

景坤,周坤论,吕抒航,等. 基于雨滴谱和雨量筒观测资料不同类型云降水对比分析[J]. 气象研究与应用,2023,44(2):69-74.
Jing Kun,Zhou Kunlun,Lv Shuhang,et al. Comparative analysis of different types of cloud precipitation based on raindrop spectra and rain gauge data[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2023,44(2):69-74.

基于雨滴谱和雨量筒观测资料不同类型云降水对比分析

景 坤, 周坤论*, 吕抒航, 王乙竹, 梁振清

(广西壮族自治区气象技术装备中心, 南宁 530022)

摘要: 选取北海国家气候观象台 2019 年 1—12 月的雨滴谱和雨量筒资料,根据雨强划分降水类型,对比分析两种设备观测对流云和层状云降水的差异。结果表明:(1)两次降水过程均以“雨”和“阵雨”为主,由于仪器测量精度不同,雨滴谱和雨量筒观测到的降水量有所差别。(2)对于对流云和层状云降水,雨量筒与雨滴谱累积降水量绝对误差均小于 20%,相关性系数均达到 0.99;另外,对流云事件雨滴谱与雨量筒累积降水量平均值误差大于层状云事件的。(3)雨滴谱仪观测出现降雨时间早于雨量筒记录的,降雨结束时间则晚于雨量筒记录的。相比于层状云降水,对流云降水起始阶段雨量更大,降雨速度更快,雨滴谱仪和雨量筒记录到有降水现象的时间差更小。

关键词: 北海;雨滴谱;雨量筒;对流云;层状云

中图分类号: P468.0*24

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.2.12

引言

雨滴谱是指单位体积内各种大小雨滴的数量随其直径的分布,是雨滴生成、下落、增长、破碎、蒸发等过程的综合结果,可直观反映云降水的微物理过程。不同类型云的降水,其雨滴谱分布也不同。对不同地区、不同类型云降水的雨滴谱进行研究,探讨不同降水云的微物理量特征及其演变规律,对检验人工增雨效果^[1]、实现雷达定量估算降水有重要意义^[1-2]。

早期,Gamache 等^[3]使用雷达反射率因子来划分降水类型,将雷达反射率因子大于 38dBZ 的降水的过程认为是对流云降水。Tokay 等^[4]采用 Gamma 函数的时间变化来划分对流云降水和层状云降水。随着雨滴谱资料的应用,刘红燕等^[5]利用地面雨滴谱资料分析不同类型云降水的特征,使用平均体积直径和中数体积直径等参数来划分层状云和对流云降水。王秋淞等^[6]根据雨滴谱仪观测资料采用 $5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 为临界值划分降水类型,即雨强超过这个值时,则认

为是对流云降水。在雷达定量估测降水方面,普遍认为暴雨过程雨强越大,雷达估测降雨的偏差越大^[7]。但采用雨滴谱资料,建立反演降水的 Z-I 关系估算降水,结果显示可提高降水估算精度^[8]。与此同时,随着雨滴谱仪的普及,相关雨滴谱仪自动观测与人工观测的评估分析^[9-10]及其与雨量传感器观测降水量误差分析的研究也相继出现^[11]。更多研究结果表明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^[12-13],但是对雨滴谱仪与雨量筒观测的降雨是否具有普适性仍然缺少大量的数据统计。

本实验依据文献[6]的方法,结合降水宏观特征量、雨滴谱资料,将降水类型划分为对流云降水和层状云降水。降水现象观测是地面气象观测的基本内容之一,实现降水现象自动观测,将有效提高观测的频次和质量^[14-15]。选取 2019 年 1—12 月广西北海国家气候观象台观测资料,统计分析不同类型降水云雨滴谱仪的观测差异,并探究其与雨量传感器观测得到雨量在时间上变化以及累积量的差异,结果可为下一步探究不同类型云的降水估测及不同雨强雨

收稿日期: 2022-09-28

基金项目: 广西壮族自治区气象技术装备中心自立项目“广西植被生态监控软件研制”、“降水过程雨滴谱的统计特征研究”

作者简介: 景坤(1993—),男,助理工程师,主要从事气象探测、装备运行保障工作。E-mail:1053667281@qq.com

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

滴谱特征分析提供借鉴和参考。

1 资料与方法

1.1 数据来源和处理

数据来源于北海国家气候观象台。采用 Parsivel2 激光雨滴谱仪(简称雨滴谱)和翻斗式雨量传感器(简称雨量筒)的观测资料,选取 2019 年 1 月—12 月雨滴谱和雨量筒同时观测(记录)到有降水过程的时间段,记录雨滴谱和雨量筒观测到的起始时刻与结束时刻,通过雨滴谱反演计算公式即可计算出雨滴谱仪观测到分钟累积降水量^[11]。此次共获得样本事件(降水过程)总计 79 次,激光雨滴谱观测到的降水过程持续时间(结束时刻与起始时刻之差)均在 0.5h 以上。

在资料处理方面,为保证数据质量将样本事件逐分钟数据中雨滴数小于 10 或雨强小于 0.1mm/h 的数据视为噪音^[16];由于大于 6mm 的雨滴在自然界中很难维持^[17],考虑个别时刻出现大于 6mm 的雨滴粒子是瞬时雨强较大导致雨滴重叠的,对以上情况数据予以剔除^[11]。全年观测到有雨滴粒子数记录的有效分钟样本数总计 11214min。由样本数据可知,北海降雨较为频繁,主要在夏秋两季,呈现出频次高且不连续的规律。北海全年(2019 年)未出现雪、阵雪、雨夹雪、阵性雨夹雪、冰雹等降水类天气现象。此外,以平均降水强度 5mm·h⁻¹ 为临界值划分降水类型^[6],2019 年北海降水包括对流云降水 39 次(样本 5839min),层状云降水 40 次(5375min),总体上层状云和对流云降水次数和样本个数相当。

1.2 雨滴谱反演计算公式

由于 Parsivel2 激光雨滴谱仪设计时考虑了雨滴的形变^[18],故不对雨滴谱记录的雨滴粒子进行形变订正。

雨滴粒子数密度计算公式^[6]表示为

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

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

其中,式(1) $N(D_i)$ 为各粒径粒子数密度; 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 5400mm² (180mm×30mm); ΔT 为取样时间 1min(60s); V_j 第 j 速度级的速度值,单位为 m/s。

单位时间(1min)的降水量,即单位时间内通过

激光带的所有粒子的体积之和除以面积(A),公式表示^[12]为

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

其中, R 为 t (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 (降水过程逐 1min)。

降水过程累积降水量(P_t)公式^[12]表示为

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

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

2.1 典型事件分析

图 1(a,b)为层状云、(c,d)对流云事件的典型事例。图 1(a,b)为 2019 年 3 月 24 日、(c,d)为 2019 年 4 月 1 日的雨量筒与雨滴谱累积降水量、雨强随时间变化情况。总体上看,图 1(a,c)雨滴谱和雨量筒累积降雨量具有很好的一致性,二者测量的累积降雨量在时间轴上总体趋势基本一致;另外,雨量筒记录的累积降水量折线呈锯齿状,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。

结合表 1,2019 年 3 月 24 日降水过程雨滴谱于 5:03 开始观测到有 0.021mm 降水记录,雨量筒则在 6:21 分开始记录到有 0.1mm 的累积降水记录,相比于雨量筒,雨滴谱观测有降水记录早 78min;雨滴谱观测到降水结束时间为 09:33(累积降雨量 0.75mm),雨量筒记录结束时间为 8:02(累积降雨量为 0.8mm),雨滴谱观测降水结束时间比雨量筒晚 91min。2019 年 4 月 1 日降水过程雨滴谱于 01:55 开始观测到有 0.021mm 降水记录,在 02:17 分则达到 0.67mm 的累积降水量,而雨量筒在 02:17 分开始记录到有 0.5mm 的累积降水记录,相比于雨量筒,雨滴谱观测有降水记录早 23min;雨滴谱观测到降水结束时间为 04:52(累积降雨量 51.64mm),雨量筒记录结束时间为 04:51(累积降雨量 50.40mm),雨滴谱观测降水结束时间比雨量筒晚 1min。据雨滴谱仪识别的天气现象情况,两次降水过程降雨类型均以“雨”和“阵雨”为主,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,就能出现降水记录,

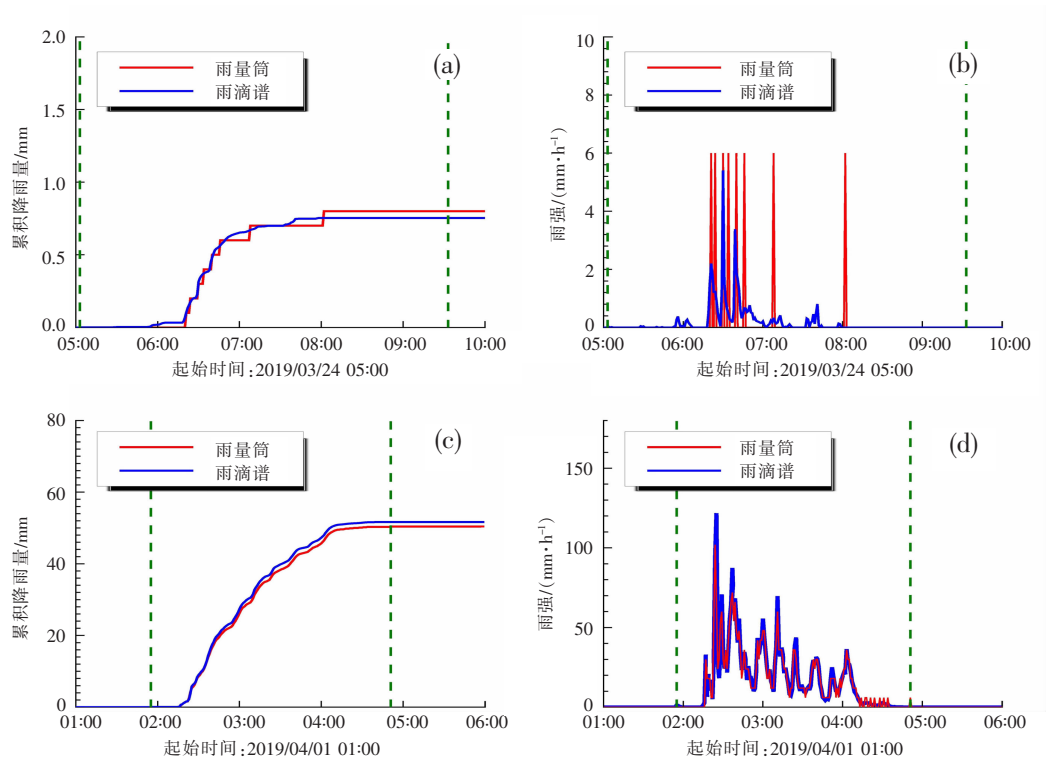


图 1 层状云、对流云事件的累积降雨量-时间变化图(a,c),层状云、对流云事件的雨强-时间变化图(b,d)
(红色实线表示雨量筒,蓝色实线表示雨滴谱,绿色虚线表示雨滴谱仪观测降水过程起止时间)

表 1 雨量筒和雨滴谱统计表

事件时间	仪器	起始时间	结束时间	持续时间/min	累积雨量 P _t /m
2019-03-24 (层状云)	雨量筒	06 : 21	08 : 02	102	0.8
	雨滴谱	05 : 03	09 : 33	271	0.75
2019-04-01 (对流云)	雨量筒	02 : 17	04 : 51	155	50.40
	雨滴谱	01 : 55	04 : 52	178	51.64

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^[13,17]。此外,典型事件中层状云、对流云降水量相对误差分别为-6.25%、2.46%,造成激光雨滴谱仪测量结果偏大或偏小的主要原因是降雨过程易造成雨滴重叠或雨滴破碎,导致识别的雨滴粒子直径偏大或偏小。

2.2 累积降水量分析

北海地区 2019 年对流云(39 次)和层状云(40 次)降雨次数相当。所有 79 个样本事件激光雨滴谱仪与雨量传感器累积降水量关系如图 2。图 2(a)为所有样本事件激光雨滴谱仪与雨量传感器累积降水量的相关性拟合。据统计,无论是对流云事件还是层状云事件,雨量筒与雨滴谱累积降水量绝对误差均

小于 20%,相关性系数均达到 0.99。图 2(b)所有事件激光雨滴谱仪与雨量传感器的累积降水量差的分布图,由图可知,对流云事件 $C_{\text{雨滴谱}} - C_{\text{雨量筒}}$ 小于 0 部分(大于 0 部分)有 17 个(22 个),均值分别为-6.82mm(2.62mm),5 次降水过程累积降水量之差大于 5mm,2 次小于-5mm;而层状云事件 $C_{\text{雨滴谱}} - C_{\text{雨量筒}}$ 基本分布 $\pm 5\text{mm}$ 的范围内,在小于 0 部分(大于 0 部分)有 15 个(25 个),均值分别为-0.35mm(0.35mm)。结合累积降水量和降水时长分析激光雨滴谱仪观测对流云和层状云累积降水量差异,主要是由于两种类型降雨云特征差异导致的,即对流云中云滴和水滴碰撞增长,产生大量大直径的雨滴,大雨滴之间相互碰撞而破碎^[18],另外遇到短时强降雨时,雨滴重叠会导致雨滴粒子直径偏大或者雨滴数减少,激光雨

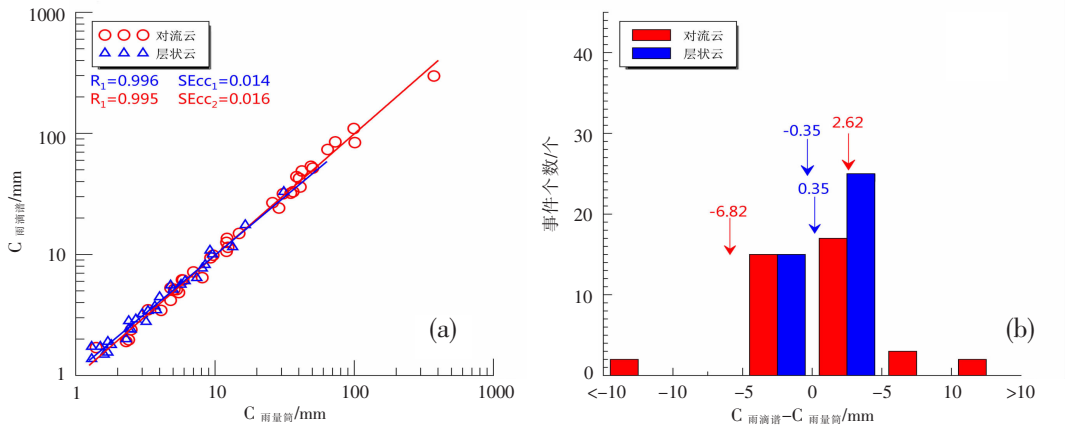


图2 (a)79个样本事件拟合激光雨滴谱仪与雨量传感器的累积降水量的关系,(b)对流云与层状云事件激光雨滴谱仪与雨量传感器的累积降水量之差的统计图
(红色圆圈为对流云事件,蓝色三角为层状云事件;红色实线为对流云事件的线性拟合,蓝色实线为层状云事件的线性拟合; $C_{雨滴谱}$ 为雨量传感器的累积降水量, $C_{雨滴谱}$ 为激光雨滴谱仪的累积降水量)

滴谱仪观测的降雨强度和累积降水量偏大或偏小;而层状云降水各微物理量的变化比较平缓^[19],这也进一步解释了层状云 $C_{雨滴谱} - C_{雨量筒}$ 基本分布 $\pm 5\text{mm}$ 的范围。

图3为所选样本事件雨量筒和雨滴谱仪累积降水量、有效时间统计直方图。统计结果显示,图3a雨量筒记录对流云、层状云事件累积降水量均值分别为32.85mm、4.38mm;图3b雨滴谱仪记录对流云、层状云事件累积降水量均值分别为31.40mm、4.47mm;显然,雨量筒和雨滴谱仪累积降水量均值相近。由于本文以平均降水强度 $5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 为临界值划分降水类型,则出现对流云事件累积降水量均值明显大于层状云事件这一结果。

降水有效时间指雨滴谱仪观测到有降水现象(雨滴粒子)的分钟数。图3c激光雨滴谱仪记录对流云(39次)、层状云事件(40次)降水有效时间均值分别为149.72min、134.38min,表明对流云降水有效时间均值多于层状云降水有效时间均值,即本次所选

样本事件中北海2019年对流云降水有效时间总计5839min,略多于层状云降水有效时间(5375min)。

2.3 特征时间分析

为了研究激光雨滴谱仪和雨量传感器记录的对流云与层状云在时间方面的差异,下面分析了两类仪器记录降水开始与结束时间的先后顺序,以及两种类型降雨云的有效时间占持续时间的比例。图4(a,b)以雨量传感器记录起始时刻作为参考点0,激光雨滴谱仪记录降水开始、结束时间、雨量传感器结束时间与参考点之差的统计直方图。总体上看无论是对流云和层状云事件,激光雨滴谱仪观测出现降雨时间均早于雨量筒记录有雨量时间,观测结束降雨时间均晚于雨量传感器记录的。出现这一现象主要是仪器测量精度不同所造成^[11],即只要出现一个小雨滴,激光雨滴谱仪就能出现降雨记录,而雨量传感器则要出现0.1mm的降水才会出现降雨记录。此外,由T1、T2、T3和T4、T5、T6的均值分别为-10.85、359.74、348.51min和-21.35、262.30、245.93min可知,

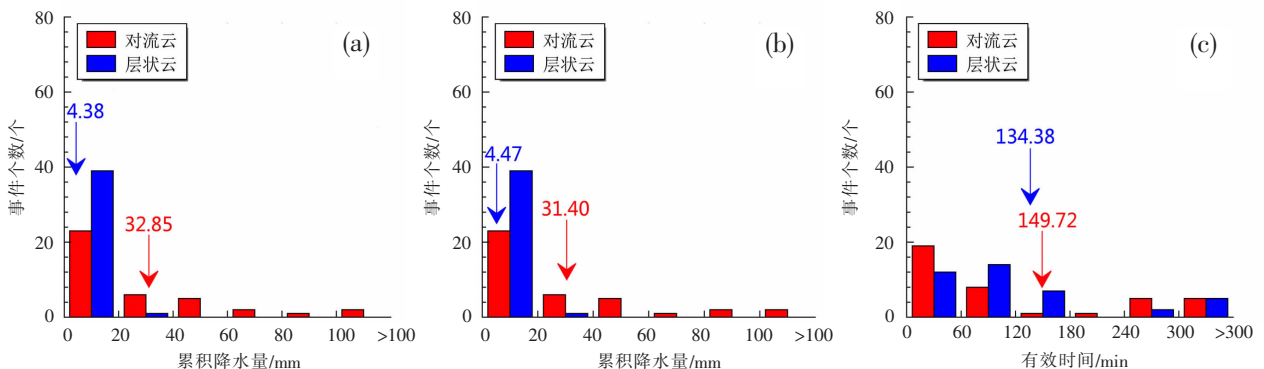


图3 (a)雨量筒、(b)雨滴谱仪累积降水量统计图,(c)对流云、层状云样本事件有效时间统计图

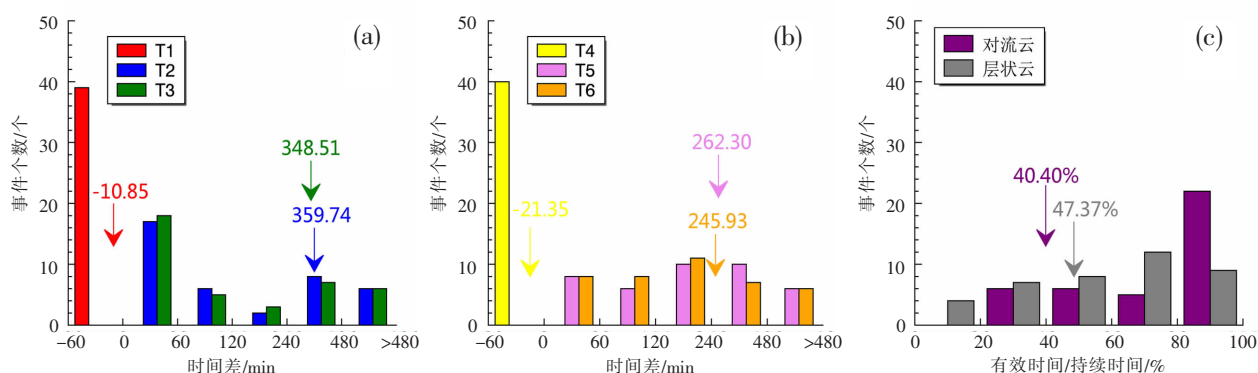


图 4 (a,b)以雨量传感器记录起始时刻作为参考点 0,各时间点与参考点之差的统计图;(a)对流云事件激光雨滴谱仪记录起始(T1 红色)和结束时刻(T2 蓝色)、雨量传感器记录结束时刻(T3 绿色), (b)层状云事件降水现象仪记录起始(T4 黄色)和结束时刻(T5 淡紫色)、雨量传感器记录结束时刻(T6 橙色), (c)对流云、层状云事件有效时间占持续时间比例的统计图

相比于层状云事件,对流云事件激光雨滴谱仪和雨量传感器记录降雨起始时刻之差均值较大($T1 > T4$),即相比于层状云降水,对流云降水起始阶段雨量更大,降雨速度更快,雨滴谱仪和雨量筒记录到有降水现象的时间差更短;无论是激光雨滴谱仪还是雨量传感器记录,北海 2019 年对流云事件降水持续时间均值明显大于层状云事件($359.74\text{min} > 262.30\text{min}$; $348.51\text{min} > 245.93\text{min}$)。图 4c 对流云、层状云事件的有效时间占持续时间比例的统计直方图。对流云、层状云事件的有效时间占持续时间比例均未达到 50%,二者相比对流云事件占比略小,分别为 40.40%、47.37%,据数据显示北海地区两种类型降雨普遍是不连续的。

3 结论

(1)典型事件分析表明,无论是对流云事件还是层状云事件,雨量筒与雨滴谱累积降水量绝对误差均小于 20%,相关性系数均达到 0.99,可反映实际降雨情况。对流云事件的雨滴谱与雨量筒累积降水量平均值误差大于层状云事件的 ($2.62 > 0.35\text{mm}$; $6.82 > 0.35\text{mm}$),主要是由于对流云中云滴和水滴碰撞增长,产生大量大直径的雨滴,大雨滴之间相互碰撞而破碎^[18],雨滴重叠导致雨滴谱仪观测的雨滴直径偏大或者雨滴数减少,进而降雨强度和累积降水量偏大或偏小^[20]。

(2)雨滴谱仪记录对流云降水有效时间均值 (149.72min)大于层状云事件的 (134.38min),根据所选样本事件统计,北海 2019 年对流云降水有效时间总计略多于层状云的 ($5839 > 5375\text{min}$)。

(3)特征时间分析表明,雨滴谱仪观测出现降雨时间早于雨量筒记录,观测结束降雨时间晚于雨量筒记录。相比于层状云事件,对流云事件雨滴谱仪和雨量筒记录降雨起始时刻之差均值较大($T1: -10.85\text{min} > T4: -21.35\text{min}$),即相比于层状云降水,对流云降水起始阶段雨量更大,降雨速度更快,雨滴谱仪和雨量筒记录到有降水现象的时间差更短。对流云、层状云事件的有效时间占持续时间比例均未达到 50%,据数据显示北海地区两种类型降水普遍是不连续的。

参考文献:

- [1] 宫福久,刘吉成,李子华. 三类降水云雨滴谱特征研究[J]. 大气科学,1997,21(5):96-103.
- [2] 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.
- [3] GAMACHE J F, HOUZE JR R A. Mesoscale air motions associated with a tropical squall line[J]. Monthly Weather Review, 1982, 110(2):118-135.
- [4] TOKAY A, SHORT D A. Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds[J]. J Appl Meteor, 1996:355-371.
- [5] 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(6):693-702.
- [6] 王秋淞,王福增,刘俊卿. 安徽淮南 2016 年夏季雨滴谱特征的研究[J]. 气象科技进展,2021,11(4):122-127.
- [7] 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.
- [8] 房彬,班显秀,郭学良,等. 雷达-雨量计-粒子激光探测仪联合估算降水量[J]. 大气科学,2010,34(3):513-519.
- [9] 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.
- [10] 李艳玉.DSG5 型降水现象仪的数据评估分析[J].气象研究与应用,2020,41(2):93-96.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 杨宁,张晋,刘钧.雨滴谱式降水现象仪降水类型判定算法优化探究[J].气象科技进展,2018,8(6):89-94.
- [15] 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.
- [16] TOKAY A. BASHOR P G. An experimental study of small-scale variability of raindrop size distribution[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,2010,49(11):2348-2365.
- [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] 于建宇,李茂善,阴蜀城,等.青藏高原那曲地区云降水微观特征雨滴谱分析[J].成都信息工程大学学报,2020,35(2):188-194.
- [19] 胡子浩,濮江平,张欢,等.庐山地区层状云和对流云降水特征对比分析[J].气象与环境科学,2013,36(4):43-49.
- [20] 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.

Comparative analysis of different types of cloud precipitation based on raindrop spectra and rain gauge data

Jing Kun, Zhou Kunlun*, Lv Shuhang, Wang Yizhu, Liang Zhenqing

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

Abstract: The observed records from raindrop spectra and rain gauge from January to December 2019 in the Beihai National Climate Observatory are used to classify precipitation types according to the average rainfall intensity and then to compare and analyze the differences between the two devices in observing convective and stratus cloud precipitation. The results show that: (1) both precipitation processes are dominated by "rain" and "showers", and the amount of precipitation observed by raindrop spectra and rain gauge differs due to the different measurement accuracy of the instruments; (2) For convective and stratiform cloud precipitation, the absolute error of cumulative precipitation between the rain gauge and raindrop spectrometer is less than 20%, and the correlation coefficient reaches 0.99. In addition, the precipitation mean error between the raindrop spectrometer and rain gauge for convective cloud events is larger than that for stratiform cloud events. (3) The raindrop observed by the raindrop spectrometer occurs earlier than that recorded by the rain gauge, and the end of the observation is later than that recorded by the rain gauge. Compared with stratiform precipitation, convective precipitation starts with greater rainfall and faster rainfall, and the time difference between raindrop spectrometers and rain gauge cylinders to record precipitation is smaller.

Key words: Beihai; rain drop spectrum; rain gauge; convective cloud; stratiform cloud