杨涛,张祖熠,杨莲梅.基于雨强分级的乌鲁木齐雨滴谱特征研究[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(4):64-71. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.04.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 基于雨强分级的乌鲁木齐雨滴谱特征研究

杨 涛 1,2,3, 张祖熠 1,2,3, 杨莲梅 1,2,3\*

(1.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002;2.新疆云降水物理与云水资源开发实验室, 新疆 乌鲁木齐 830002;3.西天山云降水物理野外科学观测基地,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:利用乌鲁木齐 PARSIVAL 激光雨滴谱仪 2012—2013 年观测资料,对春、夏、秋季不同雨强降雨的雨滴谱微物理特征参量及其随时间演变特征、Gamma 函数拟合、关系等进行研究。结果表明:(1)乌鲁木齐降雨以小粒子为主,大雨强降雨的6种特征直径最大,中雨强降雨次之,小雨强降雨最小。雨滴数密度主要来自于小雨滴(直径<1 mm),大雨滴(直径>3 mm)是雨强的主要贡献者,中雨滴(直径1~3 mm)是含水量和雷达反射率因子的主要贡献者,雷达反射率因子受雨滴尺寸影响很大。(2)小雨强降雨各微物理参量比较稳定,变化幅度不大,大雨强降雨则变化剧烈,出现多峰型,中雨强降雨介于二者之间。大雨强降雨的谱宽和峰值浓度最大,小雨强降雨最小,中雨强降雨介于二者之间。大雨强降雨的谱宽和峰值浓度最大,小雨强降雨最小,中雨强降雨介于二者之间。大雨强降雨的谱宽和峰值浓度最大,小雨强降雨最小,中雨强降雨介于二者之间。大雨强降雨的谱宽和峰值浓度最大,小雨强降雨最小。水香出的 Z-I 关系系数均小于目前常用的 Z=3001<sup>14</sup> 关系系数,因此,利用 Z=3001<sup>14</sup> 关系在鸟鲁木齐进行降雨定量估测研究时会造成对降雨强度的高估,回波强度越大,高估越明显。夏季大雨强降雨无法拟合出相关系数比较高的 Z-I 关系,这与乌鲁木齐大雨强降雨具有强度大、时间短、随时间变化迅速的特点有关。

关键词:乌鲁木齐;雨滴谱;微物理参量;Gamma 分布 中图分类号:P426.6 文献标识码:A 文章编号:1002-0799(2022)04-0064-08

雨滴谱分布在降雨微物理过程研究中具有重要 的作用,雨滴谱分布具有很强的地区、气候背景和季 节依赖性,通过将雨滴谱分为不同季节不同降雨类 型,对雨滴谱各类微物理参量及其演变特征进行分 析,可以提升雷达定量估测降雨的水平以及模式预 报初始场的精度,也可以为人工影响天气提供一定 的参考意见。

宫福久等四对沈阳地区3类降雨的雨滴谱特征

收稿日期:2021-10-11;修回日期:2022-02-21

进行研究发现,不同降雨类型的微物理参量具有较 大的差异,云内结构不均匀。牛生杰等<sup>10</sup>对宁夏地区 不同天气系统下的不同降雨云系和不同降雨强度的 雨滴谱分布进行研究,发现雨滴谱参量具有普遍偏 小的特性。Chen等<sup>10</sup>对青藏高原地区雨滴谱的日变 化进行分析发现,白天对流性降雨的质量加权平均 值直径会比夜间的大。Wen等<sup>14</sup>对中国东部地区不 同季节雨滴谱分析发现,不同季节雨滴谱参数分布 具有不同的特征,夏季主要以对流云降雨为主。对降 雨过程的雨滴谱资料分析,发现基于雨滴谱数据拟 合的三类降雨的关系,在一定程度可提高雷达估测 降雨的精度<sup>15-61</sup>。由于关系受多种因素的影响,尤其 是地理气候的影响,因此有必要研究本地化的降雨 关系。

新疆位于中国西北部,是典型的干旱半干旱气

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1507102);中央级公益性 科研院所基本科研业务费专项资金项目(IDM2022001)

**作者简介**:杨涛(1969—),男,高级工程师,主要从事天气气候研究和 气象服务。E-mail:<u>yd\_yang@sina.com</u>

通信作者:杨莲梅(1969—),女,研究员,主要从事天气气候和云降水物理研究。E-mail:yanglm@idm.en

候,降雨特征与中东部地区必然存在差异,目前国内 对于新疆地区降雨的雨滴谱特征研究很少,但近期 降雨个例相关研究也得出一些初步的结果<sup>[7-8]</sup>,新疆 天山山区雨滴谱具有粒径小、小粒子浓度高的特点, 与其他地区有较大差异。本文利用乌鲁木齐 PARSIVAL激光雨滴谱仪 2012—2013 年探测的降 雨资料,将降雨样本按照不同季节、不同雨强进行划 分,研究乌鲁木齐地区降雨的雨滴谱统计特征,以期 提高新疆降雨微物理特征的认识。

### 1 资料来源及数据处理

PARSIVEL 激光雨滴谱仪对于降雨观测具有较高的精度,本文利用安装在乌鲁木齐的激光雨滴谱仪 2012—2013 年春、夏和秋季降雨天气的观测资料,剔除降雪过程,共8561 个样本。观测的采样间隔为60 s,进行质量控制,剔除样本中雨滴个数<10 个或是降雨强度<0.1 mm·h<sup>-1</sup> 的样本<sup>[9]</sup>。

由于雨滴在下落过程中可能会发生形变、碰并、 破碎等,本文采用 Battaglia 等<sup>[10]</sup>的方法对雨滴直径 进行形变订正,同时剔除订正后直径>8 mm 的数 据,剔除粒子下落速度与 Atlas 等<sup>[11]</sup>的理论下落速度 相差>5 m·s<sup>-1</sup>的样本。

对降雨特征及各类微物理参量进行分析,首先 需要将雨滴个数转化为雨滴数密度:

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{N_{ij}}{V_j \times T \times S \times \Delta D_i}.$$
 (1)

式中, $N(D_i)$ 表示雨滴数密度,单位为 m<sup>-3</sup>·mm<sup>-1</sup>; $N_{ij}$ 表示位于第 i 个尺度档内及第 j 个速度区间内的雨 滴数; $V_j$ 表示第 j 档的雨滴下落末速度,单位为 m·s<sup>-1</sup>, T和 S 表示雨滴谱仪的采样周期和采样面积,T为 60 s,S 为 54 cm<sup>2</sup>; $\Delta D_i$ 表示第 i 个尺度档的直径间 隔。

利用雨滴数浓度及观测得到的雨滴大小、雨滴 数、雨滴下落末速度等可以计算得到雨强、液态水含 量、雷达反射率因子等参数,其数学表达式如下:

$$I = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} V_j N(D_i) D_i^3 \Delta D_i , \qquad (2)$$

$$W = \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^3 \Delta D_i , \qquad (3)$$

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

式中,I表示雨强,单位为 mm·h<sup>-1</sup>; $D_i$ 为雨滴的直径; W 表示液态水含量,单位为 mg·m<sup>-3</sup>;Z表示雷达反 射率因子,单位为 mm<sup>6</sup>·m<sup>-3</sup>。

本文春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月。利用雨强及雨强标准差对降水类型进行划 分<sup>[12]</sup>:对于某一时刻 t<sub>i</sub>,若 t<sub>i</sub>-n 到 t<sub>i</sub>+n(n=5)时间内, 样本的雨强 I>0.5 mm·h<sup>-1</sup>且其标准差<1.5 mm·h<sup>-1</sup>, 则将 t<sub>i</sub>时刻视为小雨降雨;若降水强度 I>5.0 mm·h<sup>-1</sup> 且其标准差>1.5 mm·h<sup>-1</sup>,则将 t<sub>i</sub>时刻视为大雨强降 雨;既不属于小雨强降水也不属于大雨强降水的 视为中雨强降雨。本文将雨强>0.5 mm·h<sup>-1</sup>的样 本视为小雨强降雨。各季节不同雨强的统计样本见 表 1。

表1 收集的雨滴谱观测样本按降雨强度等级 分举标准样本数

	为 天村 中 十 年 众			
观测时间	小雨强( <i>I&gt;</i> 0.5 mm・h <sup>-1</sup> 且 σ<1.5 mm・h <sup>-1</sup> )	中雨强(不属于 小、大雨强)	大雨强( <i>I</i> >5.0 mm・h <sup>-1</sup> 且 σ>1.5 mm・h <sup>-1</sup> )	
春季(3-5月)	343	292	190	
夏季(6-8月)	1 379	1 266	880	
秋季(9-11月)	1 789	1 366	1 056	
总样本数	3 511	2 924	2 126	

陈宝君等<sup>[13]</sup>用 M-P 分布和 Gamma 分布拟合实 际谱,通过二者对比分析,发现 Gamma 分布大大提 高了在小滴和大滴区段的拟合精度,通过前面的分 析可以发现,乌鲁木齐降雨主要以小雨滴为主,并且 大雨滴对于雨强和雷达反射率因子等参数具有重要 的贡献,因此本文将选用三参数的 Gamma 分布对雨 滴谱进行拟合。数学表达式如下:

 $N(D_i)=N_0D^*\exp(-\Lambda D).$  (5) 式中,D 表示粒子直径, $N_0$ 、 $\Lambda$ 分别表示雨滴的浓度 和大小因子, $\mu$  表示雨滴的形状因子,采用最小二乘 法对雨滴谱进行拟合。

# 2 不同季节三类降雨微物理参量分析

# 2.1 降雨的微物理平均特征参量分析

表 2 给出了春、夏和秋季 3 类降雨的微物理参量平均值,其中 D<sub>1</sub> 表示雨滴的平均直径、D<sub>V</sub> 表示雨滴的平均体积直径、D<sub>d</sub> 表示雨滴的众数直径、D<sub>max</sub> 表示雨滴的最大直径即谱宽、D<sub>0</sub> 表示雨滴的中数体积 直径、D<sub>m</sub>表示雨滴的质量加权平均直径、I 表示降 雨强度、N 表示雨滴的总数密度、W 表示含水量、Z 表示雷达反射率因子<sup>[14]</sup>。

由表2可知,乌鲁木齐地区降雨的微物理参量 平均值普遍偏小,不同季节不同降雨类型的众数直 径均<1 mm,乌鲁木齐地区降雨以小雨滴为主。这与 研究论文

沙漠与绿洲气象 Desert and Oasis Meteorology

第16卷 第4期 2022年8月

				表2	不同季	节不同	锋雨类型	微物理	参量平均值			
	季节	降雨类型	$D_1$ /mm	$D_v/mm$	$D_{\rm d}/{ m mm}$	$D_0/\mathrm{mm}$	$D_{\rm m}/{ m mm}$	$D_{\rm max}/{ m mm}$	$I/(\mathrm{mm} \cdot \mathrm{h}^{-1})$	$N/(\uparrow \cdot m^{-3})$	$W/(mg \cdot m^{-3})$	Z∕dBZ
		小雨强	0.823	0.963	0.736	1.282	1.240	1.851	1.10	100.93	44.74	20.87
	春	中雨强	0.883	1.056	0.753	1.440	1.394	2.163	3.94	159.86	84.20	25.74
		大雨强	0.925	1.138	0.669	1.534	1.548	2.343	16.56	111.44	87.33	28.21
		小雨强	0.950	1.125	0.792	1.544	1.455	2.071	2.06	60.22	38.59	22.89
	夏	中雨强	0.976	1.166	0.827	1.604	1.516	2.161	3.88	67.04	49.55	24.43
		大雨强	0.969	1.187	0.753	1.695	1.585	2.383	18.09	114.46	99.04	29.06
		小雨强	0.890	1.047	0.780	1.408	1.360	2.065	1.90	98.56	52.47	23.59
	秋	中雨强	0.920	1.104	0.776	1.498	1.471	2.232	4.23	111.00	67.91	25.78
		大雨强	0.944	1.178	0.752	1.550	1.663	2.625	15.67	167.52	145.38	30.59

新疆天山山区降雨的微物理参量普遍偏小的结果一 致四。3个季节中,大雨强降雨的众数直径都最小,这 主要是由于大雨强降雨中含有大量小雨滴,这与南 京地区和东北冷涡天气系统雨滴谱特性分析结果一 致[1-5]。每个季节中虽然大雨强降雨的众数直径最 小,但除夏季平均直径小于中雨强降雨的平均直径 外,其他直径均会大于小雨强降雨和中雨强降雨的 直径,说明大雨强降雨中占有一定比例的大雨滴,这 从大雨强降雨的平均谱宽、含水量和雷达反射率因 子最大也可以看出。小雨强降雨中6种特征直径在 夏季最大,春季最小,秋季介于二者之间;雨滴粒径 一致时,数密度与含水量之间具有正相关,小雨强降 雨的数密度在春季大于秋季,但是秋季小雨强降雨 的含水量大于春季小雨强降雨的含水量,这主要是 由于小雨强降雨时,秋季雨滴直径大于春季雨滴直 径。大雨强降雨的N、W、Z均比南京地区雨滴谱的 计算结果小时,这主要是由于东部地区大气中含水 量远高于新疆地区,并且对流发展也更旺盛,降雨时 会比新疆地区数浓度更大、尺度和谱宽略大。春季



和秋季的含水量高于夏季同一种降雨类型的含水 量,这主要是由于春季和秋季热力抬升强度较夏季 小,需要更多的水汽条件来支撑降水,也有可能是夏 季气温高、绝对饱和湿度大,导致降水含水量小于春 秋季节,这需要下一步工作继续研究。春季降雨各微 物理参量最小,I、N、W、Z在大雨强降雨中较大,小 雨强降雨中较小, 雷达反射率因子在三类降雨类型 中比较接近,因为Z与雨滴数密度和雨滴大小有 关, 乌鲁木齐不同季节不同降雨类型中降雨的雨滴 数密度和各类直径的平均值无明显差异,因此对于 乌鲁木齐地区降雨,无法简单用雷达反射率因子来 准确地判断降雨类型。

#### 2.2 各类雨滴对降雨的贡献

不同粒子直径对于各类降雨微物理参量的贡献 不一致,本文将粒子直径分为小雨滴(直径<1 mm)、 中雨滴(直径 1~3 mm)、大雨滴(直径>3 mm),计算 这3类雨滴对降雨微物理参量的贡献。图1、图2、图 3分别表示春季、夏季和秋季各类雨滴对降水的贡 献。



<sup>(</sup>a 为小雨强,b 为中雨强,c 为大雨强)



无论哪个季节,在小雨强降雨中小雨滴所占的 比重均最大,对雨滴数密度的贡献最大,接近80%, 大雨滴占比非常少,雨滴数密度几乎不受大雨滴的 影响,中雨滴对雨滴数密度的贡献介于二者之间,这 与天山山区雨滴谱研究结果一致四。对于每个季节, 小雨滴对雨强和雷达反射率因子的贡献都非常小, 小雨强降雨中,雨强主要由中雨滴贡献,大雨强降雨 中,大雨滴是雨强贡献的主要来源,最大为74%,中 雨强降雨的雨强由中雨滴和大雨滴共同作用。含水 量和雷达反射率因子主要由中雨滴贡献,中雨滴对 雷达反射率因子的贡献最大,接近96%,但在秋季 大雨强中,虽然大雨滴数密度仅占0.41%,但大雨滴 对Z的贡献却达到86%,这主要是由于Z与粒子直 径的6次方成正比,对雨滴直径具有极大的依赖性, 只要大雨滴略有增加,就会对雷达反射率因子造成 很大的影响,表明雷达反射率因子受雨滴尺寸影响 非常大。总体来看,虽然小雨滴占比很大,但是它对 雨强、含水量和雷达反射率因子的贡献都很小,而大 雨滴虽然占比很小,但它对雨强的贡献却很大,因此 不能忽略大雨滴对雨强的贡献。

2.3 降雨微物理参量随时间的演变特征分析

为进一步了解降雨过程中雨滴谱的变化情况, 本文选取两个典型个例,分析微物理参量随时间的 演变特征,分别是 2012 年 4 月 30 日的中雨强降雨 和 2012 年 6 月 18 日的大雨强降雨。分析的微物 理参量包括降雨强度 *I*、雨滴的总数密度 *N*、含水 量 *W*、雷达反射率因子 *Z*、雨滴的质量加权平均直 径 *D*<sub>m</sub>、雨滴的最大直径即谱宽 *D*<sub>max</sub>。

小雨强降雨总体稳定,各微物理参量变化幅 度较小,无明显异常特征。图4为2012年4月30 日的中雨强降雨微物理参量随时间的演变特征。 11:00前属于小雨强降雨,各微物理参量的变化 幅度比大雨强阶段小,变化趋势基本一致,含水量为10~100 mg·m<sup>-3</sup>,数密度为10~100 个·m<sup>-3</sup>,降雨强度集中在1 mm·h<sup>-1</sup> 附近,反射率因子在20 dBZ 附近波动,幅度较小。11:00—11:50 属于大雨强降雨,各微物理参量变化加大,雨强快速增大,至小雨强阶段迅速减小,中间出现一个明显的峰值,数密度为100~1 000 个·m<sup>-3</sup>,含水量为100~1 000 mg·m<sup>-3</sup>,变化幅度明显增大,雷达反射率因子明显增大,质量加权平均直径在2 mm 附近波动。11:50 后迅速回落至1 mm 附近,整个降雨过程中,谱宽无明显变化,始终在2 mm 附近波动。



图 5 为 2012 年 6 月 18 日大雨强降雨微物理参 量随时间的演变特征。总体来看,各微物理参量变化 幅度比较大,出现多个峰值和谷值,呈现多峰型,体 现了大雨强降雨的不稳定性。含水量和数密度主要 集中在 100~1 000 这个量级范围,这与中雨强降雨 中对流阶段变化趋势一致,反射率因子在 20~40 dBZ 波动,粒子谱宽变化范围为 2~4 mm,在谱宽出现峰 值的同时或之后一段时间,雨强也会出现峰值,大雨 滴对于雨强的贡献很大,因为大雨滴对于含水量的 贡献很小,因此谱宽出现峰值时,含水量无明显变



化。质量加权平均直径比较平稳,集中在 1~2 mm, 这与南京地区降雨微物理特性当 D<sub>m</sub>>2 mm 时,可初 步认为是大雨强降雨的结论不一致<sup>[5]</sup>,这主要是由 于新疆属于干旱半干旱地区,降雨触发机制、强度等 与南京地区有较明显的区别,因此,在今后的研究 中,需要发展适合新疆本地天气特征的降雨类型判 断方法。

# 3 Gamma 分布的雨滴谱特性分析

# 3.1 粒子平均分布谱拟合

图 6 是不同降雨类型在不同季节的 Gamma 拟 合谱。对于小雨强降雨,夏季具有最大的谱宽,雨 滴直径>1 mm,夏季雨滴谱浓度最大,春季雨滴谱 浓度最小.秋季雨滴谱浓度介于二者之间,在雨滴直 径<1 mm 范围,3个季节的拟合谱高度一致,小雨强 降雨具有明显的季节差异。中雨强降雨,直径<3 mm 范 围内3个季节的拟合谱几乎重叠在一起,这是因为 中雨强降雨兼具小雨强和大雨强降雨特性。夏季对 流发展强度较春秋两季旺盛, 使夏季谱宽略大于春 秋两季的谱宽。对于大雨强降雨,秋季的峰值浓度最 大,这主要是由于秋季冷空气南下,常出现大风降温 天气,而大风是导致大雨滴破碎的重要因素。小雨强 降雨和中雨强降雨中同样是秋季的峰值浓度最大, 雨滴直径>1 mm,春秋两季的拟合谱几乎完全一致, 这主要是由于春秋两季对流活动都比较弱,两个季 节对流发展状况较一致。夏季因为对流发展旺盛,雨 滴直径>1 mm, 粒子浓度明显大于春秋两季的粒子 浓度,谱宽也最大。雨滴谱分布的差异主要是由于不 同季节不同降雨类型的背景环境不一致,同时也与 降雨前后以及降雨过程中大气的微物理过程及动力 过程有关,未来需要加强对不同季节不同降雨条件 下降雨微物理过程和动力过程的研究,这样可以对 降雨特征有更深的认识,进一步研究降雨的形成和 演变机制。

表 3 为不同雨强不同季节 Gamma 拟合谱的参数,可见不同季节不同雨强还是有所差异,许多研究 学者发现,Gamma 拟合的 3 个参数之间并不是相互 独立的关系,它们之间具有较好的相关关系<sup>[15-16]</sup>,通 过研究 3 个参数之间的关系,可以将 3 个参数的 Gamma 分布拟合函数转化为双参数,这对于提升雨 滴谱拟合的精度具有重要的意义。

表3 不同雨强不同季节拟合谱的3个 拟合参数的数值

季节	降雨类型	$N_0/(\times 10^4)$	$\Lambda$	$\mu$
	小雨强	6.85	6.63	4.20
春	中雨强	5.11	5.51	3.56
	大雨强	2.09	4.58	2.83
	小雨强	3.69	5.54	3.97
夏	中雨强	3.00	5.16	3.63
	大雨强	1.87	4.19	2.64
	小雨强	5.79	6.09	4.19
秋	中雨强	4.71	5.51	3.69
	大雨强	3.44	4.81	3.02

# **3.2** Gamma 拟合参数 Λ-μ 关系

Zhang 等<sup>[17]</sup>发现 Λ-μ 关系在不同地理位置和气候区域中具有较大的差异,因此需要基于实际雨滴 谱拟合出适合本地区各个季节各类降雨的 Λ-μ 关系。

图 7 是 3 个季节大雨强降雨的 Λ-μ 关系曲线, 无论哪个季节,Λ 和 μ 之间都具有较好的二项式关



系,春季大雨强降雨可以描述为µ=-0.042 7A<sup>2</sup>+ 0.884 4A-0.244 2; 夏季大雨强降雨可以描述为 μ=-0.059 6A<sup>2</sup>+1.007A-0.367 1; 秋季大雨强降雨可 以描述为 µ=-0.106 8A<sup>2</sup>+1.53A-1.452。Ulbrich<sup>[15]</sup>研究 发现, $\Lambda$ - $\mu$ 关系也可以定义为 $\Lambda D_m$ =4+ $\mu$ ,式中 $D_m$ 表 示雨滴的质量加权平均直径,说明粒径大小也会对  $\Lambda - \mu$  关系产生影响,  $\Lambda$  保持不变时,  $\mu$  与粒子尺寸为 正相关,因为本文中A的值主要集中在2~6,因此根 据拟合结果同样可以得到大雨强降雨中春季雨滴尺 寸最小的结论。 $\Lambda$  不变的情况下,秋季大雨强降雨的  $\mu$  值大于夏季大雨强降雨的 $\mu$ 值,即秋季大雨强降 雨的  $D_m$  大于夏季大雨强降雨的  $D_m$  (图 7),这个结 论从表 1 中也可以得到。以上分析表明,由于  $\Lambda$ - $\mu$ 关系会受到粒子尺寸的影响,而每个季节的粒子尺 寸有较大差异,因此,有必要对不同季节的雨滴谱参 数、雨滴拟合谱、Λ-μ关系等参量进行分析。



#### 4 Z-I 关系分析

目前, 雷达反射率因子 Z 与降雨强度 I 之间的 关系式 Z=al<sup>b</sup> 被广泛应用于雷达定量估测降雨中, 国内外许多学者对于 Z-I 关系进行了大量研究,发 现其在不同地区、不同大气背景以及不同降雨类型 中具有很大的差异[18-19],表4给出了不同季节不同 降雨类型 Z-I关系的系数,系数 a 和 b 均小于目前 常用的 Z=300114 关系式中的 a和 b 值,因此,利用 Z=300114关系对乌鲁木齐地区降雨进行定量估测研 究时,会造成对降雨强度的高估,回波强度越大,高 估越严重。大雨强降雨无法拟合出相关系数比较高 的 Z-I 关系,这与乌鲁木齐对流性降雨具有强度 大、时间短、随时间变化迅速的特点有关。对新疆 伊犁河谷一次短时强降水的雨滴谱特征进行分析[20], 也无法得出相关性较好的 Z-I 关系, 说明现阶段我 国业务天气雷达内置的 Z-I 关系 Z=300I<sup>14</sup> 不适用于 乌鲁木齐地区对流性降雨。后期对于对流性降雨,可 以利用双偏振雷达参量中的差分传播相位常数 K<sub>DP</sub>, 差分发射率因子 Z<sub>DR</sub>,水平偏振的雷达反射率因子 Z<sub>H</sub>,采用 Z-K<sub>DP</sub> 法、Z-Z<sub>DR</sub>,Z<sub>H</sub> 法和 Z-Z<sub>DR</sub>,K<sub>DP</sub> 法进行 降雨估测。

表4 不同季节不同降雨类型的 Z-I 关系

季节	降雨类型	a	b	$R^2$
	小雨强	249.1	1.06	0.81
春	中雨强	211.1	1.14	0.89
	大雨强	_	_	—
	小雨强	204.8	1.05	0.81
夏	中雨强	—	—	—
	大雨强			
	小雨强	219.5	1.05	0.80
秋	中雨强	221.6	1.08	0.84
	大雨强			

### 5 结果与讨论

利用 2012—2013 年春、夏、秋季乌鲁木齐的雨 滴谱仪观测资料,分析了不同季节、不同降雨类型 的微物理参量特征及其随时间的演变特点、不同尺 寸的雨滴对各种微物理参量的贡献、粒子拟合分布 谱<sup>[21]</sup>、Λ-μ关系和 Z-I关系,得到以下主要结论:

(1)乌鲁木齐地区降雨的微物理参量平均值普 遍偏小,以小粒子为主,具有本地特征,小雨强降雨 的微物理参量变化最小,大雨强降雨的微物理参量 变化最大,中雨强降雨介于二者之间。雨滴数密度主 要来自于小雨滴的贡献,几乎不受大雨滴的影响。虽 然小雨滴占比很大,但是它对雨强、含水量和雷达反 射率因子的贡献都很小,而大雨滴虽然占比很小,但 它对雨强的贡献却很大,因此不能忽略大雨滴对降 雨微物理参量的贡献。

(2)Gamma 分布函数可以较好地拟合雨滴分 布谱,大雨强降雨的谱宽最大,小雨强降雨的谱宽最 小,中雨强降雨的谱宽介于二者之间。在季节变化 上,夏季谱宽最大,秋季次之,春季最小,秋季峰值浓 度最大,春季峰值浓度最小,夏季介于二者之间。每 个季节对流性降雨的 *A-* 关系可用二项式表示,*A*µ关系与粒子尺度有关,因为每个季节的粒子尺寸 有较大的差异,因此有必要对不同季节的雨滴谱参 数、雨滴拟合谱、*A-* 关系等参量进行分析。

(3)利用天气雷达内置的 Z-I 关系 Z=300I<sup>1.4</sup> 对 乌鲁木齐地区进行降雨定量估测时会造成对降雨强 度的高估。由于乌鲁木齐大雨强降雨具有强度大、时 间短、随时间变化迅速的特点,本文尚无法拟合出夏季大雨强降雨相关系数比较高的 Z-I 关系。

本文利用 2012—2013 年的资料对乌鲁木齐地 区降雨微物理参量和 Z-I关系等进行了分析,对乌 鲁木齐地区不同季节的降雨特性有了一定的了解。 但本文仅对降雨的微物理特征进行分析,后期可对 造成不同季节、不同降雨类型之间特性差异的微物 理过程进行深入研究。同时,可以利用双偏振雷达和 二维视频雨滴谱仪对降雨的微物理过程进行更加全 面而深入的研究。

# 参考文献:

- 宫福久,刘吉成,李子华.三类降雨云雨滴谱特性研究[J]. 大气科学,1997,21(5):607-614.
- [2] 牛生杰,安夏兰,桑建人.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,2002,21(1): 37-44.
- [3] CHEN B J, HU Z Q, LIU L P.Raindrop size distribution measurements at 4,500 m on the Tibetan Plateau during TIPEX-III [J].Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2007, 122(20):11092-11106
- [4] WEN L,ZHAO K, WANG M Y, et al.Seasonal variations of observed raindrop size distribution in East China [J]. Adv Atmos Sci, 2019, 36(4): 346-362.
- [5] 黄兴有,印佳楠,马雷,等.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, 2019,43(3):691-704.
- [6] 张扬,刘黎平,何建新,等.雨滴谱仪网数据在雷达定量降 水估测中的应用[J].暴雨灾害,2016,35(2):173-181.
- [7] 李艳伟,杜秉玉,周晓兰.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,2003,26(4):465-472.
- [8] 冯婉悦,赵城城,杨莲梅,等.乌鲁木齐地区两种类型降水的雨滴谱特征[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(3):55-61.
- [9] TOKAY A, BASHOR P G.An experimental study of smallscale variability of raindrop size distribution [J].J Appl Meteor Climatol, 2010, 49(11):2348–2365.

- [10] BATTAGLIA A, RUSTEMEIER E, TOKAY A, et al. PARSIVEL snow observations: A critical assessment [J].J. Atmos.Oceanic Technol, 2010, 27(2):333-344.
- [11] ATLAS D, SRIVASTAVA R C, SEKHON R.Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. Rev Geophys, 1973, 11(1):1–35.
- [12] 杨长业,舒小健,高太长,等.基于雨强分级的夏季降雨 微物理特性分析[J].气象科技,2016,44(2):238-245.
- [13] CHEN B, YANG J, PU J P.Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in Eastern China [J].Journal of the Meteorological Society of Japan, 2013, 91(2):215-227.
- [14] 陈宝君,李子华,刘吉成.三类降雨云雨滴谱分布模式[J].气象学报,1988,56(4):506-512.
- [15] ULBRICH C W. Nature variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J].J Climate Appl Meteor, 1983, 22(10): 1764–1775.
- [16] ZHANG G F, VIVEKANANDAN J, BRANDES E A, et al. The shape-slope relation in observed Gamma raindrop size distributions: Statistical error or useful information [J].J Atmos Oceanic Technol, 2001, 20(8):1106–1119.
- [17] ZHANG G F, Vivekanandan J, Brandes E A, et al.A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2003, 39(4):830–841.
- [18] NZEUKOU A, SAUVAGEOT H, DELFINOCHOU A, et al. Raindrop size distribution and radar parameters at Cape Verde[J].Appl Meteor, 2007,43(1):90–105.
- [19] ROSENFELD D G, ULBRICH C W.Cloud microphysical properties, process, and rainfall estimation opportunities
   [J].Meteorol Monogr, 2003, 32(52):237–258.
- [20] 江新安,王敏仲.伊犁河谷汛期一次短时强降雨雨滴谱 特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2015,9(5):56-61.
- [21] 张洪胜,何宏让,张云,等.南京地区降水雨滴谱拟合模型的参数特征分析 [J]. 气象与环境科学,2017,40(3): 71-78.

# Microphysical Characteristics of Raindrop Size Distribution Based on Rain Intensity in Urumqi

YANG Tao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Zuyi<sup>1,2,3</sup>, YANG Lianmei<sup>1,2,3</sup>

(1.Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;2.Xinjiang Cloud Precipitation Physics and Cloud Water Resources Development Laboratory,

Urumqi 830002, China;

3 Field Scientific Observation Base of Cloud Precipitation Physics in West Tianshan Mountains, Urumqi 830002, China)

Abstract Based on the measurements from PARSIVAL laser raindrop spectrometer in Urumqi from 2012 to 2013, the microphysical characteristic parameters of raindrop size distribution based on different rain intensity in spring, summer and autumn, and their evolution characteristics with time, Gamma function fitting and relationship are studied in this paper. It shows that: (1) The precipitation in Urumqi is dominated by small particles, and the six characteristics diameters of heavy rainfall are the largest, followed by moderate rainfall, and the light rainfall is the smallest. Raindrop number density mainly comes from small raindrops (diameter <1 mm), large raindrops (diameter > 3 mm) are the main contributors to rain intensity, while medium raindrops (diameter 1~3 mm) are the main contributors to water content and radar reflectivity factor, and radar reflectivity factor is greatly affected by raindrop size. (2)The microphysical parameters of light rainfall are relatively stable with little change, while heavy rainfall varies dramatically with multi-peak pattern, and moderate rainfall is between the both. The spectral width and peak concentration of heavy rainfall are the largest, while that of light rainfall is the smallest, and that of moderate rainfall is between them. The fitting spectrum of light rainfall has obvious seasonal differences. The peak concentration in autumn is the largest, which is related to the windy weather in autumn.(3) The Gamma fitting parameter relationship  $\Lambda - \mu$  is related to the particle size and can be described by a binomial equation. The fitted Z-I relationship coefficient is smaller than the commonly used  $Z=300I^{1.4}$  relationship. Therefore, the use of the  $Z=300I^{1.4}$  relationship in quantitative estimation of rainfall in Urumqi will lead to an overestimation of rainfall intensity. The greater the echo intensity is, the more obvious the overestimation would be. The heavy rainfall during summertime cannot fit the relationship well due to the characteristics of heavy rainfall in Urumqi, which is high intensity, short time and rapid change with time.

Key words Urumqi; raindrop size distribution; microphysical parameters; Gamma distribution