

黄美金,俞小鼎,林文,等,2022. 福建沿海冷锋前暖区和季风槽大暴雨环境背景与对流系统特征[J]. 气象,48(5):605-617.
Huang M J, Yu X D, Lin W, et al, 2022. Environmental background and convective system characteristics of the prefrontal and the monsoon trough torrential rains in Fujian Coastal Area[J]. Meteor Mon, 48(5):605-617(in Chinese).

福建沿海冷锋前暖区和季风槽大暴雨 环境背景与对流系统特征^{*}

黄美金^{1,2} 俞小鼎³ 林文⁴ 李婷婷² 苏志重⁵ 冯晋勤¹

1 福建省灾害天气重点实验室,福州 350001

2 福建省气象台,福州 350001

3 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

4 福建省气象科学研究所,福州 350001

5 厦门市气象台,厦门 361012

提 要: 2018年5月7日冷锋前暖区暴雨和8月29日华南季风槽暴雨,这两次大暴雨都是由广东和闽南地区的沿岸线状中尺度对流系统产生,对其环境背景与对流系统特征进行对比分析,得到主要结论如下:两次过程均有明显850 hPa和925 hPa低空急流;5月7日过程,对流层中低层条件不稳定较大,大气斜压性较强,对流有效位能和0~6 km垂直风切变相对较大,对流层中部存在明显干层,有利于强降水和雷暴大风的产生;8月29日过程,对流层中下层为弱的条件不稳定,准正压大气,更高的融化层高度,对流有效位能和0~6 km垂直风切变相对较小,垂直整层相对湿度高,有利于强降水而不利雷暴大风的产生。两次过程风暴承载层平均风均来自西南方向,前者的平流比后者要强很多;厦门及其周边闽南地区大暴雨是由于后向传播导致相继多个较强对流雨团移过同一区域形成的;5月7日后向传播形成是一个对流雨团的阵风锋与另一个对流雨团后侧的水平对流卷相遇触发新的对流导致的,新生对流来自陆地;8月29日后向传播形成则是低层暖湿气流遇到成熟对流雨团的后侧阵风锋触发新的对流,新生对流位于海上,持续移入陆地。5月7日导致大暴雨的对流系统中冰相过程和暖云过程对暴雨产生都很重要,8月29日导致极端暴雨的对流系统中暖云过程对强降水产生起主要作用。在两次过程中,对流系统冷池前沿阵风锋附近都有 γ 中尺度涡旋形成,与阵风锋辐合上升运动结合产生正的垂直螺旋度,有利于对流系统的维持。低空急流通过其对水汽和热量的输送以及与地形和对流系统冷池的相互作用,对沿岸线状中尺度对流系统的维持起到重要作用。

关键词: 锋前暖区暴雨, 季风槽暴雨, 对比分析, 环境背景, 对流系统结构和演变

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.012801

Environmental Background and Convective System Characteristics of the Prefrontal and the Monsoon Trough Torrential Rains in Fujian Coastal Area

HUANG Meijin^{1,2} YU Xiaoding³ LIN Wen⁴ LI Tingting² SU Zhizhong⁵ FENG Jinqin¹

1 Fujian Provincial Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001

2 Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

4 Fujian Institute of Meteorological Sciences, Fuzhou 350001

5 Xiamen Meteorological Observatory, Xiamen 361012

^{*} 福建省灾害天气重点实验室重大科技专项(2020BY10)、福建省自然科学基金项目(2021J01458)、福建省自然科学基金项目(2019J01099)共同资助

2021年4月12日收稿; 2022年3月24日收修定稿

第一作者:黄美金,主要从事强对流天气预报、暖区暴雨预报. E-mail:meijin_h@126.com

通讯作者:俞小鼎,主要从事强对流天气分析和临近预报研究与教学. E-mail:xdyu1962@126.com

Abstract: The two extreme torrential rain, in the warm area before the cold front on 7 May 2018 and the South China monsoon trough torrential rain without cold air on 29 August 2018, were generated in the coastal linear mesoscale convective system (MCS) in Guangdong and Southern Fujian. After comparative analysis of the environmental background and the characteristics of the convective system, the main conclusions are presented as follows. In both cases, there were obvious 850 hPa and 925 hPa low-level jets. During the torrential rain on 7 May, the middle and lower troposphere had obvious unstable conditions. The significant baroclinic atmosphere, relatively high CAPE value, medium to strong 0–6 km deep vertical wind shear and the obvious dry layer in the middle troposphere were conducive to heavy rainfall and thunderstorm. On 29 August, the conditions were only weak instability, quasi-barotropic atmosphere, higher melting layer height, relatively low CAPE value, weaker 0–6 km deep vertical wind shear and high relative humidity across vertical layers, which were very conducive to heavy rainfall rather than thunderstorm gale. The mean winds in storm bearing layer of the two processes were both from the southwest, and the advection in the former was much stronger than that in the latter. The heavy rain in Xiamen and its surrounding Southern Fujian area was caused by backward propagation, which caused a number of strong convective rain masses to move over the same area and forming heavy rain. The backward propagation on 7 May was caused by the gust front of one convective rain mass meeting with the horizontal convective roll behind another convective rain mass, triggering a new convection. The new convection came from the land. In the case on 29 August, the warm and humid air flow in the lower layer met the gust front behind the mature convective rain mass, triggering a new convection. The new convection was located at sea and continued to move onto the land. Both the ice-phase process and the warm cloud process played a strong role in the convective system on 7 May, while the convective system warm cloud precipitation dominated on 29 August. During the two torrential rains, the meso- γ scale vortex formed near the gust front in the front of the cold pool of the convective system, and combined with the convergence and upward motion of the gust front, produced a positive vertical helicity, which was beneficial to the maintenance of the convective system. The low-level jet, through its transport of water vapor and heat, interaction with topography and cold pools of the convective system, played an important role in the maintenance of the coastal linear MCS.

Key words: cold front warm sector torrential rain, monsoon trough torrential rain, comparative analysis, environmental background, convective system structure and evolution

引言

华南暖区暴雨(黄士松,1986)是指华南锋面南侧暖区(离锋面 >200 km)产生的暴雨或在南岭附近至南海北部无锋面时产生的暴雨。暖区暴雨概念源自华南暖区暴雨的研究,近年来不少学者(湛芸等,2012;孙继松等,2012;俞小鼎,2012;Zhang et al,2013;汪玲瑶等,2018;雷蕾等,2020)将暖区暴雨概念推广到华北和江南等其他地区,通常暴雨多发生于距离地面冷锋或 850 hPa 暖切变以南 100~300 km 的暖区范围内,甚至是副热带高压(以下简称副高)边缘等(陈玥等,2016)。对于暖区暴雨尤其

是华南暖区暴雨,很多学者开展了大量研究(黄士松,1986;孙建华和赵思雄,2002;何立富等,2016;徐珺等,2018;伍志方等,2018;湛芸等,2019;刘瑞鑫等,2019;Du and Chen,2019;Luo et al,2020;吴乃庚等,2020),涉及暖区暴雨的多尺度天气学特征、低空急流、对流系统触发机制和暖区暴雨的可预报性等。尤其是随着若干外场大型科学试验开展,对造成华南暖区暴雨的对流系统特征、边界层物理特征和降雨云物理过程有了更深入的认识。季风槽是由西南季风与副高西南侧的东南风交汇形成的热带降水系统(广东省气象局《广东省天气预报技术手册》编写组,2006)。季风槽暴雨和台风暴雨是华南两种大范围区域性暴雨类型(罗亚丽等,2020)。关于华

南台风暴雨,有很多研究,而对于季风槽暴雨的研究(黄忠等,2005;蒙伟光等,2014)相对较少,特别是针对季风槽暴雨过程中的中尺度对流系统(MCS)触发、演变及结构特征分析很少涉及。华南暖区暴雨和季风槽暴雨都具有明显的中尺度特征,常常在广东和闽南地区沿岸形成线状 MCS 且持续反复发生,短时雨强大,局地性特征明显,易产生极端降水,引发洪涝灾害。

2018年5月7日厦门及周边闽南地区经历一次有气象和水文观测记录以来的最强降水(以下简称“5·7”)(图1a),厦门主干道陷入水乡泽国,最深积水达到1.2 m。2018年8月27—31日,受季风槽影响,福建省中南部沿海出现大范围暴雨(以下简称“8·29”)(图1b),多个城市出现积涝。两场暴雨的

大暴雨区范围不仅覆盖了福建南部,同时覆盖了广东沿海地区,涉及福建的最强降水部分都是发生在福建南部丘陵山区南面相对平坦的沿海地区,且都是在偏南风气流加强下在沿岸形成线状 MCS 下发生的,两场暴雨既有相同点又有明显的不同。无论是冷锋前暖区暴雨还是季风槽暴雨,业务数值预报模式均存在明显偏差且对降雨量的极端性预报存在较大不足。

本文利用常规高空、地面观测资料、天气雷达以及FY-2G高分辨率可见光云图,对比分析两次过程,首先从包括广东和福建较大范围的导致两次大暴雨的对流系统演变和维持进行分析,然后聚焦厦门及周边闽南地区 MCS 的触发、演变及结构特征并进行深入分析和探讨,以期进一步揭示沿岸线状

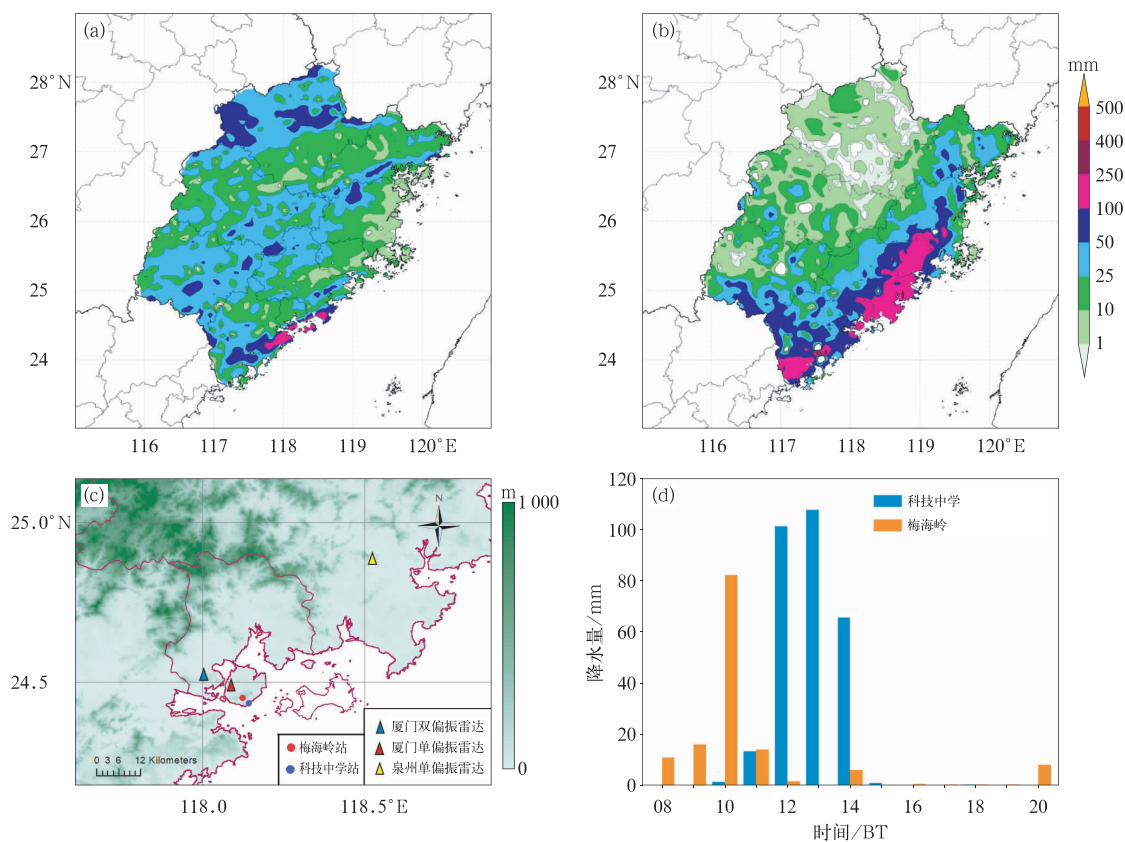


图1 2018年5月6日20时至7日20时(a)和8月28日20时至29日20时(b)福建省雨量分布;

闽南地形(阴影为海拔高度)和厦门科技中学站、梅海岭站,厦门单偏振、双偏振雷达及泉州单偏振雷达位置(c);5月7日厦门科技中学站和8月29日厦门梅海岭站08—20时小时雨量时间序列(d)

Fig.1 Distribution of rainfall in Fujian Province from 20:00 BT 6 to 20:00 BT 7 May 2018 (a) and from 20:00 BT 28 to 20:00 BT 29 August 2018 (b); the topography (shaded) of Southern Fujian and the location of Xiamen Sci-Tech Middle School Station, Meihailing Station, Xiamen Single-Polarization Radar, Dual-Polarization Radar and Quanzhou Single-Polarization Radar (c), time series of hourly rainfall

from 08:00 BT to 20:00 BT at Xiamen Sci-Tech Middle School Station on 7 May 2018 and Meihailing Station on 29 August 2018 (d)

7 May 2018 and Meihailing Station on 29 August 2018 (d)

MCS 的演变规律和维持机制,为改进这两类强降水的预报提供启发。

1 降水和环境场特征分析

1.1 降水过程概述

2018年5月7日闽南地区发生冷锋前暖区大暴雨,11—14时(北京时,下同)厦门岛内的科技中学站(图1c)最大3h雨量达274 mm,最大小时雨量达107.5 mm(图1d)。2018年8月27—31日,受季风槽影响,福建省中南部沿海的降水中心莆田市城厢区28—29日过程雨量达452.4 mm,破该站历史纪录,29日08—11时共5个站点出现100 mm以上的降水,厦门岛内的梅海岭站(图1c)09—10时雨量达82.2 mm。5月7日的大暴雨,广东沿海最大雨量出现在汕头以西的普宁县,24 h最大雨强达200 mm;此外,华南共有三条西南西—东北东走向的雨带,除了沿海降水极值,在福建北部和中部同时还有50 mm或以上的降水区域(图1a),其中沿着海岸线的雨带

最强。而8月27—31日的华南季风槽暴雨过程中,整个华南沿海地区出现大范围暴雨和大暴雨,30—31日广东惠州高潭24 h雨量高达1056.7 mm,突破广东省日雨量历史极值,位居中国大陆日雨量历史第二位(曾智琳等,2020),此次过程以沿海岸线的一条雨带为主,总体降水面上强度超过“5·7”过程的沿着海岸线雨带。

1.2 流型配置分析

2018年5月7日08时,500 hPa(图2a)华南处于高空短波槽前西南气流控制下,广东东部到福建存在近乎平行的三条对流雨带,雨带以南为 $16\sim 24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 不等的西南气流;副高主体位于南海。850 hPa(图2c)在南岭附近形成一条切变线,靠近华南海岸的对流雨带位于切变线以南的西南气流内,同时沿着华南海岸和内陆存在 $12\sim 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 西南偏西风低空急流。从850 hPa等温线分布看,华南地区具有比较显著的斜压性。地面图(图3c)上,西南—东北走向冷锋从广西北部穿过广东北部、福建西北部直到浙江北部。广东和福建南部位于地

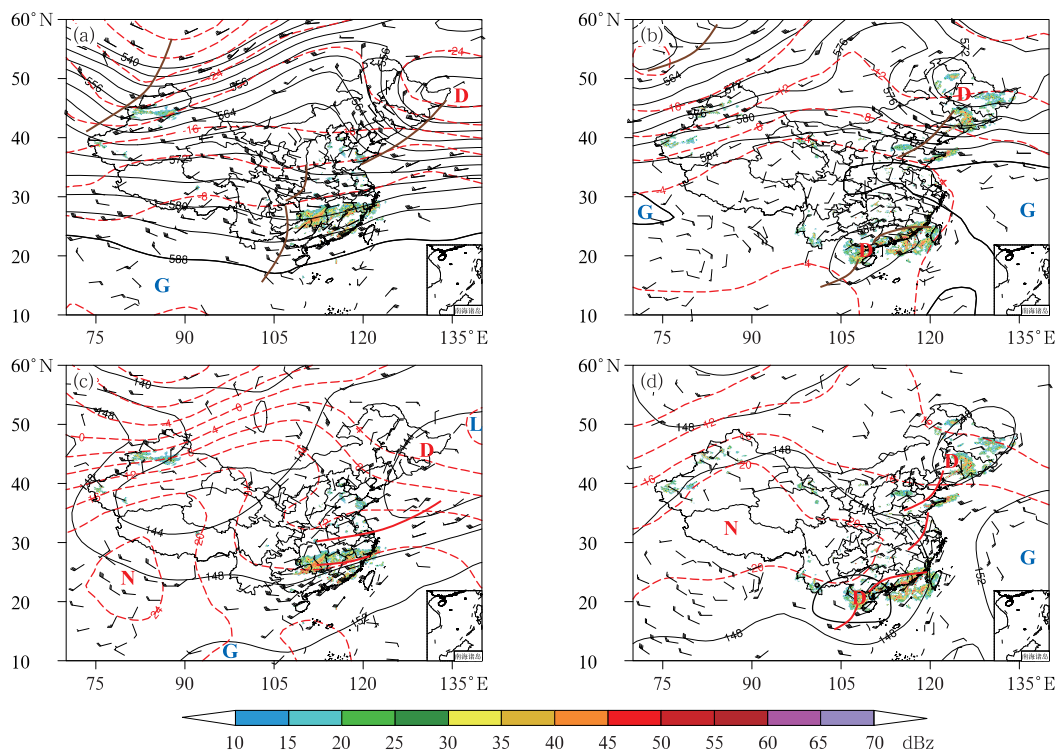


图2 2018年5月7日08时(a,c)、8月29日08时(b,d)的500 hPa(a,b)和850 hPa(c,d)天气图叠加同时间的天气雷达组合反射率因子拼图

(黑色实线:等高线,单位:dagpm;红色虚线:等温线,单位:°C;棕色实线:槽线;红色实线:切变线)

Fig. 2 The 500 hPa (a, b) and 850 hPa (c, d) weather map with radar CR mosaic at 08:00 BT 7 May (a, c) and at 08:00 BT 29 August (b, d) 2018

(black solid line: contour line, unit: dagpm; red dotted line: isotherm line, unit: °C; brown solid line: trough line; red solid line: shear line)

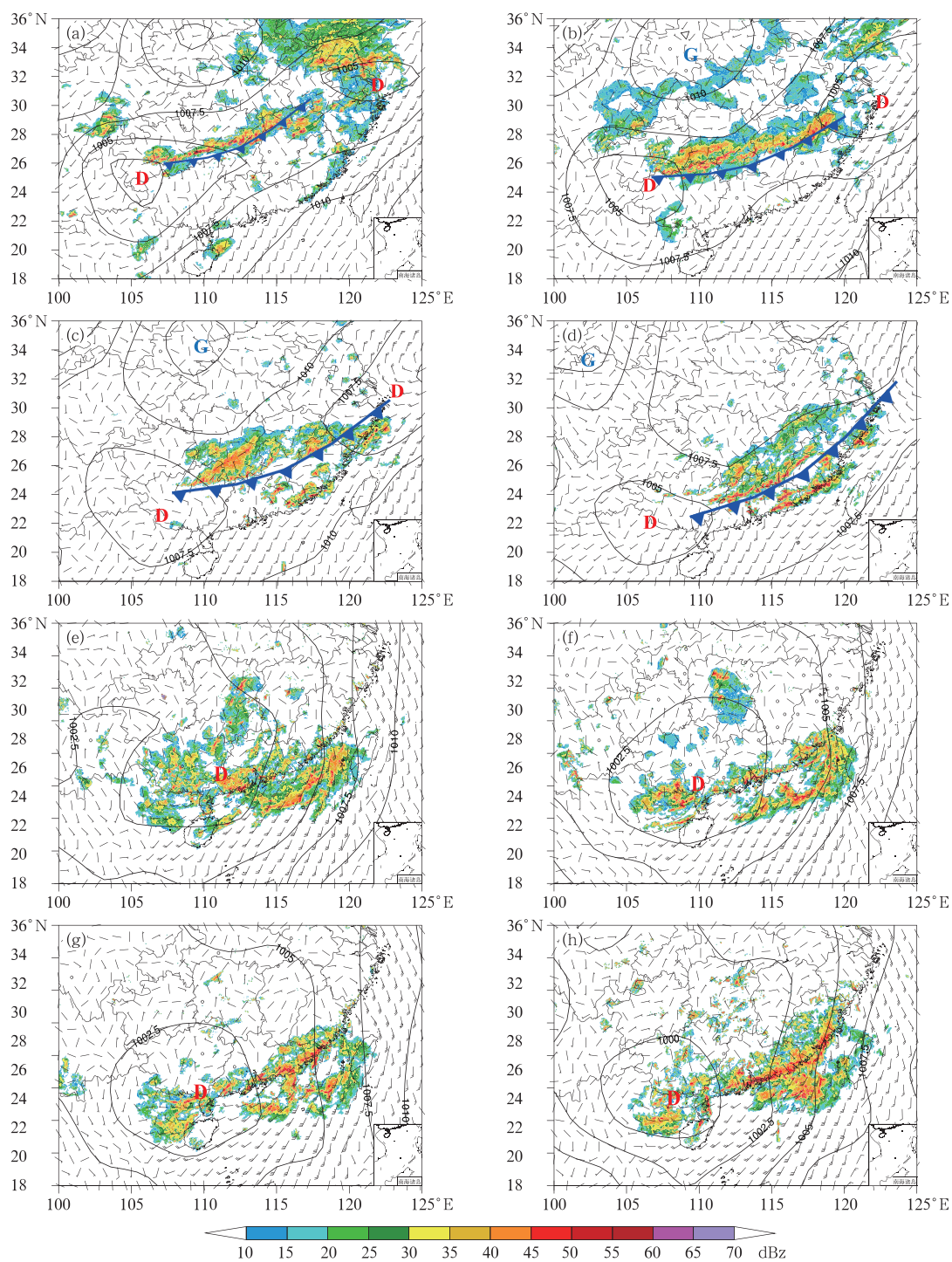


图3 2018年5月6日20时(a),7日02时(b),7日08时(c),7日14时(d)和
8月28日20时(e),29日02时(f),29日08时(g),29日14时(h)地面图叠加
同时的天气雷达组合反射率因子拼图
(黑色实线:海平面气压,单位:hPa;蓝色锯齿实线:地面锋面)

Fig. 3 The ground map with radar CR mosaic at 20:00 BT 6 (a), 02:00 BT 7 (b), 08:00 BT 7 (c),
14:00 BT 7 May (d), and at 20:00 BT 28 (e), 02:00 BT 29 (f),
08:00 BT 29 (g), 14:00 BT 29 August (h) 2018
(black solid line: sea level pressure, unit: hPa; blue sawtooth solid line: ground front)

面冷锋以南一定距离之外和 250 hPa 副热带高空急流入口区右侧(图略)。

2018 年 8 月 29 日 08 时,从地面到 500 hPa(图 3g, 图 2b、2d),一个深厚低压中心位于北部湾和广西南部交界处附近,850 hPa 沿着华南沿海存在西南偏西风和偏南风之间的显著切变,该切变是华南季风槽暴雨的关键特征之一(黄忠等,2005)。同时华南地区位于副高南部,在降水最强的华南东部 500 hPa 上风速较弱,只有 $2\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,远小于 5 月 7 日的风速;低空存在与 5 月 7 日强度相当的 $12\sim 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 西南偏西风和东南偏南风急流。华南地区温度梯度很小,处于准正压大气状态。这样一个弱的深厚低压气旋式环流系统,导致南海上季风对流云团在西南风和偏南风作用下不断北移至华南陆地上空。

1.3 探空分析

由两次过程福建和广东沿海 5 个探空站(福州、厦门、汕头、香港和阳江)探测到的环境参数(表 1)可以看出,5 月 7 日 08 时探空得到的地面与 500 hPa 温差和 850 hPa 与 500 hPa 温差明显高于 8 月 29 日 08 时探空的相应值(前者 850 hPa 与 500 hPa 温差 5 个站平均值为 23.2°C ,后者相应的平均值为 20.6°C),说明前者在对流层中下层具有更大的条件不稳定,而后者非常接近湿绝热层结,只有弱的条件不稳定;就大气可降水量和地面露点温度而言,前者 5 个站的平均值分别是 56.8 mm 和 24.0°C ,后者的相应值为 61.2 mm 和 23.8°C ,两者水汽条件大致相当,后者略好一些;前者的 CAPE 值平均值为 $1720\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,总体上明显大于后者的 CAPE 值

($820\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$);两者对应的 CIN 值总体上都很小,前者略大于后者。 $0\sim 6\text{ km}$ 风矢量差,5 月 7 日的平均值为 $15.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,属于中等偏强垂直风切变,8 月 29 日的平均值为 $3.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,属于弱的垂直风切变。两次过程 5 个探空站 850 hPa 风都达到了 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或以上的低空急流标准,前者比后者总体上要更强一些;在 925 hPa,前者达到低空急流标准($12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的有厦门、汕头和香港 3 个探空站,后者达到急流标准的有厦门和阳江 2 个探空站。低空急流或低层风都具有明显的偏南风分量。

比较厦门及周边大暴雨的代表性探空,5 月 7 日 08 时厦门探空和 8 月 29 日 08 时汕头探空(因 08 时厦门探空受到降水污染,故用上游的汕头探空代表)(图 4),这两个探空之间差异与上面讨论的华南沿海 5 个探空总体差异类似:两者水汽条件相当,前者的 CAPE 值、对流层中低层条件不稳定性和 $0\sim 6\text{ km}$ 垂直风切变值明显更大,而 $0\sim 6\text{ km}$ 垂直风切变表明大气斜压性明显;两者湿层都很深厚,CAPE 形状狭长,并存在西南低空急流,因此均有利于强降水的产生(Davis,2001;俞小鼎,2013);前者 $700\sim 400\text{ hPa}$ 的干层比后者明显,判断发生强降水同时,也存在伴随雷暴大风的可能,而 8 月 29 日仅仅限于强降水,实况天气与此相符。

2 对流系统结构和演变分析

2.1 影响福建和广东的对流系统

2018 年 5 月 6 日 20 时至 7 日 20 时和 8 月 28 日 20 时至 29 日 20 时,福建(图 1a、1b)和广东海岸的

表 1 2018 年 5 月 07 日 08 时和 8 月 29 日 08 时福建省、广东省沿海和香港关键探空参数
Table 1 Comparison of key radiosonde parameters between coastal areas of Fujian, Guangdong and Hong Kong at 08:00 BT 7 May and 08:00 BT 29 August 2018

关键参数	福州 “5·7”,“8·29”	厦门 “5·7”,“8·29”	汕头 “5·7”,“8·29”	香港 “5·7”,“8·29”	阳江 “5·7”,“8·29”
$T_{850}-T_{500}/^{\circ}\text{C}$	25,22	23,19	23,21	21,20	24,21
$T_s-T_{500}/^{\circ}\text{C}$	32,29	29,26	34,28	31,29	32,29
地面 $T_d/^{\circ}\text{C}$	22,23	24,24	24,23	24,24	26,25
PW/mm	53,56	56,60	60,64	61,65	54,61
CAPE/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	260,430	1300,200	2450,500	1500,1450	3100,1500
CIN/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	70,10	10,0	0,0	15,10	0,10
$0\sim 6\text{ km}$ 风矢量差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	22,07	18,02	10,02	16,6	12,02
850 hPa 风向风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	SWW14,SES14	SWW19,SWS16	SWW16,SWW12	SWW12,SWW12	SW12,SW12
925 hPa 风向风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	SWW6,SES8	SW12,SWS12	SW12,SW10	SW12,SW10	SW10,SW14
融化层高度/km	4.4,4.7	4.5,5.0	4.8,4.9	4.8,5.0	4.5,4.9
-20° 层高度/km	8.2,8.4	8.3,8.7	8.3,8.7	8.2,8.6	8.3,8.7
暖云层厚度/km	4.0,4.4	4.4,5.0	4.4,4.9	4.3,4.6	4.4,4.6

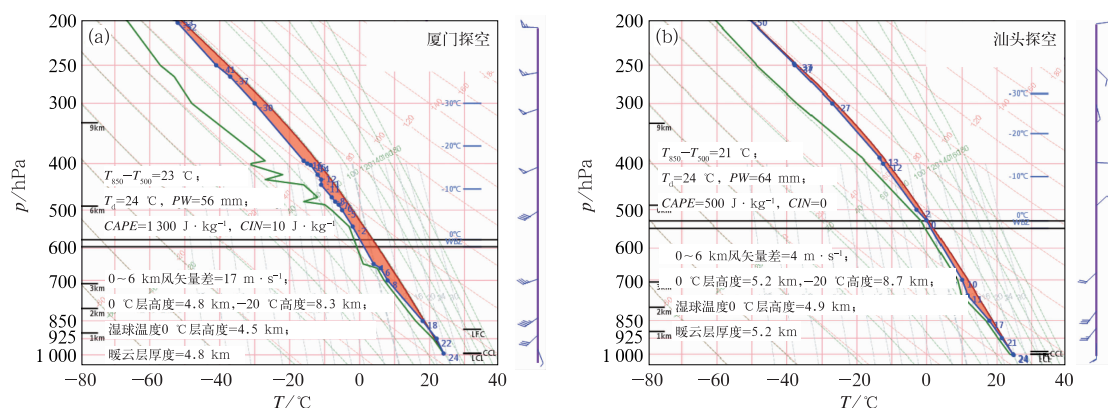


图4 2018年5月7日08时厦门(a)和8月29日08时汕头(b)探空

Fig. 4 Xiamen sounding at 08:00 BT 7 May (a) and Shantou sounding at 08:00 BT 29 August (b) 2018

大暴雨(图略)都是由沿岸附近的线状 MCS 所导致的。

5月6日20时(图3a),主要对流雨带沿着冷锋锋面呈带状分布,同时在锋前暖区有零散对流;7日01—04时,惠东到潮州一线不断有对流单体生成,并逐渐连成断线状回波,强度达35~40 dBz。04时,汕头附近有一个对流单体开始发展,06:30左右沿环境风移到福建沿海南端东山县时逐渐加强,与后向生成的单体连成一线,强度增强到45~50 dBz,强回波的范围扩大并开始进入闽南地区。7日08时,冷锋进一步南移,在锋前暖区,存在三条西南—东北走向的对流雨带:第一条位于广东东北部,第二条位于广东东南部到福建中部;在低空急流弱的倾斜抬升和持续的水汽输送作用下,上述两条对流雨带的形成,与夜间低空急流遇到西南—东北走向的广东地形相互作用抬升触发对流(图3b、3c,图2c),已经触发的对流在地形上爬升加强并发展成西南—东北方向的线状 MCS 密切相关;该线状对流系统向南的冷池出流(偏北风)与海岸附近的偏南风之间产生辐合,伴随的上升气流导致沿着福建东南部海岸线的线状对流系统的触发和形成,产生了第三条对流雨带。随着冷锋主体向南移动,位于锋前暖区的三条对流雨带合并为两条(图3d),沿着海岸线的那一条对流雨带更强一些,锋面对流雨带距离沿着海岸的暖区对流雨带大约100 km。同时,风暴承载层的平均风为西南或西南偏西气流,有利于沿着海岸线的西南偏西—东北偏东方向线状对流系统的维持。14时后,冷锋雨带与沿着海岸的暖区对流雨带逐渐合并东移减弱。“5·7”冷锋前暖区暴雨过程,对流

活动都位于陆地上,广东和福建周边海域上空基本没有对流活动,大暴雨区域主要由锋前暖区 MCS 所导致。除了强降水,广东福建境内还出现了大范围雷暴大风,主要由沿着冷锋的线状 MCS 所导致,最强阵风达到 $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而沿着海岸的暖区线状 MCS 仅在福建中部沿海出现局部雷暴大风,最强阵风达 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

“8·29”季风槽暴雨过程,辐合切变线从广东西部一直延伸到福建中部,该切变线对导致福建南部和广东沿海大暴雨的线状 MCS 的生成和维持有很大作用。28日20时(图3e),季风低压中心位于广西南部靠近北部湾区域,与地面辐合切变线对应,存在一段不连续的线状对流雨带;29日08—14时(图3g、3h),沿着华南海岸线的对流雨带整体强度有所加强,其南海海洋上的对流雨带往南北方向扩展,将上述华南沿着海岸线的雨带和位于海面上的两条雨带连接起来;此外,北部湾上空成片对流仍然活跃。在随后6小时中,沿着华南海岸线的对流雨带明显减弱。

2.2 导致厦门及周边闽南地区大暴雨的对流系统

2.2.1 2018年5月7日线状中尺度对流系统

5月7日11—14时为厦门最强降水时段(图1d)。08—13时不断有内陆的回波往东北偏东方向移动,合并到线状对流系统中;同时汕头到福建沿海南端东山县回波沿着西南风向东北方向移动,在漳州的平和到漳浦县境内逐渐合并加强,11时这个合并后的带状对流系统开始影响厦门,强度维持在50~55 dBz,范围继续扩大。而其上游,广东东

部的陆丰到汕头一带仍不断有回波生成发展并向东北移,与诏安—漳浦—厦门的回波连成一线,不断影响厦门。期间,经过厦门区域的低层最强回波维持在 50~55 dBz。14 时后,上述中尺度对流雨带逐渐向东南方向偏移,厦门大暴雨过程结束。

风暴承载层平均风是西南偏西风,线状 MCS 的对流单体大致沿着风暴承载层平均风向向着东北偏东方向移动,移动速度也与风暴承载层平均风大致相当;而上述线状对流系统的西南方不断有新的对流单体生成,形成后向传播(图 5b、5c、5d),与平流结合,不断影响厦门,即所谓“列车效应”(俞小鼎

等,2012;2020)导致了大暴雨。

由于垂直风切变大,10:50 在较强回波进入厦门区域之前(图 5a),0.5°仰角径向速度图上可以识别出一个弱的中气旋(图 5e),存在一个镶嵌在 MCS 中的微型超级单体。超级单体中的中气旋与强上升气流区位置有很大部分重合,从而具有较强垂直螺旋度,系统会抑制具有最大扰动动能尺度的部分向更小尺度的能量串级输送,使得该系统具有更高的组织性和更长的生命史,以至于可以自我维持和发展(Lilly,1986)。13:06,0.5°仰角径向速度图上(图 5f)可识别出位于紧贴线状 MCS 南部的低层辐合切变

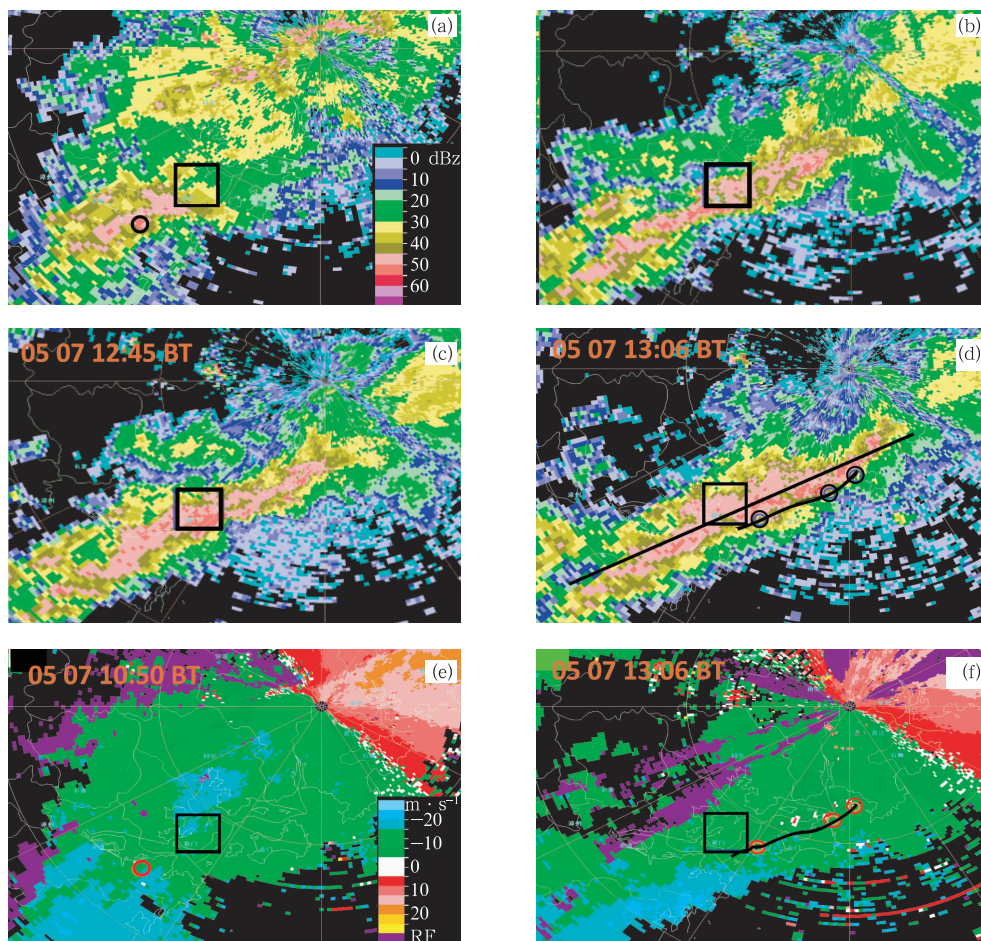


图 5 泉州 SA 型新一代天气雷达 2018 年 5 月 7 日 10:50(a),12:24(b),12:45(c),13:06(d) 0.5°仰角反射率因子和 10:50(e),13:06(f)0.5°仰角径向速度
(黑色方框标识厦门区域,黑色曲线标识低层辐合切变线,
小圆圈代表 γ 中尺度涡旋,图 5d 中黑色直线代表剖面位置,下同)

Fig. 5 Quanzhou SA radar 0.5° elevation reflectivity images at 10:50 BT (a),
12:24 BT (b),12:45 BT (c),13:06 BT (d) and 0.5° elevation radial velocity
images at 10:50 BT (e), 13:06 BT (f) 7 May 2018

(Black box marks Xiamen Area, black curve marks the low-level convergence shear line and the small circle indicates the meso- γ vortex, black straight line represents the location of the cross-section in Fig. 5d, the same below)

线,对应冷池的边界,即低层阵风锋位置。在演变过程中,该低层辐合切变线也就是阵风锋一直紧贴线状 MCS 南部侧翼,因此有利于该线状 MCS 的维持(Wilson and Mueller, 1993; Wilson and Megenhardt, 1997; Wilson et al, 1998)。沿着上述辐合切变线,有若干个 γ 中尺度涡旋;这些 γ 中尺度涡旋的产生机制与辐合切变线上的气旋式切变和辐合密切相关,由于辐合线与上升气流伴随,这些 γ 中尺度涡旋也具有比较明显的垂直螺旋度,有利于系统的维持和发展(Lilly, 1986)。

为了进一步探讨影响厦门及周边闽南地区线状 MCS 的后向传播机制,图 6a 给出了 5 月 7 日 11 时 FY-2G 静止气象卫星高分辨率云图。对流云团 B 南侧阵风锋与对流云团 A 后面沿着西南偏西—东北偏东的由水平对流卷(俞小鼎等, 2012; 2020)导致的积云线相遇,触发一系列对流单体,导致对流云团 A 的后向传播。

2.2.2 2018 年 8 月 29 日线状中尺度对流系统

8 月 29 日, 40~45 dBz 以上的较强回波相继经过厦门区域(图 7), 最强回波强度弱于 5 月 7 日。8 月 29 日福建南部风暴承载层的平均风为西南风, 与 5 月 7 日情况类似, 只是西南风速远小于 5 月 7 日过程。29 日 08:46—09:17, 影响厦门及周边闽南地区的线状 MCS 的后向传播方向是西南方向, 而在 09:28—09:59, 向西南的后向传播转为向南的后向传播, 即不断有对流单体新生的一侧位于线状 MCS 后端的偏南一侧。从高分辨率可见光云图(图 6b)可见, 新生单体 E、F、G 和 H 都来自海上, 与 5 月 7 日情况明显不同。8 月 29 日海上对流非常活跃, 而 5 月 7 日海上比较平静, 没有明显对流(图 6)。

虽然 5 月 7 日厦门降水强于 8 月 29 日, 但就闽南地区而言, 8 月 29 日的暴雨过程总体上更强, 尤其在厦门区域的下风向(东北方向)。从图 7 可见, 8 月 29 日 10:20, 强降水线状 MCS 已经移动到厦门下游的泉州地区, 其形态和结构与 5 月 7 日 13:06 线状 MCS 的形态和结构类似。沿着线状 MCS 南侧, 存在明显辐合切变线, 对应冷池边界的阵风锋。如前所述, 线状 MCS 一直紧贴其阵风锋, 有利于对流系统维持(Wilson and Mueller, 1993; Wilson and Megenhardt, 1997; Wilson et al, 1998)。沿着上述辐合切变线, 有 2 个 γ 中尺度涡旋, 与 5 月 7 日过程类似, γ 中尺度涡旋有利于系统的维持和发展。

2.2.3 导致两次闽南大暴雨过程的对流系统垂直结构对比

5 月 7 日 08 时和 8 月 29 日 08 时厦门的融化层高度分别为 4.5 km 和 5.0 km(表 1), 暖云层厚度分别为 4.4 km 和 5.0 km。5 月 7 日的对流系统介于低质心的热带海洋型和高质心的大陆强对流型(俞小鼎, 2013)之间, 最大反射率因子为 50~55 dBz, 扩展到融化层高度(图 8), 也就是最强回波大部分都位于暖云层内, 回波顶高(18.3 dBz 扩展的高度)达 10~12 km, 结合厦门双偏振多普勒天气雷达水凝物分类产品(图略)判断, 融化层以上以冰晶和霰为主。8 月 29 日对流系统属于典型的低质心热带海洋型对流(Maddox et al, 1977; Caracena et al, 1979; 俞小鼎, 2013), 最大反射率因子只有 45~50 dBz, 而且位于融化层高度(5.0 km)以下, 以暖云过程为主, 同时也存在冰相过程, 回波顶高主要在 8~9 km, 融化层以上也是以冰晶和霰为主。

冰相过程发生在暖云层顶部的融化层以上, 包

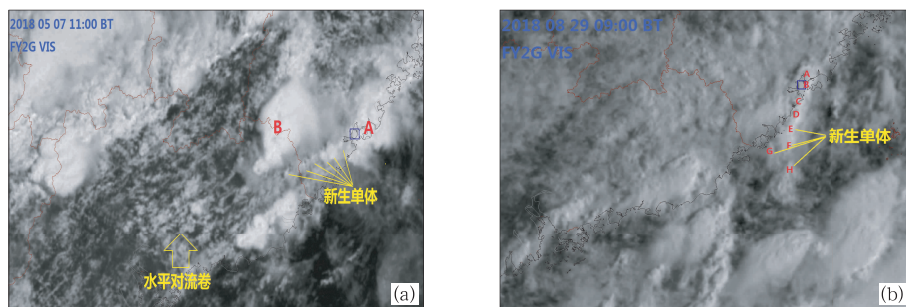


图 6 2018 年 5 月 7 日 11 时(a)和 8 月 29 日 09 时(b)FY-2G 静止气象卫星高分辨率可见光云图

Fig. 6 FY-2G high resolution visible light cloud at 11:00 BT 7 May (a) and at 09:00 BT 29 August (b) 2018

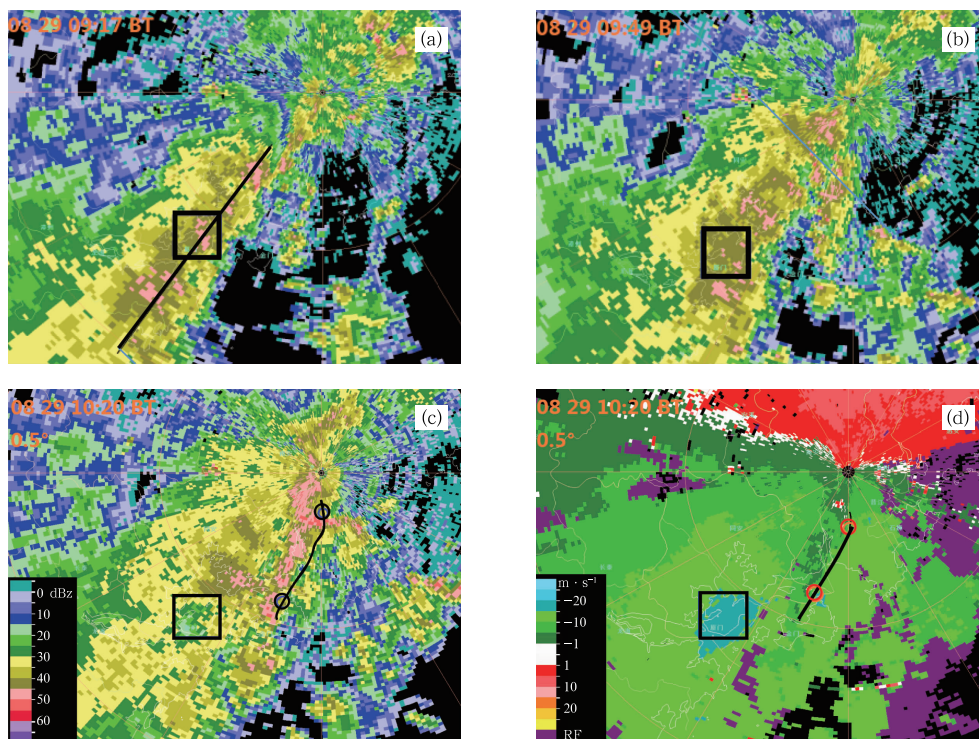


图 7 泉州 SA 雷达 2018 年 8 月 29 日 09:17(a), 09:49(b), 10:20(c) 0.5° 仰角
反射率因子和 10:20(d) 0.5° 仰角径向速度
(图 7a 中黑色直线代表剖面位置)

Fig. 7 Quanzhou SA radar 0.5° elevation reflectivity images at 09:17 BT (a),
09:49 BT (b), 10:20 BT (c) and 0.5° elevation radial velocity image
at 10:20 BT (d) 29 August 2018
(In Fig. 7a, black straight line represents the location of the cross-section)

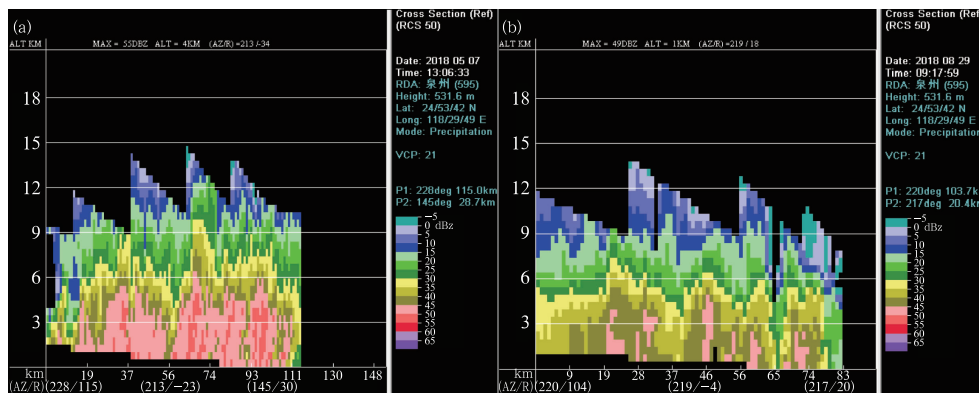


图 8 2018 年 5 月 7 日 13:06(a) 和 8 月 29 日 09:17(b) 泉州雷达分别
沿着图 5d 和图 7a 中黑色直线所做的反射率垂直剖面

Fig. 8 Vertical cross-section of Quanzhou radar reflectivity at 13:06 BT 7 May (a) and
09:17 BT 29 August (b) 2018 along the black straight line shown in Fig. 5d and Fig. 7a

括贝吉龙过程、淞附和冰晶丛集等过程, 淞附和丛集形成的冰晶或霰落到融化层以下时, 融化为雨滴, 为暖云降水提供种子, 通过进一步碰并过程形成较强降雨。5 月 7 日对流系统的冰相过程比 8 月 29 日更明显, 40 dBz 以上的回波发展到 9~10 km, 8 月

29 日的只到 5~7 km, 而作为暖云层顶部的融化层高度分别在 4.5 km 和 5.0 km 左右。

2.3 低空急流对对流系统的作用

两次大暴雨过程中, 850 hPa 和 925 hPa 都存在

低空急流。低空急流能够维持 CAPE 和提供水汽供应,从而维持暴雨持续。低空急流对于产生区域大暴雨的沿岸线状 MCS 的形成和维持也同样起到重要作用。

5月7日,低空急流遇到西南—东北走向地形触发了西南—东北走向的线状对流系统,该对流系统向南的冷池出流与海岸附近的偏南风辐合,形成的沿海线状 MCS 导致5月7日闽南大暴雨的产生。

8月29日在偏南风气流的加强下,在福建南部丘陵山区南面相对平坦的沿岸形成线状 MCS,在东南偏南风急流作用下,有利于向西南的后向传播转为向南的后向传播。同时低空急流也使得对流系统一直紧贴其阵风锋,有利沿海线状 MCS 的维持。

两次过程中,含有水汽和热量的低空急流遇到对流系统中的上升气流区,一部分暖湿气流进入上升气流区,为降水的持续补充水汽;低层暖湿气流可以恢复因对流消耗 CAPE 而降低的低层温度和露点温度,从而使得 CAPE 再生和维持,进而使得对流系统内上升气流得以维持,对流得以持续;对流系统下沉气流形成冷池,低空急流携带暖湿气流遇到冷池前沿的阵风锋抬升触发新的对流,使得产生强降水的对流系统不断有单体新生并替代旧的单体,使得对流系统维持,降水持续。

从厦门翔安站风廓线雷达(24.55°N 、 118.32°E)

逐6 min 全风速时序图(图9)可见,两次大暴雨期间低空风速脉动明显。

5月7日的暖区强降水集中在11—14时(图1d)。在发生降水之前,闽南沿海上空一直有低空急流维持,925 hPa 和 850 hPa 风速分别达 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上(图9a),07—11时低空急流扰动增强,925 hPa 比 850 hPa 先加强,最大风速分别达 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,08:30—09:30 期间,850 hPa 风速有所减弱,925 hPa 风速一度超越 850 hPa 风速;而强降水开始后,850 hPa 风速却比 925 hPa 先下降,但降幅没有 925 hPa 的大。8月29日的季风槽强降水在08—11时比较明显(图1d)。与5月7日过程不同,低空急流在29日03时后才逐渐建立起来,降水之前 925 hPa 风速一直比 850 hPa 大(图9b),05—06时,850 hPa 比 925 hPa 先加强,但 925 hPa 风速最大达 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,仍超过 850 hPa 风速;在强降水期间,两层风速虽然都减弱了,但 850 hPa 风速却比 925 hPa 的大。两次过程强降水发生之前,低空急流都有突然增强现象,而且 925 hPa 和 850 hPa 风速都有减弱增强交替脉动特征,这可能是 925 hPa 和 850 hPa 两层间发生了动量交换现象。

低空急流脉动的产生与大气边界层湍流脉动,以及对流系统的相互作用有关,但具体细节不好

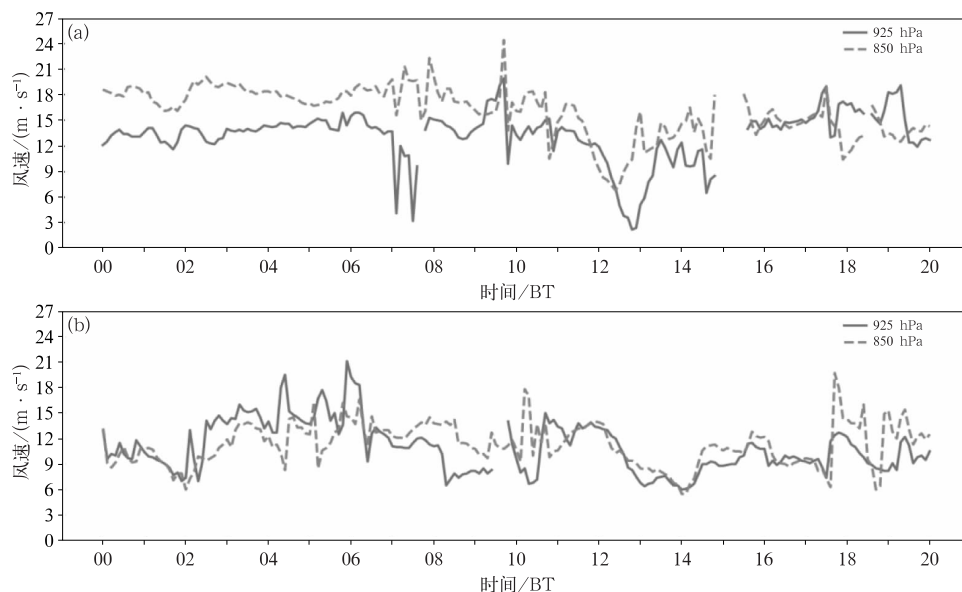


图9 2018年5月7日(a)和8月29日(b)厦门翔安站00—20时的
925 hPa、850 hPa 风廓线雷达全风速逐6 min 时序图

Fig. 9 The 6 min series of wind speed at 925 hPa and 850 hPa wind profiling radar during
00:00—20:00 BT on 7 May (a) and 29 August (b) 2018 at Xiang'an Station of Xiamen

判断。关于低空急流脉动对于导致暴雨的对流系统触发、维持和发展有什么作用和影响,目前,从本研究对资料的分析尚得不到明确的结论。

3 结论与讨论

通过对发生在广东和闽南地区 2018 年 5 月 7 日冷锋前暖区和 8 月 29 日华南季风槽两次大暴雨过程的环境背景与对流系统特征进行对比分析后,得出如下主要结论:

(1)两次大暴雨过程均在广东和闽南地区的沿岸线状 MCS 中产生。5 月 7 日对流系统发生在明显斜压大气下,沿着海岸线的线状对流系统位于不断南移的冷锋前的暖区,与锋面相距至少 100 km 以上,探空环境参数显示,CAPE 和深层垂直风切变相对较大,对流层中层存在明显干层,大气可降水量较大,融化层高度高,暖云层深厚,有利于强降水和雷暴大风的产生;8 月 29 日华南沿海受季风槽影响,在准正压大气下,环境参数显示,CAPE 和深层垂直风切变相对较小,大气可降水量较大,整层相对湿度大,融化层高度更高,暖云层更为深厚,有利于强降水而不利雷暴大风的产生。

(2)两次过程都是由于后向传播的作用,产生“列车效应”形成大暴雨。5 月 7 日的后向传播是由于一个对流雨团的阵风锋与另一个对流雨团后侧的水平对流卷相遇触发新的对流导致的,新生对流来自陆地;8 月 29 日则是由于低层暖湿气流遇到成熟对流雨团的后侧阵风锋而触发新的对流,新生对流位于海上,持续移到陆地。5 月 7 日对流系统冰相过程和暖云过程在降水中都起重要的作用,8 月 29 日对流系统暖云降水占支配地位。

(3)两次大暴雨过程中,对流系统冷池前沿阵风锋附近都有 γ 中尺度涡旋形成,与阵风锋辐合上升运动结合产生较大正的垂直螺旋度,使得系统具有更高的组织性和更长的生命史。

(4)在 5 月 7 日过程中,低空急流遇到西南—东北走向地形触发了西南—东北走向的线状对流系统,该对流系统的冷池的向南出流与来自海岸附近的偏南风在沿海地区辐合,形成导致闽南大暴雨的沿海线状 MCS。8 月 29 日,在东南偏南风急流作用下,有利于向西南的后向传播转为向南的后向传播。

(5)两次大暴雨过程中,含有水汽和热量的低空急流遇到对流系统中的上升气流区,一部分暖湿气

流进入上升气流区,为降水的持续补充水汽;低层暖湿气流可以恢复因对流消耗 CAPE 而降低的低层温度和露点,从而使得 CAPE 再生和维持,进而使得对流系统内上升气流得以维持,对流得以持续;对流系统下沉气流形成冷池,低空急流携带暖湿气流遇到冷池前沿的阵风锋抬升触发新的对流,使得产生强降水的对流系统不断有单体新生,替代旧的单体,从而对流系统得到维持,降水持续。

致谢:感谢国家气象中心天气预报技术研发室和福建省气象台付超在雷达产品上提供的技术支持。

参考文献

- 陈玥,湛芸,陈涛,等,2016. 长江中下游地区暖区暴雨特征分析[J]. 气象,42(6):724-731. Chen Y, Chen Y, Chen T, et al, 2016. Characteristics analysis of warm-sector rainstorms over the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. Meteor Mon, 42(6): 724-731(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).
- 湛芸,孙军,徐珺,等,2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. 气象,38(10):1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1255-1266(in Chinese).
- 广东省气象局《广东省天气预报技术手册》编写组,2006. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社:278. Compilation Group of Guangdong Provincial Weather Forecast Technical Manual Issued by Guangdong Meteorological Bureau, 2006. Technical Guidance on Weather Forecasting in Guangdong Province[M]. Beijing:China Meteorological Press:278(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).
- 黄士松,1986. 华南前汛期暴雨[M]. 广州:广东科技出版社:244. Huang S S, 1986. Heavy Rainfall over Southern China in the Pre-Summer Rainy Season[M]. Guangzhou:Guangdong Science and Technology Press:244(in Chinese).
- 黄忠,张东,林良勋,2005. 广东后汛期季风槽暴雨天气形势特征分析[J]. 气象,31(9):19-24. Huang Z, Zhang D, Lin L X, 2005. Synoptic analysis of heavy rain related to monsoon trough in the latter flood season of Guangdong[J]. Meteor Mon, 31(9):19-24(in Chinese).
- 雷蕾,邢楠,周璇,等,2020. 2018 年北京“7.16”暖区特大暴雨特征及形成机制研究[J]. 气象学报,78(1):1-17. Lei L, Xing N, Zhou X, et al, 2020. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15-16 July 2018 in Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 78(1):1-17(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).
- 罗亚丽, 孙继松, 李英, 等, 2020. 中国暴雨的科学和预报: 改革开放40年研究成果[J]. 气象学报, 78(3): 419-450. Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al, 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 419-450 (in Chinese).
- 蒙伟光, 张艳霞, 袁金南, 等, 2014. 华南沿海 2011 年 7 月 15—18 日持续暴雨过程中的季风槽与中尺度对流系统相互作用[J]. 气象学报, 72(3): 508-525. Meng W G, Zhang Y X, Yuan J N, et al, 2014. Monsoon trough and MCSs interactions during the persistent torrential rainfall event of 15—18 July 2011 along the South China coast[J]. Acta Meteor Sin, 72(3): 508-525 (in Chinese).
- 孙继松, 何娜, 王国荣, 等, 2012. “7. 21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J]. 暴雨灾害, 31(3): 218-225. Sun J S, He N, Wang G R, et al, 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolution and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012[J]. Torr Rain Dis, 31(3): 218-225 (in Chinese).
- 孙建华, 赵思雄, 2002. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I. 引发暴雨的 β 中尺度对流系统的数值模拟研究[J]. 大气科学, 26(4): 541-557. Sun J H, Zhao S X, 2002. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall of South China Part I: a numerical simulation study of meso- β convective system inducing heavy rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 26(4): 541-557 (in Chinese).
- 汪玲瑶, 湛芸, 肖天贵, 等, 2018. 夏季江南地区暖区暴雨的统计分析[J]. 气象, 44(6): 771-780. Wang L Y, Chen Y, Xiao T G, et al, 2018. Statistical analysis of warm-sector rainstorm characteristics over the southern of middle and lower reaches of the Yangtze River in summer[J]. Meteor Mon, 44(6): 771-780 (in Chinese).
- 吴乃庚, 温之平, 邓文剑, 等, 2020. 华南前汛期暖区暴雨研究新进展[J]. 气象科学, 40(5): 605-616. Wu N G, Wen Z P, Deng W J, et al, 2020. Advances in warm-sector heavy rainfall during the first rainy season in South China[J]. J Meteor Sci, 40(5): 605-616 (in Chinese).
- 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等, 2018. 2017 年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象, 44(4): 485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 485-499 (in Chinese).
- 徐琨, 毕宝贵, 湛芸, 等, 2018. “5. 7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报, 76(4): 511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al, 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin, 76(4): 511-524 (in Chinese).
- 俞小鼎, 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 38(11): 1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(11): 1313-1329 (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, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社: 416. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorm and Strong Convection Nowcasting[M]. Beijing: China Meteorological Press: 416 (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, 王东海, 2020. 2018 年 8 月华南超历史极值降水事件的观测分析与机理研究[J]. 大气科学, 44(4): 695-715. Zeng Z L, Chen Y, Wang D H, 2020. Observation and mechanism analysis for a record-breaking heavy rainfall event over Southern China in August 2018[J]. Chin J Atmos Sci, 44(4): 695-715 (in Chinese).
- Caracena F, Maddox R A, Hoxit L R, et al, 1979. Mesoanalysis of the Big Thompson Storm[J]. Mon Wea Rev, 107(1): 1-17.
- Davis R S, 2001. Flash flood forecast and detection methods[J]. Meteor Monogr, 28(50): 481-526.
- Du Y, Chen G X, 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part II: convection initiation[J]. Mon Wea Rev, 147(2): 543-565.
- Lilly D K, 1986. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part II: helicity and storm stabilization[J]. J Atmos Sci, 43(2): 126-140.
- Luo Y L, Xia R D, Chan J C L, 2020. Characteristics, physical mechanisms, and prediction of pre-summer rainfall over South China: research progress during 2008-2019[J]. J Meteor Soc Japan, 98(1): 19-42.
- Maddox R A, Caracena F, Hoxit L R, et al, 1977. Meteorological aspect of Big Thompson flash flood of 31 July 1976[R]. NOAA TR ERL 388-APCL 41, 83.
- Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al, 1998. Nowcasting thunderstorms: a status report[J]. Bull Amer Meteor Soc, 79(10): 2079-2100.
- Wilson J W, Megenhardt D L, 1997. Thunderstorm initiation, organization, and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines[J]. Mon Wea Rev, 125(7): 1507-1525.
- Wilson J W, Mueller C K, 1993. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution[J]. Wea Forecasting, 8(1): 113-131.
- Zhang D L, Lin Y H, Zhao P, et al, 2013. The Beijing extreme rainfall of 21 July 2012: “right results” but for wrong reasons[J]. Geophys Res Lett, 40(7): 1426-1431.

(本文责编:戴洋)