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 Chengzhi, CAO Jie, LUO Juan, et al. 2024. Analysis on characteristics and causes of the Southwest Vortex asymmetric structure during one rainstorm in the Sichuan Basin [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):627-636 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-239

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

邓承之[1],曹洁[2],罗娟[1],周国兵[3],夏蘩[1],赵衍斌[4]

(1. 重庆市气象台,重庆 401147;2. 南京信息工程大学,南京 210044;3. 重庆市气象局,重庆 401147;
4. 重庆市渝北区气象局,重庆 401120)

摘　要:为深入认识诱发暴雨的西南低涡非对称结构特征,选取近10 a来影响最大、由西南低涡缓慢移动造成的四川盆地2013年6月30日暴雨过程,基于WRF数值模拟等资料,采用跟随低涡中心移动的动态合成方法,结合涡度方程、散度方程诊断及风场分解,对西南低涡成熟阶段的非对称结构特征与成因进行分析,结果表明:(1) 西南低涡在低空表现为旋转进入中心并逐渐减弱的辐合气流,高空为旋转的辐散气流。西南低涡的降雨、正涡度、低空辐合及垂直上升运动呈显著的非对称分布。低涡前侧正涡度和辐合上升运动显著,降雨强;低涡后侧正负涡度并存,辐合上升运动较弱,降雨弱。(2) 西南低涡的非对称分布与低涡前侧的副热带高压作用有关。副热带高压维持,有利于向东南方向移动的西南低涡前侧位势高度梯度增加和低空急流增强,导致低涡前侧位势高度的拉普拉斯项和动能的拉普拉斯项呈负值演变,形成持续的低空负值非平衡动力强迫效应,促进低空辐合和垂直上升运动增长,以及强降雨发展,并通过低空辐合和垂直上升运动促进低涡前侧正涡度发展,形成西南低涡降雨、正涡度、低空辐合及垂直上升运动的非对称分布特征。

关键词:四川盆地;暴雨;西南低涡;非对称结构;非平衡动力强迫;动态合成

中图法分类号:P447　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-239

Analysis on characteristics and causes of the Southwest Vortex asymmetric structure during one rainstorm in the Sichuan Basin

DENG Chengzhi[1], CAO Jie[2], LUO Juan[1], ZHOU Guobing[3], XIA Fan[1], ZHAO Yanbing[4]

(1. *Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing* 401147;2. *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044;3. *Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing* 401147;4. *Yubei District Meteorological Bureau, Chongqing* 401120)

Abstract: To gain an in-depth understanding of the asymmetric structure of the Southwest Vortex producing rainstorms, the rainstorm process in the Sichuan Basin on 30 June 2013 was investigated in this study. This rainstorm was caused by the slowly moving Southwest Vortex, and had the most significant impact in the past decade. Based on WRF numerical simulation and other data, the asymmetric structure characteristics and causes in the mature stage of the Southwest Vortex rainstorm were analyzed by using a dynamic composite method that followed the vortex center, combined with vorticity equation diagnosis, divergence equation diagnosis, and wind field decomposition. The results are as follows. (1) The Southwest Vortex exhibited convergent airflows which rotated into the center and gradually weakened at low altitudes, while divergent airflows rotated at high altitudes. The precipitation, positive vorticity, low-level convergence, and vertical ascending motion of the Southwest Vortex exhibited significant asymmetric distribution characteristics. The front side of the vortex exhibited significant positive vorticity, and prominent convergence ascending motion, leading to heavy rainfall. While on the rear side of the vortex, the positive and negative vorticity coexisted, with weaker convergence and ascending motion, accompanied by weaker rainfall. (2) The asymmetric distribution of the Southwest Vortex was related to the impact of subtropical high in front of the vortex. The maintenance of subtropical high favors

收稿日期: 2023-11-08;**定稿日期**:2024-04-18

资助项目: 国家自然科学基金气象联合基金重点项目(U2242202);国家自然科学基金项目(91937301);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,CSTB2022NSCQ-MSX1461);中国气象局西南区域气象中心创新团队基金项目(XNQY-CXTD-202202)

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

通信作者: 曹洁,主要从事中尺度动力学理论及应用研究。E-mail:003542@nuist.edu.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

the formation of the asymmetric structure of the Southwest Vortex, which was conducive to the formation of the gradually increasing potential height gradient and the enhancement of the low-level jet in front of the southeastward vortex. The spatial distribution led to negative evolutions of the Laplace term of potential height and the Laplace term of kinetic energy, which produced a sustained low-level negative non-equilibrium dynamic forcing effect. Then the negative non-equilibrium dynamic forcing promoted the development of low-level convergence, and vertical ascending motion, and led to heavy rainfall. In addition, the positive vorticity was generated through low-level convergence and vertical ascending motion in front of the vortex, forming asymmetric distribution characteristics of rainfall, positive vorticity, low-level convergence, and vertical ascending motion associated with the Southwest Vortex.

Key words: the Sichuan Basin; rainstorm; Southwest Vortex; asymmetric structure; non-equilibrium dynamic forcing; dynamic composite

引 言

西南低涡是影响我国夏季暴雨洪涝的重要天气系统，其造成的暴雨天气的强度、频数和范围仅次于台风，对其形成与发展及引发的暴雨洪涝灾害的研究一直是气象学者和预报员的重要课题(何光碧，2012；李跃清和徐祥德，2016；李国平和陈佳，2018)。

西南低涡结构具有显著的非对称性。卢敬华(1986)指出西南低涡的结构常常是风场环流近圆形，风速分布非对称。研究表明，西南低涡具有深厚且直立的湿涡旋环流，但低涡的垂直环流相对于涡旋中心呈不对称状态(Feng et al.，2016)。西南低涡在低空表现为冷暖空气并存(赵大军等，2011)，低涡前部以暖湿平流为主，后部以干冷平流为主，冷舌和暖平流在低涡中心附近相遇并锋生，形成对流层低层到高层的深厚锋生区域(Cheng et al.，2016；Chen and Li，2022)。低涡前部暖湿平流和后部干冷平流的协同作用也有利于西南低涡的对流活动和向东运动(Lu et al.，2020；Chen and Li，2022)。

西南低涡结构对暴雨的发生发展有重要影响。西南低涡发展前期内部存在中γ尺度涡旋，低涡前期的暴雨主要位于中γ尺度涡旋中心附近(Zhai et al.，2021)。部分西南低涡成熟后有倾斜的深厚中β尺度涡旋形成(顾清源等，2008)，此类中小尺度的气旋性涡旋越深厚，降水强度越大(何跃等，2019)。成熟阶段低涡的前侧暖湿气流和后侧干冷气流的共同作用与暴雨的形成密切相关(翟丹华等，2014)。低涡中心附近冷舌与暖平流交汇锋生，暴雨主要位于平均温度偏差梯度的大值区附近(Cheng et al.，2016)。暴雨还可能出现在低涡前侧的持续性负值非平衡动力强迫区(邓承之等，2021)或暖湿边界层辐合线附近(邓承之等，2023)。模拟和统计分析表明，暖性西南低涡暴雨较有冷空气参与的西南低涡暴雨的位置更加偏南 (屠妮妮等，2012；韩林君和白爱娟，2019)。

研究表明，西南低涡的非对称结构对低涡降雨有重要影响，李国平和陈佳(2018)指出，由于理论和技术所限，对西南低涡本身结构特征的研究仍很不系统。2013年6月30日川渝地区出现一次影响严重的西南低涡暴雨过程，暴雨过程中的西南低涡在成熟后维持倾斜结构且在四川盆地内移动缓慢(邓承之等，2018；邓承之等，2021)。本文采用WRF数值模拟资料，基于动态合成方法，结合风场分解、涡度方程和散度方程计算结果，诊断分析西南低涡的涡度、散度及垂直运动演变及分布，研究暴雨过程中西南低涡的非对称结构特征及其可能成因，以期为深入理解西南低涡结构和加深此类暴雨物理机制的认识提供参考。

1 资料及方法

1.1 资料说明

文中采用自动气象站降水观测及数值模拟资料开展分析。资料包括：(1) 国家气象信息中心提供的2013年6月30日08时(北京时，下同)—7月1日08时重庆及周边地区地面自动气象站逐时降水资料(含国家站和区域站)；(2)WRF-ARW数值模拟资料。模拟采用单层网格，网格数301×221，格距9 km，垂直方向51层。模拟初值时刻为2013年6月29日20时，积分36 h，积分时间步长2 min，模拟输出时间间隔1 h。积云参数化、微物理过程、长波辐射和短波辐射、行星边界层、陆面过程依次采用Grell-Freitas、God-dard、RRTMG、YSU、Noah方案。(3)NCEP再分析资料，时段为2013年6月29日20时—7月1日08时，时间间隔为6 h，空间分辨率为1°×1°。

1.2 研究方法

分析西南低涡风场特征时采用有限区域风场分解方法。对有限区域内的风场进行旋转风与辐散风分解，是中尺度系统结构分析的一种诊断方法，在台风的运动机理研究和路径预测(周玉淑等，2008)、暴雨落区等方面具有实用价值(Bao and Yao，2022)。根据Helmholtz理论，将风场分解为旋转风与辐散风两部分，即 $\vec{V}=\vec{k}\times\nabla\Psi+\nabla\chi$ 。其中，Ψ 为流函数，χ 为速度势。采用变分法求解速度势和流函数，开展有限区域旋度风与散度风分解，能在矩形区域和不规则边界区域均保持高效和高精度优势(Cao and Xu，2011；Cao et al.，2014，2022)，具有实际应用价值。

使用涡度方程来诊断西南低涡的涡度与散度、垂直运动间的联系。涡度方程在低涡涡度分析中被广泛应用(赵宇等，2013；肖递祥等，2016)，不考虑摩擦和积云对涡度的垂直输送效应，p坐标系中的涡度方程为

$$\begin{aligned}\frac{\partial\zeta}{\partial t}=&-\left(u\frac{\partial\zeta_a}{\partial x}+v\frac{\partial\zeta_a}{\partial y}\right)-\omega\frac{\partial\zeta}{\partial p}-\zeta_a D\\&-\left(\frac{\partial\omega}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial p}-\frac{\partial\omega}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial p}\right)=\zeta_h+\zeta_v+\zeta_{\mathrm{d}}+\zeta_{\mathrm{c}}\end{aligned}\tag{1}$$

其中，ζ_h为绝对涡度平流项，由绝对涡度的水平分布不均引起；ζ_v为相对涡度垂直输送项，代表非均匀涡度场中，由于垂直运动引起的涡度局地变化；ζ_{d}为散度项，表示由于水平辐合(辐散)引起垂直涡度的增加(减小)；ζ_{c}为倾侧项，表示当有水平涡度存在时，由于垂直运动的水平分布不均而引起涡度垂直分量的变化。方程右边四项的累加代表了相对涡度的局地变化。

使用散度方程研究西南低涡低空辐合变化机制，陈忠明(2007)对散度方程作一级近似后得到

$$\frac{\partial D}{\partial t}=-\nabla^2\varphi-\nabla^2\left(\vec{V}\cdot\vec{V}\right)/2+\vec{k}\cdot\left(\nabla\times\vec{q}\right)\tag{2}$$

其中，φ为位势高度，$\vec{V}$为三维速度，$\vec{q}$为绝对涡度通量，$\vec{q}=(f+\zeta)\vec{V}$。方程右端各项依次为位势高度的拉普拉斯项、动能的拉普拉斯项及绝对涡度通量项，右端各项之和可称为非平衡动力强迫。当方程右端各项的和为负时，非平衡动力强迫为负，将激发辐合的持续增强。

采用动态合成法，对西南低涡相关特征量及其外围天气形势进行合成(Li et al.，2017；屈顶等，2023)，具体步骤为：以每个时刻的西南低涡中心所在经纬度为原点，取经向和纬向距离原点位置指定范围内的各项要素场进行合成，合成后以西南低涡中心为坐标原点，横、纵坐标分别为相对西南低涡中心的经纬度。合成的要素场包括500、700、850 hPa的高度场和风场，以及涡度、散度、垂直速度、涡度方程和散度方程各项。

2　降水实况及模拟结果验证

2013年6月30日08时—7月1日08时，四川盆地受西南低涡影响出现强降水天气，雨量分布如图1a所示。强降雨主要出现在西南低涡前侧，四川遂宁、资阳及重庆西部出现大暴雨、局地特大暴雨，最大累计雨量510.9 mm，最大小时雨强103.3 mm·h^{-1}，四川遂宁及重庆潼南两个国家气象站累计雨量分别达415.9 mm和210.4 mm，均创下建站以来的日雨量极值，暴雨引发了琼江流域严重的局地洪涝灾害。

从同时段WRF-ARW模拟的西南低涡及降雨量(图1b)来看，模拟的西南低涡及特大暴雨中心与实况较为接近，强降雨主要位于低涡前侧，并具有类似的“逗点”状的低涡强降雨分布特征，能够反映出此次西南低涡及强降雨的主要分布形态。另外，模拟结果也较好地再现了西南低涡分阶段的风场及强降雨特征(邓承之等，2021)。因此能够使用模拟资料对这次西南低涡的结构特征开展进一步的诊断分析。

3　西南低涡演变及非对称特征

3.1　西南低涡演变

西南低涡形成前，青藏高原东部维持“西低东高”环流型，西太平洋副热带高压(以下简称副热带高压)控制华南地区，高压脊向北影响华中地区北部，高原东部及四川盆地处于低槽区。逐6 h的700 hPa西南低涡平均流场(图2)可以看出，6月30日08时前后，西

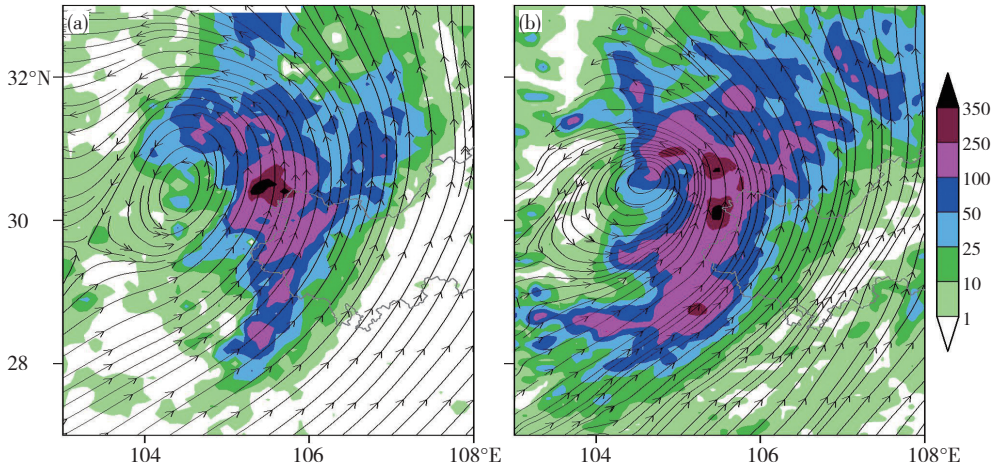


图1 2013年6月30日08时—7月1日08时重庆及周边地区实测累计降水量(填色，单位：mm)及基于NCEP再分析的700 hPa平均流场(箭头)(a)、WRF模拟的累计降水量(填色，单位：mm)及700 hPa平均流场(箭头)(b)

Fig. 1 (a) Observed accumulated precipitation (shaded, unit: mm) and average 700 hPa flow (arrow) based on NCEP analysis data, (b) WRF-simulated accumulated precipitation (shaded, unit: mm) and average 700 hPa flow (arrow) in Chongqing and surrounding areas from 08:00 BT on 30 June to 08:00 BT on 1 July 2013

南低涡形成于四川盆地西北部，形成后受东侧副热带高压脊的制约，低涡维持在四川盆地范围内缓慢移动。6月30日14时前后的移向主要为偏东方向，6月30日20时以后移向转为偏南方向，至7月1日凌晨移至四川盆地中部位置。这一时段降雨最强，也是此次暴雨过程中的西南低涡的成熟阶段(邓承之等，2021)。低涡涡旋半径初期小于100 km，6月30日20时以后低涡发展，涡旋半径增大至约150 km。结合图1可知，在西南低涡移动过程中，强降雨主要出现在低涡前侧，低涡后侧降雨较弱。

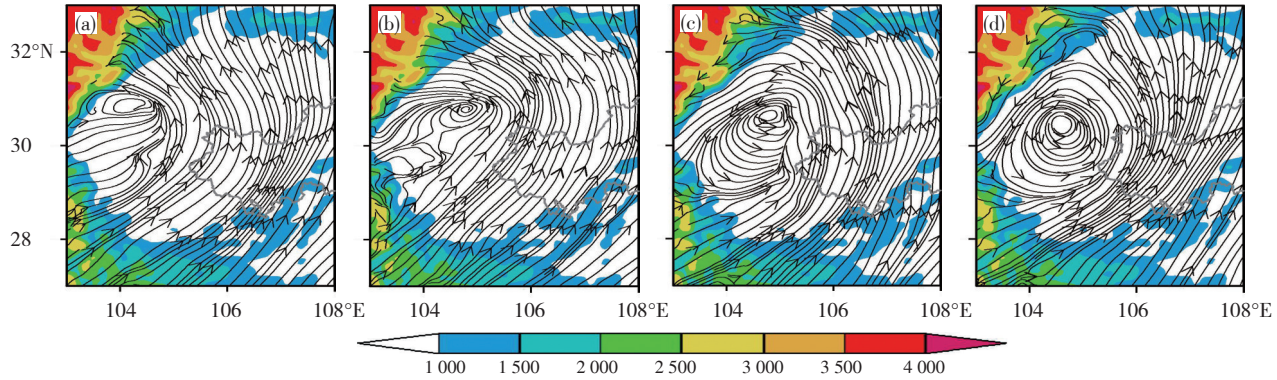


图2 2013年6月30日09—14时(a)、6月30日15—20时(b)、6月30日21时—7月1日02时(c)、7月1日03—08时(d) 700 hPa西南低涡平均流场(箭头)演变(填色代表地形高度，单位：m)

Fig. 2 Evolution of the 700 hPa average Southwest Vortex flow (arrow) (a) from 09:00 BT to 14:00 BT on 30 June, (b) from 15:00 BT to 20:00 BT on 30 June, (c) from 21:00 BT 30 June to 02:00 BT 1 July, (d) from 03:00 BT to 08:00 BT on 1 July 2013 (shaded represent terrain height, unit: m)

由6月30日21时—7月1日02时平均的旋转风与辐散风分解结果(图3)可以看出，西南低涡发展强盛阶段，其环流延伸至200 hPa以上(图3a_1)，低空700 hPa和850 hPa维持近圆形且强烈的涡旋环流(图3a_2和a_3)。

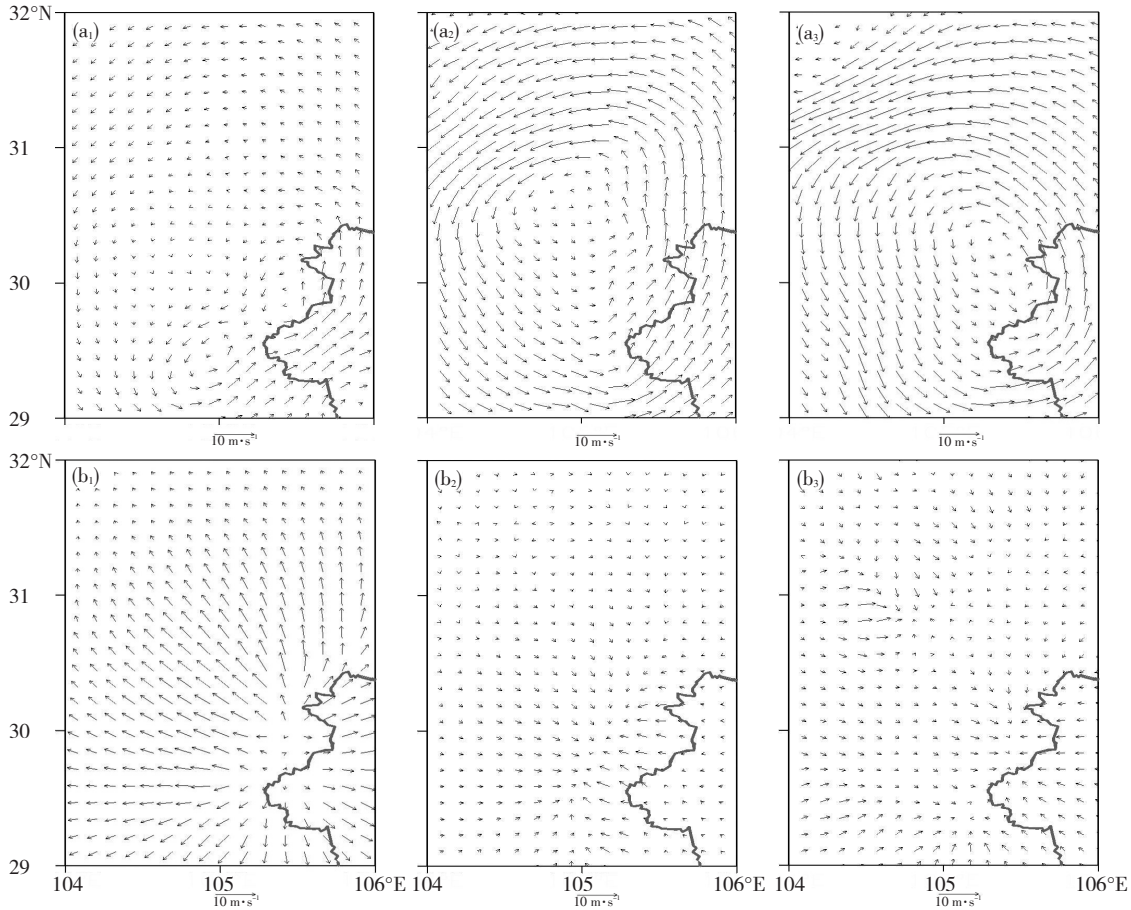


图3 2013年6月30日21时—7月1日02时西南低涡200 hPa (a_1, b_1)、700 hPa (a_2, b_2)、850 hPa (a_3, b_3)平均的旋转风(a_1—a_3)与辐散风(b_1—b_3)分布(箭头，单位：$m \cdot s^{-1}$) (灰色实线代表重庆西侧的行政边界)

Fig. 3 The average (a_1–a_3) non-divergent wind and (b_1–b_3) non-rotational wind distribution (arrow, unit: $m \cdot s^{-1}$) in the Southwest Vortex on (a_1, b_1) 200 hPa, (a_2, b_2) 700 hPa , (a_3, b_3) 850 hPa from 21:00 BT 30 June to 02:00 BT 1 July 2013 (Gray solid line represents the administrative boundary of western Chongqing)

200 hPa西南低涡东南象限形成强烈的高空辐散(图3b$_1$)，700 hPa低涡东南部存在辐合，其余区域辐合辐散特征不显著(图3b$_2$)，而850 hPa在低涡东南和东北象限存在较大范围的辐合气流，西北象限也存在小范围的辐合(图3b$_3$)。结合西南低涡的旋转风与辐散风特征可见，西南低涡盛期在高空表现为旋转的辐散气流，而在低空为旋转的辐合气流，低空辐合和高空辐散叠加于西南低涡的东南部，对西南低涡东南象限垂直上升运动的发展提供了极为有利的动力条件。

3.2 西南低涡非对称特征

采用动态合成法，以逐小时西南低涡中心所在经纬度为原点，对其风场与涡度场、散度场、垂直速度场进行合成，如图4所示。西南低涡前侧有一条旋转进入低涡中心的、风速逐渐减弱的入流气流，这支入流气流伴随显著的正涡度，形成一支旋转进入低涡中心的正涡度输送带。以西南低涡150 km的半径分析，低涡正涡度主要分布在低涡东南象限及低涡中心50 km范围内(图4a)。在西南低涡低空850 hPa上，东南与东北两象限出现较大范围的平均散度达到-6×10^{-5} s^{-1}的辐合，西北与西南象限也存在一定的辐合，但范围较小，甚至存在显著的辐散区(图4b)。与之相对应的，西南低涡东南和东北象限的700 hPa上升运动显著强于西北和西南象限(图4c)。

综上分析可见，西南低涡的降雨、正涡度、低空辐合及垂直上升运动呈显著的非对称分布，西南低涡前侧有一条旋转进入低涡中心的、风速逐渐减弱的正涡度输送带，低涡前侧正涡度和辐合上升运动显著，降雨强，低涡后侧正负涡度并存，辐合和上升运动较弱，降雨弱。

4 西南低涡非对称结构的成因

4.1 涡度分析

西南低涡的涡度、散度和垂直速度之间是互相联系的。由式(1)可知，涡度局地变化主要受绝对涡度平流项、涡度垂直输送项、散度项及倾侧项影响。图5为动态合成的涡度方程右端各项850—700 hPa的平均值分布。图中显示，对西南低涡动态合成的涡度变化而言，绝对涡度平流项、涡度垂直输送项及散度项影响较大，倾侧项可以忽略不计。其中，绝对涡度平流项在东南与东北象限以负贡献为主，在西南与西北象限主要为正贡献，但强度弱于东侧的负贡献强度，因此，绝对涡度平流项整体仍以负贡献为主。西南低涡的正涡度主要源于涡度垂直输送项及散度项，尤其散度项的正贡献最为显著，且涡度垂直输送项及散度项的正贡献主要位于西南低涡前侧的东南与东北象限。

可见，西南低涡正涡度主要源于涡度垂直输送项及散度项，即低空辐合的涡度制造及上升运动对正涡度的垂直输送作用。因此，对西南低涡而言，低空辐合和上升运动的非对称分布是导致西南低涡正涡度非对称分布的主要内在因子。

4.2 散度及非平衡动力强迫作用

在质量守恒条件的约束下，垂直上升运动及降雨与低空辐合密切相关，因此可从低空辐合的角度分析西南低涡的非对称结构特征及其可能成因。图6为动态合成的西南低涡不同象限的平均散度随时间的演变。图中显示，低涡东北与东南象限700 hPa以下长时间维持低空辐合，而300 hPa以上存在强辐散，尤其是东南象限的高空辐散最为显著，低空辐合、高空辐散的垂直散度分布有利于东北与东南象限上升运动

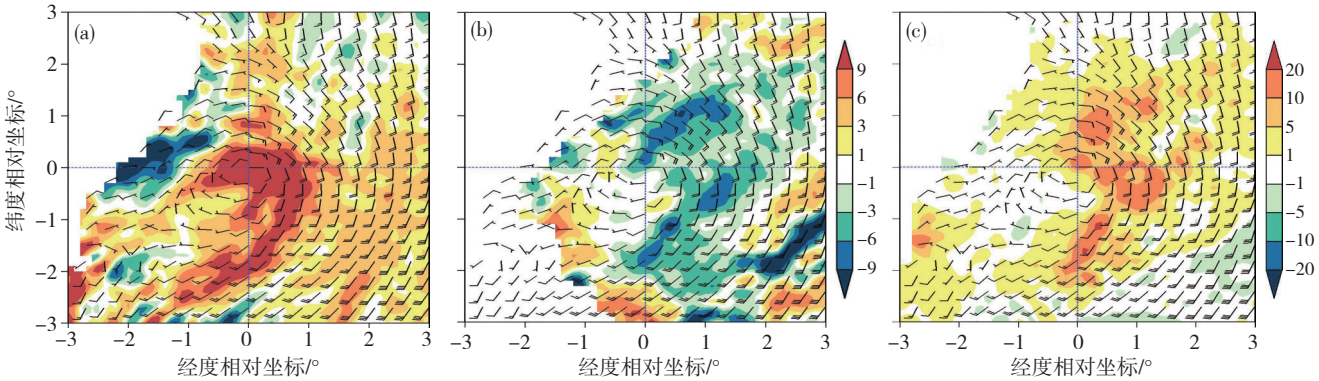


图4 动态合成的2013年6月30日08时—7月1日08时700 hPa风场(风杆，单位：m·s^{-1})与700 hPa涡度(填色，单位：10^{-5} s^{-1})(a)、700 hPa风场(风杆，单位：m·s^{-1})与850 hPa散度(填色，单位：10^{-5}s^{-1}) (b)、700 hPa风场(矢量，单位：m·s^{-1})与700 hPa垂直速度(填色，单位：10^{-2} m·s^{-1}) (c)

Fig. 4 Dynamic composites of (a) 700 hPa wind field (wind barb, unit: m·s^{-1}) and vorticity (shaded, unit:10^{-5}s^{-1}), (b) 700 hPa wind field (wind barb, unit: m·s^{-1}) and 850 hPa divergence (shaded, unit:10^{-5}s^{-1}), (c) 700 hPa wind field (wind barb, unit: m·s^{-1}) and 700 hPa vertical velocity (shaded, unit: 10^{-2} m·s^{-1}) from 08:00 BT on 30 June to 08:00 BT on 1 July 2013

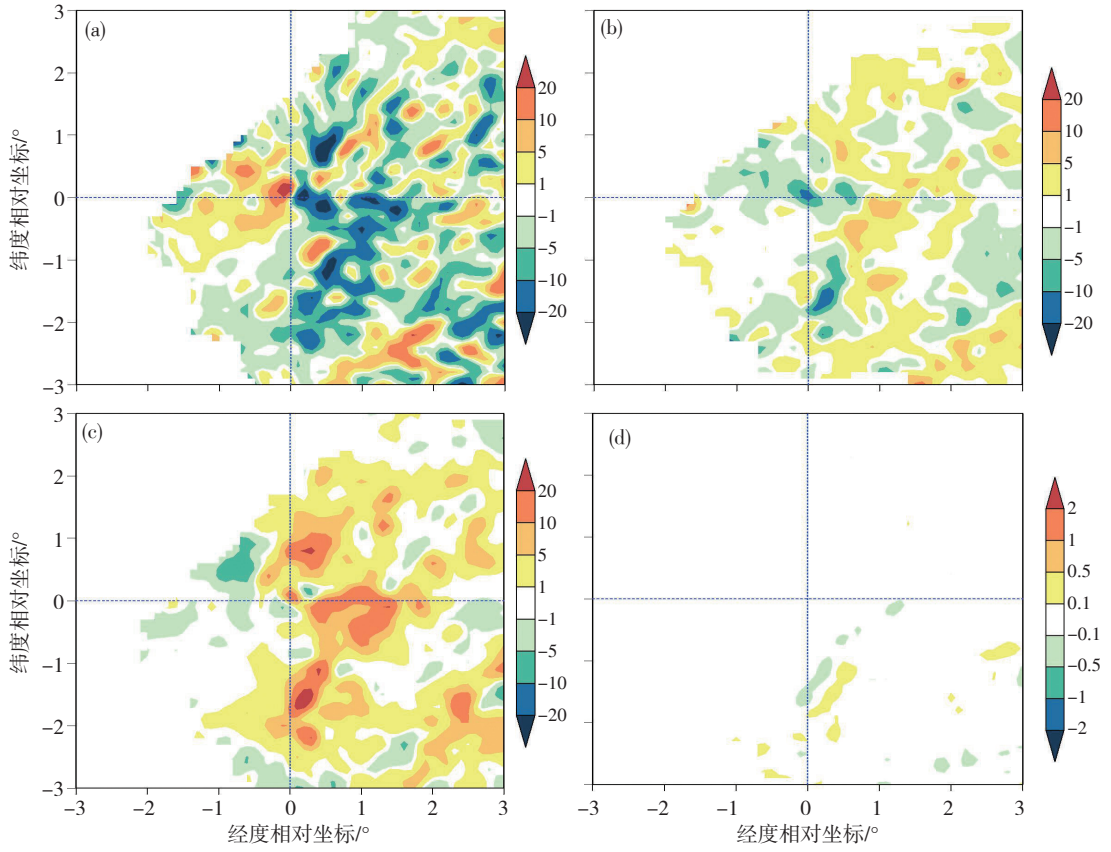


图5 动态合成的2013年6月30日08时—7月1日08时西南低涡区域850—700 hPa平均的涡度方程绝对涡度平流项(a)、涡度垂直输送项(b)、散度项(c)和倾侧项(d)分布(单位：$10^{-9}s^{-2}$)

Fig. 5 Dynamic composites of the vorticity equation terms of mean 850—700 hPa in the field of the Southwest Vortex (a) absolute vorticity advection term, (b) vertical vorticity transport term, (c) divergence term and (d) tilt term distribution (shaded, unit:$10^{-9}s^{-2}$) from 08:00 BT 30 June to 08:00 BT 1 July 2013

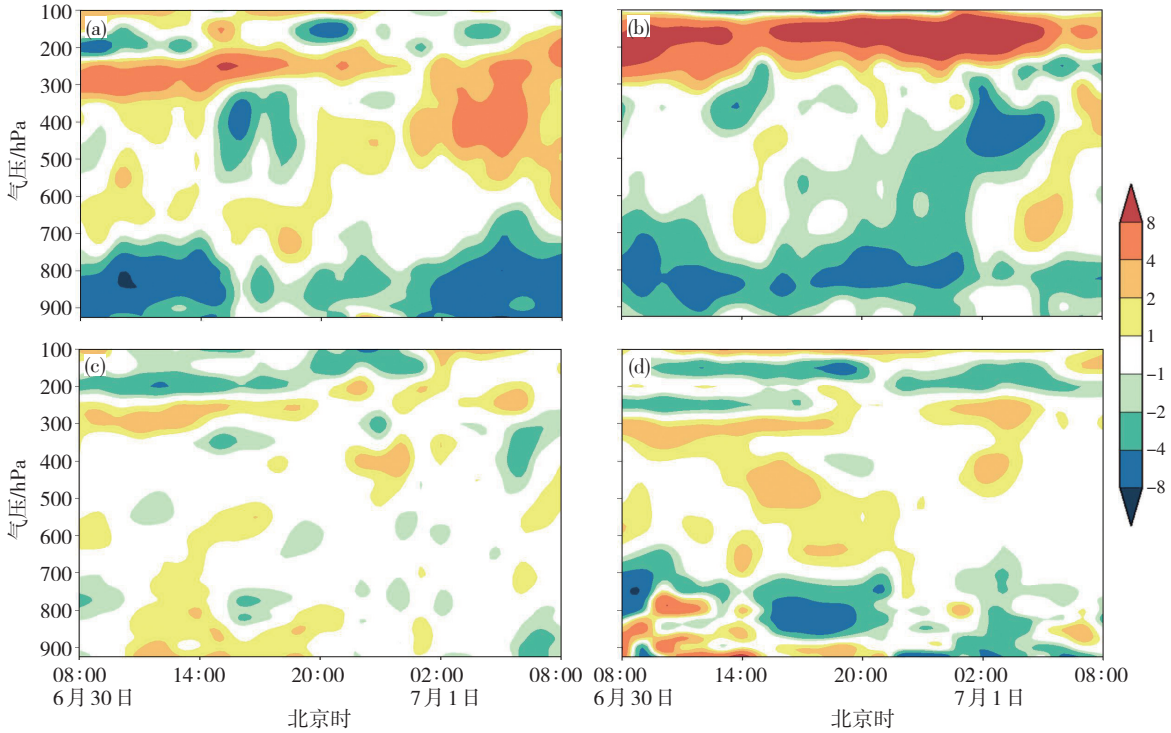


图6 动态合成的2013年6月30日08时—7月1日08时西南低涡东北象限(a)、东南象限(b)、西南象限(c)和西北象限(d)的平均散度(单位：$10^{-5}s^{-1}$)时间-高度剖面图

Fig. 6 Time-height profiles of dynamic composites of average divergence (unit:$10^{-5}s^{-1}$) in (a) northeast quadrant, (b) southeast quadrant, (c) southwest quadrant and (d) northwest quadrant of the Southwest Vortex from 08:00 BT 30 June to 08:00 BT 1 July 2013

及降雨的维持和发展。与东北和东南象限不同，西南低涡的西南象限在低空以辐散为主，西北象限的低空虽存在一定的辐合但持续时间较短。结合前文分析可知，东北与东南象限的低空辐合、高空辐散特征显著强于西北与西南象限，是形成西南低涡涡度、垂直速度及降雨非对称分布的重要因子。

由式(2)可知，散度的局地变化由非平衡动力强迫决定，若式(2)右端各项为负值，即非平衡动力强迫为负值时，散度的局地变化为负，辐合将逐渐增强，反之，辐合将逐渐减弱(陈忠明，2007)。邓承之等(2021)分析了2013年6月30日的西南低涡暴雨过程发现，对西南低涡整体而言，位势高度的拉普拉斯项为非平衡动力强迫提供了主要的负贡献来源。但在西南低涡的不同部位，非平衡动力强迫的分布特征和形成机制有较大区别。分析此次暴雨过程中西南低涡东北、东南、西南及西北象限的散度方程各项，在东北象限(图7)，负值非平衡动力强迫主要源于位势高度的拉普拉斯项和动能的拉普拉斯项，而绝对涡度通量项的贡献以正值为主。在东南象限(图8)，负值非平衡动力强迫更加显著，且位势高度的拉普拉斯项占据主要的负贡献，其次为动能的拉普拉斯项。在西南象限，非平衡动力强迫以正值为主，利于辐合减弱或辐散增强，而西北与西南象限的情况相似(图略)。

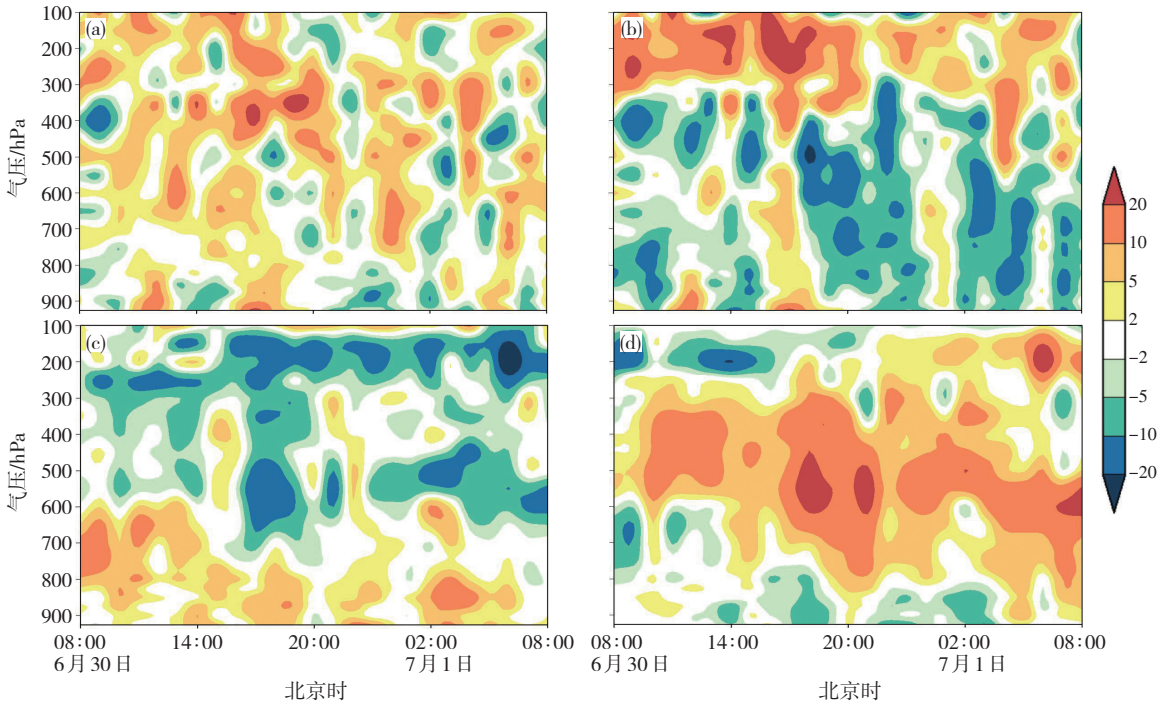


图7 动态合成的2013年6月30日08时—7月1日08时西南低涡东北象限平均的散度方程 $\partial D/\partial t$ (a)、$-\nabla^2\varphi$ (b)、$-\nabla^2\left(\vec{V}\cdot\vec{V}\right)/2$ (c)和 $\vec{k}\cdot(\nabla\times\vec{q})$ (d)的时间–高度剖面图(单位：$10^{-9}s^{-2}$)

Fig. 7 Dynamic composites of time–height profiles of the divergence equation terms (a) $\partial D/\partial t$, (b) $-\nabla^2\varphi$, (c) $-\nabla^2\left(\vec{V}\cdot\vec{V}\right)/2$ and (d) $\vec{k}\cdot(\nabla\times\vec{q})$ in the northeast quadrant of the Southwest Vortex from 08:00 BT 30 June to 08:00 BT 1 July 2013 (unit: $10^{-9}s^{-2}$)

可见，此次西南低涡区域的负值非平衡动力强迫主要源于位势高度的拉普拉斯项($-\nabla^2\varphi$)和动能的拉普拉斯项($-\nabla^2\left(\vec{V}\cdot\vec{V}\right)/2$)，即位势高度和动能梯度的空间分布。当西南低涡前侧的位势高度和动能的等值线密度向东逐渐增加时，位势高度和动能的拉普拉斯项呈负值，导致西南低涡前侧的东南与东北象限存在显著的负值非平衡动力强迫作用，激发西南低涡东南与东北象限、尤其是东南象限的低空辐合的持续增长，促进上升运动和降雨的发展，有利于西南低涡正涡度、低空辐合、垂直上升运动和降雨的非对称空间分布特征的形成。

4.3 副热带高压的作用

经过西南低涡中心做动态合成的位势高度拉普拉斯项和动能拉普拉斯项的纬向–高度剖面，如图9所示。位势高度拉普拉斯项的负贡献主要位于西南低涡中心及其前侧，动能拉普拉斯项的负贡献主要位于西南低涡中心附近偏前部的位置。而西南低涡的前侧与副热带高压相邻，卢萍和李跃清(2021)通过增强副热带高压强度的敏感性试验发现，副热带高压强度影响西南低涡的路径和演变，进而影响降水的落区和强度。图10为动态合成的西南低涡与相邻副热带高压区域的高度场和风场特征。图中显示，500、700及850 hPa上，西南低涡与副热带高压之间位势高度线密集，且密集程度在低涡中心前侧向东逐渐增加，低涡前侧形成显著的位势高度梯度，这将导致低涡前侧的

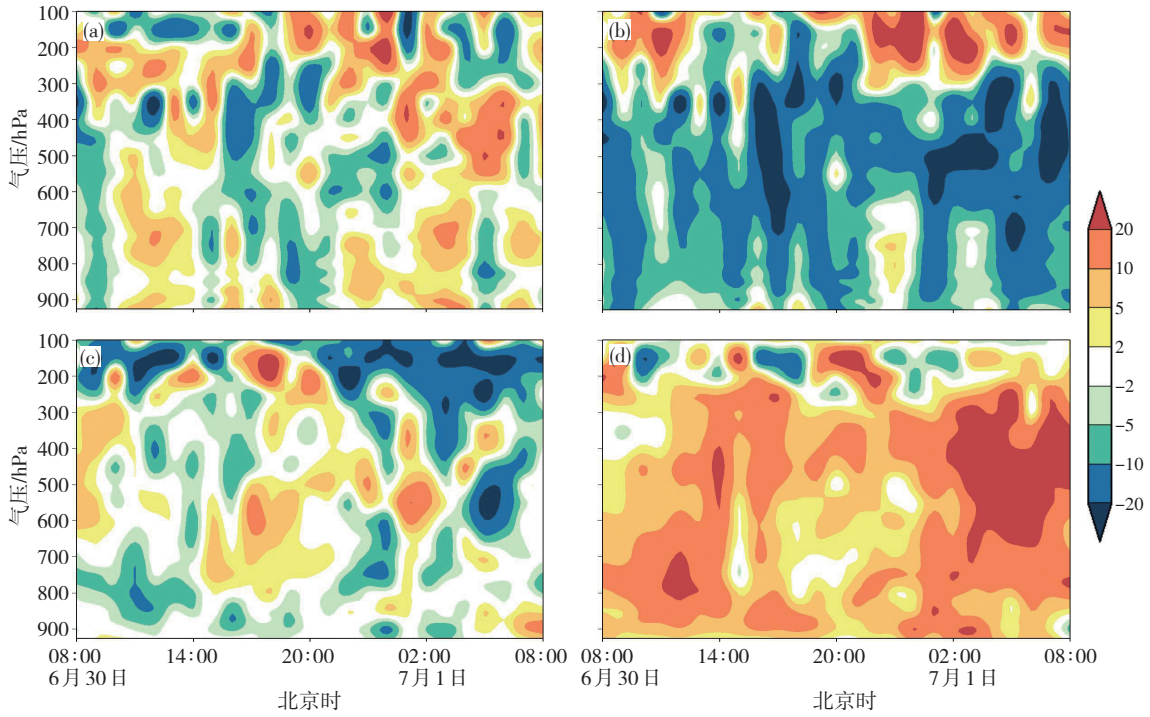


图8 同图7,但为西南低涡东南象限

Fig.8 Same as Fig.7, but in the southeast quadrant of the Southwest Vortex

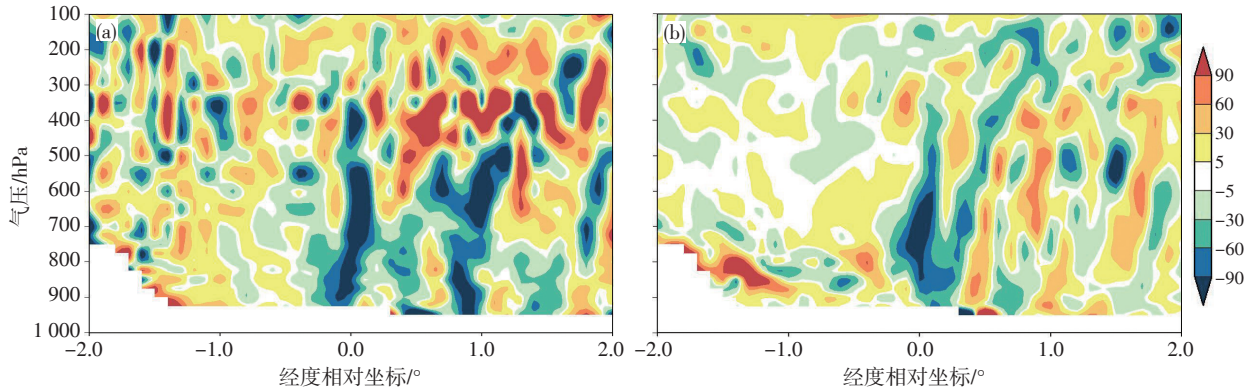


图9 动态合成的2013年6月30日08时—7月1日08时经过低涡中心的 $-\nabla^2\varphi$ (a)和 $-\nabla^2\left(\vec{V}\cdot\vec{V}\right)/2$ (b)纬向-高度剖面图(单位:$10^{-9}s^{-2}$)

Fig. 9 Dynamic composites of latitudinal-height profiles of (a) $-\nabla^2\varphi$ and (b) $-\nabla^2\left(\vec{V}\cdot\vec{V}\right)/2$ crossing through the center of the Southwest Vortex from 08:00 BT 30 June to 08:00 BT 1 July 2013 (unit: $10^{-9}s^{-2}$)

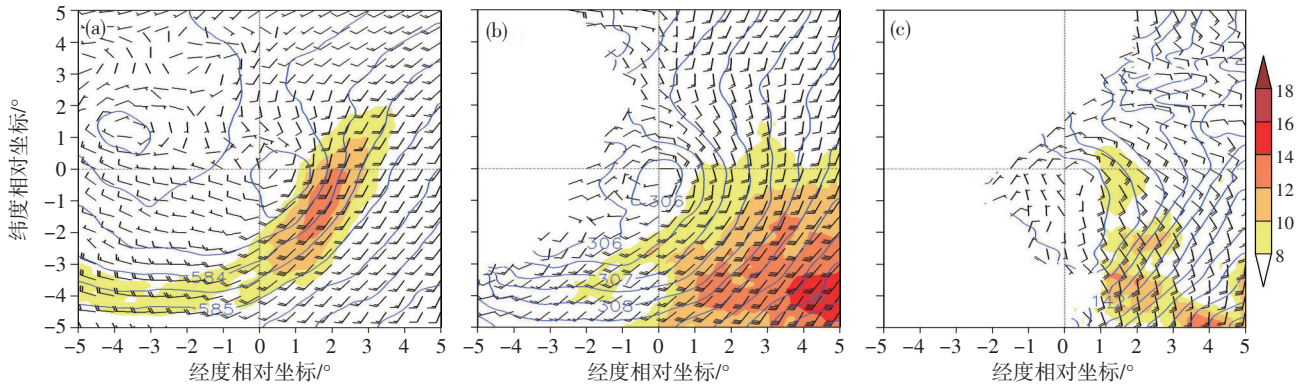


图10动态合成的2013年6月30日08时—7月1日08时500 hPa (a)、700 hPa (b)和850 hPa (c)高度场(蓝色实线,单位:dagpm)、风场(风杆)及风速场(填色,单位:m·s^{-1})

Fig. 10 Dynamic composites of geopotential height field (blue line, unit: dagpm), wind field (wind barb), and velocity field (shaded, unit: m·s^{-1}) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa from 08:00 BT on 30 June to 08:00 BT on 01 July 2013

位势高度的拉普拉斯项维持负值。同样低涡前侧与副热带高压之间形成显著的低空偏南风急流带,低涡中心前侧动能向东逐渐增加,导致西南低涡前侧动能的拉普拉斯项呈现负值。可见,西南涡东南移,与其东侧稳定维持的副热带高压之间的位势高度梯度增大、低空急流增强,形成低涡前侧向东逐渐增加的位势高度梯度和风速梯度,导致低涡与副热带高压之间的位势高度和动能的拉普拉斯项呈负值演变,形成西南低涡前侧持续的负值非平衡动力强迫效应,是西南低涡非对称结构形成的重要外因。

5 结论与讨论

本文针对2013年6月30日川渝地区出现的一次大暴雨、局地特大暴雨过程,基于WRF数值模拟资料、自动气象站资料和NCEP再分析资料,对此次过程西南低涡的非对称结构特征及可能成因进行分析研究,得出如下主要结论:

(1) 西南低涡的降雨、正涡度、低空辐合及垂直上升运动相对于西南低涡中心呈现显著的非对称分布特征,西南低涡在低空表现为旋转进入低涡中心的、逐渐减弱的辐合气流,高空表现为旋转的辐散气流。低涡前侧有显著的降雨、正涡度和辐合上升运动,尤其是低涡东南象限,低空辐合中心和高空辐散中心叠加,为上升运动和降雨的发展提供了极为有利的动力条件,而低涡后侧正负涡度并存,辐合上升运动和降雨显著弱于前侧。

(2) 动态合成的涡度分析表明,对西南低涡而言,低空辐合和垂直运动是西南低涡正涡度的主要制造者,低涡前侧持续的低空辐合和上升运动促进了西南低涡正涡度的增强,而低空辐合直接影响上升运动和降雨的发展,因此,西南低涡前强后弱的低空辐合分布,是西南低涡降雨、正涡度及上升运动形成非对称分布的主要内因。

(3) 西南低涡的非对称分布特征与副热带高压影响有关。当副热带高压维持时,有利于西南低涡向东南方向移动时,其前侧位势高度梯度增大和低空急流增强,形成向东逐渐增加的位势高度梯度和风速梯度。散度方程分析表明,当西南低涡前侧与副热带高压之间的位势高度梯度和风速梯度向东逐渐增加时,将导致低涡与副热带高压之间的位势高度和动能的拉普拉斯项呈负值演变,有利于西南低涡前侧形成持续的负值非平衡动力强迫效应,负值非平衡动力强迫促进低空辐合的增长和垂直上升运动的发展,导致降雨增强,并通过涡度制造效应促进低涡正涡度的增长。因此,副热带高压影响是西南低涡降雨、正涡度、低空辐合及上升运动呈非对称分布的重要外因。

本文主要针对西南低涡成熟阶段的非对称分布及成因进行诊断分析,给出了西太平洋副热带高压是西南低涡东移时前侧涡度、散度及上升运动呈非对称分布的重要影响系统,有助于加深西南低涡前侧非对称性特征的理解和暴雨形成物理机制的认识,帮助预报员理解前侧高压阻挡下的西南低涡更易在低涡前侧形成极端暴雨的动力机制。但这种非对称分布在西南低涡的形成、发展和消散过程中的作用及其热动力机制仍有待进一步的研究。

参考文献(References):

陈忠明.2007.暴雨激发和维持的正、斜压强迫机制的理论研究[J].大气科学,31(2):109-115. Chen Z M. 2007. Effects of barotropic and baroclinic forces on the excitation and maintenance for torrential rain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,31(2):109-115 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.10

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 Meteorology,40(1):85-97 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00106

邓承之,赵宇,牟容,等.2018.一次西南涡特大暴雨过程中MCS的演变特征[J].气象科技,46(1):121-128. Deng C Z, Zhao Y, Mu R, et al. 2018. Evolution features of MCS during a torrential rain caused by Southwest Vortex [J]. Meteorological Science and Technology,46(1):121-128 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20170017

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]. Torrential Rain and Disasters,42(1):24-36 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-024

顾清源,周春花,青泉,等.2008.一次西南低涡特大暴雨过程的中尺度特征分析[J].气象,34(4):39-47. Gu Q Y, Zhou C H, Qing Q, et al. 2008. Mesoscale characteristics analysis of severe torrential rain caused by a southwestern low vortex process [J]. Meteorological Monthly,34(4):39-47 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.04.005

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 Meteorology,38(3):552-562 (in Chinese). 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]. Meteorological Monthly,38(2):155-163 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.02.003

何跃,李强,刘伯骏,等.2019.四川盆地一次西南涡作用下大暴雨过程的短时强降水分析[J].沙漠与绿洲气象,13(6):29-38. He Y, Li Q, Liu B J, et al. 2019. Analysis of short-term heavy rainfall in a rainstorm process under the action of Southwest Vortex [J]. Desert and Oasis Meteo-

rology,13(6):29–38 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2019.06.004

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]. Torrential Rain and Disasters,37(4):293–302 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2018.04.001

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]. Advances in Meteorological Science and Technology,6(3):134–140 (in Chinese). 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 (in Chinese)

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(4):851–862. Lu P, Li Y Q. 2021. Simulation of effect of subtropical high enhancement on Southwest Vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(4):851–862 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2008.20161

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,47(5):1481–1494 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2208.21202

屠妮妮,何光碧,陈静.2012.冷暖空气入侵对西南低涡发生发展影响研究[J].高原山地气象研究,32(2):10–19. Tu N N, He G B, Chen J. 2012. Study about the effect of cold/warm air intrusion on the development of the southwest low vortex [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,32(2):10–19 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184·2012.02.002

肖递祥,郁淑华,屠妮妮.2016.高原低涡移出高原后持续活动的典型个例分析[J].高原气象,35(1):43–54. Xiao D X, Yu S H, Tu N N. 2016. Analysis of typical sustained plateau vortexes after departure [J]. Plateau Meteorology,35(1):43–54 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2015.00002

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 Meteorology.33(1):140–147 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2012.00181

赵大军,江玉华,李莹.2011.一次西南低涡暴雨过程的诊断分析与数值模拟[J].高原气象,30(5):1158–1169. Zhao D J, Jiang Y H, Li Y. 2011. Diagnostic analysis and numerical simulation of a torrential rainstorm process caused southwestern low vortex [J]. Plateau Meteorology,30(5):1158–1169 (in Chinese)

赵宇,李媛,赵光平.2013.引发暴雨天气的中尺度低涡的数值研究[J].大气科学学报,36(6):751–763. Zhao Y, Li Y, Zhao G P. 2013. A numerical study on a mesoscale vortex producing a heavy rainfall event [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,36(6):751–763 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2013.06.012

周玉淑,曹洁,高守亭.2008.有限区域风场分解方法及其在台风SAOMEI研究中的应用[J].物理学报,57(10):6654–6665. Zhou Y S, Cao J, Gao S T. 2008. The method of decomposing wind field in a limited area and its application to typhoon SAOMEI [J]. Acta Physica Sinica,57(10):6654–6665(in Chinese). doi:10.7498/aps.57.6654

Bao X H, Yao X P. 2022. Intensity evolution of zonal shear line over the Tibetan Plateau in summer: A perspective of divergent and rotational kinetic energies [J]. Advances in Atmospheric Sciences,39(7):021–1033. doi: 10.1007/s00376–021–1302–9

Cao J, Xu Q. 2011. Computing streamfunction and velocity potential in a limited domain. Part II:Numerical methods and test experiments [J]. Advances in Atmospheric Sciences,28(6):445–1458. doi:10.1007/s00376–011–0186–5

Cao J, Ran L K, Li N. 2014. An application of the Helmholtz theorem in extracting the externally induced deformation field from the total wind field in a limited domain [J]. Monthly Weather Review,142(5):2060–2066. doi:10.1175/MWR–D–13–00311.1

Cao J, Xu Q, Chen H, et al. 2022. Hybrid methods for computing the streamfunction and velocity potential for complex flow fields over mesoscale domains [J]. Advances in Atmospheric Sciences,39(9):417–1431. doi:10.1007/s00376–021–1280–y

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]. Meteorology and Atmospheric Physics,128(3):373–399. doi:10.1007/s00703–015–0420–2

Chen Y R, Li Y Q. 2022. A thermodynamic condition affecting the movement of a Southwest China Vortex case [J]. Meteorology and Atmospheric Physics,134(2):1–9. doi:10.1007/s00703–022–00874–w

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]. Journal of Climate,29(21):7675–7701. doi:10.1175/JCLI–D–15–0813.1

Li L, Zhang R H, Wen M. 2017. Genesis of Southwest Vortices and its relation to Tibetan Plateau Vortices [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,143(707):2555–2566. doi:10.1002/qj.3106

Lu P, Zheng W P, Li Y Q. 2020. Comparison of the movement and vertical structures of two types of the Southwest Vortex [J]. Meteorology and Atmospheric Physics,132(4):571–581. doi:10.1007/s00703–019–00707–3

Zhai D H, Kong F Y, Dai Z J, et al. 2021. Analysis of deep convective towers in a southwest–vortex rainstorm event [J]. Journal of Tropical Meteorology,27(2):177–190. doi:10.46267/j.1006–8775.2021.017

（责任编辑　何明琼）