

哈尔滨地区春夏季降水微结构特征

袁 成¹, 樊 玲², 李亚滨³

(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. 黑龙江省气象台, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了研究大气水资源本底分布特征, 本文提供人工影响天气潜力和背景依据, 采用 PMS 公司生产的 GBPP-100 型地面雨滴谱仪, 取得哈尔滨地区 1999 年春夏季积雨云、积层混合云和层状云 27 次降水资料, 分析了三类降水云雨滴微结构参量及其演变, 并使用线性回归和逐步判别, 对 Γ 分布参量 n_0 、 λ 和 μ 的线性关系进行统计计算, 得出了一些有意义的结果。

关键词: 降水, 雨滴谱分布, 微结构参量

中图分类号: P426.631 文献标识码: A 文章编号: 1000-2022(2001)02-0250-08

降水是大水循环研究中的一个决定性参数。在大气全球循环模式中, 它影响蒸发、土壤湿度、云量及辐射的参数变化。不同云状降水雨滴谱的研究和降水微结构特征的分析, 对于降水机制的探索、大气水资源的本底分布、人工增雨的效果检验、雷达定量测量降水和提供人工影响天气水资源参考指标, 都有着重大的理论意义和实用价值。我国从 60 年代起开展了一系列这方面的观测和研究, 取得了一些重要成果^[1]。

1999 年 5~7 月, 我们采用美国 PMS 公司生产的 GBPP-100 型地面雨滴谱仪, 在哈尔滨对 27 次降水进行了连续观测, 对三类降水云雨滴微结构参量进行分析, 计算了各档雨滴对雨强的贡献, 给出了数密度、最大直径及雨强的演变关系, 并使用筛选法对雨滴谱分布参量进行线性回归和逐步判别, 研究 n_0 、 λ 和 μ 间的线性关系。

1 仪器与观测

GBPP-100 型雨滴谱仪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, 每个通道探测范围是 0.2 mm, 第 1 个通道可测直径为 0.14~0.34 mm, ..., 第 62 通道可测 12.3~12.5 mm 的粒子。游来光和刘延刚曾使用吸水纸法和 GBPP-100 雨滴谱仪同时观测雨滴谱, 对比发现, 在大滴一端由 GBPP-100 所测得的雨滴数偏大, 因而雨强也偏大^[2]。GBPP-100 过高估计大雨滴的贡献, 是由雨滴的形变和重叠造成的^[2]。对雨滴大小和变形关系, Pruppacher 和 Pitter 研究发现^[3], 若以 (b/a) 代表变形雨滴的短长半径比, 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

$$(4/3)\pi a^2 b = (4/3)\pi a_0^3, \quad (2)$$

可求得

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

本文利用公式(3)对直径大于3 mm的雨滴进行形变误差订正。重叠误差是由GBPP-100工作原理造成的,目前尚无较好的解决办法。在降水过程中GBPP-100连续取样。一次采样时间视雨强大小取10 s或30 s不等。同时进行卫星云图接收、雷达观测和现场云和天气观测。根据这些观测资料,分析了降水类型,得到9个层状云降水日、6 770个样本,7个积雨云降水日、6 230个样本,11个积层混合云降水日、9 511个样本。总共获得22 511个样本。

表1 资料概况

Table 1 General situation of the data

类别	观测日期	观测时段	样本数
层状云	5.05	11:54~12:01	13
	5.07	08:03~08:35	61
	5.09	10:22~11:46	69
	5.17	07:58~19:18	2 409
	5.23	06:35~09:08	864
	6.18	08:07~11:54	1 157
	6.19	09:44~17:24	197
	7.09	13:11~(7.10)03:04	1 663
	7.21	09:06~14:03	337
积层混合云	5.03	09:04~11:47	311
	5.25	10:19~11:41	515
	5.26	12:19~15:12	240
	5.30	16:23~20:59	247
	5.31	06:31~09:20	326
	6.01	04:52~15:12	1 560
	6.14	08:31~(6.15)22:44	2 794
	6.22	21:48~(6.23)03:53	1 051
	6.27	05:52~10:28	704
	7.06	09:22~11:24	218
	7.08	19:38~(7.09)00:55	1 545
积雨云	5.27	07:52~09:09	1 031
	6.07	15:04~16:03	487
	6.23	07:06~08:18	2 444
	6.24	17:05~18:20	998
	6.26	23:05~(6.27)00:00	588
	7.07	15:58~16:09	62
7.24	08:00~08:25	620	

2 微物理结构的一般特征

表 2 为哈尔滨春夏季三类降水云降水微物理参量的平均值, 其中 N 、 I 为空间数密度及雨强; D_1 、 D_2 、 D_3 分别为雨滴平均直径、均方根直径、均立方根直径; D_{\max} 为最大直径; D_0 为体积中值直径, 其物理意义是: 从小滴起累积雨水量达到总雨水量的 50% 处的雨滴直径。

表 2 微物理参量平均值

Table 2 Average of microphysical parameters

类别	N/m	$I/mm \cdot h^{-1}$	$Q/g \cdot m^{-1}$	D_1/mm	D_2/mm	D_3/mm	D_{\max}/mm	D_0/mm
层状云	938.9	0.76	0.05	0.37	0.43	0.50	1.34	0.92
积层混合云	8 579.4	3.13	0.18	0.36	0.43	0.53	1.80	1.10
积雨云	29 956.0	7.23	0.41	0.34	0.43	0.55	2.20	1.40

积雨云降水强度和空间数密度都比较大, 各次降水间差异也很大, 雨强最小为 1.73 mm/h, 最大的可达 11.65 mm/h。积雨云降水含水量最大, 大滴尺度大, 平均最大直径 2.2 mm 左右, 个别大滴可达 9.4 mm。层状云的降水强度最小, 最大为 1.36 mm/h, 最小仅为 0.04 mm/h, 平均雨强为 0.76 mm/h。含水量和最大直径较小, 为 0.05 g/m、1.34 mm。大滴虽小, 但层状云的平均雨滴直径却为三类降水云中最大。中值直径 D_0 最小。积层混合云的各项参量平均值均居中。

为了揭示雨滴大小和雨强的关系, 表 3 给出了小于 1 mm 的雨滴、第 1 档(0~1 mm)的雨滴占总数密度的百分比 N_1/N 及直径在 0~1 mm、1~2 mm、2~3 mm、大于 3 mm 的雨滴对雨强的贡献 I_0/I 、 I_1/I 、 I_2/I 、 I_3/I 。由表 3 可见, 三类降水云的第 1 档(0~1 mm)的雨滴占总数密度的百分比均很大, 均大于 97%, 而大于 1 mm 的大滴虽仅占不到总雨滴数的 2.3%, 但它对雨强的贡献却大于 66%。1~2 mm 的雨滴贡献在各档雨滴中贡献最大, 均大于 40%, 但在小于 1 mm 的小滴贡献项, 层状云的贡献比例最大, 为 34%, 积雨云最小, 为 17%, 积层混合云居中, 为 19.8%。在大于 2 mm 的大滴贡献项中, 积雨云和积层混合云最大, 分别为 43.2% 和 39.6%, 层状云最小, 仅占 16.7%。这些数据说明, 层状云降水强度主要由 0~2 mm 雨滴所贡献, 而积层混合云和积雨云降水中, 大于 2 mm 雨滴对其强度的贡献相当大。

表 3 各档雨滴对雨强的贡献

Table 3 Percentage contribution of rain drops to rainfall rate

类别	N_1/N	I_0/I	I_1/I	I_2/I	I_3/I
层状云	98.3	34.0	49.6	12.5	4.2
积层混合云	97.8	19.8	40.3	15.2	24.4
积雨云	97.7	17.0	40.5	23.9	19.3

3 平均雨滴谱分布

图 1 为三类云降水的平均雨滴谱分布。从图中可以看出, 层状云的雨滴谱的谱宽较窄, 最大雨滴直径为 4.2 mm, 而积层混合云和积雨云降水的雨滴谱谱宽较宽, 最大谱宽分别达 7.4 mm、9.4 mm。这种特大雨滴早在 1962 年夏季就被何珍珍^[4]、阮忠家^[5]观测到。3 种雨滴谱

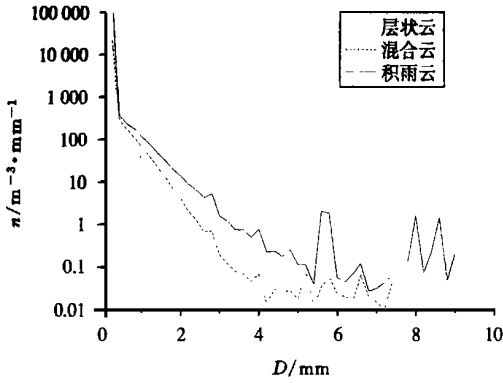


图 1 三类降水云平均雨滴谱分布

Fig. 1 Raindrop size spectra for the three kinds of precipitation

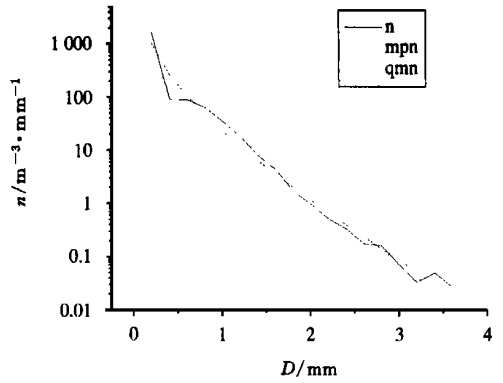


图 2 层状云平均谱分布及其平均拟合谱分布

Fig. 2 Raindrop size spectrum of stratiform cloud

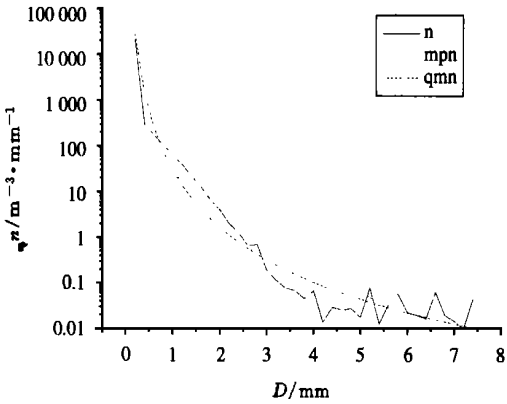


图 3 积层混合云平均谱分布及其平均拟合谱分布

Fig. 3 Raindrop size spectrum of mixed form cloud

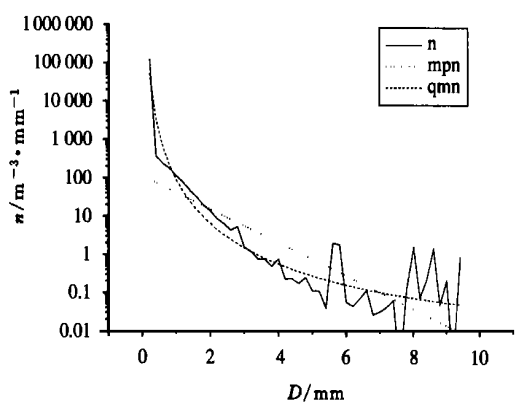


图 4 积雨云平均谱分布及其平均拟合谱分布

Fig. 4 Raindrop size spectrum of cumulonimbus

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最多,积层混合云次之,层状云最少。从谱的形状来看,积层混合云雨滴谱在大于4.0 mm 一侧呈多峰结构。积雨云雨滴谱在大滴一侧多峰结构明显。

4 雨滴谱分布密度函数参数

雨滴谱分布一般呈指数分布。Mashall 和 Palmer^[6] 得出其表达式为 $n = n_0 \exp(- \lambda D)$, 其中 n 为雨滴密度分布函数, n_0 和 λ 为参数。研究表明^[7], M-P 分布对于稳定的层状云降水拟合效果比较好,但对波动性较大的对流云降水,在小滴和大滴段偏差较大。Gamma 分布形式为 $n = n_0 D^\mu \exp(- \lambda D)$, 其中 μ 是新增的形状因子。Takeuchi^[8] 和 Ulbrich^[9] 分别用 M-P 和 Gamma 分布拟合实际谱,发现 Gamma 分布大大提高了在小滴和大滴段的拟合精度。

利用三类降水云降水的平均雨滴谱,采用最小二乘法进行 M-P 分布和 Gamma 分布拟合分析,得到如表 4 所示的 M-P 分布和 Gamma 分布各参数的拟合值。由表可见,层状云降雨的形状因子 μ 为- 1.36,而积雨云和积层混合云的 μ 为- 4.06 和- 4.30。

雨滴破碎有两种情况,一是受气流影响变形所致,二是相互碰撞而溅散。特大雨滴一部分

落地被我们测出,一部分在下落途中因碰撞和变形而破碎,这不仅可造成地面大雨滴的增多和多峰结构,也使特小雨滴大量增加。陈宝君等^[10]利用沈阳雨滴谱资料,曾得出积雨云中大滴破碎机制最强的结论。但此次观测则为积层混合云降水的大滴破碎机制较强。这可能是由于哈尔滨地区 1999 年夏季 11 次积层混合云降水中 5 次为冷锋过境过程,而冷锋过境时常伴有大风,受到地面风速的影响,雨滴受气流影响变形,同时增大了不同大小雨滴间的相对速度,而且增大了相互碰撞角,雨滴相互碰撞而溅散,因此大滴破碎机制较强。1994 年宫福久等已得出类似结论^[11]。

表 4 M-P 分布和 Γ 分布各参数的拟合值

Table 4 Fitted values of spectrum parameters for M-P and Γ distributions

类别	M-P 分布		分布		
	n_0	λ	n_0	λ	μ
层状云	609.6	3.00	173.7	2.04	- 1.36
积层混合云	105.9	1.47	26.9	- 1.04	- 4.30
积雨云	113.2	1.00	72.9	- 0.19	- 4.06

表 5 给出了两种分布计算的数密度对数的拟合相对误差。可以看出, M-P 分布适用于拟合层状云实际谱,而完全不适用于拟合积雨云和积层混合云降水的雨滴谱分布;用 Γ 分布拟合积雨云和积层混合云降水的实际雨滴谱效果较好。文献[10]也得出类似的结论。

表 5 三类云降水 M-P 分布和 Γ 分布下拟合效果

Table 5 Percentage error in M-P and Γ spectral fitting for 3 kinds of precipitation %

类别	M-P 分布数密度的对数	Γ 分布数密度对数
	$\log_{10}N$ 相对误差	$\log_{10}N$ 相对误差
层状云	14.8	12.1
积层混合云	41.9	21.5
积雨云	61.0	40.1

5 n_0 、 λ 和 μ 的线性关系

为了简化 Γ 雨滴谱分布的参数,我们对 Γ 谱分布的参数 n_0 、 λ 和 μ 的线性关系进行统计计算。本文运用统计分析方法,使用线性回归和逐步判别,对三类降水云的雨滴平均谱分布的参量进行计算和判别,得出 μ 和 n_0 、 λ 的线性关系。拟合线性经验关系式为 $\mu = A + Bn_0 + C\lambda$ 。

由表 6 可知, n_0 与 μ 的线性关系不显著, λ 与 μ 的线性关系为高度显著或显著,因此我们对 λ 与 μ 的线性关系式修正为 $\mu = A + C\lambda$, 进行统计分析计算,得到表 7。

因此,三类降水云 μ 与 λ 的关系式可分别写为

$$\text{层状云: } \mu = - 3.064\ 157 + 0.801\ 298\lambda;$$

$$\text{积层混合云: } \mu = - 3.891\ 013\ 76 + 1.612\ 143\ 37\lambda;$$

$$\text{积雨云: } \mu = - 3.504\ 314\ 99 + 1.363\ 139\ 98\lambda.$$

同时,由表 6、表 7 可见,积雨云降水时, λ 与 μ 的线性相关程度不如积层混合云和层状云降水中的 λ 与 μ 的相关程度。

表 6 三类降水云参数 n_0 、 λ 与 μ 的统计分析

Table 6 Statistical significance test on the linear relationship among the parameters (n_0 , λ and μ) for 3 kinds of precipitations

类别	n_0 与 μ		λ 与 μ	
	F 统计量	F 分布随机变量 大于此值的概率	F 统计量	F 分布随机变量 大于此值的概率
层状云	3.33	0.117 8(不显著)	68.800	0.000 2(高度显著)
积层混合云	-1.414	0.286 9(不显著)	5.147	0.000 9(高度显著)
积雨云	0.272	0.799 3(不显著)	2.825	0.047 6(显著)

表 7 三类降水云参数 λ 与 μ 的统计分析

Table 7 Regression coefficients in $\mu = A + C\lambda$ and its significance test for 3 kinds of precipitation

类别	常数项		λ 与 μ	
	A 值	C 值	F 统计量	F 分布随机变量 大于此值的概率
层状云	-3.064 157	0.801 298	158.491	0.000 1(高度显著)
积层混合云	-3.891 013 76	1.612 143 37	46.630	0.000 1(高度显著)
积雨云	-3.504 314 99	1.363 139 98	15.980	0.010 3(显著)

6 微结构参量的演变

图 5 为 6 月 18 日层状云降水过程最大直径、雨强、数密度随时间的变化。由雨强随时间的演变可以看到, 降水的雨强的起伏较小, 这反映层状云无明显降水中心, 最大雨滴直径出现峰值时, 相应的雨强也出现峰值, 雨滴数密度、雨强、最大雨滴直径三者的变化趋势一致。层状云降水各微物理参量起伏变化较为平缓。

图 6 为 6 月 1 日积层混合云降水过程最大直径、雨强、数密度随时间的变化。由雨强随时间的演变可以看到, 降水的雨强的起伏较大, 这反映积层混合云有多个降水中心, 在稳定的云内嵌有对流泡。最大雨滴直径出现峰值时, 相应的雨强一般也出现峰值, 雨滴数密度的峰值落

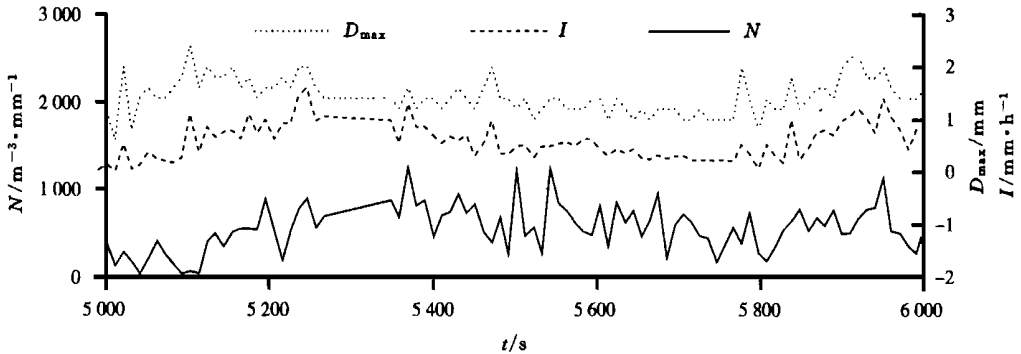


图 5 6 月 18 日 08:07 ~ 11:54 时的层状云降水微物理参量 N 、 D_{\max} 、 I 随时间的演变

Fig. 5 Evolution of microphysical parameters (N 、 D_{\max} 、 I), for stratiform cloud from 08:07 to 11:54 on 18 June

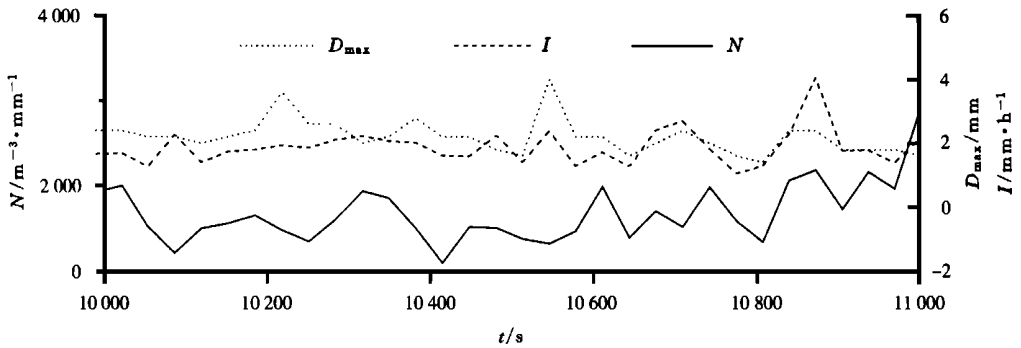


图6 6月1日04:52~15:12时的积层混合云降水微物理参量 N 、 D_{\max} 、 I 随时间的演变

Fig. 6 Evolution of microphysical parameters (N , D_{\max} , I), for mixed-form cloud from 04:52 to 15:12 on 1 June

后于雨强的峰值和 D_{\max} 的峰值。

图7为5月27日积雨云降水过程最大直径、雨强、数密度随时间的变化。由雨强随时间的演变可以看到,积雨云降水的雨强的起伏最大,这反映积雨云有多个强降水中心,云内结构极不均匀。最大雨滴直径出现峰值时,相应的雨强也出现峰值,雨滴数密度的波动起伏较大。在20 min内, I 、 N 、 D_{\max} 较大的起伏就有十几次。瞬间最大雨强超过20 mm/h,最小值约为4 mm/h。强降水维持时间比较短。从图中可以看到, I 与 N 的峰值位置基本一致, D_{\max} 的变化与 I 的变化并不完全一致,一般先是 D_{\max} 出现峰值,而后 I 、 N 出现峰值,即积雨云降水在 I 、 N 增大之前常有特大滴的降落。

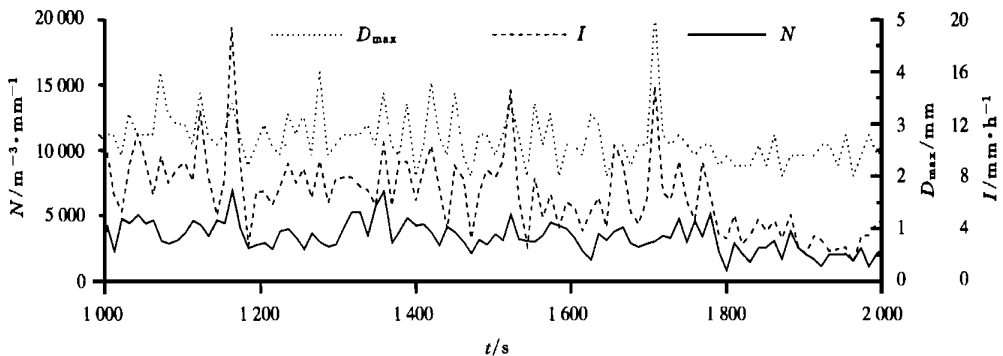


图7 5月27日07:52~09:09时的积雨云降水微物理参量 N 、 D_{\max} 、 I 随时间的演变

Fig. 7 Evolution of microphysical parameters (N , D_{\max} , I), for cumulonimbus cloud from 07:52 to 09:09 on 27 May

7 结论

(1)层状云降水雨滴谱窄,微结构参量起伏小,云内结构比较均匀;积层混合云和积雨云降水的谱较宽,并在大滴侧起伏较大,具有多峰结构,云内结构不均匀。层状云、积层混合云、积雨云降水的平均雨强、平均含水量、平均最大直径、平均中值直径依次增大;层状云的平均直径在三类降水云中最大。层状云的雨强主要由大量的0~1 mm小雨滴和1~2 mm雨滴所贡献;积层混合云和积雨云降水平均雨强主要是少数大于2 mm的大雨滴所贡献。

(2)层状云谱服从M-P分布,积雨云和积层混合云降水的雨滴实际谱用 Γ 分布拟合精度较高。

- (3) 积层混合云和积雨云降水的小滴增加与大滴的破碎机制有关。
 (4) Γ 雨滴谱分布的参数中, λ 和 μ 存在线性关系, 并呈显著性相关; n_0 和 μ 不相关。

参考文献:

- [1] 詹丽珊, 陈万奎, 黄美元. 南岳和泰山云中微结构起伏资料的初步分析[C]. 见: 中国科学院地球物理研究所集刊(第10号). 我国云雾降水微物理特征的研究. 北京: 科学出版社, 1965. 30~40
 [2] LIU Yanggang, YOU Laiguang. Error analysis of GBPP probe[J]. Atmos Res, 1994, 34(3): 379~387
 [3] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1989. 624~628
 [4] 何珍珠. 泰山一次雷雨雨滴谱观测结果[C]. 见: 中国科学院地球物理研究所集刊(第10号). 我国云雾降水微物理特征的研究. 北京: 科学出版社, 1965. 69~71
 [5] 阮忠家. 泰山两次雷雨云降水微结构的一些特征[C]. 见: 中国科学院地球物理研究所集刊(第10号). 我国云雾降水微物理特征的研究. 北京: 科学出版社, 1965. 49~61
 [6] MARSHALL J S, PALMER W McK. The distribution of raindrops with size[J]. J Meteor, 1948, 5(4): 165~166
 [7] JOSS J, GORIE G. Shapes of raindrop size distribution[J]. J Appl Meteor, 1978, 17(7): 1054~1061
 [8] TAKEUCHI D M. Characterization of raindrop size distribution[C]. Preprints of Conference: Cloud Physics and Atmospheric Electricity. Issaquah: Americ Meteor Soc, 1978. 154~161
 [9] ULBRICH C W. Effect of size distribution variations on precipitation parameters determined by dualmeasurment techniques[C]. Preprints of 20th Conference: Radar Meteor. Boston: Americ Meteor Soc, 1981. 276~281
 [10] 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
 [11] 宫福久, 刘吉成, 李子华. 三类降水云雨滴谱特征研究[J]. 大气科学, 1997, 21(5): 607~614

Microphysical features of precipitation in spring and summer in Harbin

YU AN Cheng¹, FAN ling², LI Ya-bin³

(1. Graduate School, NIM, Nanjing 210044;

2. The Weather Modification Center of Heilongjiang Province, Harbin 150036;

3. Meteorological Observatory of Heilongjiang Province, Harbin 150030)

Abstract: In order to study the characteristics of natural resources of water in the atmosphere, precipitation in Harbin from May in 1999 was observed 27 times with GBPP-100 produced by PMS Co. . In this paper, precipitation data are analyzed to obtain spectrum parameters and their evolution features. Linear and stepwise regression are also used to make a statistical analysis on the linear relationship among the spectral parameters in Γ distribution.

Keywords: precipitation, size distribution of raindrops, microstructure parameters