

周金莲, 张家国, 吴涛, 等, 2022. 长江中游梅雨锋极端暴雨过程中的边界层中尺度系统主要特征[J]. 气象, 48(8): 1007-1019.
Zhou J L, Zhang J G, Wu T, et al, 2022. Characteristics of the mesoscale weather system producing extreme rainstorm in boundary layer during the Meiyu front over the middle reaches of Yangtze River[J]. Meteor Mon, 48(8): 1007-1019 (in Chinese).

长江中游梅雨锋极端暴雨过程中的 边界层中尺度系统主要特征^{*}

周金莲¹ 张家国¹ 吴涛¹ 许冠宇¹ 刘希文¹ 王珏² 韩芳蓉¹

¹ 武汉中心气象台, 武汉 430074

² 中国气象局武汉暴雨研究所, 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

提 要: 利用 2008—2016 年常规观测、地面自动站和 NCEP 再分析场资料, 结合天气雷达和气象卫星等资料, 在系统性分析 39 例梅雨期极端暴雨过程边界层中尺度天气系统动力热力特征的基础上, 研究归纳了三种不同天气类型下极端暴雨边界层中尺度天气系统的发展模型。结果表明: 在同一类天气类型背景下, 对应的极端暴雨中尺度天气系统的发展具有相同的规律, 且极端暴雨的产生均与边界层中尺度天气系统的强烈发展有密切关系, 而长江中游特殊地形在边界层中尺度系统发生发展中起到重要作用。在有利环流背景和强烈发展边界层中尺度天气系统的触发和组织作用下, 中尺度对流系统(MCS)的合并加强、停滞、后向传播以及对流单体列车效应等是极端强降水产生的重要原因。锋面气旋类极端暴雨地面中尺度天气系统有三种, 均由冷式切变线、暖区局地中尺度辐合线和大别山西侧 MCS 出流边界等交汇发展而来。低涡切变极端暴雨的中尺度天气系统主要是边界层新生于武陵山脉东部江汉-洞庭湖平原的局地中尺度涡旋, 尺度为 150~300 km, 其形成伴随显著的边界层多支气流的强烈辐合、局地斜压性的发展过程等; 局地中尺度涡旋的形成与西南涡和长江中游特殊地形密切相关, 四川盆地西南涡加强, 湘鄂西部二级地形区域涡前强降水的形成是其发展的主要诱因, 有利于多支气流辐合的长江中游马蹄形地形是其在江汉-洞庭湖平原多发的关键因素。弱强迫梅雨锋暖区极端暴雨中尺度天气系统的形成发展与大别山西侧雷暴冷池逆流和夜间边界层超低空急流的辐合增强、维持有关。

关键词: 梅雨锋, 极端暴雨, 边界层, 中尺度天气系统, 地形, 中尺度对流系统

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.052801

Characteristics of the Mesoscale Weather System Producing Extreme Rainstorm in Boundary Layer During the Meiyu Front over the Middle Reaches of Yangtze River

ZHOU Jinlian¹ ZHANG Jiaguo¹ WU Tao¹ XU Guanyu¹

LIU Xiwen¹ WANG Jue² HAN Fangrong¹

¹ Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

² Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

Abstract: By using conventional observation data, automatic meteorological station data and NCEP reanalysis data, as well as the data of CINRAD and meteorological satellite, the mesoscale weather system development models in the boundary layer of extreme rainstorm under three different weather types are summarized,

^{*} 国家自然科学基金项目(U2142202)、中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M38)和湖北省气象局科技发展基金项目(2018Z03, 2022Y03)共同资助

2021 年 6 月 1 日收稿; 2022 年 5 月 6 日收修定稿

第一作者: 周金莲, 从事天气预报业务和相关研究工作. E-mail: zjl7988@qq.com

通讯作者: 张家国, 从事天气预报业务和相关研究工作. E-mail: wuhanzhangjiaguo@sohu.com

based on the systematic analysis about the dynamic and thermal characteristics of the boundary layer mesoscale weather system in 39 cases of extreme rainstorms. The results show that the mesoscale weather systems in extreme rainstorm share the same regularity under the same weather system. The occurrence of extreme rainstorm is closely related to the strong development of mesoscale weather system in boundary layer. The special topography in the middle reaches of the Yangtze River plays an important role in the occurrence and development of mesoscale weather systems. By the trigger and organization of strong developing mesoscale weather system in boundary layer under the background of favorable circulation, the consolidation strengthening, stagnation, backward propagation of mesoscale convective system (MCS) and convective cell train effect are important reasons for extreme heavy rainfalls. To be specific, there are three patterns of surface mesoscale synoptic systems related to frontal cyclone type, which are all developed from the intersection of cold shear line, warm mesoscale convergence line and the gust front of MCS in the west of Dabie Mountains. The low vortex shear-type mesoscale weather system is mainly a local mesoscale vortex, newly born in boundary layer in Jiangnan-Dongting Lake Plain in the eastern Wuling Mountains of Hunan and Hubei and the scale is about 150—300 km. Its formation is accompanied by the strong convergence of multiple flows in the boundary layer and the development of local baroclinicity. The strengthening of the southwest vortex and the formation of heavy precipitation in front of the second-order regional vortex in the west of Hunan and Hubei are the main inducements for the development of local mesoscale vortex in the boundary layer of the eastern plain. The horseshoe-shaped terrain in the middle reaches of the Yangtze River, which is conducive to the convergence of multiple air streams, is the key factor for the occurrence of local mesoscale vortex in the eastern plain. The formation and development of the extreme rainstorm mesoscale weather system in the warm sector of the weakly forced Meiyu front is mainly related to the enhanced convergence and maintenance of the thunderstorm cold pool countercurrent on the westside of the Dabie Mountains and the nighttime boundary layer ultra-low-level jet.

Key words: Meiyu front, extreme rainstorm, boundary layer, mesoscale weather system, topography, mesoscale convective system (MCS)

引言

受亚热带季风、特殊地形等影响,长江中游极端暴雨频繁,常引发山洪、泥石流和洪涝等灾害。许多重大过程的预报与实况均有较大偏差,如2012年7月12日鄂东局地极端暴雨过程,2019年6月5日由边界层新生的局地中尺度涡旋产生的江汉平原极端暴雨过程,2020年7月26日由低涡和地形作用引起的湖北建始极端暴雨过程等。究其原因,主要还是人们对梅雨锋极端暴雨边界层中尺度天气系统活动规律认识不够,无法对数值模式降水预报偏差做出有效的订正。

暴雨是多种尺度天气系统相互作用的结果(Maddox et al, 1979; 陶诗言, 1980; Bosart, 1984; Ninomiya et al, 2003),是在有利的天气背景下由特殊组织结构的中尺度对流系统产生的(王晓芳和崔

春光, 2012),而这些中尺度对流系统与边界层中尺度天气系统发生发展有着密切关系(贝耐芳等, 2003; 孙建华等, 2004; 廖移山等, 2011; 张家国等, 2013; 2015)。多年来,众多学者先后研究过长江中游梅雨期暴雨天气背景特征(丁一汇, 1976; 张小玲等, 2004; Luo et al, 2017),主要有低涡切变、锋面气旋和梅雨锋暖区三类(张家国等, 2015; 2018; 黄小彦等, 2020),本文将围绕这三类天气类型开展边界层中尺度天气系统活动规律研究。有关长江中游梅雨期低涡切变背景下梅雨锋暴雨典型个例研究相对较多。高坤和徐亚梅(2001)对1999年6月下旬暴雨过程研究指出,影响长江中下游梅雨锋暴雨的中尺度扰动多是西南涡前因局地热力、动力原因在边界层新生的中尺度涡旋,而西南涡一般很少移出四川盆地。董佩明和赵思雄(2004)对该过程研究发现,五个中尺度低压按其特征可归纳为两种类型:第一类中尺度低压往往表现为由长江中上游快速移动到

下游地区,并可能在长江中下游显著发展;第二类则是在长江中游地区局地新生的梅雨锋中尺度扰动。王智等(2003)研究发现,在东移的 α 中尺度低涡的东南部边界层激发出一个 β 中尺度涡旋,该 β 中尺度涡旋与一强暴雨区相伴移动。廖移山等(2011)分析发现西南涡前边界层中尺度涡旋的发展对2011年7月22日襄樊特大暴雨过程发生有重要作用。张家国等(2013)、吴涛等(2017)个例分析认为,湖北省江汉平原特大暴雨与西南涡前武陵山东部的江汉平原新生涡旋有密切关系。孙淑清和杜长萱(1996)特别指出,低涡背景下局地新生的中尺度涡旋是梅雨锋上重要的中尺度扰动系统,而西南涡本身很少移出。张敬萍等(2015)的研究揭示了局地中尺度涡旋多发于武陵山东部长江中游的地理分布特征。另外,还有许多有关中尺度涡旋及中尺度低压形成发展机理的研究(Ninomiya and Muraki, 1986; 施曙和赵思雄, 1994; 翟国庆等, 2003; 董佩明和赵思雄, 2004),得到十分有意义的结果,但对局地中尺度涡旋易在武陵山东侧多发的诱因并不清楚。统计发现,湖北省极端暴雨中锋面气旋类型背景占有较大比例(张家国等, 2018),但是锋面气旋背景下暴雨过程中尺度系统分析研究较少。张家国等(2013)分析表明在锋面气旋背景下鄂东地区极端暴雨的形成与锋面辐合线、暖区中尺度辐合线和暖区特定地形影响下雷暴出流边界的结合是导致中尺度辐合增强的原因。1998年7月21—22日长江中游连续2天出现了特大暴雨,程麟生和冯伍虎(2003)、贝耐芳等(2003)从不同角度进行了分析研究,这类暴雨梅雨锋结构显著特征是中低层锋区前倾、天气尺度垂直运动弱,本文称之为弱强迫梅雨锋暖区类极端暴雨。少数典型个例研究表明,湖北省弱强迫梅雨锋暖区极端暴雨与锋前暖区白天条件不稳定发展、夜间湖南东部北上的超低空急流的加强以及大别山脉对雷暴冷池影响有密切关系(张家国等, 2015; 黄小彦等, 2020)。这类暴雨发生于中低层锋区前倾阶段,数值模式预报效果较差,是当前天气预报业务难点。

上述研究加深了人们对长江中游梅雨锋暴雨中尺度天气系统机理认识,对暴雨预警预报业务有重要的指导作用。但是其中许多研究还是基于典型个例,缺乏系统性、规律性的总结。而相同天气背景下中尺度天气系统的形成和发展是否有共同规律?这既是科学问题,也是预警预报开展中尺度机理分析及数值模式预报订正的基础。本文在详细分析39

例梅雨锋极端暴雨过程边界层中尺度天气系统热力、动力演变过程基础上,系统性地研究了长江中游梅雨期三类天气背景下中尺度天气系统发生发展的规律、可能机制及地形作用,研究归纳出各类天气背景下极端暴雨边界层中尺度天气系统发展模型。

2 资料和研究方法

Maddox et al(1979)认为致洪降水一般为6 h雨量 >100 mm,少数 >250 mm,山区一般为50~100 mm,俞小鼎(2013)定义极端短时强降水为1 h雨量 ≥ 50 mm或3 h雨量 ≥ 100 mm的降水事件。本文将湖北省77个国家常规观测站1960—2005年逐日降水资料按升序排列,将第99个百分位值的45年平均值定义为该站点的极端暴雨阈值,然后取77个国家常规站点阈值的平均值,得到湖北省平均日极端暴雨阈值为93 mm。郑永光等(2017)认为降水强度越强的天气系统时空尺度越小,对于累积时间短的极端强降水研究,必须使用更加稠密的区域自动站降水观测资料。因此,本文选取2008—2016年梅雨期湖北省区域自动站逐小时降水资料,将满足3 h雨量 ≥ 100 mm、且出现相邻2个站点以上条件的过程,定义为一个极端暴雨过程。经过筛查,共有39次强降水过程满足极端暴雨条件。

本文利用常规观测、地面自动站和NCEP再分析场资料,结合长江中游新一代天气雷达拼图和气象卫星等资料,首先分析每次过程的环流背景和主要影响天气系统,对每次过程基于具体影响天气系统三维结构特征进行归类;其次,分析相同天气类型下每次极端暴雨过程边界层中尺度天气系统的动力、热力过程以及系统发展与中尺度对流系统加强原因;最后,建立三种不同天气类型下具有规律性的极端暴雨边界层中尺度天气系统发展模型。

3 长江中游梅雨锋极端暴雨天气类型、地形及常见的中尺度气流

天气尺度系统对中尺度环流的起源和发展起到控制作用(Bosart, 1984),长江中游梅雨锋极端暴雨的天气系统主要有锋面气旋类、低涡切变类和弱强迫梅雨锋暖区类(图1)(张家国等, 2018; 2015; 黄小彦等, 2020),分析每次天气过程的环流背景,39例极端暴雨过程的天气类型结果见表1。

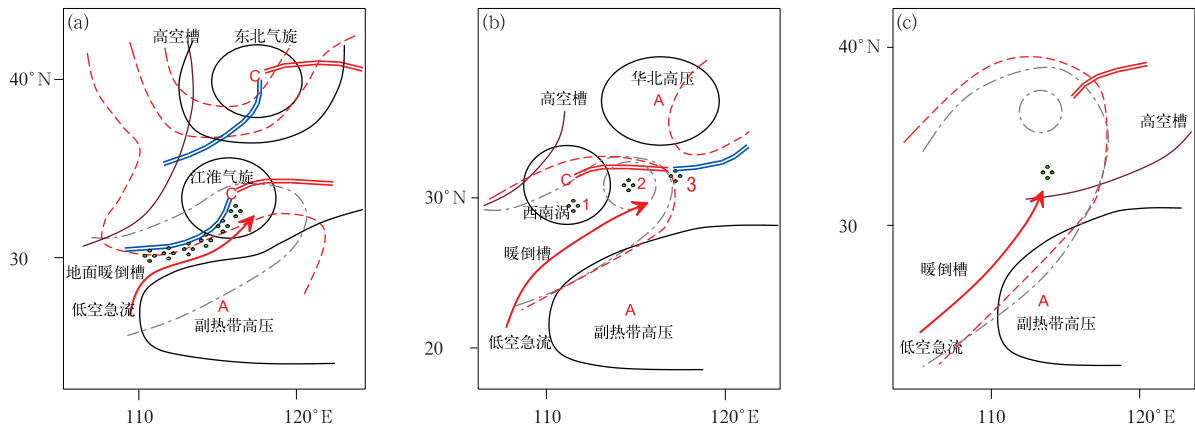


图 1 长江中游梅雨锋极端暴雨天气类型

(a)锋面气旋,(b)低涡切变,(c)弱强迫梅雨锋暖区

(图 1a 和 1b 出自张家国等,2018;红色虚线为 850 hPa 等温线,黑色实线为 500 hPa 等位势高度线,

棕色实线为 500 hPa 高空槽,红色加粗箭头为低空西南急流,灰色点划线为地面暖倒槽,

红色实线为 850 hPa 暖切,蓝色实线为 850 hPa 冷切,4 个圆点表示极端降水落区;

字母 C 表示气旋,字母 A 表示高压,数字 1,2,3 为暴雨落区编号)

Fig. 1 Extreme rainstorm weather types in Meiyu front over the middle reaches of Yangtze River

(a) frontal cyclone, (b) low vortex shear, (c) warm sector of the weakly forced Meiyu front

(red dashed line; isotherm at 850 hPa, black solid line; geopotential height at 500 hPa,

brown solid line; trough at 500 hPa, red bold arrow line; low-level southwest jet, gray dash-dotted

line; ground warm inverted trough, red and blue solid lines; warm and cold shear lines at 850 hPa,

four dots; extreme precipitation areas; C: cyclone, A: anticyclone;

numbers 1, 2, 3: numbers of extreme precipitation areas; Figs. 1a,1b from Zhang et al, 2018)

表 1 长江中游梅雨期极端暴雨天气类型统计

Table 1 Statistical table of extreme rainstorm weather types in

Meiyu period over the middle reaches of Yangtze River

天气类型	个例数	占比/%	平均极端站数	平均最大 3 h 降雨量/mm
锋面气旋类	18	46	11	149.3
低涡切变类	13	33	9	135.9
弱强迫梅雨锋暖区类	8	21	17	175.2

张家国等(2018)对锋面气旋类和低涡切变类极端暴雨开展了详细分析。从表 1 可以看到,锋面气旋类极端暴雨占有较大比率(图 1a),其特点是冷锋南下冷空气侵入长江中游地面暖倒槽,在江淮地区有弱的气旋发展,江淮气旋与稳定的副热带高压系统共同作用,导致极端暴雨产生。低涡切变类也是长江中游梅雨期重要的极端暴雨天气型(图 1b),其主要天气系统的特征是,四川盆地西南涡发展,长江中下游维持一条东西向的梅雨锋切变线,其南部为稳定的副热带高压系统,极端暴雨的产生是梅雨锋西侧西南涡扰动发展引起的。弱强迫梅雨锋暖区类极端暴雨(图 1c)的天气系统主要由中低层前倾的梅雨锋、低空急流和副热带高压等构成,该背景下天气尺度强迫较弱,在数值预报中常常会漏报,极端暴雨一般发生于低层锋区南侧暖湿条件不稳定区域,

并伴有雷暴大风天气。特别强调的是,虽然三种天气类型具有相对的独立性,但是有时在一次天气过程中可能有两种天气类型先后出现。

地形在边界层中尺度天气系统形成发展中起到重要作用(廖移山等,2011;孙继松等,2012;张家国等,2013;2015;吴涛等,2017;王珏等,2019)。如图 2 所示,长江中游湘鄂两省为马蹄形地形。受地形和地理位置的影响,湖北省境内边界层存在几支常见中尺度气流,分别为 4 支冷气流(蓝色箭头)和 3 支暖气流(红色箭头),这几支气流分别出现在不同的天气系统背景下,从而形成不同位置和不同强度的中尺度辐合系统。在后文中将会提到,这些中尺度辐合系统会触发热力对流,也可能与其他系统相遇而加强,在中尺度对流系统发生发展的过程中发挥了重要作用。

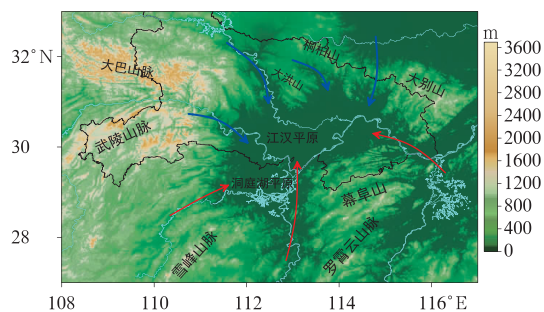


图 2 长江中游马蹄形地形及常见中尺度气流
(黑色实线为湖北省界,灰色实线为长江及其支流,
蓝色箭头表示地面冷气流,红色箭头表示
地面暖气流,填色为海拔高度;下同)

Fig. 2 Special topography (horse's hoof) and
common mesoscale airflow in the middle
reaches of Yangtze River

(black solid line: Hubei Province, grey solid line:
the Yangtze River and its tributaries, blue and
red arrows: cold and warm surface airflows,
colored: altitude; the same below)

4 三种天气类型下极端暴雨中尺度天气系统发展模型

4.1 锋面气旋类边界层中尺度天气系统

研究表明,边界层中尺度辐合线相交、汇合,或当中尺度辐合系统移入一个有利区域时,辐合就会加强(俞小鼎等,2012)。从锋面气旋背景下边界层中尺度天气系统形成发展共同特点看,首先,梅雨期偏南暖湿季风气流推进到长江中游,有利于鄂东低层暖倒槽内中尺度气流、局地中尺度辐合系统的形成,局地中尺度辐合系统一般位于幕阜山北部;之后,当锋面天气系统发展东移南下影响时,冷空气沿汉江河谷侵入到江汉平原暖倒槽内,与暖区中尺度辐合系统结合,边界层中尺度天气系统得到强烈发展并移动缓慢,由此导致极端暴雨产生。统计表明,18例锋面气旋类天气背景下的极端暴雨个例有12例具有这种相同的规律(其余6例出现在鄂西山地)。

锋面气旋背景下,边界层中尺度天气系统发展分为以下三种类型(图3)。这三种边界层中尺度类型是相对独立的,均可导致极端暴雨的产生,但有时在同一次天气过程中可先后出现几种中尺度天气类型。第一种类型是人字形辐合线Ⅰ型:冷空气沿汉

江河谷南下侵入江汉平原季风倒槽内,冷性辐合线与暖倒槽内幕阜山北部局地中尺度辐合线结合形成人字形辐合系统,中尺度对流系统(MCS)在交汇处发展最为强烈且缓慢移动(图3a)。第二种类型是中尺度气旋波型:在人字形辐合线Ⅰ型基础上,由于西南暖湿气流强盛,人字形辐合线Ⅰ型易演变成中尺度气旋波型(图3b);若大别山西侧有雷暴冷流出流入中尺度气旋波中,则会进一步增强低层辐合,MCS常具有涡旋结构、线对流列车效应、移动缓慢等特征,极易导致极端暴雨发生。第三种类型是人字形辐合线Ⅱ型:冷空气沿汉江河谷南下,冷性辐合线向东南方向移动,同时,暖倒槽内幕阜山北部局地中尺度辐合线触发午后对流系统,在其东移过程中,受大别山阻挡,雷暴冷池逆流导致MCS向西南上风方传播,此时冷池前方出流边界与东移的冷性辐合线交汇,导致中尺度系统辐合加强(图3c),因MCS合并加强及产生后向传播而导致极端暴雨产生。

2011年6月9日夜间鄂东南出现了区域性暴雨、局地特大暴雨过程,暴雨导致通城县山洪暴发。这次过程是在锋面气旋影响下、由人字形辐合线Ⅱ型中尺度天气系统产生的极端暴雨过程。早在暴雨形成2天前季风暖湿气流已经到达长江中下游地区,9日08时(北京时,下同)江淮地区有暖倒槽发展,随着500 hPa高原短波槽东移、低层弱冷空气南下,20时江淮地区有一个弱锋面气旋生成(图略)。由雷达回波和地面观测资料(图4)看出,9日12时由鄂东暖区中尺度辐合线触发的分散性雷暴移至大别山附近,而后进一步加强成西北—东南向组织化的线状对流系统,伴随一个弱的雷暴冷池出现,在其西侧地面有一中尺度辐合系统存在;同时,鄂西北有一条与冷锋位置走向一致的东北—西南向回波带,该回波带沿汉江河谷向东南方向移动。到14时,受地形阻挡,大别山附近对流系统雷暴冷流出向西南方向扩展加强,雷达观测到一些分散性单体沿流出边界排列;此时与冷锋辐合线伴随的线对流系统沿汉江河谷继续南下,与暖区西移的雷暴流出边界呈汇合之势。到18时,两辐合线交汇成人字形辐合线Ⅱ型,温度场分布有 Ω 型特征,雷达观测到两个雷暴系统交汇发展成人字形对流回波结构。之后该强对流回波系统缓慢东移,导致鄂东出现极端暴雨天气。

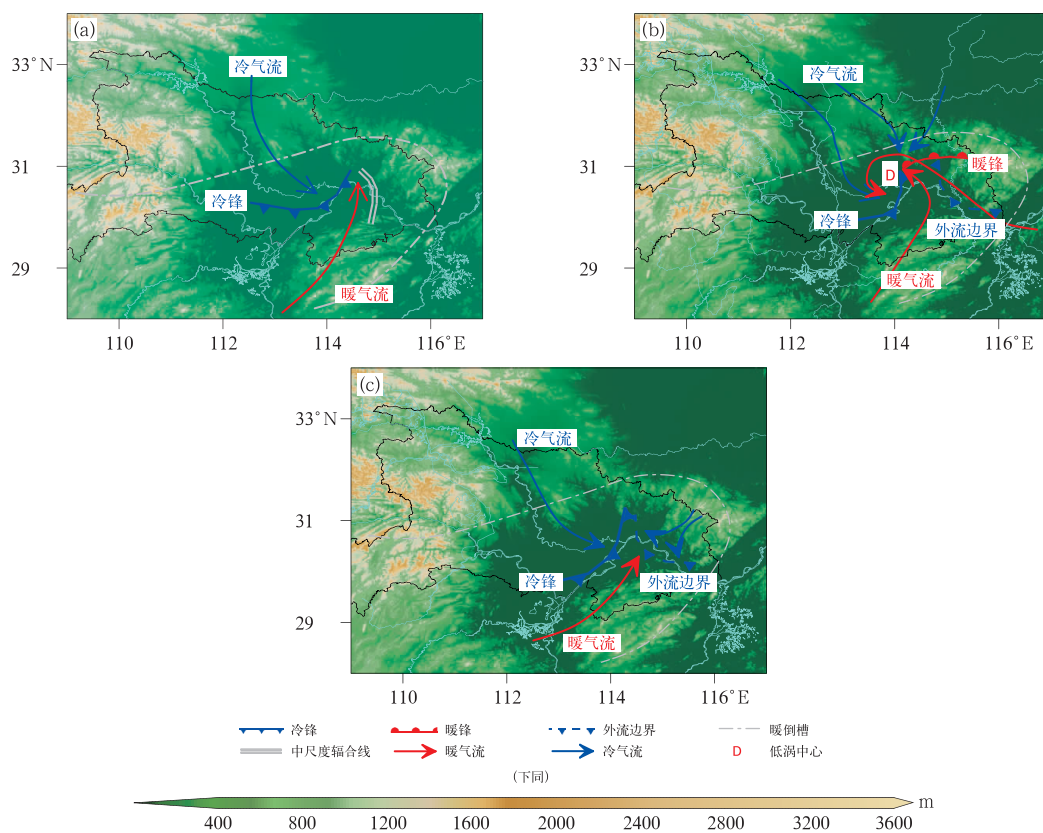


图 3 锋面气旋类边界层三种中尺度天气系统发展模型

(a)人字形辐合线 I 型,(b)中尺度气旋波型,(c)人字形辐合线 II 型

Fig. 3 Three development patterns of mesoscale weather system in the boundary layer related to frontal cyclone weather type

(a) herringbone convergence line I , (b) mesoscale cyclonic wave, (c) herringbone convergence line II

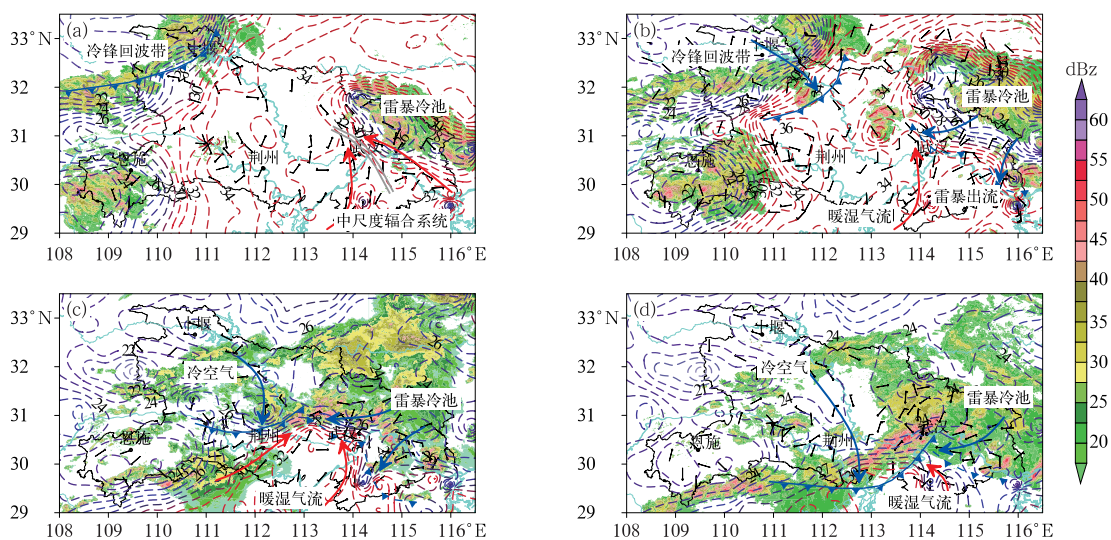


图 4 2011 年 6 月 9 日(a)12 时,(b)14 时,(c)18 时,(d)20 时地面风场(风羽)、温度场(虚线,单位: °C)和雷达组合反射率(填色)

Fig. 4 Surface wind field (barb), temperature field (dashed line, unit: °C) and composite radar reflectivity (colored) at

(a) 12:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 18:00 BT, (d) 20:00 BT 9 June 2011

4.2 低涡切变类边界层中尺度天气系统

分析 13 个低涡切变类极端暴雨过程的边界层中尺度天气系统,发现低涡切变类极端暴雨边界层中尺度天气系统主要是武陵山脉东部江汉-洞庭湖平原局地新生的中尺度涡旋(共 11 例)。下面介绍该局地中尺度涡旋的结构特征和成因,并归纳出其发生发展的概念模型。

利用 NCEP 再分析资料,分析局地中尺度涡旋

的发生发展过程及其结构特征发现,局地中尺度涡旋源地主要集中于江汉-洞庭湖平原地区(图 5),这与张敬萍等(2015)的统计结果基本一致;因局地冷空气侵入涡旋具有 β 中尺度冷暖锋结构,斜压性特征明显(表 2);边界层辐合及斜压性发展与两个局地冷源的形成有关,一个是在武陵山区西南涡降水形成的冷源,另一个是在江汉平原北部梅雨锋切变线降水形成的冷源。

表 2 江汉-洞庭湖平原局地中尺度涡旋基本特征

Table 2 The characteristics of local mesoscale vortex in Jiangnan-Dongting Lake Plain

过程时间/年月日	位置	环流厚度/hPa	水平尺度/km	地面系统	斜压性/hPa	西南涡冷源	切变线冷源
20080710	石首	地面~700	250	涡旋	无	有	有
20080722	襄阳	地面~700	250	辐合线	地面~850	有	有
20090629	洞庭湖	925~850	250	涡旋	地面~850	有	有
20100705	五峰	925~700	200	涡旋	925~700	有	有
20100711	常德	925~850	200	辐合线	925~850	有	有
20110618	荆州	地面~700	250	涡旋	地面~700	有	有
20130606	松滋	地面~700	200	涡旋	地面~700	有	有
20130624	黄冈	地面~925	150	涡旋	地面~925	有	有
20130717	十堰	无	150	辐合线	地面~700	无	无
20140717	石门	无	150	辐合线	无	无	无
20150723	洞庭湖	地面~700	250	涡旋	地面~700	有	有

低涡切变背景下边界层内局地中尺度涡旋发展的概念模型归纳如下(图 6)。该涡旋辐合发展涉及边界层三支重要的气流:一是涡旋东南部由罗霄山脉西侧北上的偏南超低空急流;二是涡旋西侧由武陵山区向东南的偏西冷气流,这支局地冷气流与西南涡的加强和武陵山脉地形抬升作用有关(西南涡在四川盆地加强,涡前西南暖湿气流在武陵山脉地形抬升作用下,常有较大范围强降水在山区形成;强降水导致武陵山区局地冷空气堆积,而后冷空气沿武陵山南坡、东坡到达江汉-洞庭湖平原地区);三是

梅雨锋切变线附近降水发展产生的偏北冷气流,西南涡发展期间,西南暖湿气流加强,梅雨锋切变线附近因辐合增强导致锋面降水发展和局地冷空气形成。在长江中游马蹄形地形作用下,三支气流在江汉-洞庭湖平原形成强烈辐合,导致中尺度涡旋强烈

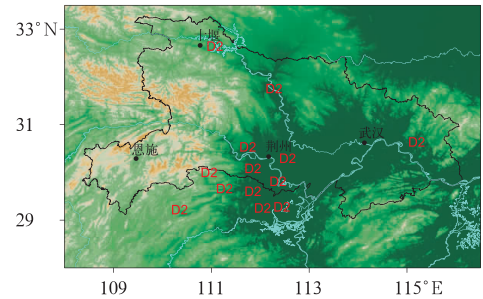


图 5 局地中尺度涡旋(D2)初始位置分布
Fig. 5 Initial location of the local mesoscale vortex (D2)

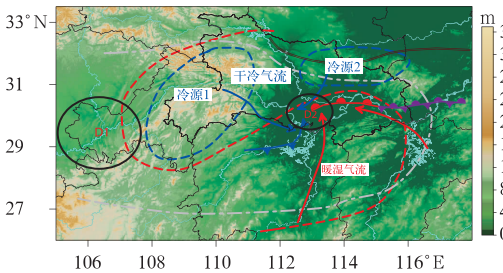


图 6 低涡切变类局地中尺度涡旋形成发展模型

(D1:西南涡,D2:局地中尺度涡旋,蓝色虚线圈:冷空气源,棕色实线:850 hPa 梅雨锋切变线;下同)

Fig. 6 The formation and development model of local mesoscale vortex related to low vortex shear weather type
(D1: southwest vortex, D2: local mesoscale vortex, blue dashed circle: cold air source, brown solid line: shear line in 850 hPa on Mei-yu front; the same below)

发展。同时,由于边界层局地冷空气的参与,涡旋常具有斜压性冷暖锋结构特征。雷达观测发现,在局地中尺度涡旋强烈发展阶段,涡旋中心附近 MCS 常具有气旋式螺旋对流雨带被大范围层状云包围的结构特征,对流单体群的涡旋性列车效应极易产生极端暴雨;在斜压发展阶段涡旋东北侧暖切变附近线对流列车效应也极易产生极端暴雨。

2013 年 6 月 6 日长江中游特大暴雨过程就是一个受江汉平原局地中尺度涡旋影响产生极端暴雨的典型例子。暴雨前长江中下游中低层受梅雨锋暖切变线控制,四川盆地有低涡发展,天气背景是典型

的低涡切变类型(图略)。

分析 NCEP 再分析资料可以看到局地中尺度涡旋系统的演变过程(图 7)。6 日 08 时四川盆地有一深厚的西南涡,东部长江中游有暖切变发展,925 hPa 上仅在江汉平原有一个弱的涡旋环流存在,说明局地中尺度涡旋开始发展;到 14 时,925 hPa 涡旋环流加强并伸展到 850 hPa,此时局地中尺度涡旋形成,尺度约为 200 km,而西南涡环流开始减弱。到 20 时,局地中尺度涡旋东移,尺度变大,强度进一步增强,后侧的西南涡环流则基本消失(图略)。分析温度场的分布、演变发现,6 日 08—14 时,925 hPa 和

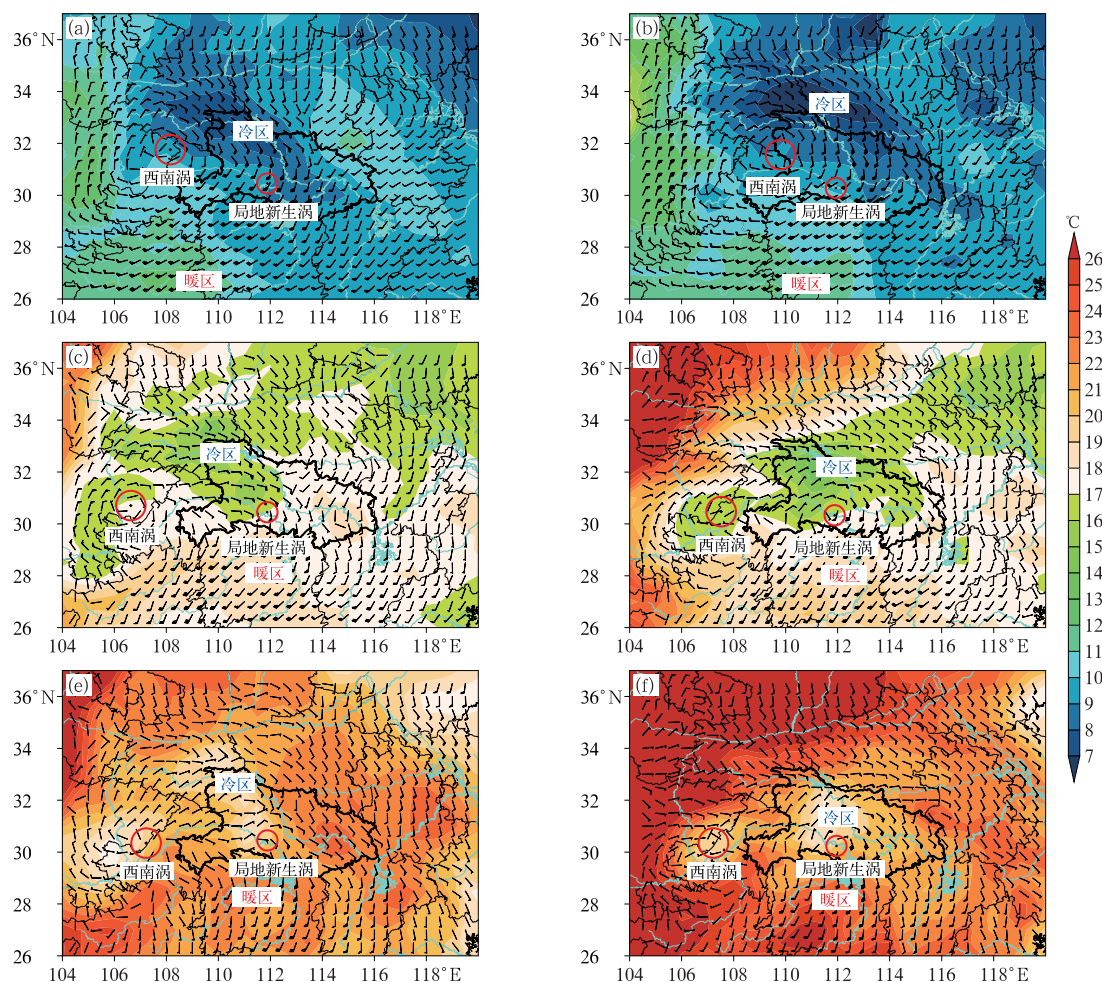


图 7 2013 年 6 月 6 日(a,c,e)08 时,(b,d,f)14 时暴雨过程中尺度涡旋演变

(a,b)700 hPa,(c,d)850 hPa,(e,f)925 hPa

(填色:温度,风矢:水平风场,红色圆圈:涡旋中心)

Fig. 7 Evolution of mesoscale vortex at (a, c, e) 08:00 BT and (b, d, f) 14:00 BT 6 June 2013

(a, b) 700 hPa, (c, d) 850 hPa, (e, f) 925 hPa

(colored: temperature, wind barb: horizontal wind, red circle: vortex center)

850 hPa 在鄂西武陵山地区(西南涡东北方)有局地冷空气形成并向东扩展,暖切变北部也有冷区发展,这些局地冷空气的发展与西南涡前鄂西武陵山地形抬升下降水的形成、以及西南气流加强暖切变附近降水发展有关。局地冷空气的形成一是有利于武陵山东侧江汉平原多支气流的辐合加强,二是局地冷空气与江汉平原的暖湿舌之间构成强的温度锋区,有利于局地中尺度涡旋斜压性发展。

综合分析地面自动站和雷达观测资料(图 8)发现,伴随西南涡的发展,江汉平原近地面有一个局地中尺度涡旋发展的过程。多支冷暖气流交汇导致涡旋发展的过程十分清晰,涡旋的位置也与 NCEP 再分析场上十分吻合,局地涡旋发展东移期间,江汉平原有涡旋状结构的强回波系统逐渐形成,其与地面中尺度涡旋相伴随。需强调的是,与一般非暴雨涡旋回波不同的是,该涡旋状结构回波内为对流螺旋雨带、外有大片层状云降水包裹,这可能是暴雨涡旋回波典型特征(吴涛等,2018)。17 时后,涡旋结构回波东移,给东部广大地区带来了持续性暴雨。

4.3 弱强迫梅雨锋暖区类边界层中尺度天气系统

分析 8 次弱强迫梅雨锋暖区极端暴雨过程的环境物理条件发现,高 CAPE、弱垂直切变、上干(500 hPa 以上)下湿的环境特征明显(图略)。在锋区附近弱的天气尺度垂直运动环境下,中低层水汽垂直输送差可能是形成上干下湿环境的重要原因。

分析典型过程 MCS 动态路径图(图 9)可见,初始 MCS 常形成于鄂东幕阜山北部的平原地区,多是由暖区局地中尺度辐合线触发生成,MCS 形成后向下风方移动,在到达大别山西侧后折返向上风方移动。极端暴雨、MCS 活动地域性特征明显,多出现在大别山西侧,这与其他作者的分析结果一致(张家国等,2015;王珏等,2019)。

图 10 是由 8 次过程概括的弱强迫梅雨锋暖区极端暴雨边界层中尺度天气系统发展模型。边界层中尺度天气系统的发展加强,是夜间超低空急流与 MCS 在大别山西侧形成的稳定维持的雷暴冷池逆流之间强烈辐合的结果。一般地,受暖区局地中尺度辐合线影响,午后在鄂东有局地雷暴发展,向大别山方向移动过程中逐渐发展成组织化的中尺度对流系统。由于大气环境状态具有一定的上干下湿、高 CAPE 等有利因素,雷暴发展旺盛,会产生适度的下沉气流,当雷暴系统受到大别山阻挡时,雷暴冷池在迎风侧积聚形成冷池逆流,并与环境场的西南风形成强烈辐合,导致在 MCS 上风方触发新的雷暴,即 MCS 后向传播,而后列车效应产生持续性强降水。

2016 年 6 月 19 日鄂东北特大暴雨发生的天气背景属于典型的弱强迫梅雨锋暖区类。暴雨发生前 500 hPa 鄂东地区仅残余一浅槽,850 hPa 暖切变线位于其北部的江淮地区,鄂东处于低层西南暖湿气流前; θ_{se} 垂直剖面上锋面前倾结构明显,特大暴雨出现在梅雨锋南侧不稳定能量大值区域(图略)。图 11

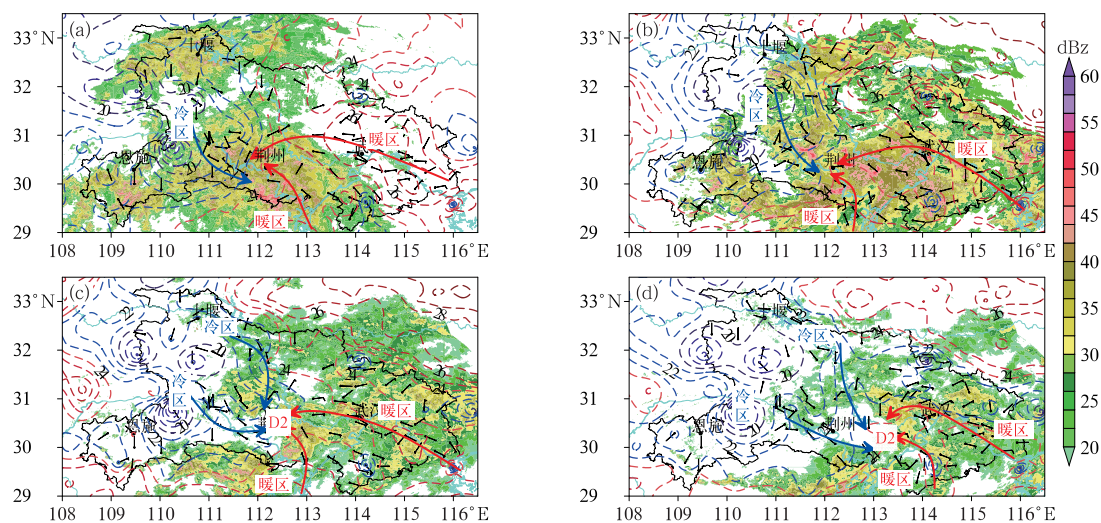


图 8 2013 年 6 月 6 日(a)08 时,(b)14 时,(c)17 时,(d)20 时地面风场(风羽)、温度场(虚线,单位:℃)和雷达组合反射率(填色)

Fig. 8 Surface wind field (barb), temperature field (dashed line, unit: °C) and composite radar reflectivity (colored) at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 17:00 BT, (d) 20:00 BT 6 June 2013

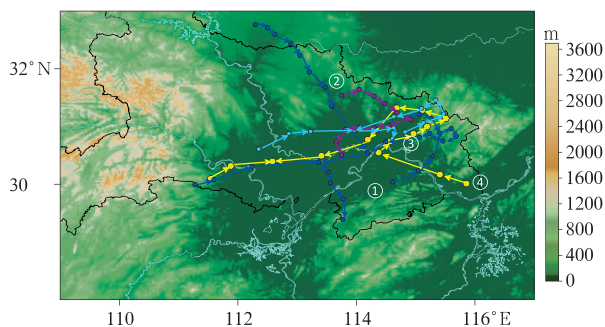


图 9 弱强迫梅雨锋暖区极端暴雨
典型个例的 MCS 移动路径

(①2010 年 7 月 8 日, ②2012 年 7 月 12 日,
③2012 年 7 月 13 日, ④2016 年 6 月 19 日)

Fig. 9 Moving routes of MCS in typical extreme
rainstorm cases in the warm sector of the weakly
forced Meiyu front weather type

(① 8 July 2010, ② 12 July 2012,
③ 13 July 2012, ④ 19 June 2016)

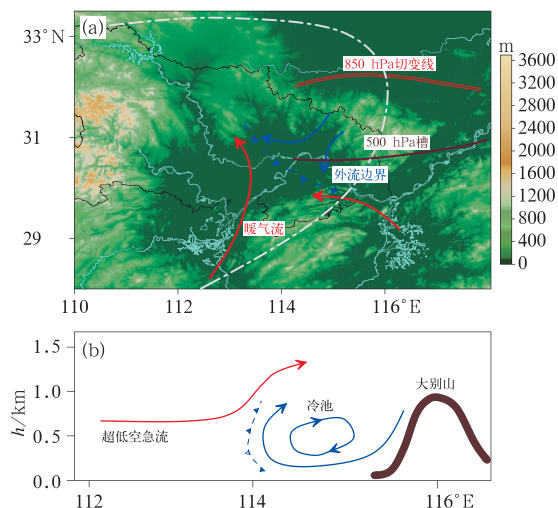


图 10 弱强迫梅雨锋暖区类中尺度
天气系统发展模型
(a)平面模型, (b)剖面模型

Fig. 10 Models of mesoscale weather system
in the warm sector of weakly forced
Meiyu front weather type
(a) planar model, (b) profile model

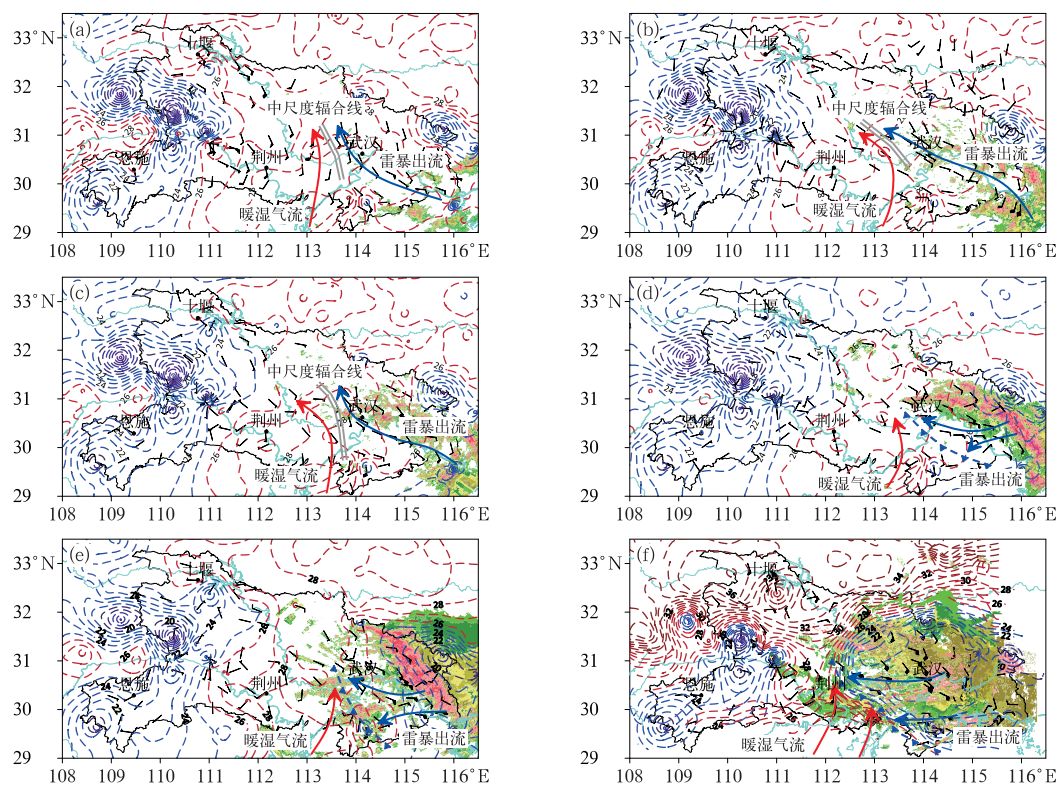


图 11 2016 年 6 月 (a) 18 日 23 时, (b) 19 日 01 时, (c) 19 日 02 时, (d) 19 日 04 时,
(e) 19 日 08 时, (f) 19 日 14 时地面风场 (风羽)、温度场 (虚线, 单位: °C) 和雷达组合反射率 (填色)

Fig. 11 Surface wind field (barb), temperature field (dashed, unit: °C) and composite radar
reflectivity (colored) from at (a) 23:00 BT 18, (b) 01:00 BT 19, (c) 02:00 BT 19,
(d) 04:00 BT 19, (e) 08:00 BT 19, (f) 14:00 BT 19 June 2016

是暴雨期间地面中尺度天气系统、MCS 雷达回波演变的过程。从雷达回波演变看,自18日23时九江附近 MCS 减弱开始,鄂东 MCS 经历了23时至19日02时向西传播(图11a~11c)、19日02—04时折向东北移动(图11c,11d)、04—08时准静止(图11d,11e)、08—14时再后向传播四个阶段(图11e,11f)。分析地面自动站风场发现,MCS 向西传播主要是九江附近 MCS 的雷暴出流沿长江向西北推进引起的,19日02时雷暴出流与幕阜山西侧北上的偏南暖湿气流在武汉西部交汇,中尺度辐合线特征明显,新的 MCS 位于辐合线东侧(图11c),02—04时 MCS 向东北方向移动并逐渐发展成密实的西北—东南向线对流系统,而辐合线少动(图11d),鄂东北开始出现短时强降水。分析 NCEP 再分析资料、多普勒雷达径向风场和地形特征发现,这一演变过程与夜间超低空急流沿浅薄冷垫爬升和大别山地形抬升发展有关(图10b);04—08时 MCS 在大别山西侧停滞近3h,导致极端暴雨;08时后雷暴出流在大别山阻挡下向西逆流,出流边界位于武汉西侧,触发新生单体,MCS 后向传播特征明显(图11e,11f),列车效应在鄂东北产生较大范围的极端暴雨。

5 结 论

本文系统地分析了39例长江中游梅雨锋极端暴雨过程边界层中尺度天气系统发生发展的动力热力特征,研究归纳出三类不同天气背景下梅雨锋极端暴雨边界层中尺度天气系统的发展模型。

锋面气旋类背景下,当季风暖湿气流向北推进到长江中游后,该地区大气低层常有暖低压倒槽建立和局地中尺度辐合线形成;当江淮气旋发展东移带动冷空气南下并侵入暖倒槽后,冷性辐合线与暖区局地中尺度辐合线结合,边界层中尺度辐合得到加强,导致 MCS 强烈发展,MCS 的合并加强及后向传播导致极端暴雨产生。

低涡切变类背景下,随着西南涡发展,涡前西南暖湿气流加强,武陵山区二级地形抬升及梅雨锋锋生作用导致武陵山区、梅雨锋附近降水加强形成局地冷空气,冷空气向东、向南扩展,在马蹄形地形作用下,与东部平原地区西南暖湿气流汇合导致局地

中尺度涡旋强烈发展。武陵山二级地形对西南涡前西南暖湿气流的抬升作用导致该区域降水得到发展是其东部局地中尺度涡旋发展的主要诱因。该涡旋是尺度约为150~300 km 的中尺度斜压性涡旋,因地域性特征明显,以后可称为江汉平原涡。涡旋中心附近 MCS 常具有气旋式螺旋对流雨带被大范围层状云包围的结构特征,对流单体群的涡旋性列车效应极易产生极端暴雨。

弱强迫梅雨锋暖区类背景下,极端暴雨发生在梅雨锋中层锋区附近和低层锋区南侧的暖湿区域,边界层中尺度天气系统的形成和发展,与夜间罗霄山脉西侧北上加强的超低空急流和大别山西侧稳定维持的雷暴冷池逆流之间辐合的强烈发展有密切关系。MCS 在大别山西侧的停滞、后向传播以及合并加强是极端暴雨易出现在大别山西侧的重要原因。

参考文献

- 贝耐芳,赵思雄,高守亭,2003. 1998年“二度梅”期间武汉-黄石突发性暴雨的模拟研究[J]. 大气科学,27(3):399-418. Bei N F, Zhao S X, Gao S T, 2003. A numerical simulation of sudden heavy rainfall occurred in Wuhan and Huangshi during July of 1998[J]. Chinese J Atmos Sci, 27(3):399-418(in Chinese).
- 程麟生,冯伍虎,2003. “98.7”暴雨 β 中尺度低涡生成发展结构演变:双向四重嵌套网格模拟[J]. 气象学报,61(4):385-395. Cheng L S, Feng W H, 2003. Structural evolution of the genesis and development on meso- β vortex for the “98.7” heavy rainfall: simulation of two ways with quartet nested grid[J]. Acta Meteor Sin, 61(4):385-395(in Chinese).
- 丁一汇,1976. 梅雨期的环流结构[J]. 气象,2(5):14-16. Ding Y H, 1976. Circulation structure in Meiyu period[J]. Meteor Mon, 2(5):14-16(in Chinese).
- 董佩明,赵思雄,2004. 引发梅雨锋暴雨的频发型中尺度低压(扰动)的诊断研究[J]. 大气科学,28(6):876-891. Dong P M, Zhao S X, 2004. A diagnostic study of mesoscale lows (disturbances) on Meiyu front and associated heavy rainfall[J]. Chinese J Atmos Sci, 28(6):876-891(in Chinese).
- 高坤,徐亚梅,2001. 1999年6月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究[J]. 大气科学,25(6):740-756. Gao K, Xu Y M, 2001. A simulation study of structure of mesovortexes along Meiyu front during 22-30 June 1999[J]. Chinese J Atmos Sci, 25(6):740-756(in Chinese).
- 黄小彦,孙继松,刘文婷,2020. 地形作用下低空急流的演变与强降水对流风暴系统的相互作用[J]. 气象学报,78(4):551-567. Huang X Y, Sun J S, Liu W T, 2020. The interaction between low-level jet evolution and severe convective rainstorms under topographic effect[J]. Acta Meteor Sin, 78(4):551-567(in Chi-

- nese).
- 廖移山,冯新,石燕,等,2011. 2008年“7.22”襄樊特大暴雨的天气学机理分析及地形的影响[J]. 气象学报, 69(6): 945-955. Liao Y S, Feng X, Shi Y, et al, 2011. Analysis of the mechanism for “2008. 7. 22” excessive rain event in Xiangfan with a focus on the terrain effect[J]. Acta Meteor Sin, 69(6): 945-955 (in Chinese).
- 施曙,赵思雄,1994. 梅雨锋上与强暴雨有关的中低压及其三维环境流场的诊断研究[J]. 大气科学, 18(4): 476-484. Shi S, Zhao S X, 1994. A diagnostic study of mesoscale on Meiyu (Baiu) front associated with heavy rainfall[J]. Sci Atmos Sin, 18(4): 476-484 (in Chinese).
- 孙继松,何娜,王国荣,等,2012. “7.21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J]. 暴雨灾害, 31(3): 218-225. Sun J S, He N, Wang G R, et al, 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolution and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012[J]. Torr Rain Dis, 31(3): 218-225 (in Chinese).
- 孙建华,卫捷,傅慎明,等,2018. 江淮流域持续性强降水过程的多尺度物理模型[J]. 大气科学, 42(4): 741-754. Sun J H, Wei J, Fu S M, et al, 2018. The multi-scale physical model for persistent heavy rainfall events in the Yangtze-Huaihe River Valley[J]. Chinese J Atmos Sci, 42(4): 741-754 (in Chinese).
- 孙建华,张小玲,齐琳琳,等,2004. 2002年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究[J]. 大气科学, 28(5): 675-691. Sun J H, Zhang X L, Qi L L, et al, 2004. A study of vortex and its mesoscale convective system during China heavy rainfall experiment and study in 2002[J]. Chinese J Atmos Sci, 28(5): 675-691 (in Chinese).
- 孙淑清,杜长萱,1996. 梅雨锋的维持与其上扰动的发展特征[J]. 应用气象学报, 7(2): 153-159. Sun S Q, Du C X, 1996. The maintenance of Mei-yu front and development associated disturbance [J]. Quart J Appl Meteor, 7(2): 153-159 (in Chinese).
- 陶诗言,1980. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社. Tao S Y, 1980. Heavy Rain in China[M]. Beijing: Science Press (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).
- 王晓芳,崔春光,2012. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征[J]. 气象学报, 70(5): 909-923. Wang X F, Cui C G, 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part I: organization mode features [J]. Acta Meteor Sin, 70(5): 909-923 (in Chinese).
- 王智,翟国庆,高坤,2003. 长江中游一次 β 中尺度低涡的数值模拟 [J]. 气象学报, 61(1): 66-77. Wang Z, Zhai G Q, Gao K, 2003. Analysis and numerical simulation of a meso- β -scale vortex in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Acta Meteor Sin, 61(1): 66-77 (in Chinese).
- 吴涛,牛奔,许冠宇,等,2018. 利用天气雷达平均散度产品分析短时强降水大气低层辐合特征[J]. 暴雨灾害, 37(4): 319-329. Wu T, Niu B, Xu G Y, et al, 2018. Analyzing the low level atmospheric convergence characteristics in the short-time heavy precipitation using average divergence products retrieved from weather radar[J]. Torr Rain Dis, 37(4): 319-329 (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).
- 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).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展 [J]. 气象学报, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3): 311-337 (in Chinese).
- 翟国庆,王智,何斌,2003. 长江中下游梅雨期中小尺度涡旋族发生演变分析[J]. 气象学报, 61(6): 661-672. Zhai G Q, Wang Z, He B, 2003. Formation and evolution analysis of the mesoscale vortex group in the middle and lower reaches during Meiyu of the Yangtze River[J]. Acta Meteor Sin, 61(6): 661-672 (in Chinese).
- 张家国,黄小彦,周金莲,等,2013. 一次梅雨锋上中尺度气旋波引发的特大暴雨过程分析[J]. 气象学报, 71(2): 228-238. Zhang J G, Huang X Y, Zhou J L, et al, 2013. Analysis of an excessive rainstorm event initiated by a mesoscale cyclonic wave along the Meiyu front[J]. Acta Meteor Sin, 71(2): 228-238 (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,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).
- 张敬萍,傅慎明,孙建华,等,2015. 夏季长江流域两类中尺度涡旋的统计与合成研究[J]. 气候与环境研究, 20(3): 319-336. Zhang J P, Fu S M, Sun J H, et al, 2015. A statistical and compositional study on the two types of mesoscale vortices over the Yangtze River Basin[J]. Climatic Environ Res, 20(3): 319-336 (in Chinese).

- 张小玲,陶诗言,张顺利,2004. 梅雨锋上的三类暴雨[J]. 大气科学, 28(2):187-205. Zhang X L, Tao S Y, Zhang S L, 2004. Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front[J]. Chinese J Atmos Sci, 28(2):187-205(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).
- Bosart L F, 1984. The Texas coastal rainstorm of 17–21 September 1979: an example of synoptic mesoscale interaction[J]. Mon Wea Rev, 112(6):1108-1133.
- Luo Y L, Zhang R H, Wan Q L, et al, 2017. The southern China monsoon rainfall experiment (SCMREX)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(5):999-1013.
- 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.
- Ninomiya K, Muraki H, 1986. Large-scale circulations over East Asia during Baiu period of 1979[J]. J Meteor Soc Japan, 64(3):409-429.
- Ninomiya K, Enomoto T, Nishimura T, et al, 2003. Synoptic- and meso- α -scale variations of the Baiu front simulated in an AGCM[J]. J Meteor Soc Japan, 81(6):1387-1405.

(本文责编:俞卫平)