

基于微雨雷达和雨滴谱仪观测的济南一次降水的微物理特征

狄瑞彤^{1,2} 王洪^{2,3}

1.山东省济宁市气象局, 济宁 272000

2.中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室, 北京 100081

3.山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031

提要: 基于 2023 年 11 月 5 日的济南地区一次层状云降水过程, 将雨滴谱、微雨雷达和地面翻斗式雨量计观测结果进行一致性比对的基础上, 研究了地面雨滴谱和降水垂直结构演变的微物理特征。结果表明, 微雨雷达在 400 m 高度估测的降水强度变化趋势与地面雨滴谱、雨量计得到的结果具有较好的一致性, 但因高度较高, 微雨雷达估测的降水强度相较雨滴谱、雨量计观测值偏小, 平均误差分别为-0.82 mm 和-1.4 mm。虽然地面降水始终为液态, 但微雨雷达可以清晰地反演出整个降水过程垂直方向上粒子相态的分层结构(雪花—混合相态—液态), 对降水垂直结构的演变和微物理过程有较好的实时监测效果。0°C层亮带高度从 3.8 km 逐渐降低至 2.2 km, 这是因为冷空气侵入使得地面气温逐渐降低, 对应空中混合相态层的高度逐渐降低, 微雨雷达可以更好地把握降水垂直结构的演变, 尤其是可根据 0°C层亮带高度的接地, 监测冬季雨雪转换及其精确到分钟级的时间点。此次降水存在不均匀性, 降水强度大小主要由降水粒子尺度决定, 而降水粒子浓度对降水强度的影响较小, 降水形成机制主要是“大滴吞噬小滴”的碰并增长。

关键词: 微雨雷达, 雨滴谱, 垂直结构, 微物理特征

Microphysical Characteristics of a Precipitation Process in Jinan Based on the Micro Rain Radar and Disdrometer Observations

DI Ruitong^{1,2} WANG Hong^{2,3}

1 Jining Meteorological Office of Shandong Province, Jining 272000

2 CMA Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Weather Modification, Beijing 100081

3 Weather Modification Office of Shandong Province People's Government, Jinan 250031

Abstract: Based on a stratiform cloud precipitation process that occurred in Jinan on 5 November 2023, this paper conducts a consistency comparison of observations from disdrometer, micro rain radar (MRR), and ground-based rain gauge. Then, the microphysical characteristics of surface raindrop size distribution and precipitation vertical structure evolution are investigated. The results show that the trend of rainfall rate estimated by the MRR at an altitude of 400 m is in good agreement with the results obtained by the ground-based disdrometer and rain gauge. However, due to the higher altitude, the rainfall rate estimated by the MRR is lower than the observations from the disdrometer and rain gauge, and their mean errors (ME) are -0.82 mm and -1.4 mm, respectively. Although the precipitation at the ground remains in the rain state throughout the process, the MRR can clearly retrieve the

收稿日期: XXXX-XX-XX; 定稿日期: XXXX-XX-XX

资助项目: 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室创新基金项目(2023CPML-B03)、山东省气象局科研项目(2022SDQN12)、山东省济宁市气象局科研项目(2025JNZL09)和山东省济宁市气象局科研项目(2024JNZL03)共同资助

作者简介: 狄瑞彤, 主要从事雷达应用研究. E-mail: 2809936119@qq.com

通讯作者: 王洪, 主要从事云降水物理的研究. E-mail: wh42233691@163.com

layered structure of particle phases (snow-mixed-rain) vertically through the whole precipitation process, providing effective real-time monitoring for the evolution of the vertical structure of precipitation and its microphysical processes. It is seen that the height of the 0°C bright band gradually decreases from 3.8 km to 2.2 km. This is caused by the intrusion of cold air, which leads to a gradual drop in ground temperature and a corresponding lowering of the mixed-phase layer in the atmosphere. The MRR is able to better capture the evolution of the vertical structure of precipitation. Especially, based on the touching ground of the 0°C bright band, it can monitor the rain-snow transition in winter and pinpoint its occurrence time with minute-level accuracy. There exists inhomogeneity during this precipitation process, with rainfall rate primarily determined by precipitation particle sizes. However, the concentration of precipitation particles has a smaller impact on the rainfall rate. Its precipitation mechanism is mainly the coalescence growth, during which larger drops swallow up the smaller ones.

Key words: micro rain radar, disdrometer, vertical structure, microphysical characteristic

引言

近年来, 新型探测设备较好地应用于降水过程的微物理特征研究。雨滴谱作为一种激光遥感设备可以进行连续观测, 获得近地面降水的雨滴谱分布, 反演出多种微物理参数。李欣和张璐(2022)利用雨滴谱、双偏振雷达观测资料, 对北上台风“利奇马”和“巴威”引发的强降水的微物理特征进行了分析, 发现在对流性降水中云水的聚集和雨滴的碰并增长占主导地位。王俊等(2022)利用雨滴谱观测资料, 研究 2018 年深入内陆的台风“温比亚”的雨滴谱演变特征, 此次降水表现为平衡雨滴谱, 即大雨滴浓度较低, 小雨滴浓度较高, 在直径 2 mm 左右粒子数密度易发生第二峰值。郭换换和王坤(2023)等利用雨滴谱和双偏振雷达资料对郑州“7·20”极端降水过程的微物理特征进行分析, 此次降水呈现较广的雨滴谱参数分布, 分布区域覆盖从海洋型对流降水至大陆型对流降水。文镓齐(2024)统计了西藏墨脱雨滴谱和微雨雷达观测的 2021 年 6~9 月的降水, 对流云降水占 6.7%, 层状云降水占 88.4%, 浅层云降水占 4.9%, 即该地区大部分为层状云降水, 对总降水量贡献最大。赵欣等(2025)基于雨滴谱和微雨雷达观测资料对西藏墨脱和广州龙门的降水过程基于广义 Γ 模型进行完整雨滴谱分布拟合, 并与标准 Γ 模型拟合结果定量对比, 表明广义 Γ 模型拟合相较于标准 Γ 模型拟合具有更小的偏差和更高的模型效率系数。

雨滴谱可以分析近地面降水过程的微物理演变, 但无法进行垂直结构微物理研究。微雨雷达 (micro rain radar, MRR; Peters et al, 2002) 作为垂直指向的连续波雷达, 可对降水进行垂直方向至 6.2 km 高度的观测。MRR 部署灵活、运维成本较低、具有较高的空间和时间分辨率, 国内外越来越多的学者利用其对不同国家和地区进行降水垂直结构的微物理特征研究。Wang et al (2017) 对山东一次层状云降水的 MRR 观测资料进行分析, 发现降水 0 测层亮带位于 2 km 左右, 可用降水粒子最大下落速度梯度和最大下落速度来指示 0 右层亮带底部位置, 验证了 MRR 对 0R 层亮带研究的优势。杨文霞等(2019)利用地面雨量计和 MRR 等观测资料, 对河北省邢台市的一次西南涡降水天气过程进行分析, 提出在 0°C 层亮带出现降水强度和液态水含量的大值中心, 可作为地面会产生较强降水的指标特征, 得出了此次天气过程进行人工增雨作业的最佳

时机。Mehta et al (2020) 利用 MRR 对位于喜马拉雅山脉东部的雨滴谱分布进行研究, 在此基础上提出一种新的 γ 型雨滴谱分布模型, 研究发现实际观测的雨滴粒径的分布与 γ 型雨滴谱分布相吻合。Zhou et al (2020) 基于陕西咸宁 MRR 资料, 研究了不同降水类型的降水参数、雨滴谱和 Z-R 关系的垂直剖面, 发现弱降水形成机制主要是大雨滴的破碎和小雨滴的蒸发, 层状云降水形成机制为大雨滴破碎和大雨滴碰并小雨滴并存, 对流云降水形成机制主要以大雨滴碰并小雨滴为主。杜牧云等 (2022) 利用 MRR 等多源观测资料, 对鄂西南一次局地雷雨大风和冰雹强对流天气过程的中小尺度特征进行分析, 雨滴谱分布显示最大直径接近于 6 mm, 粒子直径集中在 1 mm 以内。Goenka et al (2023) 基于 MRR 分析南极降水, 认为大多数发生在南极洲的降水 0°C 层亮带在海平面以上约 1~3 km 高度出现。高兰等 (2025) 利用湖北襄阳的 MRR 观测资料对对流云、层状云和弱降水的垂直结构进行研究, 发现三种降水类型微物理过程的差异性和相似性并存, 指出对流云降水雨滴谱最宽, 层状云较宽, 弱降水较窄, 且春季降水的 0°C 层亮带多集中在 4 km 左右。

综上所述, 研究降水的微物理过程, 对灾害性天气预警、人工影响天气和雷达定量降水估测具有重要作用。目前国内外学者对降水的微物理机制方面有较多研究 (温龙等, 2015; 文镓齐, 2024; Garcia-Benadi et al, 2021; Bracci et al, 2023), 但综合利用多源探测资料开展降水垂直方向与地面雨滴谱演变分析的研究仍较少, 而层状云降水作为中国北方人工增雨作业主要云系, 研究其垂直方向上降水微物理结构及其演变对全面认识降水过程、选择人工影响天气作业条件具有重要作用。因此, 本研究基于 2023 年 11 月 5 日山东济南地区一次层状云降水过程的 MRR、雨滴谱和雨量计观测资料, 在三种观测设备观测结果一致性对比的基础上, 研究此次降水的近地面和垂直演变特征, 提升对济南地区降水的微物理过程认识, 以期对灾害性天气预防、人工影响天气作业和雷达定量降水估测精度提升提供科学依据。

1 设备与方法

1.1 设备性能及数据质量控制

国内外很多学者利用 MRR 给出了层状云降水和对流云降水的精细结构 (Bringi et al, 2003; Chen et al, 2013; 温龙等, 2015; 文镓齐, 2024; 李遥等, 2025), 本研究所用 MRR 布设于山东省气象局楼顶 (型号 MRR-2, 以下简称为 MRR), 由德国 Metek 公司生产, 具体性能参数配置如表 1, MRR 的探测性能易受强垂直风和 K 波段波长衰减影响, 数据质量控制参考王洪等 (2023) 和 Garcia-Benadi et al (2020) 的方法, 对 MRR 的原始功率谱进行噪声去除、退模糊 (强垂直风造成信号的折叠订正)、衰减订正等处理; 此外, 由于 MRR 在反演时假设了降水粒子相态为纯液态, 会对 0°C 层以上的固态粒子的反演造成误差, 故本研究分析降水粒子垂直方向雨滴谱分布时, 仅考虑 0°C 层以下高度。雨滴谱和地面翻斗式雨量计均位于济南国家

基本气象站（以下简称济南站），两地相距约 10.2 km，雨滴谱是 DSG5 型降水现象仪，采样面积为 54 cm²，尺度范围为 0.062~24.5 mm，速度范围为 0.05~20.8 m·s⁻¹，分别可获得 32 个非等尺度通道和非等速度通道的粒子谱信息，图 1 给出了 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00（北京时，下同）雨滴谱观测到的降水粒子的速度和尺度分布，由图可见，其分布与 Atlas et al（1973）提出的降水粒子的尺度-速度公式大致相符,所以本研究不进行数据剔除；地面翻斗式雨量计由计量和承雨部件两部分组成，分辨率为 0.1 mm。三种探测设备的时间分辨率均为 1 min。

表 1 MRR-2 性能参数配置

Table 1 MRR-2 technical specifications

性能参数名称	指标
发射频率	24.23 GHz
波长	12.38 mm
波束宽度	2°
时间分辨率	1 min
高度分辨率	200 m
距离库数	31
谱速度分辨率	0.1905 m·s ⁻¹
速度范围	0~12.192 m·s ⁻¹
粒子尺度范围	0.109~6 mm
探测高度	6200 m

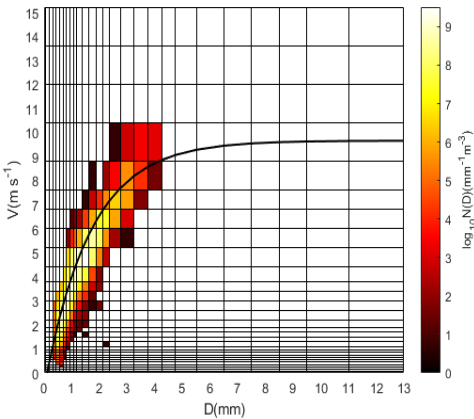


图 1 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00 济南站雨滴谱降水粒子数浓度累计分布

Fig.1 Cumulative distribution of raindrop number concentration observed by disdrometer at Jinan Station from 09:00 BT to 20:00 BT 5 November 2023

1.2 参量计算

1.2.1 MRR 参量计算

MRR 对降水微物理特征量反演的基本原理是依据直径 (D , 单位: mm) 与下落末速度 (v , 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 之间的关系式 (Gunn and Kinzer, 1949)。速度 (V , 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 通过功率谱计算获得, 雨滴数浓度 [$N(D)$ 单位: $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$] 由反射率谱和降水粒子的后向散射截面计算获得 (文镓齐, 2024)。在此基础上可计算得到微物理特征量降水强度 (R , 单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、反射率因子 (Z , 单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$)、液态水含量 (LWC , 单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 和质量加权平均直径 (D_m , 单位: mm), 其计算分别见式(1)~式(4):

$$R = \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{64} N(D_i) D_i^3 v(D_i) \Delta D_i \quad (1)$$

$$Z = 10^{18} \sum_{i=1}^{64} N(D_i) D_i^6 \Delta D_i \quad (2)$$

$$LWC = \rho_w \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{64} N(D_i) D_i^3 \Delta D_i \quad (3)$$

$$D_m = \frac{M_4}{M_3} \quad (4)$$

式中, D_i 为直径档 i 的平均直径, ΔD_i 为相应的粒子直径间隔; $v(D_i)$ 表示粒子在直径 D_i 处相对应的下落末速度, ρ_w 表示粒子密度, Γ 分布的第 n 阶矩用 M_n 表示, $M_n = \sum_{i=1}^{64} D_i^n N(D_i) \Delta D_i$ 。

平均廓线指在某时段内, 各参量分别在不同高度上的平均; NCFAD 指在某时段内, 各参量分别在不同高度上的频率分布归一化。

1.2.2 雨滴谱参量计算

单位体积单位直径 (介于 D 和 $D + \Delta D$) 的雨滴数浓度用 $N(D)$ (单位: $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$) 表示, 单位体积单位速度 (介于 V 和 $V + \Delta V$) 的雨滴数浓度用 $N(V)$ (单位: $\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) 表示 (文镓齐, 2024)。

在此基础上, 降水强度 (R , 单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 和广义截距参数 (N_w , 单位: $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$), 计算分别见式(5)~式(6):

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} D_i^3 V_j N(D_i) \Delta D_i \quad (5)$$

$$N_w = \frac{4^4}{\pi \rho_w} \frac{10^3 LWC}{D_m^4} \quad (6)$$

质量加权平均直径 (D_m , 单位: mm) 为 Γ 分布的四阶矩 M_4 除以 Γ 分布的三阶矩 M_3 , 其中, Γ 分布的 n 阶矩的计算为: $M_n = \sum_{i=1}^{32} D_i^n N(D_i) \Delta D_i$, LWC 的计算为: $LWC = \rho_w \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_i) D_i^3 \Delta D_i$ 。

1.3 降水粒子相态识别

本研究使用 RaProM 算法 (Garcia Benadi et al, 2020) 进行降水粒子相态识别, 将粒子相态分为混合相态、不确定、冰雹、雪花、雨和毛毛雨 6 种类型。依据 RaProM 算法, 0℃层亮带存在与否利用 Cha et al (2009) 算法判断, 当存在 0℃层亮带时, 则依据 Wang et al (2017) 方法判断其位置, 然后根据 Atlas et al (1973) 经验公式, 计算得到降雪和降雨时特定等效雷达反射率因子相对应的平均速度, 并结合每个高度层上的多普勒谱宽、粒子下落速度、偏宽和 0℃层亮带确定降水粒子相态。

2 降水概况及仪器探测性能分析

2.1 天气背景概况

2023 年 11 月 5 日, 受高空槽和地面气旋影响, 山东济南出现一次明显的层状云降水的天气过程, 降水初期, 500 hPa 天气图显示涡旋中心位于蒙古境内, 闭合冷中心明显 (图略), 山东地区位于冷涡前部, 850 hPa 上冷涡前部受西南气流影响。6 日凌晨, 伴随冷涡系统东移, 济南地区逐渐脱离低压影响, 降水过程趋于结束。受本次降水系统影响, 济南主要影响时段为 5 日 09:00—20:00, 济南站的地面翻斗式雨量计观测到的累积降水量为 33.9 mm。

2.2 仪器探测性能分析

此次过程, 济南双偏振多普勒天气雷达观测到大范围的层状云系, 其经过济南地区自西南向东北移动, 济南地区 MRR 也同时观测到一个具有长时间跨度的层状云降水过程。雨滴谱和 MRR 的观测资料易受多种噪声影响, 地面翻斗式雨量计可直接测量降水量, 噪声影响相对较小, 鲁棒性更高, 所以首先对比雨滴谱、MRR 和雨量计资料的一致性, 验证雨滴谱和 MRR 数据的可靠性。

由于 MRR 在近地面易受地物回波的干扰 (Wen et al, 2019), 去除第一个距离库 (200 m 高度) 的数据, 选择 400 m 高度数据与雨量计和雨滴谱进行对比, 用以验证 MRR 观测数据的可靠性及三种设备观测资料的一致性。

表 2 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00 济南站 MRR (400 m 高度)、雨量计和雨滴谱降水强度的平均误差 (ME)、均方误差 (MSE) 和相关系数 (CC)

Table 2 The mean error (ME), mean square error (MSE) and correlation coefficient (CC) of rainfall rate from MRR at the altitude of

400 m, rain gauge, and disdrometer at Jinan Station from 09:00 to 20:00 BT 5 November 2023

	MRR—雨滴谱	MRR—雨量计	雨滴谱—雨量计
ME (mm · h ⁻¹)	-0.78	-1.40	-0.62
MSE (mm · h ⁻¹)	2.48	6.88	2.91

CC

0.77

0.74

0.91

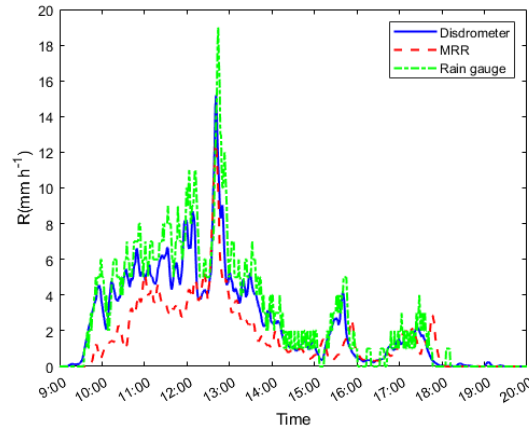


图 2 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00 济南站 MRR (400 m 高度)、雨量计与雨滴谱仪降水强度一致性对比

Fig.2 Consistency of rainfall rate from MRR at the altitude of 400 m, rain gauge and disdrometer at Jinan Station from 09:00 BT to 20:00 BT 5 November 2023

图 2 给出了观测时段济南站 MRR (400 m 高度)、雨量计和雨滴谱观测的降水强度变化曲线。由于雨量计与雨滴谱位于济南站,距离微雨雷达直线距离约 10.2 km,通过分析济南多普勒双偏振天气雷达,发现此次天气过程的移动速度约为 $22 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,从 MRR 所在位置移动到济南站需要约 28 min,为同步对比分析,将 MRR 观测数据向后移动 28 min。为避免雨量计灵敏度低造成的脉动性,对数据进行 6 min 滑动平均处理(文稼齐, 2024)。图 2 表明,三种设备观测的降水强度变化趋势相一致,降水强度峰值的位置基本保持一致。具体而言,雨量存在一定的偏差,表 2 给出了三种设备之间的 ME、MSE 和 CC。ME $> 0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,说明高估,否则为低估, MRR 相较于雨滴谱和雨量计的 ME 值均为负值,表明 MRR 相较于雨滴谱和雨量计存在普遍低估。雨量计、雨滴谱和微雨雷达之间的 CC 均较高,表明三种观测仪器间的相关性较好。对比 MSE 可知,三者之间均方误差均较小。因此,雨滴谱反演的降水强度总体上小于雨量计,这与沙修竹等(2019)和孙钦宏等(2024)的结论相近,而本研究 MRR 资料反演的降水强度明显小于雨滴谱和雨量计,可能是 MRR 的高度为 400 m,与另外两种资料存在明显的高度差,从 3.2.2 节中可见降水粒子在下落过程中粒子尺度呈增大趋势,会进一步促使近地面降水强度增大。此外, MRR 反演往往会高估小粒子浓度、低估大粒子浓度,从而直接影响降水强度的反演精度,造成对降水强度的低估(宋灿等, 2019; 仝泽鹏等, 2021)。

3 微物理特征研究

3.1 地面雨滴谱特征

为分析降水过程中不同大小粒子的演变过程,将降水粒子按尺度大小进行 3 划分,小于 1 mm 为小粒子,大于等于 1 mm 且小于 2 mm 为中粒子,大于等于 2 mm 为大粒子。图 a)~(c)分别为雨滴谱观测的济南

站 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00 降水过程的雨滴谱尺度谱、速度谱以及不同尺度粒子数量随时间的演变。此次降水雨滴谱尺度谱宽约 4 mm，速度谱宽约 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，粒子速度谱宽与尺度谱宽的大值区相一致（图 3a，3b）。同时，从降水粒子尺度构成来看，小粒子占主导地位，占比达 82.7%，此次降水平均降水强度 $3.08 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。进一步分析发现，此次降水过程存在不均匀性，图 3c 表明在 12:28—12:59 降水期间，大粒子数量出现显著跃增，该时段内小粒子占比下降至 73.23%，中粒子和大粒子占比上升，平均降水强度增至 $7.91 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在 12:28—12:59 降水期间雨滴谱观测到的降水样本数量，占此次降水过程观测到的总的降水样本数量的 6.54%，其降水量贡献却高达总量的 15.72%，这是由于降水强度与降水粒子尺度的三次方成正比见式（5），中粒子和大粒子对降水强度的贡献远高于小粒子，从而在样本量占比较低的情况下仍能带来更多的降水。

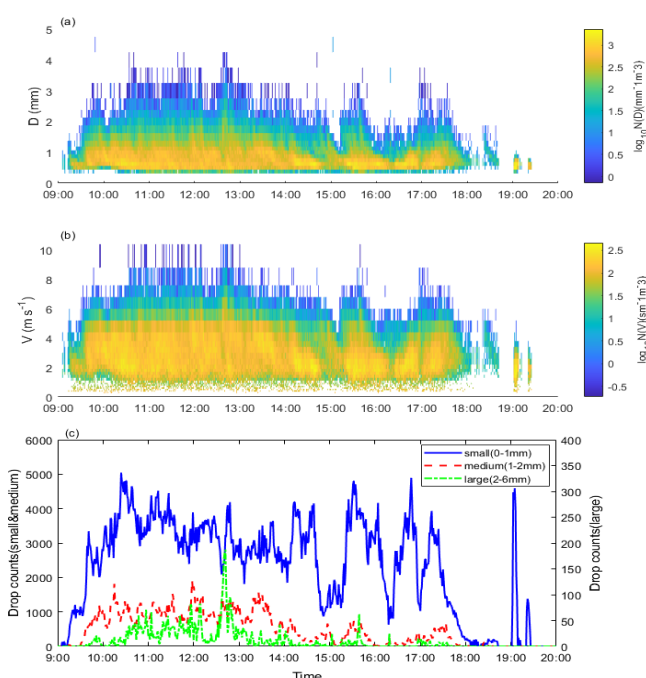


图 3 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00 济南站雨滴谱反演的(a)尺度谱，(b)速度谱，(c)不同尺度粒子数量随时间的演变

Fig.3 Time series of (a) raindrop size distribution, (b) velocity spectrum, and (c) number of particles at different sizes observed by disdrometer at Jinan Station from 09:00 BT to 20:00 BT 5 November 2023

对本次降水地面雨滴谱特征进一步研究，图 4 给出了雨滴谱观测的质量加权平均直径 (D_m) 与归一化截距参数 ($\lg N_w$) 随降水强度变化的散点图。对比 D_m-R 和 $\lg N_w-R$ 散点分布可以发现， D_m 和 $\lg N_w$ 随降水强度的变化存在显著差异。 D_m-R 拟合曲线指数为 0.148，远大于 $\lg N_w-R$ 拟合曲线指数 (0.036)，说明此次降水过程的降水强度受粒子尺度影响较大，受粒子浓度影响较小。这种“尺度增长主导、浓度基本不变”的组合特征，揭示此次降水过程属于层状云降水的微物理机制。

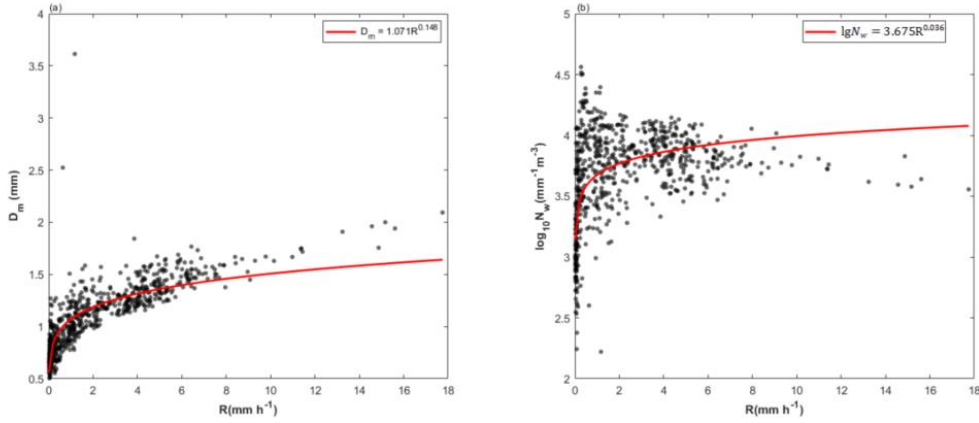


图 4 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00 济南站 (a) $D_m - R$, (b) $\lg N_w - R$ 散点分布及拟合曲线

Fig.4 The scatter plot and fitting line of (a) $D_m - R$ and (b) $\lg N_w - R$ for Jinan Station from 09:00 BT to 20:00 BT 5 November

2023

3.2 垂直结构特征

3.2.1 降水垂直结构

降水的垂直结构直接反映了降水的形成过程, 由图 5 可见, 此次降水过程存在不均匀性, 与雨滴谱观测结果相符 (图 3)。具体来看, 在降水时段 12:28—12:59, 雷达反射率因子和垂直速度显著变大, 最大反射率因子达 40 dBz (图 5a 红色方框所示), 最大垂直速度达 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5b 红色方框所示)。王洪等 (2023) 使用 MRR 进行降水垂直结构的反演, 识别出了山东地区一次夏季层状云降水的 0°C 层亮带维持在 4.2 km 左右, 但此次天气过程观测到随着降水的进行 MRR 探测到的 0°C 层亮带的高度从 3.8 km 左右逐渐降低至 2.2 km 左右。

降水粒子速度的时空分布显示 (图 5b), 0°C 层以上的高层固态粒子在下落过程中, 垂直速度较小, 约为 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 当粒子下落到 0°C 层 (即 0°C 层亮带的顶部) 时速度逐渐增大, 随后在 0°C 层亮带的厚度内粒子的垂直速度继续增大, 当粒子下落到 0°C 层亮带底部时, 粒子完全融化成液态, 此时垂直速度达到最大值, 约为 $5.5 \sim 6.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 在 0°C 层亮带高度以下, 液态粒子在下落时垂直速度变化范围不大, 直至落到地面。Wang et al (2017) 也发现降水粒子在亮带底部速度逐渐增大, 最大下落速度出现在约 1.4 km 高度, 之后降水以液态形式存在且下落速度基本保持不变。因此, MRR 的垂直速度产品可以很好地指示 0°C 层亮带底部的高度。

由图 5c 可见, 在整个降水过程自上而下分为雪花层、混合相态层、液态层, 其中混合相态层厚度约为 1~2 个距离库的高度, 即 200~400 m, 且随着降水的发展, 混合相态层的高度逐渐降低, 到 17:28 下降至 2.2 km 左右, 0°C 层高度位于混合相态层上部, 当雪花下落到 0°C 层开始融化时, 伴随着粒子下落, 在 0°C 层下

方 200~400 m 完全融化形成液态粒子，所以地面降水始终表现为液态降水。

受西南暖湿气流和冷空气的共同影响，由于冷空气的侵入，济南此次降水过程地面气温逐渐降低（图 5d）。10:00 济南站温度为 13.2 °C，17:00 降至 11.10 °C，10:00 地面区域站（距离 MRR 约 150 m）温度为 12.90 °C，17:00 温度降至 11.70 °C，与此同时，MRR 观测到的 0°C 层高度也从 10:00 的 3.8 km 左右下降至 17:00 的 2.2 km 左右，因此，地面温度和 MRR 观测到的 0°C 层亮带高度同步下降的变化特征，与温度垂直递减率相符。

由图 5 可见，MRR 给出的降水垂直结构演变与地面观测有很好的 consistency，地面气温降低，垂直方向上 0°C 层亮带的高度逐渐降低，对应空中混合相态层的高度逐渐降低。因此 MRR 可以更好地把握降水的垂直结构演变，尤其是当冬季 0°C 层亮带高度逐渐下降，当其下降到地面时，可作为地面雨雪相态转换的判别指标之一，有助于实现冬季雨雪相态转换的分钟级时间点的精确监测。

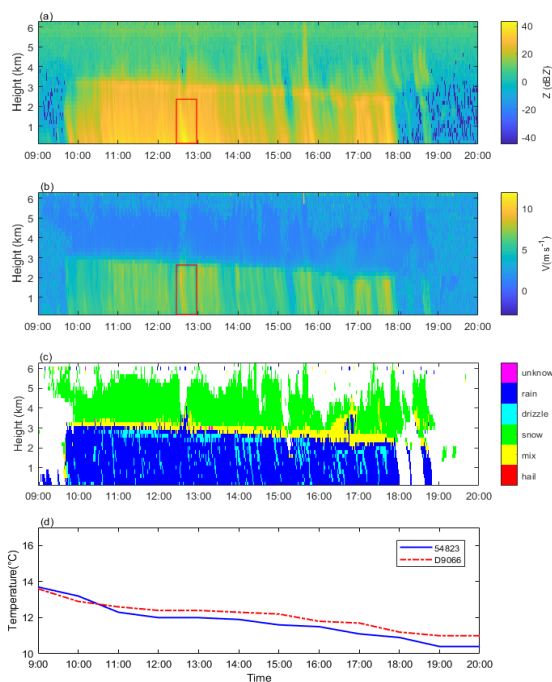


图 5 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00 济南站(a)雷达反射率因子，(b)垂直速度，(c)粒子类型，(d)济南站和地面区域站温度随时间的演变

Fig.5 (a) Radar reflectivity factor, (b) vertical velocity, (c) precipitation types, and (d) the surface temperature evolution with time observed by Jinan Station and regional station from 09:00 BT to 20:00 BT 5 November

由图 6a 可见，此次降水过程反射率因子和速度平均廓线的变化趋势及其跃增高度有一定的差异性。从 6 km 下降至 4 km 降水粒子反射率因子先缓慢减小后缓慢增加，4~2.8 km 反射率因子增大，且增率较大，在此 1.2 km 厚度反射率因子从 8.76 dBz 增加到 21.97 dBz，之后随着高度降低，反射率因子趋于缓慢增加；

从 6 km 下降至 3.8 km 降水粒子垂直速度呈缓慢减小, 3.8~2 km 垂直速度增大, 且增率较大, 在此 1.8 km 厚度垂直速度从 $1.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $5.82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 之后随着高度降低速度基本保持不变。此观测结果与黄毅梅等 (2017) 的观测结论相似, 即亮带中速度的跃增高度比反射率因子低 (70 m 左右), 本研究中低 200 m 左右, 这是因为黄毅梅等 (2017) 中的探测设备为云雷达, 本研究使用的是 MRR, 两种探测设备的高度分辨率不一致。分析造成其跃增高度差的原因, 雪花在下落到 0°C 层时, 温度升高, 表面开始融化, 且开始具有水滴反射特性, 此时雷达反射率因子出现跃增, 但速度增大不显著。当雪晶随着下落进一步融化, 速度开始出现跃增, 直至 0°C 层亮带以下粒子完全融化成液态。此外, 在 2 km 之下伴随降水粒子下落粒子尺度呈增大趋势 (图 8), 反射率因子和粒子尺度的 6 次方成正比, 进一步使得反射率因子逐渐增大。

图 6b 表现的降水强度和液态水含量平均廓线的变化趋势相一致。降水粒子在下落的过程中, 6 km 下降到 4 km, 降水强度和液态水含量均呈缓慢增加, 从高度 4 km 开始呈现显著增大直至 3 km 处, 在此 1 km 厚度, 降水强度从 $0.42 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到 $6.30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 液态水含量从 $0.09 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加到 $0.90 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 3~1.8 km 降水强度和液态水含量均减小, 且减小速度均较快, 在此 1.2 km 厚度, 降水强度从 $6.30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 减小到 $1.09 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 液态水含量从 $0.90 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 减小到 $0.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 之后呈缓慢增加趋势。降水粒子在 4 km 至 1.8 km 的下落过程中, 雪花、冰晶等粒子下落至 0°C 层时, 其表面开始融化, 出现水膜包冰的现象, 在此阶段相互碰撞的概率变大, 易形成较大粒子, 随着粒子的进一步下落温度升高, 其逐渐融化成液态水, 在此阶段液态水含量和降水强度反演值在 0°C 层亮带出现大值区, 而非真值。

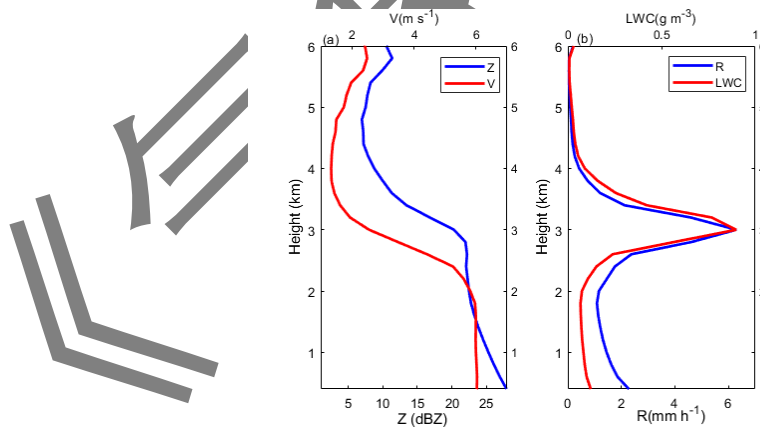


图 6 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00 济南站(a)垂直速度和反射率因子, (b)降水强度和液态水含量的平均廓线

Fig. 6 The mean profiles of (a) vertical velocity and radar reflectivity and (b) rainfall rate and liquid water content at Jinan Station
from 09:00 BT to 20:00 BT 5 November 2023

由图 7 可知, 此次降水期间, 反射率因子集中分布在 25~35 dBZ, 随着高度的降低, 反射率因子高值发生概率逐渐增大。速度分布在 $5 \sim 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 且随着高度变化发生概率分布基本保持不变。降水强度和液态

水含量分别分布在 $0.05\sim 2.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.05\sim 0.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，均随着高度的降低，低值发生概率减小。

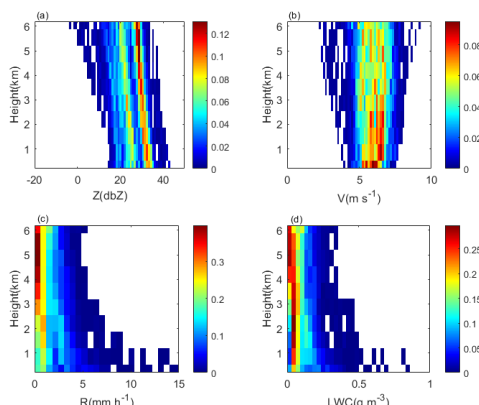


图 7 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00 济南站(a)反射率因子, (b)速度, (c)降水强度和 (d) 液态水含量的归一化频率-高度分布

图

Fig. 7 Normalized frequency-height distribution of (a) radar reflectivity, (b) velocity, (c) rainfall rate and (d) liquid water content at Jinan Station from 09:00 BT to 20:00 BT 5 November 2023

3.2.2 雨滴谱的垂直演变

MRR 的反演算法中假设了粒子相态为液态 (Peters et al, 2005)，根据图 5a 的 0°C 层高度范围 ($2.2\sim 3.8\text{ km}$)，为避免 0°C 层高度以上固态粒子的影响，只分析 0°C 层亮带以下不同高度层的雨滴谱。图 8 是 MRR 观测的 $2000\sim 400\text{ m}$ 不同高度上的雨滴谱分布，降水粒子在从 2000 m 下落到 400 m 的过程中，小粒子数浓度逐渐降低，大粒子数浓度显著增加，且大粒子尺寸逐渐增加，质量加权平均直径由 1.06 mm 增加到 1.36 mm 。即降水粒子从 0°C 层亮带底部下落到近地面的过程中，从 2000 m 的“窄谱、小滴主导”演变成 400 m 高度的“宽谱，大滴增多”。在降水粒子从亮带下方下落至地面的过程中，小粒子数量减少的可能原因包括：小粒子在下落过程中蒸发和受碰并增长机制（即“大滴吞噬小滴”）影响，下落速度更快的大粒子在下落过程中碰撞并合并较小雨滴，因此后者在使得小粒子数量减少的同时，也会造成大粒子数量的增加，本次降水过程中大滴碰并小滴的微物理过程是普遍存在的。

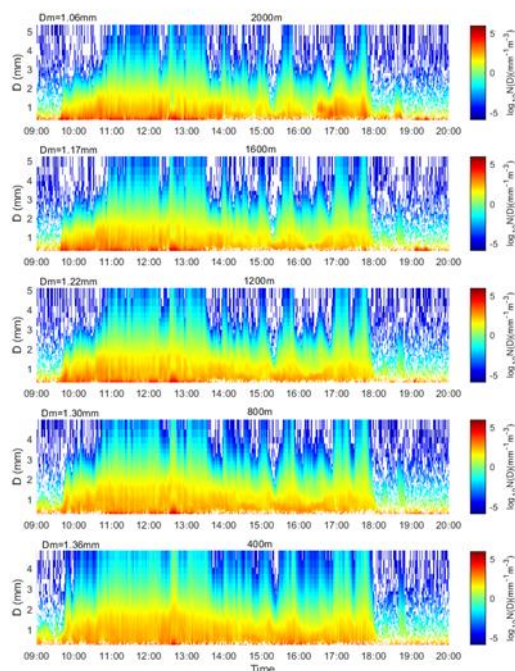


图 8 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00 济南站 0℃层亮带以下不同高度层雨滴数浓度分布

Fig.8 Distribution of raindrop number concentration in vertical direction below 0℃ layer at Jinan Station from 09:00 BT to 20:00 BT 5

November 2023

此次降水过程，雨滴谱随高度发生的演变受云物理过程（如碰并、破碎、蒸发等）和环境因素的综合影响，研究垂直方向雨滴谱演变是理解降水形成机制和降水强度变化的关键。图 9 表明，在 0℃层以下，随着高度的降低小雨滴数浓度逐渐减小，大雨滴数浓度逐渐增大，这是由于在小粒子下落过程中出现蒸发，且存在大粒子吞噬小粒子的碰并增长机制，与图 8 的结论相一致。

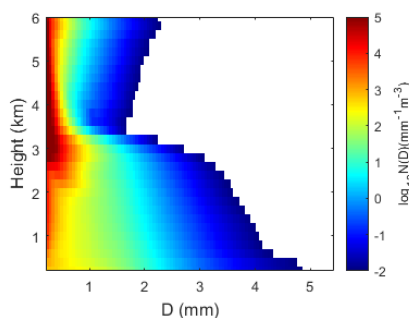


图 9 2023 年 11 月 5 日 09:00—20:00 济南站高度-雨滴谱分布

Fig.9 Vertical distribution of raindrop size distribution at Jinan Station from 09:00 BT to 20:00 BT 5 November 2023

为深入探究此次降水过程中降水粒子的演变特征，图 10 对此次降水过程的垂直雨滴谱特征进行了分钟级展现。观察发现，在 11:33—11:37 的降水时段，可以看到一个“凸起”结构（红色圆圈所示），伴随降

水的持续，“凸起”逐渐下移，并在 11:37 到达地面，“凸起”从形成到下落至地面发生在 5 min 内，且在下移的过程中其所在高度谱宽变宽，说明在此过程中发生了碰并增长，形成了较大粒子。

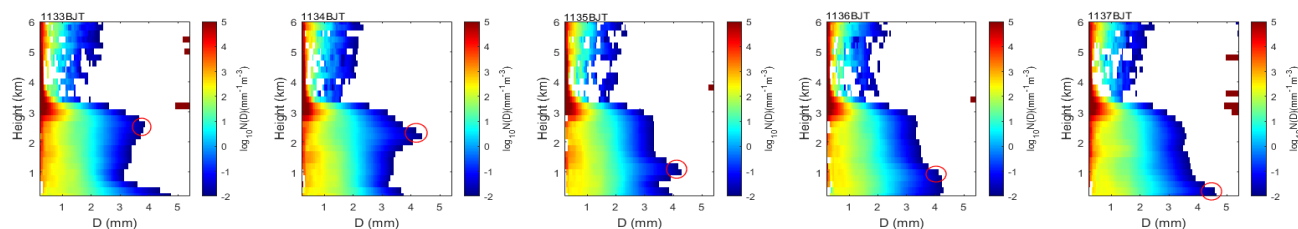


图 10 2023 年 11 月 5 日 11:33—11:37 济南站逐分钟高度-雨滴谱分布演变

Fig.10 Minutely vertical distribution of raindrop size distribution at Jinan Station from 11:33 BT to 11:37 BT 5 November 2023

4 结论与讨论

(1) 此次过程观测所使用的微雨雷达、雨量计和雨滴谱仪的数据一致性较好，降水强度峰值的时间位置基本保持一致，但微雨雷达降水强度明显偏小，这与微雨雷达本身的反演算法和对比设备的高度差异均有关。

(2) 对地面雨滴谱进行分析，此次降水过程存在不均匀性，可观察到在 12:28—12:59 降水期间，大粒子数量出现显著跃增，平均降水强度达 $7.91 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ，整个降水过程占比 6.54% 的降水样本量产生了占比 15.72% 的降水量。此次济南地区层状云降水的降水强度变化受粒子尺度影响较大，受粒子浓度影响较小。

(3) 粒子在从 0°C 层亮带底部下落至近地层的过程中，其雨滴谱谱型从“窄谱、小滴主导”向“宽谱、大滴增多”演变，质量加权平均直径由 1.06 mm 增加到 1.36 mm。由于微雨雷达观测资料的时空分辨率较高，可以从微雨雷达分钟级雨滴谱随高度的演变观测到碰并的微物理过程。

(4) 在此次层状云降水过程，垂直速度的跃增高度比反射率因子低。随着高度的降低，反射率因子高值的发生概率逐渐增大，速度的发生概率分布基本保持不变，降水强度和液态水含量低值的发生概率减小。

参考文献:

- 杜牧云, 赵娟婷, 周伶俐, 等, 2022. 鄂西南一次早春强对流过程的多源资料分析[J]. 暴雨灾害, 41(2): 174-183. Du M Y, Zhao X T, Zhou L L, et al, 2022. Analysis of an Early spring convective weather event in southwest of Hubei province based on multi-source data[J]. Torr Rain Dis, 41(2): 174-183 (in Chinese).
- 高兰, 程昌玉, 严婧, 等, 2025. 微雨雷达观测的襄阳地区降水垂直结构特征[J]. 暴雨灾害, 44(2): 226-235. Gao L, Cheng C Y, Yan J, et al, 2025. Vertical structure characteristics of precipitations in Xiangyang observed by micro rain radar[J]. Torr Rain Dis, 44(2): 226-235 (in Chinese).
- 郭换换, 王坤, 2023. 基于双偏振雷达和降水现象仪的郑州“7·20”极端强降水微物理特征分析[J]. 大气科学学报, 46(5): 713-724. Guo H H, Wang K, 2023. Analysis of the microphysical characteristics of the“7·20”extremely heavy rainfall in Zhengzhou based on dual-polarization radar and precipitation phenomenon instrument data[J]. Trans Atmos Sci, 46(5): 713-724 (in Chinese).
- 黄毅梅, 周毓荃, 杨敏, 2017. 利用 3 mm 云雷达资料分析混合相云垂直结构及过冷水分布[J]. 高原气象, 36(1): 219-228. Huang Y M, Zhou Y Q, Yang M, 2017. Using 3 mm cloud radar data to analyze frontal mixed cloud vertical structure and supercooled water[J]. Plateau Meteor, 36(1): 219-228 (in Chinese).
- 李欣, 张璐, 2022. 北上台风强降水形成机制及微物理特征[J]. 应用气象学报, 33(1): 29-42. Li X, Zhang L, 2022. Formation mechanism and microphysics characteristics of heavy rainfall caused by northward-moving typhoons[J]. J Appl Meteor Sci, 33(1): 29-42 (in Chinese).
- 李遥, 张铁凝, 赵姝慧, 等, 2025. 基于多源资料的东北冷涡降水垂直结构分析[J]. 大气科学, 49(2): 406-418. Li Y, Zhang T N, Zhao S H, et al, 2025. Analysis of the vertical structure of the northeast China cold vortex precipitation based on multisource data[J]. Chin J Atmos Sci, 49(2): 406-418 (in Chinese).
- 沙修竹, 丁建芳, 程博, 2019. 地面激光雨滴谱仪反演降水参量的特性探究[J]. 气象, 45(11): 1569-1578. Sha X Z, Ding J F, Cheng B, 2019. Characteristics of precipitation parameters reflected by ground laser raindrop disdrometer[J]. Meteor Mon, 45(11): 1569-1578 (in Chinese).
- 宋灿, 周毓荃, 吴志会, 2019. 雨滴谱垂直演变特征的微雨雷达观测研究[J]. 应用气象学报, 30(4): 479-490. Song C, Zhou Y Q, Wu Z H, 2019. Vertical profiles of raindrop size distribution observed by micro rain radar[J]. J Appl Meteor Sci, 30(4): 479-490 (in Chinese), doi: 10.11898/1001-7313.20190408.
- 孙钦宏, 马洪波, 张景红, 等, 2024. 冷涡背景下积层混合云降水的雨滴谱垂直分布及演变[J]. 气象, 50(8): 1012-1023. Sun Q H, Ma H B, Zhang J H, et al, 2024. Vertical characteristic and evolution of raindrop size distribution for stratiform and embedded convective cloud precipitation under the background of cold vortex[J]. Meteor Mon, 50(8): 1012-1023 (in Chinese).
- 全泽鹏, 杨莲梅, 曾勇, 等, 2021. 利用微雨雷达研究伊宁地区一次大雨过程的雨滴谱垂直演变特征[J]. 干旱气象, 39(2): 279-287. Tong Z P, Yang L M, Zeng Y, et al, 2021. Vertical characteristics of raindrop size distribution during a heavy rain in Yining of Xinjiang based on micro-rain radar data[J]. J Arid Meteor, 39(2): 279-287 (in Chinese).
- 王洪, 杨洁帆, 龚佃利, 等, 2023. 基于微雨雷达的降水参数反演和粒子相态识别[J]. 大气科学, 47(3): 739-755. Wang H, Yang J F, Gong D L, et al, 2023. Inversion of precipitation parameters and precipitation type classification based on micro rain radar[J]. Chin J Atmos Sci, 47(3): 739-755 (in Chinese).
- 王俊, 丛春华, 王洪, 等, 2022. 台风温比亚(2018)登陆后雨滴谱演变特征研究[J]. 气象, 48(11): 1449-1459. Wang J, Cong C H, Wang H, et al, 2022. Evolution characteristics of raindrop size distribution of landfalling Typhoon Rumbia(2018)[J]. Meteor Mon, 48(11): 1449-1459 (in Chinese).
- 温龙, 刘溯, 赵坤, 等, 2015. 两次降水过程的微降雨雷达探测精度分析[J]. 气象, 41(5): 577-587. Wen L, Liu S, Zhao K, et al, 2015. Precision evaluation of micro rain radar observation in two precipitation events[J]. Meteor Mon, 41(5): 577-587 (in Chinese).
- 文稼齐, 2024. 藏东南墨脱地区降水的垂直结构特征研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Wen J Q, 2024. Study on the vertical structure characteristics of precipitation in the Mâlog Area of south-eastern Tibetan Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- 杨文霞, 范皓, 杨洋, 等, 2019. 一次层状云降雨过程多源遥感特征参量演变分析[J]. 气象, 45(9): 1278-1287. Yang W X, Fan H, Yang Y, et al, 2019. Evolution analysis of physical quantities obtained by multi-source remote[J]. Meteor Mon, 45(9): 1278-1287 (in Chinese).
- 赵欣, 王改利, 文稼齐, 等, 2025. 基于广义 Γ 模型的完整雨滴谱分布拟合法[J]. 应用气象学报, 36(3): 328-338. Zhao X, Wang G L, Wen J Q, et al, 2025. A method for fitting full raindrop size distribution based on generalized γ model[J]. J Appl Meteor Sci, 36(3): 328-338 (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, doi: 10.1029/RG011i001p00001.
- Bracci A, Sato K, Baldini L, et al, 2023. Development of a methodology for evaluating spaceborne W-band Doppler radar by combined use of Micro Rain Radar and a disdrometer in Antarctica[J]. Remote Sens Environ, 294: 113630, doi: 10.1016/j.rse.2023.113630.
- 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.

-
- Cha J W, Chang K H, Yum S S, et al, 2009. Comparison of the bright band characteristics measured by Micro Rain Radar (MRR) at a mountain and a coastal site in South Korea[J]. *Adv Atmos Sci*, 26(2): 211-221, doi: 10.1007/s00376-009-0211-0.
- 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 of Japan*. Ser. II, 91(2): 215-227, doi: 10.2151/jmsj.2013-208.
- Garcia-Benadi A, Bech J, Gonzalez S, et al, 2020. Precipitation type classification of micro rain radar data using an improved Doppler spectral processing methodology[J]. *Remote Sens*, 12(24): 4113, doi: 10.3390/rs12244113.
- Garcia-Benad í A, Bech J, Gonzalez S, et al, 2021. A new methodology to characterise the radar bright band using Doppler spectral moments from vertically pointing radar observations[J]. *Remote Sens*, 13(21): 4323, doi: 10.3390/rs13214323.
- Goenka R, Anoop S, Ramana M V, 2023. Characteristics of precipitation over the southern ocean using micro rain radar and its comparison with space-based measurements[J]. *J Indian Soc Remote Sens*, 51(8): 1619-1630, doi: 10.1007/s12524-023-01727-8
- Gunn R, Kinzer G D, 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air[J]. *J Atmos Sci*, 6(4): 243-248, doi: 10.1175/1520-0469(1949)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2.
- Mehta S, Singh S, Mitra A, et al, 2020. Modeling of raindrop size distribution observed using micro rain radar over Darjeeling (27.05°N, 88.26°E): an eastern Himalayan region[J]. *Pure Appl Geophys*, 177(6): 2959-2976, doi: 10.1007/s00024-019-02370-6.
- Peters G, Fischer B, Andersson T, 2002. Rain observations with a vertically looking micro rain radar (MRR)[J]. *Boreal Env Res*, 7(4): 353-362.
- Peters G, Fischer B, Münster H, et al, 2005. Profiles of raindrop size distributions as retrieved by microrain radars[J]. *J Appl Meteor*, 44(12): 1930-1949, doi: 10.1175/JAM2316.1.
- Wang H, Lei H C, Yang J F, 2017. Microphysical processes of a stratiform precipitation event over eastern China: analysis using micro rain radar data[J]. *Adv Atmos Sci*, 34(12): 1472-1482, doi: 10.1007/s00376-017-7005-6.
- Wen L, Zhao K, Wang M Y, et al, 2019. Seasonal variations of observed raindrop size distribution in east China[J]. *Adv Atmos Sci*, 36(4): 346-362.
- Zhou L L, Dong X Q, Fu Z K, et al, 2020. Vertical distributions of raindrops and Z-R relationships using microrain radar and 2-D-video distrometer measurements during the integrative monsoon frontal rainfall experiment (IMFRE)[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 125(3): e2019JD031108, doi: 10.1029/2019JD031108.