

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.

Zhou Kunlun,Zhang Zherui,Cheng Zhenhua,et al. Analysis of raindrop spectral characteristics of a heavy rainfall process in Beihai city[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2022,43(2):16-22.

北海一次强降雨过程的雨滴谱特征分析

周坤论¹, 张哲睿², 成振华¹, 景 坤¹, 陶 伟¹, 李艳萍³

(1.广西壮族自治区气象技术装备中心, 南宁 530022; 2.广西壮族自治区气象服务中心 南宁 530022;

3.广西壮族自治区气象信息中心, 南宁 530022)

摘要: 基于北海国家气候观测台的自动雨量站和激光雨滴谱仪观测资料, 针对 2019 年 08 月 17 日 00:00—18:00 出现持续性降雨过程进行雨滴谱特征初步分析。结果显示: (1) 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; (2) 分钟粒子数和分钟降水量呈正相关, 但降水量不仅由粒子个数决定, 还取决于雨滴的直径; (3) 谱宽和降水粒子数随时间起伏变化基本同步, 决定了降雨强度; (4) 特征直径之间线性关系较好, 可互相包容, 能反映降水粒子大小。综上激光雨滴谱仪在不同速度、直径通道观测的雨滴粒子是可信的, 可反映实际降雨情况; 降雨强度主要由大雨滴决定; 在遇到短时强降雨时, 雨滴重叠会导致激光雨滴谱仪观测的降雨强度和累积降水量偏大。

关键词: 自动雨量站; 激光雨滴谱仪; 雨滴谱; 谱宽; 特征直径

中图分类号: P458.1*21

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.2.03

引言

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和不同类型降水云是如何形成降水的过程。近年来, 随着光电技术的发展, 激光雨滴谱仪得到广泛应用, 相关雨滴谱的研究得到了极大的发展^[1-3]。如陈宝君等通过对 3 类降水云的雨滴谱分别进行了 M-P、Gamma 分布拟合分析, 给出了分布参数随降雨强度的变化关系^[4]。柳臣中等通过对 175 次降水资料统计分析, 进一步得到 3 类云降水的雨滴谱的分布及其物理量的特征^[5], 指出降雨过程大雨滴数占比虽少, 但对降水量的贡献较明显^[5-6]。除了降雨类型外, 不同地区雨滴谱特征具有显著差异。海拔高度不同也会影响到雨滴粒径和下落尾速^[7]; 雨滴微物理参量也具有明显的区域性特征^[8-9]。

此外, 降雨强度也是影响雨滴谱特征的重要因素。李侠丽等研究结果显示, 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^[10]。

暴雨过程中降水粒子以直径小于 1mm 的雨滴为主, 直径大于 1mm 的雨滴数占比较低, 但其对雨强的贡献最大^[11]。在雨滴谱资料估测降水方面, 普遍认为暴雨过程雨强越大, 雷达估测降雨的偏差越大^[12]; 但部分研究结果显示(非强降水过程)激光雨滴谱仪与自动雨量站观测的累积降雨量结果基本一致, 二者相比前者的累积降雨量略小^[13-15]。

为探究强降水过程雨滴谱的特征, 本文利用北海国家气候观测台自动雨量站和激光雨滴谱仪观测资料, 结合雨滴谱反演计算公式, 对比激光雨滴谱仪与自动雨量站估测的累积降水量, 分析雨滴谱相关参数的特征, 探讨降水强度与粒子属性的关联等。

1 设备资料和数据处理

1.1 DSG4 降水现象仪和翻斗式雨量传感器

DSG4 降水现象仪(华创维想和德国 OTT 公司联合开发的 Parsivel2 激光雨滴谱仪)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

收稿日期: 2021-12-07

基金项目: 广西壮族自治区气象技术装备中心自立科研项目“降水过程雨滴谱的统计特征研究”

作者简介: 周坤论(1994—), 男, 广西陆川人, 硕士, 助理工程师, 主要从事气象探测系统保障等工作。E-mail: 980289314@qq.com

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⁻¹); 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。仪器设计时考虑了雨滴的形变^[16]。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±0.1mm 的误差。

1.2 数据来源及方法

1.2.1 数据来源及数据预处理

基于北海国家气候观象台的自动雨量站和 DSG4 降水现象仪的观测资料。选取 2019 年 8 月 17 日 00:00—18:00 出现持续性降水过程的时间段, 结合自动雨量站观测资料对此次降水的雨滴谱特征进行初步分析。此次北海(8 月份)降水过程未出现雪、阵雪、雨夹雪、阵性雨夹雪、冰雹等降水类天气现象; 在资料处理时, 由于自然界中降水粒子直径大于 6mm 的雨滴很难维持^[17], 因此对于该次降水过程直径大于 6mm 的雨滴记录, 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。

1.2.2 雨滴谱反演计算公式

由激光雨滴谱仪的工作原理可知, 单位时间(1min)的降水量, 即单位时间内通过(180mm×30mm=5400mm², S)激光带的所有粒子的体积之和(V)除以面积(S), 表示为^[13]

$$R_t = \left\{ \frac{\pi \rho}{6} \sum_{i=1}^{32} n(D_i) D_i^3 \right\} / 5400 \quad (1)$$

其中, R_t 为 t (该次降水过程逐 1min)时间的降水量(mm), ρ 为水的密度(g·cm⁻³), $n(D_i)$ 为 t (该次降水过程逐 1min)时间降水粒径第 i 级的降水粒子总数;

雨滴粒子数密度计算公式表示为^[15]

$$n(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{A \cdot \Delta T \cdot V_j} \quad (2)$$

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

其中, 式(2) 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 5400mm², ΔT 为取样时间 1min(60s), V_j 第 j 速度级

的速度值, 单位为 m·s⁻¹;

降水强度(I_t)计算公式表示为^[13]

$$I_t = R_t \times 60 \quad (4)$$

其中, I_t 为 t 时刻(1h)的降水强度(mm·h⁻¹);

降水过程累积降水量(P_t)表示为^[13]

$$P_t = \sum_i R_i \quad (5)$$

其中, P_t 为降水起始到 t 时刻累积的降水量(mm)。

2 结果与分析

下文将分别对自动雨量站和激光雨滴谱仪的累积降水量的差异、相关参数的特征、降水强度与粒子属性的关联等进行分析。

2.1 激光雨滴谱仪与自动雨量站观测结果的对比

Parsivel2 激光雨滴谱仪与自动雨量站测得的 P_t (和 I_t)及其相关性绘制/统计成图 1(表 1)。雨滴谱仪于 01:01 开始观测到有 0.002mm 降水记录, 01:02 有 0.25mm 的累积降水; 自动雨量站则在 01:02 分开始记录到有 0.2mm 的累积降水记录, 相比于自动雨量站, 雨滴谱仪观测有降水记录略早 1min; 雨滴谱仪观测到降水结束时间为 16:46 (累积降雨量 107.60mm), 自动雨量站记录结束时间为 16:43 (累积降雨量为 97.3mm), 雨滴谱仪观测降水结束时间略晚于自动雨量站记录的。由图 1(表 1)可知, 雨滴谱仪和自动雨量站累积降雨量具有很好的一致性, 相关性系数到达 0.9999, 二者测量的累积降雨量在时间轴上总体趋势基本一致。据雨滴谱仪识别的天气现象此次降雨类型以“雨”和“阵雨”为主, 若降雨起始时刻出现毛毛雨时, 由于仪器测量精度不同, 雨滴谱和自动雨量站观测到有降水记录的时间也会有所差别, 即雨滴谱仪只要出现一个小雨滴, 就能出现降雨记录, 而自动雨量站则要出现 0.1mm 的降水才会出现降雨记录。相关研究结果也表明激光雨滴谱仪对降水的响应明显提前于自动雨量站^[14, 17]。此外, 由激光雨滴谱仪和自动雨量站观测资料计算得到的降水过程持续时间分别为 945min 和 941min, 累积降水量及平均雨强如表 1 所示。

本次强降雨激光雨滴谱仪测得的降雨总量为 107.60mm, 雨量站测得的降雨总量为 97.30mm, 雨滴谱仪的降水测量绝对误差为 10.30mm, 相对误差为 10.59%, 这与文献[14](非强降雨)激光雨滴谱仪测量降雨的相对误差为-3.73%的结论有所差别, 造

表 1 自动雨量站和激光雨滴谱统计表 (日期 2019-08-17)

	起始时间	结束时间	持续时间 (min)	累积雨量 P_t (mm)	平均雨强 I_t ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
自动雨量站	01 : 02	16 : 43	941	97.30	6.20
激光雨滴谱仪	01 : 01	16 : 46	945	107.60	6.83

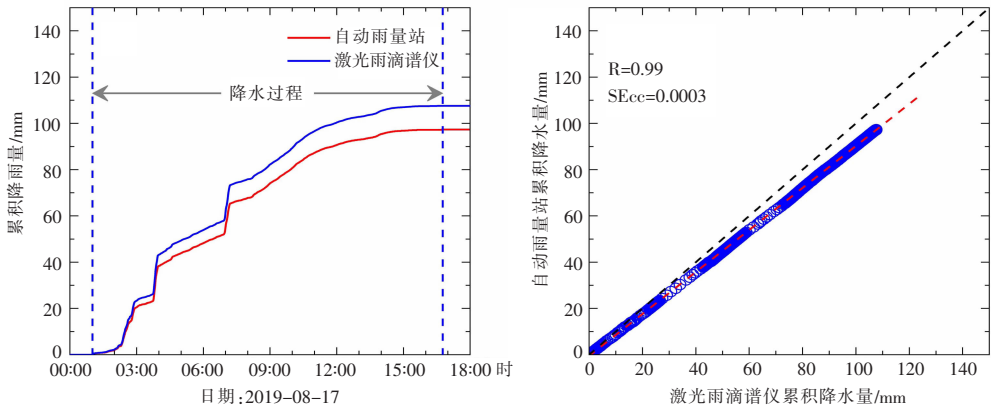


图 1 雨滴谱与自动雨量站的累积降水量变化关系

成激光雨滴谱仪测量结果偏大的主要原因是强降雨过程易造成雨滴重叠,本次强降雨过程出现多个峰值区,特别是 03:51—03:55 和 06:59—07:12 出现的两个明显峰值区雨滴重叠尤其明显,雨滴谱仪识别雨滴粒子偏大,则估测的降水量也偏大。但雨滴谱仪的观测结果基本能够反应客观降雨情况。

图 2a 总体上红蓝两条(降水强度-时间)折线的变化趋势基本一致,二者测得的降雨强度相近,且均出现两个明显峰值,自动雨量站和激光雨滴谱仪最大降水强度出现时刻同为 03:51,分别为 $120.00\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $133.80\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在降水强度较小时 ($\leq 6\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$),可以看到自动雨量站记录的绝大部分降雨强度折线

呈锯齿状,而激光雨滴谱仪观测的反而较连续平滑,呈现这样的变化趋势主要是仪器自身的精度和设计特点造成的。图 2b 红色虚线为降雨强度拟合线,黑色虚线斜率为 1,相关性系数为 0.97,从线性拟合来看,拟合线在 1:1 线下方,表明激光雨滴谱仪观测的降水强度略大于自动雨量站记录的。

综合图 1,得到自动雨量站和激光雨滴谱仪的观测结果在时间尺度上基本一致,相比于自动雨量站,激光雨滴谱仪观测资料计算得到的降水量略大,但基本上能够反应客观降雨情况,与文献[14][18]得到的研究结论相同。

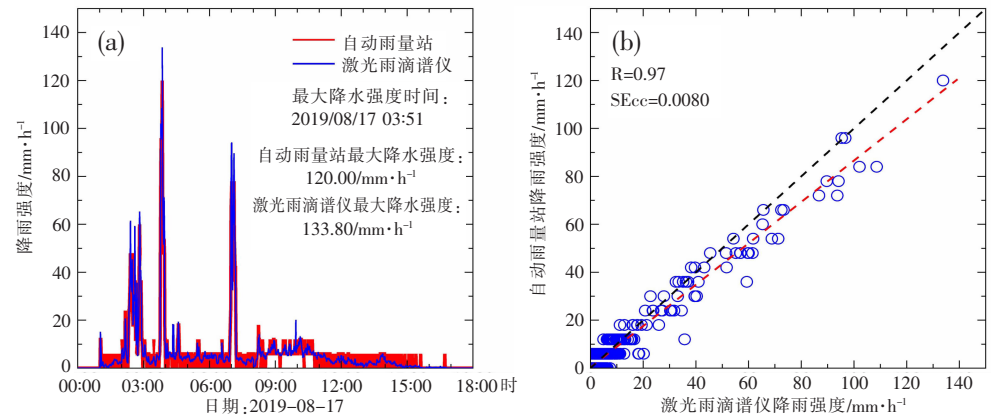


图 2 降雨强度变化关系

(a)红色实线、蓝色实线表示自动雨量站和激光雨滴谱仪的降雨强度曲线;(b)自动雨量站和激光雨滴谱仪降雨强度的相关性,蓝色圆圈为降水强度分布,红色虚线为降水强度拟合线,黑色虚线斜率为 1。

2.2 雨滴谱特征分析

2.2.1 分钟粒子数与降水量

激光雨滴谱仪观测的分钟粒子数和分钟降雨量对比结果见图 3。图 3a 可知, 分钟粒子数和分钟降

水量的变趋势基本一致, 特别是两个明显峰值, 分钟粒子数越多, 分钟降水量也越多; 图 3b 降水粒子数和降水量的相关性系数为 0.94, 由此可见降水粒子数与降水量存在正相关。

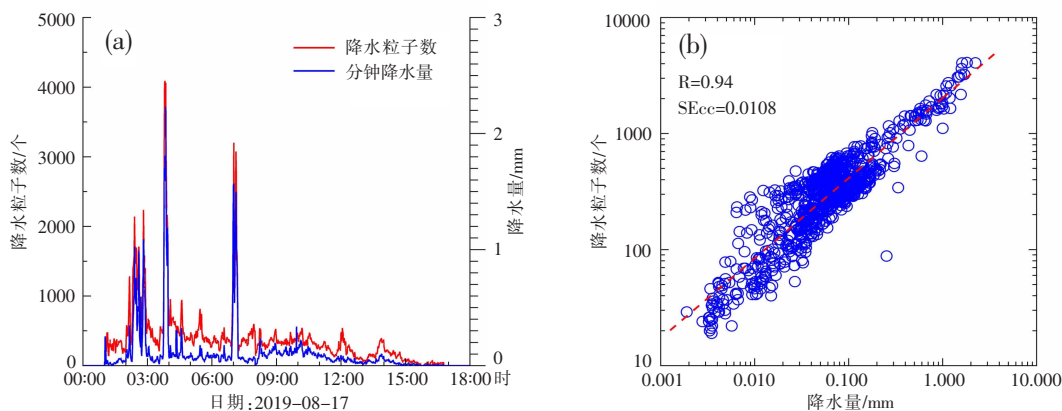


图 3 分钟粒子数与降水量变化关系

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

2.2.2 不同粒径的粒子数对总降水量的贡献

为了探讨粒子数浓度与降水量的关系, 制作了降水粒子数和降水量在不同粒子直径范围内的分布图(图 4)。

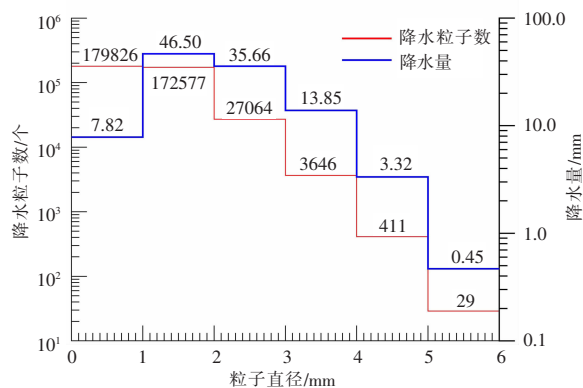


图 4 降水粒子数和降水量的关系, 红色实线(数字)表示降水粒子数, 蓝色实线和数字表示降水量。

图 4 可知, 此次降水过程直径小于 2mm 的降水粒子占粒子总数的主体 (352403 个), 占比为 91.88%, 而降水量的贡献率仅占 50.48%; 直径在 1~3mm 范围内的的粒子降水量占此次降水总量的主体(为 76.35%)。在小于 1mm 的直径范围内降水粒子数最高(179826 个), 占粒子总数的 46.88%, 而降水贡献率仅为 7.27%。相比于小于 1mm 粒子直径, 在 1~2mm 的直径范围内降水粒子数略小(172577),

而降水贡献率反而较高(43.21%)。此外, 在粒子直径大于 1mm 范围内, 降水粒子数和降水量均随粒子直径的增大而减少。

综合图 3 和图 4 可得, 总体上降水过程分钟粒子数和分钟降水量的变化趋势基本一致, 降水粒子数和降水量呈强的正相关, 相关性系数达到 0.94, 即分钟粒子数越多, 分钟降水量也越多。但降水量并不仅仅是由降水粒子数决定的, 还取决于降水粒子的直径大小, 此次降水直径大于 1mm 的雨滴占降水量的主体, 降水粒子数集中分布在小于 2mm 的粒子直径范围内, 而降水量主要分布在 1~3mm 的粒子直径范围内, 粒子数多, 降水量不一定大, 降水量主要由大粒子决定, 而不仅仅由粒子数决定。

2.2.3 谱宽和粒子数

由式(1)和式(4)可知, 降雨强度是直径的立方和降水粒子数的函数。图 5 为分钟降水粒子谱宽和粒子数的时间变化。由图可知, 此次降水过程谱宽主要集中分布在 2~3mm 左右, 降水起始和结束时刻谱宽均较大, 其中有两个降水主要峰值区, 分钟最大粒子数分别为 4090 和 3201 个, 在 03:45—03:55 和 06:59—07:12 时段, 峰值区的持续时间分别是 10min 和 13min, 谱宽均为 5.188mm。在整个降水过程中降水粒子数和雨滴谱宽有一定的相关性, 相关性系数为 0.53, 二者均连续不断地随时间起伏变化, 变化趋势基本同步, 即谱宽越大, 降水粒子数增多, 降雨

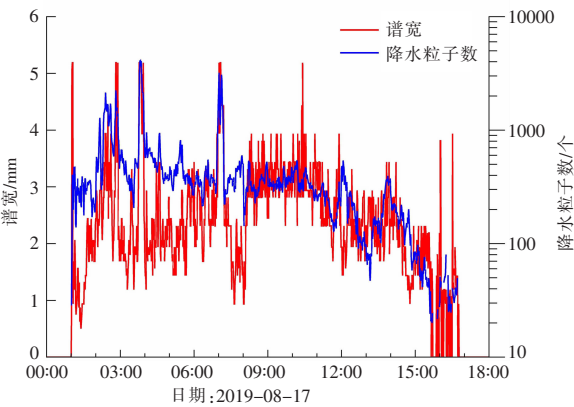


图5 谱宽/粒子个数-时间变化图

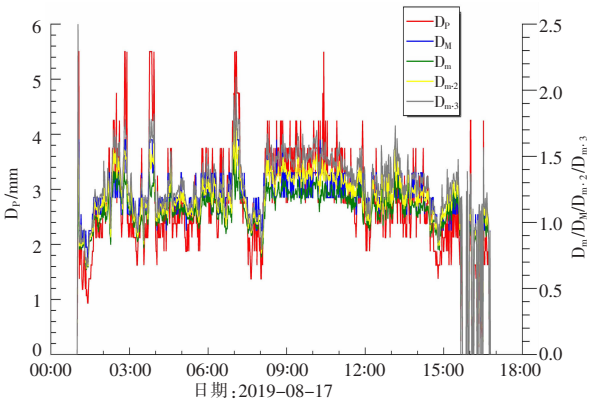


图6 特征直径-时间变化图。

强度增大。

2.2.4 特征直径

由式(3)可得整个降水过程的逐分钟将水粒子总数,即雨滴粒子数密度,结合粒径可计算得到特征直径。图6为此次降水过程特征直径-时间变化。统计结果表明特征直径随时间起伏变化趋势基本一致,峰值直径(D_p)、平均直径(D_m)、中值直径(D_M)、均平方根直径(D_{m2})、均立方根直径(D_{m3})的变化幅度分别在 0.94~5.5mm、0.64~1.73mm、0.69~1.87mm、0.65~2.14mm、0.66~2.53mm 之间,平均值分别为 2.84mm、1.11mm、1.19mm、1.20mm、1.30mm。总体上

看,在整个降水过程中除峰值直径(均值 2.84mm)以外,平均直径、中值直径、均平方根直径和均立方根直径均幅度在 1.2mm 左右。平均直径同峰值直径、中值直径、均平方根直径和均立方根直径均呈强相关,相关性系数分别是 0.74、0.75、0.99 和 0.96。表明特征直径之间存在着较好的线性关系。

综合图5,因为降水量不仅仅由粒子数量决定,也由大粒子决定,而峰值直径、平均直径、中值直径、均平方根直径、均立方根直径这五个物理量均反应了降水粒子的大小情况。此次降水过程地面雨滴谱的主要特征量如表2所示。

表2 雨滴谱特征

粒子数浓度(m^{-3})	粒子总数(个)	谱宽(mm)	平均直径(mm)	均方根直径(mm)	均立方根直径(mm)
20187	373734	2.45	1.16	1.287	1.429
最大粒子数浓度/ m^{-3}	最大粒子数	最大谱宽/mm	最大平均直径/mm	最大均方根直径/mm	最大均立方根直径/mm
46458	4090	5.19	1.73	2.145	2.532

3 结论与讨论

(1)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,相关性系数为 0.9999,二者测量的累积降水量在时间轴上呈现的总体趋势基本一致,但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,主要是因为此次降水以“雨”和“阵雨”为主,在 03:45—03:55 和 06:59—07:12 时段出现两个明显的峰值,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^[19],降水强度和累积降水量也偏大。

(2)降水过程分钟粒子数和分钟降水量在时间

轴上起伏变化趋势基本一致,二者的相关性系数为 0.94,即分钟粒子数越多,分钟降水量也越多。但降水量不是单纯的由粒子个数决定,粒子数多,降水量不一定大,降水量还取决于降水粒子的直径大小。

(3)谱宽和降水粒子数呈弱的正相关(0.53),且二者随时间起伏变化基本同步,决定了降雨强度。

(4)特征直径分析表明,峰值直径、平均直径、中值直径、均平方根直径、均立方根直径之间存在着较好的线性关系,均反应了降水粒子的大小情况,在分析特征直径时可互相包容。

(5)降水强度主要由大雨滴决定;在遇到短时强降水时,雨滴重叠会导致激光雨滴谱仪观测的降水

强度和累积降水量偏大。

激光雨滴谱仪观测的累积降水量略大于自动雨量站累积降水量, 主要原因是雨滴重叠会导致激光雨滴谱仪观测粒子直径偏大, 但是否有普适性仍需更多样本研究, 后期笔者将加强相关方面研究, 为进一步基于雨滴谱资料估测降水、建立不同性质降水的 Z-I 关系本地化, 提高降水量估算精度提供参考。

参考文献:

- [1] 万和跃, 濮江平, 刘思瑶. 雨滴谱探测技术发展及应用概述[J]. 科技创新导报, 2015, 12(31): 166-167.
- [2] 周黎明. 地面雨滴谱观测与分析研究进展[J]. 山东气象, 2014, 34(3): 1-5, 82.
- [3] 周黎明, 王俊, 龚佃利, 等. 激光雨滴谱仪在山东的布设和初步应用[J]. 山东气象, 2015, 35(1): 18-22.
- [4] 陈宝君, 李子华, 刘吉成, 等. 三类降水云雨滴谱分布模式[J]. 气象学报, 1998, 56(4): 123-129.
- [5] 柳臣中, 周筠珺, 谷娟, 等. 成都地区雨滴谱特征[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 112-121.
- [6] Larsen M L, Kostinski A B, Jameson A R. Further Evidence for Superterminal Raindrops[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 41(19): 6914-6918.
- [7] 张昊, 濮江平, 李靖, 等. 庐山地区不同海拔高度降水雨滴谱特征分析[J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(2): 43-50.
- [8] 林文, 牛生杰. 宁夏盛夏层状云降水雨滴谱特征分析[J]. 气象科学, 2009, 29(1): 97-101.
- [9] Friedrich K, Kalina E A, Aikins J, et al. Raindrop Size Distribution and Rain Characteristics during the 2013 Great Colorado Flood[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(1): 53-72.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 班显秀, 袁健, 王永亮. 沈阳一次西风槽降水过程的雨滴谱特征分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(2): 145-151.
- [14] 沈鹰, 李辰, 郑艺, 等. 曲靖一次降雨过程的雨滴谱特征分析[J]. 云南地理环境研究, 2018, 30(2): 66-71.
- [15] 邹书平, 柯莉萍, 熊凯, 等. 雨滴谱反演降水与实际降水变化趋势一致性分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(2): 1-7.
- [16] Löffler-Mang M, Joss J. An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(2): 130-139.
- [17] 胡子浩, 濮江平, 张欢, 等. Parsivel 激光雨滴谱仪观测较强降水的可行性分析和建议[J]. 气象科学, 2014, 34(1): 25-31.
- [18] Tokay A, Wolff D B, Petersen W A. Evaluation of the New Version of the Laser-Optical Disdrometer, OTT Parsivel2[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(6): 1276-1288.
- [19] 周坤论, 黄剑钊, 陶伟, 等. 降水类天气现象自动与人工观测质量对比分析[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(1): 112-117.

Analysis of raindrop spectral characteristics of a heavy rainfall process in Beihai city

Zhou Kunlun¹, Zhang Zherui², Cheng Zhenhua¹, Jing kun¹, Tao wei¹, Li Yanping³

(1. Guangxi Meteorological Technology Equipment Center, Nanning 530022, China;

2. Guangxi Meteorological Service Center, Nanning 530022, China;

3. Guangxi Meteorological Information Center, Nanning 530022, China)

Abstract: Based on the observation data of automatic rainfall station and laser raindrop spectrometer of Beihai national climate observatory, the characteristics of raindrop spectrum were preliminarily analyzed for the continuous rainfall process from 00:00 to 18:00 on August 17, 2019. The results show that (1) the cumulative precipitation of the laser raindrop spectrometer and the automatic rainfall station has a good consistency. (2) The number of particles per minute is positively correlated with the precipitation per minute, but the precipitation is not only determined by the number of particles, but also depends on the diameter of raindrops. (3) The variation of spectral width and precipitation particle number with time fluctuation is basically synchronous, which determines the rainfall intensity. (4) The characteristic diameters have a good linear relationship, can contain each other, and can reflect the size of precipitation particles. In conclusion, the raindrop particles observed by the laser raindrop spectrometer in different velocity and diameter channels are reliable and can reflect the actual rainfall. Rainfall intensity is mainly determined by large raindrops. In case of short-term heavy rainfall, the overlap of raindrops will lead to the larger rainfall intensity and cumulative precipitation observed by laser raindrop spectrometer.

Key words: automatic rain gauge; laser raindrop spectrometer; raindrop spectrum; spectrum width; characteristic diameter