

陕西汛期 5 类天气环流降水雨滴谱分布

统计特征对比研究

胡启元^{1,2} 覃章才¹ 戚友存^{3,4} 朱自伟^{3,4} 冯典² 张黎²

1 中山大学大气科学学院, 珠海 519000

2 陕西省气象台, 西安 710014

3 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 雨滴谱作为可以直接描述雨滴尺寸、数量等特征的高频次观测资料, 广泛应用到对不同天气、不同类型雨滴变化的精细化评估分析中。本研究利用 2019-2022 年陕西地区近 4 年雨滴谱资料, 分析了 5 种天气环流影响下陕西降水总体特征、暴雨过程和非暴雨过程滴谱特征以及对流降水和层云降水滴谱特征。研究表明, 雨强 $>5\text{mm h}^{-1}$ 的降水对过程总雨量贡献度在各环流之间差异明显, 不同直径区间雨滴数浓度及降雨率的贡献程度不同是形成总体特征差异的主要原因, 例如西南气流型多为长时间高浓度小雨滴形成稳定降水, 西北气流型多为短时间高浓度大雨滴形成强降水。不同环流暴雨与非暴雨降水之间的滴谱差异特征进一步增大, 高雨强降水对雨滴谱参量有明显促进作用。雨滴数浓度随直径变化的特征显示, 各环流天气暴雨过程中雨强 $>5\text{mm h}^{-1}$ 的对流降水雨滴数量比例和直径谱宽普遍高于非暴雨降水。各环流类型的对流降水之间和层云降水之间的 D_m-N_w 分布范围、量级等特征接近, 差别在于平均值点及大值区位置。对比昭苏、珠海及帕劳岛等类似地区对流降水特征, 陕西大部分对流降水偏向海洋性对流降水特征, 少数大陆性对流降水多出现在平直气流型和西北气流型天气中。本研究基于上述分析, 在传统 Z-R 经验关系的基础上, 通过雨滴谱参数优化拟合了陕西各环流降水的 Z-R 估测降水关系式, 有助于提升当地不同天气场景下雷达估测降水的准确率。

关键词 雨滴谱分布, 环流类型, 陕西降水, 分类特征, Z-R 关系

文章编号 2023117A

中图分类号 P426.62,P412

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Comparative Study on the Statistical Characteristics of Raindrop

Spectral Distribution of Five Types of Weather Circulation

Precipitation during Flood Season in Shaanxi

HU Qiyuan^{1,2}, QIN Zhangcai¹, QI Youcun^{3,4}, ZHU Ziwei^{3,4},

FENG Dian², and ZHANG Li²

收稿日期 2023-09-05 网络预出版日期

作者简介 胡启元, 男, 1989 年出生, 高级工程师, 主要从事短临预报技术和雷达估测降水研究。E-mail: 243052965@qq.com

通讯作者 戚友存, E-mail: Youcun.Qi@igsrr.ac.cn

资助项目 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2023JCQN0341), 国家重点研发计划项目 (2022YFC3002904, 2022YFC3004101), 海南省重点研发计划项目 (ZDYF2023SHFZ125), 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2024-132, FPZJ2024-131)

Funded by Shaanxi Natural Science Basic Research Program Project (Grant 2023-JC-QN-0341), National Key Research and Development Project (Grant 2022YFC3002904, Grant 2022YFC3004101), Hainan Key Research and Development Project (Grant ZDYF2023SHFZ125), China Meteorological Administration Weather Review Special Project (FPZJ2024-132, FPZJ2024-131)

1 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519000

2 Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014

3 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The raindrop spectrum, as a high-frequency observation data that directly describes the characteristics of raindrop size and quantity, has been widely used in the fine evaluation and analysis of raindrop changes in different weather conditions and types. The study utilized raindrop spectrum observation data from 2019 to 2022 in the Shaanxi Province. We have analyzed the overall characteristics of precipitation under the influence of five weather circulations, the drop spectra characteristics of rainstorm and non-rainstorm processes, and the drop spectra characteristics of convective precipitation and stratiform precipitation. The results indicate that the contribution of precipitation with rainfall rate $>5\text{mm h}^{-1}$ to the total rainfall of the process varies significantly among different circulation systems. The main reason for this situation is the difference in the number concentration and contribution of raindrops in each diameter intervals. For example, the southwest airflow type is often characterized by stable precipitation formed by long-term high concentration small raindrops, while the northwest airflow type is characterized by strong precipitation formed by short-term high concentration large raindrops. The characteristics difference of drop spectrum between different circulation rainstorm and non-rainstorm further increase, and heavy rainfall have a significant promoting effect on raindrop spectral parameters. From the variation of number concentration with diameter, the number proportion and diameter spectral width of convective precipitation raindrops with rainfall rate $>5\text{mm h}^{-1}$ in the rainstorm are generally higher than those of non-rainstorm. The distribution range and magnitude of D_m-N_w between convective precipitation and stratiform precipitation are nearly similar, with differences in the location of mean and high value areas. Compared with similar regions such as Zhaosu, Zhuhai, and Palau Island, most of convective precipitation in Shaanxi tends to have oceanic convective precipitation characteristics. A few continental convective precipitation occur in flat straight airflow weather or northwest airflow weather. Based on the above analysis, this study differs from the traditional Z-R empirical relationship and optimizes the fitting of Z-R precipitation estimation equations for various circulation precipitation based on raindrop spectra, which helps to improve the accuracy of radar precipitation estimation in different weather scenarios in the local area in Shaanxi.

Key words Raindrop size distribution, Circulation type, Precipitation in Shaanxi, Classification characteristics, Z-R relationship

1 引言

雨滴谱分布 (*DSD, Drop Size Distribution*) 可以有效对水凝物粒子的物理特征 (尺寸、形状等) 和分布特征 (粒子浓度、含水量等) 进行精确定量描述。通过基于雨滴谱资料的降水微物理特征, 能够精准分析在不同大气环境、降水类型、气候背景下降雨形成的差异性。相对于单一雨量观测数据, 雨滴谱参数具有更加直观化、定量化和多样化的研究特点, 能够开展更多检验评估进而明显改进提高雷达定量估测降水质量。

国内外大量学者通过雨滴谱对各类天气降水特征展开研究,包括降水粒子的尺寸、数浓度、反演雨强等参数特征,以及按个例过程、天气系统等滴谱分类统计特征。*Jiang et al.(2021)*分析对比了 2020、2021 年中国天山西部(昭苏)和中部(天池)夏季雨滴粒径分布特征,发现两地 *DSD* 各项参数存在明显差异并且对地理位置变化具有较高敏感性;*Luo et al.(2021)*通过 2017 年 6 月湖南长沙一次大洪水期间降水滴谱分布特征分析,发现洪水期由两个强降雨时段和一个层状雨时段组成,而最大直径达 7.5 毫米的雨滴以及高浓度的中小雨滴是两次强降雨期间降雨量变大的直接原因;*Pu et al.(2020)*研究了长江下游 5 个地区的雨滴谱特征,发现工业地区的极端降水雨量在总降水占比明显高于其他地点,市中心地区降水粒子的质量加权平均直径 D_m 在所有降雨等级和降雨类型中最大。部分学者统计研究了天气系统对降水滴谱特征的影响作用,如 *Jwa et al.(2021)*研究韩国首尔降水雨滴谱分布时,将降水过程区分为受昌马锋(*CF*)系统影响和受低压系统(*L*)影响,*CF* 型比 *L* 型更有利于云的强烈垂直发展和活跃的冰微物理过程;郭飞燕等(2023)研究了 2021 年 8 月山东一次飑线系统过程的降水滴谱特征和双偏振雷达特征,指出飑线系统经过时降水滴谱有显著演变特征,飑线主体前侧雨滴数浓度明显升高,谱宽变宽呈典型单峰特征,直径 2-4mm 粒子对降水贡献较大,飑线后侧雨滴数浓度明显降低、谱宽变窄,粒子直径以 0.5-1.5mm 为主;王俊等(2022)分析了 2018 年登陆台风温比亚深入内陆后的雨滴谱演变特征,结果表明“温比亚”台风影响河南、山东时各地云雨微物理特征类似相近,在减弱成温带气旋后影响辽宁时云雨微物理特征发生显著改变。少数学者根据当地常见天气环流进行分型对比研究,如 *Fernandez-Raga et al.(2017)*研究了西班牙莱昂降雨量最多的 5 种天气环流类型之间雨滴大小数量、*Gamma* 概率密度等差异及天气学成因,研究结果强调了在给定天气类型(天气环流)下研究雨滴谱特征的重要性;张庆池等(2022)通过淮北地区 4 种暴雨天气环流类型个例过程分类研究,指出淮北地区不同类型下暴雨微物理特征存在明显差异,其降水量级差异是由小雨滴和大雨滴对雨强贡献率存在差异造成的,并且进一步拟合得出 4 种天气类型的雷达 *Z-R* 关系。

降水雨滴谱分布变化还与降水类型(暴雨或非暴雨天气)、降水性质(对流或层云降水)有关。*Bringi et al.(2003)*分析了从近赤道(巴西)到海洋(夸贾林岛)再到大陆(佛罗里达州和科罗拉多州)等不同气候区的归一化 *Gamma* 形式雨滴谱参数可变性,提出海洋性对流降水和大陆性对流降水及其之间微物理特征差异;*Wen et al.(2016)*结合雨强、和雷达反射率垂直结构,将观测降雨分为对流型、层状和浅层降水类型,认为亚洲夏季风季节期间中国东部多发生以层状雨

为主降雨过程，但在降雨量累积方面以对流雨为主；Thurai et al.(2020)在对 2019 年飓风多里安的外部雨带进行雨滴谱特征分析时，发现外部雨带表现出副热带到中纬度大陆特征的层云雨带特征，即更高的 D_m 、亮带 Z_h 大值区等，并接近 Bringi 研究得出的层状雨线斜率；张哲等（2022）对“7.20”郑州极端暴雨的雨滴谱特征进行分析得出，在雨强最大时段雨滴 D_m 迅速增长，随后粒子数浓度也陡增，从而导致降水率的迅速增强，并且过程可能受到来自陆地和海洋的多种天气系统影响，造成“7.20”郑州特大暴雨的对流降水既不属于典型的大陆性对流降水，也不属于海洋性对流降水。

陕西地处西北内陆地区，锋面、低槽、低涡等多种天气系统共同作用易发生极端强降水或致灾暴雨，造成黄土高原、秦岭山区等地区滑坡、泥石流次生灾害频发，严重危害人民群众生命财产安全。因此如何准确分析陕西不同天气环流、天气类型带来的降水微物理特征差异，以及如何基于滴谱特征改进提高陕西定量估测降水的落区和量级准确率，具有非常重要的科研意义和应用价值。本文利用 2019-2022 年 4-9 月质控后雨滴谱观测资料，结合人工筛选出的所有降水过程，从降水滴谱总体特征到分类特征再到具体特征，研究了陕西不同天气环流降水的微物理特征，并进一步改进了定量降水估测业务 Z-R 关系。

2 数据与方法

2.1 雨滴谱数据收集与质控处理

本文使用的雨滴谱数据是通过布设在县级观测站的降水天气现象仪 OTT Parsivel² 观测设备连续采集得到的，可测粒子直径范围 0-22.4mm 共 32 个直径通道、粒子速度范围 0-26m s⁻¹ 共 32 个速度通道，标准采样时间和采样面积为 60s 和 54cm²。此外采用降水天气现象仪所在观测站点的雨量计逐小时降水量数据筛选降水天气过程。

Parsivel² 设备实际采集的降水粒子信息容易受到雨滴下落时自身误差（飞溅效应、边缘效应等）以及大气环境干扰（强风作用、昆虫影响等）影响，因此本文采用以下方法进行数据质控筛选：（1）考虑 Parsivel² 仪器灵敏度及低信噪比问题，去除 0.1 和 0.2mm 直径通道滴谱样本；（2）为避免出现因粒子数量不足导致的采样误差，去除该时刻观测雨滴总数小于 10 或反演雨强 < 0.1mm h⁻¹ 的样本；（3）考虑陕西绝大多数降水过程未出现直径 > 8mm 雨滴后，去除 8mm 以上样本；（4）为消除雨滴飞溅效应和边缘效应，采用 Brandes et al.(2002)直径-末速度经验关系对雨滴谱原始数据进行验证，去除超过经验曲线 ±60% 范围以外的样本；（5）由于 Jaffrain et al.(2011)提出 Parsivel² 仪器观测雨滴下落时存在边界效应，

对仪器采样面积 A 按照公式 $A=180\times(30-D/2)$ 进行修订，获取对应不同直径 D 粒子的有效采样面积。

通过上述方法对 2019-2022 年 4-9 月陕西 99 个滴谱观测站数据进行质量检验控制，筛除滴谱数据质控检验差的观测站点数据，最终保留 56 个数据质量良好的观测站的数据样本进行滴谱特征参数计算和统计分析。图 1 是渭南市大荔站 2019-2022 年多级质控后的雨滴观测直径 D 与下落末速度 V 、累积频次分布情况，可以看到经过质控处理后的大荔站雨滴 D 和 V 主要集中在 $0-3\text{mm}$ 和速度 $1-10\text{m s}^{-1}$ 区域内，散点累积频次占比超过 90%，并且基本符合 Brandes 经验曲线。文中采用的其他 55 个数据质量较好的站点观测降水 D - V 散点特征与大荔站数据特征相近。

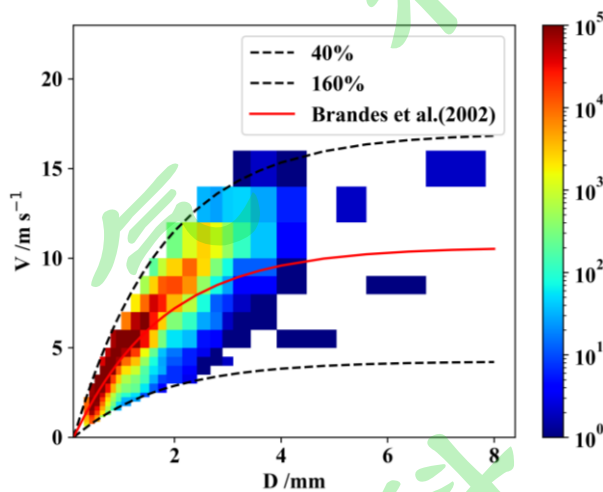


图 1 多级质控后的大荔站雨滴粒子直径 D (单位: mm) 与下落末速度 V (单位: m s^{-1}) 累积频次分布情况。(色阶代表粒子数量, 红色实线为 Brandes et al.(2002)粒子 D - V 经验关系曲线, 上下黑色虚线分别代表经验关系曲线 $\pm 60\%$ 边界曲线)

Fig. 1 The accumulated frequency distribution of Dali Station raindrop particle diameter D (unit: mm) and final falling velocity V (unit: m s^{-1}) after multi-level quality control. (the color scale represents the number of particles, the solid red line represents the Brandes et al. (2002) particle D - V empirical relationship curve, and the upper and lower black dotted lines represent the $\pm 60\%$ boundary curve of the empirical relationship curve respectively)

用于进行滴谱特征分析的雨滴谱特征参量包括不同直径雨滴数浓度 $N(D)(\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3})$ 、总雨滴数浓度 $N_t(\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3})$ 、质量加权平均直径 $D_m(\text{mm})$ 、标准化截距参数 $N_w(\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3})$ 、液态水含量 $\text{LWC}(\text{g m}^{-3})$ 、降水率 $R(\text{mm h}^{-1})$ 、单偏振雷达反射率因子 $Z(\text{mm}^6 \text{mm}^{-3})$ 等, 计算公式参考 Seela et al.(2022)和 Huang et al.(2021), 本文不再赘述。

2.2 天气环流分型与降水过程选取

根据前人研究成果(黄玉霞等, 2019; 白晓平等, 2016; 高维英, 2022)以及陕西省短期天气预报技术手册(杜继稳, 2007)等, 利用 EC 再分析资料及

MICAPS 探空观测资料,分析降水过程前期或发生期间 500hPa 至 850hPa 天气形势背景,将 2019-2022 年 4-9 月陕西所有降水天气过程归纳 5 类天气环流影响型,分别为低涡切变型、平直气流型、西北气流型、西南气流型和西风槽型。

各类天气环流类型的高低空系统配置如图 2 所示。①**低涡切变型**:过程 500hPa 副高中心偏东且强度较弱, 700hPa 或 850hPa 陕南南部受西南涡或气旋式涡旋东移影响,低涡东北部形成偏东风与偏南风切变线并带来大范围显著降水。②**平直气流型**:过程 500hPa 陕西上空气流平直且多为偏西风,700hPa 及以下受青藏高原东移或本地形成的低空切变线影响,局地对流活动剧烈,多带来分散性强降水。③**西北气流型**:过程受 500hPa 低槽后部或高压脊前部西北、偏北气流控制,700hPa 或 850hPa 以下受到西南暖湿气流或近地面偏东气流影响,易形成大范围上干下湿能量不稳定区并多形成分散对流性降水天气。④**西南气流型**:过程副高强盛并且脊线偏北,陕西受副高西侧外围的西南气流控制,水汽和不稳定能量供应充沛,与近地面东路冷空气共同作用,多带来连续性降水天气。⑤**西风槽型**:过程 500hPa 青藏高原上低槽系统东移受副高阻挡,陕西处于低槽前部,700hPa 以下偏南气流在陕西上空能够维持较长时间,该类型天气是陕西大范围降水或暴雨常见类型,常出现区域性暴雨局地大暴雨。

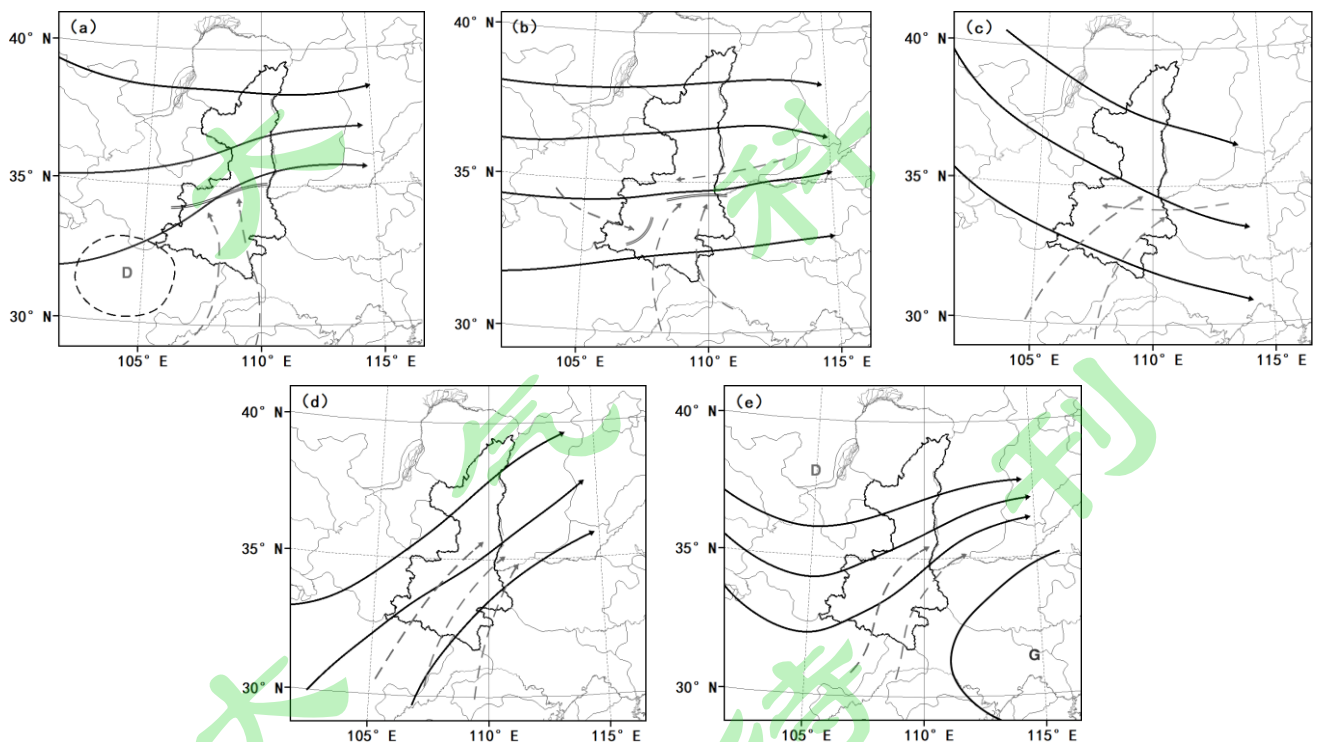


图 2 影响陕西地区降水过程的 5 种高低空天气环流形势背景。(a.低涡切变型,b.平直气流型, c.西北气流型,d.西南气流型,e.西风槽型; ———代表 500hPa 盛行气流, - - - 代表 700hPa 以下盛行气流, ===代表低空切变线, D 代表低涡或低压系统, G 代表高压系统)

Fig. 2 The high and low altitude background of five weather circulation patterns affecting precipitation processes in Shaanxi Province (a. low vortex shear type, b. flat straight airflow type, c. northwest airflow type, d. southwest airflow type, e. westerly trough type; $\longrightarrow$ represents 500hPa prevailing airflow, $-\cdots\rightarrow$ represents airflow below 700hPa, $==$ represents low altitude shear line, D represents low vortex or low-pressure system, and G represents high-pressure system)

陕西 2019-2022 年 4-9 月所有降水天气过程选取参考陕西省短期天气预报技术手册降水过程标准：①降水区位于陕西（33.5°N-35.3°N、108°E-110°E）；②过程小时平均面雨量超过 1mm 且过程最大雨强超过 1mm h⁻¹；③降水持续时间在 2 小时以上且降水间歇期小于 6 小时。所有暴雨天气过程选取参考中国气象局暴雨定义标准，即任意一个及以上观测站出现过去 24 小时累积降水量超过 50mm。

选取结果显示 2019-2022 年 4-9 月陕西共出现 116 次降水天气过程，各类型的降水天气过程（1min 滴谱样本数）和暴雨天气过程（1min 滴谱样本数）分别为：低涡切变型 20 次（743928 个）/16 次（101227 个）、平直气流型 17 次（327762 个）/4 次（22214 个）、西北气流型 20 次（196638 个）/4 次（12996 个）、西南气流型 15 次（768409 个）/13 次（140867 个）、西风槽型 44 次（1216752 个）/31 次（86828 个）。进一步综合应用基于雷达回波的对流核识别分型方法(Qi et al.,2013)和基于雨滴谱资料的反演降水率标准差比较方法 (Bringi et al.,2003; 张哲等, 2022) 选取了上述降水天气过程（包括暴雨天气过程和非暴雨天气过程）的对流降水发生时段。

3 雨滴谱特征统计分析

3.1 不同环流降水滴谱总体特征

按照 6 个等级雨强对陕西降水进行分类，即 $R \leq 1\text{mm h}^{-1}$ 、 $1 < R \leq 2\text{mm h}^{-1}$ 、 $2 < R \leq 5\text{mm h}^{-1}$ 、 $5 < R \leq 10\text{mm h}^{-1}$ 、 $10 < R \leq 30\text{mm h}^{-1}$ 、 $R > 30\text{mm h}^{-1}$ 。图 3 是 5 种天气环流不同雨强下的逐小时降水样本频率分布情况，结果显示除西南气流型以外的其他 4 类环流天气下，各等级雨强的逐小时样本数量随降雨率增大而逐渐减小，尤其雨强超过 5mm h⁻¹ 后样本数量急剧下降， $R > 5\text{mm h}^{-1}$ 的样本数仅占总样本数 5%-7%， $R > 30\text{mm h}^{-1}$ 只占 0.1%。对总降水量贡献率显示，各环流类型 $R > 5\text{mm h}^{-1}$ 的降水贡献显著，贡献率普遍超过 25%，其中平直气流型和西北气流型贡献率达到 40.5%和 41%。总体而言 5 种环流类型天气主要是以 $R < 5\text{mm h}^{-1}$ 的降水为主，各环流不同雨强的降水对总雨量贡献度差异显著，超过 5mm h⁻¹ 的强降水出现频次相对较少，但对总降水量的增幅贡献非常大。

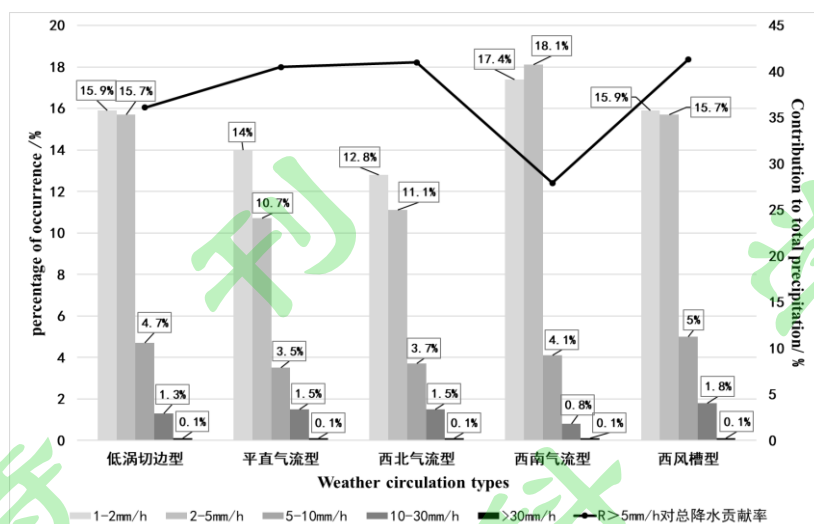


图 3 5 种天气环流影响型在不同雨强下的逐小时降水样本频率分布与总降水贡献率分布（直方图代表降水样本频率分布，黑色折线代表雨强 $R > 5mm h^{-1}$ 对总降水贡献率大小）

Fig. 3 Hourly precipitation sample frequency distribution and total precipitation contribution rate distribution of five weather circulation influence patterns under different rainfall intensities (histogram represents precipitation sample frequency distribution, black line represents the contribution rate of rainfall rate $R > 5mm h^{-1}$ to total precipitation)

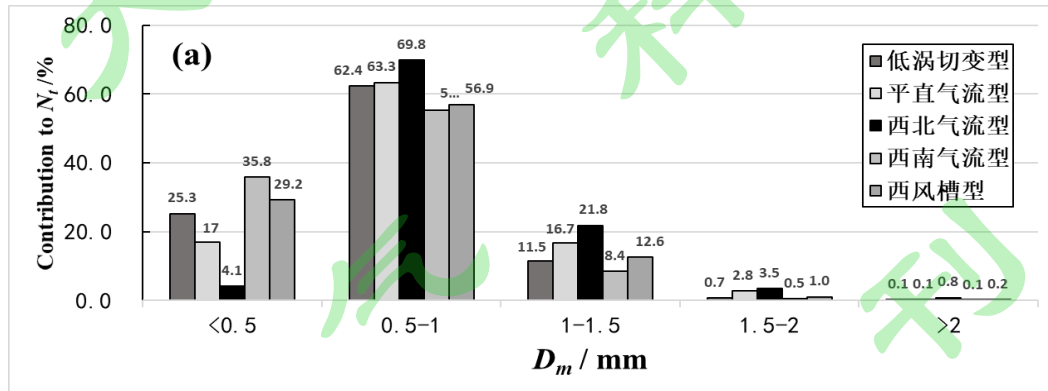
利用雨滴谱参量（总雨滴数浓度 N_t 、质量加权平均直径 D_m 、液态水含量 LWC 、降雨率 R 等）进行降水微物理特征对比分析。表 1 显示不同环流天气下各项滴谱参量平均值和最大值表现出明显差异。首先在平均降雨率 R 接近情况下，西南气流型降水雨滴的数浓度 N_t 平均值大于西北气流型，数值相差近 2.5 倍，而西北气流型降水的 N_t 最大值反过来超过西南气流型， R 最大达到 $178.84mm h^{-1}$ ，表明西北气流型降水总体偏少，但多出现高浓度、大雨滴的短时强降水天气，西南气流型降水多出现数量多的小雨滴。其他 3 类环流中平直气流型降水表现出更多的中浓度、大雨滴特征，低涡切变型和西风槽型各滴谱参量的平均值接近。从最大值上可以看出，低涡切变型、平直气流型和西北气流型表现出随着 N_t 、 D_m 和 LWC 最大值变大、 R 最大值对应增加；西南气流型虽然 N_t 最大值远超过西风槽型，但雨滴 D_m 和 LWC 最大值偏小， R 最大值仅为 $65.15mm h^{-1}$ ，这两类天气最大值对比结果表明西风槽型短时强降水发生时，虽然雨滴数量比西南气流型小，但更容易形成液态水含量较高的雨滴，天气极端性更强。

表 1 5 种天气环流类型降水滴谱参量平均特征及极值特征对比情况

Table 1 Comparison of average and extreme characteristics of precipitation DSD parameters for five weather circulation types

	N_t		D_m		LWC		R	
	Average	Max	Average	Max	Average	Max	Average	Max
低涡切变型	1632.1	28318.4	0.824	7.634	0.186	4.734	2.401	93.42
平直气流型	1143.3	18442.2	0.901	7.703	0.154	4.357	1.843	85.79
西北气流型	983.5	32547.5	0.963	7.638	0.132	8.923	1.974	178.84
西南气流型	2174.6	27438.2	0.703	7.244	0.211	3.361	2.037	64.15
西风槽型	1721.8	21748.1	0.858	7.568	0.176	5.247	2.296	106.27

从不同直径区间的雨滴对降水数浓度 N_t 和降雨率 R 的贡献情况（图 4）可以看出，无论受哪个环流天气影响，数浓度 N_t 和降雨率 R 贡献最多的雨滴直径 D_m 普遍在 $1mm$ 以下，其中西南气流型对 R 贡献率达到 95.1%，西北气流型仅为 58.1%。当雨滴直径 $>1mm$ 时，西北气流型降水对 N_t 的贡献率和对 R 贡献率分别达到 26.1% 和 41.8%，远高于低涡切变型、西南气流型和西风槽型，而平直气流型降水与西北气流型特征相似， $1mm$ 以上雨滴对 N_t 的贡献率（19.6%）比西北气流型略低，对 R 贡献度占比也达到 26.2%。上述特征进一步表明虽然陕西降水天气中 $1mm$ 以下的小雨滴占主导地位，但西北气流型和平直气流型 $1mm$ 以上的中、大雨滴数量急剧增多，并且对降雨率有明显促进作用。综上所述，各环流之间不同强度的降水对过程总雨量贡献度差异明显，不同直径雨滴对数浓度及降雨率贡献程度不同是造成差异的主要原因。



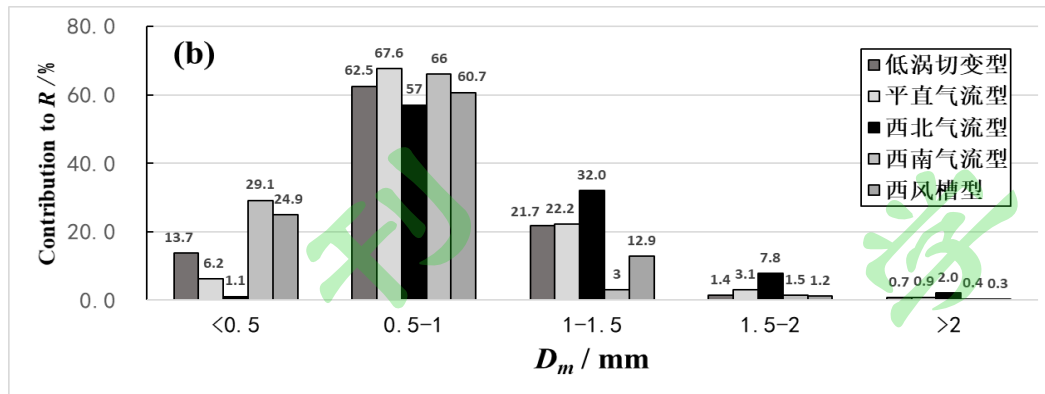


图 4 不同粒子直径 D_m 区间雨滴对降水总数浓度 N_t (a)和降雨率 R (b)的贡献率分布情况
Fig. 4 Distribution of contribution rates of raindrops with different particle size D_m intervals to total precipitation concentration N_t (a) and precipitation rate R (b).

3.2 暴雨降水与非暴雨降水滴谱特征差异

表 2 是 5 种环流暴雨和非暴雨降水的滴谱参量特征对比情况,整体来看在不同环流天气下,暴雨与非暴雨降水的滴谱参量平均值差别显著。西北气流型暴雨和非暴雨降水的雨滴 N_t 平均值相差 6 倍以上, D_m 相差近 1 倍,特别是暴雨天气 R 接近非暴雨天气 10 倍。平直气流型与西北气流型的暴雨天气滴谱特征类似,非暴雨天气雨滴 N_t 、 D_m 和 LWC 偏大。西南气流型暴雨和非暴雨降水的滴谱参数差距较小,与其他类型相比降水 N_t 均最大、平均 D_m 均最小。低涡切变型和西风槽型的暴雨天气雨滴 N_t 比非暴雨偏多 1.2-1.5 倍, R 相差达 2.5-3 倍。总体来看各环流类型暴雨天气各项滴谱参量变化普遍高于非暴雨天气,西北气流型降水对比差异最明显,西南气流型降水差异最小,并且从降雨率对比特征可以看出,各类型暴雨天气和非暴雨天气降雨率 R 差别越大, N_t 和 D_m 差别越明显,这说明高雨强降水对降水微物理参量有显著增幅作用,增幅作用最明显的是雨滴数浓度和直径变化。

表 2 暴雨天气过程和非暴雨天气过程降水滴谱参量平均特征对比情况
Table 2 Comparison of average characteristics of precipitation DSD parameters between rainstorm weather process and non-rainstorm weather process

	N_t	D_m	LWC	R
	暴雨/非暴雨	暴雨/非暴雨	暴雨/非暴雨	暴雨/非暴雨
低涡切变型	2039.3/1439.3	0.896/0.781	0.22/0.16	3.2/1.8
平直气流型	1484.6/974.8	1.041/0.807	0.19/0.12	3.0/0.9
西北气流型	1963.4/314.2	1.145/0.797	0.17/0.11	3.8/0.4
西南气流型	2248.5/2100.7	0.732/0.714	0.24/0.19	2.6/1.8
西风槽型	1994.1/1695.5	0.891/0.863	0.19/0.17	3.6/1.2

进一步研究暴雨和非暴雨天气雨滴数浓度和含水量随直径变化的差异性,本文计算了 5 种环流类型暴雨和非暴雨降水在不同雨强级别的 D_m - $\lg N_w$ 散点分布。

图 5 显示陕西暴雨与非暴雨降水雨滴 N_w 随直径增加的变化特征有显著差别，暴雨天气降水 D_m 和 lgN_w 区间分别为 0.5-2.5mm 和 2.5-6mm³mm⁻¹，非暴雨降水分别为 0.3-3mm 和 1.5-6.5mm³mm⁻¹。各环流类型暴雨降水在雨强 $R < 5mm\ h^{-1}$ 时， D_m - lgN_w 散点密集区域宽度明显小于非暴雨降水，并且 lgN_w 随着 D_m 的增加呈下降趋势及明显离散趋势；而当雨强 $R > 5mm\ h^{-1}$ 、随雨强增大时，暴雨和非暴雨降水 D_m 和 lgN_w 散点分布都趋于“收缩”，并且散点形状、密集区、离散区等分布较为一致。特别是西北气流型在 $R < 5mm\ h^{-1}$ 时暴雨降水大部分雨滴直径 $D_m < 1.5mm$ ， $R > 5mm\ h^{-1}$ 时暴雨降水比非暴雨降水的散点样本数更多、分布更集中。结合样本百分比表明，各环流类型暴雨天气雨强 $> 5mm\ h^{-1}$ 的对流降水雨滴数量比例明显高于非暴雨天气，暴雨天气雨强 $> 5mm\ h^{-1}$ 样本比例普遍超过 20%，而非暴雨天气雨强 $> 5mm\ h^{-1}$ 样本比例最大仅为 9.3%。不同环流特征对比显示平直气流型和西北气流型暴雨降水的 D_m - lgN_w 宽度明显偏小，西南气流型暴雨和非暴雨降水雨强超过 30mm h^{-1} 的散点比例小于其他类型，低涡切变型和西风槽型非暴雨降水 D_m 和 N_w 散点区域上下限更高。

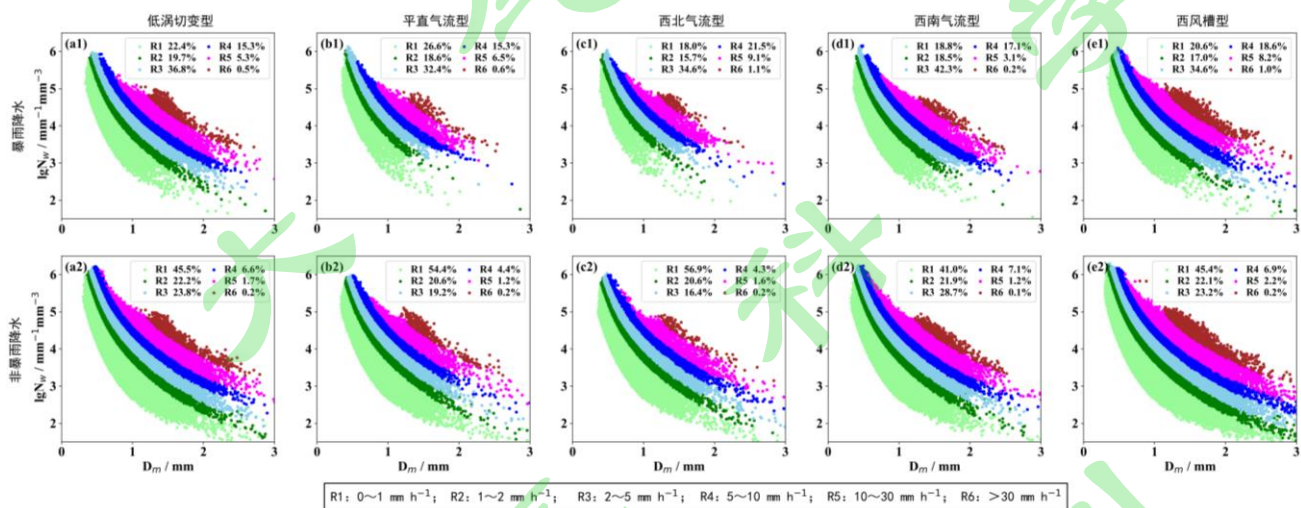


图 5 5 种环流类型暴雨和非暴雨降水不同雨强级别 D_m - lgN_w 散点分布。(a-e: 低涡切变型、平直气流型、西北气流型、西南气流型、西风槽型，图例为不同雨强的样本数量占比情况)
 Fig. 5 Distribution of D_m - lgN_w scatter points with different rainfall intensity levels in five circulation types of rainstorm and non-rainstorm weather. (a-e respectively represents low vortex shear type, flat straight airflow type, northwest airflow type, southwest airflow type, westerly trough type; the legend shows the proportion of sample size with different rainfall intensities)

3.3 对流降水与层云降水滴谱特征差异

3.1 和 3.2 节逐一分析了陕西汛期 5 类环流降水微物理总体特征，以及其中暴雨降水和非暴雨降水的滴谱特征差异。本节按照降水性质进一步深入讨论 5 类环流过程滴谱特征差异，具体分为：①暴雨-对流降水；②暴雨-层云降水；③非暴雨-对流降水；④非暴雨-层云降水。首先统计不同环流的 4 类降水雨滴

D_m - lgN_w 分布特征, 结果显示 5 种环流类型暴雨和非暴雨天气的对流降水集中区域为 D_m (0.8-1.3mm)、 lgN_w (3.9-5.0 $mm^{-3}mm^{-1}$), 层云降水集中区域为 D_m (0.4-1.1mm)、 lgN_w (4-5.7 $mm^{-3}mm^{-1}$), 不同之处是各类型降水散点平均值 (图 6 白色点) 及大值区位置有所差别。

图 6 为 5 种环流的对流和层云降水 D_m - lgN_w 散点空间及数量百分比分布, 图中数量百分比>1%的散点集中区基本分布在 *Bringi* 等人 (2003) 统计得出的层云降水与对流降水分界线 (红虚线) 两侧。大部分天气环流类型降水均较符合 *Bringi* 提出的对流和层云降水区域 (即 D_m - lgN_w 大值区位于红虚线左下侧为层云性降水、位于右上侧为对流性降水)。西北气流型与其他 4 类环流有所不同, 暴雨-对流降水 (图 6c1)、非暴雨-层云降水 (图 6c4) 与 *Bringi* 理论吻合, 但暴雨-层云降水 (图 6c2) 表现出偏向 *Bringi* 对流降水区域, 非暴雨-对流降水 (图 6c3) 表现出偏向 *Bringi* 层云降水区域。图 6c2 显示西北气流型暴雨-层云降水的 D_m - lgN_w 平均值中心很明显位于红虚线以上, 大部分散点趋于尺寸大、浓度高区域分布, 图 6c3 显示非暴雨-对流降水大多数雨滴直径偏小、浓度偏低, 这说明在西北气流型天气下发生暴雨的对流活动更加剧烈, 即使是层云降水也表现出大雨滴、高浓度的对流降水特征, 而非暴雨期间降水活动平缓, 对流活动发展高度低, 大部分对流降水更接近雨滴偏小、数量相对偏低的层云降水特征。

按照 *Bringi* 等人 (2003) 定义对流降水分为海洋性对流降水和大陆性对流降水, 陕西各环流对流降水散点大部分位于海洋性对流降水区域 (黑框) 左侧, 而且与昭苏 (*Jiang et al., 2021*)、珠海 (*Zhang et al., 2019*)、郑州 (张哲等, 2022) 等内陆地区相比, 各环流对流降水 D_m - lgN_w 平均值 (白点) 偏左上位置, 相对与帕劳岛 (*Seela et al., 2017*) 位置更接近。这表明陕西各环流类型暴雨和非暴雨对流降水主要偏向于海洋性对流降水特征, D_m 偏小、 N_w 偏大。值得注意的是, 平直气流型 (图 6b1、b3) 和西北气流型 (图 6c1、c3) 有更多的对流降水散点落在海洋性对流降水区域和大陆性对流降水区域之间, 这进一步验证了该类环流更容易发生对流活动剧烈、雨滴急速增长的短历时极端强降水。

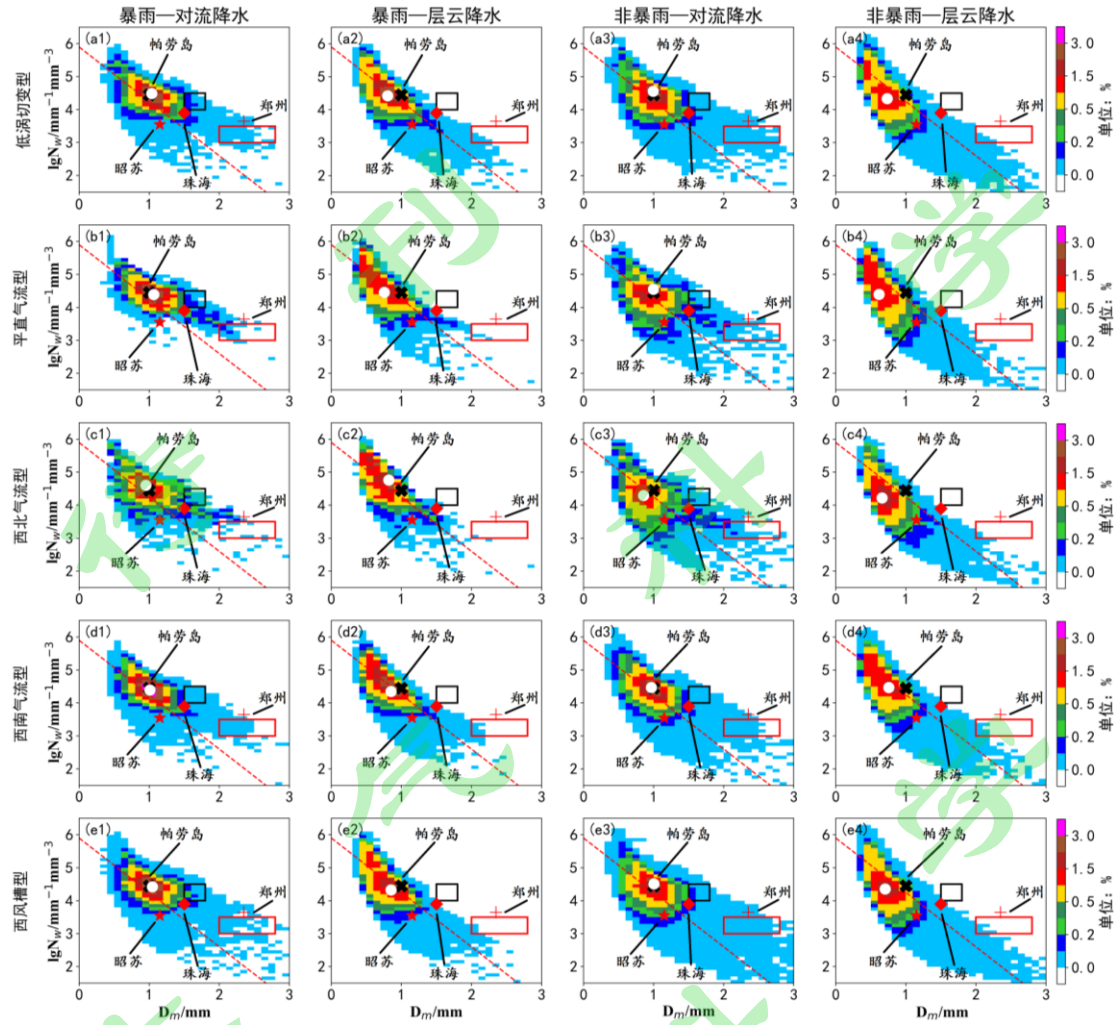


图 6 5 种环流类型暴雨和非暴雨天气的对流降水、层云降水 D_m-lgN_w 散点空间及数量百分比分布。(色阶代表不同雨强的样本数量百分比, 白点代表本文各类型天气 D_m-lgN_w 散点平均值点, 黑色叉形、红色星形、红色菱形、红色十形分别代表帕劳岛 (Seela et al., 2017)、昭苏 (Jiang et al., 2021)、珠海 (Zhang et al., 2019)、郑州 (张哲等, 2022) 地区 D_m-lgN_w 平均值点; 黑框、红框和红虚线分别代表 Brongi 等统计得出的海洋性对流降水区域、大陆性对流降水区域和层云降水 D_m-lgN_w 关系线)

Fig. 6 The spatial and quantitative percentage distribution of convective precipitation and stratiform precipitation D_m-lgN_w in rainstorm and non-rainstorm weather of five circulation types. (The color scale represents the percentage of sample size with different rainfall intensities, the white dot represents the scattered average point of D_m-lgN_w for each type of weather in this article, and the black cross, red star, red diamond, and red cross respectively represent the average point of D_m-lgN_w in the areas of Palau Island (Seela et al., 2017), Zhaosu (Jiang et al., 2021), Zhuhai (Zhang et al., 2019) and Zhengzhou (Zhang et al., 2022); the black box, red box, and red dotted line respectively represent the marine convective precipitation area, continental convective precipitation area, and the boundary line between stratiform precipitation and convective precipitation)

4 讨论与应用

4.1 滴谱特征差异原因

从上述分析结果来看, 5 类环流天气的降水微物理特征差异显著, 而差异来源于不同天气环流下水汽能量输送、辐合上升运动等动力热力条件不一致, 直接影响到水凝物粒子数量、碰并破碎作用及下落至地面的雨滴直径等 (Hu et al., 1995; Li et al., 2022)。平直气流型 (图 2b) 和西北气流型 (图 2c) 高空受偏西或西北气流影响抑制了对流活动向高层发生, 但暴雨或强降水发生时, 地面暖湿气流与冷空气交汇作用增强并形成辐合切变线或中小尺度对流系统后, 对流抑制状态被破坏更容易形成强烈上升运动。低涡切变型 (图 2a)、西南气流型 (图 2d) 和西风槽型 (图 2e) 对流抑制作用较弱, 配合充沛水汽输送有利于大范围降水发生, 但由于中低层大气状态偏暖偏湿, 造成水凝物粒子的冰相过程减少、碰并作用减弱, 不易形成大雨滴粒子。根据多年降雨水汽能量要素平均值统计结果 (表略) 显示, 平直气流型和西北气流型过程对流有效位能、 $850hPa$ 比湿平均值和上升速度中心值分别为 $598\sim 742J\ kg^{-1}$ 、 $9\sim 11g\ kg^{-1}$ 和 $-1.7\sim -2.3Pa\ s^{-1}$, 低涡切变型、西南气流型和西风槽型分别为 $569\sim 623J\ kg^{-1}$ 、 $12\sim 14g\ kg^{-1}$ 和 $-0.5\sim -1.4Pa\ s^{-1}$ 。前 2 类环流天气能量条件和上升运动有利于低层水汽输送到高层形成大雨滴, 但水汽条件较差; 后 3 类对流活动较弱, 但充沛水汽上升凝结成大量小雨滴即可形强降水。

以 2021 年 4 月和 7 月两次极端暴雨过程为例 (李明娟等, 2023; 赵强等, 2022)。2021 年 7 月 17 日在高空西北气流背景下, 关中地区前期有弱降水形成地面高温高湿区, 20 时开始暴雨区 $850hPa$ 以下比湿增大至 $16\ g\ kg^{-1}$, 最大上升速度达到 $1.8Pa\ s^{-1}$, 假相当位温 θ_{se} 维持在 $348K$ 以上, 低层冷空气触发中尺度对流系统形成突发性强降水, 对流活动强 (图 7a)、雨强大 ($64.9mm\ h^{-1}$)、持续时间短 ($4\sim 5h$)。2021 年 4 月 23 日陕南上空受为低涡切变型环流影响, 过程暴雨位于低涡东北部的强烈斜升上升运动区, 最大上升中心最大值可达 $-1.6Pa\ s^{-1}$, 但位置偏高 ($500hPa$ 附近), 低层偏南低空急流为暴雨发生维持提供充沛水汽, 暴雨区比湿最大达到 $9g\ kg^{-1}$, 能量方面 $850hPa$ 暴雨区 θ_{se} 等值线密集, 但相对“7.17”过程数值偏小, 基本在 $332K$ 以下, 因此过程对流活动较弱 (图 7b)、雨强偏小 ($12.7mm\ h^{-1}$)、持续时间长 ($20h$)。计算两次过程降水粒子平均 D_m 、平均 N_t , 2021 年 7 月 17 日西北气流型降水过程期间分别达到 $1.748mm$ 和 $1499mm^3mm^{-1}$, 而 2021 年 4 月 23 日低涡切变型降水过程仅为 $1.183mm$ 和 $822.6mm^3mm^{-1}$ 。虽然两次过程 24 小时累积降水量均超过 $100mm$, 分别达到了 $148.8mm$ 和 $116.9mm$, 但

两次过程暴雨回波强度和雨滴特征完全不同，因此降水率反演时需要考虑滴谱特征差异进行分类讨论。

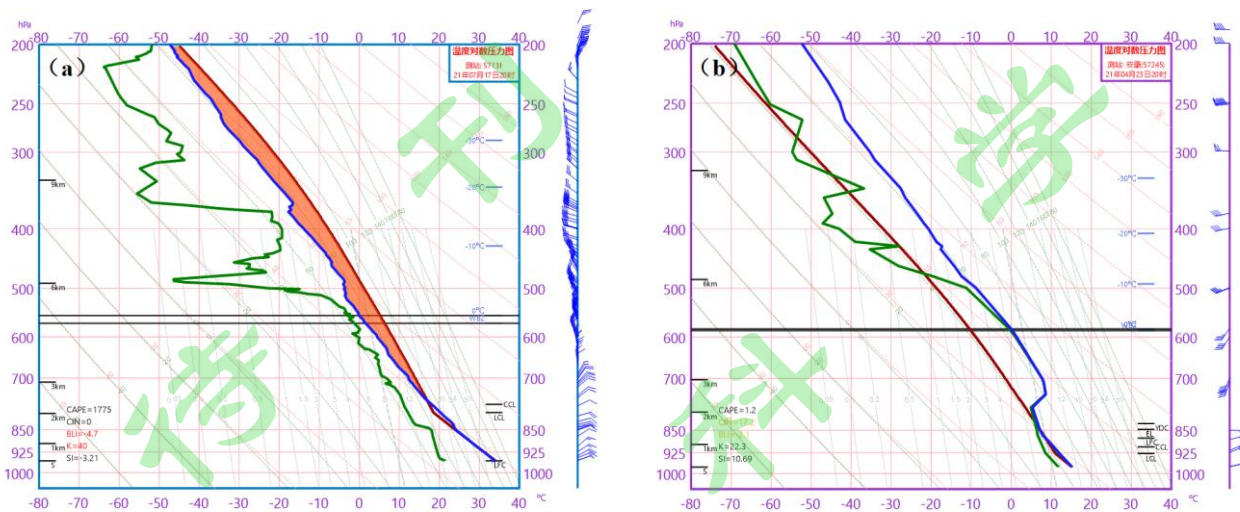


图 7 西安站和安康站 T - $\ln p$ 探空图 (a. 2021 年 7 月 17 日 20 时 b. 2021 年 4 月 23 日 20 时)

Fig. 7 The T - $\ln p$ Map of Xi'an Station and Ankang Station (a. July 17, 2021 at 20:00 b. April 23, 2021 at 20:00)

4.2 Z-R 关系改进

雨滴谱资料可以用于计算单偏振雷达反射率因子 Z 和降水率 R ，并拟合得出 Z - R 关系(Leighton et al.,2022; Zhang et al.,2001)。表 3 给出了按照 $Z=A \times R^b$ 得出的各环流类型的 Z - R 拟合关系式以及 3.3 节提到的昭苏、珠海和帕劳岛地区基于雨滴谱改进的 Z - R 关系。与昭苏、珠海和帕劳岛三个地区 Z - R 关系相比，陕西不同天气类型降水 Z - R 关系的拟合系数 A 数值偏低，对流降水系数 b 偏高。这一方面是由于昭苏等地区研究时段为 7-8 月，而本文研究时段为 4-9 月，存在更多弱对流降水样本；另一方面是因为本研究对降水天气进行细分，相比昭苏等地研究得出的单一 Z - R 拟合关系，最大程度避免了某类天气估测降水量被低估的可能。图 8 降水 Z - R 散点分布显示可以看出，与中纬度对流降水 $Z=300R^{1.4}$ (Fulton et al,1998)经验关系式相比，各环流类型全部位于经验关系式下方，说明在相同回波强度下，采用经验关系式会低估本地降水率。在低涡切变型、西南气流型和西风槽型暴雨和非暴雨天气中，当反射率因子 Z 数值减小（增大）时，对流降水 Z - R 曲线趋向位于层云降水的下方（上方），这表明在 Z 相同下，随着 Z 减小（增大），对流降水 R 估测值逐渐大于（小于）层云降水。平直气流型和西北气流型的对流降水 Z - R 曲线基本都位于层云降水上方。总的来看不同环流对流降水的拟合降水率 R 最大不超过 100mm h^{-1} ，层云降水 R 最大不超过 20mm h^{-1} ，在相同 Z 情况下，针对不同类型天气采用分类 Z - R 关系式估测的 R 数值更接近与实况雨强，而直接使用单一经验关系式会严重低估各类天气估测降雨率大小。

表 3 各环流类型不同性质降水的 Z-R 拟合关系式

Table 3 The Z-R fitting relationships for precipitation with different properties of different circulation types

	暴雨天气		非暴雨天气	
	对流降水	层云降水	对流降水	层云降水
低涡切变型	$Z=69.29R^{1.61}$	$Z=86.45R^{1.51}$	$Z=60.33R^{1.67}$	$Z=87.10R^{1.42}$
平直气流型	$Z=102.23R^{1.49}$	$Z=55.13R^{1.86}$	$Z=119.15R^{1.49}$	$Z=71.78R^{1.57}$
西北气流型	$Z=97.05R^{1.49}$	$Z=68.56R^{1.49}$	$Z=157.05R^{1.43}$	$Z=126.48R^{1.36}$
西南气流型	$Z=48.77R^{1.73}$	$Z=57.10R^{1.72}$	$Z=59.99R^{1.68}$	$Z=62.56R^{1.61}$
西风槽型	$Z=70.75R^{1.61}$	$Z=83.85R^{1.46}$	$Z=87.17R^{1.56}$	$Z=99.03R^{1.34}$
昭苏	$Z=268.54R^{1.45}$ (Jiang et al.,2021)			
珠海	$Z=498R^{1.3}$ (Zhang et al.,2019)			
帕劳岛	对流降水: $Z=163.2R^{1.41}$ (Seela et al.,2017)			
	层云降水: $Z=226.6R^{1.39}$ (Seela et al.,2017)			

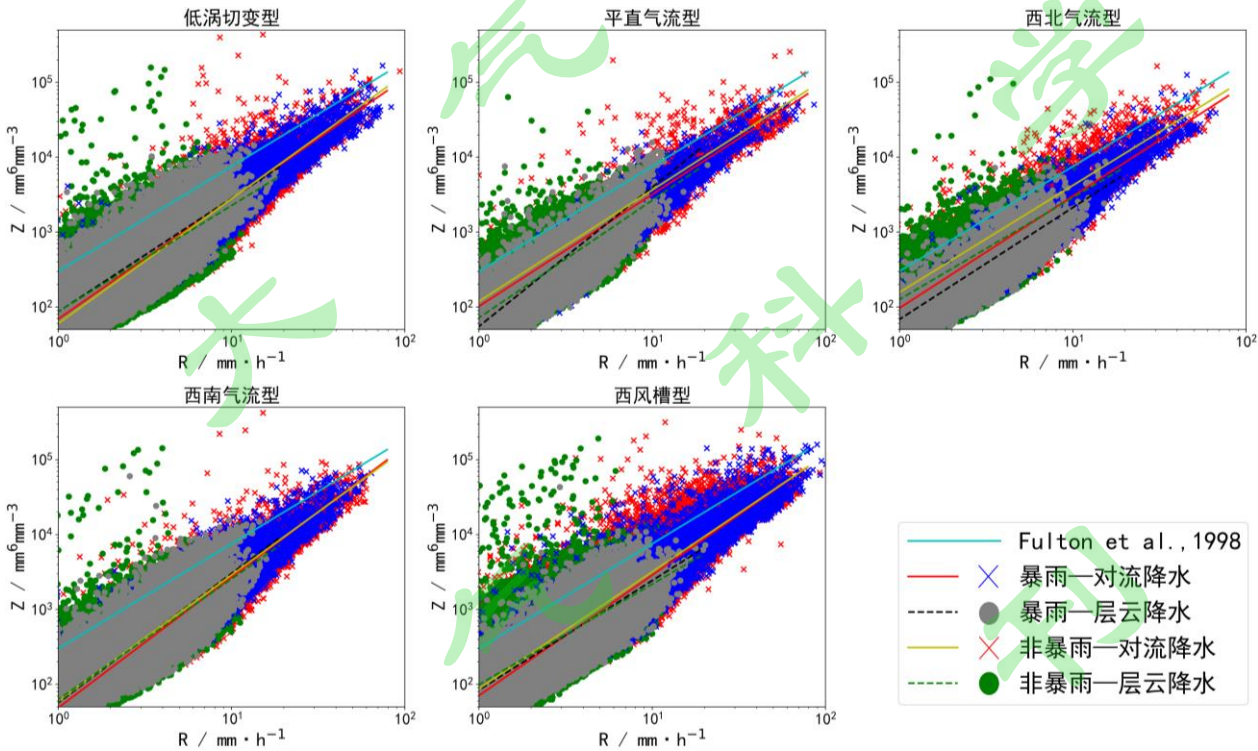


图 8 5 种环流类型暴雨和非暴雨天气的对流降水与层云降水 Z-R 散点分布及拟合曲线。(青色实线为 Fulton et al.(1998)拟合得出的经验 Z-R 关系式)

Fig. 8 The Z-R scatter distribution and fitting curve of convective precipitation and stratiform precipitation in five circulation types of rainstorm and non-rainstorm weather. (The solid cyan line is the empirical Z-R relationship obtained by Fulton et al. (1998) fitting.)

5 结论

本文利用 2019-2022 年 4-9 月陕西汛期逐分钟质控后的雨滴谱观测资料, 分析研究了陕西地区低涡切变型、平直气流型、西北气流型、西南气流型和西风槽型 5 种环流类型下降降水微物理总体特征、暴雨过程和非暴雨过程滴谱特征差异以及对流降水和层云降水滴谱特征差异, 最后基于上述滴谱特征结果统计优化拟合了陕西各环流降水的 $Z-R$ 估测降水关系式。主要结论如下:

(1) 5 类环流天气以雨强 $R < 5 \text{ mm h}^{-1}$ 的降水为主, 超过 5 mm h^{-1} 强降水发生频次相对较少, 但对总降水量的增幅贡献明显, 并且各环流不同雨强降水对总雨量的贡献差异显著。不同环流降水滴谱总体特征显示西北气流型降水粒子偏少, 多为高浓度的大雨滴, 西南气流型降水多为数量多、含水量高的小雨滴。平直气流型与西北气流型表现出较高浓度大雨滴特征。低涡切变型和西风槽型降水滴谱平均特征接近、极值特征差异明显。不同直径雨滴的数浓度及降雨率差异是造成总雨量不同的主要原因, 而数浓度和对降雨率贡献最多是 $0.5\text{-}1 \text{ mm}$ 直径区间的雨滴。

(2) 各环流类型暴雨降水和非暴雨降水的滴谱特征差异进一步增大, 西北气流型降水差异最明显, 高雨强降水对各滴谱参量有明显增幅作用, 其中雨滴数浓度和直径变化表现最显著。暴雨天气 $D_m\text{-}lgN_w$ 区间为 $0.5\text{-}2.5 \text{ mm}$ 、 $2.5\text{-}6 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-1}$, 非暴雨天气为 $0.3\text{-}3 \text{ mm}$ 、 $1.5\text{-}6.5 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-1}$, $R=0.5 \text{ mm h}^{-1}$ 是各环流降水 $D_m\text{-}lgN_w$ 分布差异的雨强分界线。所有环流暴雨天气雨强 $> 5 \text{ mm h}^{-1}$ 的对流降水雨滴数量明显高于非暴雨降水, 暴雨天气中西北气流型的对流降水比例最高, 非暴雨天气中西风槽型的对流降水比例最高。

(3) 5 类环流对流降水 $D_m\text{-}lgN_w$ 集中区域为 $0.8\text{-}1.3 \text{ mm}$ 、 $3.9\text{-}5.0 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-1}$, 层云降水位 $0.4\text{-}1.1 \text{ mm}$ 、 $4\text{-}5.7 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-1}$, 不同之处在于各环流类型降水散点的平均值及大值区位置不同。低涡切变型、平直气流型、西南气流型和西风槽型的对流降水和层云降水符合 *Bringi* 理论对流和层云降水区域。其他几类环流相比西北气流型暴雨天气的层云降水活动偏弱、非暴雨天气的对流降水活动偏强。陕西各环流类型对流降水大部分偏向于海洋性对流降水特征, 少数具有大陆性对流降水特征的对流降水发生在平直气流型和西北气流型, 这与昭苏等内陆地区和珠海等沿海地区均表现不同。

(4) 通过 5 种环流形势及气象要素对比, 发现平直气流型和西北气流型动力、热力条件有利于低层水汽输送到高层形成大雨滴, 但水汽条件较差造成水凝粒子数浓度偏低。低涡切变型、西南气流型和西风槽型对流活动相对较弱, 但充

沛水汽供应并抬升凝结成小雨滴即可形成强降水。基于雨滴谱拟合得出的各类型降水 $Z-R$ 关系显示, 相对于 $Z=300R^{1.4}$ 等经验关系, 分类降水 $Z-R$ 关系的拟合系数 A 偏低、对流降水系数 b 偏高, 如果采用经验关系会严重低估陕西雷达估测降水率。

参考文献 (References)

- 白晓平, 王式功, 赵璐, 等. 2016. 西北地区东部短时强降水概念模型[J]. 高原气象, 35(5): 1248-1256. Bai Xiaoping, Wang Shigong, Zhao Lu, et al. 2016. Conceptual Models of Short-Time Heavy Rainfall in the East of Northwest China. Plateau Meteorology. 35(5): 1248-1256. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00102.
- Brandes E A, Zhang G, Vivekanandan J. 2002. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment[J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 41(6): 674-685. doi:10.1175/1520-0450(2002)041<0674:EIREWA>2.0.CO;2
- Brandes E A, Zhang G, Vivekanandan J. 2003. An evaluation of a drop distribution-based polarimetric radar rainfall estimator[J]. J. Appl. Meteor., 42(5): 652-660. doi:10.1175/1520-0450(2003)042<0652:AEOADD>2.0.CO;2
- 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:RSDIDC>2.0.CO;2
- Chen B, Yang J, Pu J. 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in eastern China[J]. J. Meteorol. Soc. Japan, 91(2): 215-227. doi:10.2151/jmsj.2013-208
- Chen B, Wang J, Gong D. 2016. Raindrop size distribution in a midlatitude continental squall line measured by Thies optical disdrometers over East China[J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 55(3): 621-634. doi:10.1175/JAMC-D-15-0127.1
- 杜继稳. 2007. 陕西省短期天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 71pp. Du Jiwen. 2007. Shaanxi Province Short Range Weather Forecast Technical Manual (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 71pp.
- Fernandez-Raga M, Castro A, Marcos E, et al. 2017. Weather types and rainfall microstructure in Leon, Spain[J]. Int. J. Climatol., 37(4): 1834-1842. doi:10.1002/joc.4816
- Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al. 1998. The WSR-88D rainfall algorithm[J]. Wea. Forecasting, 13(2): 377-395. doi:10.1175/1520-0434(1998)013<0377:TWRA>2.0.CO;2
- 高维英. 2022. 弱天气系统下陕西暖区暴雨分型及其环境场特征[J]. 陕西气象, 344(06): 1-6. Gao Weiying. 2022. Typing of rainstorm in Shaanxi Warm Region under Weak Weather System and Its Environmental Field Characteristics[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 344(06): 1-6. doi:10.3969/j.issn.1006-4354.2022.06.001
- 郭飞燕, 刁秀广, 马艳, 等. 2023. 山东一次飑线双偏振结构与地面降水滴谱特征分析[J]. 气象学报, 81(02): 328-339. Guo Feiyan, Diao Xiuguang, Ma Yan, et al. 2023. Characteristics of the dual-polarization structure and raindrop size distribution of a squall line in Shandong. Acta Meteorologica Sinica, 81(2): 328-339. doi:10.11676/qxxb2023.20220070
- Hu Z, Srivastava R C. 1995. Evolution of raindrop size distribution by coalescence, breakup, and evaporation: Theory and observations[J]. J. Atmos. Sci., 52(10): 1761-1783. doi:10.1175/1520-0469(1995)052%3C1761:EORSDB%3E2.0.CO;2
- Huang C, Chen S, Zhang A, et al. 2021. Statistical characteristics of raindrop size distribution in

- monsoon season over South China Sea[J]. *Remote Sens.*, 13(15): 2878. doi:10.3390/rs13152878
- 黄玉霞, 王宝鉴, 黄武斌, 等. 2019. 我国西北暴雨的研究进展[J]. *暴雨灾害*, 38(05): 515-525.
- Huang Yuxia, Wang Baojian, Huang Wubin, et al. 2019. A review on rainstorm research in northwest China[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 38(5): 515-525. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.013
- Jaffrain J, Berne A. 2011. Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PARSIVEL disdrometers[J]. *J. Hydrometeorol.*, 12(3): 352-370. doi:10.1175/2010JHM1244.1
- Jiang Y, Yang L, Zeng Y, et al. 2022. Comparison of summer raindrop size distribution characteristics in the western and central Tianshan Mountains of China[J]. *Meteorol. Appl.*, 29(3): e2067. doi:10.1002/met.2067
- Jwa M, Jin H G, Lee J, et al. 2021. Characteristics of raindrop size distribution in Seoul, South Korea according to rain and weather types[J]. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 57: 605-617. doi:10.1007/s13143-020-00219-w
- Leighton H, Black R, Zhang X, et al. 2022. The Relationship Between Reflectivity and Rainfall Rate From Rain Size Distributions Observed in Hurricanes[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 49(23): e2022GL099332. doi:10.1029/2022GL099332
- Li R, Wang G, Zhou R, et al. 2022. Seasonal variation in microphysical characteristics of precipitation at the entrance of water vapor channel in Yarlung Zangbo Grand Canyon[J]. *Remote Sens.*, 14(13): 3149. doi:10.3390/rs14133149
- 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 Sens.*, 14(19): 4752. doi:10.3390/rs14194752
- 李明娟, 郭大梅, 冯典, 等. 2023. 弱天气系统强迫下一次突发性大暴雨成因分析[J]. *高原气象*, 42(4): 934-948. Mingjuan LI, Damei GUO, Dian FENG, et al. 2023. Mechanism Analysis of an Abrupt Torrential Rain Event under Weak Synoptic Forcing[J]. *Plateau Meteorology*, 42(4): 934-948. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00101
- Luo L, Wang L, Huo T, et al. 2021. Raindrop Size Distribution and Rain Characteristics of the 2017 Great Hunan Flood Observed with a Parsivel2 Disdrometer[J]. *Atmosphere*, 12(12): 1556. doi:10.3390/atmos12121556
- Marshall J S, Palmer W M K. 1948. The distribution of raindrops with size[J]. *J. Atmos. Sci.*, 5(4): 165-166. doi:10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2
- Pu K, Liu X, Wu Y, et al. 2020. A comparison study of raindrop size distribution among five sites at the urban scale during the East Asian rainy season[J]. *J. Hydrol.*, 590: 125500. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125500
- Qi Y, Zhang J, Zhang P. 2013. A real-time automated convective and stratiform precipitation segregation algorithm in native radar coordinates[J]. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 139(677): 2233-2240. doi:10.1002/qj.2095
- Seela B K, Janapati J, Lin P L, et al. 2017. A comparison study of summer season raindrop size distribution between Palau and Taiwan, two islands in western Pacific[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122(21): 11,787-11,805. doi:10.1002/2017JD026816
- Seela B K, Janapati J, Lin P L, et al. 2022. Raindrop size distribution characteristics of the western Pacific tropical cyclones measured in the Palau islands[J]. *Remote Sens.*, 14(3): 470. doi:10.3390/rs14030470
- Thurai M, Bringi V N, Wolff D B, et al. 2020. Drop size distribution measurements in outer rainbands

- of hurricane dorian at the NASA wallops precipitation-research facility[J]. *Atmosphere*, 11(6): 578. doi:10.3390/atmos11060578
- Vivekanandan J, Zhang G, Brandes E. 2004. Polarimetric radar estimators based on a constrained gamma drop size distribution model[J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 43(2): 217-230. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0217:PREBOA>2.0.CO;2
- 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 Jun, Cong Chunhua, Wang Hong, et al. 2022. Evolution Characteristics of Raindrop Size Distribution of Landfalling Typhoon Rumbia (2018)[J]. *Meteor Mon*, 48(11): 1449-1459. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.050901.
- Wen L, Zhao K, Zhang G, et al. 2016. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in East China during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and Micro Rain Radar data[J]. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 121(5): 2265-2282. doi:10.1002/2015JD024160
- Zeng Y, Yang L, Zhou Y, et al. 2022. Statistical characteristics of summer season raindrop size distribution in the western and central Tianshan Mountains in China[J]. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, 100(6): 855-872. doi:10.2151/jmsj.2022-044
- Zhang A, Hu J, Chen S, et al. 2019. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the monsoon season observed in southern China[J]. *Remote Sens.*, 11(4): 432. doi:10.3390/rs11040432
- 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 Chengcheng, Zhang Lejian, Liang Haihe, 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. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.07.006.
- Zhang G, Vivekanandan J, Brandes E A. 2001. A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39(4): 830-841. doi:10.1109/36.917906
- Zhang G, Vivekanandan J, Brandes E A, et al. 2003. The shape-slope relation in observed gamma raindrop size distributions: Statistical error or useful information?[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20(8): 1106-1119. doi:10.1175/1520-0426(2003)020<1106:TSRIOG>2.0.CO;2
- 赵强, 彭力, 李文耀, 等. 2022. 2021 年 4 月陕西一次极端暴雨过程的成因诊断[J]. *暴雨灾害*, 41(02): 109-118. Zhao Qiang, Peng Li, Li Wenyao, et al. 2022. Diagnosis of the causation of an extreme rainstorm in Shaanxi in April 2021[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 41(2): 109-118. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.001
- 张庆池, 刘端阳, 武艳, 等. 2022. 淮北地区不同类型暴雨雨滴谱特征及其 Z-R 关系研究[J]. *气象学报*, 80(06): 967-985. Zhang Qingchi, Liu Duanyang, Wu Yan, et al. 2022. Raindrop spectral characteristics and Z-R relationship of different rainstorm types in Huaibei region. *Acta Meteorologica Sinica*, 80(6): 967-985. doi: 10.11676/qxxb2022.025
- 张哲, 戚友存, 李东欢, 等. 2022. 2021 年郑州“7·20”极端暴雨雨滴谱特征及其对雷达定量降水估测的影响[J]. *大气科学*, 46(04): 1002-1016. Zhang Zhe, Qi Youcun, Li Donghuan, et al. 2022. Raindrop Size Distribution Characteristics of the Extreme Rainstorm Event in Zhengzhou 20 July, 2021 and Its Impacts on Radar Quantitative Precipitation Estimation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 46(4): 1002-1016. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21237