

易升杰, 郑飞, 肖天贵. 2019. 西南地区两次典型大暴雨环境场的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 24 (1): 73–85. Yi Shengjie, Zheng Fei, Xiao Tiangui. 2019. Comparative analysis of environmental fields of two typical rainstorm cases in southwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24 (1): 73–85, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18043.

## 西南地区两次典型大暴雨环境场的对比分析

易升杰<sup>1,2</sup> 郑飞<sup>1</sup> 肖天贵<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

<sup>3</sup> 成都信息工程大学, 成都 610225

**摘要** 四川盆地位于青藏高原的东侧, 受其地理位置的影响, 该地区的天气和气候复杂多变。尤其暴雨预报, 是气象工作者一直面临的难题。本文利用欧洲中期天气预报中心 ERA-Interim 再分析资料、格点化的降水资料 (CN05.1) 以及常规气象观测站探空资料, 从环流背景、水汽条件、动力和热力条件对比分析了 2015 年夏季四川盆地 7 月 13~15 日 (“7.13”过程) 和 8 月 16~18 日 (“8.16”过程) 两次暴雨过程的环境场, 以期加深对四川盆地暴雨机制的认识。结果表明: 1) 相对稳定的大尺度环流形势为两次大暴雨发生发展提供了有利的背景场。2) 两次过程均存在明显的高空急流和低空急流, 并且 “8.16”过程高空急流明显强于 “7.13”过程, 这也是两次过程降水强度存在明显差异的原因之一。“7.13”过程主要以低空北向急流输送孟加拉湾水汽到四川南部; “8.16”过程低空急流输送孟加拉湾水汽受四川东北部、重庆上空西南涡影响, 主要以气旋性环流输送水汽到暴雨上空。3) 从暴雨预报的指示意义上分析, 两次暴雨过程大气均处于不稳定状态, 假相当位温对于暴雨的强度和落区有较好指示。位涡扰动向低层传输, 位涡的增大预示着强降水的发生。

**关键词** 暴雨 环流背景 水汽条件 大气不稳定

文章编号 1006-9585 (2019) 01-0073-13

中图分类号 P458.3

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18043

## Comparative Analysis of Environmental Fields of Two Typical Rainstorm Cases in Southwest China

YI Shengjie<sup>1,2</sup>, ZHENG Fei<sup>1</sup>, and XIAO Tiangui<sup>3</sup>

<sup>1</sup> International Center for Climate and Environment Science, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

<sup>3</sup> Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

**Abstract** Sichuan Basin is located to the east of the Tibet Plateau. Due to its geographical location, weather and climate in this area are complicated and capricious. In particular, the rainstorm forecasting is one of the toughest problems that meteorologists need to solve. In order to understand the rainstorm mechanism in Sichuan Basin, the authors used the ERA-Interim reanalysis data, a gridded precipitation dataset and several conventional upper-air sounding data to analyze the environmental fields of two rainstorms that occurred in the summer of 2015 (the ‘7.13’ process during 13–15 July and the ‘8.16’ process during 16–18 August) from the following perspectives: The circulation background, the moisture

收稿日期 2018-10-17; 网络预出版日期 2018-10-30

作者简介 易升杰, 女, 1993 年出生, 硕士, 主要从事 ENSO 及其短期气候预测研究。E-mail: yishengjie@mail.iap.ac.cn

通讯作者 郑飞, E-mail: zhengfei@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划课题 2017YFA0604201

Funded by National Key Research and Development Programme of China (Grant 2017YFA0604201)

condition, and the dynamic and thermal conditions in Sichuan Basin. Results show that: 1) The relatively stable large-scale circulation provides a favorable background for the occurrence of the two heavy rainstorms. 2) There existed upper-level jet stream and low-level jet stream in both processes, and the upper-level jet stream in the '8.16' process was much stronger than that in the '7.13' process. This is one of the reasons why there was significant difference in the precipitation intensity between the two processes. For the '7.13' process, the low-level jet stream flowing northward transported water vapor from the Bay of Bengal to southern Sichuan. During the '8.16' process, the water vapor transported from the Bay of Bengal by the low-level jet stream was affected by the southwestern vortex over Sichuan and Chongqing, and then was transported to the rainy area by cyclonic circulation. 3) The atmosphere was unstable during the two rainstorm processes. And  $\theta_{se}$  was a good indicator of the rain intensity and falling area for the two rainstorms. The potential vorticity disturbance propagated downward to lower levels, and its increase indicated the occurrence of heavy rain.

**Keywords** Heavy rainstorm, Circulation background, Water vapor condition, Unstable atmosphere

## 1 引言

夏季暴雨是中国主要的气象灾害之一(陶诗言, 1980),往往伴随着山洪暴发以及泥石流灾害。四川盆地位于我国西南,受其地理位置和地形的影响,该地区的天气和气候复杂多变。尤其对暴雨的预报,是气象工作者一直以来面临的难题。关于四川盆地强降水的研究有很多:有的学者强调大尺度环流背景对暴雨的作用(鲍名, 2007; 陈栋等, 2007, 2010)。有的学者认为中尺度系统是暴雨直接的影响系统,高原涡东移,其湿位涡高低层正负区叠加配置,有利于四川盆地暴雨的发展(黄楚惠等, 2010)。还有学者指出西南涡是影响四川盆地暴雨重要的天气系统,一般在700 hPa上表现得比较明显,西南低涡区内有降水发生,强降水中心位于涡区东北侧(Kuo et al., 1988; 何光碧等, 2005; 于波和林永辉, 2008; Fu et al., 2011; 张朝辉等, 2011)。陈静等(2002)研究了低空急流对四川盆地西北部大暴雨过程的可能机制,发现低空偏南风急流利于暴雨的热力、水汽和动力条件。有研究发现低空急流和高空西风急流的耦合是强暴雨发生的重要原因(朱乾根等, 2001; Yang et al., 2006)。康岚等(2013)通过分析台风对四川暴雨影响的环境场,指出台风与四川暴雨统计关系最密切的台风路径与影响方式。武麦凤等(2013)对比分析了两次台风远距离暴雨发现,远距离台风可以作为扰动源,诱发低空急流,同时延长西风带系统在暴雨区的停滞时间,从而使得降水过程持续。邱静雅等(2015)还指出了位涡在等熵面的移动及演变情况,对强降水中心有指示作用。王茂书和张勇(2011)通过分析发现垂直速度、涡度和

假相当位温等物理因子在2010年7月16~18日暴雨过程中表现得很明显,是预报持续性暴雨的重要手段。

四川省区域持续性暴雨多发生在7月,降水中心主要分布在盆地西部沿山一带及盆地东北部。并且,区域持续性暴雨在2001年后发生频次较前期频繁,特别是持续3 d的持续性暴雨事件发生频率较高(王佳津等, 2017)。本文所选个例为发生在7月中旬和八月中旬持续3 d的暴雨过程,预报上难度大。因此有必要对其对比分析,揭示其原因,寻找异同,总结预报经验,以此提高暴雨预报的准确性,预防暴雨灾害。

## 2 资料和方法

文中主要使用常规探空资料和地面资料,CN05.1格点化的降水资料(吴佳和高学杰, 2013)以及欧洲中期天气预报中心ERA-Interim(ECMWF Reanalysis-Interim)1°(纬度)×1°(经度)再分析资料(Dee et al., 2011; Madonna et al., 2014)。已有研究表明:在青藏高原以及其东部地区,ERA-Interim再分析资料比NCEP和JRA再分析资料适用性更好(李瑞青等, 2012)。

在p坐标系中,忽略垂直速度的水平变化,位涡(Potential Vortex, PV, 记为 $P_v$ )(邱静雅等, 2015)可以表示为:

$$P_v = -g(\zeta + f)\frac{\partial \theta}{\partial p} + \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right), \quad (1)$$

其中, $g$ 为重力加速度; $\zeta$ 为相对涡度; $f$ 为地转牵连涡度; $\theta$ 为位温; $p$ 为气压; $u$ 、 $v$ 分别为纬向和经向风场。由此可见,位涡由绝对涡度,静力稳定度和斜压过程共同决定。

### 3 过程简介

2015年7月13~15日,最大降水区域主要出现在四川南部和攀西地区(图1a),其中峨眉山市、泸县发生了大暴雨(简称“7.13”过程)。7月13日,峨眉山市的降雨量达到了117 mm,为“7.13”

过程日降水量的最大值。泸县的累积降水量达到了153 mm。从逐6 h的降水分布(图2)来看,7月13~14日,暴雨主要分布在四川南部;7月15日,暴雨中心缓慢移至重庆—湖北—贵州等地。

2015年8月16~18日(简称“8.16”过程),最大降水区域主要出现在四川东北部(图1b)。从逐6 h降水分布的演变(图3)可知,降水带自西

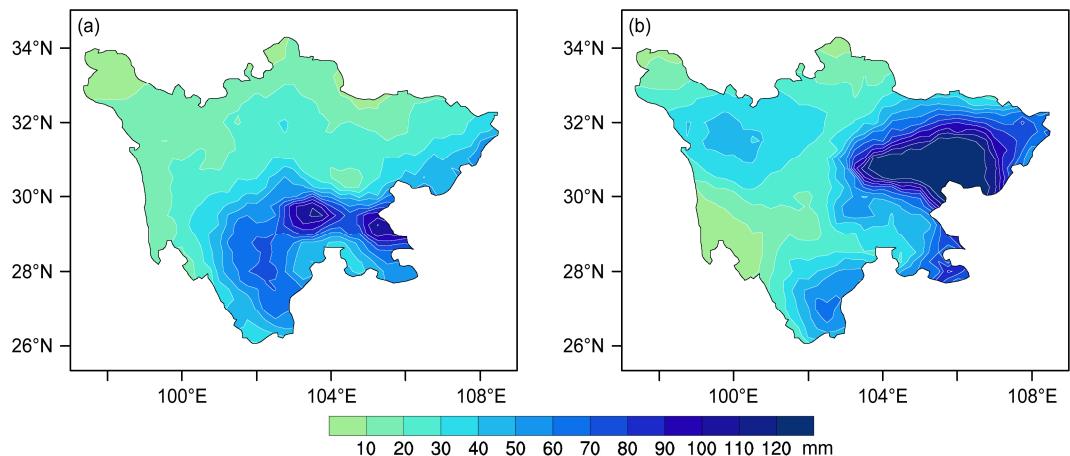


图1 2015年(a)7月13日08:00(北京时间,下同)至15日20:00、(b)8月16日08:00至18日20:00四川暴雨过程降水量

Fig. 1 Rainfall distributions in two heavy rainstorm processes in Sichuan during (a) 0800 LST 13 Jul to 2000 LST 15 Jul 2015 and (b) 0800 LST 16 Aug to 2000 LST 18 Aug 2015

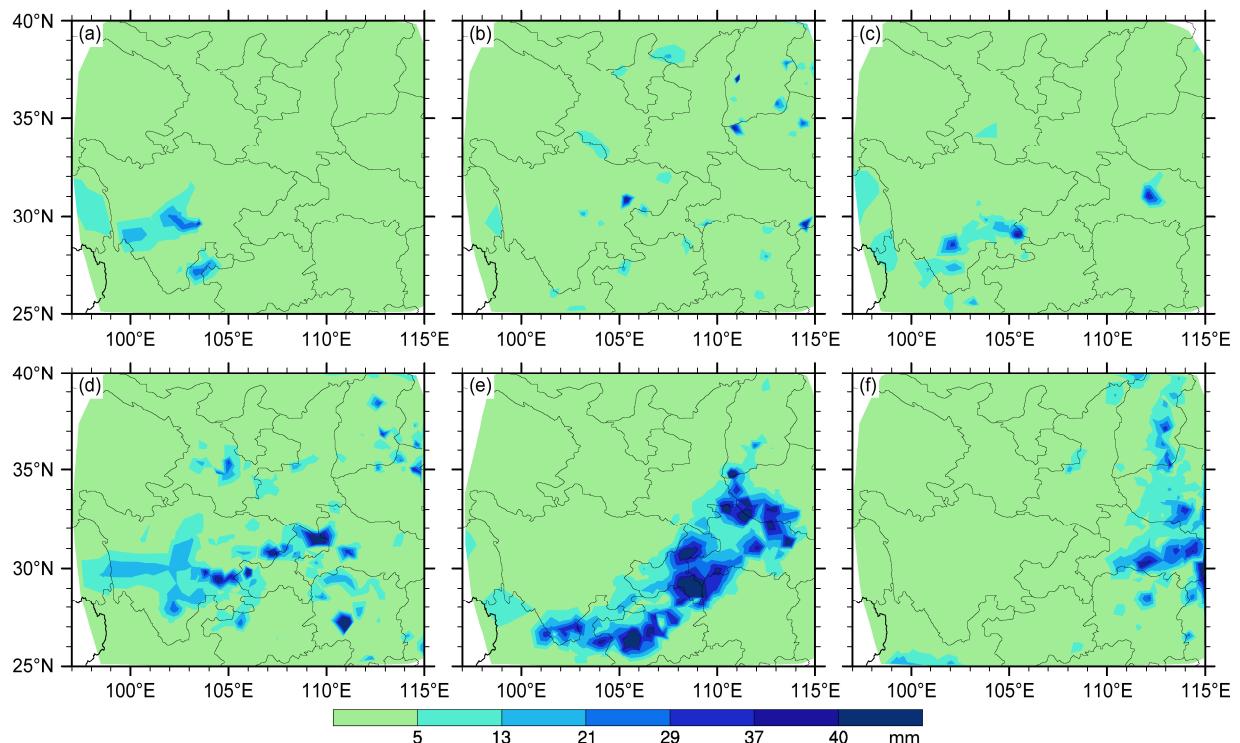


图2 2015年“7.13”过程6 h降水量:(a)7月13日08:00;(b)7月13日20:00;(c)7月14日08:00;(d)7月14日20:00;(e)7月15日08:00;(f)7月15日20:00

Fig. 2 6-h accumulative precipitation during the “7.13” process in Jul 2015: (a) 0800 LST 13 Jul; (b) 2000 LST 13 Jul; (c) 0800 LST 14 Jul; (d) 2000 LST 14 Jul; (e) 0800 LST 15 Jul; (f) 2000 LST 15 Jul

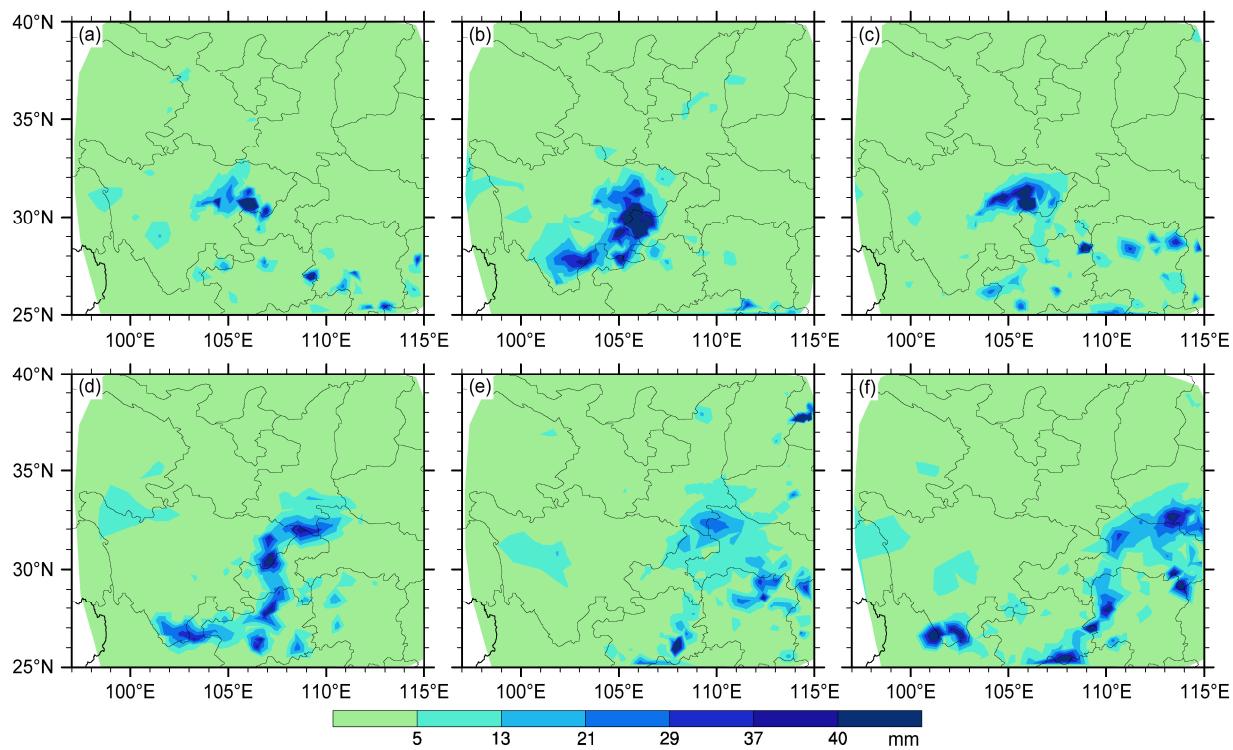


图 3 2015 年“8.16”过程 6 h 小时降水量: (a) 8 月 16 日 20:00; (b) 8 月 17 日 08:00; (c) 8 月 17 日 20:00; (d) 8 月 18 日 08:00; (e) 8 月 18 日 20:00; (f) 8 月 19 日 08:00

Fig. 3 6-h accumulative precipitation during the “8.16” process in Aug 2015: (a) 2000 LST 16 Aug; (b) 0800 LST 17 Aug; (c) 2000 LST 17 Aug; (d) 0800 LST 18 Aug; (e) 2000 LST 18 Aug; (f) 0800 LST 19 Aug

向东移动，具有范围广、局地强度大的特点。8月17日，高坪的降水量达 192 mm，为“8.16”过程日降水量的最大值，也突破了该站历史日降水量的极大值。此外，8月17日，湖南、重庆部分地区也发生了暴雨。随后，8月18日，暴雨中心缓慢移至南昌地区。

## 4 两次暴雨过程的对比分析

### 4.1 环流背景的对比分析

“7.13”过程期间，500 hPa 平均高度场中高纬呈“两槽一脊”形势（图 4a），蒙古上空的冷低压分裂出切断低压位于我国内蒙古上空，中心强度为 556 dagpm，温度场上的冷中心和低压中心重合。蒙古上空到我国新疆上空为低压槽，鄂霍次克海到我国东北部为一深厚的低压槽，整个贝加尔湖上空为高压脊控制。中高纬稳定的“两槽一脊”环流形势有利于冷空气向西南地区移动。新疆上空的低压槽分裂出小槽向中纬度移动，尤其有小槽影响四川盆地。其上空槽线呈东北—西南走向（槽线略），

槽后脊前的偏北气流有利于冷空气南下，同时，槽前正涡度平流有利于上升运动。700 hPa 高度场上，四川位于高原低压和副热带高压之间（图略），东高西低的环流形式有利于四川强降水的发生。从 850 hPa 流场来看，7 月 12 日 20:00，流线在四川南部辐合（图 5a），低层的幅合有利于上升运动发展。7 月 13 日，四川盆地位于气旋性切变中心（图略）；7 月 14 日，四川南部一直维持偏南风，利于暖湿气流向暴雨中心输送；7 月 15 日 08:00，四川上空出现了闭合的低压中心，随后，该低值系统沿着切变线东移（图略），对应着四川上空的降水缓慢结束。

“8.16”过程期间，500 hPa 平均高度场中高纬呈“两脊一槽”形势（图 4b），乌拉尔山—巴尔喀什湖上空为高压脊，暖脊前方的西北气流引导冷空气南下影响我国西北地区。鄂霍次克海上空受高压脊控制，该高压脊的稳定维持有利于蒙古低压持续向南分裂冷空气，影响我国北部。蒙古上空的切断低压向南发展影响我国新疆、内蒙古、东北地区。中低纬地区，东亚大槽即将东移入海，西北太平洋上有热带气旋生成。700 hPa 高度场上，四川东北

部、重庆上空受西南涡(张雪琦和白爱娟, 2015)影响, 四川东北部气旋性风场明显(图略)。从850 hPa流场来看, 8月16日08:00, 四川南部初生闭合的低压系统, 四川上空气旋性风切变维持; 17日08:00, 该闭合的低压系统发展为西南涡(图5b), 并逐渐向东北方向移动; 整个“8.16”过程期间, 四川上空气旋性风切变维持。

“7.13”过程中, 两支高空急流分布在四川上空, 北支呈东北—西南走向, 横跨四川北部、青海东部、甘肃、陕西上空, 急流自西向东移动, 最大风速达到 $35 \text{ m s}^{-1}$ 。南支高空急流位于青藏高原、四川南部上空。7月14日20:00(图略), 低空急流位于四川东南部上空, 风速增大到 $15 \text{ m s}^{-1}$ 。7月15日08:00(图6a), 低空急流范围增大, 四川东部一

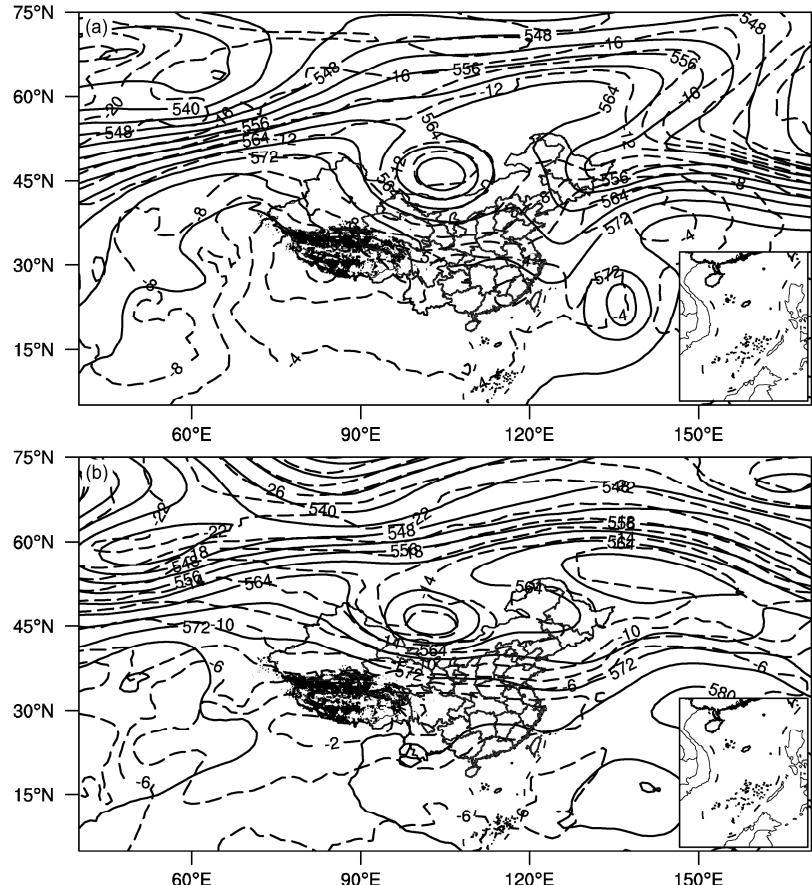


图4 2015年两次暴雨过程500 hPa平均高度场(实线, 单位: dagpm)和温度场(虚线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) (a) 7月13日08:00至15日08:00; (b) 8月16日08:00至18日08:00。阴影区地形高度大于5000 m

Fig. 4 500-hPa average geopotential height (solid lines, units: dagpm) and temperature (dashed lines, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) during two rainstorm processes: (a) 0800 LST 13 Jul to 0800 LST 15 Jul 2015; (b) 0800 LST 16 Aug to 0800 LST 18 Aug 2015. Shaded areas indicate terrain elevation above 5000 m

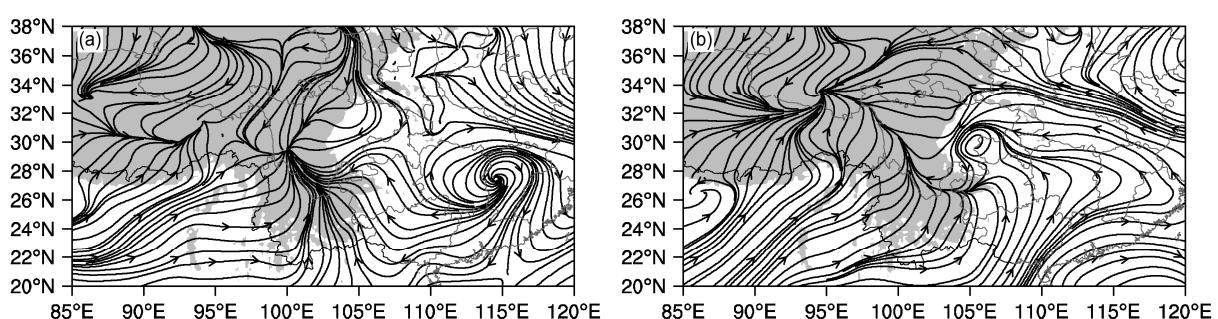


图5 2015年(a)7月12日20:00、(b)8月17日20:00四川上空850 hPa流场。阴影区地形高度大于1500 m

Fig. 5 Streamlines at 850 hPa over Sichuan: (a) 2000 LST 12 Jul 2015; (b) 2000 LST 17 Aug 2015. Shaded areas indicate terrain elevation above 1500 m

重庆西部上空的低空急流风速持续保持  $15 \text{ m s}^{-1}$ 。已有研究表明, 高空急流核左前侧间接热力环流上升支与右前侧下沉支所形成的间接环流上升支正好与低空急流轴附近的上升气流耦合, 产生强烈的上升运动(陆汉城和杨国祥, 2015)。暴雨的落区就位于高低空急流耦合区下方, 正好对应着“7.13”过程暴雨的大值区。

对比“7.13”过程, “8.16”过程期间高空急流更强, 最大风速达到  $45 \text{ m s}^{-1}$ , 自西向东横跨我国西北上空, 建立和维持了高空的条件不稳定。15日08:00至16日08:00, 低空急流自南向北靠近重庆、四川东北部, 低空急流的风速中心达到  $15 \text{ m s}^{-1}$ , 建立和维持了低空的对流不稳定。17日20:00, 低空急流中心风速快速增大, 高、低空急流前沿均到达四川附近(图6b), 两者耦合使得中低空对流上升运动得以向上发展和加强(朱乾根等, 2001)。“8.16”过程暴雨落区就在高空急流和低空急流耦合区附近。

“7.13”过程和“8.16”过程均存在低空急流, 低空急流集中输送底层动量、热量和水汽, 对四川暴雨的产生、维持和加强起着重要作用。两次过程低空急流强度相当, 但“8.16”过程四川、重庆上空有西南涡系统, 促使低层水汽大量辐合。高空急流前端到达四川, 高空急流轴左前侧有强的辐散场, 高、低空急流耦合引起强烈的上升运动, 暴雨落区均位于高、低空急流耦合区附近。

## 4.2 水汽条件的对比分析

四川盆地多面环山, 受其地理位置和复杂地形的影响, 海上的水汽不易输送到盆地中来。因此对四川暴雨的研究, 水汽输送尤其重要, 有必要研究水汽供应的环流形势。

“7.13”过程水汽主要集中在低层, 从整层的水汽通量和水汽通量散度(图7)来看, 本次过程的水汽主要由偏南气流输送。该南风气流直接向北输送来自孟加拉湾暖湿气流的热量和水汽。7月13日08:00, 四川南部出现了约为 $-5 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ 水汽通量的辐合中心(图7a), 对应着四川南部6 h降水约为35 mm(图2a)。7月14日08:00, 四川南部的水汽辐合减弱(图7b); 15日20:00, 四川东南部水汽通量的辐合再次增强(图7c), 水汽通量辐合强弱的变化与四川逐6 h降水强弱的演变基本一致。

“8.16”过程水汽仍然主要来源于孟加拉湾, 与“7.13”过程不同的是: 四川明显位于强水汽通量辐合中心, 并且, 该次过程的水汽通量输送主要受到四川、重庆上空西南涡的影响, 以气旋性环流的方式产生水汽通量的辐合。8月16日20:00, 主要以南风气流向四川东北部输送水汽和热量, 该时, 四川东北部出现了约为 $-4 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ 的辐合中心(图7d), 对应着四川东北部6 h降水约为37 mm(图3a)。8月17日20:00, 水汽通量辐合增大到 $-7 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ (图7e), 对应着四川东北部6 h

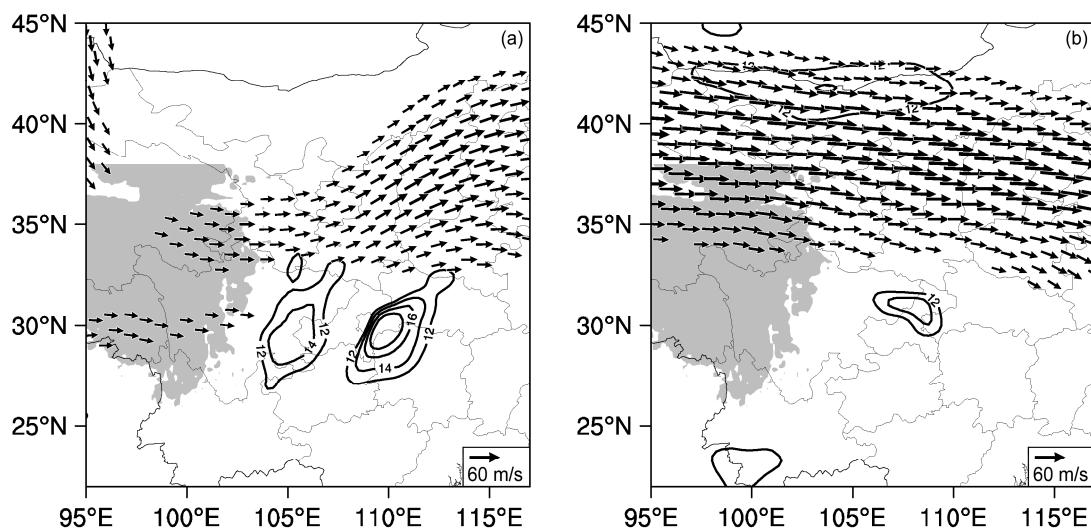


图6 2015年(a)7月15日08:00、(b)8月17日20:00两次暴雨过程200 hPa高空急流(箭头: 风速大于  $30 \text{ m s}^{-1}$ )和700 hPa低空急流(等值线: 风速大于  $12 \text{ m s}^{-1}$ )。阴影区地形高度大于3000 m

Fig. 6 200-hPa (arrows indicate wind speed  $>30 \text{ m s}^{-1}$ ) and 700 hPa (arrows indicate wind speed  $>12 \text{ m s}^{-1}$ ) jet streams: (a) 0800 LST 15 Jul 2015; (b) 2000 LST 17 Aug 2015. Shaded areas indicate terrain elevation above 3000 m

降水约增大到 43 mm (图 3b)。8月 18 日 08:00, 西南涡维持在四川上空, 气旋性环流持续在四川东北部产生强的水汽辐合 (图 7f), 四川东北部 6 h 降水约为 40 mm (图 3c)。“8.16”过程中风场上气旋性曲率最大的地方正好对应着暴雨的落区 (图 3)。

综合上述分析, “8.16”过程强于“7.13”过程的重要原因之一是水汽条件。“8.16”过程期间, 西南涡使得水汽通量和水汽通量辐合出现了迅速的增大。“7.13”过程低纬水汽通量散度弱于“8.16”过程, 又由于水汽远距离输送, 使得到达四川上空的水汽和能量并没有“8.16”过程充足。因此“7.13”过程暴雨强度明显弱于“8.16”过程。

#### 4.3 探空资料的对比分析

“7.13”过程与“8.16”过程的强降水出现在当日晚上以及次日凌晨。因此, 选取具有代表性的西昌站和达州站的探空数据 (李津等, 2017)。常用的物理参数沙氏指数 (Showalter Index, SI) 和抬升指数 (Lifted Index, 简称 LI) 可以反映大气层结稳定性: 当  $SI < 0$  或  $LI < 0$  时, 预示着大气层结

不稳定, 且负值越大, 不稳定程度越大 (刘健文等, 2005)。一般来讲, 出现强对流天气时, 对流有效位能 (Convective Available Potential Energy, 简称 CAPE) 值大于  $1500 \text{ J kg}^{-1}$ , 并且, 对流抑制能量 (Convective Inhibition, 简称 CIN) 有较为合适的值对应, 太大或太小都不利于强对流的发生 (刘健文等, 2005; 叶爱芬等, 2006)。由表 1 可见, 7月 13 日 20:00, 西昌站的沙氏指数为 -0.59, 相比 8 月 16 日 20:00, 达州站的沙氏指数为 -1.42。当  $SI < 0$  时, 预示着气层不稳定。由此可见, 相比西昌站, 达州站附近的气层更不稳定。7月 13 日 20:00, 西昌站的 LI 为 -4.12 K, 8 月 16 日 20:00, 达州站的 LI 为 -3.9 K。CAPE 能反映大气内部不稳定能量, 指示对流能否发展。由两次过程的温度对数压力探空图 (图略) 可知, 西昌站和达州站附近整层大气当日均累计了很强的对流有效位能。具体来讲, “7.13”过程 (7月 13 日 20:00), 西昌站的对流有效位能值为  $2458.8 \text{ J kg}^{-1}$ , 同时, CIN 值为  $70.1 \text{ J kg}^{-1}$ , 最大垂直上升速度高达  $70.1 \text{ m s}^{-1}$ 。对比“8.16”过

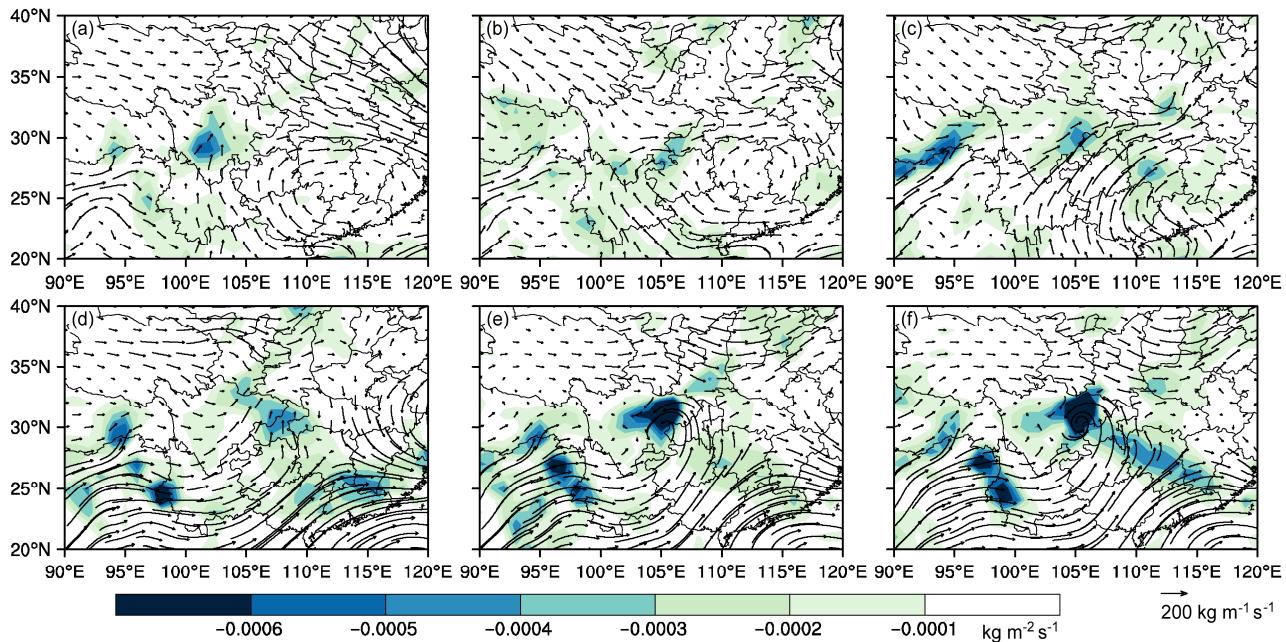


图 7 2015年7月 (a) 13日 08:00、(b) 14日 08:00、(c) 15日 20:00 和8月 (d) 16日 20:00、(e) 17日 20:00、(f) 18日 08:00 水汽通量 (箭头,  $1000\sim200 \text{ hPa}$ ) 和水汽通量散度 (填色)

Fig. 7 Moisture fluxes (vectors,  $1000\sim200 \text{ hPa}$ ) and divergence of moisture fluxes (shaded) in 2015: (a) 0800 LST 13 Jul; (b) 0800 LST 14 Jul; (c) 2000 LST 15 Jul; (d) 2000 LST 16 Aug; (e) 2000 LST 17 Aug; (f) 0800 LST 18 Aug

表 1 西昌站与达州站的物理量

Table 1 Physical quantities at Xichang and Dazhou weather stations

站名	时间	时次	对流有效位能/ $\text{J kg}^{-1}$	垂直上升速度/ $\text{m s}^{-1}$	对流抑制能量/ $\text{J kg}^{-1}$	抬升指数/K	沙氏指数
西昌	7月 13 日	20:00	2458.8	70.1	12.1	-4.12	-0.59
达州	8月 16 日	20:00	1202.7	49	0	-3.9	-1.42

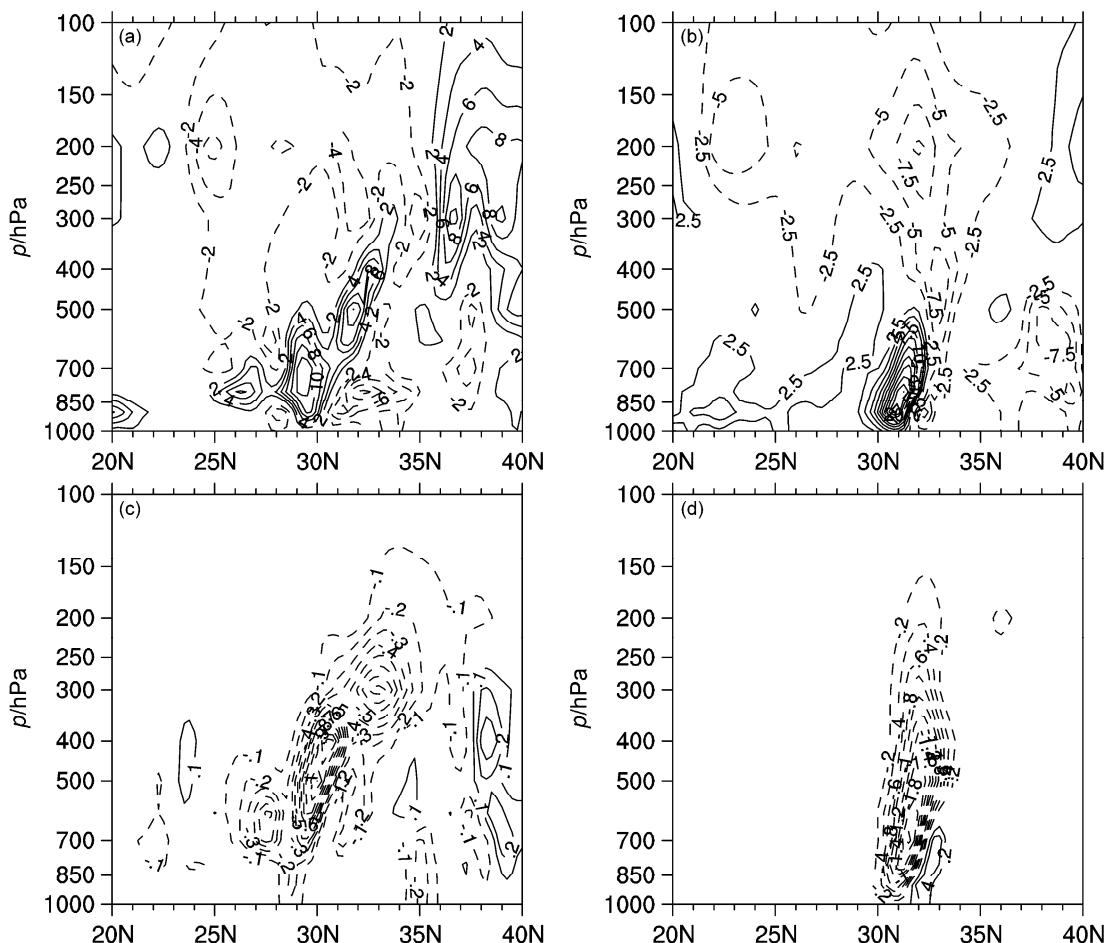
图8 过暴雨中心涡度(上; 单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )、垂直速度(下; 单位:  $\text{Pa s}^{-1}$ ): (a, c) 2015年7月14日20:00; (b, d) 2015年8月17日08:00

Fig. 8 Meridional–vertical cross sections of vorticity (upper; units:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and vertical velocity (lower; units:  $\text{Pa s}^{-1}$ ) across the rainstorm centers: (a, c) 2000 LST 14 Jul 2015; (b, d) 0800 LST 17 Aug 2015

程(8月16日20:00),达州站的CAPE值为1202.7  $\text{J kg}^{-1}$ , CIN值为0,最大垂直上升速度为 $49 \text{ m s}^{-1}$ 。综合对两次过程的SI、CAPE和CIN可知,两次过程低层大气中集聚了大量的不稳定能量,有利于对流的发生(齐琳琳等,2005; 刘璐等,2015)。

## 5 两次暴雨过程的动力、热力条件的诊断分析

### 5.1 动力条件对比分析

“7.13”过程正涡度的垂直层次发展深厚,从过暴雨中心的涡度经向剖面图(图8a)可知:在 $30^{\circ}\text{N}$ , $700 \text{ hPa}$ 上有 $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的涡度中心, $300 \text{ hPa}$ 附近有一个 $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的负值中心,低层辐合、高层辐散的动力配置有利于维持和加强上升运动,从 $850 \text{ hPa}$ 到 $200 \text{ hPa}$ 上有 $1.2 \text{ Pa s}^{-1}$ 的强上升气流

(图8c),在其南侧和北侧各有下沉运动,这种分布有助于形成反馈机制,从而进一步促进上升运动的维持和发展。

“8.16”过程暴雨中心的涡度经向剖面 $300 \text{ hPa}$ 以下为正涡度,其上为负涡度, $700 \text{ hPa}$ 有中心为 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 正值中心(图8b),最强上升中心 $2.2 \text{ Pa s}^{-1}$ 从 $700 \text{ hPa}$ 一直延伸到对流层顶(图8d),北侧有弱的下沉运动,这一时段与“8.16”过程强降水出现的时间吻合。

### 5.2 热力条件对比分析

“7.13”过程发生前,7月11日20:00,从低层到 $850 \text{ hPa}$ ,四川处于不稳定大气中(于仁成和阎丽凤,1999),假相当位温( $\theta_{se}$ ) $\geq 340 \text{ K}$ , $\theta_{se}$ 的高值区在暴雨期间一直持续。同时,对流层顶的高位涡逐渐下传, $38^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ , $300 \text{ hPa}$ 上空有中心约为 $1.3 \text{ PVU}$ 的高位涡区, $0.5 \text{ PVU}$ 的位涡区延伸到

600 hPa 以下(图略)。7月12日08:00, 四川上空的不稳定大气上升到700 hPa, 低层的不稳定大气为暴雨的发生积聚了充分的能量, 干冷空气强度增大到1.5 PVU(图9a)。已有研究表明: 对流层中低层出现高位涡中心的地区可能形成暴雨中心(戴廷仁等, 2006; 段海霞等, 2007)。7月12日20:00至7月14日08:00, 高纬度对流层顶的高位涡沿着假相当位温密集区继续下传(梁生俊和马晓华, 2012), 12日20:00, 38°N~40°N上空300 hPa附近有强度为1.25 PVU的大值中心, 位涡扰动沿着等假相当位温线向南、向下输送, 28°N~30°N上空900 hPa,  $\theta_{se}$ 达到了354 K(图9b)。13日20:00, 35°N上空850 hPa的位涡扰动继续往南输送, 28°N~30°N附近700 hPa上空冷空气强度持续增大(图9c)。14日20:00, 31°N、700 hPa仍有高于2 PVU位涡大值中心, 四川南部 $\theta_{se}$ 保持在350

K以上(图9d)。15日08:00, 四川上空位涡密集区仍然存在,  $\theta_{se}$ 逐渐减弱, 降水减弱(图略)。15日20:00, 暖空气势力进一步减弱, 降水逐渐结束。由此可见,  $\theta_{se}$ 的增大、减小与暴雨的发生、结束有着良好的对应关系, 对于暴雨的预报有一定的指示意义。

“8.16”过程发生前, 8月15日08:00, 从低层到850 hPa四川东北部上空大气处于对流不稳定中,  $\theta_{se} \geq 350$  K, 8月15日20:00, 不稳定大气上升到600 hPa(图略), 直到16日20:00, 低层的对流不稳定大气持续维持。整个暴雨期间,  $\theta_{se} \geq 350$  K的高值区一直持续, 低层的不稳定大气为“8.16”过程的发生积聚了充分的能量。

就过暴雨中心 $\theta_{se}$ 的垂直梯度而言, “8.16”过程 $\theta_{se}$ 的垂直梯度最大约为-3/25(图10b), “7.13”过程 $\theta_{se}$ 的垂直梯度最大约为-1/10(图10a), 预

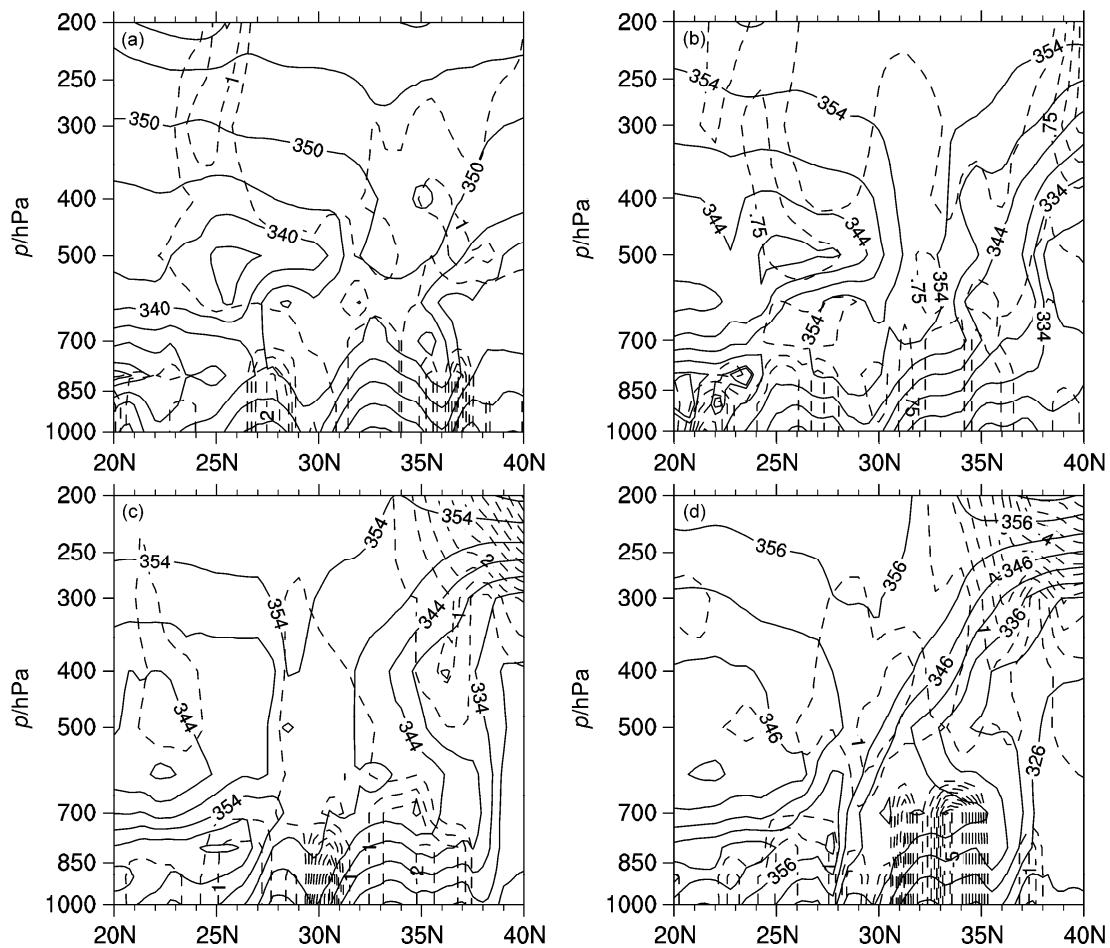


图9 过暴雨中心 $\theta_{se}$ (实线, 单位: K)和位涡(虚线, 单位: PVU)经向剖面叠加: (a) 2015年7月12日08:00; (b) 2015年7月12日20:00; (c) 2015年7月13日20:00; (d) 2015年7月14日20:00

Fig. 9 Meridional-vertical cross sections of  $\theta_{se}$  (solid lines, units: K) and potential vorticity (dashed lines, units: PVU) across the storm centers: (a) 0800 LST 12 Jul 2015; (b) 2000 LST 12 Jul 2015; (c) 2000 LST 13 Jul 2015; (d) 2000 LST 14 Jul 2015

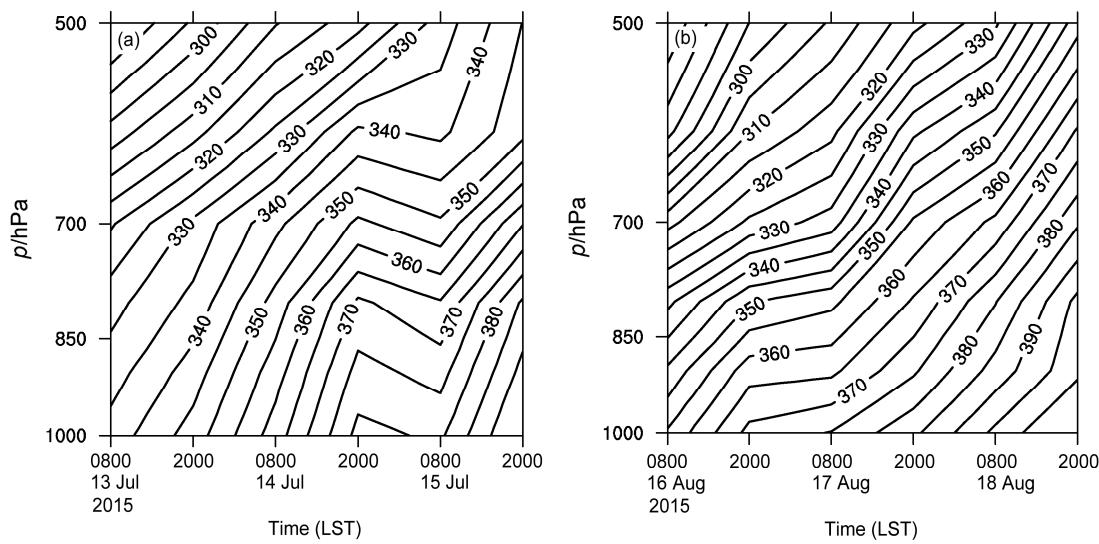


图 10 过暴雨中心的假相当位温垂直剖面(单位: K): (a) “7.13”过程( $28^{\circ}\text{N}, 103^{\circ}\text{E}$ ); (b) “8.16”过程( $31^{\circ}\text{N}, 106^{\circ}\text{E}$ )  
Fig. 10 Vertical cross sections of  $\theta_{\text{se}}$ (units: K) across the storm centers: (a) “7.13” process ( $28^{\circ}\text{N}, 103^{\circ}\text{E}$ ); (b) “8.13” process ( $31^{\circ}\text{N}, 106^{\circ}\text{E}$ )

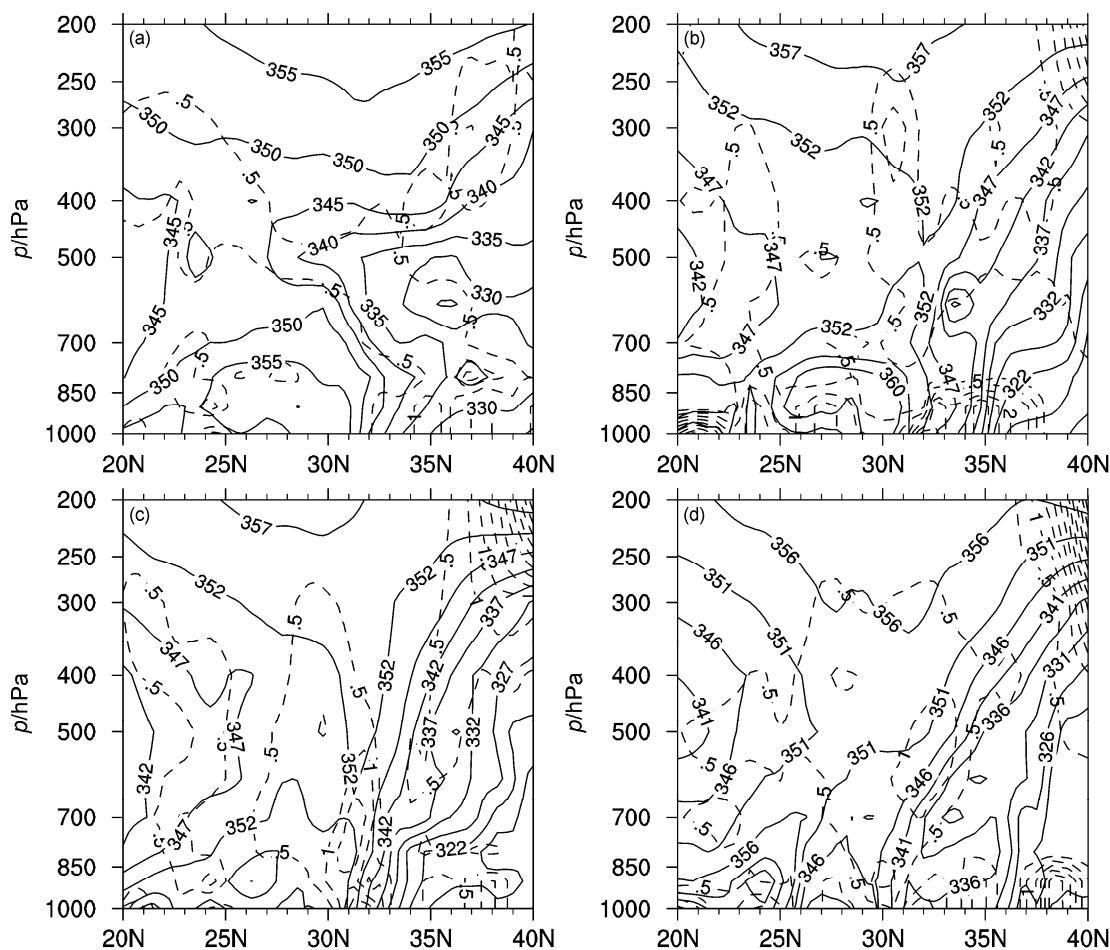


图 11 过暴雨中心  $\theta_{\text{se}}$  (实线, 单位: K) 和位涡 (虚线, 单位: PVU) 经向剖面叠加: (a) 2015 年 8 月 16 日 08:00; (b) 2015 年 8 月 16 日 20:00;  
(c) 2015 年 8 月 17 日 08:00; (d) 2015 年 8 月 18 日 20:00  
Fig. 11 Meridional-vertical cross sections of  $\theta_{\text{se}}$  (solid lines, units: K) and potential vorticity (dashed lines, units: PVU) across the storm centers: (a) 0800  
LST 16 Aug 2015; (b) 2000 LST 16 Aug 2015; (c) 0800 LST 17 Aug 2015; (d) 2000 LST 18 Aug 2015

示着“8.16”过程低层大气的对流不稳定程度强于“7.13”过程,这也部分解释了“8.16”过程降水强于“7.13”过程的原因。

同时,“8.16”过程对流层顶的高位涡仍然具有逐渐下传特征:30°N~32°N附近,15日20:00,对流层上空有中心约为1.0 PVU的高位涡区,0.5 PVU的位涡中心一直延伸到500 hPa(图略)。16日08:00,0.5 PVU的位涡中心下传到四川东北部900 hPa上空(图11a)。16日20:00,随着高纬的干冷空气逐渐向南,向下输送,35°N,850 hPa上空有强度约为2.0 PVU的大值中心,30°N~32°N附近位涡变得密集,干冷空气输送到850 hPa上空与不稳定的暖空气交汇(图11b)。17日08:00,850 hPa附近的干冷空气强度增大到1.5 PVU(图11c)。18日20:00(图11d),30°N~32°N对流层以下的干冷空气强度仍然维持在0.5 PVU左右。19日,θ<sub>se</sub>开始减小,暖空气势力逐渐减弱,降水结束。

## 6 结论与讨论

通过对2015年夏季四川盆地“7.13”过程和“8.16”过程环境场的对比分析,加深和完善了对于四川盆地暴雨机制的认识,对提高四川盆地暴雨预测有一定的科学价值和指导意义,得出如下结论:

(1) 两次过程中高纬度环流形势稳定,为两次暴雨过程提供了有利的背景场。“7.13”过程有利的环境形势有高空槽,高、低空急流。“8.16”过程有利的环境形势有高、低空急流和西南涡。

(2) 两次过程中均存在低空急流集中输送动量、热量和水汽,对四川暴雨的产生、维持和加强起着重要作用。“7.13”过程主要以南风急流输送水汽到四川南部。“8.16”过程,低空急流输送到四川后,西南涡促使低层水汽大量辐合,暴雨的落区与强辐合中心吻合。“8.16”过程强于“7.13”过程的原因可能是,低空急流带输送水汽过程中,西南涡使得四川上空附近的空气出现迅速的辐合。这也导致两次过程的水汽输送通道存在明显差异。

(3) 两次过程中均存在明显的高空急流,高空急流前端到达四川,高空急流核左前侧间接热力环流上升支与右前侧下沉支所形成的间接环流上升支正好与低空急流轴附近的上升气流耦合,产生强烈的上升运动,暴雨就发生在高、低空急流耦合区下方。其中,“8.16”过程的高空急流强于“7.13”

过程的高空急流,这也是“8.16”过程强于“7.13”过程的可能原因之一。

(4) 对比两次过程各个物理量可知:两次过程发生前,四川上空的大气均处于极其不稳定的状态。“8.16”过程θ<sub>se</sub>的大值区明显强于“7.13”过程θ<sub>se</sub>的大值区,并且,“8.16”过程中、低层的不稳定大气比“7.13”过程更加深厚。两次过程都有中高层的干冷空气沿着θ<sub>se</sub>向南、向下输送的现象,位涡大值区与强降水区域几乎吻合。“8.16”过程大气对流不稳定强于“7.13”过程,从而也解释了“8.16”过程强于“7.13”过程的原因。

必须指出的是,本文仅从天气诊断的角度对2015年夏季四川盆地两次暴雨过程的环境场进行了对比分析。对于四川盆地暴雨的影响机制,还存在进一步深入研究的问题。具体如下:

(1) 文中说明了高空急流、低空急流、西南涡有利于四川盆地暴雨形成,但不同因子对四川盆地暴雨影响的相对重要性和差异性还缺乏深入探究。对该问题的深入认识将有助于更好地预测四川盆地暴雨。

(2) 影响四川盆地暴雨因素除了高空急流、低空急流、西南涡外,已有的研究表明还有多种因素,如:高原涡、副热带高压以及热带气旋。这些因素对四川盆地暴雨的相对重要性仍然不清楚,有必要借助数值模式,开展进一步研究。

## 参考文献 (References)

- 鲍名. 2007. 近50年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景 [J]. 大气科学, 31 (5): 779~792. Bao Ming. 2007. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 31 (5): 779~792, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.05.03.
- 陈栋, 顾雷, 蒋兴文. 2010. 1981—2000年四川夏季暴雨大尺度环流背景特征 [J]. 大气科学学报, 33 (4): 443~450. Cheng Dong, Gu Lei, Jiang Xingwen. 2010. Characteristics of large-scale circulation background of summer heavy rainfall in Sichuan during 1981~2000 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 443~450, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.04.008.
- 陈栋, 李跃青, 黄荣辉. 2007. 在“鞍”型大尺度环流配置下西南低涡发展的物理过程及其对川东暴雨发生的作用 [J]. 大气科学, 31 (2): 185~201. Chen Dong, Li Yueqing, Huang Ronghui. 2007. The physical process analyses of the southwest vortex development and its effect on heavy rainfall in eastern Sichuan under the saddle pattern background of large-scale circulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 185~201, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.005.

- Chinese), 31 (2): 185–201, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.01.
- 陈静, 李川, 谌贵珣. 2002. 低空急流在四川“9.18”大暴雨中的触发作用 [J]. 气象, 28 (8): 24–29. Chen Jing, Li Chuan, Shen Guixun. 2002. The trigger action of low-level jet in a heavy rain of Sichuan Province [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 28 (8): 24–29, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2002.08.005.
- 戴廷仁, 寿绍文, 陈艳秋, 等. 2006. 辽宁地区一次暴雨过程成因的位涡诊断分析 [J]. 自然灾害学报, 15 (3): 31–36. Dai Tingren, Shou Shaowen, Chen Yanqiu, et al. 2006. Diagnostic analysis of potential vorticity for cause of a rainstorm in Liaoning area [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 15 (3): 31–36, doi:10.3969/j.issn.1004-4574.2006.03.006.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137 (656): 553–597, doi:10.1002/qj.828.
- 段海霞, 陆维松, 毕宝贵. 2007. “049”川渝暴雨的  $Q$  矢量与湿位涡分析 [J]. 南京气象学院学报, 30 (5): 674–680. Duan Haixia, Lu Weisong, Bi Baogui. 2007.  $Q$  vector and moist potential vorticity analysis for the heavy rainfall in September 2004 in Sichuan and Chongqing [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (5): 674–680, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2007.05.012.
- Fu S M, Sun J H, Zhao S W, et al. 2011. The energy budget of a southwest vortex with heavy rainfall over south China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28 (3): 709–724, doi:10.1007/s00376-010-0026-z.
- 何光碧, 陈静, 李川, 等. 2005. 低涡与急流对“04.9”川东暴雨影响的分析与数值模拟 [J]. 高原气象, 24 (6): 1012–1023. He Guangbi, Chen Jing, Li Chuan, et al. 2005. Analysis and numerical simulation for effects of vortex and jet stream on heavy rain in East Sichuan in September 2004 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (6): 1012–1023, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.06.023.
- 黄楚惠, 顾清源, 李国平, 等. 2010. 一次高原低涡东移引发四川盆地暴雨的机制分析 [J]. 高原气象, 29 (4): 832–839. Huang Chuhui, Gu Qingyuan, Li Guoping, et al. 2010. Mechanism analysis of Plateau vortex moving east trigger rainstorm in Sichuan Basin [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (4): 832–839.
- 康岚, 郝丽萍, 罗玲, 等. 2013. 1002号台风对四川盆地大暴雨的影响分析 [J]. 热带气象学报, 29 (1): 169–176. Kang Lan, Hao Liping, Luo Ling, et al. 2013. The analysis of the effect of typhoon 1002 on storm rainfall in Sichuan Basin [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 29 (1): 169–176, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.01.022.
- Kuo Y H, Cheng L S, Bao J W. 1988. Numerical simulation of the 1981 Sichuan flood. Part I: Evolution of a mesoscale southwest vortex [J]. Mon. Wea. Rev., 116 (12): 2481–2504, doi:10.1175/1520-0493(1988)116<2481: NSOTSF>2.0.CO;2.
- 李津, 赵思雄, 孙建华. 2017. 一次华北破纪录暴雪成因的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 22 (6): 683–698. Li Jin, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2017. Analysis of a record heavy snowfall event in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (6): 683–698, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16121.
- 李瑞青, 吕世华, 韩博, 等. 2012. 青藏高原东部三种再分析资料与地面气温观测资料的对比分析 [J]. 高原气象, 31 (6): 1488–1502. Li Ruiqing, Lu Shihua, Han Bo, et al. 2012. Preliminary comparison and analyses of air temperature at 2m height between three reanalysis data-sets and observation in the east of Qinghai-Xiang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (6): 1488–1502.
- 梁生俊, 马晓华. 2012. 西北地区东部两次典型大暴雨个例对比分析 [J]. 气象, 38 (7): 804–813. Liang Shengjun, Ma Xiaohua. 2012. Comparative analysis of characteristics of two typical rainstorm cases in the east of Northwest China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (7): 804–813.
- 刘健文, 郭虎, 李耀东, 等. 2005. 天气分析预报物理量计算基础 [M]. 北京: 气象出版社, 81–142. Liu Jianwen, Guo Hu, Li Yaodong, et al. 2005. Physical Quantity Calculation Basis for Weather Analysis and Forecast (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 81–142.
- 刘璐, 冉令坤, 周玉淑, 等. 2015. 北京“7.21”暴雨的不稳定性及其触发机制分析 [J]. 大气科学, 39 (3): 583–595. Liu Lu, Ran Lingkun, Zhou Yushu, et al. 2015. Analysis on the instability and trigger mechanism of torrential rainfall event in Beijing on 21 July 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 583–595, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.14144.
- 陆汉城, 杨国祥. 2015. 中尺度天气原理和预报 (3 版) [M]. 北京: 气象出版社, 60–66. Lu Hancheng, Yang Guoxiang. 2015. Principle and Forecast of Mesoscale Weather (3rd ed) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 60–66.
- Madonna E, Wernli H, Joos H, et al. 2014. Warm conveyor belts in the ERA-interim dataset (1979–2010). Part I: Climatology and potential vorticity evolution [J]. J. Climate, 27 (1): 3–26, doi:10.1175/JCLI-D-12-00720.1.
- 齐琳琳, 刘玉玲, 赵思雄. 2005. 一次强雷雨过程中对流参数对潜势预测影响的分析 [J]. 大气科学, 29 (4): 536–548. Qi Linlin, Liu Yuling, Zhao Sixiong. 2005. The analyses of convective parameters and their potential predictability in a severe thunderstorm rain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (4): 536–548, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.04.05.
- 邱静雅, 李国平, 郝丽萍. 2015. 高原涡与西南涡相互作用引发四川暴雨的位涡诊断 [J]. 高原气象, 34 (6): 1556–1565. Qiu Jingya, Li Guoping, Hao Liping. 2015. Diagnostic analysis of potential vorticity on a heavy rain in Sichuan Basin under interaction between plateau vortex and southwest vortex [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34 (6): 1556–1565, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00117.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225. Tao Shiyuan. 1980. Rainstorm in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225.
- 王佳津, 陈朝平, 刘莹, 等. 2017. 四川省持续性暴雨定义及时空分布特征 [J]. 气象科技, 45 (2): 331–341. Wang Jiajin, Chen Chaoping, Liu Ying, et al. 2017. Statistical analysis of persistent heavy rainfall in Sichuan [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 45 (2): 331–341, doi:10.19517/j.1671-6345.20160242.
- 王茂书, 张勇. 2011. 2010 年 7 月 16~18 日巴中市持续性暴雨天气诊断分析 [J]. 高原山地气象研究, 31 (3): 43–48. Wang Maoshu, Zhang Yong. 2011. Diagnostic analysis on continual rainstorm from July 16 to July 18, 2010 [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 31 (3): 43–48, doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2011.03.009.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报, 56 (4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie.

2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56 (4): 1102–1111, doi:10.6038/cjg20130406.
- 武麦风, 肖湘卉, 曹玲玲, 等. 2013. 两次台风远距离暴雨过程的对比分析 [J]. 暴雨灾害, 32 (1): 32–37. Wu Maifeng, Xiao Xianghui, Cao Lingling, et al. 2013. Comparative analysis on two rainstorm processes affected by distant typhoon [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 32 (1): 32–37, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2013.01.005.
- Yang X, Feng G, Kheong D S C. 2006. Call admission control for multiservice wireless networks with bandwidth asymmetry between uplink and downlink [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 55(1): 360–368, doi:10.1109/TVT.2005.861202.
- 叶爱芬, 伍志方, 肖伟军, 等. 2006. 对流有效位能在强对流预报中的应用研究 [J]. 热带气象学报, 22 (5): 484–490. Ye Aifen, Wu Zhifang, Xiao Weijun, et al. 2006. A study of application of cape in severe convective weather prediction [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (5): 484–490, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.05.011.
- 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 Bo, Lin Yonghui. 2008. A case study of southwest vortex causing heavy rainfall in eastern Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (1): 141–154, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.13.
- 于仁成, 阎丽凤. 1999. 从一次大暴雨过程看大中尺度间的相互作用 [J]. 大气科学, 23 (4): 504–512. Yu Rencheng, Yan Lifeng. 1999. Interaction of large scale and mesoscale from a heavy rainstorm process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (4): 504–512, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.04.14.
- 张朝辉, 李国平, 黄楚惠. 2011. 一次引发四川盆地南部暴雨的西南低涡湿旋转量分析 [J]. 高原山地气象研究, 31 (1): 46–50. Zhang Chaohui, Li Guoping, Huang Chuhui. 2011. Wet rotation analysis of southwest vortex causing a heavy rain in southern Sichuan Basin [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 31 (1): 46–50, doi:10.3969/j.issn.1674-2184-2011.01.008.
- 张雪琦, 白爱娟. 2015. “15·8”川东南涡暴雨的  $Q$  矢量分析 [J]. 高原山地气象研究, 35 (3): 32–38. Zhang Xueqi, Bai Aijuan. 2015.  $Q$ -vector analysis of the southwest vortex rainstorm in “15·8” in southeast Sichuan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 35 (3): 32–38, doi:10.3969/j.issn.1674-2184-2015.03.005.
- 朱乾根, 周伟灿, 张海霞. 2001. 高低空急流耦合对长江中游强暴雨形成的机理研究 [J]. 南京气象学院学报, 24 (3): 308–314. Zhu Qiangen, Zhou Weican, Zhang Haixia. 2001. Mechanism of the formation of torrential rain by coupled high/low level jets over the middle reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 24 (3): 308–314, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2001.03.002.