

房彬, 郭学良, 肖辉. 2016. 辽宁地区不同降水云系雨滴谱参数及其特征量研究 [J]. 大气科学, 40 (6): 1154–1164. Fang Bin, Guo Xueliang, Xiao Hui. 2016. A study on characteristics of spectral parameters and characteristic variables of raindrop size distribution for different cloud systems in Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1154–1164, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15244.

辽宁地区不同降水云系雨滴谱参数及其特征量研究

房彬¹ 郭学良² 肖辉³

1 辽宁省人工影响天气办公室, 沈阳 110016

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 利用位于辽宁省沈阳市和辽阳市的 Parsivel (Particle Size and Velocity) 激光雨滴谱仪观测到的雨滴谱资料按照积雨云降水系统、积层混合云降水系统和层状云降水系统分析雨滴谱特征量和谱参数的平均特征及随时间的演变特征。结果表明: Gamma 分布拟合谱参数 N_0 和 λ 按照层状云、积层混合云和积雨云的顺序减小, 谱参数 μ 按照层状云、积层混合云和积雨云的顺序增大; 直径小于 1 mm 的降水粒子对数浓度的贡献最大, 直径大于 1 mm 的降水粒子对雷达反射率的贡献最大; M-P 分布的谱参数 N_0 与雨强 I 具有幂函数关系, 并且随着雨强 I 的增大而增大, 谱参数 λ 与雨强 I 具有指数函数关系, 随着雨强 I 的增大而减小。

关键词 雨滴谱 降水云系 谱参数 谱特征量

文章编号 1006-9895(2016)06-1154-11

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15244

A Study on Characteristics of Spectral Parameters and Characteristic Variables of Raindrop Size Distribution for Different Cloud Systems in Liaoning Province

Fang Bin¹, Guo Xueliang², and Xiao Hui³

1 Liaoning Weather Modification Office, Shenyang 110166

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Observations of raindrop size distribution collected at Shenyang and Liaoyang, Liaoning Province, have been exploited to reveal characteristics of characteristic variables and spectral parameters of raindrop size distribution for stratus clouds, cumulus clouds, and stratus clouds embedded in convective systems. Conclusions are as follows. The spectral parameters N_0 and λ of Gamma distribution decrease and spectral parameter μ increases in the order of stratus clouds, stratus clouds embedded in convections, and cumulus clouds. Precipitation particles with diameters less than 1 mm contribute most to the number concentration, while precipitation particles with diameters greater than 1 mm make the largest contribution to radar reflectivity. The spectral parameters N_0 of M-P distribution and rainfall intensity are fitted by a power function, and results show that the spectral parameter N_0 increases with the increase of rainfall intensity. The spectral parameters λ and rainfall intensity are fitted by an exponential function, and the spectral parameters λ decreases

收稿日期 2015-08-07; 网络预出版日期 2015-12-30

作者简介 房彬, 女, 1977年生, 博士, 高级工程师, 主要从事人工影响天气方面研究。E-mail: fangbindemail@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目41475121, 辽宁省自然科学基金项目2015020773, 辽宁省“十二五”重点攻关项目2011210001

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41475121), National Natural Science Foundation of Liaoning Province (Grant 2015020773), the 12th Five-Year Key Program of Liaoning Province (Grant 2011210001)

with the increase of rainfall intensity.

Keywords Raindrop size distribution data, Precipitation-cloud system, Spectral parameters, Characteristic variables

1 引言

雨滴谱观测是云和降水物理观测的重要内容之一,在气象、水文及相关学科领域都有十分重要的应用价值。通过雨滴谱观测,可以了解降水的微物理结构,如数浓度、含水量、谱分布及降水微结构和演变特征、建立雷达反射率因子和降水强度之间的经验关系等。雨滴谱分布也为云参数化以及雷达、卫星反演降水提供重要参数。

雨滴谱(Rain Drop Size Distribution)是指单位体积内雨滴大小的分布,反映了云中成雨过程、云动力学和微物理学之间的相互制约关系,对进一步了解自然降水的物理过程、研究成雨机制、评估人工增雨的云水条件、检验催化效果等具有重要意义。雨滴谱的分布已经被研究了近100年,Marshall (1953)和Marshall and Palmer (1948)最早详细测量了平均雨滴谱的分布,并得到M-P分布。Ulbrich (1983)和Willis (1984)提出了Gamma分布的雨滴谱表达式。List (1988)使用降水强度和形状函数来描述平衡雨滴谱分布: $f_N(D, R) = R\psi_N(D)$ 。Testud et al. (2001)通过液态含水量和平均体积直径来表达雨滴谱的分布形式: $N(D) = N'_0 F_\mu(X)$ 。近些年就不同降水云系雨滴谱参数及特征量开展的研究也比较多。陈宝君等(1998)利用沈阳GBPP-100雨滴谱仪资料对三类降水云雨滴谱进行M-P分布和Gamma分布拟合。周毓荃等(2001)分析了河南省干旱年地面雨滴谱特征。牛生杰等(2002)分析了宁夏夏季不同降水天气系统雨滴谱及有关物理量的特征。刘红燕和雷恒池(2006)基于雨滴谱分析了层状云和对流云降水的特征。郑娇恒和陈宝君(2007)对雨滴谱函数M-P分布和Gamma分布进行了对比研究。杨加艳等(2010)利用二参数排序平均法和强度顺序滤波法处理雨滴谱资料并获取 μ - λ 关系。李景鑫等(2010)利用Parsivel(Particle Size and Velocity)激光雨滴谱仪观测资料给出了雨滴谱的Gamma分布拟合和参数随时间的变化特征。廖菲等(2011)分析了珠江三角洲地区夏季雷电天气系统雨滴谱特征。柳臣中等(2015)基于微物理特征参数分析了成都地区积云、积层混合云以及层状云降水雨滴谱的总体特征。

本文结合卫星云图、雷达观测以及云和天气现象观测,对位于辽宁省沈阳市(41.77°N, 123.43°E)和辽阳市(41.14°N, 123.10°E)的Parsivel激光雨滴谱仪观测到的雨滴谱资料按照积雨云降水系统、积层混合云降水系统和层状云降水系统分析雨滴谱相关参数及特征量。

2 仪器及资料订正

2.1 Parsivel 激光雨滴谱仪

Parsivel激光雨滴谱仪由德国OTT公司研制,是以激光为基础的新一代高级光学粒子测量仪器及气象传感仪器,它的主要功能是可同时测量降水所有液体和固体粒子的尺度 D 和速度 V ,并在尺度 D 和下降速度 V 方面分别提供了32个等级,输出资料是 32×32 的二维数组,数组中的某一具体数值代表了特定尺度和速度状态下的降水粒子数目Number。

2.2 雨滴谱资料订正

本研究选取的雨滴直径有效观测范围是0.2~6 mm。对观测记录中个别时刻出现大于6 mm的数据予以剔除,这主要是由雨滴重叠所造成,直径大于6 mm的滴在自然降雨中难得见到,它们在降落到地面的过程中已经破碎。直径大于1.0 mm的雨滴在下落过程中会发生明显形变,本文根据Pruppacher and Beard (1970)通过风洞试验建立的球形雨滴直径 D 和雨滴形变因子 f 之间的函数关系对直径大于1.0 mm的雨滴进行了订正,经过订正后,大于1 mm的雨滴尺度有所减小。

3 雨滴谱平均谱相关参数及特征量分析

3.1 资料选取

结合卫星云图、雷达观测以及云和天气现象观测,选取2008~2013年15次典型降水过程,分析积雨云降水系统、积层混合云降水系统和层状云降水系统雨滴谱平均谱相关参数及特征量。表1给出了15次降水过程实况。

3.2 雨滴谱平均谱相关参数

3.2.1 谱参数分析

采用Gamma分布函数拟合雨滴谱分布:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\lambda D), \quad (1)$$

其中, $N(D)$ (单位: $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$) 为单位尺度间隔、单位体积内的雨滴数; D (单位: mm) 是雨滴直径; N_0 、 λ 为谱参数, 单位分别为 $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$ 和 mm^{-1} ; μ 为形状因子, 当 $\mu > 0$ 时曲线向上弯曲, $\mu < 0$ 时曲线向下弯曲。

表 1 2008~2013 年 15 次降水过程实况

Table 1 15 precipitation processes from 2008 to 2013

降水日期	降水时段 (北京时)	降水云系	降水量/ mm	滴谱样 本数
2008 年 7 月 15 日	02:37~23:50	积雨云	68.6	765
2008 年 8 月 18 日	00:00~16:59	积层混合云	28.1	615
2009 年 7 月 14 日	00:00~22:40	积雨云	61.1	1141
2009 年 8 月 19 日	05:31~12:08	积层混合云	32.6	374
2010 年 4 月 12 日	11:00~18:26	层状云	5.2	223
2010 年 4 月 16 日	05:20~16:52	层状云	16.8	345
2010 年 4 月 18 日	02:14~12:04	层状云	1.5	147
2010 年 7 月 1 日	19:05~22:51	积雨云	22.2	204
2011 年 4 月 17 日	07:25~11:16	积雨云	5.5	91
2011 年 8 月 15 日	14:00~24:00	积层混合云	3.2	100
2011 年 8 月 16 日	00:00~09:10	积层混合云	3.3	83
2011 年 8 月 28 日	00:00~12:34	积层混合云	47.5	598
2012 年 6 月 14 日	11:00~14:38	积层混合云	8.4	127
2012 年 7 月 22 日	14:14~19:46	积雨云	63.3	105
2012 年 10 月 16 日	13:20~22:25	层状云	18.4	216
2013 年 6 月 11 日	04:46~23:44	层状云	21.3	508
2013 年 6 月 12 日	00:26~05:24	层状云	1.8	144
2013 年 7 月 2 日	04:38~09:40	积雨云	49.4	155

图 1 为不同降水云系下实测谱和用 Gamma 分布拟合的雨滴谱。从图 1 可以得出, 层状云降水测量到的雨滴谱谱宽范围在 0.312~3.25 mm 之间, 其中数浓度最大值为 $48 \text{ m}^{-3} \text{mm}^{-1}$, 出现在直径 0.437 mm 处, 整个雨滴谱曲线变化比较均匀。使用 Gamma 分布拟合层状云雨滴谱, 相关系数达到 0.978, 显著水平优于 0.05, 说明 Gamma 分布能很好地描述层状云雨滴谱分布特征, 谱参数 $\mu = 0.604$, Gamma 分布曲线向下弯曲。

积层混合云降水测量到的雨滴谱谱宽范围在 0.312~4.25 mm 之间, 其中数浓度最大值为 $48 \text{ m}^{-3} \text{mm}^{-1}$, 出现在直径 0.687 mm 处, 整个雨滴谱曲线变化比较平缓, 为单峰型。使用 Gamma 分布拟合积层混合云雨滴谱, 相关系数达到 0.970, 显著性水平优于 0.05, 说明 Gamma 分布也能很好地描述积层混合云雨滴谱分布特征, 谱参数 $\mu = 0.869$, Gamma 分布曲线向下弯曲。

积雨云降水测量到的雨滴谱谱宽范围在 0.312~5.5 mm 之间, 其中数浓度最大值为 46

$\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$, 出现在直径 0.437 mm 处, 整个雨滴谱曲线变化比较平缓, 为单峰型。使用 Gamma 分布拟合积雨云雨滴谱, 相关系数达到 0.987, 显著水平优于 0.05, 说明 Gamma 分布也能很好地描述积雨云雨滴谱分布特征, 谱参数 $\mu = 1.568$, Gamma 分布曲线向下弯曲。

实测平均谱谱宽按照层状云、积层混合云和积

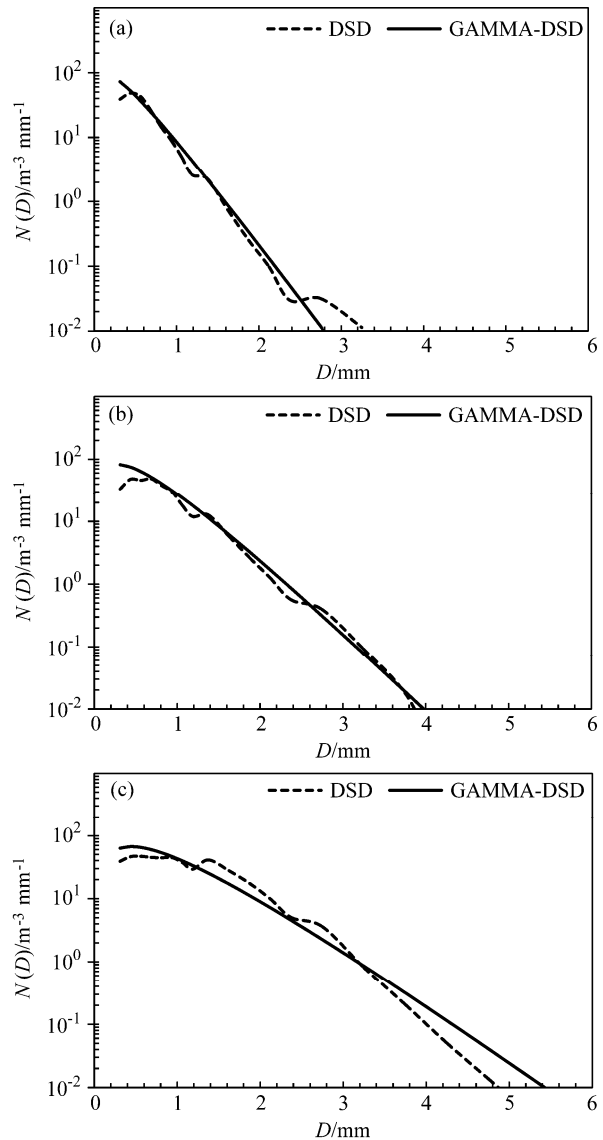


图 1 不同降水云系实测平均雨滴谱分布及 Gamma 分布拟合情况: (a) 层状云降水云系; (b) 积层混合云降水云系; (c) 积雨云降水云系。虚线为实测谱分布 (drop size distribution, 简称 DSD); 实线为 Gamma 谱分布 (Gamma drop size distribution, 简称 Gamma-DSD)

Fig. 1 Observed mean raindrop spectrum distribution and Gamma distribution fitting for different cloud systems: (a) Stratus clouds, (b) stratus clouds embedded in convections, (c) cumulus clouds. The dashed line shows the observed mean drop size distribution (DSD), and the solid line Gamma drop size distribution (Gamma-DSD)

雨云的顺序变宽; 无论哪种降水云系数浓度最大值都出现在小于 1 mm 直径范围内, 层状云在 3.25 mm 直径的数浓度为 0, 积层混合云在 3.25 mm 直径的数浓度为 $0.09 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$, 积雨云在 3.25 mm 直径的数浓度为 $0.8 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$, 为依次增加的趋势; 由于图 1 为实测平均谱, 是大量雨滴谱样本的平均, 因此得到的雨滴谱曲线变化比较平滑, 但这并不代表各种降水云系的雨滴谱在整个降水过程中都是这种比较平滑的分布。

3.2.2 Gamma 分布拟合平均谱与实测谱的相关系数

表 2 列出了 Gamma 分布拟合平均参数及与实测谱的相关系数。无论哪种降水云系 Gamma 分布对雨滴谱的拟合都很好, 相关系数都大于 0.97, 显著性水平优于 0.05。谱参数 N_0 按照层状云—积层混合云—积雨云的顺序减小; 谱参数 μ 按照层状云—积层混合云—积雨云的顺序增大, 即曲线的弯曲性变大, 这是由于随着降水不稳定性的增加, 谱宽变大, 大粒子增多了; 谱参数 λ 按照层状云—积层混合云—积雨云的顺序较小, 这是由于随着降水不稳定性的增大, 大粒子增多, 雨滴谱曲线坡度变缓, 如对 Gamma 分布取对数, 即随着降水不稳定性的增加, 谱分布的斜率变小。

表 2 不同降水云系 Gamma 分布拟合平均谱参数及与实测谱的相关系数 (r)

Table 2 The mean spectrum parameters of Gamma distribution fitting and correlation coefficient (r) of Gamma distribution fitting and Observed mean raindrop spectrum distribution for different cloud systems

降水云系	N_0	μ	λ	r
层状云	974.058	0.604	4.193	0.978
积层混合云	589.4327	0.869	3.064	0.970
积雨云	476.292	1.568	2.632	0.987

3.2.3 Gamma 分布拟合的雨滴谱与实测平均谱的相对误差

图 2 为不同降水云系下用 Gamma 分布拟合的雨滴谱与实测平均谱的相对误差, 可以得出, Gamma 分布对雨滴谱拟合的相对误差在小于 3 mm 范围较小, 大于 3 mm 范围误差较大; 层状云降水的平均相对误差为 31%, 积层混合云降水的相对误差为 45%, 积雨云的平均相对误差为 59%, 这是因为 Gamma 分布对小粒子拟合相对误差较小, 而层状云降水小粒子较多, 因此拟合相对误差较小, Gamma 分布对大粒子拟合相对误差较大, 而积层混合云和

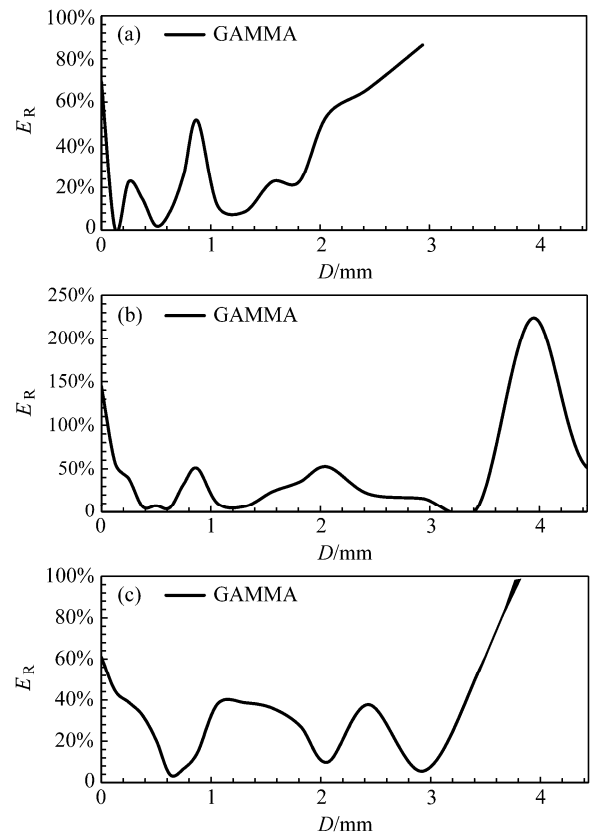


图 2 不同降水云系 Gamma 分布拟合的雨滴谱与实测平均谱的相对误差 (E_R): (a) 层状降水云系; (b) 积层混合云降水云系; (c) 积雨云降水云系

Fig. 2 Relative errors (E_R) of the Gamma-distribution-fitted raindrop spectrum and observed mean raindrop spectrum for different cloud systems: (a) Stratus clouds, (b) stratus clouds embedded in convections, and (c) Cumulus clouds

积雨云降水大粒子较多, 因此拟合相对误差较大。

3.3 谱特征量

3.3.1 特征量公式

为了讨论降水特征, 依据雨滴谱计算雨强 (I ; 单位: mm h^{-1})、雨水含量 (Q ; 单位: mg m^{-3})、雷达反射率因子 (Z ; 单位: $\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$) 三个谱特征量:

$$I = \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^3 V(D_i), \quad (2)$$

$$Q = \frac{\pi}{6} \rho \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^3, \quad (3)$$

$$Z = \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^6. \quad (4)$$

3.3.2 特征量分析

表 3 为不同降水云系下的雨滴谱特征量, 可以

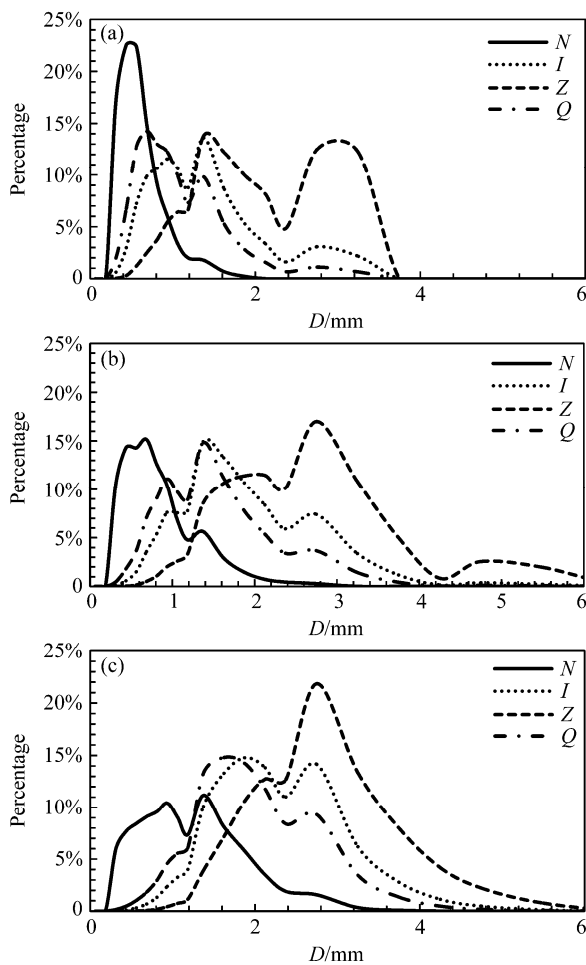


图3 不同降水云系下各尺度粒径数浓度(N)、雨强(I)、雷达反射率(Z)和液态含水量(Q)的百分比:(a)层状云降水云系;(b)积层混合云降水云系;(c)积雨云降水云系

Fig. 3 Percentages of number concentration (N), rain intensity (I), radar reflectivity (Z), and liquid water content (Q) of particles with various diameters for different cloud systems: (a) Stratus clouds, (b) stratus clouds embedded in convections, (c) cumulus clouds

得出雨强、雷达反射率、液态含水量及动能通量均按照层状云、积层混合云和积雨云的顺序增大,即随着降水不稳定性的增强而增大。图3为不同降水云系下各尺度粒径数对数浓度、雨强、雷达反射率和液态含水量的贡献。层状云降水云系,各尺度粒径数对总数浓度的贡献随直径增加呈单峰分布,在0.437 mm直径处出现峰值,峰值为22%,其中直径小于1 mm粒子的数浓度的占总数浓度的92%;各尺度粒径数对雨强的贡献随直径增加呈双峰分布,在0.937 mm和1.375 mm直径出现峰值,直径小于3 mm的粒子对雨强的贡献为98%;各尺度粒径数对液态含水量的贡献随直径增加呈双峰分布,并且峰值的位置基本与雨强峰值的位置相当,分别在

0.685 mm和1.375 mm直径出现峰值,直径小于3 mm的粒子对液态水含量的贡献为99.3%;各尺度粒径数对雷达反射率的百分比随直径增加也呈双峰分布,即1.375 mm和3.25 mm直径出现峰值,直径1~3 mm的粒子对雷达反射率的贡献为74.5%,相对于雨强和液态含水量,雷达反射率的峰值更靠近大值区。

表3 不同降水云系雨滴谱特征量

Table 3 The characteristic variables of raindrop size distribution for different cloud systems

降水云系	雨强/ mm h^{-1}	雷达反射率因 子/ $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$	液态含水量/ mg m^{-3}	动能通量/ $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$
层状云	0.22	63.23	19.24	0.0007
积层混合云	4.49	2426.87	153.32	0.0149
积雨云	30.94	28554.41	1160.60	0.1144

积层混合云降水云系,各尺度粒径数对总数浓度的贡献随直径增加呈双峰分布,峰值直径分别为0.687 mm和1.375 mm,峰值分别为15.15%和5.62%,其中直径小于1 mm粒子的数浓度的占总数浓度的77%;各尺度粒径数对雨强的贡献随直径增加呈三峰分布,峰值直径分别为0.937 mm、1.375 mm和2.75 mm,峰值分别为7.6%、14.8%和7.4%,直径小于3 mm的粒子对雨强的贡献为94.8%;各尺度粒径数对液态含水量的贡献随直径增加也呈三峰分布,并且峰值的位置与雨强峰值的位置一致,峰值直径分别为0.937 mm、1.375 mm和2.75 mm,峰值分别为11.1%、14.8%和3.6%,直径小于3 mm的粒子对液态水含量的贡献为98%;各尺度粒径数对雷达反射率的百分比随直径增加呈双峰分布,峰值直径分别为2.125 mm和2.75 mm,峰值分别为11.4%和16.9%,直径1~3 mm的粒子对雷达反射率的贡献为75.08%。

积雨云降水云系,各尺度粒径数对总数浓度的贡献随直径增加呈双峰分布,峰值直径分别为0.937 mm和1.375 mm,峰值分别为10.4%和10.1%,最大峰值直径比积层混合云和层状云向大值区靠近,其中直径小于1 mm粒子的数浓度的占总数浓度的51.2%;各尺度粒径数对雨强的贡献随直径增加呈双峰分布,峰值直径分别为1.875 mm和2.75 mm,峰值分别为14.25%和14.15%,直径小于3 mm的粒子对雨强的贡献为89.5%;各尺度粒径数对液态含水量的贡献随直径增加也呈双峰分布,并且峰值的位置与雨强峰值的位置基本一致,峰值直径分别

表 4 各档降水粒子对 N 、 I 、 Z 、 Q 贡献率

Table 4 The percentage of number concentration, rain intensity, radar reflectivity and liquid water content of different grades of particles

降水云系	直径 < 1 mm				直径 1~3 mm				直径 > 3 mm			
	N	I	Z	Q	N	I	Z	Q	N	I	Z	Q
层状云	92.0%	42.6%	13.3%	61.0%	8.0%	54.5%	74.6%	38.4%	0.01%	2.2%	12.2%	0.66%
积层混合云	76.9%	18.8%	3.8%	33.2%	22.9%	75.9%	75.1%	64.8%	0.18%	5.3%	21.1%	2.05%
积雨云	51.2%	4.8%	0.7%	11.0%	48.1%	83.5%	70.9%	83.5%	0.42%	10.6%	28.5%	5.49%

为 1.625 mm 和 2.75 mm, 峰值分别为 14.8% 和 9.3%, 直径小于 3 mm 的粒子对液态水含量的贡献为 94.5%; 各尺度粒径数对雷达反射率的百分比随直径增加呈双峰分布, 峰值直径分别为 2.125 mm 和 2.75 mm, 峰值分别为 12.74% 和 21.89%, 直径大于 1 mm 的粒子对雷达反射率的贡献为 99.3%。

将降水粒子分为直径小于 1 mm、1~3 mm 及大于 3 mm 三档, 计算各档降水粒子对数浓度、雨强、雷达反射率和液态含水量的贡献率, 结果列于表 4。对于层状云降水, 直径小于 1 mm 的粒子数占总数浓度的 92%, 对雨强和液态含水量的贡献分别为 42.6% 和 60.9%, 对雷达反射率的贡献仅为 13.3%, 而直径 1~3 mm 的粒子仅占总数浓度的 7.95%, 对雨强、液体含水量和雷达反射率的贡献分别达到了 54.5%、38.8% 和 74.5%, 直径大于 3 mm 的粒子占总数浓度的 0.01%, 对雷达反射率的贡献达到了 12.2%; 对积层混合云降水, 直径小于 1 mm 的粒子数占总数浓度的 76.9%, 对雨强和液态含水量的贡献分别为 18.8% 和 33.1%, 对雷达反射率的贡献为 3.8%, 而直径 1~3 mm 的粒子占总数浓度的 22.9%, 对雨强、液体含水量和雷达反射率的贡献分别达到了 75.9%、64.7% 和 75%, 直径大于 3 mm 的粒子占总数浓度的 0.17%, 对雷达反射率的贡献达到了 21.1%; 对积雨云降水, 直径小于 1 mm 的粒子数占总数浓度的 51.2%, 对雨强和液态含水量的贡献分别为 4.81% 和 11%, 对雷达反射率的贡献为 0.7%, 而直径 1~3 mm 的粒子占总数浓度的 48.3%, 对雨强、液体含水量和雷达反射率的贡献分别达到了 83.4%、83.4% 和 70.8%, 直径大于 3 mm 的粒子仅占总数浓度的 0.41%, 对雷达反射率的贡献达到了 28.4%, 对雨强的贡献也达到了 10.5%。

4 雨滴谱相关参数及特征量随时间变化分析

根据降水的结构特征和激光雨滴谱仪测量得

到的雨滴谱资料, 选取 3 次典型降水天气过程, 分析雨滴谱特征及相关参量随时间的变化特征。表 5 给出了这 3 次降水的实况资料。

表 5 3 次降水过程实况资料

Table 5 Three precipitation processes

降水日期	降水时段 (北京时)		降水云系	滴谱资料	
	降水日期	降水时段		降水量/ mm	滴谱资料 样本数
2011 年 8 月 16 日	00:00~09:10	积层混合云	3.3	83	
2013 年 6 月 12 日	00:26~05:24	层状云	1.8	144	
2013 年 7 月 2 日	04:38~09:40	积雨云	49.4	155	

4.1 谱参数分析

这里采用 M-P 分布函数拟合雨滴谱分布:

$$N(D) = N_0 \exp(-\lambda D), \quad (5)$$

其中, $N(D)$ (单位: $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$) 为单位尺度间隔、单位体积内的雨滴数, D (单位: mm) 是雨滴直径, N_0 、 λ 为谱参数, 单位分别为 $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$ 和 mm^{-1} 。

M-P 分布的谱参数 N_0 和 λ , 在整个降水过程中是不断变化的, 这里就谱参数和雨强的关系进行分析。图 4 为不同降水云系下谱参数随雨强的变化关系。由图 4 可以看出层状云降水过程, N_0 是随着雨强的增大而增大的, 并具有幂函数关系: $N_0 = 3175.2I^{0.5321}$, λ 随雨强的增大而减小, 并具有指数函数关系: $\lambda = -0.299\ln(I) + 3.9379$; 积层混合云降水过程, N_0 是随着雨强的增大而增大的, 并具有幂函数关系 $N_0 = 338.04I^{0.2057}$, λ 随雨强的增大而减小, 并具有指数函数关系 $\lambda = -0.313\ln(I) + 2.35969$; 积雨云降水过程, N_0 是随着雨强的增大而增大的, 并具有幂函数关系 $N_0 = 240.25I^{0.3737}$, λ 随雨强的增大而减小, 并具有指数函数关系: $\lambda = -0.301\ln(I) + 2.3664$ 。由于 M-P 分布往往高估小粒子的浓度, 因此在小粒子尺度范围的误差较大, 而层状云降水小粒子相对较多, 雨强较小, 雨强与 N_0 和 λ 虽然具有函数关系, 但是相关系数较低, 分别为 0.53 和 0.48。积层混合云降水和积雨云降水, 由于大粒子较多, 雨强与 N_0 和 λ 相关系数较大, 均大于 0.6。无论任

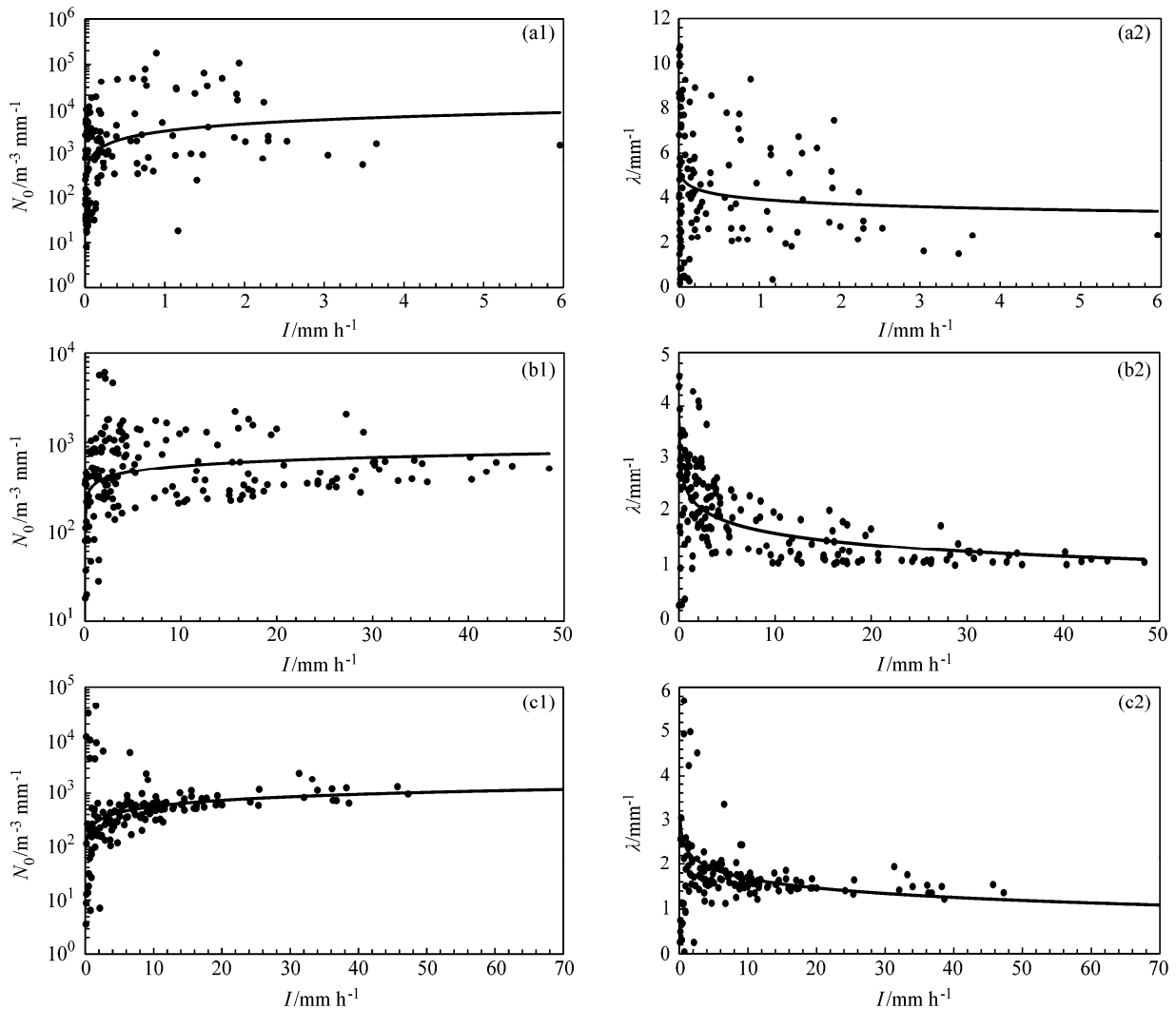


图 4 不同降水云系下谱参数随雨强的变化关系: (a1、a2) 2013 年 6 月 12 日层状云降水; (b1、b2) 2011 年 8 月 16 日积层混合云降水; (c1、c2) 2013 年 7 月 2 日积雨云降水

Fig. 4 Variations of spectral parameters with rain intensity for different cloud systems: (a1, a2) Stratus precipitation, 12 Jun 2013; (b1, b2) stratus precipitation embedded in convections, 16 Aug 2011; (c1, c2) cumulus precipitation, 2 Jul 2013

何降水云系, N_0 都具有随着雨强的增大而增大, λ 随着雨强的增大而减小的关系。

4.2 谱特征量分析

雨强与谱特征量数浓度、雷达反射率和液态含水量的关系, 在实际应用中非常重要。这里就不同降水云系分析雨强与谱特征量数浓度、雷达反射率和液态含水量的关系。图 5 为不同降水云系下雨强 I 与雨滴谱特征量的拟合情况。2013 年 6 月 12 日层状云降水天气过程, 雨强与谱特征量数浓度、雷达反射率和液态含水量的相关性都很好, 雨强与数浓度的关系为 $N=440.67I^{0.59}$, 与雷达反射率的关系为 $Z=140.36I^{1.19}$, 与液态含水量的关系为 $Q=$

$78.89I^{0.84}$, 相关系数都大于 0.8, 雨强与雷达反射率和液态含水量的相关系数均为 0.99; 2011 年 8 月 16 日积层混合云降水天气过程, 雨强与谱特征量的相关系数按照数浓度、液态含水量、雷达反射率的顺序递增, 雨强与数浓度的关系为 $N=196.66I^{0.35}$, 与雷达反射率的关系为 $Z=235.62I^{1.24}$, 与液态含水量的关系为 $Q=54.04I^{0.71}$; 2013 年 7 月 2 日积雨云降水天气过程, 雨强与谱特征量的相关系数也按照数浓度、液态水含量、雷达反射率的顺序递增, 雨强与数浓度的关系为 $N=206.88I^{0.45}$, 与雷达反射率的关系为 $Z=260.81I^{1.31}$, 与液体含水量的关系为 $Q=53.28I^{0.80}$ 。表 6 给出了不同降水云系下雨强 I 与

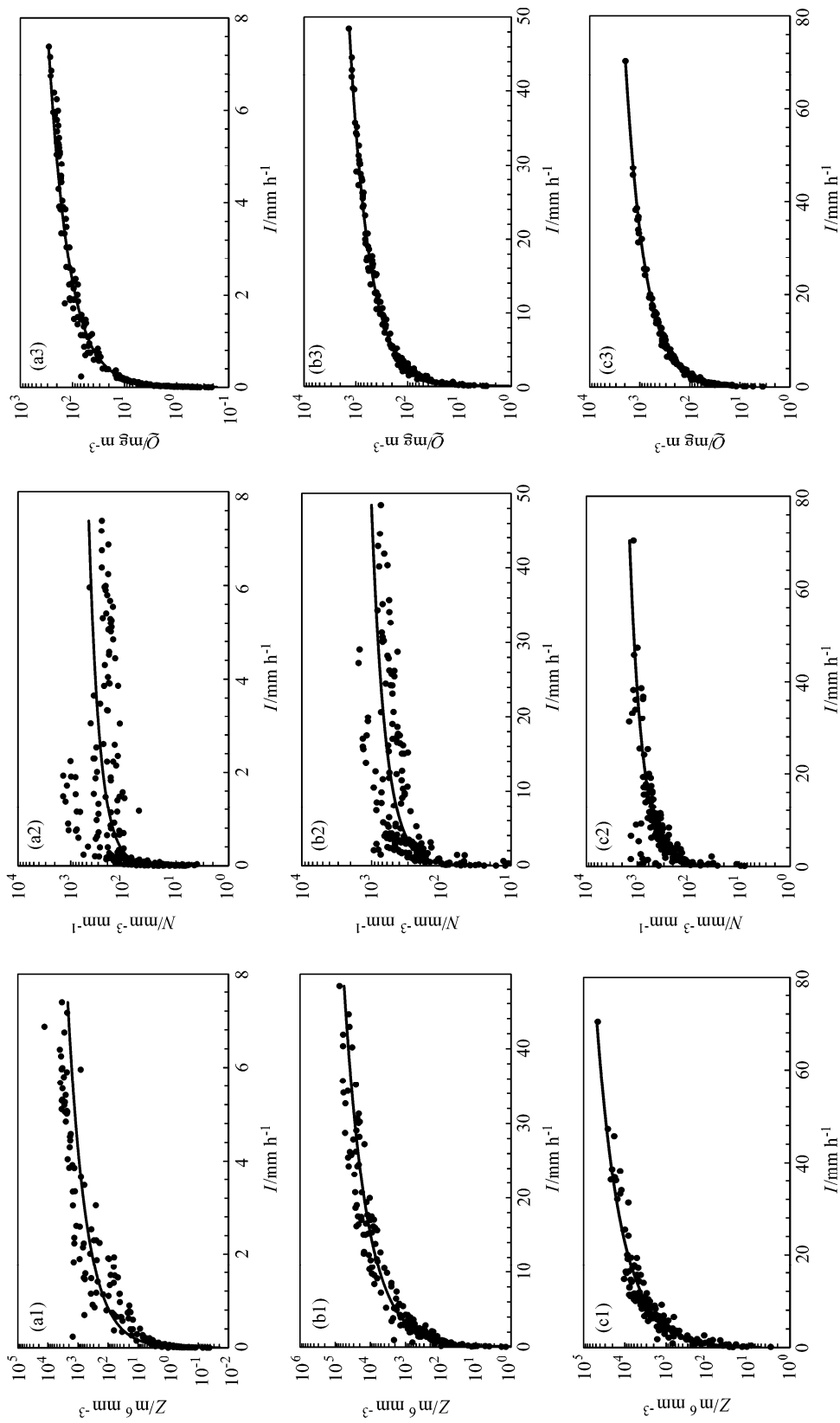


图 5 不同降水云系下雨强与雨滴谱特征量的拟合情况：(a1、a2、a3) 2013 年 6 月 12 日层状云降水；(b1、b2、b3) 2011 年 8 月 16 日积层混合云降水；(c1、c2、c3) 2013 年 7 月 2 日积雨云降水
 Fig. 5 Fitting of rain intensity and characteristic variables of raindrop size distribution for different cloud systems: (a1, a2, a3) Stratus precipitation, 12 Jun 2013; (b1, b2, b3) stratus precipitation embedded with convections, 16 Aug 2011; (c1, c2, c3) cumulus precipitation 2 Jul 2013

谱特征量拟合的相关关系。无论哪种降水天气过程，雷达反射率和雨强的相关性都很好，并且系数 a 、 b 均按照层状云—积层混合云—积雨云的顺序增加，系数 b 大于 1，即雷达反射率随雨强的增加迅速增大，与雨强大的时候，雷达反射率也大相一致。液态含水量与雨强的相关性也很好，相关系数均大于 0.96，系数 a 按照层状云—积雨云的顺序减小，系数 b 没有明显差别。数浓度与雨强的相关系数最小，系数 a 按照层状云—积层混合云—积雨云的顺序减小，系数 b 没有明显差别，系数 b 均小于 1，即数浓度随着雨强的增大增加的比较缓慢。

表 6 不同降水云系下雨强与谱特征量的关系

Table 6 Relations between rain intensity and characteristic variables of raindrop size distribution for different cloud systems

谱特征量	层状云			积层混合云			积雨云		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r
Z	140.36	1.19	0.99	235.62	1.24	0.99	260.81	1.31	0.97
N	440.67	0.59	0.83	196.66	0.35	0.78	206.88	0.45	0.85
Q	78.89	0.84	0.99	54.04	0.71	0.98	53.28	0.80	0.96

注： r 表示雨强与雨滴谱特征量 (Z 、 N 和 Q) 的相关系数； a 、 b 为雨强与雨滴谱特征量的关系式 ($Z=a^b$ 、 $N=a^b$ 、 $Q=a^b$) 中的系数。

4.3 Gamma 分布拟合特征量按照数浓度由低到高的误差序列

图 6 为不同降水云系下 Gamma 分布拟合雨强和雷达反射率并照实测数浓度由低到高的顺序输出的误差序列。积雨云降水天气过程，雨强 Gamma 分布拟合值在数浓度低于 100 m^{-3} 时相对误差较大，拟合值高于观测值，随着数浓度的增加相对误差逐渐减小，数浓度为 200 m^{-3} 时，相对误差最小，然后又随着数浓度的增加，相对误差逐渐增大，并且拟合值低于观测值，这是因为 Gamma 分布往往高估小滴低估中等以上雨滴，当实测数浓度小，小滴多大滴少的时候，Gamma 分布拟合的雨强大于实测值，当实测数浓度大，小滴相对少大滴多的时候，Gamma 分布拟合的雨强小于实测值。雷达反射率 Gamma 分布拟合值的相对误差没有呈现出与雨强一样的分布规律，无论数浓度低或高，相对误差大部分都小于 0，拟合值低于观测值，这是也与 Gamma 分布往往高估小滴低估中等以上雨滴有关，在数浓度较小时，Gamma 分布虽然高估小滴低估大滴，但是由于小滴对雷达反射率的贡献小，拟合值低于观测值，在数浓度较大时，Gamma 分布又低估了大滴，拟合值也低于观测值。

积层混合云降水天气过程，雨强 Gamma 分布拟合值在数浓度低于 100 m^{-3} 时相对误差较大，拟合值高于观测值，随着数浓度的增加相对误差逐渐减小，数浓度为 300 m^{-3} 时，相对误差最小，然后相对误差又随着数浓度的增加逐渐增大，并且拟合值低于观测值，到数浓度大于 800 m^{-3} 后，相对误差逐渐减小并维持在 50% 范围内，原因同样是 Gamma 分布往往高估小滴低估中等以上雨滴。雷达反射率 Gamma 分布拟合值的相对误差大部分都小于 0，拟合值低于观测值，并且有相对误差随着数浓度的增大而减小的趋势。

层状云降水天气过程，雨强 Gamma 分布拟合值在数浓度低于 100 m^{-3} 时相对误差较大，随着数浓度的增加相对误差逐渐减小，数浓度大于 400 m^{-3} 后，逐渐稳定在 50% 的范围内，并且拟合值基本都大于观测值，这应该与层状云降水的特点有关，在层状云降水的数浓度和积雨云降水的数浓度一样的情况下，层状云小滴多大滴少，而 Gamma 分布又往往高估小滴低估大滴，因此层状云降水云系下 Gamma 分布拟合值往往大于观测值。雷达反射率 Gamma 分布拟合值的相对误差具有随着数浓度的增大而减小的趋势，在数浓度小于 200 m^{-3} 范围内相对误差波动较大，拟合值分布没有一定规律，当数浓度大于 200 m^{-3} 后，相对误差逐渐减小并稳定在一定范围内，拟合值大多数情况小于观测值，这同样与层状云降水的特点有关。

5 结论

(1) 实测平均谱谱宽按照层状云、积层混合云和积雨云的顺序变宽，无论哪种降水云系数浓度最大值都出现在小于 1 mm 直径范围内，大于 3 mm 直径的粒子数浓度按照层状云、积层混合云和积雨云的顺序增加。无论哪种降水云系 Gamma 分布对雨滴谱的拟合都很好，谱参数 N_0 和 λ 按照层状云、积层混合云和积雨云的顺序减小；谱参数 μ 按照层状云、积层混合云和积雨云的顺序增大。Gamma 分布拟合的雨滴谱与实测平均谱的平均相对误差按照层状云、积层混合云和积雨云的顺序增大。

(2) 不同降水云系下，雨强、雷达反射率、液态含水量及动能通量均按照层状云—积层混合云—积雨云的顺序增大；各尺度粒径数对总数浓度、雨强、液态含水量、雷达反射率的百分比随直径呈单峰或双峰分布，最大峰值直径按照层状云、积层

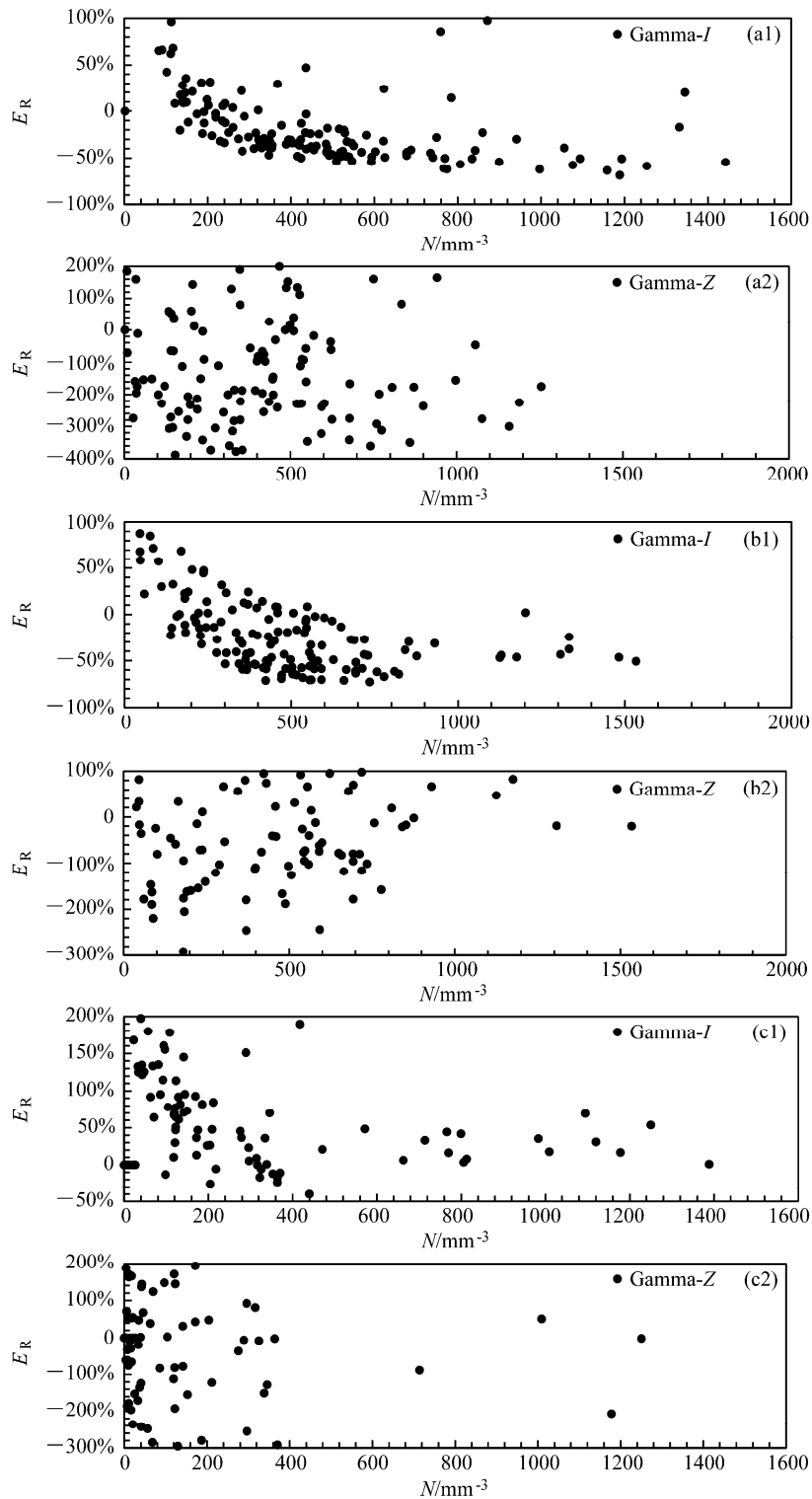


图 6 不同降水云系下 Gamma 分布拟合雨强和雷达反射率并按照实测数浓度由低到高顺序输出的相对误差序列：(a1、a2) 2013 年 6 月 12 日层状云降水；(b2、b2) 2011 年 8 月 16 日积层混合云降水；(c) 2013 年 7 月 2 日积雨云降水

Fig. 6 Relative error sequences of Gamma-distribution-fitted rain intensity and radar reflectivity outputted in an order from low to high number concentration for different cloud systems: (a1, a2) Stratus precipitation, 12 Jun 2013; (b1, b2) stratus precipitation embedded in convections, 16 Aug 2011; (c1, c2) cumulus precipitation, 2 Jul 2013

混合云和积雨云的顺序向大尺度直径方向移动。

(3) 无论哪种降水云系直径小于 1 mm 的降水粒子对数浓度的贡献最大, 直径大于 1 mm 的降水粒子对雷达反射率的贡献最大。小滴对数浓度贡献虽然大, 但对雷达反射率的贡献却很小, 大滴对数浓度贡献很小, 对雷达反射率贡献却很大。这是因为雷达反射率与降水粒子直径的六次方成正比, 因此较多的小粒子提供散射回波功率的极小部分, 而少数大水滴提供散射回波功率的绝大部分。

(4) M-P 分布的谱参数 N_0 与雨强 I 具有幂函数关系, 并且随着雨强 I 的增大而增大, 谱参数 λ 与雨强 I 具有指数函数关系, 随着雨强 I 的增大而减小。数浓度、雷达反射率和液态含水量与雨强 I 均呈幂函数关系, 并且相关性都很好。雷达反射率与雨强 I 的相关系数 a 、 b 均按照层状云、积层混合云和积雨云的顺序增加, 系数 b 大于 1; 数浓度、液态含水量与雨强 I 的相关系数 a 按照层状云、积层混合云和积雨云的顺序减小, 系数 b 均小于 1。

(5) 积雨云和积层混合云降水云系下, Gamma 分布拟合雨强的相对误差在数浓度小于 100 m^{-3} 时较大, 拟合值大于观测值, 随着数浓度的增加, 相对误差逐渐减小, 在数浓度为 $200 \sim 300 \text{ m}^{-3}$ 时最小, 然后又随着数浓度的增加逐渐增大, 并且拟合值小于观测值, 当数浓度大于 800 m^{-3} 后, 相对误差稳定在 50% 范围内。层状云降水云系下, 雨强 Gamma 分布拟合值在数浓度低于 100 m^{-3} 时相对误差较大, 随着数浓度的增加相对误差逐渐减小, 数浓度大于 400 m^{-3} 后, 逐渐稳定在 50% 的范围内, 并且拟合值基本都大于观测值。

参考文献 (References)

- 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. Chen Baojun, Li Zihua, Liu Jicheng, et al. 1998. Model of raindrop size distribution in three types of precipitation [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 56 (4): 506–512, doi:10.11676/qjxb1998.046.
- 李景鑫, 牛生杰, 王式功, 等. 2010. 积层混合云降水雨滴谱特征分析 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 46 (6): 56–61. Li Jingxin, Niu Shengjie, Wang Shigong, et al. 2010. Precipitation characteristics related to raindrop size distribution in laminated hybrid cloud [J]. J. Lanzhou Univ. (Natural Sci.) (in Chinese), 46 (6): 56–61.
- 廖菲, 邓华, 万齐林, 等. 2011. 珠江三角洲地区两次夏季典型雷电天气系统的雨滴谱特征观测研究 [J]. 高原气象, 30 (3): 798–808. Liao Fei, Deng Hua, Wan Qilin, et al. 2011. Observation studies on characteristics of raindrop size distribution of two typical summer thunderstorm cases in the Pearl river delta [J]. Plat. Meteor. (in Chinese), 30 (3): 798–808.
- List R. 1988. A linear radar reflectivity-rainrate relationship for steady tropical rain [J]. J. Atmos. Sci., 45 (23): 3564–3572, doi:10.1175/1520-0469(1988)045<3564:ALRRRF>2.0.CO;2.
- 柳臣中, 周筠琦, 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]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 26 (1): 112–121, doi:10.11898/1001-7313.20150112.
- 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. Liu Hongyan, Lei Hengchi. 2006. Characteristics of rain from stratiform versus convective cloud based on the surface raindrop data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 693–702, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.14.
- Marshall J S, Palmer W M. 1948. The distribution of rain drops with size [J]. J. Appl. Meteor., 5: 165–166.
- Marshall. 1953. Precipitation trajectories and patterns [J]. J. Meteor., 10 (1): 25–29, doi: 10.1175/1520-0469(1953)010<0025:PTAP>2.0.CO;2.
- 牛生杰, 安夏兰, 桑建人. 2002. 不同天气系统宁夏夏季降雨谱分布参量特征的观测研究 [J]. 高原气象, 21 (1): 37–44. Niu Shengjie, An Xialan, Sang Jianren. 2002. Observational research on physical feature of summer rain drop size distribution under synoptic systems in Ningxia [J]. Plat. Meteor. (in Chinese), 21 (1): 37–44, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.01.007.
- Pruppacher H R, Beard K V. 1970. A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 96 (408): 247–256, doi:10.1002/qj.49709640807.
- Testud J, Oury S, Black R A, et al. 2001. The concept of “normalized” distribution to describe raindrop spectra: A tool for cloud physics and cloud remote sensing [J]. J. Appl. Meteor., 40 (6): 1118–1140, doi:10.1175/1520-0450(2001)040<1118:TCOND>2.0.CO;2.
- Ulbrich C W. 1983. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. Climate Appl. Meteor., 22 (10): 1764–1775, doi:10.1175/1520-0450(1983)022<1764:NVITAF>2.0.CO;2.
- Willis P T. 1984. Functional fits to some observed drop size distributions and parameterization of rain [J]. J. Atmos. Sci., 41 (9): 1648–1661, doi:10.1175/1520-0469(1984)041<1648:FFTSOD>2.0.CO;2.
- 杨加艳, 肖辉, 肖稳安, 等. 2010. 基于SATP和SIFT方法分析雨滴谱特征及参数关系 [J]. 高原气象, 29 (2): 486–497. Yang Jiayan, Xiao Hui, Xiao Wen'an, et al. 2010. A study of raindrop size distributions and their characteristic parameters based on the methods of SATP and SIFT [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (2): 486–497.
- 郑娇恒, 陈宝君. 2007. 雨滴谱函数的选择: 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]. Sci. Meteor. 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 (S): 39–47. Zhou yuqian, Liu Xiaotian, Zhou Feifei, et al. 2001. Characteristics of surface raindrop spectra in drought years in Henan province [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 12(S): 39–47, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.z1.006.