郭云云,罗辉,青泉,等,2024.2022 年春季四川盆地一次飑线的环境条件与回波特征[J]. 气象,50(12):1480-1494. Guo Y Y, Luo H, Qing Q, et al,2024. Environmental conditions and radar echo characteristics of a squall line in Sichuan Basin in spring 2022[J]. Meteor Mon,50(12):1480-1494(in Chinese).

# 2022 年春季四川盆地一次飑线的 环境条件与回波特征\*

郭云云<sup>1,2</sup> 罗 <sup>x</sup><sup>1,2</sup> 青 <sup>x</sup><sup>1,2</sup> 安琳莉<sup>1,2</sup> 韦 玮<sup>3</sup>

1 四川省气象台,成都 610072
 2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072
 3 成都市气象台,成都 610030

提要:2022年4月11日夜间,四川盆地出现一次飑线天气过程,造成安岳12级以上雷暴大风。由于对飑线系统快速发展机理认识不足,大风和短时强降水预报均出现较大偏差。基于多源观测资料和ERA5再分析资料,对该次飑线过程的环流背景、回波演变及对流系统维持消亡原因进行诊断分析。结果表明:飑线发生在500hPa高空槽前和700hPa南风急流的耦合区内,高层辐散、低层辐合在飑线形成前显著增强,为风暴发展提供了动力条件;盆地中南部具有超过1000J·kg<sup>-1</sup>的对流有效位能,大于15m·s<sup>-1</sup>的深层和浅层垂直风切变,代表站3.8km高度的湿球0℃层和7km高度的-20℃层,达6.88℃·km<sup>-1</sup>的垂直温度递减率,探空廓线的"喇叭口"形态等环境特征,尤其是垂直风切变、中层干层和对流下沉有效位能等环境要素接近或超过统计极值,为飑线的合并发展、强雷暴大风的发生提供了有利的环境条件。飑线北段对流系统受龙泉山脉地形、冷池和地面辐合线共同作用而触发、发展,南段对流系统则主要受低层动力作用抬升发展,两段线状对流系统东移至盆地中部高能高湿地区后,在地面辐合线、强冷池和700hPa急流的共同作用下,合并增强发展为镶嵌有超级单体和弓形回波的南北向飑线系统。飑线形成前的超级单体风暴和飑线成熟阶段都具有回波悬垂、弱回波区、后侧入流、中层径向辐合等结构特征。对流层中层后侧入流、干夹卷形成的下沉气流使得超级单体风暴和冷池的移速超过其他部分而形成弓形回波,下击暴流产生的大风和地面降水造成的冷池传播速度显著强于0~3km垂直风切变则是飑线快速消亡的重要原因。

关键词:飑线,弓形回波,冷池,垂直风切变

**中图分类号:** P458 文献标志码: A

**DOI**: 10.7519/j.issn. 1000-0526. 2024. 080502

## Environmental Conditions and Radar Echo Characteristics of a Squall Line in Sichuan Basin in Spring 2022

GUO Yunyun<sup>1,2</sup> LUO Hui<sup>1,2</sup> QING Quan<sup>1,2</sup> AN Linli<sup>1,2</sup> WEI Wei<sup>3</sup>

1 Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072

2 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

3 Chengdu Meteorological Observatory, Chengdu 610030

**Abstract**: A squall line occurred in Sichuan Basin on 11 April 2022, causing extreme thunderstorm gale  $(37.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$ . Due to the poor understanding of the rapid development mechanism of the squall line, there were large deviations in the forecast of short-time severe rainfall and gale during the squall line

<sup>\*</sup> 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目重点专项(SCQXKJYJXZD202101、SCQXJZD202102-09)、中国气象局复 盘总结专项(FPZJ2023-110)、风云卫星应用先行计划(FY-APP-ZX-2022.0209)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J013)和国家自然 科学基金项目(42105153)共同资助

<sup>2023</sup>年12月31日收稿; 2024年9月15日收修定稿

第一作者:郭云云,主要从事天气预报及相关研究.E-mail:244052395@qq.com

通讯作者:罗辉,主要从事天气预报及相关研究.E-mail:623885263@qq.com

process. Based on multi-source observation data and ERA5 reanalysis data, the circulation background and echo evolution as well as the maintenance and extinction of the squall line are analyzed. The results are as follows. The squall line occurred in the mutual coupling area of upper trough at 500 hPa and the southerly jet at 700 hPa. Upper-level divergence and low-level convergence were significantly enhanced before the squall line formed, which provided dynamic conditions for the development of the storm. In the southcentral part of Sichuan Basin, the convective available potential energy (CAPE) was greater than 1000 J •  $kg^{-1}$ , the deep and shallow vertical wind shears were greater than 15 m  $\cdot$  s<sup>-1</sup>, the height of wet bulb temperature 0°C was 3.8 km, the height of -20°C was 7 km, the vertical temperature lapse rate was 6.88°C  $\cdot$ km<sup>-1</sup> and a "bell mouth" existed in temperature humidity profile below lifting condensation level. Especially, the vertical wind shear, mid-level dry layer and downdraft CAPE approached or exceeded the extreme values, which provided favorable environmental conditions for the merging and development of the squall line and the occurrence of severe thunderstorms and gale. Convections in the northern segment of the squall line were triggered, developing under the combination influence of the terrain of Longquan Mountains, cold pool and surface convergence line. In the south section, convections were uplifted by the dynamic action of the lower level. Due to the 700 hPa jet stream, surface cold pool and convergence line, two sections of linear convection were intensified and merged into a north-south squall line system with super-cell storms and bow echoes when moving eastward to the high energy and humidity areas in central basin. Super-cells before the formation of squall line and the echoes of the mature squall line both had overhang echoes, weak echo zones, rear inflow and mid-level radial convergence. Downdraft formed by the rear inflow and dry curl in the middle troposphere made the supercell storm and cold pool move faster than other parts. Then, a bow echo was formed. Because of the gale of downburst and precipitation, propagation velocity of the cold pool was significantly stronger than the 0-3 km vertical wind shear, which was an important cause for the rapid extinction the squall line.

Key words: squall line, bow echo, cold pool, vertical wind shear

## 引 言

俞小鼎等(2020)定义中国飑线为连续或准连续 的多单体线状风暴 40 dBz 以上部分回波长度≥ 100 km,长宽比大于 5:1,生命史不少于 1 h,在其 生命史中至少有 3 个国家级气象站或 8 个区域级气 象站达 17 m・s<sup>-1</sup>以上雷暴大风。飑线作为高度组 织化的强对流天气系统,过境时常常引起风速突变、 气温陡降、气压涌升等(章国材,2011),从而造成强 风、冰雹、龙卷及短时强降水等严重灾害性天气(俞 小鼎等,2012)。因其生命史短、尺度比较小、突发性 强,一直是预报的难点,探讨其发展演变过程对防灾 减灾有重要作用。

早在 20 世纪 50 年代,飑线便受到科学家们的 广泛关注,但飑线的发展维持机制尚未完全明了。 Newton(1950)提出在存在垂直风切变时,低层辐 合、高层辐散的配置有利于飑线在顺着垂直风切变 的方向维持发展,而后 Fujita(1955)指出环境垂直 风切变是其发展演变的关键因子。Rotunno et al (1988)通过探究不同水平垂直风切变的强度对飑线 发展的影响发现,低层强切变、高层弱切变有利于飑 线发展,垂直风切变和冷池的关系会影响飑线的发 展,即著名的 RKW 理论。当然 RKW 理论也受到 一些质疑,如 RKW 理论过分简化了飑线过程 (Lafore and Moncrieff, 1989; Garner and Thorpe, 1992)、忽略了深层的垂直风切变(Coniglio and Stensrud, 2001; Evans and Doswell, 2001) 等。 Weisman and Rotunno(2004)针对这些质疑对原有 理论进行了一些修正,飑线的生命史和强度不仅对 地面至2.5 km 之间的垂直风切变最为敏感,某些情 况下,更取决于地面至5 km 之间的垂直风切变。 国内也有许多学者对 RKW 理论进行试验和检验 (陈明轩和王迎春,2012;陈涛等,2020;彭霞云等, 2022),均验证了 RKW 理论在飑线发展中的重要作 用。

我国飑线发生的大尺度环流背景主要有高空槽 后型、高空槽前型、高压后部型、东风波型或台风倒 槽型,中低层的切变线、冷锋、低涡等都可以触发飑 线的生成和发展(丁一汇等,1982)。近年来,国内许 多学者都对飑线进行过详细诊断,并得到一些重要 结论。诸如冷池和垂直风切变之间的水平涡度不平 衡导致由地面辐合线触发的弱飑线过程的发展(杨 吉等,2020),低层垂直风切变和冷池传播速度的比 值与冷涡底部飑线线状对流发展密切相关(彭霞云 等,2022)等。飑线研究通常以江淮流域、华北和东 北地区的高空槽后型(冷涡南部)居多(郑媛媛等, 2014;杨珊珊等,2016;公衍铎等,2019;王婷婷等, 2023),但也有少量研究集中在西南地区高空槽前型 暖区飑线。这一类型飑线的重要特征是低空急流发 展,南支槽前高低空急流为可为强对流雹暴提供水 汽和动量条件(张腾飞等,2018),暖平流和湿舌向北 伸展,建立强位势不稳定,高冷低暖的配置及冷池和 地面风的相互作用对维持暖区飑线的发展有重要作 用(翟丽萍等,2018),中低层强垂直风切变也可以影 响其组织和发展,当垂直风切变较强时,飑线的生命 史则较长(丁一汇等,1982)。

2022年4月11日夜间,四川盆地遭遇了一次 飑线天气过程,给安岳带来了自有气象记录以来的 最大风速(37.4 m·s<sup>-1</sup>),如此强度的大风在盆地较 为少见(费海燕等,2016;康岚等,2018;龙柯吉等, 2020)。由于盆地飑线发生较少,研究较为欠缺,对 极端大风形成的环境条件和飑线系统快速发展机理 认识并不充分,在资阳、内江等地的短时强降水和大 风预报中均出现了较大偏差,因此有必要对该类过 程进行详细的诊断研究,以期为提升本地飑线预报 预警能力提供参考依据。

## 1 资料和方法

本文使用资料时间段为 2022 年 4 月 11—12 日。实况资料包括:(1)四川地面气象观测站数据, 包含降水量、风速风向、气压、气温、湿度、闪电等要 素;(2)宜宾站、沙坪坝站的探空数据;(3)成都多普 勒天气雷达逐 6 min 体扫资料、SWAN 拼图资料; (4)FY-4A 云顶亮温资料;(5)再分析资料为欧洲中 期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA5 逐小时数 据,空间分辨率为 0.25°×0.25°,垂直方向为 36 层。

讨论冷池边界扩张速度 C(单位:m·s<sup>-1</sup>)时参

考陈涛等(2020)的简化公式:

$$C^2 = \frac{2\Delta p}{\bar{\rho}} \tag{1}$$

式中: $\Delta p$  为冷池内外气压差(单位:hPa), $\bar{\rho}$  为地面 平均空气密度(单位:kg·m<sup>-3</sup>)。选取冷池中心和 前沿 3~4 个气象站观测的气压数据,估计冷池内外 气压变化并计算冷池密度流传播速度。

## 2 天气实况

2022年4月11日20:00(北京时,下同)至12 日 08:00,四川盆地出现了一次大范围强对流天气 过程。上游线状对流自西向东移动,在翻越龙泉山 脉后,北段线状对流强烈发展并与盆地南部北上的 多单体雷暴合并、组织化,最终在22:00 左右发展成 镶嵌有弓形回波的强飑线,随后快速减弱消失 (图 1)。受其影响,11 日 20:00 至 12 日 02:00 盆地 南部和中部出现了冰雹、短时强降水及雷暴大风天 气,累计降水量在 50 mm 以上的站点达 192 个站, 雨量分布不均;小时雨强在 50 mm • h<sup>-1</sup>以上的有 13个站,最大雨强为 76.5 mm • h<sup>-1</sup>(图 2a)。8 级 以上有105个站,10级以上有14个站,自贡富顺车 桥村和资阳安岳分别在 21:03 和 21:57 出现瞬时风 速达 36.9 m • s<sup>-1</sup> 和 37.4 m • s<sup>-1</sup> 的强雷暴大风 (图 2b),安岳大风破当地有记录以来的极值,局地出 现冰雹。以安岳站为例(图 2c),21:44-21:48 飑线 弓形回波前沿影响该站,风速迅速增加至 25.1 m · s<sup>-1</sup>,气温显著下降,21:50-21:56,受弓形回波主体



图 1 2022 年 4 月 11 日 20:00-23:00 雷达组合 反射率因子(等值线,≥40 dBz)时间演变 Fig. 1 Time evolution of radar composite reflectivity factor (contour, ≥40 dBz) from 20:00 BT to 23:00 BT 11 April 2022



图 2 2022 年 4 月(a,b)11 日 20:00 至 12 日 02:00 四川盆地(a)6 h 累计降水量和(b)地面极大风风速分布, (c)11 日 21:00—23:00 安岳站 1 min 2 m 气温、2 m 露点温度、地面与 950 hPa 气压差值、地面极大风风速时间序列 Fig. 2 Distribution of (a) 6 h accumulated precipitation and (b) surface extreme wind speed in Sichuan Basin from 20:00 BT 11 to 02:00 BT 12 April, (c) time-series of minutely 2 m temperature, 2 m dew-point temperature, pressure difference between surface and 950 hPa, surface extreme wind speed at Anyue Station during 21:00—23:00 BT 11 April 2022

(反射率因子达 65 dBz 以上)影响,风速跃增至 37.4 m·s<sup>-1</sup>,气温持续下降至 15.4℃,气压涌升, 并产生冰雹,而后弓形回波主体过境,产生降水,最 大 10 min 降水量达 20 mm(22:00-22:10),大风先 于降水影响该站。此次飑线天气具有移速快、风力 强、灾害重的特点,造成直接经济损失高达上亿元。

## 3 天气形势和环境场特征分析

#### 3.1 天气形势与动力特征

11日 20:00,500 hPa 高度场上(图 3a)川西高 原东部至盆地西部有一高空槽,盆地处于槽前强劲 的西南风气流之中,槽后有弱冷平流侵入。700 hPa 上盆地西部有切变线维持(图 3b),其东侧强盛的西 南低空急流从孟加拉湾沿云贵地区向盆地南部和中 部不断输送水汽。21:00—22:00,南风急流带加宽 且风速加大,而后北风增强,急流东移南退,至12日 01:00,盆地中部形成西南涡并向东北部移动 (图略)。850 hPa上(图 3c)盆地西部受偏北气流影 响,存在显著冷平流,宜宾、泸州交界地区涡旋中心 稳定维持至 03:00 后向东北方向移动至重庆南部。 综上,此次飑线发生在 500 hPa 高空槽前和 700 hPa 南风急流的耦合区内,飑线增强区域与 700 hPa 急 流出口左侧区域对应,水汽、不稳定能量的输送为飑 线的快速发展提供了有利条件。

飑线形成前后的动力垂直分布特征显示,11日 21:00(图4a),30.5°N以南中低层辐合、高层辐散特



- 注: 於巴阴影为相应向良压地形遮蔽。
- 图 3 2022 年 4 月 11 日 20:00(a)500 hPa,(b)700 hPa,(c)850 hPa 位势高度(黑色等值线, 单位:dagpm)、风场(风羽)、风速(填色)和等温线(红色等值线,单位:℃) Fig. 3 The geopotential height (black contour, unit: dagpm), wind field (barb), wind speed (colored) and temperature (red contour, unit: ℃)
  - at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa at 20:00 BT 11 April 2022



Fig. 4 Vertical profile of divergence (colored), vorticity (contour, unit:  $10^{-5}$  s<sup>-1</sup>) and horizontal wind field (barb) along 105. 35°E at (a) 21:00 BT and (b) 22:00 BT 11 April 2022

征较上一时刻明显增强,高低层辐合辐散中心绝对 值均可达  $2 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup>及以上,有利于强垂直上升运 动发展。30.5°~32°N 区域内 850 hPa 以下则为辐 散区,这与近地面层偏北气流有关。22:00(图 4b), 由于低层北风的进一步增强并东移南压,850 hPa 以下的辐散区也南压至 29°N 附近,30.5°N 以南上 空辐合、辐散有所减弱。从涡度变化来看,辐合区几 乎与正涡度相对应,21:00—22:00,30.5°N 以南的 正涡度中心值较 20:00 增加至 2.4×10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>,动力 强迫明显增强,有利于飑线的合并发展。

#### 3.2 环境场特征

11 日 18:00 左右,四川盆地中南部低层湿度条件 较好,850 hPa 比湿达 12 g·kg<sup>-1</sup>(图 5a),但 700 hPa 比 湿只有 6~8 g·kg<sup>-1</sup>。但 20:00 开始,随着 700 hPa 急流增强,均有西南向水汽输送,低层水汽通量辐合 最强可达  $1.5 \times 10^{-7}$  g·cm<sup>-2</sup>·hPa<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>,盆地 中、南部低层水汽辐合最为显著(图 5a)。整层大气 可降水量(PWAT)也从 18:00(图 5b)的 35 mm 左右增至 20:00(图略)的 40 mm 以上。850 hPa 和



图 5 2022 年 4 月 11 日(a)18:00 850 hPa 与 500 hPa 的假相当位温差(红色等值线,单位:℃)、850 hPa 比湿 (绿色等值线,单位:g・kg<sup>-1</sup>)和 20:00 700 hPa 水汽通量散度(阴影,单位:10<sup>-7</sup> g・cm<sup>-2</sup>・hPa<sup>-1</sup>・s<sup>-1</sup>), (b)18:00 CAPE(黑色等值线,单位:J・kg<sup>-1</sup>)、CIN(阴影)和整层大气可降水量(绿色等值线, 单位:mm),(c)20:00 1000~500 hPa(阴影)和 1000~700 hPa(等值线,单位:m・s<sup>-1</sup>)垂直风切变
Fig. 5 (a) Difference of pseudo-equivalent temperature (red contour, unit: ℃) between 850 hPa and 500 hPa, 850 hPa specific humidity (green contour, unit: g・kg<sup>-1</sup>) at 18:00 BT, and 700 hPa water vapor flux divergence (shaded, unit: 10<sup>-7</sup> g・cm<sup>-2</sup>・hPa<sup>-1</sup>・s<sup>-1</sup>) at 20:00 BT, (b) CAPE (black contour, unit: J・kg<sup>-1</sup>), CIN (shaded) and vertically integrated atmospheric precipitable water (green contour, unit: mm) at 18:00 BT, and (c) 1000-500 hPa (shaded) and 1000-700 hPa (contour, unit: m・s<sup>-1</sup>) vertical wind shear at 20:00 BT 11 April 2022

500 hPa 的假相当位温差( $\Delta \theta_{se}$ )表明,除盆地西部 外,其余地区差值均在 9℃以上,中南部偏东位置可 达 24℃,层结非常不稳定。与西部地区相比,东部 地区更有利于对流发展(图 5a)。午后,盆地西南 部、中部、南部对流有效位能(CAPE)逐渐增加,至 18:00(图 5b),区域内 CAPE 均超过 1000 J•kg<sup>-1</sup>, 最大值可达 2500 J•kg<sup>-1</sup>,后因西南部降水产生,能 量耗散,但 20:00 盆地中部、南部偏东位置仍然维持 在 1000 J•kg<sup>-1</sup>以上,局地可达 1500 J•kg<sup>-1</sup> (图略);此时对流抑制能量普遍在 100~200 J• kg<sup>-1</sup>,表明上述区域较有利于对流的发生发展。 19:00,代表站安岳和宜宾的湿球 0℃层高度分 别为 3.8 km、4.1 km, - 20℃ 层高度分别为 7.0 km、6.9 km,温度直减率分别为 6.88 ℃・ km<sup>-1</sup>、5.1 ℃・km<sup>-1</sup>,温湿廓线形态呈"上干下湿" 的喇叭口形状(图略),两地合适的湿球 0℃层和 -20℃ 层高度均有利于冰雹的发展,安岳较大的温 度直减率更有利于大风天气的发生。此时两地探空 850 hPa 以下风速均较小,尤其是盆地中部,但 20:00 开始,因 700 hPa 上开始有 12 m・s<sup>-1</sup>的急流 发展(图 3b),因此有明显的水汽辐合。



图 6 为安岳、宜宾及沙坪坝三个站与中国西南

图 6 2022 年 4 月 11 日 20:00 沙坪坝、宜宾、安岳及中国西南地区强雷暴大风环境参数箱线图 Fig. 6 Box plot of ambient parameters of severe thunderstorm gale at Shapingba Station, Yibin Station, Anyue Station and in Southwest China Region at 20:00 BT 11 April 2022

区域强雷暴大风环境参数(费海燕等,2016),对比后 可发现,安岳 CAPE 达 1690 J•kg<sup>-1</sup>,最接近西南 地区均值(1785 J·kg<sup>-1</sup>),沙坪坝次之。三个站地 面 2 m 气温(T<sub>sur</sub>)和露点温度(T<sub>d<sub>sur</sub>)虽相当,但安岳</sub>  $T_{sur}$ 最高,沙坪坝次之。安岳和沙坪坝高能高湿特 征尤其明显,盆地中部发生强对流的潜势最大。盆 地中南部浅层(1000~700 hPa, shr<sub>0~7</sub>)和深层 (1000~500 hPa, shr<sub>0~5</sub>)垂直风切变普遍达 15 m • s<sup>-1</sup>以上(图 5c)。三个代表站的环境垂直风切变均 明显高于西南地区均值,安岳站(shr<sub>0~7</sub>为18m・ s<sup>-1</sup>, shr<sub>0~5</sub>为24m·s<sup>-1</sup>)与其他两个站相比最高, 属于强垂直风切变,目接近西南地区极值,中等及以 上强度垂直风切变是形成弓形回波的重要因素,对 流风暴的弓形特征与地面直线型风害明显相关 (Hamilton,1970)。冷却负浮力是激发强下沉气流 的因素之一(许焕斌,2012),下沉对流有效位能 (DCAPE)显示,安岳和沙坪坝超过1300 J·kg<sup>-1</sup>, 并接近极值,官宾低于西南地区均值。400、500和 700 hPa 的温度露点差( $\Delta T_{400}$ 、 $\Delta T_{500}$ 、 $\Delta T_{700}$ )表明三

个站均有中层干层存在,沙坪坝和安岳中层干层更 为明显,温度露点差大于 30℃,远超西南地区统计 值极值。由此可见,盆地中部的环境条件尤其是垂 直风切变、中层干层和 DCAPE 等环境要素接近或 超过统计极值,是最有利于强雷暴的合并发展形成 弓形回波和强雷暴大风发生的区域。

## 4 对流触发与飑线演变分析

#### 4.1 对流触发

形成飑线的北段对流形成于龙泉山脉附近,雷达 回波演变表明,11日19:33,与龙泉山走向基本一致 的多个初始对流单体开始形成发展(图略)。20:07 (图7a),其北段(E,成都境内)东移且持续发展,南段 (F,眉山境内)则逐渐减弱消失。选取龙泉山北段东 侧代表站计算抬升凝结高度和自由对流高度,结果显 示,二者均低于900 hPa,龙泉山北段山脉海拔高度为 1000 m 左右,该海拔高度对东侧气流可以起到一定



注:AB、CD为剖线;E、F分别为北段、南段对流,椭圆为对流范围。

图 7 2022 年 4 月 11 日 20:07 成都雷达(a)2.4°仰角反射率因子, 沿图 7a 中(b) AB 实线和(c) CD 实线的反射率因子垂直剖面

Fig. 7 (a) Reflectivity factor at 2. 4°elevation of Chengdu Radar, (b, c) vertical profile of reflectivity factor along the solid lines of (b) AB and (c) CD in Fig. 7a at 20:07 BT 11 April 2022

的强迫抬升作用,20:00由于龙泉山附近北风侵入, 加之降水影响,北段山脉附近有4℃左右的降温 (图 8a) 而形成冷池, 同时地面存在风速辐合 (图 8b),冷池与前沿暖湿气流交汇,在地面辐合线 前侧不断触发对流,风速辐合区和温度梯度区向东 南发展,造成新生对流向东南传播。龙泉山脉南段 东侧代表站计算的自由对流高度在 900 hPa 左右, 山脉海拔高度为100 m 左右,地形对于气流强迫抬 升作用较小,气流无法到达自由对流高度。此外, 20:00 南段山脉附近降温幅度在 2℃以内,冷池效应 弱,因此未能在对流前侧持续触发新对流,南段对流 F逐渐减弱。此时眉山东部有初始对流发展,反射 率因子核心普遍介于 35~40 dBz,高度维持在 2~ 5 km(图 7b,7c), CAPE 值维持在 1000 J·kg<sup>-1</sup>以 上,低层存在明显的水汽通量辐合(图 5a,5b),30°N 以南地面到 700 hPa 的动力抬升作用较北部更为显 著(图略)。在高能高湿条件下,动力抬升可以使气 块较易抬升至自由对流高度,正浮力作用可使对流 强烈发展(雷蕾等,2021)。

#### 4.2 飑线演变

11 日 19:00 开始,在成都、眉山、乐山一带有南 北向的 35 dBz 以上分散对流单体发展,FY-4A 资料 显示有低于-32℃黑体亮温(TBB)的对流云团出 现,此时只有一些零星的闪电出现(图略)。20:07 (图 9a),龙泉山北段线状对流发展旺盛,南段对流 发展较弱,其东侧的盆地南部开始有新生对流出现, 成都东部低于-50℃的 TBB 范围扩大并与眉山、乐 山等地连接形成中尺度对流系统;20:30(图 9b),北 段线状对流和盆地南部新生对流均处于快速发展阶 段,TBB 也降低至-60℃,中尺度对流系统范围进 一步扩大(图略)。

20:59(图 9c), 盆地南部的线状对流合并发展 为长度约 70 km 的线状对流,且有多个强单体中 心,龙泉山北段的线状对流 E(图 7a)在翻山后与南 侧新生单体合并发展,南北向发展长度约120 km, 对流的线状排列结构比较松散,在两条线状对流间 隔的区域有多个单体快速发展,与南北两侧的线状 对流有明显的合并趋势;21:28(图 9d)随着新生对 流的发展与合并,长度超过 300 km 的正南北向飑 线形成,最强单体位于资阳中部,飑线中间多个强单 体进一步合并加强并东移;21:56(图 9e),位于飑线 中间的弓形回波在安岳处达到最强,地面出现了此 次过程的最大阵风(37.4 m  $\cdot$  s<sup>-1</sup>)。此时形成的  $\alpha$ 中尺度对流系统在盆地中部强度达到最强,安岳地 区 TBB 低于-75℃, TBB 低于-70℃的区域内雷 暴活动显著增加,但大部分为负闪电,局部开始出现 一些正闪电,说明系统中冰相粒子增多,有利于局地 冰雹的形成与发展(图 10),但这与张腾飞等 (2018)、罗琪等(2019)研究的飑线系统中出现大范 围正闪电有所不同。22:19(图 9f)之后,飑线开始 迅速减弱,并未持续发展,α中尺度对流系统范围虽 未减小,但 TBB 上升,闪电次数减少(图略),开始产 生以短时强降水为主的强对流天气。



注:图 a 中白色区域数据缺测,下同;图 b 中灰色阴影为海拔大于 530 m 地形,综色线为地面辐合线。

图 8 地面气象观测站 2022 年 4 月 11 日(a) 20:00 1 小时变温(填色)和 变压(等值线,单位:hPa),(b) 19:55 5 min 平均风(风羽)

Fig. 8 (a) The 1 h temperature change (colored) and pressure change (contour, unit: hPa) at 20:00 BT, and (b) wind (barb) averaged in 5 min at surface meteorological

observation stations at 19:55 BT 11 April 2022



图 9 2022 年 4 月 11 日雷达组合反射率因子拼图 Fig. 9 Mosaic chart of radar composite reflectivity factor on 11 April 2022



综上所述,11日19:04-20:59为飑线形成前

的多地对流发展阶段;21:22—22:19 为飑线成熟阶 段,其中21:28—21:56 形成显著的弓形回波;22:19 后飑线快速减弱消亡。此次飑线从开始形成到减弱 持续时间不到1 h,这样短的维持时间与中国其他地 区大多数飑线过程的持续时间有明显差异(Wang et al,2019;杨吉等,2020;袁招洪,2021;赖安伟等; 2021;Liu et al,2022)。

## 5 飑线形成和发展的回波特征

#### 5.1 飑线形成

11日21:16,有多个南北向排列的新生单体快 速发展,最强回波超过65dBz(图11a),从XY方向 的剖面(图11b)看,5个强单体回波发展旺盛, 35dBz发展高度基本超过10km,单体之间有弱回 波开始合并,最南端单体35dBz强回波发展至 15km,从北向南的1、2号单体合并,在4~6km高 度出现云桥现象,2号单体有多个强中心,低层回波 范围小、强度弱,强回波从空中开始快速发展,整体

气流中形成(图 11f)。

回波处于发展阶段。飑线自西向东发展,北部线状 对流南端不断与新生对流合并发展,从 MN 方向的 剖面(图 11c)看,超过 55 dBz 的强回波发展高度达 到 8 km,单体东侧有弱回波区,回波呈现明显的倾 斜结构,在弱回波区一侧有一支近乎垂直的上升气 流,为对流的发展提供水汽和能量,同时与高空的正 速度区形成强的中层径向辐合(图 11e),这预示将 出现较强的下沉气流,从而导致地面大风的产生(俞 小鼎等,2006a)。在 M<sub>1</sub>N<sub>1</sub> 的剖面(图 11d)中,N<sub>1</sub>



注:XY、MN、M1N1分别为剖线;图 b 中数字代表对流单体编号;图 e 中箭头代表气流方向,下同。

图 11 2022 年 4 月 11 日 21:16(a)成都雷达 0.5°仰角反射率因子,沿(b)XY、(c)MN、(d)M<sub>1</sub>N<sub>1</sub> 实 线的反射率因子垂直剖面,沿(e)MN、(f)M<sub>1</sub>N<sub>1</sub> 实线的径向速度垂直剖面
Fig. 11 (a) Reflectivity factor at 0.5° elevation of Chengdu Radar, (b-d) vertical profile of radar reflectivity factor along the solid lines of (b) XY, (c) MN, (d) M<sub>1</sub>N<sub>1</sub> in Fig. 11a, (e, f) vertical profile of radial velocity along the solid lines of (e) MN, (f) M<sub>1</sub>N<sub>1</sub> in Fig. 11a at 21:16 BT 11 April 2022

侧的对流从6km高度发展,并与西侧的对流连接,

整体呈现非常强的前倾结构,对应速度图中5 km

以下存在大范围偏东风,约5 km 高度处有非常强

的垂直风切变,中层快速发展的对流在低层的偏东

对流主体到达资阳西部一自贡东部一线时,负变温、

正变压区主要位于对流主体西侧,变温中心简阳小

时气温下降 6.7℃,同时增压 2 hPa 左右,强负变温

地面气象观测站气温演变显示,11日21:00,当

区与下游资阳之间的冷池最强出流(密度流)强度较 20:00 快速增大,冷池前沿存在强的变温和变压梯 度,均指向东南方向。同时,眉山地区冷池的变温和 变压梯度均指向正东方向,即两个区域的密度流分 别为西北风和西风,且均向资阳地区汇集(图 12a), 直至 21:22,龙泉山北段和盆地中南部两段线状对 流系统都处于快速发展阶段,但未达到飑线定义标 准。21:22 之后,在强冷池、地面辐合线和中层偏南 风急流的共同作用下,两段线状对流系统在东移到 高能(CAPE>1000 J • kg<sup>-1</sup>、 $\Delta\theta_{se}$ >12°C)、高湿 (PWAT>40 mm)和强垂直风切变(>18 m • s<sup>-1</sup>) 的资阳地区后合并加强,发展为镶嵌有弓形回波的 纵向长约 300 km 飑线系统。

#### 5.2 飑线成熟

11 日 21:22—22:19 为飑线成熟阶段,盆地中 部南部的能量、水汽、动力条件非常适合雷暴发展, 其中 21:50—22:56 是弓形回波最强时段。

21:56,飑线发展旺盛,弓形回波处最强反射率 因子达 65 dBz(图 13a),从反射率因子 GH 的剖面 (图 13d)看,50 dBz 回波发展高度可达 5 km 以上, 资阳境内强回波高度可达 7 km,此处正是弓形回波 所处位置。当弓形回波出现后,风场和对流结构会 加大地面大风的强度(俞小鼎等,2006b)。沿其移 动方向(图 13a 中白线 EF)作剖面,超过 50 dBz 的 回波发展高度达 10 km,具有产生冰雹的典型特征, 实况也显示安岳出现了冰雹天气;对流单体前侧存 在弱回波区、回波悬垂等特征(图 13b)。对应径向 速度剖面(图 13e)中,单体前侧存在明显的上升气流,径向速度可达 27 m·s<sup>-1</sup>,在前侧上升气流的左侧存在显著的下沉气流,径向速度可达 20 m·s<sup>-1</sup>, 两者在 7 km高度左右的径向速度大值区形成明显的中层径向辐合。另外在强回波后侧中层有偏西风入流,该气流可以使大量的干冷空气进入飑线系统,致使系统内混合相态水蒸发、融化或升华,过程中会吸收大量的热量而使后侧大气剧烈降温而形成强下沉气流(图 13e),最终导致该部分对流风暴移速超过其他部分而形成弓形回波,6min内,反射率因子核区迅速下降,产生下击暴流(图 13c),导致地面气温快速下降形成冷池和强风(公衔铎等,2019)。

随着上游降水和大风产生,地面辐合线东移, 21:45位于资阳中部,其两侧的风速差最大可达 12 m·s<sup>-1</sup>,温差可达 6℃以上(图 12c)。地面冷池 效应非常明显,负变温和正变压大值区移至安岳, 22:00小时变温中心值可达-10.2℃,小时变压中 心值达 3 hPa(图 12b),表明雷暴高压已经影响到安 岳。

#### 5.3 飑线快速消亡原因探讨

11日22:19之后, 弓形回波前侧已无明显对流 新生与合并, 回波结构整体均匀, 虽仍有多个强质心 单独存在, 但对流处于减弱消亡阶段(图略)。

飑线发展趋势的判断在短时临近预报中非常重要,此次飑线从开始形成到减弱持续时间不到1h, 如此短的维持时间与与中国其他地区大多数飑线过 程的持续时间有明显差异。利用 RKW 理论探讨飑





图 12 地面气象观测站 2022 年 4 月 11 日(a)21:00、(b)22:00 1 小时变温(填色)和

变压(等值线,单位:hPa),(c)21:45 5 min 平均风速(风羽)和气温(数字,单位:℃)

Fig. 12 The 1 h temperature change (colored) and pressure change (contour, unit: hPa) at (a) 21:00 BT and

(b) 22:00 BT, (c) wind speed (barb) and temperature (value, unit:  $^\circ\!\!C$ ) averaged in 5 min

at surface meteorological observation stations at 21:45 BT 11 April 2022



图 13 2022 年 4 月 11 日(a)21:56 成都雷达 0.5°仰角反射率因子,(b)21:56、(c)22:02 沿图 13a 中 EF 实线的反射率因子剖面,21:56 沿图 13a 中(d)GH 实线的反射率因子剖面、 (e)EF 实线的径向速度剖面

Fig. 13 (a) Reflectivity factor at 0.5° elevation of Chengdu Radar at 21:56 BT, vertical profile of (b, c) radar reflectivity factor along the solid line EF in Fig. 13a at (b) 21:56 BT and (c) 22:02 BT, and (d) radar reflectivity factor along the solid line GH and (e) radial velocity along the solid line EF in Fig. 13a at 21:56 BT 11 April 2022

线发展与快速减弱的原因:当冷池强于或弱于低层 垂直风切变,不利于飑线系统维持,而当冷池与低层 垂直风切变相当时,则利于飑线系统发展维持 (Rotunno et al,1988;Weisman,1992;Weisman and Rotunno,2004)。参考陈涛等(2020)中的方法估算 过程中冷池密度流传播速度,结果见表1。

11日20:00,对流在成都东部地区发展,但受龙 泉山脉地形影响,发展较弱,冷池内外气压差较小, 冷池传播速度为18.3 m·s<sup>-1</sup>;20:00—21:00,龙泉 山脉北段东侧对流发展,并伴随有短时强降水、大风 等天气出现; 21:00 冷池密度流的传播速度增至 21.0 m·s<sup>-1</sup>, 冷池效应增强, 有利于大风增强; 21:45 安岳上游出现7级偏北大风(图 12c),强的冷 池密度流和环境偏北风叠加,导致了安岳大风的增 强; 22:00,由于地面降水产生以及12级以上雷暴大 风的出现导致冷池强度达到最强, 冷池密度流的传 播速度增至 25.7 m·s<sup>-1</sup>。

从冷池密度流传播速度和 0~3 km 垂直风切 变比值来看,三个时刻中,21:00 的比值最接近 1,这 种近似平衡的状态有利飑线回波发展,回波上也显

表 1	2022 年 4 )	月 11	日冷池密度流传播速度和 0~3	km 垂直风切变对比
-----	------------	------	-----------------	------------

Table 1	Comparison of	f propagation sp	eed of cold pool d	lensity flow and	0-3 km vertical wind shear or	n 11 April 2022
时间/BT	$\Delta p/\mathrm{hPa}$	2 m 气温/℃	$\bar{ ho}/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3})$	$C/(m \cdot s^{-1})$	上游测站 ΔU <sub>0~3 km</sub> /(m・s <sup>-1</sup> )	$C/\Delta U_{0\sim 3~\mathrm{km}}$
20:00	+2.1	21.3 (兴隆)	1.12	18.3	12.68 (温江)	1.44
21:00	+2.5	19.8 (简阳)	1.13	21.0	16.15 (龙泉驿)	1.30
22:00	+3.8	16.4 (安岳)	1.15	25.7	11.62 (简阳)	2.21

示 21:00—22:00 飑线组织性达到最强并发展成弓 形回波。之后由于冷池传播速度显著强于垂直风切 变,不利于对流系统的发展和长时间维持,导致飑线 系统快速减弱消亡。此外,盆地中南部区域 CAPE 由 20:00 的 800 J·kg<sup>-1</sup>以上降至 22:00 的 400~ 600 J·kg<sup>-1</sup>;22:00,850 hPa 以下北风增强并快速 侵入盆地中部,700 hPa 南风急流减弱东退,对水汽 和能量的输送也明显减弱(图略)。因此,该区域环 境场中热力和水汽条件的减弱也加速了飑线消亡。

## 6 结论和讨论

本文综合多种观测资料和欧洲中心再分析资料,详细分析了2022年4月11日四川盆地一次飑线过程的环流背景和雷达回波特征,图14展示了此次飑线的影响系统、能量特征和弓形回波雷暴热力、动力结构,主要得到以下结论。

(1)本次飑线过程发生在 500 hPa 高空槽前, 700 hPa 南风急流发展,850 hPa 冷平流明显,地面 有热低压,高层辐散低层辐合特征在飑线形成前显 著增强,增强的上升运动为风暴发展提供了动力条 件。盆地中南部 CAPE 普遍维持在 1000 J•kg<sup>-1</sup> 以上,大于15 m・s<sup>-1</sup>的深层和浅层垂直风切变、代 表站3.8 km 高度的湿球0℃层和7 km 高度的 -20℃层、达6.88 ℃・km<sup>-1</sup>的垂直温度直减率、 探空廓线的"喇叭口"形态等环境特征都有利于对流 系统的发展和大风、冰雹等强对流天气的发生。垂 直风切变、中层干层和DCAPE等环境要素接近或 超过中国西南地区统计极值,是此次雷暴能够组织 合并形成弓形回波和强雷暴大风的关键因素。

(2)飑线北段对流受龙泉山脉地形、冷池和地面 辐合线共同作用而触发发展,南段对流受低层动力 作用抬升发展,两段线状对流东移至盆地中部高能 高湿地区后,在强冷池、地面辐合线和 700 hPa 南风 急流共同作用下,增强合并发展为一条南北向、镶嵌 有超级单体和弓形回波的飑线系统。

(3)飑线形成前南北两段线状对流中的超级单体风暴和飑线成熟阶段的回波都具有回波悬垂、弱回波区、后侧入流、中层径向辐合等结构特征。对流层中层强的后侧入流、干夹卷形成强的下沉气流,致使部分对流风暴移速超过其他部分而形成弓形回波,并在安岳造成12级以上雷暴大风。强下沉气流和地面降水造成冷池传播速度显著强于0~3 km 垂直风切变则是导致飑线快速消亡的重要原因。此



Fig. 14 Conceptual model for thermodynamic and dynamic structure of the evolution of squall line and bow echo thunderstorms on 11 April 2022

外,850 hPa 以下北风快速增强侵入盆地中部、700 hPa 南风急流减弱东退后对水汽和能量的输送减弱等环 境特征也都加速了飑线的消亡。

本文对飑线形成和维持的动力、环境条件、回波 演变及消亡的原因进行了初步分析,虽然得到一些 有意义的结论,但更加细致的动力诊断以及 RKW 理论的使用还有必要利用更高分辨率数值模拟资料 和更多盆地内的飑线个例进行进一步分析验证。

#### 参考文献

- 陈明轩,王迎春,2012. 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,70(3): 371-386. Chen M X, Wang Y C, 2012. Numerical simulation study of interactional effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China[J]. Acta Meteor Sin,70(3):371-386(in Chinese).
- 陈涛,张芳华,符娇兰,等,2020.2014 年 5 月 8—9 日引发珠江口区 域强降水的两个长生命史 MCS 特征分析[J]. 气象,46(4):449-461. Chen T, Zhang F H, Fu J L, et al, 2020. Analysis of two successive rainstorm-induced long-lived mesoscale convective systems struck pearl river estuary during 8−9 May 2014[J]. Meteor Mon,46(4):449-461(in Chinese).
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,等,1982. 我国飑线发生条件的研究[J]. 大 气科学,6(1):18-27. Ding Y H,Li H Z,Zhang M L,et al,1982. A study on the genesis conditions of squall-line in China[J]. Chin J Atmos Sci,6(1):18-27(in Chinese).
- 费海燕,王秀明,周小刚,等,2016.中国强雷暴大风的气候特征和环 境参数分析[J]. 气象,42(12):1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al,2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteor Mon,42(12):1513-1521(in Chinese).
- 公衍铎,郑永光,罗琪,2019. 冷涡底部一次弓状强飑线的演变和机理 [J]. 气象,45(4):483-495. Gong Y D,Zheng Y G,Luo Q,2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the south side of a cold vortex[J]. Meteor Mon,45(4):483-495(in Chinese).
- 康岚,刘炜桦,肖递祥,等,2018. 四川盆地一次极端大风天气过程成 因及预报着眼点分析[J]. 气象,44(11):1414-1423. Kang L,Liu W H,Xiao D X, et al, 2018. Analysis on formation reason and forecast of an extreme gale in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon,44 (11):1414-1423(in Chinese).
- 赖安伟,马鹤翟,崔春光,等,2021. 雷达反射率反演水汽和温度同化 技术在一次飑线过程中的应用研究[J]. 气象,47(8):932-952. Lai A W,Ma H D,Cui C G,et al,2021. A squall line case study of assimilating the radar data, retrieval of water vapor and incloud potential temperature from reflectivity in a 3DVAR framework[J]. Meteor Mon,47(8):932-952(in Chinese).
- 雷蕾,孙继松,陈明轩,等,2021.北京地区一次飑线的组织化过程及 热动力结构特征[J].大气科学,45(2):287-299. Lei L,Sun J S,

Chen M X, et al, 2021. Organization process and thermal dynamic structure of a squall line in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 45 (2):287-299(in Chinese).

- 龙柯吉,康岚,罗辉,等,2020.四川盆地雷暴大风雷达回波特征统计 分析[J]. 气象,46(2):212-222. Long K J,Kang L,Luo H,et al, 2020. Statistical analysis of radar echo characteristics of thunderstorm gales in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon,46(2):212-222(in Chinese).
- 罗琪,郑永光,陈敏,2019.2017 年北京北部一次罕见强弓状飑线过 程演变和机理[J]. 气象学报,77(3):371-386. Luo Q, Zheng Y G, Chen M, 2019. Evolution and development mechanisms of a rare strong arc-shaped squall line that occurred in northern Beijing in 2017[J]. Acta Meteor Sin,77(3):371-386(in Chinese).
- 彭霞云,章丽娜,刘汉华,等,2022. 冷涡底部对流引起的杭州湾极端 大风形成机制分析[J]. 气象,48(6):719-728. Peng X Y,Zhang L N,Liu H H, et al, 2022. Formation mechanism of extreme winds in Hangzhou Bay caused by convection at the bottom of cold vortex[J]. Meteor Mon,48(6):719-728(in Chinese).
- 王婷婷,朱文剑,姚凯,等,2023.2021 年吉林中部一次极端雷暴大风 的中尺度成因分析[J]. 气象,49(10):1215-1226. Wang T T, Zhu W J, Yao K, et al, 2023. Mesoscale analysis of an extreme thunderstorm gale in central Jilin Province in 2021[J]. Meteor Mon,49(10):1215-1226(in Chinese).
- 许焕斌,2012.强对流云物理及其应用[M].北京:气象出版社:340. Xu H B,2012. The Physics of Severe Convective Storms and Its Application[M]. Beijing: China Meteorological Press: 340 (in Chinese).
- 杨吉,郑媛媛,夏文梅,等,2020. 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,46(3):357-366. Yang J,Zheng Y Y, Xia W M,et al,2020. Numerical analysis of a squall line case influenced by northeast cold vortex over Yangtze-Huaihe River Valley[J]. Meteor Mon,46(3):357-366(in Chinese).
- 杨珊珊,谌芸,李晟祺,等,2016. 冷涡背景下飑线过程统计分析[J]. 气象,42(9):1079-1089. Yang S S, Chen Y, Li S Q, et al, 2016. Analysis of squall lines under the background of cold vortex[J]. Meteor Mon,42(9):1079-1089(in Chinese).
- 俞小鼎,王秀明,李万莉,等,2020. 雷暴与强对流临近预报[M],北 京:气象出版社:117-126. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorms and Severe Convection Forecasting[M]. Beijing: China Meteorological Press:117-126(in Chinese).
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.2006a.多普勒天气雷达原理与业务应用 [M],北京:气象出版社:91-180.Yu X D,Yao X P,Xiong T N, et al,2006a. The Principles and Business Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing; China Meteorological Press; 91-180 (in Chinese).
- 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等,2006b. 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,17(4):385-393. Yu X D, Zhang A M,Zheng Y Y, et al,2006b. Doppler radar analysis on a series of downburst events[J]. J Appl Meteor Sci,17(4):385-393(in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展

[J]. 气象学报,70(3):311-337. Yu X D,Zhou X G,Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin,70(3):311-337(in Chinese).

- 袁招洪,2021. 大气环境条件对夜间飑线影响的敏感性试验[J]. 气象 学报,79(6):977-1001. Yuan Z H,2021. Sensitivity of a nocturnal squall line to atmospheric conditions[J]. Acta Meteor Sin,79 (6):977-1001(in Chinese).
- 翟丽萍,农孟松,赖珍权,等,2018.广西"4·20"暖区飑线的形成及结构[J].高原气象,37(2):568-576. Zhai L P, Nong M S, Lai Z Q, et al,2018. Formation and structure of "4·20" warm sector squall line in Guangxi Province[J]. Plateau Meteor, 37(2):568-576(in Chinese).
- 章国材,2011.强对流天气分析与预报[M].北京:气象出版社.Zhang G C,2011. The Analysis and Forecasting of Severe Convective Weather[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 张腾飞,张杰,张思豆,等,2018. 云南南支槽飑线雹暴中尺度特征及 环境条件[J]. 高原气象,37(4):958-969. Zhang T F, Zhang J, Zhang S D, et al, 2018. Mesoscale characteristics and environmental conditions of south trough squall-line hailstorm in Yunnan[J]. Plateau Meteor, 37(4):958-969(in Chinese).
- 郑媛媛,张雪晨,朱红芳,等,2014.东北冷涡对江淮飑线生成的影响 研究[J].高原气象,33(1):261-269. Zheng Y Y,Zhang X C,Zhu H F,et al,2014. Study of squall line genesis with northeast cold vortex[J]. Plateau Meteor,33(1):261-269(in Chinese).
- Coniglio M C, Stensrud D J, 2001. Simulation of a progressive derecho using composite initial conditions[J]. Mon Wea Rev, 129 (7):1593-1616.
- Evans J S, Doswell C A, 2001. Examination of derecho environments using

proximity soundings[J]. Wea Forecasting, 16(3): 329-342.

- Fujita T,1955. Result of detailed synoptic studies of squall lines[J]. Tellus,7(4):405-436.
- Garner S T, Thorpe A J, 1992. The development of organized convection in a simplified squall-line model [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 118(503):101-124.
- Hamilton R E,1970. Use of detailed intensity radar data in mesoscale surface analysis of the July 4,1969 storm in Ohio//Proceedings of the 14th Radar Meteorology Conference. Tucson, AZ: Amer Metero Soc:339-342.
- Lafore J P, Moncrieff M W, 1989. A numerical investigation of the organization and interaction of the convective and stratiform regions of tropical squall lines[J]. J Atmos Sci,46(4):521-544.
- Liu Y A,Ping F,Fan J H,2022. Comparative study of the simulation and mechanism of two different severe thunderstorms embedded in a squall line in North China[J]. Atmos Res,270:106074.
- Newton C W,1950. Structure and mechanism of the prefrontal squall line[J]. J Meteor,7(3):210-222.
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L, 1988. A theory for strong long-lived squall lines[J]. J Atmos Sci, 45(3): 463-485.
- Wang H,Kong F Y,Wu N G, et al,2019. An investigation into microphysical structure of a squall line in South China observed with a polarimetric radar and a disdrometer[J]. Atmos Res, 226:171-180.
- Weisman M L, 1992. The role of convective generated rear-inflow jets in the evolution of long-lived mesoconvective systems[J]. J Atmos Sci,49(19):1826-1847.
- Weisman M L, Rotunno R, 2004. "A theory for strong long-lived squall lines" revisited[J]. J Atmos Sci,61(4):361-382.

(本文责编:张芳)