

2024年贵阳机场两次飊线过程的环境条件与雷达特征对比分析

杨新宇, 罗璇, 陈炯瑶

中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2026年7月31日; 录用日期: 2026年9月14日; 发布日期: 2026年9月23日

摘要

基于ECMWF再分析资料、常规天气资料、探空资料、贵阳机场地面观测纪要栏资料、自观逐分钟资料以及雷达资料, 对2024年贵阳机场两次飊线过程进行诊断分析, 结果表明: 两次过程均受西南涡影响, 700 hPa西南急流造成低层动力结构不稳定; “上冷下暖”的垂直结构提供了热力不稳定条件; 低层辐合、中层辐散的配置则提供了动力不稳定条件。K指数、SI指数、CAPE值均表明两次过程前贵阳上空存在大量不稳定能量; 较大的SSI指数表明大风出现条件有利; 较高的0℃层和-20℃层高度不利于冰雹产生。雷达回波显示两次过程均呈现明显的弓状回波特征, 且低层出现速度辐合。两次过程不同点在于: 在影响系统方面, 4月18日过程受垂直槽东移及地面低压前部影响, 7月1日过程则受前倾槽和地面辐合线影响。在水汽条件方面, 7月1日700 hPa水汽通量值相对较弱。4月18日低层为东北偏南辐合, 7月1日则为西北西南辐合, 且零速度线风速梯度相对较大。

关键词

飊线, 中分析, 雷达回波

Comparative Analysis of Environmental Conditions and Radar Characteristics of Two Squall Line Processes at Guiyang Airport in 2024

Xinyu Yang, Xuan Luo, Jiongyao Chen

Guizhou Sub-Bureau of Southwest China Air Traffic Management Bureau, CAAC, Guiyang Guizhou

Received: July 31, 2026; accepted: September 14, 2026; published: September 23, 2026

文章引用: 杨新宇, 罗璇, 陈炯瑶. 2024年贵阳机场两次飊线过程的环境条件与雷达特征对比分析[J]. 自然科学, 2026, 14(5): 704-713. DOI: 10.12677/ojns.2026.145074

Abstract

Based on ERA5 reanalysis data, conventional weather data, sounding data, surface observation records from Guiyang Airport, minute-by-minute automatic weather station data, and radar data, a diagnostic analysis was conducted on two squall line events at Guiyang Airport in 2024. The results indicate that both events were influenced by a southwest vortex, with the 700 hPa southwest jet stream causing instability in the low-level dynamic structure. The “cold upper, warm lower” vertical structure provided thermal instability conditions, while the configuration of low-level convergence and mid-level divergence provided dynamic instability conditions. The K-index, SI index, and CAPE values all indicated the presence of substantial unstable energy over Guiyang before both events. The relatively high SSI values suggested favorable conditions for strong winds. The high altitudes of the 0°C and -20°C layers were unfavorable for hail formation. Radar echoes showed that both events exhibited distinct bow-echo characteristics, with velocity convergence observed at low levels. The differences between the two events are as follows: In terms of influencing systems, the April 18 event was affected by an eastward-moving vertical trough and the front of a surface low, while the July 1 event was influenced by a forward-tilting trough and a surface convergence line. Regarding moisture conditions, the 700 hPa water vapor flux on July 1 was relatively weaker. On April 18, low-level convergence was from the northeast-south direction, whereas on July 1, it was from the northwest-southwest direction, and the wind speed gradient along the zero-velocity line was relatively larger.

Keywords

Squall Line, Mesoanalysis, Radar Echo

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

飑线在气象学上是指由许多雷暴单体(包括若干超级单体)侧向排列而形成的强对流云带, 当其过境时气压涌升、气温急降、相对湿度大幅上升、气象要素剧烈变化, 伴有强降水、强雷电、雷暴大风、冰雹、下击暴流等[1][2]对飞行有重要影响的天气。对于飑线的分析主要从环流形势、中小尺度结构、雷达产品等方面着手, 许爱华等[3]将强天气分为冷平流强迫类、暖平流强迫类、斜压锋生类、准正压类以及高架对流类这五类。聂云等[4]对贵州一次暖区飑线研究分析发现 850 hPa 的切变和地面热低压控制下的低空暖湿平流对热力不稳定性起增大作用。王兴菊等[5]对安顺一次飑线天气过程诊断分析发现当贵州省上空出现大范围的高温高湿区对飑线的触发和发展提供了很好的能量条件。洪俊等[6]研究上饶春季两次飑线过程发现强的冷池密度是造成地面大风的重要原因之一。熊英等[7]研究华南前汛期两次飑线大风过程发现垂直风切变的大值区队大风落区有指示意义。丁治英等[8]对江淮两次飑线的水汽敏感性试验表明中低层的水汽对地面降水均有很大的影响, 中层的水汽含量增加则增加降雹的可能性。陈淑琴等[9]研究浙北沿海 3 次槽前型飑线的演变过程发现在西太平洋副高以及低层西南急流的配置下, 较强的垂直风切有利于对流的维持。

贵阳机场依托西北高东南低的云贵高原, 山地性气候显著。在距离机场西南面 20 多公里的多个水库也为机场天气变化提供了一定的水汽支持。贵阳机场全年均可出现雷暴, 在春夏季出现日数最多。贵阳

机场的雷暴大风一般较常出现于多系统过境时的强雷暴天气下，少数也出现在较强的热力性雷暴中。由于飏线是在同一气团中形成和传播的中系统[1]，所以飏线对飞机起降的影响比单个雷暴影响更大，对此本文对 2024 年出现的两次飏线过程的特征进行分析，为预报对飞行有重要影响的强对流天气提供思路。

2. 资料与实况概况

本文利用 ECMWF 再分析资料、常规资料和探空资料、贵阳机场地面观测纪要栏资料、自观逐分钟资料、本站雷达资料，从环流背景、物理量、雷达回波特征三个方面入手，对贵阳机场 2024 年 4 月 18 日和 7 月 1 日两次飏线过程进行分析。本文时间为北京时。

两次飏线过程实况(见表 1)中雷雨的持续时间和伴随天气有所不同。在民航气象地面观测规范中，大风与飏是两种定义：大风是指瞬时风速达到 17 米/秒的风，记录时只看基准观测点的数值；飏则是瞬时风速增大至少 8 米/秒，且增大后瞬时风速达到 11 米/秒或以上[10]。4 月 18 日的飏线过境时伴随大风现象，其中大风出现时间为 21:28 至 21:31；7 月 1 日飏线过境时伴随飏，其中飏出现时间为 13:04 至 13:17，可见两次风速大值的时段短，仅在几分钟到十几分钟。此外，通过对比两次过程出现时段内跑道四个观测点最大风速可知，4 月 18 日的飏线过境时整个机场受强对流影响时间更长且强降水时间持续较长，而 7 月 1 日飏线过境对跑道南端的影响更大且降水强度更大。

Table 1. Observations of the two squall line events

表 1. 两次飏线过程实况

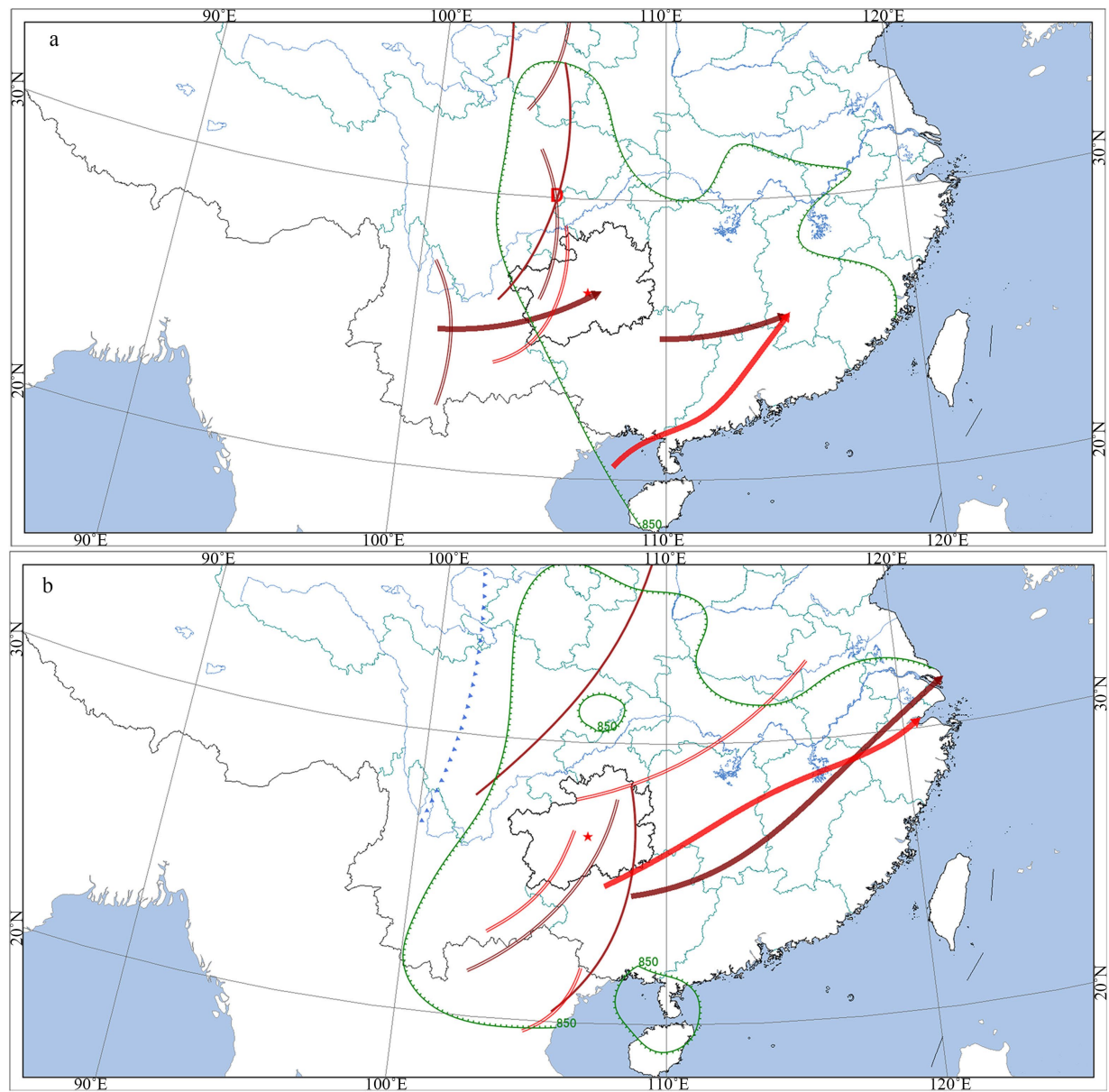
出现日期	雷暴时段	纪要栏实况天气	最大风速 m/s			
			19 R	19 L	01 R	01 L
4 月 18 日	20:07~02:14	中雷雨伴雷暴大风	18	18	18	17
7 月 1 日	12:45~13:48	强雷雨伴飏	15	15	17	17

3. 环流背景

3.1. 形势场分析

本文利用中分析对两次飏线过程的高空环流形势进行分析。对 4 月 18 日 20 时高空形式(见图 1(a))进行分析：500 hPa 中高纬度呈两槽一脊的环流形势(图略)，东槽位于西太平洋，西槽则分为两截影响我国西部，槽后有明显的冷平流，西槽北段位于内蒙西部至甘肃南部，西槽南段则位于四川东部至贵州西北部，贵阳机场受槽前西南气流的影响；700 hPa 在四川中部有一西南涡，四川中东部至贵州西北部(与 500 hPa 槽交叉)以及云南中部有切变，此时贵阳机场位于西南涡底前部的西南急流轴正前方，有明显的风速的辐合，轴上最大风速为 20 米/秒；850 hPa 西南涡位于重庆，贵州北部至云南中东部有一切变，贵阳受低涡前部的东南气流影响，此外贵阳机场此高度温度露点差小于等于 5℃的湿区内。

7 月 1 日 08 时高空环流形势(见图 1(b))，在 500 hPa 中高纬呈一槽一脊的环流形势(图略)，河套北部有一明显低压，我国中西部受分段槽影响，槽后有明显冷平流，贵阳机场处于槽后西北气流影响，此时副高控制我国华南一带，副高脊线位于 25°N 附近；700 hPa 上西南涡位于渝黔湘三省交界位置处，从贵州东北部至云南西南部有一切变(在 850 hPa 切变前，500 HP 槽线后)，贵阳机场受该切变线后部偏北气流影响，西南急流位于长江中下游地区，急流轴上最大风速为 20 米/秒；850 hPa 西南涡位于贵州北部，此时长江中下游地区形成一暖式切变，西南中部则为冷式切变，贵阳机场位于两切变底前部且仍受西南急流的影响，此时长江中下游仍有最大风速为 20 米/秒的西南急流，贵阳机场仍位于此高度温度露点差小于等于 5℃的湿区内。



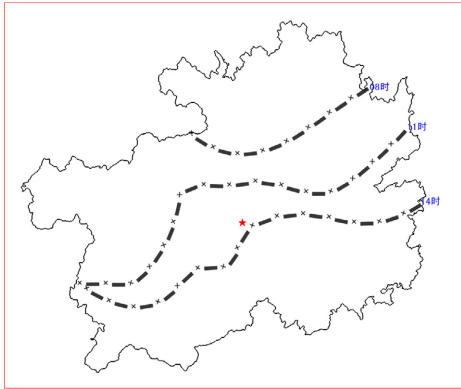
注：本研究所使用的中国省级行政界线及水系等地理数据，源自 MICAPS 4.0.5 气象信息综合分析处理系统内置的地理信息图层(包括省级行政界线 Province.shp、中国国界 NationalBorder.shp，以及黄河、长江、淮河等主要河流与湖泊水系数据)。地图采用兰伯特等角圆锥投影(Lambert Conformal Conic，双标准纬线 30°N、60.2°N，中央经线 110°E，基准椭球 Clarke 1866)，经边界提取与拓扑处理后叠加形成中国地形底图，用于本研究的空间分析展示。

Figure 1. Upper-level synoptic patterns at (a) 20:00 LST 18 April and (b) 08:00 LST 1 July. (Note: the star marks the location of Guiyang Airport; “D” denotes a closed southwest vortex; the shaded area indicates the significant moisture zone where the dewpoint depression $\leq 5^{\circ}\text{C}$)

图 1. 4 月 18 日 20 时高空形式图(a)和 7 月 1 日 08 时高空形式图(b)(注：五角星表示贵阳机场所在位置，D 表示闭合的西南涡，显著湿区是温度露点差小于等于 5°C 区域)

地面实况上的影响系统分别为辐合线和低压。4 月 18 日 08 时低压位于青海东部，逐渐往东南移动，14 时该低压已移动至四川南部，20 时低压已移动至云贵交界处，此时贵阳机场受低压前部偏南气流控制，低层辐合为强天气提供动力条件。7 月 1 日地面实况(见图 2)此时在贵州中北部有明显的辐合线，贵州机场此时处于辐合线南部，受偏南气流控制，11:00 辐合线已南压至贵阳机场附近，此时低层有强的辐合上

升运动，14 时辐合线受高层引导气流控制继续南移至贵州南部，此贵阳机场地面已转为辐合线后部偏北气流控制。



注：本图为基于 MICAPS 4.0.5 气象信息综合分析处理系统绘制的地面辐合线图。图中黑色实线为贵州省省界(源自系统内置省级行政界线图层 Province.shp)，红色五角星标注龙洞堡机场(贵阳龙洞堡国际机场，ZUGY)所在位置。地图采用兰伯特等角圆锥投影(双标准纬线 30°N、60.2°N，中央经线 110°E，基准椭球 Clarke 1866)，经边界提取与拓扑处理后作为地面辐合线分析的底图，用于本研究的气象要素空间分析。

Figure 2. Surface convergence line path, 08:00~14:00 1 July
图 2. 7 月 1 日 08 时至 14 时地面辐合线移动路径

3.2. 垂直层结分布

两次过程的探空图垂直结构上存在明显差异。4 月 18 日 20 时探空曲线(见图 3(a))呈“X 型结构”[11]在海拔 2 千米左右湿度较大，其余都比较干，且在 700 hPa 上出现较为明显的逆温层；从该时次的垂直风切来看，近地面有弱的冷平流，逆温层的高度对应着有明显的暖平流，且 700 hPa 附近有明显的风速随高度增加，对应着西南急流，整层呈“冷 - 暖 - 弱冷”、“干 - 湿 - 干”的不稳定层结，有利于对流发生。7 月 1 日 08 时的探空曲线(见图 3(b))湿层厚度较大，从地面可达 500 hPa 附近为相对湿度大于 80% 的层结，且在 2.5 千米海拔高度上出现极薄的等温层。对于该时次的垂直风切来看，地面至 700 hPa 风速随高度增加且风随高度顺转，即存在暖平流，700~600 hPa 上有风随高度逆转，即存在冷平流，则该时次贵阳在垂直方向上为上冷下暖且湿层厚的不稳定层结配置，出现强降水的概率更高。

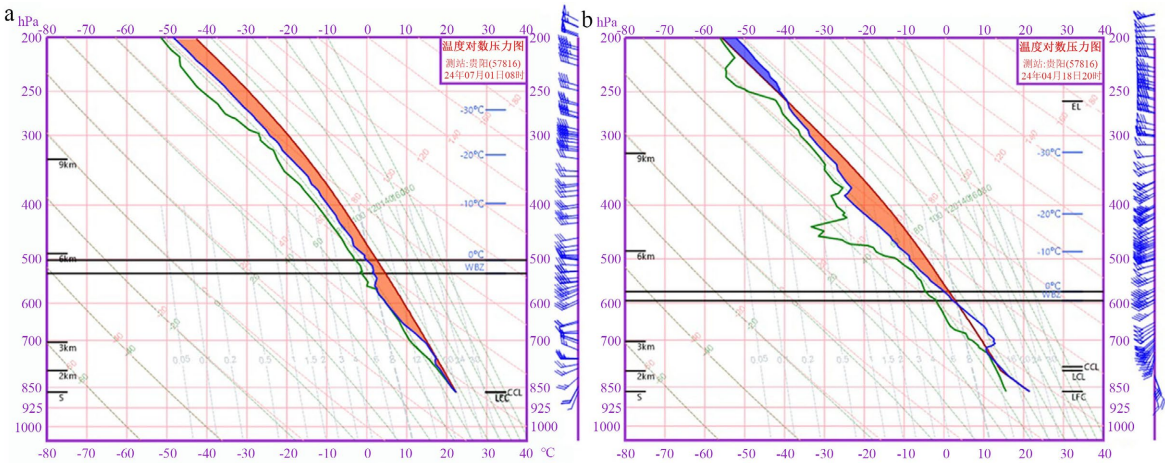


Figure 3. Sounding profiles at Guiyang station at (a) 20:00 on 18 April and (b) 08:00 on 1 July
图 3. 4 月 18 日 20 时 (a)和 7 月 1 日 08 时 (b)贵阳站的探空图

选取两次过程前不同能量指数(见表 2)对比分析,贵阳在这两个时次均处在大气不稳定有利于对流发展的区域。首先常用的 K 指数、SI 指数、CAPE 三个常用对流指数进行对比分析:其中 K 指数均在 35℃ 以上,当 K 指数大于 30 时较可能发生对流[12],表明贵阳上空的大气不稳定能量增加,有利于发生对流;SI 指数则均为负数,说明贵阳均处于大气层结不稳定的区域;两次过程前 CAPE 值均为正,则两次过程发生前贵阳均有利于对流发生,7 月 1 日的过程具有更高的不稳定能量。

Table 2. Atmospheric instability indices derived from sounding data
表 2. 探空不稳定能量表

时间	K/℃	SI/℃	CAPE/(J~kg ⁻¹)	T ₈₅₀₋₅₀₀ /℃	SSi	700 hPa 比湿(g/kg)	850 hPa 比湿(g/kg)
4 月 18 日 20 时	37.7	-3.97	952.4	28.4	272.6	8.89	12.58
7 月 1 日 08 时	39.4	-2	1838.3	21.5	293.6	11.52	18.64

注: K 为 K 指数; SI 为沙氏指数; CAPE 为对流有效位能; T₈₅₀₋₅₀₀ 为 850 hPa 与 500 hPa 的温度; SSi 为风暴强指数。

董玲等[13]发现在预报大风等对流性天气时假相当位温 θ_{se} 、K 指数、SI 指数、风暴强度 SSI 指数参考意义强于 CAPE 和抬升指数 LI。毛程燕等[14]发现垂直风切增强会促进超级单体以及多单体风暴的形成和发展。两次过程前的 SSI 指数均大于 250,说明上下层存在较大的垂直风切变,有利于地面强阵风的出现。4 月 18 日的零度层和-20℃层分别在 4.7 千米和 7.2 千米,7 月 1 日的零度层和-20℃层分别在 5.8 千米和 9.1 千米,两次过程零度层高度较高,融化层较厚,均不利于形成冰雹。综上所述,两次过程前贵阳上空存在大量不稳定能量,既有利于强对流的发生,其中对流伴随的大风和强降水天气的概率更高,较高的零度层和较厚的融化层不利于冰雹的产生。

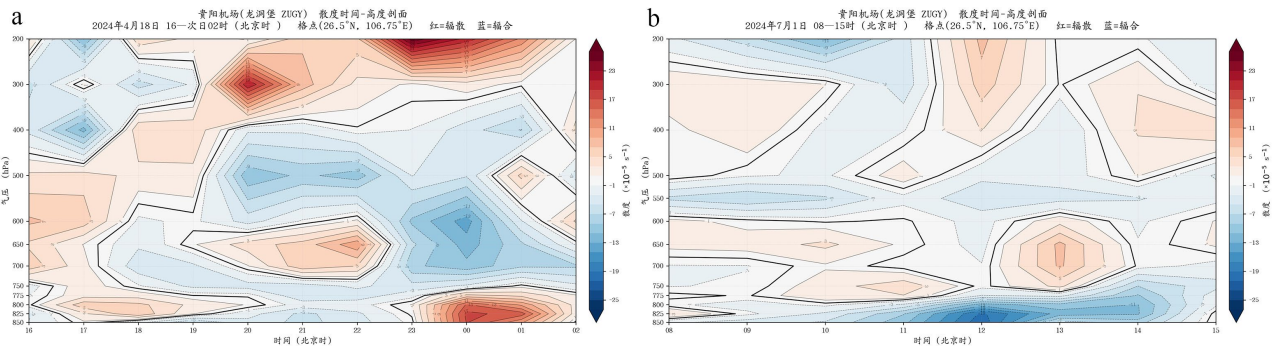


Figure 4. Time–height cross sections of divergence at Guiyang Airport for (a) 16:00 18 April–02:00 19 April and (b) 08:00~15:00 1 July (unit: 10⁻⁵ s⁻¹)

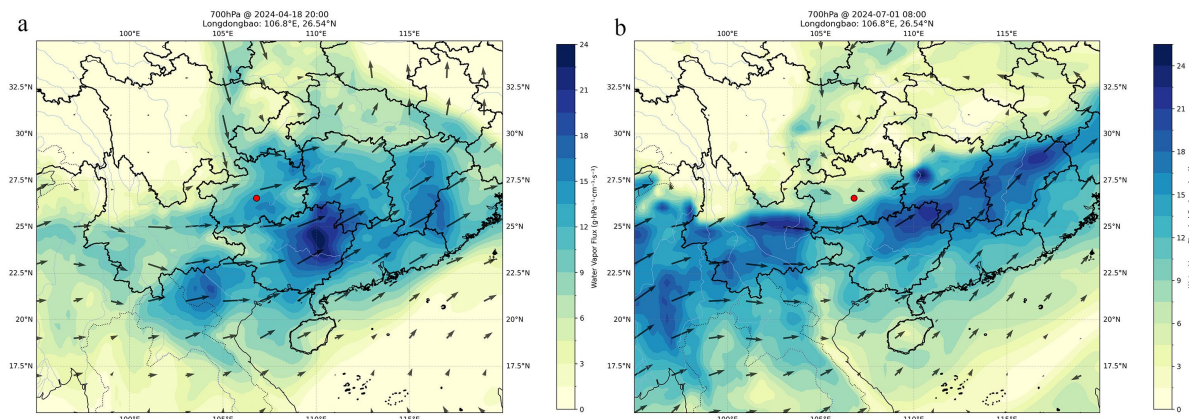
图 4. 贵阳机场 4 月 18 日 16 时~19 日 02 时 (a)和 7 月 1 日 08 时~15 时 (b)随时间变化散度垂直剖面(单位: 10⁻⁵ s⁻¹)

对比贵阳机场 850 hPa 至 200 hPa 散度随时间变化的垂直剖面可知,均出现低层辐合中层辐散,二者在强度上有所区别,7 月 1 日低层辐合强度更强,4 月 18 日高层辐散更强。4 月 18 日(见图 4(a)) 18 时前弱辐散发展至 500 hPa, 18~20 时稳定层结往不稳定过度, 600 hPa 以下呈“辐合-辐散-弱辐合”配置, 20 时~23 时 600 hPa 以下呈低层辐合中层辐散配置, 23 时后低层和高层都为强辐散区域($\geq 15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)中, 中层较厚辐散区在 01 之后也转为辐合。7 月 1 日(见图 4(b)) 09~15 时低层辐散中层辐合, 且 12 时低层辐合最强。

3.3. 水汽条件

由探空图可知两次飑线过程前低层的水汽较多,加之云贵高原西高东低的地形因素,本文通过分析 700 hPa 的水汽通量和风场(见图 5)得出两次过程发生前贵阳机场水汽从孟加拉湾输送到长江以南的区域,

且在机场南部有水汽通量极大值区。4月18日20时贵阳机场处于急流轴左后侧,水汽通量值为 $12 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 有较好的水汽条件。7月1日08时贵阳机场处于西南急流的左侧,弱东北气流控制,处于水汽通量值增加区域,但弱于4月18日20时,为 $4 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 水汽条件较弱。



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2023) 2762 号的标准地图制作, 底图无修改。图中红点表示贵阳机场位置。

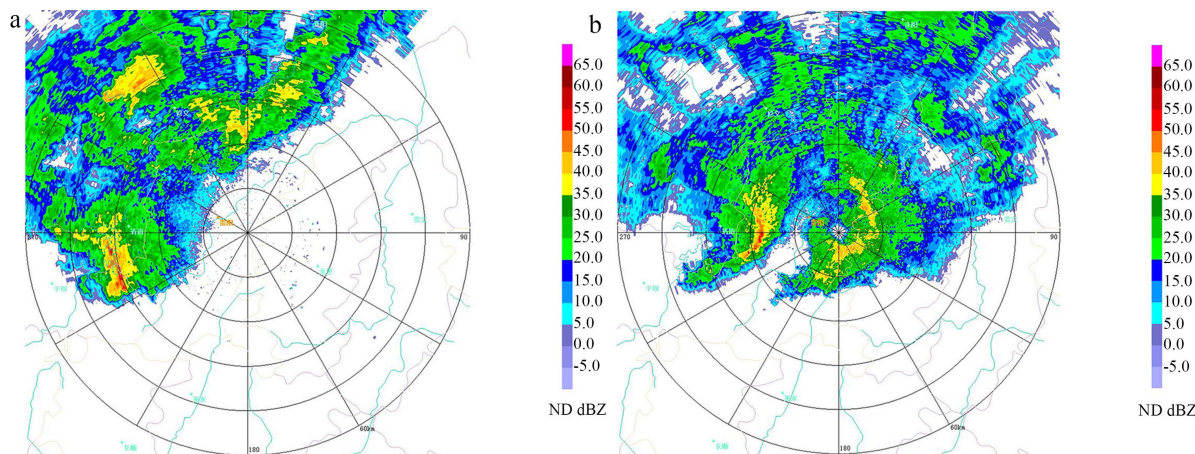
Figure 5. 700 hPa water vapor flux (shaded, $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind vectors ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 20:00 18 Apr and (b) 08:00 1 July
图 5. 4月18日20时 (a)和7月1日08时 (b)700 hPa 的水汽通量(阴影, 单位 $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)以及风场图(箭头, 单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

4. 多普勒天气雷达回波特征分析

4.1. 反射率因子

在 2.4° 仰角下两次飊线演变情况中, 发现两次过程均由不连续的强对流回波东移逐渐合并成对本场造成影响, 其中最大反射率均能达到 $55\text{--}60 \text{ dBZ}$, 且4月18日过程弓状回波更明显。

4月18日20:25 (见图 6(a))距离本场 36 公里的西南面已形成一条竖直状强回波带, 回波最强在 50 至 55 dBZ 。受高层引导气流的影响, 强回波带东移且移至本场上空时阵风最大 18 m/s , 21:34 (见图 6(b))已东移到本场上空偏西且呈弓状回波, 此回波的强度有所减弱且 17 m/s 以上的大风消失, 在该回波西方 20 千米处有一迅速东移的弓状强回波, 其强度最强在 55 dBZ 。伴随着中高层槽线东移, 两条弓状回波合并, 已于 22:06 (见图 6(c))移出本场且强度减弱, 但其后方仍形成强度在 35 dBZ 的絮状回波经过本场, 造成本场降水时间长达六个小时。



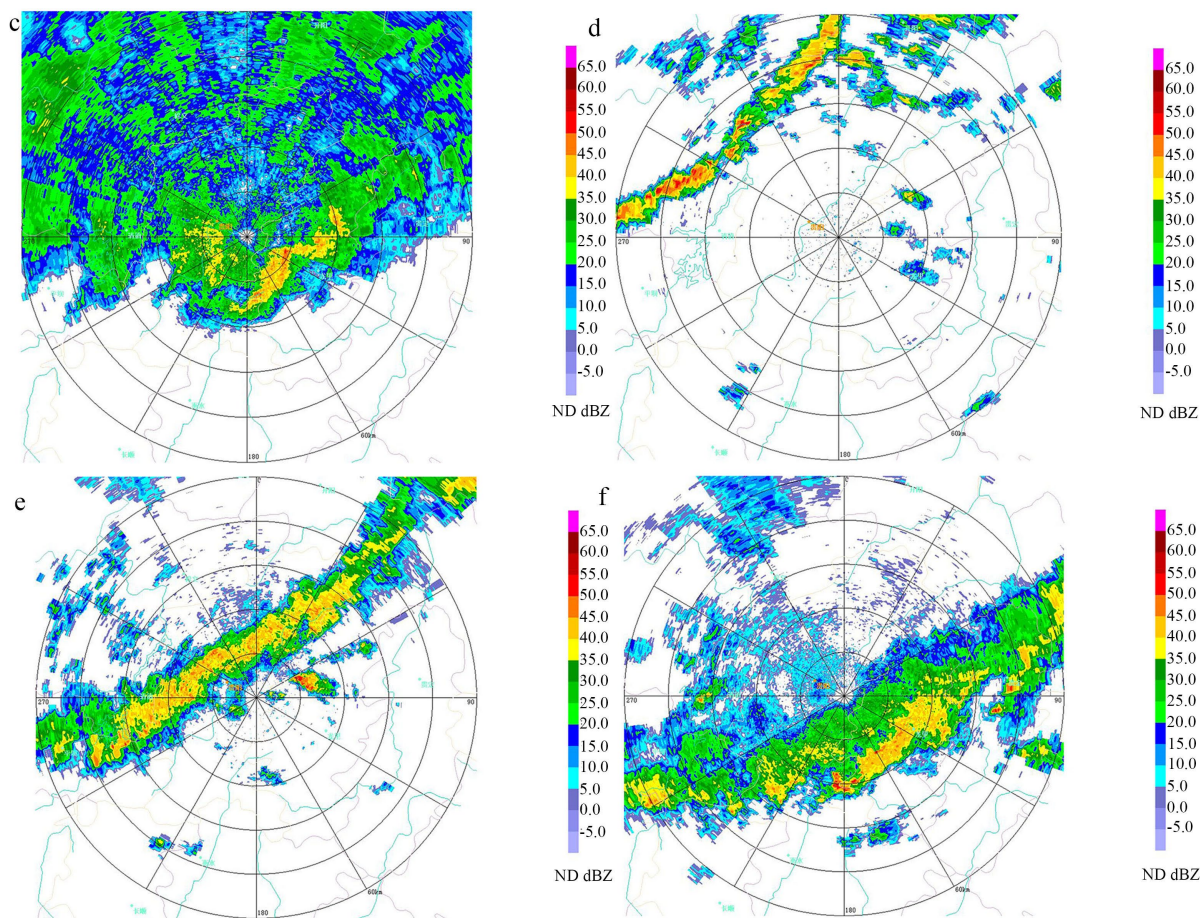


Figure 6. Radar reflectivity factor at Guiyang Airport at (a) 20:25, (b) 21:34, and (c) 22:06 on 18 April; and (d) 11:49, (e) 12:44, and (f) 13:31 on 1 July (elevation angle: 2.4°; range rings at 30, 60, and 100 km, the same below)
图 6. 4 月 18 日 20:25 (a); 21:34 (b); 22:06 (c) 和 7 月 1 日 11:49 (d); 12:44 (e); 13:31 (f) 贵阳机场本站雷达反射率因子 (雷达仰角为 2.4°, 图像圈层距离为 30、60、100 km, 下同)

7 月 1 日 11:49 雷达反射率因子 (见图 6(d)) 贵州西北部距本场 36 公里处有一条明显不连续的细长弓状回波, 回波强度最强在 55 dBZ, 快速向东南方向移动。12:44 (见图 6(e)) 距本场 15 公里处转为连续型线性回波, 回波强度略微减弱。此回波继续东移时, 13:04 本场实况天气为强雷雨伴雹, 其中跑道南头的风速变化更为剧烈; 13:31 (见图 6(f)) 强回波头尾相链接且逐渐远离本场。

4.2. 径向速度

两次过程均出现强速度中心, 其中 4 月 18 日的飊线过境前后本场低层风向是由东风转北风, 且存在速度模糊, 7 月 1 日的飊线过境前后径向速度类似于冷锋过境时演变。

4 月 18 日 20:25 (见图 7(a)) 飊线距离本场 36 千米, 此时零速度线在低层为指向东南方向的 V 型, 且仅西北方为正速度, 即本场低层存在辐合。21:34 (见图 7(b)) 零速度线在低层为反 S 型, 说明机场上空存在暖平流为飊线提供不稳定能量和水汽西北东南走向。东北和西南方向上, 距离本场 8 公里范围高度 400 米处存在径向速度大于 14 m/s 的强中心。22:06 (见图 7(c)) 低层仍然为弱的东北气流, 但上空已转为西北气流控制, 本场上空转为稳定。

7 月 1 日 11:49 (见图 7(d)) 径向速度中本场东北正西南负, 零速度线呈西北东南走向, 且风速较小, 本场低层受西南气流控制。12:44 (见图 7(e)) 零速度线呈 V 字型指向西方, 西负东正, 本场低层存在辐合,

且北边风速梯度大于本场南部,北偏西出现速度大于 -14 m/s 的强中心。此时零速度线的拐角位于本场中心西北方说明飑线还未经过本场但距离本场不远。13:31 (见图 7(f))中低层均转为西北风控制, 30 公里范围内风速梯度明显。

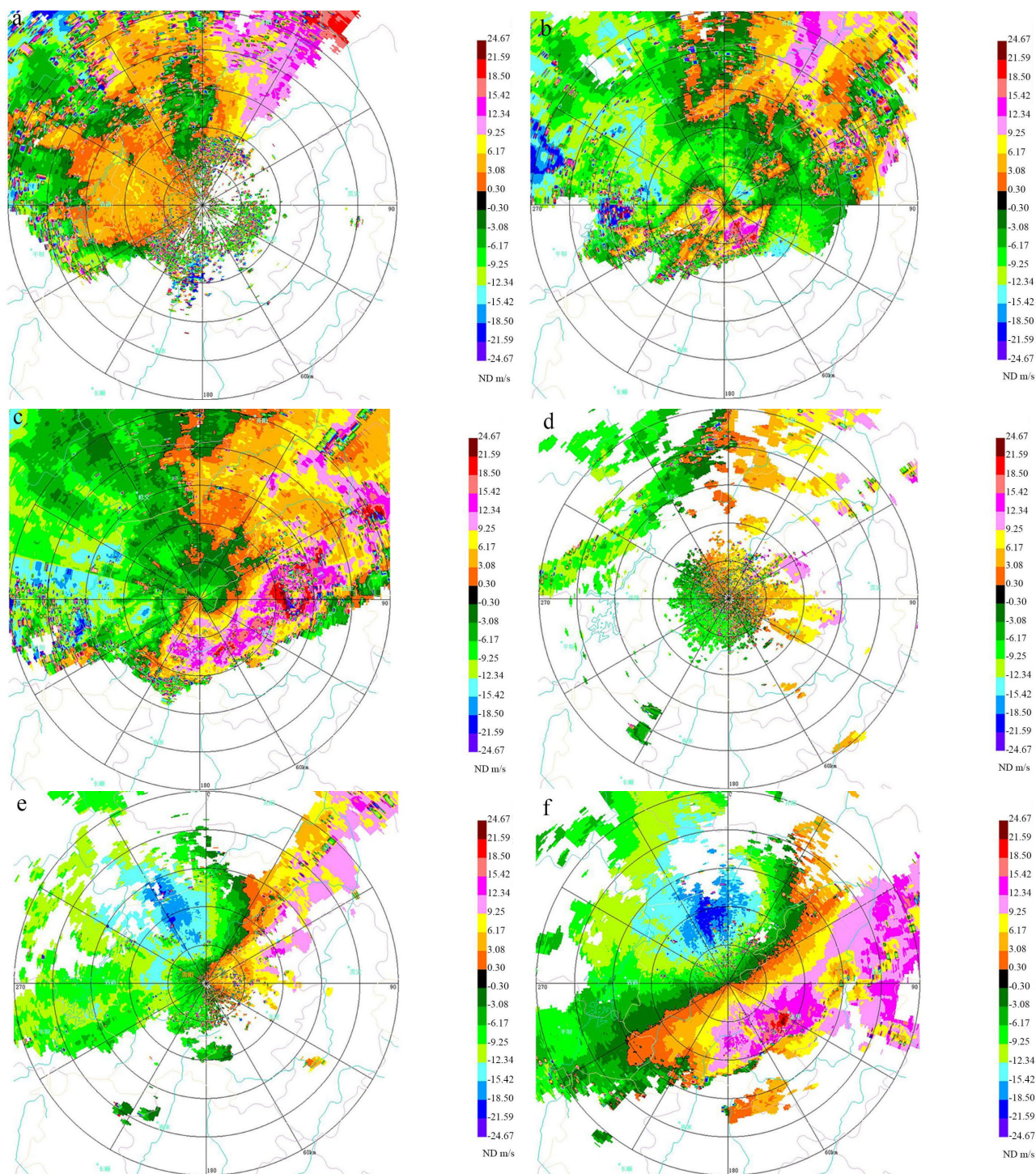


Figure 7. Radar radial velocity at Guiyang Airport at (a) 20:25, (b) 21:34, and (c) 22:06 on 18 April; and (d) 11:49, (e) 12:44, and (f) 13:31 on 1 July

图 7. 4 月 18 日 20:25 (a); 21:34 (b); 22:06 (c) 和 7 月 1 日 11:49 (d); 12:44 (e); 13:31 (f) 贵阳机场本站雷达径向速度

5. 讨论与结论

本文通过分析 2024 年 4 月 18 日以及 7 月 1 日影响贵阳机场的飊线过程进行对比分析。结果表明:

(1) 两次过程触发机制不同, 4 月 18 日受槽线东移及地面低涡前部辐合影响, 雷雨时段较长; 7 月 1 日则是受前倾槽以及地面辐合线触发产生。

(2) 都是上冷下暖、低层辐合中层辐散的不稳定层结, 4 月 18 日在低层有较薄的湿层, 呈“干-湿-干”的层结, 高层辐散、水汽通量偏强, 7 月 1 日则中低层湿度大于 80%, 低层辐合较强。两次过程 K 指数、SI 指数、CAPE 值均表明两次过程前贵阳上空存在大量的不稳定能量, 较大 SSI 指数则说明有利于大风出现, 贵阳上空的 0℃度层、-20℃层高度较高, 不利于产生冰雹。

(3) 在雷达特征上, 两次过程均出现弓状回波、V 字型结构。4 月 18 日的飊线过程出现两条弓状回波, 大风出现在第一条弓状回波经过本场时, 此时低层存在风速辐合, 第一条回波刚过境本场低层零速度呈反 S 型, 即低层暖平流继续提供第二条回波不稳定能量; 7 月 1 日的飊线过程只有一条弓状回波, 零速度线风速梯度相对较大。

本研究仅基于两次个例分析, 且以定性分析为主, 缺乏定量诊断与数值模拟支撑。雷达资料未充分利用双偏振参量及三维风场反演。未来可结合高分辨率数值模拟深化机理研究, 利用双偏振雷达及多源资料揭示飊线精细结构, 增加个例建立贵阳机场飊线统计数据库与概念模型, 为航班绕飞、起降决策及停机位调度提供精细化预警支持, 提升贵阳机场应对强对流天气的运行保障水平。

参考文献

- [1] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 第 4 版. 北京: 气象出版社, 2007: 407-416.
- [2] 寿绍文, 励申申, 寿亦萱, 等. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 116-127.
- [3] 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 2014, 40(4): 400-411.
- [4] 聂云, 周继先, 李习瑾, 等. 贵州一次暖区飊线过程的环境条件和结构特征[J]. 干旱气象, 2020, 38(5): 782-793.
- [5] 王兴菊, 周文钰, 蒙军, 等. 安顺市一次飊线天气过程的诊断分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(5): 11-18.
- [6] 洪俊, 周丽蓉, 陈小军, 等. 2018 年春季上饶市 2 次飊线天气成因分析及预报关键点[J]. 江西科学, 2019, 37(2): 254-259, 303.
- [7] 熊英, 彭霁霁. 华南前汛期冷空气影响下两次飊线大风过程的对比分析[J]. 广东气象, 2019, 41(6): 19-23.
- [8] 丁治英, 王楠. 两次飊线过程中短时强降水和冰雹强度差异及成因分析[J]. 气象科学, 2015, 35(1): 83-92.
- [9] 陈淑琴, 章丽娜, 俞小鼎, 等. 浙江沿海连续 3 次飊线演变过程的环境条件[J]. 应用气象学报, 2017, 28(3): 357-368.
- [10] 中国民用航空局. 民用航空气象地面观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [11] 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等. 2017 年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象, 2018, 44(4): 485-499.
- [12] 唐卫亚, 等. 天气学分析基础[M]. 北京: 气象出版社, 2016: 200-206.
- [13] 董玲, 马中元, 周湘萍. 2017 年 4-8 月江西 9 次飊线天气诊断分析[J]. 江西科学, 2021, 39(2): 299-307.
- [14] 毛程燕, 汪晨, 龚理卿, 等. 浙江春季两次飊线的环境场条件和多普勒雷达特征对比分析[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(3): 31-38.