氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

2017年广东西部一次暖区极端降水过程的维持机制及微物理特征

叶朗明 徐碧裕 刘显通 蒲义良 李晓惠

Maintenance Mechanism and Microphysical Characteristics of an Extreme Intensity Precipitation in Warm Are in Western Guangdong in 2017

YE Langming XU Biyu LIU Xiantong PU Yiliang LI Xiaohui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20028

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

年厦门地区小时尺度极端降水特征分析

–

气候与环境研究. 2019, 24(3): 359 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18139

华东地区极端降水动力降尺度模拟及未来预估

Dynamical Downscaling Simulation and Projection of Extreme Precipitation over East China

气候与环境研究. 2019, 24(1): 86 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17169

中国东部春季极端降水与同期欧亚大陆地表感热的可能联系

Possible Linkage between Spring Extreme Precipitation over East China and Surface Sensible Heat Flux over the Eurasian Continent

气候与环境研究. 2018, 23(1): 103 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16226

暖季极端降水与温度的关系研究——以安徽省为例

Relationship between Precipitation Extremes with Temperature in the Warm Season in Anhui Province

气候与环境研究. 2017, 22(5): 623 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17009

近16年暖季青藏高原东部两类中尺度对流系统（MCS）的统计特征

Statistical Features of Two Types of Mesoscale Convective Systems (MCSs) Generated over the Eastern Tibetan Plateau during 16 Consecutive Warm Seasons

气候与环境研究. 2020, 25(4): 385 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19040

不同嵌套方式下的积云对流方案对上海崇明极端暴雨高分辨率模拟的影响研究

Impact of Cumulus Parameterization Schemes with Multigrid Nesting on the High-Resolution Simulation of an Extreme Heavy Rainfall Event in Chongming, Shanghai

气候与环境研究. 2021, 26(1): 58 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20016

关注微信公众号，获得更多资讯信息

叶朗明, 徐碧裕, 刘显通, 等. 2021. 2017 年广东西部一次暖区极端降水过程的维持机制及微物理特征 [J]. 气候与环境研究, 26(3): 263−274.
YE Langming, XU Biyu, LIU Xiantong, et al. 2021. Maintenance Mechanism and Microphysical Characteristics of an Extreme Intensity Precipitation in Warm Are in Western Guangdong in 2017 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (3): 263−274. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20028

2017 年广东西部一次暖区极端降水过程的维持机制及微物理特征

叶朗明[1] 徐碧裕[1] 刘显通[2] 蒲义良[1] 李晓惠[3]

1 广东省江门市气象局，广东江门 529000
2 中国气象局广州热带海洋气象研究所，广州 510080
3 广东省台山市气象局，广东台山 529200

摘 要 2017 年 6 月 22 日广东西部经历了一次罕见的极端降水事件（24 h 最大累积雨量 562.5 mm），刷新了多项当地的历史雨量纪录。本文利用区域自动站、多普勒雷达和风廓线仪等观测资料，分析了这次极端暖区降水的维持机制，并通过二维雨滴谱仪、FY-3B 微波湿度计研究了其微物理特征。结果表明：6 月 21 日夜间一条地面中尺度辐合线触发对流单体，导致准静止长生命史 MCS（Mesoscale Convective System）的产生和维持。这条辐合线位于天露山附近，处于由降水物蒸发冷却导致的较冷空气堆（较低相当位温）与来自海洋的较暖空气堆（较高相当位温）之间，中尺度辐合线两侧温差约 2～3°C，环境大气的特征为对流抑制能量弱，抬升凝结高度低。本次降水事件中，对流云云顶高度较高，降水极值中心位于两个亮温极值中心之间过渡区以西的亮温梯度大值区，可降水量较高。降水雨滴谱在高湿环境中表现为暖性降水特征，最强降水时间段内，小雨滴数浓度超过 10^5 mm^{-1} m^{-3}，远高于华南地区夏季平均值（约 10^4 mm^{-1} m^{-3}），且同时存在部分大粒子，从而导致了更高的降水效率和局地强降水。MCS 产生的偏北风冷出流与西南暖湿气流相遇并产生强辐合，持续触发新的对流单体，使得 MCS 维持准静止，不断地产生降水。

关键词 极端降水 暖区降水 中尺度对流系统 中尺度辐合线 二维雨滴谱仪 FY-3B 微波湿度计
文章编号 1006-9585(2021)03-0263-12 **中图分类号** P445 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20028

Maintenance Mechanism and Microphysical Characteristics of an Extreme Intensity Precipitation in Warm Are in Western Guangdong in 2017

YE Langming[1], XU Biyu[1], LIU Xiantong[2], PU Yiliang[1], and LI Xiaohui[3]

1 *Jiangmen Meteorological Service*, *Jiangmen*, *Guangdong Province* 529000
2 *Guanzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Guangzhou* 510080
3 *Taishan Meteorological Service*, *Taishan*, *Guangdong Province* 529200

收稿日期 2020-03-16；**网络预出版日期** 2020-07-06
作者简介 叶朗明，男，1982 年出生，硕士，高级工程师，主要从事暴雨研究。E-mail: ye_langming@126.com
通讯作者 刘显通，E-mail: xtliu@gd121.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41705020、41975138，广东省科技计划项目 2017A020219005、2017B020244002，气象预报技术发展专项 YBGJXM-20171A-04，中国气象局预报员专项 CMAYBY2020-092
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41705020 and 41975138), Guangdong Science and Technology Program (Grants 2017A020219005 and 2017B020244002), Special Program for the Development of Meteorological Forecasting Technology (Grant YBGJXM-20171A-04), Special Program for Forecasters of China Meteorological Administration (Grant CMAYBY2020-092)

Abstract A rare extreme precipitation event (maximum cumulative rainfall of 562.5 mm in 24 h) was experienced in western Guangdong on 22 June 2017, which resulted in a number of local historical rainfall records and caused serious property damage. This paper analyzed the maintenance mechanism of this extreme precipitation in the warm zone using the observation data of the automatic regional station and the Doppler radar and wind profiler. The microphysical characteristics of precipitation were studied using a two-dimensional video disdrometer (2DVD) and an FY-3D microwave humidity sensor. Results show that a surface mesoscale convergence line that triggered the convective cells on the night of 21 June leads to the generation and maintenance of the quasi-stationary long-life MCS (Mesoscale Convective System). The convergence line near the Tianlu Mountain lies between the cooler air reactor (lower equivalent potential temperature) caused by the evaporation and cooling of precipitation and the warmer air reactor (higher equivalent potential temperature) from the ocean. The temperature difference between the two sides of the mesoscale convergence line is about 2°C–3°C. The ambient atmosphere is characterized by the weak convection inhibition energy and low uplift condensation height. The height of the convective cloud on top of this precipitation event is relatively high, and the center of the extreme value of precipitation is located in the large value region of the bright temperature gradient that lies to the west of the transition zone between the two bright temperature extreme value centers. The precipitation raindrop spectrum shows the characteristics of warm precipitation in the high-humidity environment. During the period of the strongest precipitation, the concentration of small raindrops exceeds 10^5 mm^{-1} m^{-3}, which is much higher than the average value in south China during summer (about 10^4 mm^{-1} m^{-3}). Few large particles also exist, leading to a higher precipitation efficiency and local heavy precipitation. The cold outflow of the northerly wind generated by the MCS encounters the warm and wet airflow of southwest China and forms a strong convergence, which continuously triggers new convective cells, enabling the MCS to remain quasi-static and continuously produce precipitation.

Keywords Extreme precipitation, Warm-sector precipitation, MCS, Mesoscale convergence line, 2DVD disdrometers, FY-3B microwave humidity sensor

1 引言

极端强降水事件由于其强致灾性，一直以来都是国内外气象学者关注的重点，例如：2012 年 7 月 21 日北京极端降水天气（孙继松等, 2012; Zhong et al., 2015）、2017 年 5 月 7 日广州的极端降水天气（田付友等, 2018; 傅佩玲等, 2018; 伍志方等, 2018）、2018 年 8 月 30 日粤东极端降水天气（李明华等, 2019; 郭姿佑等, 2019）等。华南是我国的三大雨区之一（陶诗言, 1980），强降水事件频发，危害性极强。前人的研究表明，华南的强降水事件是不同纬向环流相互作用的结果，尤其在暖区降水过程中，来自低纬度的夏季风为华南强降水提供了充足的水汽，经常产生热带海洋型对流，部分降水过程产生的小时雨量可达 100 mm 以上，如 1979 年 5 月广东阳江区域自动站曾出现 220.2 mm h^{-1} 的短时极端强降水（黄士松, 1986）。其具有强度大、范围小、对流性明显、降水时段集中（林良勋等, 2006; 赵玉春等, 2009）等特征。暖区降水是我国华南汛期降水的一个重要特征，华南的暖区强降水事件与局地的下垫面特征密切相关，如山脉抬升、海陆差异摩擦、海陆风环流、地形中尺度辐合线等因子均可以在一定的不稳定条件下触发强降水（夏茹娣等, 2006; 徐燚等, 2013; 叶朗明和苗峻峰, 2014）。

2017 年 6 月 22 日凌晨，广东阳江—恩平局部区域出现了小时雨量超过 160 mm，24 h 雨量超过 500 mm 的极端降水事件，刷新了该地区有气象记录以来的降水极值，造成了严重的财产损失。本次强降水事件与典型华南前汛期暴雨的环境条件和概念模型（黄士松, 1986）相比，差异显著，其既没有大槽大脊配合，也没有显著的低空急流。在这类非典型天气背景下，极端累积雨量的出现是由较大的降水强度和较长的降水持续时间共同导致的，而降水强度与降水类型和降水粒子的微物理特征密切相关。由于之前的多数研究缺乏高时空分辨率的综合观测数据，对非典型天气背景下华南前汛期极端降水的成因，特别是对其中引发强降水 MCS（Mesoscale Convective System）的发生发展机制以及降水微物理特征的认识尚待深入。本文利用区域自动站、多普勒雷达、二维雨滴谱仪、风廓线仪和 FY-3B 微波湿度计等多源观测资料，主要围绕 MCS 的触发和维持机制以及云滴雨滴微观特征等方面进行分析，以期提高对该类极端天气的预报水

平，并为相关的研究提供参考。

2　资料与方法

本研究采用华南地区地面自动站、风廓线仪、多普勒天气雷达、二维雨滴谱仪、卫星微波湿度计和 NCEP 再分析资料等多种观测资料进行综合分析。其中，阳江多普勒雷达（站号 Z9662）位于（21°50'43"N，111°58'46"E），海拔高度 106 m，本部雷达的资料取样密度为 6 min。阳江风廓线仪（站号 G7190，海拔高度 119 m）位于关键区南侧约 30 km 的阳江城区。

2.1　区域自动站资料

广东西部的区域自动站资料稠密、站点分布合理，因此本文利用逐小时加密观测资料（风向、风速、气温）来分析中小尺度对流发展机制。考虑到各站点分布海拔高度不一致，首先根据温度垂直递减率（基于探空观测）将不同高度的自动站观测数据订正到 50 m 海拔高度的同一水平面上，并插值到空间分辨率为 0.1°（纬度）×0.1°（经度）水平网格。然后计算各网格点与区域平均气温的差值。

2.2　雨滴谱资料

雨滴谱是单位体积中雨滴的数量随雨滴大小的分布，是云降水物理过程中重要的参数之一。本文雨滴谱资料来源于中国气象局龙门云物理野外科学试验基地（恩平站）一台 2DVD（Two-Dimensional Video Disdrometer）雨滴谱仪，该仪器由奥地利 Joanneum Research 生产的第三代产品。该雨滴谱仪利用两台相互垂直方向的光源高速线阵列扫描（55 kHz），采样面积约为 10×10 cm^2，两束光源垂直高度差约为 6～7 mm。2DVD 雨滴谱仪可以获取降水量、降水强度、雨滴谱分布、粒子形状和宽高比等信息，其观测雨滴的水平和垂直分辨率均高于 0.2 mm。2DVD 雨滴谱仪位于暴雨极值中心恩平锦江站（站号 G2164）偏东方向，距离仅 10 km，且雨滴谱连续记录了强降水期间的雨滴谱数据，本研究将雨滴谱资料处理成 1 min 分辨率数据。

2.3　卫星反演微波湿度计资料

微波湿度计资料源于国家气象中心接收的 FY-3B 微波湿度计产品，FY-3B 是我国第二代极轨气象卫星，一天 2 个时次，2017 年 6 月 22 日 01:40（北京时间，下同）资料正好覆盖了强降水发生区域。FY-3B 微波湿度计主要用于探测大气水汽含量、云中液态水含量、大气湿度垂直分布等。其中 1～2 探测通道频率 150 GHz，受冰和液态降水粒子的散射衰减较大，而 3～5 通道以吸收水汽为主，能够反映降水云团中上层（400 hPa、600 hPa 和 800 hPa）水汽特征，本文可以从上述 5 个通道微波亮温图分析暴雨云团的结构特征。

2.4　再分析资料

本文天气尺度形势与环境条件分析资料为美国环境预报中心（NCEP）提供的 FNL 全球再分析资料，一日 4 次，时间间隔 6 h，空间分辨率为 1°（纬度）×1°（经度）。

3　降水实况和天气背景

2017 年 6 月 22 日凌晨，在广东省西部沿海的恩平市及阳江市（图 1a）附近发生了一次极端降水过程，自动站降水资料显示（图 1b），雨量大值中心呈准东西分布，主要位于天露山和云雾山南侧的地势较平坦地区。云雾山与天露山均呈东北—西南走向，最高海拔分别约 1.7 km 和 1.2 km，两座山脉在阳春的岗美镇至潭水镇之间形成向南的喇叭口。3 个降水极值中心分别是恩平锦江站（站号 G2164）562.5mm、阳春岗美（站号 G2367）318.7mm、阳春潭水（站号 G2352）293.9 mm，本文研究的关键区取图 1b 中黑色虚线框所表示的范围，包含了此次过程的全部强降水站点。

从小时降水演变来看（图 1c、1d），主要降水时段可以分成两个：第一阶段发生在 22 日 00:00 至 06:00，主要特点是雨强大且雨强大小变化显著，表现出显著的对流性降水特征；第二阶段发生在 22 日 07:00 至 12:00，本阶段内雨强显著减小且趋于平缓，具有层状云降水的特征。从 5 min 降雨演变进一步表明（图 1e），不仅累积降水量极端，短时雨强也非常极端，其中，第一阶段恩平大田镇 02:00 至 03:00 和 03:00 至 04:00 的小时降水分别为 165 mm 和 135.1 mm，3 h 累积降水量达到了 365.1 mm，均打破了恩平的降水量记录。另外，前 30 min 降雨强度呈逐渐增强的趋势，这也表明降雨云团在不断增强，02:50 至 02:55 达到每 5 min 约 18 mm 降水的极大值。在大田镇 02:00 至 03:00 165 mm 的小时极端降水中，大约 100 mm 的降水是在 02:30 至 03:00 内产生的，这次降雨强度和效率都是比较罕见的。阳春岗美和潭水站分别在

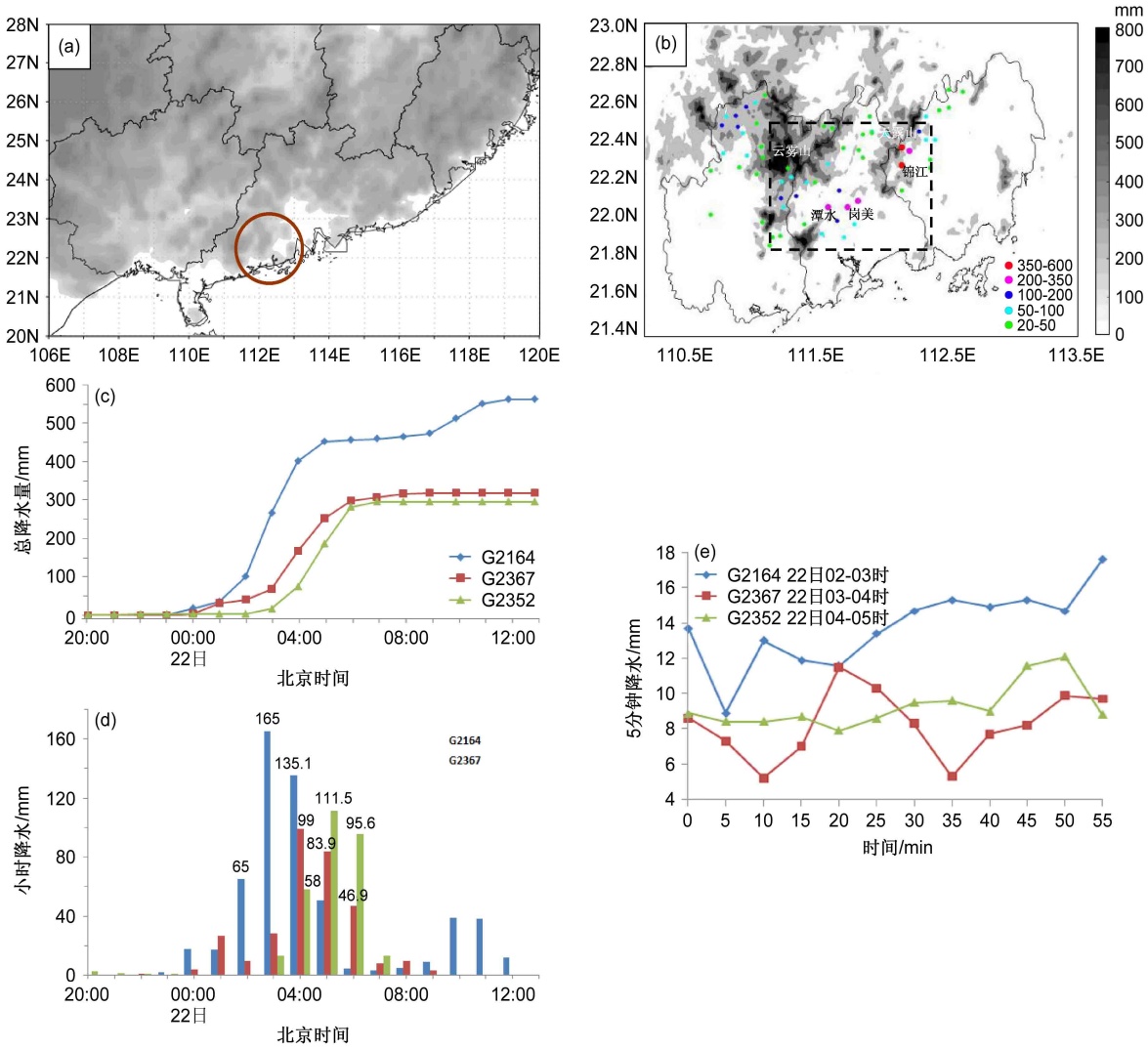

图 1 （a）华南地形（阴影部分为海拔高度≥50 m；红圈为研究区域）和（b）2017 年 6 月 21 日 20:00 至 22 日 20:00 粤西 24 h 累积雨量（彩色圆点，单位：mm；阴影部分为详细地形，方框为研究区域）；代表站 2017 年 6 月 21 日 20:00 至 22 日 13:00（c）小时雨量和（d）累积雨量变化，以及（e）最强时段 5 min 雨量变化（蓝色线为 G2164 恩平锦江站，红色线为 G2364 阳春岗美站，绿色线为 G2352 阳春潭水站）

Fig. 1 (a) Topographic map of South China (the shaded areas are the topographic height≥50 m; red circle shows research area); (b) accumulated rainfall (color dot, units: mm) of west Guangdong in 24 hours from 2000 BJT (Beijing time) 21 June to 2000 BJT 22 June 2017 (shaded areas represent the topographic map; rectangle dotted line shows research area); variation of (c) hourly rainfall and (d) cumulative rainfall at the representative stations from 2000 BJT 21 June to 1300 BJT 22 June, and (e) 5-min variations of rainfall during the strongest rainfall period (the blue line represents the G2164 Enping Jinjiang station, the red line represents the G2364 Yangchun Gangmei station, and the green line represents the G2352 Yangchun Tanshui station)

03:00 至 04:00、04:00 至 05:00 时录得 99 mm 和 111.4 mm 小时雨量，对应的 5 min 降水量显示，起始阶段降水量就达到每 5 min 约 8 mm 降水，随后逐渐增大。由于极端强降水主要出现在第一阶段（00:00 至 06:00），本文将着重研究该阶段的天气背景，以及强降水中尺度对流系统的产生机制与微物理特征。

2017 年 6 月 21 日 20:00 至 22 日 14:00，关键区一直处于低层高假相当位温（θ_{se}）的暖湿偏南气流中（图略），没有显著的锋面，对流层中层在中低纬度经向度较小，西风平直，冷空气活动较弱，上述特征表明本次极端降水过程属于暖区暴雨。从天气背景来看，21 日 20:00（即暴雨发生前），200 hPa 高空华南沿海风场呈现弱的反气旋环流（图 2a），500 hPa 副热带高压西脊点西伸至 113°N（图 2b），广西东部维持浅槽，广东沿海处

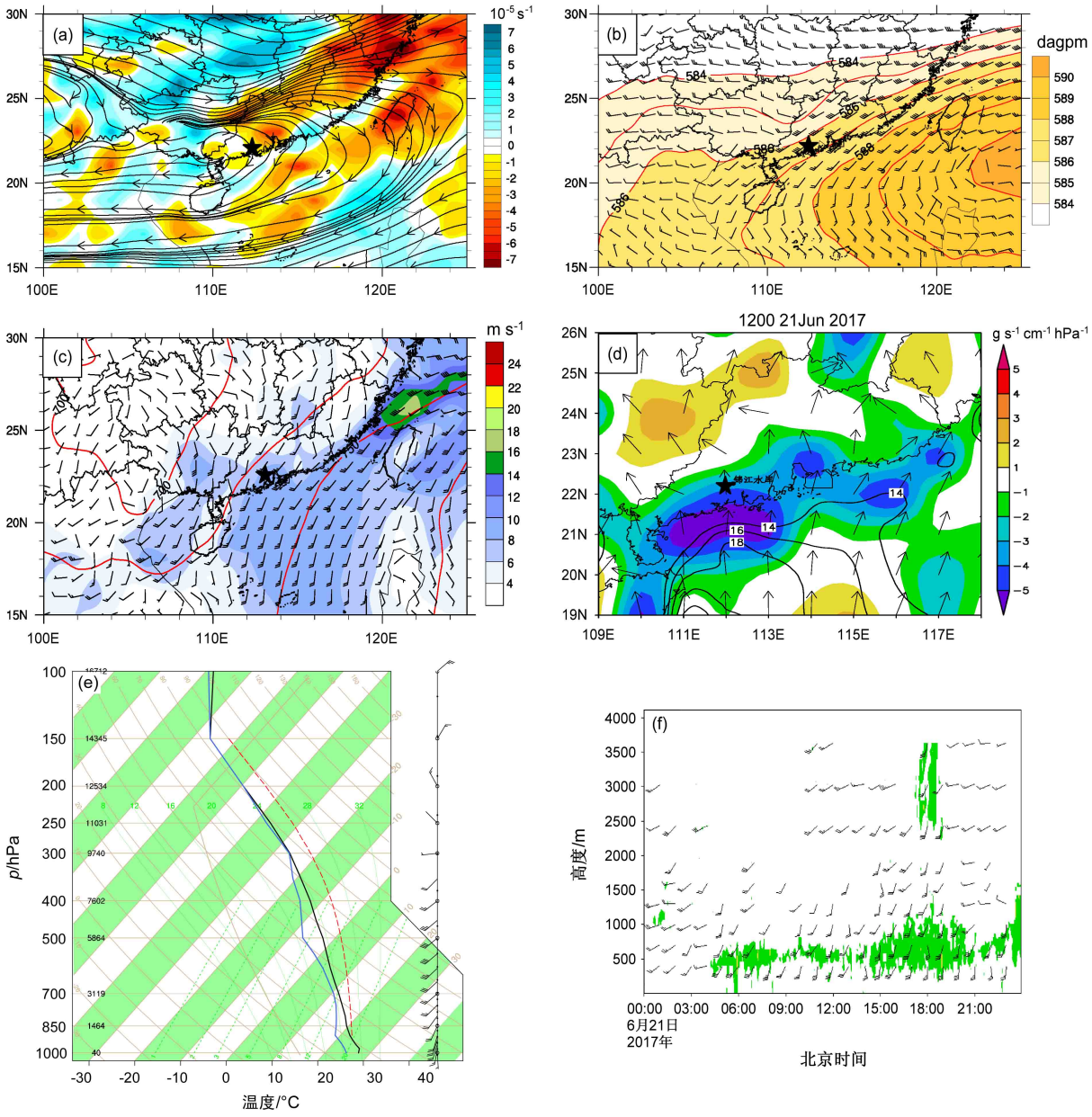

图 2　2017 年 6 月 21 日 20:00（a）200 hPa 流场（流线）、散度（填色，单位：$10^{-5}s^{-1}$）、（b）500 hPa 位势高度场（等值线，单位：dagpm）和风场（矢量，单位：m s^{-1}）、（c）925 hPa 位势高度场（等值线，单位：gpm）和风场（填色区：风速≥4 m s^{-1}，单位：m s^{-1}）、（d）1000 hPa 水汽通量（等值线和箭头，单位：g s^{-1} cm^{-1} hPa^{-1}）和水汽通量散度（填色，单位：g s^{-1} cm^{-2} hPa^{-1}）；2017 年 6 月（e）21 日 20:00 阳江 T−log$p$ 分布（T 表示温度，p 表示气压，蓝色为露点曲线，黑色为层结曲线，红色为状态曲线）和（f）21 日 08:00 至 22 日 08:00 阳江风廓线仪观测风廓线（绿色填色区：水平风速≥12 m s^{-1}）

Fig. 2　(a) 200-hPa streamline and the divergence (colored, units: $10^{-5}s^{-1}$), (b) 500-hPa geopotential height (contour, units: gpm) and wind (vector, units: m s^{-1}), (c) 925-hPa geopotential height (contour, units: gpm) and wind (the shadow areas are the wind speed ≥ 4 m s^{-1}, units: m s^{-1}), (d) 1000-hPa vapor flux (contour lines and arrows, units: g s^{-1} cm^{-1} hPa^{-1}) and vapor flux divergence (colored, units: g s^{-1} cm^{-2} hPa^{-1})at 2000 BJT 21 June 2017; (e) vertical profiles plotted on the skew-temperature Log-pressure diagram of temperature at 2000 BJT 21 June 2017 (the blue line is the dew point curve, the black line is the stratification curve, and the red line is the state curve); (f) Yangjiang wind profiler from 0800 BJT 21 June to 0800 BJT 22 June (the green shadow areas correspond to wind speed ≥ 12 m s^{-1})

在南支槽前和副热带高压西北侧的强盛西南气流中（阳江探空站显示风速达 16 m s^{-1}），边界层也是一致偏南风（图 2c），利于在华南地区建立深厚的水汽供应通道（图 2d）。综合来看，关键区（黑色五角星）处于高层辐散且低层水汽辐合显著的环流形势下，十分有利于对流的发生。

本文利用距离强降水中心约45 km处阳江的风廓线仪观测资料及15 km处再分析资料构建的探空曲线来分析MCS发生发展的大气热力和动力条件。2017年6月21日08:00（暴雨发生前的白天）再分析探空资料（22°N，112°E）显示，对流有效位能约为1764 J/kg（图2e），该区域整层可降水量达60 mm（图略），说明大气中的不稳定能量和水汽条件十分有利于MCS的发生。21日20:00（MCS初生前），近地面露点由24.1°C上升至约24.7°C，12 h前的近地层干区消失，对流抑制能量减小，从地面到高层的温度露点差较小，整层大气可降水量增加至70 mm左右。阳江风廓仪表明，关键区中高空气流基本维持不变，但1000 m以下风速增加显著，风向由21日08:00的西南风逐渐转为偏南风（图2f），而且低层暖平流趋于明显，0°C层高度抬高；随着气流和大气温湿层结的改变，抬升凝结高度从940 hPa降至962 hPa附近，对流抑制能量从−2 J/kg下降至−8 J/kg，同时对流有效位能增加约262 J/kg，达到2026 J，可以看出在12 h内阳江—恩平周边的大气中尺度环境条件逐渐有利于强对流的发生。综合上述，弱对流抑制、低抬升凝结高度、中等对流有效位能、深厚的湿层，均表明关键区的大气环境更加有利发生高强度的降水。

4 中尺度对流系统的触发和维持机制

本次强降水的直接影响系统为MCS，根据其回波特征可以大致分为3个阶段：（1）初始对流发展阶段（2017年6月21日21:00至24:00），（2）大田对流增强阶段（2017年6月22日00:00至03:00）和（3）对流雨带传播阶段（2017年6月22日04:00至07:00）。降水始于21日夜间（21:00），此时，有小片弱降水回波从广东西部移入阳江市境内并不断东移，截止21日23:06，该弱回波移至恩平天露山，此时MCS开始发展，在雷达回波图上可以看到有多个对流单体在这个区域生成（图略），并陆续出现大于20 mm h^{-1}的短时强降水。随着时间推移（00:00至03:00），对流系统不断发展扩张，逐渐形成以恩平大田（天露山东南侧）为中心的团状对流。这个强降水MCS的触发与维持（21日21:00至22日03:00）是本次极端降水出现的直接原因，值得深入分析。

4.1 辐合线形成与MCS初生

分析区域自动站资料发现，地面中尺度辐合线对于本次强降水MCS的形成起到了至关重要作用。这条辐合线于2017年6月21日夜间开始形成，它与当日白天陆地出现的局地降水和局部海陆风环流密切相关。21日上午，广东沿海有偏南风从洋面吹向陆地，由于大气层结有一定对流抑制，仅广东东部及西部沿海出现短时强降水。21日13:00至14:00，随着低层大气热力条件改善及地形抬升，在关键区以北的云雾山及云雾山迎风坡也有对流发生发展，形成了方圆约40 km的对流雨团，并稳定维持在关键区以北的山脉附近。其造成了10～60 mm的累积雨量，而关键区以南平坦地区几乎无降水，导致其日间地面气温（31～32°C）相比于关键区北侧（29～30°C）要高1～2°C，比前一天同时刻气温也偏高约1.5°C，这主要是由于北侧的降水区存在降水蒸发造成的降温。关键区以北地区原本上午一致的偏南气流，由于受到21日午后降水的影响（蒸发冷却造成的地面升压趋势伴有偏北的变压风），到傍晚，本地区的偏南风气流显著减弱甚至出现弱偏北风。在降水物蒸发冷却的持续作用下，截止21日20:00，关键区北侧天露山气温（25～26°C）相比于其临近沿海地区（28～29°C）的平原低3°C，这表明关键区北侧的近地面已经形成了一定厚度的冷空气堆。

2017年6月21日21:00至22:00在冷空气堆的南侧形成一条西南—东北向的中尺度辐合线（图3a），这条辐合线两侧的地面温差2～3°C，辐合线南侧吹3～4 m/s偏南风，北侧风速很小，辐合线附近形成风的辐合。孙继松和杨波（2008）在北京地形对强天气的研究表明，当下垫面形成1°C/10 km量级以上水平温度梯度时，十几分钟到1 h将形成有利于对流发生的切变环境。在此次过程中，恩平城区与天露山脉之间水平温度梯度量级可达到2°C/10 km，可以看到1～2 h以后（21日23:00至24:00）初始对流得到发展和增强，并在辐合区出现10～20 mm h^{-1}的降水（图3b、3c），由此可知，这条辐合线对于MCS的触发至关重要。

4.2 辐合线的稳定维持

为了进一步解释中尺度辐合线附近持续触发的对流与重点地区极端降水的关系，本文选取2017年6月21日22:00至22日05:00用于识别和跟踪主要对流雨带在关键区的活动。按照对流出现的时

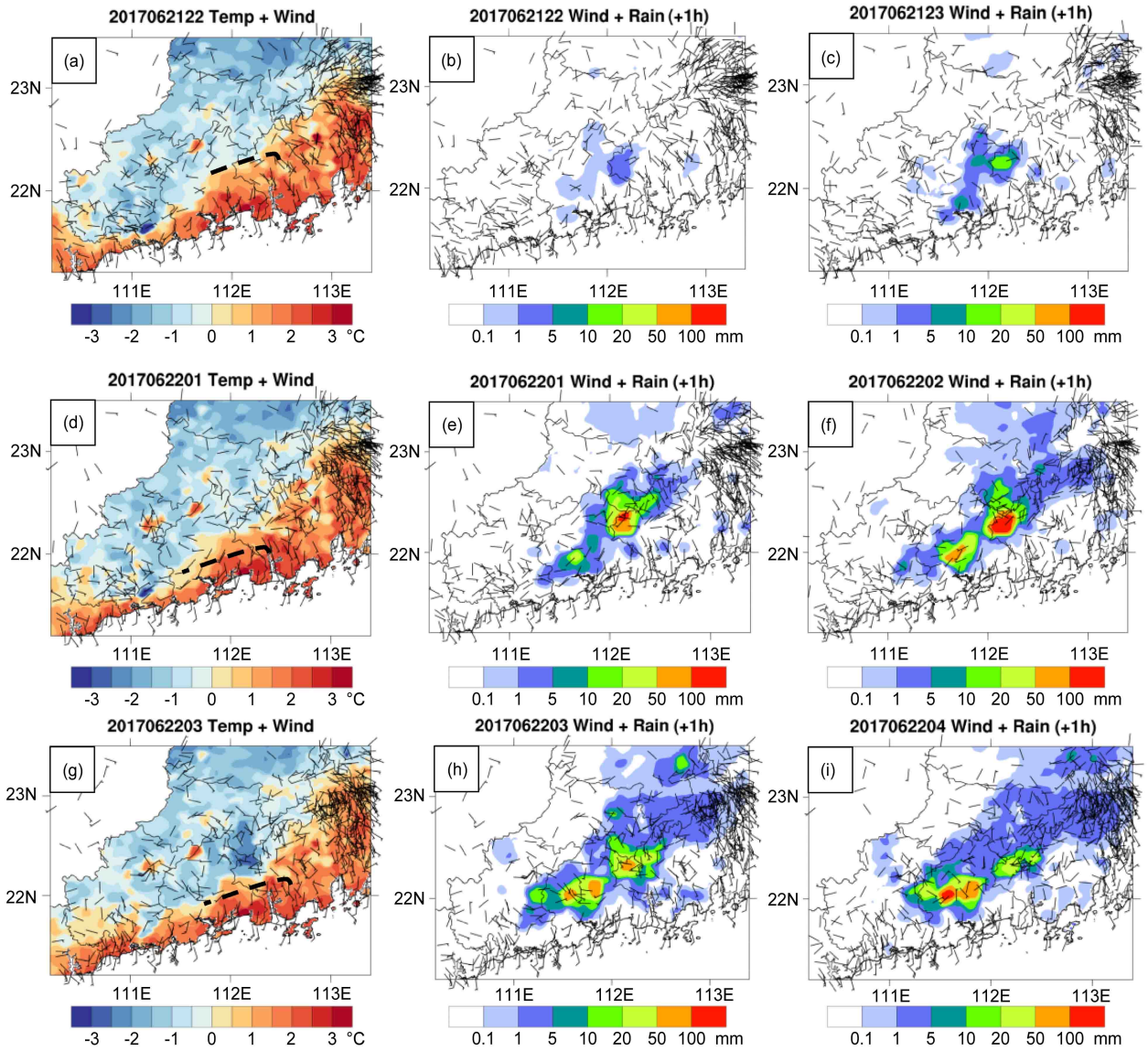

图 3　2017 年 7 月（a）21 日 22:00、（d）22 日 01:00、（g）22 日 03:00 广东省区域自动站地面风场（风杆）和气温（填色）距平分布（黑色虚线为中尺度辐合线）；2017 年 7 月（b）22 日 01:00、（c）21 日 23:00、（e）22 日 01:00、（f）22 日 02:00、（h）22 日 03:00、（i）22 日 04:00 广东省区域自动站地面风场（风杆）和该时刻未来 1 h 降雨量（填色）分布

Fig. 3　Distribution of surface wind (wind rod) and temperature anomaly (shaded) at the regional automatic stations in Guangdong Province at (a) 2200 BJT 21 June, (d) 0100 BJT 22 June, and (g) 0300 BJT 22 June 2017 (the black dotted line represents the mesoscale convergence line). Distribution of surface wind field (wind rods) and hourly rainfall (rainfall in the next one hour at this time) at the automatic stations in Guangdong Province at (b) 2200 BJT 21, (c) 2300 BJT 21, (e) 0100 BJT 22, (f) 0200 BJT 22, (h) 0300 BJT 22, and (i) 0400 BJT 22 June 2017

间顺序对其进行编号，这种分析方法被 Wu and Luo（2016）采用过。21 日 23:24 关键区内有 3 个雨带（图 4a；编号 1～3）：雨带 1 位于辐合线的东北角，其在东移过程中与辐合线脱离（图 4c），失去西南暖湿气流的供应而减弱，大约 40 min 后变为层状雨区（图 4d–4f）；雨带 2 位于关键区西北角，它向东移动后并入辐合线，在其上游（西南方向）有新的对流（雨带 3）出现，在随后的 1～2 h 缓慢东移到关键区中部地区（图 4b），这个对流雨带的西南侧始终紧靠辐合线，并维持较长的生命史，22 日 00:36（图 4c）两条雨带逐渐合并为雨带 6。22 日 01:12 还有一条雨带（编号 5）位于雨带 6 的西侧，它稳定少动，同时其西侧有新生的对流带发展。另外，在雨带 5 南侧，中尺度出流边界附近出现新的对流单体，它在约 40 min 后雨带 4 和雨带 5 合并形成雨带 7。

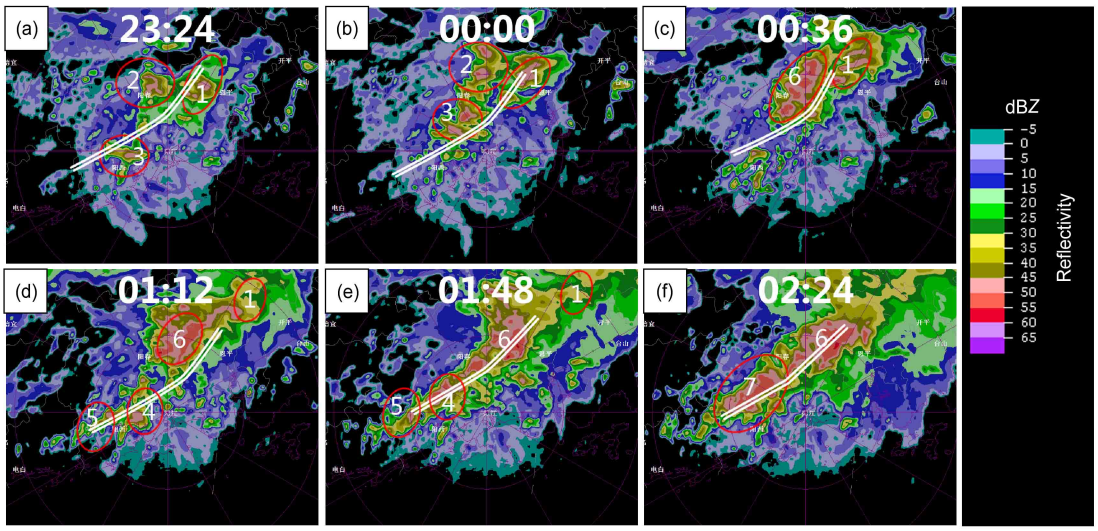

图 4 2017 年 7 月（a）21 日 23:24、（b）22 日 00:00、（c）22 日 00:36、（d）22 日 01:12、（e）22 日 01:48、（f）22 日 02:24 阳江雷达组合反射率（白色双实线为中尺度辐合线；1～7 的数字标号代表不同的雨带）

Fig. 4 Combined reflectivity of Yangjiang radar at (a) 2324 BJT 21 June, (b) 0000 BJT 22 June, (c) 0036 BJT 22 June, (d) 0112 BJT 22 June, (e) 0148 BJT 22 June, and (f) 0224 BJT 22 June 2017. The white double solid lines represent the mesoscale convergence lines, the mark numbers show different rain areas

通过对雨带的分析表明，辐合线附近的冷出流与西南气流携带暖湿空气形成抬升，不断产生新的对流单体，他们遵循的对流层低层西南气流向东北方向，排列起来形成中 β 尺度雨带，远离辐合线的雨带迅速减弱，移入辐合线的雨带得到维持和增强，其中雨带 6 在天露山附近增强，并长时间（大约 2～4 h）维持，对导致极端降水至关重要，下面重点针对该时期雨带进行分析。

4.3 MCS 的增强

为了研究长生命史的 MCS（雨带 6）形成机制，选取 22 日 01:00 至 03:00 天露山区域的高密度精细化资料进行分析。图 5a 可以看到，在强降水中心的西北侧为海拔高度 500～1200 m 的天露山，东南侧为地势平坦的恩平城区，两者相距 18 km。22 日 01:00 对流触发后，在山脉的地形强迫抬升作用下进一步增强，01:00 至 02:00 在天露山东南侧出现 10～30 mm h^{-1} 强降水，降水物的蒸发冷却导致山区温度由 26°C 进一步降至 24°C，而辐合线南侧的恩平城区气温仍维持在 27～29°C，两者之间水平温度梯度达 2.5°C/10 km，此时辐合线两侧风速明显增强。通过推导中尺度 Boussinesq 近似的扰动方程组（孙继松和杨波, 2008; 叶朗明等, 2019），得出：假定一个简单的二维空间中尺度流场，中尺度运动完全由地形强迫造成的，则风垂直切变和温度水平分布的关系为 $\partial(\partial u/\partial z)/\partial t = -\lambda(\partial\theta/\partial x)$。这样由于降水潜热释放原因，在对流层中层将出现山坡（天露山）一侧气温高于南部的现象，即 $\partial\theta/\partial x > 0$，根据上述公式关系，将出现对流层中上层南风气流减速，对流层低层南风气流加速的现象。而在近地面层，降水蒸发将造成山坡的气温快速下降，进一步加大了水平温度梯度，即边界层顶南风气流加速明显快于近地面层的现象，造成风场垂直切变（水平涡度）加强，水平涡度在有利的条件下被扭转成垂直涡度，从而有利于 MCS 的维持。同时，从 01:42 阳江雷达组合反射率图 5d 和径向速度图 5d 来看，天露山附近的对流发展异常旺盛，强回波中心达 63 dBZ，回波顶高伸展至 15 km，低空水汽不断对流体中流入，边界层辐合进一步加强，22 日 02:00 至 03:00 恩平锦江站记录到 165 mm h^{-1} 的强降水（图 5c）。由此可见，由于天露山脉地形作用，从地面至边界层顶部的风速垂直切变与强降水之间可能出现正反馈现象，导致这种小尺度对流系统长时间维持。

5 微物理结构特征

本次极端暴雨事件的产生与 MCS 的云团特征、降水类型、降水粒子的微物理特征密切相关。这次暴雨过程在微物理结构上是否满足极端降水特征？本节从对流云团和雨滴谱特征上进行了研究。

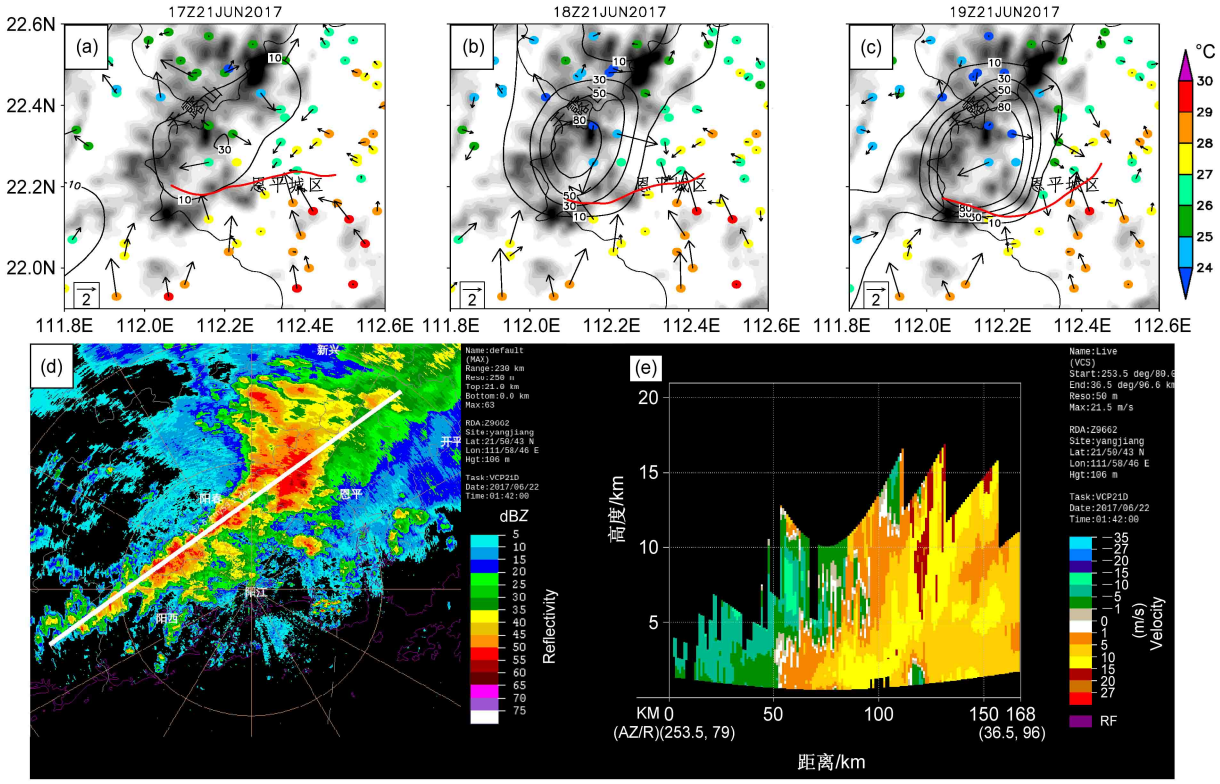

图 5　2017 年 7 月 22 日（a）01:00、（b）02:00、（c）03:00 区域自动站风场（箭头）、气温（彩色圆点）和该时刻未来 1 h 降雨量（等值线，单位：mm）分布（红色实线为中尺度辐合线；灰色阴影部分为详细地形）；(d) 2017 年 7 月 22 日 01:42 阳江雷达（d）组合反射率（单位：dB*Z*）和（e）径向速度剖面（剖面位置如 d 图中白色实线所示）

Fig. 5　Distribution of wind field (arrow), temperature (colored dot), and hourly rainfall (rainfall in the next one hour at this time; contour, units: mm) in Guangdong at (a) 0100 BJT 22 June, (b) 0200 BJT 22, and (c) 0300 BJT 22 2017 (the solid red line represents the mesoscale convergence line, the shaded areas represent the topographic height). (d) Combined reflectance (dB*Z*) and (e) radial velocity profile of Yangjiang radar at 0142 BJT 22 June (the positions of the profiles are shown as the solid white line in Fig.5d)

5.1　云团微波特征分析

云的组成和相态反映了 MCS 发展情况，通过卫星反演技术可以获取云顶温度，并以此来判别深对流和上冲云顶。目前，深对流红外探测主要采用云顶亮温阈值法。一般以−38°C 以下的云顶明温度作为判断深部对流的标准，−65°C 以下的云顶亮温为冲顶对流云的标准。由于红外通道的光谱特性，对深对流云和卷云的识别可能比较困难，因为深厚对流伴随着浓度较高的冰粒子，而 183.31 GHz 附近的水汽通道，对冰水含量的变化尤其敏感。微波具有穿透云和雨的独特优势，能更清晰地揭示强降水云团的结构特征。

由 FY-3B 微波湿度计 CH1（图 6a）、CH2（图 6b）可知，广东西部有呈准东西分布的对流云系活动，小于−120°C 的对流云区中存在有两个小于−140°C 的强对流中心，而两个对流中心之间过渡带以西的亮温梯度大值区就是关键区的所在位置；从 CH3（通道 3）、CH4（通道 4）、CH5（通道 5）也同样可以看到处于过渡带中。可以推断出 01:40 分关键区正好处于两个亮温极值中心以西的亮温梯度大值区，应该分布着大量冰粒子和云中水粒子，对流极为强烈。由于 3～5 通道反映 400 hPa、600 hPa、800 hPa 水汽特征，也说明从底层到高层水汽供应充分。

5.2　降水微物理特征

廖菲等（2011）利用雨滴谱观测资料对华南不同降水过程特征进行分析，均得出了有意义的结论。从地面的滴谱资料分析来看，此次降水过程雨滴的微物理特征上也具有一定的特殊性。2017 年 6 月 21 日至 22 日恩平站 2DVD 雨滴谱仪观测的雨滴谱随时间变化特征如图 7a 所示。可以看到 2DVD 观测的雨滴数浓度非常高，最强降水时间段的小雨滴数浓度超过 10^5 mm^{-1} m^{-3}，远高于华南地区夏季平均值（约为 10^4 mm^{-1} m^{-3}），从分布来看存在大量

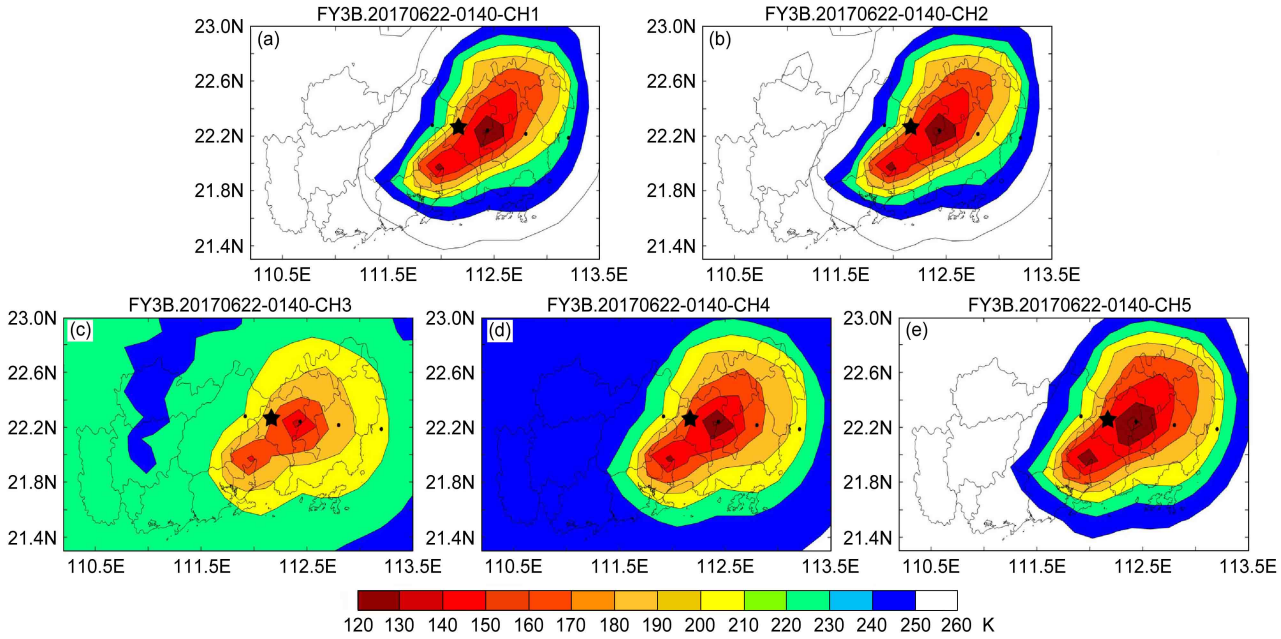

图 6 2017 年 6 月 22 日 01:40 FY3B 微波湿度计资料（填色区域为亮温≤250 K，黑色五角星代表极值中心）：（a）通道 1；（b）通道 2；（c）通道 3；（d）通道 4；（e）通道 5

Fig. 6 FY3B microwave hygrometer data at 0140 BJT 22 June 2017 for (a) Channel 1, (b) Channel 2, (c) Channel 3, (d) Channel 4, and (e) Channel 5 (units: K; the colored areas represent the light temperature ≤250 K, the black stars represent the extreme center)

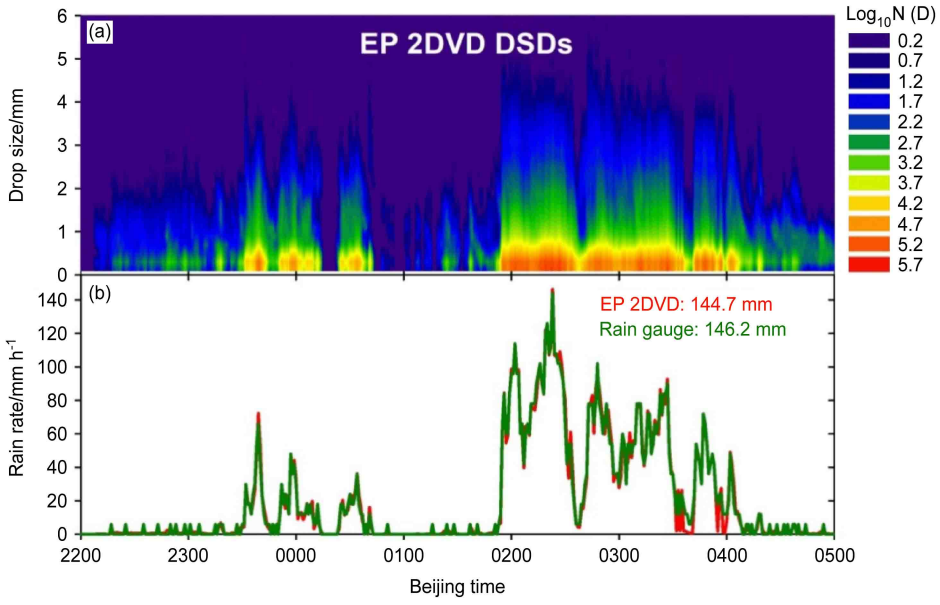

图 7 2017 年 6 月 21 日 22:00 至 22 日 05:00 恩平站（a）2DVD 雨滴谱仪观测的雨滴谱随时间变化，（b）2DVD 雨滴谱仪（红色线）和台站雨量计（绿色线）观测的降水强度变化

Fig. 7 (a) Variation of the raindrop spectrum observed by the 2DVD raindrop spectrometer at Enping station from 2200 BJT 21 June to 0500 BJT 22 June 2017; (b) variation of precipitation intensity observed by the 2DVD raindrop spectrometer (red line) and the station's rain gauge (green line) from 2200 BJT 21 June to 0500 BJT 22 June 2017

大粒径雨滴，雨滴尺寸可达 4 mm 以上。图 7b 还给出了分钟级降水强度随时间变化特征，可以看到 2DVD 雨滴谱仪观测的降水强度变化与附近的台站雨量计基本一致（两者直线距离 15 m），总降水量观测误差在 1% 左右，最大小时雨强接近 150 mm h^{-1}。

依据降水强度及其随时间变化特征，将降水分为对流性降水和层云性降水（图 8）。此次过程对

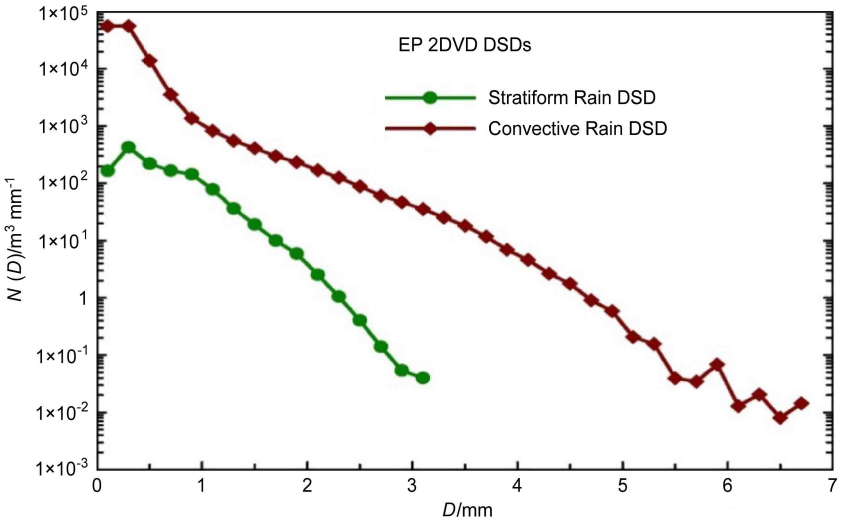

图 8　2017 年 6 月 21 日 22:00 至 22 日 05:00 恩平站 2DVD 雨滴谱仪观测的对流性降水（深红色线）和层云性降水（深绿色线）平均雨滴谱分布

Fig. 8　Distribution of convective precipitation (dark red line) and stratospheric precipitation (dark green line) observed by the 2DVD raindrop spectrometer at Enping station from 2200 BJT 21 June to 0500 BJT 22 June 2017

流性降水样本比例高达 46%，远超过华南地区夏季平均值（约 18%）。对流性降水小粒径段雨滴数浓度接近 10^5 $mm^{-1}m^{-3}$，雨滴谱宽高达 6.7 mm，且各个粒径段雨滴数浓度远远高于层云性降水。整体而言，此次降水过程的降水粒子雨滴总体数浓度非常高，且存在大雨滴，从而导致超高雨强。对流性降水样本的平均尺寸介于 1.5～2.0 mm，归一化截距指数介于 3.4～4，整体降水属性介于大陆型降水与海洋型降水之间。

6　结论和讨论

本文利用阳江多普勒雷达、风廓线仪、FY-3B 微波湿度计和二维雨滴谱仪等多种新型探测资料，对 2017 年 6 月 22 日华南一次极端降水的维持机制及微物理特征进行了综合分析。研究结果表明：

（1）本次极端降水过程发生在暖湿西南气流中，中低纬度西风气流平直，冷空气活动弱，属于典型的暖区降水。尽管西南气流的风速并不算大，但其在关键区的辐合显著，且输送了大量的水汽，此外，关键区的环境条件都有利于 MCS 的发生发展，而且对流抑制能量较小，有利于对流的触发。

（2）此次过程的累积降水量主要由一个局地发生发展的准静止长生命史的 MCS 产生。对流于 2017 年 6 月 21 日夜间（22:00）触发，不同性质下垫面热力差异以及降水蒸发冷却导致在山前形成中尺度辐合线，这对于本次强降水 MCS 的触发至关重要。中尺度辐合线两侧温差约 2～3°C，由于环境大气低层十分暖湿，且中低层风速较小，因此 MCS 造成的冷出流与边界南侧的环境暖湿气流风速相当，稳定少动的辐合线持续触发新的对流单体。

（3）从探空站和风廓仪资料分析可知，暴雨发生前温暖潮湿的背景环境中，南风层的增厚与其风速的增大为对流的发生发展提供了有利的动力条件，充沛的热量与水汽输送加剧了气层的不稳定性，为对流的发生发展提供了有利的热力条件。本次事件中，对流云的高度较高，分布着大量冰粒子和云中水粒子。雨滴谱仪资料显示，最强降水时间段的小雨滴数浓度远高于华南地区夏季平均值，且出现大量大雨滴，整体降水属性介于大陆型降水与海洋型降水之间。对流云团特征和粒子微物理特征保证了极高的降水效率，使得短时间内局地产生了极强的降水。

本文初步揭示了此次极端降水事件的降水特征，探讨了强降水 MCS 的维持机制和云雨微物理过程。由于观测资料和分析方法的限制，对此次过程的了解仍然存在很多不足。例如：观测资料时空分辨率还不够高，更加细微的中 β、中 γ 尺度系统的三维结构和演变特征仍未进行细致探讨，且对于地形的具体作用也分析不够，这些方面将在以后的工作中进行研究。

参考文献（References）

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 Peiling, Hu Dongming, Zhang Yu, et al. 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou region on 7 May 2017 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 44(4): 500−510. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.04.003

郭姿佑, 伍志方, 蔡景就, 等. 2019. “18·8”广东季风低压持续性特大暴雨水汽输送特征 [J]. 暴雨灾害, 38(6): 587−596. Guo Ziyou, Wu Zhifang, Cai Jingjiu, et al. 2019. Analysis of water vapor transport characteristics of a monsoon low-pressure continuous heavy rain event at the end of August 2018 in Guangdong area [J]. Torr Rain Disaster (in Chinese), 38(6): 587−596. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.06.003

黄士松. 1986. 华南前汛期暴雨 [M]. 广州: 广东科技出版社, 244pp. Huang Shisong. 1986. Heavy Rain in Pre-Flood Season in South China (in Chinese) [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 244pp.

李明华, 陈芳丽, 姜帅, 等. 2019. “18.8”粤东暴雨中心极端强降水“列车效应”分析 [J]. 暴雨灾害, 38(4): 329−337. Li Minghua, Chen Fangli, Jiang Shuai, et al. 2019. The analysis of train effect features of a record-breaking severe rainfall in eastern region of Guangdong in August 2018 [J]. Torrential Rain Disaster. (in Chinese), 38(4): 329−337. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.04.005

廖菲, 邓华, 万齐林, 等. 2011. 珠江三角洲地区两次夏季典型雷电天气系统的雨滴谱特征观测研究 [J]. 高原气象, 30(3): 798−808. Liao Fei, Deng Hua, Wan Qilin, et al. 2011. Observation studies on characteristics of raindrop size distribution of two typical summer thunderstorm cases in the Pearl River Delta [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 30(3): 798−808.

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, 119pp. Lin Liangxun, Feng Yerong, Huang Zhong, et al. 2006. Technical Guidance on Weather Forecating in Guangdong Province (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 119pp.

孙继松, 杨波. 2008. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨 [J]. 大气科学, 32(6): 1352−1364. Sun Jisong, Yang Bo. 2008. Meso-β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(6): 1352−1364. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.10

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 Jisong, He Na, Wang Guorong, et al. 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. Torrential Rain Disaster. (in Chinese), 31(3): 218−225.

陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, pp. Tao Shiyan. 1980. Rainstorm in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.

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 Fuyou, Zheng Yongguang, Zhang Xiaoling, et al. 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 44(4): 469−484. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.04.001

Wu Mengwen, Luo Yali. 2016. Mesoscale observational analysis of lifting mechanism of a warm-sector convective system producing the maximal daily precipitation in China mainland during pre-summer rainy season of 2015 [J]. J. Meteor. Res., 30(5): 719−736. doi:10.1007/s13351-016-6089-8

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 Zhifang, Cai Jingjiu, Lin Liangxun, et al. 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 44(4): 485−499. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.04.002

夏茹娣, 赵思雄, 孙建华. 2006. 一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统环境特征的分析研究 [J]. 大气科学, 30(5): 988−1008. Xia Rudi, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2006. A study of circumstances of Meso-β-scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(5): 988−1008. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.26

徐燚, 闫敬华, 王谦谦, 等. 2013. 华南暖区暴雨的一种低层重力波触发机制 [J]. 高原气象, 32(4): 1050−1061. Xu Yi, Yan Jinghua, Wang Qianqian, et al. 2013. A low-level gravity wave triggering mechanism for rainstorm of warm zone in South China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 32(4): 1050−1061. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00100

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 Langming, Miao Junfeng. 2014. Mesoscale analysis of a typical heavy rain event caused by returning flow in the warm sector in southern China [J]. Torrential Rain Disaster. (in Chinese), 33(4): 342−350. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.04.006

叶朗明, 吴乃庚, 张华龙, 等. 2019. 海陆风和地形对一次弱天气背景下暖区特大暴雨的影响分析 [J]. 暴雨灾害, 38(6): 597−605. Ye Langming, Wu Naigeng, Zhang Hualong, et al. 2019. Analysis of the influence of sea-land breeze and topography on the extraordinary heavy rain in warm sector under a weak weather background [J]. Torrential Rain Disaster. (in Chinese), 38(6): 597−605. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.06.004

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 Yuchun, Wang Yehong. 2009. A review of studies on torrential rain during pre-summer flood season in South China since the 1980’s [J]. Torrential Rain Disaster. (in Chinese), 28(3): 193−202, 228. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2009.03.001

Zhong L Z, Mu R, Zhang D L, et al. 2015. An observational analysis of warm-sector rainfall characteristics associated with the 21 July 2012 Beijing extreme rainfall event [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 120(8): 3274−3291. doi:10.1002/2014JD022686