

# 基于地面雨滴谱资料分析层状云和对流云降水的特征

刘红燕<sup>1</sup> 雷恒池<sup>2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所中层大气遥感与探测开放实验室, 北京 100029

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

**摘要** 根据由声雨滴谱仪测量得到的雨滴谱资料, 结合降水云的结构来将降水云系划分成为对流云降水云系和层状云降水云系。分析这两种降水云系中的稳定雨滴谱特征, 包括雨滴谱的各种特征直径(平均直径  $D_m$ 、众数直径  $D_d$ 、平均体积直径  $D_v$ 、优势直径  $D_p$ 、中数直径  $D_{nd}$  和中数体积直径  $D_n$ )、峰值结构和  $Z-R$  关系等。通过对这些量的分析, 进一步分析划分降水云系的判据。

**关键词** 声雨滴谱仪 雨滴谱 层状云 对流云

**文章编号** 1006-9895(2006)04-0693-10 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

## Characteristics of Rain from Stratiform Versus Convective Cloud Based on the Surface Raindrop Data

LIU Hong-Yan<sup>1</sup> and LEI Heng-Chi<sup>2</sup>

1 *Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Laboratory of Cloud - Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** It is very meaningful to separate the precipitation cloud system into convective cloud and stratiform cloud. The separation is important to improve the remote sensing of precipitation and compute the heat momentum, and so on. The raindrop size distribution and the structure of precipitation cloud are used to separate the precipitation cloud system into convective cloud and stratiform cloud. In Beijing, the time of convective precipitation is short. Some convective precipitation lasts just half an hour. Moreover, during the precipitation, there often exists lightning and thunder. The time of stratiform precipitation, which lasts at least 5 hours, is longer than that of convective precipitation. The bottom of stratiform cloud is low and has mean structure. First of all, the equilibrium raindrop size distributions are analyzed. The equilibrium raindrop size distributions are continuous and have the similar characteristics in the width of the spectra and maximum of  $N(D)$ , and so on. Six kinds of diameters are calculated, including the mean diameter  $D_m$ , the mode diameter  $D_d$ , the mean volume diameter  $D_v$ , the predominant diameter  $D_p$ , the median volume diameter  $D_n$  and the median diameter  $D_{nd}$ . It is found that for convective cloud  $D_v > 1.20$  mm, and  $D_n > 1.5$  mm. The peak of raindrop size distribution is analyzed. There is no single peak of raindrop size distribution in the convective precipitation, however, there exists in stratiform precipitation. The raindrop size distributions are separated into 3 kinds, such as single-peak raindrop size distribution, double-peak raindrop size distribution and three-peak raindrop size distribution. The diameters corresponding to the peaks are analyzed. The rain-rate  $R$  and the radar reflectivity factor  $Z$  are calculated using the equilibrium raindrop size distribution, and then the relationship

**收稿日期** 2005-05-08, 2005-09-05 收修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展规划项目 2001CB309402, 国家自然科学基金资助项目 40428006、40227001

**作者简介** 刘红燕, 女, 1975 年出生, 博士生, 研究方向: 云雾物理。E-mail: hongyan@mail.iap.ac.cn

between  $R$  and  $Z$  are calculated. Compared with the stratiform cloud precipitation, the factor of the relationship is high for convective cloud precipitation. The factor is larger than 200 for convective cloud precipitation, and the factor is smaller than 200 for stratiform cloud precipitation. All the informations can be used to separate precipitation cloud into convective cloud and stratiform cloud. But the precipitation is complex, so it should be careful to use one of the informations.

**Key words** disdrometer, raindrop size distribution, stratiform cloud, convective cloud

## 1 引言

将降水云系划分成对流云或者层状云降水云系可以提高遥感测量降水的精度。同时,对于不同类型的降水,由于其热量垂直廓线分布的计算公式不同,所以对降水系统做划分也是非常有用的。可以用空气速度和水滴的降落速度的垂直廓线,来划分不同的降水类型。在层状云降水中,空气的垂直速度比水滴的降落速度小,而在对流云降水中,两者的差别不明显。然而,雷达没有测量空气速度的能力(或者没有同时测量水滴和空气速度的能力),所以划分降水类型是使用间接的方法。Johnson 和 Hamilton<sup>[1]</sup>的研究中,把降水强度  $0.5 \text{ mm}/5 \text{ min}$  作为划分降水类型的标准,当降水强度超过这个值时,认为这种降水为对流云降水。Gamache 和 Houze<sup>[2]</sup>使用雷达反射率因子来划分降水类型,他们认为当降水的雷达反射率因子大于  $38 \text{ dBZ}$  时,降水云系为对流云降水。Gamache 等<sup>[2]</sup>和 Churchill 等<sup>[3]</sup>都提到,可以使用云的水平结构的均一性来划分层状云和对流云。Steiner 等<sup>[4]</sup>和 Rosenfeld 等<sup>[5]</sup>使用降水雷达反射率的扫描数据,在  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  网格点中,根据对流云或者层状云的反射率与周边网格点的不同特征来作分析研究。其中, Rosenfeld 等<sup>[5]</sup>使用反射率的垂直廓线分布,而 Steiner 等<sup>[4]</sup>通过云的水平结构是否均一来划分降水类型。Waldvogel<sup>[6]</sup>在对雨滴谱  $N(D)$  ( $N$  表示直径为  $D$  的雨滴的数密度)拟合时,发现当降水从对流云向层状云过渡时,  $N_0$  突然升高。Tokay 和 Short<sup>[7]</sup>将降水系统划分为对流云降水和层状云降水,并用  $\Gamma$  函数系数的时间变化来划分降水类型,方法与 Waldvogel<sup>[6]</sup>的雷同。他们在观测中发现,在降水强度为  $6 \text{ mm}/\text{h}$  的降水中,有两组雨滴谱有明显的差别,其中一组小雨滴占优势,另一组大雨滴占优势,前者是由于对流云降水引起的,而后者是由层状云引起的。然而, Yuter 和 Houze<sup>[8]</sup>在研究中发

现,在层状云降水的雨滴谱中,同时存在大雨滴和小雨滴。国内,陈万奎等<sup>[9]</sup>和陈德林等<sup>[10]</sup>对雨滴谱的特征也进行过详尽的分析和研究,得出有意义的结论。

本文根据实际降水过程中云的结构特征以及由声雨滴谱仪测量得到的雨滴谱资料,将降水云系划分为对流云降水云系和层状云降水云系,分析这两种降水云系的地面雨滴谱资料。第 2 节介绍观测过程和观测仪器声雨滴谱仪。第 3 节对层状云和对流云的雨滴谱进行分析,分析的内容包括两种降水过程的雨滴谱谱分布、六种直径(平均直径  $D_m$ 、众数直径  $D_d$ 、平均体积直径  $D_v$ 、优势直径  $D_p$ 、中数直径  $D_{nd}$  和中数体积直径  $D_n$ )以及雨滴谱峰值特征。根据地面雨滴谱资料计算了降水强度和雷达反射率因子,并比较分析北京地区的层状云、对流云降水的  $Z-R$  关系的特征。第 4 节给出结论并进行了讨论。

## 2 仪器介绍和理论基础

### 2.1 仪器介绍

声雨滴谱仪测雨仪是一种用来测量雨滴大小的仪器,是瑞典 Disdromet 公司生产,由 Joss 和 Waldvogel 于 1967 年设计完成,根据雨滴撞击传感器的垂直冲击力来测量雨滴的大小。它由四部分组成:传感器、处理器、分析器和计算机。采样面积,即传感器的表面积为  $50 \text{ cm}^2$ 。声雨滴谱仪器有 20 个通道,每个通道对应某一雨滴直径范围。表 1 列出声雨滴谱仪器 20 个通道对应的雨滴直径大小以及测量精度。在强降水中,声雨滴谱仪器会低估小雨滴的数目,但是 Tokay 和 Short<sup>[7]</sup>的研究认为,声雨滴谱仪对于小雨滴的低估,对  $Z-R$  关系的影响不到 3%。

我们使用声雨滴谱仪器测量了北京地区的雨滴资料。声雨滴谱仪器放置在中国科学院大气物理研究所合建楼 12 层楼顶,距地高度约为  $35 \text{ m}$ 。在

表 1 声雨滴谱仪器 20 个通道对应的实际雨滴的直径和测量精度

Table 1 The mindrop diameter and the precision of the 20 channels of disdrometer

通道数 Channel	雨滴直径 Diameter/mm	雨滴直径的精度 Precision of diameter/mm
1	0.35	0.05
2	0.45	0.05
3	0.55	0.05
4	0.65	0.05
5	0.75	0.05
6	0.9	0.1
7	1.1	0.1
8	1.3	0.1
9	1.5	0.1
10	1.7	0.1
11	1.95	0.15
12	2.25	0.15
13	2.55	0.15
14	2.85	0.15
15	3.15	0.15
16	3.5	0.2
17	3.9	0.2
18	4.3	0.2
19	4.75	0.25
20	5.0	0.25

2004 年 8 月 21 日以前的降水雨滴测量中, 仪器的采样时间为 4 分钟, 前 2 分钟测量数据, 后 2 分钟存储数据。在这之后, 仪器的采样时间为 2 分钟, 前 1 分钟测量数据, 后 1 分钟存储数据。

在使用声雨滴谱仪器测量降水雨滴谱时, 我们还用雨滴谱试纸与声雨滴谱仪同时对降水雨滴做观测实验。雨滴谱试纸测量雨滴的方法是, 在降雨时, 将表面涂有染色剂的过滤试纸暴露在雨中, 当雨滴落在试纸上时, 会在试纸上产生一个有染色剂颜色的圆点, 这个点的直径被认为只与真实雨滴直径有关(事实上, 这个点的直径也是试纸有效厚度的函数, 同时它还依赖于雨滴的降落速度, 而且试纸的湿度也影响这两种直径之间的关系)。在建立起真实雨滴的直径与试纸上雨滴印记点的直径之间的经验关系后, 就可以使用这种经验关系, 通过测量试纸上各种雨滴印记点的直径, 来获得真实雨滴的大小。雨滴谱试纸在测量雨滴时, 由于雨滴落在试纸上会破碎产生小雨滴, 而导致试纸高估了小雨滴的数目。但是, 这种测量的误差对  $Z-R$  关系的影响很小。

表 2 所用吸水试纸关于水滴印记直径与真实雨滴直径的检验结果

Table 2 The real diameter of raindrop and the diameter of corresponding raindrop on the raindrop paper

水滴印记直径 Diameter of drop on the raindrop paper/mm	真实雨滴直径 Diameter of raindrop/mm	水滴印记直径 Diameter of drop on the raindrop paper/mm	真实雨滴直径 Diameter of raindrop/mm
0.5	0.2	15.5	2.6
1.0	0.4	17.0	2.8
2.0	0.6	19.0	3.0
3.0	0.8	20.5	3.2
4.0	1.0	22.5	3.4
5.0	1.2	24.5	3.6
6.0	1.4	26.5	3.8
7.5	1.6	28.0	4.0
9.0	1.8	30.0	4.2
10.5	2.0	32.0	4.4
12.0	2.2	34.0	4.6
14.0	2.4	36.0	4.8

本实验使用的雨滴谱试纸是中国科学院大气物理研究所吸水纸。雨滴谱试纸的采样面积为  $400 \text{ cm}^2$ 。采样时间根据雨滴谱试纸上面雨滴的多少来决定。一般保证在采样时间内雨滴谱试纸上面有 200 个雨滴。表 2 是所用吸水试纸关于水滴印记直径与真实雨滴直径的检验结果。

雨滴谱试纸与声雨滴谱仪器的对比实验共做了三次, 时间分别为 2004 年 5 月 25 日、6 月 16 日和 9 月 14 日。这三次降水过程的降水云层分布均匀, 降水强度变化不大较稳定, 且降水强度属于中等偏低, 一般都在  $7 \text{ mm/h}$  以内。所以选择这样的降水有两个原因, 第一是为了减少雨滴谱试纸的测量误差。用雨滴谱试纸测量降水时, 当大雨滴落在试纸上时, 大雨滴破碎产生许多小雨滴, 从而使得小雨滴在试纸上的数目增多, 使雨滴谱试纸测量的小雨滴数目偏高, 由此计算得到的降水强度增大。而由于小雨滴数目增加对于计算雷达反射率因子的影响不明显, 这样又会导致根据试纸测量的雨滴资料而计算得到的  $Z-R$  关系出现偏差。另外, 大雨滴落在试纸上的印记很大, 常常会部分或全部掩盖其他雨滴, 造成雨滴谱试纸读数困难而不准确。由于大雨滴较多出现在降水强度大、变化剧烈的对流云降水中, 所以, 我们选择的降水都是强度比较均匀、稳定的中等强度降水, 这种降水中的大雨滴数目较少, 尽可能地避免了雨滴谱试纸的测量误差。第二

是为了减小两种仪器由于测量空间不同而引起的差异。在两种仪器测量降水时,虽然可以保证测量的同时性,但它们测量的始终是不同的空间的降水雨滴。如果选择空间变化大的降水,就会增大两种仪器由于测量空间不同而引起的测量差异。我们所选择的这三种降水云层,分布都比较均一,降水时间长。这些对于两种仪器的比较都是很有利的。

在这三次对比测量实验中,声雨滴谱仪器在2004年5月25日和6月16日每4分钟采样一次,前2分钟用于采集数据,后2分钟用于保存数据;2004年9月14日的降水是2分钟采样一次,前1分钟采集数据,后1分钟保存数据。声雨滴谱仪器是自动测量,所以我们设定雨滴谱试纸的测量时间都在声雨滴谱仪器测量雨滴的时间内。对于雨滴谱试纸,2004年5月25日的测量时间为12:27~15:33(北京时,下同),共11个样本;2004年6月16日的测量时间为10:38~17:34,共22个样本;2004年9月14日的测量时间为15:47~17:30,共18个样本。为了保证雨滴谱试纸不会因为空气湿度大而变潮湿,我们都是边准备试纸边测量,所以雨滴谱试纸测量的样本数目比声雨滴谱仪器的少。由测量的雨滴可以计算得到降水强度 $R$ 和雷达反射率因子 $Z$ ,分别求这两种测量方法得到的 $R$ 以及 $Z$ 之间的相关系数。其中就降水强度(雷达反射率因子)而言,2004年5月25日的相关系数为0.84(0.85),2004年6月16日的为0.82(0.82),2004年9月14日的为0.84(0.85)。

在比较分析两种测量方法相关性的同时,我们还分析了它们的降水强度和雷达反射率因子随时间变化的趋势。由于在2004年5月25日和6月16日这两次实验中,用雨滴谱试纸测量降水过程中,有的雨滴谱数据之间的时间间隔比较长,这样对于这种时间性的分析将会有许多不确定的影响因子,为此,我们选择了2004年9月14日实验过程。这次实验中数据采集时间比较集中,因此得到的分析结果有说服力。图1是两种测量仪器得到的降水强度随时间的变化,图2是两种测量仪器得到的雷达反射率因子随时间的变化。在图1、2中,虽然降水强度/雷达反射率因子在量值上存在一些差别,但是它们随时间的变化趋势是一致的。由此也可以说明两种仪器在测量过程中,其时间性是一致的。

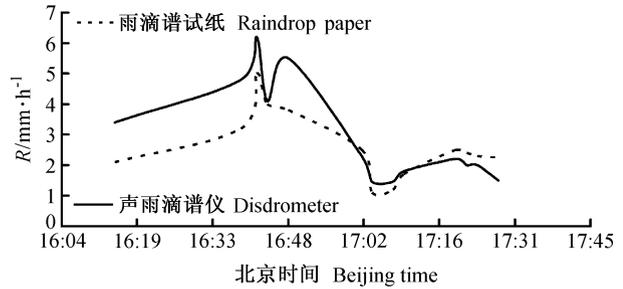


图1 声雨滴谱仪与雨滴谱试纸的降水强度 $R$ 的时间变化  
Fig. 1 The precipitation intensity  $R$  variation with time for disdrometer and raindrop paper

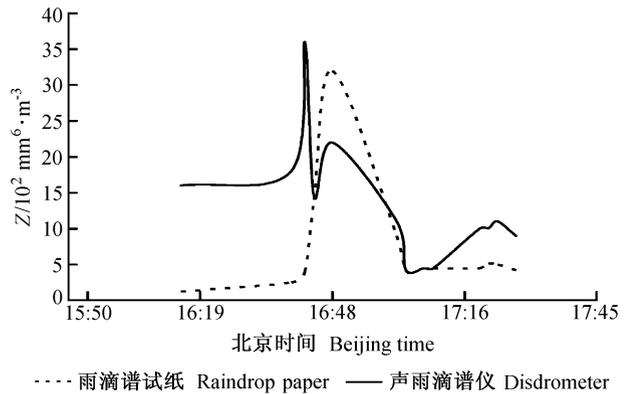


图2 声雨滴谱仪与雨滴谱试纸的雷达反射率因子 $Z$ 的时间变化  
Fig. 2 The radar reflectivity factor  $Z$  variation with time for disdrometer and raindrop paper

## 2.2 数据资料介绍

### 2.2.1 降水云系

在将降水云系划分为对流云和层状云时,国内外许多作者提出了各种方法。本文根据实际降水过程中降水云的结构特征和由声雨滴谱仪器测量得到的雨滴谱资料来划分降水云系。北京地区的降水一般从4月份开始,到6、7、8月时,降水的次数增多。以后几个月,北京地区的降水开始逐渐减少,降水强度也开始减弱,但每次降水的持续时间较长。我们所选择的强对流降水都发生在7月份,分别是2004年7月1日、7日、8日和2005年7月10日。这4次对流云降水的云系结构为明显的发展旺盛的积云,云体高,云底呈黑色,可以看到降水云体的边界。降雨发生前天空比较晴朗,降雨发生突然且持续时间在1小时左右,降雨停止后,天空较快晴朗,云层消散快。同时,这种降雨伴随有雷声和闪电。从这些信息可以确定这种降水为对流云降水。我们所选择的层状云降水,包括2004年5月

25 日、6 月 16 日、9 月 14 日三次降水过程。在云体结构上,层状云降水云系与对流云降水云系有不同的特征。这三次层状云降水云系云底的水平结构均匀、云层密,看不出云层的垂直结构,整个云系分布面积广,看不到云的水平边界。而且这三次降水持续时间长,5 月 25 日的降水从 09:48~16:58,6 月 16 日的降水从早上 08:23 一直持续到次日早上 05:00,9 月 14 日从 13:24 到次日 05:00 降水仍在继续。从这些降水云系的特征中,可以确定这三次降水过程为层状云降水云系。

不仅从降水云的结构特征可以将降水划分为层状云降水和对流云降水,也可以根据由声雨滴谱仪器测量得到的雨滴谱数据来划分降水类型。在我们所选定的这些降水资料中,对流云降水云系所产生的雨滴直径最大值出现在声雨滴谱仪器的第 17、18 通道,甚至第 20 通道中,相应的直径为 3.9 mm、4.3 mm 以及 5.0 mm。而在这三次层状云降水云系产生的雨滴中,其最大直径分别为 3.15 mm、3.5 mm 以及 4.3 mm。层状云降水云系的雨滴谱谱宽较对流云降水云系的窄。

综合降水云体的结构特征和降水雨滴谱的谱宽,我们将降水云系划分为对流云降水云系和层状云降水云系。下面,我们将就这两类降水云系所产生的降水雨滴谱特征进行分析研究。

### 2.2.2 稳定雨滴谱

在 1948 年,Marshall 和 Palmer<sup>[11]</sup>通过对大量雨滴资料统计分析得到雨滴谱的分布——指数分布,而后由 Ulbrich<sup>[12]</sup>提出的使用  $\Gamma$  函数来描述雨滴谱的分布形式被常常使用。在比较这两种方法时,层状云降水的雨滴谱呈指数分布,而对流云降水呈  $\Gamma$  函数分布。影响雨滴谱分布的因子有很多,包括碰并、破碎、碰撞破碎、蒸发、自发增长、上升气流作用、下沉气流作用、风的水平切变作用等,而且陆地与海洋降水的雨滴谱特征也存在较大的差异。这些因子会影响各种直径雨滴的数目,从而影响到雨滴谱的分布形式。在降水过程中,这些因子对雨滴谱的影响程度各不相同,因而就是相隔很短时间的雨滴谱之间也会存在明显的差异。为此,我们选定每次降水过程中时间连续的分布形式相似的雨滴谱作为各次降水的特征雨滴谱来研究。在这几次降水过程中,除了 2004 年 6 月 16 日的稳定雨滴谱是多个时间段之外,在其余降水日期中我们选定

表 3 降水中总雨滴谱数目和稳定雨滴谱数目

Table 3 The number of total raindrop size distribution and the number of stable raindrop size distribution

降水日期 Precipitation date	降水云系 Precipitation cloud	雨滴谱总数目 Number of to- tal $N(D)$	稳定谱数目 Number of st- able $N(D)$
2004-05-25	S	80	32
2004-06-16	S	156	52
2004-09-14	S	253	81
2004-07-01	C	13	6
2004-07-07	C	13	9
2004-07-08	C	24	13
2005-07-10	C	23	18

注: S: 层状云系, C: 对流云系

Note: S: Stratiform cloud, C: Convective cloud

的稳定雨滴谱时间都是在一个时间段中发生的。

表 3 中列出这几次降水过程中总的雨滴谱个数和稳定谱的个数。由于层状云(简称 S)降水时间长,所以选择的稳定谱数目较对流云的多,但是,从稳定谱数目所占总雨滴谱数目上来看,对流云(简称 C)中出现稳定谱的比例在 50% 以上,而层状云的在 50% 以下。

下面,将通过比较分析这些降水过程稳定谱的特征,来研究这两类降水云系的微物理特征的异同之处。

## 3 雨滴谱特征分析

### 3.1 各种直径(6 种直径的分析)

在表征雨滴谱的特征时,对各种直径值进行研究是非常有意义的。这里,我们计算了每次降水的 6 种直径,即平均直径  $D_m$ 、众数直径  $D_d$ 、平均体积直径  $D_v$ 、优势直径  $D_p$ 、中数直径  $D_{nd}$  和中数体积直径  $D_n$ 。表 4 列出了这 6 种直径的定义和计算公式。

表 5 和表 6 列出的是这几次降水过程中雨滴谱的 6 种直径的平均值和标准偏差值。在周毓荃等<sup>[13]</sup>、宫福久等<sup>[14]</sup>和陈宝军等<sup>[15]</sup>的研究中认为,在对流云降水中小雨滴的数密度比较大,最终导致对流云降水的雨滴尺度比层状云的小。但我们所研究的这几次降水过程中,这种雨滴尺度的特性并不明显,可能与声雨滴谱仪器测量的原理有关。声雨滴谱仪器测量的实际是雨滴的动量值。当大雨滴与小雨滴同时(或间隔时间比较短)落在感应面上时,大雨滴的信号会全部(或部分)掩盖掉小雨滴的信号,这样声雨滴谱仪器测量得到的小雨滴的数目是偏小的。因此,由声雨滴谱仪器测量得到的降水雨

滴尺度与周毓荃等<sup>[13]</sup>、宫福久等<sup>[14]</sup>和陈宝军等<sup>[15]</sup>的不同。相反,由声雨滴谱仪测量得到的对流云的雨滴尺度相对来说比层状云的大,尤其是平均体积直径和中数体积直径除 2004 年 7 月 8 日降水以外,在其他几次降水过程中,对流云的值得明显比层状云的大。从这 6 种直径的标准偏差来分析,对流云降水的偏差也普遍比层状云的大,尤其是平均直径  $D_m$ 、众数直径  $D_d$  和平均体积直径  $D_v$  的标准偏差。由此,在我们划分降水云系为层状云和对流云时,可以将雨滴谱的平均体积直径和中数体积直径作为划分标准。根据所分析的这几次降水过程中得

到的值,我们认为雨滴谱的平均体积直径大于 1.20 mm 和中数体积直径大于 1.5 mm 的降水是对流云降水。2004 年 7 月 8 日的降水,从降水云可以认为此次降水为对流云降水,但是,根据平均体积直径和中数体积直径却不能认定这次降水是对流云降水。为此,在这个判断标准上附加其他信息时,可以使获得更加精确划分降水云系的标准。

### 3.2 降水雨滴谱的峰值

在大多数情况下,理论得到的雨滴谱与测量得到的雨滴谱分布之间存在比较大的差异。导致这种差异的原因是真实测量得到的雨滴谱中,存在着多

表 4 6 种直径的符号、定义和表达式

Table 4 The symbols, definitions and equations of the 6 kinds of diameter

直径 Diameter	符号 Symbol	定义 Definition	表达式 Equation
平均直径 The mean diameter	$D_m$	全部雨滴的直径总和除以雨滴的总数 The sum of all the diameters /the sum of the number of raindrops	$D_m = \frac{\sum_{i=1}^{20} N_i(D_i)D_i}{\sum_{i=1}^{20} N_i(D_i)}$
众数直径 The mode diameter	$D_d$	最大频率直径 The diameter having the max frequency	$N(D)$ 最大值所对应的直径 The diameter having the max of $N(D)$
平均体积直径 The mean volume diameter	$D_v$	平均雨滴体积所对应的直径 The diameter corresponding to the mean volume of raindrop	$D_v = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{20} N_i(D_i)D_i^3}{\sum_{i=1}^{20} N_i(D_i)} \right]^{1/3}$
优势直径 The predominant diameter	$D_p$	对含水量贡献最多的直径 The diameter having the max water content	$N(D)D^3$ 最大值所对应的直径 The diameter having the max of $N(D)D^3$
中数直径 The median diameter	$D_{nd}$	半数雨滴的直径小于(或者大于)此值 The diameters of half the raindrops are less than or larger than the diameter	$2 \int_{D_{min}}^{D_{nd}} N(D)dD = \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D)dD$
中数体积直径 The median volume diameter	$D_n$	含水量的一半是由半径大于此值的大雨滴所组成的 Half of the water content is attributed to the raindrops with diameters larger than the diameter	$2 \int_{D_{min}}^{D_n} D^3 N(D)dD = \int_{D_{min}}^{D_{max}} D^3 N(D)dD$

表 5 降水过程的各种直径的平均值

Table 5 The mean value of diameter for the raindrop size distribution

降水日期 Precipitation date	降水云系 Precipitation cloud	各种直径的平均值 Mean of all kinds of diameter/mm					
		$D_m$	$D_d$	$D_v$	$D_p$	$D_{nd}$	$D_n$
2004-05-25	S	0.88	0.81	0.99	1.25	0.81	1.25
2004-06-16	S	0.94	0.92	1.05	1.27	0.89	1.25
2004-09-14	S	1.04	0.94	1.20	1.70	0.97	1.54
2004-07-01	C	1.04	0.79	1.29	1.98	0.92	1.85
2004-07-07	C	1.18	1.17	1.33	1.58	1.14	1.58
2004-07-08	C	0.89	0.83	1.07	1.68	0.85	1.49
2005-07-10	C	1.70	1.48	1.95	2.74	1.54	2.51

表 6 降水雨滴谱中各种直径的标准偏差

Table 6 The standard deviation of the diameter for the raindrop size distribution

降水日期 Precipitation date	降水云系 Precipitation cloud	各种直径的标准偏差 Standard deviation of all kinds of diameter/mm					
		$D_m$	$D_d$	$D_v$	$D_p$	$D_{nd}$	$D_n$
2004-05-25	S	0.11	0.22	0.13	0.28	0.13	0.20
2004-06-16	S	0.10	0.16	0.13	0.34	0.12	0.21
2004-09-14	S	0.17	0.21	0.21	0.54	0.18	0.41
2004-07-01	C	0.26	0.36	0.22	0.33	0.29	0.29
2004-07-07	C	0.23	0.33	0.27	0.38	0.16	0.37
2004-07-08	C	0.38	0.52	0.43	0.80	0.48	0.58
2005-07-10	C	0.36	0.41	0.44	0.97	0.32	0.68

表 7 降水雨滴谱中各种峰值所占比例

Table 7 The frequency of all kinds of peaks in the raindrop size distribution

降水日期 Precipitation date	降水云系 Precipitation cloud	单峰谱	双峰谱	三峰谱	四峰谱	五峰谱
		$N(D)$ having single peak	$N(D)$ having double peaks	$N(D)$ having three peaks	$N(D)$ having four peaks	$N(D)$ having five peaks
2004-05-25	S	21.21	36.36	33.33	6.06	0
2004-06-16	S	20.75	43.40	26.42	3.77	3.77
2004-09-14	S	6.10	35.37	41.46	14.63	1.22
2004-07-01	C	0	14.29	42.86	14.29	14.29
2004-07-07	C	0	33.33	44.44	11.11	11.11
2004-07-08	C	0	33.33	44.44	11.11	0
2005-07-10	C	0	16.67	33.33	50.00	0

个峰值的结构, 不论是降水时间长或降水时间短的雨滴谱中, 都存在着多峰值的现象。而在一些模式计算的雨滴谱<sup>[16~19]</sup>, 表明在降水趋于平稳的雨滴谱分布中, 有多峰值的特征。因此, 通过分析测量的雨滴谱分布的峰值特征, 可以判断降水是否达到了平稳状态。

在我们所选择的几次降水过程的稳定雨滴谱中也存在着多峰结构, 本文定义的峰值其实是指极大值, 这个值比与其相邻的前、后值都大, 称为峰值。我们将雨滴谱按照峰值的数目分为单峰雨滴谱、双峰雨滴谱、三峰雨滴谱、四峰雨滴谱、五峰雨滴谱。统计每次降水过程中这五种雨滴谱占总雨滴谱的比例, 可以分别得到各种峰值出现的频率数。表 7 中列出了这几次降水过程中各种峰值出现的频率数。由于在分析雨滴谱特征时, 所选定的雨滴谱都是时间连续、特征相似的谱, 我们认为这样的谱在降水过程中是稳定的谱。在对流云降水过程中, 稳定谱没有出现单峰值, 这与模式计算的结果是一致的, 但在层状云降水中, 稳定谱中出现了单峰值的谱。这说明在模式计算中, 对于不同云系类型的降水雨

滴谱应该分别给予不同的考虑, 而不能认定所有降水的稳定谱都是多峰值的雨滴谱。

在这几次降水过程中, 雨滴谱出现双峰值、三峰值的频率比较高, 四峰、五峰值的频率比较小。同时, 由于我们所选定的稳定雨滴谱数目比较少, 出现四个或五个峰值雨滴谱的个数就更加少。对这几个有限的雨滴谱进行分析所得到的结果是很难有说服力的, 所以在以下内容中, 我们没有分析出现四个、五个峰值的雨滴谱, 而是重点分析单峰值、双峰值和三个峰值的雨滴谱特征。

由于对流云降水的稳定谱中没有出现单峰值结构, 所以仅对层状云进行分析。表 8 中列出了所分析的单峰雨滴谱的特征。在 2004 年 5 月 25 日降水中, 单峰值的雨滴谱其峰值所对应的直径范围在 0.45~1.1 mm 之间, 其中 0.90 mm 直径处出现峰值的可能性最大, 为 57.14%。2004 年 6 月 16 日降水中单峰值雨滴谱的峰值所对应的直径范围在 0.65~1.10 mm 之间, 2004 年 9 月 14 日单峰值雨滴谱的峰值直径范围在 0.45~0.90 mm 之间, 这两次降水的单峰雨滴谱同样在 0.90 mm 处出现峰值的频率最高。

对于出现两个峰值的雨滴谱,我们分别讨论各个峰值所对应的直径范围,以及峰值出现频率最高所对应的直径,具体内容列在表9中。其中,2004年7月1日的稳定雨滴谱中只有一个雨滴谱出现双峰值。三次层状云降水的两个峰值的雨滴谱中,第一个峰值或者第二个峰值出现频率最高时,所对应的直径值分别都是一个值,虽然不同降水日期中得到的值不同。比如2004年5月25日和2004年6月16日第一个峰值在直径为0.65 mm时出现频率最高,而2004年9月14日的为0.90 mm;2004年

5月25日和2004年6月16日第二个峰值在直径为0.90 mm处出现频率最高,而2004年9月14日的为1.95 mm。在统计对流云降水时,我们发现双峰值雨滴谱峰值出现频率最高所对应的直径不存在唯一值,比如在2004年7月7日对流云降水的双峰雨滴谱中第一个峰值在三个直径处出现的频率是一样的,这个原因主要是对流云降水时间短、样本数目少的缘故。在对流云和层状云降水的双峰雨滴谱中,第一个峰值或者第二个峰值所对应的直径范围之间没有明显的差别。

表8 单峰雨滴谱的峰值特征

Table 8 The peak characteristics of the single-peak raindrop size distribution

降水日期	降水云系	峰值的直径范围	峰值频率最高的直径	峰值最大频率值
Precipitation date	Precipitation cloud	Diameter of peak/mm	Diameter of the highest frequency of peak /mm	The highest frequency of peak
2004-05-25	S	0.45~1.10	0.90	57.14
2004-06-16	S	0.65~1.10	0.90	54.55
2004-09-14	S	0.45~0.90	0.90	40.00

表9 双峰雨滴谱的峰值特征

Table 9 The peak characteristics of the double-peak raindrop size distribution

降水日期	降水云系	第一个峰值的直径范围	第一个峰值出现频率最高的直径		第二个峰值出现频率最高的直径
			Diameter of the highest frequency of the first peak /mm	第二个峰值的直径范围	Diameter of the highest frequency of the second peak /mm
Precipitation date	Precipitation cloud	Diameter of the first peak /mm	Diameter of the highest frequency of the first peak /mm	Diameter of the second peak /mm	Diameter of the highest frequency of the second peak /mm
2004-05-25	S	0.45~0.90	0.65	0.75~1.95	0.90
2004-06-16	S	0.45~1.10	0.65	0.90~1.95	0.90
2004-09-14	S	0.45~1.10	0.90	0.90~2.25	1.95
2004-07-01	C	0.65	0.65	0.90	0.90
2004-07-07	C	0.55~1.10	0.55, 0.9, 1.1	0.90~1.95	0.9, 1.3, 1.95
2004-07-08	C	0.55~0.75	0.55, 0.75	1.10~1.95	1.95
2005-07-10	C	0.45~1.30	0.45, 0.55, 1.3	0.90~1.95	0.9, 1.1, 1.95

表10 三峰雨滴谱的峰值特征

Table 10 The peak characteristics of the three-peak raindrop size distribution

降水日期	降水云系	第一个峰值的直径范围	第一个峰值出现频率最高的直径	第二个峰值		第三个峰值的直径范围	第三个峰值的直径范围
				第二个峰值的直径范围	Diameter of the second peak/mm		
Precipitation date	Precipitation cloud	Diameter of the first peak/mm	Diameter of the highest frequency of the first peak/mm	Diameter of the second peak/mm	Diameter of the second peak/mm	Diameter of the third peak	Diameter of the third peak/mm
2004-05-25	S	0.55~0.9	0.65	0.90~1.95	1.10	1.30~2.85	1.95
2004-06-16	S	0.55~1.10	0.65	0.90~1.95	0.90	1.30~1.95	1.95
2004-09-14	S	0.45~1.10	0.65	0.65~1.95	0.90	1.10~3.55	1.95
2004-07-01	C	0.65~1.10	1.10	1.10~1.95	1.95	1.95~3.90	1.95
2004-07-07	C	0.45~0.75	0.65	0.75~1.30	0.90	1.10~1.95	1.95
2004-07-08	C	0.55~0.9	0.55	0.90~1.95	0.90	1.70~2.85	1.95
2005-07-10	C	1.10~1.3	1.30	1.50~2.25	1.95	1.95~4.30	3.15

表 10 中列出了这几次降水过程中雨滴谱的三峰值特征。在这几次降水过程中,除了 2005 年 7 月 10 日降水过程外,其余降水的三个峰值雨滴谱中,第一个峰值常出现在 0.65 mm,第二个峰值常出现在 0.90 mm,而第三个峰值对应的直径常出现在 1.95 mm。2005 年 7 月 10 日的降水发生时间段为从 14:27~15:17,降水之前天气晴朗,降水之后天气也很快转晴,降水强度大、时间短,而且声雨滴谱仪器所采集到的每一分钟雨滴谱在各个通道几乎都有值。而 2004 年 7 月 1 日的降水发生在 16:27~17:23,2004 年 7 月 8 日降水发生在 20:46~22:56。相对于下午和晚上,中午时分的温度更高,形成的热对流相对会更加强烈,这也许导致了所形成的雨滴谱出现不同的特征。同样,在 2004 年 7 月 7 日 14:00~15:00 点发生的降水,从雨滴谱上分析,其降水强度也明显比 2005 年 7 月 10 日的降水弱。通过这些分析比较,可见雨滴谱的特征是复杂的,不仅不同云系的雨滴谱之间存在差异,就是同一类型的降水云系之间也会存在明显的差别,而要解释这些原因则有待于我们今后作更进一步的研究。

### 3.3 雷达反射率因子同降水强度之间的关系

由于  $Z-R$  关系的时空特征以及地理特征变化较大,通过分析  $Z-R$  关系,对于北京地区的降水特征的认识也是有意义的。本文就所选择的 6 次降水过程的雨滴谱资料来分析比较对流云降水与层状云降水的  $Z-R$  关系。

根据降水雨滴谱资料可以计算得到相应采样时间中的降水积分参数,比如降水强度  $R$  和雷达反射率因子  $Z$ 。

$$R = \frac{\pi}{6} \frac{3.6}{10^3} \frac{1}{St} \sum_{i=1}^{20} n_i D_i^3, \quad (1)$$

$$Z = \frac{1}{St} \sum_{i=1}^{20} \frac{n_i}{V(D_i)} D_i^6, \quad (2)$$

其中,  $n_i$  表示声雨滴谱仪器第  $i$  个通道的雨滴数目,  $D_i$  表示声雨滴谱仪器第  $i$  个通道所对应的雨滴直径值。  $S$  表示声雨滴谱仪器的采样面积,  $t$  为采样时间。  $V(D_i)$  表示直径为  $D_i$  的雨滴的降落末速度。我们使用 Atlas 等<sup>[18]</sup>建立的公式(3)来计算直径为  $D_i$  的雨滴相应降落末速度  $V_i$ 。

$$V(D_i) = 9.65 - 10.3 \exp(-6D_i). \quad (3)$$

我们使用最小二乘法来拟合  $\ln r$  和  $\ln Z$  之间

表 11  $Z-R$  函数关系的系数  $a$  和指数  $b$

Table 11 The coefficient  $a$  and the exponent  $b$  of the  $Z-R$  function relationship

降水日期 Precipitation date	降水云系 Precipitation cloud	$a$	$b$
2004-05-25	S	200	1.20
2004-06-16	S	153	1.11
2004-09-14	S	157	1.07
2004-07-01	C	812	1.09
2004-07-07	C	483	1.32
2004-07-08	C	262	1.22
2005-07-10	C	620	1.61

的函数关系。 $Z-R$  关系一般被写为

$$Z = aR^b. \quad (4)$$

表 11 中列出了这 7 次降水的  $Z-R$  关系,其中  $a$  为  $Z-R$  关系的系数,  $b$  为  $Z-R$  关系的指数。在表 11 中,对于指数  $b$ ,对流云降水和层状云降水之间没有明显的差别。而对于系数  $a$ ,对流云降水的值明显比层状云降水的高。层状云降水的  $a$  值一般在 200 以下,而对流云降水的都大于 200,而且数值分散程度也较层状云的大。考虑到  $Z-R$  关系随时间、空间以及地理位置的不同会发生改变,我们统计分析得到的这种结果只是北京地区这几次降水过程所具有的特征,这种分析结果对于其他地区研究  $Z-R$  关系也许有一定的比较、指示意义,但并不表明其他地区也同样具有这种特征。

## 4 讨论

把降水云系划分为对流云或层状云降水云系是非常有意义的。本文根据降水云的结构特征和由声雨滴谱仪器测量得到的雨滴谱数据,将降水云系划分为对流云降水云系和层状云降水云系。通过比较对流云与层状云的降水雨滴谱的特征,分析这两种降水云系之间的相同和不同之处,进而根据这两种降水云系的不同特征提出其他可以用于划分降水云系的标准。在我们的研究中,得到下面几点可以用来作为划分降水云系的有利条件。

(1) 在研究降水雨滴谱的各种直径时,平均体积直径大于 1.20 mm 和中数体积直径大于 1.5 mm 的降水是对流云降水。

(2) 在研究稳定谱分布的峰值特征时,层状云的稳定谱中包含有单峰雨滴谱,而对流云的稳定谱中不包含单峰雨滴谱。

(3) 在根据雨滴谱而得到降水强度  $R$  和雷达反射率因子  $Z$  之间的关系时, 不同降水云系得到的  $Z-R$  关系的系数是有明显差别的, 其中对对流云得到的  $Z-R$  关系的系数比较大, 在 200 以上, 而且数值比较分散; 层状云得到的  $Z-R$  关系的系数在 200 以内, 数值相对集中。

虽然得到了这些结论, 但是考虑到降水云系与地理位置有关的特点, 在将这些结论用于其他地区时还是要谨慎。同样在北京, 这些特征也只能是划分降水云系的辅助信息。由于降水结构的复杂性, 将多种信息综合起来, 将对正确划分降水云系非常有帮助。

**致谢** 本文得到陈洪滨老师和吴玉霞老师的指导和帮助。在使用声雨滴谱仪器观测时得到黄其荣老师、吴益美的帮助。在此一并表示感谢!

### 参考文献 (References)

- [1] Johnson R H, Hamilton P J. The relationship of surface pressure features to the precipitation and air flow structure of an intense midlatitude squall line. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**: 1444~1472
- [2] Gamache J F, Houze R A Jr. Mesoscale air motions associated with a tropical squall line. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 118~135
- [3] Churchill D D, Houze R A Jr. Development and structure of winter monsoon cloud clusters on 10 December 1978. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 933~960
- [4] Steiner M, Houze R A Jr, Yuter S E. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 1978~2007
- [5] Rosenfeld D, Amitai E, Wolff D B. Classification of rain regimes by the three-dimensional properties of reflectivity fields. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 198~211
- [6] Waldvogel A. The  $N_0$  jump of raindrop spectra. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**: 1067~1078
- [7] Tokay A, Short D A. Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds. *J. Appl. Meteor.*, 1996, **35**: 355~371
- [8] Yuter S E, Houze R A Jr. Measurements of raindrop size distributions over the pacific warm pool and implications for  $Z-R$  relations. *J. Appl. Meteor.*, 1997, **36**: 847~867
- [9] 陈万奎, 严采繁. 雨滴谱及其特征水平分布的个例分析. 气象, 1988, **14** (1): 8~11
- Chen W K, Yan C F. A case study of raindrop spectra and its characteristic parameters along horizontal level. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1988, **14** (1): 8~11
- [10] 陈德林, 谷淑芳. 大暴雨雨滴平均谱的研究. 气象学报, 1989, **47** (1): 124~127
- Chen D L, Gu S F. Research on the mean spectrum of the rain storm. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1989, **47** (1): 124~127
- [11] Marshall J S, Palmer W M. The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, 1948, **5**: 165~166
- [12] Ulbrich C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. *J. Appl. Meteor.*, 1983, **22**: 1764~1775
- [13] 周毓荃, 刘晓天, 周非非, 等. 河南干旱年地面雨滴谱特征. 应用气象学报, 2001, **12**(增刊): 39~47
- Zhou Y Q, Liu X T, Zhou F F, et al. Characteristics of surface raindrop spectra in drought years in Henan province. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2001, **12**(Supplement): 39~47
- [14] 宫福久, 刘吉成, 李子华. 三类降水云雨滴谱特征研究. 大气科学, 1997, **21** (5): 607~614
- Gong F J, Liu J C, Li Z H. Study of the raindrop size distributions for three types of precipitation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1997, **21** (5): 607~614
- [15] 陈宝君, 李子华, 刘吉成. 三类降水云雨滴谱分布模式. 气象学报, 1998, **56** (4): 506~512
- Chen B J, Li Z H, Liu J C. Model of raindrop size distribution in three types of precipitation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (4): 506~512
- [16] Valdez M P, Young K C. Number fluxes in equilibrium raindrop populations: A Markov chain analysis. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **42**: 1024~1036
- [17] List R, Donaldson N R, Stewart R E. Temporal evolution of drop spectra to collisional equilibrium in steady and pulsating rain. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 362~372
- [18] Brown P S Jr. Parameterization of drop-spectrum evolution due to coalescence and breakup. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 242~249
- [19] Feingold G, Tzivion S, Levin Z. Evolution of raindrop spectra. Part I: Solution to the stochastic collection/breakup equation using the method of moments. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 3387~3399