

文章编号: 2096-1618(2023)03-0349-09

触发四川盆地极端短时强降水的中尺度对流系统环境条件

张武龙^{1,2}, 青泉^{1,2}, 杨景朝^{2,3}, 陶勇⁴

(1. 四川省气象台, 四川 成都 610072; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072; 3. 四川省气象灾害防御技术中心, 四川 成都 610072; 4. 贵州省气象服务中心, 贵州 贵阳 550002)

摘要:为研究触发极端降水的中尺度对流系统(MCS)环境条件,利用常规探空和地面观测资料以及雷达组合反射率因子资料,分析2013–2019年5–9月41例触发四川盆地极端短时强降水的MCS的环流形势和中尺度物理量特征,并对MCS的成因进行初步探讨。结果表明:触发四川盆地极端短时强降水的MCS发生的天气形势可分为斜压锋生类和准正压类。斜压锋生类天气形势可分为低层切变型和西南低涡型,分别对应邻近层状云类和涡旋类MCS发生前的环流背景。准正压类天气形势可分为低槽东移型、两高切变型、东风扰动型,易发生平行层状云类、后向扩建类和尾随层状云类MCS。邻近层状云类和涡旋类MCS的抬升凝结高度和平衡高度高于平行层状云类、后向扩建类和尾随层状云类MCS。高温高湿环境是5类MCS发生发展的共同特征,涡旋类和邻近层状云类MCS环境的热力不稳定性相对较高,涡旋类和邻近层状云类、平行层状云类和后向扩建类MCS发生在低层水汽输送更为充沛的环境下。相较于其他3类MCS,强的垂直风切变更有利于后向扩建类和平行层状云类MCS的发展维持。在准正压类天气形势下,天气尺度强迫较弱,MCS形成和发展与低层流场、地面中尺度辐合线、地形强迫以及雷暴冷池有密切关系。

关键词:气象学;极端降水;MCS;环境条件

中图分类号:P456.7

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcu.2023.03.015

0 引言

中尺度对流系统(MCS)由于不同的组织结构特征和生命周期,可产生不同强度、不同类型的强对流天气,包括强降水、雷暴大风、冰雹、龙卷等^[1]。研究表明^[2–5],MCS的组织类型、持续时间和空间分布与环境条件有着密切的关系。丁一汇等^[6]将中国飚线的环流背景分为槽前型、槽后型、高压后部型和台风倒槽型,并认为冷锋、切变线、低涡等天气系统是飚线触发和维持的有利条件,吴瑞姣等^[7]在此基础上对飚线天气系统又进行了进一步细分。王晓芳^[8]统计长江中下游地区梅雨期线状MCS环境特征,发现将近半数的MCS是在地面低压倒槽影响下形成,且中低层850 hPa切变线是MCS的主要影响系统。Zheng等^[9]指出在中国中东部,干、湿环境下MCS产生的强对流天气明显不同,干环境主要产生雷暴大风和冰雹,湿环境下则以强降水为主,特别是极端强降水。郑淋淋等^[10]分析江淮流域MCS环境条件,发现MCS在干、湿环境下的抬升凝结高度、对流有效位能、对流抑制能量、抬升指

数等物理量参数存在明显差异。盛杰等^[11]研究华北线状MCS表明强雷暴大风型MCS的环境大气斜压性强,中层干,大的垂直减温率、最优对流有效位能和下沉对流有效位能是其重要环境条件,而强降水型MCS的天气尺度强迫相对较弱,水汽条件相对更加充沛。范元月等^[12]对湖北宜昌地区极端短时强降水MCS进行了深入分析,并按照天气潜势条件分型,总结概念模型。上述研究结果均对认识当地MCS发生的环境条件具有一定参考价值。

四川盆地是中国西南地区MCS高发地之一,每年由于MCS造成的强对流天气给四川盆地带来巨大的经济损失,尤其以极端性暴雨最为严重^[13–16]。张武龙等^[17]统计了2013–2019年5–9月41例触发四川盆地极端短时强降水的MCS过程,并将其分为6种组织类型:尾随层状云类(TS,个例数3)、邻近层状云类(TL/AS,个例数10)、平行层状云类(PS,个例数9)、后向扩建类(BB/QS,个例数8)、涡旋类(VS,个例数6)和无组织对流类(UC,个例数5),并详细分析了上述6类MCS的组织结构及其时空分布特征。在此基础上,利用常规探空和地面观测资料,结合SWAN系统新一代天气雷达组合反射率因子资料,分析触发四川盆地极端短时强降水的不同类型MCS的环境条件,以期为做好极端短时强降水预报服务工作提供参考依据。

收稿日期:2022-03-30

基金项目:四川省科技厅资助项目(2022YFS0542);四川省重点实验室资助项目(SCQXKJYJXZD202101、SCQXKJYJXMS202112、SCQXKJQN2019001);中国局预报员专项资助项目(CMAYBY2020–110);四川智能网格预报创新团队资助项目(川气发[2022]52号)

通信作者:青泉.E-mail:qxtqingq@163.com

1 数据来源

所用数据包括:(1)2013–2019年5–9月41例触发四川盆地极端短时强降水的MCS过程发生前临近的08时或20时的常规探空和地面观测资料;(2)41例MCS的组合反射率因子资料,来源于SWAN系统新一代天气雷达组网拼图,空间分辨率 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,时间分辨率6 min。

本文所提及的触发四川盆地极端短时强降水的MCS过程是指雷达回波的对流区组合反射率因子 ≥ 40 dBz,回波伸展水平尺度 >100 km,持续时间超过3 h,并造成至少1个国家自动站且有1个相邻的区域自动站3 h雨量 ≥ 100 mm^[17]。

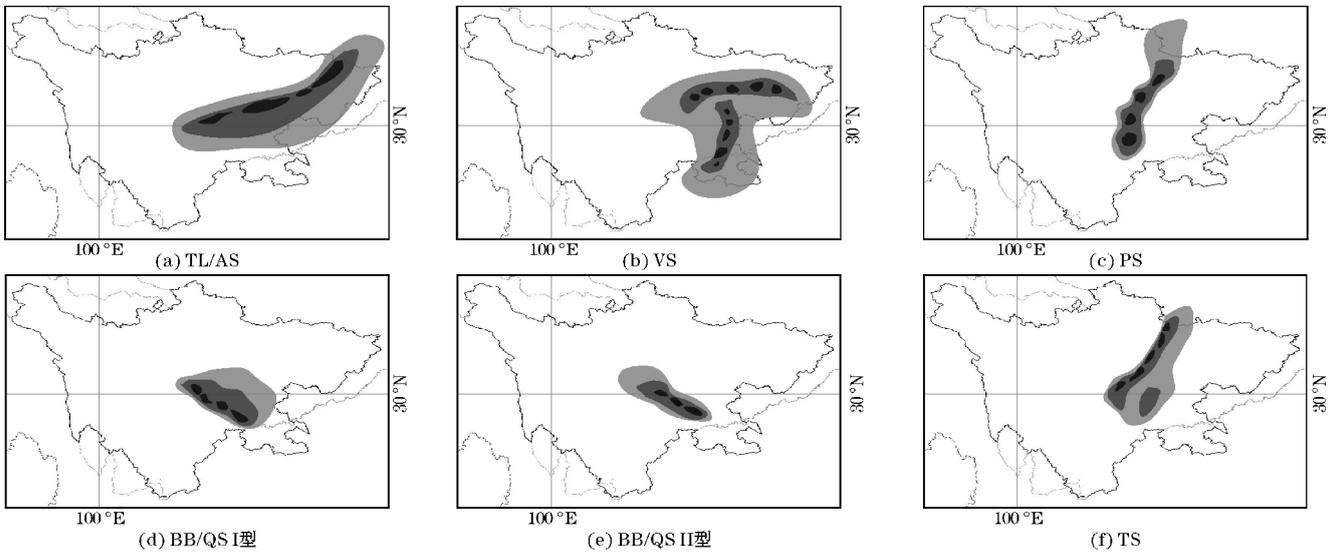


图1 触发四川盆地极端短时强降水的MCS成熟阶段雷达组合反射率示意图(阴影由浅到深表示反射因子分别为20、30、40dBz)

斜压锋生类天气形势概念模型主要分为低层切变型(图2a)和西南低涡型(图2b),分别对应TL/AS(图1a)和VS(图1b)发生前的环流背景。500 hPa高原低槽东移至盆地西部,引导700 hPa偏北风进入盆地与偏南风形成切变线;同时,地面冷锋从陕甘地区南部南下侵入盆地,冷暖气团温度梯度加大以及锋面的动力强迫抬升,使得不稳定度增强,从而有利于MCS的形成发展。这是两类天气形势的共同特点,而不同之处在

2 环流形势

天气尺度系统通过改变局地热力不稳定、垂直风切变、抬升运动以及水汽等条件,制约着MCS的发生发展过程。许爱华等^[18]按照热动力学结构特征将中国强对流天气环流形势分为斜压锋生类、准正压类等5种类型。参照此分类方法,结合四川天气系统特点,对张武龙等^[17]分析的组织特征较明显的5类MCS(图1)发生前的环流形势进行统计。结果表明,所有的邻近层状云类(TL/AS)和涡旋类(VS)MCS个例均在斜压锋生类环流形势下发生,而在准正压类环流形势下则易发生平行层状云类(PS)、后向扩建类(BB/QS)和尾随层状云类(TS)MCS。

于前者850 hPa表现为冷暖气流交汇形成的切变线,TL/AS出现在切变线附近的偏南气流中,并沿着切变线分布;后者850 hPa在盆地内有明显的西南低涡生成,VS出现在低涡附近偏暖湿一侧,并沿着低涡冷暖切变线呈涡旋状分布。此外,还有3例的TL/AS发生前850hPa为偏东风倒槽(图略)。两类MCS主要在500 hPa槽前西南风引导下向东或东北方向移动。

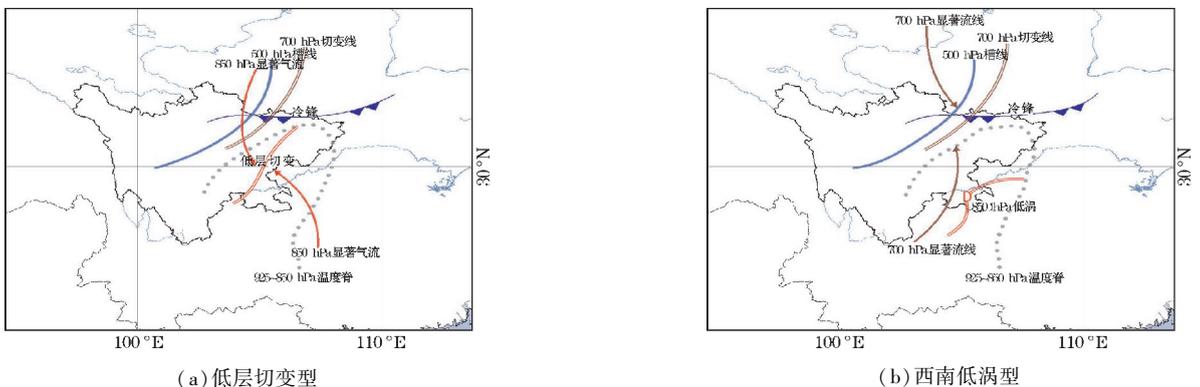


图2 斜压锋生类天气形势概念模型

准正压类天气形势概念模型主要分为低槽东移型(图 3a)、两高切变型(图 3b)、东风扰动 I 型(图 3c)和 II 型(图 3d)。低槽东移型准正压类天气形势表现为 500 hPa 高空槽位于川西高原,700 hPa 切变线在陕甘南部附近,盆地受偏南暖湿气流影响,850 hPa 盆地多为偏东风暖倒槽影响,地面冷锋距盆地较远,盆地为暖低压控制。此类环流背景发生在斜压锋生类天气形势之前,整个过程中盆地无明显的高空冷平流或地面冷空气影响。据统计,有 4 例 PS(图 1c)和 6 例 BB/QS(图 1d)出现在此类环流背景下。此外,还有 5 例 PS(图 1c)出现在两高切变型天气形势下,500 hPa 副高稳定少动,呈带状分布控制盆地,同时与青藏高压对峙,在川西高原西北部形成切变。低层 700 hPa 为偏西南风控制,850 hPa 为偏东南气流影响,地面为暖低压。在两类弱天气系统影响的背景条件下,PS 和 BB/QS 多在

700 hPa 偏西南气流的引导下向偏北方向移动。

东风扰动型天气形势概念模型如图 3(c)和图 3(d)所示。I 型和 II 型共同特点为 500 hPa 副高稳定或西伸时,控制盆地大部分地方,沿偏西或者偏西北路径移动的台风登陆后减弱成台风低压并继续沿着副高外围移动的。低层盆地暖区与台风低压环流的冷区形成温度锋区,有利于 MCS 的形成和发展。二者不同之处在于,I 型天气形势下出现了 2 例 BB/QS(图 1e),500 hPa 副高位置偏北,BB/QS 出现在副高边缘的盆地南部至西南部一带,在低层偏东气流的引导下向西或西南方向移动;II 型天气形势下则易出现 TS(图 1f),500 hPa 副高偏西,控制盆地东北部、中部至南部一带,TS 在副高边缘生成发展,并在低层偏东气流的引导下向西移动,影响盆地西部地区。

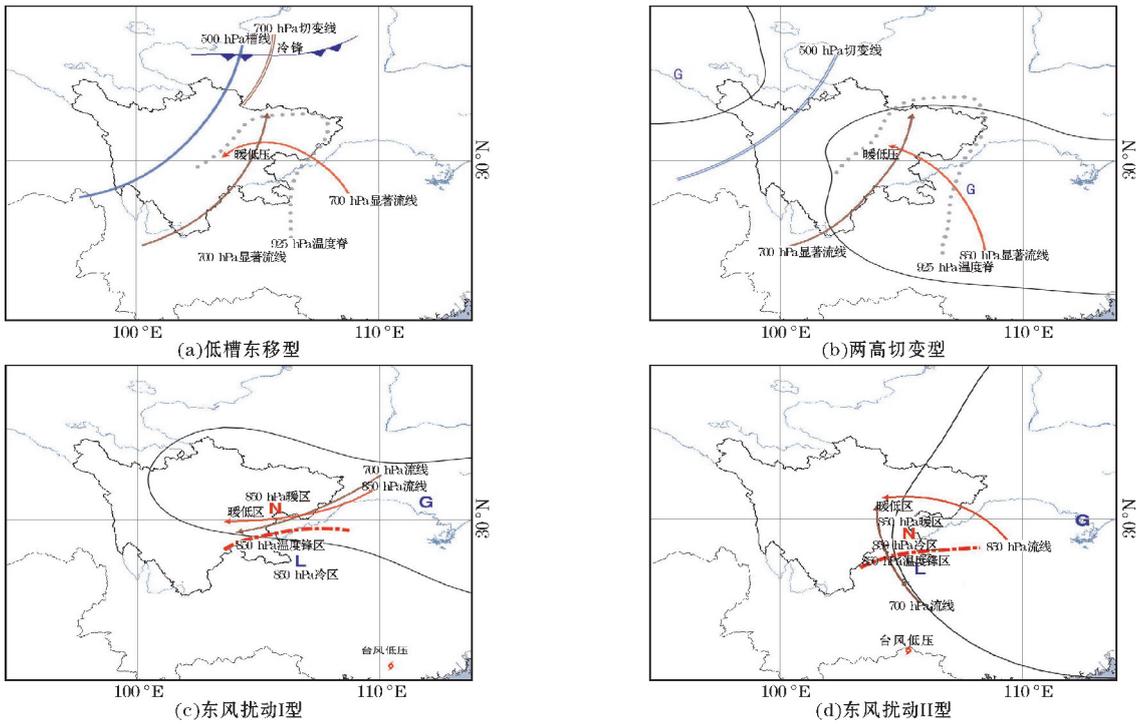


图 3 准正压类天气形势概念模型

3 中尺度物理量特征

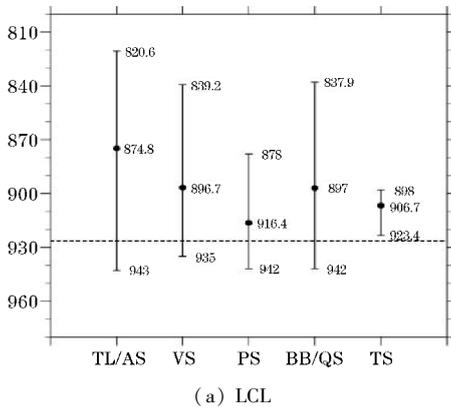
利用四川盆地内包括成都温江、宜宾、达州、重庆沙坪坝 4 个探空站的实况观测资料计算相关物理量,通过对比诸多物理量参数在不同 MCS 类型中的值域分布特征,最终选取了表 1 中 9 个对 MCS 发生发展所需的热力、水汽和垂直风切变等条件有代表性的,在不同 MCS 类型中存在较大差别的物理量进行着重分析。为了便于对比,分析中也给出了近 10 年 5-9 月四川盆地短时强降水(1h 降水量 ≥ 20 mm)的不同物理量平

均值统计结果^[19]。

表 1 物理量列表

物理量	符号	单位
抬升凝结高度	LCL	hPa
平衡高度	EL	hPa
对流有效位能	CAPE	J/kg
850 hPa 假相当位温	θ_{se850}	$^{\circ}\text{C}$
850 hPa 和 500 hPa 的假相当位温差	$\theta_{se850} - \theta_{se500}$	$^{\circ}\text{C}$
700 hPa 比湿	Q_{700}	$^{\circ}\text{C}$
850 hPa 比湿	Q_{850}	$^{\circ}\text{C}$
0~3 km 的垂直风切变	SHR ₃	m/s
0~6 km 的垂直风切变	SHR ₆	m/s

图4(a)给出了触发四川盆地极端短时强降水的MCS的抬升凝结高度(LCL)值域分布,5类MCS的LCL平均值均高于短时强降水平均值926.4 hPa,其中TL/AS的LCL平均值最高,PS最低。LCL是未饱和湿空气块受外力作用抬升导致凝结的高度,LCL越高,雷暴发生发展所需的外力抬升就越强。从图4(a)还可以看到,整体上斜压锋生类MCS(TL/AS和VS)的LCL要高于准正压类MCS(PS、BB/QS和TS),这说明



斜压锋生类MCS需要更强的多尺度天气系统共同抬升作用。同样地,5类MCS的平衡高度(EL)平均值均高于短时强降水平均值207.4 hPa(图4b),斜压锋生类MCS的EL也要高于准正压类,并且TL/AS和VS的EL最小值也在207.4 hPa之上。EL也称为对流上限,EL越高,雷暴可发展的高度越高,越有利于极端短时强降水MCS,特别是TL/AS和VS的发展。

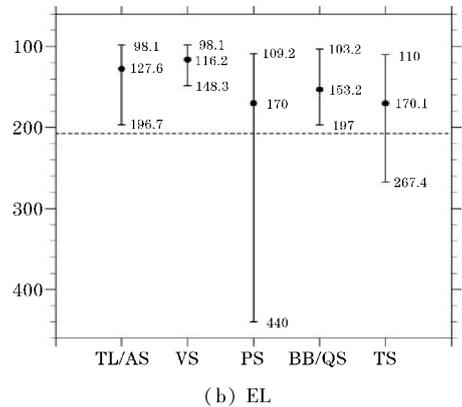


图4 触发四川盆地极端短时强降水的MCS的LCL和EL值域分布(下端和上端的短横线分别表示最小和最大值,圆点表示平均值;横虚线表示短时强降水平均值)

MCS发生发展一般与气团的热力稳定度有关,统计发现不同类型MCS的热力不稳定条件也存在明显差异。VS的对流有效位能(CAPE)平均值最大,高达2870.8 J/kg;BB/QS的CAPE平均值最小,为1450 J/kg,均显著高于短时强降水平均值451.9 J/kg(图5a)。这说明大的CAPE值是触发四川盆地极端短时强降水的MCS形成的重要条件。假相当位温是包含温度、气压、湿度的一个综合物理量,850 hPa假相当位温(θ_{se850})通常看作是低层能量的积累。5类MCS的 θ_{se850} 平均值均高于短时强降水平均值83.3 °C(图5b),VS的 θ_{se850} 平均值最高,可达92.6 °C,明显高于盛杰等^[11]统计的华北强降水型线状对

流系统的 θ_{se850} 平均值(78 °C)。斜压锋生类MCS的 θ_{se850} 平均值也高于准正压类,斜压锋生类MCS的发生需要更大的低层能量积累。850 hPa和500 hPa的假相当位温差($\theta_{se850} \sim \theta_{se500}$)表征的是中低层的潜在热力不稳定。5类MCS的 $\theta_{se850} \sim \theta_{se500}$ 值域分布特征与 θ_{se850} 类似,平均值在12.4 °C ~ 19.7 °C,均高于短时强降水平均值10.1 °C(图5c)。中低层越不稳定,越有利于极端短时强降水MCS的发展。通过比较5类MCS的CAPE、 θ_{se850} 和 $\theta_{se850} \sim \theta_{se500}$ 值域分布特征,可以发现VS发生在热力不稳定性最高的气团中,TL/AS次之,准正压类MCS环境的热力不稳定性相对较低。

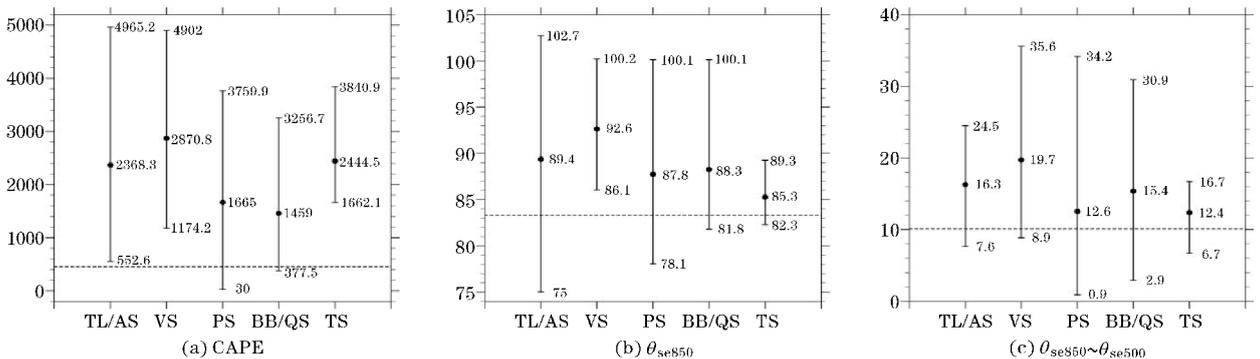


图5 触发四川盆地极端短时降水的CAPE、 θ_{se850} 和 $\theta_{se850} \sim \theta_{se500}$ 的值域分布

水汽含量是影响雷暴强度和结构特征的一个非常重要的因素^[20-21]。从不同类型MCS的850 hPa比湿(Q_{850})值域分布来看(图6a),5类MCS的 Q_{850} 平均值均高于短时强降水平均值15.8 g/kg,在16.3 ~

18.4 g/kg,其中VS的 Q_{850} 平均值最大,并且明显高于华北强降水型线状对流系统的 Q_{850} 平均值(15.2 g/kg)^[11]。5类MCS的700 hPa比湿(Q_{700})值域分布与 Q_{850} 类似,平均值在11.5 ~ 12.5 g/kg,其中PS

的 Q_{700} 平均值最大, TS 最小(图 6b)。由此可见,低层高水汽含量是触发四川盆地极端强降水的 MCS 形成的必要条件之一,相较于 TS,其他 4 类 MCS 发生在低

层水汽输送更为充沛的环境下。值得一提的是,触发四川盆地强降水的 MCS 发展所需的热力和水汽条件较华北地区都更加苛刻,环境高温高湿特点更加突出。

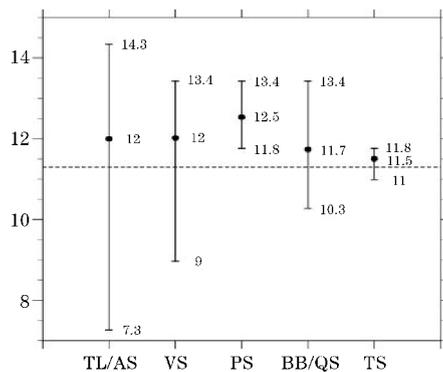
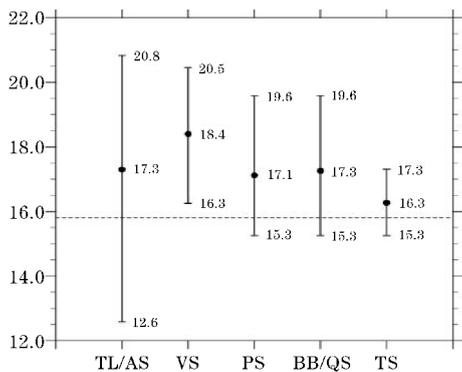


图 6 触发四川盆地极端短时降水的 Q_{850} 和 Q_{700} 值域分布

垂直风切变制约着雷暴的发展强度和组织化程度^[22-24]。与雷暴大风、冰雹相比,强降水对流系统产生在垂直风切变较弱的环境下^[25]。图 7(a) 给出了 5 类 MCS 的 0~3 km 垂直风切变 (SHR_3) 值域分布, TL/AS、VS、PS 和 TS 的 SHR_3 平均值均处于短时强降水平均值 (6.4 m/s) 左右。BB/QS 的 SHR_3 平均值为 12.1 m/s, 显著高于其他 4 类 MCS, 说明 SHR_3 对于

BB/QS 的发展维持有重要的作用。除 TS, 其他 4 类 MCS 的 0~6 km 垂直风切变 (SHR_6) 平均值均高于短时强降水平均值 6.4 m/s (图 7b), 尤其是 BB/QS 和 PS 的 SHR_6 平均值可达 9.4 m/s 和 9.8 m/s, 这与华北强降水型线状对流系统的 SHR_6 平均值 (9.8 m/s) 相当^[11]。BB/QS 的发展演变具有明显的后向传播特征, 这与其较强的垂直风切变有密切的关系。

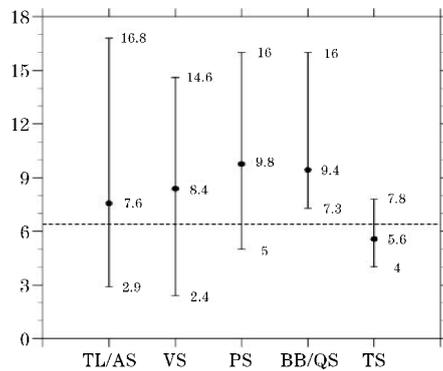
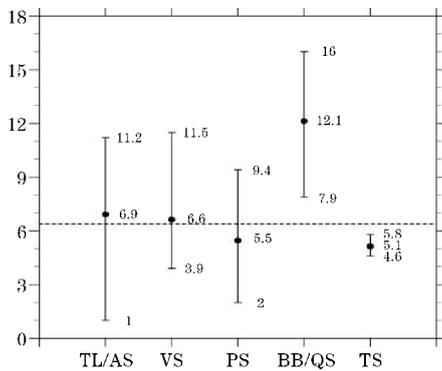


图 7 触发四川盆地极端短时降水的 SHR_3 和 SHR_6 值域分布

4 MCS 的成因分析

TL/AS 和 VS 均发生在斜压性较强的环境大气下, 冷暖空气的强烈交汇导致斜压锋生, 低涡(切变线)发展和锋面的动力强迫对该两类 MCS 的形成至关重要。在准正压类天气形势下, 冷暖平流远不及斜压锋生类显著, 天气尺度强迫较弱, MCS 的发展和移动与低层流场、地面中尺度系统和地形等有密切关系。下面主要对弱强迫背景下, PS、BB/QS 和 TS 的成因进行初步探讨。

统计表明, 所有 PS 个例均出现在盆地西部, 且多呈沿山分布, 地形强迫是其形成的重要条件。2013 年 7 月 8 日 20 时至 9 日 08 时, 四川盆地发生了一例 PS, 该个例发生在低槽东移型的准正压类天气形势下。7 月 8 日 20 时, 850 hPa 盆地主要受低涡倒槽的影响(图 8a), 西部山前的偏东风在地形的阻挡及抬升作用下形成辐合, 触发对流单体沿山分布, 逐渐形成线状对流(图 9a); 700 hPa 盆地为一致的偏南风(图 8b), 对流单体在偏南风的引导下自南向北移动形成列车效应。在径向速度图上(图 9b), 近地层的偏东风具有偏北的分量, 使对流单体向后传播, 与平移方向相反, 从而减缓其移动速度, 使列车效应更加显著, 有利于极端强降水的发生。

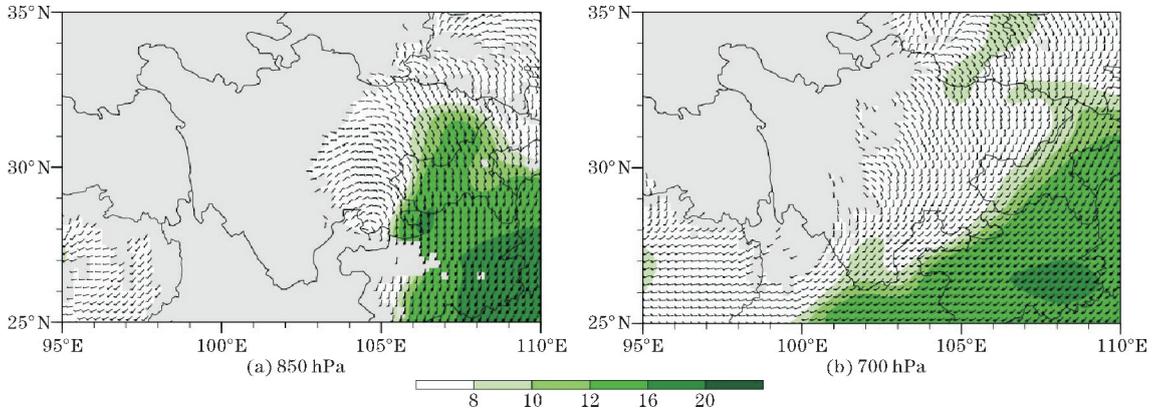


图8 2013年7月8日20时平行层状云类MCS低层风场(灰色阴影代表地形高度高于850(700)hPa,绿色阴影代表风速大小)

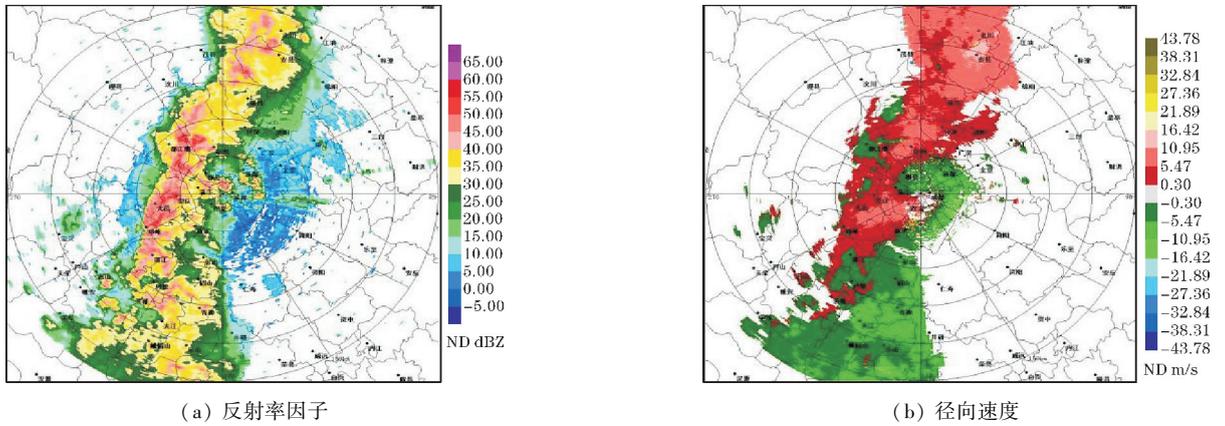


图9 2013年7月9日01时成都雷达组合反射率因子和径向速度

BB/QS在盆地内分布较为分散,中小尺度系统影响更为复杂,其生成发展与地形、地面中尺度辐合线以及雷暴冷池均有密切关系。以2009年8月2日傍晚发生的BB/QS分析其形成和发展的原因。该个例同样发生在低槽东移型的准正压类天气形势下,850 hPa为偏东风,700 hPa为偏南风,低层流场与2013年7月9日PS个例类似。2个个例中MCS均呈沿山分布,但

PS主要出现在盆地西北部沿山,呈东北西南走向(图9a);BB/QS则出现在盆地西南部沿山,呈西北东南走向(图10a)。从图10(b)可以看到,18时左右低层为偏东北风,并且偏北分量占主导地位,与盆地西北部山脉走向几乎平行,而与西南部山脉几乎垂直,偏北风在地形强迫下,于西南部山前形成辐合,使得对流单体呈西南部沿山分布。

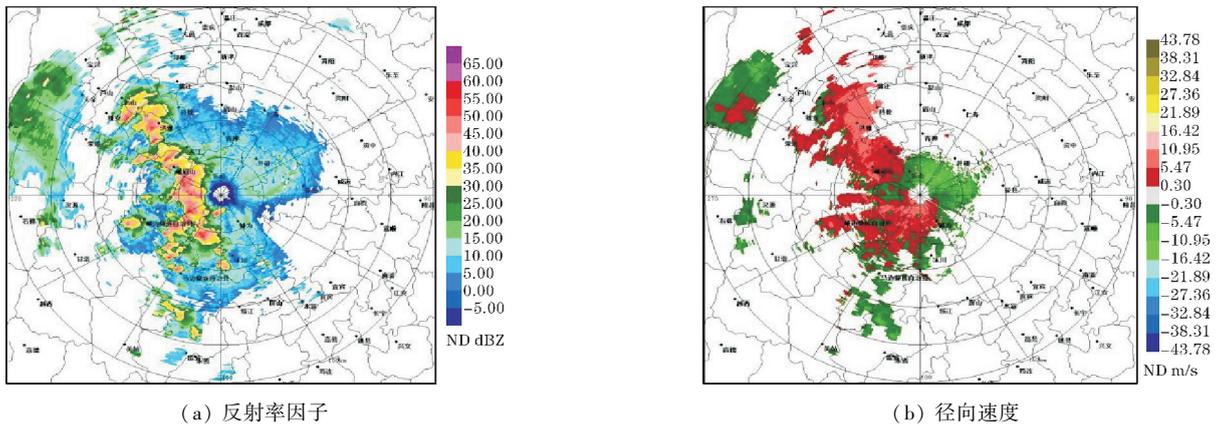


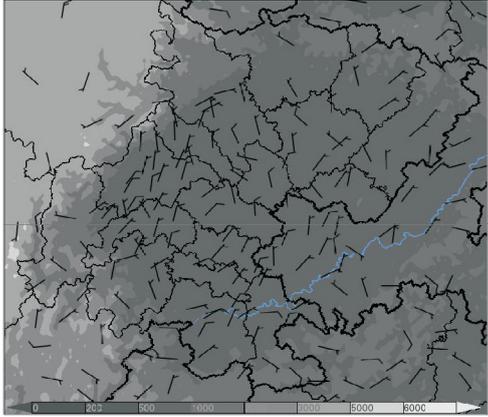
图10 2019年8月2日17:59乐山雷达组合反射率因子和径向速度

从地面风场(图11)还可以看到,盆地西部山前为偏北风,在地形作用下,西南部山前逐渐转为偏西北风,并形成地面中尺度辐合线,辐合线的强迫抬升作用有利于BB/QS的维持和加强。图12给出了8月2日

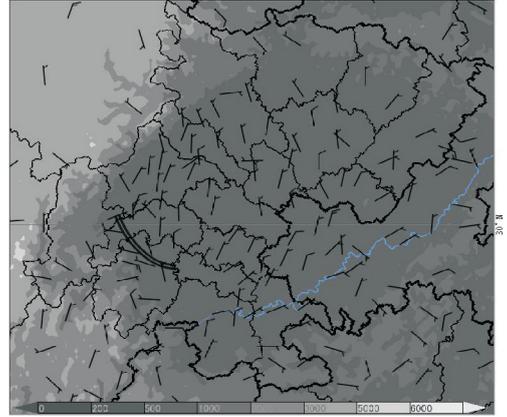
17-18时的小时温差,雷暴底部下沉气流形成的冷池在地面偏北风的引导下向山前堆积,不断激发新的对流单体,在700 hPa偏南风的引导下新的对流单体不断并入到对流带中,单体后向传播与平移相抵消,BB/QS

处于相对静止的状态,从而产生极端强降水。综上所述, BB/QS 初始雷暴是低层偏北风在地形抬升作用下

形成的,地面中尺度辐合线以及雷暴冷池使得 BB/QS 得以维持和发展。



(a) 17 时



(b) 18 时

图 11 2019 年 8 月 2 日 17 时和 18 时四川盆地地面中尺度自动站风场(双实线为中尺度辐合线,填色为地形高度)

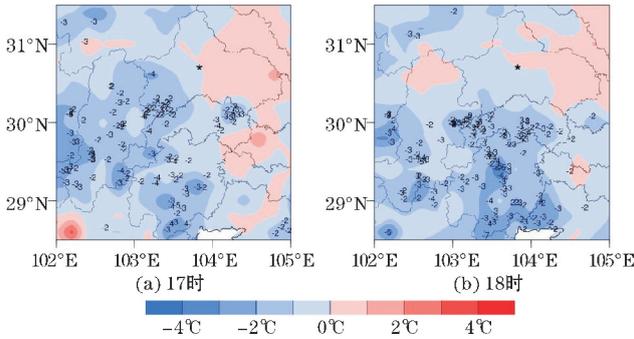


图 12 2019 年 8 月 2 日 17 时和 18 时四川盆地西南部地面中尺度自动站小时温差

对于 TS 而言,地面中尺度辐合线的抬升作用是其形成和维持的重要原因。2018 年 8 月 2 日凌晨,四川盆地出现了 1 例 TS。从图 13 中可以看到,线状对流 TS 自东向西移动,在 01 时处于成都雷达的东侧,02 时靠近雷达,到 04 时已逐渐移至成都雷达的西侧。结合地面中尺度自动站风场(图 14),可发现 01 时在盆地中部有地面中尺度辐合线存在,是在盆地东部的偏东风与盆地西部的偏北风作用下形成;02 时辐合线略微西移,04 时辐合线逐渐西移至盆地西部沿山。对比雷达组合反射率因子图,TS 线状对流就位于地面中尺度辐合线的上方。

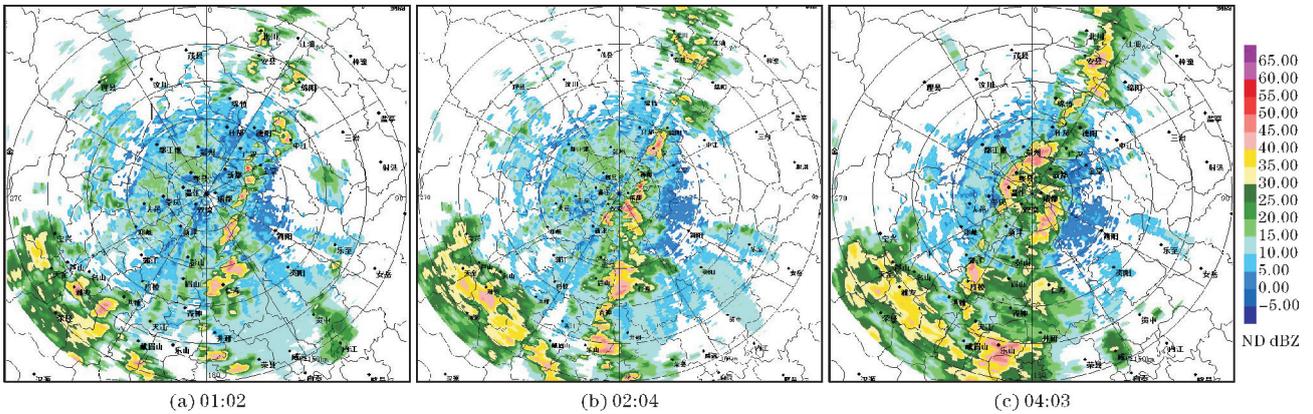


图 13 2018 年 8 月 2 日 01:02,02:04,04:03 乐山雷达组合反射率因子

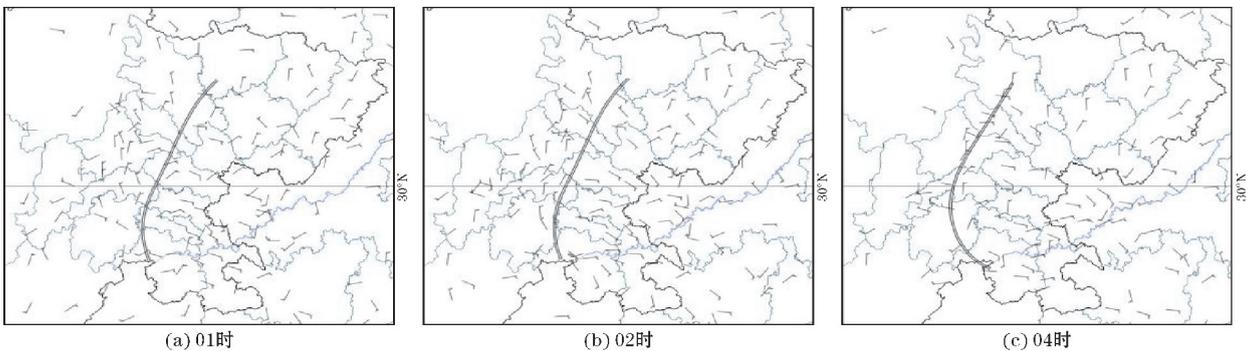


图 14 2019 年 8 月 2 日 01 时,02 时,04 时四川盆地地面中尺度自动站风场(双实线为中尺度辐合线)

5 结论和讨论

利用常规探空和地面观测资料,结合 SWAN 系统新一代天气雷达组合反射率因子资料,分析了 2013–2019 年 5–9 月 41 例触发四川盆地极端短时强降水的中尺度对流系统(MCS)环境条件,主要结论如下:

(1)触发四川盆地极端短时强降水的 MCS 发生的天气形势可分为斜压锋生类和准正压类。斜压锋生类天气形势可分为低层切变型和西南低涡型,分别对应邻近层状云类(TL/AS)和涡旋类(VS)MCS 发生前的环流背景。准正压类天气形势可分为低槽东移型、两高切变型、东风扰动 I 型和 II 型。平行层状云类(PS)MCS 易出现在低槽东移型和两高切变型环流背景下,后向扩建类(BB/QS)MCS 易出现在低槽东移型和东风扰动 I 型环流背景下,东风扰动 II 型则对应尾随层状云类(TS)MCS 发生前的环流背景。

(2)TL/AS 和 VS 的抬升凝结高度高于 PS、BB/QS 和 TS,斜压锋生类 MCS 需要更强的多尺度天气系统共同抬升作用。同样地,TL/AS 和 VS 的平衡高度也高于 PS、BB/QS 和 TS,平衡高度越高,越有利于斜压锋生类 MCS 的发展。高温高湿环境是 5 类 MCS 发展的共同特征。VS 发生在热力不稳定性最高的气团中,TL/AS 次之,准正压类 MCS 环境的热力不稳定性相对较低。相较于 TS,其他 4 类 MCS 发生在低层水汽输送更为充沛的环境下。BB/QS 的 0~3 km 垂直风切变显著高于其他 4 类 MCS,BB/QS 和 PS 的 0~6 km 垂直风切变也较其他 3 类 MCS 更大。较强的垂直风切变有利于 BB/QS 和 PS 的发展和维持。

(3)在准正压类天气形势下,天气尺度强迫较弱,MCS 的发展和移动主要受低层流场、地面中尺度系统和地形等影响。在低层特定流型下,地形强迫是 PS 形成的重要条件;BB/QS 生成发展与地形、地面中尺度辐合线以及雷暴冷池均有密切关系;对于 TS 而言,地面中尺度辐合线的抬升作用是其形成和维持的重要原因。

触发四川盆地极端短时强降水的不同类型 MCS 是在不同的环境条件下,多种尺度系统相互作用下产生和发展,其组织类型和时空分布特征与环流背景、中尺度物理量分布等因素有关。虽然前人对四川盆地 MCS 已有一些个例研究,但是从多年统计角度给出 MCS 的环境条件,尚未见到有公开报道。此外,四川盆地与中国中东部^[9]、华北^[11]以及长江中下游地区^[8]强降水 MCS 形成所需的中尺度物理量条件有所不同,地域差异明显,这也是本文研究价值所在。

参考文献:

- [1] 俞小鼎,周小刚,王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,2012,70(3):311–337.
- [2] 俞小鼎,郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报,2020,78(3):391–418.
- [3] 张小玲,谌芸,张涛. 对流天气预报中的环境场条件分析[J]. 气象学报,2012,70(4):642–654.
- [4] 陈涛,代刊,张芳华. 一次华北飑线天气过程中环境条件与对流发展机制研究[J]. 气象,2013,39(8):945–954.
- [5] 杨新林,孙建华,鲁蓉,等. 华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J]. 气象,2017,43(7):769–780.
- [6] 丁一汇,李鸿洲,章名立,等. 我国飑线发生条件的研究[J]. 大气科学,1982,6(1):18–27.
- [7] 吴瑞姣,陶玮,周昆,等. 江淮灾害性大风飑线的特征分析[J]. 气象,2019,45(2):155–165.
- [8] 王晓芳. 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,2012,70(5):924–935.
- [9] Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China[J]. Wea Forecasting,2013,28(5):1081–1098.
- [10] 郑淋淋,孙建华. 干、湿环境下中尺度对流系统发生的环流背景和地面特征分析[J]. 大气科学,2013,37(4):891–904.
- [11] 盛杰,郑永光,沈新勇. 华北两类产生极端强天气的线状对流系统分布特征与环境条件[J]. 气象学报,2020,78(6):877–898.
- [12] 范元月,罗剑琴,张家国,等. 宜昌极端短时强降水中尺度对流系统特征分析[J]. 气象,2020,46(6):776–791.
- [13] 杨康权,张琳,肖递祥,等. 四川盆地西部一次大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 高原气象,2013,32(2):357–367.
- [14] 孙建华,李娟,沈新勇,等. 2013 年 7 月四川盆地一次特大暴雨的中尺度系统演变特征[J]. 气象,2015,41(5):533–543.
- [15] 杨舒楠,张芳华,徐珺,等. 四川盆地一次暴雨过程的中尺度对流及其环境场特征[J]. 高原气象,2016,35(6):1476–1486.
- [16] 杨康权,肖递祥,罗辉,等. 四川盆地西部两次

- 暖区暴雨过程分析[J]. 气象科技, 2019, 47(5):795-808.
- [17] 张武龙, 康岚, 陶勇, 等. 四川盆地极端短时强降水中尺度对流系统组织类型[J]. 成都信息工程大学学报, 2021, 36(6):697-704.
- [18] 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 2014, 40(4):400-411.
- [19] 张武龙, 康岚, 杨康权, 等. 四川盆地不同强度短时强降水物理量特征对比分析[J]. 气象, 2021, 47(4):439-449.
- [20] 孙建华, 郑淋淋, 赵思雄. 水汽含量对飑线组织结构和强度影响的数值实验[J]. 大气科学, 2014, 38(4):742-755.
- [21] 王秀明, 周小刚, 俞小鼎. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究[J]. 气象学报, 2013, 71(5):839-852.
- [22] 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社, 2020:416.
- [23] 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 北京“7. 21”暴雨雨团的发生和传播机理[J]. 气象学报, 2013, 71(4):569-592.
- [24] 郑淋淋, 孙建华. 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, 2016, 40(2):324-340.
- [25] 樊李苗, 俞小鼎. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(1):156-165.

Environmental Conditions of Mesoscale Convective Systems Triggering Extreme Flash-Rain in Sichuan Basin

ZHANG Wulong^{1,2}, QING Quan^{1,2}, YANG Jingchao^{2,3}, TAO Yong⁴

(1. Sichuan Provincial Meteorology Observatory, Chengdu 610072, China; 2. Heavy Rain and Drought-Flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 3. Sichuan Meteorological Disasters Prevention Technology Center, Chengdu 610072, China; 4. Guizhou Meteorological Service Center, Guiyang 550002, China)

Abstract: Due to discuss environmental conditions of mesoscale convective systems triggering extreme precipitation, using the conventional sounding and surface observation datasets, and composite radar reflectivity data, this study investigates the synoptic situation, mesoscale physical parameters and formation of 41 MCSs triggering extreme flash-rain between May and September during 2013–2019 in Sichuan basin. The results show that there are two synoptic situation configurations of MCSs: baroclinic frontogenesis and quasi-barotropic category. The baroclinic frontogenesis synoptic category can be classified into southwest vortex and low-level shear patterns, representing the circulation background before the occurrence of Training Line/Adjoining Stratiform (TL/AS) and Vorticity Stratiform (VS) MCSs, respectively. The quasi-barotropic synoptic category can be classified into low-trough eastward movement, shear between two high-pressure and easterly disturbance patterns. In these patterns, Parallel Stratiform (PS), Back-Building/Quasi-Stationary (BB/QS) and Trailing Stratiform (TS) MCSs are easy to occur. Comparing with PS, BB/QS and TS modes, TL/AS and VS modes have relatively high altitude of lifting condensation level and equilibrium level. The high temperature and high humidity environment is the common feature of producing and developing the five MCS modes. The higher thermal instability is benefit for VS and TL/AS modes, and the more vapor transport in low level can make for generating VS, TL/AS, PS and BB/QS modes. The strong vertical wind shear play a more important role in the development and maintenance of BB/QS and PS modes than that in the other 3 modes. In quasi-barotropic synoptic situation, the formation and development of MCSs have a close relationship with low-level stream field, surface mesoscale convergence line, topographic effect and thunderstorm cold pool under weak synoptic-scale forcing.

Keywords: meteorology; extreme precipitation; MCS; environmental conditions