

赵娴婷,王晓芳,王珏,等,2020.2016年7月18—20日湖北省特大暴雨过程的中尺度特征分析[J].气象,46(4):490-502. Zhao X T, Wang X F, Wang J, et al, 2020. Analysis of mesoscale characteristics of torrential rainfall in Hubei Province during 18—20 July 2016[J]. Meteor Mon, 46(4):490-502(in Chinese).

2016年7月18—20日湖北省特大暴雨过程 的中尺度特征分析*

赵娴婷 王晓芳 王珏 汪小康 肖艳姣 冷亮 付志康

中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430205

提 要: 利用多种常规和非常规观测资料诊断分析了湖北 2016 年 7 月 18—20 日特大暴雨过程的降水特点以及中尺度对流系统(MCS)的发生发展特征和环境场条件,结果表明:此次特大暴雨过程具有很强的极端性,分为梅雨锋南侧暖区降水和梅雨锋面降水两个阶段,都具有较为极端的水汽条件。第一阶段在地面风场辐合的作用下触发了初生对流单体,西南低空急流出现脉动,湿层的增厚促进了强雷暴的发展。新生单体在雷暴上游生成,迅速并入强雷暴,后向传播是其稳定少动的重要原因之一。强盛阶段,强雷暴具有暖云低质心的特征,低层垂直风切变与雷暴偏北风出流的方向配置、中气旋的出现都促进了上升运动,促使强雷暴长时间维持,造成了马良站连续数小时出现高强度降水。第二阶段,环境风平行分量远大于垂直分量,促进了东北—西南向平行层状 MCS(PS 型 MCS)的形成。具有多单体依次排列的特征,新生单体在系统西南侧地面辐合线的作用下不断生成发展,使得 PS 型 MCS 增强维持,移动缓慢。马良站受到 PS 型 MCS 对流线和西北侧层状回波的影响,小时强降水明显较第一阶段偏弱。

关键词: 极端暴雨,强雷暴,平行层状 MCS,风廓线

中图分类号: P445,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.04.004

Analysis of Mesoscale Characteristics of Torrential Rainfall in Hubei Province During 18—20 July 2016

ZHAO Xianting WANG Xiaofang WANG Jue WANG Xiaokang
XIAO Yanjiao LENG Liang FU Zhikang

Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

Abstract: Based on various conventional and unconventional data, precipitation characteristics, generation and development of the mesoscale convective system (MCS) and environment conditions of the torrential rainfall in Hubei Province during 18—20 July 2016 are analyzed in this paper. The results show that this torrential rainfall process was highly extreme. The process consisted of warm area precipitation in the south of Meiyu front and Meiyu frontal precipitation. There were extreme water vapor conditions in the two periods. In the first stage, the primary convective monomers were triggered by the convergence of the ground wind field. The southwest low-level jet showed pulsation. The thickening of the wet layer promoted the development of strong thunderstorm. The new monomers formed in the upper reaches of thunderstorms, and rapidly merged into strong thunderstorm. The backward propagation was one of the important reasons for its stable and moveless. In the strong phase, the strong thunderstorm had the characteristics of

* 国家自然科学基金项目(41620104009、91637211、41705019、41975058)和湖北省气象局科技发展基金项目(2017Q03、2019Z03)共同资助
2018年12月18日收稿; 2019年10月22日收修定稿

第一作者:赵娴婷,主要从事暴雨机理研究. Email:yingzi190110@163.com

warm cloud and low center of mass. The configuration of vertical wind shear in the low layer and the northerly outflow of thunderstorm and the appearance of mesocyclone both promoted the upward movement, causing the long-term maintenance of the strong thunderstorm. It caused high intensity precipitation at Maliang Station for several hours. In the second stage, the line-parallel layer-mean wind component was bigger than the line-perpendicular, which promoted the formation of northeast-southwest parallel stratiform MCS. It had the characteristics of multiple monomers arranged in sequence, and the nascent monomers were continuously generated under the effect of the ground convergence line on the southwest side of the system. Their development made the parallel stratiform MCS enhanced and maintained. The Maliang Station was affected by the parallel stratiform MCS convection line and the northwest side layered echo, and the hourly precipitation was significantly weaker than in the first stage.

Key words: extreme torrential rainfall, severe thunderstorm, parallel stratiform MCS, wind profile

引言

暴雨是重要的灾害性天气之一,常常造成内涝、洪水、泥石流等自然灾害,给人民生命财产安全和社会经济发展带来严重威胁,对暴雨的观测分析和预报预警一直是国内外气象工作者关注的焦点。研究表明,暴雨通常是在有利的天气背景和环境条件下产生的。黄明策等(2010)、孙俊等(2014)、杨舒楠等(2017)、赵娴婷等(2016)研究指出低空急流和超低空急流的发展增强和暴雨的发生具有密切的关系。湛芸等(2012)、廖晓农等(2013)研究指出2012年北京“7·21”特大暴雨水汽条件有较强的极端性。王啸华等(2012)、赵金霞等(2012)、栗晗等(2018)研究认为边界层辐合线是对流发生发展的重要因素之一。

早在20世纪80年代,陶诗言(1980)就指出梅雨锋降水是多尺度系统相互作用的结果。中尺度对流系统(MCS)往往是导致暴雨的直接影响系统(张弘和孙伟,2005;何立富等,2006;梁红丽等,2018)。国内外针对MCS已经开展了很多研究。伍志方等(2018)研究指出在2017年广州“5·7”特大暴雨中,MCS成熟回波垂直结构上均呈低质心暖云降水特点。张楠等(2018)指出“后向传播”机制是雷暴产生强降水的重要成因。郑淋淋和孙建华(2016)通过数值试验研究发现垂直风切变的增强利于对流的组织化且易形成线状。Parker and Johnson(2000)将线状MCS分为3类:层云区位于对流区后部的尾随层状(tailing stratiform, TS)MCS,层云区位于前部的前导层状(leading stratiform, LS)MCS和层状云

平行于对流区的平行层状(parallel stratiform, PS)MCS,且研究指出层云区的形状与受对流层中高层系统相对气流影响的水汽平流有一定的关系。国内王晓芳和崔春光(2012)、王晓芳(2012)对长江中下游地区梅雨期线状MCS的组织类型和环境特征进行了统计分析,指出环境风相对对流线分量的垂直分布是决定线状MCS组织模型的重要因子。

2016年7月18—20日湖北出现特大暴雨过程,过程雨量大,极端事件多发,其中荆门马良站32 h降水达874.6 mm,其6、12、32 h降水均突破历史极值,极为罕见。本文即利用多种常规和非常规观测资料对此次特大暴雨过程的降水特点以及中尺度系统的发生发展特征和环境场条件进行诊断分析,以期对此类极端降水发生发展过程加深认识,为今后的预报提供思路。

1 资料与方法

所用的资料包括NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 逐6 h再分析资料、国家观测站24 h降水资料、逐1 h降水资料、湖北逐1 h区域自动站风场资料、常规探空资料、多普勒雷达组合反射率资料、单站雷达资料(荆州站)、边界层风廓线雷达探测资料(荆门站)和地基GPS/MET水汽监测资料(湖北)。其中,地基GPS/MET水汽监测资料为大气整层可降水量,是利用湖北省气象局建设接收的GPS/MET站点资料及相关地面资料,通过GAMIT解算软件并采用一定的反演方法(徐桂荣等,2010)计算得到的。国内多名气象工作者对湖北省GPS/MET数据质量进行了检验,指出GPS/MET数据与常规探空资料

有较好的相关性,相关系数达 0.9 以上(王继竹等, 2014;付志康等,2017)。

基于多源观测资料,运用诊断分析和对比分析的方法,对 2016 年 7 月 18—20 日特大暴雨过程的降水特点以及中尺度系统的发生发展特征和环境场条件开展了分析研究。

MCS 环境风的计算是用荆门风廓线雷达探测的各层次平均风场代表环境风场,将其投影到对流线移向上再减去“对流线”本身的移速,即得到相对于 MCS 平均风场的垂直分量,正值代表相对于 MCS 移向向前,负值代表相对于 MCS 移向向后。将环境风场投影到平行于对流线的方向,即得到相对于 MCS 平均风场的平行分量。

2 降水概况和环流背景

2.1 降水概况

2016 年 7 月 17—20 日,湖北地区出现强降水过程,造成鄂东北部、江汉平原北部、鄂西南局部地区出现严重洪涝灾害,倒塌房屋 8771 间,370 万余人受灾,死亡 18 人,失踪 3 人,农作物受灾面积为 330 980 hm^2 ,直接经济损失达 121.6 亿元。此次降水过程特点:(1)降水强度大,极端事件多发。7 月 18—20 日 72 h 累计强降水带呈东北—西南走向,强降水中心位于荆门附近(图 1a)。9 站出现极端日降水事件;3 站出现连续降水极端事件,其中随州、京山突破历史极值。荆门市沙洋县马良镇 32 h(7 月

19 日 02 时至 20 日 09 时)累计雨量为 874.6 mm,其 6、12、32 h 累计雨量均突破了湖北省有气象记录以来的历史极值。(2)高强度降水持续时间长。马良镇 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的强降水持续了 8 h,累计雨量为 599.8 mm, $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上强降水持续了 5 h,其中最小时降水出现在 19 日 06 时,达 $110.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 1b)。

2.2 天气背景分析

2016 年 7 月 18—20 日的环流形势场(图 2)显示,在 500 hPa 上,中高纬度西风槽发展东移,湖北地区主要受到槽前西南气流影响。在 700 hPa 上,18 日 20 时,西南低涡位于川东,暖切变线位于湖北中部。高假相当位温舌区从西南向东北伸展至湖北境内,其南侧伴随中心 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的西南低空急流,至 19 日 14 时,高假相当位温舌区范围逐渐扩大,低空急流强度逐渐增强(图略)。可见,湖北地区对流层低层暖湿空气进一步增强。19 日 20 时,低涡暖切东移北抬,湖北地区主要受低涡后部冷切变线的影响。湖北境内高假相当位温舌区逐渐变窄,其北侧假相当位温锋区逐渐南压,西南低空急流伸展至鄂东,范围扩大,中心强度增强至 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。综合小时降水和天气形势的演变特征,可以将降水划分为两个阶段:第一阶段(19 日 01—17 时),为暖区强降水;第二阶段(19 日 20 时至 20 日 09 时),为锋面强降水。两个阶段降水都伴随强盛的低空急流,为强降水的发生输送了充足的水汽和不稳定能量。

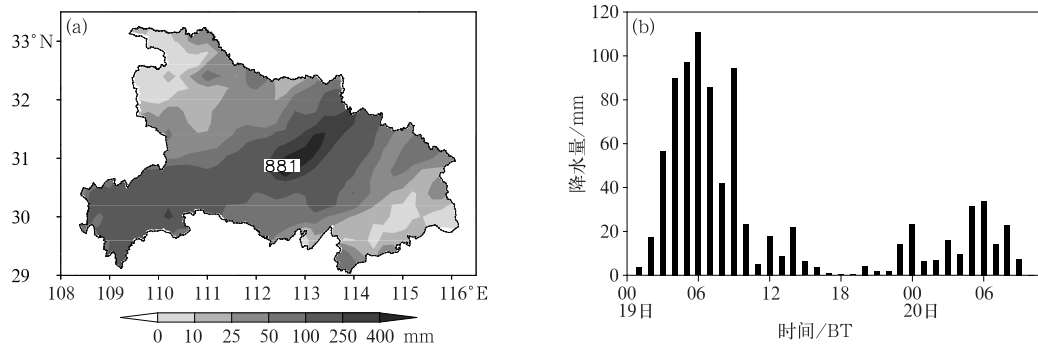


图 1 2016 年 7 月(a)18 日 08 时至 21 日 08 时 72 h 累计降水分布,

(b)19 日 00 至 20 日 11 时马良镇自动站小时降水量

Fig. 1 The accumulated rainfall during the period from 08:00 BT 18 to 08:00 BT 21 (a), time series of hourly rainfall at the automatic weather station of Maliang Town during the period from 00:00 BT 19 to 11:00 BT 20 (b) July 2016

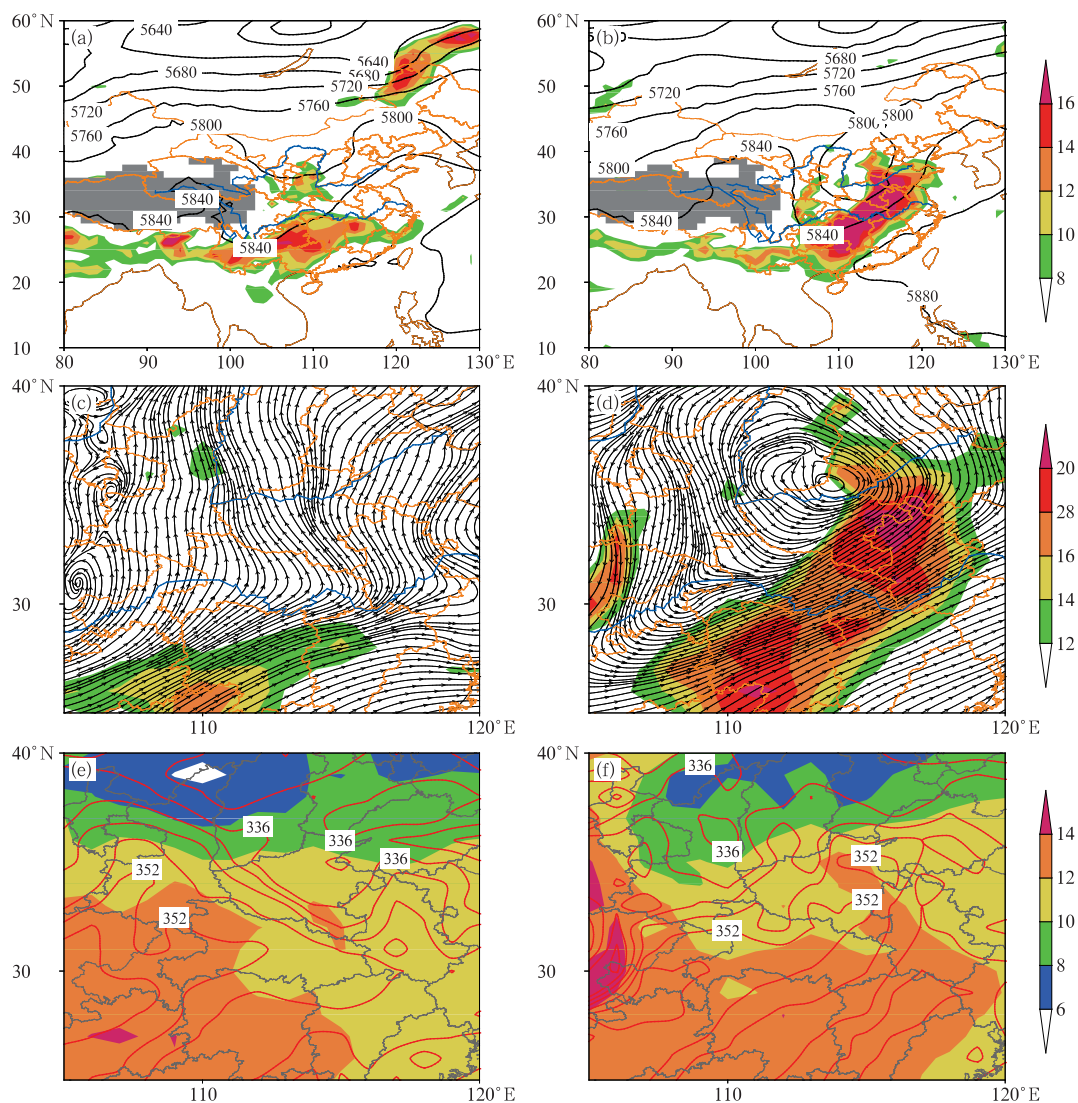


图 2 2016 年 7 月 18—19 日 (a,b)500 hPa 高度场(黑线,单位:gpm)和 700 hPa 水汽通量场(填色区,单位: $g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1}$;灰色阴影:700 hPa 地形), (c,d)700 hPa 全风速场(填色区,单位: $m \cdot s^{-1}$)和流场,(e,f)700 hPa 假相当位温场(红线,单位:K)和温度场(填色区,单位: $^{\circ}C$) (a,c,e)18 日 20 时,(b,d,f)19 日 20 时

Fig. 2 Distribution of (a, b) geopotential height (black line, unit: gpm) at 500 hPa and vapor flux (shaded area, unit: $g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1}$) at 700 hPa (grey shaded: 700 hPa topographic height), (c, d) 700 hPa total wind speed field (shaded area, unit: $m \cdot s^{-1}$) and flow field, and (e, f) equivalent potential temperature (red line, unit: K) and temperature (shaded area, unit: $^{\circ}C$) at 700 hPa in 18—19 July 2016 (a, c, e) 20:00 BT 18, (b, d, f) 20:00 BT 19

3 环境场特征

3.1 水汽条件

充沛的水汽是强降水产生的必要条件,大气可

降水量(简称 PWV)是表征整层水汽的水汽含量的物理量。从湖北 GPS/MET 组网探测的 PWV 分布(图略)来看,7 月 18 日 20 时,湖北中部大部分地区 PWV 在 60 mm 以上,在 18 日夜间至 19 日凌晨,马良站附近 PWV 迅速增加。19 日 00—23 时,马良站附近钟祥 GPS 监测的 PWV 维持在 67~75 mm

(图 3)。研究指出 PWV 达到 70 mm 是大气中非常极端的水汽条件 (Tian et al, 2015)。田付友等 (2017) 统计指出我国中东部大于 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水天气的 PWV 均值为 59.9 mm。可见, 7 月 18—19 日马良站附近水汽条件非常有利于短时强降水的发生。

3.2 探空分析

从 7 月 18 日和 19 日 20 时的武汉探空 (图 4a) 来看, 两个阶段强降水发生前, 低层和高层都趋于饱和。抬升凝结高度和自由对流高度均较低, CAPE 值分别为 700.9 和 $2237 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, K 指数分别为 40 和 41°C 。整体上看层结条件都较为有利。通过分析各层风场发现, 18 日 20 时, $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变为 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 为弱垂直风切变。Davis (2001) 指出对流层整层相对湿度越大, 垂直风切变越小, 雨滴越不容易蒸发, 降水效率越大。19 日 20 时, $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变增强为 $15.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到中等以上垂直风切变。郑淋淋和孙建华 (2016) 指出垂直风切变的增强有利于对流组织成线状。

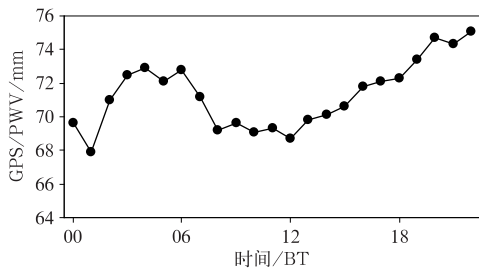


图 3 2016 年 7 月 19 日钟祥 GPS 监测的 PWV 随时间的演变

Fig. 3 Variation of GPS/PWV at Zhongxiang Station on 19 July 2016

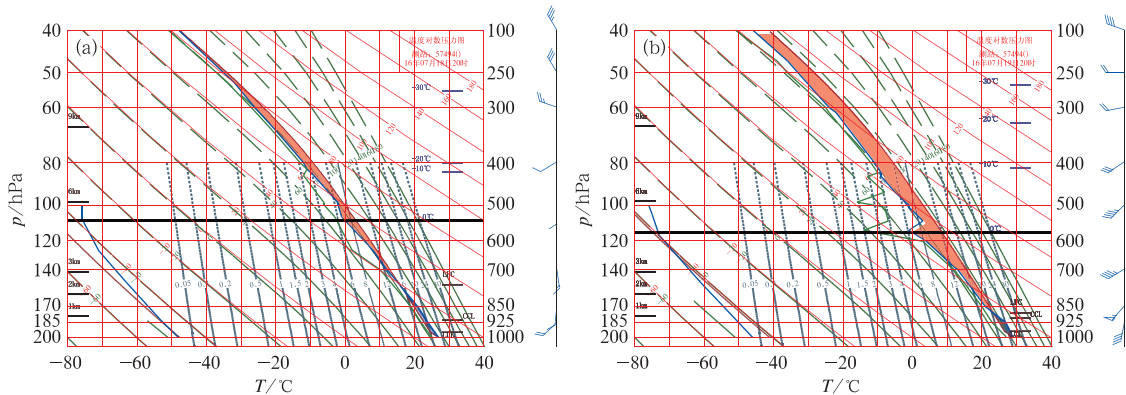


图 4 2016 年 7 月 (a) 18 日 20 时和 (b) 19 日 20 时武汉探空 T -log p 图

Fig. 4 Wuhan sounding T -log p chart at 20:00 BT 18 (a) and 19 (b) July 2016

4 第一阶段中尺度特征及形成维持机制

4.1 雷达回波演变特征分析

暖区强降水期间, 雷达回波的演变分为 3 个阶段。

第一阶段为稳定少动的块状回波形成。7 月 19 日 01 时 (图 5a), 马良南侧形成 45 dBz 以上的对流回波 A, 分为南北两块, 北侧对流回波迅速经过马良站, 南侧对流回波西侧和南侧不断有新单体生成并迅速增强至 45 dBz 后并入强回波。02:12 (图略), 原强回波 A 的南侧对流回波移至马良站上空, 之后稳定少动, 维持在马良站附近。至 03 时 (图 5b), 回波 A 中 40 dBz 以上的强回波已经发展为椭圆形块状回波, 且回波中心强度达到 55 dBz。04:12 (图 5c), 45 dBz 以上面积扩大一倍, 聚合成一个中心强度 55 dBz 以上的东北—西南向椭圆形块状回波单体, 其西南侧又有新生单体生成并入, 50 dBz 的强中心逐渐连成一条线, 位于强回波的南侧。

第二阶段为具有“穹窿”结构的强单体形成。05 时 (图 5d), 强回波 A 进一步发展, 成为一个结构密实的圆形块状回波单体, 50 dBz 以上面积扩大一倍, 回波强度达到最强。强单体 A 稳定维持在马良站, 导致马良站出现了最强的 2 h 降水 (05 时 $97.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 06 时 $110.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。

荆州单站雷达资料显示, 19 日 04:23, 0.5° 仰角上, 强单体 A 东南前沿出现了 V 型缺口 (图 6a), 同时在 0.5° 径向速度场上可以看到出现了中涡旋, 旋转速度为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6b), 1.5° 仰角上也可以看

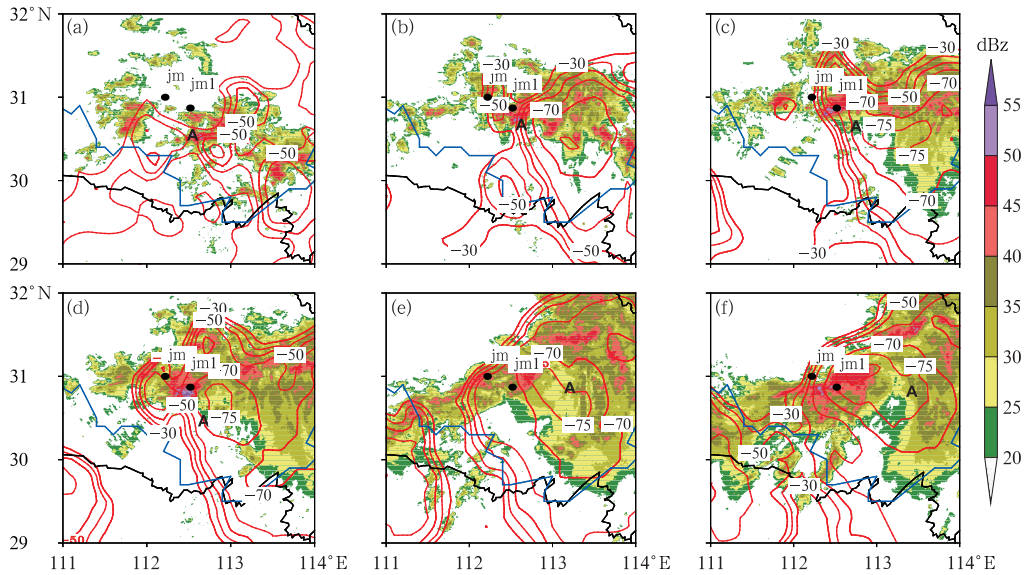


图5 2016年7月19日雷达组合反射率拼图(填色区)和卫星亮温(等值线,单位:℃)分布

(a)01:00,(b)03:00,(c)04:12,(d)05:00,(e)08:00,(f)09:00

(“•”为马良和荆门站位置)

Fig.5 Radar reflectivity (shaded area) and TBB distribution (contour, unit: ℃) on 19 July 2016

(a) 01:00 BT, (b) 03:00 BT, (c) 04:12 BT, (d) 05:00 BT, (e) 08:00 BT, (f) 09:00 BT

(“•”: locations of Jingmen Station and Maliang Station)

到V型缺口(图6c),径向速度场显示旋转速度为 $13.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图6d)。两个仰角上都出现了涡旋,且旋转速度达到了弱中气旋的标准,可判断出现了弱中气旋。弱中气旋的特征维持了两个体扫。在剖面图上(图6e),可以看到回波顶高18 km左右,回波中心强度在2 km左右,达62 dBz,回波质心较低,50 dBz以上强回波在7 km以下,19日08时的零度层高度为5190 m,50 dBz回波最大伸展高度仅高于零度层2 km左右,大部分还位于大气零度层以下,具有暖云低质心降水的特征。整体回波呈倾斜结构,45 dBz强回波向南侧倾斜,“穹窿”前方清晰可见弱回波区缺口,45 dBz以上强回波位于“穹窿”区上方。“穹窿”内部回波强度较小,说明此时维持着强盛的上升气流,使得强单体能够长时间维持。

第三阶段为多单体风暴的形成,08时(图5e),强回波A已经减弱移出马良站,其西南侧的强回波迅速向东北移动并入回波A,回波A进一步增强,形成东北—西南向椭圆形多单体风暴。09时,40 dBz以上强回波面积扩大至最大(图5f),缓慢东移,造成了马良站再次出现 $94.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水。在荆州单站雷达资料显示的剖面图上(图6g),可以看到此时对流系统由多个单体构成,中心强度在50 dBz

左右。09:53,强回波迅速减弱消散(图略)。

从卫星云图上看(图5),第一阶段强降水发生时,云顶亮温呈椭圆形,非对称分布, $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的TBB等值线基本上盖住了湖北地区25 dBz以上的大片回波,梯度大值区位于东侧,A作为整个镶嵌在大片层状回波中的一个强单体,位于东侧TBB梯度大值区,TBB低值中心的西北侧,TBB低值中心低于 $-75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

综上所述,可以看出马良站第一阶段的强降水主要由镶嵌在大片层状回波中的强单体A造成,它位于云顶亮温梯度大值区,具有稳定少动、上游新生单体并入的特征,在强盛阶段发展成为嵌有中气旋的强单体。在垂直结构上表现为低质心暖云降水的特点,强盛期具有向南侧倾斜的穹窿结构。

4.2 强雷暴形成维持机制

在第一阶段强降水过程中,强雷暴稳定维持造成了19日马良站03—07时连续5 h小时降水超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。强雷暴的维持与低空急流的发展密切相关。马良站附近荆门风廓线雷达显示(图7a),在19日02—08时,1000~2400 m对流层低层一直维持着 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的西南急流,且于02时和04时

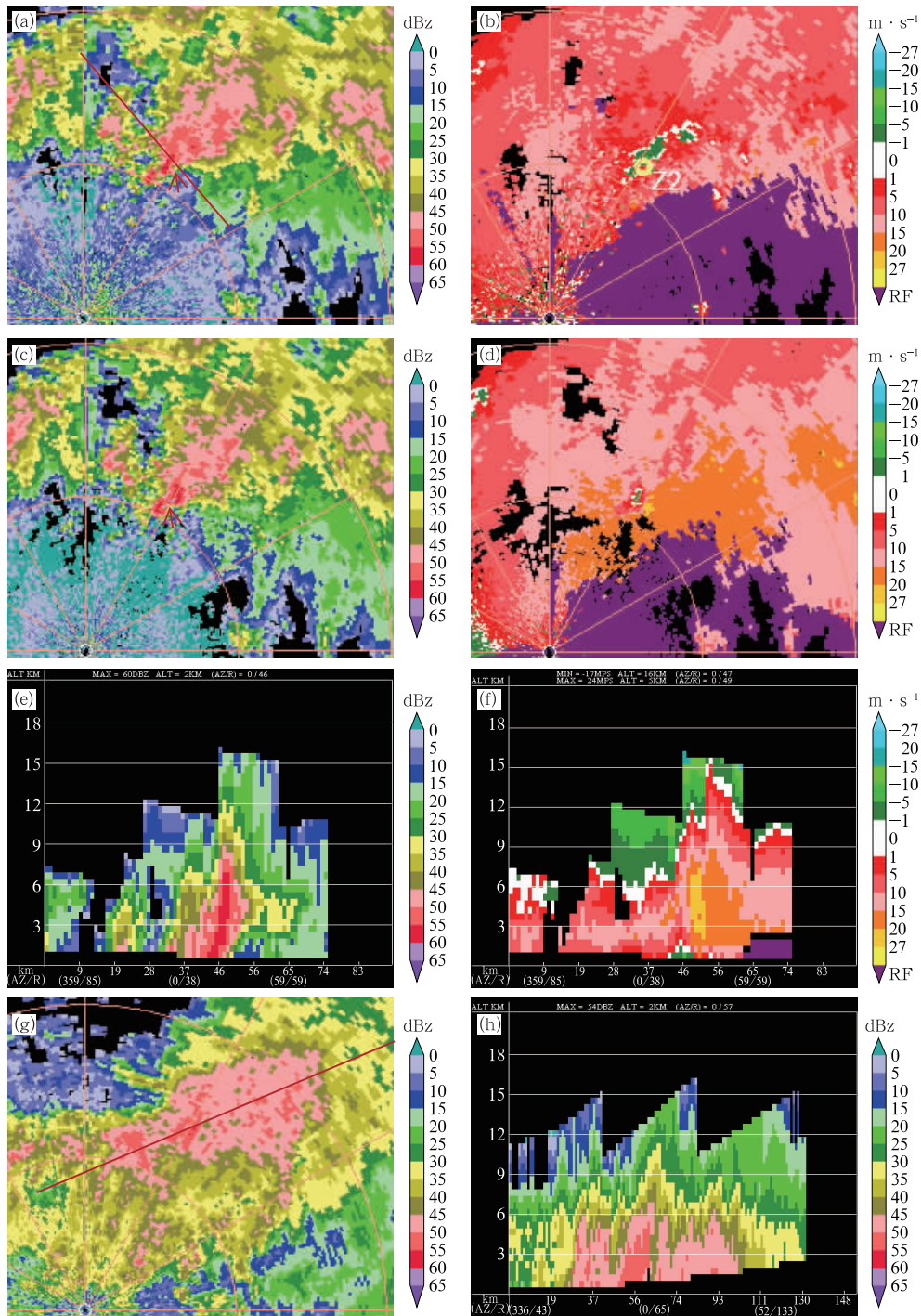


图 6 2016 年 7 月 19 日 04:23 荆州雷达(a,b)0.5°和(c,d)1.5°的(a,c)反射率(红色箭头: V 型缺口,图 6a 中红线:图 6e,6f 的剖面位置), (b,d)径向速度(黄色圆圈:中气旋)和(e)反射率、(f)径向速度剖面以及 09:04 荆州雷达(g)0.5°的雷达反射率(红色线为图 6h 的剖面)和(h)沿回波移动方向的雷达反射率剖面

Fig. 6 Radar reflectivity (a, c; red arrow: V-shaped notch; red line in Fig. 6a: profile position in Figs. 6e, 6f) and radial velocity (b, d; yellow circle: mesocyclone) of Jingzhou Radar at 0.5° (a, b) and 1.5° (c, d), and the cross sections of radar reflectivity (e) and radial velocity (f) at 04:23 BT 19 July 2016; radar reflectivity at 0.5° (g, red line: profile position in Fig. 6h) and the cross section of radar reflectivity (h) of Jingzhou Radar at 09:04 BT 19 July 2016

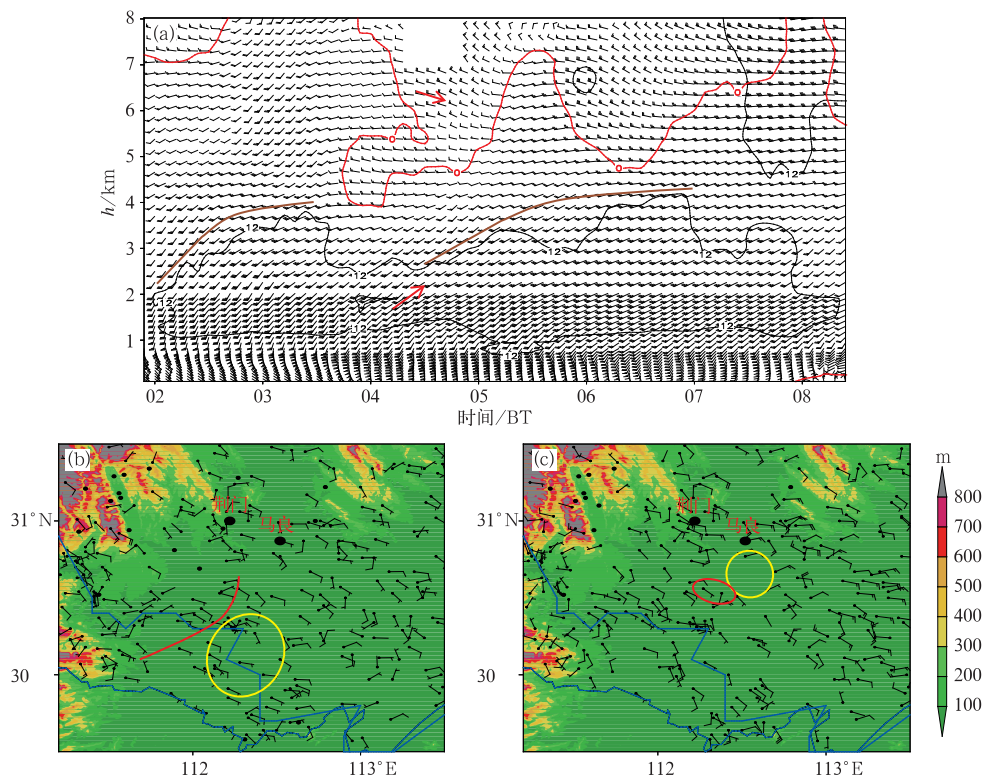


图 7 2016 年 7 月(a)19 日 02:00—08:30 荆门站风廓线雷达探测的水平风场(风羽)和全风速场(黑色等值线)垂直分布随时间的演变(红色实线:南北风分界线,箭头:示意风向,棕色实线:西南急流向高空发展的示意线);(b)18 日 23 时(黄色圆圈:初始回波位置,红色实线:辐合线)和(c)19 日 03 时(黄色圆圈:强回波 A 区域,红色圆圈:新生单体位置)地面风场(阴影:地形)

Fig. 7 (a) Structure of vertical wind profile with 6-min time span during the period 02:00—08:30 BT 19 July 2016 at Jingmen Observatory (barb: horizontal wind, black line: total wind speed pattern, red line: the dividing line between north and south winds, arrow: wind direction, brown line: the development of the southwest jet); (b, c) surface wind barbs at 23:00 BT 18 July (b, yellow circle: initial echo location, red line: convergence line) and at 03:00 BT 19 July (c, yellow circle: strong echo location, red circle: new monomer location) (shaded: terrain)

两次出现急流的向上扩展,05 时左右向下扩展,出现 1000 m 以下的超低空急流。马良站位于荆门站的东侧,低空急流出现脉动,湿层的增厚促使强雷暴增强和维持。

强雷暴在马良站附近稳定维持,后向传播也是重要的原因之一。18 日 23 时(图 7b),沙洋至荆州一带地面风场中东北风和东南风产生辐合,呈东北—西南走向,地面辐合线为初生对流单体的触发提供了动力辐合条件。此时马良站附近为东南风。19 日 03—07 时(图 1b),马良站一直维持着强降水。04:23 荆州雷达径向速度剖面(图 6f)显示,近地层有一定的负速度,延伸至 2 km 左右。由于荆州站位于强单体的西南方向,表明单体内由于降水拖曳等作用产生了偏北的辐散流出。马良站附近地面的风场可能受到降水辐散流出等影响,由东南风转为东北风,与南侧的东南风形成辐合(图 7c)。在强回

波上游(西南侧)不断激发出新生单体。风廓线显示(图 7a),中层为西南风,受西南引导气流影响,新生单体逐渐东北移并入强雷暴,因此强雷暴在马良站附近稳定少动,且与新单体多次合并,强度得到维持加强。另一方面,1000 km 以下为偏南风,3000 km 左右逐渐转为偏西风,低层垂直风切变与雷暴偏北风出流的方向配置使得对流容易垂直向上发展,有利于雷暴的加强和维持。

最大小时强降水出现在 19 日 05—06 时,强雷暴也发展到最强盛的阶段。在最强小时降水出现之前,19 日 04:23 和 04:29,强雷暴中出现了中气旋和穹窿结构。从风廓线随时间的演变上看(图 7a),19 日 03:30 以后,4000 m 以上逐渐由西南风转为偏西风,至 04 时,已转为偏北风,此时,强单体已经发展成中心强度 55 dBz 以上的椭圆形块状回波单体,高空转为偏北风,导致垂直风切变增强,利于中气旋结

构的出现。中气旋加强了雷暴主体内气流的旋转, 旋转的上升运动使得雷暴进一步强烈发展。

5 第二阶段中尺度特征及形成维持机制

5.1 雷达回波演变特征分析

19日22:18(图8a), 鄂中形成三条平行的东北—西南向对流线 A、B、C, 逐渐向东北方向移动。19日23:48(图8b), 东侧的对流线 C 减弱消失, 西侧和中部的对流线发展加强, 中心回波强度在 50 dBz 以上, 之后西侧对流线 A 逐渐合并到中部对流线 B 中, 20日00:48(图8c), 已经形成了东北—西南向平行层状 MCS(PS 型 MCS), 系统整体呈带状分布, 对流线两侧有狭窄的层状回波区。新单体在系统西南侧荆州一带不断产生发展, 向东北移动平行并入强对流回波区。系统在 01 时之前, 移动缓慢, 整体较稳定地维持在鄂中, 01 时之后, 移动加速。20日02:18(图8d), PS 型 MCS 已经移过马良站, 45 dBz 以上回波断裂成几块, 结构变得松散, 迅速减弱, 转为非线性 MCS。20日03:18(图8e), 在

PS 型 MCS 减弱回波的西南侧, 有新对流回波 D 生成, 迅速东北向移动, 经过马良站后减弱消散。其后非线性 MCS 中不断有对流回波发展增强并向东北方向移动(图8f)。

从荆州单站雷达资料看(图9a), 20日00:45, 在雷达径向 45° , 距雷达 25~150 km 处是 PS 型 MCS。沿雷达径向 45° 做剖面图(图9b), PS 型 MCS 由多个单体排列组成, 最强的单体回波顶高在 16 km 左右, 50 dBz 回波伸展高度在 4 km 左右, 强度较第一阶段强雷暴偏弱, 19日20时的零度层高度为 5643.6 m, 主要为暖云降水。

从卫星云图上看(图8), 第二阶段强降水发生时, 云顶亮温呈长椭圆形, 对称分布, 沿云团长轴两侧的云顶温度梯度大, 雷达回波中强对流区对应于 TBB 低值区, TBB 低值中心低于 -70°C 。两个阶段 TBB 中心值对比, 第一阶段云顶亮温更低, 云团发展更为强烈。

综上所述, 可以看出马良站第二阶段的强降水主要由 PS 型 MCS 和非线性 MCS 造成, PS 型 MCS 呈东北—西南向带状分布, 层状回波分布在对流线两侧, 具有前期稳定、后期加速东移、上游新生单体并入对流线的特征, 在垂直结构上表现为多个具有

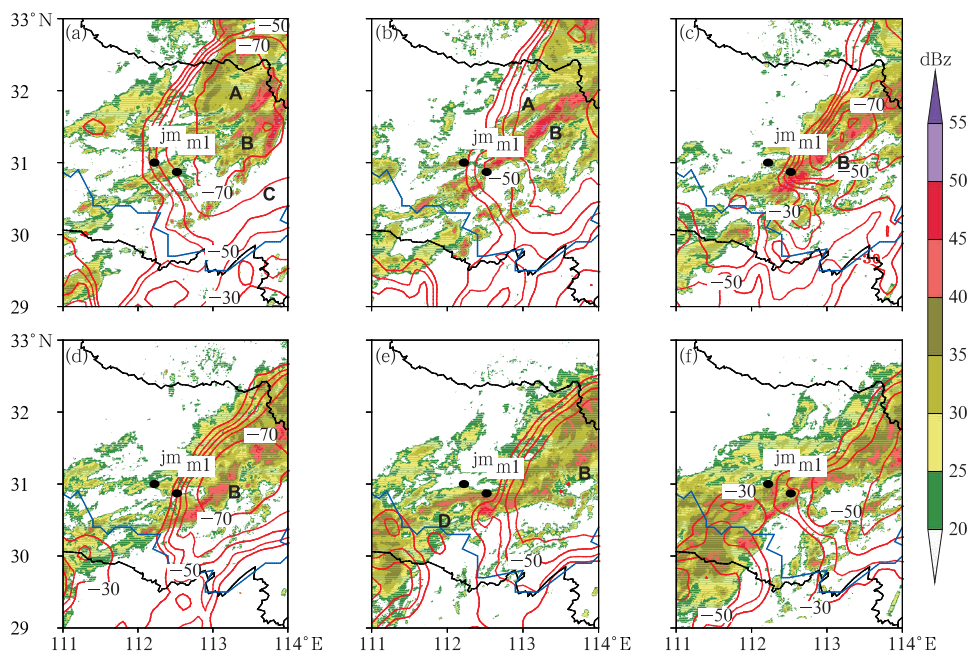


图8 同图5, 但为2016年7月(a)19日22:18, (b)19日23:48, (c)20日00:48, (d)20日02:18, (e)20日03:18, (f)20日04:24

Fig. 8 Same as Fig. 5, but at 22:18 BT (a), 23:48 BT (b) 19 July and at 00:48 BT (c), 02:18 BT (d), 03:18 BT (e) and 04:24 BT 20 July 2016

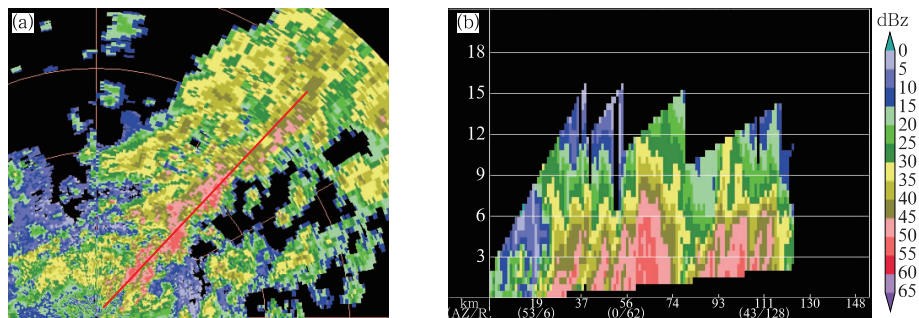


图9 2016年7月20日00:45荆州(a)雷达0.5°的雷达反射率(红线:剖面位置)和(b)径向45°的雷达反射率剖面

Fig. 9 Radar reflectivity at 0.5° (a, red line: profile position) and the cross section of radar reflectivity at 45° (b) of Jingzhou Radar at 00:45 BT 20 July 2016

低质心暖云结构的对流单体依次排列。值得注意的是,与第一阶段强雷暴中出现的上游新生单体并入比较,PS型MCS中新生单体由于离主体回波有一定的距离,可以在得到足够发展后再被并入系统中,成为一个独立的单体。而强雷暴中的新生单体在刚生成不久后就被强雷暴吸收,合并为强雷暴的一部分,强雷暴得以加强。

5.2 PS型MCS形成维持机制

在第二阶段中,PS型MCS是19日22时至20日02时主要的影响系统,虽然较第一阶段强雷暴的降水强度减少很多,但是5h累计降水也达到了51.7mm,其中2个时次出现了 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的强降水。PS型MCS由多个对流单体排成一列,马良站强降水主要是受到MCS对流线和西北侧的层状回波的共同影响。由于有些时次对流单体经过马良站,有些时次层状回波经过马良站,所以造成的马良站最大小时降水仅为 $23.3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,较第一阶段强雷暴导致的强降水明显偏小。PS型MCS的形成需要有利的环境风条件,王晓芳和崔春光(2012)研究指出PS型MCS以平行于对流线方向的平均风分量最为显著,且随高度增大。本文运用风廓线雷达探测的水平风的垂直分布,计算了平行于对流线的平行风分量和垂直于对流线的垂直风分量。如表1所示,从低层到高层相对于对流线的平行风分量都远大于垂直风分量,但是与王晓芳和崔春光(2012)研究不同的是,平行风分量随高度呈现先增大后减小的趋势。

PS型MCS的形成维持需要充足的水汽供应。风廓线显示(图10a),19日20时至20日00时,整层都是强盛的西南风。1000m以下维持 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

以上的超低空急流。00时以后,2000m以上也是一致的西南风,3000m左右间断出现 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的低空急流。整层强盛的西南风,低空西南急流和边界层急流对PS型MCS的形成维持起到了重要作用。

PS型MCS的维持机制主要是新单体在上游荆州地区不断生成,迅速发展增强后并入对流系统。从地面加密风场可以看出,19日22时(图10b),南北各存在一条东北—西南向辐合线,北侧辐合线位于荆门,与主体回波位置接近。南侧辐合线位于荆州,与新生单体回波位置接近。至20日00时(图10c),北侧辐合线略有东移,底部移近马良站,为PS型MCS主体回波的维持提供了有利的辐合条件。南侧辐合线一直稳定维持在荆州附近,利于为新生单体的持续生成。新生单体在强盛的西南引导气流(图10a)的作用下并入回波主体,使得PS型MCS发展加强。至20日01时(图略),北侧辐合线进一步东移,底部已经移过马良站。荆门风廓线图显示,00:48近地面转为西北风,至01:42,1000m左右也出现偏北气流,并迅速向上扩展,至02:54,2000m以下都转为西北气流控制,低层由西南风转为西北风,风速较小,说明低层有冷切变经过荆门地区。弱冷空气从低层侵入,可以造成暖湿空气的被迫抬升,导致凝结释放潜热,促进对流的发展。但是由于近地面冷空气的侵入也加速了PS型MCS的东移,至02:18,回波主体已在马良站偏东约50km处(图8d)。但是,南侧辐合线仍然稳定在荆州一带,新生单体也一直在荆州一带生成发展,受西南引导气流影响在主体回波西侧发展,不能及时地并入主体回波,PS型MCS迅速减弱消散。

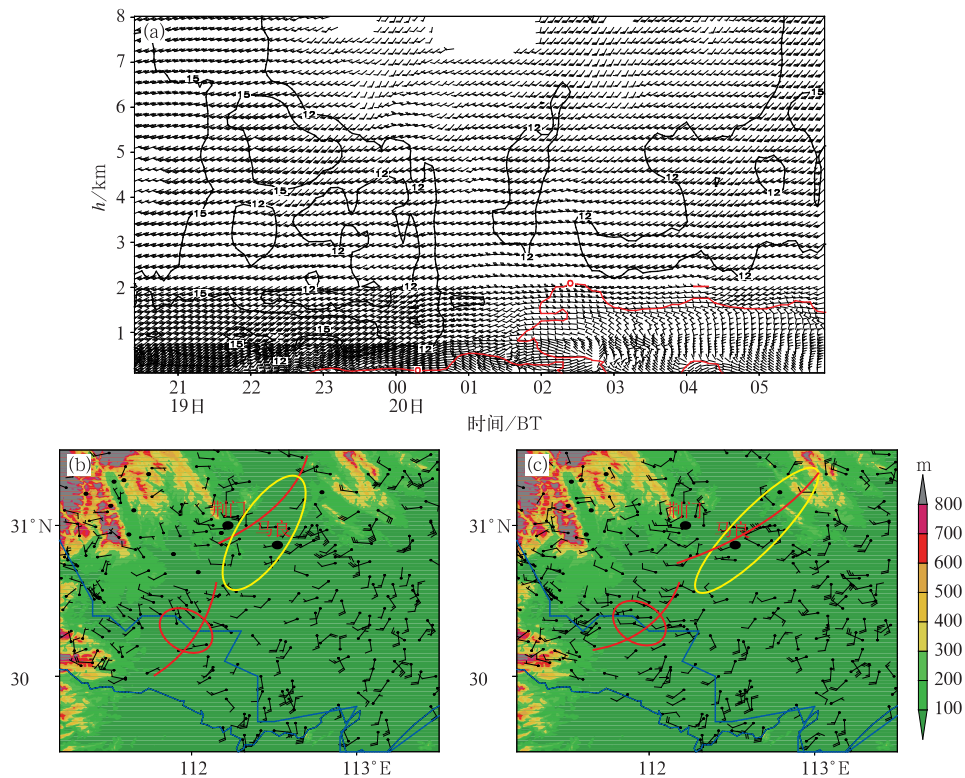


图 10 同图 7, 但为 (a) 19 日 20:00 至 20 日 05:00, (b) 19 日 22 时 (黄色圆圈: 对流线区域) 和 (c) 20 日 00 时 (黄色圆圈: PS 型 MCS 区域) (红色圆圈: 新生单体)

Fig. 10 Same as Fig. 7, but (a) during the period from 20:00 BT 19 to 05:00 BT 20 July, (b) at 22:00 BT 19 July (yellow circle: convective line location) and (c) at 00:00 BT 20 July 2016 (yellow circle: PS MCS location) (red circle: new monomer)

表 1 PS 型 MCS 相对对流线垂直和平行的平均风分量的垂直分布 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 1 Vertical distribution of the line-parallel or line-perpendicular layer-mean winds component relative to MCS (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

垂直层次	垂直风分量	平行风分量
中高层(5~8 km)	-0.92	9.77
中低层(2~4 km)	2.87	11.94
低层(0~1 km)	0.33	7.24

6 结论与讨论

2016 年湖北 7 月 18—20 日特大暴雨是一次极端降水过程, 具有降水强度大, 极端性强的特点, 本文通过分析多种常规和非常规资料, 分析了不同阶段的中尺度系统和环境条件:

(1) 极端降水分为暖区降水和锋面降水两个阶

段, 暖区降水效率高, 高强度降水持续时间长, 锋面降水小时降水量峰值相对较小, 高强度降水持续时间较短。

(2) 此次过程是在高空槽、低涡切变和低空急流的共同作用下造成的, 暖区降水伴随着低空暖湿气流的加强扩展, 锋面降水伴随着假相当位温锋区的南压。两个阶段的不稳定条件都非常有利于短时强降水的发生, 且都具有较为极端的水汽条件。

(3) 西南低空急流出现脉动, 湿层的增厚促使第一阶段强雷暴发展维持。初生对流单体在地面风场辐合的作用下触发, 向东北方向移动的同时发展增强为块状强回波。可能受到雷暴偏北出流的影响, 马良站附近地面转变为东北风, 与南侧的东南风形成辐合, 不断在强回波上游激发出新生单体, 并向东北方向移动并入强回波, 使得强回波稳定少动, 强度加强。强盛阶段, 强雷暴具有暖云低质心的特征, 出现向南倾斜的穹窿结构。低层垂直风切变与雷暴

偏北风出流的方向配置使得对流容易垂直向上发展。垂直风切变的增强,促使中气旋结构的出现,中气旋加强了雷暴主体内气流的旋转,旋转的上升运动促进雷暴维持发展。

(4) 环境风从低层到高层相对于对流线的平行风分量都远大于垂直风分量,利于第二阶段 PS 型 MCS 生成。PS 型 MCS 呈东北—西南向分布,对流线垂直剖面呈现多单体依次排列的特征。新生单体在系统西南侧地面辐合线的作用下不断生成发展,在西南气流的引导下并入对流线,促使 PS 型 MCS 增强维持,移动缓慢。后期,近地面冷空气的侵入加速了 PS 型 MCS 主体回波的东移,造成了主体回波与新生单体出现分离,PS 型 MCS 迅速减弱消散。PS 型 MCS 影响期间,马良站受其对流线和西北侧层状回波的影响,小时强降水明显较第一阶段偏弱。

本文仅从天气形势、中尺度特征、环境条件等方面诊断分析了7月18—20日的特大暴雨过程,未能仔细分析马良站东北侧大洪山地形的影响,地形对此次强降水过程的影响还有待于开展数值模拟试验进一步详细研究。

参考文献

- 裴芸,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).
- 付志康,万蓉,于胜杰,等,2017.湖北地基GPS大气可降水量变化特征分析及应用[J].气象科学,37(4):553-560. Fu Z K, Wan R, Yu S J, et al, 2017. Analysis and application of ground-based GPS precipitable water vapor characteristics[J]. J Meteor Sci, 37(4): 553-560 (in Chinese).
- 何立富,黄忠,郝立生,2006.“0374”南京特大暴雨中尺度对流系统分析[J].气象科技,34(4):446-454. He L F, Huang Z, Hao L S. 2006. Analysis of mesoscale convective systems in a heavy rain event in Nanjing[J]. Meteor Sci Technol, 34(4): 446-454 (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).
- 栗哈,王新敏,张霞,等,2018.河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,44(9):1136-1147. Li H, Wang X M, Zhang X, et al, 2018. Analysis on extremity and characteristics of the 19 July 2016 severe torrential rain in the north of Henan Province[J]. Meteor Mon, 44(9): 1136-1147 (in Chinese).
- 梁红丽,王曼,李湘,2018.2012年春末昆明大暴雨的中尺度对流系统特征分析[J].气象,44(11):1391-1403. Liang H L, Wang M, Li X, 2018. Characteristic analysis of mesoscale convective system of heavy rainstorm in Kunming in the late spring 2012[J]. Meteor Mon, 44(11): 1391-1403 (in Chinese).
- 廖晓农,倪允琪,何娜,等,2013.导致“7.21”特大暴雨过程中水汽异常充沛的天气尺度动力过程分析研究[J].气象学报,71(6):997-1011. Liao X N, Ni Y Q, He N, et al, 2013. Analysis of the synoptic-scale dynamic process causing the extreme moisture environment in the “7.21” heavy rain case[J]. Acta Meteor Sin, 71(6): 997-1011 (in Chinese).
- 孙俊,邓国卫,张渝杰,等,2014.“13·6·30”遂宁市特大暴雨成因的初探[J].气象,40(10):1174-1182. Sun J, Deng G W, Zhang Y J, et al, 2014. Primary study of the extreme rainfall event in Suining City on 30 June 2013[J]. Meteor Mon, 40(10): 1174-1182 (in Chinese).
- 陶诗言,1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社:225. Tao S Y, 1980. Torrential Rain in China[M]. Beijing: Science Press, 225 (in Chinese).
- 田付友,郑永光,张涛,等,2017.我国中东部不同级别短时强降水天气的环境物理量分布特征[J].暴雨灾害,36(6):518-526. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al, 2017. Characteristics of environmental parameters for multi-intensity short-duration heavy rainfalls over East China[J]. Torr Rain Dis, 36(6): 518-526 (in Chinese).
- 王继竹,郭英莲,徐桂荣,等,2014.湖北省不同资料反演大气可降水量的误差分析[J].气象,40(11):1308-1315. Wang J Z, Guo Y L, Xu G R, et al, 2014. Error analysis of estimating precipitable water vapor from different databases in Hubei Province[J]. Meteor Mon, 40(11): 1308-1315 (in Chinese).
- 王晓芳,2012.长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析Ⅱ:环境特征[J].气象学报,70(5):924-935. Wang X F, 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part II: environmental characteristics[J]. Acta Meteor Sin, 70(5): 924-935 (in Chinese).
- 王晓芳,崔春光,2012.长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析Ⅰ:组织类型特征[J].气象学报,70(5):909-923. Wang X F, Cui C G, 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part I: organization mode features[J]. Acta Meteor Sin, 70(5): 909-923 (in Chinese).
- 王啸华,吴海英,唐红昇,等,2012.2009年7月7日南京短时暴雨的中尺度特征分析[J].气象,38(9):1060-1069. Wang X H, Wu H Y, Tang H S, et al, 2012. Mesoscale characteristic analysis on a short time torrential rain in Nanjing on 7 July 2009[J]. Meteor Mon, 38(9): 1060-1069 (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).
- 徐桂荣,孙振添,李武阶,等,2010.地基微波辐射计与 GPS 无线电探空和 GPS/MET 的观测对比分析[J].暴雨灾害,29(4):315-321. Xu G R, Sun Z T, Li W J, et al, 2010. Observational comparison among microwave water radiometer, GPS radiosonde and GPS/MET[J]. Torr Rain Dis, 29(4):315-321(in Chinese).
- 杨舒楠,路屹雄,于超,2017.一次梅雨锋暴雨的中尺度对流系统及低层风场影响分析[J].气象,43(1):21-33. Yang S N, Lu Y X, Yu C, 2017. Analysis on mesoscale convective system and impact of low level wind in a Meiyu heavy rainfall event[J]. Meteor Mon, 43(1):21-33(in Chinese).
- 张弘,孙伟,2005.初夏青藏高原东侧一次特大暴雨的综合分析[J].高原气象,24(2):232-239. Zhang H, Sun W, 2005. Synthetic analyses of an extreme heavy storm rain on the east side of Qinghai-Xizang Plateau in early summer[J]. Plateau Meteor, 24(2):232-239(in Chinese).
- 张楠,杨晓君,邱晓滨,等,2018.一次突发性暴雨的机理分析及短期预报思考[J].气象,44(1):118-131. Zhang N, Yang X J, Qiu X B, et al, 2018. Mechanism analysis and rethinking of short-term prediction of a sudden rainstorm[J]. Meteor Mon, 44(1):118-131(in Chinese).
- 赵金霞,徐灵芝,卢焕珍,等,2012.盛夏渤海湾大气边界层辐合线触发对流风暴对比分析[J].气象,38(3):336-343. Zhao J X, Xu L Z, Lu H Z, et al, 2012. Comparative analysis of boundary layer convergence lines triggering convective storm in Bohai Bay[J]. Meteor Mon, 38(3):336-343(in Chinese).
- 赵婷婷,赵玉春,汪小康,等,2016.宜昌峡口区夏季暴雨天气分型及多普勒雷达特征[J].暴雨灾害,35(4):334-343. Zhao X T, Zhao Y C, Wang X K, et al, 2016. Weather classification and Doppler radar characteristics of summer rainstorms in Yichang gap district[J]. Torr Rain Dis, 35(4):334-343(in Chinese).
- 郑淋淋,孙建华,2016.风切变对中尺度对流系统强度和组织结构影响的数值试验[J].大气科学,40(2):324-340. Zheng L L, Sun J H, 2016. The impact of vertical wind shear on the intensity and organizational mode of mesoscale convective systems using numerical experiments[J]. Chin J Atmos Sci, 40(2):324-340(in Chinese).
- Davis R S, 2001. Flash flood forecast and detection methods[M]// Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston: American Meteorological Society:481-525.
- Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev, 128(10):3413-3436.
- Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al, 2015. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China[J]. J Meteor Res, 29(3):370-384.