used to fit the diameter of raindrops.

**Key words:** Harbin, micro-physical structure, distribution characteristics of raindrops spectrum