

贵阳机场一次下击暴流天气过程的多源观测分析

唐 枫, 邓小光, 罗 浩

民航贵州空管分局气象台, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年6月3日; 录用日期: 2025年7月18日; 发布日期: 2025年7月25日

摘 要

利用贵阳机场自动气象站、双偏振雷达、激光测风雷达及微波辐射计等多源观测数据, 分析了2025年5月20日一次致灾性下击暴流过程。结果表明: 中层干冷空气侵入叠加降水拖曳作用, 触发了强下沉气流, 导致地面瞬时风速达31.3 m/s的辐散型大风; 自动气象站捕捉到跑道南北端反向风场(北风转东南风)、气压陡升3 hPa及气温骤降5.8℃; 双偏振雷达识别出65 dBZ强回波、中气旋及冰雹相态(相关系数 < 0.9); 微波辐射计显示CAPE值剧增至1933 J/kg, 液态水含量峰值1.32 g/m³, 层结极度不稳定。通过多源观测数据协同分析为下击暴流预警提供了关键指标。

关键词

下击暴流, 微波辐射计, 激光雷达, 双偏振雷达

Multi-Source Observational Analysis of a Downburst Weather Process at Guiyang Airport

Feng Tang, Xiaoguang Deng, Hao Luo

Meteorological Office of Guizhou Air Traffic Management Branch, Civil Aviation Administration of China, Guiyang Guizhou

Received: Jun. 3rd, 2025; accepted: Jul. 18th, 2025; published: Jul. 25th, 2025

Abstract

Utilizing multi-source observational data from Guiyang Airport's automatic weather station, dual-polarization radar, wind lidar, and microwave radiometer, this study analyzes a damaging downburst

event occurring on May 20, 2025. Results indicate that the intrusion of mid-level dry cold air combined with precipitation drag triggered intense downdrafts, generating surface divergent winds with instantaneous speeds reaching 31.3 m/s. The automatic weather station captured opposing wind fields (northerly shifting to southeasterly) at runway ends, a 3 hPa pressure surge, and a 5.8°C temperature drop. Dual-polarization radar identified 65 dBZ strong echoes, a mesocyclone, and hail signatures (correlation coefficient < 0.9). Microwave radiometer data revealed CAPE values sharply increasing to 1933 J/kg, liquid water content peaking at 1.32 g/m³, and extreme atmospheric instability. This multi-source collaborative analysis provides critical indicators for early warning of downbursts.

Keywords

Downburst, Microwave Radiometer, Lidar, Dual Polarization Radar

Copyright © 2025 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

下击暴流作为强对流天气系统中的“隐形杀手”，是由雷暴云内强下沉气流触地后引发的地面辐散性直线型大风，其瞬时风速可达 50 m/s (15 级)，水平尺度通常小于 10 公里，持续时间仅数分钟至 20 分钟[1]。由于尺度小、突发性和致灾性强等特点，下击暴流较难进行监测预警[2][3]，对飞行安全造成重大威胁。为此，国内外的学者对下击暴流的监测和预警开展了深入研究。Sengupta 等[4]的研究发现，降水的蒸发和冻结水凝固物的融化为干下击暴流的产生提供了负的浮力。王秀明等[5]指出，下击暴流的动力过程涉及降水粒子拖曳效应、中层干空气侵入及垂直风切变协同作用。王凯等[6]在“东方之星”事件调查中发现，类似地形辐合线可通过增强低层暖湿平流与垂直不稳定能量积累，显著提升下击暴流触发概率。孙凌峰等[7]对武汉 6.22 空难中下击暴流特征的分析发现，下击暴流的发生发展与大尺度天气系统密不可分，大尺度天气背景为其提供有利的环境场。牛向华等[8]对发生西宁机场的下击暴流观测的研究发现，测风激光雷达对跑道区域下击暴流辐散风场的水平和垂直结构均有良好的识别效果。夏羽等[9]的研究发现，强下沉气流叠加降水拖曳作用，会导致地面出现大范围大风，同时快速降低的 VIL 和中气旋对大风的预报有一定的指示意义。毕旭等[10]的研究指出，下击暴流生命周期中，由于垂直气流快速变化，会导致雷达反射率因子先减小，后短时增大的情况。

2025 年 5 月 20 日，贵阳龙洞堡国际机场(以下简称贵阳机场)遭遇了一次剧烈的下击暴流天气过程，通过数据资料的分析，发现贵阳机场正处于下击暴流移动路线上，机场跑道安装的自动气象观测设备和激光测风雷达等设备较好地记录了下击暴流的要素变化情况。因此分析此次下击暴流天气过程的多源探测数据，对贵阳机场下击暴流监测预警的方法和技术进行更深层次的研究，显得尤为必要。

2. 探测设备及资料

2.1. 贵阳机场多源探测设备

自动气象观测系统：一共 6 套，分别位于贵阳机场 19R 跑道入口、01L 跑道入口以及跑道中间(西跑道)和 19L 跑道入口、01R 跑道入口以及跑道中间(东跑道)，能够探测该点的风向风速、气温、气压、湿度、RVR、能见度和降水量等信息。C 波段多普勒双偏振天气雷达，探测范围 150 km，能够探测对流天

气的相关产品。FC-III 型激光测风雷达, 安装于贵阳机场老塔台明室外, 高度 42 米, 距跑道中线 600 米, 能够测量水平 10 km 距离范围内的风场信息。HTG-4 型地基多通道微波辐射计, 能自动完成地面到高空 10 km 的大气温湿度探测, 时间间隔 3 min, 垂直共 93 层。上述探测设备的安装位置图见图 1。



Figure 1. Location map of detection equipment at Guiyang Airport
图 1. 贵阳机场探测设备位置图

2.2. 数据资料

欧洲中心 ERA5 逐小时地面资料(2 米气温、地表气压、10 米风等)和高空资料(UV 风、位势高度、垂直速度、涡度、散度、相对湿度、比湿等共 37 层), 空间分辨率 $0.25 \times 0.25^\circ$ 。贵阳龙洞堡机场逐小时常规观测数据、地面观测记录以及贵阳市实况探空资料。2.1 中所述探测设备探测到的气象资料, 包括自动气象观测系统分钟级数据、双偏振雷达扫描数据、激光雷达风场数据和微波辐射计探空数据等。Himawari-9 气象卫星 B13 通道资料, 包括云顶亮温等数据。本文采用 Python、Origin 及雷达软件对数据资料进行处理并制图。

3. 天气实况回顾

5 月 20 日凌晨(北京时间, 下同), 贵阳机场出现一次极端强对流天气过程, 根据气象地面观测记录显示, 5 月 20 日 04:30-08:47 雷暴; 04:56-05:30 中阵雨, 04:59-05:22 大雨; 05:03-05:29 飑; 05:03-05:06 和 05:17-05:21 大风, 最大风速 31.3 米/秒, 05:06-05:22 弱冰雹, 直径 9 mm, 过程降水量: 68.9 mm。极端大风造成贵阳机场范围内 118 棵树木倾倒, 滑行道遭到污染, 因为天气过境阶段机场航班量较少, 同时气象部门提前发布了强天气机场警报, 仅有 1 架进港航班备降, 另有 8 架出港航班因滑行道清理延误。

4. 天气形势分析

环流形势分析

5月19日20时的环流形势(图2)进行分析可知,高空500 hPa上环流特征为两槽一脊型,两槽位于乌拉尔山以东的西伯利亚及亚洲东岸上空,脊位于贝加尔湖以南的蒙古高原为主,我国西南地区受槽底偏西气流控制,夜间多波动;700 hPa贵州地区以偏西南气流为主,川渝地区有弱低涡,夜间东移,水汽大值区与低空急流主要在广西至湖南南部;850 hPa以偏南气流为主,水汽大值区及低空急流同样位于广西湖南等地。地面上有弱冷空气自东北路径向西南渗透。

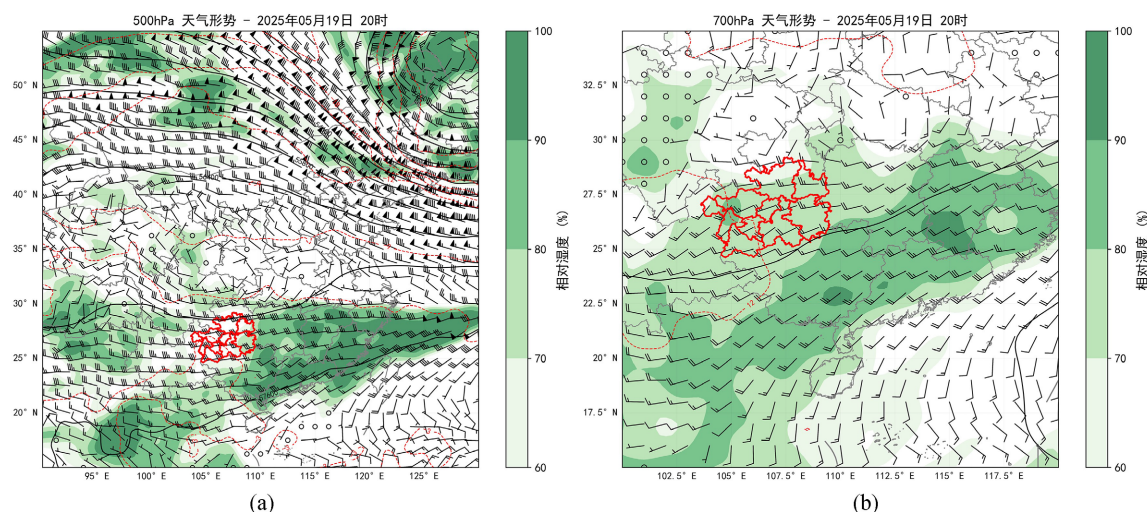


Figure 2. Weather map at 20:00 on 2025.5.19: 500 hPa. (a) 700 hPa; (b) Contour: geopotential height, unit: dagpm; shading: relative humidity, unit: %, wind field: wind barbs

图 2. 2025 年 5 月 19 日 20 时天气图: 500 hPa。(a) 700 hPa; (b) 等值线: 位势高度, 单位: dagpm; 填色: 相对湿度, 单位: %, 风场: 风杆

5. 探测资料分析

5.1. 自动气象观测数据分析

此次天气过程较强时段为 05:00~05:30 间,重点对此阶段的自动气象观测系统探测到的分钟级风向风速、气压、温度、降水、能见度等气象要素变化情况进行分析。

图 3 给出了 04:40~05:40 间贵阳机场两条跑道共 6 套自动气象观测系统记录到的分钟级瞬时风向风速变化情况。从图 3(a)可以看出,西跑道地面风从 04:55 开始迅速增大,在 05:05 左右达到风速峰值,其中 01L 跑道(西跑道南头)最大风速 30 米/秒,大风时间维持至 05:20 左右,风向由东北风转为北风再转为东风;19R 跑道(西跑道北头)最大风速 23 米/秒,在 05:09 左右风速降低至仅 5.9 米/秒,后又快速增大至 19.1 米/秒,风向由西北风转为偏西风至偏东南风。从图 3(b)可以看出,东跑道地面风从 04:55 开始迅速增大,在 05:05 左右达到风速峰值,其中 01R 跑道(东跑道南头)最大风速 31.3 米/秒,大风时间维持至 05:20 左右,风向由东北风转为北风至偏东风;19L 跑道(东跑道北头)最大风速 26.8 米/秒,在 05:12 左右风速降低 13.2 米/秒,后又快速增大至 20.9 米/秒,风向由西北风转为偏西风至偏南风。由此可见,两条跑道的风向风速变化情况较为相似,大风期间呈现出跑道北头风向北风为主,跑道南头南风为主的辐散形势,且均出现了风速快速减小后又陡增的情况,尤其在中间端至北头的体现更为明显,本次过程地面强风(≥ 17 m/s)持续时间为 25 分钟(04:55~05:20),水平影响尺度约 4 km,符合一次下击暴流路径上风向风

速的变化情况。

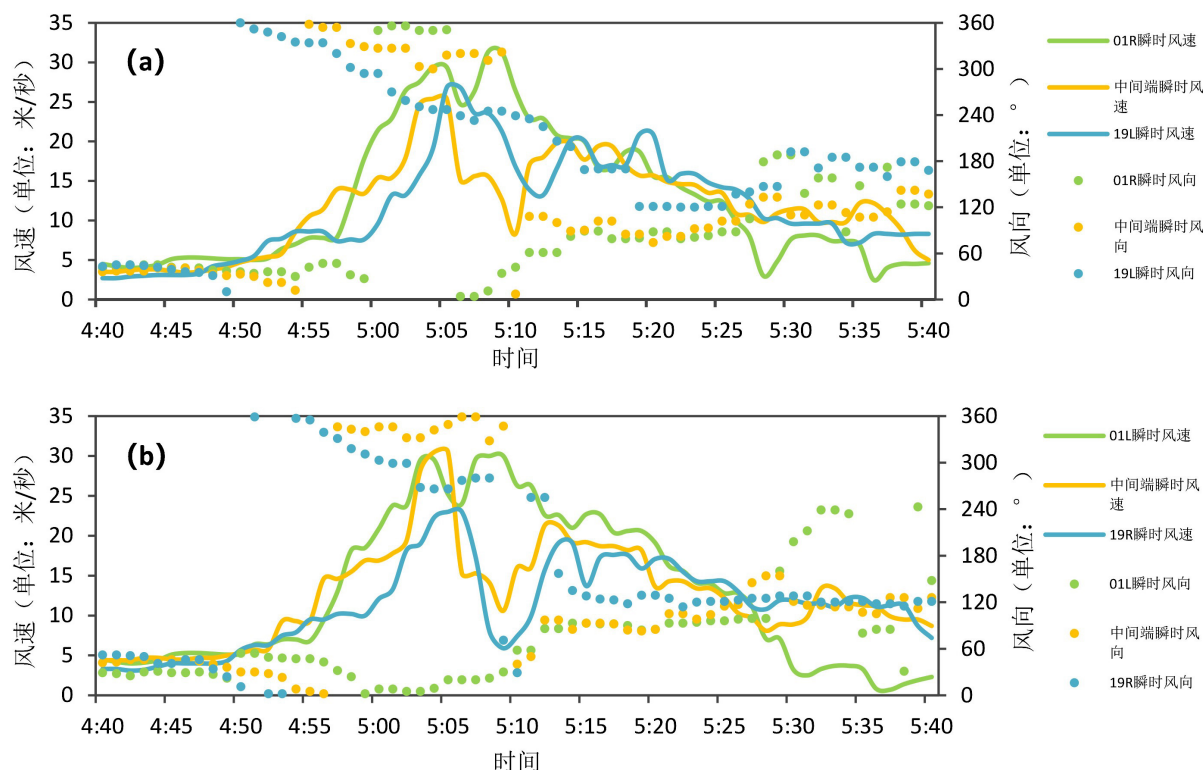


Figure 3. Instantaneous wind direction and speed variations at Guiyang Airport's west runway (a) and east runway (b) from 04:40 to 05:40 on 2025.5.20

图 3. 2025 年 5 月 20 日 04:40~05:40 贵阳机场西跑道(a)和东跑道(b)瞬时风向风速变化

为更深入研究此次过程中的风向风速变化情况, 选取如图 4 所示从 04:55 开始间隔 5 分钟的 8 个时间点不同自观设备所测的风向风速数据与机场平面图相叠加(图 4), 更加直观地对下击暴流移经贵阳机场的过程进行观测和分析。本场于 04:00 左右地面风由南风转为北风并维持; 04:55 时, 机场以北风为主, 风速开始增大; 05:00 时, 风向维持西北风, 风速快速增大, 南头风速最大; 05:05 时, 北头转为偏西至西南大风, 中间和南头保持偏北大风, 风速均超过 20 米/秒; 05:10 时, 北头与中间端风速迅速减小, 并开始呈现出辐散形势, 南头继续保持偏东北大风; 05:15 时, 北头与中间端风速再次快速增大, 其中北头为偏东南风, 中间端与南头为东风, 呈现出辐散趋势; 05:20 与 05:25 整体风场维持, 但风速持续减小; 05:30 时, 机场已转为偏南风并继续维持。地面风场上的快速变化和地面辐散的出现, 再次印证了下击暴流发生的可能性, 并指示出机场位于下击暴流移动路径之上。

图 5 给出了 04:40~05:40 期间, 基准观测点气象要素的变化情况。从 04:52 开始出现降水, 并在 04:55 开始降水量快速增大, 一度达到 4.3 mm/分钟, 从降水开始至 05:21 降水量就达到 61.5 mm, 已达到较强短时强降水的标准。跑道视程 RVR 在降水开始后出现陡降的情况, 最低降至 75 米, 降水减小后 RVR 迅速回升, 说明降水是引起 RVR 降低的主要原因。气温在降水开始后迅速降低, 从 21.3℃ 迅速降低至 15.5℃, 后缓慢回升, 同时气压快速上升, 从降水开始前的 881 hPa 猛增至 884 hPa, 后又快速恢复至降水前数值。结合地面风的变化可以看出, 各项要素变化的主要原因是下击暴流中的高空冷空气随强降水迅速冲向地面, 造成气温骤降、气压急升、RVR 急剧降低, 从侧面印证了机场位于下击暴流移动路径之上。

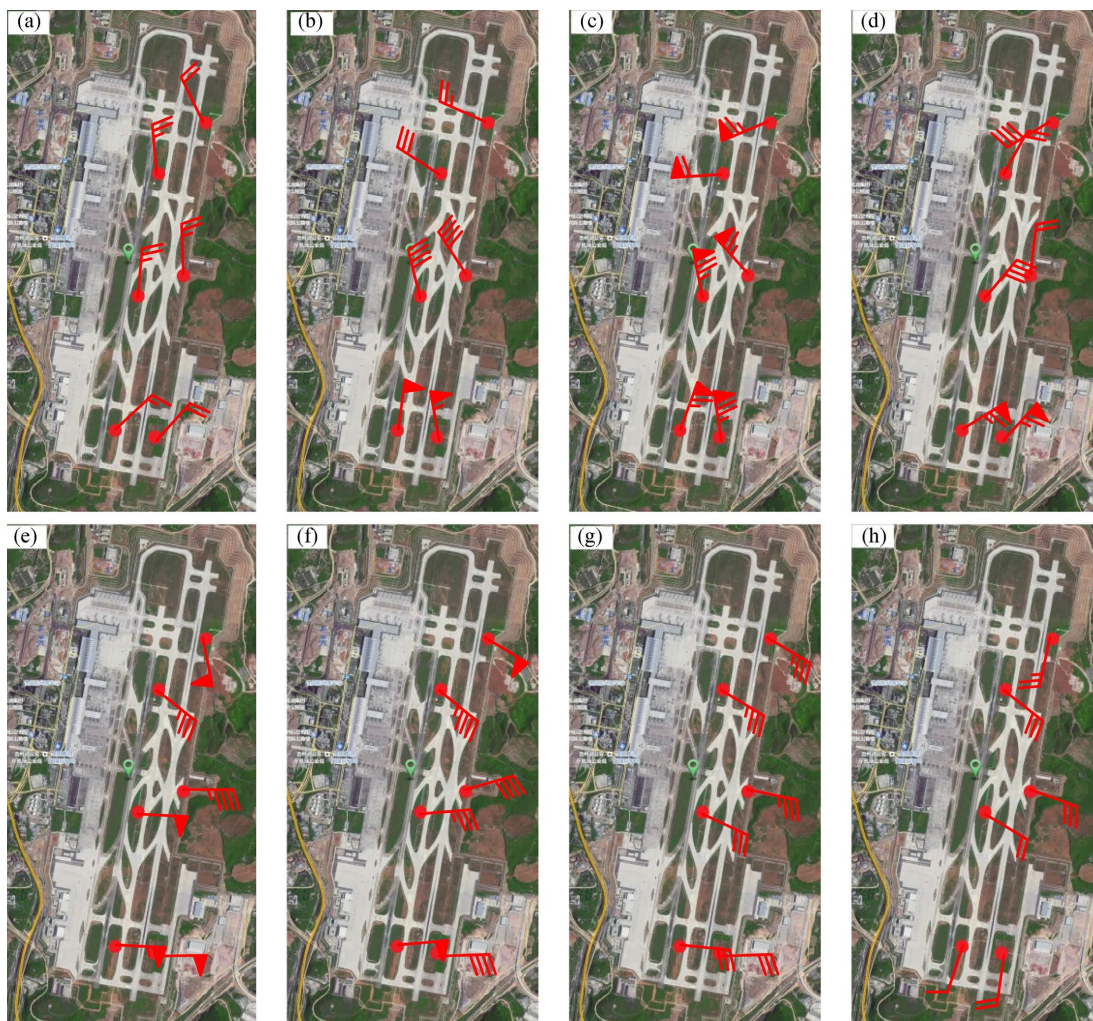


Figure 4. Wind direction and speed measured by the automatic weather observation system at Guiyang Airport at different times

图 4. 不同时刻贵阳机场自动气象观测系统所测风向风速图

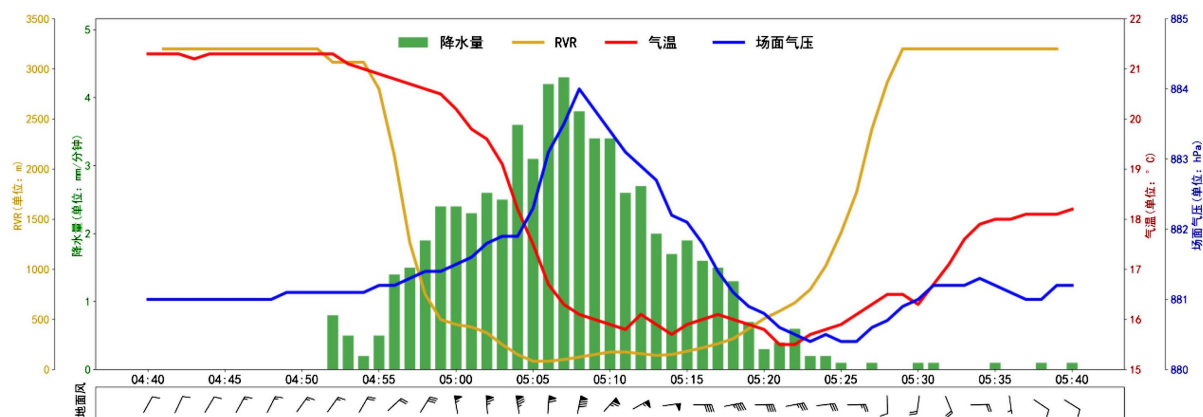


Figure 5. Precipitation (unit: mm), RVR (unit: m), temperature (unit: °C), surface pressure (unit: hPa), and surface wind variation trends at the reference point of Guiyang Airport from 04:40 to 05:40 on 2025.5.20

图 5. 2025 年 5 月 20 日 04:40~05:40 贵阳机场基准点降水量(单位: mm) RVR (单位: 米)气温(单位: °C)场面气压(单位: hPa)和地面风变化趋势

5.2. 多普勒天气雷达资料分析

从天气雷达扫描产品中辨别强对流天气特征。图 6 给出了 2025 年 5 月 19 日不同时次的天气雷达图，从图 6(a)~(d)组合反射率可以看出，机场西北侧，一条西南东北走向的强对流云带，正在发展并向东南方向移动，尤其是西北方向 40~60 公里处的强对流云团中，反射率因子强度超过 65 dBZ，反映出对流云团中伴随较大的降水粒子，有冰雹存在的可能性；从图 6(e)~(h)仰角 1.5°的径向速度图可以看出，对应组合反射率最强位置处出现正负速度对应特征，反映出强对流云团强烈的上升情况；从图 6(i)~(l)垂直液态水含量图可以看出，对于组合反射率因子最强位置处出现垂直液态水含量大值区，最大值超过 37.5 kg/m²，同时垂直液态水含量呈现先增后减的趋势；从图 6(m)~(p)雨强图可以看出，对应组合反射率最强位置处的雨强出现大值区，最大雨强超过 150 mm；从图 6(q)~(t)粒子相态图可以看出，对应位置出现大雨滴、雨夹雹的识别情况，且维持时间较长，说明对流云团发展较为深厚。从中可以看出强回波核移动到本场时(≥ 50 dBZ)生命史已超过 90 分钟。

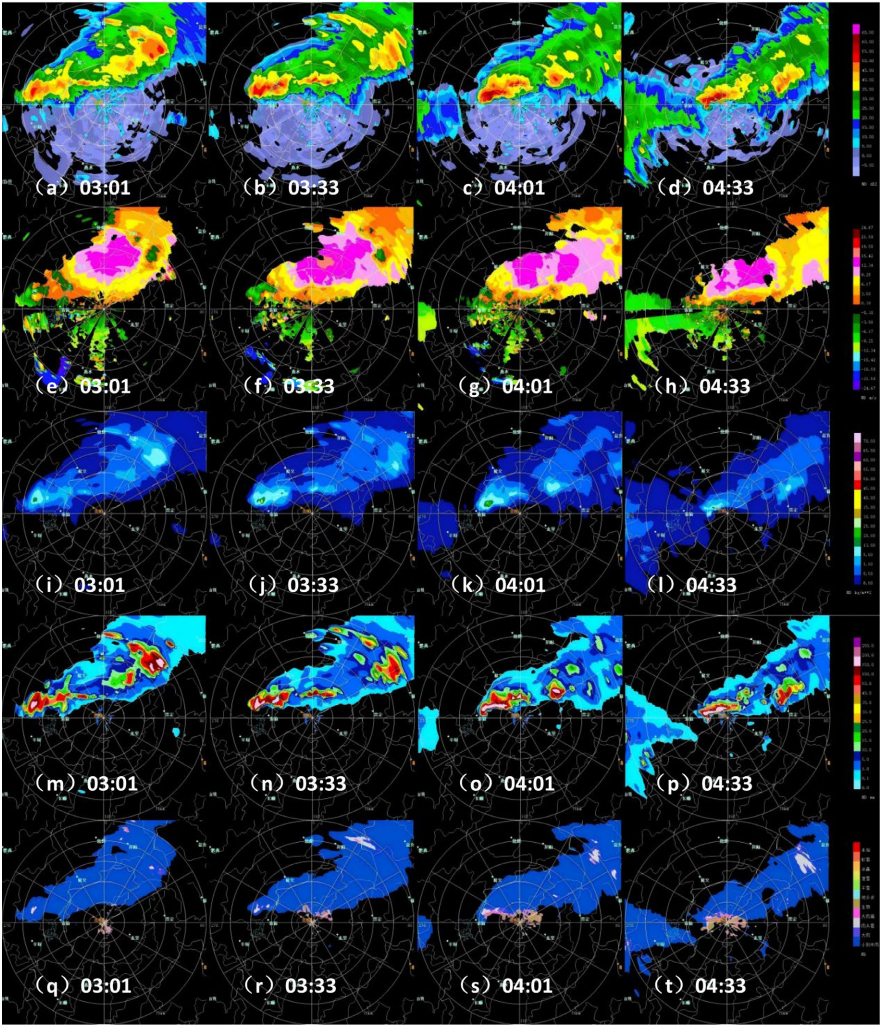


Figure 6. Weather radar images at different times on 2025.5.20, where (a)~(d) represent composite reflectivity (unit: dBZ), (e)~(h) denote radial velocity (elevation angle 1.5°, unit: m/s), (i)~(l) indicate vertically integrated liquid water content (unit: kg/m²), (m)~(p) show rainfall intensity (unit: mm), and (q)~(t) display hydrometeor phase classification

图 6. 2025 年 5 月 20 日不同时次的天气雷达图，其中(a)~(d)为组合反射率(单位: dBZ), (e)~(h)为径向速度(仰角 1.5°, 单位: m/s), (i)~(l)为垂直液态水含量(单位: kg/m²), (m)~(p)为雨强(单位: mm), (q)~(t)为粒子相态

5.3. 卫星云图资料分析

从此次天气过程的 TBB 演变情况(图 7)可以看出,这是一次中- β 尺度对流复合体天气过程。20 日 03 时(图 7(a)), 贵州西部开始有中- α 尺度对流云生成发展。04 时(图 7(b)), 对流云团已发展至中- β 尺度并与中部对流云团开始合并。05 时(图 7(c)), 该中- β 尺度对流云团已覆盖贵阳市大部, 中心 TBB 值远低于 -60°C , 给贵阳机场带来强降水。06 时(图 7(d))对流云团继续东移, 对贵阳机场的影响减小。

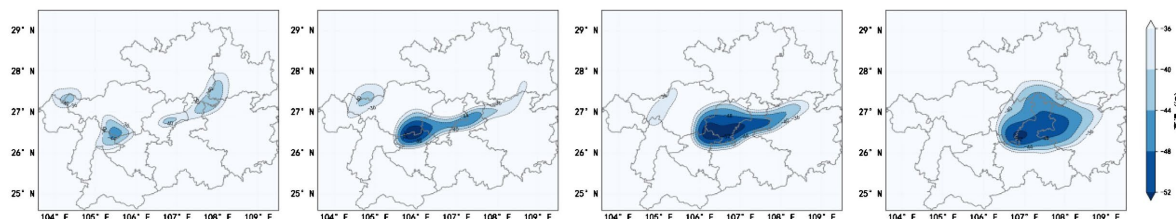


Figure 7. Evolution of TBB on 2025.5.20 (Unit: $^{\circ}\text{C}$)

图 7. 2025 年 5 月 20 日 TBB 演变情况(单位: $^{\circ}\text{C}$)

5.4. 微波辐射计资料分析

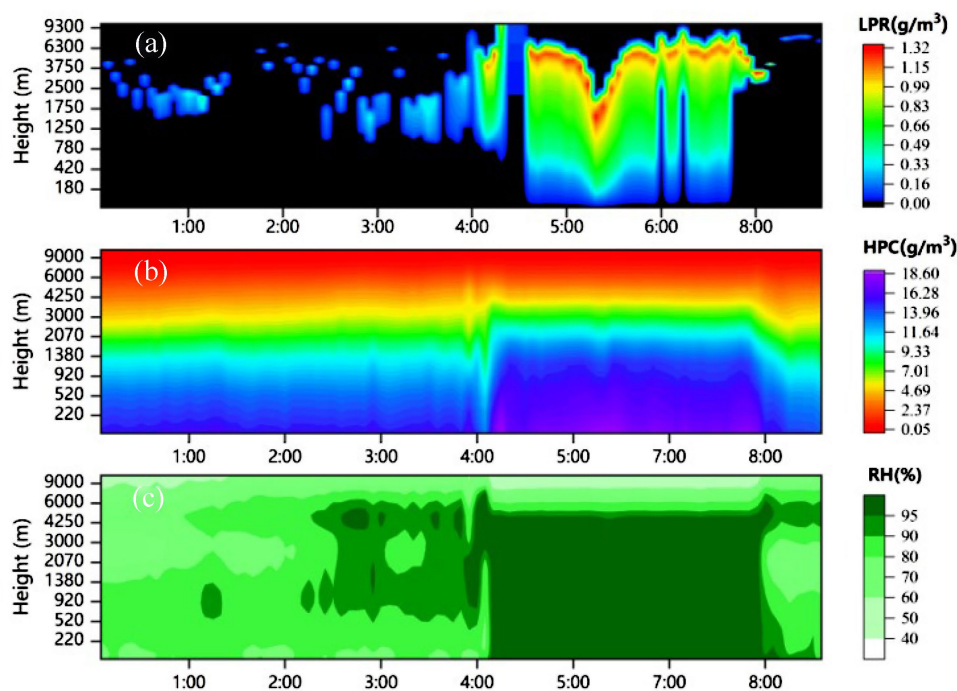


Figure 8. Liquid water profile (LPR), absolute humidity profile (HPC), and relative humidity profile (RH) during 00:00-09:00 on 2025.5.20

图 8. 2025 年 5 月 20 日 00:00~09:00 期间液态水廓线(LPR)、绝对湿度廓线(HPC)以及相对湿度廓线(RH)

微波辐射计可以对大气层结和稳定性情况进行探测。图 8 分别显示了微波辐射计探测的液态水廓线(LPR)、绝对湿度廓线(HPC)以及相对湿度廓线(RH)。分析其变化情况可以看出,微波辐射计上空液态水、绝对湿度及相对湿度均呈现出先增强再减弱又增强的变化趋势,变化趋势与此次天气过程实况记录吻合。5 月 20 日 04:30 左右开始, LPR 廓线开始在空中出现液态水含量大值区, 05:10 左右最强降水时段, 最大

值达 1.32 g/m^3 以上, 且最大值中心快速下降, 说明高空中的液态水呈现快速下冲趋势; 从 HPC 廓线上也能反映出相同时段内绝对湿度增强明显(最高可达 18.6 g/m^3), 同时高湿层略微抬升; 从 RH 廓线上可以看出相对湿度快速增加, 相对湿度大值区自地面延伸至 4000 米以上, 且整层 RH 均大于 97%。

图 9 则是微波辐射计探测到的稳定性指数变化情况, 可以看出在天气发生前(04:30), K 和 TTI 指数保持在 40 左右, SI、KOI、LI 保持在 0 以下, 呈现出较强的不稳定性, 天气开始后, 上述指数均出现小幅度震动, 随着天气过境震动逐渐降低。CAPE 值则体现出较大变化, 天气发生之前, CAPE 值保持在 70~900 J/kg 之间震动, 平均值 387 J/kg, 天气开始后出现较大震荡, 波动上升至 1000 J/kg 以上, 峰值达 1933 J/kg, CAPE 值剧增时段(04:30~05:10)与雷达 VIL 跃增时段相关系数达 0.91 ($p < 0.01$), 表明能量累积与云内水凝物增长高度协同, 体现出较大的不稳定能量以及较为不稳定的大气层结状态, 为后续雷暴天气的持续发生创造了条件。

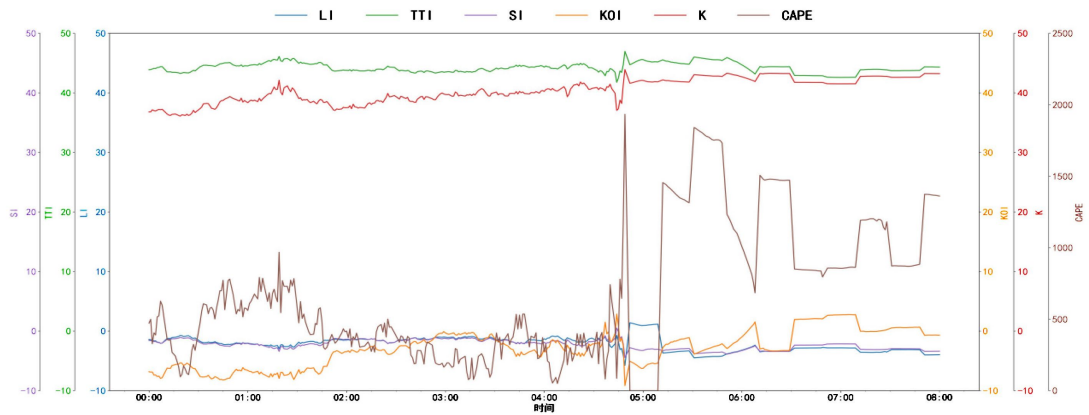


Figure 9. Showing the changes over time of LI, TTI, SI, KOI, K, and CAPE from 00:00 to 08:00 on 2025.5.20
图 9. 2025 年 5 月 20 日 00:00~08:00 期间 LI、TTI、SI、KOI、K、CAPE 随时间的变化

5.5. 激光测风雷达资料分析

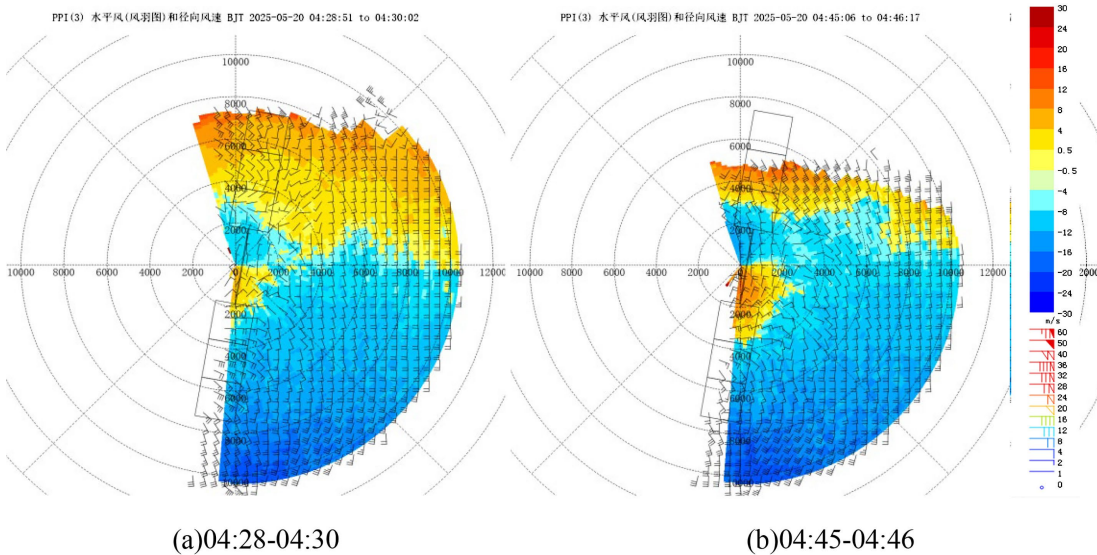


Figure 10. :Horizontal wind and radial wind speed PPI from wind lidar on 2025.5.20 (3° elevation angles)
图 10. 2025 年 5 月 20 日激光测风雷达水平风和径向风速 PPI(3°仰角)

由 2025 年 5 月 20 日激光测风雷达 PPI 产品(图 10)分析可知: 04:28~04:30 雷达量程开始受到降水影响, 北面量程降低为 8 公里, 并在 45°方位探测到西北风, 风速 12~20 米/秒, 在雷达中心 2 公里范围内探测到北风, 风速 2~4 米/秒, 北风层高度 120 米以内。04:45~04:46 北面量程降低至 5 公里, 因较强降水影响了雷达对该部分区域风向风速的探测情况, 此时雷达中心北风区域扩展至 3 公里以上, 风速增大到 8~10 米/秒, 北风层高度上升到 150 米以上, 雷达中心以南 2 公里处出现较强径向辐合。由于激光雷达安装位置原因, 雷达西面有较大遮挡角(202°~352°), 因此对于本次由西向东发展移动的天气过程观测和预警效果有限。同时因此次过程伴随较强降水, 导致能见度快速降低, 也影响了激光雷达对于风向风速的探测, 但是能够从雷达量程的快速缩减情况以及该方向上最大量程, 结合其他探测设备资料, 综合判断强降水及地面辐合线的位置。

6. 结论

本研究通过多源观测数据综合分析了 2025 年 5 月 20 日贵阳机场下击暴流天气过程, 主要结论如下:

(1) 天气背景与触发机制: 本次过程发生在西南槽前偏西气流背景下, 中层干冷空气侵入叠加降水粒子拖曳效应, 在“上干下湿”层结、中激发强下沉气流。

(2) 地面风场与要素响应: 机场的自动气象观测系统清晰记录到辐散型风场演变: 跑道北端由西北风转为偏南风, 南端维持东北风, 水平尺度约 4 km; 气象要素剧变: 气压陡升 3 hPa, 气温骤降 5.8℃, RVR 最低降至 75 m, 与下沉气流触地特征高度吻合。

(3) 多源观测协同验证: 双偏振雷达上识别出正负速度对、高悬强回波、粒子相态及低相关系数等冰雹回波特征; 卫星云团上云顶亮温 TBB 反映云团发展旺盛; 微波辐射计上 CAPE 值大幅度震荡, 反映能量快速累积并释放, 液态水廓线较好反演了强降水情况。激光雷达捕捉到地面辐合线形成。

参考文献

- [1] 李宏海, 欧进萍. 我国下击暴流的时空分布特性[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(6): 9-18.
- [2] Wang, X., Wang, H., He, J., *et al.* (2022) Automated Recognition of Macro Downburst Using Doppler Weather Radar. *Atmosphere*, **13**, Article 672. <https://doi.org/10.3390/atmos13050672>
- [3] 王鹤婷, 王清川, 许敏, 等. 基于 S 波段双偏振雷达的一次下击暴流初探[J]. 河南科学, 2023, 41(8): 1127-1133.
- [4] Sengupta, A. and Sarkar, P.P. (2007) Experimental Measurement and Numerical Simulation of an Impinging Jet with Application to Thunderstorm Microburst Winds. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, **96**, 345-365. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.09.001>
- [5] 王秀明, 俞小鼎, 费海燕, 等. 下击暴流形成机理及监测预警研究进展[J]. 气象, 2023, 49(2): 129-145.
- [6] 王凯, 梁益同, 刘敏. “东方之星”翻沉事件风灾现场调查分析与致灾风速估算[J]. 气象, 2020, 46(1): 98-107.
- [7] 孙凌峰, 郭学良, 孙立潭, 等. 武汉“6·22”空难下击暴流的三维数值模拟研究[J]. 大气科学, 2003, 27(6): 1077-1092.
- [8] 牛向华, 黄轩, 朱文会, 等. 1.55μm 激光雷达高原机场下击暴流探测应用研究[J]. 激光技术, 2024, 48(3): 318-326.
- [9] 夏羽, 肖湛臻, 唐巧珍. 一次伴随阵风锋的下击暴流天气分析[J]. 气象科技, 2019, 47(4): 663-672.
- [10] 毕旭, 徐军昶, 杨亦典, 等. 两次下击暴流天气的环境背景及多普勒雷达特征[J]. 陕西气象, 2021(5): 1-8.