

东南沿海地区孤立与飑线对流两种类型 冰雹云地面降水粒子谱特征

龚成龙¹ 林文^{2,3} 段卿^{3,4} 沈永生¹ 何清芳⁵

¹ 福建省三明市气象局, 三明 365000

² 福建省气象科学研究所, 福州 350001

³ 福建省灾害天气重点实验室, 福州 350001

⁴ 福建省气象信息中心, 福州 350001

⁵ 福建省龙岩市气象局, 龙岩 364000

提 要: 福建丘陵山地的复杂地形造成冰雹云呈现出单体、飑线等多类型特征。本文针对孤立单体和飑线对流两种类型冰雹云微物理特征的分类对比研究较少的问题, 基于 2023 年 3 月东南沿海山区丘陵区一次持续性强对流过程, 利用 S 波段双偏振雷达和地面降水粒子谱资料, 对孤立单体和飑线对流中两类冰雹云地面降水粒子谱特征进行对比分析。结果表明, 孤立单体在集中降雹区粒径更大、谱结构更复杂, 粒子总数浓度波动显著, 速度-尺度谱离散度较高, 表明其内部冰相过程更为活跃; 飑线对流以高密度冰雹为主, 小雨滴浓度较高, 粒子谱结构相对单一; 两类对流的降水粒子浓度峰值均出现在集中降雹区后的强降雨区, 谱宽收窄, 大粒子减少; 冰雹云不同阶段降水粒子谱特征存在明显差异; 将降水过程划分为四个阶段, 不同阶段粒子谱特征存在明显差异。该结果有助于加深对孤立单体、飑线对流两种类型冰雹云的微物理过程认识, 为短时临近预警与人工防雹作业提供支撑。

关键词: 冰雹云, 雨滴谱, 降水粒子谱, 微物理特征, 速度尺度谱

Surface Raindrop Spectral Characteristics of Isolated and Squall-Line Hailstorms in Southeastern Coastal China

Gong Chenglong¹ Lin Wen^{2 3} Duan Qing^{3 4} Shen Yongsheng¹ He Qingfang⁵

¹ Sanming Meteorological Office of Fujian Province, Sanming 365000

² Fujian Institute of Meteorological Science, Fuzhou 350001

³ Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001

⁴ Fujian Meteorological Information Center, Fuzhou 350001

⁵ Longyan Meteorological Bureau of Fujian Province, Longyan 364000

福建省自然科学基金项目 (2023J011327)、华东区域气象科技协同创新基金合作项目 (QYHZ202312)、中国气象局-成都信息工程大学人工影响天气联合研究中心开放课题 (2024GDRY011) 和 三明市科技计划项目 (2023-S-42) 共同资助

第一作者: 龚成龙, 主要从事地基遥感探测设备技术保障与资料应用研究.Email: zerogong5@foxmail.com

通讯作者: 林文, 主要从事大气物理与人工影响天气研究.E-mail: donnakoon@foxmail.com

Abstract: The complex terrain of the hilly and mountainous regions in Fujian Province gives rise to diverse hail cloud structures, notably isolated convective cells and squall lines. In this study we address the lack of comparative research on the microphysical characteristics of these two types of hail-bearing convection. Based on a persistent severe convective event that occurred in March 2023 over the hilly terrain in the southeastern coastal regions of China, we comparatively analyze the surface spectral characteristics of precipitation particles associated with isolated cells and squall-line systems by using the S-band dual-polarization radar data and the observations of surface precipitation particle spectra. The results show that the isolated convective cells during the concentrated hailfall stage exhibit larger particle sizes, more complex spectral structures, more pronounced fluctuations in total particle number concentration, and greater dispersion in the velocity and size spectra. All these features indicate that the internal ice-phase processes are even more vigorous in this stage. In contrast, squall-line convection is characterized by high-density hailstones, a relatively high concentration of small raindrops, and simpler spectral structures. For the two convective types, the peaks in precipitation particle concentration both appear near the front side of the cloud system in the severe rainfall area following the main hailfall stage, accompanied by narrowing spectral width and reduction in large particles. Moreover, the precipitation process is further divided into four distinct stages, each showing markedly different spectral characteristics. These findings could enhance the understanding of the microphysical processes of isolated and squall-line hail clouds and provide scientific support for short-time nowcasting and hail suppression operations.

Keywords: hail clouds, raindrop spectra, precipitation particle spectra, microphysical characteristic, velocity-diameter spectra

引言

风暴产生的大量不同尺寸的冰雹会对生产、生活等造成损害，极端情况下还可造成巨大的经济损失和人员伤亡。通过地面观测获取的冰雹过程中的降水粒子的大小、形状、浓度、密度等地面降水微物理参量，为分析冰雹云的结构特征提供了重要的数据支撑，并能在一定程度上反映对流云内冰雹的生长过程。冰雹谱的观测研究是国内强对流观测研究的重要组成部分之一，该类观测可揭示冰雹过程的区域特征，并为了解冰雹云结构及微物理机制提供依据。

目前国内外学者主要通过雷达、卫星、地面降水粒子谱等观测结合数值模拟方法对冰雹云的宏微观结构特征开展研究。牛生杰等（1999）基于观测结果提出了冰雹动能与雷达反射率因子的线性拟合关系，为冰雹强度的雷达估算提供了参考。王雨曾（1987）、李聪等（2017）、岳治国和梁谷（2018）、杨宁等（2021）、余文梅等（2025）通过分析冰雹观测数据揭示了冰雹粒子的分布特性，认为观测研究结果有助于模拟冰雹的形成过程和改进预警模型。刘晓莉和水旭琼（2015）研究发现冰雹谱宽度随上升气流增强而增大，提出上升气流是影响冰雹形成生长的重要动力条件。Yin et al（2021）通过数值模拟揭示了微物理过程

对单体中冰雹落区分布及其大小的影响,指出冰晶与霰粒的生成发展是影响风暴强度及降水效率的重要因素。陈垚等(2022)通过双偏振雷达及地面降水粒子谱观测,提出了一种有效区分霰粒子和冰雹粒子的雨滴谱反演算法。Rosenfeld(2007)、徐小红等(2022)结合卫星观测资料与云微物理特征参数,实现了冰雹云的早期识别与自动预警。杜牧云等(2022)、李晗琪等(2025)结合多源数据和机器学习方法探讨了强对流天气的预警算法,为改进冰雹预警系统提供了重要参考。

福建武夷丘陵生态区为我国东南沿海的冰雹多发区(Li et al, 2024)。春夏季是福建的冰雹高发期,其冰雹分布特征与气候背景和天气形势密切相关(蔡义勇等, 2009)。陈秋萍等(2015)认为福建地区的超级单体风暴的中气旋维持时间、垂直风切变和风暴顶辐散对冰雹云微物理演变起关键作用。何清芳等(2022)基于地面降水粒子谱和双偏振雷达观测相结合,对比了闽西南地区冰雹云与短时强降水两类强对流云的动力和微物理特征差异。冯晋勤等(2024)通过闽西南持续性强降水事件,发现其地面降水粒子以高浓度小雨滴为主、冰相过程显著,并提出复杂地形和气流辐合作用是增强降水效率的重要因素。由于福建属丘陵山地,复杂地形造成冰雹云呈现单体、飢线等多类型特征,同时近年来该地区特种作物人工防雹需求激增,由于这两类冰雹云微物理特征的分类对比研究相对较少,缺乏有针对性的人工防雹作业技术方案制定依据。因此,本文基于2023年3月22—24日持续多日且对流形式多样的大范围冰雹过程,利用地面观测数据和双偏振天气雷达等资料,研究降雹云的孤立单体与飢线不同部位的降水粒子特征,对比分析两类降雹云系的微物理特征差异,为冰雹短时临近预警及人工防雹作业区识别提供观测依据。

1. 资料处理与概况

1.1 资料和方法

2023年3月22—24日,武夷丘陵生态区发生了一次大范围连续多日的降雹过程。期间,江西赣州石城,以及福建南平光泽、顺昌和龙岩永定等地均有冰雹观测记录。本文利用三明、龙岩的S波段双偏振天气雷达、国家级气象观测站地面降水粒子谱观测数据对冰雹云开展综合观测研究。地面降水粒子谱观测数据由DSG4型降水现象仪采集。该仪器采用与Parsivel2激光雨滴谱仪相同的光学传感器技术,能够同时测量降水粒子的直径(D)与下落末速度(V)。其中,粒子速度的测量范围为 $0.05\sim 20.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,粒径的测量范围为 $0.062\sim 24.5\text{ mm}$,时间分辨率为 1 min 。参考Yuter et al(2006)、Friedrich et al(2013)、Jia et al(2019)的方法先对所用观测数据进行质量控制:(1)剔除小粒子数据:排除直径

<0.3 mm 粒子的观测数据，以排除微小粒子的影响；（2）样本选择：仅选择原始粒子数大于 10 个的观测数据；（3）排除强风影响：排除由强风引起的慢落速大滴以减小观测误差，此类雨滴具有较大的直径（约为 5 mm）和相对较慢的下落速度（约为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）；（4）排除雨滴溅散误差：剔除由雨滴在仪器探头溅散产生的异常粒子，判据为直径 <2 mm，且下落速度低于雨滴理论末速度曲线的 60%下偏界限；（5）排除采样区边缘误差：剔除由采样区边缘不完整遮挡导致的异常观测，判据为直径 <8 mm，且下落速度高于雨滴理论末速度曲线的 60%上偏界限。同时参照 Friedrich et al（2013）的思路，结合不同相态粒子的理论末速度与直径关系对地面降水粒子进行相态分类：雨滴采用 Gunn and Kinzer（1949），霰粒采用 Locatelli and Hobbs（1974），霰雹、冰雹采用 Knight and Heymsfield（1983）。

经过处理后雨滴总数浓度 (NT, 单位: $\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$)、雨强 (RR, 单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 如式 (2) 所示, 含水量 (LWC, 单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 见式 (3), 体积中值直径 (D_0) 和最大直径平均值 (D_{\max}) 如式 (4) 所示 (林文等, 2009; 2016):

$$\text{NT} = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) dD \quad (1)$$

$$\text{RR} = \frac{\rho\pi}{6} \int N(D) D^3 V(D) dD \quad (2)$$

$$\text{LWC} = \frac{\rho\pi}{6} \int N(D) D^3 dD \quad (3)$$

$$\int_{D_0}^{D_{\max}} D^3 N(D) dD = \int_{D_{\min}}^{D_0} D^3 N(D) dD \quad (4)$$

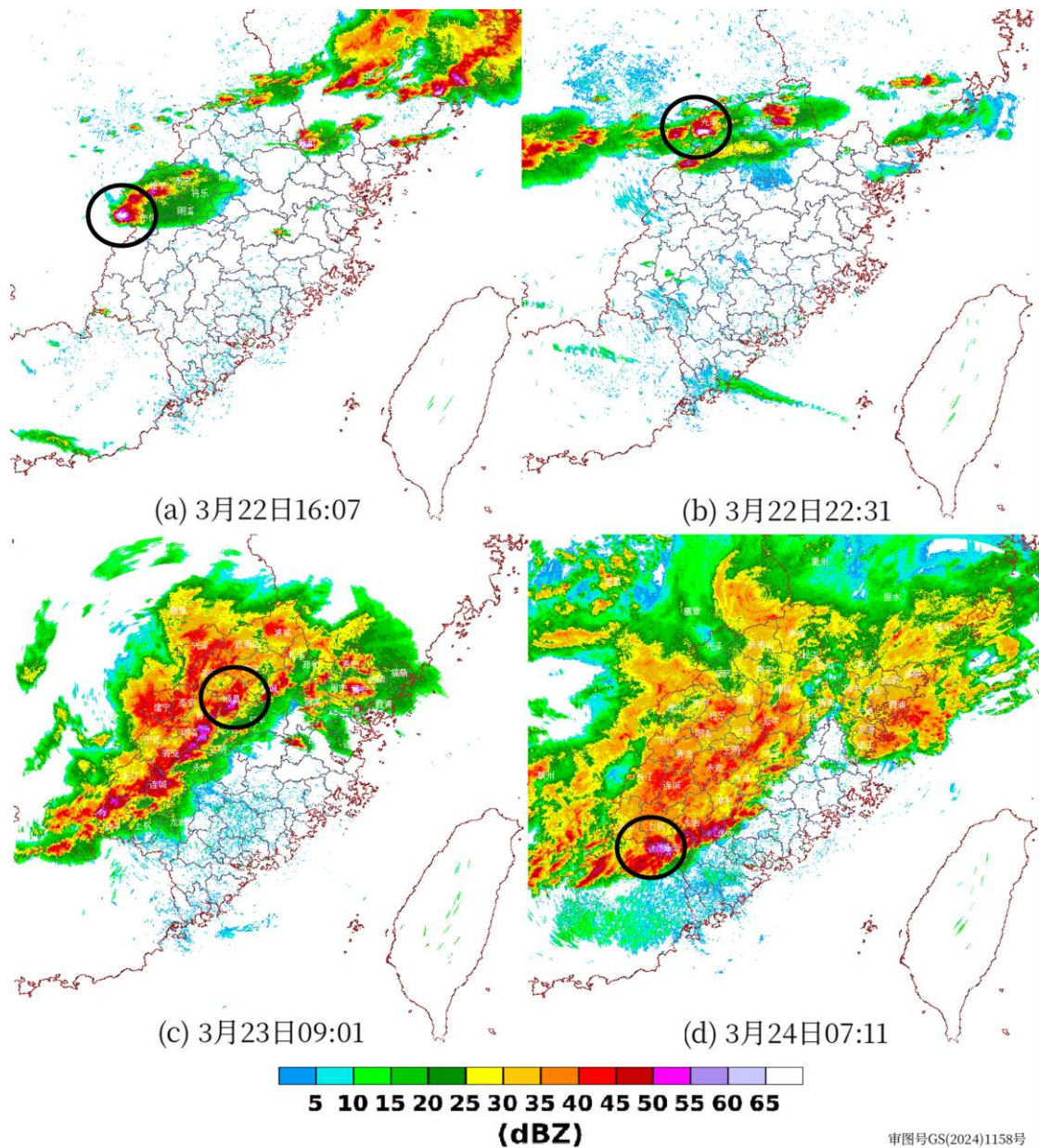
式中: D 为雨滴直径 (单位: mm), $N(D)$ 为单位尺度间隔下单位体积雨滴数 (单位: $\text{个} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$), $V(D)$ 为各档粒子下落末速度 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), ρ 为水密度 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); D_{\min} 与 D_{\max} 分别为质控后参与计算的最小与最大粒径, D_0 定义为累积数量分布百分比达到 50% 时所对应的粒径, 其意义为当雨强相同时, D_0 大, 表示雨滴谱中有较多的大雨滴, 而 D_0 小表示有较多的小雨滴。

1.2 降雹概况

本研究选取了江西赣州石城、福建南平光泽和顺昌, 以及龙岩永定的 4 个降雹个例。其中, 2023 年 3 月 22 日 16:07 (北京时, 下同) 石城 (站名 58814) 开始降雹, 最大冰雹直径为 30 mm, 降雹期间本站最大风速为 $14.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 22 日 22:31 光泽 (站名 58724) 开始降雹, 最大冰雹直径为 20 mm, 降雹期间本站最大风速为 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 23 日 09:01 顺昌 (站名 58823) 开始降雹, 最大冰雹直径为 10 mm, 降雹期间本站最大风速为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 24 日 07:11 永定 (站名 59113) 开始降雹, 最大冰雹直径为 6 mm, 降雹期间本站最大风速为 $4.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

根据雷达回波特征对上述 4 个冰雹云进行分类, 参照 Meng et al (2013) 对华东地区飑线的定义, 即线状或类线状的中尺度对流系统 (MCS), 在雷达组合反射率因子图像上表现为连续或近连续的高反射率因子带, 长度一般大于 100 km, 持续时间不少于 3 h, 且常伴有后部层状云降水区和显著线状对流带结构。本研究结合各站点降雹时次的组合反射率因子空间分布特征 (图 1), 并综合对流带空间形态, 将经过石城和光泽站的冰雹云归类为孤立单体 (图 1a, 1b; 表现为孤立高反射率因子核心, 空间分布相对局限), 经过顺昌和永定站的冰雹云归类为飑线 (图 1c, 1d; 呈现明显带状强回波结构, 空间尺度更大)。下文分析地面微物理参量和粒子谱特征同样基于该分类, 用于对比孤立单体、飑线对流两种

类型冰雹云的降水微物理过程。



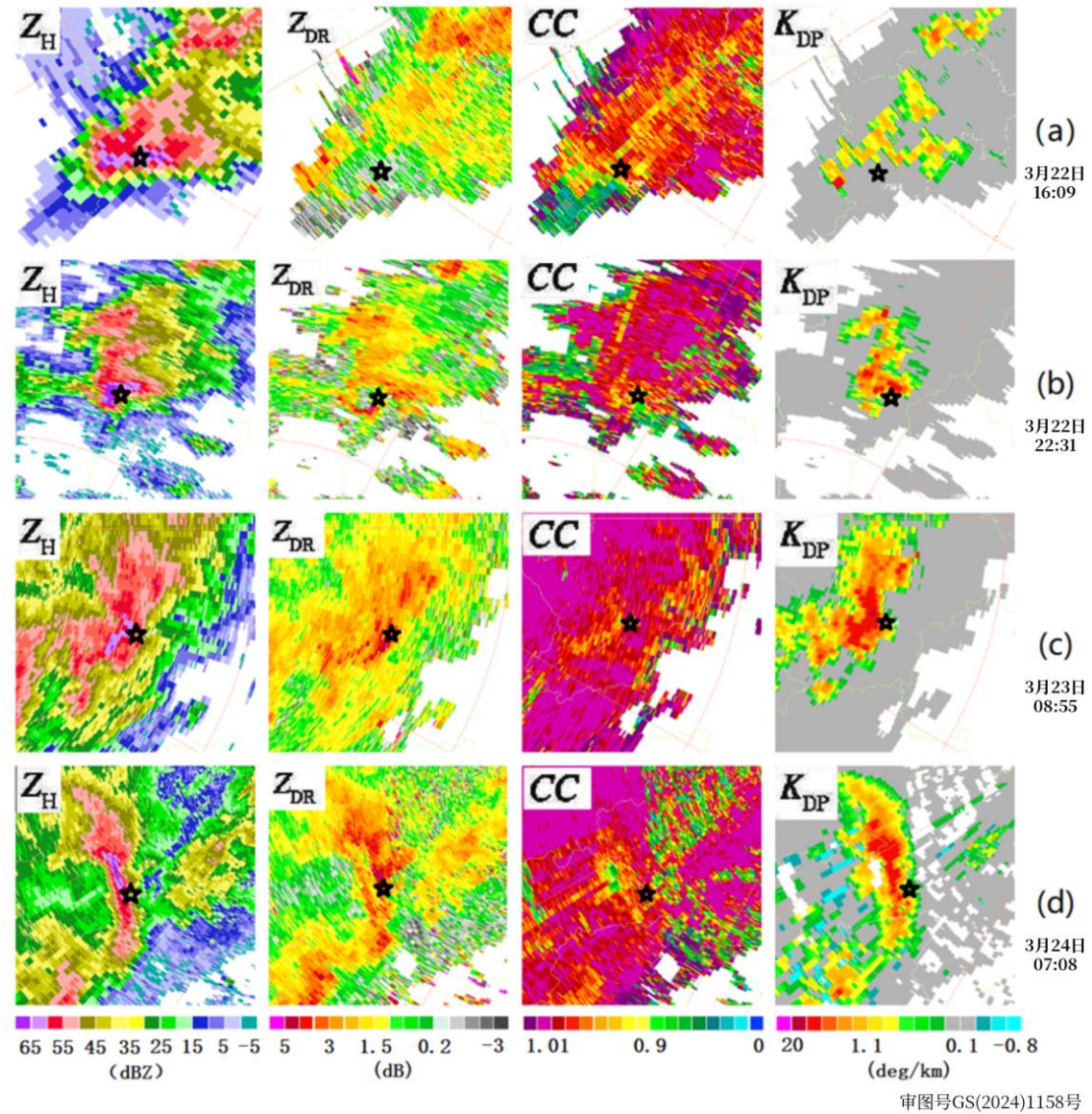
注：黑圈为此次观测的冰雹云。

图1 2023年3月（a）22日16:07石城站，（b）22日22:31光泽站，（c）23日09:01顺昌站，（d）24日07:11永定站降雹时刻的雷达组合反射率因子

Fig.1 Composite reflectivity of radar corresponding to the hailfall time at (a) Shicheng Station at 16:07 BT 22, (b) Guangze Station at 22:31 BT 22, (c) Shunchang Station at 09:01 BT 23, and (d) Yongding Station at 07:11 BT 24 March 2023

2. 云体降雹时的双偏振雷达回波特征

Z_H 、 Z_{DR} 、 CC 和 K_{DP} 是双偏振雷达的四个重要的双偏振雷达参量，分别反映了水平和垂直极化的回波信号的强度、比值、相似度和相位差（潘佳文等，2020）。冰雹的形状、密度、方向和融化过程会影响以上参量的大小（Kumjian and Ryzhkov, 2008）。因此，选取冰雹云降雹时刻 0.5° 仰角双偏振雷达参量（图 2）来初步分析降雹时近地面降水粒子的大致特征。



注：☆为地面观测站位置。

图 2 2023年3月（a~d）22日16:09石城站，（e~h）22日22:31光泽站，（i~l）23日08:55顺昌站，（n~p）24日07:08永定站降雹时刻 0.5° 仰角双偏振雷达参量

Fig.2 Dual-polarization radar echo characteristics at 0.5° elevation corresponding to the hailfall time at (a—d) Shicheng Station at 16:09 BT 22, (e—h) Guangze Station at 22:31 BT 22, (i—l) Shunchang Station at 08:55 BT 23, and (n—p) Yongding Station at 07:08 BT 24 2023

16:09 石城站（图 2a）的 Z_H 最大值为 66.5 dBz， Z_{DR} 为 -0.5 dB，CC 为 0.95， K_{DP} 为 $0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ；22:31 光泽站（图 2b）的 Z_H 最大值为 72 dBz， Z_{DR} 为 0.06 dB，CC 为 0.95， K_{DP} 为 $0.2^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ；石城和光泽两个站点上空最低仰角出现较高的 Z_H ，对应低 Z_{DR} 、高 CC 及低 K_{DP} ，这些特征表明近地面层主要为大的干冰雹，可能存在轻微的表面融化现象。08:55 顺昌站（图 2c）的 Z_H 最大值为 65.5 dBz， Z_{DR} 为 1.5 dB，CC 为 0.90， K_{DP} 为 $4.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ；07:08，永定站（图 2d）的 Z_H 最大值为 67.5 dBz， Z_{DR} 为 1.0 dB，CC 为 0.90， K_{DP} 为 $4.1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ ；顺昌和永定站近地层主要是以含水量较大的湿性冰雹为主，也可能存在大雨滴与小冰雹的混合状态，同时在这两类云系移动前侧近地层均观测到 Z_{DR} 弧。

综上所述，将石城和光泽个例归类为孤立单体过境，顺昌和永定个例归类为飑线过境，下文将通过地面降水粒子谱，结合上述双偏振雷达参量特征进一步分析地面降雹的相态特征。

3. 两类云型地面降水微物理特征对比分析

3.1 地面降水微物理参量演变特征

为了区分强对流云系的不同部位, 根据金祺等(2015)方法, 结合雷达回波特征及雨强, 将强对流降水过程划分为 4 个关键阶段, 即云体前侧、集中降雹区、强回波降水区、云体后侧, 分析 NT、RR、 D_{\max} 、 D_0 在强对流云系不同部位降水中的特征。

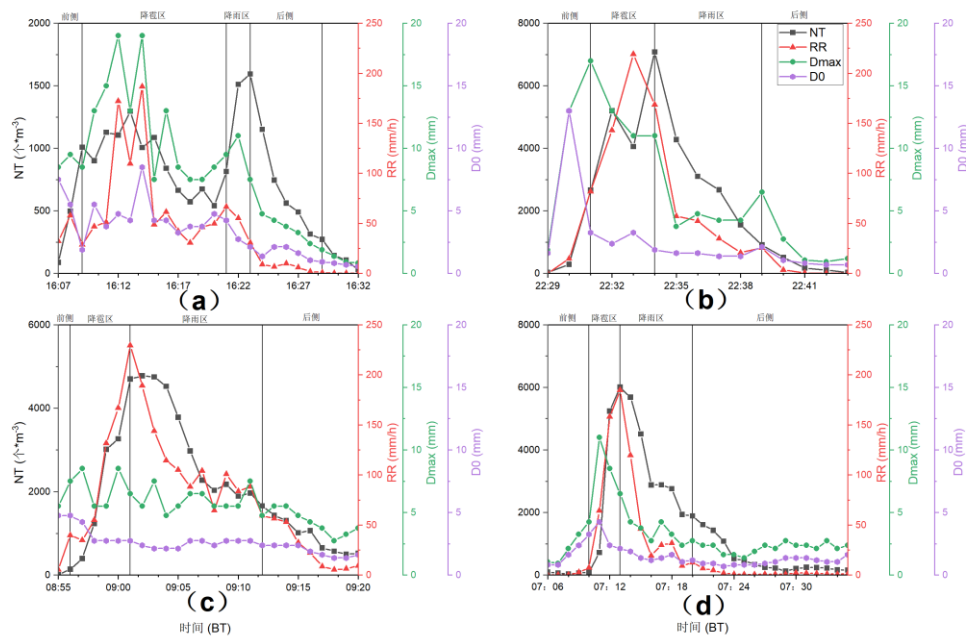


图3 2023年3月 (a) 22日16:07—16:31石城站, (b) 22日22:29—22:43光泽站, (c) 23日08:55—09:20顺昌站, (d) 24日07:06—07:30永定站冰雹过程降水粒子谱微物理参量随时间的演变

Fig. 3 Evolution of microphysical parameters of precipitation particle spectra with time during the hail process at (a) Shicheng Station from 16:07 BT to 16:31 BT 22, (b) Guangze Station from 22:29 BT to 22:43 BT 22, (c) Shunchang Station from 08:55 BT to 09:20 BT 23, and (d) Yongding Station from 07:06 BT to 07:30 BT 24

March 2023

3.1.1 孤立单体

在 16:07—16:09 石城站 (图 3a) 的云体前侧降水, D_{\max} 为 9.5 mm, D_0 达 7.5 mm, 但 NT 较低, 说明此时以数量较少的大雨滴为主, 此时降水中可能已混有少量小冰雹。16:09 的降雹初期 D_0 出现减小, 同时 NT 增大, 说明小粒子占比在增大; 随后 D_{\max} 出现两次 19 mm 的高值 (受限于仪器性能, 探测的冰雹尺度低于人工观测值), 分别对应的 D_0 为 4.75

mm 和 8.5 mm，同时 NT 相差不大，说明 D_{\max} 第二次峰值时，其大粒子占比大于第一次；RR 峰值也在集中降雹区达最大，该峰值主要由大冰雹粒子所导致。在连续降大冰雹后， D_0 和 RR 均开始逐步减小，但在 16:16 D_{\max} 又出现了一个小峰值（达 13 mm），对应的 D_0 没有增加且 NT 降低，结合图 2a 所示，此时的大粒子仍为冰雹。到了集中降雹区后的强回波降水区，NT 快速升高至最大值，同时 D_{\max} 和 D_0 以及 RR 也出现小幅增加，此时 Z_H 值约为 66.5 dBz，CC 值约为 0.95 且 Z_{DR} 在 1.5 dB 左右（图略），表明大量雨滴粒子中仍可能夹杂着小冰雹。到了云体后侧，随着云系强度减弱逐渐云体移出，NT、 D_0 和降水量快速减小。

光泽站（图 3b）观测大致与石城站相似，云体前侧降水以数量较少的大雨滴为主，也可能存在小冰雹；集中降雹区 D_0 开始减小且 NT 增大， D_{\max} 最大达 17 mm（略小于人工观测），但降雹时间短观测到的冰雹数量少，RR 峰值也出现在降雹期间；NT 在降雹后随即出现峰值，同时 D_{\max} 、 D_0 和 RR 已开始减小；云体后侧雨滴谱各项双偏振雷达参量均减少。

3.1.2 飑线

08:55 顺昌站（图 3c）的云体前侧降水，与孤立单体类似也以数量较少的大雨滴为主。在集中降雹区， D_{\max} 达到最大值 8.5 mm，略小于人工观测，同样观测到 D_0 低于降雹前。09:02—09:12 的强回波降水区，NT 快速增多达到最大值后减弱，RR 与 NT 峰值同步；期间仍有极少量尺度较大的降水粒子使 D_{\max} 出现起伏；由图 2c 可见， Z_{DR} 较高、CC 值接近于 1.0 且 K_{DP} 较大，说明此时的强降水以大雨滴贡献为主。09:13—09:20 的云体后侧，NT、 D_{\max} 、 D_0 及 RR 均迅速减小。

永定站观测与顺昌站相似，07:06—07:10 云体前侧降水以数量较少的大雨滴为主， D_{\max} 和 D_0 快速增大。07:11—07:13 的集中降雹区， D_{\max} 在 07:11 达到最大值（11 mm）， D_0 也达到最大值（4.25 mm），大于人工观测到的最大冰雹直径（6 mm）。降雹后 D_{\max} 和 D_0 立即开始下降、NT 和 RR 快速上升，在强降水区达峰值。随后进入云体后侧阶段，NT、RR、 D_{\max} 和 D_0 均快速减小，直至云系移出站点上空。

3.2 不同部位的地面降水粒子尺度谱特征

为了进一步研究孤立单体、飚线对流两类冰雹云不同部位的降水粒子特征差异，从峰值、谱宽及峰型特征方面，分别对比 4 个冰雹过程不同降水阶段的降水粒子尺度平均谱（图 4，图 5）。

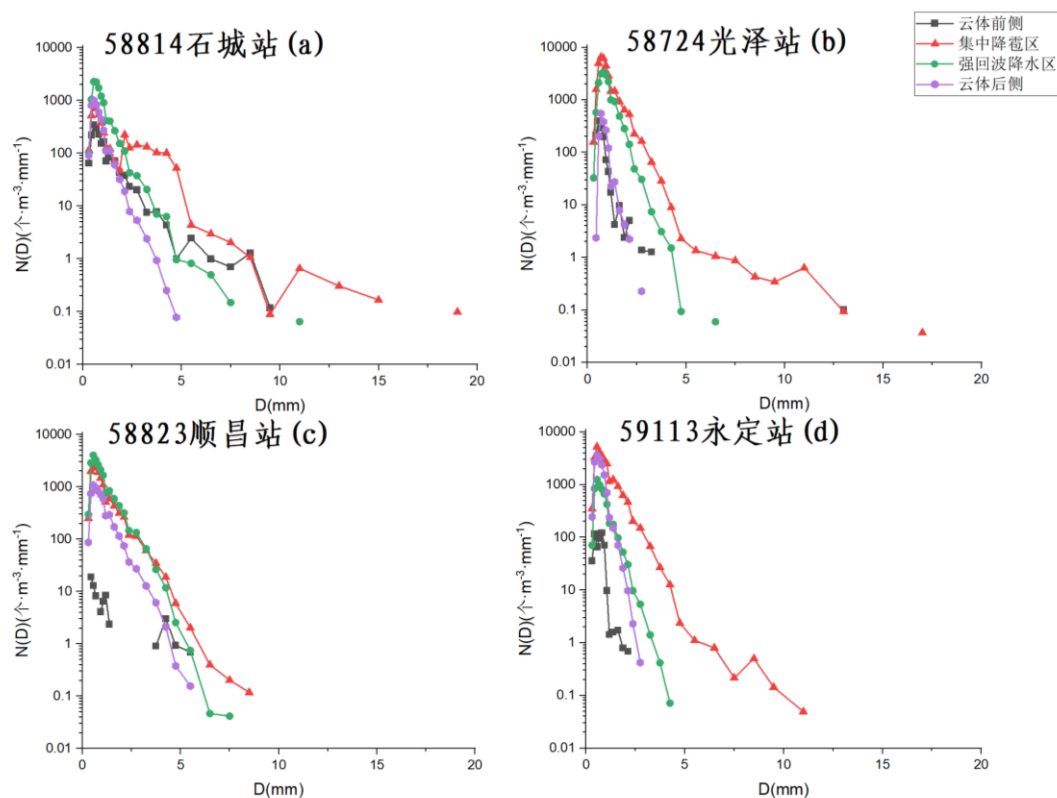


图4 2023年3月 (a) 22日16:07—16:31石城站, (b) 22日22:29—22:43光泽站, (c) 23日08:55—09:20顺昌站, (d) 24日07:06—07:30永定站冰雹过程不同阶段降水粒子尺度平均谱

Fig. 4 Average spectra of precipitation particle sizes at different stages during the hail process at (a) Shicheng Station from 16:07 BT to 16:31 BT 22, (b) Guangze Station from 22:29 BT to 22:43 BT 22, (c) Shunchang Station from 08:55 BT to 09:20 BT 23, and (d) Yongding Station from 07:06 BT to 07:30 BT 24 March 2023

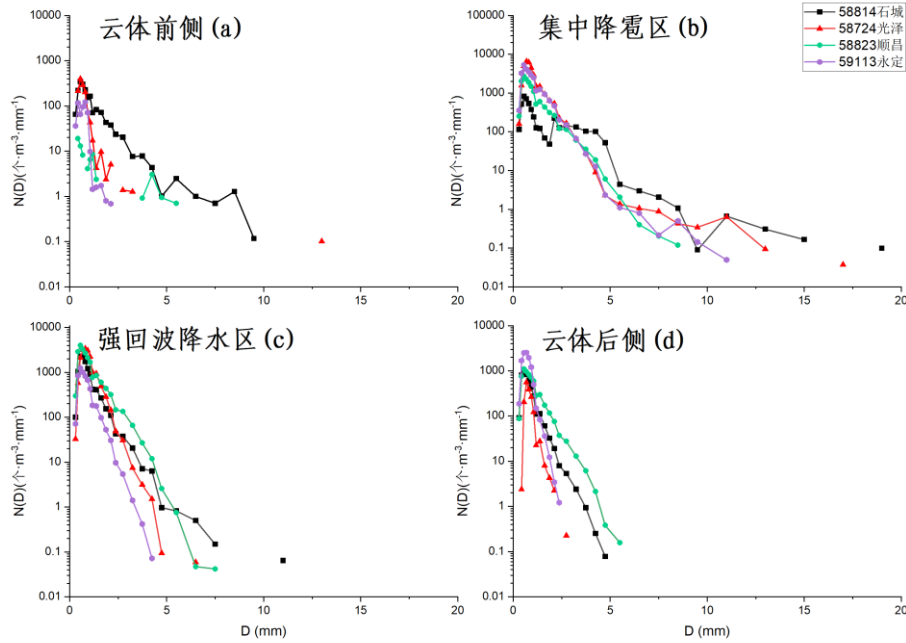


图 5 2023 年 3 月 22—24 日不同站点冰雹过程在 (a) 云体前侧, (b) 集中降雹区, (c) 强回波降水区, (d) 云体后侧的降水粒子尺度平均谱

Fig.5 Average spectra of precipitation particle sizes in (a) front side of the cloud system, (b) hailfall concentration area, (c) intense echo precipitation, and (d) back side of the cloud system at different stations from 22 to 24 March 2023

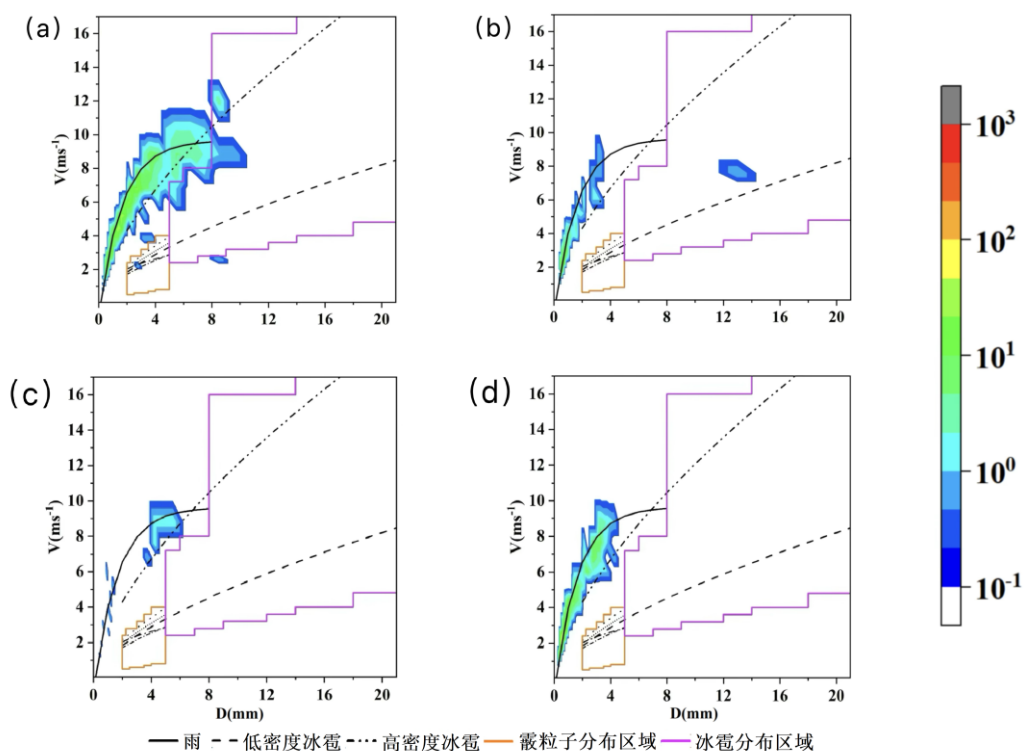
在云体前侧, 石城站和光泽站的粒子尺度平均谱峰值相近 (图 5a), $N(D)$ 分别为 $346.506 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $396.485 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$, 尺度谱呈明显的多峰结构; 其中, 石城站出现直径接近 10 mm 的大粒子, 光泽站小粒子 $N(D)$ 浓度与石城相当, 中-大粒子的 $N(D)$ 明显小于石城站, 同时出现了极少量的直径超过 10 mm 的大粒子。在集中降雹区, 石城站 (图 4a) 较前一阶段中中等大小 (3~5 mm) $N(D)$ 显著增加, 多峰结构变化更为明显, 谱宽迅速增宽, 达到 4 个阶段中 (云体前侧、集中降雹区、强回波降水区、云体后侧) 的最大值; 同时, 光泽站谱宽也出现迅速增宽 (图 4b), 但与石城站不同的是没有出现剧烈的多峰结构 (图 5b), 不同尺度粒子 $N(D)$ 均呈增加特征, 小粒子 $N(D)$ 增幅最显著。当进入强回波降水区时, 石城站、光泽站粒子谱宽减小 (图 4a, 4b), 特别直径中等以上 ($\geq 3\text{mm}$) 的粒子数明显减少, 多峰或双峰结构较之前趋于平缓, 虽然还是存在个别大粒子, 但小粒子 $N(D)$ 数浓度仍处于高位。石城站、光泽站在云体后侧的粒子谱谱宽都有继续大幅收窄, 小粒子

$N(D)$ 略高于云体前侧区域。

顺昌站和永定站在云体前侧，谱宽较石城站和光泽站观测到的孤立单体前侧偏窄（图 5a），超过 5 mm 的粒子较少，存在着相对不明显的多峰结构。飢线个例进入集中降雹区后，顺昌站、永定站各粒径段的 $N(D)$ 均明显增加（图 4c, 4d），谱宽出现增宽；但与孤立单体相比，这两个站的粒子谱谱宽相对较窄且多峰结构不明显（图 5b）。在强回波降水区，粒子谱谱宽收窄，永定站谱宽收窄较快（图 4d），而顺昌站还存在少量的大粒子（图 5c），此差异主要与永定站飢线过境快且回波面积相对较小有关（图 2）。在云体后侧，粒子谱谱宽进一步收窄，但顺昌站谱宽收窄幅度较孤立单体小（图 5d）；与孤立单体不同的是，此时这两个站观测到的小粒子 $N(D)$ 远高于云体前侧区域。

3.3 地面降水粒子速度-尺度谱特征

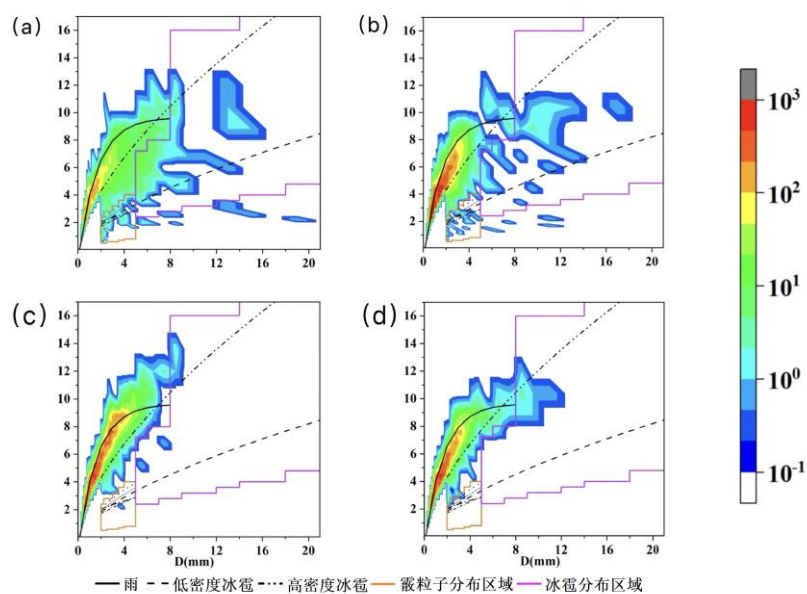
由于雨、雹和霰等不同相态降水粒子的下落末速度与直径间的相关关系存在显著差异，为进一步分析两类冰雹云的集中降雹过程中的降水粒子相态组成特征，图 6 和图 7 分别为 4 个云体前侧和集中降雹区的地面降水粒子尺度-速度关系图，参考 Friedrich et al（2013）的方法，将 D 与 V 投影到速度-尺度空间，并以雨滴、霰粒及雹类粒子的末速度-粒径关系曲线（Gunn and Kinzer, 1949; Locatelli and Hobbs, 1974; Knight and Heymsfield, 1983）作为判别条件，依据散点相对各判别区域的落区完成相态分类，并开展相态组成分析。



注：填色为单位尺度间隔下单位体积雨滴数，单位： $\text{个} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

图6 2023年3月(a) 22日16:07—16:09石城站, (b) 22日22:29—22:31光泽站, (c) 23日08:55—08:56顺昌站, (d) 24日07:06—07:10永定站冰雹过程云体前侧粒子速度-尺度谱

Fig.6 Particle velocity and size spectra on the front side of the cloud system during the hail process at (a) Shicheng Station from 16:07 BT to 16:09 BT 22, (b) Guangze Station 22:29 BT to 22:31 BT 22, (c) Shunchang Station 08:55 BT to 08:56 BT 23, and (d) Yongding Station 07:06 BT to 07:10 BT 24 March 2023



注：填色为单位尺度间隔下单位体积雨滴数，单位： $\text{个} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

图 7 2023 年 3 月 (a) 22 日 16:09—16:21 石城站, (b) 22 日 22:31—22:34 光泽站, (c) 23 日 08:56—09:01 顺昌站, (d) 24 日 07:10—07:13 永定站冰雹过程集中降雹区粒子速度-尺度谱

Fig. 7 Particle velocity and size spectra in hailfall concentration area during the hail process at (a) Shicheng Station from 16:09 BT to 16:21 BT 22, (b) Guangze Station from 22:31 BT to 22:34 BT 22, (c) Shunchang Station from 08:56 BT to 09:01 BT 23, and (d) Yongding Station from 07:10 BT to 07:13 BT 24 March 2023

与 3.2 节中的分析一致，孤立单体云体前侧降水粒子的速度-尺度谱均出现了少量冰雹，而飢线云体前侧则均为雨滴粒子，并且 4 个站在云体前侧观测到的 $N(D)$ 都不高（图 6）。在集中降雹区阶段（图 7），孤立单体内部观测到的降水粒子相态类型较飢线内部更复杂，即其速度-尺度谱离散度更大，石城站和光泽站观测到的冰相粒子除了冰雹还有大量的霰粒，冰雹粒子既有低密度也有高密度冰雹；而顺昌站和永定站所观测到的冰相粒子则以高密度冰雹为主，并且大部分降水粒子更集中在雨线附近。此外，集中降雹期间石城站观测到的雨滴数浓度明显较其他站少，特别是较同样是孤立单体的光泽站少，结合地面观测到的冰雹尺度较其他站更大，因此导致雨滴数量偏少的原因主要在于大冰雹在湿增长过程中消耗大量过冷水（Heymsfield et al, 1980; Zakinya, 2008; Kaltenboeck and Ryzhkov, 2013）。

综上所述，在孤立单体和飢线对流云系前侧均可观测到以少量大雨滴为主的降水，孤立单体在该部位已夹杂少量冰雹。而集中降雹后的强降水区均立即出现粒子总数浓度的峰值，这与 Li et al (2024) 讨论的强对流云系风场结构造成的多方向粒子分选集中过程、相似，强对流云系前侧由于强垂直风切变造成降水粒子仅剩大粒子（直径 $>5 \text{ mm}$ ），小-中粒子（直径约为 $1\sim5 \text{ mm}$ ）随着风场移动在云体后侧高度聚集，从而导致短时降水量加剧。此外，本文个例中孤立单体观测到的冰雹直径均大于飢线对流，孤立单体的 Z_{DR} 柱最高可分别高达 $7\sim8 \text{ km}$ ，水平范围约为 $4\sim6 \text{ km}$ ，相比之下飢线对流的 Z_{DR} 柱最高仅达 $5\sim6 \text{ km}$ ，水平范围约为 $2\sim3 \text{ km}$ ，说明孤立单体内存在更强的上升气流（Aregger et al, 2025; Klaus and Krause, 2024）；孤立单体的最大回波强度中心高度也明显更高（约为 7 km ），飢线仅约为 4.5 km ，说明强上升气流可将冰雹粒子输送至更高层生长，有利于大冰雹的形成（Allen et al, 2020）。同时，孤立单体表现出更为明显且持续的湿增长区（该区域 0°C 层以上 $Z_{\text{H}} > 50 \text{ dBZ}$, $Z_{\text{DR}} < 0 \text{ dB}$, K_{DP} 缺值；林文等, 2020），而飢线对流中则表现不明显，说明孤立单体中充足的过冷水和湿增长环境能够促进冰雹的快速生长和增大（Forcadell et al, 2024）。孤立单体具有更强的宏观动力支撑，有利于在云体高层维持充足的过冷水含量和湿增长环境，为更大尺寸冰雹的生成和生长提供了有利条件。因此，结合地面降水粒子谱特

征，孤立单体产生的降水粒子总数浓度在集中降雹区存在较大波动、尺度谱多峰结构明显且冰相粒子类型多样，而飚线对流中表现得单向增大、尺度谱多峰结构较弱且冰相粒子类型单一，表明孤立单体可能具有更复杂的冰相过程（Zawadzki et al, 2001；Yin et al, 2021；Dong et al, 2024；Guo et al, 2024；Liu et al, 2025）。

《气象学报》

4. 结论

本文基于 2023 年 3 月 22—24 日发生在东南沿海山区丘陵地区的两类冰雹云（孤立单体和飑线对流）的地面降水粒子谱特征及其演变过程，结合雷达观测分析两类的冰雹云各个阶段的微物理特征异同点。

（1）在云体前侧，受风切变影响，孤立单体和飑线对流的粒子谱均表现为数量较少的大粒子，孤立单体可能会出现大雨滴夹杂少量冰雹的现象，而飑线对流前侧均为大雨滴；

（2）在集中降雹区，两类对流降水的粒子尺度谱最宽，孤立单体产生的冰雹尺度大于飑线对流，孤立单体粒子总数浓度存在波动、尺度谱多峰结构明显且冰相粒子类型多样，而飑线对流中表现得单向增大、尺度谱多峰结构较弱且冰雹类型单一，孤立单体瞬时雨强峰值出现在该阶段；

（3）由于多方向粒子分选集中过程，孤立单体和飑线对流降水粒子总数浓度的峰值均立即出现在集中降雹后的强降水区，尺度谱谱宽收窄，大粒子占比减少，飑线对流瞬时雨强峰值出现在该阶段且与总数浓度峰值同步。

由于本文研究主要基于单次连续过程中出现的孤立单体、飑线对流两类冰雹云个例展开，虽然在一定程度上能够体现两种类型冰雹云的特征差异，但其结论的普遍性仍存在一定局限性，未来的研究将致力于通过更多个例的统计分析逐步完善结论，为进一步理解冰雹云的微物理机制，提升冰雹识别预警和防灾减灾措施提供科学依据。

参考文献

- 蔡义勇, 王宏, 余永江, 2009. 福建省冰雹时空分布与天气气候特征分析[J]. 自然灾害学报, 18(4): 43-48. Cai Y Y, Wang H, Yu Y J, 2009. Spatiotemporal distribution and weather characteristics of hail in Fujian Province[J]. J Nat Dis, 18(4): 43-48 (in Chinese).
- 陈垚, 寇蕾蕾, 蒋银丰, 等, 2022. 基于新型观测算子的双偏振雷达雨滴谱变分反演[J]. 热带气象学报, 38(6): 854-869. Chen Y, Kou L L, Jiang Y F, et al, 2022. Variational raindrop size distribution retrieval from dual-polarimetric radar based on a new observation operator[J]. J Trop Meteor, 38(6): 854-869 (in Chinese).
- 陈秋萍, 陈齐川, 冯晋勤, 等, 2015. “2012.4.11”两个强降雹超级单体特征分析[J]. 气象, 41(1): 25-33. Chen Q P, Chen Q C, Feng J Q, et al, 2015. Analysis of two severe hail supercell storms on 11 April 2012[J]. Meteor Mon, 41(1): 25-33 (in Chinese).
- 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]. Torr Rain Dis, 41(2): 174-183 (in Chinese).
- 冯晋勤, 潘佳文, 何清芳, 等, 2024. 极端持续性强降水过程雷达偏振量特征及演变[J]. 应用气象学报, 35(5): 577-589. Feng J Q, Pan J W, He Q F, et al, 2024. Characteristics and evolution of radar polarization during extremely persistent heavy rainfall[J]. J Appl Meteor Sci, 35(5): 577-589 (in Chinese).

- 冯晋勤, 张深寿, 吴陈锋, 等, 2018. 双偏振雷达产品在福建强对流天气过程中的应用分析[J]. 气象, 44(12): 1565-1574. Feng J Q, Zhang S S, Wu C F, et al, 2018. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian[J]. Meteor Mon, 44(12): 1565-1574 (in Chinese).
- 何清芳, 林文, 张深寿, 等, 2022. 闽西南地区一次春季降雹过程的双偏振参量及降水粒子谱特征[J]. 气象, 48(7): 856-867. He Q F, Lin W, Zhang S S, et al, 2022. Dual polarization parameters and precipitation particle spectrum characteristics of a spring hail event in southwestern Fujian[J]. Meteor Mon, 48(7): 856-867 (in Chinese).
- 金祺, 袁野, 纪雷, 等, 2015. 安徽滁州夏季一次飑线过程的雨滴谱特征. 应用气象学报, 26(6), 725-734. Jin Q, Yuan Y, Ji L., et al. 2015. Characteristics of raindrop size distribution of a squall line case in summer in Chuzhou, Anhui Province. Journal of Applied Meteorological Science, 26(6), 725-734. (in Chinese).
- 李聪, 姜有山, 姜迪, 等, 2017. 一次冰雹天气过程的多源资料观测分析[J]. 气象, 43(9): 1084-1094. Li C, Jiang Y S, Jiang D, et al, 2017. Observation and analysis of a hailstorm event based on multi-source data[J]. Meteor Mon, 43(9): 1084-1094 (in Chinese).
- 李晗琪, 王海江, 顾桃峰, 等, 2025. 基于深度学习的卫星和雷达数据融合的冰雹识别[J]. 气象, 1-21: 网络首发时间: 2025-12-15. Li H Q, Wang H J, Gu T F, et al, 2025. Deep learning-based hail identification using fusion of satellite and radar data. Meteorological Monthly, 1-21. Published online December 15, 2025(in Chinese).
- 林文, 牛生杰, 2009. 宁夏盛夏层状云降水雨滴谱特征分析. 气象科学, 29(1), 97-101. Lin W, Niu S J. (2009). Analysis of the characteristics of raindrop size distribution for stratiform clouds precipitation in midsummer over Ningxia. Scientia Meteorologica Sinica, 29(1), 97-101 (in Chinese).
- 林文, 林长城, 李白良, 等, 2016. 登陆台风麦德姆不同部位降水强度及谱特征[J]. 应用气象学报, 27(2): 239-248. Lin W, Lin C C, Li B L, et al, 2016. Rainfall intensity and raindrop spectrum for different parts in landing typhoon Matmo[J]. J Appl Meteor Sci, 27(2): 239-248 (in Chinese).
- 林文, 张深寿, 罗昌荣, 等, 2020. 不同强度强对流云系 S 波段双偏振雷达观测分析[J]. 气象, 46(1): 63-72. Lin W, Zhang S S, Luo C R, et al, 2020. Observational analysis of different intensity severe convective clouds by S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 46(1): 63-72 (in Chinese).
- 刘晓莉, 水旭琼, 2015. 青海两次多单体降雹过程的雹谱分布特征[J]. 大气科学学报, 38(6): 845-854. Liu X L, Shui X Q, 2015. The hail size distribution characteristics of two multi-cell hail processes in Qinghai[J]. Trans Atmos Sci, 38(6): 845-854 (in Chinese).
- 牛生杰, 马磊, 翟涛, 1999. 冰雹谱分布及 Z_e - E 关系的初步分析[J]. 气象学报, 57(2): 217-225. Niu S J, Ma L, Zhai T, 1999. Preliminary analysis of the hailstone spectra distribution and the relations between Z_e and E [J]. Acta Meteor Sin, 57(2): 217-225 (in Chinese).
- 潘佳文, 魏鸣, 郭丽君, 等, 2020. 闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析. 气象, 46(12), 1608-1620. Pan J W, Wei M, Guo L J, et al, 2020. Analysis of dual-polarization characteristics of a large hail supercell evolution in southern Fujian. Meteorology, 46(12), 1608-1620 (in Chinese).
- 王雨曾, 1987. 当前外场防雹试验的若干情况[J]. 气象, 13(8): 3-7. Wang Y Z, 1987. The current status of hail suppression experiment in the field[J]. Meteor Mon, 13(8): 3-7 (in Chinese).
- 徐小红, 余兴, 刘贵华, 等, 2022. 冰雹云卫星早期识别与自动预警[J]. 大气科学, 46(1): 98-110. Xu X H, Yu X, Liu G H, et al, 2022. Early identification and automatic warning of hail clouds by satellite[J]. Chin J Atmos Sci, 46(1): 98-110 (in Chinese).
- 杨宁, 苏德斌, 苏立娟, 等, 2021. 冰雹云探测技术研究进展——基于巴彦淖尔人工防雹技术研究试验[J]. 气象科技进展, 11(5): 141-148. Yang N, Su D B, Su L J, et al, 2021. Research progress of hail cloud observation technology—based on field campaigns in Bayannur[J]. Adv Meteor Sci Technol, 11(5): 141-148 (in Chinese).

- 岳治国, 梁谷, 2018. 陕西渭北一次降雹过程的粒子谱特征分析[J]. 高原气象, 37(6): 1716-1724. Yue Z G, Liang G, 2018. Characteristics of precipitation particles in a hailstorm process in Weiwei Area of Shaanxi Province[J]. Plateau Meteor, 37(6): 1716-1724 (in Chinese).
- 余文梅, 陈豫英, 马国涛, 等, 2025. 宁夏六盘山区一次局地特大冰雹的雷达观测特征. 气象, 51(5): 595-606. YU Wenmei, CHEN Yuying, MA Guotao, et al, 2025. Radar Observation Characteristics of a Local Outsize Hail in Liupan Mountains, Ningxia. Meteorological Monthly, 51(5): 595-606. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.122703.
- Allen J T, Giammanco I M, Kumjian M R, et al, 2020. Understanding hail in the Earth system[J]. Rev Geophys, 58(1): e2019RG000665.
- Aregger M, Martius O, Germann U, et al, 2025. Differential reflectivity columns and hail: Linking C-band radar-based estimated column characteristics to crowdsourced hail observations in Switzerland. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 151(771), e5003. <https://doi.org/10.1002/qj.5003>
- Dong Y, Hua S F, Chen B J, et al, 2024. Numerical simulation of a pulse hailstorm in the plateau region in southwestern China [J]. Atmos Res, 299: 107218.
- Forcadell V, Augros C, Caumont O, et al, 2024. Severe-hail detection with C-band dual-polarisation radars using convolutional neural networks[J]. Atmos Meas Tech, 17(22): 6707-6734.
- 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.
- Gunn R, Kinzer G D, 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air[J]. J Atmos Sci, 6(4): 243-248.
- Guo X, Guo X L, Fu D H, 2024. Synoptic, dynamical and microphysical properties for splitting and non-splitting hailstorms[J]. Atmos Res, 299: 107203.
- Heymsfield A J, Jameson A R, Frank H W, 1980. Hail growth mechanisms in a Colorado storm: part II: hail formation processes[J]. J Atmos Sci, 37(8): 1779-1807.
- Jia X, Liu Y, Ding D, et al. 2019. Combining disdrometer, microscopic photography, and cloud radar to study distributions of hydrometeor types, size and fall velocity. Atmospheric Research, 228, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.025>
- Kaltenboeck R, Ryzhkov A, 2013. Comparison of polarimetric signatures of hail at S and C bands for different hail sizes[J]. Atmos Res, 123: 323-336.
- Klaus V, Krause J. 2024. Investigating hailstorm updrafts and nowcasting hail size using a novel radar-based updraft detection[J]. Wea Forecasting, 39(12): 1795-1815.
- Knight C A, Heymsfield A J, 1983. Measurement and Interpretation of Hailstone Density and Terminal Velocity[J]. J Atmos Sci, 40: 1510–1516. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040<1510:MAIOHD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<1510:MAIOHD>2.0.CO;2)
- Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(7): 1940-1961.
- Li H R, Yin J F, Kumjian M, 2024. Z_{DR} backwards arc: evidence of multi-directional size sorting in the storm producing 201.9 mm hourly rainfall[J]. Geophys Res Lett, 51(10): e2024GL109192.
- Liu Q Q, Zhou A, Zhao K, et al, 2025. Microphysical evolution of heavy rainfall during a bow echo event in South China: characteristics and the mesovortex-related impacts[J]. J Geophys Res Atmos, 130(2): e2024JD041381.
- Locatelli J D, Hobbs P V, 1974. Fall speeds and masses of solid precipitation particles[J]. J Geophys Res, 79(15): 2185-2197.
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J, 2013. General features of squall lines in East China[J]. Mon Wea Rev, 141(5): 1629-1647.
- Rosenfeld D, 2007. Cloud top microphysics as a tool for precipitation measurements[M].
- Levizzani V, Bauer P, Turk F J. Measuring Precipitation From Space, Advances In Global Change Research. Dordrecht: Springer: 67-78.

- Yin L, Ping F, Xu H B, et al, 2021. Numerical simulation and the underlying mechanism of a severe hail-producing convective system in East China[J]. J Geophys Res Atmos, 126(11): e2019JD032285.
- Yuter S E, Kingsmill D E, Nance L B, et al, 2006. Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow[J]. J Appl Meteor Climatol, 45(10): 1450-1464.
- Zakinyan R G, 2008. On the theory of hailstone growth[J]. Izv Atmos Ocean Phys, 44(2): 207-212.
- Zawadzki I, Fabry F, Szyrmer W, 2001. Observations of supercooled water and secondary ice generation by a vertically pointing X-band Doppler radar[J]. Atmos Res, 59-60: 343-359.

《气象》
《天气》