

韦靖,汤耀国,毛家桢,等. 桂北一次极端强降雨过程宏微观物理特征分析[J]. 气象研究与应用,2023,44(1):81-86.

Wei Jing,Tang Yaoguo,Mao Jiashen,et al. Analysis on macro-microscopic physical characteristics of an extreme rainfall process in northern Guangxi[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2023,44(1):81-86.

# 桂北一次极端强降雨过程宏微观物理特征分析

韦靖<sup>1</sup>, 汤耀国<sup>2\*</sup>, 毛家桢<sup>3</sup>, 刘银焕<sup>3</sup>, 梁丽娜<sup>4</sup>, 施洁云<sup>1</sup>

(1.扶绥县气象局, 广西 扶绥 543200; 2.南宁市气象局, 南宁 530029; 3.崇左市气象局, 广西 崇左 532200;

4.环江毛南族自治县气象局, 广西 环江 547100)

**摘要:** 利用环江站降水现象仪雨滴谱资料,结合雷达资料、全球再分析资料(FNL资料),分析了桂北地区2022年6月20日“龙舟水”极端强降雨过程的宏微观物理特征。结果表明,此次过程受短波槽和西南急流影响,桂北地区水汽条件和动力条件较好,深厚湿对流发生发展条件有利,“列车效应”导致环江站短时强降水持续出现;雨强与雨滴直径、雨滴数浓度有较好的对应关系,强降雨时段比弱降雨时段具有更大的雨滴直径和更高的雨滴数浓度;不同降雨时段平均谱均呈单峰结构,数浓度峰值均位于0.7 mm 粒径附近。

**关键词:** 雨滴谱;极端强降雨;“龙舟水”;桂北

**中图分类号:** P458.1\*21.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.1.14

## 引言

每年4月开始,华南进入前汛期。其中,降水最集中、雨量最大的过程主要发生在5月下旬至6月中旬,因正值端午俗称“龙舟水”<sup>[1]</sup>。“龙舟水”期间,南海季风活跃,华南地区常发生持续性暴雨天气,导致严重的江河洪涝<sup>[2]</sup>。因此,做好“龙舟水”的预报和预警是前汛期工作的重点。国内已有学者对“龙舟水”开展了相关研究。胡娅敏等<sup>[3]</sup>对华南地区49a“龙舟水”进行降水分型,发现其具有东南沿海型、北部型和西南沿海型3种优势降水型。伍红雨等<sup>[4]</sup>研究指出,“龙舟水”偏多时西太平洋副热带高压偏弱、低层西南气流显著偏强。刘国均等<sup>[5]</sup>从天气形势、卫星云图和雷达资料等方面对2008年台山市“龙舟水”特大暴雨过程进行分析,为之后“龙舟水”暴雨预报提供了参考。张凌云和刘蕾<sup>[2]</sup>对柳州2020年一次“龙舟水”过程进行诊断分析,指出数值模式对低层切变线和地面冷空气的预报偏差是导致暴雨落区预报偏差的重要原因。目前,针对广西地区“龙舟水”过程的研究主要集中在大气宏观动力、热力学方面,而

针对其降水微物理特征的研究还比较欠缺。

2022年广西“龙舟水”(5月21日—6月21日),全区平均降雨量490.8mm,是常年同期的1.6倍,也是新中国成立以来最强的一次。其中,6月17—21日是“龙舟水”期间极端性最强的一次过程,强降雨落区主要位于桂北,具有累积雨量大、大暴雨落区集中、雨势猛、极端性强等特点。据国家级气象观测站资料统计,环江国家气象观测站(下文简称环江站)于6月20日出现280.3mm的全区最大日降雨量(以北京时20时为日界,下同)。因此,利用环江站降水现象仪雨滴谱资料,结合雷达资料、FNL再分析资料,从宏观、微观角度出发,分析此次极端强降雨的动力、水汽条件以及云降水微物理特征,以期为提高“龙舟水”预报预测能力提供参考。

## 1 资料与方法

文中使用的气象资料包括环江站降水现象仪雨滴谱资料、广西国家级气象观测站雨量资料、河池国家天气雷达站(下文简称河池雷达站)雷达资料以及美国国家环境预报中心(NCEP)/美国国家大气研究中心

收稿日期: 2022-11-16

基金项目: 广西气象科研计划项目(桂气科2022M03)、崇左气象科研项目(崇气科201807-1)

作者简介: 韦靖(1996—),女,助理工程师,主要从事县级综合气象业务。E-mail:543721343@qq.com

\* 通讯作者: 汤耀国(1987—),男,工程师,主要从事大气环境气象预报。E-mail:247707946@qq.com

(NCAR)的全球再分析资料(FNL 资料),资料时段均为 2022 年 6 月 19 日 20 时(北京时,下同)至 20 日 20 时。

降水现象仪采样间隔为 1min, 采样面积为 54cm<sup>2</sup>, 输出的雨滴谱数据矩阵包含 32 级尺度通道(直径探测区间为 0~26mm)和 32 级速度通道(速度探测区间为 0~22.4m·s<sup>-1</sup>)。由于前两个尺度通道的雨滴直径很小,易受湍流、地面飞溅等因素影响导致信噪比很低,并且自然界降雨几乎不存在 8mm 以上的雨滴,故剔除前两个尺度通道的数据及直径大于 8mm 的异常记录<sup>[6]</sup>,即雨滴直径的有效观测记录是 0.25~8.0mm。另外,参照 Friedrich 等<sup>[7]</sup>研究,剔除偏离雨滴理论下落末速度±60%以外的降水粒子以便消除测量误差。由于雨滴在下落过程中一般为非球形,故参照 Battaglia 等<sup>[8]</sup>研究方法将雨滴谱数据进行形变订正处理:粒径小于 1mm 时默认为球形,粒径在 1~5mm 时认为轴率(粒子高宽比)为 1~0.7 的扁椭球形,粒径大于 5mm 时认为轴率为 0.7 的扁椭球形粒子。

经过数据质量控制和形变订正后的雨滴谱资料,即可用于计算雨滴数浓度  $N(D_i)$  和雨强  $R$ :

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

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} \frac{D_i^3 \cdot n_{ij}}{A \cdot \Delta t} \quad (2)$$

其中,  $N(D_i)$  为第  $i$  个直径通道雨滴数浓度,单位: mm<sup>-1</sup>·m<sup>-3</sup>;  $n_{ij}$  为第  $i$  个直径通道、第  $j$  个速度通道的雨滴数;  $A$  为降水现象仪采样面积,单位: m<sup>2</sup>;  $\Delta t$  为采样时间间隔,单位: s;  $V_j$  代表第  $j$  个速度通道的雨滴下落末速度,单位: m·s<sup>-1</sup>;  $\Delta D_i$  代表对应通道的宽度,单位: mm;  $R$  为利用雨滴谱资料计算得到的雨强,单

位: mm·h<sup>-1</sup>;  $D_i$  为第  $i$  个直径通道雨滴直径,单位: mm。

## 2 降水实况和天气形势分析

### 2.1 降水实况

2022 年 6 月 20 日桂东北发生的极端强降雨过程强降雨落区主要分布在桂北,特别是河池市东北部和柳州市北部,雨量且落区集中。据国家级气象观测站资料显示,日降雨量极值出现在环江站 280.3mm。从环江站小时雨量时序图来看(图 1),降雨时段在 19 日 22 时至 20 日 11 时,其中,20 日 00—03 时小时雨强大且波动明显,表现为显著的对流性降水特征,最大小时雨强达 78.4mm,降雨极端性强、致灾危险性大。

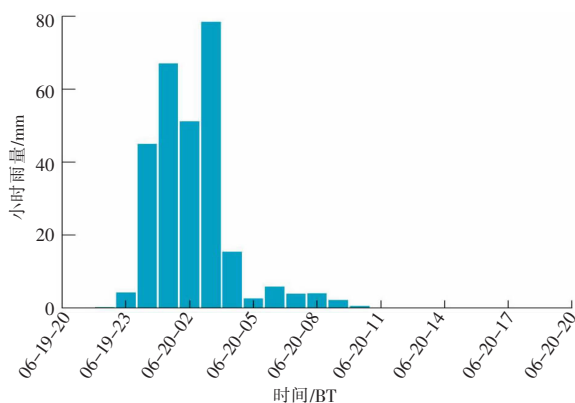


图 1 2022 年 6 月 20 日环江站小时雨量时序图

### 2.2 天气环流背景

2022 年 6 月 20 日 02 时, 500hPa 上(图 2a)亚洲中纬度地区维持两槽一脊形势, 副热带高压位置偏东, 高空槽东移影响广西, 正好位于环江站上空。850hPa 风场(图 2b)显示, 桂北有—东北—西南向的

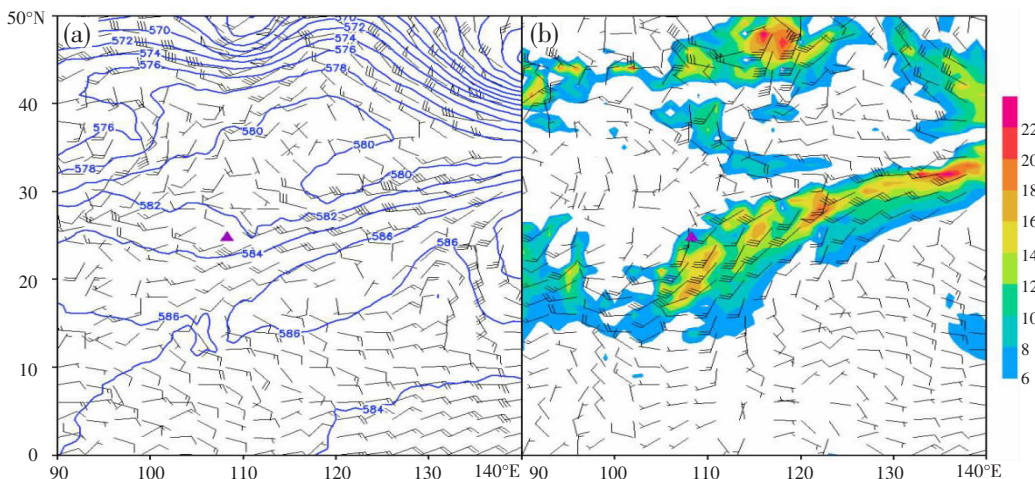


图 2 2022 年 6 月 20 日 02 时(a)500hPa 高度场(蓝线)、风场(风向杆)和(b)850hPa 风场(风向杆,填色区为风速大于 6m·s<sup>-1</sup> 的区域,紫色三角形对应环江站位置)

切变线,已压至环江站附近,低层西南急流维持,急流轴中心风速超过  $16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,并且急流横跨经度范围较大,十分利于孟加拉湾和南海水汽输送至华南地区。高空槽的动力强迫作用以及低空急流输送的充足水汽,为桂北地区强降雨的发生构建了有利的环境背景场。

### 2.3 水汽条件及动力条件

造成暴雨所需的水汽往往由低层强盛西南急流提供,水汽通量散度变化能很好地反映水汽的汇集情况<sup>[9]</sup>。如图 3a 所示,20 日 02 时,西南风和偏南风持续输送暖湿空气,建立起深厚的水汽供应通道。此

时,环江站附近有明显的水汽辐合中心,中心值达到  $-80\times 10^{-6}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,水汽条件十分有利。对经过环江站( $24.8^{\circ}\text{N}$ )的散度经向垂直分布情况(图 3b)进行分析,环江站在 700hPa 以下的低层为辐合层,最强位于 900hPa 附近( $-4\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ ),400hPa 以上为辐散层。环江站上空存在较强的上升运动,从地面伸展至 200hPa 附近,上升运动大值区出现在 700~600hPa 之间,达  $-1.2\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$  以上。付炜等<sup>[10]</sup>研究指出,500hPa 高空槽位置与低层辐合区叠加,有利于深厚湿对流环境的形成,最终造成暴雨的发生。

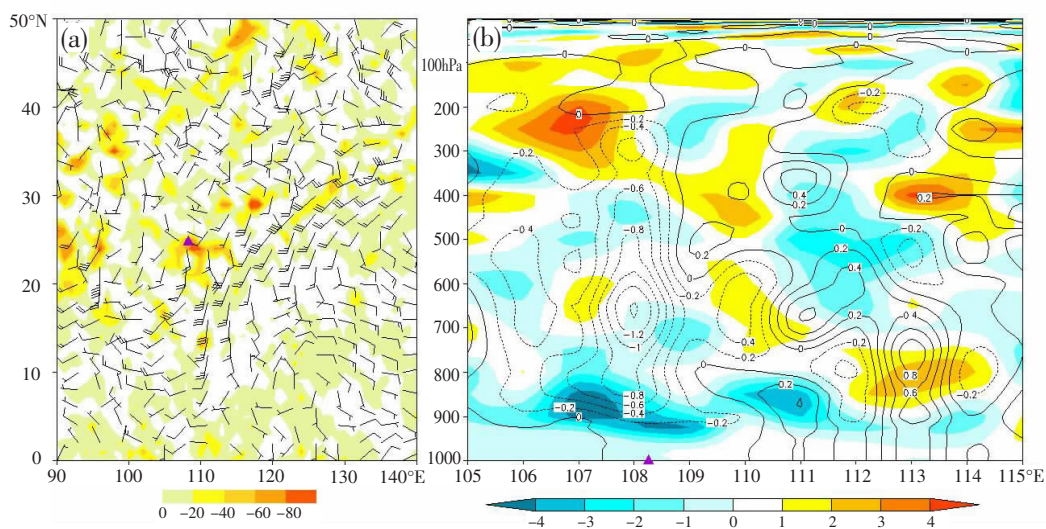


图 3 2022 年 6 月 20 日 02 时 (a)925hPa 风场(风向杆)、水汽通量散度场(填色,单位:  $10^{-6}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )和 (b)沿  $24.8^{\circ}\text{N}$  的散度(填色,单位:  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ )、垂直速度(黑线,单位:  $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ )经向垂直剖面。紫色三角形对应环江站位置。

## 3 降水微物理特征

降水是云中微物理、动力、热力过程以及诸因素综合作用的结果,其降水粒子尺度、谱分布、形状等微物理特征量是揭示降水物理本质的重要特征量<sup>[11]</sup>。极端暴雨过程的产生,与降水类型、降水粒子的微物理特征密切相关,也受系统的移动速度、尺度和组织结构共同影响<sup>[12]</sup>。

### 3.1 对流系统结构特征

此次降雨过程,河池雷达站东部不断有对流单体被激发生成,向下游(东偏南方向)移动并发展,逐渐与原有单体合并加强,致使环江县东南部的对流回波列车效应明显,强降雨持续时间长。由 20 日 00:54 河池雷达站组合反射率(图 4a)可见,此时环江县东南部为强回波区,最大回波强度达 55dBZ 以

上。从反射率因子垂直剖面(图 4b)上看,影响环江县的中尺度对流系统较为深厚,回波顶高度在 15km 以上,45dBZ 反射率因子垂直伸展至 10km 高度,强回波反射率极值约 60dBZ,位于 5km 高度附近。俞小鼎<sup>[13]</sup>指出,如果 40dBZ 反射率因子垂直扩展到  $-20^{\circ}\text{C}$  等温线以上高度,则判定为高质心结构。结合当天的探空资料( $-20^{\circ}\text{C}$  层位于 8.9km 高度附近),易判断出图 4b 中的中尺度对流系统属于高质心降水云团,云团中除液态水以外,还含有过冷水或冰晶粒子等混合相态水物质,降水粒子冰相作用较强。

### 3.2 微物理特征

利用研究时段内的环江站雨滴谱资料计算雨强,并与本站雨量传感器分钟雨量进行相关性分析,结果为 0.986,表明降水现象仪观测资料能较好地反映实际降雨情况,这与周坤论等<sup>[14]</sup>的研究结论



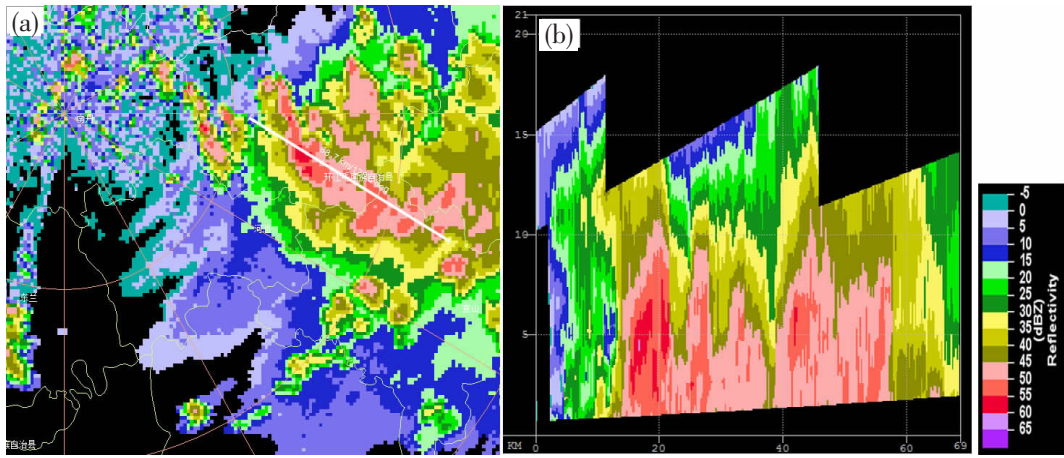


图4 2022年6月20日00:54河池雷达站垂直剖面(单位:dBZ)  
(a)组合反射率;(b)反射率因子

相一致。

为了解环江站降雨过程中雨滴数浓度、雨滴直径和雨强等微物理量随时间的变化情况,绘制雨滴谱时间序列图(图5)。由图可知,降水现象仅反演的雨强在20日02:23达到最大值 $137\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。19日22:34—20日03:14时段(下文简称强降雨时段),雨强较强且波动剧烈,这与雨量传感器观测到的小时雨量最大值时段基本一致,其余时段(下文简称弱降雨时段)雨强基本在 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下,降雨强度较为平缓。强降雨时段内大雨滴( $>3\text{mm}$ )数量较多,部分大雨滴的直径甚至超过 $6\text{mm}$ ,雨滴数浓度相对较高,小雨滴( $<1\text{mm}$ )数浓度出现超过 $1000\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 的大值区,数浓度大于 $100\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区域扩展至 $3\text{mm}$ 附近。弱降雨时段雨滴直径普遍在 $2.5\text{mm}$ 以下,少数雨滴直径达到 $3.0\text{mm}$ ;各粒径段雨滴数浓度均较

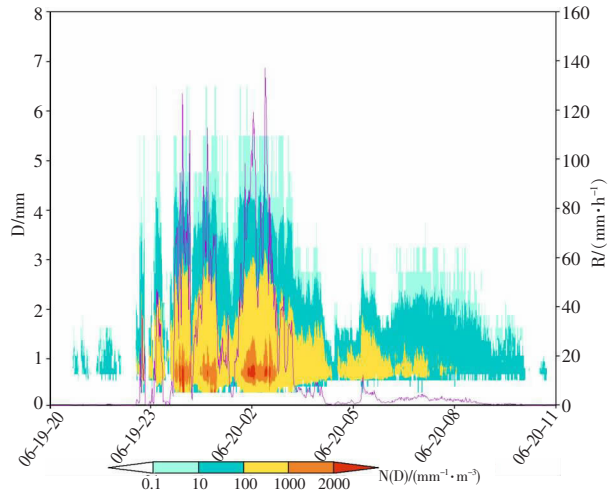


图5 环江站雨滴数浓度(色阶,单位: $\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ )、雨滴直径(色阶高度,单位: $\text{mm}$ )及雨强(紫色曲线,单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )的时间序列图

低,基本在 $100\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,只有部分时刻 $0.6\sim 1.6\text{mm}$ 粒径段内超过 $100\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 。总体上,雨强与雨滴直径、雨滴数浓度有较好的对应关系。

图6展示了所有降雨合集、强降雨时段和弱降雨时段内不同粒径区间的雨滴数浓度平均值分布情况。从图中可以看到,各降雨时段的小雨滴数浓度最高,中雨滴次之,大雨滴最低。平均谱均呈单峰结构,所有降雨合集、强降雨时段和弱降雨时段的平均数浓度峰值分别为 $447\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $977\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $145\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ,峰值均出现在 $0.7\text{mm}$ 直径附近,与图5所反映的情况一致。弱降雨时段在各粒径处的数浓度均远小于强降雨时段,且两者在中、大雨滴粒径段内随着直径增大其数浓度差异程度也加大。弱降雨时段的粒径谱宽仅为 $4.8\text{mm}$ ,远小于强降雨时段的粒径谱宽 $7.5\text{mm}$ 。与傅佩玲等<sup>[12]</sup>研究的广州特大

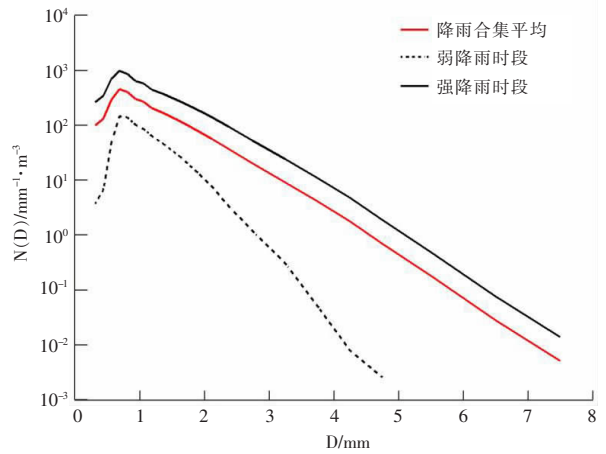


图6 所有降雨合集(红色实线)、强降雨时段(黑色实线)和弱降雨时段(黑色虚线)在不同粒径下的平均谱分布

暴雨个例(强降雨时段平均谱峰值数浓度大于  $10^4 \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ , 最大粒径达到 6.5mm)相比, 此次桂北强降雨过程的雨滴数浓度偏低, 主要表现为小雨滴偏少, 但大雨滴数浓度偏高, 降水粒子直径相对较大。

## 4 结论

本文利用雨滴谱数据、雷达资料和 FNL 资料, 对 2022 年“龙舟水”期间桂北一次极端强降雨的大气动力、水汽条件以及云降水微物理特征进行了综合分析, 得到主要结论如下:

(1) 本次强降雨过程主要受短波槽和西南急流共同影响, 桂北地区水汽辐合作用强、垂直上升运动强烈, 高空槽位置与低层辐合区叠加较好, 利于深厚湿对流的形成和发展。

(2) 对流单体不断被激发并与原有单体合并加强, 形成列车效应导致环江站持续出现短时强降雨。强降雨发生时的中尺度对流系统较为深厚, 属于高质心降水云团。

(3) 雨强与雨滴直径、雨滴数浓度有较好的对应关系。强降雨时段的雨滴直径偏大, 雨滴数浓度较高; 弱降雨时段的雨滴直径普遍较小, 雨滴数浓度较低。

(4) 各降雨时段平均谱均呈单峰结构, 数浓度峰值均位于 0.7mm 粒径附近。弱降雨时段的粒径谱宽远小于强降雨时段, 二者雨滴数浓度的差异程度在中、大雨滴粒径段内随直径增大而加大。

### 参考文献:

- [1] 潘嘉念. 广东省农业气象灾害及其防灾减灾对策[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 173.
- [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] 胡娅敏, 杜尧东, 罗晓玲. 近 49 年华南“龙舟水”的降水分型[J]. 气象, 2013, 39(8): 1031–1041.
- [4] 伍红雨, 李春梅, 王迪龙. 近 55 年广东“龙舟水”异常特征及成因分析[J]. 热带气象学报, 2017, 33(5): 608–616.
- [5] 刘国均, 陈志强, 杨锦青. 2008 年台山市“龙舟水”特大暴雨过程分析[J]. 气象研究与应用, 2009, 30(增刊 2): 47–48.
- [6] 周丹, 周淑玲, 田金华, 等. 基于 Parsivel 降水现象仪资料的郑州“7·20”罕见特大暴雨微物理特征分析[J]. 气象与环境科学, 2022, 45(2): 93–101.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 孙继松. 短时强降雨和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(6): 498–506.
- [10] 付炜, 唐明晖, 叶成志. 强西南急流背景下湘桂边界两次预报失败的暖区暴雨个例分析[J]. 气象, 2020, 46(8): 1001–1014.
- [11] 刘显通, 冯璐, 万齐林, 等. 华南地区典型强降水系统微物理特征差异分析[C]//第 35 届中国气象学会年会 S13 大气物理学与大气环境, 2018: 152–154.
- [12] 傅佩玲, 胡东明, 张羽, 等. 2017 年 5 月 7 日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析[J]. 气象, 2018, 44(4): 500–510.
- [13] 俞小鼎. 短时强降雨临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 202–209.
- [14] 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.

## Analysis on macro–microscopic physical characteristics of an extreme rainfall process in northern Guangxi

Wei Jing<sup>1</sup>, Tang Yaoguo<sup>2\*</sup>, Mao Jiashen<sup>3</sup>, Liu Yinhuan<sup>3</sup>, Liang Li'na<sup>4</sup>, Shi Jieyun<sup>1</sup>

(1. Fusui Meteorological Bureau, Guangxi Fusui 543200, China; 2. Nanning Meteorological Bureau, Nanning 530029, China; 3. Chongzuo Meteorological Bureau, Guangxi Chongzuo 532200, China; 4. Huanjiang Meteorological Bureau, Guangxi Huanjiang 547100, China)

**Abstract:** Based on the raindrop spectrum observation collected by the precipitation phenomometer of Huanjiang station, combined with the radar data and NCEP/NCAR–FNL reanalysis data, the macro–microscopic physical characteristics of an extreme dragon–boat rainfall process in northern Guangxi on June 20, 2022, are analyzed. Results show that the process is caused by a short–wave trough and the southwest jet, which can provide adequate moisture conditions and dynamic conditions in northern Guangxi, in favor of the development of deep moist convection, and the training effect leads to the continuous occurrence of short–term heavy rainfall at Huanjiang station. There is good correspondence between the rainfall intensity and the raindrop particle size and raindrop number concentration. Compared with the weak rainfall process, the heavy rainfall process has a larger raindrop particle size and higher raindrop number concentration. The average spectra of the different rainfall periods show a unimodal structure, with the peak values of number concentration located near the particle size of 0.7mm.

**Key words:** raindrop spectrum; extreme rainfall; dragon–boat precipitation; northern Guangxi