基于多源资料的东北冷涡降水垂直结构分析

李遥1,2,3, 张铁凝1,2,3*, 赵姝慧3, 孙丽1,2,3, 翟晴飞4

1. 中国气象局沈阳大气环境研究所,辽宁 沈阳, 110016

2. 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点实验室,北京,100081

辽宁省人工影响天气办公室,辽宁 沈阳,110016
 辽宁省气象信息中心,辽宁 沈阳,110016

摘要:为进一步研究东北冷涡云系降水的垂直结构,本文利用布设在辽宁省阜新蒙古族自治 县国家级地面观测站内的微雨雷达和激光雨滴谱仪等设备,对2020年以来阜蒙县的三次东北 冷涡降水天气过程的微物理特征进行分析。结果表明:在层云稳定性降水主导的个例中,微 雨雷达和雨滴谱仪测得的雨滴谱吻合程度较高,而在对流性降水较多的个例中,微雨雷达与 雨滴谱仪观测的平均雨滴谱仅在中等粒子段(1-2.5mm)表现出较好的一致性;在层云性降 水阶段,较小的冰晶粒子更快的通过零度层开始融化,小液滴在零度层下方累积,出现数浓 度的极值,在该极值下方,较大的冰晶粒子经历了更长的融化距离,成为较大雨滴,同时, 小云滴的累积进一步促进了大云滴的收集及碰并效应的发生,利于大雨滴的形成,在零度层 下方出现一个雨滴谱谱宽的极值,表现为垂直方向的雨滴谱的"凸起","凸起"的发生到 下落发生在2-3分钟之内。垂直方向雨滴谱的拓宽在地面能否带来明显的雨强的明显增大, 要取决于近地层大气中水汽含量,在辽西地区即表现为,干旱的春季,大气相对湿度较低, 亮带对于地面雨滴谱的拓宽无明显帮助,但在水汽相对充沛的夏季,"凸起"的下移一定程 度上导致了近地层雨滴谱拓宽及雨强的增大;相对其他地区,辽西地区降水粒子数浓度偏小, 但层云性降水和对流性降水的平均数浓度差别不大,质量加权直径的差异导致了雨强的差 异。

关键词 东北冷涡 微雨雷达 雨滴谱垂直结构 文章编号: 2023095B

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Analysis of Vertical Structure of the Northeast China Cold

Vortex Precipitation Based on Multisource Data

LI Yao^{1,2,3}, ZHANG Tiening^{1,2,3*}, ZHAO Shuhui², SUN Li^{1,2,3}, ZHAI Qingfei⁴ 1.The Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang, 110016, Liaoning, China;

投稿日期 2023-07-11; 网络预出版日期

作者简介 李遥, 女, 硕士, 主要从事云雾降水物理学研究。E-mail: 1801067024@ qq.com 通讯作者 张铁凝, E-mail: ztniris@163.com

资助项目 中国气象局沈阳大气环境研究所联合开放基金课题(2022SYIAEKFZD03;2023SYIAEKFMS13), 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面上项目(2023CPML-B04);中国 气象局创新发展专项(CXFZ2022J059)

Funded by China Meteorological Administration Shenyang Institute of Atmospheric Environment Joint Open Fund Project (No.2022SYIAEKFZD03; No.2023SYIAEKFMS13), Innovation Foundation of CPML(No. 2023CPML-B04) China Meteorological Administration Innovation and Development Project (No.CXFZ2022J059)

2. Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Weather Modification (CPML), CMA,10081,Beijing, China;

3. Liaoning Weather Modification Office, Shenyang, 110016, Liaoning, China:

4. Liaoning Meteorological Information Centre, Shenyang, 110016, Liaoning, China Abstract: To study the vertical structure of the northeast cold vortex cloud system precipitation further, this paper analyzes the microphysical characteristics of the three northeast China cold vortex precipitation events in Fuxin since 2020 by using the micro-rain radar and laser disdrometer deployed in the national ground observation station of Fuxin Mongol Autonomous County, Liaoning Province. The results show that the drop size distribution(DSD) measured by the micro rain radar and the disdrometer have good consistency in the cases dominated by stable precipitation of Stratus clouds, while the average drop size distribution observed by the micro rain radar and the disdrometer only shows good consistency in the medium particle segment (1-2.5mm) in the cases with more convective precipitation. During the stratiform precipitation, the smaller ice crystal particles begin to melt faster through the 0 $^{\circ}$ C layer, and the small liquid droplets accumulate below the 0 $^{\circ}$ C layer, and extreme value of the droplet concentration appears, below this height, and the larger ice crystal particles experience a longer melting distance and become larger raindrops. At the same time, the accumulation of small liquid drops further promotes the collection and collision effect of large droplets, which is conducive to the formation of larger raindrops, and an extreme value of spectral width of DSD appears below the melting layer, which is manifested as a "Bulge", which occurred within 2-3 minutes from the onset to the fall. Whether the broadening of the DSD in the vertical direction can significantly increase rainfall intensity on the ground depends on the water vapour content in the near-surface atmosphere. In the dry spring of western Liaoning, the relative humidity of the atmosphere is low, and the bright band has no obvious help for the broadening of the ground DSD. But in the summer when the water vapour is relatively abundant, the downward movement of the "Bulge" to a certain extent leads to the widening of the near-ground DSD and the increase of rain intensity. Compared with other regions, the number concentration of rain droplets in western Liaoning is small. Still, the average concentration of stratus precipitation and convective precipitation is not much different, and the difference in mass-weighted diameter leads to the difference in rain intensity.

Keywords Northeast China Cold Vortex; micro rain radar; the vertical structure of DSD

1引言

东北冷涡是东亚中高纬度地区重要的天气系统,常常带来暴雨、冰雹、短时大风和低温 天气,对东北冷涡云降水的云宏微观结构特征进行分析和研究具有重要的意义。雨滴谱分布 (Raindrop Size Distribution,简称 DSD)作为降水的基本微物理特征,反映了单位体积内雨 滴数浓度随粒径的变化情况,是降水形成过程中云中动力和微物理过程综合作用的最终体 现。从云内初始形成到最终降落地面,雨滴要经历碰撞、并合、破碎等复杂的微物理过程, 再加上蒸发、湍流、尺度筛选等复杂的外部环境作用,雨滴谱分布往往不同(张洪胜,2017)。 研究表明,受到气候、地形条件以及降水类型等因素影响,雨滴谱谱型和相关特征量具有明 显的空间和时间变化(Bringi V N et al,2003;Ulbrich C W et al,2007; Zhikang F et al,2020;杨涛 等,2023)。相比多普勒天气雷达和气象卫星资料,雨滴谱资料可以更直观地反映降水的微 物理过程,其特征参量是评价人工影响天气作业效果的重要参考,对雨滴谱开展深入研究可 以更清楚地了解云水转化和降水演变的机制(张宇,2013),在人工影响天气指挥和效果评估中都有着重要的应用价值(潘雯菁,2018; 濮江平,2010)。

对比不同云系降水地面雨滴谱的研究表明: 在降水强度或雨水含量相同的情况下, 层状 云降水雨滴谱谱宽较窄, 降水粒子以小雨滴为主; 对流云降水谱宽较宽, 雨滴尺度较大(柳 臣中等,2015;Maki M et al,2001;Chen B et al,2016;Islam T et al,2012)。此外, 不同降水强度下 的地面雨滴谱分布也有一定的差异(Harikumar R et al,2010;Kumar L S et al,2011), 研究雨 滴谱随降水强度的演变有利于理解各类微物理过程在不同降水阶段所起的作用。Harkumar 等(2011)利用印度南部四个测站的降水资料, 分析雨滴谱对数正态分布的拟合参数随降水 强度的变化,结果表明标准差 σ 随降水强度的变化较小,可近似为常数, 而几何平均直径 D_g 和雨滴总数浓度 N_t 随降水强度增加呈指数增大。

然而雨滴在下落过程中同时受到浮力、重力和空气阻力的作用,在垂直方向有着复杂的 变化,相对于地面雨滴谱观测,研究不同高度层上的降水粒子特征及其随降水的变化有助于 进一步理解降水形成和演变的微物理机制。微雨雷达(Micro rain radar)通过雨滴大小和散 射截面、下落速度之间的关系,利用多普勒效应测量不同高度层的雨滴大小分布,可获取包 括雷达反射率、液态水含量、雨强、降水粒子下落速率和雨滴谱垂直分布等产品,常用于对 雨滴谱垂直方向分布进行连续探测,与雨滴谱仪和云雷达配合,可以得到 6km 以下不同高 度上的雨滴谱及降水云的微物理情况。国内对于微雨雷达观测降水的相关研究多集中在微雨 雷达与其他降水观测仪器的精度对比分析(王洪等,2017;温龙等,2015)及降水个例的微 物理参量的时空演变特征(温龙,2016;Wen et al.,2016;全泽鹏等,2021; 宋灿等,2019)等 方面。崔云扬等(2019)利用河北邢台一部 K 波段的微雨雷达观测了一次冷锋云系的降水, 讨论了一次降水个例中有雨滴的碰并、蒸发、破碎等演变过程,结果表明降水在云内云外受 不同的微物理过程影响,云外低层雨滴间的碰并作用较强。王洪等(2022)基于多源资料分 析了山东积层混合云降水的粒子形态及雨滴谱特征,对 0℃层附近的雨雪转换进行了细致的 分析,认为对流云降水环境垂直气流及粒子尺度变化范围均大于层状云降水。

辽宁西部地区十年九旱,水资源匮乏对农业种植造成了恶劣影响,同时辽西自然生态区 抵抗力稳定性相对较弱,需要对其进行强制性的严格保护,这对生态修复型人工增雨作业提 出了更高的要求。前人对于辽宁地区降水微物理特征的研究主要依靠雨滴谱仪(陈宝君等, 1998;宫福久等,2007),对于降水特征量垂直廓线和垂直雨滴谱的观测十分有限,缺乏对 于降水垂直结构分布和微物理特征的认识,无法进行客观的作业效果评估。2019年7月, 在辽宁省西部阜新蒙古自治县架设了辽宁省首部 MRR-2型垂直指向微雨雷达及K波段云雷 达,基于以上设备的观测资料,我们对东北冷涡影响下的辽西地区降水过程微物理特征进行 了详细分析。针对辽西地区的雨滴谱垂直结构的进一步研究可以帮助我们增强对辽西地区降 水的认知,提高模式预报准确性,进而为人工增雨的作业效果评估提供有力参考。

2 资料来源与方法介绍

2.1 资料来源

选取 2020 年以来的三次东北冷涡影响下的降水天气过程(个例 1:2020 年 4 月 16 日; 个例 2: 2020 年 8 月 12 日; 个例 3: 2022 年 6 月 22 日)。研究采用的 MRR-2 微雨雷达、 HMB-KPS 毫米波测云仪和 DSG5 型降水现象仪等设备均位于辽宁省阜新蒙古族自治县国家 级地面观测站内(站号 54237, 121.7458°E, 42.0672°N)。微雨雷达是一种 K 波段垂直指向 雷达,采用连续调频技术(FM-CW),通过获取多普勒功率谱,利用降水粒子下落速度与 直径的经验公式反演得到雨滴谱(Atlas D et al,1973),垂直方向共 31 层,高度分辨率可设 置为 30-200 m,2022 年以前,阜蒙县的微雨雷达设置高度分辨率为 100 m,2022 年以后设 置为 200 m,采样时间为 10 s; HMB-KPS 毫米波测云仪是一种 Ka 波段垂直指向云雷达,探 测高度为 120m-20km,时间分辨率为 1min,空间分辨率为 30m;降水现象仪核心部件与德 国 OTT 公司生产的 Parsivel 雨滴谱仪类似(Loffler-Mang M,2000),有 32 个尺度通道和 32 个速度通道,其中粒径测量范围为 0.2-25.0 mm,速度测量范围为 0.2-20.0 m·s⁻¹,采样面积 为 54 cm²,采样时间是 1 min;雨量筒最低分辨率为 0.1 mm,采样时间为 1 min。

2.2 方法介绍

利用实测得到的 DSD 分布,可以通过以下公式得到雷达反射率因子 Z(mm⁶·mm⁻³)、降水率(mm·h⁻¹)、液态水含量 LWC(g·m⁻³)及总雨滴数浓度 N_t 等降水积分参数:



(4)

$N_t = \sum_{i=1}^L N(D_i) \Delta D_i$

其中 L 为总分档数, *D_i*为第 i 档的等效雨滴粒径, *ΔD_i*为对应的分档间隔, *V_i*(m·s⁻¹) 为第 i 档内雨滴降落速度的平均值。*N*(*D_i*)(mm⁻¹·m⁻³)为 *D_i*-0.5*ΔD_i*到 *D_i*+0.5*ΔD_i*区间内的雨滴 数浓度。参考 Tokay 等(2010)提出的对降水样本的定义方法,对于每分钟的数据,将降水 强度 R≥0.1 mm·h⁻¹ 的数据视为 1 个降水样本,其余的均视为非降水样本。雨滴谱仪资料是 将每分钟降水粒子数小于 10 的删除,微雨雷达是根据雨滴谱仪观测将非降水引起的噪声去 除。采用 Chen 等(2014)的方法,将雨滴谱采集到的降水数据分为层状云降水、对流性降 水、微弱降水三类。具体来说:连续 10 分钟以上的时间段内,降水强度大于 0.5 mm·h⁻¹,且 该时间段内,降水强度的标准偏差小于 1.5 mm·h⁻¹,识别为层状云降水;降水强度大于 5 mm·h⁻¹

3天气背景及地面雨滴谱特征

3.1 降雨阶段天气背景分析

辽宁地区的降水过程,主要受暖湿气流影响,结合风云四号卫星红外云图叠加 ECWMF 再分析 500hPa 等高线、等温线和 850hPa 风场(图 1)、云雷达、微雨雷达及地面自动站数 据对选取的三次个例进行环流背景场介绍(图 2)。个例 1(图 1.a、图 2.a): 2020年16日 20时,冷涡中心位于河北,观测点处于冷涡前侧,切变线北侧,受东南风影响,观测区域的 水汽条件较好,利于降水的发生,16日 20时到 17日 02时,雷达反射率因子随着高度的降 低而减小,在 2km 以上位置,反射率因子可达到 0-20 dBz,高层的反射率因子呈现双峰分 布,2 km 以下,随着高度的降低,降水粒子平均粒径开始缓慢增长直至地面,但始终未超 过 0.6 mm,雨滴数浓度在 1 km 附近出现小幅增长,但在 800 m 以下快速减少,总的来说雨 滴谱始终维持在较窄范围,该阶段降水粒子几乎很少能够到达地面。17日 02 时,冷涡继续 南下,中心移动至辽宁南部,该时段测站上空开始出现连续的降水。近 1 km 处具有明显的 融化层亮带,厚度达 300 m 左右。研究表明:亮带的明显程度与融化前的粒子密度有关,亮 带的宽度随降水强度的增大而增大(Fabry F et al,1995)。由于本次过程降水强度较小,因此其宽度较窄。相较其他类型降水,层云亮带下的雷达反射率因子相对均匀。随着冷涡的移动,05时,观测区域风向转为偏北风,水汽条件转差,雨滴谱谱宽收窄,平均粒径再次减小到0.6 mm 以下,降水趋于结束。本次过程整体雨强较小,最大小时雨强为15 mm·h⁻¹。个例2(图 1.b、图 2.b): 2020 年 8 月 12 日 14 时,高空槽伴随低空切变线东移,阜蒙县上空开始有云移入,以单层云为主。12 日 16 时观测站上空受冷涡云系东侧的分散对流云团影响,产生了比较明显的对流性降水,最大雨强接近 60 mm·h⁻¹。云雷达回波接地,受强降水导致的信号衰减影响,雷达在垂直方向上的探测能力受限,4 km 以上几乎没有探测数据。12 日 17~21 时,云雷达回波底高几乎均为3 km 以上,回波强度为 15~25 dBz,此阶段降水不明显。21 时以后,雷达回波顶高有明显的下降(从 10 km 下降至 6km)。在 12 日 21 时至 13 日 00 时,4.5 km 高度附近存在一条明显的亮带。随着云系继续向东移动,13 日 03~08 时观测站位于冷涡云系尾部云带的中后部,13 日 09~11 时,一块新的对流云团移入,雷达回波大于40 dBz 的范围明显增大,降水强度最大达 109.8 mm·h⁻¹。个例 3(图 1.c、图 2.c): 2022 年 6 月 22 日 02 时,受东北冷涡底部锋区影响,锋区上多短波槽活动,配合低空丰沛的水汽



输送,温度层结存在低层暖,高层冷的对流不稳定条件,05时前后测站上空开始出现降水, 4km 高度存在一条明显亮带,12时,受暖切变线影响,降水进一步加强,微雨雷达测得最 大小时雨强达到 87.4mm·h⁻¹,微雨雷达和云雷达均在近地层测到了强回波区。根据本文参考 的降水分类方法,图 2.a3、b3、c3 中通过背景颜色给出了三次个例降水的分类,其中可以大 致认为个例 1 降水强度较小,以层云稳定性降水为主,个例 2、3 降水强度较大,对流性降 水占比较高。

图 1.三次东北冷涡降水红外云图叠加 500hPa 高度场、500hPa 温度场和 850hPa 风场(a:2020 年 4 月 16 日、

b:2020年8月12日、c:2022年6月22日)

Fig 1. Superposition of infrared cloud image, geopotential height field at 500 hPa, temperature field at 500 hPa, and wind field at 850hPa(barb) during the three northeast cold vortex precipitation events, (a:April 16th, 2020,

b:August 12th, 2020, c:June 22th, 2022)



图 2. 三次东北冷涡降水中云雷达测得反射率因子、微雨雷达测得反射率因子、雨滴谱仪和微雨雷达测得 的小时雨强(2020年4月16日: a1-a3、2020年8月12日: b1-b3、2022年6月22日: c1-c3)

Fig 2.Reflectivity factor measured by cloud radar, reflectivity factor measured by light rain radar, hourly rain intensity measured by raindrop spectrometer and light rain radar in three northeast cold vortex precipitation (April

16th, 2020: a1-a3, August 12th, 2020: b1-b3, June 22th, 2022: c1-c3)

为具体说明三次东北冷涡降水的数据收集情况,给出三次东北冷涡降水不同类型降水样 本量及占比(表1),可以看出虽然在个例1中,对流性降水占比较少,但个例2和个例3 很好地弥补了这一点,使收集到的不同类型降水样本数相对均匀,本文将主要针对层云性降 水和对流性降水进行详细分析。另外,2022年以前,本文所用微雨雷达设置的高度分辨率 为100m,即最高探测高度为3100m,所以对于个例2的降水探测未到0℃层,为完整讨论 降水过程中云和降水粒子在垂直方向上的微物理变化,下文关于降水垂直结构的有关讨论 中,主要选取个例1和个例3进行详细分析。

Table 1.Sample size and proportion of different types of precipitation in three northeast cold vortex precipitation								
	层云性降水		对流性降水		微弱降水		未分类降水	
	样本数	占比	样本数	占比	样本数	占比	样本数	占比
2020年4月16日	288	63%	12	3%	144	32%	12	3%
2020年8月12日	56	13%	98	23%	174	41%	101	24%
2022年6月22日	217	28%	155	20%	176	23%	223	29%

表 1	.二次东:	北泠涡降水个	同类型降水	样本重及占比
-----	-------	--------	-------	--------

3.2 地面雨滴谱特征

图 3 给出了微雨雷达不同高度、雨滴谱和雨量筒测得的小时降水相关性(图 3.a)及三次个例雨滴谱和微雨雷达测得的不同高度雨滴谱(图 3.b-d),可以看出,雨量筒和微雨雷达的近地面高度层测得的小时雨强有较高的一致性。由于雨量筒本身的限制,导致部分小雨

强时段雨量筒未测到降水,而当雨强较大时,微雨雷达和雨滴谱仪都测得了比雨量筒更大的 小时雨强,这可能与雨滴在探测方向上的破碎与重叠有关。微雨雷达 100 m 高度的雨滴谱受 地面杂波的影响,与雨滴谱仪和微雨雷达其他高度层的雨滴谱一致性较差(Wang H et al, 2017),所以本文中选用 200 m 高度层的微雨雷达数据进行近地面雨滴谱分析,在该高度层 上,三次个例中微雨雷达测得的小时降水量与雨量筒测得的小时降水量平均 R² 达到 0.93, 数据可信度较高。

对比三次个例的雨滴谱(图 3.b-d),在层云稳定性降水主导的个例 1 微雨雷达和雨滴 谱仪测得的雨滴谱吻合程度较高,在对流性降水较多的个例 2、3 中,微雨雷达与雨滴谱仪 观测的平均雨滴谱在中等粒子段(1-2.5mm)表现出较好的一致性,而在小粒子端(<0.5mm), 微雨雷达观测数浓度明显高于雨滴谱仪。这与前人研究结果一致(温龙等,2015),对流性 降水存在个别雨强较大的样本,可能伴有一定的垂直气流影响,此时雨滴谱仪对小滴速度测 量偏大,会导致雨滴谱仪对小粒子数浓度有一定低估(Kirankumar et al,2013; Niu S et al, 2010;李慧等,2018),另外雨滴谱仪在测量时假设一次只能经过一个粒子,也会导致测得 小粒子数浓度的偏少。总的来说,微雨雷达 200m 观测到的雨滴谱较为可信,可以看到雨滴 谱基本成单峰分布,降水强度较大的个例雨滴谱谱宽无明显拓宽,但 1mm 以上大雨滴数浓 度明显增多。





Fig 3. Correlation of hourly precipitation in three cases MRR vs YDP vs RG (a), raindrop spectrum distribution at different heights of raindrop spectrometer and raindrop spectrometer in case1 (b), case2 (c), case3 (d)

4 冷涡降水的垂直结构分析

4.1 垂直雨滴谱分析

为详细分析不同类型降水时段降水粒子的变化过程,选取个例 1、3 对不同类型降水时 段的垂直雨滴谱进行了逐分钟分析(图 4、图 5)。参考前文提到的降水分类方法,选取有代表 性的降水时段,个例 1 将 4:01-4:06 的降水识别为层云稳定性降水(图 4.a),将 4:14-4:19 的 降水识别为对流混合性降水(图 4.d),个例 3 将 16:07-16:12 的降水识别为层云稳定性降水 (图 5.a),将 15:35-15:40 的降水识别为对流混合性降水(图 5.d),并给出对应时段的云 雷达雷达反射率因子 Z (图 4.b,图 5.b)和径向速度 V (图 4.c,图 5.c)的垂直分布辅助分 析。

在个例1中,参考降水时段的环境背景分析,3:00-5:00时段,垂直温度层结稳定,无明显对流,可以排除探测到的对流性降水是局地产生的对流泡的可能,而认为其是云系的移动

导致的对云不同部位的垂直探测。4:00 以前,1km 以上产生较强的上升气流,将中层水汽向 上抬升,促进云层向上旺盛发展,水汽在3km以上累积,云系发展旺盛区域移出观测区后, 地面观测到一段十分钟的短时强降水。对比微雨雷达和云雷达反射率因子垂直分布(图 4.b、 c),对流性降水阶段,1.2km以上强度两台设备均存在雷达反射率数值骤然下降的现象,可 以排除云雷达的降雨衰减,即本次对流性降水由低层云系主导。在层状云降水阶段,雨滴谱 的垂直分布图中在零度层亮带下方出现一个谱宽的极值,是降水粒子经过零度层后融化,导 致液态大滴的累积,由于微雨雷达对液态降水的高敏感度,雷达反射率开始跃增,在图像中 体现为该处垂直雨滴谱图中的"凸起"(4:01)。在"凸起"的上方,存在小滴数浓度的极 值,即,液态小滴粒子的累积发生在大滴累积之前,一方面,这是由于较小的冰晶粒子经过 融化层可以更快融化(王洪等, 2022),另一方面,大滴的形成促进了碰并的发生,导致了 小滴粒子的迅速消耗。随着降水的持续,该"凸起"下移,并到达地面(4:02),随后亮带 下方再次形成"凸起"(4:03)并重复该过程(图4中红圈位置),这与 Ma N et al(2022)的发 现类似,在个例1中,"凸起"的发生到下落发生在2-3分钟之内,对于层状云降水,这种 宽谱的形成和下移并未导致近地层降水谱宽的明显变化,可能是由于个例1发生在春季,近 地面的干燥导致在该种类型降水中,降水粒子由蒸发主导消耗了大量的较大雨滴。而在对流 性降水中,近地面降水谱宽较宽且无明显变化,但可以看到4:14-4:16,近地面有明显的大粒 子增多同时小粒子减少(图4中黄色方块位置),4:18后,小粒子继续累积增多,而后形成 大粒子,可以认为此阶段是由碰并主导的降水过程。

在个例 3 中,层云性降水阶段,稳定深厚的层云主导了该时段的降水,与个例 1 相似, 该时段在亮带下方出现了谱宽的极值,即"凸起",随着"凸起"的下移,新的"凸起"立 即形成(图 5 中红圈位置),随着大滴的累积, 3.8 公里以下的小滴(0.2-0.3mm)被迅速消 耗,在该次降水过程中,"凸起"的下移导致了一定程度上近地层雨滴谱的拓宽,由于该阶 段环流背景比较稳定,大滴的破碎并不明显,在亮带附近被被消耗的小滴并未得到补充,在 零度层下方形成的谱宽极值基本可以为维持到近地面,可能是由于在该次过程中,碰并和蒸 发作用基本达到平衡。而本次降水过程的亮带高度较高,在对流性降水阶段,降水粒子在下 落过程中经历了更加复杂的生长机制,在亮带下方,同样存在小滴粒子的迅速消耗,但由于, 对流阶段的近地层气流复杂,降水的同时,在近地层出现上升气流(见图 5.c 黄框部分), 上升气流的出现导致了粒子的大量破碎,使得小滴的消耗得以补充,同时,在上升气流中未 破碎的雨滴持续长大,引起了近地层雨滴谱的拓宽。

9



图 4 个例 1 不同类型降水垂直特征:层云降水阶段雨滴谱垂直分布(a)云雷达雷达反射率因子垂直分布(b)、 云雷达速度垂直分布(c)、对流降水阶段雨滴谱垂直分布(d)

Fig. 4 Vertical characteristics of different types of precipitation: Vertical DSD of the Stratus clouds (a) Vertical distribution of CR radar reflectance factor (b), vertical distribution of CR velocity (c), vertical DSD of the convective precipitation(d) in case 1



云雷达速度垂直分布(c)、对流降水阶段雨滴谱垂直分布(d)

Fig. 5 Vertical characteristics of different types of precipitation: Vertical DSD of the Stratus clouds (a) Vertical distribution of CR radar reflectance factor (b), vertical distribution of CR velocity (c), vertical DSD of the convective precipitation(d) in case 3 图 6 是个例 1、3 对流性降水和层云性降水雨滴谱随高度的分布,其中,横坐标为雨滴 直径 D(mm),纵坐标为垂直高度(m),色标代表雨滴数浓度的对数分布,黑线是各层平均粒 径。可以看出,个例 1 (图 6.a、b)存在谱宽随着高度降低先减小后增大,根据云雷达和微 雨雷达垂直反射率情况 (图 2.a)可以看到 2000 m 高度附近云内存在干区,在近地层,对流 性降水的雨滴谱谱宽相对层云性降水更大,质量平均直径也更大。在 1-1.5 km 高度层,两种 降水都出现了快速的雨滴谱拓宽,这是固态降水粒子融化导致的微雨雷达信号值跃迁。层云 性降水中,其垂直运动较弱,导致在近地层,降水难以维持零度层附近的雨滴谱宽度,小粒 子数浓度的减少、质量平均直径的减小以及谱宽的缩窄这里认为是受近地层蒸发作用的影 响。而在对流性降水中,较强的垂直运动促进了雨滴碰并,从图 6.a 中可以看出,在对流性 降水中,在融化层以下,随高度的降低雨滴谱仍有轻微拓宽,同时伴随有小粒子数浓度的减 小,这是碰并作用的典型表现。而在个例 3 中(图 6.c、d),除零度层附近有类似于个例 1 中液态大滴的累积以外,强烈碰并作用在近地层引起了谱宽的再次拓宽,这也与夏季充沛的 水汽导致的中间层的小雨滴得到补充有关。



图 6. 微雨雷达测得垂直高度雨滴谱: 个例 1: 对流降水(a)、层云降水(b); 个例 3: 对流降水 (c)、层云降水(d)

Fig 6. Vertical DSD detected by MRR: case1 Stratus precipitation (a) 、 case1 convective precipitation (b) 、 case3 Stratus precipitation (c)、 case3 convective precipitation (d)

4.2 垂直方向雨滴谱参数特征

Gamma 分布的 DSD 的 n 阶矩可以表示为:

$$M_n = \int_0^{D_{max}} D^n N(D) dD \tag{5}$$

在雨滴谱的 Gamma 分布拟合中,参数之间存在较高的泊松分布关系(Moisseev et

al,2007)。Willis(1984)、Testud(2001)等结合雷达反演降水的需要,提出了标准化的Gamma 雨滴谱分布形式:

$$N(D) = N_w f(\mu) (\frac{D}{D_m})^{\mu} exp[-(4+\mu)\frac{D}{D_m}]$$
(6)

$$f(\mu) = \frac{6}{4^4} \frac{(4+\mu)^{\mu+4}}{\Gamma(\mu+4)}$$
(7)
(mm)为 4 阶和 3 阶矩的比值:

$$D_m = \frac{M_4}{M_3}$$
(8)

标准化截断参数N_w(mm⁻¹m⁻³)可以表示为:

质量加权平均粒径Dm

$$N_w = \frac{4^4}{\pi \rho_w} \left(\frac{10^3 LWC}{D_m^4}\right) \tag{9}$$

[*N_w*,*D_m*,*µ*]三个参数可用来描述雨滴谱特征。其中 *N_w*反应粒子浓度的大小,*D_m*为质量加权 直径,用来描述降水粒子中大个粒子的比重,*D_m*大说明降水粒子中含有的大粒子多,*µ*是 谱形参数。



图 7. 微雨雷达 200m 高度 lg*Nw-Dm* 散点分布 (a) 、个例 1、3 *Dm* 随高度的变化 (b、f) 、lg*Nw* 随高度的 变化 (c、g) 、*R* 随高度的变化 (d、h) 、LWC 随高度的变化 (e、i) Fig.7 Scatter distribution of lg*Nw-Dm* at 200m height of micro rain radar (a), *Dm* changes with height (b, f), lg*Nw*

changes with height (c, g), R changes with height (d, h), LWC changes with height (e, i) in case $1 \sqrt{3}$

为进一步研究本次降雨的微物理机制,图7给出了微雨雷达200m高度上的雨滴粒子质量加权直径与数浓度的关系及雨滴谱参数随高度的变化,图7.a中较大的红色圆点为三次过程中对流性降水的lgNw-Dm平均值,较大的蓝色原点则代表层云性降水中的该值,黑色虚线为不同气候背景层状云降水lgNw-Dm最小二乘拟合曲线,灰色方框为海洋、大陆型对流性降水的lgNw-Dm散点分布区域(Bringi et al, 2013)。灰色虚线是Thompson EJ et al (2015)给出的指数形状的lgNw特征值,该值用于区分发生在赤道附近的岛屿(热带海洋性气候)的对流性降水和层云性降水。对比图中黑色虚线位置及层状云降水的散点分布(图7.a),可以看出,本次降水的层云稳定性降水基本处于经验曲线下方,即辽西地区东北冷涡降水的层云性降水阶段整体数浓度偏小,粒径偏小,这与辽西地区常年的干旱有关。相比于层云性降水,对流性降水散点主要分布在上方,由更多的较大雨滴(1-2.5mm)主导,强烈的垂直运动促

进了雨滴的碰并繁生,利于大雨滴的生成。但对于辽西地区,层云性降水和对流性降水的平均数浓度差别不大,雨强的差别主要取决于平均质量直径的不同。具体到不同高度层(图 7.b-i),在不同季节的两种类型降水中,在零度层附近不同大小的冰晶先后融化,较大粒子迅速生成,总数浓度迅速减少,但发生在春季的个例 1,在零度层附近生成的大雨滴下落至地面的过程较短,降水强度的维持依赖于较大雨滴,在个例 1 中两种类型降水的数浓度几乎相同,在相当干燥的近地层,蒸发导致了雨滴质量加权直径的减小,图 7.e、i中 LWC 随高度的变化证明了这一点。个例 3 发生在水汽相对充沛的夏季,层云性降水和对流性降水均能通过碰并作用产生充足的大雨滴,但对流性降水的雨滴在零度层附近经过碰并小粒子被迅速消耗导致数浓度的迅速下降后,充足的水汽使得粒子的数浓度得到补充,小雨滴的生成也导致质量加权直径相对于层云降水阶段略小,夏季对流性降水由较大的雨滴数浓度主导。

表 2.不同类型降雨参数对比							
11(-)	Table 2. Comparison of different types of rainfall parameters						
~	层云降水			对流降水			
	$\log N_w$	D_m		$\log N_w$	D_m		
阜蒙	3.77	1.07		3.82	1.54		
南京	3.82	1.13		4.24	1.40		
榆林	3.92	1.46		4.16	1.52		

表 2 结合 Long Wen et al(2019)给出的江苏南京季节性雨滴谱分析及 Zongxu Xie(2020)给出的陕西榆林的季节性雨滴谱分布对降雨参数进行对比分析。可以看出,尽管东北冷涡过程的动力条件较好,有利于降水的维持,但由于阜蒙县上空的干旱气候,使雨滴蒸发显著,层云性降雨雨滴质量加权直径更小,即降水中较小的粒子占有更大的比重,对流性降水则相反,两种类型降水粒子数浓度均小于其他地区。

5.结论

(1)在层云稳定性降水主导的个例中微雨雷达和雨滴谱仪测得的雨滴谱吻合程度较高,而 在对流性降水较多的个例中,微雨雷达与雨滴谱仪观测的平均雨滴谱仅在中等粒子段(12.5mm)表现出较好的一致性,在小粒子端(<0.5mm),微雨雷达观测数浓度明显高于雨滴谱 仪。

(2) 在层云型降水阶段,较小的冰晶粒子通过零度层后迅速融化,液态小粒子在零度层下 方累积,垂直方向雨滴谱中出现小粒子数浓度的极值,在该极值下方,较大的冰晶粒子经历 了更长的时间和距离,融化成为较大雨滴,同时,小粒子的累积进一步促进了碰并效应的发 生,利于大雨滴的形成,在零度层下方出现一个谱宽的极值,表现为垂直方向的雨滴谱的"凸 起","凸起"的发生到下落发生在2-3分钟之内。垂直方向雨滴谱的拓宽在地面能否带来 明显的雨强增大,要取决于近地层大气中水汽含量,在辽西地区即表现为,干旱的春季,大 气相对湿度较低,亮带对于地面雨滴谱的拓宽无明显帮助,但在水汽相对充沛的夏季,"凸 起"的下移一定程度上导致了近地层雨滴谱拓宽及雨强的增大。

(3)由于辽西地区常年的干旱,辽西地区东北冷涡降水的层云性降水阶段雨滴整体数浓度 偏小,粒径偏小。虽然在对流性降水中,强烈的垂直运动促进了云的发展和雨滴的碰并繁生, 有利于大雨滴的生成,但对于辽西地区,层云性降水和对流性降水的平均雨滴数浓度差别不 大,雨强的差别主要取决于平均质量直径的不同。

参考文献(References)

- Atlas D, Srivastava R, Sekhon R S.1973.Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. Reviews of Geophysics, 11(1): 1-35.
- 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.
- Chen B, Wang J, Gong D. 2016.Raindrop Size Distribution in a Midlatitude Continental Squall Line Measured by Thies Optical Disdrometers over East China[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 55(3): 621–634.
- Chen Y, Liu H, An J, et al. 2014. A field experiment on the small-scale variability of rainfall based on a network of Micro Rain Radars and rain gauges[J]. J Appl Meteor Climatol, 54: 243-255.
- Geoffroy O, Siebesma A P, Burnet F.2014.Characteristics of the raindrop distributions in RICO shallow cumulus[J]. ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS, 14(19).
- 宫福久,何友江,王吉宏,等.2007.东北冷涡天气系统的雨滴谱特征[J].气象科学,(04):365-373.
- 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,(04):123-129.
- 崔云扬,周毓荃,蔡淼.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(03):618-633.
- Fabry F, Zawadzki I. 1995.Long-Term Radar Observations of the Melting Layer of Precipitation and Their Interpretation[J]. Journal of the Atmospheric Sciences.52(7):838-851.
- Harikumar R, Sampath S, Kumar V S. 2010. Variation of rain drop size distribution with rain rate at a few coastal and high altitude stations in southern peninsular India[J]. Advances in Space Research, 45(4): 576-586.

Islam T, Rico-Ramirez MA, Thurai M, et al.2006. Characteristics of raindrop spectra as normalized

gamma distribution from a Joss–Waldvogel disdrometer[J]. Atmospheric Research, 81(none): 57-73.

- 贾星灿,牛生杰.2008.空中、地面雨滴谱特征的观测分析[J].南京气象学院学报,31(06):865-870.DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2008.06.014.
- Kumar L S, Lee Y H, Ong J T. 2011.Two-parameter gamma drop size distribution models for Singapore[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(9): 3371-3380.
- 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(dec.):56-63.DOI:10.1016/j.atmosres. 07.018.

柳臣中,周筠珺,谷娟,等.2015.成都地区雨滴谱特征[J].应用气象学报,26(1):112-121.

- Loffler-Mang M, Joss J. 2000.An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 17(2): 130-139.
- Maki M, Keenan T D, Sasaki Y, et al.2001.Characteristics of the raindrop size distribution in tropical continental squall lines observed in Darwin, Australia[J], 40(8): 1393-1412.
- Ma N, Chen Y, Jia Z, et al. 2022. Analyses of DSD Vertical Evolution and Rain Variation Mechanism in Stratiform Cloud Cases Using Micro Rain Radar. Remote Sens. 14(7):1655.
- Niu S, Jia X, Sang J, et al. 2010.Distributions of Raindrop Sizes and Fall Velocities in a Semiarid Plateau Climate: Convective versus Stratiform Rains[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 49(4):632-645.
- 潘雯菁.2018.人工减雨作业对雨滴谱的影响分析及天气雷达在其中的应用[D].南京信息工程 大学.
- 濮江平,张伟,姜爱军,等.2010.利用激光降水粒子谱仪研究雨滴谱分布特性[J].气象科学, 30(05): 701-707.

Zhikang F,Xiquan D, et al.2020. Statistical Characteristics of Raindrop Size Distributions and Parameters in Central China During the Meiyu Seasons[J].Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(19).

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(04):479-490.

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(05): 577-587.

- Tokay A, Bashor P G.2010.An experimental study of small-scale variability of raindrop size distribution[J], Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49(11): 2348-2365.
- Thompson E J, Rutledge S A, Dolan B, et al. 2015.Drop Size Distributions and Radar Observations of Convective and Stratiform Rain over the Equatorial Indian and West Pacific Oceans[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 72(11):150728070220006.
- 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.
- Ulbrich C W, Atlas D. 2007. Microphysics of Raindrop Size Spectra: Tropical Continental and Maritime Storms[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 46(11): 1777-1791.
- Wang H, Lei H, Yang J.2017.Microphysical processes of a stratiform precipitation event over eastern China: analysis using micro rain radar data[J]. 大气科学进展, 34(012):1472-1482.

王洪, 雷恒池, 杨洁帆. 2017. 微降水雷达测量精度分析. 气候与环境研究[J], 22 (4): 392 - 404.

王洪,张佃国,王文青,等.2022.基于多源资料的积层混合云降水微物理特征 [J].大气科学,46(4): 886-902.

温龙. 2016. 中国东部地区夏季降水雨滴谱特征分析[D].南京大学. Wen L

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. 气象,41(5): 577-587.

- Wen, L., K. Zhao, G. F. Zhang, et al., 2016. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in East China during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and Micro Rain Radar data[J]. J Geophys Res-Atmos, 121, 2265-2282.
- 王洪,张佃国,王文青,王俊,李毅,王烁.基于多源资料的积层混合云降水微物理特征[J].大气科学,2022,46(04):886-902.
- 杨涛,杨莲梅,刘凡,等. 2023. 中国西天山两次短时强降水过程雨滴谱特征研究[J]. 大气科学, 47(5): 1495-1509.
- 张宇,牛生杰,贾星灿.2013.雨滴下落过程谱分布演变的数值模拟[J].大气科学学报, 36(06):699-707.DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2013.06.006.
- 张洪胜,何宏让,张云,等.2017.南京地区降水雨滴谱拟合模型的参数特征分析[J].气象与环 境科学,40(03):71-78. DOI:10.16765/j.cnki.1673-7148.2017.03.012.