

基于混合长基线贵州天电阵列的一次强对流天气过程分析

李俊瑶, 罗浩, 唐枫, 黄金全

中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州空管分局气象台, 贵州 贵阳

收稿日期: 2026年2月11日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

利用ERA5再分析资料、贵阳龙洞堡机场C波段双偏振天气雷达资料雷达数据和基于混合基线技术的闪电探测定位系统构成的贵州天电阵列闪电定位数据, 对2025年2月14日贵州省一次高架雷暴天气过程进行分析。结果表明: 此次对流天气主要受高空槽以及低空急流、地面准静止锋的影响。850百帕至地面形成冷垫, 700百帕暖湿气流沿着冷垫爬升, 在空中激发对流, 出现高架雷暴。闪电分布与对流天气移动方向基本一致, 在贵州省西南部闪电活动活跃, 分布密集, 最大密度达到28次/ $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$; 闪电密集区域与降水量最大值区域对应, 闪电极性以负闪电为主, 负闪电比例达到62%。在贵阳市出现雷雨时段的三个雷达图和闪电极性分布图上看, 冬季对流降水强度较弱, 最大组合反射率值为55 dBz, 对流分布松散, 且移动迅速。闪电分布在回波移动前方, 可借助雷电监测预警系统, 对高架雷暴天气的发展阶段和方向进行判断, 并迅速决策、提前发布预警信息。

关键词

高架雷暴, 闪电, 雷达回波, 混合长基线贵州天电阵列

Analysis of a Severe Convective Weather Process Based on the Hybrid Long-Baseline Guizhou Lightning Detection Array

Junyao Li, Hao Luo, Feng Tang, Jinquan Huang

Meteorological Office of Guizhou Air Traffic Management Sub-Bureau, Southwest Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Guiyang Guizhou

Received: February 11, 2026; accepted: March 9, 2026; published: March 19, 2026

文章引用: 李俊瑶, 罗浩, 唐枫, 黄金全. 基于混合长基线贵州天电阵列的一次强对流天气过程分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(2): 402-411. DOI: 10.12677/ccr.2026.152045

Abstract

This study analyzes an elevated thunderstorm event that occurred in Guizhou Province on February 14, 2025, utilizing ERA5 reanalysis data, C-band dual-polarization weather radar data from Guiyang Longdongbao Airport, and lightning location data from the Guizhou Lightning Detection Array, which is based on hybrid baseline technology. The results indicate that this convective weather event was primarily influenced by an upper-level trough, low-level jet streams, and a surface quasi-stationary front. A cold layer formed between 850 hPa and the surface, while warm and moist air at 700 hPa ascended along this cold layer, triggering convection aloft and resulting in an elevated thunderstorm. The lightning distribution was generally consistent with the movement direction of the convective weather. Lightning activity was frequent and densely distributed in the southwestern part of Guizhou Province, with the maximum density reaching 28 flashes per $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ grid. Areas with high lightning density corresponded well with regions of maximum precipitation. The lightning polarity was predominantly negative, with negative flashes accounting for 62%. During the thunderstorm period in Guiyang City, three radar images and the lightning polarity distribution map revealed that the winter convective precipitation was relatively weak, with a maximum composite reflectivity of 55 dBz. The convection was loosely organized and moved rapidly. Lightning was distributed ahead of the radar echo movement. Therefore, lightning monitoring and early warning systems can be utilized to assess the development stage and direction of elevated thunderstorms, facilitating rapid decision-making and the issuance of advance warning information.

Keywords

Elevated Thunderstorm, Lightning, Radar Echo, Hybrid Long-Baseline Guizhou Lightning Detection Array

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

高架雷暴是一种特殊类型的强对流天气, 通常指在相对较高的海拔或特定地形区域形成的雷暴系统。其特点是雷暴云的主体发展于近地面冷空气层之上, 能量来源与低空暖湿气流抬升密切相关, 常伴随剧烈闪电、短时强降水、冰雹及强阵风等极端天气现象。贵州地区由于其特殊的地形和海拔高度, 属于高架雷暴多发区域。在高架雷暴的特征与机理方面, 胡萍等[1]对比分析了黔东北两次冷锋后高架雷暴过程, 指出其均受高空槽、中低层切变及低空急流影响, 逆温层以上“上干冷、下暖湿”的层结、强垂直风切变与中层温度递减率为其提供了有利条件; 张亚男等[2]进一步总结贵阳机场冬季高架雷暴的预报指标, 指出700 hPa与500 hPa温差达 15°C 、逆温层显著、水汽呈“上干下湿”分布等特征; 陈军等[3]对比了贵州铜仁两次大范围冰雹过程, 指出地面发展雷暴与高架雷暴在触发机制、上升运动高度及雷达回波形态上存在明显差异。雷暴的出现往往伴随闪电的发生。闪电作为大气中的强对流活动产物, 接地瞬间巨大电流的热效应和电磁效应会对接地点及附近造成直接物理损害[4]。在闪电活动与雷达回波特征的关联方面, 程向阳等[5]针对安徽一次致灾雷暴过程, 发现闪电以负地闪为主, 密集区与雷达强回波中心对应良好, 且雷电灾害与承灾体暴露度和防护水平密切相关; 廖颖楠[6]分析赣州强降水过程中的闪电特征, 指出负地闪占优, 闪电频次峰值领先于降水峰值, 且闪电多位于强回波移动方向前方; 黄琳[7]对江西一次

强暴雨过程的研究表明,有组织的对流回波群及“弓”状、“V”形飚线回波更易伴随密集闪电活动,且回波顶高和垂直液态水含量(VIL)与闪电强度相关较好;黄延刚等[8]通过对广东一次强对流过程的分析,指出闪电在发生发展阶段超前雷达回波约10~40分钟,成熟阶段则集中于回波强度 >40 dBz、VIL >20 kg/m²的区域;吴俊杰等[9]的研究发现,中国南方地区闪电夏多冬少,季节交替对闪电峰值时刻影响较小;张丹[10]对内蒙古一次强对流过程的分析也得出类似结论,并指出强对流旺盛阶段正地闪和正云闪频次显著增加。

贵州地处云贵高原东侧,属于典型的喀斯特地貌发育区域,受地形变化影响形成的立体气候特征明显,造成境内雷暴活动复杂多变[11]。冬春交替之际是贵阳机场高架雷暴高发时段,雷电活动是贵州地区民航运行高影响天气因素之一,本次分析将从天气系统配置、物理机制分析到雷达与闪电特征融合的多角度研究,为贵阳机场高架雷暴的监测、预警与预报提供有益参考。

2. 资料来源

分析所用资料包括:(1) ERA5 再分析资料,分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间间隔为1小时,用于分析强对流天气发生的大尺度天气背景;(2) 贵阳龙洞堡机场 C 波段双偏振天气雷达资料雷达数据的时间分辨率为5分钟,距离分辨率为150公里;(3) 闪电资料来源民航贵州空管分局2023年引进的基于混合基线技术的闪电探测定位系统,由8个探测站点和1个数据处理中心构成了贵州天电阵列网络。该系统基于 DTOA (到达时间差)并行定位算法和聚类分析的对流核实时追踪、闪电数据实时采集存储等核心技术研发[12],对各站获取的闪电信号进行闪电特征、类型和放电位置解算,同时融合雷暴闪电所揭示的雷暴对流中心及其所处生命阶段追踪信息,实现贵州空域内强雷暴对流中心的实时监测。

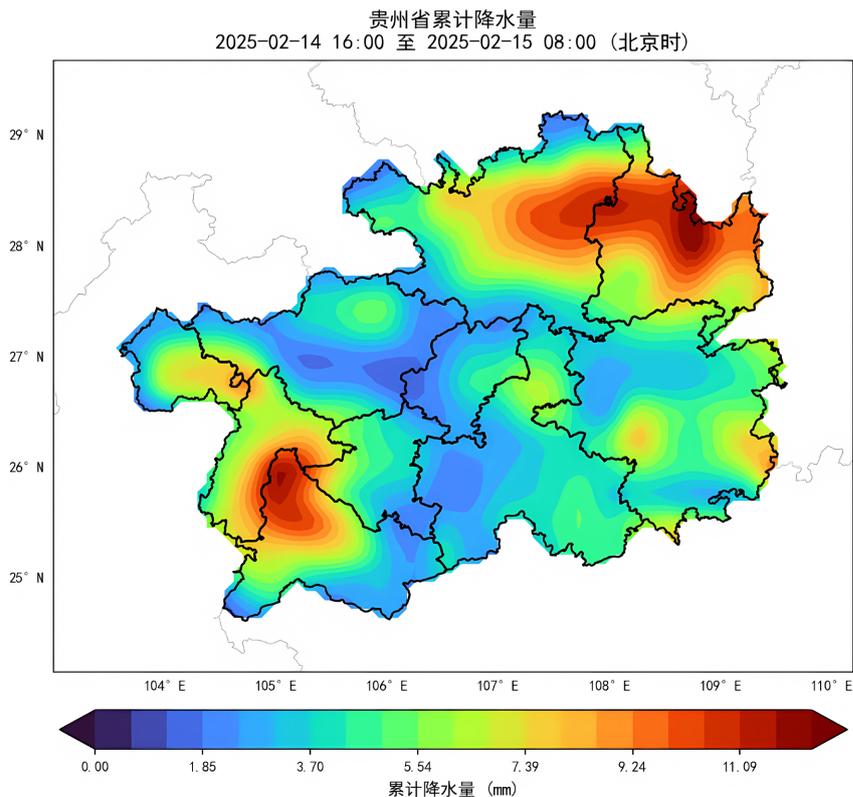


Figure 1. Distribution of accumulated precipitation from 16:00 on February 14 to 08:00 on February 15, 2025 (Unit: mm)
图 1. 2025 年 2 月 14 日 16:00~2 月 15 日 08:00 累计降水量分布(单位: mm)

3. 天气实况与环流背景分析

3.1. 天气实况

2025年2月14日傍晚开始, 贵州西南至东北部地区出现大范围降水天气, 局部地区伴有雷暴和高频次闪电, 持续时间约10小时。2025年2月14日19:00~15日05:00, 贵阳市受对流云团影响, 其中14日19:13~20:49 贵阳机场出现弱雷雨。

图1为2025年2月14日16:00~2月15日08:00(北京时, 下同)10小时累计降水量。从图中可以看出降水极大值中心呈两极分布, 主要集中在贵州西南部黔西南北部、铜仁大部地区, 贵州省中部和东南部均有降水出现。整体过程降水量不大, 最大降水量为15.8 mm。

3.2. 环流背景分析

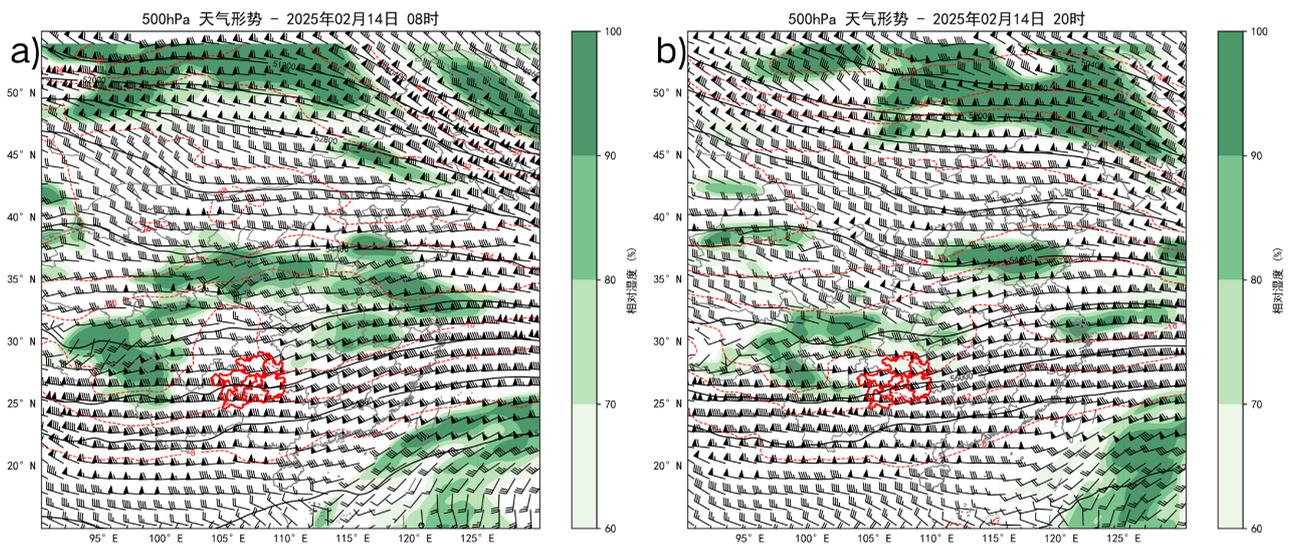


Figure 2. 500 hPa upper-level weather chart at 08:00 (a) and 20:00 (b) on February 14, 2025

图2. 2025年2月14日500 hPa高空天气图08:00(a), 20:00(b)

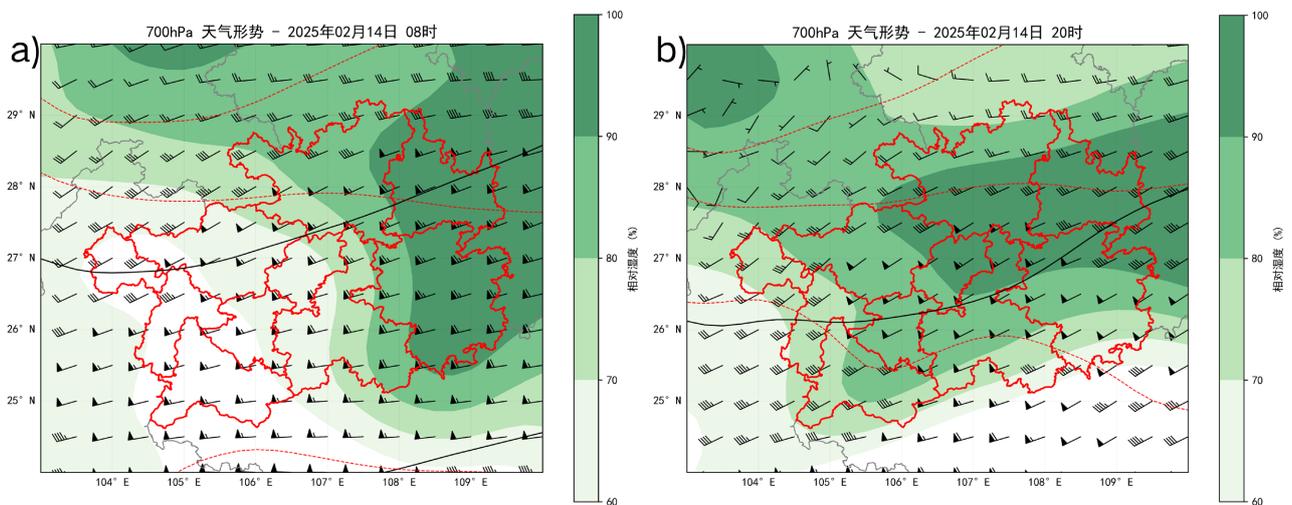


Figure 3. 700 hPa upper-level weather chart at 08:00 (a) and 20:00 (b) on February 14, 2025

图3. 2025年2月14日700 hPa高空天气图08:00(a), 20:00(b)

图 2 给出了 2025 年 2 月 14 日 08:00、2 月 14 日 20:00 2 个时次的高低空实况场，从图 2(a)中可见在 2 月 14 日 08:00 的 500 hPa 上，贵州上游地区处于南支槽前西南气流控制，槽前气流呈现汇合趋势，槽线移动较为缓慢，此时贵州东北部地区有一后倾槽，随着温度槽位置的前移，平流作用加强，槽将继续加深发展。2 月 14 日当日 20:00 (图 2(b))，贵州地区处于槽前广阔范围内，盛行辐合上升气流，此时温度槽与高空槽相重合时，垂直槽出现，这时高空槽发展到最盛阶段，也是天气过程发展的强盛时段。

700 hPa (图 3(a), 图 3(b))西南急流显著，风速最大值达到 26 m/s，在 2 月 14 日 20:00 (图 3(b))西南急流速度略减小，但出现了风速的辐合，水汽条件也持续增强。

850 hPa (图 4(a), 图 4(b))上，在贵州省东南部有一条切变线摆动，2 月 14 日 20:00 (图 4(b))有明显东北回流冷空气的加入，切变线明显南压，冷空气覆盖东北至西南一带，形成一个较冷的下垫面。

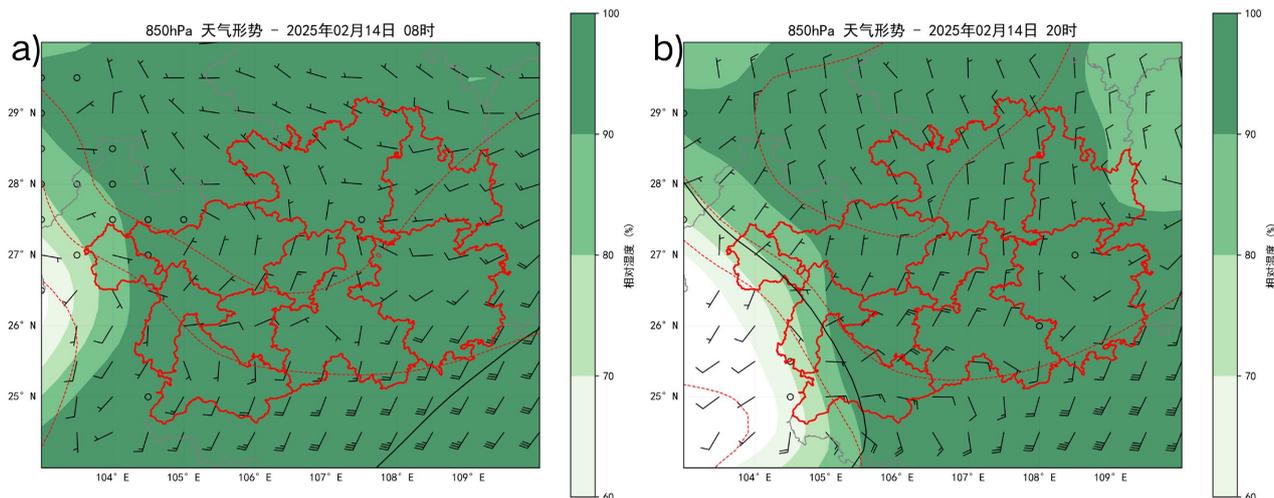


Figure 4. 850 hPa upper-level weather chart at 08:00 (a) and 20:00 (b) on February 14, 2025

图 4. 2025 年 2 月 14 日 850 hPa 高空天气图 08:00 (a), 20:00 (b)

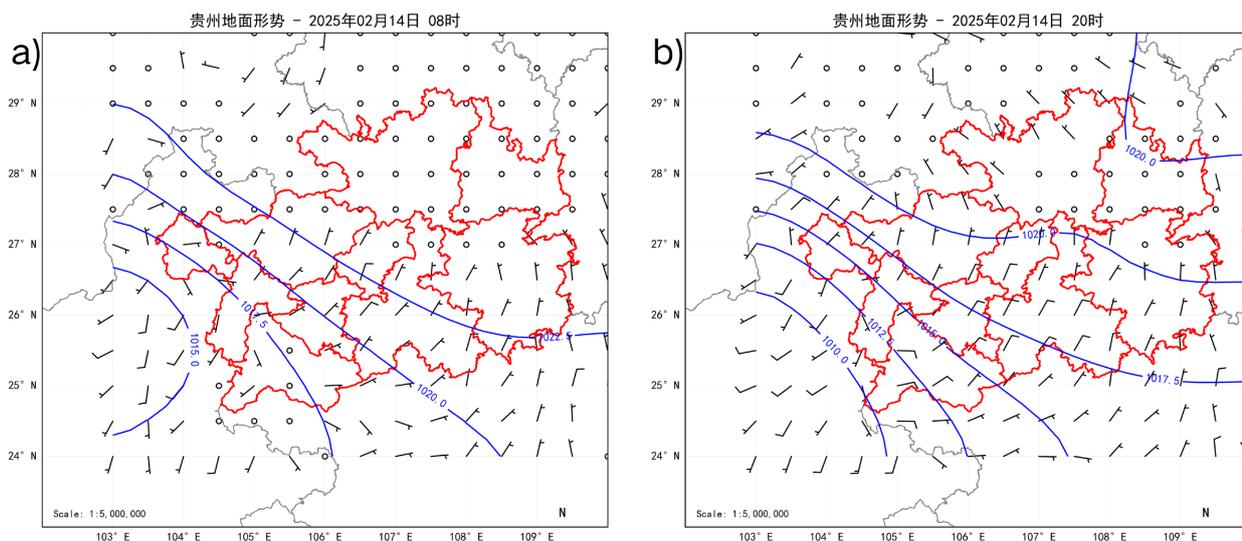


Figure 5. Surface weather chart at 08:00 (a) and 20:00 (b) on February 14, 2025

图 5. 2025 年 2 月 14 日地面形势图 08:00 (a), 20:00 (b)

分析结果表明此次雷雨天气发生的主要影响系统为 500 百帕高空槽以及 700 百帕低空急流，地面图

上有(图 5(a), 图 5(b))准静止锋维持。雷雨发生时, 贵州地区受到 500 百帕高空槽东移过境影响, 700 百帕西南急流风速达到 26 米/秒, 850 百帕为偏北风, 风速 2 米/秒, 地面有静止锋面在贵州西南部阻挡, 地面最高温度为 1.9°C。850 百帕至地面形成冷垫, 700 百帕暖湿气流沿着冷垫爬升, 在空中激发对流, 出现高架雷暴。

3.3. 探空分析

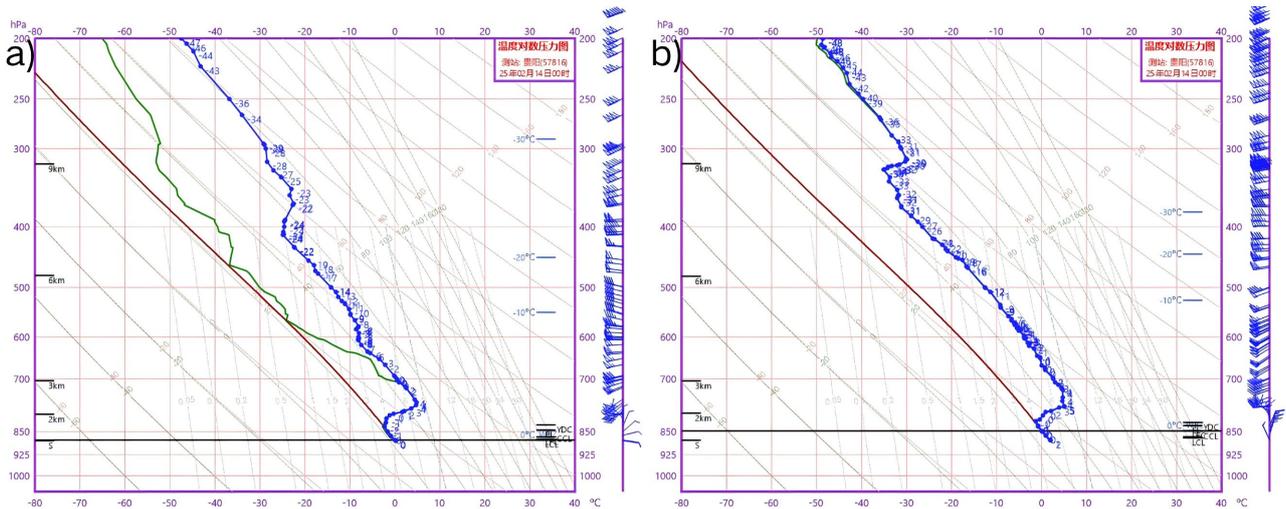


Figure 6. Sounding chart at Guiyang Station at 08:00 (a) and 20:00 (b) on February 14, 2025

图 6. 2025 年 2 月 14 日贵阳站探空图 08:00 (a), 20:00 (b)

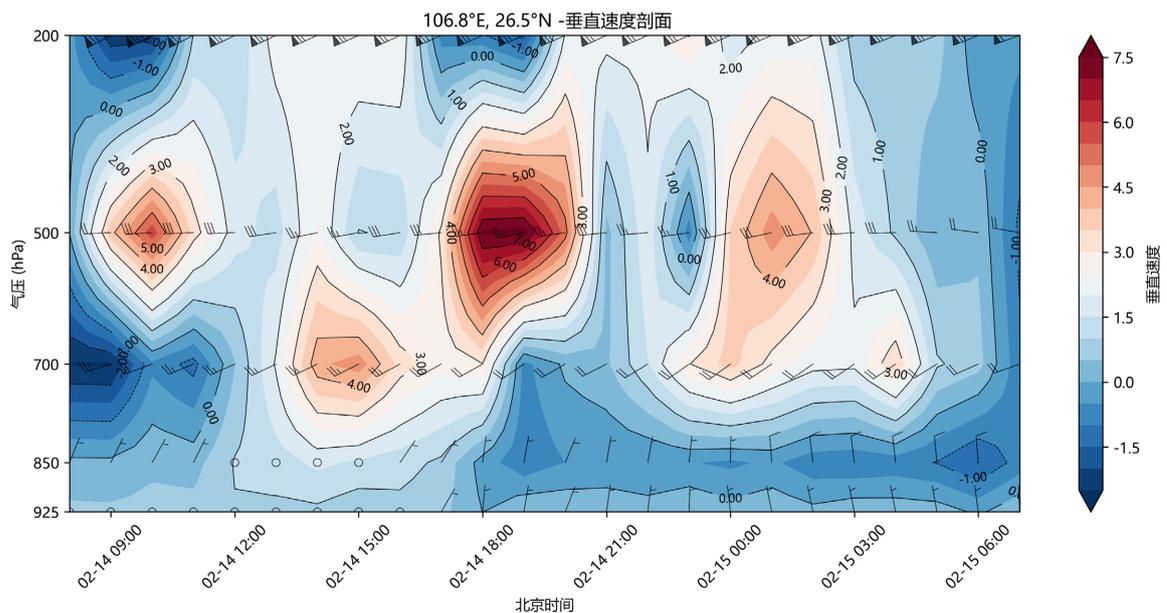


Figure 7. Time-height cross-section of vertical velocity at Guiyang (106.8°E , 26.5°N) from 08:00 on February 14 to 07:00 on February 15, 2025 (Unit: $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

图 7. 2025 年 2 月 14 日 08:00~15 日 07:00 贵阳(106.8°E , 26.5°N)垂直速度时间 - 高度垂直剖面图(单位: $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

图 6(a)是 08 时贵阳站实况探空图, 500 hPa 温度为 -15°C , 700 hPa 温度为 0°C , 水汽层在 600 hPa 高度附近, 近地层 850 hPa 到 700 hPa 存在明显逆温层, 表明该高度有明显的暖湿水汽输送。地面至 850 hPa

均为东北气流,表明地面受冷空气控制。20时贵阳站实况探空图上(图 6(b)),500 hPa 的温度为 -13°C ,700 hPa 温度为 1°C ,逆温层仍然存在但有所减弱,表明有能量释放,地面至 850 hPa 仍为偏北风整层水汽非常好。此次雷雨发生前,各常用物理量数值偏低,CAPE (对流有效位能)为 0.6 J/kg ,沙氏指数为 18°C ,K 指数为 7°C ,不稳定能量指数对于此次雷雨预报指示意义差,仅能从 700 百帕和 500 百帕的温差来判断,08 时温差为 14°C ,20 时温差为 15°C ,虽然近地面冷,但强劲的西南暖湿气流在 700 百帕附近形成暖层,造成 700 百帕至 500 百帕之间层结不稳定。水汽条件上,850 百帕比湿为 4 g/kg ,温度露点差为 0.5°C ,低层水汽达到饱和。但这种水汽条件在贵州冬春季属于较为常见的情况,对流能否触发还需和不稳定层结以及一定的动力抬升作用有关。图 7 给出了贵阳站(106.8°E , 26.5°N)2025 年 2 月 14 日 08:00~15 日 07:00 垂直速度时间-高度垂直剖面图,可以看到在 14 日 18:00~21:00,500 hPa 出现上升运动中心,最大上升速度达到 $7 \times 10^{-2}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此时贵阳市出现雷雨天气。20:00 后上升运动逐渐减小,降水也逐步减弱。

4. 闪电与多源资料对比分析

4.1. 闪电资料分析

本次降水天气过程持续时间较长,图 8 是 2025 年 2 月 14 日 16:00~15 日 08:00 贵州省降水过程地闪频数变化,共监测到地闪出现 780 次,云闪出现 1118 次,其中正地闪出现 300 次,负地闪出现 480 次,平均闪电强度达到 10.6 kA 。本次天气过程在 17:30 达到巅峰,最强天气过程出现在六盘水东部和黔西北部,持续时间在 30 分钟左右,此时闪电频次最密集,18:30 后地闪频次逐渐减少,到 15 日 08:00 前,仍有闪电活动分散出现。

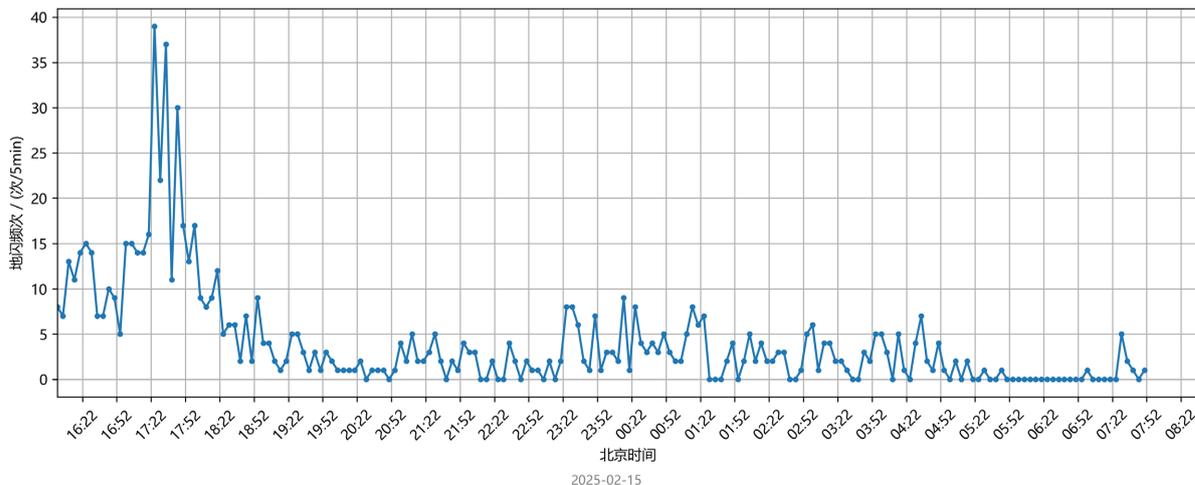


Figure 8. Variation in cloud-to-ground lightning frequency during the precipitation process in Guizhou Province from 16:00 on February 14 to 08:00 on February 15, 2025

图 8. 2025 年 2 月 14 日 16:00~15 日 08:00 贵州省降水过程地闪频数变化

4.2. 闪电与雷达资料对比分析

雷达的基本反射率产品不仅能够测定回波的强度、结构特征、移动规律及演变趋势,还能借助连续演变资料分析其移动方向、强度变化和发展态势。为更好地发现雷达和闪电之间的演变关系,将贵阳市出现最强雷雨时段的雷达组合反射率与对应时刻的闪电观测数据进行对比分析。通过对比 2025 年 2 月 14 日 19:18、19:50、20:32 这三个时次的组合反射率与贵州省闪电极性分布图(图 9)看出,此过程组合反射率强度不大,对流单体面积较小,最强中心强度为 55 dBz 。19:18 时(图 9(a)),回波主体在贵阳南部,

回波形态松散呈带状分布，最强回波中心出现在贵阳安顺交界处。通过跟踪该区域回波演变情况，当日对流回波特点为：回波强度整体偏弱，生消很快，且移动迅速，回波移速约为 60 公里/小时。后续 19:50 (图 9(c))、20:32 (图 9(e))这两个时次的回波东移，强度减弱并逐渐消散。对比分析过程中 19:18 (图 9(b))、19:50 (图 9(d))、20:32 (图 9(f))这三个时次的闪电极性分布图看出，负闪电主要分布在回波组合反射率最高的地方以及回波移动方向，正闪电分布稍滞后于负闪电的位置，但分布趋势与负闪电大致相似，主要聚集在回波移动方向。

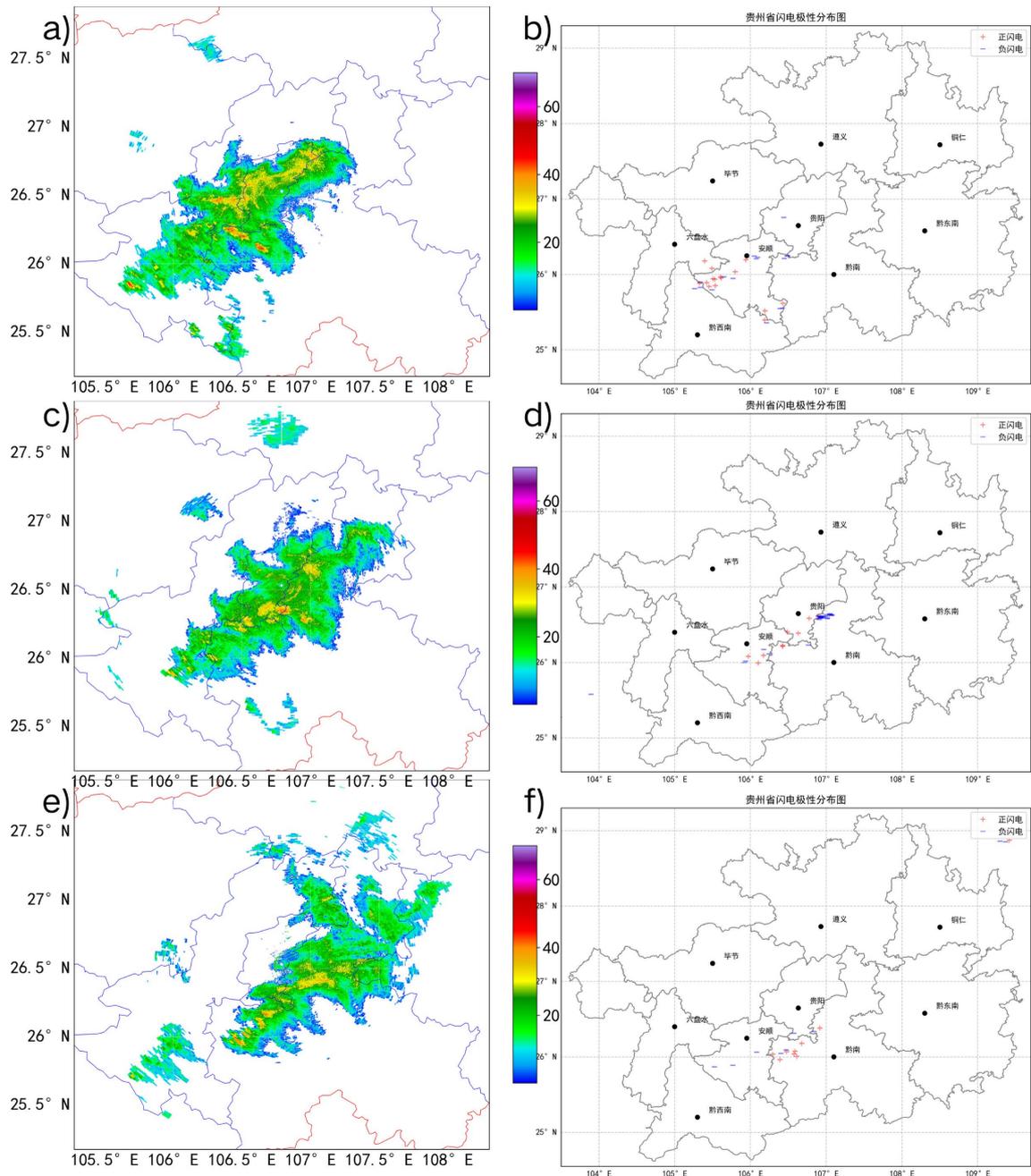


Figure 9. Composite reflectivity and lightning polarity distribution in Guizhou Province at 19:18 (a, b), 19:50 (c, d), and 20:32 (e, f) on February 14, 2025

图 9. 2025 年 2 月 14 日 19:18 (a, b)、19:50 (c, d)、20:32 (e, f) 三个时次的组合反射率与贵州省闪电极性分布图

4.3. 本次闪电与降水过程量分布分析

本次高架雷暴过程雨带自西南像东北方向移动,从过程累计降水量(图 1)和贵州省闪电极性分布图(图 10(a))对比来看,闪电分布与整体降水带分布一致,在贵州省西南部降水量最多地区,以负闪电为主,正闪电分布在降水量最大值中心周围;贵州省东北部地区的闪电分布松散,可判断为冬季对流天气以层状云降水为主,云中闪电较少,闪电活动较弱。

从过程累计降水量(图 1)和累积闪电分布密度(图 10(b))对比来看,贵州省西南部闪电密集区跟降水量密集区有较好的对应关系,在强回波主体附近,闪电活动持续时间较长,密度最大,最大密度达到 28 次/ $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,闪电越密集的地方,降水量越大,对流发展越旺盛。

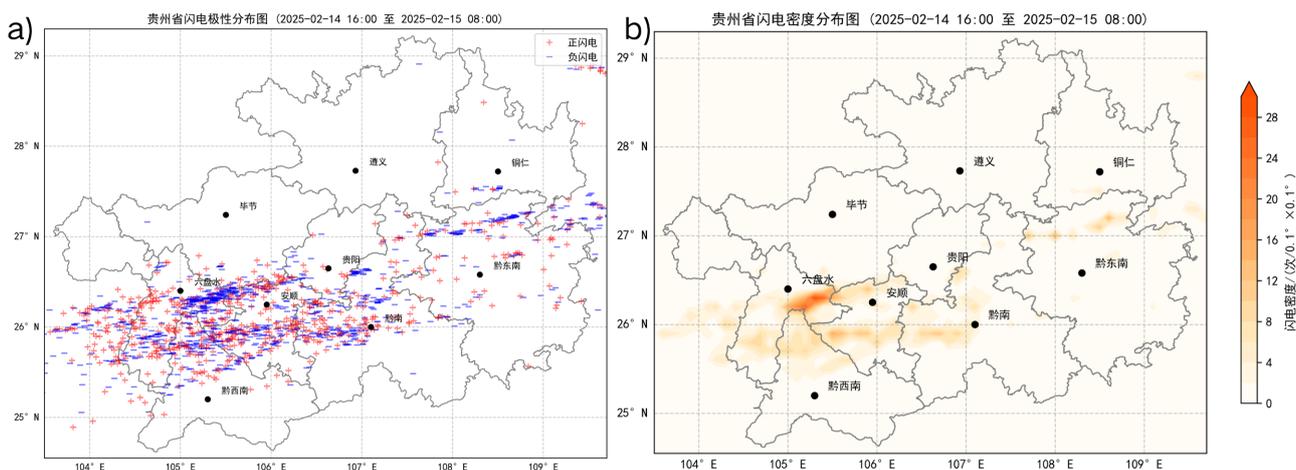


Figure 10. Lightning polarity distribution (a) and lightning density distribution (b) in Guizhou Province from 16:00 on February 14 to 08:00 on February 15, 2025

图 10. 2025 年 2 月 14 日 16:00~2 月 15 日 08:00 贵州省闪电极性分布(a)和贵州省闪电密度分布(b)

5. 结论

通过 2025 年 2 月 14 日贵阳地区高架雷暴强对流过程,结合形势场、物理量场、雷达回波和闪电分布等方面进行综合分析,初步得出以下结论:

(1) 此次对流天气主要受高空槽以及低空急流、地面准静止锋的影响。850 百帕至地面形成冷垫,700 百帕暖湿气流沿着冷垫爬升,在空中激发对流,出现高架雷暴。

(2) 闪电分布与对流天气移动方向基本一致,在贵州省西南部闪电活动活跃,分布密集,最大密度达到 28 次/ $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$;闪电密集区域与降水量最大值区域对应,闪电极性以负闪电为主,负闪电比例达到 62%。

(3) 在贵阳市出现雷雨时段的三个雷达图和闪电极性分布图上看,冬季对流降水强度较弱,最大组合反射率值为 55 dBz,对流分布松散,且移动迅速。闪电分布在回波移动前方,可借助雷电监测预警系统判断,对流发展阶段和方向,迅速决策、提前发布预警。

基金项目

中国民用航空西南地区空中交通管理局创新类项目“雷电为主的热力型强对流天气监测和临近预警在航空气象中的应用”(SWGZATMB2024001)资助。

参考文献

- [1] 胡萍,刘玉林,杨群,等. 2019 年 2 月黔东北锋后冷区两次高架雷暴过程的对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022,

- 16(2): 91-98.
- [2] 张亚男, 刘贵萍. 贵阳机场近 16a 冬季雷暴特征及物理机制研究[J]. 山地气象学报, 2025, 49(2): 37-45.
- [3] 陈军, 李小兰, 黎荣, 等. 贵州铜仁两次大范围冰雹过程的对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(4): 30-36.
- [4] 唐枫, 黄金全, 邓小光, 杨凤婷, 李俊瑶. 基于混合基线天电阵列的贵州闪电活动时空分布特征[J]. 中国航班, 2025(16): 230-233.
- [5] 程向阳, 朱浩, 周昆, 等. 安徽地区一次致灾雷暴过程的闪电特征分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(3): 265-273.
- [6] 廖颖楠. 赣州一次强降水过程的闪电特征与多尺度资料分析[J]. 江西科学, 2023, 13(7): 166-170.
- [7] 黄琳. 江西省一次强暴雨过程雷达回波及闪电特征分析[J]. 暴雨灾害, 2024, 43(6): 1287-1294.
- [8] 黄延刚, 顾松山, 杨才文, 等. 一次强对流过程中的闪电特征分析[J]. 气象科技, 2007, 35(3): 7-10.
- [9] 吴俊杰, 陈明, 温颖. 中国南方地区闪电活动特征[J]. 科技和产业, 2023, 23(7): 254-262.
- [10] 张丹. 一次强对流天气的雷达和闪电特征分析[J]. 内蒙古气象, 2024, 41(1): 56-59.
- [11] 吴安坤, 张淑霞, 刘波, 等. 近 50 年贵州省雷暴气候特征分析[J]. 防灾科技学院学报, 2013, 15(4): 87-91.
- [12] 王文伟. 基于混合天电阵列的闪电电磁传输特性的观测和模拟研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.