

贵阳机场一次冬季初雷强对流天气诊断分析

唐 枫, 宋 媛, 邓小光

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年5月23日; 录用日期: 2025年6月18日; 发布日期: 2025年6月27日

摘 要

为提高贵阳机场初雷及强对流天气的预报准确率, 本文基于自观、雷达资料、欧洲中心ERA5再分析资料, 对贵阳机场2024年1月1日的一次强对流天气成因进行分析。结果表明: 500 hPa高空槽东移、850 hPa切变线是此次过程发生的天气背景。1日12时(世界时)贵阳站探空显示0℃层高度位于3379米, -20℃层高度位于6073米, 有出现冰雹天气的潜势; 1日12~15时贵阳机场上空850 hPa水汽条件好, 贵州中南部整层可降水量较大; 低层辐合、高层辐散, 在垂直方向上形成抽吸作用; 12时贵州中部垂直螺旋度绝对值较大, 15时显著减小; 12时贵阳机场850 hPa与500 hPa温差较大(20℃左右), 15时明显减小; 12时贵阳机场上空低层强正涡度向上延伸至中层, 预示着可能出现超级单体, 15时中低层正涡度中心减小且下移, 高层转为负涡度。

关键词

初雷, 冰雹, 强对流, 假相当位温

Diagnostic Analysis of a Winter First Thunderstorm Severe Convective Weather Event at Guiyang Airport

Feng Tang, Yuan Song, Xiaoguang Deng

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

Received: May 23rd, 2025; accepted: Jun. 18th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

Abstract

To improve the forecast accuracy of initial thunderstorms and severe convective weather at Guiyang Airport, this study analyzes the causes of a severe convective weather event on January 1,

2024, based on automatic weather station data, radar data, and ERA5 reanalysis data from the European Centre. The results indicate that the eastward movement of the 500 hPa upper-level trough and the 850 hPa shear line provided the synoptic background for this event. The 12:00 UTC sounding at Guiyang Station showed the 0°C level at 3379 meters and the -20°C level at 6073 meters, suggesting potential hail conditions. From 12:00 to 15:00 UTC, favorable moisture conditions were observed at 850 hPa over Guiyang Airport, with high precipitable water throughout the atmospheric column in central and southern Guizhou. Low-level convergence and upper-level divergence created a vertical pumping effect. The absolute value of vertical helicity was significant in central Guizhou at 12:00 UTC but markedly decreased by 15:00 UTC. The temperature difference between 850 hPa and 500 hPa over Guiyang Airport was large (approximately 20°C) at 12:00 UTC but significantly reduced by 15:00 UTC. At 12:00 UTC, strong low-level positive vorticity extended upward to the mid-levels over Guiyang Airport, indicating possible supercell development. By 15:00 UTC, the mid- to low-level positive vorticity center weakened and descended, while the upper levels transitioned to negative vorticity.

Keywords

First Thunder, Hail, Severe Convection, Pseudo-Equivalent Potential Temperature

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

初雷作为强对流天气的起始标志,在航空气象预报中具有非常重要的意义,其时空特征可直接反映区域大气-动力条件的协同演变,贵阳龙洞堡机场地处云贵高原东侧,受独特的地理位置和复杂地形影响,天气复杂多变。初雷的预报一直是航空气象预报的难点和重点工作。刘开宇等[1]应用湿位涡理论探讨了贵阳机场初雷与倾斜位涡、湿位涡的关系;罗璇等[2]对比了贵阳机场 2020 年、2022 年两次初雷天气过程在影响系统、探空图、垂直结构、对流初生地等的异同;宋媛等[3]研究发现,贵阳机场初雷多发生于冬末或初春,最早开始于 1 月 4 日。

强对流天气突发性强、持续时间短、伴随天气剧烈,包括雷暴、冰雹、雷暴大风、短时强降水,预报难度极大,对航空运输安全与效率构成了严峻挑战。近年来,气象学家们开展了大量关于强对流方面的研究[4]-[7]。机场作为航空运输的核心节点,其运行安全高度依赖气象条件的稳定性。然而,强对流天气的突发性、局地性和强破坏性等特点,极易导致航班延误、备降、返航甚至飞行事故,给空中交通管理、机场地面保障及旅客出行带来巨大压力[8] [9]。据统计,全球范围内近 30%的航班延误与恶劣天气有关,其中强对流天气是主要诱因之一。

强对流天气对机场运行的影响主要体现在飞行安全风险、运行效率下降、地面设施威胁等几个方面[10] [11]。低空风切变、微下击暴流等伴随天气可能严重影响飞机起降阶段的操控性,强降水可能导致跑道关闭、地面滑行中断,而雷暴区绕行则会增加空域拥堵和燃油消耗,冰雹、强风可能损坏停机坪航空器及机场导航设备,进一步造成更大的经济损失[12]-[14]。

尽管现代气象监测技术(如多普勒雷达、数值预报模型)和航空管理手段(如协同决策系统 CDM)已显著提升对强对流天气的预警能力,但其预报时效性和空间分辨率仍存在局限。

本文基于自观、雷达资料、欧洲中心 ERA5 再分析资料,对贵阳机场 2024 年 1 月 1 日的一次强对流天气成因进行分析,以期探讨机场强对流天气的生成机理、影响特征,旨在提升贵阳机场初雷、强对流

天气的预报能力，为保障航空安全与效率提供理论依据和技术参考。

2. 资料

本文所用资料包括贵阳机场 AWOS 自动观测系统资料、历史观测资料、贵阳机场 714CDP 雷达资料、欧洲中心 ERA5 逐小时再分析资料(空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)。本文所用时间均为世界协调时。

3. 贵阳机场近 10 年初雷分析

如表 1 所示，贵阳机场近 10 年初雷出现时间 1 月和 2 月均为 4 次，3 月为 2 次，其中 2024 年初雷突破贵阳机场历史初雷最早时间；初雷当日最高温除 2018 年外均低于 20°C ，其中 2017 年、2019 年、2025 年初雷当日最高温均低于 5°C ，均为高架雷暴；初雷当日过程降水量均小于 10 mm、以小雨为主，2024 年初雷当日过程降水量达到中雨；从对航班影响情况来看，贵阳机场初雷持续时间一般不长，因此对航班影响整体不大，2018 年、2024 年初雷均造成 15 架次以上的航班备降，对运行产生了较大影响。

Table 1. Statistics of first thunderstorms at Guiyang Airport from 2016 to 2025
表 1. 2016 年~2025 年贵阳机场初雷统计

时间	初雷时间	当日最高温($^{\circ}\text{C}$)	当日降水量(mm)	航班备降(架)
2016 年	1 月 4 日	16.4	0.4	0
2017 年	2 月 23 日	2.8	0.7	0
2018 年	2 月 27 日	22.4	3.6	16
2019 年	2 月 17 日	1.2	8.5	0
2020 年	1 月 6 日	19.9	6.3	0
2021 年	3 月 5 日	12.0	0.8	2
2022 年	1 月 4 日	11.9	5.6	1
2023 年	3 月 12 日	13.5	4.8	0
2024 年	1 月 1 日	15.3	25.7	15
2025 年	2 月 14 日	3.8	4.2	1

4. 实况分析

从 1 月 1 日午后至夜间(04:00~16:00)贵州区域内的降水量和强对流分布来看(图 1)，贵州省大部地区出现雷雨天气，12 h 降水量大于 10 mm 的区域呈东北 - 西南带状分布，主要集中在贵州东北部、东部及中南部；部分区域出现了 25 mm 以上的降水，站点数高达 139 站，其中 4 个站降水量达 50 mm 及以上；从强对流分布来看，贵州大部(2540 个站)出现了闪电，而闪电密集的区域出现在省中南部一带，密集中心与降水大值区基本对应。另外，有 1 个站出现冰雹、1 个站出现 17~25 m/s 大风；34 个站出现小时降水量大于 20 mm 的强降水，强降水区主要集中在贵州中南部。其中有 8 个站小时降水量 30~50 mm，26 个站小时降水量 20~30 mm。综上可知，2024 年 1 月 1 日午后至夜间，贵州区域内出现了一次大范围的强对流天气过程。

从贵阳机场天气实况上看(表 2)，2024 年 1 月 1 日 10:18~14:48 贵阳机场出现间歇性雷暴天气，期间 11:55~12:04 出现中阵雨伴冰雹，12:55~13:10 出现短时中雷雨天气；过程降水量为 25.7 mm。因本场天气原因，共造成 15 个航班备降。

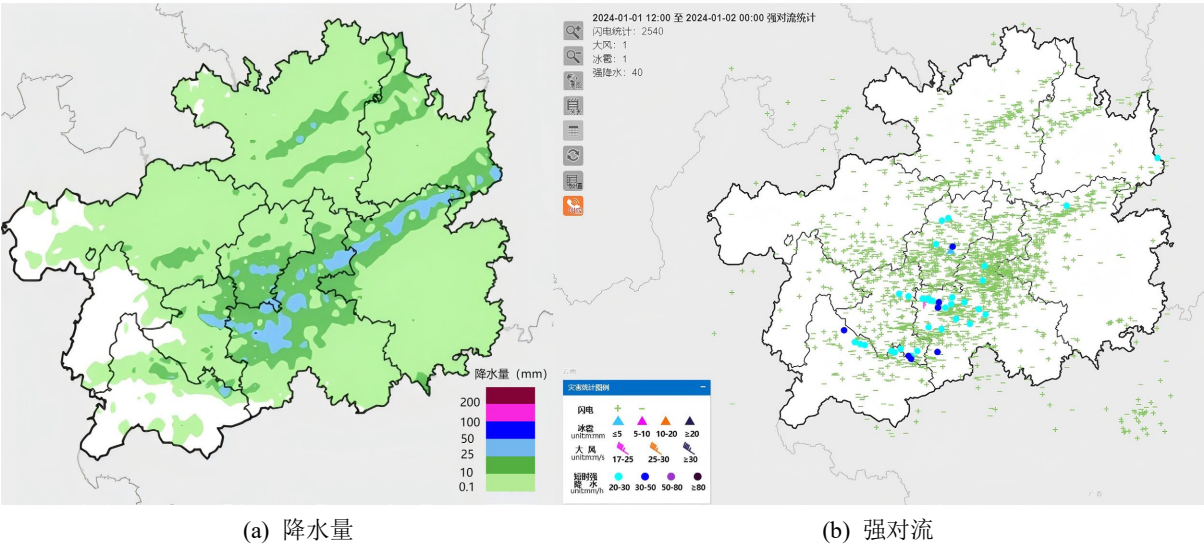


Figure 1. Distribution of precipitation and severe convection in Guizhou Province from 04:00 to 16:00 on January 1, 2024
图 1. 2024 年 1 月 1 日贵州省 12 h (04:00~16:00)降水量和强对流分布

Table 2. Observation summary column of Guiyang Airport (ZUGY)
表 2. 贵阳机场(ZUGY)观测纪要栏

日期	纪要栏
2024 年 1 月 1 日	-SHRA2150- -RA2318-0028 -SHRA0505-0535 0705-0735 1141-SHRA1155- -SHRA1204-SHRA1255- - SHRA1310-1545 TS1018W-1029N-1045E 1135W-1152Z-1207E-1219E 1240W-1255Z-1321E-1448E SHGR1155-1204

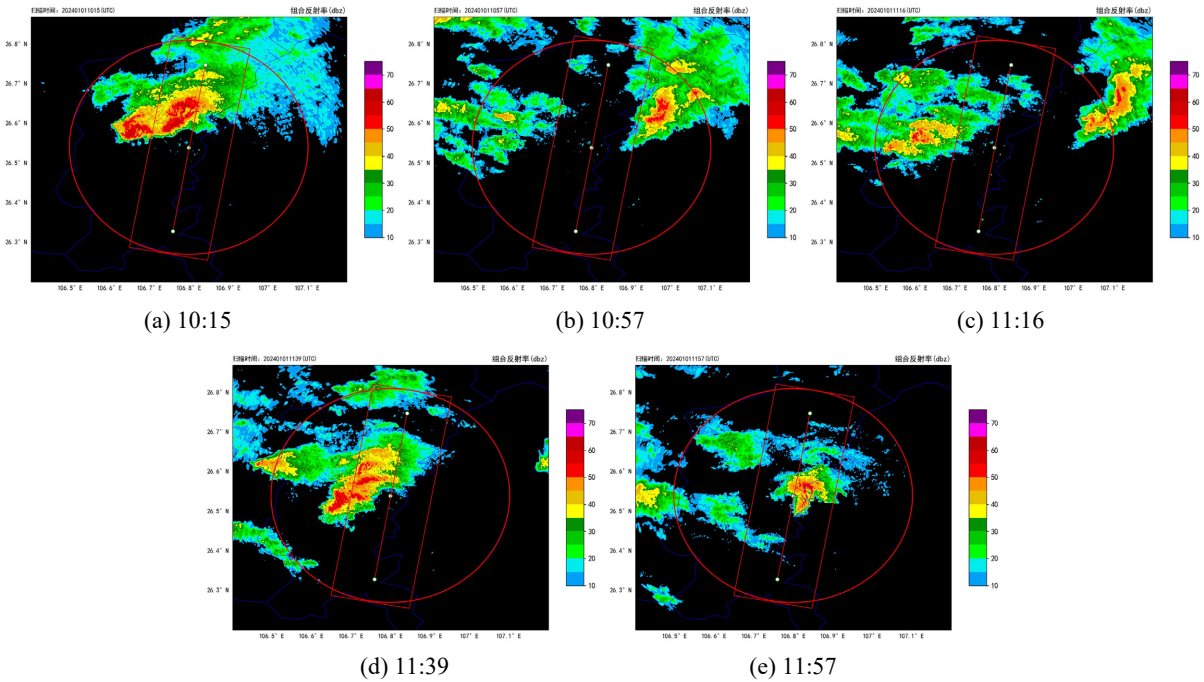


Figure 2. Distribution map of radar composite reflectivity in key areas of Guiyang on January 1, 2024
图 2. 2024 年 1 月 1 日贵阳关键区雷达组合反射率分布图

结合雷达图来看,由图2可见,机场关键区回波强度较强。1日11时左右,贵阳机场西面30 km外不断有回波生成,整体自西向东移动影响本场,强度逐渐加强。15时后回波主体才完全过境本场,且强度基本减弱,本场雷雨天气结束。

5. 天气形势分析

从当日08时的环流形势上看(图3),500 hPa中高纬为一槽一脊的形势,巴尔喀什湖附近至我国新疆北部一带受高压脊控制,槽位于我国东北经内蒙古至河套一带;中纬度地区多波动;南支槽位于云南东部,贵州大部受南支槽前西南气流控制。700 hPa中高纬的环流形势与500 hPa大致相似,中纬度地区多波动;西南地区大部受槽前西南急流控制。850 hPa中高纬为两槽一脊,脊位于我国新疆北部区域,东部槽位于我国东北地区东部,西南地区大部受偏南气流控制。从地面图上来看,冷锋从我国东北经华北平原向南延伸至秦岭以北,我国西北地区大部受强冷空气控制,高压中心位于青藏高原,中心气压为1040 hPa;贵阳机场受高压底部弱冷空气控制。

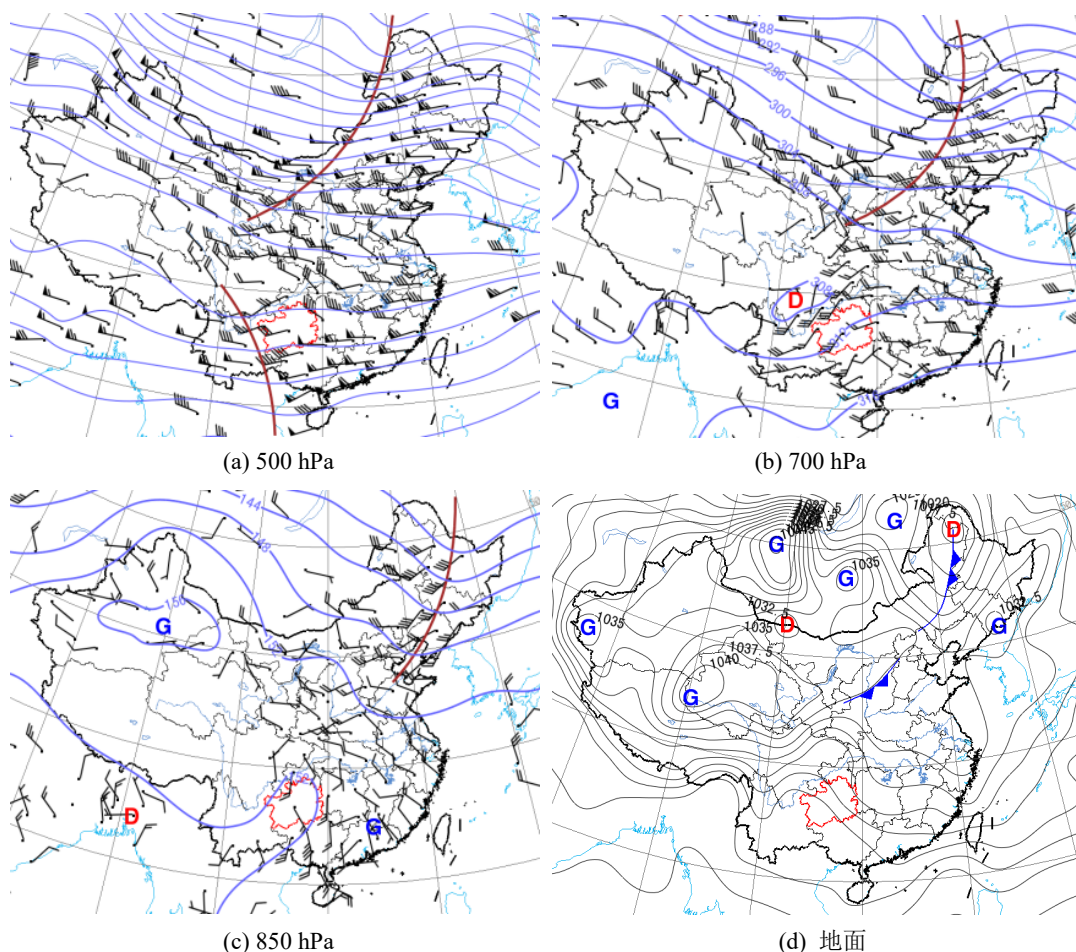


Figure 3. Circulation pattern at 00:00 on 2024.1.1

图3. 2024年1月1日00时环流形势

从当日12时中分析来看(图4),12时500 hPa高空槽位于云南东部,后续高空槽过境影响贵州中部;700 hPa、850 hPa切变线位于川渝交界处;地面辐合线位于贵州中部以南;贵州中西部位于700 hPa、850 hPa急流左侧;700 hPa水汽较差,850 hPa水汽较好。

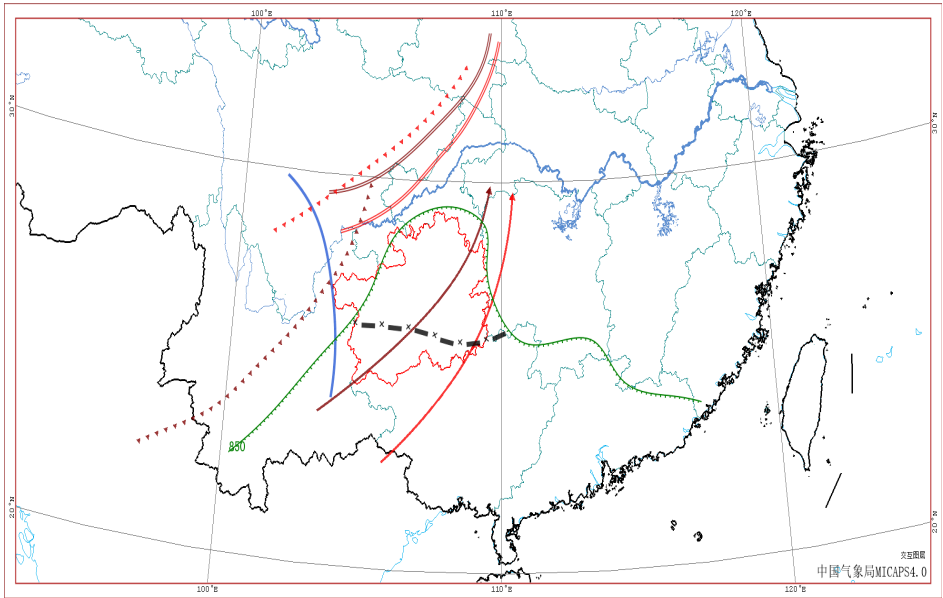


Figure 4. Mesoscale weather analysis at 12:00 on 2024.1.1
图 4. 2024 年 1 月 1 日 12 时中尺度天气分析

从当日 00 时的探空分布来看(图 5)，垂直方向上风随高度顺转，低层有暖平流；K 指数为 36.2、SI 指数为-1.33、CAPE 指数为 0；0℃层高度位于 3434 米，-20℃层高度位于 6447 米；抬升凝结高度较低，在 850 hPa 以下；对流凝结高度在 700~850 hPa；“上干下湿”的结构利于强对流天气的发生。1 日 20 时 K 指数为 32.2、SI 指数为 1.4；0℃层高度位于 3379 米，-20℃层高度位于 6073 米，有出现冰雹天气的潜势；低层风随高度顺转有暖平流，有利于强对流天气的发生。

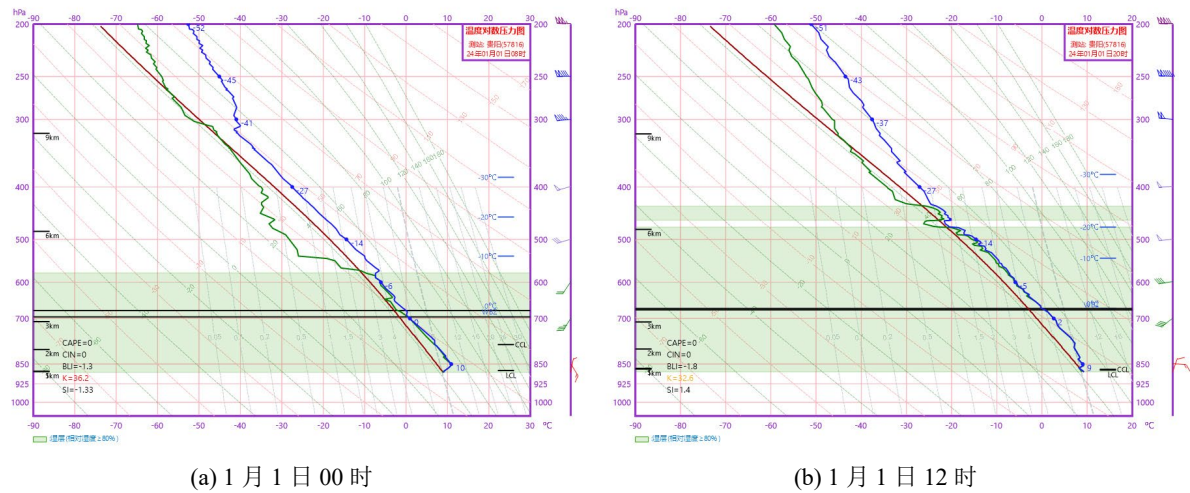


Figure 5. Sounding map of Guiyang Station on 2024.1.1
图 5. 2024 年 1 月 1 日贵阳站探空图

6. 物理量场分析

6.1. 水汽条件

充沛的水汽条件是强对流天气形成和发展的关键因素。水汽通量是指单位时间内通过单位垂直面积

的水汽水平输送量。如图 6 所示, 从 1 月 1 日 12 时 850 hPa 风场可见, 切变线位于贵州中部, 贵阳机场受切变线影响, 贵州大部水汽通量较大, 水汽充沛。15 时切变线南压至贵州东南部至南部一带, 贵阳机场 850 hPa 转为偏北气流控制, 贵州北部、西北部水汽通量减少, 但贵州中南部水汽条件依然较好。

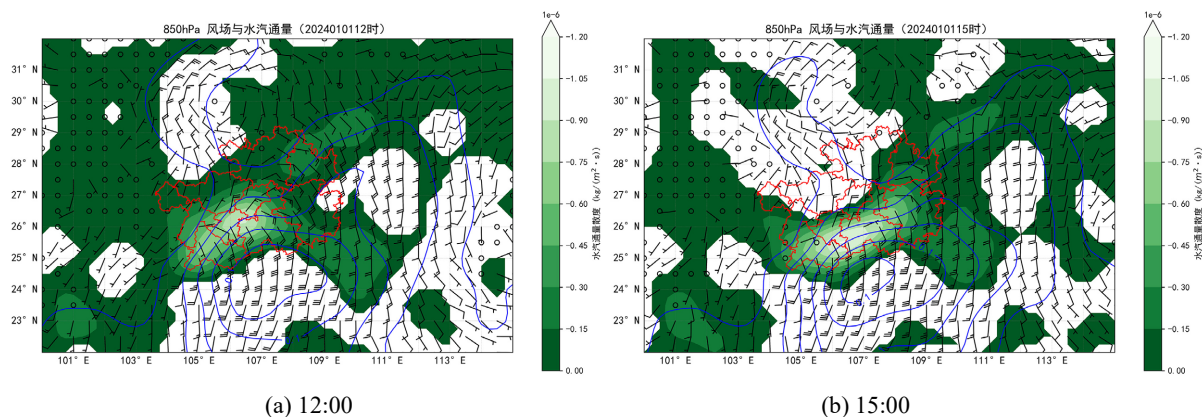


Figure 6. Wind field and moisture flux at 850 hPa
图 6. 850 hPa 风场与水汽通量

大气整层可降水量是指单位面积大气柱内所含有的所有水汽凝结为液态水时所对应的垂直深度, 是衡量大气中水汽总储量的关键指标, 对强对流天气的触发具有重要指示意义。由图 7 可见, 1 日 12 时至 15 时贵州大部大气整层可降水量变化不大, 均大于 35 mm, 贵州中部达 40 mm 左右, 说明贵州中部具有较高的强降水潜势。

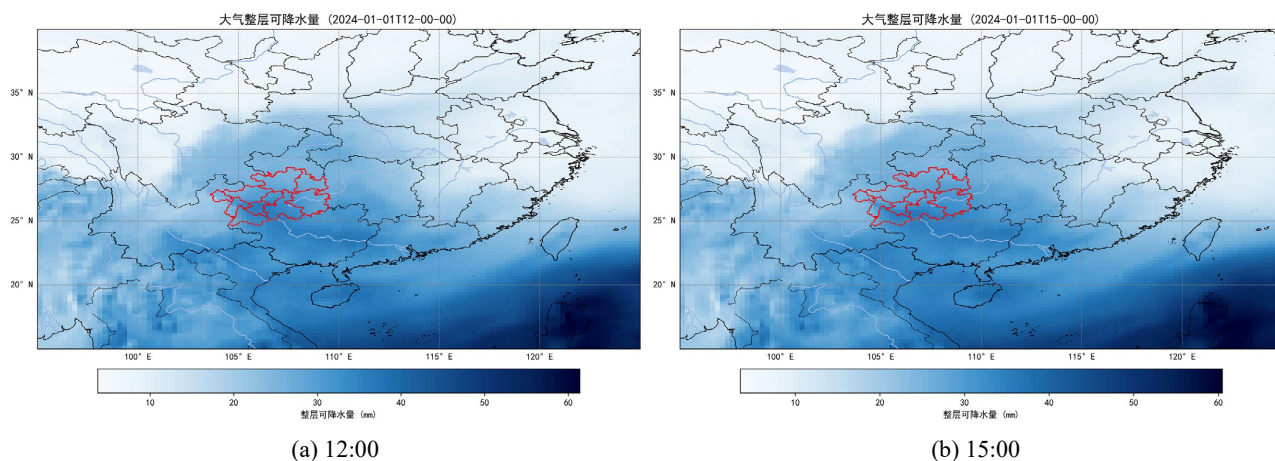


Figure 7. Precipitable water vapor in the entire atmospheric column
图 7. 大气整层可降水量

6.2. 假相当位温

假相当位温是表征湿空气能量状态的综合指数, 对强对流天气的预报具有重要的参考意义。假相当位温高值区常与低空急流重迭, 湿急流通过垂直方向的水汽和能量输送, 将低层的暖湿空气抬升到高层, 为强对流天气提供源源不断的能量支持。如图 8 所示, 1 日 12 时从北向南贵州省大部的假相当位温逐渐增大, 贵阳机场假相当位温为 320 K 左右; 15 时, 850 hPa 切变线南压, 贵州南部的急流区也南压, 相比 12 时假相当位温低值区整体南压, 贵阳机场假相当位温降至 296 K 左右, 能量较弱。

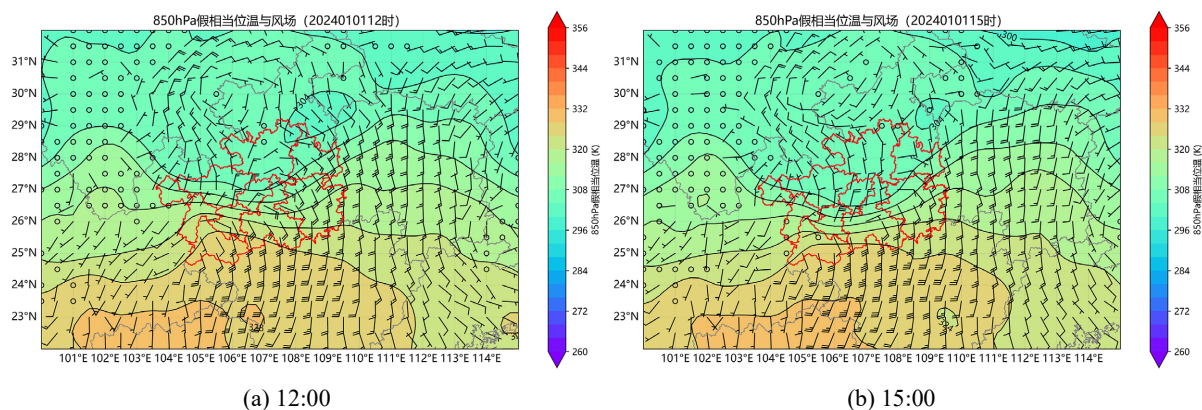


Figure 8. 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature and wind field
图 8. 850 hPa 假相当位温与风场

6.3. 散度

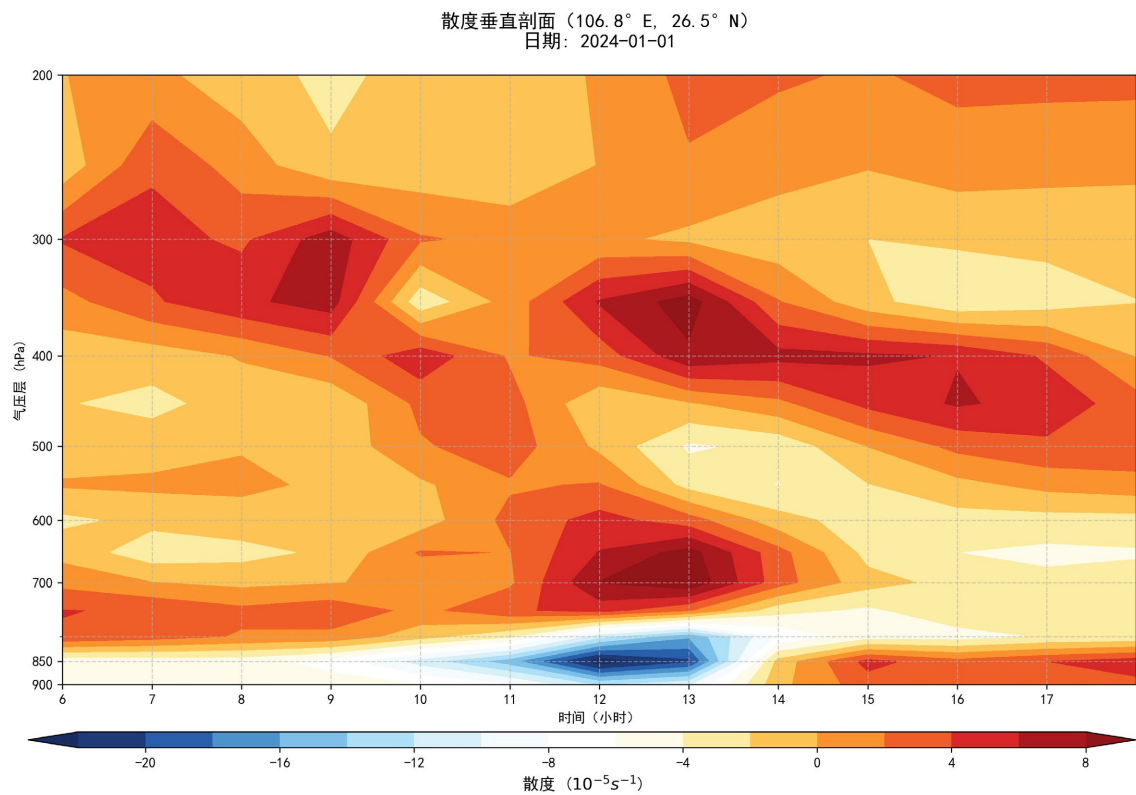


Figure 9. Vertical cross-section of divergence along Guiyang Airport (106.8° E, 26.5° N) on 2024.1.1
图 9. 2024 年 1 月 1 日散度沿贵阳机场(106.8° E, 26.5° N)的垂直剖面

散度是表征大气辐合或辐散的物理量，即可描述气流的汇聚或扩散，直接影响强对流天气的动力结构。当散度为正值，表示气流辐散；反之，当散度为负值则表示气流辐合。如图 9 所示，1 日 11 时至 14 时，贵阳机场上空低层有一个辐散中心，高层有辐合中心。低层辐合、高层辐散，在垂直方向上形成抽吸作用，利于强对流天气的发生和维持，与贵阳机场的雷暴时间对应较好。尤其 12 时至 13 时，分别对应低层的辐合高值区、高层的辐散高值区，说明该时段内强对流天气的潜势条件更好(实况 11:55~12:04 贵

阳机场出现中阵雨伴冰雹)。14 时后贵阳机场上空低层转为辐合,对应贵阳机场雷暴天气也结束,转为小阵雨天气。

6.4. 垂直螺旋度

垂直螺旋度是描述大气中旋转和垂直运动耦合程度的物理量,对强对流天气的组织化、旋转特征及维持机制至关重要。垂直螺旋度高时,水平涡度与垂直风切变的协同作用使上升气流发生旋转。如图 10 所示,1 日 12 时贵州中部垂直螺旋度绝对值较大,15 时显著减小。

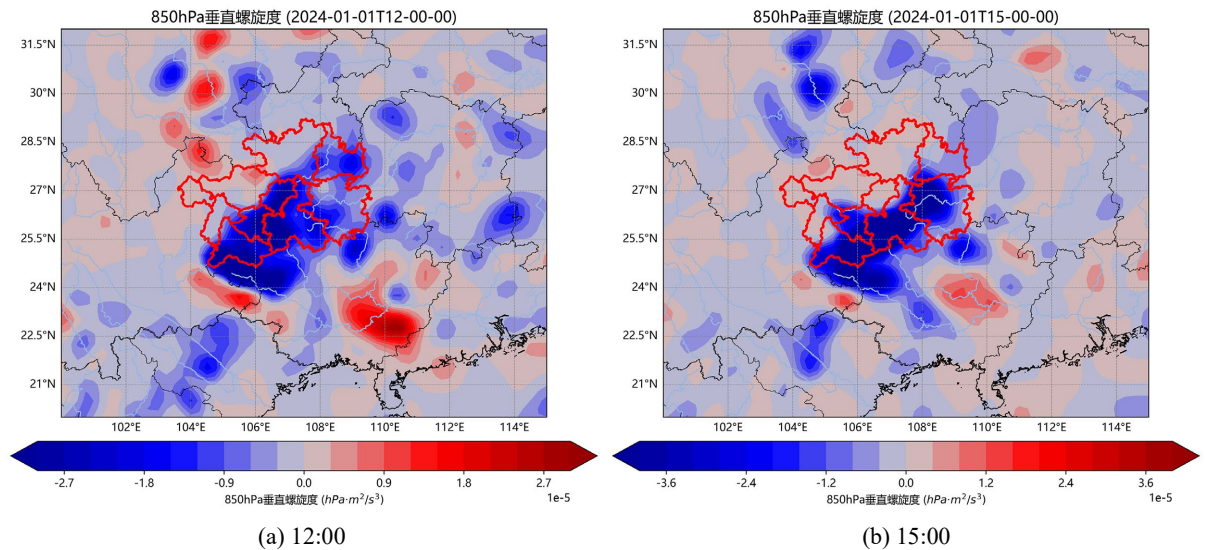


Figure 10. 850 hPa vertical helicity
图 10. 850 hPa 垂直螺旋度

6.5. 850 hPa 与 500 hPa 温差

850 hPa 与 500 hPa 温差可反映大气层结的不稳定性,温差越大,表示大气越不稳定,越有利于强对流天气的发生;反之,温差越小,大气越稳定。由图 11 可见,1 日 12 时贵州中南部,850 hPa 与 500 hPa 温差较大,贵阳机场为 20°C 左右,有利于强对流天气发生;1 日 15 时,贵阳机场 850 hPa 与 500 hPa 温差明显减小,强对流天气也趋于结束。

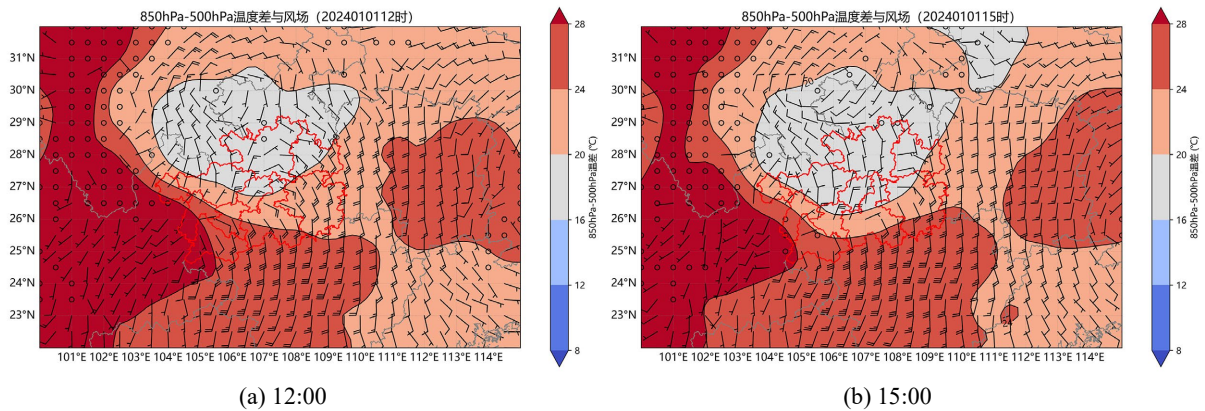


Figure 11. 850 hPa-500 hPa temperature difference
图 11. 850 hPa-500 hPa 温度差

6.6. 相对涡度沿 26.5° N 的垂直剖面

相对涡度沿固定纬度的垂直剖面,可以揭示该纬度上相对涡度的垂直分布及其与动力、热力条件的耦合情况,为强对流天气触发机制的诊断提供一定的帮助。由图 12(a)可见,1 日 12 时贵阳机场(106.5° E)上空 700 hPa 以下相对涡度均为正值,正涡度极大值中心位于 800 hPa 左右;700 hPa 以上为负涡度。1 日 12 时贵阳机场上空低层强正涡度向上延伸至中层,预示着可能出现超级单体。1 日 15 时,贵阳机场上空正涡度中心减小,且下移;高层也转为负涡度,预示着强对流天气的结束。

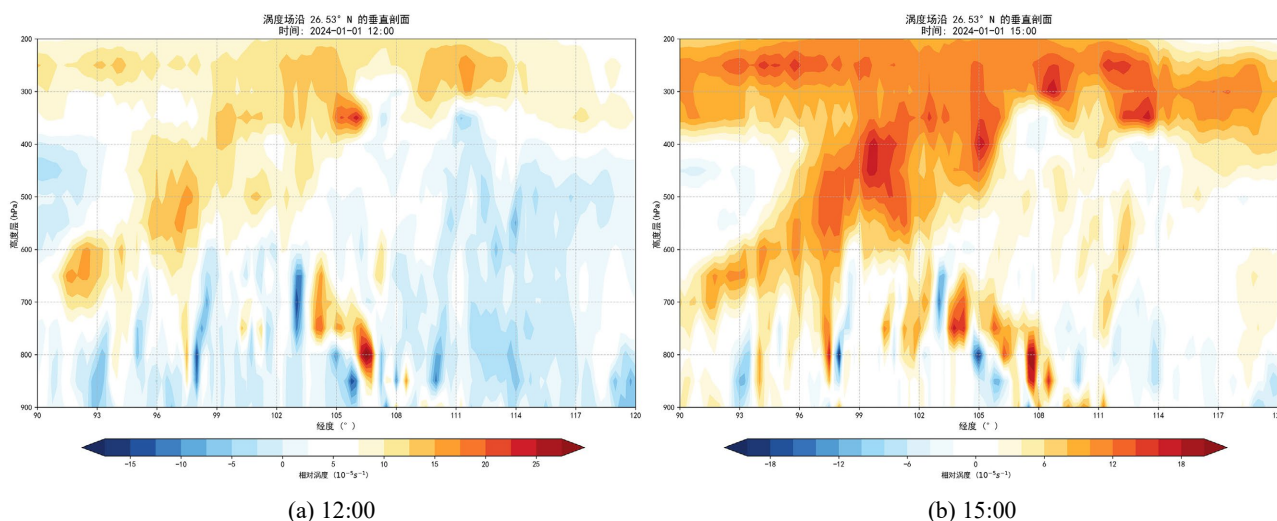


Figure 12. Vertical profile of relative vorticity along 26.5° N

图 12. 相对涡度沿 26.5° N 的垂直剖面

7. 结论

本文基于自观、雷达资料、欧洲中心 ERA5 再分析资料,对贵阳机场 2024 年 1 月 1 日的一次强对流天气成因进行分析。结论如下:

- (1) 500 hPa 高空槽东移、850 hPa 切变线是此次过程发生的天气背景;
- (2) 1 日 12 时贵阳站探空显示 0℃层高度位于 3379 米, -20℃层高度位于 6073 米,有出现冰雹天气的潜力;
- (3) 1 日 12~15 时贵阳机场上空 850 hPa 水汽条件好,贵州中南部整层可降水量较大;
- (4) 1 日 12 时低层辐合、高层辐散,在垂直方向上形成抽吸作用;贵州中部垂直螺旋度绝对值较大,15 时显著减小;12 时贵阳机场 850 hPa 与 500 hPa 温差较大(20℃左右),15 时明显减小;
- (5) 12 时贵阳机场上空低层强正涡度向上延伸至中层,预示着可能出现超级单体,15 时,中低层正涡度中心减小且下移,高层也转为负涡度。

参考文献

- [1] 刘开宇, 宋静, 高勇. 贵阳机场初雷天气的湿位涡诊断分析[C]//中国气象学会. 第 35 届中国气象学会年会 S1 灾害天气监测, 分析与预报. 合肥: 中国气象学会, 2018: 1050-1051.
- [2] 宋媛, 陈义义. 贵阳机场雷暴天气特征[J]. 地理科学研究, 2023, 12(4): 570-577.
- [3] 罗璇, 张宏国. 贵阳机场两次初雷天气对比分析[J]. 地理科学研究, 2023, 12(2): 287-294.
- [4] 俞小鼎. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象, 2014, 40(6): 649-654.

- [5] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 202-209.
- [6] 俞小鼎, 郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 391-418.
- [7] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 2017, 43(6): 641-652.
- [8] 黄洲升, 田齐齐, 唐卫贞. 强对流天气下航路多目标改航规划[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1648-1657.
- [9] 孟令航, 徐肖豪, 李善梅, 等. 不确定强对流天气下动态改航路径规划[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(4): 686-691.
- [10] 王岩韬, 刘锬, 赵焱飞. 雷暴天气下的多航班备降动态优化方案[J]. 工程科学学报, 2023, 45(4): 654-662.
- [11] 聂颖, 余星源, 张军, 陈宝君. 2017 年 6 月 10 日南京机场强降水过程对航空飞行影响分析[J]. 气象科学, 2020, 40(4): 554-559.
- [12] 谢忠妙, 李昌昊. 2019 年南宁机场初雷天气过程分析[J]. 气象研究与用, 2020, 12(41): 38-44.
- [13] 戴伦. 雷雨天气民航飞行的特点[J]. 军民两用技术与产品, 2017(16): 7-8.
- [14] 杨洁, 王兵, 刘峰, 陈云峰, 林智. 葵花 8 号卫星在白云机场一次强对流冰雹中的监测应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(1): 46-53.