

吴亚昊. 长沙一次强降水过程的雨滴谱特征分析[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(3): 77–83.

WU Yahao. Analysis on raindrop spectrum characteristics of a heavy rainfall process in Changsha[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(3): 77–83.

# 长沙一次强降水过程的雨滴谱特征分析

吴亚昊

(湖南省气象台, 长沙 410118)

**摘要:** 分析 2015 年 6 月 21 日湖南长沙一次强降水过程的雨滴谱微物理参数特征及其随雨强的变化。结果表明, 本次强降水过程主要受到高空低槽、中低层低涡切变和地面冷空气共同影响, 雷达反射率因子和雨强随时间的变化基本一致, 粒子数浓度与雨强、雷达回波强度与加权平均直径的时间序列之间均是高度正相关。当  $R \geq 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 标准化截距参数随雨强增大而显著增长但形状因子值整体上是变小的, 不同雨强间隔中的多峰谱比例进一步提升,  $\lg N_w$  和  $D_m$  的分布趋于集中且其值增大,  $\lg N_w - R$  的幂指数关系拟合的相关性较差。各类平均谱基本是单峰谱, 随着雨强增大, 峰值直径略变大, 谱宽逐渐增大, 各尺度档粒子浓度值显著增加。适用本次降水的  $Z-R$  关系是  $Z = 26.67R^{1.88}$ , 尤其当雨强迅速增加时, 它更能反映真实降雨分布。

**关键词:** 雨滴谱; 标准化 Gamma 分布;  $\lg N_w - D_m$ ;  $Z-R$  关系

**中图分类号:** P426.6

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.3.14

雨滴谱是单位体积中的雨滴大小分布。掌握雨滴谱分布特征对于把握降水特性、优化云微物理参数化方案和提高雷达定量估测降水精度等都有重要作用<sup>[1]</sup>。早期测量方法包括滤纸色斑法、动力学法、面粉球法、快速摄影法和浸润法等, 从 20 世纪 90 年代开始, 人们逐步开展利用光电、声电等降水粒子谱仪来测量雨滴大小和数目的研究, 大大提高了雨滴谱观测工作的效率<sup>[2]</sup>。

不同降水类型的雨滴谱分布随大气条件和局地地形条件等发生变化<sup>[3]</sup>, 濮江平等<sup>[4]</sup>认为暴雨过程中小雨滴占多数而大雨滴数量随雨强增大而增多; 江新安等<sup>[5]</sup>利用常规地面、高空、雷达以及雨滴谱数据分析伊犁一次短时强降水过程的雨滴谱特征, 发现此次过程雨滴数浓度大、雨滴谱宽且分布差异大; 周黎明等<sup>[6]</sup>对于不同天气系统影响形成暴雨过程的微物理特征进行研究, 发现气旋暴雨中的雨滴数浓度、雨强、最大直径等参量明显低于低槽冷锋和切变线暴雨; 王俊等<sup>[7]</sup>在分析山东短时强降水和冰雹云降水个例雨滴谱特征时, 指出短时强降水的对流降水雨滴谱谱型包括单峰谱、双峰谱和多峰谱, 认为暖云

中雨滴碰并、碰撞–破碎的维持对于短时强降水中形成较多平衡谱有重要影响; 韦靖等<sup>[8]</sup>在分析桂北地区“龙舟水”极端强降雨过程时, 发现雨强与雨滴直径、雨滴数浓度有良好对应关系。

Marshall 等<sup>[9]</sup>认为雨滴谱用指数分布描述粒径随直径的变化较好, Ulbrich<sup>[10]</sup>提出三参数的 Gamma 雨滴谱分布能更好的反映真实降水过程中各直径雨滴的演变特征。不同地区和气候条件下基于雨滴谱观测数据拟合的 Gamma 分布参数随雨强变化较大, 使用能自动连续观测且精度高的激光降水粒子谱仪代替地面雨量计确定关系, 可在一定程度改善局部地区定量降水估测的精度。

长沙地处湘江下游和长浏盆地西缘, 属洞庭湖平原的南端向湘中丘陵盆地过渡的地带, 因其特殊的地理位置, 使得其除受到西风带系统影响外, 还常受到台风和东风波等系统的影响, 每年的 4—6 月, 冷暖空气频繁交汇, 极易形成强降水天气。暴雨常造成洪涝, 给人民群众生命财产和国民经济等带来巨大损失<sup>[11]</sup>。学者多从宏观角度研究湖南暴雨的天气系统配置、环境特征、时空分布或触发机制<sup>[12–14]</sup>,

收稿日期: 2023-05-07

基金项目: 国家自然科学基金气象联合基金项目(U2242201)、湖南省科技厅重点研发项目(2019SK2161)、湖南省气象局创新发展专项(2023-ZDZX05)

作者简介: 吴亚昊(1989—), 女, 工程师, 主要从事灾害性天气预报预警工作。E-mail: 2845024549@qq.com

很少从微观角度分析长沙地区强降水的微物理特征。本文利用安装在湖南省气象局的激光降水粒子谱仪,分析发生在2015年6月21日的一次暴雨过程,从谱分布、标准化 Gamma 分布参数和  $Z-R$  关系等方面进行讨论,以期得到长沙暴雨的部分雨滴谱参数特征,进一步为湖南暴雨预报预警工作提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 设备简介

雨滴谱仪安装在湖南省气象预警中心办公楼顶,设备是由德国 OTT 公司与北京华创风云有限公司基于现代激光技术光学遥测原理联合开发的 HSC-OTT Parsivel 降水粒子谱仪,主要由激光发射器和接收器两部分组成,可以同时测量降水粒子的尺寸和下落末速度,它将降水粒子按照等效体积直径和下落末速度各划分为 32 个等级,考虑到仪器信噪比等原因,不使用前两个直径通道的数据<sup>[15]</sup>,故粒径和落速的有效测量范围分别为 0.2~25 mm 和 0.2~20 m·s<sup>-1</sup>,取样面积为 180 mm×30 mm,采样周期为 1min,最小雨强分辨率为 0.001 mm·h<sup>-1</sup>。罗林艳等<sup>[16]</sup>将湖南省激光雨滴谱仪观测数据与省内 12 个地面气象观测站累积降水量进行对比,得到雨滴谱仪累积降水量和翻斗式雨量计累积降水量变化趋势基本一致的结论,验证了仪器测量滴谱数据的可靠性。

### 1.2 数据质量控制

王鹏飞和李子华等<sup>[17]</sup>认为一般情况下,直径超过 6 mm 的雨滴早已在下落过程中破碎,剔除雨滴直径大于 6 mm 的观测数据;另外,剔除当前时刻仪器采集到的粒子总数小于 10 且降雨强度小于 0.1 mm·h<sup>-1</sup> 的样本,将之视为非降水数据<sup>[18]</sup>。

### 1.3 计算方法

利用雨滴谱仪观测资料,计算可得雨滴尺度谱:

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{V_j \times T \times S \times \Delta D_i} \quad (1)$$

$N(D_i)$  是指第  $i$  个直径通道  $D_i$  至  $D_i + \Delta D_i$  的雨滴数浓度,单位是 mm<sup>-1</sup>·m<sup>-3</sup>;  $n_{ij}$  为第  $i$  个直径通道、第  $j$  个速度通道的雨滴数;  $V_j$  为第  $i$  个直径通道、第  $j$  个速度通道对应的雨滴下落末速度,单位是 m·s<sup>-1</sup>;  $\Delta D_i$  为第  $i$  个直径通道的宽度,单位是 mm;  $T$  和  $S$  分别代表雨滴谱采样周期 60 s 和取样面积 54 cm<sup>2</sup>,代入上式中进行计算时均需换算成国际单位。 $D_{aver}$  表示当前时刻雨滴的平均直径,单位是 mm。

在获得雨滴尺度谱的基础上,进一步计算可得

粒子总数浓度  $N_s$ 、雷达反射率因子  $Z$  和降水强度  $R$ , 单位分别是 mm<sup>-1</sup>·m<sup>-3</sup>、mm<sup>6</sup>·m<sup>-3</sup> 和 mm·h<sup>-1</sup>;  $M(D_i)$  和  $V(D_i)$  分别表示第  $i$  个直径通道对应的雨滴质量及其雨滴下落末速度,它们的单位分别是 g 和 m·s<sup>-1</sup>。

$$N_s = \sum_{i=1}^{32} N(D_i) \quad (2)$$

$$Z = \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^6 \Delta D_i \quad (3)$$

$$R = \sum_{i=1}^{32} N(D_i) \times M(D_i) \times V(D_i) \Delta D_i \quad (4)$$

研究表明雨滴谱分布使用 Gamma 函数拟合误差较小,本文采用 Gamma 分布对雨滴谱进行拟合,其表达式可以写为:

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

上式中截距参数  $N_0$  和斜率参数  $\lambda$  的单位分别是 mm<sup>-1-μ</sup>·m<sup>-3</sup>、mm<sup>-1</sup>; 形状因子  $\mu$  是无量纲参数,  $\mu > 0$  代表曲线上凹,  $\mu < 0$  表示曲线下凹,当  $\mu = 0$  时三参数的 Gamma 分布变为 M-P 分布。

采用阶矩法计算 Gamma 分布的特征参数,定义  $i$  阶矩为:

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

由于截距参数  $N_0$  的单位需要依赖  $\mu$ , 不具有独立物理意义,采用标准化 Gamma 分布拟合雨滴谱,计算公式如下:

$$N(D) = N_w f(\mu) \left( \frac{D}{D_m} \right)^\mu \exp \left[ -(\mu + 4) \frac{D}{D_m} \right] \quad (7)$$

其中  $N_w$  的单位为 mm<sup>-1</sup>·m<sup>-3</sup>, 能反映雨滴数浓度且与降水类型有关。当液态水含量相同时, Gamma 分布可以用截距参数  $N_w$ 、加权平均直径  $D_m$  和形状因子  $\mu$  进行描述。使用中间矩量计算 Gamma 分布谱参数效果较好<sup>[19]</sup>, 本文采用第 3、4、6 阶矩量计算  $N_w$ 、 $D_m$  和  $\mu$ , 其中  $G$  为中间参数。雨强划分方面, 参考 Porcu 等<sup>[20]</sup>的方法, 将雨强  $R$  划分为  $0.1 \leq R < 1$ 、 $1 \leq R < 2$ 、 $2 \leq R < 5$ 、 $5 \leq R < 10$ 、 $10 \leq R < 20$  和  $R \geq 20$  六个范围。

$$N_w = \frac{256}{6} \times \frac{M_3^5}{M_4^4} \quad (8)$$

$$D_m = \frac{M_4}{M_3} \quad (9)$$

$$G = \frac{M_4^3}{M_3^2 M_6} \quad (10)$$

$$\mu=\frac{11G-8+\sqrt{G(G+8)}}{2(1-G)}\tag{11}$$

2 结果与分析

2.1 过程概况

分析 MICAPS 数据发现，本次强降水过程主要受到高空低槽、中低层低涡切变和地面弱冷空气共同影响。长沙位于高能量区，对流层低层水汽通道的建立和由南海热带低值系统外围气流提供的水汽大量集中输送为对流发展提供不稳定条件和水汽条件；区域对流层低层为正涡度、中高层为负涡度，极强的垂直上升运动为对流发展提供良好的动力条件。从过程雷达回波演变来看，过程回波以积层混合云降水回波为主，没有形成极端暴雨，但水汽条件、动力条件和能量条件相对充足，故降雨持续时间长。本文选择的时间段是 2015 年 6 月 21 日 09:24—22:53，图 1 展示了基于雨滴谱分钟级观测数据，计算得到此过程中雨滴谱特征参数的时序分布情况。如图 1a 所示，雷达反射率因子和降水强度随时间的变化基本一致，两者之间的相关系数为 0.87；另外，粒子数浓度的时序分布（图 1b）与雨强随时间的变化基本一致，两者之间的相关系数高达 0.92。

2.2 雨滴谱特征分析

2.2.1 特征参数随雨强的变化

本次降水过程共收集到 645 个(min)有效的雨滴谱样本，参考 Porcua 等<sup>[20]</sup>的方法把它们按照雨强进行分类，表 1 给出了不同雨强下的样本数、雷达回波强度、降雨强度、标准化截距参数、加权平均直径和形状因子的平均值统计情况。由表 1 可知样本中

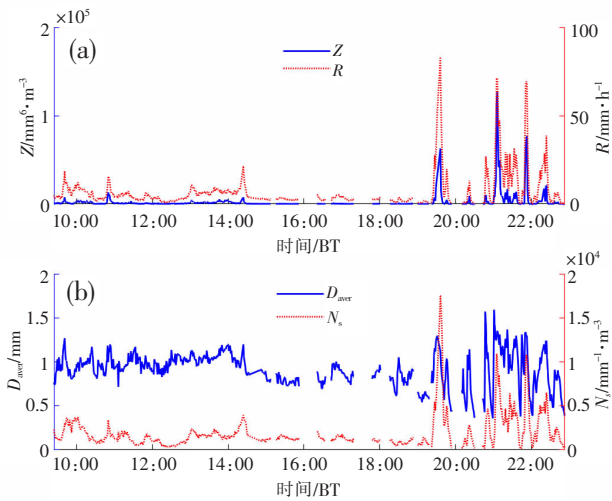


图 1 2015 年 6 月 21 日 09:24—22:53 雨滴谱特征参数的时序分布图  
(a) 雷达反射率因子(单位: mm<sup>6</sup> · m<sup>-3</sup>)和降水强度(单位: mm · h<sup>-1</sup>)随时间的变化; (b) 平均直径(单位: mm)和粒子总数浓度(单位: mm<sup>-1</sup> · m<sup>-3</sup>)随时间的变化

$2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 5\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $5\text{mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq R < 10\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的个数分别占比 39.53%和 25.74%，是本次降水过程的雨强主要分布范围；雷达回波强度和加权平均直径与雨强的变化呈现正相关性；雨强较小时，标准化截距参数的值仅有微弱波动，当  $R \geq 5\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  时，标准化截距参数的值随雨强增大是显著增长的；而当雨强增大时，形状因子的值在整体上逐渐变小，粒子的活跃程度和谱宽与雨强变化成正比。本次降水过程雨滴谱特征量  $\lg N_w$  和  $D_m$  平均值分别为 3.62 和 1.29，Wen 等<sup>[21]</sup>使用雨滴谱仪探测南京地区梅汛期降水  $\lg N_w$  和  $D_m$  的平均值分别为 4.09 和 1.55。

表 1 雨滴谱特征参数随雨强的变化

$R/\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	样本数 /个	平均值				
		$Z/\text{dBZ}$	$R/\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	$N_w/\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$	$D_m/\text{mm}$	$\mu$
整体分布	645	26.76	7.14	4195.78	1.29	9.14
$0.1 \leq R < 1$	53	14.09	0.58	3310.44	0.73	24.53
$1 \leq R < 2$	72	22.09	1.52	3186.73	1.07	11.99
$2 \leq R < 5$	255	25.85	3.19	3299.13	1.19	8.53
$5 \leq R < 10$	166	32.18	6.94	3971.62	1.45	6.10
$10 \leq R < 20$	55	36.37	14.04	6677.99	1.55	7.20
$R \geq 20$	44	44.28	37.54	9602.25	1.81	6.38

为进一步分析  $\lg N_w$  与  $D_m$  和雨强的相关性，绘制  $\lg N_w-R$  和  $D_m-R$  分布及其基于最小二乘拟合的幂指数曲线，分别如图 2a 和图 2b 所示，可知  $\lg N_w-R$

和  $D_m-R$  的拟合指数均为正值，表示  $D_m$  和  $\lg N_w$  的值均随雨强增大而增大，这可能是由于强降水发生时，雨滴粒子碰撞和破碎机制相对有效所致；当雨强较

小时,lgN<sub>w</sub>和D<sub>m</sub>的数据比较分散,lgN<sub>w</sub>的分布范围大于D<sub>m</sub>的变化范围,lgN<sub>w</sub>的散点分布范围随雨强增大而减小;D<sub>m</sub>=0.97R<sup>0.19</sup>,二者拟合的相关系数是

0.55;lgN<sub>w</sub>=3.33R<sup>0.04</sup>但两者拟合的相关系数仅为0.23,lgN<sub>w</sub>-R的幂指数关系拟合的相关性较差,与Testud等<sup>[23]</sup>的研究结论一致。

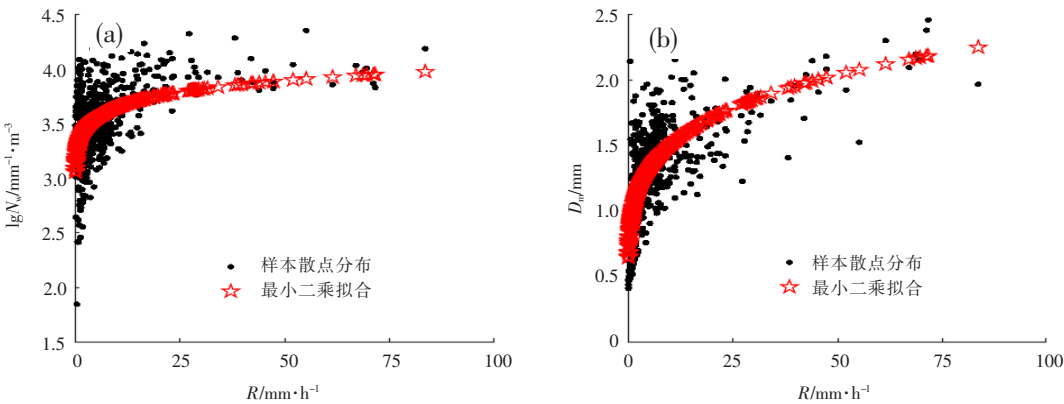


图2 样本散点分布(黑色圆点)及其拟合分布(红色五角星)  
(a)lgN<sub>w</sub>-R;(b)D<sub>m</sub>-R

按照降水过程中粒子数浓度随直径变化的浓度极大值,可将雨滴谱谱型分为无峰型、单峰型、双峰型和多峰型,可在一定程度上反映降水粒子的活跃性。降水过程中不同雨强间隔中的雨滴谱型分布如表2所示,发现0.1≤R<1时,谱型以单峰型(73.58%)为主,双峰型(20.75%)次之,有少量无峰型

(3.77%)存在,多峰型仅占1.9%;当1≤R<10时,雨滴谱以双峰型为主,多峰型次之,没有无峰谱分布;R≥10时的样本以多峰谱为主,双峰谱和单峰谱次之,没有无峰谱分布且各档雨强间隔中的多峰谱占比伴随雨强增大是进一步增大的。

表2 2015年6月21日09:24-22:53不同雨强间隔中雨滴谱谱型分布

R/mm·h <sup>-1</sup>	样本数 (所占比例%)	谱型分布			
		无峰型	单峰型	双峰型	多峰型
0.1≤R<1	53 (8.22)	2 (3.77%)	39 (73.58)	11 (20.75)	1 (1.9)
1≤R<2	72 (11.16)	0	20 (27.78)	30 (41.67)	22 (30.55)
2≤R<5	255 (39.53)	0	47 (18.43)	127 (49.80)	81 (31.77)
5≤R<10	166 (25.74)	0	18 (10.84)	76 (45.78)	72 (43.38)
10≤R<20	55 (8.53)	0	9 (16.36)	21 (38.18)	25 (45.46)
R≥20	44 (6.82)	0	5 (11.36)	13 (29.55)	26 (59.09)

M-P分布是Gamma分布在μ=0时的特例,大量研究表明Gamma分布对于各类降水拟合效果更好<sup>[9-10]</sup>。图3a给出了降水过程中的平均谱分布及特征谱型拟合,由图可知,整体上雨滴数浓度随粒子直径增大而先增大后减小,与M-P分布相比,Gamma分布对于平均谱的拟合效果较好;根据Gamma分布拟合的Ns-D关系式为Ns=26930D<sup>3.44</sup>exp(-4.73D),相关系数达0.97;根据M-P分布拟合的Ns-D关系式为Ns=324.4exp(-0.69D),相关系数为0.65。不同

雨强间隔中的平均谱分布如图3b所示,各类平均谱基本都是单峰谱,伴随雨强增大,其峰值直径略微增大,谱宽值逐渐增大,各尺度档粒子数浓度值显著增加。雨滴谱数浓度在小粒子端迅速提升、在中粒子附近显著凸起、在较大粒子端逐渐抬升,尺度谱随直径变化的斜率减小,这些共同造成雨强增大。

2.2.2 lgN<sub>w</sub>-D<sub>m</sub>分布

为了研究标准化截距参数与加权平均直径之间的关系,图4展示不同雨强条件下的lgN<sub>w</sub>-D<sub>m</sub>分布,



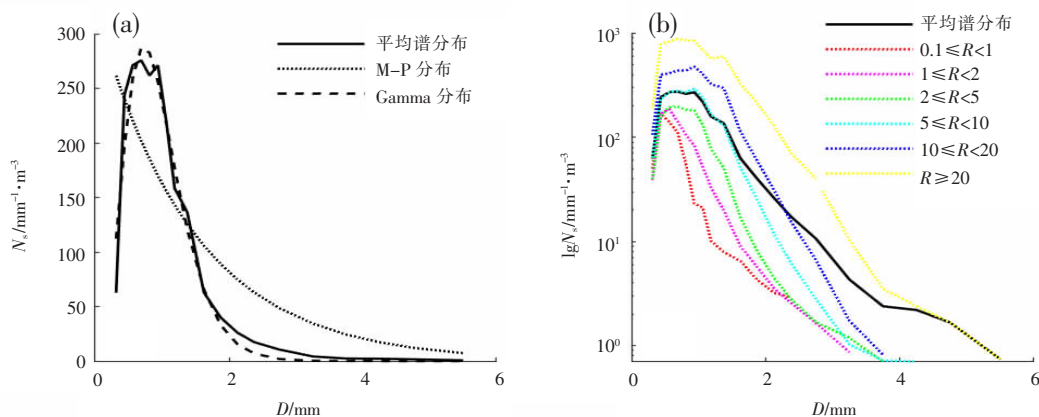


图3 降水过程中(a)平均雨滴谱拟合及(b)不同雨强范围平均谱的变化( $R$ ,单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )

可知不同雨强下的  $\lg N_w-D_m$  线性关系存在显著差异,当雨强相同时  $\lg N_w-D_m$  之间存在显著的负相关关系;中等强度雨强下  $\lg N_w-D_m$  的分布相对集中。

### 2.2.3 Z-R 关系

Z-R 关系是雷达定量估测降水的重要基础,其指数随地区和降水类型等发生变化<sup>[25-26]</sup>,目前雷达系统最常用的 Z-R 关系<sup>[27]</sup>是  $Z=300R^{1.4}$ 。图5给出本次降水过程 Z-R 分布的实际样本散点图,也给出基

于最小二乘原理拟合的  $Z=26.67R^{1.88}$  (相关系数 0.86)和基于  $Z=300R^{1.4}$  拟合的散点分布。根据不同 Z-R 关系反演得到的雨强时序分布如图6所示,对比降水过程中的实际雨强演变,可见在实际业务中使用雷达自带的 QPE 产品时,需要根据降水类型和强度进行 Z-R 关系的订正,才能获得更准确的累计降水产品,尤其是当雨强迅速增加时。

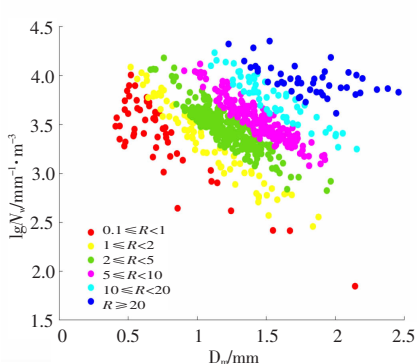


图4 不同雨强条件下的  $\lg N_w-D_m$  分布( $R$ ,单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )

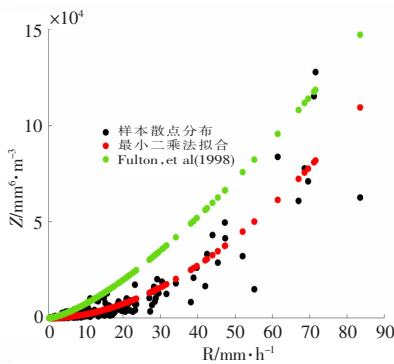


图5 雷达反射率因子和降水强度关系的散点拟合图

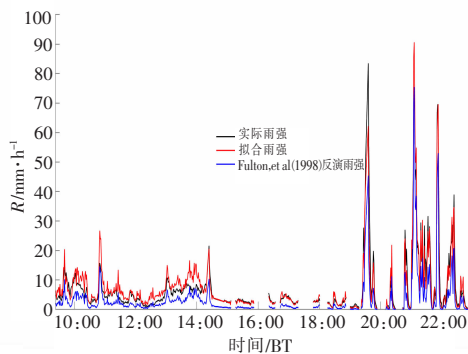


图6 不同 Z-R 关系反演雨强的时间序列图

## 3 结论

分析 2015 年 6 月 21 日发生在湖南长沙的一次强降水过程的雨滴谱资料,得到以下结论:

(1)本次强降水过程主要受到高空低槽、中低层低涡切变和地面弱冷空气共同影响。区域水汽辐合充足、垂直上升运动强烈,以及高低层环流配置,导致降雨持续长。雷达反射率因子和雨强的时间序列基本一致,过程粒子数浓度与雨强演变的相关系数达 0.92。

(2)雷达回波强度和加权平均直径随雨强的变化是正相关的;当  $R \geq 5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  时,标准化截距参数值随雨强增大而显著增长,而形状因子值整体上是变小的;本次降水过程雨滴谱特征量  $\lg N_w$  和  $D_m$  平均值分别为 3.62 和 1.29; $\lg N_w$  和  $D_m$  的值均随雨强增大而增大;雨强较小时, $\lg N_w$  和  $D_m$  的数据相对分散, $\lg N_w$  的变化范围大于  $D_m$  的变化范围, $\lg N_w$  的变化范围随雨强增大而减小; $\lg N_w-R$  的幂指数关系拟合的相关性较差。当雨强相同时  $\lg N_w-D_m$  之间是负相关的,中等强度雨强下的  $\lg N_w-D_m$  分布相对集中。

(3)当  $R < 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  时,雨滴谱以单峰型为之,仅有少量无峰谱;当  $R < 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  时,谱型以双峰型为主,多峰型次之,没有无峰谱;伴随雨强增大,不同雨强范围的多峰谱比例进一步提升。谱型拟合方面,Gamma 分布拟合的相关系数高达 0.97。各类平均谱基本都是单峰谱,随着雨强增大,峰值直径略增加,谱宽逐渐增大,各尺度档粒子数浓度值显著增加。

(4)基于最小二乘原理拟合适用强降雨过程的  $Z-R$  关系是  $Z=26.67R^{1.88}$ ,与经典  $Z-R$  关系相比,尤其是当雨强迅速增加时,更能反映实际降雨分布。

#### 参考文献:

- [1] BRINGI V N, CHANRASEKAR V. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001:211-274.
- [2] 刘红燕,雷恒池.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,2006,30(4):693-702.
- [3] 濮江平,张昊,周晓,等.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,2012,32(3):253-259.
- [4] 周黎明,王庆,李芳.山东不同天气系统下暴雨雨滴谱特征分析[J].自然灾害学报,2017,26(6):217-223.
- [5] 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.
- [6] 王俊,姚展予,侯淑梅,等.一次飑线过程的雨滴谱特征研究[J].气象学报,2016,74(3):450-464.
- [7] 韦靖,汤耀国,毛家桑,等.桂北一次极端强降雨过程宏观物理特征分析[J].气象研究与应用,2023,44(1):81-86.
- [8] MARSHALL J S, PALMER W M K. The distribution of raindrops with size[J]. Journal of The Atmospheric Sciences, 1948, 5(4):165-166.
- [9] ULBRICH C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution[J]. J Climate Appl Meteor, 1983, 22, 1764-1775.
- [10] BRINGI V N, CHANDRASEKAR V, HUBBERT J, et al. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis[J]. J Atmos Sci, 2003, 60(2):354-365.
- [11] 宋伟,李诚.长沙地区暴雨气候特征分析及个例研究[J].现代农业科技,2017(19):188-191,194.
- [12] 周慧,杨令,刘志雄,等.湖南省大暴雨时空分布特征及其分型[J].高原气象,2013,32(5):1425-1431.
- [13] 戴泽军,蔡荣辉,彭莉莉,等.湖南持续性区域暴雨气候特征及暴雨落区分型[J].高原气象,2019,38(3):573-582.
- [14] 兰明才,周莉,蒋帅,等.副热带高压控制下湖南两次短时暴雨发生及系统维持机制对比分析[J].气象科技,2022,50(4):512-525.
- [15] CHEN B J, 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.
- [16] 罗林艳,罗宇,周建君,等.湖南省雨滴谱仪与常规降水观测对比分析[J].中低纬山地气象,2022,46(6):108-114.
- [17] 王鹏飞,李子华.微观云物理学[M].北京:气象出版社,1989:406-408.
- [18] TOKAY A, PETERSEN W A, GATLIN P, et al. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated distributions [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30(8):1672-1690.
- [19] 郑娇恒,陈宝君.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,2007,27(1):17-25.
- [20] PORCÙ F, D'ADDERIO L P, Prodi F, et al. Rain drop size distribution over the Tibetan Plateau[J]. J Atmospheric Research, 2014(150):21-30.
- [21] WEN L, ZHAO K, ZHANG G F, et al. Seasonal variations of observed raindrop size distribution in East China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(4):346-362.
- [22] 张庆池,刘端阳,武艳,等.淮北地区不同类型暴雨雨滴谱特征及其  $Z-R$  关系研究[J].气象学报,2022,80(6):967-985.
- [23] TESTUD J, OURY S, BLACK R A, et al. The concept of "normalized" distribution to describe raindrop spectra: A tool for cloud physics and cloud remote sensing[J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(6):1118-1140.
- [24] 党张利,马思敏.六盘山区夏季一次层状云降水成因及宏观特征分析[J].气象研究与应用,2023,44(2):75-80.
- [25] BATTAN E A, ZHANG G F, VIVEKANANDAN J. An evaluation of a drop distribution-based polarimetric radar rainfall estimator[J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15(10):1120-1121.
- [26] MAKI M, KEENAN T D, SASAKI Y, et al. Characteristics of the raindrop size distribution in tropical continental squall lines observed in Darwin, Australia [J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(8):1392-1412.
- [27] FULTON R A, BREIDENBACH J P, SEO D J, et al. The WSR-88D rainfall algorithm[J]. Weather And Forecasting, 1998, 13(2):377-395.

## Analysis on raindrop spectrum characteristics of a heavy rainfall process in Changsha

WU Yahao

(Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410118, China)

**Abstract:** This article analyzes the characteristics of the raindrop spectral microphysical parameters of a heavy precipitation process in Changsha, Hunan Province, on June 21, 2015, and its variation with rain intensity, showing that this heavy precipitation process is mainly affected by the combination of the upper-air trough, the low-middle-level vorticity shear, and the surface cold air. Changes of radar echo intensity and rainfall intensity with time are basically consistent. The time series of number concentration and rainfall intensity are highly correlated, as well as the time series of radar echo intensity and the weighted average diameter. The standardized intercept parameter increases significantly with the increasing rainfall intensity, while the shape factor decreases on the whole, the multi-peak spectrum proportion in different rainfall intensity intervals further increases, the distributions of  $\lg N_w$  and  $D_m$  tend to be concentrated and their values are increasing, and the fitting correlation of  $\lg N_w - R$  is poor when  $R \geq 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ . The average raindrop spectrum is unimodal. With the increased rain fall intensity, the peak diameter increases slightly, the spectrum width increases gradually and the number concentration of each rainfall scale increases significantly. The  $Z-R$  relationship is  $Z=26.67R^{1.88}$ , which could better reflect the real raindrop spectrum, especially for the rapidly increased rainfall intensity.

**Key words:** Raindrop spectrum; the standardized Gamma distribution;  $\lg N_w - D_m$ ;  $Z-R$  relationship