

胡雅君,张伟,赵玉春,等,2020.“5·7”闽南沿海暖区特大暴雨中尺度特征分析[J].气象,46(5):629-642. Hu Y J, Zhang W, Zhao Y C, et al, 2020. Mesoscale feature analysis on a warm-sector torrential rain event in southeastern coast of Fujian on 7 May 2018[J]. Meteor Mon, 46(5):629-642(in Chinese).

“5·7”闽南沿海暖区特大暴雨中尺度特征分析^{*}

胡雅君^{1,2} 张 伟^{1,3} 赵玉春^{1,2} 陈德花^{1,3}

1 海峡气象开放实验室, 厦门 361012

2 福建省灾害天气重点实验室, 福州 350001

3 厦门市气象台, 厦门 361012

提 要: 利用双偏振多普勒雷达、风廓线雷达、雨滴谱仪等新型探测资料以及双雷达风场反演资料、地面加密自动观测站资料与 FNL 再分析资料, 分析了 2018 年 5 月 7 日闽南沿海一次暖区特大暴雨过程的中尺度特征。结果表明: 此次特大暴雨发生在强盛的超低空西南急流区内; 超低空急流具有明显的脉动特征, 其突然增强引起低空扰动加强, 造成明显的低层辐合; 深厚的西南急流导致对流回波形态与回波移动方向高度一致, 使得多个强降水对流系统接连经过同一区域, 形成列车效应, 这是强降水长时间维持的重要原因; 强降水对流回波带中, 水平方向存在风向、风速双重辐合, 垂直方向上存在明显的波状运动, 上升运动位于强回波前部, 使其不断向东北方向移动, 同时在强降水对流回波带东南侧存在明显的补偿性次级环流, 使低层辐合和上升运动得以维持; 高浓度的小雨滴与大雨滴并存是此次暖区强降水云微物理的重要特征。

关键词: 暖区暴雨, 超低空急流, 列车效应, 次级环流

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.05.004

Mesoscale Feature Analysis on a Warm-Sector Torrential Rain Event in Southeastern Coast of Fujian on 7 May 2018

HU Yajun^{1,2} ZHANG Wei^{1,3} ZHAO Yuchun^{1,2} CHEN Dehua^{1,3}

1 Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen 361012

2 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001

3 Xiamen Meteorological Observatory, Xiamen 361012

Abstract: Based on the data of dual polarization Doppler radar, wind-profiling radar, disdrometer, dual-Doppler radar retrieval, automatic weather stations and FNL reanalysis data, this paper analyzes the mesoscale characteristics of warm-sector torrential rain in southeastern coast of Fujian Province on 7 May 2018. The results show that this torrential rain process occurred inside the strong ultra-low-level southwest jet. The pulsation feature of ultra-low-level jet was obvious. Sudden enhancement of the jet favored the low-level disturbance, which caused significant low-level convergence. Deep southwest jet led to high consistency of convective echo pattern and echo moving direction, causing multiple severe convective systems to pass the same area repeatedly (a train effect), which was an important reason for the severe rainfall to last such a long time. There existed both wind speed and direction convergence inside the strong echo in horizontal direction. In vertical direction, there was significant wave-like motion in the echo band

^{*} 国家自然科学基金项目(41675047、41675018、41705045)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-054)、福建省“强降水机理与预报技术研究”创新团队、厦门市气象局“海洋气象精细化预报”创新团队和海峡气象开放实验室开放课题(Hxkf016)共同资助

2019 年 3 月 13 日收稿; 2019 年 11 月 19 日收修定稿

第一作者: 胡雅君, 主要从事中尺度天气分析. Email: hyjxzs2016@126.com

with the ascending motion in the front of the strong echo. This could guide echo to move northeastward. At the same time, there was significant compensatory secondary circulation in southeast of the strong echo, maintaining low-level convergence and the upstream. In addition, high concentration of small raindrops with a few large raindrops was the main cloud microphysical characteristics of this warm-sector torrential rain.

Key words: warm-sector torrential rain, ultra-low-level jet, train effect, secondary circulation

引 言

暴雨是我国夏季常见灾害性天气之一。暖区暴雨通常指发生在锋前南侧西南暖湿气流中,距离锋面 200~300 km 的暴雨,有时则发生在西南风和东南风汇合气流里,甚至一致的西南气流辐合区中(黄士松,1986)。暖区暴雨是华南前汛期暴雨的重要组成部分,由于其独特的中尺度对流特征,模式经常对其漏报(伍志方等,2018)。针对华南前汛期暖区暴雨,近 20 年来国内开展了大量外场试验(Kuo and Chen,1990;薛纪善,1999;周秀骥等,2003),对其从背景环流场、中尺度风场特征等方面进行了较多研究。朱乾根等(2000)、丁一汇(2005)研究表明:华南暖区暴雨通常伴随着中层高空槽东移,200 hPa 南亚高压处于中南半岛,其东侧的高空强辐散区为暴雨提供了较强的抽吸作用;低层则伴随着明显的低空急流,尤其是超低空急流发展。此外,陶诗言等(1980)提出了华南暖区暴雨的四类天气学模型。何立富等(2016)则将暖区暴雨的天气形势总结为边界层辐合线型、偏南风风速辐合型、强西南急流型三类。华南暖区暴雨具有非常明显的对流不稳定特征,暴雨云团通常由 β 或 γ 中尺度对流系统产生(Akiyama,1984;Chen,1992)。对流层低层或边界层内的风场扰动,尤其是超低空急流中的风速脉动,是暖区暴雨最常见的触发机制之一,暴雨产生的凝结潜热释放又对中尺度对流系统(MCS)的维持、移动和发展起到正反馈作用(Zhang,1992;张庆红等,2000;赵玉春和王叶红,2010)。另外,地形通过造成风场强迫抬升或系统性辐合,或形成偏南风辐合区和中尺度辐合线,有利于暴雨加强(吴恒强,1983;赵玉春和王叶红,2009)。

(超)低空急流是有利于暖区暴雨形成的重要系统之一。由于受观测条件的限制,早期对急流的研究通常使用探空资料(孙淑清和翟国庆,1980;吴启树等,2010)。气象观测网的建设和气象探测手段的

增强,为使用多普勒天气雷达或风廓线雷达资料分析暖区暴雨中尺度风场结构演变提供了便利。Zhong et al(1996)根据风廓线雷达对低空急流发生、发展和消亡过程进行连续监测,研究急流和暴雨形成的物理机制。刘淑媛等(2003)研究发现,暴雨发生前,动量从高空不断下传,使得低层风速不断增强,导致低空急流建立和增强,同时加强了低层垂直风切变,为暴雨提供有利的热力和动力条件。强降水过程中,低空急流存在明显的中小尺度脉动特征,且通常比暴雨发生提前约 1~2 h(周芯玉等,2015)。暴雨与边界层急流之间也存在明显的正反馈关系(孙继松,2005;张京英等,2005)。由多普勒天气雷达获取的高分辨率三维风场能够识别出降水区超低空中尺度涡旋系统,再通过这些系统可以分析强降水的形成和维持原因(郑媛媛等,2009)。雷达径向速度图上的逆风区对暴雨的维持也具有一定的指示意义(张沛源和陈荣林,1995)。由双雷达风场反演能清晰地看到低层切变移动,以及暴雨、冰雹过程中不同阶段 MCS 的三维风场结构(韩颂雨等,2017;张伟等,2017)。此外,多普勒雷达资料同化对提高中尺度模式初始场准确性具有重要意义(王叶红等,2008;邱崇践等,2000)。

2018 年 5 月 7 日,闽南沿海发生了一次极端特大暴雨过程,最强降水区在人口密集的厦门岛内,造成厦门城市内涝与交通堵塞,对市民和游客出行影响很大。此次暴雨过程 24 h 累计雨量、最强 3 h 累计雨量、最大小时雨强均创厦门有气象和水文观测记录以来历史极值。而 GRAPES、T639、欧洲中心细网格、日本等多家数值模式对此次暴雨过程均明显漏报,24 h 累计雨量最多仅预报到 20 多毫米,中尺度模式 FJ-WRF 虽然预报出暴雨量级的降水,但暴雨落区在内陆而非沿海。本文基于风廓线雷达、双偏振多普勒天气雷达、雨滴谱仪等新型探测资料以及双雷达风场反演资料、地面加密自动观测站资料和美国气象环境预报中心(NCEP)/美国国家大气研究中心(NCAR)提供的全球再分析资料(FNL),初

步分析了此次暴雨过程的强降水对流活动及其三维风场结构特征、中尺度风场演变及其与强降水发展、维持的联系,以期加深对暖区暴雨的认识、提高其短临预报准确率。

1 资料与方法

本文使用的资料包括:(1)闽南地区 390 个地面区域自动气象观测站资料;(2)翔安站风廓线雷达和雨滴谱仪数据;(3)厦门双偏振雷达和泉州多普勒雷达基数据,其位置分布见图 1,分别位于 24.49°N 、 118.00°E 和 24.9°N 、 118.49°E ,两部雷达相距 64 km;(4)利用罗昌荣等(2012)开发的“基于地球动态坐标系的双雷达风场反演”软件得到的三维风场反演数据,其可靠性已由王叶红等(2019)利用厦门探空站秒级数据以及厦门翔安风廓线雷达观测资料进行对比验证,适宜反演区见图 1 中两个圆圈未相交区域(灰色阴影区),暴雨带和翔安站均位于该适宜反演区域内,反演网格为 $0.005^{\circ}\times 0.005^{\circ}$,垂直格距为 500 m,垂直方向上采用 Cressman 插值方法;(5) $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料(FNL)。

2 暴雨实况

此次特大暴雨过程于 2018 年 5 月 7 日 08 时左右从漳州开始,后向东北方向移动,11 时强降雨区扩展到厦门岛内,至 16 时趋于结束。该过程具有局地性强、强度大等特征。上述 8 h 过程雨量呈现明显的东北—西南向带状分布(图2),强降雨主要集中在

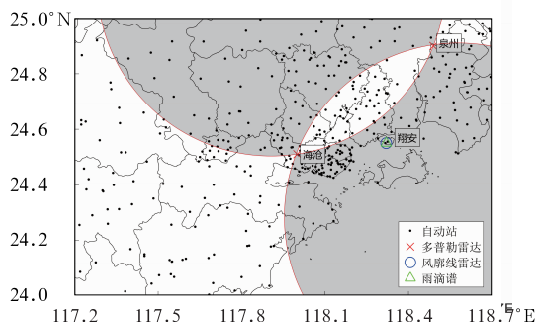


图1 闽南地区观测仪器分布
(阴影区域为双雷达最佳反演区域)

Fig.1 Distribution of observation instruments
in southern Fujian Province
(Shaded area indicates optimal retrieval area)

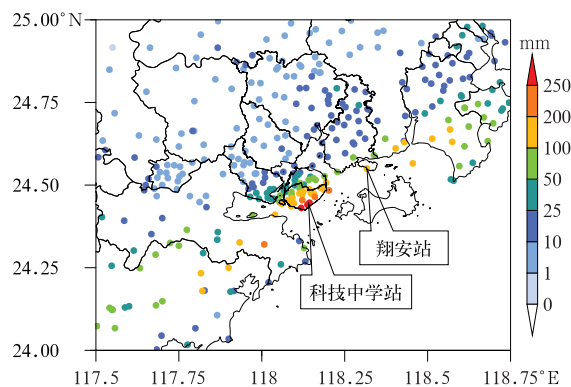


图2 2018年5月7日08—16时
闽南地区累计雨量

Fig.2 Distribution of accumulated rainfall
in southern Fujian Province during
08:00–16:00 BT 7 May 2018

在厦门岛内的东南部、翔安南部、漳州沿海、泉州沿海地区。共有 3 个站累计雨量超过 250 mm,均位于厦门岛内。最大累计雨量出现在厦门岛内的科技中学站(F2101),为 290 mm,最大 3 h 雨量达 274 mm,出现在 11—14 时。

图 3a 给出了此次过程中科技中学站(F2101)的逐 5 min 降水演变,从中看到,强降水具有一定的波动特征,主要的 6 个降水峰值分别出现在 11:25、

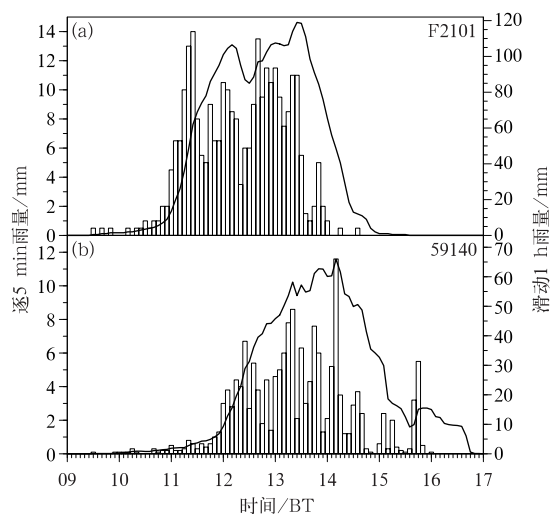


图3 2018年5月7日09—17时(a)科技中学站
(F2101)和(b)翔安站(59140)逐5min
雨量(柱状)和滑动1h累计雨量(曲线)
Fig.3 Variation of 5 min rainfall
and hourly moving accumulated rainfall
(line) at (a) Kezhongxue Station (F2101)
and (b) Xiang'an Station (59140)
during 09:00–17:00 BT 7 May 2018

11:45、12:00、12:40、13:20 和13:50,这表明强降水由多个 MCS 造成。具体而言,降水从 09:30 开始,5 min 雨量约为 0.5 mm,雨强较弱;自 11 时开始,雨强明显增强,5 min 雨量从 2 mm 跃增到 6 mm 以上;11:20 以后有多个时次 5 min 雨量超过 10 mm,最大甚至达到 14 mm(11:20—11:25)。从滑动 1 h 累计雨量变化看,11:25 开始持续超过 50 mm,在 13:25 达到最大,为 119 mm。

从风廓线雷达和雨滴谱仪所在站点翔安站(59140)逐 5 min 和滑动 1 h 累计雨量变化看(图 3b),降水从 10 时开始,10:00—11:50 雨强较弱,5 min 雨量均在 1 mm 以下;12 时开始雨强明显增强,5 min 雨强多次超过 5 mm;14:05—14:10 达到最大,为 11 mm,滑动 1 h 累计雨量也在此时达到最大,为 65.9 mm。

3 特大暴雨的环流形势特征

5 月 7 日 08 时,200 hPa 福建上空为明显的辐

散,但最强辐散区域位于湖南、江西以及福建西部,并非闽南沿海(图 4a)。500 hPa 闽南沿海位势高度为 584~588 dagpm(图 4b),是华南前汛期有利于发生暴雨的环流形势(朱乾根等,2000);西南风速大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且处于明显的正涡度平流中。850 hPa 在湖北、湖南、江西一带存在切变线,此次暴雨正是发生在切变线南侧的西南暖湿气流中,距离切变线 200~300 km,属典型的暖区暴雨;福建全省大部分地区风速大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,达到低空急流的标准,沿海以及闽西地区的风速甚至超过 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有利于低层水汽输送以及不稳定层结的建立(朱乾根等,2000);全省假相当位温均高于 344 K,处于高能高湿状态,但最强降雨主要出现在沿海,而非地形动力抬升条件更好的内陆地区(图 4c)。925 hPa 全省假相当位温均高于 348 K,同样处于高能高湿状态;沿海地区存在一支明显的超低空急流,急流风速约为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但内陆地区风速较小,均低于 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4d)。Du and Chen(2018)在分析华南锋面降水和暖区降水时发现,前者主要受低空急流(850

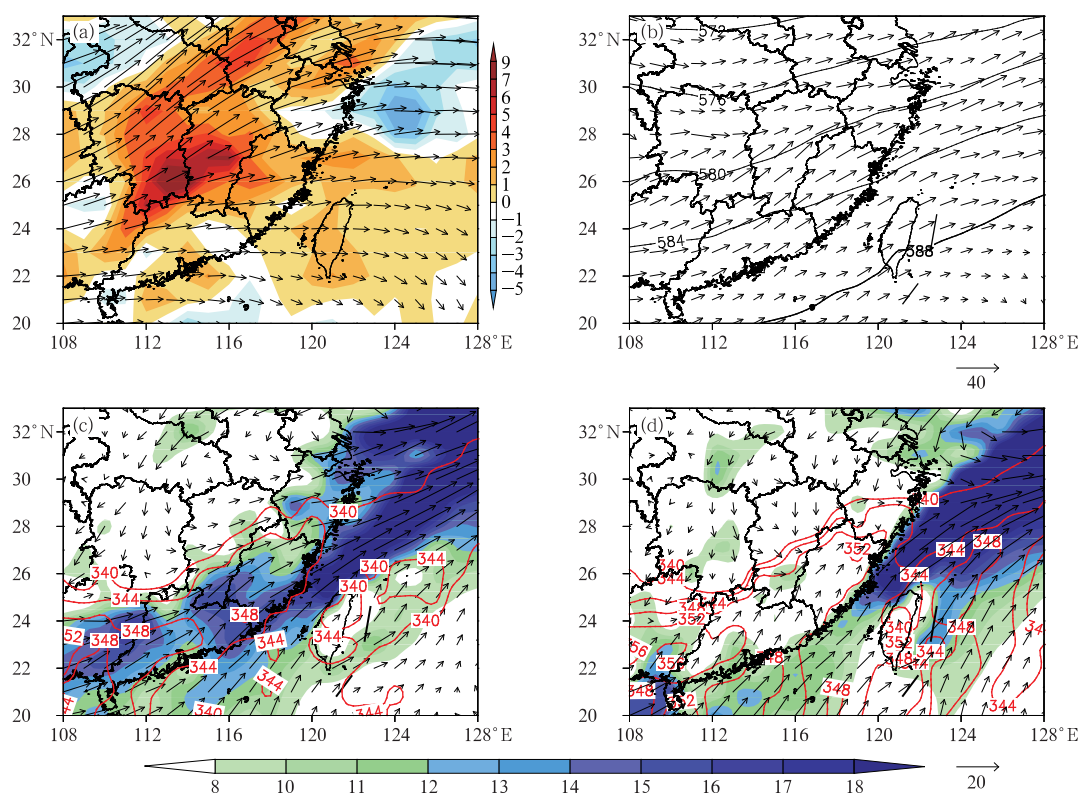


图4 2018年5月7日08时(a)200 hPa风场(箭头)和散度场(填色,单位: 10^{-5} s^{-1}),

(b)500 hPa高度场(等值线,单位:dagpm;加粗线为588线)和风场(箭头),

(c)850 hPa,(d)925 hPa风场(箭头)、全风速(填色,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和假相当位温(红线,单位:K)

Fig. 4 (a) 200 hPa wind (arrow) and divergence (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}), (b) 500 hPa geopotential height (black contours, unit: dagpm; bold for line 588) and wind (arrow), (c) 850 hPa and (d) 925 hPa wind (arrow), speed (shaded, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and pseudoequivalent potential temperature (red contours, unit: K) at 08:00 BT 7 May 2018

~700 hPa)影响,而后者与超低空急流(925 hPa)关系更为密切。因此 925 hPa 超低空急流是此次暖区特大暴雨的关键天气系统。

图 5 为 5 月 7 日 08 时(强降水发生前 3 h)厦门站探空曲线,从图中可以看到,厦门上空从地面至 300 hPa 均为明显的西南风,有利于整层水汽输送。925 hPa 与 500 hPa 风向几乎一致,0~6 km 风向差别仅为 10° ,垂直风切变很弱;且地面至 500 hPa 相对湿度均大于 80%,湿层深厚;抬升凝结高度与对流凝结高度几乎同时位于 1000 hPa,0℃层高度为 4.8 km,暖云层深厚,云底以下无明显蒸发;K 指数为 37°C ,SI 指数为 -0.37°C ,为弱的不稳定,CAPE 值为 $1292 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,属于中等强度,并且呈现明显的细长型;这样的结构特征使得暴雨过程中垂直上升运动中等,强回波中心较低,降雨性质为暖云降水,有利于降水效率的提升(孙继松,2017)。自由对流高度为 885 hPa,环境大气为条件性静力不稳定,在深厚的西南暖湿气流中,容易发生“列车效应”(孙继松等,2013)。

4 强降水对流回波演变特征

分析本次暖区特大暴雨过程中 7 日 08—16 时厦门海沧双偏振雷达组合反射率(图 6,黑线 1—2 为 24.11°N 、 117.6°E 与 24.77°N 、 118.68°E 连线,黑线 3—4 为 24.64°N 、 118.02°E 与 24.24°N 、 118.26°E 连线)变化发现,08 时在闽南沿海的最南部东山地区有带状回波(多单体 A)发展并向东北方向移动,同时在内陆有回波(多单体 B)向东北偏东方向移动(图 6a)。到 09 时回波开始影响厦门地区(图 6b)。10 时内陆回波与沿海回波合并(多单体 C)且明显加强,其合并后继续向东北方向移动,同时在漳州漳浦地区有回波持续生成(单体 D)并继续向东北方向移动(图 6c)。11 时强回波开始影响厦门地区,雨强明显增大(图 6d)。12 时回波 D 与 C 连接,形成一条较长的东北—西南向带状回波,强度进一步增强(图 6e)。由于回波移动方向与回波带方向一致,导致强降水长时间维持。14 时由于高空引导气流偏西分量增大(图略),对流回波带略向东移,陆地降水才略有减弱(图 6g)。15—16 时整体回波减弱东移(图 6h,6i)。由此可见,影响闽南沿海的强回波带是由内陆的回波东移与沿海生成的回波

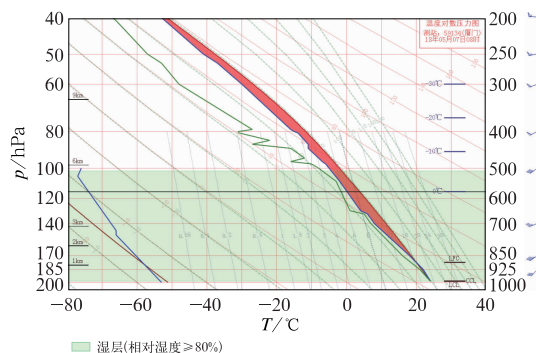


图 5 2018 年 5 月 7 日 08 时厦门站探空曲线

Fig. 5 Sounding curves for Xiamen Station
at 08:00 BT 7 May 2018

合并加强所致,而漳州漳浦地区又不断有回波生成并向东北方向移动,形成了明显的列车效应(冯晋勤等,2008),从而产生一条长回波带,此带状回波长时间维持在闽南沿海地区,造成该地区强降水突破历史纪录。

沿强降水对流回波带(东北—西南向)所作的雷达反射率因子垂直剖面(图 7)显示,强回波在漳州沿海不断生成,回波中心不断向东北方向移动。自 12 时开始强回波中心相互连接(图 7c),形成一条带状回波并一直维持到 15 时后才趋于减弱(图 7f)。另外,由厦门探空计算的大气 0℃层高度约为 4.8 km,强回波(45 dBz 以上)均位于 0℃层(黑色实线)以下,且向下一直扩展到近地面,属于明显的低质心暖云降水,其粒子相态主要为液态水。

从沿强降水对流回波带的组合反射率的时间演变图上可直观看到列车效应全过程(图 8a),从 08 时开始,漳州东山地区不断有回波生成并向东北方向移动,逐步形成列车效应,期间有 7 个强降水对流系统(雷达反射率因子超过 45 dBz)分别活动在 09:30、10:30、11:00、11:30、12:00、12:10、12:30 附近,每个对流系统维持 1~2 h。值得注意的是,部分对流系统在向东北方向移动过程中,其速度逐渐减慢,如第一个对流系统(09:30 生成)形成后移速减慢,导致 10:30 生成的系统在 10:45 左右追上并与之合并。总体而言,影响厦门地区强降水对流系统实际为 6 个,移动至 24.33°N 、 117.96°E 后,速度进一步减慢,导致多个强降水对流系统连成一片,反复经过闽南沿海,造成强降水持续发生。16 时之后漳州沿海地区的回波明显减弱,不再有强回波生成。

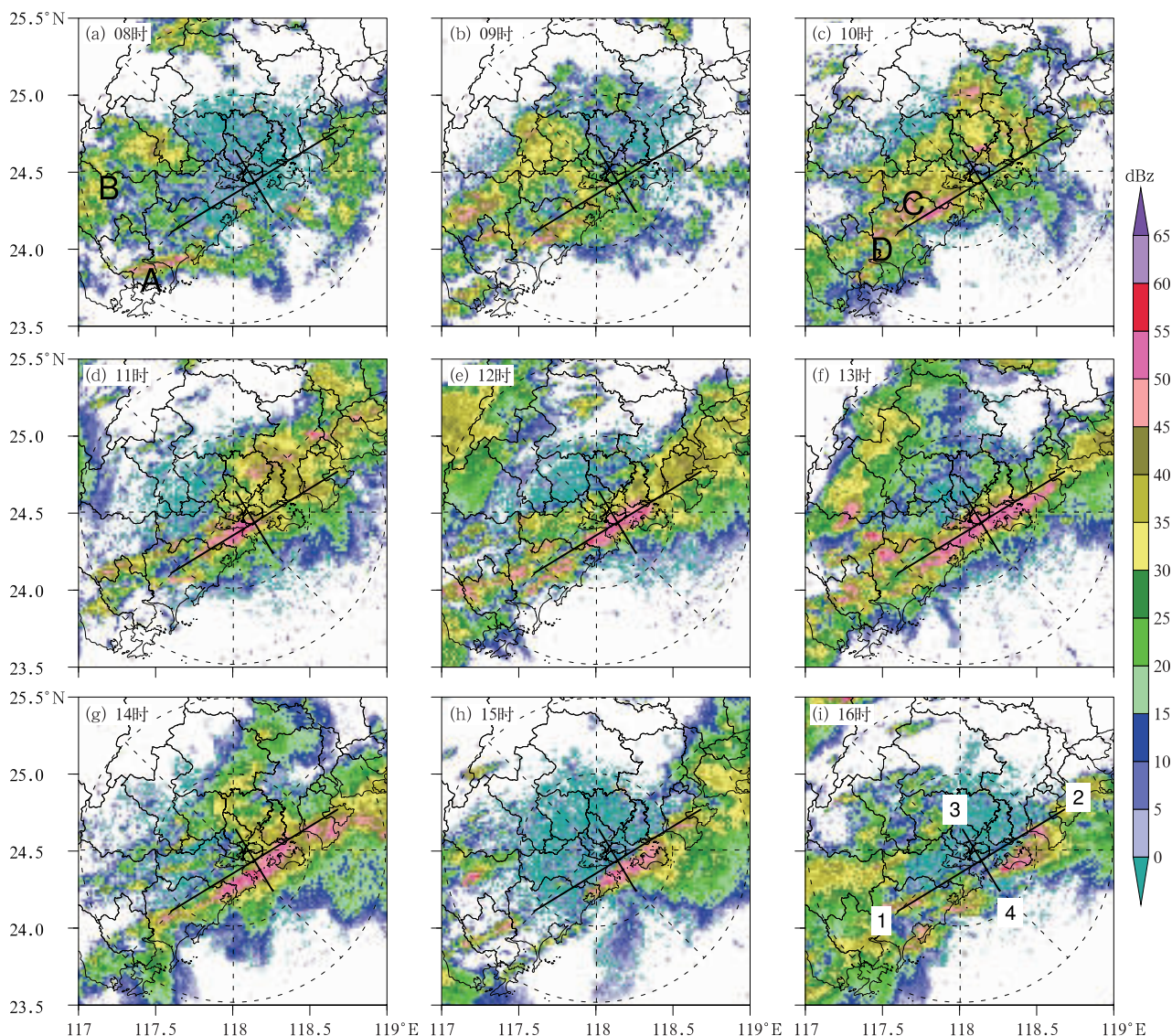


图6 2018年5月7日08—16时厦门海沧双偏振雷达逐小时组合反射率演变

Fig. 6 Composite reflectivity of Xiamen Haicang dual polarization

Doppler radar during 08:00–16:00 BT 7 May 2018

垂直于强降水对流回波带(西北—东南向)的垂直剖面(图8b)显示,强回波主要从11时开始影响厦门岛内,且一直维持。14时以后,回波才整体向东南方向移动,厦门岛内降水减弱。另外,图8a中黑色实线(左)和图8b中黑色实线均为科技中学站所在经纬度,强降水回波均从11时持续到14时,受6个强降水对流系统影响的时间与图3a中科技中学站的5 min降水实况以及峰值基本匹配;图8a中黑色实线(右)为翔安站所在经纬度,45 dBz以上的强回波从12时开始到15时左右结束,这与图3a中翔安站的降水实况也是一致的。以上分析表明,典型的

列车效应导致了闽南沿海的强降水持续。

5 强降水对流系统三维风场结构特征

5.1 风场水平结构特征

为了分析此次特大暴雨过程的中尺度水平风场演变特征,图9给出5月7日11—14时闽南沿海地区1500 m高度双雷达反演风场和回波强度。从图中看到,11时强回波还未进入厦门岛内,厦门岛至泉州一带低层均为明显的西南风,且全风速最大超过

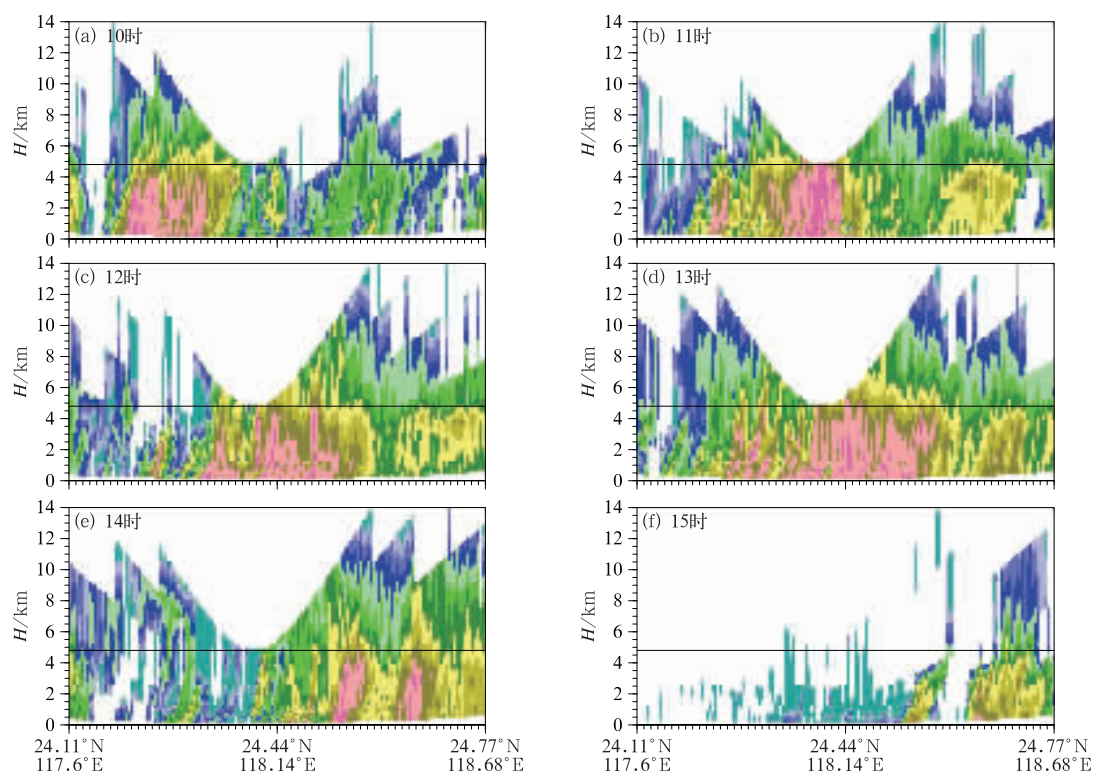


图7 2018年5月7日10—15时厦门海沧双偏振雷达反射率因子沿图6i中线段1—2的垂直剖面
(黑线为0℃层)

Fig. 7 Vertical profile of base reflectivity of Xiamen Haicang dual polarization radar along line 1—2 in Fig. 6i during 10:00—15:00 BT 7 May 2018
(black lines: height of 0°C layer)

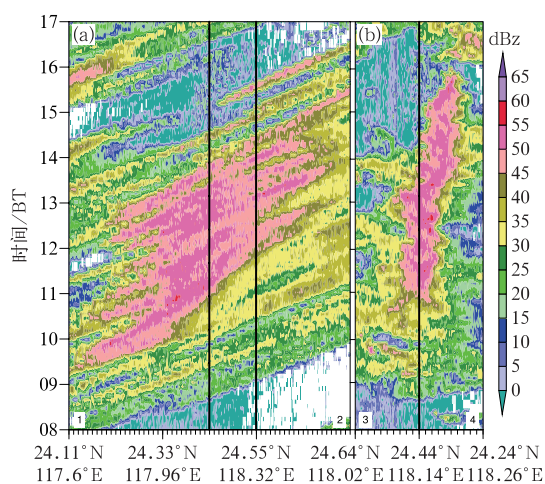


图8 2018年5月7日08—17时(a)沿图6i中黑线1—2, (b)沿图6i中黑线3—4的组合反射率的时间演变
(图8a中左、右黑线分别为科技中学站、翔安站在经纬度;图8b黑线为科技中学站经纬度)

Fig. 8 Composite reflectivity Hovmöller diagram along (a) line 1—2 and (b) line 3—4 in Fig. 6i during 08:00—17:00 BT 7 May 2018
(In Fig. 8a, the line on left is Kejizhongxue Station, the line on the right is Xiang'an Station; in the Fig. 8b, the line is Kejizhongxue Station)

$16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 风速分布显示,此时低层风速分布较为一致,辐合强度较弱(图9a)。12时强回波向东北方向移动并呈现明显的带状分布,强度加强,1500 m高度回波强度最大超过50 dBZ;与此同时低层风向风速都有明显变化,强回波区域内出现了明显的风向汇合,且风速从强回波之外向强回波区域内迅速递减,强回波区域内的风速甚至低于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,因此在强回波区域内存在显著的风向风速双重辐合(图9b)。13时强回波进一步向东北方向移动,强辐合区也同步向东北方向移动(图9c)。14时与13时情况类似,回波与辐合区进一步向东北方向移动(图9d)。

分析结果表明,弱回波区中急流的强度几乎不变,与环境场一致;强回波区中风向风速发生明显改变,主要是强回波区域内的风速明显减小和指向强回波中心的风向汇合,因此在强回波区域内造成风向风速双重辐合。这种带状辐合能为上升运动提供充足的动力条件,使得带状强回波一直维持。另外,由于回波上游出现明显的风速辐合,因而在上游持续有回波生成,这也是导致列车效应的原因之一。值得注意的是,强回波带伴随着辐合区的发展,因此风场的变化与辐合区的形成可能是由于强降水粒子

对于低层水平风的削弱阻挡作用而造成的。

分析风廓线雷达资料发现,此次过程强降水期间(超)低空急流具有明显的脉动特征。这种脉动有利于低层扰动增强,进而有利于中尺度对流系统发展(刘淑媛等,2003;黄明策等,2010;冯晋勤等,2017)。图10为5月7日08—15时翔安站风廓线雷达水平风时序图。从图中看到,08时以后超低空急流不断增强,甚至400 m高度也达到急流标准,在12时(翔安站雨强显著增强)之前,从海平面高度至10 km是较为一致的强西南—偏南风,急流层非

常深厚,有利于水汽输送和不稳定层结的建立,进而有利于列车效应的维持。从12时开始,850 hPa以下的风速明显减弱,风向也有明显改变,而翔安站雨强则明显增强,直到13时以后,低层风速才又有所增强,但仍远弱于强降水发生前(09—12时)。结合图3b翔安站逐5 min雨量和图8a中翔安站(黑色实线,右)组合反射率时间演变可知,降水发生前超低空急流发展,而当雨强增强时,低层风速明显减弱,风向也有明显变化。

为进一步分析低空急流的脉动特征,图11给出

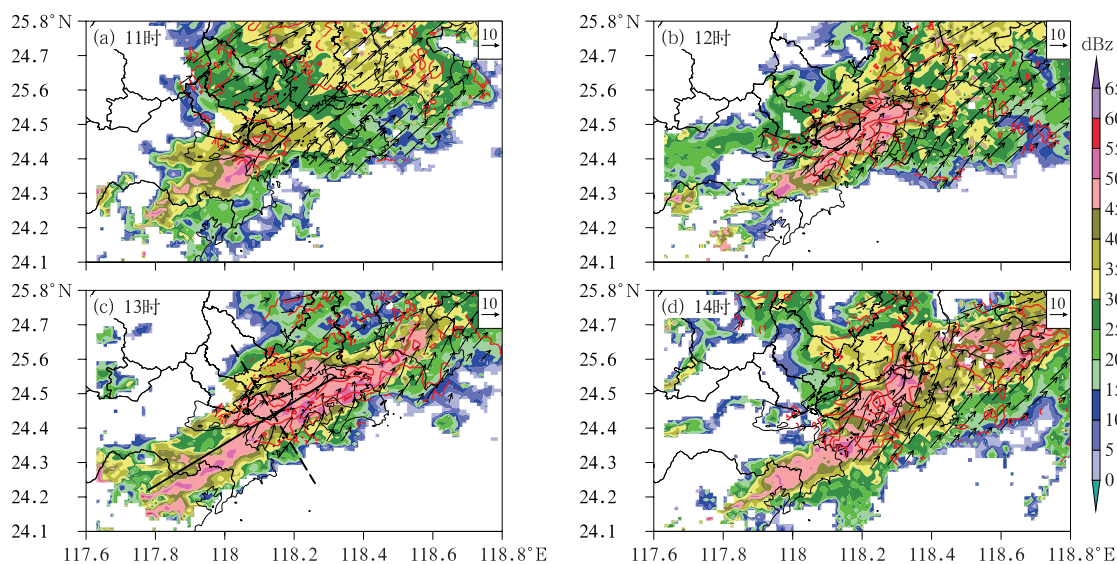


图9 闽南沿海2018年5月7日11—14时1500 m回波强度(填色)、反演水平风场(箭头)和反演水平风速(红线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)分布

Fig. 9 Distribution of echo intensity (shaded), retrieval horizontal wind (vector) and speed (red contours, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of southern Fujian at 1500 m height during 11:00–14:00 BT 7 May 2018

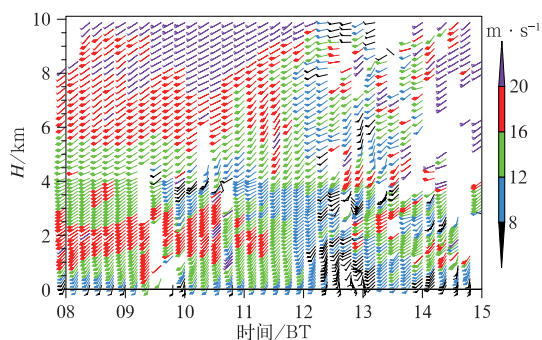


图10 2018年5月7日08—15时翔安站风廓线雷达0~10 km高度水平风时序图

Fig. 10 Time series of wind profile at 0–10 km height from wind-profiling radar at Xiang'an Station during 08:00–15:00 BT 7 May 2018

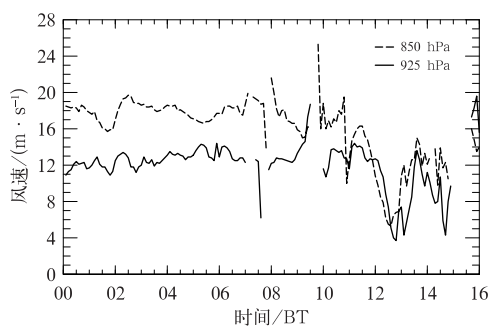


图11 2018年5月7日00—16时翔安站风廓线雷达850 hPa(虚线)与925 hPa(实线)全风速时序图

Fig. 11 Time series of speed from wind-profiling radar at Xiang'an Station at 850 hPa (dashed line) and 925 hPa (solid line) during 00:00–16:00 BT 7 May 2018

翔安站 850、925 hPa 风速时序图。从图中看到,5 月 7 日 00—08 时,即降雨发生之前,闽南沿海一直存在低空急流和超低空急流,850、925 hPa 风速分别维持在 $16、12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,且存在明显的脉动。09 时 925 hPa 风速突然增强,09:30 超过 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,一度接近 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与此同时 850 hPa 风速略有下降,这表明此时 850 hPa 与 925 hPa 可能存在动量交换过程。11:30,850 hPa 风速开始减弱,但仍达到低空急流的标准,直到接近 12 时,850 hPa 风速才减弱到小于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。12 时以后,925 hPa 风速也明显减弱,至 12:30 左右降至最低。说明超低空急流的突然增强可能是暴雨发生的前兆信号。

5.2 风场垂直结构特征

沿回波传播方向(图 9c 中黑色实线)所作的垂直剖面(图 12)显示,漳州沿海地区不断有回波生成(图 12a~12c 中 $24.22^{\circ}\sim 24.33^{\circ}\text{N}$),强回波(大于 45 dBz)不断向东北方向移动,回波顶高均不超过 5 km 。从反演风场看,强回波形成后,较平直的风场逐渐呈现波动特征,沿着回波传播方向,强回波的前部为上升气流,其后部为下沉气流(图 12a,12b),孙继松等(2013)也曾指出列车效应中沿回波传播方向,垂直运动呈现出上升-下沉交替出现的波动特

征,使得强回波不断向前发展、移动。到回波发展鼎盛期(图 12c),强回波所在位置为一致的上升气流。对于科技中学站(24.44°N 、 118.14°E),11 时开始不断受强回波影响,对应该站为弱下沉运动,随后逐渐转为上升运动,一直持续到 14 时,14 时以后回波强度和垂直速度都明显减弱(图 12d),降水也趋于结束。

为更清晰地研究此次强回波的三维风场结构,图 13 给出科技中学站沿近似垂直于回波传播方向(图 9c 中黑色虚线)所作的剖面。从图中看到,科技中学站降水初期(图 13a),在强回波所在位置,两侧气流汇合,其中东南侧入流要比西北侧强,东南侧 $1.5\sim 5 \text{ km}$ 均为较强入流,其厚度超过 3.5 km ,而西北侧尽管由于反演数据原因无法确定入流厚度,但图中仍清晰显示 3 km 以下的入流风速要比东南侧小,且风向较为混乱,不如东南侧一致地朝向强回波区域;两侧气流汇合形成明显的上升运动,有利于强回波发展,另外此时上升运动略微向西北侧倾斜。在强降水时段(图 13b,13c),强回波的东南侧逐渐形成一个明显的次级环流,入流顶端高度逐渐降低,12:01 降至 4.5 km ,13:21 又降至 4 km ,入流厚度随之减弱;西北侧的汇流进一步减弱,13:21 甚至逐渐转为弱出流;强上升运动仍维持在科技中学站,但

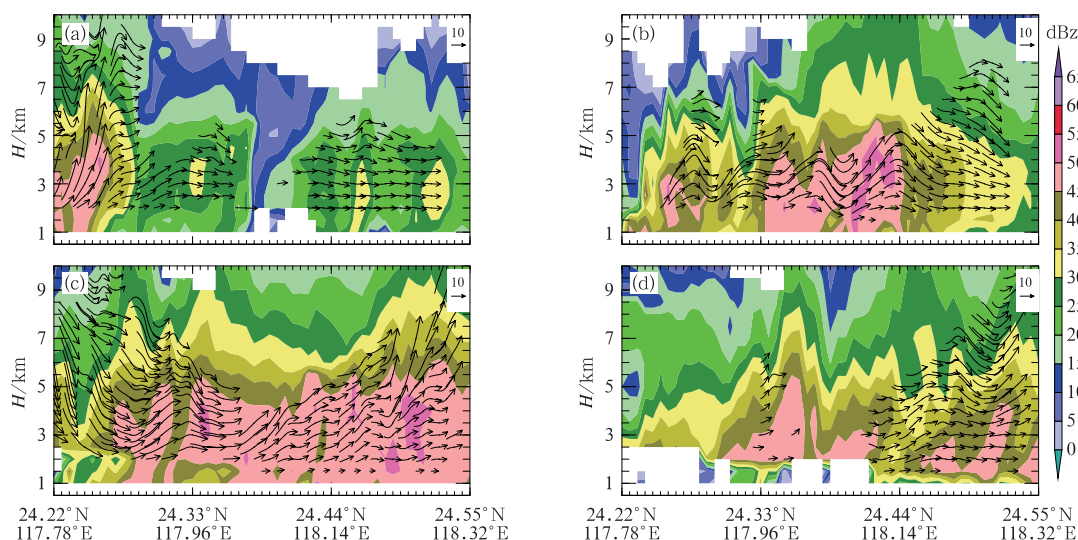


图 12 2018 年 5 月 7 日(a)09:43,(b)11:10,(c)13:05,(d)14:08 沿图 9c 中黑色实线的垂直剖面
回波强度(填色)和反演风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直速度扩大为原来的两倍)

Fig. 12 Vertical profiles of echo intensity (shaded) and retrieval wind (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, vertical velocity increased twice the original one) along the black solid line in Fig. 9c on 7 May 2018
(a) 09:43 BT, (b) 11:10 BT, (c) 13:05 BT, (d) 14:08 BT

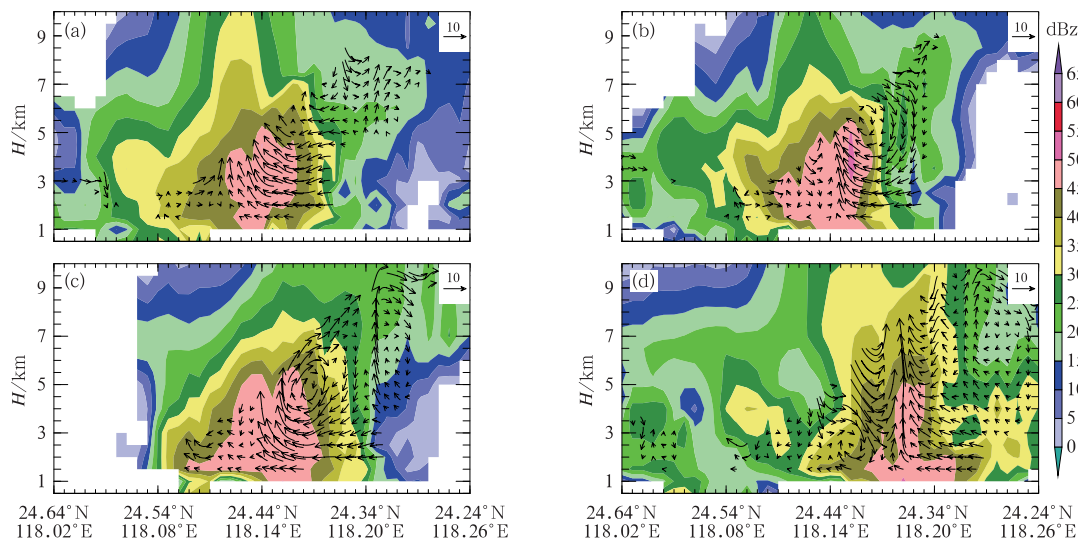


图 13 2018 年 5 月 7 日 (a)11:15, (b)12:01, (c)13:21, (d)14:02 沿图 9c 中黑色虚线的垂直剖面
回波强度(填色)和反演风场(箭头, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 垂直速度扩大为原来的两倍)

Fig. 13 Vertical profiles of echo intensity (shaded) and retrieval wind (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, vertical velocity increased twice the original one) along the black dashed line in Fig. 9c on 7 May 2018
(a) 11:15 BT, (b) 12:01 BT, (c) 13:21 BT, (d) 14:02 BT

逐渐从向西北侧倾斜转为向东南侧倾斜;另外在次级环流的东南侧可看到一支弱上升气流,预示着强回波随后可能会向东南方向移动。14 时以后,强回波、强上升运动都向东南方向移动,不再维持在科技中学站附近,次级环流结构消失,科技中学站强降水结束。

6 强对流降水的微物理特征

分析翔安雨滴谱仪探测资料和厦门海沧双偏振雷达的双偏振参量发现,此次降水具有典型的暖区降水微物理特征。图 14a 给出翔安雨滴谱仪所探测的暴雨过程中雨滴谱随时间的变化,从图中看到:整个降水过程中,小雨滴的浓度 $[N(D)]$ 都比大雨滴大,前者最大超过 $10^4 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$;雨滴粒径分布广,最大雨滴粒径接近 6 mm。对比自动站实测和雨滴谱反演雨量(图 14b)可知,两者基本吻合,其中滑动 1 h 累计雨量两者相关系数高达 0.998,逐 5 min 雨量两者相关系数也达到 0.993,都通过了 0.001 的显著性水平检验。

为分析不同降水阶段的微物理特征,对比强降水阶段(11:51—14:40)和弱降水时段(09:00—11:50)的雨滴粒径分布(图略)。从中看到,两个阶段都是小雨滴(直径小于 1 mm)、浓度高,随着雨滴直径增大,

雨滴浓度减小。对比两个阶段相同尺度的粒子浓度,强降水阶段远大于弱降水阶段,前者小雨滴浓度最大可达 $10^4 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,后者不到 $10^3 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

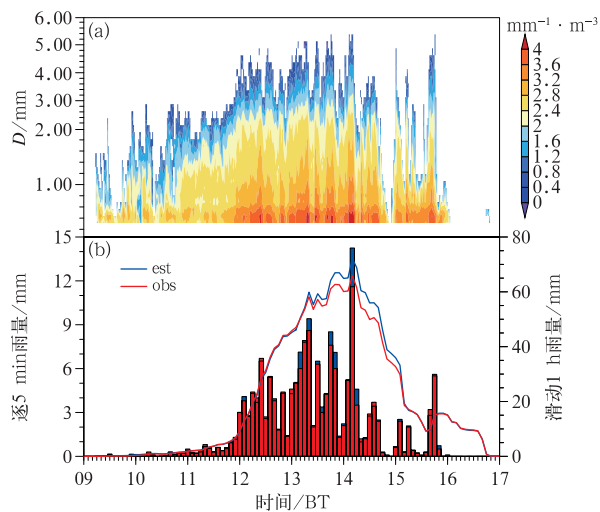


图 14 2018 年 5 月 7 日 09—17 时 (a)翔安雨滴谱仪探测的雨滴数浓度变化(取以 10 为底的对数),
(b)翔安自动站实测(红色)和雨滴谱反演(蓝色)所得逐 5 min 雨量(柱状)和滑动 1 h 累计雨量(曲线)
Fig. 14 (a) Time series of raindrop concentrations from disdrometer (in the base logarithmic),
(b) variation of observed (red) and retrieved (blue) 5 min rainfall (bar) and hourly moving accumulated rainfall (line) at Xiang'an Station during 09:00—17:00 BT 7 May 2018

另外,强降水阶段的雨滴最大直径接近 6 mm,而弱降水阶段的雨滴最大直径不到 4 mm。由此可见,高浓度的小雨滴和大雨滴的并存造成了局地强降水(傅佩玲等,2018)。

另外,双偏振雷达也能获得雨滴的大小和浓度信息。差分反射率(Z_{DR})表示降水粒子水平反射率和垂直反射率之比,雨滴越大, Z_{DR} 越大。张羽等(2017)制作 $Z_H - Z_{DR}$ 的散点图,发现: $Z_H < 25$ dBz 时, Z_{DR} 接近于 0 dB; $Z_H > 25$ dBz 后, Z_H 每增加 1 dBz, Z_{DR} 增幅约为 0.1 dB; $Z_H > 50$ dBz 后, Z_{DR} 普遍达到 2 dB。沿着强降水对流回波带(东北—西南向)对 Z_{DR} 所作的垂直剖面(图 15),与图 12 对比, Z_{DR} 的大值区($Z_{DR} > 1.2$ dB)与反射率因子的大值区($Z_H > 45$ dBz)以及上升运动在不同时刻都能很好地匹配,回波越强,对应的 Z_{DR} 越大,最大值超过 2 dB,而在回波低于 25 dBz 的位置, Z_{DR} 为 $-0.3 \sim 0.3$ dB;上升运动越强, Z_{DR} 大值区高度越高,形成 Z_{DR} 柱(Hubbert et al, 2018),但 Z_{DR} 大值区均在 0°C 层以下,与强回波发展高度一致。09:43,强回波在漳州沿海发展,此时上升运动很强,大雨滴被强烈的上升运动抬升,高层 Z_{DR} 比低层大,降水较弱(图 15a)。11:10,强回波继续向前移动、发展,在科技中

学站附近,强回波的前部上升运动仍然很强,降水也有所增强,整层 Z_{DR} 都很大,形成 Z_{DR} 柱,预示着雨强继续增强;同时在漳州沿海又有强回波生成,上升运动的位置也出现 Z_{DR} 大值区(图 15b)。13:05,强回波区域的上升运动有所减弱, Z_{DR} 值也有所减小, Z_{DR} 柱结构消失,漳州沿海仍有新生回波, Z_{DR} 也有与上升运动对应的大值区(图 15c)。14:08,上升运动明显减弱, Z_{DR} 值明显减小,厦门岛雨强明显减弱(图 15d)。

差分相移率(K_{DP})依赖于粒子数的密度,对回波强度大于 45 dBz 的强对流产生的暴雨有很好的识别度(张杰等,2010)。张羽等(2017)通过计算 $Z_H - K_{DP}$ 的散点图,发现:在 $Z_H < 35$ dBz 时, K_{DP} 接近于 $0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$;在 $Z_H > 35$ dBz 时, K_{DP} 才和 Z_H 有很好的对应, Z_H 每增加 1 dBz, K_{DP} 增幅约为 $0.2^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 。沿着强降水对流回波带(东北—西南向)对 K_{DP} 作垂直剖面(图 16)。与图 12 对比, K_{DP} 的大值区($K_{DP} > 1.1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$)与反射率因子的大值区(> 45 dBz)以及上升运动同样能很好地匹配,都处于 0°C 层以下,上升运动所在位置 $K_{DP} > 1.1^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,表明粒子数浓度大,液态水含量高,容易发生短时强降水。其中 K_{DP} 最大值约为 $3.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,据此估测的雨强约为

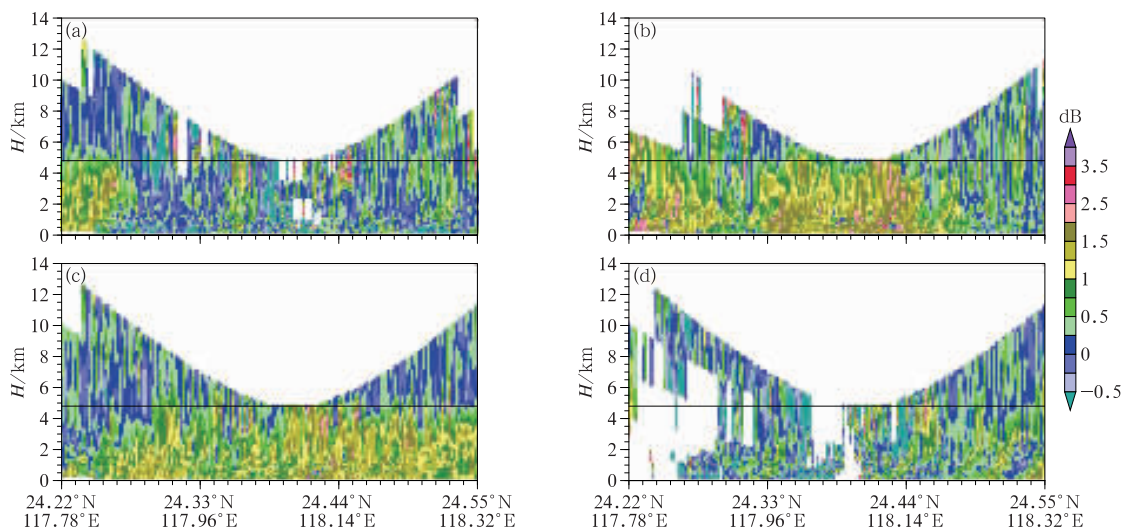


图 15 2018 年 5 月 7 日(a)09:43,(b)11:10,(c)13:05,(d)14:08 厦门海沧双偏振雷达差分反射率 Z_{DR} 沿图 9c 中黑色实线的垂直剖面
(黑线为 0°C 层)

Fig. 15 Vertical profiles of differential reflectivity of Xiamen Haicang polarimetric dual polarization radar along the black solid line in Fig. 9c on 7 May 2018
(a) 09:43 BT, (b) 11:10 BT, (c) 13:05 BT, (d) 14:08 BT
(black lines: the height of 0°C layer)

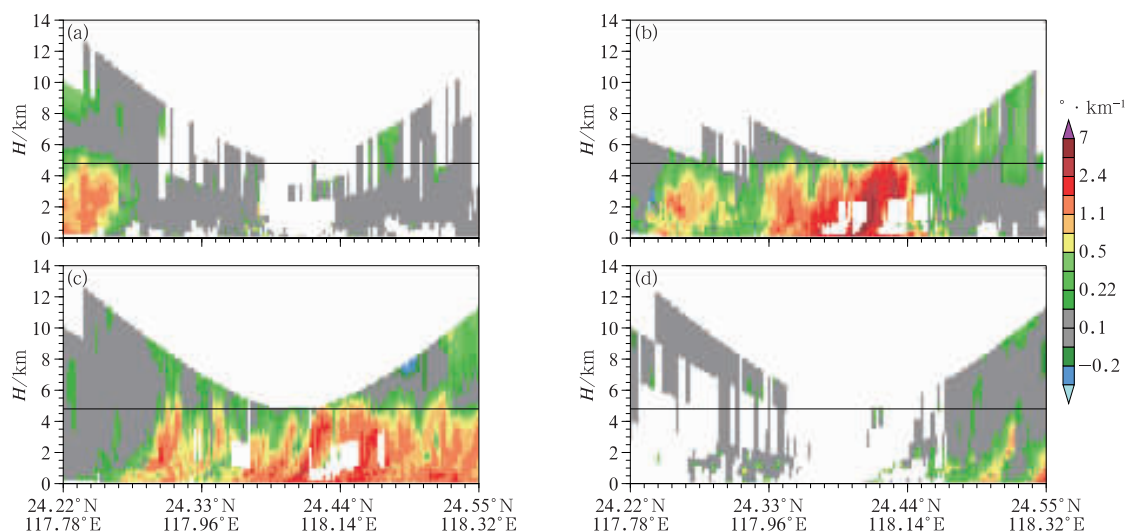


图 16 同图 15, 但为差分相移率 K_{DP} 沿图 9c 中黑色虚线的垂直剖面

Fig. 16 Same as Fig. 15, but for the vertical profiles of specific differential phase shift K_{DP} along the black dashed line in Fig. 9c

120 mm · h⁻¹, 与自动站观测结果相近。

在 11:10 (图 16b) 和 13:05 (图 16c), 有强雷达回波的地方, K_{DP} 却没有数据 (强降水时段其他时刻也存在类似情况, 图略), 张羽等 (2017) 指出这是由于 K_{DP} 的计算与协相关系数 CC 有关, 当 $CC < 0.9$ 时, 不计算 K_{DP} 。对照 CC 的垂直剖面图 (图略) 发现, 在 K_{DP} 缺失的强回波区域, CC 明显小于 0.9, 说明导致强回波区域 K_{DP} 出现缺失的原因就是受到 CC 的影响。

双偏振参量的分析结果与翔安雨滴谱仪的观测结果一致, 此次短时强降水过程中雨滴浓度大, 且存在大雨滴。

7 结 论

本文利用双偏振雷达、风廓线雷达、雨滴谱仪等多种新型观测资料, 分析了 2018 年 5 月 7 日闽南沿海暖区特大暴雨的中尺度特征。主要结论如下:

(1) 此次过程属于典型的暖区暴雨, 发生在上下层一致的西南气流环境场中。低空急流和超低空急流是造成此次特大暴雨主要天气系统, 尤其是 925 hPa 超低空急流与假相当位温高能中心, 为此次暴雨提供了强盛的动力、水汽以及层结不稳定条件。高低层风向高度一致导致前后共有 6 个强降水对流系统影响厦门地区, 典型的列车效应造成了闽南沿海的强降水持续。

(2) 风廓线雷达观测显示, 沿海的低空急流与超低空急流在此次特大暴雨过程中存在明显的脉动特征。这种脉动能够导致低空出现明显的辐合区, 提供强降水发生发展的中尺度动力条件。在强降雨发生之前, 925 hPa 的风速存在明显的跃增; 而当雨强增强时, 低层风速明显减弱, 风向也有略微改变。

(3) 双雷达风场反演结果表明, 强降水区域的低层存在明显的风向和风速辐合, 并与强回波的移动保持同步。低层辐合可能是由于强降水对急流的减弱作用造成的, 这种减弱作用能够使低层辐合维持, 且在回波的上游造成明显辐合, 从而进一步加强列车效应。沿着强降水对流回波传播方向, 强回波的前部为上升气流, 后部为下沉气流, 使得强降水对流回波不断向前发展、移动。强降水对流回波两侧气流汇合, 且以东南侧汇流为主, 在东南侧形成明显次级环流, 有利于强回波和强降水维持。

(4) 双偏振参量和雨滴谱分析表明, 此次降水具有低质心暖云降水的微物理特征, 强降水阶段的雨滴粒径分布广, 高浓度的小雨滴和大雨滴的并存造成了局地强降水。

参考文献

- 丁一汇, 2005. 高等天气学: 第 2 版 [M]. 北京: 气象出版社: 585. Ding Y H, 2005. Advanced Synoptic Meteorology [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press: 585 (in Chinese).
- 冯晋勤, 童以长, 罗小金, 2008. 一次中-β 尺度局地大暴雨对流系统的雷达回波特征 [J]. 气象, 34(10): 50-59. Feng J Q, Tong Y C,

- Luo X J, 2008. CINRAD radar echo features of a meso- β scale local heavy rainfall convective system[J]. Meteor Mon, 34(10): 50-59(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).
- 傅佩玲, 胡东明, 张羽, 等, 2018. 2017年5月7日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析[J]. 气象, 44(4): 500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 500-510(in Chinese).
- 韩颂雨, 罗昌荣, 魏鸣, 等, 2017. 三雷达、双雷达反演降雹超级单体风暴三维风场结构特征研究[J]. 气象学报, 75(5): 757-770. Han S Y, Luo C R, Wei M, et al, 2017. Research on three-dimensional wind field structure characteristic of hail supercell storm by dual-and triple-Doppler radar retrieval[J]. Acta Meteor Sin, 75(5): 757-770(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).
- 黄明策, 李江南, 农孟松, 等, 2010. 一次华南西部低涡切变特大暴雨的中尺度特征分析[J]. 气象学报, 68(5): 748-762. Huang M C, Li J N, Nong M S, et al, 2010. An analysis of the mesoscale features of an excessive rainfall triggered by low-vortex shear in the western part of South China[J]. Acta Meteor Sin, 68(5): 748-762(in Chinese).
- 黄士松, 1986. 华南前汛期暴雨[M]. 广州: 广东科技出版社: 94-95. Huang S S, 1986. Rainstorms of the First Rainy Season in South China [M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press: 94-95(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).
- 罗昌荣, 池艳珍, 周海光, 2012. 双雷达反演台风外围强带状回波风场结构特征研究[J]. 大气科学, 36(2): 247-258. Luo C R, Chi Y Z, Zhou H G, 2012. Characteristics of 3-D wind structure of typhoon outer intensive banded echo using dual-Doppler weather radar data[J]. Chin J Atmos Sci, 36(2): 247-258(in Chinese).
- 邱崇践, 余金香, Qin X, 2000. 多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进[J]. 气象学报, 58(2): 244-249. Qiu C J, Yu J X, Qin X, 2000. Use of Doppler-radar data in improving short-term prediction of mesoscale weather[J]. Acta Meteor Sin, 58(2): 244-249(in Chinese).
- 孙继松, 2005. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. 大气科学, 29(3): 445-452. Sun J S, 2005. A study of the basic features and mechanism of boundary layer jet in Beijing Area[J]. Chin J Atmos Sci, 29(3): 445-452(in Chinese).
- 孙继松, 2017. 短时强降水和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害, 36(6): 498-506. Sun J S, 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall[J]. Torr Rain Dis, 36(6): 498-506(in Chinese).
- 孙继松, 何娜, 郭锐, 等, 2013. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制[J]. 大气科学, 37(1): 137-148. Sun J S, He N, Guo R, et al, 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms[J]. Chin J Atmos Sci, 37(1): 137-148(in Chinese).
- 孙淑清, 翟国庆, 1980. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用[J]. 大气科学, 4(4): 327-337. Sun S Q, Zhai G Q, 1980. On the instability of the low level jet and its trigger function for the occurrence of heavy rain-storms[J]. Chin J Atmos Sci, 4(4): 327-337(in Chinese).
- 陶诗言, 等, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 225. Tao S Y, et al, 1980. Rainstorms in China[M]. Beijing: Science Press: 225(in Chinese).
- 王叶红, 赵玉春, 罗昌荣, 等, 2019. 双雷达风场反演拼图在登陆台风“莫兰蒂”(1614)强降水精细预报中的同化应用试验[J]. 气象学报, 77(4): 617-644. Wang Y H, Zhao Y C, Luo C R, et al, 2019. Assimilation experiments for the application of dual-radar retrieval wind mosaics in detailed heavy precipitation forecast produced by landfall typhoon “Meranti”(1614)[J]. Acta Meteor Sin, 77(4): 617-644(in Chinese).
- 王叶红, 赵玉春, 张兵, 等, 2008. “7·8”特大暴雨过程雷达风场资料的三维变分同化研究[J]. 气象科学, 28(3): 301-307. Wang Y H, Zhao Y C, Zhang B, et al, 2008. On the three-dimensional variational assimilation of Doppler-radar retrieved wind field related to catastrophic torrential rain on July 8, 2003[J]. Sci Meteor Sin, 28(3): 301-307(in Chinese).
- 吴恒强, 1983. 海南岛地形造成的绕流效应对粤桂南部降雨的影响[J]. 大气科学, 7(3): 335-340. Wu H Q, 1983. Diffractive flow effect caused by Hainandao Island on precipitation in nearby regions[J]. Sci Atmos Sin, 7(3): 335-340(in Chinese).
- 吴启树, 郑颖青, 沈新勇, 等, 2010. 福建一次秋季大范围暴雨成因分析[J]. 气象科学, 30(1): 126-131. Wu Q S, Zheng Y Q, Shen X Y, et al, 2010. Analysis of a wide range autumn rainstorm in Fujian Province[J]. Sci Meteor Sin, 30(1): 126-131(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).
- 薛纪善, 1999. 1994年华南夏季特大暴雨研究[M]. 北京: 气象出版社: 185. Xue J S, 1999. Study on Extremely Heavy Rainfall in South China in the Summer of 1994[M]. Beijing: China Meteorological Press: 185(in Chinese).
- 张杰, 田密, 朱克云, 等, 2010. 双偏振雷达基本产品和回波分析[J].

- 高原山地气象研究, 30(2):36-41. Zhang J, Tian M, Zhu K Y, et al, 2010. Analysis on the products and echo of dual-linear polarization Doppler weather radar[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 30(2):36-41(in Chinese).
- 张京英, 漆梁波, 王庆华, 2005. 用雷达风廓线产品分析一次暴雨与高低空急流的关系[J]. 气象, 31(12):41-45. Zhang J Y, Qi L B, Wang Q H, 2005. Analysis of relationship between heavy rain and jetstream with radar VWP product[J]. Meteor Mon, 31(12):41-45(in Chinese).
- 张沛源, 陈荣林, 1995. 多普勒速度图上的暴雨判据研究[J]. 应用气象学报, 6(3):373-378. Zhang P Y, Chen R L, 1995. A study of heavy rain signature recognition by radar velocity images[J]. Quart J Appl Meteor, 6(3):373-378(in Chinese).
- 张庆红, 刘启汉, 王洪庆, 等, 2000. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟[J]. 科学通报, 45(18):1988-1992. Zhang Q H, Lau K H, Wang H Q, et al, 2000. Numerical simulation on mesoscale convective system along Meiyu front in southern China[J]. Chin Sci Bull, 45(18):1988-1992.
- 张伟, 罗昌荣, 郑辉, 2017. 双雷达反演闽南地区一次暴雨过程三维风场结构特征研究[J]. 气象与环境科学, 40(4):76-82. Zhang W, Luo C R, Zheng H, 2017. Characteristics analysis of 3-dimensional wind structure of a heavy rainfall event in southern Fujian using dual-radar retrieval[J]. Meteor Environ Sci, 40(4):76-82(in Chinese).
- 张羽, 胡东明, 李怀宇, 2017. 广州双偏振天气雷达在短时强降水中的初步应用[J]. 广东气象, 39(2):26-29. Zhang Y, Hu D M, Li H Y, 2017. Preliminary application of a dual polarization weather radar in Guangzhou during a short-range intensive rain[J]. Guangdong Meteor, 39(2):26-29(in Chinese).
- 赵玉春, 王叶红, 2009. 近30年华南前汛期暴雨研究概述[J]. 暴雨灾害, 28(3):193-202, 228. Zhao Y C, Wang Y H, 2009. A review of studies on torrential rain during pre-summer flood season in South China since the 1980's[J]. Torr Rain Dis, 28(3):193-202, 228(in Chinese).
- 赵玉春, 王叶红, 2010. 高原涡诱生西南涡特大暴雨成因的个例研究[J]. 高原气象, 29(4):819-831. Zhao Y C, Wang Y H, 2010. A case study on plateau vortex inducing southwest vortex and producing extremely heavy rain[J]. Plateau Meteor, 29(4):819-831(in Chinese).
- 郑媛媛, 张小玲, 朱红芳, 等, 2009. 2007年7月8日特大暴雨过程的中尺度特征[J]. 气象, 35(2):3-7. Zheng Y Y, Zhang X L, Zhu H F, et al, 2009. Mesoscale characteristic analysis of the excessive storm on July 8, 2007[J]. Meteor Mon, 35(2):3-7(in Chinese).
- 周芯玉, 廖菲, 孙广凤, 2015. 广州两次暴雨期间风廓线雷达观测的低空风场特征[J]. 高原气象, 34(2):526-533. Zhou X Y, Liao F, Sun G F, 2015. Study on the relationship between mesoscale wind field changes and rainstorm using wind profiler data[J]. Plateau Meteor, 34(2):526-533(in Chinese).
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等, 2003. '98华南暴雨科学试验研究[M]. 北京:气象出版社:370. Zhou X J, Xue J S, Tao Z Y, et al, 2003. The Scientific Experimental Study of Heavy Rainfalls over South China in 1998[M]. Beijing:China Meteorological Press:370(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2000. 天气学原理和方法:第3版[M]. 北京:气象出版社:649. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2000. Principle and Method of Synoptic Meteorology[M]. 3rd ed. Beijing:China Meteorological Press:649(in Chinese).
- Akiyama T, 1984. A medium-scale cloud cluster in a Baiu front. Part I: evolution process and fine structure[J]. J Meteor Soc Jpn, 62(3):485-504.
- Chen G T J, 1992. Mesoscale features observed in the Taiwan Meiyu season[J]. J Meteor Soc Jpn, 70(1B):497-516.
- 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.
- Hubbert J C, Wilson J W, Weckwerth T M, et al, 2018. S-Pol's polarimetric data reveal detailed storm features (and insect behavior)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 99(10):2045-2060.
- Kuo Y H, Chen G T J, 1990. The Taiwan area mesoscale experiment (TAMEX): an overview[J]. Bull Amer Meteor Soc, 71(4):488-503.
- Zhang D L, 1992. The formation of a cooling-induced mesovortex in the trailing stratiform region of a midlatitude squall line[J]. Mon Wea Rev, 120(12):2763-2785.
- Zhong S Y, Fast J D, Bian X D, et al, 1996. A case study of the great plains low-level jet using wind profiler network data and a high resolution mesoscale model[J]. Mon Wea Rev, 124(5):785-806.