

长江中游两次 MCC 过程环境流场及物理条件分析

韦惠红 徐双柱 郭英莲 王艳杰 刘希文

(武汉中心气象台, 武汉 430074)

摘要 利用常规气象资料、GFS $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 再分析资料以及云图资料,分析了 2007 年长江中游 2 例中尺度对流复合体(MCC)的大尺度环境场和物理量特征。结果表明:①MCC 是低槽云系尾部由几个 β 、 α 中尺度云团合并增强结果,合并是其形成最重要的一个因子;②MCC 发生在有利的天气形势背景下,中层有短波槽、低层有冷暖切变线和范围宽广的西南急流带,强盛西南急流给暴雨区提供充足的动力、水汽、不稳定条件。西南暖湿气流维持、边界层暖切变线形成且稳定少动对 MCC 形成起关键作用,在低层冷切尾部和暖切顶部,干冷与暖湿空气交汇出现锋生导致上升运动加强,激发不稳定能量释放,MCC 在此处形成。能量锋生与高空急流右后侧辐散气流耦合可能是导致 MCC 发展主要动力强迫机制;③MCC 环境流场表现为对流层上部为反气旋性辐散环流,中层和低层均为气旋性辐合环流,从低层到中层正涡度柱连成一片,形成深厚垂直正涡度柱,中低层深厚辐合为 MCC 维持提供了有利动力条件。

关键词 长江中游 中尺度对流复合体(MCC) 能量锋 涡度柱

引言

暴雨及其造成的洪涝是我国主要的自然灾害之一,中尺度对流系统是暴雨的直接制造者,致洪暴雨往往由中尺度对流系统持续影响所致。中尺度对流复合体(MCC)是造成大范围暴雨、强对流天气的重要中尺度天气系统,与一般中尺度系统相比,其生命周期较长,面积要大得多。自 Maddox^[1]发现 MCC 以来,对其发生发展的大尺度天气条件已有很多研究。Maddox^[2]指出,MCC 是在弱的地面锋面附近有明显的南风低空急流输送暖湿空气的区域生成,往往与对流层中层向东移动的短波槽相联系,该短波槽东南方相当大的区域中大气呈条件性不稳定状态,主要的强迫因子是对流层低层的暖湿气流,高层则位于西风急流的反气旋一侧。此后,我国气象工作者对 MCC 形成机制和物理背景进行了较多研究。覃丹宇等^[3]对 MCC 和一般暴雨云团发生发展的物理条件差异进行个例分析指出,MCC 发生在较弱的斜压环境,对流层低层有明显的天气系统(如切变线、中尺度低涡),高层出现在反气旋环流里。井喜

等^[4]分析淮河流域一次 MCC 环境流场及动力场表明,对流层中层来自北方的干侵入对 MCC 生成发展起重要作用。吕艳彬等^[5]研究华北平原 MCC 发生环境条件指出,华北产生 MCC 的环境背景及物理条件与我国南方及北美类似,多发生在对称不稳定的高温高湿大气中。MCC 作为暴雨过程中比较特殊的系统,尺度较大,持续时间长,能产生较大范围暴雨,常造成一些地区出现致洪暴雨事件^[6-12]。本文选取长江中游 2007 年 2 例有相似降水特点的 MCC 过程,采用天气学诊断方法,对 MCC 发生的大尺度环流场和物理量场进行诊断分析;通过比较 2 例 MCC 的发生发展条件,以期更好地揭示其形成机制和特点,加强对长江中游地区 MCC 发生发展规律研究,为 MCC 暴雨业务预报提供有价值的参考依据。

1 资料说明

本文分析采用的资料主要包括:常规气象观测资料和全国一般站逐日降水资料,每 6 h 一次 NCEP $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ GFS 再分析资料,FY-2C 云图资

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206003)、中国气象局项目“卫星资料在暴雨监测和预报中的应用子系统适应性改造”资助

作者简介:韦惠红,女,1978 年生,高级工程师,主要从事天气预报技术与方法研究,Email:whh1978@163.com

收稿日期:2012 年 8 月 2 日;定稿日期:2013 年 5 月 13 日

料。选取满足以下条件的暴雨云团为 MCC^[6-8]：
① $T_{BB} \leq -32^\circ\text{C}$ 的冷云盖面积在 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上；
② $T_{BB} \leq -52^\circ\text{C}$ 的冷云盖面积在 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上；
③ 满足条件①和条件②的时间达到 6 h 以上；
④ $T_{BB} \leq -52^\circ\text{C}$ 面积达最大时云团的偏心率大于等于 0.7。

文中选取出现在长江中游 2007 年 5 月 30—31 日（以下称个例 I）和 2007 年 7 月 1—2 日 MCC（以下称个例 II）暴雨过程为研究对象，在同时满足上述条件①和②的情况下，个例 I 中 MCC 生命史为 10 h，个例 II 中 MCC 生命史长达 11 h。

2 暴雨过程概述

2007 年 5 月 30—31 日和 7 月 1—2 日，长江中

下游受低槽云系及低槽云系尾部 MCC 影响，在湖北省中东部地区、河南南部出现了暴雨到大暴雨天气过程（图 1）。两次过程暴雨走向略有区别，个例 I 呈南北走向，个例 II 呈西南—东北走向；大暴雨主要集中在江汉平原北部到鄂东北地区，雨带较为相似，在河南南部出现小范围大暴雨区，但是范围较小，个例 II 在河南南部出现降水中心达 253 mm，只有一个站达到了大暴雨量级，局地性较强。

个例 I 和个例 II 在湖北省暴雨和大暴雨相似性较高，暴雨主要集中在江汉平原、鄂东北、鄂南北部地区，大暴雨在江汉平原北部和鄂东北地区；其不同点是，个例 I 24 h 累积最大降水达 150 mm，个例 II 达 124 mm，个例 I 在 24 h 累积降水比个例 II 强度大。

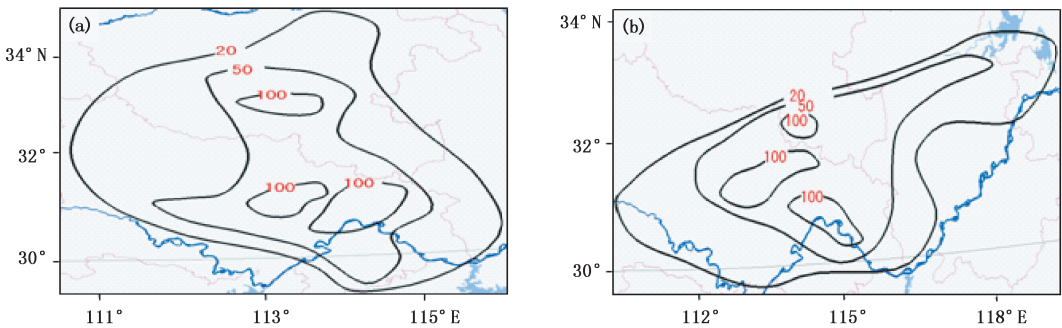


图 1 两次过程 24 h 降水量分布：(a) 5 月 30 日 08:00 至 31 日 08:00，(b) 7 月 1 日 08:00 至 2 日 08:00（单位：mm）

3 MCC 演变特征与大尺度环流背景分析

3.1 卫星云图演变特征

从 FY-2C 红外亮温图上分析造成两次暴雨过程的 MCC 发展和演变方式。个例 I 中，2007 年 5 月 30 日 16:00（图略），中纬度地区 113°E 附近存在南北向低槽云系，随着低槽云系东移，其尾部 β 、 α 中尺度云团出现合并，合并使得云团快速发展，冷云区面积扩大，20:00（图 2a，彩页），在 114°E 、 32°N 附近，河南南部与鄂东北交界处 MCC 开始形成。随着西侧 β 云团东移与 MCC 合并，MCC 面积不断扩大，并略有南压，31 日 00:00， $T_{BB} \leq -53^\circ\text{C}$ 冷云区面积达 $11 \times 10^4 \text{ km}^2$ ， $T_{BB} \leq -63^\circ\text{C}$ 冷云区变得狭长，呈准东西带状，北边界出现“V”形缺口，强降水主要发生在“V”形缺口附近的红安、安陆境内，安陆站 31 日 01:00 1 h 降水达 52.2 mm。31 日 02:00（图 2b，彩页），MCC 位置几乎不变， $T_{BB} \leq -53^\circ\text{C}$ 冷

云区面积增大，“V”形缺口向南发展， $T_{BB} \leq -63^\circ\text{C}$ 冷云区出现分裂，后部的云团增强，前部的云团迅速减弱消亡。05:00（图 2c，彩页），MCC 几乎发展成圆形，偏心率 ≥ 0.7 ， $T_{BB} \leq -53^\circ\text{C}$ 冷云区面积达到 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。07:00，云团不再具有 MCC 特征，强降水随之结束。

个例 II 中，2007 年 7 月 1 日 14:00（图略），从东海到淮河流域有东西向低槽云系，低槽云系尾部 α 中尺度云团出现向后发展，同时从湖南西北部有小尺度云团向江汉平原移动并急剧增强。17:00（图 3a，彩页），低槽云系尾部和江汉平原北部 α 云团在鄂东北上空合并发展，18:00 MCC 形成，MCC 开始呈东西向长条形，随后偏心率逐渐增大。20:00（图 3b，彩页），MCC 在鄂东北快速发展， $T_{BB} \leq -53^\circ\text{C}$ 冷云区面积达到 $15 \times 10^4 \text{ km}^2$ ， $T_{BB} \leq -83^\circ\text{C}$ 冷云区面积达到 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。22:00（图 3c，彩页）， $T_{BB} \leq -63^\circ\text{C}$ 冷云区几乎呈圆形，偏心率达到最大，此时强降水出现在 T_{BB}

$\leq -85^{\circ}\text{C}$ 冷云区内部,随 MCC 东移,强降水中心随之东移并略有南压。2 日 00:00, $T_{\text{BB}} \leq -85^{\circ}\text{C}$ 冷云区面积开始迅速缩小, MCC 进入减弱消亡阶段; 02:00, $T_{\text{BB}} \leq -53^{\circ}\text{C}$ 冷云区面积小于 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 云区不再具有 MCC 特征,强降水也随之结束。

对比分析两次 MCC 发展演变和形态特征,相同点是 MCC 都是在低槽云系尾部由几个中尺度云团发展、合并形成的,其不同点是, MCC 演变和中心强度有较大差别,个例 I 经历了一次分裂再发展的过程;个例 II $T_{\text{BB}} \leq -53^{\circ}\text{C}$ 冷云区面积比个例 I 要大的多,且出现较大范围 $T_{\text{BB}} \leq -85^{\circ}\text{C}$ 冷云区,但是个例 II 24 h 累积降水比个例 I 要弱,说明云顶亮温与降水不是简单的线性关系。

在水汽云图上(图略),个例 I 中,在 MCC 发展过程中,在陕西和河南附近出现南北向干裂缝(即干空气区),干裂缝向南缓慢移动,31 日 05:00,干裂缝南部到达 MCC 北边界,说明有干冷空气缓慢入侵;例 II 中,在 MCC 持续期间,在 MCC 北侧有大片干区维持,没有干冷空气缓慢渗透情况,两次过程干空气的影响方式完全不同。

3.2 大尺度环流背景

个例 I, 5 月 30 日 08:00(图略), 200 hPa 等压面上, $10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 地区为南亚高压控制, 35°N 附近存在西风急流带(大于等于 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 500 hPa 河套中部有短波槽,副热带高压控制广东地区,华中位于高压环流外围西南气流中, 700 hPa 河套中部有南北向冷切变线发展, 850 hPa 四川东部有西南低涡,低涡东南侧有大于等于 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 西南急流带发展。20:00(图略), 南亚高压增强并略有北抬, 中纬度急流带变窄增强, 500 hPa 短波槽南压到河南中部,副热带高压外围西南风明显增大,武汉站风速由 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 700 hPa 南北向冷切变线从河套地区迅速东移到 103°E 附近, 850 hPa 西南涡东移到江汉平原北部,从低涡中心向北伸出南北向暖切变线,在暖式切变线右侧出现偏南急流带(大于等于 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。在卫星云图上, 14:30,在南北向低槽云系尾部(112.2°E , 33°N)有一中尺度云团新生发展,该云团东移过程中与后部中 β 云团合并迅速增强, 20:00 在鄂东北附近发展形成 MCC, MCC 在高空急流右后侧、700 hPa 冷切尾部、850 hPa 暖切变线顶部形成。31 日 02:00(图 4a), 500 hPa 短波槽迅速南压到暴雨区上空,槽后偏北气流引导低层

偏北风增强, 850 hPa 暖切变线转变成冷切变线,此时西南暖湿增强发展,形成从南海向华北发展的水汽、能量通道,在切变线两侧南北两支气流同时加强导致在河南形成中尺度低涡,该低涡环流发展导致低层辐合明显加强。MCC 在 500 hPa 槽线上、低层冷切尾部、偏南急流核左前侧发展增强。

个例 II, 7 月 1 日 08:00(图略), 200 hPa 中纬度地区出现不连续的急流带, 500 hPa 东北低槽槽线延伸至河南中部,副热带高压西脊点至 117°E , 长江中下游地区位于高压环流北部偏西气流上,低层从渤海到河南中部有西南—东北向冷切变线,切变线以南西南急流核达到 $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。14:00(图略), 受华南稳定副热带高压影响,低层切变线南压受阻,在其尾部(鄂东北附近)形成东西向冷切变线。卫星云图上,从 11:00 开始,在低槽云系尾部有中 β 云团向后发展加强。20:00(图 4b), 200 hPa 南亚高压向东、向北扩张,中纬度西风急流带风速增强,但较个例 I 明显偏弱,鄂东北位于东段急流带右后侧气流辐散区。500 hPa 华北低槽东移出海,在华北低槽和河套短波槽之间有弱脊发展,使得低层河南境内有高压环流发展,加上西南暖湿气流稳定维持,导致鄂东北东西向切变线维持和鄂西南暖切变线形成。16:00,在湖南西北部有中 β 云团沿暖切变线东移发展, 18:00 与低槽云系尾部云团在江汉平原北部合并形成 MCC, MCC 在低层冷切变线尾部与暖切变线顶部相交处形成并发展成熟。2 日 02:00, 河套低槽快速东移南压到湖北东部,低层冷切变位置几乎不变,暖切变风场辐合减弱,此时 MCC 演变成一般暴雨云团。

上述对两次过程环流背景进行了详细分析,对比两次过程,其相同点:低层范围宽广的西南暖湿急流带、稳定切变线是主要动力、热力、水汽来源, MCC 都出现在高空急流右后侧, 500 hPa 短波槽前部、低层冷切变线尾部和暖切变线顶部。这与 Maddox 指出的 MCC 与 500 hPa 短波槽相联系,主要强迫因子是低层暖湿气流相一致。

其不同点是:①两次过程高空急流强弱不同,个例 I 高空急流较强,导致高层抽吸作较强;②低层冷切变形成方式不同,个例 I 冷切变线是快速东移发展型,使得其后部偏北风东移南下影响,个例 II 是稳定维持型,其后部偏北风也是稳定维持。上述水汽云图分析中,两次过程干空气的影响方式完全不同,可能是低层冷切变线形成方式不同所致;③西南急

流和切变线走向不同,个例Ⅰ西南急流向华北发展,在南北向切变线底部,即暴雨区有偏北风和偏南风剧烈交汇,个例Ⅱ西南急流向长江下游发展,切变线呈东西向,河南高压和西南暖湿气流在 $31^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$

对峙,导致低层冷切变线稳定少动(超过了 12 h),但风场为偏北风和偏西风交汇,风向辐合没有个例Ⅰ明显。

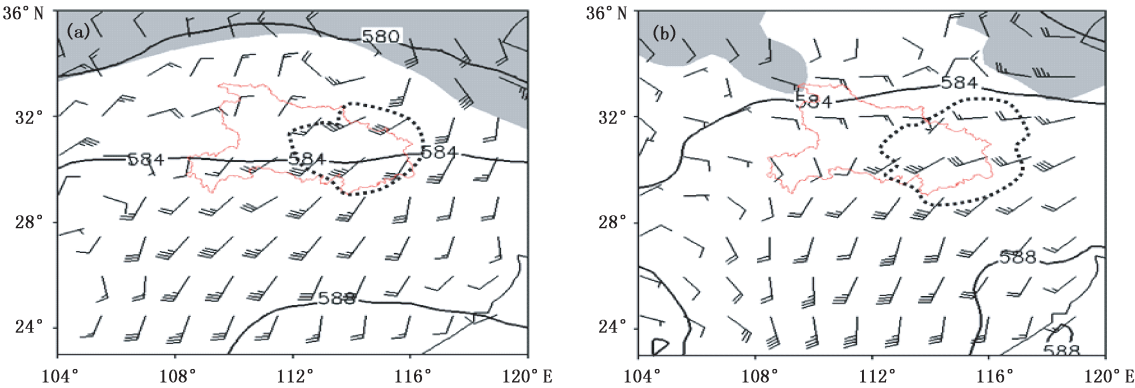


图 4 两次过程环流形势:(a)2007 年 5 月 31 日 02:00,(b)7 月 1 日 20:00
(阴影区为 200 hPa 全风速大于等于 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区;实线为 500 hPa 等高线(单位: dagpm);风矢为 850 hPa 风场;
粗虚线为成熟期 MCC- 53°C 廓线)

4 两次过程 MCC 形成物理条件比较

4.1 能量及不稳定条件差异

假相当位温(θ_{se})是表征大气温度、压力、湿度的综合特征量,其分布反映大气中能量的分布和潜在的不稳定,通常 850 hPa 取 $\theta_{se}=340\text{ K}$ 为高能暖湿气团和一般气团的分界线^[7]。

为了进一步分析干湿空气影响产生的不稳定情况,图 5(彩页)给出个例Ⅰ暴雨中心(114°E)和个例Ⅱ暴雨中心(114.5°E) θ_{se} 和风矢量经向垂直剖面。在 MCC 形成初期(图略),随着西南暖湿气流发展,个例Ⅰ和个例Ⅱ边界层能量迅速增大,高能区(大于等于 350 K)发展到暴雨中心北侧,MCC 在高温高湿区发展。31 日 02:00(图 5a),个例Ⅰ边界层偏南风转为偏北风引导弱冷空气南下,低能舌侵入到高能区内,低层假相当位温线变密集,低层出现能量锋生,干湿空气在 MCC 云罩北侧(32.5°N 附近)剧烈交汇,能量锋区从南向北倾斜,形成上湿下干配置,在暴雨区上空形成宽广的从近地面到 200 hPa 的一致上升气流,促使不稳定能量释放。个例Ⅱ中,1 日 14:00(图略),南北干湿空气在 32°N 附近对峙,垂直能量锋区从地面发展到 300 hPa,高能舌向高空发展,20:00(图 5b),700 hPa 附近有低能舌向南发展但无明显南压,说明北部增强干冷空气和南部暖

湿气流发生对峙,这与前面环境场分析中河南有高压环流发展相一致,导致中层假相当位温线变密集出现锋生,在暴雨区形成上干下湿配置,上升运动增强,但较个例Ⅰ弱。

从上述分析可知,受干冷和暖湿空气共同作用,两次过程在暴雨区上空都出现了能量锋生现象,由于干冷空气作用方式不同,个例Ⅰ能量锋生主要出现在低层,个例Ⅱ能量锋生出现在中层。两个过程干冷空气入侵高度不同,导致垂直高度上干湿配置和能量锋生高度不同并由此带来的影响需要做进一步分析。

4.2 水汽条件分析

对于持续时间长、雨强大的中尺度暴雨过程,水汽维持和补充至关重要,水汽通量散度大小反映水汽聚集情况。图 6 给出个例Ⅰ、Ⅱ在 MCC 持续期间 925 hPa 水汽通量散度分布。个例Ⅰ中,MCC 形成前 12 h(图略),从鄂西到河南西部有一条西南—东北向水汽辐合带稳定维持。31 日 02:00(图 6a),随着低层切变线东移和西南急流向北发展,水汽辐合带向东发展且辐合强度和范围增大,水汽辐合带控制江淮流域大部地区,在暴雨中心即鄂东北上空出现水汽辐合中心(小于等于 $-12\times 10^{-8}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$),强降水区水汽出现剧烈辐合,给暴雨发生提供充足的水汽条件。个例Ⅱ中,7 日 1 日 14:00

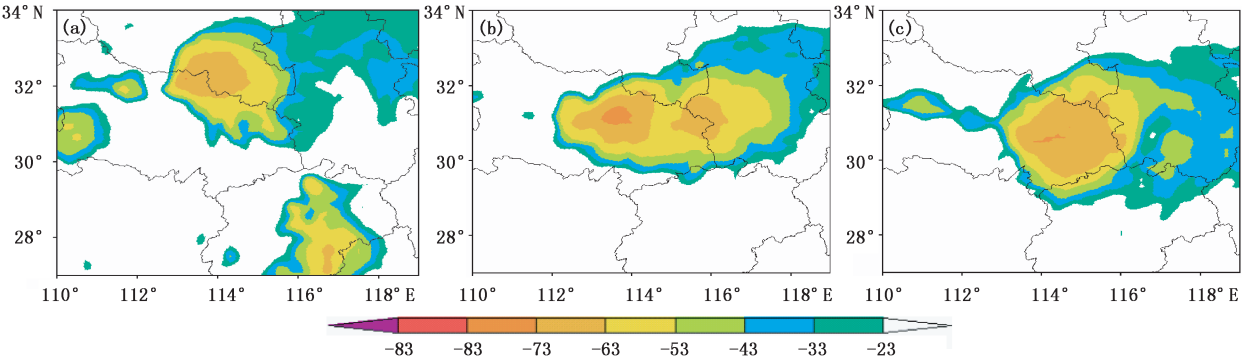


图 2 2007 年 5 月 30—31 日 FY-2C 红外亮温图:(a) 30 日 20:00,(b) 31 日 02:00,(c) 31 日 05:00 (单位: °C)

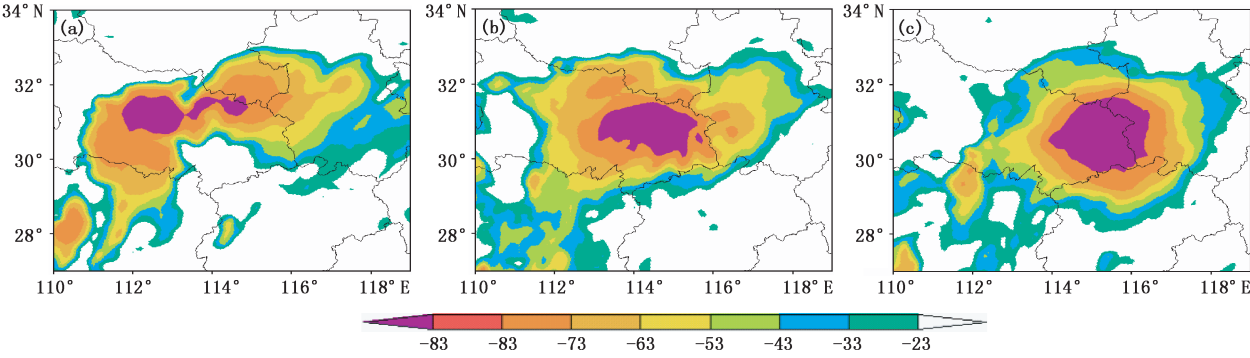


图 3 2007 年 7 月 1 日 FY-2C 红外亮温图:(a) 1 日 17:00,(b) 1 日 20:00,(c) 1 日 22:00(单位: °C)

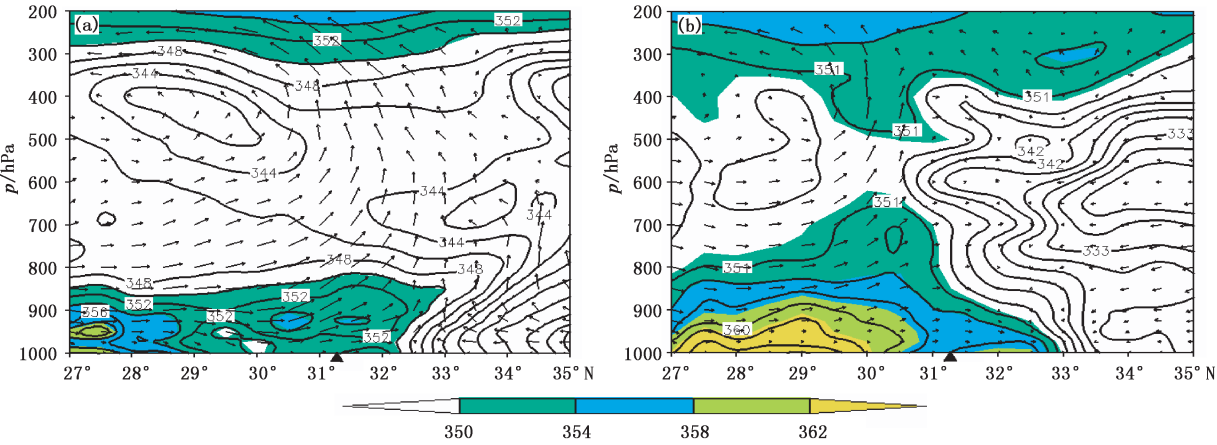


图 5 沿暴雨中心假相当位温和风矢量经向剖面图:(a) 2007 年 5 月 31 日 02:00,(b) 7 月 1 日 20:00
(▲为暴雨中心,阴影区为 $\theta_{se} \geq 350$ K)

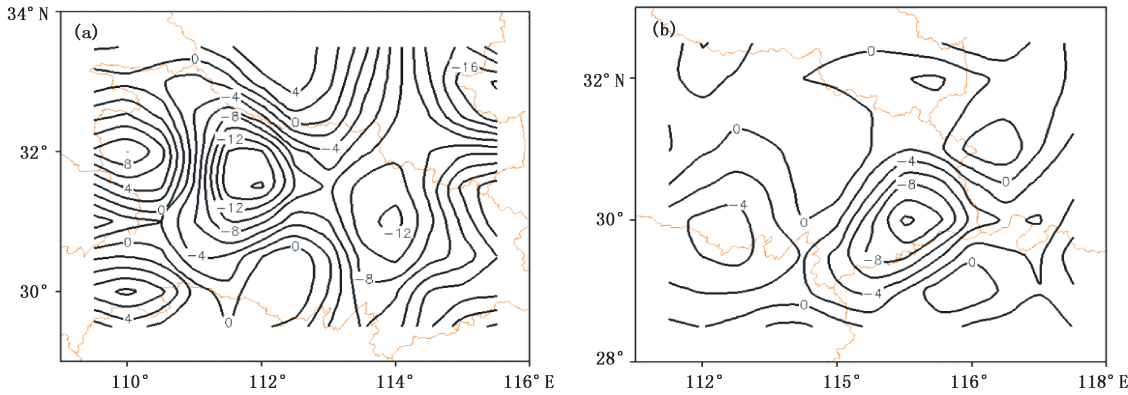


图 6 两次过程 925 hPa 水汽通量散度分布(单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$):
(a) 2007 年 5 月 31 日 02:00, (b) 7 月 1 日 20:00

(图略),湖北省中北部地区有东西向水汽辐合带;20:00(图 6b),水汽辐合带略有南压,在鄂东南出现水汽辐合中心(小于等于 $-10 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),水汽辐合中心位于暴雨中心东南侧,水汽辐合条件较个例 I 差。从上述对环境场分析可知,个例 I 在暴雨区为偏北风和偏南风交汇,风向辐合较个例 II 明显,这可能是导致个例 I 水汽辐合较强的原因。

此外分析两次过程中低层湿度条件表明(图略),在 MCC 形成前 12 h,从低层到 500 hPa 华南到暴雨区均为高湿度区($(t-t_d) \leq 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$),说明在个例 I、个例 II MCC 形成过程中,在其南侧存在大范围深厚高湿区,在有利的风场条件下,在暴雨区形成水汽辐合,给暴雨发生提供了充足的水汽条件。

4.3 动力抬升条件

低空急流是动量、热量和水汽的高度集中带,为暴雨发生提供水汽、动力和热力条件,对不稳定能量的积累、输送和释放起关键作用。分析 850 hPa 西南急流发展演变可知(图略),MCC 形成前,两例均表现为 MCC 南侧有南北两个西南急流带(大于等于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),随着 MCC 发展,两个急流带合并加强,形成从南海发展的远距离暖湿气流输送带。个例 I 中,西南急流从华南向华东发展,急流输送带较为集中,MCC 发生在风速大于等于 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 西南急流核左前侧 50 km 范围内;个例 II 中,西南急流从华南向长江中下游发展,急流带范围宽广,MCC 发生在风速大于等于 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 西南急流核左前侧

100 km 范围内,急流出口区左侧强气旋性切变有利于暴雨区辐合上升运动发展。

分析涡度场和散度场分布,可进一步了解 MCC 发生时动力环境场特征。图 7 为 MCC 持续期间沿个例 I 暴雨中心(114°E)和个例 II 暴雨中心(114.5°E)经向涡度垂直剖面。个例 I 中,5 月 30 日 20:00(图略),低层有一条从暴雨中心向北倾斜发展的正涡度带,正涡度带向上发展到 600 hPa,高层有大片辐散区;31 日 02:00(图 7a),正涡度带向上发展,在 300 hPa 以下形成深厚垂直正涡度柱,中层 500~600 hPa 之间出现正涡度中心(大于等于 $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$),高层负涡度增强。个例 II 与个例 I 类似,到 1 日 20:00(图 7b),低层正涡度区向中层发展,在 600 hPa 附近出现正涡度中心(大于等于 $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$),高层负涡度中心增强。用类似方法作个例 I 和个例 II 的散度垂直剖面(图略),均表现为低层为辐合中心、高层为辐散中心,同时中层出现弱辐合现象。上述分析表明,个例 I、II 在 MCC 发生区域,近地面为气旋性辐合环流,中层也为气旋性辐合环流使 MCC 维持,高层则为反气旋辐散环流;从低层到中层均为正涡度,形成深厚垂直正涡度柱,低层和中层分别出现正涡度中心。个例 I 与个例 II 相比,中低层正涡度值较大,正涡度柱发展高度较高,导致上升气流较个例 II 明显;从图上还可发现,个例 I 暴雨中心位于正涡度中心南侧,个例 II 暴雨中心位于正涡度中心上,上述两点区别可能与西南急流和切变线走向不同有关。

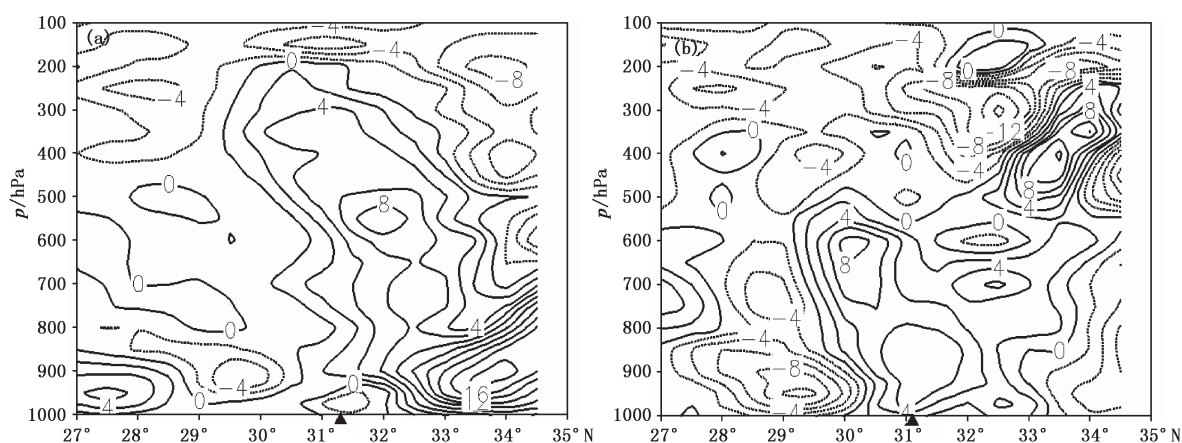


图 7 沿暴雨中心的涡度(单位: 10^{-5} s^{-1}) 经向剖面图: (a) 2007 年 5 月 31 日 02:00, (b) 7 月 1 日 20:00
(▲所示为暴雨中心)

5 结论

通过对长江中游 2 例 MCC 过程卫星云图演变特征、大尺度环境场和物理量诊断的综合分析, 得出以下结论:

(1) MCC 是在低槽云系尾部由几个 β 、 α 中尺度云团传播、合并的结果, 合并是其发展最重要因子, 在鄂东持续时间均超过了 8 h, 位置少动略有东移。

(2) MCC 发生在有利的天气形势背景下, 中层有短波槽、低层有冷暖切变线和范围宽广的西南急流带, 稳定西南急流带给暴雨区提供充足的动力、水汽、不稳定条件。在低层冷切尾部和暖切顶部, 干冷与暖湿空气交汇出现锋生导致上升运动加强, 激发不稳定能量释放, MCC 在此处形成。

(3) 受干冷和暖湿空气共同作用, 两次过程在暴雨区上空都出现了能量锋生现象, 由于干冷空气作用方式不同, 个例 I 能量锋生主要出现在低层, 个例 II 能量锋生主要出现在中层。能量锋生与高空急流右后侧辐散气流耦合可能是导致 MCC 发展主要动力强迫机制。

(4) MCC 发生区域, 低层和中层为气旋性辐合环流使 MCC 维持, 高层则为反气旋辐散环流, 从低层到中层正涡度柱连成一片, 形成深厚垂直正涡度柱, 低层和中层分别出现正涡度中心, 中低层深厚辐合为 MCC 维持提供了有利动力条件。

(5) 两次 MCC 过程在高空急流、冷暖切变线的走向和形成方式、西南急流走向等不同, 并由此带来

的水汽辐合程度、冷空气作用方式、不稳定能量和涡度发展有所区别, 可能是导致两次 MCC 在发展演变和由此带来的降水强度、分布差异的主要原因。

参考文献

- [1] Moddax R A. Mesoscale convective complexes [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1980, 61: 1374-1387.
- [2] Maddox R A. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude mesoscale convective complexes [J]. Mon Wea Rev, 1983, 111: 1475-1493.
- [3] 覃丹宇, 江吉喜, 方宗义, 等. MCC 和一般暴雨云团发生发展的物理条件差异 [J]. 应用气象学报, 2004, 15 (5): 590-600.
- [4] 井喜, 井宇, 李明娟, 等. 淮河流域一次 MCC 的环境流场及动力分析 [J]. 高原气象, 2008, 27(2): 349-357.
- [5] 吕艳彬, 郑永光, 李亚萍, 等. 华北平原中尺度对流复合体发生的环境和条件 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(4): 406-412.
- [6] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2003: 121.
- [7] 张文建, 许建民, 方宗义, 等. 暴雨系统的卫星遥感理论和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2004: 272-275.
- [8] 方宗义, 覃丹宇. 暴雨云团的卫星监测和研究进展 [J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 583-593.
- [9] 陈秋萍, 陈齐川, 刘锦绣, 等. 应用卫星、雷达资料的强对流天气预报预警系统 [J]. 气象科技, 2011, 39(5): 545-551.
- [10] 陶祖钰, 黄伟, 顾雷. 常规资料揭示的中尺度对流复合体的环流结构 [J]. 热带气象学报, 1996, 12(4): 372-379.
- [11] 何禀文, 葛文忠, 高玉春, 等. 湘西北地区一次局地特大暴雨分析 [J]. 气象科技, 2010, 38(2): 193-197.
- [12] 杨学斌, 湛芸, 代玉田. 山东一次区域性暴雨中尺度特征分析 [J]. 气象科技, 2012, 40(4): 627-634.

Analysis of Environmental and Synoptic Physical Conditions of Two MCC Processes over Middle Reaches of Yangtze River

Wei Huihong Xu Shuangzhu Guo Yinglian Wang Yanjie Liu Xiwen

(Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074)

Abstract: Based on the conventional data, GFS reanalysis data, and satellite images of FY-2C, two MCC processes in 2007 are analyzed, with emphasis on the environmental flow and synoptic physical conditions. The results demonstrate: several meso- β and meso- α scale cloud clusters intensified and merged, from which the MCCs formed; the MCCs developed in the favorable environmental field, with the trough in the middle layer, the warm-cold shear and the broad warm-wet airflow in the lower layer. The enhancement of the southwestward warm-wet airflow and the formation and maintenance of the warm-shear line in the lower layer were the key factors to MCC formation; the joint influencing of cold air and moist-warm flow led to energy frontogenesis. The coupling of frontogenesis in lower layer and its associated strong divergence in the right-rear of the high-level jet were the main dynamical mechanisms of MCC formation. There existed anticyclone divergence flow in the upper layer, and cyclone convergence flow in the middle-lower layer, and the vertical vorticity column supplied favorable dynamical mechanism in the rainstorm centre.

Key words: Yangtze River region, MCC, energy front, vorticity column