

张庆池,吕翔,刘子贺,等,2022. 登陆台风不同强度降水的雨滴谱特征对比[J]. 气象,48(12):1617-1628. Zhang Q C, Lyu X, Liu Z H, et al, 2022. Comparison of raindrop spectrum characteristics of rainfall caused by two typhoons[J]. Meteor Mon, 48(12):1617-1628(in Chinese).

登陆台风不同强度降水的雨滴谱特征对比*

张庆池^{1,3} 吕翔¹ 刘子贺^{1,3} 李静怡¹ 王珂玮¹ 郭晞²

1 江苏省徐州市气象局,徐州 221002

2 江苏省气象局,南京 210008

3 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210041

提 要: 利用江苏省徐州、新沂两站架设的 Parsivel 第 2 代激光雨滴谱资料对 2018—2019 年影响江苏的台风温比亚和利奇马造成的不同阶段降水进行对比分析和研究。结果表明:雨强较小时,以中、小雨滴为主;雨强增大时,大雨滴增多。强降水对应数量较多的大雨滴。“利奇马”降水主要由高浓度的中、小雨滴构成,具有热带台风降水的低质心特征;“温比亚”降水存在浓度较高的大雨滴,回波发展高度高,更偏于温带台风降水特征。两个台风的强降水阶段都对应大的谱宽和雨滴直径,不仅大雨滴多,中、小雨滴也多,在大雨滴处呈多峰现象,符合 Gamma 分布,表现为对流云降水特征。弱降水阶段“温比亚”谱宽和最大雨滴直径较大,但雨滴平均直径不大,大小雨滴悬殊,基本符合 Gamma 分布,为混合云降水特征;弱降水阶段“利奇马”谱宽和雨滴直径较小,有更多的小雨滴,平均谱型较平缓,符合 Marshall-Palmer 分布,为层状云降水特征。两个台风强弱降水时间段的雷达反射剖面图与雨滴谱也有一定对应关系,回波伸展越高,35 dBz 有效降水回波越宽广,高空形成更多更大的雨滴,下落的雨滴不断碰并,雨滴数浓度增大,直径增大,弱降水时间段则相反。造成强降水的主要是由大直径雨滴构成的对流云降水,混合云降水也会形成强降水,层状云降水较弱。层状云降水中的中小雨滴数量最多且对降水起主要贡献,对流云降水的中小雨滴数量虽多,但起主要贡献的为更大直径雨滴。“温比亚”强、弱降水阶段的 Z-R 关系接近一致,降水类型相近,与标准关系相比系数偏小,雷达估测降水偏小。“利奇马”强、弱降水阶段 Z-R 关系差别较大,属于不同降水类型,与标准关系相比指数偏大,雷达估测降水偏大。标准关系并不适用于不同降水过程,总结适用于各地、各季不同降水类型的 Z-R 关系很有必要。

关键词: 台风,雨滴谱,雨强,雨滴数浓度,谱特征

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.071501

Comparison of Raindrop Spectrum Characteristics of Rainfall Caused by Two Typhoons

ZHANG Qingchi^{1,3} LYU Xiang¹ LIU Zihe^{1,3} LI Jingyi¹ WANG Kewei¹ GUO Xi²

1 Xuzhou Meteorological Office of Jiangsu Province, Xuzhou 221002

2 Jiangsu Meteorological Service, Nanjing 210008

3 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210041

Abstract: The second generation laser raindrop spectrum data of Parsivel in Xuzhou and Xinyi in Jiangsu Province are used to analyze the precipitation in different stages caused by typhoons Rumbia and Lekima from 2018 to 2019. The results are as follows. Small- and medium-sized raindrops are with weak rain intensity and when the intensity increases the diameters of raindrops increase. There are more big raindrops in heavy rain. With much more small and medium raindrops, the “Lekima” precipitation event has the low centroid

* 国家自然科学基金项目(41805038)、江苏省自然科学基金项目(BK20171095)和江苏省气象局预报员专项(JSYBY201905)共同资助
2021 年 10 月 14 日收稿; 2022 年 8 月 8 日收修定稿

第一作者:张庆池,主要从事大气物理和灾害性天气机理和预报技术研究. E-mail:zhangqc0910@163.com

通讯作者:吕翔,主要从事天气预报和灾害性天气研究. E-mail:amy0516lx@126.com

characteristics of precipitation caused by tropical typhoon. Contrarily, with much more big raindrops, the “Rumbia” precipitation event has the characteristic of precipitation caused by extratropical typhoon. During both of the heavy rain events, there are larger average spectrum widths and diameters of raindrops, higher raindrop concentration, multi-peaks of large raindrops, which accords with the Gamma distribution, showing characteristics of convective precipitation. Large spectrum width and maximum diameter of raindrops are found in weak rain event caused by “Rumbia”, but the average diameter of raindrops is small and there were great differences between large and small drops in diameter, which basically follows the Gamma distribution, being mixed cloud precipitation. On the contrary, in weak rain event by “Lekima”, there is smaller average spectrum width, raindrop diameter and more small raindrops, and the spectral pattern is smooth, in line with the Marshall-Palmer distribution, which are characterized by stratiform cloud precipitation. The radar reflection profiles of the two-typhoon strong and weak precipitation periods also have a certain corresponding relationship with the raindrop spectrum. The higher the echo extension, the wider the 35 dBz effective precipitation echo, and more and larger raindrops are formed at high altitudes. The falling raindrops continue to collide and merge, and with the increase of the number of raindrops, the diameter increases, and the opposite is true for the weak precipitation period. Heavy rain is mainly caused by convective cloud containing more large raindrops, and also by mixed cloud. Small and medium raindrops in mixed cloud precipitation contribute most both in number and precipitation. Although there are more small and medium raindrops in convective cloud precipitation, the raindrops with larger diameters are the major contributors. Compared with the empirical relations, the typhoon precipitation derived from the actual index of $Z-R$ relationship might be underestimated or overestimated. The empirical relations are not applicable to different types of precipitation. It is necessary to summarize the $Z-R$ relationship applicable to different precipitation types in different places and seasons.

Key words: typhoon, raindrop spectrum, rain intensity, raindrop number concentration, spectral characteristic

引 言

台风是形成于热带海洋大气中强烈的暖性涡旋系统,往往伴随着大风、暴雨和巨浪等现象,是全球最具有破坏性的自然灾害之一。西北太平洋是全球台风生成最多的海域,每年平均大约有 7 个台风登陆中国沿海地区,使中国成为受台风影响最为严重的国家之一。近年来,台风登陆中国沿海后北上造成的极端强降水引起更多的重视,其带来的城市、农田积涝和流域洪水有着巨大的灾害性。台风的移动路径、暴雨落区及形成机理都是预报中需要重点关注的(陈联寿等,2017;任福民和杨慧,2019)。目前,国内研究台风降水,主要是环流诊断分析、天气雷达、数值模拟等(高拴柱,2020;梁军等,2019;杨舒楠等,2019;2021;董林等,2020;朱红芳等,2019)。台风降水定量估测大多通过雷达反射率因子 Z 和雨强 R 的关系(冯婉悦等,2021;Atlas et al,1973),即

$Z-R$ 关系,研究表明,经典的 $Z-R$ 关系并不适用于所有降水情况,其受地域、降水类型等因素的影响很大,因此 Petersen et al(1999)、Vieux and Bedient (1998)都建立了不同地区特定的 $Z-R$ 关系。随着观测技术的发展,雨滴谱成为研究降水云物理过程的重要内容(Battaglia et al,2010;Niu et al,2010;李景鑫等,2010;张昊等,2011;朱亚乔和刘元波,2013;梅海霞等,2017),一些学者针对不同地区(杨俊梅等,2016;赵城城等,2021)、不同降水类型(罗俊颖等,2012;谢媛等,2015;周黎明等,2015;金祺等,2015)、不同天气系统(周黎明等,2017;梅海霞等,2020)、不同高度降水天气(袁野等,2016;李慧等,2018;程鹏等,2021)等作出了细致研究。通过分析雨滴谱特征,可以深入探究台风内部的云降水物理过程及内在机制。Ulbrich and Lee(2002)分析了 2000 年台风 Helene 降水的雨滴谱特征,证明了影响过程中 $Z-R$ 关系的不稳定。Tokay et al(2008)分析 2004—2006 年大西洋 7 个台风过程,研究雨滴谱

中各参数变化和对降水的作用,发现热带台风降水主要由高浓度的中、小雨滴构成,而温带台风则存在浓度较高的大雨滴。Chen et al(2012),林文等(2016)先后分析了登陆台风莫拉克、麦德姆不同部位的雨滴谱特征。朱红芳等(2020)对比分析了 1211 号台风海葵影响过程中不同站点在本体降水阶段与冷空气入侵降水阶段的雨滴谱特征差异。冯婉悦等(2021)对比分析了 1818 号台风温比亚外围云系影响区域的雨滴谱仪数据计算的 Z-R 关系与雷达实测、雨量计实测的差异。申高航等(2020; 2021)在 1909 号台风利奇马的台风暖区、台风与西风槽相互作用区及西风槽影响区分别挑选 4 个极端强降水中心,利用雨滴谱资料分析了不同站点和不同降水时段的雨滴谱特征。以往研究多是利用雨滴谱资料对单个台风个例的不同部位、不同阶段的特征分析,对不同登陆台风造成的阶段性降水特征对比分析较少。

2018—2019 年先后有台风温比亚和利奇马在中国东部沿海登陆北上,具有生命史长、影响范围广、风雨强度大、灾情严重等共同点,影响历史罕见。同时两个台风又各具特点:“温比亚”近海生成,登陆强度弱,登陆后向西北深入内陆,强度长时间维持,降水阶段性特征明显;“利奇马”登陆强度强,登陆后沿我国东部沿海地区北上,降水阶段性特征不明显。江苏徐州地处内陆黄淮地区、苏鲁豫皖四省交界,历史上少有登陆台风直接影响,在这两个台风过程中先后受到台风外围、台风倒槽、台风本体等阶段影响,出现了极端强降水。本文利用架设在江苏徐州、新沂两站的雨滴谱探测仪收集到的观测资料,对这两个登陆北上、影响严重的台风系统造成的阶段性降水微物理特征进行分析,比较其雨滴谱演变特征及不同阶段的微物理特征差异,分析台风系统降水中对流云降水、层状云降水以及混合云降水的特征,得出不同降水强度下台风系降水的雨滴谱特征、各尺度雨滴对台风降水的贡献以及各自的 Z-R 关系。

1 台风概况与天气背景

图 1 为台风温比亚和利奇马的路径,数据来自中国气象局最佳路径数据集(Ying et al, 2014; Lu et al, 2021)。“温比亚”于 2018 年 8 月 15 日生成,17 日凌晨登陆上海,经江苏苏州进入太湖后一路西

行进入安徽境内,逐渐转向西北方向移动,傍晚进入河南境内,19 日进入山东,强度逐渐减弱,20 日凌晨在山东北部变性为温带气旋。受其影响,16 日夜间至 19 日,江苏陆续出现强风雨天气,尤其是江苏西北部的徐州地区,大部分县(市)出现大暴雨,位于苏鲁豫皖交界的丰县、沛县以及徐州市区部分地区达到特大暴雨,最大累计降水量为 534.4 mm,创下历史极值。

“利奇马”于 2019 年 8 月 4 日生成,7 日晚加强为超强台风,10 日凌晨在浙江温岭沿海登陆,登陆时中心附近最大风力为 16 级($52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 超强台风级),中心最低气压为 930 hPa,是 2019 年登陆中国的最强台风,在 1949 年以来登陆中国大陆的台风中强度排名第五。登陆后穿过浙江、江苏移入黄海西部海域,随后在山东青岛沿海再次登陆,穿过山东半岛后进入渤海,之后受到西北气流和台风罗莎的共同影响,在莱州湾附近徘徊,13 日 08 时(北京时,下同)减弱为热带低压。“利奇马”持续时间长,北上影响范围广,陆地滞留时间长达 44 h。受其影响,浙江、山东、江苏等地均出现极端强降雨天气,江苏全省平均过程雨量为 117.6 mm,仅次于历史上 6214 号和 6513 号台风,是近 54 年来影响江苏雨量最大的台风。

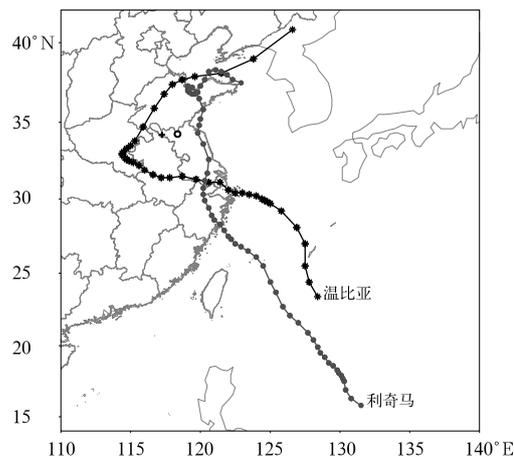


图 1 台风温比亚(黑色)和利奇马(灰色)移动路径与徐州站(+)、新沂站(O)位置(下同)

Fig. 1 Observed tracks of typhoon “Rumbia” (black) and “Lekima” (gray) (Symbols “+” and “O” indicate the locations of Xuzhou Station and Xinyi Station, the same below)

台风降水的复杂性决定了即使在同一系统影响过程中也可能存在明显的变化,不同的影响时间,或者受台风不同部位影响,可能对应不同的降水类型(朱亚乔和刘元波,2013),其降水云物理特征也存在一定差异,本文选取两个台风影响徐州过程中的不同阶段来分析不同雨强的雨滴谱特征。由于其移动路径、环流形势都存在较大差异,致使不同阶段的主要影响系统也不相同,图 2、图 3 给出了两个台风不同降水阶段的 500 hPa 平均高度场,研究采用 ERA5 资料。

2018 年 8 月 16 日 08 时,台风温比亚位于东海上,副热带高压(以下简称副高)势力强大,在副高西南侧东南气流的引导下,“温比亚”向西偏北方向移动,受台风外围云系影响,徐州开始出现分布不均匀的雷阵雨。17 日 20 时,副高势力减弱,“温比亚”进一步向西北移动,徐州位于台风倒槽右侧,受副高西南侧的东南风急流影响,水汽输送十分有利,17 日

后半夜降水开始加强,此阶段对流不是很强,以低质心降水为主,降水效率较高,最大小时雨强为 $21.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,总体雨量达到暴雨。18 日,副高减弱东退至洋面,“温比亚”由于缺少引导气流在河南境内移动缓慢,随着西风槽东移,槽后携带的冷空气与台风倒槽右侧东南暖湿急流交汇,引发强烈的辐合抬升和不稳定能量释放,在苏鲁豫皖交界处造成了持续性强降水。

2019 年 8 月 10 日,“利奇马”登陆后沿副高西侧向偏北方向移动,由于副高减弱,引导气流减弱,移速变慢,受其北侧倒槽影响,强降水集中在远离台风本体的江苏北部,徐州以东稳定维持一条南北向的螺旋雨带,有明显列车效应,出现了大暴雨(郭云谦等,2020;向纯怡等,2020)。11 日,随着“利奇马”继续北上,低压环流中心穿越江苏北部,此时产生降水为本地降水,强度明显减弱,强降水集中在台风倒槽和冷空气叠加影响的山东地区。

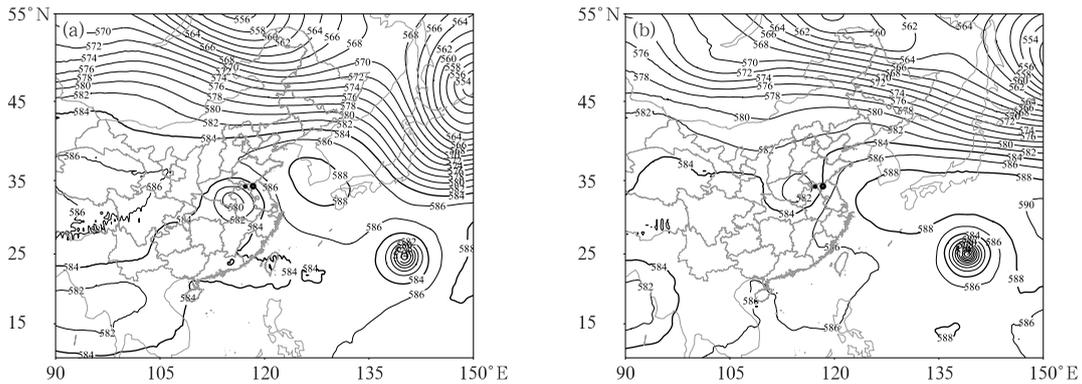


图 2 2018 年 8 月(a)17 日 08 时至 18 日 08 时,(b)18 日 17 时至 19 日 02 时的 500 hPa 平均高度场(单位:dagpm)
Fig. 2 The averaged geopotential height field (unit: dagpm) at 500 hPa from (a) 08:00 BT 17 to 08:00 BT 18 and (b) 17:00 BT 18 to 02:00 BT 19 August 2018

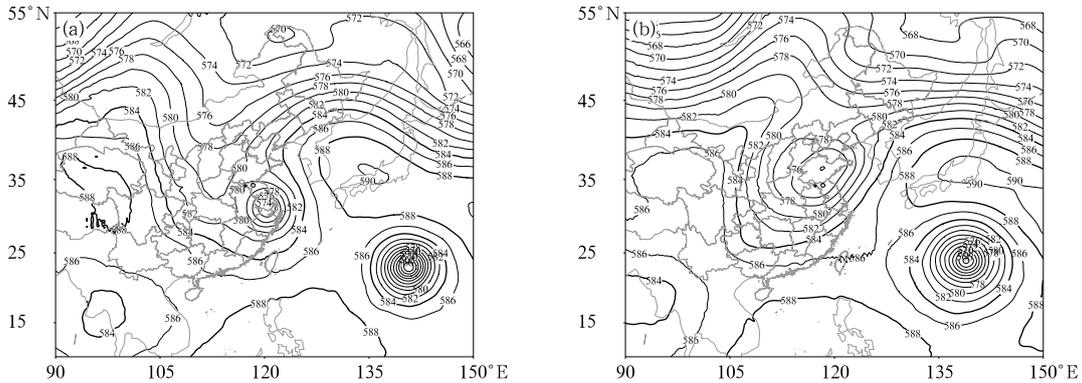


图 3 2019 年 8 月(a)10 日 11—17 时,(b)11 日 11—17 时的 500 hPa 平均高度场(单位:dagpm)
Fig. 3 The averaged geopotential height field (unit: dagpm) at 500 hPa in (a) 11:00—17:00 BT 10 and (b) 11:00—17:00 BT 11 August 2019

2 雨滴谱数据和质量控制

Parsivel 雨滴谱仪目前布设在江苏各个人工观测站点,是以激光测量为基础的粒子测量传感器,能够测量地面降水的通量谱(金祺等,2015)。它能提供 11 种时间分辨率(10 s~1 h)、32 个直径通道和 32 个速度通道的测量数据,测量直径范围为 0.2~25.0 mm, 落速范围为 0.2~20.0 m·s⁻¹。本文数据采样间隔为 1 min,为减小误差,对收集到的雨滴谱数据采用 Battaglia et al(2010)的轴比订正法进行订正。另外,对观测数据进行质量控制,剔除前两个尺度档和订正后雨滴直径大于 8 mm 的数据,以及雨滴下落速度与 Atlas et al(1973)的经典下落速度相差大于 5 m·s⁻¹的数据。

为对雨滴谱谱型及分布函数进行分析,需要将观测数据转换为单位体积、单位尺度间隔内的雨滴数浓度:

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

式中: n_{ij} 表示直径位于第 i 个尺度区间内同时下落速度介于第 j 个速度区间的雨滴数, A 是仪器的采样面积(单位:m²), Δt 是采样时间间隔(单位:s), D_i 和 ΔD_i 分别表示第 i 个尺度区间的中心直径和该区间的尺度间隔(单位:mm), V_j 表示第 j 个速度区间的中心速度(单位:m·s⁻¹)。 $N(D_i)$ 表示直径介于 D_i 与 $D_i + \Delta D_i$ 的单位体积单位尺度间隔内的雨滴数(单位:mm⁻¹·m⁻³)。

根据雨滴谱数据计算得到质量加权平均直径 D_m 、雨强 R (单位:mm·h⁻¹)和雨水含量 Z (单位:mm⁶·m⁻³)的计算公式为

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^{32} D_i^4 N(D_i) \Delta D_i}{\sum_{i=1}^{32} D_i^3 N(D_i) \Delta D_i} \quad (2)$$

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

$$Z = \sum_{i=1}^{32} D_i^6 N(D_i) \Delta D_i \quad (4)$$

Niu et al(2010)研究表明,对于层状云和对流云降水的雨滴谱,Gamma 函数的拟合效果都优于 Marshall-Palmer 函数,因此选用有三个可变参数的 Gamma 函数对雨滴谱进行拟合:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D) \quad (5)$$

式中: D 是雨滴直径(单位:mm), N_0 是截距参数(单位:mm^{-1- μ} ·m⁻³), μ 是形状因子, Λ 是斜率参数(单位:mm⁻¹)。

为验证雨滴谱资料的可靠性,李林等(2022)采用雨滴谱计算出的雨强值 R 与漏斗雨量器观测值数据对比相关系数高达 0.985,图 4 为“利奇马”过程两种不同观测仪器对雨强的对比,分析两次台风过程中计算值 R 是否能够大致反映真实降雨的变化趋势,从“利奇马”过程中两种数据对比可以看出其变化趋势、量级大小基本处于一致,相关系数可达 0.986,有较好的相关性,说明雨滴谱资料可以用来表示降雨的变化。“温比亚”过程对比有相同的结论(图略)。

3 台风降水雨滴谱演变特征

3.1 雨滴谱时间变化特征

“温比亚”影响期间,徐州站出现大暴雨,雨滴谱观测计算得到的雨强 R 变化显示,出现两个明显的阶段,前一阶段(17 日 08 时至 18 日 08 时)雨强较小,大部分时段不超过 10 mm·h⁻¹,后一阶段(18 日 17 时至 19 日 02 时)雨强增大,大部分在 10 mm·h⁻¹以上,还出现了 20 mm·h⁻¹以上持续性的短时强降雨,过程最大雨强也出现在这个阶段。结合形势分析,该站在两个阶段分别处于台风不同部位,前一阶段“温比亚”向西偏北移动,受外围螺旋云带影响,以低质心暖云降水为主,后一阶段“温比亚”停滞少动趋于转向,冷空气与台风倒槽暖气流

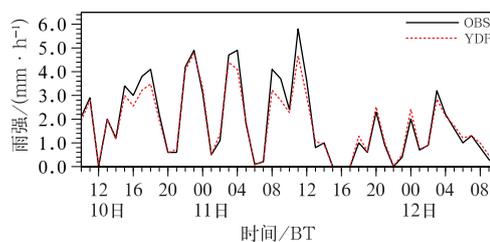


图 4 2019 年 8 月 10—12 日台风利奇马过程雨滴谱计算降水强度(红线)与漏斗雨量器观测值(黑线)对比

Fig. 4 Comparison between the precipitation intensity derived from raindrop spectrum (red line) and the rain gauge observed value (black line) during the rainfall process caused by Typhoon Lekima during 10—12 August 2019

结合,降水显著加强。对比分析弱降水阶段 P1(17 日 08 时至 18 日 08 时)和强降水阶段 P2(18 日 17 时至 19 日 02 时)的雨滴谱时间演变(图 5),两个阶段雨滴数浓度存在明显差别,其浓度高低与雨强大小关系密切,弱降水阶段对应较低雨滴数浓度,强降水阶段雨滴数浓度显著增大,同时雨滴数浓度大值也主要对应雨强陡增时段。从雨滴大小分布看,第一阶段降水主要由中小雨滴构成,第二阶段雨滴直径明显增大。与第一阶段相比,数量不断增多的大雨滴形成第二阶段的降水,导致雨强、回波强度均显著增大。相关系数分析表明,雨滴数浓度和雨滴直径两者共同作用与雨强相关性最好,达到 0.95,

此外雨滴数浓度和雨强的单独相关性也达到 0.90,明显高于雨滴直径和雨强的相关性。

对比处于强降水阶段(18 日 21 时)和弱降水阶段(17 日 12 时)徐州站附近的雷达垂直剖面可以看到(图 6),强降水阶段中存在大范围的对流云回波,且对流发展旺盛,出现多个 45 dBz 以上的强中心,回波伸展高度达到 10 km 以上,对应更多更大的雨滴分布。而弱降水阶段,回波较为分散,虽有小块对流发展,但范围小,组织化较弱,伸展高度也不高,站点上空以较弱的层状云回波为主,整体对应浓度较低的中小雨滴分布。

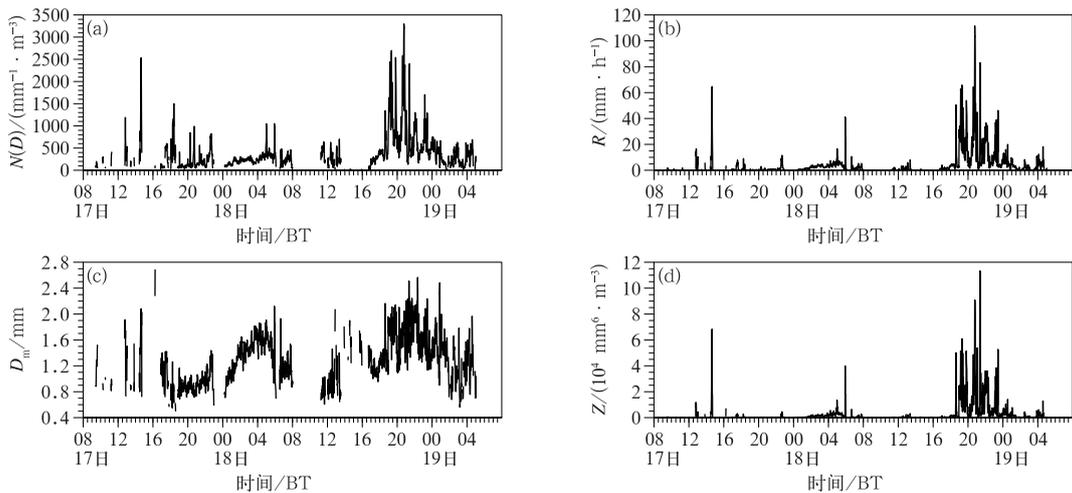


图 5 2018 年 8 月 17—19 日台风温比亚影响期间徐州站雨滴谱时间序列

(a) 雨滴数浓度 $N(D)$, (b) 雨强 R , (c) 质量加权平均直径 D_m , (d) 反射率因子 Z

Fig. 5 Time series of (a) raindrop number concentration $N(D)$, (b) rainfall intensity R , (c) raindrop diameter D_m and (d) radar reflectivity factor Z at Xuzhou Station under the influence of Typhoon Rumbia during 17—19 August 2018

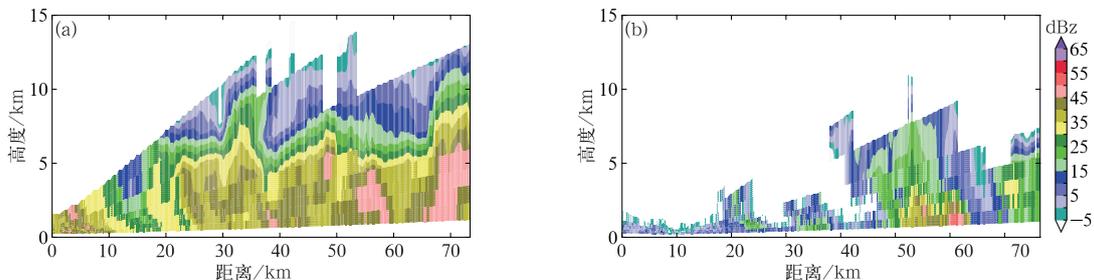


图 6 2018 年 8 月台风温比亚影响期间徐州站(a)18 日 17 时至 19 日 02 时强降水, (b)17 日 08 时至 18 日 08 时弱降水时间段雷达回波剖面图

Fig. 6 Radar echo profile during (a) heavy precipitation from 17:00 BT 18 to 02:00 BT 19 and (b) weak precipitation at Xuzhou Station from 08:00 BT 17 to 08:00 BT 18 August 2018 under the influence of Typhoon Rumbia

而“利奇马”登陆后其外围云系较早影响江苏,但对江苏影响以台风倒槽和本体降水为主,对流不强,降水阶段性不明显。选取利奇马过程中出现大暴雨的新沂站,选取前后两个阶段:强降水阶段 P1 (10 日 11—17 时)、弱降水阶段 P2 (11 日 11—17 时)。P1 阶段雨强陡增,普遍超过 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的短时强降水也持续出现, P2 阶段雨强明显减弱,大部分时段在 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下。对应形势场,强降水阶段新沂站处于台风倒槽附近,弱降水阶段由于“利奇马”逐渐北上处于台风环流附近,以本体降水为主。分析前后两个阶段降水的雨滴谱特征演变(图 7),可以看出在两个阶段的雨滴数浓度比较接近,但对应的雨滴直径存在明显的差

别,分别为 1.37 mm 和 0.67 mm ,表明第一阶段降水主要由大雨滴构成,第二阶段雨滴直径明显较小,因而造成雨强和回波强度上的显著差异。从相关系数分析也表明,雨滴数浓度和雨滴直径两者共同作用与雨强相关性最好,达到 0.91 ,明显高于二者与雨强的单独相关。对比影响时强、弱两个降水阶段新沂站点附近的雷达剖面发现(图 8),强降水阶段对应大范围的强回波发展,回波伸展高度较高,但强回波中心高度基本在 $5 \sim 6 \text{ km}$ 以下,低质心特征相比温比亚影响时更为明显。而弱降水阶段为大范围的层状云降水回波,性质比较均一,整体强度较弱,伸展高度较低,低质心特征更加明显,对应中小雨滴较为集中。

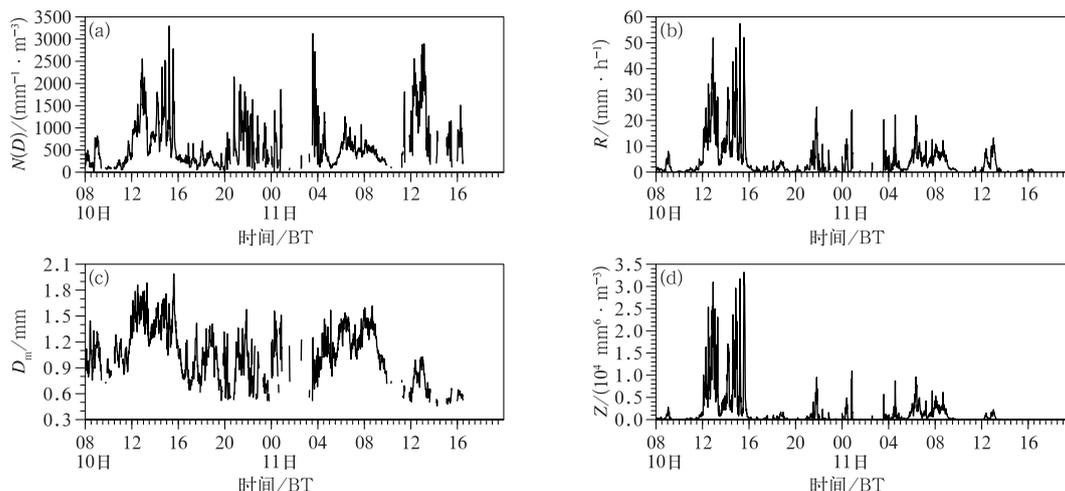


图 7 2019 年 8 月 10—11 日台风利奇马影响期间新沂站雨滴谱时间序列
(a) 雨滴数浓度 $N(D)$, (b) 雨强 R , (c) 质量加权平均直径 D_m , (d) 反射率因子 Z

Fig. 7 Time series of raindrop (a) number concentration $N(D)$, (b) rainfall intensity R , (c) raindrop diameter D_m and (d) radar reflectivity factor Z at Xinyi Station under the influence of Typhoon Lekima during 10—11 August 2019

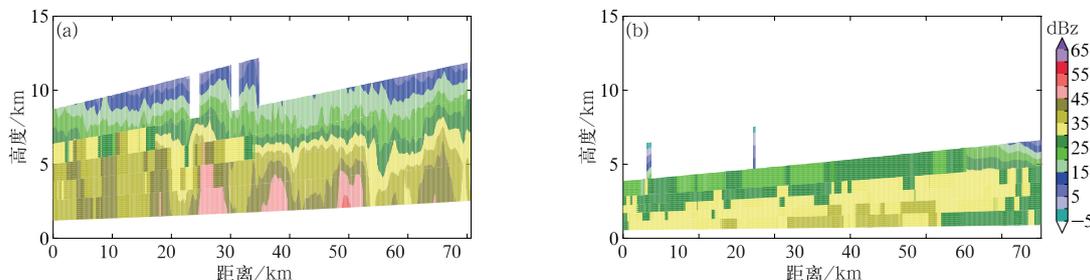


图 8 2019 年 8 月台风利奇马影响期间新沂站(a)10 日 11—17 时强降水, (b)11 日 11—17 时弱降水时间段雷达回波剖面

Fig. 8 Radar echo profile at Xinyi Station during (a) heavy precipitation in 11:00—17:00 BT 10 and (b) weak precipitation in 11:00—17:00 BT 11 August 2019 under the influence of Typhoon Lekima

两次台风降水过程中,当雨强较小($<10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)时,雨滴直径分布在 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$,说明以数量众多的中小雨滴为主;当雨强 $>10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,粒径普遍超过 1.5 mm ,且雨滴直径随雨强增大而增大。与之前吕童(2018)得出雨强越大,大雨滴数量越少的结论不同的是,在这两次台风过程中,大雨滴数量并没有明显减小,有时还会出现增大的趋势,

也就是说强降水大都对应数量较多的大雨滴。

表 1 给出了具体的雨滴谱特征平均值对比,在雨强接近的情况下,“利奇马”的平均雨滴数浓度 N 和含水量 W 明显大于“温比亚”,质量平均直径 D_m 和平均直径 D_a 相对偏小,尤其在弱降水阶段。因此,“利奇马”降水是由数量更多的中小雨滴构成,而“温比亚”降水则更多的是由大雨滴构成。

表 1 台风温比亚和利奇马不同降水阶段的雨滴谱特征平均值

Table 1 The averaged microphysical parameters in different precipitation periods between typhoons “Rumbia” and “Lekima”

台风	不同阶段	数浓度 N $/(\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	雨强 R $/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	含水量 W $/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	回波强度 Z $/(\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3})$	质量平均直径 D_m/mm	平均直径 D_a/mm
“温比亚”	强降水	931.0	13.10	0.71	6644	1.37	0.92
	弱降水	1161.0	2.60	0.20	3017	0.67	0.60
“利奇马”	弱降水	259.8	2.52	0.14	1288	1.17	0.80
	强降水	686.0	13.76	0.65	10549	1.58	0.98

3.2 平均谱和 Gamma 拟合分布特征

为进一步分析两次台风降水过程中不同阶段的平均谱分布特征,通过对各直径区间雨滴数浓度进行平均计算出徐州和新沂站在“温比亚”雨滴直径-雨滴数浓度谱分布(图 9)。可以看到,“温比亚”两个阶段平均谱分布比较接近,都具有较大的谱宽,最大雨滴直径超过 5 mm ;数浓度大值区主要集中在 $0.44 \sim 1.05 \text{ mm}$,强降水阶段最大数浓度为 $10^3 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,高于弱降水阶段,且在各雨滴段都具有更大的数浓度,大雨滴段呈多峰结构;而弱降水阶段各直径大小的雨滴都较少,且呈单峰型。

“利奇马”平均谱呈现 Gamma 分布,在强降水阶段具有更宽的谱宽,直径在 $0.56 \sim 1.05 \text{ mm}$ 范围

内的雨滴数浓度较高,呈现多峰结构;在此以外,随着雨滴直径增大或减小,数浓度均为减小的趋势,最大降水雨滴直径可达到 4 mm 。在弱降水阶段,直径在 $0.56 \sim 1.05 \text{ mm}$ 的降水雨滴数浓度更高,甚至高于强降水阶段,呈“单峰型”;随着雨滴直径的增大或减小,数浓度也呈减小趋势,但谱宽较窄,且大直径雨滴数浓度显著小于强降水阶段,最大降水雨滴直径仅为 2 mm 左右。

对比两次台风降水不同阶段的雨滴谱谱型特征可以发现,“温比亚”台风强弱两个阶段降水型特征较为一致,强降水阶段雨强大,雨滴谱更宽,回波强度大, D_m 较大,不仅大雨滴多,中小雨滴也多,在大雨滴处呈多峰现象,Gamma 分布符合对流云降水特征;弱降水阶段谱宽较宽,最大雨滴直径较大,但平

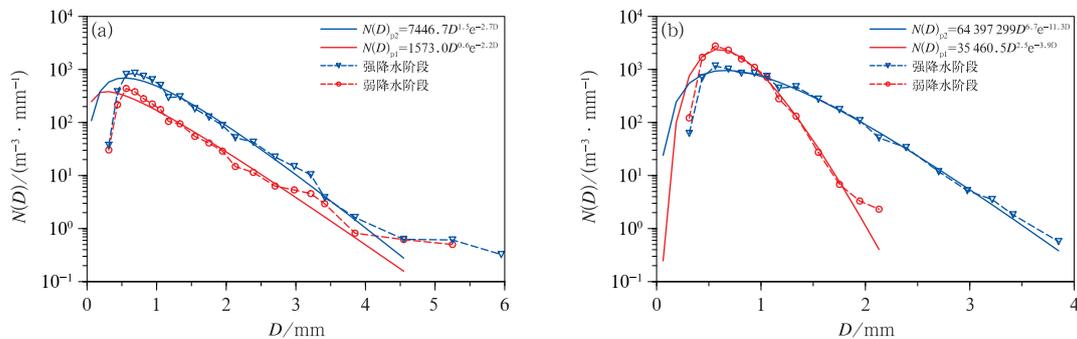


图 9 台风(a)温比亚和(b)利奇马不同降水阶段的平均谱分布(虚线)、Gamma 拟合分布(实线)

Fig. 9 The averaged raindrop spectrum (dotted line), Gamma fitting (solid line) distribution characteristics between typhoons (a) “Rumbia” and (b) “Lekima” in different precipitation periods

均直径不大,大小雨滴悬殊,基本符合 Gamma 分布,为层积混合云降水特征。“利奇马”前后两个阶段降水对比更加明显,强降水阶段同时具有较大的谱宽、雨强和回波强度, D_m 较大,大雨滴处呈多峰现象,表现出显著的对流云降水特征;弱降水阶段有较多的小雨滴,雨滴平均谱谱型较为平缓,谱宽较窄,基本符合 Marshall-Palmer 拟合分布,为明显的层状云降水特征。这与前人所得到的不同降水雨滴谱的谱型分布特征基本吻合。

平均谱对比分析再次表明,“利奇马”降水过程雨滴数浓度高于“温比亚”,尤其是中小雨滴;而“温比亚”谱宽更大,存在更大直径雨滴。“利奇马”降水主要由高浓度的中、小雨滴构成,“温比亚”则存在浓度较高的大雨滴。且无论大雨滴是否存在,中雨滴及小雨滴都占绝对多数。分析环流背景和台风移动路径,“利奇马”海上发展时间长,登陆强度强,登陆后沿海北上,没有深入内陆,海洋水汽通道维持,影响江苏时没有明显变性,降水对流性不强,更多表现出热带台风降水特征;而“温比亚”在海上快速发展,登陆强度不强,登陆后深入内陆,与冷空气结合,逐渐变性为温带气旋,降水对流性更强。因此得出热带台风降水和温带台风降水明显不同的谱特征,和 Tokay et al(2008)的研究结论相一致。

3.3 不同直径雨滴对降水的贡献率

通过对比不同直径雨滴所构成的雨强和贡献率

(图 10)可以看出,“温比亚”的强降水阶段数浓度主要集中在 0.56~1.05 mm 直径雨滴段,但降水主要集中在 1.34~2.70 mm 直径雨滴段,其对雨强的贡献率占 73%以上;在弱降水阶段数浓度和雨强都集中在 1.05~2.39 mm 雨滴段,降水占 74%以上。“利奇马”在强降水阶段数浓度也主要集中在 0.56~1.05 mm 直径雨滴段,但降水主要集中在 1.3~2.3 mm 雨滴段,贡献率达到 70%以上;弱降水阶段雨强和数浓度主要集中在 0.56~1.05 mm 雨滴段,降水占 80%以上。

3.4 Z-R 关系讨论

对两个台风降水的 Z-R 关系分别进行拟合发现(图 11),“温比亚”前后两个阶段曲线较为接近,具有大体一致的 Z-R 关系,因此推断降水类型也相近,根据之前分析可知,两个阶段雨滴谱型特征接近,混合云降水兼具对流性降水特征。Z-R 关系为 $Z=213.1R^{1.4}$,与标准 $Z=300R^{1.4}$ 系数略偏小,指数一致,用标准 Z-R 关系估测降水会偏小。对“利奇马”强、弱降水阶段分别进行拟合发现,两个阶段的 Z-R 关系中指数相同,系数相差较大,导致曲线差别较大,因此对应两种不同的降水类型,这和前面的分析结论一致。也说明前后阶段的相同雨强下,对流性降水的回波强度更强,同样在相同回波强度下,对流性降水的雨强相对较小。这和对流云降水具有更高浓度的大雨滴有关。拟合得出“利奇马”降水阶段

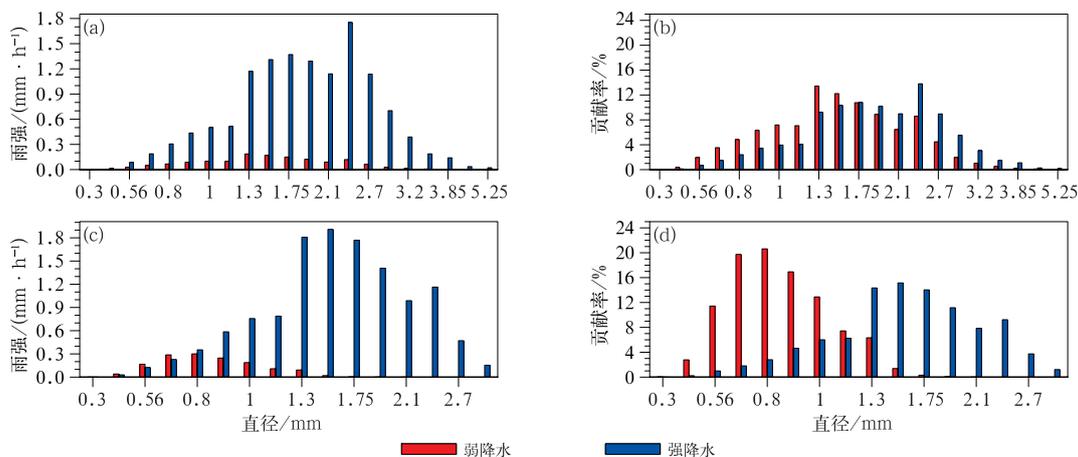


图 10 (a,b)“温比亚”,(c,d)“利奇马”各阶段不同直径雨滴构成的(a,c)雨强及(b,d)贡献率

Fig. 10 (a, c) The rain intensity and (b, d) the contribution rate of different diameter raindrops between (a, b) “Rumbia” and (c, d) “Lekima” in different precipitation periods

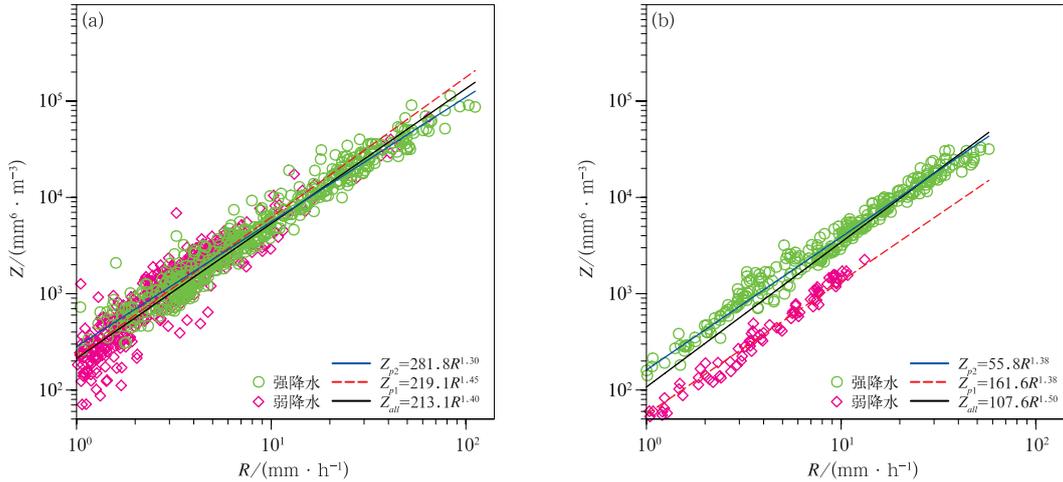


图 11 (a)“温比亚”,(b)“利奇马”Z-R 关系拟合曲线及强降水、弱降水阶段对比

Fig. 11 Relationship of Z-R and comparison of heavy precipitation and weak precipitation of typhoons (a) “Rumbia” and (b) “Lekima”

的 Z-R 关系为 $Z = 107.6R^{1.5}$, 与标准的 $Z = 300R^{1.4}$ 相比较而言指数偏大, 因此用标准 Z-R 关系估测雷达回波的降水会偏大。为改进雷达估测降水精度, 后续需要继续开展不同地点、不同季节或降水类型的雷达反射率因子 Z 和雨强 R 的关系。

4 结 论

对 2018—2019 年影响江苏的“温比亚”、“利奇马”的不同位置造成的不同强度降水和雨滴谱特征进行了对比分析和研究, 结果表明:

(1) 雨强较小时, 以中、小雨滴为主; 雨强增大时, 大雨滴增多。强降水对应数量较多的大雨滴。

(2) “利奇马”降水过程雨滴数浓度高于“温比亚”, 尤其是中小雨滴; 而“温比亚”谱宽更大, 存在更大直径雨滴。表明“利奇马”台风降水主要由高浓度的中、小雨滴构成, 具有热带台风降水特征; “温比亚”则存在浓度较高的大雨滴, 更偏于温带台风降水特征。这从两次过程强、弱降水阶段的雷达垂直剖面对比也可以发现, “温比亚”降水回波发展高度更高, 尤其是强降水阶段; 而“利奇马”不管是强降水还是弱降水阶段回波均呈现低质心特征。

(3) 通过对比分析两个台风的强、弱降水阶段得出台风系统降水中对流云降水、层状云降水及混合云降水的特征。“温比亚”前后降水阶段谱型特征较为一致, 谱宽和最大雨滴直径均较大, 但强降水阶段不仅大雨滴多, 中小雨滴也多, 在大雨滴处呈多峰现象, Gamma 分布符合对流云降水特征; 弱降水阶段

雨滴平均直径不大, 大小雨滴悬殊, 基本符合 Gamma 分布, 为混合云降水特征。“利奇马”前后阶段对比更为明显, 强降水阶段表现出显著的对流云降水特征; 弱降水阶段有较多的小雨滴, 雨滴平均谱型较为平缓, 谱宽较窄, 基本符合 Marshall-Palmer 分布, 为层状云降水特征。

(4) 分析不同降水强度下台风系统降水的雨滴谱和各直径雨滴对台风降水的贡献可以发现, 造成强降水的主要是由大直径雨滴 (大于 1.3 mm) 构成的对流云降水; 混合云降水也会形成强降水; 层状云降水较弱。层状云降水, 直径为 0.5~1.05 mm 的中小雨滴数量最多, 对降水也起最主要贡献; 对流云降水, 虽然也是直径为 0.5~1.05 mm 的中小雨滴数量最多, 但对降水起主要贡献的为更大直径的雨滴。

(5) “温比亚”强、弱降水阶段的 Z-R 关系接近一致, 具有相近的降水类型, 与标准的 Z-R 关系相比系数偏小, 指数一致, 雷达估测降水偏小。“利奇马”强、弱降水阶段 Z-R 关系差别较大, 对应两种不同的降水类型, 与标准的 Z-R 关系相比指数偏大, 雷达估测降水偏大。为改进雷达估测降水精度, 有必要开展不同地点、不同季节或降水类型的 Z-R 关系研究。

参考文献

- 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 L S, Meng Z Y, Cong C H, 2017. An overview on the research of typhoon rainfall distribution[J]. J

- Mar Meteor, 37(4):1-7(in Chinese).
- 程鹏,常祎,刘琴,等,2021. 祁连山春季一次层状云降水的雨滴谱分布及地形影响特征[J]. 大气科学, 45(6):1232-1248. Cheng P, Chang Y, Liu Q, et al, 2021. A case study of raindrop size distribution and orographic impact characteristics in spring stratiform precipitation over the Qilian Mountains [J]. Chin J Atmos Sci, 45(6):1232-1248(in Chinese).
- 董林,许映龙,吕心艳,等,2020. 台风纳沙和海棠的预报着眼点分析[J]. 气象, 46(1):29-36. Dong L, Xu Y L, Lyu X Y, et al, 2020. Analysis of forecast focuses of binary typhoons Nesat and Haitang[J]. Meteor Mon, 46(1):29-36(in Chinese).
- 冯婉悦,施丽娟,王智敏,等,2021. 雨滴谱仪资料在“温比亚”台风降水估测中的应用探究[J]. 气象, 47(4):389-397. Feng W Y, Shi L J, Wang Z M, et al, 2021. Application of raindrop disdrometer data in rainfall estimation of Typhoon Rumbia[J]. Meteor Mon, 47(4):389-397(in Chinese).
- 高拴柱,2020. 2018 年台风温比亚的强对流螺旋雨带观测特征分析[J]. 气象, 46(6):792-800. Gao S Z, 2020. Characteristics analysis on the severe convective spiral rainband of Typhoon Rumbia (2018)[J]. Meteor Mon, 46(6):792-800(in Chinese).
- 郭云谦,王毅,沈越婷,等,2020. 台风“利奇马”不同区域降水极端性特征及成因分析[J]. 气象科学, 40(1):65-77. Guo Y Q, Wang Y, Shen Y T, et al, 2020. Analysis on characteristics of the extreme precipitation of Typhoon “Lekima”[J]. J Meteor Sci, 40(1):65-77(in Chinese).
- 金祺,袁野,刘慧娟,等,2015. 江淮之间夏季雨滴谱特征分析[J]. 气象学报, 73(4):778-788. Jin Q, Yuan Y, Liu H J, et al, 2015. Analysis of microphysical characteristics of the raindrop spectrum over the area between the Yangtze River and the Huaihe River during summer[J]. Acta Meteor Sin, 73(4):778-788(in Chinese).
- 李慧,银燕,单云鹏,等,2018. 黄山层状云和对流云降水不同高度的雨滴谱统计特征分析[J]. 大气科学, 42(2):268-280. Li H, Yin Y, Shan Y P, et al, 2018. Statistical characteristics of raindrop size distribution for stratiform and convective precipitation at different altitudes in Mt. Huangshan[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2):268-280(in Chinese).
- 李林,孙赫敏,仰美霖,等,2022. 基于速度和数量阈值的雨滴谱质量控制方法[J]. 气象, 48(7):891-898. Li L, Sun H M, Yang M L, et al, 2022. Disdrometer's data quality control method based on speed and quantity threshold[J]. Meteor Mon, 48(7):891-898(in Chinese).
- 李景鑫,牛生杰,王式功,等,2010. 积层混合云降水雨滴谱特征分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 46(3):56-61. Li J X, Niu S J, Wang S G, et al, 2010. Precipitation characteristics related to raindrop size distribution in laminated hybrid cloud[J]. J Lanzhou Univ (Nat Sci), 46(3):56-61(in Chinese).
- 梁军,张胜军,冯呈呈,等,2019. 台风 Polly(9216)和 Matmo(1410)对辽东半岛降水影响的对比分析[J]. 气象, 45(6):766-776. Liang J, Zhang S J, Feng C C, et al, 2019. Comparison of synoptic circulations of heavy rain associated with typhoons Polly and Matmo over Liaodong Peninsula[J]. Meteor Mon, 45(6):766-776(in Chinese).
- 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 W, Lin C C, Li B L, et al, 2016. Rainfall intensity and raindrop spectrum for different parts in landing typhoon Matmo[J]. J Appl Meteor Sci, 27(2):239-248(in Chinese).
- 吕童,2018. 登陆台风雨滴谱特征观测研究[D]. 南京:南京大学. Lyu T, 2018. Observational Study of the Characteristics of Raindrop Size Distribution of Landfalling Typhoons[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese).
- 罗俊颀,贺文彬,李金辉,等,2012. 2003 年春季陕西省层状云降水的雨滴谱特征[J]. 气象, 38(9):1129-1134. Luo J J, He W B, Li J H, et al, 2012. Characteristics in size distribution of raindrops of stratiform precipitation in spring 2003 of Shaanxi Province[J]. Meteor Mon, 38(9):1129-1134(in Chinese).
- 梅海霞,郭文刚,周林义,等,2017. 雨滴谱谱形参数对梅雨降水模拟能力的影响[J]. 气象, 43(1):34-45. Mei H X, Guo W G, Zhou L Y, et al, 2017. Effect of shape parameter of raindrop spectrum on the simulation of Meiyu rainfall[J]. Meteor Mon, 43(1):34-45(in Chinese).
- 梅海霞,梁信忠,曾明剑,等,2020. 2015—2017 年夏季南京雨滴谱特征[J]. 应用气象学报, 31(1):117-128. Mei H X, Liang X Z, Zeng M J, et al, 2020. Raindrop size distribution characteristics of Nanjing in summer of 2015—2017[J]. J Appl Meteor Sci, 31(1):117-128(in Chinese).
- 任福民,杨慧,2019. 1949 年以来我国台风暴雨及其预报研究回顾与展望[J]. 暴雨灾害, 38(5):526-540. Ren F M, Yang H, 2019. An overview of advances in typhoon rainfall and its forecasting researches in China during the past 70 years and future prospects[J]. Torr Rain Dis, 38(5):526-540(in Chinese).
- 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 G H, Gao A C, Li J, 2020. Analysis of the characteristics of raindrop spectrum in different heavy precipitation centers caused by Typhoon “Lekima”[J]. J Meteor Sci, 40(1):106-113(in Chinese).
- 申高航,高安春,李君,2021. 雨滴谱及双偏振雷达等资料在一次强降水过程中的应用[J]. 气象, 47(6):737-745. Shen G H, Gao A C, Li J, 2021. Application of raindrop spectrum and dual polarization radar data to a heavy rain process[J]. Meteor Mon, 47(6):737-745(in Chinese).
- 向纯怡,赵海坤,刘青元,等,2020. 1909 号台风“利奇马”登陆后强降水分布特征[J]. 气象科学, 40(3):294-302. Xiang C Y, Zhao H K, Liu Q Y, et al, 2020. The distribution of torrential rain after landfalling of Typhoon “Lekima”(1909)[J]. J Meteor Sci, 40(3):294-302(in Chinese).
- 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 Y, Chen Z R, Dai J H, et al, 2015. Analysis on raindrop spectrum in four types of precipitation in Shanghai[J]. J Meteor Sci, 35(3):353-361(in Chinese).

- 杨俊梅,陈宝君,韩永翔,等,2016.山西省不同地区雨滴谱的统计特征[J].气象科学,36(1):88-95. Yang J M, Chen B J, Han Y X, et al, 2016. Statistical characteristics of raindrop size distribution in different regions of Shanxi[J]. J Meteor Sci, 36(1): 88-95 (in Chinese).
- 杨舒楠,曹勇,陈涛,等,2019.台风苏迪罗登陆次日分散性暴雨成因及预报着眼点[J].气象,45(1):38-49. Yang S N, Cao Y, Chen T, et al, 2019. Causes and focus points of forecasting the scattered rainstorm of Typhoon Soudelor on day 2 after landing[J]. Meteor Mon, 45(1): 38-49 (in Chinese).
- 杨舒楠,路屹雄,张芳华,等,2021.热带风暴艾云尼持续性强降水成因分析[J].气象,47(1):106-116. Yang S N, Lu Y X, Zhang F H, et al, 2021. Analysis on causes of persistent heavy rainfall brought by Tropical Storm Ewiniar[J]. Meteor Mon, 47(1): 106-116 (in Chinese).
- 袁野,朱士超,李爱华,2016.黄山雨滴下落过程滴谱变化特征[J].应用气象学报,27(6):734-740. Yuan Y, Zhu S C, Li A H, 2016. Characteristics of raindrop falling process at the Mount Huang [J]. J Appl Meteor Sci, 27(6): 734-740 (in Chinese).
- 张昊,濮江平,李靖,等,2011.庐山地区不同海拔高度降水雨滴谱特征分析[J].气象与减灾研究,34(2):43-50. Zhang H, Pu J P, Li J, et al, 2011. Analysis of characteristics of raindrop size distribution at different altitudes in Lushan[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 34(2): 43-50 (in Chinese).
- 赵城城,张乐坚,梁海河,等,2021.北京山区和平原地区夏季雨滴谱特征分析[J].气象,47(7):830-842. Zhao C C, Zhang L J, Liang H H, et al, 2021. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution between mountain and plain areas over Beijing in summer[J]. Meteor Mon, 47(7): 830-842 (in Chinese).
- 周黎明,王庆,龚佃利,等,2015.山东一次暴雨过程的云降水微物理特征分析[J].气象,41(2):192-199. Zhou L M, Wang Q, Gong D L, et al, 2015. Microphysical properties of cloud and precipitation during a rainstorm process in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 41(2): 192-199 (in Chinese).
- 周黎明,王庆,李芳,2017.山东不同天气系统下暴雨雨滴谱特征分析[J].自然灾害学报,26(6):217-223. Zhou L M, Wang Q, Li F, 2017. Analysis on characteristics of raindrop size distribution of rainstorm under different weather system in Shandong Province [J]. J Nat Dis, 26(6): 217-223 (in Chinese).
- 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 H F, Wang D Y, Yang Z X, et al, 2020. Analysis of raindrop spectrum characteristics for a heavy rain event caused by Typhoon Haikui (No. 1211) in Anhui[J]. Torr Rain Dis, 39(2): 167-175 (in Chinese).
- 朱红芳,杨祖祥,王东勇,等,2019.进入内陆的两个台风降水特征对比分析[J].气象学报,77(2):268-281. Zhu H F, Yang Z X, Wang D Y, et al, 2019. Comparative analysis of the rainstorms caused by two typhoons in inland China[J]. Acta Meteor Sin, 77(2): 268-281 (in Chinese).
- 朱亚乔,刘元波,2013.地面雨滴谱观测技术及特征研究进展[J].地球科学进展,28(6):685-694. Zhu Y Q, Liu Y B, 2013. Advances in measurement techniques and statistics features of surface raindrop size distribution[J]. Adv Earth Sci, 28(6): 685-694 (in Chinese).
- Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S, 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. Rev Geophys, 11(1): 1-35.
- Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al, 2010. PARSIVEL snow observations: a critical assessment[J]. J Atmos Oceanic Technol, 27(2): 333-344.
- Chen B J, Wang Y, Ming J, 2012. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution in Typhoon Morakot (2009) [J]. J Trop Meteor, 18(2): 162-171.
- 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.
- Niu S J, Jia X C, Sang J R, et al, 2010. Distributions of raindrop sizes and fall velocities in a semiarid plateau climate: convective versus stratiform rains [J]. J Appl Meteor Climatol, 49(4): 632-645.
- Petersen W A, Carey L D, Rutledge S A, et al, 1999. Mesoscale and radar observations of the Fort Collins flash flood of 28 July 1997 [J]. Bull Am Meteor Soc, 80(2): 191-216.
- Tokay A, Bashor P G, Habib E, et al, 2008. Raindrop size distribution measurements in tropical cyclones [J]. Mon Wea Rev, 136(5): 1669-1685.
- Ulbrich C W, Lee L G, 2002. Rainfall characteristics associated with the remnants of tropical storm Helene in upstate South Carolina [J]. Wea Forecasting, 17(6): 1257-1267.
- Vieux B E, Bedient P B, 1998. Estimation of rainfall for flood prediction from WSR-88D reflectivity: a case study, 17-18 October 1994 [J]. Wea Forecasting, 13(2): 407-415.
- 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.

(本文责编:王婷波)