



邓承之, 朱岩, 刘毅, 等. 2026. 影响重庆的西南涡强降水动态分布特征及成因分析 [J]. 大气科学, 50(4): 1179–1193. DENG Chengzhi, ZHU Yan, LIU Yi, et al. 2026. Analysis of Dynamic Distribution Characteristics and Genesis of the Southwest China Vortex Rainstorms in Chongqing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 50(4): 1179–1193. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2508.25052

影响重庆的西南涡强降水动态分布特征及成因分析

邓承之^{1,2} 朱岩¹ 刘毅¹ 翟丹华¹ 周国兵³ 吴胜刚¹

¹ 重庆市气象台, 重庆 401147

² 致灾天气数智融合预报预警重庆市重点实验室, 重庆 401147

³ 重庆市气象局, 重庆 401147

摘要 针对西南涡及其强降水落区的移动性, 选取 2019~2023 年影响重庆的 25 次西南涡强降水过程, 采用跟随低涡中心移动的动态合成方法, 分析了强降水相对于西南涡中心的动态分布特征与成因。结果表明: 西南涡强降水可分为东南型、东部型和多象限型三类。各类西南涡强降水分布和高空急流位置、低槽强度及经向度、低空急流出口区、冷暖平流分布等密切相关, 热力、动力特征表现出明显的异同性。东南型为持续时间较短、抬升运动较弱的西南涡影响, 低涡垂直方向发展较为浅薄, 呈现显著向西北倾斜特征。东部型为持续时间长、抬升运动强的西南涡影响, 低涡垂直方向发展较为深厚, 低层呈现向西北倾斜特征。多象限型为后部有冷空气持续侵入且抬升运动强的西南涡影响, 低涡前后风速具有一定对称性, 冷暖气流交汇显著, 低涡垂直方向发展最为深厚, 低层呈现向北倾斜特征。

关键词 四川盆地 西南涡 强降水 动态分布 动态合成

文章编号 1006-9895(2026)04-1179-15

中图分类号 P458.1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2508.25052

Analysis of Dynamic Distribution Characteristics and Genesis of the Southwest China Vortex Rainstorms in Chongqing

DENG Chengzhi^{1,2}, ZHU Yan¹, LIU Yi¹, ZHAI Danhua¹,
ZHOU Guobing³, and WU Shenggang¹

¹ Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

² Chongqing Key Laboratory of Numerical Model-AI Integrated Forecast and Warning for Severe Weather, Chongqing 401147

³ Chongqing Meteorological Administration, Chongqing 401147

Abstract To investigate the mobility of the Southwest China Vortex (SWV) and its associated rainstorm regions, this study examined 25 SWV-related rainstorm events that affected Chongqing during 2019–2023. A dynamic compositing method that tracks the movement of the vortex center was employed to analyze the dynamic characteristics and genesis of the SWV and the distribution of heavy rainfall relative to the vortex center. The conclusions are as follows: SWV

收稿日期 2025-03-30; 网络预出版日期 2025-10-29

作者简介 邓承之, 男, 正高级工程师, 主要从事灾害性天气预报研究。E-mail: 95640680@qq.com

通讯作者 刘毅, 男, 正高级工程师, 主要从事灾害性天气预报研究。E-mail: 269239974@qq.com

资助项目 国家自然科学基金气象联合基金重点项目 U2242202, 重庆市自然科学基金项目 CSTB2022NSCQ-MSX0665, 中国气象局创新发展专项 CXFZ2024J070、CXFZ2026J015

Funded by Joint Meteorological Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant U2242202), Chongqing Natural Science Foundation General Project (Grant CSTB2022NSCQ-MSX0665), Innovation and Development Special Project of China Meteorological Administration (Grants CXFZ2024J070, CXFZ2026J015)

rainstorms can be categorized into three types: southeastern, eastern, and multi-quadrant types. The distribution of heavy rainfall for each SWV type is closely related to the position of the upper-level jet, the intensity and meridional extent of the trough, the exit region of low-level jets, and the distribution of warm-air and cold-air advection, while the thermodynamic and dynamic characteristics exhibit distinct similarities and differences. The southeastern type is influenced by the short-lived SWV with weaker upward motion, shallow vertical development, and a pronounced northwestward tilt. The eastern type involves the long-lived, intense SWV with deeper vertical development and a low-level northwestward tilt. The multi-quadrant type is influenced by the SWV with sustained cold-air intrusion from the rear and strong uplift movement. The configuration features symmetric winds in the front and rear, pronounced cold- and warm-air convergence, the deepest vertical development among the three types, and a low-level northward tilt.

Keywords Sichuan Basin, Southwest China Vortex, Rainstorm, Dynamic distribution, Dynamic compositing

1 引言

西南低涡（简称西南涡）是我国西南地区特殊地形与区域环流相互作用下、对流层低层（700 或 850 hPa）川西高原和四川盆地等产生的 α 中尺度涡旋，是影响西南及周边地区强降水发生的重要天气系统（寿绍文，2019；赖欣等，2023；孙建华等，2024）。西南涡形成后，可产生范围不大的阴雨天气，但当其离开源地外移发展时，常伴随下游大范围的强降水天气（卢敬华，1986）。对流层中高层冷空气侵入和低层偏西风水汽输送，利于西南涡生成后东移（潘昉等，2011）。并且，前部暖湿平流和后部干冷平流的协同作用，是西南涡维持气旋结构和向前移动的重要因子（Chen and Li, 2022）。西南涡东移过程中其前侧的降水增强，与持续的负值非平衡动力强迫有关（邓承之等，2021，2024），也与低涡东移过程中前侧的不稳定性增加和对流活动更强有关（Lu et al., 2020）。总之，西南涡是影响我国降水过程的重要天气系统之一。

学者们常基于气象要素和多尺度天气系统配置联合表达西南涡强降水的位置和强度特征。研究表明，垂直螺旋度的大值中心位置和强弱变化与西南涡强降水的位置和强度有很好的对应关系（王中等，2008）。不稳定性 and 低空急流轴在判断西南涡强降水过程的初始对流启动位置上有重要作用（宗志平等，2013）。伴随深厚中气旋的强降水超级单体可能导致西南涡极端强降水中心的发生（陈贵川等，2013）。北方干冷空气和南方暖湿气流交汇产生的平均温度偏差梯度的大值区是西南涡强降水的主要落区（Cheng et al., 2016）。西南涡形成初期的强降水主要位于由潜热加热引起的中尺度“涡旋热塔”附近（Zhai et al., 2021）。西南涡中心及其

前侧的暖湿边界层辐合线附近易发生中尺度对流系统和强降水（邓承之等，2023）。

而对西南涡强降水过程进行分类，可以更系统地刻画其分布和热动力特征。卢萍等（2014）按照西南涡的移动路径，将影响重庆强降水的西南涡分为偏东路径型、东北路径型和停滞少动型。三种类型西南涡的移动路径主要受大尺度环流影响，不同路径西南涡造成的强降水落区通常位于低涡中心附近，雨带分布与低涡移动路径基本一致。翟丹华等（2014）对影响重庆中西部的西南涡强降水个例的合成分析表明，700 hPa 正涡度中心南侧由低层辐合和高层辐散形成的上升运动区常与强降水落区相对应。Feng et al.（2016）按照分布区域和季节将西南涡分为盆地冬春季干冷涡、盆地暖季降水涡、山区边界层干暖涡和山区深厚强降水涡 4 类。其中，盆地暖季降水涡的夜发性特征显著，强降水对应一个更强、更深、更直立的湿涡旋环流，以及更强的辐合上升运动。韩林君和白爱娟（2019）按最大降水相对西南涡的位置将西南涡强降水分为 12 类，选取其中频数较高的 4 类分析其降水特征。发现中部降水型的强降水范围最广，雨强最大，其次为东南降水型、东部降水型与东北降水型。东北与中部降水型流场相似，冷暖气流在盆地北部交汇，东部与东南部降水型无显著北方冷空气影响，降水位置偏南。毛紫怡和刘金卿（2021）利用多变量 EOF 法和 K 均值聚类法将影响湖南的西南涡强降水分为暖区类、回流类和锋面类，其中，暖区类强度最强，落区集中在湘中以北，回流类和锋面类强度相当，回流类落区集中在湘东南，锋面类落区位于锋面附近并沿切变线分布。姚静等（2024）合成分析了陕南近年的 38 个西南涡强降水日，强降水落区主要位于 700 hPa 西南涡中心的东北象限附近、切

变线以南区域、假相当位温的梯度大值区, 以及 500 hPa 西风槽和副高外围西南气流的交汇区域, 且对应 200 hPa 强辐散区。

但上述研究对西南涡及其强降水的动态移动及其影响特征考虑较少, 实际上, 西南涡及其降水的位置和强度是时刻变化的, 而结合西南涡中心位置变化的动态分析, 可以更清晰地刻画西南涡及其强降水的关系。目前, 对西南涡的精细结构及其引发高影响天气的物理机理等方面的认识仍存在较多不足, 对西南涡及其降水影响的研究和预报仍是气象学领域的重点和难点之一(何光碧, 2012; 李跃清和徐祥德, 2016; 李国平和陈佳, 2018)。由于重庆位于西南涡主要源地四川盆地的东南部, 西南涡强降水占重庆汛期大范围强降水过程的 76% 以上(王中和王嘉佩, 2024), 因此, 深刻理解西南涡及其强降水特征对重庆汛期的强降水天气预报极为重要。本文在参考中国气象局成都高原气象研究所整编《西南低涡年鉴》的基础上, 选取 2019~2023 年影响重庆地区的 25 次西南涡强降水过程, 采用跟随低涡中心移动的动态合成法, 依据西南涡影响范围内强降水的象限分布特征进行分类并开展合成分析, 以减少因西南涡和降水移动引起的对低涡降水落区分析的不足, 进一步揭示强降水相对于西南涡中心的分布特征及其成因。

2 资料与方法

2.1 资料说明

采用的资料包括: (1) 2019~2023 年选取西南涡强降水过程期间的 ERA5 再分析资料, 时间分辨率逐小时, 空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 用于分析天气形势和西南涡时空演变特征; (2) 国家站和区域自动站逐小时降水资料, 用于分析降水时空演变特征。

2.2 研究方法

采用动态合成法, 对西南涡强降水及其天气形势开展动态合成分析(Li et al., 2017; 屈顶等, 2023), 研究西南涡强降水空间分布及热动力结构特征。具体步骤为: 以逐小时西南涡中心所在经纬度为原点, 横、纵坐标分别为相对于西南涡中心的经、纬度。取经向和纬向距离原点位置指定范围内的降水及各项要素场进行合成。合成的要素场包括降水、位势高度、风场, 以及温度平流、垂直速度、相当位温、涡度、散度等。

2.3 西南涡强降水个例选取及分类

参考《西南低涡年鉴》, 选取 2019~2023 年对重庆地区影响较大的 25 次西南涡强降水过程, 强降水过程为造成 6 个以上国家站出现 ≥ 50 mm 日降水量的降水过程。这些西南涡强降水过程, 700 hPa 西南涡中心主要形成在四川盆地的中西部区域, 在盆地内维持时间 8~59 h, 其中, 多数西南涡在四川盆地内的影响时间少于 24 h, 超过 24 h 的 6 例。西南涡生成后, 一般向东、偏南或偏北移动, 个别西南涡也存在向西移动的情况。

依据逐个西南涡强降水过程动态合成的强降水落区, 人工分析其强降水象限分布。首先, 基于其东北、东南、西南、西北 4 个基本象限, 以及两个和以上多个组合象限, 根据强降水的集中分布, 将西南涡强降水个例按照单象限东北、东南、西南、西北, 以及两象限东部、西部、北部、南部和多象限等划分不同类型, 然后, 分别对所得不同类型的西南涡强降水开展合成分析, 研究不同象限分布的西南涡强降水过程的天气系统配置和热动力结构特征。

3 西南涡强降水分布特征及分类

3.1 西南涡平均降水分布

动态合成的西南涡降水和流场空间分布如图 1 所示(各类西南涡强降水个例的流场和降水合成分析, 见图 2)。西南涡东南象限降水最强, 逐小时平均降水量主要在 1~3 mm 之间, 并出现较大范围的 2~3 mm 降水区域。其次为东北象限, 逐小时平均降水量主要在 0.5~3 mm 之间, 2~3 mm 的降水区域小于东南象限。西南象限逐小时平均降水量在 0.1~2 mm 之间, 约半数区域出现 0.5~2 mm 的降水。西北象限降水最弱, 逐小时平均降水量主要在 0.1~0.5 mm 之间, 仅西南涡中心附近出现较小范围 0.5~2 mm 的降水(图 1a)。与逐小时平均降水量分布类似, 5 mm、10 mm 和 20 mm 以上的小时降水量出现频率最高的均为东南象限, 其次为东北象限, 西南象限较少, 西北象限最少(图 1b~d)。而 50 mm 以上的小时降水分布较为分散, 主要出现在东北、东南和西南三象限(图 1e)。

综上所述, 虽然西南涡各象限均可能出现降水, 但主要降水位于西南涡的东南、东北和西南象限。其中, 东南象限降水最为显著, 强降水频次最高, 其次为东北象限, 再次为西南象限, 西北象限降水最弱。

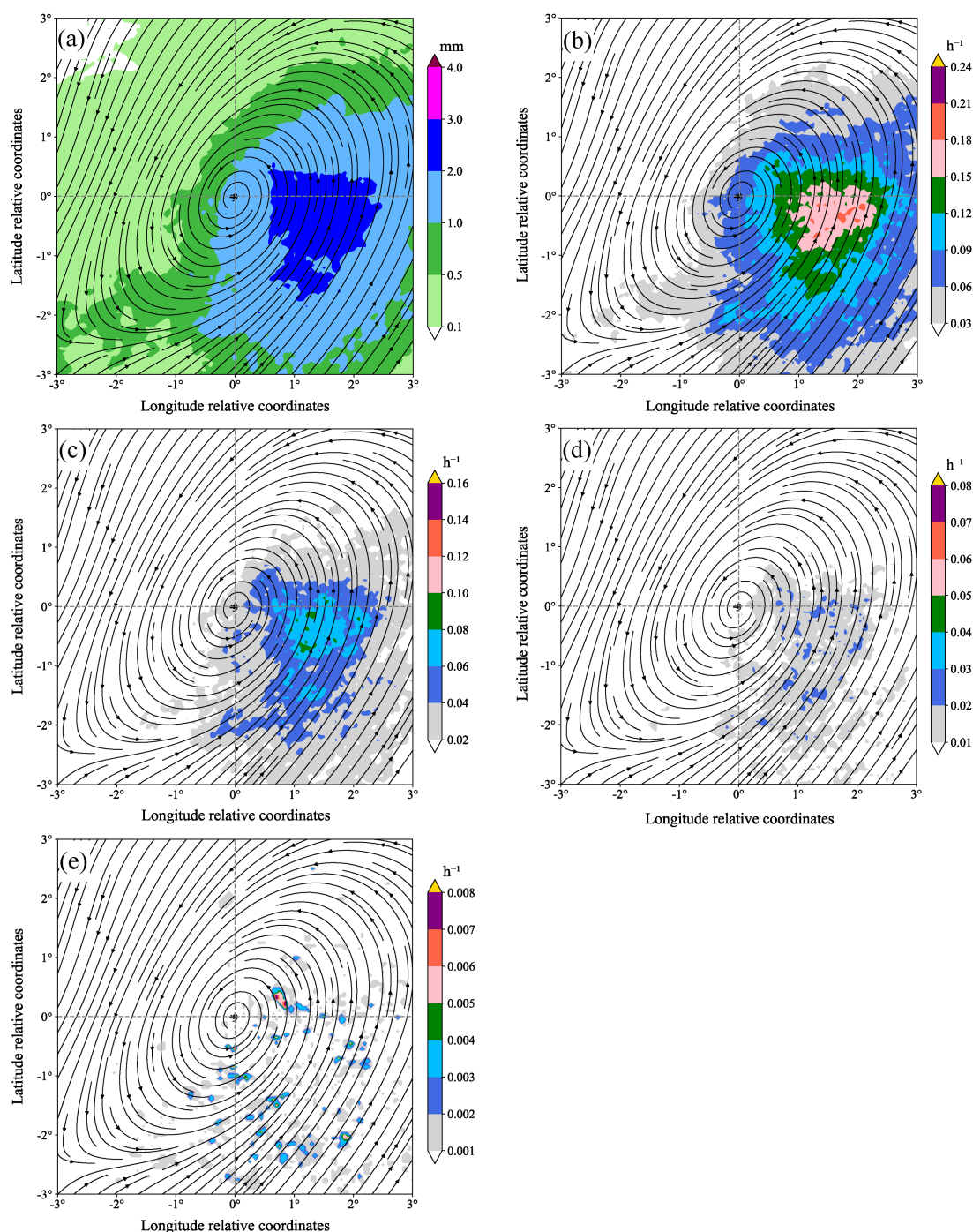


图1 2019~2023年西南涡逐小时平均流场(流线)叠加(a)逐小时平均降水量(填色,单位: mm)、(b) ≥ 5 mm小时降水频率(填色,单位: h^{-1})、(c) ≥ 10 mm小时降水频率(填色,单位: h^{-1})、(d) ≥ 20 mm小时降水频率(填色,单位: h^{-1})和(e) ≥ 50 mm小时降水频率(填色,单位: h^{-1})的空间分布。垂直和水平虚线代表经过西南涡中心的经线和纬线,下同。

Fig. 1 Spatial distribution of the hourly mean flow field (streamlines) overlaid with (a) hourly mean precipitation (color shadings, units: mm) and hourly precipitation frequency for thresholds of (b) ≥ 5 mm, (c) ≥ 10 mm, (d) ≥ 20 mm and (e) ≥ 50 mm (color shadings, units: h^{-1}) in the SWV (Southwest China Vortex) from 2019 to 2023. Vertical and horizontal dashed lines denote the longitude and latitude lines passing through the SWV center, the same below.

3.2 西南涡降水象限分类

依据逐个西南涡强降水过程动态合成的强降水

落区开展主观分型,可将西南涡强降水个例分为东南型、东部型和多象限型三类。东南型的强降水主

要位于西南涡的东南象限, 东部型的强降水主要位于西南涡的东南和东北两象限, 多象限型的强降水主要位于西南涡的东南、东北和西南三象限。统计东南型、东部型和多象限型的西南涡强降水个例数, 如表 1 所示。东南型出现 7 例, 西南涡维持平

均时长 15.4 h, 总时长 108 h, 占全部西南涡强降水个例总时长的 21%; 东部型最多, 出现 12 例, 低涡平均维持 23.6 h, 总时长 283 h, 占全部西南涡强降水个例总时长的 54%; 多象限型出现 6 例, 低涡维持平均时长 21.8 h, 总时长 131 h, 占全部

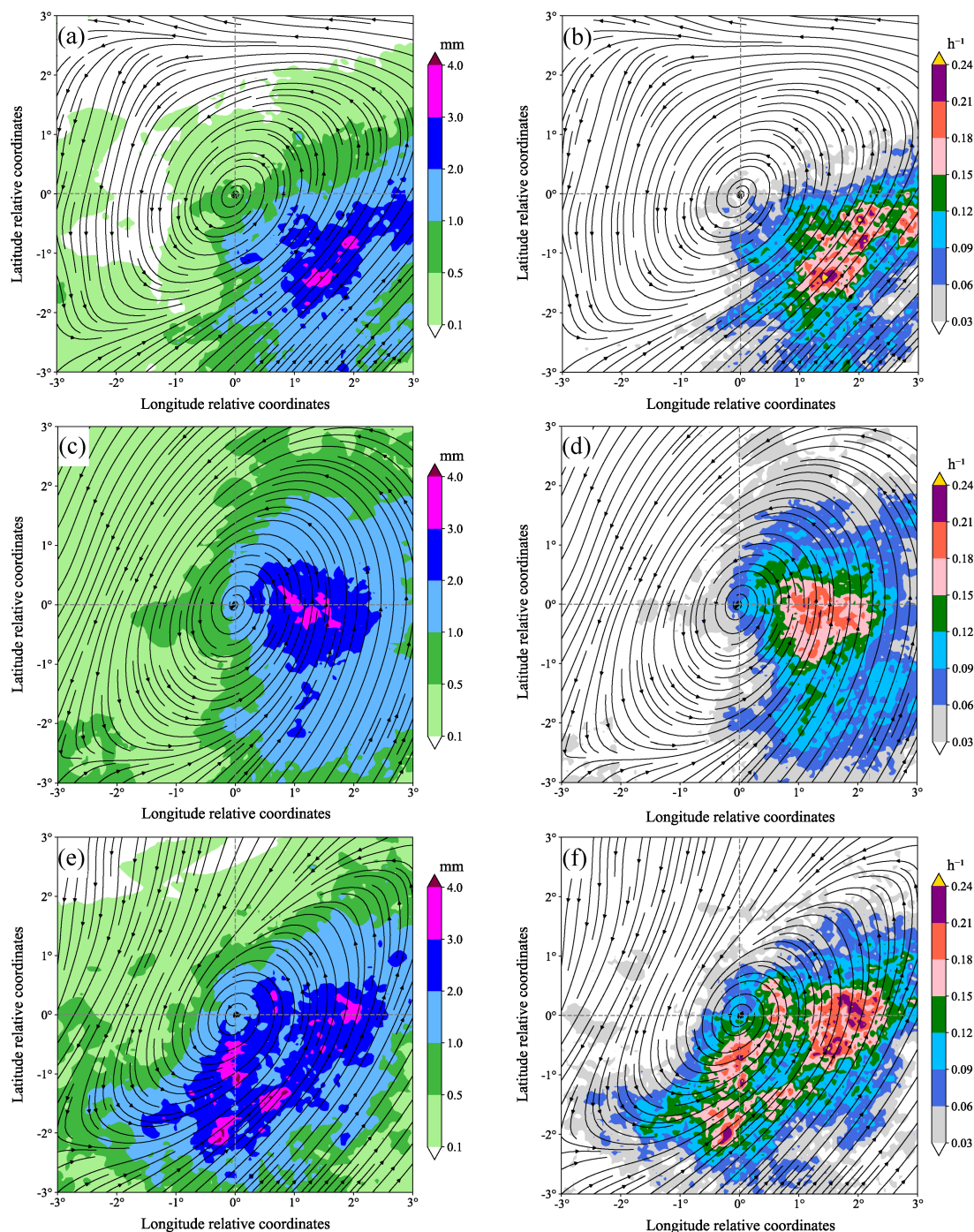


图 2 2019~2023 年 (a、b) 东南型、(c、d) 东部型和 (e、f) 多象限型西南涡强降水过程中 (a、c、e) 流场和降水量 (填色, 单位: mm) 的分布以及 (b、d、f) 流场和 5 mm 以上小时雨量出现频率 (填色, 单位: h^{-1}) 的分布。

Fig. 2 Distributions of (a, c, e) streamlines and precipitation (color shadings, units: mm), and (b, d, f) frequency of hourly precipitation exceeding 5 mm (color shadings, units: h^{-1}) in (a, b) southeastern type, (c, d) eastern type, and (e, f) multi-quadrant type SWV rainstorm events from 2019 to 2023.

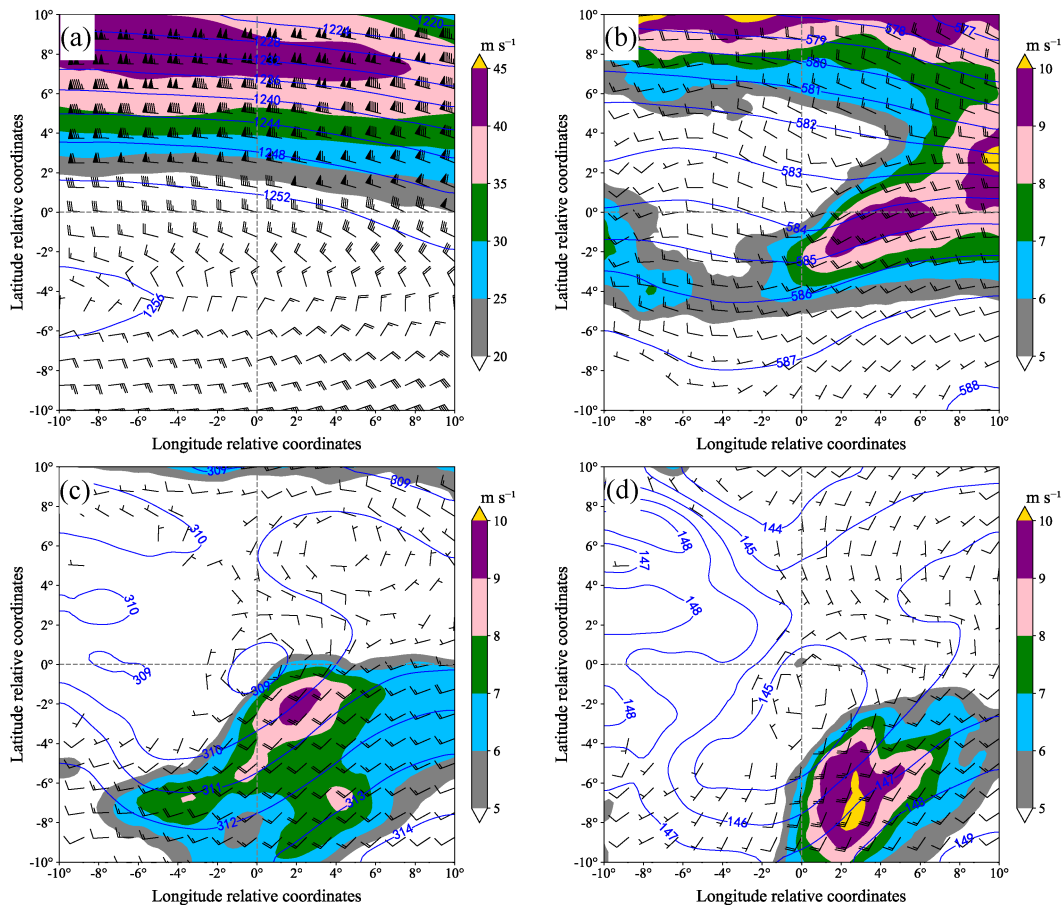


图3 2019~2023年东南型西南涡强降水过程中(a) 200 hPa、(b) 500 hPa、(c) 700 hPa和(d) 850 hPa位势高度场(蓝色实线, 单位: dagpm)、风场(风向杆)和风速(填色, 单位: m s^{-1})的空间分布。

Fig. 3 Spatial distributions of (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, and (d) 850 hPa geopotential height (blue contours, units: dagpm), wind (barbs), and wind speed (color shadings, units: m s^{-1}) in the southeastern type SWV rainstorm events from 2019 to 2023.

表1 2019~2023年各类西南涡强降水统计特征

Table 1 Statistical characteristics of different types of SWV rainstorms from 2019 to 2023

西南涡	西南涡降水			
	降水个例数	平均时长/h	累计时长/h	累计时长占比
东南型	7	15.4	108	21%
东部型	12	23.6	283	54%
多象限型	6	21.8	131	25%

西南涡强降水个例总时长的25%。

对各类西南涡强降水个例进行流场和降水的合成分析,如图2所示。东南型的强降水落区主要位于西南涡东南象限的100~200 km范围内(图2a)。东部型的强降水落区主要位于西南涡的东北和东南象限,即西南涡东部的50~200 km范围内(图2c)。而多象限型的强降水落区主要位于西南涡的东北、东南和西南象限0~250 km范围内

(图2e)。上述主要降水落区也是各类西南涡强降水过程中5 mm以上小时雨量出现频率最高的区域(图2b、d、f)。10 mm、20 mm和50 mm以上的小时雨量出现频率也具有相似分布(图略)。

可见,在影响重庆的各类西南涡强降水中,东南型维持时间最短,占比最少,东部型维持时间最长,占比最多,多象限型维持时间略低于东部型,而占比略高于东南型。

4 分型西南涡强降水的天气形势特征

4.1 东南型西南涡强降水

不同类型西南涡强降水过程具有差异化的天气学特征。图3东南型西南涡强降水过程的等压面天气形势。图中显示,东南型西南涡强降水发生期间,200 hPa为南亚高压控制,高空急流位于南亚高压北侧,急流区南缘距离西南涡中心约4~5个纬距

(图 3a), 高空急流的抽吸作用为西南涡的发展提供了有利的高空辐散条件。位于西南涡中心上空的 500 hPa 低槽呈西南—东北走向, 经向度小, 强度弱, 但低涡西南侧有另一南支槽存在 (图 3b)。南支槽前的西南气流与西风带低槽后部的偏北气流在西南涡东南象限辐合, 有利于西南涡东南象限上升运动增强。700 hPa 和 850 hPa 西南涡风场不对称特征显著, 西南涡后侧的风场显著弱于前侧 (图 3c、d)。700 hPa 和 850 hPa 低空急流的出口区均位于西南涡的东南象限, 低空辐合抬升作用显著。结合图 2 可知, 有利于强降水在东南象限发生发展。

4.2 东部型西南涡强降水

图 4 为东部型西南涡强降水过程的等压面天气形势。东部型西南涡强降水过程同样出现在 200 hPa 南亚高压控制形势下, 但高空急流区南缘距离西南涡中心更远, 约 5~6 个纬距 (图 4a)。西南涡中心上空的 500 hPa 西风带低槽呈南北走向, 经向度和强度显著高于东南型 (图 4b)。700 hPa

和 850 hPa 西南涡后侧的风场略弱于前侧, 风场仍具有非对称特征, 但非对称性显著弱于东南型 (图 4c、d)。700 hPa 低空急流出口区北抬了约 1~2 个纬度, 到达西南涡的东北象限, 850 hPa 低空急流出口区仍位于东南象限。高低空的天气系统配置有利于西南涡东北和东南象限辐合上升运动的发展以及强降水的发生。

4.3 多象限型西南涡强降水

图 5 为多象限型西南涡强降水过程的等压面天气形势。多象限型西南涡强降水过程中, 200 hPa 高空急流位置与东部型类似, 急流区南缘距离西南涡中心约 5~6 个纬距 (图 5a)。西南涡中心上空 500 hPa 西风带低槽呈西南—东北走向, 但经向度和强度高于东南型 (图 5b), 有利于产生更大范围的垂直上升运动。700 hPa 和 850 hPa 西南涡后侧的风场中心强度接近于前侧, 西南涡后侧有显著西北气流流入, 前侧有显著的西南气流发展, 低涡风场更加对称, 低涡表现为切变线上的涡旋形态

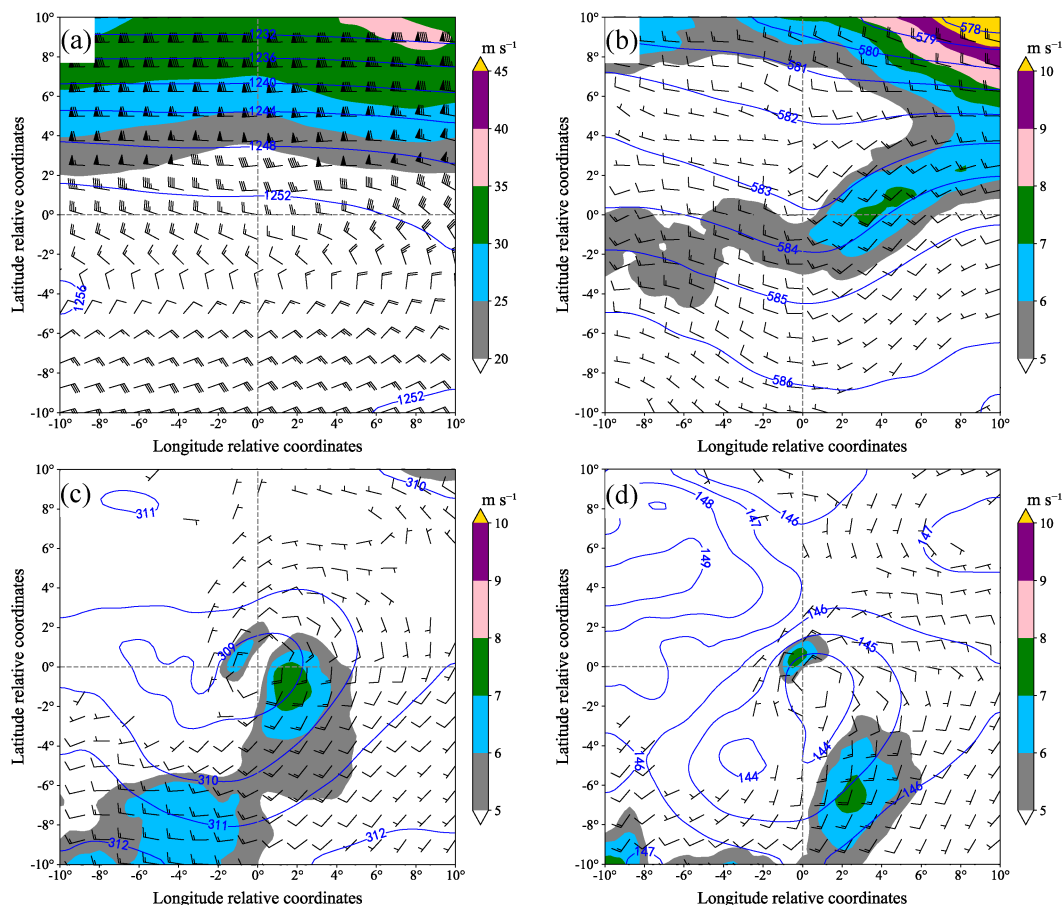


图 4 同图 3, 但为东部型西南涡强降水过程。

Fig. 4 Same as Fig.3, but in the eastern type SWV rainstorm events.

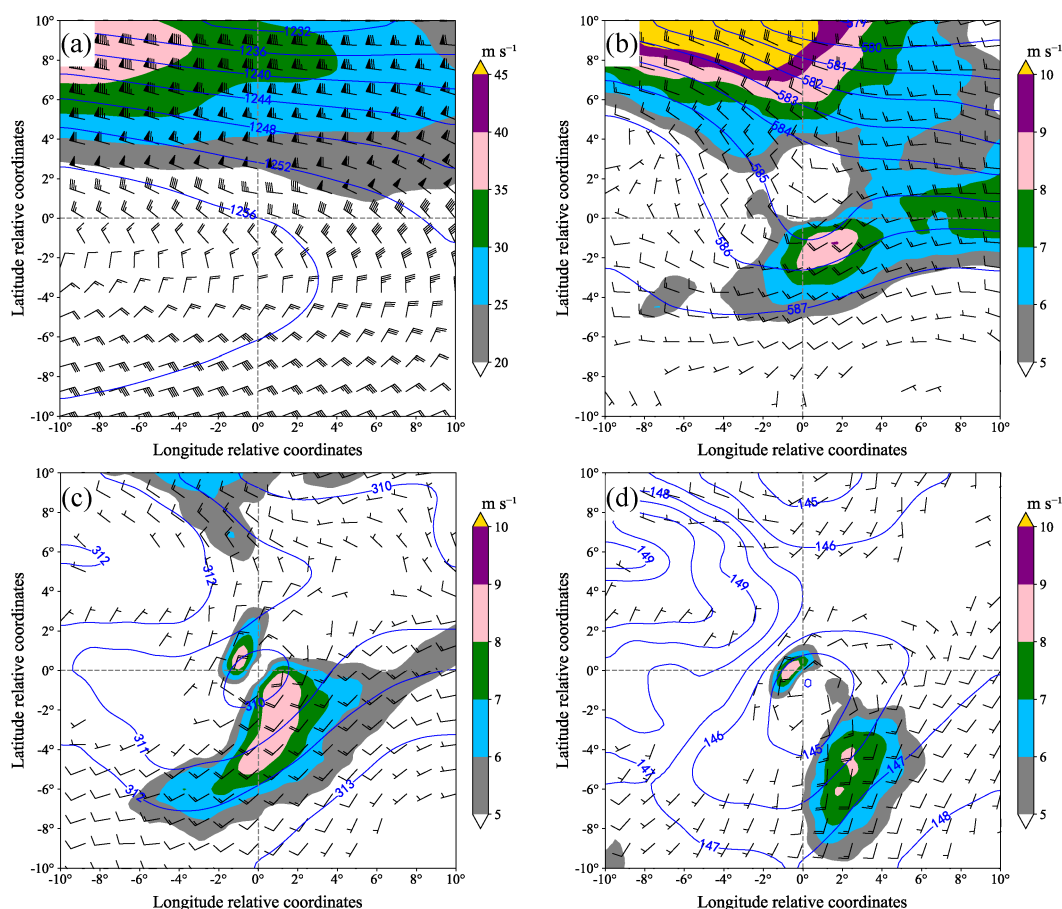


图5 同图3, 但为多象限型西南涡强降水过程。

Fig. 5 Same as Fig.3, but in the multi-quadrant type SWV rainstorm events.

(图 5c、d)。700 hPa 西南低空急流出口区位于西南涡的东北象限, 850 hPa 西南低空急流出口区仍位于东南象限, 西南涡的西南象限存在偏北风急流和西南风急流的辐合, 有利于西南涡东北、东南和西南多个象限的辐合上升运动和强降水发展。

4.4 低空天气形势差异

东南型、东部型和多象限型与全部西南涡强降水个例的低空形势差异特征如图 6 所示。由于东南型西南涡强降水的低空风场不对称特征显著, 西南涡 700 hPa 和 850 hPa 的东南象限均存在显著的西南风距平和 $2\sim 3\text{ m s}^{-1}$ 的风速正距平, 而东北象限存在偏北风距平和 $1\sim 2\text{ m s}^{-1}$ 的风速负距平 (图 6a、b), 利于东南象限低空辐合增强。东部型西南涡强降水的低空风场较东南型更加对称, 低空天气形势与平均场的差异主要体现在东南和东北象限, 东南和东北象限均表现为偏东风距平, 但东南象限为 $1\sim 2\text{ m s}^{-1}$ 的风速负距平, 东北象限为 $1\sim 2\text{ m s}^{-1}$ 的风速正距平 (图 6c、d), 表明低空大风速区向

东北象限发展, 东北象限辐合增强。多象限型西南涡强降水, 伴有后部冷空气侵入, 其西北象限以偏北风距平和 $1\sim 3\text{ m s}^{-1}$ 的风速正距平为主, 表明偏北风增强, 而西南和东南象限偏南风增强, 有利于冷暖气流汇合和东北—西南向的切变线维持, 且西南和东南象限的风速正距平范围比东南型西南涡强降水更加偏北 (图 6e、f), 表明低空大风速区更加偏北, 利于西南涡多象限强降水的发生发展。

4.5 温度平流分布

冷暖平流能够进一步揭示西南涡强降水过程的热动力特征。图 7 为 500 hPa 和 700 hPa 的温度平流分布。可以看出, 各型西南涡强降水过程中, 500 hPa 低槽前均以暖平流为主, 槽后均以冷平流为主。700 hPa 西南涡前部以暖平流为主, 西南涡后部以冷平流为主。在东南型西南涡强降水中, 500 hPa 低槽前后的冷暖平流强度和范围大致相当, 700 hPa 低槽前侧暖平流强于低槽后侧的冷平流, 且暖平流中心主要位于东南象限 (图 7a、b)。而

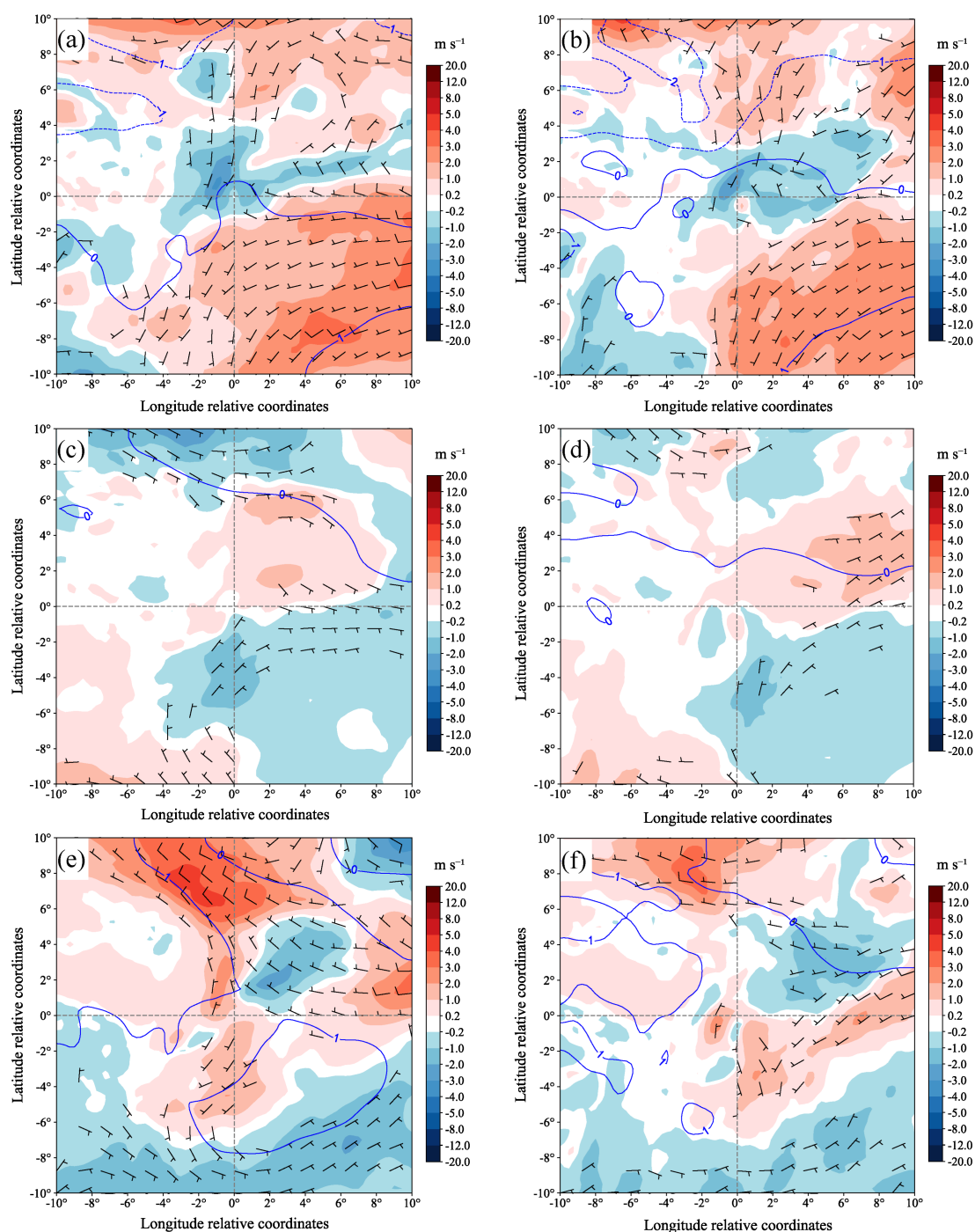


图 6 2019~2023 年 (a、b) 东南型、(c、d) 东部型和 (e、f) 多象限型与全部西南涡强降水过程的 700 hPa (左列) 和 850 hPa (右列) 位势高度场 (蓝色实线, 单位: dagpm)、风场 (风向杆) 和风速 (填色, 单位: m s^{-1}) 的距平场空间分布。

Fig. 6 Spatial distributions of the anomaly fields in (a, b) southeastern type, (c, d) eastern type, and (e, f) multi-quadrant type relative to all SWV rainstorm events at 700 hPa (left column) and 850 hPa (right column), showing geopotential height (blue contours, units: dagpm), wind field (barbs), and wind speed (color shadings, units: m s^{-1}) from 2019 to 2023.

在东部型西南涡强降水中, 500 hPa 低槽前后的暖冷平流和西南涡前后的暖冷平流, 均表现为暖平流强于冷平流, 且西南涡前侧的暖平流中心较东南型偏北了约 1 个纬度, 主要位于东北象限 (图 7c、d)。

多象限型西南涡强降水过程中, 500 hPa 槽后存在连续的大片冷平流区, 冷平流的强度和范围显著强于槽前的暖平流, 也强于东南型和东部型西南涡强降水过程槽后的冷平流强度, 700 hPa 西南涡两侧

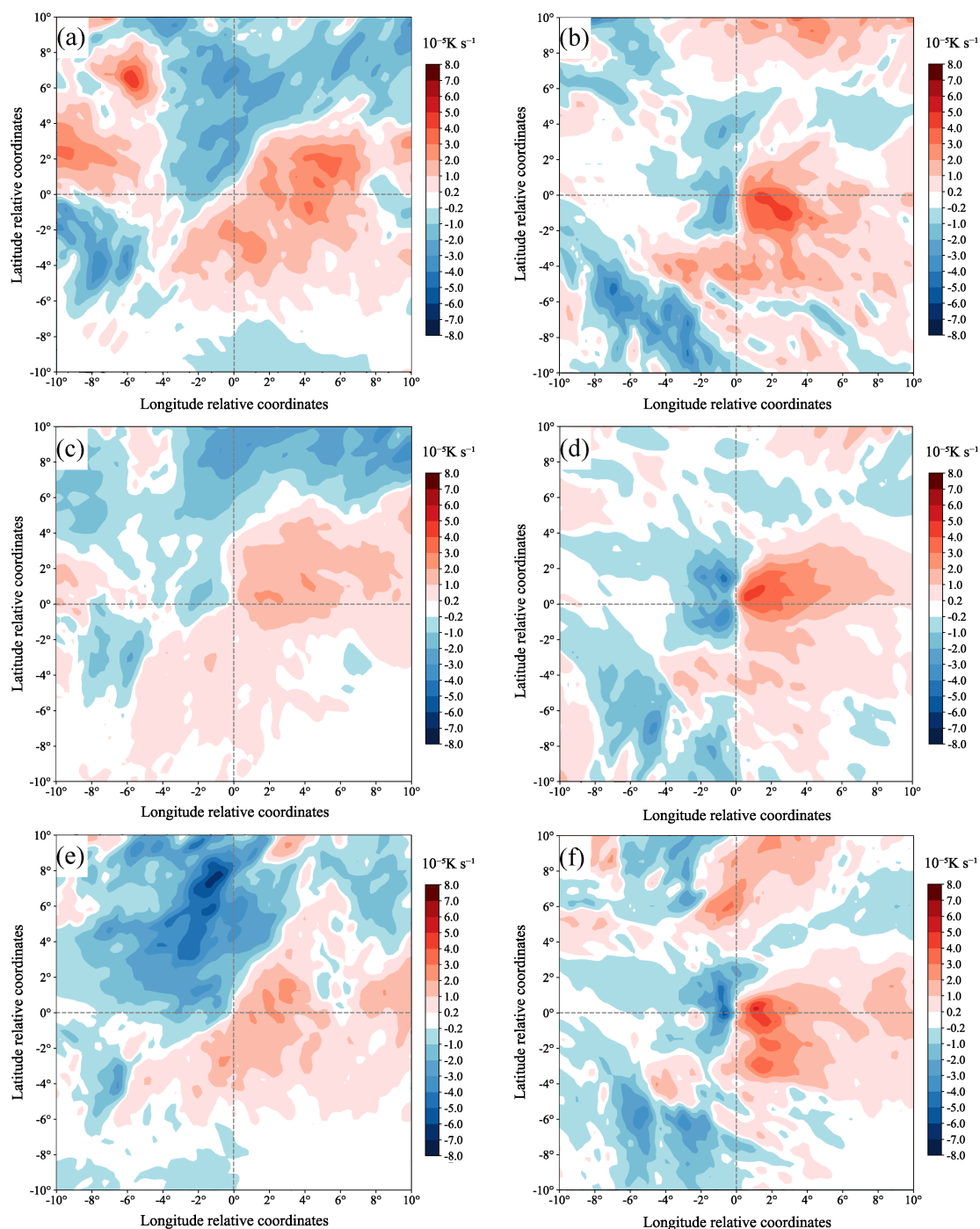


图 7 2019~2023 年 (a、b) 东南型、(c、d) 东部型、(e、f) 多象限型西南涡强降水过程的 500 hPa (左列) 和 700 hPa (右列) 温度平流 (填色, 单位: 10^{-5} K s^{-1}) 的空间分布。

Fig. 7 Spatial distributions of temperature advection (color shadings, units: 10^{-5} K s^{-1}) at 500 hPa (left column) and 700 hPa (right column) in (a, b) southeastern type, (c, d) eastern type, and (e, f) multi-quadrant type SWV rainstorm events from 2019 to 2023.

的冷暖平流基本相当, 也是三种类型西南涡强降水中最强, 西南涡前侧的暖平流中心主要位于东北和东南两个象限, 较东南型偏北约 $0.5 \sim 1$ 个纬度 (图 7e、f)。

结合前述分析可知, 东南型和东部型西南涡强

降水主要发生在低槽和低涡前侧西南暖湿气流作用的区域, 而多象限型西南涡强降水主要发生在低槽两侧的冷暖气流交汇区域。

4.6 相当位温和动力特征分布

相当位温和垂直速度可以表征西南涡的暖湿特

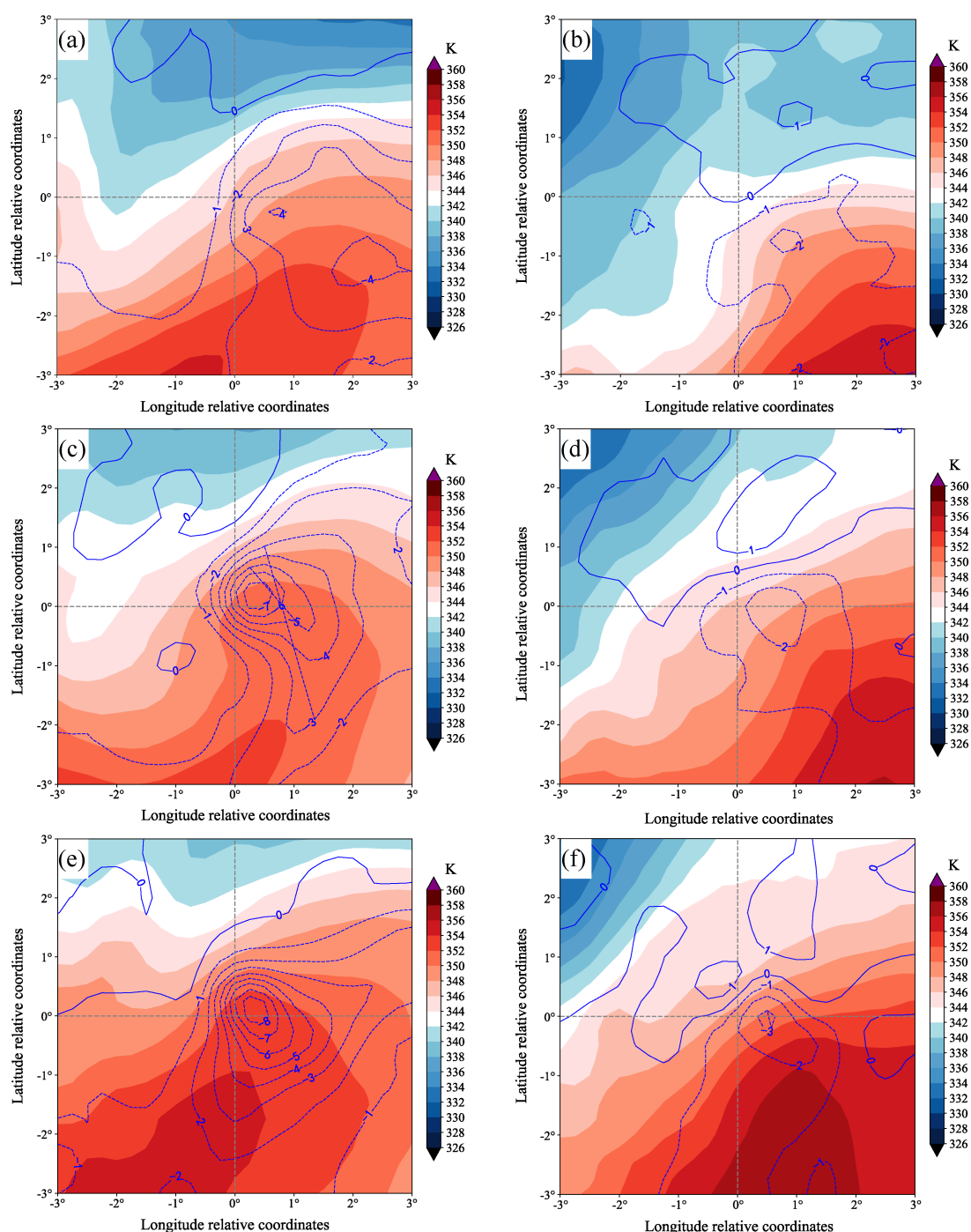


图 8 2019~2023 年 (a、b) 东南型、(c、d) 东部型、(e、f) 多象限型西南涡强降水过程的 700 hPa (左列) 和 850 hPa (右列) 相当位温 (填色, 单位: K) 和垂直速度 (等值线, 单位: $10^{-1} \text{ Pa s}^{-1}$) 的空间分布。

Fig. 8 Spatial distributions of equivalent potential temperature (color shadings, units: K) and vertical velocity (contours, units: $10^{-1} \text{ Pa s}^{-1}$) at 700 hPa (left column) and 850 hPa (right column) in (a, b) southeastern type, (c, d) eastern type, and (e, f) multi-quadrant type SWV rainstorm events from 2019 to 2023.

征和上升运动的强弱, 如图 8 所示。对比分析可以发现, 东南型西南涡强降水 850 hPa 暖湿舌集中在东南象限 (图 8a、b), 东部型西南涡强降水 850 hPa 暖湿舌进一步向北发展, 进入东北象限 (图 8c、

d), 多象限型西南涡强降水的暖湿舌影响东南、东北和西南三个象限, 影响范围最大 (图 8e、f), 强降水范围也最大。从上升运动强度看, 东南型西南涡强降水最弱, 且主要位于东南象限; 东部型西

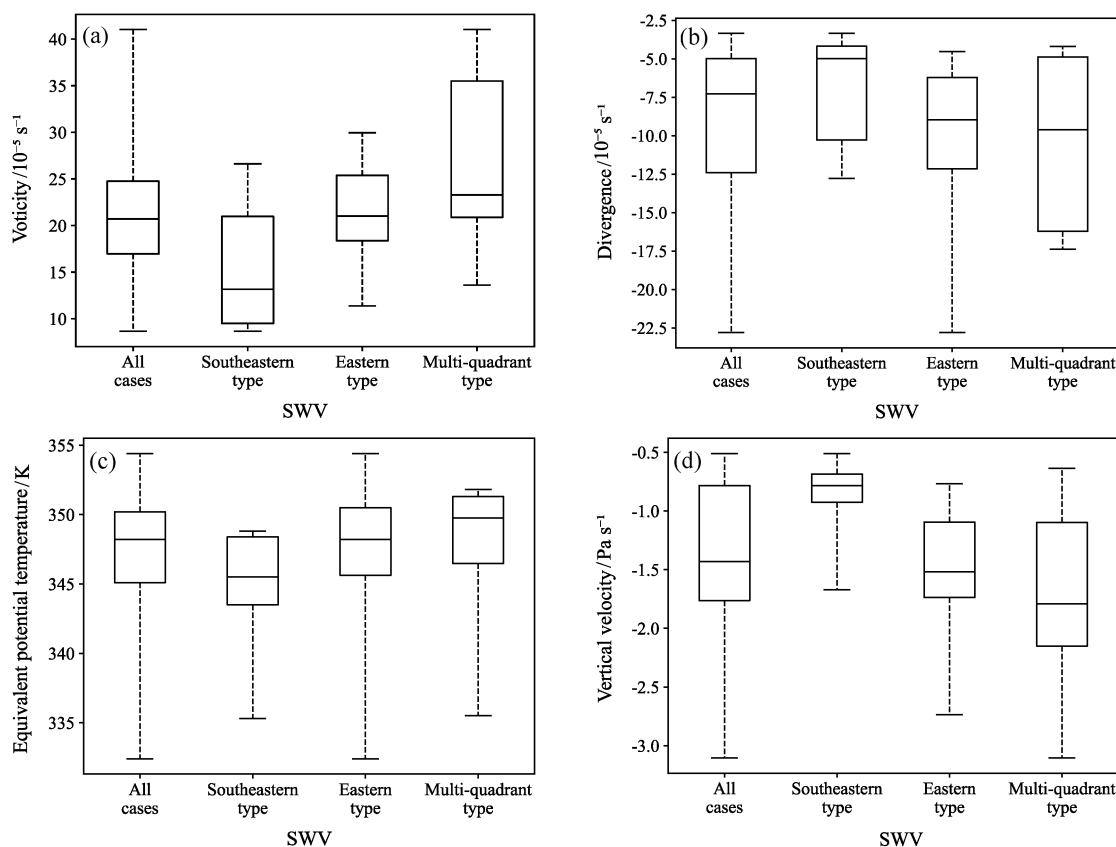


图9 不同类型西南涡强降水个例 700 hPa (a) 最大涡度 (单位: 10^{-5} s^{-1})、(b) 最小散度 (单位: 10^{-5} s^{-1})、(c) 平均相当位温 (单位: K) 和 (d) 最小垂直速度 (单位: Pa s^{-1}) 箱线图, 计算经纬度范围为距离西南涡中心 $\pm 3^\circ$

Fig. 9 Box plots of (a) maximum vorticity (units: 10^{-5} s^{-1}), (b) minimum divergence (units: 10^{-5} s^{-1}), (c) mean equivalent potential temperature (units: K), and (d) minimum vertical velocity (units: Pa s^{-1}) of different types of the SWV rainstorm cases at 700 hPa, the latitude and longitude range for calculating located within $\pm 3^\circ$ from the SWV center.

南涡强降水与多象限型相当, 显著强于东南型, 东部型主要影响东南和东北象限, 多象限型主要影响东南、东北和西南三个象限。

分析三类西南涡强降水的涡度、散度、相当位温和垂直运动 (图 9) 可知, 700 hPa 西南涡的最大正涡度以多象限型最强, 东部型其次, 东南型最弱; 辐合和上升运动以东部型和多象限型较强, 东南型较弱, 相当位温以多象限型最高, 东部型其次, 东南型最弱。

综上所述, 东南型西南涡强降水发生在辐合上升运动较弱的西南涡东南象限暖湿区, 东部型西南涡强降水发生在强烈辐合抬升的西南涡东部暖湿区, 多象限型西南涡强降水发生在冷暖气流强烈交汇、上升运动剧烈的东南、东北和西南象限暖湿区。

图 10 为经过西南涡中心的相对涡度、散度、风场的纬向和经向剖面。可以看出, 东南型西南涡

强降水过程中, 西南涡的正涡度柱主要在 500 hPa 以下, 从地面到 500 hPa 呈现由东南向西北倾斜的垂直分布, 低涡辐合较弱, 集中在东南部 (图 10a、b)。东部型的西南涡正涡度柱更加深厚, 达到 400 hPa 以上, 地面至 700 hPa 仍呈现由东南向西北倾斜的垂直分布, 且正涡度柱东侧出现较强的低空辐合、高空辐散特征, 有利于西南涡的发展 (图 10c、d)。多象限型的西南涡正涡度柱发展最深厚, 达到 300 hPa, 正涡度柱除在地面至 700 hPa 存在一定程度的向北倾斜外, 整体以垂直发展为主 (图 10e、f)。西南涡附近的低空辐合、高空辐散特征最为显著, 后部的偏北气流也最强。

可见, 东南型西南涡强降水的西南涡发展较为浅薄, 由东南向西北倾斜的垂直分布特征最为显著, 东部型的西南涡较为深厚, 700 hPa 以下存在由东南向西北倾斜的垂直分布特征, 700 hPa 以上以垂直向上发展为主; 多象限型的西南涡发展最为

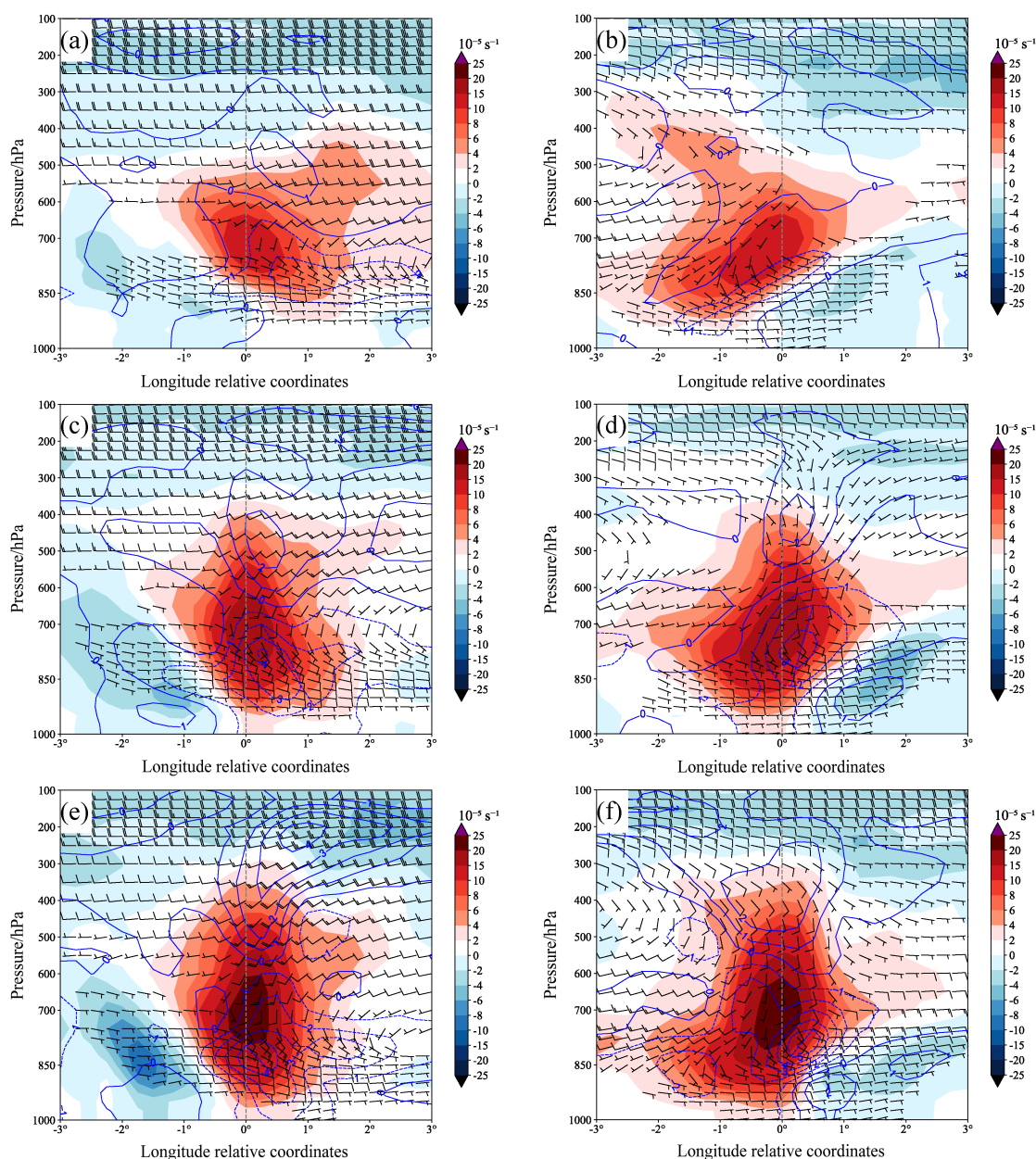


图 10 2019~2023 年 (a、b) 东南型、(c、d) 东部型和 (e、f) 多象限型西南涡强降水过程的相对涡度 (填色, 单位: 10^{-5} s^{-1})、散度 (等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1})、风场 (风杆, u 或 v 和 $\omega \times 5$ 合成) 的纬向—高度 (左列) 和经向—高度 (右列) 的剖面。

Fig. 10 Cross-sections of (a, b) southeastern type, (c, d) eastern type, and (e, f) multi-quadrant type SWV rainstorm events, showing the zonal-vertical (left column) and meridional-vertical (right column) of relative vorticity (color shadings, units: 10^{-5} s^{-1}), divergence (contours, units: 10^{-5} s^{-1}), and synthesized wind (barbs: horizontal wind components u or v combined with vertical velocity $\omega \times 5$) from 2019 to 2023.

深厚, 除 700 hPa 以下存在一定程度的向北倾斜特征外, 垂直向上发展最为显著。

5 小结与讨论

参考《西南低涡年鉴》, 选取 2019~2023 年影响重庆地区的 25 次西南涡强降水过程, 包括了西南涡向东、向南、向北移动以及个别向西移动的

强降水过程情况。在此基础上, 对上述西南涡强降水过程进行分类, 并采用动态合成方法, 对其天气形势、温度平流和垂直结构等热力、动力特征进行合成分析, 得出如下主要结论:

(1) 影响重庆的西南涡强降水主要出现在西南涡的东南和东北象限, 其次为西南象限, 西北象限降水较弱。西南涡强降水过程可分为三类: 东南

型、东部型和多象限型,三种类型的强降水分别位于西南涡的东南象限、东南和东北两象限,以及东南、东北和西南三象限。

(2) 25 例影响重庆的西南涡强降水过程,东南型出现 7 例,累计出现时次占比约 21%,西南涡在四川盆地内维持时间较短,平均约 15 h,强降水主要位于西南涡东南象限 100~200 km 范围;东部型出现 12 例,累计出现时次占比约 54%,西南涡在四川盆地内维持时间最长,平均达到约 24 h,强降水主要位于西南涡东北和东南象限 50~200 km 范围;多象限型出现 6 例,累计出现时次占比约 25%,西南涡在四川盆地内平均维持约 22 h,强降水主要出现在西南涡的东北、东南和西南象限 0~250 km 范围。

(3) 西南涡的强降水分布和高空急流位置、低槽强度及经向度、低空急流出口区、冷暖平流分布等密切相关。各不同类型西南涡强降水过程均发生在高空 200 hPa 辐散和 500 hPa 低槽影响背景下,其热力、动力特征表现出明显的异同性。

(4) 东南型西南涡强降水表现为持续时间较短、抬升运动较弱的西南涡影响,发生在西南—东北走向的弱西风带低槽影响下,高空急流南缘距离西南涡中心约 4~5 个纬距,西南涡前侧偏南气流的风速显著强于后侧偏北气流,低涡东南象限暖平流显著,700 hPa 和 850 hPa 低空西南风急流出口区均位于西南涡的东南象限。西南涡发展较为浅薄,垂直结构从低层向上逐渐向西北方向倾斜。东部型为持续时间长、抬升运动强的西南涡影响,发生在南北向的西风带低槽影响下,高空急流位置略偏北,其南缘距离低涡中心约 5~6 个纬距,700 hPa 西南风低空急流出口区位于西南涡的东北象限,850 hPa 暖平流中心也向北移至东北象限,西南涡发展较为深厚,垂直结构从低层开始同样向西北方向倾斜,但中上层以垂直向上发展为主。多象限型为后部有显著冷空气持续侵入且抬升运动强的西南涡影响,发生在西南—东北走向的强冷槽背景下,高空急流位置略偏北,西南涡呈现为切变线上的涡旋形态,冷暖气流交汇显著,西南涡前后风速具有一定的对称性,700 hPa 西南风低空急流出口区位于西南涡的东北象限,西南涡垂直方向发展最为深厚,在低空存在一定程度的向北倾斜特征,中上层以垂直向上发展为主。

本文选取的西南涡强降水个例均为造成重庆强

降水过程的个例,而对于更大范围的西南涡作用来说,配合地形的影响,西南涡的西北象限也可能出现强降水,尤其是其热动力机制与上述三种类型应有所不同,包括复杂地形的重要作用,今后需进一步深入系统地分析研究。

参考文献 (References)

- 陈贵川, 谌芸, 张勇, 等. 2013. “12.7.21” 西南涡极端强降雨的成因分析 [J]. 气象, 39(12): 1529–1541. Chen G C, Chen Y, Zhang Y, et al. 2013. Causes analysis of the southwest vortex extremely heavy rainfall on 21 July 2012 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 39(12): 1529–1541. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.12.001
- Chen Y R, Li Y Q. 2022. A thermodynamic condition affecting the movement of a Southwest China vortex case [J]. Meteor. Atmos. Phys., 134(2): 36. doi:10.1007/s00703-022-00874-w
- Cheng X L, Li Y Q, Xu L. 2016. An analysis of an extreme rainstorm caused by the interaction of the Tibetan Plateau vortex and the Southwest China vortex from an intensive observation [J]. Meteor. Atmos. Phys., 128(3): 373–399. doi:10.1007/s00703-015-0420-2
- 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. (in Chinese), 40(1): 85–97. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00106
- 邓承之, 张焱, 李强, 等. 2023. 四川盆地一次暖性西南低涡大暴雨的中尺度分析 [J]. 暴雨灾害, 42(1): 24–36. Deng C Z, Zhang Y, Li Q, et al. 2023. Mesoscale analysis on one warm southwest vortex rainstorm in the Sichuan Basin [J]. Torr. Rain Dis. (in Chinese), 42(1): 24–36. doi:10.12406/byzh.2022-024
- 邓承之, 曹洁, 罗娟, 等. 2024. 四川盆地一次暴雨过程中西南低涡非对称结构特征及其成因分析 [J]. 暴雨灾害, 43(6): 627–636. Deng C Z, Cao J, Luo J, et al. 2024. Analysis on characteristics and causes of the southwest vortex asymmetric structure during one rainstorm in the Sichuan Basin [J]. Torr. Rain Dis. (in Chinese), 43(6): 627–636. doi:10.12406/byzh.2023-239
- Feng X Y, Liu C H, Fan G Z, et al. 2016. Climatology and structures of southwest vortices in the NCEP climate forecast system reanalysis [J]. J. Climate, 29(21): 7675–7701. doi:10.1175/JCLI-D-15-0813.1
- 韩林君, 白爱娟. 2019. 2004–2017 年夏半年西南涡在四川盆地形成降水的特征分析 [J]. 高原气象, 38(3): 552–562. Han L J, Bai A J. 2019. Precipitation characteristics of southwest vortex in Sichuan Basin from May to October in 2004–2017 [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 38(3): 552–562. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00100
- 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. (in Chinese), 38(2): 155–163. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.2.003
- 赖欣, 王庆语, 皇甫静亮, 等. 2023. 西南涡的气候学研究进展 [J]. 大气科学, 47(6): 1983–2000. Lai X, Wang Q Y, Huangfu J L, et al.

2023. Progress in climatological research on the Southwest China vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(6): 1983–2000. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2304.23021
- 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. (in Chinese), 37(4): 293–302. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.04.001
- Li L, Zhang R H, Wen M. 2017. Genesis of southwest vortices and its relation to Tibetan Plateau Vortices [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 143(707): 2555–2566. doi:10.1002/qj.3106
- 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. (in Chinese), 6(3): 134–140. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.018
- 卢敬华. 1986. 西南低涡概论 [M]. 北京: 气象出版社, 1–270. Lu J H. 1986. Generality of the Southwest Vortex [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–270.
- 卢萍, 翟丹华, 李英, 等. 2014. 影响重庆暴雨的三类西南低涡浅析 [J]. 热带气象学报, 30(4): 736–746. Lu P, Zhai D H, Li Y, et al. 2014. Analysis of three kinds of southwest vortexes influencing rainstorms in Chongqing City [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 30(4): 736–746. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.04.014
- Lu P, Zheng W P, Li Y Q. 2020. Comparison of the movement and vertical structures of two types of the southwest vortex [J]. Meteor. Atmos. Phys., 132(4): 571–581. doi:10.1007/s00703-019-00707-3
- 毛紫怡, 刘金卿. 2021. 湖南省西南涡暴雨的分类研究 [J]. 暴雨灾害, 40(1): 52–60. Mao Z Y, Liu J Q. 2021. Classification of rainstorms in Hunan Province affected by the Southwest China vortex [J]. Torr. Rain Dis. (in Chinese), 40(1): 52–60. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.007
- 潘旸, 李建, 宇如聪. 2011. 东移西南低涡空间结构的气候学特征 [J]. 气候与环境研究, 16(1): 60–70. Pan Y, Li J, Yu R C. 2011. Climatic characteristics of the spatial structure of the eastward-moving southwest vortex [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 16(1): 60–70. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.01.06
- 屈顶, 李跃清, 李娟, 等. 2023. 不同类型九龙涡的水汽输送与热力结构特征的对比分析 [J]. 大气科学, 47(5): 1481–1494. Qu D, Li Y Q, Li J, et al. 2023. Comparative analysis of water vapor transport and thermodynamic characteristics of different types of Jiulong Vortices found in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(5): 1481–1494. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2208.21202
- 寿绍文. 2019. 中国暴雨的天气学研究进展 [J]. 暴雨灾害, 38(5): 450–463. Shou S W. 2019. Progress of synoptic studies for heavy rain in China [J]. Torr. Rain Dis. (in Chinese), 38(5): 450–463. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.007
- 孙建华, 周玉淑, 傅慎明, 等. 2024. 近十年我国涡旋系统的研究进展 [J]. 大气科学, 48(1): 228–260. Sun J H, Zhou Y S, Fu S M, et al. 2024. Progress on vortices in China in the past ten years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(1): 228–260. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2311.23323
- 王中, 王嘉佩. 2024. 2012—2020 年西南低涡气候特征及对重庆暴雨的影响 [J]. 高原山地气象研究, 44(1): 128–133. Wang Z, Wang J P. 2024. Climatic characteristics of Southwest China vortex and its impact on rainstorm in Chongqing from 2012 to 2020 [J]. Plateau Mountain Meteor. Res. (in Chinese), 44(1): 128–133. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2024.01.015
- 王中, 白莹莹, 杜钦, 等. 2008. 一次无地面冷空气触发的西南涡特大暴雨分析 [J]. 气象, 34(12): 63–71. Wang Z, Bai Y Y, Du Q, et al. 2008. Analysis of a torrential southwest vortex rainstorm without surface cold air intrusion [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 34(12): 63–71. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.12.008
- 姚静, 李培荣, 肖贻青, 等. 2024. 陕南西南涡暴雨的热动力特征分析 [J]. 高原气象, 43(3): 655–666. Yao J, Li P R, Xiao Y Q, et al. 2024. Thermodynamic characteristics of southwest vortex rainstorm in southern Shaanxi [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 43(3): 655–666. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00074
- 翟丹华, 刘德, 李强, 等. 2014. 引发重庆中西部暴雨的西南低涡特征分析 [J]. 高原气象, 33(1): 140–147. Zhai D H, Liu D, Li Q, et al. 2014. Feature analysis of southwest vortex causing heavy rain in western and middle Chongqing [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 33(1): 140–147. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00181
- Zhai D H, Kong F Y, Dai Z J, et al. 2021. Analysis of deep convective towers in a southwest-vortex rainstorm event [J]. J. Trop. Meteor., 27(2): 177–190. doi:10.46267/j.1006-8775.2021.017
- 宗志平, 陈涛, 徐琨, 等. 2013. 2012 年初秋四川盆地两次西南暴雨过程的对比分析与预报检验 [J]. 气象, 39(5): 567–576. Zong Z P, Chen T, Xu J, et al. 2013. Analysis and forecast verification of two southwest vortex torrential rain events in Sichuan Basin in early autumn of 2012 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 39(5): 567–576. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.05.004