



基于两类地面观测仪器对比的微雨雷达降水探测能力评估

李波 张冰松 高兰 严婧 程昌玉 赖晨

Assessment of precipitation detection capacity of MRR via comparisons with two kinds of ground precipitation instruments

LI Bo, ZHANG Bingsong, GAO Lan, YAN Jing, CHENG Changyu, LAI Chen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-191>

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>

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>

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>

华南前汛期强降水过程雨滴谱特征研究

Research on raindrop size distributions of strong precipitation events during the South China pre-flood season

暴雨灾害. 2024, 43(6): 637-647 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-119>

地基多波长雷达垂直探测云降水微物理特征研究进展

Research progress in profiling cloud and precipitation microphysics characteristic with ground-based multi-frequency radars

暴雨灾害. 2023, 42(4): 361-371 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-075>

毫米波云雷达观测和反演云降水微物理及动力参数方法研究进展

Reviews on retrieval methods for microphysical and dynamic parameters with cloud radar

暴雨灾害. 2021, 40(3): 231-242 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李波,张冰松,高兰,等.2026.基于两类地面观测仪器对比的微雨雷达降水探测能力评估[J].暴雨灾害,45(4):533–542. LI Bo, ZHANG Bingsong, GAO Lan, et al. 2026. Assessment of precipitation detection capacity of MRR via comparisons with two kinds of ground precipitation instruments [J]. *Torrential Rain and Disasters*,45(4):533–542 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024–191

基于两类地面观测仪器对比的微雨雷达降水探测能力评估

李波¹, 张冰松², 高兰², 严婧², 程昌玉², 赖晨²

(1. 中国长江电力股份有限公司, 宜昌 443002; 2. 湖北省气象信息与技术保障中心, 武汉 430074)

摘要: 微雨雷达 (Micro Rain Radar, MRR) 反演结果受多种因素影响, 为评估 MRR 降水探测能力和应用效果, 以地面雨量计数据为基准, 基于襄阳地区 2022 年 3 月—2023 年 5 月降雨过程中 MRR 和同址 DSG5 型降水现象仪测量的雨滴谱信息及其反演的特征参量, 从不同高度和不同降雨类型等方面对 MRR 降水探测能力进行评估, 并选取 2023 年 5 月 4 日一次典型降水过程对应的观测结果开展 MRR 应用效果分析。结果表明: (1) 当探测高度为 100 m 时, MRR 与雨量计所测的小时降雨量值最为接近。(2) 相较于对流云降水和弱降水, 层状云降水时 MRR 的探测性能最优。(3) 相较于 DSG5, 对流云降水时 MRR 中等雨滴和大雨滴对降雨率的贡献均偏小, 而小雨滴数浓度及其对降雨率的贡献偏大。(4) 在襄阳市一次典型降水过程中, MRR 可清晰观测到零度层亮带的垂直结构, 层状云降水和弱降水零度层亮带高度基本稳定在 3.8 km 左右; 对于层状云降水, 粒子在零度层经历复杂的相态变化后最终融化成雨滴, 在降至地面过程中主要经历小雨滴的碰并和蒸发, 中等雨滴对地面降雨率的贡献最大。

关键词: 微雨雷达; 雨滴谱; 对比评估; 降雨微物理结构特征

中图法分类号: P414

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2024–191

Assessment of precipitation detection capacity of MRR via comparisons with two kinds of ground precipitation instruments

LI Bo¹, ZHANG Bingsong², GAO Lan², YAN Jing², CHENG Changyu², LAI Chen²

(1. *China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002*; 2. *Hubei Meteorological Information and Technological Support Center, Wuhan 430074*)

Abstract: Retrieval results of Micro Rain Radar (MRR) are affected by various factors. To evaluate the precipitation detection capability and application performance of MRR, we take rain gauge observations as the benchmark. Based on raindrop size distribution data and retrieved characteristic parameters measured by MRR and collocated DSG5 present weather sensor during rainfall events from March 2022 to May 2023 in Xiangyang area, the precipitation detection capability of MRR is assessed from the perspectives of different detection heights and rainfall types. Moreover, observations from a typical precipitation case on 4 May 2023 are selected to analyze the practical application effect of MRR. The results are as follows. (1) Hourly rainfall values detected by MRR at the height of 100 m agree best with those measured by the rain gauge. (2) MRR achieves optimal detection performance for stratiform precipitation compared with convective precipitation and light rain. (3) For convective precipitation, the contributions of medium and large raindrops to rain rate derived from MRR are smaller, while the number concentration of small raindrops and their contribution to rain rate are larger relative to DSG5. (4) In the typical precipitation case over Xiangyang, MRR can clearly capture the vertical structure of the melting-layer bright band. The height of the bright band remains stable at approximately 3.8 km for both stratiform precipitation and light rain. For stratiform precipitation, hydrometeors undergo complex phase transitions at the melting layer and finally melt into raindrops. During their fall to the surface, small raindrops mainly experience collision-coalescence and evaporation processes, and medium raindrops contribute the most to surface rain rate.

Key words: micro rain radar; raindrop size distributions; comparative evaluation; microphysical structure characteristics of precipitation

收稿日期: 2024–10–30; 定稿日期: 2024–12–30

资助项目: 中国长江电力股份有限公司横向项目 (2423020002)

第一作者: 李波, 主要从事水电气象预报方法研究。E-mail: li_bo@ctg.com.cn

通信作者: 高兰, 主要从事气象雷达应用研究。E-mail: gaolan@mail.ustc.edu.cn

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

引 言

微雨雷达 (Micro Rain Radar, MRR) 是一种垂直指向性调频连续波多普勒雷达, 可观测高至 6 km 的雨滴下落速度、雨滴谱 (Raindrop Size Distributions, DSD)、反射率因子 (Z)、降雨率 (R) 和液态水含量 (LWC) 等参数。由于 MRR 具有较高的时间和空间分辨率, 近年来国内外许多学者利用其对降雨进行研究。Wen 等 (2016) 利用 MRR 和二维视频雨滴谱仪数据对中国东部梅雨季降水特征和不同降雨类型对应的 Z - R 关系进行了研究, 认为 MRR 在浅层雨的识别和定量研究等方面具有明显优势。Wang 等 (2017) 利用 MRR 数据对济南一次层状降水事件的微物理过程和零度层亮带进行了分析, 其研究结果证明了 MRR 在研究降雨微物理过程及零度层亮带具有巨大优势。Zhou 等 (2020) 利用咸宁站的 MRR 等数据, 对不同降水类型和不同高度的 DSD、降水参数和 Z - R 关系的垂直剖面进行了研究, 其研究结果为雷达降水估计的改进提供了参考。Urgilés 等 (2021) 基于 MRR 和激光雨滴谱仪的长序列数据, 利用 K-means 聚类方法对热带安第斯山脉的降雨进行了分类, 该分类对雷达降水估算改进以及数值模拟中云微物理过程的参数化模型研究具有重要意义。周伶俐等 (2023) 基于秭归、荆州和南京三站并址观测的 MRR 等数据, 对 2020 年梅雨期长江中下游地区 DSD 垂直结构特征和相应的 Z - R 关系进行了研究, 为雷达定量估测降水精度的提高以及模式中降水参数化方案的改进提供了重要依据。以上研究表明, MRR 对认识降水微物理过程、提高雷达定量估测降水的精度以及改进模式降水参数化方案等具有重要意义。

然而, MRR 的反演结果受多种因素影响。研究表明, 当存在下沉气流时, MRR 观测到的雨滴速度比在静止大气中的下落速度大, 由此造成反演的雨滴直径 (D) 偏大; 而当存在上升气流时, 观测到的雨滴速度比在静止大气中的下落速度小, 由此造成反演 D 偏小, 并且下沉气流比上升气流对 D 反演的影响更大 (Adirosi et al., 2015; 何思远等, 2015; 饶晨等, 2020)。MRR 对弱降水和层状云降水的探测效果较好 (Wang et al., 2017; Kidd et al., 2021), 由于对流云降水通常伴随着强垂直气流, 使得 MRR 反射率频谱混叠, 衰减系数会被高估很多, 导致数据剔除过大, 最终导致 MRR 反演的反射率、降雨率和衰减系数出现较大误差 (Tridon et al., 2011)。因此, 在利用 MRR 进行降雨观测研究之前, 必须针对不同降雨类型开展 MRR 降水探测能力评估和适用性分析。

MRR 和雨滴谱仪均能获得 DSD 并通过反演得到 Z 、 R 和 LWC 等降雨特征量 (Battaglia et al., 2010), 许多研究将 MRR 与雨滴谱仪进行对比分析, 从而对仪器的观测精度和效果进行评估。DSG5 型降水现象仪是国内气象业务中较为常用的一种激光雨滴谱仪。与 MRR 探测原理不同, 激光雨滴谱仪基于激光光学散射原理测量雨滴的 D 、下落速度、形状等参量 (付志康等, 2022; 刘晓璐等, 2023), 再根据雨滴下落速度以及 D 等参数与雨滴谱之间的关系推导出雨滴谱分布。MRR 和雨滴谱仪对降雨特征量的测量均是间接性的, 导致其测量结果容易受到多种噪声干扰, 而地面雨量计直接对降雨量进行测量, 噪声干扰相对较少, 鲁棒性较高, 因此许多研究以地面雨量计为基准, 将 MRR 和雨滴谱仪结合起来进行对比评估 (Kirankumar 和 Kunhikrishnan, 2013; 温龙等, 2015)。

襄阳市位于长江第一大支流-汉江中游, 2019 年襄阳国家基本气象站引进了 MRR, 这为研究长江流域降雨垂直结构特征并进一步提升综合降水探测能力提供了有利条件。本文以地面雨量计数据为基准, 基于 2022 年 3 月—2023 年 5 月襄阳国家基本气象站降水过程中 MRR 和同址 DSG5 型降水现象仪测量的雨滴谱信息及其反演的特征参量, 从不同高度和不同降雨类型等方面对 MRR 进行降水探测能力评估, 并选取襄阳站 2023 年 5 月 4 日一次典型降水过程对应的观测结果开展 MRR 应用效果分析, 以期为提高长江流域降雨微物理过程的认识、提升雷达定量估测降水精度以及人工影响天气效果等提供必要的技术前提。

1 研究区域及资料与方法

1.1 研究区域

如图 1 所示, 研究区域襄阳地处长江支流汉江中游, 汉水穿城而过。当地气候复杂多变, 夏季降水最多, 冬季最少, 年际间季节性降水变化波动较大, 降水最大值与最小值差距较大, 汛期降水占全年降水的 75% 以上 (王馨凝, 2015)。充沛的汛期降水为开展本地降水垂直微物理观测、评估微雨雷达探测性能提供了典型试验条件。

1.2 资料说明

本文使用的数据为 2022 年 3 月 1 日—2023 年 5 月 11 日中国气象局天擎大数据云平台的 SL3-1 型翻斗式雨量计 (以下简称 RG)、DSG5 型降水现象仪 (以下简称 DSG5) 数据以及襄阳市气象局提供的 MRR-2 型微雨雷达 (以下简称 MRR) 观测数据, 剔除 2022 年 12 月—2023 年 2 月降雪时段数据, 仅保留

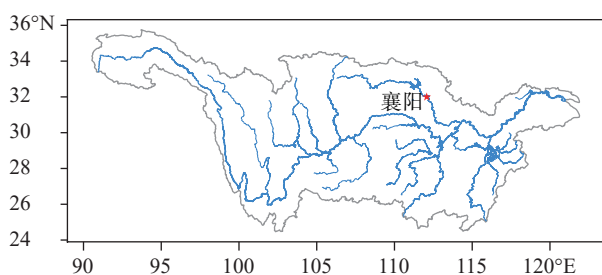


图1 襄阳地区(红色五角星)在长江流域中的位置(蓝色线条为长江及其一级支流)

Fig. 1 Location of Xiangyang region (the red pentagram) in the Yangtze River Basin (The blue curve represents the Yangtze River and its class I tributary)

降雨样本。以上数据均来自襄阳国家基本气象站(以下简称襄阳站)的同址观测设备。RG与MRR、MRR与DSG5以及RG与DSG5之间的距离分别为45 m、39 m和5 m。RG仅记录逐分钟降雨量;DSG5基于激光散射原理获取雨滴直径、下落速度并反演雨滴谱;MRR时间分辨率10 s,可垂直观测不同高度雨滴谱、降雨率、反射率因子、液态水含量等垂直剖面参量。

MRR工作频率为24.15 GHz,波长为1.25 cm,时间分辨率为10 s,可测量范围内的速度和高度通道数分别为64和32,对应直径范围为0.246~0.503 mm,速度分辨率为0.191 m·s⁻¹,垂直分辨率可调,当垂直分辨率为0.1 km(0.2 km)时,起测高度为0.1 km(0.2 km),对应的最大探测高度为3.1 km(6.2 km)。2023年1月起襄阳站MRR垂直分辨率由0.1 km调整为0.2 km,最大探测高度由3.1 km提升至6.2 km。

DSG5是一种基于激光光学散射原理进行测量的自动化降水滴谱测量设备。当雨滴经过采样区时,测量其通过激光束时信号的衰减振幅可以反演出 D ,信号变化的持续时间可以反演出雨滴下落速度(付志康等, 2022)。DSG5采样区面积为54 cm²,可测量范围内的直径和速度各分为32档共计1 024个级别, D 级别的宽度从0.125~26 mm不等,速度级别宽度则由0.1~21.4 m·s⁻¹不等。

RG的传感器由集水器、翻斗、调节螺钉、干簧管等构成。在测量过程中,随着翻斗间歇翻倒动作,带动开关,发出一个个脉冲信号,将非电量转换成可以进行计量的物理信号。其承水口内径为200 mm,分辨率为0.1 mm,测量范围为0~4 mm·min⁻¹。

1.3 研究方法

1.3.1 降水相关物理量计算

利用MRR所测多普勒频谱可计算得到一定高度上直径为 D (单位:mm)的雨滴下落速度 v (单位:

m·s⁻¹)以及单位体积单位谱间隔内雨滴数浓度 $N(D)$ (单位:m⁻³·mm⁻¹),进而可以利用DSD可反演出与降水相关物理量。本文利用MRR和地面降水观测仪器所测并反演的降水相关物理量进行MRR降水探测能力对比评估和应用效果分析,物理量主要包括雷达反射率因子 Z (单位:dBz)、降雨率 R (单位:mm·h⁻¹)、液态水含量LWC(记为 L_{WC} ,单位:g·m⁻³)和降水率谱 $R_D(D)$ (单位:mm·h⁻¹·mm⁻¹),具体计算公式(Zeng et al., 2023)为

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

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^{64} v(D_i) \cdot N(D_i) \cdot D_i^3 \cdot \Delta D_i \quad (2)$$

$$L_{WC} = \frac{\pi}{6000} \sum_{i=1}^{64} N(D_i) \cdot D_i^3 \cdot \Delta D_i \quad (3)$$

$$R_D(D) = \frac{6\pi}{10^4} \cdot D^3 \cdot N(D) \cdot v(D) \quad (4)$$

其中, D_i 为第 i 档雨滴直径,共64档; ΔD_i 为对应的直径间隔, $v(D_i)$ 是第 i 档速度谱下落速度。 $N(D_i)$ 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。

1.3.2 降雨类型分类

由于MRR对不同降雨类型的探测能力不同,本文按照MRR第一层分钟 R 的大小及其随时间的变化将降雨类型分为弱降水、层状云降水、对流云降水和待定类型(Bringi et al., 2003; Chen et al., 2013),以便更好地分析MRR在不同降雨类型观测中的适用性。

每个样本的 R 值取MRR第一层的分钟级平均值。样本分类及具体占比如表1所示。本文统计总样本数为23 414个,其中弱降水、层状云降水、对流云降水和待定类型样本数分别为12 476、5 165、539和5 234个,对应的占比分别为53.28%、22.06%、

表1 襄阳站2022年3月—2023年5月不同降雨类型的样本数、累计降雨量及其占比

Table 1 Samples, accumulated rainfalls, and their proportions corresponding to different rain types at Xiangyang station from March 2022 to May 2023

降雨类型	样本		累计雨量	
	数量	占比/%	雨量/mm	占比/%
弱降水	12 476	53.28	42.82	5.28
层状云降水	5 165	22.06	228.19	28.15
对流云降水	539	2.30	235.17	29.01
待定	5 234	22.35	304.50	37.56

2.30% 和 22.35%; 样本总累计降雨量为 810.73 mm, 其中弱降水、层状云降水、对流云降水和待定类型样本的累计降雨量分别为 42.82、228.19、235.17 和 304.50 mm, 对应的占比分别为 5.28%、28.15%、29.01% 和 37.56%。值得注意的是, 弱降水样本数占比较大, 但其对总累计降雨量贡献却较小; 而对流云降水样本数占比虽然较小, 但其对总累计降雨量贡献却较大。

1.3.3 DSG5 数据质量控制

在利用 DSG5 对液态降水过程进行观测及微物理参量反演前, 需要进行数据质量控制。采用有效观测截面代替设备的物理观测截面, 以减少设备边界效应对参量反演的影响 (Tokay et al., 2013)。自然降水中很少有超过 10 mm 的雨滴存在, 个别超过 10 mm 的粒子往往是雨滴重叠所产生的, 因此首先需要剔除 $D > 10$ mm 的雨滴。对于分钟样本数据, 当

设备观测截面记录的粒子数小于 10 个, 可以认为是噪声的影响, 也将其进行剔除 (Kruger and Krajewski, 2002; Wen et al., 2016; Angulo-Martinez et al., 2018)。此外, 由于雨滴溅射、垂直气流等对观测的影响 (Atlas et al., 1973), 会观测到一些速度较大的小粒子以及速度较小的大粒子, 研究时需要将每分钟观测到的雨滴数据根据理论速度-直径关系式进行过滤, 以剔除速度-直径理论值 $\pm 60\%$ 之外的粒子 (付志康等, 2022; 文稼齐等, 2023)。

不同降雨类型下, DSG5 观测雨滴个数 (n) 的速度-直径分布如图 2 所示。灰色虚线以外的数据被剔除。层状云降水的小雨滴 ($D < 1$ mm) 和中等雨滴 ($1 \leq D < 3$ mm) 数量较其他两类降雨类型更多, 而对流云降水的大雨滴 ($D \geq 3$ mm) 数量相对更多, 这可能与不同降雨类型对应 R 阈值及微物理过程有关。

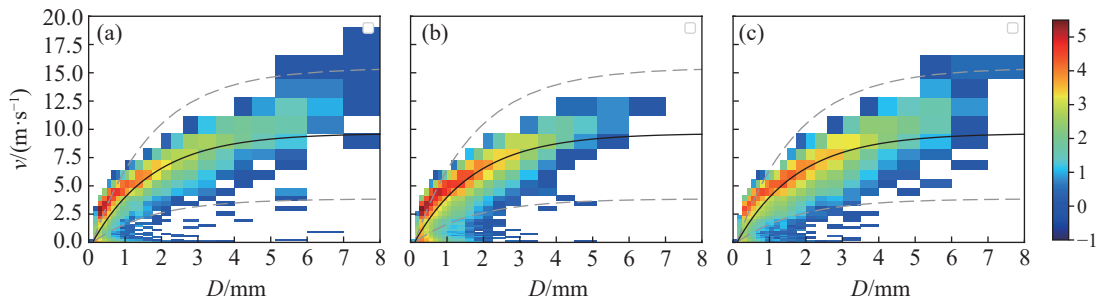


图 2 襄阳站 2022 年 3 月—2023 年 5 月弱降水 (a)、层状云降水 (b) 和对流云降水 (c) 对应的 DSG5 观测雨滴个数 (n) 的速度 (V)-直径 (D) 分布[填色表示 $\log_{10}(n)$; 黑色实线为 Atlas 经验曲线 (Atlas et al., 1973); 灰色虚线为经验曲线的 $\pm 60\%$ 范围]

Fig. 2 DSG5-observed number of raindrops (n) as a function of the falling velocity (V) and drop diameter (D) corresponding to (a) light rain, (b) stratiform rain, and (c) convective rain at Xiangyang station from March 2022 to May 2023. Shadow represents $\log_{10}(n)$, black curve represents the Atlas empirical relationship between diameter and velocity (Atlas et al., 1973) and grey dashed lines denote $\pm 60\%$ range of the experience relationship

三种降雨类型 DSD 的共同点在于, 小雨滴和中等雨滴数量较多, 而大雨滴数量相对较少。小雨滴速度异常, 即速度超过理论值 $\pm 60\%$ 的数量相对较多; $D < 1.5$ mm 的雨滴实测速度对应的个数极大值较理论值普遍偏大。胡子浩等 (2014)、吴宜等 (2021) 利用 Parsivel 激光雨滴谱仪对南京地区的观测结果以及文稼齐等 (2023) 利用降水现象仪对藏东南墨脱地区的观测结果, 均出现相似情况; 而 Luo 等 (2021) 和 Ji 等 (2019) 分别利用 2DVD 视频雨滴谱仪和 Parsivel 激光雨滴谱仪对北京地区的观测结果、宋灿等 (2019) 利用 Parsivel 激光雨滴谱仪对河北邢台的观测结果以及 Janapati 等 (2020) 利用 Parsivel 激光雨滴谱仪对台湾地区和印度的观测结果, 对应的偏大情况并不明显。推测该现象可能与不同地区对应的不同微物理过程相关, 襄阳地区 $D < 1.5$ mm 的雨滴在地面附近的实际下降速度较理论值偏高。

2 结果分析

2.1 不同高度层 MRR 与 RG 小时降雨量对比

作为一种垂直指向性雷达, MRR 能够观测到垂直方向上不同高度 R 。底层 R 容易受到近地表局部多种因素影响 (Blocken et al., 2006; 黄浩明等, 2024)。为分析出与 RG 观测值最为接近时 MRR 的探测高度, 基于襄阳站 2022 年 3 月 1 日—2023 年 5 月 11 日降雨过程的观测数据, 利用不同高度下 MRR 所测 R 的分钟级平均值计算出分钟降雨量, 而后通过积分求和计算出小时降雨量, 将 RG 分钟级降雨量进行累加得到对应的小时降雨量, 共计得到 1 388 对小时降雨量样本。

图 3 为 RG 和 MRR 在不同离地高度对应的小时降雨量散点图。当高度从 100 m 逐步上升至 600 m 时, 二者的相关系数基本呈减小趋势, 平均绝对百分比误差逐步增大, 拟合的斜率从 1.324 逐渐减小至

0.935, 截距从-0.532 逐渐增加至 0.621, 说明随着高度升高, RG 和 MRR 所测小时降雨量的相关性逐渐变差, 数据发散程度逐步上升。相较于 RG, 在 300 m 高度及以下时, MRR 容易出现小降雨量被低估、大降雨量被高估的情况; 在 400 m 高度时, 大、小降雨

量被高估和低估情况相当; 而在 500 m 高度及以上时, MRR 更容易出现小降雨量被高估、大降雨量被低估的情况。综合多项评估指标可知, MRR 在高度为 100 m 时与雨量计观测值最为接近, 这与姜嘉俊等 (2021) 利用 MRR 对宁波典型降水的研究结果相似。

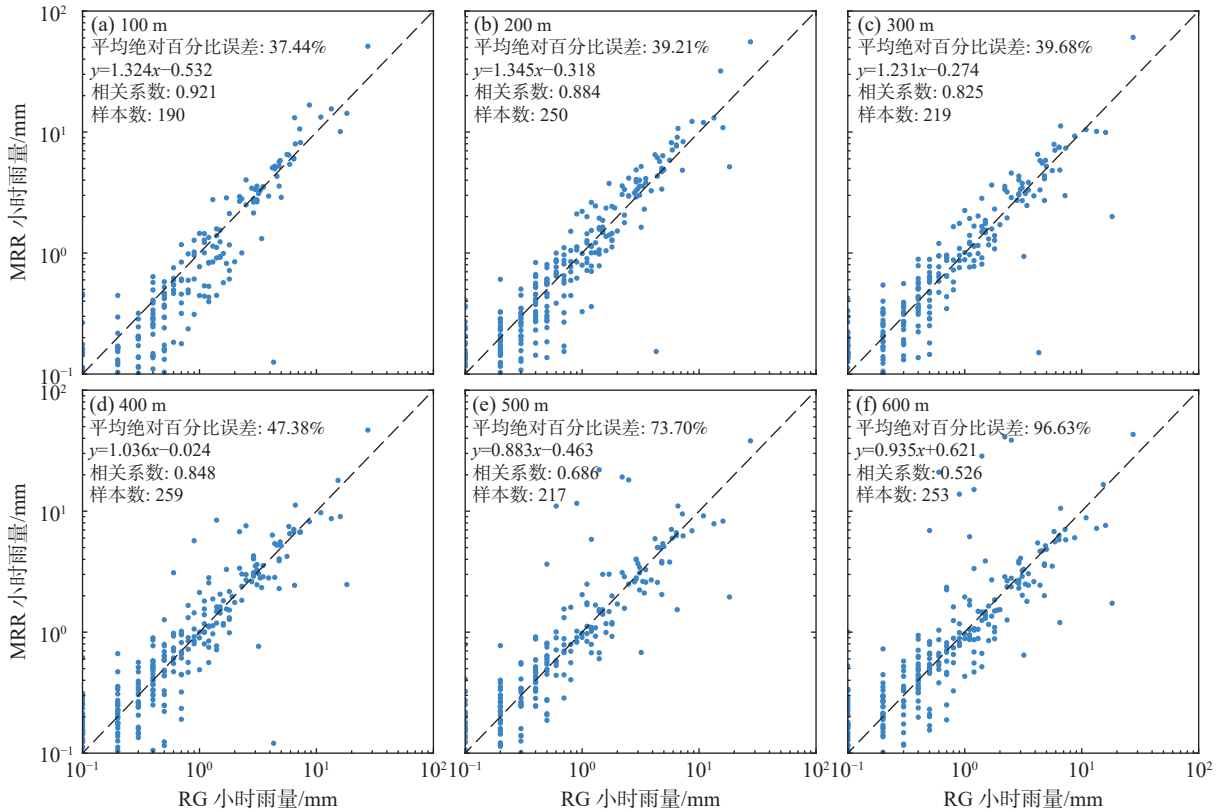


图 3 MRR 100 m (a), 200 m (b), 300 m (c), 400 m (d), 500 m (e), 600 m (f) 离地高度下与 RG 的小时降雨量散点图

Fig. 3 Scatter plots of hourly precipitation derived from micro rain radar (MRR) observed at different heights above ground

(a) 100 m, (b) 200 m, (c) 300 m, (d) 400 m, (e) 500 m, and (f) 600 m versus surface rain gauge (RG)

2.2 MRR、DSG5 与 RG 累计降雨量对比

通过综合对比不同降雨类型下 MRR、DSG5 和 RG 的累计降雨量, 可以对不同仪器的测量特点以及误差来源进行分析。表 2 给出襄阳站 2022 年 3 月 1 日—2023 年 5 月 11 日不同降雨类型条件下 RG、DSG5 以及 MRR 第一层对应的累计降雨量统计结

表 2 襄阳站 2022 年 3 月—2023 年 5 月不同降雨类型下 MRR、DSG5 以及 RG 累计降雨量及其相对偏差

Table 2 Accumulated rainfalls and their relative deviations estimated by MRR, DSG5, and RG corresponding to different rain types at Xiangyang station from March 2022 to May 2023

降雨类型	累计降雨量/mm			相对偏差/%	
	MRR	DSG5	RG	MRR	DSG5
弱降水	138.78	108.46	158.00	-12.17	-31.35
层状云降水	323.73	179.53	311.30	3.99	-42.33
对流云降水	282.40	125.09	181.70	55.42	-31.16

果。对于弱降水, MRR、DSG5 和 RG 的累计降雨量分别为 138.78、108.46 和 158.00 mm, 前两者相对于 RG 的偏差分别为-12.17% 和-31.35%。对于层状云降水, MRR、DSG5 和 RG 的累计降雨量分别为 323.43、179.53 和 311.30 mm, 前两者相对于 RG 的偏差分别为 3.99% 和-42.33%。对于对流云降水, MRR、DSG5 和 RG 的累计降雨量分别为 282.40、125.09 和 181.70 mm, 前两者相对于 RG 的偏差分别为 55.42% 和-31.16%。

总体而言, 相较于 RG, DSG5 在所有降雨类型条件下的累计降雨量均出现低估, 而 MRR 仅在弱降水时低估累计降雨量, 在层状云降水和对流云降水时高估累计降雨量。当降雨类型为层状云降水时, MRR 的累计降雨量相对偏差最小, 而当降雨类型为对流云降水时, MRR 的累计降雨量相对偏差最大。

为进一步研究不同降雨类型下 MRR 和 DSG5 相对于 RG 的累计降雨量偏差, 按照不同降雨类型对

样本进行分时段的累计降雨量统计并进行对比分析。弱降水累计降雨量样本的时间区间划分规则为: 降雨持续时间大于或等于 10 min, 且该时间段内仅发生弱降水或待定降雨类型。同理可划分层状云降水和对流云降水累计降雨量样本时间区间。

图 4 给出不同降雨类型下 RG 与 MRR、RG 与 DSG5 样本的累计降雨量散点图。对于 MRR, 当降雨类型为层状云降水时, MRR 与 RG 累计降雨量平均绝对百分比误差最小, 相关系数和拟合系数均最接近于 1, 且截距最小, 二者吻合程度较好; 当降雨类型为弱降水时, 拟合系数小于 1, 相关系数在三种降雨类型中最小, 说明弱降水对应的累计降雨量容易被低估且发散程度较高; 当降雨类型为对流云降水

时, 拟合系数大于 1, 虽然相关系数较弱降水更接近于 1, 但是平均绝对百分比误差在三种降雨类型中最大, 说明对流云降水对应的累计降雨量更容易被大大高估。对于 DSG5, 三种降雨类型的拟合系数均小于 1, 且截距均小于 0, 说明三种降雨类型对应的 DSG5 累计降雨量均容易被低估。其中, 对流云降水对应的相关系数最接近于 1, 平均绝对百分比误差最小, 层状云降水的平均绝对百分比误差最大, 拟合系数最小, 弱降水的拟合系数最接近于 1, 但是截距却最小。说明弱降水对应的累计降雨量发散程度较高, 且当累计降雨量较小时, 被低估的程度更高; 而对流云降水对应的累计降雨量收敛程度较高, 且累计降雨量的低估程度相对弱降水和层状云降水更轻。

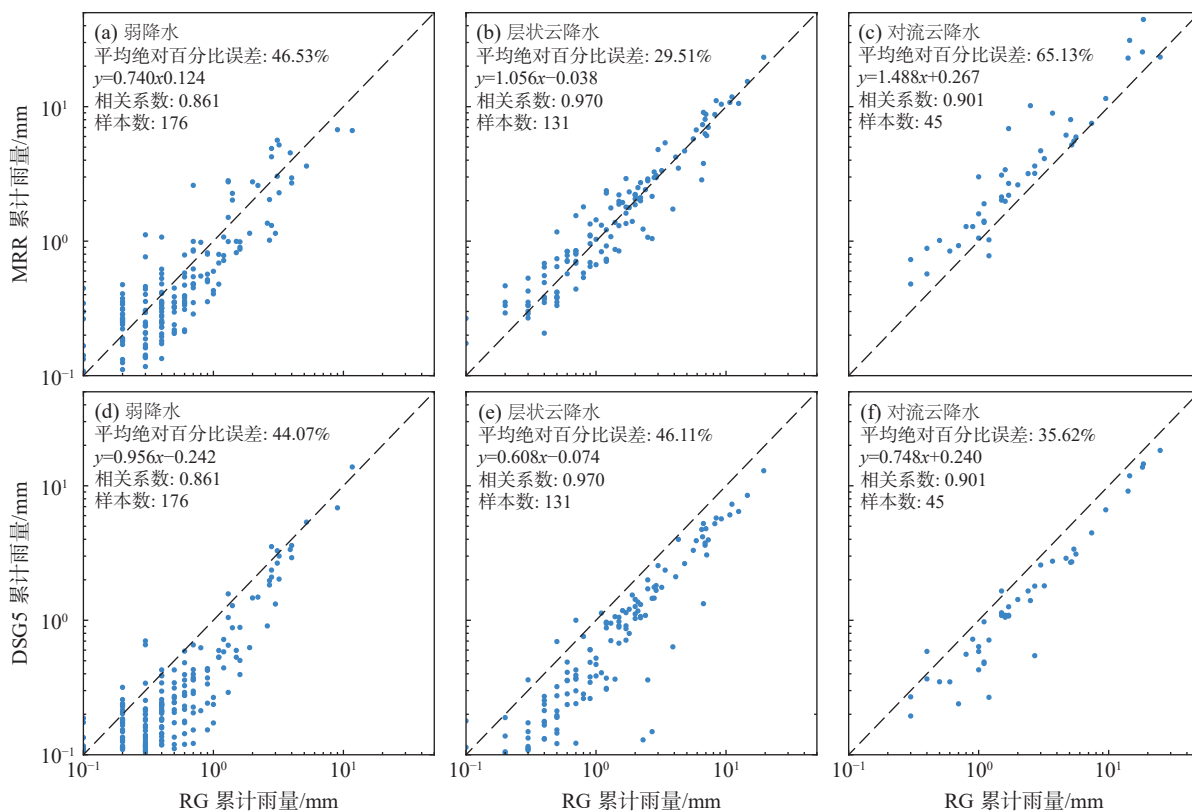


图 4 襄阳站 2022 年 3 月—2023 年 5 月弱降水 (a, d)、层状云降水 (b, e)、对流云降水 (c, f) 对应的 RG 和 MRR (a, b, c) 以及 RG 和 DSG5 (d, e, f) 累计降雨量散点图

Fig. 4 Scatter plots of accumulated rainfall (a, b, c) by RG and MRR, and (d, e, f) by DSG5 and MRR corresponding to (a, d) light rain, (b, e) stratiform rain, and (c, f) convective rain at Xiangyang station from March 2022 to May 2023

综合对比 MRR 和 DSG5 在三种降雨类型下的评估指标可知, 当降雨类型为层状云降水时, MRR 的探测性能最优; 当降雨类型为对流云降水时, DSG5 容易低估降雨量而 MRR 容易高估降雨量; 当降雨类型为弱降水时, 二者均容易低估降雨量。

2.3 MRR 与 DSG5 平均雨滴谱及降水率谱对比

为进一步分析不同降雨类型下 MRR 和 DSG5 观测 R 出现偏差的原因, 分别对 MRR 和 DSG5

的平均雨滴谱 $\log_{10}N(D)$ 及平均降水率谱 $\log_{10}R_D(D)$ 进行对比, 结果如图 5 所示。

图 5 显示, 相较于 MRR, 三种降雨类型下 DSG5 观测的小雨滴 $\log_{10}N(D)$ 均偏小。Wen 等 (2016)、文稼齐等 (2023) 研究均表明, 同类型的雨滴谱仪容易低估小雨滴数浓度, 这可能与设备本身采样面积太小、对低密度的小雨采样缺乏代表性有关 (杜波等, 2017)。由于 R 大小与雨滴粒径、数浓度以及速度均

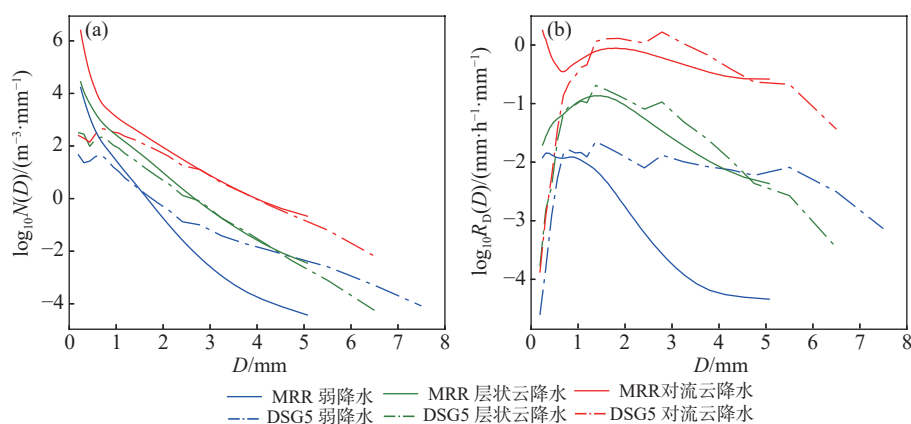


图5 襄阳站2022年3月—2023年5月不同降雨类型下MRR和DSG5对应的平均雨滴谱 $\log_{10}N(D)$ (a) 和平均降水率谱 $\log_{10}R_D(D)$ (b) 随直径 D 变化

Fig. 5 The (a) Mean raindrop spectra $\log_{10}N(D)$ and (b) mean precipitation rate spectra $\log_{10}R_D(D)$ corresponding to MRR and DSG5 under different rain types at Xiangyang station from March 2022 to May 2023

有关,而小雨滴数浓度一般较大,因此,图5中小雨滴对应的 $\log_{10}R_D(D)$ 也普遍偏小。杜波等(2017)研究表明, R 越小,降水现象仪的漏报率越高;而 R 较小时,小雨滴的占比通常较大。因此,本文中MRR与DSG5小雨滴 $\log_{10}N(D)$ 以及 $\log_{10}R_D(D)$ 的对比结果可为降水现象仪对小雨滴的漏报提供新的证据。

对于层状云降水和对流云降水,相较于DSG5, MRR观测的中等雨滴 $\log_{10}N(D)$ 普遍偏大,二者观测的大雨滴 $\log_{10}N(D)$ 吻合程度较好,但是对应的 $\log_{10}R_D(D)$ 却普遍偏小,且大雨滴的 $\log_{10}R_D(D)$ 偏小更严重。结合图2可知,DSG5所测中等雨滴和大雨滴速度较理论值普遍偏大,而同一 D 下MRR采用的是理论速度值,因此,相对于DSG5, MRR速度的偏小导致对应的 $\log_{10}R_D(D)$ 偏小。实际上,襄阳站MRR可能受到垂直气流或地形等因素影响,使其利用雨滴下落速度与 D 之间的经验关系计算得到的 D 和数浓度并不准确,最终导致 $\log_{10}R_D(D)$ 和累计降雨量等特征量计算结果出现偏差。表2显示,虽然MRR反演计算的累计降雨量较DSG5高,但是MRR中等雨滴和大雨滴的 $\log_{10}R_D(D)$ 均小于DSG5对应的 $\log_{10}R_D(D)$,说明层状云降水和对流云降水时,小雨滴对累计降雨量的贡献是MRR累计降雨量高于DSG5的主要原因。综上,推测层状云降水和对流云降水时,垂直气流或地形等因素对小雨滴的速度影响是导致MRR累计降雨量偏大的主要原因之一。

对于弱降水,相较于DSG5, MRR计算的累计降雨量偏小程度更轻(表2),而MRR中、大雨滴的 $\log_{10}N(D)$ 及 $\log_{10}R_D(D)$ 较DSG5小(图5),说明小雨滴对弱降水降雨量的影响更大,对小雨滴的漏报是DSG5计算累计降雨量偏小的主要原因。

2.4 基于MRR观测的典型降水个例微物理垂直结构特征

2023年5月4日襄阳站观测到一次降水过程,此次降水过程涵盖弱降水、层状云降水以及对流云降水,且三种降水类型的连续性均较好。图6为该降水过程中MRR所测 Z 、 L_{WC} 以及 R 随时间的演变。分析可知,当降雨类型为层状云降水或弱降水时,可观测到明显的零度层亮带,高度基本稳定在3.8 km,此时层状云降水和弱降水对应的 Z 分别约为35 dBz和20 dBz;在接近地面时,弱降水对应的 Z 约为10 dBz,对流云降水对应的 Z 基本保持在40 dBz以上。这些结果与Zhou等(2020)、杨俊梅等(2024)的研究结果相似。另外, Z 、 L_{WC} 及 R 的时变形态具有一致性,均能较好反映出各特征量在零度层附近的垂直变化及时变特征。值得注意的是,当降雨类型为对流云降水时,无法判断零度层亮带高度。研究表明,对流云降水受雨衰和垂直气流等影响,衰减系数通常被高估很多,数据剔除过大(Tridon et al., 2011),这可能是导致该降雨过程中对流云降水 Z 衰减严重以致无法观测到对应零度层亮带的原因。

DSD在垂直方向的演变能够反映雨滴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,因此分析其垂直演变特征可以揭示云雨转化和降水形成的机制。当降雨类型为层状云降水时, MRR的观测性能最优,因此对襄阳站2023年5月4日降雨过程中的层状云降水对应的平均雨滴谱 $\log_{10}N(D)$ 和平均降水率谱 $\log_{10}R_D(D)$ (图7)进行统计分析。总体来看,小雨滴数浓度大于中等雨滴数浓度,大雨滴数浓度最小。中等雨滴对 R 的贡献最大,而大雨滴虽然对应较大体积,但是数浓度相对较少,使得其对 R 的贡献不如中等雨滴,这与Tokay等

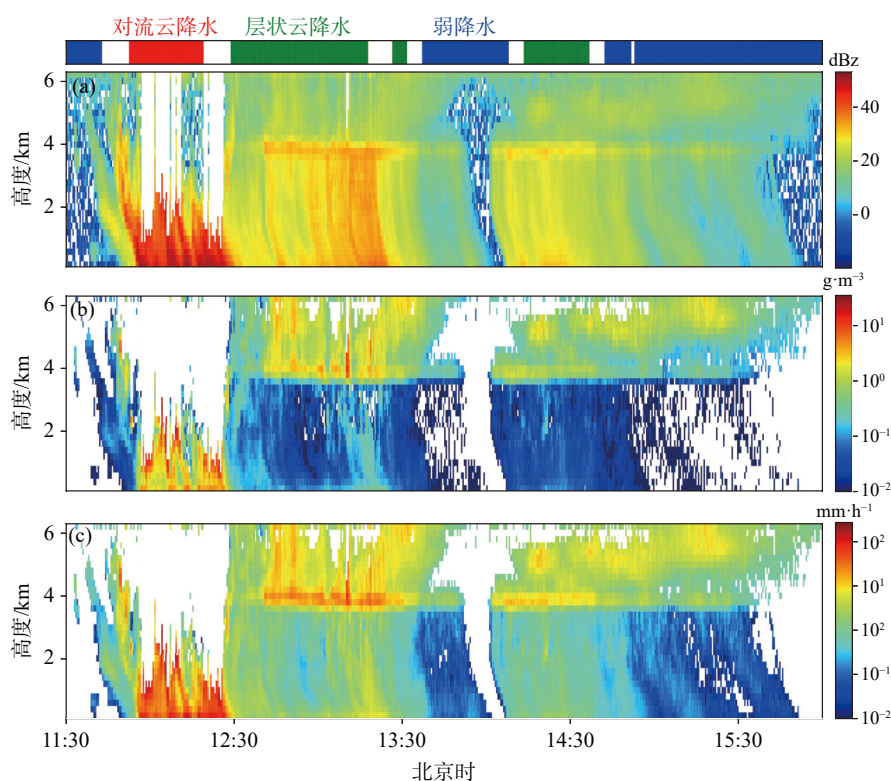


图 6 襄阳站 2023 年 5 月 4 日降雨过程 MRR 所测反射率因子 Z (a)、液态水含量 LWC (b) 以及降雨率 R (c) 的时间-高度剖面图

Fig. 6 Time-height profile of (a) radar reflectivity Z , (b) liquid water content LWC , and (c) rain rate R obtained by MRR during the precipitation event at Xiangyang station on May 4, 2023

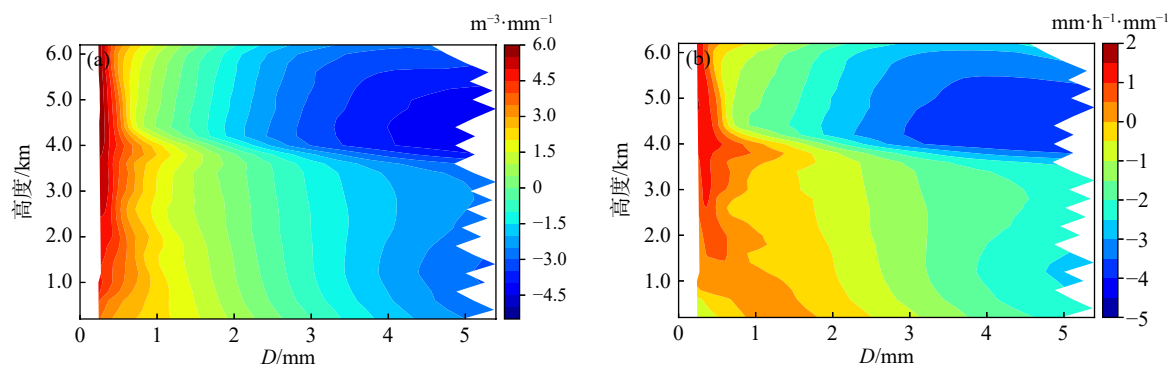


图 7 襄阳站 2023 年 5 月 4 日降雨过程中 MRR 反演的层状云降水的平均雨滴谱 $\log_{10}N(D)$ (a) 和平均降水率谱 $\log_{10}R_D(D)$ (b) 在雨滴直径 D 和高度的二维空间图

Fig. 7 Contour plots of MRR-retrieved (a) mean raindrop spectra $\log_{10}N(D)$ and (b) mean precipitation rate spectra $\log_{10}R_D(D)$ for stratiform rain in the two-dimensional space of raindrop diameters D and heights during the precipitation event at Xiangyang station on May 4, 2023

(2013) 以及周伶俐等 (2023) 的研究结论一致。

此外, 图 7 还显示, 随着高度下降, 在经过零度层亮带时, $\log_{10}N(D)$ 和 $\log_{10}R_D(D)$ 均存在明显的跳变现象, 这与零度层亮带内粒子相态的复杂变化过程有关。由于 MRR 在计算 DSD 时假设的观测对象为液态雨滴, 所以本文主要分析零度层亮带以下 DSD 的变化特征。在 3.5~1.0 km 内, 小雨滴明显减少, 中等雨滴略微增多, 大雨滴略微减少, 表明该高度层以小雨滴碰并为中等雨滴以及大雨滴的破碎过程为主, 还可能存在小雨滴的蒸发。在 1 km 以下, 小雨滴减少

更为明显, 中等雨滴增多也更为明显, 大雨滴数略微增大, 表明该高度层以小雨滴碰并为中等雨滴和大雨滴的过程为主, 且碰并作用较 3.5~1.0 km 时更强。

3 结论与讨论

本文基于襄阳地区 2022 年 3 月 1 日—2023 年 5 月 11 日微雨雷达 (MRR)、降水现象仪 (DSG5 以及地面翻斗式雨量计 (RG) 观测数据, 对不同降雨类型和不同高度下 MRR 反演的小时降雨量和累计降雨量等进行对比分析和评估, 并探讨了 MRR 观测的襄

阳地区 2023 年 5 月 4 日一次典型降水过程对应的微物理垂直结构特征,得出以下主要结论:

(1) MRR 在高度为 100 m 时与 RG 观测值最为接近。随着高度从 100 m 上升至 600 m, MRR 与 RG 小时降雨量的相关系数基本呈减小趋势,平均绝对百分比误差逐步增大,拟合斜率从 1.324 逐渐减小至 0.935,截距从-0.532 逐渐增加至 0.621。

(2) MRR 在层状云降水时的探测性能最优。对流云降水时, MRR 容易高估降雨量;弱降水时, MRR 容易低估降雨量;层状云降水时, MRR 对累计降雨量略微高估,与 RG 观测小时降雨量的相关系数和拟合系数均最接近于 1,且截距最小。

(3) 相较于 DSG5, 对流云降水时 MRR 中等雨滴和大雨滴对降雨率的贡献均偏小,而小雨滴数浓度及其对降雨率的贡献偏大。垂直气流或地形等因素对小雨滴的速度影响可能是导致对流云降水时 MRR 累计降雨量偏大的主要原因之一。

(4) MRR 观测的襄阳市一次典型降水过程中,层状云降水和弱降水对应的零度层亮带高度基本稳定在 3.8 km 左右;对于层状云降水,粒子在零度层经历复杂的相态变化后最终融化成雨滴,在降至地面过程中主要经历小雨滴的碰并和蒸发过程,1 km 以下的雨滴碰并作用较 3.5~1.0 km 强,中等雨滴对地面降雨率的贡献最大。

相较于 MRR, 三类降雨条件下 DSG5 反演的小雨滴平均雨滴谱整体偏低, MRR 观测结果可作为佐证 DSG5 小雨滴漏报问题的新型观测依据。在 DSG5 的业务观测应用中,需充分考量该观测特征,以提升降水观测数据的可靠性。同时 MRR 具备高垂直分辨率观测优势,能够精细刻画雨滴融化、碰并破碎等垂直微物理演变规律,弥补地面单点雨滴谱仪的观测局限,在校正雨滴谱观测偏差、改进雷达定量降水估测、完善数值模式降水参数化方案等方面具有潜在的应用价值。

参考文献 (References):

- 杜波,马舒庆,梁明珠,等.2017.雨滴谱降水现象仪对比观测试验技术应用分析[J].*气象科技*,45(6):995-1001. Du B, Ma S Q, Liang M Z, et al. 2017. Observational contrast experiment and application of rain drop spectrum precipitation phenomenon instrument [J]. *Meteorological Science and Technology*,45(6):995-1001 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20160724
- 付志康,万蓉,肖艳姣,等.2022.业务 DSG5 型降水现象仪与 parsivel 降水雨滴谱仪测量参数对比分析[J].*暴雨灾害*,41(4):434-444. Fu Z K, Wan R, Xiao Y J, et al. 2022. Comparison of precipitation measurement by DSG5 and Parsivel present weather instrument [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(4):434-444 (in Chinese). doi:10.3969/j.

issn.1004-9045.2022.04.008

- 何思远,刘晓阳,孙大利,等.2015.速度谱低端法在 MRR 反演雨滴谱中的应用研究[J].*北京大学学报(自然科学版)*,51(3):427-436. He S Y, Liu X Y, Sun D L, et al. 2015. The implementation about the method of low-bound velocity spectrum reduce errors in MRR retrieval [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*,51(3):427-436 (in Chinese). doi:10.13209/j.0479-8023.2014.174
- 胡子浩,濮江平,张欢,等.2014.Parsivel 激光雨滴谱仪观测较强降水的可行性分析和建议[J].*气象科学*,34(1):25-31. Hu Z H, Pu J P, Zhang H, et al. 2014. Feasibility analyses and recommendations of Parsivel optical distrometer in measurements of strong precipitation [J]. *Torrential Rain and Disasters*,34(1):25-31. (in Chinese). doi:10.3969/2012jms.0184
- 黄浩明,陈金星,姚秋芳,等.2024.梅州短时强降水时空分布特征及地形影响[J].*广东气象*,46(1):44-48. Huang H M, Chen J X, Yao Q F, et al. 2024. On the characteristics of spatiotemporal distribution of short-term, intense rains in Meizhou and the terrain effect [J]. *Guangdong Meteorology*,46(1):44-48 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2024.01.010
- 刘晓璐,郭善云,郑飒飒,等.2023.安宁河谷雨季层状云和对流云降水的雨滴谱特征[J].*高原山地气象研究*,43(3):32-39. Liu X L, Guo S Y, Zheng S S. 2023. Raindrop size distribution characteristics of stratiform and convective precipitation during rainy season in Anning River Valley [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,43(3):32-39 doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2023.03.004
- 姜嘉俊,王晓慧,刘圣楠.2021.微雨雷达在宁波典型降水过程中的表现特征[J].*气象研究与应用*,42(1):20-26. Jiang J J, Wang X H, Liu S N. 2021. Performance characteristics of micro rain radar in typical precipitation process in Ningbo [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*,42(1):20-26. doi:10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.1.04
- 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, Xiaohao 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
- 王馨凝.2015.襄阳地区降水多年变化特征及趋势分析[J].*现代农业科技*,10(3):228-230. Wang X N. 2015. Precipitation change characteristic and trend analysis over mutiple years in Xiangyang [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*,10(3):228-230 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007-5739.2015.10.138
- 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.1000526.2015.05.006
- 文锦齐,王改利,周任然,等.2023.藏东南墨脱地区季风期降水的垂直结构特征[J].*应用气象学报*,34(5):562-573. Wen J Q, Wang G L,

- Zhou R R, et al. 2023. Vertical structure characteristics of precipitation in Mêdog area of southeastern Tibet during the Monsoon period [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*,34(5):562–573 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20230505
- 吴宜,刘西川,孙宇,等.2021.雨滴谱式降水现象仪与人工观测结果的一致性分析[J].*气象科技*,49(1):32–39. Wu Y, Liu X C, Sun Y, et al. 2021. Consistency analysis of raindrop-spectrum precipitation phenomenon sensor and manual observation results [J]. *Meteorological Science and Technology*,49(1):32–39 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671–6345.20200064
- 杨俊梅,孙鸿博,田晓婷,等.2024.山西中部一次积层混合云降水微物理特征[J].*沙漠与绿洲气象*,18(3):24–31. Yang J M, Sun H P, Tian X T, et al. 2024. Microphysical characteristics of mixed convective stratiform cloud precipitation in central Shanxi [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,18(3):24–31 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2024.03.004
- 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
- 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
- Angulo-Martinez M, Beguería S, Latorre B, et al. 2018. Comparison of precipitation measurements by OTT Parsivel2 and Thies LPM optical disdrometers [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*,22(5):1–37. doi:10.5194/hess–22–2811–2018
- 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):135. 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
- Blocken B, Poesen J, Carmeliet J. 2006. Impact of wind on the spatial distribution of rain over micro-scale topography-numerical modelling and experimental verification [J]. *Hydrological Processes*,20(2):1–27. doi:10.1002/hyp.5865
- 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]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,60(2):354–365. doi:10.1175/1520–0469(2003)060<0354>2.CO;2
- 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.2013–208
- Janapati J, Seela B K, Lin P L, et al. 2020. Raindrop size distribution characteristics of indian and pacific ocean tropical cyclones observed at India and Taiwan sites [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*,98(2):299–317. doi:10.2151/jmsj.2020–015
- Ji L, Chen H, Li L, et al. 2019. Raindrop size distributions and rain characteristics observed by a parsivel disdrometer in beijing, northern China [J]. *Remote Sensing*,11(1479):1–21. doi:10.3390/rs11121479
- Kidd C, Graham E, Smyth T, et al. 2021. Assessing the impact of light/shallow precipitation retrievals from satellite-based observations using surface radar and micro rain radar observations [J]. *Remote Sensing*,13(9):1–13. doi:10.3390/rs13091708
- 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(2013):56–63. doi:10.1016/j.atmosres.2013.07.018
- Kruger A, Krajewski W F. 2002. Two-dimensional video disdrometer: a description [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*,19(5):602–617. doi:10.1175/1520–0426(2002)019<0602>2.CO;2
- Luo L, Guo J, Chen H, et al. 2021. Microphysical characteristics of rainfall observed by a 2DVD disdrometer during different seasons in Beijing, China [J]. *Remote Sensing*,13(2303):1–23. doi:10.3390/rs13122303
- Tokay A, Petersen W A, Gatlin P, et al. 2013. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*,30(8):1672–1690. doi:10.1175/JTECH-D-12–00163.1
- 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
- Urgilés G, Céleri R, Trachte K, et al. 2021. Clustering of rainfall types using micro rain radar and laser disdrometer observations in the Tropical Andes [J]. *Remote Sensing*,13(5):1–22. doi:10.3390/rs13050991
- Wang H, Lei H, Yang J. 2017. Microphysical processes of a stratiform precipitation event over Eastern China: analysis using micro rain radar data [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,34(12):1472–1482. doi:10.1007/s00376–017–7005–6
- 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
- Zeng Y, Li J, Yang L, et al. 2023. Microphysical characteristics of raindrop size distribution and implications for dual-polarization radar quantitative precipitation estimations in the Tianshan mountains, China [J]. *Remote Sensing*,15(10):1–19. doi:10.3390/rs15102668
- 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 唐永兰)