

基于C波段双偏振雷达一次强对流过程观测分析

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: 2025年12月18日; 录用日期: 2026年1月15日; 发布日期: 2026年1月26日

摘要

利用贵阳龙洞堡国际机场C波段双偏振天气雷达资料和ERA5再分析资料, 对2025年5月4日贵州省西北部一次伴有冰雹大风灾害性天气过程(简称“05·04”过程)天气背景和双偏振雷达回波参数演变进行分析。结果表明: 在对流天气的酝酿阶段, 高空槽系统引导中高层干冷空气向南推进, 与低层持续输送的暖湿偏南气流形成显著交汇, 从而构成了“上冷下暖”的热力不稳定层结, 这为强对流的发生奠定了关键的大尺度环流背景。随后, 在地面中尺度辐合线的动力抬升作用下, 区域内积聚的大量不稳定能量被迅速释放, 推动对流风暴快速生成并增强。雷达观测显示, 反射率因子图上强回波区呈现典型的钩状形态, 并伴有清晰的V型缺口和弱回波区结构。其中, 强度超过50 dBz的强回波垂直伸展高度达到10公里以上, 表现出强风暴单体的显著特征。上述雷达回波形态与垂直结构共同指示, 该风暴具备产生冰雹和大风等强对流天气的充分条件。双偏振参量显示低仰角反射率因子 Z_h 大值区与 Z_{DR} 零值附近、 K_{DP} 大值区对应融化冰雹和大雨滴混合特征显著。

关键词

天气学, 双偏振雷达, 冰雹

Observational Analysis of a Severe Convective Event Using C-Band Dual-Polarization Radar

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: December 18, 2025; accepted: January 15, 2026; published: January 26, 2026

Abstract

Utilizing observation data from the Guiyang Longdongbao International Airport C-band dual-polarization weather radar and ERA5 reanalysis data, this study analyzes the synoptic background and the evolution of dual-polarization radar echo parameters associated with a severe convective weather event characterized by hail and damaging winds (referred to as the “05·04” event) that occurred in northwestern Guizhou Province on 4 May 2025. The results indicate that during the incipient stage of the convective event, an upper-level trough system steered dry and cold air from the mid-upper levels southward. This airflow significantly converged with the persistent warm-moist southerly flow at lower levels, establishing a thermodynamic instability characterized by a “cold-over-warm” stratification. This configuration provided the crucial large-scale circulation background for the development of severe convection. Subsequently, forced by the dynamic lifting of a surface mesoscale convergence line, the substantial unstable energy accumulated in the region was rapidly released, triggering the quick initiation and intensification of convective storms. Radar observations revealed that the area of intense reflectivity on the plan position indicator (PPI) displayed a typical hook echo morphology, accompanied by a distinct V-notch and a weak echo region (WER). Notably, the strong reflectivity cores exceeding 50 dBZ extended vertically above 10 km, exhibiting the hallmark characteristics of a vigorous storm cell. The combined radar echo morphology and vertical structure collectively indicated that this storm possessed the necessary conditions for producing severe convective weather, including hail and damaging winds. Dual-polarization parameters showed that the area of high reflectivity (Z_h) at low elevation angles corresponded to regions with differential reflectivity (Z_{DR}) near zero and high specific differential phase (K_{DP}), signifying a significant mixture of melting hail and large raindrops.

Keywords

Synoptic Meteorology, Dual-Polarization Radar, Hail

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

强对流天气是一种由强烈对流运动引发的灾害性天气现象，通常伴随雷暴活动发生。其主要表现形式包括达到或超过 17.2 米/秒的对流性大风、冰雹，以及小时雨量在 20 毫米及以上的短时强降水等。此类天气系统具有显著的突发性特征，生命史较短，但天气要素变化剧烈，破坏力强，往往在短时间内对交通运输、农业生产、城市运行及人民生命财产安全构成严重威胁[1]。贵州地处云贵高原东部，地形复杂，受高原天气系统和低纬天气系统的共同影响，是我国强对流天气多发地区之一[2]。这些强对流天气往往会给当地的生命财产安全、农业生产以及航空交通等带来严重威胁。准确监测和预警强对流天气对于防灾减灾至关重要。

天气雷达作为监测强对流天气的重要手段，能够实时获取降水系统的强度、速度、谱宽等信息[3]。C 波段双偏振天气雷达在常规天气雷达的基础上，增加了水平和垂直两个方向的偏振发射和接收功能，能够获取更多的降水粒子微观特征信息，如差分反射率(Z_{DR})、相关系数(Cc)、比差分相移(K_{DP})等[4]。双偏振参数能够从不同物理角度揭示降水粒子的形状、空间取向、相态(液态/固态/混合态)以及尺寸分布等关键微物理信息，对于识别强对流天气中的冰雹、下击暴流等灾害性天气具有独特的优势[5]。

近年来，利用双偏振天气雷达资料对强对流天气的研究取得了许多成果。如潘玉洁等[5]基于一次飑线系统的双偏振雷达观测资料分析，其前沿位置常出现典型的“ Z_{DR} 弧”和“Cc洞”特征，这些特征与下沉气流及地面强风的形成机制具有显著相关性，可视为下击暴流过程的重要预警指标；冯晋勤等[6]发现偏振量 Z_{DR} 、 Cc 和 K_{DP} 可以较好地监测强对流中的降水强度和冰雹大小。然而，针对贵州地区强对流天气的双偏振雷达特征研究相对较少。因此，本文利用贵阳龙洞堡机场C波段双偏振天气雷达资料和ERA5再分析资料，对2025年5月4日贵州省西北部地区发生的一次伴有冰雹大风的强对流天气过程进行深入分析，旨在揭示该地区此类强对流天气在双偏振雷达上的回波演变特征，为今后的灾害性天气监测预警提供参考依据。

2. 资料和天气实况

本文所用资料包括：(1) 贵阳龙洞堡机场C波段双偏振天气雷达资料，该雷达采用“双发双收”工作体制，能够同时发射水平和垂直极化波，获得反射率因子(Z)、速度(V)、差分反射率(Z_{DR})、相关系数(Cc)、比差分相移(K_{DP})等参数，雷达数据的时间分辨率为5分钟，距离分辨率为150公里；(2) 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。

5月4日14:00开始，贵州省西北部地区有分散对流天气开始发展，15:00分散对流单体缓慢向东南移动，4日16时~5日00时组合反射率产品呈多单体对流风暴缓慢东移南压影响贵州省中东部和东南部地区。过程中毕节市的七星关、大方、金沙、黔西，贵阳市的息烽、清镇，遵义市的习水、桐梓、汇川，黔东南州的丹寨、凯里、麻江、黔南州的独山、瓮安、贵定、都匀、龙里共17个县(市、区)境内出现冰雹，黔西市化屋村出现极大风速为 $44.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (16时33分)。本次强对流天气过程席卷贵州省从西北至东南的多个地区，导致大范围冰雹、大风和短时强降水天气发生。从过程特点来看，其不仅持续时间长、影响地域广，而且对流性天气强度大，最终造成了严重的灾害损失。

3. 环流背景

强对流天气发生前，4日08:00(北京时)高空环流形势显示，500 hPa等压面上(图1(a))，贵州处于到

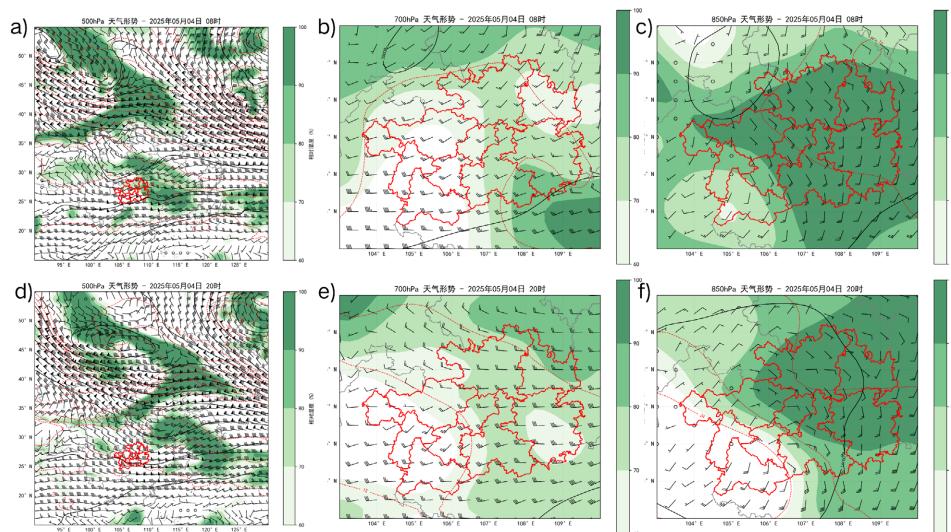


Figure 1. Synoptic charts for 08:00 and 20:00 on 4 May ((a) 500 hPa 08:00, (b) 700 hPa 08:00, (c) 850 hPa 08:00, (d) 500 hPa 20:00, (e) 700 hPa 20:00, (f) 850 hPa 20:00)

图 1. 5月4日08:00和20:00天气形势图((a) 500 hPa 08:00, (b) 700 hPa 08:00, (c) 850 hPa 08:00, (d) 500 hPa 20:00, (e) 700 hPa 20:00, (f) 850 hPa 20:00)

580 位势什米线北侧槽前，受高空槽前西南气流影响下，此时温度槽落后于高度槽，槽后存在冷平流，且有明显的向南加深的形势；700 hPa (图 1(e))来自孟加拉湾的西南暖湿气流加强，为强降水提供充足的水汽条件；850 hPa 处于热低压控制下，随着白天地表加热增强，热低压进一步发展，贵州区域低层呈现明显高温高湿环境。贵州西北地区探空图上早晨有弱逆温层，垂直风向随高度顺转，层结曲线和露点曲线呈喇叭口分布，中高层大气干区明显，表明大气中热量和水汽垂直分布不均匀，是一个储存了丰富对流不稳定能量环境[7]。贵州省西北部地区 850 hPa 与 500 hPa 温差($T_{850-500\text{hPa}}$)>21℃，温度垂直递减率较大，有利于大气不稳定层结发展。午后，在边界层辐合线扰动及能量锋区抬升作用的叠加下，省西北部对流天气发展。该区域垂直方向上 0~3 km 存在 $15\sim16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 中等强度的垂直风切变，配合中高层干冷空气的加入，有利于组织对流的形成。温度垂直分布上，0℃层在 4700 m 高度附近，-20℃层在 7700 m 高度附近，此类层结配置有利于冰雹的生长与下落，从而提高了该地区出现冰雹天气的可能性。

4 日 20:00，500 hPa (图 1(d))已转为槽后西北气流控制，高空冷平流自西向东影响贵州西北部至中东部地区，高空槽加深及高空辐散加强，有利于地面气旋加强发展；700 hPa 西南急流维持，850 hPa 水汽聚集在省中东部一带。

4. 雷达回波特征分析

4.1. 强雷暴单体水平结构演变

“05·04”强对流天气过程的雷达回波演变特征如下：基通过对贵阳龙洞堡雷达站 2.4°仰角平面位置显示(PPI)的连续监测分析可见，2025 年 5 月 4 日 13:58 前后，在毕节市中东部有强度超过 50 dBz 的分散性对流单体生成。14 时至 18 时，这一强回波整体呈现缓慢东南移的趋势。在此过程中，对流活动活跃，单体经历了多轮发展和消长的生命周期，其核心最强反射率达到 70 dBz，其所经路径上出现了冰雹、大风及短时强降水等实况灾害。为进一步剖析风暴结构，选取 16:30 位于黔西的一个代表性强雷暴单体进行分析(图 2)。图 2(a)展示了该单体低层 1.5°仰角径向速度(V)和反射率因子(Z_h)图像，可以观察到明显的钩状回波形态及入流一侧(南侧)陡峭的反射率梯度。在回波的西北侧存在典型的 V 型缺口，此特征常与强下沉气流或降水拖曳作用有关[8]。该区域最大回波强度 62.5 dBz (高度约 2450 米)，并伴有弱回波区(BWER)结构，这些均是深厚、有组织强对流单体的典型雷达形态特征。

图 3 给出 16:40 该强雷暴单体不同仰角反射率因子(Z_h)和 1.5°仰角径向速度(V)，低层 1.5°仰角径向速度上出现中气旋(图 3(d))，距离贵阳龙洞堡雷达 79.04 公里，转动速度达 $23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，达到强中气旋强度，强雷暴单体加强为超级单体，在 2.4°仰角上(图 2(b))，沿强回波区(反射率因子 > 60 dBz)径向上探测到三体散射长钉(TBSS)，表明空中已有冰雹存在，实况地面出现直径大于 20 毫米的大冰雹。18 时至 20 时，该超级单体继续向东南缓慢移动。至 18:50，其主体已位于机场东南方向，对机场的影响显著减弱。最终于 5 日 00 时，该对流单体移出贵州省。

4.2. 强雷暴单体垂直结构

为更清楚显示该强雷暴单体的垂直结构，在 16:40 时沿该单体移动方向作雷达反射率因子与径向速度的垂直剖面图。在反射率因子垂直剖面(图 4)中，可以清楚地观测到该风暴具有典型超级单体的深厚、高悬强回波特征。强度超过 50 dBz 的回波区垂直伸展超过 10 公里高度，其顶高已高于环境-20℃层所在高度，为冰雹粒子的生长和累积提供了充分的空间。在强回波中心的右下方，悬垂回波也非常明显。同时中低层还存在明显的有界弱回波区(BWER)，回波墙沿着 BWER 左侧的形成一个垂直的狭长区域，从 8 公里左右高度一直延伸到 4 公里的高度，下部代表冰雹下落区域，最大回波强度达 64.8 dBz。径向速度垂直剖面(图 5)揭示了支撑该风暴发展的动力结构。在风暴南侧的入流区，低层存在显著的正速度大值区，

表明强暖湿空气流入[9]。速度场结构呈现出典型的低层辐合、中高层辐散配置，构成了深厚而强盛的上升气流。这种持续、有组织的垂直环流为雹胚的反复循环和增长提供了极其有利的动力条件，是导致强冰雹产生和维持的关键机制。

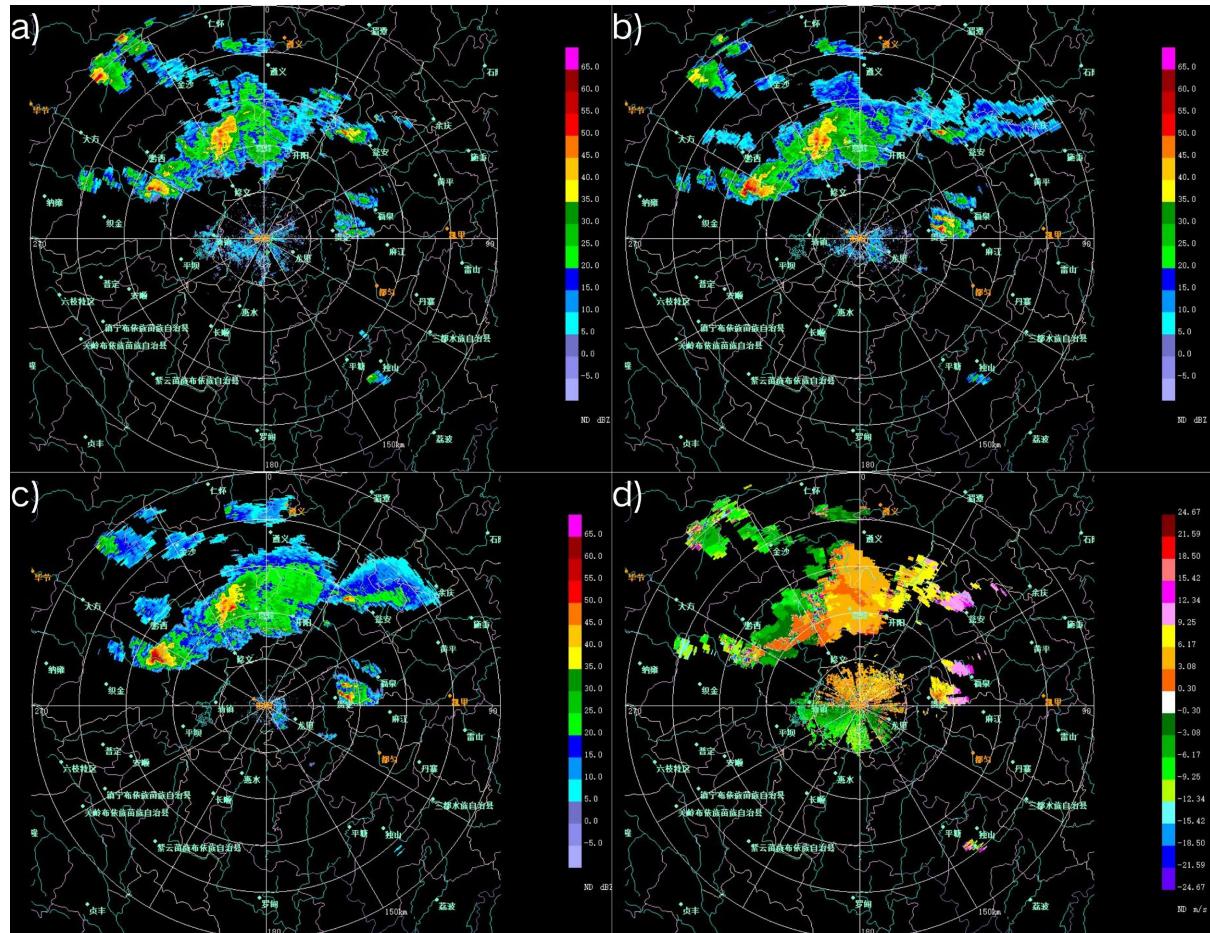
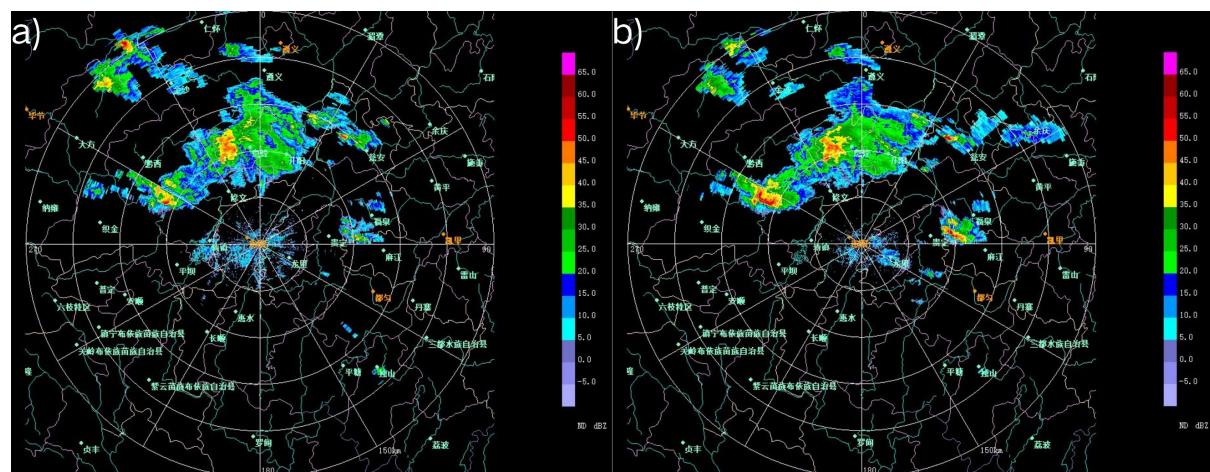


Figure 2. Plots of base reflectivity at various elevation angles and radial velocity at 1.5° elevation angle at 16:30 on 4 May ((a) $1.5^\circ Z_h$, (b) $2.4^\circ Z_h$, (c) $3.4^\circ Z_h$, (d) $1.5^\circ V$)

图 2. 5月4日16:30不同仰角基本反射率因子和 1.5° 仰角径向速度图((a) $1.5^\circ Z_h$, (b) $2.4^\circ Z_h$, (c) $3.4^\circ Z_h$, (d) $1.5^\circ V$)



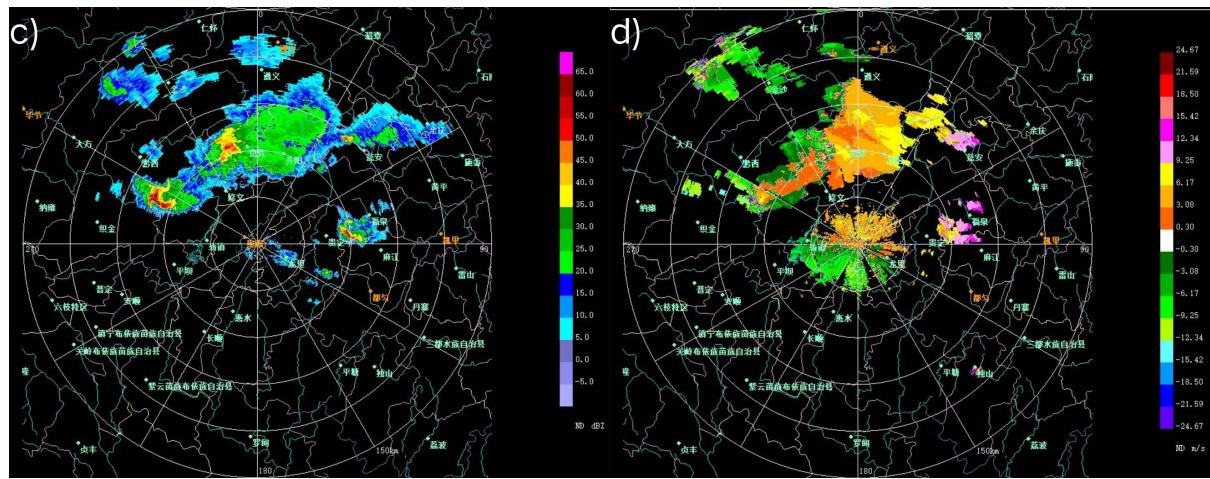


Figure 3. Plots of base reflectivity at various elevation angles and radial velocity at 1.5° elevation angle at 16:40 on 4 May
((a) $1.5^\circ Z_h$, (b) $2.4^\circ Z_h$, (c) $3.4^\circ Z_h$, (d) $1.5^\circ V$)

图 3. 5月4日 16:40 不同仰角基本反射率因子和 1.5° 仰角径向速度图((a) $1.5^\circ Z_h$, (b) $2.4^\circ Z_h$, (c) $3.4^\circ Z_h$, (d) $1.5^\circ V$)

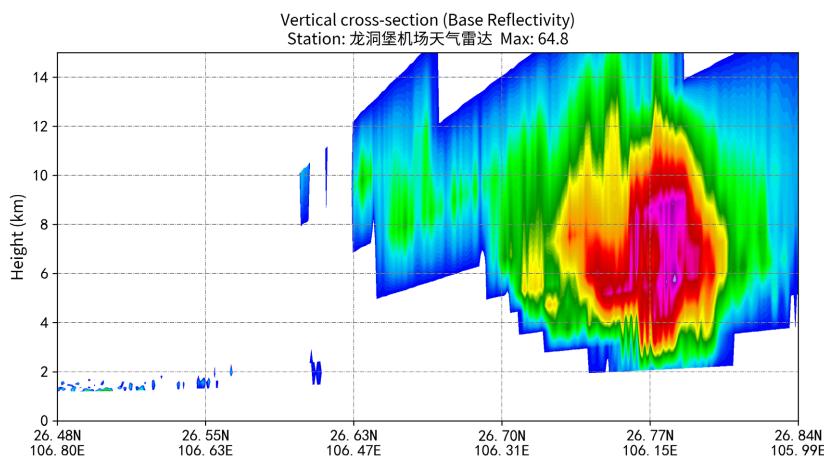


Figure 4. Reflectivity cross-section at 16:40 on 4 May

图 4. 5月4日 16:40 反射率因子剖面

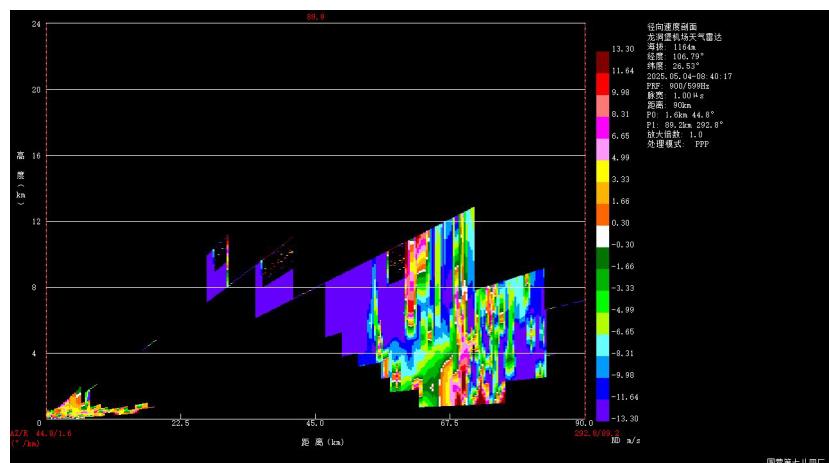


Figure 5. Radial velocity vertical cross-section at 16:40 on 4 May

图 5. 5月4日 16:40 径向速度垂直剖面

4.3. 双偏振参量对冰雹的识别

双偏振雷达通过其双线偏振功能，能有效探测大气粒子的偏振特征。这不仅提升了冰雹的甄别与降水的估测精度，还能解析冰雹在垂直方向上的相态演变过程，对判断短时强降水混合冰雹等强对流天气具有重要意义。在强对流单体发展过程中，短时强降水与冰雹常常共存，仅凭常规雷达反射率因子难以准确区分其内部水凝物相态，结合实况观测天气现象和双偏振雷达参数分析，可显著提升对冰雹云的识别能力。差分反射率因子 Z_{DR} 、相关系数 Cc 和比差分相移 K_{DP} ，等偏振量可分别反映粒子的形状、均匀性和液态水含量，可以更准确地识别冰雹云特征。

差分反射率 Z_{DR} (dB) 的定义式为：

$$Z_{DR} = 10 \log(Z_{HH}/Z_{VV}) = 10 \log Z_{HH} - 10 \log Z_{VV}$$

式中： Z_{HH} 为水平偏振反射率因子， Z_{VV} 为垂直偏振反射率因子，

$$Z_{HH} \text{ 定义式为: } Z_{HH} = \int_0^{\infty} N(D) D_H^6 dD$$

$$Z_{VV} \text{ 定义式为: } Z_{VV} = \int_0^{\infty} N(D) D_V^6 dD$$

式中： $N(D)$ 表示降水粒子的雨滴谱分布； D_H 表示水平方向上雷达探测到的降水粒子的尺寸； D_V 表示垂直方向上雷达探测到的降水粒子的尺寸[4]。差分反射率 Z_{DR} 主要用于表征降水粒子形状相对球体的偏离程度及其在空间中的平均取向分布，同时也可辅助判别粒子的相态组成。在强天气过程中，探测到的水凝物尺寸越大、对流活动越强，所对应的水平极化反射率因子 (Z_{HH}) 也就越大。

通过差分反射率 Z_{DR} 的大小可以了解粒子的形状及其相态。雨滴的 Z_{DR} 一般在 1~5 之间，数值越大雨滴越大；大雨滴或者包裹着水膜的冰粒子， Z_{DR} 在 3~6 dB；冰雹的 Z_{DR} 一般在 -1 到 1 之间，并且对应着强 Z_h 的区域，融化的冰雹、湿冰雹更大。

K_{DP} 是沿着径向单位距离上的传播微差相移，反映了各种偏振参量在传播途径上，由于传播系数不同所导致相位的变化 ($K_{DP} = \frac{\varphi_{DP}(r_2) - \varphi_{DP}(r_1)}{2(r_2 - r_1)}$)，主要用于强降水区域的识别和混合有冰雹的大雨区判断。

值的大小表征沿雷达波束路径上液态水含量的高低。在固态与液态降水粒子的判别中，两者的 K_{DP} 取值范围通常有显著差异，出现纯冰雹时 K_{DP} 的值在 $-0.5\text{--}1.0^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ ，但在冰雹发生融化或与雨水混合时，因液态水含量显著增加， K_{DP} 会明显升高。

相关系数 Cc 反映了水平偏振和垂直偏振回波之间的零滞后相关系数 ($Cc = \frac{|R_a| + |R_b|}{2(Z_h Z_v)^{1/2}}$) [4]。当出现融化的冰雹或雨夹冰雹时， Z_{DR} 值会变得很大，有时会达到 5~6 dB，此时 Cc 是探测冰雹最稳定的特征参量，即使在湿冰雹状态下，没有明确的 Z_{DR} 特征时， Cc 也会在 0.70~0.96 之间。

为对比分析强雷暴单体的双偏振参量特征，基于 1.5°仰角平面位置显示器(PPI)数据，对其核心区域展开详细观测。在反射率因子 $Z_h \geq 55 \text{ dBz}$ 的强回波中心区域(图 6(a))，对应的差分反射率 (Z_{DR} ，图 6(b))普遍维持在 -1~1 dB，显示出粒子形状近似球体或取向杂乱的特征；同时该区域的比差分相移 (K_{DP} ，图 6(c)) 呈现显著高值，即 $K_{DP} > 7^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ ，中心峰值达 $12.69^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ ，指示存在高浓度的液态水或大密度、非球形降水粒子。此外，相关系数 (Cc ，图 6(d)) 在此区域下降至 0.95 以下，表明该区域内水凝物相态、尺寸或形状不一，混合态特征明显。值得注意的是，在强回波中心前沿，出现 K_{DP} 空白区，对应区域 $Z_{DR} > 2 \text{ dB}$ ，这种偏振参量配置：高 Z_h 、低 Z_{DR} 、高 K_{DP} 结合较低的 Cc ，与强回波中心前沿表现出的高 Z_{DR} 形

成鲜明对比[10]，共同表明：在强回波核心区，水凝物以已经融化或部分融化的冰雹与大型雨滴的混合体为主导；而前沿较高的 Z_{DR} 区则可能对应着更多尚未完全融化的冰雹或大雨滴。

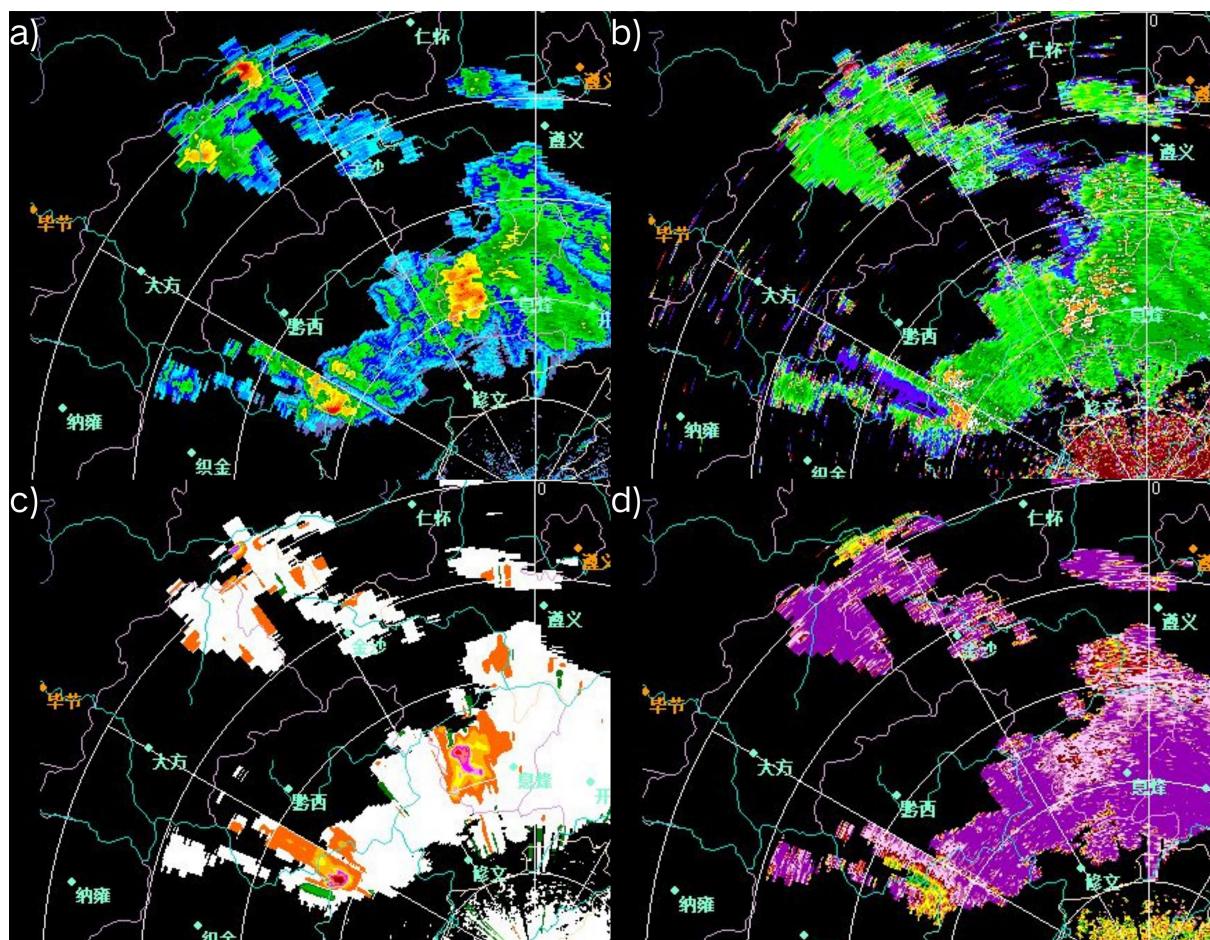


Figure 6. Dual-polarization parameters at 16:40 on 4 May ((a) $1.5^{\circ}Zh$, (b) $1.5^{\circ}Z_{DR}$, (c) $1.5^{\circ}KDP$, (d) $1.5^{\circ}Cc$)
图 6. 5月4日 16:40 双偏振参量((a) $1.5^{\circ}Zh$, (b) $1.5^{\circ}Z_{DR}$, (c) $1.5^{\circ}KDP$, (d) $1.5^{\circ}Cc$)

5. 小结

本文利用贵阳龙洞堡机场C波段双偏振天气雷达资料和ERA5再分析资料，对2025年5月4日贵州一次伴有冰雹的强对流天气过程进行了详细分析，主要结论如下：

1) 此次过程500 hPa高空槽携带冷空气南下，与低层偏南暖湿气流在贵州地区交汇，形成了上冷下暖的不稳定层结。500 hPa高空槽前的西南气流提供动力条件，700 hPa西南低涡切变线和强盛的西南急流为强对流发生输送充足水汽，850 hPa地面倒槽顶部的偏南气流加强了低层辐合，有利于不稳定能量聚集。垂直方向上存在中等强度的风切变，中低层水汽充沛，午后地面加热作用增强，这些因素共同为强对流天气的发生提供了有利环境条件。

2) 贵阳龙洞堡雷达观测显示，在低层反射率因子场上存在具有典型钩状形态的强回波结构，该特征常与中气旋相关联。回波同时表现出清晰的V型缺口及伴有界弱回波区结构，其中超过50 dBz的强回波区垂直发展高度达10公里以上。上述雷达特征共同指示该风暴为高度组织化的强对流单体，其结构配置极有利于产生大冰雹及伴随的灾害性大风天气。

3) 贵阳龙洞堡雷达双偏振参量显示低仰角反射率因子 Z_h 大值区与 Z_{DR} 零值附近、 K_{DP} 大值区对应融化冰雹和大雨滴混合特征显著。

基金项目

中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局创新类项目(GZSWATMB-202405 贵州空域对流天气监测预警一体化业务平台)资助。

参考文献

- [1] 俞小鼎, 张爱民, 郑媛媛, 等. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 2006(4): 385-393.
- [2] 廖瑶, 杨富燕, 罗宇翔, 等. 云贵高原气溶胶分布的区域与气候特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 316-323.
- [3] 王秀明, 俞小鼎, 刘黎平, 等. 融合临近预报技术探讨[J]. 气象科学, 2015, 35(3): 297-304.
- [4] 郭桐, 柳东慧. C 波段双偏振多普勒天气雷达原理及主要偏振参量应用分析[J]. 河南科技, 2021, 40(19): 140-142.
- [5] 潘玉洁, 赵坤, 潘益农, 等. 用双多普勒雷达分析华南一次飑线系统的中尺度结构特征[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 736-751.
- [6] 冯晋勤, 张深寿, 吴陈锋, 等. 双偏振雷达产品在福建强对流天气过程中的应用分析[J]. 气象, 2018, 44(12): 1565-1574.
- [7] 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.
- [8] 吴福浪, 李云, 方艳莹, 等. 基于 S 波段双偏振雷达一次强雹暴过程观测分析[J]. 气象科技, 2023, 51(2): 245-253.
- [9] 姚浪, 周永水, 李刚, 等. 双偏振雷达在毕节一次强风暴中的特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(4): 45-50.
- [10] 杨春艳, 陈杨, 孟庆怡, 等. 黔西南一次中 β 尺度强对流天气分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(6): 1-8.