宋雯雯,李国平,叶瑶.2024.基于多源资料的四川盆地西部一次持续性极端暴雨过程分析[J].暴雨灾害,43(1):13-22. SONG Wenwen, LI Guoping, YE Yao. 2024. Analysis of a sustained extreme rainstorm event in western Sichuan Basin by using multi-source data [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):13-22 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-221

基于多源资料的四川盆地西部一次持续性极端暴雨过程分析

宋雯雯[1,2],李国平[3],叶瑶[2]

(1.中国气象局大气探测重点开放实验室,成都 610225;2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072;3.成都信息工程大学大气科学学院,成都 610225)

摘　要:利用常规观测、FY-4A TBB资料和ERA5再分析资料,从环流背景、中尺度特征、水汽和动力条件、能量和不稳定条件等方面,对2020年8月14—18日发生在四川盆地西部的一次持续性极端暴雨过程进行分析。结果表明:西太平洋副热带高压稳定少动,导致高原低槽东移受阻而稳定维持在四川盆地西部,中低层有切变线和急流维持,配合地面冷空气南下,为持续性极端暴雨提供了有利的环流背景。中尺度对流云团生成、合并、加强,受地形阻挡及副热带高压外围气流、切变线和中尺度低涡的持续影响,对流云团强中心维持在四川盆地西部,是暴雨过程的直接影响系统。暴雨水汽来源于孟加拉湾和西太平洋,在地形辐合抬升作用下,四川盆地西部形成强水汽辐合中心,暴雨过程中各水汽物理量呈现极端性,为持续性极端暴雨的产生提供了充足的水汽条件。暴雨区上空始终有气流辐合与正涡度发展,有利于垂直上升运动加强;暴雨区位于假相当位温密集的锋区中,锋区的动力强迫有利于能量和水汽向上输送,使暴雨区持续维持高能、高湿环境,雨区上空有广义湿位涡异常。暴雨区位势不稳定主要由其散度分量造成,代表水平散度和位势稳定度的耦合作用,位势散度正值区由散度分量和垂直风切变分量共同决定,850 hPa位势散度高值区与强降雨落区有较好对应。

关键词:四川盆地;持续性极端暴雨;广义湿位涡;位势散度

中图分类号:P458.1+21.1　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.12406/byzh.2022-221

Analysis of a sustained extreme rainstorm event in western Sichuan Basin by using multi-source data

SONG Wenwen[1], LI Guoping[2], YE Yao[1]

(1. *Key Laboratory of Atmosphere Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu* 610225; 2. *Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu* 610072; 3. *School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu* 610225)

Abstract: Based on the conventional observation data, FY-4A TBB data, and ERA5 reanalysis data, a sustained extreme rainstorm event occurred in the western Sichuan Basin from August 14 to 18, 2020 was analyzed from the aspects of circulation background, mesoscale characteristics, water vapor and dynamic conditions, energy and instability conditions, etc. The results are as follows. The rainstorm was caused by the stable and limited movement of the western Pacific subtropical high, which blocked the eastward movement of the plateau low-trough and kept it stable in the western basin. At the same time, the shear line and jet stream were maintained in the middle and lower levels, and the surface cold air moving southward provides a favorable circulation background for the continuous extreme rainstorm. The formation, merging, and strengthening of mesoscale convective cloud clusters were affected by the topographic barrier, peripheral airflow of subtropical high, the shear line, and mesoscale low vortex. The strong center of the convective cloud cluster was maintained in the western part of the basin, which was the direct influence system of the rainstorm event. The rainstorm water vapor originated from the Bay of Bengal and the western Pacific Ocean. Under the influence of the topographic convergence uplift, a strong water vapor convergence center was formed in the western part of the basin. The each water vapor physical quantity in the rainstorm event presents extreme characteristics, providing sufficient water vapor

收稿日期: 2022-11-03;**定稿日期:**2023-07-19

资助项目: 中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(2023KLAS06M);国家自然科学基金项目(42175002,42075013);中国气象局西南区域气象中心创新团队(XNQYCXTD-202201,XNQYCXTD-202203);中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J016)

第一作者: 宋雯雯,主要从事灾害性天气诊断及机理研究。E-mail: songww8682@sina.com

通信作者: 李国平,主要从事天气动力学和高原气象学研究。 E-mail: liguoping@cuit.edu.cn

conditions for the generation of continuous extreme rainstorm. Convergence and positive vorticity were developed throughout the rainstorm over the rainstorm area, which favored the enhancement of vertical upward movement. The rainstorm area was located in the frontal area of dense pseudo-equivalent potential temperature, and the dynamic forcing of the frontal area was beneficial to the upward transport of energy and water vapor, which made the rainstorm area maintain a high-energy and high-humidity environment continuously. The generalized wet potential vorticity anomalies were also found over the rainstorm area. The instability of the rainstorm area potential was mainly caused by its divergence component, which represented the coupling effect of horizontal divergence and potential stability. The positive divergence of potential was determined by the divergence component and the vertical wind shear component. The 850 hPa area with a high potential divergence value corresponded well with the heavy precipitation area.

Key words: Sichuan Basin; continuous extreme rainstorm; generalized wet potential vorticity; potential divergence

引 言

暴雨是我国夏季最主要的气象灾害，暴雨引发的洪涝常给人民生命财产和国民经济造成巨大损失(陶诗言，1980)。四川盆地位于青藏高原东南边缘，地形复杂，四周山脉环绕，中部地形低凹，其暴雨具有频发性和持续性。每年夏季四川盆地会不同程度受到暴雨的影响，由于暴雨过程降雨时间长、总量大，极易诱发泥石流、山体滑坡等次生灾害。以往众多针对四川盆地暴雨的研究表明，高原低涡、西南低涡、低层切变线等是引发四川盆地暴雨的重要影响系统(汤欢等，2020；Zhang et al.，2021；邓承之等，2021，2023；殷菲等，2022)，南海、孟加拉湾、中国东部及沿海是四川盆地暴雨水汽的主要源地(李晓容等，2020；王佳津等，2021)；四川盆地暴雨区存在气流辐合、气旋性涡度及强上升运动等(李琴等，2016；宋雯雯等，2018)；四川盆地地形对强降雨的产生有辐合抬升及加强的作用(杨舒楠等，2016；张芳丽等，2020)。而四川盆地西部位于高原边坡地带，地形更为复杂，在大尺度环流和局部地形作用下，暴雨过程可演化为持续性极端暴雨，因此四川盆地西部暴雨的预报预警面临更大挑战。针对四川盆地西部的暴雨，付智龙等(2022)进行动力分析和局地环流模拟指出，伸入四川盆地的东南风受到龙门山脉的强迫抬升是暴雨触发的诱因，山地-平原环流受近地面热力扰动驱动。杨康权等(2019)对比四川盆地西部两次暴雨过程指出，两次强降雨过程均随着地面辐合线的生成而发生，且强降雨中心出现在中尺度辐合线附近。这些成果初步揭示了引发四川盆地西部暴雨的局地环流场特征和影响系统等，但对持续性极端暴雨的动热力结构配置、不稳定度变化原因等研究较少。因此，需要针对这些科学问题进一步研究。

2020年8月14—18日，四川盆地西部出现了一次持续性极端暴雨天气过程，其中绵竹站最大日降雨量突破历史极值，江油、荥县、广汉站最大日降雨量突破8月历史记录，强降雨造成青衣江雅安城区段出现百年一遇洪水，大渡河下游、岷江下游也出现超警戒水位。本文利用多源资料，从环流背景、中尺度特征、水汽和动力条件、能量和不稳定条件等方面，对此次暴雨过程进行分析，探讨对流不稳定演变及其与降水的联系，以期加深对这类持续性极端暴雨机理的认识，为业务预报提供借鉴与参考。

1 资料和方法

1.1 资料说明

使用资料包括：(1) 国家气象信息中心提供的四川省158个国家气象站逐小时降雨资料，用于分析暴雨过程的降水特征；(2) 欧洲中期数值预报中心第五代全球再分析资料ERA5 (时间分辨率为1 h，空间分辨率为0.25°×0.25°)，用于分析广义湿位涡、位势散度、整层水汽通量等物理量；(3) 国家卫星气象中心提供的FY-4A TBB资料(时间分辨率为1 h，空间分辨率为4 km)，用于分析中尺度对流云团特征。以上资料时段为2020年8月13日08时—19日08时(北京时，下同)。

1.2 研究方法

广义湿位涡、位势散度等物理量对极端暴雨的发生有一定指示作用(黄昕等，2021；冉令坤等，2021)，选取这两个物理量对暴雨过程进行诊断分析。广义湿位涡包含了大气热力、动力和水汽的相互作用，能在一定程度上反映大气的非均匀饱和特性。Gao等(2004)引入了广义位温θ^*，并定义了广义湿位涡P_g，其表达式为

$$\theta^* = \theta \exp\left[\frac{Lq_s}{C_pT}\left(\frac{q}{q_s}\right)^k\right] \tag{1}$$

$$P_g = \alpha\zeta_a \bullet \nabla_3\theta^* \tag{2}$$

其中，θ为位温，T为温度，q为比湿，q_s为饱和比湿，C_p是干空气定压比容，L是水汽凝结潜热率，α为湿空气比容，ζ_a为绝对涡度，$\left(\frac{q}{q_s}\right)^k$为凝结函数，当$k$值取9时凝结概率函数能够较好地代表大气中的凝结过程。

位势散度是强迫大气位势稳定度发展变化的主要物理因素，是表征大气(尤其是中尺度系统)动力、热力综合特征的物理量(周围等，2018)，其p坐标系下的表达式(张景等，2019)为

$$m_p=\rho g\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial \theta_e}{\partial x}+\rho g\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial \theta_e}{\partial y}-\rho g\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)\frac{\partial \theta_e}{\partial p} \quad (3)$$

其中，ρ 为密度，g 为重力加速度，θ_e 为假相当位温，u、v 分别为 x、y 方向的速度。位势散度分为散度分量 m_{bt} 和垂直风切变分量 m_{bc}，等式右侧第3项为散度分量 m_{bt}，表示水平散度与位势稳定度的耦合效应，等式右侧第1、2项之和为垂直风切变分量 m_{bc}，表示垂直风切变对相当位温的平流。当 $m_p<0$ 时，有利于不稳定度的维持；$m_p>0$ 时，将会抑制不稳定的发展。

2 降雨实况和环流背景

2.1 降雨实况

2020年8月14日20时—18日20时，四川盆地西部出现了一次持续性极端暴雨过程，全省有32个国家站发生暴雨，40个国家站发生大暴雨，1站发生特大暴雨，最大过程降雨量出现在绵竹，为475.3 mm (图1a)。暴雨站数在四川盆地历史上居8月暴雨过程站数第1，历年暴雨过程站数第4。15日20时—18日20时连续3 d日降雨量均达到全省区域性暴雨天气过程标准(四川省气象局，2014)。15日20时—16日20时为最强降雨时段，22个国家站24 h降雨量≥100.0 mm，其中绵竹站达302.6 mm (图1b)。由绵竹站小时降雨量(图1c)演变可知，绵竹站短时强降水主要发生在15日23时—16日05时，最大小时雨强为53.1 mm·h^{-1}。此次过程具有小时雨强大、持续时间长、累计降雨量大的特点。

肖递祥等(2017)将四川盆地极端暴雨定义为：24 h降雨量有10个及以上国家站≥100.0 mm并且至少有1个站超过250.0 mm或24 h降雨量有1个及以上站≥400.0 mm。若暴雨持续时间达48 h以上，则为一次持续性极端暴雨。根据此定义，此次暴雨从持续时间和降雨量可判断为一次持续性极端暴雨过程。下面从环流背景和中尺度特征来探讨暴雨的持续性，从水汽和动力条件探讨暴雨的极端性，从能量和不稳定条件探讨对流不稳定演变及其与降水的联系。

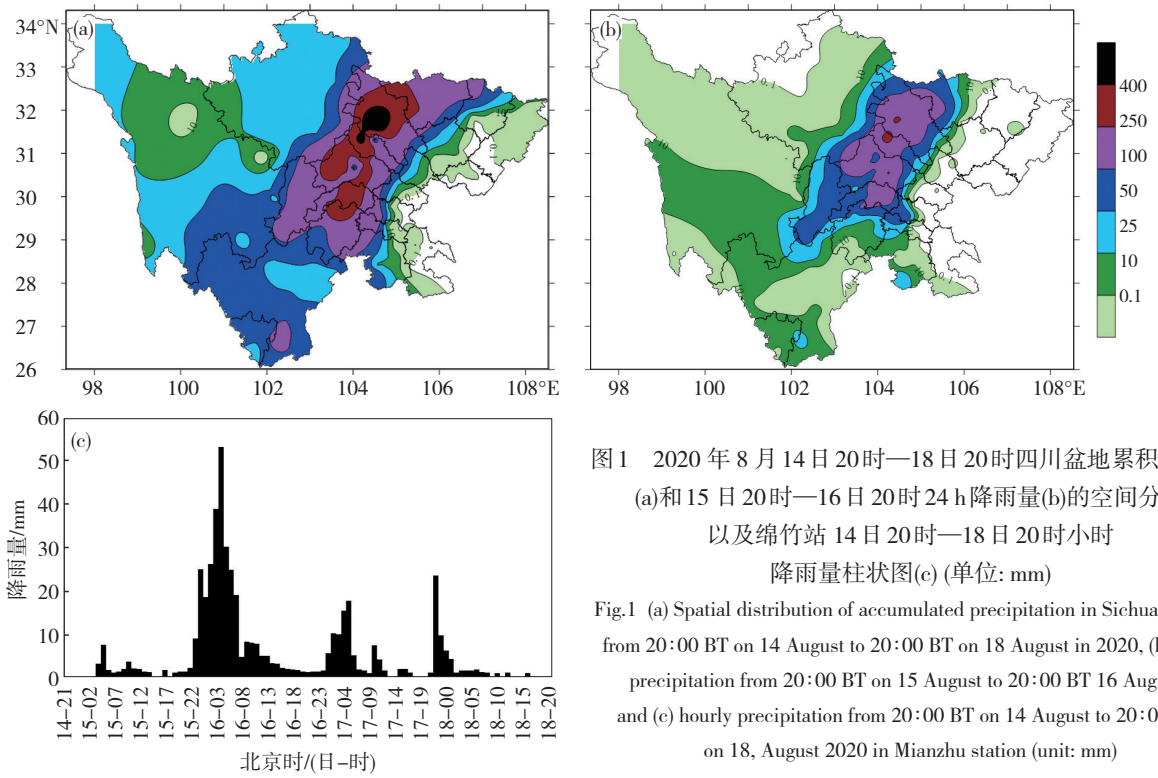


图1　2020年8月14日20时—18日20时四川盆地累积降雨量(a)和15日20时—16日20时24 h降雨量(b)的空间分布以及绵竹站14日20时—18日20时小时降雨量柱状图(c) (单位：mm)

Fig.1 (a) Spatial distribution of accumulated precipitation in Sichuan Basin from 20:00 BT on 14 August to 20:00 BT on 18 August in 2020, (b) 24 h precipitation from 20:00 BT on 15 August to 20:00 BT 16 August, and (c) hourly precipitation from 20:00 BT on 14 August to 20:00 BT on 18, August 2020 in Mianzhu station (unit: mm)

2.2 环流背景

由8月14—18日天气形势分析可知，500 hPa中高纬巴尔喀什湖附近长波槽维持，并不断分裂短波槽与高原波动结合东移，在此期间，西太平洋副热带高压(以下简称副高)稳定少动，其西伸脊点在105°—110°E之间来回摆动，受其阻挡作用，高原低槽东移缓慢，四川盆地西部一直处于副高外围气流影响之下，槽后冷平流与副高带来的暖湿气流在四川盆地西部交汇(图2a)。700 hPa上，川西高原东部到四川盆地西北部一带一直受切变线影响，且移动缓慢，同时伴随着偏南低空急流(图2b)。850 hPa四川盆地北部有明显的风向辐合，偏南气流在地形阻挡作用下，向四川盆地西部发生气旋式弯曲，15日23时—16日12时加强为中尺度低涡，导致四川盆地西部强降雨发生(图2c)。地面上，16日20时冷锋位于河套地区，南段一直延伸至四川盆地西北部，冷高压强度约为

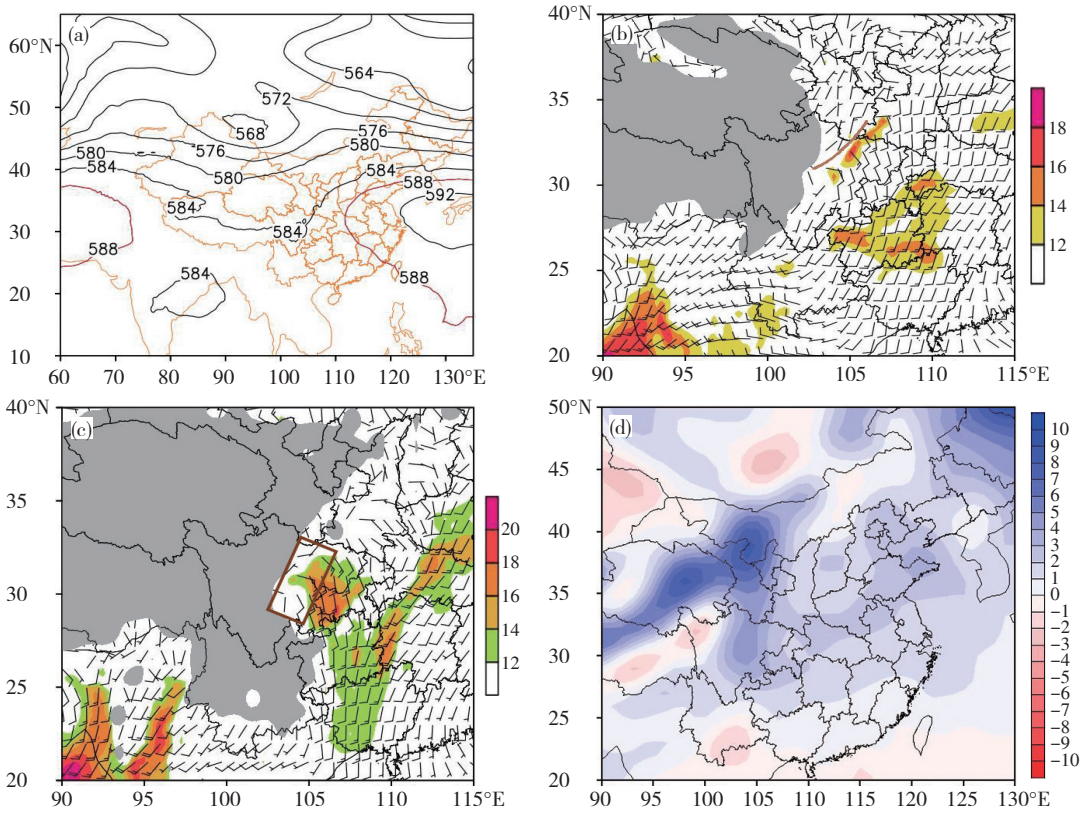


图2 2020年8月16日02时500 hPa高度场(a,单位: dagpm), 700 hPa (b)、850 hPa (c)风场(风羽)和低空急流(彩色阴影,单位:m·s^{-1};灰色阴影为地形,棕色实线为切变线,棕色矩形为风场辐合区)以及16日20时24 h变压场(d,单位: hPa)

Fig.2 (a) 500 hPa height field (unit: dagpm), (b) 700 hPa, and (c) 850 hPa wind field (barb) and low-level jet stream (colored shadow, unit: m·s^{-1}, the gray shadow is for terrain, the solid brown line isthe shear line, and the brown rectangle is convergence area of wind field) at 02:00 BT on 16 August, and (d) 24 h change pressure field (unit: hPa) at 20:00 BT on 16 August 2020

1 012.5 hPa左右,并伴有明显正变压(图2d)。17日20时(图略),弱冷空气在四川盆地西南部与暖湿空气交汇,触发了乐山等地短时强降水及大风等强对流天气。

综上,此次持续性极端暴雨过程是由于副高稳定少动,导致高原低槽东移受阻而稳定维持在四川盆地西部,中低层有切变线和急流维持,配合地面冷空气南下而触发。

3 中尺度对流云团特征

对流云团冷核的演变与地面雨强有很好对应关系。15日03时(图3a),四川盆地西部已有明显的对流云团出现,中心位于西部沿山一带,云顶温度低于-62 ℃,造成了未来1 h江油等地的短时强降水(小时雨强41.3 mm·h^{-1})。16日00时(图3b),位于川西高原北部的高空槽东移加深,700 hPa切变线较为深厚,850 hPa有中尺度低涡生成,四川盆地西部迅速发展出一个近圆形的对流云团,中心云顶温度低于-72 ℃,达到中尺度对流复合体(MCC)标准。16日01时(图3c),MCC低于-72 ℃的圆形范围不断扩大,造成了北川等4个站的短时强降水。16日02—03时(图3d、e),北侧的强对流云团逐渐接近并合并到MCC中,MCC形状由近圆形演变为椭圆形,绵竹出现了短时强降水(小时雨强53.1 mm·h^{-1})。16日05时(图略),MCC开始减弱消失。此后,随着低层中尺度低涡强度减弱,对流云团中心强度和范围略有减弱。17日23时(图3f),冷暖空气在四川盆地西南部交汇,川西高原和乐山一带又有明显的对流云团生成,中心云顶温度低于-62 ℃,乐山出现最大小时雨强63.8 mm·h^{-1}。18日02时(图略),两个对流云团再次合并,乐山1 h降雨量达32.7 mm。18日08时(图略),随着副高东退,对流云团减弱消失,降雨趋于结束。此次暴雨过程中,川西高原和四川盆地西部不断有对流云团生成、合并和加强,且四川盆地西部有MCC生成,是短时强降水的直接影响系统。

4 水汽和动力条件

4.1 水汽条件

充足的水汽输送和辐合是持续性极端暴雨形成的必要条件。从暴雨区整层大气可降水量及其水汽通量可知,15日02时(图略),可降水量高值带经云贵

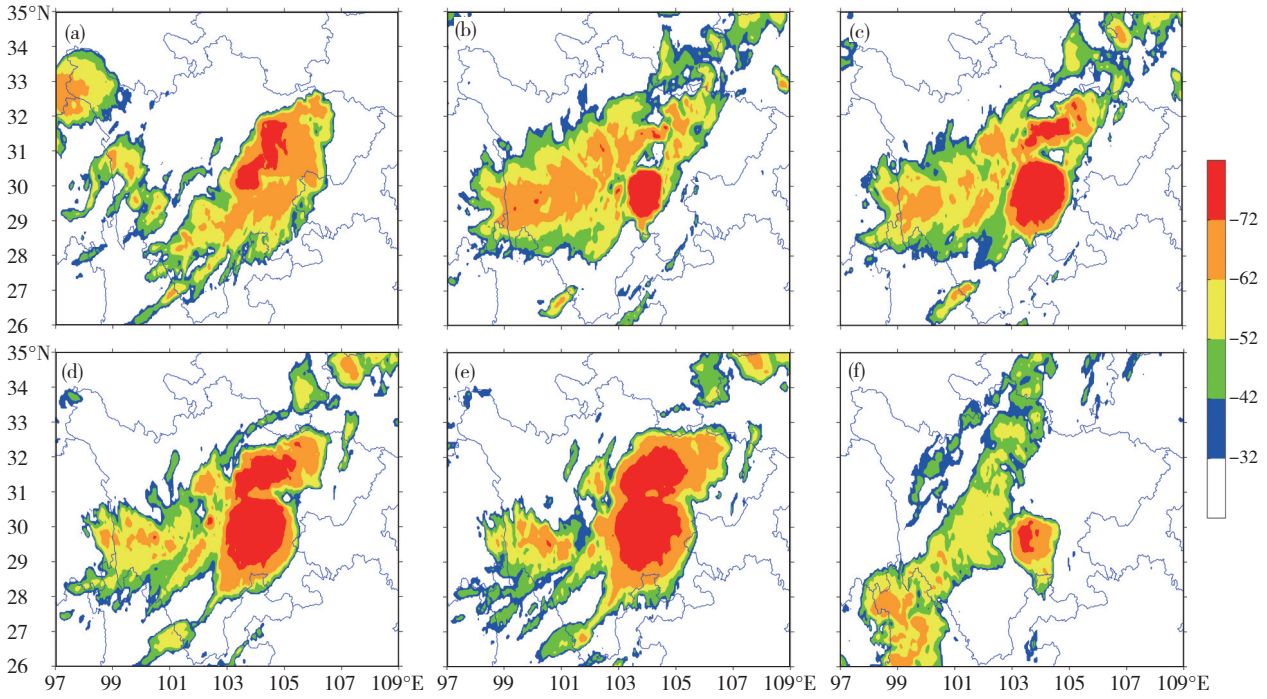


图3 2020年8月15日03时(a)、16日00时(b)、16日01时(c)、16日02时(d)、16日03时(e)、17日23时(f)四川盆地FY-4A卫星TBB(单位：℃)的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the TBB (unit: ℃) measured by FY-4A satellite in Sichuan Basin at (a) 03:00 BT on 15 August, (b) 00:00 BT on 16 August, (c) 01:00 BT on 16 August, (d) 02:00 BT on 16 August, (e) 03:00 BT on 16 August, (f) 23:00 BT on 17 August, 2020

高原到达四川盆地，孟加拉湾(以下简称孟湾)水汽通过西南气流不停向四川盆地输送，在西北部形成水汽通量辐合中心。16日02时(图4)，由于受风场气旋性曲率影响以及地形阻挡作用，四川盆地西部水汽辐合中心进一步增强。18日02时(图略)，可降水量高值区位于东南沿海一热带低压内，其外围偏东气流和孟湾水汽通道在云贵高原附近汇合后向四川盆地输送，在850 hPa切变线的辐合作用下，四川盆地西南部形成较强的辐合中心。上述分析表明，此次持续性极端暴雨水汽来源于孟湾和南海，同时在地形辐合抬升作用下，四川盆地西部形成强水汽辐合中心，为持续性极端暴雨的产生提供了充足的水汽条件。

进一步分析此次暴雨水汽的极端性，统计2010—2020年四川盆地西部区域性暴雨过程(四川省气象局，2014)，并选取其中15次(表1)，利用ERA5再分析资料计算暴雨中心整层大气可降水量、整层水汽通

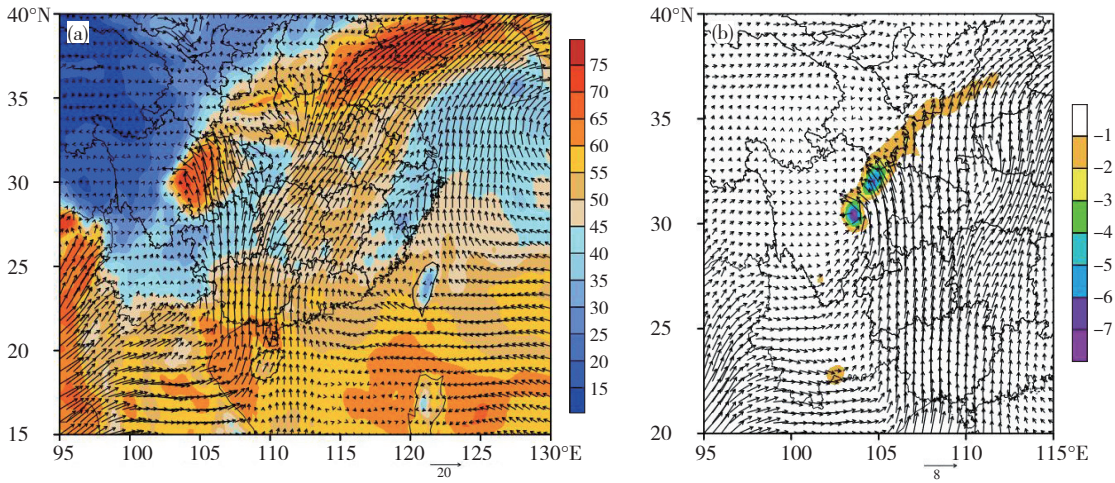


图4 2020年8月16日02时整层大气可降水量(填色，单位：mm)和850 hPa风场(矢量，单位：$m \cdot s^{-1}$) (a)、整层水汽通量(箭头，单位：10 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)和整层水汽通量散度(填色，单位：$10^{-4} kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) (b)

Fig.4 (a) Whole layer atmospheric precipitable water (shaded, unit: mm) and 850 hPa wind field (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$), (b) Whole layer water vapor flux (arrow, unit: 10 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$) and the whole layer moisture flux divergence (shaded, unit: $10^{-4} kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) at 02:00 BT on 16 August, 2020

表1 2010—2020年四川盆地西部15次区域性暴雨过程发生时间、暴雨站数、暴雨中心及24 h最大降雨量

Table 1 Occurrence time, rainstorm stations, rainstorm centers, and 24-hour maximum rainfall during regional rainstorm cases in the western basin from 2010 to 2020

发生时间/(年-月-日)	暴雨站数	暴雨中心	24 h最大降雨量/mm
2010-07-24	45	剑阁	173.8
2010-08-18	27	绵竹	294.8
2011-07-28	34	旺苍	239.5
2012-07-20	15	剑阁	148.4
2013-07-09	26	都江堰	415.9
2014-07-08	14	双流	225.2
2014-07-30	33	新津	174
2016-07-21	17	江油	168.7
2018-06-26	11	彭山	193.4
2018-07-01	35	梓潼	218.4
2018-07-10	28	广汉	321.9
2018-07-14	20	江油	217.6
2019-07-28	20	剑阁	150.6
2019-09-12	32	德阳	176.1
2020-08-15	48	绵竹	302.6

量和水汽通量散度。由暴雨过程中各水汽物理量极大值的箱线图(图5)可知,暴雨中心整层可降水量极大值分布区间为54.0～76.0 mm,平均值为63.6 mm,75%分位数为67.0 mm。整层水汽通量分布区间为(2.8～7.5)×10 kg·m^{-1}·s^{-1},平均值为5×10 kg·m^{-1}·s^{-1},75%分位数为6×10 kg·m^{-1}·s^{-1}。整层水汽通量散度分布区间为(−5.2～−1.0)×10^{-4} kg·m^{-2}·s^{-1},平均值为−2.5×10^{-4} kg·m^{-2}·s^{-1},75%分位数为−1.2×10^{-4} kg·m^{-2}·s^{-1}。此次暴雨过程整层大气可降水量、整层水汽通量和水汽通量散度的极大值分别为68.0 mm、6.0×10 kg·m^{-1}·s^{-1}、−4.5×10^{-4} kg·m^{-2}·s^{-1},仅次于2018年7月10日暴雨,超过了其余13次历史暴雨过程,呈现极端性特点,为此次持续性极端暴雨的产生提供了重要条件。

4.2 动力条件

强大的动力抬升作用是暴雨发生发展的重要条件。沿104.2°E经暴雨中心作涡度、散度、垂直速度的经向垂直剖面图(图6)可知,15日02时(图6a、b),降雨初期暴雨区内(31°—33°N) 400 hPa以下为正涡度,以上为负涡度,正涡度中心位于750 hPa的31°N处,达25×10^{-5} s^{-1};暴雨区上空700 hPa有−20×10^{-5} s^{-1}的气流辐合中心,300 hPa有20×10^{-5} s^{-1}的气流辐散中心,呈现出

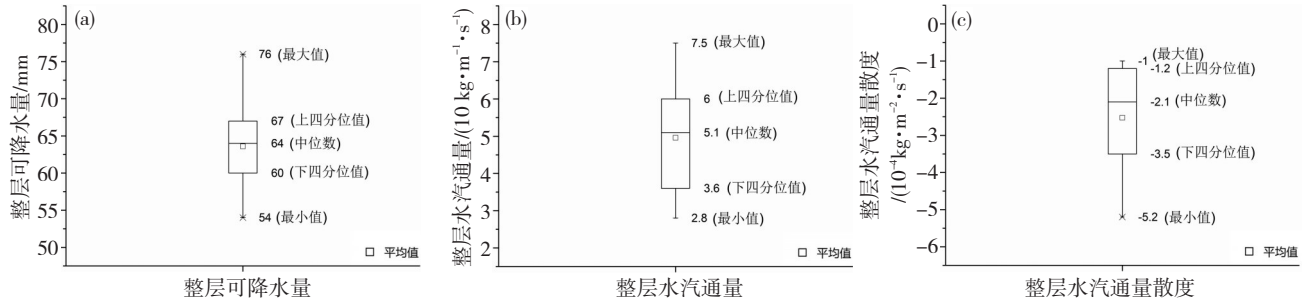


图5 2010—2020年四川盆地西部15次暴雨过程中暴雨中心整层可降水量(a)、整层水汽通量(b)和整层水汽通量散度(c)箱线图

Fig.5 Boxplots of (a) whole layer precipitable water, (b) whole layer vapor flux, and (c) whole layer vapor flux divergence for the rainstorm center during 15 rainstorm events in western Sichuan Basin from 2010 to 2020

低层辐合、高层辐散的散度场分布,这种抽吸作用有利于上升运动增强,使短波槽槽前强上升运动叠加地形抬升作用,在暴雨区上空500 hPa处形成了−5 Pa·s^{-1}的强上升运动中心,进而导致暴雨的发生。16日02时(图6c、d),随着降雨的持续增强,暴雨区内正涡度向南倾斜,且伸展到了200 hPa,正涡度中心上升至450 hPa,与强辐合中心基本重合,此时上升运动也发生倾斜,上升高度达到200 hPa,上升速度增大。18日02时(图略),暴雨区南移至(29°—31°N),其上空为40×10^{-5} s^{-1}的正涡度中心,散度场一直维持低层辐合、高层辐散的状态,使暴雨区内维持强烈的上升运动。综上,降雨期间,暴雨区上空始终有气流抽吸与正涡度发展,有利于垂直上升运动加强,为此次持续性极端暴雨提供有利的动力条件。

由广义位温和广义湿位涡的垂直分布可知,15日02时(图7a),降雨区上空为θ^*密集区,等θ^*线从300 hPa延伸至近地面,表明有凝结潜热释放,对应600 hPa以下0.2 PVU的广义湿位涡异常高值区(图7d)。16日02时(图7b),降雨区上空等θ^*线呈漏斗状,垂直梯度增强,广义湿位涡在850 hPa形成了0.7 PVU的中心值(图7e)。18日02时(图7c),降雨区上空850 hPa有350 K的θ^*中心,广义湿位涡异常值继续维持在800 hPa以下(图7f),这与实际大气集中在低层一致,一定程度上反映出水汽分布特征。从各时刻850 hPa广义湿位涡与1 h降雨量可知(图略),广义湿位涡异常区对应降雨落区,可为降雨预报可以提供一定的参考。

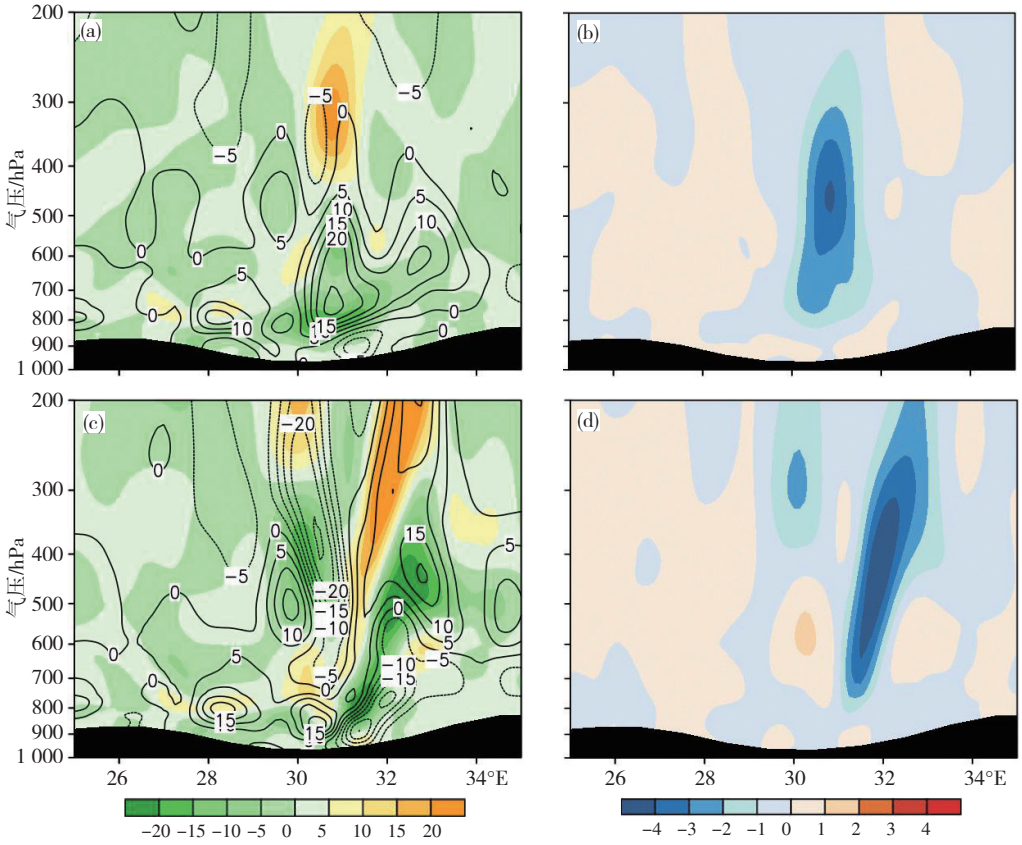


图6　2020年8月15日02时(a, b)、16日02时(c, d)沿104.2°E经暴雨中心的涡度(等值线,单位: $10^{-5}s^{-1}$)和散度(彩色阴影,单位: $10^{-5}s^{-1}$)(a, c)以及垂直速度(阴影,单位: $Pa\cdot s^{-1}$)(b, d)的经向垂直剖面(黑色阴影为地形,下同)

Fig.6　Meridional cross-section of (a, c) vorticity (contour line, unit: $10^{-5}s^{-1}$), divergence (color shadow, unit: $10^{-5}s^{-1}$), and (b, d) vertical velocity (shadow, unit: $Pa\cdot s^{-1}$) across the rainstorm center along 104.2°E at (a, b) 02:00 BT on 15 August, (c, d) 02:00 BT on 16 August, 2020 (Black shadow is the terrain, same hereafter)

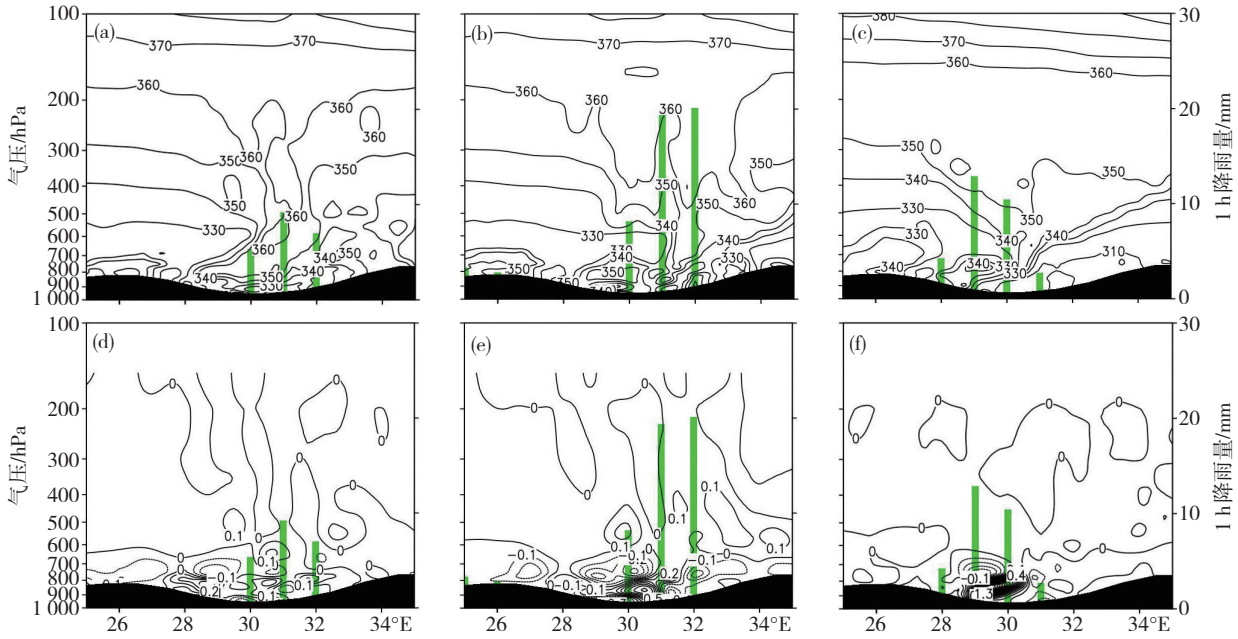


图7　2020年8月15日02时(a, d)、16日02时(b, e)、18日02时(c, f)沿104.2°E经暴雨中心的广义位温(等值线,单位:K)与1 h降雨量(柱状,单位: mm) (a, b, c)以及广义湿位涡(等值线,单位: PVU)与1 h降雨量(柱状,单位: mm) (d, e, f) 的经向垂直剖面

Fig.7 Meridional cross sections of (a, b, c) generalized potential temperature (isoline, unit: K) and 1 h rainfall (column, unit: mm), (d, e, f) generalized wet potential vortex (isoline, unit: PVU) and 1h rainfall (column, unit: mm) through rainstorm center along 104.2°E at (a, d) 02:00 BT on 15 August, (b, e) 02:00 BT on 16 August, and (c, f) 02:00 BT on 18 August, 2020

5 能量和不稳定条件

5.1 能量条件

假相当位温是综合表征大气温湿特征的物理量，能反映大气温湿能量的分布，其与对流的发生发展有很大的关系。从沿104.2°E经暴雨中心所作的假相当位温垂直剖面图可知(图略)，强降雨初期(15日02时)，暴雨区上空为360 K的假相当位温大值区，其高度伸展到300 hPa，比湿大值区(>10.0 $g\cdot kg^{-1}$)伸展到500 hPa，说明其处于高能高湿的环境中。16日02时，随着强降雨的持续，假相当位温发生倾斜，暴雨区位于假相当位温密集的能量锋区中，锋区的动力强迫有利于能量和水汽的向上输送，使暴雨区持续维持高能高湿的环境，为暴雨的产生提供有利的能量条件。18日02时，四川盆地西部上空假相当位温数值减小，比湿也减小，能量得到快速释放，不稳定层结逐步降低。

5.2 不稳定条件

利用位势散度研究大气位势(对流)稳定度发展的变化。15日02时(图8a)，降雨初期强降雨区内(30°—32°N) 500 hPa以下为正位势散度，两个中心值分别位于(31°N) 800 hPa处和600 hPa处，达到20×10^{-6} $K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$，与平均小时雨量(10 mm)中心对应，说明降雨开始消耗低层不稳定能量，在500 hPa以上为较强的负位势散度，说明强降雨区上空还有较强的未被抑制的对流不稳定发展，同时南侧弱降雨区上空750 hPa也有负位势散度发展，因此其低层也存在较强的对流不稳定。16日02时(图8d)，强降雨持续，范围向南扩展增强，强降雨区的正位势散度向上伸展到300 hPa，两个正位势散度中心位于850 hPa (31°N)和500 hPa (32°N)，中心值增大到了$30\times10^{-6}K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$，31°N处平均小时雨量也增大到20 mm，强降雨进一步消耗对流不稳定能量，降雨明显发展，此时降雨区上空还有明显的负位势散度，对流不稳定也继续发展。18日02时(图略)，强降雨区南移至四川盆地西南部，降雨区上空800 hPa以下正位势散度中心值维持在$30\times10^{-6}K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$，800 hPa以上负位势散度中心值达到$-30\times10^{-6}K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$，29°N处平均小时雨量达到15 mm以上，强烈对流不稳定能量的释放可能是导致该时刻强降雨的原因。对比图(8b—f)可知，降雨区上空的位势散度负值区主要是由其散度分量决定，高层气流辐散($\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}>0$)，位势不稳定($\frac{\partial \theta_e}{\partial p}>0$)，$m_{bt}<0$，造成位势散度的负值区($m_p<0$)。在低层，位势散度正值区是由散度分量和垂直风切变

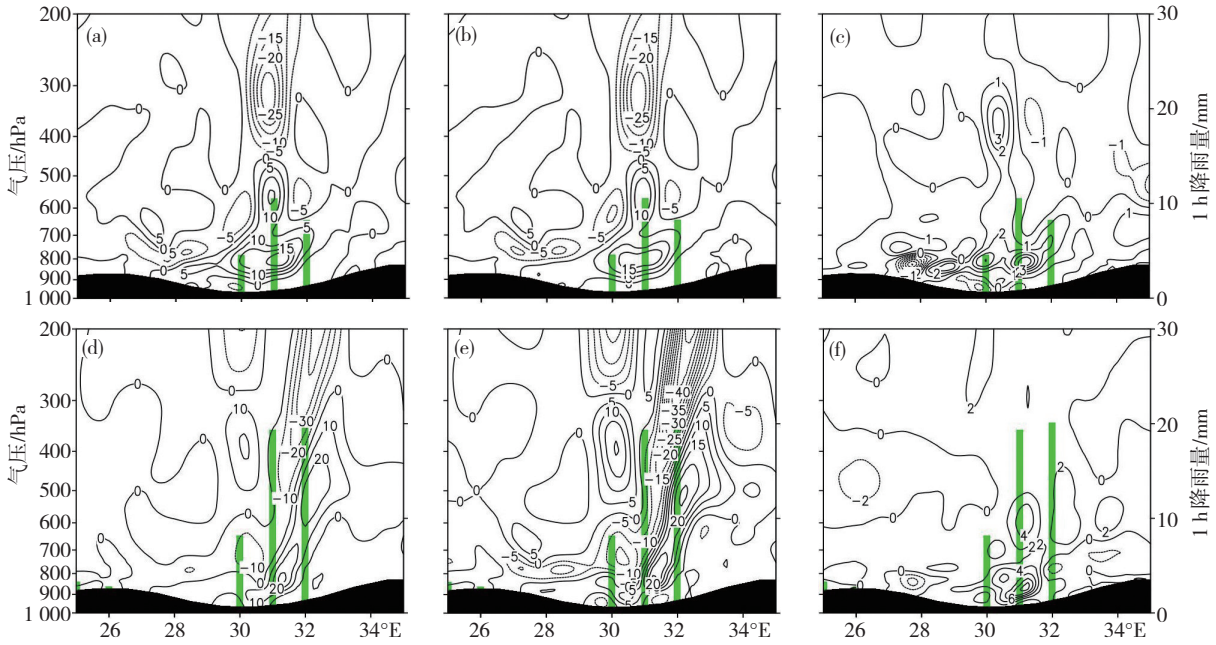


图8 2020年8月15日02时(a, b, c)、16日02时(d, e, f)沿104.2°E经暴雨中心的位势散度(m_p) (等值线,单位: $10^{-6}K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)与1 h降雨量(柱状,单位: mm) (a, d)、散度分量(m_{bt}) (等值线,单位: $10^{-6}K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)与1 h降雨量(柱状,单位: mm) (b, e)、垂直风切变分量(m_{bc}) (等值线,单位: $10^{-6}K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)与1 h降雨量(柱状,单位: mm) (c, f)的经向垂直剖面

Fig.8 Meridional cross-sections of (a, d) potential divergence (m_p) (isoline, unit: $10^{-6}K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$) and 1 h rainfall (column, unit: mm), (b, e) divergence component (m_{bt}) (isoline, unit: $10^{-6}K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$) and 1 h rainfall (column, unit: mm), (c, f) vertical wind shear component (m_{bc}) (contour line, unit: $10^{-6}K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$) and 1 h rainfall (column, unit: mm) along 104.2°E through the rainstorm center at (a, b, c) 02:00 BT on 15 August and (d, e, f) 02:00 BT on 16 August, 2020

分量共同决定,由于地形作用使得气流在四川盆地西部辐合,因此 $\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}<0$,同时降雨区内对流不稳定($\frac{\partial \theta_e}{\partial p}>0$),使得 $m_{bt}>0$,而 $m_{bc}>0$ 是由水平风的垂直切变(垂直风切变)和大气的斜压性共同造成。综上,暴雨区位势散度负值区主要由散度作用造成,代表水平散度和位势稳定度的耦合作用,位势散度正值区是由散度分量和垂直风切变分量共同决定。周围等(2018)研究表明位势散度对降雨落区有一定指示意义。从降雨过程中各时刻850 hPa位势散度与1 h降雨量可知(图略),位势散度高值区与降雨落区都有较好的对应关系,大值区基本覆盖强降雨区。

图9展示此次四川盆地西部持续性极端暴雨的概念模型,副高位于110°E附近,且稳定少动,导致高原低槽东移受阻而稳定维持在四川盆地西部,中低层中尺度低涡、切变线、急流在四川盆地西部生成和发展,在地形作用下抬升加强,形成气旋性辐合,使对流层低层气流辐合高层辐散,配合地面冷空气影响,当大气可降水量、假相当位温等水汽、动热力条件积累到一定程度时,导致持续性极端暴雨发生。

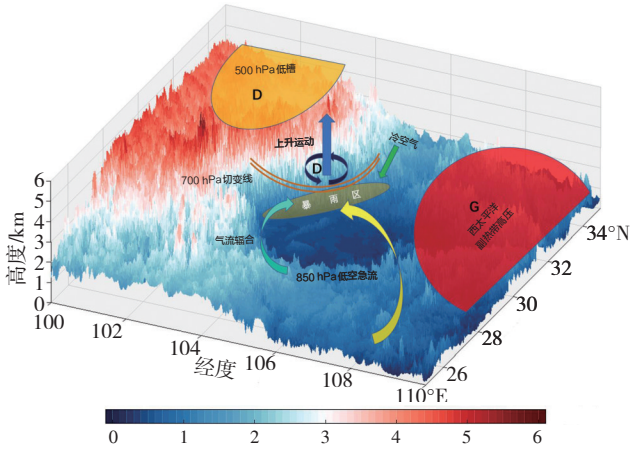


图9 2020年8月14—18日四川盆地西部持续性极端暴雨的概念模型(填色表示地形高度)

Fig.9 Conceptual model of the sustained extreme rainstorm in western Sichuan Basin from August 14 to 18, 2020 (Color shadow is the terrain)

6 结论与讨论

本文利用多源资料对2020年8月14—18日四川盆地西部的一次持续性极端暴雨过程进行综合分析,得到以下主要结论:

(1) 此次持续性极端暴雨过程是由于西太平洋副热带高压稳定少动,导致高原低槽东移受阻而稳定维持在四川盆地西部,中低层有切变线和急流维持,配合地面冷空气南下而触发。川西高原和四川盆地西部不断有对流云团生成、合并、加强,并且强中心维持在四川盆地西部,是此次暴雨过程中短时强降水的直接影响系统。

(2) 此次持续性极端暴雨水汽来源于孟加拉湾和西太平洋,在地形辐合抬升作用下,四川盆地西部形成强水汽辐合中心,为持续性极端暴雨提供了充足水汽条件,降雨过程中各类水汽物理量为近年四川盆地西部区域性暴雨第二强。

(3) 降雨期间,暴雨区上空始终有气流辐合与正涡度发展,有利于垂直上升运动加强;暴雨区位于假相当位温密集的能量锋区,锋区的动力强迫有利于能量和水汽向上输送,使暴雨区持续维持高能、高湿环境,出现广义湿位涡异常,为暴雨的产生提供有利的能量条件。

(4) 位势散度分析表明降雨初始发生在对流不稳定区,随着强降雨的发展,降雨区内对流不稳定能量释放,该区域趋于对流稳定。降雨区内的位势不稳定主要由其散度分量造成。位势散度高值区与降雨落区有较好对应,对降雨落区预报有指示意义。

极端暴雨的天气背景是多样化的,本文仅是持续性极端暴雨的个例研究,未来需要对多个持续性极端暴雨历史个例进行天气动力学分析以建立这类暴雨的天气学概念模型。

参考文献(References):

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

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

付智龙,李国平,姜凤友,等.2022.四川盆地西部一次暖区山地暴雨事件的动力过程分析与局地环流数值模拟[J].大气科学,46(6):1366-1380. Fu Z L, Li G P, Jiang F Y, et al. 2022. Dynamic analysis and local circulation numerical simulation of a warm-sector mountain rainstorm event in the western Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(6):1366-1380 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21054

黄昕,周玉淑,冉令坤,等. 2021.一次新疆伊犁河谷特大暴雨过程的环境场及不稳定条件分析[J].大气科学,45(1):148-164. Huang X, Zhou Y S, Ran L K, et al. 2021. Analysis of the environmental field and unstable conditions on a rainstorm event in the Ili Valley of Xinjiang [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(1):148-164 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19219

李琴,杨帅,崔晓鹏,等.2013. 四川暴雨过程动力因子指示意义与预报

意义研究[J].大气科学,40(2):341-356. Li Q, Yang S, Cui X P, et al. 2016. Diagnosis and forecasting of dynamical parameters for a heavy rainfall event in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,40(2):341-356 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.14296

李晓容,高青云,付世军.2020.四川盆地东北部三次持续性暴雨过程水汽输送特征分析[J].暴雨灾害,39(3):234-240. Li X R, Gao Q Y, Fu S J. 2020. Analysis of water vapor transport characteristics of the three persistent rainstorm processes in northeastern Sichuan basin [J]. Torrential Rain and Disasters,39(3):234-240 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.003

冉令坤,李舒文,周玉淑,等.2021. 2021年河南"7.20"极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析[J].大气科学,45(6):1366-1383. Ran L K, Li S W, Zhou Y S, et al. 2021. Observational analysis of the dynamic, thermal, and water vapor characteristics of the "7.20" extreme rainstorm event in Henan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(6):1366-1383 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21160

四川省气象局.2014.四川天气预报手册 [M].四川:西南交通大学出版社:66-68. Sichuan Meteorological Bureau. 2014. Sichuan Weather Forecast Manual [M]. Sichuan:Southwest Jiaotong University Press:66-68 (in Chinese)

宋雯雯,李国平,龙柯吉,等.2018. 两类动力因子对四川盆地一次低涡暴雨的应用研究[J].高原气象,37(5):1289-1303. Song W W, Li G P, Long K J, et al. 2018. Application research of two types of dynamical factors in a vortex rainstorm in Sichuan Basin [J]. Plateau Meteorology,37(5):1289-1303 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00015

汤欢,傅慎明,孙建华,等.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 H, Fu S M, Sun J H, et al. 2020. Investigation of severe precipitation event caused by an eastward-propagating MCS originating from the Tibetan Plateau and a downstream southwest vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,44(6):1275-1290 (in Chinese). 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:1-71. Tao S Y.1980. Heavy Rainfall in China [M]. Beijing:Science Press:1-71 (in Chinese)

王佳津,肖递祥,王春学.2017.四川盆地极端暴雨水汽输送特征分析[J].自然资源学报,32(10):1768-1783. Wang J J, Xiao D X, Wang C X. 2017. The water vapor transportation characteristics of the extreme severe rain events in Sichuan Basin [J]. Journal of Natural Resources,32(10):1768-1783 (in Chinese). doi:10.11849/zrzyxb.20160916

肖递祥,杨康权,俞小鼎,等.2017.四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J].气象,43(10):1165-1175. Xiao D X, Yang K Q, Yu X D, et al. 2017.Characteristics analysis of extreme rainstorm events in Sichuan Basin [J]. Meteorological Monthly,43(10):1165-1175 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.001

杨康权,肖递祥,罗辉,等.2019.四川盆地西部两次暖区暴雨过程分析[J].气象科技,47(5):795-808. Yang K Q, Xiao D X, Luo H, et al. 2019. Analysis of two warm-sector heavy rain processes in Western Sichuan Basin [J]. Meteorological science and technology,47(5):795-808 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20180405

杨舒楠,张芳华,徐珺,等.2016. 四川盆地一次暴雨过程的中尺度对流及其环境场特征[J]. 高原气象,35(6):1476-1486. Yang S N, Zhang F H, Xu J, et al. 2016. Mesoscale convective systems and characteristics of environment field of a heavy rainfall process occurred in Sichuan Basin [J]. Plateau Meteorology,35(6):1476-1486 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00105

殷菲,王磊,王有恒.2022.四川盆地一次暴雨过程的数值模拟及螺旋度分析[J].沙漠与绿洲气象,16(5):78-86. Yin F,Wang L, Wang Y H. Numerical simulation and helicity analysis of a heavy rain process in the Sichuan Basin [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(5):78-86 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.05.011

张芳丽,李国平,罗潇.2020. 四川盆地东北部一次突发性暴雨事件的影响系统分析[J]. 高原气象,39(2):321-332. Zhang F L, Li G P, Luo X. 2020. Some Influence factors of a sudden rainstorm event in Northeast Sichuan Basin of China [J]. Plateau Meteorology,39(2):321-332 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00080

张景,周玉淑,沈新勇,等.2019. 2016年"7.19"京津冀极端降水系统的动热力结构及不稳定条件分析[J].大气科学,43(4):930-942. Zhang J, Zhou Y S, Shen X Y, et al. 2019. Evolution of dynamic and thermal structure and instability condition analysis of the extreme orecipitation system in Beijing-Tianjin-Hebei on July 19 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(4):930-942 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18231

周围,包云轩,冉令坤,等.2018.一次飑线过程对流稳定度演变的诊断分析[J].大气科学, 42(2):339-356. Zhou W, Bao Y X, Ran L K, et al. 2018. Diagnostic analysis of convective stability evolution during a squall line process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,42(2):339-356 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17126

Gao S T, Wang X R, Zhou Y S. 2004. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. Geophysical Research Letters,31(12):L12113. doi:10.1029/2003GL019152

Zhang G S, Mao J Y, Liu Y M, et al. 2021. PV perspective of impacts on downstream extreme rainfall event of a Tibetan Plateau vortex collaborating with a Southwest China Vortex [J]. Advances in Atmospheric Sciences,38(11):1835-1851. doi:10.1007/S00376-021-1027-9

(责任编辑 唐永兰)