

毛家燊, 陈逸伦, 张慕祺, 等. 2023. 崇左和防城港两地的台风韦帕 (201907) 降雨雨滴谱对比分析 [J]. 大气科学, 47(3): 655–666. MAO Jiashen, CHEN Yilun, ZHANG Aoqi, et al. 2023. Comparative Analysis of Rainfall Droplet Spectra of Typhoon Wipha (201907) in Chongzuo and Fangchenggang, China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(3): 655–666. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21116](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21116)

# 崇左和防城港两地的台风韦帕 (201907) 降雨 雨滴谱对比分析

毛家燊<sup>1,2</sup> 陈逸伦<sup>1,3</sup> 张慕祺<sup>1,3</sup> 陈淑敏<sup>1,3</sup> 方容<sup>1,3</sup>  
黎伟标<sup>1,3</sup> 李明学<sup>4</sup>

1 中山大学大气科学学院, 珠海 519082

2 广西崇左市气象局, 崇左 532200

3 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519080

4 广西防城区气象局, 防城港 538000

**摘要** 利用崇左国家气象观测站、防城国家基准气候站的雨滴谱观测数据, 结合观测站雨量数据及雷达观测资料, 分析 2019 年 8 月 2~3 日台风“韦帕”影响期间内陆背风侧 (LSI)、近海岸迎风侧 (WSC) 不同降水阶段的雨滴谱结构特征及其差异。结果显示, 台风“韦帕”降雨以中、小雨滴贡献为主, 尤其中雨滴贡献率稳定在 70% 以上。LSI 处以层状云降水为主, 雨强相对平缓, WSC 处表现为积层混合云降水, 雨强较大且波动剧烈。因强烈的对流上升运动导致 WSC 的雨滴数浓度、雨滴直径明显大于 LSI。LSI 处在台风登陆后雨势增强的主要因素是雨滴直径增大, WSC 处由台风眼墙转变为强对流螺旋雨带影响后其雨势增强则主要是由于雨滴数浓度增加。台风“韦帕”对流降水的质量加权平均直径均值为 1.85 mm, 对数标准化数浓度均值为  $3.95 \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$ ; LSI 处对流降水位于海洋性对流区域内, 而 WSC 处则介于海洋性和大陆性对流之间。

**关键词** 台风暴雨 螺旋雨带 台风眼壁 近海岸山脉 雨滴谱

文章编号 1006-9895(2023)03-0655-12

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21116](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21116)

## Comparative Analysis of Rainfall Droplet Spectra of Typhoon Wipha (201907) in Chongzuo and Fangchenggang, China

MAO Jiashen<sup>1,2</sup>, CHEN Yilun<sup>1,3</sup>, ZHANG Aoqi<sup>1,3</sup>, CHEN Shumin<sup>1,3</sup>, FANG Rong<sup>1,3</sup>,  
LI Weibiao<sup>1,3</sup>, and LI Mingxue<sup>4</sup>

1 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082

2 Chongzuo Meteorological Bureau, Chongzuo, 532200

3 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080

收稿日期 2021-07-09; 网络预出版日期 2021-11-17

作者简介 毛家燊, 男, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事台风暴雨研究。E-mail: [maojsh@mail2.sysu.edu.cn](mailto:maojsh@mail2.sysu.edu.cn)

通讯作者 陈逸伦, E-mail: [chenylun3@mail.sysu.edu.cn](mailto:chenylun3@mail.sysu.edu.cn)

资助项目 广东省基础与应用基础研究重大项目 2020B0301030004, 国家自然科学基金 42075004、42105068, 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设项目 311021009, 中山大学中央高校基本科研业务费专项基金 2021qntd29, 中山大学热带大气—海洋系统科学教育部重点实验室资助项目

Funded by Guangdong Major Project of Basic and Applied Basic Research (Grant 2020B0301030004), National Natural Science Foundation of China (Grants 42075004, 42105068), Innovation Group Project of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai) (Grant 311021009), Fundamental Research Funds for the Central Universities Sun Yat-sen University (Grant 2021qntd29), Key Laboratory of Tropical Atmosphere–Ocean System, Ministry of Education, Sun Yat-sen University

4 Fangcheng District Meteorological Bureau, Fangchenggang, Guangxi Province 538000

**Abstract** We analyzed the structural characteristics and differences in raindrop spectrum at different precipitation stages on the inland leeward side (LSI) and near-coast windward side (WSC) during the impact of typhoon Wipha from August 2 to 3, 2019. We used the raindrop spectrum observation data from Chongzuo National Meteorological Observatory and Fangcheng National Reference Climate Station, combined with rainfall data and radar observation data for the analysis. The results show that typhoon Wipha's rainfall is mainly contributed by medium and small raindrops, with the proportion of medium raindrops consistently exceeding 70%. The rainfall at LSI is dominated by stratiform clouds with relatively gentle rain intensity, while the rainfall at WSC is characterized by mixed cumulus clouds with considerable rain intensity and severe fluctuations. Raindrop concentration and diameter are significantly larger at WSC than at LSI due to the considerable convective activity and upward velocity. The main factor for the increase in rain intensity at LSI after typhoon landfall is an increase in raindrop diameter. Meanwhile, the increase in rain intensity at WSC after the change from typhoon eye wall to a strong convective spiral rain band is mainly due to an increase in raindrop number concentration. The average mass-weighted mean diameter of typhoon Wipha's convective precipitation is 1.85 mm, with a logarithmic normalized intercept of  $3.95 \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$ . Convective precipitation occurs in the maritime convective region at LSI, while it occurs between maritime and continental convection at WSC.

**Keywords** Typhoon rainstorm, Spiral rainband, Eyewall, Near-coastal mountain range, Raindrop spectrum

## 1 引言

中国是受台风影响最严重的国家之一，台风所引发的强降水往往具有较强致灾性，因此，开展台风暴雨研究，了解暴雨的落区、强度及其物理机制等特征，对气象防灾减灾具有重要意义。台风暴雨研究内容较为广泛，很多气象工作者从天气学诊断分析、数值模拟等方面出发，取得较丰硕的研究成果（庞琦烨等，2019；姚晨等，2019；薛一迪和崔晓鹏，2020；杨舒楠和端义宏，2020；郑林晔等，2020；陈淑琴等，2021）。台风降雨中的对流云降水、层状云降水、混合性降水和弱降水的微物理特征各具特色，深入了解其微物理特性对于天气雷达定量降水估测及台风预报至关重要（Wang et al., 2021）。雨滴谱是降水的基本微物理特性，可计算出雨滴浓度、雨强、雨水含量等重要微物理参量，可用于分析不同降水类型或同一降水系统不同生命阶段的云物理特征、降水属性（谢媛等，2015）。雨滴物理参量含有雨滴形成过程的丰富信息，利用雨滴谱观测资料研究暴雨过程中降水微物理特征已成为台风暴雨研究的重要内容。

台风对流降水比普通海上对流降水具有更高的雨滴浓度和更低的雨滴直径，暖雨积聚过程在登陆中国后的台风降雨中占主导地位（Wen et al., 2018）。台风摩羯（201814）途经浙江等地后移入山东，变性为温带气旋，此时雨滴大小分布不再具有海洋对流降水的特征，而更具有大陆对流降水的典型特征

（Wang et al., 2021）。登陆海南岛等热带地区的台风保持原有属性，具有明显海洋对流降水特征（Zheng et al., 2021）。登陆我国的台风系统所产生降水，粒径在 0.5~1 mm 之间的粒子数浓度最大，中小粒子浓度是雨强的决定因素（吕童，2018）。申高航等（2020）研究了台风“利奇马”不同强降水中心雨滴谱随时间的变化，指出地面降水强度与 1.2 mm 雨滴高浓度区域有非常好的对应关系。

台风过程不同降水阶段、不同降水部位的雨滴谱特征均有所不同（林文等，2016；朱红芳等，2020）。登陆后的台风降水较登陆前具有更大的谱宽以及在各粒径段内（尤其是小雨滴）有更高的数浓度（Feng et al., 2021）。Zheng et al. (2021) 研究指出，台风螺旋雨带的冰相微物理过程在不同阶段存在明显差异，霰粒含量与雨带发展程度高度相关。Bao et al. (2020) 对比分析了 2018 年台风“玛丽亚”内雨带和外雨带对流性降雨的雨滴谱特征，指出内雨带地面降水的中小雨滴浓度比外雨带降水低得多，但对应更大的平均雨滴直径。Merceret (1974) 分析了大西洋飓风 Ginger 的雨滴谱特征，指出外围雨带与眼墙降水之间的雨滴谱无明显差异。Chen et al. (2012) 研究了 2009 年台风莫拉克的雨滴谱特征，表明台风外围雨带和眼墙降水有显著差异，眼墙降水的粒径分布比外围雨带及眼区降水更宽。

广西地处华南西部，属亚热带季风气候区，地形复杂，暴雨洪涝灾害频发。伍红雨等（2011）研

究发现华南年平均暴雨日数总体上由沿海向内陆递减, 最多中心出现在广西东兴。覃卫坚等(2012)指出广西暴雨主要发生在汛期(4~9月), 防城、东兴因受地形影响导致其极端强降水过程最多。台风往往造成广西大范围的暴雨天气, 孟加拉湾到南海一带西南季风加强在广西特大暴雨过程中起了很重要的作用(卢小丹等, 2017)。目前针对影响华南西部的台风暴雨过程雨滴谱特征分析研究尚少, 降水粒子谱微物理特征认识还不充分, 制约了台风数值预报模式中微物理参数化和天气雷达定量降水估测的准确性。本文以2019年第7号台风“韦帕”对广西西南部所造成的暴雨过程为例, 分析台风在不同地理环境和不同影响阶段的降雨雨滴谱特征, 以期提高对台风暴雨过程降水机制的认识, 为台风预报及精细化预警服务提供参考依据。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料说明

本文选取2019年8月2日至3日崇左国家气象观测站( $22^{\circ}23'N$ ,  $107^{\circ}23'E$ ; 海拔195.8 m; 图1紫色圆点处, 标记CZ)、防城国家基准气候站( $21^{\circ}47'N$ ,  $108^{\circ}21'E$ ; 海拔32.4 m; 图1棕色圆点处, 标记FC)自动站雨量资料、降水现象仪观测的雨滴谱数据, 以及防城港国家天气雷达站( $21^{\circ}32'N$ ,  $108^{\circ}16'E$ ; 天线馈源海拔56 m; 图1蓝色五角星处, 标记WR)的观测资料。其中, 崇左站、防城站雨滴谱观测分别使用江苏省无线电科学研究所生产的DSG1型、北京华创维想生产的DSG4型降水现象仪, 这两种型号仪器均严格按照中国气象局综合观测司2013年11月发布的《降水现象仪功能规格需求书》进行研发, 采样面积为 $54\text{ cm}^2$ , 采样间隔为1 min, 包含32级尺度通道(中值粒径范围为 $0.062\sim24.5\text{ mm}$ )和32级速度通道(中值速度范围为 $0.05\sim20.8\text{ m s}^{-1}$ ), 满足粒子直径、速度观测的最大允许误差不超过 $\pm 1$ 级; 防城港国家天气雷达站为S波段新一代天气雷达, 以VCP21体扫模式运行, 所使用的雷达组合反射率探测范围为230 km、空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 。

所使用的台风路径资料为中国气象局上海台风研究所及中国气象局编制的西北太平洋海域最佳路径数据集(网址: <https://tcdata.typhoon.org.cn/>[2021-06-17]), 时间分辨率为6 h, 但在登陆前24小时及在我国陆地活动期间的时间分辨率则加密为3 h。

数据集包含与热带气旋相关的各种信息, 如最佳路径、登陆地点、强度、风力、中心最低气压等, 支持与热带气旋气候活动和热带气旋预报相关的过程和模式的研究(Ying et al., 2014; Lu et al., 2021)。

崇左站、防城站分别位于防城港雷达站西北方向约130 km处、偏北方向约3 km处, 两站之间隔着东北—西南走向的十万大山山脉, 山脊平均海拔高度1000 m左右(图1所示)。崇左站处于内陆背风侧(LSI), 防城站处于近海岸迎风侧(WSC)。

### 2.2 数据预处理

由于雨滴在下落过程中一般为非球形, 为了减小误差, 需要将雨滴谱数据进行形变订正处理, 因此参照Battaglia et al. (2010)给出的公式, 当粒径小于1 mm时形变忽略不计, 默认为球形; 当粒径在 $1\sim 5\text{ mm}$ 时, 认为是轴率( $a_r$ , 粒子高宽比)为 $1\sim 0.7$ 的扁椭球形粒子, 即 $a_r=1.075-0.075D_q$ ,  $D_q$ 为所测雨滴直径; 当粒径大于5 mm时, 认为是轴率为0.7的扁椭球形粒子, 即 $a_r=0.7$ 。另外, 由于降水现象仪观测时前两个尺度通道的信噪比很低, 故在处理数据时不予考虑; 且由于自然界降水几乎不存在8 mm以上的雨滴, 观测数据中个别时刻出现大于8 mm的大粒子是由雨滴重叠所造成, 需要进行剔除, 因此雨滴粒径的有效观测范围是 $0.25\sim 8.0\text{ mm}$ 。

雨滴在下落过程中受到重力和空气阻力的共同作用, 在两力达到平衡时则以匀速下落, 此下落速度称为雨滴下落末速度。根据Atlas et al. (1973)的研究, 在垂直气流速度为零的理想状况下, 雨滴下落末速度( $V$ )与粒径( $D$ )存在一定关系, 即满足 $V=9.65-10.3\exp(-0.6D)$ 。雨滴下落末速度可以由降水现象仪直接测得, 雨滴在同一直径档的实际落速在一定范围内变化, 分布于雨滴理论下落末速度曲线的两侧(贾星灿等, 2018)。Friedrich et al. (2013)研究指出, 降水现象仪处于 $10\text{ m s}^{-1}$ 以上的强风环境中时容易产生雨滴速度观测错误, 因此需剔除偏离雨滴理论下落末速度 $\pm 60\%$ 以外的雨滴谱数据。

### 2.3 雨滴谱特征量计算

利用雨滴谱数据, 根据下面的公式计算雨滴数浓度 $N(D_i)$ :

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

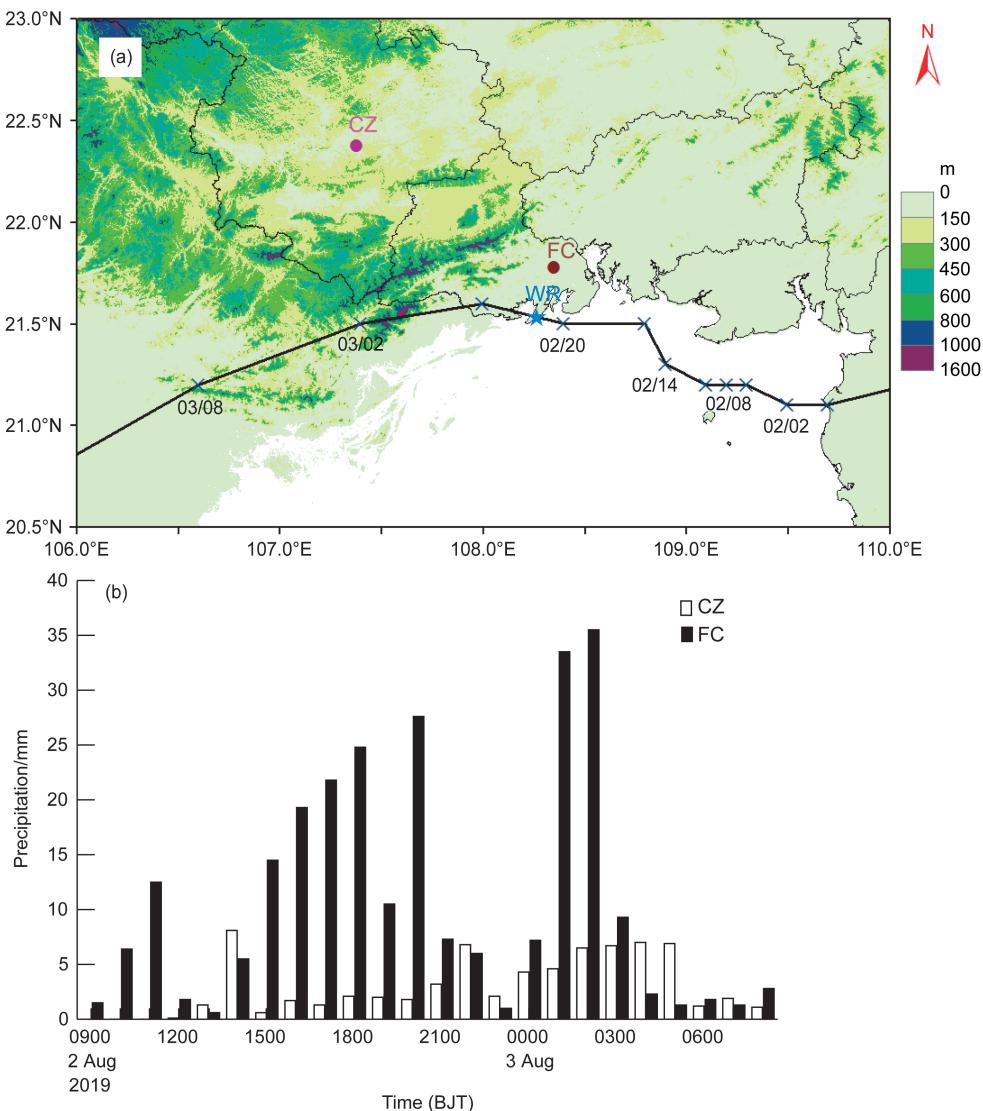


图 1 (a) 台风“韦帕”进入北部湾后的移动路径; (b) 2019 年 8 月 2 日 08:00 至 3 日 08:00 (北京时, 下同) 崇左站、防城站小时雨量时间序列

Fig. 1 (a) Observed track of typhoon Wipha after entering the Beibu Gulf; (b) time series of 1-h accumulated precipitation at Chongzuo station and Fangcheng station from 0800 BJT (Beijing time) August 2 to 0800 BJT August 3, 2019

式中,  $N(D_i)$  (单位:  $\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}$ ) 为单位体积内第  $i$  个直径  $D_i$  (单位: mm) 至  $D_i + \Delta D_i$  的雨滴数浓度,  $n_{ij}$  为第  $i$  个直径通道、第  $j$  个速度通道的雨滴数,  $A$  (单位:  $\text{m}^2$ ) 和  $t$  (单位: s) 分别代表采样面积和采样时间间隔,  $V_j$  (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 为第  $j$  个速度通道的雨滴下落末速度,  $\Delta D_i$  为对应通道的直径间隔。

通过  $N(D_i)$  可计算出雨强  $R$  (单位:  $\text{mm h}^{-1}$ )、雨水含量  $W$  (单位:  $\text{g m}^{-3}$ )、质量加权平均直径  $D_m$  (单位: mm) 和标准化数浓度  $N_w$  (单位:  $\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}$ ):

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=3}^{23} \sum_{j=1}^{32} V_j \cdot N(D_i) \cdot D_i^3 \cdot \Delta D_i, \quad (2)$$

$$W = \frac{\pi \cdot \rho_w}{6000} \sum_{i=3}^{23} N(D_i) \cdot D_i^3 \cdot \Delta D_i, \quad (3)$$

$$D_m = \frac{\sum_{i=3}^{23} D_i^4 \cdot N(D_i) \cdot \Delta D_i}{\sum_{i=3}^{23} D_i^3 \cdot N(D_i) \cdot \Delta D_i}, \quad (4)$$

$$N_w = \frac{(4.0)^4}{\pi \cdot \rho_w} \left( \frac{10^3 W}{D_m^4} \right), \quad (5)$$

其中, 水的密度  $\rho_w$  取值为  $1.0 \text{ g cm}^{-3}$ 。

利用上述公式, 使用经过处理后的雨滴谱观测资料, 分别计算崇左站、防城站的雨强  $R$ , 并与同测站雨量传感器测得的分钟雨量进行相关性分析, 相关系数分别为 0.917、0.974。考虑仪器测量精度的差异, 认为降水现象仪观测资料能较好反映实际降水变化情况, 经处理后的数据质量可靠。

#### 2.4 降水分类方法

为研究层云降水和对流降水的特征, 采用降雨强度  $10 \text{ mm h}^{-1}$  为阈值来区分层云和对流降水, 以便与之前的研究 (Bringi et al., 2003; Chang et al., 2009; Wen et al., 2018; Zheng et al., 2021) 进行比较分析。

### 3 台风“韦帕”天气概况

2019年第7号台风“韦帕”于7月31日08:00(北京时, 下同)在南海北部海面正式生成, 随后向西北方向移动; 8月1日登陆海南文昌后徘徊摆动, 后折向北行登陆广东湛江, 并于1日22:00进入北部湾后沿海岸线西行, 2日21:00在防城港市沿海再次登陆, 后继续西行进入越南, 于3日14:00减弱为热带低压, 3日20:00停止编号。台风“韦帕”因受副热带高压、自身的非对称结构以及“双台风效应”叠加影响(曾佩芳等, 2021), 具有路径复杂、移动缓慢、登陆次数多的特点, 在北部湾广西近海及陆地停留将近25小时。图1a展示了台风“韦帕”进入北部湾后移动路径情况。

受台风“韦帕”影响, 7月31日08:00至8月3日17:00广西南部大部地区出现暴雨到大暴雨, 局部特大暴雨, 最大降水出现在防城港市防城区滩营乡(407 mm)。强降雨时段主要集中在2日08:00至3日08:00, 从崇左站、防城站雨量传感器观测到的逐小时降雨量(图1b)中可看出: 崇左站降雨较为平缓, 各时次雨量较均匀, 2日21:00之后(即台风登陆后)小时雨强有所增强; 防城站降雨强度波动剧烈, 2日下午及3日凌晨雨势较强。

由此可见, 台风“韦帕”影响期间, WSC的小时雨强明显强于LSI, 且呈现出显著的波动演变特征。

台风环流内的暴雨落区主要包括眼壁暴雨、螺旋雨带暴雨、小涡暴雨、倒槽暴雨、切变暴雨, 每类落区的暴雨特点和形成机理都不尽相同(陈联寿等, 2017)。从雷达组合反射率演变可见(图2), 崇左站8月2日主要受台风螺旋雨带影响, 以层状云降水为主, 反射率基本在45 dBZ以下; 而防城站主要受台风眼墙和台风登陆后的螺旋雨带影响, 属于积层混合云降水, 最大回波强度达到55~60 dBZ。从图2d可看到, 此时崇左站、防城站虽同受螺旋雨带影响, 但由于十万大山山脉的强迫抬升作用, 导致防城站的对流发展旺盛, 回波强度明显强于崇左站。表1列出了台风“韦帕”影响期间, 崇左站、防城站暴雨天气主要降水时段划分。下文将以LSI、WSC的S1、S2降水时段为研究对象, 对比分析崇左和防城港两地的台风降雨雨滴谱特征差异。

### 4 雨滴谱特征分析

雨滴在下落中受到蒸发、碰并、破碎等过程影响而发生变化, 这些变化会直接反映在雨滴谱分布上(吕童, 2018)。雨滴谱的谱型及有关特征参量能较好地反映降水微物理特征, 是深入了解降水发展演变过程以及揭示降水机制的重要参数(李侠丽等, 2019)。

#### 4.1 雨滴谱时间序列特征分析

图3展示了台风“韦帕”影响期间LSI、WSC的雨滴数浓度、雨滴直径及雨强随时间的变化情况。由图分析可知:(1)LSI处(图3a)因以螺旋雨带层状云降水为主, 雨强相对平缓, 大部分时间均小于 $10 \text{ mm h}^{-1}$ , 最大雨强出现在S2阶段为 $35.4 \text{ mm h}^{-1}$ , 台风登陆后螺旋雨带降水有所增强。WSC处(图3b)由于是积层混合云降水, 雨强较大且波动剧烈, 最大雨强出现在S2阶段为

表1 崇左站、防城站各降水阶段及主要影响系统

Table 1 Different rainfall stages and the main influence systems at Chongzuo station and Fangcheng station

站点	地理环境	降水时段	影响系统
崇左站	内陆背风侧(LSI)	2019年8月2日12:00~21:00(S1)	螺旋雨带(登陆前)
		2019年8月2日21:00至3日05:00(S2)	螺旋雨带(登陆后)
防城站	近海岸迎风侧(WSC)	2019年8月2日14:00~22:00(S1)	台风眼墙
		2019年8月3日00:00~03:00(S2)	螺旋雨带(对流旺盛)

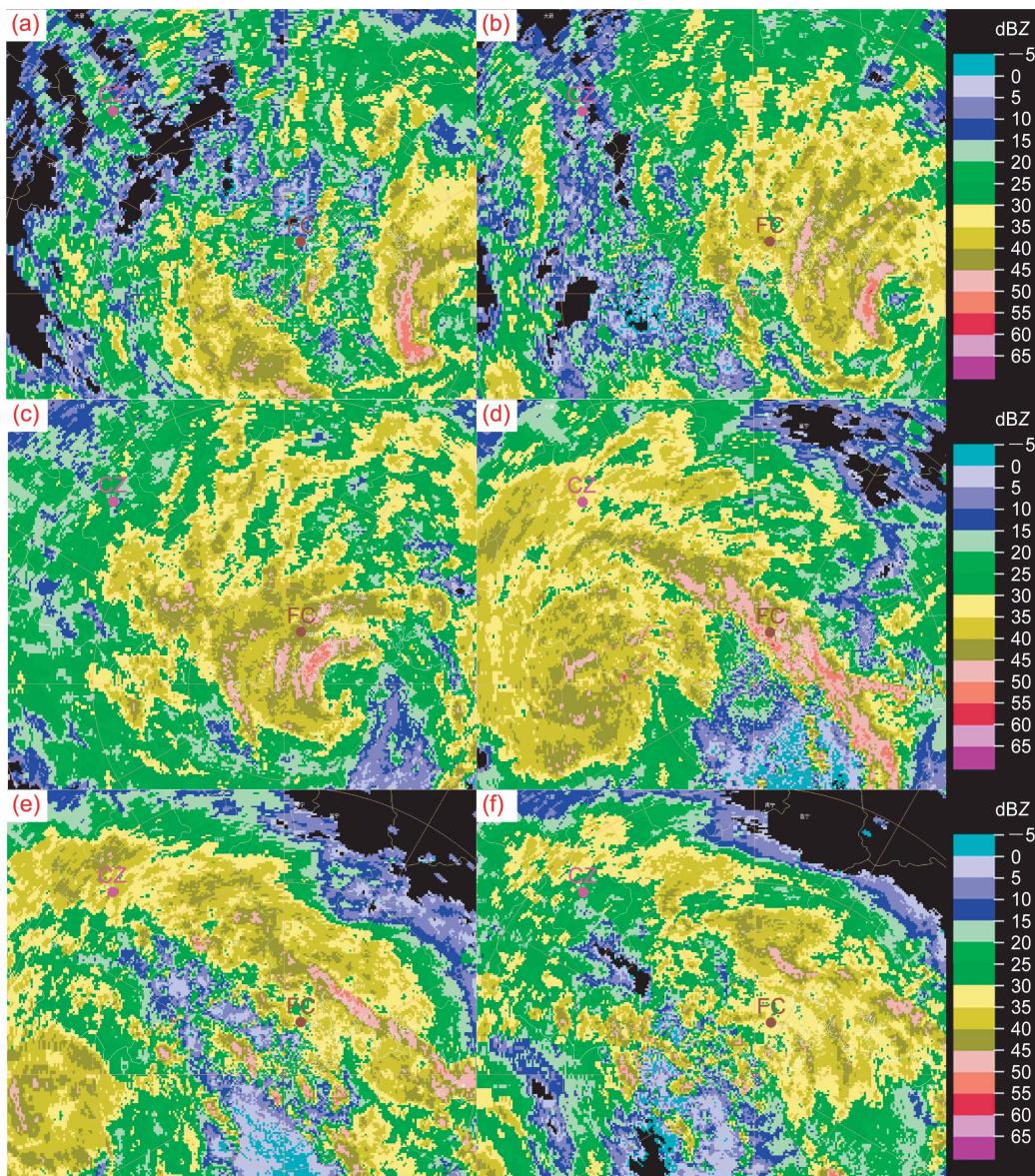


图2 2019年8月2日(a)12:03、(b)14:00、(c)19:03及3日(d)01:04、(e)03:01、(f)05:03的雷达组合反射率(紫色圆点为崇左站位置,棕色圆点为防城站位置)

Fig. 2 The radar combined reflectivity at (a) 1203 BJT August 2, (b) 1400 BJT August 2, (c) 1903 BJT August 2, (d) 0104 BJT August 3, (e) 0301 BJT August 3, (f) 0503 BJT August 3, 2019. Purple dot shows the location of Chongzuo station and the brown dot represents Fangcheng station

$78.5 \text{ mm h}^{-1}$ 。总体来说, WSC 降水明显强于 LSI。(2) 雨滴可按直径大小分为小雨滴( $0.25\sim 1 \text{ mm}$ )、中雨滴( $1\sim 3 \text{ mm}$ )、大雨滴( $3 \text{ mm}$ 以上)三类(黄兴友等, 2019), LSI 处(图 3a)雨滴直径大多小于  $3 \text{ mm}$ , 即以中小雨滴为主, S2 阶段的粒径较 S1 阶段有所增大, 出现一定数量的大雨滴; WSC 处(图 3b)大部分时间均出现有大雨滴, 大雨滴数量相对较多, 并且出现有粒径超过  $5 \text{ mm}$  的大雨滴。(3) LSI 处(图 3a)降水期间各粒径的雨滴数浓度普遍小于  $1000 \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$ , 数浓

度大于  $100 \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$  的降水粒子主要集中在粒径  $1.5 \text{ mm}$  以下; WSC 处(图 3b)大多时刻均出现了雨滴数浓度超过  $1000 \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$  的大值区, 数浓度大于  $100 \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$  的降水粒子主要集中在粒径  $2.5 \text{ mm}$  以下。

总而言之, WSC 处降水比 LSI 具有更高的雨滴数浓度、更大的雨滴直径。究其原因, 主要是因为 WSC 处对流强盛, 强烈的上升运动利于小雨滴向上抬升形成更大的雨滴或保持在高处通过碰撞合并形成大雨滴而降落到地面(Seela et al., 2018);

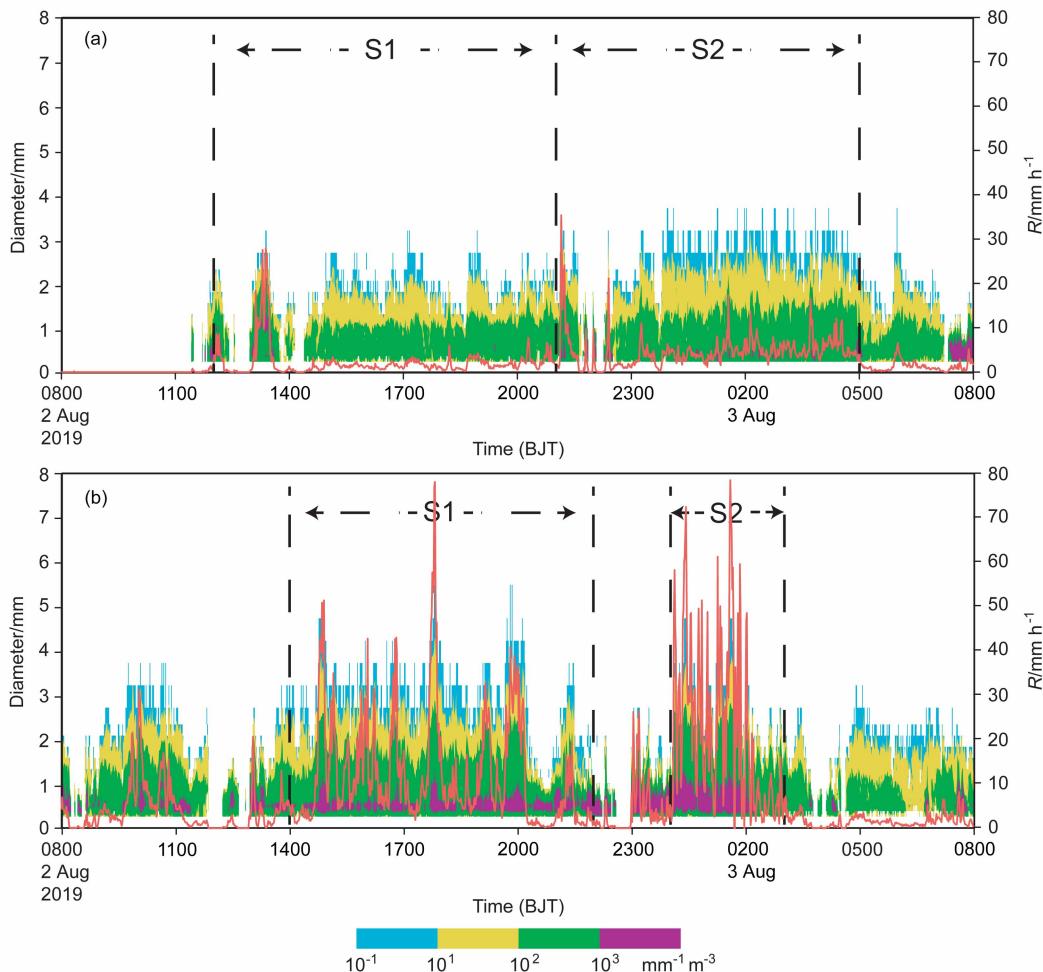


图3 台风“韦帕”影响期间(a)内陆背风侧(LSI)、(b)近海岸迎风侧(WSC)雨滴数浓度(色阶)、雨滴直径(色阶高度)及雨强(红色曲线)随时间变化

Fig. 3 Time series of raindrop number concentration (shaded areas), raindrop diameter (height of shaded areas), and rain intensity (red solid line) at (a) inland leeward side (LSI) and (b) near-coast windward side (WSC) during the impact of typhoon Wipha

并且，强烈的对流也会导致较大粒子在下落过程中更容易破碎成大量的小粒子，促使雨滴数浓度增加(张丰伟等, 2019)。另外，沿海山脉地形影响也有积极的促进作用。Zagrodnik et al. (2021)研究指出，气旋经过沿海山脉时大量水汽被引导到岸上，低层水汽在沿海山麓爬升快速产生云水，气流在迎风斜坡上升，因冷凝和碰撞合并产生的大量小水滴以及高层冰粒转化的众多大雨滴降落到迎风侧，仅有少数冰粒随强盛气流越过坡顶后在背风侧形成大雨滴降落到地面。

#### 4.2 平均谱分布特征分析

为研究 LSI、WSC 不同降水阶段的谱分布特征，通过计算不同时段降水粒子各直径区间雨滴数浓度的平均值，制作平均谱分布图(图4)。从图中可看出：LSI、WSC 各降水阶段雨滴谱均呈单峰

结构，各峰值均位于粒径为 0.562 mm 位置处，雨滴数浓度在粒径小于 0.562 mm 时随粒径而递增，之后随粒径的增大而减小，但 LSI 在 0.687~1.062 mm 粒径段的浓度减小相对缓慢；WSC 处各阶段降水的谱宽均超过 6 mm，数浓度峰值均超过  $1000 \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$ ，远大于 LSI，这与上节的结论一致。LSI 降水期间，S2 的谱宽较 S1 略大，并且在各粒径段均比 S1 有着更高的数浓度，表明螺旋雨带的雨滴数浓度、谱宽在台风登陆后有一定程度的增大；WSC 降水期间，S1 的谱宽较 S2 大，两者之间的数浓度在粒径小于 0.562 mm 时相差不大，S1 的雨滴数浓度在 0.687~3.75 mm 粒径段较 S2 小，在之后的粒径段才比 S2 有更高的数浓度。

以上分析表明，台风“韦帕”影响期间，WSC 处降水的谱宽明显大于 LSI；螺旋雨带的雨滴数浓

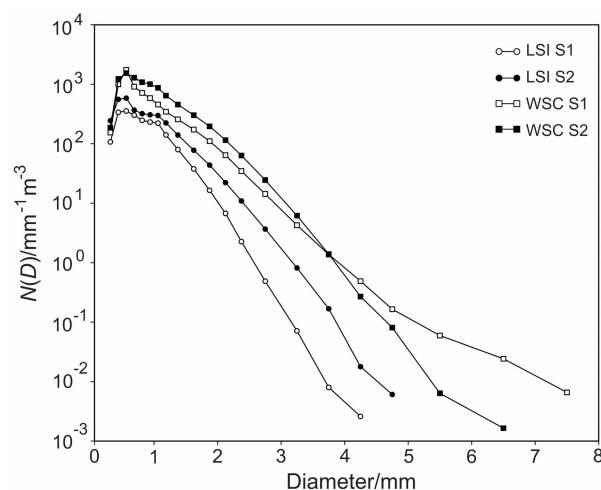


图 4 LSI、WSC 各降水阶段不同粒径下的平均谱分布

Fig. 4 Average spectra of raindrop size at different rainfall stages at LSI and WSC

度、谱宽在台风登陆后有一定程度的增大，眼墙降水较螺旋雨带具有更大的谱宽；眼墙降水在各粒径段内均比弱对流螺旋雨带具有较高的雨滴数浓度，但对于对流发展旺盛的螺旋雨带则会出现中雨滴粒径段内的数浓度明显高于台风眼墙的情况。

#### 4.3 雨滴谱微物理结构特征参量分析

表 2 列出 LSI、WSC 各降水阶段微物理结构特征参量平均值，其中质量加权平均直径  $D_m$  和标准化数浓度  $N_w$  可以不受雨强大小影响而比较各降水系统的雨滴谱特征 (Bringi et al., 2003; 吕童, 2018)。从表中可得知，LSI 各阶段降水的平均量  $R$ 、 $D_m$ 、 $\lg N_w$  及  $W$  均小于 WSC。LSI 处在台风登陆后， $R$  增强， $D_m$  增大明显，但  $\lg N_w$  基本维持；这是由于该处的螺旋雨带对流较弱，雨强总体不大，此时雨势增强主要由雨滴直径的增大所致，雨滴数浓度维持不变直至雨强超过某个阈值 (Bao et al., 2019)。然而，对于 WSC 处，在由台风眼墙影响转变为强对流螺旋雨带影响后， $R$  增强，但  $D_m$  变化不大， $\lg N_w$  增大明显，这可以解释为：WSC 处的对流强盛，强烈的上升气流更利于雨滴直径的增大 (Bao et al., 2020)，但当降水增强到一定程度时，雨滴的碰并联合和破碎过程达到平衡， $D_m$  趋于稳定值，此时雨强的增强主要是由于  $\lg N_w$  的增大所致 (Chen et al., 2013; 吕童, 2018)。结合图 4 分析可知，WSC 处 S2 阶段的平均雨强大于 S1 阶段，主要是由于其具有较高浓度的中雨滴。

不同地区、不同影响系统产生的对流降水，

表 2 LSI、WSC 各降水阶段微物理特征量的平均值

Table 2 Average values of microphysical parameters in different rainfall stages at LSI and WSC

各降水阶段	微物理特征量			
	$R/\text{mm h}^{-1}$	$D_m/\text{mm}$	$\lg N_w/\text{mm}^{-3}$	$W/\text{g m}^{-3}$
LSI S1	2.34	1.21	3.61	0.15
LSI S2	4.68	1.52	3.60	0.29
WSC S1	11.92	1.58	3.86	0.70
WSC S2	22.19	1.56	4.10	1.17

$D_m$  和  $\lg N_w$  存在一定差异。Bringi et al. (2003) 归纳指出海洋性对流降水  $D_m$  在  $1.5\sim1.75 \text{ mm}$ 、 $\lg N_w$  在  $4\sim4.5 \text{ mm}^{-3}$  值域内，大陆性对流降水  $D_m$  在  $2\sim2.75 \text{ mm}$ 、 $\lg N_w$  在  $3\sim3.5 \text{ mm}^{-3}$  值域内。Chang et al. (2009) 对登陆台湾北部台风的雨滴谱特征进行了分析，发现对流降水  $D_m$  平均值约为  $2 \text{ mm}$ 、 $\lg N_w$  平均值约为  $3.8 \text{ mm}^{-3}$ ，介于海洋性和大陆性对流之间，并认为台湾中央山脉的抬升效应导致对流降水的雨滴直径大、浓度小。Wen et al. (2018) 分析了登陆我国的 7 个台风雨滴谱特征，发现对流降水微物理特征差异不大，其中登陆广东的台风 Nida、Hato、Pakhar 对流降水  $D_m$  平均值分别为  $1.4 \text{ mm}$ 、 $1.2 \text{ mm}$ 、 $1.3 \text{ mm}$ ， $\lg N_w$  平均值分别为  $4.5$ 、 $4.8$ 、 $4.7 \text{ mm}^{-3}$ 。Zheng et al. (2021) 对登陆海南的台风个例进行研究，得出对流降水  $D_m$  平均值为  $1.49 \text{ mm}$ 、 $\lg N_w$  平均值为  $4.47 \text{ mm}^{-3}$ 。

图 5 展示了台风“韦帕”影响期间 LSI、WSC 各降水阶段的  $D_m$ 、 $\lg N_w$  散点分布情况。从图中可看出：LSI 主要以层云降水为主（即位于雨强  $R=10 \text{ mm h}^{-1}$  曲线左侧），S1、S2 阶段出现的少量对流降水样本基本位于海洋性对流区附近；WSC 出现对流降水的频次较高，大部分对流降水样本位于海洋性和大陆性对流之间，甚至有小部分对流降水样本（主要出现在 S1 阶段）位于大陆性对流区内。从对流降水的平均值也可看到，LSI 处对流降水位于海洋性对流区域内，而 WSC 处对流降水则介于海洋性和大陆性对流之间。台风“韦帕”对流降水的  $D_m$ 、 $\lg N_w$  平均值分别为  $1.85 \text{ mm}$ 、 $3.95 \text{ mm}^{-3}$ ，比 Chang et al. (2009) 所分析台风对流降水的  $D_m$  值小、 $\lg N_w$  值大，但与 Wen et al. (2018)、Zheng et al. (2021) 所研究的登陆华南地区台风相比则具有更大的平均直径及更低的数浓度。

#### 4.4 不同粒径雨滴对降水的贡献率

为了解 LSI、WSC 各降水阶段不同粒径雨滴

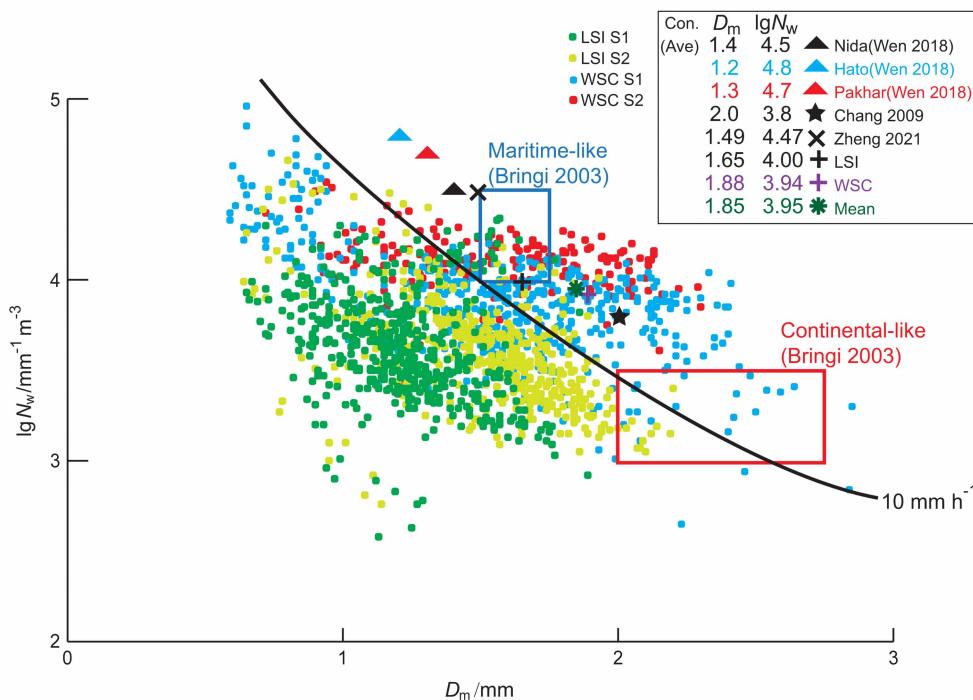


图 5 LSI、WSC 各降水阶段质量加权平均直径  $D_m$  和对数标准化数浓度  $\lg N_w$  散点分布情况。黑色曲线为雨强  $R=10 \text{ mm h}^{-1}$ ；深蓝色矩形框、红色矩形框分别对应 Bringi et al. (2003) 指出的海洋性、大陆性对流降水落区，黑色框中列出了各类研究对流降水的特征量平均值

Fig. 5 Scatter plot of mass-weighted mean diameter ( $D_m$ ) versus logarithmic normalized intercept ( $\lg N_w$ ) in different rainfall stages at LSI and WSC. The black curve shows rain intensity of  $10 \text{ mm h}^{-1}$ . Outlined rectangles of dark blue and red correspond to the maritime and continental convective clusters reported by Bringi et al. (2003), and the black box lists the average values of the characteristic quantities for convective precipitation in various research

对降雨强度的贡献率，分别计算小雨滴（ $0.25\sim1 \text{ mm}$ ）、中雨滴（ $1\sim3 \text{ mm}$ ）、大雨滴（ $3 \text{ mm}$  以上）对降雨强度的平均贡献率  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ ，并绘制贡献率分布图（图 6）。从图中可看出：（1）LSI、WSC 各阶段降水均以中、小雨滴的贡献为主，贡献率达 90% 以上，尤其中雨滴的贡献率达到 70% 以上。（2）LSI 处，S2 阶段降水的大、中雨滴贡献率明显高于 S1，小雨滴则反之；WSC 处，S2 阶段降水除中雨滴贡献率高于 S1 外，其余均低于 S1。此外，WSC 各阶段降水的大雨滴贡献率明显大于 LSI，特别是台风眼墙降水阶段。

表 3 列出了不同雨强等级下各档雨滴对降水的平均贡献率。由表可看到：在不同等级雨强中，中雨滴的贡献率基本占据决定性地位。LSI 处随着雨强的增强，小雨滴贡献率递减，中雨滴贡献率递增，大雨滴贡献率总体不大且呈先增后减趋势。WSC 处随着雨强的增强，小雨滴贡献率递减，中雨滴贡献率先增后减，大雨滴贡献率迅速递增；中雨滴贡献率在雨强  $20 \text{ mm h}^{-1}$  处达到最大值，并且此时大

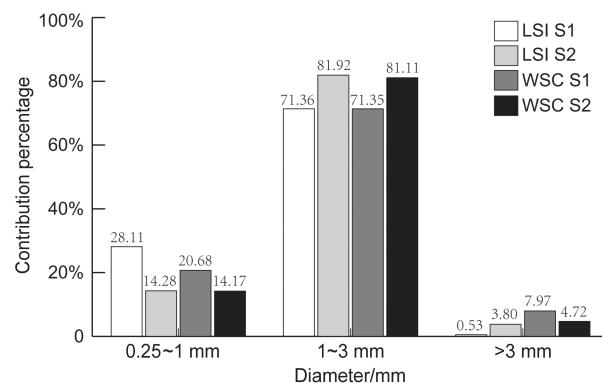


图 6 LSI、WSC 各降水阶段中各档雨滴对雨强的贡献率

Fig. 6 Contributions of raindrops in each bin to rain intensity in different rainfall stages at LSI and WSC

雨滴贡献率开始超越小雨滴，成为降雨强度的第二大贡献者。

## 5 结论

(1) 台风“韦帕”影响期间，LSI 处以层状云降水为主，雨强相对平缓，WSC 处表现为积层

表3 LSI、WSC不同雨强等级下各档雨滴对降水的贡献率

Table 3 Contributions of raindrops in each bin to precipitation under different rain rates at LSI and WSC

降水等级/mm h <sup>-1</sup>	LSI雨强等级			WSC雨强等级		
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
0<R≤2	35.38%	64.54%	0.08%	65.25%	32.61%	2.14%
2<R≤5	13.08%	84.11%	2.81%	26.35%	70.62%	3.03%
5<R≤10	8.34%	85.77%	5.89%	12.27%	82.39%	5.34%
10<R≤20	6.16%	90.95%	2.89%	8.37%	85.04%	6.59%
20<R≤40	4.38%	93.69%	1.93%	4.98%	82.74%	12.28%
R>40				3.99%	77.75%	18.26%

混合云降水，雨强较大且波动剧烈。由于对流发展旺盛，WSC处的降雨强度明显强于LSI。

(2) WSC、LSI不同降水阶段的雨滴谱均呈单峰结构，峰值位于粒径0.562 mm位置处。WSC的雨滴数浓度、雨滴直径明显大于LSI，强烈的对流上升运动是根本原因。螺旋雨带的雨滴数浓度、谱宽在台风登陆后有一定程度的增大。眼墙降水较螺旋雨带具有更大的谱宽，且在各粒径段内均比弱对流螺旋雨带具有较高的雨滴数浓度，但对于对流发展旺盛的螺旋雨带则会出现中雨滴粒径段内的数浓度明显高于台风眼墙的情况。

(3) LSI螺旋雨带降水的R、D<sub>m</sub>、lgN<sub>w</sub>及W均小于WSC。LSI处对流较弱，雨强总体不大，台风登陆后雨势增强的最主要因素是雨滴直径增大；WSC处对流强盛，由台风眼墙转变为强对流螺旋雨带影响后其雨势增强则主要是由于雨滴数浓度增加，尤其是中雨滴数浓度的增加。

(4) 台风“韦帕”对流降水的D<sub>m</sub>、lgN<sub>w</sub>平均值分别为1.85 mm、3.95 mm<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>，与登陆华南其他地区的台风已有研究结果相比具有更大的平均直径及更低的数浓度。LSI处对流降水位于海洋性对流区域内，而WSC处则介于海洋性和大陆性对流之间。

(5) WSC、LSI处降水均以中、小雨滴贡献为主，贡献率达90%以上，尤其中雨滴贡献率达到70%以上。WSC各阶段降水的大雨滴贡献率明显大于LSI，特别是台风眼墙降水阶段。随着雨强增强，小雨滴贡献率递减，中雨滴贡献率呈递增趋势，但WSC处在雨强增至20 mm h<sup>-1</sup>时中雨滴的贡献率达到最大值，此时大雨滴贡献率也开始超越小雨滴，成为降雨强度的第二大贡献者。

## 参考文献 (References)

- Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. Rev. Geophys., 11(1): 1–35. doi:[10.1029/RG011i001p00001](https://doi.org/10.1029/RG011i001p00001)
- Bao X W, Wu L G, Tang B, et al. 2019. Variable raindrop size distributions in different rainbands associated with typhoon Fitow (2013) [J]. J. Geophys. Res., 124(22): 12262–12281. doi:[10.1029/2019JD030268](https://doi.org/10.1029/2019JD030268)
- Bao X W, Wu L G, Zhang S, et al. 2020. Distinct raindrop size distributions of convective inner- and outer-rainband rain in typhoon Maria (2018) [J]. J. Geophys. Res., 125(14): e2020JD032482. doi:[10.1029/2020JD032482](https://doi.org/10.1029/2020JD032482)
- Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al. 2010. PARSIVEL snow observations: A critical assessment [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 27(2): 333–344. doi:[10.1175/2009JTECHA13321](https://doi.org/10.1175/2009JTECHA13321)
- 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]. J. Atmos. Sci., 60(2): 354–365. doi:[10.1175/1520-0469\(2003\)060<0354:rsdide>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<0354:rsdide>2.0.co;2)
- Chang W Y, Wang T C C, Lin P L. 2009. Characteristics of the raindrop size distribution and drop shape relation in typhoon systems in the western Pacific from the 2D video disdrometer and NCU C-band polarimetric radar [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 26(10): 1973–1993. doi:[10.1175/2009jtecha1236.1](https://doi.org/10.1175/2009jtecha1236.1)
- Chen B J, Wang Y, Ming J. 2012. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution in typhoon Morakot (2009) [J]. J. Trop. Meteorol., 18(2): 162–171. doi:[10.3969/j.issn.1006-8775.2012.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-8775.2012.02.006)
- Chen B J, Yang J, Pu J P. 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in eastern China [J]. J. Meteor. Soc. Jpn. Ser. II, 91(2): 215–227. doi:[10.2151/jmsj.2013-208](https://doi.org/10.2151/jmsj.2013-208)
- 陈联寿, 孟智勇, 丛春华. 2017. 台风暴雨落区研究综述 [J]. 海洋气象学报, 37(4): 1–7. Chen Lianshou, Meng Zhiyong, Cong Chunhua. 2017. An overview on the research of typhoon rainfall distribution [J]. J. Mar. Meteor. (in Chinese), 37(4): 1–7. doi:[10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.001](https://doi.org/10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.001)
- 陈淑琴, 李英, 范锐敏, 等. 2021. 台风“山竹”(2018)远距离暴雨的成因分析 [J]. 大气科学, 45(3): 573–587. Chen Shuqin, Li Ying, Fan Yuemin, et al. 2021. Analysis of long-distance heavy rainfall caused by typhoon Mangosteen (2018) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3): 573–587. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20126](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20126)
- Feng L, Liu X T, Xiao H, et al. 2021. Characteristics of raindrop size distribution in typhoon Nida (2016) before and after landfall in southern China from 2D video disdrometer data [J]. Adv. Meteor., 2021: 9349738. doi:[10.1155/2021/9349738](https://doi.org/10.1155/2021/9349738)
- Friedrich K, Kalina E A, Masters F J, et al. 2013. Drop-size distributions in thunderstorms measured by optical disdrometers during VORTEX2 [J]. Mon. Wea. Rev., 141(4): 1182–1203. doi:[10.1175/mwr-d-12-00116.1](https://doi.org/10.1175/mwr-d-12-00116.1)
- 黄兴友, 印佳楠, 马雷, 等. 2019. 南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及其在天气雷达探测中的应用 [J]. 大气科学, 43(3):

- 691–704. Huang Xingyou, Yin Jia'nan, Ma Lei, et al. 2019. Comprehensive statistical analysis of rain drop size distribution parameters and their application to weather radar measurement in Nanjing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 691–704. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18113](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18113)
- 贾星灿, 马新成, 毕凯, 等. 2018. 北京冬季降水粒子谱及其下落速度的分布特征 [J]. 气象学报, 76(1): 148–159. Jia Xingcan, Ma Xinchen, Bi Kai, et al. 2018. Distributions of particle size and fall velocities of winter precipitation in Beijing [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(1): 148–159. doi:[10.11676/qxb2017.085](https://doi.org/10.11676/qxb2017.085)
- Lu X Q, Yu H, Ying M, et al. 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(4): 690–699. doi:[10.1007/s00376-020-0211-7](https://doi.org/10.1007/s00376-020-0211-7)
- 李侠丽, 潘先洁, 童应祥, 等. 2019. 两次强降水过程雨滴谱特征及差异 [J]. 气象科技, 47(2): 322–328. Li Xiali, Pan Xianjie, Tong Yingxiang, et al. 2019. Raindrop spectral characteristics of two different types of heavy precipitation based on raindrop spectral data [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 47(2): 322–328. doi:[10.19517/j.1671-6345.20180132](https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.20180132)
- 林文, 林长城, 李白良, 等. 2016. 登陆台风麦德姆不同部位降水强度及谱特征 [J]. 应用气象学报, 27(2): 239–248. Lin Wen, Lin Changcheng, Li Bailiang, et al. 2016. Rainfall intensity and raindrop spectrum for different parts in landing typhoon Matmo [J]. J. Appl. Meteor. y Sci. (in Chinese), 27(2): 239–248. doi:[10.11898/1001-7313.20160212](https://doi.org/10.11898/1001-7313.20160212)
- 卢小丹, 王黎娟, 刘国忠, 等. 2017. 两个不同季节台风引发广西特大暴雨的水汽和螺旋度对比分析 [J]. 热带气象学报, 33(3): 375–385. Lu Xiaodan, Wang Lijuan, Liu Guozhong, et al. 2017. Comparative analysis of moisture and helicity during extraordinary storms caused by two typhoons in different seasons [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 33(3): 375–385. doi:[10.16032/j.issn.1004-4965.2017.03.009](https://doi.org/10.16032/j.issn.1004-4965.2017.03.009)
- 吕童. 2018. 登陆台风雨滴谱特征观测研究 [D]. 南京大学硕士学位论文. Lyu Tong. 2018. Observational study of the characteristics of raindrop size distribution of landfalling typhoons [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University.
- Merceret F J. 1974. On the size distribution of raindrops in hurricane Ginger [J]. Mon. Wea. Rev., 102(10): 714–716. doi:[10.1175/1520-0493\(1974\)102<0714:otsdor>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1974)102<0714:otsdor>2.0.co;2)
- 庞琦烨, 平凡, 沈新勇, 等. 2019. 不同微物理方案对台风“彩虹”(2015)降水影响的比较研究 [J]. 大气科学, 43(1): 202–220. Pang Qiye, Ping Fan, Shen Xinyong, et al. 2019. A comparative study of effects of different microphysics schemes on precipitation simulation for typhoon Mujigae (2015) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(1): 202–220. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17291](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17291)
- 覃卫坚, 李栋梁, 雷雪梅, 等. 2012. 广西暴雨非均匀性分布特征研究 [J]. 热带气象学报, 28(2): 258–264. Qin Weijian, Li Dongliang, Lei Xuemei, et al. 2012. Analysis on inner-annual inhomogeneity of rainstorm events in Guangxi [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 28(2): 258–264. doi:[10.3969/j.issn.1004-4965.2012.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4965.2012.02.014)
- Seela B K, Janapati J, Lin P L, et al. 2018. Raindrop size distribution characteristics of summer and winter season rainfall over North Taiwan [J]. J. Geophys. Res., 123(20): 11602–11624. doi:[10.1029/2018jd028307](https://doi.org/10.1029/2018jd028307)
- 申高航, 高安春, 李君. 2020. 台风“利奇马”不同强降水中心的雨滴谱特征分析 [J]. 气象科学, 40(1): 106–113. Shen Gaohang, Gao Anchun, Li Jun. 2020. Analysis of the characteristics of raindrop spectrum in different heavy precipitation centers caused by typhoon “Lekima” [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 40(1): 106–113. doi:[10.3969/2019jms.0064](https://doi.org/10.3969/2019jms.0064)
- Wang H, Wang W Q, Wang J, et al. 2021. Rainfall microphysical properties of landfalling typhoon Yagi (201814) based on the observations of micro rain radar and cloud radar in Shandong, China [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(6): 994–1011. doi:[10.1007/s00376-021-0062-x](https://doi.org/10.1007/s00376-021-0062-x)
- Wen L, Zhao K, Chen G, et al. 2018. Drop size distribution characteristics of seven typhoons in China [J]. J. Geophys. Res., 123(12): 6529–6548. doi:[10.1029/2017jd027950](https://doi.org/10.1029/2017jd027950)
- 伍红雨, 杜尧东, 秦鹏. 2011. 华南暴雨的气候特征及变化 [J]. 气象, 37(10): 1262–1269. Wu Hongyu, Du Yaodong, Qin Peng. 2011. Climate Characteristics and variation of rainstorm in South China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 37(10): 1262–1269. doi:[10.7519/j.issn.1000-0526.2011.10.009](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2011.10.009)
- 谢媛, 陈钟荣, 戴建华, 等. 2015. 上海地区几类强降水雨滴谱特征分析 [J]. 气象科学, 35(3): 353–361. Xie Yuan, Chen Zhongrong, Dai Jianhua, et al. 2015. Analysis on raindrop spectrum in four types of precipitation in Shanghai [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 35(3): 353–361. doi:[10.3969/2014jms.0046](https://doi.org/10.3969/2014jms.0046)
- 薛一迪, 崔晓鹏. 2020. “威马逊”(1409)强降水物理过程模拟诊断研究 [J]. 大气科学, 44(6): 1320–1336. Xue Yidi, Cui Xiaopeng. 2020. Diagnostic and numerical study on physical process of strong rainfall associated with Rammam (1409) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1320–1336. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19224](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19224)
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al. 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 31(2): 287–301. doi:[10.1175/JTECH-D-12-00119.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00119.1)
- 杨舒楠, 端义宏. 2020. 台风温比亚(1818)降水及环境场极端性分析 [J]. 应用气象学报, 31(3): 290–302. Yang Shun'an, Duan Yihong. 2020. Extremity analysis on the precipitation and environmental field of typhoon Rumbia in 2018 [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 31(3): 290–302. doi:[10.11898/1001-7313.20200304](https://doi.org/10.11898/1001-7313.20200304)
- 姚晨, 娄珊珊, 叶金印. 2019. 冷空气影响台风暴雨的中尺度分析及数值模拟 [J]. 暴雨灾害, 38(3): 204–211. Yao Chen, Lou Shanshan, Ye Jinyin. 2019. Mesoscale analysis and numerical simulation of a typhoon rainstrom event affected by cold air [J]. Torrential Rain Disasters (in Chinese), 38(3): 204–211. doi:[10.3969/j.issn.1004-9045.2019.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.03.002)
- Zagrodnik J P, McMurdie L, Conrick R. 2021. Microphysical enhancement processes within stratiform precipitation on the barrier and sub-barrier scale of the Olympic mountains [J]. Mon. Wea. Rev.,

149(2): 503–520. doi:[10.1175/mwr-d-20-0164.1](https://doi.org/10.1175/mwr-d-20-0164.1)

曾佩芳, 薛宇峰, 梁梅, 等. 2021. 台风“韦帕”的非对称结构特征及其登陆异常的成因分析 [J]. 气象研究与应用, 42(1): 118–121. Zeng Peifang, Xue Yufeng, Liang Mei, et al. 2021. Asymmetric structural characteristics of Typhoon Wipha and analysis of its landing anomaly [J]. J. Meteor. Res. Appl. (in Chinese), 42(1): 118–121. doi:[10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.1.21](https://doi.org/10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.1.21)

张丰伟, 张逸轩, 韩树浦, 等. 2019. 2016年5月6日重庆万盛短时强降水雨滴谱特征分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 13(4): 46–51. Zhang Fengwei, Zhang Yixuan, Han Shupu, et al. 2019. Raindrop spectrum characteristics during a short-time strong rainfall on 6 May 2015 in Wansheng of Chongqing [J]. Desert Oasis Meteor. (in Chinese), 13(4): 46–51. doi:[10.12057/j.issn.1002-0799.2019.04.007](https://doi.org/10.12057/j.issn.1002-0799.2019.04.007)

郑林晔, 谌芸, 肖天贵. 2020. 台风“玛莉亚”(201808)内核和外围螺旋雨带强降水成因初探 [J]. 成都信息工程大学学报, 35(6): 653–662. Zheng Linye, Chen Yun, Xiao Tiangu. 2020.

Preliminary study on the causes of heavy precipitation in the main core and spiral rainband belt of typhoon Maria (201808) [J]. J. Chengdu Univ. Inf. Technol. (in Chinese), 35(6): 653–662. doi:[10.16836/j.cnki.jcuit.2020.06.012](https://doi.org/10.16836/j.cnki.jcuit.2020.06.012)

Zheng H P, Zhang Y, Zhang L F, et al. 2021. Precipitation microphysical processes in the inner rainband of tropical cyclone Kajiki (2019) over the South China Sea revealed by Polarimetric radar [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(1): 65–80. doi:[10.1007/s00376-020-0179-3](https://doi.org/10.1007/s00376-020-0179-3)

朱红芳, 王东勇, 杨祖祥, 等. 2020. “海葵”台风(1211号)暴雨雨滴谱特征分析 [J]. 暴雨灾害, 39(2): 167–175. Zhu Hongfang, Wang Dongyong, Yang Zuxiang, et al. 2020. Analysis of raindrop spectrum characteristics for a heavy rain event caused by typhoon Haikui (No. 1211) in Anhui [J]. Torrential Rain Disasters (in Chinese), 39(2): 167–175. doi:[10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.007)