

朱义青, 万夫敬, 刘新磊, 2026. 山东南部一次强降水超级单体的成因及雨滴谱特征分析[J]. 气象, 52(3): 287-300. Zhu Y Q, Wan F J, Liu X L, 2026. Formation mechanism and raindrop size distribution characteristics of a severe precipitation supercell in southern Shandong[J]. Meteor Mon, 52(3): 287-300 (in Chinese).

山东南部一次强降水超级单体的成因及 雨滴谱特征分析*

朱义青¹ 万夫敬^{2,3} 刘新磊¹

1 山东省临沂市气象局, 临沂 276004

2 华东区域相控阵天气雷达应用联合实验室, 上海 200030

3 山东省青岛市气象局, 青岛 266003

提 要: 2023 年 7 月 12 日夜, 山东费县附近受强降水超级单体影响, 出现罕见的特大暴雨事件, 综合利用多源观测资料和 ERA5 再分析资料, 深入探讨了此次极端降水的环流背景、高低空急流耦合机制、中小尺度天气系统活动特征及降水的微物理特征。结果表明, 此次降水过程受多尺度系统协同作用, 有利的环流形势、环境风场、水汽传输为短时强降水产生提供大尺度背景条件。迅速发展的西南边界层急流(SW-BLJ)与天气尺度西南低空急流(SW-LLJ)在山东南部地区耦合, 增强了对流层中低层的上升运动; 同时, 对流层中低层的辐合与南亚高压东北侧的高空辐散区配合进一步增强了深层上升运动。受双低空急流的共同影响, 山东南部地区中尺度对流系统强烈发展, 促进了极端强降水的发生。极端强降水与暖云厚度、最大液态水混合比含量大值中心呈显著正相关。此次极端强降水兼具热带海洋性与大陆对流性混合型降水特征, 降水初期, 雨滴数浓度急剧增加且雨滴直径显著增大。降水强盛时段, 降水粒子直径 $D_m < 2$ mm 的占比接近 85.00%, 但大雨滴数量随雨强的增大而增多。从对降水的贡献率来看, 尽管 2~3 mm 的中粒子仅占 11.77%, 但对降水贡献率最大, 达 32.74%, 其次是 1~2 mm 的小粒子, $D_m < 1$ mm 的粒子数量虽然多, 占 43.35%, 但是对降水的贡献率不足 4.00%。强降水超级单体影响阶段呈现升尺度特征, 3~4 mm 粒子占比虽不足 6.00%, 但对降水贡献率最大, 达 30.04%, $D_m > 6$ mm 的特大粒子对降水贡献率达 8.81%。

关键词: 极端暴雨, 强降水超级单体, 高低空急流, 雨滴谱特征

中图分类号: P458, P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.101501

Formation Mechanism and Raindrop Size Distribution Characteristics of a Severe Precipitation Supercell in Southern Shandong

ZHU Yiqing¹ WAN Fujing^{2,3} LIU Xinlei¹

1 Linyi Meteorological Office of Shandong Province, Linyi 276004

2 East China Phased Array Weather Radar Application Joint Laboratory, Shanghai 200030

3 Qingdao Meteorological Bureau of Shandong Province, Qingdao 266003

Abstract: On the night of 12 July 2023, a rarely-seen extreme torrential rain event occurred near Feixian County in Shandong Province, under the influence of a severe precipitation supercell. This study comprehensively uses multi-source observational data and ERA5 reanalysis data in investigating the circulation

* 中国气象局复盘总结专项(FPZJ2024-074)、山东省气象局创新团队项目(SDCXTD2023-1)、青岛市气象局重点课题(2023qdxz02)、山东省气象局榜单类专项项目(2023SDBD08)和山东省气象局科研专项(2023SDYD30)共同资助

2025 年 2 月 18 日收稿; 2025 年 10 月 15 日收修定稿

第一作者: 朱义青, 主要从事强对流天气研究. E-mail: lyzhuyiqing@163.com

通讯作者: 万夫敬, 主要从事强对流预报和关键技术研究. E-mail: 1005418392@qq.com

background, coupling mechanism of upper- and lower-level jets, characteristics of meso- and small-scale weather systems, and microphysical features of precipitation associated with this extreme event. The results show that this event was driven by the synergistic effect of multi-scale systems. Favorable circulation patterns, ambient wind fields, and water vapor transport provided large-scale background conditions for the short-time heavy rainfall. The rapidly developing southwest boundary layer jet (SW-BLJ) coupled with the synoptic-scale southwest low-level jet (SW-LLJ) over southern Shandong enhanced upward motion in the middle and lower troposphere. Meanwhile, convergence in the middle and lower troposphere, combined with upper-level divergence in the northeastern divergent zone of the South Asian high, further strengthened deep-layer upward motion. Under the combined influence of the double low-level jets, mesoscale convective systems developed intensely in southern Shandong, promoting the occurrence of heavy rainfall. Furthermore, the event exhibited mixed characteristics of both tropical maritime and continental convective types. At the initial stage of precipitation, there was a sharp increase in raindrop number concentration and a significant enlargement of raindrop diameters. During the peak rainfall period, small particles with a mass-weighted mean diameter (D_m) < 2 mm accounted for nearly 85.00%, and the number of large raindrops increased with the intensification of rainfall intensity. In terms of contribution to precipitation, although medium-sized particles (2–3 mm) only accounted for 11.77%, they contributed most to precipitation, reaching 32.74%, followed by small particles (1–2 mm). Although particles with D_m < 1 mm were the most numerous, accounting for 43.35%, their contribution to precipitation was less than 4.00%. The severe precipitation supercell stage showed an “upscaling” feature. Particles in the 3–4 mm range, although accounting for less than 6.00% in terms of frequency, contributed 30.04% of the total precipitation, while particles with D_m > 6 mm contributed 8.81% to the precipitation.

Key words: extreme torrential rain, severe precipitation supercell, upper- and lower-level jets, raindrop size distribution characteristic

引 言

近年来,受全球气候变化影响,我国极端降水事件呈现强度增强、频次增加、局地性突显的特征(Chen and Zhai, 2013; 雷蕾等, 2017; Zhou et al, 2017; 布和朝鲁等, 2022; Liu et al, 2023),由此引发的山洪、泥石流及城市积涝等灾害造成重大经济损失和人员伤亡。极端强降水的形成机制复杂,涉及天气尺度环流、中小尺度系统相互作用及复杂地形强迫等耦合过程(Luo et al, 2014; Xu et al, 2022; 张芳等, 2022; 符娇兰等, 2023)。其中,中小尺度对流系统的触发、组织化及维持机制是预报难点(Schumacher and Johnson, 2000; 张晓茹等, 2022; 张元春等, 2023)。近年来,随着观测技术的进步和数值模式的发展,暴雨的多尺度相互作用机制逐渐清晰。研究表明,天气尺度高低空急流配置通过提供强水汽输送和动力抬升条件影响降水强度(Du et al, 2022; 汪小康等, 2022; 马长健等, 2023; 张端禹等,

2024),中尺度对流系统的组织化过程及其与低空急流的耦合作用(徐珺等, 2018; Du and Chen, 2019; 蒲义良等, 2023)也是降水强度增强的关键因素,而地形抬升与边界层过程通过增强局地辐合进一步提升降水强度(Gan et al, 2019; Xia et al, 2019)。苏爱芳等(2022)发现豫北地区一次极端暴雨由中低层暖湿平流强迫、地形的强动力辐合抬升及低空弱冷空气入侵三者协同引发;龚琬丁等(2023)指出山东地区一次极端暴雨中,低涡与副热带高压间增强的气压梯度会通过加强低空急流等引发极端暴雨;郑丽娜和孙继松(2024)提出泰山地形引发的垂直运动可通过影响对流触发,改变降水强度与落区分布。

此外,极端降水强度的变化还与雨滴尺度分布及其微物理过程紧密相关,不同降水类型往往伴随着独特的微物理机制。雨滴谱是云降水物理学的核心研究内容之一,其特征分析对于揭示极端降水的发展演变及微物理过程具有重要参考价值(王俊等, 2021; 张哲等, 2022; 高安春和申高航, 2022; 王洪霞等, 2023; 杨涛等, 2023)。相关研究揭示了不同场景

下的规律,王俊等(2023)分析2021年郑州“7·20”特大暴雨发现,降水粒子直径的增长是暴雨强度增强的主因,粒子浓度增加为次因,2~4 mm直径雨滴对总降水量的贡献率高达61.9%;申高航等(2021)指出山东一次大范围强降水阶段雨滴谱较宽且呈双峰结构,直径>1 mm的雨滴数与分钟降水量相关性达95.68%,降水减弱时,谱宽变窄且呈单峰结构,该直径雨滴数量显著减少;李山山等(2023)发现短时与持续性强降水在雨滴谱特征上存在显著差异,且分别与对流云、层状云内的微物理过程相关。综上,极端降水过程中的雨滴分布特征及其微物理过程极为复杂,不同降水类型、同一过程的不同阶段乃至不同区域所表现出的微物理机制均存在显著差异。

2023年7月12日夜间,山东南部临沂费县等地区遭遇了年度最为猛烈的极端暴雨事件,降水的突发性强,累计降水量大,并伴有极端短时强降水,最大降水量为280.9 mm,最大1 h降水量为114.1 mm,引发城乡大面积积水、洪涝等灾害。尽管业务数值模式和主观预报对此次过程做出预报,但存在累计降水量和降水极值显著偏小、强降水落区偏南等问题,致使大范围暴雨漏报。这次极端暴雨过程中,天气系统、低空急流等因素如何相互作用,共同导致了降水的突发性强、累计降水量大且伴有极端短时强降水等特征?雨滴谱特征在降水不同阶段有何差异,这些差异所反映的微物理过程如何影响降水强度及雨强变化特征?本文将利用常规观测资料、地面加密自动站资料、临沂多普勒雷达资料、费县地面雨滴

谱资料和ERA5再分析资料等,探究本次暴雨发生发展的环流条件、急流演变及微物理特征,旨在为类似突发性强、局地性显著的对流性暴雨的精细化预报预警提供参考。

1 降水实况和极端性特征

2023年7月12日夜间,山东南部地区遭遇了强烈的暴雨到大暴雨天气(图1),暴雨区主要集中在临沂、菏泽、枣庄、济宁、泰安等地,全省24 h平均降水量为48.8 mm,其中,257站次降水量为100~250 mm,7站次降水量超过250 mm,最大为280.9 mm(临沂市费县尚庄站)。本次降水过程的一个显著特征是伴随短时强降水,共有89站次小时降水量超过50 mm(表1),临沂费县尚庄站小时降水量达114.1 mm(21:00—22:00,北京时,下同),10 min降水量达37.5 mm(21:10—21:20),表现出累计降水量大、强降水时段集中和局地极端性突出的特征。

2 天气背景和天气尺度触发、维持机制

200 hPa形势场(图2a)显示,2023年7月12日08:00鲁南地区处于南亚高压东北部气流的分流区,高空存在强烈辐散。500 hPa形势场(图2b)表明,河南中北部一带的短波槽在东移过程中逐渐加深发展,影响山东中南部地区;同时西太平洋副热带高压(以下简称副高)强盛,呈西南—东北走向。850 hPa水汽

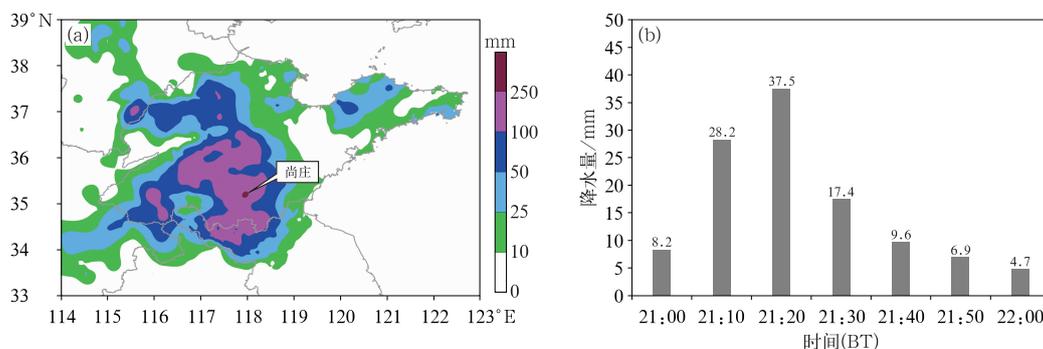


图1 2023年7月(a)12日08:00至13日08:00累计降水量和
(b)12日夜间费县尚庄站逐10 min降水量

Fig. 1 (a) Accumulated precipitation from 08:00 BT 12 to 08:00 BT 13 July
and (b) 10 min precipitation on the night of 12 July at
Shangzhuang Station in Feixian County in 2023

表 1 2023 年 7 月 12 日 08:00 至 13 日 08:00 山东省最大小时降水量级分布统计
Table 1 Hourly maximum precipitation characteristics in Shandong Province
from 08:00 BT 12 to 08:00 BT 13 July 2023

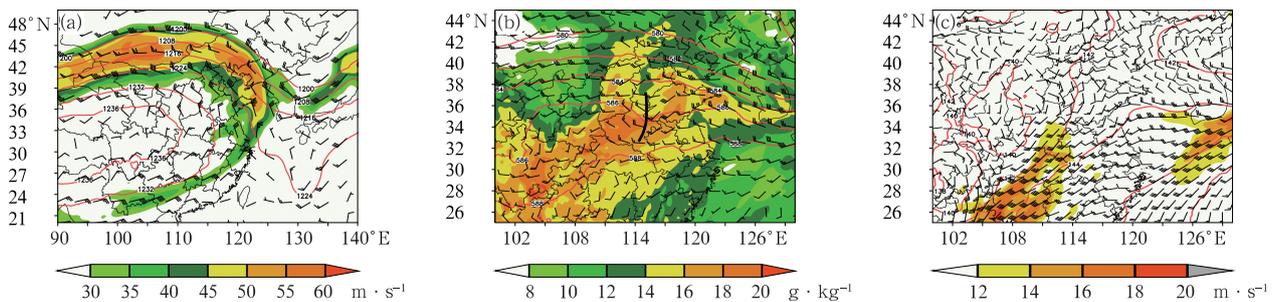
小时降水量/mm	站次	代表站	出现时间
[1,10)	820		
[10,25)	629		
[25,50)	399		
[50,80)	78		
[80,100)	10	枣庄山亭店子站	12 日 21:00
[100,150)	1	临沂尚庄站	12 日 22:00

输送通道畅通(图 2c),西南低空急流(SW-LLJ)核位于湖南中部地区,最大风速达 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,鲁南处于其出口区,风速辐合明显,该地区比湿普遍达 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,局地超过 $18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,极端强降水落区位于 850 hPa 低空急流出口区的左侧。高空的辐散抽吸效应配合低层辐合,共同促进鲁南地区上升运动的建立与维持。

徐州探空资料显示,7 月 12 日 08:00 极端强降水发生前(图 3a),925 hPa 及以下为东南风,其上为西南风,风随高度顺转,暖平流显著,对流有效位能(CAPE)为 $1045 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,对流抑制能量(CIN)为 $162 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,KI 指数 $\geq 36^\circ\text{C}$,SI 指数 $\leq -0.44^\circ\text{C}$,大气可降水量(PW)为 70.3 mm,暖云层厚度为 4756 m。至 20:00(图 3b),风场结构未发生显著变化,但热力与不稳定参数等出现剧烈变化,CAPE 显

著跃增至 $4187 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CIN 接近于零值,KI 指数升高至 $\geq 45^\circ\text{C}$,SI 指数降低至 $\leq -4^\circ\text{C}$,自由对流高度低至 210 m,PW 增大至 76.5 mm,暖云层厚度扩展至 5114 m,且 925 hPa 以下温度露点差趋近于零值,表明了大气层结处于极端不稳定状态,极易触发深厚湿对流。

在强降水过程中,对流层相对湿度的变化对降水效率具有重要影响。冉令坤等(2021)的研究表明,相对湿度增大能够有效降低雨滴蒸发率,从而提高降水效率。12 日 20:00 强降水发生前,费县尚庄区域已出现整层大气饱和现象(图 4a),其中 600 hPa 以上区域相对湿度超过 95%。同时,0°C 层高度稳定维持在 600~500 hPa。21:00—22:00 的强降水时段,暖云层发展尤为显著。期间,高层湿度场发生明显变化,至 13 日 00:00 左右,300 hPa 高度附近相



注:图 b 中粗实线为槽线。

图 2 2023 年 7 月 12 日 08:00(a)200 hPa 位势高度场(红色等值线,单位:dagpm)、高空急流(全风速 $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,填色)、风场(风羽),(b)500 hPa 位势高度场(红色等值线,单位:dagpm)、风场(风羽)、850 hPa 比湿(填色)和(c)850 hPa 位势高度场(红色等值线,单位:dagpm)、风场(风羽)、低空急流(全风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,填色)

Fig. 2 (a) 200 hPa geopotential height field (red contour, unit:dagpm), high-level jet stream (total wind speed $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, colored) and wind field (barb), (b) 500 hPa geopotential height field (red contour, unit:dagpm), wind field (barb), 850 hPa specific humidity (colored) and (c) 850 hPa geopotential height field (red contour, unit:dagpm), wind field (barb), low-level jet stream (total wind speed $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, colored) at 08:00 BT 12 July 2023

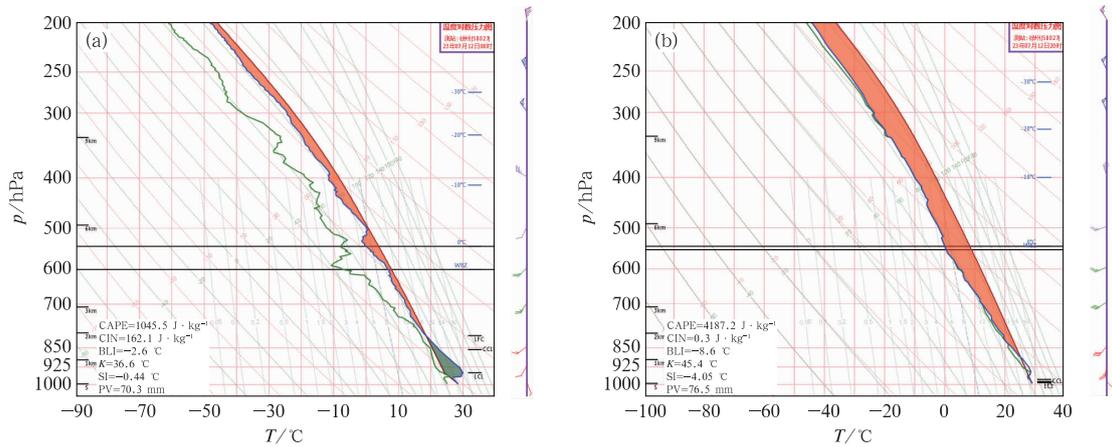
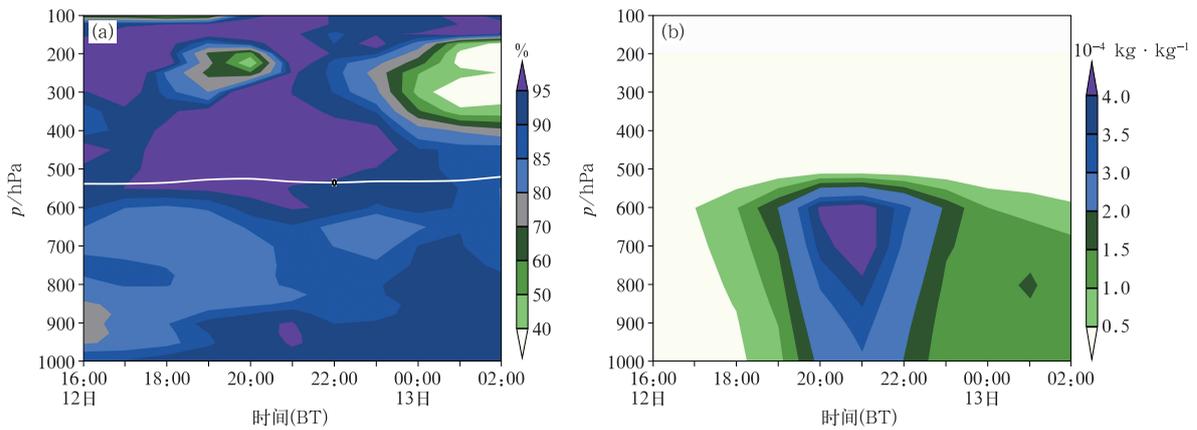


图 3 2023 年 7 月 12 日 (a)08:00 和 (b)20:00 徐州站 T-lnp 图

Fig. 3 T-lnp diagram of Xuzhou Station at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 12 July 2023



注:图 a 中白线为 0 °C 层高度。

图 4 2023 年 7 月 12 日 16:00 至 13 日 02:00 尚庄站 (a)相对湿度、(b)液态水混合比含量的高度-时间演变

Fig. 4 Height-time evolution of (a) relative humidity and (b) liquid water mixing ratio content at Shangzhuang Station from 16:00 BT 12 to 02:00 BT 13 July 2023

对湿度急剧下降至 80% 以下。然而,在中低层,由于低空急流持续水汽输送影响,相对湿度仍维持在较高水平。这种高低层湿度场的差异一直持续到 SW-LLJ 与西南边界层急流(SW-BLJ)减弱消失后,中低层相对湿度也随之快速下降。进一步分析发现,12 日 20:00 起,费县尚庄上空的暖云(雨水+云水)层开始迅速增厚(图 4b)。在极端短时强降水发生前(约 21:00),暖云层达到最大厚度,垂直范围从近地面延伸至 500 hPa,650 hPa 高度附近出现液态水混合比含量大值中心,强度达 $4 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且该高湿区持续时间较长。上述结构演变表明,暖云层厚度、最大液态水混合比含量大值中心与极端强降水的发生具有显著的正相关关系。

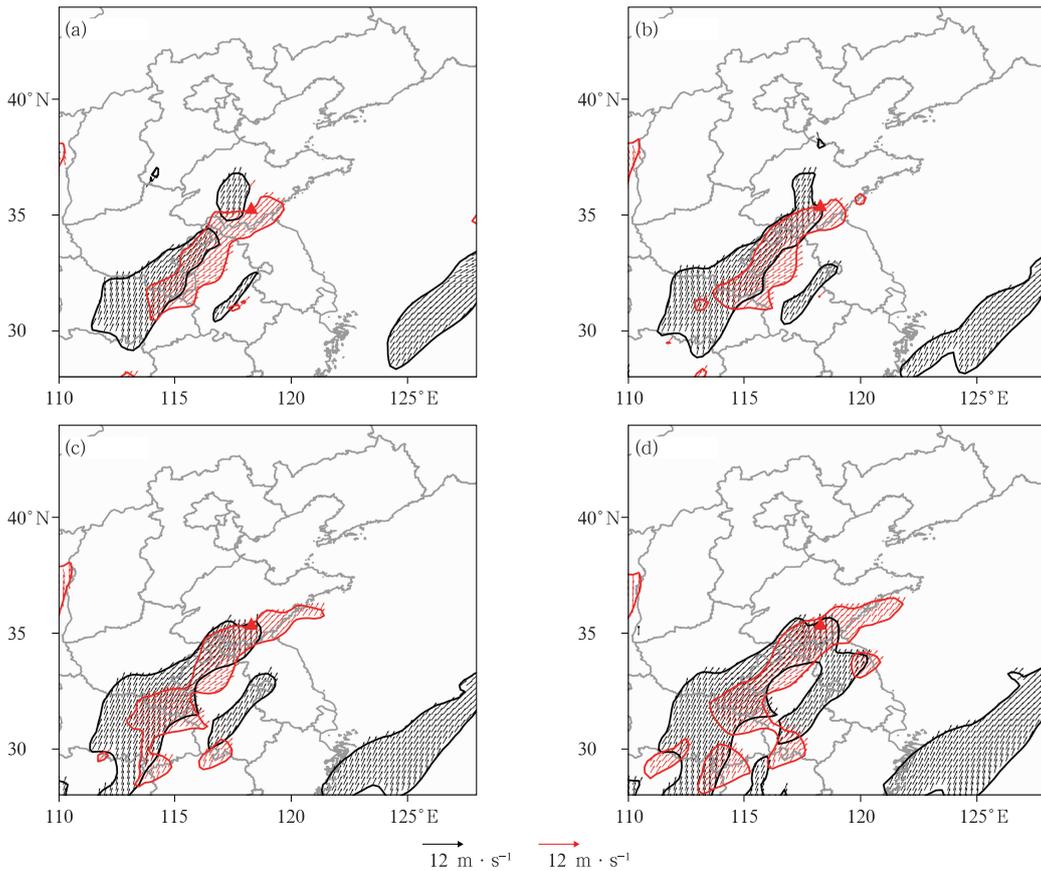
3 双低空急流的耦合

天气尺度低空急流通常指对流层中低层 900~600 hPa 风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南气流(朱乾根, 2000; 马长健等, 2023),最大风速位于 1~4 km 高度,其变化主要受天气形势影响。边界层急流(风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的最大风速出现在 1 km 以下的边界层内,具有明显的日变化特征。Du and Chen (2019)、Luo and Du(2023)通过研究华南、河南等地区 700 hPa 和 950 hPa 双低空急流过程,揭示了边界层急流与天气尺度低空急流间的多种耦合机制,其中双低空急流重叠型之一,即边界层急流出口区

的低层辐合与天气尺度低空急流驱动的中层辐合上下叠置,共同促进了中低层显著的垂直上升运动。2023年7月12日19:00—22:00鲁南地区亦存在此类典型重叠结构:950 hPa SW-BLJ与700 hPa SW-LLJ在垂直方向上形成耦合(图5)。这种上下重叠的急流耦合机制通过增强中低层辐合,对12日夜间费县尚庄站出现的极端短时强降水($114.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)具有决定性促进作用。

ERA5资料显示,19:00(图5a),华中到黄淮一带SW-BLJ呈现出一窄一宽,南北两个显著的大风速带分别位于安徽至江苏中部、湖北东北部与河南南部交界区,两者风速均超过 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。北侧较宽的SW-BLJ准连续地向东延伸至山东南部,并与SW-LLJ头部枝状相交于山东东南部,费县尚庄站位于950 hPa SW-BLJ出口区右侧与700 hPa SW-LLJ出口区左侧之间的重叠区域中部。20:00

(图5b),SW-BLJ顶端宽度有所收缩,SW-LLJ则有加强北进趋势,两支急流顶端呈近似正交配置。21:00(图5c),两支急流位置关系发生显著调整:SW-BLJ明显南落,费县尚庄站转为其左前侧;SW-LLJ进一步北进延伸至山东半岛以东海域。此时,两支急流在延伸趋势上高度重合,近乎上下平行叠置。费县尚庄站转为双低空急流的典型重叠区,即SW-BLJ出口区左侧与SW-LLJ的左前侧。该配置持续至22:00(图5d),之后急流南落,极端雨强出现在21:00—22:00双低空急流上下重叠区的左前侧。根据江苏邳州风廓线雷达观测(位于费县尚庄站以南约77 km处)(图略),20:20前后,上游低空急流显著增强并垂直扩展,形成典型的双低空急流结构:700 hPa高度的SW-LLJ叠加950 hPa附近的SW-BLJ。值得注意的是,2 km高度层风速始终低于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流阈值,未能形成独立的急流中心。



注:红色三角形为费县尚庄站位置,下同。

图5 2023年7月12日(a)19:00,(b)20:00,(c)21:00,(d)22:00 700 hPa(红色风矢)、950 hPa(黑色风矢)风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水平风场

Fig. 5 Horizontal wind field with wind speed $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ at 700 hPa (red vector) and 950 hPa (black vector) at (a) 19:00 BT, (b) 20:00 BT, (c) 21:00 BT and (d) 22:00 BT 12 July 2023

该双急流配置自 20:20 持续至 22:00 左右,这一观测事实与 ERA5 资料所揭示的急流结构特征相吻合。

垂直方向上,强降水期间双低空急流强度增强,其重叠区左前侧的上升运动显著增强。20:00,降水区上空 950~650 hPa 范围内的西南气流尤为强劲,至 21:00(图 6),低空急流核强度达到最大,中心位于 800 hPa 附近,风速达 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此时,低层 SW-BLJ 出口区左侧与中层 SW-LLJ 出口区左侧的辐合区相叠加,形成了深厚的低层辐合层;高层则受南亚高压东北侧分流区的辐散作用影响,构成了“低层辐合-高层辐散”的动力结构。该配置在尚庄附近激发出强烈的上升运动,急流增强进一步加剧左前侧切变辐合,促使上升运动持续增强。21:00,400 hPa 和 700~500 hPa 分别出现两个上升运动中心,强度

均超过 $3.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。综上,SW-BLJ 与 SW-LLJ 出口区辐合,配合南亚高压东北侧的高空辐散共同增强了鲁南地区的上升运动,是尚庄站出现极端降水 ($114.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 的重要动力机制。

4 极端强降水对流系统的发展演变

2023 年 7 月 12 日 19:00—21:00 临沂雷达组合反射率因子与地面风场演变(图 7)显示,19:00,西北风与东南风在山东滕州西部交汇形成的地面中尺度辐合线(图 7a)触发了初始对流单体。随后,在环境中层西南气流引导下,对流单体向东北方向移动,并于 20:00 移至滕州东部,对流单体进一步发展加强(图 7b)。21:00,对流单体逐渐演变为中尺度带状回波并移至费县附近(图 7c),费县附近的东南风与偏北风形成地面中尺度辐合线,辐合线两侧冷暖差异显著、温度梯度大。同时,相应 925 hPa 附近西南风也显著增强,不稳定能量和水汽随着边界层急流的加强持续输送至费县附近。地面气温数据显示,20:00 尚庄站的气温不降反升,由 24.6°C 升至 25°C 。尽管 20:00 徐州站的 0~6 km 垂直风切变中等偏弱,但是 20:20 起低空急流的建立和增强使垂直风切变达到中等到强水平;另外,在双低空急流上下重叠区的左前侧,天气尺度辐合抬升和水汽条件较好;双急流与南亚高压东北侧高空辐散协同作用,有利于深对流的发展。21:00 尚庄附近存在显著的中尺度辐合线,即存在较强的抬升触发机制,以上均为带状回波加强为强降水超级单体提供了有利条件。最终,在中尺度辐合线及其右侧、温度梯度大值区偏暖区一侧,带状回波迅速增强,发展出强降水超级单体风暴。

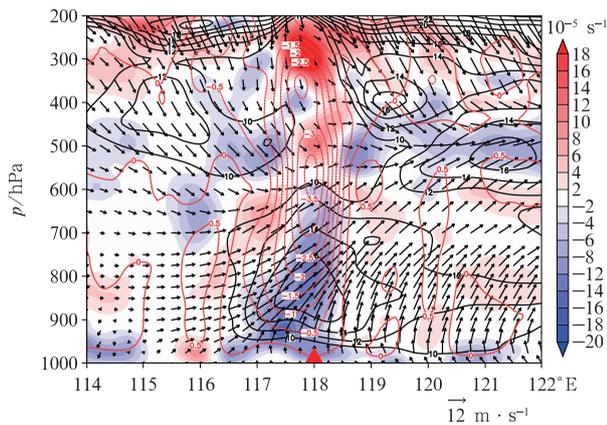
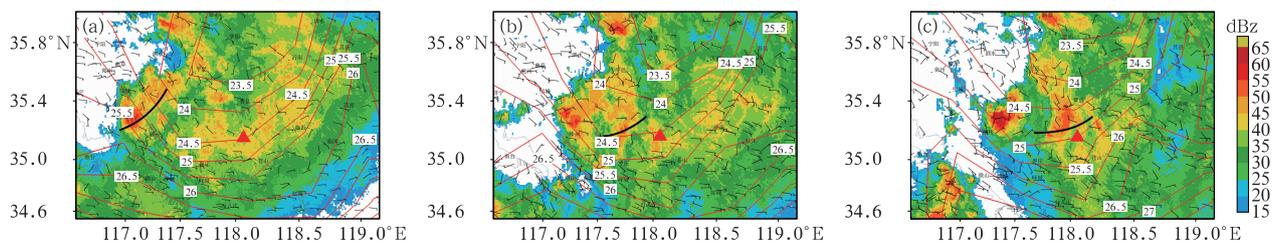


图 6 2023 年 7 月 12 日 21:00 水平风场(风矢)、风速(黑色等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、散度(填色)和垂直速度(红色等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Horizontal wind field (vector), wind speed (black contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), divergence (colored) and vertical velocity (red contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 21:00 BT 12 July 2023



注:黑色实线为地面辐合线。

图 7 2023 年 7 月 12 日(a)19:00,(b)20:00,(c)21:00 组合反射率因子(填色)、地面自动站风场(风羽)及气温(红色等值线,单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 7 Composite reflectivity factor (colored), wind field (barb) and temperature (red contour, unit: $^\circ\text{C}$) of ground automatic stations at (a) 19:00 BT, (b) 20:00 BT and (c) 21:00 BT 12 July 2023

此次极端强降水是层积混合型降水,局地伴有明显的对流性质。大范围 30~40 dBz 层云降水回波嵌入强回波带或块,并观测到强降水超级单体(图 8a)。12 日夜间,中尺度带状回波西南侧不断有新生对流单体生成后合并,形成与低空急流伸展方向一致的层积混合降水带。单体的后向传播导致对流雨带长时间影响同一地区,尤其是 21:00—22:00,费县附近出现一条西南—东北向、强度超过 50 dBz 的中尺度弓状回波带,镶嵌于大片层云回波中。此外,由于回波带走向与单体移动方向近乎平行,费县及其附近的尚庄等地出现了“列车效应”,导致持续性强降水发生,尚庄站 10 min 级雨强演变直观地展示了这一过程(图 1b)。系统发展高度较低,回波顶高约为 12 km 左右,而 40 dBz 以上强度的回波主要集中在 8 km 以下(图 8b)。回波结构密实,大于 50 dBz 的强回波质心位于 5 km 以下,低于 0°C

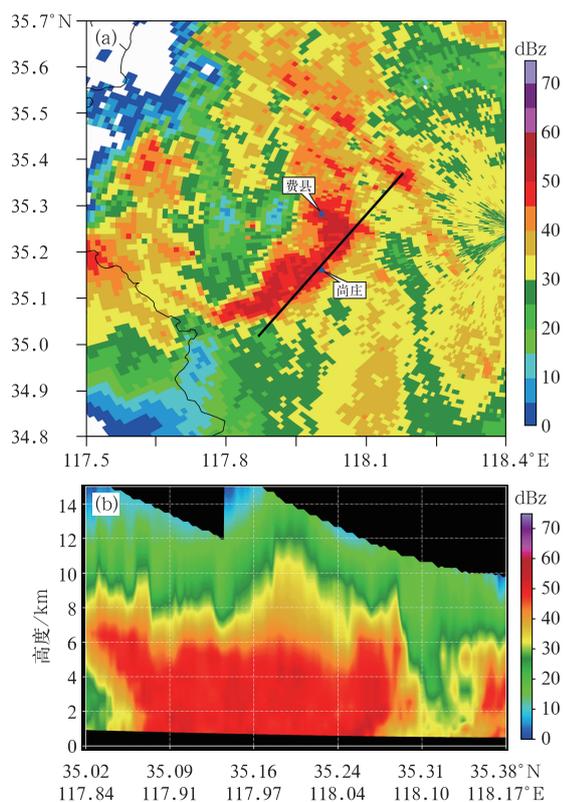


图 8 2023 年 7 月 12 日 21:16(a)临沂多普勒雷达 0.5°仰角反射率因子和(b)沿图 8a 中黑色实线的反射率因子剖面

Fig. 8 (a) Reflectivity factor at 0.5° elevation of Linyi Doppler Radar at 21:16 BT 12 July 2023, and (b) profile of reflectivity factor along the black solid line in Fig. 8a

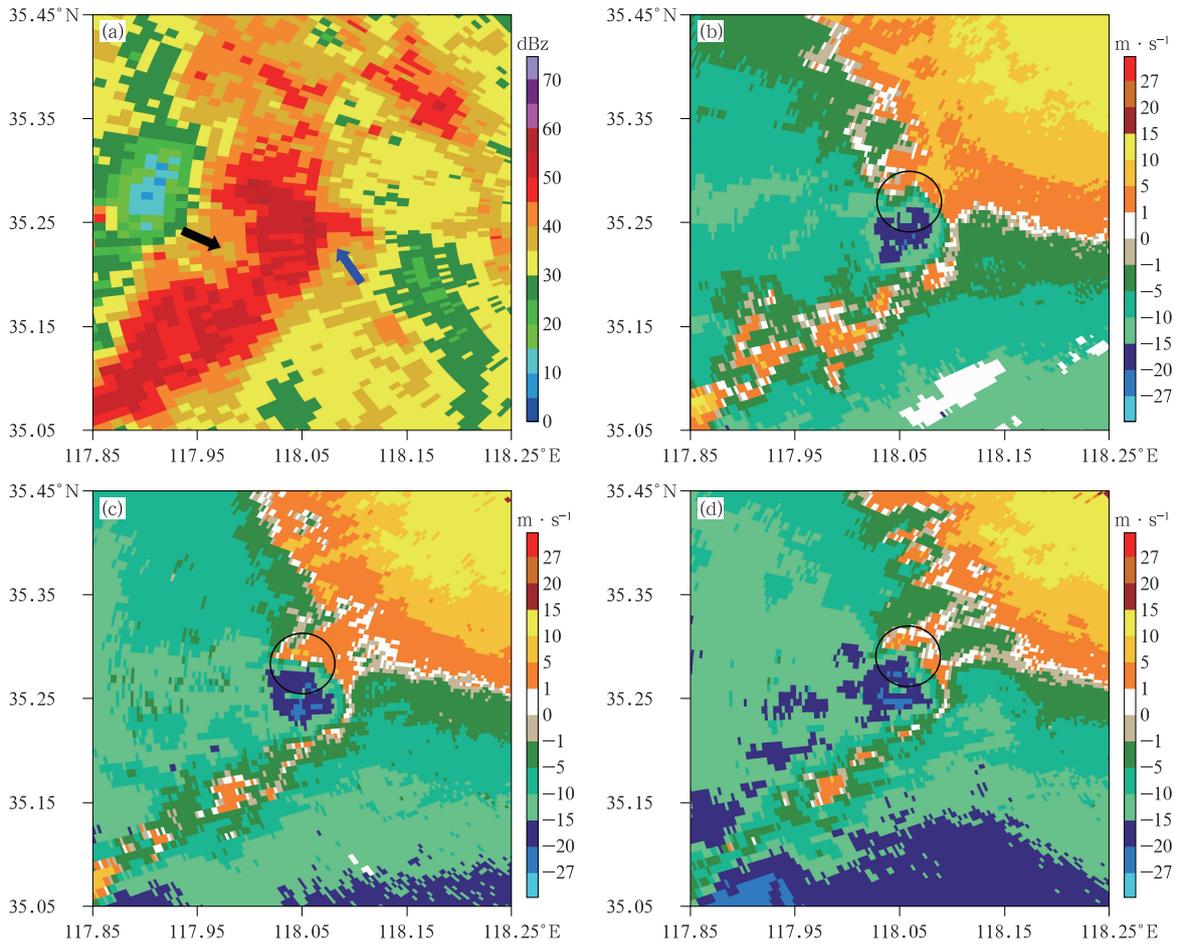
层高度(5.2 km)。降水效率较高,以低质心暖云主导,具有典型的暖云降水型特征。

21:10 开始,费县站附近风暴逐渐呈现出强降水超级单体的特征,21:16,超级单体发展趋于完整,形态更加典型(图 9a)。其东南侧包含着一个与弱回波区相关联的前侧 V 型缺口,缺口处镶嵌前侧中气旋,从仰角 1.5°垂直伸展到 3.4°,中气旋直径约 4.7 km、底高为 1.5 km(图 9b),持续 3 个体扫。超级单体中气旋(图 9 黑色圆圈)最大转动速度为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,属于中等强度(俞小鼎等,2006),该中气旋被降水回波所包裹,位于弓形超级单体右侧顶端,与 Moller et al(1994)关于强降水超级单体特征的研究结果相吻合。此外,弓状回波后侧 V 型缺口与后侧入流缺口(RIN)相对应(图 9a)。之后,超级单体进入成熟阶段,中气旋附近的辐合强度达到 $6.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,此时费县尚庄站 10 min 降水量达 37.5 mm。以上分析可见,天气尺度短波槽和低空急流以及中尺度辐合线多尺度系统协同作用导致了此次极端降水的发生。

5 极端强降水雨滴谱特征

5.1 雨滴谱整体特征和时间演变

2023 年 7 月 12 日 19:00—23:00 是降水主要时段,其中强降水超级单体在 21:05—21:22 经过费县站(图 8a),该时段的雨滴谱资料较好地捕捉并反映了强降水超级单体影响前后的微物理特性。图 10a 为 19:00—23:00 质量加权平均直径(D_m)与降水强度(R)的关系: $R < 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, D_m 随 R 增大显著增大; $R > 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 后, D_m 增大趋势减缓,最终稳定在约 2.5 mm 左右。这一现象说明,在高强度降水条件下,雨滴的碰并与破碎趋于动态平衡,从而限制了雨滴直径的进一步增长。图 10b 为样本 D_m 与截距参数($\lg N_w$, N_w 为归一化截距参数)的散点分布,依据 Bringi et al(2003)的分类标准,对流降水可分为热带海洋性与大陆对流性两类:海洋性对流通常表现为较小的 D_m 和较高的 $\lg N_w$,而大陆性对流则相反。本次降水中,多数样本点位于两类对流之间的过渡区域,海洋性区域落点较多,大陆性区域无落点(图 10b),反映出本次降水兼具较高雨滴数浓度和较大雨滴直径的特征,属于热带



注:蓝色箭头为前侧 V 型缺口,黑色箭头为后侧入流急流,黑色圆圈为中气旋。

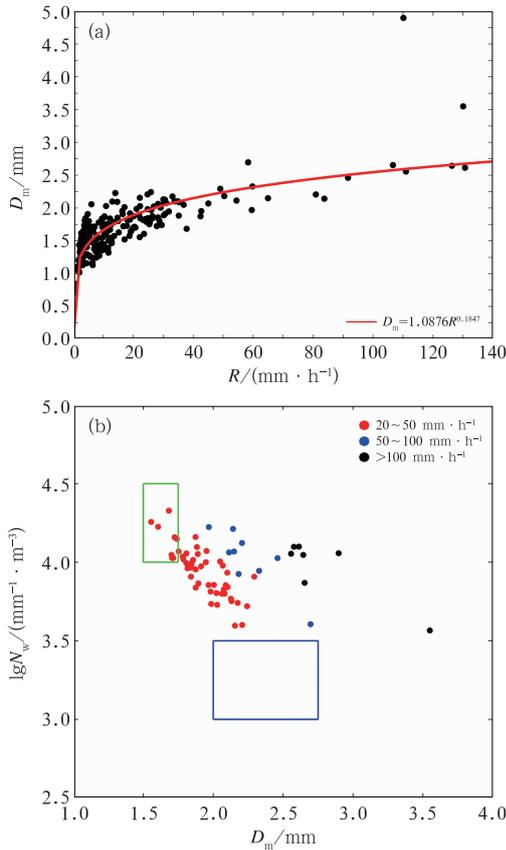
图 9 2023 年 7 月 12 日 21:16 临沂多普勒雷达(a)1.5°仰角反射率因子和 (b)1.5°、(c)2.4°及(d)3.4°仰角径向速度

Fig. 9 (a) Reflectivity factor at 1.5° elevation, and the radial velocities at (b) 1.5° elevation, (c) 2.4° elevation and (d) 3.4° elevation in Linyi Doppler Radar at 21:16 BT 12 July 2023

海洋性与大陆对流性混合型降水。当 R 为 $20 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, D_m 主要分布在 $1.5 \sim 2.5 \text{ mm}$, 而 $\lg N_w$ 分布在 $3.5 \sim 4.5 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 。随着 R 增强, $D_m - \lg N_w$ 分布向右上方偏移。当 R 超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 高 $\lg N_w$ 值与大 D_m 值并存, 说明水汽极其丰富, 雨滴碰并增长强烈, D_m 随之增大, 共同促成了 $114.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的极端短时强降水。综上, 这次极端短时强降水源于西南暖湿低空急流和超低空急流输送的丰富热带海洋水汽北上, 并与中纬度冷空气相互作用, 兼具大陆对流性与热带海洋性混合的特征, 且更偏向于海洋性对流类型。

图 11 为 2023 年 7 月 12 日 19:00—23:00 经三点平滑处理的雨滴谱特征量随时间的变化, 该处理有效降低了 1 min 样本的随机波动, 更准确地呈现

了特征量的变化趋势。自 19:30 起, 粒子数浓度 (N_t) 与 D_m 的变化展现出明显的同步性。强降水发生前, N_t 保持低水平, 降水发生后, N_t 和 D_m 同步增长, 且两者峰值出现的时段一致。尽管 D_m 与 R 的变化趋势相近, 但 N_t 与 D_m 的同步性更为显著。具体而言, R 快速增大时, D_m 亦迅速增大至峰值(约 3.2 mm), 与该时段 $114.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水相对应。随后, D_m 与 N_t 下降, R 亦随之迅速减弱。22:00 后, R 再次增强时, N_t 与 D_m 有波动式小幅激增。以上分析表明, 强降水开始时, 降水滴谱发生显著变化, 表现在雨滴数浓度急剧增加和雨滴直径的显著增大, 中小雨滴占大多数, 大雨滴数量随 R 的增大而增多。



注:图 a 中红线为基于最小二乘法拟合的全体样本曲线;图 b 中绿框为海洋性分布区域,蓝框为大陆性分布区域(Bringi et al, 2023)。

图 10 2023 年 7 月 12 日 19:00—23:00 费县站雨滴谱观测仪 (a) $R-D_m$ 和 (b) D_m-lgN_w 分布
Fig. 10 Distribution of (a) $R-D_m$ and (b) D_m-lgN_w of the raindrop spectrum observation instrument at Feixian Station from 19:00 BT to 23:00 BT 12 July 2023

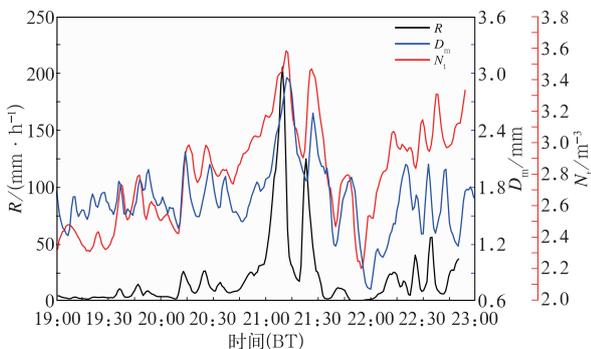
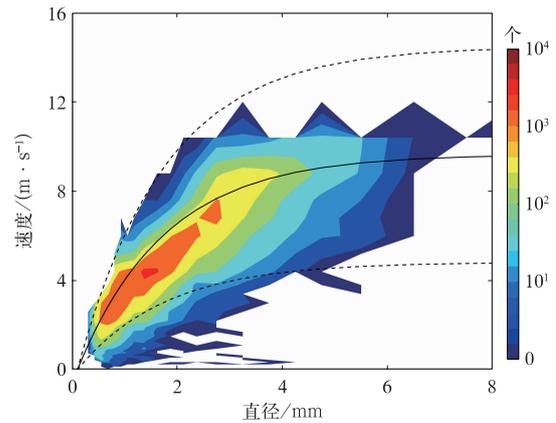


图 11 2023 年 7 月 12 日 19:00—23:00 费县站雨滴谱特征时序变化
Fig. 11 Time-series of raindrop spectrum characteristics at Feixian Station from 19:00 BT to 23:00 BT 12 July 2023

5.2 强降水阶段不同尺寸雨滴对降水的贡献

2023 年 7 月 12 日 21:00—22:00 经质量控制后雨滴谱仪观测的降水粒子数量、速度与直径的分布如图 12 所示,该时段降水粒子直径和速度关系与理论预期一致,粒子数量大值区紧密沿理论曲线分布。粒径为 0.5~4 mm 的粒子数量最集中,尤其在理论曲线附近,粒子数超 4000 个,4 mm 附近仍高达 600 个以上。大雨滴的增长主要归因于碰并过程,该机制促使大雨滴吸纳众多小雨滴,导致小雨滴浓度下降。同时,雨滴尺寸增大后,增速趋缓,从而制约了大雨滴数量的急剧增加。在本次降水过程中,大雨滴的数量却异常多,这暗示了大气中水汽含量极为充沛。此外,本时段观测到直径超 8 mm 的粒子。Beard et al(1986)指出,自然降水粒子直径上限约 8 mm,超出此范围可能因表面张力与空气阻力共同作用而破碎,因此,当前超限观测值的真实性尚不确定,可能源于真实粒子或其他因素。

基于雨滴粒子 D_m 的精细划分(<1、1~2、2~3、3~4、4~5、5~6、6~7、 ≥ 7 mm),剖析了 21:00—22:00 各粒径区间粒子对降水量的贡献率及其出现占比。21:00—22:00(表 2),从占比分布看, $D_m <$



注:黑色实线是雨滴下落末速度经验公式,黑色虚线是速度数据质量控制线。

图 12 2023 年 7 月 12 日 21:00—22:00 费县站雨滴谱观测仪观测的降水粒子数量(填色)、速度与雨滴直径的分布
Fig. 12 Distribution of precipitation particle number (colored), velocity and raindrop diameter observed by the raindrop spectrum observation instrument at Feixian Station from 21:00 BT to 22:00 BT 12 July 2023

1 mm 和 1~2 mm 的小粒子占主导,分别占 43.35% 和 41.17%,合计接近 85%,2~3 mm 的中粒子占 11.77%,而更大粒径($D_m \geq 3$ mm)的粒子出现频率较低。这表明在本次强降水过程中,小粒径粒子在数量上占绝对优势。从对降水量的贡献率来看,2~3 mm 的粒子贡献率最大,达到 32.74%,尽管其占比仅为 11.77%。其次是 1~2 mm 的小粒子,贡献率占 23.48%,3~4 mm 较大粒子虽然占比少,为 2.95%,但是贡献率也占 23.11%,4~5 mm 大粒子贡献率为 10.77%,而 <1 mm 尽管数量多,但对降水的贡献率却不足 4%。5~6、6~7、 ≥ 7 mm 粒子单项贡献均较低。综上, $1 \leq D_m < 4$ mm 的粒子共同贡献了总降水量的 79.33%,是本次强降水的主要贡献者。特别值得注意的是,2~3 mm 的中等直径粒子虽出现频率不高,却是降水贡献最大的群体;而 $D_m < 1$ mm 的小粒子尽管数量占优,对降水的直接贡献却十分有限。

表 2 2023 年 7 月 12 日 21:00—22:00 不同直径的粒子占比和对降水量的贡献率

Table 2 Contribution rates and frequency ratios of particles with different diameters to precipitation from 21:00 BT to 22:00 BT 12 July 2023

粒子直径/mm	占比/%	降水贡献率/%
$D_m < 1$	43.35	3.78
$1 \leq D_m < 2$	41.17	23.48
$2 \leq D_m < 3$	11.77	32.74
$3 \leq D_m < 4$	2.95	23.11
$4 \leq D_m < 5$	0.63	10.77
$5 \leq D_m < 6$	0.11	3.51
$6 \leq D_m < 7$	0.01	0.63
$D_m \geq 7$	0.01	1.98

5.3 不同雨强下雨滴谱特征对比

2023 年 7 月 12 日 21:00—22:00 费县站分钟级降水量和雨滴数浓度分布(图 13)显示,当中尺度带状对流回波主体影响费县时(21:00—21:35),降水强度与雨滴数浓度同步迅速增长。该阶段出现两个降水峰值,21:14 前后费县站 1 min 降水量达到第一个峰值,为 3.2 mm,由大量的 0.5~3 mm 粒子与少量超过 5 mm 的大粒子共同贡献;第二个在 21:27,贡献粒子组成类似。21:40 后,随着主体回波后侧层云降水开始,降水强度与雨滴数浓度骤降,雨滴谱变窄,直径减小,降水粒子主要集中在 0.5~1 mm,揭示了对流降水与后续层云降水在雨滴谱上

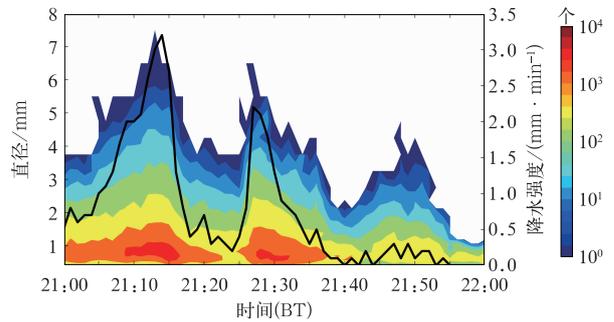


图 13 2023 年 7 月 12 日 21:00—22:00 费县站雨滴谱观测仪观测的降水粒子数量(填色)、直径与分钟降水强度(实线)分布

Fig. 13 Distribution of precipitation particle number (colored), raindrop diameter observed by the raindrop spectrum observation instrument and minutely precipitation intensity (solid line) at Feixian Station from 21:00 to 22:00 12 July 2023

的显著差异,这一发现与王俊等(2016)的研究结果一致。整个过程中,粒子数浓度增高(尤其是中、大粒子),使谱宽达到峰值,说明伴随着对流系统的发展,在剧烈辐合上升运动中,大量小粒子碰并增长为中、大雨滴,粒子呈现出较大粒径、较高数浓度的特征,呈现出海洋性与大陆性对流混合特征,导致降水效率较高、雨强增大。

基于费县站在主体对流回波影响前(阶段 A: 21:01—21:02,雨强 $0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)、强降水超级单体影响期间阶段(阶段 B: 21:13—21:14,雨强 $3.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)和主体回波后侧的尾随层云区域影响时(阶段 C: 21:44—21:45,雨强 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)三个特定时段,探讨分阶段、不同雨强下降水微物理特征的差异(图 14),各直径区间雨滴粒子对降水量的贡献率及其占比。在阶段 A,采样体积内的雨滴粒子数量相对较少(1519 个),以直径 < 2 mm 的小雨滴为主,占比高达 88.08%。尽管小雨滴占据主导地位,但直径在 2~3 mm 区间的粒子却对此时的降水量贡献最大,占比达到 46.31%。此外,观测到极少的最大雨滴直径(D_{\max})为 3.7 mm 的粒子。对于阶段 B,雨强显著增强,采样体积内雨滴粒子数量剧增至 4699 个,反映出降水粒子浓度大幅提升,该阶段小雨滴(直径 < 1 mm)占比下降,中到大雨滴占比上升。特别是直径 1~2 mm 的粒子占比最大,达 41.22%,而直径 3~4 mm 的粒子占比虽不足 6%,但成为降水量的最大贡献群体,占

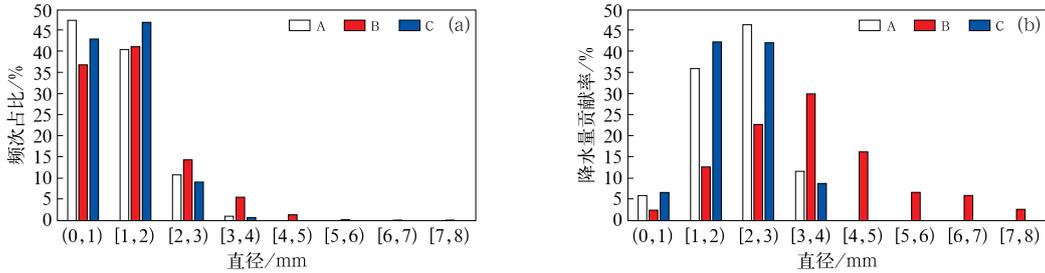


图 14 2023 年 7 月 12 日 21:00 费县站 A、B 和 C 阶段(a)不同平均直径粒子占比和(b)其对降水量的贡献率

Fig. 14 (a) Proportion of particles with different average diameters and (b) their contribution rates to precipitation at stage A, B, and C at Feixian Station at 21:00 BT 12 July 2023

30.04%。相对阶段 A 直径在 2~3 mm 区间的粒子对降水量贡献最大,出现了粒子直径尺度“升尺度”的特征。值得注意的是,直径 > 1 mm 的雨滴对降水量总贡献率超过 97%,且观测到直径 > 6 mm 的特大粒子(D_{\max} 达 7.5 mm),特大粒子对降水贡献率达 8.81%。可见,经暖雨过程后粒子数浓度与直径同步剧增,高浓度小雨滴通过强碰并过程迅速增长为大粒子,形成宽谱分布,从而显著提升降水效率。在阶段 C,粒子数量迅速减少至 504 个,尽管仍以直径 < 2 mm 的粒子为主(占比 90.08%),但 2~3 mm 的粒子成为降水量最主要的贡献群体(42.14%),与阶段 B 相比,反映出粒子直径尺度的“降尺度”的现象。C 阶段的降水中未见直径 > 6 mm 的粒子, D_{\max} 减小至 3.2 mm。综合三个阶段可见,雨强较小时以中、小雨滴为主;雨强增大时,大雨滴数量增多,强降水对应更多的大粒径雨滴,阶段 B 雨滴直径最大、谱宽最广,因而在短时间内形成极端强降水;而雨滴直径过小则难以形成强降水。

6 结 论

本文利用地面气象观测数据、探空站数据、多普勒天气雷达观测数据、地面雨滴谱仪数据以及 ERA5 再分析资料,研究了 2023 年 7 月 12 日山东南部地区一次极端降水事件的天气背景、双低空急流耦合机制、中小尺度系统的活动及降水的微物理特征,结论如下:

(1) 7 月 12 日山东南部极端降水事件发生在 500 hPa 短波槽前、200 hPa 南亚高压东部脊线邻近的分流区,具备有利的环流形势、环境风场、水汽传输条件。极端降水时段暖云层厚度从地面延伸至 500 hPa,暖云层厚度、最大液态水混合比含量大值

中心与极端强降水具有较好的相关性。

(2) 迅速发展的 SW-BLJ 与 SW-LLJ 在山东南部地区耦合,双低空急流和南亚高压东北侧分流区高空辐散之间的相互作用,形成对流层由低到高的辐合-辐散配置,致使极端降水阶段山东南部地区上空对流层的上升运动显著增强,促进了对流活动的增强。天气尺度短波槽和低空急流、中尺度辐合线、小尺度中气旋多尺度系统协同触发强降水。地面中尺度辐合线触发和促使了对流单体的发生发展,降水过程具有强降水超级单体和低质心暖云降水特征。

(3) 本次极端强降水由西南暖湿低空急流和超低空急流携带的丰富水汽北上,与中纬度冷空气相互作用,兼具海洋性与大陆性混合特征,更趋近海洋性对流。降水初期,雨滴数浓度急剧增加伴随雨滴直径显著增大。降水主要发生时段(21:00—22:00),尽管 $D_m < 2$ mm 的小粒子在数量上占绝对优势(接近 85%),但对降水的实际贡献主要来自中、大粒径粒子,其中 $1 \leq D_m < 4$ mm 的粒子共同贡献了总降水量的 79.33%,特别是 2~3 mm 直径的粒子虽出现频率仅为 11.77%,却贡献了 32.74% 的降水量,成为最主要的降水贡献群体,其次是 1~2 mm 的小粒子, $D_m < 1$ mm 的粒子数量虽然多,占 43.35%,但是贡献率不足 4.00%。充沛的水汽条件促使雨滴谱拓宽并呈现显著的“升尺度”特征,粒子数浓度与直径同步剧增,高浓度小雨滴通过碰并过程迅速增长为大粒子。强降水超级单体影响阶段,3~4 mm 粒子占比虽不足 6.00%,但对降水贡献率最大,达 30.04%。

参考文献

布和朝鲁, 诸葛安然, 谢作威, 等, 2022. 2021 年“7.20”河南暴雨水汽

- 输送特征及其关键天气尺度系统[J]. 大气科学, 46(3): 725-744. Bueh C L, Zhuge A R, Xie Z W, et al, 2022. Water vapor transportation features and key synoptic-scale systems of the "7. 20" rainstorm in Henan Province in 2021[J]. Chin J Atmos Sci, 46(3): 725-744(in Chinese).
- 符娇兰, 权婉晴, 麦子, 等, 2023. "23·7"华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条件初探[J]. 气象, 49(12): 1435-1450. Fu J L, Quan W Q, Mai Z, et al, 2023. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12): 1435-1450(in Chinese).
- 高安春, 申高航, 2022. 多源资料分析鲁西局地大暴雨成因及降水的微物理特征[J]. 气象, 48(11): 1475-1486. Gao A C, Shen G H, 2022. Causes and precipitation microphysical characteristics of localized heavy rainstorm in western Shandong based on multi-source data[J]. Meteor Mon, 48(11): 1475-1486(in Chinese).
- 龚琬丁, 周玉淑, 钟珊珊, 等, 2023. 山东地区一次夏季极端暴雨中尺度系统发展演变过程及机理分析[J]. 大气科学, 47(3): 786-804. Gong W D, Zhou Y S, Zhong S S, et al, 2023. Evolution process and mechanism analysis of the mesoscale system of an extreme summer rainstorm in Shandong Province[J]. Chin J Atmos Sci, 47(3): 786-804(in Chinese).
- 雷蕾, 孙继松, 何娜, 等, 2017. "7. 20"华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J]. 气象学报, 75(5): 685-699. Lei L, Sun J S, He N, et al, 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016[J]. Acta Meteor Sin, 75(5): 685-699(in Chinese).
- 李山山, 王晓芳, 李国平, 等, 2023. 短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比[J]. 暴雨灾害, 42(1): 1-12. Li S S, Wang X F, Li G P, et al, 2023. Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain[J]. Torr Rain Disasters, 42(1): 1-12(in Chinese).
- 马长健, 李艳, 徐邦琪, 2023. 双低空急流对"21·7"河南极端暴雨的影响[J]. 大气科学, 47(5): 1611-1625. Ma C J, Li Y, Xu B Q, 2023. Impact of double low-level jets on the extreme rainstorm in Henan Province in July 2021[J]. Chin J Atmos Sci, 47(5): 1611-1625(in Chinese).
- 蒲义良, 卢翔诗, 胡胜, 等, 2023. 华南沿海一次暖区特大暴雨的对流特征和发展机制分析[J]. 气象, 49(2): 201-212. Pu Y L, Lu X S, Hu S, et al, 2023. Convective characteristics and development mechanisms of an extreme warm-sector rainfall in the coastal area of South China[J]. Meteor Mon, 49(2): 201-212(in Chinese).
- 冉令坤, 李舒文, 周玉淑, 等, 2021. 2021年河南"7. 20"极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析[J]. 大气科学, 45(6): 1366-1383. Ran L K, Li S W, Zhou Y S, et al, 2021. Observational analysis of the dynamic, thermal, and water vapor characteristics of the "7. 20" extreme rainstorm event in Henan Province, 2021[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6): 1366-1383(in Chinese).
- 申高航, 高安春, 李君, 2021. 雨滴谱及双偏振雷达等资料在一次强降水过程中的应用[J]. 气象, 47(6): 737-745. Shen G H, Gao A C, Li J, 2021. Application of raindrop spectrum and dual polarization radar data to a heavy rain process[J]. Meteor Mon, 47(6): 737-745(in Chinese).
- 苏爱芳, 席乐, 吕晓娜, 等, 2022. 豫北"21·7"极端暴雨过程特征及成因分析[J]. 气象, 48(5): 556-570. Su A F, Xi L, Lyu X N, et al, 2022. Analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in northern Henan[J]. Meteor Mon, 48(5): 556-570(in Chinese).
- 王洪霞, 苗爱梅, 邱贵强, 等, 2023. "0711"山西晋城极端强降水过程的宏微观特征分析[J]. 高原气象, 42(5): 1232-1246. Wang H X, Miao A M, Qiu G Q, et al, 2023. Macro and micro characteristics of extreme heavy rainfall process in Jincheng of Shanxi Province on 11 July 2021[J]. Plateau Meteor, 42(5): 1232-1246(in Chinese).
- 王俊, 陈宝君, 周淑玲, 等, 2023. 郑州"7·20"特大暴雨雨滴谱特征分析[J]. 高原气象, 42(5): 1247-1259. Wang J, Chen B J, Zhou S L, et al, 2023. Analyzing the characteristics of raindrop size distributions of the "7·20" torrential rain in Zhengzhou on 20 July 2021[J]. Plateau Meteor, 42(5): 1247-1259(in Chinese).
- 王俊, 王文青, 王洪, 等, 2021. 山东北部一次夏末雹暴地面降水粒子谱特征[J]. 应用气象学报, 32(3): 370-384. Wang J, Wang W Q, Wang H, et al, 2021. Hydrometeor particle characteristics during a late summer hailstorm in northern Shandong[J]. J Appl Meteor Sci, 32(3): 370-384(in Chinese).
- 王俊, 姚展予, 侯淑梅, 等, 2016. 一次飑线过程的雨滴谱特征研究[J]. 气象学报, 74(3): 450-464. Wang J, Yao Z Y, Hou S M, et al, 2016. Characteristics of the raindrop size distribution in a squall line measured by Thies optical disdrometers[J]. Acta Meteor Sin, 74(3): 450-464(in Chinese).
- 汪小康, 崔春光, 王婧羽, 等, 2022. "21·7"河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. 气象, 48(5): 533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5): 533-544(in Chinese).
- 徐珺, 毕宝贵, 湛芸, 等, 2018. "5. 7"广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报, 76(4): 511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al, 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin, 76(4): 511-524(in Chinese).
- 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. Yang T, Yang L M, Liu F, et al, 2023. Raindrop size distribution characteristics of two short-term heavy precipitation processes in western Tianshan, China[J]. Chin J Atmos Sci, 47(5): 1495-1509(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社: 91-180. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Doppler Weather Radar Principle and Business Applications[M]. Beijing: China Meteorological Press: 91-180(in Chinese).

- 张端禹, 王俊超, 王晓芳, 等, 2024. 高、低空急流耦合对山东“利奇马”台风暴雨增幅影响的诊断研究[J]. 大气科学, 48(2): 445-462. Zhang D Y, Wang J C, Wang X F, et al, 2024. Diagnostic research on heavy rain growth in Shandong Province influenced by landing Typhoon Lekima due to the coupling of upper- and low-level jet streams[J]. Chin J Atmos Sci, 48(2): 445-462 (in Chinese).
- 张芳, 张芳华, 孔期, 等, 2022. 2018年5月21日四川盆地极端大暴雨的中尺度成因和预报偏差分析[J]. 气象, 48(6): 691-704. Zhang F, Zhang F H, Kong Q, et al, 2022. Mesoscale mechanisms and forecast bias of the extreme rainstorm in Sichuan Basin on 21 May 2018[J]. Meteor Mon, 48(6): 691-704 (in Chinese).
- 张晓茹, 陈豫英, 姚姗姗, 等, 2022. 贺兰山东麓一次局地强对流暴雨的中尺度特征[J]. 气象, 48(7): 801-812. Zhang X R, Chen Y Y, Yao S S, et al, 2022. Mesoscale characteristics of a local severe convective rainstorm at the eastern foot of Helan Mountains [J]. Meteor Mon, 48(7): 801-812 (in Chinese).
- 张元春, 孙建华, 傅慎明, 等, 2023. “21·7”河南特大暴雨的中尺度系统活动特征[J]. 大气科学, 47(4): 1196-1216. Zhang Y C, Sun J H, Fu S M, et al, 2023. Active characteristics of mesoscale systems during the heavy rainfall in Henan Province in July 2021 [J]. Chin J Atmos Sci, 47(4): 1196-1216 (in Chinese).
- 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]. Chin J Atmos Sci, 46(4): 1002-1016 (in Chinese).
- 郑丽娜, 孙继松, 2024. 泰山地形对一次副高边缘大暴雨过程影响的观测分析[J]. 气象学报, 82(2): 155-167. Zheng L N, Sun J S, 2024. Observational analysis of the topographic effect of Mount Tai on an extreme rainfall event occurring at the edge of the subtropical high[J]. Acta Meteor Sin, 82(2): 155-167 (in Chinese).
- 朱乾根, 2000. 天气学原理和方法[M]. 3版. 北京: 气象出版社. Zhu Q G, 2000. Principles and Methods of Synoptic Meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- Beard K V, Johnson D B, Baumgardner D, 1986. Aircraft observations of large raindrops in warm, shallow, convective clouds[J]. Geophys Res Lett, 13(10): 991-994.
- 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 Y, Zhai P M, 2013. Persistent extreme precipitation events in China during 1951—2010[J]. Climate Res, 57(2): 143-155.
- Du Y, Chen G X, 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over southern China. Part II: convection initiation[J]. Mon Wea Rev, 147(2): 543-565.
- Du Y, Shen Y A, Chen G X, 2022. Influence of coastal marine boundary layer jets on rainfall in South China[J]. Adv Atmos Sci, 39(5): 782-801.
- Gan Y T, Li N N, Li J, 2019. Differences in the rainfall characteristics between Mount Tai and its surrounding areas[J]. J Meteor Res, 33(5): 976-988.
- Liu X, Yang M X, Wang H, et al, 2023. Moisture sources and atmospheric circulation associated with the record-breaking rainstorm over Zhengzhou City in July 2021[J]. Nat Hazards, 116(1): 817-836.
- Luo Y H, Du Y, 2023. The roles of low-level jets in “21·7” Henan extremely persistent heavy rainfall event[J]. Adv Atmos Sci, 40(3): 350-373.
- Luo Y L, Gong Y, Zhang D L, 2014. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Mei-Yu front in East China[J]. Mon Wea Rev, 142(1): 203-221.
- Moller A R, Doswell III C A, Foster M P, et al, 1994. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures[J]. Wea Forecast, 9(3): 327-347.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2000. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev, 133(4): 961-976.
- Xia R D, Zhang D L, 2019. An observational analysis of three extreme rainfall episodes of 19—20 July 2016 along the Taihang mountains in North China[J]. Mon Wea Rev, 147(11): 4199-4220.
- Xu J, Li R M, Zhang Q H, et al, 2022. Extreme large-scale atmospheric circulation associated with the “21·7” Henan flood[J]. Sci China: Earth Sci, 65(10): 1847-1860.
- Zhou X Y, Bai Z J, Yang Y H, et al, 2017. Linking trends in urban extreme rainfall to urban flooding in China[J]. Int J Climatol, 37(13): 4586-4593.

(本文责编: 侯翠梅)