

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).

冷涡背景下积层混合云降水的 雨滴谱垂直分布及演变^{*}

孙钦宏^{1,2,3} 马洪波⁴ 张景红^{1,2,3} 谭 月^{1,2,3}

1 吉林省气象灾害防御技术中心, 长春 130062

2 中国气象局-吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室, 长春 130062

3 中国气象局吉林云物理野外科学试验基地, 长春 130062

4 吉林省气象台, 长春 130062

提 要: 利用 2021 年 8 月 24—25 日吉林靖宇微雨雷达反演的垂直探测资料, 结合雨滴谱仪、雨量计等地面资料, 分析了长白山麓一次混合云降水过程的雨滴谱垂直分布及微物理特征参量演变特征。结果表明: 雨量计、雨滴谱仪探测地面雨量与微雨雷达反演的 150 m 高度雨量变化趋势基本一致, 但观测值与反演值存在一定偏差。Gamma 函数对地面雨滴谱拟合优度达到 0.99, 拟合效果优于微雨雷达, 对微雨雷达反演的大雨滴数浓度拟合值明显偏小。不同直径(D)雨滴对不同高度微物理参量贡献不同, 小雨滴($D \leq 1.0$ mm)对雨强、反射率因子、液态水含量、总数浓度贡献率一般随着高度降低而降低, 中雨滴(1.0 mm $< D \leq 3.0$ mm)和大雨滴($D > 3.0$ mm)对参量贡献率基本随着高度降低而升高。不同降水阶段的雨滴蒸发、碰并作用不同, 降水前期气温高且湿度低, 雨滴下落过程中蒸发作用较强, 而降水集中期相对湿度接近饱和, 雨滴碰并增长作用明显。

关键词: 长白山, 雨滴谱, 微雨雷达, 垂直特征, 微物理参量

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.061301

Vertical Characteristic and Evolution of Raindrop Size Distribution for Stratiform and Embedded Convective Cloud Precipitation Under the Background of Cold Vortex

SUN Qinhong^{1,2,3} MA Hongbo⁴ ZHANG Jinghong^{1,2,3} TAN Yue^{1,2,3}

1 Jilin Technology Center of Meteorological Disaster Prevention, Changchun 130062

2 CMA Joint Open Laboratory for Weather Modification People's Government of Jilin Province, Changchun 130062

3 CMA Jilin Cloud Physics Field Scientific Test Base, Changchun 130062

4 Jilin Meteorological Observatory, Changchun 130062

Abstract: Using the observation data of micro rain radar, raindrop disdrometer and rain gauge at Jingyu Station, Jilin Province, from 24 to 25 August 2021, the vertical distribution of raindrop size and the evolution of microphysical characteristic parameters in a mixed cloud precipitation process at Changbai Mountain are analyzed. The results show that the rainfall variation trend with high resolution of 150 m retrieved by micro rain radar and the ground rainfall measured by raindrop disdrometer and rain gauge are basically

^{*} 国家自然科学基金面上基金项目(41975182)、吉林省科技发展计划重点研发项目(20230203126SF)和吉林省气象局技术发展专项(202210、202308)共同资助

2023 年 11 月 29 日收稿; 2024 年 6 月 15 日收修定稿

第一作者: 孙钦宏, 主要从事人工影响天气技术研究. E-mail: 43236496@qq.com

通讯作者: 张景红, 主要从事人工影响天气技术研究. E-mail: Zhangjh@163.com

consistent, but there are some deviations between the observed values and inversion values. The Gamma function goodness of fit clocks up 0.99 for the ground raindrop size distribution, which is better than that of micro rain radar. In addition, the fitting value for number concentration of large raindrops ($D > 3.0$ mm) retrieved by micro rain radar is significantly smaller. Research also shows that raindrops in different diameters have different contributions to microphysical parameters at different heights. For small raindrops ($D \leq 1.0$ mm), its contribution rate to rainfall intensity, reflectivity factor, liquid water content, and total number concentration decreases generally with lowering height. However, the contribution rate of medium raindrops ($1.0 \text{ mm} < D \leq 3.0 \text{ mm}$) and large raindrops to these parameters increases as height declines. Besides, the evaporation and coagulation effects of raindrops show varieties in different precipitation stages. In the early precipitation stage, the evaporation effects of raindrops is stronger due to higher temperature and lower relative humidity in the falling process of raindrops. In the stage of concentrated precipitation, the coagulation effect of raindrops is more evident with the relative humidity approaching saturation.

Key words: Changbai Mountain, raindrop size distribution, micro rain radar, vertical characteristic, microphysical parameter

引 言

冷涡作为冷性气旋式环流系统(Hsieh, 1949),其深厚的冷性结构易造成对流层中上层的大气不稳定,在低涡西部和东南部区域发生短时暴雨等强对流天气(Hoskins et al, 1985; 郑秀雅等, 1992)。近些年来,国内外学者对冷涡背景下强对流天气系统的规律、机理及数值模拟开展大量研究(杨磊和郑永光, 2023; 沈杭锋等, 2021; 迟静等, 2021),对冷涡的气候特征及其对大气环境、海气相互作用的影响进行了分析研究(Xie and Bueh, 2015)。开展冷涡影响下降水结构和微物理特征研究,能够提升对该类天气的理解和认识,同时云和降水微物理结构的研究对于提升雷达估测降水、数值模式参数化等具有重要意义(Niu et al, 2010; Hou et al, 2020)。

雨滴谱分布反映了云中成雨过程的动力和微物理过程特征,是云降水微物理结构研究的重要内容之一(房彬等, 2016)。陈宝君等(1998)对沈阳夏季不同类型降水的雨滴谱拟合函数进行对比分析,指出Gamma函数拟合参数均随雨强增大而减小的变化关系。Bringi et al(2003)通过雨滴谱标准截距参数和质量等效直径的统计分析,将对流性降水的雨滴谱划分为海洋型和大陆型。吴亚昊等(2016)通过计算爬线不同时刻粒子总数浓度、中值体积直径和峰值数,分析了降水过程的雨滴谱的变化,讨论了雨

滴谱变化和雷达回波强度对降水估测的影响。不同地区、地形及降水类型条件下,雨滴谱分布存在一定差异(黄泽文等, 2022; 赵城城等, 2021; 李慧等, 2021; 梅海霞等, 2020; 黄兴友等, 2019; 宋灿等, 2019),不同天气系统影响下降水的微物理机理差异造成雨滴谱分布也有所不同(王俊等, 2021; 2023; 张庆池等, 2022a; 冯婉悦等, 2021)。张庆池等(2022b)分析淮北地区夏季4种类型暴雨的雨滴谱指出,不同类型暴雨谱型-斜率以及反射率因子-雨强有所差异。微雨雷达技术的不断成熟丰富了研究雨滴谱分布特征的手段,崔云扬等(2019)利用河北邢台Ka波段微雨雷达等资料分析了冷锋降水,指出降水在云内和云外受不同微物理过程影响,不同高度雨滴碰并、蒸发作用不同。王洪等(2020)对济南地区不同云系降水雨滴谱微物理参数分析指出,层状云降水粒子中值体积直径平均在1 mm左右,垂直气流大小对微雨雷达反演降水参数具有一定影响。

长白山是我国东北地区重要的生态安全屏障和水源涵养生态区,开展其特殊地形的云降水微物理特征研究具有重要意义(孙钦宏等, 2023),然而目前对长白山地区云降水微物理过程雨滴谱垂直结构及演变特征的研究并不多。本文选取2021年8月24—25日长白山麓靖宇一次冷涡暴雨天气过程,利用微雨雷达、雨滴谱仪、地面雨量计等观测反演数据,研究了此次降水过程雨滴谱垂直结构及微物理参数分布演变特征,分析了降水过程中不同阶段雨

滴谱垂直结构异同,有助于进一步认识长白山地区特殊地形下云降水微观特征,为该地区雷达定量估测降水、云模式参数化及人工增雨工作提供参考。

1 资料与方法

1.1 设备与资料

利用中国气象局吉林云物理野外观测试验基地的微雨雷达、雨滴谱仪、地面雨量计等观测资料开展分析研究。该观测地点位于吉林靖宇国家气象观测站(海拔高度为 569.9 m),该测站位于长白山脉西麓低山地带,距长白山主峰直线距离为 110 km。雨滴谱仪为 Parsivel² 型激光雨滴谱仪,该仪器基于激光感应原理获取雨滴直径和下落速度谱数据,有效采样面积为 54 cm²,探测时间分辨率为 1 min,探测直径范围为 0.062~24.5 mm,探测下落速度范围为 0.050~20.80 m·s⁻¹,直径和下落速度数据均为非线性不等间距的 32 档通道。微雨雷达为 MRR2 型,该仪器是一种垂直指向雷达,采用连续调频获取电磁波束后向散射功率谱,基于粒子下落速度和直径的经验公式反演得到不同高度层、不同直径粒子谱数据,谱数据分为不等间距的 64 档通道,垂直高度为 31 层,探测直径范围为 0.239~5.343 mm,最大时间分辨率为 10 s,最大空间分辨率为 100 m。本研究采用时间分辨率 1 min、高度分辨率 150 m、最高探测高度 4650 m 的探测模式开展分析研究。降水过程的天气背景场分析采用欧洲中期天气预报中心 ERA5 逐小时再分析资料,其水平分辨率为 0.25°×0.25°。

1.2 质量控制和物理参量计算方法

考虑到雨滴谱仪存在信噪比、重叠探测、非降水探测等影响(Jaffrain and Berne, 2011; Friedrich et al, 2013),对雨滴谱仪原始数据进行以下质量控制处理:

(1)为降低非降水样本,剔除粒子数小于 10 和雨强小于 0.1 mm·h⁻¹ 的样本;

(2)为降低设备灵敏度误差,剔除雨滴直径为 0.062 mm 及 0.187 mm 这两个通道的数据样本;

(3)为降低重叠探测造成虚假信息,剔除直径大

于 6 mm 的数据样本;

(4)基于雨滴末速度与直径的理论关系(Atlas et al, 1973),剔除末速度超过理论关系±60% 以上的数据样本(张庆池等, 2022a; 2022b; 王俊等, 2023)。

根据微雨雷达探测反演原理,造成其产品误差的因素包括雷达信号衰减、粒子相态、垂直风速等。为降低雷达电磁波束对大雨强的衰减,微雨雷达反演算法产品已对雷达信号衰减进行订正(Peters et al, 2005; 2010; 宋灿等, 2019; 崔云扬等, 2019)。此次降水过程 0℃ 层高度为 4300 m,本研究对粒子谱及微物理参量垂直分布的分析主要集中在 0℃ 层以下,微雨雷达反演的粒子相态误差基本可以忽略,而垂直风速造成的反演误差将在后文进一步探讨。

利用雨滴谱仪质量控制后的数据资料可计算单位时间单位体积内雨滴数浓度,微雨雷达探测反演的原始数据包括不同高度层雨滴粒子直径 D (单位: mm) 和数浓度 $N(D)$ (单位: m⁻³·mm⁻¹),在不考虑环境大气垂直风场条件下,依据雨滴末速度与直径的理论关系,得到不同直径雨滴下落速度 V (单位: m·s⁻¹)。通过雨滴谱仪和微雨雷达观测数据进而计算得到液态水含量 W (单位: g·m⁻³)、总数浓度 N_t (单位: m⁻³)、雨强 R (单位: mm·h⁻¹) 和反射率因子 Z (单位: mm⁶·m⁻³) 等,计算公式详见 Ulbrich and Atlas (1998)、Vivekanandan et al (2004)、李慧等(2018)、李山山等(2020)研究。考虑到 Gamma 函数对雨滴谱分布拟合具有较好的效果(陈宝君等, 1998; 郑娇恒和陈宝君, 2007),本研究采用 Gamma 函数对雨滴谱分布进行拟合,利用二、四、六阶矩对截距参数 N_0 (单位: mm^{-1-μ}·m⁻³)、形状参数 $μ$ 和斜率参数 $Λ$ (单位: mm⁻¹) 进行估算,同时通过三、四阶矩计算获得质量等效直径 D_m (单位: mm)、标准截距参数 N_w (单位: m⁻³·mm⁻¹) 等,计算公式详见李山山等(2020)、王俊等(2021)、张庆池等(2022b)研究。

2 结果与分析

2.1 天气背景概况

2021 年 8 月 24—25 日吉林靖宇出现一次明显

降水天气,雨量计观测降水发生在24日17:50至25日04:38(北京时,下同),总降水量为64.5 mm,累计降水达到暴雨量级,最大雨强为 $18.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。降水开始时,500 hPa 涡旋中心位于蒙古境内,具有明显的闭合冷中心(图略),靖宇地区位于冷涡前部,850 hPa 冷涡前部东南气流与低压外围偏东气流在靖宇交汇开始形成降水。24日23:00伴随冷涡系统东移,850 hPa 暖切变线由东南—偏东向加强为偏南—偏东向,造成降水强度明显增强(图1)。25日凌晨,靖宇地区逐渐脱离低压影响,主要受冷涡前部西南气流控制,降水过程趋于结束。参考地面雨滴谱分钟降水雨强、标准差区间方法(Bringi et al, 2003; Chen et al, 2013; 唐继顺等, 2021)进行云降水分类发现,本次过程分钟雨强总样本501个,其中层云降水57个,对流降水87个,混合降水201个,弱降水156个,即层云降水、对流降水及混合降水占总样本的68.9%;结合多普勒天气雷达组合反射率产品可见,整个降水过程中絮状混合云回波特征明显(图略);由此可以得出本次降水为冷涡背景下一次积层混合云降水过程。

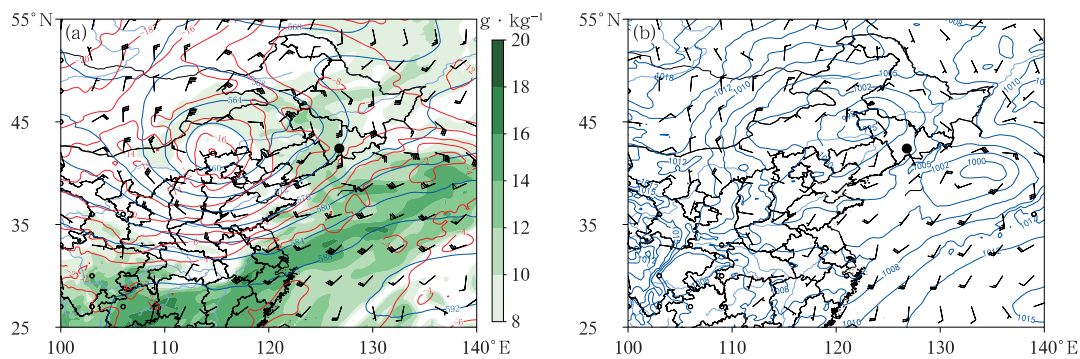
2.2 仪器探测性能对比分析

图2给出了本次降水过程地面雨滴谱仪、翻斗雨量计和微雨雷达150 m高度逐10 min雨量随时

间的演变。三者探测反演的雨量变化趋势较为一致,峰值位置基本保持同步,但雨量值存在一定偏差,雨滴谱仪反演值整体上最小,微雨雷达和雨量计在降水过程不同阶段的雨量值互有高低,这一结果与伊宁地区降水过程(全泽鹏等, 2021)研究结果一致,沙修竹等(2019)对河南省地面雨滴谱仪反演降水的研究显示,雨滴谱仪反演值小于雨量计的样本占比达44%。本次过程开始阶段(24日17:50—21:25),雨量计值总体上小于微雨雷达150 m高度雨量值、大于雨滴谱仪反演值;集中阶段(24日21:25至25日02:00),微雨雷达与雨量计雨量值互有高低,但强降水时次微雨雷达明显偏大于雨量计;减弱阶段(25日02:00—04:38),微雨雷达150 m高度雨量值小于雨量计值。

造成三种仪器探测反演雨量值出现偏差的原因,除了受垂直高度上微物理过程影响外,主要与仪器性能原理及反演算法有关。具体包括:

(1)微雨雷达采用连续调频获取电磁波束后向散射功率谱,其反演算法假设环境空气垂直速度为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而实际环境空气中较大的垂直气流对参数的反演可能产生两种影响:一是垂直气流使得雷达功率谱在速度轴上产生折叠,进而影响降水参数的反演(Tridon et al, 2011);二是垂直方向若为下沉气流,将造成雨滴下落速度偏大,使得直径被高



注:黑点为靖宇站。

图1 2021年8月24日23:00(a)500 hPa位势高度(蓝线,单位:dagpm)、500 hPa温度(红线,单位:℃)、850 hPa风场(风羽)和比湿(填色), (b)海平面气压场(蓝线,单位:hPa)和地面风场(风羽)

Fig. 1 (a) 500 hPa geopotential height (blue line, unit: dagpm), 500 hPa temperature (red line, unit: $^{\circ}\text{C}$), 850 hPa wind field (barb) and specific humidity (colored), (b) sea level pressure field (blue line, unit: hPa) and surface wind field (barb) at 23:00 BT 24 August 2021

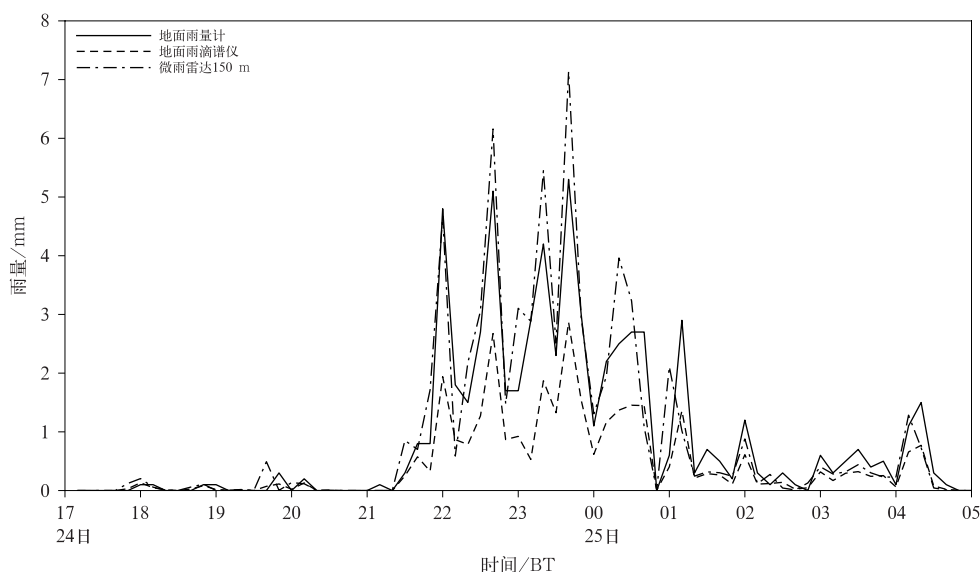


图 2 2021 年 8 月 24—25 日地面雨量计与雨滴谱仪、
微雨雷达 150 m 探测的逐 10 min 雨量随时间演变

Fig. 2 Evolution of 10 min accumulated rainfall detected by ground rain gauge,
disdrometer and 150 m micro rain radar from 24 to 25 August 2021

估。同时,由于雨滴粒子后向散射截面与直径 6 次方成正比(王洪等,2020),后向散射截面增大进而造成粒子数浓度减小;垂直方向若为上升气流则相反。雨滴粒子下落速度、直径及数浓度误差共同影响,造成雨量值反演偏差。同时,微雨雷达波束宽度接近 2° ,使得探测面积偏大,湍流导致微雨雷达功率谱拓宽,均造成其反演的雨强偏大(王洪等,2017)。

(2)雨滴谱仪利用光电感应技术,通过雨滴穿越激光束信号衰减获取直径,并通过穿行时间探测下落速度。由于仪器探测存在雨滴对仪器边界效应、非球形形变等因素,也造成雨量反演结果的偏差(Jaffrain and Berne, 2011; Battaglia et al, 2010)。丁建芳等(2022)对比层状云降水的雨滴谱反演和雨量计观测发现,雨滴谱仪反演结果较观测值偏小。

(3)翻斗雨量计作为业务广泛应用的降水测量仪器,其工作原理是通过翻斗倾倒雨水发送脉冲信号计数测量,测量中会受翻斗雨水残余、翻转过程遗漏、探测时间延迟等因素影响,导致出现不同程度偏差。

2.3 平均谱及拟合谱垂直分布

为了解雨滴下落过程中粒子谱垂直分布及变化特征,本研究参考李山山等(2020)的雨滴尺度划分标准,按直径 D 分为小雨滴($D \leq 1.0$ mm)、中雨滴

($1.0 \text{ mm} < D \leq 3.0 \text{ mm}$)、大雨滴($D > 3.0 \text{ mm}$),同时选取地面、150、300、600、1050、1500 m 作为特定高度层,分析本次降水过程不同高度层雨滴平均谱及拟合谱分布(图 3)。由地面平均谱分布曲线可以看出,本次过程曲线形态与李山山等(2020)、陈宝君等(1998)研究结果相似,可能与本地特殊气候特点有关。微雨雷达不同高度平均谱曲线随着雨滴直径增大呈现“收敛-发散-收敛”趋势,粒子下落时小雨滴数量明显减小,而中雨滴和大雨滴数量有所增加,这与 Wang et al(2017)研究结果一致。小雨滴随高度降低其数浓度明显变小,直径 0.2 mm 左右的小雨滴在地面与在 1500 m 高度的数浓度相差两个量级,可见小雨滴粒子自云底下落过程中蒸发、碰并作用起主导地位;中雨滴和大雨滴下落过程中数浓度增大,直径 3.0 mm 左右的雨滴数浓度增大幅度更明显,大雨滴随直径增加各高度层浓度变化越来越小。但从地面与微雨雷达 150 m 对比来看,地面中雨滴和大雨滴的数浓度低于微雨雷达 150 m,出现了平均谱分布不连续的情况,主要考虑是由两种仪器原理、反演算法及微物理过程等因素造成。具体包括:

(1)150 m 以下近地层风场扰动较高空更为剧烈,中雨滴碰并作用加强且大雨滴更易破碎,造成其

数浓度出现下降,这与王洪等(2020)对济南地区液态降水微物理参数分析结论一致。

(2)微雨雷达反演算法中忽略垂直方向气流输送,但实际大气中,强降水往往伴随较强的上升气流,因此雨滴下落速度反演值偏小,进而影响粒子后向散射截面,最终使得高空雨滴粒子数浓度偏大。

(3)尽管本研究对雨滴谱仪原始数据进行了初步质量控制,但降水粒子重叠影响无法消除,仪器原理性误差导致粒子数量偏小。

从 Gamma 函数拟合谱可以看出,小雨滴和中雨滴拟合效果较好,大雨滴数浓度拟合值偏小,直径越大拟合偏离度越高,这与 White et al(2002)研究结果一致。

Gamma 函数拟合参数能够表征拟合曲线的形态,可决系数 r^2 作为拟合优度检验统计量可用于评估拟合效果, r^2 越接近 1.0,说明拟合效果越好(张宏群等,2022)。本研究地面雨滴谱拟合参数 N_0 、 μ 及 Δ 均大于高空,不同高度 $\lg N_0$ 在 $3.35 \sim 4.34 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,150 m 以下近地层形状参数 $\mu > 0$,150 m 以上高度 $\mu < 0$ 。与长白山麓夏季地面雨滴谱拟合参数平均值(孙钦宏等,2023)对比,本次过程地面 N_0 、 μ 参数值介于对流降水与层云降水之间, Δ 参数值高于两者统计平均值。除此之外,地面 r^2 为 0.99,而高空 r^2 位于 $0.31 \sim 0.35$,由此可见 Gamma 函数对地面雨滴谱拟合效果很好,但对高空雨滴谱分布拟合存在一定缺陷。

2.4 微物理参量垂直分布及演变

为了解此次降水过程中微物理参数垂直结构及演变特征,图 4 给出此次降水过程不同高度雨强 R 、

反射率因子 Z 、液态水含量 W 、雨滴总数浓度 N_t 和质量等效直径 D_m 分布及其随时间变化。由图 4 可见, W 、 N_t 大值区空间匹配度较高,而 R 、 Z 、 D_m 垂直分布均有所不同。结合图 2 可以看出:无降水阶段,各物理参量值随高度降低逐渐减小,垂直变化的梯度不大,到近地层 150 m 时参量值极小;降水集中阶段,随着高度降低, N_t 先变大后变小, D_m 持续增大,由于反射率因子是直径的六阶函数(Ulbrich and Atlas,1998;Vivekanandan et al,2004),直径变化对 Z 影响更直接,从而使得 Z 随高度降低持续明显增大,在近地层 150 m 时出现最强反射率回波;弱降水阶段, D_m 随高度降低有所增大, W 、 R 及 N_t 略有减小,使得 Z 随高度降低整体上有变大。由此可见,雨滴粒子由高空下落至近地层时,数浓度减小,雨滴直径明显变大,表明近地层雨滴粒子碰并增长作用明显,大雨滴的不断增长使反射率因子达到最大值,相比雨滴数浓度,反射率因子和雨强对直径变化更为敏感,这一特征在降水集中阶段更为明显。

标准截距参数 N_w 由于不受形状参数 μ 的影响,能够反映雨滴数浓度大小情况(Testud et al,2001), D_m 能够反映雨滴平均尺度情况。为进一步分析本次降水过程雨滴谱垂直分布特征,图 5 给出各高度层 N_w 及 D_m 随时间演变。此次降水过程中, D_m 整体上维持在 $0.2 \sim 1.6 \text{ mm}$,同一时刻不同垂直高度上变化不大,随着高度降低 D_m 均有所变大,降水强度越强 D_m 垂直变化幅度越明显; N_w 整体维持在 $10^3 \sim 10^7 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$,同一时刻不同高度差异较大,随着高度的降低 N_w 明显减小,雨强越强垂直变化越明显,1500 m 与 150 m 的 N_w 最大差值超过两个量级。由此表明,雨滴粒子自高空下落

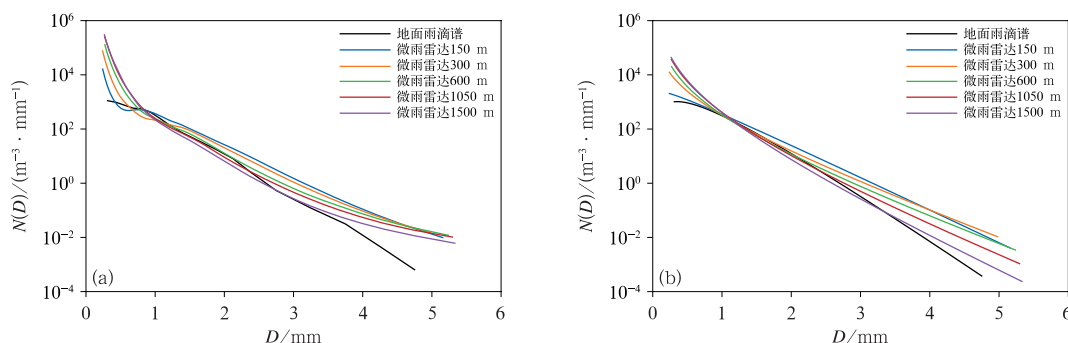


图 3 不同高度层雨滴(a)平均谱及(b)拟合谱分布

Fig. 3 Distribution of (a) averaged spectra and (b) fitting spectra of raindrops at different heights

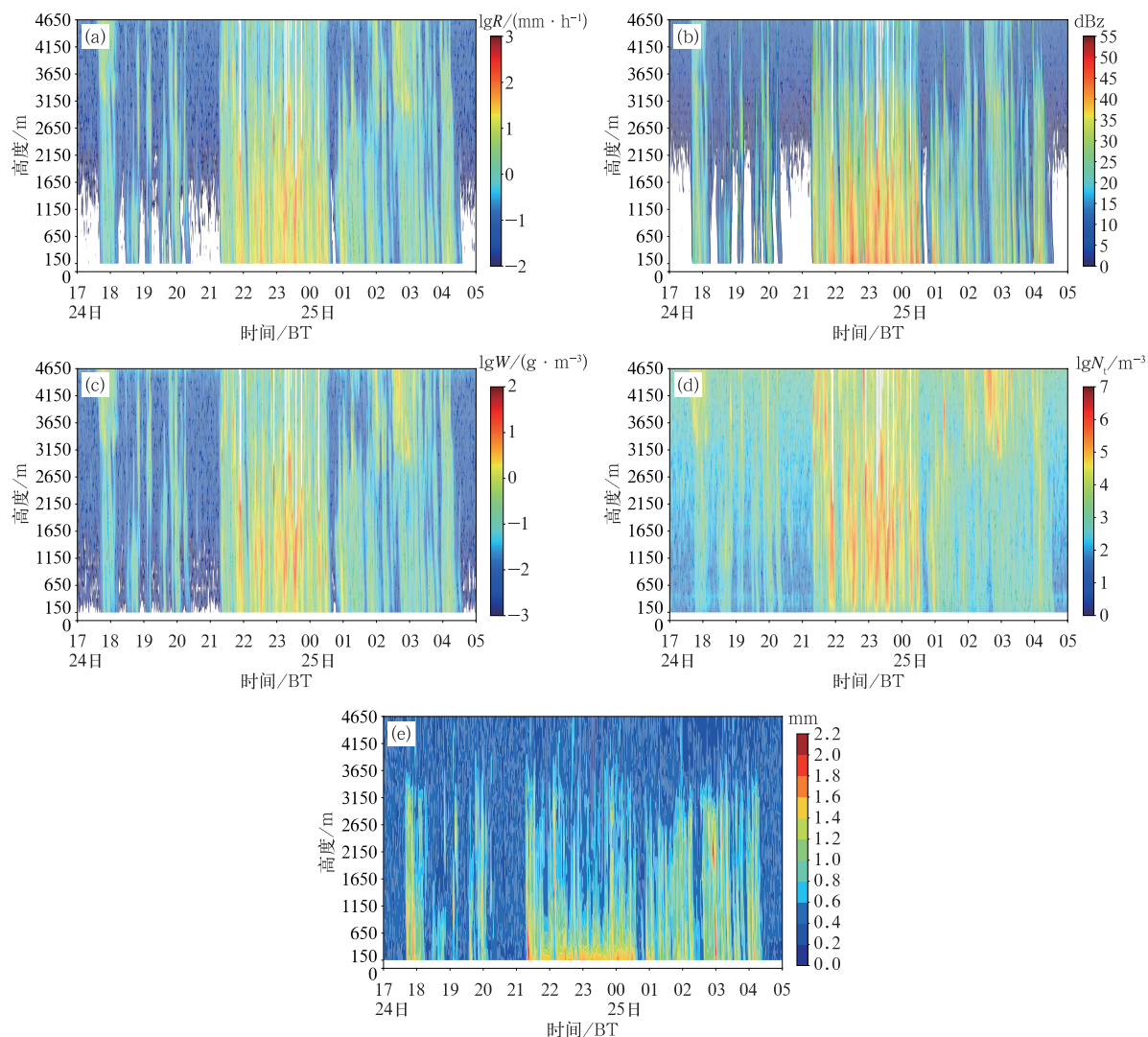


图 4 2021 年 8 月 24—25 日 (a) R , (b) Z , (c) W , (d) N_t , (e) D_m 随时间的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution with time of (a) R , (b) Z , (c) W , (d) N_t and (e) D_m from 24 to 25 August 2021

过程中,雨滴直径变大且数浓度明显减小,微物理过程碰并增长起主导作用,而地面 D_m 整体上小于高空,考虑这是由于不同设备探测原理差异造成的,同时受近地层下垫面因素干扰有关。

为量化分析雨滴对微物理参量的贡献,表 1 给出不同直径雨滴对微物理参量的平均贡献率。由表可见:小雨滴对 R 、 Z 、 W 、 N_t 贡献率大致随高度升高而变大,对 1500 m 高度 N_t 贡献率最高达到 99.77%,而对 Z 贡献率最高仅为 10.28%;中雨滴贡献率基本随着高度升高而变小;大雨滴对 R 、 W 、 N_t 贡献率一般随着高度升高而变小,对 Z 贡献率随高度升高而增大,该直径范围雨滴仅对 Z 贡献率较高,对其他微物理参量贡献率均不超过 10%。从

相同高度雨滴贡献对比来看,近地层 150 m 小雨滴对 N_t 贡献起主要作用,中雨滴对 R 、 Z 、 W 贡献起主要作用,贡献率均超过 70%;1500 m 高度小雨滴对 R 、 W 、 N_t 贡献起主要作用,贡献率分别为 64.64%、86.28%、99.77%,中雨滴对 Z 贡献起主要作用。由此可见,地面雨滴对微物理参量贡献与高空垂直变化趋势存在较大差异,将其与辽宁地区不同降水云系地面雨滴的特征量贡献(房彬等,2016)对比可以看出,此次过程粒子贡献率特征与辽宁积层混合云降水特征较为接近。

2.5 不同降水阶段微物理参量垂直分布

雨滴粒子下落中,蒸发、碰并等过程的发生与环

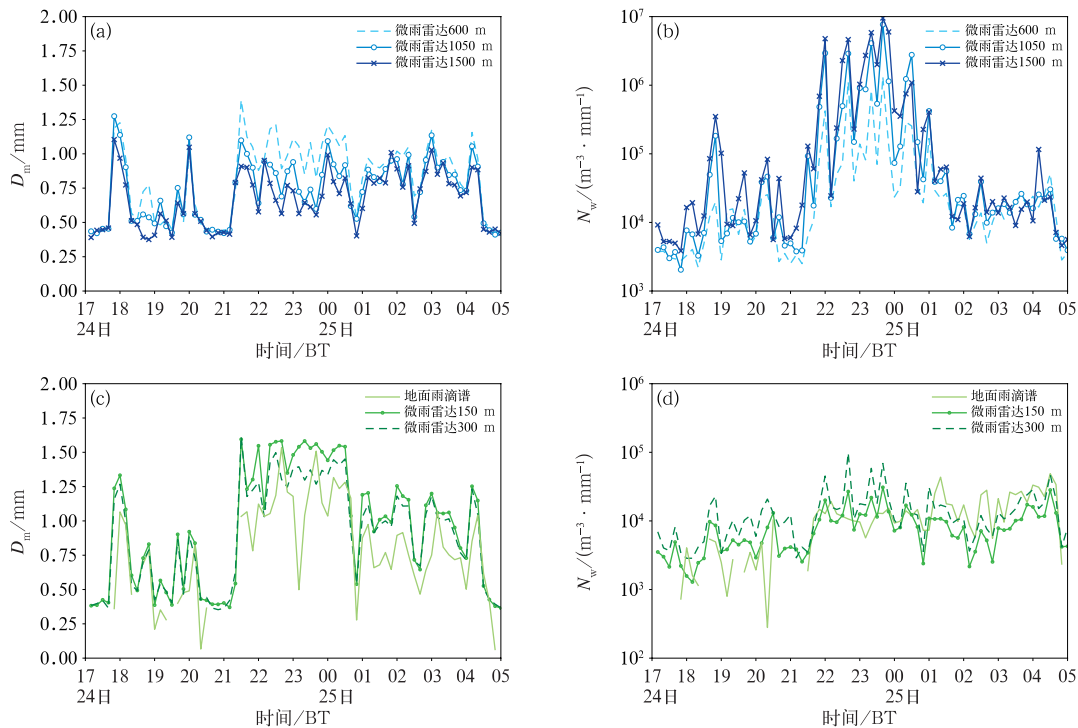


图 5 2021 年 8 月 24—25 日不同高度层(a,c) D_m , (b,d) N_w 随时间演变

(a,b)微雨雷达 600、1050、1500 m, (c,d)地面雨滴谱和微雨雷达 150 m、300 m

Fig. 5 Time evolution of (a, c) D_m and (b, d) N_w at different heights from 24 to 25 August 2021

(a, b) micro rain radar: 600, 1050, 1500 m,

(c, d) groud disdrometer and micro rain radar: 150 m, 300 m

表 1 不同直径雨滴对微物理参量贡献率(单位: %)

Table 1 Contribution rate of raindrops with different diameters to microphysical parameters (unit: %)

高度/m	R			Z			W			N_t		
	小雨滴	中雨滴	大雨滴	小雨滴	中雨滴	大雨滴	小雨滴	中雨滴	大雨滴	小雨滴	中雨滴	大雨滴
地面	24.51	74.00	1.49	4.79	85.40	9.82	33.48	65.73	0.79	88.86	11.14	0.00
150	12.34	82.11	5.55	1.61	71.33	27.07	22.72	73.87	3.41	90.73	9.24	0.03
300	15.74	78.29	5.97	1.41	68.66	29.93	37.40	59.50	3.11	98.14	1.85	0.00
600	36.75	59.12	4.13	3.84	63.31	32.85	65.04	33.42	1.54	99.20	0.80	0.00
1050	55.20	41.47	3.33	6.82	57.07	36.12	80.69	18.36	0.95	99.63	0.37	0.00
1500	64.64	33.27	2.08	10.28	58.52	31.20	86.28	13.19	0.53	99.77	0.23	0.00

境空气的温湿条件有关。本次降水过程地面气温由 22.9℃持续下降至 16.8℃,依据相对湿度变化将此次降水划分为四个阶段:第一阶段(24 日 17:00—18:20)由 68% 上升至 90%;第二阶段(24 日 18:20—19:09)由 90% 下降至 80%;第三阶段(24 日 19:09—22:29)由 80% 上升至 99%;第四阶段(24 日 22:29 至 25 日 05:00)稳定维持在 99%(图略)。图 6 给出各阶段微物理参量平均值垂直分布。第一阶段,从 4650 m 到 3150 m 高度 R 、 W 、 N_t 均明显减小,环境气温较高使得雨滴粒子蒸发作用明显,从 3150 m 到地面 R 、 W 、 Z 变化不大, N_t 持续变小,

D_m 维持少变后明显增大,表明雨滴粒子下落过程中碰并增长作用明显;第二阶段,从 4650 m 至地面 R 、 W 变化不大, Z 略有变大, N_t 持续变小而 D_m 先变小后明显增大,该阶段各高度层 D_m 平均值要小于第一阶段,可能由于环境湿度有所降低,雨滴碰并作用有所减弱;第三、第四阶段微物理参量垂直分布基本一致,此期间降水强度大、环境温度低且湿度逐渐变大至饱和, R 、 Z 、 D_m 随高度降低而变大, W 先变大后减小, N_t 随高度降低有所减小。除此之外,总降水过程的微物理参量垂直分布与第三、四阶段基本一致。与河北邢台冷锋云系降水(崔云扬等,2019)

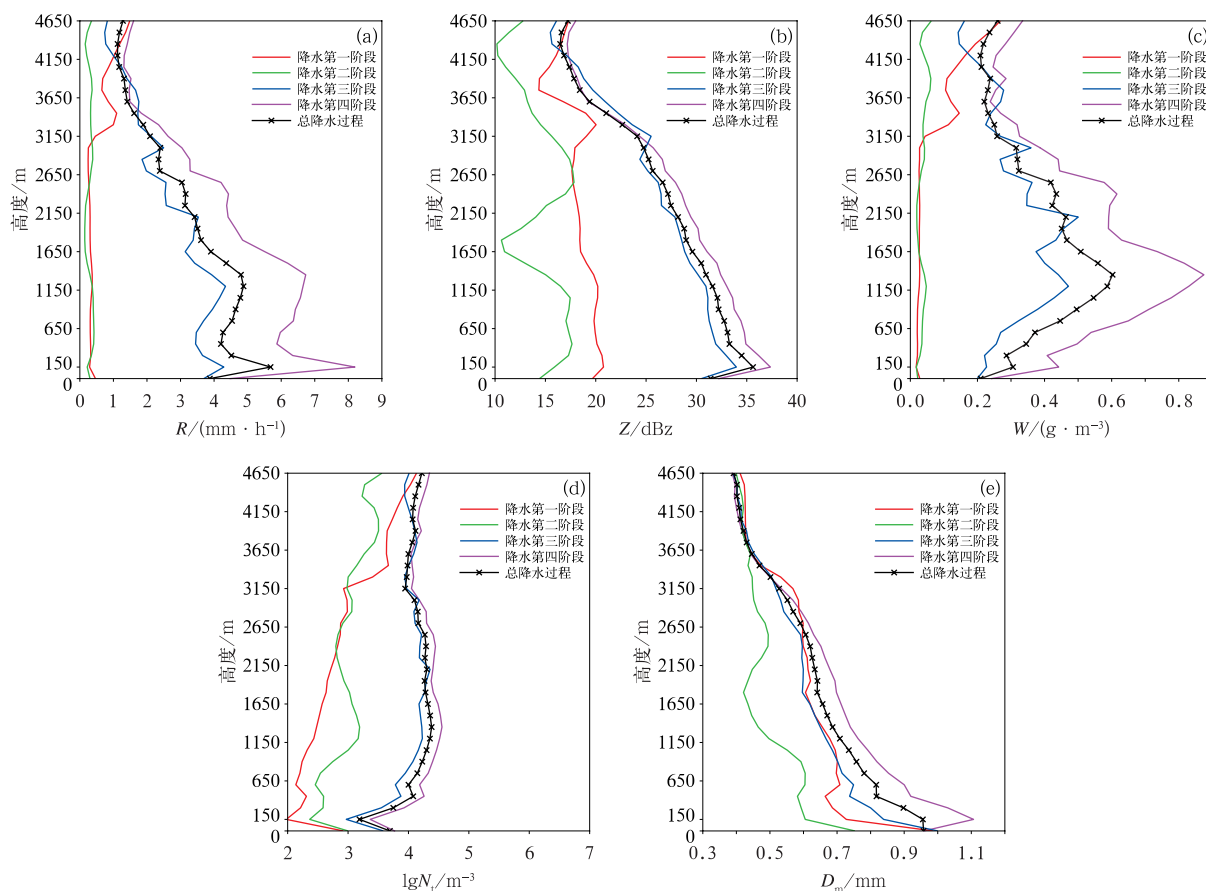


图 6 2021 年 8 月 24 日 17:00 至 25 日 05:00 不同降水阶段 (a) R , (b) Z ,
(c) W , (d) N_t , (e) D_m 的平均值随高度变化垂直分布

Fig. 6 Verticle profiles of average value of (a) R , (b) Z , (c) W , (d) N_t and (e) D_m in different precipitation stages from 17:00 BT 24 to 05:00 BT 25 August 2021

特征相比,此次长白山麓混合云降水过程环境气温更高,使得降水前期蒸发作用更强,而降水集中期环境湿度更大,液态水含量更高,雨滴下落时碰并增长作用更明显。

3 结论与讨论

本文针对 2021 年 8 月 24—25 日长白山麓一次冷涡背景下的积层混合云降水天气过程,利用微雨雷达、雨滴谱仪及雨量计等设备观测/反演资料,分析了此次降水过程不同垂直高度雨滴谱分布特征,研究了降水不同阶段的雨滴谱微物理特征参量垂直结构及演变规律,得出以下结论:

(1) 对此次降水过程,雨量计、雨滴谱仪和微雨雷达反演的 150 m 高度雨量变化趋势较为一致,峰值位置也基本同步,但由于仪器设计原理、反演算法等因素的影响,观测值与反演值存在一定偏差。雨

滴谱仪反演雨量值普遍偏小,降水中期和前期微雨雷达反演值较雨量计探测值偏大。

(2) 小雨滴在下落过程中蒸发、碰并作用使数浓度明显减小,1500 m 高度与地面的粒子数浓度相差两个量级;中雨滴和大雨滴粒子受碰并作用影响数量有所增加。Gamma 函数对小雨滴和中雨滴平均谱拟合效果较好,对大雨滴平均谱拟合存在低估,且直径越大拟合偏离度越高;地面雨滴谱拟合可决系数达到 0.99,而高空雨滴谱位于 0.31~0.35。

(3) 不同直径雨滴在不同高度对微物理特征参量贡献不同。小雨滴对雨强、反射率因子、液态水含量、总数浓度的贡献率大体随着高度降低而降低,中雨滴和大雨滴对微物理参量贡献率基本随着高度降低而升高,同时大雨滴对高层反射率因子贡献率高于低层。在近地层,小雨滴对总数浓度贡献起主要作用,而中雨滴对雨强、反射率因子、液态水含量贡献起主要作用;在高层,小雨滴对雨强、液态水含量、

总数浓度贡献起主要作用,而中雨滴对反射率因子贡献更为关键。

(4)雨滴下落过程中,反射率因子及质量等效直径均随高度降低而变大,总数浓度随高度降低而变小,雨滴碰并增长作用逐渐增强。降水前期,环境温度较高且湿度较小,小雨滴蒸发作用占据主导;降水集中期,环境湿度变大,液态水含量更高,雨滴下落时碰并增长作用更明显。

本文针对长白山麓一次冷涡背景下积层混合云降水过程开展相关研究,初步得到该次降水过程不同仪器探测性能分析结果、雨滴谱垂直分布特征以及微物理参量垂直结构及演变特征。由于观测设备原理性能、天气条件、季节因素等影响,相关研究结论的普适性有待于深入分析验证。环境垂直风场对微雨雷达反演算法的影响不容忽视,强盛的垂直气流容易造成回波功率谱折叠,使其反演的物理参量发生较大变化。此外,雨滴谱仪算法订正应充分考虑雨滴形变、重叠等因素。除此之外,为了解降水云内及云下微物理过程特征,应进一步结合云雷达、云高仪等资料开展深入分析研究。

参考文献

- 陈宝君,李子华,刘吉成,等,1998. 三类降水云雨滴谱分布模式[J]. 气象学报,56(4):506-512. Chen B J, Li Z H, Liu J C, et al, 1998. Model of raindrop size distribution in three types of precipitation[J]. Acta Meteor Sin, 56(4):506-512(in Chinese).
- 迟静,周玉淑,冉令坤,等,2021. 吉林一次极端降水发生发展热力过程的数值模拟分析[J]. 大气科学,45(6):1400-1414. Chi J, Zhou Y S, Ran L K, et al, 2021. Numerical simulation analysis on the generation and evolution of the dynamic and thermodynamic processes of an extreme rainfall in Jilin Province[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6):1400-1414(in Chinese).
- 崔飞扬,周毓荃,蔡森,2019. 利用微雨雷达研究一次冷锋云系降水的垂直结构分布及演变特征[J]. 大气科学,43(3):618-633. Cui Y Y, Zhou Y Q, Cai M, 2019. Vertical structure and evolution of precipitation associated with clouds along a cold front based on micro rain radar observations[J]. Chin J Atmos Sci, 43(3):618-633(in Chinese).
- 丁建芳,程博,沙修竹,等,2022. 河南省层状云降水雨滴谱特征分析[J]. 气象与环境科学,45(1):55-64. Ding J F, Cheng B, Sha X Z, et al, 2022. Characteristics analysis of raindrop size distribution for stratiform cloud precipitation in Henan Province[J]. Meteor Environ Sci, 45(1):55-64(in Chinese).
- 房彬,郭学良,肖辉,2016. 辽宁地区不同降水云系雨滴谱参数及其特征量研究[J]. 大气科学,40(6):1154-1164. Fang B, Guo X L, Xiao H, 2016. A study on characteristics of spectral parameters and characteristic variables of raindrop size distribution for different cloud systems in Liaoning Province[J]. Chin J Atmos Sci, 40(6):1154-1164(in Chinese).
- 冯婉悦,施雨娟,王智敏,等,2021. 雨滴谱仪资料在“温比亚”台风降水估测中的应用探究[J]. 气象,47(4):389-397. Feng W Y, Shi L J, Wang Z M, et al, 2021. Application of raindrop disdrometer data in rainfall estimation of Typhoon Rumbia[J]. Meteor Mon, 47(4):389-397(in Chinese).
- 黄兴友,印佳楠,马雷,等,2019. 南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及其在天气雷达探测中的应用[J]. 大气科学,43(3):691-704. Huang X Y, Yin J N, Ma L, et al, 2019. Comprehensive statistical analysis of rain drop size distribution parameters and their application to weather radar measurement in Nanjing[J]. Chin J Atmos Sci, 43(3):691-704(in Chinese).
- 黄泽文,彭思越,张浩然,等,2022. 福建安溪雨滴谱特征[J]. 应用气象学报,33(2):205-217. Huang Z W, Peng S Y, Zhang H R, et al, 2022. Characteristics of raindrop size distribution at Anxi of Fujian[J]. J Appl Meteor Sci, 33(2):205-217(in Chinese).
- 李慧,苏立娟,郑旭程,等,2021. 呼和浩特降雨和降雪过程粒子谱分布特征分析[J]. 气象,47(1):71-81. Li H, Su L J, Zheng X C, et al, 2021. Analysis on characteristics of particle size distribution during rain and snow processes in Hohhot[J]. Meteor Mon, 47(1):71-81(in Chinese).
- 李慧,银燕,单云鹏,等,2018. 黄山层状云和对流云降水不同高度的雨滴谱统计特征分析[J]. 大气科学,42(2):268-280. Li H, Yin Y, Shan Y P, et al, 2018. Statistical characteristics of raindrop size distribution for stratiform and convective precipitation at different altitudes in Mt. Huangshan[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2):268-280(in Chinese).
- 李山山,王晓芳,万蓉,等,2020. 青藏高原东坡不同海拔区域的雨滴谱特征[J]. 高原气象,39(5):899-911. Li S S, Wang X F, Wan R, et al, 2020. The characteristics of raindrop spectrum in different altitude region on the eastern slope of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 39(5):899-911(in Chinese).
- 梅海霞,梁信忠,曾明剑,等,2020. 2015—2017年夏季南京雨滴谱特征[J]. 应用气象学报,31(1):117-128. Mei H X, Liang X Z, Zeng M J, et al, 2020. Raindrop size distribution characteristics of Nanjing in summer of 2015—2017[J]. J Appl Meteor Sci, 31(1):117-128(in Chinese).
- 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).
- 沈杭锋,林宏伟,娄小芬,等,2021. 两次东风带高空冷涡强对流天气对比分析[J]. 气象,47(11):1380-1390. Shen H F, Lin H W, Lou X F, et al, 2021. Comparative analysis of two severe convective weather events under the influence of upper-tropospheric cold vortex in easterlies[J]. Meteor Mon, 47(11):1380-1390(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).
- 孙钦宏, 马洪波, 齐彦斌, 等, 2023. 2021年夏季长白山麓雨滴谱分布特征[J]. *应用气象学报*, 34(3): 336-347. Sun Q H, Ma H B, Qi Y B, et al, 2023. Distribution characteristics of raindrop spectrum at Changbai Mountain foothills in summer of 2021[J]. *J Appl Meteor Sci*, 34(3): 336-347 (in Chinese).
- 唐继顺, 刘晓阳, 刘均慧, 等, 2021. 北京低边界层雨滴谱的垂直分布特征[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 57(6): 1045-1057. Tang J S, Liu X Y, Liu J H, et al, 2021. Vertical distribution characteristics of raindrop size distribution at lower atmospheric boundary layer in Beijing[J]. *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 57(6): 1045-1057 (in Chinese).
- 全泽鹏, 杨连梅, 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, 雷恒池, 杨洁帆, 2017. 微降水雷达测量精度分析[J]. *气候与环境研究*, 22(4): 392-404. Wang H, Lei H C, Yang J F, 2017. Analysis of measurement accuracy of micro rain radar[J]. *Climatic Environ Res*, 22(4): 392-404 (in Chinese).
- 王洪, 雷恒池, 杨洁帆, 等, 2020. 山东不同云系降水微物理参数特征[J]. *大气科学*, 44(2): 315-326. Wang H, Lei H C, Yang J F, et al, 2020. Characteristics of rain microphysical parameters for different cloud systems in Shandong Province[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(2): 315-326 (in Chinese).
- 王俊, 王文青, 王洪, 等, 2021. 短时强降水和冰雹云降水个例雨滴谱特征分析[J]. *高原气象*, 40(5): 1071-1086. Wang J, Wang W Q, Wang H, et al, 2021. Characteristics of the raindrop size distribution during a short-time heavy rainfall and a squall line accompanied by hail[J]. *Plateau Meteor*, 40(5): 1071-1086 (in Chinese).
- 王俊, 姚展予, 侯淑梅, 等, 2023. 山东夏季两次极端雨强暴雨的雨滴谱特征研究[J]. *大气科学*, 47(2): 311-326. Wang J, Yao Z Y, Hou S M, et al, 2023. The characteristics of raindrop size distribution in two rainstorms with extreme rainfall rates in summer in Shandong Province[J]. *Chin J Atmos Sci*, 47(2): 311-326 (in Chinese).
- 吴亚昊, 刘黎平, 周筠珺, 等, 2016. 雨滴谱的变化对降水估测的影响研究[J]. *高原气象*, 35(1): 220-230. Wu Y H, Liu L P, Zhou Y J, et al, 2016. Study of raindrop influence of spectrum change on precipitation estimation[J]. *Plateau Meteor*, 35(1): 220-230 (in Chinese).
- 杨磊, 郑永光, 2023. 东北地区雷暴大风观测特征及其与东北冷涡的关系研究[J]. *气象学报*, 81(3): 416-429. Yang L, Zheng Y G, 2023. Observational characteristics of thunderstorm gusts in Northeast China and their association with the Northeast China cold vortex[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(3): 416-429 (in Chinese).
- 张宏群, 陈思, 周望, 等, 2022. 基于迭代重加权最小二乘法的雨滴谱函数拟合研究[J]. *气象科学*, 42(2): 235-243. Zhang H Q, Chen S, Zhou W, et al, 2022. Research on raindrop spectral function fitting based on iterative reweighted least square method[J]. *J Meteor Sci*, 42(2): 235-243 (in Chinese).
- 张庆池, 刘端阳, 武艳, 等, 2022a. 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(6): 967-985. Zhang Q C, Liu D Y, Wu Y, et al, 2022a. Raindrop spectral characteristics and Z-R relationship of different rainstorm types in Huaibei Region[J]. *Acta Meteor Sin*, 80(6): 967-985 (in Chinese).
- 张庆池, 吕翔, 刘子贺, 等, 2022b. 登陆台风不同强度降水的雨滴谱特征对比[J]. *气象*, 48(12): 1617-1628. Zhang Q C, Lyu X, Liu Z H, et al, 2022b. Comparison of raindrop spectrum characteristics of rainfall caused by two typhoons[J]. *Meteor Mon*, 48(12): 1617-1628 (in Chinese).
- 赵城城, 张乐坚, 梁海河, 等, 2021. 北京山区和平原地区夏季雨滴谱特征分析[J]. *气象*, 47(7): 830-842. Zhao C C, Zhang L J, Liang H H, et al, 2021. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution between mountain and plain areas over Beijing in summer[J]. *Meteor Mon*, 47(7): 830-842 (in Chinese).
- 郑娇恒, 陈宝君, 2007. 雨滴谱分布函数的选择: M-P 和 Gamma 分布的对比研究[J]. *气象科学*, 27(1): 17-25. Zheng J H, Chen B J, 2007. Comparative study of exponential and gamma functional fits to observed raindrop size distribution[J]. *J Meteor Sci*, 27(1): 17-25 (in Chinese).
- 郑秀雅, 张廷治, 白人海, 1992. 东北暴雨[M]. 北京: 气象出版社. Zheng X Y, Zhang T Z, Bai R H, 1992. Rainstorm over Northeast China[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S, 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. *Rev Geophys*, 11(1): 1-35.
- Battaglia A, Rustemeier E, Tokay A, et al, 2010. Parsivel snow observations; a critical assessment[J]. *J Atmos Ocean Tech*, 27(2): 333-344.
- 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.
- 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 Japan*, 91(2): 215-227.
- Friedrich K, Kalina E A, Masters F J, et al, 2013. Drop-size distributions in thunderstorms measured by optical disdrometers during VORTEX2[J]. *Mon Wea Rev*, 141(4): 1182-1203.
- Hsieh Y P, 1949. An investigation of a selected cold vortex over North America[J]. *J Meteor*, 6(6): 401-410.
- Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W, 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 111(470): 877-946.
- Hou T J, Lei H C, Hu Z X, et al, 2020. Simulations of microphysics and precipitation in a stratiform cloud case over northern China:

- comparison of two microphysics schemes[J]. *Adv Atmos Sci*, 37(1):117-129.
- Jaffrain J, Berne A, 2011. Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PARSIVEL disdrometers[J]. *J Hydrometeorol*, 12(3):352-370.
- Niu S J, Jia X C, Sang J R, et al, 2010. Distributions of raindrop sizes and fall velocities in a semiarid Plateau climate: convective versus stratiform rains[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49(4):632-645.
- Peters G, Fischer B, Clemens M, 2010. Rain attenuation of radar echoes considering finite-range resolution and using drop size distributions[J]. *J Atmos Ocean Tech*, 27(5):829-842.
- 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.
- Testud J, Oury S, Black R A, et al, 2001. The concept of “normalized” distribution to describe raindrop spectra: a tool for cloud physics and cloud remote sensing[J]. *J Appl Meteor*, 40(6):1118-1140.
- Tridon F, Van Baelen J, Pointin Y, 2011. Aliasing in micro rain radar data due to strong vertical winds[J]. *Geophys Res Lett*, 38(2):L02804.
- Ulbrich C W, Atlas D, 1998. Rainfall microphysics and radar properties: analysis methods for drop size spectra[J]. *J Appl Meteor*, 37(9):912-923.
- Vivekanandan J, Zhang G F, Brandes E, 2004. Polarimetric radar estimators based on a constrained gamma drop size distribution model[J]. *J Appl Meteor*, 43(2):217-230.
- Wang H, Lei H C, Yang J F, 2017. Micro physical processes of a stratiform precipitation event over eastern China: analysis using micro rain radar data[J]. *Adv Atmos Sci*, 34(12):1472-1482.
- White A B, Gottas D J, Strem E T, et al, 2002. An automated bright-band height detection algorithm for use with Doppler radar spectral moments[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 19(5):687-697.
- Xie Z W, Bueh C, 2015. Different types of cold vortex circulations over Northeast China and their weather impacts[J]. *Mon Wea Rev*, 143(3):845-863.

(本文责编:戴洋)