

苟阿宁,王玉娟,张家国,等,2019.一次梅雨锋附近“列车效应”致灾大暴雨过程观测分析[J].气象,45(8):1052-1064. Gou A N, Wang Y J, Zhang J G, et al, 2019. Analysis on heavy rainfall event caused by “train effect” in a Meiyu front of Hubei Province[J]. Meteor Mon, 45(8):1052-1064(in Chinese).

一次梅雨锋附近“列车效应”致灾 大暴雨过程观测分析*

苟阿宁¹ 王玉娟² 张家国¹ 吴涛¹ 韩芳蓉¹ 冷亮³

1 武汉中心气象台,武汉 430074

2 青海省气象灾害防御技术中心,西宁 810001

3 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430074

提 要: 2016 年 7 月 6 日在武汉发生了一次造成城市严重内涝的暴雨过程。本文利用多普勒天气雷达、逐小时地面加密观测资料和 EC 0.25°×0.25°细网格模式数据,对这次梅雨锋附近极端暴雨的降水特征、中尺度对流系统演变和暴雨成因等进行了细致分析,结果表明:(1)本次大暴雨是在典型梅雨期环流形势下发生的,副热带高压西北侧的高温、高湿区配合江淮切变线稳定少动,暴雨则出现在西南低空急流风速辐合区,925 hPa 西南低空气流的进退有利于东北路冷空气南下,这与雨带的落区和维持有密切联系。(2)梅雨锋狭长雨带上的降水量分布呈现不均匀性,强暴雨主要集中在几个中心,降水中心的分布与梅雨锋附近低层风场扰动有关,梅雨锋雨带上产生大暴雨是一个典型的中尺度对流系统(MCS),沿着西南—东北走向的引导气流移动,湖北特殊地形促使“列车效应”进一步加强。(3)列车线主要由江淮切变线或边界层辐合线附近的中尺度系统扰动形成,地面中尺度气旋性辐合及低空西南急流长时间维持,是形成“列车效应”的主要原因。(4)MCS 在雷达回波上有三个明显特征,第一个是 MCS 在雷达回波形态上属于带状对流,由层状云和列车线共同组成,雨带与西南气流走向一致;第二特征是层状云和列车线移动方向几乎一致,MCS 移动方向与列车线走向平行,垂直于列车线的分量很小;第三个是对流单体在列车线上游新生、加强,并向下游移动,对流单体的传播方向和列车线方向相反。(5)西南急流向近地面扩展、“牛眼”结构及风随高度顺转等中尺度系统,促使近地面扰动加强,诱发强降水。

关键词: 梅雨锋,中尺度对流系统,观测分析,列车效应

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.002

Analysis on Heavy Rainfall Event Caused by “Train Effect” in a Meiyu Front of Hubei Province

GOU Aning¹ WANG Yujuan² ZHANG Jiaguo¹ WU Tao¹ HAN Fangrong¹ LENG Liang³

1 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

2 Qinghai Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Xining 810001

3 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074

Abstract: An urban flooding was caused by heavy rainfall in Wuhan on 6 July 2016. Based on Doppler weather radar of Wuhan and surface automatic station observation, and EC 0.25°×0.25° fine-grid model data, the characteristics of heavy rainfall, the evolution features of mesoscale convective system (MCS), the environmental condition and radar echo structure of Meiyu front are studied in this paper. The result

* 湖北省气象局面上项目(2016Y02)、湖北省雷电灾害防御科研专项(FL-Z-201401)和湖北电网洪涝灾害特殊区域分布图绘制项目(SG-TYHT/16-YJ-179)共同资助

2018 年 5 月 25 日收稿; 2018 年 12 月 13 日收修定稿

第一作者:苟阿宁,主要从事强对流和雷电预报预警技术方法研究. Email: aning0770@163.com

shows that (1) the heavy rainfall event occurred under the circulation pattern of typical Meiyu period. The high temperature and high humidity areas on the northwest side of the subtropical anticyclone were stable with the Jianghuai shear line, and the heavy rainfall appeared in the convergence zone of the southwest low-level jet. (2) The train line was mainly composed of the mesoscale system near the Jianghuai shear line or boundary convergence line. The mesoscale cyclonic convergence and low-level southwest jet maintained a long time, which is the main reason for the formation of the “train effect”. (3) Heavy rainfall was a typical MCS, which moved along the southwest-northeast direction, and the special topography of Hubei reinforced the “train effect”. (4) The MCS has three distinct characteristics in radar echo. The first one is MCS in the radar echo pattern belongs to the band composed of stratiform and convective rain train line, consistent with the trend of the southwest airflow. The second is MCS moved in the direction of stratiform cloud and train lines were almost the same. MCS's direction was parallel to the train line, and the component perpendicular to the train line is quite small. The third is the convective cells were newly born and strengthened in the upstream on the train line, moving downstream. The convective propagation direction and train line were in the opposite direction. (5) The southwest jet near the ground and bulls eyes intensified the precipitation.

Key words: Meiyu front, mesoscale convective system (MCS), observation analysis, train effect

引 言

2016 年湖北省入梅以来,先后经历了四轮强度大、来势猛、危害重、范围广的强降雨袭击。受第四轮强降雨影响,7 月 1—6 日,湖北遭遇 1998 年以来最强暴雨,多县(市、区)降雨量突破历史极值,部分重灾县(市、区)降水量累计超过 1000 mm(局部 12 h 降雨 380 mm)。7 月 5 日至 6 日凌晨,湖北江汉平原至鄂东一带局部出现大到暴雨,其中,1 h 雨量超过 50 mm 的有 70 个站次,最大小时雨强出现在武汉城区($87 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),6 h 累计雨量为 233 mm,此次过程导致武汉城区渍水严重,长江一度达到最高警戒水位线。根据湖北省民政厅统计的灾情资料显示,截至 7 月 6 日 08 时,强降雨造成湖北省 17 个市(州、直管市、林区)80 个县(市、区)1090.06 万人受灾,死亡 47 人、失踪 10 人(其中武汉市江夏区死亡 8 人、武汉市新洲区死亡 6 人失踪 1 人),直接经济损失达 158 亿元。

湖北中东部致灾暴雨主要集中在 5 日夜间至 6 日凌晨,其直接原因是由于天气尺度系统稳定少动且持续时间较长,边界层中尺度系统扰动,激发对流单体新生,整个系统移动缓慢配合“列车效应”新生对流单体的后向传播造成的。“列车效应”一词来源于国外,最早出现在产生强降水的主要机制——中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)

中,指的是同一个对流系统内多个独立的对流单体连续不断经过同一固定位置而产生强降水(Chappell, 1986; Corfidi, 2003; Doswell III et al, 1996)。Maddox et al(1979)建立了容易出现“列车效应”导致极端强降水事件的三种天气系统流型配置。Doswell III et al(1996)、Davis(2001)先后从雷达上对“列车效应”进行了定义,描述为在雷达回波上,有组织的对流回波像火车车厢一样不断经过同一位置。Schumacher and Johnson(2005; 2006; 2008), Schumacher(2009), Peters and Roebber(2014)和 Peters and Schumacher(2014; 2015)相继根据“列车效应”列车线(training line)的位置演变对 MCS 进行了分类研究。Aylward and Dyer(2010)认为形成极端强降水的“列车效应”不仅要考虑持续时间,更要考虑降水量的大小。国内学者根据雷暴生成和发展机制,将“列车效应”形象地比喻为雨带就像一列沿铁路线缓慢移动的火车,对流单体犹如一辆辆不同的车厢依次经过某一固定地点,间歇性的短时强降水最终造成局地大暴雨或特大暴雨(冯晋勤等, 2008; 何群英等, 2009)。众多学者研究指出,“列车效应”是产生极端降水从而造成洪涝灾害的主要回波特征之一(杨春等, 2009; 何群英等, 2009; 2011; 黄小玉等, 2010; 杨磊等, 2017; 吴涛等, 2017)。张京英等(2010)对大暴雨过程中短时强降水机制分析发现,当高空气流转为西南风,中低空西南气流和高空西南气流同向叠加时,对流层中层

西南急流建立并且向超低空传递,促使中小系统生成,导致短时强降水。孙继松等(2013)研究指出深对流雷暴或雷暴群形成的重力波诱发对流单体不断新生并沿着西南气流传播而出现“列车效应”,并在传播中不断发展,西南气流末端出现暴雨中心。张家国等(2006;2010;2011)对湖北不同区域暴雨的形成机理和监测预报方法等进行了比较全面的研究,将典型区域性暴雨的形态与中尺度系统结合,这些研究加深了对暴雨机理和MCS的认识。

MCS的演变特征与暴雨形成有密切联系,对其形成机制的研究是开展短时临近预报的重要基础。“列车效应”虽不是造成极端强降水的必要条件,但是什么样的环境条件能发生“列车效应”及新生单体的触发和传播机制是预报员目前主要面临解决的难题之一。近年来,随着湖北省新一代多普勒天气雷达及地面加密观测站的建设完善,在机理认识有限的情况下,对预报经验的深入总结和系统提炼,对暴雨研究和预报具有重要意义。本文以2016年7月6日武汉致灾大暴雨过程为例,利用武汉新一代多普勒天气雷达和地面加密自动观测站资料等,采用天气形势诊断和观测资料相结合的方法,重点分析湖北中东部特殊地形条件下梅雨期近地层中尺度系统的发生、发展以及与之相联系的暴雨结构特征,揭示此次致灾大暴雨“列车效应”在雷达回波中的结构和演变特征。

1 降水特征分析

这次暴雨过程是2016年湖北入梅以来的第四场暴雨过程,从48h的雨量分布(图1a)来看,江汉平原南部至湖北东北部出现了暴雨,过程累计雨量国家站中2站为250~500mm、13站为100~250mm、10站为50~100mm,累计雨量较大的降水站点依次为:蔡甸(276mm)、武汉(251mm)、江夏(233mm)、新洲(210mm)、仙桃(196mm)、团风(186mm)、黄陂(166mm)。而乡(镇)雨量统计的结果显示,34乡(镇)为250~500mm、258乡(镇)为100~250mm,雨量较大的有:蔡甸玉贤(357mm)、侏儒(304mm)、消泗(305mm)、洪北农场(292mm)、仙桃西流河(350mm)、仙桃城区(297mm)、武汉挽月中学(346mm)、洪山青菱(292mm)。降水过程始于5日12时(北京时,下同),6日18时之后降水趋于结束,整个降水过程超

过24h,持续时间较长,降水最强时段集中在5日20时至6日10时,最强降水出现在6日凌晨,武汉附近的蔡甸、武汉城区和黄冈,过程累计雨量在250mm以上,最大中心为蔡甸(276mm)。

从雨带的分布情况来看,整个雨带呈西南—东北走向的狭长带状分布,100mm以上的降水自江汉平原南部延伸至湖北东北部,每个时间段的降水量并非均匀分布,降水落区和强度也存在很大差异。5日中午开始江汉平原不断有回波生成,向东北方向移动,形成一条西南—东北走向的雨带,20时开始雨团逐渐增强,降水强度随之增加,且沿着雨带主轴维持,造成范围较大的极端暴雨,6日18时左右趋于结束。从蔡甸玉贤、仙桃西流河和武汉挽月中学三站的逐小时雨量时序图(图1b)演变来看,雨强呈现多峰分布,由于不断有中尺度对流系统新生之后沿着雨带主轴移经站点造成的,强暴雨集中在几个中心,30~60mm的小时雨强在武汉持续了4h以上。而这些降水中心与中尺度对流系统的演变、梅雨锋系统的高低空配置、边界层风场扰动和近地面中尺度辐合系统密切相关。

2 大尺度环流背景及环境分析

2016年7月5—6日大暴雨过程是一个典型的梅雨形势。图2a给出了此次梅雨锋极端暴雨过程中的主要影响系统,对流层上部200hPa有一支清楚的副热带高空急流控制中高纬地区,南亚高压较强,控制着青藏高原及西南区域;500hPa中高纬地区有一个阻塞高压,西太平洋副热带高压(以下简称副高)脊线北抬至 25°N ,5日20时副高逐渐西伸北抬,588dagpm则停留在湖北东部地区,江汉平原和鄂东地区处在副高外围西北侧高温、高湿区域,高空低槽位于重庆—鄂西北地区,低槽移动缓慢;700hPa从5日08时开始西南急流逐渐发展加强,急流中心最大风速达到 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,湖北中南部处在西南急流控制之下;而850hPa华北高压和副高形成对峙状态,两高之间在江汉平原到鄂东北一线一条西南—东北向江淮切变线形成并维持,850hPa江淮切变线南侧、副高西北侧西南低空急流持续加强,武汉恰好处在西南低空急流出口区左侧,急流中心风速高达 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,西南低空急流为此次武汉大暴雨提供了充沛的水汽和不稳定能量。从5日

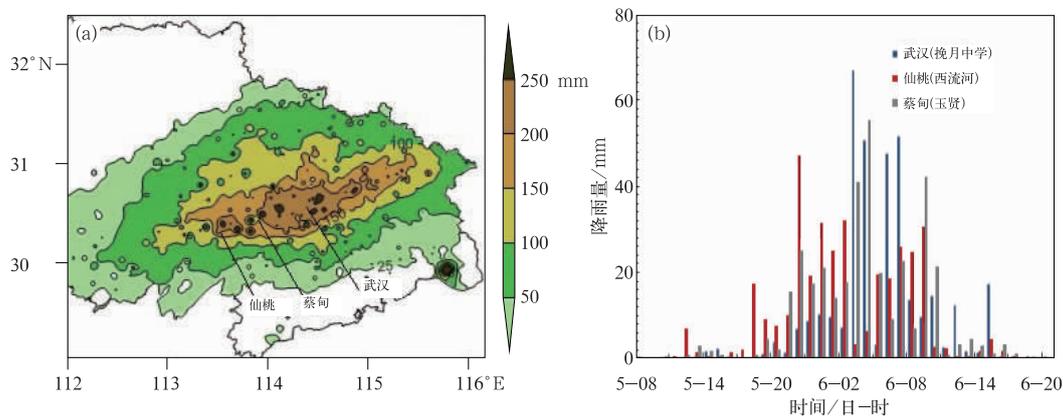


图 1 2016 年 7 月(a)5 日 08 时至 7 日 08 时 48 h 累计雨量以及(b)5 日 08 时至 6 日 20 时蔡甸玉贤、仙桃西流河和武汉挽月中学三个加密站逐小时降水量

Fig. 1 (a) Accumulated precipitation from 08:00 BT 5 to 08:00 BT 7 July 2016 and (b) temporal evolution of hourly precipitation from 08:00 BT 5 to 20:00 BT 6 July 2016 at Yuxian Station in Caidian, Xiliuhe Station in Xiantao and Wanyue Middle School Station in Wuhan of Hubei Province

08—20 时可以清楚看到,500 hPa 低槽是一个快速北收的过程,而 850 hPa 江淮切变线位置则稳定少动。暴雨的发生除了需要考虑充分的水汽供应和强烈的上升运动之外,还有较长的持续时间,本次大暴雨过程两大影响天气系统:低空西南急流和江淮切变线稳定少动,从 7 月 5 日 08 时持续到 6 日 08 时,累计时长超过 24 h,为强降水的发生提供了非常有利的的水汽、动力和不稳定能量条件。

中低层风场(925 hPa)扰动对 MCS 的触发发展起到了关键作用,925 hPa 形势场(图 2b~2d)江淮切变线两侧的风场完整展现了南风气流从南向北推进的过程。5 日 08 时(图 2b)江淮切变线压在武汉、江汉平原中东部一线,此时的切变线以冷式为主,切变线北侧的安徽北部是一支完整的东北气流(图 2b 中黑色箭头所示,下同),随着南风气流的加强,5 日 20 时(图 2c)中切变线逐渐由冷式转为暖式切变线,安徽北侧的偏北气流转为东北偏东方向,6 日 08 时(图 2d)江淮切变线的暖式结构更明显,南风气流占据了湖北中东部,切变线北侧的偏北气流消失,转为暖湿的东南气流。江淮切变线冷暖属性的变化和北风气流的减弱至消失完整展现了南风气流北推加强的过程。从 5 日 20 时地面观测(图 2e)分析可知,地面梅雨锋基本呈准静止状态,主要位于 30°N 附近,天气形势系统的稳定维持以及两高之间的低值区静止少动为 MCS 的形成提供了有利条件。地面有东北路弱空气,而梅雨锋的位置较高空切变线

的位置偏南,整个梅雨锋的结构由地面至高空是一个微微向北倾斜的结构。整层辐合系统基本重叠,有利于强的上升运动,MCS 在低空急流辐合区生成,地面弱冷空气和偏东、偏南暖湿气流相遇,触发和加强了对流系统。

长沙站位于西南急流上游,5 日 20 时长沙探空站(图 3a)显示,400 hPa 以下已经转为西南气流控制,700 hPa 西南急流达到 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,上游西南暖湿气流发展旺盛,为下游武汉等地的暴雨提供充沛水汽和不稳定能量输送, $T-T_d$ 自 850 hPa 向上先增大再减小,700 hPa 偏干,K 指数 34°C ,CAPE 呈瘦长型,达 $108 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此时武汉站(图 3b)450 hPa $T-T_d \approx 0^\circ\text{C}$,整层水汽近乎饱和,湿层深厚,500 hPa 以下为西南气流,抬升凝结高度(LCL)低至 1000 hPa 左右,大气层结变得不稳定,K 指数为 40°C ,瘦长型 CAPE 达 $353.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。中低层的引导气流较为一致,为西南风,气层整层高湿,说明有比较深厚的暖平流输送。这种整层高湿的高低空配置在江淮切变线或边界层辐合线的触发机制下引发了此次大暴雨。

3 近地面中尺度对流系统演变

3.1 近地面中尺度辐合系统和对流系统演变

中尺度系统是梅雨锋暴雨的直接制造者,暴雨

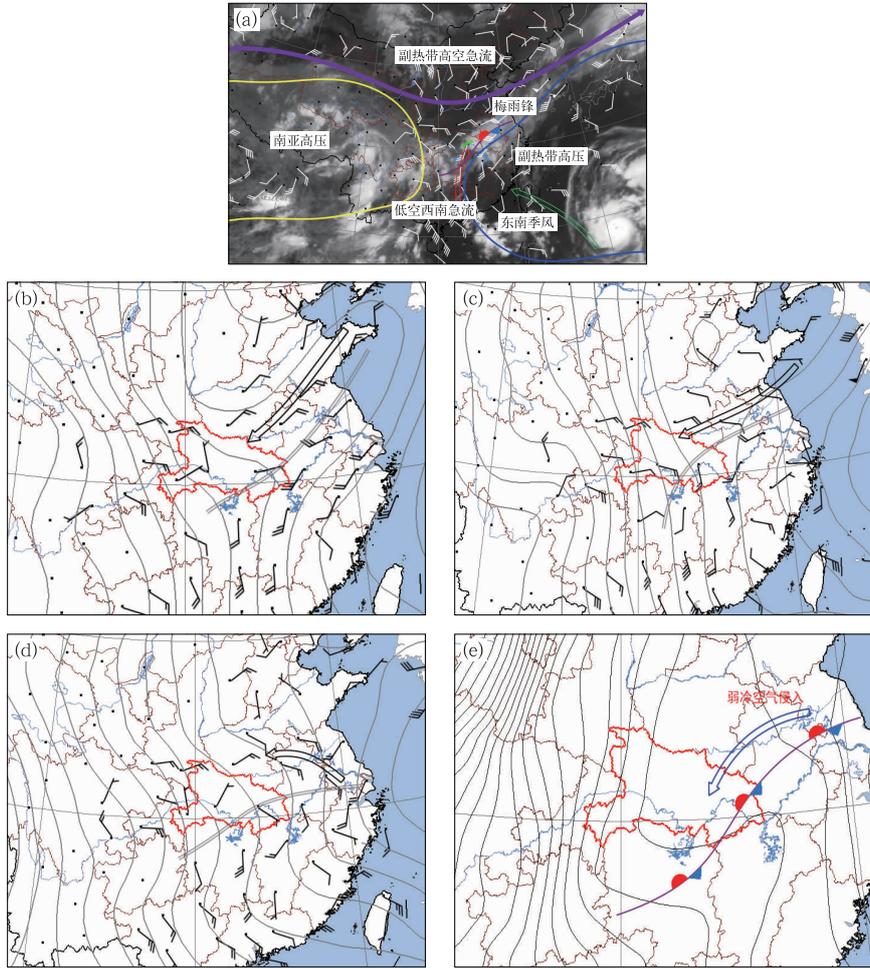


图 2 2016 年 7 月 5—6 日梅雨锋极端暴雨过程水平环流多尺度结构模型(a), 5 日 08 时(b)、20 时(c)、6 日 08 时(d)低层 925 hPa 风场扰动和 5 日 20 时地面形势(e) (图 2a 中, 紫色粗箭头: 200 hPa 副热带高空急流; 红色粗箭头: 850 hPa 低空西南急流; 绿色粗箭头: 东南季风; 风向杆: 5 日 20 时 850 hPa 观测风场; 黄色实线: 南亚高压; 蓝色实线: 副热带高压; 红蓝双色线: 梅雨锋; 绿色阴影: 暴雨落区; 黑白阴影: 6 日 03 时红外云图; 图 2b~2d 中, 黑色粗箭头: 925 hPa 北路冷空气; 灰色实线: 等高线; 灰色双实线: 925 hPa 切变线; 图 2e 中, 蓝色粗箭头: 地面北路冷空气)

Fig. 2 Conceptual graph of multi-scale and multi-height influencing systems for 5—6 July 2016 Meiyu front heavy rainfall event (a); 925 hPa wind field at 08:00 BT (b) and 20:00 BT (c) 5 July, and 08:00 BT 6 July (d); surface charts at 20:00 BT 5 July (e) 2016

(In Fig. 2a, thick purple arrows indicate HLJ; red and green arrows are LLJ at 850 hPa and southeast monsoon, respectively; wind barb gives 850 hPa observational wind field at 20:00 BT 5 July 2016; yellow and blue solid lines show South Asia high and subtropical anticyclone, respectively; purple line with red and blue markings give the location of Meiyu front; green shaded area is the area of heavy rain; infrared cloud image at 03:00 BT 6 July 2016 is shaded. In Figs. 2b—2d, thick black arrow indicates 925 hPa north cold air; gray lines are contour lines; gray double solid line is 925 hPa shear line. In Fig. 2e, thick blue arrow is north surface cold air)

发生前低层风场的动力作用十分显著。从图 4 近地面中尺度系统发生发展过程来看, 此次大暴雨过程影响对流单体触发和移动的中尺度系统有两个, 一个是中尺度南风气流的北推发展, 另外一个为地面中尺度辐合线的形成和维持。6 日 02 时之前鄂东地区地面环境气流主要以华北高压底部扩散南下的

偏北气流为主, 暖湿气流此刻正在由湖南中部向鄂东地区北推加强, 此阶段地面中尺度辐合线并不清楚, 925 hPa 以上的江淮切变线触发加强了仙桃至武汉的对流单体, 强降水出现在梅雨锋后部。02 时之后偏南暖湿气流北推至鄂东地区, 地面上可以看到明显的中尺度偏(东)南气流和扩散南下的偏北气

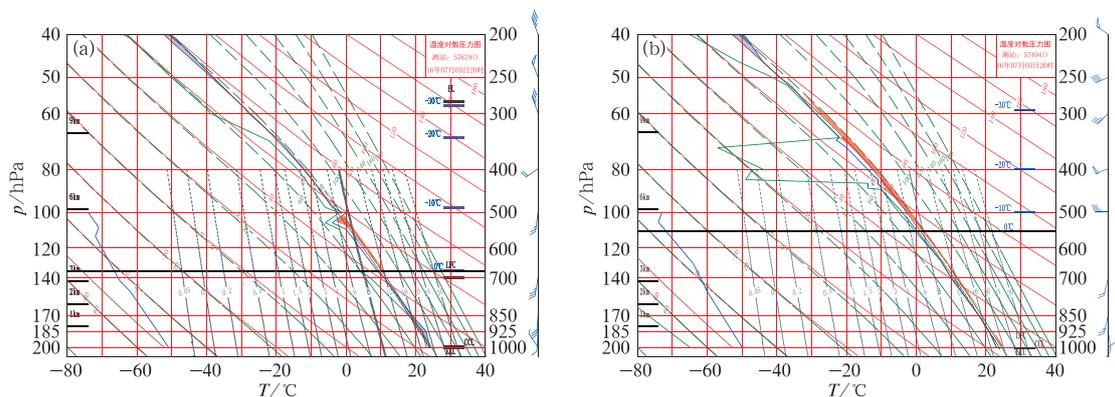


图 3 2016 年 7 月 5 日 20 时长沙站(a)和武汉站(b)探空

Fig. 3 Sounding at (a) Changsha Station and (b) Wuhan Station at 20:00 BT 5 July 2016

流在武汉和仙桃附近形成的中尺度辐合线,辐合线附近 MCS 得到了明显加强和维持,造成武汉地区大暴雨。

主要的“列车效应”有两轮。第一轮从 5 日 20 日至 6 日 02 时,此阶段地面以偏北气流为主,中尺度辐合线并不清楚,地面温度在 $24\sim 26^{\circ}\text{C}$,没有明显的温度梯度,符合湖北梅雨期暴雨特征。5 日 20 时(图 4a),925 hPa 江淮切变线由冷式逐渐转为暖式切变线,带状 MCS 在暖切顶部,呈东北—西南走向,湖南长沙一带可以看到明显的对流单体在南风气流中发展北抬,上游仙桃附近的对流单体在偏南气流和暖切的交汇处不断发展、加强,单体的移动方向和引导气流方向一致,MCS 轴线位置(列车线,下同)位于监利—仙桃—武汉—新洲一线。23 时(图 4b)925 hPa 偏南气流北推至鄂东,湖南中部的对流单体减弱,暖切位置稳定在江汉平原至武汉一线,但暖切南部的南风气流明显加强,仙桃至武汉沿线处在暖切顶部和南风气流的交汇处,对流单体进一步加强,江汉平原南部的对流单体不断沿着江淮切变线 MCS 主轴方向向下游鄂东北移动,地面仍以偏北气流为主,没有明显的中尺度辐合线。到了 6 日 02 时(图 4c),925 hPa 南风气流和暖切交汇点的触发作用继续激发仙桃附近的对流单体生成,而地面两支中尺度偏(东)南气流形成,和偏北气流对峙,武汉地区的环境风气旋性旋转特征更加明显,地面触发系统开始加强。第一轮“列车效应”主要是由近地面 925 hPa 的江淮切变线触发形成的,MCS 内部多个对流单体不断移经武汉造成短时强降水,对流单体沿着西南引导气流向东北方向移动,单体移动方向和 MCS 轴线(列车线)方向平行(孙继松等,

2013),地面环境风以偏北气流为主,没有明显的中尺度辐合线,单体的后向传播特征不明显(图 4g)。

第二轮“列车效应”从 6 日 02 时持续到 06 时,仙桃附近的气旋性辐合不断加强,环境风由偏北气流转为东北气流,东南气流在鄂东南至江汉平原南部加强,武汉附近的气旋性中尺度地面辐合线维持时间较长,仙桃附近偏北气流和东南气流形成的地面辐合线变得活跃,辐合线周围不断有新生对流单体生成,沿着引导气流向东北方向移动,武汉处在副高外围西南急流出口处,对流单体在移动过程中不断加强,武汉第二轮强降水来袭。6 日 02 时(图 4d),MCS 主体移动至武汉以北,而 MCS 中武汉附近仍有一个对流单体强度超过 50 dBz,地面东北气流和东南气流形成的中尺度辐合线是该单体加强维持的主要原因之一,仙桃附近出现偏北和东南气流的弱辐合,雷达图上清楚地看到开始有范围较小、强度较弱的对流单体后向传播生成。04 时(图 4e),MCS 前侧的层状云区已移至鄂东北,MCS 上游后向传播的对流单体不断沿着列车线向下游方向移动,对流单体发展加强,武汉附近的对流单体中 50 dBz 的回波范围扩大。05 时(图 4f)武汉地区的气旋性辐合依旧很强,仙桃地面环境风逐渐转为偏北气流,辐合区减弱南压,导致对流单体后向传播的地面中尺度系统遭到破坏,雷达图上仙桃附近的单体开始减弱,列车线的线性开始瓦解,此时武汉上空辐合线仍然清楚,强降水维持。06 时之后(图略)仙桃附近的中尺度地面辐合线完全消失,列车线也随之南压到嘉鱼—江夏—黄冈一线,武汉降雨逐渐减弱,第二轮“列车效应”结束。第二轮“列车效应”中对流单体的后向传播特征明显,列车线主要

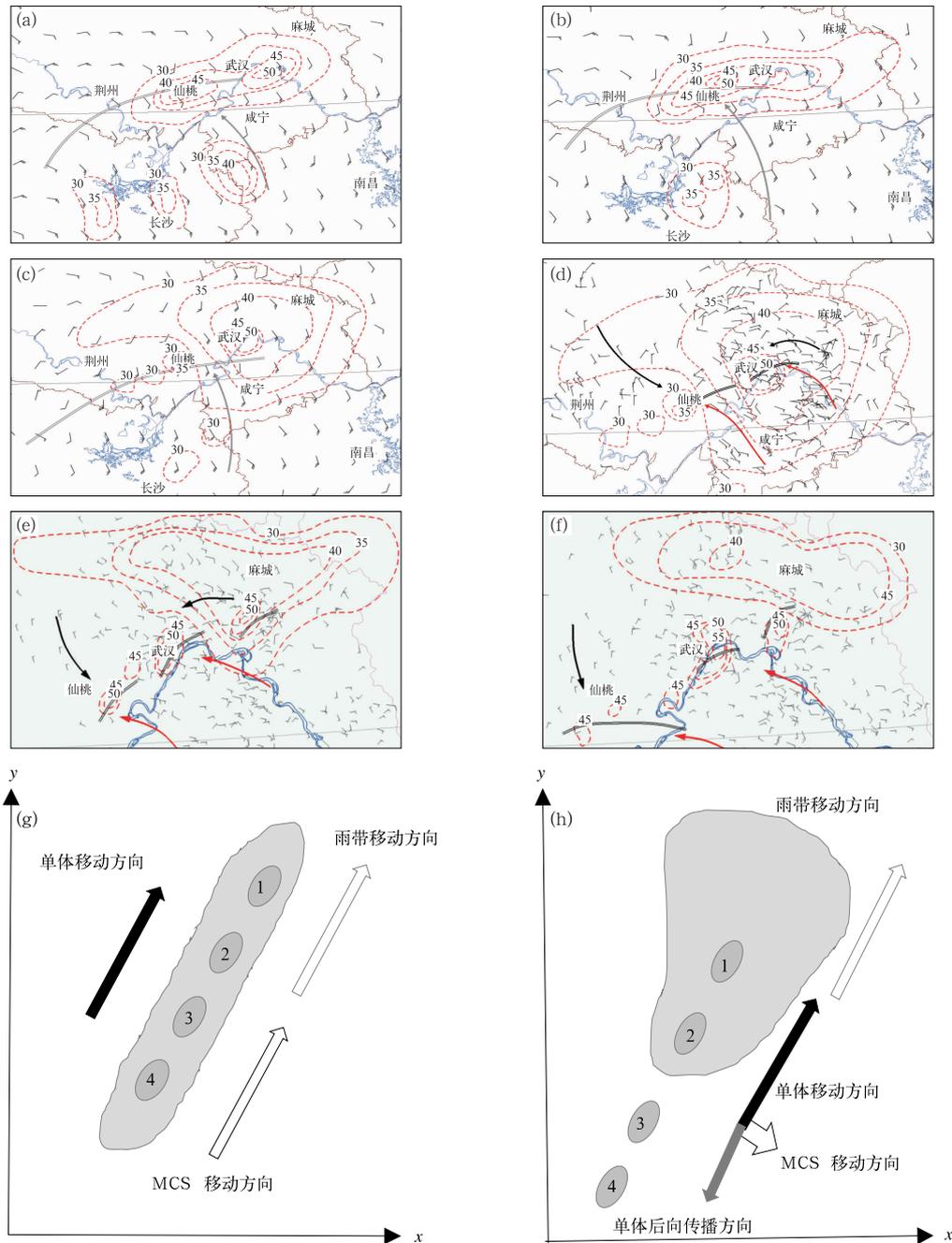


图 4 2016 年 7 月(a)5 日 20 时、(b)23 时、(c)6 日 02 时 925 hPa 和(d)6 日 02 时、(e)04 时、(f)05 时地面中尺度对流系统演变以及(g)第一轮、

(h)第二轮“列车效应”对流单体和 MCS 移动示意图

(黑色和红色箭头分别为地面偏北和偏南(东南)气流,灰色箭头为 925 hPa 南风气流;红色虚线为组合反射率 $MCS \geq 30$ dBZ 对流系统,单位:dBz;灰色和黑色双实线分别为 925 hPa 江淮切变线和中尺度地面辐合线)

Fig. 4 Evolution of surface mesoscale systems from 5 to 6 July 2016

(a) 925 hPa 20:00 BT 5 July, (b) 925 hPa 23:00 BT 5 July, (c) 925 hPa 02:00 BT 6 July; (d) surface 02:00 BT 6 July, (e) surface 04:00 BT 6 July, (f) surface 05:00 BT 6 July;

(g, h) sketh map of two kinds of multi-cell transmitting

(Black, red and gray arrows are north air stream, south (south east) air stream at surface and south air stream at 925 hPa, respectively; red dotted line is composite reflectivity ≥ 30 dBz, unit: dBz; the double black and gray solid lines are the mesoscale convergence line at surface and Jianghuai shear line)

由江淮切变线或边界辐合线附近的中尺度系统扰动形成,地面中尺度气旋性辐合及低空西南急流长时间维持,是形成“列车效应”的主要原因,对流单体在列车线上游中尺度辐合区新生、加强,并向下游移动,对流单体的传播方向和列车线方向相反导致 MCS 移动速度缓慢(图 4h),继而引发武汉新一轮短时强降水。

3.2 地面中尺度辐合系统和逐时强降水中心演变

从两轮“列车效应”对应的累计雨量来看,5 日 20 时至 6 日 02 时的 6 h 累积强降水(图 5a)位于仙桃至武汉西南象限,此时环境风东南气流较弱,偏北和弱东南气流形成的地面辐合线位于武汉南部, MCS 内中尺度对流系统沿着列车线向东北方向传播,所经之处产生了短时强降水,仙桃和武汉西南象

限的累计雨量较大,仙桃 6 h 雨量超过 125 mm,武汉西南部则达到 100 mm。6 日 02—06 时(图 5b)仙桃西北象限也有一个范围较小的强降水中心,由于此时对流单体范围较小,在向东北方向移动的过程中累计雨量不大,6 h 累计雨量超过 75 mm,强降水位置明显北抬至武汉,150 mm 的强降水范围较大,期间由于东南风加强,出现两条地面辐合线,一条是仙桃附近诱发对流单体后向生成传播的辐合线,另外一条仍位于武汉,位置稍微北抬。“列车效应”持续期间,地面辐合线位置稳定少动,走向和列车线走线一致,辐合系统在武汉附近停滞了较长时间,导致武汉 6 日 02—06 时 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水落区稳定少动。逐小时降水和辐合线的演变位置(图 5c)分析发现,地面中尺度辐合系统和逐小时强降水中心有很好的对应关系,强降水发生在中尺度辐合线

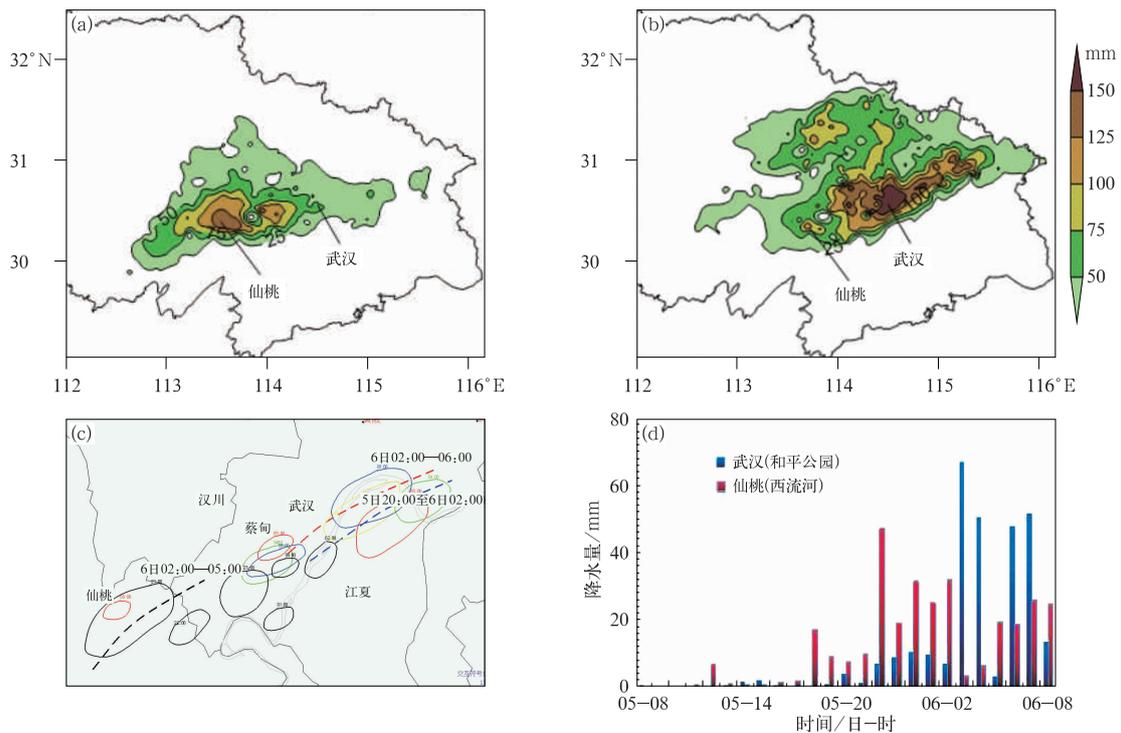


图 5 2016 年 7 月(a)5 日 20 时至 6 日 02 时和(b)6 日 02—06 时累计雨量,(c)地面辐合线和 $\geq 30 \text{ mm}$ 逐时强降水中心演变(蓝色、红色和黑色虚线分别为 5 日 20 时至 6 日 02 时、6 日 02—06 时和 6 日 02—05 时地面辐合线位置,黑色、红色、绿色、蓝色和黄色实线为 5 日 21 时至 6 日 02 时、6 日 02—06 时逐时强降水中心);(d)5 日 08 时至 6 日 08 时仙桃西流河和武汉和平公园逐小时降水

Fig. 5 Total precipitation from 20:00 BT 5 to 02:00 BT 6 (a) and 02:00 BT to 06:00 BT 6 July (b); (c) temporal evolution of the surface convergence line every 6 h and rainstorm centre ($\geq 30 \text{ mm}$) every hour from 20:00 BT 5 to 06:00 BT 6 July (Blue, red and black dotted lines depict the surface convergence line from 20:00 BT 5 to 02:00 BT 6 July, 02:00 BT to 06:00 BT 6 July and 02:00 BT to 05:00 BT 6 July; black, red, green, blue and yellow solid lines are the hourly rainstorm centre); (d) hourly rainfall of Xiantao and Wuhan from 08:00 BT 5 to 08:00 BT 6 July 2016

附近。在仙桃西流河站和武汉和平公园站的逐小时雨量演变关系中(图 5d),武汉强降水发生在 6 日 02 时之后,仙桃则发生在 02 时之前,武汉的降水强度明显大于仙桃,且第二轮“列车效应”中对流单体后向传播在仙桃造成的累计降水不大。

3.3 特殊地形辐合抬升作用

湖北地形复杂,四面环山,中间呈“喇叭口”状向南敞开,而鄂东地区的大别山山脉,平均海拔高度为 1500 m,西侧桐柏山平均海拔高度 600 m,两山形成一个东南—西北走向的山脉,鄂东南幕阜山脉平均海拔为 1000 m,中间是地势平坦的江汉平原,由南向北地势逐渐抬高,天气尺度南风背景下地面中尺度辐合系统的形成与鄂东特殊地形有密切关系(张家国等,2015)。此次过程中第一轮“列车效应”中地面环境气流主要以偏北气流为主,而降水强度更大的第二轮“列车效应”中对流系统的触发系统主要是地面辐合线引起的,地面辐合线主要是三支中尺度气流汇合而成,而这三支中尺度气流则是在鄂东特殊地形辐合下形成的(图 6)。5 日 20 时,华北高压底部冷空气在大别山北侧不断堆积形成冷池,迎面受到大别山(海拔 1500 m)、桐柏山(600 m)阻挡,在气压梯度力作用下冷空气沿着小丘陵间隙穿过大别山向南爆发,形成两支中尺度偏北气流。天气尺度南风气流在向北推进的过程中受到鄂东南幕阜山阻挡,沿着江汉平原南部鄱阳湖一线在幕阜山北侧形成一支中尺度偏南气流,而东南气流则是在武汉大别山和幕阜山中间一条东西向的狭管地带形成的,上述三支气流形成的中尺度地面辐合线是第二轮“列车效应”发生的关键触发因子。可见,地面中尺度系统的发生发展与湖北特殊地形密切相关。



图 6 地形辐合对武汉大暴雨的影响
(灰色箭头为地形辐合形成的中尺度气流)

Fig. 6 Effect of the terrain convergence
on heavy rainfall

(Gray arrow line means the mesoscale air flow)

4 多普勒天气雷达监测资料分析

本次大暴雨主要是由于 MCS“列车效应”导致的,图 7 是一次具有明显“列车效应”的带状 MCS 整个生命史雷达观测。

4.1 “列车效应”回波演变过程分析

从 5 日 20 时至 6 日 05 时武汉单站的新一代多普勒天气雷达监测资料发现,江汉平原至鄂东北有一条西南—东北走向的带状回波,西南象限传播路径上,对流单体明显增加,整个传播过程中列车线位置变化不大。“列车效应”中的对流单体是沿着列车线主轴不断向东北象限移动。不同的是 6 日 02 时开始在西南象限不断有新的对流单体生成,由东北向西南方向后向传播,与列车线移动方向相反。那么“列车效应”的传播机制与暴雨中心是如何形成的呢?图 7 选择了 4 个不同体扫时刻的组合反射率因子,分别沿着“列车效应”的垂直方向做垂直剖面,发现在列车效应西南端,红圈所示位置,6 日 02 时之前(图 7a~7d)该处对流有一个明显的发展加强过程,其发射率因子从 40 dBz 以下加强到 45~55 dBz,所对应的回波高度也有明显增加,45 dBz 的回波高度从 4 km 发展至 6 km 附近,在加强的过程中,沿着东北方向向武汉移动,而在列车效应的东北端,对流单体有一个减弱的趋势,其反射率因子最大值从 45~55 dBz 下降到 40 dBz 以下,对应的回波高度也有所下降。不同的是 02 时之后(图 7e~7h)回波范围扩大,北部是层状云降水,而在层状云降水南侧“列车效应”西南端的江汉平原东部仙桃一带,也就是 MCS 的上风方向,仙桃附近边界层中尺度辐合线的维持导致不断有新的对流单体生成、加强,且后向传播,致使“列车效应”持续时间较长。剖面上显示回波降水水质心较低,属于典型的低质心降水,诱发降水效率较高。

图 8 为 MCS“列车效应”成熟阶段对流单体发展示意图。“列车效应”第一阶段, MCS 呈带状, MCS 内部多个对流单体呈线状排列,对流单体从上风方向沿着列车线向东北方向移动,在列车线西南端,该处对流单体有一个明显的发展加强(图 8a),在加强的过程中,又沿着东北方向移动(图 8b)。第二阶段 MCS 北部有层状云降水形成,层状云南侧和上风方向不断有对流回波新生、发展,并不断朝东

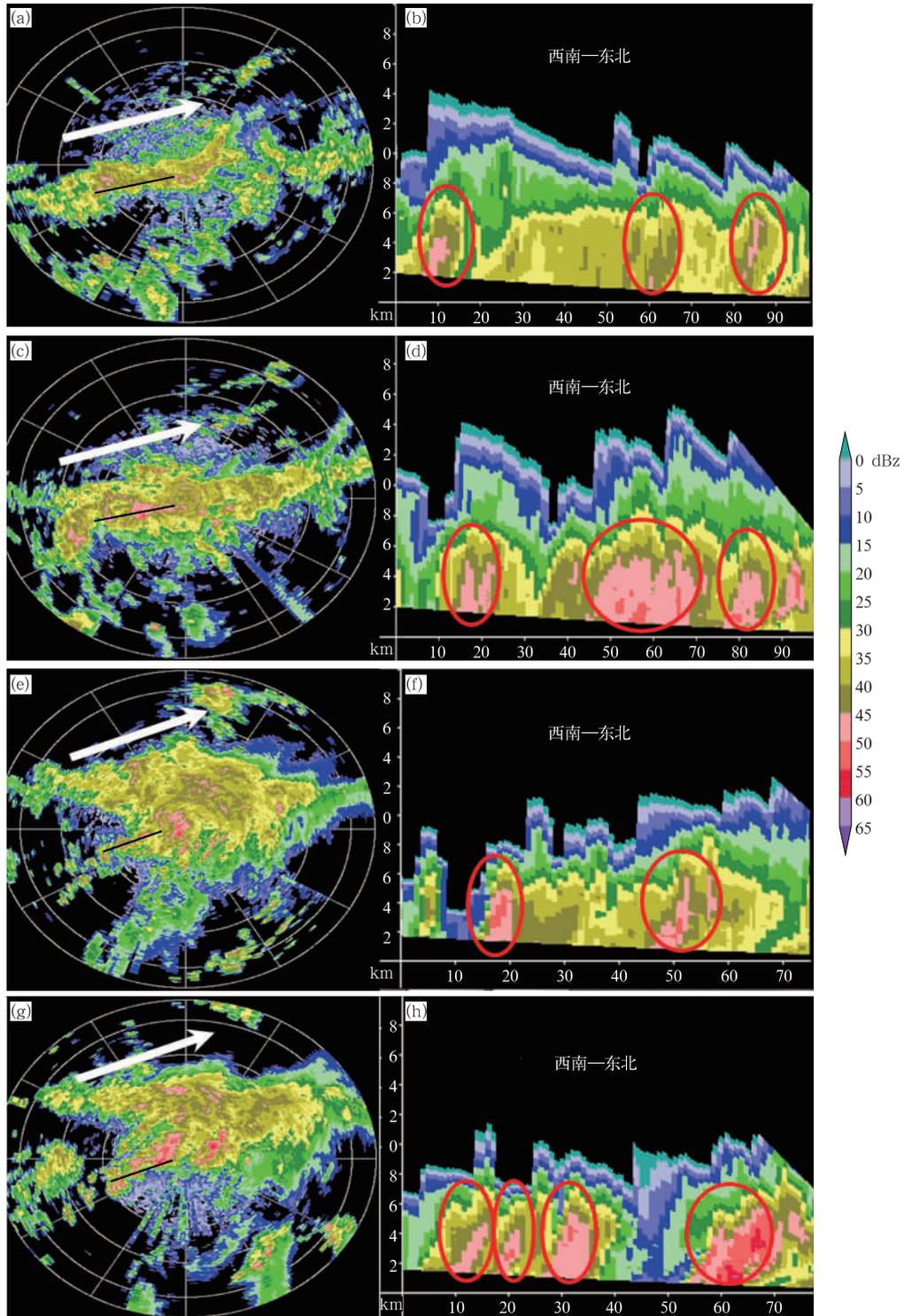


图 7 2016 年 7 月(a,b)5 日 20 时、(c,d)5 日 22 时、(e,f)6 日 02 和(g,h)6 日 05 时
雷达组合反射率(a,c,e,g)和剖面图(b,d,f,h)
(白色箭头为“列车效应”移动方向,黑色实线为剖面位置)

Fig. 7 The evolution of composite reflectivity (a, c, e, g) and vertical profile (b, d, f, h) at 20:00 BT 5 (a, b), 22:00 BT 5 (c, d), 02:00 BT 6 (e, f), 05:00 BT 6 (a, b) July 2016 (The white arrow is the direction of the train effect, and the black solid line is the section position)

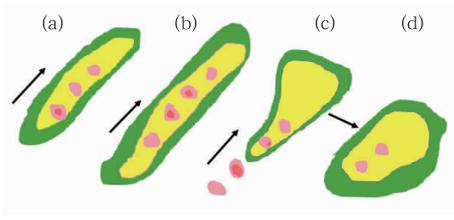


图 8 MCS“列车效应”成熟阶段
雷暴生消演变示意图

Fig. 8 Evolution diagram of thunderstorm
generation and extinction in mature
stage of “train effect”

北方向即下风方向移动(图 8c), 减弱阶段列车线西南侧不再有新对流单体产生, 原对流单体在向东北方向移动的过程中不断减弱并逐渐消亡, 层状云范围扩大(图 8d)。两个阶段中带状回波受到引导气流, 也就是低空西南风的作用自西南向东北方向移动, 雷达西南象限新生单体的传播方向与引导气流相反, 是一种典型的后向传播机制(Corfi di, 2003)。后向传播是由地面上中尺度偏(东)南气流和扩散南下的偏北气流在武汉和仙桃附近形成的中尺度辐合线长时间维持造成的, 辐合线附近不断有对流单体新生后, 沿着西南引导气流向东北方向移动、加强。后向传播致使新生对流单体沿着引导气流方向移动缓慢, 且对流单体传播和传播方向几乎平行, “列车效应”维持时间较长。MCS 在雷达回波上表现为三个明显特征。第一个特征是雷达回波形态上属于带状对流, 由层状云和列车线组成, 西南象限为对流单体列车线, 其中列车线由多个对流单体组成, 且单体方向和列车线走向平行。第二个特征是 MCS 的移

动方向和列车线近似平行, 垂直于列车线移动的速度分量很小。第三个特征是列车线上对流单体在上游新生、加强, 并向下游移动。

4.2 “列车效应”的风场结构特征分析

低层的湿度对降水的贡献最为重要。在降水区中, 水汽通量辐合主要由风的辐合所造成, 特别是在低层空气里水平辐合最为重要。刘淑媛等(2003)利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动发现, 强降水的出现和超低空急流风速中心的出现相对应。在武汉多普勒天气雷达 3.4° 仰角径向速度图上(图 9a), 径向图上零速度线呈“S”型分布, 暖平流强盛, 而近地层 2 km 以下为偏东气流, 而 2 km 以上则转为西南气流, 暖湿层深厚。另外, 4~6 km 有一对 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的“牛眼”结构, 而 MCS 带状回波与西南急流中心走向一致。风廓线产品 VWP(图 9b)显示 1.2~8 km 为一致的西南急流, 强降水与低空急流向近地面扩展的程度有关, 从 02 时开始西南急流向下扩展(图 9b 中红色箭头所示), 存在动量下传, 引起低空扰动加强, 继而引发强降水。

5 结 论

通过多尺度天气环境、地形条件及雷达回波演变对本次梅雨锋致灾大暴雨“列车效应”观测分析, 通过围绕此次暴雨大尺度环境背景特点(暴雨过程类型、降水维持时间长的原因及环境条件)、中尺度对流系统的类别和演变过程、边界层中尺度对流系统的演变特征及 MCS 触发加强机制等方面进行了

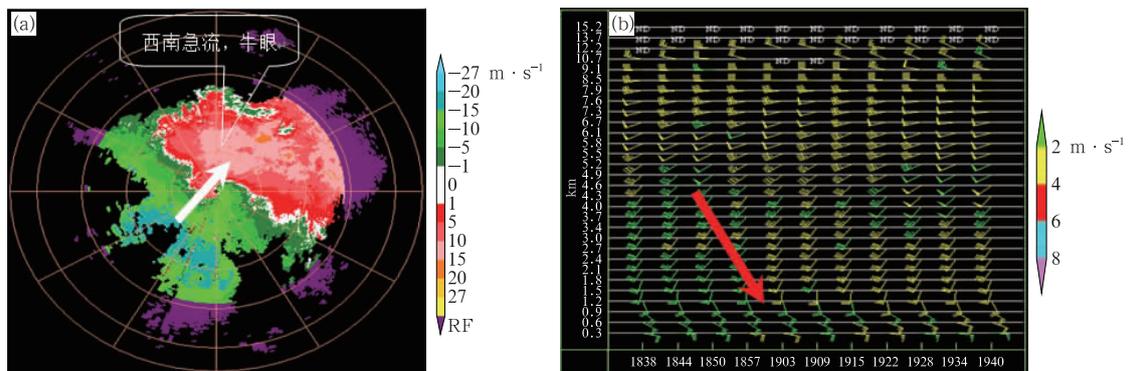


图 9 2016 年 7 月 6 日 02:30 3.4° 仰角速度(a)和风廓线产品 VWP(b)
(白色箭头为西南急流, 红色箭头为西南急流向下扩展)

Fig. 9 The 3.4° radial velocity (a) and VWP product (b) at 02:30 BT 6 July 2016
(White arrow is southwest jet stream, and red arrow is southwest jet stream downward expanding)

细致分析,得到以下主要结论:

(1) 此次梅雨锋致灾大暴雨持续时间较长,整个雨带呈西南—东北走向的狭长带状分布,与锋面形状相似。强降水主要分为两段,第一段为5日20时至6日02时,强降水主要集中在仙桃至武汉区间,对流单体的移动方向和MCS移动方向一致;第二段出现在6日02—08时,强降水以武汉为主,对流单体的移动方向和MCS移动方向呈 90° 夹角,后向传播特征明显。梅雨锋雨带上的降水量的时空分布是不均匀的,强暴雨集中在几个中心, $30\sim 60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的小时雨强在武汉持续了4h以上,强降水的位置与梅雨锋上的风场扰动关系密切。

(2) 导致大暴雨发生的天气系统是典型的梅雨期形势,天气尺度系统稳定维持时间较长,武汉上游充沛的水汽输送、整层高温高湿、瘦长型的CAPE,低的抬升凝结高度和强盛的暖平流、冷暖空气对峙,构成了强的整层暖湿垂直结构,具备暴雨发生的潜势条件。马蹄形向南敞口地形、武汉附近的狭管区、鄂东北大别山地形抬高冷池出流和鄂东南幕阜山地形阻挡形成的三支中尺度气流,是对流单体触发、加强的关键因子。

(3) “列车效应”持续时长超过8h,列车线沿着西南急流引导方向移动。“列车效应”共分为两个阶段,不同的是第二阶段在西南象限不断有新对流单体生成之后,沿着列车线后向传播,与列车线移动方向相反,导致“列车效应”再次爆发。

(4) MCS在雷达回波上表现为三个明显特征。第一个特征是雷达回波形态上属于带状对流,由层状云和列车线组成,西南象限为对流单体列车线,其中列车线由多个对流单体组成,且单体方向和列车线走向平行。第二个特征是MCS的移动方向和列车线近似平行,垂直于列车线移动的速度分量很小。第三个特征是列车线上对流单体在上游新生、加强,并向下游移动。

(5) 雷达回波中强回波高度较低,属于典型的低质心降水,径向速度图上出现“牛眼”结构,风随高度顺转,暖平流旺盛,VWP产品可以看到西南急流向近地面有一个明显的下传,引起低空扰动加强,继而引发强降水。

梅雨锋暴雨是湖北夏季的主要降水,是洪涝灾害、城市内涝和山体滑坡的重要缔造者。湖北特殊地形影响下梅雨锋附近中尺度对流系统的演变特征与暴雨形成关系密切,研究梅雨锋附近“列车效应”

极端暴雨的形成机理和结构,掌握其演变规律是十分必要的,这对于提高长江流域梅雨锋暴雨的机理研究和短时临近预报有重要意义。

参考文献

- 冯晋勤,童以长,罗小金,2008.一次 β 中尺度局地大暴雨对流系统的雷达回波特征[J].气象,34(10):50-54. 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): 50-54(in Chinese).
- 何群英,东高红,贾慧珍,等,2009.天津一次突发性局地大暴雨中尺度分析[J].气象,35(7):16-22. He Q Y, Dong G H, Jia H Z, et al, 2009. Mesoscale analysis of a sudden heavy rain in Tianjin [J]. Meteor Mon, 35(7): 16-22(in Chinese).
- 何群英,解以扬,东高红,等,2011.海陆风环流在天津2009年9月26日局地暴雨过程中的作用[J].气象,37(3):291-297. He Q Y, Xie Y Y, Dong G H, et al, 2011. The role of sea-land breeze circulation in local convective torrential rain happening in Tianjin on 26 September 2009[J]. Meteor Mon, 37(3): 291-297(in Chinese).
- 黄小玉,陈江民,叶成志,等,2010.“碧利斯”引发湘东南特大暴雨的多普勒雷达回波特征分析[J].大气科学学报,33(1):7-13. Huang X Y, Chen J M, Ye C Z, et al, 2010. Analysis of the torrential rain in southeastern Hunan caused by the severe tropical storm Bilis using Doppler radar data[J]. Trans Atmos Sci, 33(1): 7-13(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 Tropical Meteor, 19(3): 285-290(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).
- 吴涛,张家国,牛奔,2017.一次强降水过程涡旋状MCS结构特征及成因初步分析[J].气象,43(5):540-551. Wu T, Zhang J G, Niu B, 2017. Preliminary analysis of structure characteristics and causes for heavy-rain-producing vortex-shaped MCS[J]. Meteor Mon, 43(5): 540-551(in Chinese).
- 杨春,谌芸,方之芳,等,2009.“07.6”广西柳州极端暴雨过程的多尺度特征分析[J].气象,35(6):54-62. Yang C, Chen Y, Fang Z F, et al, 2009. Multi-scale characteristics analysis of Liuzhou server heavy rainfall in June, 2007[J]. Meteor Mon, 35(6): 54-62(in Chinese).
- 杨磊,蒋大凯,王瀛,等,2017.“8·16”辽宁特大暴雨多尺度特征分析[J].干旱气象,35(2):267-274. Yang L, Jiang D K, Wang Y, et al, 2017. Analysis on multi-scale characteristics of a torrential rainstorm in Liaoning Province on 16 August 2013[J]. J Arid

- Meteor, 35(2):267-274(in Chinese).
- 张家国,王珏,黄治勇,等,2011.几类区域性暴雨雷达回波模型[J].气象,37(3):285-290. Zhang J G, Wang J, Huang Z Y, et al, 2011. Several kinds of regional rainstorm radar echo models[J]. Meteor Mon, 37(3):285-290(in Chinese).
- 张家国,吴翠红,王珏,等,2006.一次冷锋大暴雨过程的多普勒雷达观测分析[J].应用气象学报,17(2):224-231. Zhang J G, Wu C H, Wang J, et al, 2006. Observational analysis on a cold front heavy rain using Doppler radar data[J]. J Appl Meteor Sci, 17(2):224-231(in Chinese).
- 张家国,岳阳,牛淑贞,等,2010.一次长历时特大暴雨多普勒雷达中尺度分析[J].气象,36(4):21-26. Zhang J G, Yue Y, Niu S Z, et al, 2010. Mesoscale analysis on a long-lasting torrential rainfall event by Doppler radar[J]. Meteor Mon, 36(4):21-26(in Chinese).
- 张家国,周金莲,谌伟,等,2015.大别山西侧极端降水中尺度对流系统结构与传播特征[J].气象学报,73(2):291-304. Zhang J G, Zhou J L, Chen W, et al, 2015. The structure and propagation characteristics of the extreme-rain-producing MCS on the west side of Dabie Mountain[J]. Acta Meteor Sin, 73(2):291-304(in Chinese).
- 张京英,陈金敏,刘英杰,等,2010.大暴雨过程中短时强降水机制分析[J].气象科学,30(3):407-413. Zhang J Y, Chen J M, Liu Y J, et al, 2010. Analysis of mechanisms of short-time rainfall in the process of strong rainfall[J]. J Meteor Sci, 30(3):407-413(in Chinese).
- Aylward R P, Dyer J L, 2010. Synoptic environments associated with the training of convective cells[J]. Wea Forecasting, 25(2):446-464.
- Chappell C F, 1986. Quasi-stationary convective events[M]// Ray P S. Mesoscale Meteorology and Forecasting. Boston: American Meteorological Society:289-309.
- Corfidi S F, 2003. Cold pools and MCS propagation: Forecasting the motion of downwind-developing MCSs[J]. Wea Forecasting, 18(6):997-1017.
- Davis R S, 2001. Flash flood forecast and detection methods[M]// Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston: American Meteorological Society:481-525.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 11(4):560-581.
- Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R, 1979. Synoptic and meso-alpha scale aspects of flash flood events[J]. Bull Amer Meteor Soc, 60(2):115-123.
- Peters J M, Roebber P J, 2014. Synoptic control of heavy-rain-producing convective training episodes[J]. Mon Wea Rev, 142(7):2464-2482.
- Peters J M, Schumacher R S, 2014. Objective categorization of heavy-rain-producing MCS synoptic types by rotated principal component analysis[J]. Mon Wea Rev, 142(5):1716-1737.
- Peters J M, Schumacher R S, 2015. Mechanisms for organization and echo training in a flash-flood-producing mesoscale convective system[J]. Mon Wea Rev, 143(4):1058-1085.
- Schumacher R S, 2009. Mechanisms for quasi-stationary behavior in simulated heavy-rain-producing convective systems[J]. J Atmos Sci, 66(6):1543-1568.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev, 133(4):961-976.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2006. Characteristics of U. S. extreme rain events during 1999-2003[J]. Wea Forecasting, 21(1):69-85.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2008. Mesoscale processes contributing to extreme rainfall in a midlatitude warm-season flash flood [J]. Mon Wea Rev, 136(10):3964-3986.