

华北2024年8月9日一次短时强降水的雷达特征

史俊玉^{1,2}, 毛文书^{1*}

¹成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

²中国气象局航空气象重点开放实验室, 北京

收稿日期: 2026年6月24日; 录用日期: 2026年8月21日; 发布日期: 2026年9月1日

摘要

本文利用DDW1三维全闪定位资料、双偏振雷达、地面降水及探空资料, 选取2024年8月9日华北地区极端短时强降水过程, 深入解析了强降水系统的动力-微物理-电活动三维演变特征。结果表明: 本次极端降水过程中, 强降水阶段对流核心反射率和KDP均处高值, ZDR柱顶高接近-20℃层, 液态与过冷水被有效输送至混合相区0℃层以上重质冰相粒子(霰粒和冰雹)高度集聚并与强回波区重合, 而轻质冰相粒子(冰晶、雪晶)则弥散分布于外围弱回波区。云闪辐射源主要分布在3~15 km高度, 且分别有72.7%和50.9%的辐射源落入ZDR柱区和KDP高值区, 展现出优异的空间匹配特征。充沛的过冷液态水、霰粒和冰晶在混合相态区的共存与碰撞, 为非感应起电和云闪活动发展提供了有利的动力-微物理条件。

关键词

短时强降水, 雷达回波, 闪电活动, 华北地区

Radar Characteristics of a Short-Time Heavy Rainfall in North China on August 9, 2024

Junyu Shi^{1,2}, Wenshu Mao^{1*}

¹School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Key Laboratory of Aeronautical Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing

Received: June 24, 2026; accepted: August 21, 2026; published: September 1, 2026

Abstract

In this paper, the extreme short-time heavy rainfall process in North China on August 9, 2024 is selected by using DDW1 three-dimensional all-flash positioning data, dual-polarization radar, surface precipitation and sounding data, and the three-dimensional evolution characteristics of

*通讯作者。

dynamic-microphysical-electrical activity of heavy rainfall system are deeply analyzed. The results show that during this extreme precipitation process, the reflectivity and KDP of the convective core are high in the heavy precipitation stage, and the top height of the ZDR column is close to the -20°C layer. The liquid and supercooled water are effectively transported to the mixed phase zone. Above the 0°C layer, the heavy ice particles (graupels and hail) are highly concentrated and overlap with the strong echo area, while the light ice particles (ice crystals and snow crystals) are dispersed in the peripheral weak echo area. The cloud-to-cloud flash radiation sources are mainly distributed at the height of 3~15 km, and 72.7% and 50.9% of the radiation sources fall into the ZDR column area and the KDP high value area, respectively, showing excellent spatial matching characteristics. The coexistence and collision of abundant supercooled liquid water, graupel and ice crystals in the mixed phase region provide favorable dynamic-microphysical conditions for the development of non-inductive electrification and cloud flash activity.

Keywords

Short-Time Heavy Rainfall, Radar Echo, Lightning Activity, North China

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. 绪论

在强对流天气研究中, 雷达回波结构与闪电活动的关系一直受到关注。研究表明, 总闪活动与对流上升气流强度、混合相态区粒子输送及冰相通量密切相关[1][2]。近年来, 我国闪电探测正由传统 ADTD 二维定位向具备高度探测能力的 DDW1 三维全闪定位发展, 显著提升了探测灵敏度和高度测量精度[3][4]。同时, 新一代双偏振雷达的应用实现了云内水成物粒子相态的精细化识别[5]。国内外研究进一步证实, 风暴是否起电及闪电频次高度依赖于强回波伸展至混合相态区的程度, 以及冰相降水物质(如霰粒与冰晶)的有效碰并增长过程[6][7]。

在短临预警方面, 闪电跃增作为识别对流快速发展的核心指标[8], 与风暴内部上升气流增强、过冷水向高层输送以及冰相粒子碰并增多等动力-微物理演变紧密相连[9]。因此, 将三维闪电资料与双偏振雷达参量垂直联合分析, 有助于从宏观动力和微观起电角度深入解析强风暴内部三维结构, 为短时强降水短临预警提供科学依据。

已有研究从区域统计及二维平面匹配等方面揭示了华北地区短时强降水与电活动的联系[10]-[12]。然而, 利用三维全闪与双偏振雷达资料, 针对带状强降水系统中动力-微物理-电活动垂直耦合特征的精细化个例分析仍较少, 特别是降水与闪电峰值的时空同步性及各参量空间配置机理仍需深入探讨。基于此, 本文选取 2024 年 8 月 9~10 日京津冀地区一次极端短时强降水过程, 综合多源高分辨率资料分析其微物理结构与云闪演变特征, 以期揭示该类带状强降水系统中动力-微物理-电活动的内在联系与物理机制。

2. 研究数据与方法

2.1. 数据来源与预处理

本研究利用 2024 年 8 月 9 日华北暖季一次对流系统的多源高时空分辨率观测资料, 主要包括:

(1) 闪电资料升级后的 DDW1 型三维全闪定位系统资料, 用于提取云闪(IC)和地闪(CG)三维辐射源的时空三维坐标[4][10]。

(2) 京津冀 CIRCADIAN 新一代双偏振雷达组网数据(时频 6 min), 经双线性插值统一处理为水平分辨率 0.01°、垂直分辨率 1.0 km (0.5~19.5 km, 共 20 层)的三维笛卡尔网格格点数据, 利用其观测的双偏振参量(ZH, ZDR, KDP, CC)表征水成物粒子特征。

(3) 华北区域高密度自动雨量站(AWS)逐小时降水资料, 经严格质量控制剔除异常极值[12]。

(4) 北京站(站号 54511) 20:00 (BJT)的秒级常规探空观测, 用于获取对流层环境热动力参数及关键对流层高度。

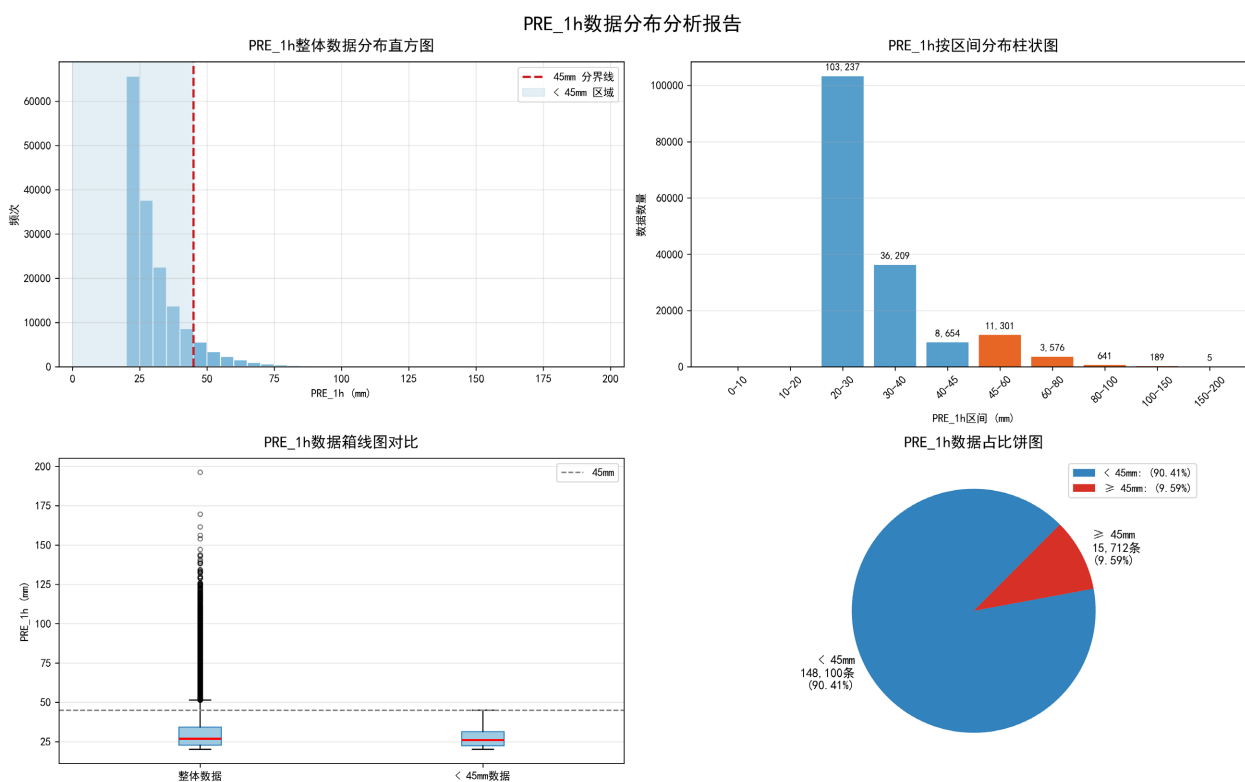
2.2. 分析方法与关键公式

为精细化刻画对流系统的动力、微物理与电活动特征, 建立以下分析方法:

组合反射率(CR)计算: 利用三维雷达格点资料, 对每个水平格点 (x, y) 上方垂直方向 z 所有层的反射率因子取最大值并投影到同一平面[11]:

$$CR_{(x,y)} = \max_k [Z_{(x,y,z_k)}] \quad (2-1)$$

极端降水事件定义: 采用近 15 年小时降水数据的百分位阈值法, 提取排序前 10% (对应雨强小时雨强 ≥ 45 mm/h)定义为极端短时强降水(SDHR)事件。如图 1 为降水数据分布特征[13]。



注: 图片由 python 软件制图。

Figure 1. Analysis of distribution characteristics of hourly precipitation (PRE_1h) data

图 1. 小时降水量(PRE_1h)数据分布特征分析

数据极差归一化: 为消除多源参量量纲影响, 对相关指标进行极差归一化:

$$\hat{x}_{i,t} = \frac{x_{i,t} - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}} \quad (2-2)$$

式中, $x_{i,t}$ 为第 t 个时次的第 i 项指标, $x_{i,\min}$ 和 $x_{i,\max}$ 分别为该指标在全部分析时次中的最小值和最大值。当最大值与最小值相同时, 归一化结果取 0。

综合推荐评分(S): 结合闪电与雷达特征构建对流核心评分模型:

$$S_i = 0.28\hat{N}_{IC} + 0.14\hat{N}_{mix} + 0.08\hat{N}_0 + 0.16\hat{N}_{micro} + 0.08\hat{N}_{ZDR} + 0.08\hat{N}_{KDP} + 0.05\hat{N}_{ZH} + 0.05\hat{Z}_{max} + 0.04K\hat{D}P_{max} + 0.02\hat{A}_{ZDR} + 0.02\hat{A}_{KDP} \quad (2-3)$$

其中, $\hat{N}_{IC}$ 为云闪辐射源总数, $\hat{N}_{mix}$ 为位于 $0^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$ 混合相态层内的辐射源数, $\hat{N}_0$ 为 0°C 层以上的辐射源数; $\hat{N}_{micro}$ 、 $\hat{N}_{ZDR}$ 、 $\hat{N}_{KDP}$ 和 $\hat{N}_{ZH}$ 分别为落入任一微物理特征区、ZDR 柱区、KDP 高值区和强回波区的辐射源数; $\hat{Z}_{max}$ 和 $K\hat{D}P_{max}$ 分别为研究区域内最大反射率和最大 KDP, $\hat{A}_{ZDR}$ 和 $\hat{A}_{KDP}$ 分别为 ZDR 柱和 KDP 高值区面积。

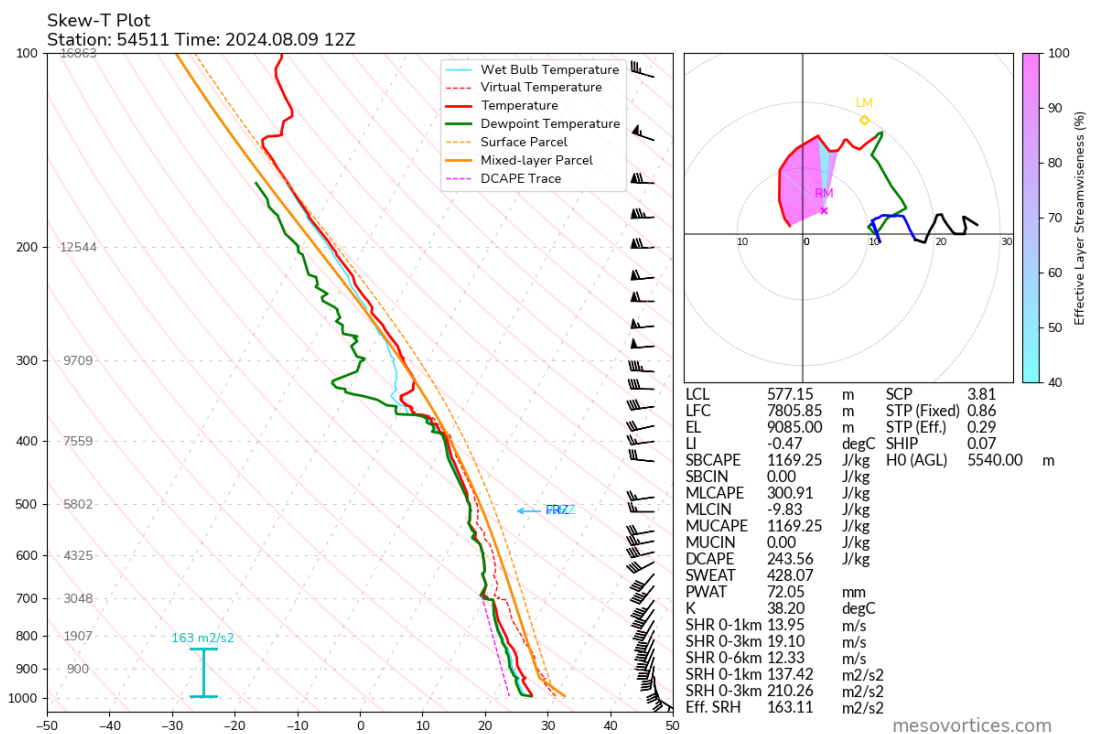
为进一步定量描述云闪辐射源与雷达微物理特征的空间匹配程度, 分别计算辐射源落入强回波区、ZDR 柱区、KDP 高值区及任一微物理特征区的比例:

$$P_x = \frac{N_x}{N_{IC}} \times 100\% \quad (2-4)$$

式中, N_{IC} 为统计时段内云闪辐射源总数, N_x 为落入第 x 类雷达特征区的云闪辐射源数, x 分别表示强回波区、ZDR 柱区、KDP 高值区和任一微物理特征区。由于不同雷达特征区之间可能存在重叠, 各匹配比例之和不要等于 100%。

3. 2024 年 8 月 9 日极端降水微物理与全闪特征

3.1. 大尺度环境背景

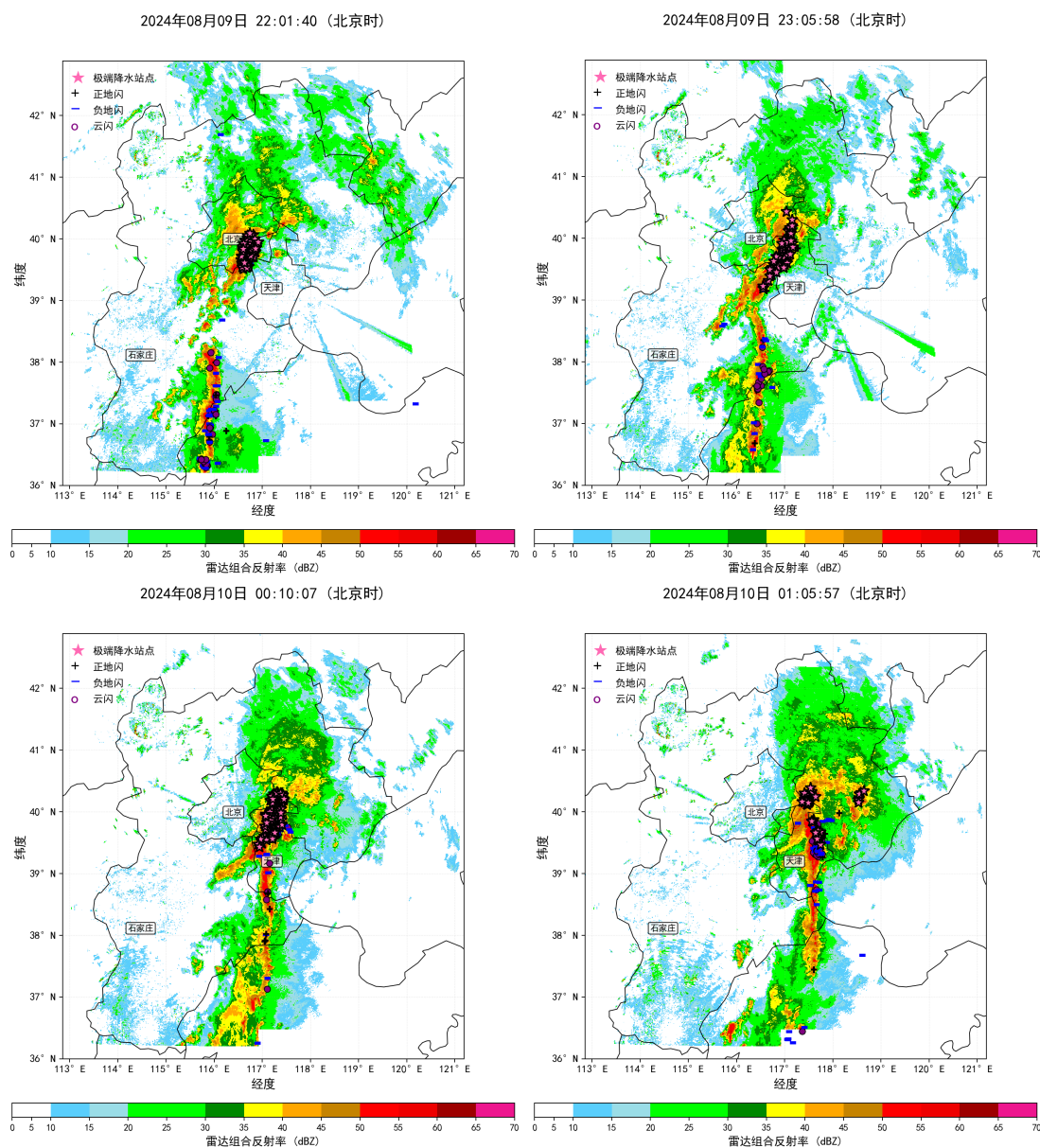


注: 图片由 python 软件制图。

Figure 2. Environmental sounding before heavy rainfall at 20:00 (BJT) 54511 station on August 9, 2024
图 2. 2024 年 8 月 9 日 20:00 (BJT) 54511 站强降水前环境探空

2024年8月9~10日京津冀极端降雨过程前期20时北京探空表明(如图2): 低层至中层温、露点曲线贴近, 水汽充沛, 可降水量72.05 mm, 抬升凝结高度仅577 m。热力上SBCAPE、MUCAPE均为1169 J/kg, 对流不稳定能量中等, CIN近0、对流抑制微弱, K指数38.2℃, 利于雷暴与强降水发展。风场方面, 0~3 km、0~6 km垂直风切变分别为19.10 m/s、12.33 m/s, 低层风切变可组织对流; 0~3 km风暴相对螺旋度210.26 m²/s², 低层风随高度转向显著, 便于对流单体合并、带状回波维持并加剧局地降雨。整体降水前期环境特征为水汽丰厚、低层高湿、云底低、对流抑制弱, 具有中等不稳定能量与适宜垂直风切变的特征。

3.2. 降水过程和闪电活动时空演变



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为GS(2016)610号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 3. Evolution of radar combined reflectivity and total lightning activity of the extreme rainstorm process in North China on August 9~10, 2024

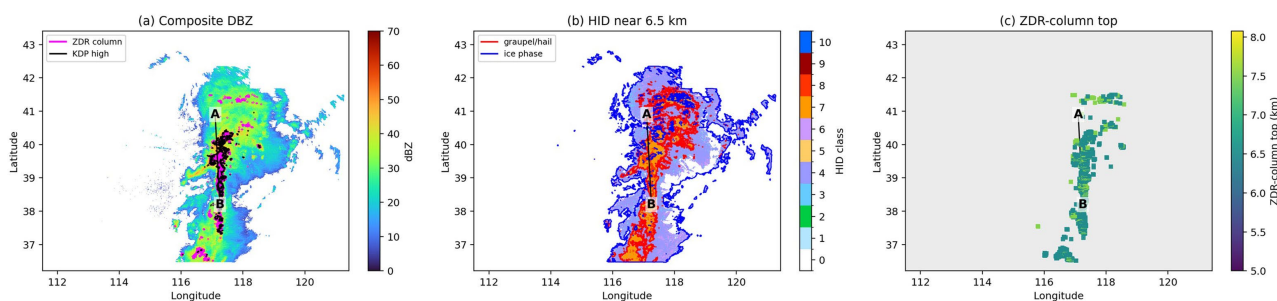
图3. 2024年8月9~10日华北极端暴雨过程的雷达组合反射率与全闪活动演变

2024年8月9日对流系统演化分为三个阶段: 21:00~23:00 在河北中南部初生, 单体合并为对流簇, 闪电密集但降水零散局地; 23:00~次日 01:00 北移重组形成东北-西南向带状强回波, 进入降水爆发期, 北京周边极端降水站点集中于 50 dB 以上强回波区, 雨强、范围显著增大; 02:00~03:59 系统东移消散, 动力抬升减弱、回波松散碎片化, 降水与闪电活动快速衰减, 最终随层状云铺开消亡。

图 3 选取 22:01 至次日 01:05 四个关键时次雷达组合反射率, 叠加前后 3 分钟闪电、极端降水站点, 展示回波、闪电与降水的匹配关系。全过程降水极值区与闪电密集区对应度高: 发展初期西南部对流垂直发展旺盛, 紧实的 50 dB 以上回波核心伴随大量闪电; 系统东北行受冷暖交汇持续增强, 23:05、00:10 形成大范围强带状对流, 北京周边极端降水站点激增、强回波范围扩张; 强盛阶段闪电集中于回波梯度大、水成物含量高的强降水区, 反映强对流回波、起电与降水紧密关联; 01:05 进入维持阶段后, 三者高度匹配特征持续至系统消散。

3.3. 对流系统双偏振参量特征分析

选取强降水典型时刻 00:29 精细化剖析对流动力与微物理特征: 图 4(a) 中强回波沿主对流带呈紧实南北线状分布, 对流核心完整强盛; 核心区 ZDR 柱与 KDP 大值区空间高度重合, 紧贴反射率中心, 表明低层至中层液态水输送充沛、雨滴碰并增长高效, 大量大雨滴堆积, 支撑短时强降水持续发生。图 4(b) 为 6.5 km 高度水成物分类(HID), 各相态粒子分层富集明显。冷云区冰晶、雪晶等轻质冰粒大范围弥散于对流带外围; 霰、冰雹等重冰粒子集中在强回波核心与 ZDR 柱上方, 体现强上升运动对大冰相粒子的抬升集聚作用, 其中, 6.5 km 高度水凝物分类标准具体为: (0: 无回波, 1: 小雨, 2: 中雨, 3: 大雨, 4: 干雪, 5: 湿雪, 6: 冰晶, 7: 低密度霰, 8: 高密度霰, 9: 冰雹, 10: 大雨滴)。图 4(c) ZDR 柱顶高可表征局地上升运动强弱, 其沿对流带呈离散斑块分布, 顶高多为 5~8 km, 说明系统上升气流呈局地单体化特征。柱顶偏高区域对应强抬升核心, 充足过冷水输送至中高层, 利于冰粒碰冻生成霰与冰雹; 无明显 ZDR 柱或柱顶偏低区域上升运动微弱, 过冷水供给不足, 粒子增长、起电过程均受抑制。



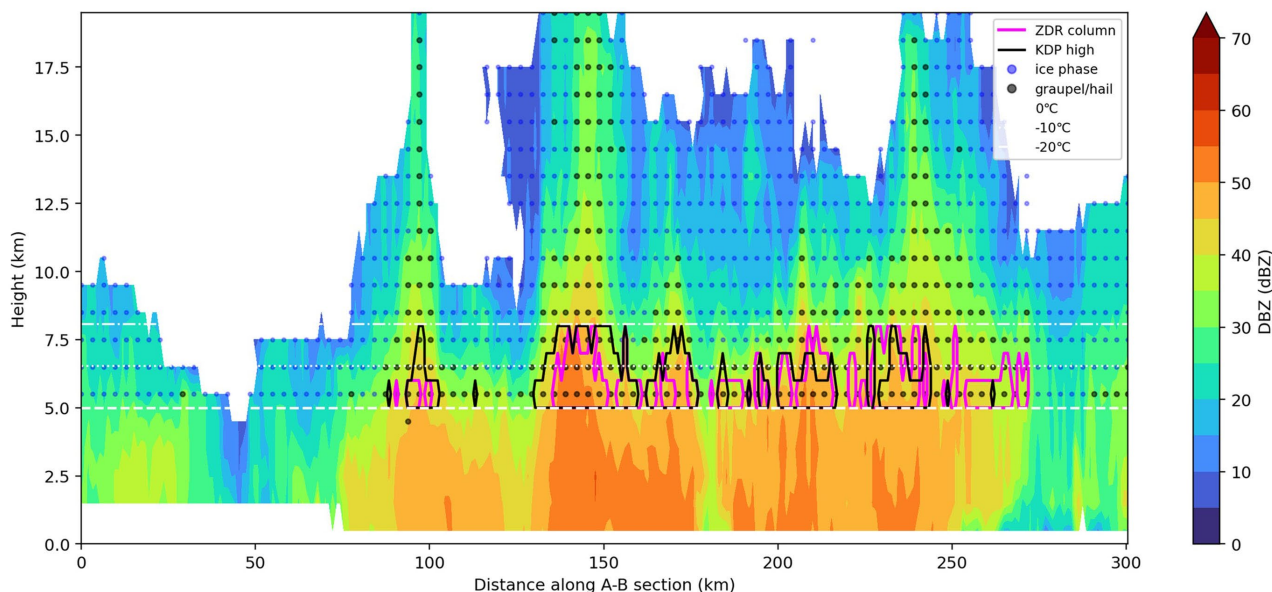
注: 图片由 python 软件制图。

Figure 4. Dual-polarization radar parameters, hydrometeor phase and ZDR_column top distribution of convective systems over North China at 00:29 on August 10, 2024

图 4. 2024 年 8 月 10 日 00:29 华北对流系统双偏振雷达参数、水凝物相态及 ZDR_column 顶部分布

图 5 展示了沿 A-B 剖面的反射率、ZDR 柱、KDP 大值区及冰相粒子的垂直分布。从反射率来看, 对流核心在低层具有明显的强回波结构, 局地最大反射率达到 60.6 dB。强回波并未只停留在近地层, 而是向上延伸到 0℃ 层以上, 说明该阶段对流发展较强, 云内存在较明显的垂直输送。ZDR 柱主要出现在 0℃ 层附近及其上方, 并可向上延伸至约 7.5 km, 接近 -20℃ 层附近。其水平范围较大, 图中 KDP 大值区与部分 ZDR 柱位置较为接近, 尤其在强回波上方和混合相态层附近更为明显。从 HID 叠加结果看, 0℃ 层以上分布有较多冰相粒子, 其中霰和冰雹等重质冰相粒子主要位于混合相态区, 并与强回波区高度重合,

冰晶、雪等轻质冰相粒子则主要分布在弱回波区, 且多集中在对流上部及外围区域。且 00:29 (BJT)时刻的对流核心同时具有强降水、强上升气流、低层雨滴增长和高层冰相粒子发展等特征, 为短时强降水和高频次闪电活动提供了有利条件。



注: 图片由 python 软件制图。

Figure 5. Aug. 10, 2024 00:29:52 BJT convection system dual-polarization biophysical vertical structure

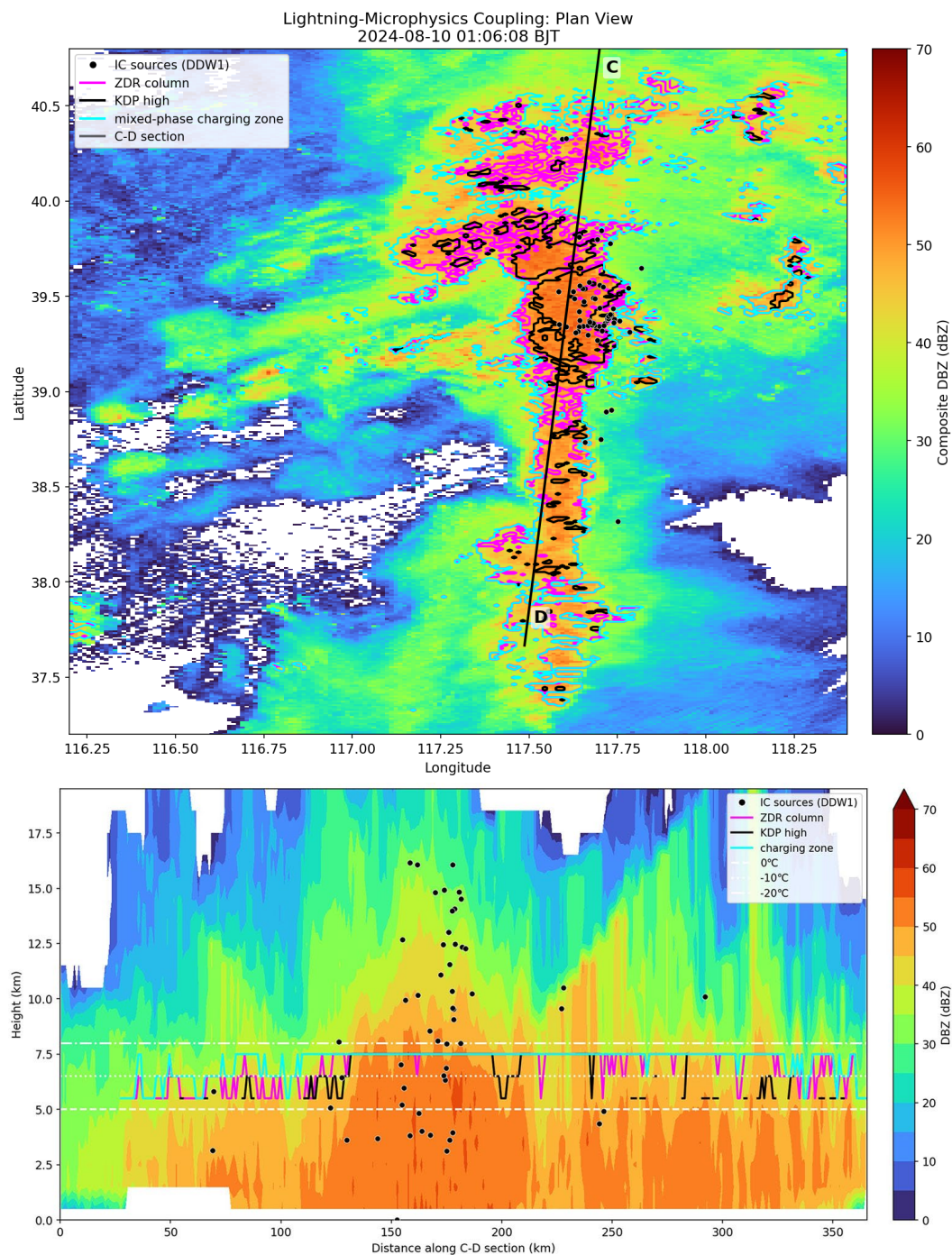
图 5. 2024 年 8 月 10 日 00:29:52 BJT 对流系统双偏振微物理垂直结构

3.4. 全闪活动与微物理过程的关系

前一节主要分析 00:29 (BJT)强降水阶段的双偏振微物理结构。为进一步研究闪电活动与雷达微物理特征之间的关系, 按照 2.2.6 节所述方法, 对研究时段内全部雷达体扫时次进行综合评分(图略)。结果表明, 2024 年 8 月 10 日 01:06:08 (BJT)的综合推荐评分达到全时段最大值, 且该时次前后各 6 min 内共观测到 55 个云闪辐射源, 为研究时段内的最高值。因此, 选取该时次开展闪电-微物理特征分析。

图 6(a)为 2024 年 8 月 10 日 01:06:08 雷达组合反射率、ZDR 柱、KDP 高值区、混合相态区与 DDW1 云闪辐射源叠加图, 直观反映对流动力、微物理及起电活动的空间耦合特征。此时对流呈南北向带状, 北段回波更强, 中心强度 40~55 dB, 粒子富集、对流发展旺盛。微物理上, 39.0°N 以北强回波周边分布大量 ZDR 柱与 KDP 大值区, 前者代表上升气流抬升大水滴与湿增长粒子, 后者表征高液态水含量与粒子旺盛碰并, 二者共存体现云内液、冰相微物理过程同步活跃。云闪辐射源集中于回波带中北段, 和 ZDR 柱、KDP 高值区、混合相态区匹配良好, 说明云闪多发生在过冷水与冰粒子共存、微物理作用强烈的区域, 并非仅出现在反射率极值区, 印证起电活动依赖复杂云内微物理环境。定量统计 01:06:08 前后 6 分钟共 55 个云闪辐射源: 76.4%位于 0°C 层以上, 20.0%处于 0°C~20°C 混合相态层; 72.7%、50.9%分别落在 ZDR 柱、KDP 高值区内, 合计 87.3%分布于两类微物理特征区, 量化证实云闪与混合相微物理过程紧密相关。C-D 剖面横穿云闪、ZDR 柱与 KDP 高值集中的带状对流系统(图 6(b)): 强回波延伸至 8~10 km, 对流发展深厚; 云闪源分布 4~16 km, 密集于 0°C~20°C 及更高层, 此处粒子共存、碰撞起电活跃。5~7 km 中低层的 ZDR 柱、KDP 大值区与上方云闪密集区水平对应良好。由 01:06:08 (BJT)时刻 DDW1 观测的云闪辐射源的高度分布(图略)。整体来看, 该时刻云内放电主要发生在对流云中高层, IC 源高度主要

分布在约 3~15 km 之间。在 3~7 km 和 9~15 km 高度范围内均有较明显分布, 中低层也存在一定电活动。结合温度层结来看, 0℃、-10℃和-20℃高度大致分别位于 5 km、6.5 km、8 km 附近。相当一部分 IC 源位于 0℃层以上, 并向-20℃层以上延伸。



注: 图片由 python 软件制图。

Figure 6. Plane coupling of radar microphysical structure with lightning activity (a) and vertical distribution with 01:06:08 (BJT) C-D profile (b)

图 6. 雷达微物理结构与闪电活动的平面耦合 (a)和与 01:06:08 (BJT) C-D 剖面的垂直分布 (b)

4. 讨论

4.1. 本次过程与华北地区相关研究的异同

本次华北带状强降水过程的发展演变及闪电空间分布特征与已有研究[14][15]结果基本一致,均表现为多个对流单体合并、组织化发展为线状强回波,且电活动与强降水中心高度依附于强回波带附近。同时,本次过程表现出独特的动力-微物理耦合特性。系统在典型强降水阶段展现出极强的对流特征与丰富的冰相物质丰度,ZDR柱顶高延伸至 -20°C 层附近,大量重质冰相粒子高度富集于混合相态区;三维全闪辐射源则在垂直方向(3~15 km)与ZDR柱、KDP高值区呈现出优异的空间匹配,体现了非感应起电机制对云内微物理环境的强依赖性。此外,强降水阶段与云闪活跃顶峰存在约37 min的时间滞后,表明粒子增长、电荷分离至宏观放电之间存在一定的物理演变链。

4.2. 结论的适用范围与局限性

本文所得结论主要适用于环境水汽充沛、具深厚混合相态区的暖季对流系统。由于缺乏风暴内部垂直速度及电荷结构的直接观测,文中关于起电机制的推断仍基于观测特征,后续将引入更多异质性个例并结合数值模拟展开进一步检验。

5. 结论

针对2024年8月9日华北极端短时强降水过程,本文深入解析了对流系统动力、微物理与电活动的垂直特征,主要结论如下:

(1) 强降水阶段系统动力抬升强劲、水汽充沛。对流核心呈高反射率和大KDPK_{DP}KDP特征,低层雨滴碰并增长充分;同时,ZDR柱顶高伸展至 -20°C 层附近,将充沛的过冷水持续向高空输送。这导致 0°C 层以上的混合相态区内霰粒、冰雹等重质冰相粒子高度集聚并与强回波重合,而冰雪晶等轻质粒子则向外围及对流上部弥散分布。

(2) 全闪活跃期云闪辐射源主要分布在3~15 km,在垂直方向呈明显的双峰结构(3~7 km和9~15 km),且绝大部分位于 0°C 层以上。云闪辐射源三维空间分布与强回波区、ZDR柱及KDP高值区具有优异的空间匹配关系,定量统计显示,分别有72.7%和50.9%的云闪辐射源落入ZDR柱区和KDP高值区。这证实过冷液态水、霰粒与冰晶在混合相态区的充沛共存与剧烈碰撞,为非感应起电及云闪活动的发展提供了决定性的物理条件。

致 谢

衷心感谢中国气象局航空气象重点开放实验室开放研究课题(HKQXM-2024004)对本研究的资助。

参考文献

- [1] Deierling, W., Petersen, W.A., Latham, J., Ellis, S. and Christian, H.J. (2008) The Relationship between Lightning Activity and Ice Fluxes in Thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **113**, D15210. <https://doi.org/10.1029/2007jd009700>
- [2] Deierling, W. and Petersen, W.A. (2008) Total Lightning Activity as an Indicator of Updraft Characteristics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **113**, D16210. <https://doi.org/10.1029/2007jd009598>
- [3] 张道远, 王猛, 沈琪, 等. DDW1型闪电定位仪数据质量分析评估[J]. 气象水文海洋仪器, 2024, 41(1): 13-16.
- [4] 李庆申, 陈宇涵, 张阳, 等. DDW1闪电定位系统及性能评估[J]. 气象科技, 2020, 48(6): 788-794.
- [5] 徐舒扬, 吴翀, 刘黎平. 双偏振雷达水凝物相态识别算法的参数改进[J]. 应用气象学报, 2020, 31(3): 350-360.
- [6] Gauthier, M.L., Petersen, W.A., Carey, L.D. and Christian, H.J. (2006) Relationship between Cloud-to-Ground Lightning

- and Precipitation Ice Mass: A Radar Study over Houston. *Geophysical Research Letters*, **33**, L20803. <https://doi.org/10.1029/2006gl027244>
- [7] Mattos, E.V., Machado, L.A.T., Williams, E.R. and Albrecht, R.I. (2016) Polarimetric Radar Characteristics of Storms with and without Lightning Activity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **121**, 14.201-14.202. <https://doi.org/10.1002/2016jd025142>
- [8] Schultz, C.J., Petersen, W.A. and Carey, L.D. (2009) Preliminary Development and Evaluation of Lightning Jump Algorithms for the Real-Time Detection of Severe Weather. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **48**, 2543-2563. <https://doi.org/10.1175/2009jamc2237.1>
- [9] Schultz, C.J., Carey, L.D., Schultz, E.V. and Blakeslee, R.J. (2017) Kinematic and Microphysical Significance of Lightning Jumps versus Non-Jump Increases in Total Flash Rate. *Weather and Forecasting*, **32**, 275-288. <https://doi.org/10.1175/waf-d-15-0175.1>
- [10] 王志超, 庞文静, 梁丽, 许崇海, 雷勇. ADTD 闪电定位网在北京地区定位效率的自评估[J]. 气象科技, 2018, 46(4): 638-643+664.
- [11] Liu, D., Sun, M., Su, D., Xu, W., Yu, H. and Chen, Y. (2021) A Five-Year Climatological Lightning Characteristics of Linear Mesoscale Convective Systems over North China. *Atmospheric Research*, **256**, Article 105580. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105580>
- [12] Wu, F., Cui, X., Zhang, D. and Qiao, L. (2017) The Relationship of Lightning Activity and Short-Duration Rainfall Events during Warm Seasons over the Beijing Metropolitan Region. *Atmospheric Research*, **195**, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.032>
- [13] Schär, C., Ban, N., Fischer, E.M., Rajczak, J., Schmidli, J., Frei, C., *et al.* (2016) Percentile Indices for Assessing Changes in Heavy Precipitation Events. *Climatic Change*, **137**, 201-216. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1669-2>
- [14] 易笑园, 张义军, 王红艳, 董昊, 张楠, 徐姝. 线状中尺度对流系统内多个强降水单体的结构演变及闪电活动特征[J]. 气象学报, 2013, 71(6): 1035-1046.
- [15] 易笑园, 孙晓磊, 张义军, 等. 雷暴单体合并进行中雷达回波参数演变及闪电活动的特征分析[J]. 气象学报, 2017, 75(6): 981-995.