

周坤论,黄剑钊,王玮,等.柳州2022年“龙舟水”过程一次降水的雨滴谱特征分析[J].气象研究与应用,2023,44(1):87-93.
Zhou Kunlun,Huang Jianzhao,Wang Wei,et al. Analysis of the raindrop spectrum characteristics of a dragon-boat precipitation process in Liuzhou city in 2022[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2023,44(1):87-93.

柳州2022年“龙舟水”过程一次降水的雨滴谱特征分析

周坤论,黄剑钊,王 玮,吕抒航

(广西壮族自治区气象技术装备中心,南宁 530022)

摘要:利用柳州国家站DSG5型降水现象仪(雨滴谱仪)对柳州2022年6月16日18时—17日11时暴雨过程的雨滴谱特征进行分析,并与自动雨量传感器(雨量筒)数据对比,探究不同雨强范围雨滴谱特征。结果表明:(1)雨滴谱仪和雨量筒的累积降雨量具有很好的一致性,相关性系数达到0.99;降水量与分钟粒子数呈强相关(0.82)。(2)降水量的多少不仅仅由雨滴粒子的数量决定,还取决于雨滴粒子的直径;本次降水主体以粒径小于3 mm的雨滴粒子为主;降水贡献主体以1~4 mm的雨滴粒子为主。(3)雨强增大,雨滴粒子数密度逐渐增大,小雨滴更容易合并成大雨滴。(4)无论雨强大小,粒子数占比均随粒径区间的增加而下降,小雨滴粒子占比始终最高;随着雨强增大,小雨滴($D \leq 2$ mm)降水贡献率占比下降,大雨滴($D > 2$ mm)降水贡献率占比升高,进一步表明雨强增大,对流增强。

关键词:柳州;“龙舟水”;雨滴谱;雨量站;雨强

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.1.15

引言

“龙舟水”一般指华南地区端午前后(5月下旬—6月下旬期间)发生的强降水天气^[1],具有范围广、强度强、持续时间长、致灾程度重等特点^[2]。雨滴谱是指单位空间体积内不同尺度雨滴的数量随雨滴直径的分布,反映了降水的微观物理过程。因此,研究“龙舟水”过程的雨滴谱特征,对了解自然降水的物理过程、时空分布特征,为数值模式提供科学依据和更好地实现雷达定量估测降水有重要意义^[3]。

近年来,随着雨滴谱仪、测雨雷达等新技术的应用,丰富了降雨测量的手段^[4],也为研究降雨的微观特征提供了更为便捷的手段,相关雨滴谱的研究得到了极大的发展。国内,如周坤论等^[5]研究结果显示,激光雨滴谱仪在不同速度、直径通道观测的雨滴粒子数是可信的,可反映实际降水情况。李侠雨等^[6]指出雨强的大小直接影响到雨滴谱的特征参数,且随着雨强的增大而增大。毛志远等^[7]认为暴雨过程中降水粒子以直径小于1 mm的雨滴为主,直径大于

1 mm的雨滴数占比较低,但其对雨强的贡献最大。蔡钊等^[8]研究显示,在中雨、大雨雨型情况下,雨滴直径直方图的“双峰”较为明显,但随着降雨雨强的增大,在暴雨雨型下有可能出现“三峰”的情况,而在小雨雨型时更容易出现“单峰”现象。国外,Pruppacher等^[9]指出大雨滴在下落的过程中,存在其本身动力学上的不稳定而造成雨滴的破碎以及合并。Villermaux等^[10]进一步证实了雨滴在下落过程中存在复杂的动力学过程以及与邻近雨滴的相互作用。Larsen等^[11]通过对雨滴谱仪的持续观测,发现降雨过程小直径的雨滴占比较高。基于以上研究,下面开展了对广西雨滴谱特征的研究。

2022年6月端午节期间,广西桂北地区发生了一次较严重的“龙舟水”持续性暴雨过程,引发了严重的城市内涝和江河洪涝。为了解“龙舟水”过程雨滴谱的特征,本文对柳州国家站自动雨量传感器(雨量筒)和DSG5型降水现象仪(雨滴谱)观测资料,对柳州6月16日—17日暴雨过程进行分析,结合雨滴谱反演计算公式,探究不同雨强范围雨滴谱特征

收稿日期:2022-11-25

基金项目:广西壮族自治区气象局青年人才培养项目(桂气科2022QN09)、广西壮族自治区气象技术装备中心自立项目“降水过程雨滴谱的统计特征研究”

作者简介:周坤论(1994—),男,工程师,从事气象探测技术保障和雨滴谱特征研究。E-mail:980289314@qq.com

以及降水量和雨滴粒子数随雨滴直径的分布情况。

1 仪器和数据

降水类天气现象自动化观测对降雨过程识别较强,捕获率较高,大大减轻了基层观测人员的工作压力,降低了人工观测的主观性,能全面连续地反映降水实情^[5]。本文使用 Parsivel2 雨滴谱仪持续观测柳州 2022 年龙舟水过程一次降水数据进行分析。

1.1 仪器介绍

DSG5 降水现象仪(华云升达)主要由激光发射器和接收器(长 180mm,宽 30mm)两部分组成,工作方式连续采样,采样时间为 1min。测量的数据共有 32 个等容积直径通道($D_i, i=1, 32$, 测量范围为 0~26mm)级和 32 个速度通道($V_j, j=1, 32$, 测量范围为 0~22.4m/s);实际给出的观测结果是降水粒子在 D_i 和 V_j 分级的二维场中的粒子个数(n_{ij}),共有 1024 个等级的降水粒子密度。由于仪器信噪比的原因,不使用前两个直径通道的数据,因此,实际可测的降水粒子直径范围为 0.25~26mm。

翻斗式雨量传感器的采样时间为 1min,观测精度为 0.1mm,分钟降雨强度存在着 ± 0.1 mm 的误差。

1.2 数据来源和方法

利用柳州国家站自动雨量传感器(雨量筒)和 DSG5 型降水现象仪(雨滴谱)观测资料,选取 2022 年 6 月 16 日 18 时—17 日 11 时出现持续性降水过程的时间段,结合雨滴谱反演计算公式,对比分析激光雨滴谱仪与自动雨量传感器估测的累积降水量及雨滴谱相关参数的关系,探讨不同降水强度雨滴谱的特征以及降水量与雨滴粒子属性的关系等。由于降水现象仪观测时前两个尺度通道的信噪比较低,故在处理数据时不予考虑;且由于自然界降水中大于 8mm 的雨滴很难维持^[12],观测数据中个别时刻出现大于 8mm 的大粒子,则认为是瞬时雨强较大(造成雨滴重叠)或非降水物造成出现的,予以剔除,因此本次降水过程最终使用的粒子范围是 0.25~8.0mm。

1.2.1 雨滴粒子形变订正

通常雨滴在下落过程中为非球形,为减小误差,对雨滴谱仪测得的雨滴粒子进行变形修订。雨滴粒径形变修订采用 Battaglia 等^[13]中给出的方法进行处

$$\begin{cases} a_r=1, & D_{eq}<1 \\ a_r=1.075-0.075D_{eq}, & 1<D_{eq}<1 \\ a_r=0.7, & D_{eq}>5 \end{cases} \quad (1)$$

式中定义轴比 a_r 为雨滴粒子径向和横向长度的比值,对于粒径小于 1mm 的降水粒子定义为球形,即 $a_r=1$;对于粒径在 1~5mm 的降水粒子定义轴比为 $a_r=1.075-0.075D_{eq}$, D_{eq} 为所测雨滴粒子直径;对粒径大于 5mm 的降水粒子定义轴比为 $a_r=0.7$ 。

1.2.2 雨滴粒子速度处理

Atlas 等^[14]研究表明,降水粒子理想状况下,对于粒径小于 0.03mm 的雨滴粒子,粒子下落末速度 $v=0$;对于粒径在 0.03~0.6mm 的雨滴粒子,雨滴下落末为 $v=4.323 \times (D_{eq}-0.03)$;对于粒径大于 0.6mm 的雨滴粒子,雨滴下落末速度为 $v=9.65-10.3 \exp(-0.6D_{eq})$ 。Friedrich 等^[15]研究表明,当遇到强风(大于 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)时,降水现象仪测得的雨滴粒子速度存在错误,由于本次降水过程并未出现强风,即风速大于 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强风环境,因此雨滴粒子速度采用降水现象仪直接测得的即可。

1.2.3 雨滴谱反演计算公式

雨滴粒子数密度计算公式^[16]表示为

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

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

其中,式(1) $N(D_i)$ (单位: $\text{mm}^{-1}\text{m}^{-3}$)为单位体积内第 i 级直径 D_i (单位:mm)至 $D_i+\Delta D_i$ 的雨滴粒子数密度; n_{ij} 代表降水粒径第 i 级、速度第 j 级的雨滴个数, A 为激光雨滴谱仪采样底面积为 0.0054m^2 , ΔT 为取样时间 60s, V_j 第 j 速度级的速度值,单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; ΔD_i 为对应速度通道的直径间隔;

降水强度(R_t)计算公式^[16]表示为

$$R_t = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^{32} D_i^3 \cdot V(D_i) \cdot N(D_i) \cdot \Delta D_i \quad (3)$$

R_t 为 t 时刻的降水强度($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$);

降水过程累积降水量(P_t)表示为

$$P_t = \sum_t \frac{R_t}{60} \quad (4)$$

P_t 为降水起始到 t 时刻累积的降水量(mm)。

2 结果与分析

研究显示,激光雨滴谱仪和自动雨量站累积降水量具有很好的一致性^[5]。为探究降水量与雨滴粒子属性的关系以及不同降水强度雨滴谱的特征。下文将对比雨量筒和雨滴谱仪累积降水量的差异、降水量和雨滴粒子的关系、不同降水强度区间雨滴谱

分布及降水量和粒子数的占比情况等进行分析。

2.1 累积降水量和雨强分析

图 1 为本次降水过程雨滴谱仪与雨量筒累积降水量和雨强-时间变化曲线, 蓝、红色虚线为雨滴谱仪和雨量筒记录降水的起始、结束时刻, 黄色虚线为 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 线。图 1a 从时间上看, 雨滴谱仪在 18:22 分就已经观测到有雨滴粒子, 而雨量在 19:35 分才记录到有 (0.1mm 的) 降水量, 另外雨滴谱仪在观测降水结束时刻也比雨量筒观测的晚得多, 分别是 10:40 和 8:52, 这主要是二者仪器的性能决定的^[5]。图 1a 总体上显示, 雨滴谱仪和雨量筒的累积降雨量随时间轴的起伏变化基本一致, 二者具有很好的一致性, 相关性系数达到 0.99; 雨滴谱仪的累积降水量为 67.83mm, 雨量筒的为 63.20mm, 前者略多。图 1b 雨

滴谱仪和雨量筒的雨强随时间的起伏变化总体趋势基本一致, 整个降水过程, 雨强 (雨滴谱) 出现了多个峰值, 特别是 03 时—04 时的这个时间段, 雨强最大, 达到了 $128.96\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。结合图 1a 雨滴谱仪观测的降水强度和累积降水量略大于自动雨量站的, 主要在降水过程出现多个明显的峰值, 特别是在 03 时—04 时之间, 出现雨强 (雨滴谱) 极值, 瞬时雨强较大, 雨滴重叠导致激光雨滴谱仪识别的降水粒子直径偏大, 降水强度和累积降水量也略偏大。

若以 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ^[17] 的降水强度来划分降水类型 (黄色虚线为分界线), 16 日 18 时、17 日 02 时和 17 日 11 时主体以层状云降水为主; 17 日 24 时以对流云降水为主。由于不同类型云降水的雨滴谱特征不是本文的研究重点, 故未深入讨论。

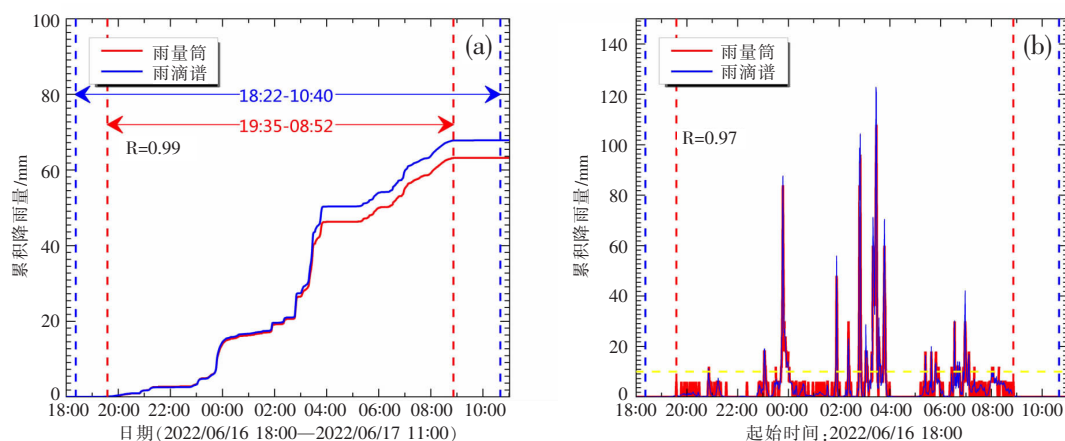


图 1 雨滴谱与雨量筒累积降水量和雨强-时间变化图

2.2 降水量与粒子属性的关系

(1) 降水量与粒子数

图 2a 为降水粒子数, 分钟降水量-时间变化曲线, 图 2b 显示了分钟降水粒子数与分钟降水量的相

关性。整体上, 分钟降水量与分钟粒子数量随时间起伏变化的趋势基本一致; 且二者呈强相关, 相关性系数达到了 0.82。那么降水量的多少是否就由雨滴粒子的数量决定?

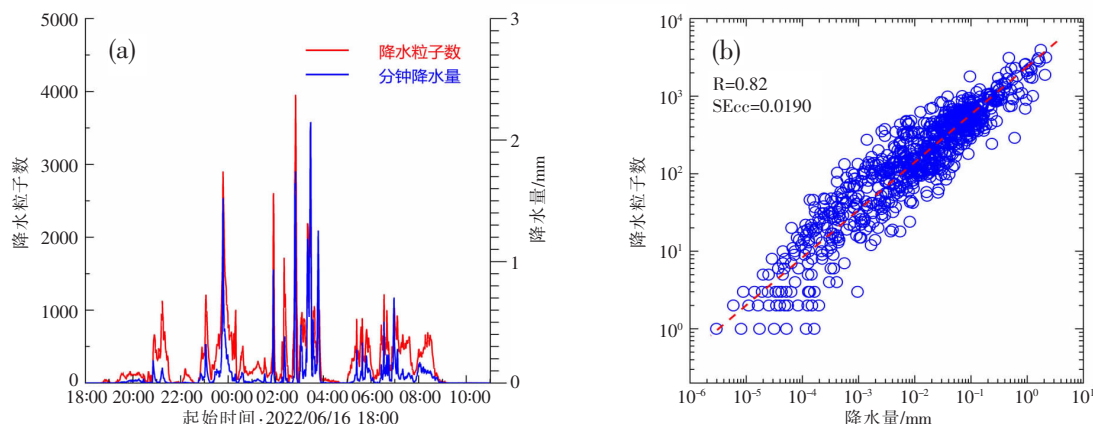


图 2 (a) 降水粒子数/分钟降水量-时间变化图; 红色实线为降水分钟粒子数, 蓝色实线为分钟降水量; (b) 分钟降水粒子数与分钟降水量的相关性, 蓝色圈为散点, 红色虚线为拟合线

(2)降水量与粒子直径

图3为本次降水过程雨滴粒子数和降水量在不同粒径区间的占比情况。小于1mm的粒径区间,粒子数占比为58.81%,但降水量占比仅为7.28%;1~3mm的粒径区间,粒子数占比为40.17%,而降水量占比达70.32%;大于3mm的粒径区间,粒子数占比为1.02%,降水量占比为22.40%。总体上,本次降水过程主体以小于3mm的雨滴粒子为主,小于1mm的雨滴粒子占比最多;降水贡献率主体集中在1~4mm的雨滴。粒子数占比随粒径区间的增大而下降;降水量占比(除小于1mm的粒径区间外)随粒径区间的增大而下降。因此,降水量的多少不仅仅由雨滴粒子的数量决定,还取决于雨滴粒子的直径。

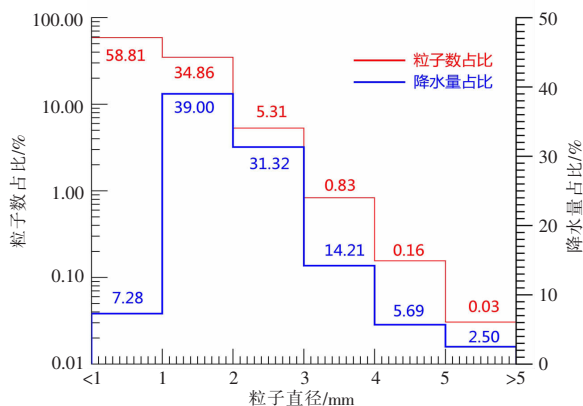


图3 雨滴粒子数和降水量在不同粒径区间的占比图
(红色实线为粒子数占比,蓝色实线为降水量占比)

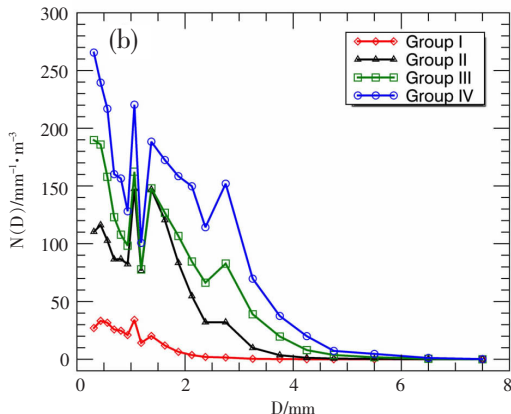
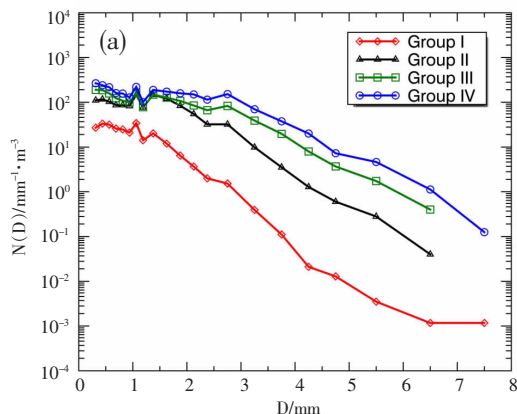


图4 不同雨强区间平均谱分布
(a)对数坐标;(b)普通坐标

(2)降水量与粒子数-雨滴直径分布

图5为不同雨强区间降水量与粒子数占比随粒径的变化情况。图5a Group I(0~0.3mm·min⁻¹)降水粒子数占比出现三个峰值分别为12.9%(0.437mm)、13.2%(1.062mm)、7.8%(1.375mm),随着雨强的增大,

2.3 不同雨强区间的平均谱、降水量与粒子数-雨滴直径分布

本次降水过程,按逐分钟雨强划分为4个雨强区间:(1)0~0.3mm·min⁻¹(Group I);(2)0.3~0.6 mm·min⁻¹(Group II);(3)0.6~1.2 mm·min⁻¹(Group III);(4)>1.2 mm·min⁻¹(Group IV)。下面将对不同雨强区间的平均谱分布、降水量与粒子数随粒径变化、降水量与粒子数在不同粒径区间的占比进行分析。

(1)不同雨强区间平均谱分布

图4为不同雨强区间平均谱分布。图4a为对数坐标;图4b为普通坐标。总体显示,随着雨强的增大,雨滴粒子数密度逐渐增大。Group I(红线)、Group II(黑线)峰值均分别出现在粒径为0.437、1.062、1.375mm处,且极值点均在1.062mm处;Group III(绿线)、Group I(蓝线)峰值则在1.062、1.375、2.75mm处,且极值点均在0.312mm处。另外,雨滴谱仪观测到的雨滴最大直径达7.5mm,这种特大雨滴文献[18]在对积层混合云的研究中也曾观测到,总体符合对流云的雨滴谱演变的客观规律。四个雨强区间,无论是小雨强(Group I)还是大雨强(Group IV),平均谱分布均出现了多个峰值,并且随着雨强的增大,粒子数密度逐渐增大,且峰值开始逐渐明显,表明雨强越大产生的雨滴越多,雨滴粒子之间碰撞(破碎、合并)越剧烈,更容易破碎产生小雨滴或者合并成更大雨滴。

图5b Group II(0.3~0.6mm·min⁻¹)降水粒子数占比三个峰值分别为9.0%(0.437mm)、11.4%(1.062mm)、11.3%(1.375mm),此过程小雨滴占比下降,大雨滴粒子占比增加,即在一定雨强范围内(0~0.6mm·min⁻¹),随着雨强的增大(Group I增至Group II),小雨滴更

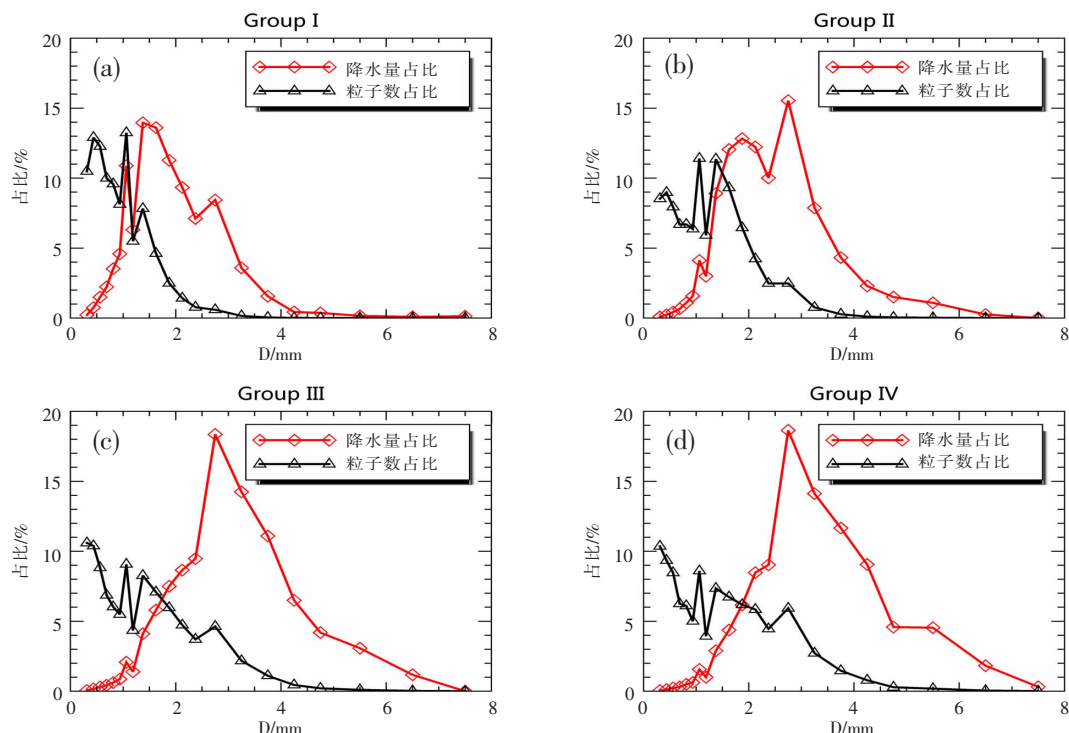


图 5 不同雨强区间降水量与粒子数占比随粒径的变化图

(a) $0 \sim 0.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (Group I); (b) $0.3 \sim 0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (Group II); (c) $0.6 \sim 1.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (Group III); (d) $> 1.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (Group IV)

容易合并成大雨滴;随着雨强的继续增大,图 5c Group III ($0.6 \sim 1.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 降水粒子数占比三个峰值分别为 9.1% (1.062mm)、8.3% (1.375mm)、4.6% (2.75mm),极值点 0.312mm 处,占比为 10.6%;此过程,小雨滴占比增加,且更大的雨滴粒子数占比出现峰值 (2.75mm),即大雨滴数占比也增加,表明随着雨强继续增大 (Group II 增至 Group III),雨滴粒子之间的碰撞更加剧烈,破碎产生了更多的小雨滴粒子或合并成了更多的大雨滴;图 5d Group IV ($> 1.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 降水粒子数占比三个峰值分别为 8.6% (1.062mm)、7.3% (1.375mm)、5.9% (2.75mm),极值点仍为 0.312mm 粒径处,此过程相对于 Group III,峰值在 1.062mm ($8.6\% < 9.1\%$) 和 1.375mm ($7.3\% < 8.3\%$) 处的雨滴粒子数占比略微下降,峰值在 2.75mm 处增大,即 $5.9\% > 4.6\%$ 。此时,雨强继续增大,雨滴粒子合并略大于破碎,但并不明显,即雨滴粒子碰撞剧烈,破碎和合并接近一个相对均衡的状态。

另外,降水量占比的分布,Group I 小雨强时,降水量占比出现 3 个峰值,极值点在 1.062mm 处,随着雨强的增大,极值点发生变化,Group II 在 1.875mm 和 2.75mm 处呈现明显的峰值,相对于 Group I 降水贡献率占比最大的雨滴粒径增大;随着雨强继续增大,降水量占比 (Group III 和 Group IV)

仅在 2.75mm 处出现一个明显峰值,也就是说随着雨强的增大,大雨滴粒子的降水贡献率也在增大。

(3) 降水量与粒子数占比

图 6 为不同雨强区间降水量与雨滴粒子数在不同粒径区间的占比情况。图 6a Group I 降水贡献率主要是小于 3mm 的雨滴;Group II 降水贡献率主要是 1~3mm 的雨滴;Group III 和 Group IV 降水贡献率主要是 1~5mm 的雨滴;小于等于 2mm 的粒径区

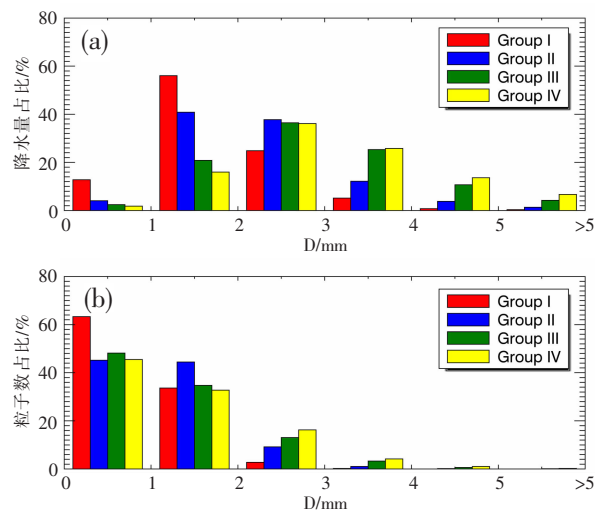


图 6 不同雨强区间降水量与雨滴粒子数在不同粒径区间的占比图

(a) 降水量占比; (b) 雨滴粒子数占比

间,降水量占比均随雨强的增大而下降,大于 2mm 的粒径区间,降水量占比总体随雨强的增大而增大。图 6b 总体显示,4 个雨强区间,粒子数占比均随粒径区间的增加而下降;无论是大雨强还是小雨强,小于 1mm 雨滴粒子数占比均是最高,1~2mm 的雨滴粒子数占比次之;大于 2mm 的粒径区间,随着雨强增大,粒子数占比增大。

综上,无论雨强的大小,小雨滴粒子占比始终最

高;雨滴粒子数均随粒径区间的增大而减少;随着雨强的增加大,小雨滴($D \leq 2\text{mm}$)的降水贡献率下降,大雨滴($D > 2\text{mm}$)的降水贡献率升高,进一步表明雨强增大,对流增强,产生的雨滴粒子更多,雨滴碰撞更剧烈,破碎产生小雨滴,合并形成大粒子,影响粒子数占比和降水的贡献率。

此次降水过程激光雨滴谱的主要特征量如表 1 所示。

表 1 雨滴谱特征

最大粒子数浓度 / m^{-3}	粒子总数 /个	分钟最大粒子数 /个	平均直径 /mm	最大直径 /mm	平均谱宽 /mm	最大谱宽 /mm
445	300510	3955	0.98	7.5mm	1.82	7.19

3 结论

(1)雨滴谱仪观测降水起始(结束)时刻比雨量筒观测的早(晚),主要是由于两种仪器测量精度不同导致的^[5];雨滴谱仪和雨量筒的累积降雨量相关性系数达到 0.99;二者的累积降雨量和雨强在时间轴上起伏变化总体趋势基本一致。另外,雨滴谱仪观测的累积降水量和降水强度略大于自动雨量站的,主要在降水过程出现多个明显的峰值,特别是在 03 时—04 时之间,出现雨强极值,瞬时雨强较大,雨滴重叠导致激光雨滴谱仪识别的降水粒子直径偏大,降水强度和累积降水量也略偏大;16 日 18 时—17 日 02 时和 17 日 04—11 时主体以层状云降水为主;17 日 02—04 时以对流云降水为主。

(2)降水量与分钟粒子数随时间起伏变化趋势基本一致;且二者呈强相关,相关性系数达到了 0.82;小于 1mm 的粒径区间,粒子数占比为 58.81%,但降水量占比仅为 7.28%;1~3mm 的粒径区间,粒子数占比为 40.17%,而降水量占比达 70.32%,表明降水量的多少不仅仅由雨滴粒子的数量决定,还取决于雨滴粒子的直径。另外,本次降水过程主体以粒径小于 3mm 的雨滴粒子为主,小于 1mm 的雨滴粒子占比最多;降水贡献主体以 1~4mm 的雨滴粒子为主。

(3)随着雨强的增大,雨滴粒子数密度逐渐增大。四个雨强区间($0 \sim 0.3$ 、 $0.3 \sim 0.6$ 、 $0.6 \sim 1.2$ 、 $> 1.2\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$),无论是小雨强还是大雨强区间,平均谱分布均出现了多个峰值,并且随着雨强的增大,粒子数密度逐渐增大,且峰值开始逐渐明显,表明雨强越大产生的雨滴越多,雨滴粒子之间碰撞(破碎、合并)越剧

烈,更容易破碎产生小雨滴或者合并成更大雨滴。在一定雨强范围内 ($0 \sim 0.6\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$),随着雨强的增大,小雨滴更容易合并成大雨滴;雨强继续增大 ($\text{Group: } 0.6 \sim 1.2\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$),小雨滴占比增加,大雨滴数占比也增加,表明随着雨强继续增大,雨滴粒子之间的碰撞更加剧烈,破碎产生了更多的小雨滴粒子或合并成了更多的大雨滴; $\text{Group IV} (> 1.2\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$ 雨强继续增大,雨滴粒子合并略大于破碎,但并不明显,即雨滴粒子碰撞剧烈,破碎和合并接近一个相对均衡的状态。另外,降水量占比的分布,Group I 小雨强时,降水量占比出现 3 个峰值,极值点在 1.062mm 处,随着雨强继续增大,降水量占比 (Group III 和 Group IV)在 2.75mm 处出现一个明显峰值,也就是说随着雨强的增大,大雨滴粒子的降水贡献率也在增大。

(4)4 个雨强区间,粒子数占比均随粒径区间的增加而下降;无论雨强的大小,小雨滴粒子占比始终最高;雨滴粒子数均随粒径区间的增大而减少;随着雨强的增加大,小雨滴($D \leq 2\text{mm}$)的降水贡献率占比下降,大雨滴($D > 2\text{mm}$)的降水贡献率占比升高,进一步表明雨强增大,对流增强,产生的雨滴粒子更多,雨滴碰撞更剧烈,破碎产生小雨滴,合并形成大粒子,影响粒子数占比和降水的贡献率。

参考文献:

- [1] 钱维宏,艾阳,陈绿文,等. 一次广东典型龙舟水暴雨过程的扰动形势分析[J]. 热带气象学报, 2020, 36(4): 434-443.
- [2] 张凌云,刘蕾. 柳州 2020 年一次“龙舟水”成因及预报偏差分析[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(3): 67-71.

- [3] 金祺, 袁野, 刘慧娟, 等. 江淮之间夏季雨滴谱特征分析[J]. 气象学报, 2015, 73(4): 778–788.
- [4] 张晓宇, 雷勇, 王柏林, 等. Parsivel 与 LNM 激光雨滴谱仪降水观测的差异[J]. 气象科技, 2016, 44(4): 548–554.
- [5] 周坤论, 张哲睿, 成振华, 等. 北海一次强降雨过程的雨滴谱特征分析[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(2): 16–22.
- [6] 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.
- [7] 毛志远, 黄光瑞, 黄彦彬, 等. 海南省秋季暴雨过程雨滴谱的特征分析[J]. 海南大学学报(自然科学), 2020, 38(1): 59–66.
- [8] 蔡钊, 刘九夫, 廖爱民, 等. 基于雨滴谱仪的降雨雨滴特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 93–98.
- [9] Pruppacher H R, Klett J D, Wang P K. Microphysics of Clouds and Precipitation[J]. Aerosol Science and Technology, 1980, 28(4): 381–382.
- [10] Villermaux E, Bossa B. Single-Drop Fragmentation Determines Size Distribution of Raindrops[J]. Nature Physics, 2009, 5(9): 697–702.
- [11] Larsen M L, Kostinski A, Jameson A R. Further Evidence for Superterminal Raindrops[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 41(19): 6914–6918.
- [12] Tokay A, Short D A. Evidence from Tropical Raindrop Spectra of the Origin of Rain from Stratiform Versus Convective Clouds[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1996: 355–371.
- [13] Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al. PARSIVEL Snow Observations: A Critical Assessment [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(2): 333–344.
- [14] Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. Doppler Radar Characteristics of Precipitation at Vertical Incidence[J]. Reviews of Geophysics, 1973, 11(1): 1–35.
- [15] Friedrich K, Kalina E A, Masters F J, et al. Drop-Size Distributions in Thunderstorms Measured by Optical Disdrometers during VORTEX2[J]. Monthly Weather Review, 2013, 141(4): 1182–1203.
- [16] 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.
- [17] Zheng H P, Zhang Y, Zhang L F, et al. Precipitation Microphysical Processes in the Inner Rainband of Tropical Cyclone Kajiki (2019) over the South China Sea Revealed by Polarimetric Radar[J]. Advances In Atmospheric Sciences, 2021, 38(1): 65–80.
- [18] 宫福久, 何友江, 王吉宏, 等. 东北冷涡天气系统的雨滴谱特征[J]. 气象科学, 2007, 27(4): 365–373.

Analysis of the raindrop spectrum characteristics of a dragon-boat precipitation process in Liuzhou city in 2022

Zhou Kunlun, Huang Jianzhao, Wang Wei, Lv Shuhang

(Guangxi Meteorological Technical Equipment Center, Nanning 530022, China)

Abstract: Using the DSG5 precipitation phenomenon instrument (raindrop spectrometer) of Liuzhou National Station, the characteristics of raindrop spectrum were analyzed from 18:00 on June 16 to 11:00 on June 17, 2022, and were compared with the data of the automatic rainfall sensor (rain gauge) to explore the characteristics of the raindrop spectrum in different rain intensity ranges. The results show that: (1) The cumulative rainfall obtained from the raindrop spectrometer and the rain gauge has a good consistency with a correlation coefficient of 0.99; There is a strong correlation between precipitation and the particle number per minute with a correlation coefficient of 0.82; The amount of precipitation not only depends on the number of raindrop particles, but also depends on the diameter of raindrop particles; The main part of this precipitation is dominated by the raindrop particles less than 3mm in size; The main contribution of precipitation is dominated by 1~4mm raindrop particles. (2) With the increase of rain intensity, the number density of raindrop particles gradually increases, and the small raindrops are more likely to merge into large raindrops, and the collision between raindrop particles is more intense, resulting in more small raindrop particles or merging into more large raindrops; (3) Regardless of the rain intensity, the proportion of particles decreases with the increase of the particle size, and the proportion of small raindrops is always the highest; With the increase of rainfall intensity, the proportion of precipitation contribution of small raindrops ($D \leq 2$ mm) decreases, and the proportion of precipitation contribution of large raindrops ($D > 2$ mm) increases, which further indicates that the convection increases with increasing rain intensity.

Key words: Liuzhou; dragon-boat precipitation; raindrop spectrum; rainfall station; rain intensity