

2024年6~7月湘中邵阳持续性强降水雷达回波特征分析

王晶晶¹, 张俊利¹, 陈青¹, 唐娅琼¹, 易婷²

¹湖南省邵阳市气象局, 湖南 邵阳

²湖南省邵阳市隆回县气象局, 湖南 邵阳

收稿日期: 2026年8月2日; 录用日期: 2026年8月27日; 发布日期: 2026年9月4日

摘要

2024年6月16日至7月2日, 湘中邵阳出现一次持续性极端强降雨天气过程, 具有雨强大、极端性突出、暴雨落区高度重叠、致灾严重等特点。本文综合利用FY-2G卫星TBB、S波段双偏振雷达及区域自动站观测资料等, 重点剖析了降水最强时段的对流云团演变与雷达回波结构。结果表明: 本次过程中小时雨强 ≥ 80 mm时, 对流云团TBB低于 -72°C ; 对流系统后向传播与列车效应共同作用, 叠加地形增幅和前期降水水汽累积效应, 是本次暴雨持续时间长、落区高度重叠的关键原因; 雷达双偏振参量ZDR、KDP大值区与强降水落区高度吻合, 其中KDP的突变特征能够精准定位极端降水核心区域。研究结论可为湘中地区夏季持续性极端暴雨的机理研究、监测预警工作提供参考。

关键词

TBB, 雷达回波, 后向传播, 列车效应, 双偏振参量

Radar and Satellite Characteristics of Persistent Heavy Precipitation in Central Hunan (Shaoyang) from Late June to Early July 2024

Jingjing Wang¹, Junli Zhang¹, Qing Chen¹, Yaqiong Tang¹, Ting Yi²

¹Shaoyang Meteorological Bureau of Hunan Province, Shaoyang Hunan

²Longhui County Meteorological Bureau of Shaoyang, Hunan Province, Shaoyang Hunan

Received: August 2, 2026; accepted: August 27, 2026; published: September 4, 2026

文章引用: 王晶晶, 张俊利, 陈青, 唐娅琼, 易婷. 2024年6~7月湘中邵阳持续性强降水雷达回波特征分析[J]. 自然科学, 2026, 14(5): 582-589. DOI: 10.12677/ojns.2026.145062

Abstract

From June 16 to July 2, 2024, a persistent extreme heavy rainfall event occurred in Shaoyang, central Hunan Province, characterized by high hourly intensity, remarkable extremity, highly overlapping rainstorm locations, and severe societal impacts. Using FY-2G satellite black-body brightness temperature (TBB), S-band dual-polarization radar, and regional automatic weather station observations, this study examined the evolution of convective cloud clusters and radar echo structures during the most intense precipitation period. The results show that: (1) when the hourly rainfall intensity reached ≥ 80 mm, the TBB of convective cloud clusters was consistently lower than -72°C ; (2) the combined action of backward propagation and the train effect, together with terrain amplification and moisture accumulation from antecedent precipitation, was the key reason for the long duration of the rainstorm and the high overlap of rainstorm locations; (3) the high-value zones of the dual-polarization parameters ZDR and KDP were highly consistent with heavy-rainfall areas, and the abrupt variation of KDP could accurately pinpoint the core regions of extreme precipitation. These conclusions provide a reference for mechanism research and monitoring-early-warning practices of persistent extreme summer rainstorms in central Hunan.

Keywords

TBB, Radar Echo, Backward Propagation, Train Effect, Dual-Polarization Parameters

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

夏季持续性强降雨是我国南方典型的高影响对流天气，极端性强、致灾重。天气雷达作为强对流天气短临监测的关键工具，在暴雨、冰雹、雷暴大风等灾害性天气的预警中发挥着不可替代的作用。辛玮琦[1]等基于多次暴雨过程的回波分析，指出结合组合反射率(CR)产品与 10 分钟超短时强降雨的演变规律，可实现提前 1 小时的预警时效。李明华[2]、杨舒楠[3]等强调地形强迫对强回波生成与发展的增幅作用，曾琳[4]发现 ZDR 峰值的出现可作为强降水增强的前兆信号，结合 KDP 大值区可更准确判断降水强度的变化趋势。此外，孔祥伟[5]、张俊兰[6]、王成福[7]、陈鲍发[8]等通过分类统计短时强降雨过程，归纳了不同类型暴雨的雷达回波结构与演变共性特征。2024 年 6~7 月湘中邵阳接连出现三轮极端暴雨，造成较重灾害。为进一步揭示湘中区域持续性极端暴雨的形成规律，本文利用多源观测资料分析其环境条件与中尺度特征，重点研究后向传播、列车效应维持机制及双偏振参量指示意义，为今后同类暴雨预报提供借鉴。

2. 灾情与天气实况

2.1. 灾害灾情

2024 年 6 月 16 日至 7 月 2 日的持续性强降雨造成邵阳全域 54.7 万人受灾，农业生产受损严重，房屋损毁共计 221 间，直接经济损失达 6.66 亿元，无人员伤亡。

2.2. 天气实况与降雨极端性

降水实况显示，过程可划分为三个阶段(见表 1)。总体特征：一是降水范围广，全市日平均降水量均

超过 35 mm；二是雨强大，小时雨量超过 50 mm 的站点逐轮增多，邵东市龙虎坝站小时雨强达 94.8 mm，突破区域历史极值；三是累计雨量极端，最大过程累计降水量高达 627.4 mm (绥宁县长铺子乡黄泥井站)；四是暴雨落区高度重叠，强降水中心反复出现在绥宁、洞口、隆回、新邵、邵东及城步西南部。1 h、3 h、6 h 降雨量多项突破历史极值(见表 2)。

Table 1. Characteristics of three heavy precipitation processes
表 1. 三次强降水过程特征

阶段	全域平均降水量(mm)	单站最大过程降水量(mm/站)	最大小时雨强 (mm/h, 出现站名及时间)	≥50 mm/h 站数
过程 I	76.5	311.9 (绥宁县长铺子乡秋木田站)	81 (邵阳县九公桥站 16 日 20~21 时)	7
过程 II	71.6	198.7 (邵东市黑田铺镇建龙桥站)	94.8 (邵东龙虎坝 24 日 14~15 时)	16
过程 III	106	319.2 (绥宁县金屋塘镇岳溪江站)	81.9 (绥宁黄泥井 30 日 04~05 时)	27

注：① 全域平均降水量为邵阳市所有自动站过程累积雨量的算术平均(数据来源于邵阳市气象局，已经省级质控修订)；② 最大小时雨量括号内为出现站点及对应时段(北京时，下同)；③ 过程 I、II、III 分别对应 6 月 16 日 08 时~18 日 08 时、23 日 08 时~25 日 08 时、29 日 08 时~7 月 2 日 08 时。

Table 2. Extreme precipitation records for different durations
表 2. 不同历时降水量极值

1 小时降雨量极值(mm)	3 小时降雨量极值(mm)	6 小时降雨量极值(mm)
邵东市龙虎坝站 94.8 (6 月 24 日 14~15 时)	邵阳县九公桥镇 137.0 (6 月 16 日 19~22 时)	武冈市大甸镇 134.6 (6 月 24 日 14~20 时)
邵阳县九公桥镇 81.0 (6 月 16 日 20~21 时)	—	邵阳县九公桥镇 140.0 (6 月 16 日 19 时~17 日 01 时)

3. 环境条件分析

3.1. 大尺度环流背景

三次暴雨过程均发生在相似的大尺度环流背景下，200 hPa 上副热带西风急流位于 30~40°N，邵阳处于南亚高压东侧与副热带西风急流南侧辐散分流区中；500 hPa 中高纬为“两槽一脊”型，环流经向度大，贝加尔湖冷槽阶段性南下，副热带高压呈带状分布，其西侧边缘的西南气流引导南方暖湿空气向湘中输送；中低层西南暖湿气流发展旺盛，冷暖空气交汇于湖南地区，地面前期受稳定低压控制，后期有冷空气影响。这种“高层辐散、低层辐合”的垂直结构，形成了强烈的抽吸作用，是强降水过程得以长时间维持的核心动力机制。

3.2. 水汽与热力条件

暴雨主要水汽输送路径为“南海 - 广西 - 湖南”，850 hPa 存在持续的西南急流，水汽通量普遍大于 $12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，垂直方向上，整层水汽通量散度在强降水时段持续低于 $-5 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，表明水汽在中低层强烈辐合。垂直速度诊断显示，850 至 500 hPa 被深厚的上升运动覆盖，中心可达 -1.2 Pa/s ，显著提升了降水效率。

热力条件方面，K 指数普遍维持在 36℃~44℃之间，在小时雨强突破 80 mm 的极端时段(如邵东龙虎坝 94.8 mm/h)，K 指数均攀升至 38℃以上。CAPE 值在三次过程中均达到 600~1800 J/kg 的中等偏强水平，其中过程 I 局地超过 1800 J/kg，为对流触发提供了充足的能量储备。

3.3. 地形强迫作用

结合 90 m SRTM 高分辨率地形数据与 850 hPa 风场(见图 1)可以看出: 850 hPa 持续的偏南风/西南风源源不断把暖湿水汽输送到邵阳。受雪峰山脉地形阻挡, 西南气流在迎风坡一侧产生强烈的强迫抬升, 极易触发对流生成; 越山后受地形扰动与重力波影响, 回波强度增强、移速减缓, 导致强降水中心在绥宁、洞口一带高度重叠。

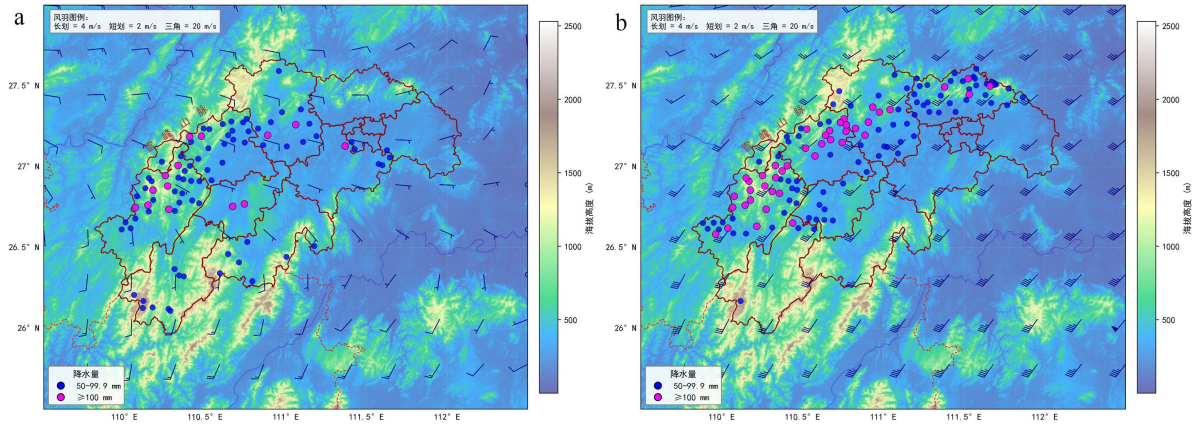


Figure 1. Distribution of 850-hPa wind barbs, topography, and 24-h precipitation grade during Processes I and III. (a) Process I: 850-hPa wind barbs overlaid on topography at 20:00 BT 16 June 2024. The corresponding 24-h precipitation period is from 18:00 BT 16 to 08:00 BT 17 June; (b) Process III: Same as (a), but at 02:00 BT 30 June 2024. The corresponding 24-h precipitation period is from 08:00 BT 29 to 08:00 BT 30 June. (In the figure, the color-shaded background denotes elevation (m); black solid lines indicate the administrative boundaries of Shaoyang City and its subordinate counties (districts), while the red dashed line represents the boundary of Hunan Province; the blue and magenta dots indicate the areas with 24-h precipitation of 50–99.9 mm (rainstorm) and ≥ 100 mm (heavy rainstorm), respectively)

图 1. 过程I与过程III期间 850 hPa 风场、地形与 24 小时降水量级分布。(a) 过程I, 2024 年 6 月 16 日 20 时 850 hPa 风羽叠加地形高度, 对应降水时段为 16 日 18 时至 17 日 08 时; (b) 过程III, 2024 年 6 月 30 日 02 时 850 hPa 风羽叠加地形高度, 对应降水时段为 29 日 08 时至 30 日 08 时。(图中背景彩色区域为地形海拔高度(单位: m); 黑色实线为邵阳市及县(区)行政边界, 红色虚线为湖南省界; 蓝色与紫红色圆点分别表示 24 小时降水量达 50~99.9 mm (暴雨) 和 ≥ 100 mm (大暴雨) 的落区)

4. 中尺度对流系统特征

4.1. TBB 演变特征

从 FY-2G 卫星 TBB 分布(见图 2~4)可见, 过程 I 期间有多个中尺度 β - α 对流系统相继生成。16 日 19 时, 邵阳中部武冈地区出现 β 中尺度对流单体, TBB $< -62^{\circ}\text{C}$, 对应小时雨强 68.3 mm; 20 时该单体移至邵阳县, TBB 骤降至 $< -72^{\circ}\text{C}$, 梯度急剧增大, 对应九公桥站小时雨强 81 mm。17 日 00 时, 绥宁北部多个 β 系统发展, TBB $< -62^{\circ}\text{C}$, 局地雨强 54.2 mm; 09 时, α 中尺度系统在邵阳南部生成并快速东移, 绥宁 TBB $< -72^{\circ}\text{C}$, 雨强达 59.3 mm。分析表明, 本次过程中小时雨强 ≥ 80 mm 时, TBB 低于 -72°C ; 而成片 ≥ 50 mm/h 的强降水区, 通常对应近圆形的 -72°C 冷云区, 且云团边界清晰、梯度陡峭; 当出现 β 或更小尺度对流单体时, 局地自动站雨量常超 50 mm/h。

过程 II 强降水时段, 6 月 24 日湘中以南维持强盛的中尺度 α 对流云团, 核心区域 TBB 低于 -72°C , 邵阳处于云团后部温度梯度大值区, 邵东大部分区域 TBB 低于 -62°C , 局地低于 -72°C , 强温度梯度驱动局地极端降水发生, 14~15 时邵东龙虎坝站小时雨量达 94.8 mm。18 时, 洞口至武冈一带再次新生强对流单体, 云团结构密实、TBB 低于 -72°C , 对应洞口县局地小时雨量 93.5 mm, 对流单体的快速新生和高强度发展, 是本轮短时极端降水的直接触发因素。

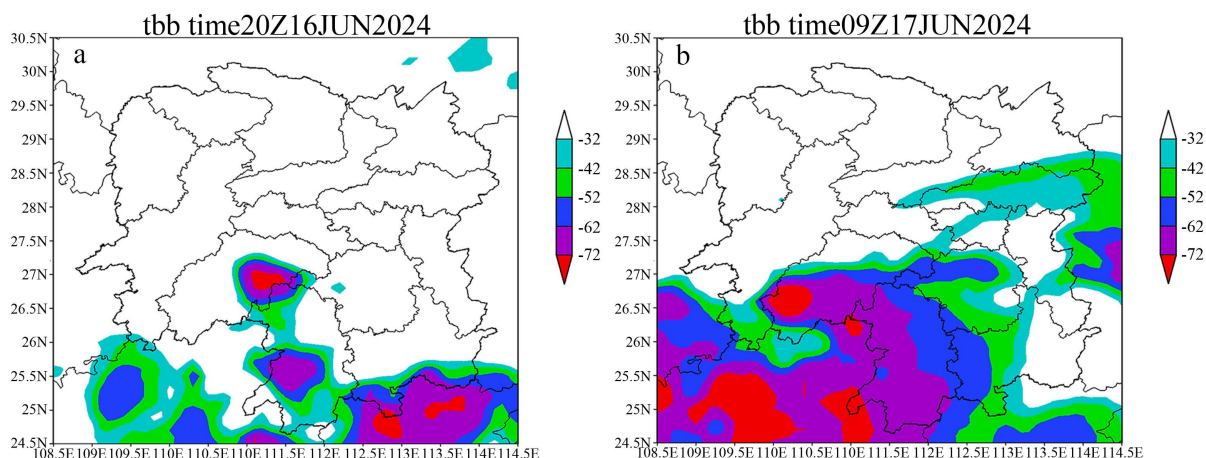


Figure 2. FY-2G satellite TBB distribution (unit: $^{\circ}\text{C}$): (a) 20:00 BT on 16th; (b) 09:00 BT on 17th

图 2. FY-2G 卫星 TBB 分布(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 16 日 20 时; (b) 17 日 09 时

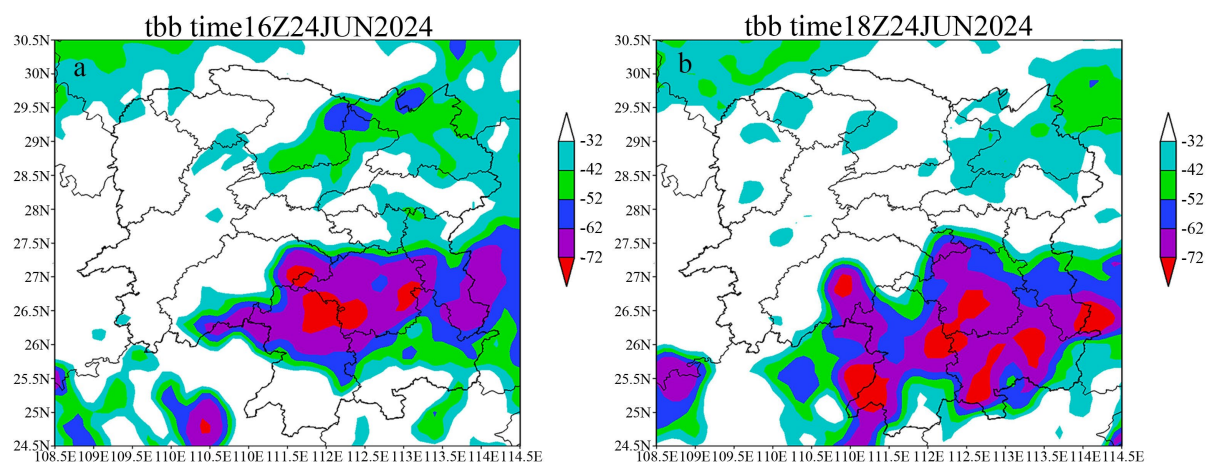


Figure 3. FY-2G satellite TBB distribution (unit: $^{\circ}\text{C}$): (a) 16:00 BT on 24th; (b) 18:00 BT on 24th

图 3. FY-2G 卫星 TBB 分布(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 24 日 16 时; (b) 24 日 18 时

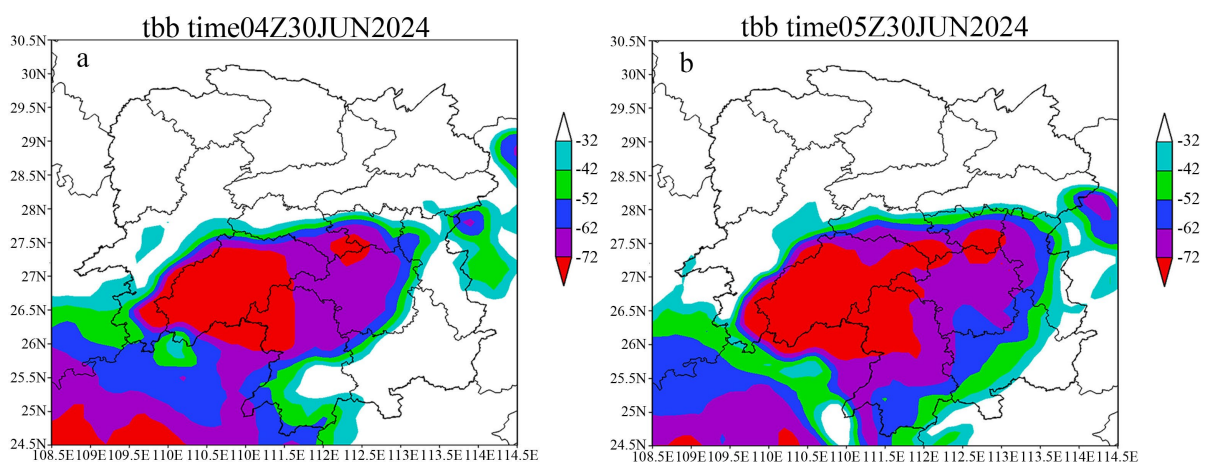


Figure 4. FY-2G satellite TBB distribution (unit: $^{\circ}\text{C}$): (a) 04:00 BT on 30th; (b) 05:00 BT on 30th

图 4. FY-2G 卫星 TBB 分布(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 30 日 04 时; (b) 30 日 05 时

过程 III 期间, 6 月 30 日 00 时湖南境内生成多个东北 - 西南向排列的对流单体, 所有单体 TBB 均

低于 -62°C ；02 时邵阳至怀化南部的对流单体合并增强，形成椭圆形强对流云团，核心区域 TBB 低于 -72°C ；04 时 -72°C 冷云区呈近圆形分布，邵阳西侧云顶温度梯度剧烈，对应绥宁至洞口一带 9 个站点小时雨量超 50 mm，最大雨量达 81.9 mm；05 时冷云区范围进一步扩张，云团边界清晰、温度梯度维持，持续触发短时强降水。

综合多时段 TBB 场与地面降水实况的对应关系，可总结出本地化识别规律：邵阳地区小时雨强 ≥ 80 mm 的极端短时降水，对应对流云团 TBB $< -72^{\circ}\text{C}$ ；成片区域性 ≥ 50 mm/h 的强降水，一般 -72°C 区域呈近圆形分布，且对流云团边缘梯度清晰；中尺度 β 及更小尺度的零散对流单体，极易触发局地极端短时强降水，单点小时雨量可突破 50 mm/h。

4.2. 雷达实况分析

4.2.1. 过程 I 雷达分析

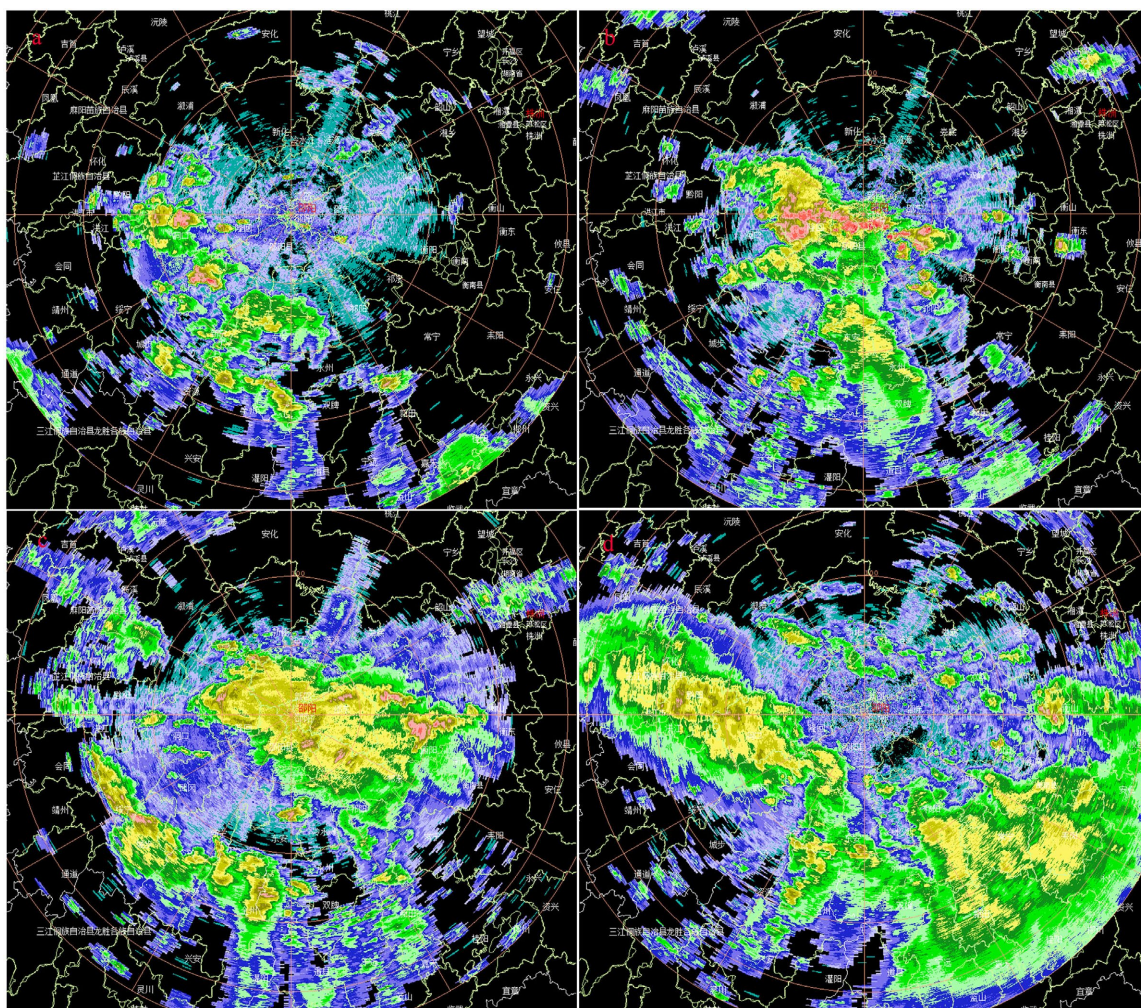


Figure 5. Evolution of composite reflectivity (CR, unit: dBZ) during Process I. (a) 18:00 BT on 16th; (b) 20:00 BT on 16th; (c) 22:00 BT on 16th; (d) 02:00 BT on 17th

图 5. 过程 I 组合反射率因子(CR, 单位: dBZ)演变。(a) 16 日 18:00, (b) 16 日 20:00, (c) 16 日 22:00, (d) 17 日 02:00

过程 I 雷达回波演变(见图 5)可分为两个主要阶段。第一阶段为 16 日 16 时至 21 时，绥宁境内率先出现多个弱对流单体东移发展，移至洞口、武冈后增强，18 时武冈最大反射率因子达 58 dBZ。同时，前沿隆回、

邵阳县、邵东等地新生单体稳定少动、持续加强。20时,新生单体与东移回波在邵阳中部组织成东西向带状强回波,北部最大反射率达62 dBZ,径向速度显示低层辐合,预示回波将持续并进一步发展加强。20时至21时邵阳县九公桥镇最大反射率因子维持在47.5 dBZ以上,小时雨强达81 mm,突破当地历史极值。

第二阶段:16日22时开始,邵阳市北部地区的强回波结构逐渐松散,强度明显减弱,绥宁和城步出现西北-东南向回波带向东移动,西北段移速较慢且有所加强,造成绥宁局地小时雨强超50 mm。17日白天以前,怀化中南部持续新生对流东移,形成后向传播影响邵阳西部及以北;桂林西北部不断有对流生成影响邵阳西南地区。本阶段回波强度弱于第一阶段,但后向传播与列车效应使降水持续,造成大范围暴雨和大暴雨,绥宁和洞口降水量强于城步、新宁,主要是因为怀化入境的对流单体越雪峰山脉后受地形抬升增幅,叠加前期降水使当地水汽充沛,降水效率提高。

4.2.2. 过程 II 雷达分析

第一阶段:23日午后至24日11时,邵阳全市多分散性小块状对流,局地伴有短时强降水。23日21时28分邵阳县至邵东一带对流发展迅速,22时13分东移合并加强,反射率因子 >50 dBZ, ZDR为0~2 dB,局部2.5~3 dB, KDP为 $0.5\sim1.7^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$, $CC>0.98$,表明存在液态大雨滴且数浓度较高。随后强回波面积继续扩大、强度增强。23时38分邵东全境受强回波影响,出现大到暴雨。

第二阶段:24日12时开始邵阳全境热对流新生显著增多,前沿及后向不断触发单体,移动中合并发展为多条带状强回波。13时45分邵东、邵阳县一带出现了大范围 >50 dBZ的强回波区, KDP增至 $1.1\sim3.1^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$,降水效率极高,邵东出现94.8 mm/h的极端雨强。16时多条带状回波连成片状,移速明显减慢,上游绥宁、城步持续新生对流单体并入,降水长时间维持。25日00时前后回波整体减弱,过程趋于结束。

4.2.3. 过程 III 雷达分析

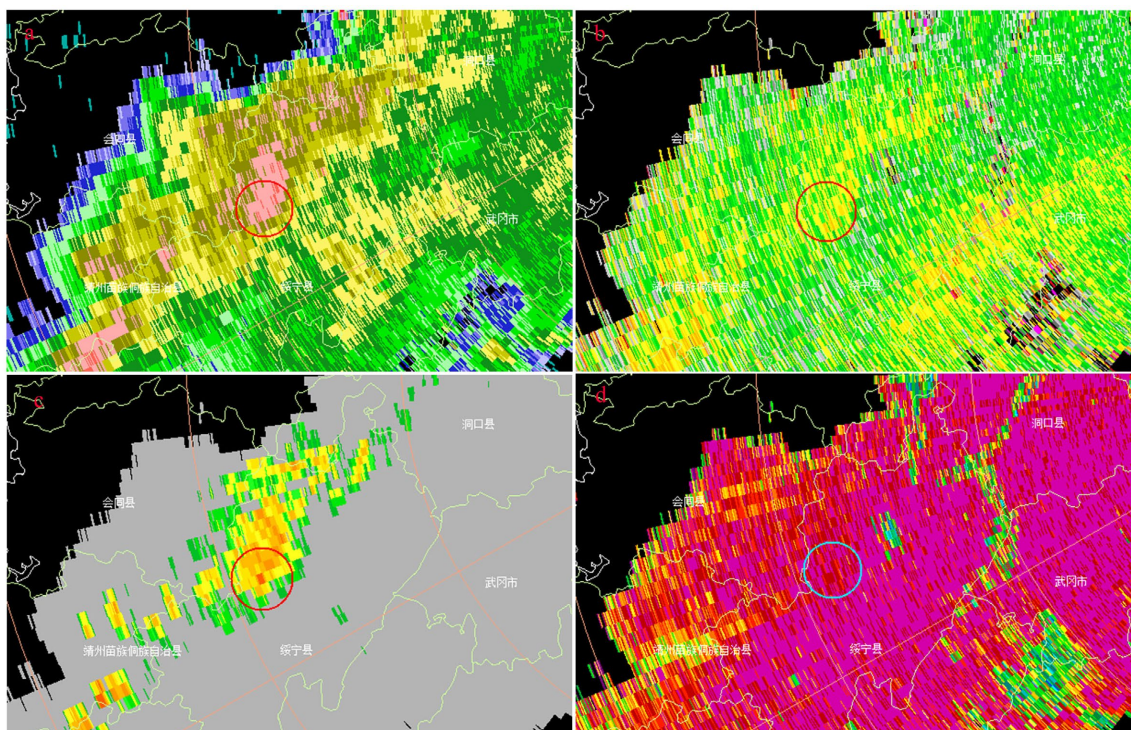


Figure 6. Spatial distribution of dual-polarization radar products (Z (a), ZDR (b), KDP (c), CC (d)) at 19:48 on July 1st (elevation 0.5°)

图 6. 7月1日19:48 0.5° 仰角双偏振雷达产品(Z (a)、ZDR (b)、KDP (c)、CC (d))空间分布

第一阶段：29 日 23 时邵阳西部有松散降水回波向东北移动。30 日 01 时 30 分，洞口、绥宁回波显著加强，排列紧密形成列车效应，反射率因子 >45 dBZ，ZDR 为 1~2 dB，KDP 为 $0.75\sim1.7^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ ，CC >0.98 ，局地雨强 $20\sim55$ mm/h。随后强回波范围缓慢扩大，覆盖西部、北部和中部，直至 30 日 08 时 30 分主体减弱东移。该阶段回波在西部停留时间长、强度大，Z、ZDR、KDP 大值区集中于此，导致隆回、洞口、绥宁等地暴雨到大暴雨。

第二阶段：7 月 1 日 16 时上游怀化强降雨(小时雨强 $60\sim70$ mm/h)缓慢东移，17 时 30 分影响邵阳西部。19 时 20 分回波主体东移南压，但雨强减弱，强降雨仅限绥宁北部。19 时 48 分雷达(见图 6)可见，强回波对应 KDP 为 $0.75\sim2.4^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ ，ZDR 为 1~2 dB，其中 KDP 与强降水峰值对应良好，ZDR 大值变化较周围测站的降水峰值提前约 2 个体扫(12 分钟)。相较于 Z、ZDR、CC 大面积的高值区，KDP 具有明显“突变”特征，监测其大值区的移动，能准确定位强降雨的位置。

5. 结论与讨论

本文基于多源观测资料，对 2024 年 6~7 月邵阳持续性极端强降雨过程的环境背景、中尺度演变及雷达回波特征开展分析，主要结论如下：

1) 本次过程发生在高层辐散、低层辐合的大尺度环流背景下，低层西南急流输送充沛水汽，K 指数 $38^{\circ}\text{C}\sim44^{\circ}\text{C}$ 、中等偏强的 CAPE 与 0~6 km 弱垂直风切变共同为对流系统长时间维持提供了有利的环境条件。

2) TBB 与雨强关系密切。小时雨强 ≥ 80 mm 的极端降水，对应对流云团 TBB 低于 -72°C ；成片 ≥ 50 mm/h 强降水对应近圆形 -72°C 冷云区，云团边缘温度梯度清晰。

3) 后向传播与列车效应叠加是降水持续、落区重叠的主要原因，叠加前期降水的水汽累积效应与雪峰山脉地形增幅作用，共同造成邵阳西部地区降水反复加强、极值突出。

4) 双偏振参量 ZDR、KDP 的大值区与极端降水落区高度吻合。其中 KDP 的“突变”区域可精准指示核心降水区；ZDR 大值区出现早于降水峰值约 12 分钟，为短临预警提供了有效的前兆信号，这与曾琳 [4] 等对超级单体强降水前兆的分析结论一致。

本研究仍存在一定局限，对流触发的精细物理机制、地形与水汽条件的定量增幅效果有待进一步剖析。后续可结合数值模拟深化机理研究，完善湘中区域暴雨预警指标体系。

参考文献

- [1] 辛玮琦, 马中元, 谌云, 等. 宜丰短时强降雨雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(2): 70-80.
- [2] 李明华, 陈芳丽, 姜帅, 等. “18.8”粤东暴雨中心极端强降水“列车效应”分析[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(4): 329-337.
- [3] 杨舒楠, 张芳华, 徐珺, 等. 四川盆地一次暴雨过程的中尺度对流及其环境场特征[J]. 高原气象, 2016, 35(6): 1476-1486.
- [4] 曾琳, 张羽, 李浩文, 等. 2020 年 5 月 22 日广州强降水超级单体的 S 波段双偏振雷达回波分析[J]. 气象科学, 2023, 43(2): 235-244.
- [5] 孔祥伟, 杨建才, 李红, 等. 甘肃河东地区不同环流形势下短时强降雨的雷达回波特征分析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1057-1070.
- [6] 张俊兰, 李伟, 郑育琳. 昆仑山北坡短时强降水天气分型及雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(1): 1-9.
- [7] 王成福, 谢蕊, 吉哲君, 等. 甘南高原大到暴雨天气过程分型及特征[J]. 干旱气象, 2019, 37(1): 97-108+118.
- [8] 陈鲍发, 马中元, 黄龙飞, 等. 赣东北致洪暴雨的天气分型和回波特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 38(3): 18-22.