王孝慈,李双君,孟英杰,2022. 武汉地区4次低质心类短时强降水对流风暴特征分析[J]. 气象,48(5):633-646. Wang X C, Li S J, Meng Y J, 2022. Characteristics of four low-echo-centroid convective storms of short-time heavy rainfall in Wuhan[J]. Meteor Mon, 48(5):633-646(in Chinese).

武汉地区4次低质心类短时强降水对流风暴特征分析*

王孝慈 李双君 孟英杰

武汉中心气象台,武汉 430074

提 要: 利用自动气象站逐小时和逐5 min观测资料、长江中游雷达组合反射率因子SWAN拼图产品及NCEP FNL再分析资料,对武汉地区4次低质心类短时强降水对流风暴特征进行分析。结果表明:不同的天气背景诱发的对流系统特征不同,低层暖强迫造成的斜压不稳定背景下,环境条件高能高湿,雷暴冷池的积累有利于稳定性降水前沿触发线状强对流;斜压锋生天气背景下,冷暖剧烈交汇使得大气斜压性显著增强,地面多有中尺度气旋波发展,锋区冷区稳定性降水中多伴随短时强降水,而暖区能量、湿度条件更好,易诱发短时强降水等分散性强对流;准正压天气背景下,大气斜压性弱,环境高能高湿,多由近地面层流场强迫和局地热力差异触发剧烈的热对流活动。从对流风暴雷达回波特征和降水特征来看,TS类线状中尺度对流系统(MCS)移速较快,短时强降水范围小;准静止类表现为带状走向的大范围层状云回波稳定维持,中间伴有多个积云对流生消迭代,每一阶段降水增强都与新生对流单体途经武汉站点相对应;组织合并类在回波合并时,意味着短时强降水的发展增强,合并后的回波形态和走向影响着降水的强度和持续时间。在不同的环境背景、触发诱因和组织形态下,短时强降水发生前后地面气象要素表现出不同的变化特征,锋面特征和对流触发位置的不同导致温度变化特征差异。地面中尺度系统对于MCS的触发、组织发展有重要作用,其生消演变相对于MCS在时间上通常具有一定的提前量,关注地面辐合线、温度锋区等地面中尺度系统,对于预判MCS的触发、组织形态的演变等具有很好的指示意义。

关键词: 短时强降水,形势配置,对流风暴,地面辐合线,地面中尺度系统

中图分类号: P468 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.051001

Characteristics of Four Low-Echo-Centroid Convective Storms of Short-Time Heavy Rainfall in Wuhan

WANG Xiaoci LI Shuangjun MENG Yingjie

Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract: Based on hourly and 5 min observation data of automatic weather station, SWAN mosaic product of radar composite reflectivity in the middle reaches of the Yangtze River and NCEP FNL reanalysis data, the characteristics of four convective storms with low-echo-centroid of short-term heavy precipitation in Wuhan are analyzed. The results show that the characteristics of convective system induced by different weather backgrounds are different. Under the background of baroclinic instability caused by low-level warm forcing, the environmental conditions are high energy and high humidity, and the accumulation of thunderstorm cold pool is conductive to triggering linear severe convection in the stable precipitation front. Under the baroclinic frontogenesis background, the convergence of cold and warm air is intense, strengthening

* 国家重点研发计划(2018YFE0196000)资助

2021年2月18日收稿; 2021年6月10日收修定稿

第一作者:王孝慈,主要从事水文气象预报相关工作. E-mail:wxc327@163.com

通讯作者:李双君,主要从事短时临近预报预警相关工作. E-mail:dreamom@163.com

the baroclinicity; there are more mesoscale cyclonic waves on the ground, and the stable precipitation in the front area is often accompanied by a short-time heavy rainfall. Under the quasi barotropic background, the baroclinic atmosphere is weak, but the high-energy and high-humidity environment as well as the near-surface flow field forcing and local thermal difference are easy to trigger severe thermal convection activities. In addition, according to the radar echo characteristics and precipitation characteristics of convective storms, the TS (trailing stratiform cloud) type moves faster, resulting in a small range of short-time heavy rainfall. Quasi-stationary type shows that the echoes of large-scale stratiform cloud with zonal trend are stable, and there are multiple cumulus convective echoes in the middle. The precipitation enhancement in each stage corresponds to the new convective cell passing through Wuhan Station. The consolidation type is in the circulation when the waves merge, often accompanied by the occurrence of heavy rainfall, and the echo shape and direction after merging affect the intensity and duration of precipitation. Actually, under different environmental backgrounds, triggering inducement and organizational form, the surface meteorological elements before and after the occurrence of short-time heavy rainfall show different change characteristics. The different fronts and convection triggering positions lead to different changes in temperature. Ground mesoscale system plays an important role in triggering and organizing the development of mesoscale convective system (MCS). Its generation, elimination and transformation usually have a certain advance in time for MCS. So, paying attention to the development and evolution of ground mesoscale systems such as ground convergence line and temperature front area is of great significance for predicting the triggering and organizational evolution of MCS.

Key words: short-time heavy rainfall, situation configuration, convective storm, surface convergence line, surface mesoscale system

引 言

短时强降水作为夏季常见的一种灾害性天气，雨强大，致灾性强，常诱发山区山洪、滑坡等地质灾害，造成城市内部突发内涝、积渍，公共交通、民众生活等深受影响。武汉地区作为长江中游经济、文化、政治中心，社会关注度高，同时也是短时强降水高影响区域。据统计，武汉地区历史上发生过多次影响较大的暴雨过程，这其中大多数均为短时强降水类；就武汉本站而言，短时强降水导致的暴雨为年均3次，暴雨日数为年均5次(毛以伟，2013)，由于其突发性强，雨强大，预报难，对民众生活影响深远，研究短时强降水特征对于气象灾害防御有重要的意义。如武汉2007年5月31日05时雨强为94 mm·h^{-1}，创下了有完整气象记录以来5月最高，当天中心城区有20多处明显积水，最深处达2 m；武汉2013年7月7日08时的3 h累计降水量达76.2 mm，强降水导致49处路段交通受阻，10余个地库500多辆车辆被淹，水产、农作物直接经济损失达1.97亿元；2016年6月1日受超强厄尔尼诺影响，武汉普降暴雨，光谷地段降水量达115 mm，数十处地段内涝积渍严重，对交通及市民出行造成严重影响。

短时强降水的发生与有利的天气系统配置密切相关，不同的过程其天气背景和中尺度环境特征往往也各有不同。众多学者从不同的角度出发，对短时强降水影响天气背景进行了分析归纳和总结，如根据地面气团热力性质并结合雷达产品分析，建立了暖区对流系统和锋面对流系统模型(魏慧娟等，2013)；根据500 hPa低值系统位置，结合物理量对比，分为冷涡槽前、槽后两类天气背景(郑媛媛等，2011)；刘爱鸣等(2001a；2001b)以850 hPa影响系统为主，结合500 hPa和地面系统，归纳了六种天气模型。不同地域短时强降水的天气背景和中尺度环境特征具有各自的地域差异，王锡稳等(2004)、许新田等(2010)、王毅等(2012)、张涛等(2012)和许爱华等(2014)对各自不同地域出现的引发短时强降水的天气形势配置进行了分析，其中许爱华等(2014)通过大量个例总结，从强对流天气形成的热力不稳定等条件出发，提出了中国中东部地区强对流天气的5种天气形势和环境要素配置，张家国等(2018)应用天气诊断方法分析提炼了长江中游地区5种极端

降水天气系统配置,指出了不同配置条件下天气预报的关注重点。同时,短时强降水的触发以及组织发展常具有显著的中尺度对流特征,以中尺度系统为着眼点,结合环流背景,许多气象工作者基于个例统计分析,对中尺度影响系统分类,建立了相关中尺度概念模型以及预报方法(崔讲学,2011;吴翠红和王晓玲,2013;吴翠红和龙利民,2011;毛以伟,2013)。按照产生强降水的对流系统特征和属性差异,Lemon(1977)将强对流系统分为大陆和热带强对流型两种,前者发展深厚,对流可发展到较高的高度,云体主要位于 0℃层以上,云中存在很多大雨滴和雹粒子,因此也叫冷云型对流降水,简称高质心大陆性;后者常由暖云降水为主导,称低质心降水,多发生在热带海洋上,但很多国内学者研究发现在中国盛夏季节中高纬强降水也往往具有类似暖云降水的属性(郝莹等,2012;俞小鼎,2012;段鹤等,2014;孙继松等,2015;郑永光等,2017)。其中,郝莹等(2012)、段鹤等(2014)分别对安徽和云南地区的强降水天气特征进行统计研究发现,在所有短时强降水天气过程中,低质心强降水回波出现的概率达到 88%以上,远远多于高质心强降水回波。而从曹艳察等(2020)对低、高质心对流风暴的对比分析来看,高质心降水具有强的垂直风切变条件及较快的移动速度。

2020 年长江中游经历超长梅雨期,梅雨期累计降水历史排位第三,与前人研究有所区别,本文主要对 2020 年武汉地区 4 次低质心类对流风暴短时强降水过程的天气模型、雷达回波组织结构特征及地面中尺度系统、边界层气象要素特征等进行对比分析,以期为汛期武汉地区短时强降水预报预警工作提供参考。

1　资料和方法

本文使用的资料包括:武汉地区气象观测站(国家站:5 个站;区域站:189 个站;如图 1 所示)逐小时和逐 5 min 观测资料;SWAN 提供的长江中游多普勒天气雷达组合反射率因子拼图产品,时间分辨率为6 min;NCEP FNL 再分析资料(空间分辨率为 1°×1°,时间分辨率为 6 h)。

武汉处于平原地区,地势较为平坦,从致灾性角度来,引发城市内涝需要达到较强的雨强,综合俞小鼎(2013)、张家国等(2018)对极端强降水的研究结果,这里定义 2020 年武汉地区短时强降水个例筛选标准为:(1)出现雨强≥50 mm·h^{-1}的站点;(2)最强雷达回波组合反射率因子≥50 dBz,以混合型对流为主。

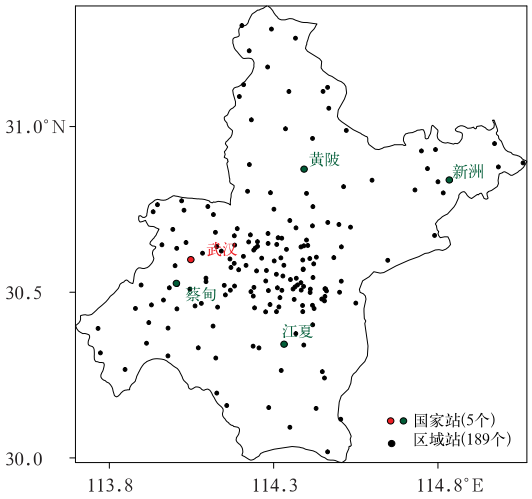

图 1　武汉地区自动气象站分布

Fig. 1　Distribution of automatic weather stations in Wuhan

根据对流风暴成熟阶段的最大回波强度和垂直结构特征,本文定义的低质心型指最大反射率因子一般为 50 dBz 左右,其所对应的强回波高度在 0℃层以下,即质心较低;高质心通常最大反射率因子为 55～65 dBz,50 dBz 所对应回波顶高高于 0℃层 2 km 以上,即质心较高;混合型一般对应最大反射率因子强度在 50 dBz 以上,其中 50 dBz 所对应回波顶略高于 0℃层,但未达到 2 km 以上。

2　降水和环流背景特征

2.1　2020 年武汉地区强降水特征

从 1961—2020 年 6—8 月武汉地区国家站平均暴雨日数逐年变化曲线(图 2)可以看出,2020 年日降水量≥50 mm 的 5 个国家站算术平均值历史排位第三,约为 7.4 d,仅次于 1991 年的 8.2 d 和 1969 年的 7.6 d,超历史均值(3.1 d)4.3 d。2020 年武汉地区共发生暴雨过程 9 次,分别为 6 月 9 日、6 月 12 日、6 月 26 日、6 月 28 日、7 月 4—5 日、7 月 6 日、7 月 18 日、8 月 10 日和 8 月 20 日,因本文旨在对低质心类短时强降水过程进行分析,经过筛选只有 6 月 12 日、7 月 6 日、8 月 10 日、8 月 20 日这 4 次过

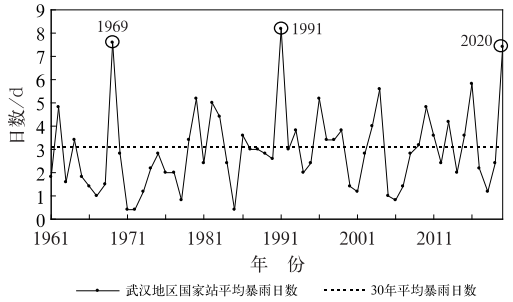

图 2 1961—2020 年 6—8 月武汉地区国家站平均暴雨日数逐年变化曲线

Fig. 2 Annual variation curve of average rainstorm days at national stations in Wuhan from June to August during 1961－2020

程满足条件(毛以伟,2013)。后面将对这 4 次降水过程进行详细分析。

2.2 降水特点

4 次过程武汉地区气象观测站累计降水量分布(图 3a～3d)表明,6 月 12 日、8 月 10 日和 8 月 20 日短时强降水过程的暴雨落区范围小,较为分散;7 月 6 日降水过程雨区覆盖面积大,持续时间较长。其中,6 月 12 日 20—23 时(北京时,下同),3 h 最大累计降水量站出现在武汉城区(63 mm),(表 1);7 月 6 日 03—08 时,3 h 最大累计降水量站出现在江夏区(151 mm);8 月 10 日 01—06 时,3 h 最大累计降水量站出现在黄陂区(132 mm);8 月 20 日 14—17 时,3 h 最大累计降水量站出现在武汉城区(68 mm)。

从雨强站点分布图(图 3e～3h)来看,雨强≥30 mm·h^{-1}的站点多分布在武汉中部、南部。其中,6 月 12 日站点雨强多以 20～30 mm·h^{-1}为主,30～50 mm·h^{-1}次之,个别站点出现≥50 mm· h^{-1};

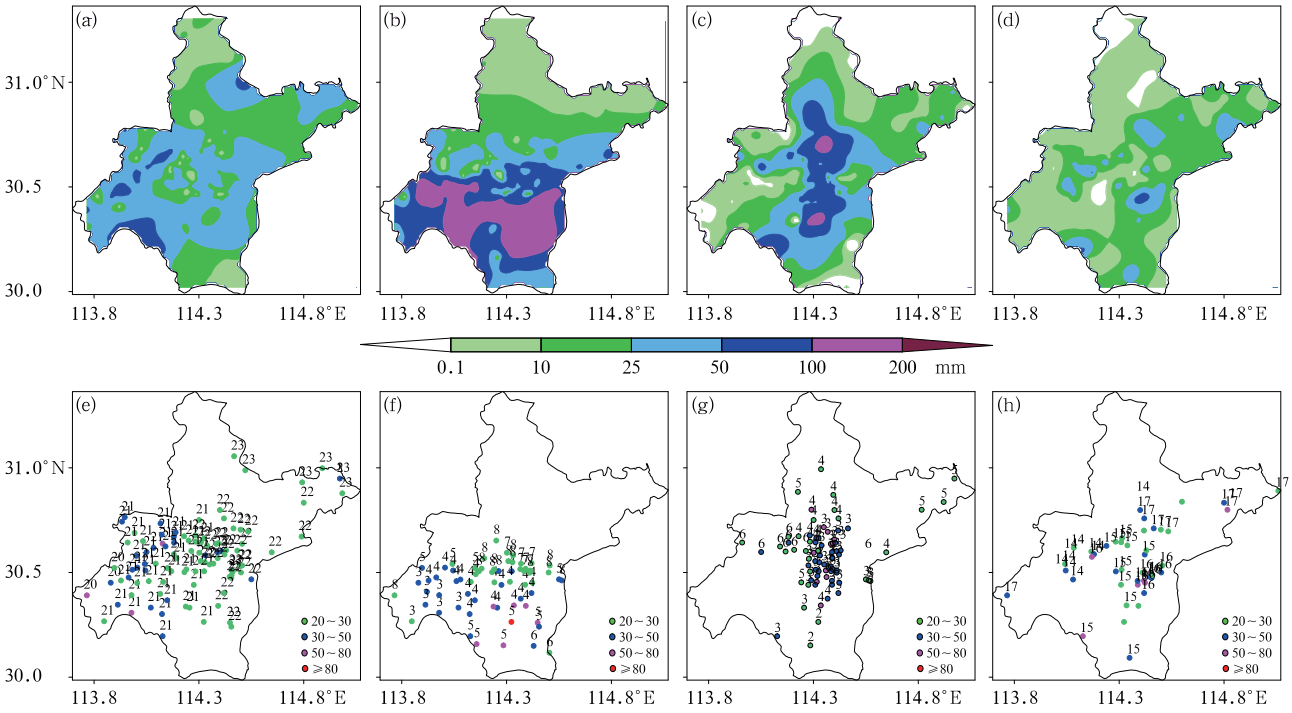

图 3 2020 年武汉地区短时强降水雨量分布特征:(a～d)国家站及区域站累计降水量,(e～h)最大小时雨强站点分布(彩色圆点,单位:mm· h^{-1};数字代表出现最强雨强的时间)(a,e)6 月 12 日 20—23 时,(b,f)7 月 6 日 03—08 时,(c,g)8 月 10 日 01—06 时,(d,h)8 月 20 日 14—17 时

Fig. 3 Rainfall distribution characteristics of short-time heavy rainfall in Wuhan Area (a－d) accumulated precipitation at national and regional stations, (e－h) distribution of stations with maximum hourly rainfall intensity (color dot, unit: mm · h^{-1}. The number represents the time for the heaviest rainfall intensity) in 2020 (a, e) 20:00－23:00 BT 12 June, (b, f) 03:00－08:00 BT 6 July, (c, g) 01:00－06:00 BT 10 August, (d, h) 14:00－17:00 BT 20 August

7 月 6 日和 8 月 10 日站点雨强≥20～30、30～50 及 50～80 mm·h^{-1} 出现频次较为一致;8 月 20 日站点雨强多以 20～30 mm·h^{-1} 或 30～50 mm·h^{-1} 为主,50～80 mm·h^{-1} 次之。4 次过程的短时强降水维持时间约为 2～3 h,强降水时段分别出现在夜间、清晨和午后。

2.3　4 次过程天气形势配置

许爱华等(2014)对 2000 年以来中国中东部近百次强对流天气个例环境场进行分析,由强对流的不稳定条件和主要触发条件的角度触发,提出中国中东部地区强对流天气的 5 种基本类别,本节将参考上述分类,由强对流天气发生的基本条件入手,从热/动力不稳定条件、水汽场特征这三个方面出发分析 4 次过程的天气形势配置。

2.3.1　6 月 12 日过程——暖强迫类

6 月 12 日降水过程为暖强迫类天气,其高低空配置特征为(图 4):从 500 hPa 来看,强降水发生在短波槽前与西太平洋副热带高压(以下简称副高)西北侧边缘处,正涡度平流明显,有利于垂直上升运动;200 hPa 在武汉上空为明显的西风急流分流区,抽吸作用显著;925～700 hPa 有强盛的西南暖湿急流发展,武汉处于急流出口左侧,低层切变线发展,辐合明显;高低空急流耦合产生强烈的垂直上升运动。从热力条件来看,强天气发生前和发生时,近地面层处于暖低压倒槽的控制下,表现为高温、高湿,

表 1　2020 年武汉地区 4 次降水过程对流风暴类型及降水特点

Table 1　Convective storm types and precipitation characteristics of four precipitation processes in Wuhan Area in 2020

强降水时段/BT	强对流天气形势配置	对流风暴类型	移动传播特点	有无地面辐合线	代表站,最大雨强/(mm·h^{-1})	代表站 3 h 最大累计雨量/mm
6 月 12 日 20—23 时	低层暖平流强迫型	低质心型	快速移动	有	东西湖体育中心,57	63
7 月 6 日 03—08 时	斜压锋生类	低质心型	准静止	有	乌龙泉,89	151
8 月 10 日 01—06 时	斜压锋生类	低质心型	快速移动	有	滠口,75	132
8 月 20 日 14—17 时	准正压类	低质心和混合型为主包含高质心型	快速移动	有	暴雨预警中心,50	68

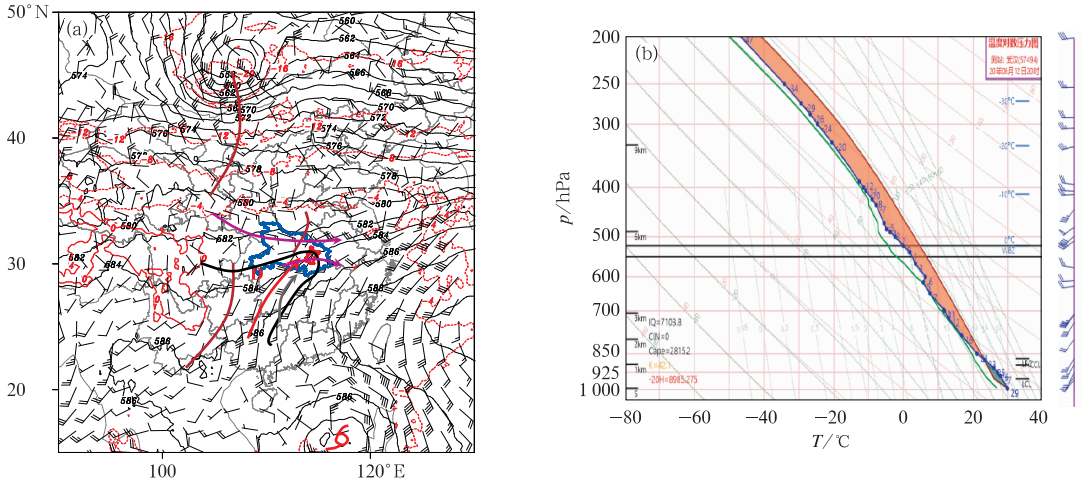

图 4　2020 年 6 月 12 日 20 时(a)NCEP 再分析资料天气形势及中尺度分析,(b)武汉站探空图

(图 4a 中,等值线:500 hPa 位势高度场,单位:dagpm;风羽:850 hPa 风场;红色虚线:等温线;棕色实线:槽线;红色、灰色、紫色箭头:850 hPa、925 hPa、200 hPa 显著气流;黑色粗实线:地面等压线;下同)

Fig. 4　(a) Synoptic situation and mesoscale analysis chart of NCEP final analysis data, (b) radiosonde map of Wuhan Station at 20:00 BT 12 June 2020

(in Fig. 4a, isoline: 500 hPa geopotential height field, unit: dagpm; barb: wind field at 850 hPa; red dotted line: isotherm; brown solid line: trough line; red, gray and purple arrows: 850 hPa, 925 hPa and 200 hPa significant air flow; black thick solid line: ground isobaric line; the same below)

常有中尺度辐合线形成发展，700 hPa 以下西南暖湿急流强盛，等温度线与风向交角较大，暖平流强迫显著，斜压性增强，500 hPa 温度槽略超前高度槽，有弱的暖平流，中低层暖区建立快，有利于热力不稳定层结的加强。从武汉站探空资料来看，武汉上空西南气流强盛，水汽充沛，湿层深厚，中低层暖平流显著，有利于不稳定能量的积累，对流有效位能(CAPE)高达 2800 J·kg^{-1}，K 指数为 42℃，抬升凝结高度(LCL)约为 950 hPa，对流凝结高度(CCL)约为 890 hPa，较容易触发对流活动，高能高湿，对流不稳定显著，为短时强降水的发生提供了有利的条件。

2.3.2 7 月 6 日、8 月 10 日过程——斜压锋生类

斜压锋生类天气过程：7 月 6 日个例(图 5a，5b)、8 月 10 日个例(图 5c，5d)，强降水多发生在高空槽前，地面锋区暖区附近。其高低空配置特征为：500 hPa 中纬度冷槽东移，槽后偏北气流携带冷空气南下，有明显的冷平流发展；700～850 hPa 切变线显著，南侧有强盛的西南暖湿急流，暖湿平流明显，北侧为显著的偏北气流，冷暖气团交汇剧烈，大气斜压性增强，温度梯度增大，导致强烈的锋生和辐合抬升强迫；地面锋区活跃，多有中尺度气旋波发展，在气旋波暖区触发短时强降水等强对流天气；同时，200 hPa 位于西风急流分流辐散区，配合低空急流的耦合抽吸作用，进一步加剧了锋面附近垂直上升对流活动。从探空图上可以看出此类过程风垂直切变较大，从低层到高由西南气流转为偏北气流。

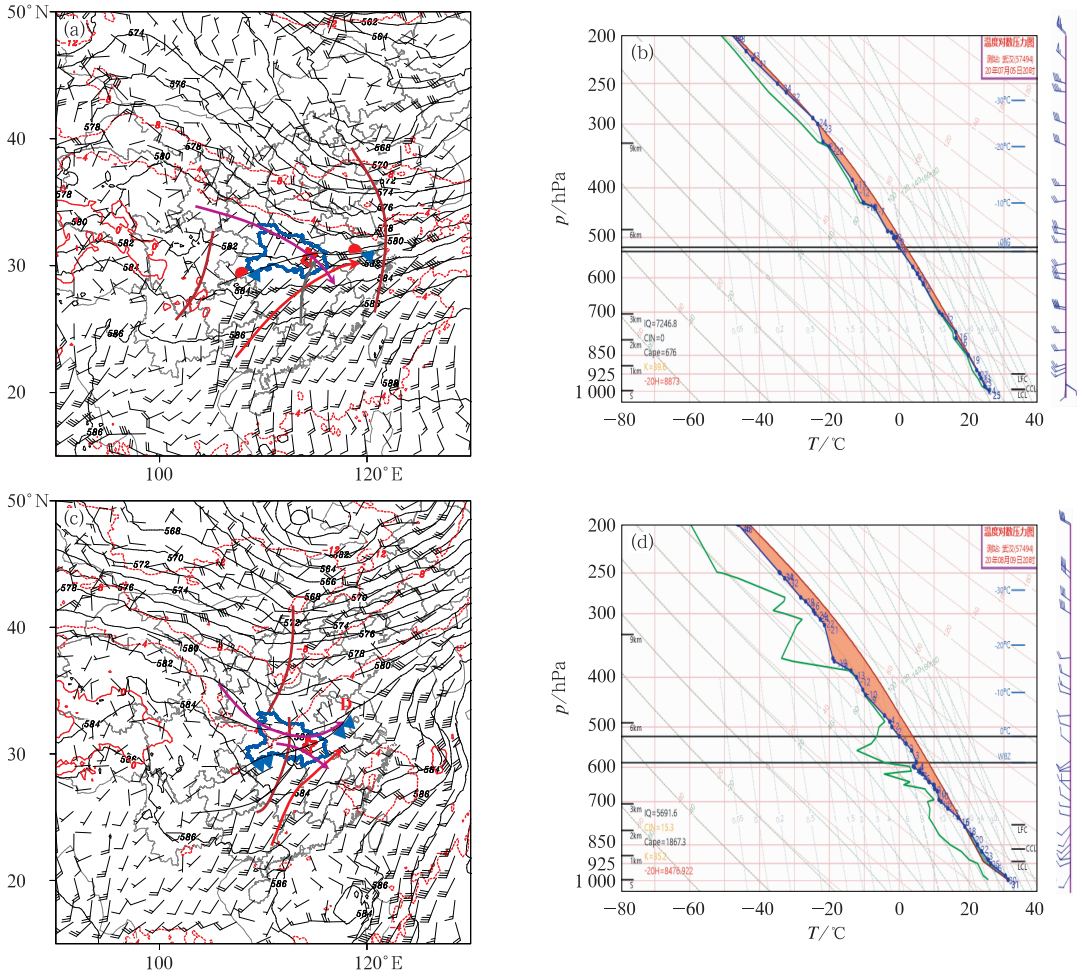

图 5 2020 年(a)7 月 6 日 02 时和(c)8 月 10 日 02 时 NCEP 最终分析资料天气形势及中尺度分析，(b)7 月 5 日 20 时和(d)8 月 9 日 20 时武汉站探空图

(图 5a 中红蓝标志：地面静止锋，图 5c 中蓝色标志：地面冷锋)

Fig. 5 (a, c) Synoptic situation and mesoscale analysis chart of NCEP final analysis data at (a) 02:00 BT 6 July, (c) 02:00 BT 10 August; (b, d) radiosonde map of Wuhan Station at (b) 20:00 BT 5 July, (d) 20:00 BT 9 August 2020

(in Fig. 5a, red and blue mark: ground stationary front; in Fig. 5c, blue mark: ground cold front)

从热力不稳定条件和水汽条件来看,低空西南急流发展,暖湿平流显著,带来有利的能量积累以及充沛的水汽辐合,高空槽后冷平流扩散到槽前,同低层暖湿气流叠加,有利于热力不稳定层结的建立。从武汉探空图上可以看出,7 月 5 日 20 时武汉上空整层湿度条件较好,CAPE 值约为 1000 J·kg^{-1},K 指数为 39℃,LCL 很低,约为 990 hPa,对流指数不是非常高,梅雨准静止锋锋面强迫起了关键触发作用,多在范围较大的降水回波中触发短时强降水这类对流活动;8 月 9 日 20 时低层为暖湿平流,中高层有弱干冷空气侵入,CAPE 值为 1800 J·kg^{-1},K 指数为 35℃,LCL 约为 920 hPA,跟 7 月 5 日相比,冷锋移动速度较快,对流活动发展在锋面南侧暖区中,湿层条件没有 7 月 5 日过程强,不稳定能量较高,对流指数较高,有利于小范围的短时强降水的触发和组织,降水云团移动更快。

2.3.3　8 月 20 日过程——准正压类

准正压类天气过程(8 月 20 日个例)的高低空配置特征为(图 6):西太平洋副高西伸北抬明显,副高西北侧有西风带低槽东移逼近,武汉位于低槽前部、副高西北边缘的垂直运动上升区,低层受热带低压倒槽尾部和东风扰动东南气流影响,存在一定的风向、风速辐合,提供了初始对流条件。从热力条件和湿度条件来看,中低层为显著暖区控制,风场表现为一致的偏南风气流,能量积累显著,水汽充沛,湿层深厚;跟前面个例相比,冷暖平流不明显,大气斜压性较弱,近地面层的偏东风流场强迫和局地的热力差异是主要的对流触发机制。从 14 时订正的武汉探空资料来看,CAPE 值高达2540 J·kg^{-1},K 指数为 39.4℃,LCL 约为 950 hPa,CCL 约为850 hPa,有一定的对流抑制能量(CIN)和边界层逆温,有利于对流能量的积聚,加剧对流活动的发展。

3　对流风暴结构特征和降水特点

诸多研究表明,短时强降水的发生是多种尺度天气系统相互作用的结果(杨波等,2016;易笑园等,2018)。不同环流背景下环境条件配置差异,导致诱发的对流风暴的特征不同,是造成强降水不同分布特征的直接原因。本节将对不同天气过程的对流风暴结构特征及降水特征进行详细分析,探讨强降水在不同阶段雨强差异的成因。

利用雷达组合反射率因子 SWAN 拼图产品资料和区域站逐小时、逐 5 min 降水观测资料,对 4 次低质心对流风暴的组织结构、演变规律和降水特征进行对比分析。根据对流风暴成熟时期回波发展强度及垂直结构特征,将其分为三类:低质心、高质心和混合型(曹艳察等,2020;孙继松等,2015)。文中 4 次过程中前 3 次为低质心型对流,最后 1 次是以低质心型对流为主,伴有高质心型(表 1)。本节从对流风暴的回波组织形态角度出发,分别对 4 次强降水过程的风暴结构特征及降水特点进行详细分析。

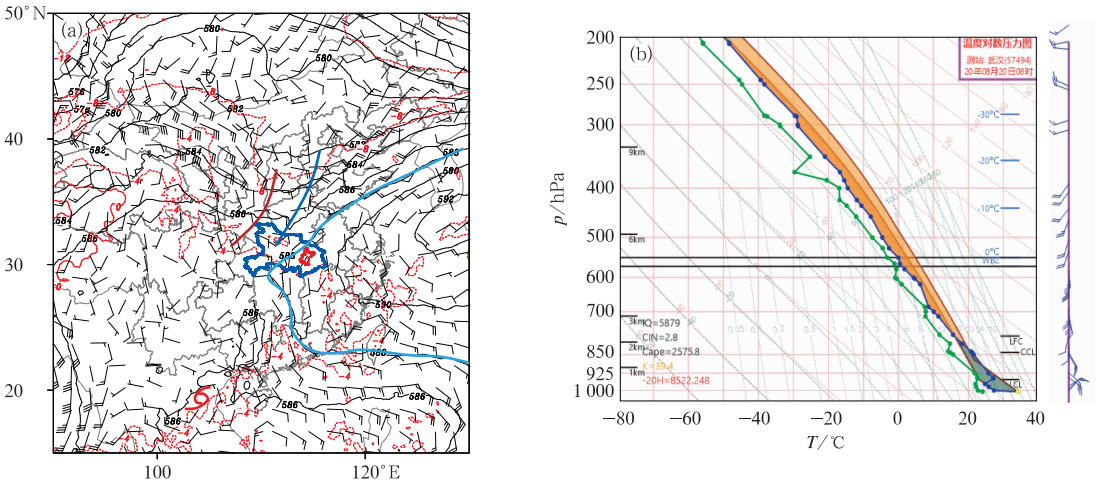

图 6　2020 年 8 月 20 日(a)14 时 NCEP 最终分析资料天气形势及中尺度分析,(b)08 时武汉站探空图

Fig. 6　(a) Synoptic situation and mesoscale analysis chart of NCEP final analysis data at 14:00 BT, (b) radiosonde map of Wuhan Station at 08:00 BT 20 August 2020

3.1 6 月 12 日 20—23 时——尾随层状云类

6 月 12 日武汉大暴雨过程的中尺度对流系统(MCS)呈东北—西南向线状对流,向东北方向移动,表现为 TS 类线状中尺度对流系统特征(王珏等,2019)。这类 MCS 层状云降水回波尾随在线状对流带之后,新单体在对流带之前生成,即向前传播,传播方向与对流带几乎垂直(图 7a,7e,7i)。从雷达回波垂直剖面图(图 7a,7i)可以看出,层状云降水回波的强度在 10～40 dBz,30 dBz 强度的回波高度可达 12～14 km;强回波集中在 MCS 的中下部,45 dBz 基本在 7 km (0℃层)以下,最大反射率因子高度在 2 km 上下,回波质心偏低。从降水强度时间序列分布来看,6 月 12 日 20—21 时东西湖体育中心站雨强为 56.6 mm·h^{-1},其中 21:30 达到 15 mm·(5 min)$^{-1}$的高峰,之后维持在 10 mm·(5 min)$^{-1}$的平均峰值近 15 min。此类 MCS 前沿为多单体组成的线状对流,移速较快,造成的短时强降水范围小,降水强度多呈单峰分布。

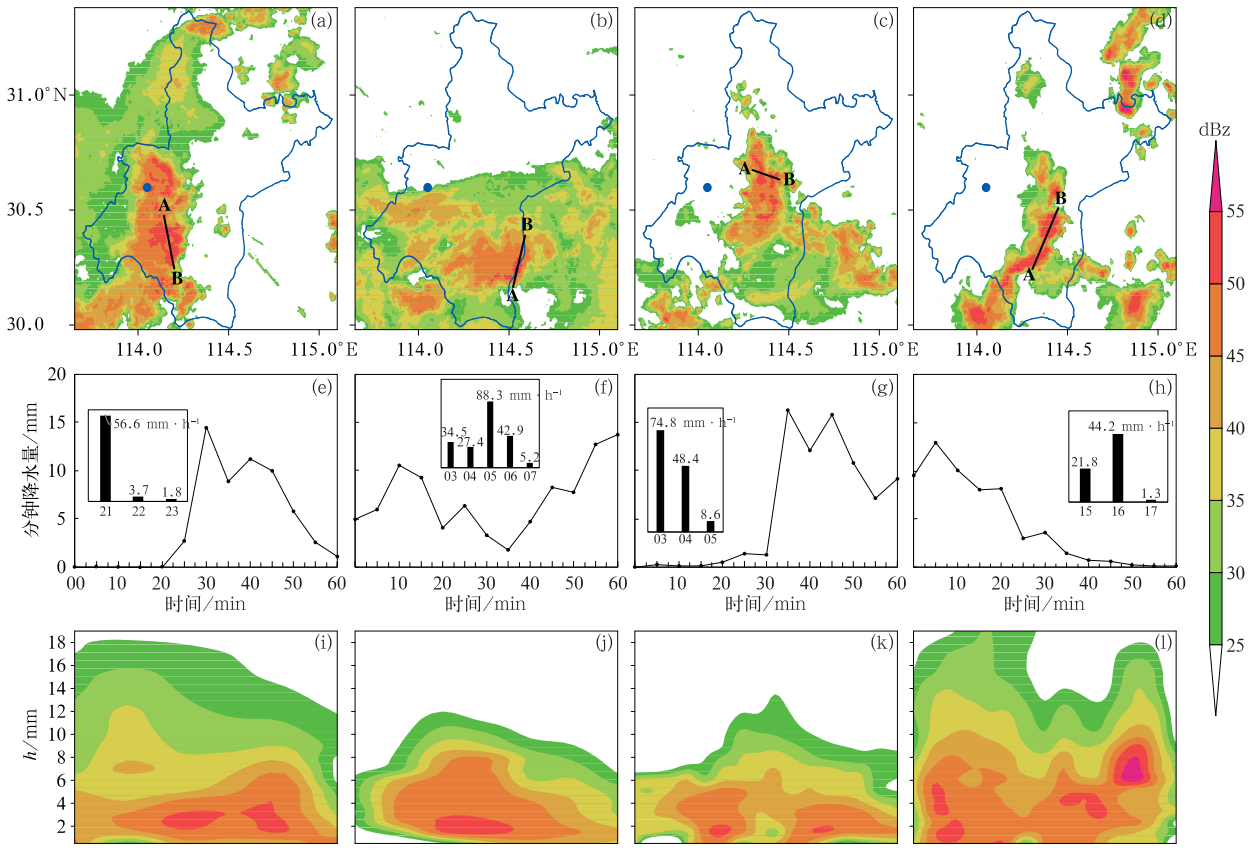

图 7 2020 年(a)6 月 12 日 20:36,(b)7 月 6 日 04:12,(c)8 月 10 日 02:24,(d)8 月 20 日 14:48 风暴成熟阶段武汉雷达组合反射率因子;(e)6 月 12 日 21—23 时东西湖体育中心站,(f)7 月 6 日 03—07 时乌龙泉站,(g)8 月 10 日 03—05 时滠口站,(h)8 月 20 日 15—17 时暴雨预警中心站最大雨强代表站小时雨量变化及最大小时降水时段内的分钟雨量变化;(i～l)时间同图 7a～7d,但为风暴成熟阶段沿图 7a～7d 中 A－B 线段所示回波垂直剖面

Fig. 7 (a－d) Radar composite reflectivity factor at (a) 20:36 BT 12 June, (b) 04:12 BT 6 July, (c) 02:24 BT 10 August, (d) 14:48 BT 20 August 2020; (e－h) hourly rainfall variation of maximum rainfall intensity at representative stations and minutely rainfall variation within maximum hourly precipitation period at (e) 21:00－23:00 BT 12 June at Dongxihu Sports Center Station, (f) 03:00－07:00 BT 6 July at Wulongquan Station, (g) 03:00－05:00 BT 10 August at KaiKou Station, (h) 15:00－17:00 BT 20 August at Rainstorm Warning Center in 2020; (i－l) same as those of time in Figs. 7a－7d, but vertical echo profiles along line A－B in Figs. 7a－7d in storm mature stage

3.2　7 月 6 日 03—08 时——准静止类

7 月 6 日武汉大暴雨是梅雨准静止锋背景下伴随的短时强降水过程(图 7b,7f,7j)。梅雨锋锋面雨带在长江中游沿线长时间维持,表现为东西带状走向的大范围稳定性层状云降水回波稳定维持,大片的层状云回波中有不断生消的积云对流回波从武汉上空交替经过,稳定性降水中伴随有突然增强的短时强降水(图 7f)。从雷达回波垂直剖面来看(图 7j),层状云回波强度在 10～35 dBz,30 dBz 回波高度可达 10～12 km;造成短时强降水的对流回波 45 dBz 发展高度可达 8～9 km,最大反射率因子高度在 2 km 上下,回波质心偏低。7 月 6 日 03—07 时的雨强为 88.3 mm·h^{-1},3 h 累计降水达 150 mm 左右。04—05 时的 5 min 雨量时间演变序列显示,该时段内降水特征呈波动式变化;在 04:10 达到第一个峰值,为 11 mm·(5 min)$^{-1}$,之后呈下降趋势,04:35 开始降水再次增强,在 04:55 达到第二个峰值,为 14 mm·(5 min)$^{-1}$,每一阶段降水增强都与新生对流单体途经武汉站点相对应,途经该站的对流单体生消交替,造成了稳定性降水与短时强降水的交替迭代,这种回波特征与降水特点同梅雨锋南侧高能高湿的环境特征有关,与热带系统强降水特点有相似(田付友等,2017)。

3.3　8 月 10 日 01—06 时——组织合并类

8 月 10 日武汉大暴雨对流风暴回波结构表现出组织合并特征(图 7c,7g,7k)。01 时在江夏南部有窄带回波形成并向偏北方向移动发展,结构略松散,同时在武汉西部有分散性块状对流回波向东传播,02 时南部窄带回波同西部块状回波在武汉中部合并加强,回波形态变得紧凑密实,之后受低层偏南风气流引导北上。从雷达回波垂直剖面来看,该过程中回波伸展高度不高,45 dBz 强回波的发展高度在 5 km 以下,质心较低。从降水时间序列来看,强降水发生时段出现在回波合并之后,回波开始合并加强对应着降水量跃增,02—03 时的雨强达 74.6 mm·h^{-1},02:35 达到第一个峰值,为 17 mm·(5 min)$^{-1}$,并在 10 min 之后再次达到峰值;回波合并后移速缓慢,维持了 2 个多小时才开始减弱,与此对应,03—04 时的雨强仍维持在 50 mm·h^{-1}左右,强降水过程持续约 2 h。

3.4　8 月 20 日 14—17 时——组织合并类

同 8 月 10 日过程类似,8 月 20 日过程也为组织合并类对流风暴。14 时在武汉中西部有分散的块状回波在向东移动,过程中快速组织发展成一条南北向窄带回波,同时在江夏南部也有一条东西向窄带弓形回波向北移动,其西段同南北向窄带回波南段于 14:30 在武汉中南部合并加强成新的弓状回波,之后在近地面层南风急流的作用下截断为东西两端,东段维持高组织化的带状回波向东北方向移动发展,西段向西偏北方向移动中逐渐分散消亡。与 8 月 10 日过程不同的是,此次过程无论是合并前还是合并后,回波均表现为高度组织化的线状对流,对流发展更为剧烈,强回波影响范围和强度也明显强于 8 月 10 日,移动速度更快。从雷达回波垂直剖面图中可以看出(图 7l),弓状回波中有多个对流单体存在,层状云降水回波的高度在 10～14 km,30 dBz 回波可达 10～12 km 高度;对流性降水回波发展很高,50 dBz 回波最高发展到 7～9 km 高度。强回波集中回波体的中上部,因此此次强降水过程还伴随有地面雷暴大风的出现。从强降水时序图可以看出,在 15:05 回波合并后降水强度达到顶峰,为 14 mm·(5 min)$^{-1}$,之后回波断裂移出,降水也在 20 min 之后降水趋于结束,同 8 月 10 日相比,由于系统移动较快,降水强度和影响范围更小。

同 6 月 12 日过程相比,两次过程回波都表现出高度组织化的线状对流,回波移动快速,不同的是线状对流后方没有大范围的层状云存在,究其原因,可能与不同的对流强迫触发有关,6 月 12 日过程为低层强西南暖湿平流强迫触发,在大范围稳定性降水后,对应地面降温升压产生冷池,冷池能量积累到一定程度,激发的冷出流于层状云回波前沿同环境风辐合抬升,在有利的高能高湿环境下,形成剧烈发展的线状对流;而 8 月 20 日过程为准正压环境下局地的热力强迫和偏东风扰动强迫触发,对流在触发开始就非常剧烈,很快形成多个高度组织化的线状对流。从降水时间序列来看,两次过程降水量均呈单峰型,强降水影响时间短,范围小,不同的是 6 月 12 日短时强降水后伴随较长时间的层状云稳定性降水,而此次过程线状回波快速过境后,降水即结束,

为典型的盛夏午后热对流活动。

4 地面中尺度特征

4.1 地面气象要素时间变化特征

4 次武汉地区短时强降水过程的天气系统配置不同、对流风暴回波组织不同、强降水时段也不同。本节对这 4 次过程的地面气象要素进行对比，分析短时强降水发生前、中、后期地面相关要素变化规律。

6 月 12 日过程中，短时强降水时段发生在 20:30—21:00(图 8a)，最大降水强度为 15 mm·(5 min)$^{-1}$，降水呈单峰型。在强降水发生前 5～10 min，风速开始加大，强降水结束前 5 min 风速迅速减小；降水发生前温度和露点温度差值为 4℃，降水开始后，温度降低，温度露点差逐渐减小最终达到一致，即湿度快速上升达到饱和；降水发生中、后期，气压呈波动上升状态，形成小高压鼻。地面气象要素演变具有明显的 TS 类线状 MCS 过境特征，对流发生前，后部冷池发展溢出的冷出流前进到回波前沿，风速加大，同前方环境风辐合，激发新的线状对流，湿度增加，降水发生，同时后部冷池跟随前进发展，气压升高。

8 月 20 日过程与 6 月 12 日过程类似，都是由线状对流导致，地面要素变化有明显弓形回波雷暴过境的特征(图 8b)，强降水呈单峰型，发生在 15:00—15:35，最大降水强度为 14 mm·(5 min)$^{-1}$，在降水发生时，温度露点差迅速减小，湿度快速达到饱和状态，风速明显增大，与降水的起止时间一致，气压从降水开始时就呈波动上升状态，上升到一定值后逐渐下降。同 6 月 12 日过程相比，风速增大和气压升高同短时强降水同时发生，而 6 月 12 日过程，风速增大和气压升高发生在短时强降水发生前，

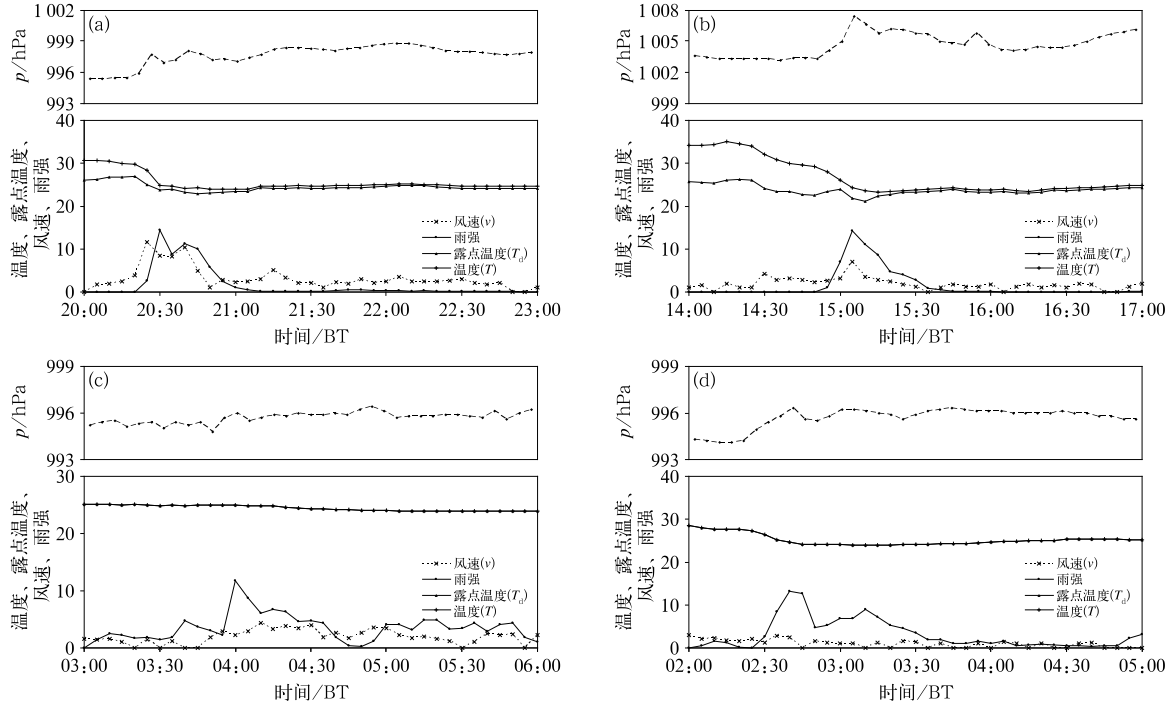

图 8 2020 年 4 次短时强降水气象要素变化

(a)6 月 12 日 20—23 时东西湖体育中心，(b)8 月 20 日 14—17 时软件学院，

(c)7 月 6 日 03—06 时梁子湖，(d)8 月 10 日 02—05 时武汉三环线

(雨强，单位：mm·h^{-1}；T，T_d，单位：℃；v，单位：m·s^{-1})

Fig. 8 Element variations of four short-time heavy precipitations in 2020

(a) Dongxihu Sports Center at 20:00－23:00 BT 12 June, (b) Software College at 14:00－17:00 BT 20 August, (c) Liangzi Lake at 03:00－06:00 BT 6 July, (d) Wuhan Third Ring Road at 02:00－05:00 BT 10 August

(intensity of precipitation, unit: mm·h^{-1}; T, T_d, unit: ℃; v, unit: m·s^{-1})

风力加大更为显著;这可能与此次过程为 2 条线状对流组织合并发展有关,相向而行的 2 条带状回波在武汉中南部合并,辐合上升对流增强,同时也对合并位置处风速的增大有一定的遏制,而 6 月 12 日过程首先是雷暴冷出流风力加大,然后同前沿环境风辐合触发线状对流,因此风力加大早于短时强降水发生。

7 月 6 日 03—06 时和 8 月 10 日 02—05 时地面气象要素变化特征较为一致,都是斜压锋生类锋面附近降水的气象要素特征。降水均呈多锋波动型(图 8c,8d);在降水发生前、中、后湿度、风速均变化不大;气压在降水发生后有小幅度波动性上升,形成小高压鼻;2 次降水过程中温度露点差始终为 0℃,湿度一致达到饱和状态。2 次过程都发生在半夜,7 月6 日 03—06 时降水发生前后温度变化不明显,但 8 月 10 日 02—05 时这次过程在降水发生前温度就开始下降,降水发生时温度幅度达 4℃,这与 2 次过程不同的触发位置有关,7 月 6 日 MCS 为准静止锋锋面上触发的强对流活动,锋面附近气象要素趋于稳定,而 8 月 10 日过程为冷锋推进过程中后部冷空气侵入锋前暖区诱发强对流,伴随有地面气温的明显下降。

由此可见,不同的环境背景、触发诱因和组织形态下,短时强降水发生前后地面气象要素表现出不同的变化特征,这与苏俐敏等(2014)、吴进等(2018)在研究江西和北京地区短时强降水边界层气象要素变化特征时得到的结论一致。6 月 12 日过程与8 月 20 日过程都是高度组织化的线状对流,具有相似的要素变化特征,湿度、风力、气压明显增加,但触发机制不同导致风力加大的时间和幅度不同;7 月 6 日过程和 7 月 10 日过程都是斜压锋生类锋面附近降水,湿度始终较为饱和,风速、气压在降水前后小幅波动,但锋面特征和对流触发位置的不同导致降水温度变化不同。

4.2　地面辐合线

大尺度天气环流背景和环境特征为对流风暴的形成提供有利的环境条件,MCS 则是对流能否触发的关键(孔凡超等,2016)。本节将围绕地面要素(温度、风向、风速)特征,分析武汉地区诱发短时强降水的 MCS 的可能触发机制。

由图 9a 可以看出,6 月 12 日 20 时武汉东南部温度较高为 28℃,西侧由于降水和雷暴冷池的温度输送作用为 24℃,东西两侧温差达到 4℃。地面辐合线同温度梯度区密集带相对应,其西侧为西偏北的雷暴冷出流,东侧为环境偏东风。尾随层状云类 MCS 的线状回波线在地面辐合线附近形成,后部有层状云回波发展;由于西北部冷性气流锲入导致对流线头部一段有混合型降水构成的涡旋状回波,强降水常发生在这个部位。这可能是因为近地面冷空气进入暖低压倒槽后有利于中尺度涡旋的组织和发展,逗点状的 MCS 与地面涡旋环流相配合,同时,回波带处于相对暖湿区域内,对流活跃,易产生强降水。

7 月 6 日在准静止锋附近有东西走向的大范围层状云回波,中间伴随积云对流回波发展。02:35 武汉地区东南部有地面辐合线形成(图 9b),地面辐合线位于准静止锋锋区地面冷区一侧,从地面温度场来看,武汉地区处于 25℃的锋面冷区内,其南侧是 28℃的锋面暖区,辐合线东侧为东偏南风,西侧为偏北风,40 min 之后,层状云回波中出现东北—西南走向的强对流回波短带自西向东发展、传播;受准静止锋和地面辐合线共同影响,层状云回波中不断有分散的块状回波或窄带回波生消交替,使得长时间的稳定性降水中伴随有短时强降水的起伏波动,每一次降水峰值对应新的积云对流过境。此次短时强降水的触发与地面辐合线的形成有关,并且地面中尺度天气系统发生发展早于对应的 MCS 发生发展,对预报预警工作有重要的指导意义。

8 月 10 日过程发生在地面锋区暖区,从 00:20 地面温度场可以看到武汉温度为 28℃(图 9c),相对周边明显高出 4℃,地面热力不均导致局地升温是此次地面中尺度辐合系统生成的主要原因(喻谦花等,2016)。对流初始阶段武汉西侧由于冷锋推进有零散对流发展东移,南侧随着暖区南风发展有东西向窄带回波发展北上,之后武汉中部在地面风场上表现为三支气流交汇的地面辐合线,分别为顺着汉江下来的西北气流,从湖南北部上来的西南气流,以及从东部过来的偏东南气流;此时,武汉南部窄带回波逐渐转竖并与西侧向东传播的团状回波相遇合并发展,同地面辐合线走向一致,地面中尺度辐合系统的发生发展触发了中小尺度对流系统的发生发展,从而诱发了武汉中部的短时强降水天气。

8 月 20 日 14 时,武汉地区有两处对流发展:一处位于武汉南部,呈向北突起的弓形线状对流带向北发展,另一处位于武汉西部,呈块状对流单体向东

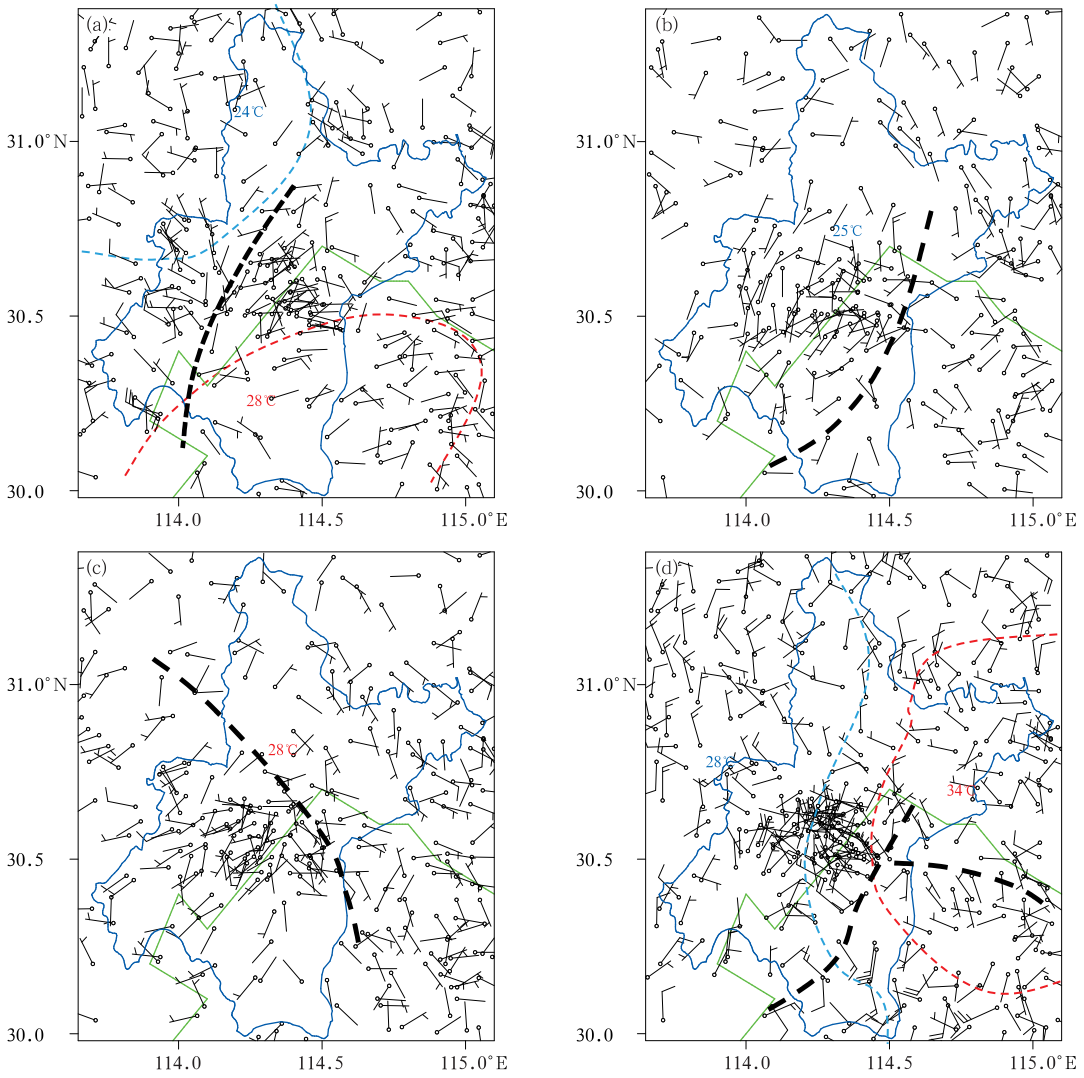

图 9 2020 年(a)6 月 12 日 20:00,(b)7 月 6 日 02:35,(c)8 月 10 日 00:20,(d)8 月 20 日 14:25 武汉及周边地区地面自动站风场

(蓝虚线:冷舌,红虚线:暖舌,黑虚线:地面辐合线)

Fig. 9 Wind field of ground automatic stations in Wuhan and surrounding areas at (a) 20:00 BT 12 June, (b) 02:35 BT 6 July, (c) 00:20 BT 10 August, and (d) 14:25 BT 20 August 2020

(blue dotted line: cold tongue, red dotted line: warm tongue, black dotted line: ground convergence line)

移动。从地面观测来看,风场呈现出“人”字型地面辐合线(图 9d),西段为西南—东北向,位于西部块状对流和南部弓形对流西段之间,东段为东西向,位于南部弓状回波东段前沿。随着弓状回波后部南风以及西部块状回波后部北风的发展,西段地面辐合线加强,西部分散性块状对流逐渐发展合并为南—北向带状对流,随后与北上的弓形对流西段再次合并加强,形成新的线状对流,造成武汉地区中部的短时强降水。此外,从图中可以看出西段对流线位于温度梯度大值区内,冷暖交汇显著,这种配置下容易激发高度组织化的线状或带状对流。

由此可见,地面中尺度系统对于 MCS 的触发、组织发展有重要作用,它的发生、发展和消亡相对于 MCS 的演变在时间上通常具有一定的提前量。因此,短时临近预警业务中,关注地面辐合线,温度锋区等地面中尺度系统的发展演变,对于预判 MCS 的触发、组织形态的演变等具有很好的指示意义。

5 结论与讨论

本文利用武汉地区自动气象站逐小时和逐 5 min 降水资料、SWAN 提供的长江中游雷达组合

反射率因子拼图产品及 NCEP/FNL 再分析资料,对武汉地区 4 次低质心类短时强降水对流风暴特征进行分析。结果表明:

(1)4 次过程中雨强≥30 mm·h^{-1}的站点多分布在武汉地区中部、南部,短时强降水维持时长均在 2～3 h,强降水时段多出现在夜间、清晨和午后。

(2)从热力不稳定强迫角度出发,4 次过程的天气形势配置分别为暖强迫类、斜压锋生类和准正压类。不同天气背景造成的不同对流特征,暖强迫背景下,环境条件高能高湿,雷暴冷池的积累有利于稳定性降水前沿触发 TS 类线状对流 MCS;斜压锋生背景下,冷暖气团交汇剧烈,大气斜压性强,地面锋区活跃,多有中尺度气旋波发展,锋区冷区稳定性降水中多伴随短时强降水,暖区能量、湿度条件更好,易诱发短时强降水等分散性强对流;准正压背景下,大气斜压性较弱,但高能高湿的环境以及近地面层流场强迫和局地热力差异,易触发剧烈的热对流活动。

(3)从对流风暴雷达回波特征和降水特征来看,4 次低质心降水过程分别为 1 次 TS 类线状中尺度对流系统、1 次准静止类和 2 次组织合并类。TS 类表现为层状云降水回波尾随在线状对流带之后,移速较快,造成的短时强降水范围小,之后多伴随稳定性降水;准静止类表现为带状走向的大范围层状云回波稳定维持,中间伴随有多个积云对流回波生消交替,每一阶段降水增强都与新生对流单体途经武汉站点相对应,造成了稳定性降水与短时强降水的交替迭代;组织合并类为两处或多处分散的回波相遇合并加强,回波合并时常伴随着强降水的发生,合并后的回波形态和走向影响着降水的强度和持续时间。

(4)不同的环境背景、触发诱因和组织形态下,短时强降水发生前后地面气象要素表现出不同的变化特征。6 月 12 日过程与 8 月 20 日过程都是高度组织化的线状对流,具有相似的要素变化特征,湿度、风力、气压明显增加,但触发机制不同导致风力加大的时间和幅度不同;7 月 6 日过程和 7 月 10 日过程都是斜压锋生类锋面附近降水,湿度始终较为饱和,风速、气压在降水前后小幅波动,但锋面特征和对流触发位置的不同导致降水温度变化不同。

(5)地面中尺度系统对于 MCS 的触发、组织发展有重要作用,它的发生、发展和消亡相对于 MCS 的演变在时间上通常具有一定的提前量,4 次过程均有地面辐合线的参与,因此,在短时临近预警业务中,关注地面辐合线,温度锋区等地面中尺度系统的发展演变,对于预判 MCS 的触发、组织形态的演变等具有很好的指示意义。

参考文献

曹艳察,郑永光,盛杰,等,2020. 2018 年 7 月 15—17 日北京极端强降水过程三类对流风暴及其强降水特征分析[J]. 气象,46(7):885-897. Cao Y C,Zheng Y G,Sheng J,et al,2020. Characteristics of three types of convective storms during the Beijing extreme precipitation event in 15－17 July 2018[J]. Meteor Mon,46(7):885-897(in Chinese).

崔讲学,2011. 湖北省天气预报手册:暴雨预报[M]. 北京:气象出版社:222. Cui J X,2011. Handbook of Atmospheric Forecast in Hubei Province－Rainstorm Forecast[M]. Beijing:China Meteorological Press:222(in Chinese).

段鹤,夏文梅,苏晓力,等,2014. 短时强降水特征统计及临近预警[J]. 气象,40(10):1194-1206. Duan H,Xia W M,Su X L,et al,2014. Features statistics and warning of flash heavy rains[J]. Meteor Mon,40(10):1194-1206(in Chinese).

郝莹,姚叶青,郑媛媛,等,2012. 短时强降水的多尺度分析及临近预警[J]. 气象,38(8):903-912. Hao Y,Yao Y Q,Zheng Y Y,et al,2012. Multi scale analysis and nowcasting of short time heavy rainfall[J]. Meteor Mon,38(8):903-912(in Chinese).

孔凡超,赵庆海,李江波,2016. 2013 年 7 月冀中特大暴雨的中尺度系统特征和环境条件分析[J]. 气象,42(5):578-588. Kong F C,Zhao Q H,Li J B,2016. Diagnostic analysis of mesoscale system and environmental conditions during Hebei severe rainstorm[J]. Meteor Mon,42(5):578-588(in Chinese).

刘爱鸣,林毅,刘增基,等,2001a. 前汛期短历时强降水天气分析(一)——影响系统的气候特征[J]. 福建气象,(3):6-10. Liu A M,Lin Y,Liu Z J,et al,2001a. The analysis of the ultra-short strong precipitation during the rainfall season(Ⅰ)—climate characteristics affecting the system[J]. J Fujian Meteor,(3):6-10(in Chinese).

刘爱鸣,林毅,刘增基,等,2001b. 前汛期短历时强降水天气分析(二)——大范围强降水的概念模式[J]. 福建气象,(4):1-4. Liu A M,Lin Y,Liu Z J,et al,2001b. The analysis of the ultra-short strong precipitation during the rainfall season(Ⅱ)—conceptual model of wickspread precipitation[J]. J Fujian Meteor,(4):1-4(in Chinese).

毛以伟,2013. 武汉短历时暴雨分析及预报研究[D]. 兰州:兰州大学. Mao Y W,2013. The analysis and forecasting research of short-duration rainstorm in Wuhan[D]. Lanzhou:Lanzhou University(in Chinese).

苏俐敏,夏文梅,马中元,等,2014. 2012 年江西宜春四类短时强降水特征分析[J]. 气象科学,34(6):700-708. Su L M,Xia W M,Ma Z Y,et al,2014. Characteristics of four types of short-term strong precipitation in Yichun of Jiangxi Province in 2012[J]. J Meteor Sci,34(6):700-708(in Chinese).

孙继松,雷蕾,于波,等,2015. 近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. 气象学报,73(4):609-623. Sun J S,Lei L,Yu B,et al,2015. The fundamental features of the extreme severe rain

events in the recent 10 years in the Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin,73(4):609-623(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).

王锡稳,陶健红,刘治国,等,2004."5.26"甘肃局地强对流天气过程综合分析[J].高原气象,23(6):815-820. Wang X W,Tao J H,Liu Z G,et al,2004. Synthetical analysis of a local severe convection weather process in Gansu[J]. Plateau Meteor,23(6):815-820(in Chinese).

王毅,郑媛媛,张晓美,等,2012.夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究[J].气象,38(12):1473-1481. Wang Y,Zheng Y Y,Zhang X M,et al,2012. The contrastive research on environmental conditions for tornadic and nontornadic severe convective weather under ahead of trough pattern during summer in Anhui Province[J]. Meteor Mon,38(12):1473-1481(in Chinese).

魏慧娟,赵龙,孙菀,2013.2010—2012年河南省驻马店市短历时强降水的形成原因及物理模型的建立[J].河南科学,31(3):365-369. Wei H J,Zhao L,Sun Y,2013. The causes analysis of short-duration strong precipitation and physical model establishment in Zhumadian City,Henan Province from 2010 to 2012 [J]. Henan Sci,31(3):365-369(in Chinese).

吴翠红,龙利民,2011.湖北省中尺度暴雨天气分析图集[M].北京:气象出版社:390. Wu C H,Long L M,2011. Atlas of Mesoscale Rainstorm Atmospheric Analysis in Hubei Province[M]. Beijing:China Meteorological Press:390(in Chinese).

吴翠红,王晓玲,2013.湖北省中尺度暴雨诊断分析研究[M].北京:气象出版社:202. Wu C H,Wang X L,2013. Diagnostic Analysis of Mesoscale Rainstorm in Hubei Province[M]. Beijing:China Meteorological Press:202(in Chinese).

吴进,李琛,于波,等,2018.两类短时强降水天气边界层气象要素变化特征[J].气象,44(7):902-910. Wu J,Li C,Yu B,et al,2018. Study on the variation characteristics of meteorological elements in the boundary layer of two types of short time heavy rainfall [J]. Meteor Mon,44(7):902-910(in Chinese).

许爱华,孙继松,许东蓓,等,2014.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,40(4):400-411. Xu A H,Sun J S,Xu D B,et al,2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon,40(4):400-411(in Chinese).

许新田,王楠,刘瑞芳,等,2010.2006年陕西两次强对流冰雹天气过程的对比分析[J].高原气象,29(2):447-460. Xu X T,Wang N,Liu R F,et al,2010. Comparative analyses on two severe convective hailstorm weather processes in Shaanxi Province in 2006 [J]. Plateau Meteor,29(2):447-460(in Chinese).

杨波,孙继松,毛旭,等,2016.北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征[J].气象学报,74(6):919-934. Yang B,Sun J S,Mao X,et al,2016. Multi-scale characteristics of atmospheric circulation related to short-time strong rainfall events in Beijing[J]. Acta Meteor Sin,74(6):919-934(in Chinese).

易笑园,陈宏,孙晓磊,等,2018."7·20"气旋大暴雨中多尺度配置与MγCS发展的关系[J].气象,44(7):869-881. Yi X Y,Chen H,Sun X L,et al,2018. Multi scale configuration of the 20 July 2016 cyclone induced severe torrential rain and its relationship with the development of MγCS[J]. Meteor Mon,44(7):869-881 (in Chinese).

喻谦花,郑士林,吴蓁,等,2016.局部大暴雨形成的机理与中尺度分析[J].气象,42(6):686-695. Yu Q H,Zheng S L,Wu Z,et al,2016. The forming mechanism and mesoscale analysis of local heavy rainfall[J]. Meteor Mon,42(6):686-695(in Chinese).

俞小鼎,2012.2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J].气象,38(11):1313-1329. Yu X D,2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon,38(11):1313-1329(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,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).

张涛,方翀,朱文剑,等,2012.2011年4月17日广东强对流天气过程分析[J].气象,38(7):814-818. Zhang T,Fang C,Zhu W J,et al,2012. Analysis of the 17 April 2011 severe convective weather in Guangdong[J]. Meteor Mon,38(7):814-818(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).

郑媛媛,姚晨,郝莹,等,2011.不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J].气象,37(7):795-801. Zheng Y Y,Yao C,Hao Y,et al,2011. The short time forecasting and early warning reasearch on severe convective weather under different types of large scale circulation background[J]. Meteor Mon,37(7):795-801(in Chinese).

Lemon L R,1977. New severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria:a preliminary report[R]. NOAA technical memorandum NWS NSSFC. Washington:NOAA:60.

(本文责编:王婷波)