第43卷第3期	大 气 科 学	Vol. 43 No. 3
2019年5月	Chinese Journal of Atmospheric Sciences	May. 2019

黄兴友,印佳楠,马雷,等. 2019. 南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及其在天气雷达探测中的应用 [J]. 大气科学, 43(3): 691-704. Huang Xingyou, Yin Jianan, Ma Lei, et al. 2019. Comprehensive statistical analysis of rain drop size distribution parameters and their application to weather radar measurement in Nanjing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 691-704. doi: 10.3878/j. issn. 1006-9895.1805.18113

## 南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及其 在天气雷达探测中的应用

## 黄兴友 印佳楠 马雷 黄兆楚

南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京210044

**摘 要** 雨滴谱包含了降雨的丰富信息,不仅能反映雨滴群的微物理特性,也能反映降雨类型、降雨强度等宏观 特性,并且在雷达气象领域也有重要的价值。论文对2015和2016年度南京地区32次降雨过程的雨滴谱资料进行 了处理、并对多种雨滴参数进行了详细的统计和分析,拟合了层状云降雨、对流云降雨以及积层混合云降雨的雨 滴谱Gamma分布参数。另外,还基于雨滴谱数据拟合了雷达反射率因子Z与降雨强度R的Z-R关系,计算了差分 反射率Z<sub>DR</sub>、相位常数K<sub>DP</sub>以及衰减参数,并利用衰减参数进行了C波段雷达回波的衰减订正试验。结果表明: (1)层状云降雨的各微物理参数比较稳定,积雨云的变化剧烈;层云降雨和积层混合云降雨的中雨滴、积雨云降 雨的大雨滴对雷达反射率因子的贡献最大。(2)积雨云降雨的滴谱最宽,层状云降雨的最窄。(3)利用依据雨滴 谱数据拟合的三类降雨Z-R关系,可以一定程度地提高雷达估测降雨的精度。(4)利用基于雨滴谱数据拟合的衰 减系数,有效地进行了C波段双偏振雷达回波强度的衰减订正,体现了统计参数和拟合参数准确性。

关键词 雨滴谱 微物理参量 Gamma分布 Z-R关系 双偏振参数
 文章编号 1006-9895(2019)03-0691-14 中图分类号 P412 文献标识码 A
 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18113

## Comprehensive Statistical Analysis of Rain Drop Size Distribution Parameters and Their Application to Weather Radar Measurement in Nanjing

#### HUANG Xingyou, YIN Jianan, MA Lei, and HUANG Zhaochu

Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Rain drop size distribution (DSD) contains plenty of information, which reflects not only microphysical characteristics of the rainfall, but also macro-physical properties like rainfall type, rainfall intensity and so on, and has important applications in radar meteorology. In this study, 32 rainfall events data collected by a Parsivel laser spectrometer at Nanjing from 2015 to 2016 are pre-processed and detailed statistics and analysis are conducted. The Gamma-distribution functions of DSD have been fitted for stratiform, convective and mixed-phase rainfall. The Z-R relationships have been established based on the dataset. Polarimetric variables like differential reflectivity  $Z_{DR}$ , specific

收稿日期 2018-01-21; 网络预出版日期 2018-07-02

作者简介 黄兴友,男,1965年出生,博士,教授,主要从事大气探测和雷达气象学的研究。E-mail: hxyradar@126.com

资助项目 国家自然科学基金项目41475034、41475035,国家重点基础研究发展计划(973计划)项目2013CB430101

Found by National Natural Science Foundation of China (Grants 41475034, 41475035), National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2013CB430101)

differential phase  $K_{DP}$  and attenuation parameters are calculated, and the attenuation correction of C-band radar reflectivity factor is tested and validated. The results are as follows. (1) Microphysical variables are less fluctuating for stratiform rainfall, but they vary significantly for cumulonimbus rainfall. Middle-size raindrops contribute more to radar reflectivity and rain rate for stratiform and mixed-phase rainfall, while big-size raindrops make more contributions for cumulonimbus rainfall. (2) The DSD spectral width is the broadest for cumulonimbus rainfall and the narrowest for stratiform rainfall. (3) The accuracy of rainfall estimate from radar measurements can be effectively improved using the fitted Z-R relationship compared to that using the default Z-R relationship. (4) Effective attenuation correction of C-band radar reflectivity factor based on the fitted parameters implies that the DSD statistics and fitting parameters are reliable. **Keywords** Raindrop size distribution, Microphysical parameters, Gamma distribution, Z-R relationship, Polarimetric variable

## 1 引言

雨滴是云中微物理过程和诸多因素综合作用的 结果之一,它在不同降雨类型、不同地点地形下变 化很大。研究不同降雨类型的雨滴谱特征,不仅可 以分析降雨微物理结构及其演变规律,也可以更好 地进行天气雷达回波的衰减订正和提高雷达定量估 测降雨的精度。

Marshall and Palmer (1948) 最早认为指数分 布能够较好地描述雨滴数量随雨滴大小的分布情况 (即M-P分布)。后来的研究发现,不同类型的降 雨具有不同的雨滴谱类型,宫福久等(1997)分析 了沈阳地区的雨滴谱资料,发现三类降雨的微物理 参量随时间的起伏变化比较大,平均雨滴谱具有较 大差异。Tokay et al. (2008) 认为在热带气旋降雨 中,中小雨滴最多,很少有超过4mm直径的大雨 滴。Wang et al. (2016)的研究也有相似的结论, 认为台风雨滴小、但数浓度大。濮江平等(2012) 指出,暴雨过程的中小雨滴占大多数,但大雨滴数 量也不少,雨强越大,雷达估测降雨的偏差越大。 除了雨型的影响外,雨滴谱还表现出垂直方向上的 差异性。张昊等(2011)利用庐山地区一次对流性 降雨雨滴谱资料,发现雨滴大小、下落末速度均随 海拔高度变化。Kirankumar et al. (2008) 根据印 度双频风廓线雷达资料反演的雨滴谱参数,也指出 对流云降雨的雨滴谱参数中形状因子随高度变化很 大。雨滴谱的地区特性也很显著,林文和牛生杰 (2009)分析了宁夏银川地区四次层状云降雨雨滴 谱资料,发现雨滴微物理参量普遍偏小,具有宁夏 的区域性特征。Friedrich et al. (2016)发现平原地 区观测的雨滴一般大于山麓地区的,山麓地区的雨 滴谱具有数量更多的小雨滴。关于雨滴谱和降雨强 度之间的情况,柳臣中等(2015)通过分析成都地 区的雨滴谱资料,发现降雨过程的中、大雨滴数量 虽少,但对强降雨的贡献明显。

既然雨滴谱随雨型、地区、高度等因素而变 化,包含两个参数的指数形式M-P分布函数很难 准确描述雨滴谱,Ulbrich(1983)提出了一个修 正后的雨滴谱分布形式,即Gamma分布,它包含 三个参数,可以更好地描述雨滴谱。这也是目前广 泛使用的雨滴谱形式。本文利用南京信息工程大学 探测基地的Parsivel雨滴谱仪在2015~2016年探测 的32次降雨过程的雨滴谱资料,研究南京地区降 雨的雨滴谱特性,分别拟合出层状云降雨、积层混 合云降雨和对流云降雨的雨滴谱分布参数,再拟合 出三类降雨的*Z*-*R*(雷达反射率因子*Z*和降雨强度 *R*)关系,计算了基于雨滴谱的双偏振参量和衰减 参数,并对C波段雷达的回波强度进行了可靠的衰 减订正,间接地验证了雨滴谱参数统计的可靠性, 体现了雨滴谱参数在雷达气象中的应用。

#### 2 资料观测与数据处理

Parsivel激光雨滴谱仪能够获取降雨粒子的尺度、降落速度、雨强和粒子数量等信息(濮江平等,2007)。安置在南京信息工程大学探测基地的 Parsivel雨滴谱仪,比较完整地收集了2015和2016 年两年的32次降雨过程数据,包括13次层状云降 雨(ST)、7次积雨云降雨(CB)和12次积层混合 云降雨(SC),见表1。其中,小雨、中雨的情况 占大多数,大雨、暴雨的过程较少。

在使用 Parsivel 雨滴谱资料时,需要进行预处 理:(1)将雨滴谱仪的面浓度数据转化为体积浓度 数据(吴林林,2014),(2)剔除直径大于7 mm

		微物理参量									
		N	R	W	Z <sub>max</sub>						
云类	编号	$/m^{-3}$	$/mm \ h^{-1}$	$/mg m^{-3}$	/dBZ	$D_1$	$D_{ m v}$	$D_{\rm p}$	$D_0$	$D_{\rm m}$	$D_{\max}$
ST	1	121.1	0.71	47.3	34.07	0.784	0.851	1.294	1.091	1.121	1.573
	2	153.53	0.92	61.23	36.54	0.8	0.86	1.232	1.078	1.106	1.57
	8	179.7	1.75	105.05	38.35	0.854	0.909	1.307	1.162	1.192	1.70
	10	111.64	0.93	57.04	37.99	0.849	0.916	1.508	1.236	1.273	1.8
	12	308.18	1.92	117.41	38.1	0.78	0.847	1.264	1.097	1.134	1.76
	14	247.13	1.66	102.59	38.74	0.765	0.843	1.461	1.179	1.22	1.83
	15	262.1	0.94	67.6	34.27	0.711	0.765	1.053	0.944	0.969	1.412
	17	132.62	0.45	32.84	34.87	0.685	0.744	1.096	0.925	0.951	1.33
	18	185.02	1.56	95.4	39.32	0.818	0.888	1.417	1.192	1.229	1.79
	20	135.45	0.84	55.5	36.88	0.795	0.858	1.232	1.072	1.098	1.52
	22	99.93	0.9	53.98	38.2	0.856	0.921	1.528	1.236	1.273	1.78
	23	125.52	1.16	70.58	38	0.876	0.938	1.494	1.241	1.277	1.81
	29	205.03	0.65	47.49	38.47	0.662	0.732	1.088	0.934	0.964	1.42
SC	3	436.92	7.51	377.34	54.59	0.898	0.977	1.691	1.455	1.512	2.45
	5	271.89	4.77	235.02	55.41	0.914	0.992	1.807	1.473	1.527	2.33
	6	104.47	1.37	75.53	47.08	0.922	0.986	1.727	1.391	1.434	2.01
	11	145.22	2.14	114.48	43.86	0.93	0.991	1.651	1.37	1.413	2.05
	13	300.05	3.7	202.73	48.32	0.861	0.932	1.557	1.314	1.361	2.10
	16	250.18	2.68	152.86	45.93	0.882	0.954	1.701	1.372	1.424	2.18
	21	241.28	3.55	189.84	49.09	0.918	0.989	1.664	1.399	1.446	2.18
	27	322.76	3.44	187.61	50.81	0.817	0.896	1.623	1.322	1.376	2.16
	28	574.15	8.73	451.84	56.12	0.882	0.952	1.574	1.377	1.432	2.37
	30	340.94	5.01	260.19	53.53	0.87	0.949	1.676	1.395	1.449	2.292
	31	174.49	1.89	105.95	41.79	0.862	0.94	1.777	1.382	1.434	2.13
	32	292.85	5.09	260.77	49.19	0.967	1.034	1.841	1.519	1.581	2.51
CB	4	505.43	12.8	577.64	57.75	0.959	1.051	2.124	1.722	1.799	2.93
	7	463.57	17.77	695.72	61.34	1.024	1.12	2.504	2.009	2.078	3.28
	9	303.03	9.37	398.27	57.5	1.086	1.154	2.035	1.751	1.808	2.69
	19	646.06	16.42	721.53	57.74	0.966	1.064	2.292	1.815	1.899	3.12
	24	664.4	20.39	840.61	56.12	0.972	1.081	2.756	2.108	2.22	3.67
	25	328.88	11.21	476.4	56.09	1.04	1.124	2.349	1.875	1.954	3.08
	26	641 33	18.01	766 1	57 11	0.877	0.972	1 873	1 672	1 706	2 65

表1 各次降雨过程中微物理参量及特征直径平均值

的雨滴数据以及3σ准则(σ为标准差; 王可法等, 2011)以外的雨滴。

#### 3 三类降雨微物理特征参量分析

#### 3.1 降雨微物理参量的平均特征分析

降雨微物理参量包括:雨滴数密度N(单位: m<sup>-3</sup>)、雷达反射率因子Z(单位:dBZ)、含水量W(单位:mg m<sup>-3</sup>)、雨强R(单位:mm h<sup>-1</sup>)和粒子 特征直径(单位:mm)等;其中,特征直径包括 平均直径 $D_1$ 、平均体积直径 $D_v$ 、优势直径 $D_p$ 、中 值体积直径 $D_0$ 、质量加权平均直径 $D_m$ 和平均最大 直径 $D_{max}$ (杨长业等,2016)。

从表1中可以看出:(1)积雨云降雨的雨滴数 密度N比层状云降雨的高一倍以上,积层混合云降 雨的雨滴数密度介于两者之间;(2)Z、W和R在 层状云降雨中较小,在积雨云降雨中较大;(3)出 现层状云降雨与较弱对流性降雨的雷达反射率因子 Z相近的情况,因为Z是雨滴数密度和雨滴大小的

3 期

综合反映,弱对流云降雨虽然N大,但雨滴小。因此,不能利用雷达反射率因子Z准确地判别雨型。

分析表1中雨滴的特征直径,可以得出:(1) 积雨云降雨的6种特征直径最大,层状云降雨的6 种特征直径最小,而积层混合云降雨既有积雨云降 雨特征又有层状云降雨特征,与上述两类降雨不好 区分; (2) 积雨云降雨的平均直径D<sub>1</sub>稍大于层状 云降雨的平均直径,有时甚至比层状云降雨的还 小,因为积雨云降雨中庞大的小雨滴数导致平均直 径降低(周毓荃等, 2001; 宫福久等, 2007); (3) 对含水量贡献最多的直径D。基本在1~3 mm之间, 积雨云中偏大一点,层状云和积层混合云中偏小一 点; (4) 中数体积直径 D<sub>0</sub>和质量加权平均直径 D<sub>m</sub> 具有较好的正相关, D<sub>0</sub>稍小于D<sub>m</sub>。在层状云与积 雨云中, D<sub>0</sub>和D<sub>m</sub>着区别明显, 可以作为划分三类 降雨的补充标准;(5)与我国北方和中西部地区 [北京(刘玉超, 2013)、成都(柳臣中等, 2015) ]特征直径比较发现,南京浦口地区各种特 征直径都偏大一些,这是由于南京地处江河流域, 降水丰沛,南京降雨有其本地性的特点。

#### 3.2 各类雨滴对降雨的贡献

为了更好地研究雨滴尺度分布对降雨微物理参量的贡献,将雨滴按直径大小分为三类:(1)小雨 滴: 0.2~1 mm;(2)中雨滴: 1~3 mm;(3)大 雨滴: 3 mm以上,分别计算各类雨滴对微物理参 量的贡献(包括各类雨滴数密度所占百分比、降雨 强度所占百分比、含水量所占百分比、雷达反射率 因子所占百分比)。

图1是降雨过程中各类雨滴的贡献。在层状云 降雨中,小雨滴占比最多,对雨滴数密度的贡献达 到85%左右:中雨滴是雷达反射率因子、雨强和 含水量贡献的主要来源,所占百分比都在60%以 上;大雨滴很少。在积雨云降雨中,小雨滴数目也 是最多的,占65%左右;中雨滴也是雨强和含水 量贡献的主要来源,所占比重在60%以上;但大 雨滴对雷达反射率因子的贡献最大,虽然大雨滴数 量所占比重只有1%左右,所以积雨云降雨的雷达 反射率因子受大雨滴的影响明显。在积层混合云降 雨中,小雨滴数目最多,达到75%左右,中雨滴 对雷达反射率因子、雨强和含水量的贡献都很大, 所占百分比在60%以上,大雨滴略有增多,对雷 达反射率因子的贡献显著增大,表明雷达反射率因 子受雨滴尺度影响很大。宫福久等(1997)曾指出 积云降雨强度大,是由于大雨滴的贡献。

#### 3.3 降雨微物理参量的演变特征分析

为了分析三类降雨微物理参量的演变,根据时间跨度,选取三个典型个例进行分析,分别是: 2015年11月12日层状云降雨、2015年9月5日积雨云降雨和2016年6月21日积层混合云降雨。分析的微物理参量有粒子数密度N、雷达反射率因子 Z、降雨强度R、含水量W、质量加权平均直径D<sub>m</sub>和粒子谱宽DW。



图1 (a) 层状云、(b) 积层混合云、(c) 积雨云降雨中各类雨滴对降雨微物理参量(粒子数密度*N*、雷达反射率因子*Z*、降雨强度*R*、含水量*W*)的贡献 Fig. 1 Contributions to rainfall microphysical parameter (number concentration *N*, radar reflectivity factor *Z*, rain rate *R*, water content *W*) from different sizes of raindrops: (a) Stratiform rainfall; (b) stratocumulus rainfall; (c) cumulonimbus rainfall





层状云降雨中各微物理参量起伏幅度较小,粒 子数密度大体在一个数量级内起伏,雷达反射率因 子、雨强和含水量都比较小,质量加权平均直径的 变化范围是0~2 mm,粒子谱宽在0~3 mm之间变 化。各微物理量的演变趋势基本相同,具有较好的 相关性。

3期

积雨云降雨中各微物理参量起伏幅度比较大, 峰谷间变化剧烈,粒子数密度、雨强和含水量在两 个数量级内变化,质量加权平均直径在0~4 mm 之间变化,粒子谱宽变化范围是0~6 mm,各微物 理参量趋势基本一致。在这次降雨过程,微物理参 数起伏变化大,降雨由弱变强很快,由强变弱却较 为缓慢,起伏次数很多。

图 2 为 2016 年 6 月 21 日 06:47~09:12 (北京 时,下同)积层混合云降雨中微物理特征参量的演 变情况。总体看来,积层混合云降雨各微物理参量 起伏情况介于积雨云降雨和层状云降雨之间。在 07:30 以前属于层状云降雨,各微物理参量起伏变 化不大,粒子数密度在 10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup>间缓慢变化,各微 物理参量比较小,质量加权平均直径和粒子谱宽也 符合前面分析的层状云降雨特征。07:30~08:00 属 于积雨云降雨,各微物理参量起伏增大,短时间内 出现峰值,粒子数密度、雨强和含水量均在两个数 量级内变化,质量加权平均直径在 0~4 mm之间 变化,粒子谱宽接近 6 mm,符合分析的积雨云降 雨演变特征。08:00以后,又演变为层状云降雨。 从质量加权平均直径*D*<sub>m</sub>曲线来看,*D*<sub>m</sub>在积雨云降 雨时间段比层状云降雨时间段要大很多,可初步认 为当*D*<sub>m</sub>大于2 mm时出现积雨云降雨。

## 4 基于Gamma分布拟合的雨滴谱特 性分析

国外许多学者很早之前提出用M-P分布、对数分布、Gamma分布等拟合实际雨滴谱(濮江平等,2010),目前M-P分布和Gamma分布最常用。

相对于M-P分布,Gamma分布具有普适性,拟 合各类降雨的效果都很好(郑娇恒和陈宝君, 2007)。本文采用Gamma分布模型拟合实际雨滴谱:

 $N(D) = N_0 D^{\mu} \exp(-\lambda D),$  (1) 其中, D是等效直径,单位为mm; N(D)是单位空 间体积、单位尺度间隔的雨滴数浓度,单位为 m<sup>-3</sup> mm<sup>-1</sup>;  $N_0$ 是浓度参数,单位为mm<sup>-1- $\mu$ </sup> m<sup>-3</sup>;  $\mu$ 是形状因子,为无量纲参数;  $\lambda$ 是斜率参数,单位 为mm<sup>-1</sup>。

采用阶矩法估计Gamma分布参数,引入的*n* 阶矩表达式如下:

$$\left\langle D^{n}\right\rangle = \int D^{n} n\left(D\right) dD = N_{0} \lambda^{-(\mu+n+1)} \Gamma\left(\mu+n+1\right),$$
(2)

其中, 上标n表示阶数, 如雷达反射率因子、差

示传播相位常数和含水量分别对应6阶、4阶和3 阶矩; *D*是等效直径,单位为mm; *n*(*D*)是单位空间体积、单位尺度间隔的雨滴数浓度,单位为 $m^{-3}$  mm<sup>-1</sup>; *N*<sub>0</sub>是浓度参数,单位为mm<sup>-1-µ</sup> m<sup>-3</sup>; *µ* 是形状因子,为无量纲参数; *λ*是斜率参数,单 位为mm<sup>-1</sup>。

求取 Gamma 分布参数需要三个阶矩。与 Tokay and Short(1996)的方案相似,本文采用3阶、 4阶、6阶矩计算 Gamma参数。Gamma 分布三个参 数的公式分别为

$$\mu = \frac{11G - 8 + [G(G + 8)]^{\frac{1}{2}}}{2(1 - G)},$$
 (3)

$$\lambda = \frac{\left(\mu + 4\right)M_3}{M_4},\tag{4}$$

$$N_{0} = \frac{\lambda^{\mu+3}M_{3}}{\Gamma(\mu+4)},$$
 (5)

式中,

$$G = \frac{M_4^3}{M_3^2 M_6},$$
 (6)

其中,G为定义的中间变量, $M_3$ 、 $M_4$ 、 $M_6$ 分别代表3阶、4阶、6阶矩。

#### 4.1 降雨过程中雨滴谱演变特征分析

图3为2015年11月12日层状云降雨中实际雨 滴谱的变化情况。降雨初期,雨滴数目较少,以 0.2~1 mm的小雨滴为主,最大粒子直径小,之后 雨强出现起伏,雨滴谱分布随之表现出差异:在 13:15~13:30和14:00~14:30,雨强达到峰值,雨 滴谱逐渐变宽,雨滴数密度峰值位于0.5 mm左右, 雨滴数增大的同时小雨滴数也增多,这可能与云滴 间的碰撞合并及大滴在下落过程中破碎有关。降雨 末期(15:00之后),雨强逐渐变小,雨滴数密度减 小,滴谱变窄,雨滴谱趋于稳定。

图4为2015年9月5日积雨云降雨中实际雨滴 谱的变化情况。降雨初期,雨强较弱,雨滴数目较 少,谱宽较窄,最大雨滴直径也较小。降雨中期, 雨强增大并剧烈变化,雨滴谱逐渐变宽,小雨滴数 呈数量级增多,大雨滴数目明显增长,呈现多峰型 谱分布。之后1个小时雨滴谱趋于稳定,直到15: 15左右,小雨滴数又达到峰值。降雨末期,雨强 减弱,雨滴数密度减少,大雨滴消失,雨滴谱变窄 并趋于稳定,重新呈现单峰型谱分布。可以看出, 积雨云的雨滴谱普遍比层状云的宽,滴谱变化情况 更剧烈,最大雨滴直径也大得多。

图5为2016年6月21日积层混合云降雨中实际



图3 2015年11月12日层状云降雨中雨滴谱分布随时间演变: (a) 10:53; (b) 11:43; (c) 12:33; (d) 13:23; (e) 14:13; (f) 15:03; (g) 15:53; (h) 16:43

Fig. 3 Variation of raindrop size distribution with time in stratiform rainfall on December 12, 2015: (a) 1053 BT (Beijing time); (b) 1143 BT; (c) 1233 BT; (d) 1323 BT; (e) 1413 BT; (f) 1503 BT; (g) 1553 BT; (h) 1643 BT





图4 2015年9月5日积雨云降雨中雨滴谱分布随时间演变: (a) 01:09; (b) 01:29; (c) 01:49; (d) 02:09; (e) 02:29; (f) 02:53; (g) 03:09; (h) 03:29

Fig. 4 Variation of raindrop size distribution with time in cumulonimbus rainfall on September 5, 2015: (a) 0109 BT; (b) 0129 BT; (c) 0149 BT; (d) 0209 BT; (e) 0229 BT; (f) 0253 BT; (g) 0309 BT; (h) 0329 BT





Fig. 5 Variation of raindrop size distribution with time in stratocumulus rainfall on June 21, 2016: (a) 0647 BT; (b) 0706 BT; (c) 0727 BT; (d) 0742 BT; (e) 0807 BT; (f) 0827 BT; (g) 0847 BT; (h) 0907 BT

雨滴谱的变化情况。降雨初期,雨滴谱较窄,雨滴数密度较小,最大雨滴直径介于2~3mm之间,接近层状云降雨特征。之后进入积雨云降雨段,

雨强迅速增大,大小雨滴数目大幅增长,数密度 峰值向大滴端移动,雨滴谱变宽,最大雨滴直径 达到5mm,呈多峰型谱分布,与积雨云接近。 降雨末期,大小雨滴数同时减少,数密度峰值又 偏向小滴端,雨滴谱再次变窄,最大粒子直径只 有2.5 mm,多呈单峰型谱分布。

#### 4.2 平均雨滴谱特征分析

图6是三类降雨的平均雨滴谱和Gamma 拟合曲线。层状云降雨的滴谱谱宽最窄,雨滴最大直径只有4mm;积雨云降雨的滴谱谱宽最宽,雨滴最大直径接近6mm;积层混合云降雨的滴谱谱宽介于前两者之间,雨滴最大直径在5mm左右。值得注意的是,层状云降雨的小雨滴数密度高于积层混



图6 三类降水的平均雨滴谱分布与Gamma 拟合曲线 Fig. 6 Raindrop size distributions and Gamma-distribution fitting curves for three types of rainfall

合云降雨的小雨滴数密度,但中、大雨滴的数密度 低于积层混合云降雨的数密度。

对比雨滴谱的拟合数据和实测数据,可以得到 拟合数据的差异性,积雨云降雨的差异为12.56%, 积层混合云降雨为1.42%,层状云降雨为1.79%。 因此,用Gamma分布模型拟合南京浦口地区实际 雨滴谱精度较高。

#### 4.3 Gamma 拟合参数分析

对 32 次降雨过程的雨滴谱进行 Gamma 分布拟 合,分析其三参数  $N_0$ 、 $\mu$ 和 $\lambda$ ,发现 $\mu$ 和 $\lambda$ 具有良 好的正相关,在定义中, $D_m = (\mu+4)/\lambda$ ,可见当 $D_m$ 的变化范围不大时, $\mu$ 和 $\lambda$ 必定具有良好的相关性 (杨长业等,2016),这一关系式在双偏振雷达反演雨 滴谱、双偏振雷达定量测量降雨等方面有重要的应用 价值。但此关系式会随时间、地点、气候条件和降雨 类型的不同而变化,因此基于实际雨滴谱拟合出适合 本地区各类降雨的 $\mu$ - $\lambda$ 关系至关重要(温龙,2016)。

图7是三类降雨的 Gamma 分布参数 $\mu$ - $\lambda$  散点 图及拟合曲线,可以看出:(1)无论哪类降雨, $\mu$ 和 $\lambda$ 都有较好的二项式关系。(2)层状云降雨拟合 参数 $\mu$ 和 $\lambda$ 范围最大,拟合结果的相关系数最低; 积雨云降雨拟合参数 $\mu$ 和 $\lambda$ 范围最小,拟合结果的 相关系数最高;积层混合云降雨拟合参数 $\mu$ 和 $\lambda$ 范 围及拟合结果的相关系数介于两者之间。(3)层状 云、积层混合云和积雨云降雨中 $\mu$ - $\lambda$ 拟合曲线逐渐 抬升,说明说明这一关系式在特定降雨中更为 适用。



图7 实测雨滴谱参数 $\mu$ (形状因子,无量纲参数)和 $\lambda$ (斜率参数,单位:mm<sup>-1</sup>)散点图及拟合曲线:(a)层状云;(b)积层混合云;(c)积雨云

Fig. 7 Scatter plots of  $\mu$  (form factor, dimensionless parameter) and  $\lambda$  (slope parameter, units: mm<sup>-1</sup>) calculated from measured raindrop parameters and fitting curves of  $\mu$  and  $\lambda$ : (a) Stratiform rainfall; (b) stratocumulus rainfall; (c) cumulonimbus rainfall

#### 5 利用雨滴谱数据拟合 Z-R 关系

雷达反射率因子Z和降雨强度R的计算表达式 如下:

$$Z = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^6 N(D) \, \mathrm{d}D, \qquad (7)$$

$$R = \frac{\pi}{6} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 N(D) V(D) \, \mathrm{d}D.$$
 (8)

其中, V(D)是雨滴下落末速度关于直径的函数,可 以看出,雨滴谱分布对Z-R有直接影响,相同的雷 达反射率因子可能对应不同的粒子谱结构。时空差 异和不同降雨类型会导致Z-R关系的变化(张培昌 等,2001),因此,利用固定不变的Z-R关系,会 导致定量估测降雨的误差。

研究表明, 雷达反射率因子与降雨强度的关系 遵从 Z=BR<sup>b</sup>形式, 其中 B、b 是需要拟合的系数 (张培昌等, 2001)。根据 Parsivel 雨滴谱资料, 计 算对应的 Z和 R, 并利用最小二乘法求出三类降雨 的 Z=BR<sup>b</sup>关系中的参数 B、b, 如表 2 和图 8 所示, 可以得到较准确的 Z-R关系, 同时计算决定系数 CC<sup>2</sup>(相关系数 CC 的平方), 决定系数介于0到1 之间, 当决定系数越接近 1 时, 回归效果越显著

表2 三类降雨的Z-R关系(天气雷达Z=300R<sup>1.4</sup>)

Table 2 Z-R relationships for three types of rainfall (weather radar  $Z=300R^{1.4}$ )

	Z=BR <sup>b</sup> 关系中的参数				
降雨云类	В	b	$CC^2$		
层状云(ST)	200.13	1.48	0.81		
积层混合云(SC)	218.32	1.49	0.93		
积雨云(CB)	290.35	1.53	0.86		

(吴林林, 2014)。

层状云、积层混合云和积雨云降雨的拟合 Z-R 关系式分别是: Z=200.13R<sup>1.48</sup>、Z=218.32R<sup>1.49</sup>、Z= 290.35R<sup>1.53</sup>,图8中的虚线是我国业务气象雷达内 置的 Z-R关系(Z=300R<sup>1.4</sup>),实线是拟合的积雨云 Z-R关系,可以看出,采用内置的Z=300R<sup>1.4</sup>,会导 致积雨云降雨强度和降雨量的高估,当回波强度增 大时,高估更加严重。

# 6 利用雨滴谱数据计算C波段的双偏 振参量

双偏振雷达可以探测降雨粒子群的雷达反射率因子Z(即Z<sub>H</sub>)、差分反射率因子Z<sub>DR</sub>和差示传播相位常数*K*<sub>DP</sub>等参量,这些参数对于提高定量估测降雨精度和双偏振雷达数据质量控制具有重要的作用。他们可以通过以下表达式计算得到(吴林林,2014):

$$Z = \frac{\Lambda^4}{\pi^5 |K_w|^2} \left\langle 4\pi |S_{\rm hh}(D)|^2 \right\rangle, \tag{9}$$

$$Z_{V} = \frac{\Lambda^{4}}{\pi^{5} |K_{w}|^{2}} \left\langle 4\pi |S_{vv}(D)|^{2} \right\rangle, \qquad (10)$$

$$Z_{\rm DR} = 10\log_{10}\frac{Z}{Z_{\rm V}},$$
 (11)

$$K_{\rm DP} = \frac{180\Lambda}{\pi} (1 - 2\sigma_{\varphi}^2) \left\langle \text{Re} \left[ f_{\rm a}(0) - f_{\rm b}(0) \right] \right\rangle, (12)$$
$$A_{\rm H} = 4.343 \times 10^{-3} \int_{0}^{D_{\rm max}} \sigma_{\rm HH}(D) N(D) \, \mathrm{d}D, (13)$$
$$A_{\rm V} = 4.343 \times 10^{-3} \int_{0}^{D_{\rm max}} \sigma_{\rm VV}(D) N(D) \, \mathrm{d}D, (14)$$

$$A_{\rm DP} = A_{\rm H} - A_{\rm V}, \qquad (15)$$



图8 积雨云降雨的雷达反射率因子Z与降雨强度R关系散点图及拟合结果



其中, $Z_v$ 是垂直偏振的雷达反射率因子,是计算  $Z_{DR}$ 的过渡参量;参数 $K_w$ 是雨滴的复折射指数项, 视为常数; $\Lambda$ 是雷达波长; $S_{hh}$ 和 $S_{vv}$ 分别是散射矩 阵的元素,代表水平和垂直偏振信号强度; $\sigma_{\phi}$ 是 雨滴倾斜角度的标准差; $\operatorname{Re}(f_a(0))$ 和 $\operatorname{Re}(f_b(0))$ 分别 是前向散射长轴实部和前向散射短轴实部, $A_{H}$ 和  $A_v$ 分别是水平偏振信号和垂直偏振信号的衰减 系数。

参考Zhang et al. (2001)的T-Marix方法,在 已知不同直径雨滴对应的轴比关系情况下,结合雷 达散射分量和雨滴谱资料,可以利用公式 (9)至 (15)计算得到C波段雷达的双偏振参数。在计算 时,雨滴的复折射指数可选用20℃温度下数据, 即70.88+*i*×29.43 (其中,*i*为虚数单位),雨滴的 轴比(雨滴的长短轴之比)采用Brandes et al. (2002)提出的经验关系:

$$r = 0.9951 + 0.0251 D_{\rm eq} - 0.036 D_{\rm eq}^2 +$$

0.00503*D*<sup>3</sup><sub>eq</sub> - 0.0002492*D*<sup>4</sup><sub>eq</sub>, (16) 其中,*r*是轴比; *D*<sub>eq</sub>是等效粒子直径,单位为mm。 6.1 *Z*-*Z*<sub>DR</sub>关系曲线和*Z*-*K*<sub>DP</sub>关系曲线

图9是利用2015和2016年度雨滴谱数据计算 得到的Z-Z<sub>DR</sub>散点图,当反射率因子小于20dBZ 时,Z<sub>DR</sub>趋近于0。当反射率因子到达25dBZ时, Z<sub>DR</sub>达到0.8dBZ。因此,在使用弱降雨订正Z<sub>DR</sub>时, 需要选用小于20dBZ的样本计算,保证Z<sub>DR</sub>接近于 0。当雷达反射率因子大于40dBZ后,Z<sub>DR</sub>迅速增 大,甚至可以达到6dB。2015和2016年的Z-Z<sub>DR</sub>的 情况基本一致。

图10是利用2015、2016年度雨滴谱资料计算

得到的 Z-K<sub>DP</sub> 散点图,当反射率因子小于 40 dBZ 时,K<sub>DP</sub> 的值趋近于 0;当反射率因子到达 40 dBZ 以后,K<sub>DP</sub>迅速增大,可达 8° km<sup>-1</sup>。

#### 6.2 $Z_{X_{DR}}$ 的衰减订正系数 $A_{H}_{A_{DP}}$

根据双偏振雷达的探测理论可知(董振贤和李 妙英,2004), *K*<sub>DP</sub>不容易受到雨滴谱、部分阻挡以 及雷达标定误差的影响,因而可用于衰减订正。 Bringi et al. (1990)通过散射模拟发现C波段雷达 反射率因子Z的衰减率*A*<sub>H</sub>和差分反射率因子*Z*<sub>DR</sub>的 衰减率*A*<sub>DP</sub>与相位常数*K*<sub>DP</sub>之间存在线性关系(*A*<sub>H</sub>= *j*·*K*<sub>DP</sub>, *A*<sub>DP</sub>=*k*·*K*<sub>DP</sub>, *j*、*k*分别为衰减系数)。

图 11 和图 12 分别是利用 2015、2016 年度雨滴 谱数据计算得到的 A<sub>H</sub>和 A<sub>DP</sub>与 K<sub>DP</sub>之间的散点图。 总体看来, A<sub>H</sub>的拟合度要高于 A<sub>DP</sub>,说明 Z 的衰减 订正比 Z<sub>DR</sub>的衰减订正可靠。

#### 6.3 双偏振雷达反射率因子衰减订正个例

为了验证雨滴谱资料用于C波段双偏振雷达衰减订正的可靠性,利用拟合的K<sub>DP</sub>与衰减系数A<sub>H</sub>和 A<sub>DP</sub>的关系进行了衰减订正,选取的雷达资料时间 为2015年6月27日01:39:49。

订正方案是,当0.1< $K_{DP}$ <3° km<sup>-1</sup>时,使用 $K_{DP}$ 进行衰减订正,订正算法是 $A_{H}$ =j· $K_{DP}$ ,利用2015 和2016年度的雨滴谱资料拟合出的j为0.092 dB (°)<sup>-1</sup>。 当 $K_{DP}$ <0.1° km<sup>-1</sup>或 $K_{DP}$ >3° km<sup>-1</sup>时, $K_{DP}$ 可靠性不 高,不能很好地用于订正,采用衰减系数 $A_{H}$ 进行 订正;订正算法是 $A_{H}$ = $\alpha Z^{8}$  (Z的单位为mm<sup>6</sup> m<sup>-3</sup>), 利用2015和2016年度的雨滴谱资料拟合出的 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为 $\alpha$ =1.436×10<sup>-5</sup> dB km mm<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>; $\beta$ =0.855。如 图 13 所示。当 $K_{DP}$ =0.1° km<sup>-1</sup>时,前后两种订正方



图9 (a) 2015和 (b) 2016年雨滴谱反演雷达反射率因子Z与差分反射率因子Z<sub>DR</sub>散点图

Fig. 9 Scatter plots of differential reflectivity factor  $Z_{DR}$  and radar reflectivity factor Z retrieved from raindrop size distributions in (a) 2015 and (b) 2016



图10 (a) 2015和 (b) 2016年雨滴谱反演雷达反射率因子Z与相位常数K<sub>DP</sub>散点图

Fig. 10 Scatter plots of specific differential phase K<sub>DP</sub> and radar reflectivity factor Z retrieved from raindrop size distributions in (a) 2015 and (b) 2016



图11 (a) 2015和 (b) 2016年雨滴谱反演雷达反射率因子衰减率A<sub>H</sub>与相位常数K<sub>DP</sub>散点图

Fig. 11 Scatter plots of specific attenuation A<sub>H</sub> versus specific differential phase K<sub>DP</sub> retrieved from raindrop size distributions in (a) 2015 and (b) 2016



图 12 (a) 2015 和 (b) 2016年雨滴谱反演差分反射率因子衰减率A<sub>DP</sub>与相位常数K<sub>DP</sub>散点图 Fig. 12 Scatter plots of differential attenuation A<sub>DP</sub> versus specific differential phase K<sub>DP</sub> retrieved from raindrop size distributions in (a) 2015 and (b) 2016

案的单库(75 m 路径长度)订正量分别是 7.5457×10<sup>-4</sup> dB和7.6517×10<sup>-4</sup> dB,两者几乎一 致;当 $K_{DP}$ =3° km<sup>-1</sup>时,前后两种订正方案的单库 订正量分别是0.0412 dB和0.0401 dB,非常接近。 所以,本文采用的分段订正方案,其订正量是连 续的。

图14反映了南京信息工程大学C波段双偏振 雷达的衰减订正情况,图14a订正前的雷达反射率

0.8 0.8 (a)  $A_{\rm H}$ =1.436×10<sup>-5</sup>  $Z^{0.855}$ (b) =0.092K<sub>DF</sub> 0.6 0.6 A<sub>H</sub>/dB km<sup>-1</sup> A<sub>H</sub>/dB km<sup>-1</sup> 0.4 0.4 0.2 0.2 0 0 2 4 6 8 0 10 20 30 40 50 60 70 0  $K_{\rm DP}(^{\circ}) \rm \, km^{-1}$ 

图13 雨滴谱拟合 (a) 雷达反射率因子衰减率 $A_{\rm H}$ 与相位常数 $K_{\rm DP}$ 和 (b)  $A_{\rm H}$ -Z散点图及拟合结果 Fig. 13 Scatter plots of (a) specific attenuation  $A_{\rm H}$  versus specific differential phase  $K_{\rm DP}$  (b) specific attenuation  $A_{\rm H}$  versus radar reflectivity factor Z retrieved from raindrop size distributions and fitting results

K<sub>DP</sub>(°) km<sup>-1</sup>



图14 2015年6月27日衰减订正(a)前、(b)后南京信息工程大学C波段双偏振雷达水平反射率因子Z<sub>H</sub>与(c)江苏省气象局S波段雷达反射率因子Z分布 Fig. 14 Reflectivity factors of C-band radar of Nanjing University of Information Science and Technology at H-polarization (a) before and (b) after attenuation correction, and (c) reflectivity factors of S-band radar of Jiangsu Provincial Meteorological Service on June 27, 2015

因子(单位: dBZ),图 14c 是临近(相隔 2.6 km) 的江苏省气象局S波段业务气象雷达的雷达反射率 因子,可以看出,两者有明显的差异,C波段回波 由于衰减等因素造成了回波的弱化。一般认为S波 段信号的衰减很少(张培昌等,2001),可视为准 确的回波。图14b是经过衰减订正后的雷达反射率 因子,明显得到了增强,与图14c的差异缩小了很 多,说明了衰减订正的准确性,也说明了基于雨滴 谱数据拟合的结果比较可靠。

#### 7 结论与讨论

针对2015和2016年度、南京浦口的32次不同 降雨过程的Parsivel雨滴谱资料,进行了分类和统 计处理,得到了层状云、积层混合云和积雨云三 类降雨的微物理参量、平均雨滴谱特征和Z-R关 系等特性参数,并进行了相应的分析,主要结论 如下:

(1) 层状云降雨的各微物理参量起伏较小,积 雨云降雨的微物理参量起伏比较大,而积层混合云 降雨的各微物理参量起伏情况介于前两者之间。中 值体积直径*D*<sub>0</sub>可以成为区分层状云降雨和积雨云 降雨的一个参考指标。

(2) 三类云降雨的雨滴谱可以用 Gamma 分布 拟合,积雨云降雨的滴谱最宽,层状云降雨的滴谱 最窄;积雨云的大雨滴对雷达反射率因子的贡献 最大。

(3)利用南京浦口地区的雨滴谱资料,进行积雨云、积层混合云和层状云降雨的Z-R关系拟合, 分别为: Z=200.13R<sup>1.48</sup>; Z=218.32R<sup>1.49</sup>; Z=290.35R<sup>1.53</sup>。

(4)利用雨滴谱资料,计算了三类降雨在C波段的双偏振参量,包括差分反射率因子Z<sub>DR</sub>、差示传播相位常数K<sub>DP</sub>以及衰减系数,还进行了C波段双偏振雷达回波强度的衰减订正,参照S波段雷达的回波强度,验证了衰减订正的可靠性,体现了雨滴谱统计数据的准确性及雨滴谱数据的应用价值。

论文利用两年的雨滴谱数据,得到了南京地区 雨滴谱分布函数、Z-R关系及双偏振参量等参数, 在南京地区有一定的普适性,但不一定适合其他地 区,因为雨滴谱具有地区性差异,但本文中的数据 处理方法和计算方案可以用于其他地区雨滴谱数据 的处理,以便得到当地的相关参数。

#### 参考文献(References)

- Brandes E A, Zhang G F, Vivekanandan J. 2002. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment [J]. J. Appl. Meteor., 41(6): 674–685. doi:10.1175/1520-0450(2002)041<0674:EIREWA>2.0.CO;2
- Bringi V N, Chandrasekar V, Balakrishnan N, et al. An examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1990, 7(7):829–840. doi:10.1175/1520-0426(1990)0072.0.CO;2
- 董振贤, 李妙英. 2004. 双偏振多普勒天气雷达的偏振参量及其应用 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 5(3): 98-102. Dong Zhenxian, Li Miaoying. 2004. Polarimetric measurements of dualpolarization radar and application [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition) (in Chinese), 5 (3): 98-102. doi:10.3969/j.issn.1009-3443.2004.03.025
- Friedrich K, Kalina E A, Aikins J, et al. 2016. Raindrop size distribution and rain characteristics during the 2013 great Colorado flood [J]. Journal of Hydrometeorology, 17(1): 53–72. doi:10.1175/ JHM-D-14-0184.1
- 宫福久,刘吉成,李子华.1997. 三类降水云雨滴谱特征研究 [J]. 大气科学, 21(5): 607-614. Gong Fujiu, Liu Jicheng, Li Zihua. 1997. Study of the raindrop size distributions for three types of precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 21(5): 607-614. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1997.05.12
- 宫福久,何友江,王吉宏,等. 2007. 东北冷涡天气系统的雨滴谱特征 [J]. 气象科学, 27(4): 365-373. Gong Fujiu, He Youjiang, Wang Jihong, et al. 2007. Characteristics of raindrop size distributions of northeast cold vortex precipitation in China [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27(4): 365-373. doi:10.3969/j. issn.1009-0827.2007.04.002
- Kirankumar N V P, Rao T N, Radhakrishna B, et al. 2008. Statistical characteristics of raindrop size distribution in southwest monsoon season [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47(2): 576–590. doi:10.1175/2007JAMC1610.1
- 林文, 牛生杰. 2009. 宁夏盛夏层状云降水雨滴谱特征分析 [J]. 气象 科学, 29(1): 97-101. Lin Wen, Niu Shengjie. 2009. Characteristics of the surface raindrop size distribution of summer stratiformis precipitation in Ningxia Province [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 29(1): 97-101. doi: 10.3969/j. issn. 1009-0827.2009. 01.016
- 柳臣中,周筠珺,谷娟,等. 2015. 成都地区雨滴谱特征 [J]. 应用气象 学报, 26(1): 112-121. Liu Chenzhong, Zhou Yunjun, Gu Juan, et al. 2015. Characteristics of raindrop size distribution in Chengdu [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 26(1): 112-121. doi:10.11898/1001-7313.20150112
- 刘玉超. 2013. 北京对流云、层状云降水微物理特征分析 [D]. 南京 信息工程大学硕士学位论文. Liu Yuchao. 2013. Analysis on microphysical characteristics of convective and stratiform cloud precipitation in Beijing [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology

- Marshall J S, Palmer W M. 1948. The distribution of raindrops with size [J]. J. Meteor., 5(4): 165–166. doi:10.1175/1520-0469(1948)005 <0165:TDORWS>2.0.CO;2
- 濮江平,赵国强,蔡定军,等. 2007. Parsivel<sup>®</sup>激光降水粒子谱仪及其 在气象领域的应用 [J]. 气象与环境科学, 30(2): 3-8. Pu Jiangping, Zhao Guoqiang, Cai Dingjun, et al. 2007. Parsivel<sup>®</sup> precipitation particle spectrometer and application in meteorological realm [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 30(2): 3-8. doi:10.3969/j.issn.1673-7148.2007.02.001
- 濮江平,张伟,姜爱军,等. 2010.利用激光降水粒子谱仪研究雨滴谱 分布特性 [J]. 气象科学, 30(5): 701-707. Pu Jiangping, Zhang Wei, Jiang Aijun, et al. 2010. Characteristics of gamma raindrop size distribution based on the precipitation particle spectrometer [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 30(5): 701-707. doi:10. 3969/j.issn.1009-0827.2010.05.018
- 濮江平,张昊,周晓,等. 2012. 对流性降水雨滴谱特征及其与雷达反 射率因子的对比分析 [J]. 气象科学, 32(3): 253-259. Pu Jiangping, Zhang Hao, Zhou Xiao, et al. 2012. Comparative analysis on rain spectrum characteristics of deep convective cloud and its radar reflectivity [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 32(3): 253-259. doi:10.3969/2012jms.0013
- 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. doi:10.1175/1520-0450(1996)035< 0355:EFTRSO>2.0.CO;2
- Tokay A, Bashor P G, Habib E, et al. 2008. Raindrop size distribution measurements in tropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 136(5): 1669–1685. doi:10.1175/2007MWR2122.1
- Ulbrich C W. 1983. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. J. Climate Appl. Meteor., 22(10): 1764–1775. doi: 10.1175/1520-0450(1983)022<1764: NVITAF>2.0. CO;2
- 王可法,张卉慧,张伟,等. 2011. Parsivel 激光雨滴谱仪观测降水中 异常数据的判别及处理 [J]. 气象科学, 31(6): 732-736. Wang Kefa, Zhang Huihui, Zhang Wei, et al. 2011. The detection and elimination of abnormal data for the precipitation observed by Parsivel precipitation particle spectrometer [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 31(6): 732-736. doi:10.3969/j. issn.1009-0827.2011.06.009
- 温龙.2016.中国东部地区夏季降水雨滴谱特征分析 [D].南京大学 硕士学位论文. Wen Long. 2016. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution observed in east China during the Asian summer monsoon season [D]. M. S. thesis (in Chinese),

Nanjing University

- 吴林林. 2014. 利用雨滴谱对移动双偏振雷达进行质量控制及降水 估测 [D]. 中国气象科学研究院博士学位论文. Wu Linlin. 2014. Application study of mobile c-band dual-polarization radar quality control and QPE using raindrop size distribution [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences
- Wang M J, Zhao K, Xue M, et al. 2016. Precipitation microphysics characteristics of a typhoon Matmo (2014) rainband after landfall over eastern China based on polarimetric radar observations [J]. J. Geophys. Res., 121(20): 12415–12433. doi:10.1002/2016JD025307
- 杨长业, 舒小健, 高太长, 等. 2016. 基于雨强分级的夏季降水微物理 特征分析 [J]. 气象科技, 44(2): 238-245. Yang Changye, Shu Xiaojian, Gao Taichang, et al. 2016. Microphysical features for summer rain based on rain intensity classification [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 44(2): 238-245. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2016.02.012
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 171-271. Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. 2001. Radar Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 171-271
- 张昊, 濮江平, 李靖, 等. 2011. 庐山地区不同海拔高度降水雨滴谱特 征分析 [J]. 气象与减灾研究, 34(2): 43 - 50. Zhang Hao, Pu Jiangping, Li Jing, et al. 2011. Analysis of characteristics of raindrop size distribution at different altitudes in Lushan [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 34(2): 43 - 50. doi: 10. 3969/j.issn.1007-9033.2011.02.007
- 郑娇恒, 陈宝君. 2007. 雨滴谱分布函数的选择: M-P和Gamma分布 的对比研究 [J]. 气象科学, 27(1): 17-25. Zheng Jiaoheng, Chen Baojun. 2007. Comparative study of exponential and Gamma functional fits to observed raindrop size distribution [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27(1): 17-25. doi:10.3969/j.issn. 1009-0827.2007.01.003
- 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(S1): 39-47. Zhou Yuquan, Liu Xiaotian, Zhou Feifei, et al. 2001. Characteristics of surface raindrop spectra in drought years in Henan Province [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12(S1): 39-47. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.z1.006
- Zhang G, Vivekanandan J, Brandes E. 2001. A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(4): 830–841. doi:10.1109/36.917906