

王珏, 张家国, 吴涛, 等, 2019. 湖北省极端短时强降水 MCS 类型及特征分析[J]. 气象, 45(7): 931-944. Wang J, Zhang J G, Wu T, et al, 2019. MCS classification and characteristic analyses of extreme short-time severe rainfall in Hubei Province[J]. Meteor Mon, 45(7): 931-944 (in Chinese).

湖北省极端短时强降水 MCS 类型及特征分析*

王 珏¹ 张家国² 吴 涛² 钟 敏² 王珊珊²
周金莲² 黄小彦² 韩芳蓉² 王孝慈²

1 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
2 武汉中心气象台, 武汉 430074

提 要: 重点利用新一代天气雷达、常规探空和地面中尺度观测等资料, 在详细分析湖北省 2008—2015 年 62 例极端短时强降水中尺度对流系统演变过程的雷达回波特征基础上, 研究归纳了湖北省 6 类极端短时强降水 MCS 模态, 其中包括 4 类线状(尾随层状云、平行层状云、后向扩建类、邻近层状云类)和 2 类非线性状(涡旋状类和层状云环绕类)MCS 模态。初步研究表明: (1) 4 类线状 MCS 的模态和环境风相对对流线分量的垂直分布与早期的研究结果基本一致。(2) 非线性状的涡旋状类 MCS 模态典型特征是大范围层状云降水包裹着螺旋式涡旋对流回波带, 多形成于西南涡前切变线附近, 主要与西南涡前鄂西山地平原过渡带边界层中尺度涡旋系统的触发和组织有关。(3) 湖北省后向扩建类 MCS 常出现在山脉迎风坡一侧, 与中尺度地形对冷池的阻挡、冷池对 MCS 的组织作用等有关。(4) 涡旋状 MCS 持续时间较长、范围较大, 而层状云环绕类 MCS 维持时间较短。

关键词: 极端短时强降水, MCS 模态, 雷达回波特征, 冷池

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.07.004

MCS Classification and Characteristic Analyses of Extreme Short-Time Severe Rainfall in Hubei Province

WANG Jue¹ ZHANG Jiaguo² WU Tao² ZHONG Min² WANG Shanshan²
ZHOU Jinlian² HUANG Xiaoyan² HAN Fangrong² WANG Xiaoci²

1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205
2 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract: Using the data of CINRAD, conventional sounding and surface observation, the radar echo characteristics during the mesoscale convective system (MCS) processes of 62 extreme short-time severe rainfalls in Hubei Province during 2008—2015 were analyzed. Six MCS patterns were studied and summarized, including 4 linear patterns (trailing-stratiform, parallel-stratiform, back-building/quasi-stationary and training line/adjoining stratiform) and 2 nonlinear patterns (vorticity-stratiform and surrounding-stratiform). The study reveals that (1) the 4 linear MCS patterns and vertical distribution of ambient wind relative to the convective line component are basically consistent with the results of earlier studies. (2) The typical characteristic of the nonlinear vorticity-stratiform MCS is that the spiral vortex convective echo bands are enwrapped by the wide range stratiform-cloud rain echo. The vorticity-stratiform MCSs are

* 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0109400)、湖北省气象科技发展基金(2018Z03 和 2017Y02)共同资助

2018 年 2 月 26 日收稿; 2019 年 4 月 12 日收修定稿

第一作者: 王珏, 主要从事强对流天气监测预警及相关研究工作. Email: hbwjue@163.com

通信作者: 张家国, 主要从事天气预报业务及相关研究工作. Email: wuhanzhangjiagu@sohu.com

mostly formed near the shear line in front of the southwest vortex, which is mainly related to the triggering and organization of the mesoscale vortex system in the boundary layer over the transitional zone between mountain and plain of western Hubei. (3) The back-building/quasi-stationary MCSs mostly occur on the windward slope, which is related to the blocking function of the mesoscale terrain and the organizational role of the cold pool. (4) The vorticity-stratiform pattern has the longest duration and the largest range, while the surrounding-stratiform pattern is the shortest in duration.

Key words: extreme short-time severe rainfall, MCS pattern, radar echo characteristics, cold pool

引 言

对流性暴雨尤其是极端对流性暴雨极易引发山洪、泥石流、城市渍涝等次生灾害并给经济社会带来巨大的影响。因此,长期以来极端对流性暴雨预报预警一直是气象业务的重点和难点。对流性暴雨与中尺度对流系统(MCS)的发生发展密切相关,针对其局地性强、生命史短和降水强度大的特点,气象台站主要是采取在天气雷达、气象卫星严密观测的基础上,通过对中尺度对流系统发生发展机理的分析来开展极端对流性暴雨短临预警的思路。因此,研究总结基于天气雷达的极端对流性暴雨的模式是一项重要的基础性研究工作。

利用天气雷达观测资料开展 MCS 模式的研究,国内外气象工作者做了大量工作。在国外,20 世纪 90 年代初期,Schiesser et al(1995)通过分析瑞士多年灾害性中尺度降水系统特征,将成熟阶段 MCS 分为 3 类:尾随层状云(Trailing Stratiform, TS)、前导层状云(Leading Stratiform, LS)和无层状云(convective lines with No Stratiform, NS)。后来,Parker and Johnson (2000)在上述基础上统计了美国中部地区线状中尺度对流系统,依照 MCS 的回波组织模式分为类似的 TS、LS 和平行层状云(Parallel Stratiform, PS)3 类。21 世纪 Schumacher and Johnson (2005)又提出了两个新的类型:邻近层状云/单向发展线状(Training Line/Adjoining Stratiform, TL/AS)和后向建立或准静止(Back-Building/Quasi-Stationary, BB/QS),并指出这两类 MCS 极易产生极端强降水。在国内,王晓芳和崔春光(2012)将长江中下游梅雨期的 MCS 分为线状和非线状两大类,其中线状 MCS 有 8 种典型类型:尾随层状降水、准静止后向建立、邻近层状云、前导层状降水、平行层状降水、断裂线状、镶嵌线状和长带层状降水。Zheng et al(2013)利用天气雷达组合反

射率资料将中国中东部夏季 MCS 分为 7 类,包括一种非线状模式和 6 种线状模式: NS、TS、LS、PS、弓状回波(Bow Echoes)、镶嵌线状(Embedded Lines),并统计分析各类 MCS 时空分布、引发的主要灾害性天气及环境特征量。张小玲等(2014)统计了梅雨锋上产生短时强降水的 MCS 演变模式主要为纬向型、经向型、转向型和合并型四类,经向型和合并型 MCS 前向传播占很大比重,生命史和产生的强降水更短;转向型和纬向型 MCS 的后向传播比重大,尤其转向型中不存在前向传播,对应短时强降水持续时间最长。另外,还有较多关于 MCS 形态特征、形成原因的十分有意义的研究工作(黄小玉等,2006;张家国等,2008;2011;2015;吴涛等,2017;李彦霖等,2018;田付友等,2018;伍志芳等,2018)。从早期的研究亦可以看出线状 MCS 只是产生强降水的 MCS 中的一部分,即便仅仅是线状 MCS 在其发展的过程中也会出现不同模式之间的转换(Parker and Johnson, 2000; Zheng et al, 2013)。上述研究结果对极端降水预报预警业务起到重要指导作用。

长江中游地区影响天气系统独特、地形作用复杂(吴涛等,2017;张家国等,2018),湖北气象工作者在天气预报预警业务中发现还存在其他非常重要的极端降水 MCS 模式,同时早期研究的线状模式还须进一步完善。本文重点利用雷达、卫星、常规探空和地面观测等资料,在详细分析湖北省 2008—2015 年 62 例极端短时强降水中尺度对流系统雷达回波演变特征基础上,研究归纳了湖北省短时强降水 MCS 模式,并对部分 MCS 模式成因进行了探讨。

1 分析方法

极端天气事件是指某一区域内在统计分布上不经常或者极少发生的天气事件,通常发生概率低于 10%(IPCC, 2013)。因此,极端事件的概率通常以

百分位数的形式讨论,而第 95%分位数通常被用作阈值(Frich et al, 2002; Zhai et al, 2005)。Zheng et al(2016)按国家气象站不同累积时段极端降水量序列的第 70%和 90%分位数,分 3 级建立了不同累积时段的极端降水阈值并统计其分布特征。同时也提出目前我国极端降水研究使用的都是国家气象观测站降水资料,而降水强度越强的天气系统时空尺度越小,有必要使用更加稠密的区域自动气象站降水观测资料进行研究分析(郑永光等,2017)。因此,本文选取国家气象观测站某一年的日降水量序列的第 99%分位数作为该站这一极端降水阈值,30 年的阈值平均即得到该站 30 年来极端降水阈值,湖北省 77 个国家站极端降水阈值平均后,得到 30 年湖北省平均日极端降水阈值为 93 mm。将 2008—2015 年日降水资料与阈值比较,得到满足条件的日极端降水过程。在此基础上,按照至少有相邻两个区域观测站 3 h 雨量 ≥ 100 mm 的标准,确定了 62 个极端短时降水 MCS 过程,大致为 20 年一遇的强降水。Maddox et al (1979)研究美国洪水案例指出,致洪降水一般在 6 h 内雨量 > 100 mm,少数 > 250 mm,山区一般为 50~100 mm。俞小鼎(2013)将 1 h 雨量 ≥ 50 mm 或 3 h 雨量 ≥ 100 mm 的降水事件称为极端短时强降水,与本文极端短时强降水过程阈值基本一致。

利用 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 分辨率的 SWAN 系统新一代天气雷达组合反射率因子资料,参考 Parker and

Johnson(2000)和王晓芳和崔春光(2012)关于 MCS 分类方法,即基于 MCS 回波的组织形态、MCS 单体移动特征、单体新生及演变,对湖北省极端短时强降水 MCS 进行分类;同时,统计了 MCS 的时空分布,并利用探空、地面观测等资料对线状 MCS 的环境风相对于对流线分量的垂直分布和非线状 MCS 的成因等开展研究。

2 湖北省极端短时强降水 MCS 分类及特征

将湖北省 62 个极端短时强降水中尺度对流系统分为 6 种模态,如表 1 所示。其中,4 种线状 MCS 模态包括:尾随层状云(TS)、平行层状云(PS)、后向扩建类(BB/QS)、邻近层状云(TL/AS),这些线状 MCS 的模态与早期的研究基本一致(Parker and Johnson, 2000; Schumacher and Johnson, 2005),但是 TS 类和 BB/QS 类 MCS 在形态上与早期结果略有差异;2 种非线状 MCS 模态包括:涡旋类(Vorticity Stratiform, VS)和层状云环绕类(Surrounding Stratiform, SS),为新增加的两种模态。各类 MCS 所占比例有较大差异,其中 TS 类最小为 4.8%;SS 类最大为 33.9%,TL/AS 类次之为 19.4%;而 PS 类、BB/QS 类和 VS 类所占个例相当。下面就每类 MCS 模态特征进行详细描述。

表 1 6 类 MCS 模态个例统计表
Table 1 Case statistics of six MCS archetypes

MCS 类型	尾随层状云 (TS)	平行层状云 (PS)	后向扩建类 (BB/QS)	邻近层状云类 (TL/AS)	层状云环绕类 (SS)	涡旋类 (VS)
个例数	3	9	9	12	21	8
比例/%	4.8	14.5	14.5	19.4	33.9	12.9

2.1 TS 类 MCS 模态

TS 类 MCS 主要特征是在线对流移动方向后侧有大范围层状云降水回波,尤其在线对流的北端,而在线对流移动方向前侧有新单体生成,即向前传播,传播方向与线对流几乎垂直。研究发现,湖北极端短时强降水的 TS 类 MCS 形态与经典形态基本一致,仍有些不同之处,主要表现在,除对流线后有层状云降水外,对流线头部也被大片的层状云降

水区包裹,有时还有相对强的对流短带镶嵌其中,整体上类似天气尺度逗点云形态;另外,在头部的后侧还有以弱降水回波甚至无降水回波为特征的入流通道,同时对流线上强单体出现在此处的可能性更大(图 1a),强降水多发生在这个位置,有时还伴有阵性大风,后面的分析将初步揭示其形成原因。TS 类 MCS 产生极端降水的个例较少,极端降水范围小,主要因为线对流移动较快,仅产生单峰强降水。但当遇到前方有对流存在时,通过合并加强有可能导

致局地强降水;或者线对流移动变慢、转向,回波带上单体移动有列车效应时也可能产生极端短时强降水。Parker and Johnson (2000)研究了风暴相对风的分层分布后指出,在与线对流垂直方向上,从地面到对流层高层均有朝向后侧(与移动方向相反)的风分量,在中低层(5 km)以下垂直对流线的风分量明显大于平行对流线的风分量,这也是层状云朝向对流线移动方向后侧的主要原因。本文与之研究统计结果基本一致(图略)。

2011年6月9日16时,受锋面影响,随州西南部有西南—东北向线状对流系统随锋面东移南压。19:06,对流线南端和前侧有单体新生汇入对流线,北段朝向移动方向后侧有大范围层状云降水,对流

线头部也被层状云包围,层状云与对流线相接位置有相对干冷的气流卷入形成的入流通道(图 2b, 2c, 蓝色箭头所示)。22时, MCS 移速减慢, 对流线南部强回波持续时间较长, 产生极端降水, 区域站小时最大雨量 103.5 mm (图 2, 阴影区为累积降水 ≥ 100 mm 区域, 以下典型个例图相同)。需指出的是, 由于采用的是组合反射率因子产品, 在线对流前部出现的“层状云回波”是中高云回波, 强度要比线对流后部层状云降水回波弱, 地面也没有降水发生。

2.2 PS 类 MCS 模式

PS 类 MCS 同样由线状对流性降水回波和层状

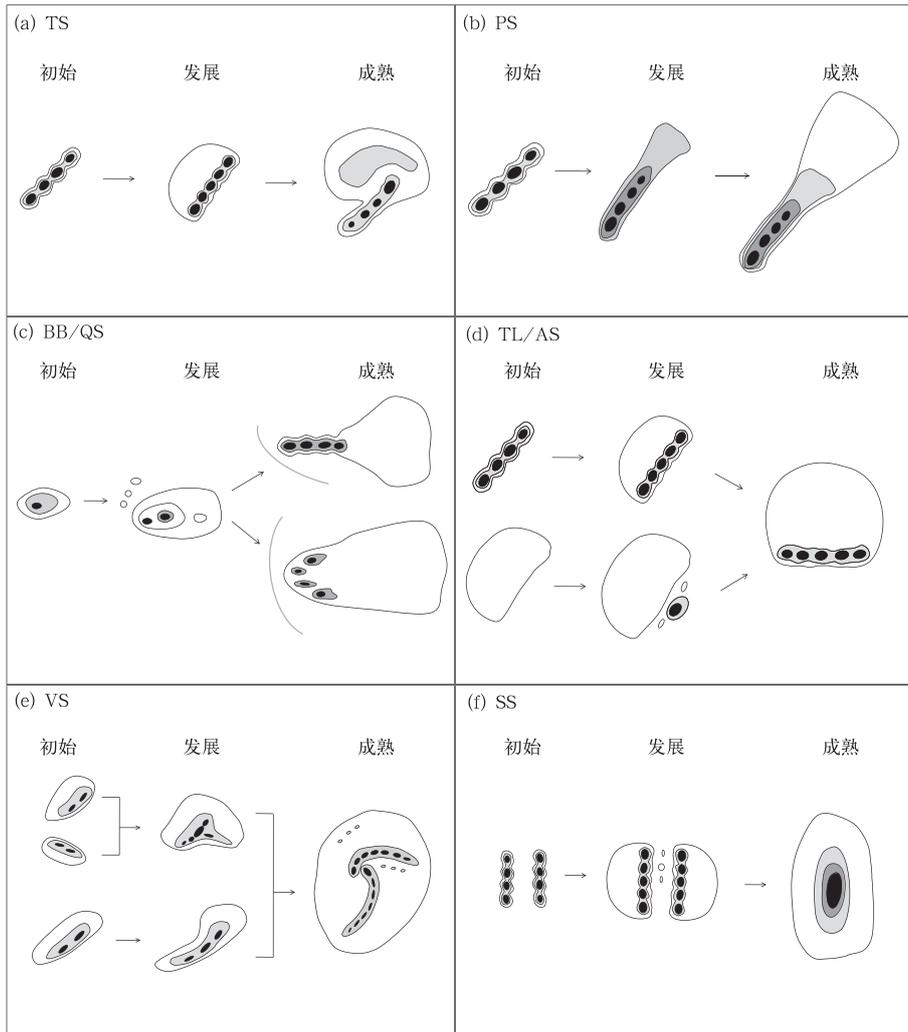


图 1 6 类 MCS 发展示意图

Fig. 1 Schematic reflectivity drawing of idealized life cycles for six MCS archetypes

云降水回波构成,与 TS 类不同的是,层状云降水回波位于对流线的一端。单体一般在对流线上风方一端新生,沿着对流线向下风方移动,并减弱成层状云降水,反射率因子垂直剖面图上可以看到新生单体、成熟单体和消亡单体并存于对流线上,列车效应显著,极容易形成极端降水(图 1b)。分析表明,上风方暖湿气流活跃有利于对流发展,而下风方层状云区域低层以下沉气流为主,对移入下游对流单体发展起到抑制的作用。环境风相对于对流线分量随高度分布与王晓芳(2012)的分析结果基本一致,从 850 hPa(1.2~1.5 km)开始,平行于对流线的风分量开始增加,且风速始终大于垂直于对流线的风分量,有利于形成单体风暴的列车效应。

2012 年 8 月 5 日鄂西北特大暴雨是一个典型的 PS 类 MCS 造成的极端降水,最大 3 h 累积降水

达 221.9 mm(图 3)。5 日 20 时十堰东南部有西北—东南向的线状对流发展,新生回波位于对流线的东南端,向西北方向移动。23:18,对流线上对流回波强度加强,同时对流线西北端有对流单体减弱后形成的层状云降水出现(图 3b)。6 日 02:30,对流线强度维持,单体在对流线东南端新生,对流线西北端形成大范围的层状云降水,MCS 内新生单体、成熟单体和消亡单体同时存在,自东南向西北顺序排列,在单体经过的路径上由于列车效应产生极端降水,极端降水区位置与线对流位置一致(图 3c)。

2.3 BB/QS 类 MCS 模式

BB/QS 类 MCS 常发生在西南暖湿气流中,暖区暴雨特征明显,在雷达反射率因子图表现为上风方一侧为对流单体排列成的对流带,下风方是大片

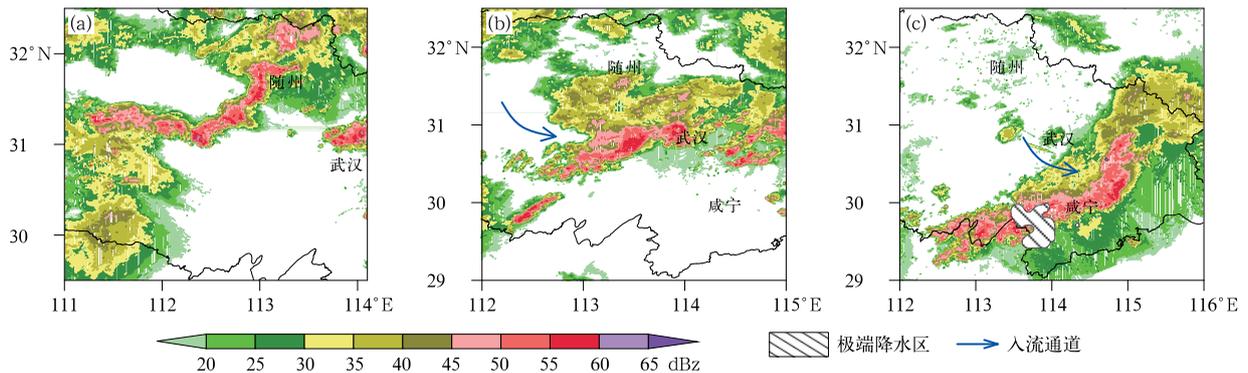


图 2 2011 年 6 月 9 日(a)16:48,(b)19:06,(c)22:00

TS 类 MCS 个例演变雷达组合反射率图

Fig. 2 Composite radar reflectivities of TS MCS archetype cases at (a) 16:48 BT, (b) 19:06 BT and (c) 22:00 BT 9 June 2011

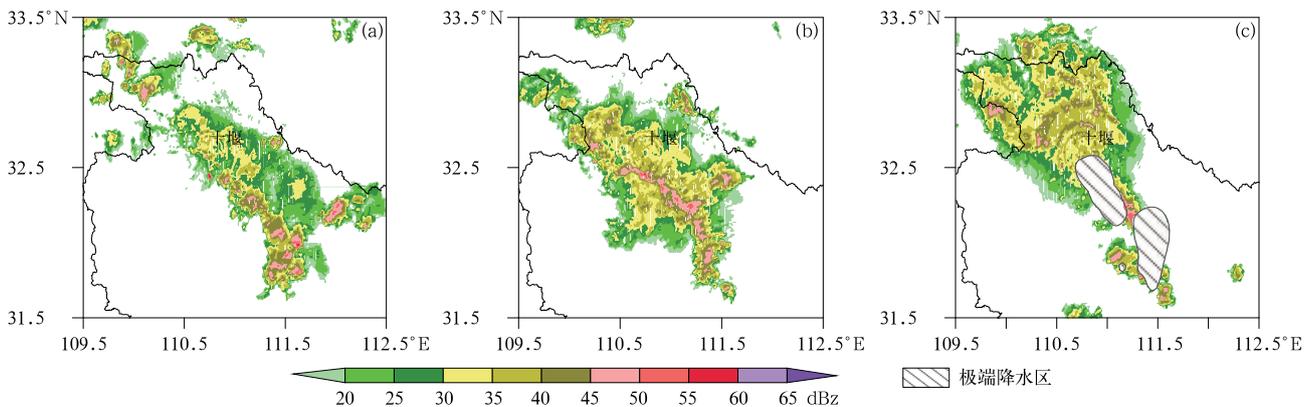


图 3 同图 2,但为 2012 年 8 月 5 日(a)19:54,(b)23:18 和 6 日(c)02:30 PS 类

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for PS MCS archetype cases

at (a) 19:54 BT 5, (b) 23:18 BT 5 and (c) 02:30 BT 6 August 2012

层状云降水回波(图 1c)。统计发现湖北省极端短时强降水 BB/QS 类 MCS 有两种常见形态:一种是对流线呈与引导风向平行的短带状,单体在对流线的上风方一端生成发展,向下风方移动,然后在下风方一端减弱演变成大片层状云降水区。由于传播方向与平移方向相反,MCS 少动极易形成极端短时强降水,形态与 PS 类相似,但对流线回波强度更强,对流线两侧回波梯度更大,对流单体向上风方传播的特征更为突出,与 Schumacher and Johnson (2005)和王晓芳(2012)的研究结果一致。另一种形态是对流线呈与引导风向垂直的短带状,多个对流单体迎着上风方向并排新生,连接成与上风方向垂直的短带,强回波带中部的对流发展最强,向上风方凸出,使得对流带迎风侧略呈弧状,在上风方一侧对流回波出流边界上均有单体新生,随引导气流发展并入对流带,层状云位于对流带下风方一侧,这与前期研究结果有差异。在环境风相对于对流线分量的垂直分布上无论是垂直或者是平行于对流线的中低层相对风都更小,显然,这是弱斜压性和弱风垂直切变的暖湿气团的特征表现。在红外卫星云图上,当 MCS 对流单体后向传播明显时, BB/QS 类 MCS 在

上风方常有指状云特征,这是强暴雨云团显著特征之一。

2012 年 7 月 12 日鄂东北特大暴雨是由一个发生于梅雨锋南侧,西南暖湿气流内的 BB/QS 类 MCS 造成的。01:54,在桐柏山东侧有西西南—东东北向短带状对流回波,系统向偏东方向传播和移动,层状云位于对流线西北侧(图 4a)。03 时,对流线强度增强,范围扩大,新生单体位于对流线西南端,层状云降水区位于对流线东北端(图 4b)。03:54,对流线演变成西南—东北向的短带,单体在对流线的西南端生成(图 4c),向东北方向移动,在对流线尾部减弱,形成宽广的层状云降水区,单体传播方向与 MCS 移动方向相反,MCS 呈现稳定少动的状况,短带上强回波的列车效应产生极端降水,局部 3 h 降水达 284 mm(图 4a~4c)。2013 年 6 月 24 日下午发生在大别山南侧的极端短时降水则是由西南气流中另一种形态的 BB/QS 类 MCS 造成(图 4d~4f)。24 日 11 时起在大别山附近有大量的单体新生。13:30 对流单体在山脉西南侧合并成强回波短带,并且对流带东北侧已形成层状云降水(图 4e)。15:24 强对流回波带演变成成西北—东南

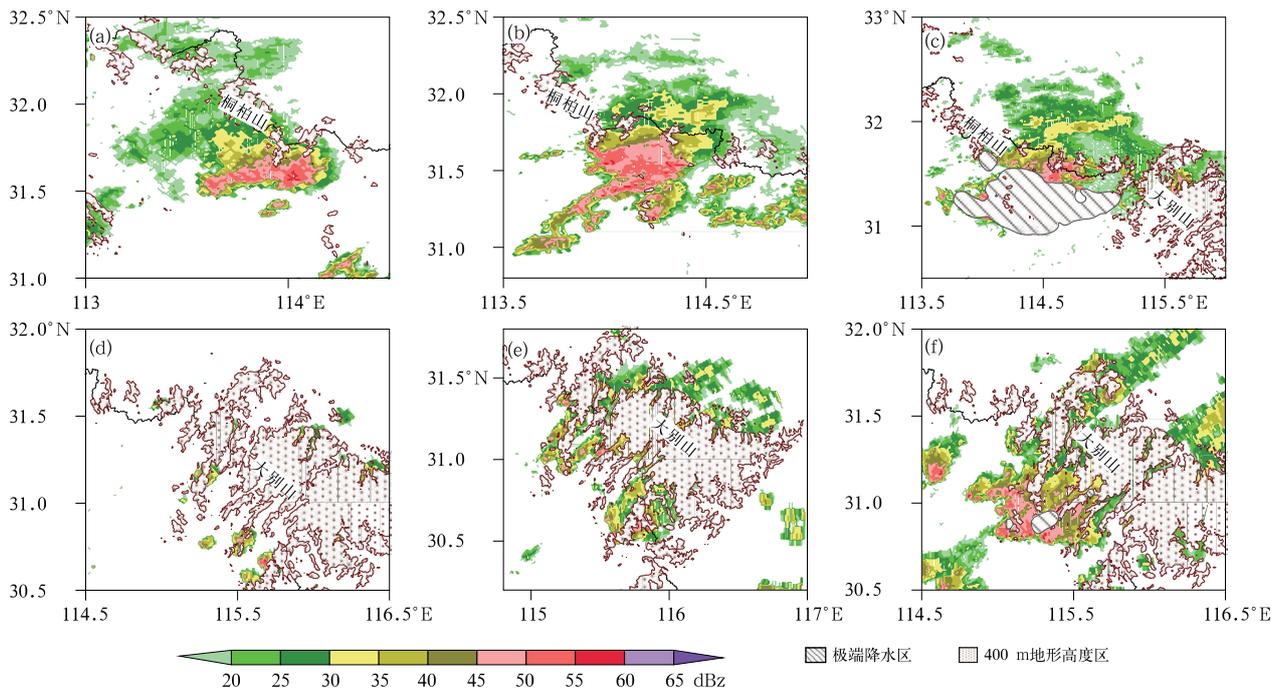


图 4 2012 年 7 月 12 日(a~c)和 2013 年 6 月 24 日(d~f)BB/QS 类 MCS 两种形态个例演变雷达组合反射率图
(a)01:54,(b)03:00,(c)03:54;(d)11:48,(e)13:30,(f)15:24

Fig. 4 Composite radar reflectivities in cases of two BB/QS MCS archetypes
on (a-c) 12 July 2012 and (d-f) 24 June 2013

(a) 01:54 BT, (b) 03:00 BT, (c) 03:54 BT; (d) 11:48 BT, (e) 13:30 BT, (f) 15:24 BT

向的对流回波短带,对流带的西南侧有单体新生向东北方向移动,并入对流回波带,强回波前缘略成弧线,线对流后侧则是减弱对流回波形成的大片层状云降水(图 4f)。由于回波带与环境风垂直,单体经历的路程短,列车效应相对较弱,产生的极端降水范围略小,主要位于强回波带中部,小时最大降水达 79.8 mm。

2.4 TL/AS 类 MCS 模态

TL/AS 类 MCS 是极易产生极端强降水的 MCS 类型之一。该类 MCS 在雷达反射率因子图上有三个明显特征:第一,形态上属于线状对流,由层状云和对流列车线组成,一般北侧为层状云降水回波,南侧为对流列车线,单体沿列车线走向排列;第二,对流单体在列车线的上游新生、加强,沿对流向下游移动;第三,整个 MCS 移动方向与列车线走向基本平行,垂直于列车线的速度分量很小。TL/AS 类 MCS 的第一特征在静态模型上与 TS 类 MCS 有些类似,但是 MCS 运动特征及新生单体传播特征(第二、三特征)与 TS 类明显不同,产生的极端降水往往沿着对流带分布。

图 1d 给出了 TL/AS 类 MCS 的两种不同形成方式:(1)由 TS 类 MCS 发展演变而来,多发生于锋面气旋类天气背景下。此时,850 hPa 切变线位于高空槽底部,在南下过程中受到准东西向副热带高

压的阻挡,切变线由西南—东北向逐渐转为西西南—东东北向,实际雨带与切变线走向一致,高低层环流的相互作用使得引导气流平行于雨带的速度分量变大,垂直于雨带的速度分量变小,TS 类 MCS 转变成 TL/AS 类 MCS。(2)层状云南部有对流回波新生并向顺风方移动形成,通常发生在西南涡切变天气背景下,由低涡东侧的回波演变而来。此时,东西向的副热带高压与西南涡东侧暖切变走向基本一致,低涡与副热带高压之间位置相对稳定。当低涡东移,位势梯度加大,南风增强,低涡东侧的暖切变北抬,在切变线附近有 MCS 生成。由于副高和低层切变线的走向均与雨带走向一致,平行于雨带方向的速度分量明显大于垂直雨带方向的速度分量,因而形成 TL/AS 型 MCS。所以当 TS 类 MCS 向 TL/AS 类 MCS 转变或层状云靠暖区一侧对流有新生是该类 MCS 产生强降水预警的最佳先兆。

TL/AS 类 MCS 环境风相对于对流线垂直和平行分量的垂直分布(图略)表明平行对流线的平均风分量近地层最小,随高度上升显著地增大,垂直于对流线的风分量在近地层最大,随高度明显减弱,对流层中层平行对流线的平均风分量明显大于垂直于对流线的风分量,与 Schumacher and Johnson (2005)的研究结果相近。

图 5 给出了 TL/AS 类 MCS 两种形成方式的

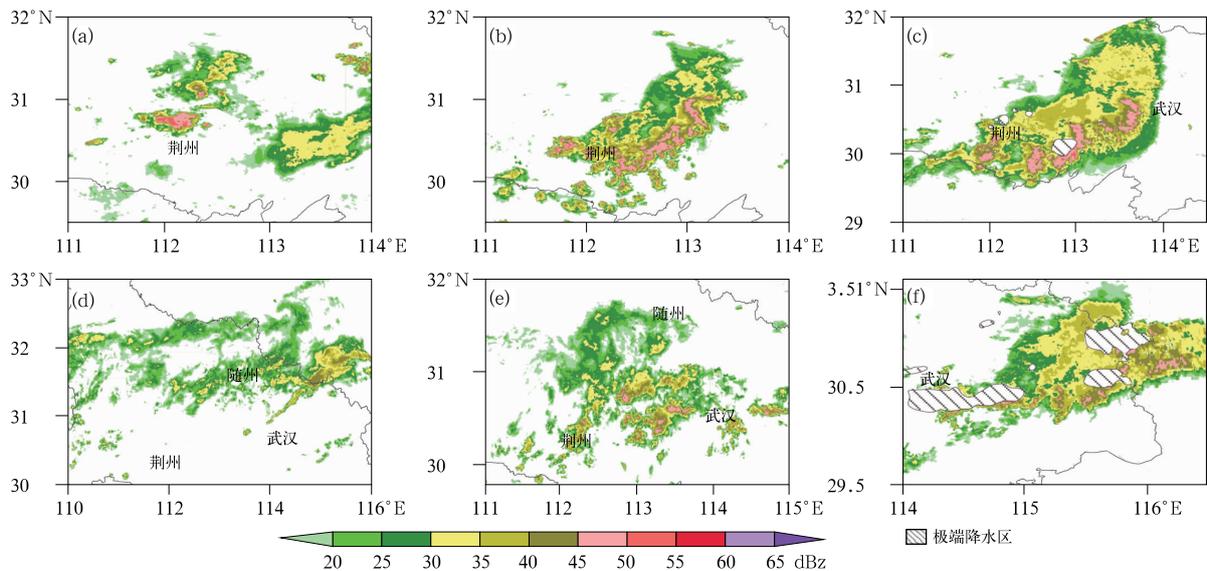


图 5 同图 4, 但为 2013 年 7 月 20—21 日(a~c)和 5—6 日(d~f)TL/AS 类

(a)20 日 21:00, (b)20 日 23:36, (c)21 日 01:36; (d)5 日 12:00, (e)5 日 20:24, (f)6 日 01:30

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the cases of two TL/AS MCS evolutions in (a~c) 20—21 and (d~f) 5—6 July 2013

(a) 21:00 BT 20, (b) 23:26 BT 20, (c) 01:36 BT 21; (d) 12:00 BT 5, (e) 20:24 BT 5, (f) 01:30 BT 6

实例。2013 年 7 月 20 日夜间至 21 日凌晨,荆州东部有一个 TS 类 MCS 转向成为 TL/AS 类 MCS,并产生了极端降水(图 5a~5c)。20 日 20 时起荆州北部有对流回波发展,21 时组织成西南—东北向的对流回波带。23:36 MCS 在东南方向移动的过程中,对流线后侧有大范围层状云降水,与对流线方向夹角大,具有 TS 类 MCS 的特征。21 日 01:36 后,线对流北段移速快于南段,逐渐转为西西南—东东北向,对流线上单体移动方向与对流线平行,层状云位于对流线北侧,TL/AS 类 MCS 形成(图 5c),强降雨开始出现,最大小时降水到达 90.1 mm。图 5d~5f 为 TL/AS 类 MCS 的另一种形成方式。2013 年 7 月 5 日 12 时起,荆州北部到随州有大范围西南—东北向层状云降水,偏东方向移动并缓慢南压。20 时,荆州南部对流回波发展,向东北方向移动,与南下的层状云回波合并。6 日 01 时,MCS 移到武汉东部之后组织成准东西向的线对流,层状云位于线对流北侧,线对流的西南端有对流单体新生,单体移动方向与对流线走向一致,形成列车效应,区域站 3 h 累积降水达 141.2 mm。

2.5 VS 类 MCS 模态

VS 类 MCS 为非线状 MCS 类型,雷达反射率因子图上的特征为大范围层状云降水回波中包裹着

一条或多条气旋性涡旋状对流回波带(图 1e 所示),对流回波带围绕涡旋中心做气旋性运动。不同于常见的直线型列车效应,旋转式列车效应是 VS 类 MCS 产生极端降水的主要方式。后期,随着涡旋的发展,涡后冷气流的卷入最终可能会演变成 α 中尺度的 TS 类。VS 类 MCS 的形成主要有两种方式:一种是两条或多条不同来向的对流系统相向移动合并形成,另一种是线对流上有气旋性扰动发展,导致线对流后有气流侵入从而发生形变而成,其中以第一种形成方式居多。VS 类 MCS 是湖北省极端短时强降雨类中最重要的一类,常出现在长江中游梅雨期西南低涡前方暖切变附近,与其他类型相比,它降水强度大、影响时间长、范围广、灾害重。

与线状 MCS 相比,VS 类 MCS 的演变要复杂得多,图 6 给出了两种形成方式的实例。例 1:2011 年 6 月 17—18 日,低涡切变天气背景下,一个以合并方式形成的 VS 类 MCS 产生大范围大暴雨的例子。17 日 20:30 在鄂西南宜昌东部有对流短带发展并向偏东方向移动,同时,湖南常德附近有对流带发展向东北方向移动(图 6b)。约 2 h 后,两者在宜昌东部山地平原过渡带合并加强,合并后回波移速变慢并出现涡旋运动,到 18 日 01 时演变成为中心是气旋性涡旋状对流回波带、外围是大范围层状云降水的 VS 类 MCS(图 6a~6c)。该系统东移过程

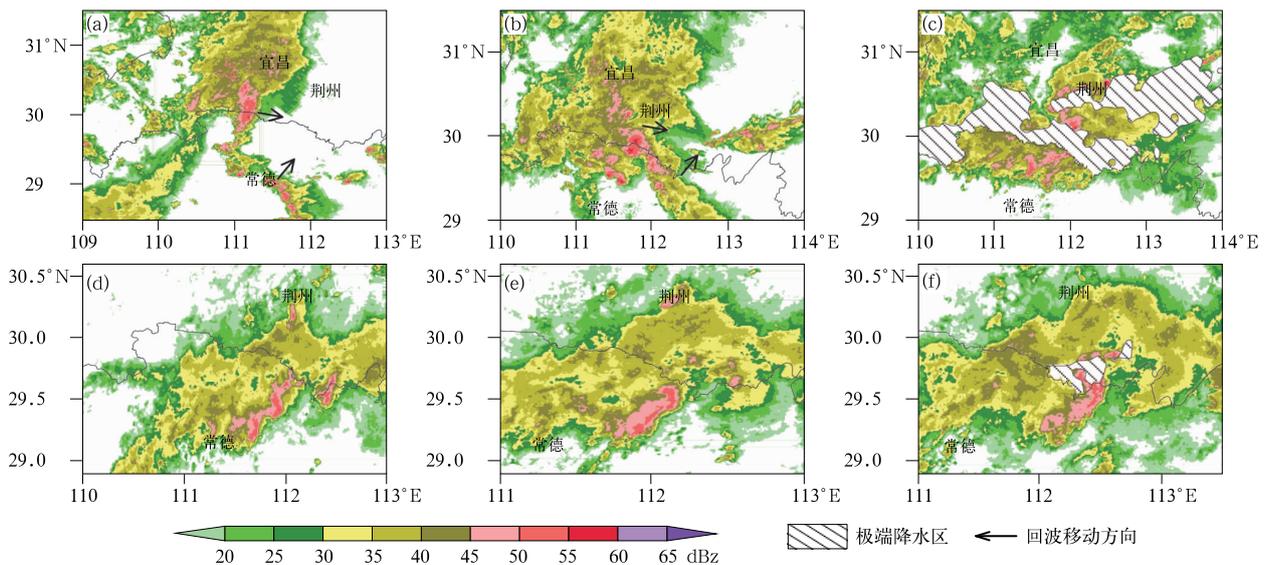


图 6 同图 4,但为 2011 年 6 月 17—18 日(a~c)和 2014 年 7 月 17 日(d~f)VS 类
(a)17 日 20:30,(b)17 日 22:42,(c)18 日 01:00;(d)09:24,(e)10:06,(f)11:00

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for the cases of two VS MCS evolutions
on (a—c) 17—18 June 2011 and (d—f) 17 July 2014

(a) 20:30 BT 17, (b) 22:42 BT 17, (c) 01:00 BT 18; (d) 09:24 BT, (e) 10:06 BT, (f) 11:00 BT

中产生了江汉平原 20 个站的大暴雨,3 h 最大降水达 188.6 mm。例 2:2014 年 7 月 17 日造成了江汉平原南部强降水的 VS 类 MCS 则是由线状对流受气旋性扰动影响形成的。09:24,常德北部有西南—东北向的对流回波带发展,西北侧有大范围层状云降水,对流带向东北方向移动,向东南方向传播运动不明显,具有 TL/AS 类 MCS 特征(图 6d)。10:06,对流回波带北端向前突起成弓形,回波涡旋运动增强(图 6e)。至 11 时,对流回波带演变成具有大范围层状云降水包裹气旋性涡旋状对流带结构的 MCS,径向速度图上该区域对应明显的气旋性流场(图略),在其中心附近小时雨量达到 50 mm(图 6d~6f)。

2.6 SS 类 MCS 模态

SS 类 MCS 是本文 MCS 种类中出现最多的,占个例总数的 33.9%,常引发局地极端降水天气。MCS 在雷达反射率因子图上的降水回波形状不规则,但基本上是对流性强回波集中于降水回波中间,多呈长团状,层状云降水回波环绕在其四周(图 1f),MCS 在原地停留 2~3 h 后才开始移动或者分裂减弱。SS 类 MCS 的形成方式以不同移向的对流系统合并为主,图 1f 仅给出常见形成方式。

2014 年 8 月 6 日是发生在湖北宜昌东部山地平原过渡带 SS 类 MCS 的典型例子(图 7)。6 日午后宜昌西南、常德南部均有对流发展,20:30 宜昌南部对流单体合并成对流回波块,同时常德南部的对流回波向东北方向移动(图 7a)。22 时在宜昌附近

形成了大范围的强对流回波,由于武陵山的阻挡,雷暴流出向东部、南部平原地区扩散,在荆州南部触发对流(图 7b)。23:30 荆州南部对流与常德附近北上的对流合并成为长团状的 MCS,强回波居中,层状云降水回波位于强对流降水回波四周,MCS 维持 2~3 h,局地产生了 141 mm 的降水(图 7c)。

3 MCS 时空分布特征

以累积雨量最大的区域站所在位置作为 MCS 的位置,得到 6 类 MCS 的空间分布图(图 8)。统计分析表明,TS 类个例较少,3 个个例均发生于山脚,多为偏东方向移动(图 8a);PS 类常发生于鄂西山地,有少数出现武汉附近及幕阜山北侧,山区 MCS 多沿山脉的走向或河谷移动,武汉附近 MCS 则向西移动(图 8b);BB/QS 类 MCS 多形成于山脉的迎风侧,常常出现在大别山和大洪山南侧,鄂西山地、江汉平原各有一例,该类 MCS 常常向背离山脉一侧传播(图 8c);TL/AS 类主要分布在江汉平原以东的平原地带,移动方向主要为东南和东北方向(图 8d);VS 类多形成于武陵山以东的江汉平原,以及江汉平原南侧的湘鄂交界地区,其形成与该地中尺度涡旋发展有关,MCS 向偏东或东北方向移动(图 8e);SS 类常常发生在鄂西山地和大别山、幕阜山西侧,仅有少数个例出现在江汉平原,MCS 移动趋势不明显(图 8f)。

有研究表明 MCS 的分布与地面短时强降水(中国气象局对全国短时临近预报业务的标准规定:

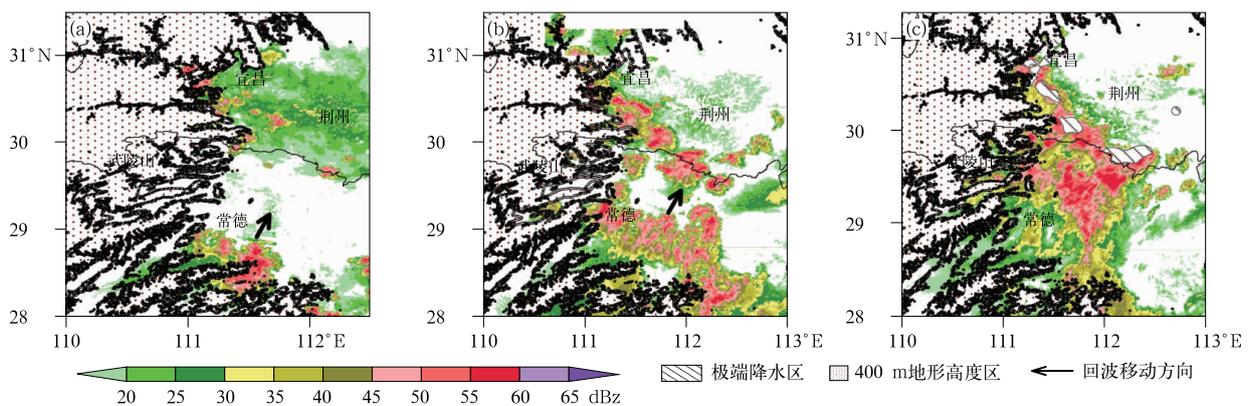


图 7 同图 2,但为 2014 年 8 月 6 日(a)20:30,(b)22:00,(c)23:30 SS 类

Fig. 7 Same as Fig. 2, but for SS MCS archetype cases

at 20:30 BT (a), 22:00 BT (b) and 23:30 BT (c) 6 August 2014

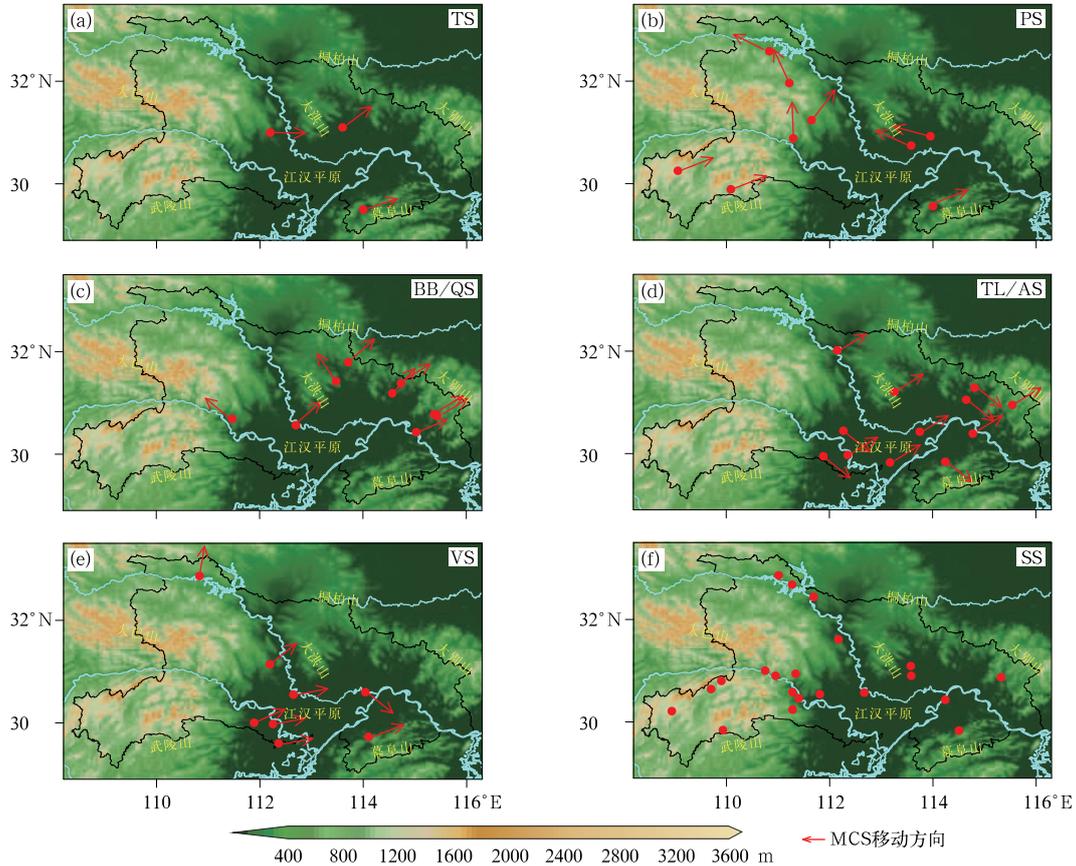


图 8 6 类 MCS 空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution of six MCS archetypes

20 mm · h⁻¹)分布接近(陈炯等, 2013)。本研究以是否出现 20 mm · h⁻¹ 雨团作为 MCS 形成和消亡的标志, 结合雷达反射率因子图, 统计 MCS 生命期包含的时段占个例总数百分比, 从而得到 6 类 MCS 时间分布图(图 9)。TS 类 MCS 多发于傍晚至上半夜; PS 类出现的时段较为分散, 多发生于 07—20 时; BB/QS 类 MCS 多发生于 02—06 时; TL/AS 类 MCS 出现次数最多的为 22—08 时, 维持时间较长; VS 类 MCS 为降水维持时间最长的 MCS, 维持时间长, 导致各时段比例接近, 出现次数最多的为 08—11 时; SS 类 MCS 也多发于傍晚至上半夜。总的来说, 这些 MCS 在傍晚到凌晨出现的最多, 这与夜间梅雨锋、西南气流加强有较大关系(Pham et al, 2008; Chen et al, 2010; 周静等, 2017; 张家国等, 2108)。

4 几类 MCS 模态成因分析

研究发现, MCS 模态成因十分复杂, 与环境风

垂直分布、中尺度系统组织和地形等影响有关(Parker and Johnson, 2000; 王晓芳, 2012; 张家国等, 2015; 吴涛等, 2017; 赵宇等, 2017; 徐珺等, 2018)。对于线状 MCS 模态的成因, 王晓芳和崔春光(2012)从环境风相对于对流线分量的垂直分布上对 TS、TL/AS、LS、PS、BB/QS 类 MCS 进行了对比分析, 这里重点从边界层中尺度系统、地形等对 MCS 形态的影响, 分析 TS 类与经典形态出现差异的原因、地形对 BB/QS 类 MCS 的影响及非线状 MCS 的形成原因。

4.1 中尺度气旋对 TS 类 MCS 的形成作用

前面 2.1 节描述的 TS 类 MCS 的逗点形态、头部后侧弱降水回波入流通道特征十分重要, 因为这些特征的形成与近地面中尺度气旋波的发生发展和组织作用密切相关。分析发现, 逗点头部主要位于中尺度气旋中心附近, 大片层状云降水发展与气旋发展有关, 线对流主体与气旋冷锋相对应, 暖锋则与横向相对弱的对流短带相对应。另外, 近地面中尺

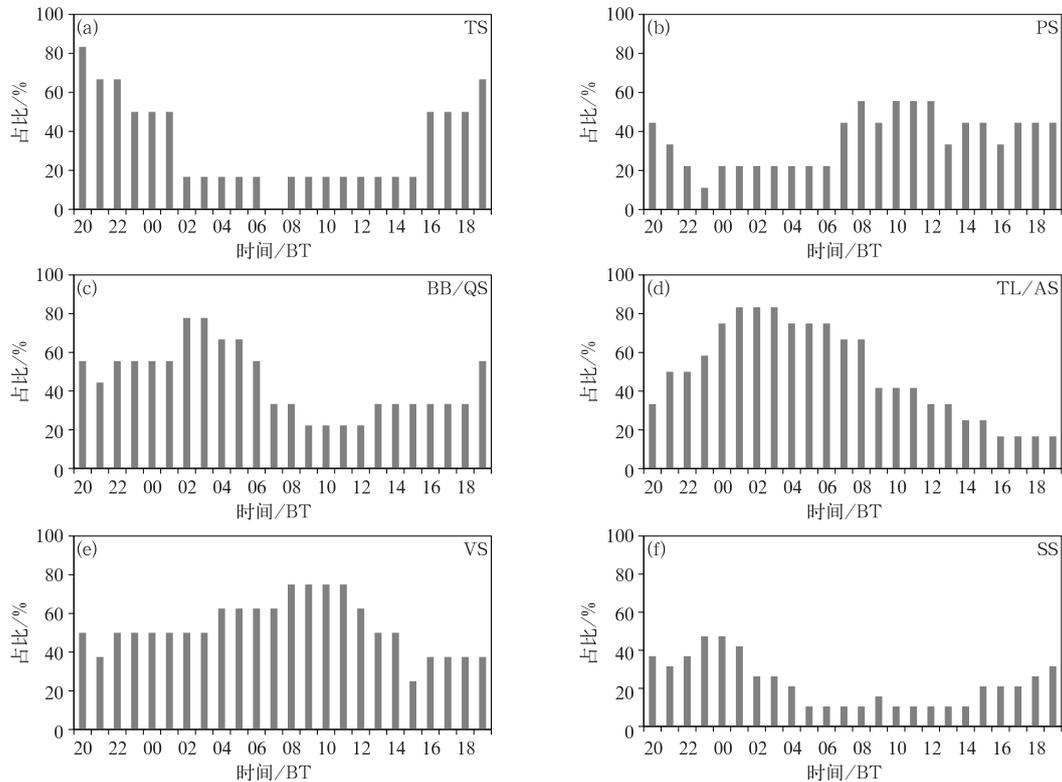


图 9 6 类 MCS 时间分布图

Fig. 9 Temporal distribution of six MCS archetypes

度气旋波一般发生在冷锋进入暖低压倒槽后,多出现在江汉平原以东地区,这与 TS 类 MCS 分布特征一致。2011 年 6 月 9 日就是一次在冷锋南下的天气背景下由 TS 类 MCS 产生的雷雨大风和大暴雨天气过程,由图 10a 可以看出,9 日 22 时在对流线后侧弱回波通道处,地面风场呈气旋性旋转,有气压中心存在,温度场也出现了明显的冷暖锋区,说明该处有 β 中尺度的锋面气旋发展。由于尺度较小,生命史不长,常规天气图很难分析出来。雷达回波上与中尺度气旋相对应的中尺度对流系统属典型的 TS 模态,这说明 TS 型中尺度对流系统的形成发展与 β 中尺度的锋面气旋发展和组织作用密切相关。

4.2 江汉平原涡旋对 VS 类 MCS 的形成作用

空间分布统计(图 8)表明,VS 类 MCS 主要分布于武陵山东侧的江汉平原。分析发现,边界层江汉平原涡旋的发展和组织作用是 VS 类 MCS 形成的重要原因(吴涛等,2017)。低涡切变是长江中游梅雨期极端暴雨发生的最重要天气系统之一,江汉平原涡是西南低涡前侧边界层内的新生涡,在低涡切变系统影响下,江汉平原涡的发展与地面暖倒槽、

低涡前暖湿气流和地形等密切相关,而边界层多支气流(包括中尺度雷暴冷出流和环境气流)的强烈辐合导致垂直涡度的向上迅速发展是江汉平原涡形成的重要机制之一(吴涛等,2017;张家国等,2018)。2011 年 6 月 18 日发生在江汉平原的特大暴雨过程是在西南涡切变的天气背景下,由边界层中尺度涡旋环流触发和组织产生的一个典型的 VS 类 MCS 造成的。图 10b 所示,MCS 在雷达反射率因子上表现为,大片层状云降水回波包裹着螺旋状对流回波带,MCS 具有气旋性运动特征,螺旋雨带对应位置上,地面风场呈气旋性旋转,气压场上中尺度低压也很明显。结合边界层动力、热力场和雷达回波特征分析推断,边界层内多支气流的辐合可能是导致涡旋强烈发展的主因。从图上亦可看出,这种涡旋环流不伴随明显的温度锋区,不是锋面附近发展起来的中尺度锋面气旋系统。另外,中尺度涡旋发展后期可能演变为中尺度气旋波,此时 MCS 形态也可能演变为锋面气旋类的逗点状。

4.3 地形对 BB/QS 类 MCS 的形成作用

统计分析表明,湖北省极端短时强降水中的

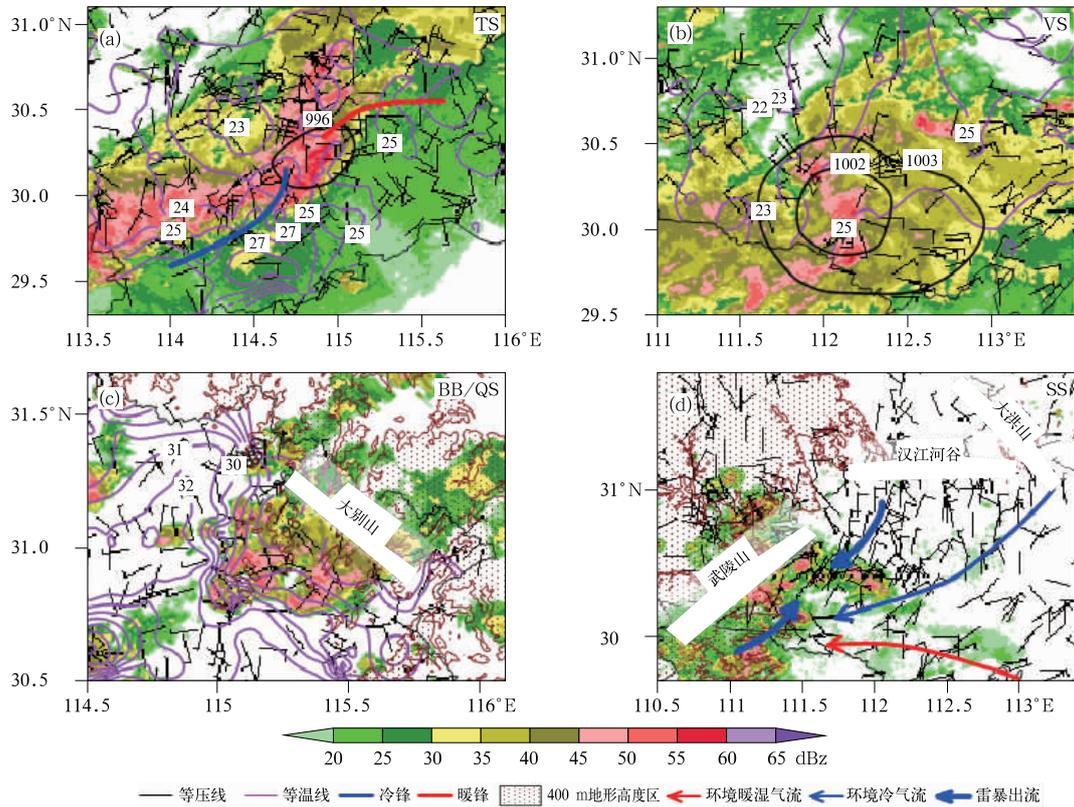


图 10 4 类 MCS 个例组合反射率和加密地面资料分析

(a)2011 年 6 月 9 日 22 时, (b)2011 年 6 月 18 日 01 时,
(c)2013 年 6 月 24 日 15 时, (d)2014 年 7 月 10 日 21 时

Fig. 10 Composite radar reflectivities of four MCS archetypes and encrypted ground data analysis

(a) 22:00 BT 9 June 2011, (b) 01:00 BT 18 June 2011,
(c) 15:00 BT 24 June 2013, (d) 21:00 BT 10 July 2014

BB/QS 类 MCS 一般常发生于梅雨锋南侧西南暖湿气流控制下的大别山迎风坡一侧。研究指出,山脉对雷暴冷出流的阻挡是该区域 BB/QS 类 MCS 多发的主要原因(张家国等,2015)。当中尺度对流系统远离山脉时,由于没有地形阻挡,在风暴承载层平均风为西南风引导下,冷池、出流边界向东北扩展,中尺度对流系统以向前传播为主,中尺度对流系统内自东向西依次是新生单体、成熟单体和消亡单体;当冷池继续东移遇到大别山阻挡后,冷池移动减缓,冷空气在山前堆积,不久向西南方向流出,向前传播逐步转为向后传播,中尺度对流系统内自西向东依次是新生单体、成熟单体和消亡单体。向后传播与平移相抵消,中尺度对流系统处于相对静止或缓慢移动状态,导致多个不同生命阶段的单体经过同一位置,或 MCS 少动,产生持续性强降水。图 10c 为 2013 年 6 月 24 日一次西南涡切变系统影响下鄂东

北局部大暴雨过程中 BB/QS 类 MCS 强盛时期地面温度场、风场及雷达反射率因子叠加图,从图上可以看出地面冷池位于大别山南侧,冷池边缘温度梯度明显,形态与对流回波一致。冷池中心是雷暴底部下沉气流形成的东北气流,东北气流在冷池前端与地面环境风——西南风形成强烈辐合,对流单体在此新生发展,这十分有利于单体向西南方向传播,类似情况在大洪山西南侧也时常出现。

需要指出的是,盛夏长江中游地区受热带登陆台风或东风波系统影响时,鄂西山地宜昌以东的江汉平原盛行偏东的暖湿气流,BB/QS 类 MCS 也可能在此地区形成。

4.4 MCS 合并与 SS 类 MCS 的形成

SS 类 MCS 多发生于盛夏副热带高压北侧地面暖倒槽中,不稳定能量高,有利于局地对流发展;另

外鄂西复杂地形在热力动力方面的作用,增加了对流发展、合并产生强降水几率。对流合并或汇合实际上反映了不同来向的雷暴产生的边界层中尺度冷气流(也包括环境暖湿气流)的强烈辐合,通过地面风场分析可以清楚看到这些气流形成的辐合流场,这与雷达反射率因子图上强对流位于强辐合中心、周围是层状云降水区的模态是吻合的。有时在雷暴强烈发展时 MCS 出现旋转运动,这可能与边界层气流的强烈辐合、气柱在垂直方向拉升气旋性涡旋发展有关。同时, MCS 发展后期又因强降水中下沉气流向四周辐散,使得周边对流再次发展起来,形成内为层状云降水、外围对流单体环状结构的形态。2014年7月10日21时(图10d),自汉江河谷南下的雷暴出流、武陵山东南侧北上的雷暴出流、大洪山东侧西行的环境冷气流及鄂东南暖性的偏东气流,在武陵山东部的山地平原过渡带汇合,对流回波在这里合并、加强,产生极端降水。

5 结 论

通过对2008—2015年湖北省62例极端短时强降水个例的新一代天气雷达、气象卫星、常规观测资料和地面加密观测资料的综合分析,重点基于MCS演变过程的雷达回波特征,归纳出长江中游极端短时强降水MCS的模态,统计了时空分布,并初步研究了部分MCS模态的成因,主要结论如下:

(1) 62个极端短时强降水中尺度对流系统分为6种模态,其中,4种线状中尺度对流系统模态包括:尾随层状云(TS)、平行层状云(PS)、后向扩建类(BB/QS)、邻近层状云类(TL/AS),这些线状MCS的模态与早期的研究基本一致,但是TS和BB/QS类MCS在形态上与早期结果有些差异;两种非线性状中尺度对流系统模态包括:涡旋状类(VS)和层状云环绕类(SS),为新增加的两种模态。各类MCS在个例中所占比例有较大差异。

(2) VS类MCS是长江中游地区一种非常重要的极端短时强降水MCS模态,成熟期的MCS以中心是多条气旋式螺旋对流带、外围是大范围层状云降水为主要特征,螺旋雨带也可以演变成S形、逗点型等形态。长江中游地区VS类MCS的形成与武陵山以东边界层强烈发展的中尺度涡旋的触发和组织作用有密切关系。

(3) BB/QS类MCS多发生在大别山、大洪山

迎风坡一侧,其原因与地形阻挡等导致雷暴冷池向上风方传播有密切关系。另外BB/QS类MCS多发生于梅雨锋前暖区,其产生的暴雨多为暖区暴雨。

(4) 盛夏SS类MCS多活动于鄂西南的复杂地形区域,因为该区域局地对流频发,多个中尺度对流系统容易合并形成SS类MCS。而夏季在鄂东地区尤其是大别山西侧,在梅雨锋南侧附近也能观测这类MCS活动,只是对流强度相对较弱一些。有意义的是,SS类MCS常常是长团状对流被层状云所包裹,这实际上反映了暴雨发生时边界层存在多支气流强烈辐合。

参考文献

- 陈炯,郑永光,张小玲,等,2013.中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J].气象学报,71(3):367-382. Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season[J]. Acta Meteor Sin, 71(3):367-382(in Chinese).
- 黄小玉,陈媛,顾松山,等,2006.湖南地区暴雨的分类及回波特征分析[J].南京气象学院学报,29(5):635-643. Huang X Y, Chen Y, Gu S S, et al, 2006. Classification and radar echo features of rain-storms in Hunan[J]. J Nanjing Inst Meteor, 29(5):635-643 (in Chinese).
- 李彦霖,张述文,田程,等,2018.基于雷达回波的贵阳地区对流性降水特征分析[J].气象,44(6):752-758. Li Y L, Zhang S W, Tian C, et al, 2018. Statistics characteristics of radar echoes of convective precipitation in Guiyang[J]. Meteor Mon, 44(6):752-758(in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 44(4):469-484(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).
- 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).
- 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).
- 徐珺, 毕宝贵, 湛芸, 等, 2018. “5.7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报, 76(4):511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al, 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):511-524(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]. Torr Rain Dis, 32(3):202-209(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, 王珏, 吴涛, 等, 2018. 长江中游地区极端降水主要天气系统类型分析[J]. 暴雨灾害, 37(1):14-23. Zhang J G, Wang J, Wu T, et al, 2018. Weather system types of extreme precipitation in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Torr Rain Dis, 37(1):14-23(in Chinese).
- 张家国, 王珏, 周金莲, 等, 2008. 暴雨多普勒天气雷达回波特征分析及临近预警[J]. 暴雨灾害, 27(4):326-329. Zhang J G, Wang J, Zhou J L, et al, 2008. Doppler radar echo analysis for rainstorm nowcasting[J]. Torr Rain Dis, 27(4):326-329(in Chinese).
- 张家国, 周金莲, 湛伟, 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).
- 张小玲, 余蓉, 杜牧云, 2014. 梅雨锋上短时强降水系统的发展模式[J]. 大气科学, 38(4):770-781. Zhang X L, Yu R, Du M Y, 2014. Evolution pattern of short-time intense precipitation-producing systems associated with Meiyu front[J]. Chin J Atmos Sci, 38(4):770-781(in Chinese).
- 赵宇, 裴昌春, 杨成芳, 2017. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统触发和组织化的观测分析[J]. 气象学报, 75(5):700-716. Zhao Y, Pei C C, Yang C F, 2017. Observational analysis of initiation and organization of meso-scale convective systems in a heavy rainfall event associated with Meiyu front[J]. Acta Meteor Sin, 75(5):700-716(in Chinese).
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎, 2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 43(6):641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6):641-652(in Chinese).
- 周静, 郑永骏, 苗春生, 等, 2017. 梅雨锋强降水与低空急流日变化的观测分析和数值模拟[J]. 热带气象学报, 33(5):750-761. Zhou J, Zheng Y J, Miao C S, et al, 2017. The characteristics and numerical simulation of diurnal variations of low-level jet and Meiyu front heavy rainfall[J]. J Trop Meteor, 33(5):750-761(in Chinese).
- Chen H M, Yu R C, Li J, et al, 2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River Valley[J]. J Climate, 23(4):905-917.
- Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al, 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century[J]. Climate Res, 19(3):193-212.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York: Cambridge University Press: 1535.
- Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R, 1979. Synoptic and meso- α scale aspects of flash flood events[J]. Bull Amer Meteor Soc, 60(2):115-123.
- Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev, 128(10):3413-3436.
- Pham N T, Nakamura K, Furuzawa F A, et al, 2008. Characteristics of low level jets over Okinawa in the Baiu and post-Baiu seasons revealed by wind profiler observations[J]. J Meteor Soc Japan, 86(5):699-717.
- Schiesser H H, Houze R A Jr, Huntrieser H, 1995. The mesoscale structure of severe precipitation systems in Switzerland[J]. Mon Wea Rev, 123(7):2070-2097.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective system[J]. Mon Wea Rev, 133(4):961-976.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al, 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J Climate, 18(7):1096-1108.
- Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al, 2013. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China[J]. Wea Forecasting, 28(5):1081-1098.