

邓承之,周国兵,李强,等,2024. 四川盆地一次西南低涡影响下的飑线天气特征及其成因[J]. 气象,50(7):777-790. Deng C Z, Zhou G B, Li Q, et al, 2024. Characteristic and formation of a squall line influenced by the southwest vortex in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 50(7):777-790(in Chinese).

四川盆地一次西南低涡影响下的飑线 天气特征及其成因*

邓承之^{1,2} 周国兵³ 李 强² 刘伯骏² 夏 繁²

1 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 重庆 401147

2 重庆市气象台, 重庆 401147

3 重庆市气象局, 重庆 401147

提 要: 2019 年 6 月 4 日夜间到 5 日白天, 四川盆地东部出现一次西南低涡影响下的飑线过程, 采用多源观测及欧洲中心再分析资料, 分析此次飑线过程的特征及成因。结果表明: 飑线形成前四川盆地中部已出现暴雨, 该对流性暴雨在高空低槽和暖性西南低涡的环流背景下产生, 相应的对流层大气湿层深厚且具有一定对流有效位能。飑线发生在冷空气翻越秦岭进入西南低涡后部的显著锋生过程中, 在高空低槽、西南低涡及强冷锋的共同影响下, 冷锋垂直环流与西南低涡垂直环流合并, 锋区抬升机制显著增强, 为飑线在重庆西部形成提供了有利的动力抬升条件。重庆西部的大气环境有利于飑线形成, 具有较大的对流层中下层垂直减温率、对流有效位能及深层垂直风切变, 且对流层中层干空气特征显著。雷达上表现为冷切变线形成的线状对流与西南低涡锋生区中的强降雨对流合并发展, 在重庆西部形成“人字形”回波, 回波后部边界层内由前期暴雨形成的冷区在冷锋南下和锋后干空气中的雨滴蒸发冷却作用下进一步降温形成冷池出流, 利于飑线的形成; 弓状飑线在形成之后维持了约 1.5 h。冷锋后部强低空水平动能的向南及向下输送, 以及地面冷暖空气间位温梯度的显著增强, 均有利于地面大风的形成。

关键词: 强对流, 飑线, 弓形回波, 西南低涡, 冷锋

中图分类号: P458, P433

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.043001

Characteristic and Formation of a Squall Line Influenced by the Southwest Vortex in Sichuan Basin

DENG Chengzhi^{1,2} ZHOU Guobing³ LI Qiang² LIU Bojun² XIA Fan²

1 CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147

2 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

3 Chongqing Meteorological Service, Chongqing 401147

Abstract: One squall line influenced by the southwest vortex occurred in the eastern part of Sichuan Basin from the night of 4 June to the day of 5 June 2019. Using multi-source observation data and ECMWF Re-analysis data, the characteristics and formation of the squall line are analyzed. The results show that convective heavy rainfall before the occurrence of the squall line was formed in the central Sichuan Basin under the background of the high-altitude trough and the warm southwest vortex, combined with troposphere

* 国家自然科学基金气象联合基金重点项目(U2242202)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J011)、重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX0665、CSTC2021JCYJ-MSXMX0057、CSTB2022NSCQ-MSX1461)、中国气象局西南区域气象中心创新团队基金(XNQYCXTD-202202)和重庆市气象部门业务技术攻关项目(YWJSGG-202201)共同资助

2023 年 8 月 30 日收稿; 2024 年 4 月 8 日收修定稿

第一作者: 邓承之, 主要从事暴雨及强对流天气预报研究. E-mail: 95640680@qq.com

通讯作者: 周国兵, 主要从事灾害性天气影响及机理研究. E-mail: zhou-gb@163.com

atmospheric environment of the deep wet layer and certain convective available potential energy (CAPE). The squall line occurred during the prominent frontogenesis process of cold front which surmounted the Qinling Mountains and entered the rear of the southwest vortex. With the joint influence of the high-altitude trough, southwest vortex and strong cold front, the cold front vertical circulation merged with the southwest vortex vertical circulation, and the combined vertical circulation circle significantly strengthened the uplift mechanism of the frontal zone, which provided favorable dynamic lifting conditions for the formation of the squall line in western Chongqing. The atmospheric environment in western Chongqing was conducive to the formation of the squall line. There was dry air in the middle troposphere, large vertical temperature lapse rate in the lower and middle troposphere layers, significant CAPE, and large deep vertical wind shear. The formation process of the squall line observed by radar was characterized by the combined development of linear convection with the cold shear line and strong rainfall convection in the southwest vortex frontogenesis region, forming the “herringbone” echo in the west of Chongqing. The cold front behind the “herringbone” echo moved southward, and combined with the evaporation and cooling of raindrops in the dry environment behind the front, cooled down the cold area formed by the rainstorm to the cold pool outflow in the boundary layer, promoting the formation of the squall line. The arc-shaped squall line maintained for about 1.5 h after its formation. The southward and downward transport of low-level horizontal kinetic energy at the rear of the front area and the enhancing of the potential temperature gradient between the surface cold and warm air during the formation of the squall line all contributed to the formation of the surface gales.

Key words: severe convection, squall line, bow echo, southwest vortex, cold front

引 言

西南低涡是西南地区暴雨最主要的影响系统(朱乾根等,2007;刘德等,2012;张亚萍等,2015;陈贵川等,2015;何光碧等,2016;肖红茹等,2021;吴志鹏等,2021)。西南低涡背景下持续的低空辐合和深厚的湿大气环境有利于暴雨的发生发展,四川盆地许多罕见的暴雨洪涝灾害均与西南低涡活动有关(何光碧,2012;李国平和陈佳,2018;李跃清,2021;周春花等,2022)。如1998年夏季长江流域中上游地区降水异常偏多与频繁活动的西南低涡密切相关(陈忠明等,2003);2004年9月四川盆地东部的特大暴雨洪涝灾害,由长时间维持的 α 中尺度西南低涡影响形成(宗志平和张小玲,2005;赵思雄和傅慎明,2007);2013年6月29日至7月1日四川盆地中东部的特大暴雨天气,与四川盆地内移动缓慢的深厚西南低涡影响有关(翟丹华等,2015;高笃鸣等,2018;程晓龙等,2019;邓承之等,2021)。

西南低涡作为 α 中尺度系统,在适宜的环境条件及天气系统配置下也可能形成飑线,产生严重的天气灾害。目前对西南低涡影响下的飑线天气研究较少。飑线发生的大气环境与暴雨不同,高对流有

效位能、中等以上的低层和深层垂直风切变有利于飑线的形成,对流层中层干空气及大的垂直减温率造成大的下沉对流有效位能,有利于弓形回波和地面大风的形成(孙继松和陶祖钰,2012;张哲等,2018;罗琪等,2019;公衍铎等,2019;吴海英等,2021)。若低层垂直风切变较强时,低层湿度对风暴结构有决定性的影响,当低层具有中-高湿度环境时易形成飑线(王秀明等,2013;孙建华等,2014)。而在低层风切变和不稳定层结配合下,具有横向梯度的湿度场也对飑线形成有利(张弛等,2019)。

李跃清和徐祥德(2016)指出,当前西南低涡活动及其相关的灾害性天气研究仍存在诸多薄弱环节,如西南涡及其演变的中尺度结构、内部特征与多尺度作用等。近年来,四川盆地内已数次出现西南低涡影响下的暴雨及飑线呈阶段性发展的天气过程,造成较大的影响,但对此类灾害性天气发生发展,尤其是西南低涡影响下的飑线过程形成的热动力机制仍不十分了解。2019年6月4日夜至5日白天,四川盆地出现了一次西南低涡影响下的大范围强对流天气过程,过程前期以暴雨为主,过程后期以飑线为主,强降雨及阵性大风等造成了十分严重的影响。因此,本文采用常规气象观测资料、自动气象站资料、多普勒雷达及ERA5($0.25^\circ \times 0.25^\circ$)的

逐小时分析场资料等,通过中尺度分析,探讨此次强对流天气的发生背景、大气环境特征以及在西南低涡影响下飑线过程形成的热动力机制,以加深对四川盆地内西南低涡影响下的此类强天气过程演变机制的理解。

1 资料与方法

本文采用的资料包括:(1)国家气象信息中心提供的地面自动站数据,用于分析降水演变、地面大风及地面位温场特征;(2)欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA5 全球逐小时再分析数据,时间段为 2019 年 6 月 4 日 08:00 至 5 日 20:00(北京时间,下同),空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直为 37 层,用于分析环流背景和主要影响系统特征;(3)国家气象信息中心提供的沙坪坝站和宜宾站探空数据,用于分析大气环境特征;(4)重庆市气象局提供的 SWAN 拼图资料和永川站多普勒天气雷达逐 6 分钟体扫资料,用于分析对流系统的演变和结构。在锋面影响分析中使用了锋生函数,包含水汽因子的湿锋生函数 F 可写为如下形式(Chen et al, 2007; 张芳华等, 2014):

$$F = \frac{d}{dt} |\nabla \theta_e| = F_1 + F_2 + F_3$$

$$F_1 = -\frac{1}{2 |\nabla \theta_e|} \left[\left(\frac{\partial^2 \theta_e}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \theta_e}{\partial y^2} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial^2 \theta_e}{\partial x \partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]$$

$$F_2 = -\frac{1}{2} |\nabla \theta_e| \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$F_3 = -\frac{1}{|\nabla \theta_e|} \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \left(\frac{\partial \theta_e}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

式中: θ_e 为相当位温, F_1 为变形项, F_2 为辐合项, F_3 为垂直项;当 $F > 0$ 时锋生, $F < 0$ 时锋消。

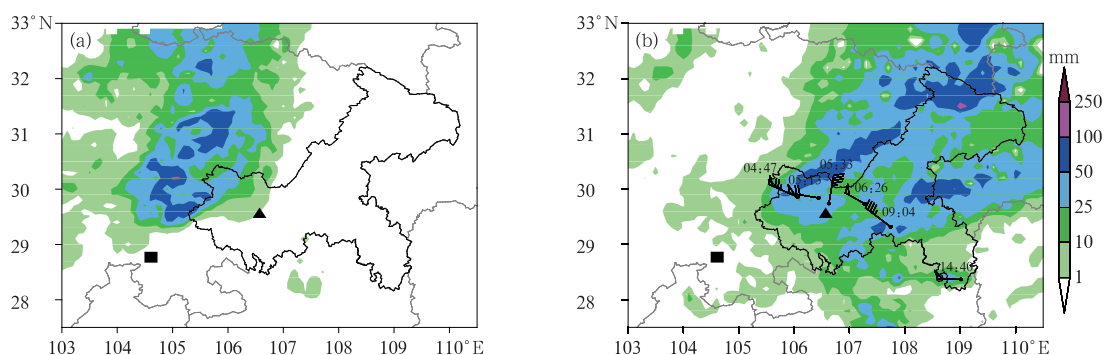
在地面大风成因分析中计算了质量权重动能,用于分析中尺度对流系统的动能演变(刘式适和刘式达, 1991; 张琳娜等, 2018)。质量权重动能 $\rho\kappa$ 的计算如下:

$$\rho\kappa = (1/2)\rho(u^2 + v^2) \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度, $\kappa = (1/2)(u^2 + v^2)$, u 、 v 分别为 x 、 y 方向的速度。

2 天气过程概况

2019 年 6 月 4 日 20:00 至 5 日 15:00, 四川盆地出现一次自西向东移动的大范围强对流天气。此次强对流天气可分为两个阶段:4 日 20:00 至 5 日 04:00 为暴雨阶段,强天气类型以短时强降雨和雷电为主,四川中部出现暴雨到大暴雨(图 1a);5 日 04:00 以后进入飑线阶段,短时强降雨、阵性大风和雷电并存,四川盆地东部出现暴雨到大暴雨,伴随重庆境内自西北向东南移动的地面大风带(图 1b)。过程最大累计雨量为 137 mm,最大小时雨强为 $81 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,均位于重庆市潼南区青云水库站,极



注:黑色三角形、方块分别代表重庆沙坪坝、四川宜宾站位置,风羽上方数字为极大风速出现时刻。

图 1 2019 年 6 月(a)4 日 20:00 至 5 日 04:00 累计降雨量(填色), (b)5 日 04:00—15:00 累计降雨量(填色)及国家站 8 级以上极大风分布(风羽,极大风速 $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 1 (a) Precipitation (colored) from 20:00 BT 4 to 04:00 BT 5 June 2019, (b) precipitation (colored) from 04:00 BT to 15:00 BT 5 June 2019 and extreme wind above scale 8 at national stations (barb, extreme wind speed $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

大风速达到 11 级 ($30.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 于 5 日 04:47 出现在重庆市铜梁站。此次强对流天气过程造成川渝地区数万人受灾, 多地房屋、广告牌和树木倒塌, 致灾影响十分显著。

3 主要影响系统及环境条件

图 2 为 500 hPa 形势及 200 hPa 急流的演变。6 月 4 日 20:00, 500 hPa 高空低槽移至川西高原上空(图 2a), 5 日 04:00 发展东移至四川盆地中部(图 2b)。低槽后部伴有冷平流, 并已开始侵入槽前

区域, 有利于槽前对流不稳定性的增加。200 hPa 西风急流主支经西北地区东部、华北地区, 向东延伸至华东一带, 急流中心超过 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着高空低槽东移, 高空急流增强, 中心风速发展至 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 急流入口区向南延伸至四川盆地北部, 辐散抽吸作用进一步加强。高空低槽产生的抬升和高空急流入口区的辐散抽吸作用, 为强对流天气的发展提供了有利的环流背景。

李国平等(1991)将距锋区较远、形成于暖区中的西南低涡归为暖性西南低涡。4 日 20:00(图 3a), 850 hPa 上, 在高空低槽东移影响四川盆地和高空急

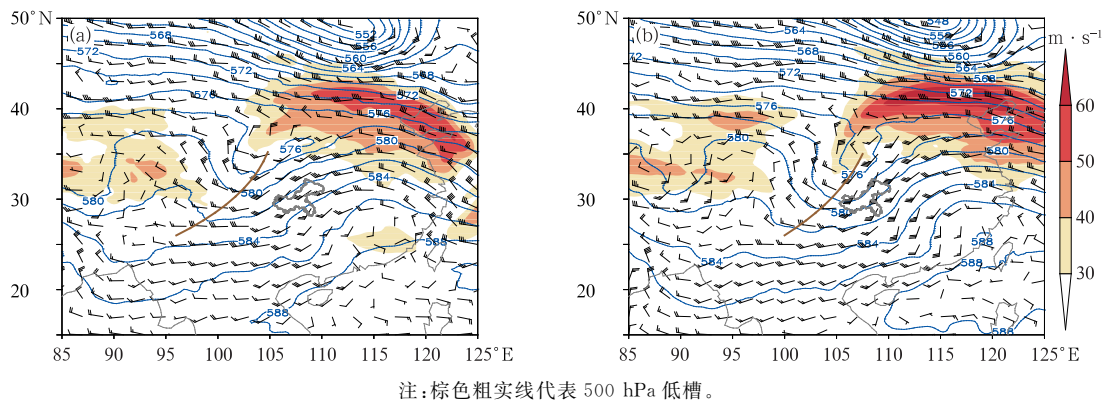


图 2 2019 年 6 月 (a) 4 日 20:00 和 (b) 5 日 04:00 500 hPa 高度场(实线, 单位: dagpm)、风场(风羽)与 200 hPa 高空急流(填色)

Fig. 2 Geopotential height (solid line, unit: dagpm) and wind (barb) at 500 hPa, high-level jet (colored) at 200 hPa at (a) 20:00 BT 4 and (b) 04:00 BT 5 June 2019

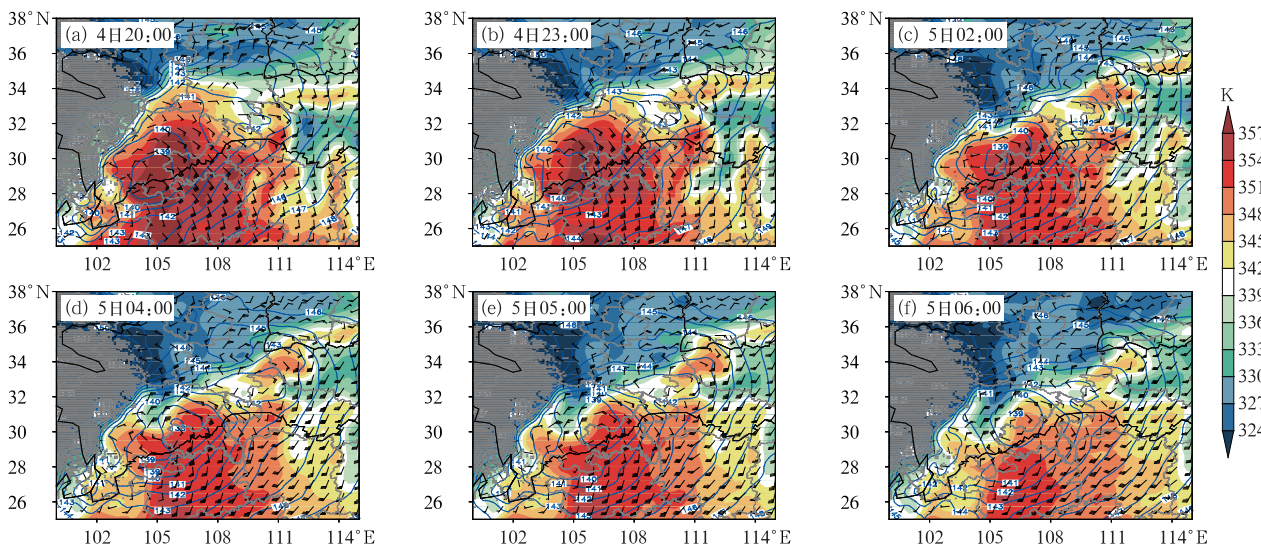


图 3 2019 年 6 月 4 日 20:00 至 5 日 06:00 850 hPa 高度场(实线, 单位: dagpm)、风场(风羽)与相当位温(填色)分布

Fig. 3 Geopotential height (solid line, unit: dagpm), wind (barb) and equivalent potential temperature (colored) at 850 hPa from 20:00 BT 4 to 06:00 BT 5 June 2019

流加强的同时,四川盆地西南部有西南低涡形成,涡区伴随高相当位温中心,低涡东侧有显著的低空东南风急流。在低槽及暖性西南低涡的共同影响下,4日20:00—21:00四川盆地西部开始有分散的对流促发。4日23:00至5日02:00(图3b和3c),低槽及西南低涡发展东移,西南低涡中心由140 dagpm降至139 dagpm,分散性对流逐渐组织加强,盆地中部出现范围较大的暴雨。之后,四川盆地北侧的冷空气迅速翻越秦岭进入西南低涡后部,5日04:00—06:00(图3d~3f),西南低涡的性质由前期以暖空气为主逐渐转变为冷暖空气并存,低涡涡区内冷暖空气强烈交汇,强对流天气由暴雨阶段进入飊线阶段。

可见,此次强对流过程前期的暴雨天气主要由东移的高空槽和低空暖性西南低涡影响形成,后期飊线天气的发生由高空槽、西南低涡及冷锋共同影响形成。强对流过程由暴雨阶段向飊线阶段的演变,发生在低涡后部冷空气南下和低涡前侧暖湿空气的强烈交汇过程中。

深厚的湿大气环境有利于暴雨的发生,上干冷下暖湿的大气环境有利于产生大风和冰雹(丁一汇等,1981;雷蕾等,2011;高晓梅等,2018;蔡雪薇等,2019)。图4为6月4日20:00宜宾站与沙坪坝站的探空曲线。由图可见宜宾站850~500 hPa接近饱和,对流有效位能(CAPE)为 $356 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,沙氏指数为 -1.4°C ,具备较为深厚的湿大气层结和一定的条件不稳定性(图4a),有利于对流性强降雨的发生。而沙坪坝站CAPE达到 $1800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,925~500 hPa的垂直风切变达到 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图4b),中

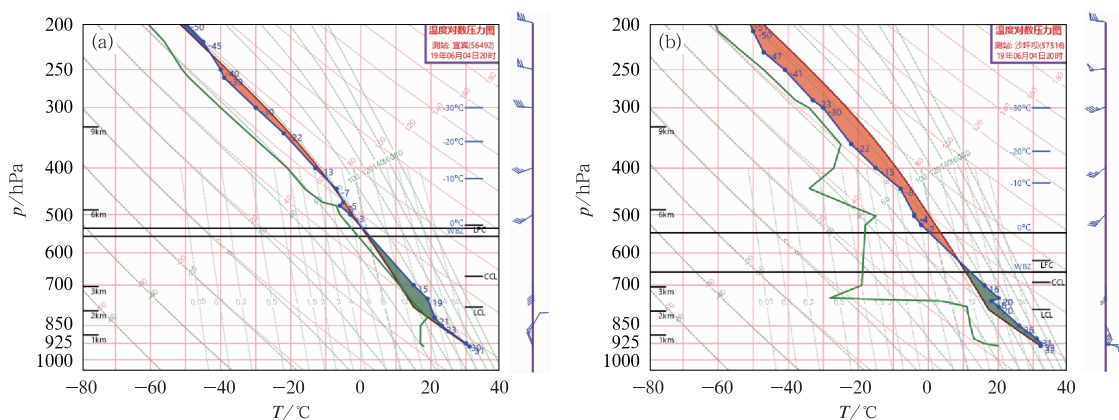
等大小的CAPE和深层垂直风切变更有利于大风及冰雹天气的发生(公衍铎等,2019;罗琪等,2019;陈晓欣等,2022;侯淑梅等,2023)。且沙坪坝站750~450 hPa有显著的干空气存在,当中层干空气通过夹卷等作用进入对流系统后,有利于下沉气流的增强和地面大风的出现(Knupp,1987;袁招洪,2021)。抬升指数达到 -4°C 左右,满足典型飊线发生前的抬升指数阈值(Meng et al,2013)。850 hPa与500 hPa温差达到了 30°C ,显著的对流层中低层垂直减温率也对强对流天气的发生极为有利(沈杭锋等,2019)。

可见,四川中南部地区的深厚湿层及一定的对流有效位能,有利于对流性暴雨的发展(王婧羽等,2022),而重庆西部地区显著的中层干空气、较大的对流层中低层垂直减温率和对流有效位能、较大的深层垂直风切变等,为飊线天气的发生提供了有利的环境条件。

4 飊线对流系统演变及机制

4.1 飊线系统演变特征

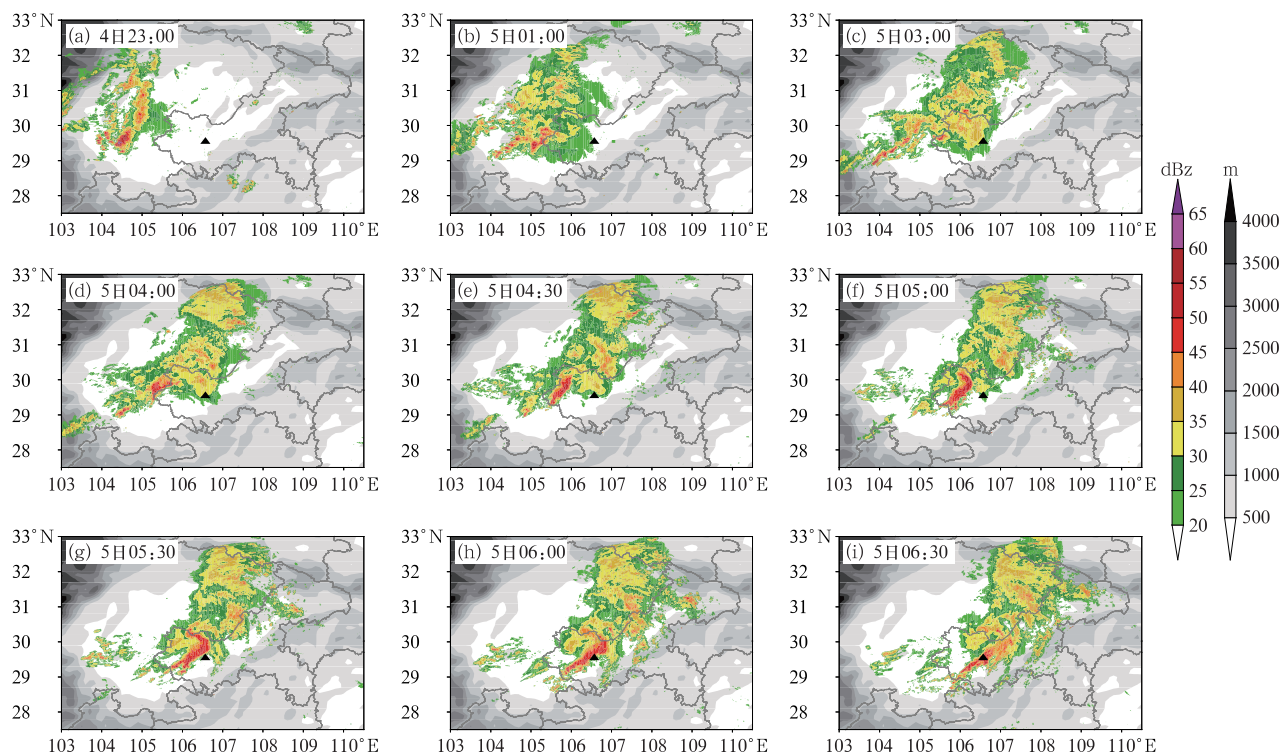
6月4日20:00—23:00,四川盆地西部出现分散性的对流,并在东移的过程中组织合并(图5a)。4日23:00至5日02:00发展成为四川盆地中部较大范围的中尺度对流系统,形成了四川盆地中部暴雨天气(图5b)。之后,盆地西南部由冷切变线形成的线状回波东移,5日03:00与盆地中部强回波合并(图5c)。合并后在四川遂宁及内江附近形成了一个 β 中尺度的“人字形”强回波(图5d)。04:30



注:站点分别位于图1中黑色方块与三角形位置。

图4 2019年6月4日20:00(a)宜宾站和(b)沙坪坝站温度-对数压力图

Fig. 4 T - $\ln p$ diagram of (a) Yibin Station and (b) Shapingba Station at 20:00 BT 4 June 2019



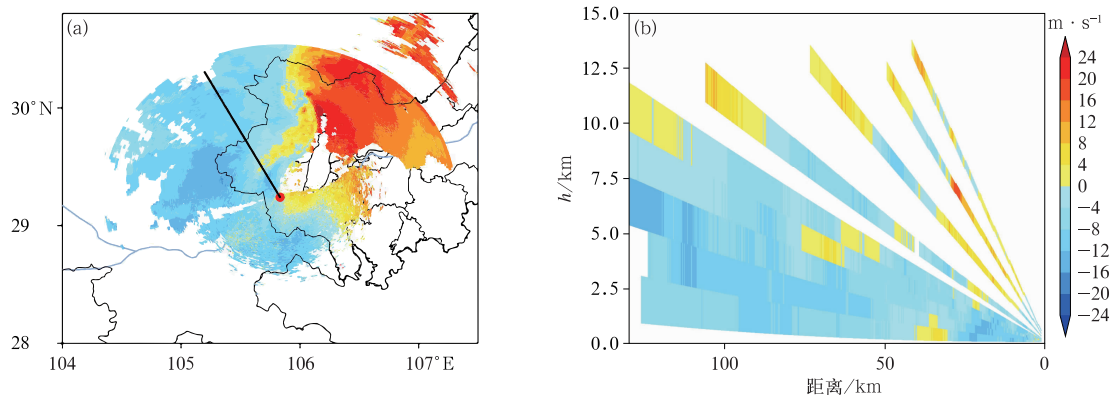
注:灰色阴影代表地形,黑色三角形代表重庆沙坪坝站位置。

图 5 2019 年 6 月 4—5 日雷达组合反射率因子拼图(填色)

Fig. 5 Composite reflectivity mosaic (colored) from 4 to 5 June 2019

“人字形”强回波逐渐东移进入重庆西部,其后侧迅速向内塌陷并演变形弓状(图 5e)。根据中国区域飊线的定义,即水平尺度大于等于 100 km、生命史不少于 1 h、伴有区域性雷暴大风且准连续的多单体线状风暴(俞小鼎等,2020),此时已形成飊线。5 日 05:00—06:00,该弓状飊线发展并快速东移,水

平尺度达到 150 km 以上,移速达到 $60 \sim 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 5f~5h)。移速较快的线状回波常带来地面大风(孙继松等,2013;盛杰等,2020)。04:46,重庆市铜梁站出现了此次过程中的极大风速 $30.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,永川雷达径向速度显示(图 6),雷达西北侧存在低空的辐散气流带,剖面图上距离雷达 30 km 以



注:红色圆点代表雷达位置,黑色线条代表剖面位置。

图 6 2019 年 6 月 5 日 04:46 重庆永川雷达 1.5° 仰角(a)径向速度及(b)剖面

Fig. 6 (a) Radial velocity at 1.5° elevation and (b) its profile of Yongchuan Radar in Chongqing at 04:46 BT 5 June 2019

内、2 km 以下低空存在朝向雷达的 $-16 \sim -10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的近乎接地的负径向速度,而在上方离开雷达的正径向速度也达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,反映了在弓状飊线形成后飊线前部向后的上升气流和飊线后部中下层向前的下沉气流结构。之后东移的飊线形成了暴雨和西北—东南走向的地面大风带,造成了多处广告牌和建筑物等倒塌,是此次强对流过程中致灾影响最严重的阶段,弓状形态维持了约 1.5 h 之后逐渐减弱分离(图 5i)。

4.2 飊线系统形成及演变机制

飊线形成过程中,700 hPa 上维持西南低涡前侧的强西南气流(图 7a,7b)。850 hPa 上 5 日 04:00 由冷切变线形成的线状回波与盆地中部强回波合并形成的“人字形”回波位于低涡中心西南侧,低涡中心后部由冷空气南下形成的呈气旋性弯曲的偏北风急流侵入“人字形”回波后部(图 7c)。地面至 700 hPa 垂直风切变达到 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,切变矢量为西南方向,与飊线并不垂直,而地面至 850 hPa 存在接近垂直于飊线的 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的偏北风切变区,与

冷池相互作用,有利于飊线的形成和维持。“人字形”回波向低涡中心东南侧移动,并逐渐塌陷演变为弓状飊线(图 7d)。

冷暖空气交汇导致锋生效应和抬升作用显著加强。4 日 20:00,四川盆地中南部为西南低涡影响,冷锋位于秦岭以北,盆地内涡区及秦岭北侧冷锋附近存在锋生,对流初生在高空冷槽影响下的四川盆地西部(图 8a)。4 日 23:00,对流东移至盆地内西南低涡锋生区内发展,冷锋锋生区延伸至四川盆地北部(图 8b)。随着冷锋翻越秦岭进入西南低涡后部,冷暖气流交汇,西南低涡涡区内锋生效应和上升运动显著增强(图 8c)。之后,冷锋继续南下,850 hPa 偏北风急流向南推进(图 8d)。在冷锋南下过程中,其后部中低层伴随显著的干空气和下沉气流(图 9),锋区降水遇到夹卷进来的环境干空气时,雨滴蒸发引起空气冷却,有利于下沉气流增强,到地面附近形成冷池和辐散风,且夹卷进入的干空气动量和飊线本身的移动动量在下沉气流中向下传输,有利于移动方向上地面辐散风的显著加强(De Szoeke et al, 2017;杨吉等,2020)。

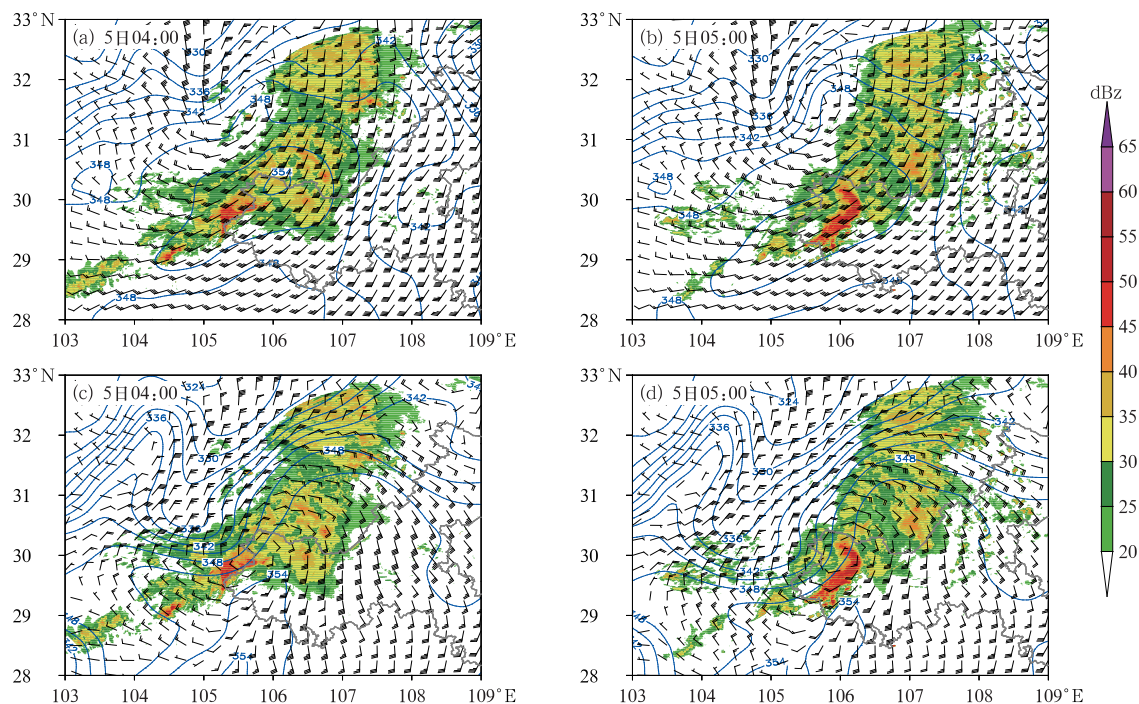
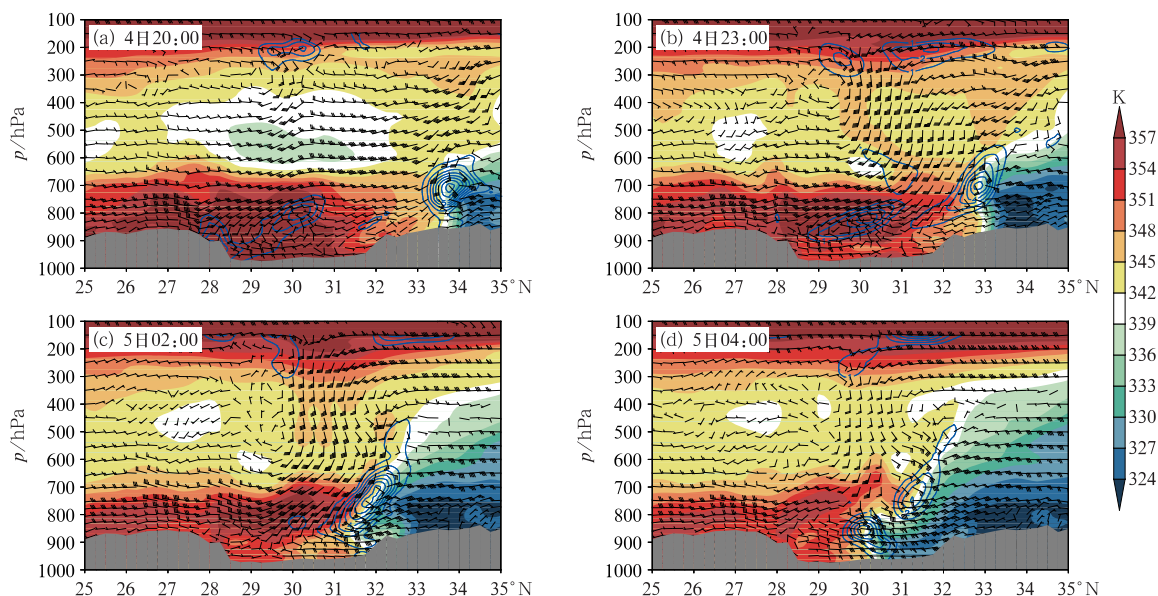


图7 2019年6月5日(a,b)700 hPa,(c,d)850 hPa 相当位温(实线,单位:K)、风场(风羽)及雷达回波(填色)演变

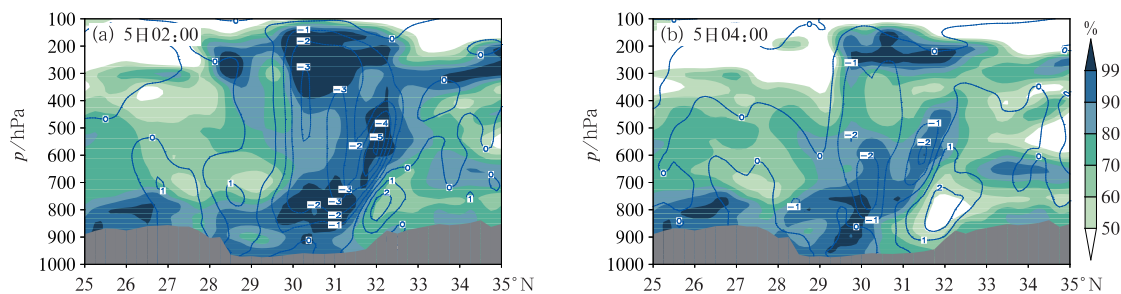
Fig. 7 Evolution of equivalent potential temperature (solid line, unit: K), wind (barb) and radar echo (colored) at (a, b) 700 hPa, and (c, d) 850 hPa on 5 June 2019



注：风羽由经向速度和 5 倍的垂直速度合成，灰色阴影代表地形。

图 8 2019 年 6 月 4—5 日风场(风羽)、相当位温(填色)和锋生函数
(实线,单位: $10^{-8} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 105°E 的剖面

Fig. 8 Profiles of wind (barb), equivalent potential temperature (colored) and frontogenesis function value (solid line, unit: $10^{-8} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) along 105°E from 4 to 5 June 2019



注：灰色阴影代表地形。

图 9 2019 年 6 月 5 日相对湿度(填色)和垂直速度(蓝线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 105°E 的剖面

Fig. 9 Profiles of relative humidity (colored) and vertical velocity (blue line, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) along 105°E on 5 June 2019

可见,强对流过程由暴雨向飑线阶段的演变,发生在低涡后部冷空气南下,与低涡前侧暖湿空气强烈交汇过程中,西南低涡垂直环流圈与冷锋垂直环流圈合并,锋区的锋生效应和抬升机制显著加强,锋后中低层伴随显著干空气,为飑线的形成提供了有利的动力条件。

飑线发展与冷池效应有关,四川盆地地形复杂,自动气象站的海拔高度差异较大,因此采用基于地面自动站气温和气压资料绘制的位温分布来分析地

面气温的演变。4 日 20:00 至 5 日 02:00,四川盆地西部对流性降雨发展东移,地面出现由对流性降雨导致的弱冷区,并随降雨东移逐渐扩大,300 K 以下的冷区扩展至盆地中部的遂宁和宜宾等地。03:00,北方冷锋侵入四川盆地,位温低于 297 K 的冷区从盆地北部扩散南下(图 10a)。04:00,盆地西南部的线状回波与重庆西部的强降雨回波合并发展成为“人字形”的强回波,盆地北部冷区和偏北风进一步加强(图 10b)。之后,地面瞬时风力达到 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以

上的偏北风侵入“人字形”的强回波后部,结合前述锋区后部干空气中的雨滴蒸发冷却作用,形成了低于 298 K 的冷池,冷池出流增强,并与上方西南暖湿气流形成了显著的冷暖交汇和抬升机制,有利于飊线的形成和维持(图 10c,10d)。

可见北方冷锋南下结合锋后雨滴蒸发冷却作用,导致由前期降雨形成的冷区进一步降温形成冷池,冷池出流利于飊线的形成和维持,而飊线前后的

位温梯度加大,密度流加强,也有利于地面风速的增强(孙继松,2023)。飊线形成过程中,由于前期降雨导致地面处于冷区中,与飊线相关的冷池强度偏弱。以飊线过程中最大风出现的铜梁站为代表(图 11),飊线过站时降雨增强,5 分钟降雨量达到 12.8 mm,但气温下降仅约 2℃,气压上升约 3 hPa。

大风的形成也与锋后偏北风动量的向下传输有关。张琳娜等(2018)利用质量权重动能方程对一次

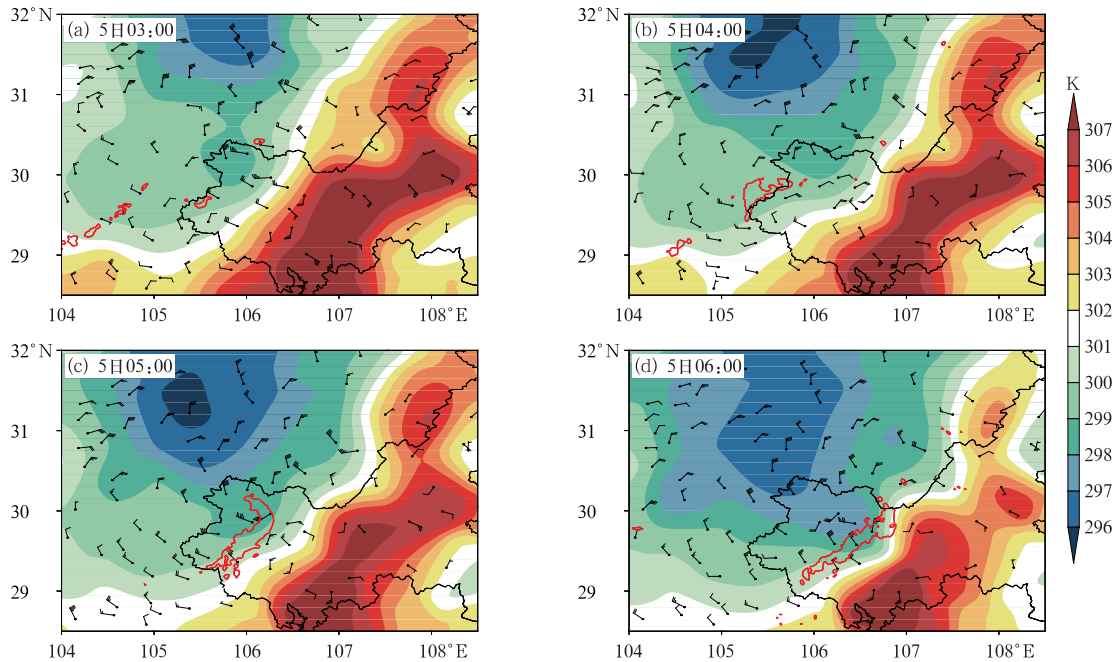


图 10 2019 年 6 月 5 日 03:00—06:00 逐小时地面位温(填色)、瞬时风(风羽)和 45 dBz 的雷达回波(红线)分布

Fig. 10 Distribution of hourly ground potential temperature (colored), instant wind (barb) and radar echo of 45 dBz (red line) from 03:00 BT to 06:00 BT 5 June 2019

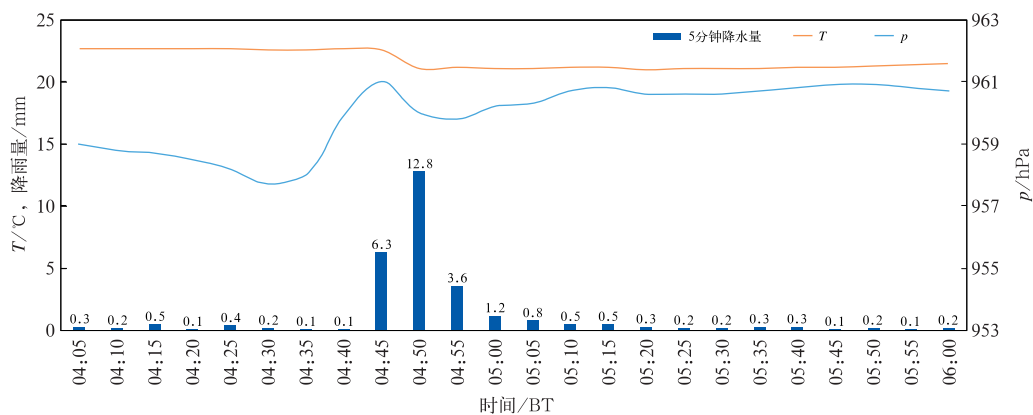


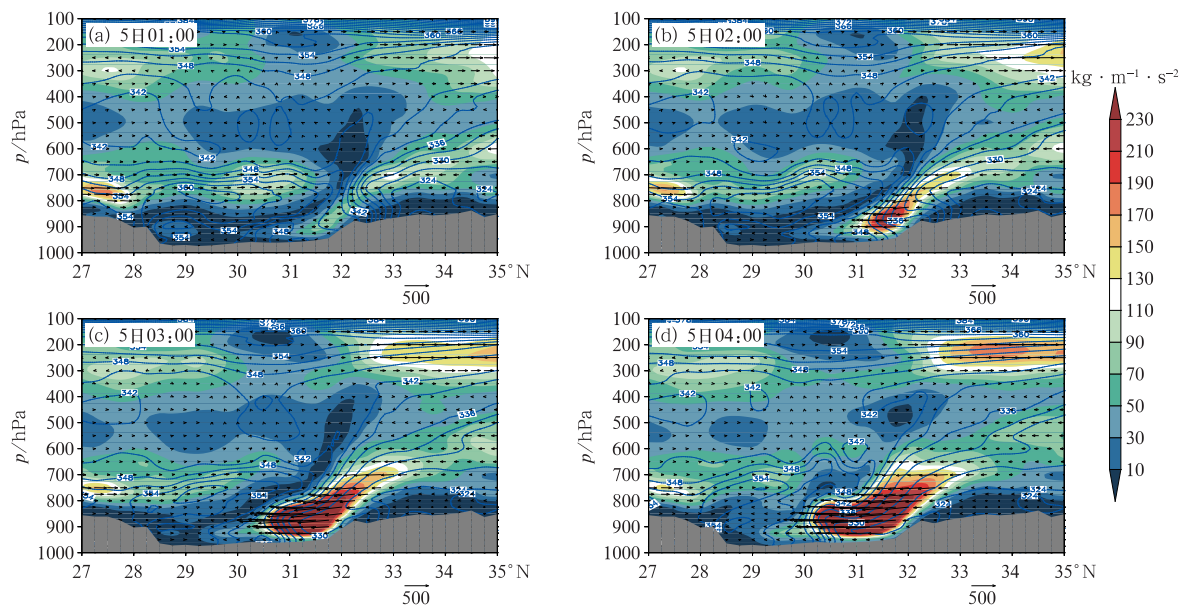
图 11 2019 年 6 月 5 日 04:05—06:00 铜梁站逐 5 分钟降雨量、气温和气压

Fig. 11 The 5 min precipitation, temperature and pressure of every 5 minutes at Tongliang Station from 04:05 BT to 06:00 BT 5 June 2019

雷暴系统中的动能输送的研究表明,雷暴系统后部层云区的中低层存在动能高值区,在后部入流作用下,动能将倾斜向下输送,雷暴系统对流云区的中低层下沉气流也会向下输送动能。图12为此次强对流过程中的相当位温、质量权重动能与质量动能通量沿 105°E 的纬度-高度剖面。图中显示,5日01:00(图12a),北方冷锋逐渐越过秦岭山脉进入四川盆地,斜压锋区对应的相当位温密集带由南向北倾斜,锋后具有较强的偏北风质量权重动能,中心达到 $100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 以上,随着锋区向南输送。5日02:00(图12b),锋面迅速南下进入四川盆地内,锋后偏北风进一步加大,对应的质量权重动能快速增强形成高值区,中心达 $200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 以上,并在锋后下沉气流的作用下存在向低层的输送过程,有利于锋区垂直运动的发展和扰动气压梯度的加强。03:00—04:00(图12c,12d),在动能输送、气压梯度力做功及雨滴蒸发冷却等多种作用下,冷锋后部的水平动能进一步增强,700 hPa以下存在深厚的强质量权重动能区,中心超过 $230\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$,这提供了对飚线形成有利的局地环流条件,也有利于极端地面大风的形成。另外,在冷锋下山的

过程中,300 hPa以上的高空风动能也显著增强,高空急流入口区位于低空冷暖气流交汇区的上空,产生的辐散抽吸作用也有利于锋区上升运动和锋区垂直环流的进一步发展。

综合上述分析,总结了此次西南低涡影响下的飚线过程的天气学概念模型(图13)。西南低涡形成于四川盆地中部,低涡前部有显著的西南暖湿气流,后部有显著的干冷空气南下。冷锋垂直环流与西南低涡垂直环流合并,低空冷暖空气强烈交汇,并在地面形成强烈的位温梯度,为飚线的形成提供了有利的动力条件。冷切变线前侧具有较大的对流有效位能及垂直风切变,且对流层中层干空气特征显著,为飚线形成提供了有利的层结环境。飚线形成于西南低涡冷切变线前侧、地面冷空气前沿及有利的大气环境中。西南低涡后部的强冷空气入侵和低空偏北风急流,结合锋后干冷空气中的雨滴蒸发冷却作用,由前期暴雨形成的边界层内的冷区进一步降温形成冷池,有利于飚线的形成及维持。飚线后部低空强水平动能的向下输送和地面位温梯度的加大,也有利于地面混合性大风的形成。



注:灰色阴影代表地形。

图12 2019年6月5日01:00—04:00逐小时的相当位温(蓝线,单位:K)、质量权重动能(填色)与质量动能通量(箭头,单位: $\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$)沿 105°E 的垂直剖面

Fig. 12 Vertical profile of hourly equivalent potential temperature (blue line, unit: K), mass kinetic energy (colored) and mass kinetic energy flux (arrow, unit: $\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$)

along 105°E from 01:00 BT to 04:00 BT 5 June 2019

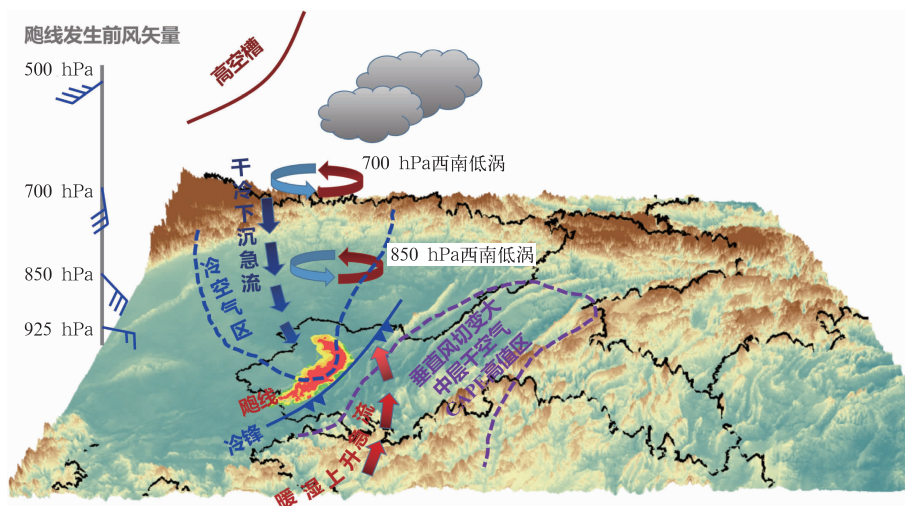


图13 2019年6月5日四川盆地西南低涡影响下飑线的天气学概念模型

Fig. 13 Synoptic conceptual model of squall line under the influence of the southwest vortex in Sichuan Basin on 5 June 2019

5 结论与讨论

2019年6月4日夜间至5日白天发生在四川盆地的大范围强对流天气,具有阶段性的演变特征。4日20:00至5日04:00以暴雨天气为主,5日04:00以后演变为飑线天气,其中弓状飑线维持了大约1.5 h。本文采用多源观测资料及ERA5再分析资料对此次飑线天气的演变特征及机制进行了诊断分析。

(1)飑线形成前的对流性暴雨在高空低槽和暖性西南低涡的环流背景下产生,降雨在四川盆地西部促发,随冷槽东移,在西南低涡锋生区中发展加强。飑线主要由高空冷槽、西南低涡及冷锋等共同影响形成。西南低涡后部冷空气南下,冷锋垂直环流与西南低涡垂直环流合并,涡区内低空冷暖气流交汇显著,为飑线的形成提供了有利的动力条件。

(2)飑线的形成与环境条件有关。飑线形成前的对流性暴雨发生在湿层深厚且具有一定对流有效位能的大气中。而飑线发生在具有较大的对流有效位能和深层垂直风切变的大气环境中,对流层中层750~450 hPa有显著的干空气存在,对流层中低层具有较大的垂直减温率,均有利于飑线天气的发生发展。

(3)雷达上此次飑线的形成过程表现为冷切变线形成的线状对流与西南低涡锋生区内的强降雨对

流合并发展,形成“人字形”回波并移向具有显著层结不稳定的重庆西部地区。同时冷锋南下结合锋后干空气中的雨滴蒸发冷却作用,由前期暴雨形成的冷区进一步降温,冷池出流有利于促进飑线的形成和维持。冷锋后部出现强低空水平动能输送,而锋后下沉支中的向下输送作用导致低空水平动能的向下输送,以及冷锋南下导致地面冷暖空气间的位温梯度加大,密度流加强,有利于飑线和地面大风的形成。

川渝地区由西南低涡和冷空气结合形成的暴雨事件较为常见,但在西南低涡影响下出现飑线天气的个例相对少但影响同样严重。此次西南低涡影响下的先暴雨后飑线的阶段性强对流天气,不仅与多尺度天气系统的共同影响及适宜配置有关,也与西南低涡不同部位的大气环境特征及中尺度对流的合并发展有关,其飑线发展的精细结构及机制还有待于更多更深入的研究。

参考文献

- 蔡雪薇, 谌芸, 沈新勇, 等, 2019. 冷涡背景下不同类型强对流天气的成因对比分析[J]. 气象, 45(5): 621-631. Cai X W, Chen Y, Shen X Y, et al, 2019. Cause analysis of different types of severe convective weather under cold vortex background[J]. Meteor Mon, 45(5): 621-631(in Chinese).
- 陈贵川, 刘德, 张焱, 等, 2015. 重庆市暴雨天气分析图集[M]. 北京: 气象出版社. Chen G C, Liu D, Zhang Y, et al, 2015. Atlas of Rainstorm Weather Analysis in Chongqing[M]. Beijing: China

- Meteorological Press(in Chinese).
- 陈晓欣,俞小鼎,王秀明,2022. 中国大范围雷暴大风事件(Derechos)研究:时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J]. 气象学报, 80(1):67-81. Chen X X, Yu X D, Wang X M, 2022. Investigation of derechos in China: spatiotemporal distribution, environmental characteristics, and morphology of derechos producing convective systems[J]. Acta Meteor Sin, 80(1):67-81(in Chinese).
- 陈忠明,徐茂良,闵文彬,等,2003. 1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨[J]. 高原气象, 22(2):162-167. Chen Z M, Xu M L, Min W B, et al, 2003. Relationship between abnormal activities of southwest vortex and heavy rain the upper reach of Yangtze River during summer of 1998[J]. Plateau Meteor, 22(2):162-167(in Chinese).
- 程晓龙,李跃清,徐祥德,等,2019. 汛期西南涡暴雨的数值模拟研究[J]. 高原气象, 38(2):359-367. Cheng X L, Li Y Q, Xu X D, et al, 2019. Research and numerical simulation of a torrential rain caused by the Southwest China vortex during flood period[J]. Plateau Meteor, 38(2):359-367(in Chinese).
- 邓承之,赵宇,孔凡铀,等,2021. “6·30”川渝特大暴雨过程中西南低涡发展机制模拟分析[J]. 高原气象, 40(1):85-97. Deng C Z, Zhao Y, Kong F Y, et al, 2021. A numerical simulation study of the southwest vortex mechanism during the “6·30” heavy rain event in Sichuan and Chongqing[J]. Plateau Meteor, 40(1):85-97(in Chinese).
- 丁一汇,章名立,李鸿洲,等,1981. 暴雨和强对流天气发生条件的比较分析[J]. 大气科学, 5(4):388-397. Ding Y H, Zhang M L, Li H Z, et al, 1981. A comparative study on the occurrence conditions of heavy rainfall and severe convective weather[J]. Chin J Atmos Sci, 5(4):388-397(in Chinese).
- 高笃鸣,李跃清,程晓龙,2018. 基于西南涡加密探空资料同化的一次奇异路径耦合低涡大暴雨数值模拟研究[J]. 气象学报, 76(3):343-360. Gao D M, Li Y Q, Cheng X L, 2018. A numerical study on a heavy rainfall caused by an abnormal-path coupling vortex with the assimilation of Southwest China vortex scientific experiment data[J]. Acta Meteor Sin, 76(3):343-360(in Chinese).
- 高晓梅,俞小鼎,王令军,等,2018. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J]. 气象学报, 76(2):196-212. Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al, 2018. Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin, 76(2):196-212(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).
- 何光碧,2012. 西南低涡研究综述[J]. 气象, 38(2):155-163. He G B, 2012. Review of the southwest vortex research[J]. Meteor Mon, 38(2):155-163(in Chinese).
- 何光碧,曾波,郁淑华,等,2016. 青藏高原周边地区持续性暴雨特征分析[J]. 高原气象, 35(4):865-874. He G B, Zeng B, Yu S H, et al, 2016. Analysis of durative rainstorm characteristics occurred in the ambient area of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 35(4):865-874(in Chinese).
- 侯淑梅,朱晓清,史茜,等,2023. 冷涡背景下山东省“5·17”极端强对流天气环境条件分析[J]. 气象, 49(11):1328-1342. Hou S M, Zhu X Q, Shi Q, et al, 2023. Analysis of the environmental conditions of “5·17” extremely severe convective weather in Shandong Province under the background of cold vortex[J]. Meteor Mon, 49(11):1328-1342(in Chinese).
- 雷蕾,孙继松,魏东,2011. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. 气象, 37(2):136-141. Lei L, Sun J S, Wei D, 2011. Distinguishing the category of the summer convective weather by sounding data in Beijing[J]. Meteor Mon, 37(2):136-141(in Chinese).
- 李国平,陈佳,2018. 西南涡及其暴雨研究新进展[J]. 暴雨灾害, 37(4):293-302. Li G P, Chen J, 2018. New progresses in the research of heavy rain vortices formed over the Southwest China[J]. Torr Rain Dis, 37(4):293-302(in Chinese).
- 李国平,万军,卢敬华,1991. 暖性西南低涡生成的一种可能机制[J]. 应用气象学报, 2(1):91-99. Li G P, Wan J, Lu J H, 1991. A potential mechanism of the warm vortex genesis in Southwest China[J]. Quart J Appl Meteor, 2(1):91-99(in Chinese).
- 李跃清,2021. 西南涡涡源研究的有关新进展[J]. 高原气象, 40(6):1394-1406. Li Y Q, 2021. New related progress on researches of the vortex source of Southwest China vortex[J]. Plateau Meteor, 40(6):1394-1406(in Chinese).
- 李跃清,徐祥德,2016. 西南涡研究和观测试验回顾及进展[J]. 气象科技进展, 6(3):134-140. Li Y Q, Xu X D, 2016. A review of the research and observing experiment on Southwest China vortex[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3):134-140(in Chinese).
- 刘德,张亚萍,陈贵川,等,2012. 重庆市天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社. Liu D, Zhang Y P, Chen G C, et al, 2012. Weather Forecast Technical Manual in Chongqing[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 刘式适,刘式达,1991. 大气动力学[M]. 北京:北京大学出版社:20-21. Liu S K, Liu S D, 1991. Atmospheric Dynamics[M]. Beijing: Peking University Press:20-21(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).
- 沈杭锋,方桃妮,蓝俊倩,等,2019. 一次强飑线过程极端大风的中尺度分析[J]. 气象学报, 77(5):806-822. Shen H F, Fang T N, Lan J Q, et al, 2019. Mesoscale analysis of the extremely damaging gale in a severe squall line[J]. Acta Meteor Sin, 77(5):806-822

- (in Chinese).
- 盛杰,郑永光,沈新勇,2020. 华北两类产生极端强天气的线状对流系统分布特征与环境条件[J]. 气象学报,78(6):877-898. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, 2020. Climatology and environmental conditions of two types of quasi-linear convective systems with extremely intense weather in North China[J]. Acta Meteor Sin, 78(6):877-898(in Chinese).
- 孙继松,2023. 与直线型对流大风相关的强风暴形态结构和热力学过程[J]. 气象,49(1):1-11. Sun J S,2023. The pattern structure and thermodynamic and dynamic processes of severe storms associated with linear convective gales[J]. Meteor Mon,49(1):1-11(in Chinese).
- 孙继松,何娜,郭锐,等,2013. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制[J]. 大气科学,37(1):137-148. Sun J S, He N, Guo R, et al, 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms[J]. Chin J Atmos Sci,37(1):137-148(in Chinese).
- 孙继松,陶祖钰,2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象,38(2):164-173. Sun J S, Tao Z Y,2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast[J]. Meteor Mon,38(2):164-173(in Chinese).
- 孙建华,郑淋淋,赵思雄,2014. 水汽含量对飑线组织结构和强度影响的数值试验[J]. 大气科学,38(4):742-755. Sun J H, Zheng L L, Zhao S X, 2014. Impact of moisture on the organizational mode and intensity of squall lines determined through numerical experiments[J]. Chin J Atmos Sci,38(4):742-755(in Chinese).
- 王婧羽,崔春光,陈杨瑞雪,等,2022. 西南山区5—8月产生突发性暴雨事件的中尺度对流系统的时空分布特征[J]. 气象学报,80(1):21-38. Wang J Y, Cui C G, Chen Y R X, et al,2022. Temporal and spatial characteristics of mesoscale convective systems associated with abrupt heavy rainfall events over Southwest China during May—August[J]. Acta Meteor Sin,80(1):21-38(in Chinese).
- 王秀明,周小刚,俞小鼎,2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究[J]. 气象学报,71(5):839-852. Wang X M, Zhou X G, Yu X D,2013. Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures[J]. Acta Meteor Sin,71(5):839-852(in Chinese).
- 吴海英,曾明剑,蒋义芳,等,2021. 一次雹暴过程中对流系统演变特征的模拟分析[J]. 高原气象,40(3):569-579. Wu H Y, Zeng M J, Jiang Y F, et al,2021. Simulation analysis of evolution characteristics of the convective system during a hail storm course[J]. Plateau Meteor,40(3):569-579(in Chinese).
- 吴志鹏,李跃清,李晓岚,等,2021. WRF模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响[J]. 大气科学,45(1):58-72. Wu Z P, Li Y Q, Li X L, et al,2021. Influence of different planetary boundary layer parameterization schemes on the simulation of precipitation caused by Southwest China vortex in Sichuan Basin based on the WRF model[J]. Chin J Atmos Sci,45(1):58-72(in Chinese).
- 肖红茹,王佳津,肖递祥,等,2021. 四川盆地暖区暴雨特征分析[J]. 气象,47(3):303-316. Xiao H R, Wang J J, Xiao D X, et al, 2021. Analysis of warm-sector rainstorm characteristics over Sichuan Basin[J]. Meteor Mon,47(3):303-316(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).
- 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:415-416. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorm and Strong Convection Nowcasting[M]. Beijing:China Meteorological Press:415-416(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).
- 翟丹华,张亚萍,邱鹏,等,2015. 琼江两次洪水过程的水文气象分析[J]. 气象,41(1):59-67. Zhai D H, Zhang Y P, Qiu P, et al,2015. Hydrometeorological analysis of two flood events in Qionjiang River Basin[J]. Meteor Mon,41(1):59-67(in Chinese).
- 张弛,王咏青,沈新勇,等,2019. 东北冷涡背景下飑线发展机制的理论分析和数值研究[J]. 大气科学,43(2):361-371. Zhang C, Wang Y Q, Shen X Y, et al,2019. Theoretical analysis and numerical study on the development mechanism of squall line in the northeast cold vortex[J]. Chin J Atmos Sci,43(2):361-371(in Chinese).
- 张芳华,陈涛,杨舒楠,等,2014. 一次冬季暴雨过程中的锋生和条件对称不稳定分析[J]. 气象,40(9):1048-1057. Zhang F H, Chen T, Yang S N, et al,2014. Diagnosis of the frontogenesis and CSI features during a torrential rainfall event in winter[J]. Meteor Mon,40(9):1048-1057(in Chinese).
- 张琳娜,冉令坤,李娜,等,2018. 雷暴大风过程中对流层中低层动量通量和动能通量输送特征研究[J]. 大气科学,42(1):178-191. Zhang L N, Ran L K, Li N, et al,2018. Analysis of momentum flux and kinetic energy flux transport in the middle and lower troposphere during a thunderstorm event[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1):178-191(in Chinese).
- 张亚萍,邓承之,牟容,等,2015. 重庆市强对流天气分析图集[M]. 北京:气象出版社. Zhang Y P, Deng C Z, Mu R, et al,2015. Atlas of Severe Convective Weather Analysis in Chongqing[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 张哲,周玉淑,高守亭,2018. 一次辽东湾飑线过程的观测与数值模拟分析[J]. 大气科学,42(5):1157-1174. Zhang Z, Zhou Y S, Gao S T,2018. Observational and numerical analyses of a squall line occurring over Liaodong Gulf of China[J]. Chin J Atmos Sci,42(5):1157-1174(in Chinese).
- 赵思雄,傅慎明,2007. 2004年9月川渝大暴雨期间西南低涡结构及

- 其环境场的分析[J]. 大气科学, 31(6):1059-1075. Zhao S X, Fu S M, 2007. An analysis on the southwest vortex and its environment fields during heavy rainfall in eastern Sichuan Province and Chongqing in September 2004[J]. Chin J Atmos Sci, 31(6): 1059-1075(in Chinese).
- 周春花, 肖递祥, 郁淑华, 2022. 诱发四川盆地极端暴雨的西南涡环流背景和结构特征[J]. 气象, 48(12):1577-1589. Zhou C H, Xiao D X, Yu S H, 2022. Circulation background and structural characteristics of the southwest vortex inducing extreme rainstorm in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 48(12):1577-1589 (in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理和方法: 第 4 版[M]. 北京: 气象出版社: 371-374. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Synoptic Principles and Methods[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press: 371-374(in Chinese).
- 宗志平, 张小玲, 2005. 2004 年 9 月 2—6 日川渝持续性暴雨过程初步分析[J]. 气象, 31(5): 37-41. Zong Z P, Zhang X L, 2005. Analysis on heavy rain event in Sichuan and Chongqing during 2—6 September 2004[J]. Meteor Mon, 31(5): 37-41 (in Chinese).
- Chen G T J, Wang C C, Wang A H, 2007. A case study of subtropical frontogenesis during a blocking event[J]. Mon Wea Rev, 135(7):2588-2609.
- De Szoeki S P, Skillingstad E D, Zuidema P, et al, 2017. Cold pools and their influence on the tropical marine boundary layer[J]. J Atmos Sci, 74(4):1149-1168.
- Knupp K R, 1987. Downdrafts within high plains cumulonimbi. Part I: general kinematic structure[J]. J Atmos Sci, 44(6): 987-1008.
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J, 2013. General features of squall lines in East China[J]. Mon Wea Rev, 141(5):1629-1647.

(本文责编: 俞卫平)