

陈磊,陈宝君,杨军,等. 2013. 2009—2010年梅雨锋暴雨雨滴谱特征[J]. 大气科学学报, 36(4): 481-488.

Chen Lei, Chen Bao-jun, Yang Jun, et al. 2013. Characteristics of raindrop size distribution of rainstorm on Meiyu front during 2009—2010[J]. Trans Atmos Sci, 36(4): 481-488. (in Chinese)

## 2009—2010年梅雨锋暴雨雨滴谱特征

陈磊<sup>1</sup>, 陈宝君<sup>2</sup>, 杨军<sup>1</sup>, 濮江平<sup>3</sup>, 刘慧娟<sup>4</sup>, 高正华<sup>5</sup>

(1. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京大学 大气科学学院, 江苏 南京 210093;  
3. 解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101; 4. 安徽省人工影响天气办公室, 安徽 合肥 230031;  
5. 淮南市气象局, 安徽 淮南 232007)

**摘要:** 2009、2010年夏季利用 Parsivel 激光降水粒子谱仪在淮南和南京同时观测到两次梅雨锋暴雨过程, 获得了 3 617 个雨滴谱样本资料。采用矩矩法对 Gamma 函数进行拟合, 分析了梅雨锋暴雨降水微结构特征。结果表明: 主雨带和雨带边缘的雨滴谱存在明显差别, 处于主雨带中的降水粒子尺度明显大于雨带边缘的粒子尺度; 梅雨锋暴雨过程中  $0.25\text{ mm} < D \leq 1.0\text{ mm}$  的粒子所占比例最大, 但对于雨强贡献最大的则是  $1.0\text{ mm} < D \leq 2.0\text{ mm}$  的粒子; 雨滴谱谱型以双峰型为主, 几乎不存在无峰型; 与其他微结构特征量不同的是, 雨滴谱峰值直径  $D_p$  随着雨强的增大先增加后减小, 而雨滴谱分布参数  $N_0$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$  则随着雨强的增大而一直减小, 其中  $\mu$ - $\lambda$  间存在较好的二项式函数关系; 梅雨锋暴雨的  $Z$ - $R$  关系为  $Z = 212R^{1.38}$ 。

**关键词:** 梅雨锋; 雨滴谱; Gamma 分布;  $Z$ - $R$  关系

**中图分类号:** P426      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-7097(2013)04-0481-08

## Characteristics of raindrop size distribution of rainstorm on Meiyu front during 2009—2010

CHEN Lei<sup>1</sup>, CHEN Bao-jun<sup>2</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, PU Jiang-ping<sup>3</sup>,  
LIU Hui-juan<sup>4</sup>, GAO Zheng-hua<sup>5</sup>

(1. School of Atmospheric Physics, NUIST, Nanjing 210044, China;

2. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

4. Weather Modification Office of Anhui Province, Hefei 230031, China; 5. Huainan Meteorological Bureau, Huainan 232007, China)

**Abstract:** Using the Parsivel laser precipitation particle spectrometer, 3 617 samples of raindrop size distribution of Meiyu front rainstorm were observed in Huainan and Nanjing during summer of 2009—2010. Gamma raindrop size distribution function is fitted by moment method, and the micro-structure of Meiyu front rainstorm is analyzed. Results show that the sizes of precipitation drops in rain belt are larger than those on the edge of rain belt. Contributions to total number concentration of raindrops with diameter of 0.25—1.0 mm are the maximum, but those to total rainfall intensity of raindrops with diameter of 1.0—2.0 mm are the maximum. The raindrop size distributions of Meiyu front rainstorm mostly show double peak type, without non-peak type. The peak diameter of raindrop size distribution of Meiyu front rainstorm first increases and then decreases with the rainfall intensity. However, the parameters of Gamma distribution,  $N_0$ ,  $\mu$  and  $\lambda$  always decrease with the rainfall intensity, and there is a good binomial function relationship between  $\mu$  and  $\lambda$ . In addition, the  $Z$ - $R$  relationship of Meiyu front rainstorm is

收稿日期: 2011-01-05; 改回日期: 2012-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41175118); 公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201306040)

通信作者: 陈宝君, 博士, 教授, 研究方向为云降水物理学, bjchen@nju.edu.cn.

$$Z = 212R^{1.38}$$

**Key words:** Meiyu front; raindrop size distribution; Gamma distribution; Z-R relationship

## 0 引言

梅雨锋降水是我国长江中下游地区重要的水源补给,其暴雨过程带来了大量的降水。梅雨锋暴雨过程是在有利的天气背景条件和复杂的云物理过程中形成的,长期以来,国内多侧重于天气学分析、数值模式等对梅雨锋暴雨进行研究(洪延超等,1987;王建捷和李泽椿,2002;蒋建莹和倪允琪,2003),而雨滴谱的观测分析方面却不多见。卞礼智等(1984)对1981年的一次梅雨锋暴雨过程进行分析,指出雨团内外平均雨滴谱有明显的不同,雨滴谱谱型多为多峰型。蒋年冲等(1986)认为,梅雨锋暴雨雨滴谱服从M-P分布,雨团内平均谱特征量比雨团外的要大,雨滴谱谱型以多峰型为主。许绍祖等(1987)对南京地区1980—1983年间的梅雨锋降水雨滴谱进行统计,重点分析了分谱型下的雨滴谱不同的微物理特征。

关于雨滴谱的观测,传统的快速摄影法、滤纸色斑法等工作量大、强度高、连续性差,不适合时间长、数据量大的降水过程的观测分析。近年来,随着激光技术的应用,Parsivel激光降水粒子谱仪(简称Parsivel)被广泛的应用于降水粒子的探测方面(Battaglia et al., 2010; Chen et al., 2011),大大提高了测量精度,保证了时间的连续性。本文利用Parsivel在2009、2010年夏季在安徽省淮南市、江苏省南京市浦口区和江宁区进行了观测,期间观测到了两次梅雨锋暴雨过程,分别是2009年7月6—7日和2010年7月12—13日。本文主要对这两次过程进行了统计分析,揭示梅雨锋暴雨的微物理特征。Gamma分布参数 $N_0$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$ 之间并不是相互独立的,能够找出其中的关系,对于云模式中云粒子谱分布参数化方案的改进有很大帮助。Zhang et al. (2003)指出 $\mu$ 和 $\lambda$ 之间存在二项式函数关系。那么梅雨锋暴雨雨滴谱是否也存在这样的关系?本文对此进行了研究。另外,Z-R关系也是雨滴谱研究的重要内容之一,通过雨滴谱的观测分析可以对雷达测量降水的Z-R关系进行修订,标准的Z-R关系( $Z = 300R^{1.40}$ )是否适合梅雨锋暴雨降水的估测,本文也做了说明。

## 1 资料与设备

### 1.1 天气形势

2009年7月6日20时—7日20时(北京时间,下同),亚洲中高纬维持两高一低的形势,中西伯利亚高压脊前西北气流引导冷空气到达长江沿岸,500 hPa上副高588 dagpm等值线维持在30°N附近,暖湿空气沿副高边缘向长江中下游输送,冷暖空气交汇于长江下游地区,并有风速的辐合。地面图上(图略),6日20时,一条东北—西南走向的切变线位于黄淮流域—西南中部。7日08时,切变线略有南压,南京位于切变线南侧,并有风速的辐合,急流轴位于广西—湖南—江西—淮南—苏南一带,南京位于急流轴出口区的左侧。7日20时,切变线北抬。

2010年7月11日20时—12日20时,亚洲中高纬维持两低一高的形势,蒙古和新疆高压脊前西北气流引导冷空气南下与副高边缘西南气流引导的暖湿空气交汇于长江下游地区。地面图上(图略),11日20时—12日20时,西南涡切变沿长江沿岸延伸到长江下游,切变线位置基本少动,南京一直位于切变线南侧,并明显有风速的辐合,急流轴位于广西—湖南—江西—淮南—苏南一带,南京位于急流轴出口区的左侧。

### 1.2 激光粒子谱仪

Parsivel激光降水粒子谱仪是德国OTT公司生产的以激光为基础的新一代高级光学粒子测量仪器,可以同时测量降水粒子的尺度和速度,其测量系统由发射器、接收器和控制、运算、存储等部分组成。发射器连续不断的发射出宽30 mm,长180 mm的激光束,当有降水粒子通过时,接收器接收到减弱的光强,降低了输出电压,以此来得到降水粒子的尺度,同时根据电压的变化时间来测量出粒子的速度。Parsivel可以做到全天候、无人值守、自动记录,这大大方便了对各种降水过程的观测。Löffler-Mang and Joss (2000)利用Parsivel的测量数据和Joss-Waldvogel雨滴谱仪、Hellmann雨量计和粒子分光计的测量结果进行比较,发现Parsivel对于尺度的测量误差是5.0%,可以说该仪器对降水粒子的测量具有一定的科学性。

Parsivel降水粒子谱测量系共有32个尺度通道

和32个速度通道,其中粒子尺度测量范围为0.2~25 mm,粒子速度测量数据范围为0.2~20 m/s,最后每一个样本中的粒子谱测量数据就有 $32 \times 32 = 1024$ 个,具体参见 Battaglia et al. (2010)。

### 1.3 数据收集和分析方法

利用3台激光粒子谱仪于2009—2010年春、夏季期间对江淮梅雨进行了观测,其中一台布设在安徽省淮南市气象局,地理位置(117°01'E,32°39'N),海拔32.6 m,简称淮南观测点;一台布设在江苏省南京市浦口区南京信息工程大学大气探测基地,地理位置(118°42'E,32°12'N),海拔22 m,简称浦口观测点;一台布设在江苏省南京市江宁区解放军理工大学气象学院,地理位置(118°49'E,32°01'N),海拔15 m,简称江宁观测点。本文利用3个地点同时观测,采样时间为1 min,于2009年7月6—7日和2010年7月12—13日观测到两次梅雨锋暴雨过程,获得了4组雨滴谱数据,共计3617个有效样本(表1)。

雨滴在下落过程中一般为非球形,利用以下公式(Battaglia et al., 2010)对雨滴进行形变修正,

$$D_q = \begin{cases} D_{\text{par}}, & \text{当 } D_{\text{par}} \leq 1.00 \text{ mm}; \\ (1.075 - 0.075D_{\text{par}})D_{\text{par}}, & \text{当 } 1.00 \text{ mm} < D_{\text{par}} \leq 5.00 \text{ mm}; \\ 0.7D_{\text{par}}, & \text{当 } D_{\text{par}} > 5.00 \text{ mm}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $D_q$ 代表雨滴等效球形直径; $D_{\text{par}}$ 代表 Parsivel 测得的雨滴直径。另外,剔除直径大于6 mm的雨滴,因为,在自然降水中很少见到,一般认为这样的大雨滴在下落过程中已经破碎了,不会存在。

在云物理降水研究中,一般认为 Gamma 分布较 M-P 分布对于积状云和积层混合云降水拟合精度高(陈宝君等,1998),故本文利用 Gamma 分布来拟合梅雨锋暴雨雨滴谱。Gamma 分布函数为:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\lambda D). \quad (2)$$

其中: $N_0$ 是滴谱截距参数( $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-\mu-1}$ ); $\mu$ 是形状因子(无量纲参数); $\lambda$ 是斜率参数( $\text{mm}^{-1}$ )。

目前,阶矩法估计谱分布参数被广泛的应用于雨滴谱方面的研究(Ulbrich and Atlas, 1998; Caracciolo et al., 2006),其优点在于各阶矩量与雨滴谱参数有一定的对应关系,如含水量与3阶矩成比例,雷达反射因子与6阶矩成比例等。一般采用中间阶矩(Chu and Su, 2008; Cao and Zhang, 2009)拟合效果较好,本文采用2、3、4阶矩来对 Gamma 函数中的3个参数进行估计。第  $n$  阶矩定义为:

$$M_n = \int_0^\infty N(D) D^n dD. \quad (3)$$

那么 Gamma 分布下的矩为:

$$M_n = \frac{N_0 (\Gamma(n + \mu + 1))}{\lambda^{n+\mu+1}}. \quad (4)$$

其中: $M_4/M_3$ 是质量加权平均直径  $D_m$ ,

$$D_m = \frac{M_4}{M_3} = \frac{(4 + \mu)}{\lambda}. \quad (5)$$

那么,在 Gamma 分布中  $N_0$ 、 $\mu$  的表达式分别为:

$$N_0 = \frac{(\mu + 4)^{\mu+4}}{(\mu + 3)!} \cdot \left(\frac{M_3}{M_4}\right)^{\mu+4} \cdot M_3, \quad (6)$$

$$\mu = \frac{(3M_4M_2 - 4M_3^2)}{(M_3^2 - M_4M_2)}.$$

## 2 梅雨锋暴雨的微结构特征

### 2.1 梅雨锋暴雨微结构特征参量

表1列出了4组梅雨锋暴雨微结构特征量平均值,其中  $M$  为样本个数、 $N$  代表粒子数浓度、 $R$  代表雨强、 $W$  代表液态含水量、 $Z$  为雷达反射率因子、 $D_a$  为平均直径、 $D_0$  为体积中值直径、 $D_m$  为质量加权平均直径、 $D_p$  为峰值直径、 $D_{\text{max}}$  为最大直径。结合雷达回波(图1)进行分析可见,2009年7月7日淮南处于主雨带的北缘,少数小尺度的对流性雨团经过淮南,强降水持续时间相对较短,样本个数相对较少,平均粒子数浓度较大, $R$ 、 $W$ 、 $Z$  平均值均较大,但是其  $D_a$ 、 $D_0$ 、 $D_m$  和  $D_{\text{max}}$  值相对较小,说明降水粒子尺度较小;而在同一天的南京,在主雨带的覆盖下,降水持续时间较长,对流性雨团发展旺盛,尽管粒子平均数浓度较小,但是其粒子尺度较大,给南京带来了较强的降水。2010年7月12日的梅雨锋暴雨持续时间较长,浦口观测点处于主雨带中,粒子数浓度和粒子尺度均较大,降水较强;而相距几十公里远的江宁观测点则靠近雨带的边缘,粒子数浓度相对较小,粒子尺度也较小。说明了同一雨团微物理结构的不均匀性。两次梅雨锋暴雨过程中,主雨带降水粒子尺度要明显大于雨带边缘的粒子尺度。

### 2.2 梅雨锋暴雨各粒子尺度档对雨强的贡献

为揭示雨滴的尺度分布与梅雨锋暴雨的降水强度之间的关系,列出了各档雨滴对数浓度和总雨强的贡献情况(表2), $N_1/N$ 、 $N_2/N$ 、 $N_3/N$ 、 $N_4/N$  分别代表  $0.25 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm}$ 、 $1.0 \text{ mm} < D \leq 2.0 \text{ mm}$ 、 $2.0 \text{ mm} < D \leq 3.0 \text{ mm}$ 、 $D > 3.0 \text{ mm}$  的雨滴占总数浓度的百分比; $R_1/R$ 、 $R_2/R$ 、 $R_3/R$ 、 $R_4/R$  分别代表  $0.25 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm}$ 、 $1.0 \text{ mm} < D \leq 2.0 \text{ mm}$ 、 $2.0 \text{ mm} < D \leq 3.0 \text{ mm}$ 、 $D > 3.0 \text{ mm}$  的雨滴对雨强的贡献百分比。

表 1 梅雨锋暴雨微结构特征参量

Table 1 Microphysical parameters of Meiyu front rainstorm

资料	$M/$ 个	$N/$ $m^{-3}$	$R/$ $(mm \cdot h^{-1})$	$W/$ $(g \cdot m^{-3})$	$Z/$ dBz	$D_a/$ mm	$D_0/$ mm	$D_m/$ mm	$D_p/$ mm	$\overline{D_{max}}/$ mm	$D_{max}/$ mm
2009-07-07 淮南	301	478.2	11.0	0.48	28	0.89	1.36	1.37	0.72	2.29	5.95
2009-07-07 南京浦口	828	298.4	8.0	0.32	28	0.93	1.47	1.48	0.75	2.50	5.95
2010-07-12 南京浦口	1 301	427.0	8.8	0.39	31	0.91	1.42	1.43	0.69	2.46	5.95
2010-07-12 南京江宁	1 187	344.9	5.37	0.29	29	0.90	1.36	1.37	0.75	2.32	5.95

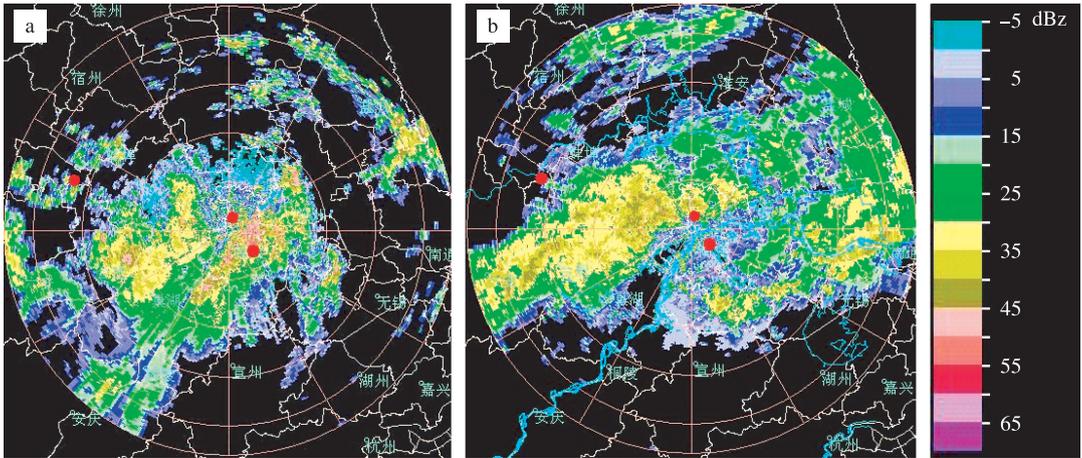


图 1 2009 年 7 月 7 日 00 时(a)和 2010 年 7 月 12 日 09 时(b)两次梅雨锋暴雨过程的 PPI 回波图(红色圆点表示观测位置)

Fig. 1 PPI echo images of Meiyu front rainstorm at (a)00:00 BST 7 July 2009 and (b)09:00 BST 12 July 2010(the red dots represent observation location)

表 2 各档雨滴对总数浓度、总雨强的贡献

Table 2 Contributions to total number concentration and total rainfall intensity of raindrops in different diameter ranges %

资料	$N_1/N$	$N_2/N$	$N_3/N$	$N_4/N$	$R_1/R$	$R_2/R$	$R_3/R$	$R_4/R$
2009-07-07 淮南	67.0	30.8	2.1	0.1	29.2	54.1	15.0	1.7
2009-07-07 南京浦口	63.3	34.2	2.4	0.1	20.4	59.3	16.8	3.5
2010-07-12 南京浦口	65.9	31.5	2.5	0.1	23.4	55.8	19.4	1.4
2010-07-12 南京江宁	63.9	34.7	1.4	0.01	19.7	67.1	12.9	0.3

由表 2 可见,2009 年 7 月 7 日的降水过程,淮南  $0.25 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm}$  的粒子偏多,占总数浓度的比例高达 67.0%,高于南京的 63.3%。而  $1.0 \text{ mm} < D \leq 3.0 \text{ mm}$  的粒子所占比例均比南京的小,对雨强的贡献也相对要小。说明了主雨带的雨滴谱分布在  $D > 1.0 \text{ mm}$  段高于雨带边缘的雨滴谱分布,较大粒子对强降雨的贡献较大。2010 年 7 月 12 日的降水过程,浦口观测点的  $0.25 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm}$  的粒子所占比例大于江宁,浦口  $1.0 \text{ mm} < D \leq 2.0 \text{ mm}$  的粒子所占比例为 31.5%,小于江宁的 34.7%,而  $D > 2.0 \text{ mm}$  的粒子所占比例均大于江

宁。说明了主雨带降水的大粒子明显多于边缘雨带。总体来讲,梅雨锋暴雨以  $0.25 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm}$  的粒子为主,而对降水强度贡献最大的是  $1.0 \text{ mm} < D \leq 2.0 \text{ mm}$  的粒子, $D > 3.0 \text{ mm}$  的粒子所占比例最小,对雨强的贡献也最小。梅雨锋暴雨与之前得出的其他类型降水各档雨滴对数浓度和总雨强的贡献情况存在较大差别(樊玲等,2001;周毓荃等,2001;李艳伟等,2003)。出现这种现象的主要原因是不同地区、不同季节、不同降水类型的雨滴谱分布明显不同。

### 2.3 梅雨锋暴雨雨滴谱谱型

关于雨滴谱谱型的分布,刘红燕和雷恒池(2006)认为,多峰型雨滴谱分布是降水达到稳定的特征之一,另外,雨滴谱多峰型的分布也反映了云中降水粒子的活跃程度(吴兑等,1998)。表 3 是江淮梅雨锋暴雨雨滴谱谱型分布情况,可见,江淮梅雨锋暴雨雨滴谱多以双峰型为主,单峰型次之,再次为多峰型,无峰型几乎不存在,这与之前的研究结果一致(蒋年冲等,1986)。对比于华南前汛期的降水(吴兑等,1998),江淮梅雨锋暴雨双峰型以上的比例较高,单峰型所占比例稍低。而成都地区 4—6 月低涡云系的降水雨滴谱多以无峰型为主,双峰型和多峰型很少出现(卿清涛等,1994)。由此可见,不同地区、不同季节和不同降水类型的雨滴谱谱型分布也是不同的。

### 2.4 梅雨锋暴雨分雨强情况下的雨滴谱分布

为了更加深入地理解梅雨锋暴雨雨滴谱分布,参考 Caracciolo et al. (2006) 将所有样本按照雨强分为 6 类进行分析(图 2、表 4)。由图 2 可见,随着雨强的增大,雨滴谱谱宽变大,最大雨滴直径达到 5.95 mm,各尺度档的粒子数浓度也相应增大,然

表 3 梅雨锋暴雨雨滴谱谱型的分布

资料	无峰型	单峰型	双峰型	多峰型
2009-07-07 淮南	0.3	18.9	77.5	3.3
2009-07-07 南京浦口	0.1	29.8	68.9	1.2
2010-07-12 南京浦口	0	12.1	86.9	1.0
2010-07-12 南京江宁	0	13.4	85.6	1.0

而,峰值直径却先增大后减小。由表 4 的统计结果中可以明显的看出,这与 Caracciolo et al. (2006) 的结论不同。造成这种现象的原因是较强的对流作用使得大量较大粒子在下落的过程中破碎成小雨滴。另外,随着雨强的增大,雨滴谱谱型在较大滴端逐渐上抬,斜率逐渐变小,正是由于大量较大粒子的显著增加造成了雨强的变大。

由表 4 可见,梅雨锋暴雨微结构特征量  $N$ 、 $D_m$ 、 $D_0$  和  $Z$  几乎是随着雨强的增大而增大,而雨滴谱参量  $N_0$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$  则随着雨强的增大而减小。关于 Gamma 分布的这 3 个参数,Tokay and Short(1996)发现,

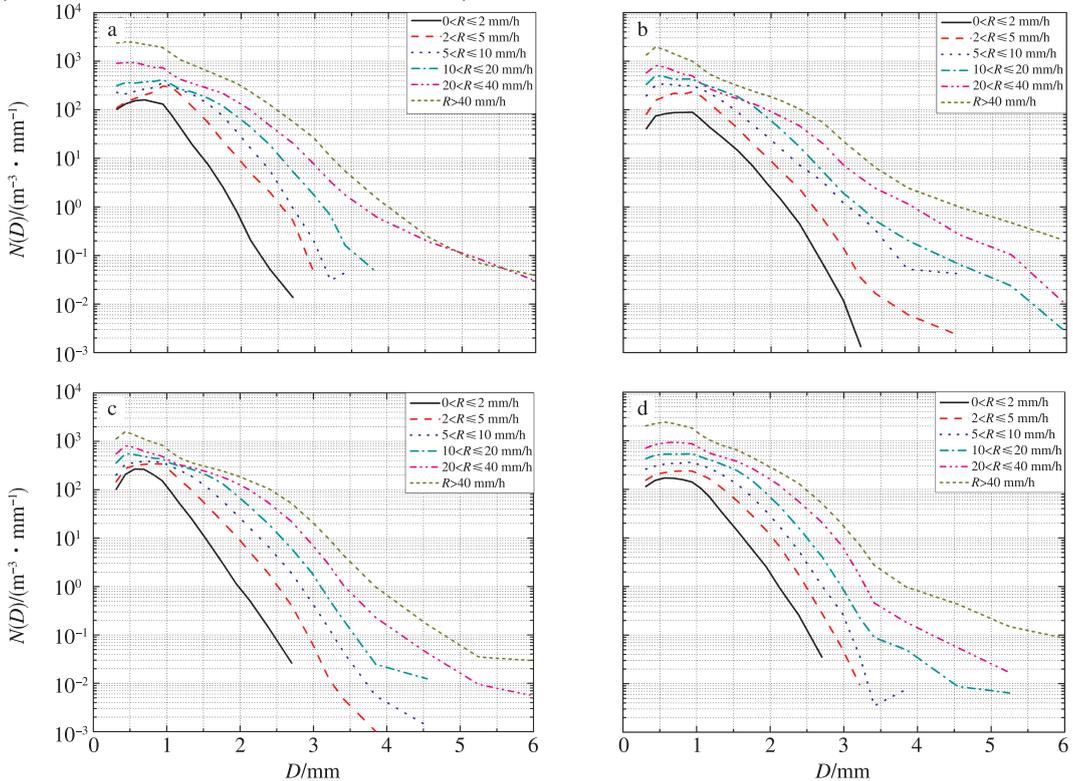


图 2 6 种雨强下的雨滴谱 a. 2009-07-07 淮南;b. 2009-07-07 南京浦口;c. 2010-07-12 南京浦口;d. 2010-07-12 南京江宁

Fig. 2 Raindrop size distribution for six rainfall rate categories a. in Huainan on 7 July 2009;b. in Pukou, Nanjing on 7 July 2009;c. in Pukou, Nanjing on 12 July 2010;d. in Jiangning, Nanjing on 12 July 2010

表 4 雨强分类情况下的谱参数和微物理结构参量的平均值

Table 4 Averaged raindrop size distribution parameters and microphysical parameters for six rainfall rate categories

资料	雨强分类/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	$M$ / 个	$N$ / $\text{m}^{-3}$	$D_m$ / mm	$D_0$ / mm	$D_p$ / mm	$R$ / ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	$Z$ / dBz	$N_0$ / ( $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$\mu$	$\lambda$ / $\text{mm}^{-1}$
2009-07-07 淮南	$0 < R \leq 2$	153	125.8	1.04	1.03	0.71	0.70	19	$3.88 \times 10^{18}$	12.8	17.8
	$2 < R \leq 5$	43	262.4	1.41	1.40	0.91	3.54	30	$5.86 \times 10^{10}$	9.6	10.3
	$5 < R \leq 10$	23	390.3	1.54	1.52	0.85	7.31	35	$4.21 \times 10^8$	8.34	8.17
	$10 < R \leq 20$	27	525.1	1.78	1.79	0.74	13.27	39	$1.40 \times 10^6$	5.66	5.66
	$20 < R \leq 40$	33	1 069.5	1.99	2.01	0.47	30.03	44	$1.06 \times 10^5$	3.72	4.05
	$40 < R$	20	2 744.5	2.00	1.98	0.52	75.56	48	$6.08 \times 10^4$	2.88	3.46
2009-07-07 南京浦口	$0 < R \leq 2$	524	84.7	1.27	1.26	0.79	0.91	22	$5.41 \times 10^{18}$	9.41	12.06
	$2 < R \leq 5$	91	217.9	1.49	1.49	0.82	2.88	30	$2.75 \times 10^{12}$	7.25	8.12
	$5 < R \leq 10$	60	376.8	1.72	1.71	0.74	7.16	36	$2.02 \times 10^8$	5.70	6.30
	$10 < R \leq 20$	58	585.1	1.82	1.80	0.67	13.90	39	$8.97 \times 10^6$	5.45	5.54
	$20 < R \leq 40$	34	768.2	2.17	2.17	0.51	26.61	44	$9.47 \times 10^4$	2.77	3.26
	$40 < R$	60	1 669.0	2.34	2.29	0.46	62.54	49	$2.08 \times 10^4$	1.83	2.58
2010-07-12 南京浦口	$0 < R \leq 2$	428	178.6	1.02	1.01	0.71	0.90	20	$2.57 \times 10^{19}$	11.54	17.16
	$2 < R \leq 5$	254	318.4	1.36	1.34	0.76	3.33	30	$6.04 \times 10^{10}$	7.10	8.68
	$5 < R \leq 10$	265	433.4	1.56	1.55	0.73	7.13	35	$9.40 \times 10^7$	6.31	6.91
	$10 < R \leq 20$	195	632.4	1.74	1.73	0.65	14.56	39	$2.23 \times 10^6$	5.52	5.62
	$20 < R \leq 40$	114	844.4	1.98	2.00	0.55	27.78	43	$1.43 \times 10^5$	4.54	4.39
	$40 < R$	45	1 418.7	2.16	2.22	0.46	52.38	47	$2.85 \times 10^4$	3.24	3.38
2010-07-12 南京江宁	$0 < R \leq 2$	474	150.2	1.15	1.14	0.72	1.02	22	$2.60 \times 10^{19}$	8.65	12.02
	$2 < R \leq 5$	399	262.8	1.42	1.41	0.78	3.23	31	$3.12 \times 10^{10}$	6.65	7.65
	$5 < R \leq 10$	169	435.1	1.53	1.52	0.78	6.81	35	$4.81 \times 10^7$	6.56	7.03
	$10 < R \leq 20$	80	718.5	1.65	1.63	0.76	13.69	39	$2.36 \times 10^6$	6.22	6.29
	$20 < R \leq 40$	48	1 200.7	1.85	1.84	0.76	29.55	43	$1.88 \times 10^5$	4.68	4.73
	$40 < R$	17	2 628.9	1.99	1.97	0.62	55.37	48	$8.50 \times 10^4$	3.19	3.67

$N_0$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$  则随着雨强的增大而增大。Caracciolo et al. (2006) 指出,  $N_0$ 、 $\lambda$  随着雨强的增大而减小,  $\mu$  则随着雨强的增大而增大。Nzeukou et al. (2004) 认为,  $N_0$ 、 $\mu$  随着雨强的增大而增大,  $\lambda$  则随着雨强的增大而减小。由此可见, 不同地区不同类型的降水雨滴谱分布存在较大差别, Gamma 分布的 3 个参数  $N_0$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$  随着雨强的变化情况也并不是统一的。当  $\mu < 0$  时, Gamma 分布的曲线是向下凹陷的; 当  $\mu > 0$  时, Gamma 分布的曲线是向上凸起的。由图 2 可见, 随着雨强的变大, 各曲线的向上凸起程度逐渐减小, 曲线走势明显趋于平滑, 另外, 各曲线的斜率也明显减小, 所以,  $N_0$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$  是随着雨强的增大而减小, 这应该是梅雨锋暴雨雨滴谱分布的特征之一。这也

反映了, 降水粒子在较大滴端的增加和各尺度档粒子数浓度  $N$  的增大是造成较大雨强的主要原因。

对比分析 3 个观测点微结构参量随雨强的变化, 2009 年的暴雨过程, 南京市浦口地区分雨强情况下, 除了  $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < R \leq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  外, 其他分雨强段的  $N$  均小于淮南地区, 而分雨强下的  $M$  则明显多于淮南地区, 另外,  $D_m$  和  $D_0$  值也均比淮南地区要大, 说明在南京浦口区的降水粒子尺度明显大于淮南地区, 在南京上空的梅雨锋暴雨云物理过程较强, 故造成了较大的降水。2010 年的暴雨过程, 雨带没有覆盖淮南, 而给南京地区带来了较强的降水。当  $R \leq 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 浦口区分雨强情况下的  $M$  少于江宁区,  $D_m$  和  $D_0$  值也小于江宁区, 当

$R > 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,浦口区分雨强下的  $M$  明显多于江宁区,尽管  $N$  低于江宁区,但  $D_m$  和  $D_0$  值则明显大于江宁区,说明浦口区上空对流性降水较强,粒子尺度较大。正如前文所述,江宁区近于雨带的边缘,较强的对流云团较少,尽管粒子数浓度较大,但降水粒子尺度较小,也就造成了降水量明显比浦口区小。这也反映了,同一雨团内降水微结构分布不均匀。

### 3 雨滴谱特征参量间的关系

大量研究表明,Gamma 分布更接近于自然降水粒子谱分布,其被广泛地应用于云物理研究中。Gamma 分布函数的3个参数  $N_0$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$  并不是相互独立的变量,它们之间存在着一定的关系,那么寻求其间的相互关系从而形成较好的 Gamma 分布参数化方案,对于云模式的计算和双线偏振多普勒雷达定量测量降水意义重大。Zhang et al. (2003) 对  $\mu$ - $\lambda$  关系进行研究,认为它们之间存在着很好的二项式函数关系,

$$\lambda = 0.036 5\mu^2 + 0.735\mu + 1.935. \quad (7)$$

之后 Seifert (2005) 将此关系式带入到云模式中进行验证,得到了较好的模拟效果。考虑到双线偏振多普勒雷达在测量降水过程中对于小雨敏感性不高以及减小阶矩法在拟合过程中出现的偏差,选取粒子个数大于  $500 \text{ m}^{-3}$  且  $R > 2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的样本进行拟合,得出了较好的  $\mu$  和  $\lambda$  间的二项式函数关系(表5)。

表5 梅雨锋暴雨的  $\mu$ - $\lambda$  关系

Table 5 The  $\mu$ - $\lambda$  relationship of Meiyu front rainstorm

资料	$\mu$ - $\lambda$ 关系	相关系数 $r$
2009-07-07 淮南	$\lambda = 0.020 5\mu^2 + 0.623 6\mu + 1.558 8$	0.98
2009-07-07 南京浦口	$\lambda = 0.017 6\mu^2 + 0.741 1\mu + 1.301 9$	0.95
2010-07-12 南京浦口	$\lambda = 0.021 9\mu^2 + 0.630 8\mu + 1.776 6$	0.86
2010-07-12 南京江宁	$\lambda = 0.022 2\mu^2 + 0.589 3\mu + 2.117 6$	0.86

以上得出的拟合结果相关系数均较高,与 Zhang et al. (2003) 得出的结论相似,对比4个观测点得出的  $\mu$ - $\lambda$  关系式,不难发现,各项系数相差不大,曲线相似(图略),说明了在梅雨锋暴雨微结构中, $\mu$  和  $\lambda$  之间存在较好的二项式函数关系。

### 4 梅雨锋暴雨 Z-R 关系分析

雷达定量估测降水是通过雷达反射率因子和雨强的关系式 ( $Z = 300R^{1.40}$ ) 来完成的,然而,雷达反射率因子是由降水粒子谱分布决定的,不同的粒子谱分布会得到不同的雷达反射率因子。大量研究表明(邓雪娇等,1996;刘红燕和雷恒池,2006),Z-R 关系会因时间、空间和地理位置的不同而不同,那么寻求一个合适的 Z-R 关系,对于改进局部地区特定季节降水的估测就显得尤为重要。本文对各观测点上的雨滴谱数据进行统计分析,得出了每个观测点上的 Z-R 关系(表6)和总的 Z-R 关系(图3)。

表6 梅雨锋暴雨的 Z-R 关系

Table 6 The Z-R relationship of Meiyu front rainstorm

资料	$Z = aR^b$ 关系	相关系数 $r$
2009-07-07 淮南	$Z = 250R^{1.30}$	0.90
2009-07-07 南京浦口	$Z = 245R^{1.38}$	0.87
2010-07-12 南京浦口	$Z = 173R^{1.44}$	0.94
2010-07-12 南京江宁	$Z = 213R^{1.39}$	0.93

由表6可见,梅雨锋暴雨的 Z-R 关系除2009年淮南的系数  $b$  和2010年南京浦口地区的系数  $a$  偏小外,其他各项系数相差不大。为此,本文对所有数据进行拟合得到,两次梅雨锋暴雨 Z-R 关系为:  $Z = 212R^{1.38}$  (图3),其相关系数高达0.90。与目前雷达系统采用的标准  $Z = 300R^{1.40}$  关系相比,系数  $a$  明显偏小,指数  $b$  几乎相似,由图3不难看出,标准的 Z-R 关系低估了降水。

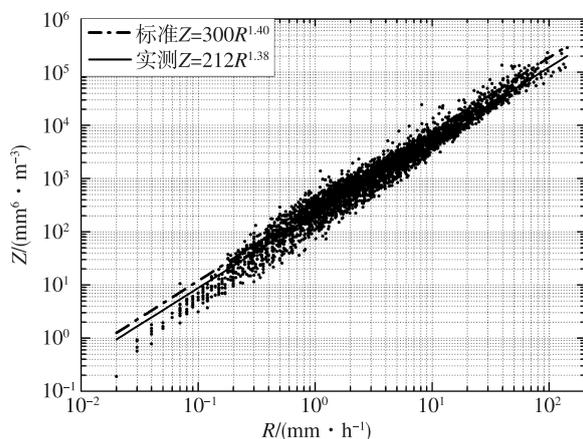


图3 全部梅雨锋暴雨的 Z-R 关系

Fig. 3 The Z-R relationship of whole Meiyu front rainstorms

## 5 结论

1) 梅雨锋暴雨主雨带内的雨滴谱分布和雨带边缘的雨滴谱分布存在明显差异, 其主雨带内降水粒子数浓度高、尺度大, 雨带边缘的降水粒子数浓度也较高, 但粒子尺度较小。

2) 梅雨锋暴雨降水主要是以  $0.25 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm}$  的粒子为主, 但对雨强的贡献最大的则是  $1.0 \text{ mm} < D \leq 2.0 \text{ mm}$  的粒子, 其次为  $0.25 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm}$  的粒子, 再次为  $2.0 \text{ mm} < D \leq 3.0 \text{ mm}$  的粒子, 最后是  $D > 3.0 \text{ mm}$  的粒子。

3) 梅雨锋暴雨雨滴谱双峰型所占比例最大, 其次是单峰型, 再次为多峰型, 几乎不存在无峰型。

4) 梅雨锋暴雨特征参量值  $N$ 、 $D_m$ 、 $D_0$  和  $Z$  几乎是随着雨强的增大而增大, 而雨滴谱峰值直径  $D_p$  随着雨强的增大先增加后减小; 雨滴谱参量  $N_0$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$  则随着雨强的增大而减小。较大粒子的增多和各尺度档的粒子数浓度增大是造成雨强增大的主要原因。

5) Gamma 分布中的参数  $\mu$  和  $\lambda$  之间存在较好的二项式函数关系, 这与 Zhang et al. (2003) 的研究结论相似, 这一关系的确定对于模式运算中的 Gamma 分布参数化和提高偏振雷达测量降水具有重要意义。

6) 几个点的观测数据显示, 梅雨锋暴雨的  $Z$ - $R$  关系 ( $Z = aR^b$ ) 与标准的  $Z$ - $R$  关系 ( $Z = 300R^{1.40}$ ) 比较可见,  $a$  值偏小,  $b$  值相似。所有数据统计结果为:  $Z = 212R^{1.38}$ , 与雷达测量降水的  $Z$ - $R$  关系相比发现, 标准的  $Z$ - $R$  关系低估了降水。

## 参考文献:

卞礼智, 邢克溥, 蒋年冲, 等. 1984. 一次梅雨锋降水的雨滴谱分析 [J]. 南京气象学院学报, 7(1): 36-46.

陈宝君, 李子华, 刘吉成, 等. 1998. 三类降水云雨滴谱分布模式 [J]. 气象学报, 56(4): 506-512.

邓雪娇, 黄浩辉, 吴兑. 1996. 广州地区汛期强降水的微物理特征 [J]. 热带气象学报, 12(2): 167-173.

樊玲, 袁成, 张云峰. 2001. 哈尔滨地区积雨云降水微结构特征 [J]. 气象科学, 21(4): 399-408.

洪延超, 黄美元, 吴玉霞. 1987. 梅雨锋云系中尺度系统回波结构及其与暴雨的关系 [J]. 气象学报, 5(1): 56-64.

蒋建莹, 倪允琪. 2003. 一次梅雨锋暴雨过程多尺度特征的诊断分析 [J]. 气象学报, 61(6): 673-683.

蒋年冲, 卞礼智, 邢克溥. 1986. 梅雨锋暴雨的雨滴谱分析 [J]. 气象, 12(5): 6-10.

李艳伟, 杜秉玉, 周晓兰. 2003. 新疆天山山区雨滴谱特性及分布模式 [J]. 南京气象学院学报, 26(4): 465-472.

刘红燕, 雷恒池. 2006. 基于地面雨滴谱资料分析层状云和对流云降水的特征 [J]. 大气科学, 30(4): 693-702.

卿清涛, 刘兴荣, 李相会, 等. 1994. 成都地区 4—6 月低涡云系降水的雨滴谱分析 [J]. 成都气象学院学报, 9(2): 24-29.

王建捷, 李泽椿. 2002. 1998 年一次梅雨锋暴雨的中尺度对流系统的模拟与诊断分析 [J]. 气象学报, 60(2): 146-155.

吴兑, 邓雪娇, 黄浩辉. 1998. 广州地区 1994 年 6 月洪涝期间降水的物理化学特征 [J]. 大气科学, 22(2): 228-234.

许绍祖, 雷连科, 张学儒, 等. 1987. 南京地区梅雨降水的微物理结构特征 [J]. 南京大学学报: 自然科学, 23(1): 176-185.

周毓荃, 刘晓天, 周非非, 等. 2001. 河南干旱年地面雨滴谱特征 [J]. 应用气象学报, 12(增刊): 39-47.

Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al. 2010. Parsivel snow observations: A critical assessment [J]. J Atmos Ocean Technol, 27(2): 333-344.

Cao Q, Zhang G. 2009. Errors in estimating raindrop size distribution parameters employing disdrometer and simulated raindrop spectra [J]. J Appl Meteor, 48(2): 406-425.

Caracciolo C, Prodi F, Battaglia A, et al. 2006. Analysis of the moments and parameters of a Gamma DSD to infer precipitation properties: A convective stratiform discrimination algorithm [J]. Atmos Res, 80(2/3): 165-186.

Chen B, Hu W, Pu J. 2011. Characteristics of the raindrop size distribution for freezing precipitation observed in southern China [J]. J Geophys Res, 116, D06201. doi:10.1029/2010JD015305.

Chu Y, Su C. 2008. An investigation of the slope-shape relation for Gamma raindrop size distribution [J]. J Appl Meteor, 47(10): 2531-2543.

Löffler-Mang M, Joss J. 2000. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors [J]. J Atmos Ocean Technol, 17(2): 130-139.

Nzeukou A, Sauvageot H, Ochou A D, et al. 2004. Raindrop size distribution and radar parameters at cape verde [J]. J Appl Meteor, 43(1): 90-105.

Seifert A. 2005. On the shape-slope relation of drop size distributions in convective rain [J]. J Appl Meteor, 44(7): 1146-1151.

Tokay A, Short D A. 1996. Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds [J]. J Appl Meteor, 35(3): 355-371.

Ulbrich C W, Atlas D. 1998. Rainfall microphysics and radar properties: Analysis methods for drop size spectra [J]. J Appl Meteor, 37(9): 912-923.

Zhang G, Vivekanandan J, Brandes E A, et al. 2003. The shape-slope relation in observed Gamma raindrop size distribution: Statistical error or useful information [J]. J Atmos Oceanic Technol, 20(8): 1106-1119.