

基于雨滴谱仪的降雨雨滴特征分析

蔡钊^{1,2},刘九夫^{1,2},廖爱民^{1,2},廖敏涵^{1,2},刘宏伟^{1,2},
王欢^{1,2},马涛^{1,2},卓鹏^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院,江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要:利用雨滴谱仪对2019年5—10月和2020年6—7月的雨滴特性进行分析,并与实验场内0.1 mm和0.5 mm分辨率的雨量计观测数据对比,得到雨滴到达地面时的尾速、直径及其两者之间的关系特征,并探究不同雨强范围雨滴直径的分布情况。结果表明:2019年5—10月出现频率最高的是0.5 mm左右直径雨滴,占比超过20%,0.7 mm直径以下的雨滴占比约为65%;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;2019年5—10月和2020年梅雨季,雨强在0.5 mm/min以下的频率超过90%,这要求雨量计在出厂标定时必须小雨雨强下进行。

关键词:雨滴谱仪;雨滴尾速;雨滴直径;雨量计

中图分类号:P334 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)05-0093-06

Analysis of characteristics of raindrops based on distrometers//CAI Zhao^{1,2}, LIU Jiufu^{1,2}, LIAO Ai min^{1,2}, LIAO Minhan^{1,2}, LIU Hongwei^{1,2}, WANG Huan^{1,2}, MA Tao^{1,2}, ZHUO Peng^{1,2} (1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The characteristics of raindrops from May to October in 2019 and from June to July in 2020 were analyzed by using distrometers, and the results were also compared with the measured data of 0.1 mm and 0.5 mm resolution rain gauges calibrated in the experimental field. The raindrop velocity and diameter and the relationship between them were obtained. The distribution of raindrop diameters in different rainfall intensities was investigated. The results show that the raindrops with the highest frequency of about 0.5 mm diameter accounts for more than 20%, and the raindrops with diameter less than 0.7 mm accounts for about 65% from May to October in 2019. The distribution histogram shows a more obvious double peak phenomenon in moderate and heavy rainfall patterns. With the increase of rainfall intensity, triple peak phenomenon occurs in storm rain pattern while single peak phenomenon occurs in light rain pattern. The frequency of the rainfall intensity less than 0.5 mm/min is over 90% from May to October in 2019 and during the rainy season in 2020, which requires the factory calibration of rain gauges under weak rainfall intensity.

Key words: raindrop distrometer; raindrop velocity; raindrop diameter; rain gauge

降水测量是水循环、水资源调查评价、生态文明建设、气候变化等研究的基石^[1],翻斗式、虹吸式、称重式雨量计等降水测量仪器为水文气象的试验研究以及日常业务观测都提供了良好的保证,但这些传统的雨量计无法捕捉雨滴的微观特征。近年来雨滴谱仪、测雨雷达等新技术的应用,丰富了降雨测量的手段^[3],也为研究降雨的微观特征提供了更为便捷的手段。雨滴谱仪有二维视频雨滴谱仪、激光式雨滴谱仪等多种不同类型设备^[6]。在国内,胡子浩等^[8]进行了基于雨滴谱仪测量降雨的比对实验研

究,对雨滴谱仪在降水测量中的作用评估以及改进提出了建议。在国外,Villiermaux等^[11]指出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。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的破碎,以及雨滴之间的合并^[14]。合并后的雨滴以原来两个雨滴中较大的速度下落,而大雨滴破碎产生的小雨滴,则以相同的速度下落^[15]。Guillermo等^[16]在研究中利用光学图像的方法,证实了大雨滴在下落过程中产生的破碎小雨滴,其尾速比通常的认知要大。Larsen等^[17]也

基金项目:国家自然科学基金(91647203,51609145);国家重点研发计划(2017YFC0405700)

作者简介:蔡钊(1991—),男,博士研究生,主要从事水文实验和水文监测新技术研究。E-mail:caizhao27@126.com

水利水电科技进展,2021,41(5) Tel:025-83786335 E-mail:jz@hhu.edu.cn http://jour.hhu.edu.cn

• 93 •

通过对雨滴谱仪的持续观测,得出降雨发生后小直径的雨滴占比较高的结论。

先前研究主要侧重于雨滴谱仪与试验实测数据的比对和误差来源分析,以及雨滴的物理特性分析等,对雨滴本身的特性与雨强的关系,到达地面后的尾速和直径的关系,不同雨强下雨滴直径分布情况的分析较少。因此笔者利用 Parsivel (OTT) 雨滴仪对 2019 年 5—10 月和 2020 年梅雨季的降雨进行雨滴特性分析,深入探究雨滴的微观特性,得到雨滴到达地面时的尾速、直径及其两者之间的关系特征,并探究不同雨强范围雨滴直径的分布情况,为雨滴特性的进一步研究,以及雨滴谱仪在水文试验和观测的资料分析以及数据对比分析提供参考,可为未来雨量计的标定提出新的建议。

1 研究方法

1.1 场地位置

本研究在南京水利科学研究院滁州水文实验基地(118°12'E, 32°17'N)内开展,气象场内布置了 2 个间距 2 m 的 Parsivel (OTT) 型雨滴仪:SL3-1 型 0.1 mm 雨量计,JDZ 型 0.2 mm、0.5 mm 雨量计,以及其他众多水文实验仪器^[18],见图 1。图 1 中 D01、D02 为 2 台雨滴谱仪,J01、J03、J05 分别为分辨率 0.1 mm、0.5 mm、0.2 mm 的雨量计(每种分辨率的雨量计为 2 对)。

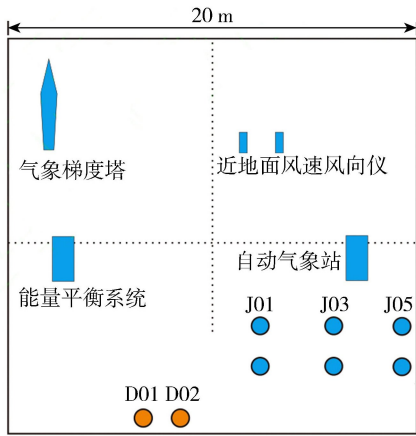


图 1 滁州水文实验基地仪器布置

1.2 实验仪器及降水资料

Parsivel (OTT) 型雨滴仪主要利用光学原理^[19],测量到达仪器测量范围内的雨滴的粒径、速度、能量、雨滴类型等参数。本研究中雨滴谱仪雨强为 0.001 ~ 9999.9 mm/h,粒径为 0.2 ~ 24.5 mm,速度为 0.2 ~ 20 m/s,其中雨滴直径谱在雨滴的横向和纵向(D 和 V 方向)进行了 32 个分级。用于比对的雨量计分别为 0.1 mm 分辨率的 SL3-1 型雨量计和 0.5 mm 分辨率的 JDZ 型雨量计,且这两种雨量计在

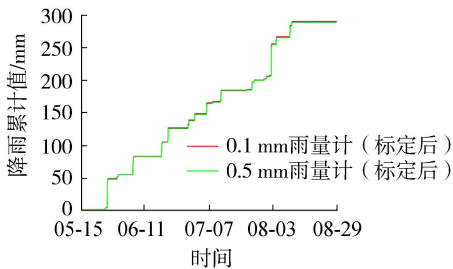
安装前均进行了严格的标定试验,将雨量计的计量误差控制在±4%以内。为满足雨滴谱仪、滁州水文实验基地内 X 波段双偏振测雨雷达和雨量计的试验研究要求,滁州水文实验基地所有的雨量计、雨滴谱仪的数据记录频率均为 1 min/次,高于行业业务标准 5 min/次。

降雨资料使用 2019 年 5—10 月和 2020 年梅雨季的降水数据,由于 2019 年降水量较少,其梅雨季节非常短,而 2020 年梅雨季降雨量较多,因此分别进行了雨滴特性分析。

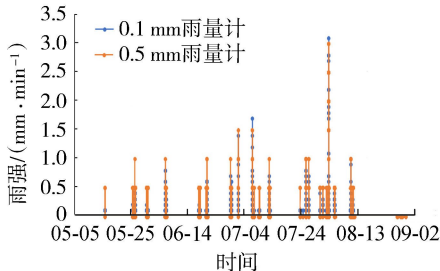
2 结果与分析

2.1 雨滴谱仪与实测数据比较

对比 2019 年 5—10 月 0.1 mm 和 0.5 mm 雨量计监测结果(图 2)可知,它们在降雨总量的捕获中差别很小,仅相差 2 mm 左右,但从降雨量的累计差异可看出,在 7 月份之后的降雨中,每场降雨均存在 0.1 mm 雨量计测量值略大于 0.5 mm 雨量计的情况。特别是在 7 月 6 日和 8 月 2 日的降雨测量中,0.1 mm 雨量计每分钟的测量值明显偏大,这之前有关雨量计特性试验结果一致^[21],即 SL3 型 0.1 mm 雨量计误差和稳定性方面的要求均不如 JDZ 型 0.5 mm 雨量计。



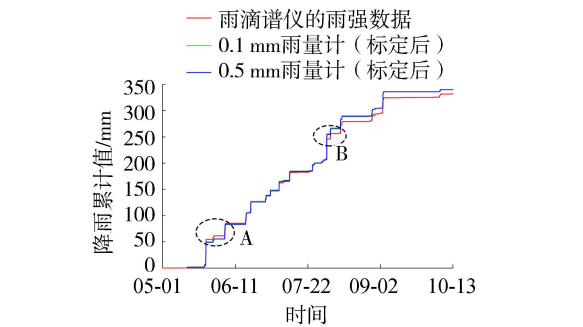
(a) 2019年5—10月0.1 mm和0.5 mm雨量计累积雨量



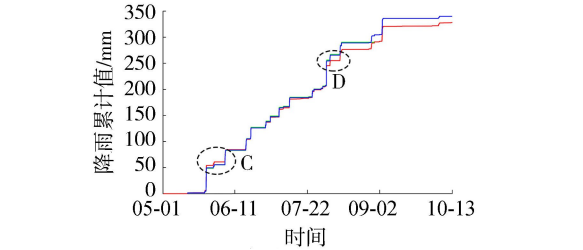
(b) 2019年5—10月0.1 mm和0.5 mm雨量计测量雨量

图 2 2019 年 5—10 月 0.1 mm、0.5 mm 雨量计观测值对比

2019 年 5—10 月中,2 台雨滴谱仪 D01 和 D02 的累积雨量和实验场内已标定的 0.1 mm、0.5 mm 雨量计测量的累积雨量的对比如图 3 所示。图 3 反映了雨滴谱仪数据的变化以及与雨量计观测数据的差异:2 台雨滴谱仪测得的雨量和 0.1 mm、0.5 mm 雨量计的观测值整体趋势基本一致,除去图 2 中 4 个点的雨量累计值不一致外,雨量基本一致,说明雨滴



(a) 雨滴谱仪D01与0.1mm和0.5mm雨量计测量的累积雨量



(b) 雨滴谱仪D02与0.1mm和0.5mm雨量计测量的累积雨量

图3 2019年5—10月雨滴谱仪累积雨量和
0.1 mm、0.5 mm 雨量计测量的累积雨量对比

谱仪在雨量测量中有一定的可信度。另外,2台雨滴谱仪在降雨发生后的雨量数据趋势、雨量计量等方面的差距很小,说明其仪器在自身差异化方面有一定的保证。

针对存在差异的4个点(A~D点)进行单独分析,A处和C处雨滴谱仪数据大于0.1 mm、0.5 mm雨量计测量值的主要原因是雨量计的数据传输素材(CR1000)在2019年5月26日凌晨6点左右出现了短暂的供电缺失造成的数据缺失。B处和D处雨滴谱仪数据小于0.1 mm、0.5 mm雨量计测量值的主要原因是2019年8月2日实验基地出现供电问题,导致雨滴谱仪出现数据缺失,缺失值在10 mm左右。

2.2 雨滴谱仪粒径分析

对2019年5—10月和2020年梅雨季的雨滴粒径统计如图4、图5所示,由于雨滴谱仪的测量数据在进行内部分组时,0~1.25 mm直径范围的分组间隔为0.125 mm,1.25~2.5 mm分组间隔为0.25 mm;依次类推,因此图4中柱状图的宽度代表了分组间隔的大小,图中0~1.25 mm柱状的宽度小于1.25~2.5 mm的宽度。从雨滴谱仪测量的雨滴直径结果可看出雨滴的直径分布呈现“双峰”分布的形态,在0.438~0.562 mm和1.25~1.5 mm直径处出现了2个柱状峰值,这可能与不同降雨类型(降雨雨强)下不同直径雨滴的占比有关。

从图4可知在2019年5—10月中频率最高的为0.5 mm直径左右的雨滴,占比超过20%;0.7 mm直径以下的雨滴占比约65%,1 mm直径以下的雨滴占比更是接近83%。说明在夏秋季节滁州实验基

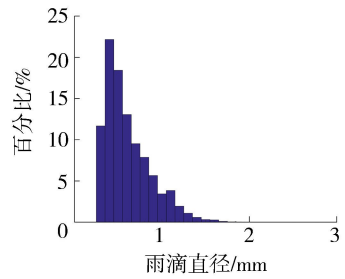


图4 2019年5—10月2台雨滴谱仪的
雨滴直径统计结果

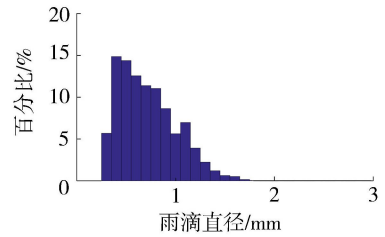


图5 2020-06-10—2020-07-21 梅雨季雨滴谱仪的
雨滴直径统计结果

地的降雨主要以小直径的雨滴为主,大雨滴的直径占比很小,这与Larsen等^[17]的研究相吻合:即雨滴在下落过程中存在破碎过程,到达地面的雨滴主要以小直径的雨滴为主。

由图5可知2020年梅雨季中雨滴的直径分布在整体上与2019年5—10月基本相似;统计频率图中出现2个峰值,且降雨雨滴的直径集中在1 mm以下。但梅雨季也有不同之处:2个峰值集中在0.375~0.5 mm和1.187~1.25 mm之间,分别占比14.86%和6.98%,远高于2019年此分布区间的占比。造成此现象的原因可能是梅雨季云层中形成的雨滴初始直径较大,在下落过程中发生了更多的破碎和碰撞。

滁州实验基地内布置的雨量计记录频次均为1 mm/min,可真实反映出自然降雨的每分钟雨强。图6为使用0.1 mm雨量计观测的2019年5—10月和2020年梅雨季的雨强分布频率直方图。由图6可清晰看出,无论是2019年还是2020年的梅雨季,降雨雨强在0.5 mm/min以下的频率超过了90%,雨强在0.3 mm/min以下的频率超过了80%,即大部分的自然降雨为小雨强,这与通常的认知有些许

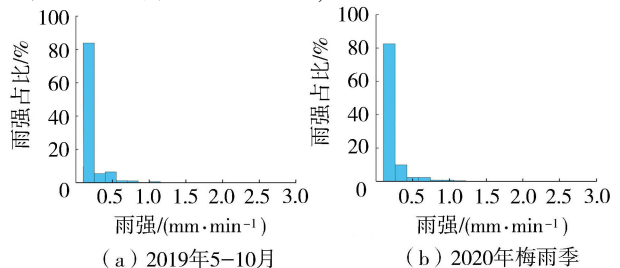


图6 2019年5—10月和2020年梅雨季0.1 mm
雨量计记录的雨强分布直方图

区别,也为未来雨量计的标定提出了新要求:雨量计在出厂标定时必须在小雨强下将误差控制在 $\pm 4\%$ 以内,以满足全年降水计量误差控制需求。

由不同雨强区间内雨滴直径分布情况(图7、图8)可知,在不同雨强范围内雨滴直径的分布呈现不同的特征,在较小雨强下($0 \sim 0.3 \text{ mm/min}$),小直径的雨滴占比较多,集中在 $0.2 \sim 0.6 \text{ mm}$ 之间,占比40%左右,且并未出现“双峰”的分布形态;随着雨强的增大($0.3 \sim 0.6 \text{ mm/min}$),雨滴粒径占比较多的集中在 1.5 mm 左右(图7中A、B两点)。随着雨强的继续增大,直径在 1.5 mm 左右的雨滴占比呈现逐渐减小的趋势,分布直方图呈现出较为明显的“双峰”现象。这可能与雨滴下落过程中的碰撞破

碎以及雨滴之间的合并有关,在小雨强下雨滴以小直径为主;随着雨强的增大,在一定雨强范围内雨滴的破碎量变小或者雨滴融合较多,造成较大直径的雨滴占比较多;随着雨强继续增大,雨滴之间的碰撞增多,以及大雨滴破碎为小直径雨滴的概率增大,进而出现分布中的“双峰”现象。

2.3 不同雨型下雨滴直径分布分析

自然界中不同雨型对应的雨滴谱存在不同的特性,图9给出了2019年6场不同雨型的降雨雨滴直径分布。6场降雨中,小雨、中雨各2场,大雨和暴雨各1场。对不同雨型的直径分析可得到:①无论任何雨型,直径占比最大的始终是 0.5 mm 左右直径的雨滴。②雨滴直径直方图一般存在“双峰”现象;

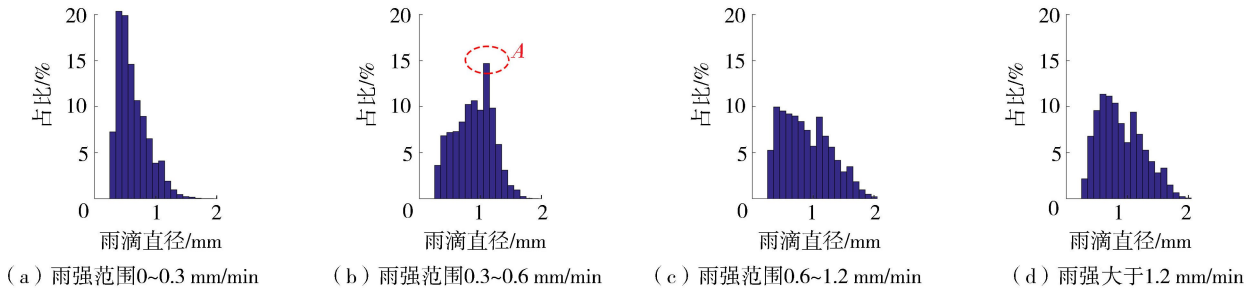


图7 2019年5—10月不同雨强范围内雨滴直径的分布直方图

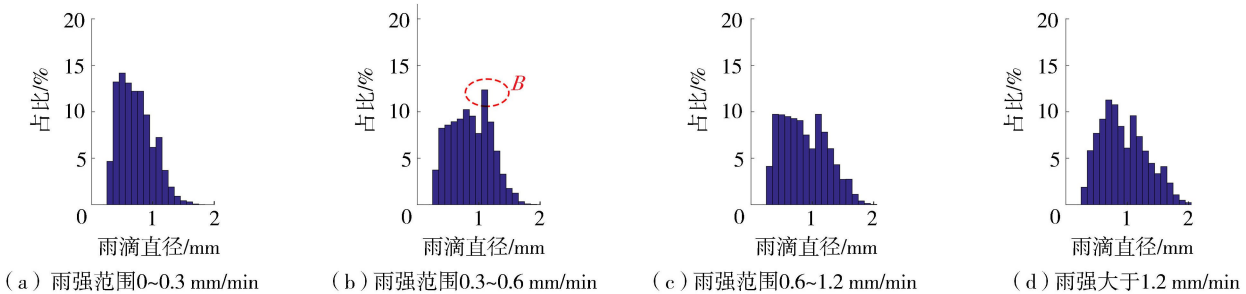


图8 2020年梅雨季不同雨强范围内雨滴直径的分布直方图

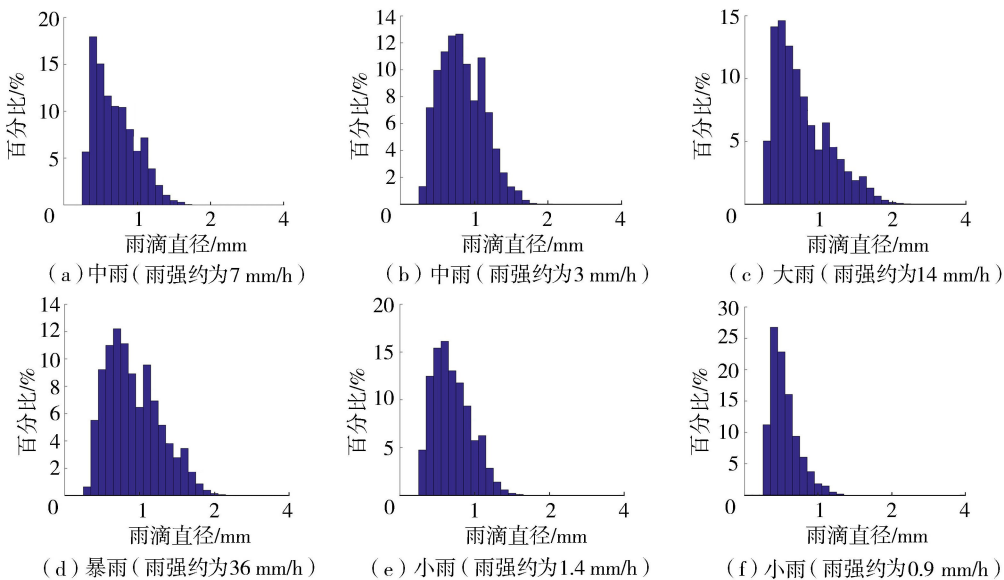


图9 2019年5—10月不同雨型时雨滴直径的分布直方图

但在不同雨型的情况下,“双峰”的形态有很大的变化,有可能出现“三峰”(图9(d)),甚至可能消失变为“单峰”(图9(f))的现象。在中雨和大雨雨型下,雨滴直径的直方图均呈现“双峰”现象。随着雨强的增大,变为暴雨时,则会出现第3个较为突出的峰值,这可能是由于在暴雨发生时,降雨雨滴的初始直径较大,存在较多的碰撞和融合。随着降雨雨强的减小,则会只出现0.5 mm左右直径占比最大的“单峰”现象(图9(f)),这可能与雨滴形成的初始直径较小有关,雨滴在下落的过程中,存在较多的碰撞,但雨滴融合较少。

2.4 雨滴谱粒径与速度关系分析

雨滴谱仪测量雨滴的直径和速度关系如图10所示,并在图中给出了置信水平95%的置信椭圆。由图10可知:①降雨雨滴的最大速度可达10 m/s,且出现最大速度的雨滴直径均在1 mm以下,这可能与雨滴在空中下落时的破碎有关。大雨滴在下落时产生破碎,生成更多小直径的雨滴,这些小雨滴破碎后的速度与大雨滴相同;而在小雨滴下落过程中承受空气阻力较小,因此在到达地面时,会产生非常大的尾速度。②雨滴直径均小于5 mm,且95%的雨滴样本落在速度0~7 m/s、直径0.4~3.8 mm之间。在降雨量较大的2020年6—7月梅雨季,置信椭圆整体显得更为“消瘦”,即降雨雨滴的粒径范围更为集中,且速度分布的范围更广。③大直径雨滴(大于3 mm)的尾速范围稳定在1~4 m/s之间;而尾速较大(大于7 m/s)的雨滴,直径普遍在2 mm以下,且集中在1~2 mm区间之内,原因可能与大直径雨滴破碎产生小雨滴的下落速度较大有关。

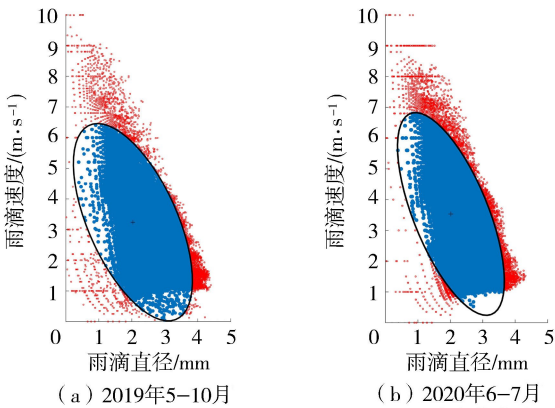


图10 2019年5—10月和2020年6—7月雨滴直径和速度分布以及基于正态分布的置信水平95%置信椭圆

3 结 论

a. 2019年5—10月出现频率最高的是0.5 mm左右直径雨滴,占比超过20%;0.7 mm直径以下的雨滴占65%左右;直径1 mm以下的雨滴占83%左右。

雨滴的直径分布呈现“双峰”分布形态,在2020年6—7月的表现更为明显,其占比集中在0.375~0.5 mm和1.187~1.25 mm之间,分别为14.86%和6.98%。

b. 在中雨、大雨雨型的情况下,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;而在小雨雨型时则更容易出现“单峰”现象。通过实验基地0.1 mm、0.5 mm雨量计和雨滴谱仪降雨量的对比可发现了雨滴谱仪在降水量的反演中有一定的可信度,同时0.1 mm雨量计在大雨强下存在观测值略大于0.5 mm雨量计的情况。

c. 2019年5—10月和2020年梅雨季,雨强在0.5 mm/min以下的频率超过90%,雨强在0.3 mm/min以下的频率超过了80%。这为未来雨量计的标定提出了新的要求,即雨量计在出厂标定时必须在小雨强下进行标定,将误差控制在±4%以内,以满足全年降水测量的误差控制需求。

d. 降雨雨滴的最大速度可达10 m/s,且出现速度最大值的雨滴直径均在1 mm以下;雨滴直径均小于5 mm,且95%的雨滴样本落在速度0~7 m/s、直径0.4~3.8 mm之间。大直径的雨滴(大于3 mm)的尾速范围稳定在1~4 m/s之间;而尾速较大(大于7 m/s)的雨滴,直径普遍在2 mm以下,且集中在1~2 mm之内。

参考文献:

[1] 黄炜,李雪真,赵嘉,等. 基于朴素贝叶斯算法的流域降水预测方法[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(4): 65-69. (HUANG Wei, LI Xuezheng, ZHAO Jia, et al. A precipitation forecasting method for a river basin based on naive Bayes algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(4): 65-69. (in Chinese))

[2] 刘培,吴凯,许怡,等. 中国大陆 TRMM 降水多尺度精度评价[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3): 42-47. (LIU Pei, WU Kai, XU Yi, et al. Multi-scale accuracy evaluation of TRMM precipitation data in mainland China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3): 42-47. (in Chinese))

[3] 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. (ZHANG Xiaoyu, LEI Yong, WANG Bolin, et al. Experimental on precipitation observation differences between parsivel laser raindrop spectrometer and LNM [J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(4): 548-554. (in Chinese))

[4] 吴宜,刘西川,张军,等. Parsivel 激光雨滴谱仪与雨量计观测降水的一致性分析[J]. 气象科技, 2020, 48(2): 147-153. (WU Yi, LIU Xichuan, ZHANG Jun, et al. Consistency analysis of precipitation observed by parivel laser disdrometer and rain gauges [J].

- Meteorological Science and Technology, 2020, 48 (2): 147-153. (in Chinese))
- [5] 苏立娟, 郑旭程, 达布希拉图, 等. 基于雨滴谱仪建立不同性质降水 Z-I 关系并与雷达作对比分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34: 103-108. (SU Lijuan, ZHENG Xucheng, DABU Xilatu, et al. The Z-I relation of different precipitation based on the parsivel data and comparative analysis of radar and parsivel[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34: 103-108. (in Chinese))
- [6] LIU X C, GAO T C, LIU L. A comparison of rainfall measurements by multiple instruments [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(7): 1585-1595.
- [7] LOFFLER-MANG M, JOSS J. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2000, 17(2): 130-139.
- [8] 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. (HU Zihao, PU Jiangping, ZHANG Huan, et al. Feasibility analyses and recommendations of parsivel optical distrometer in measurements of strong precipitation [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34 (1): 25-31. (in Chinese))
- [9] 周黎明, 王俊, 张洪生, 等. 激光雨滴谱仪与自动气象站观测雨量对比分析[J]. 气象科技, 2010(1):113-117. (ZHOU Liming, WANG Jun, ZHANG Hongsheng, et al. Comparison of rainfall measurement between Laser raindrop spectrometer and automatic meteorological station [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2010(1): 113-117. (in Chinese))
- [10] 沙修竹, 丁建芳, 程博. 地面激光雨滴谱仪反演降水参量的特性探究[J]. 气象, 2019, 45 (11): 1569-1578. (SHA Xiuzhu, DING Jianfang, CHENG Bo. Characteristics of precipitation parameters reflected by ground laser raindrop disdrometer [J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(11): 1569-1578. (in Chinese))
- [11] VILLERMAUX E, BOSSA B. Single-drop fragmentation determines size distribution of raindrops [J]. Nature Physics, 2009, 5(9): 697-702.
- [12] XU S, CUI J, REN X. Applied mechanics and engineering model on raindrops falling [C] // 2nd International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology. Paris: Atlantis Press, 2012:482-486.
- [13] CHOWDHURY M N, TESTIK F Y, HORNACK M C, et al. Free fall of water drops in laboratory rainfall simulations [J]. Atmospheric Research, 2015, 168: 158-168.
- [14] PRUPPACHER H R, KLETT J D, WANG P K. Microphysics of clouds and precipitation [J]. Aerosol Science and Technology, 1980, 28(4):381-382.
- [15] TESTIK F Y, BARROS A P. Toward elucidating the microstructure of warm rainfall: a survey[J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45(2):1-21.
- [16] GUILLERMO M M, KOSTINSKI A B, SHAW R A, et al. Do all raindrops fall at terminal speed? [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(11):1-4.
- [17] LARSEN M L, KOSTINSKI A B, JAMESON A R. Further evidence for superterminal raindrops [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 41 (19): 6914-6918.
- [18] 蔡钊, 刘九夫, 李薛刚, 等. 风场对雨量计收集降水影响的流体动力学研究[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 17-23. (CAI Zhao, LIU Jiufu, LI Xuegang, et al. CFD simulation of wind field impact on gauge precipitation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 17-23. (in Chinese))
- [19] VALDIVIA J M, CONTRERAS K, MARTINEZ-CASTRO D, et al. Dataset on raindrop size distribution, raindrop fall velocity and precipitation data measured by disdrometers and rain gauges over peruvian central andes (12.0°S)[J]. Data in Brief, 2020, 29: 1-3.
- [20] 陈凤琴, 韩合忠, 耿灵生, 等. 基于激光雨滴谱仪的降雨特征研究[J]. 中国水土保持, 2017(2): 42-43. (CHEN Fengqin, HAN Hezhong, GENG Lingsheng, et al. Study on rainfall characteristics based on laser raindrop spectrometer[J]. Soil and Water Conservation in China, 2017(2): 42-43. (in Chinese))
- [21] 李薛刚, 刘九夫, 廖爱民, 等. 八种国内翻斗式雨量计翻斗计量误差测评分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37 (6):166-169. (LI Xuegang, LIU Jiufu, LIAO Aimin, et al. Evaluation of measurement errors for eight domestic tipping bucket rain gauges [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(6):166-169. (in Chinese))
- (收稿日期:2020-10-08 编辑:骆超)
- +++++
- (上接第 92 页)
- [9] 曹权, 施建勇, 雷国辉, 等. 软土中静压桩贯入引起的超静孔压力理论分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8 (1): 83-88. (CAO Quan, SHI Jianyong, LEI Guohui, et al. Theoretical analysis of distribution of excess pore water pressure caused by installing pile in soft clay [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 2012, 8(1): 83-88. (in Chinese))
- [10] 姚笑青, 胡中雄. 饱和软土中沉桩引起的孔隙水压力估算[J]. 岩土力学, 1997, 18(4): 30-35. (YAO Xiaoqing, HU Zhongxiong. Estimating method for excess pore-water pressure developed during pile driving [J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(4): 30-35. (in Chinese)).
- [11] 胡中雄. 饱和软黏土中单桩承载力随时间的增长[J]. 岩土工程学报, 1985 (3): 58-61. (HU Zhongxiong. Increase of bearing capacity of single pile in saturated soft clay with time [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985(3): 58-61. (in Chinese))
- [12] 赵维炳, 施建勇. 软土固结与流变[D]. 南京: 河海大学出版社, 1996.
- (收稿日期:2020-09-03 编辑:郑孝宇)