

文章编号: 2096-1618(2024)05-0597-05

# 长沙地区两次积层混合云降水微物理特征对比与分析

汪玲, 唐林, 李琼, 丁莉

(湖南省人工影响天气中心, 湖南长沙 410118)

**摘要:**选取2019年5月12–13日、2020年5月14–15日湖南长沙夏季两次积层混合云强降水过程进行对比与分析。首先对降水特征分析,将降雨过程划分为层状云阶段和对流云阶段,对雨滴谱及雨滴谱特征参数进行对比与分析,并对不同阶段 $Z-R$ 关系进行拟合计算,结果表明:两次过程不同阶段雨滴谱分布及降水率都不同,层状云降水阶段,降水率小且粒子直径基本不超过3 mm,谱宽较窄;对流云降水阶段,最大瞬时降水率分别高达46.97 mm/h、114.40 mm/h,同时分别观测到5.5 mm、8 mm降水粒子,谱宽较宽;两次过程存在高浓度的小雨滴,其直径主要在1.0 mm左右,降水粒子数在500左右及以下居多,降水粒子数的突然增大会导致短时强降雨出现;对两次过程不同阶段的 $Z-R$ 关系( $Z=AR^b$ )进行估计对比,结果也有差距,同阶段,系数 $A$ 取值变化范围较大, $b$ 取值相近在1~2波动,不同阶段, $A$ 和 $b$ 取值都不一样,但对流云阶段 $A$ 和 $b$ 取值更大。

**关键词:**雨滴谱;  $Z-R$ 关系; 层积混合云

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.05.012

## 0 引言

雨滴谱观测在降水数值天气预报中扮演重要角色,了解雨滴谱特征,对提高数值天气预报(NWP)的可靠性及准确性具有重要作用。几十年来,随着光电雨滴谱仪技术发展,中国开展了很多雨滴谱观测研究<sup>[1–3]</sup>,陈磊等针对安徽、江苏地区的两次梅雨降水过程雨滴谱研究,主雨带和雨带边缘雨滴谱呈现明显差别;卢超等对深圳地区的强降水过程进行分析,发现不同天气系统降水雨滴谱呈现不同的微观特征;吴亚昊等对广东的一次对流性降雨雨滴谱进行分析,指出同一过程不同阶段雨滴谱不一样, $Z-R$ 关系降水估计也不一样。可见,影响雨滴谱变化的因子较多,每个雨滴谱都有其共性与独特性,对于不同天气个例,研究分析雨滴谱对于了解微物理过程有一定帮助。

本文应用雨滴谱仪观测资料,并结合地面雨量计观测资料,选择湖南长沙夏季两次积层混合云强降水过程进行对比与分析,分析其微观物理特征参量及其演变,并将两次降雨过程划分为层状云阶段和对流云阶段,对雨滴谱及雨滴谱特征参数进行对比与分析,并对不同阶段 $Z-R$ 关系进行拟合计算,通过分析该降水过程的微观物理特征,对于了解长沙地区层积混合云降水特征有一定参考意义。

## 1 仪器及资料

选取安装在湖南省气象局院内观测场的 OTT-Parsivel 激光雨滴谱仪 2019 年 5 月 12–13 日、2020 年 5 月 14–15 日降水过程观测资料及翻斗式雨量计观测资料,观测时间分辨率分别为 1 min 和 1 h。OTT-Parsivel 是一种新型的光学雨滴谱仪<sup>[4]</sup>,运用红外激光测量原理,使用一种激光二极管,功率为 3 MW,向水平方向发射薄而宽的红外激光(宽 30 mm、长 180 mm),通过大气后聚集在光电二极管上,当降水粒子下降通过测量区域(采样面积=54 cm<sup>2</sup>)时,光电二极管接收到的激光强度会发生变化,在假设粒子是球形的情况下,从光强度减小的持续时间和减小的幅度估算粒子的速度。将每个雨滴的粒径 32 个粒径档(0.062 ~ 24.5 mm)和 32 下落速度档(0.05 ~ 20.8 ms<sup>-1</sup>),由于在最小的两个尺寸档内的信噪比小,该档位内没有记录粒子,因此最小可检测粒子尺寸约 0.312 mm。OTT-Parsivel 具有稳定的测量性能,精密的防水设计及简便的操作,使之成为在无人职守或维护困难的环境下实现测量的理想选择。

## 2 雨滴谱相关参数计算

计算一定离散时间内单位体积、单位尺寸间隔内的雨滴数浓度  $N(D)$ ,计算公式<sup>[5–6]</sup>为

收稿日期: 2023-05-12

基金项目: 湖南省气象局资助项目(CXFZ2022-QNZX24)

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

式中,  $N(D_i)$  ( $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) 为单位尺度间隔、单位体积内的雨滴个数;  $\Delta t$  为采样时间 (s),  $i$  代表粒径对应的档位;  $j$  代表某一粒径大小和采样时间  $\Delta t$  内的粒子,  $n_{ij}$  是指在第  $i$  粒径档位和采样时间  $\Delta t$  内的粒子个数;  $D_i$  为第  $i$  档的等效雨滴直径 (mm);  $A_j$  为粒子  $j$  经过的有效测量区域的面积 ( $\text{m}^2$ );  $V_j$  为粒子  $j$  的下落末速度 ( $\text{m/s}$ ),  $\Delta D$  粒径分档间隔 (mm);  $n_{ij}$  为直径处于第  $i$  档对应速度为第  $j$  档内的粒子个数。

由雨滴谱仪观测得到雨滴谱数据 (包括雨滴直径、下落速度等) 后, 将  $N(D_i)$  代入以下公式, 可估算出降雨率  $R$  ( $\text{mm/h}$ )、液水含量  $\text{LWC}$  ( $\text{g/m}^3$ )、雷达反射率  $Z$  ( $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ ) 和雨滴总数  $N_t$  ( $\text{m}^{-3}$ ) 等降雨积分参数。计算公式分别为<sup>[7]</sup>:

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^L D_i^3 V_i N(D_i) \Delta D_i \quad (2)$$

$$\text{LWC} = \frac{\pi}{6000} \sum_{i=1}^L D_i^3 N(D_i) \Delta D_i \quad (3)$$

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

$$N_t = \sum_{i=1}^L N(D_i) \Delta D_i \quad (5)$$

$L$  为总的分档数取 32,  $D_i$  为第  $i$  档内的等效直径 (mm),  $V_i$  为第  $i$  个速度档内的粒子下落的平均速度 ( $\text{m/s}$ ),  $\Delta D$  为对应的分档间隔。DSD 的  $n$  阶矩表达式为

$$M_n = \int_0^\infty D^n N(D) dD \quad (6)$$

质量加权平均直径  $D_m$  为 4 阶和 3 阶的比值:

$$D_m = \frac{M_4}{M_3} \quad (7)$$

### 3 降水特征分析

两次降水过程的降雨时长、总降水量较大、范围较广, 且强弱降水交替出现, 最大小时降雨量达到 12 mm (中-大雨)、25 mm (大-暴雨), 都属于夏季较为典型的积层混合云强降水过程。

第 1 个强降雨过程 (下文统称过程 1): 雨滴谱仪和雨量计观测时间段均为 5 月 12 日 10 时至 13 日 17 时 (图 1), 其中, 在 5 月 12 日 16–19 时 (阶段 1)、5 月 12 日 22 时 13 日 01 时 (阶段 2) 及 5 月 13 日 12–13 时 (阶段 3) 的 7 h 平均小时雨量 8 mm 左右, 根据气象标准规范, 小时降水量在 8 ~ 16 mm 为大雨<sup>[8]</sup>, 将以上时段划分为中到大雨的强对流阶段, 其他弱降水为层状云

降水阶段。据观测, 此次降雨持续 31 h, 雨滴谱仪、雨量计观测累积降水 98.88 mm、97.4 mm。

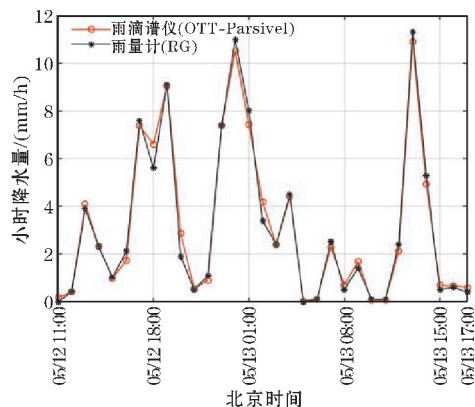


图1 2019年5月12–13日小时降水量

第 2 个强降雨过程 (下文统称过程 2): 雨滴谱仪和雨量计观测时间段为 5 月 14 日 17 时至 15 日 11 时 (图 2), 其中, 在 5 月 14 日 17–18 时 (阶段 1)、5 月 15 日 02–03 时 (阶段 2) 及 5 月 15 日 04–06 时 (阶段 3) 的 4 h 平均小时雨量达到 16 mm, 同上将以上时段划分为中到大雨的强对流阶段, 其他弱降水为层状云降水阶段。据观测, 此次降雨持续 18 h, 雨滴谱仪、雨量计观测累积降水 85.23 mm、77 mm。

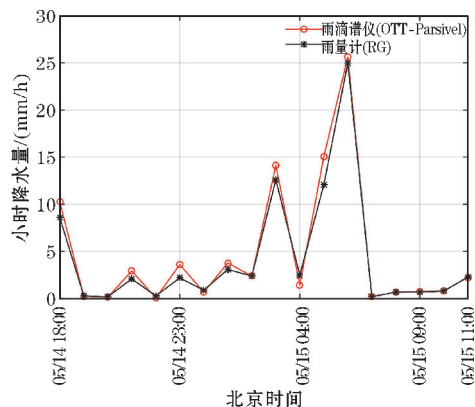


图2 2020年5月14–15日小时降水量

### 4 雨滴谱特征分析

统计两次强降水过程雨滴谱、降水率随时间变化趋势如图 3~4, 2 个过程划分为 6 个对流云阶段和 7 个层状云阶段, 其中对流云阶段的滴谱变化及降水率变化如虚线区域所示, 其他为层状云降水阶段。通过对比分析, 不同阶段降水存在明显的差异: 在层状云降水阶段, 降水率基本在 20 mm/h 内, 绝大多数降水率小于 10 mm/h, 降落至地面的雨滴主要由较低浓度的小粒子构成, 其直径大多不超过 3 mm, 谱宽较窄; 进入对流云降水阶段, 小粒子浓度明显增加, 尤其是 1 mm 左

右的粒子数浓度增加非常明显,且从地面雨滴谱仪观测到在过程 1 的 12 日 19:00 左右出现了最大瞬时降水率 $46.97\text{ mm/h}$ ,同时在该时刻出现粒子直径较大值接近 $5.5\text{ mm}$ ,在过程 2 的 15 日 5:00 左右出现最大瞬时降水率 $114.40\text{ mm/h}$ ,同时在该时刻出现粒子直径较大值接近 $8.0\text{ mm}$ ,表现出谱宽较大的特征,在这也属于强对流云降水谱宽的典型特征。

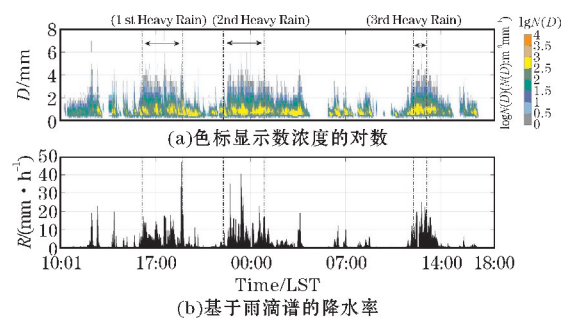


图3 2019年5月12日10:00至5月13日18:00雨滴谱仪观测数据计算的雨滴谱分布及随时间变化的降水率(虚线区域为对流云降水阶段,其余为层状云降水阶段)

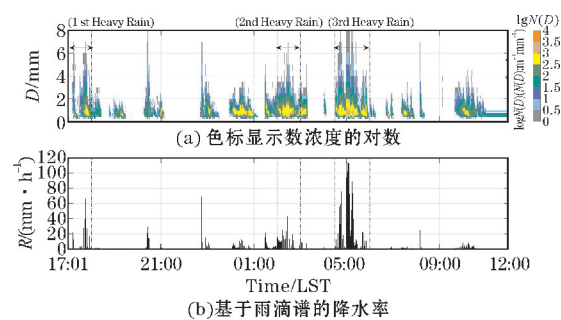


图4 2020年5月14日17:00至5月15日12:00雨滴谱仪观测数据计算的雨滴谱分布及随时间变化的降水率(虚线区域为对流云降水阶段,其余为层状云降水阶段)

根据雨滴谱仪数据,在两次强降水过程中,存在高浓度的小雨滴,其直径主要在 $1.0\text{ mm}$ 左右,反射率强度在 $0\sim 60\text{ dBZ}$ ,平均反射率为中等强度( $25\sim 30\text{ dBZ}$ ),由图 5~6 知反射率大小与质量加权平均直径明显正相关;雨滴总数与反射率基本成正相关,但是在过程 1 的 13 日 15~17 时出现负相关,是因为雨滴浓度虽然小,但在这阶段出现雨滴直径比较大,大雨滴对反射率贡献值较大,导致反射率较大,而在过程 2 的 15 日 5 时左右雨滴浓度出现极大值,雨滴直径微微增大,相比雨滴数对反射率贡献值更大,导致反射率、降水率都出现了极大值;液水含量与降雨率正相关性较好,在雨强较大的对流降水中通常超过 $0.5\text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;过程 1 的分钟降雨率大值少且连续时间短,没形成暴雨,而过程 2 的最大分钟降雨率达到 $114.40\text{ mm/h}$ ,分钟降雨率在 15 日 5 时内连续 10 次出现大于 $70\text{ mm/h}$ 的强降雨,造成

过程 2 最强降雨出现;在两次降水过程中,降水粒子数在 500 左右及以下居多,中值质量加权平均直径过程 2( $1.39\text{ mm}$ )大于过程 1( $1.17\text{ mm}$ ),但是在过程 2 的强降雨阶段出现了大于 1000,最大达 2240 的高降水粒子数,降水粒子数的突然增大是导致过程 2 出现短时暴雨的主要原因之一。

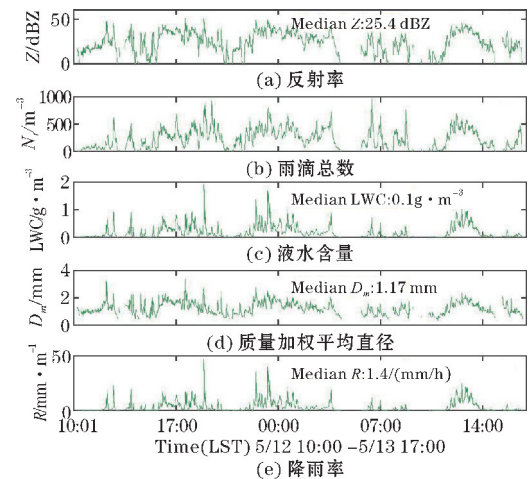


图5 2019年5月12日10时-13日17时雨滴谱特征参数分析

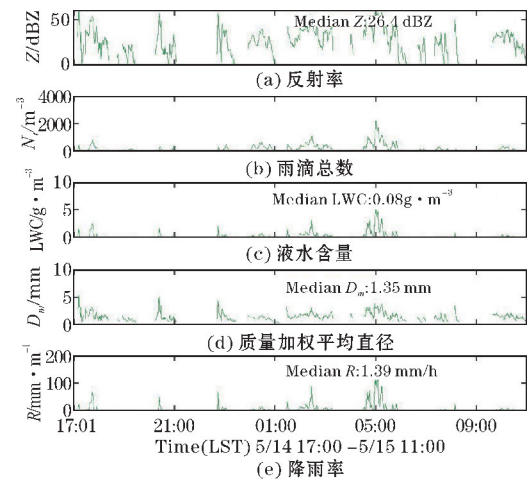


图6 2020年5月14日17时-15日12时雨滴谱特征参数分析

## 5 Z-R 关系分析

上述分析表明雨滴谱、降雨率在不同过程不同阶段都有差异,而在最小二乘法推导  $Z-R$  的经验关系中, $A$  和  $b$  的值与 DSD 的变化与微物理特征量密切相关<sup>[9]</sup>。选择合适的  $A$  和  $b$ ,对提高雷达定量降水估测(QPE)具有重要意义,其中的经验关系  $Z = 300 R^{1.4}$  广泛应用于新一代天气雷达定量估测降水<sup>[10]</sup>。本文使用雨滴谱数据分别计算整个降雨过程及对流云阶段、层状云阶段的  $Z-R$  关系(图 7~8)。结果显示:对流云阶段比层状云阶段有更强的降雨率和更高的反射率,



如过程1在对流云阶段,观测到最高降水率46.97 mm/h及平均反射率因子34.3 dBZ,在层状云阶段,观测到最高降水率21.2 mm/h及平均反射率因子24.7 dBZ; $Z$ - $R$ 关系估计也有差距,同阶段,系数 $A$ 取值变化范围较大, $b$ 取值相近在1~2波动,不同阶段, $A$ 和 $b$ 取值都不一样,但是过程2和过程1都表现出:对流云阶段 $A$ 和 $b$ 取值更大(表1);另外,对于整个降雨过程 $Z$ - $R$ 关系估算,过程1、过程2与经验关系都有差异,前者在弱降水端估测值相差较大,随着降水增强两者估测值相近(图7),而后者在弱降水端估测值相差较大,随着降水增强两者估测值相差增大(图8)。可见,直接采用经验关系进行 $Z$ - $R$ 关系估算不稳定,且在不同过程、不同阶段的系数 $A$ , $b$ 都有一定差异。

表1 两个降水过程不同阶段 $Z$ - $R$ 关系估计与对比

	过程1		过程2	
	$A$	$b$	$A$	$b$
层状云阶段	213.2	1.4	308.2	1.4
对流云阶段	258.4	1.5	367.7	1.5
整个过程	230.1	1.5	330.6	1.5

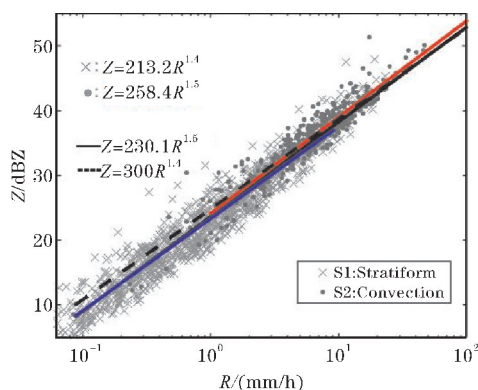


图7 层状云阶段(灰色×)和对流云阶段(灰色点)的1-minDSD数据的 $Z$ - $R$ 散点图及对应的 $\lg R$ 和 $10 \lg Z$ 之间拟合关系(黑色实线代表整个降雨过程的拟合关系,黑色虚线代表传统的 $Z$ - $R$ 关系(过程1))

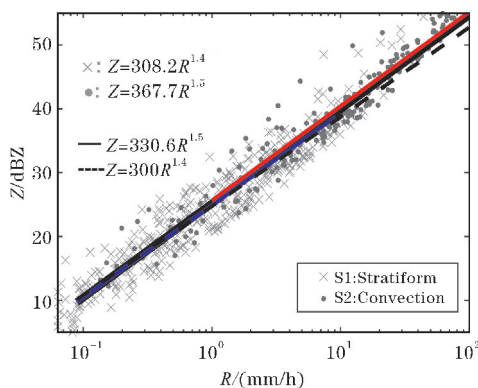


图8 层状云阶段(灰色×)和对流云阶段(灰色点)的1-minDSD数据的 $Z$ - $R$ 散点图及对应的 $\lg R$ 和 $10 \lg Z$ 之间拟合关系(黑色实线代表整个降雨过程的拟合关系,黑色虚线代表传统的 $Z$ - $R$ 关系(过程2))

## 6 结论

借助同过程雨滴谱仪、雨量站数据进行对比分析,对2019年5月12-13日、2020年5月14-15日湖南长沙夏季两次强降水过程的降水微物理特征进行研究,首先对降水特征进行初步分析,再将该过程划分为层状云阶段和对流云阶段,对雨滴谱及雨滴谱特征参数进行对比与分析,并对不同阶段 $Z$ - $R$ 关系进行拟合计算,得出如下结论。

(1)对不同阶段雨滴谱分布及降水率随时间变化进行分析,发现不同阶段降水存在明显的差异:在层状云降水阶段,降水率大多数小于10 mm/h,主要由较低浓度的小粒子构成,且粒子直径大多不超过3 mm,谱宽较窄;对流云降水阶段,小粒子浓度逐渐增加,尤其是小于1 mm的粒子数浓度增加非常明显,最大瞬时降水率分别高达46.97 mm/h、114.40 mm/h,同时分别观测到5.5 mm、8 mm的降水粒子,与层状云对比,对流云谱宽更宽<sup>[11-13]</sup>。

(2)两次强降水过程都存在高浓度的小雨滴,其直径主要在1.0 mm左右;反射率大小与质量加权平均直径、雨滴总数基本成正相关,雨滴直径或雨滴浓度对反射率影响较大;液水含量与降雨率正相关性较好<sup>[15]</sup>;降水粒子数在500左右及以下居多,但是在过程2出现了最大达2240的高降水粒子数,并伴随短时暴雨出现<sup>[16]</sup>,高降水粒子数可作为短时强降雨辅助预警指标之一。

(3) $Z$ - $R$ 关系估计也有差距,同阶段,系数 $A$ 取值变化范围较大, $b$ 取值相近在1~2波动<sup>[3]</sup>;不同阶段, $A$ 和 $b$ 取值都不一样,但是过程2和过程1都表现出:对流云阶段 $A$ 和 $b$ 取值更大;而对于整个降雨过程 $Z$ - $R$ 关系估算,过程1、过程2与经验关系都有差异<sup>[17-18]</sup>,前者在弱降水端估测值相差较大,随着降水增强两者估测值相近,而后者相反。可见,采用经验关系估测降水不稳定,为提高降水估测精度,将过程降水可按不同阶段进一步进行划分,但是本文仅对两个个例进行分析,不同阶段 $Z$ - $R$ 关系估计异同还需要更多实例进行进一步研究总结。

## 参考文献:

- [1] 陈磊,陈宝君,杨军,等. 2009-2010年梅雨锋暴雨雨滴谱特征[J]. 大气科学学报, 2013, 36(4): 481-488.
- [2] 陈子健,胡向峰,陈宝君,等. 河北省中南部暴雨雨

- 滴谱特征[J]. 干旱气象,2019,37(4):586-596.
- [3] 吴亚昊,周筠珺,刘黎平. 雨滴谱的变化对降水估计的影响[J]. 成都信息工程学院学报,2015,30(1):88-95.
- [4] 濮江平,赵国强,蔡定军,等. Parsivel 激光降水粒子谱仪及在气象领域的应用[J]. 气象与环境科学,2007,30(2):3-8.
- [5] 陈子健,胡向峰,陈宝君,等. 河北省中南部暴雨雨滴谱特征[J]. 干旱气象,2019,37(4):586-596.
- [6] 杨长业,舒小健,高太长,等. 基于雨强分级的夏季降水微物理特征分析[J]. 气象科技,2016,44(2):238-245.
- [7] 罗丽. 北京地区云降水微物理特征的地面观测及雷达反演研究[D]. 北京:中国科学院大学,2020.
- [8] 孙学金,王晓蕾,李浩,等. 大气探测学[M]. 北京:气象出版社,2010:75-90.
- [9] 王福增,王秋淞,何山,等. 贵州正安夏季雨滴谱特征分析[J]. 成都信息工程大学学报,2020,35(6):689-696.
- [10] 杨俊梅,陈宝君,韩永翔,等. 山西省不同地区雨滴谱的统计特征[J]. 气象科学,2016,36(1):88-95.
- [11] 黄凡凌. 基于微雨雷达和2 DVD 观测局地降水的研究[D]. 成都:成都信息工程大学,2020.
- [12] 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.
- [13] 韩辉邦,张博越,马守存,等. 黄河上游地区降水雨滴谱特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2019,13(6):119-125.
- [14] 卢超,罗红艳,李磊,等. 2015-2016 年深圳地区强降水过程滴谱特征分析[J]. 气象科技,2018,46(3):563-567.
- [15] 郭建,唐德才. 山东一次适宜增雨作业的雨滴谱特征分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(3):383-387.
- [16] 李侠丽,潘先洁,童应祥,等. 两次强降水过程雨滴谱特征及差异[J]. 气象科技,2019,47(2):322-328.
- [17] 张玉欣,韩辉邦,郭世钰,等. 祁连山南麓夏季不同降水云系雨滴谱特征及其 Z-R 关系[J]. 干旱区研究,2021,38(4):1048-1057.
- [18] 刘红燕,陈洪滨,雷恒池,等. 利用 2004 年北京雨滴谱资料分析降水强度和雷达反射率因子的关系[J]. 气象学报,2008,66(1):125-129.

## Comparison and Analysis of Microphysical Characteristics in Mixed Convective-Stratiform Cloud Precipitation over Changsha Area

WANG Ling, TANG Lin, LI Qiong, DING Li

(Hunan Weather Modification Center, Changsha 410118, China)

**Abstract:** Based on the comparison and analysis of characteristics of the two heavy precipitation processes in summer over Hunan province in Changsha on May 12-13, 2019 and May 14-15, 2020, the characteristics of precipitation are analyzed firstly, the processes are divided into two stages: the stratiform cloud stage and the convective cloud stage, the raindrop spectrum and its characteristic parameters are compared and analyzed, the results show that the raindrop distribution and precipitation rate are different in different stages of the two processes. In the stage of stratiform ones, the precipitation rate is small, the particle diameter is below 3 mm, and the spectrum is narrow, while in the stage of convective ones, the maximum instantaneous precipitation rates are as high as 46.97 mm/h and 114.40 mm/h, at the same time, 5.5 mm and 8.0 mm precipitation particles are observed and raindrops have a broad spectrum; the number of precipitation particles is about or below 500, and the sudden increase of the number of precipitation particles lead to the appearance of short-term heavy rainfall; The Z-R relation ( $Z=AR^b$ ) is different in different stages, at the same stage, the values of coefficient A vary widely, and b is almost consistent and fluctuates from 1 to 2, while at different stages, A and b have different values, but both show that the values of A and b are larger in the stage of convective ones.

**Keywords:** raindrop spectrum; Z-R relationship; mixed convective-stratiform cloud