

侯淑梅,周成,韩永清,等.山东省线状中尺度对流系统与多单体风暴的合并特征[J].海洋气象学报,2020,40(1):57-65.  
HOU Shumei, ZHOU Cheng, HAN Yongqing, et al. Characteristics of merging between linear mesoscale convective system and multi-cell storm in Shandong[J].Journal of Marine Meteorology,2020,40(1):57-65. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.006.(in Chinese)

## 山东省线状中尺度对流系统与多单体风暴的合并特征

侯淑梅<sup>1</sup>,周成<sup>2</sup>,韩永清<sup>1</sup>,孙晶<sup>1</sup>

(1.山东省气象台,山东 济南 250031;2.德州市气象局,山东 德州 253000)

**摘要:**利用济南多普勒天气雷达产品和华北区域雷达拼图等资料,普查了2012—2016年影响山东的线状中尺度对流系统(linear mesoscale convective system,LMCS),分析了LMCS与多单体风暴的合并方式以及合并后的演变趋势等特征,得到如下几条结论:1)LMCS(A)与多单体风暴(B)有A追B,A扩展,A、B相向和B追A四种合并方式;2)LMCS与多单体风暴合并的临界距离为30 km;3)LMCS与多单体风暴合并后,强度增强或维持,尺度增大,生命史延长,长轴将可能转向;4)LMCS与多单体风暴合并时,其本身合并部分将减弱,多单体风暴合并进入LMCS,成为LMCS的一部分;5)合并是雷暴的传播运动造成的;6)63.3%的合并案例会产生雷暴大风、冰雹或强降水灾害,雷暴大风灾害出现的概率最大。

**关键词:**线状中尺度对流系统;多单体风暴;合并方式;合并临界距离;演变趋势;传播运动

**中图分类号:** P458.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)01-0057-09

**DOI:**10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.006

## Characteristics of merging between linear mesoscale convective system and multi-cell storm in Shandong

HOU Shumei<sup>1</sup>, ZHOU Cheng<sup>2</sup>, HAN Yongqing<sup>1</sup>, SUN Jing<sup>1</sup>

(1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 2. Dezhou Meteorological Bureau, Dezhou 253000, China)

**Abstract** Based on Jinan Doppler weather radar products and radar mosaics of North China, the linear mesoscale convective systems (LMCSs) that affected Shandong from 2012 to 2016 are generally surveyed, and the merging modes of LMCS and multi-cell storm and the evolution trend after merging are analyzed. The results are listed as follows. 1) There are 4 merging modes, A (LMCS) chasing B (multi-cell storm), A extending, A B facing, and B chasing A. 2) The distance threshold of merging between LMCS and multi-cell storm is 30 km. 3) After LMCS merges with multi-cell storm, the intensity increases or keeps, the spatial scale is enlarged, the lifespan is prolonged, and the long axis probably experiences a turn. 4) When LMCS merges with multi-cell storm, the merged part would be weakened, and the multi-cell storm merges into the LMCS, becoming part of the LMCS. 5) The merging results from the propagation of thunderstorms. 6) Thunderstorm gale, hail, or heavy rainfall occurs in 63.3% of the merging cases, and thunderstorm gale has the maximum probability of occurrence.

**Key words** linear mesoscale convective system (LMCS); multi-cell storm; merging mode; distance threshold of merging; evolution trend; propagation

收稿日期:2019-10-04; 修订日期:2019-11-07

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2016DM20);中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-041);山东省气象局科研项目(2016sdqxz01,2014sdqxm21)

作者简介:侯淑梅,女,正高级工程师,主要研究方向为灾害性天气预报及机理分析,shmh0808@163.com。

## 引言

静止气象卫星资料分析<sup>[1-2]</sup>显示,小尺度云团间的合并在中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)形成过程中起着重要的作用,东北地区的中尺度对流复合体是由零散分布的对流云团通过合并逐渐发展起来的<sup>[3]</sup>。付丹红和郭学良<sup>[4]</sup>研究发现,积云合并**在强 MCS 形成中有非常重要的作用,相邻孤立对流单体合并成为积云团,接着相邻积云团合并形成强 MCS,最后 MCS 内的强中心合并形成线状中尺度对流系统(linear mesoscale convective system, LMCS),强中心并合过程伴随着强降水、大风等剧烈天气的产生。**JIRAK et al.<sup>[5]</sup>利用雷达和卫星资料分析了3年 MCS 的统计特征,结果表明,71%的 MCS 在生成、发展阶段出现合并,合并系统比未合并系统能产生更严重的龙卷、冰雹、大风、降水量和人员伤亡。卓鸿等<sup>[6]</sup>对济南“7·18”大暴雨的研究表明,这次持续拉长状对流系统先后由10个对流单体复合而成,济南市强降水过程则是由合并后的对流单体内部的2个强度不同的上冲云顶合并成一个更强的上冲云顶造成的。

合并过程不仅促成 MCS 的生成,使得云体增强发展,而且为对流系统维持补充了能量,使系统生命史延长。对流云并合过程中,伴随着云(团)之间物质和能量交换,这种交换有利于云并合后先发展增强,再扩展层化。积层混合云系的发展维系过程就是对流云不断新生并合进入云系的过程,新生对流云系不断地为云系提供水分和能量,促使云系维持发展<sup>[7]</sup>。

LMCS 不仅在形成阶段与对流云合并密切相关,LMCS 形成后,仍然会发生与其他对流风暴合并的现象。康兆萍和林永辉<sup>[8]</sup>发现东侧对流回波与西侧的平行层状 MCS 合并后,形成了弓形回波,发展为典型的尾随层状云 MCS。风暴合并是形成弓形回波的一种常见方式<sup>[9]</sup>,在有利的环境条件下,准静止飑线与孤立超级单体合并后,会演变为弓形回波<sup>[10-11]</sup>。龙卷的发展和飑线与超级单体合并的时间接近<sup>[12-13]</sup>,风暴单体间的合并和相互作用可能对龙卷存在激发作用<sup>[14]</sup>。2005年7月12日,山东一个弓状回波在发展后期与一个孤立的超级单体风暴合并后形成新的弓形回波,产生了更加强烈的大风和灾害性冰雹<sup>[15]</sup>。2012年8月18日,飑线与多单体风暴合并后,在宁阳和章丘分别产生了 EF2 级和 EF0 级龙卷<sup>[16-17]</sup>。

虽然近几年已经有一些科研人员开始关注对流风暴之间的合并特征和机理<sup>[15-16,18-19]</sup>,但对于 LMCS 与多单体风暴的合并特征没有进行过系统的分析研究。近年来山东出现多次强的 LMCS, LMCS 在移动过程中不断发生与其他多单体风暴的合并,造成严重的灾害。2016年6月13日两条飑线先后进入山东,造成全省大范围的雷暴大风、冰雹和短时强降水<sup>[20]</sup>,汶上出现了12级( $33.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )的雷暴大风。无独有偶,2018年6月13日,一条飑线横扫山东,青岛出现12级( $34.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )雷暴大风。这两个个例均发生了飑线与多单体风暴合并导致强度增强的现象。本文通过普查近几年影响山东的 LMCS,分析 LMCS 与多单体风暴的合并特征,以期提高对 LMCS 与多单体风暴合并特征和演变趋势的认识,为短时临近预报预警提供科学参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

使用的资料主要有济南多普勒天气雷达产品、华北区域雷达拼图。统计时间为2012—2016年共5 a,每年4—10月。时间均为北京时间。

### 1.2 方法

统计表明,影响山东的 LMCS 中,大于50 km 的  $\beta$  中尺度的个例占总数的80%<sup>[21]</sup>。根据济南多普勒天气雷达组合反射率产品和华北区域雷达拼图,规定35 dBZ 以上回波结构比较紧密且同时满足以下条件确定为一个 LMCS:1)长度大于等于50 km;2)长宽之比大于等于5:1;3)最大回波强度大于等于50 dBZ。通过人工普查挑选,共筛选出30个 LMCS 个例(表1)。LMCS 的尺度是指35 dBZ 以上连续回波的最大范围。

表1 2012—2016年 LMCS 个例统计

年份	5月	6月	7月	8月	9月	合计
2012	0	2	5	1	1	9
2013	1	0	4	7	0	12
2014	0	1	0	0	0	1
2015	0	0	0	2	0	2
2016	0	5	1	0	0	6
合计	1	8	10	10	1	30

## 2 LMCS 与多单体风暴的合并方式

多个对流单体经历了无数次分裂和合并过程,

渐趋组织化才形成 LMCS。LMCS 形成以后,有的保持着原有的尺度和强度继续移动,有的在移动过程中与其他多单体风暴发生合并。30 个个例中,有 17 例 LMCS 与其他多单体风暴发生合并。与 LMCS 合并的多单体风暴,根据其尺度和强回波中心特征分为以下两类:有多个强回波中心且排列为带状的称为雷暴带;多个强回波中心排列不规则的称为雷暴群。尽管与 LMCS 合并的回波尺度和形态不尽相同,为了与 LMCS 区别开来,将其统称为多单体风暴。

为了描述方便,将 LMCS 称为 A,与 LMCS 合并的多单体风暴称为 B,LMCS 与多单体风暴的合并方式有以下 4 种:A 追 B,A 扩展,A、B 相向和 B 追 A。A 追 B 为多单体风暴位于 LMCS 下游,LMCS 移速大于多单体风暴与之合并;A 扩展为 LMCS 与多单体风暴移动方向相同,LMCS 的传播方向与多单体风暴 B 相对于 A 的方位相同,LMCS 范围扩大与多单体风暴合并;A、B 相向为 LMCS 与多单体风暴移动方向相交而合并;B 追 A 为多单体风暴位于 LMCS 上游,移速大于 LMCS 并与之合并。17 例合并个例中,A 追 B 的最多,为 8 例(47.1%);其次是 A、B 相向,有 5 例(29.4%);再次为 A 扩展,有 3 例(17.6%);B 追 A 最少,只有 1 例(5.9%)。

### 2.1 A 追 B 形态

A 追 B 是指 LMCS 在多单体风暴的上游,一方面 LMCS 的移速大于位于下游的多单体风暴,另一方面,LMCS 与多单体风暴均向二者之间的区域传播,导致二者之间不断有新回波生成,最终导致二者合并(图 1)。待合并的多单体风暴有两种情况,其中一种为多单体风暴与 LMCS 相互独立,在 LMCS 下游生成,与 LMCS 距离 30~130 km,共有 5 个个例。另一种情况为待合并的多单体风暴是 LMCS 前向传播导致的新生雷暴,与 LMCS 距离较近(30 km 之内)。无论哪种多单体风暴,单体新生后均以发展为主,移动缓慢,最终与快速移动的 LMCS 合并。

2012 年 7 月 12 日 11:10,在青州北部生成一块新单体。单体迅速向东西两侧传播,范围扩大,强度增强,同时缓慢向东南方向移动。12:39(图 2a)已发展成为一个准东西向的带状回波,称其为 LMCS-A,同时在 LMCS-A 的南侧又新生出两块新单体 C、D。之后 LMCS-A 在向东南方向移动的同时,东侧靠近新单体 C 的一侧快速向南传播,新单体 C 以发展为主,快速向北传播,移动缓慢,导致二者于 13:14(图 2b)合并为一体,为东北—西南走向,称其

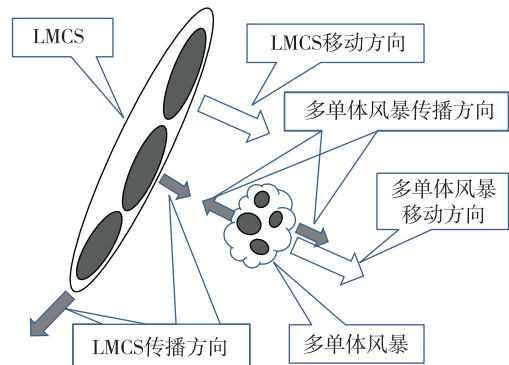


图 1 LMCS 与多单体风暴合并形式之 A 追 B 模型图  
Fig.1 Merging mode of A (LMCS) chasing B (multi-cell storm)

为回波带 B。LMCS-A 的西部仍为东西走向。新单体 D 也以发展为主,移动缓慢,其范围有所扩展,同时在泰安的北部又有一块新单体 E 生成。14:39(图 2c),新单体 E 向东移动的同时向东传播,LMCS-A 的西侧向东南方向移动的同时向西传播,与新单体 E 的新生部分合并。回波带 B 向东南方向移动过程中略有减弱北收。此后,LMCS-A 与新单体 E 向东南方向移动,因为二者的传播方向相交,15:20 二者合并为东北—西南向的回波带,仍称其为 LMCS-A。之后,LMCS-A 继续向东南方向移动,向西南方向传播,东部逐渐减弱断裂。15:56(图 2d),LMCS-A 演变成一条东北—西南向的飚线。

### 2.2 A、B 相向形态

A、B 相向是指 LMCS 与多单体风暴的移动方向相交,最终二者合并(图 3)。最初 LMCS 与多单体风暴相距较远时,各自按原有方式发展和移动。当二者距离小于 30 km 时,二者之间将有新的对流单体发展,产生云桥,将二者连接起来,促使二者快速合并。

2012 年 7 月 10 日 18:58(图 4a),河北东部有一条东北—西南向的带状回波,称其为 LMCS-A,LMCS-A 向东南方向移动。在京津地区有一条西北—东南向的带状回波,称其为 LMCS-B,LMCS-B 向南移动,二者之间距离逐渐缩短。19:33(图 4b)二者之间距离减小到 25 km,二者之间新生对流单体快速发展,形成云桥,逐渐将二者连接起来,促使二者合并。之后 LMCS-B 的西北端减弱,东南端快速产生新的对流单体,与 LMCS-A 合并,19:51(图 4c)二者之间的云桥已逐渐成为 LMCS-A 的一部分,同时 LMCS-B 继续减弱。20:27(图 4d),LMCS-B 完

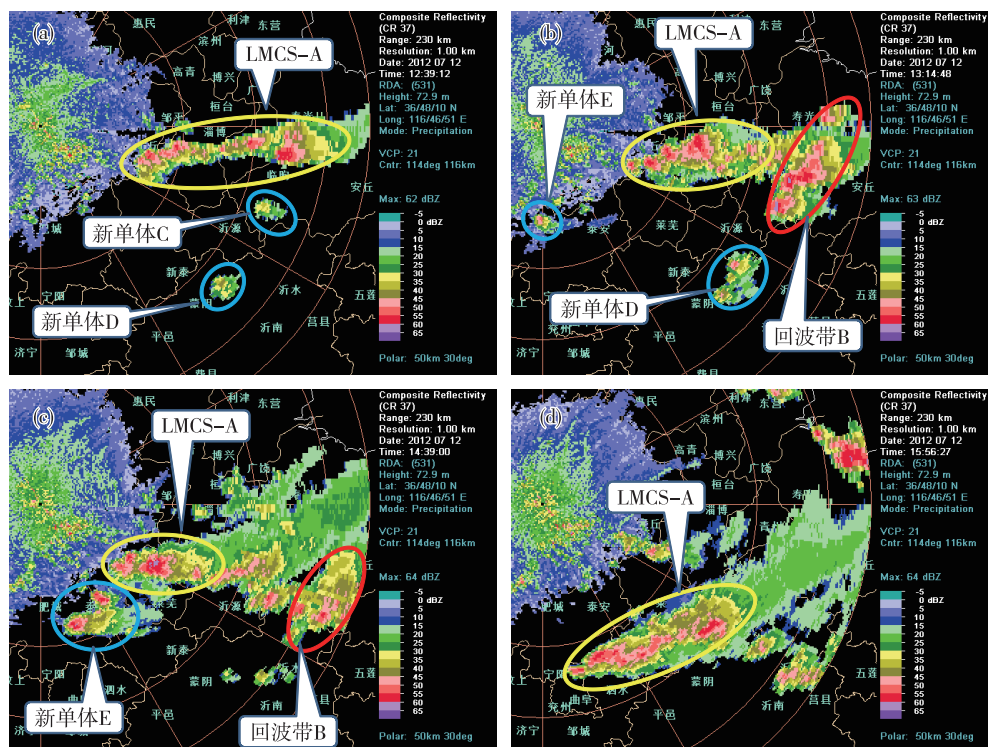


图2 LMCS与多单体风暴合并形式之A追B(2012年7月12日, a.12:39, b.13:14, c.14:39, d.15:56 BST;黄色圈内为LMCS-A,蓝色圈为新生多单体风暴,红色圈为回波带B)

Fig.2 Merging mode of A chasing B (a. 12:39 BST, b. 13:14 BST, c. 14:39 BST, d. 15:56 BST; yellow circle for LMCS-A, blue circle for new multi-cell storm, red circle for echo band B) on 12 July 2012

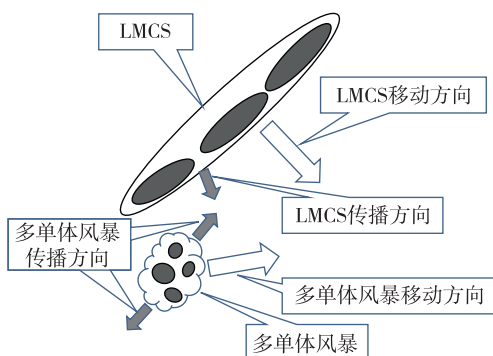


图3 LMCS与多单体风暴合并形式之A、B相向模型图  
Fig.3 Merging mode of A B facing

全并入 LMCS-A, 两条 LMCS 合并为一条 LMCS, 仍称其为 LMCS-A, LMCS-A 的头部向右转, 由原来的弓形演变为东北—西南向的 LMCS。

### 2.3 A 扩展形态

A 扩展一般是 A、B 的移动方向相同, LMCS 的传播方向朝向多单体风暴, 多单体风暴也向着 LMCS 方向传播, 二者之间不断有新的对流单体生成, 二者之间的距离缩短, 导致二者逐渐合并 (图 5)。

2012年7月21日19:02, 河北涞源、易县一带

有一块对流云团, 该云团在向东北方向移动的过程中呈现后向传播特征, 其西南方向不断有新单体生成并与云团主体合并, 云团尺度逐渐扩大, 强度增强, 于 22 日 01:29 形成东北—西南向的 LMCS。LMCS 生成后, 仍呈后向传播特征, 其西南方向不断有新的对流单体生成并与 LMCS 合并, LMCS 尺度继续增大, 强度持续增强。此时在河南北部安阳一带有一块弱的对流云团也向东北方向移动, 最大回波强度为 30 dBZ, 称其为云团 B。LMCS 的尾部与云团 B 之间最短距离为 130 km。云团 B 在向东北方向移动过程中呈前向传播特征, 所以在 LMCS 与云团 B 之间不断有新单体生成、发展加强, 二者之间的距离逐渐缩短。03:46 (图 6a) 二者之间的距离缩短至 50 km, 云团 B 的东北侧新生两块小的对流单体, 预示二者之间的距离将继续缩短。04:22 (图 6b) 云团 B 已发展为东北—西南向, 尺度达 90 km 的带状回波, 强回波中心达 50 dBZ, 与 LMCS 之间的距离也缩短至 15 km。05:28 (图 6c) 云团 B 处于 LMCS 尾部的东南侧, 其强回波中心增强到 55 dBZ, 与 LMCS 之间的最短距离小于 10 km。06:21 (图 6d) LMCS 原来的尾部逐渐减弱, 云团 B 完全并入

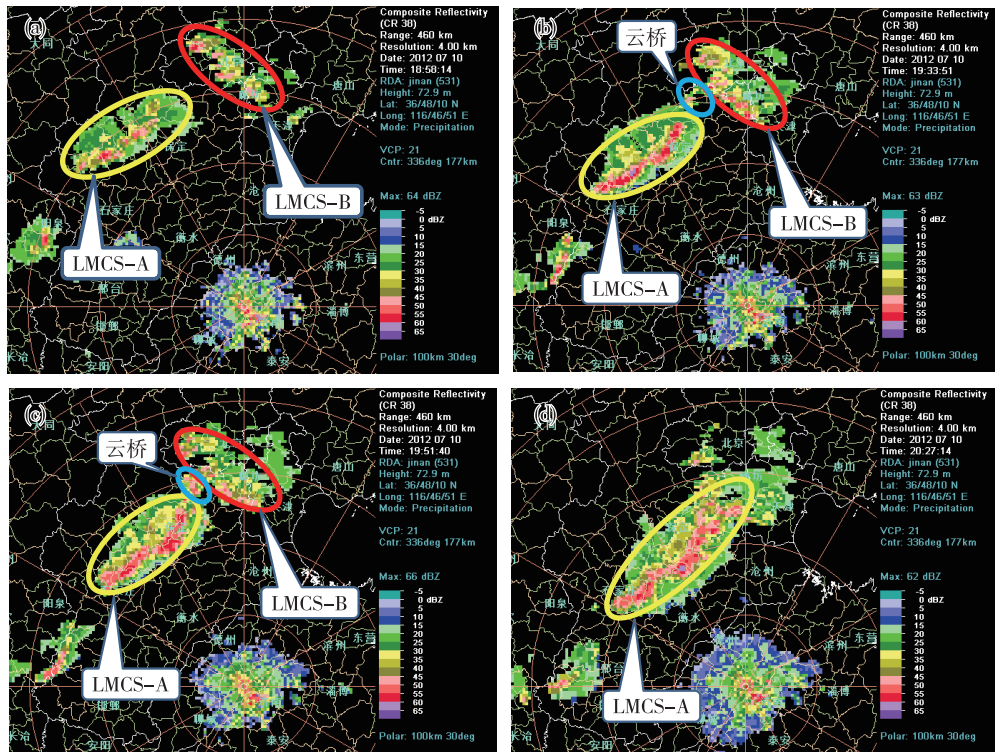


图 4 LMCS 与多单体风暴合并形式之 A、B 相向 (2012 年 7 月 10 日, a.18:58, b.19:33, c.19:51, d.20:27 BST; 黄色圈内为 LMCS-A, 蓝色圈为云桥, 红色圈为 LMCS-B)

Fig.4 Merging mode of A B facing (a. 18:58 BST, b. 19:33 BST, c. 19:51 BST, d. 20:27 BST; yellow circle for LMCS-A, blue circle for cloud bridge, red circle for LMCS-B) on 10 July 2012

LMCS, 成为 LMCS 新的尾部, 完成新旧更替。

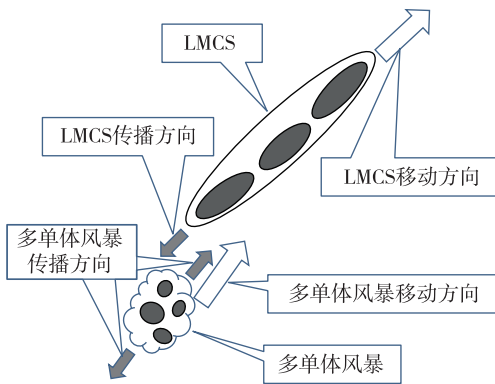


图 5 LMCS 与多单体风暴合并形式之 A 扩展模型图

Fig.5 Merging mode of A extending

### 2.4 B 追 A 形态

B 追 A 是指 LMCS 为后向传播, 其尾部不断生成的对流单体逐渐并入 LMCS (图 7)。此类与 A 扩展的区别是, A 扩展中的多单体风暴是独立于 LMCS 存在的, 最初与 LMCS 的距离较远; 而 B 追 A 中的多单体风暴是 LMCS 后向传播生成的, 与 LMCS 距离较近。

2012 年 6 月 14 日 02:32, 河北东部沧州、衡水

到邢台一带有分散的对流单体向东北方向移动, 单体群呈后向传播特征, 其西南方向不断有新单体生成, 并逐渐合并。这些分散的单体群向东北方向移动的同时, 逐渐合并增强, 06:37 (图 8a) 组织化成一个东北—西南向的 LMCS, 强回波中心为 55 dBZ。LMCS 仍然呈后向传播特征, 其西南方向不断有新单体生成, 06:49 (图 8b), 在 LMCS 的西南方向有新的对流单体生成, 称其为云团 B, 与 LMCS 之间的距离小于 10 km。06:55 (图 8c), 云团 B 逐渐发展增强, 范围扩大。同时 LMCS 的尾部强度也在增强, 二者之间的间隙减小。07:07 (图 8d) 云团 B 与 LMCS 合并为一体, 成为 LMCS 尾部的一部分。

### 2.5 合并临界距离

分析上述 LMCS 与多单体风暴合并特征时发现, 当 LMCS 与其他多单体风暴的距离大于 30 km 时, 二者将保持自身原有的发展趋势移动和传播; 当二者之间的距离小于 30 km 时, 在二者之间的区域将有新的对流单体发展, 逐渐缩短二者之间的距离, 直到二者最终合并。因此 LMCS 与多单体风暴合并的临界距离为 30 km。

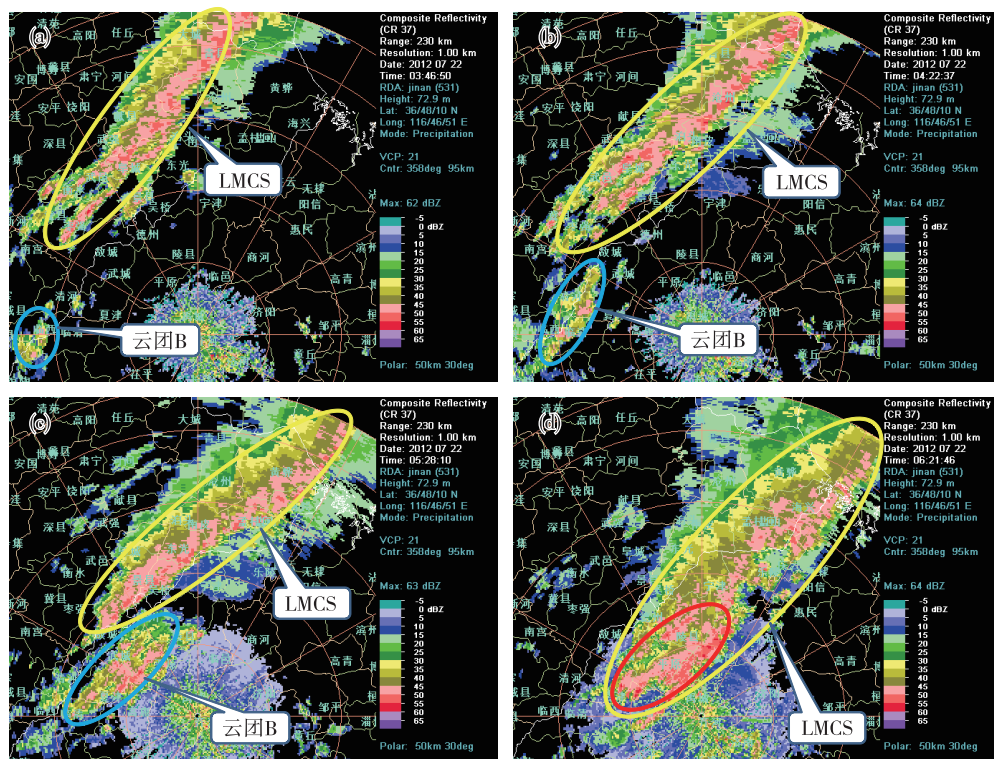


图6 LMCS与多单体风暴合并形式之A扩展(2012年7月22日, a. 03:46, b. 04:22, c. 05:28, d. 06:21 BST;黄色圈内为LMCS,蓝色圈为云团B,红色圈是LMCS与云团B合并后部分)

Fig.6 Merging mode of A extending (a. 03:46 BST, b. 04:22 BST, c. 05:28 BST, d. 06:21 BST; yellow circle for LMCS, blue circle for cloud cluster B, red circle for merged part of LMCS and cloud cluster B) on 22 July 2012

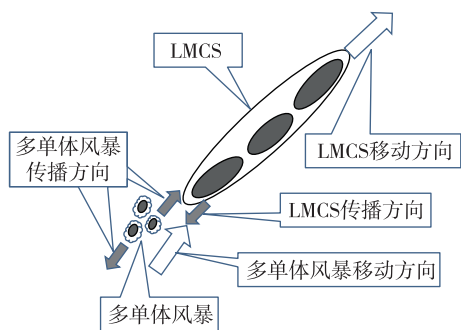


图7 LMCS与多单体风暴合并形式之B追A模型图

Fig.7 Merging mode of B chasing A

## 2.6 合并与传播

通过上述4种合并方式的分析发现,LMCS与多单体风暴的合并过程中,不仅仅是移动速度不同造成二者的合并,合并过程中均伴随着雷暴的传播运动。无论是二者的移动方向相同还是相交,二者均会向着二者之间的区域传播,导致二者之间的距离不断缩小。尤其是当二者之间的距离小于合并临界距离时,二者均向着对方的方向快速传播,促使二者合并。侯淑梅等<sup>[22]</sup>在研究后向传播雷暴时发现同样的现象,当有多个雷暴群共存时,新雷暴

的初生地点位于两个雷暴群之间,使二者逐渐合并为一体。在不稳定的大气层结条件下,新雷暴容易发生在具有明显斜压特征的水汽辐合中心附近<sup>[23]</sup>。如果LMCS与多单体风暴向着相反的方向传播,除非一个移动速度明显大于另一个,二者才有合并的可能。但是在相同的大尺度背景条件下,二者所受的引导气流基本是相同的,二者的平流运动差异不会太显著。因此,合并与雷暴的传播运动密不可分,合并是雷暴的传播运动造成的。

## 3 LMCS与多单体风暴合并后的结果

### 3.1 雷达回波的演变趋势

LMCS与多单体风暴合并后,一方面可能会增大LMCS的强度,另一方面可能会增大LMCS的尺度,延长LMCS的生命史。17例中有11例合并后强度增大,6例强度不变;10例尺度增大,6例尺度不变,只有1例尺度减小。尺度减小的个例是LMCS的中间部位与多单体风暴合并,同时LMCS的尾部断裂减弱,导致尺度减小。LMCS与多单体风暴合并后,一般情况下,LMCS原有的部位减弱,新合并进来的风暴代替原来部位成为LMCS的一部

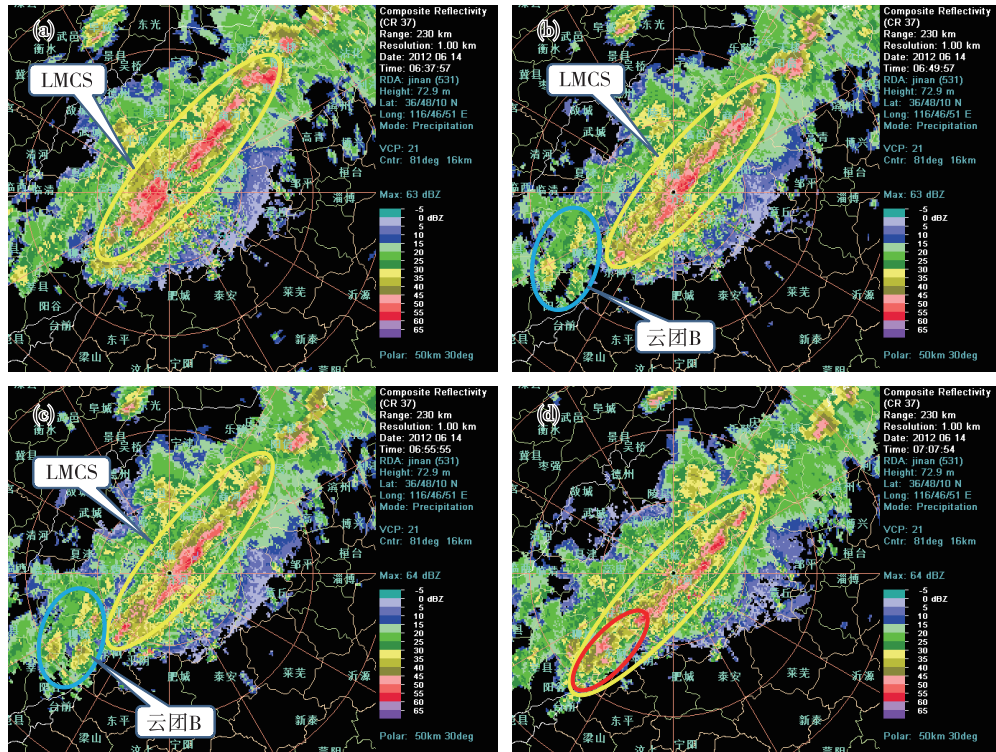


图 8 LMCS 与多单体风暴合并形式之 B 追 A (2012 年 6 月 14 日, a. 06:37, b. 06:49, c. 06:55, d. 07:07 BST; 图中符号含义与图 6 相同)

Fig.8 Merging mode of B chasing A (a. 06:37 BST, b. 06:49 BST, c. 06:55 BST, d. 07:07 BST; the symbols denote the same meanings as those in Fig.6) on 14 June 2012

分,因此 LMCS 强度可能变化的同时,长轴的走向也可能产生变化。

当 LMCS 的头部或尾部与其他多单体风暴发生合并时,LMCS 尺度可能会增大,LMCS 的长轴方向可能转向。2013 年 7 月 29 日 11:20,河北东部巨鹿到曲周一带,一块对流云团在向东北方向移动过程中发展迅速,13:04(图 9a)发展为一条东北—西南向的 LMCS,最大回波强度为 55 dBZ,尺度达 150 km。LMCS 呈后向传播特征,其尾部不断有新单体生成,称其为云团 B。云团 B 生成后逐渐与 LMCS 合并。14:42(图 9b) LMCS 尺度已达 220 km,但走向仍然为东北—西南走向,而且其尾部继续有新单体生成(仍称其为云团 B)并与之合并。

当 LMCS 的中间部位与其他多单体风暴合并时,可能在合并处断裂,LMCS 长轴方向也将转向,尺度减小。2015 年 8 月 22 日 13:03,河北景县有一块对流单体,该单体发展迅速,16:39(图 9c)组织化为一条东—西方向的 LMCS,尺度为 150 km。此时在 LMCS 东南方向的平阴和肥城一带有两块对流单体,称其为云团 B。17:26(图 9d) LMCS 在向东南方向移动过程中与云团 B 合并,同时,

LMCS 的北段逐渐减弱,转化为强度在 30~35 dBZ 的层积混合性降水云团,LMCS 的南段与云团 B 合并后转为准东西向的 LMCS,尺度降为 105 km。

### 3.2 产生的灾害

根据民政部门的灾情资料,发现 30 个 LMCS 个例中有 19 例出现了灾情,灾害性天气种类有雷暴大风、冰雹和强降水,产生灾情的概率为 19/30 = 63.3%。产生灾害的个例中有 18 例出现大风灾害(其中有 2 例出现龙卷),有 10 例伴有冰雹灾害,有 12 例伴有暴雨。三种灾害性天气同时出现的案例有 6 例,出现概率为 6/30 = 20%。冰雹和大风同时出现的有 4 例,大风与暴雨同时出现的有 5 例。两种灾害同时出现的概率为 9/30 = 30%。冰雹灾害不单独出现,有冰雹时均伴有大风。有大风时不一定有冰雹,有 3 例仅出现大风灾害。只有 1 例只出现短时强降水灾害。另外 11 例虽然没有灾情,但均出现了短时强降水天气。

2012 年 8 月 18 日下午,山东境内形成一条飚线,造成山东中北部地区出现暴雨到大暴雨,并伴有大风。齐河站 14—20 时降水量高达 132.9 mm,其间 17 时和 18 时的小时降水量分别为 56.4 mm、

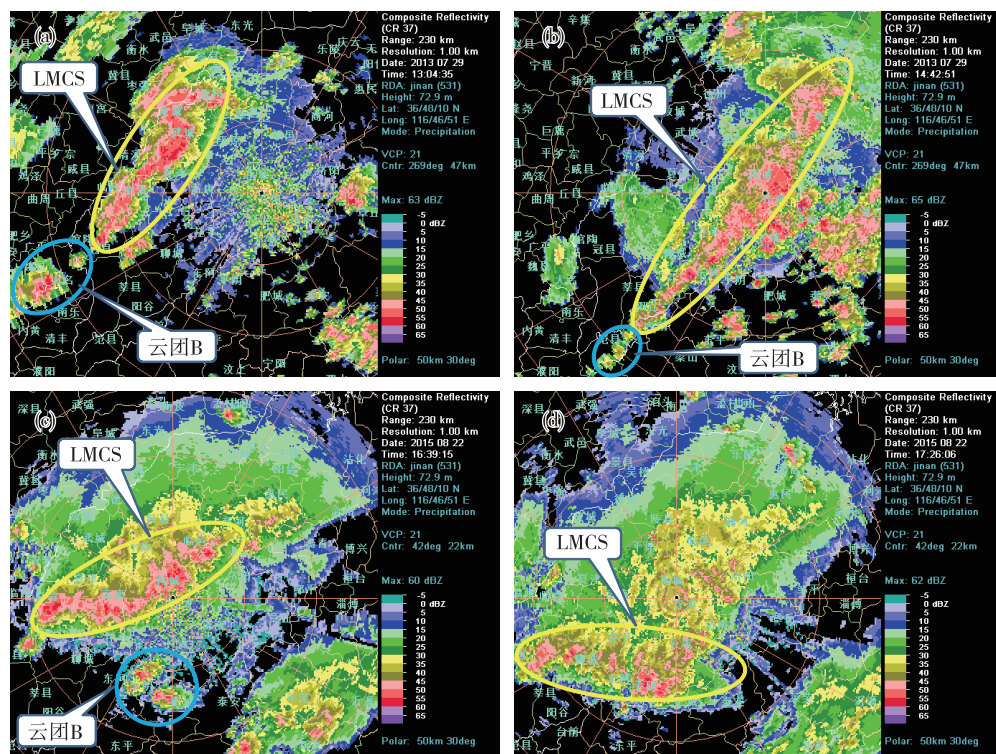


图9 LMCS与多单体风暴合并后雷达回波的演变趋势(a. 2013年7月29日13:04 BST, b. 2013年7月29日14:42 BST, c. 2015年8月22日16:39 BST, d. 2015年8月22日17:26 BST;图中符号含义与图6相同)

Fig.9 Evolution trend of radar echo after LMCS merges with multi-cell storm (a. 13:04 BST on 29 July 2013; b. 14:42 BST on 29 July 2013; c. 16:39 BST on 22 August 2015; d. 17:26 BST on 22 August 2015; the symbols denote the same meanings as those in Fig.6)

67.3 mm。山东中西部地区出现区域性雷暴大风,多站监测到9级以上大风,其中宁阳和章丘境内分别监测到  $26.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $22.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的极大风速。灾后调查表明,宁阳和章丘两地分别出现了EF2级和EF0级龙卷<sup>[17]</sup>,分别称之为宁阳龙卷和章丘龙卷。侯淑梅等<sup>[16]</sup>研究表明,宁阳龙卷和章丘龙卷分别是单体与单体以及弓形回波与单体合并导致雷暴强度增强造成的。单体与单体以及弓形回波与单体的合并过程均经历了合并初期、合并中期和完全合并期,合并的结果是上游回波减弱并入下游回波,上游回波产生的下沉气流与暖湿空气辐合,促使下游回波持续发展。合并过程使低层小尺度涡旋强度增强,高度降低,出现非相关切变和中气旋,形成深厚的辐合层,产生龙卷。

#### 4 结论与讨论

本文普查了影响山东的LMCS,分析了LMCS与多单体风暴的合并方式和合并后LMCS的演变趋势及产生的灾害,得出以下几条结论。

1) LMCS(A)与多单体风暴(B)的合并方式有4

种:A追B,A扩展,A、B相向和B追A。其中A追B最多,其次是A、B相向,B追A最少。

2) LMCS与多单体风暴合并的临界距离为30 km。当二者之间的距离大于临界距离时,二者将保持自身原有的发展趋势移动和传播,当二者之间距离小于临界距离时,二者之间将产生新的对流单体,促使二者快速合并。

3) LMCS与多单体风暴合并后,强度增强或维持,尺度增大,生命史延长,长轴将可能转向。当LMCS的中间部位与其他多单体风暴合并时,可能在合并处断裂,尺度减小。

4) LMCS与多单体风暴合并时,其本身合并部分将减弱,多单体风暴合并进入LMCS,成为LMCS一部分。

5) 合并是雷暴的传播运动造成的。

6) LMCS与多单体风暴合并个例中,63.3%会产生雷暴大风、冰雹或强降水灾害,其中雷暴大风灾害出现的概率最大。三种灾害并存的概率为20%,两种灾害并存的概率为30%,没有出现灾情的案例也会出现短时强降水天气。



本文主要对 LMCS 与多单体风暴的合并方式和合并后的演变趋势进行了普查和分析,对 LMCS 形成过程中的合并特征未作统计。LMCS 在形成过程中经历了无数次单体与单体或者单体与多单体的合并。尽管很多个例的观测表明对流云合并后出现强度增大、生命史延长等现象,但也有一些个例的观测显示对流云合并后强度没有增大,这可能与待合并的两块对流云所处的生命阶段和合并位置有关,也可能与当时两块对流云所处的环境条件和地形有关,或者兼而有之。后序工作将通过典型个例,分析雷暴的合并与雷暴生命期和合并位置的关系,以期更进一步掌握雷暴合并的机理及其可能产生的灾害性天气。

### 参考文献:

- [1] 于仁成,高瑞华,宋同文,等.一次中尺度对流系统分析[J].气象,1998,24(3):33-37.
- [2] 林永辉,布和朝鲁.2001年8月初上海强暴雨中尺度对流系统的数值模拟研究[J].气象学报,2003,61(2):196-202.
- [3] 谢静芳,王晓明.东北地区中尺度对流复合体的卫星云图特征[J].气象,1995,21(5):41-44.
- [4] 付丹红,郭学良.积云并合在强对流系统形成中的作用[J].大气科学,2007,31(4):635-644.
- [5] JIRAK I L, COTTON W R, McANELLY R L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development [J]. Mon Wea Rev, 2003, 131 ( 10 ): 2428-2449.
- [6] 卓鸿,赵平,任健,等.2007年济南“7·18”大暴雨的持续拉长状对流系统研究[J].气象学报,2011,69(2):263-276.
- [7] 李艳伟,牛生杰,罗宁,等.积云并合扩展层化型积层混合云的数值模拟分析[J].地球物理学报,2009,52(5):1165-1175.
- [8] 康兆萍,林永辉.华南一次飏线过程线状对流模态变异机理研究[J].大气科学学报,2017,40(5):631-640.
- [9] KLIMOWSKI B A, HJELMFELT M R, BUNKERS M J. Radar observations of the early evolution of bow echoes [J]. Wea Forecasting, 2004, 19(4):727-734.
- [10] CALIANESE E J, JORDAN J K, CURRAN E B, et al. The mayfest high-precipitation supercell of 5 May 1995: A case study [C]//Preprints, 21st Conf on Severe Local Storms. San Antonio, TX: American Meteorological Society; 2002, 105-108.
- [11] SIEVEKING J E, PRZYBYLINSKI R W. The interaction of a HP supercell thunderstorm and bow echo to produce a prolonged severe wind event in east central Missouri [C]//22nd Conf on Severe Local Storms. Hyannis, MA: American Meteorological Society; 2004, 7A. 5.
- [12] GOODMAN S J, KNUPP K R. Tornado genesis via squall line and supercell interaction revisited-The 15 November 1989 Huntsville tornado [C]//Conference on Severe Local Storms, 16th Conf on Atmospheric Electricity, Kananaskis Park, Canada, Oct. 22-26, 1990, Preprints ( A92-27926 10-47 ). Boston, MA: American Meteorological Society; 1990, 566-571.
- [13] WOLF P L. WSR-88D radar depiction of supercell-bow echo interaction: Unexpected evolution of a large, tornadic, “ comma-shaped ” supercell over eastern Oklahoma [J]. Wea Forecasting, 1998, 13(2):492-504.
- [14] 朱江山,刘娟,边智,等.一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究[J].气象,2015,41(2):182-191.
- [15] 王俊,龚佃利,刁秀广,等.一次弓状回波、强对流风暴及合并过程研究 I:以单多普勒雷达资料为主的综合分析[J].高原气象,2011,30(4):1067-1077.
- [16] 侯淑梅,闵锦忠,刁秀广,等.飏线发展过程中回波合并的特征分析[J].大气科学学报,2018,41(3):367-376.
- [17] 刁秀广,万明波,高留喜,等.非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警[J].气象,2014,40(6):668-677.
- [18] 王俊,盛日锋,陈西利.一次弓状回波、强对流风暴及合并过程研究 II:双多普勒雷达反演三维风场分析[J].高原气象,2011,30(4):1078-1086.
- [19] 易笑园,张义军,沈永海,等.一次海风锋触发的多单体雹暴及合并过程的观测分析[J].气象学报,2012,70(5):974-985.
- [20] 张琴,孟伟,朱敏,等.2016年6月13-14日山东强对流天气过程的中尺度特征及成因分析[J].海洋气象学报,2017,37(4):101-112.
- [21] 王俊.线状中尺度对流系统的多普勒雷达统计特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(4):25-33.
- [22] 侯淑梅,俞小鼎,张少林,等.山东中西部后向发展雷暴初步研究[J].气象学报,2015,73(5):819-836.
- [23] 侯淑梅,孙鹏程,杨璐瑛,等.环境场条件对雷暴传播运动影响实例分析[J].海洋气象学报,2018,38(4):58-70.