崔梦雪,张晗昀,陈德花,等.2024. 2023年4月18日厦门暖区特大暴雨的中尺度特征及低空急流的作用[J].暴雨灾害,43(5):521-531.
CUI Mengxue, ZHANG Hanyun, CHEN Dehua, et al. 2024. Mesoscale characteristics and role of low-level jets in a warm-sector severe torrential rain event in Xiamen on 18 April 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):521-531 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-107

2023年4月18日厦门暖区特大暴雨中尺度特征及低空急流的作用

崔梦雪[1,2],张晗昀[1,3],陈德花[1,2],黄昕[1,2],苏志重[1,2],胡雅君[1,4]
(1. 厦门市海峡气象开放实验室,厦门 361012;2. 厦门市气象台,厦门 361012;
3. 厦门市海沧区气象局,厦门 361026;4. 厦门市翔安区气象局,厦门 361103)

摘　要:2023年4月18日厦门遭遇入汛以来最强暖区暴雨过程,过程具有降水强度大、局地性强等特点。利用常规观测资料、地面自动站观测资料以及双偏振雷达、风廓线雷达、雨滴谱仪等新型探测资料对此次暴雨的天气背景、中尺度对流系统发展演变及低空急流在其中的作用进行了分析,结果表明:(1) 此次暖区暴雨主要影响系统为偏南风天气尺度低空急流和东南风边界层急流,其强烈发展增强了局地的水汽及不稳定条件;(2) 低质心的线状中尺度对流系统(MCS)嵌有类超级单体风暴在低空急流左侧辐合区内形成发展,MCS在福建南部沿海长时间维持,形成"列车效应"导致厦门极端强降水的发生;(3) 类超级单体风暴强回波区差分反射率因子(ZDR)、差分传播相移(KDP)与相关系数(CC)均较大,质心低于经典超级单体风暴。此外,强降水云具有高浓度的小雨滴与大雨滴并存的暖区暴雨云微物理特征。(4) 低空急流迅速增强和向下扩展与强降水密切相关,双低空急流耦合产生的上升运动是此次暖区暴雨主要的天气尺度触发机制。

关键词:暖区暴雨;边界层急流;低空急流;中尺度特征
中图法分类号:P458　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.12406/byzh.2023-107

Mesoscale characteristics and role of low-level jets in a warm-sector severe torrential rain event in Xiamen on 18 April 2023

CUI Mengxue[1,2], ZHANG Hanyun[1,3], CHEN Dehua[1,2], HUANG Xin[1,2], SU Zhizhong[1,2], HU Yajun[1,4]

(1. *Xiamen Key Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen* 361012; 2. *Xiamen Meteorological Observatory, Xiamen* 361012;
3. *Haicang Meteorological Bureau, Xiamen* 361026; 4. *Xiangan Meteorological Bureau, Xiamen* 361103)

Abstract: An extremely warm-sector severe torrential rain event occurred in Xiamen on 18 April, 2023, characterized by high intensity, strong locality and hard to predict. The synoptic background, mesoscale characteristics and the role of low-level jets were analyzed using multi-source detection data such as conventional observation data, automatic meteorological stations data, dual polarization Doppler radar, wind-profile radar and disdrometer. The results are as follows. (1) The southerly synoptic-system-related low-level jet (SLLJ) and southeasterly boundary layer jet (BLJ) are the main influence systems, whose significant development improved local water vapor and instability conditions. (2) The linear mesoscale convective system (MCS) embedded with quasi-supercell storm, formed and developed in the left side of the low-level jet. It has been maintained for a long time along the southern coast of Fujian, exhibiting low echo centroids and high precipitation efficiency. This combination causes severe torrential rain due to the "train effect". (3) The ZDR, KDP, CC are all large in the strong echo area of the quasi-supercell storm, with a lower centroid height compared to the classical supercell storm. High concentrations of small and large raindrops are the main cloud microphysical characteristics of warm-sector torrential rain. (4) The rapid intensification and downward expansion of the low-level jet is closely related to heavy rain, and the ascending motion produced by the coupling of the double low-level

收稿日期: 2023-05-23;**定稿日期**:2023-06-25
资助项目: 福建省自然科学基金项目(2022J011081);福建省气象局新录用研究生基层专项(2021G02);厦门市社会发展领域指导性项目(3502Z20214ZD4008,3502Z20214ZD4011,3502Z20214ZD4010)
第一作者: 崔梦雪,主要从事天气动力学研究。E-mail: mengxuecui@126.com
通信作者: 陈德花,主要从事天气预报业务与技术研究。E-mail: 497075676@qq.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

jets was the main synoptic-scale triggering mechanism for this warm-sector heavy severe torrential rain.

Key words: warm sector torrential rain; boundary layer jet; low-level jet; mesoscale characteristics

引 言

2023年4月18日厦门突发暖区极端特大暴雨(以下简称“4.18”厦门暖区暴雨),最大24 h累积降水量达到313.2 mm,厦门同安国家气象站日降水量突破该站4月历史极值,强降水造成厦门市城区大面积内涝、多数航班延误,引发社会极大关注。这次过程具有降水强度大、局地性强、预报难度大等特点。中国气象局全球同化预报模式(CMA-GFS)、欧洲中心全球数值预报模式(ECMWF)、中国气象局广东快速更新同化数值预报模式(CMA-GD)以及中国气象局上海数值预报模式(CMA-SH)对此次过程均出现明显漏报,最大24 h降水仅预报局部10~20 mm,而中国气象局中尺度天气数值预报模式(CMA-MESO)在17日08时起报时刻虽然预报了17日夜间到18日白天暴雨量级,但范围和强度仍明显不足,短期预报中预报员仅报出了雷阵雨和局部大雨。当对流触发以后,厦门市气象台根据总结的暖区暴雨预报模型,果断提前发布了暴雨红色预警信号,提前量达到108 min,及时有效的短临预警有效弥补了短期预报的不足。暖区特大暴雨形成机制复杂、预报难度大、致灾性强,给灾害防御带来极大挑战,因此深入研究暖区暴雨特征及形成机制对于城市防灾减灾十分必要。

暖区暴雨一直是大气科学领域中的研究热点和预报业务难点之一,它通常是指产生于地面锋线南侧暖区中的暴雨,大多发生在地面锋面系统前端200~300 km或更远位置(黄士松等,1986)。典型暖区暴雨过程往往出现在暖湿气团中,大气环境具有显著的对流不稳定性,但天气尺度斜压强迫较弱,中尺度对流系统(MCS)触发和发展机制复杂,降水过程受地形、海陆分布、辐射等复杂物理过程影响,主客观预报均缺乏较好的技巧(王丛梅和俞小鼎,2015;谌芸等,2018)。暖区暴雨突发性强、短时雨强大,易引发洪涝灾害,并给社会经济和人民财产安全带来巨大损失。自20世纪70年代以来,我国针对暖区暴雨开展了一系列研究及观测试验(薛纪善,1994;周秀骥等,2003;赵玉春和王叶红,2009;王坚红等,2017;周涛等,2022),并取得了大量有价值的成果。何立富等(2016)将暖区暴雨归纳为三类类型,即边界层辐合线型、偏南风风速辐合型、强西南急流型。众多研究表明,暖区暴雨具有明显的中尺度特征,其触发与中尺度过程及下垫面特征有关,如边界层急流(叶朗明和苗峻峰,2014;张萍萍等,2019)、地形抬升(田付友等,2018)、重力波(刘蕾等,2012)等。近年来,随着气象业务现代化进程加快,较多新型气象探测设备相继应用到天气监测预警业务与服务之中,关于低空急流对暖区暴雨触发与发展的影响有了更深入的认识,改变了过去因受限于高时空分辨率资料缺乏而对低空急流及其与暖区暴雨关系认识的不足。刘淑媛等(2003)利用风廓线雷达资料分析了低空急流与暴雨的关系,指出强降水的发生对应西南急流脉动加强及向地面扩展,低空急流中小尺度脉动对强降水的出现有一定指示意义。周芯玉等(2017,2019)分析暴雨期间低层风场表明,低空急流的建立与增强加强了高低层垂直风切变,为暴雨产生提供了有利的动力条件。郑婧等(2020)研究指出,1.5~3 km高度风速在16 $m\cdot s^{-1}$以上低空急流的出现可提前1~3 h预示下风方向的强降水。上述研究成果,一定程度上提升了对于暖区暴雨的认识。

厦门地处台湾海峡南部、福建南部的九龙江入海处,受季风影响前汛期(4~6月)雨日多、雨强大,暴雨频繁,台湾海峡地形“狭管效应”明显,低空急流特征与华南有所不同,统计表明,闽南一带前汛期暖区暴雨有80%以上伴有低空急流出现,其发生发展局地性强,触发机制复杂,数值模式对其预报能力有限,常常使暖区暴雨漏报。因此有必要对暖区暴雨个例开展深入分析,研究其中尺度特征及形成的可能机制,提高暖区暴雨预报能力。基于此,本文利用多种观测资料对导致“4.18”厦门暖区暴雨的中尺度对流系统的发展演变以及低空急流对特大暴雨的作用进行分析,探讨此类暖区暴雨过程环境背景、中尺度特征及可能的触发机制,以期提高对此类局地极端降水事件的认识,为之后类似的暖区暴雨过程的预报和预警提供参考。

1 资料说明

使用资料包括:(1) 福建省72个国家气象站和2 145个区域气象站资料;(2) 厦门S波段双偏振多普勒天气雷达产品,该雷达站位于厦门海沧蔡尖尾山(118.00°E,24.51°N);(3) 厦门翔安风廓线雷达数据;(4) 厦门同安雨滴谱仪观测数据。以上资料来源于国家气象信息中心全国综合气象信息共享平台“天擎”,并由该平台进行了质控;(5) 欧洲中期天气预报中心ERA5再分析资料,垂直方向从1 000 hPa到100 hPa共27层,水平分辨率0.25°×0.25°,时间分辨率1 h。

2 降水实况

“4.18”厦门暖区暴雨过程始于4月18日03:00(北京时，下同)，当日15:00基本结束，降水主要集中在12 h内。从闽南地区各气象观测站17日20:00—18日20:00 24 h累积降水量分布(图1)可见，强降水区集中在以厦门为中心的闽南沿海一带，呈东北-西南带状分布，长约150 km，宽约40 km，具有明显的β中尺度特征。该过程降水影响范围广、强度强，厦门全市面雨量达124.1 mm，120个区域气象站(占全市气象站的54.1%)降水达到大暴雨量级；最大24 h累积降水量为313.2 mm，出现在厦门同安区溪林村站，几乎接近厦门区域气象站日降水量极值(其历史最大值为315.7 mm，出现在2000年6月18日)，约为厦门市年均降水量的1/4；同安国家气象站日降水量达到190.3 mm，突破该站4月历年日降水量极值。

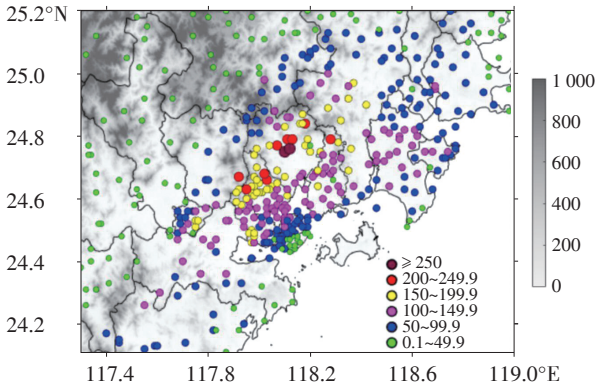


图1 2023年4月17日20:00—18日20:00闽南地区气象站24 h累计降水量(彩色圆点，单位：mm)与地形(填色，单位：m)的空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of accumulated rainfall (colored dots, unit: mm) and topographical altitude (shaded, unit: m) in southern Fujian Province from 20:00 BT 17 April to 20:00 BT 18 April 2023

图2为4月18日03:00—15:00位于暴雨中心的同安溪林村站、海沧古楼农场站(过程小时雨量最大站)逐5 min降水与逐小时降水量变化。从图2a可见，溪林村站降水呈波动变化，主要表现为3个峰值，强降水集中在18日07:00、11:00、12:00前后，这表明降水过程受到多个对流系统的持续影响；该站最大小时雨量为58.8 mm，≥30 mm·h^{-1}的强降水持续了5 h，因降水强度大、强降水持续时间长，造成该站极端特大暴雨。同时，古楼农场站降水变化呈双峰型(图2b)，强降水主要集中在18日07:00—08:00、12:00—13:00，第1次降水峰值强度明显强于第2次，尤其是07:00—07:30最大5 min雨量高达15.5 mm，30 min雨量69.8 mm，小时雨量82.5 mm，降水效率高、雨强大。此次降水过程具有突发性局地性强、降水强度大、小时雨强强等特点。

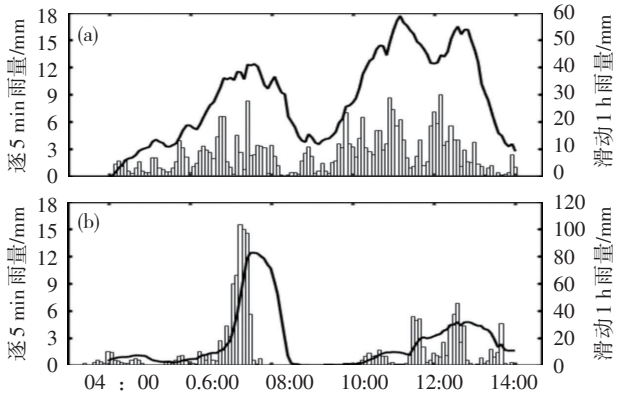


图2 2023年4月18日03:00—15:00溪林村站(a)、海沧古楼农场站(b)逐5 min雨量(柱状)与滑动1 h累计雨量(曲线)变化图

Fig. 2 The variation of 5-min rainfall (bar) and hourly moving accumulated rainfall (line) at (a) Xilincun station and (b) Haicang Gulounongchang station from 03:00 BT to15:00 BT on 18 April 2023

3 环流形势

3.1 环流背景与影响系统

“4.18”厦门暖区暴雨前的17日20:00 500 hPa(图略)欧亚中高纬地区环流呈现两槽一脊型，有一深厚高空槽由贝加尔湖以东伸向华北，西南地区东部有低槽东移，副热带高压(以下简称副高)呈带状，588 dagpm线控制华南沿海，副高西伸脊点到达80°E，其脊线位于16°N附近，厦门处于副高北侧。850 hPa(图略)切变线位于江汉、江淮一带，厦门处于切变线南侧暖区之中，距该切变线系统300 km以上。18日08:00 500 hPa上(图3a)副高稳定少动，厦门上空位势高度达到587 dagpm。随着500 hPa中纬度低槽发展东移，槽前偏南风加强，850 hPa闽南沿海南风加强形成一支偏南风低空急流，急流核位于厦门上空达到16 m·s^{-1}，在低空急流的作用下，来自南海的暖湿气流持续向闽南沿海输送，水汽通量辐合达到-10^{-4} g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}，假相当位温达到340 K以上，急流区与假相当位温舌区相配合，闽南地区增温增湿明显(图3b)。另外，925 hPa闽南沿海东南风边界层急流达到17 m·s^{-1}(图3c)，在沿海摩擦辐合和地形抬升作用下利于形成强降水，闽南沿海比湿高达16 g·kg^{-1}，异常强的东南风边界层急流持续向闽南沿海输送水汽和不稳定能量，是引发此次特大暴雨发生发展的主要影响系统。与此对应，100 hPa南亚高压由中南半岛移上青藏高原，其脊线达到25°N，较其4月气候平均态位置异常偏北，此时闽南沿海存在明显辐散(图3d)，形成有利于产生暴雨的高空环流形势。地面图上(图略)，云南贵州一带维持一低压系统，低压倒槽控制我国南方大部，福建沿海偏南风有所加强。上述分析表明，强烈发展的偏南风低空急流和东南风边界层急流是此次暖区暴雨的关键影响系统，其合理配置及相互作用为这

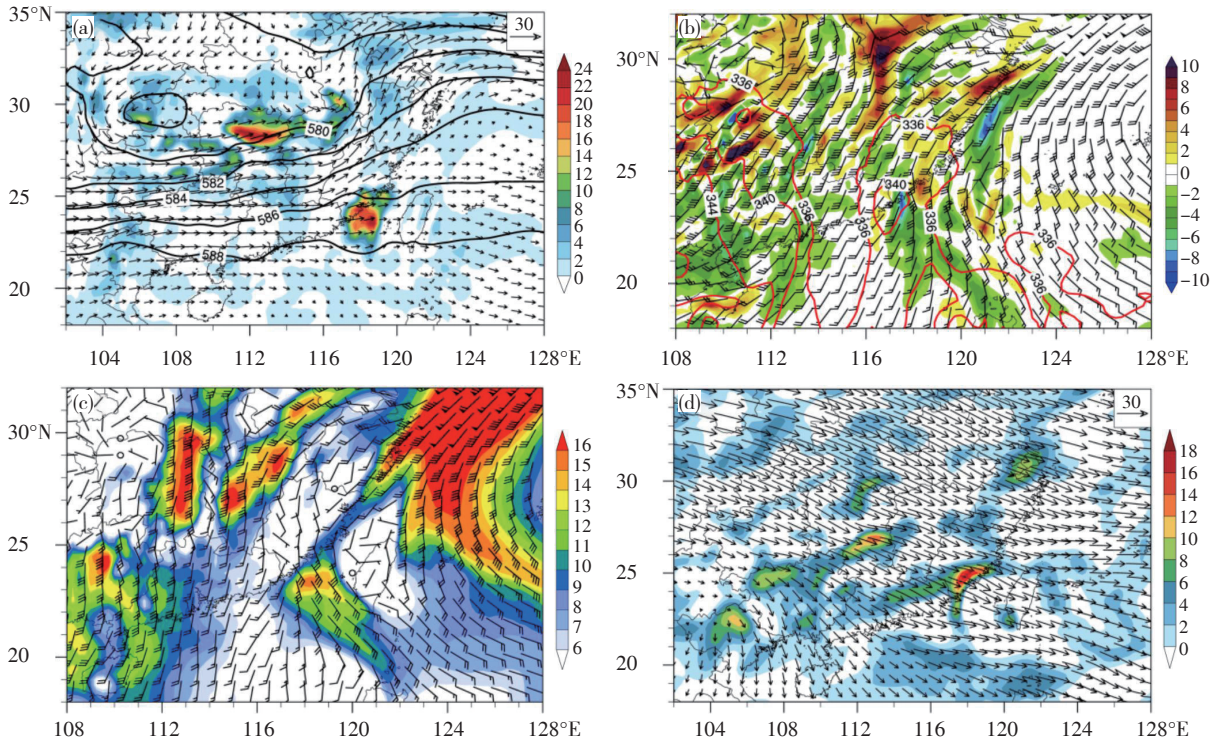


图3 2023年4月18日08:00 500 hPa (a)风场(箭头)、高度场(等值线,单位: dagpm)与垂直速度(填色,单位: cm·s^{-1});850 hPa (b)风场(风向杆)、水汽通量散度(填色,单位: 10^{-5} g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1})与假相当位温(红线,单位: K);925 hPa (c)风场(风向杆)与比湿(填色,单位: g·kg^{-1});100 hPa (d)风场(箭头)与散度场(填色,单位: 10^{-5}s^{-1})

Fig. 3 The spatial distribution of (a) the 500 hPa wind (arrow), geopotential height (contours, unit: dagpm) and vertical velocity (shaded, unit:cm·s^{-1}), (b) 850 hPa wind (barb), vapor flux divergence (shaded, unit: 10^{-5}g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}) and pseudo-equivalent potential temperature (red contours, unit:K), (c) 925 hPa wind (barb) and specific humidity (shaded, unit: g·kg^{-1}) ,(d) 100 hPa wind (arrow) and divergence (shaded, unit:10^{-5}s^{-1}) at 08:00 BT 18 April 2023

次暖区暴雨的发生发展提供了有利的背景条件。

3.2 探空分析

4月17日20:00 (强降水开始前7 h)厦门站常规探空图(图4a)显示,探空曲线整体呈现上干下湿结构,低层为西南风,中层为偏西风,湿层浅薄,925 hPa、850 hPa比湿分别为11 g·kg^{-1}、9.8 g·kg^{-1},明显低于华南一带4月产生暴雨的比湿13.8 g·kg^{-1}(925 hPa)、12.7 g·kg^{-1}(850 hPa)(包慧濛等,2021)。从对流参数看,此时对流有效位能(CAPE)为299 J·kg^{-1},*K*指数为17.5 ℃,0—6 km垂直风切变为12.5 m·s^{-1},深层垂直风切变中等偏弱,自由对流高度接近500 hPa,强对流发生的潜势条件并不充分。利用ERA5再分析资料得到18日02:00探空(图4b),可见低层偏南风迅速加强,850 hPa以下为饱和湿层,温度直减率接近湿绝热递减率,厦门925 hPa、850 hPa比湿分别达到15.2 g·kg^{-1}、13.2 g·kg^{-1},水汽条件较17日20:00极大改善。随着夜间低空急流和边界层急流不断输送水汽及不稳定能量,低层暖湿平流有利于层结不稳定的增强,CAPE值增大到475 J·kg^{-1}并呈狭长型,*K*指数达35 ℃,对流条件明显改善,抬升凝结高度和自由对流高度降低,暖云层厚度近5 km,0—6 km垂直风切变降低到8 m·s^{-1},均有利于产生高效率降水(俞小鼎,2013)。同时0—1 km垂直风切变增强到12 m·s^{-1},也有利于对流的组织化发展及长时间维持。因此,低空急流和边界层急流的发展使得水汽条件与不稳定条件极大改善,有利于厦门地区强降水发生发展。

4 中尺度特征分析

4.1 中尺度对流系统(MCS)的演变特征

从卫星云图演变来看(图略),引发"4.18"厦门暖区暴雨的MCS表现为线状MCS特征,宽30~50 km,长120~140 km。根据MCS对"4.18"厦门暖区暴雨发生发展过程的不同影响,其演变可分为三个阶段: 一是MCS组织形成阶段(17日22:00—18日04:00);二是MCS发展阶段(18日04:00—09:00),MCS中存在多单体合并形成类超级单体风暴,产生局地性强降水;三是MCS成熟阶段(18日09:00—13:00),其持续影响厦门造成大范围强降水。

(1) MCS组织阶段。从17日22:00开始,福建南部沿海不断有零散的对流单体生成并向北移动,18日02:00以后雷达回波在闽南沿海一带聚合合并,逐渐组织化为块状(γ尺度),并自南向北开始影响厦门,回波强度在40~50 dBz,回波质心高度在2~4 km之间(图略),对

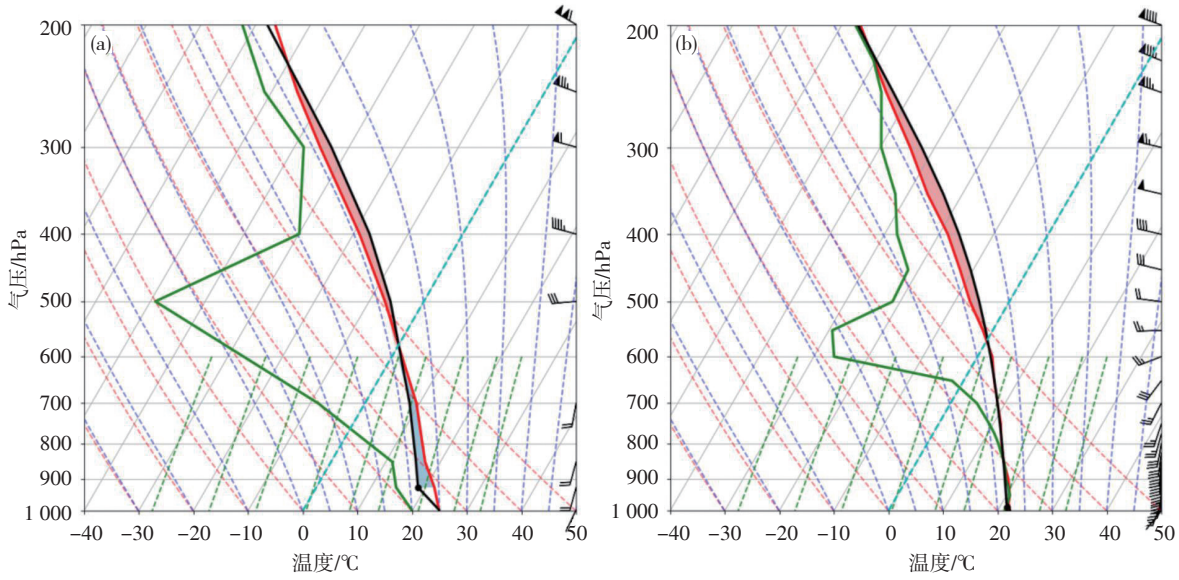


图4 2023年4月17日20:00厦门探空图(a)与4月18日02:00厦门ERA5再分析探空图(b)

Fig. 4 Sounding chart at Xiamen station at (a) 20:00 BT 17 April and (b) 02:00 BT 18 April 2023 but from ERA5

应此时地面降水效率不高，小时雨量小于10 mm。

(2) MCS发展阶段。分析4月18日不同时刻厦门海沧S波段双偏振雷达逐小时1.5°仰角基本反射率因子(图5a—d)可知，此阶段MCS主要分为东西两段，西段主要为孤立的对流单体不断生成，并排列成线状向东北方向移动，东段为长约80 km、宽约30 km的带状回波，结构密实，MCS反射率因子强度在50～60 dBz，质心高度较低，50 dBz以上的强回波主要集中在2～6 km高度(图略)，以热带海洋型暖云对流降水为主，其自西南向东北方向持续影响厦门，形成列车效应。06:52 (图5b)，多个单体经过九龙江入海口以后合并加强，反射率因子达到60 dBz以上，并存在后向传播。07:09 (图5c)，回波反射率因子增加到64.5 dBz，回波结构密实，造成海沧区小时雨量达到82.5 mm。08:00 (图5d)开始该对流单体移入厦门内海后进一步发展，出现勾状回波、有界弱回波区等类似超级单体回波特征，最强反射率因子达到67 dBz，速度图最低三个仰角(0.5°、1.5°、2.4°)上出现水平尺度为3～4 km的速度对，底高0.6 km，顶高1.2 km，垂直涡度大致为$4.9\times10^{-3}\ s^{-1}$，旋转速度9.8 $m\cdot s^{-1}$，属于弱切变，达不到中气旋标准(俞小鼎，2006)。类超级单体风暴沿厦金海域东移影响厦门沿海地区，造成陆上多站小时雨量超过50 mm。

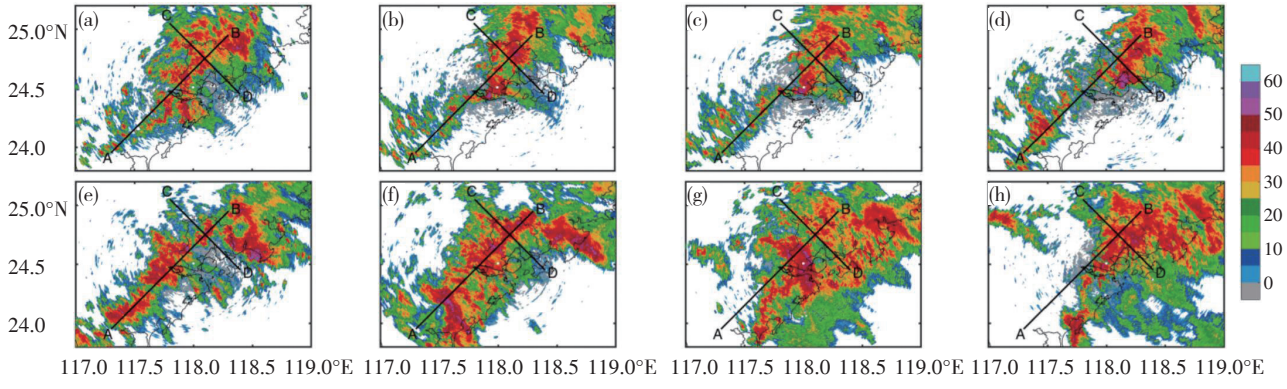


图5 2023年4月18日05:32 (a)、06:52 (b)、07:09 (c)、08:00 (d)、09:31 (e)、10:29 (f)、11:31 (g)、12:29 (h)厦门海沧S波段双偏振雷达1.5°仰角基本反射率因子(单位：dBz)

(图中直线AB、CD为图6剖面位置，AB、CD交点位置为溪林村站)

Fig. 5 Evolution of 1.5° elevation basic reflectivity factor of Xiamen Haicang S band dual polarization radar at (a) 05:32 BT, (b) 06:52 BT, (c) 07:09 BT, (d) 08:00 BT, (e) 09:31 BT, (f)10:29 BT, (g)11:31 BT and (h)12:29 BT 18 April 2023 (The straight line AB and CD in the figure represents the position of the cross-section in Fig. 6, the intersection of straight lines AB and CD is located at Xilincun station)

(3) MCS成熟阶段(图5e—h)。MCS结构更加密实，范围继续扩大，形成长约120～140 km、宽30～50 km的带状MCS，该系统持续维持在距海岸线20 km左右的位置，其走向与海岸线平行，且其形态基本一致，并持续向东北方向移动，激发多个对流单体持续影响厦门，产生大范围强降水。此阶段该MCS系统反射率因

子在45～55 dBz之间，回波顶高在6～10 km，50 dBz以上强回波主要集中在2～6 km高度(图略)，表现低质心的热带海洋型降水回波。暖云降水效率高、强降水持续时间长，共同造成了厦门极端特大暴雨。

“列车效应”是对流系统反复生成并经过同一地区，造成降水时间长、累计雨量大的天气现象(高留喜等，2011)。考虑到“4.18”厦门暖区暴雨过程伴有明显的“列车效应”，因此沿不断有回波新生并影响福建沿海一带(图5直线AB)作雷达组合反射率因子时间演变图(图6a)。从中看出，18日03时以后不断有45 dBz以上强回波持续影响闽南一带，MCS系统形态与海岸线近乎平行，并沿海岸线移动，造成降水持续时间长、累计雨量大，形成明显的“列车效应”。另外，过溪林村并垂直海岸线沿图5中直线CD的雷达组合反射率因子时间演变图(图6b)显示，共有8个中尺度对流单体影响厦门，每个持续约1～2 h。以日降水量最大的溪林村站为例，强回波主要影响时间在04:00、06:00—07:00、07:30—09:00、10:00—11:00以及12:00—13:30。其中04:00前后回波产生的5 min雨量在2～3 mm，此时降水效率相对不高，06:00—07:00、07:30—9:00强回波引起的5 min雨量达到8 mm，此时出现厦门降水的第一次峰值，以局地强降水为主，而10:00—11:00以及12:00—13:30阶段，强回波引起的5 min雨量最大达到9 mm，降水效率进一步加强，强回波持续时间长。14:00以后，随着MCS逐渐减弱消散，厦门强降水基本结束。

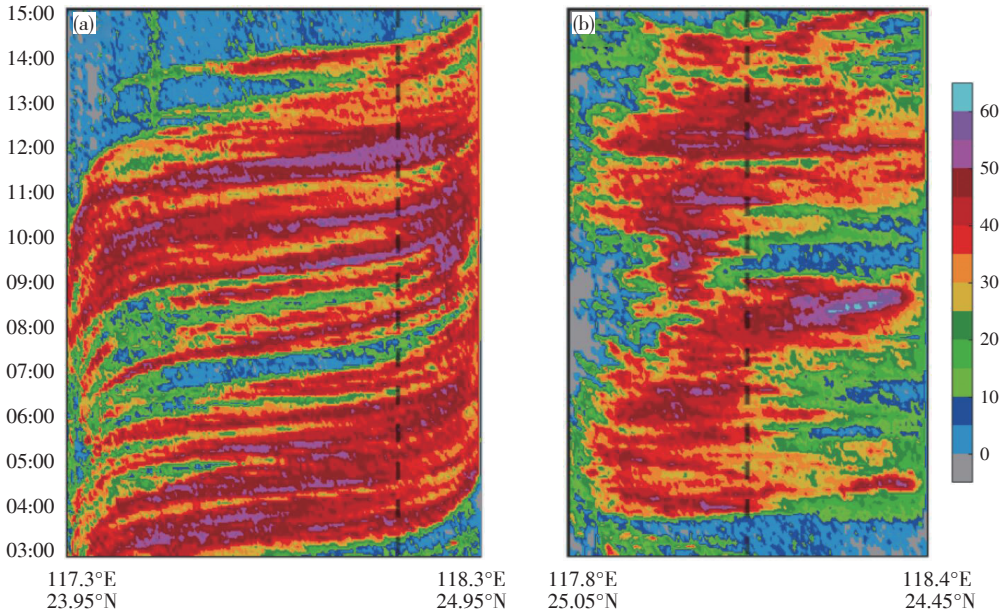


图6 2023年4月18日03:00—15:00沿图5中直线AB (a)和CD (b)的组合反射率因子(单位：dBz)时间演变(虚线代表溪林村站位置)

Fig. 6 Composite reflectivity (unit: dBz) Hovmoller diagram along (a) line AB and (b) line CD in Fig. 5 from 03:00 BT to 15:00 BT 18 April 2023 (The dashed line represents the latitude and longitude of Xilincun Station)

以上分析表明，引发厦门暖区暴雨的MCS持续时间长，回波质心低、暖云降水效率高，MCS中8个中尺度对流单体在12 h内相继影响厦门，通过“列车效应”导致极端强降水。

4.2 类超级单体风暴的双偏振参量特征

在此次强降水过程中，最大小时雨强主要出现在类超级单体风暴发展东移的过程中，本文对该风暴的双偏振特征进行分析，研究暖区强降水云微物理特征。4月18日08:00，MCS中有类超级单体风暴形成，出现大片反射率因子达到60 dBz以上的强回波。17日20:00厦门探空湿球0 ℃层高度在3.4 km，湿球−20 ℃层高度7.3 km，其垂直积分液态水含量(VIL)达到37 kg·m^{-2}，基于单体的VIL达到50 kg·m^{-2}以上，雷达冰雹指数显示大冰雹概率达到100%。如此强的回波是否就会对应冰雹产生，下文就类超级单体风暴的双偏振参量特征作进一步分析。

选取回波最强时刻分析类超级单体风暴的双偏振参量(图7)表明，类超级单体风暴低层存在一个前侧V型入流缺口(FFN)及反射率因子梯度大值区，回波具有倾斜结构，速度场上低层存在弱的中γ尺度速度对，0.5°仰角上存在4 dB左右的差分反射率(ZDR)弧，其形成与超级单体的粒子分选机制有关(Kumjian and Ryzhkov，2008)，代表较大尺寸的雨滴(Wu et al.，2016)。差分传播相移KDP值达到5 °·km^{-1}左右，相关系数CC值大于0.98，表明此时低层存在数量较多的较大雨滴。

“4.18”厦门暖区暴雨过程恰逢全国新一代天气雷达多观测模式运行试点，厦门多普勒天气雷达及时切

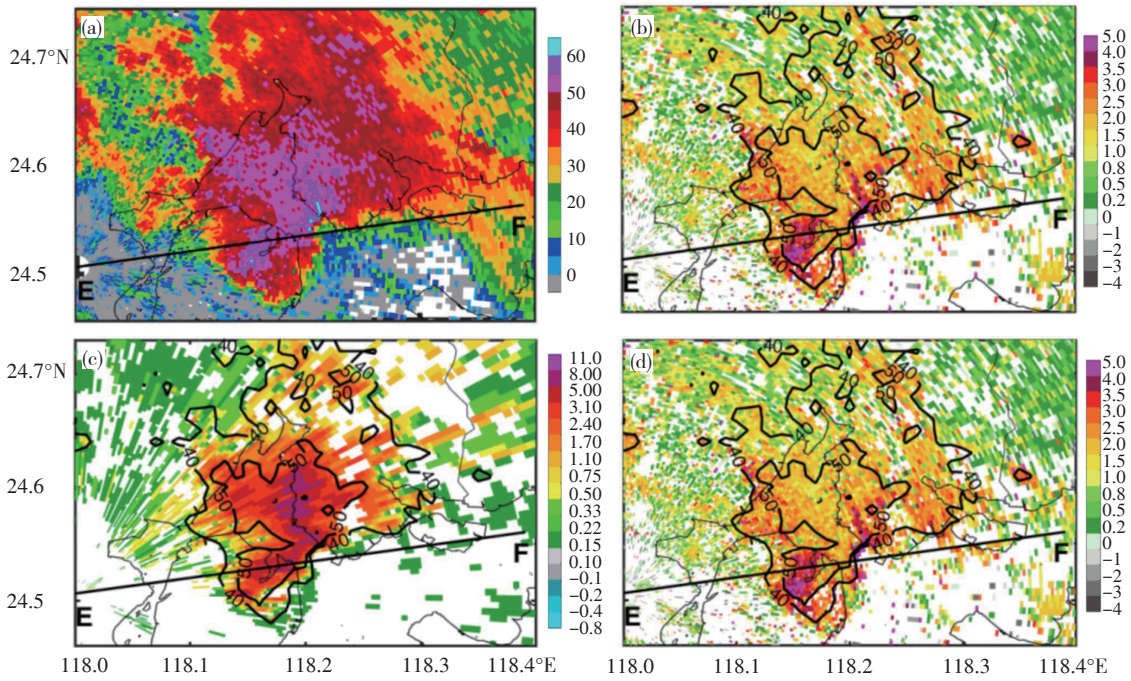


图7 2023年4月18日08:12厦门雷达0.5°仰角水平反射率因子(a，单位：dBz)、差分反射率因子ZDR (b，单位：dB)、差分传播相移KDP (c，单位：°·km^{-1})与相关系数CC (d) (图中直线EF为图8剖面位置)

Fig. 7 (a) The horizontal reflectivity factor (unit: dBz), (b) differential reflectivity (unit: dB), (c) specific differential phase shift (unit: °·km^{-1}) and (d) correlation coefficient (CC) of Radar 0.5° elevation at 08:12 BT on 18 April 2023 (The straight line EF in the figure represents the position of the cross-section in Fig. 8)

换到VCP11模式，从而可以观测到近距离处高空的降水回波。分析沿回波强中心所作的各双偏振参量垂直剖面图(图8)可知，类超级单体反射率因子达到60 dBz以上，回波呈倾斜结构，并有明显的“穹隆”、有界弱回波区BWER及回波悬垂(图8a)，表明有强盛的上升气流，强反射率因子代表的强回波主要集中在4—6 km高度，质心明显低于闽南一带产生冰雹的经典超级单体回波(崔梦雪等，2020)。4—6 km高度上强回波中心处对应ZDR值为4~5 dB，表明强回波区主要以扁平的大雨滴为主，ZDR柱高度达到6 km代表强盛的上升气流(图8b)。强回波中心对应KDP最大值达到8 °·km^{-1}以上(图8c)，CC值大于0.97 (图8d)，代表液态粒子浓度大，表明在强回波区主要是以过冷却大雨滴为主。而风暴低层强反射率因子区对应ZDR明显减小，表明暖云中液态粒子下落过程中雨滴破碎尺度减小，高浓度的小粒子与较大粒子混合产生以短时强降水为主的强对流天气。18日08:00—09:00厦门翔安9个区域自动站小时雨量达到50 mm以上，最大小时雨量为72.8 mm，局地还出现了7~8级阵风。

4.3 强降水的雨滴谱特征特征

从18日04:00—15:00同安站雨滴谱随时间变化(图9)可见，“4.18”厦门暖区暴雨过程以高浓度小粒子为主，1~2 mm的小粒子占绝大多数，1 mm以内小粒子浓度接近10^4 mm^{-1}·m^{-3}，但也存在大粒子，最大粒径达到6 mm。对应同安地面降水实况，在同安产生强降水的07:00—08:00、11:00—12:00均伴随小粒子浓度迅速跃增，而10:00强降水主要表现为大粒子跃增，表明高浓度小粒子与少量大粒子共存有利于产生强降水，这也是华南暖区暴雨常见的雨滴谱特征(胡雅君等，2020)。

对强降水的双偏振特征和雨滴谱特征分析表明，引发强降水的类超级单体风暴具有勾状回波、有界弱回波区及低层γ尺度弱切变，质心低于经典超级单体回波，强回波区ZDR、KDP与CC均较大，表明高层以过冷却大雨滴为主，下降过程中雨滴破碎尺度减小。雨滴谱分析表明高浓度小粒子与少量大粒子共存造成了此次强降水。

5 低空急流特征及其作用分析

5.1 低空急流演变特征

低空急流是形成暖区暴雨的重要天气系统，根据低空急流最大风速轴所在高度可将其分为两类：一类是出现在1 ~ 3 km之间的天气尺度低空急流(SLLJ)，常伴随天气系统出现；另一类是出现在1 km以下的边界层急流(BLJ) (Chen et al., 1994; Du et al., 2012)。两类低空急流的特征、成因及对降水的影响均存在差异(刘鸿波等，2014；智协飞等，2022)。图10给出4月17日20:00—18日14:00翔安站风廓线雷达4 km高度以下水平风随时间演变，从中可见，17日夜间开始边界层

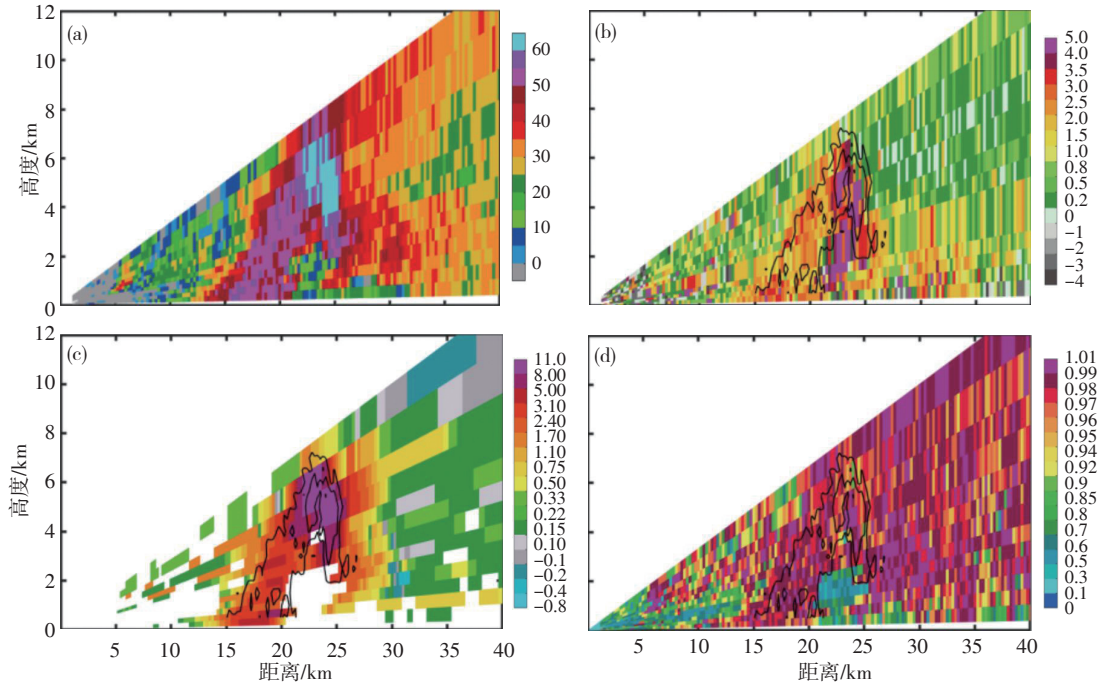


图8 2023年4月18日08:12沿图7直线EF所作的基本反射率因子(a,单位:dBz)、差分反射率因子ZDR (b,单位:dB)、差分传播相移KDP (c,单位:°·km^{-1})与相关系数CC (d)垂直剖面图(黑色等值线为50、60 dBz水平反射率因子)

Fig. 8 Vertical profile of (a) basic reflectivity factor (unit: dBz), (b) Differential reflectivity (unit: dB), (c) Specific differential phase shift (unit: °·km^{-1}) and (d) Correlation coefficient (CC) along line EF in Fig 7 at 08:12 BT 18 April 2023 (Black contour lines represent horizontal reflectivity factor of 50 dBz and 60 dBz)

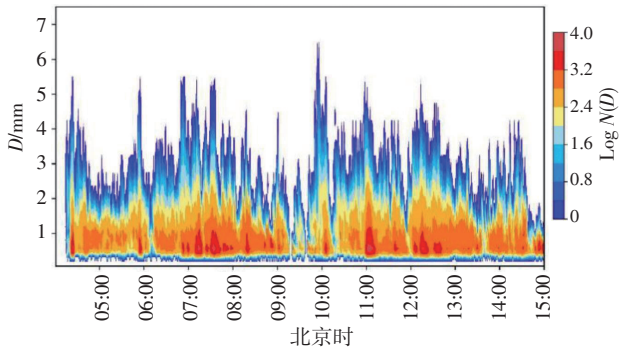


图9 2023年4月18日04:00—15:00同安站雨滴谱仪探测的雨滴数浓度(Log $N(D)$)变化(取以10为底的对数)

Fig. 9 Time series of raindrop concentrations from Tongan disdrometer from 04:00 BT to 15:00 BT 18 April 2023 (Take the logarithm base on 10)

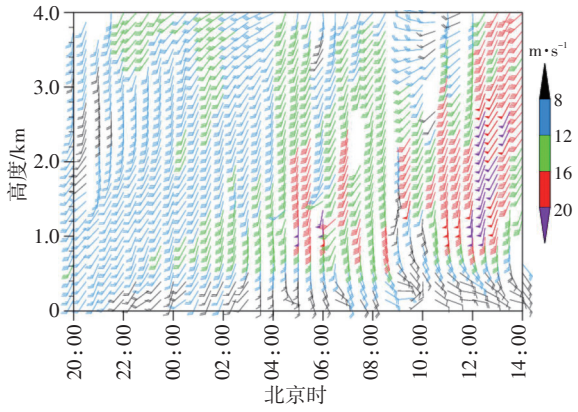


图10 2023年4月17日20:00至18日14:00翔安站风廓线雷达0—4 km高度水平风时序图

Fig. 10 Time series of wind profile at 0–4 km height during 20:00 BT 17 April to 14:00 BT 18 April 2023

偏南风不断加强;23:00左右600 m高度边界层西南风达到12 m·s^{-1},边界层急流不断加强并向高层伸展;到18日03:00低层转为一致的南风,05:00边界层南风急流强度达到20 m·s^{-1},1~2 km高度低空急流随之加强到16 m·s^{-1},急流层非常深厚,此时厦门大部降水在10 mm·h^{-1}以内。随着边界层急流和天气尺度低空急流的加强,07:00—09:00厦门产生大范围50 mm·h^{-1}以上强降水,出现第一个降水峰值,降水开始后急流强度有所减弱。当日10:00以后,天气尺度低空急流和边界层急流再度发展,由南风急流逐渐转为西南风急流,强度超过20 m·s^{-1},近地面转为东南风,垂直风切变进一步加大,而10:00—13:00出现第二个降水峰值。大量研究表明,低空急流与降水存在明显的正反馈作用(孙继松,2005;刘鸿波等,2014;何立富等,2016),低空急流通过输送水汽和不稳定能量从而促进强降水的发生,降水凝结释放潜热又进一步加强低空急流。此次过程中,17日夜间到18日凌晨边界层急流和天气尺度低空急流的加速超前于降水开始,表明低空急流的脉动和加强对强降水的出现具有一定的指示意义(刘淑媛等,2003;郑婧等,2020),而18日白天强降水开始后潜热释放又进一步加强了低空急流和边界层急流。

5.2 低空急流与地面降水的演变关系

低空急流指数是指2 km以下急流中心最大风速v与12 m·s^{-1}风速在该时刻最低位置D的比值，用以定量表征低空急流脉动强度和向下扩展程度(李晨光等，2003)。分析翔安风廓线雷达630 m、1 470 m风速、低空急流指数及厦门全市逐5 min面雨量时间变化(图11)可见，降水开始前(18日00:00—04:00)，两层风速均呈波动增加，低空急流指数缓慢增加。04:00以后，630 m高度风速先减小后增加，1 470 m高度风速迅速增加。07:00前后，630 m高度风速增加到14 m·s^{-1}，1 470 m高度风速达到17 m·s^{-1}，低空急流指数跃增，最大达4.15×10^{-2} s^{-1}。08:00以后，厦门降水明显增强，出现第一次降水峰值，天气尺度低空急流和边界层急流增强较强降水发生提前约1 h。08:00—09:00第一次降水峰值期间两层风速及低空急流指数均先下降后增加，表明急流和降水间的正反馈作用。10:00以后，630 m高度风速明显减小，1 470 m高度风速再次加强，最强达20 m·s^{-1}以上。11:00后，1 470 m高度急流再次跃增，630 m高度风速维持较小，低空急流指数小幅增加。12:00—13:00厦门降水达到最强，出现第二次降水峰值，强降水过后1 470 m高度风速和低空急流指数再度增强，14:00以后降水趋于结束。可见，两次强降水峰值发生前1 h左右低空急流强度、低空急流指数跃增，而降水发生后通过凝结潜热释放进一步加强了急流强度，边界层急流跃增与早晨降水关系密切，而午后降水与天气尺度低空急流加强有关。

5.3 双低空急流的耦合作用

Du和Chen (2019)利用数值模式研究表明，天气尺度低空急流和边界层急流存在耦合作用，在边界层急流出口区存在辐合，天气尺度低空急流入口区存在辐散，低层辐合中层辐散从而形成强烈的上升运动。那么，“4.18”厦门暖区暴雨过程中是否存在双低空急流的耦合作用？分析“4.18”厦门暖区暴雨开始前的两支低空急流可见，此次降水过程中，850 hPa偏南风从17日夜间发展，18日00:00天气尺度低空急流核位于江西一带，急流强度达到16 m·s^{-1}，18日05:00低空急流进一步发展东移，福建南部沿海处于低空急流的入口区的右侧，存在正涡度平流利于产生水平辐散(图12a)。925 hPa边界层急流同样从17日夜间开始逐渐发展，18日05:00在台湾海峡南部边界层急流中心强度达到16 m·s^{-1}，福建沿海处于边界层急流的出口区，在漳州和厦门一带持续有风速的辐合(图12b)。从沿117.8°E所作的经向剖面(图12c)上看到，边界层急流强烈发展

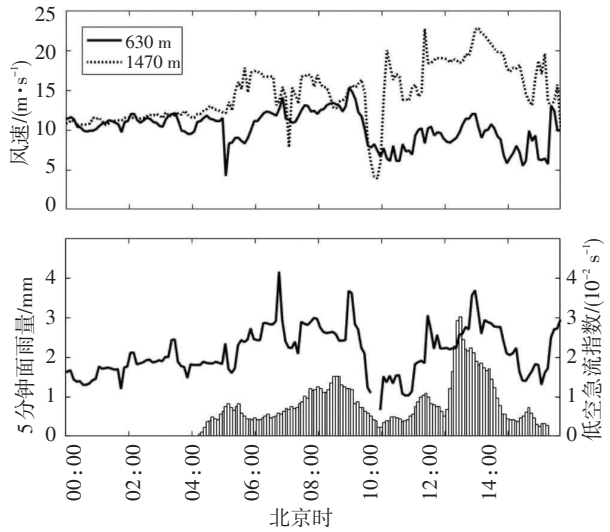


图11 2023年4月18日00:00—15:00翔安站风廓线雷达630 m(实线)、1 470 m (虚线)高度风速随时间演变(a)，以及低空急流指数(实线)、逐5 min厦门全市面雨量时间演变(b)

Fig. 11 Time evolution of (a) wind speed (unit: m·s^{-1}) at heights of 630 m (solid line) and 1 470 m (dashed line) in wind profile radar of Xiang'an, and (b) Low level jet index (solid line, unit: s^{-1}) and areal rainfall every 5 minutes in Xiamen (unit: mm) from 00:00 BT to 15:00 BT 18 April 2023

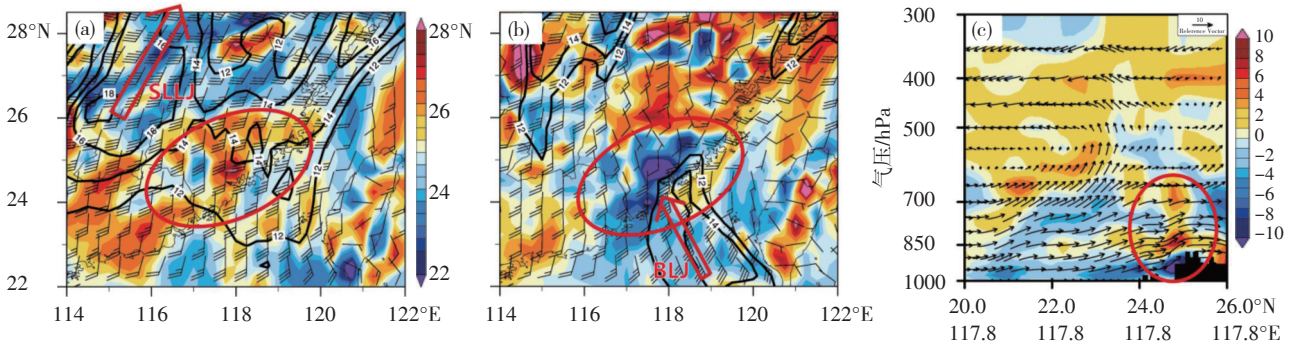


图12 2023年4月18日05:00 850 hPa风场(风向杆)、散度场(填色，单位：10^{-5} s^{-1})和风速(等值线)叠加图(a)，925 hPa风场(风向杆)、散度场(填色，单位：10^{-5}s^{-1})和风速(等值线)叠加图(b)，以及沿117.8°E的风场(箭头)和散度场(填色，单位：10^{-5}s^{-1})经向剖面图(c)(红色箭头代表天气尺度低空急流，红色圆圈示意闽南沿海一带)

Fig. 12 (a) The 850 hPa wind (wind bar), divergence field (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) and wind speed (contour line), (b) 925 hPa wind (wind bar), divergence field (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) and wind speed (contour line), (c) Wind the meridional height cross section of (arrow) and divergence fields (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) along 117.8°E at 05:00 BT 18 April 2023 (The red arrow represents the synoptic-system-related low-level jet (SLLJ), and the red circle indicates the southern coast of Fujian)

北推过程中受到海陆交界摩擦辐合以及福建沿海向中部沿山地形阻挡而抬升，使得中低层上升运动发展，而双低空急流耦合形成低层辐合、中层辐散的配置，辐合辐散不断向上发展，有利于在福建沿海形成强烈深厚的上升运动(图略)，从而使得降水强度进一步增大。

综上分析表明，强降水发生前天气尺度低空急流和边界层急流表现出明显增强，对强降水预报具有一定的指示意义，而双低空急流耦合产生的上升运动是此次暖区暴雨主要的天气尺度触发机制。

6 结论与讨论

基于探空、地面自动站、双偏振雷达、风廓线雷达、雨滴谱仪等多源观测资料，对2023年4月18日厦门入汛以来最强暖区暴雨过程天气背景、中尺度特征进行综合分析，并探讨了低空急流对暴雨发生发展的作用，主要结论如下：

(1) 这是一次发生在偏南风天气尺度低空急流和东南风边界层急流配合下的暖区暴雨过程，具有降水强度大、局地性强、预报预测难等特点，8个强降水对流系统在12 h内持续影响厦门，“列车效应”导致厦门产生极端强降水。暴雨区沿海岸线呈β中尺度带状分布，日降水量接近厦门历史极值。

(2) 线状MCS长时间维持在福建南部沿海，回波质心低、降水效率高，为典型的热带海洋型降水回波。MCS中存在单体合并发展为类超级单体风暴，类超级单体风暴具有勾状回波、有界弱回波区及低层γ尺度弱切变，质心低于经典超级单体回波，强回波区ZDR、KDP与CC均较大，表明高层以过冷却大雨滴为主，下降过程中雨滴破碎尺度减小。雨滴谱分析表明高浓度小粒子与少量大粒子共存造成了此次强降水。

(3) 低空急流脉动增强和向下扩展与强降水发生密切相关，双低空急流耦合是此次暖区暴雨过程主要的天气尺度触发机制。边界层急流在夜间加强并与天气尺度低空急流耦合，形成低层辐合中层辐散的配置，并通过低层增温增湿改善了局地对流条件，在福建南部沿海摩擦辐合和地形强迫抬升作用下形成上升运动，降水开始后潜热释放又进一步加强了天气尺度低空急流和边界层急流，通过正反馈过程进一步加强了降水强度。

本文基于观测事实对“4.18”厦门暖区暴雨过程进行了初步探讨，发现天气尺度低空急流和边界层急流的发展及耦合与暖区暴雨密切相关，但是否对暖区暴雨预报有明确的指示意义？仍需要积累大量的暖区暴雨个例进行统计分析。另外，天气尺度低空急流与边界层急流如何耦合加强降水？地形对于沿海线状MCS的触发、传播作用是什么？这些科学问题及其内在物理机制还有待今后开展深入的诊断分析及模拟试验。

参考文献(References):

包慧濛,肖安,李葳,等.2021.南方比湿特征及其与暴雨的关系[J].气象与环境科学,44(2):33-42. Bao H M, Xiao A, Li W, et al. 2021. Characteristics of specific humidity in South China and its relationship with rainstorm [J]. Meteorological and Environmental Sciences,44(2):33-42 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki. 1673-7148.2021.02.005

谌芸,吕伟绮,于超,等.2018.北方一次暖区大暴雨降水预报失败案例剖析[J].气象,44(1):15-25. Chen Y, Lv W Q, Yu C, et al. 2018. Analysis of a forecast failure case of warm sector torrential rainfall in North China [J]. Meteorological Monthly,44(1):15-25 (in Chinese). doi: 10.7519/ j.issn.1000-0526.2018.01.002

崔梦雪,张晗昀,张伟,等.2020.闽南一次超级单体风暴双偏振特征分析[J].海峡科学,(4):3-10.Cui M X, Zhang H Y, Zhang W, et al. 2020. Analysis of dual polarization parameters for a supercell storm in southern Fujian [J]. Strait Science,(4):3-10 (in Chinese). doi:10.3969/ j.issn.1673-8683.2020.04.002

高留喜,王彦,万明波,等.2011. 2009-08-17山东特大暴雨雷达回波及地形作用分析[J].大气科学学报,34(2):239-245. Gao L X, Wang Y, Wang M B, et al. 2011. A study on radar-echo and the impact of terrain on the heavy torrential rainfall event in Shandong Province on 17 August 2009 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,34(2):239-245 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.02. 014

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]. Journal of Applied Meteorological Science,27(5):559-569 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313. 20160505

黄士松,李真光,包澄澜,等.1986.华南前汛期暴雨[M].广州:广东科技出版社:94-95. Huang S S, Li Z G, Bao C L.et al. 1986. Rainstorm of the first rainy season in South China [M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press: 94-95 (in Chinese)

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]. Meteorological Monthly,46(5):629-642 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526

李晨光,刘淑媛,陶祖钰.2003.华南暴雨试验期间香港风廓线雷达资料的评估[J].热带气象学报,19(3):269-276. Li C G, Liu S Y, Tao Z Y. 2003. Review of wind profiler data og HongKong during IOP of HUAMEX and SCSMEX [J]. Journal of Tropical Meteorology,19(3):269-276 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2003.03.006

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 Meteorologica Sinica,72(2):191-206 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2014.022

刘蕾,丁治英,常越,等.2012. WRF中地形重力波参数化方案在一次华南暖区暴雨形成机制分析中的应用[J],气象科技,40(2):232-240. Liu L, Ding Z Y, Chang Y, et al. 2012. Application of parameterization of orographic gravity wave drag in WRF model to mechanism analysis of a heavy rain in warm sector over south china [J]. Meteorological Sci-

ence and Technology,40(2):232–240 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671–6345.2012.02.017

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]. Journal of Tropical Meteorology,19(3):285–290 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–4965.2003.03.008

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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,29(3):445–452 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2005.03.12

田付友,郑永光,张小玲,等.2018. 2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J].气象,44(4):469–484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al. 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017 [J]. Meteorological Monthly,44(4):469–484 (in Chinese). doi:10.7519/ j.issn.1000–0526.2018.04.001

王丛梅,俞小鼎.2015. 2013年7月1日河北宁晋极端短时强降水成因研究[J].暴雨灾害, 34(2):105–116. Wang C M, Yu X D. 2015. Nvestigation of the cause of an extreme flash–rain event in Ningjin County on 1 July 2013 [J]. Torrential Rain and Disasters,34(2):105–116 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045. 2015.02.002

王坚红,杨艺亚,苗春生,等.2017.华南沿海暖区暴雨系统研究进展[J].气象科技进展,7(4):38–46. Wang J H, Yang Y Y, Miao C S, et al. 2017. The research progress of the systems of warm–sector heavy rainfall in South China coasts [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,7(4):38–4 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095–1973.201

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 Meteorogical Press:185 (in Chinese)

叶朗明,苗峻峰.2014.华南一次典型回流暖区暴雨过程的中尺度分析[J].暴雨灾害,33(4):342–350. Ye L M, Miao J F. 2014. Mesoscale analysis of a typical heavy rain event caused by returning flow in the warm sector in southern China [J]. Torrential Rain and Disasters,33(4):342–350 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2014.04.006

俞小鼎.2006.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社:112. Yu X D. 2006. Doppler weather radar principle and application [M]. Beijing:China Meteorogical Press:112 (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]. Torrential Rain and Disasters,32(3):202–209 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2013.03.002

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. 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]. Torrential Rain and Disasters,28(3):193–202 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2009.03

郑婧,陈娟,徐星生,等.2020.一次低空急流加强下的暴雨过程成因分析[J].干旱气象,38(3):411–422. Zheng J, Chen J, Xu X S, et al. 2020. Analysis on causes of a rainstorm process under enhanced low–altitude Jet condition [J]. Journal of Arid Meteorology,38(3):411–422 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006–7639(2020)–03–0411

张萍萍,董良鹏,钟敏,等.2019.湖北省西南气流型暖区暴雨相关特征分析[J].沙漠与绿洲气象,13(6):13–19. Zhang P P, Dong L P, Zhong M, et al. 2019. Characteristics analyses on the southwest airflow warm–sector rainstorm in Hubei province [J]. Desert and Oasis Meteorology,13(6):13–19 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2019.06.002

周秀骥,薛纪善,陶祖钰,等.2003.98年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 Meteorogical Press:370 (in Chinaese)

智协飞,李佳,张玲,2022.双低空急流影响下华南初夏降水日变化的时空分布特征[J].大气科学学报,45(3):444–455. Zhi X F, Li J, Zhang L.2022. Temporal and spatial distributions of diurnal cycle of early–summer precipitation in South China influenced by double low–level jets [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,45(3):444–455 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210119001

周涛,李娜,许敏,等,2022.基于多源资料的一次暖区暴雨水汽特征分析[J].沙漠与绿洲气象,16(5):62–69. Zhou T, Li N, Xu M, et al. 2022. Water wapor characteristics of a rainstorm in warm region based on multisource data [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(5):62–69 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2022.05.009

周芯玉,涂静,廖菲,等.2017. 2014年5月23日广州中北部大暴雨过程多尺度特征研究[J].暴雨灾害,36(3):235–242. Zhou X Y, Tu J, Liao F, et al. 2017. A study on the multiscale characteristics of the rainstorm occurred in north of Guangzhou on 23 May 2014 [J]. Torrential Rain and Disasters,36(3):235–242 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2017.03.006

周芯玉,廖菲,胡东明.2019.利用风廓线雷达对广东前汛期短时强降水类暴雨过程低空风场特征的研究[J].热带气象学报,35(3):332–342. Zhou X Y, Liao F, Hu D M. 2019. A study on low–level wind field characteristics of rainstorm containing short–range heavy rainfall during April to June rainy season in Guandong by wind profiler data [J]. Journal of Tropical Meteorology,35(3):332–342 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004–4965.2019.031

Chen Y, Chen X A, Zhang Y.1994. A diagnostic study of the low–level jet during TAMEX IOP 5 [J]. Monthly Weather Review,122(10):2257–2284. doi:10.1175/1520–0493(1994)1222.0.CO;2

Du Y, Zhang Q H, Ying Y, et al. 2012. Characteristics of low–level jets in Shanghai during the 2008–2009 warm seasons as inferred from wind profiler radar data [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 90(6):891–903. doi:10.2151/jmsj.2012–603

Du Y, Chen G X. 2019. Heavy rainfall associated with double low–level jets over southern China. Part II: Convection initiation [J]. Monthly Weather Review,147(2):543–565. doi:10.1175/MWR–D–18–0102.1

Kumjian M R and Ryzhkov A V. 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. Journal of applied meteorology and climatology, 47(7):1940–1961. doi:10.1175/ 2007JAMC1874.1

Wu D, Zhao K, Kumjian M R, et al. 2018. Kinematics and microphysics of convection in the outer rainband of Typhoon Nida (2016) revealed by polarimetric radar [J]. Monthly Weather Review,146(7):2147–2159. doi:10.1175/MWR–D–17–0320.1

（责任编辑　闵爱荣）