暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

微雨雷达观测的襄阳地区降水垂直结构特征

高兰 程昌玉 严婧 赖晨 赵羽佳 徐桂荣

Vertical structure characteristics of precipitations in Xiangyang observed by micro rain radar

GAO Lan，CHENG Changyu，YAN Jing，LAI Chen，ZHAO Yujia，XU Guirong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-130

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

2020年梅雨期长江中下游地区雨滴谱垂直结构特征
Vertical structures of raindrop size distributions over the middle and lower reaches of Yangtze River during the Meiyu period in 2020
暴雨灾害. 2023, 42(4): 455-466 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-244

青藏高原东侧甘孜云雷达观测的非降水云垂直结构特征分析
Vertical structure of non-precipitation cloud obtained from cloud radar observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau
暴雨灾害. 2020, 39(5): 442-450 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.002

2020年梅雨期上海一次强降水过程垂直结构的综合观测分析
Observational analysis of vertical structure of a heavy precipitation event in Shanghai during Meiyu period in 2020
暴雨灾害. 2020, 39(6): 658-665 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.014

山东省三个不同区域降水雨滴谱特征的对比分析
Comparison study of raindrop size distribution in three regions of Shandong Province
暴雨灾害. 2023, 42(5): 585-594 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-187

“海葵”台风(1211号)暴雨雨滴谱特征分析
Analysis of raindrop spectrum characteristics for a heavy rain event caused by typhoon Haikui (No.1211) in Anhui
暴雨灾害. 2020, 39(2): 167-175 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.007

短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比
Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain
暴雨灾害. 2023, 42(1): 1-12 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-119

关注微信公众号，获得更多资讯信息

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 Lan, CHENG Changyu, YAN Jing, et al. 2025. Vertical structure characteristics of precipitations in Xiangyang observed by micro rain radar [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):226−235 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−130

微雨雷达观测的襄阳地区降水垂直结构特征

高兰[1], 程昌玉[1], 严婧[1], 赖晨[1], 赵羽佳[2], 徐桂荣[3]

(1. 湖北省气象信息与技术保障中心/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074; 2. 湖北省襄阳市人工影响天气办公室, 襄阳 441021; 3. 中国气象局武汉暴雨研究所 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205)

摘　要: 研究雨滴谱及其反演特征量的垂直结构特征有助于加深对降雨微物理结构认识和改善雷达定量降水估计。利用 2022 年 3 月—2023 年 5 月襄阳国家气象站微雨雷达和雨量计数据, 研究了该地区不同季节下对流云降水、层状云降水和弱降水等三种降雨类型的雨滴谱及其反演的反射率因子等特征量垂直结构特征。结果表明: (1) 襄阳地区春季降雨云的零度层亮带多数集中在约 4 km 高度, 降雨微物理参量在零度层亮带有跳变现象。(2) 在零度层亮带以下, 不同降雨类型的垂直结构存在明显差异, 对流云降水雨滴谱最宽, 数浓度最高, 雨滴下降过程中水汽凝结增长和雨滴碰并共同存在, 1 km 以下时雨滴碰并过程占主导; 层状云降水雨滴谱较宽, 数浓度较高, 雨滴下降过程中的碰并作用较弱降水明显, 同时还存在明显的小雨滴蒸发作用和部分大雨滴的破碎; 弱降水雨滴谱较窄, 数浓度较小, 在 3~1 km 高度时, 雨滴碰并作用较为明显, 在1 km 以下时, 大、中雨滴破碎, 小雨滴大量蒸发。(3) 对于层状云降水和对流云降水, 中雨滴对地面降水强度贡献最显著, 而对于弱降水, 小雨滴对地面降水强度贡献最显著。(4) 夏、秋季弱降水和层状云降水对应的微物理过程具有一定的相似性, 但雨滴碰并过程不如春季明显, 春、夏季对流云降水的微物理变化过程较秋季强烈, 说明在不同季节, 各降雨类型的微物理过程相似性和差异性并存。

关键词: 降水结构特征; 微雨雷达; 雨滴谱; 襄阳地区

中图法分类号: P412　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−130

Vertical structure characteristics of precipitations in Xiangyang observed by micro rain radar

GAO Lan[1], CHENG Changyu[1], YAN Jing[1], LAI Chen[1], ZHAO Yujia[2], XU Guirong[3]

(1. *Hubei Meteorological Information and Technological Support Center/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research*, *Wuhan* 430074; 2. *Hubei Xiangyang Weather Modification Office*, *Xiangyang* 441021; 3. *China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research*, *Institute of Heavy Rain*, *China Meteorological Administration*, *Wuhan* 430205)

Abstract: Studying the vertical structure characteristics of raindrop size distributions (DSD) and their inversion features can help to promote our understanding of rainfall microphysical structures and improve the radar quantitative precipitation estimation. In this paper, the vertical structure characteristics of DSD and their inversion features corresponding to three rain types, namely convective rain (CR), stratiform rain (SR), and light rain (LR) in different seasons, are investigated based on the MRR data from March 2022 to May 2023 at Xiangyang national basic meteorological station. The results are as follows. (1) The bright band height of the rainfall clouds in spring of Xiangyang is mainly concentrated at about 4 km and the microphysical parameters of the precipitation suffer severe trembling here. (2) The vertical structures of DSD corresponding to different rain types are obviously different below the bright band. CR has the widest DSD spectra and highest number concentration. The evaporation and collision process co-exist as the rain drops, however, below 1 km the evaporation is dominant. SR showed relativity wide DSD spectra and high number concentration. Its evaporation process is more obvious

收稿日期: 2024−07−05; **定稿日期**: 2024−09−06

资助项目: 湖北省自然科学基金气象创新发展联合基金项目 (2022CFD018, 2023AFD107); 湖北省气象局科技发展基金 (青年) 项目 (2023Q08)

第一作者: 高兰, 主要从事气象雷达数据处理及其应用研究。E-mail: gaolan@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 徐桂荣, 主要从事大气探测和云-降水研究。E-mail: grxu@whihr.com.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

than that of LR as the rain drops. Besides, there are also significant evaporation for small raindrops and fragment for some large raindrops. LR has a narrower spectra and smaller number concentration. At height 3~1 km, the collision process is obvious. At height below 1 km, large and medium raindrops fragment and small raindrops evaporate in large quantities. (3) For SR and CR, medium raindrops contribute most significantly to the surface rain rate. However, for LR, small raindrops contribute most significantly to the surface rain rate. Large raindrops make the least contribution for all cases. (4) The microphysical processes of LR and SR in summer and autumn are similar to some extent, yet the collision–coalescence processes is weaker than that in spring, while the microphysical change process of CR in spring and summer is stronger than that in autumn, and this shows the microphysical processes of different rainfall types have both seasonal similarities and differences.

Key words: precipitation structure characteristics; micro rain radar; raindrop size distributions; Xiangyang area

引　言

雨滴谱分布 (Raindrop Size Distributions, DSD) 是描述雨滴数浓度随雨滴直径变化的函数 (周伶俐等, 2023)。基于 DSD 与降水特征量的理论关系, 可计算出反射率因子、降水率及液态水含量等降水物理量, 为研究降水的垂直结构提供关键信息 (Harikumar et al., 2009)。此外, 雨滴在下落过程中受重力、浮力和空气阻力共同作用, 主要发生碰并、破碎和蒸发等微物理过程, 导致 DSD 在垂直方向上存在一定差异 (Tang et al., 2014; 左园园等, 2022)。因此, 研究 DSD 及其反演特征量的垂直变化对研究降水的垂直结构并理解其物理过程具有重要意义。

微雨雷达 (Micro Rain Radar, MRR) 具有较高的时间和空间分辨率, 可观测从地面至高空 6 km 内不同高度层的降水和 DSD 特征, 这对于认识降水过程、改进数值预报模式和雷达定量降水估计、提高短时天气预报预警准确率、研究人工影响天气等具有重要意义 (Ojo et al., 2019; Ramadhan et al., 2020)。Peters 等 (2002) 首次使用 MRR 的长期观测数据进行对比研究, 认为 MRR 在改进雷达反射率-降水强度 (Z-R) 关系和促进雷达定量降水估计等方面具有潜在应用价值。Diederich 等 (2004) 将 MRR 与雨滴谱仪等进行对比, 认为 MRR在研究降雨的微观结构及改进天气雷达定量降水估计等方面具有较大潜力。温龙等 (2015) 将 MRR与业务 S 波段天气雷达等进行定量对比分析, 评估了 MRR 探测的 DSD、降水和雷达回波精度。Adirosi等 (2015) 结合地面二维视频 (2DVD) 雨滴谱仪估算的垂直风影响, 对 MRR 多普勒频谱进行再处理, 以便从 MRR 频谱中更好地估算 DSD。王洪等 (2023) 采用 RaProM 算法 (Garcia-Benadi et al., 2020)对液态降水参数进行反演, 并对粒子相态进行识别。这些研究加深了对 MRR 探测性能及其在降水微物理研究中应用潜力的认识。

随着 MRR 的不断普及和发展, 国内外学者利用 MRR 对不同国家和地区的降水垂直结构特征进行研究, 充分挖掘 MRR 在更多领域的应用价值。杨文霞等 (2019) 利用 MRR 以及地面雨量计等观测资料, 对河北省邢台市某次西南涡天气过程的降水云系进行了综合分析, 推断出该次天气过程有利的人工增雨作业时机。Mehta 等 (2020) 基于 MRR 对喜马拉雅山脉东部地区的 DSD 分布进行研究, 提出了一种新的γ模型。傅新姝等 (2020) 基于 MRR 等多源新型遥感探测资料, 对上海梅雨期一次强降水过程的垂直结构特征进行分析, 获得了降水垂直结构的演变特征。杜牧云等 (2022) 综合利用 MRR 等多源探测资料, 对鄂西南某次伴有局地冰雹和雷雨大风的强对流过程进行了中小尺度特征分析, 增强了对降水物理过程的认识。Goenka 等 (2023) 利用 MRR 对南极洲上空降水特征进行了分析, 认为南极洲大多数降水事件强度为 0~5 mm·h^{-1}和 5~90 mm·h^{-1}, 零度层亮带出现在平均海平面以上 1~3 km 高度范围内。

综上所述, MRR 在研究降水结构特征方面具有较为明显的优势。为了进一步提升综合降水探测能力, 襄阳国家基本气象站于 2019 年引进了 MRR-2 型微雨雷达, 这为研究襄阳降水垂直结构特征提供了有利条件。本文基于 2022 年 3 月至 2023 年 5 月襄阳国家基本气象站 MRR 所测数据, 首先以地面翻斗式雨量计为基准, 对 MRR 数据进行评估, 而后对比分析不同季节下三种降雨类型, 即层状云降水 (Stratiform Rain, SR)、对流云降水 (Convective Rain, CR) 和弱降水 (Light Rain, LR) 的平均 DSD、平均降水率谱、质量加权平均直径、标准化截距参数以及平均反射率因子等参数, 研究不同季节、不同降雨类型的降水结构特征, 探讨雨水在下降过程中的微物理过程, 旨在为襄阳地区 Z-R 关系的改进以及雷达定量降水估计能力的提升提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本研究所用数据来自襄阳国家气象站的同址观测设备, 包括德国 Metek 公司生产的 MRR-2 型微雨

雷达和常规地面业务降水观测设备 SL3-1 型翻斗式雨量计, 两者之间的直线距离约 45 m。

MRR 是一种采用连续调频技术的垂直指向性 K 波段多普勒天气雷达, 工作频率为 24.15 GHz, 波长为 1.25 cm, 垂直分辨率可调, 当垂直分辨率为 0.1 km (0.2 km) 时, 起测高度也为 0.1 km (0.2 km), 对应的最大探测高度为 3.1 km (6.2 km), 时间分辨率为 10 s。SL3-1 型翻斗式雨量计分辨率为 0.1 mm, 测量范围为 0~4 mm·min^{-1}。

研究数据包括雨量计和 MRR 观测的降雨信息、降雨粒子谱信息及其反演的物理参量, 对应时间段为 2022 年 3 月 1 日至 2023 年 5 月 11 日。其中, 由于 12 月到次年 2 月通常观测到的是降雪事件, 而本次的研究对象为降雨事件, 因此将 2022 年 12 月至 2023 年 2 月的数据予以剔除。另外, 从 2023 年 1 月开始, MRR 的高度分辨率由原来的 0.1 km 调整为 0.2 km, 因此本文在统计过程中, MRR 最底层对应的高度会根据实际情况调整。

1.2 研究方法

1.2.1 降水特征量计算

MRR 通过多普勒频移得到降水粒子的下落速度, 根据雨滴下落末速度与雨滴直径之间的关系以及 DSD 与后向散射截面谱之间的理论关系 (Atlas et al., 1973), 计算不同高度的 DSD。在静止大气的假设下雨滴下落末速度与其直径之间的经验公式解析形式为

$$v = \left(9.65 - 10.3 \cdot e^{-0.6 \cdot D}\right) \cdot \delta(z) \tag{1}$$

其中D为高度z时下落末速度为v的粒子直径, $\delta(z)$为订正因子 (Foote and Toit, 1969)。利用多普勒功率谱$P_r(v,z)$计算雨滴谱$N(D,z)$

$$N(D,z) = C_R / g_n(z) \cdot z^2 l(z) P_r(v,z) / \sigma(D) \cdot \partial v / \partial D(v,z) \tag{2}$$

其中, C_R为雷达常数, $g_n(z)$为标准化的转化函数, $l(z)$为双向衰减路径积分, 单个直径D的球形粒子散射截面$\sigma(D)$可利用米散射理论计算得到。

根据定义, 反射率因子 Z (dBz)、雨强R (mm·h^{-1}) 和小时雨量 R_h (mm) 等特征量的计算公式 (Battaglia et al., 2010; 饶晨等, 2020) 如下

$$Z = 10 \cdot \log_{10}\left(\sum_{i=1}^{64} N(D_i) \cdot D_i^6 \cdot \Delta D_i\right) \tag{3}$$

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^{64} V(D_i) \cdot N(D_i) \cdot D_i^3 \cdot \Delta D_i \tag{4}$$

$$R_\mathrm{h} = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} \bar{R} \tag{5}$$

$N(D_i)$(mm^{-1}·m^{-3})为单位体积单位谱间隔内雨滴数浓度。D_i为第i档雨滴直径, 共 64 档; ΔD_i(mm)为对应的直径间隔, $V(D_i)$ (m·s^{-1}) 是第i档速度谱下落速度。$N(D_i)$(mm^{-1}·m^{-3})代表直径在D_i和$D_i+\Delta D_i$之间, 单位间隔内雨滴的数浓度。$\bar{R}$为 1 min 雨强的平均值, 当观测的雨强值不连续时, 将空值填充为零。

基于 DSD 对降雨微物理结构进行特征分析时, 通常采用质量加权平均直径D_m(mm)和标准化截距参数N_w(m^{-3}·mm^{-1})来分别表征雨滴直径和雨滴数浓度。

$$D_\mathrm{m} = \frac{M_4}{M_3} \tag{6}$$

$$N_\mathrm{w} = \frac{4^3}{\pi \rho_\mathrm{w}} \cdot \frac{10^3 L_\mathrm{WC}}{D_\mathrm{m}^{\ 4}} = \frac{128 (M_3)^5}{3 (M_4)^4} \tag{7}$$

其中, M_3和M_4分别表示 DSD 的 3 阶矩和 4 阶矩, ρ_w为固定系数, L_{wc}表示液态水含量。DSD 的 n 阶矩定义如下

$$M_n = \int_{D_\mathrm{min}}^{D_\mathrm{max}} N(D) \cdot D^n \mathrm{d}D \tag{8}$$

1.2.2 降雨分类

按照分钟雨强的大小及其随时间的变化将降雨类型分为层状云降水 (SR)、对流云降水 (CR) 和弱降水 (LR) 三种降雨类型, 雨强大于 0 mm·h^{-1}但不属于以上三种类型的归为待定类型 (Chen et al., 2013; 江雨霏等, 2023)。具体方法如下: 对于某一时刻t_i, 其对应的雨强记为$R(t_i)$。如果在时间区间$[t_i - N_\mathrm{s}, t_i + N_\mathrm{s}]$内的$R$值均大于或等于 0.5 mm·h^{-1}, 且标准差小于或等于 1.5 mm·h^{-1}, 则归类为 SR; 如果在时间区间$[t_i - N_\mathrm{s}, t_i + N_\mathrm{s}]$内的$R$值均大于或等于 5 mm·h^{-1}, 且标准差大于 1.5 mm·h^{-1}, 则归类为 CR; 当R值处在 (0, 0.5) mm·h^{-1}时, 归类为 LR。本文N_s取值为 5 s, 每个样本的R值取 MRR 第一层的分钟级平均值。按照不同季度 (春季 3—5 月, 夏季 6—8 月, 秋季 9—11 月) 对样本降雨类型进行统计, 结果如图 1 所示。统计总样本量为 23 414 min, 样本总累积降雨量为 810.73 mm, 其中, LR、SR、CR 和待定类型样本数占比分别为 53.28%、22.06%、2.30% 和 22.35%, 对应的累积降雨量占比分别为 5.28%、28.15%、29.01% 和 37.56%。值得注意的是, LR 样本数量占比通常较大, 但是对总累积降雨量贡献却较小; 而 CR 样本数量占比虽然较小, 但其对总累积降雨量贡献却较大。

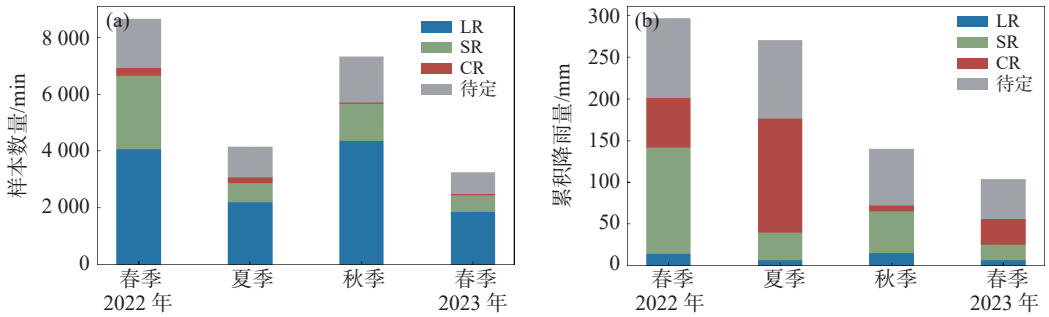


图 1 襄阳站 2022—2023 年不同季节弱降水 (LR)、层状云降水 (SR)、对流云降水 (CR) 和待定降雨类型的样本数量 (a) 和累积降雨量 (b) 分布统计图

Fig. 1 Statistical distributions of the (a) samples and (b) accumulated precipitations of the classified light rain (LR), stratiform rain (SR), convective rain (CR), and unclassified rain types in different seasons from 2022 to 2023 at Xiangyang station

2 结果分析

2.1 MRR 雨量反演精度评估

鉴于累积降雨量是评估 MRR 准确性的重要参数之一 (Kirankumar and Kunhikrishnan, 2013), 本研究通过对比雨量计的季度累积降雨量和 MRR 在第一层高度的季度累积降雨量, 来评估 MRR 的雨量反演精度, 对比结果见图 2。MRR 春夏季累积降雨量普遍偏大, 而秋季累积降雨量则偏小。

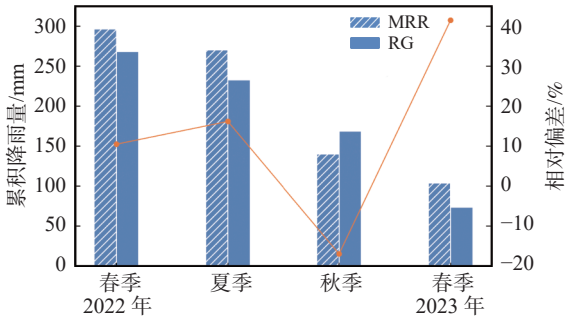


图 2 2022—2023 年襄阳站不同季节微雨雷达 (MRR) 和雨量计 (RG) 累积降雨量及相对偏差对比图

Fig. 2 Comparison plot of the accumulated precipitation of MRR and rain gauge and the corresponding relative deviation in different seasons from 2022 to 2023 at Xiangyang station

总体而言, 相对于雨量计观测, MRR 总的累积降雨量偏大约 9.09%。可见, MRR 和雨量计的季度累积降雨量的一致性较好, 说明 MRR 反演得到的雨强可用。相比于雨量计, MRR 整体上高估了季度累积降雨量。造成 MRR 和雨量计的季度累积降雨量产生偏差的原因, 一方面是两种设备的分辨率和测量原理不同, 特别是雷达信号的雨衰影响以及下沉气流引起的频谱混叠 (Jana et al., 2018), 春夏季 CR 发生相对较多, MRR 受雨衰和下沉气流的影响严重, 使得所测累积降雨量普遍偏大; 另一方面是由于设备的制造工艺差异等影响产生的系统性偏差 (李锐和傅云飞, 2005)。

2.2 不同降雨类型的垂直结构特征分析

DSD 在垂直方向的演变能够反映降水粒子在下落过程中经历的吸附增长、碰并、破碎、蒸发等微物理过程, 从而揭示云雨转化和降水形成的机制。平均降水率谱可表征不同直径的雨滴对降水强度的贡献 (Zhou et al., 2020)。已有的研究表明, 不同降雨类型的 DSD 及其对应的微物理过程通常不同 (Chen et al., 2013; Wen et al., 2016), 研究不同降雨类型的垂直结构特征有助于提高对降水微物理过程的认识。图 3 和图 4 分别给出了襄阳站不同季节、不同降雨类型对应的平均 DSD 和平均降水率谱等值线图。由于 MRR 垂直分辨率的调整, 2023 年春季观测高度增加了 1 倍。在 3.1 km 以下, 各季节对应降雨类型的平均 DSD (平均降水率谱) 的分布形态具有较好的一致性, 证实了 MRR 观测的连续性和稳定性, 略微的差异与不同统计样本量有关。

结合图 3 和图 4 可以发现, 2023 年春季零度层亮带多数稳定在 4 km 左右, 在天气较为寒冷时, 零度层亮带可能会低于 4 km, 使得平均 DSD 在 4 km 以下存在波动情况。总体来看, 小雨滴 (D<1 mm) 数浓度大于中等雨滴 (1≤D<3 mm) 数浓度, 大雨滴 (D≥3 mm) 数浓度最小。CR 的 DSD 参量值普遍大于 SR, LR 的 DSD 相对最小, 这可能与不同降雨类型对应的不同雨强阈值以及不同微物理过程有关。

随着高度下降, 在 3~1 km 内, CR 小、中、大雨滴均增多; 在 1 km 以下, CR 以雨滴碰并过程为主, 碰并过程消耗了小雨滴, 增加了中等雨滴和大雨滴。对于 SR, 在 3~1 km 内, 小雨滴的蒸发和碰并使小雨滴减少, 中等雨滴增多; 同时, 大雨滴的破碎使大雨滴减少, 中等雨滴增多。在 1 km 以下, SR 小雨滴明显减少, 中等雨滴和大雨滴有所增多, 说明在接近地面时雨滴碰并过程较为明显且小雨滴消耗较大, 同时还可能存在小雨滴的蒸发作用。对于 LR, 在 3~

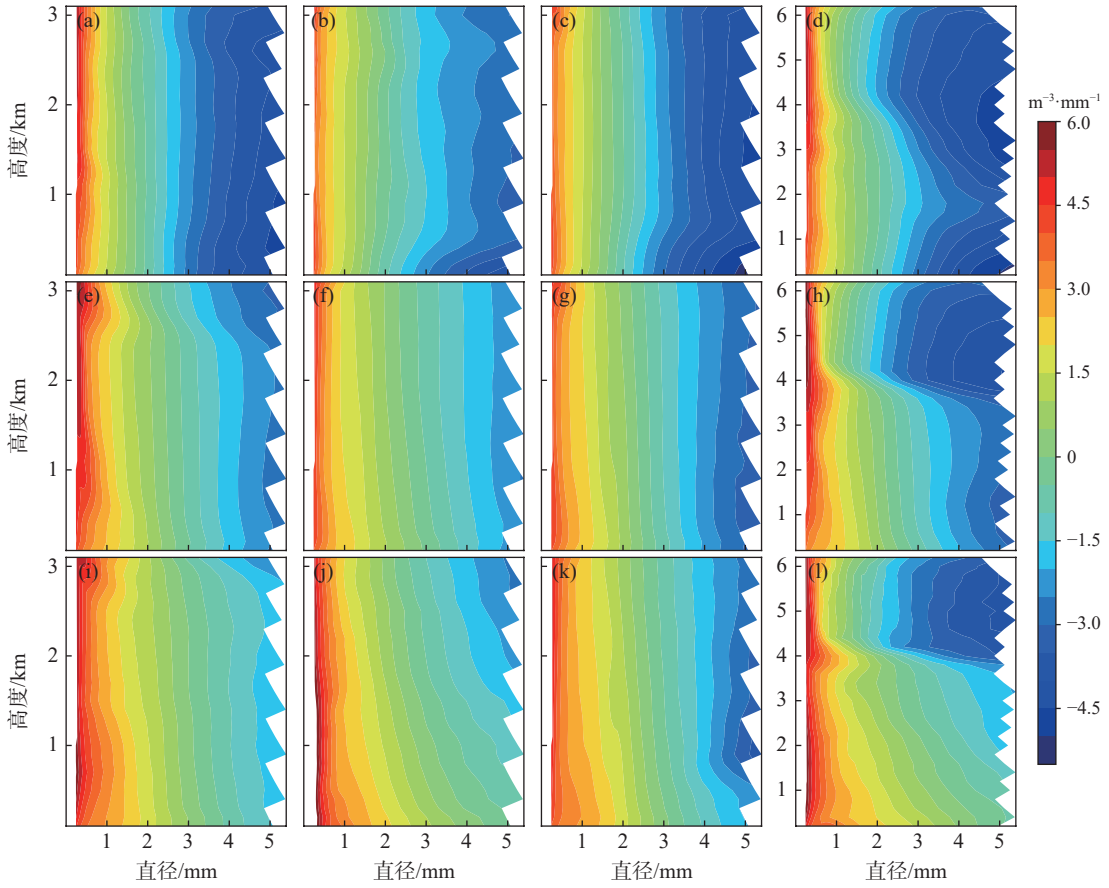


图 3 襄阳站 2022 年春 (a, e, i)、夏 (b, f, g)、秋 (c, g, k) 和 2023 年春季 (d, h, i) MRR 反演的 LR (a, b, c, d)、SR (e, f, g, h) 和 CR (i, j, k, l) 的平均雨滴谱 $\log_{10}N(D)$ 在雨滴直径和高度二维空间的等值线图

Fig. 3 Contour plots of MRR inverted mean raindrop spectra $\log_{10}N(D)$ in the two-dimensional space of raindrop diameters and heights for (a, b, c, d) LR, (e, f, g, h) SR, and (i, j, k, l) CR at Xiangyang station in the (a, e, i) spring, (b, f, j) summer, (c, g, k) autumn of 2022, and (d, h, i) spring of 2023

1 km 内, 小雨滴减少, 中等雨滴基本保持不变, 大雨滴略微增多, 暗示该高度层以雨滴碰并过程为主, 大雨滴数浓度的增加消耗了小雨滴。在 1 km 以下, LR 小雨滴继续减少, 中等雨滴变化不明显, 大雨滴急剧减少, 说明在接近地面时, 雨滴的破碎和蒸发作用均较为明显, 大、中雨滴的破碎使大雨滴数浓度急剧减小, 虽然该过程会导致小雨滴增多, 但小雨滴的大量蒸发抵消了这一增长, 并使其数浓度进一步减小。

在接近地面时, LR 小雨滴对雨强的贡献最为明显, 中等雨滴次之, 大雨滴对雨强的贡献极其微弱。SR 对雨强起主要贡献的为中等雨滴, 小雨滴对雨强的贡献较为明显, 随着雨滴粒径的进一步增大, 对雨强的贡献越来越小。这个结论与宋灿等 (2019) 对河北邢台的层状云降水微物理特征量和 DSD 的垂直分布特征研究结果一致, 即近地面直径在 1~2 mm 之间的粒子对降水强度贡献最大。然而对于 CR, 对雨强起主要贡献的雨滴粒径受季节因素影响较前两者大, 总体来讲, 中等雨滴对雨强贡献均较大, 2022 年夏季以及 2023 年春季大雨滴对雨强贡献也不弱。

不同季节的 DSD 既有一定的相似性又有一定的差异。夏季和秋季的 LR (SR) 雨滴谱相似度较高, 说明夏季和秋季的 LR (SR) 对应的微物理过程较为相似。春季 LR (SR) 小雨滴数浓度普遍大于夏季和秋季, 且小雨滴对雨强的贡献也明显大于夏季和秋季; 然而夏季 LR (SR) 大雨滴数浓度及其对雨强的贡献均大于春季和秋季。春季和夏季 CR 小雨滴数浓度及其对雨强的贡献均大于秋季, 中等雨滴和大雨滴随高度变化较秋季更为剧烈, 说明春季和夏季 CR 对应的微物理变化过程较秋季更为强烈。

2.3 不同降雨类型的特征量垂直廓线

DSD 特征量的差异能够反映不同的微物理过程, 通过分析 DSD 特征量垂直廓线特征有助于理解降雨的微物理过程。图 5 给出了襄阳站 2022 年春、夏、秋季以及 2023 年春季 D_m、$\log_{10}N_w$和反射率因子统计平均值 (Z_e) 垂直廓线图。由于观测模式的改变使得 2023年的高度分辨率由原来的 100 m 调整为 200 m, 2023 年春季 $\log_{10}N_w$ 变化较 2022 年春季更为平滑, 说明垂直廓线抗干扰能力有所提高, 并且分辨

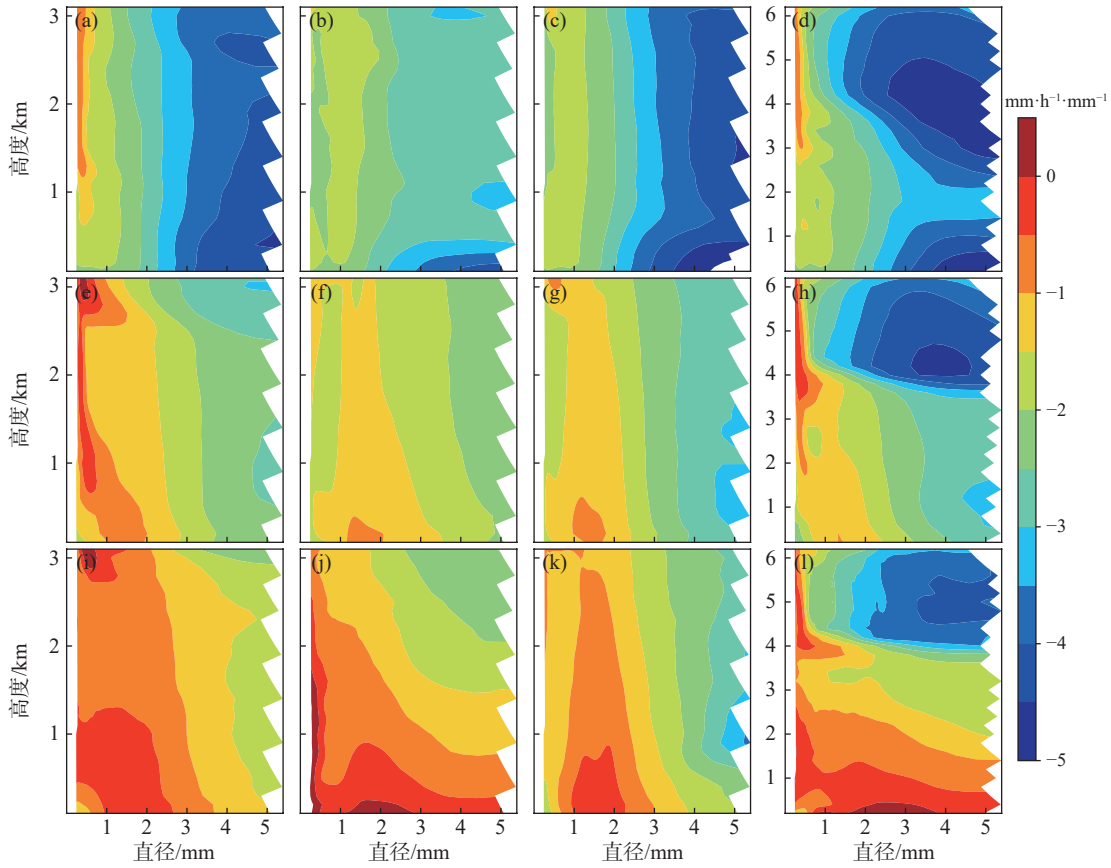


图 4 同图 3, 但为平均降水率谱 $\log_{10}R_D(D)$

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the mean precipitation rate spectra $\log_{10}R_D(D)$

率的改变使得观测高度由原来的 3.1 km 提升至 6.2 km, 相比于2022 年春季, 2023 年春季能够明显观测到零度层亮带及其附近的特征量变化。在零度层亮带 (约 4 km) 以上高度, D_m、$\log_{10}N_w$ 和 Z_e 随高度变化缓慢, 在 CR、SR、LR 三种降水类型中, CR 具有最小的 D_m 而 LR 具有最大的 D_m, 然而 LR 具有最小 $\log_{10}N_w$ 而 SR 具有最大的 $\log_{10}N_w$, 说明不同降雨类型在零度层亮带以上高度具有相似的物理过程, 但不同降雨类型会造成滴谱参量数值差异。在零度层亮带 (4 km 左右) 以下高度, 不同季节的 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 随高度的变化具有一定的相似性。总体上来说, 随着高度下降, LR 的 D_m 逐渐增大而 $\log_{10}N_w$总体减小, 说明 LR 在该高度区域以雨滴碰并过程为主; SR 的 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 随高度的变化与 LR 相似, 但 SR 的 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 随高度的变率大于 LR, 说明 SR 的雨滴碰并过程比 LR 显著; CR 的 D_m 也随高度下降而增大且变率比 SR 更大, 在 1 km 以下 D_m 增大更快, 但 CR 的 $\log_{10}N_w$ 随高度下降均出现了先增大后变小的现象, 这可能是水汽凝结增长和雨滴碰并的共同结果, 因为 CR 往往有强烈的上升气流, 能够让水汽凝结增长过程对雨滴粒径增大和数浓度增加产生更大作用, 但随着雨滴粒径的增大和雨滴数浓度的增加, 雨滴的碰并过程逐渐占主导, 导致 1 km 以下 CR 的 D_m 快速增长而数浓度开始下降。可见, 不同降雨类型其微物理过程会有差异, 而微物理过程的差异则产生不同的降雨效果。

不同季节的 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 随高度的变化既有一定的相似性又有一定的差异。随着高度下降, 夏、秋季的 LR (SR) 对应的 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 随高度的变化规律基本一致, 说明夏季和秋季的 LR (SR) 对应的微物理过程相似度较高。春季 LR (SR) 对应的 D_m 增大速率较夏、秋季强, 且其 $\log_{10}N_w$ 减小速率较夏、秋季更为明显, 说明春季 LR (SR) 的碰并过程较夏、秋季更为明显。以上现象的出现可能与不同季节下降水云系的发展以及气溶胶影响等相关。Hao 等 (2017) 对江淮地区夏季气溶胶的研究结果表明, 气溶胶作为云凝结核会引起云滴液态含水量增大, 增加云凝结核浓度会导致 1 km 以下云滴数浓度增加。李照荣等 (2003) 对兰州地区秋季层状云的研究结果表明, 秋季层状云中普遍存在逆温层, 逆温较强时, 气流的垂直速度、云厚度、水汽输送都被抑制, 雨滴增长有限。王斌等 (2008) 对鄂西北夏季对流降水云的研究表明, 生成雨粒子的主要冰相过程为: 雨水在上升气流的携带下积聚到雨霰作用带中, 在达到峰值后, 霰

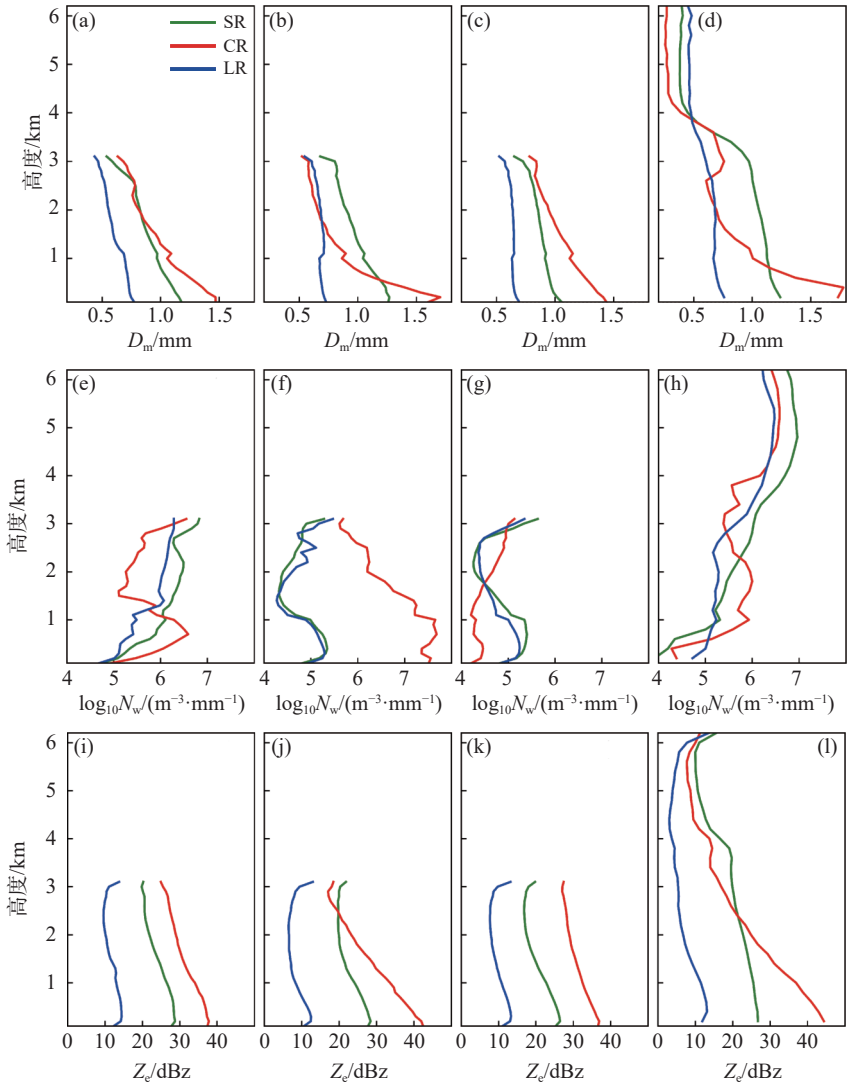


图 5 襄阳站 2022 年春 (a, e, i)、夏 (b, f, j)、秋 (c, g, k) 以及 2023 年春季 (d, h, l) 对应的统计平均 D_m (a, b, c, d)、$\log_{10}N_w$ (e, f, g, h) 以及 Z_e (i, j, k, l) 垂直廓线图

Fig. 5 Vertical profiles of statistical average (a, b, c, d) D_m, (e, f, g, h) $\log_{10}N_w$ and (i, j, k, l) Z_e in the (a, e, i) spring, (b, f, j) summer and (c, g, k) autumn of 2022 and (d, h, l) spring of 2023 at Xiangyang station

融化成雨水。因此，夏秋两季的降水主要为霰粒子或冻滴融化产生的地面降水。而王秀娟等 (2013) 对我国中东部地区春季降雨过程的研究表明，雪是形成雨滴的重要粒子，在雪完全融化为后，雨滴粒子完全由重力碰并增长。因此春季的碰并过程一般更为明显。

春、夏季 CR 的 D_m 增大较秋季更明显，且春、夏季 CR 的 $\log_{10}N_w$ 在垂直方向上的变化较秋季也更剧烈，春、夏季 CR 的 Z_e 垂直递减率达到 5 dB·km^{-1} 以上，而秋季 CR 的 Z_e 垂直递减率约为 3 dB·km^{-1}，说明春、夏季 CR 在下降过程中的微物理变化较秋季更加强烈。2022 年春季和 2023 年春季在 3 km 以下的 D_m 垂直递减率、$\log_{10}N_w$ 变率以及 Z_e 垂直递减率均存在一定的差异，这可能与 2023 年春季样本量较 2022 年春季样本量偏少(图 1)有关。

由于 Z_e 与雨滴粒径和数浓度均有关，其中雨滴粒径贡献相对较大，因此，图 5 中 Z_e 的垂直结构特征更接近 D_m，但也受数浓度变化的调制。总体上，Z_e 随高度的下降逐渐增大，其中，CR 的 Z_e 随高度下降增大最快，SR 次之，LR 最慢，这与图 5 中 D_m 的垂直结构特征相近。需要指出的是，由于 MRR 的第一层和顶层数据容易受杂波影响而出现误差 (周伶俐等, 2023)，这可能造成 MRR 的 D_m、$\log_{10}N_w$ 和 Z_e 在第一层和顶层的变化存在不确定性。

3 结论与讨论

本文基于襄阳国家气象站 2022 年 3 月 1 日—2023 年 5 月 11 日微雨雷达 (MRR) 和雨量计观测数据，

对 MRR反演的雨量精度进行评估, 并探讨了襄阳地区层状云降水 (SR)、对流云降水 (CR) 以及弱降水 (CR) 三种降雨类型的降水垂直结构特征。得出以下主要结论:

(1) 襄阳地区春季零度层亮带多数集中在 4 km 左右高度。平均雨滴谱、平均降水率谱以及平均 D_m 在零度层亮带均表现为随高度降低而明显的升高, 而统计平均 Z_e 在零度层亮带存在突然的跳变。

(2) 不同降雨类型的主要降雨贡献粒径不同。对于 CR 和 SR, 中雨滴对地面降水强度贡献最显著; 而对于 LR, 小雨滴对地面降水强度贡献最显著, 中雨滴次之; 大雨滴的贡献均最小。

(3) 不同降雨类型的雨滴谱结构存在明显差异。CR 雨滴谱最宽, 数浓度最高, SR 次之, LR 雨滴谱最窄, 数浓度最小。随着高度下降, 在 3~1 km 内, CR 水汽凝结及小雨滴和 (或) 中雨滴的碰并使所有雨滴数浓度均增加, SR 小雨滴的蒸发和碰并及大雨滴的破碎消耗了小雨滴和大雨滴, 增加了中雨滴, LR 碰并过程消耗了小雨滴, 增加了大雨滴; 在 1 km 以下, CR 雨滴碰并消耗了小雨滴, 增加了中雨滴和大雨滴, SR 雨滴碰并和可能存在的蒸发使小雨滴数浓度明显减小, 中雨滴和大雨滴数浓度有所增加, LR 大雨滴和中雨滴的破碎和蒸发使两者数浓度急剧减小, 小雨滴的大量蒸发使其数浓度不增反降。

(4) 不同降雨类型的微物理过程不同。在零度层亮带 (约 4 km) 以上高度, 春季不同降雨类型雨滴谱参量数值存在差异, 但是具有相似的物理过程; 在零度层亮带以下, 随着高度下降, LR 以雨滴碰并过程为主, SR 雨滴碰并过程比 LR 显著, 而对于 CR, 水汽凝结增长和雨滴碰并共同存在, 1 km 以下时雨滴碰并过程逐渐占主导。

(5) 不同季节的不同降雨类型既有相似性又存在差异。夏季和秋季的 LR (SR) 对应的微物理过程较为相似, 而春季 LR (SR) 小雨滴数浓度及其对雨强的贡献普遍大于夏季和秋季, 且春季对应的碰并过程较夏、秋季更为明显。夏季 LR (SR) 大雨滴数浓度及其对雨强的贡献均大于春季和秋季。春季和夏季 CR 小雨滴数浓度及其对雨强的贡献均大于秋季, 且微物理变化过程较秋季更为强烈。

本文中图 3 和图 4 显示, 当高度从 3 km 下降到 1 km 时, CR 小、中、大雨滴数浓度均增多。该现象可能由于该高度层内的降雨过程以水汽吸附凝结增长为主, 还可能伴随小雨滴和 (或) 中等雨滴的碰并。另外, 仪器本身对于 CR 探测能力的不足也可能限制了该高度层的数据精度。对该现象的深入探讨还需收集更多样本并结合多源探测资料进一步研究。

MRR 对 SR 和 LR 的探测能力较好, 而对 CR 的探测能力较弱, 这主要是因为在利用 MRR 对 CR 进行探测时, 接收信号受多种复杂因素影响, 使得其对雨滴谱估算的精度还有待提高。Kunz (2007) 研究表明, CR 的云底一般带负电, 云顶带正电, 其场线分布影响大气电场; 雨滴可携带电荷, 降雨期间的电场常出现快速波动, 因此, 在利用 MRR 对 CR 进行探测时, 所接收到的电磁信号会受到由云层和雨滴产生的电磁波干扰。Tridon 等 (2011) 的研究表明, 由于 CR 常常会受到强垂直风影响, 导致 MRR 反射率频谱混叠, 使得所计算的雨滴谱存在异常, 进而影响各特征量的反演精度。在后续工作中, 需着重研究包括湍流在内的非零径向风以及云、雨携带电场等多种影响因素对 CR 的电磁场干扰规律, 以增强 MRR 对 CR 的探测能力。

参考文献 (References):

杜牧云,赵娴婷,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]. Torrential Rain and Disasters,41(2):174−183 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.10049045.2022.02.008

傅新姝,顾问,彭杰,等.2020. 2020 年梅雨期上海一次强降水过程垂直结构的综合观测分析[J].暴雨灾害,39(6):658−665. Fu X S, Gu W, Peng J, et al. 2020. Observational analysis of vertical structure of a heavy precipitation event in Shanghai during Meiyu period in 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,39(6):658−665 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.06.014

江雨霏,杨莲梅,曾勇,等.2023.昭苏夏季层状云和对流云降水的雨滴谱特征[J].沙漠与绿洲气象,17(3):8−16. Jiang Y F, Yang L M, Zeng Y,et al. 2023. Characteristics of raindrop size distribution for stratiform and convective precipitation in summer in Zhaosu [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(3):8−16 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.03.002

李锐,傅云飞.2005. GPCP 和 TRMM PR 热带月平均降水的差异分析[J].气象学报,63(2):146−160. Li R, Fu Y F. 2005. A comparison study of the tropical monthly precipitation estimated by GPCP version 2 datasets and TRMM PR observations [J]. Acta Meteorologica Sinica,63(2):146−160 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577−6619.2005.02.002

李照荣,李荣庆,李宝梓.2003.兰州地区秋季层状云垂直微物理特征分析[J].高原气象,22(6):583−589. Li Z R, Li Q R, Li B Z. 2003. Analyses on vertical microphysical characteristics of autumn stratiform cloud in Lanzhou region [J]. Plateau Meteorology,22(6):583−589 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:1000−0534.2003.06.008

饶晨,肖辉,姚振东,等.2020.基于微雨雷达观测北京地区夏冬季降水个例特征分析[J].成都信息工程大学学报,35(4):392−399. Rao C, Xiao H, Yao Z D, et al. 2020. Characteristic analysis of precipitation in

summer and winter in Northern China based on micro rain radar observation [J]. Journal of ChengDu University of Information Technology,35(4):392−399 (in Chinese). doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.04.005

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]. Journal of Applied Meteorological Science, 30(4):479−490 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20190408

王斌,石燕,吴涛,等.2008.鄂西北夏季对流云降水微物理过程数值模拟[J].暴雨灾害,27(1):11−18. Wang B, Shi Y, Wu T, et al. 2008. Numerical simulation on precipitation microphysical processes of convective cloud during summer in Northwestern Hubei province [J]. Torrential Rain and Disasters,27(1):11−18 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2008.01.002

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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,47(3):739−755 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.10069895.2201.21210

王秀娟,李培仁,赵震,等.2013.一次层状云系结构和降水机制的观测与数值模拟[J].气候与环境研究,18(3):311−328. Wang X J, Li P R, Zhao Z, et al. 2013. A case study of stratiform cloud structure and precipitation mechanism based on observation and simulation [J]. Climatic and Environmental Research,18(3):311−328 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2012.11061

温龙,刘溯,赵坤,等.2015.两次降水过程的微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]. Meteorological Monthly,41(5):577−587 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.10000526.2015.05.006

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 physicsl quantities obtained by multiremote sensing in a process of stratiform cloud rainfall [J]. Meteorological Monthly,45(9):1278−1287 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2019.09.008

周伶俐,付志康,徐桂荣,等.2023. 2020 年梅雨期长江中下游地区雨滴谱垂直结构特征[J].暴雨灾害,42(4):455−466. Zhou L L, Fu Z K, Xu G R, et al. 2023. Vertical structures of raindrop size distributions over the middle and lower reaches of Yangtze River during the Meiyu period in 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,42(4):455−466 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022244

左园园,郑佳锋,贺婧姝,等.2022.一次高原涡过境的不同云-降水垂直结构和特征研究[J].高原气象,41(5):1251−1265. Zuo Y Y, Zheng J F, He J S, et al. 2022. Study on the vertical structures and characteristics of different cloud-precipitation types during a Qinghai-Xizang plateau vortex transit [J]. Plateau Meteorology,41(5):1251−1265 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00059

Adirosi E, Baldini L, Roberto N, et al. 2015. Improvement of vertical profiles of raindrop size distribution from micro rain radar using 2d video disdrometer measurements [J]. Atmospheric Research, 169(B):404−415. doi:10.1016/j.atmosres.2015.07.002

Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. Reviews of Geophysics and Space Physics,11(1):1−35. doi:10.1029/011i001p00001

Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al. 2010. PARSIVEL snow observations: a critical assessment [J]. Journal of Atmospheric& Oceanic Technology,27(2):333−344. doi:10.1175/2009JTECHA1332.1

Chen B, Yang J, Pu J. 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in eastern China [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,91(2):215−227. doi:10.2151/jmsj.2013208

Diederich M, Crewell S, Simmer C, et al. 2004. Investigation of rainfall microstructure and variability using vertically pointing radar and disdrometer [C]//Third European Conference on Radar Meteorology and Hydrology, 8086

Foote G B, Toit P S D. 1969. Terminal velocity of raindrops aloft [J]. Journal of Applied Meteorology,8(2):249−253. doi:10.1175/1520−0450(1969)008<0249:TVORA>2.0.CO;2

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 Sensing,12(24):4113. doi:10.3390/rs12244113

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]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing,51(3):1619−1630. doi:10.1007/s12524023017278

Hao J, Yin Y, Kuang X, et al. 2017. Aircraft measurements of the aerosol spatial distribution and relation with clouds over eastern China [J]. Aerosol and Air Quality Research,17:3230−3243. doi:10.4209/AAQR.2016.12.0576

Harikumar R, Sampath S, Kumar V. 2009. An empirical model for the variation of rain drop size distribution with rain rate at a few locations in southern India [J]. Advances in Space Research,44(5):837−844. doi:10.1016/j.asr.2008.11.001

Jana S, Rakshit G, Maitra A. 2018. Aliasing effect due to convective rain in doppler spectrum observed by micro rain radar at a tropical location [J]. Advances in Space Research,62(9):2443−2453. doi:10.1016/j.asr.2018.07.010

Kirankumar N V P, Kunhikrishnan P K. 2013. Evaluation of performance of Micro Rain Radar over the tropical coastal station Thumba (8.5°N, 76.9°E) [J]. Atmospheric Research,134:56−63. doi:10.1016/j.atmosres.2013.07.018

Kunz M. 2007. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences,7(2):327−342. doi:10.5194/nhess−7−327−2007

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 and Applied Geophysics,177(1):2959−2976. doi:10.1007/s00024−019−02370−6

Ojo J S, Daodu O O, Ojo O L. 2019. Analysis of vertical profiles of precipitable liquid water content in a tropical climate using micro rain radar [J]. Journal of Geoscience and Environment Protection, 7(2):140−155. doi:10.4236/gep.2019.72010

Peters G, Fischer B, Andersson T. 2002. Rain observations with a

vertically looking Micro Rain Radar (MRR) [J]. Boreal Environment Research,7(4):353−362. doi:10.1029/2002GB001897

Ramadhan R, Marzuki, Vonnisa M, et al. 2020. Diurnal variation in the vertical profile of the raindrop size distribution for stratiform rain as inferred from micro rain radar observations in Sumatra [J]. Advances in Atmospheric Sciences,37(8):832−846. doi:10.1007/s00376020916769

Tang Q, Xiao H, Guo C, et al. 2014. Characteristics of the raindrop size distributions and their retrieved polarimetric radar parameters in northern and southern China [J]. Atmospheric Research,135(1):59−75. doi:10.1016/j.atmosres.2013.08.003

Tridon F, Baelen J V, Pointin Y. 2011. Aliasing in Micro Rain Radar data due to strong vertical winds [J]. Geophysical Research Letters,38(2):79−89. doi:10.1029/2010GL046018

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 2D video disdrometer and Micro Rain Radar data [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(5):2265−2282. doi:10.1002/2015JD024160

Zhou L, Dong X, Fu Z, 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]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,125(3):1−18. doi:10.1029/2019JD031108

(责任编辑　杨　浩)

《暴雨灾害》征稿简则

《暴雨灾害》是中国气象局武汉暴雨研究所主办的中文学术期刊，主要刊载与暴雨、强对流天气及其次生灾害相关的最新研究成果和综合评述。本刊为中国科技核心期刊 (中国科技论文统计源期刊) 双月刊，欢迎国内外从事大气科学研究和气象业务、服务的科技工作者投稿。

1 来稿要求

1) 论点明确、文字精练、数据可靠。其书写顺序为：中文题名(不超过 20 个汉字)、作者姓名、单位、摘要 (400 字左右，一般应包含研究目的、资料、方法、结果和结论)、关键词 (4 ~ 6 个为宜)；英文题名、作者姓名、单位、摘要、关键词；正文；结论与讨论；参考文献。

2) 论文具体格式请参考本刊网站下载中心的《暴雨灾害》论文投稿模板或参考本刊网站首页最新发表论文。投稿时只需上传论文 word 文档，版权转让协议待论文录用后另行提交。

3) 论文首页脚页处附各类资助项目名称（编号）和第一作者姓名、主要研究领域、E-mail。第一作者下方可列一位通信作者姓名、主要研究领域、E-mail，通信作者对该文负有学术责任。

4) 来稿中计量单位一律采用中华人民共和国法定计量单位。

5) 所附插图、表格宜少而精，图表应随文给出，并提供英文图 (表) 题。一篇论文插图不宜超过 10 幅，要求图像清晰；附表一般应制成三线表 (表中数据宜采用 word 文档录入)。图 (表) 中的量和单位用“/”隔开，物理量用斜体，并注明图 (表) 号、图 (表) 题、图 (表) 注以及符号文种、大小写、正斜体、黑白体、上下脚码等。

6) 本刊参考文献使用著者-出版年制，具体参见本刊网站下载中心的“《暴雨灾害》参考文献引用和著录格式”。

2 投稿须知

1) 请勿一稿多投。稿件初审时限为40 d。修改稿务必在 45 d 内修回 (另有约定除外)，否则，视作自动撤稿。若 6 个月内未见刊用通知，可自行处理。

2) 请作者通过本刊网站 (http://www.byzh.org.cn) 提交稿件并查询稿件处理进展。

3) 本刊编辑可能会对录用稿件作适当的文字性和技术性删改处理。不同意者，请书面说明。

4) 本刊已入编中国学术期刊 (光盘版)、中国期刊网、数字化期刊群万方数据库、中文科技期刊数据库、博看网及中国核心期刊 (遴选) 数据库等。来稿一经录用，将同时被光盘版和数据库收录。若作者不同意收录，请来稿时说明。

5) 本刊对录用稿件收取论文版面费。印刷出版后一次性支付稿酬 (包含纸质版、数字版稿酬以及网络版著作权使用费)，并赠送当期《暴雨灾害》2 册。

3 通联方式

来信(函) 请寄至“430205 湖北省武汉市东湖高新技术开发区金融港二路 6 号《暴雨灾害》编辑部”，也可通过邮箱 (byzh7939@163.com) 或电话 (027-81804908，81804915，81804935) 联系。

微信扫一扫
关注《暴雨灾害》