

2015年7月29日华北一次短时强降水的闪电活动特征

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18日; 录用日期: 2026年8月28日; 发布日期: 2026年9月7日

摘 要

本文利用ADTD、WWLLN闪电定位资料、S波段天气雷达、地面降水观测资料和ERA5再分析资料, 针对2015年7月29日华北一次极端短时强降水过程开展精细化个例研究, 分析强降水系统的闪电活动时空演变。对强降水-强闪电和强降水-弱闪电雷暴系统进行对比, 初步探讨了特定电活动背景下极端降水形成机制的可能差异。结果表明: 在此次特定天气事件中, 南部强闪电系统闪电与强回波同步发展, 最大反射率达70 dB, 40 dB强回波顶高稳定在18.5~19.5 km, 强回波质心进入-10℃至-20℃混合相态起电层, 强上升气流支撑冰相粒子有效碰并, 闪电密度峰值达7.8次/100 km²/6 min; 北部弱闪电系统虽然降水范围广、回波强, 但呈现对流区后置、层状云区前置的结构, 单体合并后大粒径水凝物快速下落抑制了上升气流, 且冰晶被输送至前方层状云区, 与后方对流区的霰粒子发生空间分离, 导致混合相态区有效碰并概率大幅降低, 非感应起电难以维持, 最终表现出强降水-弱闪电特征。

关键词

短时强降水, 雷达回波, 闪电活动, 华北地区

Lightning Activity Characteristics of a Short-Time Heavy Rainfall in North China on July 29, 2015

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 18, 2026; accepted: August 28, 2026; published: September 7, 2026

*通讯作者。

文章引用: 史俊玉, 毛文书. 2015年7月29日华北一次短时强降水的闪电活动特征[J]. 自然科学, 2026, 14(5): 611-625.
DOI: 10.12677/ojns.2026.145065

Abstract

In this paper, ADTD, WLLN lightning location data, S-band weather radar, surface precipitation observation data and ERA5 reanalysis data were used to carry out a detailed case study on an extreme short-term heavy rainfall process in North China on July 29, 2015, and to analyze the temporal and spatial evolution of lightning activity in the heavy rainfall system. By comparing the strong precipitation-strong lightning and strong precipitation-weak lightning thunderstorm systems, the possible differences in the formation mechanism of extreme precipitation under the background of specific electrical activity are preliminarily discussed. The results show that in this specific weather event, the lightning and strong echo of the southern strong lightning system developed synchronously, the maximum reflectivity reached 70 dB, the top height of 40 dB strong echo was stable at 18.5~19.5 km, the center of mass of strong echo entered the mixed phase state electrification layer from -10°C to -20°C , the strong updraft supported the effective collision of ice particles, and the peak value of lightning density reached 7.8 times/100 km²/6 min. Although the weak lightning system in the north has a wide range of precipitation and strong echo, it presents a structure of rear convection area and front stratiform cloud area. After the merging of the cells, the rapid fall of large-size hydrometeors inhibits the updraft, and the ice crystals are transported to the front stratiform cloud area, which is spatially separated from the graupel particles in the rear convection area, resulting in a significant reduction in the effective collision probability of the mixed phase region, and the non-inductive electrification is difficult to maintain, and finally shows the characteristics of strong precipitation-weak lightning.

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

在全球气候变暖的背景下, 极端天气气候事件发生的频率增加、强度增强, 影响范围扩大, 极端降水作为其中重要类型之一, 正在对区域防灾减灾提出更高要求[1][2]。华北地区人口密集、产业活动集中, 城市化水平较高, 区域内降水时空分布不均, 降水量的年际变化与大雨频率和暴雨贡献率关系密切[3][4]。近几十年来, 在气候变化的影响下, 华北极端降水事件的突发性和局地性更加明显, 北京、河北等地多次出现突破历史记录的极端暴雨过程[5]-[7]。这类降水往往历时短、雨强大、落区集中, 一旦发生在城市低洼区、交通枢纽或山前地带, 容易诱发城市内涝、山洪、滑坡泥石流等次生灾害, 进一步加重区域灾害风险[8][9]。因此, 围绕华北短时强降水过程开展精细化分析, 有助于认识该类天气的发生发展特征, 为灾害防御和短临预警提供参考。闪电活动是强对流系统发展过程中的重要现象, 但其与降水强度之间并不是简单的一一对应关系。在部分强对流过程中, 强回波和高雨强常伴随频繁闪电; 而在另一些过程中, 即使地面降水极强, 闪电活动也可能并不活跃。造成这种差异的关键, 与对流系统内部上升气流持续性、混合相态区水成物分布以及冰相粒子碰撞起电条件有关。非感应起电理论认为, 在一定的过冷水条件下, 当上升气流能够将过冷液态水输送到 0°C 层以上时, 冰晶、霰等冰相物粒子在混合相态区发生碰撞并产生电荷分离, 从而产生闪电活动[10]。已有研究表明, 闪电活动频次与上升气流速度、冰相粒子含

量以及 40 dB 以上强回波体积和面积等雷达特征参数具有高度相关性[11]。在华北地区, 太行山地形强迫[12]与局地城市热岛效应[13]常导致对流单体在组织化过程中表现出复杂的闪电活动特征。因此, 将雷达对流结构与闪电活动结合起来分析, 有助于进一步认识短时强降水过程中的动力和微物理机制。

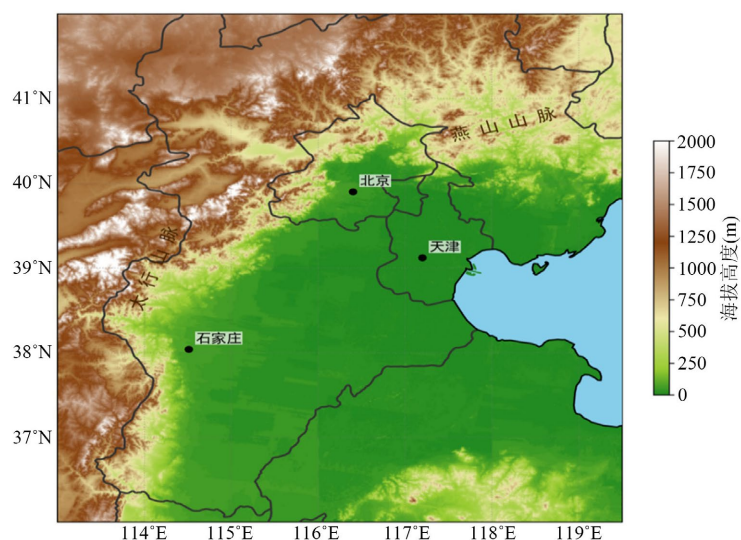
目前, 关于华北暴雨的天气学背景、水汽输送和环流配置已有较多研究[14][15], 但对于强降水过程中, 产生不同闪电活动的对流系统的内部结构及其随降水过程的演变特征等认识仍有进一步加深。尤其是在相似的大尺度环境下, 不同降水单体可能表现出完全不同的电活动特征: 强降水-强闪电、强降水-弱闪电。因此, 有必要结合雷达资料、闪电定位资料和环境背景场资料, 对强降水系统的垂直结构、闪电分布和微物理过程进行综合分析。

本文选取 2015 年 7 月 29 日石家庄极端短时强降水过程为主要个例。该过程在相近的大尺度水汽和不稳定条件下, 同时出现强闪电降水区和弱闪电降水区, 为比较不同电活动背景下的强降水形成机制提供了较好的研究对象。通过对比两个区域的雷达回波结构、闪电密度变化及强回波垂直发展特征, 可以进一步分析强降水增强是否必然对应闪电活动增强。

2. 研究数据与方法

2.1. 研究区域

研究区域为华北地区(图 1), 重点关注京津冀城市群及周边区域。该区域的地形条件具有典型性, 西部紧邻太行山, 北部为燕山山脉, 东南部面向渤海湾, 整体呈现半封闭的喇叭口形态。受地形起伏和海陆热力差异共同影响, 该区域在夏季主汛期期间, 容易使偏南方向的暖湿气流受到阻挡并产生抬升运动, 进而发展形成强烈的深厚湿对流过程。



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 1. Topography and provincial boundary distribution map of Beijing region
图 1. 京津冀地区地形与省界分布图

2.2. 研究数据与处理方法

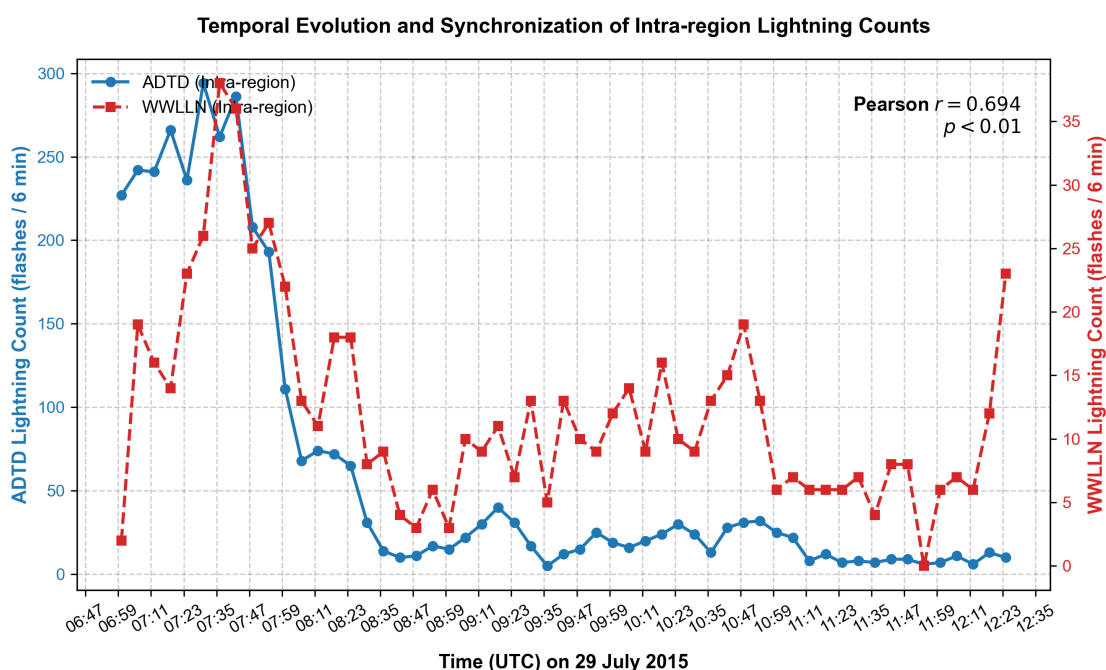
研究数据包括闪电定位、天气雷达、地面雨量站和 ERA5 再分析资料, 从闪电活动、雷达结构、降水分布及环境背景等方面开展极端强降水过程的综合分析, 具体资料如下:

2.2.1. 闪电定位网资料

本文所用闪电资料包括 ADTD 地闪定位资料、WWLLN 全球闪电定位网资料。

ADTD 闪电定位系统来自中国气象局大气探测中心。该系统在京津冀地区依托天津塘沽、北京、河北保定、张家口和承德等站点进行联合定位, 可记录地闪发生时间、位置、强度和极性等信息。在较理想的探测条件下, 系统中心区定位误差约为 500 m, 边缘区域约为 1 km [16]。

受限于 2015 年观测设备的局限性, 本文研究个例期间无法获取完整的总闪电数据。尽管存在这一局限性, 但诸多国内外研究已证实, 地闪频数的频次演变与强对流系统的生命史(发展、成熟、消散阶段)以及降水强度的时空分布仍存在显著的正相关关系[17], 能够有效捕捉和反映雷暴核心区的对流动力学特征。此外, 本文引入了 WWLLN 全球闪电定位资料进行辅助和交叉印证。在实际观测中, 由于 ADTD 与 WWLLN 在探测频段、站点布局及探测效率(DE)上存在本质差异, 导致两者在同一时段、相同区域内记录到的闪电绝对频数存在较明显的数值差异[18][19]。比对分析结果表明, ADTD 地闪频数的时间演变趋势与 WWLLN 的变化趋势具有高度的一致性(图 2)。这种时空演变趋势的强同步性有力地证明了 ADTD 闪电定位数据在反映该对流系统发生、发展规律上的可靠性, 确保了后续分析结果的准确性。



注: 图片由 python 软件制图。

Figure 2. The comparison of the temporal evolution of lightning frequency between ADTD and WWLLN in the core area of strong convection on July 29, 2015

图 2. 2015 年 7 月 29 日强对流核心区域内 ADTD 与 WWLLN 闪电频数时间演变对比

2.2.2. 多普勒天气雷达资料

雷达数据来自京津冀地区组网的 CIRCADIAN 新一代天气雷达。该雷达约每 6 min 完成一次体积扫描, 扫描仰角包括 0.5°至 9.9°等多个层次, 最大有效探测距离约为 230 km。

对于深厚对流系统而言, 单一仰角资料难以完整反映风暴的垂直结构和强度变化。因此, 本文采用经双线性插值处理后的三维笛卡尔坐标网格资料。该资料水平分辨率为 0.01°, 垂直方向从 0.5 km 延伸至 19.5 km, 共 20 层, 层间距为 1.0 km。在此基础上, 对每个水平格点上方各高度层的反射率因子进行比

较, 选取垂直柱内最大值并投影到同一平面, 从而得到组合反射率产品[20]:

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

式中: $CR_{(x,y)}$ 为水平坐标 (x,y) 处的组合反射率因子, $Z_{(x,y,z_k)}$ 为三维坐标 (x,y,z_k) 处的雷达反射率因子观测值, k 为垂直高度层索引, Z_k 为第 k 层的高度, $\max k$ 表示对所有垂直高度层的反射率因子取最大值。本文参考强对流物理学经典方法, 利用 40 dBZ 强回波顶高、强回波质心高度以及回波垂直剖面等三维结构特征, 作为指示雷暴内部上升/下沉气流强弱间接动力学指标。

2.2.3. 地面雨量站资料

降水实况资料取自华北地区国家级和区域级自动气象站(AWS)观测网络。高密度 AWS 资料能够较好地捕捉局地短时强降水中心及其空间变化。为提高资料可靠性, 本文对原始降水数据进行了质量控制, 包括剔除累积量与降水率不一致的记录、删除 5 min 雨量超过 30 mm 的异常值, 并检查时间序列连续性[21]。

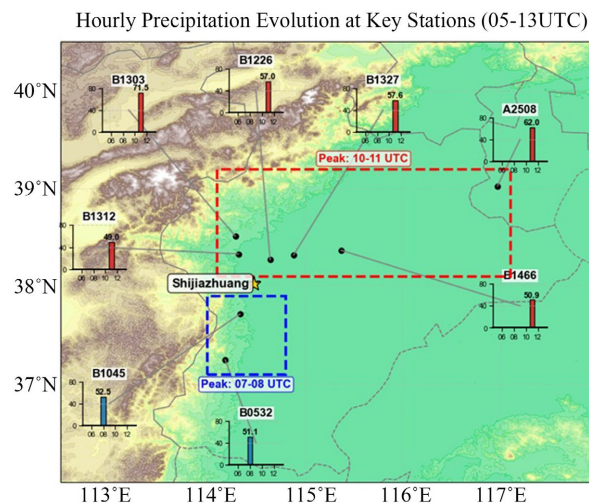
2.2.4. ERA5 再分析资料

为分析极端短时强降水发生期间的环境条件, 本文选用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA5 再分析资料。该资料通过同化卫星、探空、地面观测等多源信息, 提供连续的全球大气背景场, 适用于暴雨和强对流过程的环境诊断。ERA5 资料时间分辨率为 1 h, 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。选取变量主要包括 CAPE、K 指数、850 Pa 比湿、850 Pa 水汽通量, 以及 850 Pa 和 500 Pa 风场。其中, CAPE 和 K 指数用于分析大气不稳定程度; 850 Pa 比湿和水汽通量用于判断低层水汽条件; 850 Pa 与 500 Pa 风场则用于分析低层暖湿输送、中层引导气流和垂直风切变特征。ERA5 资料在本文中主要作为环境背景场, 与雷达、闪电和地面降水观测资料结合, 用于分析强降水过程的发展条件。

3. 2015 年 7 月 29 日极端暴雨闪电与对流结构特征

3.1. 降水实况与大尺度环境背景

3.1.1. 降水空间分布

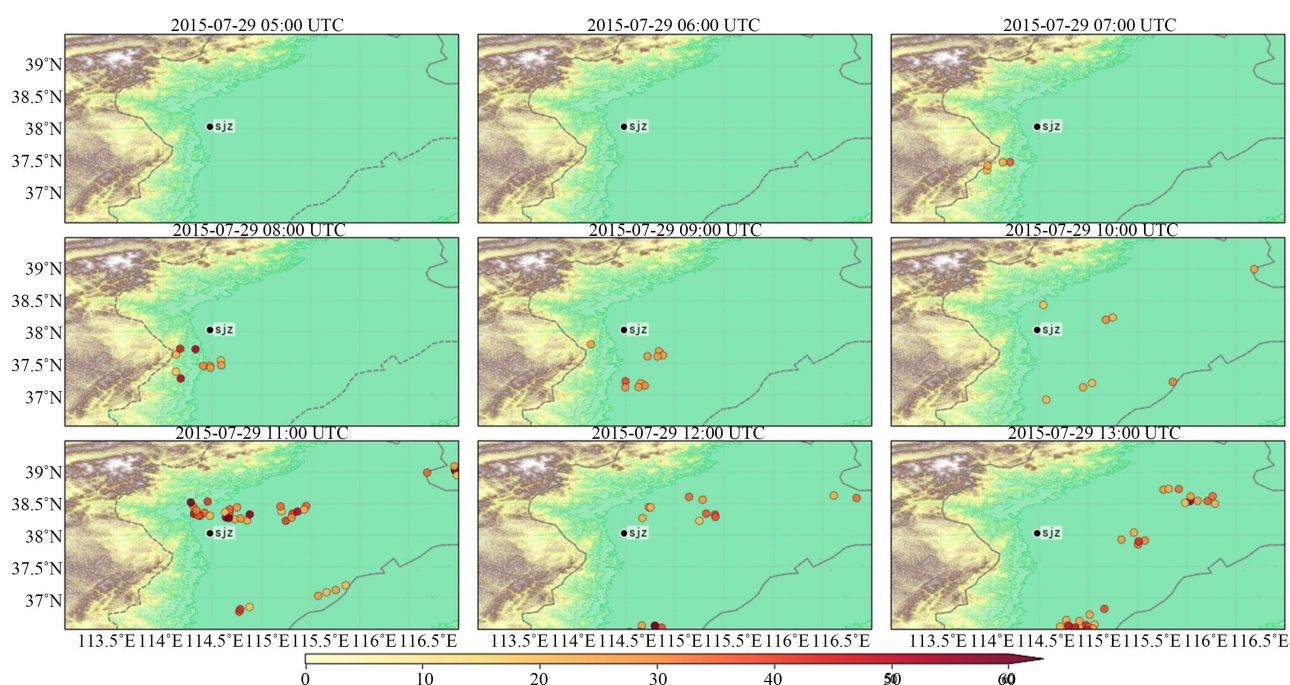


注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)610 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 3. Atemporal distribution of precipitation stations

图 3. 降水站点时空分布图

2015 年 7 月 29 日 05 时~13 时(世界时), 华北地区经历了短时强降雨, 具有累计雨量大、降雨范围广、小时雨强强等极端性特征。据统计主要降水区内的雨量信息发现, 共有 8 个站点的观测数据突破了 45 mm/h 的极端降水阈值(图 3)。从演变路径来看(图 4), 当日 07~08 时, 石家庄南部区域率先爆发了伴随高频闪电的强降水-强闪电过程。随着对流单体的发展与移动, 10~11 时在石家庄北部区域演变出一次降水范围更广、但电活动受到明显抑制的弱闪电-强降水过程。结合空间分布特征, 早期的南部强闪电阶段涵盖了其中 2 个极端降水中心, 而随后的北部弱闪电阶段则对应了其余 6 个极端降水站点。



注: 该图基于自然资源部标准地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 4. Spatial evolution of precipitation process color of the icon indicates precipitation, and the darker the color of the icon, the greater the precipitation

图 4. 降水过程空间演变图色标表示降水量, 色标颜色越深代表降水量越大

3.1.2. 动力、热力及水汽环境配置

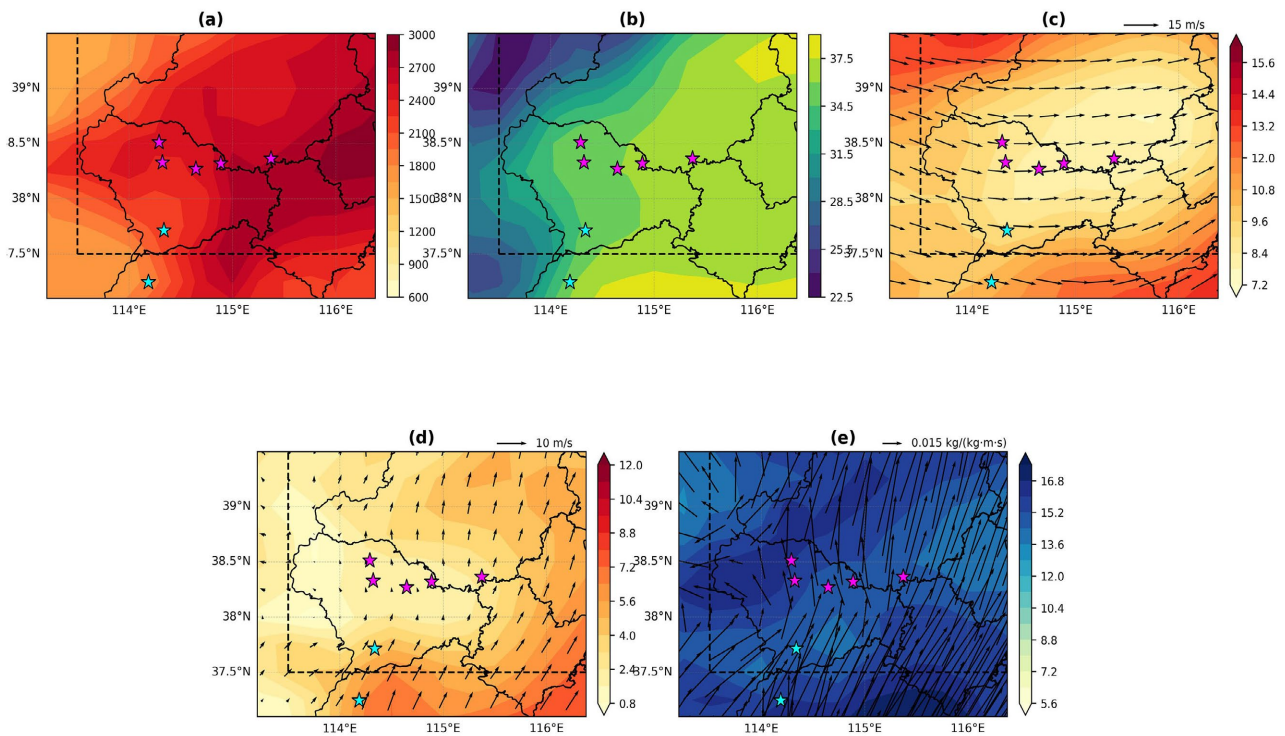
2015 年 7 月 29 日, 研究区受高能、高湿大气环境场控制, 大气层结极不稳定, 具备强对流与极端降水发生的有利背景。本次极端降水是热力不稳定、动力抬升和充足水汽输送多因子协同作用的结果, 各气象环境条件均显著偏优, 为强闪电、短时极端降水等剧烈对流天气的发生发展提供了良好基础。

热力不稳定能量蓄积是本次对流天气爆发的关键前提。由图 5(a)可见, 研究区前期累积了充足的对流潜势, 为对流系统发展提供了有力能量支撑。其中南部强闪电区 CAPE 值达 2100 J/kg, 远超常规对流临界值, 可支撑局地强对流天气发生; 而后续发生极端降水的北部区域 CAPE 值突破 2400 J/kg, 超高不稳定能量为北部极端降水爆发与对流维持提供了核心能量。图 5(b)的 K 指数进一步验证了区域暖湿不稳定特征, 大范围区域 K 指数稳定维持在 35℃以上, 表明中低层大气具备深厚的暖湿结构, 显著加剧了大气层结不稳定, 有效促进了强对流天气的发展与增强。

动力抬升环流的有利配置为对流发展提供了关键动力条件。图 5(c)的 500 hPa 环流场显示, 研究区处于西风槽前部, 槽前强盛西南气流带来强烈的辐合抬升作用, 有效触发低层暖湿空气抬升, 启动局地对

流活动。配合图 5(d) 的 850 hPa 低层风场, 研究区持续受偏南气流控制, 高低层风场存在明显的风向、风速差异, 形成深厚的垂直风切变。该风场结构能够持续强化垂直上升运动、维系对流系统结构, 避免对流快速消散, 为极端降水的持续性发展提供了重要动力支撑。

充沛的水汽输送是极端降水形成与维持的物质基础。图 5(e) 水汽通量分布显示, 研究区存在一条高强度、持续性的南北向低空水汽输送带, 可为降水过程持续供给水汽。区域低层比湿高值区 ($>16 \text{ g/kg}$) 呈带状贯穿石家庄附近核心降水区, 近地层水汽饱和程度高、水汽含量充足。源源不断的水汽输送与局地辐合汇聚, 使研究区水汽条件持续富集, 完全满足强对流与极端降水的物质需求, 为本次持续性极端降水过程的爆发与增幅奠定了坚实的水汽基础。



注: 填色代表对应物理量强度, 箭头代表矢量场, 虚线框为局地核心研究区, 五角星为强降水站点。该图基于自然资源部标准地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 5. The spatial distribution of thermal, dynamic and water vapor physical quantities in the strong convective environment field on July 29, 2015 was analyzed. (a) Spatial distribution of convective available potential energy (CAPE); (b) Spatial distribution of K index; (c) 500 hPa wind field distribution; (d) 850 hPa wind field distribution; (e) Spatial distribution of water vapor flux and specific humidity at 850 hPa

图 5. 2015 年 7 月 29 日强对流环境场热力、动力及水汽物理量空间分布。(a) 对流有效位能(CAPE)空间分布; (b) K 指数空间分布; (c) 500 hPa 风场分布; (d) 850 hPa 风场分布; (e) 850 hPa 水汽通量及比湿空间分布

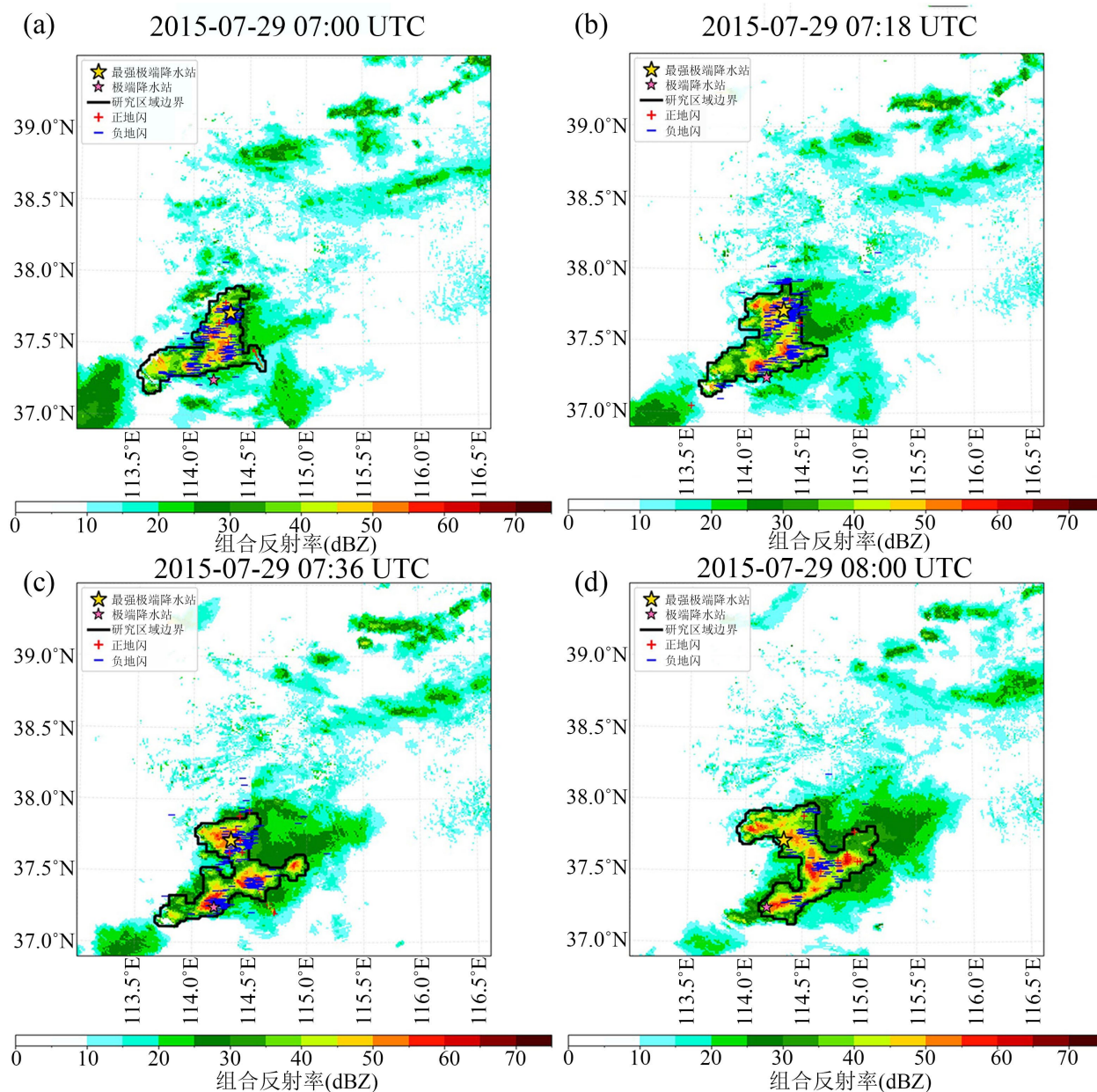
3.2. 强、弱闪电活动区域雷暴系统的对流结构差异

3.2.1. 南部强闪电活动雷暴系统

针对南部强闪电活动雷暴系统, 基于雷达与闪电时空以及极端降水站点叠加观测, 提取了该系统在 07:00 至 08:00 极端短时强降水内的四个关键时次(07:00、07:18、07:36 及 08:00)进行特征分析。

由图 6 可见, 雷达回波结构演变与闪电频次的增减表现出极高的协同性。07:00 对流系统开始发展, 雷达回波中心反射率达到 40 dB 左右。此时回波面积较小且结构松散, 闪电活动已经开始出现, 主要集

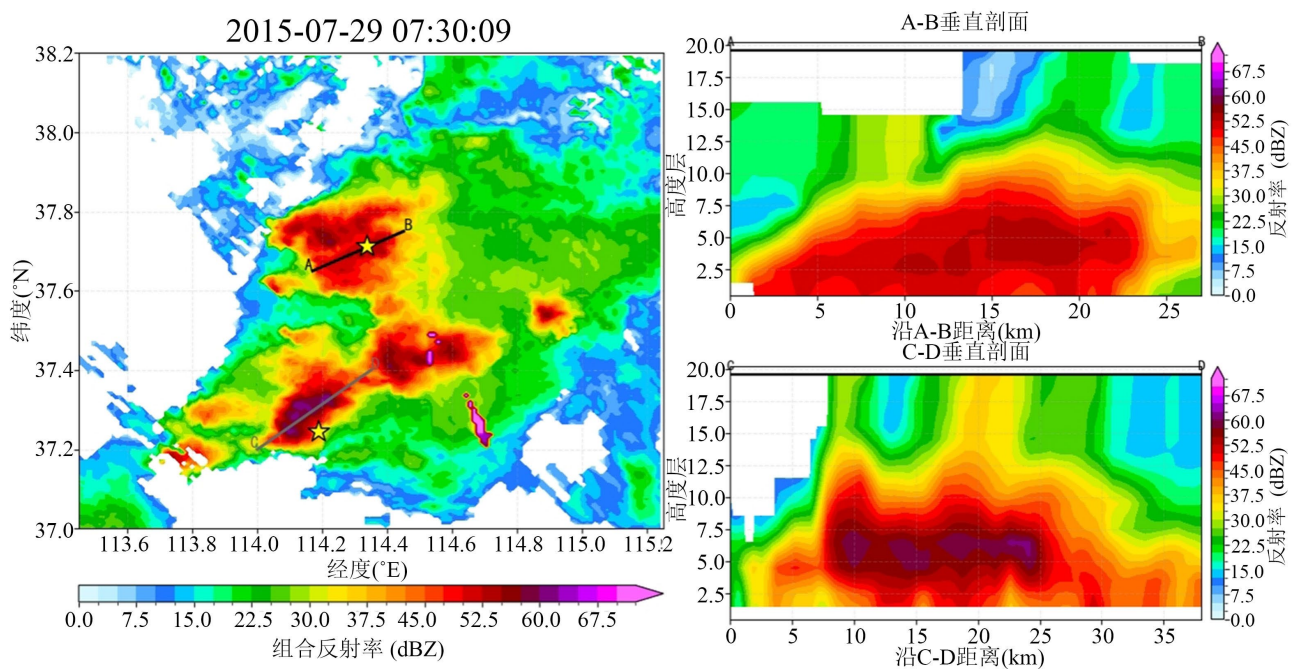
中在系统中心及其附近区域。07:18 对流单体迅速增强, 40 dB 以上的强回波范围明显扩大, 内部出现了大于 50 dB 的强回波中心。与此同时, 闪电数量急剧增加, 闪电密度高值区主要集中在 45 dB 以上的强回波区域内。07:36 系统发展到成熟阶段, 回波结构更加紧实, 核心区反射率维持在 50 dB 以上。这一时刻闪电频次达到峰值, 闪电不仅覆盖了强回波中心, 还分布在对流系统的前沿区域。到了 08:00, 系统开始进入减弱阶段, 50 dB 的强回波面积明显缩小, 回波结构逐渐变得分散。伴随着强回波强度的降低, 闪电数量也迅速减少, 仅剩下少量的闪电分布在回波区内。整体上看, 在这一小时的过程中, 闪电主要集中在强回波区, 闪电数量的增减与雷达强回波的演变过程在时空上对应得较好。



注: 图片由 python 软件制图。

Figure 6. The evolution of radar echo and lightning activity of thunderstorm system with strong lightning activity in the south
图 6. 南部强闪电活动雷暴系统的雷达回波和闪电活动演变图

图 7 给出了 07:30 经过极端降水站点的雷达反射率垂直剖面。从剖面结构可以看出, 该阶段对流单体发展极其深厚。大于 40 dBZ 的强回波柱不仅宽广, 其顶端更是向上伸展到了 10 km 左右, 而 50 dBZ 以上的强回波质心同样越过了 7~8 km 的高度层。在华北夏季, 这一高度为 -10°C 至 -20°C 的混合相态起电区域。这种高质心、深厚强回波柱的垂直拓扑结构, 在动力学上是深厚强上升气流持续存在的显著物理表征。虽然受资料限制缺乏径向速度直接印证, 但 50 dBZ 强回波质心能够长期被抬升并维持在冰相区, 本身就直接证明了系统内部存在着极强的上升气流, 足以托举大粒径水凝物。强上升气流将大量低层过冷液态水源不断地输送至高空冰相区, 促使冰晶、霰粒子等在此区域发生高频碰并, 触发了极高效率的非感应起电过程, 从而产生该阶段剧烈的闪电活动。



注: 图片由 python 软件制图。

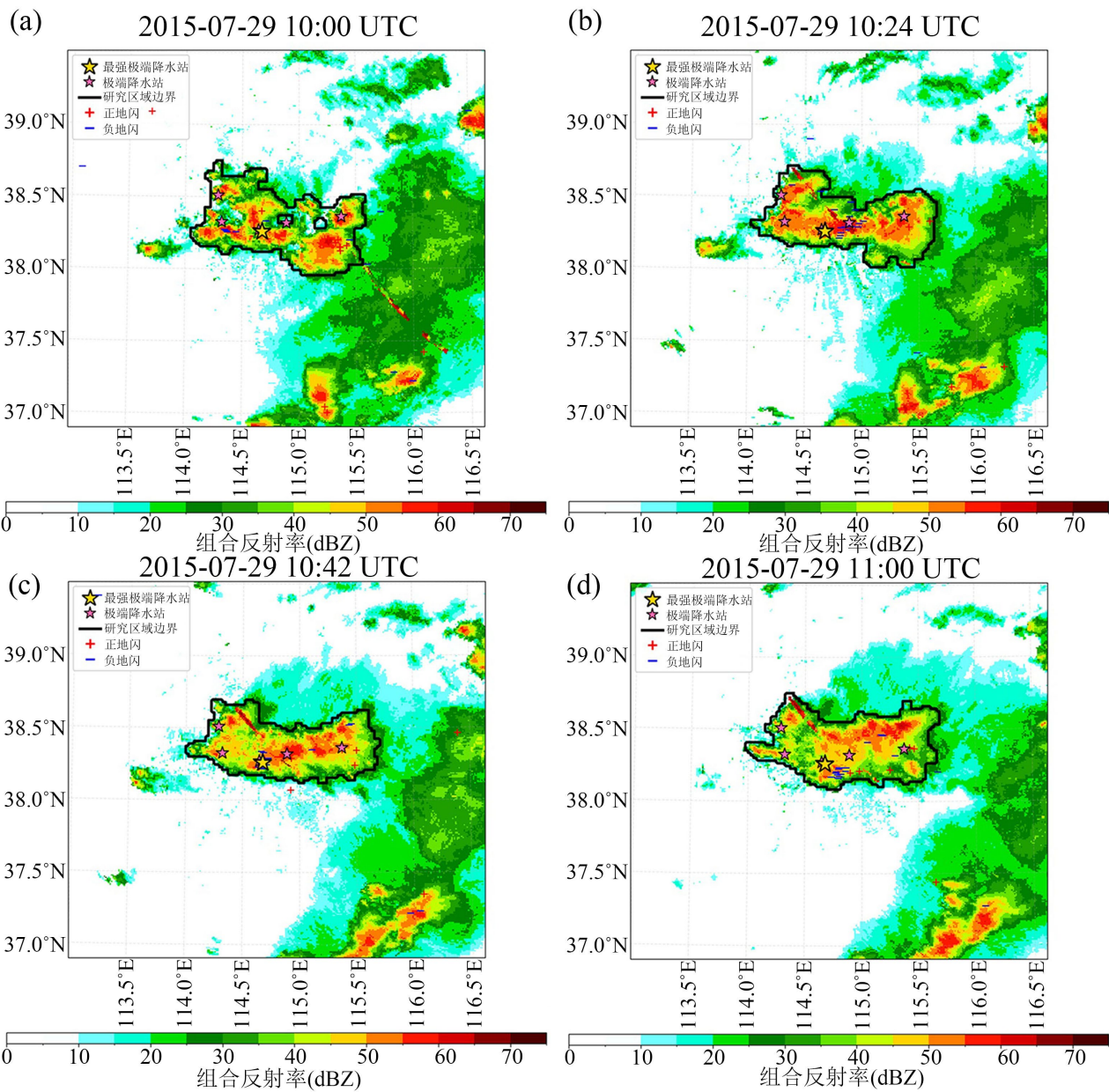
Figure 7. The vertical structure profile of the strong lightning activity thunderstorm system
图 7. 强闪电活动雷暴系统的垂直结构剖面图

3.2.2. 北部弱闪电活动雷暴系统

图 8 展示了北部弱闪电活动雷暴系统 10:00~11:00 UTC 的完整时空演变过程, 完整呈现了对流单体合并、成熟强盛至衰减消散的阶段性特征。10:00~10:12, 研究区外围多个零散对流单体逐步靠拢融合, 建立回波衔接结构, 垂直对流运动在 10:12 前后达到峰值, 雷达回波强度显著提升, 但该阶段系统几乎无闪电活动。随后系统进入稳定强盛阶段, 10:24~10:30 组合反射率达全过程最高, 核心区域形成连片高强度回波; 10:36 碎片化强回波完全贯通, 对流系统整体性显著增强, 10:42 回波水平覆盖范围扩张至峰值, 在研究区形成大范围持续性降水雨带。10:42 后雷暴动力条件逐渐衰弱, 系统开始减弱, 回波面积持续收缩, 10:54 紧实的回波结构逐步解体、核心强回波强度与范围同步衰减。整体来看, 该雷暴系统回波强度、空间覆盖规模整体偏大, 降水转化条件良好, 具备强降水发生的动力基础, 但全程闪电频次极低、分布零散, 并未随对流发展和回波增强有所增多, 呈现出典型的强降水、弱起电的弱对流雷暴特征。

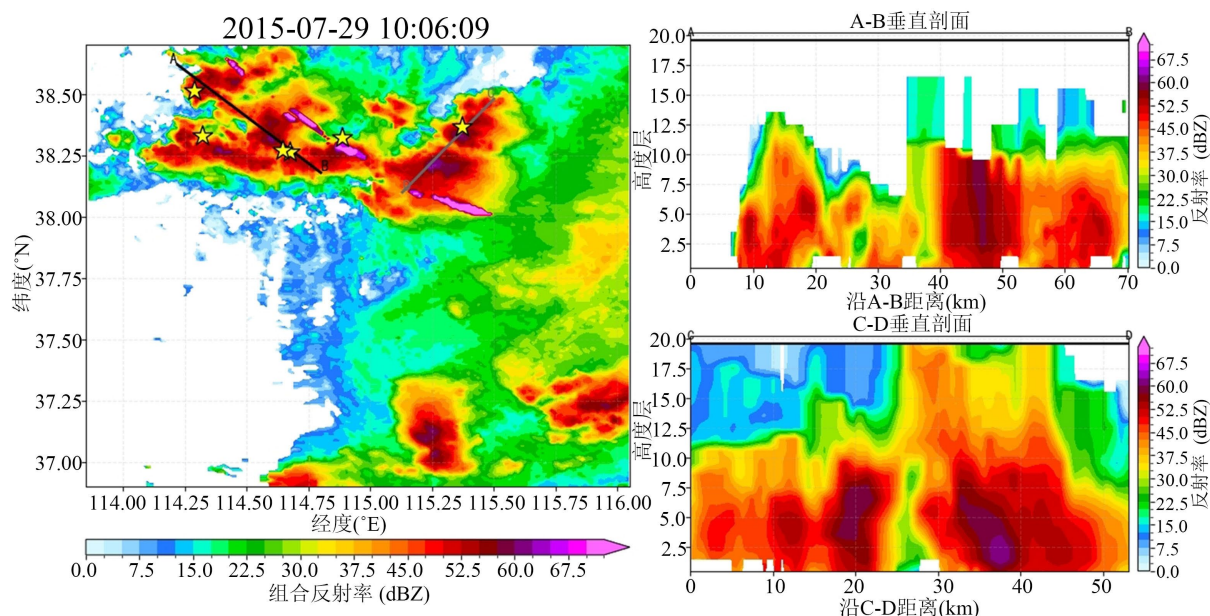
图 9 给出了 10:06 UTC 经过北部极端降水站点的雷达反射率平面及垂直剖面图。从平面形态上看,

该时刻北部系统内存在多个强回波主体, 整体呈典型的块状、分散型分布, 强回波区范围广, 反射率空间梯度变化明显, 强回波区与降水站点的位置高度吻合。就高值中心而言, 系统的回波主体强度普遍维持在 40 至 55 dB 之间, 局部极值中心超过了 60 dB, 是此次过程中对流发展最旺盛的阶段之一。结合 A-B、C-D 两条垂直剖面可以看到, 系统内部包含极其强盛的对流核心: 大于 50 dB 的强回波不仅在近地面维持了极高强度, 其主体也向上大幅伸展, 形成了明显的高反射率柱结构, 对流顶高度可达 10 km 以上, 展现出典型的对流性强降水回波的三维空间特征, 为短时极端强降水提供了充足的动力和水汽条件。



注: 图片由 python 软件制图。

Figure 8. Spatial evolution of thunderstorm system with strong lightning activity in the north
图 8. 北部强闪电活动雷暴系统的空间演变图



注：图片由 python 软件制图。

Figure 9. Vertical section of northern weak lightning system

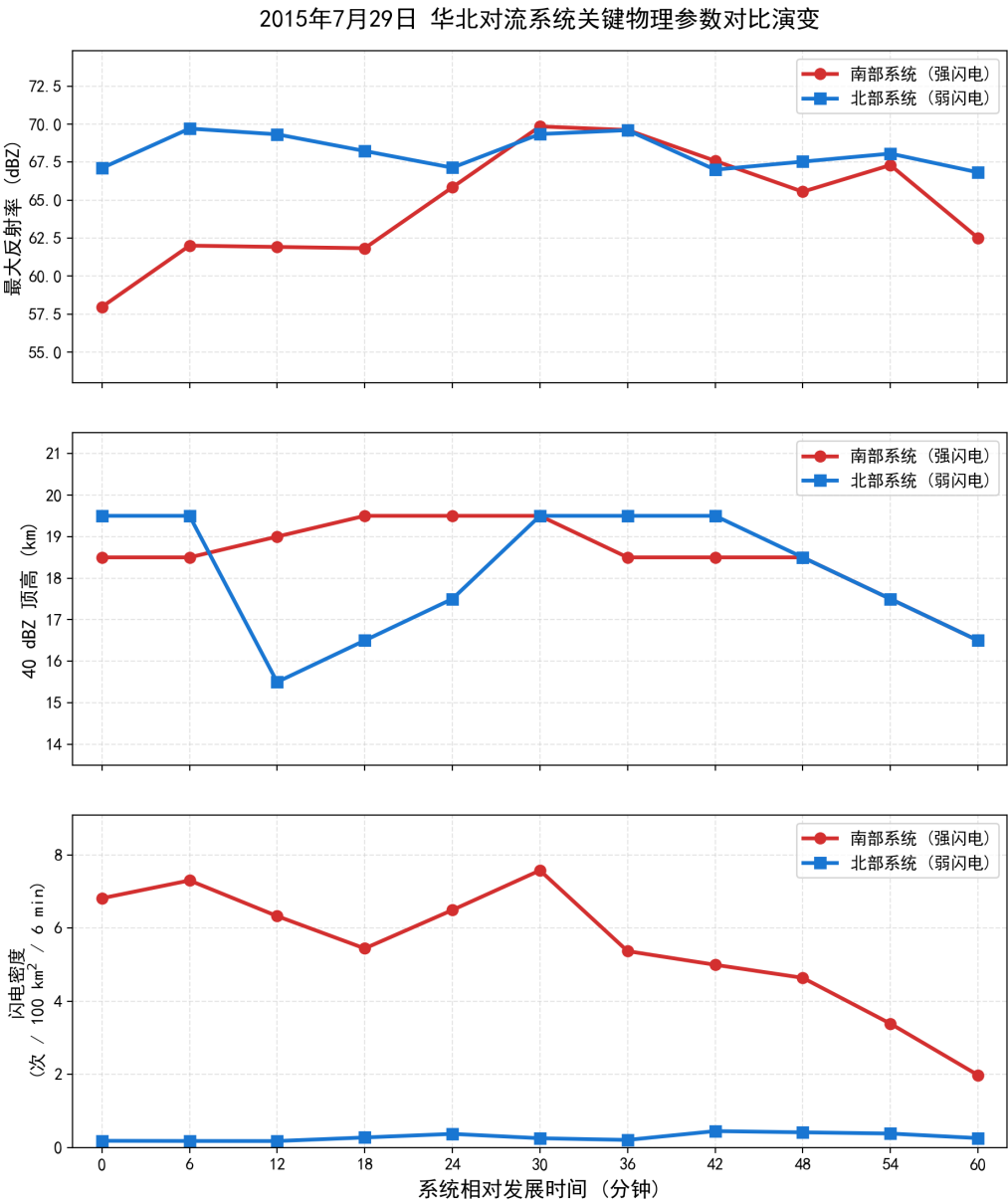
图 9. 北部弱闪电系统垂直剖面图

为进一步定量揭示南、北部雷暴系统的结构演变差异，图 10 给出了两者在相对生命史时间轴下的关键物理参数对比。结果表明，在最大反射率演变中，南、北部系统展现出高度的相似性，全过程维持在 55~70 dBZ 的极高区间，这解释了两系统均能诱发地面极端短时强降水的底层根基。然而，在动力托举与电活动方面，两者呈现出截然相反的拓扑特征：南部强闪电系统的 40 dBZ 强回波顶高在发展中后期(12~36 min)稳定维持在 18 km 以上的高位，强回波质心深厚地穿过了非感应起电层，催生了局地闪电密度的爆发(峰值达 7.8 次/100 km²/6 min)；相反，北部弱闪电系统的 40 dBZ 顶高在前 12 分钟发生剧烈塌陷，迅速由 19.5 km 跌落至 15.5 km 左右，全程闪电密度受到显著抑制。这种高反射率、回波顶突然降低的配置，定量印证了北部系统因大粒径水凝物快速下落引发的强负载拖曳效应，进而阻断了高空冰相区的起电机制。

图 11 给出了 2015 年 7 月 29 日 11:00 UTC 华北地区中尺度对流系统的雷达组合反射率及其垂直剖面。由图 11(a)可见，研究区内存在多个对流回波单体，对流活动分布较为分散，其中石家庄北部附近的对流系统发展最为旺盛、结构最为完整，强回波中心主要位于整个系统西南侧至中部区域，是本次对流过程的核心主体。图 11(b)进一步显示，该系统在水平结构上具有较清晰的前后分布特征：较强回波区集中在系统后部，而范围较大的弱回波区位于系统前方，并沿系统前进方向向东北侧扩展。沿图 11(b)中黑色矩形区域前进的方向所作的垂直剖面见图 11(c)。剖面结果表明，强回波主要分布在系统后侧，局地反射率可超过 45 dB，且强回波主体集中在 5 km 左右。系统前侧则以范围较大的弱回波为主，表现出较明显的层状云降水特征。结合水平回波分布和垂直剖面结构来看，该系统具有典型的前向层状云中尺度对流系统特征，即对流区位于后侧，层状云区位于系统前方，结构分层清晰、特征十分典型。

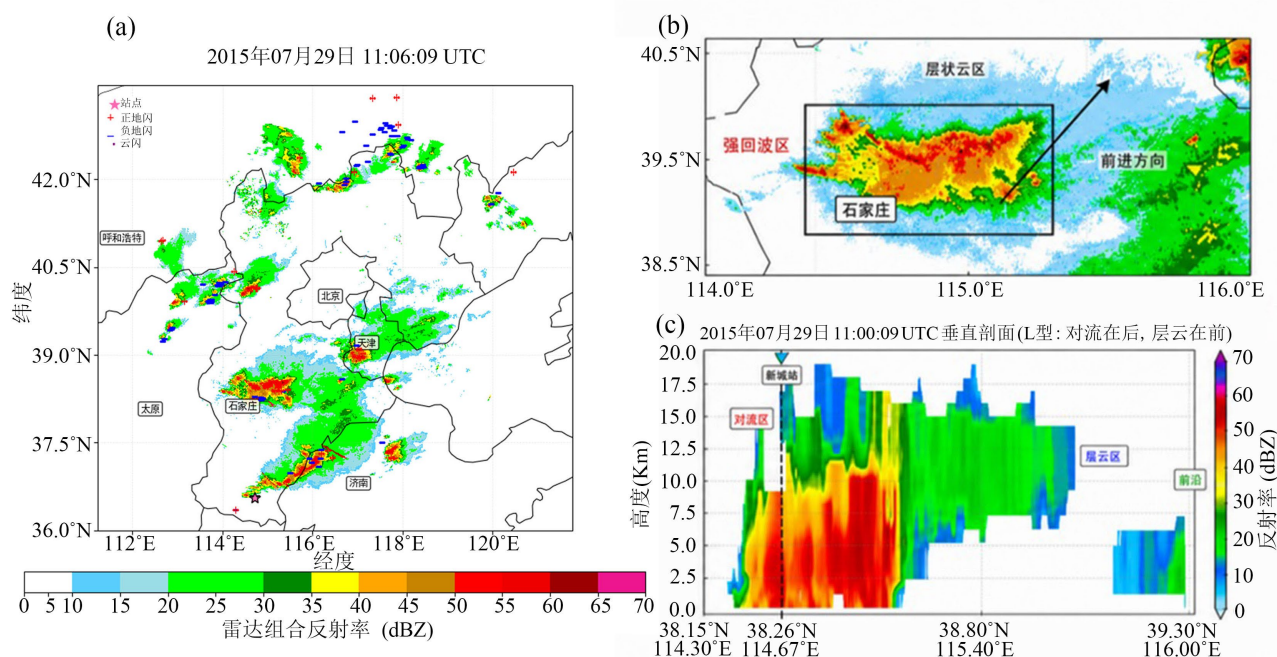
结合图 12 可知，该系统表现为典型的前导层状云 - 后部对流(Leading Stratiform, 简称 LS 型)中尺度对流系统(MCS)结构。大面积层状云分布于系统移动前沿，强对流核心则位于系统后侧。这一特殊的动力与微物理结构，是导致本次过程强降水、弱闪电特征形成的核心物理机制。在强盛西南暖湿气流的持续输送下，后部对流核心区水汽充沛，低空暖云碰并增长过程异常活跃，快速催生出大量大粒径液态降水粒子。随后，环境风切变对云内不同构型的水凝物产生了显著的微物理动力分选(Size Sorting)

作用：大质量的雨滴与重冰相粒子受重力主导快速下落，垂直穿过对流核心区。这不仅在地面触发了极端短时强降水，而且深厚的大粒径粒子因水凝物负载效应(Water Loading)对周围大气产生强烈的动力拖曳。这种强烈的拖曳效应在雷达回波上直接表征为 40 dBZ 强回波顶高剧烈回落；在缺乏径向速度直接观测的情况下，该回波演变特征间接证实了对流内部的上升气流受到系统性抑制，动力下沉气流逐渐占据主导。同时，上述分选过程导致轻、重冰相粒子在空间上严重分离——轻质冰晶被水平风高空输送并集中于前侧层云区，而霰、冰雹等重冰相粒子则残留在后侧对流核心区。这种空间错位导致对流区内缺乏充足的冰晶-霰粒碰撞有效混合区，非感应起电机制受到显著抑制，最终致使系统表现为弱闪电强降水的现象。



注：图片由 python 软件制图。

Figure 10. Comparison of key physical parameters of strong and weak lightning systems in the north and south
图 10. 南北部强弱闪电系统关键物理参数对比图



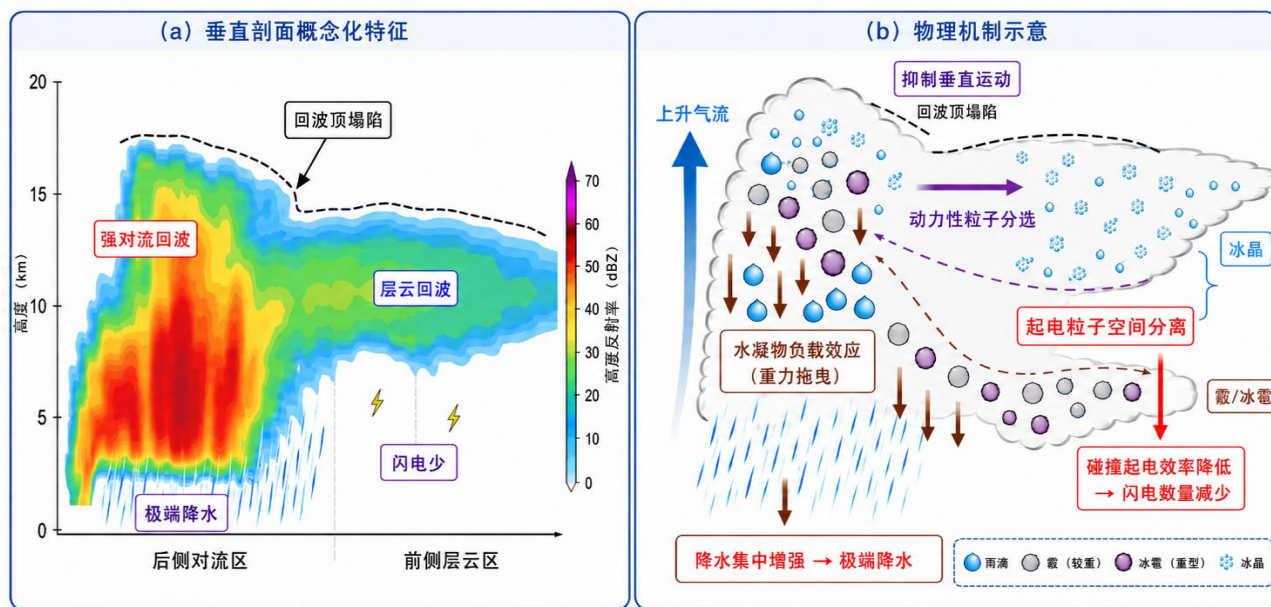
注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)610 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 11. Radar echoes and vertical cross-section of the northern weakly-electrified mesoscale convective system

图 11. 北部弱闪电中尺度对流系统的雷达回波及垂直剖面

2015年7月29日北部强降水弱闪电概念模型示意图

LS型系统: 对流在后, 层云在前



注: 图片由 python 软件制图。

Figure 12. Conceptual model of strong precipitation and weak lightning in northern China on July 29, 2015

图 12. 2015 年 7 月 29 日北部强降水弱闪电概念模型示意图

4. 结论

(1) 在此次 2015 年 7 月 29 日的特定个例中, 石家庄南部的强闪电活动雷暴系统表现出闪电活动和强回波同步发展, 最大反射率达 70 dB, 40 dB 强回波顶高维持在 18.5~19.5 km, 闪电密度峰值达到 7.8 次/100 km²/6 min。强回波质心进入了-10℃~-20℃的混合相态起电层, 上升运动把水凝物持续输送到冰相区, 霰和冰晶有条件发生碰并起电, 从而产生强降水-强闪电特征。

(2) 基于本次特定个例观测 2015 年 7 月 29 日石家庄北部弱闪电活动雷暴系统, 降水覆盖范围广、雷达回波强度偏大, 但闪电活动偏弱且并未随回波发展同步增强。系统整体云体发展较为深厚, 18 dB 回波顶高可达 19.5 km。对流单体合并后, 低层辐合与水汽凝结作用增强, 地面降水强度明显提升, 闪电密度始终维持在较低水平。该系统呈现对流区后置、层状云区前置的前向层状云结构, 单体合并后对流核心内大粒径水凝物大量生成并快速下落, 加重水凝物负载、拖曳抑制上升气流, 造成强回波顶高频繁降低。同时霰粒子集中于后侧对流区, 冰晶粒子被水平气流输送至前方层状云区, 两类粒子发生空间分离, 混合相态起电层内粒子有效碰并概率大幅降低, 非感应起电机难以维持, 形成了本次过程中特有的强降水-弱闪电特征。

5. 讨论与局限性

本研究基于 2015 年 7 月 29 日特定个例初步提炼了物理概念模型(图 12), 但受限于个例数量与历史技术条件, 仍存在以下不足及后续完善方向:

个例局限与模型假设性: 华北强对流天气具有高度的局地异质性。本文模型属于基于特定个例推导出的物理假说, 其普适性仍是一个有待更多个例检验的科学假设。

探测技术与资料的时代局限: 受 2015 年技术限制, 仅获取了二维地闪和单偏振雷达资料。在剖析强降水-弱闪电微物理机制时, 既缺乏云闪的空间高度分布特征, 也缺乏云内水成物粒子相态的直接观测, 限制了对电动力学内在本质的精细辨识。

未来研究方向展望: 后续将开展多年份同类事件的统计普适性验证; 引入新一代双偏振雷达参数(如 ZDR、KDP)与三维全闪数据深化微物理反演; 并尝试利用耦合带电/放电模块的高分辨率数值模式进行典型案例模拟, 通过数值诊断弥补观测不足, 对本文假说给予更科学的定量论证。

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] 孙劭. 我国极端天气气候事件发生规律、特点及影响[J]. 中国减灾, 2021(15): 10-17.
- [2] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.
- [3] 刘海文. 华北汛期降水的多尺度变化及其大尺度降水条件的演变研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009.
- [4] 刘海文, 袁帅, 杨朝虹, 等. 华北汛期降水长期变化规律研究新进展[J]. 大气科学学报, 2022, 45(5): 700-712.
- [5] 陈涛, 谌芸, 方翀, 等. “23·7”华北极端暴雨精细特征和天气学成因分析[J]. 气象学报, 2024, 82(5): 600-614.
- [6] 荆浩, 亢妍妍, 吴宏议, 等. 北京“23·7”极端强降雨特征和成因分析[J]. 气象, 2024, 50(5): 616-629.
- [7] 李峰, 吴蕾, 张林, 等. 华北“23.7”特大暴雨天气尺度系统活动特征及致雨机制[J]. 大气科学学报, 2025, 48(5): 828-842.
- [8] 耿晓君, 赵钟楠, 李原园, 等. 我国极端降水与洪涝灾害事件特点及应对思路 and 对策[J]. 中国水利, 2025(22): 47-51, 72.

- [9] 张金良, 罗秋实, 王冰洁, 等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 6-15.
- [10] Takahashi, T. (1978) Riming Electrification as a Charge Generation Mechanism in Thunderstorms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **35**, 1536-1548. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1978\)035<1536:reaacg>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035<1536:reaacg>2.0.co;2)
- [11] 杨美荣. 基于 TRMM 卫星对强对流天气中闪电活动、雷达反射率及冰散射的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [12] 李晓兰, 陈涛, 赵玮, 等. 太行山精细地形对“23·7”华北极端暴雨特征影响的观测分析[J]. 大气科学, 2025, 49(3): 629-644.
- [13] 孙继松, 杨波. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨[J]. 大气科学, 2008(6): 1352-1364.
- [14] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [15] 张文龙, 崔晓鹏. 近 50a 华北暴雨研究主要进展[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(4): 384-391.
- [16] 易笑园, 宫全胜, 李培彦, 等. 华北飚线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标[J]. 气象, 2009, 35(2): 34-40, 135.
- [17] Soriano, L.R., de Pablo, F. and Díez, E.G. (2001) Relationship between Convective Precipitation and Cloud-to-Ground Lightning in the Iberian Peninsula. *Monthly Weather Review*, **129**, 2998-3003. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2998:rbcpac>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2998:rbcpac>2.0.co;2)
- [18] 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.
- [19] 王志超, 庞文静, 梁丽, 等. 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.
- [20] 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 ID: 105580. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105580>
- [21] 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>