

# 贵州一次春季飑线天气的综合分析

罗浩, 张亚男

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: 2022年7月27日; 录用日期: 2022年8月31日; 发布日期: 2022年9月9日

## 摘要

本文利用卫星、雷达、高空及地面常规观测资料、ERA5再分析资料对2022年5月9日贵州一次春季飑线天气进行了综合分析, 研究表明: 此次飑线天气初发于高湿高能的暖区, 边界层辐合线及中层弱冷平流的入侵共同触发了对流天气的产生; 此次飑线天气的移动方向与700 hPa上的引导气流方向一致, 而移动速度则受到中层气流(700 hPa~500 hPa)的合成影响; 通过对较大范围内冷平流的溯源发现, 此次飑线天气并无明显的锋生特征, 近地面强冷平流并非触发此次飑线天气的关键因素, 而上游地区高空槽及切变线后部的偏北气流所携带的弱冷平流是触发对流天气的关键因素之一。

## 关键词

飑线, 冷平流, 触发机制, 引导气流

# Comprehensive Analysis of a Spring Squall Line Weather in Guizhou

Hao Luo, Ya'nan Zhang

Guizhou Air Traffic Control Sub Bureau of CAAC, Guiyang Guizhou

Received: Jul. 27<sup>th</sup>, 2022; accepted: Aug. 31<sup>st</sup>, 2022; published: Sep. 9<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

A spring squall line weather happened on May 9, 2022 in Guizhou was comprehensively analyzed by using satellite, radar, upper air and ground observation data and ERA5 reanalysis data. The study shows that the squall line weather began in the high humidity and high energy warm area. THE boundary layer convergence line and weak cold advection of middle layer trigger the generation of convection weather together. The squall line weather moved in the same direction as the guiding flow on 700 hPa. The move speed of squall line is affected by the middle layer air flow (700 hPa~500 hPa); through the tracing of cold advection in a large scope. The squall line weather does not have the ob-

vious frontogenesis characteristics, the strong cold advection near ground is not a key factor in triggering the squall line. The weak cold advection carried by the northerly airflow behind the trough and shear line in the upstream area is one of the key factors triggering the convection weather.

## Keywords

Squall Line, Cold Advection, Trigger Mechanism, Guiding Flow

Copyright © 2022 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

飑线是狭窄的线状对流带[1], 长度可达数百公里, 宽度却仅几公里到几十公里, 是一种组织性较强的中尺度对流系统[2], 飑线伴随的天气有雷暴、大风、冰雹和短时强降水等极端灾害天气, 甚至可能引发龙卷, 其发生发展迅速, 预报难度较大。业内对于飑线有过不少研究, 屈梅芳等分析了一次弱垂直风切变环境下飑线发展维持的成因, 研究表明中尺度辐合线以及中层后侧干冷空气入侵是触发飑线的关键因素[3], 王智等对长三角地区一次飑线过程进行了数值预报分析, 同样强调了中层干冷空气入侵对于触发飑线的重要性, 另外, 低层维持暖湿气流也同样重要[4], 其他一些学者针对不同地域的飑线天气也进行了大量研究[5] [6] [7]。

贵州省位于云贵高原东部, 全域海拔在 500~3000 米之间, 地貌以山地、丘陵为主, 复杂多变的地形特征和纵横交错的河流使得贵州省一年四季均有可能发生对流天气, 其中犹以春季发生的强对流天气居多, 冰雹、短时强降水以及极端大风等天气每年都会发生[8] [9], 而造成这些强对流天气发生的中小尺度系统也十分繁多, 诸如冷锋、飑线、西南涡等, 春季强对流天气在贵州省多呈西北-东南走向, 超级单体风暴、多单体风暴、飑线频发, 针对这些天气有不少学者进行过研究[10] [11] [12], 以往的研究中对于冷空气的来源提及相对较少, 本文对贵州省一次春季飑线天气进行了多尺度的综合分析, 分析的着眼点在于对边界层辐合线的追踪以及中层冷平流的溯源, 并以为飑线天气的提前预报和预警服务提供论据和支撑。

## 2. 资料

本文选取的资料包括: 1) 高空及地面常规观测资料; 2) 欧洲中心  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  ERA5 逐小时再分析资料; 3) 日本 JMA 葵花 8 卫星逐小时云图资料, 包含反照率及云顶亮温数据; 4) 贵阳机场多普勒气象雷达资料; 5) 全球数字高程模型 DEM 地形数据。本文所涉及的时间均为北京时。

本文所使用到的分析方法有中尺度综合分析、形势分析、诊断分析, 在分析中着重加强了对边界层辐合线的追踪和中层干冷空气的溯源。

## 3. 过程介绍及形势背景

### 3.1. 过程简介

2022 年 5 月 9 日午后至夜间(12:00~24:00), 贵州省自西北向东南出现了大范围对流天气, 如图 1 所示, 省的西北部和北部主要出现了短时强降水(图 1(a)), 西南部则出现了短时强降水、雷电以及冰雹等极

端灾害天气(图 1(b)), 是此次飊线天气的重灾区, 其中有不少站点的小时降水量超过了 30 毫米, 贵阳市中南部、黔西南州还出现了大风天气。

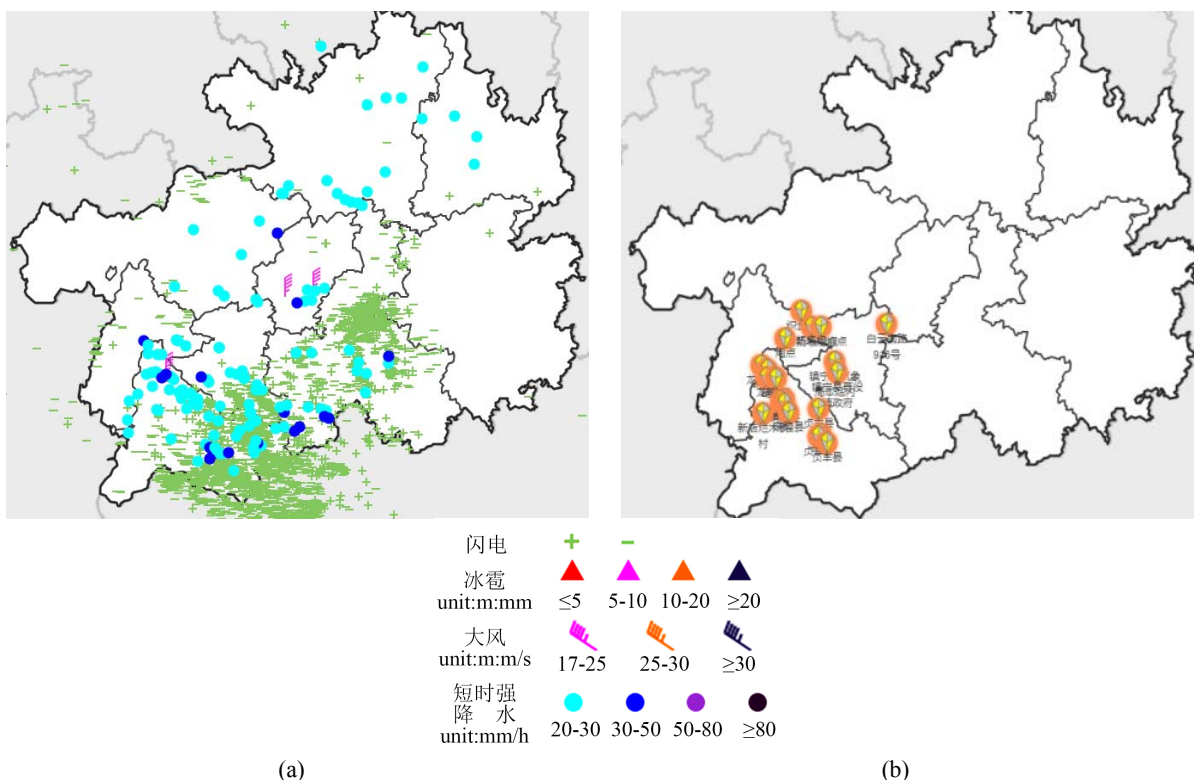


Figure 1. Synthetical monitoring of strong convection from 12:00 to 24:00 in Guizhou Province, May 9, 2022, (a) short-term heavy precipitation, surface strong wind and lightning monitoring; (b) hail monitoring

图 1. 贵州省 2022 年 5 月 9 日 12:00~24:00 强对流综合监测, (a) 短时强降水、地面大风及雷电监测; (b) 冰雹监测

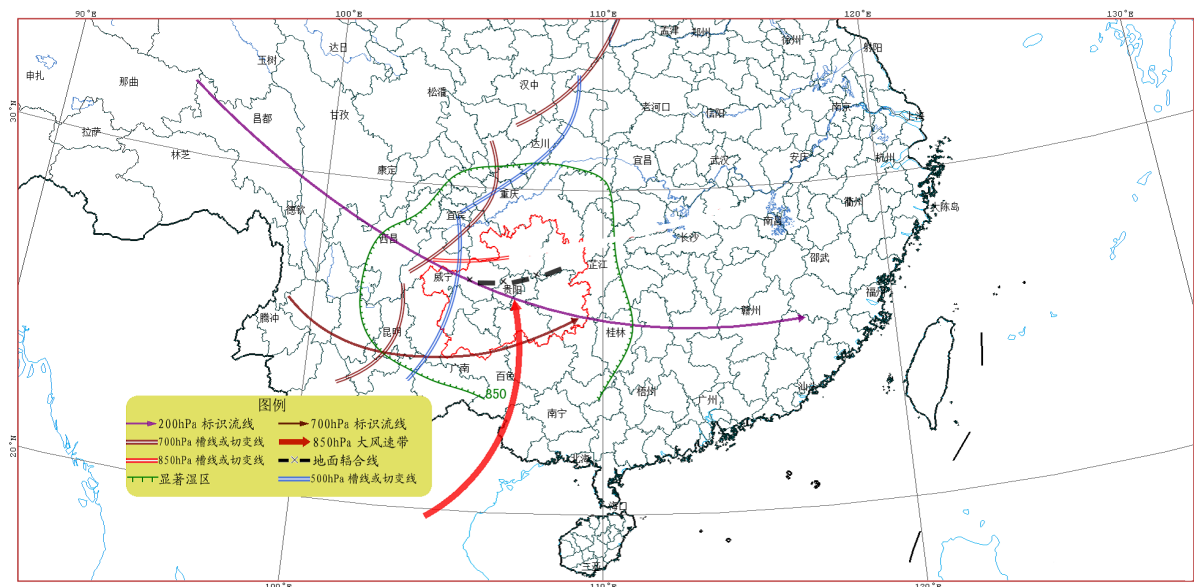


Figure 2. Mesoscale comprehensive analysis in the key area at 08:00, May 9, 2022

图 2. 2022 年 5 月 9 日 08 时关键区中尺度综合分析

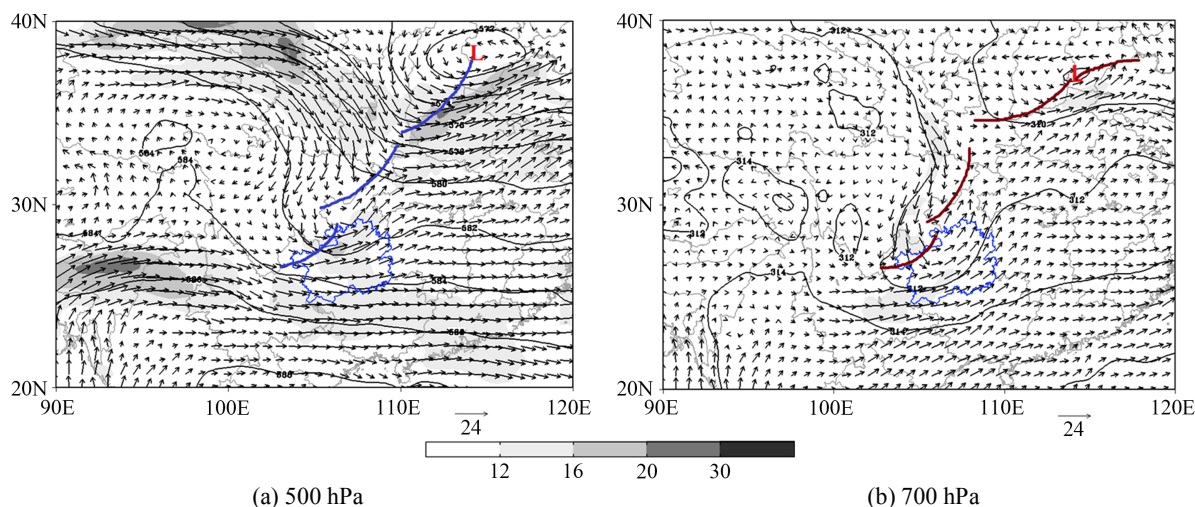
### 3.2. 前期形势

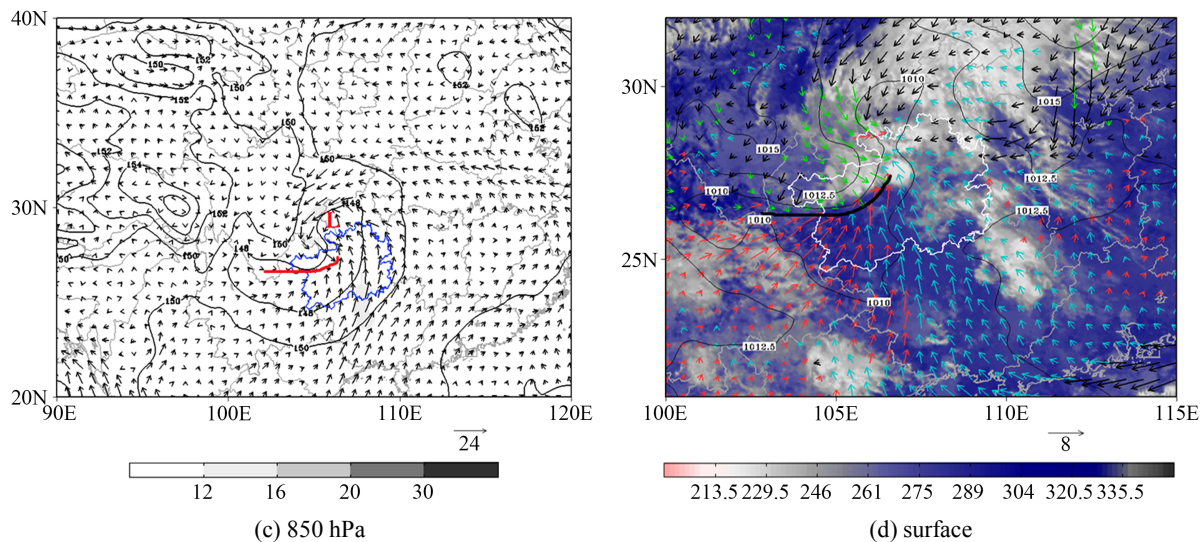
图2显示了2022年5月9日08时贵州省及其上游地区的中尺度综合分析场,由图可见,200 hPa上有一支风速超过30 m/s的显著气流自西北向东南贯穿整个贵州省;500 hPa上自秦岭到四川盆地中东部再到云贵交界处有阶梯槽存在,贵州省大部均位于槽前西南气流;700 hPa上的切变线位置与500 hPa槽接近,但从北至南均落后于500 hPa上的阶梯槽,在贵州省南部地区有一支风速超过10 m/s的显著气流呈东西向分布;850 hPa上的切变线位于贵州西北部地区,呈东西向分布,有一支偏南急流自南向北进入贵州中部,风速最大达到了14 m/s,整个贵州省的温度露点差均小于5℃,处于高湿环境;地面图上在贵州省西北部,贵阳市北部地区有明显的地面辐合线存在;探空图显示,贵阳站08时K指数为32.4,SI指数-0.5,CAPE指数为432.4 J/kg,不稳定能量充沛,地面比湿为15 g/kg,850 hPa比湿为13 g/kg,水汽条件较好,探空图(图略)为喇叭形开口,下湿上干,500 hPa以下风向随高度顺时针旋转,暖平流显著;从08时中尺度分析可见,位于低空急流左侧,500 hPa及700 hPa槽线切变线前部的整个贵州省中西部都是对流天气最有可能发生的重点区域,本文将重点研究造成对流触发的关键因素以及对爬线的移动路径进行追踪分析。

## 4. 爬线诊断分析

### 4.1. 动力条件

500 hPa阶梯槽及700 hPa切变线9日08时(图2)位于川渝交界和云贵交界位置,贵州地区处于槽前,而850 hPa上的切变线和地面的辐合线均位于贵州省西北部地区,可统称为边界层辐合线,呈准东西向,辐合中心气旋性曲率最大处位于毕节西部。如前文所述,贵州中西部整体处于高湿高能区,不稳定能量及低层水汽充沛,大气层结有利于强对流天气的发生。9日12时左右,如图3(a)所示,500 hPa阶梯槽南段位于贵州省毕节西部至滇东,700 hPa切变线已迅速从滇东(图2)移动至毕节西部(图3(b)),但贵州大部仍处于槽前,850 hPa显示(图3(c)),低空急流控制了贵州省东部地区,偏南风延展到黔东北,切变线此时位于毕节南部,结合图3(d)可见,地面辐合线位置相较于850 hPa切变线稍显偏南,二者均呈东西向,此时卫星云图上对流云图已经处于初生阶段,云团的前沿位于边界层辐合线以北,对流云图初生时的形态呈准东西向。综上分析可知,在对流初生时,贵州大部仍然处于槽前的暖区中,高空槽及切变线位于毕节西部至滇东一带,初生的对流云系与边界层辐合线的位置高度重合,因此可以推断,边界层辐合线是造成高空槽前暖区高湿高能环境下对流天气发生的主要触发机制。





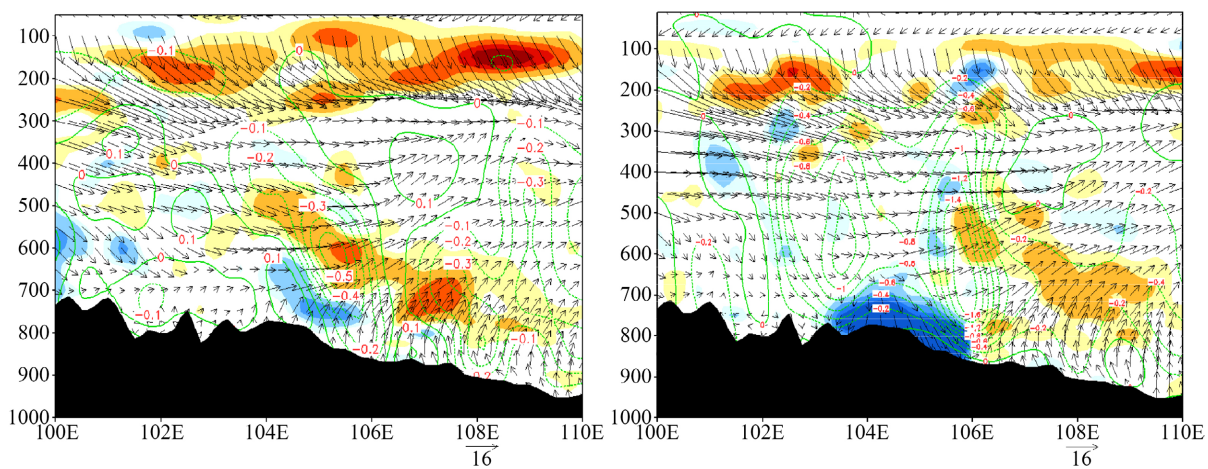
**Figure 3.** 12:00, 09 May 2021 (a): 500 hPa geopotentialheight (contour line, unit: dagpm), wind field (colorfilled: wind speed; wind vector unit: m/s), trough (blue curve); (b): 700 hPa geopotentialheight (contour line, unit: dagpm), wind field (colorfilled: wind speed; wind vector, unit: m/s), shear line (brown curve); (c): 850 hPa geopotentialheight (contour line, unit: dagpm), wind field (colorfilled: wind speed; wind vector, unit: m/s), shear line (red curve); (d): Himawari 8 infrared satellite image tbb (colorfilled, unit: K), mean sea level pressure (contour line, unit: hPa), ground wind field (wind vector, unit: m/s), convergence line (black curve)

**图 3.** 2021 年 5 月 9 日 12:00 (a): 500 hPa 高度场(等值线, 单位: dagpm)、风场(填色: 全风速; 风矢, 单位: m/s)、槽线(蓝色曲线); (b): 700 hPa 高度场(等值线, 单位: dagpm)、风场(填色: 全风速; 风矢, 单位: m/s)、切变线(棕色曲线); (c): 850 hPa 高度场(等值线, 单位: dagpm)、风场(填色: 全风速; 风矢, 单位: m/s)、切变线(红色曲线); (d): 葵花 8 红外卫星云顶亮温(填色, 单位: K)、海平面气压场(等值线, 单位: hPa)、地面风场(风矢, 单位: m/s)、辐合线(黑色曲线)

### 4.2. 物理量诊断

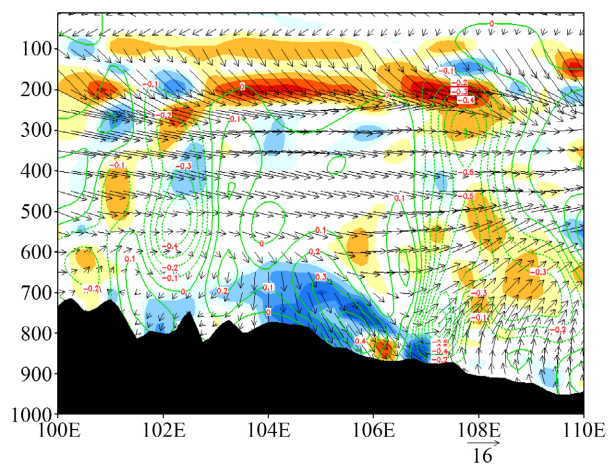
如前文所述, 边界层内的辐合线是造成 5 月 9 日爬线天气对流初发时刻的主要触发机制, 对物理量的诊断分析如图 4 所示, 9 日 08 时高空槽整体还位于 105°E 附近, 106°E~108°E 所在的贵州省大部处于槽前, 600 hPa 以下暖平流显著(图 4(a)), 但值得注意的是, 此时在 104°E~105°E 之间 600 hPa~800 hPa 之间有明显的冷平流入侵, 图 4(d)所示的相对湿度和水汽通量散度显示, 此时并无较大的水汽辐合区域, 到了 9 日 12 时对流初生时, 温度平流(图 4(b))显示, 106°E 以西的近地面出现强冷平流区域, 400 hPa~600 hPa 之间也有明显的弱冷平流存在, 边界层以内的冷平流入侵相较于高空略微领先, 这说明, 虽然边界层辐合线是对流初生的主要触发机制, 但中层弱冷平流的入侵也几乎同时影响到了对流天气的发生和发展, 此时水汽通量散度的负值极大区(图 4(e))正好位于 106°E 附近, 达到了 $-16 \cdot 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 低层水汽强烈辐合, 到了 16 时, 冷平流一方面继续东进, 另一方面随着高空槽的东移, 冷平流的厚度也逐渐增加, 图 4(c)显示冷平流不仅水平跨度更大, 垂直方向上也延展到了 600 hPa 附近, 而图 4(f)则显示, 尽管冷平流强势推进, 但水汽辐合的中心区域却并未扩大, 而是快速移动到了 108°E 附近, 这说明对流天气主要发生在冷暖平流交界的倾斜狭窄面, 东西向的跨度有限, 这也是爬线天气的典型特征之一。

前文从爬线天气的动力机制和物理量方面进行了诊断分析, 初步表明这次春季爬线天气主要是初发在暖区高湿高能环境下, 受边界层辐合线和中层弱冷平流入侵共同触发的强对流天气, 其发生发展迅速, 垂直剖面切片分析可见其在东西方向上的跨度较小, 下面将针对爬线的移向和移速进行测算和分析。

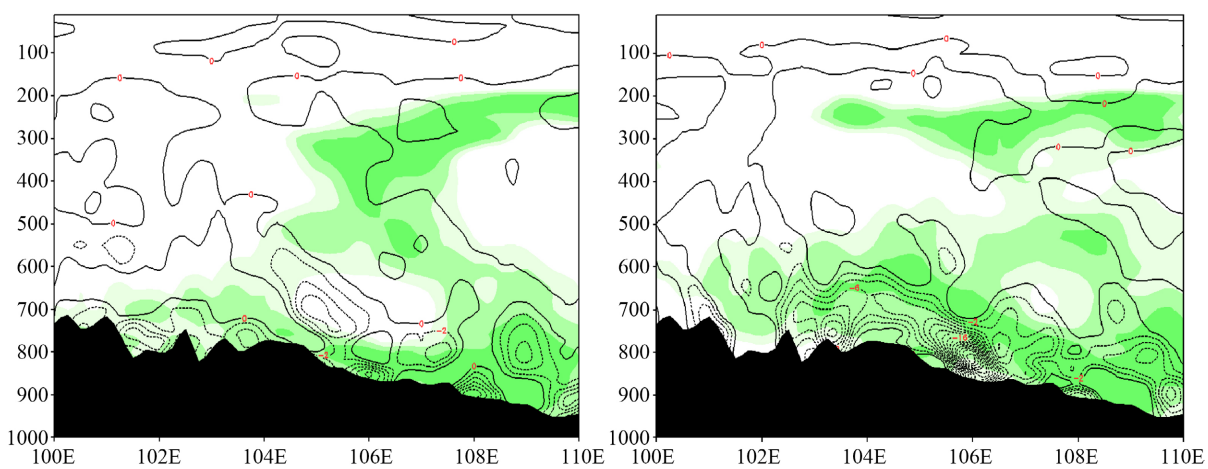
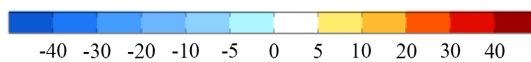


(a)

(b)

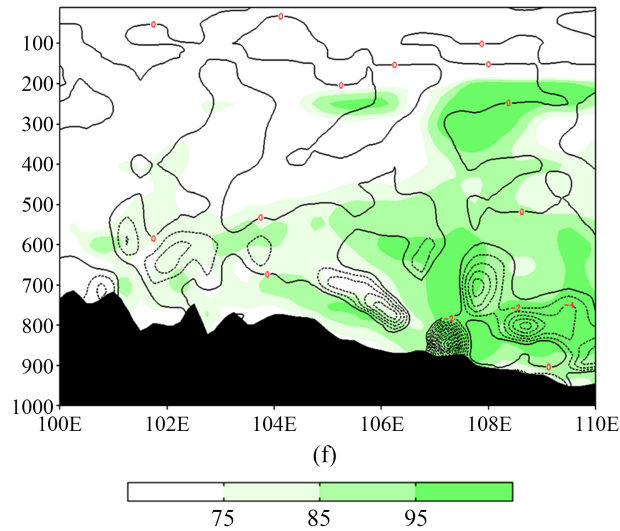


(c)



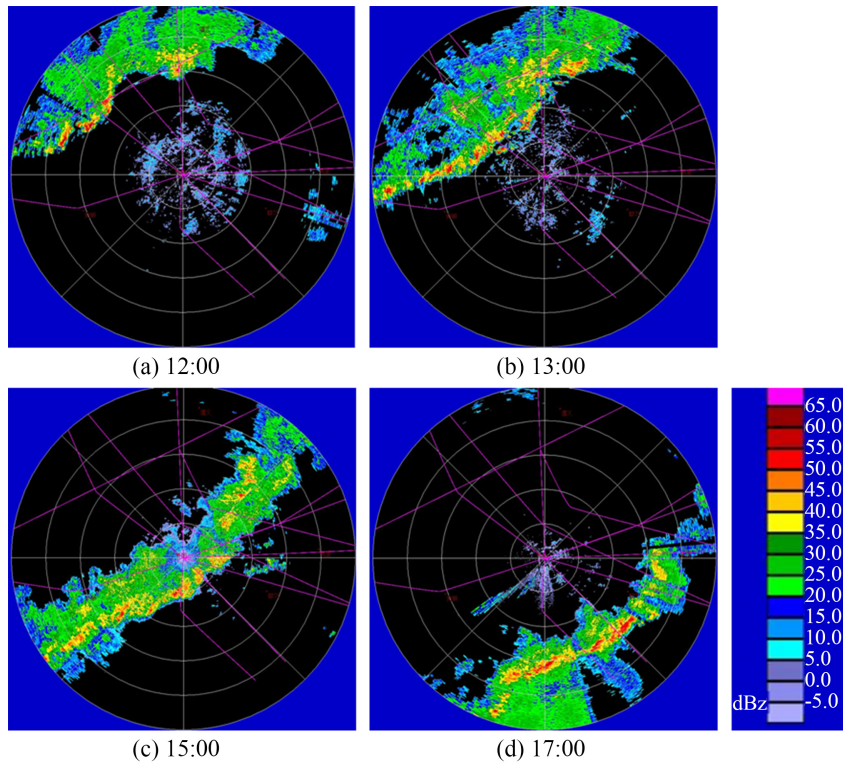
(d)

(e)



**Figure 4.** Temperature advection (colorfilled, unit:  $10^{-5} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ ), wind field (wind vector, unit: m/s), vertical velocity (green contour line, unit: Pa/s) along  $27^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$ : (a) 08:00, May 9, 2022; (b): 12:00, May 9, 2022; (c): 16:00, May 9, 2022; Relative humidity (colorfilled, unit: %), water vapor flux divergence (black contour line, unit:  $10^{-8} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) along  $27^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$ : (d): 08:00 May 9, 2022; (e): 12:00 May 9, 2022; (f): 16:00 May 9, 2022

**图 4.** 沿  $27^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$  垂直剖面, 温度平流(填色, 单位:  $10^{-5} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ )、风场(风矢, 单位: m/s)、垂直速度(绿色等值线, 单位: Pa/s): (a): 2022 年 5 月 9 日 08:00; (b): 2022 年 5 月 9 日 12:00; (c): 2022 年 5 月 9 日 16:00; 相对湿度(填色, 单位: %)、水汽通量散度(黑色等值线, 单位:  $10^{-8} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ): (d): 2022 年 5 月 9 日 08:00; (e): 2022 年 5 月 9 日 12:00; (f): 2022 年 5 月 9 日 16:00



**Figure 5.** Guiyang Airport Doppler weather radar PPI (elevation  $2.5^{\circ}$ ) (a): 12:00, May 9, 2022; (b): 13:00 May 9, 2022; (c): 15:00 May 9, 2022; (d): 17:00 May 9, 2022

**图 5.** 贵阳机场多普勒气象雷达 PPI (仰角  $2.5^{\circ}$ ) (a): 2022 年 5 月 9 日 12:00; (b): 2022 年 5 月 9 日 13:00; (c): 2022 年 5 月 9 日 15:00; (d): 2022 年 5 月 9 日 17:00

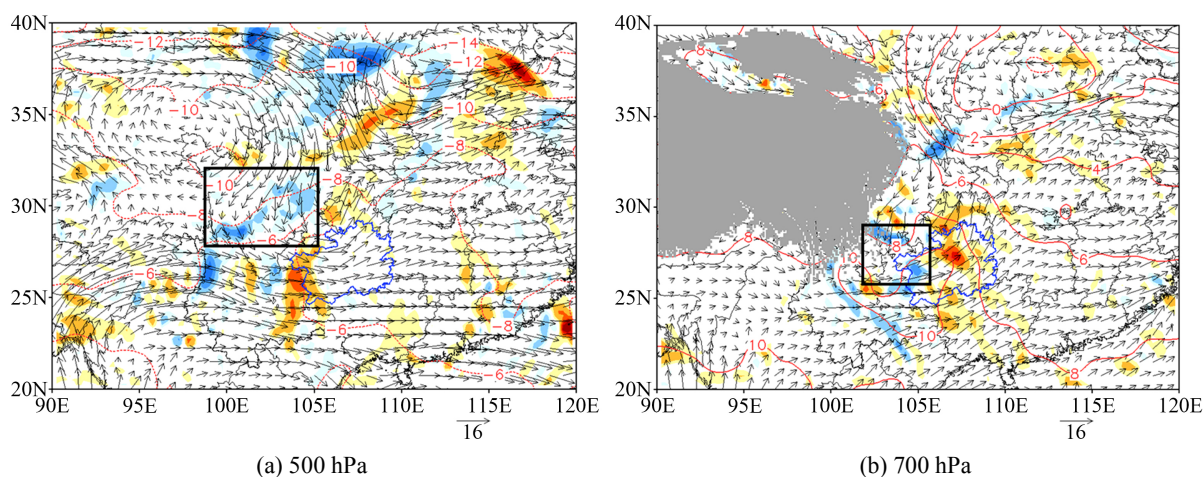
### 4.3. 飚线的移向和移速

如图 5(a)所示, 5月9日 12:00 是对流初生时刻, 位置为贵阳市偏北到西北方向 90~120 公里处, 尽管卫星云图显示对流云图呈准东西向(图 3(d)), 但多普勒气象雷达则能看到回波的强中心带已呈东北-西南向, 不过此时对流天气呈多处单发状态, 还没有完全组织成线状模式, 然而仅仅过了一小时, 到了 13:00, 如图 5(b)所示, 此时雷达回波已呈现出完整的飚线特征, 长度超过了 200 公里, 宽度不足 10 公里, 而且迅速从西北向东南方向移动了超过 30 公里, 15:00 时(图 5(c))飚线就已经过境到了贵阳市东南方向 20~30 公里处, 长度进一步增加到接近 300 公里, 雷达回波强中心带的宽度却仍然不足 10 公里, 到了 17:00 时, 飚线系统继续加速向东南方向移动到了离贵阳市 90 公里处。仅经粗略的测算就可以得知, 此次春季飚线天气的平均移动速度达到了 35 km/h, 最大时速则超过了 40 km/h, 移动方向呈现出一致的西北-东南向, 结合图 3 可知, 12:00~13:00 之间, 500 hPa 高空槽位置落后于飚线系统, 此时贵阳市西北方向 90 公里处仍为偏西气流, 风速为 14 米/秒(50 Km/h), 700 hPa 偏西到西北气流, 风速为 9 米/秒(32 km/h), 由此可推测此次春季飚线的移向更接近于 700 hPa 上的引导气流, 而移动速度则受到中层气流(700 hPa~500 hPa)的合成影响。

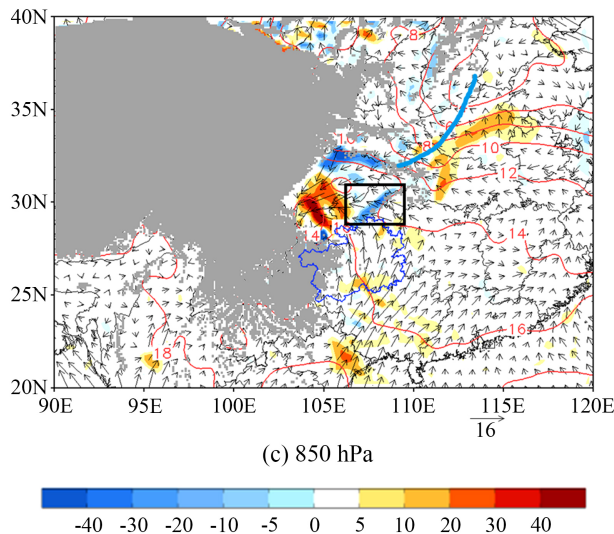
另外, 此次飚线天气虽然造成了大风冰雹等极端灾害天气, 但并没有在发展过程中形成超级单体风暴, 而对于超级单体风暴来说, 其传播和移动方向总是偏向于环境风的右侧, 此次春季飚线天气的移动方向则和 700 hPa 的引导气流保持一致。

### 5. 冷平流来源

前文对动力机制、物理量诊断和飚线的移向和移速进行了分析, 但尚有一个问题亟待解决, 那就是此次春季飚线天气过程中层弱冷平流和边界层内的强冷平流的来源。在高湿高能的暖区结构长时间维持的情况下, 冷平流的侵入无疑是造成对流触发的第一要素, 尤其是对于春季强对流天气来说, 此时热力不稳定还不足以导致纯粹的热力性对流天气, 对无论是中层还是边界层内的冷平流进行溯源分析, 可以为今后同类型天气的预报和预警服务提供有力的支撑。如图 6(a)所示, 5月9日 08 时, 500 hPa 高空槽所在的区域(图 3(a))有明显的冷平流集聚, 700 hPa (图 6(b))上在切变线附近同样存在冷平流集聚区, 整体范围相较于 500 hPa 更小, 但位置有一定程度的重叠, 而 850 hPa (图 6(c))上在 500 hPa 及 700 hPa 存在冷平流的关键区域并无明显冷平流活动, 只在贵州省北部川渝交界处有狭窄的带状冷平流区域, 结合温度场来看, 9 日 08 时 700 hPa 和 850 hPa 上都没有明显的等温线积聚, 锋区特征不明显, 850 hPa 的偏南急流此时完全控制了贵州中东部, 南风势力翻越贵州北部山区进入了四川盆地, 近地面冷空气活动并不明显。







**Figure 6.** 08:00, May 9, 2022 temperature advection (colorfilled, unit:  $10^{-5} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ ), wind field (wind vector, unit: m/s), temperature field (red contour line, in  $^{\circ}\text{C}$ ), cold advection key area (black box) (a): 500 hPa; (b): 700 hPa; (c): 850 hPa; gray shaded is the terrain height

**图 6.** 2022 年 5 月 9 日 08:00 温度平流(填色, 单位:  $10^{-5} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ )、风场(风矢, 单位: m/s)、温度场(红色等值线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、冷平流关键区(黑色方框) (a): 500 hPa; (b): 700 hPa; (c): 850 hPa; 灰色阴影为地形高度

对于对流初发后边界层内的强冷平流区域(图 4), 一个可能的推测是来自于强对流风暴所携带的下沉气流所致, 近地面的强冷平流区和强天气落区在时间上高度重合, 然而随着高空槽切变线的继续东移, 飏线系统也快速向东南方向移动, 高空槽后的偏北气流不断下沉, 使得近地面的冷平流区无论是在水平尺度上还是垂直方向上都进一步扩大, 然而此较大范围的冷平流区域并不出现在飏线前沿, 而是位于飏线移出后的广大区域, 因此结合前文分析可以合理推测, 此次春季飏线冷平流的入侵主要来自中层(500 hPa~700 hPa)高空槽和切变线所携带的下沉气流。

## 6. 结论

本文利用卫星、雷达、高空及地面常规观测资料、ERA5 再分析资料对 2022 年 5 月 9 日贵州一次春季飏线天气进行了综合分析, 得出主要结论如下:

1) 此次飏线天气初发于高湿高能的暖区, 在不稳定能量充足和水汽充沛的情况下, 边界层辐合线及中层弱冷平流的入侵共同触发了对流天气的产生。

2) 此次飏线天气的移动方向与 700 hPa 上的引导气流方向一致, 而移动速度则受到中层气流(700 hPa~500 hPa)的合成影响。

飏线所带来的强对流区在其下方产生因下沉气流而导致的冷平流并不一定揭示出近地面存在显著的冷空气活动, 通过对较大范围内冷平流的溯源发现, 此次飏线天气并无明显的锋生特征, 近地面强冷平流出现时刻与对流天气发生时刻高度一致, 并且在飏线系统过境之后才因高空槽后的偏北下沉气流所致开始扩大范围, 因此并非触发飏线天气的关键因素, 而上游地区高空槽及切变线后部的偏北气流所携带的弱冷平流是触发对流天气的关键因素之一。

## 参考文献

- [1] 朱娟, 张立凤, 张铭. 盛夏苏北地区一次飏线过程的数值模拟研究[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(1): 15-23.
- [2] 吴福浪, 赵成华, 陶俞锋. 浙江“3·4”暖区飏线环境场和雷达回波特征分析[J]. 浙江气象, 2021, 42(4): 8-12.

- 
- [3] 屈梅芳, 俞小鼎, 农孟松, 等. 一次弱垂直风切变环境下飑线发展维持的成因分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(5): 466-473.
- [4] 王智, 邹兰军. 一次长三角地区飑线过程的数值预报分析[J]. 气象科学, 2022, 42(6): 420-426.
- [5] 杨吉, 郑媛媛, 夏文梅, 等. 东北冷涡影响下江淮地区一次飑线过程的模拟分析[J]. 气象, 2020, 46(3): 357-366.
- [6] 陈明轩, 王迎春. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 371-386.
- [7] 赵晨阳, 徐国强. 尺度适应的对流参数化方案对一次华南飑线模拟的影响[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 297-314.
- [8] 周明飞, 熊伟, 杜小玲. 贵州近 10 年短时强降水统计分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2016, 31(4): 425-432.
- [9] 李力, 万雪丽, 齐大鹏, 等. 贵州省雷暴大风时空分布及对流参数特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(2): 1-8.
- [10] 许可, 杜小玲, 周文钰, 等. 贵州一次暖区飑线大风与大冰雹的雷达结构特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(3): 65-72.
- [11] 周明飞, 杜小玲, 罗敬, 等. 贵州“5.15”极端风雹天气过程的环境场合雷达回波特征[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(2): 158-166.
- [12] 王兴菊, 周文钰, 蒙军, 等. 安顺市一次飑线天气过程的诊断分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(5): 11-18.