

高影响西南涡发展指数探索

卢萍^{1,2}

1. 中国气象局成都高原气象研究所, 成都, 610072

2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都, 610072

摘要 本文采用 ERA5 ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) 逐时再分析资料, 分析了长距离移动和稳定少动两次高影响西南涡过程, 基于影响西南涡过程的关键因子定义了一个低涡发展指数, 探讨了低涡发展指数与西南涡及降水演变的关系, 结果表明: (1) 大气中低层辐合和假相当位温是影响低涡发展演变的关键物理因子; (2) 无论是远距离位移还是稳定少动的西南涡过程, 低涡发展指数都可以指示出低涡强度、位置的发展演变趋势, 并能解释强低涡过程出现的其它弱闭合低压或一涡多心现象, 以及表征西南涡的未来移动。(3) 低涡发展指数不仅能指示出低涡降水的强度及落区, 还能反映西南涡与降水之间互存共生的关系, 一定程度上解释了“涡生雨”和“雨生涡”现象。”

关键词 西南涡, 发展演变, 低涡发展指数, 暴雨

文章编号 2023092B

文献标识码 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2311.23092

Exploration of the development and evolution mechanism of the Southwest Vortex from a new vortex development index

Lu Ping^{1,2}

1. *Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration (CMA), Chengdu 610072*

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

Abstract Based on the ERA5 ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) hourly reanalysis data, this paper analyzes two different high-impact Southwest Vortex (SWV) processes with long-distance movement and stagnation over local area. It is suggested that two physical variables, the low- to mid-level convergence and pseudo-equivalent potential temperature, are the key factors influencing the development and evolution of the vortex. According to these findings, a vortex development index is defined in this study. By comparing the vortex development index with the evolution of the SWV and precipitation, we found that: (1) the vortex development index could indicate the

收稿日期 2023-07-06; 网络预出版日期

资助项目: 国家自然科学基金项目 (U2242202), 中国气象局西南区域气象中心创新团队基金 (XNQYXTD-202202), 四川省自然科学基金项目 (2022NSFC0021), 科技部国家重点研发计划 (2022YFC3003902)

作者简介 卢萍, 女, 研究员, 主要从事天气分析、资料分析、数值模拟研究。E-mail: abc-123@mail.iap.ac.cn

development and evolution trend of the intensity and position of the vortex, whether it is a long-distance moving or a local stationary SWV process. The index could also reveal the occurrence of other weak closed lows or multi-core vortices during intense vortex events, as well as the moving mechanism of the SWV. (2) The vortex development index not only indicates the intensity and coverage area of vortex precipitation but also reflects the coexistence phenomenon between the SWV and precipitation, thereby providing a possible explanation for both the "rain-induced vortex" and the "vortex-induced rain" phenomenon. Results of this study suggest the positive significance of the vortex development index in the forecast of both the precipitation distribution and the position of the precipitation center of the high-impact SWV heavy rainfall events.

Key words Southwest Vortex, development and evolution mechanism, vortex development index, heavy rainfall

1 引言

西南低涡（简称西南涡，缩写为 SWV）是青藏高原东侧背风坡地形、加热与大气环流相互作用下，在我国西南地区(100° - 108° E, 26° - 33° N)形成的气旋性中尺度闭合低压系统，通常出现在 700-850 hPa 等压面上，水平尺度约 200-500 km（卢敬华，1986；李国平等，2018）。西南涡从源地可细分为九龙涡、盆地涡和小金涡（马勋丹等，2018；刘冲，等 2020；李跃清，2021）。主要活动路径有三条：偏东路径、东南路径、东北路径（王金虎等，2015）。西南涡不仅是我国夏半年重要的降水灾害性天气系统，西南涡暴雨也是我国一种特色突出、成因复杂的典型暴雨现象（李跃清和徐祥德，2016），因此，西南涡及其降水影响一直是关注的重点和难点。

长期以来，不少学者围绕西南涡开展了结构、演变、机理等方面的研究。西南涡的成因与多尺度复杂地形密不可分，赵平等（1991）提出，地形对高原南侧的西南气流具有明显的阻挡作用，并决定着西南涡的形成，潜热通过加强西南涡上空高层辐散和低层辐合，使低涡发展。吴国雄等（1999）指出地形作用引起的等熵面倾斜，西南季风气流北上与高原地形相互作用形成较强的南风垂直切变，两者结合导致西南涡发生。数值试验也揭示青藏高原和横断山脉对西南涡生成的

位置和尺度起主要作用，其次才是四川盆地的作用，秦岭、大巴山脉对西南涡的形成不具有决定性影响，（母灵等，2013；Wang et al, 2014）。西南涡的结构非常复杂，在整个气旋式环流的局部存在反气旋式环流，表现出非连续特征（邹波等，2000；屈顶等，2021）。强烈发展的西南涡是一个十分深厚的系统，正涡度可以达到 500hPa 以上，同时也是一个非对称的中尺度系统，西南涡发展到强盛阶段时云顶亮温 TBB 才出现明显的低值区（陈忠明等，1998；Fu et al, 2015；Ni et al, 2017）。低空急流的加强会引起低层辐合产生潜热释放，导致中层位涡增加，使西南涡发展演变为深厚系统（朱禾等，2002；徐亚梅，2003）。高笃鸣等（2017）指出仅靠高层的高位涡不足以激发和维持 700hPa 的西南涡，需要通过低层水平辐合引起正涡度增加并向上输送来增强 700hPa 的气旋式环流，进而促进西南涡的移动和发展，初期降水的潜热释放也起重要作用。西南涡的移动受到许多因子影响，其中环境流场的引导起着较重要作用（陈忠明，1989）。卢敬华等（1996）认为西南涡的移动除受综合引导气流牵引之外，还受 700hPa 高度场上的散度、涡度平流、垂直涡旋通量分布不均以及地面气压梯度的控制。此外，副高和 700hPa 地转风对西南涡的移动同样起着重要作用（Zhong et al, 2014 Lu et al, 2020；卢萍等，2021）。并且，西南涡生成之后东移、发展，会造成我国中东部广大地区的暴雨和洪涝灾害，如：1998 年夏季西南涡活动频繁，发展和东移的低涡高达 70%以上，近 90%的西南涡活动带来了长江上游的区域性暴雨过程（陈忠明等，2003）。西南涡引发的降水强度、落区与低涡的强度和移动路径密切相关（卢萍等，2014，2016）。

目前，对于引发暴雨的西南涡的发展演变机制的研究还比较分散，诸如西南涡的发展演变机理及西南涡与暴雨的关系等问题都有待新认识或再认识。本文研究对象仅限于高影响的西南涡（强度大，造成了暴雨过程），首先通过分析西南涡发展演变的具体过程，找出影响西南涡发展演变的关键物理因子，再由关键因子定义了一个低涡发展指数，然后检验该低涡发展指数对于低涡的发展演变及其暴雨过程的指示意义，希望通过此研究进一步加深对高影响西南涡发展演变机制的认识。

2 两次西南涡发展过程简介

下面的分析都基于 ERA5 再分析资料（水平分辨率： $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ；垂直分辨

率为 50hPa（最底层 1000hPa，共 19 层）；时间分辨率：1h）。在 10 多个典型个例分析的基础上，考虑篇幅所限，仅就 2 次典型西南涡过程的剧烈演变阶段展开分析讨论，并增加一个个例用于检验。选取该 2 个个例的原因：个例 1 的剧烈变化体现在短时间内发生了超长位移，个例 2 则表现为位移小，强度大。选取的 2 个个例西南涡处于高原以东的演变阶段，避开了高海拔复杂地形区，中低层资料具有相当的适用性和可靠性。

2020 年 7 月 11 日 00 时，四川盆地内存在明显的西南涡，低涡中心位于 104.75°E , 31.25°N （图 1a），逐 3 小时的 700hPa 位势高度场显示，该低涡中心气压逐渐升高，低压区域逐步向东北方向扩展（图 1），06 时、09 时，西南涡的外围（东北长轴方向）出现了强度弱范围小的闭合低压（分别位于 113.25°E , 33.25°N 和 113.75°E , 33.5°N ）（图 1c、d），12 时，低压区进一步向东北方向伸展，演变为东北—西南走向的长带状（图 1e），15 时，低压带内出现 2 个强度相当的低压中心，表现为明显的双心结构（图 1f），21 时，东北部形成了一个非常显著的闭合低压，中心位于 115.5°E , 35.25°N （图 1h），与 00 时低涡中心位置相距甚远（李跃清等，2022）。本次低涡完整过程是从 10 日从青藏高原东坡生成，一直持续到 16 日移入日本以东。7 月 11 日这一天是它整个发展演变过程中位移最大的一个阶段，在 24h 这么短时间段发生了超长位移，因此文中主要给出这个发展阶段的演变图，探究其长距离位移的原因（简称“20200711”过程）。

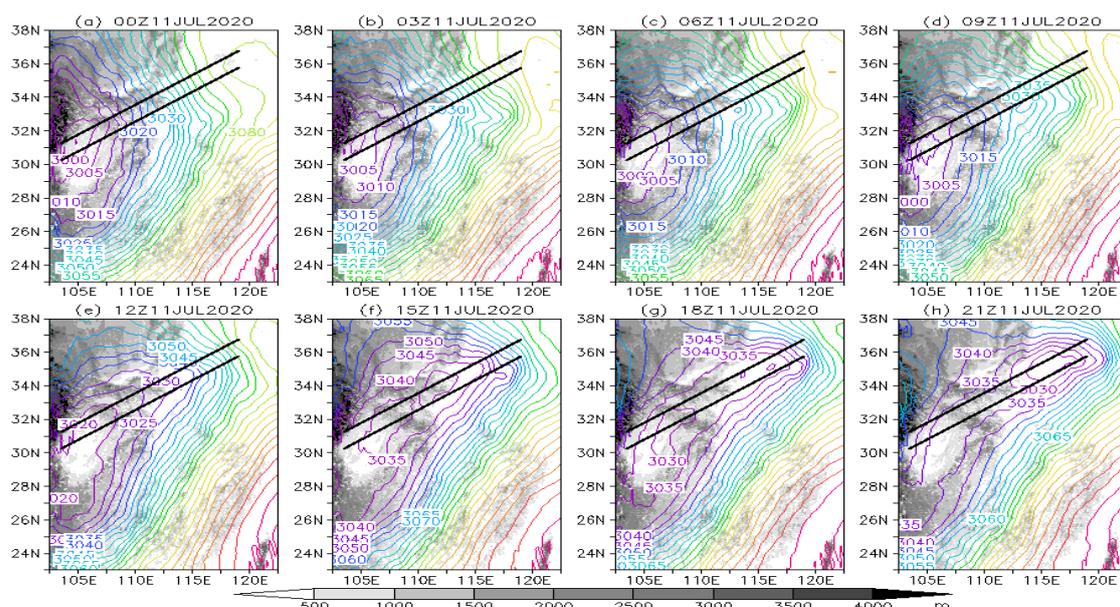


图 1 “20200711”过程中，700hPa 位势高度场随时间的演变（单位：gpm），灰色阴影是地形（单位：m）。
[键入文字]

Figure.1 Evolution of 700hPa geopotential height field in the process of "20200711" (unit: gpm) , and the gray shadow is the terrain (unit: m).

2020年8月11日-12日，四川盆地内出现了明显的西南涡中尺度系统，整个过程期间西南涡稳定少动，移动距离不大。11日21时，西南涡中心位于 104°E ， 30.75°N （图2a），12日00时，西南涡中心在原地少动（ 104.25°E ， 30.75°N ），低涡中心气压增高，闭合低压带略向东北延展（图2b）。12日03时，低涡内部低涡中心东北部（ 104.75°E ， 31.25°N ）又出现一个小的闭合中心，表现为不对称的双心低涡（图2c）。12日09时，东北部的涡明显增强，低涡中心位于 105.5°E ， 31.75°N （图2e）。15时，盆地东北部低涡中心的气压梯度进一步增大，中心位于 106°E ， 31.75°N （图2g），直到21时，低涡中心一直以较强梯度的形式维持在 106°E ， 32°N 附近（图2i）。此次低涡过程11日夜间在高原边坡生成后，12日迅速发展增强，13日很快就消亡（李跃清等，2022）。与“20200711”过程相较，这次过程的低涡强度（闭合低压区内的气压梯度）大，位移小，文中主要关注这次低涡发展增强的演变阶段（简称“20200812”过程）。

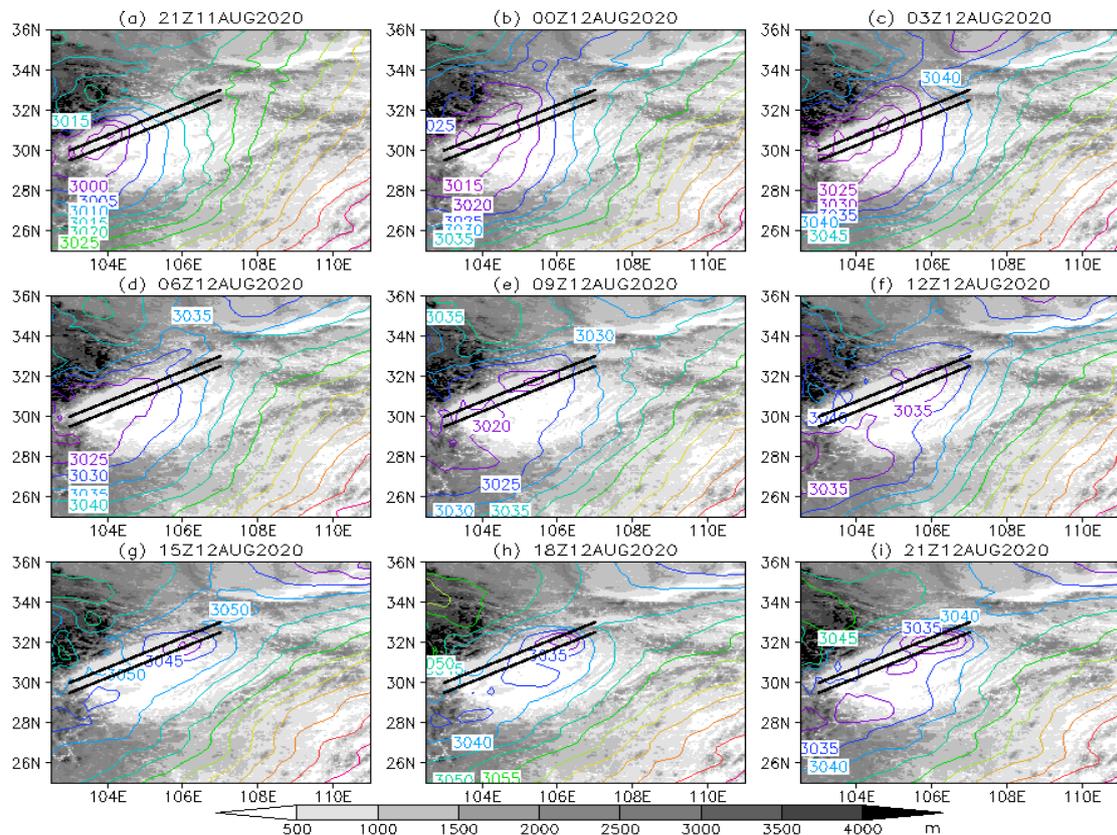


图2 同图1，但为“20200812”过程。

Fig.2 Same as Fig.1, but for the "20200812" process.

[键入文字]

3 影响西南涡发展演变的关键因子

影响西南涡移动发展演变的因子非常多,在对比分析了西南涡演变过程中各个物理量自身变化与西南涡涡心位置(低压中心)、强度(气压梯度)、范围(闭合低压区的范围)等演变时段和强度的契合度后(图略),发现影响西南涡发展演变移动最关键的动力因子是散度,热力因子是假相当位温。西南涡通常位于850-700hPa,因此中低层动热力场的影响最为直接和显著。

图3是“20200711”西南涡发展演变过程中,过西南涡中心(图1中两条黑实线之间,共计5个斜剖面)平均的涡度和散度剖面。7月11日00时,西部105°E附近,有较强的正涡度,辐合区位于最强正涡度的东北部,110°E以东区域无明显的正涡度区(图3a);此后,105°E正涡度区无明显辐合,涡度逐渐减弱,106°-108°E范围内,中低层一直有辐合维持,该区域也一直维持一定的正涡度;03时以后,111°E以东区域,也出现了正涡度带,该正涡度带随着时间逐渐东移增强(图3b-h)。纵观整个“20200711”西南涡过程,正涡度的发展与中低层辐合之间的契合度非常高(其涡度和散度都随高度向北倾斜(经向剖面图略),西南涡实际是从大气低层发展起来的)。

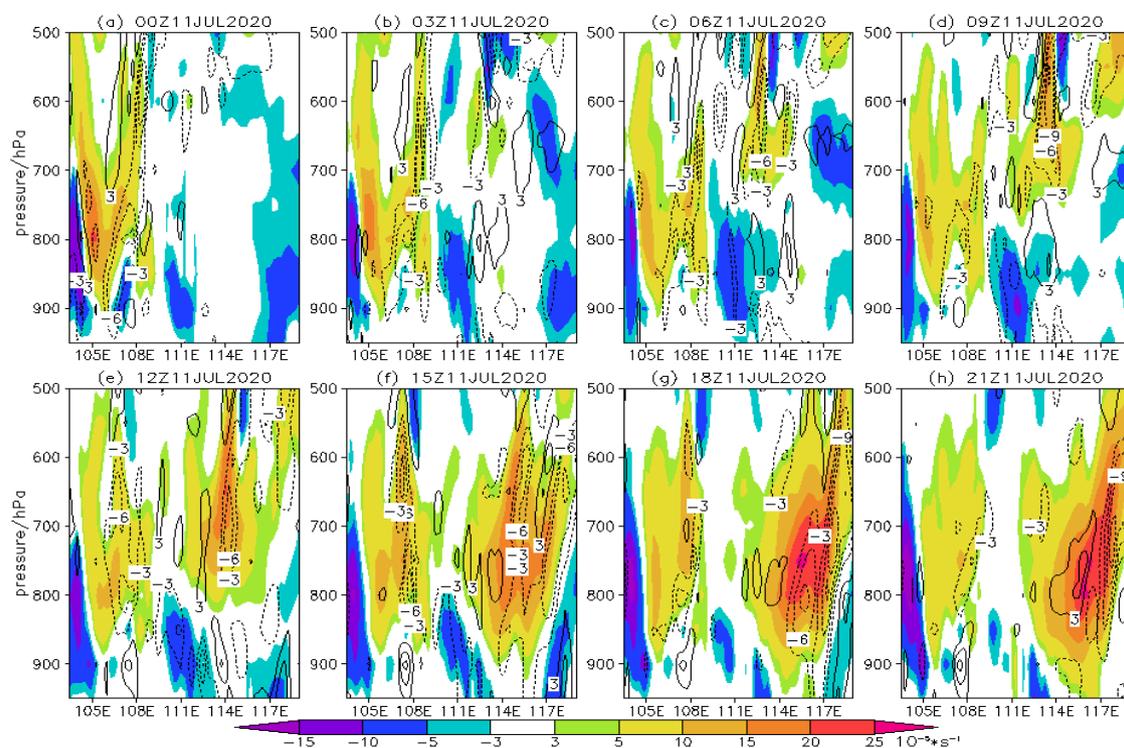


图3 “20200711”过程中,过西南涡中心区域的涡度(彩色填色,单位: $10^{-5} \cdot s^{-1}$)和散度(黑色等值线,单位: $10^{-5} \cdot s^{-1}$)随时间演变的垂直剖面。

[键入文字]

Fig. 3 Vertical profile of the evolution of vorticity (color filling, unit: 10^{-5}s^{-1}) and divergence (black contour, unit: 10^{-5}s^{-1}) over time in the central region of the southwest vortex during the process of "20200711".

8月11日21时,西部104°E附近,有较强的正涡度,强辐合区位于最强正涡度的东部104.25°E,最强辐合区位于900hPa高度附近,105°E以东区域无强的正涡度区(图4a);此后至12日06时,低层辐合逐渐减弱东移,西部正涡度也同步减弱(图4b-d);09时以后,低层辐合再次增强,最强辐合中心位于850hPa附近,中低层强辐合随着缓慢东移增强,与之对应的正涡度也同步东移增强(图4e-i)。与位移大的“20200711”过程相似,稳定少动的“20200812”过程中,正涡度的发展与中低层辐合之间位置、强度和伸展高度的匹配度同样很高,由此可见,两个个例都证明了中低层辐合的确是低涡发展演变的一个关键指示因子。邓承之等(2021)在2013年“6•30”西南涡大暴雨过程分析中,认为西南低涡的发展依靠负值非平衡动力强迫作用和低空辐合的观点相一致。

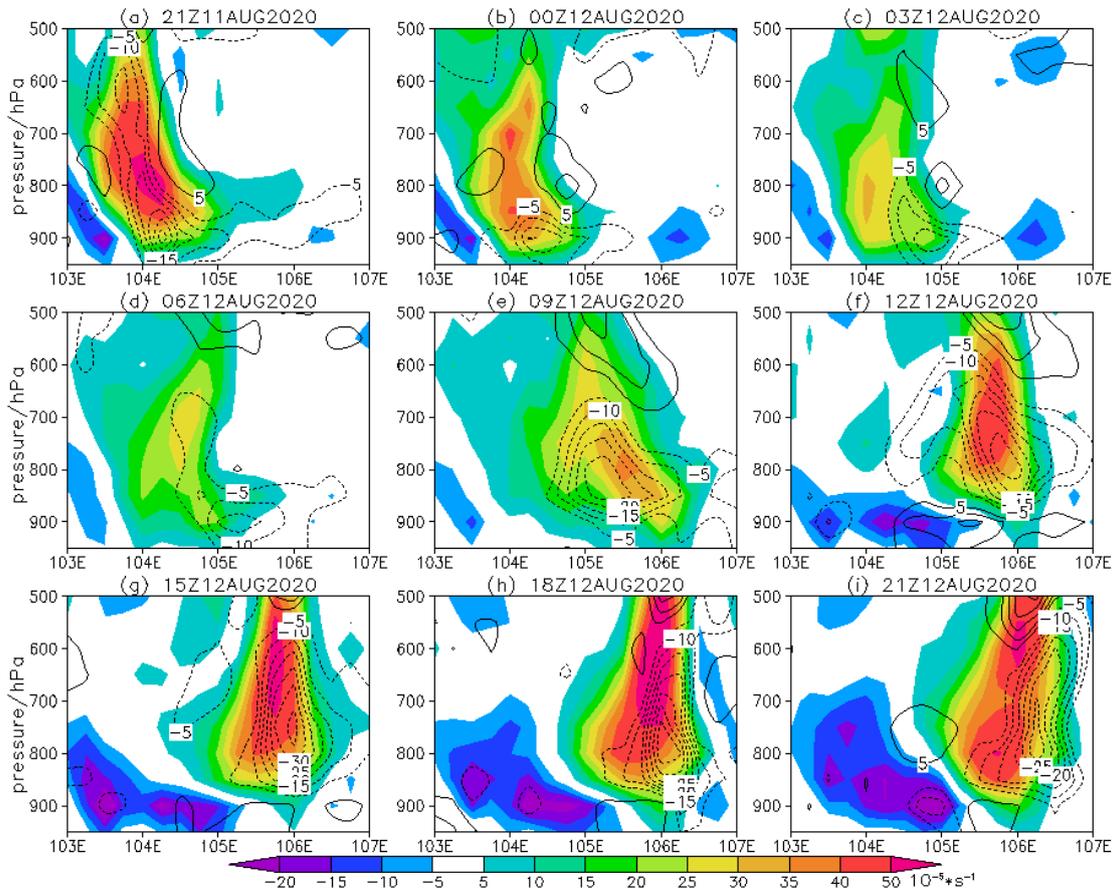


图4 同图3, 但为“20200812”过程。

Fig.4 Same as Fig.3, but for the "20200812" process.

[键入文字]

图 5 给出了“20200711”过程中，850-600hPa 平均的假相当位温纬向距平、水平梯度及 700hpa 流场随时间的变化。7 月 11 日 00 时，西部 105°E 附近有明显的气旋性环流，中低层假相当位温大值区位于西南地区，低涡东北侧的西南气流在 31°N 以北产生气旋性偏转，转向为东南风，110°E 以东地区风向切变带与假相当位温的水平梯度大值区位置相吻合（图 5a）；此后，西南地区高假相当位温一直维持，假相当位温纬向正距平区、水平梯度大值区及风向辐合带逐渐缓慢向东北部伸展，21 时，在 115°E，35°N 附近形成明显的闭合环流（图 5b-h）。在整个“20200711”过程中，气旋性环流的发展与中低层假相当位温（大值区和水平梯度大值区）之间的吻合度较高。

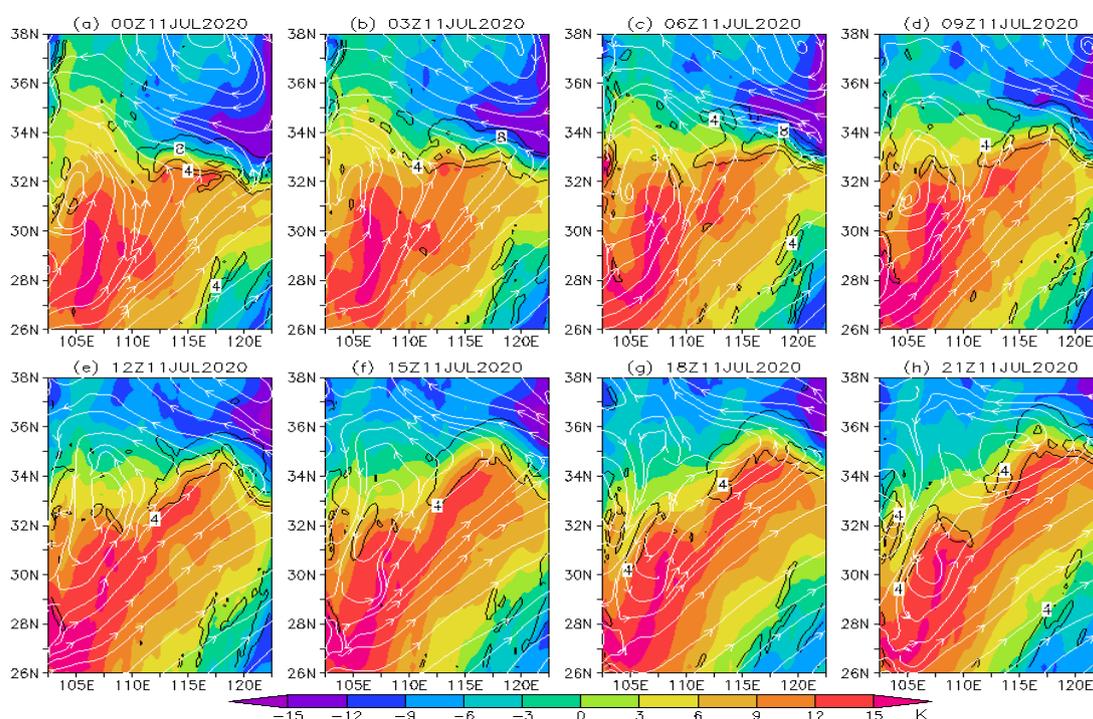


图 5 “20200711”过程中，中低层（850-600hPa 平均）假相当位温纬向距平（彩色阴影，单位：K）、水平梯度绝对值之和（黑色等值线，单位：K o^{-1} ）和 700hPa 流场（白色流线，单位： ms^{-1} ）随时间的演变。

Fig.5 Evolution of zonal anomaly (color shadow, unit: K) and absolute value of horizontal gradient(black contour, unit: K o^{-1}) of pseudo-equivalent temperature and 700hPa flow field (white flow line, unit: ms^{-1}) during the process of "20200711".

下面，分析稳定少动的“20200812”过程中，假相当位温与 700hpa 流场演变过程之间的关系。8 月 11 日 21 时，低涡中心位于 104°E 附近，低涡区对应的

[键入文字]

中低层假相当位温值较大，假相当位温梯度大值区在低涡中心东北部（图 6a）。12 日 00 时以后，有明显的北风入侵，假相当位温梯度大值区与北风辐合区位置较为一致，低涡中心位于假相当位温值较大的区域，流线的涡旋中心也是随假相当位温纬向水平梯度大值区移动，12 日 15 时，在 106°E，32°N 附近形成明显的闭合环流（图 5b-i）。对于稳定少动的“20200812”西南涡过程，气旋性环流的发展同样与中低层假相当位温的关系非常密切。陈双等（2022）在一次西南涡暴雨多尺度分析中也指出西南涡在暖湿环境气流作用下，触发新的对流，并向假相当位温高值区发展。张芳等（2022）对 2018 年“5.21”四川盆地大暴雨分析中也提到上升运动会产生在温度梯度大值区附近。

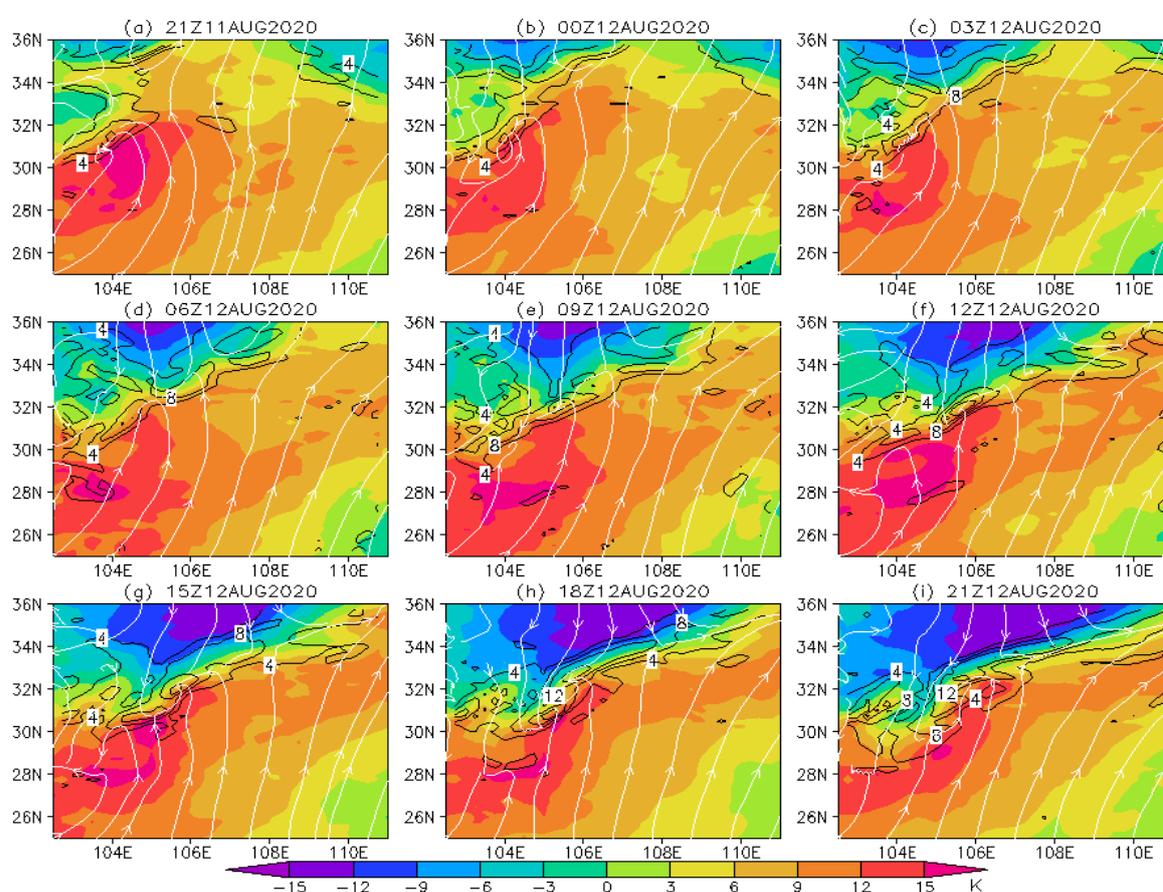


图 6 同图 5，但为“20200812”过程。

Fig.6 Same as Fig.5, but for the "20200812" process.

4 西南涡发展指数的定义

上面的两次西南涡过程都显示，低涡的发展演变与中低层辐合和假相当位温之间关系密切，因此将这两个物理量场作为低涡发展的关键影响因子，定义了一个西南涡发展指数：

[键入文字]

$$I_{swv} = (\theta_{se} - \overline{\theta_{se}}) * \left(\left| \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right| \right) * (-div\vec{U})$$

当 $I_{swv} \geq 5 * 10^{-4} K \text{ } \circ^{-1} s^{-1}$ 时，有利于低涡维持发展

其中： θ_{se} 是中低层（850~600hPa 平均，这个高度范围是热力影响较为显著的层次）假相当位温， $\overline{\theta_{se}}$ 是 θ_{se} 的纬向（104°E~122°E）平均值， $(\theta_{se} - \overline{\theta_{se}})$ 即表示中低层假相当位温的纬向距平（负值被设置为 0），符号为正； $|\partial\theta_{se}/\partial x|$ 和 $|\partial\theta_{se}/\partial y|$ 分别是 θ_{se} 的在 x 和 y 方向水平梯度的绝对值，符号为正； $div\vec{U}$ 是中低层（850hPa~700hPa，中低层辐合大值中心通常位于该高度层之间）平均散度，当辐合时，符号为负，辐散时，符号为正；因此，当 $I_{svd} \geq 5 * 10^{-4} K \text{ } \circ^{-1} s^{-1}$ 时，有利于低涡维持发展（阈值选为 $5 * 10^{-4}$ ，是为了有效地剔除小扰动干扰）。另外，未考虑 850hPa 以下的低层是为了去除边界层内较强的热力和动力干扰。从指数定义公式可以看到，三者中低层辐合的影响最大，一是其数值的波动范围最大，二是它直接影响到指数的符号（性质）。假相当位温梯度和纬向正距平大值区通常与锋区和低层结稳定度区相关联。

5 西南涡发展指数与西南涡及其暴雨演变过程的关系

该低涡发展指数结合了中低层大气的动热力因素，接下来检验该低涡发展指数是否能有效地指示低涡及其暴雨的发展演变过程。

图 7 是“20200711”过程中，低涡发展指数和 700hPa 位势高度的随时间的演变图。11 日 00 时，位势高度显示闭合低压中心位于 104.75°E，31.25°N，闭合低压区主要位于 110°E 以西，低涡区内发展指数都低于 $2 * 10^{-4} K \text{ } \circ^{-1} s^{-1}$ ，高发展指数区位于 112°E 以东的非低压区域（低压闭合线以外），03 时与 00 时情形相似，06 时和 09 时，发展指数与低压区仍然不匹配，仅在低涡发展指数的西部（112°E-113°E 附近）出现了非常弱小的闭合低压中心，12 时-18 时，低压区向东北方向强烈伸展，18 时，低压区与发展指数大值区终于重叠，此时，低涡在该区域迅速发展壮大，至 21 时，发展为有一定规模的显著强低涡，且低涡继续向发展指数较大的区域移动，而西部原来的低涡区因为一直无高低涡发展指数相匹配，随时间逐渐减弱（图 7）。通过分析“20200711”大幅度东北移动的西南涡

过程中，低涡发展指数与西南涡演变过程的关系，发现该低涡发展指数既可以很好地诠释 06 时、09 时小闭合低压的成因，又可以指示出低涡强度以及伸展区的演变发展趋势，还能解释像“20200711”这种远距离位移西南涡的移动机制。这个指数可以很好地反映有利于低涡发展的能量的配置，非连续性、非均匀性的动热力能量的聚合是造成低涡不断生成、维持、发展的主要原因，低涡的移动并非单纯随引导流的位移现象，而是在低压区域内的低涡中心再生/增强的另一种表象。

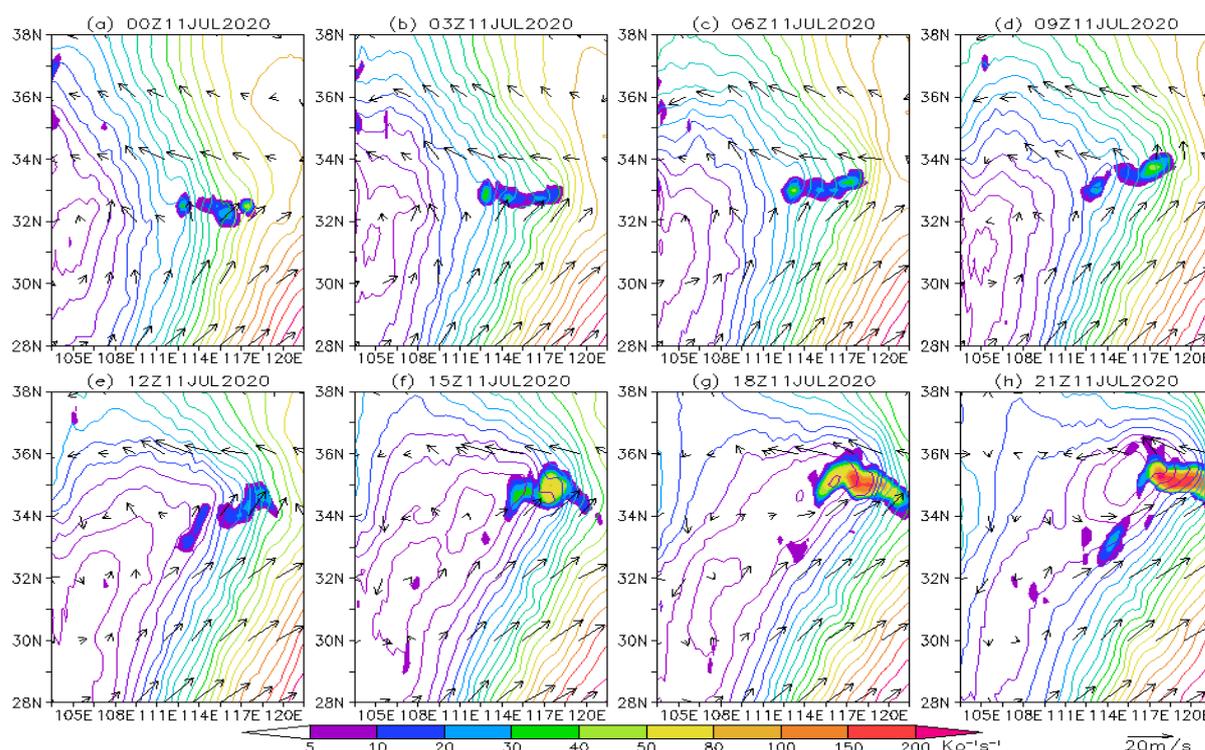


图 7 “20200711” 过程中，低涡发展指数（彩色阴影，单位： $K o^{-1} s^{-1}$ ）、700hPa 位势高度（彩色等值线，单位：gpm）和风场（黑色矢量箭头，单位： ms^{-1} ）随时间的演变。

Fig.7 Evolution of the vortex development index (color shadow, unit: $K o^{-1} s^{-1}$), 700hPa potential height (color contour, unit: gpm) and wind field (black vector arrow, unit: ms^{-1}) during the process of "20200711".

下面，对比原地少动的“20200812”西南涡过程中，低涡发展指数和低涡强度及位置的关系。11日21时，位势高度显示闭合低压中心位于 $104^{\circ}E, 30.75^{\circ}N$ ，低涡发展指数大于 $2 * 10^{-4} K o^{-1} s^{-1}$ 区域位于低涡中心北部（图 8a），12日00时-06时，低涡区向发展指数大值的方向（东北）伸展（图 8b-d），09时，低涡中心与发展指数高值区几乎重叠，低涡再次增强（图 8e），12时，发展指数大值中

[键入文字]

心继续向东北方向小幅移动（图 8f），15 时-21 时，发展指数大值区一直维持在原处，低涡中心同样停留在 106°E，32°N，同时，有较大的低涡发展指数向西南方向延伸，低压区也呈现西南延展的趋势（图 8g-i）。由此可见，对于移动距离小的低涡，低涡发展指数同样可以指示出低涡强度、位置，低涡中心移动方向、低压区伸展趋势，即使像“20200812”这种移动范围小的西南涡过程，其移动也并不是简单的低压系统随引导气流平移。

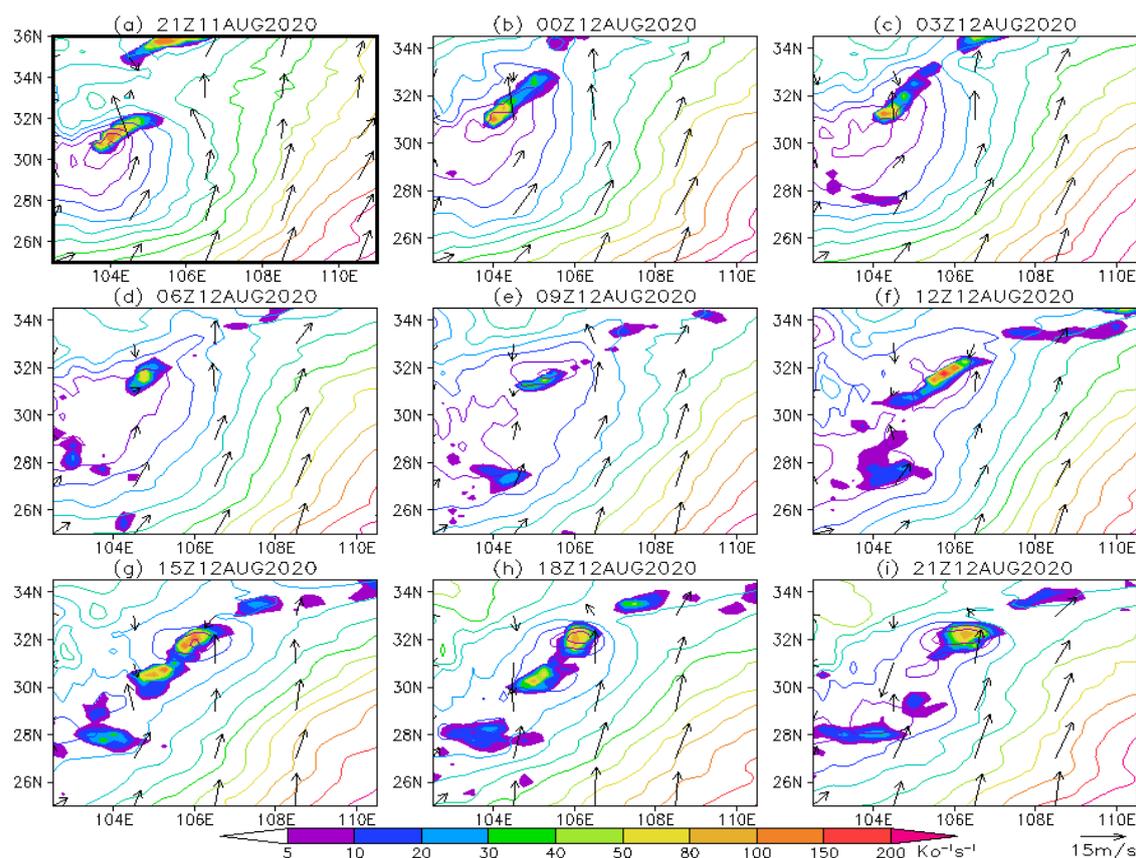


图 8 同图 7，但为“20200812”过程。

Fig.8 Same as Fig.7, but for the "20200812" process.

下面再给出一个低涡先稳定少动再东移的“20150721”西南涡过程，进一步验证低涡发展指数对西南涡演变过程的指示作用。在“20150721”过程中，低涡发展指数和低涡强度及位置的关系。21 日 18 时，低涡中心在指数大值区生成（图 9a），此后大值区与低涡中心偏离，位于其东北侧，低涡涡型随之向东北区伸展（图 9b-d），22 日 06 时后（图 9e-j），指数再次与低涡中心重叠，西南涡进一步发展加强，直到 23 日 00 时，低涡指数大值区移到低涡东北侧，低涡中心随之向东北迁移（图 9k-l）。当低涡指数与低涡中心重叠时，西南涡与低涡指数同步加强；低涡指数偏离西南涡中心时，西南涡有向高指数区偏离/迁移的趋

[键入文字]

势。总的来说，西南涡的移动发展演变取决于低压区域内强动热能量的转移、聚合、发散。

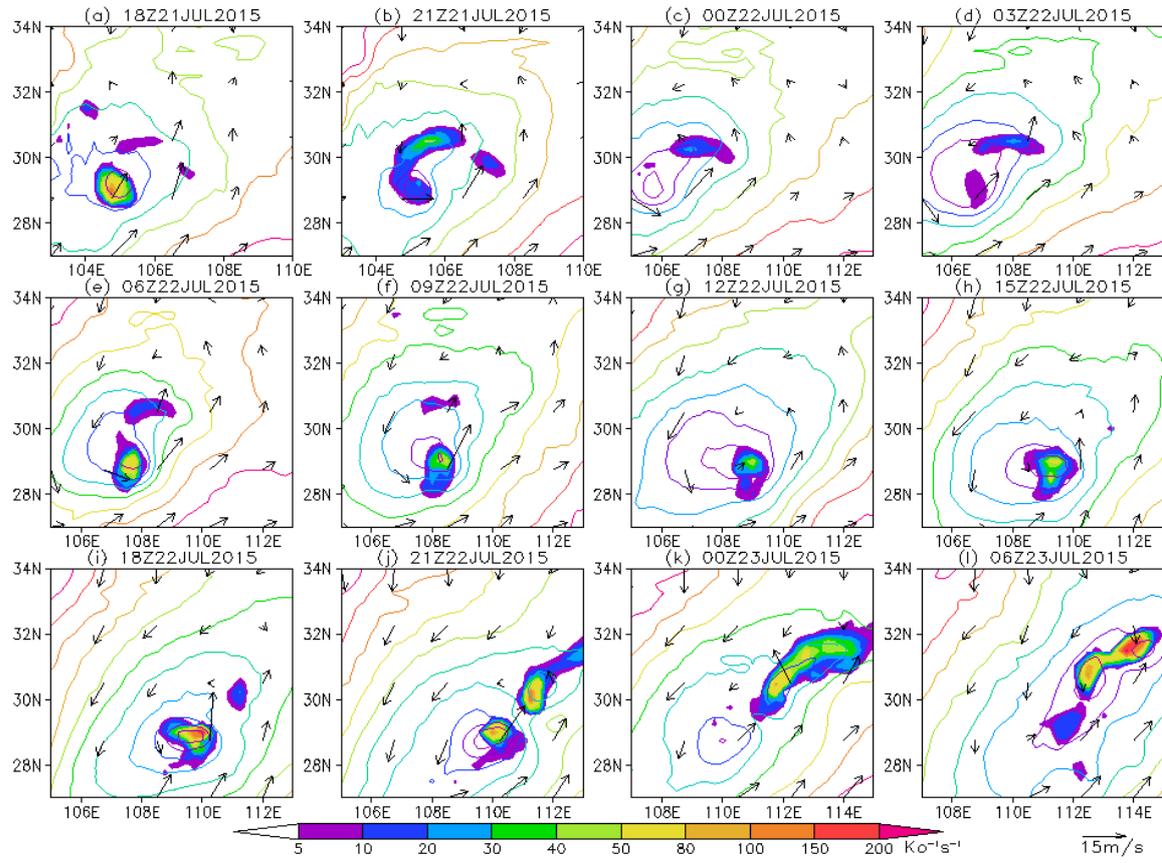


图 9 同图 7，但为“20150721”过程。

Fig.9 Same as Fig.7, but for the "20150721" process.

西南涡中尺度天气系统之所以受到关注，是源于它与降水息息相关，尤其是高影响的西南涡，常常伴有暴雨天气过程。低涡发展指数与西南涡暴雨之间是否存在一定的联系呢？这里，就西南涡演变过程中，低涡发展指数与西南涡暴雨强度、落区、发生时间等关系开展分析研究。

图 10 是“20200711”过程中，低涡发展指数和逐时降水分布的对比图。11 日 00 时，700hPa 流场显示低涡中心位于 105°E，31.5°N 附近，低涡降水发生在低涡的东北部，降水强度不大，另一非低涡强降雨带在我国中东部地区，该雨带与低涡发展指数大值区位置较一致，其它时次与 00 时情形相似，低涡发展指数大值区与强降雨雨带基本重合，大值中心也与强降雨中心位置较为一致（位置偏差可能因为低涡发展指数的演变会略超前于降水）（图 10）。通过分析“20200711”大幅度东北移动的西南涡过程中低涡发展指数与暴雨的关系，发现该低涡发展指数既能指示出低涡降水的强度及落区，又能反映西南涡与降水之间互存共生的现

[键入文字]

象，从一定程度上解释了“雨生涡”和“涡生雨”都是合理的。“雨生涡”是由于降水产生的潜热会引发大气热力结构的变化，进而增强低层辐合，低涡发展指数必然增强，有利于低涡的产生和发展。“涡生雨”则是低涡的存在，能导致低层大气辐合上升，从而带来降水。

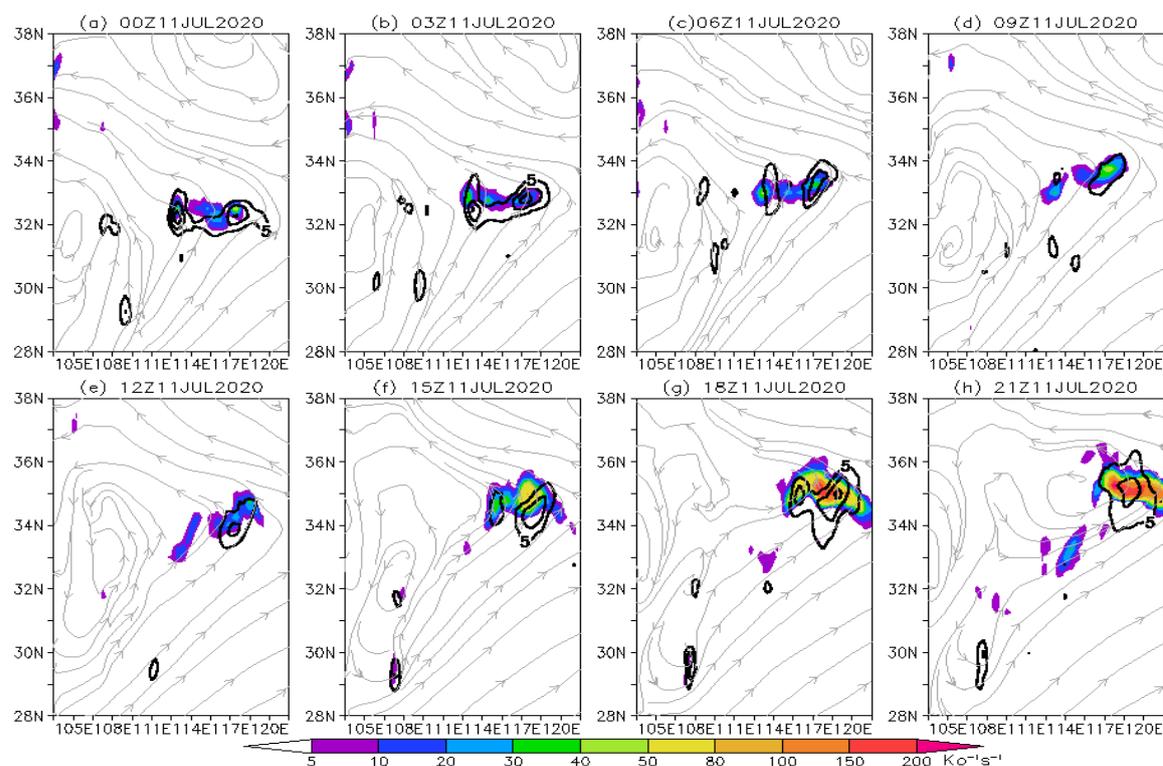


图 10 “20200711”过程中，低涡发展指数（彩色阴影，单位： $K o^{-1} s^{-1}$ ）、小时降水（黑色等值线，单位： mmh^{-1} ）和 700hPa 流场（灰色，单位： ms^{-1} ）随时间的演变。

Fig. 10 Evolution of the vortex development index (color shadow, unit: $Ko^{-1}s^{-1}$), hourly precipitation (black contour, unit: mmh^{-1}) and 700hPa flow field (gray, unit: ms^{-1}) during the process of "20200711".

图 11 是“20200812”过程中，低涡发展指数和逐时降水分布的对比图。8月11日21时，700hPa流场显示低涡中心位于 $103.75^{\circ}E$ ， $30.5^{\circ}N$ 附近，低涡降水发生在低涡的东北部，降水强度大，且强降水中心与高发展指数中心高度吻合，12日00时以后，偏北风入侵，出现明显的南北风辐合带，强降水中心依然与低涡发展指数大值区相对应。其它时次与00时情形相似，低涡发展指数大值区与强降水雨带基本重合，指数大值中心与强降水中心位置相一致，且低涡强度和低涡发展指数都较大时，降水强度也大（图11）。

图 11 是“20150721”过程中，低涡发展指数和逐时降水分布的对比图。8月11日21时，700hPa流场显示低涡中心位于 $103.75^{\circ}E$ ， $30.5^{\circ}N$ 附近，低涡降水发
[键入文字]

生在低涡的东北部，降水强度大，且强降水中心与高发展指数中心高度吻合，12日00时以后，偏北风入侵，出现明显的南北风辐合带，强降水中心依然与低涡发展指数大值区相对应。其它时次与00时情形相似，低涡发展指数大值区与强降水雨带基本重合，指数大值中心与强降水中心位置相一致，且低涡强度和低涡发展指数都较大时，降水强度也大（图11）。“20200812”西南涡过程中，低涡发展指数同样能指示出西南涡降水的主要落区和降水中心的位置（图12）。由此可见，西南涡过程中，一向被关注的降水落区问题也能通过该指数得到释疑，低涡的动热力结构的不均匀性，导致西南涡降水分布的不均匀性，这个指数能反映低涡系统的高能区，由此指示出低涡降水的强度及落区。

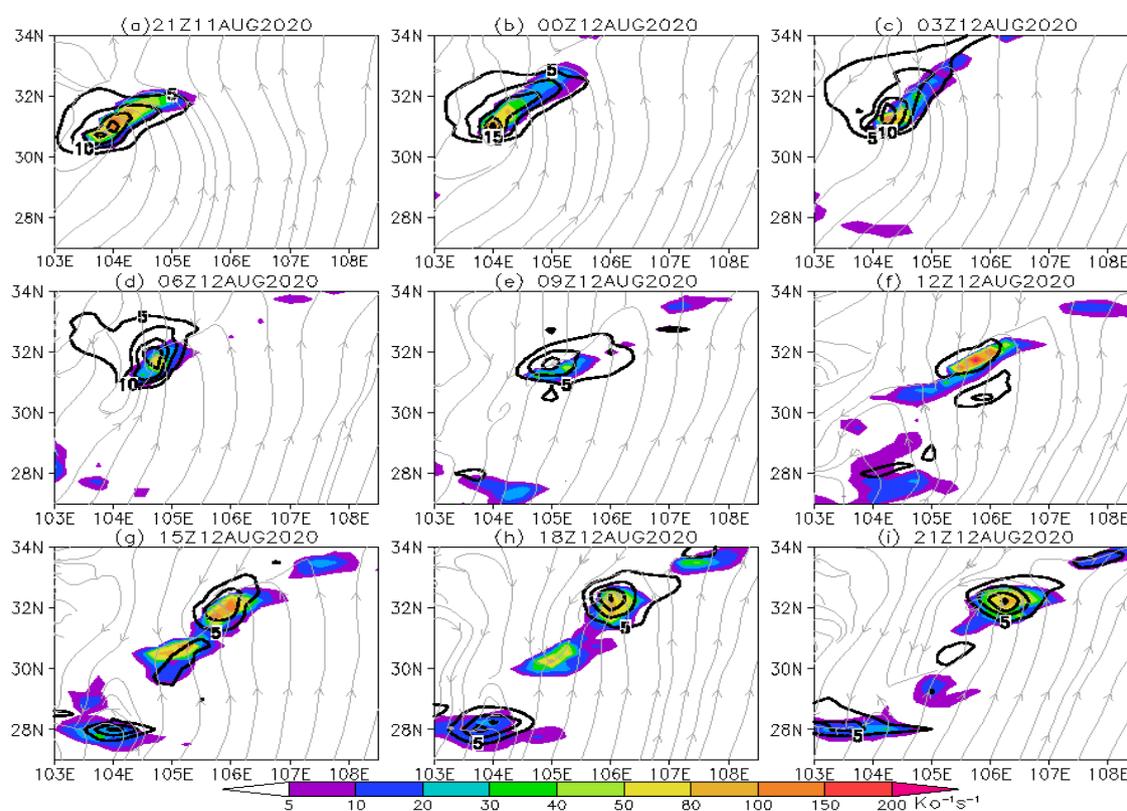


图11 同图10，但为“20200812”过程。

Fig.11 Same as Fig.10, but for the "20200812" process.

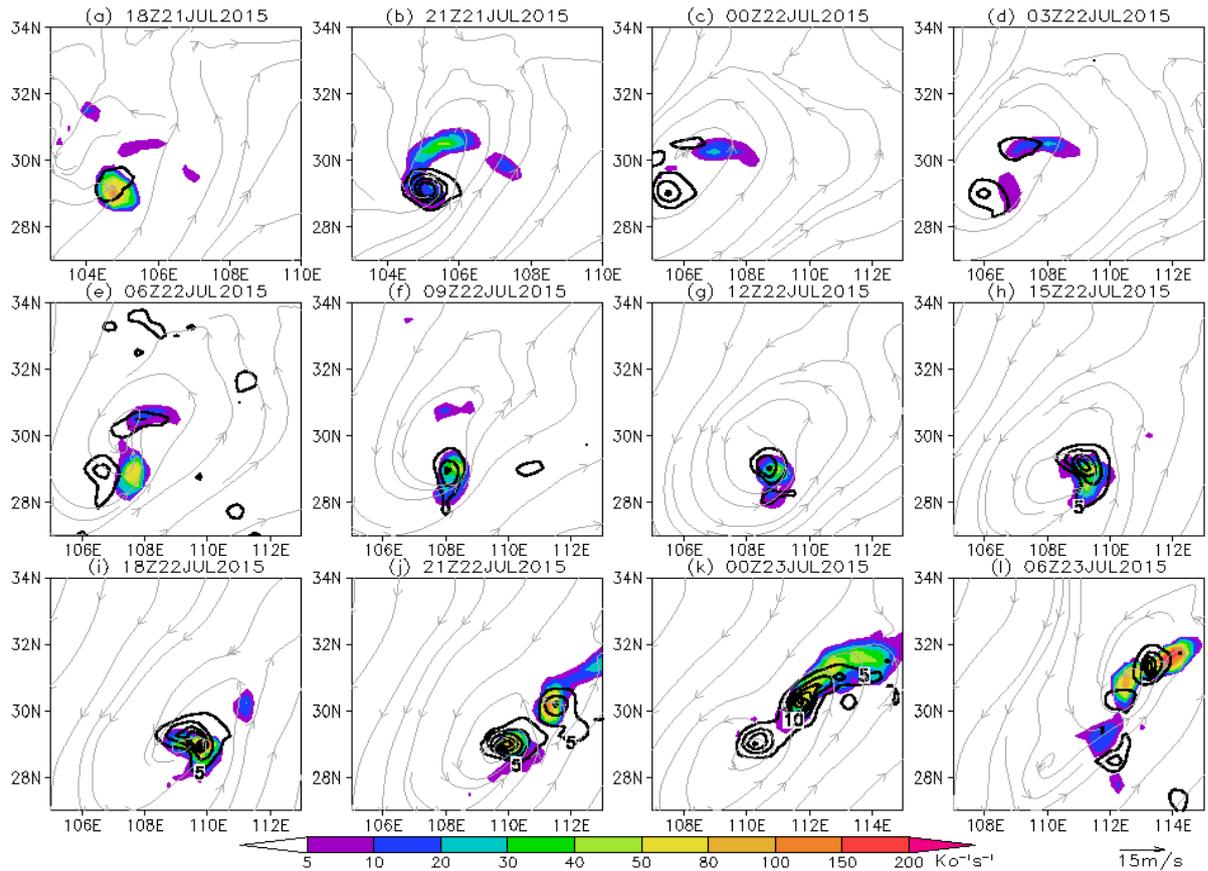


图 12 同图 10，但为“20150721”过程。

Fig.12 Same as Fig.10, but for the "20150721" process.

6 结论与讨论

通过对长距离移动和稳定少动的两次高影响西南涡过程进行分析，发现西南涡的发展演变与中低层辐合和假相当位温之间关系密切，认为这两个物理量是西南涡发展的关键影响因子，基于这两个物理量定义了一个低涡发展指数，最后检验了低涡发展指数对西南涡及降水演变的指示能力，得到以下结论：

无论是远距离位移还是稳定少动的西南涡过程，都与大气中低层辐合和假相当位温变化具有密切的关系，代表大气动力特征的中低层辐合与热力特征的假相当位温是影响低涡发展演变的关键物理因子，由此建立的低涡发展指数都可以指示出低涡强度发展趋势、低涡中心移动方向及低压区伸展趋势。低压带内不连续、非均匀性的动热力能量的聚合是造成低涡不断生成、维持、发展的主要原因，低涡的移动并非单纯随引导流的位移现象，也可以是低压区域内的低涡中心再生/增强的另一种形式。简而言之，西南涡的移动发展机理为：西南涡的移动发展演变取决于在低压区域内强动热能量的转移、聚合、发散。

低涡发展指数通过计算得到动/热力不均匀的低涡系统的高能区，不仅能很好地指示降水的强度及落区，还能反映西南涡与降水之间具有互存共生的关系，从一定程度上解释了“涡生雨”和“雨生涡”现象。对于西南涡暴雨的落区和降水中心位置的预报有相当积极的意义。

虽然本文在多个个例的基础上，针对 3 次典型的高影响西南涡个例进行了分析，得到了关于西南涡及其暴雨天气演变的一些有意义的结果。但是，由于西南涡及其降水影响的复杂性、多样性，今后还需要进一步的深入化、系统化，从基础理论、数值模拟和数理方法等方面给以更有力的分析论证。

参考文献

- 陈双, 孙继松, 何立富, 2022. 四川盆地不同落区的三次强降水过程多尺度特征分析[J]. 高原气象, 41(5): 1190-1208. Chen Shuang, Sun Jisong, He Lifu, 2022. Analysis of Multi-scale Characteristics of Three Different Types of Heavy Rainfall in Sichuan Basin[J]. Plateau Meteorology, 41(5): 1190-1208.
- 陈忠明.1989.环境场作用与西南涡移动的初步分析[J].高原气象, 8(4):301-312. Chen Zhongming .1989. The preliminary study if effect of environment flow fields on movement of southwest vortex. Plateau Meteorology, 8(4):301-312 (in Chinese)
- 陈忠明, 缪强, 闵文彬.1998.一次强烈发展西南涡的中尺度结构分析[J].应用气象学报, 9(3): 273-282. Chen Zhongming, Miao Qiang, Min Wenbin.1998. A case analysis on mesoscale structure of severe southwest vortex.Quarterly Journal of Applied Meteorology, 9(3): 273-282 (in Chinese)
- 陈忠明, 徐茂良, 闵文彬, 等.2003.1998年夏季西南涡活动与长江上游暴雨[J]. 高原气象, 22(2):162-167. Chen Zhongming, Xu Maoliang, Min Wenbin, et at.2003. Relationship between Abnormal Activites of Southwest Vortex and Heavy Rain the Upper Reach of Yangtze River during Summer of 1998[J]. Plateau Meteorology, 22(2):162-167. (in Chinese)
- 邓承之, 赵宇, 孔凡铀, 等, 2021. “6•30”川渝特大暴雨过程中西南低涡发展机制模拟分析[J]. 高原气象, 40(1): 85-97. Deng Chengzhi, Zhao Yu, Kong Fanyou, 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)
- Fu SM, Li WL, Sun JH.2015. Universal evolution mecha-nisms and energy conversion characteristics of long-lived mesoscale vortices over the Sichuan Basin[J]. Atmos Sci Lett, 16(2):127-134
- 高笃鸣, 李跃清, 程晓龙.2018.基于西南涡加密探空资料同化的一次奇异路径耦合低涡大暴雨数值模拟研究. 气象学报, 76 (3) : 343-360.Gao Duming, Li Yueqing, Cheng Xiaolong.2018. A numerical study on a heavy rainfall caused by an abnormal-path coupling vortex with the assimilation of southwest China vortex scientific experiment data[J]. Acta Meteorologica Sinica, 76(3): 343-360 (in Chinese)
- 李国平, 陈佳.2018.西南涡及其暴雨研究新进展[J].暴雨灾害, 37(4):293-302. Li Guoping, Chen Jia. 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)
- 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 Yueqing, Xu Xiangde, 2016. A Review of the Research and Observing Experiment on Southwest China Vortex. Advances in Meteorological Science and Technology, 6(3): 134-140
- 李跃清, 2021.西南涡源研究的有关新进展[J].高原气象, 40(6):1394-1406. LI Yueqing, 2021.New Related Progress on Researches of the Vortex Source of Southwest China Vortex[J]. Plateau Meteorology, 40(6):1394-1406.
- 李跃清, 闵文彬, 彭骏, 等, 2022. 西南涡年鉴(2020)[M]. 北京: 科学出版社, 148-149, 154-155. Li Yueqing, Min Wenbin, Peng Jun, et al.,2022.The Yearbook of Southwest Vortex 2020[M].Science Press, Beijing, P148-149, P154-155.
- 刘冲, 赵平.2020. 1979—2016年四川盆地低涡的气候特征分析[J]. 气候变化研究进展, 16(2): 203-214. Liu C, Zhao P. 2020. Climatological characteristics of Sichuan Basin vortex during 1979-2016 [J], Climate Change Research, 16(2): 203-214 (in Chinese)
- 卢敬华, 1986. 西南涡概论[M]. 北京: 气象出版社, 57-63.Lu JH. 1986. Introduction to the Southwest Vortex[M].China Meteorological Press, Beijing, P57-63
- 卢敬华, 雷小途.1996.西南涡移动的初步分析[J].成都信息工程学院学报, 11(1~2):40-49. Lu JH, Lei XT .1996. Preliminary analysis of movement of southwest vortex. Journal of Chengdu Institute of Meteorology 11(1~2):40-49 (in Chinese)
- 卢萍, 李跃清, 郑伟鹏, 等.2014.影响华南持续性强降水的西南涡分析和数值模拟[J].高原气象, 33(6):1457-1466. Lu Ping, Li Yueqing, Zheng Weipeng .2014. The analysis and numerical simulation of the southwest vortex on continuous heavy rain processes in Southern China. Plateau Meteorology 33(6):1457-1466 (in Chinese).
- 卢萍, 李旭, 李英, 等. 2016. 空间加密探空观测资料对西南涡暴雨天气过程数值模拟的影响 [J]. 大气科学, 40(4): 730-742. Lu Ping, Li Xu, Li Ying, et al. 2016. The influence of spatially intensive sounding observation data on the numerical modeling of southwest vortex rainfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 40(4): 730-742 (in Chinese)
- Ping Lu, Weipeng Zheng, Yueqing Li.2020.Comparison of the movement and vertical structures of two types of the southwest vortex[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 132:571-581
- 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 Ping, Li Yueqing. 2021. Simulation of Effect of Subtropical High Enhancement on Southwest Vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)
- 马勋丹, 智协飞, 王静, 等, 2018. 1979-2016 年夏季西南涡活动及其与降水的关系[J].大气科学学报, 41(2):198-206. Ma X D, Zhi X F, Wang J, et al. 2018. Analysis of the Southwest Vortex activities in summer and their relationship with precipitation during the period of 1979—2016[J].Trans Atmos Sci, 41(2): 198-206 (in Chinese)
- [键入文字]

- 母灵, 李国平.2013.复杂地形对西南涡生成和移动影响的数值试验分析[J].成都信息工程学院学报, 28(6):241-248. Mu Ling, Li Guoping. 2013. Numerical experiments analysis of impact of complex terrain on generation and move of southwest vortex [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 28 (3): 241-248 (in Chinese)
- Ni CC, Li GP, Xiong XZ .2017. Analysis of a vortex precipitation event over Southwest China using AIRS and in situ measurements[J]. Advances in Atmospheric Sciences (4):559-570 (in Chinese)
- 屈顶, 李跃清, 2021. 西南涡之九龙涡的三维环流和动力结构特征[J]. 高原气象, 40(6): 1497-1512. Qu Ding, Li Yueqing, 2021. Characteristics of the Three-Dimensional Circulation and Dynamic Structure of Jiulong Vortex of Southwest China Vortex[J]. Plateau Meteorology, 40(6):1497-1512 (in Chinese)
- Wang Qiwei, Tan Zhemin. 2014. Multi-scale topographic control of southwest vortex formation in Tibetan Plateau region in an idealized simulation [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 119 (20): 11543-11561
- 王金虎, 李栋梁, 王颖.2015.西南涡活动特征的再分析[J].气象科学, 35(2): 133-139. Wang Jinhu, Li Dongliang, Wang Ying. 2015. Characteristics reanalysis on Southwest vortex[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 35(2) : 133-139 (in Chinese)
- 吴国雄, 刘还珠.1999.全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展[J].气象学报, 57(1):1-4. Wu Guoxiong, Liu Huanzhu.1999.Complete form of vertical vorticity tendency equation and slantwise vorticity development[J]. Acta Meteorologica Sinica, 57(1):1-4 (in Chinese)
- 徐亚梅.2003.低空急流的加强对深厚西南涡发展及稳定维持的作用[J].浙江大学学报理学版, 30(1): 98-102. Xu Yamei.2003.Effect of low-level jet's enhancement on the development and stable maintenance of deep southwest-vortex[J].Journal of Zhejiang University(Science Edition), 30(1):98-102 (in Chinese)
- 张芳, 张芳华, 孔期, 等.2022.2018年5月21日四川盆地极端大暴雨的中尺度成因和预报偏差分析[J].气象, 48(6): 691-704.Zhang Fang, Zhang Fanghua, Kong Qi, et al., 2022. Mesoscale mechanisms and forecast bias of the extreme rainstorm in Sichuan Basin on 21 May 2018[J].Meteor Mon, 48(6): 691-704(in Chinese)
- 赵平, 孙淑清.1991.一次西南涡形成过程的数值试验和诊断(一)——地形动力作用和潜热作用对西南涡影响的数值试验对比分析[J].大气科学, 15(6): 46-52. Zhao Ping, Sun Shuqing.1991.Numerical simulation and diagnosis of the formation of SW Vortex I :an analysis of numerical simulation of the effects of topography and latent heat on SW Vortex[J]. 15(6):46-52 (in Chinese)
- Zhong Rui, Zhong Lin-Hao, Hua Li-Juan, et al., 2014.A Climatology of the Southwest Vortex during 1979-2008[J].Atmospheric and Oceanic Science Letters,(6):577-583
- 朱禾, 邓北胜, 吴洪. 2002. 湿位涡守恒条件下西南涡的发展[J]. 气象学报, 60(3): 343-351. Zhu He, Deng Beisheng, Wu Hong. 2002. The development of southwest vortex in conservation of moist potential vorticity [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 60 (3): 343-351 (in Chinese)
- 邹波, 陈忠明.2000.一次西南涡发生发展的中尺度诊断[J].高原气象, 19(2):141-149. Zou Bo, Chen Zhongming.2000.Mesoscale analysis on the formation and development of Southwest Vortex during 8-10
- [键入文字]

July 1989[J]. Plateau Meteorology, 19(2):141-149 (in Chinese)