

陈芳丽,姜帅,李明华,等,2021. 边界层急流在粤东暴雨中心两次极端强降水过程中的作用[J]. 气象,47(3):290-302. Chen F L, Jiang S, Li M H, et al, 2021. The role of boundary layer jet in two severe rainfalls over eastern region of Guangdong Province [J]. Meteor Mon, 47(3):290-302(in Chinese).

边界层急流在粤东暴雨中心两次 极端强降水过程中的作用^{*}

陈芳丽¹ 姜 帅^{1,2} 李明华^{1,3,4} 曾丹丹¹ 马泽义^{1,2} 李娇娇^{1,2} 甘 泉¹

1 广东省惠州市气象局,惠州 516001

2 广东省惠州市突发事件预警信息发布中心,惠州 516001

3 深圳市气象局(台),深圳 518040

4 深圳南方强天气研究重点实验室,深圳 518040

提 要: 基于广东省气象观测资料、汕尾多普勒天气雷达产品和全球再分析资料 CSFR, 分析了 2013 年 8 月和 2018 年 8 月发生在粤东暴雨中心的破纪录极端强降水过程, 阐明边界层急流的作用。结果表明: (1) 两次过程的主要影响系统分别为长时间缓慢移动的 1311 号台风尤特残余环流和季风低压外围环流, 当粤东暴雨中心处于台风环流东南侧和季风低压东侧时, 边界层急流在该区域辐合抬升, 形成的中尺度能量锋利于强降水的触发; (2) 边界层急流为强降水提供了充沛的、源源不断的水汽条件, 同时配合特殊地形的摩擦、阻挡等作用, 在粤东暴雨中心内形成了明显的水汽通量辐合; (3) 持续性强降水发展期间, 大气层结长时间处于不稳定状态与对流层低空暖湿平流的不断输送密切相关。两次过程中不同点主要表现为边界层急流强度和风向不同, 由此带来的气流辐合方式和强降水范围有明显的差异, 季风低压影响过程中边界层急流作用更显著。

关键词: 边界层急流, 极端强降水, 粤东暴雨中心, 惠东高潭

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.03.003

The Role of Boundary Layer Jet in Two Severe Rainfalls over Eastern Region of Guangdong Province

CHEN Fangli¹ JIANG Shuai^{1,2} LI Minghua^{1,3,4} ZENG Dandan¹

MA Zeyi^{1,2} LI Jiaojiao^{1,2} GAN Quan¹

1 Huizhou Meteorological Office of Guangdong Province, Huizhou 516001

2 Huizhou Emergency Early Warning Information Release Center of Guangdong Province, Huizhou 516001

3 Shenzhen Meteorological Bureau, Shenzhen 518040

4 Shenzhen Key Laboratory of Severe Weather in South China, Shenzhen 518040

Abstract: Based on meteorological monitoring data in Guangdong Province, the Shanwei radar data and global reanalysis data CFSR, this study analyzed the processes of two record-breaking extremely severe precipitation events in August 2013 and August 2018 over the eastern part of Guangdong, aiming to expound the effect of boundary layer jet. The results are as follows. (1) The main influence systems of the two processes respectively were the long time slowly-moving residual circulation of Typhoon Utor and the outer circulation of monsoon depression. When the eastern region of Guangdong was located on the southeast

^{*} 广东省自然科学基金项目(2019A1515010814)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-091)和广东省气象局科研项目(GRMC2017M29)共同资助

2020 年 2 月 25 日收稿; 2020 年 7 月 29 日收修定稿

第一作者: 陈芳丽, 主要从事中短期气象预报及服务工作. E-mail: 419569019@qq.com

side of typhoon circulation or the east side of monsoon depression, the convergence and uplift of boundary layer jet formed clear mesoscale energy fronts, which were the favorable conditions for severe precipitation. (2) Boundary layer jet provided abundant and continuous water vapor conditions for the severe rainfall, cooperated with the effect of special topographic friction and countercheck, thus remarkable convergence of water vapor flux was formed in the east of Guangdong. (3) During the development of persistent heavy rainfall, the atmospheric stratification was unstable for a long time, which was closely related to the continuous transport of warm and wet advection in the lower troposphere. The major differences between the two processes mainly lies in the differences of intensity and wind direction of boundary layer jet, thus the way of airflow convergence and scope of severe rainfall were significantly different. The role of boundary layer jet is revealed more significantly during the influence process of monsoon depression.

Key words: boundary layer jet, extreme severe rainfall, rainstorm center in eastern region of Guangdong, Gaotan of Huidong

引 言

对流层低层的暖湿水汽输送是华南暴雨过程中不可或缺的条件之一,而暖湿水汽的输送往往是由低空急流完成的。据统计,大约75%的暴雨在出现前一天有低空急流,20%的暴雨与低空急流同时出现(林良勋等,2006)。低空急流不仅为暴雨的发生发展提供了充沛的水汽条件,在其前方产生水汽通量辐合,也使得大气层结产生热力不稳定等(梁红丽和程正泉,2017;郑婧等,2018;陈健康等,2019),与暴雨之间也存在正反馈现象(王春红和蒋全荣,1997;刘鸿波等,2014;何立富等,2016)。近年来有许多学者关注华南暴雨中低空急流的作用(刘淑媛等,2003;陈炳洪等,2011;何立富等,2016;苗春生等,2017;冯晋勤等,2017;文萍等,2019;蔡景就等,2019),或索马里急流越赤道输送对我国初夏降水的影响(石文静和肖子牛,2013),也有一些学者聚焦边界层急流的重要性,张端禹等(2014)指出华南前汛期暖区暴雨过程中,边界层偏南风急流的生消活动与水平尺度均较重要。孔期和林建(2017)分析一次华南暴雨过程时指出广东东南部暖区暴雨由边界层风速辐合及地形海岸线作用产生,边界层辐合特征最清楚。曾智琳等(2019)在探讨一次华南沿海强降水过程的对流触发与维持时,提出了边界层风场与汕尾海陆边界及特殊地形结构配合下形成的一种对流维持机制。Du and Chen(2018;2019a)和Chen et al(2018)对低空急流(LLJs)和南海的边界层急流(BLJs)以及季风日变化等方面做了大量研究,指出南海的BLJs与暖区暴雨关系更加密切。基于上述

成果,本研究旨在探讨边界层急流在惠东高潭和汕尾附近地区近10年来的两次超历史纪录的极端强降水过程的作用。

对于华南沿海地区,一线业务人员在预报预测业务中发现在没有850 hPa急流存在或西南风速较弱的情况下,925 hPa偏南气流的扰动也可引起暖区暴雨,这说明边界层气流对于华南沿海暴雨不可忽视的作用。在2018年8月超历史纪录的极端强降水过程中(以下简称“18·8”),雨带基本位于广东中、东部沿海地区,最强降水中心位于粤东暴雨中心区域内。对于此次过程,陈芳丽等(2018)、李明华等(2019a)、蔡景就等(2019)研究发现925 hPa及其以下的边界层急流起着非常重要的作用。与“18·8”过程相隔仅5年的2013年8月极端强降水过程(以下简称“13·8”),降水范围覆盖整个广东省,但最强降水落区也是出现在粤东暴雨中心内,分析发现强盛的季风急流对此次过程起关键性作用(陈芳丽等,2014;程正泉等,2014;罗秋红等,2015)。即两次不同大气环流背景形势下的极端强降水,最强降水中心都出现在粤东暴雨中心,过程中边界层急流作用不可忽视,那么边界层急流在粤东暴雨中心极端强降水过程中的作用是什么?这是个值得探讨的问题。

此外,“13·8”和“18·8”极端强降水造成粤东暴雨中心内严重的洪涝、地质等灾害,给两大关系民生的惠东白盆珠水库和汕尾公平水库的库容和泄洪等提出巨大挑战。由于经历和总结分析了“13·8”过程,当地气象局在预报和决策服务“18·8”过程中及时应对(李明华等,2019b),为政府防灾减灾救灾提供了可靠、有效的气象保障。因此,对“13·8”和

“18·8”过程进一步的深入研究非常有必要和意义。因此,本研究着眼于两次过程中以惠东高潭为代表站的最强降水时段内,边界层急流对粤东暴雨中心极端强降水的作用进行论述,以期为今后该区域强降水的预报预测提供理论依据。

1 资料与方法

本研究主要通过天气学统计进行分析和归纳总结,所用数据包括再分析资料和地面观测数据等:2013年8月和2018年8—9月美国国家环境预报中心的CFSR(NCEP Climate Forecast System Reanalysis)逐6h全球再分析数据,水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,垂直分辨率共37层;2013年8月和2018年8—9月广东省地面气象监测站点的降水、风和气温,阳江、香港和河源探空站数据,以及汕尾新一代多普勒天气雷达产品;地形图取自华南区域卫星遥感数据分析与应用平台。

粤东暴雨中心范围自西向东包括惠州惠东东部山区、汕尾全市、揭阳中部和汕头西部(陈芳丽等,2019),而最核心区域主要是沿莲花山山脉两侧的汕尾中北部和惠东高潭附近地区。“13·8”过程最强降水时段为2013年8月16日14时至17日14时,“18·8”过程最强降水时段为2018年8月30日05时至31日05时。

2 “13·8”和“18·8”两次极端强降水过程特征

2.1 过程概况

两次过程均具有极端强降水落区集中、雨量超历史纪录的特征。图1给出了“13·8”和“18·8”过程中最大24h降水时段的空间和时间分布。在“13·8”过程中降水最强时段雨带呈西北—东南向(图1a),降水范围较广,但超过250mm的强降水区主要集中在粤东暴雨中心,24h最大降水量为惠东高潭的924.3mm,惠东白盆珠596.4mm次之;“18·8”过程中降水最强时段雨带集中在粤东沿海地区呈东西带状分布(图1b),24h最大降水量也为惠东高潭达1056.7mm,破了广东省有气象记录以来降水极值,其次为惠东高潭的885.4mm和惠东白盆珠的793.5mm。

同时具有雨强强、强降水持续时间长的特征。

如图1c,1d,在“13·8”过程中有19个时次小时降水量超过20mm,7个时次超过50mm,小时降水量最大为118.9mm;在“18·8”过程中19个时次小时降水量超过20mm,10个时次超过50mm,小时降水量最大为98.6mm。

两次过程均属典型暖区对流性降水(图2),即回波质心低、降水效率高。对流强度“13·8”过程稍强,最大组合反射率都在60dBz左右, ≥ 45 dBz强回波垂直高度都在0~6km,回波质心非常低,但 ≥ 30 dBz回波垂直高度及回波顶高(图略)“13·8”过程比“18·8”过程要高一些。强降水回波主要沿莲花山山脉(地形见图9)呈西南—东北向不断发展,这一现象在“18·8”过程中表现更为显著(李明华等,2019a)。

此外,从香港探空图(图3)和物理量要素统计来看(表1,表2),湿层深厚,并长时间维持较大的对流有效位能(CAPE)和非常低的抬升凝结高度(LCL),暖云层亦深厚,厚度达4000~4400m,可降水量为70~80 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,地面露点温度维持在25~26 $^{\circ}\text{C}$,但 ΔT_{85-50} (850~500hPa温度差)小于25 $^{\circ}\text{C}$,介于22~23 $^{\circ}\text{C}$,0~6km风矢量差最大为13.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (2018年30日20时),其余均小于12 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此,两次过程中对流层中下层均处于弱的条件不稳定,深层垂直风切变较弱,存在利于较高降水效率的深厚暖云层和湿层等,这种大气环境场的配置非常有利强降水甚至极端强降水的发生发展,而不利雷暴大风和冰雹的发生(俞小鼎等,2012;俞小鼎,2013;孙继松等,2014)。

2.2 强盛的边界层急流助力粤东极端强降水

两次过程均发生在东亚夏季风强盛期。从全球大气环流形势场(图略)和中国气象局国家气候中心发布的季风监测简报可以看出,2013年和2018年东亚副热带夏季风(6—8月)强度较常年同期偏强,尤其是2018年强度异常偏强,两次过程中南海监测区平均纬向风也较常年异常偏强,这种形势非常有利于1311台风尤特残余环流和“18·8”过程中的季风低压长时间维持,反过来台风残余环流和季风低压的长时间维持非常有利于西南—东南气流沿台风(低压)环流向华南大陆上空输送。

卷入台风(低压)的西南(偏南)急流的风速、风向的辐合抬升方式不同。图4给出“13·8”和“18·8”两次过程中500hPa高度场和925hPa风场形势如图4a所示,“13·8”过程的主要诱因为

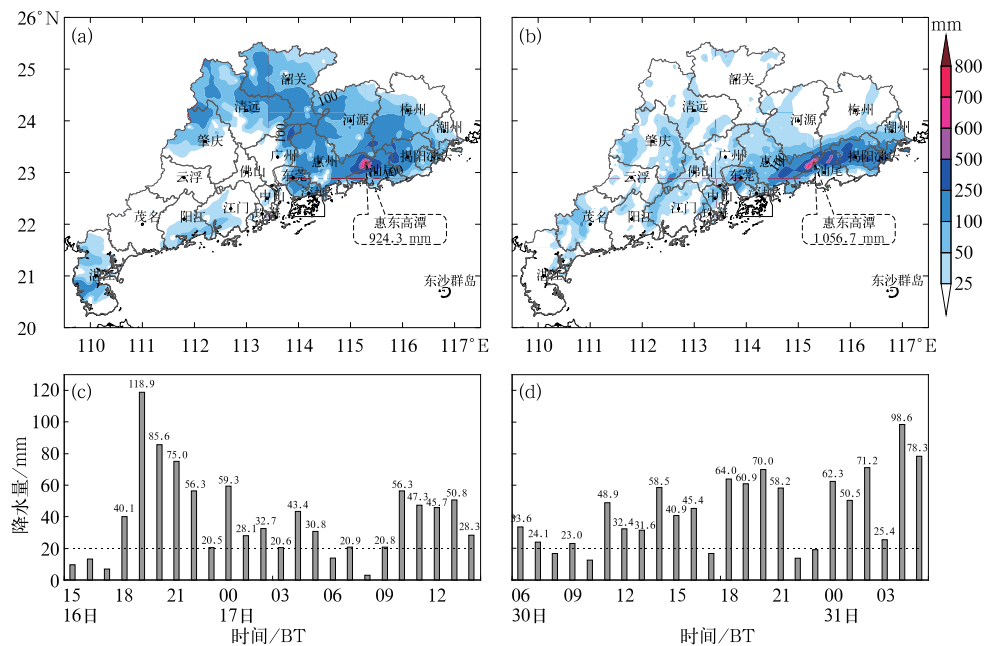


图1 2013年8月16日14时至17日14时(a,c)以及2018年8月30日05时至31日05时(b,d)广东降水的空间分布(a,b)和惠东高潭小时降水量的时间序列(c,d)

Fig. 1 Accumulative precipitation in Guangdong (a, b) and hourly precipitation at Gaotan of Huidong (c, d) during (a, c) 14:00 BT 16 to 14:00 BT 17 August 2013 and (b, d) 05:00 BT 30 to 05:00 BT 31 August 2018

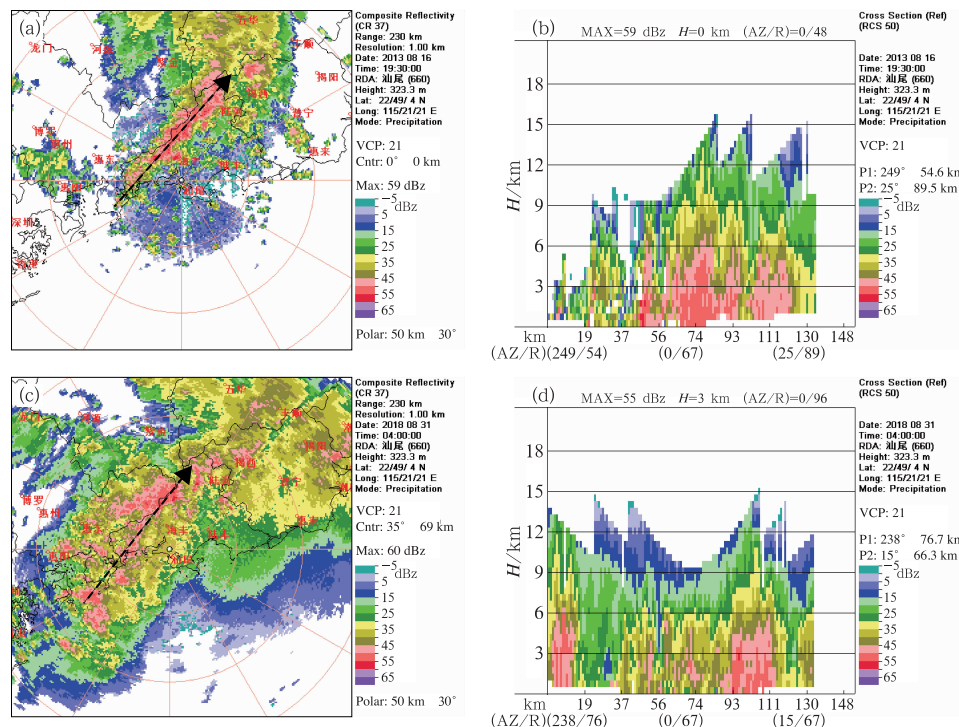


图2 2013年8月16日19:30(a,b)和2018年8月31日04:00(c,d)汕尾雷达组合反射率(a,c)和剖面(b,d) (图2a,2c中黑虚线箭头为剖面位置和方向)

Fig. 2 Combined reflectivity (a, c) and profile (b, d) of Shanwei Radar at 19:30 BT 16 August 2013 (a, b) and 04:00 BT 31 August 2018 (c, d)

(the dotted black arrows represent the position and direction of the section in Figs. 2a and 2c)

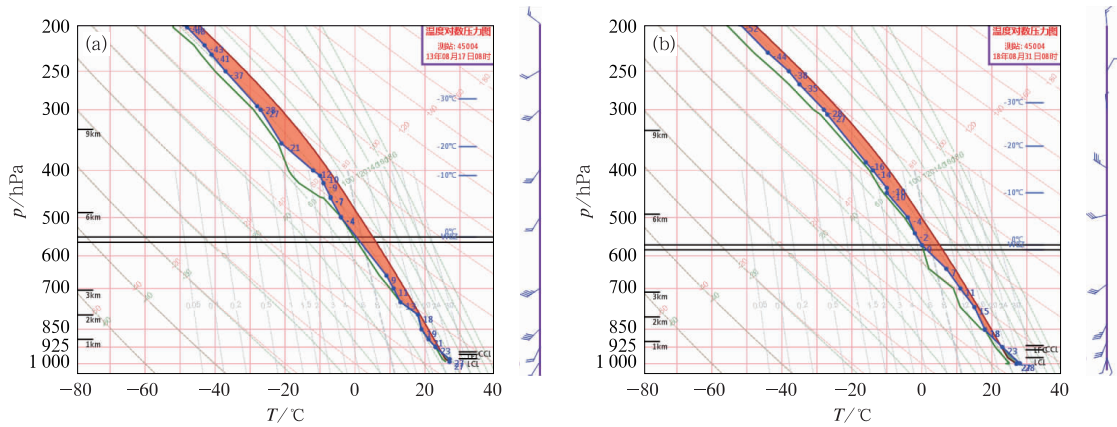


图 3 2013 年 8 月 17 日 08 时(a)和 2018 年 8 月 31 日 08 时(b)香港探空图
Fig. 3 T-lnp maps of Hongkong Sounding at
08:00 BT 17 August 2013 (a) and 08:00 BT 31 August 2018 (b)

表 1 “13·8”过程中香港探空站物理量要素统计表

Table 1 Statistics of elements of Hongkong Sounding in the August 2013 process						
时间/BT	$\Delta T_{85-50}/^{\circ}\text{C}$	可降水量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	地面露点温度/ $^{\circ}\text{C}$	CAPE/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	暖云层厚/m	0~6 km 风矢量差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
16 日 08 时	22	79.5	25.0	2307.5	4248.9	9.6
16 日 20 时	23	70.8	24.8	1702.0	4192.9	7.8
17 日 08 时	23	77.6	25.4	2566.9	4109.1	2.8
17 日 20 时	22	71.9	25.3	2546.7	4399.7	8.4

表 2 “18·8”过程中香港探空站物理量要素统计表

Table 2 Statistics of elements of Hongkong Sounding in the August 2018 process						
时间/BT	$\Delta T_{85-50}/^{\circ}\text{C}$	可降水量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	地面露点温度/ $^{\circ}\text{C}$	CAPE/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	暖云层厚/m	0~6 km 风矢量差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
29 日 20 时	22	73.4	24.9	2253.8	4264.4	6.6
30 日 08 时	23	78.9	24.0	1804.0	4018.6	9.6
30 日 20 时	22	70.5	25.4	2547.5	4147.5	13.9
31 日 08 时	22	70.6	24.7	1909.8	4179.8	9.0

1311 号超强台风尤特登陆减弱后的残余环流。由于受北侧偏强的大陆副热带高压环流影响,向东北方向移动的台风残余环流中心至桂东北部时移速减缓,随后折向西南,台风中心在桂东北维持约 2 d,期间卷入“尤特”环流的强盛季风在台风东南侧形成西南风和东南风的汇合,引发了粤西北至粤东一带持续性强降水;从图 4b 中可以看出,“18·8”过程主要诱因是季风低压外围环流,季风低压中心自南海北部西移至北部湾附近后,在北部湾附近缓慢摆动约 2.5 d,期间呈不对称的椭圆形态,低压东侧环流形成气旋式弯曲的暖式切变,随着切变的北推,偏南急流在粤东沿海形成辐合抬升。还有一点与“13·8”过程不同的是,“18·8”过程中副热带高压西侧与低压东侧形成大的气压梯度,从而有利于南海北部至

粤东沿海的边界层急流加强,在上述有利的大气环流形势下粤东暴雨中心出现了破纪录的极端强降水。因此,两次过程的共同特征是均伴有强盛的西南(偏南)急流,由于影响天气系统的不同,造成粤东暴雨中心区域内急流辐合抬升的机制存在差异。两次过程中季风急流也存在明显的日变化和风速的差异。广东沿海的阳江、香港和粤东暴雨中心北部的河源探空站风速实况如表 3 和表 4 所示,除 850 hPa 风速达到急流外,925 hPa 风速也可达到或超过 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。强降水时段“13·8”过程风速大于“18·8”过程,且均在每日 08 时出现明显的风速增大,即季风在凌晨形成一次脉冲。过程最大风速出现在强降水时段开始前或开始时。还有一点差异是 925 hPa 风速的演变,“18·8”过程中河源站风速

一直维持较小,且波动不大,这说明在“18·8”过程中边界层急流的作用比“13·8”更突出。进一步分析 850~1000 hPa 风场和散度场(图 5),发现两次过程辐合大值区均集中在 900 hPa 以下的边界层内,“13·8”过程辐合更强烈。总之,强盛的边界层急流有利于粤东极端强降水的发生发展,但由季风低压引发的“18·8”过程中边界层急流作用更显著。

综上所述,不管是由台风残余环流,还是季风低压为诱因造成的粤东暖区极端强降水,其共同点就是过程中均伴有强盛的、持续长时间的低空季风急流,尤其是边界层急流的作用不容忽视,那么边界层急流(气流)在这两次极端强降水过程中究竟起什么作用呢?

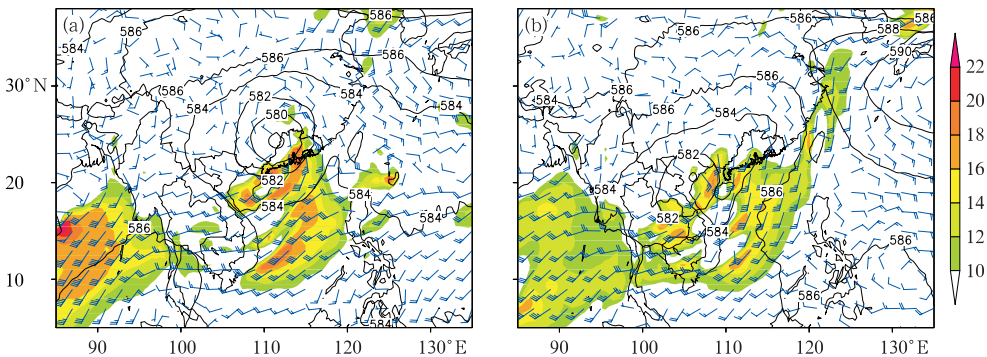


图 4 2013 年 8 月 16 日 08 时(a)和 2018 年 8 月 30 日 08 时(b)
500 hPa 高度场(等值线,间隔 2 dagpm)和 925 hPa 风场(风向杆,填色区风速 $\geq 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 4 The 500 hPa geopotential height field (contours, interval 2 dagpm) and 925 hPa wind field (wind barb, colored indicates area $\geq 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 08:00 BT 16 August 2013 (a) and 08:00 BT 30 August 2018 (b)

表 3 2013 年 8 月 15 日 20 时至 18 日 08 时阳江、香港和河源探空站风速统计表
Table 3 High-altitude wind speed at Yangjiang, Hongkong and Heyuan stations from 20:00 BT 15 to 08:00 BT 18 August 2013

时间/BT	850 hPa 风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			925 hPa 风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	阳江	香港	河源	阳江	香港	河源
8 月	15 日 20 时	16	9	15	9	10
	16 日 08 时	17	14	18	14	12
	16 日 20 时	11	12	12	10	8
	17 日 08 时	14	15	11	11	8
	17 日 20 时	12	8	8	9	3
	18 日 08 时	11	11	8	11	9

表 4 2018 年 8 月 29 日 20 时至 9 月 1 日 08 时阳江、香港和河源探空站风速统计表
Table 4 High-altitude wind speed at Yangjiang, Hongkong and Heyuan stations from 20:00 BT 29 August to 08:00 BT 1 September 2018

2013 年/BT	850 hPa 风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			925 hPa 风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	阳江	香港	河源	阳江	香港	河源
8 月	29 日 20 时	9	12	11	11	10
	30 日 08 时	18	15	14	16	10
	30 日 20 时	9	7	10	8	5
	31 日 08 时	13	13	10	12	11
	31 日 20 时	7	6	10	8	6
9 月	1 日 08 时	7	7	9	9	7

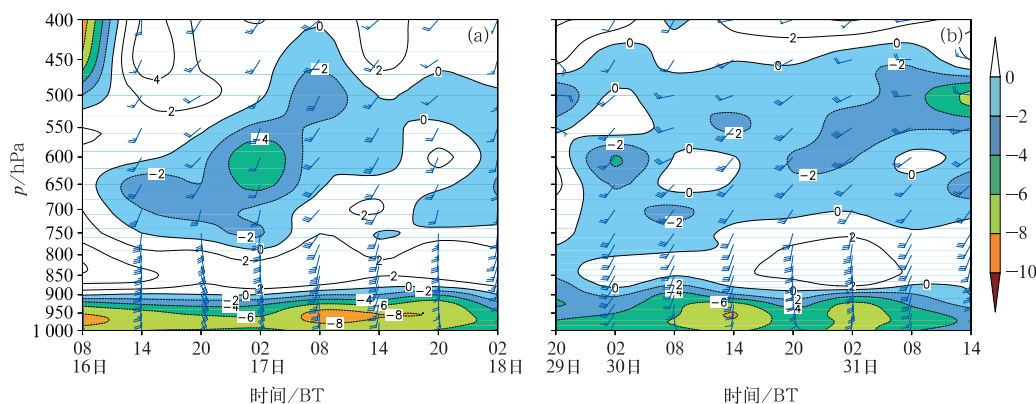


图 5 23°N、115.5°E 单点散度场(填色,单位: 10^{-1} s^{-1})和风场(风向杆)的垂直-时间剖面
(a)2013 年 8 月 16 日 08 时至 18 日 02 时,(b)2018 年 8 月 29 日 20 时至 31 日 14 时

Fig. 5 The height-time cross section of divergence (colored, unit: 10^{-1} s^{-1}) and wind field (wind barb) at 23°N, 115.5°E from 08:00 BT 16 to 02:00 BT 18 August 2013 (a) and from 20:00 BT 29 to 14:00 BT 31 August 2018 (b)

3 边界层急流作用分析

研究表明(Trier et al, 2006; Tuttle and Davis, 2006; 程正泉等, 2014; Du and Chen, 2019b; Chen et al, 2017), 低空急流通过输送湿热气流为暴雨区提供了有利的热力、动力和水汽条件。从第 2 节概述可以看出, 尽管由于主要诱因不同, 造成边界层急流来向不同, 但对于降水的触发和维持, 即边界层急流所起的作用是相同的, 区别在于强弱程度和影响范围。

3.1 边界层急流辐合形成中尺度能量锋有利于强降水的触发

中尺度能量锋是触发华南暴雨的机制之一。两次过程中边界层急流风向和风速的辐合使得暴雨区内大气中能量不断累积, 形成等假相当位温(θ_{se})线密集区, 即中尺度能量锋区, 并伴有锋生和明显的垂直上升运动, 有利于该区域内强降水的触发。

图 6 给出强降水时段的风场、 θ_{se} 场和锋生函数。结合第 2.2 节, 从图 6a 中风场的垂直剖面可以看出, 在“13·8”过程中, 由于 1311 号台风尤特环流东南部不同方向气流的旋转汇入, 使得位于惠东高潭附近地区上空出现了西南、偏南和东南三股气流的辐合抬升, 这种不同风向的辐合在 850 hPa 表现得最为显著。而从图 6c 风场的垂直剖面可以看出,

“18·8”过程中在最强时段主要表现为较一致的偏南气流影响, 这是由于惠东高潭位于季风低压的东侧, 随着季风低压倒槽的北推, 粤东沿海由西南气流逐渐转为偏南气流。因此, 由于输入暴雨区的对流层急流存在差异, 两次过程中的中尺度能量锋特征不同。 θ_{se} 大值区均位于对流层低层, 但“13·8”过程较“18·8”过程更深厚。从图 6b, 6d 中 θ_{se} 水平场可见, 不同气团之间产生的斜压性有明显的差异, “13·8”过程最明显时段为 16 日 20 时, 粤东暴雨区等 θ_{se} 线最密集层为 850 hPa, 此时 115°E 附近 $\Delta\theta_{se}$ 约为 $6 \text{ K} \cdot (150 \text{ km})^{-1}$, 呈南北向分布, 影响区域较广。而在“18·8”过程中, 最显著层为 1000 hPa, 115°E 附近 $\Delta\theta_{se}$ 约为 $6 \text{ K} \cdot (200 \text{ km})^{-1}$, 锋区强度较弱, 但锋区随系统北抬后在珠江口到粤东沿海长时间维持。结合锋生函数的变化可以发现, 在中尺度能量附近锋生函数为负值, 即伴随有锋生现象, 这一特征在“13·8”过程中更显著, 而主要由边界层偏南气流辐合引发的“18·8”过程中锋生现象并不明显。同时, 粤东暴雨中心附近及其以南的区域均存在明显的上升运动(图 7), 对流层低层的散度场随高度增加也表现为辐合-辐散的垂直配置, 即 900 hPa 以下为强辐合, 900~750 hPa 为辐散(图 5)。

综上所述, 两次过程中形成的中尺度能量锋有利于该地区强降水的触发, 但“13·8”过程中低空不同风向的气流辐合所形成的中尺度能量锋较“18·8”过程更为深厚, 强度更强。

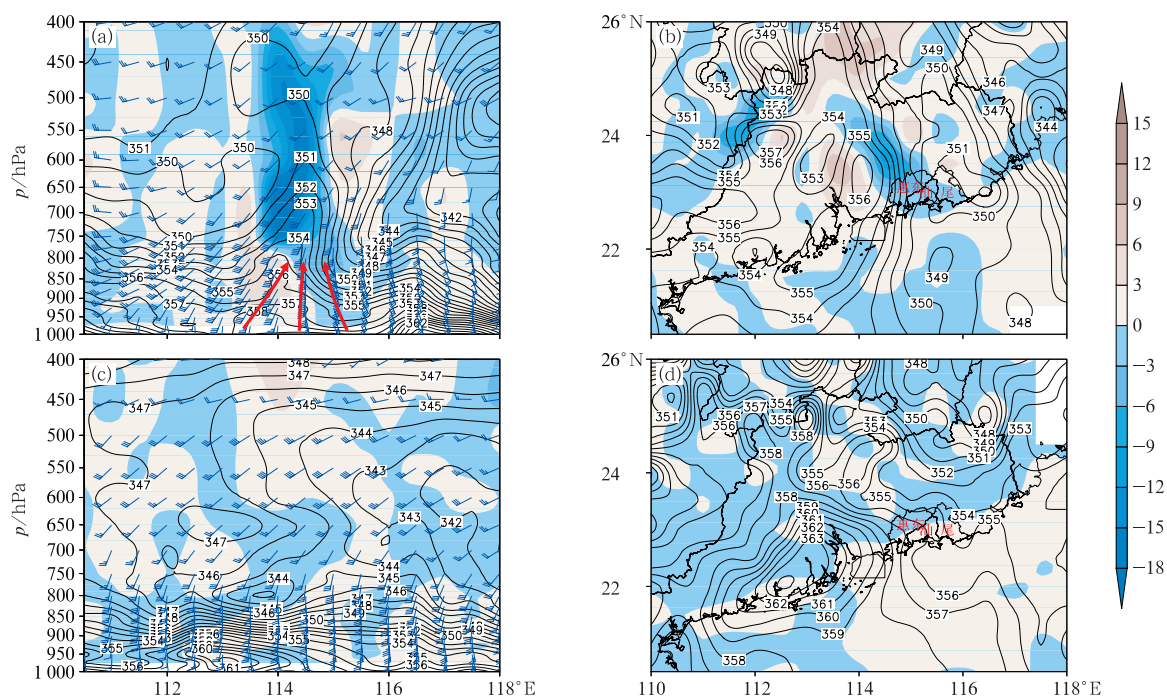


图6 2013年8月16日20时(a,b)和2018年8月31日02时(c,d) θ_{se} 场(等值线,单位:K)、锋生函数(填色,单位: $10^{-9} K \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)和风场(风向杆),

(a,c)沿 $23^{\circ}N$ 的垂直-纬向剖面,(b)850 hPa,(d)975 hPa

Fig. 6 Pseudo-equivalent potential temperature (contours, unit: K), frontogenesis function (colored, unit: $10^{-9} K \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$) and wind field (wind barb)

at 20:00 BT 16 August 2013 (a, b) and 02:00 BT 31 August 2018 (c, d)

(a, c) vertical profile along $23^{\circ}N$, (b) 850 hPa, (d) 975 hPa

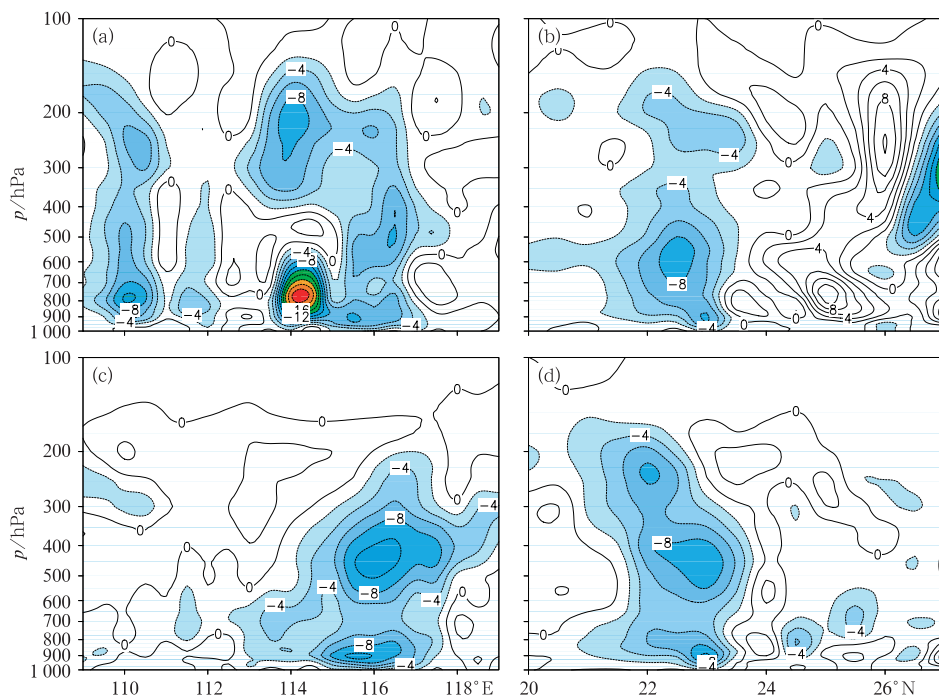


图7 2013年8月16日20时(a,b)和2018年8月31日02时(c,d)垂直速度的垂直剖面(单位: $10^{-1} Pa \cdot s^{-1}$)

(a,c)沿 $23^{\circ}N$, (b,d)沿 $115.5^{\circ}E$

Fig. 7 Vertical profile of vertical velocity (unit: $10^{-1} Pa \cdot s^{-1}$) at

20:00 BT 16 August 2013 (a, b) and 02:00 BT 31 August 2018 (c, d)

(a, c) along $23^{\circ}N$, (b, d) along $115.5^{\circ}E$

3.2 边界层急流提供了源源不断的水汽输送

暴雨区水汽输送至关重要。1311 号台风尤特残余环流和季风低压外围环流卷入强盛的东亚夏季风,在东亚夏季风与低涡环流的共同作用下,边界层急流向粤东暴雨中心输入充沛的、足够支撑起持续性强降水的水汽,同时由于特殊地形对急流的摩擦和阻挡等作用,粤东暴雨中心区域内出现了明显的水汽通量散度辐合,从而使得该区域出现显著高于其余地区的极端强降水。

图 8 给出两次过程降水最强时段的水汽通量和

水汽通量散度场。综合各图可以发现,惠东和汕尾一带的粤东沿海地区水汽辐合主要集中在 1000 hPa,该区域 850 hPa 上已经呈现为水汽通量辐散,这一特点在“18·8”过程中最为显著,但“13·8”过程中水汽辐合最大值区位于最大强降水区西北侧,850~925 hPa 最明显。结合图 1a,1b 的降水落区,可以发现 925 和 1000 hPa 的边界层水汽辐合大值区的重叠部分与强降水落区对应较好。再结合两次极端强降水过程中逐 6 h 的 925 和 1000 hPa 水汽通量和水汽通量散度演变情况(图略),最强降水时段粤东暴雨中心 925 和 1000 hPa 均维持水汽通量的

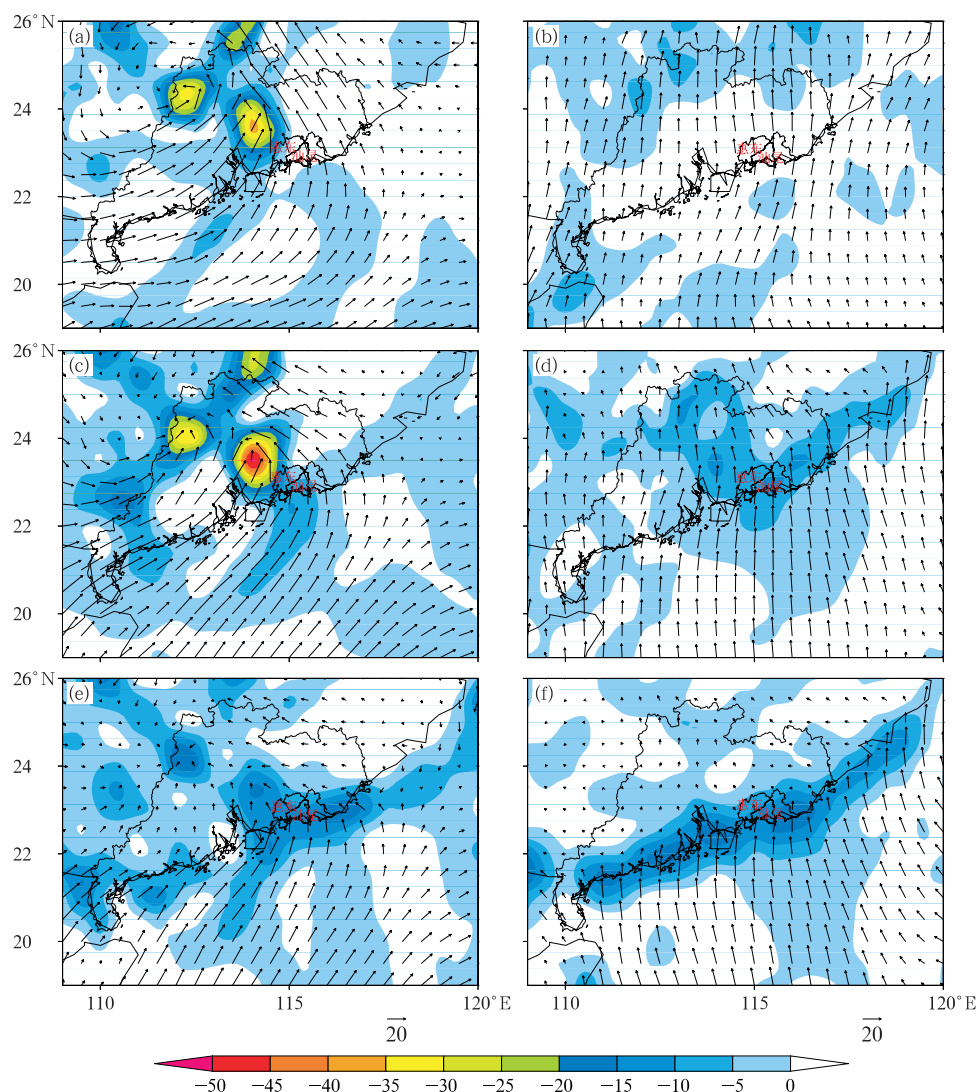


图 8 2013 年 8 月 16 日 20 时(a,c,e)和 2018 年 8 月 31 日 02 时(b,d,f)
水汽通量(箭头,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量散度(填色,单位: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a,b)850 hPa,(c,d)925 hPa,(e,f)1000 hPa

Fig. 8 Vapor flux (vector, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
at 20:00 BT 16 August 2013 (a, c, e) and 02:00 BT 31 August 2018 (b, d, f)
(a, b) 850 hPa, (c, d) 925 hPa, (e, f) 1000 hPa

辐合,更能证实这一特点。另外,综合粤东暴雨中心内单点(23°N 、 115.5°E)水汽通量散度场的垂直-时间剖面图来看(图略),均出现了两次明显的边界层水汽通量散度辐合增大过程,这一变化主要发生在凌晨至上午,与季风的日变化息息相关(Chen et al, 2018)。在整个过程中降水出现明显减弱时,对应低空西南—偏南风显著减弱(图略)。因此,源源不断的水汽输送为暴雨区提供了充沛的水汽条件,而边界层水汽通量的辐合更有利于粤东暴雨中心极端强降水的发生。

水汽通量的辐合也与特殊地形密切相关。从第2.2节已知,水汽输送通道和强弱受限于台风残余环流、季风低压、季风等天气系统的影响,但水汽通量的辐合,既与西南气流与东南气流的汇合造成的风向辐合,以及西南—偏南气流的脉动造成的其前侧风速辐合有关,同时与海陆分布、粗糙下垫面摩擦和特殊地形阻挡等因素密不可分,在这两次过程中粤东暴雨中心恰好符合以上几点。如图9所示,粤东暴雨中心南邻南海,汕尾境内地势自南向北为平原—丘陵—山脉,最为特殊的是呈东北—西南走向的莲花山山脉,与呈西北—东南走向的大南山和南阳山系组成了典型的“人”字型地形。莲花山主峰海拔约为1337m,莲花山西端北侧为惠东东部山区,呈现为向西南开口的“U”型山谷地貌,其中高潭地处“U”型山谷底部的莲花山山脉的一处山坳里。因此,当由边界层急流主导的强降水过程时,这种地形的作用凸显,因此,在水汽通量散度场上该地区边界层表现为长时间、明显的水汽通量辐合区。

此外,研究已证实(王春红和蒋全荣,1997;何立富等,2016),低空急流与降水之间存在一种正反馈作用,低空急流有利于降水触发,而降水凝结潜热释放又可以使低空急流加强,显然这一特征在这两次过程也是存在的。综上所述,边界层急流为粤东暴雨中心极端强降水提供了充沛的水汽供应,同时在边界层急流和地形的共同作用下,该区域存在明显的水汽通量辐合,非常有利于极端强降水的发生发展。

3.3 低层暖湿平流的不断输送利于大气层结不稳定状态维持

强暖平流的输送导致不稳定能量持续补充,以补充因强降水导致的能量损耗(程正泉等,2014)。分析温度平流变化特征,在粤东暴雨中心区垂直层面上(图10a,10c),800 hPa以下的对流层低层长时间维持比较强的暖平流,中高层冷平流相对较弱,尤其是“18·8”过程。结合水平温度平流场(图10b,10d)和温度场(图略)可以发现,暖平流的输送通道二者不同,“13·8”过程暖平流主要沿“尤特”外围环流输送,在粤东暴雨中心附近及其上游形成正温度平流大值区,广东上空大气层结不稳定维持与上游地区高温区的建立及维持有关(程正泉等,2014)。“18·8”过程亦是如此,“18·8”暖平流大值区主要位于粤西沿海,与粤东沿海之间形成明显的温度梯度,同时在30日夜间到31日凌晨,有一支暖平流从南海中部往粤东暴雨区输送,使得粤东沿海温度梯度进一步加大。



图9 粤东暴雨中心地理特征

Fig. 9 Geographical feature of the rainstorm center in eastern region of Guangdong

为进一步说明低层暖湿气流与大气层结不稳定状态维持的关系,分析 $\partial\theta_{se}/\partial p$ 的变化特征(图 11), $\partial\theta_{se}/\partial p > 0$ 表示条件不稳定,可以看出两次过程中 700 hPa 以下均长时间处于条件不稳定状态,尤其

是 850 hPa 及其以下的对流层低层。由于暖湿气流的不断输送使得不稳定能量得以补充和持续,CAPE 值也长时间维持较大,“13·8”过程中除 16 日 20 时 CAPE 值($1702 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)略小外,其余时次

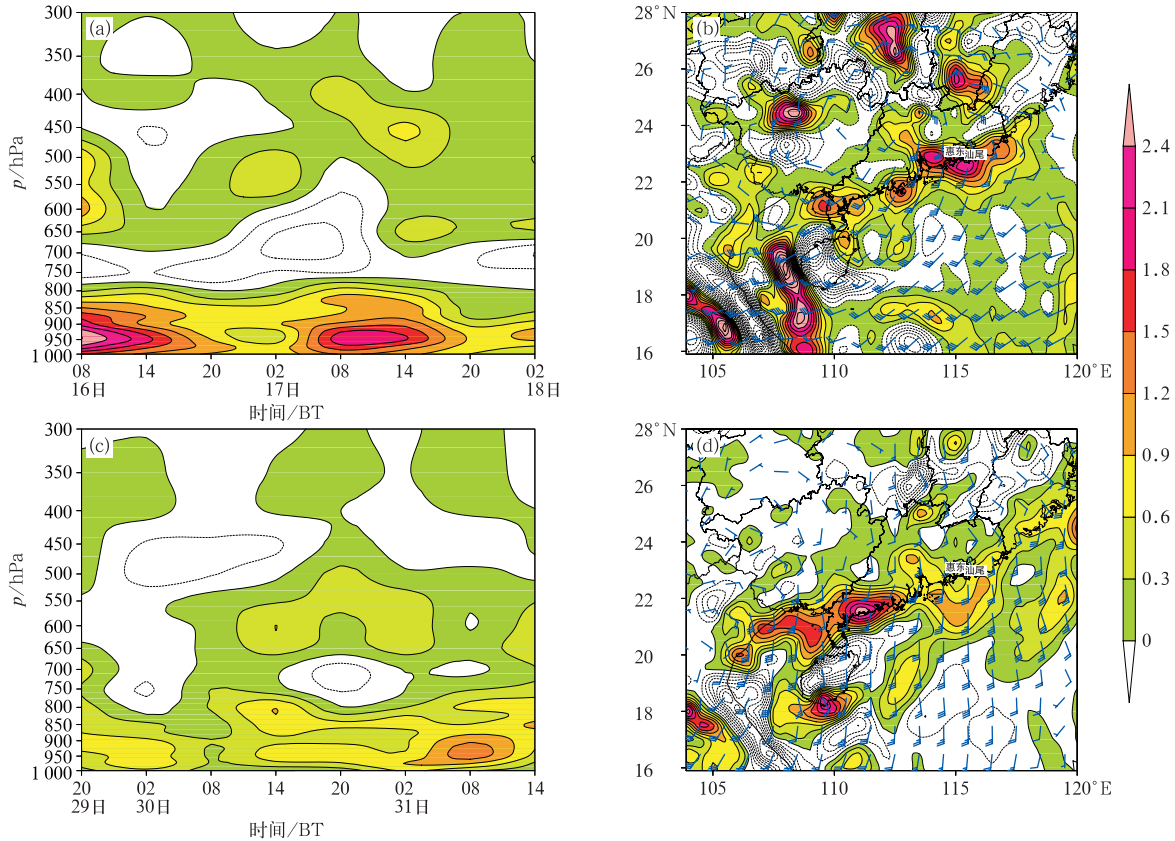


图 10 “13·8”过程(a)和“18·8”过程(c)温度平流(填色,单位: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)的垂直-时间剖面以及 2013 年 8 月 17 日 08 时(b)和 2018 年 8 月 31 日 02 时(d)925 hPa 温度平流场和风场(风向杆)

Fig. 10 The height-time cross section of temperature advection (colored, unit: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$) at 23°N , 115.5°E from 08:00 BT 16 to 02:00 BT 18 August 2013 (a) and from 20:00 BT 29 to 14:00 BT 31 August 2018 (c), temperature advection and wind field (wind shaf) at 925 hPa, at 08:00 BT 17 August 2013 (b) and 02:00 BT 31 August 2018 (d)

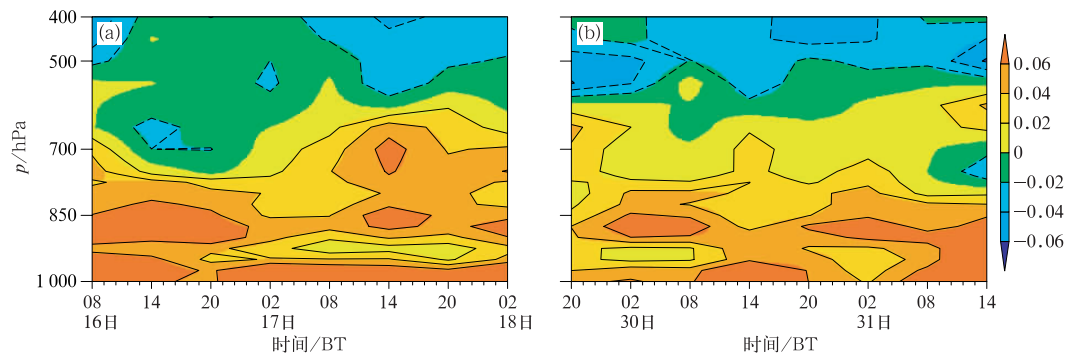


图 11 同图 5,但为 $\partial\theta_{se}/\partial p$ (填色,单位: $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$)

Fig. 11 Same as Fig. 5, but for $\partial\theta_{se}/\partial p$ (colored, unit: $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$)

介于 $2\,300 \sim 2\,600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, “18·8”过程 08 时略小,但 20 时亦高达 $2\,200 \sim 2\,600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 大的 CAPE 值利于对流降水的持续。因此,粤东暴雨中心区域内大气层结不稳定状态的维持得益于对流层低层暖湿气流的不断输送,有利于持续性强降水的发展。

4 结论与讨论

边界层急流(暖湿气流)与粤东暴雨中心暴雨息息相关,配合莲花山山脉、大南山和南阳山等特殊地形,往往造成该区域内非常可观的降水过程。对于如“13·8”和“18·8”这种较为少见的极端强降水过程,边界层急流所起作用如下:

(1)两次极端强降水过程分别发生在 1311 号台风尤特残余环流和季风低压外围环流影响下,台风与季风低压的中心位置非常关键,使得粤东暴雨中心正好处于台风中心东南侧和季风低压的气旋式切变线南侧。主要影响系统移动缓慢,在有利于粤东暴雨中心强降水的区域内维持约 2 d。

(2)粤东暴雨中心区域内,由于边界层急流的汇合和不断增强,与大陆不同性质气流形成中尺度能量锋,中尺度能量锋的存在非常有利于强降水的触发和维持。

(3)边界层急流为粤东暴雨中心强降水提供了充沛的水汽供应,同时,边界层急流在粗糙的沿海下垫面、莲花山山脉和“人字”型等特殊地形的摩擦和阻挡作用下,形成显著的水汽通量辐合,为极端强降水的发展创造了非常有利的水汽条件。

(4)强降水持续期间,向粤东暴雨中心不断输送的对流层低层暖湿平流,导致该区域内大气层结长时间处于不稳定状态中,利于强降水的持续发展。

本文讨论了边界层急流对于粤东暴雨中心极端强降水的作用,但这两次过程中,强降水落区是非常局地的,暴雨中心区域内各站降水量差异也很大,且最大降水落区均出现在惠东东部山区的高潭附近,这是个值得探讨的问题,作者将在以后的相关研究中进一步论述。

致谢:中山大学大气科学学院陈桂兴教授和广东省气象局程正泉首席给予本文指导和建议,汕尾市气象局吴道远和黄卫东提供汕尾多普勒天气雷达数据,谨致谢忱!

参考文献

蔡景就,伍志方,陈晓庆,等,2019. “18·8”广东季风低压持续性特大暴雨成因分析[J]. 暴雨灾害,38(6):576-586. Cai J J, Wu Z F, Chen X Q, et al, 2019. Cause analysis of persistent torrential rain

associated with monsoon depression occurred in Guangdong on August 2018[J]. Torr Rain Dis, 38(6):576-586(in Chinese).

陈炳洪,林良勋,张维,等,2011. 5·23 广东特大暴雨过程特点及数值诊断分析[J]. 热带气象学报,27(5):738-744. Chen B H, Lin L X, Zhang W, et al, 2011. The characters and numerical diagnostic analysis on torrential rain on 23 May, 2009 in Guangdong [J]. J Trop Meteor, 27(5):738-744(in Chinese).

陈芳丽,李明华,杜小松,等,2014. 惠州高潭一次特大致洪暴雨过程分析[J]. 广东气象,36(2):24-29. Chen F L, Li M H, Du X S, et al, 2014. Analysis of an unusually heavy, flood-causing rain at Gaotan, Huizhou[J]. Guangdong Meteor, 36(2):24-29(in Chinese).

陈芳丽,李明华,姜帅,等,2019. 粤东暴雨中心的降水气候统计特征和成因分析[J]. 广东气象,41(4):6-10. Chen F L, Li M H, Jiang S, et al, 2019. On the statistical characteristics of precipitation climatology of heavy rain centers in eastern Guangdong and analysis of its causation[J]. Guangdong Meteor, 41(4):6-10(in Chinese).

陈芳丽,李明华,曾丹丹,等,2018. “8·31”广东极端强降水过程边界层触发条件分析[J]. 广东气象,40(5):1-5. Chen F L, Li M H, Zeng D D, et al, 2018. Analysis of triggering conditions of the boundary layer for an extremely intense rain in Guangdong on August 31, 2018 [J]. Guangdong Meteor, 40(5):1-5(in Chinese).

陈健康,赵玉春,陈赛,等,2019. 闽中南罕见冬季锋前暴雨两个例特征分析[J]. 气象,45(2):228-239. Chen J K, Zhao Y C, Chen S, et al, 2019. Characteristic analysis on a winter prefrontal torrential rain in central and southern Fujian[J]. Meteor Mon, 45(2):228-239(in Chinese).

程正泉,林良勋,沙天阳,等,2014. “尤特”特大暴雨过程的热力条件分析[J]. 气象,40(12):1507-1512. Cheng Z Q, Lin L X, Sha T Y, et al, 2014. Analysis of atmosphere stratification in extremely heavy rainfall event associated with Severe Typhoon Utor[J]. Meteor Mon, 40(12):1507-1512(in Chinese).

冯晋勤,俞小鼎,蔡菁,等,2017. 福建春季西南急流暖湿强迫背景下的强对流天气流型配置及环境条件分析[J]. 气象,43(11):1354-1363. Feng J Q, Yu X D, Cai J, et al, 2017. Flow pattern and ambient condition analysis of spring southwest low-level jet warm sector severe convection in Fujian[J]. Meteor Mon, 43(11):1354-1363(in Chinese).

何立富,陈涛,孔期,2016. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学报,27(5):559-569. He L F, Chen T, Kong Q, 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):559-569(in Chinese).

孔期,林建,2017. 2015 年 5 月 19-20 日华南地区不同性质暴雨成因和预报分析[J]. 气象,43(7):792-803. Kong Q, Lin J, 2017. Analysis on causes and forecasts of the torrential rainfall with different features over South China during 19 to 20 May 2015 [J]. Meteor Mon, 43(7):792-803(in Chinese).

李明华,陈芳丽,姜帅,等,2019a. “18·8”粤东暴雨中心极端强降水“列车效应”分析[J]. 暴雨灾害,38(4):329-337. Li M H, Chen F L, Jiang S, et al, 2019a. The analysis of train effect features of a record-breaking severe rainfall in eastern region of Guangdong in August 2018[J]. Torr Rain Dis, 38(4):329-337(in Chinese).

- 李明华,林杰荣,甘泉,等,2019b. 惠州市应对超历史特大暴雨灾害气象服务的实践与思考[J]. 广东气象,41(1):31-34,39. Li M H,Lin J R,Gan Q,et al,2019b. Practice and consideration of meteorological service of Huizhou in response to torrential rain disaster[J]. Guangdong Meteor,41(1):31-34,39(in Chinese).
- 梁红丽,程正泉,2017. 2014年两次相似路径影响云南台风降水差异成因分析[J]. 气象,43(11):1339-1353. Liang H L,Cheng Z Q,2017. Cause analysis of precipitation difference between two typhoons influencing Yunnan along similar tracks in 2014[J]. Meteor Mon,43(11):1339-1353(in Chinese).
- 林良勋,冯业荣,黄忠,等,2006. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社:97-126. Lin L X,Feng Y R,Huang Z,et al,2006. Technical Guidance on Weather Forecasting in Guangdong Province[M]. Beijing:China Meteorological Press:97-126(in Chinese).
- 刘鸿波,何明洋,王斌,等,2014. 低空急流的研究进展与展望[J]. 气象学报,72(2):191-206. Liu H B,He M Y,Wang B,et al,2014. Advances in low-level jet research and future prospects[J]. Acta Meteor Sin,72(2):191-206(in Chinese).
- 刘淑媛,郑永光,陶祖钰,2003. 利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J]. 热带气象学报,19(3):285-290. Liu S Y,Zheng Y G,Tao Z Y,2003. The analysis of the relationship between pulse of LLJ and heavy rain using wind profiler data[J]. J Trop Meteor,19(3):285-290(in Chinese).
- 罗秋红,王凤,吴乃庚,2015. 强台风“尤特”(1311)连续暴雨的成因分析[J]. 广东气象,37(6):14-18. Luo Q H,Wang F,Wu N G,2015. Analysis of the causation of a sustained heavy rain with the severe Typhoon Utor[J]. Guangdong Meteor,37(6):14-18(in Chinese).
- 苗春生,杨艺亚,王坚红,等,2017. 两类华南沿海暖区暴雨特征及热力发展机制对比研究[J]. 热带气象学报,33(1):53-63. Miao C S,Yang Y Y,Wang J H,et al,2017. Comparative study of characteristics and thermodynamical development mechanism on two types of warmsector heavy rainfall in South China coast[J]. J Trop Meteor,33(1):53-63(in Chinese).
- 石文静,肖子牛,2013. 近60年索马里急流越赤道水汽输送的变化特征及对中国初夏降水的影响[J]. 气象,39(1):39-45. Shi W J,Xiao Z N,2013. Variation of the cross-equatorial moisture transport in Somali and its impact on China early summer rainfall in nearly 60 years[J]. Meteor Mon,39(1):39-45(in Chinese).
- 孙继松,戴建华,何立富,等,2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法——中国强对流天气预报手册[M]. 北京:气象出版社:28-30. Sun J S,Dai J H,He L F,et al,2014. Basic Principles and Technical Methods of Severe Convective Weather Forecast-Severe Convective Weather Forecast Manual of China[M]. Beijing:China Meteorological Press:28-30(in Chinese).
- 王春红,蒋全荣,1997. 一次华南低空急流暴雨的数值模拟[J]. 热带气象学报,13(2):187-192. Wang C H,Jiang Q R,1997. Numerical simulation of a South China LLJ and heavy rainfall process[J]. J Trop Meteor,13(2):187-192(in Chinese).
- 文萍,许映龙,柳龙生,2019. 台风“山竹”(1822)引发华南暴雨过程机制分析[J]. 海洋气象学报,39(3):29-35. Wen P,Xu Y L,Liu L S,2019. Analysis on mechanism of torrential rain in South China induced by Typhoon Mangkhut (2018) [J]. J Mar Meteor,39(3):29-35(in Chinese).
- 俞小鼎,2013. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害,32(3):202-209. Yu X D,2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torr Rain Dis,32(3):202-209(in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,70(3):311-337. Yu X D,Zhou X G,Wang X M,2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin,70(3):311-337(in Chinese).
- 曾智琳,湛芸,朱克云,2019. 2017年6月一次华南沿海强降水的对流性特征及热动力机制研究[J]. 大气科学,43(6):1295-1312. Zeng Z L,Chen Y,Zhu K Y,2019. Convective characteristics and thermal dynamic mechanisms for coastal torrential rainfall over South China during June 2017[J]. Chin J Atmos Sci,43(6):1295-1312(in Chinese).
- 张端禹,崔春光,赵玉春,2014. 2010年前汛期末华南西部和东部暴雨对比分析[J]. 气象与环境学报,30(6):8-15. Zhang D Y,Cui C G,Zhao Y C,2014. Contrast analysis of a heavy rain at the end of the first rainy season in 2010 in west and east of South China[J]. J Meteor Environ,30(6):8-15(in Chinese).
- 郑婧,许爱华,孙素琴,等,2018. 高空西北气流下特大暴雨的预报误差分析及思考[J]. 气象,44(1):93-106. Zheng J,Xu A H,Sun S Q,et al,2018. Forecast error analysis of extremely heavy rain under high-level northwest flow[J]. Meteor Mon,44(1):93-106(in Chinese).
- Chen G X,Lan R Y,Zeng W X,et al,2018. Diurnal variations of rainfall in surface and satellite observations at the monsoon coast (South China)[J]. J Climate,31(5):1703-1724.
- Chen G X,Sha W M,Iwasaki T,et al,2017. Diurnal cycle of a heavy rainfall corridor over East Asia[J]. Mon Wea Rev,145(8):3365-3389.
- Du Y,Chen G X,2018. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. part I:ensemble-based analysis[J]. Mon Wea Rev,146(11):3827-3844.
- Du Y,Chen G X,2019a. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. part II:convection initiation[J]. Mon Wea Rev,147(2):543-565.
- Du Y,Chen G X,2019b. Climatology of low-level jets and their impact on rainfall over southern China during the early-summer rainy season[J]. J Climate,32(24):8813-8833.
- Trier S B,Davis C A,Ahijevych D A,et al,2006. Mechanisms supporting long-lived episodes of propagating nocturnal convection within a 7-day WRF model simulation[J]. J Atmos Sci,63(10):2437-2461.
- Tuttle J D,Davis C A,2006. Corridors of warm season precipitation in the Central United States[J]. Mon Wea Rev,134(9):2297-2317.