

周春花,肖递祥,郁淑华,2022. 诱发四川盆地极端暴雨的西南涡环流背景和结构特征[J]. 气象,48(12):1577-1589. Zhou C H, Xiao D X, Yu S H, 2022. Circulation background and structural characteristics of the southwest vortex inducing extreme rainstorm in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 48(12):1577-1589(in Chinese).

诱发四川盆地极端暴雨的西南 涡环流背景和结构特征^{*}

周春花¹ 肖递祥^{2,4} 郁淑华^{3,4}

1 四川省气象灾害防御技术中心,成都 610072

2 四川省气象台,成都 610072

3 中国气象局成都高原气象研究所,成都 610072

4 高原与盆地气象灾害四川省重点实验室,成都 610072

提 要: 利用降雨实况和 EAR5 再分析资料,统计 1981—2020 年四川盆地出现的 19 次西南涡诱发极端暴雨个例,对其发生的环流背景和西南涡结构特征进行动态合成分析,结果表明:西南涡诱发极端暴雨过程中,西南涡生命史为 48~132 h,极端暴雨一般是在西南涡生成后 18 h 内开始。形成西南涡的环流背景可分为东高西低型和西风波动型两类;东高西低型南亚高压和西太平洋副热带高压(简称副高)均较强,500 hPa 贝加尔湖低槽南端与高原低槽叠加形成深厚低槽,四川盆地位于槽前和副高西侧;西风波动型副高位于 140°E 以东,南亚高压较东高西低型更偏西偏南,四川盆地受青藏高原低槽东移影响;两种类型均存在一支孟加拉湾—南海—四川盆地的水汽输送通道,其中东高西低型水汽输送更强。东高西低型背景下西南涡强度更强、范围更大,在垂直方向上具有深厚暖心结构,风场不对称分布深厚;西风波动型背景下西南涡具有“上冷-中暖-下较冷”的温度异常分布,风场不对称性仅维持在低层;两种类型共同特征是低层显著高能高湿,正涡度柱内为“低层辐合-高层辐散”动力结构。

关键词: 西南涡,极端暴雨,动态合成,东高西低型,西风波动型,结构特征

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.081101

Circulation Background and Structural Characteristics of the Southwest Vortex Inducing Extreme Rainstorm in Sichuan Basin

ZHOU Chunhua¹ XIAO Dixiang^{2,4} YU Shuhua^{3,4}

1 Sichuan Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Chengdu 610072

2 Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072

3 Chengdu Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072

4 Heavy Rain and Drought-Flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

Abstract: Based on rainfall observation and EAR5 reanalysis data, 19 cases of extreme rainstorms induced by southwest vortex and seen in Sichuan Basin from 1981 to 2020 are statistically analyzed, and the dynamic synthesis analysis on the circulation background and the structural characteristics of the southwest vortex are carried out. The results show that the life time of the southwest vortex lasts for 48—132 h, and the extreme rainstorm generally breaks out within 18 hours after the southwest vortex is formed. The circulation

^{*} 国家自然科学基金重点项目(91937301)、四川省科技计划重点研发项目(2022YFS0542)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z033)、成都市气象局影响预报创新团队建设和高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室发展基金项目(SCQXKJZD2020006)共同资助

2021 年 11 月 18 日收稿; 2022 年 9 月 7 日收修定稿

第一作者:周春花,主要从事灾害评估和天气预报工作. E-mail:304799187@qq.com

通讯作者:肖递祥,主要从事天气预报及相关技术研究. E-mail:5955532@qq.com

background of southwest vortex can be divided into two types; the east high west low type and the low trough type. The South Asian high and the subtropical high are strong in the east high west low type. The southern end of the 500 hPa Lake Baikal low trough is superimposed with the plateau low trough to form a deep low trough. Sichuan Basin is located in front of the trough and on the west side of the subtropical high. The low trough type is located in the east of 140°E of the subtropical high, and the South Asian high is more westward and southward than the east high west low type. Sichuan Basin is affected by the eastward shift of the low trough of the Qinghai-Tibetan Plateau. The both types have the water vapor transport channel from the Bay of Bengal to South China Sea to Sichuan Basin, and the water vapor transport of the east high west low type is much stronger. Under the background of east high west low type, the southwest vortex is stronger in intensity and larger in scope, having a deep warm core structure in the vertical direction, and a deep asymmetric distribution of the wind field. Under the background of the low trough type, the southwest vortex has a temperature anomalous distribution of “cold in the upper part-warm in the middle-cooler in the lower part”, and the asymmetry of the wind field is only maintained at the lower level. The common features of the two types are the high energy and high humidity in the lower layer, and the positive vorticity column has a “convergence in the lower layer and divergence in the upper layer” dynamic structure.

Key words: southwest vortex, extreme rainstorm, dynamic synthetic, the east high west low type, the low trough type, structure characteristic

引 言

四川盆地位于青藏高原东侧,是我国暴雨多发区之一,由于特殊的地理位置和复杂的地形条件,暴雨常引发山洪和泥石流等自然灾害,尤其是极端暴雨引发的灾害更为严重,对当地生产生活甚至生命财产造成了严重的威胁(谭小平,2013;陈红专,2021)。西南涡是四川盆地极端暴雨过程中的重要天气系统之一(肖递祥等,2017;肖红茹等,2021)、“81·7”特大暴雨(程麟生和郭英华,1988)、2004年9月4—6日川东北持续大暴雨(于波和林永辉,2008)、2013年“6·30”(孙俊等,2014)川渝特大暴雨、2013年7月8—9日四川盆地西部特大暴雨(孙建华等,2015)等过程中,西南涡都引发了超历史纪录的极端暴雨。

西南涡是在特殊的地理环境与区域环流背景下,生成于青藏高原东侧的川西高原和四川盆地700 hPa或850 hPa等压面的气旋式低压系统(卢敬华,1986;徐裕华,1991)。西南涡大多在原地活动,少数可以移出涡源,在四川盆地和长江中下游地区引发大范围的暴雨和强对流天气(李跃清和徐祥德,2016;高守亭和周玉淑,2019;刘金卿和李子良,2020;何光碧,2012;李国平,2021;李超等,2018)。

关于西南涡引发暴雨的结构特征,广大气象工作者已进行了大量的个例研究,韦统健和薛建军(1996)认为西南涡是一个很强的斜压系统,存在显著的南北向温度梯度。陈忠明等(1998)研究表明,成熟的西南涡是一个深厚的系统,正涡度可伸展至100 hPa以上,同时也是一个准圆形而非对称的中尺度系统。康岚等(2011)分析了4次暴雨过程的西南涡特征,认为在西南涡形成阶段,整层均为正涡度,一般维持深厚的上升气流,具有较为深厚的暖心结构。在其发展旺盛阶段,正涡度呈上升趋势,对流层中低层转为冷心结构,中高层则以暖心结构为主。江玉华等(2012)对6次西南涡进行合成分析,指出西南涡热力结构特征表现为200 hPa明显增暖,对流层中低层则由暖转冷;动力结构具有槽前正涡度加强,伸展高度达到300 hPa以上,且正涡度中心随高度向西倾斜等特征。陈贵川等(2018)研究了一次冷性停滞型西南涡结构演变特征,认为西南涡成熟阶段,高低层正涡度柱几乎垂直耦合,水平流场上表现为近圆形。

以上研究加深了对引发暴雨的西南涡动力、热力结构和演变特征的认识,但以往的研究大多针对单个个例,或者合成分析的个例次数较少、所使用的资料分辨率较低,且没有专门针对极端暴雨进行合成分析。为加强对西南涡诱发极端暴雨天气的研

究,本文选取 1981—2020 年四川盆地出现的 19 次西南涡诱发的极端暴雨个例,使用高精度的 ERA5 再分析资料对其发生的环流背景和西南涡三维环流、动力、热力结构特征进行动态合成分析,以期对西南涡诱发极端暴雨的基本特征得到一些新的认识。

1 资料和方法

1.1 资 料

高空分析资料利用欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析资料(ERA5),垂直方向 27 层,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间间隔为 1 h。地面降雨资料利用 1981—2020 年四川盆地 103 个国家站逐日和逐小时实况观测降雨量。文章中所涉及地图已由四川省测绘地理信息局审核,审核号为川 S(2021)00009 号。

1.2 方 法

极端暴雨个例统计标准:日降雨(20—20 时或 08—08 时)有一站 ≥ 250 mm,即为一个极端暴雨个例,当 20—20 时和 08—08 时同时出现,以最大降雨时段统计为一个个例。

西南涡标准参照李跃清等(2015)西南涡年鉴统计标准:700 hPa 等压面,在青藏高原背风坡($26^{\circ} \sim 33^{\circ}\text{N}$ 、 $99^{\circ} \sim 109^{\circ}\text{E}$)出现风向呈气旋式环流的完整低涡即为西南涡。

西南涡诱发极端暴雨个例统计标准:西南涡同时或先于极端暴雨出现,且在极端暴雨出现时段内,6 h 间隔的再分析资料有连续 2 个以上的时次出现西南涡,并至少有一个以上 ≥ 250 mm 降雨站点距离西南涡中心 200 km 范围内。

西南涡发生天气背景分型:通过普查西南涡诱发极端暴雨发生的 500 hPa 环流背景,可分为东高西低型和西风波动型。东高西低型是指我国东部地区为西太平洋副热带高压(以下简称副高)控制,我国西部地区为低值系统,四川盆地受青藏高原低槽和西北槽东移的共同影响;西风波动型是指副高位置较为偏东,我国中纬度地区为西风带波动气流控制,四川盆地受青藏高原低槽东移影响。

文中大尺度环流形势合成采用算数平均方法,其结构特征采用动态合成方法进行分析,具体方法

(曾波等,2017)如下:

$$\bar{S}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i(x, y) \quad (1)$$

式中: $\bar{S}(x, y)$ 为样本平均场, $S_i(x, y)$ 为第 i 个个例的物理量场, N 为样本总数。具体做法:以每个西南涡几何中心(700 hPa)作为中心坐标,采用经纬距范围内 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 的格点直角坐标进行物理量场算数平均的动态合成。环流形势和结构特征的合成分析,均选取每次个例暴雨中心站点小时降雨量最大的时次作为代表时次进行平均。

2 结果分析

1981—2020 年共出现 53 次极端暴雨,其中 28 次有西南涡直接影响。有 4 次是极端暴雨先于西南涡出现,不符合西南涡诱发极端暴雨个例要求。3 次为连续两天出现的,为避免重复分析,仅选取降雨极值最大的一天作为代表。另有 2 次为高原涡与西南涡耦合共同影响的个例,这类过程本文暂不做讨论。因此本文实际选取了 19 次由西南涡诱发的极端暴雨个例进行分析。

在 19 次西南涡诱发极端暴雨过程中(表 1),极端暴雨多发生在 20—20 时时段内,共 14 次,仅有 5 次发生在 08—08 时时段内。从降雨量本站历史排位来看,27 站次日雨量超过 250 mm 的降雨中有 20 站次在本站历史排位为第一,其余 7 站次列第二至第四位,足以说明西南涡是诱发四川盆地极端暴雨的主要影响系统。

陶诗言等(2000)认为西南涡的活动与副高西北侧和中纬度西风槽前的西南气流密切相关。通过普查上述西南涡诱发极端暴雨发生的环流背景,发现 500 hPa 主要有两种形势:一种是我国东部地区为副高控制,西部地区为低值系统影响(以下简称“东高西低”型),与肖递祥等(2017)分析的极端暴雨主要环流背景类似;另一种是副高位置较为偏东,我国中纬度地区为西风带波动气流控制(以下简称“西风波动”型)。其中有 15 次发生在东高西低形势下,暴雨发生在副高边缘,且多出现在 7 月,占比约 53%,4 次发生在副高位置偏东偏南的西风波动形势下,多发生在 6 月,占比约 50%。西南涡诱发极端暴雨过程中,西南涡生命史在 48~132 h。西南涡出现 0~18 h 内诱发极端暴雨发生。

表 1 1981—2020 年西南涡诱发四川盆地极端暴雨个例

Table 1 Cases of extreme rainstorm induced by southwest vortex in Sichuan Basin from 1981 to 2020

序号	极端暴雨发生 时间/(年月日时)	西南涡的环 流背景类型	西南涡维 持时间/h	相对西南涡维持时间内 极端暴雨发生时段/h	≥250 mm 站名 (降雨量/mm)	本站历史排位/ 全省历史排位
1	19810712—0713 20—20	东高西低型	108	0~24	广汉(267); 新都(299.6); 资阳(266.3); 龙泉驿(262.7)	2/37; 1/17; 1/40; 2/45
2	19840623—0624 20—20	东高西低型	72	0~24	洪雅(257.4)	2/54
3	19840701—0702 20—20	东高西低型	60	0~24	峨眉山(362.3)	1/7
4	19870709—0710 08—08	东高西低型	132	12~36	绵竹(277)	1/22
5	19890606—0607 08—08	东高西低型	48	12~36	通江(267.8)	1/29
6	19890708—0709 08—08	东高西低型	90	18~42	武胜(298.4)	1/16
7	19910629—0630 20—20	东高西低型	48	12~36	邻水(290.2); 纳溪(257.9)	1/20;1/52
8	19980705—0706 08—08	东高西低型	78	6~30	温江(300.2)	1/14
9	20040903—0904 20—20	东高西低型	84	12~36	渠县(272.9)	1/33
10	20100716—0717 20—20	东高西低型	72	0~24	万源(257.6); 乐山(255.8)	2/53; 1/57
11	20130708—0709 20—20	东高西低型	48	12~36	都江堰(423.8)	1/3
12	20140808—0809 20—20	东高西低型	108	0~24	蓬溪(261.8)	2/46
13	20140912—0913 20—20	东高西低型	72	0~24	广安(269.9); 邻水(268.1)	1/34; 1/35
14	20170705—0706 20—20	东高西低型	84	0~24	蓬溪(250.3)	3/60
15	20200815—0816 20—20	东高西低型	48	0~24	绵竹(302.6); 北川(266.6); 龙泉驿(264.3)	1/15; 1/39; 1/44
16	19880625—0626 20—20	西风波动型	60	0~24	高县(315.3)	1/12
17	19900901—0902 20—20	西风波动型	72	0~24	峨眉(265.9)	4/42
18	19970626—0627 20—20	西风波动型	72	12~36	自贡(301.1)	1/16
19	20070709—0710 08—08	西风波动型	102	6~30	隆昌(344.1)	1/9

图 1 为两类环流背景下的 24 h 雨量合成和极端暴雨落区分布,可以看到东高西低型(图 1a)暴雨中心以盆地西部的乐山—成都—绵阳一线为主,合成平均雨量 50 mm 以上的区域也位于盆地西部,但盆地大部的平均雨量都达到了 25 mm 以上,250 mm 以上的极端暴雨以盆地西部最多(11 站次),其次是盆地东北部(6 站次)。西风波动型的暴

雨中心以及合成平均雨量 50 mm 以上的区域均位于盆地南部的宜宾—内江一线(图 1b),25 mm 以上的范围比东高西低型更小,位于盆地南部和西部沿山地区。说明东高西低型暴雨影响范围更广,对盆地西部影响最大,西风波动型暴雨对盆地南部影响最大。

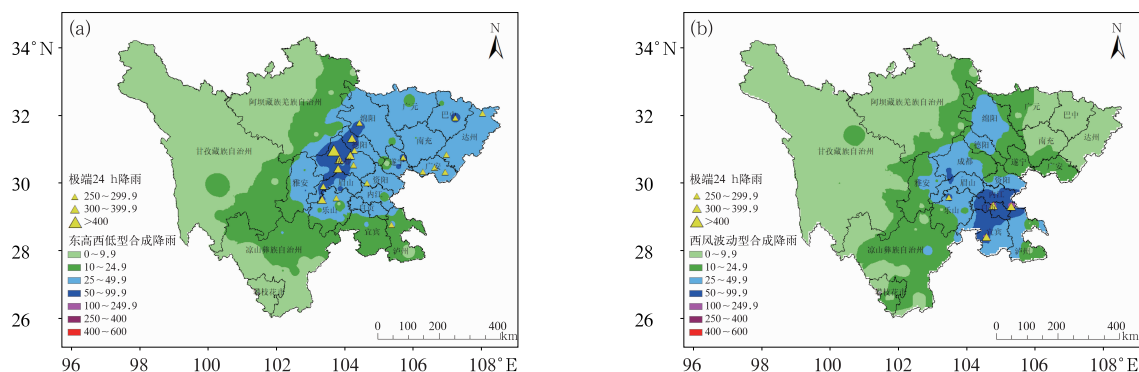


图 1 1981—2020 年西南涡诱发极端暴雨的平均 24 h 雨量合成(填色)

和极端暴雨落区(黄色三角)(单位:mm)

(a)东高西低型,(b)西风波动型

Fig. 1 The average 24 h rainfall (colored) and the area (yellow triangle) of extreme rainstorm induced by different types of southwest vortex from 1981 to 2020 (unit: mm)

(a) the east high west low type, (b) the low trough type

3 环流形势分析

按照 500 hPa 环流背景,将西南涡诱发极端暴雨的环流背景分为了东高西低型(15 次)和西风波动型

(4 次)两种类型。东高西低型的副高 588 dagpm 平均脊线位于 25°N、西脊点位于 115°E 附近,贝加尔湖低槽南端与高原低槽叠加,四川盆地处于副高西侧和高空槽前(图 2a);200 hPa 南亚高压中心位于 30°N、95°E 附近,高压强度为 1255 dagpm,四川盆

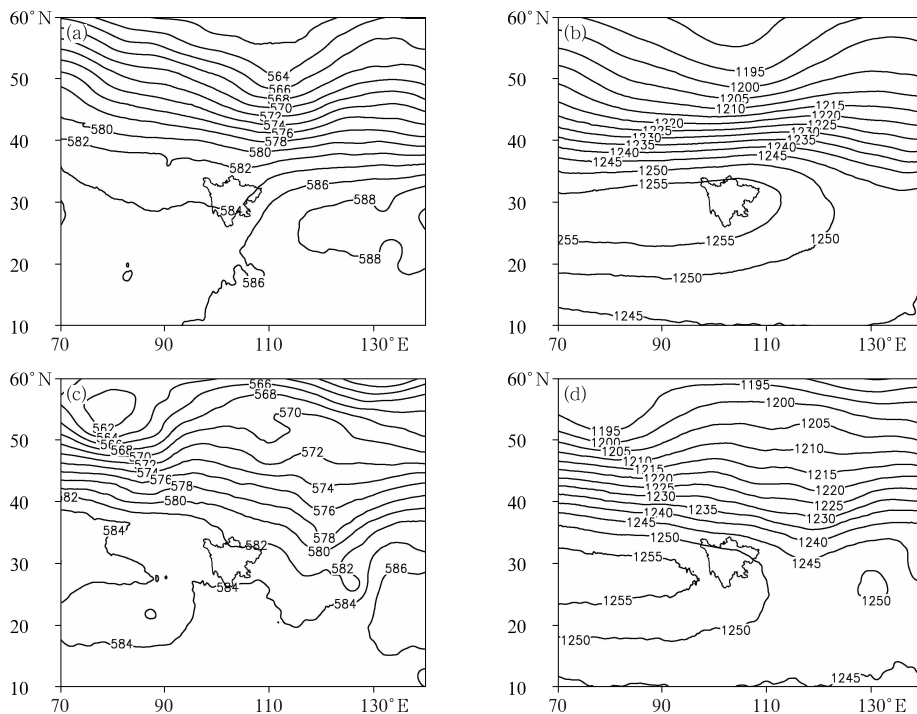


图 2 (a,c)500 hPa 和(b,d)200 hPa 平均位势高度场(等值线,单位:dagpm)

(a,b)东高西低型,(c,d)西风波动型

Fig. 2 The mean geopotential height field (contour, unit: dagpm) at (a, c) 500 hPa and (b, d) 200 hPa

(a, b) the east high west low type, (c, d) the low trough type

地受完整的高压环流控制(图2b)。西风波动型500 hPa副高588 dagpm位于140°E以东(图2c), 586 dagpm位于130°E附近,我国中纬度地区为西风带系统所控制,四川盆地受青藏高原东移的低槽影响;200 hPa南亚高压中心位于29°N、85°E,中心强度为1255 dagpm,与东高西低型相比,南亚高压位置更为偏西,四川盆地位于南亚高压中心东侧(图2d)。

分析850 hPa(图3b和3d)和700 hPa(图3a和3c)合成平均水汽通量及散度分布可以看出,两类环流背景影响下水汽输送通道类似,850 hPa水汽主要来自孟加拉湾和南海,700 hPa水汽主要来自孟加拉湾,经云贵地区向四川盆地输送。不同的是,西

风波动型在孟加拉湾—南海一带的水汽通量值更大,850 hPa和700 hPa分别达 $(14\sim 18)\times 10^{-2}$ 和 $(8\sim 10)\times 10^{-2} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$,较东高西低型大 $(2\sim 4)\times 10^{-2} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$,但850 hPa从南海—贵州一带和700 hPa从云贵地区北上向四川盆地输送的水汽却是东高西低型更强,分别达 $(10\sim 16)\times 10^{-2}$ 和 $(6\sim 10)\times 10^{-2} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$,较西风波动型大 $(4\sim 6)\times 10^{-2} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 。水汽输送至四川盆地形成了明显辐合,受龙门山地形影响,两种类型均在盆地西部沿山地区辐合最强。850 hPa水汽辐合较700 hPa更为显著,且与图1中暴雨中心和合成平均降雨量分布基本一致。东高西低型在盆地西部沿山地区850 hPa

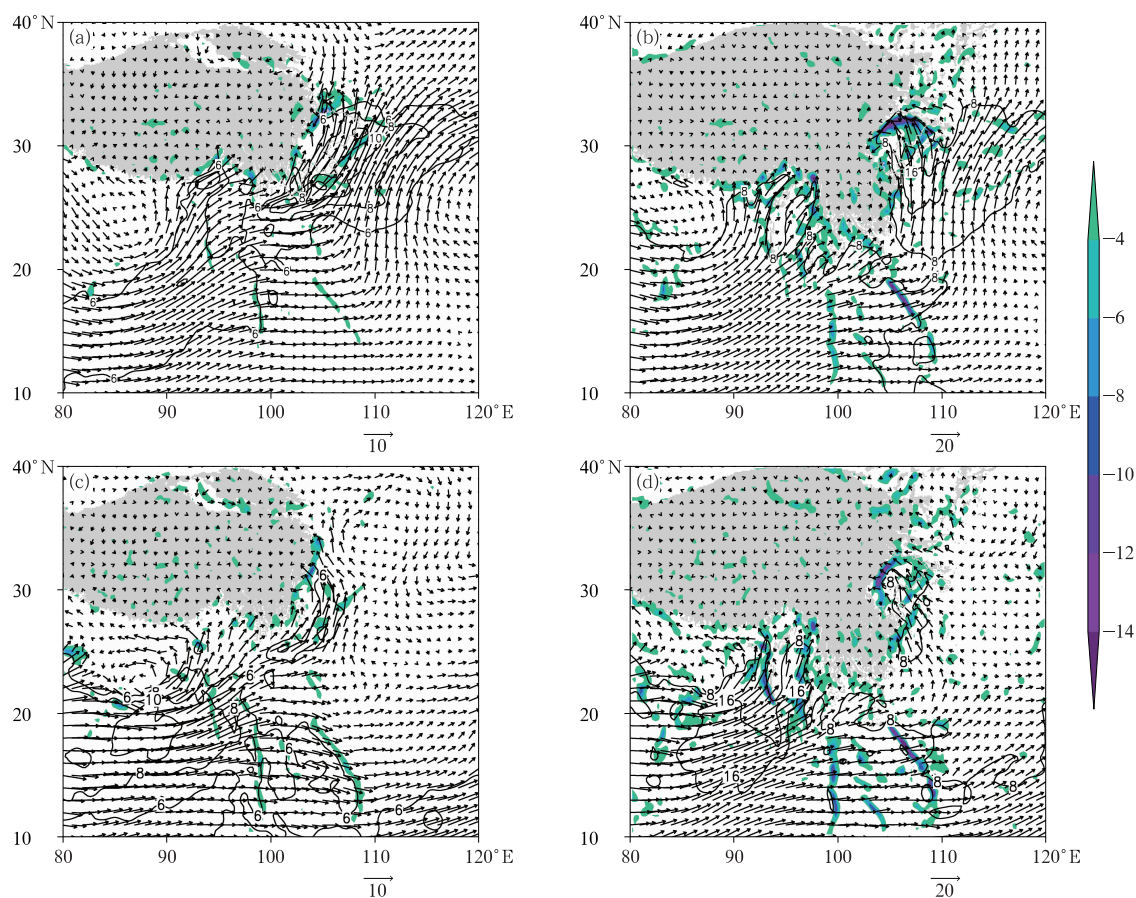


图3 (a,c)700 hPa,(b,d)850 hPa 平均水汽通量(箭矢和等值线,单位: $10^{-2} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$)和水汽通量散度(填色,仅显示负值,单位: $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$)
(a,b)东高西低型,(c,d)西风波动型
(灰色阴影为青藏高原地形)

Fig. 3 The mean water vapor flux (arrow vector and contour, unit: $10^{-2} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$) and water vapor flux divergence (colored, negative values only, unit: $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$) at (a, c) 700 hPa, (b, d) 850 hPa
(a, b) the east high west low type, (c, d) the low trough type
(gray shadow; Tibetan Plateau)

水汽通量散度值达到了 $(-12 \sim -8) \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$,其次在盆地东北部,也存在一个 $-8 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 以上的辐合中心,两个辐合中心分别与两个暴雨中心相对应;西风波动型则是在盆地西部沿山地区和盆地南部出现了水汽辐合中心,强度与东高西低型的两个中心值相当,但盆地西部沿山地区的水汽辐合带明显比东高西低型更窄,对应平均降雨量和暴雨中心频次均更低,盆地南部的辐合中心与暴雨中心基本对应。

4 西南涡空间结构特征

4.1 水平特征

图 4 为两种背景下 700 hPa 风场和高度场的动态合成(纬向相对坐标从左向右表示自西向东,经向相对坐标从下到上表示从南向北,下同)。东高西低型背景下的西南涡高度场中心强度更强(图 4a),环流结构更完整,700 hPa 中心强度为 307 dagpm,最外围闭合等高线为 308.5 dagpm,具有东北—西南向的长轴特征,按最外围闭合等高线来看,长轴约

8 个纬度,短轴约 6 个经度,长轴方向上两侧有明显的不对称性,这与卢敬华和雷小途(1996)的研究一致,西南涡是一个呈近圆形而非对称的中尺度系统。风场上结构不对称显著,其东南象限风速显著强于西北象限,东南象限的风速普遍在 $6 \sim 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大风速为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而西北象限的风速普遍仅为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,两者风速的最大值差为 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

西风波动型背景下的西南涡高度场中心强度较东高西低型略弱(图 4b),尺度更小,中心强度为 307.5 dagpm,最外围闭合等高线为 308.5 dagpm,在高度场上具有东北—西南向的长轴特征,长轴约 6 个纬度,短轴约 4 个经度。风场上结构也呈不对称分布,但不对称性强度小于东高西低型,其东南象限最大风速仅为 $6 \sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且范围较小,西北象限风速为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,两者风速差的最大值为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

两种背景下的西南涡均具有东北—西南向的长轴特征特征,与刘冲和赵平(2020)的研究结果类似,与江玉华等(2012)对四川盆地西南涡暴雨过程合成分析结果不同的是,引发极端性暴雨的西南涡右侧偏南风风速明显更强。

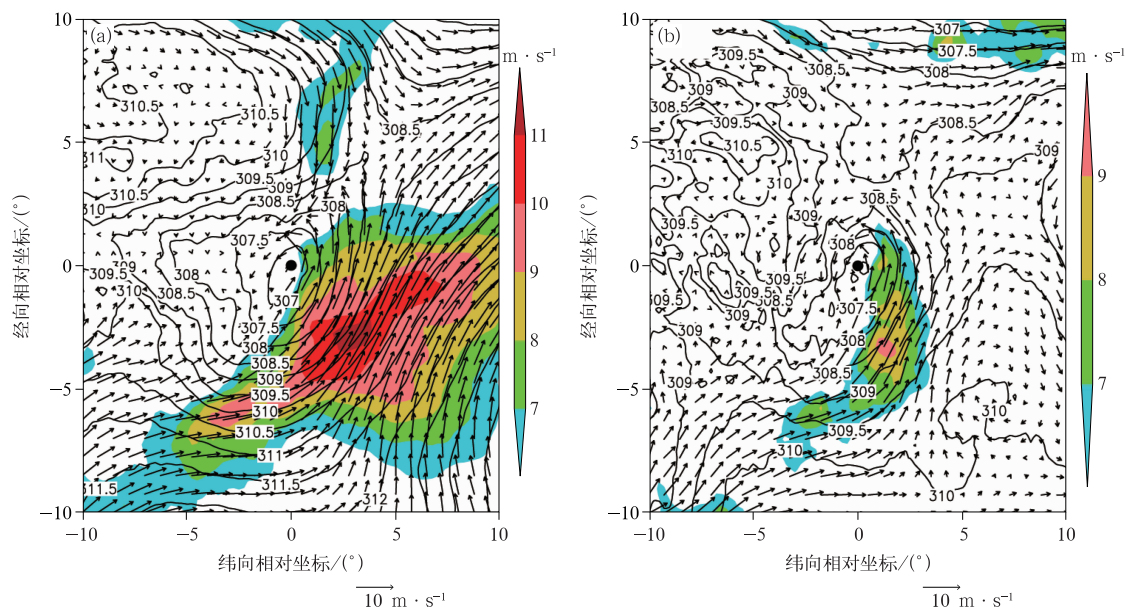


图 4 平均 700 hPa 风场(箭矢,彩色阴影为 $\geq 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速)和位势高度场(等值线,单位: dagpm)

(a)东高西低型,(b)西风波动型

(黑色圆点为合成西南涡中心,下同)

Fig. 4 Average 700 hPa wind field (arrow vector, colored: $\geq 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

and geopotential height field (contour, unit: dagpm)

(a) the east high west low type, (b) the low trough type

(Black dot is the center of the southwest vortex, the same below)

4.2 垂直结构特征

4.2.1 位势高度、温度、风场结构特征

进一步分析西南涡中心高度、温度异常垂直剖面,异常值为等压面上西南涡合成区域内每个格点温度或位势高度值减去该合成区域的平均值(屈顶和李跃清, 2021),合成区域以西南涡为圆心,半径 10 个经纬距,即纬向相对坐标 $[-10^{\circ}, 10^{\circ}]$ 、经向相对坐标 $[-10^{\circ}, 10^{\circ}]$ 区域内。

图 5 为动态合成的高度和温度异常分布(图中纬向相对坐标从左到右表示自西向东,经向相对坐标从左到右表示从南向北,下同)。东高西低型背景下的西南涡在温度场上是一个深厚的暖性低涡(图 5a, 5b),暖层高度达到了 150 hPa,暖中心位于低涡正上方的 400~300 hPa,暖中心温度偏暖达 3.5 K。暖层之上的对流层顶是冷层,并有一 2.5 K 的冷中心。这与屈顶和李跃清(2021)的研究一致,但东高西低型暖层强度略强,暖层高度更高。西南涡北侧对流层中低层为冷区,冷区前沿位于西南涡

中心北侧 2 个纬距。高度场上,西南涡区域内 500 hPa 以下为负异常区,并有一 4 dagpm 异常中心配合,500 hPa 以上为正异常区,200~150 hPa 有 6 dagpm 异常中心。西风波动型背景下的西南涡温度场暖层厚度较东高西低型偏弱(图 5c, 5d),从低层至高层呈“较冷-暖-冷”的异常分布,700 hPa 以下受西北侧的冷空气影响,为冷区,700~200 hPa 为暖区,并在 300 hPa 有 2.5~3 K 的暖中心,暖中心位于低涡中心西南方向上空,再向上转为冷区。高度场 600 hPa 以下为负异常区,并有一 2 dagpm 异常中心配合,负异常区较东高西低型偏弱,其上为正异常区,200~150 hPa 有 6 dagpm 异常中心。

对比两种背景下西南涡的温度、高度异常值三维结构,东高西低型的暖层较西风波动型更为深厚,东高西低型是一个深厚的暖性低涡,有“上冷-中下暖”结构,西风波动型呈“下较冷-中暖-上冷”结构,同时中高层高度场的负异常值也显著大于西风波动型。

西南涡的垂直速度在整个对流层都表现为上升

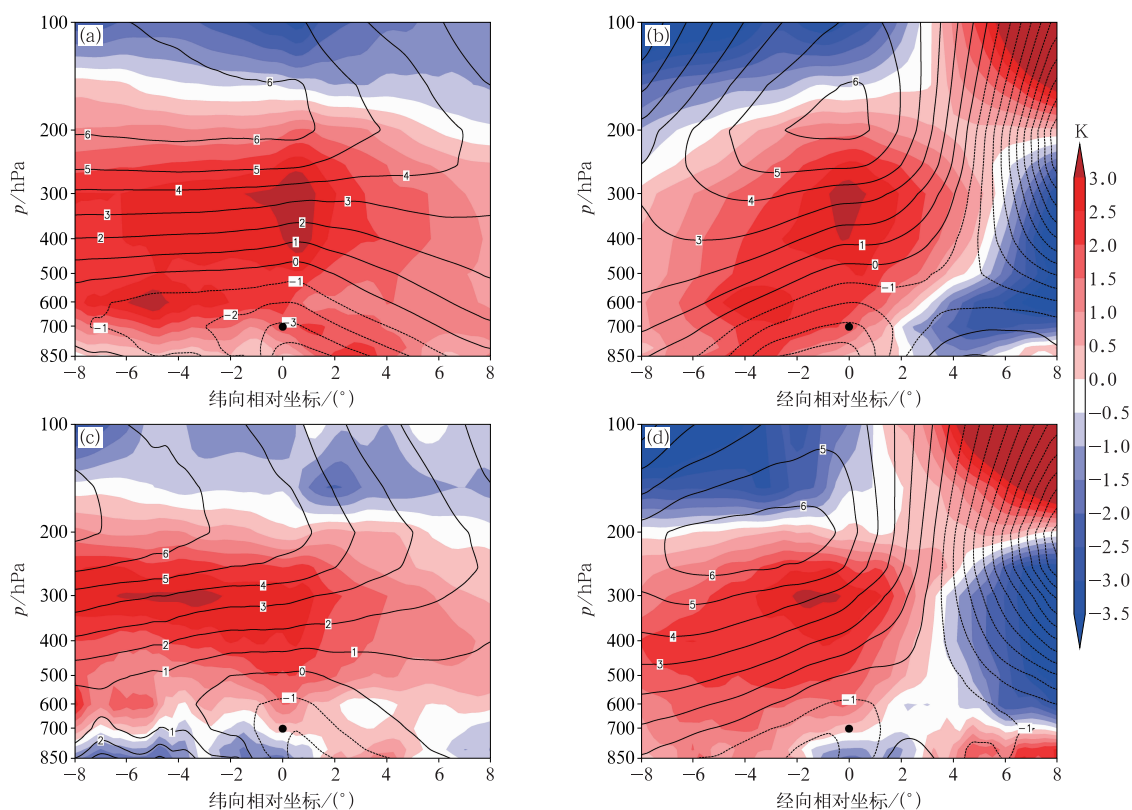


图 5 西南涡位势高度(等值线,单位:dagpm)和温度(填色)异常的垂直剖面
(a,b)东高西低型;(c,d)西风波动型

Fig. 5 Vertical profile of southwest vortex geopotential height (contour, unit: dagpm) and temperature (colored) anomalies
(a, b) the east high west low type, (c, d) the low trough type

气流,最大上升气流中心位于低涡区附近(刘红武等,2016)。图 6 为西南涡风场动态合成纬向(经向)垂直剖面,在纬向相对坐标图上,东高西低型背景下的西南涡东侧 850~300 hPa 为南风(图 6a),最大风速位于 700 hPa,达 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对流层高层为强北风,150 hPa 有北风中心,风速为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。西南涡西侧从低层到高层有弱北风。西南涡南北风不对称分布较为深厚,从 850 hPa 维持至 400 hPa。上升速度最大为 $1.8 \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,上升运动高度达到了 150 hPa,最大上升速度位于低涡中心东侧和北侧 1 个经纬距范围内。西风波动型东侧的南风风速强度和达到的高度均弱于东高西低型(图 6c),其东侧南风最大风速为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,400 hPa 以上为北风,北风中心也位于 150 hPa,风速仅为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。但其西侧的北风强度强于东高西低型,西南涡南北风分布仅在 850~600 hPa 呈不对称分布。上升速度的强度和高度均弱于东高西低型,其上升运动高度只达到 300 hPa 附近。

经向相对坐标上,东高西低型的西南涡中心

600 hPa 以下北侧为弱的东风(图 6b),最大风速仅为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南侧有较强西风,风速为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,气流在低层呈气旋式环流特征。北侧上空有强西风带,中心风速为 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南部上空有较强的东风,中心风速为 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,气流在高层呈反气旋环流特征,上升运动高度达到 150 hPa。西风波动型的西南涡中心 600 hPa 以下北侧低层东风强于东高西低型(图 6d),达到了 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,低层气流分布不利于气旋式环流的发展。高空风速均弱于东高西低型,北侧西风带中心风速为 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南部东风带中心风速约 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,气流在高层呈反气旋环流特征,上升运动的高度在 300 hPa。

对比两类环流背景下西南涡的风场三维结构,上升速度相当,最大垂直速度位于 700~400 hPa,达到 $-1.8 \sim -1.4 \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,与江玉华等(2012)对四川盆地暴雨过程统计结果一致,但上升运动高度东高西低型强于西风波动型。东高西低型风场不对称分布更为深厚,同时低槽南侧西风强于北侧东风,有利于气旋性环流的发展,西风波动型风场仅在低

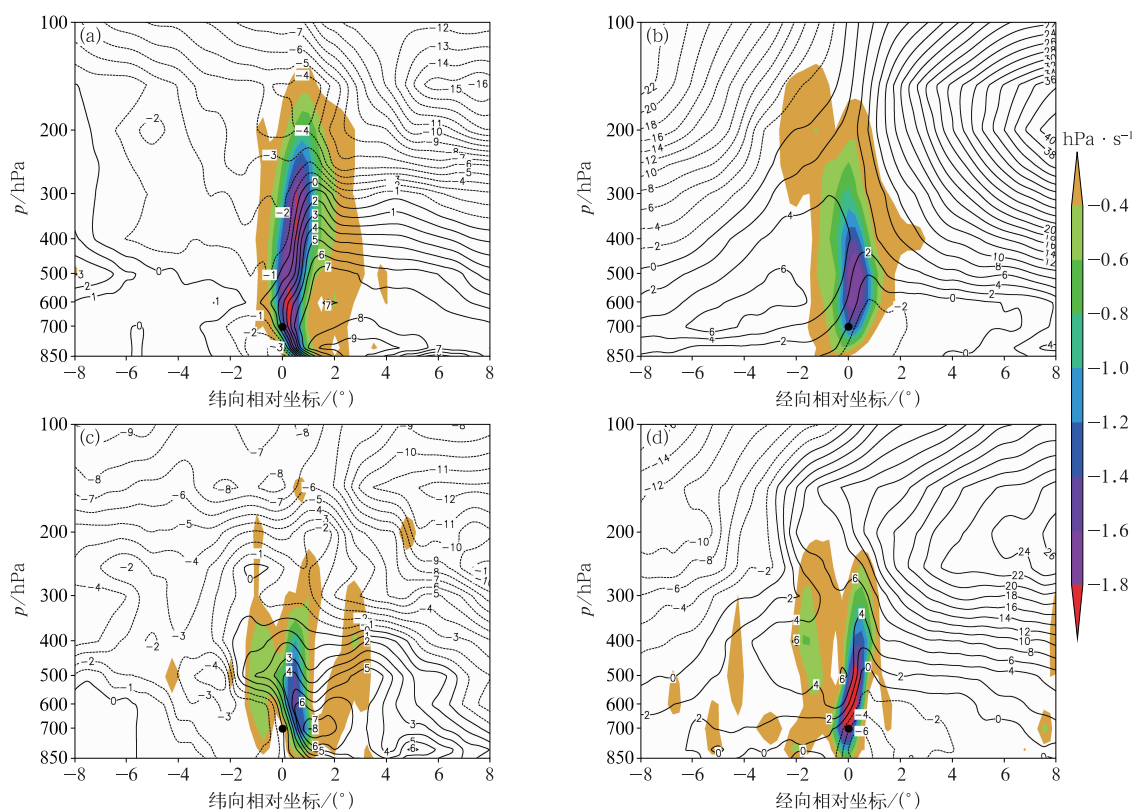


图 6 西南涡(a,c)南北风,(b,d)东西风(等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和上升速度(填色)
(a,b)东高西低型,(c,d)西风波动型

Fig. 6 (a, c) The south-north wind, (b, d) the east-west wind (contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
and vertical profile of rising velocity (colored)
(a, b) the east high west low type, (c, d) the low trough type

层呈不对称分布。

4.2.2 动力结构特征

东高西低型背景下的西南涡动力结构特征如图7a,7b,正涡度大值区主要位于西南涡中心及偏东、偏南2个经纬度范围内,正涡度随高度上升略向北偏。正涡度中心值为 $14 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,高度发展至200 hPa。在正涡度柱内有“低层辐合-高层辐散”的散度分布特征,无辐散层在550 hPa,其下层的辐合值为 $(-12 \sim -8) \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。西风波动型背景下的西南涡正涡度大值区位于其中心及偏西、偏南2个经纬度范围内(图7c,7d),正涡度强度显著强于东高西低型,正涡度中心达 $18 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以上,但发展高度弱于东高西低型,高度仅达300 hPa。正涡度柱内也有“低层辐合-高层辐散”的散度分布特征,但其无辐散层高度低于东高西低型,无辐散层位于600 hPa,其下的辐合强度弱于东高西低型,辐合值在 $(-8 \sim -6) \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

两类环流背景下西南涡的动力特征表现为正涡度位于其中心及周围2个经纬度范围内,正涡度发

展旺盛,东高西低型的正涡度发展高度强于西风波动型,但强度弱于西风波动型。西风波动型的无辐散层高度、低层辐合强度低于东高西低型。刘冲和赵平(2020)对1979—2016年夏季长生命史西南涡动力垂直结构合成分析发现,在低涡成熟期,东移型、东北移型、西移型低涡中心正涡度最高可伸展至200 hPa,而东南移型和少动型只能发展到400 hPa,各种类型正涡度中心位于800~700 hPa层,最大值接近 $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$;各种类型在850 hPa存在一个辐合中心,在500 hPa存在一个辐散中心。与刘冲和赵平(2020)研究的长生命史西南涡相比,造成极端性暴雨的西南涡的正涡度发展高度相当或更高,正涡度中心出现高度和强度基本一致,其中西风波动型的正涡度中心高度略高;低层辐合中心层次基本一致,但高层辐散高度更高。

4.2.3 热力结构特征

东高西低型背景下的西南涡中心及东、南侧对流层低层假相当位温最大值为359 K(图8a,8b),假相当位温高值由850 hPa向上伸至600 hPa,200 hPa

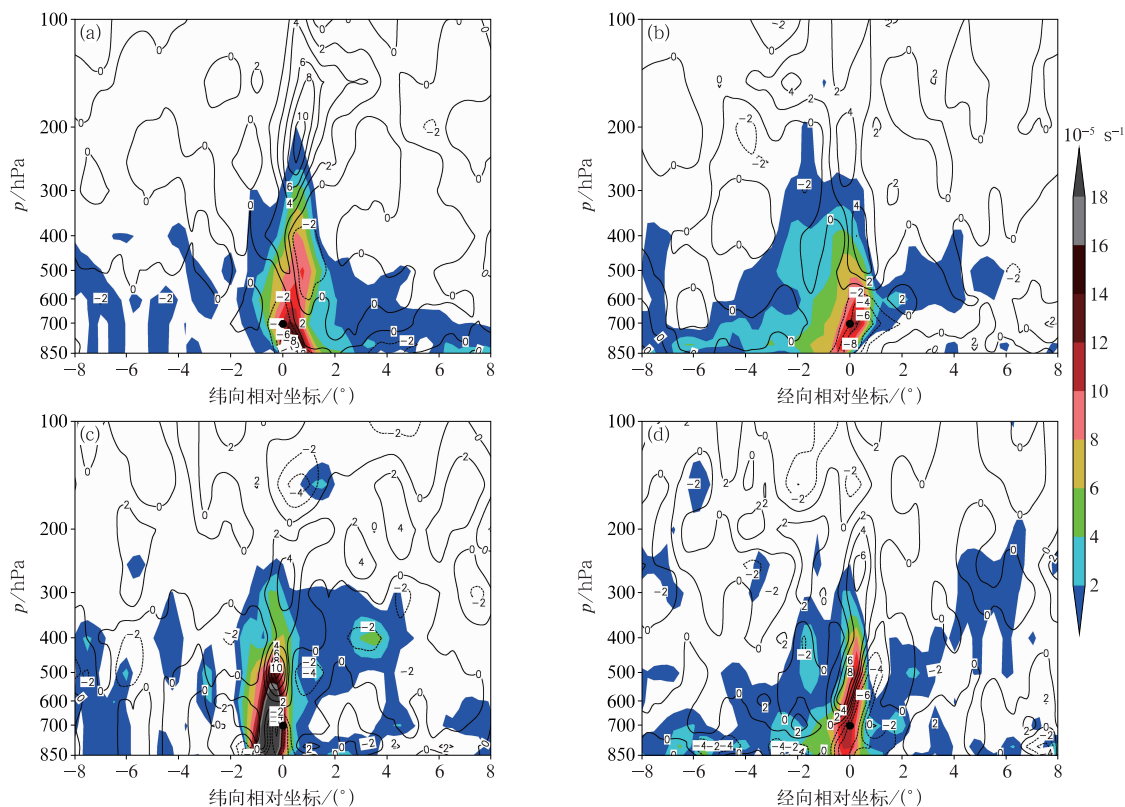


图7 西南涡散度场(等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})、正涡度(填色)的垂直剖面
(a,b)东高西低型,(c,d)西风波动型

Fig. 7 Vertical cross-sections of divergence field (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}) and positive vorticity (colored)

(a, b) the east high west low type, (c, d) the low trough type

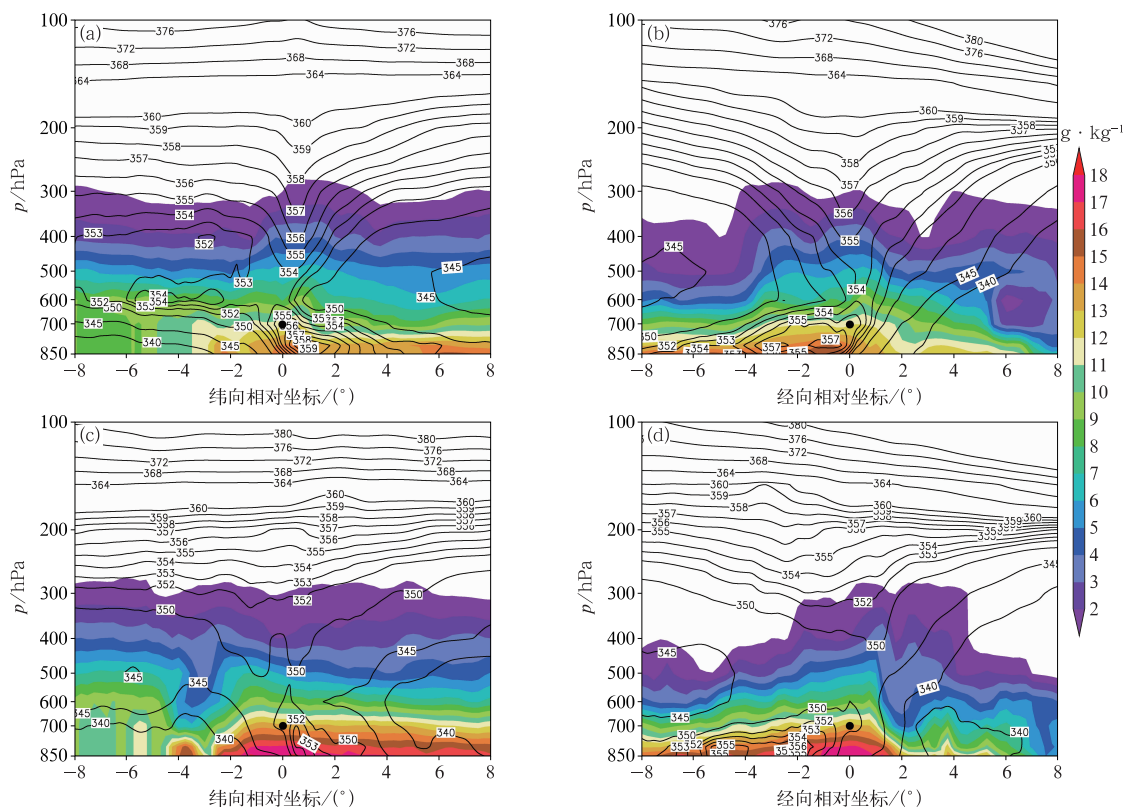


图 8 西南涡假相当位温(等值线,单位:K)、比湿(填色)的垂直剖面

(a,b)东高西低型,(c,d)西风波动型

Fig. 8 Vortice cross-sections of equivalent potential temperature (contour, unit: K) and specific humidity (colored)

(a,b) the east high west low type, (c, d) the low trough type

附近假相当位温高值下伸至 500 hPa 附近,同时 600 hPa 以下假相当位温随高度的上升而减小, $\theta_{se850} - \theta_{se600}$ 为 5 K。西南涡中心及东、南侧有湿舌发展,低层比湿达到了 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。西风波动型背景下西南涡区域低层假相当位温较东高西低型略低(图 8c,8d),西南涡东侧低层最大值仅为 353 K,南侧最大值为 356 K,且 700 hPa 以下假相当位温随高度上升而减小, $\theta_{se850} - \theta_{se600}$ 为 6 K,低层湿舌发展,低层比湿达到了 $17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。两种类型低层暖湿特征均十分明显,850 hPa 假相当位温较江玉华等(2012)对四川盆地暴雨过程统计结果高 3~7 K,850 hPa 平均比湿也接近或高于四川盆地极端暴雨指标(肖递祥等,2017)。

5 结论与讨论

本文利用 1981—2020 四川盆地国家站降雨资料和 ERA5 再分析资料,选取西南涡诱发日最大降

雨量超过 250 mm 的 19 次极端暴雨个例进行动态合成,着重分析了两类西南涡发生的环流背景和低涡系统的结构特征,得到以下结论:

(1)西南涡是诱发四川盆地极端暴雨的重要天气系统,19 次暴雨过程中共出现了 26 站次日雨量超过 250 mm 的极端暴雨,其中 20 站次为建站以来日最大降雨量纪录,出现暴雨中心最多的是成都和宜宾,西南涡生命史在 48~132 h,西南涡诱发极端暴雨一般是在西南涡生成后 0~18 h 内发生。

(2)西南涡诱发极端暴雨的环流背景可分为东高西低型和西风波动型两类,东高西低型南亚高压和副高均发展强盛,500 hPa 贝加尔湖低槽南端与高原低槽叠加形成深厚低槽,四川盆地位于槽前和副高西侧;西风波动型的副高位置偏东,四川盆地受东移青藏高原低槽影响,200 hPa 南亚高压脊线较东高西低型更偏南和偏西;孟加拉湾—南海—四川盆地是强水汽输送的主要通道,其中东高西低型水汽输送强度更强,低层水汽辐合区域和暴雨发生区域基本一致。

(3)西南涡在水平方向的高度场上表现为东北—西南向的长轴特征,是一个近乎椭圆的中尺度系统,长轴两侧的风场有明显的不对称性。东高西低型背景下的西南涡强度更强、范围更大,两侧风场的不对称性更强。西风波动型背景下的西南涡强度略弱,范围较小。西南涡在垂直方向上的位势高度场特征是负异常高度伸展至500 hPa,以上为反位相分布,位势高度正异常中心位于温度正异常中心上方。

(4)东高西低型背景下的西南涡具有深厚的暖心结构,西南涡上空的温度呈“中下暖-上冷”分布,正涡度伸展高度更高,同时整层风速更强,风场的不对称分布更为深厚。西风波动型背景下西南涡温度场呈“下较冷-中暖-上冷”的异常分布,正涡度强度更强,但伸展高度略低,同时整层风速相对较弱,风场的不对称分布也较为浅薄。两种类型共同特征是低层显著高能高湿,正涡度柱内为“低层辐合-高层辐散”动力结构。

以上结论仅针对500 hPa环流背景进行分类得到的结果,其中西风波动型仅有4例,合成结果的代表性可能存在一定的不确定性。今后还需要对更多类似个例进行对比与合成分析,以完善对不同环流背景下诱发四川盆地极端暴雨的西南涡结构特征的认识。

参考文献

- 陈贵川, 谌芸, 王晓芳, 等, 2018. 一次冷性停滞型西南低涡结构的演变特征[J]. 高原气象, 37(6): 1628-1642. Chen G C, Chen Y, Wang X F, et al, 2018. The developmental characteristics of the structure of a stationery cold southwest vortex[J]. Plateau Meteor, 37(6): 1628-1642(in Chinese).
- 陈红专, 2021. 湖南极端降水的气候特征及天气系统分型研究[J]. 气象, 47(10): 1219-1232. Chen H Z, 2021. Climatic characteristics and weather system classification of extreme precipitation in Hunan Province[J]. Meteor Mon, 47(10): 1219-1232(in Chinese).
- 陈忠明, 缪强, 闵文彬, 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): 273-282. Chen Z M, Miao Q, Min W B, 1998. A case analysis on mesoscale structure of severe southwest vortex[J]. J Appl Meteor, 9(3): 273-282(in Chinese).
- 程麟生, 郭英华, 1988. “81.7”四川暴雨期西南涡生成和发展的涡源诊断[J]. 大气科学, 12(1): 18-26. Cheng L S, Guo Y H, 1988. Vortex source diagnosis on the generation and development of the southwest vortex during the “81.7” heavy rain in Sichuan[J]. Sci Atmos Sin, 12(1): 18-26(in Chinese).
- 高守亭, 周玉淑, 2019. 近年来中尺度涡动力学研究进展[J]. 暴雨灾害, 38(5): 431-439. Gao S T, Zhou Y S, 2019. Progress in dynamics of mesoscale vortex in recent years[J]. Torr Rain Dis, 38(5): 431-439(in Chinese).
- 何光碧, 2012. 西南低涡研究综述[J]. 气象, 38(2): 155-163. He G B, 2012. Review of the southwest vortex research[J]. Meteor Mon, 38(2): 155-163(in Chinese).
- 江玉华, 杜钦, 赵大军, 等, 2012. 引发四川盆地东部暴雨的西南低涡结构特征研究[J]. 高原气象, 31(6): 1562-1573. Jiang Y H, Du Q, Zhao D J, et al, 2012. Study on structure characteristic of southwest vortex accompanying with heavy rainstorm in East Sichuan Basin[J]. Plateau Meteor, 31(6): 1562-1573(in Chinese).
- 康岚, 郝丽萍, 牛俊丽, 2011. 引发暴雨的西南低涡特征分析[J]. 高原气象, 30(6): 1435-1443. Kang L, Hao L P, Niu J L, 2011. Feature analysis on southwest vortex of triggering rainstorm[J]. Plateau Meteor, 30(6): 1435-1443(in Chinese).
- 李超, 崔春光, 蒋兴文, 等, 2018. 特殊地形对鄂东北一次局地强降水过程的作用机制分析[J]. 气象, 44(9): 1117-1135. Li C, Cui C G, Jiang X W, et al, 2018. Mechanism analysis of the effect of special topography in middle-lower reaches of Yangtze River on local severe precipitation in Northeast Hubei[J]. Meteor Mon, 44(9): 1117-1135(in Chinese).
- 李国平, 2021. 青藏高原天气动力学研究的新进展[J]. 气象科技进展, 11(3): 58-65. Li G P, 2021. New research progress in synoptic dynamics of the Tibetan Plateau[J]. Adv Meteor Sci Technol, 11(3): 58-65(in Chinese).
- 李跃清, 闵文彬, 彭骏, 等, 2015. 西南低涡年鉴-2013[M]. 北京: 科学出版社. Li Y Q, Min W B, Peng J, et al, 2015. Southwest Vortex Yearbook-2013[M]. Beijing: Science Press(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 Y Q, Xu X D, 2016. A review of the research and observing experiment on Southwest China vortex[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 134-140(in Chinese).
- 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]. Adv Climate Change Res, 16(2): 203-214(in Chinese).
- 刘红武, 邓朝平, 李国平, 等, 2016. 东移影响湖南的西南低涡统计分析[J]. 气象与环境科学, 39(1): 59-65. Liu H W, Deng Z P, Li G P, et al, 2016. Statistical analysis of the eastward southwest vortices influenced Hunan[J]. Meteor Environ Sci, 39(1): 59-65(in Chinese).
- 刘金卿, 李子良, 2020. 一次西南涡诱生气旋引发的湖南大暴雨个例分析[J]. 高原气象, 39(2): 311-320. Liu J Q, Li Z L, 2020. A case study of a heavy rainstorm in Hunan triggered by the induced cyclone of southwest vortex[J]. Plateau Meteor, 39(2): 311-320(in Chinese).
- 卢敬华, 1986. 西南低涡概论[M]. 北京: 气象出版社: 56-58. Lu J H, 1986. Introduction to Southwest Vortex[M]. Beijing: China Meteorological Press: 56-58(in Chinese).
- 卢敬华, 雷小途, 1996. 西南低涡移动的初步分析[J]. 成都气象学院学报, 11(1-2): 40-49. Lu J H, Lei X T, 1996. Preliminary analysis of movement of southwest vortex[J]. J Chengdu Inst Meteor, 11(1-2): 40-49(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 D, Li Y Q, 2021. Characteristics of the three-dimensional circulation and dynamic structure of Jiulong vortex of Southwest China vortex[J]. Plateau Meteor, 40(6): 1497-1512(in Chinese).
- 孙俊, 邓国卫, 张渝杰, 等, 2014. “13·6·30”遂宁市特大暴雨成因的初探[J]. 气象, 40(10): 1174-1182. Sun J, Deng G W, Zhang Y J, et al, 2014. Primary study of the extreme rainfall event in Suining City on 30 June 2013[J]. Meteor Mon, 40(10): 1174-1182(in Chinese).
- 孙建华, 李娟, 沈新勇, 等, 2015. 2013 年 7 月四川盆地一次特大暴雨的中尺度系统演变特征[J]. 气象, 41(5): 533-543. Sun J H, Li J, Shen X Y, et al, 2015. Mesoscale system study of extreme rainfall over Sichuan Basin in July 2013[J]. Meteor Mon, 41(5): 533-543(in Chinese).
- 谭小平, 2013. 四川省抗击“2013. 7. 9”特大暴雨洪灾[J]. 中国防汛抗旱, 23(5): 1-2, 21. Tan X P, 2013. Sichuan Province fights “2013. 7. 9” heavy rainstorm and flood[J]. China Flood Drought Manag, 23(5): 1-2, 21(in Chinese).
- 陶诗言, 陈联寿, 徐祥德, 等, 2000. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展(二)[M]. 北京: 气象出版社: 268-378. Tao S Y, Chen L S, Xu X D, et al, 2000. The Progress of Theory Research on the Second Qinghai-Tibet Plateau Atmospheric Experiment (2)[M]. Beijing: China Meteorological Press: 268-378(in Chinese).
- 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): 456-463. Wei T J, Xue J J, 1996. The mesoscale structure characteristics of southwest vortex over Jianghuai River areas[J]. Plateau Meteor, 15(4): 456-463(in Chinese).
- 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 analyses of extreme rainstorm events in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 43(10): 1165-1175(in Chinese).
- 肖红茹, 王佳津, 肖递祥, 等, 2021. 四川盆地暖区暴雨特征分析[J]. 气象, 47(3): 303-316. Xiao H R, Wang J J, Xiao D X, et al, 2021. Analysis of warm-sector rainstorm characteristics over Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 47(3): 303-316(in Chinese).
- 徐裕华, 1991. 西南气候[M]. 北京: 气象出版社: 56-60. Xu Y H, 1991. Climate of Southwest China[M]. Beijing: China Meteorological Press: 56-60(in Chinese).
- 于波, 林永辉, 2008. 引发川东暴雨的西南低涡演变特征个例分析[J]. 大气科学, 32(1): 141-154. Yu B, Lin Y H, 2008. A case study of southwest vortex causing heavy rainfall in eastern Sichuan Basin[J]. Chin J Atmos Sci, 32(1): 141-154(in Chinese).
- 曾波, 何光碧, 余莲, 2017. 川渝地区两类西南涡物理量场诊断分析[J]. 成都信息工程大学学报, 32(2): 157-164. Zeng B, He G B, Yu L, 2017. Diagnostic analysis of the physical field for two types of southwest vortexes in Sichuan-Chongqing Region[J]. J Chengdu Univ Inform Technol, 32(2): 157-164(in Chinese).

(本文责编:王蕾)