

强降水型西南低涡族的个例研究

李梓睿¹, 傅慎明^{*2}, 袁俊鹏¹, 杨若钧³, 俞竣琿⁴, 翟季青⁵, 孙世军⁶, 李万莉⁷

1 云南大学地球科学学院, 昆明, 650091

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京, 100029

3. 广州市香港科大霍英东研究院大气研究中心, 广州, 510000

4. 青海大学能源与电气工程学院, 西宁 810016

5. 山东鲁软数字科技有限公司, 山东, 250101

6 国网山东省电力公司, 山东, 250013

7 气象干部培训学院, 北京, 100081

摘要: 四川盆地及其周边地区的强降水过程中常常出现多个中尺度涡旋共存或交替生消的情况, 本文定义同一时段内出现的西南低涡及与其密切联系的中尺度涡旋(如有)的总体为西南低涡族, 它既包含了传统的西南低涡也包含了一般的中尺度涡旋。本文利用 ERA5 再分析资料和国家自动站加密观测资料, 对四川盆地 2020 年 8 月 12-14 日(协调世界时, 下同)一次由西南低涡族引发的强降水事件进行了研究。结果表明, 降水时段内共有 16 个中尺度涡旋交替出现(编号 Vortex I–Vortex XVI), 它们是本次强降水过程的主导天气系统, 其中 Vortex I、Vortex II、Vortex IV、Vortex XVI 为西南低涡, 剩余的其它涡旋为一般中尺度涡旋。大尺度环流背景的三维配置有利于本次强降水事件的发生, 主要表现为对流层高层南亚高压伴随的强辐散有利于上升运动, 中层西风带短波槽前的暖平流利于低层上升运动的发展与维持, 对流层低层盛行的西南风低空急流带来了充沛的水汽, 并在急流前方造成较强的低层辐合。Vortex I 和 Vortex II 是西南低涡, 也是本次西南低涡族的主要成员, 它们均具有生命史长、垂直伸展深厚、降水强的特征。此二个涡旋的热力结构显著不同, 其中 Vortex I 为冷心结构, 而 Vortex II 为暖心结构。构成 Vortex I 和 Vortex II 的空气粒子大多来自对流层低层, 在二者形成前 5 至 7 小时内, 空气粒子显著上升, 伴随较强的降水过程, 辐合导致的垂直拉伸(stretching)使这部分空气粒子的气旋式涡度显著增大, 而倾斜效应(tilting)则减缓了它们气旋式涡度的增长; 总体而言, 来自云贵高原空气粒子的气旋式涡度贡献大于来自青藏高原

作者简介 李梓睿, 女, 1998 年生, 硕士研究生, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: lizirui@126.com

通讯作者 傅慎明, E-mail: fusm@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金委面上项目(42475008)

Funded by General Projects of the National Natural Science Foundation of China (42475008)

空气粒子的气旋式涡度贡献。涡度收支表明，主导 Vortex I 和 Vortex II 演变的因子存在较显著的异同点：辐合造成的垂直拉伸与对流引起气旋式涡度的垂直输送是 Vortex I 生成、发展和维持的最有利因子，倾斜效应与水平平流则主导了 Vortex I 的消亡。辐合与涡度垂直输送也是 Vortex II 生成的有利因子，而气旋式涡度的水平、垂直输送是 Vortex II 维持的有利因子，在其消亡期，除了涡度的垂直输送，其他因子均加速了 Vortex II 的消亡。

关键词：中尺度涡旋；西南涡；暴雨；四川盆地；涡度收支

On the southwest vortex group that induced torrential rainfall: A case study

Li Zirui¹, Fu Shenming^{*2}, Yuan Junpeng¹, Yang Ruojun³, Zhai Jiqing⁴, Sun Shijun⁵

1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China

2. International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. Atmospheric Research Center, Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou, 510000

4. Shandong Luruan Digital Technology Co., Ltd., Shandong, 250101

5. State Grid Shandong Electric Power Company, Shandong, 250013

Abstract: Multiple mesoscale vortices often coexist or alternate in the process of torrential rainfall in southwest China. The southwest vortices and its closely related mesoscale vortices (if any) which occur during the same period is defined as the southwest vortex group in this article. The southwest vortex group include both traditional southwest vortices and general mesoscale vortices. Based on ERA5 reanalysis data and precipitation data obtained by an automatic observation station, a torrential rainfall event occurs from 12-14 August 2020 (Coordinated Universal Time, the same below) was studied, wherein southwest vortex group is found. The results show that: a

total of 16 mesoscale vortices were found (numbered Vortex I-Vortex XVI), which were the dominant weather system for this torrential rainfall event. Among southwest vortex group, Vortex I, Vortex II, Vortex IV and Vortex XVI are southwest vortices, and others are general mesoscale vortices. The large-scale background is conducive to this event, mainly manifested as strong upper-level divergence which related to the South Asia High, a middle-tropospheric warm advection which related to a Westerlies shortwave trough, and a vigorous southwesterly low-level jet which brought abundant water vapor and caused a strong low-level convergence. Vortex I and Vortex II are both southwest vortices and the main members of the southwest vortices, which are characterized by long life span, deep vertical extension, and strong related precipitation. The thermal structures of the two are significantly different, with cold and warm core structures, respectively. Most of the air particles that formed Vortex I and Vortex II were sourced from the lower troposphere. Within 5 to 7 hours before their formation, the air particles significantly ascend, accompanied by strong precipitation processes. The vertical stretching caused by convergence makes the cyclonic vorticity increasing significantly, while the tilting effect decreasing the cyclonic vorticity. Air particles from the Yunnan-Guizhou Plateau made the larger contribution of cyclonic vorticity than which from the Tibetan Plateau. Vorticity budget shows that there are significant similarities and differences in the factors that dominate the evolution of Vortex I and Vortex II. Vertical stretching due to convergence and vertical advection of cyclonic vorticity due to convection, are the most favorable factors for the generation, development, and maintenance of the Vortex I, whereas tilting effects and horizontal advection dominate its extinction. For Vortex II, convergence and vertical advection are also the favorable factors for its generation, whereas the horizontal and vertical advection of cyclonic vorticity are the dominant factors of its maintenance, during its demise period, except vertical advection other factors all accelerated the dissipated.

Keywords: Mesoscale vortex; southwest vortex; torrential rainfall; Sichuan Basin; Vorticity budget

1. 引言

西南低涡是形成于我国西南地区（100-108°E，26-33°N 范围内）的中尺度涡旋系统（Fu et al., 2020），其多出现在对流层低层，在 850hPa、700hPa 上最为明显（卢敬华，1986）。西南低涡的发生、发展和移动常伴随强降水（李跃清等，2016；张敬萍等，2015）。当西南低涡维持稳定少动时，可造成源地内（即川渝地区）的持续性大暴雨过程。如 1981 年 7 月 9 日，在西南低涡影响下，四川盆地西南部骤降暴雨，甘洛县境内 24 小时累积降水量达到 204 mm（张小玲等，2005）；1993 年 7 月 28 至 30 日，四川盆地西南部出现了特大暴雨，峨眉山市 24 小时累积降水量达 509.5 mm，打破四川 40 年日降水量极值（陈忠明等，1999）。当西南低涡东移时可影响长江流域、淮河流域、华北、东北、华南等地区，造成大范围的洪涝灾害。如 1998 年，由于西南低涡频繁生成、东移，长江流域发生全流域性特大洪水事件（陈忠明等，2003）；2021 年 7 月 11 至 12 日由于西南低涡不断东移北上，先后给陕西、山西、河南、河北、北京、天津等省市，带来强降雨，多个气象站点降水打破历史极值（Yang et al., 2023）。

气象学者对西南低涡的形成机理开展了一系列研究。结果表明，西南低涡的形成受大、中、小地形的多尺度综合作用（Wang and Tan, 2014），同时也受地形与大气环流间的作用（Chen and Li, 2022）。多数西南低涡在生成后维持准静止，是位于对流层低层的涡旋系统（张敬萍等，2015），强烈发展的西南低涡可伸展至 100 hPa（陈忠明，1998），其温湿场和垂直速度场呈不对称特点（韦统健等，1996；李跃清等，2016）。李超等（2015）以及叶瑶和李国平（2016）从统计角度研究了西南低涡的降水与环流背景条件。Fu et al.（2015）对 14 年夏季的西南低涡进行统计分析，按动力和热力特征将其分为四类，对比揭示了四类西南低涡的三维特征，发现生成前有降水的西南低涡比生成前无降水的西南低涡具有更强的强度以及更大的三维尺度。西南低涡的发展与冷空气活动、低层辐合、非线性作用以及非绝热加热都密切联系（陈忠明，1990；李江萍，2012；卢萍等，2014；刘晓冉和李国平，2014；李跃清，2011，2016，2021；卢萍和李跃清，2021），尤其是高原东移对流系统产生的非绝热加热，有利于西南低涡和强降水的发展（Fu et

al., 2019; Tang et al., 2022)。

受资料分辨率限制, 过去研究认为西南低涡仅是一个水平尺度约 300~500km 的 α 中尺度涡旋 (何光碧等, 2012; 吴珍珍等, 2018)。陶诗言 (1980) 曾指出, 在西南涡系统内部可以包含更小尺度的天气系统, 并在一次天气过程中发现, 三个与西南涡相关联的中尺度低涡位于同一条切变线的形势。近年来, 随着观测资料分辨率提高和数值产品增多, 对西南低涡结构的认识不断深入。有研究发现在同一次暴雨过程中可以出现多个西南低涡及其它类别的中尺度涡旋 (水平尺度为 2 km -2000 km; Orianski, 1975), 在有利水汽条件下, 这些涡旋周边均可产生灾害性天气 (Zhou et al., 2017)。例如, 2010 年 7 月 16 至 17 日的四川暴雨事件是由三个交替出现的西南低涡导致, 且潜热释放及地形对多个西南低涡的形成密切相关 (Wu et al., 2022)。周括等 (2017) 研究 2013 年 7 月 17 至 18 日造成四川地区暴雨的西南低涡, 发现其存在双核结构, 中心分别位于四川省东北部, 和四川省南部, 强降水中心与两个西南低涡中心有较好的对应关系。多涡旋降水的现象并非孤例, 吴珍珍研究 2011 年 8 月 4 至 5 日的四川盆地多西南低涡及其带来的天气, 指出在研究时段内有四个西南低涡交替出现, 对流云团与降水和西南低涡中心有较好的对应 (吴珍珍等, 2018)。本文定义同一时段内出现的西南低涡及与其密切联系的中尺度涡旋 (如有) 的总体为西南低涡族, 包含两种情形: (i) 全部涡旋都是西南低涡 (个数 ≥ 2); (ii) 出现过至少 1 个西南低涡, 还出现了与西南低涡密切联系的一般的中尺度涡旋 (个数 ≥ 1)。西南低涡族可在四川盆地内引发强度很大的降水, 并且持续时间也普遍较长。目前国内外对西南低涡族的研究较少, 西南低涡族多个成员对降水的影响及彼此之间的相互作用尚不清楚, 研究此类事件有助于丰富对西南低涡的现有认识。为此, 本文以一次西南低涡族影响四川盆地产生大暴雨的事件为例, 利用高时空分辨率的再分析数据以及国家站点加密降水观测资料, 对之进行分析与诊断, 以期弥补现有研究的不足。

2. 资料与方法

2.1 资料

本文使用的再分析资料是欧洲中期天气预报中心 ECMWF 发布的全球气候再分析资料最新产品 ERA5 (Hersbach et al, 2020), 其时间分辨率 1 h, 空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 垂直层从地面 1000 hPa 至 0.1 hPa 共 37 层。该资料主要用于西南低涡族中各个涡旋成员的识别、大尺度环流形势的分析、物理量的计算诊断及后向轨迹追踪研究。全国地面自动站逐小时加密观测降水资料, 用于分析地面中尺度降水的特征。

2.2 西南低涡族成员及涡旋相关降水定义

任何涡旋都不只是二维的 (Holton, 2004), 它们具有垂直伸展, 是三维空间内的系统 (Li et al., 2019)。由 Fu et al. (2015) 的研究可知, 西南低涡的中心层次约位于 700 hPa (这是多数研究使用 700 hPa 作为西南低涡研究层次的原因); 最深厚的西南低涡顶层可达 100 hPa (陈忠明, 1998), 底层可达地面 (张敬萍等, 2015)。参照前人关于西南低涡的定义, 本文定义的西南低涡族, 是指同一时段内出现的西南低涡及与其密切联系的中尺度涡旋 (如有) 的总体。除了仅有西南低涡的情况 (个数 ≥ 2), 西南低涡族包括以下两类涡旋成员: (i) 关注时段内的所有西南低涡 (个数 ≥ 1)。西南低涡判断标准为: 700 hPa 上, 四川盆地及其周边地区初生的、至少闭合 $3/4$ 的气旋式环流 (受地形影响, 有些涡旋未能完全闭合)。它们全部满足西南低涡的传统定义, 本文不仅关注它们的中心层次 700 hPa, 还关注它们的垂直伸展 (Fu et al., 2015)。(ii) 同一关注时段内, 初生于四川盆地及其周边地区、与西南低涡有密切联系的其它中尺度涡旋 (个数 ≥ 1), 此类涡旋可以位于对流层的低、中、高层, 将涡旋结构连续出现次数最多的层次定义为涡旋的中心层。

西南低涡族里每一个涡旋都是西南低涡族的成员, 对于每个成员, 在每个时刻确定其中心位置 (形心), 以该中心为中心, 3° 为半径划定一个圆形区域, 该区域内的所有有效降水 (>0.1 mm) 均被认为是该时段内与此旋相关的降水 (Fu et al., 2022)。需要注意的是, 每个涡旋的相关降水只是代表这些降水与该涡旋直接相关, 并不代表此涡旋是引发这些降水的唯一系统。在多个涡旋共存时, 与它们相关的降水有可能重合, 因为目前尚无法精确计算各个涡旋对于降水的具体贡献, 因此, 重合的这部分降水会被认为是与

多个涡旋均直接相关。在比较 2 个涡旋降水的强弱时，重复的降水部分在 2 个涡旋中均有出现，因此，这部分降水将会被抵消，并不会对两个涡旋降水强弱的比较产生影响。本文将根据西南低涡族各成员相关降水的强弱对比，筛选出西南低涡族中与降水相关度最高的几个成员（即西南低涡族的主要成员），并进一步诊断分析这些主要成员的生成、演变机理。

2.3 水汽追踪方案

本文使用美国国家海洋和大气管理局（NOAA）空气资源实验室开发的 HYSPLIT（Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory）version 5.2.1（Stein et al., 2015）后向轨迹追踪模式，模式中平流和扩散计算均采用拉格朗日方法。根据国家标准 GB/T 28592-2012 中的雨量等级划分标准，规定：2020 年 8 月 12 日 15 时至 14 日 02 时整个时段内，过程降雨量在 0-75mm 为暴雨以下量级；过程降雨量 $\geq 75\text{mm}$ 为暴雨。为了研究暴雨区的持续水汽供应源地，确定水汽追踪方案如下：根据过程累积降水量（35 h）超过 75mm 的站点，选取关键区，逐小时将产生降水的站点与 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的格点匹配，得到的格点即为水汽追踪的起点；垂直方向每隔 25 hPa 选取一层，追踪时长为 5 天。考虑气块 5 天内的移动距离，本文在区域 $20^\circ\text{E}-160^\circ\text{E}$ ， $0^\circ\text{N}-70^\circ\text{N}$ 内运行 HYSPLIT 模式，以确定对此次降水过程有主要贡献的水汽来源。在此基础上，引入定量估计水汽收支、贡献的计算公式。在拉格朗日方法中，用比湿 q 随时间 t 的变化 dq/dt 来诊断粒子水汽含量（Stohl et al., 2004, 2005），方程如下：

$$e - p = m \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

式中 m 为粒子质量，本文 m 取单位质量 1， e （单位面积蒸发量）和 p （单位面积降水量）分别为沿轨迹水分的增、减率。为反映整个大气柱水汽收支的情况，将面积为 A 的区域上空大气柱内包含的 N 个粒子的水分变化 dq/dt 累加可得到：

$$E - P \approx \frac{\sum_{i=1}^N (e - p)}{A} = \frac{\sum_{i=1}^N m \frac{dq}{dt}}{A} \quad (2)$$

式中 $E-P$ 在地表为净水汽通量, E 和 P 分别代表单位面积蒸发率和单位面积降水率。考虑同一地点, 极短时间内, 若只有蒸发或降水一个主导过程 (即 $|E| \gg |P|$ 或 $|E| \ll |P|$), 因此可以单独诊断 E 或 P 。当 $E-P > 0$ 时, 蒸发速率 $E \approx E-P$; 当 $E-P < 0$ 时, 降水速率 $P \approx P-E$ 。总体而言, $E-P$ 为正值表示该区域可能是降水的强水汽源区, 经过该区域的目标粒子获取水汽; 反之则表示该区域可能是强水汽汇区 (即降水发生区), 经过该区域的目标粒子释放水汽。根据江志红等 (2013) 提出的轨迹分析定量研究方法, 用如下两式客观评估不同区域空气块贡献率、水汽贡献率:

$$\text{空气块贡献: } Q_{air} = \frac{\sum_1^m i}{\sum_1^n i} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{水汽贡献: } Q_v = \frac{\sum_1^m q_{last}}{\sum_1^n q_{last}} \times 100\% \quad (4)$$

式中 Q_{air} 和 Q_v 分别为某一区域输送的空气块、水汽的贡献率, q_{last} 为空气块最终位置的比湿, m 是为该区域输送的空气块个数, n 为空气块总数。

2.4 西南低涡族主要成员的追踪方案

为分析西南低涡族主要成员的生成机理, 同样利用 HYSPLIT version 5.2.1 模式, 对构成此涡旋的粒子进行轨迹追踪, 方案如下: 根据主要成员在生成时刻的大小及垂直伸展, 以 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率均匀选点, 垂直方向每隔 25 hPa 选取一层, 从生成时刻向前追踪 24 h。沿轨迹计算温度、比湿、垂直速度、涡度等值, 以表征该涡旋形成前各物理量沿轨迹的变化情况。

类似水汽贡献的定量估计, 定义涡度贡献的客观分析方法, 以估计不同区域气块对主要成员形成的贡献:

$$\text{涡度贡献: } Q_{\zeta} = \frac{\sum_1^m \zeta_{last}}{\sum_1^n \zeta_{last}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 Q_{ζ} 是为某一区域输送空气块的涡度贡献率, ζ_{last} 为空气块最终位置 (即西南低涡生成时) 的涡度, m 是为该区域输送的空气块个数, n 为空气块总数。

2.5 涡度收支方程

因涡度可有效表征涡旋的旋转强弱 (Fu et al., 2017), 本研究使用气压坐标系下的涡度收支方程 (Kirk, 2003), 来研究西南低涡族主要成员的生成、演变机理, 其在拉格朗日观点下的表达式为:

$$\frac{d\zeta}{dt} = \underbrace{\vec{k} \cdot \left(\frac{\partial \vec{V}_h}{\partial p} \times \nabla_h \omega \right)}_{\text{(I)}} - \underbrace{(\zeta + f) \nabla_h \cdot \vec{V}_h}_{\text{(II)}} - \underbrace{\beta v}_{\text{(III)}} \quad (6)$$

式中 ζ 为相对涡度, f 为地转涡度。等式左边为涡度个别变化项, 代表质点旋转强弱随时间的变化; 等式右边第一项 (I) 为倾斜项 (TIL 项), 表示由倾斜效应造成涡度的变化; 等式右边第二项 (II) 为伸展项 (STR 项), 表示由于气块垂直拉伸 (收缩) 导致气旋式涡度的制造 (减损); 等式右边第三项 (III) 为行星涡度平流项 (BET 项), 该项相对于 TIL 项和 STR 项为小项, 不做深入讨论。在 2.4 西南低涡族主要成员轨迹追踪研究结果的基础上, 利用 (6) 式, 沿轨迹计算涡度收支情况, 以研究涡度沿轨迹变化的原因。这种沿轨迹计算涡度收支的方法, 是研究中尺度涡旋形成的有效方法 (Wang and Tan, 2014; Feng et al., 2020)。

因 $\frac{d\zeta}{dt}$ 可展开为如下形式: $\frac{d\zeta}{dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p}$, 故气压坐标系下的涡度收支方程还可

写为如下形式:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \left[-\left(u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) - \beta v \right] - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} \right) - (f + \zeta) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (7)$$

(I) (II) (III) (IV)

该式为欧拉观点下的涡度收支方程。等式左边为涡度局地变化项 (LT)，等式右侧第一项 (I) 为绝对涡度的水平平流项 (HAV)，其中 βv 为行星涡度平流的作用远小于相对涡度平流；第二项 (II) 为相对涡度的垂直平流项 (VAV)；第三项 (III) 为倾斜项 (TIL)，代表垂直速度的水平分布不均所导致的将水平涡度扭转为垂直涡度的倾斜效应；第四项 (IV) 为伸展项 (STR)，代表水平辐合辐散引起相对涡度的改变。方程右端四项之和定义为 TOT 项： $TOT = HAV + VAV + TIL + STR$ 。因涡度是微观概念，仅描述质点的自转的强弱，需要对其进行面积分，来表征西南低涡整体的旋转强弱。本研究根据西南低涡族主要成员的大小，选取关键区，关键区的选取通过敏感性实验，即各物理量的计算结果对关键区面积相对较小的改变（各边界 $\pm 0.25^\circ$ ）是不敏感的。计算关键区内涡度收支各项的平均值，用于研究西南低涡族主要成员的生

成、发展机理。

3. 个例概况

3.1 降水概况

2020 年 8 月 12 至 14 日，在西南低涡族影响下，四川盆地出现一次持续性暴雨过程，引发山洪，导致部分城市发生内涝，造成严重的经济损失。至 8 月 13 日，绵阳市约有 2.7 万人受灾，直接经济损失达 1.2 亿元，广元市直接经济损失达 0.2 亿元。本次降水主要集中于四川盆地，具有降水强度高、持续时间长、影响范围广的特点。过程累积降水量图（图 1a）表明，雨带呈西南-东北走向，降水中心有两个，一个位于盆地东北部的巴中、广元、南充市；另一个位于盆地中部的内江市。最大累积降水高达 259.3mm，出现在南充市，最大小时降水量达 95.1mm，出现在南充市南部县。总体而言，区域平均降水和极值降水随时间的变化特征一致（图 1b）。在关注时段内，区域平均降水、极值降水的最大值都出现在 12 日 15 时；从 12 日 16 时至 12 日 22 时，降水强度有所减弱；从 12 日 23 时至 13 日 20 时，区域平均和极值降水都呈现波动，降水仍能维持一定强度。从 13 日 21 时至 14 日 02 时降水不断减弱，过程趋于结束。

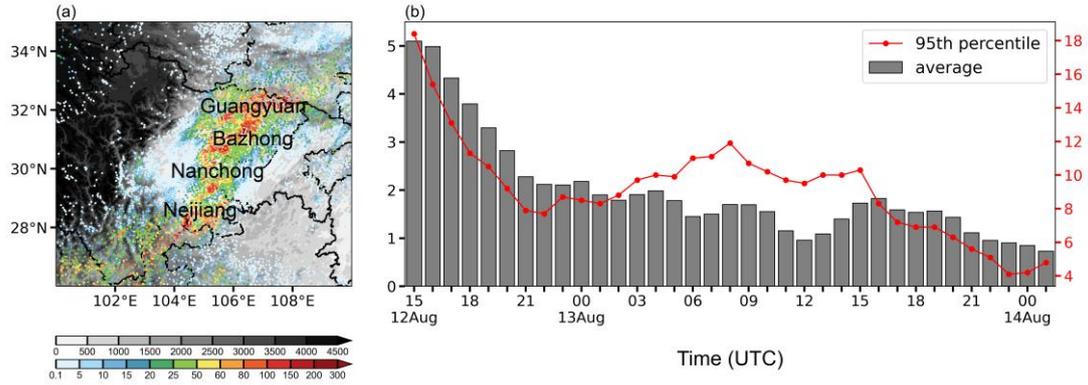


图 1 (a) 2020 年 8 月 12 日 15 时至 14 日 02 时 35h 站点累积降水量 (单位: mm; 彩色阴影)。灰色阴影代表地形 (单位: m); (b) 区域 (100-110 °E, 26-35 °N) 平均降水量 (柱状图, 单位: mm), 站点降水 95 百分位值 (红线, 单位: mm)。

Figure 1 (a) Accumulated precipitation from 15:00 UTC 15 to 02:00 UTC 14 August (units: mm, color shadings). Gray shadings denote terrain height (units: m). (b) Hourly precipitation (100-110 °E, 26-35 °N) (bar, units: mm), and 95th percentile value (red line, units: mm).

8 月 12 日 15 至 23 时是降水集中的时段, 降水从云南东北部至盆地连成一片, 雨带范围大, 呈东北-西南走向, 累积降水大值中心分别位于四川与重庆交界处、云南与四川交界处, 8 h 单站累积降水量最大值达 198.8 mm, 位于南充市仪陇县 (图 2a)。12 日 23 时至 13 日 07 时, 降水强度减弱, 雨带断为南、北两部分, 北侧雨带位于四川东北部, 南侧雨带位于云南与四川交界处, 单站累积降水量最大值位于巴中市通江县 (图 2b)。13 日 07 至 15 时, 北侧雨带略微北抬, 降水强度较上一时段有所减弱, 南侧雨带消失, 单站累积降水量最大值位于达川区 (图 2c)。13 日 15 时至 23 时, 北侧雨带略微增强, 并向西北方向移动, 单站累积降水量最大值位于广元市旺苍县 (图 2d)。13 日 23 时至 14 日 02 时, 降水逐渐减弱至消失 (图略)。

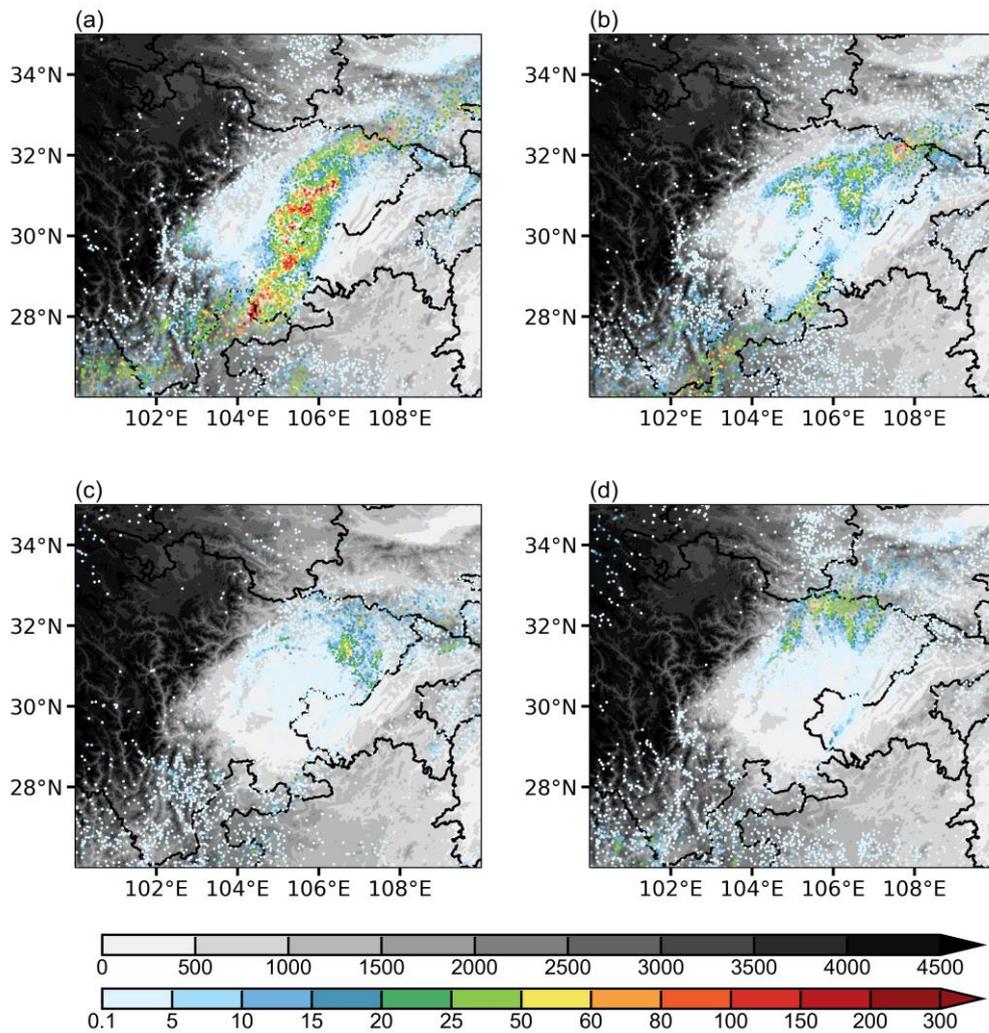


图2 2020年8月12至13日站点8h累积降水量(单位: mm; 彩色点): (a) 8月12日15时至23时; (b) 8月12日23时至13日07时; (c) 8月13日07时至15时; (d) 8月13日15时至23时。灰色阴影代表地形(单位: m)。

Figure 2. 8-h accumulated precipitation observed by the automatic station from 12 to 13 August 2020 (units: mm, color shading dots): (a) 15:00 UTC 12 to 23:00 UTC 12 August. (b) 23:00 UTC 12 to 07:00 UTC 13 August. (c) 07:00 UTC 13 to 15:00 UTC 13 August. (d) 15:00 UTC 13 to 23:00 UTC 13 August. Gray shadings denote terrain height (units: m).

3.2 环流背景

本次降水发生在有利背景环流条件下, 对流层高层 200hPa (图 3a, b) 高空急流维持在中高纬度地区, 南亚高压位于高空急流南侧, 稳定维持在我国南部上空。四川省位于强高空急流出口右侧, 受南亚高

压控制，高层有较强的辐散场，利于上升运动的维持。对流层中层 500hPa（图 3d, e）副高稳定位于西北太平洋，控制我国东南地区，其西部外围偏南气流利于水汽的向北输送。在副高西北方，青藏高原东北部存在一个东移的西风带短波槽（图 3d），四川盆地受槽前暖平流影响。根据准地转理论可知（Holton, 1979），槽前暖平流利于上升运动的发生与维持，同时也有利于对流层低层减压，此两者均有利于西南低涡的生成（Fu et al., 2019）。对流层低层 850 hPa（图 3g, h）水汽湿度较大，低空急流位于四川省南部，利于水汽的北向输送和盆地地区低层辐合的维持。随着高层辐散场的减弱、中层中纬度槽的减弱东移、以及低空急流的减弱（图 3c, f, i），大气背景环流条件逐渐变得不利于西南低涡和降水的维持，西南低涡随之消亡，降水也随之减弱。

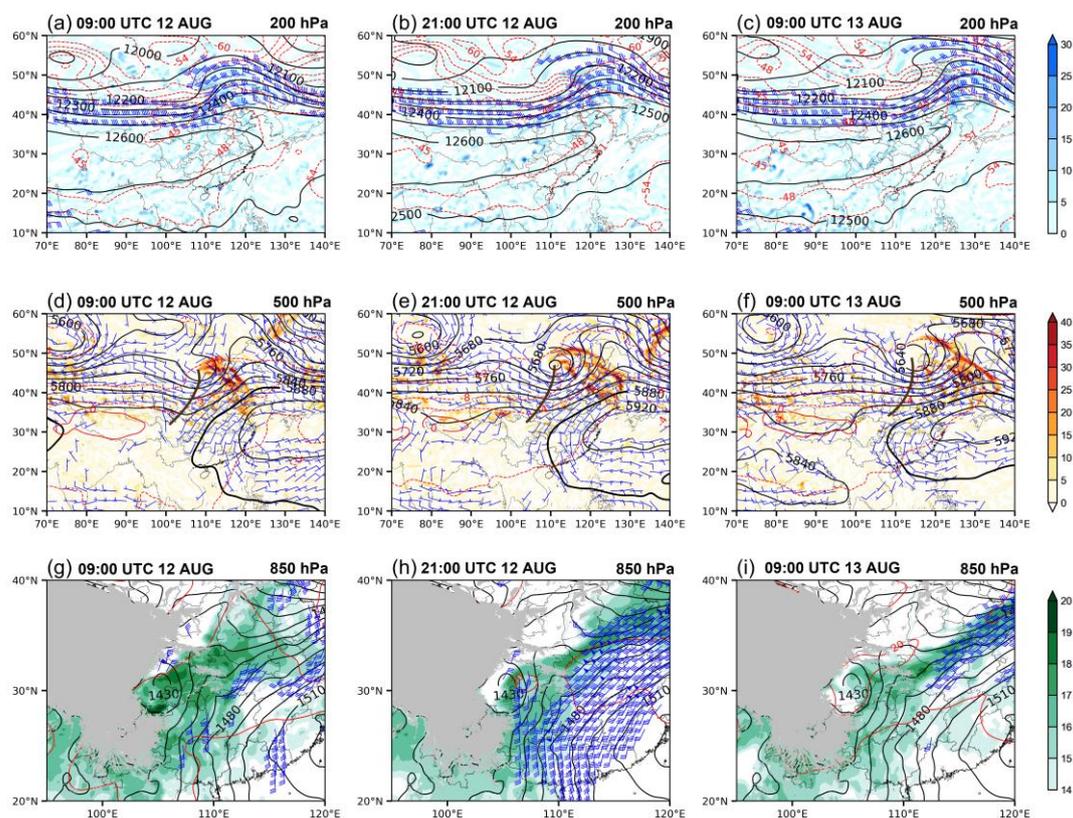


图 3 2020 年 8 月 12 日 19 时至 13 日 09 时逐 12h 背景场分布。(a-c) 200 hPa 位势高度场（黑色实线，单位：gpm），温度场（红线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ），风场（风向杆，一个箭羽表示 10m/s），散度（阴影，单位： 10^{-5} s^{-1} ）；(d-f) 500 hPa 位势高度场（黑色实线，单位：gpm），温度场（红线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ），风场（风向杆，一个箭羽表示 4m/s），温度平流（阴影，单位： $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$ ），棕

色实线为槽线；(g-i) 850 hPa 位势高度场（黑色实线，单位：gpm），温度场（红线，单位：°C），风场（风向杆，一个箭羽表示 4m/s），比湿（阴影，单位：g kg⁻¹）。

Figure 3 Background field distribution at 12-h intervals from 09:00 UTC 12 to 09:00 UTC 13 August 2020. (a-c) 200 hPa geopotential height (solid black line, units: gpm), temperature (red line, units: °C), wind field (wind bar, one a full bar represents 10m/s), divergence (shading, units: 10⁻⁵ S⁻¹). (d-f) 500 hPa geopotential height (solid black line, units: gpm), temperature (red line, unit: °C), wind field (wind bar, a full bar represents 4m/s), temperature advection (shading, units: 10⁻⁵ °C S⁻¹), the brown solid lines denote trough. (g-i) 850 hPa potential height (solid black line, units: gpm), temperature (red line, unit: °C), wind field (wind bar, a full bar represents 4m/s), specific humidity (shading, units: g kg⁻¹).

3.3 水汽来源

图 4a 所示的水汽后向追踪结果表明，影响降水的绝大多数粒子起源于目标区域（四川盆地东北部）以南的孟加拉湾、北部湾，以西的欧亚大陆。源自欧亚大陆的气块较干，主要位于对流层中高层（500 hPa 至 200hPa），这部分气块的温度较低，除了输送水汽外，中高层干冷空气的入侵有助于增强四川盆地局地大气的不稳定。源自孟加拉湾和北部湾的气块较湿，主要位于对流层低层（800 hPa 以下）。

为定量分析强降水的水汽源区，本文划分了四个子区域 A、B、C 和 D，其分别对应欧亚大陆地区、目标地区（四川盆地东北部）、孟加拉湾地区、北部湾地区，见图 4b-4d 所示的后向轨迹水汽收支结果。图 4b 中蓝色表示该地以水汽释放为主，红色表示该地以水汽获取为主，可以明显看出，大多数粒子在到达降水目标区域 B 前，经历了多次蒸发和降水，最主要的水汽源区（E-P>0）为孟加拉湾和北部湾（区域 C、D），最主要的水汽汇区（E-P<0）为目标区域和欧亚大陆（区域 B、A）。依据方程（2）和（4）计算得到，区域 A 对目标区域的空气块贡献约为 20.0%，但水汽贡献仅为~3.1%（图 4c），其对应气块的总体水汽的获取低于水汽的释放（图 4d），因此，区域 A 对目标区域内降水的绝对贡献不大。目标地区（区域 B）气块数目最少，水汽贡献最小，其主要以水汽的释放为主，对应本区域内的强降水过程。区域 C 的空

气块贡献和水汽贡献均为最多（均超过 60%），且以水汽释放为主，是本次降水的最主要水汽源地。区域 D 的空气块贡献约为 21.3%（图 4c），水汽贡献约为 15.8%（图 4d），该部分气块也以水汽释放为主，是本次降水第二重要的水汽源地。

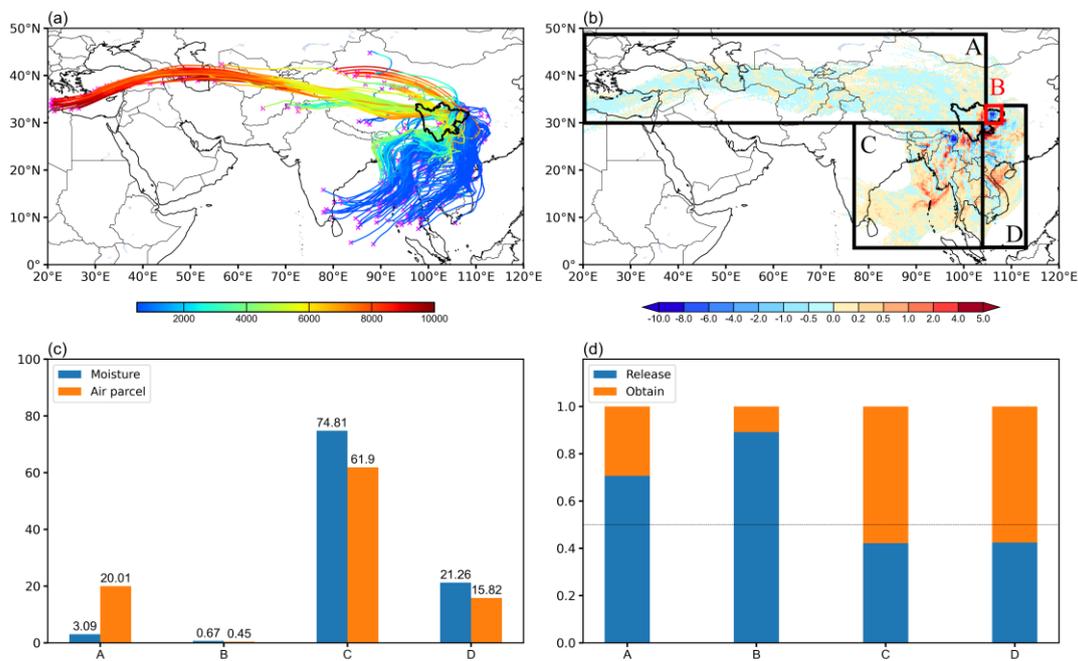


图 4 (a) 每隔 100 条绘制的水汽追踪轨迹及气块离地高度（彩色阴影，单位：m）；(b) 根据追踪结果计算得到的 E-P 值（彩色阴影，单位：mm）；(c) 各区域空气块、水汽贡献（单位：%）；(d) 各区域水汽收支情况

Figure 4 (a) Trajectories and height (color shadings, units: m) for the target particles drawn every 100. (b) Values of E-P (color shadings, units: mm). (c) Contribution of air mass and water vapor in each region (units: %); (d) Water vapor budget in each region.

3.4 西南低涡族概况

根据 2.2 节定义的西南低涡族判定标准，逐小时、逐层次进行主观识别，在降水时段内共识别到 16 个涡旋（表 1），从 Vortex I 至 Vortex XVI 编号，其中 Vortex I、Vortex II、Vortex IV、Vortex XVI 为西南低涡（符合传统定义；Fu et al., 2015），其它涡旋为一般中尺度涡旋。西南低涡族各个成员在其中心层次上的流场如图 5 所示。总体而言，本次西南低涡事件中各个涡旋在其生成后均维持在源地内，移动性均不强。其中，Vortex I 最先出现其在发展过程中向南分裂出 Vortex II，从 12 日 18 时至 13 日 03 时，两个涡

旋同时存在。Vortex III 生成于 900 hPa，其生成 1 h 后就与 Vortex II 合并，使 Vortex II 得到进一步发展。

Vortex IV 至 Vortex XVI 为从 Vortex I 或 Vortex II 主体中脱离而形成，生命史较短，垂直伸展浅薄。在西南低涡族所有的 16 个成员中，Vortex I 和 Vortex II 生命史较长、垂直伸展最深厚。

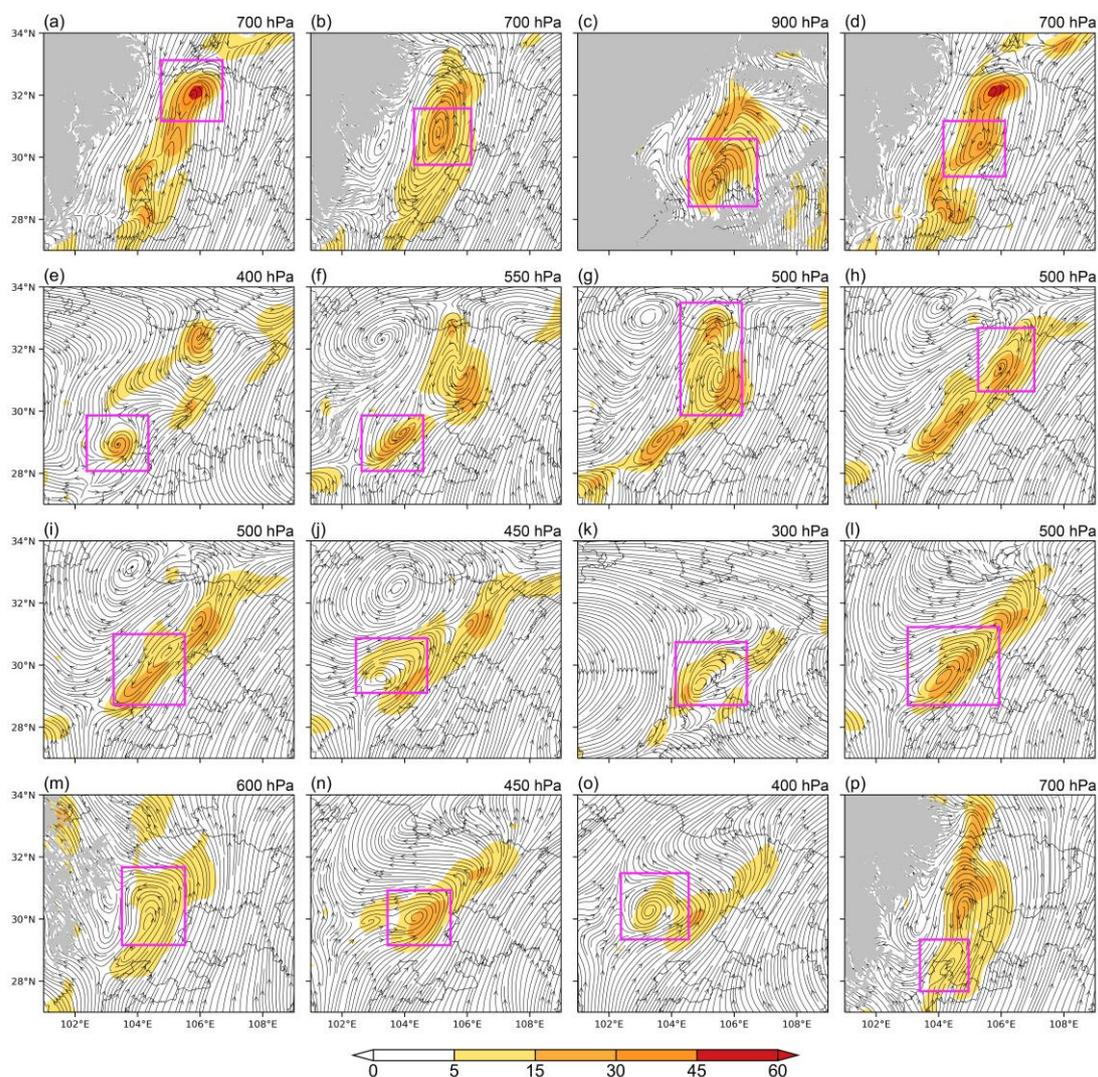


图 5 Vortex I 至 Vortex XVI 在中心层次的流场和涡度（阴影，单位： 10^{-5} s^{-1} ）：(a) 12 日 15 时至 13 日 04 时 Vortex I 700 hPa 平均流场；(b) 12 日 18 时至 14 日 02 时 Vortex II 825 hPa 平均流场；(c) 12 日 18 时至 12 日 19 时 Vortex III 900 hPa 平均流场；(d) 12 日 21 时至 12 日 22 时 Vortex IV 700 hPa 平均流场；(e) 12 日 23 时至 13 日 06 时 Vortex V 400 hPa 平均流场；(f) 13 日 06 时至 13 日 13 时 Vortex VI 550 hPa 平均流场；(g) 13 日 07 时至 13 日 08 时 Vortex VII 500 hPa 平均流场；(h) 13 日 10 时至 13 日 13 时 Vortex VIII 500 hPa 平均流场；(i) 13 日 10 时至 13 日 12 时 Vortex IX 500 hPa 平均流场；(j) 13 日 11 时至 13

日 12 时 Vortex X 450 hPa 平均流场; (k) 13 日 11 时至 13 日 14 时 Vortex XI 300 hPa 平均流场; (l) 13 日 12 时至 13 日 15 时 Vortex XII 500 hPa 平均流场; (m) 13 日 14 时至 13 日 16 时 Vortex XIII 600 hPa 平均流场; (n) 13 日 14 时至 13 日 16 时 Vortex XIV 450 hPa 平均流场; (o) 13 日 13 时至 13 日 19 时 Vortex XV 400 hPa 平均流场; (p) 13 日 13 时至 13 日 14 时 Vortex XVI 700 hPa 平均流场。

Figure 5 Streamline field and vorticity (shading, units: 10^{-5} s^{-1}) of Vortex I to Vortex XVI in the central level: (a) The average streamline field of Vortex I at 700 hPa from 15:00 UTC 12 to 04:00 UTC 13 August; (b) The average streamline field of Vortex II at 825 hPa from 18:00 UTC 12 to 04:00 UTC 13 August; (c) The average streamline field of Vortex III at 900 hPa from 18:00 UTC 12 to 19:00 UTC 12 August; (d) The average streamline field of Vortex IV at 700 hPa from 21:00 UTC 12 to 22:00 UTC 12 August; (e) The average streamline field of Vortex V at 400 hPa from 23:00 UTC 12 to 06:00 UTC 13 August; (f) The average streamline field of Vortex VI at 550 hPa from 13:00 UTC 06 to 13:00 UTC 13 August; (g) The average streamline field of Vortex VII at 500 hPa from 07:00 UTC 13 to 08:00 UTC 13 August; (h) The average streamline field of Vortex VIII at 500 hPa from 10:00 UTC 13 to 13:00 UTC 13 August; (i) The average streamline field of Vortex IX at 500 hPa from 10:00 UTC 13 to 12:00 UTC 13 August; (j) The average streamline field of Vortex X at 450 hPa from 11:00 UTC 13 to 12:00 UTC 13 August; (k) The average streamline field of Vortex XI at 300 hPa from 11:00 UTC 13 to 14:00 UTC 13 August; (l) The average streamline field of Vortex XII at 500 hPa from 12:00 UTC 13 to 15:00 UTC 13 August; (m) The average streamline field of Vortex XIII at 600 hPa from 14:00 UTC 13 to 16:00 UTC 13 August; (n) The average streamline field of Vortex XIV at 450 hPa from 14:00 UTC 14 to 16:00 UTC 13 August; (o) The average streamline field of Vortex XV at 400 hPa from 13:00 UTC 13 to 19:00 UTC 13 August; (p) The average streamline field of Vortex XVI at 700 hPa from 13:00 UTC 13 to 14:00 UTC 13 August;

结合 2.2 节西南低涡族成员相关降水的定义, 计算得到 16 个西南低涡族成员的累积降水如图 6a 所示, 其空间分布与过程累积降水的空间分布 (图 1a) 基本一致, 西南低涡族相关降水占总降水的比例达 80% (图 6b), 为本次降水过程的主导系统。进一步计算各西南低涡族成员对应的累积降水, 根据其强弱进行排序, 结果如表 1 所示。

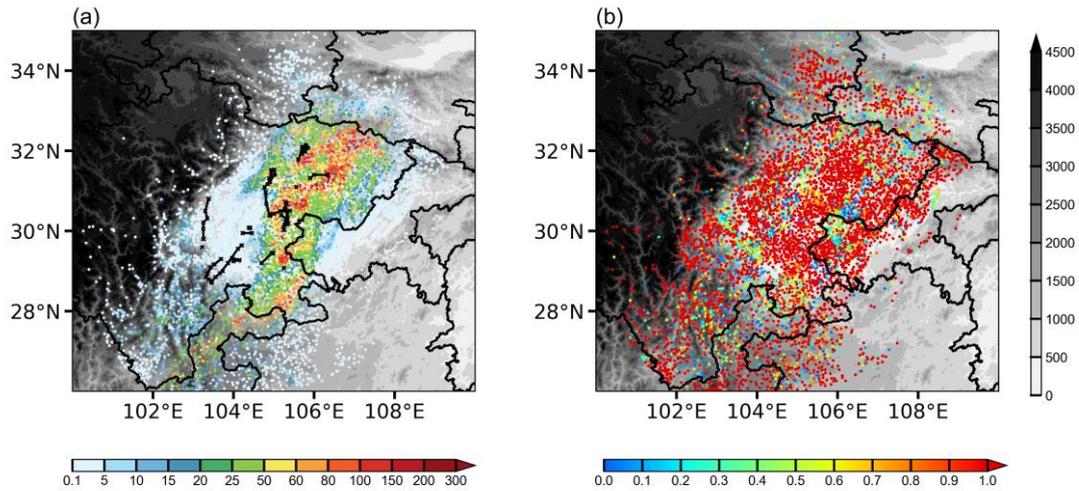


图 6 (a) 西南低涡族 16 个成员的累积降水 (彩色点, 单位: mm) 和西南低涡族 16 个成员的移动路径 (黑线); (b) 16 个西南低涡累积降水占区域累积降水的比例 (彩色点)。灰色阴影代表地形。

Figure 6 (a) Accumulated precipitation of 16 members of the Southwest vortex group (color shading dots, units: mm) and tracks of 16 Southwest vortices (black line). (b) The proportion of accumulated precipitation of 16 members of the Southwest vortex group to regional accumulated precipitation (color shading dots). Gray shadings denote terrain height (units: m).

表 1 西南低涡族成员概况, 按达到强降水站点数由多至少排序

西南低涡族成员	生成时间	消亡时间	生命史 (h)	垂直伸展 (hPa)	达到强降水 (\geq 75mm) 的站点数
Vortex I	15:00 UTC 12 August	04:00 UTC 13 August	13	800-450	181
Vortex II	18:00 UTC 12 August	02:00 UTC 14 August	32	900-450	156
Vortex V	23:00 UTC 12 August	06:00 UTC 13 August	7	450-350	4
Vortex VI	06:00 UTC 13 August	13:00 UTC 13 August	7	600-350	1
Vortex VII	07:00 UTC 13 August	08:00 UTC 13 August	~1	~500	1
Vortex III	18:00 UTC 12 August	19:00 UTC 12 August	~1	~900	0

Vortex IV	21:00 UTC 12 August	22:00 UTC 12 August	~1	700-650	0
Vortex VIII	10:00 UTC 13 August	13:00 UTC 13 August	3	500-450	0
Vortex IX	10:00 UTC 13 August	12:00 UTC 13 August	2	~500	0
Vortex X	11:00 UTC 13 August	12:00 UTC 13 August	~1	~450	0
Vortex XI	11:00 UTC 13 August	14:00 UTC 13 August	3	~300	0
Vortex XII	12:00 UTC 13 August	15:00 UTC 13 August	3	600-450	0
Vortex XIII	14:00 UTC 13 August	16:00 UTC 13 August	2	~600	0
Vortex XIV	14:00 UTC 13 August	16:00 UTC 13 August	2	~450	0
Vortex XV	13:00 UTC 13 August	19:00 UTC 13 August	6	~400	0
Vortex XVI	13:00 UTC 13 August	14:00 UTC 13 August	~1	~700	0

综合考虑西南低涡族中各个成员的生命史长短、累积降水强度、垂直伸展厚度，筛选出西南低涡族中的主要成员为 Vortex I 和 Vortex II，此两者均为西南低涡，其累积降水均有分布集中、面积大、强度强的特点（图 7a）。Vortex I 累积降水主要集中于盆地中部，降水中心分别位于南充市和内江市，累积降水量最大值为 221.4 mm，最大小时降水量达 95.1mm。Vortex I 累积降水占总降水的比例约 70%，与其相关的降水以强降水为主；Vortex II 累计降水主要集中于盆地东北部，降水中心有两个，一个位于巴中市与南充市交界处，另一个位于泸州市与宜宾市交界处（图 7b），累积降水最大值为 97.4 mm。Vortex II 累积降水占总累积降水的比例约 48%。

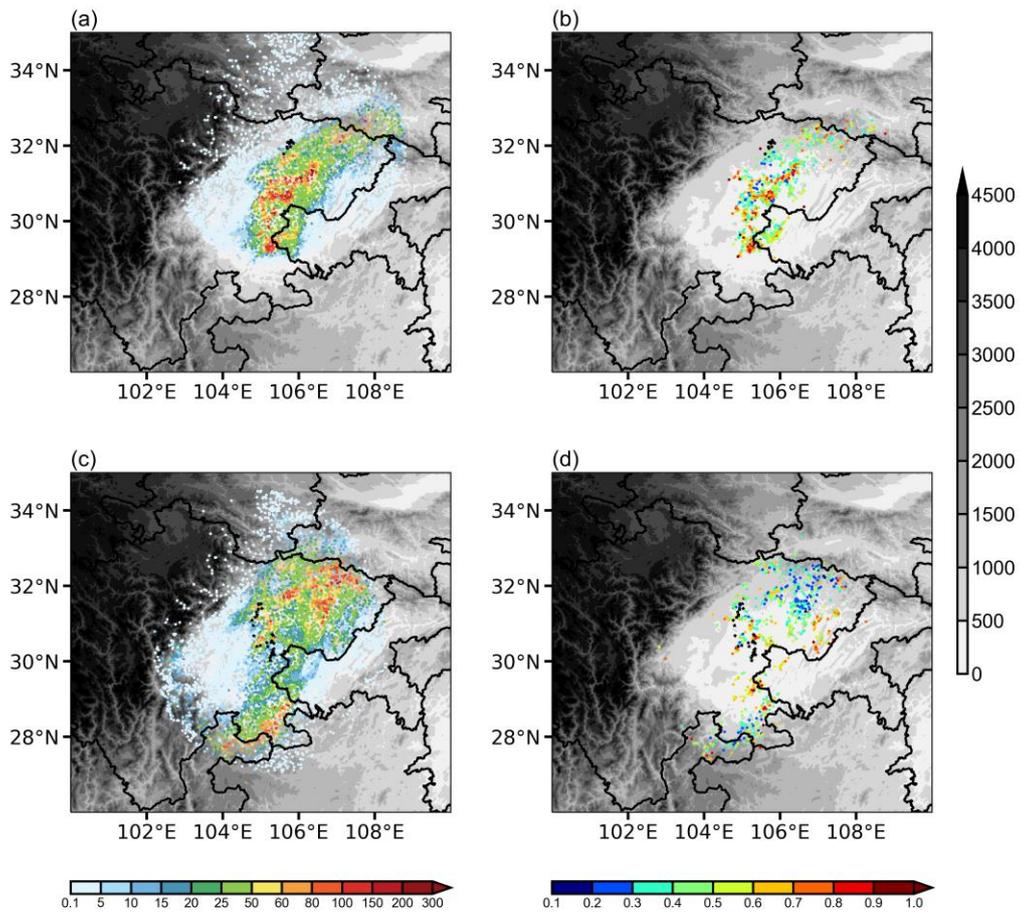


图7 (a) Vortex I 累积降水 (彩色点, 单位: mm); (b) Vortex I 超过 15mm 降水占总降水的比例 (彩色点); (c) Vortex II 累积降水 (彩色点, 单位: mm); (d) Vortex II 超过 15mm 降水占总降水的比例 (彩色点)。黑点代表西南低涡中心, 灰色阴影代表地形 (单位: m)。

Figure 7 (a) Vortex I accumulated precipitation (color shading dots, units: mm). (b) The proportion of Vortex I precipitation exceeding 15mm in total precipitation (color shading dots). (c) Vortex II accumulated precipitation (color shading dots, unites: mm). (d) The proportion of Vortex II precipitation exceeding 15mm to total precipitation (color shading dots.). The black dots represent the Southwest vortex center, gray shadings denote terrain height (units: m).

4. 西南低涡族主要成员的结构和演变

4.1 Vortex I 的结构与演变

根据 Vortex I 流场、涡度场特征，经过敏感性试验（关键区选取需要对结果的影响较小），对其选取 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 的关键区（图 5a 紫色框所示范围），计算各物理量在关键区内的平均值，以有效表征 Vortex I 的整体特征。Vortex I 生成于 12 日 15 时，首先从对流层低层发展，垂直伸展为 750 – 650 hPa（气旋式环流结构连续出现在 750 hPa 至 650 hPa）。此后，Vortex I 在垂直方向上快速发展，至 12 日 21 时其底层（西南低涡垂直伸展内气压最大的层次）向下伸展至 800 hPa，顶层（西南低涡垂直伸展内气压最小的层次）已到达 550 hPa。Vortex I 中心约位于 700 hPa 附近，在关键区内有显著的气旋性涡度（图 8a），其所在层次内存在显著辐合，其所在层次上（500 hPa 以上）则存在较强的辐散（图 8b），Vortex I 的垂直伸展范围内存在一致的上升运动（图 8c）。根据关键区内涡度的变化特征，本文将 Vortex I 生命史划分为四个阶段：

(i) 生成阶段（2020 年 8 月 12 日 10 时至 12 日 15 时），该阶段内 Vortex I 关键区区域平均涡度持续增加，但流场上未出现明显的涡旋结构；(ii) 发展阶段（2020 年 8 月 12 日 15 时至 12 日 18 时），区域平均的气旋式涡度迅速增加，且保持较高的强度；(iii) 维持阶段（2020 年 8 月 12 日 18 时至 12 日 21 时），区域平均涡度维持在 $11\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 左右；(iv) 衰减阶段（2020 年 8 月 12 日 21 时至 13 日 03 时），区域平均气旋式涡度与 Vortex I 的垂直伸展均迅速减小。

在 Vortex I 中心（ 32.25°N ， 105.75°E ）附近，强烈发展的正位涡柱可从地面伸展至 300 hPa，正位涡柱中心（大于 4 PVU）位于 850 hPa 至 750 hPa，正位涡柱中心相对湿度大于 95%，这说明非绝热加热是正位涡制造的主要原因。沿剖面计算各气压层上温度的平均值，用实际温度值减去该层平均值，得到温度离差剖面图（图 8h）。在降水物蒸发冷却及北侧较冷空气的影响下，Vortex I 所在范围内温度离差可达 -1.0°C （图 8i），具有“冷心”结构。

4.2 Vortex II 的结构与演变

对 Vortex II 选取 $1.5^{\circ}\times 1.5^{\circ}$ 的关键区（图 5b 紫色框所示范围），同样计算各物理量在关键区内的平均值，以表征 Vortex II 的整体特征。Vortex II 生成于 12 日 18 时，其在生成时刻的垂直伸展为 825 hPa – 750

hPa。此后，Vortex II 在垂直方向上快速发展，至 13 日 03 时 Vortex II 底层伸展至 900 hPa，顶层已达 450 hPa。Vortex II 中心位于 825 hPa 附近，在关键区内有显著的气旋性涡度（图 8d），以辐散为主（图 8e），但能维持一定强度的上升运动（图 8f）。根据关键区内涡度的变化特征，将 Vortex II 生命史划分为四个阶段：（i）生成阶段（2020 年 8 月 12 日 11 时至 12 日 18 时），该阶段区域平均气旋式涡度持续增加，但流场上未出现明显的涡旋结构；（ii）发展阶段（2020 年 8 月 12 日 18 时至 13 日 03 时），Vortex II 在垂直方向上快速发展；（iii）维持阶段（2020 年 8 月 13 日 03 时至 13 日 13 时），区域平均涡度维持在 $16 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 左右；（iv）衰减阶段（2020 年 8 月 13 日 13 时至 14 日 02 时），区域平均气旋式涡度迅速减弱。

在 Vortex II 中心（ 30.5°N ， 105°E ）附近，正位涡柱可从地面伸展至 300 hPa，正位涡柱中心（大于 3PVU）位于 900 至 750hPa，正位涡柱中心相对湿度大于 95%，非绝热加热是它形成的主要原因。因其生成位置偏南，且受强降水释放的凝结潜热影响，Vortex II 所在范围内温度离差增幅至 1.5°C ，“暖心”结构明显。

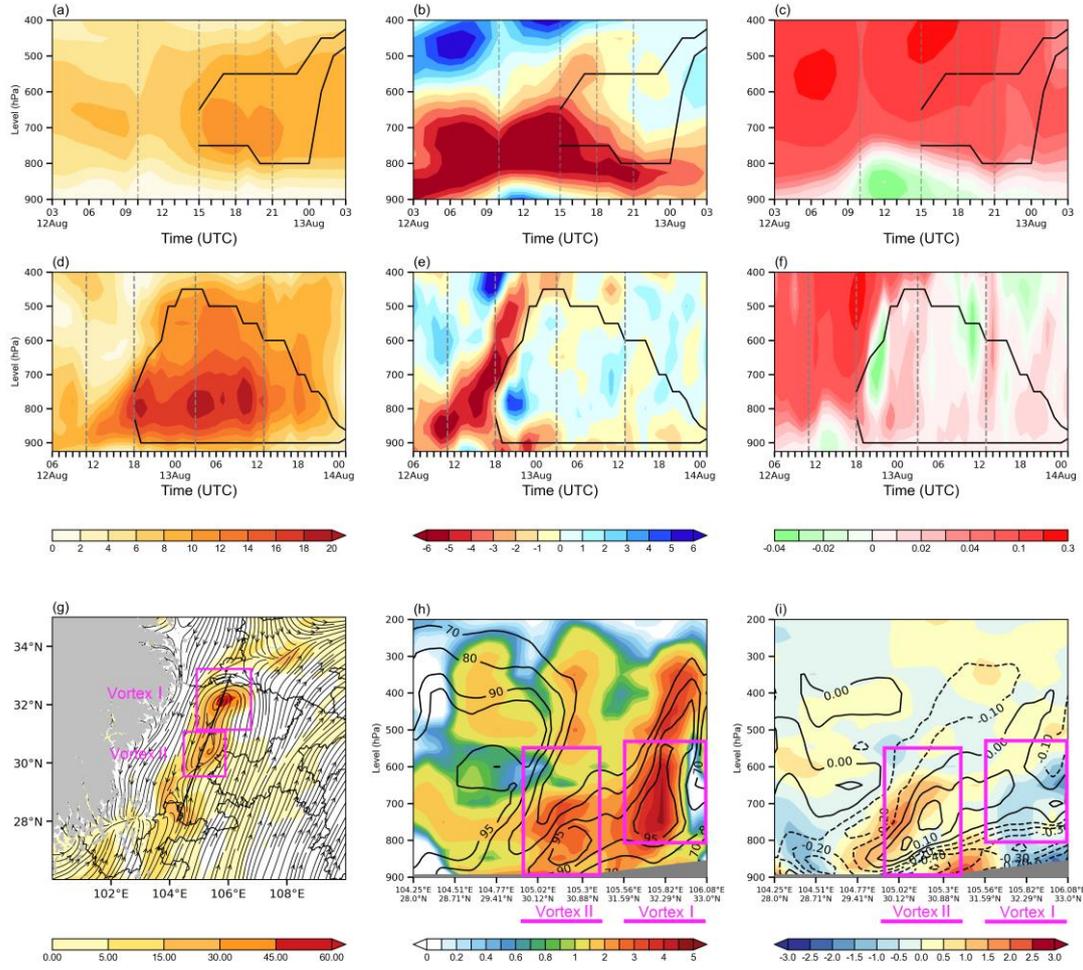


图8 2020年8月12日03时至13日03时 Vortex I 区域平均 (a) 涡度 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1}); (b) 散度 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1}); (c) w (阴影, 单位: m s^{-1}); 2020年8月12日06时至14日01时 Vortex II 区域平均 (d) 涡度 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1}); (e) 散度 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1}); (f) w (阴影, 单位: m s^{-1}); (黑色实线表征西南低涡上、下边界; 垂直灰色实线划分其生命周期); (g) 2020年8月12日21时700hPa流场和涡度 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1}); (h) 2020年8月12日21时, 位涡 (阴影, 单位: PVU), 相对湿度 (黑色实线) 沿黑色实线的垂直剖面, 灰色阴影为地形, 紫色矩形表示 Vortex I 和 Vortex II 所在范围; (i) 2020年8月12日21时, 温度离差 (阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$), $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$ (黑线, 单位: K hPa^{-1}) 沿黑色实线的垂直剖面, 灰色阴影为地形, 紫色矩形表示 Vortex I 和 Vortex II 的垂直伸展。

Figure 8 From 03:00 UTC 12 to 03:00 UTC 13 August, vortex I-averaged (a) vorticity (shading, units: 10^{-5} s^{-1}). (b) Divergence (shading, units: 10^{-5} s^{-1}). (c) w (shading, units: m s^{-1}). From 06:00 UTC 12 to 01:00 UTC 14 August, vortex II-average (d) vorticity (shading, units: 10^{-5} s^{-1}). (e) Divergence (shading, units: 10^{-5} s^{-1}). (f) w (shading, units: m s^{-1}) (Solid black lines indicate the top and bottom levels of the

Southwest vortex. The vertical gray solid line divides the life span of the vortex). (g) Streamline field and vorticity (shading, units: 10^{-5} s^{-1}) at 700 hPa on 2100 UTC 12 August 2020. (h) The vertical profile of the potential vorticity (shading, units: PVU), relative humidity (solid black line) along the solid black line, the gray shaded area with terrain above 3000 m in height, and the purple rectangle represents the key region of Vortex I and Vortex II. (i) The temperature deviation (shading, units: $^{\circ}\text{C}$), $\frac{\partial\theta}{\partial p}$ (black line, units: K hPa^{-1}) along the vertical profile of the solid black line, the gray shaded area with terrain above 3000 m in height, and the purple rectangle represents the key region of Vortex I and Vortex II.

5. 西南低涡族主要成员的生成、发展机理

5.1 生成机理

5.1.1 Vortex I 的生成机理

Vortex I 在初生时刻的垂直伸展为 750 hPa – 600 hPa，使用 2.4 节的追踪方案，将 Vortex I 追踪起始高度选择在 750、725、700、675、650、625、600 hPa 上（垂直间隔为 25 hPa）。从 2020 年 8 月 12 日 15 时开始追踪，向前追踪 24 h，共得到 405 条轨迹（图 9a），其中有 326 条轨迹（80.5%）在 Vortex I 生成时具有气旋性涡度，其有利于 Vortex I 的形成；剩余的 79 条轨迹（19.5%）在 Vortex I 生成时具有反气旋性涡度，不利于其形成。关注对 Vortex I 形成有正贡献的气块，根据气块起点所在高度，将气块划分为三类：源自低层（低于 Vortex I 底层，>750 hPa）、中层（与 Vortex I 垂直范围相同的层，750 hPa – 600 hPa）、高层（高于 Vortex I 顶层，<600 hPa）。在此基础上，对源自低、中、高层的轨迹分别聚类，根据聚类结果（图 9c）可知，构成 Vortex I 的气块有两个源地，分别为青藏高原东北边缘（位于 32.75°N 以北），和云贵高原（位于 30.75°N 以南）。利用方程（5）统计分析，发现对 Vortex I 形成占主导贡献的气块来自对流层低层，且源自关键区以南地区气块的正涡度贡献（53.4%）大于源自关键区以北地区的气块（37.7%）。源自低层、关键区以南的气块较暖湿，其在向北运动的过程中显著上升，比湿显著降低，与强降水过程对

应。源自低层、关键区以北的气块较干冷，其在向南运动的过程中先上升后下沉，在下沉过程中气块比湿和位温均略微增加。总体而言，无论是源自关键区以南还是以北的气块，气旋性涡度显著连续增加的时间段都出现在 Vortex I 生成前 5 个小时内（即从 12 日 10 时至 12 日 15 时），在其他 19 个小时内，气块涡度变化不大，由此可知，12 日 10 时至 12 日 15 时是 Vortex I 形成的关键阶段，这与欧拉观点下分析得到的结果相一致。

沿轨迹的涡度收支表明，在 Vortex I 形成关键期（即 12 日 10 时至 12 日 15 时），源自低层、关键区以南的气块气旋性涡度显著增加，STR 总效应显著为正，利于 Vortex I 的形成；而 TIL 的总效应为负，其主要作用是减缓气旋性涡度的增加。由于 STR 的正效应强于 TIL 的负效应，TOT 项（即 TIL+STR）为正（从 0 增加至 $3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ）；源自低层、关键区以北的气块，STR 表现为弱的正效应，TIL 表现为弱的负效应，TOT 项为正，但其增幅较小（从 0 增加至 $5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ ）。总的来说，Vortex I 形成的主要机制是，源自低层关键区以南（即云贵高原）的气块在辐合的作用下发生垂直拉伸，产生气旋性涡度，配合源自低层关键区以北（即青藏高原东北边缘）的气块，使关键区内的气旋式涡度增长，从而导致了 Vortex I 的生成。

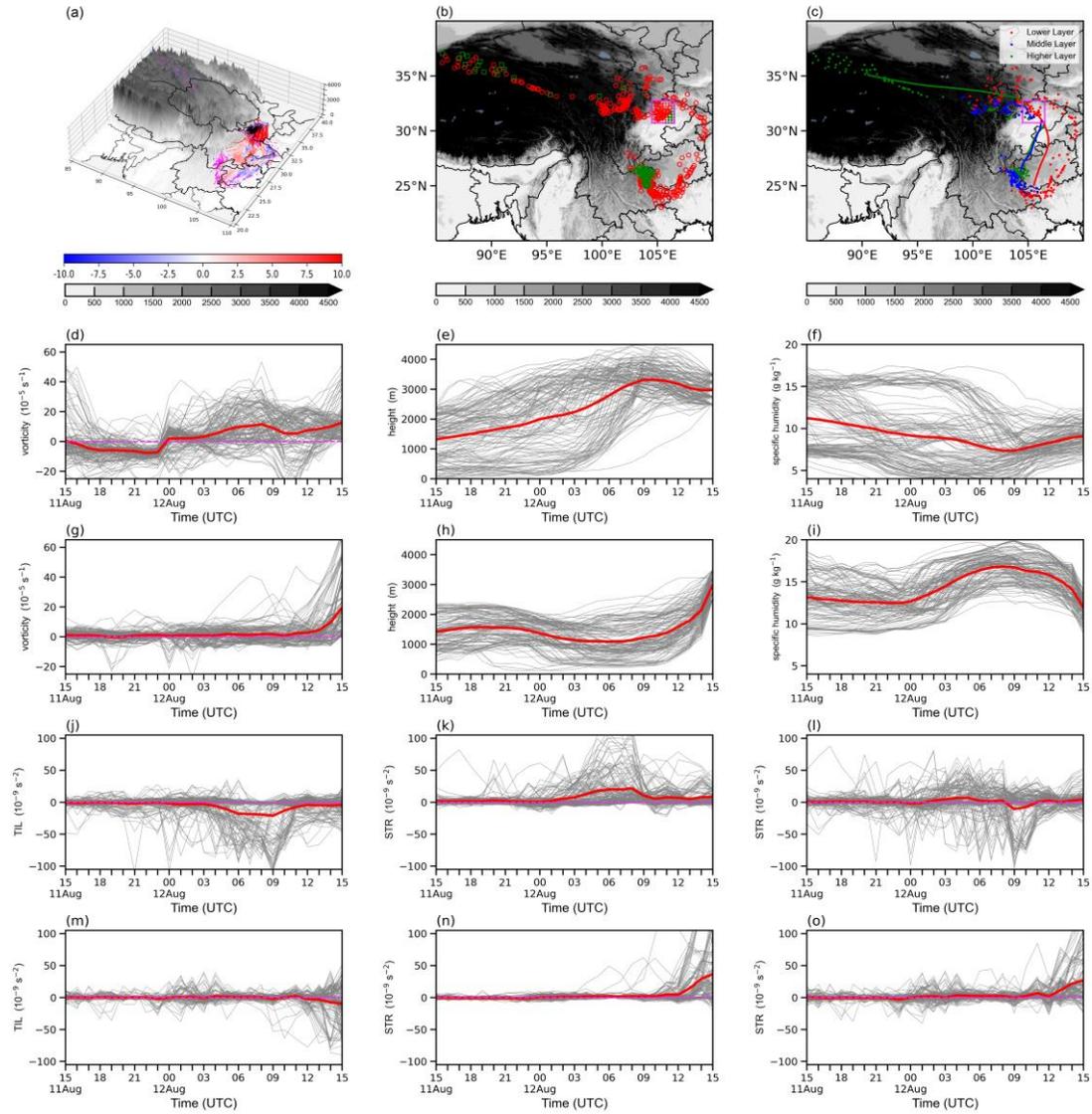


图9 (a) Vortex I形成的三维轨迹图，紫色点标记形成前 24 h 空气粒子的位置，黑点标记形成时空气粒子的位置，彩色阴影表示涡度（单位： 10^{-5} s^{-1} ）；(b) 与 Vortex I 形成相关的 326 条气旋性轨迹的初始（红色空心圆）和结束位置（红色实心圆），与 Vortex I 形成相关的 79 条反气旋性轨迹的初始（绿色空心矩形）和结束位置（绿色实心矩形），紫色矩形为 Vortex I 关键区；(c) 与 Vortex I 形成相关的 326 条气旋性轨迹的聚类结果（图中实线），实心点为轨迹的初始位置（红色代表初始位置位于低层，蓝色代表初始位置位于中层，绿色代表初始位置位于高层）；(a-c) 中灰色阴影为地形（单位： m ）；(d-f) 源自低层、关键区以南气旋性轨迹的涡度（ 10^{-5} s^{-1} ）、高度（ m ）、比湿（ g kg^{-1} ）的变化；(g-i) 源自低层、关键区以北气旋性轨迹的涡度（ 10^{-5} s^{-1} ）、高度（ m ）、比湿（ g kg^{-1} ）的变化；(j-l) 源自低层、关键区以南气旋性轨迹 TIL、STR、TOT（ 10^{-9} s^{-2} ）的变化；(m-o) 源自低层、关键区以北气旋性轨迹 TIL、STR、TOT（ 10^{-9} s^{-2} ）的变化。

Figure 9 (a) Illustrates the three-dimensional trajectories that featured cyclonic vorticity at the time when the Vortex I formed. Purple dots marked the positions of air particles 24 hours before the formation, black dots marked the positions of air particles at the time of formation, and vorticity (color shadings, units: 10^{-5} s^{-1}). (b) The initial (red hollow circle) and final (red solid circle) positions of 326 cyclonic tracks associated with the formation of Vortex I, the initial (green hollow rectangle) and final (green solid rectangle) positions of 79 anticyclonic tracks associated with the formation of Vortex I, and the purple rectangle is the key region of Vortex I. (c) Clustering results of 326 cyclonic tracks related to Vortex I formation (solid line), with solid points representing the initial location of the tracks (red represents formed at the low level, blue represents formed at the middle level, and green represents the formed at the high level). Gray shadings in (a-c) denote terrain height (units: m). (d-f) Vorticity along the low-level cyclonic trajectories (units: 10^{-5} s^{-1}), heights (units: m), and specific humidity (units: g kg^{-1}) which from south of the key region. (g-i) Vorticity along the low-level cyclonic trajectories (units: 10^{-5} s^{-1}), heights (units: m), and specific humidity (units: g kg^{-1}) which from south of the key region. (j-l) TIL, STR, TOT along the low-level cyclonic trajectories (units: 10^{-9} s^{-2}) from the south of the critical area. (m-o) TIL, STR, TOT along the low-level cyclonic trajectories (units: 10^{-9} s^{-2}) from the north of the critical area.

5.1.2 Vortex II 的生成机理

Vortex II 在初生时刻位于 825 至 750 hPa, 故 Vortex II 追踪起始高度选择在 825、800、775、750 hPa (均匀间隔 25 hPa), 从 2020 年 8 月 12 日 18 时, 向前追踪 24 h, 共得到 196 条轨迹 (图 10a), 其中有 151 条轨迹 (77%) 在 Vortex II 生成时具有气旋性涡度, 利于 Vortex II 形成; 有 45 条轨迹 (33%) 在 Vortex II 生成时具有反气旋性涡度, 不利于 Vortex II 形成。同样关注对 Vortex II 形成有正贡献的气块, 根据气块起点所在高度, 将气块划分为三类: 源自低层 (低于 Vortex II 底层, $<825 \text{ hPa}$)、中层 (与 Vortex II 垂直范围相同的层, 825~750 hPa)、高层 (高于 Vortex II 顶层, $>750 \text{ hPa}$)。同样对源自低、中、高层的轨迹分别聚类, 结果与 Vortex I 类似 (图 10c), 构成 Vortex II 的气块源地为两个, 分别为青藏高原东北边缘 (位于 31.25°N 以北), 和云贵高原 (位于 29.75°N 以南)。对 Vortex II 形成占主导贡献的气块来自对流

层低层（西南低涡下方），且源自关键区以南地区气块的正涡度贡献（61.5%）大于源自关键区以北地区的气块（16.0%）。源自低层、关键区以南的气块较暖湿，其在向北运动过程中显著上升，比湿略微降低，位温略微增加，对应一定强度降水的产生。源自低层、关键区以北的气块较干冷，在向南运动的过程中先上升后下沉，伴随着比湿的降低和位温的增加。无论是源自关键区以南还是以北的气块，气旋性涡度累积增加的时间段都出现在 Vortex II 生成前 7 个小时内（即从 12 日 11 时至 12 日 18 时），在其他 17 个小时内，涡度变化不大，即 12 日 11 时至 12 日 18 时是 Vortex II 形成的关键阶段，与欧拉观点下分析得到的结果一致。

在 Vortex II 形成关键期（即 12 日 11 时至 12 日 18 时），源自低层、关键区以南气块的气旋性涡度累积增加，STR 总效应为正，利于气旋性涡度的增加；而 TIL 的总效应为负，其主要作用是减缓气旋性涡度的增加。STR 的正效应强于 TIL 的负效应，TOT 项为正（从 0 增加至 $18 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ ）；源自低层、关键区以北的气块，STR 表现为弱的正效应，TIL 表现为弱的负效应，TOT 项为正，但其增幅较小（从 0 增加至 $7 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ ）。与 Vortex I 类似，Vortex II 形成的主要机制是，来自低层、关键区以南的气块垂直拉伸产生气旋性涡度，配合源自低层、关键区以北的气块，使气旋性涡度得到增加。进一步计算得到，无论是 Vortex I 还是 Vortex II，气旋性涡度的快速累积增加均出现在气块进入四川盆地后（图略），这说明四川盆地局地的对流过程（伴随辐合与上升运动）是两个西南低涡形成的重要条件。

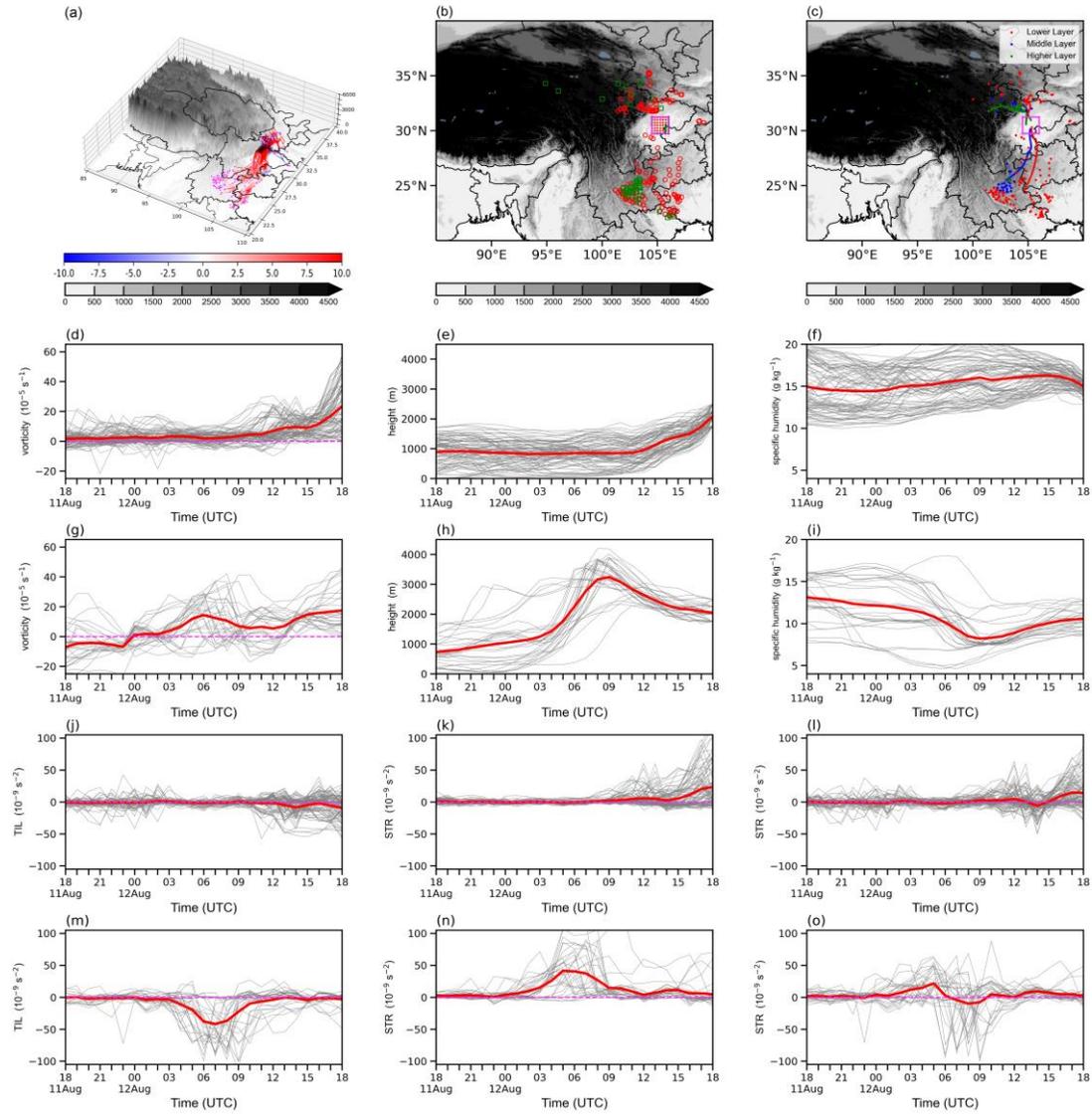


图 10 (a) Vortex II 形成的三维轨迹图，紫色点标记形成前 24h 空气粒子的位置，黑点标记形成时空气粒子的位置，彩色阴影表示涡度（单位： 10^5 s^{-1} ）涡度（阴影，单位： 10^5 s^{-1} ）；(b) 与 Vortex II 形成相关的 151 条气旋性轨迹的初始（红色空心圆）和结束位置（红色实心圆），与 Vortex II 形成相关的 45 条反气旋性轨迹的初始（绿色空心矩形）和结束位置（绿色实心矩形），紫色矩形为 Vortex II 关键区；(c) 与 Vortex II 形成相关的 151 条气旋性轨迹的聚类结果（图中实线），实心点为轨迹的初始位置（红色代表初始位置位于低层，蓝色代表初始位置位于中层，绿色代表初始位置位于高层）；(a-c) 中灰色阴影为地形（单位：m）；(d-f) 源自低层、关键区以南气旋性轨迹的涡度 (10^5 s^{-1})、高度 (m)、比湿 (g kg^{-1}) 的变化；(g-i) 源自低层、关键区以北气旋性轨迹的涡度 (10^5 s^{-1})、高度 (m)、比湿 (g kg^{-1}) 的变化；(j-l) 源自低层、关键区以南气旋性轨迹 TIL、STR、TOT (10^9 s^{-2}) 的变化；(m-o) 源自低层、关键区以北气旋性轨迹 TIL、STR、TOT (10^9 s^{-2}) 的变化；

Figure 10 (a) Illustrates the three-dimensional trajectories that featured cyclonic vorticity at the time when the Vortex II formed. Purple dots marked the positions of air particles 24 hours before the formation, black dots marked the positions of air particles at the time of formation, and vorticity (color shadings, units: 10^{-5} s^{-1}). (b) The initial (red hollow circle) and final (red solid circle) positions of 151 cyclonic tracks associated with the formation of Vortex II, the initial (green hollow rectangle) and final (green solid rectangle) positions of 41 anticyclonic tracks associated with the formation of Vortex II, and the purple rectangle is the key region of Vortex II. (c) Clustering results of 151 cyclonic tracks related to Vortex II formation (solid line), with solid points representing the initial location of the tracks (red represents formed at the low level, blue represents formed at the middle level, and green represents the formed at the high level). Gray shadings in (a-c) denote terrain height (units: m). (d-f) Vorticity along the low-level cyclonic trajectories (units: 10^{-5} s^{-1}), heights (units: m), and specific humidity (units: g kg^{-1}) which from south of the key region. (g-i) Vorticity along the low-level cyclonic trajectories (units: 10^{-5} s^{-1}), heights (units: m), and specific humidity (units: g kg^{-1}) which from south of the key region. (j-l) TIL, STR, TOT along the low-level cyclonic trajectories (units: 10^{-9} s^{-2}) from the south of the critical area. (m-o) TIL, STR, TOT along the low-level cyclonic trajectories (units: 10^{-9} s^{-2}) from the north of the critical area.

5.2 演变机理

基于 2.5 节的讨论，利用方程（7）计算得到涡度收支各项，并在西南低涡族主要成员关键区内对涡度收支各项进行区域平均，以有效表征此主要成员的演变机理，该方法在过去的研究中被广泛使用（Fu et al., 2017; Yang et al., 2023）。

5.2.1 Vortex I 的演变机理

如图 11 所示，Vortex I 在生成（2020 年 8 月 12 日 10 时至 12 日 15 时），和发展（2020 年 8 月 12 日 15 时至 12 日 18 时）阶段，TOT 项在 850 至 750 hPa 范围内显著大于 0，说明气旋式涡度快速增长，对应了 Vortex I 的形成与快速发展。辐合导致的垂直拉伸（STR 项）是 Vortex I 形成与发展的最有利因素；上

升运动引起的气旋性涡度向上输送 (VAV 项), 是第二主导因素。TIL 和 HAV 均为负, 减缓了 Vortex I 气旋性涡度的增加, 二者均不利于 Vortex I 的生成与发展。在维持阶段 (2020 年 8 月 12 日 18 时至 12 日 21 时), 关键区内辐合有所减弱, 但能维持一定强度 ($-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), STR 项是 Vortex I 得以维持的主导因素。在上升运动的作用下, VAV 总效应仍为正, 利于 Vortex I 的维持。TIL 项与 VAV 项大致呈对称分布, TIL 的总效应为负, 不利于 Vortex I 的维持。由于关键区内涡度相对周围大气属于高值区, 水平平流的流入会带来低的气旋式涡度, 故 HAV 项为负, 是最不利于 Vortex I 气旋性涡度维持的因子。在衰减阶段 (2020 年 8 月 12 日 21 时至 13 日 03 时), 关键区内散度由正变负, 对应 STR 项由正变负, 配合负的水平平流和负的倾斜效应导致 Vortex I 中心区域气旋性涡度快速衰减, 在该阶段内, 涡度的垂直输送项为正, 是抵抗 Vortex I 衰减的最重要的因素。综上所述, Vortex I 在不同阶段演变的主导因子如表 2 所示。

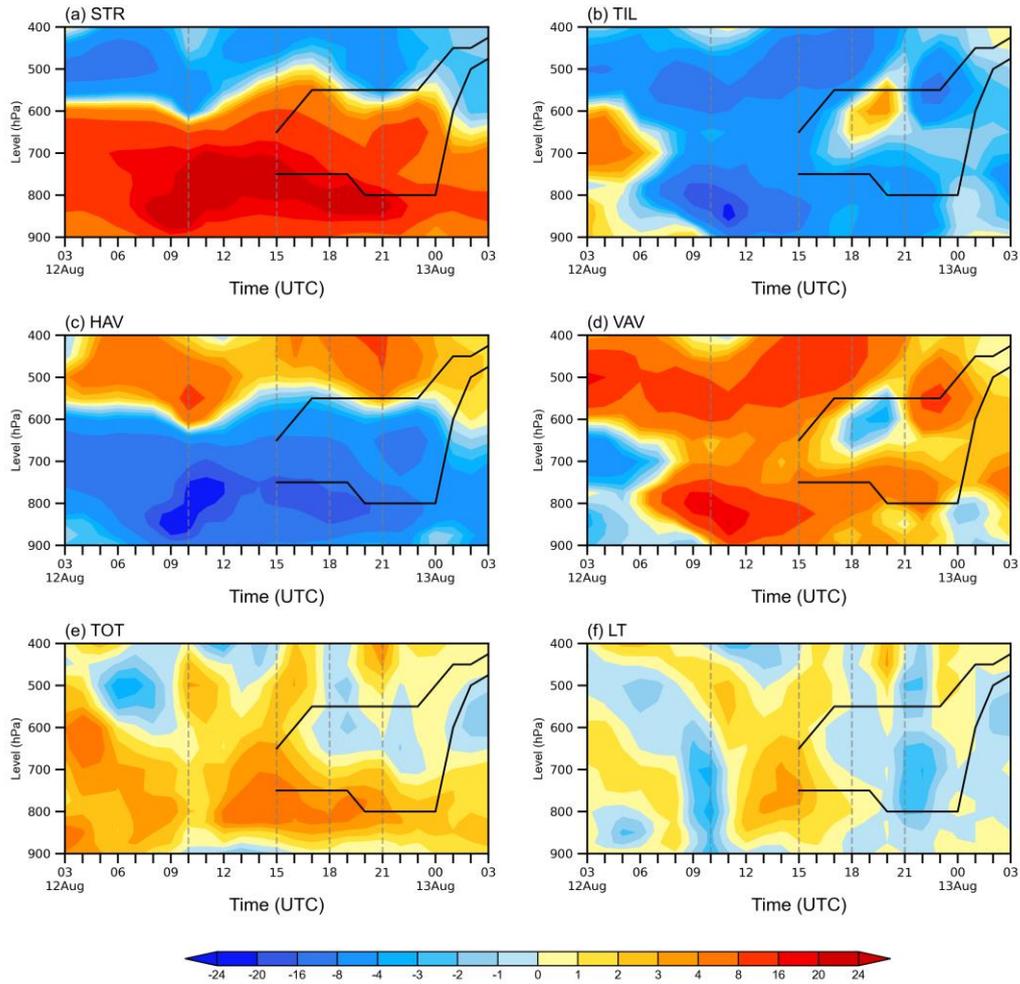


图 11 Vortex I 区域平均涡度收支各项的（单位： 10^{-9} s^{-2} ）时间—高度剖面图：（a）STR 项；（b）TIL 项；（c）HAV 项；（d）HAV 项；（e）TOT 项；（f）LT 项

Figure 11 Vorticity budget averaged over the Vortex I key region from 03:00 UTC 12 to 03:00 UTC 13 August 2020 (shading, units: 10^{-9} s^{-2}): (a) STR term. (b)TIL term. (c)VAV term. (d)HAV term. (e)TOT term. (f)LT term.

5.2.2 Vortex II 的演变机理

Vortex II 在生成阶段（2020 年 8 月 12 日 11 时至 12 日 18 时），TOT 项在 900 至 850hPa 范围内显著大于 0，对应 Vortex II 的形成，关键区内以辐合为主，STR 项是 Vortex II 形成的主导因子；上升运动对气旋性涡度的输送（VAV 项）也利于 Vortex II 的形成，重要性位居第二。TIL 项和 HAV 项均为负，减缓了气旋性涡度的增加，均不利于 Vortex II 的生成。在发展（2020 年 8 月 12 日 18 时至 13 日 03 时）和维持

(2020年8月13日03时至13日13时)阶段, 涡度的水平平流项和与对流相关的垂直平流项是主导因素。前者主要由通过关键区西侧边界的正涡度输送所致; 后者主要通过上升运动输送正涡度所致。关键区内 STR 项和 TIL 项以负值为主, 均不利于 Vortex II 的发展与维持。在衰减阶段(2020年8月13日13时至14日02时), Vortex II 关键区内气旋性涡度快速衰减, 与辐散相关的垂直收缩、负的水平平流以及负的倾斜效应, 都是 Vortex II 气旋性涡度减弱的因素, 而 VAV 项为正, 减缓了 Vortex II 的衰减。综上所述, Vortex II 在不同阶段演变的主导因子如表 2 所示。

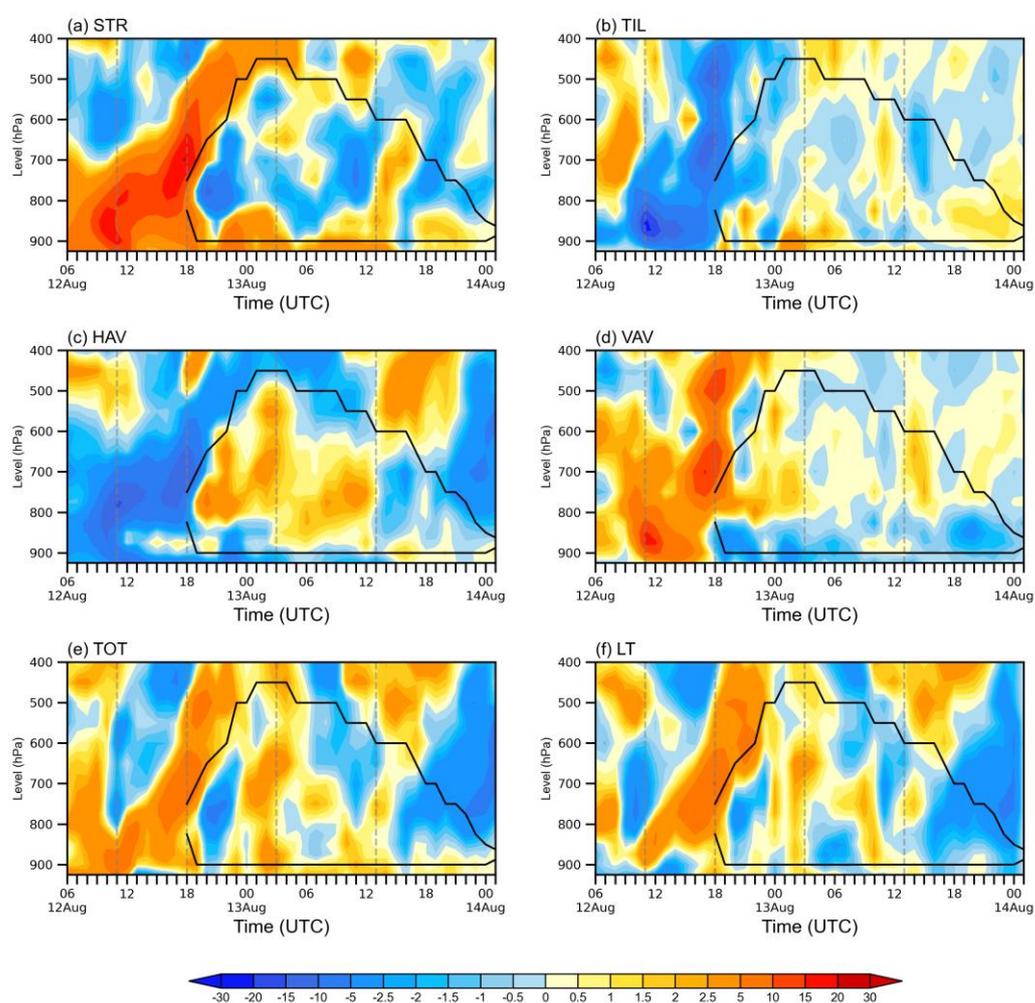


图 12 Vortex II 区域平均涡度收支各项的 (单位: 10^{-9} s^{-2}) 时间—高度剖面图: (a) STR 项; (b) TIL 项; (c) VAV 项; (d) HAV 项; (e) TOT 项; (f) LT 项

Figure 12 Vorticity budget averaged over the Vortex II key region from 06:00 UTC 12 to 01:00 UTC 14 August 2020 (shading, units: 10^{-9}

s-2): (a) STR term. (b)TIL term. (c)VAV term. (d)HAV term. (e)TOT term. (f)LT term.

表 2 西南低涡族主要成员在不同阶段演变的主导因子

		生成阶段	发展阶段	维持阶段	衰减阶段
有利因子	Vortex I	STR, VAV	STR, VAV	STR, VAV	VAV
	Vortex II	STR, VAV	HAV, VAV	HAV, VAV	VAV
不利因子	Vortex I	TIL, HAV	TIL, HAV	TIL, HAV	HAV, TIL, STR
	Vortex II	HAV, TIL	STR, TIL	STR, TIL	HAV, TIL, STR

注：STR 为伸展项；TIL 为倾斜项。VAV 为相对涡度的垂直平流项；HAV 为相对涡度的水平平流项，加粗表示利于西南低涡主要成员发展的主导因子。

6. 总结与讨论

2020 年 8 月 12 日至 14 日，四川盆地出现一次持续性强降水过程，具有强度高、持续时间长、影响范围广的特点，造成了严重的经济损失。本次事件由西南低涡族（共包含 16 个涡旋，其中 4 个为西南低涡）直接引发，研究此类事件有助于丰富对西南低涡降水的现有认识。

研究表明，本次事件发生在有利的大尺度环流背景下：对流层高层存在与南亚高压相关的强辐散；对流层中层存在与西风带短波槽相关的显著暖平流；对流层低层存在与强西南低空急流有关的充沛的水汽输送与较强的低层辐合。Vortex I 和 Vortex II 具有生命史长、垂直伸展深厚、相关降水强的特征，是本次西南低涡族的主要成员。这两个涡旋均为西南低涡，其生命史长分别为 13h 和 32h，其两者热力结构显著不同。根据关键区内平均涡度的变化情况，本文将 Vortex I 和 Vortex II 的生命史划分为：生成、发展、维持、衰减四个阶段。它们的涡度、散度和垂直速度在不同阶段均存在显著的异同点。后向轨迹粒子追踪分析表明，在 Vortex I 和 Vortex II 形成阶段，大多数空气块都经历了明显的上升运动与降水过程，来自对流层低层的空气块对两者的形成至关重要，且源自云贵高原空气粒子的气旋式涡度贡献大于源自青藏

高原空气粒子的气旋式涡度贡献。涡度的累积增加分别出现在 Vortex I 和 Vortex II 形成前的 5 至 7 个小时内。与辐合相关的垂直拉伸是 Vortex I 和 Vortex II 形成的主导因素。云贵高原和四川盆地对二者的形成有重要影响，气块在进入四川盆地后，涡度呈累积增加，地形的影响需进一步研究。涡度收支表明，主导 Vortex I 和 Vortex II 演变的因子存在显著的异同点。辐合垂直伸展和与垂直涡度输送对 Vortex I 的生成、发展起主导作用；倾斜效应和水平平流加速了 Vortex I 消亡。对于 Vortex II 而言，与辐合有关的 STR 项和与对流有关的 VAV 项也是其生成的有利因子；气旋式涡度的水平和垂直平流均利于 Vortex II 维持；在其消亡期，除了气旋式涡度垂直平流，其他因子均加速了 Vortex II 的衰减。

参考文献 (References)

- 陈忠明. 1990. 西南低涡发生发展的一种动力机制 [J]. 高原山地气象研究, 000(004): 1-9. Chen Zhongming. 1990. A dynamic mechanism for the occurrence and development of the southwest vortex [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 000(004): 1-9.
- 陈忠明. 1998. 一次强烈发展西南低涡的中尺度结构分析 [J]. 应用气象学报, 9(3): 10. Chen Zhongming. 1998. Analysis of the Mesoscale Structure of a Strongly Developing Southwest Low Vortex [J]. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9(3): 10. doi: 10.1007/s00376-999-0032-1
- 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): 6. Chen Zhongming, Xu Maoliang, Min Wenbin, et al. 2003. Activity of southwest vortex and rainstorm in the upper reaches of yangtze river in summer 1998[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22(2): 6. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2003.02.010
- Feng Shuanglei, Jin Shuanglong, Fu Shenming, et al. 2020. Formation of a kind of heavy precipitation producing mesoscale vortex around the Sichuan Basin: an along-track vorticity budget analysis [J]. Atmos. Sci. Lett., 21(3). doi:10.1002/asl2.949.
- Fu Shenming, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2009. An analysis of the eddy kinetic energy budget of a southwest vortex during heavy rainfall over South China [J]. Atmos. Oceanic. Sci. Lett., 2(3): 135-141. doi: 10.1080/16742834.2009.11446791
- Fu Shenming, Li Wanli, Sun Jianhua, et al. 2015. Universal evolution mechanisms and energy conversion characteristics of long-lived mesoscale vortices over the Sichuan Basin [J]. Atmos. Sci. Lett., 16(1): 127-134. doi: 10.1002/asl2.533.
- Fu Shenming, Cao Jie, Jiang Xiaowen, et al. 2017. On the variation of the divergent flow: An eddy-flux form equation based on the quasi-geostrophic balance and its application [J]. Adv. Atmos. Sci., 34(5): 599-612. doi: 10.1007/s00376-016-6212-x.
- Fu Shenming, Mai Zi, Sun Jianhua, et al. 2019. Impacts of convective activity over the Tibetan Plateau on plateau vortex, southwest vortex, and downstream precipitation [J]. J. Atmos. Sci., 76(12): 3803-3830. doi:10.1175/JAS-D-18-0331.1
- Fu Shenming, Zhang Yuanchun, Wang Huijie, et al. 2022. On the evolution of a long-lived mesoscale convective vortex that acted as a crucial condition for the extremely strong hourly precipitation in zhengzhou [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 127(11). doi: 10.1029/2021JD036233
- Holton J R. 2004. An Introduction to Dynamic Meteorology [M]. 4th ed. San Diego: Academic Press, 552 pp.
- 何光碧. 2012. 西南低涡研究综述 [J]. 气象, 38(2): 9. He Guangbi. 2012. A Review of Research on Southwest Low Vortex[J]. Meteorology (in Chinese), 38(2): 9.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horanyi A, Munoz-Sabater J, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730): 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- 江志红, 任伟, 刘征宇, 等. 2013. 基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析 [J]. 气象学报, 71(2): 10. Jiang Zhihong, Ren Wei, Liu Renyu, et al. 2013. Analysis of Water Vapor Transport Characteristics of Meiyu in the Jianghuai River Based on Lagrangian Method [J]. Journal of Meteorology (in Chinese), 71(2): 10. doi: 10.11676/qxxb2013.017
- Kirk J R. 2003. Comparing the dynamical development of two mesoscale convective vortices[J]. Monthly Weather Review, 131(5): 862-890.
- 卢敬华. 1986. 西南低涡概论 [M]. 气象出版社. Lu Jinghua. 1986. Generality of the Southwest Vortex (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

- 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): 11. Lu Ping, Zhai Danhua, Li Ying, et al. 2014. Analysis of three types of Southwest Vortex affecting rainstorm in Chongqing [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 30(4): 11. doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2014.04.014.
- 卢萍, 李跃清. 2021. 增强副热带高压对西南涡影响的数值试验 [J]. 大气科学, 45(04): 851-62. Lu Ping, Li Yueqing. 2021. Numerical experiments on the impact of enhanced subtropical high pressure on the southwest vortex [J] Atmospheric Science (in Chinese), 45(04): 851-62. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.20161
- 李超, 李跃清, 蒋兴文. 2015. 四川盆地低涡的月际变化及其日降水分布统计特征 [J]. 大气科学, 39(6): 13. Li Chao, Li Yueqing, Jiang Xingwen. 2015. Monthly variation of low eddies in the Sichuan Basin and statistical characteristics of their daily precipitation distribution [J]. Atmospheric Science (in Chinese), 39(6): 13. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14270.
- 李江萍, 王式功, 孙国武. 2012. 高原低涡研究的回顾与展望 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 48(4): 9. Jiangping, Wang Shigong, Sun Guowu. 2012. Review and Prospects of Plateau Low Eddies Research [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science Edition (in Chinese), 48 (4): 9.
- 刘晓冉, 李国平. 2014. 一次东移型西南低涡的数值模拟及位涡诊断 [J]. 高原气象, 33(005): 1204-1216. Liu Xiaoran, Li Guoping. 2014. Numerical simulation and potential vortex diagnosis of an eastward moving southwest low vortex [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33(005): 1204-1216. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00151.
- 李跃清, 赵兴炳, 张利红, 等. 2011. 年夏季西南涡加密观测科学试验 [J]. 高原山地气象研究, 31(4): 5. Li Yueqing, Zhao Xingbing, Zhang Lihong, et al. 2011. Scientific experiment of Southwest vortex encryption observation in summer [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 31(4): 5. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2011.04.002.
- 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, (3): 7. Li Yueqing, Xu Xiangde. 2016. Review and Progress of Southwest Vortex Research and Observation Experiments [J]. Progress in Meteorological Technology (in Chinese), (3): 7. doi: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.018
- 李跃清. 2021. 西南涡涡源研究的有关新进展 [J]. 高原气象, 40(6): 13. Li Yueqing. 2021. New Advances in the Study of Southwest Vortex Sources [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 40(6): 13. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.zk005.
- Orianski, L., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56, 527-530.
- Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, et al. 2015. NOAA'S HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin America Meteorology Social*, 96(12): 2059-2077.
- Stohl A, James P. 2004. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I: method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in central Europe [J]. *Journal of Hydrometeorology* 5: 656-678. doi: 10.1175/1525-7541(2004)0052.0.CO;2
- Stohl A, James P. 2005. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part II: moisture transports between earth's ocean basins and river catchments [J]. *Journal of Hydrometeorology* 6: 961-984. doi: 10.1175/JHM470.1
- 汤欢, 傅慎明, 孙建华, et al. 2020. 一次高原东移 MCS 与下游西南低涡作用并产生强降水事件的研究 [J]. 大气科学, 44(6): 1275-1290. Tang Huan, Fu Shenming, Sun Jianhua, et al. Investigation of severe precipitation event caused by an eastward propagating MCS originating from the Tibetan Plateau and a downstream southwest vortex [J]. *Chin. J. Atmos. Sci. (In Chinese)*, 44: 1275-1290. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19206.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rainfalls in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.
- Wang Qiwei, Tan Zheming. 2014. Multi-scale topographic control of southwest vortex formation in Tibetan Plateau region in an idealized simulation [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119: 11543-11561. doi:10.1002/2014JD021898.

- 韦统健, 薛建军. 1996. 影响江淮地区的西南涡中尺度结构特征 [J]. 高原气象, 15(4): 8. Wei Tongjian, Xue Jianjun. 1996. The mesoscale structural characteristics of the southwest vortex affecting the Jianghuai region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 15 (4): 8.
- 吴珍珍, 刘海文, 潘丽丽. 2018. 2011 年 8 月 4-5 日四川盆地双核西南低涡及其带来的降水天气分析 [J]. 成都信息工程大学学报. Analysis of the precipitation weather caused by the dual core southwest vortex in the Sichuan Basin from August 4-5 [J]. 2011. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese). doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2018.06.014
- Wu Zhenzhen, Liu Haiwen, Chan Kelvin T. F., et al. 2022. Effects of Topography and Latent Heat on the Evolution of a Mesoscale Dual-Core Southwest Vortex Over Sichuan Basin, China [J]. Front. Earth Sci. doi: 10.3389/feart.2022.827601
- 吴珍珍. 2018. 双西南低涡分析及其数值模拟 [D]. 成都信息工程大学硕士学位论文, 49pp. Wu Zhenzhen. 2018. Analysis and numerical simulation of the double Southwest vortices [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chengdu University of Information Technology, 49pp.
- Yang Kangquan, Xiao Dixiang, Jiang Xingwen, et al. 2023. Mechanisms Governing the Formation and Long-Term Sustainment of a Northeastward Moving Southwest Vortex [J]. Sustainability, 15(12): 9255. doi.org/10.3390/su15129255
- 叶瑶, 李国平. 2016. 近 61 年夏半年西南低涡的统计特征与异常发生的流型分析 [J]. 高原气象, 35(4): 9. Ye Yao, Li Guoping. 2016. Statistical characteristics and abnormal flow pattern analysis of the southwest vortex in the past 61 years in the summer and half of the year [J]. Plateau meteorology (in Chinese), 35(4): 9. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00073.
- 张敬萍, 傅慎明, 孙建华, 等. 2015. 夏季长江流域两类中尺度涡旋的统计与合成 [J]. 气候与环境研究, 20(3): 319-336. Zhang Jingping, Fu Shenming, Sun Jianhua, et al. 2015. Statistics and synthesis of two types of mesoscale eddies in the Yangtze River Basin during summer [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 20(3): 319-336. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14164
- 张小玲, 陶诗言, 张庆云. 2005. 梅雨锋西端高空低压槽前持续性暴雨分析—1981 年 7 月四川大暴雨 [C]. 中国气象学会 2005 年年会论文集. Zhang Xiaoling, Tao Shiyan, Zhang Qingyun. 2005. Analysis of persistent rainstorm in front of the upper level low pressure trough at the west end of Meiyu front - heavy rainstorm in Sichuan in July 1981 [C]. Proceedings of the 2005 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society (in Chinese).
- 周括. 2017. 西南低涡结构分析及其数值模拟 [D]. 成都信息工程大学硕士学位论文, 47pp. Zhou Kuo. 2017. Analysis and numerical simulation of Southwest vortex structure [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chengdu University of Information Technology, 47pp.
- Zhou Kuo, Liu Haiwen, Zhao Liang, et al. 2017. Binary mesovortex structure associated with southwest vortex [J]. Journal of Turbulence, 18(6).