暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

短时强降水和持续强降水过程雨滴谱特征对比分析

廖慕科 王俊 唐熠 袁春梅 王艳兰 尹海燕 龙凤翔 殷智

Comparative analysis of raindrop size distribution characteristics between a short-duration and a persistent heavy rainfall process

LIAO Muke，WANG Jun，TANG Yi，YUAN Chunmei，WANG Yanlan，YIN Haiyan，LONG Fengxiang，YIN Zhi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-149

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比

Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain

暴雨灾害. 2023, 42(1): 1-12 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-119

华南前汛期强降水过程雨滴谱特征研究

Research on raindrop size distributions of strong precipitation events during the South China pre-flood season

暴雨灾害. 2024, 43(6): 637-647 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-119

4次台风暴雨在泰山山顶和山底的雨滴谱特征对比分析

Comparison analysis of raindrop spectrum characteristics of four typhoon rainstorms at the top and foot of Mount Tai

暴雨灾害. 2025, 44(5): 621-631 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-170

基于分钟雨量的浙江省汛期短时强降水特征研究

Investigating the characteristics of short-duration heavy rainfall during flood season in Zhejiang Province using the minute rain gauge data

暴雨灾害. 2025, 44(1): 60-70 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-062

北京地区两次极端特大暴雨过程中短时强降水环境条件对比分析

Comparison of short-duration heavy rainfall environmental conditions during two extreme torrential rainfall events over Beijing area

暴雨灾害. 2021, 40(1): 27-36 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.004

南岭地区汛期短时强降水的时空变化特征分析

Analysis of spatiotemporal characteristics of the short-duration heavy rainfall during the flood season in Nanling Mountain

暴雨灾害. 2025, 44(6): 780-791 https://doi.org/10.12406/byzh.2025-014

关注微信公众号，获得更多资讯信息

廖慕科,王俊,唐熠,等.2026.短时强降水和持续强降水过程雨滴谱特征对比分析[J].暴雨灾害,45(2):229−238. LIAO Muke, WANG Jun, TANG Yi, et al. 2026. Comparative analysis of raindrop size distribution characteristics between a short-duration and a persistent heavy rainfall process [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):229−238 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−149

短时强降水和持续强降水过程雨滴谱特征对比分析

廖慕科[1], 王俊[2], 唐熠[1], 袁春梅[1], 王艳兰[1], 尹海燕[3], 龙凤翔[1], 殷智[1]

(1. 广西壮族自治区桂林市气象局, 桂林 541001; 2. 山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031;
3. 广西壮族自治区北海市气象局, 北海 536000)

摘　要: 为更好认识广西不同类型强降水过程微物理特征的差异, 利用常规气象观测、降水现象仪、多普勒雷达和ERA5 再分析等资料, 对比分析了 2023 年 5 月 22 日桂林短时强降水和 2023 年 6 月 8 日北海持续性强降水的天气背景、雷达回波演变特征, 重点分析了两次过程的地面雨滴谱特征的差异。结果表明: (1) 桂林短时强降水受低涡、切变线和冷空气共同影响, 雷达回波显示对流发展强盛, 冷云过程发展充分, 云中存在大冰雹等固态粒子; 北海持续性强降水受热带低压影响, 对流发展稍弱, 雷达强回波中心在 0℃ 层以下, 以暖云降水为主。(2) 桂林对流云降水雨滴谱有较大的平均质量加权直径 (D_m) 和较低的归一化截距参数 (N_w), 属于大陆性对流降水雨滴谱特征; 北海对流云降水雨滴谱有较低 D_m 和较高 N_w, 属于海洋性对流云降水雨滴谱特征。(3) 桂林对流云降水冷云中的固态粒子融化后形成较大直径的粒子谱, 暖云中碰并和碰撞-破碎过程更容易形成平衡雨滴谱, 而近 80% 过渡雨滴谱的出现比例显示碰撞-破碎过程显著改变雨滴谱的分布; 北海对流云降水冷云中的固态降水粒子只能提供较小尺度的粒子谱, 平衡雨滴谱和过渡雨滴谱出现的比例远低于桂林对流降水, 碰撞-破碎过程的作用小得多。

关键词: 雨滴谱; 短时强降水; 持续性强降水; 平衡雨滴谱

中图法分类号: P412　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−149

Comparative analysis of raindrop size distribution characteristics between a short-duration and a persistent heavy rainfall process

LIAO Muke[1], WANG Jun[2], TANG Yi[1], YUAN Chunmei[1], WANG Yanlan[1],
YIN Haiyan[3], LONG Fengxiang[1], YIN Zhi[1]

(1. *Guilin Meteorological office of Guangxi Zhuang Autonomous Region*, *Guilin* 541001; 2. *Shandong Weather Modification Office*, *Jinan* 250031; 3. *Beihai Meteorological office of Guangxi Zhuang Autonomous Region*, *Beihai* 536000)

Abstract: To better understand the differences in microphysical characteristics of heavy rainfall events in Guangxi, this study utilized conventional meteorological observations, disdrometers, Doppler radar data, and ERA5 reanalysis to examine two heavy rainfall cases: a short-duration intense rainfall event in Guilin on May 22, 2023, and a long-lasting rainfall event in Beihai on June 8, 2023. While the synoptic backgrounds and radar echo features of both events were compared, particular emphasis was placed on analyzing the differences in their ground-based raindrop size distribution (DSD) characteristics. The results are as follows. (1) The short-duration heavy rainfall in Guilin resulted from the interaction of a low-level vortex, a shear line, and cold air intrusion.Convection was strong and well-developed, characterized by a fully developed cold cloud process, with solid particles (including large hail) inferred to exist within the clouds. In contrast, the prolonged heavy rainfall in Beihai was primarily associated with a tropical low-pressure system. Convection was relatively weaker, with strong echo centers located below the 0 ℃ layer, indicating dominance by warm cloud precipitation. (2) The DSD of convective precipitatio in Guilin exhibited larger mass-weighted mean diameter (D_m) and a lower generalized intercept parameter (N_w), characteristic of continental convective precipitation. By comparison, the convective precipitation in Beihai showed smaller D_m and higher N_w, typical of oceanic convective cloud precipitation. (3) In Guilin, the melting of solid particles in cold clouds contributed to larger-

收稿日期: 2024−08−05; **定稿日期:** 2025−01−02

资助项目: 桂林市重点研发计划项目 (20220118-3, 20230112-1); 山东省气象局重点课题 (2024sdqxz08, 2018sdqx12); 桂林市气象局自立科研项目 (QNZX202403)

第一作者: 廖慕科, 主要从事天气预报及服务研究。E-mail: 1900018480@qq.com

通信作者: 王俊, 主要从事云降水物理研究。E-mail: wangjun818@sohu.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

diameter droplets. Additionally, collision and coalescence processes in warm clouds facilitated the formation of equilibrium DSDs. Nearly 80% of the spectra were transitional, indicated that the collision–fragmentation process significantly altered the raindrop size distribution. In Beihai, solid precipitation particles in cold clouds mainly contributed small-size particle spectra. Although warm clouds allowed sufficient time for collision and coalescence mechanisms, the proportions of equilibrium and transitional spectra were much lower than those in Guilin, suggesting a weaker role of the collision-fragmentation process.

Key words: raindrop spectrum; short-duration heavy rainfall; prolonged heavy rainfall; equilibrium raindrop spectrum

引　言

雨滴谱是云和降水微物理特性的基本表征，其分布与气候背景、地理位置、降雨类型有关，不同天气系统的降水微物理特征也存在很大的差异，详细了解雨滴谱的变化对雷达定量测量降水、人工增雨效果检验及作业方案制定具有重大的实用价值 (江雨霏等, 2023; 刘晓璐等, 2023)。华南是中国暴雨多发地区之一，近几十年来科研人员在华南地区开展了多次大规模暴雨外场观测试验研究计划 (Luo et al., 2017)，随着双偏振雷达、降水现象仪等观测设备的布设，暴雨雨滴谱等微物理特征的观测研究也随之增多 (罗亚丽等, 2020)。

华南地区降水雨滴谱特征显示出显著的时空差异性和多样性，其中南海海面不同区域降水的微物理特征有明显差异 (Zeng et al., 2019)，不同季节的对流降水雨滴谱特征从海洋性逐渐转变为大陆性；广东沿海对流降水具有海洋性对流降水雨滴谱特征 (Zhang et al., 2019; Chen et al., 2023; Bringi et al., 2003)；内陆地区对流降水具有大陆性对流降水雨滴谱特征；迎风坡降水的中值平均质量加权直径 (D_m) 值高于背风坡，从沿海到山区，归一化截距参数 (N_w) 值的中值逐渐减小 (Zhang et al., 2023)；锋面系统降水倾向于大陆性对流降水雨滴谱特征，热带气旋降水倾向于海洋性，暖区极端降水具有高雨滴浓度、并存在大雨滴 (叶朗明等, 2021)，对流性降水雨滴谱特征介于海洋性与大陆性对流降水之间；夏季季风降水介于海洋性和大陆性对流降水雨滴谱特征之间；闽南沿海前汛期季风爆发前后的雨滴谱特征有明显差异，2018 年和 2019 年季风爆发后雨滴谱参数呈现相反的变化趋势 (胡雅君等, 2022)。

学者们对广西区域内的雨滴谱特征研究也有一些成果，例如北部湾沿海暖区暴雨的对流性降水雨滴谱特征偏大陆性，雨强增大，N_w 逐渐增大 (毛家燊等, 2024)；Li 等 (2022) 利用钦州 2 a 雨滴谱观测资料分析表明，对流降水具有较低的 N_w 和较大的 D_m，是典型的大陆性对流降水雨滴谱特征；柳州“龙舟水”强降水过程的地面降水粒子数主要来源于直径小于 2 mm 的粒子 (周坤论等, 2023)，但降水量主要由直径 1~3 mm 的粒子贡献。不过，上述研究着眼于单个地区的雨滴谱特征分析，而不同地区、不同天气系统、不同降水过程的雨滴谱特征对比，以及雨滴谱的统计特征等方面尚有大量的内容需要研究。因此，本文选取 2023 年 5 月 22 日发生在桂林的一次短时强降水和同年 6 月 8 日在北海发生的持续性强降水个例，利用常规观测资料、降水现象仪、多普勒雷达和 ERA5 数据，对比分析两次降水过程的地面雨滴谱特征之间的差异，以期加深对不同天气系统影响下强降水微物理形成机理的认识。

1 资料和方法

1.1 资料说明

使用资料包括：(1) 来源于广西壮族自治区气象台开发的气象综合显示平台 2023 年 5 月 21 日 20:00 (北京时，下同)—22 日 20:00 桂林国家气象观测站 (110.30°E, 25.32°N, 海拔高度 164.4 m; 以下简称为桂林国家站)、2023 年 6 月 7 日 20:00—8 日 20:00 北海国家气候观象台 (109.18°E, 21.45°N, 海拔高度 10.3 m; 以下简称为北海国家站) 的小时降水数据；(2) 同时期桂林、北海国家站的降水现象仪观测数据，其中桂林降水现象仪是 DSG5 型，北海降水现象仪是 DSG4 型，两种型号的降水现象仪的工作方式都是连续采样，采样时间为 1 min，降水粒子谱数据有 32 个直径通道，对应粒径范围为 0.0~26.0 mm; 32 个速度通道，下落速度范围为 0.0~22.4 $m\cdot s^{-1}$ (Löffler-Mang and Joss, 2000)。(3) 桂林市气象局提供的 2023 年 5 月 22 日桂林雷达站单偏振雷达数据、北海市气象局提供的 2023 年 6 月 8 日北海雷达站双偏振雷达数据，两部雷达的探测时间分辨率均为 6 min，径向分辨率为 250 m; (4) 欧洲中期天气预报中心 2023 年 5 月 21 日 20:00 的 850 hPa、2023 年 6 月 8 日 08:00 的 700 hPa 高度场、风场的 ERA5 数据。

1.2 雨滴谱参数计算方法

降水现象仪观测资料质量控制的第一步是去掉偏离雨滴落速-直径经验关系较大的粒子，本文采用去除偏离雨滴落速-直径经验关系±60% 的粒子 (Friedrich et al., 2013)；第二步考虑边界效应，对不同直径粒子的有效采样面积进行订正 (Jaffrain and Berne, 2011)；虽然自然降水中可以观测到直径超过

9 mm 的超大雨滴 (Gatlin et al., 2015), 但一般自然降水中直径大于 8 mm 的雨滴很少, 因此剔除直径大于 8 mm 的粒子数据; 由于信噪比低, 第三步剔除前两档粒径 (0.062 mm 和 0.187 mm) 的数据, 测量的粒子最小直径 (D_{min}) 为 0.312 mm, 测量的粒子最大直径 (D_{max}) 为 7.5 mm; 第四步剔除 1 min 内粒子总数 <10 个或者雨强<0.1 mm·h^{-1} 的噪声样本 (王俊等, 2022; 李山山等, 2023; 江雨霏等, 2023)。

利用降水现象仪观测资料, 雨滴尺度谱计算公式如下

$$N(D_j)=\sum_{i=1}^{32}\frac{n_{ij}}{A_r\cdot\Delta t\cdot V_i\cdot\Delta D_j} \tag{1}$$

其中, $N(D_j)$ 是第 j 个直径通道的雨滴数浓度; A_r 是降水现象仪取样面积, 订正后为 $180\times(30-D_j/2)\times10^{-6}\cdot m^2$ (Jaffrain and Berne, 2011); Δt是取样时间, 为 60 s; n_{ij} 是第 j 个直径通道、第 i 个速度通道的雨滴浓度; V_i 是第 j 个直径通道、第 i 个速度通道对应的雨滴落速; ΔD_j 和 D_j 分别是第 j 个直径通道的宽度和平均直径。

本文利用归一化 Gamma 函数 (Testud et al., 2001) 的 N_w 和 D_m 来分析雨滴谱的有关特征, 相关计算公式如下

$$N_w=\frac{4^4}{\pi\rho_w}\left(\frac{W}{D_m^4}\right) \tag{2}$$

$$D_m=\frac{\sum_{j=1}^{32}N(D_j)D_j^4\Delta D_j}{\sum_{j=1}^{32}N(D_j)D_j^3\Delta D_j} \tag{3}$$

$$W=\frac{\pi\rho_w}{6}\times10^{-3}\sum_{j=1}^{32}D_j^3N(D_j)\Delta D_j \tag{4}$$

其中, W 是雨水含量, ρ_w 是雨水密度; 另外, 雨强 (R)、雨滴总浓度 (N_T)、雷达反射率因子 (Z)、谱宽 (D_{max}) 也可以利用雨滴谱资料分别计算 (王俊等, 2022)。

2 天气背景和雷达回波特征

2.1 降水实况及天气背景

2023 年 5 月 22 日, 桂林出现了一次短时强降水过程, 其中市区区域气象观测站 05:00—08:00 3 h 累积雨量达到 300.1 mm, 最大小时雨量为 160.6 mm, 均为桂林市区历史之最, 桂林国家站1 h 最大降雨量为 84.6 mm (图 1a、b)。此次降水过程的主要特点是短时雨强大、局地性强、极端性突出, 发生在地面冷锋侵入的背景下 (翟丽萍等, 2024)。

2023 年 6 月 7 日—11 日, 北海出现持续性强降水过程, 最大 1 h、3 h、6 h 及 24 h 累计雨量均突破了北海市的历史极值, 最大 6 h 雨量为 440.5 mm, 突破广西历史极值, 北海国家站累积雨量达 694.8 mm, 其中 8 日的累积雨量达 429.9mm (图 1b)。

桂林短时强降水发生前后, 华南沿海受西太平洋副热带高压 (以下简称为副高) 控制, 21 日 08:00, 地面西南暖低压发展加强, 16:00 桂林国家站最高气温达 33.9 ℃; 低层西南急流加强, 850 hPa 桂林西南风风速为 18 m·s^{-1}, 西南急流为强降水提供了强不稳定能量和水汽条件。21 日 20:00, 850 hPa 低涡、切变线缓慢南压影响桂林, 切变线两侧风速切变约为 20 m·s^{-1}, 较前一时次增大, 表明切变线附近的辐合抬升作用在进一步增强 (图 2a)。22 日 05:00—07:00 地

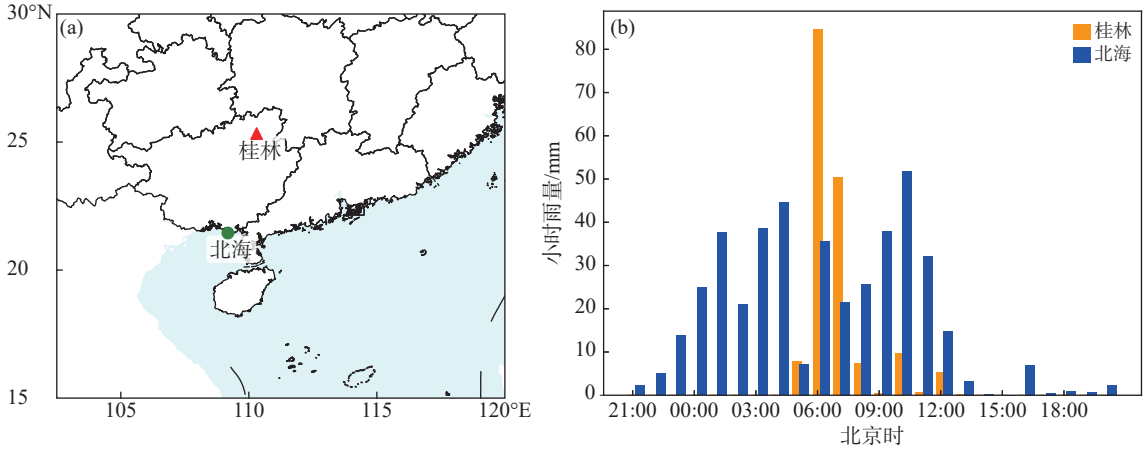


图 1 桂林国家站和北海国家站站点位置 (a) 及 2023 年 5 月 21 日 20:00—22 日 20:00 桂林国家站、6 月 7 日 20:00—8 日 20:00 北海国家站逐小时雨量变化 (b)

Fig. 1 (a) Locations of the Guilin and Beihai national meteorological stations and (b) time series of hourly precipitation at the Guilin station from 20:00 BT on May 21 to 20:00 BT on May 22, and at the Beihai station from 20:00 BT on June 7 to 20:00 BT on June 8, 2023

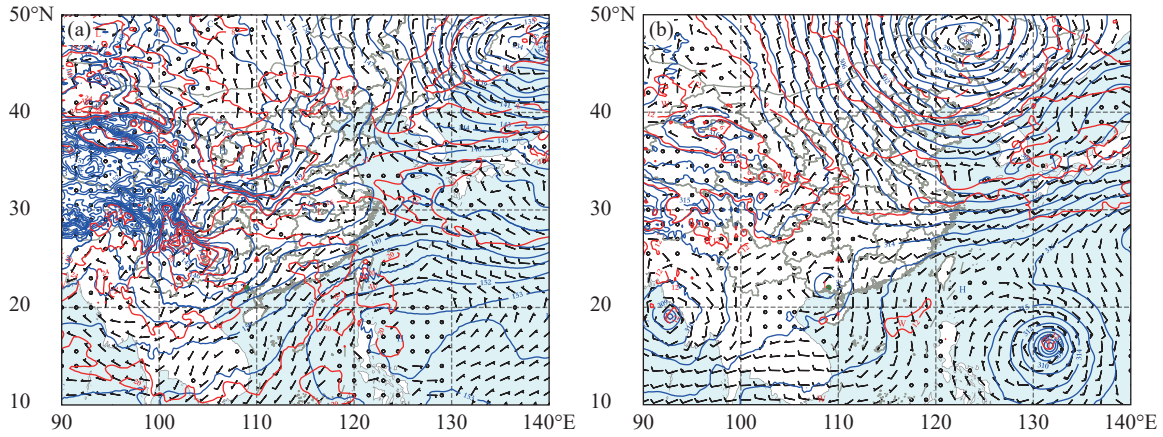


图 2 2023 年 5 月 21 日 20:00 850 hPa (a) 和 2023 年 6 月 8 日 08:00 700 hPa (b) 位势高度场 (蓝色等值线, 单位: dagpm)、温度场 (红色等值线, 单位: ℃) 和风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1})

Fig. 2 Distributions of geopotential height (blue contours, unit: dagpm), temperature (red contours, unit: ℃), and wind fields (barbs, unit: m s^{-1}) at (a) 850 hPa at 20:00 BT on May 21, 2023, and (b) 700 hPa at 08:00 BT on June 8, 2023

面冷锋自北向南移过桂林市区, 强降水发生在冷锋过境期间, 落区在冷锋后部。22 日 08:00, 低涡强度减弱, 切变线、地面冷锋移出桂林地区, 强降水结束。21 日 20:00, 桂林探空曲线 (图略) 显示, 桂林中低层大气湿层浅薄, 上干下湿, 0 ℃ 高度为 5.7 km, 沙氏指数 (SI) 为−1.16 ℃, 对流有效位能 (CAPE) 值为 2 398.9 J·kg^{-1}, 有利于强对流天气的发生和发展。

北海的持续性强降水是由弱热带低压造成 (覃皓等, 2024), 2023 年 6 月 7 日 20:00, 热带低压进入广西沿海, 移动缓慢, 在广西陆上维持约 42 h, 强降水区主要位于其环流东侧及南侧的偏南气流区域, 6—8 日副高西端呈南北走向, 其边沿稳定的偏南气流输送大量的水汽和不稳定能量 (图 2b), 为热带低压稳定维持及北上影响广西沿海提供了极为有利的条件。07 日 20:00 的探空曲线 (图略) 显示, 整层温度露点差小、湿层深厚, 0 ℃ 高度为 5.4 km, SI 为 −1.57 ℃, CAPE 为 1 425.8 J·kg^{-1}, 大气层结不稳定, 亦有利于强对流天气的发生和发展。

两次降水过程中, 大气环境均具有较高的不稳定能量, 桂林降水由地面冷锋和低涡切变线引发, 持续时间短; 北海降水由热带低压引起, 湿层深厚, 降水持续时间长。

2.2 雷达回波特征

桂林单偏振雷达组合反射率因子显示 (图 3a), 22 日 03:32 发展旺盛的线状中尺度对流系统开始影响桂林, 最大反射率因子超过 60 dBz, 回波顶高约为 7 km, 50 dBz 和 40 dBz 强回波顶高分别约为 9 km 和 15 km, 属于典型的强对流系统降水 (Yu et al., 2022), 04:00 线状强回波带东段显著减弱, 而西段的前侧不断有强对流单体发展, 由线状中尺度对流系统转变为区域型中尺度对流系统 (王晓芳和崔春光, 2011)。沿 04:13 最强回波区域作垂直剖面图 (图 4a), 65 dBz 和 55 dBz 强回波顶高分别约为 8 km 和 9 km, 超过 0 ℃ 层高度。参考有关研究结果 (覃靖等, 2017; 孙炜文等, 2022;

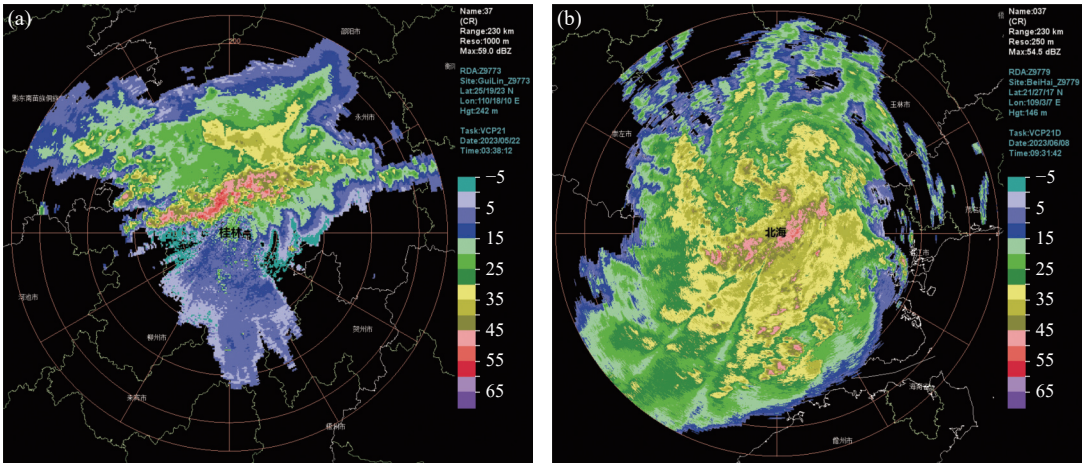


图 3 2023 年 5 月 22 日 03:32 桂林 (a) 和 2023 年 6 月 8 日 09:31 北海 (b) 雷达组合反射率因子 (单位: dBz)

Fig. 3 Composite radar reflectivity (unit: dBz) for (a) Guilin at 03:32 BT on May 22, 2023, and (b) Beihai at 09:31 BT on June 8, 2023

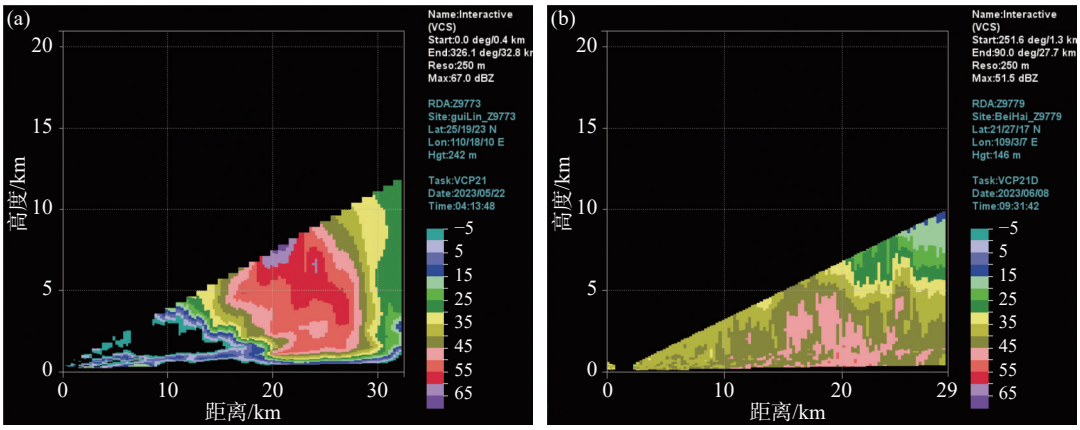


图 4 2023 年 5 月 22 日 04:13 桂林 (a) 和 2023 年 6 月 8 日 09:31 北海 (b) 雷达基本反射率因子 (单位: dBz) 的垂直剖面

Fig. 4 Vertical cross-sections of radar base reflectivity (unit: dBz) of (a) Guilin at 04:13 BT on May 22, 2023, and (b) Beihai at 09:31 BT on June 8, 2023

Ulbrich and Atlas, 2007), 桂林短时强降水的冷云发展强盛, 推测云中存在较大直径的冰雹粒子。

北海降水以大范围的层状云回波为主 (图 3b), 其中存在一条西南—东北向的强回波带, 最大反射率因子≥50 dBz。降水回波自西南向东北缓慢移动, 不断与其前方新生成的降水回波合并, 形成后向传播、以及列车效应, 造成持续性强降水。沿最强回波区域做垂直剖面, 40 dBz 回波顶高一般低于 6 km (图 4b), 少部分顶高超过 6 km。因此, 北海对流降水主要属于弱对流系统降水、以及少量中等强度对流系统降水 (Yu et al., 2022)。

3 地面雨滴谱特征比较分析

地面雨滴谱是云中微物理过程与动力过程相互作用的最终结果, 下文将从不同的角度分析两次过程的雨滴谱和参数的有关特征, 从而更好地理解短时强降水和持续性强降水地面雨滴谱以及微物理过程之间的异同。

3.1 雨滴谱和积分参数演变特征

图 5 是桂林 2023 年 5 月 22 日 04:00—13:00 地面降水参数以及 $N(D)$ 随时间的演变。04:52 降水开始, R 迅速增大, 04:55—06:54 是 R>20.0 mm·h^{-1} 的对流降水阶段, 最大 R 为 137.6 mm·h^{-1} (图 5a)。

N_T 在 430.0~2 322.1 m^{-3} 之间, Z 在 39.5~55.4 dBz 之间。06:55—12:20 R 减弱, 但存在四个 R>10.0 mm·h^{-1} 的对流降水中心, 此时段 N_T 较低, 小于 500.0 m^{-3}, Z< 48.2 dBz。$N(D)$ 演变 (图 5b) 显示, 对流降水时段小雨滴 (D≤1.0 mm) 数浓度高, 其最大值为 2 384.6 mm^{-1}·m^{-3} (05:49); 中等尺寸雨滴 (1.0 mm<D≤3.0 mm) 数浓度在 50.0~1 000.0 mm^{-1}·m^{-3} 之间; 大雨滴 (3.0 mm<D≤ 5.0 mm) 数浓度在 1.0~100.0 mm^{-1}·m^{-3} 之间; 特大雨滴 (D>5.0 mm) 数浓度一般低于 3.0 mm^{-1}·m^{-3}, 最大谱宽为 7.5 mm。其它降水时段, 不同尺寸雨滴的数浓度较低: 小雨滴一般低于 500.0 mm^{-1}·m^{-3}, 中等尺寸雨滴一般在 1.0~300.0 mm^{-1}·m^{-3} 之间, 大雨滴一般低于 50.0 mm^{-1}·m^{-3}。

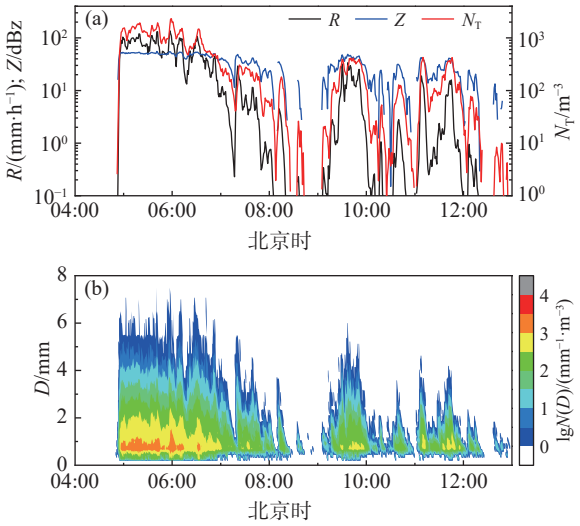


图 5 2023 年 5 月 22 日 04:00—13:00 桂林雨强 (R)、反射率因子 (Z)、雨滴浓度 (N_T) (a) 和地面雨滴谱 lg$N(D)$ (b) 随时间演变

Fig. 5 Temporal evolutions of (a) R, Z and N_T, and (b) lg$N(D)$ at Guilin from 04:00-13:00 BT on May 22, 2023

图 6 为北海 2023 年 6 月 7 日 20:00—8 日 20:00 地面降水参数以及 $N(D)$ 随时间的演变。对流降水阶段 (6 月 7 日 21:00—8 日 12:00) 最大 R 为 105.4 mm·h^{-1}, 出现在 02:57 (图 6a), Z 最大值为 55.0 dBz, R> 100.0 mm·h^{-1} 仅出现 1 min。6 月 7 日 21:00—8 日 12:00, 出现多个 R>50.0 mm·h^{-1} 的对流降水中心, N_T 最大为 3 360.1 m^{-3}, 比桂林的最大浓度高得多。$N(D)$ 随时间的演变 (图 6b) 显示, 不同的对流降水中心对应较高的粒子数浓度和较大的雨滴谱宽。小雨滴数浓度最大为 5 218.1 mm^{-1}·m^{-3}; 中等尺寸雨滴的数浓度变化范围较大, 在 5.0~2 250.0 mm^{-1}·m^{-3} 之间; 大雨滴数浓度在 1.0~50.0 mm^{-1}·m^{-3} 之间; 特大雨滴数浓

度较低，一般小于 1.0 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$。弱降水阶段 (6 月 8 日 12:00 以后) 也有较高的小雨滴数浓度，最高可达 2 529.4 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$，但中等尺寸和大雨滴的数浓度较少，因此，尽管雨滴浓度较高，Z 却较低。

综上，桂林对流降水的雨滴谱较宽且大尺寸雨滴较多；而北海对流降水具有多个雨强中心，雨滴浓度高，特别是小和中等尺寸雨滴的数浓度更高。

3.2 不同雨强平均雨滴谱特征

根据 R 将两次降水的雨滴谱资料分成七类 (表 1)。桂林以 50.0 $mm\cdot h^{-1}<R\leqslant100.0$ $mm\cdot h^{-1}$ 的样本最多，而 $R>100.0$ $mm\cdot h^{-1}$ 也有较多样本。北海则以 10.0 $mm\cdot h^{-1}<R\leqslant50.0$ $mm\cdot h^{-1}$ 的样本最多。两次降水过程不同 R 的 D_m、对数截距参数 ($\lg N_w$) 均随着 R 增大而增大。

桂林七类 R 的平均雨滴谱之间的变化有明显不同 (图 7a)：第 1 类和第 2 类平均雨滴谱相比，小雨滴的数浓度非常接近，但中等尺寸雨滴的数浓度差异较大。第 3 类与第 2 类平均雨滴谱相比，各直径档的雨滴数浓度都有显著增加，尤其是中等尺寸雨滴的数浓度增加更多。第 4 类平均雨滴谱与第 3 类相比，小雨滴的数浓度依然接近，但中等尺寸、大雨滴和特

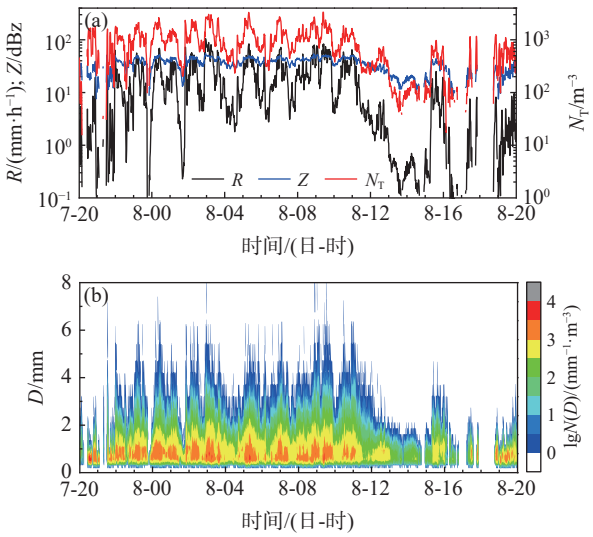


图 6 2023 年 6 月 7 日 20:00—8 日 20:00 北海 R、Z、N_T (a) 和 $\lg N(D)$ (b) 随时间演变

Fig. 6 Temporal evolutions of (a) R, Z and N_T, and (b) $\lg N(D)$ at Beihai from 20:00 BT on 7 June 2023 to 20:00 BT on 8 June 2023

表 1 2023 年 5 月 22 日桂林和 2023 年 6 月 7—8 日北海七类雨滴谱的样本数、平均质量加权直径 (D_m)、对数截距参数 ($\lg N_w$) 和平均雨强 ($\bar{R}$)

Table 1 Number of samples, R and $\lg N_w$ and D_m retrieved from 7 categories of raindrop size distributions at Guilin on May 22 and Beihai on June 7-8, 2023

分类	R/(mm·h^{-1})	样本数/min		$\lg N_w$/(mm^{-1}·m^{-3})		D_m/mm		$\bar{R}$/(mm·h^{-1})	
		桂林	北海	桂林	北海	桂林	北海	桂林	北海
1	$0.5<R\leqslant2$	68	145	3.19	3.97	1.29	0.97	1.02	1.19
2	$2<R\leqslant5$	39	178	3.30	3.87	1.61	1.27	3.49	3.36
3	$5<R\leqslant10$	27	192	3.45	3.96	1.75	1.42	7.48	6.99
4	$10<R\leqslant20$	41	210	3.39	3.99	2.10	1.65	14.22	14.57
5	$20<R\leqslant50$	45	274	3.48	4.00	2.46	1.95	34.69	32.27
6	$50<R\leqslant100$	68	100	3.76	4.08	2.54	2.16	76.87	64.02
7	$100<R\leqslant200$	12	1	3.89	3.79	2.61	2.78	116.51	105.44

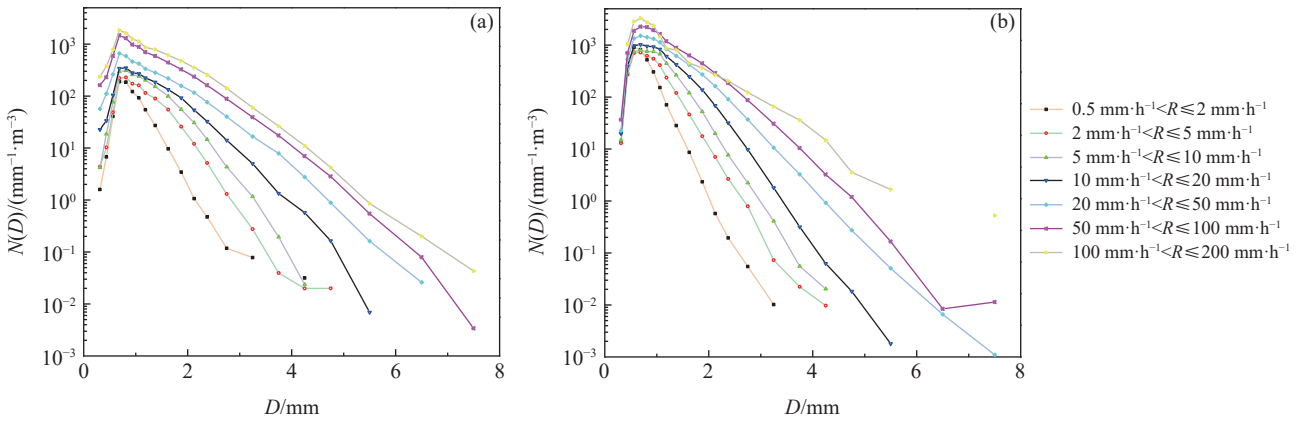


图 7 2023 年 5 月 22 日桂林 (a) 和 2023 年 6 月 8 日北海 (b) 不同雨强平均雨滴谱分布特征

Fig. 7 Average raindrop size distributions for different rain rate categories at (a) Guilin on May 22, 2023, and (b) Beihai on June 8, 2023

大雨滴的数浓度显著增加, 较大直径雨滴浓度的增加是导致 R 增大的主要因素。第 5、6、7 类雨强的平均雨滴谱与第 4 类相比, 各直径档的雨滴数浓度几乎同时增加, 表明 R 的增大是由不同尺寸雨滴浓度同时增加所致。随着 R 增大, 前四类平均雨滴谱之间的小雨滴数浓度接近, 但较大直径粒子数浓度有较明显差异; 而后三类平均雨滴谱之间的各直径档的雨滴数浓度都同时增加。

北海七类 R 的平均雨滴谱之间的变化相对较为单一 (图 7b): 第 1—6 类雨强的平均雨滴谱随着 R 增大, 谱宽增大且较大直径雨滴的数浓度增加更为显著, 较大直径雨滴浓度的增加是 R 增大的主要因素。第 7 类平均雨滴谱的小雨滴数浓度较高, 中等尺寸雨滴的数浓度较低, 而大和特大雨滴的数浓度较高, 但由于该类雨强仅持续了 1 min, 其变化特征不具有统计意义。七类平均雨滴谱的小雨滴数浓度比较接近, 但较大直径粒子数浓度有较明显差异。

3.3 N_w-D_m 分布特征

图 8 为 $\lg N_w$-D_m 分布图, 并根据表 1 中的七类 R 将数据分类显示。两次过程的 $\lg N_w$-D_m 分布特征有显著差异, 桂林的三类弱降水 ($R\leqslant 10.0$ mm·h^{-1}) 具有较低 $\lg N_w$ 值 (一般<3.8) 和较大的 D_m (一般>1.0 mm)。而对流降水 (R>10.0 mm·h^{-1}) 的数据点也是有较低的 $\lg N_w$ 值和较大的 D_m, 数据点分布在大陆性对流降水区域 (Bringi et al., 2003) 周围 (图 8a)。R>50.0 mm·h^{-1} 的两类对流降水, 少量样本的 $\lg N_w$>4.0, D_m<2.3 mm, 靠近海洋性对流降水区域。平均 $\lg N_w$、D_m (图 8 中黑色“+”号) 值为 3.60、2.41, 很靠近大陆性对流降水区域 (图 8a 中绿色矩形框)。北海的三类弱降水有较大 $\lg N_w$ 值 (>3.0) 和较小 D_m (一般<2.0 mm), 而对流降水的数据点有较高的 $\lg N_w$ 值, 集中在海洋性对流降水区域 (Bringi et al., 2003) 周围 (图 8b 中绿色矩形框), R>20.0 mm·h^{-1} 的对流降水存在一些 D_m>2.0 mm 的点, 它们位于大陆性对流降水区域之上。特别是 R>100.0 mm·h^{-1} 的 1 min 对流降水具有较低 $\lg N_w$ 值和较大 D_m, 更接近大陆性对流降水雨滴谱特征, 这是因为该雨强的雨滴谱有较多直径大于 3.0 mm 的大雨滴。平均 $\lg N_w$、D_m (图 8 中黑色“×”号) 值为 4.01、1.87, 靠近海洋性对流降水区域 (图 8b); 两次降水过程的层状降水和对流降水之间的分离线 (图 8 中黑色点划线) 也稍有不同, 桂林对流降水分离线有稍小的斜率, 而这两条分离线的斜率都比 (Bringi et al, 2009) 给出的对流和层状降水分离线 (图 8a 中黑色实线) 的斜率要小, 表明两次降水形成的微物理机制比较复杂, 冷暖云过程都有一定的作用, 而桂林的冷云过程更强盛, 起主导作用, 雨滴谱形成主要是暖雨-冰相混合和冰相过程两种机制; 北海以暖云过程为主, 雨滴谱形成主要是暖雨-冰相混合和碰并过程两种机制 (Dolan et al., 2018)。

3.4 平衡雨滴谱等不同类型雨滴谱特征

云中不同的微物理过程和动力学过程会影响地面雨滴谱分布特征 (Rosenfeld and Ulbrich, 2003)。暖云中的雨滴碰并和碰撞-破碎是决定自然降水中地面雨滴谱分布的主要机制之一 (McFarquhar, 2004; Straub et al., 2010)。D'Adderio 等 (2015) 通过计算 1.0~2.6 mm 范围内雨滴谱分布曲线的最大斜率 (HS), 以此判断云中是否存在碰并和碰撞-破碎过程, 并根据 HS 数值定义了六类雨滴谱: 第Ⅰ类平衡雨滴谱 HS>0.0 m^{-3}·mm^{-2}; 第Ⅱ类过渡雨滴谱 −0.5≤HS<0.0 m^{-3}·mm^{-2}; 第Ⅲ—Ⅴ类非平衡雨滴谱, 每间隔 −0.5 m^{-3}·mm^{-2} 分类; 第Ⅵ类 HS<−2.0 m^{-3}·mm^{-2}。

表 2 为桂林和北海各类雨滴谱出现的百分比, 桂林短时强降水仅有三类雨滴谱, 其中平衡雨滴谱占比为 7.94%, 过渡雨滴谱占比高达 79.37%, 非平衡雨

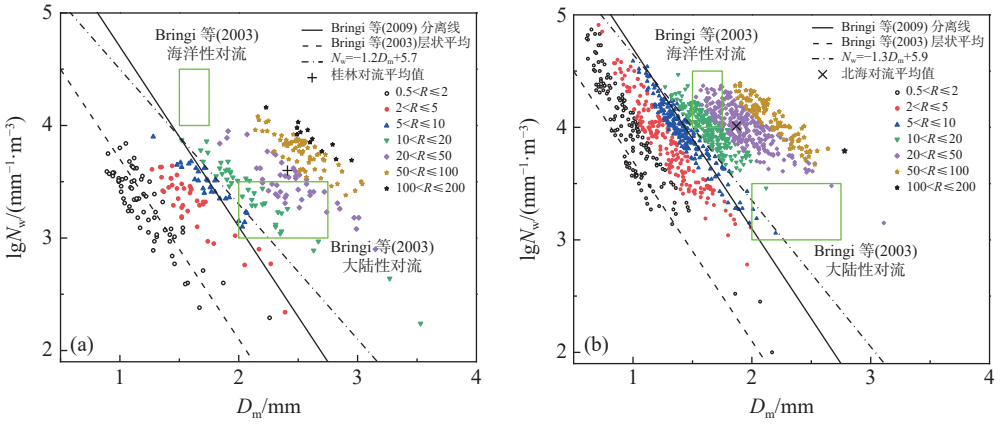


图 8 2023 年 5 月 22 日桂林 (a) 和 2023 年 6 月 8 日北海 (b) 不同雨强 $\lg N_w$-D_m 散点图

Fig. 8 Scatter plot of $\lg N_w$-D_m for different rain rate categories at (a) Guilin on May 22, 2023, and (b) Beihai on June 8, 2023

表 2 2023 年 5 月 22 日桂林短时强降水和 2023 年 6 月 8 日北海持续强降水过程中不同最大斜率 (HS) 分类谱出占比 (单位: %)

Table 2 Percentage of occurrence for each maximum slope (HS) spectral class during the short-duration heavy rainfall in Guilin on May 22, 2023, and the persistent heavy rainfall in Beihai on June 8, 2023

观测点	HS>0.0	−0.5<HS≤0.0	−1.0<HS≤−0.5	−1.5<HS≤−1.0	−2.0<HS≤−1.5	HS≤−2.0
桂林	7.94	79.37	12.70	-	-	-
北海	1.57	31.57	60.29	6.43	0.14	-

注: 表中“-”代表此处无数据

滴谱占比为 12.70%。北海持续性强降水各类雨滴谱的比例也明显不同, 平衡雨滴谱仅占 1.57%, 过渡雨滴谱占比约为 31.57%, 非平衡雨滴谱占比显著增大, 第Ⅲ非平衡雨滴谱占比约为 60.29%, 第Ⅳ、Ⅴ类非平衡雨滴谱占比较低。

D'Adderio 等 (2015, 2018) 的统计显示, 自然降水中平衡雨滴谱的出现几率一般不超过 7%, 而过渡雨滴谱有较高的百分比 (15%~47%)。相比之下, 桂林的平衡雨滴谱比例较高, 过渡雨滴谱的出现比例远高于 D'Adderio 等 (2015) 的统计结果, 但略低于河南 2021 年 7 月 20 日极端暴雨降水中的比例 (王俊等, 2023)。

与热带大陆深对流风暴 (Ulbrich and Atlas, 2007) 的观测结果相比, 桂林短时强降水在 0 ℃ 层以上有更强的雷达回波, 云中存在 D>(15~20) mm 的冰雹粒子。这些冰粒子在下落超过 4 km 高度时可以完全融化 (Ryzhkov et al., 2013), 形成直径 8 mm 以上的特大雨滴。由于 0 ℃ 层足够高, 融化的雨滴仍有足够的时间运行碰并和碰撞-破碎机制, 因此桂林地面降水中存在更多的平衡和过渡雨滴谱。北海降水的雷达回波强中心位于 0 ℃ 层以下, 0 ℃ 层以上回波很快减弱。由于缺少大的固态粒子, 冰粒子融化形成的雨滴尺寸偏小, 暖云中碰并过程为主, 碰并和碰撞-破碎难以达到平衡状态, 较低的平衡雨滴谱和过渡雨滴谱的出现比例表明碰撞-破碎过程的作用显著减弱。

图 9 为平衡雨滴谱和其它各类雨滴谱的平均分布, 桂林平均平衡雨滴谱具有较低的粒子数浓度和谱宽 (图 9a), D 在 1.0~2.6 mm 之间的粒子数浓度变化较小, 没有明显的第二峰。过渡雨滴谱和非平衡雨滴谱的平均分布类似, 但在 D 为 1.0~2.6 mm 之间的平均过渡雨滴谱的分布曲线有较小的斜率, 雨滴数浓度随着直径增大减小较慢。北海的平均平衡雨滴谱 (图 9b) 与桂林相比有一定差异, 在直径 1.375 mm 处有明显的第二峰, 并且有更多直径大于 4.0 mm 的大雨滴。平均过渡雨滴谱在直径 2.0 mm 附近有较高的雨滴数浓度, 分布曲线有较小的斜率。三类非平衡雨滴谱在 2.0 mm 附近的分布曲线斜率明显不同, 第Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类非平衡雨滴谱在 D 为 1.0~2.6 mm 之间的曲线斜率逐渐减小, 即随着直径增大雨滴数浓度减少的速度逐渐增大, 谱宽也逐渐变小。

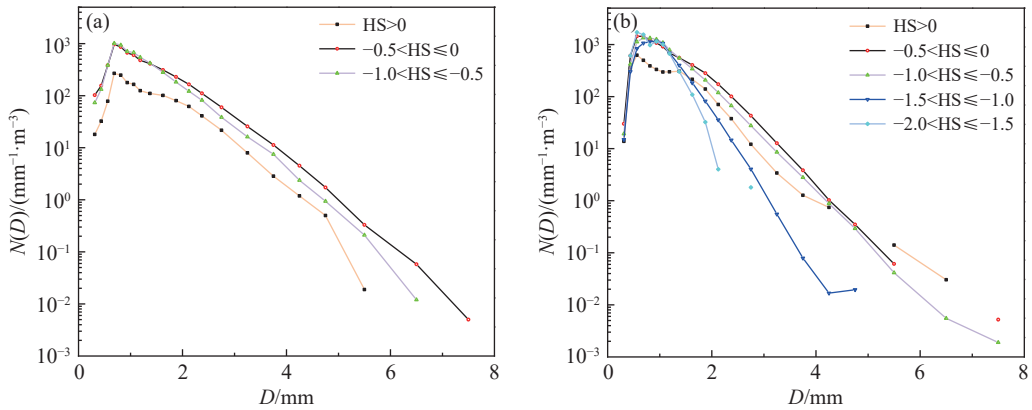


图 9 2023 年 5 月 22 日桂林 (a) 和 2023 年 6 月 8 日北海 (b) 强降水过程不同分类谱的平均雨滴谱分布

Fig. 9 Average raindrop size distributions for different classified spectra during the heavy rainfall processes in (a) Guilin on May 22, 2023, and (b) Beihai on June 8, 2023

4 结论和讨论

本文利用常规观测资料、降水现象仪观测资料, 结合多普勒雷达产品和 ERA5 再分析资料, 对比分析了 2023 年 5 月 22 日广西桂林短时强降水、2023 年 6 月 8 日北海持续性强降水过程的天气系统、雷达回波特征, 并重点分析了两次强降水过程雨滴谱特征之间的差异。得到以下主要结论:

(1) 桂林短时强降水受低涡、切变线和冷空气共同影响, 雷达回波显示对流发展强盛, 云中存在冰雹等固态粒子, 降水持续时间短, 属于强对流系统降水。北海持续性强降水受热带低压和副热带高压影响, 降水持续时间长, 雷达强回波中心位于 0 ℃ 层以下, 主要属于弱对流系统降水。

(2) 桂林与北海的平均雨滴谱随雨强变化特征差异明显。桂林不同尺寸雨滴数浓度随雨强增大表现出不同的变化特征, 呈现典型大陆性对流降水属性; 相比之下, 北海平均谱的小雨滴数浓度在各雨强下趋于一致, 仅较大直径粒子浓度差异随直径增大而增加, 表现出显著的海洋性对流降水属性。归一化 Gamma 谱参数进一步证实, 桂林短时强降水具有大陆性特征, 而北海则属于海洋性特征。

(3) 两地微物理机制活跃度差异显著。桂林短时强降水中平衡雨滴谱(7.94%)和过渡雨滴谱(79.37%) 的占比均显著高于北海持续性强降水 (平衡雨滴谱和过渡雨滴谱分别为 1.57% 和 31.57%)。这一分布差异表明, 桂林短时强降水暖云过程中的雨滴碰并和碰撞-破碎机制远比北海活跃。

本文对比分析了广西两次强降水过程的地面雨滴谱特征、以及碰并和碰撞-破碎等微物理过程的影响, 对于深入认识不同强降水过程的微物理特性、改进数值模拟的参数化方案以及提高雷达定量估测降水精度具有积极意义。然而, 地面雨滴谱是云中微物理过程与动力过程相互作用的产物, 仅依靠地面雨滴谱资料推断雨滴谱的形成机理存在一定的局限性。因此, 下一步需要利用双偏振雷达等观测资料, 分析降水粒子在空中的变化特征, 综合空中和地面观测资料, 更深入探讨不同微物理过程对地面强降水形成的影响。

参考文献 (References):

胡雅君,张伟,张玉轩,等.2022.闽南沿海 2018—2019 年季风爆发前后雨滴谱特征对比分析[J].气象学报,80(4):618−631. Hu Y J, Zhang W, Zhang Y X, et al. 2022. Comparative analysis of raindrop size distribution characteristics before and after monsoon onset in southern coast of Fujian province in 2018—2019 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 80(4):618−631 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2022.045

江雨霏, 杨莲梅, 曾勇, 等.2023.昭苏夏季层状云和对流云降水的雨滴谱特征[J].沙漠与绿洲气象,17(3):8−16 Jiang Y F, Yang L M, Zeng Y, et al. 2023. Characteristics of raindrop size distribution for stratiform and convective precipitation in Summer in Zhaosu [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(3):8−16 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.03.002

李山山,王晓芳,李国平,等.2023.短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比[J].暴雨灾害,42(1):1−12. Li S S, Wang X F, Li G P, et al. 2023. Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain [J]. Torrential Rain and Disasters,42(1):1−12 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−119

罗亚丽,孙继松,李英,等.2020.中国暴雨的科学与预报: 改革开放 40 年研究成果[J].气象学报,78(3):419−450. Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al. 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: Research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(3):419−450 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.057

刘晓璐,郭善云,郑飒飒,等.2023.安宁河谷雨季层状云和对流云降水的雨滴谱特征[J].高原山地气象研究,43(3):32−39 Liu X L, Guo S Y, Zheng S S, et al. 2023. Raindrop size distribution characteristics of stratiform and convective precipitation during rainy season in Anning River Valley [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 43(3):32−39 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.03.004

毛家燊,廖胜石,蒋亚平,等.2024.北部湾沿海热带气旋暴雨与暖区暴雨雨滴谱特征分析[J].气象与环境科学,47(4):32−41. Mao J S, Liao S S, Jiang Y P, et al. 2024. Analysis on characteristics of the raindrop size distribution between tropical cyclone rainstorm and warm-sector rainstorm in Beibu Gulf coast [J]. Meteorological and Environmental Sciences,47(4):32−41 (in Chinese)

覃皓,农孟松,翟丽萍,等.2024.广西沿海“23.6”弱热带低压破纪录暴雨过程的诊断分析[J].气象学报,82(3):289−305. Qin H, Nong M S, Zhai L P, et al. 2024. Diagnosis of the June 2023 record-breaking rainstorm caused by a weak tropical depression in the coastal area of Guangxi, China [J]. Acta Meteorologica Sinica,82(3):289−305 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2024.20230121

覃靖,潘海,刘蕾,等.2017.桂北地区强冰雹的雷达临近预警指标分析[J].灾害学,32(2):159−164. Qin J, Pan H, Liu L, et al. 2017. Radar early warning index analysis of servere hail in north of Guangxi [J]. Journal of Catastrophology,32(2):159−164 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−811X.2017.02.028

孙炜文,王璇,肖潇.2022.江西一次冰雹过程的 S 波段双偏振雷达回波特征分析[J].暴雨灾害,41(6):621−630. Sun W W, Wang X, Xiao X. 2022. Analysis on characteristics of S-band dual-polarization radar echo of a hail event in Jiangxi Province [J]. Torrential Rain and Disasters,41(6):621−630 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2020−242

王俊,丛春华,王洪,等.2022.台风温比亚 (2018) 登陆后雨滴谱演变特征研究[J].气象,48(11):1449−1459. Wang J, Cong C H, Wang H, et al. 2022. Evolution characteristics of raindrop size distribution of landfalling typhoon Rumbia (2018) [J]. Meteorological Monthly,48(11): 1449−1459(in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.050901

王俊,陈宝君,周淑玲,等.2023.郑州“7•20”特大暴雨雨滴谱特征分析[J].高原气象,42(5):1247−1259. Wang J, Chen B J, Zhou S L, et al. 2023. Analyzing the characteristics of raindrop size distributions of the “7·20” torrential rain in zhengzhou on 20 July 2021 [J]. Plateau Meteorology,42(5):1247−1259 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2022.00089

王晓芳,崔春光.2011.中尺度对流系统研究的若干进展[J].暴雨灾害,30(2):97−106. Wang X. F, Cui C G. 2011. Some advances in the study of mesoscale convective systems [J]. Torrential Rain and Disasters,30(2):97−106 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2011.02001

叶朗明,徐碧裕,刘显通,等.2021. 2017 年广东西部一次暖区极端降水过

程的维持机制及微物理特征[J].气候与环境研究,26(3):263−274. Ye L M, Xu B Y, Liu X T, et al. 2021. Maintenance mechanism and microphysical characteristics of an extreme intensity precipitation in warm area in western Guangdong in 2017 [J]. Climatic and Environmental Research,26(3):263−274 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.10069585.2020.20028

翟丽萍,梁依玲,周云霞,等.2024.桂林“5.22”极端强降雨过程的观测分析[J].暴雨灾害,43(3):313−321. Zhai L P, Liang Y L, Zou Y X, et al. 2024. Observation analysis of “5.22” extreme rainfall event in Guilin [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):313−321 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−141

周坤论,黄剑钊,王玮,等.2023.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,44(1):87−93. Zhou K L, Huang J Z, Wang W, et al. 2023. Analysis of the raindrop spectrum characteristics of a dragon-boat precipitation process in Liuzhou city in 2022 [J]. Journal of Meteorological Research and Application,44(1):87−93 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45−1356/P.2023.1.15

Bringi V N, Chandrasekar V, Hubbert J, et al. 2003. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,60(2):354−365. doi:10.1175/1520−0469(2003)060<0354:RSDIDC>2.0.CO;2

Bringi V N, Thurai M, Baumgardner D. 2009. Raindrop fall velocities from an optical array probe and 2-D video disdrometer [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,48(12):2549−2564. doi:10.1175/2009JAMC2050.1

Chen C, Zhang A, Wu N G, et al. 2023. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the south China monsoon region (Guangdong Province) [J]. Journal of Tropical Meteorology,29(1):55−67. doi:10.46267/j.1006−8775.2023.005

D'Adderio L P, Porcù F, Tokay A. 2015. The role of collision–coalescence and breakup in the raindrop size distribution observed during the HyMeX SOP1 campaign [J]. Journal of Hydrometeorology,16(2):628−644. doi:10.1175/JHM−D−14−0107.1

D'Adderio L P, Porcù F, Tokay A. 2018. Evolution of drop size distribution in natural rain [J]. Atmospheric Research,200:70−76. doi:10.1016/j.atmosres.2017.10.019

Dolan B, Fuchs B, Rutledge S A, et al. 2018. Primary modes of global drop-size distributions [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,75(5):1453−1476. doi:10.1175/JAS−D−17−0242.1

Friedrich K, Kalina E A, Masters F J, et al. 2013. Drop-size distributions in thunderstorms measured by optical disdrometers during VORTEX2 [J]. Monthly Weather Review,141:1182−1203. doi:10.1175/MWR−D−12−00116.1

Jaffrain J, Berne A. 2011. Experimental quantification of the sampling uncertainties associated with measurements from Parsivel disdrometers [J]. Journal of Hydrometeorology,12(2):352−370. doi:10.1175/2010JHM1245.1

Gatlin P N, Thurai M, Bringi V N, et al. 2015. Searching for large raindrops: A global summary of two-dimensional video disdrometer observations [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,54(5):1069−1089. doi:10.1175/JAMC−D−14−0269.1

Li X, Chen S, Li Z, et al. 2022. Statistical characteristics of warm season raindrop size distribution in the Beibu Gulf, South China [J]. Remote Sensing,4(19):4752. doi:10.3390/rs14194752

Löffler-Mang M, Joss J. 2000. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,17(2):130−139. doi:10.1175/1520−0426(2000)017<0130:AODFMS>2.0.CO;2

Luo Y L, Zhang R H, Wan Q L, et al. 2017. The southern China monsoon rainfall experiment (SCMREX) [J]. Bulletin Of the American Meteorological Society,98(5):999−1013. doi:10.1175/BAMS−D−15−00235.1

McFarquhar G M. 2004. A new representation of collision-induced breakup of raindrops and its implications for the shapes of raindrop size distributions [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,61(7):777-794. doi:10.1175/1520−0469(2004)061<0777:ANROCI>2.0.CO;2

Rosenfeld D, Ulbrich C W. 2003. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities [C]. Radar and Atmospheric Science: A Collection of Essays in Honor of David Atlas. Meteorological Monographs, American Meterological Society,52:237-258

Ryzhkov A, Kumjian M R, Ganson S M, et al. 2013. Polarimetric radar characteristics of melting hail. Part I: Theoretical simulations using spectral particle models [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,52(12):2849−2869. doi:10.1175/JAMC−D−13−073.1

Straub W, Behrang K, Seifert A, et al. 2010. Numerical investigation of collision-induced breakup of raindrops. Part II: Parameterizations of coalescence efficiencies and fragment size distributions [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,67(3):576−588. doi:10.1175/2009JAS3245.1

Testud J, Oury S, Black R A, et al. 2001. The concept of “normalized” distribution to describe raindrop spectra: A tool for cloud physics and cloud remote sensing [J]. Journal of Applied Meteorology,40(6):1118−1140. doi:10.1175/1520−0450(2001)040<1118:TCODTD>2.0.CO;2

Ulbrich C W, Atlas D. 2007. Microphysics of raindrop size spectra: Tropical continental and maritime storms [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,46(11):1777−1791. doi:10.1175/2007JAMC1430.1

Yu S T, Luo Y L, Wu C, et al. 2022. Convective and microphysical characteristics of extreme precipitation revealed by multisource observations over the Pearl River Delta at monsoon coast [J]. Geophysical Research Letters,49:e2021GL097043. doi:10.1029/2021GL097043

Zeng Q W, Zhang Y, Lei H C, et al. 2019. Microphysical characteristics of precipitation during pre-monsoon, monsoon, and postmonsoon periods over the South China Sea [J]. Advances in Atmospheric Sciences,36(10):1103−1120. doi:10.1007/s00376−019−9005−5

Zhang A, Hu J J, Chen S, et al. 2019. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the monsoon season observed in southern China [J]. Remote Sensing,11(5):432−447. doi:10.3390/rs11050432

Zhang A, Chen C, Wu L. 2023. Regional variability of raindrop size distribution from a network of disdrometers over complex terrain in southern China [J]. Remote Sensing,15:2678. doi:10.3390/rs15102678

(责任编辑 唐国瑛)