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

基于多源观测资料的长沙“4·29”强对流天气过程分析

王青霞 唐明晖 吴亚昊 赵恩榕 苏涛 唐瑶

Analysis of "4·29" severe convective weather event in Changsha based on multi-source observation data

WANG Qingxia，TANG minghui，WU Yahao，ZHAO Enrong，SU Tao，TANG Yao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-112

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

鄂西南一次早春强对流过程的多源资料分析

Analysis of an early spring convective weather event in southwest of Hubei province based on multi-source data

暴雨灾害. 2022, 41(2): 174-183 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.008

一次春季雨雪天气的降水相态演变特征分析

Analysis on the phase transformation of precipitation in a rain and snow event in spring

暴雨灾害. 2022, 41(3): 290-297 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.005

湖南一次雨雪天气降水相变的环境条件与双偏振雷达特征分析

Analysis on environmental conditions and dual-polarization radar characteristics of the phase transformation of precipitation in a rain and snow event in Hunan

暴雨灾害. 2023, 42(3): 293-302 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-065

基于双偏振雷达资料的洞庭湖区一次强对流过程的分阶段特征分析

Staged characteristics analysis of a severe convection over the Dongting Lake area based on dual-polarization Doppler weather radar data

暴雨灾害. 2023, 42(6): 692-703 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-170

一次冰雹过程的多源资料观测特征分析

Analysis of the characteristics of a hail event with multi-source data

暴雨灾害. 2024, 43(3): 322-331 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-032

江西一次冰雹过程的S波段双偏振雷达回波特征分析

Analysis on characteristics of S-band dual-polarization radar echo of a hail event in Jiangxi Province

暴雨灾害. 2022, 41(6): 621-630 https://doi.org/10.12406/byzh.2020-242

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王青霞,唐明晖,吴亚昊,等.2025.基于多源观测资料的长沙“4·29”强对流天气过程分析[J].暴雨灾害,44(3):309−321. WANG Qingxia, TANG minghui, WU Yahao, et al. 2025. Analysis of "4·29" severe convective weather event in Changsha based on multi-source observation data [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):309−321 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−112

基于多源观测资料的长沙“4·29”强对流天气过程分析

王青霞[1, 2, 3, 4], 唐明晖[1, 2, 3, 4], 吴亚昊[1, 2, 3, 4], 赵恩榕[1, 2, 3, 4], 苏涛[1, 2, 3, 4], 唐瑶[1, 5]

(1. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118; 2. 湖南省气象台, 长沙 410118; 3. 洞庭湖国家气候观象台, 岳阳 414000; 4. 中国气象局高影响天气 (专项) 重点开放实验室, 长沙 410118; 5. 湖南省气象灾害防御技术中心, 长沙 410053)

摘　要: 2024 年 4 月 29 日长沙出现一次大暴雨并伴有强雷电、雷暴大风、局地小冰雹等强对流天气过程 (以下简称“4·29”过程), 引发严重城市内涝和大风灾害。利用多普勒双偏振天气雷达、风廓线雷达、激光雨滴谱仪、闪电定位仪、气象观测站等多源观测资料对该过程对流最强阶段的中小尺度特征进行初步分析。结果表明: (1) 长沙市区为强降雨、强闪电及雷暴大风密集区。13 个站最大分钟降雨量达 5 mm, 莲花站最大分钟降雨量 (5 mm) 超过“21·7”河南特大暴雨最大分钟降雨量 (4.3 mm)。(2) 不同直径 (D) 对应的雨滴数浓度随时间的变化与雨滴谱分钟降雨量的时间演变基本一致, D>1 mm 的雨滴对降雨贡献更大; 高浓度的中小雨滴数浓度和一定比例的大雨滴可在一定程度导致局地高效强降雨; 不同降雨类型的平均谱均为单峰谱, 对流云降水的雨滴最大 D 和各粒径对应的雨滴数浓度均显著高于层状云降水; 对流云降水的粒子较活跃, 粒子质量加权平均直径和广义截距参数 (D_m-$\log_{10}Nw$) 特征偏向“大陆性对流”, 二者均与降雨强度的变化成正比。(3) 中尺度对流系统 (MCS_s) 中有多个对流单体合并、增强发展, 且后侧不断有单体新生补充; 长沙市区剧烈对流天气由弓状回波过境所致, 分钟降雨量达 5 mm 的站点有 3.1 °·km^{-1} 的差分相移率 (K_{DP}) 大值区经过; 近地面差分反射率因子 (Z_{DR}) 值高 (达 3 dB)、K_{DP} 值强 (达 3.1 °·km^{-1})、相关系数 (CC) 值 (0.97~0.99) 大, 说明降至地面为数浓度高的扁平大雨滴, 强降雨拖曳作用加剧了雷暴大风。(4) 此次过程负闪强于正闪, 闪电密集区与暴雨区对应, 闪电峰值较降雨峰值提前 10~20 min, 双偏振参量 Z_{DR}>2 dB、K_{DP}>0.5 °·km^{-1} 可作为强雷电发布的预警指标, 预警可提前 6~12 min。

关键词: 多源观测资料; 风廓线雷达; 多普勒双偏振天气雷达; 激光雨滴谱仪; 闪电定位仪

中图法分类号: P458.1$^+$21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−112

Analysis of "4·29" severe convective weather event in Changsha based on multi-source observation data

WANG Qingxia[1, 2, 3, 4], TANG minghui[1, 2, 3, 4], WU Yahao[1, 2, 3, 4], ZHAO Enrong[1, 2, 3, 4], SU Tao[1, 2, 3, 4], TANG Yao[1, 5]

(1. *Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction*, *Changsha* 410118; 2. *Hunan meteorological observatory*, *Changsha* 410118; 3. *Dongting Lake National Climatic Observatory*, *China Meteorological Administration*, *Yueyang* 414000; 4. *Key Laboratory of High Impact Weather* (*special*) *China Meteorological Administration*, *Changsha* 410118; 5. *Hunan Meteorological Disaster Prevention Technology Center*, *Changsha* 410053)

Abstract: A severe convective weather event (hereinafter referred to as "April 29" event) accompanied by heavy rainstorm, strong lightning, thunderstorm, gale, local hail occurred in Changsha on April 29, 2024, causing serious urban waterlogging and gale disasters. By using the multi-source observational data from doppler dual-polarization weather radar, wind profile radar, laser raindrop spectrum, and lightning locator, the small and medium-scale characteristics during the strongest convection stage of the event are preliminarily analyzed. The results are as follows. (1) Changsha is a concentrated area of heavy precipitation, and strong lightning and thunderstorm winds. The maximum minute precipitation intensity at 13 stations reached 5 mm, and the maximum minute rainfall (5 mm) at Lianhua

收稿日期: 2024−06−04; **定稿日期:** 2025−01−05

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3007804); 湖南省气象局 2023 年创新发展专项 (CXFZ2023-ZDZX01); 中国气象局 2023 年度决策气象服务专题研究项目 (JCZX2023008)

第一作者: 王青霞, 主要从事灾害天气预报技术研究。E-mail: 286535177@qq.com

通信作者: 唐明晖, 主要从事天气预报技术研究。E-mail: 3617176@qq.com

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

National Station in Changsha exceeded the maximum minute rainfall (4.3 mm) during the "21.7" Henan heavy rainstorm. (2) The variation of the number concentrations of raindrops corresponding to different diameters with time is basically consistent with the time evolution of the minute precipitation of the raindrop spectrum, and the raindrops with a diameter of more than 1 mm contribute more significantly to precipitation. A high concentration of small-sized and medium-sized raindrops and a certain proportion of larger raindrops can lead to efficient heavy precipitation to a certain extent. The average spectrum of different precipitation types exhibited unimodal distribution. The maximum diameter and the number concentration of raindrops corresponding to each particle size of convective cloud precipitation are significantly higher than those of stratiform cloud precipitation. And the particles of convective cloud precipitation are more active. The mass-weighted average diameter and generalized intercept parameter (D_m-$\log_{10}N_w$) show "continental convection" characteristics, both of which are positively correlated with the precipitation intensity. (3) Multiple convective cells in the mesoscale convective system merge and enhance, with new cells continuously developed at the rear side. The severe convective weather in the Changsha urban area is caused by the transit of bow echo, and the station with minute rainfall reached 5 mm corresponds to a differential phase shift rate (K_{DP}) large value area of 3.1° km^{-1}. High near-surface differential reflectance factor (Z_{DR}) values (reached 3 dB), strong K_{DP} values (reached 3.1 °·km^{-1}), and large correlation coefficients (CC, 0.97-0.99) indicate that the flat big raindrops with extremely high number concentration fall to the ground, and the heavy precipitation drag effect intensify the occurrence of thunderstorm gale. (4) The negative flashes predominate over the positive flashes, and the area with a large flash rate corresponds to the rainstorm area. The peak of lightning is 10-20 minutes before the precipitation maxima. The dual-polarization parameters Z_{DR}>2 dB and K_{DP}>0.5 °·km^{-1} can be used to serve as strong lightning warning, with a leading time of about 6-12 minutes.

Key words: multi-source observation data; wind profile radar; dual polarization radar; raindrop spectrograph; lightning locator

引　言

暴雨作为主要灾害性天气之一，往往对城市交通、电力、通讯造成较大的灾害损失，一直是气象科研和业务部门关注的重点。多普勒双偏振天气雷达、风廓线雷达、激光雨滴谱仪等新型探测设备，对暴雨具有较高时空分辨率的探测能力。如双偏振雷达与单极化雷达相比，能测得差分反射率因子 (Z_{DR})、差分相移率 (K_{DP})、差分相移率相关系数 (CC) 等新的独立变量，实时对空中降水粒子进行观测分类，提供更加全面的降水相态信息 (程周杰等, 2009)；借助风廓线雷达能早于天气图获知冷空气入侵时间，并精细地分析出槽脊过境、冷暖平流等天气系统演变 (唐明晖等, 2023b)；激光雨滴谱仪可以间隔 1 min 连续观测下落中的毛毛雨、大雨、冰雹以及介于降雨和冰雹之间的各类降水 (周黎明等, 2017; 李晓惠等, 2024;)；闪电定位仪不仅能监测暴雨过程中闪电的落区、类型、强度等，且通过闪电与暴雨落区、峰值的关系可提前预判降雨强度，为暴雨预警提前发布提供参考 (成勤等, 2020)。以上新型探测设备观测资料的应用，能弥补常规观测资料时空分辨率不足的问题，更好地发现和认识暴雨的生消演变和物理机制。

近 10 a 来学者针对多源观测资料在暴雨等强对流天气中的应用开展了持续研究，并取得一系列研究成果。崔春光等 (2013) 利用多普勒天气雷达、风廓线雷达、微波辐射计、GPS 探空等观测资料，分析了咸宁一次非线状中尺度对流系统 (MCS) 引发的短时强降水，结果表明这些高时空分辨率观测资料对 MCS 演变过程有较好的分析能力。李聪等 (2017) 利用微波辐射计、风廓线雷达和雨滴谱仪等观测资料，分析了南京的一次冰雹过程，结果表明这些新型观测资料能较好地反映冰雹天气的发生机制及强风暴演变特征。杜牧云等 (2022) 综合利用多普勒天气雷达、风廓线雷达、二维视频雨滴谱仪、三维闪电监测网等多源观测资料，对鄂西南一次局地冰雹和雷雨过程的中小尺度特征进行了分析，结果表明多源观测资料的应用能为分类强对流天气特征分析及预警发布提供参考。顾佳佳和武威 (2017) 利用多普勒天气雷达、卫星云图、地基 GPS 水汽、闪电定位等资料，对豫北一次特大暴雨过程的中尺度对流特征进行分析，结果表明多源观测资料能对暴雨的中尺度对流特征分析和预报预警提供更多有价值的参考。以上结果表明新型多源观测资料在强对流天气预报预警中发挥了重要作用。

2024 年 4 月 29 日长沙出现一次大暴雨过程，并伴有强雷电、雷暴大风、局地小冰雹等强对流天气 (以下简称“4·29”过程)，引发严重城市内涝和大风灾害，造成部分路段出行受阻，长沙火车南站候车厅雨水溢流，对“五一”假期旅客出行造成影响。据湖南省应急管理部门消息，该次过程共造成 4 000 余人受灾，房屋损坏 1 000 余间，直接经济损失 2 600 余万，造成重大经济损失和社会影响。本文利用风廓线雷达、激光雨滴谱仪、多普勒双偏振天气雷达、闪电定位仪等观测资料对该过程对流最强阶段的中小尺度特征进行初步分析，探讨多源观测资料在暴雨、强对流天气监测预报预警中的应用，以期为预报员利用新型多源观测资料开展暴雨、强对流天气分析和监测预警提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

采用的资料包括: (1) 长沙 291 个气象观测站 (含莲花、黄花 2 个国家气象观测站和 289 个区域气象观测站) 逐分钟极大风速、降雨量, 用于天气要素分析; (2) 常规高空地面观测数据, 用于天气形势分析; (3) 长沙 S 波段多普勒双偏振天气雷达 (以下简称长沙双偏振雷达) 观测资料, 海拔高度 622 m, 雷达扫描模式为 VCP21, 用于暴雨、强对流双偏振特征分析; (4) 湖南 ADTD 型雷电定位资料, 用于闪电与降雨落区、峰值对比分析; (5) 长沙 CFL 风廓线雷达 (以下简称长沙风廓线雷达) 观测资料, 用于风垂直结构分析; (6) 长沙 DSG1 型激光雨滴谱仪 (以下简称长沙雨滴谱仪) 资料, 用于降雨粒子特征分析。其中长沙风廓线雷达、长沙雨滴谱仪、莲花国家级气象观测站 (以下简称莲花站) 均布设在长沙国家综合气象观测试验基地。以上资料均来自于湖南省气象信息中心, 时段为 2024 年 4 月 29 日 08:00—30 日 08:00 (北京时, 下同)。

1.2 研究方法

考虑仪器自身局限性, 对逐分钟雨滴谱数据进行质量控制, 具体方法如下: (1) 前两个直径通道因信噪比较低, 且自然界中极少存在直径大于 8.0 mm 的雨滴, 故舍弃前两个直径通道和直径大于 8.0 mm 的数据; (2) 剔除粒子总数小于 10 或降雨强度小于 0.1 mm·h^{-1} 的噪声样本; (3) 当雨滴下落受到边际效应和飞溅效应等影响时, 观测的雨滴直径 D 和下落末速度可能存在较大偏差, 参考 Altas 等 (1973) 的方法剔除粒子下落速度超过理论下落速度 (V=9.65−10.3e$^{-0.6D}$) 对应的±60% 范围的数据 (葛黎黎等, 2023)。

质量控制后, 将各个通道观测的雨滴个数转化为雨滴数浓度 $N(D)$ (单位: mm^{-1}·m^{-3}), 进一步计算得到降雨强度 R (单位: mm·h^{-1})、反射率因子 Z (单位: mm^6·m^{-3})、质量加权平均直径 D_m (单位: mm) 和广义截距参数 N_w (单位: mm^{-1}·m^{-3}), 计算公式 (江雨霏等, 2023) 如下

$$N(D_i)=\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}}{A\cdot T\cdot V_j\cdot \Delta D_i} \tag{1}$$

$$R=\frac{6\pi}{10^4}\sum_{i=1}^{32}\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}\cdot D_i^3}{A\cdot T} \tag{2}$$

$$Z=\sum_{i=1}^{32}\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}\cdot D_i^6}{A\cdot T\cdot V_j} \tag{3}$$

$$D_\mathrm{m}=\frac{\sum_{i=1}^{32}N(D_i)D_i^4\Delta D_i}{\sum_{i=1}^{32}N(D_i)D_i^3\Delta D_i} \tag{4}$$

$$N_\mathrm{w}=\frac{256}{6}\cdot\frac{\left[\sum_{i=1}^{32}N(D_i)D_i^3\Delta D_i\right]^5}{\left[\sum_{i=1}^{32}N(D_i)D_i^4\Delta D_i\right]^4} \tag{5}$$

其中 n_{ij} 代表第 i 个直径通道、第 j 个速度通道的雨滴, A (单位: m^2) 和 T (单位: s) 分别是雨滴谱仪的采样面积和采样时间, V_j (单位: m·s^{-1}) 为第 j 个速度通道的下落末速度, ΔD_i (单位: mm) 为直径通道间隔。N_w 的分布不受雨滴谱谱形影响, 是可以反映雨滴数浓度的独立物理量, 但由于 N_w 的尺度变化常相差几个量级, 故本文主要讨论取对数后的 $\log_{10}N_\mathrm{w}$ 数值变化, 这可以尽量消除异方差, 使非线性的变化关系转化为线性关系, 便于进行参数估计。

为研究对流云降水和层状云降水在本次过程的雨滴谱特征差异, 参照 Chen 等 (2013) 方法将本次降雨过程分为对流云降水和层状云降水, 分类方法如下: 对于 t 时刻的逐分钟雨滴谱资料, 若[t−5, t+5]时间内的降雨强度均大于 5 mm·h^{-1} 且其标准差大于 1.5 mm·h^{-1}, 则识别为对流云降水; 若[t−5, t+5]时间内的降雨强度均大于 0.5 mm·h^{-1} 且其标准差小于 1.5 mm·h^{-1}, 则识别为层状云降水; 否则, 若其既不属于对流云降水也不属于层状云降水, 识别为混合云降水, 本文对其不作讨论。

此外, 本文使用天气学诊断和统计方法分析过程的天气实况、影响系统、雷达及闪电特征。

2 天气实况及影响系统

图 1 给出 2024 年 4 月 29 日 08:00—30 日 08:00 长沙降雨量、雷暴大风、闪电、最大分钟降雨量的空间分布和 29 日 12:00—14:00 莲花站分钟降雨量、极大风速时序图。分析可知, “4·29”过程具有以下特点: (1) 强降雨覆盖范围广、局地降雨量大、分钟雨强极端。长沙出现暴雨 145 站, 占比高达 49%, 大暴雨 13 站 (图 1a), 其中最大分钟降雨量达 5 mm 的有 13 站, 主要出现在 29 日 12:22—13:17, 区域集中在长沙市区 (图 1c, 表 1), 莲花站最大分钟降雨量为 5 mm (图 1d), 超过“21·7”河南特大暴雨最大分钟降雨量 (4.3 mm)。(2) 闪电活动剧烈。监测到闪电 15 122 次, 其中正闪 2 405 次, 负闪 12 717 次, 负闪占比高达

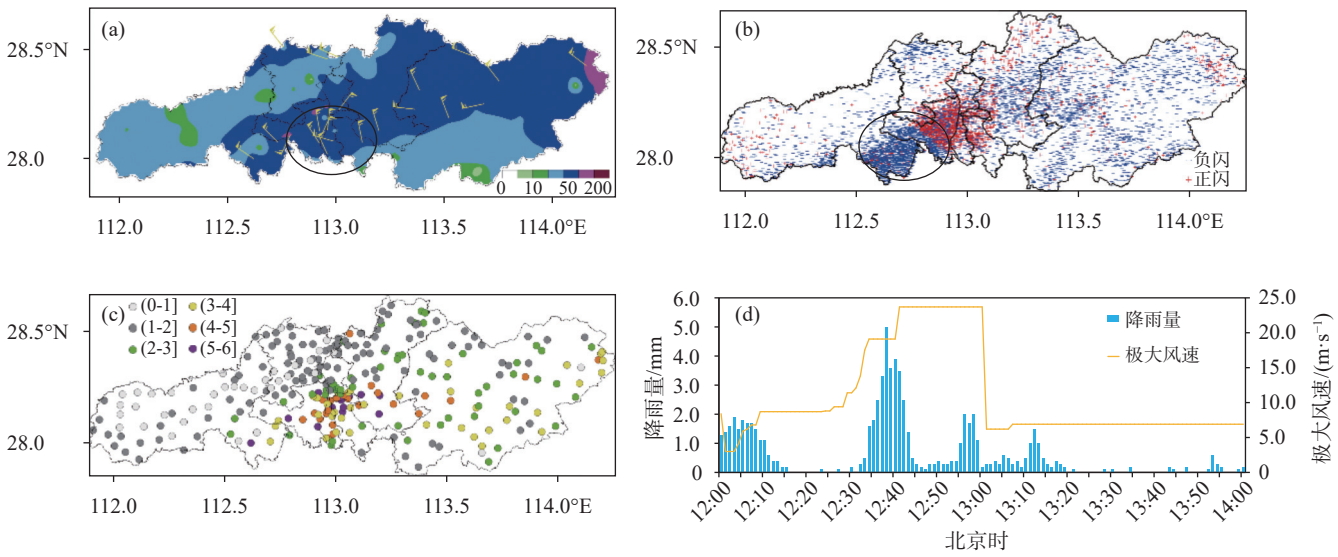


图 1 2024 年 4 月 29 日 08:00—30 日 08:00 长沙降雨量 (单位: mm) 和雷暴大风 (a)、闪电 (b)、最大分钟降雨量 (c,单位: mm) 空间分布和莲花站 29 日 12:00—14:00 分钟降雨量和极大风速时序图 (d) (图 a, b 中黑色椭圆为长沙市区所在位置)

Fig. 1 Spatial distribution of (a) accumulated precipitation (unit: mm) and thunderstorm, (b) lightning, (c) maximum minute precipitation (unit: mm) in Changsha from 08:00 BT on April 29 to 08:00 BT on April 30, 2024, (d) time series of minute precipitation and maximum wind speed at Lianhua Station from 12:00 BT to 14:00 BT on April 29, 2024 (The black ellipse represents the urban area of Changsha in Fig. 1a and Fig. 1b)

表 1 2024 年 4 月 29 日 08:00—30 日 08:00 最大分钟降雨量达到 5 mm 站点的要素特征

Table 1 Characteristic parameters of stations with maximum minute precipitation reaching 5 mm from 08:00 BT on April 29 to 08:00 BT on April 30, 2024

站名	累计降雨量/mm	最大分钟降雨量		K_{DP}/(°· km^{-1})	
		量值/ mm	出现时间	0.5°仰角	1.5°仰角
桔子洲天马	63.4	6.0	12:53	6.4	6.3
荷花园	51.7	5.8	13:00	8.0	7.5
马坡岭	63.2	5.7	13:02	5.4	5.4
黄兴镇车马	82.6	5.5	13:12	4.1	4.4
长桥公园	82	5.4	13:12	4.4	8.7
大屯营	81.2	5.3	12:22	4.8	4.5
黄花	**86.5**	**5.2**	**13:17**	**6.7**	**9.4**
东塘七里庙	68	5.2	12:56	4.1	6.4
咸嘉湖	102.7	5.1	12:54	6.1	8.0
圭塘沙湾	60.1	5.1	13:05	4.1	5.8
雨花区政府	55.4	5.1	13:01	4.2	4.5
莲花	**105.8**	**5.0**	**12:38**	**7.0**	**8.0**
巴溪洲	63.2	5.0	12:46	6.0	8.0

注: K_{DP}指差分相移率, 粗体为长沙市区黄花、莲花国家气象观测站要素。

84%, 长沙市区闪电活动最为密集 (图 1b)。(3) 雷暴大风和小冰雹发生在局地。全市共出现 22 站次雷暴大风, 其中 14 站次集中在市区, 极大风速最大达 26.5 m·s^{-1} (10 级, 13:10), 局地出现小冰雹 (图 1a)。综上, “4·29”过程最强阶段为 29 日 12:00—14:00, 长沙市区强降雨、强对流最集中。因此, 后续主要针对该阶段进行分析。

分析天气形势可知 (图略), 29 日 08:00, 500 hPa 高空槽分为南北两支, 北支槽位于内蒙古中部-西北地区东部一带, 南支槽位于四川中部-云南北部, 湖南位于南支槽前正涡度平流区; 700 hPa 以下四川东部低涡发展, 其东侧暖切变线伸展至湖南北部, 切变线南侧有强盛低空急流配合, 最大风速达 20 m·s^{-1}, 比湿为 15 g·kg^{-1}, 水汽条件充足; 地面低压倒槽向东延伸至湖南中部一带, 受弱冷空气渗透南下影响, 长沙为弱东北风。11:00, 弱冷空气在湖南中部娄底触发对流, 并在中低层西南气流的引导下逐渐向东北方向移动影响长沙; 14:00, 冷空气加强, 长沙低层北风加大, 雨带南压, 降雨减弱。

选取 29 日 12:00—14:00 长沙逐 6 min 风廓线

雷达资料 (图 2, 受强降雨过境影响, 12:42—12:54 数据缺测较多) 进行分析可知, 12:30 前, 600 m 以下为东北风, 表明强降雨发生前, 长沙边界层已受到弱冷空气影响; 13:00 后, 1.0—1.5 km 高度风向逐渐转为西南风, 13:06—13:24 出现风速脉动特征, 西南风增强至 20 m·s^{-1}, 13:00—13:06 边界层出现 15.1 m·s^{-1} 的东北风, 0—1 km 高度垂直风切变加大, 长沙出现 10 级大风。

3 雨滴谱特征

3.1 雨滴谱资料可信度

图 3 给出质控前后的雨滴谱降水粒子分布及莲花站逐小时降雨量对比。质控前 (图 3a) 降水粒子总数为 322 767 个, 质控后 (图 3b) 滤除 3.53% 粒子数。为验证雨滴谱数据的可靠性, 将雨滴谱仪质控后得到的瞬时雨强换算成分钟降雨量, 按小时进行累加得到雨滴谱小时降雨量 (图 3c 黑色实线), 与莲花站雨量计获取的小时降雨量 (图 3c 黑色虚线) 进行对

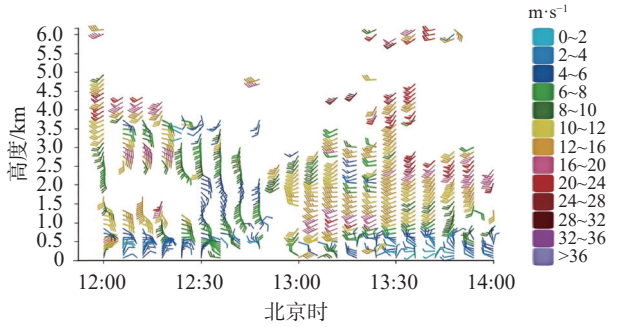


图 2 2024 年 4 月 29 日 12:00—14:00 长沙风廓线雷达水平风时间-高度剖面图

Fig. 2 Time-altitude profile of horizontal wind from wind profile radar at Changsha from 12:00 BT to 14:00 BT on April 29, 2024

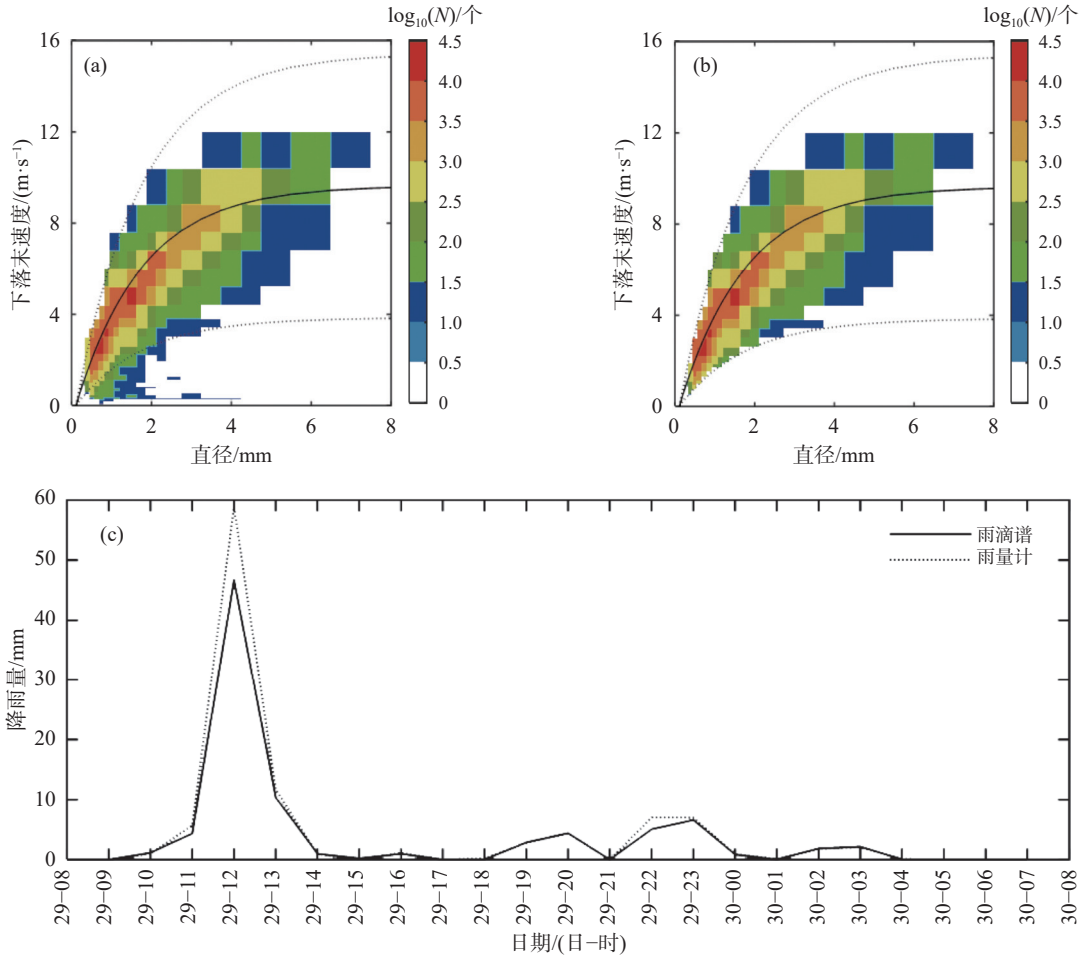


图 3 2024 年 4 月 29 日 08:00—30 日 08:00 长沙雨滴谱仪质控前 (a)、质控后 (b) 降水粒子谱分布及雨滴谱仪和雨量计的小时降雨量对比 (c) (*N* 表示粒子个数,黑色实线和黑色虚线分别代表 Altas 等 (1973) 提出的理论下落末速度经验公式及其对应的±60% 阈值)

Fig. 3 Raindrop spectrum data of Changsha (a) before quality control, (b) after quality control, (c) comparison of hourly rainfall between rain gauge and raindrop spectrum from 08:00 BT on April 29 to 08:00 BT on April 30, 2024 (*N* represents the number of particles, as well as the black solid line and the black dashed line represent the empirical formula of theoretical falling velocity proposed by Altas et al. (1973) and its corresponding value of ± 60%, respectively)

比发现，质控后的雨滴谱小时降雨量虽然在强降雨阶段略有低估，但二者的时间序列演变基本一致，相关系数超过 0.99，因此认定质控后的雨滴谱仪数据可信度较高。

3.2 雨滴谱时间演变特征

从雨滴数浓度 ($\log_{10}N(D)$)、雨滴谱分钟降雨量 (R_{min}) 和不同直径 (D) 对应的粒子个数 (N)、降雨强度 (R)、反射率因子 (Z)、质量加权平均直径 (D_m) 和广义截距参数 ($\log_{10}N_w$) 随时间的变化可知，不同 D 对应的 $\log_{10}N(D)$ 随时间的变化 (图 4a) 与 R_{min} 的时间演变 (图 4b 绿柱) 基本一致，与 D<1 mm 粒子数的变化 (图 4b 蓝色实线) 相比，R_{min} 和 D>1 mm 粒子数的变化 (图 4b 红色虚线) 基本重合，说明 D>1 mm 的雨滴对降雨贡献更大。11:00—11:54，降雨相对连续平稳，雨滴谱微物理参数振幅较小，此时 $\log_{10}N(D)$ 的最大值是 2.62 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$，最大雨滴 D 仅为 3.25 mm，R (图 4c 红色实线)、Z (图 4c 蓝色实线)、D_m (图 4d 红色实线) 和 $\log_{10}N_w$ (图 4d 蓝色实线) 的极大值分别为 5.05 $mm\cdot h^{-1}$、37.37 dBz、2.17 mm 和 3.67 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$。11:55—13:18 是对流最强阶段，降雨迅速发展且随时间波动剧烈，R、Z、D_m 和 $\log_{10}N_w$ 的极大值分别为 282.95 $mm\cdot h^{-1}$、58.63 dBz、3.63 mm 和 4.53 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$；期间 R_{min} 有多个峰值分布，最大值 (4.72 mm) 出现在 29 日 12:38，该时刻雨滴最大 D 和 $\log_{10}N(D)$ 最大值分别为 5.50 mm 和 4.02 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$，D<1.187 mm 雨滴的 $\log_{10}N(D)$ 大于 3.50 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$，D<2.125 mm 雨滴的 $\log_{10}N(D)$ 仍大于 3.00 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$；13:19 开始降雨明显减弱，此阶段雨滴最大 D 和 $\log_{10}N(D)$ 的最大值仍有 4.75 mm 和 2.71$mm^{-1}\cdot m^{-3}$，但分钟降雨量最大值仅为 0.54 mm。可见，当降雨增强时，不同雨滴 D 对应的 $\log_{10}N(D)$ 和 R、Z 波动剧烈，但 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 的变化相对平稳，且高浓度的中小雨滴数浓度和一定比例的大雨滴可在一定程度导致局地高效强降雨。

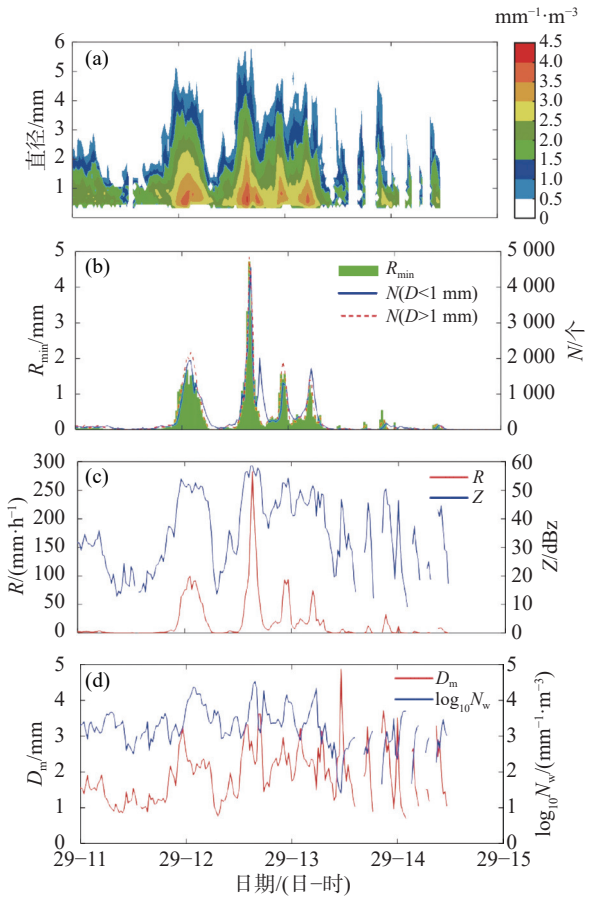


图 4 2024 年 4 月 29 日 11:00—15:00 雨滴数浓度 $\log_{10}N(D)$ (a)、雨滴谱分钟降雨量 R_{min} 和不同直径粒子个数 N (b)、降雨强度 R 和反射率因子 Z (c)、质量加权平均直径 D_m 和广义截距参数 $\log_{10}N_w$(d) 时序图

Fig. 4 Temporal distribution of (a) number concentration ($\log_{10}N(D)$), (b) raindrop spectrum minute precipitation (R_{min}) and the number of particles (N) with different diameters, (c) precipitation intensity (R) and reflectivity factor (Z), (d) the mass-weighted diameter (D_m) and generalized intercept parameter ($\log_{10}N_w$) from 11:00 BT to 15:00 BT on April 29, 2024

3.3 雨滴谱统计特征

统计可知，“4·29”过程最强阶段包含对流云降水样本 87 min 和层状云降水样本 41 min，两者对强降雨阶段降雨量的贡献率分别为 95.08% 和 1.67%，说明对流云降水在强降雨阶段占主导地位，层状云降水对降雨量的贡献较小。下文将进一步对强降雨阶段的对流云降水和层状云降水雨滴谱特征进行统计分析，以深入了解降水的微物理特征。

3.3.1 尺度谱分布特征

根据强降雨阶段的平均尺度谱分布 (图略)，发现层状云降水和对流云降水均为单峰谱，$\log_{10}N(D)$ 随 D 增大均先增大后减小，峰值 D 均为 0.562 mm；不同之处在于对流云降水 D 和 $\log_{10}N(D)$ 的最大值分别为 7.5 mm 和 3.27 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$，而层状云降水 D 和 $\log_{10}N(D)$ 的最大值分别仅为 3.75 mm 和 2.18 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$，对流云降水平均谱的谱宽和各粒径的 $\log_{10}N(D)$ 均远大于层状云降水。

3.3.2 D_m 和 N_w 的分布特征

雨滴谱微物理参量 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 能在一定程度反映成云致雨机理 (冯婉悦等, 2021)。图 5 为“4·29”过程最强阶段不同降雨类型的 D_m-$\log_{10}N_w$ 分布，分析可知，Bringi 等 (2003) 提出的层云-对流分界线并不足以准确区分不同降雨类型的 D_m-$\log_{10}N_w$ 散点分布，因为 Bringi 等 (2003) 的研究对象是美国湿季对流，而以往的研究多数选取研究时段内的 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 平均值 (Wu et al., 2019)；对流云降水 (图 5 红

色圆点) 粒子的 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 分别集中在 0.96~3.71 mm 和 1.65~4.53 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$, 主要位于“海洋性”对流落区右侧, 对流云降水粒子的 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 平均值 (图 5 黄色五角形) (2.31 mm, 3.50 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$) 位于“大陆性”对流落区; 层状云降水 (图 5 蓝色圆点) D_m 和 $\log_{10}N_w$ 的值域范围明显小于对流云降水, 其具体分布范围分别在 0.90~2.66 mm 和 1.66~3.67 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$, 层状云降水粒子的 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 平均值 (图 5 黄色三角形) (1.43 mm, 3.18 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$) 位于层状云降水-对流云降水的分界线左侧, 层状云降水的平均 D_m 较小, 说明层状云降水往往发生在相对稳定的状态, 而对流云降水通常包含较强冷凝-碰撞-凝聚过程, 有利于冰雹和霰形成, 易产生较大粒径 (Houze, 1997)。本文强降雨阶段对流云降水的平均 D_m- $\log_{10}N_w$ 分布明显偏向大陆性对流 (较大的 D_m 和较小的 $\log_{10}N_w$), Zhang 等 (2019) 研究的珠海夏季对流云降水平均 D_m- $\log_{10}N_w$ 分布 (图 5 紫色五角形) 介于海洋性对流和大陆性对流, 与本文强降雨阶段的对流云降水相比, D_m 略小但 $\log_{10}N_w$ 较大, 因为此处暖雨频发; 张秋晨和王文青 (2023) 以垦利、平阴、胶南分别代表山东黄河三角洲、内陆、沿海代表站点研究山东省不同区域降雨雨滴谱特征时发现, 代表山东内陆的平阴对流云降水 (图 5 蓝色五角形) 的平均 D_m 与本例类似而 $\log_{10}N_w$ 较大; 李晓惠等 (2024) 研究的华南前汛期强降雨雨滴谱 (图 5 绿色五角形) 结果表明, 暖区对流云降水的平均 D_m- $\log_{10}N_w$ 有显著海洋性对流特征, 表现为较小的 D_m 和更大的 $\log_{10}N_w$。

图 6 给出强降雨阶段不同类型降雨 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 随 R 的变化及其概率密度函数 (PDF) 分布, 分析可知 D_m 随 R (图 6a) 增大而增大且平衡状态下的 D_m 将趋于相对稳定, 用幂指数关系 ($y=ax^b$) 对层状云降水和对流云降水的 D_m-R 进行拟合得到 D_m=$1.38R^{0.20}$ 和 D_m=$1.75R^{0.09}$, 平衡状态下的 D_m 大于郑州的 D_m (2.6 mm) (张哲等, 2022), 也大于南京的 D_m (1.8~2.0 mm) (Wen et al., 2019) 和北京的 D_m (2.0~2.5 mm) (Ma et al., 2019); $\log_{10}N_w$ 也随 R (图 6b) 增大而增大, 层状云降水和对流云降水 $\log_{10}N_w$-R 幂指数关系依次为 $\log_{10}N_w$ =$3.18R^{0.01}$ 和 $\log_{10}N_w$=$2.89R^{0.06}$, 平衡状态下的 $\log_{10}N_w$ 接近 4.13 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$; 层状云降水的 PDF 分布常有多个极值而对流云降水的 PDF 分布多为单峰谱, 且对流云降水 (图 6 红色实线) 的 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 值域、平均值均较大, 说明对流云降水的微物理结构存在显著的非均匀性。

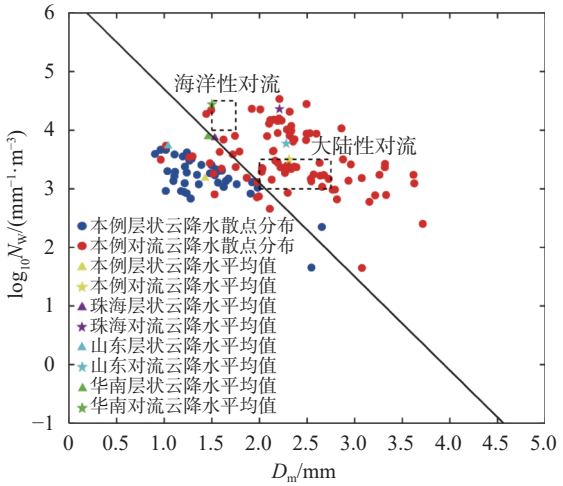


图 5 强降雨阶段的层状云降水和对流云降水质量加权平均直径 (D_m)-广义截距参数 ($\log_{10}N_w$) 分布图 (黑色实线为 Bringi 等 (2003) 提出的层云-对流分界线; 黑色虚线矩形框为 Bringi 等 (2003) 提出的海洋性对流范围或大陆性对流范围)

Fig. 5 Scatter plot of D_m and $\log_{10}N_w$ for stratiform cloud precipitation and convective cloud precipitation during the heavy precipitation stage (The black solid line represents the boundary line for stratiform clouds defined by Bringi et al. (2003). The Black dashed rectangles marks represents the maritime or continental convective range defined by Bringi et al.(2003))

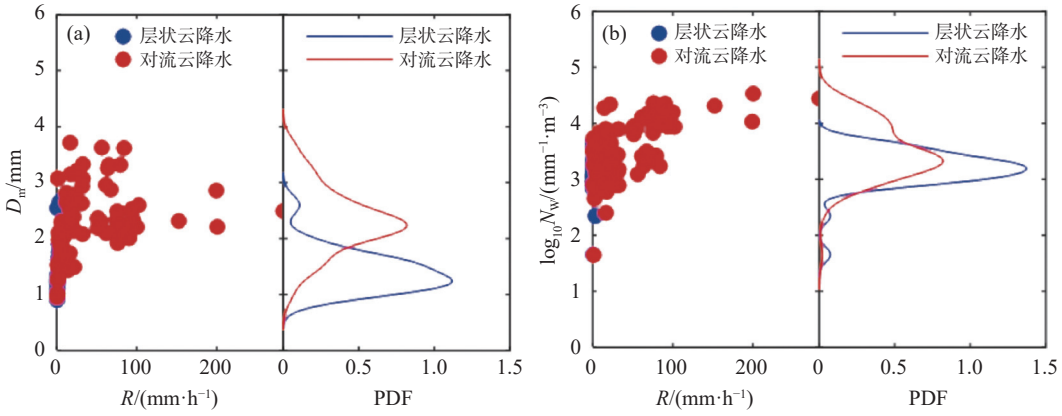


图 6 强降雨阶段质量加权平均直径 D_m (a) 和广义截距参数 $\log_{10}N_w$ (b) 随雨强 R 的变化及其概率密度函数 PDF 分布

Fig. 6 Variation of (a) mass-weighted diameter (D_m) and (b) generalized intercept parameter ($\log_{10}N_w$) with precipitation intensity, (b) probability density functions (PDF) distribution during heavy precipitation stages

4 双偏振雷达特征

对组合反射率因子 (CR) 演变进行分析可知，“4·29”过程是受中尺度对流系统 (MCSs) 影响所致。11:17 MCSs 对应有 A、B 两个强对流单体 (以下简称单体) 呈东—西向排列，在引导气流的作用下逐渐东移，CR 强中心达 60 dBz (图 7a)，A、B 单体对应的 55~60 dBz 强回波有 K_{DP} 大值区 (≥1.7 °·km^{-1}) 与之对应 (图 7b)。11:43，A、B 单体合并，B 单体后侧有新单体 C 生成，强度仅为 35~40 dBz (图 7c)，C 单体对应的 K_{DP} 明显偏弱，仅出现 1~2 个像素点的 0.33~0.5 °·km^{-1} (图 7d)；12:11，C 单体的 CR 中心强度增至 45~50 dBz (图 7e)，对应 K_{DP} 增至 0.75 °·km^{-1}，发展快 (图 7f)；12:40，C 单体并入 A、B 单体且 MCSs 中有强弓状回波生成，C 单体后侧源源不断有新生单体 D 生成 (图 7g)，D 单体和此前的 C 单体类似，D 单体的 K_{DP} 明显偏弱，随着强弓状回波扫过长沙市区，暴雨、雷暴大风、小冰雹天气发生，弓状回波的 K_{DP} 达 2.4~3.1 °·km^{-1}，甚至出现了 7 °·km^{-1} (图 7h)，说明数浓度大；13:08，随着 MCSs 东移北上，弓状回波逐渐演变成块状 (图略)，对应 K_{DP} 仍有 2.4~3.1 °·km^{-1} (图略)，给黄兴镇带来 10 级雷暴大风，且连续 20 min 极大风速维持在 26.5 m·s^{-1}。

对分钟降雨量达到 5 mm 的 13 个站 10 km 范围内 0.5°仰角 K_{DP} 值进行统计 (表 1)，分析发现分钟降雨量达到 5 mm 时段均有 3.1 °·km^{-1} 的 K_{DP} 值经过，分钟降雨量达到 6 mm 的天马站有 3.1~7.0 °·km^{-1} 的 K_{DP} 值经过，0.5°仰角 13 站对应高度均在 1 km 左右。因此在保证双偏振数据质量可靠的情况下，1 km 左右高度出现 K_{DP} 大值区 (≥3.1 °·km^{-1}) 可作为强降雨的一个指标。

莲花站出现强对流天气最集中时段为 29 日 12:30—13:00，其中 12:34—12:43 分钟降雨量均达到 1 mm、12:42—13:00 分钟极大风速均达 23.7 m·s^{-1}、12:38—12:42 出现小冰雹，因此对 12:40 的双偏振参量进行分析。0.5°仰角水平反射率因子 (Z_H) (≥45 dBz) 回波成弓状，弓状回波前侧 Z_H 梯度强，强中心达 60 dBz (图 8a)；莲花站位于弓状回波的曲率最大处 (图 8a 白色圆圈位置)，Z_H 强中心 (≥60 dBz) 对应的回波顶高 (TOP)、垂直积分液态水含量 (VIL) 明显偏强，分别达 14 km、50 kg·m^{-2} (图 8c—d)，说明对流发展旺盛且含水量高。0.5°仰角 Z_H (≥60 dBz) 对应 Z_{DR}、K_{DP} 分别达 3 dB (图 8b)、3.1 °·km^{-1} (图 7h)。

沿 MCS$_S$ 移动方向经过莲花站作垂直剖面 (剖面点为图 8 中 AB 所在位置)。Z_H 垂直剖面 (图 9a) 显示，有多个对流单体呈东—西向排列，其中右侧的强单体对应弓状回波 (图 9a 方框所示)，60 dBz 强回波扩展至 7 km 高度 (超过-10 ℃ 对应的高度)，左侧有多个对流单体发展，强中心强度为 45~50 dBz。Z_{DR} 垂直剖面 (图 9b) 显示，弓状回波对应的 Z_{DR} 柱扩展至 5 km 以上；随着上升气流携带水汽向上输送，会导致雨滴碰并增长、含水量进一步增大；左侧的对流单体对应着 Z_{DR} 柱最高扩展到 7 km 高度，虽然左侧对流单体强度偏弱，但为发展中的对流单体 (潘佳文等, 2023)。湿层零度层高度 (WBZ) 以上有 Z_{DR} 负值区，对应区域 Z_R 达 60 dBz，说明有冰雹在该处碰并

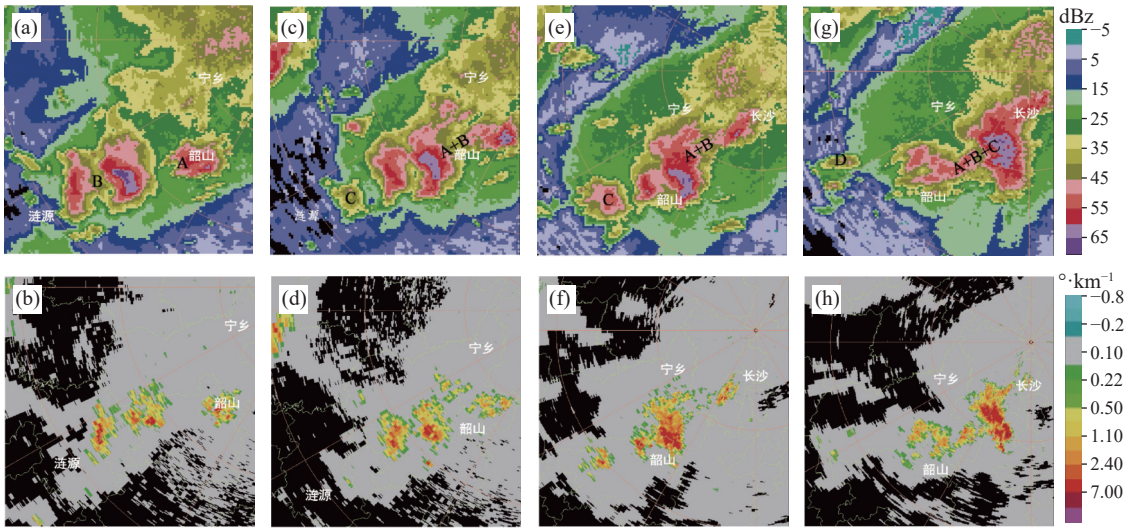


图 7 2024 年 4 月 29 日长沙雷达 11:17 (a)、11:43 (c)、12:11 (e)、12:40 (g) 组合反射率因子 (CR) 及 11:17 (b)、11:43 (d)、12:11 (f)、12:40 (h) 差分相移率 (K_{DP})

Fig. 7 Composite reflectivity factors (CR) from Changsha Radar at (a) 11:17 BT, (c) 11:43 BT, (e) 12:11 BT, (g) 12:40 BT and specific differential phase (K_{DP}) at (b) 11:17 BT, (d) 11:43 BT, (f) 12:11 BT, (h) 12:40 BT on April 29, 2024

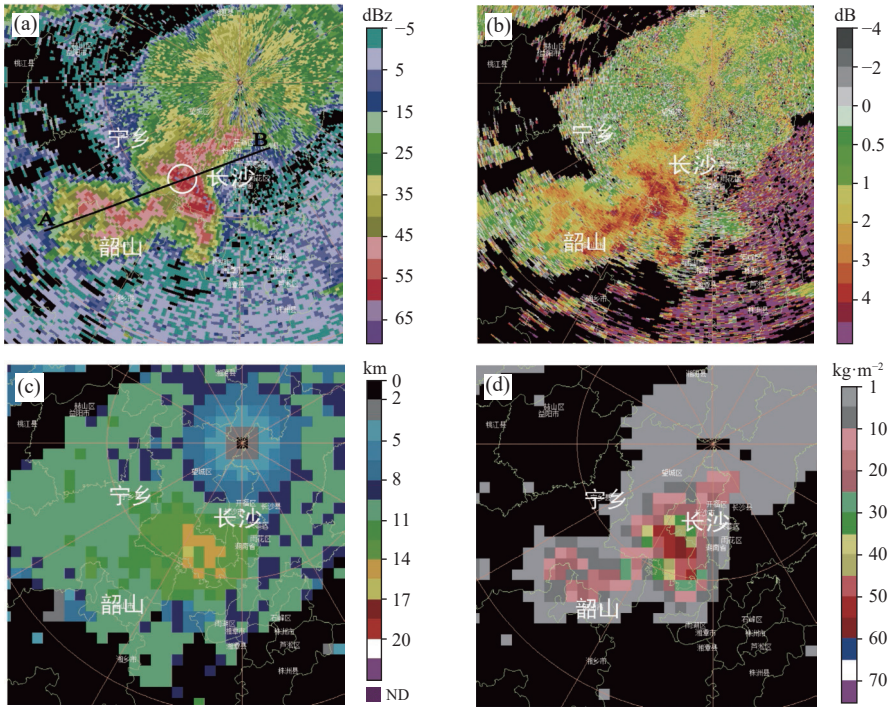


图 8 2024 年 4 月 29 日 12:40 长沙雷达 0.5°仰角水平反射率因子 Z_H (a)、差分反射率因子 Z_{DR} (b)、回波顶高 TOP (c)、垂直积分液态水含量 VIL (d) (a 图中黑直线为剖面所在位置, 白色椭圆为莲花站所在位置)

Fig. 8 (a) Reflectivity factor Z_H, (b) differential reflectivity Z_{DR}, (c) top height of the storm TOP, and (d) vertically integrated liquid water content VIL at 0.5° elevation from Changsha radar station at 12:40 BT on April 29, 2024 (The black line denotes the location of the profile, the white ellipse denotes the location of the Lianhua Station, and the black curve denotes the location of the Z_{DR} arc in Fig. 8a)

增长; WBZ 以下均为 Z_{DR} 正值区域, 说明冰晶水凝物降至融化层后融化成雨滴; Z_{DR} 正值区域有 3.5 dB 以上的大值区, 局地达 5 dB (图 9b 方框所示), 说明该区域有扁平大雨滴。K_{DP} 垂直剖面 (图 9c) 显示, WBZ 高度以下有宽广 K_{DP} 大值区 (≥1.7 °·km^{-1}), 最强达 3.1 °·km^{-1} (图 9c 方框所示), 说明雨滴的数浓度大。CC 垂直剖面 (图 9d) 显示, CC 大部分为 0.97~0.99, 但出现了小范围 0.84~0.90 低值区 (图 9d 方框所示), 该低值区正好和 K_{DP} 空洞对应, 说明空洞区域粒子均一性差。综合双偏振雷达剖面显示, 2 km 以下 Z_H 强回波中心 (≥60 dBz) 对应 Z_{DR}、K_{DP} 分别达 3 dB、3.1 °·km^{-1}, 说明即将降至地面的雨滴为扁平大雨滴且数浓度相当高, 对应实况 12:34—12:43 连续 10 min 分钟降雨量达 1 mm、12:37—12:41 连续 4 min 分钟降雨量达 3 mm, 最强达 5 mm (12:38), 降雨极端性特征明显。

唐明晖等 (2023a)、Romine 等 (2008) 等指出低层 K_{DP} 显著大值区若位于 Z_H 大值区 (≥50 dBz) 内, 则 K_{DP} 大值区与下沉气流有较好对应关系, 预示着强降雨拖曳作用会加剧大风的产生, 对比莲花站分钟降雨量、极大风速演变 (图 1d) 可知, 1 mm 分钟降雨量出现的时间先于雷暴大风, 12:38 分钟降雨量达 5 mm, 12:42—13:00 分钟极大风速均为 23.7 m·s^{-1}, 说明长沙市区的雷暴大风和强降雨拖曳密切相关, 也说明持续分钟降雨量达到 1 mm 的拖曳作用可导致雷暴大风。

5 闪电特征

已有研究表明, 闪电活动不仅与降雨强度、降雨落区密切相关, 且对强降雨出现时间有一定指示意义, 如张腾飞等 (2011) 对云南汛期强对流暴雨闪电特征进行分析指出, 闪电频数峰值与降雨量峰值同相或者超前 1~2 h; 魏庆等 (2023) 在四川西部一次极端短时强降水过程中, 指出闪电频次峰值超前强降雨峰值 0.5~1 h。因此, 下面选取降雨最强的长沙市区来分析闪电对强降雨的指示作用。

图 10 给出长沙市区 12:00—14:00 逐 10 min 平均降雨量和闪电频次、地闪频次、正/负闪频次及其占比时序图, 其中某时刻闪电频次和平均降雨量分别为该时刻前 10 min 时段内闪电累计次数和区域平均降雨量。分析可知, 降雨呈单峰结构, 12:40 开始增强, 13:00 达到峰值, 10 min 平均降雨量达 5.1 mm, 13:40 后逐渐减弱, 平均降雨量超过 2 mm 的时段出现在 12:50—13:20; 总闪和正闪频次演变较为一致, 均在 12:50 达到峰值, 较降雨峰值提前 10 min, 区别在于总闪在 13:20 还有一个次峰值; 地闪、负闪演变

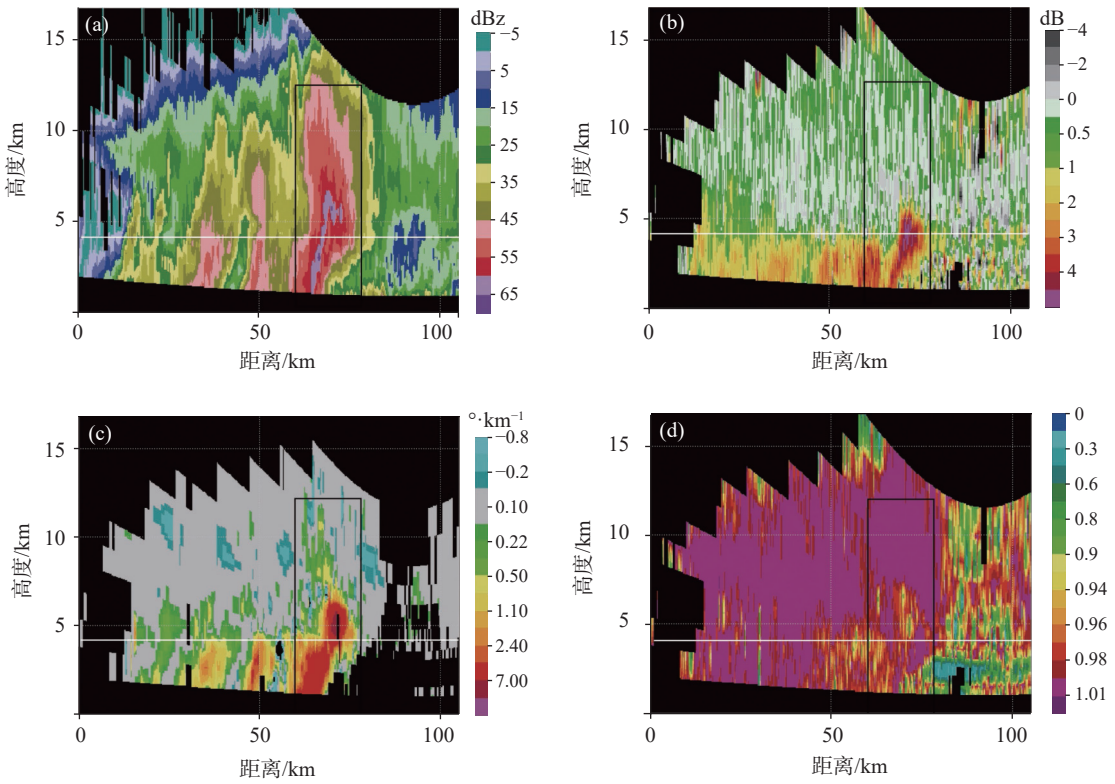


图 9 2024 年 4 月 29 日 12:40 沿图 8a 中 AB 线所作的反射率因子 Z_H (a)、差分反射率因子 Z_{DR} (b)、差分相移率 K_{DP} (c)、差分相移率相关系数 CC (d) 垂直剖面图 (黑色方框为弓形回波所在的区域,白线为 WBZ 所在高度)

Fig. 9 Vertical profile of the (a) reflectivity factor Z_H, (b) differential reflectivity Z_{DR}, (c) specific differential phase K_{DP}, and (d) correlation coefficient CC along the solid line AB in Fig. 8a at 12:40 BT on April 29, 2024 (The black box indicates the bow echo, the white line denotes the WBZ height)

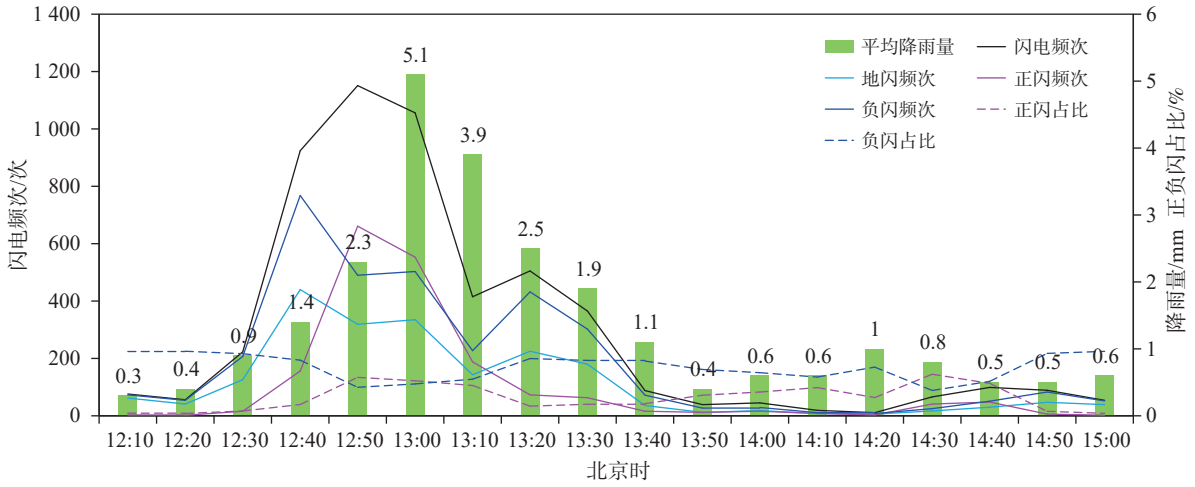


图 10 2024 年 4 月 29 日 12:00—14:00 长沙市区逐 10 min 平均降雨量、闪电频次、地闪频次、正/负闪频次及其占比时序图

Fig. 10 Time series evolution of 10 minutes average precipitation, total flash frequency, ground flash frequency, positive/negative flash frequency, and their ratios in Changsha urban area from 12:00 BT to 14:00 BT on April 29, 2024

趋势较为一致, 均呈多峰特征, 12:40 出现第一个峰值, 较降雨峰值提前 20 min, 13:00、13:20 另有两个次峰值。综合来看, 闪电频次与降雨强度有较好的对应关系, 强降雨出现在闪电快速跃增后的 10~20 min, 其中负闪、地闪的预警提前量较正闪更大。分阶段来看, 降雨最强时段 (12:50—13:10) 正闪频次快速增加, 占比约 50%~80%; 降雨发展和减弱时段负闪、地闪占比增加。这是由于正电荷通常在云的上部, 对流发展旺盛时, 强烈的上升气流会将更多的冰晶和电荷粒子带入云的上部, 进一步加剧正电荷累积, 且与过程伴随小冰雹、雷暴大风有关。

图 11 给出长沙市区 3 个降雨最强时次 (13:00、13:06、13:12) 闪电的空间分布。可见 13:00 闪电密集区主要集中在长沙市区的开福区、芙蓉区及雨花区,

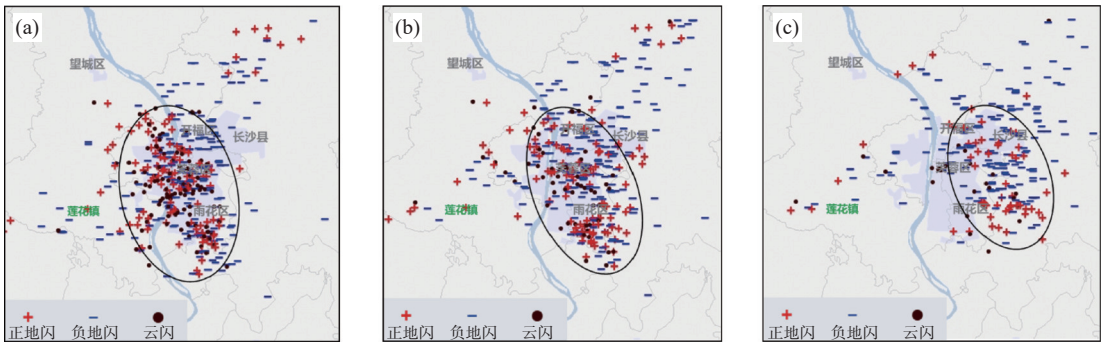


图 11 2024 年 4 月 29 日 13:00 (a)、13:06 (b)、13:12 (c) 长沙市区闪电空间分布 (黑色椭圆为闪电密集区)

Fig. 11 Spatial distribution of lightning flashes in Changsha urban area at (a) 13:00 BT, (b) 13:06 BT, and (c) 13:12 BT on April 29, 2024 (The black ellipse in the picture represents the lightning-intensive area)

未影响到长沙县南部, 较其他 2 个时次, 该时次闪电最为密集且云闪占比更高, 与图 10 最强降雨时次对应; 13:06 闪电密集区略有东移, 闪电密度略有减小, 长沙县南部闪电快速发展; 13:12 闪电密集区移至长沙县南部, 但闪电区域和强度均较前 2 个时次明显减小, 与该时次降雨减弱相对应。

结合 13:00 长沙双偏振雷达 0.5°、2.4°仰角 Z_{DR}、K_{DP} 参量 (图 12) 分析可知, 闪电主要出现在 Z_{DR}>0、K_{DP}>0 的区域内, 二者大值区与闪电密集区有较好的一致性, 这与阮悦等 (2022)、贺宏兵等 (2015) 的研究结论基本一致。0.5°仰角 Z_{DR} 大值区位于长沙县东部, 与 13:06 闪电密集区对应较好, 2.4°仰角 Z_{DR} 大值区较 0.5°仰角更偏东, 与 13:12 闪电密集区对应较好, K_{DP} 也有类似规律。说明双偏振雷达能对闪电进行提前预警, 且高仰角的预警提前量更大。结合强度来看, Z_{DR}> 2 dB、K_{DP}>0.5 °·km^{-1} 可作为强雷电的预警指标。

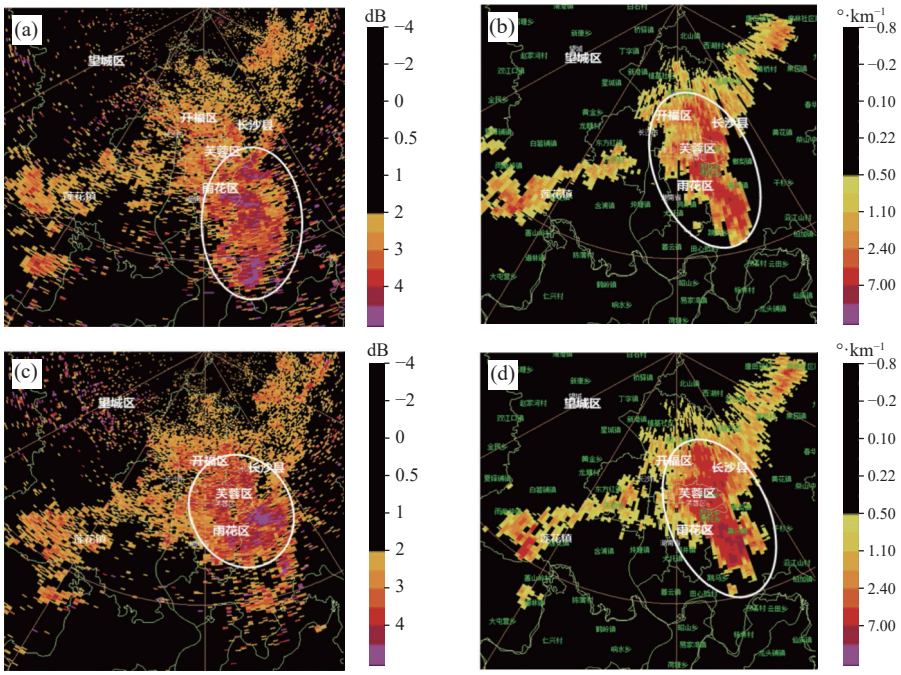


图 12 2024 年 4 月 29 日 13:00 长沙雷达 0.5°仰角 (a、c) 和 2.4° (b、d) 仰角差分反射率因子 Z_{DR} (a、b)、差分相移率 K_{DP} (c、d) 图 (白色椭圆形为大值区)

Fig. 12 The (a, b) reflectivity factor Z_{DR} and (c, d) phase shifting rate K_{DP} of Changsha Radar at (a, c) 0.5 ° and (b, d) 2.4 ° elevation angles at 13:00 BT on April 29, 2024 (The white ellipse represents the high-value area)

6 结论与讨论

利用风廓线雷达、激光雨滴谱仪、多普勒双偏振天气雷达、闪电定位仪等多源资料对 2024 年长沙“4·29”过程最强阶段的中小尺度特征和成因进行分析, 得出如下主要结论:

(1) 该过程暴雨覆盖范围广、局地降雨量大、分钟雨强极端, 并伴有强雷电、区域性雷暴大风和局地小冰雹, 其中长沙市区为对流最强区域, 有 13 站最大分钟降雨量达 5 mm, 莲花站最大分钟降雨量超过

“21.7”河南特大暴雨最大分钟降雨量。

(2) 不同直径 (D) 对应的 $\log_{10}N(D)$ 随时间的变化与雨滴谱分钟降雨量的时间演变基本一致，D>1 mm 的雨滴对降雨贡献更大；高浓度的中小 $\log_{10}N(D)$ 和一定比例的大雨滴可在一定程度导致局地强降雨；对流云降水对强降雨贡献较大，层状云降水对强降雨贡献较小，它们的平均谱均为单峰谱，对流云降水的雨滴最大 D 和各粒径对应的 $\log_{10}N(D)$ 均显著高于层状云降水；对流云降水的平均 D_m-$\log_{10}N_w$ 偏向“大陆性对流”，与降雨强度的变化成正比，说明其粒子较活跃。

(3) MCSs 中多个对流单体合并、增强发展，且后侧不断有单体新生补充，MCSs 中有强弓状回波生成，强弓状回波扫过长沙市区，导致暴雨、雷暴大风、小冰雹等剧烈天气发生；分钟降雨量达到 5 mm 的区域其 0.5°仰角对应的 K_{DP} 达到 3.1 °·km^{-1}；近地面 Z_{DR} 值高 (达 3 dB)、K_{DP} 值强 (达 3.1 °·km^{-1})、CC 值大 (0.97~0.99)，说明降至地面为数浓度高的扁平大雨滴；1 mm 分钟降雨量出现的时间先于雷暴大风，说明强降雨拖曳作用加剧了雷暴大风。

(4) 降雨峰值出现在闪电快速跃增后的 10~20 min，其中负闪、地闪的预警提前量更大，降雨最强时段正闪占比增加，为 50%~80%。此次过程双偏振参量 Z_{DR}>2 dB、K_{DP}>0.5 °·km^{-1} 可作为强雷电发布的预警指标。

本文主要利用多源观测资料对长沙大暴雨过程的中小尺度特征进行了初步分析，但仍有诸多科学问题值得深入研究。如，如何基于雨滴谱特征进行降雨量的定量计算？降雨最强时段雨滴谱与双偏振参量有怎样的对应关系？强降雨出现时间和风廓线雷达资料显示的 2 km 以上风速增大的时间有偏差，原因何在？后续可采用更精细的逐分钟资料以及数值模拟等手段，针对上述问题开展深入研究。

参考文献 (References):

成勤,张科杰,夏羽,等.2020.湖北省 2020 年“6·27”特大暴雨过程闪电与降水关系分析[J].暴雨灾害,39(6):620−628. Cheng Q, Zhang K J, Xia Y, et al. 2020. Analysis of relationship between lightning and rainfall during ‘6·27’ super rainstorm of Hubei Province in 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,39(6):620−628 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.06.010

程周杰,刘宪勋,朱亚平.2009.双偏振雷达对一次水凝物相态演变过程的分析[J].应用气象学报,20(5):594−601. Cheng Z J, Liu X X, Zhu Y P. 2009. A process of hydrometeor phase change with dual-polarimetric Radar [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 20(5):594−601 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20090511

崔春光,王晓芳,付志康.2013.多源探测资料在一次非线状 MCS 分析中的综合应用[J].气象,39(5):556−566. Cui C G, Wang X F, Fu Z K. 2013. Synthetic application of multiple intensified observation data in the analysis of nonlinear mesoscale convective system [J]. Meteorological Monthly,39(5):556−566 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2013.05.003

杜牧云,赵娴婷,周伶俐,等.2022.鄂西南一次早春强对流过程的多源资料分析[J].暴雨灾害,41(2):174−183. Du M Y, Zhao X T, Zhou L L, et al. 2022. Analysis of an early spring convective weather event in southwest of Hubei province based on multi-source data [J]. Torrential Rain and Disasters,41(2):174−183 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.02.008

冯婉悦,王智敏,杨莲梅,等.2021.乌鲁木齐两种类型降水的雨滴谱特征[J].沙漠与绿洲气象,15(3):55−61. Feng W Y, Wang Z M, Yang L M, et al. 2021. Raindrop size distribution of two types of precipitation in Urumqi [J]. Desert and Oasis Meteorology,15(3):55−61 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2021.03.007

顾佳佳,武威.2017.2016 年“7·9”豫北特大暴雨过程的中尺度特征分析[J].暴雨灾害,36(5):440−452. Gu J J, Wu W. 2017. Mesoscale characteristics of an excessive heavy rain event in northern Henan on 9 July 2016 [J]. Torrential Rain and Disasters,36(5):440−452(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.05.006

葛黎黎,吕国真,赵桂香,等.2023.山西晋城“7·11”暴雨过程雨滴谱特征研究[J].沙漠与绿洲气象,17(3):17−25. Ge L L, Lu G Z, Zhao G X, et al. 2023. Raindrop size distribution characteristics of “7.11” rainstorm in Jincheng, Shanxi [J]. Desert and Oasis Meteorology, 17(3):17−25 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.03.003

贺宏兵,胡明宝,李超,等.2015.双偏振多普勒天气雷达监测雷电的分析[J].解放军理工大学学报 (自然科学版),15(2):184−190. He H B, Hu M B, Li C, et al. 2015. Analysis of lightning detection with dual-polarization Doppler weather radar [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition),15(2):184−190 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1009−3443.2013.04.070

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

李晓惠,冯璐,叶朗明,等.2024.华南前汛期强降水过程雨滴谱特征研究[J].暴雨灾害,43(6):637−647. Li X H, Feng L, Ye L M, et al. 2024. Research on raindrop size distributions of strong precipitation events during the South China pre-flood season [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):637−647 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−075

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]. Meteorological Monthly,43(9):1084−1094 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.09.006

潘佳文,徐鸣一,吴举秀,等.2023.基于对流风暴结构的双偏振雷达 Z_{DR} 柱识别及应用研究[J].气象学报,81(6):943−957. Pan J W, Xu M Y, Wu J X, et al. 2023. Identification of the Z_{DR} column in dual polarization radar observations based on convective storm structure and related applications [J]. Acta Meteorologica Sinica,81(6):943−957 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20230050

阮悦,黄慧琳,魏鸣,等.2022.福建冰雹云三维闪电及双偏振雷达回波特

征分析[J].气象,48(4):442−451. Ruan Y, Huang H L, Wei M, et al. 2022. Analysis of three dimensional lightning and dual-polarization radar echo characteristics of hail cloud over Fujian [J]. Meteorological Monthly,48(4):442−451 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.011501

唐明晖,陈龙,陈鹤,等.2023.基于双偏振雷达资料的洞庭湖区一次强对流过程的分阶段特征分析[J].暴雨灾害,42(6):692−703. Tang M H, Chen L, Chen H, et al. 2023. Staged characteristics analysis of a severe convection over the Dongting Lake area based on dual-polarization doppler weather radar data [J]. Torrential Rain and Disasters,42(6):692−703 (in Chinese). doi:10.12406/bvzh.2022−170

唐明晖,俞小鼎,王青霞,等.2023.湖南一次雨雪天气降水相变的环境条件与双偏振雷达特征分析[J].暴雨灾害,42(3):293−302. Tang M H. Yu X D, Wang Q X, et al. 2023. Analysis on environmental conditions and dual-polarization radar characteristics of the phase transformation of precipitation in a rain and snow event in Human [J]. Torential Rain and Disasters,42(3):293−302 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−065

魏庆,周威,吴容,等.2023.盆地西部一次极端短时强降水过程的多源资料分析[J].高原山地气象研究,43(2):19−27. Wei Q, Zhou W, Wu R, et al. 2023. Application analysis of multi-source observation data in local extreme short-time heavy rain [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,43(2):19−27 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.02.003

张秋晨,王文青.2023.山东省三个不同区域降水雨滴谱特征的对比分析[J].暴雨灾害,42(5):585−594. Zhang Q C, Wang W Q. 2023. Comparison study of raindrop size distribution in three regions of Shandong Province [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):585−594 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−187

张腾飞,段旭,张杰,等.2011.云南强对流暴雨的闪电和雷达回波特征及相关性[J].热带气象学报,27(3):379−386. Zhang T F, Duan X, Zhang J, et al. 2011. Characteristcs of lightning and radar echoes and relations between them for strong convective rainstorm in Yunnan [J]. Journal of Tropical Meteorology,27(3):379−386 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−4965.2011.03.011

张哲, 戚友存, 李东欢, 等.2022.2021 年郑州“7·20”极端暴雨雨滴谱特征及其对雷达定量降水估测的影响[J].大气科学,46(4):1002−1016. Zhang Z, Qi Y C, Li D H, et al. 2022. Raindrop size distribution characteristics of the extreme rainstorm event in Zhengzhou 20 July, 2021 and its impacts on radar quantitative precipitation estimation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(4):1002−1016 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2201.21237

周黎明,王庆,李芳.2017.山东不同天气系统下暴雨雨滴谱特征分析[J]. 自然灾害学报,26(6):217−223. Zhou L M, Wang Q, Li F. 2017. Analysis on characteristics of raindrop size distribution of rainstorm under different weather system in Shandong Province [J]. Journal of Natural Disasters,26(6):217−223 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2017.0624

Altas D, Srivastava R C, Sekhon R S. 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. Reviews of Geophysics, 11(1):1−35. doi:10.1175/1520−0469(1974)031

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

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

Houze Jr R A. 1997. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,78(10):2179−2196. doi:10.1175/1520−0477(1997)0782

Ma Y, Ni G H, Chandrasekar V, et al. 2019. Statistical characteristics of raindrop size distribution during rainy seasons in the Beijing urban area and implications for radar rainfall estimation [J]. Hydrology and Earth System Sciences,23(10):4153−4170. doi:10.5194/hess−23−4153−2019

Romine G S, Burgess D W, Wilhelmson R B. 2008. A dual–polarization–radar–based assessment of the 8 May 2003 Oklahoma city area tornadic supercell [J]. Monthly Weather Review,136(8): 2849−2870. doi:10.1175/2008mwr2330.1

Wen L, Zhao K, Zhang G F, 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]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,121(5):2265−2282. doi:10.1002/2015JD024160

Wu Z, Zhang Y, Zhang L, et al. 2019. Characteristics of summer season raindrop size distribution in three typical regions of western Pacific [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,124(7):4054−4073. doi:10.1029/2018JD029194

Zhang A, Hu J, Chen S, et al. 2019. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the monsoon season observed in southern China [J]. Remote Sensing,11(4):432. doi:10.3390/rs11040432

(责任编辑　唐永兰)