

陈芳丽,姜帅,张东,等,2022.相似环流背景下粤西沿海暖区降水迥异的对比分析[J].气象,48(10):1257-1269. Chen F L, Jiang S, Zhang D, et al, 2022. Comparison of different precipitation in the warm sector of western Guangdong coast under the background of similar circulations[J]. Meteor Mon, 48(10): 1257-1269 (in Chinese).

相似环流背景下粤西沿海暖区降水迥异的对比分析*

陈芳丽¹ 姜 帅^{1,2} 张 东³ 刘显通⁴ 雷卫延¹ 曾丹丹⁵

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 广东省气象台,广州 510080

4 中国气象局广州热带海洋气象研究所,广州 510080

5 广东省河源市气象局,河源 517000

提 要: 在相似的大气环流背景条件下,2020年6月2日和3日广东粤西沿海的降水特征出现了较大差异,其机理机制值得深入探究。基于 ERA5 再分析资料、风廓线雷达产品和实况观测数据等,对比分析了这两天粤西沿海大气环流和物理量场的差异,并讨论了低空急流对该区域暖区降水的触发和维持机制。结果表明:当低空西南急流轴位于桂东,南海西北部边界层偏南急流在夜间加强,其前侧到达粤西沿海且长时间维持时,边界层偏南急流前侧风速辐合和粤西沿海地形对偏南向气流的阻挡作用造成的动力辐合抬升有利于该地区对流触发,同时冷池的存在和维持有利于粤西沿海暖区暴雨的发展和维持。当低空急流显著加强且东扩北收,边界层急流转为西南向并伸展至珠江三角洲北部时,不利于粤西沿海对流触发和发展。

关键词: 低空西南急流,边界层偏南急流,暖区暴雨,广东

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.013001

Comparison of Different Precipitation in the Warm Sector of Western Guangdong Coast Under the Background of Similar Circulations

CHEN Fangli¹ JIANG Shuai^{1,2} ZHANG Dong³ LIU Xiantong⁴ LEI Weiyang¹ ZENG Dandan⁵

1 Huizhou Meteorological Office of Guangdong Province, Huizhou 516001

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

3 Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

4 Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080

5 Heyuan Meteorological Office of Guangdong Province, Heyuan 517000

Abstract: Under the similar atmospheric circulation backgrounds, the precipitation characteristics along the coast of Guangdong on 2 and 3 June 2020 are quite different, so the mechanism is worthy of deeply exploring. Based on ERA5 reanalysis data, wind profile radar products and observation data, we comparatively analyze the differences of precipitation, atmospheric circulation and physical quantity field in the warm sector of western Guangdong coast in the two days. Besides, we also discuss the trigger and maintenance mechanism of the double low-level jets for the precipitation in the warm sector of the region. The main conclusions are as follows. The low-level southwest jet axis was located in eastern part of Guangxi, the

* 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111200001)、广东省气象局重点项目(GRMC2020Z02)、广东省气象局面上项目(GRMC2021M23)和广东省惠州市科技研发计划项目(2021WC010307)共同资助

2021年9月22日收稿; 2022年1月30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。E-mail:419569019@qq.com

通讯作者:张东,主要从事短期气象预报工作。E-mail:gz_zhangd@163.com

boundary layer southerly jet over the northwest of the South China Sea strengthened at night and its front side reached the coast of western Guangdong, maintaining for a long time. Under such a condition, the dynamic convergence and uplift caused by the convergence of wind speed in the front of the boundary layer southerly jet and the blocking effect of the coastal terrain of western Guangdong on the southward flow were conducive to the occurrence of convection in this area. At the same time, the existence and maintenance of cold pool favored the development and maintenance of rainstorm in the coastal warm sector of western Guangdong. When the low-level jet was significantly strengthened, expanding to the east and retracting to the north, and the boundary layer jet turned to the southwest extending to the north of the Pearl River Delta, the condition is not beneficial to the triggering and development of convection in the west coast of Guangdong.

Key words: low-level southwest jet, boundary layer southerly jet, warm sector rainstorm, Guangdong Province

引 言

目前,在我国暴雨的研究和业务中,暖区暴雨仍属热点和难点。20世纪70年代至今,我国通过开展多次外场观测科学试验(如南海季风试验)和国家重点基础研究发展计划(973计划)项目等,在暖区对流发生发展机制等方面取得了诸多进展,已有的研究成果普遍认为暖区暴雨基本伴有低空西南急流发展或边界层急流加强(林良勋等,2006;何立富等,2016;寿绍文,2019;谌芸等,2019),并且在1500 m以下存在温湿度差异较大的不同特性的急流。早在20世纪80年代,周军(1986)就讨论了华南暴雨中边界层偏南风急流(SBLJ)和低空急流(LLJ)的区别,以及SBLJ形成的原因。近年来,诸多学者针对低空急流对暖区暴雨的触发机制等进行了研究,如赵玉春等(2008)认为季风涌对暖区暴雨的影响更为直接,尤其是越赤道气流加强后造成华南南部和南海北部西南低空急流的加强,导致暖区有利的中尺度环境形成;于鑫等(2017)指出北部湾低压(槽)发展导致的强盛低层西南气流为粤西沿海的一次暴雨过程发生提供了充沛的水汽;黄小彦等(2020)指出低空急流下边界不断向下扩展过程中在地形抬升作用下触发了迎风坡上初始雷暴等。针对暖区暴雨与LLJ的统计分析,苗春生等(2017)将华南沿海暖区暴雨分为偏南向型和西南向型;丁治英等(2011)、陈翔翔等(2012)、刘瑞鑫等(2019)统计得出在南风影响下的暖区暴雨发生频率较高、影响较大,低层南风辐合是产生暖区暴雨的重要机制之一。同时,许多学者也关注了边界层急流对暖区暴雨的作用,如孙

建华和赵思雄(2000)对暖区暴雨数值模拟的结果表明边界层过程对强的对流性降水的模拟是不可忽略的;张端禹等(2014)指出边界层偏南风急流的生消活动与水平尺度的演变对于华南前汛期暖区暴雨均较重要;蔡景就等(2019)、陈芳丽等(2021)指出边界层偏南急流的演变是造成粤东沿海暖区极端暴雨的重要机制之一;曾智琳等(2019)指出夜间边界层西南急流的建立是强迫地面风速水平切变、边界层风速垂直切变产生的主要原因;Wu et al(2020a)通过对比锋面暴雨和暖区暴雨的差异,提出了海陆风、边界层急流和海岸地形作用下影响暖区暴雨发生发展的边界层天气概念模型;Du et al(2020a)指出更强的南海边界层急流更有利于华南海岸附近初始对流的触发和发展等。不同于只针对低空急流或边界层急流对暖区暴雨的研究, Du and Chen(2018;2019a;2019b)研究指出华南沿海暖区暴雨的发生发展与边界层急流(BLJ)、天气尺度低空急流(SLLJ)的相互作用和日变化特征有密切关系,并提出了双低空急流触发海岸附近对流的天气概念模型。然而,在业务实践中发现,双低空急流起主导作用触发的粤西沿海暖区暴雨过程中,二者的位置有时并非完全上一致,且当低空急流加强到一定程度后会成为输送通道,反而不利于沿海降水的发生发展,目前的研究成果尚未给出粤西沿海暖区暴雨发生时,低空急流和边界层急流最有利的配置和强度等。

2020年“龙舟水”期间,广东强降水频发,其中6月1—4日出现了一次由夏季风爆发引发的典型暖区暴雨过程。该过程最大特点和预报难点是粤西沿海暴雨触发的时段和强度预报,期间在大气环流形势场特征相似的情况下,2日粤西沿海出现了暴雨到

大暴雨、局部特大暴雨,最大降水量达到 459.6 mm,而 3 日只出现了一些分散性阵雨,降水量级差异很大。此次过程中各家数值模式对于低空急流附近的降水预报效果更好,而对于边界层急流引发的粤西沿海降水能力较弱,当 2 日低空西南急流轴位于桂东时,粤西沿海暖区暴雨漏报;3 日低空急流东扩入粤后,粤西沿海降水反而不明显,因此,此次双低空急流造成粤西沿海暴雨的机制值得深入探究。本研究将分析 2020 年 6 月 2 日和 3 日大气环流背景场和粤西沿海降水的差异,并探讨粤西沿海区域内强降水的触发和维持机制,研究结果有望于加深对双低空急流作用下广东沿海暖区暴雨形成机理的认识。

1 资料与方法

根据天气学分析方法,采用 2020 年 6 月 1—4 日 ERA5(the fifth generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis)逐小时全球再分析数据,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,垂直分辨率为 17 层,以及实况观测数据进行天气形势和物理量分析;采用广东省地面气象监测站点的降水和风、阳江探空站数据、阳江海陵岛风廓线雷达产品,以及广东天气雷达拼图产品,分析降水时空分布特征、实况风演变和降水回波特征等。

2 降水差异分析

从 6 月 2 日和 3 日 08 时(北京时,下同)实况观测数据可以看出(图 1),华南上空两日的大气环流

形势很相似,588 dagpm 线均位于华南沿海,对流层低层的影响系统为低空西南急流和边界层偏南急流。从天气学分类来看,该次降水属于广东暖区暴雨型中的一类,即高空槽前和副热带高压(以下简称副高)边缘西南(偏南)急流造成的暖区暴雨(林良勋等,2006;陈芳丽等,2014)。在这两日相似的大气环流背景场影响下,造成了粤西沿海迥异的降水。

从 2020 年 6 月 1 日 20 时至 3 日 20 时广东累计降水量时空分布特征(图 2)可以发现,2 日粤西沿海(图中红框区域内)的茂名东部—阳江—江门南部—珠海西部一带出现了暴雨到大暴雨、局部特大暴雨(图 2a),该区域内过程累计降水量大、雨强强,其中阳江的 6 个站点降水量超过 250 mm,最大小时雨强为 $98.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (阳东塘坪,2 日 04—05 时),最大单站 24 h 累计降水量为 459.6 mm(江城白沙气象监测站);2 日 20 时至 3 日 20 时粤西沿海大部分地区降水量均不足 10 mm(图 2b)。从白沙气象监测站降水的时间分布来看(图 2c),强降水 2 日凌晨被触发,夜雨特征明显;强降水持续时间长,04—12 时连续 9 h 时降水量超过 20 mm,04—05 时最大降水量达 66.4 mm。

天气雷达回波也可清晰反映出 2 日和 3 日粤西沿海降水的差异和特征。分析 2—3 日凌晨雷达回波的演变特征(图 3),2 日粤西沿海的初始回波出现在 01 时后,随后不断发展,03 时后组织化进一步加强,降水强度明显增强,最大小时雨强超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,此时回波呈现为准静止状态,阳江上空 45 dBz 以上的强回波长时间驻留,造成了连续 9 h 的短时强降水,为典型的粤西沿海暖区暴雨特征。相较于 2 日的强回波驻留和发展,3 日凌晨粤西沿

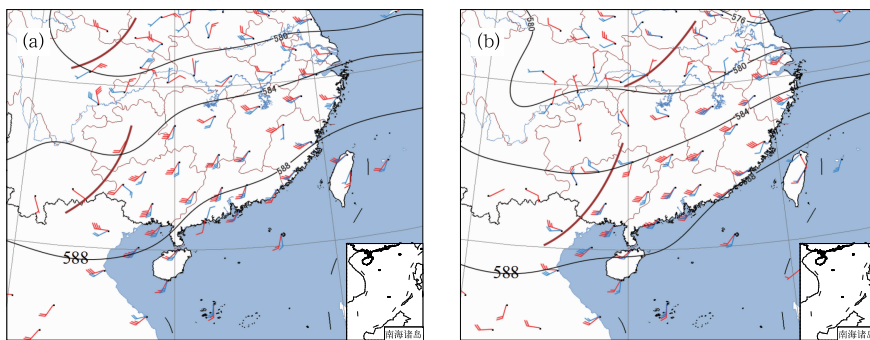


图 1 2020 年 6 月(a)2 日 08 时和(b)3 日 08 时 500 hPa 高度场(等值线,间隔 4 dagpm,棕红色线表示槽线)、850 hPa(红色风羽)和 925 hPa(蓝色风羽)风场
Fig. 1 500 hPa height field (contour, interval 4 dagpm; brownie-red line: trough line), 850 hPa (red barb) and 925 hPa (blue barb) wind fields at
(a) 08:00 BT 2 and (b) 08:00 BT 3 June 2020

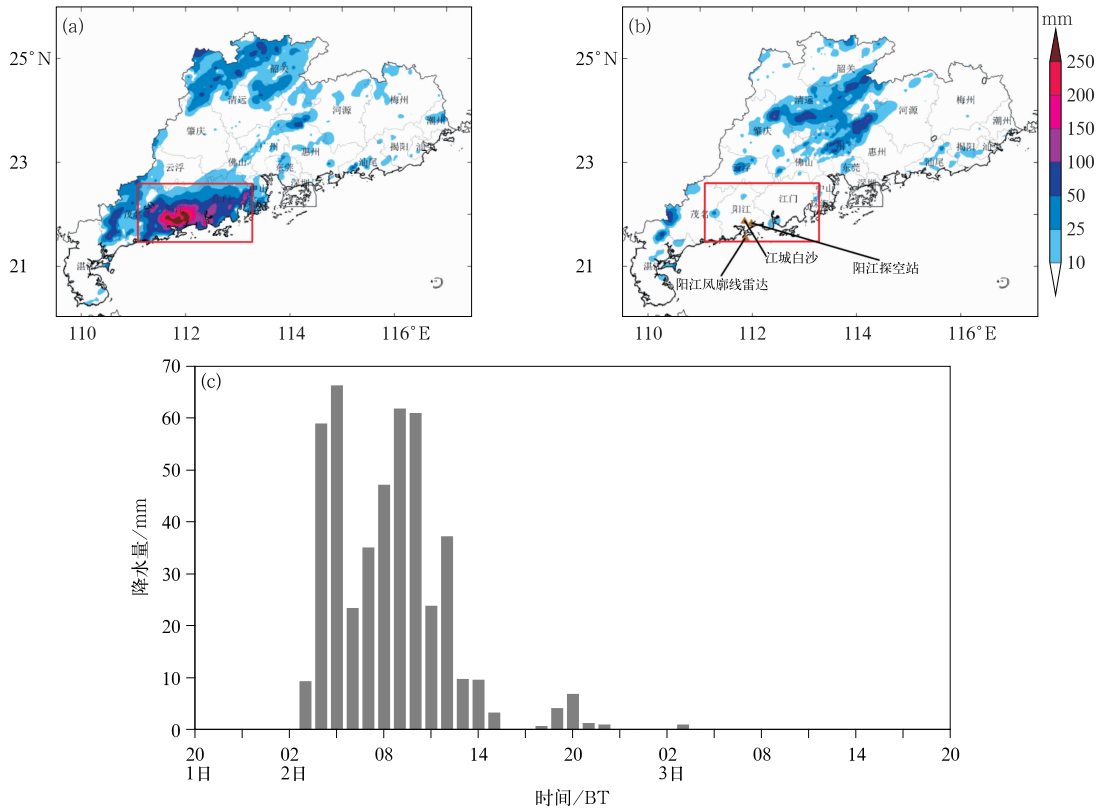


图 2 2020 年 6 月(a)1 日 20 时至 2 日 20 时和(b)2 日 20 时至 3 日 20 时广东省 24 h 累计降水量及(c)阳江江城白沙气象监测站 1 日 20 时至 3 日 20 时逐时降水量序列
(图 2a,2b 红框为粤西沿海强降水区,下同)

Fig. 2 Accumulated precipitation in Guangdong (a) from 20:00 BT 1 to 20:00 BT 2 June and (b) from 20:00 BT 2 to 20:00 BT 3 June, and (c) hourly precipitation at Baisha Station in Yangjiang from 20:00 BT 1 to 20:00 BT 3 June 2020

(The red boxes in Figs. 2a and 2b show the severe precipitation area along the coast of western Guangdong, the same below)

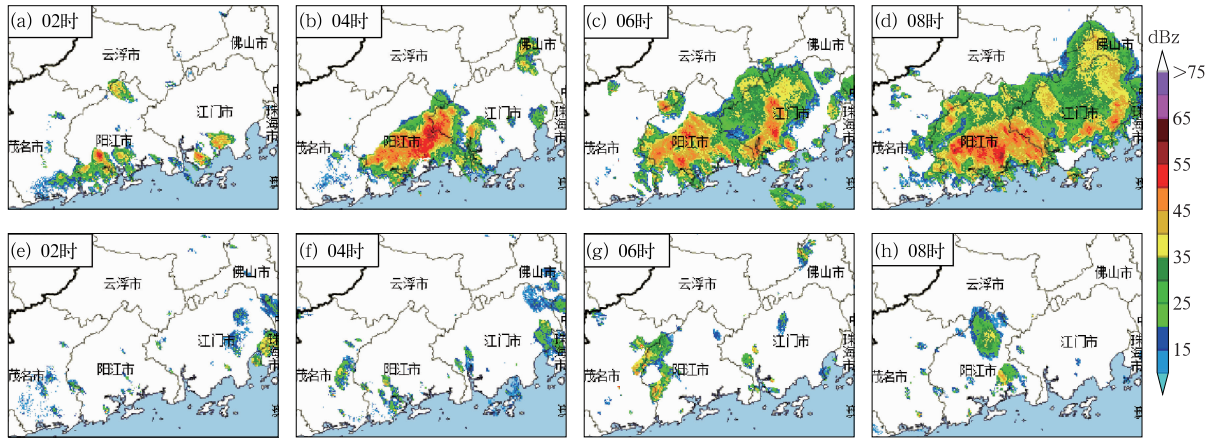


图 3 2020 年 6 月(a,b,c,d)2 日和(e,f,g,h)3 日 02—08 时广东 2.5 km 高度雷达反射率因子

Fig. 3 Reflectivity of radar at 2.5 km height in Guangdong from 02:00 BT to 08:00 BT

(a, b, c, d) 2 June and (e, f, g, h) 3 June 2020

海只生成了一些较弱的分散回波,对流强度显著偏弱。

Wu et al(2020b)指出由于缺乏“锋面、切变、低涡”等经典风向辐合型的天气尺度系统强迫,目前对

于暖区暴雨及其相关的热力环境条件的模式可预测性是有限的,在业务上很难预报,有时甚至事后亦难以系统地解释;陈涛等(2020)指出比较锋面降水和暖区降水的集合预报敏感性表明,锋面降水对于锋前低压槽、低空急流等天气系统强迫具有较高预报敏感性。针对暖区暴雨的难点,覃武等(2020)、付炜等(2020)、胡宁等(2020)也从暖区暴雨的模式预报失败案例中总结经验和进行可预报性探讨等。对于此次粤西沿海的降水过程,从多家数值模式降水预报来看(图 4),ECMWF 高分辨率数值预报、NCEP_GFS 以及 CMA-TRAMS(9 km 南海台风模式)和 CMA-GD(3 km 广东模式)对于 2 日和 3 日的降水预报均不理想,其中 ECMWF 细网格、CMA-TRAMS 和 CMA-GD 模式预报的降水落区和强度与实况偏差很大,对于 2 日粤西沿海只报出小到中雨量级的降水,强降水基本漏报;NCEP_GFS 模式预报效果略好,显示 2 日粤西沿海和近海区域内有中到大雨量级的降水,但强降水范围和量级明显偏弱于实况,3 日中到大雨降水范围有所缩小,相较于实况则量级偏强范围偏大。因此,若根据数值模式的降水预报产品,并不能预报出 2 日和 3 日降水量级的差异,且容易造成 2 日强降水漏报、3 日空报。

通过对比分析各家数值模式预报的对流层低层风场、高度场和降水可以发现(图略),2 日和 3 日各家模式预报降水落区主要位于副高西北侧的低空急流辐合区附近。由于 2 日 NCEP_GFS 预报 588 dagpm 线和低空急流位置较实况偏东,ECMWF 和 CMA-GD

模式预报接近实况;边界层急流的预报也有明显的差异,NCEP_GFS 预报南海西北部至粤西沿海为偏南风,而 ECMWF 和 CMA-GD 预报则为西南风,因此 NCEP_GFS 预报强降水落区较其余几家模式更为偏东,粤西沿海降水更明显。3 日各家均预报 588 dagpm 线东移,但低空急流演变预报不一致,ECMWF 和 CMA-GD 模式预报与实况基本一致,强度明显增强,NCEP_GFS 预报位置变化不大、强度略有增强;NCEP_GFS 预报边界层气流靠近珠江口一侧转为西南风,因此 NCEP_GFS 预报降水强度变化不大,但粤西沿海落区减小,ECMWF 和 CMA-GD 预报广东境内降水落区变化不大,但强度减弱。因此,各家数值模式对于 2 日和 3 日对流层低层风场的预报差异主要表现在低空急流轴位置和边界层急流风向变化等。

3 天气系统和物理量场对比分析

在 500 hPa 高空槽和副高的影响下,6 月 1—4 日华南地区对流层低层风场经历了起始—强盛—减弱的季风爆发过程,2—3 日为发展的强盛期(图 5),期间 850 hPa 西南低空急流大风速核强度呈加强趋势,且桂东向东北方向推进和向东扩展,950 hPa 偏南(西南)急流位于北部湾和南海西北部,南海西北部急流在粤西沿海风速明显减小,急流强度变化也与 850 hPa 西南急流有所不同,凌晨加强最显著。

2 日 850 hPa 急流轴主要位于广西东部,南海

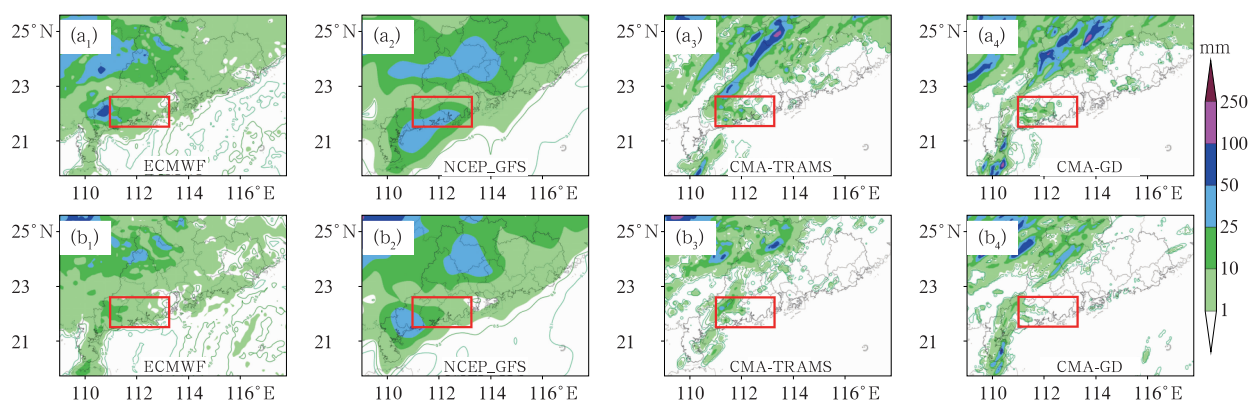


图 4 2020 年 6 月 1—3 日各家数值模式 5 月 31 日 20 时起报对应时段的 24 h 降水量预报
($a_1 \sim a_4$) 1 日 20 时至 2 日 20 时, ($b_1 \sim b_4$) 2 日 20 时至 3 日 20 时

Fig. 4 The 24 h precipitation forecast initiated from 20:00 BT 31 May by numerical models
for the corresponding periods during 1—3 June 2020

($a_1 - a_4$) from 20:00 BT 1 to 20:00 BT 2, ($b_1 - b_4$) from 20:00 BT 2 to 20:00 BT 3

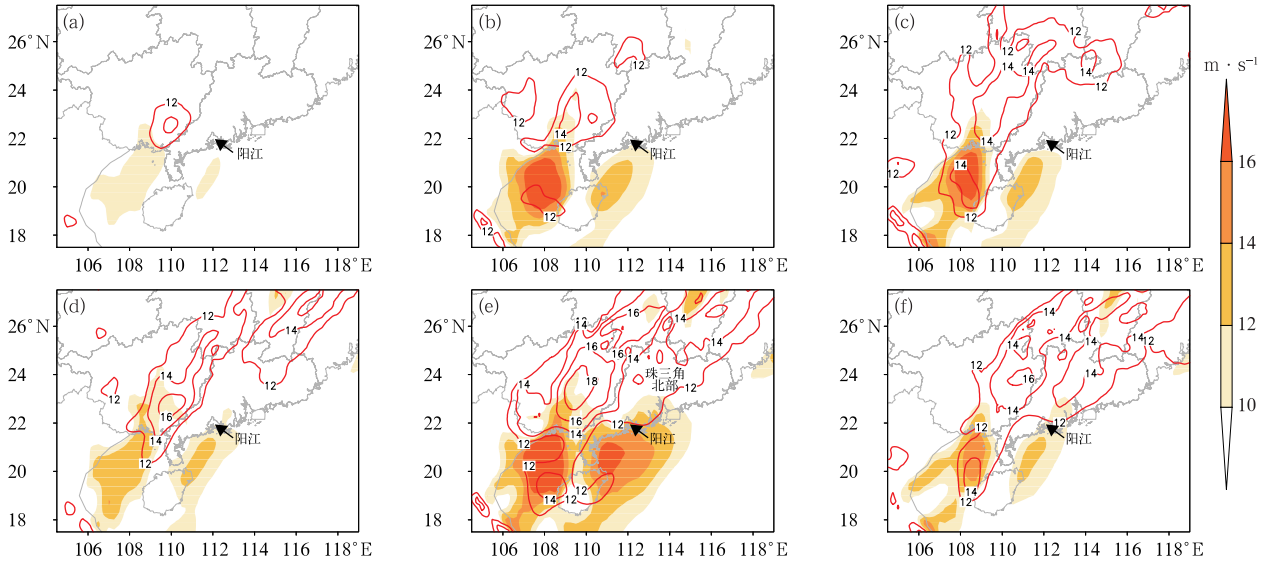


图 5 2020 年 6 月 1—3 日 850 hPa 全风速(等值线, $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 950 hPa 全风速(填色)

(a) 1 日 20 时, (b) 2 日 02 时, (c) 2 日 08 时, (d) 2 日 20 时, (e) 3 日 02 时, (f) 3 日 08 时

Fig. 5 The 850 hPa (isoline, $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) and 950 hPa (colored) wind speeds during 1—3 June 2020

(a) 20:00 BT 1, (b) 02:00 BT 2, (c) 08:00 BT 2,

(d) 20:00 BT 2, (e) 02:00 BT 3, (f) 08:00 BT 3

西北部 950 hPa 急流前侧至阳江附近沿海, 边界层急流前侧辐合区内触发了暖区强降水, 高空槽前和 850 hPa 切变线附近的降水不明显; 3 日 850 hPa 急流轴强度增强, 在高空槽东移和副高东退的影响下, 其大风速核明显向东北和东扩展, 期间高空槽和切变线附近的桂西北至赣北一带降水明显被触发, 形成主雨带, 而处于 850 hPa 西南急流后侧的粤西沿海暖区降水明显减弱, 此时在 850 hPa 低空急流增强的耦合带动下, 950 hPa 急流也随之增强, 且向东北方伸至珠江三角洲北部, 这种形势更有利于珠江三角洲北部的清远、韶关南部—广州、惠州北部一带地区(图 2b 中强降水区)对流的触发。因此, 在有利的大气环流背景下, 粤西沿海强降水与低空西南急流和边界偏南(西南)急流变化相关, 尤其是与边界层急流的演变关系更为密切, 但由于南海北部气象探空站稀疏, 并不能根据海上实况监测来判断粤西沿海暴雨区上游边界层风速的变化特征, 这也是广东沿海暖区暴雨预报中的困难所在。

从垂直层面来分析低空急流的垂直演变差异, 做降水范围内($111^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$)平均风场的垂直-经向剖面, 以及 2 日和 3 日 02 时相较于整个过程(1 日 08 时至 4 日 20 时)平均风场的距平场。2 日凌晨(图 6a), 对流层低层风速较过程平均风场变化不

大, 低空西南急流位置较高, 中心位于 650 hPa 附近, 边界层急流中心较低, 中心在 950 hPa; 3 日凌晨(图 6b), 对流层低层风速整体显著增强, 西南低空急流中心下沉至 800 hPa 附近, 而边界层急流中心略有所抬升, 且向北明显延伸, 即边界层急流前侧已越过阳江沿海上空, 也就是说, 3 日对流层低层大气环流形势较 2 日更有利暖湿水汽和能量向北输送, 导致沿海暖湿能量辐合抬升潜势的减弱。

从探空站实况风场的变化为更直观地分析粤西沿海强降水附近低空西南急流和边界层偏南(西南)急流风速的演变特征, 选取最靠近海岸和边界层急流的阳江探空站风场做风速廓线图(图 7), 从图 7a 可以看出, 2 日 02 时探空站处于低空急流轴右侧和南海边界层急流前侧(图 5b), 950~925 hPa 附近风速为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 850 hPa 风速只有 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。3 日凌晨(图 7b), 950~850 hPa 风速明显增大, 且 850 hPa 风速超过 950 hPa 风速, 此时探空站已处于低空急流和南海边界层急流影响下(图 5e)。

阳江风廓线雷达产品能更高时间和垂直分辨率的反映出对流层低层风场的变化。阳江风廓线雷达位置如图 2b 所示, 位于阳江海陵岛, 处于强降水区上游, 岛内只在 2 日 20 时前后出现了不足 10 mm 的降水量。从阳江海陵岛的风廓线风场变化特征来

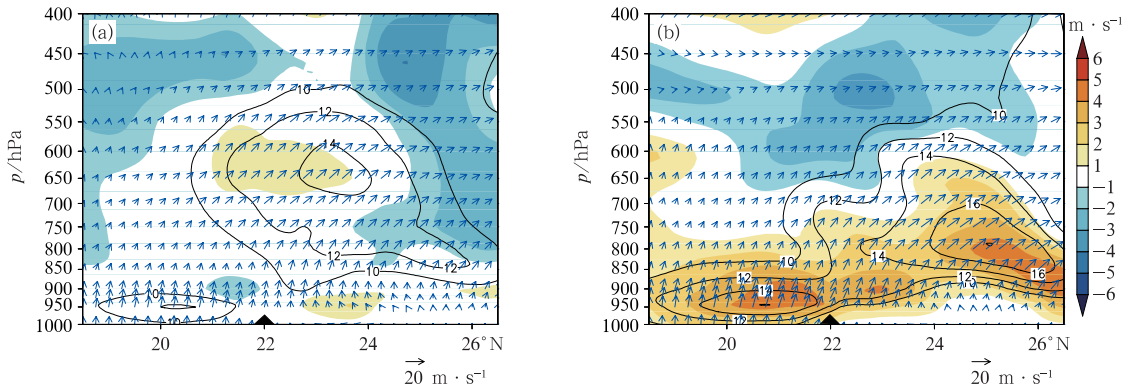


图 6 2020 年 6 月(a)2 日 02 时,(b)3 日 02 时 111°~113°E 范围内平均风场(风矢, 风速 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以等值线显示)和风速距平场(填色)的垂直-经向剖面 (黑色三角形代表阳江沿海,下同)

Fig. 6 Vertical-meridional profile of averaged wind field (wind vector, contour: $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind speed anomaly field (colored) over 111°–113°E at (a) 02:00 BT 2 and (b) 02:00 BT 3 June 2020 (The black triangle represents the coastal area of Yangjiang, the same below)

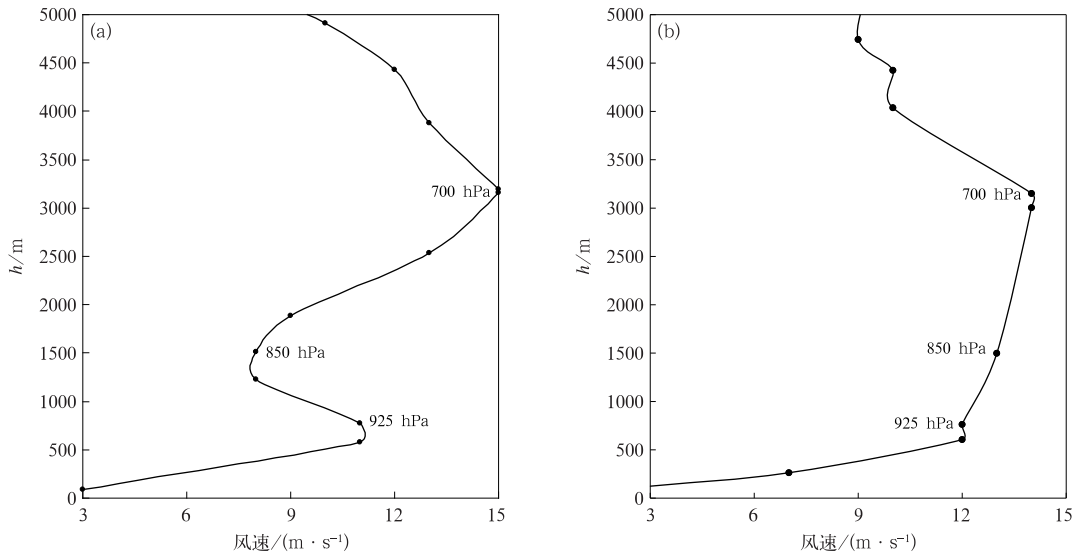


图 7 2020 年 6 月(a)2 日 02 时和(b)3 日 02 时阳江探空风速

Fig. 7 Wind speed of Yangjiang sounding at (a) 02:00 BT 2 and (b) 02:00 BT 3 June 2020

看(图 8),该地区 2—3 日对流层低层风速最大的差异在于边界层风速的变化。2 日 00 时开始 400 m 上下的阳江上空风速开始加大,03 时前 580 m 以下至近地层偏南风风速出现明显加大,风速增大的时间与粤西沿海对流初始触发时间一致,即边界层急流的脉冲与该区域降水有直接关系。3 日凌晨 100 m 风速较之 2 日偏弱,且风向为西南向,此时显著的特点是大风速范围垂直向上伸展,对应于实况 850 hPa 西南风风速的显著增大,有利于暖湿水汽沿西南急流向内陆输送,粤西沿海只出现了一些分散性阵雨,强降水落区主要集中在其东北方的珠江三角洲北部地区。因此,结合降水实况,粤西沿海的强降水与边界层急流的关系更为密切。

上述大气环流的演变导致两日内物理量场也有所差异,从 2 日降水发生前(图 9a)和 3 日凌晨(图 9b)阳江探空图来看,探空站位于强降水区南侧,两个时次 K 指数相当,分别为 38.2℃和 38.4℃,均超过强对流天气阈值 35℃。大气可降水量分别为 64.4 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 74.2 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。对流有效位能(CAPE)值差异较大,分别为 1777.6 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 600.1 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,对流抑制能(CIN)值则是后者大于前者。此外,3 日凌晨地面温度较 2 日低了约 3℃,且存在逆温现象。总之,2 日和 3 日凌晨,阳江附近的大气层结均处于不稳定状态,但 2 日凌晨较之 3 日更为不稳定,3 日对流的触发需要更强的抬升条件,即 2 日更有利于强降水的发生。

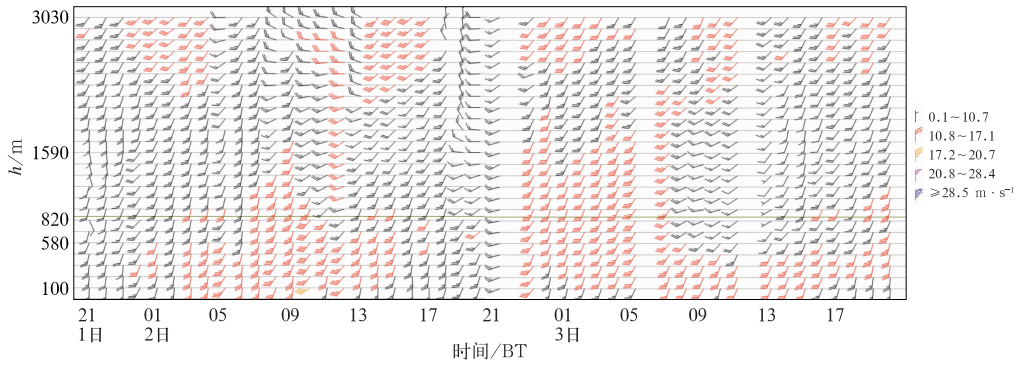


图 8 2020 年 6 月 1 日 21 时至 3 日 20 时阳江风廓线雷达风羽图(间隔 1 h)

Fig. 8 Wind barb chart of Yangjiang Wind Profiler from 21:00 BT 1 to 20:00 BT 3 June 2020 (interval 1 h)

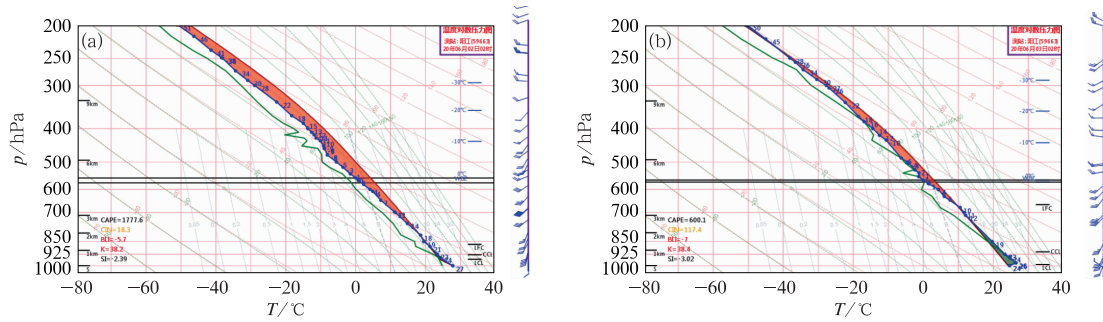


图 9 2020 年 6 月 (a)2 日 02 时和 (b)3 日 02 时阳江探空图

Fig. 9 T - $\ln p$ maps of Yangjiang sounding at (a) 02:00 BT 2 and (b) 02:00 BT 3 June 2020

综上所述,在弱高空槽和副高的影响下,低空西南急流和边界层偏南急流的演变是 2 日和 3 日阳江及附近粤西沿海地区是否产生降水的重要影响系统,而 2 日凌晨由于南海西北部边界层偏南急流脉冲形成的风速辐合是阳江附近强降水的关键原因。

4 触发和维持机制

4.1 双低空急流动力抬升作用对比

从第三节可知,2 日粤西沿海处于 850 hPa 西南急流后部和 950 hPa 偏南急流前端,这种大气环流形势将导致该区域上空对流层低层自下而上形成辐合-辐散的垂直配置,另一方面,边界层偏南气流夜间加强形成风速脉冲,使得其前端风速辐合加强(Wu et al, 2020a),二者共同作用使得底层暖湿水汽的辐合抬升,造成粤西沿海大气层结不稳定潜势的增长,但 3 日随着对流层低层急流强度的明显增强,使得粤西沿海形成暖湿水汽输送通道,对流潜势减弱。

为了论证这一特点,分别做 2 日和 3 日 02 时降水范围内($111^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$)平均的散度场和垂直速度场的垂直-经向剖面。2 日凌晨(图 10a),粤西沿海自低层向高层表现为辐合-辐散交替特征,对明显的垂直上升运动,此外,北侧的下沉运动一方面使得粤西沿海不稳定区域范围受限,对流在较小的区域内发生发展,另一方面加强了边界层急流前侧即粤西沿海地区暖湿水汽的堆积抬升,利于强降水的增强和维持;3 日凌晨(图 10b),随着西南低空急流和边界层急流的显著增强和北推,粤西沿海边界层辐合抬升较 2 日凌晨有所加强,且向北推进,但 700 hPa 以上垂直速度负值区明显减弱,甚至转为正值,低层北侧正值区也较 2 日凌晨明显减弱,对照图 9b 阳江探空中 CIN 值为 $117.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,自由对流高度为 664.7 hPa,明显高于 700 hPa,即,3 日凌晨阳江上空有较强的对流抑制,上升运动未能突破自由对流高度,对流触发条件较 2 日凌晨明显偏差,不利于对流产生。因此,当边界层急流前侧到达粤西沿海时,形成暖湿气流的辐合抬升更有利于该地区对流的触发,而当双低空急流显著加强,边界层急

流前侧超过粤西沿海伸展至珠江三角洲北部时,辐合抬升作用减弱。

4.2 边界层偏南风风向与地形作用

广东沿海喇叭口、迎风坡、局地低矮地形等对暖区暴雨起着非常重要的作用(林良勋等,2006;李博等,2013;何立富等,2016;Du and Chen,2019b),但边界层南风风向的偏差将带来差异较大的降水落区和强度,朱乾根等(2007)指出当山的坡度越大,地面风速越大,且风向与山的走向越垂直时,地面垂直运动越强。

阳江市东部、西部和北部为群山所环抱,南面濒临南海,呈东北—西南走向的云雾山脉和天露山分别位于阳江西部和东北部,东部与江门之间多为丘陵地貌,天露山海拔在 500~1000 m,位于茂名市信宜县境内的云雾山脉最高峰大田顶海拔为 1704 m。此次强降水落区主要位于云雾山脉东南侧和天露山西南侧的漠江冲击平原和丘陵地带。结合上述边界层风向的变化、雷达回波演变,以及图 11 给出的单站降水和极大风的时序图,单站分别选取降水量最大的阳江江城白沙气象监测站和凤廓线雷达附近的海陵岛海洋气象观测站,综合分析可以发现,2 日降水开始前和初始时,阳江附近以偏南到东南风为主,3 日凌晨较 2 日风向发生明显顺时针偏转,平均风向偏转约 20°~30°,以西南风为主。即当 2 日凌晨边界层风向以偏南分量为主时,风向与山脉之间的夹角趋于 90°,云雾山和天露山南侧降水回波不断发展,长时间维持,且强度最强;3 日随着 850 hPa 低空西南急流向东扩展,阳江附近边界层转为以西

南分量为主,此时风向与山脉夹角减小,趋于平行,雷达回波图上只有较弱的分散回波生成。

由上述分析可知,边界层偏南急流与地形作用加强了此次强降水,这与王坚红等(2017)提出粤西沿海暖区暴雨多由偏南向型辐合线系统造成的结论一致,即阳江附近地形对偏南型辐合线系统主要起到山脉地形正面阻挡和狭管辐合上升作用,进一步增强了大气层结不稳定。

4.3 冷池对降水维持作用

华南沿海地区冷池(湛芸等,2019)或者降水引起的冷流(Wang et al,2014;吴亚丽等,2018)与暖气团之间的中尺度边界上对流不断被触发,即冷池或冷流对于华南沿海暖区暴雨的维持起着重要的作用。Du et al(2020b)通过热浮力来表征冷池,即 $B = g(\theta_v - \bar{\theta}_v) / \bar{\theta}_v$,式中 θ_v 为虚位温, $\bar{\theta}_v$ 为虚位温的水平区域平均,区域平均取值范围为图 2 中粤西强降水区域(21.5°~22.5°N,111°~113°E)。

分析 2 日和 3 日凌晨 1000 hPa 水平热浮力和沿 112°E 垂直热浮力演变特征,可以明显看出,2 日 02 时对流初始触发时(图 12a、12d),在没有冷空气南侵的背景下,由于海陆热力差异和边界层急流加强,水平层上阳江附近出现显著的南北热力差异,形成了明显的中尺度热力不稳定锋区,垂直层上表现为正负热浮力之间较陡峭的锋面,锋面两侧正负值均较强,导致了较强的锋面梯度;3 日 02 时(图 12c、12f),随着对流层低层暖湿气流的加强和北推,阳江南北侧热力差异显著减小,为很弱的冷热对峙,此时热力条件不利于对流维持。因此,阳江北侧冷池的

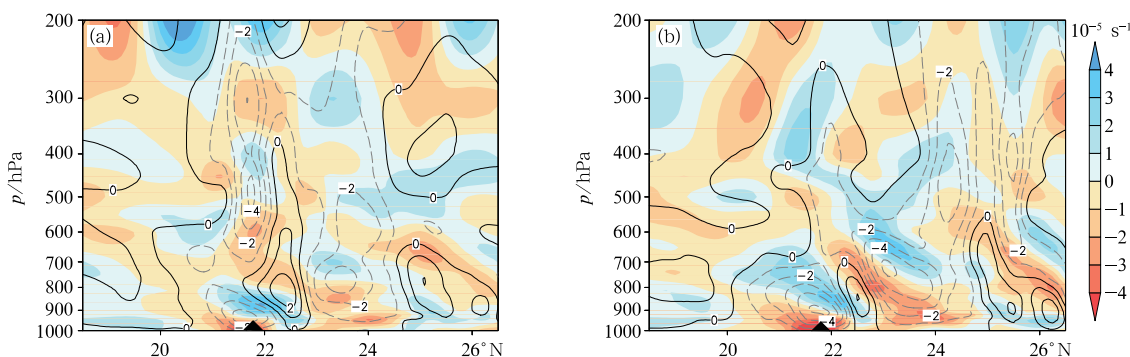


图 10 2020 年 6 月(a)2 日 02 时和(b)3 日 02 时 111°~113°E 范围内平均散度场(填色)

和垂直速度场(等值线,单位:10⁻¹ Pa · s⁻¹)的垂直-经向剖面

Fig. 10 Vertical-meridional profile of averaged divergence field (colored) and vertical velocity field (contour, unit: 10⁻¹ Pa · s⁻¹) over 111°-113°E at (a) 02:00 BT 2 and (b) 02:00 BT 3 June 2020

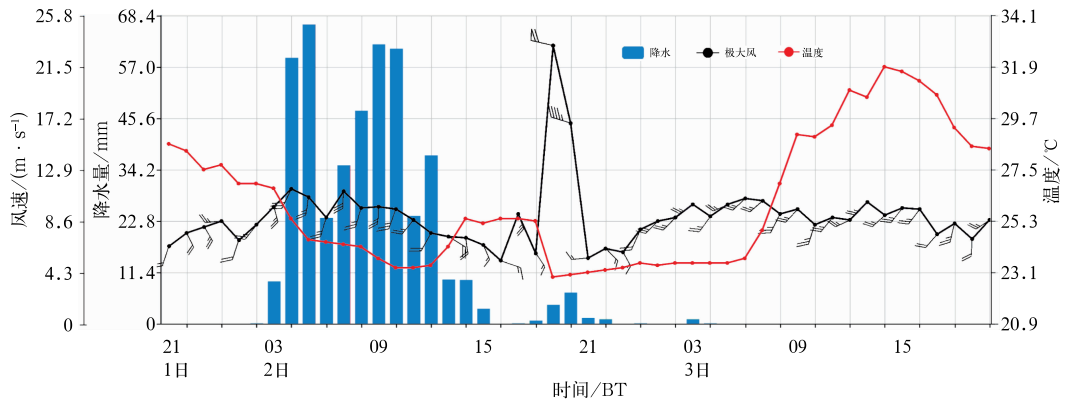


图 11 2020 年 6 月 1 日 21 时至 3 日 20 时阳江海陵岛气象监测站逐时极大风(黑色实线)、江城白沙气象监测站逐时降水量(柱状)和温度(红色实线)

Fig. 11 Hourly maximum wind (balck solid line) of Hailing Island Station, hourly precipitation (column) and temperature (red solid line) of Baisha Station in Yangjiang from 21:00 BT 1 to 20:00 BT 3 June 2020

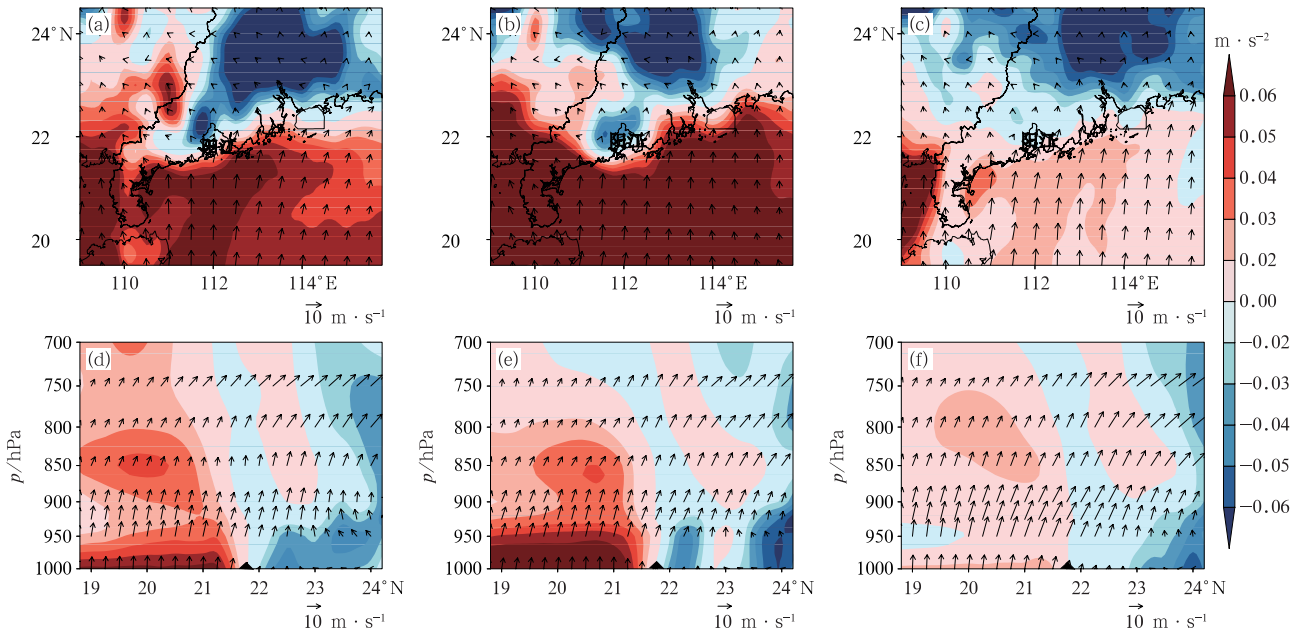


图 12 2020 年 6 月 2 日(a,d)02 时和(b,e)08 时,(c,f)3 日 02 时(a,b,c)1000 hPa 热浮力(填色)和风场(风矢),及(d,e,f)对应时次沿 112°E 热浮力的垂直-经向剖面

Fig. 12 (a, b, c) The 1000 hPa thermal buoyancy field (colored) and wind field (wind vector) and (d, e, f) vertical-meridional profile of thermal buoyancy field along 112°E at (a, d) 02:00 BT 2, (b, e) 08:00 BT 2 and (c, f) 02:00 BT 3 June 2020

存在有利于粤西沿海暖区暴雨的维持。

粤西沿海强降水从 2 日凌晨持续至上午,在此期间,阳江白沙温度变化如图 11 所示,呈逐渐下降趋势,降幅约为 4℃,表明由于降水出现较明显的对流冷池。再分析 2 日 08 时粤西沿海热浮力演变特

征(图 12b、12e),此时阳江北侧冷池强度较 02 时有所减弱,但仍维持较强,且范围扩大,垂直方向锋区更明显,对流回波呈稳定少动态势,地面 10 m 风场上(图 13)也可以清晰地分析出由冷池出流和偏南风之间形成的地面中尺度辐合线,在广东短临时临近

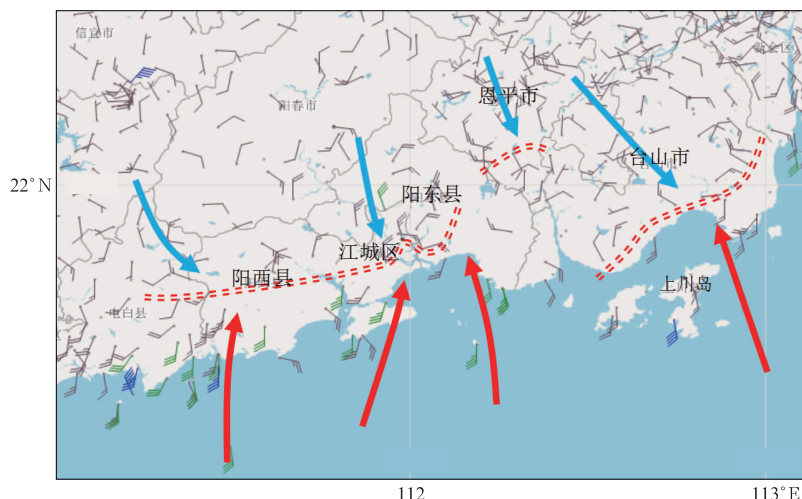


图 13 2020 年 6 月 2 日 08 时地面风场

(双红虚线为中尺度辐合线, 矢量箭头为流线)

Fig. 13 Surface wind field at 08:00 BT 2 June 2020

(Red broken line is surface mesoscale convergence line, arrow represents streamline)

天气预报业务中地面中尺度辐合线的维持是判断降水是否持续的有力判据,冷池也对降水回波的发展和维持起着重要的作用。

因此,结合 2 日和 3 日冷池变化趋势和降水实况对比,可以得出冷池与暖气团之间的中尺度锋区的存在和维持有利于粤西沿海降水回波的发展和维持,是影响暖区暴雨长时间维持的重要原因。

5 结论与讨论

通过对比 2020 年 6 月 2 日和 3 日大气环流背景场的异同特征,以及分析了粤西沿海强降水的触发机制,得出以下结论:

(1)此次强降水过程夜雨特征明显。初始对流在凌晨触发,至中午减弱,降水集中时段为 2 日 03—12 时。

(2)此次粤西沿海暖区暴雨发生在弱高空槽和副高为主要影响天气系统的背景场下,双低空急流即低空西南急流和边界层偏南(西南)急流的演变对 2 日和 3 日阳江及附近粤西沿海地区降水发生发展和维持起着非常重要的作用,尤以边界层偏南急流的加强是强降水发生发展的关键因素。

(3)当低空急流轴位于桂东,南海西北部上空的边界层偏南急流在夜间加强,其前侧达到粤西沿海时,形成辐合抬升有利于该区域对流的触发,同时当

边界层急流为偏南风向时,阳江附近地形对强降水的作用更显著,但当低空急流显著加强且东扩北收,边界层急流转为西南向,其前侧超过粤西沿海伸展至珠江三角洲北部时,该区域辐合抬升作用减弱。

(4)阳江北侧冷池的存在和维持有利于降水回波的发展和维持,是影响暖区暴雨长时间持续的重要原因。

本研究为低空急流发生时在相似环流背景下产生的迥异降水事件,通过对比分析,总结了此类天气粤西沿海暖区降水的预报经验,以期减少强降水的空报和漏报。当 850 hPa 急流轴位于两广交界附近,南海西北部边界层急流开始发展,且将在粤西沿海出现显著的风速辐合时,应重点关注风速辐合区和沿海地形迎风坡一带强降水的触发;当粤西沿海上空 850 hPa 风速明显增加,且该区域处于低空急流轴后侧,边界层急流也进一步增强,前侧辐合区向内陆推进时,粤东沿海将处于低空暖湿气流的输送通道内,大气环流形势不利于强降水的发生发展。

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).
- 陈芳丽, 张子凡, 李明华, 等, 2014. 惠州市近 40 年前汛期暴雨的气候特征分析[J]. 广东气象, 36(3):25-29, 36. Chen F L, Zhang Z F, Li M H, et al, 2014. Analysis on climate characteristics of rainstorms in the annually first rain season of Huizhou in the past 40 years[J]. Guangdong Meteor, 36(3):25-29, 36(in Chinese).
- 陈涛, 陈博宇, 于超, 等, 2020. 华南前汛期锋面对流系统和暖区对流系统的多尺度特征和集合预报敏感性对比分析[J]. 气象, 46(9):1129-1142. Chen T, Chen B Y, Yu C, et al, 2020. Analysis of multiscale features and ensemble forecast sensitivity for MCSs in front-zone and warm sector during pre-summer rainy season in South China[J]. Meteor Mon, 46(9):1129-1142(in Chinese).
- 陈翔翔, 丁治英, 刘彩虹, 等, 2012. 2000—2009 年 5、6 月华南暖区暴雨形成系统统计分析[J]. 热带气象学报, 28(5):707-718. Chen X X, Ding Z Y, Liu C H, et al, 2012. Statistic analysis on the formation system of warm-sector heavy rainfall in May and June from 2000—2009[J]. J Trop Meteor, 28(5):707-718(in Chinese).
- 湛芸, 陈涛, 汪玲瑶, 等, 2019. 中国暖区暴雨的研究进展[J]. 暴雨灾害, 38(5):483-493. Chen Y, Chen T, Wang L Y, et al, 2019. A review of the warm-sector rainstorms in China[J]. Torr Rain Dis, 38(5):483-493(in Chinese).
- 丁治英, 刘彩虹, 沈新勇, 2011. 2005—2008 年 5、6 月华南暖区暴雨与高、低空急流和南亚高压关系的统计分析[J]. 热带气象学报, 27(3):307-316. Ding Z Y, Liu C H, Shen X Y, 2011. Statistical analysis of the relationship among warm sector heavy rainfall, upper and lower tropospheric jet stream and South Asia high in May and June from 2005 to 2008[J]. J Trop Meteor, 27(3):307-316(in Chinese).
- 付炜, 唐明晖, 叶成志, 2020. 强西南急流背景下湘桂边界两次预报失败的暖区暴雨个例分析[J]. 气象, 46(8):1001-1014. Fu W, Tang M H, Ye C Z, 2020. Analysis of two forecast failure cases of warm-sector rainstorms on Hunan-Guangxi border area in severe southwest jet[J]. Meteor Mon, 46(8):1001-1014(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).
- 胡宁, 符娇兰, 汪会, 2020. 华南前汛期强降水个例模式降水预报误差成因初探[J]. 气象, 46(8):1026-1038. Hu N, Fu J L, Wang H, 2020. Analysis of the source of model precipitation prediction bias for a heavy rainfall event in the pre-flood season in South China[J]. Meteor Mon, 46(8):1026-1038(in Chinese).
- 黄小彦, 孙继松, 刘文婷, 2020. 地形作用下低空急流的演变与强降水对流风暴系统的相互作用[J]. 气象学报, 78(4):551-567. Huang X Y, Sun J S, Liu W T, 2020. The interaction between low-level jet evolution and severe convective rainstorms under topographic effect[J]. Acta Meteor Sin, 78(4):551-567(in Chinese).
- 李博, 刘黎平, 赵思雄, 等, 2013. 局地低矮地形对华南暴雨影响的数值试验[J]. 高原气象, 32(6):1638-1650. Li B, Liu L P, Zhao S X, et al, 2013. Numerical experiment of the effect of local low terrain on heavy rainstorm of South China[J]. Plateau Meteor, 32(6):1638-1650(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:90-126. Lin L X, Feng Y R, Huang Z, et al, 2006. Technical Guidance on Weather Forecasting in Guangdong Province[M]. Beijing: China Meteorological Press:90-126(in Chinese).
- 刘瑞鑫, 孙建华, 陈鲍发, 2019. 华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究[J]. 大气科学, 43(1):119-130. Liu R X, Sun J H, Chen B F, 2019. Selection and classification of warm-sector heavy rainfall events over South China[J]. Chin J Atmos Sci, 43(1):119-130(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).
- 覃武, 刘国忠, 赖珍权, 等, 2020. 华南暖区暴雨预报误差及可预报性探讨[J]. 气象, 46(8):1039-1052. Qin W, Liu G Z, Lai Z Q, et al, 2020. Study on forecast errors and predictability of a warm-sector rainstorm in South China[J]. Meteor Mon, 46(8):1039-1052(in Chinese).
- 寿绍文, 2019. 中国暴雨的天气学研究进展[J]. 暴雨灾害, 38(5):450-463. Shou S W, 2019. Progress of synoptic studies for heavy rain in China[J]. Torr Rain Dis, 38(5):450-463(in Chinese).
- 孙建华, 赵思雄, 2000. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究[J]. 大气科学, 24(3):381-392. Sun J H, Zhao S X, 2000. A diagnosis and simulation study of a strong heavy rainfall in South China[J]. Chin J Atmos Sci, 24(3):381-392(in Chinese).
- 王坚红, 杨艺亚, 苗春生, 等, 2017. 华南沿海暖区辐合线暴雨地形动力机制数值模拟研究[J]. 大气科学, 41(4):784-796. Wang J H, Yang Y Y, Miao C S, et al, 2017. The numerical study of terrain dynamic influence on warm area heavy rainfall of convergence lines in South China coast[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4):784-796(in Chinese).
- 吴亚丽, 蒙伟光, 陈德辉, 等, 2018. 一次华南暖区暴雨过程可预报性的初值影响研究[J]. 气象学报, 76(3):323-342. Wu Y L, Meng W G, Chen D H, et al, 2018. A study of the impact of initial conditions on the predictability of a warm-sector torrential rain over South China[J]. Acta Meteor Sin, 76(3):323-342(in Chinese).

- 于鑫,郑腾飞,黄健,等,2017. 一次华南海岸带暖区暴雨过程的观测分析[J]. 热带气象学报, 33(1): 134-144. Yu X, Zheng T F, Huang J, et al, 2017. An observational analysis of a torrential rainstorm in the warm sector of South China coastal areas[J]. J Trop Meteor, 33(1): 134-144(in Chinese).
- 曾智琳, 谌芸, 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).
- 赵玉春, 李泽椿, 肖子牛, 2008. 华南锋面与暖区暴雨两个例对比分析[J]. 气象科技, 36(1): 47-54. Zhao Y C, Li Z C, Xiao Z N, 2008. Comparison analysis of South China front and warm-area heavy rain systems in June 2006[J]. Meteor Sci Technol, 36(1): 47-54(in Chinese).
- 周军, 1986. 华南暴雨区边界层急流的特征和成因[J]. 南京气象学院学报, (4): 348-356. Zhou J, 1986. Characteristics and formation of the jet stream in the boundary layer over South China[J]. J Nanjing Inst Meteor, (4): 348-356(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理与方法(第 4 版)[M]. 北京: 气象出版社: 338-340. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Weather Principles and Methods(4th ed)[M]. Beijing: China Meteorological Press: 338-340(in Chinese).
- 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.
- Du Y, Chen G X, Han B, et al, 2020a. Convection initiation and growth at the coast of South China. Part I: effect of the marine boundary layer jet[J]. Mon Wea Rev, 148(9): 3847-3869.
- Du Y, Chen G X, Han B, et al, 2020b. Convection initiation and growth at the coast of South China. Part II: effects of the terrain, coastline, and cold pools[J]. Mon Wea Rev, 148(9): 3871-3892.
- Wang H, Luo Y L, Jou B J D, 2014. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMRX: observational analysis[J]. J Geophys Res Atmos, 119(23): 13206-13232.
- Wu N G, Ding X, Wen Z P, et al, 2020a. Contrasting frontal and warm-sector heavy rainfalls over South China during the early-summer rainy season[J]. Atmos Res, 235: 104693.
- Wu N G, Zhuang X R, Min J Z, et al, 2020b. Practical and intrinsic predictability of a warm-sector torrential rainfall event in the South China monsoon region[J]. J Geophys Res Atmos, 125(4): e2019JD031313.

(本文责编:王蕾)