

# 2020年贵阳机场一次超级单体风暴天气 诊断分析

罗璇

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳  
Email: luoxuan\_2007@126.com

收稿日期: 2020年8月20日; 录用日期: 2020年9月4日; 发布日期: 2020年9月11日

---

## 摘要

本文利用地面和高空资料,对贵阳机场2020年5月19日超级单体风暴发生的天气形势、动力和水汽条件进行诊断分析,得到以下结论:(1)强天气发生前贵州区域有高低空急流耦合,中西部500 hPa有干冷空气入侵,低层有暖湿气流输送;(2)超级单体风暴天气落区和地面辐合线的位置基本一致;(3)0~6公里之间存在强的垂直风切变,0℃层和-20℃层高度适宜;(4) $\theta_{se}$ 值大于340 K,气层对流性不稳定,垂直方向有强烈的上升运动;(5)水汽自南向北、自地面向高空输送,机场上空中低层水汽充沛;(6)雷达图像上有超级单体风暴特征,径向速度图像存在中气旋。

## 关键词

超级单体, 雷暴大风, 中气旋

---

# Diagnostic Analysis of a Supercell Storm Weather at Guiyang Airport in 2020

Xuan Luo

Guizhou ATC Branch, Guiyang Guizhou  
Email: luoxuan\_2007@126.com

Received: Aug. 20<sup>th</sup>, 2020; accepted: Sep. 4<sup>th</sup>, 2020; published: Sep. 11<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

This paper uses the ground and upper air data to diagnose and analyze the weather situation, power and water vapor conditions of the supercell storm on May 19, 2020 in Guiyang Airport. The

following conclusions are obtained: (1) The high and low air jets are coupled before the occurrence of strong weather in Guizhou, and dry and cold air invading at 500 hPa in the central and western regions, with warm and humid air flows in the lower layers; (2) the locations of the supercell storm weather landing area and the ground convergence line are basically the same; (3) there is a strong vertical wind shear between 0 - 6 km, the 0°C layer and the -20°C layer are suitable; (4) the  $\theta_{se}$  value is greater than 340 K, the air layer is unstable in convection, and there is a strong upward movement in the vertical direction; (5) the water vapor is transported from south to north and from the ground to high altitude, and there is plenty of water vapor in the low-level sky above the airport; (6) the radar image has the characteristics of a supercell storm, and the radial velocity image has a mesocyclone.

## Keywords

Supercell, Thunderstorm Gale, Mesocyclone

Copyright © 2020 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

超级单体风暴是具有单一的特大垂直环流的巨大强风暴云[1], 水平尺度最大可达几十公里, 生命史一般为几小时, 出现的天气现象要比一般雷暴强很多, 常伴有大风、短时强降水、冰雹、龙卷等灾害性天气。“超级单体”是由 Browning and Ludlam [2]在 1962 年首次提出的, Browning [3]指出, 超级单体风暴一个重要的雷达回波特征是存在一个弱回波区(WER)或有界弱回波区(BWER)。1978 年 Browning 将[4]超级单体定义为具有中气旋的对流单体, 自此雷达气象界将具有持久深厚的中气旋作为超级单体的定义。中气旋是与强对流风暴的上升气流和下沉气流紧密相联的小尺度涡旋[5] [6]。中气旋在雷达图上的典型模式是有一对正负速度中心呈方位对称, 背向雷达时, 负速度中心在零速度带的左侧, 正速度中心在零速度带的右侧。当中气旋处在有一定风速的环境风场中时, 其多普勒速度图像特征稍有变化[6] [7]。超级单体风暴根据其降水强度和空间特征可以分为经典超级单体风暴、强降水(HP)超级单体风暴和弱降水(LP)超级单体风暴[6] [8]。2020 年 5 月 19 日夜间影响贵阳机场的强雷雨大风天气, 通过雷达图像特征和天气形势的分析, 可以判定为是一次超级单体风暴天气。

贵州位于云贵高原的东斜坡上, 西北高东南低, 地貌类型复杂, 以山地、丘陵为主。贵阳市位于贵州中部, 而贵阳龙洞堡机场位于贵阳市西南方向, 距市区 10 公里, 海拔高度 1037 米。机场西侧 15~30 公里有红枫湖、百花湖、花溪水库等几个人工水库, 对于机场雷暴天气提供了丰富的水汽来源。

北京时间 2020 年 5 月 19 日 21:00 时至 22:40 时贵阳机场受超级单体风暴过境影响, 发生弱到强雷雨天气, 21:52 时至 22:23 时伴随出现 17 米/秒以上的大风天气, 22:05 出现 32 米/秒阵风, 刷新贵阳机场历年来的风速极值, 过程降水量 36.4 mm, 大风导致 2 个航空器位移, 5 个航班受雷雨影响各降。全省受此次天气影响, 有 29 个测站出现 8 级以上大风, 贵阳城区很多大树被拦腰折断, 电线杆倒塌, 贵阳城区、白云区、观山湖区、清镇市等地降冰雹, 最大冰雹直径 15 毫米。

本文利用常规观测资料, 计算相关物理量场, 分析了过程发生的环流特点、动热力和水汽条件, 希望能为以后预报超级单体风暴天气提供帮助。本文选取的资料时间为天气发生前 2020 年 5 月 19 日 08 时、20 时(北京时)的地面和高空实况探测资料。贵阳机场海拔 1037 米, 坐标 26°N、106°E。

## 2. 环流形势分析

### 2.1. 高空形势

在 19 日 08 时 200 hPa 天气图上, 贵州中部、东部受西北风向的高空急流带控制, 贵阳上空风速达 50 米/秒, 20 时 200 hPa 天气图上, 高空急流继续维持, 贵阳上空风速 48 米/秒, 威宁站(42 米/秒)、贵阳站(48 米/秒)昆明站(34 米/秒)、百色站(36 米/秒)间有显著的风速差, 在贵州西部形成风速辐散区。在 08、20 时 500 hPa 天气图上, 高空槽位于湖南、江西交界处, 贵州区域受高空槽后西北气流影响, 贵阳上空西北风风速 14 米/秒, 温度槽落后于高度槽, 有冷平流从西北部进入贵州。在 19 日 08 时 700 hPa 天气图上, 高空槽位于云南东部, 贵州受槽前西南气流影响, 贵阳为西南风, 风速 4 米/秒; 暖中心位于云南南部, 贵州受暖脊控制。20 时 700 hPa 天气图上, 云南境内的高空槽加深, 延伸至云南、广西交界处, 贵州境内西南气流加强为西南急流, 贵阳站风速 14 米/秒; 暖中心强度和范围增强, 北抬至昆明、西昌、威宁间, 中心气温 17℃, 贵阳仍位于暖脊范围, 气温 11℃。在 19 日 08 时 850 hPa 天气图上, 川东、重庆地区受低涡控制, 切变线位于成都以南, 重庆以北地区, 同时暖中心也位于川东, 中心气温 23℃, 贵州受切变前部偏南暖湿气流影响。20 时 850 hPa 天气图上, 切边南压至川黔交界处, 暖中心强度增强, 达 26℃, 贵阳上空偏南暖湿气流增强, 风速增大至偏南急流 12 米/秒, 温度为 24℃。

图 1 是 2020 年 05 月 19 日 20 时 200 hPa 至 850 hPa 的中尺度天气分析。通过分析, 200 hPa 高空急流和 700 hPa 低空急流趋于正交, 和 850 hPa 低空急流交角为 180 度, 根据尤西林尼等人研究[9] [10] [11] 最大的对流不稳定发生在高低空急流轴趋于正交和平流强度最大时。200 hPa 高空急流和低空急流的耦合作用加强了上升运动和次级环流的发展。在 500 hPa 上有干舌(温度露点差大于 15℃)从云南东部延伸至贵州中西部及广西大部分地区, 850 hPa 上的显著湿区(露点温度大于 10℃)位于贵州、广西、广东和云南, 同时贵州、广西以及云南、及广东部分地区也是 T850-T500 大值区(图 1 黄色虚线区域, 温差大于 22℃), 综上所述, 在贵州尤其是贵州中西部, 对流层中层 500 hPa 有干冷空气入侵, 而低层有暖湿气流自南向北输送, 并且是高低空急流耦合区, 这些是深厚对流发展的有利条件。因此贵州西部是此次超级单体风暴的初生地, 而贵州中部是风暴发展最强盛的地区。



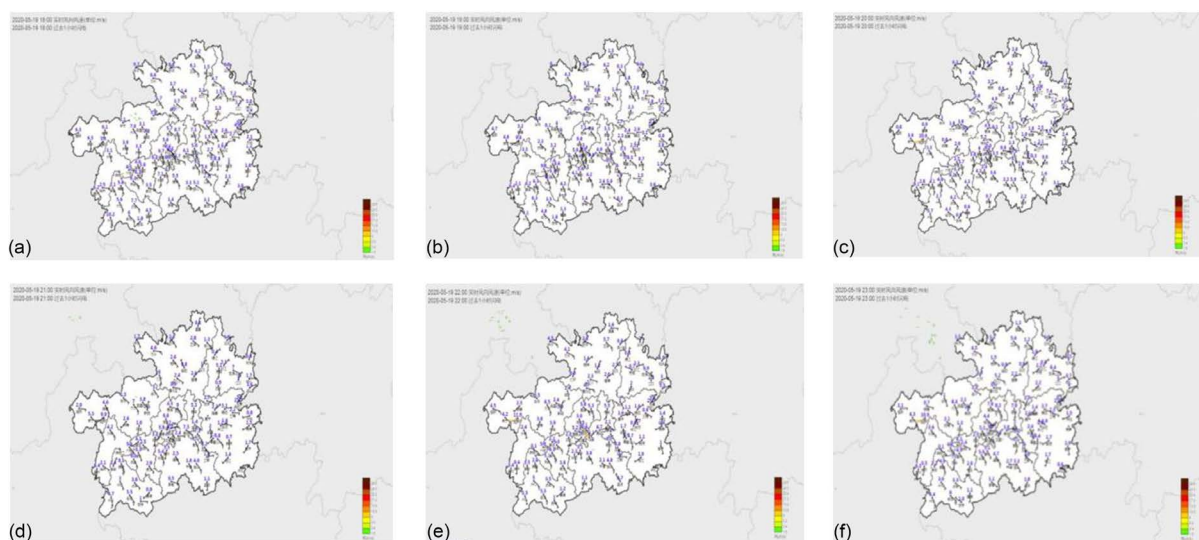
Figure 1. Mesoscale analysis chart at 20:00 (Beijing time) on May 19, 2020

图 1. 2020 年 05 月 19 日 20 时(北京时)中尺度分析图

### 2.2. 地面形势

图 2 是贵州省自动气象站测得实时风向风速图。在 18 时图上(图 2(a)), 贵州区域受偏南气流影响,

但在贵州西北部毕节 - 大方、金沙 - 黔西之间有一条较短的地面辐合线，同时探测到毕节附近闪电，这与雷达图像上探测到的雷暴生成时间基本吻合。19 时(图 2(b))地面辐合线仍在毕节 - 大方、金沙 - 黔西之间，但其东侧延伸至息烽 - 修文之间，此时贵阳市范围仍受一致的偏南风影响，风速 6~10 米/秒。20 时地面辐合线压过毕节 - 大方，在黔西 - 织金、修文 - 清镇间形成气旋式环流，而清镇附近有贵阳市周边水域面积最大的人工水库红枫湖，根据雷达图像，此时超级单体在距贵阳西北 30 公里的清镇市增强，后侧出现 V 型缺口。21 时，虽然黔西 - 织金、修文 - 清镇间仍维持气旋式环流，但在环流前部贵阳 - 乌当 - 龙里又生成地面辐合线，此时机场(机场位于贵阳 - 龙里之间)开始闻雷。22 时，气旋式环流中心移动至贵阳 - 龙里 - 都匀 - 花溪 - 惠水间，此时贵阳城区和龙洞堡机场出现 17 米/秒以上的大风、短时强降水。23 时后，气旋环流东移至龙里 - 都匀间，贵阳市区及机场强天气结束。此次超级单体风暴天气落区和地面辐合线的位置基本一致，地面辐合线为此次强对流的发生提供了最重要的动力抬升条件。



**Figure 2.** The wind direction and speed map of the automatic ground station in Guizhou Province on May 19, 2020, 18:00 - 23:00 (Beijing time). (a) 18 o'clock; (b) 19 o'clock; (c) 20 o'clock; (d) 21 o'clock; (e) 22 o'clock; (f) 23 o'clock

**图 2.** 2020 年 05 月 19 日 18 时~23 时(北京时)贵州省地面自动站风向风速图。(a) 18 时; (b) 19 时; (c) 20 时; (d) 21 时; (e) 22 时; (f) 23 时

### 2.3. 探空图分析

从 5 月 19 日 20 时贵阳的探空图 3 可以发现，20 时贵阳站测得 K 指数 38，CAPE 值为 477，此次超级单体风暴发生前对流有效位能并不高，根据陆汉城等人的研究[12]，高值 CAPE 有利于强对流的发展，但低值 CAPE 并不能排除对流风暴的发生，垂直风切变与大气不稳定能量两者可以互相弥补。而在垂直方向上，850 hPa 至 600 hPa 之间风向随高度顺转，中低层有暖平流加入。500 hPa (16 米/秒，西北气流)和 700 hPa (14 米/秒，西南急流)之间有明显的垂直风切变，风矢量差的数值约为 15 米/秒，垂直风切变的数值为  $0.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。此次过程也验证了超级单体中强的上升气流不完全是由 CAPE 转换而来的，还可以通过环境风垂直风切变转换而来[8]。0°C 高度 5418 米，在 500 hPa (高度为 5810 米)附近有干冷平流加入，-20°C 高度 8345 米，0°C 层和 -20°C 层高度差 2927 米，符合强对流及冰雹发生时温度层结配置。根据探空图，贵阳上空，低层暖湿，中层干冷，是极不稳定的层结，并且 0~6 公里之间明显的垂直风切变，有利于上升运动的形成，加速了暖湿气流和干冷空气的融合。

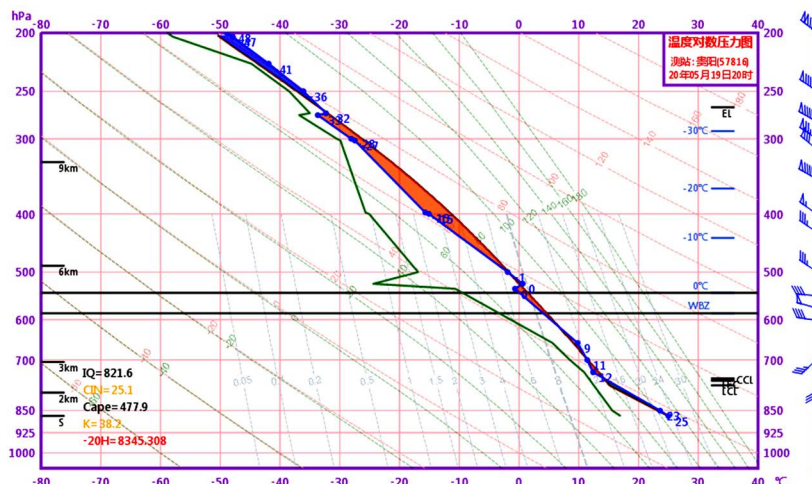


Figure 3. T-lnP map of Guiyang Station at 20:00 (Beijing time) on May 19, 2020  
图 3. 2020 年 05 月 19 日 20 时(北京时)贵阳站探空图

### 3. 动力、水汽条件分析

#### 3.1. 动力条件分析

假相当位温( $\theta_{se}$ )随高度的变化是判断气层稳定度的一个判据： $\theta_{se}$ 随高度增加，表示气层对流性稳定； $\theta_{se}$ 随高度减小，表示气层对流性不稳定； $\theta_{se}$ 随高度不变，表示气层对流性中性[13]。在 $\theta_{se}$ 沿 $106^\circ\text{E}$ （贵阳机场的经度）的垂直剖面图(图 4(a))中，25 oN 至 35 oN 之间是等 $\theta_{se}$ 线密集陡峭区，而 25 oN 至 30 oN 之间 1 公里以下的边界层，等 $\theta_{se}$ 线随纬度向北倾斜， $\theta_{se}$ 随高度增加，气层对流稳定，而 1 公里~5.5 公里间的中低空， $\theta_{se}$ 随高度减小，气层对流性不稳定，并且 $\theta_{se}$ 线密集陡峭，根据湿位涡和倾斜涡度发展理论[14]，这能促进上升运动发展，并且在贵阳上空 $\theta_{se}$ 值大于 340 K，超出了强对流天气发生时的阈值，有利于强天气的发生。

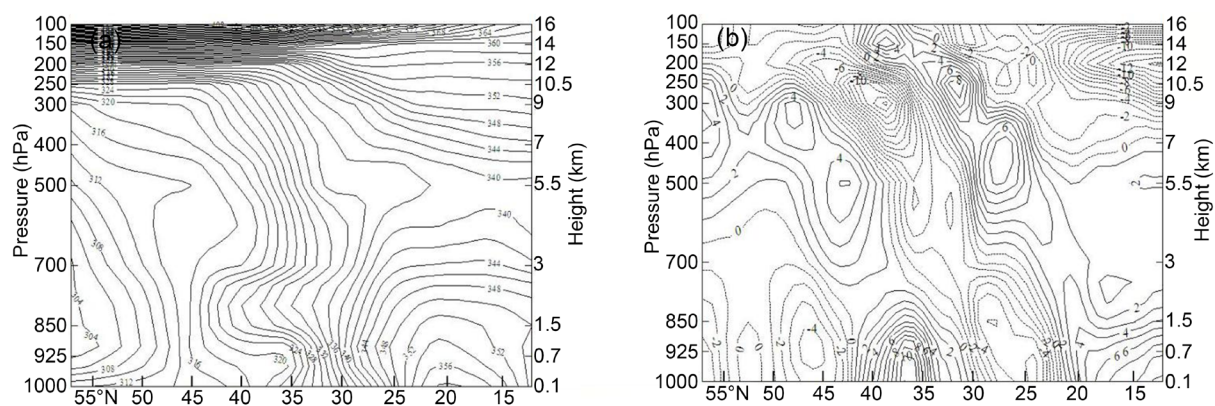


Figure 4. The vertical cross-sectional view of each physical quantity at 20:00 (Beijing time) on May 19, 2020. (a)  $\theta_{se}$  (unit: K); (b) Divergence (unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

图 4. 2020 年 05 月 19 日 20 时(北京时)各物理量垂直剖面图。(a) 假相当位温  $\theta_{se}$  (单位: K); (b) 散度(单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

图 4(b)是 5 月 19 日 20 时散度沿  $106^\circ\text{E}$  的垂直剖面。在图中，25 oN 至 30 oN 之间，3 公里以下的中低空是辐合区(图中虚线区域)，其中 1.5 公里处是辐合中心，中心值为  $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。垂直高度 3~9 公里是辐散区，5.5~7 公里之间是辐散中心，中心值为  $7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。26 oN (机场的纬度)的空中，中低层辐合，

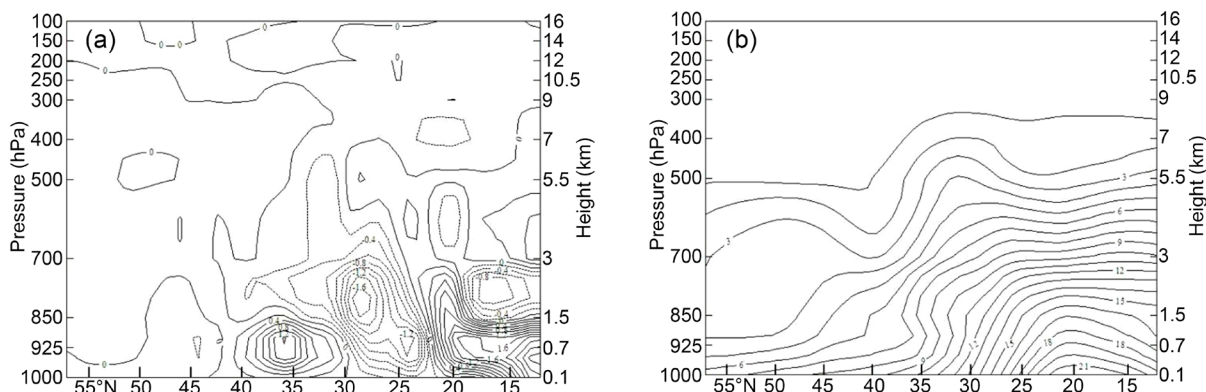
高层辐散，这是强对流天气发生时的典型垂直结构，有利于强上升运动的形成和水汽的垂直输送，以及冷暖空气的融合。在上升运动的垂直剖面图上(图略)，25 oN 至 30 oN 之间的高空确有强的上升运动，700~500 hPa 是上升运动的强中心，中心数值 38 m/s。

### 3.2. 水汽条件分析

图 5 是水汽条件物理量的垂直剖面图。在沿 106°E 的水汽通量散度垂直剖面图(图 5(a))上，20°N 以南的低空是水汽的辐散区，25°N~30°N 之间，垂直高度 3 公里以下是水汽的辐合区，可见在低层有大量水汽自南向北输送并且在 25°N~30°N 之间形成辐合。25°N~30°N 之间，在 500 hPa 附近有弱的水汽辐散区，中心位于 5.5 公里附近。而贵阳机场(26°N)中低空，位于水汽通量散度的辐合大值区，中高层也有水汽辐散。贵阳上空中低层的水汽辐合大值区的为此次超级单体风暴的发生提供了源源不断的水汽输送，同时中低层水汽辐合，高层水汽辐散，在垂直方向上也有水汽向高空输送。

图 5(b)是比湿沿 106°E 的垂直剖面图，40°N 以南是等比湿线的密集区，比湿大值区位于 20°N 附近，中心值大于 21 g/kg。比湿大值区自南向北、自地面向高空逐渐减小，在机场(26°N)上空虽然不是比湿大值中心，但是 850 hPa 以下的低层，比湿大于 15 g/kg，700~850 hPa 比湿在 10~15 g/kg，中低空水汽充沛。结合水汽通量散度，在超级单体风暴发生前，低层高湿，同时又有水汽辐合上升，这为此次强天气的发生提供了充分的水汽条件。

通过物理量场分析，贵阳地区中低层辐合，高层辐散；垂直方向有强烈的上升运动；大量的水汽自南向北、自地面向高空输送，这些为超级单体风暴天气发生提供了强烈上升运动、充沛水汽输送。



**Figure 5.** Vertical cross-sections of physical quantities of water vapor at 20:00 (Beijing time) on May 19, 2020. (a) Vertical section view of water vapor flux divergence (unit:  $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ ); (b) Specific humidity vertical section view (unit:  $\text{g}/\text{kg}$ )

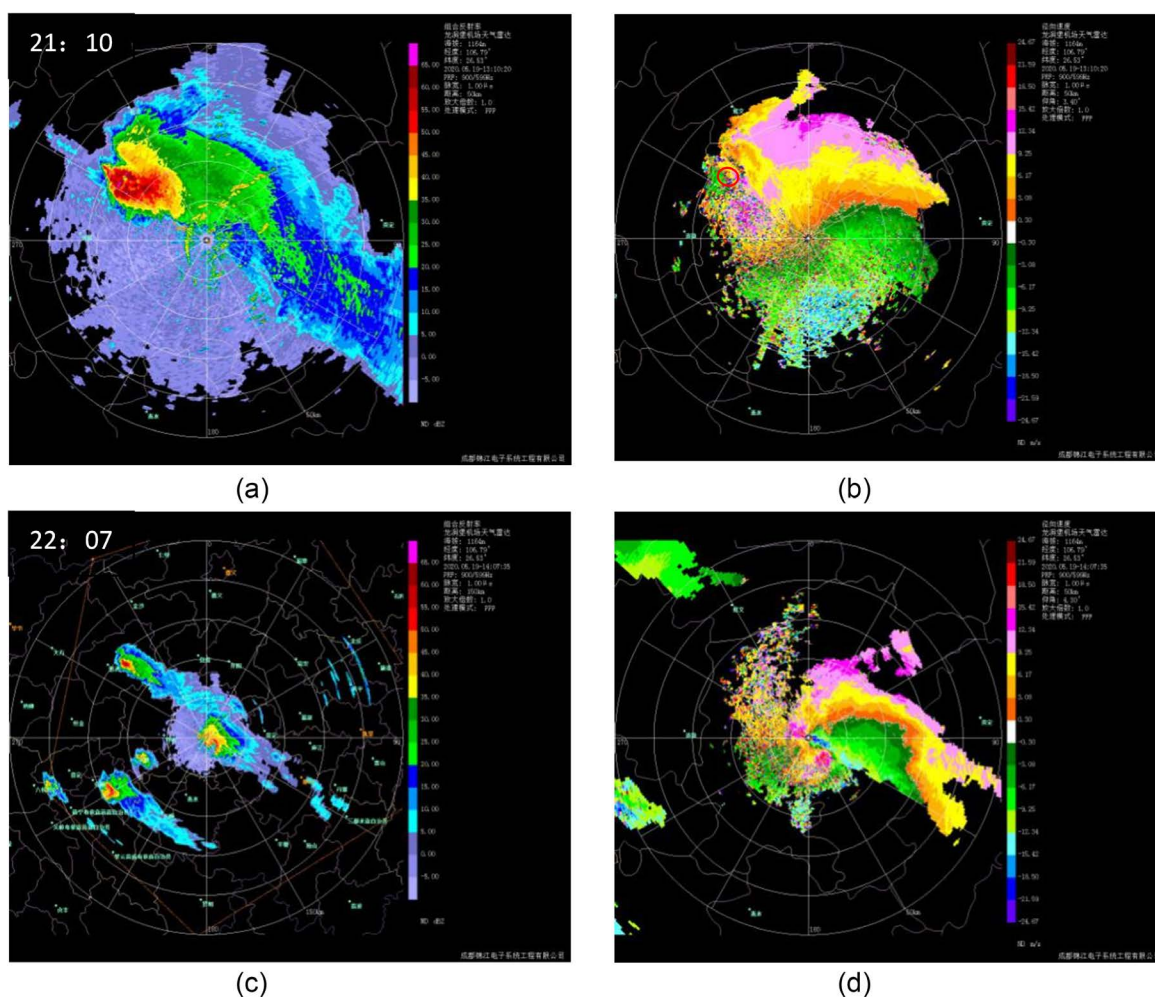
**图 5.** 2020 年 05 月 19 日 20 时(北京时)各水汽物理量垂直剖面图。(a) 水汽通量散度(单位:  $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ )垂直剖面图; (b) 比湿垂直剖面图(单位:  $\text{g}/\text{kg}$ )

### 4. 雷达图像分析

贵阳机场雷达位于 R01 号跑道以南约 2 公里左右的山丘上，海拔高度 1164 米。图 6 给出了此次天气过程机场天气雷达组合反射率和径向速度图像，显示距离 50 公里。18:00 起，在贵州西北部毕节地区开始有强回波生成，回波呈圆形，结构较松散，中心强度大于 60 dbz，直径约 10 公里。受 500 hPa 西北气流的引导，以 30 km/h 的速度向东南方向移动。21:10 时，回波到达清镇附近，离机场 25 km，由于红枫湖附近充沛水汽的补充，回波得到加强，回波范围增大，直径约 20 公里，结构更加紧凑，在组合反射率图上(图 6(a))，回波形状仍维持单泡结构，呈椭圆形，回波中心强度超过 65 dBz，在前进方向的后侧可以测得 V 型缺口，这是由于大的降水粒子对回波的衰减造成的，是冰雹回波的典型特征，结合实况观测，

在清镇确实出现冰雹天气。在速度图上，可以探测到中气旋特征，低仰角速度图像是辐合旋转，而高仰角(14.6°、19.5度)速度图像是辐散旋转。图 6(b)给出了 3.4°仰角速度图像，红圈圈出的区域就是中气旋的位置，速度零速线与径线平行，背向雷达零线右侧是正速度区，左侧是负速度区。根据中气旋特征可以判断此时超级单体风暴已经形成，并伴随冰雹天气。

21 时，虽然强回波位于机场西北 26 公里处，由于回波很强，机场已经可以观测到闪电，听到雷声。21:48 时，强回波移至机场上空，机场出现强雷雨伴 17 米/秒以上的大风天气。并于 22:05 时出现贵阳机场历年来风速极值 32 米/秒，风向 140°。分析 22:07 时的雷达图像，在组合反射率图像上(图 6(c))，回波中心强度超过 60 dBz，在回波右前侧(机场东南 2 公里)探测到“V 型缺口”，这是由于强入流气流进入上升气流形成得，极有可能引起破坏性大风。在速度图像上(图 6(d))，在“V 型缺口区”前侧，对应存在中气旋，4.3°仰角的速度图像上，最大正速度 21.6 米/秒，最大负速度-24.7 米/秒，两者距离约 6 公里，旋转速度为 33.9 米/秒，属于中等强度中气旋[6]。此中气旋同样在低仰角速度图像呈现辐合旋转，而高仰角(14.6°、19.5 度)速度图像是辐散旋转。22:23 时后，回波移动至机场东南 10 公里处，机场雷雨大风天气逐渐减弱。



**Figure 6.** The combined reflectivity and radial velocity image of Guiyang Airport on May 19, 2020. (a) The combined reflectance image at 21:10; (b) The radial velocity image at 21:10; (c) The combined reflectance image at 22:07; (d) The radial velocity image at 22:07

**图 6.** 2020 年 5 月 19 日贵阳机场雷达组合反射率和径向速度图像。(a) 21:10 时组合反射率图像；(b) 21:10 时径向速度图像；(c) 22:07 时组合反射率图像；(d) 22:07 时径向速度图像

## 5. 小结

本文利用常规观测资料、相关物理量实况场资料,对贵阳机场2020年5月19日超级单体风暴天气发生的环流特点、动热力和水汽条件进行了分析,得到以下结论:

(1) 贵州区域有高低空急流的耦合,贵州中西部对流层中层500 hPa有干冷空气入侵,而在低层有暖湿气流自南向北输送;

(2) 超级单体风暴天气落区和地面辐合线的位置基本一致;

(3) 探空图上,贵阳上空低层暖湿,中层干冷,0~6公里之间有明显的垂直风切变,0℃层和-20℃层高度适宜;

(4) 贵阳上空 $\theta_{se}$ 值大于340 K,中低空 $\theta_{se}$ 随高度减小,气层对流性不稳定,且 $\theta_{se}$ 线密集陡峭,垂直方向有强烈的上升运动;

(5) 机场上空700 hPa以下水汽充沛,且水汽中低层辐合,高层辐散,有水汽自南向北、自地面向高空输送;

(6) 雷达图像上有明显的超级单体风暴特征,径向速度图像证明存在中气旋。

## 参考文献

- [1] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2000:351.
- [2] Browning, K.A. and Ludlam, F.H. (1962) Airflow in Convective Storms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **88**, 117-135. <https://doi.org/10.1002/qj.49708837602>
- [3] Browning, K.A. and Donaldson, R.J. (1963) Airflow and Structure of Atornadic Storm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **20**, 533-545. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0533:AASOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0533:AASOAT>2.0.CO;2)
- [4] Browning, K.A. (1978) The Structure and Mechanisms of Hailstorms. *Meteorological Monographs*, **16**, 1-36. [https://doi.org/10.1007/978-1-935704-30-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-935704-30-0_1)
- [5] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2000:404.
- [6] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:116-120,207-209.
- [7] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报,2004,62(3):317-328.
- [8] 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学,2008,32(3):508-522.
- [9] L.W. 尤西林尼, D.R. 约翰森. 对流层高、低空急流的耦合和强对流风暴发展的关系[J]. 气象科技,1980(S4):3.
- [10] Brown, R.A. and Wood, V.T. (1991) On the Interpretation of Single-Doppler Velocity Patterns within Severe Thunderstorms. *Weather and Forecasting*, **6**, 32-48. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1991\)006<0032:OTIOSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1991)006<0032:OTIOSD>2.0.CO;2)
- [11] Brooks, H.E., Doswell III, C.A. and Wilhelmson, R.B. (1994) The Role of Midtropospheric Winds in the Evolution and Maintenance of Low-Level Mescy Clones. *Monthly Weather Review*, **122**, 126-136. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0126:TROMWI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0126:TROMWI>2.0.CO;2)
- [12] 陆汉城,杨国祥. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京:气象出版社,2015:262-263.
- [13] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2003:150-164.
- [14] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报,1995,53(4):387-404.