

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.

Wang Jun. Study on Doppler radar features of linear mesoscale convective systems[J].Journal of Marine Meteorology,2017,37(4): 25-33. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.004. (in Chinese)

## 线状中尺度对流系统的多普勒雷达统计特征分析

王俊

(山东省人民政府人工影响天气办公室,山东 济南 250031)

**摘要:** 利用济南 CINRAD/SA 新一代多普勒天气雷达资料,统计分析了 2004—2015 年约 15 万 km<sup>2</sup> 区域内发生的 148 个线状中尺度对流系统(linear mesoscale convective systems,简称 LMCSs)的多普勒雷达回波特征。主要分析了 LMCSs 的年和月分布、典型尺度、典型回波强度的统计特征以及初始回波出现时间、位置、LMCSs 持续时间、演变过程回波合并特征、移动速度和方向、发展后期回波演变特征、组织类型等。LMCSs 存在明显的年际变化,不同年份之间有很大的差别,而每年的 6 月和 7 月是 LMCSs 的高发期;80% 的 LMCSs 是大于 50 km 的中-β 尺度,20% 属于中-α 尺度,成熟期 97.3% LMCSs 的最大回波强度在 55~70 dBz 间;10—22 时之间易开始形成 LMCSs,14—16 时是峰值,凌晨不易形成 LMCSs,而 LMCSs 持续时间在 2~18 h 之间,6~8 h 是峰值;一半的 LMCSs 在演变过程出现回波合并,合并过程可以分为与孤立对流单体合并、与对流回波群合并和与对流回波带合并三类;地形对 LMCSs 的触发有重要影响,太行山脉、鲁中山区的北麓和西麓容易触发形成 LMCSs。这些研究为认识 LMCSs 发生、演变、减弱各阶段的特征,进一步提高对 LMCSs 的实时监测、短时预警水平提供了基础。

**关键词:** 新一代多普勒雷达;线状中尺度对流系统;回波合并;组织类型

**中图分类号:** P458.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)04-0025-09

**DOI:**10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.004

## Study on Doppler radar features of linear mesoscale convective systems

WANG Jun

(Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031, China)

**Abstract** Using data of a new generation Doppler weather radar located at Qihe, the features of 148 linear mesoscale convective systems (LMCSs), which occurred within area about 150 thousand square kilometers from 2004 to 2012, are statistically analyzed including inter-annual and inter-monthly distributions, typical scales and typical echo intensities; The presentation time and position of initial echoes, duration, echo merge features, move speeds and directions, evolution characteristics and types of organizations at later stage of LMCSs are also studied. LMCSs has obvious inter-annual characteristic, while the peak period within a year is from June to July. 80% LMCSs are meso-β systems with diameters greater than 50 km, and 20% LMCSs belong to meso-α system. For 97.3% of the LMCSs, the maximum echo during their mature stage are between 55 and 70 dBz. LMCSs tend to formation between 10:00-22:00 with maximum frequency between 14:00-16:00, while it is barely developed during wee hours. The durations of LMCSs are between 2 and 18 hours, and most between 6 and 8 hours. Half LMCSs

收稿日期:2017-08-18; 修订日期:2017-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41275044)

作者简介:王俊(1966—),男,研究员级高级工程师,主要从事云降水物理研究,wangjun818@sohu.com。

experience echo merges, which are grouped into 3 categories including with Isolated Convection, with Convective echo group, and with convective echo belt. Underlying topography may has great influence on initials of LMCSs. The topography around Tai-hang Mountains, north and west parts of Mountain Tai is favorable for LMCSs triggering. This study could be helpful for understanding the features of LMCSs in different stages. In addition, it could be helpful to improve the real-time monitoring and short-term warning for the LMCSs.

**Key words** Doppler radar; linear mesoscale convective systems; echo merger; organizational mode

## 引言

线状中尺度对流系统(linear mesoscale convective systems,简称LMCSs)是根据雷达回波形态确定的强对流类型,根据PPI(平面位置显示)或CR(组合反射率)资料,确定35 dBz以上对流回波区域的长宽之比大于5,并且长度最少为50 km<sup>[1-3]</sup>。LMCSs是造成暴雨、冰雹、雷雨大风和龙卷等灾害性天气的重要系统,基于雷达观测资料的统计研究表明,在瑞士<sup>[4]</sup>、美国东部<sup>[2]</sup>和西班牙加泰罗尼亚地区<sup>[5]</sup>,LMCSs约占中尺度对流系统的二分之一,具有强的降水和冰雹灾情记录。Jirak et al.<sup>[6]</sup>统计分析了美国4—8月的387个MCSs,首先利用卫星资料识别中尺度对流系统(mesoscale convective systems,简称MCSs),然后利用雷达资料进行分类研究,结果表明:LMCSs占16.3%,并出现最高频率的大风、降雨量和较高频率的冰雹和龙卷灾害。岳治国等<sup>[7]</sup>利用711雷达资料,分析了陕西渭北地区335例中尺度对流系统(主要是中- $\beta$ 和中- $\gamma$ 尺度)的组织演变模型,在单体、线状、区域型3大类MCSs中,LMCSs约占总数的21.2%,并且具有最高的降雹概率,雹灾面积广,灾情最重。

因此,对以飏线为主的LMCSs的研究一直受到气象学家的广泛关注,在LMCSs的分类、时空分布、平均生成环境、组织模型等方面已经有了很多统计研究结果。Bluestein and Jain<sup>[1]</sup>利用Oklahoma风暴试验11a的雷达资料,将52例强飏线分为断裂线型、后部扩建型、破碎区域型和嵌入区域型4种,它们产生的环境条件(垂直风切变、CAPE值、理查逊数等)存在差别,而有利于中纬度飏线产生的环境特征,一是大尺度环境对流层为位势不稳定,即存在很大的对流有效位能;二是平均风的最大垂直切变在低层,切变向量在顺时针方向偏离飏线45°左右。Houze et al.<sup>[8]</sup>根据成熟阶段中纬度飏线系统的对称程度,将其分为对称型和不对称型。Parker and Johnson<sup>[9]</sup>将美国中部LMCSs分为3类,即拖曳层状

(trailing stratiform, TS)、先导层状(leading stratiform, LS)和平行层状(parallel stratiform, PS)MCSs,3类LMCSs的对流有效位能、抬升凝结高度、对流凝结高度和抬升指数等热力学要素存在不同。

丁一汇等<sup>[10]</sup>研究我国飏线的生成环境表明,切变线、冷性高压后部、冷涡、冷锋、露点锋、辐合线甚至地形都是飏线形成的背景条件。岳治国等<sup>[11]</sup>根据雷达回波的形态,把陕西渭北7a间71次带状MCSs个例分为拖曳层状、先导层状、平行层状和断裂带状MCSs4种类型,分析了4类带状MCSs的雷达回波统计特征。段鹤等<sup>[12]</sup>统计归纳出滇南普洱市2004—2009年18次飏线发生前的天气形势及物理量场特征、飏线的时间分布特征、飏线的移动路径等,根据灾害类型和飏线中单体的结构将飏线分为5种类型。

济南位于华北东南部,周边区域是MCSs的多发区之一<sup>[13]</sup>,山东和渤海区域也是我国北方(35°N以北)MCSs和M $\alpha$ CS较为活跃的区域<sup>[14]</sup>。卓鸿等<sup>[15]</sup>利用13a逐小时卫星资料研究了黄河下游中尺度对流系统的气候特征。近10a来,这一区域几乎每年都有强中尺度对流系统的发生,如2001年8月23日的强飏线、2004年6月21日较大范围飏线、2005年7月12日弓状回波、2006年4月28日弓状回波、2007年7月18日大暴雨、2009年6月2—3日的强飏线等过程<sup>[16-23]</sup>,暴雨、大风、冰雹和龙卷等灾害性天气造成了严重的财产损失和人员伤亡。

本文利用济南CINRAD/SA新一代多普勒雷达产品资料,统计分析了2004—2015年148例LMCSs的多普勒雷达回波特征。主要统计分析了LMCSs的年和月分布、典型尺度、典型回波强度、初始回波出现时间和位置、持续时间、演变过程回波合并特征、移动速度和方向、发展后期回波演变规律、组织类型等基本特征。为认识LMCSs发生、演变、减弱各阶段的雷达回波特征,进一步提高对LMCSs的实时监测、短时预警水平提供基础。

## 1 资料说明

使用的资料主要是济南 CINRAD/SA (36°48'10"N, 116°46'51"E) 的 37、38 号产品, 分析的个例在成熟阶段的对流回波三分之二位于区域 (35°00'~38°35'N, 114°32'~119°011'E), 即 37 号产品的 200 km 探测范围, 面积约 15 万 km<sup>2</sup>, 包括山东大部、河北东南部和河南东北部小部分区域(图 5 中虚线方形区域)。而 38 号产品主要用于分析一些个例的开始、结束时间以及源地和结束地点。

统计时间是 2004—2015 年共 12 a, 每年的 4—9 月。LMCSs 的判别标准根据 CR 或 PPI 资料, 40 dBz 以上对流回波区域的长宽之比大于 5, 长度大于等于 50 km, 最大回波强度大于 50 dBz。

## 2 统计结果

### 2.1 年、月分布

统计表明, 12 a 总计有 148 个 LMCSs 个例(表 1)。每年出现线状中尺度对流系统的次数存在明显差别, 最多是 2008 年, 有 23 个个例, 2005—2008 年个例较多, 而 2010 年以来 LMCSs 的个例明显减少, 2011 年和 2010 年是低值, 只有 3 个和 4 个, 2012 年以后有增加的趋势。

不同月份 LMCSs 的出现有明显差别, 6、7 月出现的频数最高, 这两个月共占总数的 64.9%, 是 LMCSs 出现的主要月份。另外, 不同年份各月出现的频数不同, 但峰值基本是在 6 月或者 7 月。9 月只有 4 例 LMCSs, 2012 年 9 月 27 日的 LMCSs 是统计个例中出现最晚的。4 月出现了一定数量的个例, 最早过程是 2006 年 4 月 6—7 日, 而 2006 年 4 月 28 日发生的弓状回波则产生较强的灾害<sup>[19]</sup>。

表 2 线状中尺度对流系统典型尺度统计

尺度(L)/km	2015年	2014年	2013年	2012年	2011年	2010年	2009年	2008年	2007年	2006年	2005年	2004年	总计
50≤L≤100	1	3	1	1	2	2	1	7	7	4	7	4	40
100<L≤150	2	2	3	0	1	0	3	8	9	6	7	4	45
150<L≤200	2	2	2	3	0	1	3	3	3	5	3	1	28
200<L≤250	1	0	2	1	0	0	1	2	0	3	2	1	13
250<L≤300	1	0	3	1	0	1	1	1	0	1	0	0	9
>300	1	0	2	0	0	0	1	2	2	0	0	5	13

### 2.3 典型回波强度统计分析

典型回波强度是指 LMCSs 成熟期时的最大回波强度, 间隔 5 dBz 进行分级统计。结果(表 3)表

表 1 不同年、月线状中尺度对流系统统计

Table 1 Statistics of linear mesoscale convective systems for different years and months

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	合计
2015年	0	0	1	2	5	0	8
2014年	0	0	3	2	1	1	7
2013年	1	2	0	4	6	0	13
2012年	0	0	1	4	1	0	6
2011年	1	1	1	0	0	0	3
2010年	0	0	2	0	2	0	4
2009年	2	0	3	4	1	0	10
2008年	0	5	8	7	2	1	23
2007年	2	4	3	8	4	0	21
2006年	3	2	8	5	1	0	19
2005年	0	1	7	10	1	0	19
2004年	0	0	8	5	0	2	15
合计	9	15	45	51	24	4	148

### 2.2 典型尺度统计

LMCSs 的典型尺度是指成熟时大于 40 dBz 回波区的连续长度, 为了较为详细地了解系统回波的长度, 间隔 50 km 分为一级进行统计, 大于 300 km 的归为一档, 主要是考虑尺度比较大时单雷达不易给出全貌。统计结果(表 2)表明, LMCSs 的典型尺度为 100~150 km, 共有 45 个个例, 占总数的 30.4%; 50~100 km 具有次高的几率, 共有 40 个个例, 约占 27.0%; 150~200 km 间有 28 个个例, 占总数的 18.9%。大于 200 km 的中- $\alpha$  尺度一共出现 35 次, 占总数的 23.6%。表明分析个例中 LMCSs 的尺度主要是大于 50 km 的中- $\beta$  尺度, 约占总数的五分之四, 而中- $\alpha$  尺度约占五分之一。

明, 最大回波强度主要出现在 55~70 dBz 间, 出现几率约为 97.3%, 其中 60~65 dBz 具有最大几率, 出现 64 次, 占总数的 43.2%。50~55 dBz 出现的几

率较小,一共只有4个个例。

另外,不同年份最大回波强度的分布略有不同,如2004年最大回波强度偏小,出现几率较大的

是55~65 dBz,而2008年最大回波强度偏大,出现几率较大的是60~70 dBz。

表3 典型回波强度统计

Table 3 Statistics of linear mesoscale convective systems on typical reflectivity

个

回波强度(Z)/dBz	2015年	2014年	2013年	2012年	2011年	2010年	2009年	2008年	2007年	2006年	2005年	2004年	总计
50≤Z≤55	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	4
55<Z≤60	4	3	3	0	1	2	0	3	10	7	4	7	44
60<Z≤65	4	4	7	3	2	1	3	10	8	6	9	7	64
65<Z≤70	0	0	3	3	0	0	7	9	2	5	6	1	36

#### 2.4 开始时间、持续时间统计分析

开始时间是指形成LMCSs的雷达初始回波(≥15 dBz)出现的时刻。由于雷达回波不断生消变化,需要仔细分析才能确定直接形成线状中尺度对流系统的雷达初始回波。如2005年7月12日弓状回波产生过程<sup>[18]</sup>,12日01:19(北京时,下同)在山西的阳泉附近有回波生成,经过一系列发展演变,12日10:13在清河附近有新回波产生,而这新生回波直接发展成弓状回波,这种情况下开始时间是指直接发展成LMCSs的回波出现的时刻。

持续时间是指LMCSs的开始时间到回波结束之间的时间。所谓回波结束,在此是指最大回波强

度小于40 dBz,原因是线状中尺度对流系统在减弱阶段有时回波很快消散结束,有时候则转变为大范围积层混合云,持续较长时间,有时单雷达跟踪不到回波完全消散结束,并且由于后期回波性质已发生变化,回波转变成积层混合云,所以采用这个标准。

LMCSs开始时间的统计(表4)表明,一天的绝大部分时间都可以开始形成线状中尺度对流系统,10—22时之间易产生LMCSs,共有115个个例,占总数的77.7%。午后14—16时是峰值,产生LMCSs的机会比较大。22时之后逐渐减少,特别是00—08时之间不易产生LMCSs。

表4 开始时间统计

Table 4 Statistics on initial time

个

开始时间(BST)	2015年	2014年	2013年	2012年	2011年	2010年	2009年	2008年	2007年	2006年	2005年	2004年	总计
00—02时	1	0	0	0	0	0	1	1	1	2	0	1	7
02—04时	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3
04—06时	0	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	4
06—08时	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
16—18时	2	0	0	2	0	0	0	3	2	4	4	4	21
18—20时	1	2	2	0	0	1	3	2	5	1	1	1	19
20—22时	0	1	2	0	1	1	0	0	2	2	3	2	14
22时—次日00时	0	1	2	1	0	0	1	3	0	0	1	0	9

持续时间统计(表5)表明,LMCSs持续时间为2~18 h,4~12 h出现的几率比较大,共出现124次,占总个例的83.8%,其中6~8 h是峰值,共出现42次,占总个例的28.4%,持续时间超过16 h和小于4 h的个例都较少。总的来说,大部分线状中尺度对流系统的雷达回波持续时间在7 h左右。

#### 2.5 线状中尺度对流系统后期演变特征

LMCSs在后期的演变存在很大差别,有些个例

在减弱阶段回波减弱消散得很快,而有些个例则减弱成大范围的积层混合云,可以持续较长时间,这对于分析LMCSs的持续时间以及临近预报服务都会产生重要影响。下面对LMCSs后期的演变特征进行简单统计分析,判断大范围积层混合云的标准是 $20 \leq Z < 40$  dBz的积层混合云回波区长和宽分别大于200 km和100 km。

表5 持续时间统计

Table 5 Statistics on duration time

持续时间( $t$ )/h	2015年	2014年	2013年	2012年	2011年	2010年	2009年	2008年	2007年	2006年	2005年	2004年	总计
$2 \leq t \leq 4$	0	1	3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	7
$4 < t \leq 6$	2	1	3	4	1	0	0	0	4	2	2	1	20
$6 < t \leq 8$	4	4	4	2	0	2	0	7	5	5	6	3	42
$8 < t \leq 10$	2	1	1	0	1	1	2	5	6	5	6	6	36
$10 < t \leq 12$	0	0	1	0	1	0	3	6	2	5	4	4	26
$12 < t \leq 14$	0	0	1	0	0	1	2	4	0	1	1	0	10
$14 < t \leq 16$	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	1	5
$16 < t \leq 18$	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2

统计表明,大范围积层混合云共出现 20 个个例,占总数的 13.5%。图 1 给出了 2 次典型个例的组合反射率,图 1a 是 2004 年 6 月 22 日飑线过程后期 02:59 的组合反射率图,此时对流带后面的积层混合云的长和宽分别大于 200 km 和 150 km。图 1b

是 2007 年 7 月 18 日 LMCSs 在 20:04 的组合反射率图,此时对流带后面的积层混合云长度大于 300 km,而宽度在最大处也超过了 100 km。因此,过程在短时强降水结束后,还有较长时间的积层混合云降水。

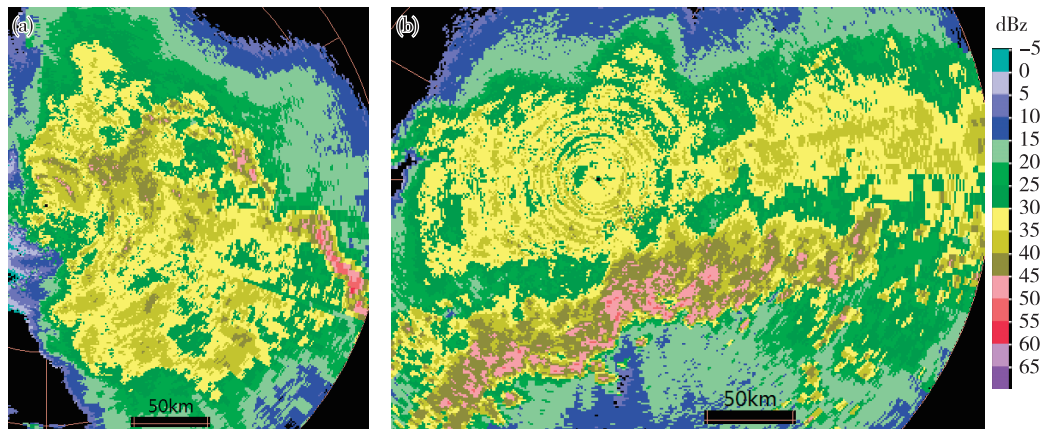


图1 具有大范围积层混合云的 LMCSs 个例——2004 年 6 月 22 日 02:59(a)和 2007 年 7 月 18 日 20:04(b)组合反射率  
Fig.1 Cases of LMCSs with mixed convective-stratiform clouds (Composite reflectivity; a.at 02:59 BST on 22 Jun. 2004, b. at 20:04 BST on 18 Jul. 2007)

2.6 组织类型

利用组合反射率产品(37 和 38 号产品),按照 Parker and Johnson<sup>[9]</sup>对线状中尺度对流系统的分类标准,分析成熟期时 LMCSs 的组织类型。统计表明,TS 型是 LMCSs 的主要类型,总计 91 个个例,占总数的 61.5%。LS 型有 27 个个例,占总数的 18.2%。PS 型有 30 个个例,占总数的 20.3%。

另外,Parker and Johnson 研究表明,LMCSs 的类型在发展演变过程不是固定不变的,各种类型之间存在相互转化,PS 型转成其它类型的概率比较大,我们的统计分析也有类似的结果,特别是由于运动方向的改变,PS 型易转变成其他类型。典型 TS 型 LMCSs 的雷达回波结构由 Houze et al.<sup>[24]</sup>给

出,目前国内对 LMCSs 的研究主要集中在 TS 型。LS 型线状中尺度对流系统只有很少的个例分析<sup>[25]</sup>,而 PS 型中尺度对流系统还未见相关研究。图 1 中的个例都是典型 TS 型 LMCSs,下面给出其他两种类型的典型个例。

2.6.1 先导层状型

2006 年 4 月 6 日是一次较典型的 LS 型线状中尺度对流系统(图 2),09:35 时成熟阶段的积层混合云区范围不大,10:24 时减弱阶段积层混合云区范围明显增大。与 TS 型的积层混合云相比,我们统计的 LS 型 LMCSs 的积层混合云区一般要小得多。

许多研究表明,由于低层入流的来源不同又可

以把 LS 型 LMCSs 分成 RFLS (rear-fed leading stratiform) 和 FFLS (front-fed leading stratiform) 两种<sup>[26]</sup>。FFLS 突出的特征<sup>[27]</sup>是在系统的层状降水区低层前方有一个由上而下、从前向后加速的入流、翻转的上升气流和中上层形成从后向前的气流,这个从后向前的气流携带了大量的暖湿水汽是

系统前方层状云形成的主要来源。而 RFLS 除了有 FFLS 的特征气流外,还有一股从后向前的对流层低层入流。本文只给出了各种类型的雷达回波特征,各种类型 LMCSs 形成的环境条件、内部结构等特征需要深入研究更多个例。

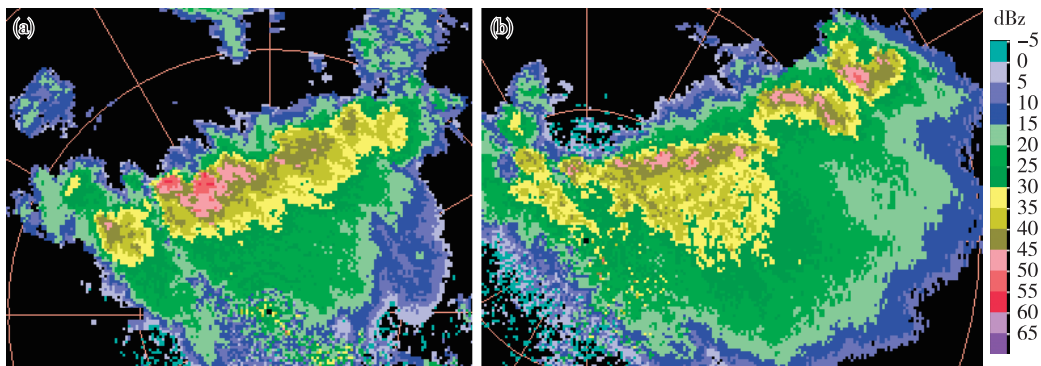


图2 2004年4月6日不同时刻 LMCSs 组合反射率(a. 09:35, b. 10:24)

Fig.2 Composite reflectivity of LMCSs at different time on 6 Apr. 2004 (a. 09:35 BST, b. 10:24 BST)

### 2.6.2 平行层状型

2008年5月14日是一次 PS 型线状中尺度对流系统个例(图3a),成熟阶段强对流回波位于右端(相对于白色箭头所示的前进反方向),层状云区位于左侧,运动方向基本与强对流回波的走向垂直,移动速度 61 km/h,方向 326°。

2012年7月29日是 PS 型转 TS 型个例(图3b、c),29日 15:15 在济南东部的邹平—章丘一带有孤立对流回波发展,回波缓慢向东北方向移动,17:20 已发展成为 LMCSs,长约 70 km,回波强度 64 dBz,积层混合云在对流回波带的前方。17:50 时线状中

尺度对流系统开始缓慢向偏南方向移动,层状云区逐渐转向 LMCSs 的左后侧,即成为 TS 型 LMCSs。以上两个个例具有不同的特点,2008年5月14日 LMCSs 的运动方向与对流回波带垂直,而2012年7月29日 LMCSs 具有较复杂的运动特征,前期的运动方向平行于对流回波带、后期则垂直于对流回波带。

Parker<sup>[28-29]</sup>基于雷达观测和数值模拟等研究总结出了 PS 型 LMCSs 的概念模型,可能由于典型 PS 型 LMCSs 的尺度偏小,这类中尺度对流系统的观测研究还较少。

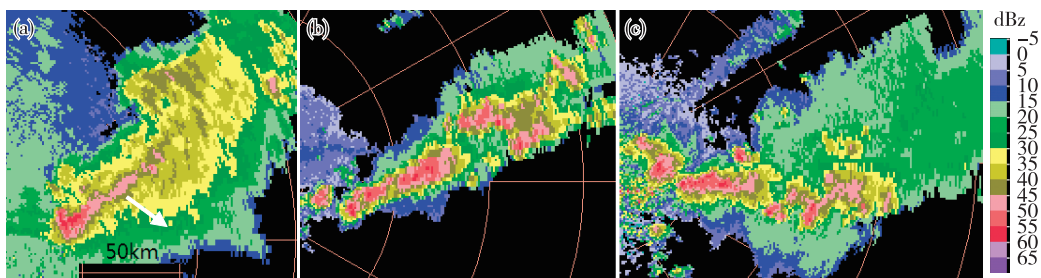


图3 平行层状型 LMCSs 组合反射率(a.2008年5月14日 15:36,白色箭头指示移动方向,b. 2012年7月29日 17:20, c. 2012年7月29日 19:07)

Fig.3 Composite reflectivity of parallel layer type LMCSs (a. at 15:36 BST on 14 May 2008, the white arrow indicates moving direction, b. at 17:20 BST, and c. 19:07 BST on 29 Jul. 2012)

### 2.7 合并特征

回波合并 LMCSs 的演变过程起到重要作用,研究合并过程不仅对搞清楚很多 LMCSs 的形成过

程有意义,而且对已有 LMCSs 和孤立雷暴(或者雷暴群)合并的研究有助于搞清楚许多突发强对流天气产生的原因,对临近预报服务也有积极意义。

Jirak et al.<sup>[6]</sup>统计表明,MCSs 具有通过合并形成的倾向,71%的中尺度对流系统在生成、发展阶段出现合并,而 49.2%的 LMCSs 存在合并过程,合并个例有更强的龙卷、冰雹、大风灾害。不同尺度对流回波通过合并可以形成线状中尺度对流系统<sup>[25]</sup>,而 LMCSs 与局地对流回波(或回波带)合并可造成灾害性暴雨和大风<sup>[30-31]</sup>。

统计表明,合并个例共计有 80 例,占总数 54.1%,即一半以上的个例出现合并过程。另外,分析表明合并过程可以发生在不同尺度回波之间,也可以在相近尺度回波之间产生合并。既存在不同移动方向、较大回波间的合并,也有 LMCSs 与较小尺度回波间的合并。下面进一步分类分析 LMCSs 与其他回波合并的初步特征。

1) LMCSs 与孤立对流单体回波合并,合并次数一般在 5 次以下。一共有 36 例,占合并个例的 45%。合并后 LMCSs 一般有加强或者变化不大,减弱的个例较少。另外,一般是靠近过程孤立回波发展得较强,而回波合并后变化不剧烈。单体与

LMCSs 的距离一般较近,约 10 km,统计个例中如 2005 年 7 月 12 日被合并单体距离线状中尺度对流系统 75 km 的情况并不多见。

2) LMCSs 与对流回波群合并,合并次数 5 次以上。一共有 30 例,占合并个例的 37.5%。图 4a、b 是 2006 年 5 月 4 日 LMCSs 与对流回波群合并个例,21:24 在线状中尺度对流系统 L1 的尾部前方 C 区有对流回波群发展,L1 在向东北方向移动过程中逐渐与对流回波合并,至 22:06 合并结束。合并过程形成了 L1 的新尾部回波,而原有的尾部回波逐渐分离。

3) LMCSs 与对流回波带合并。一共有 14 例,占合并个例的 17.5%。2006 年 7 月 31 日是 LMCSs 与对流回波带间的合并(图 4c),线状中尺度对流系统 L1 为拖曳层状型 LMCSs,向东北方向移动,其前面的对流回波带 L2 属于平行层状型,移动速度较慢,L1 追上 L2 后两者逐渐合并,而合并处回波强度基本无变化。

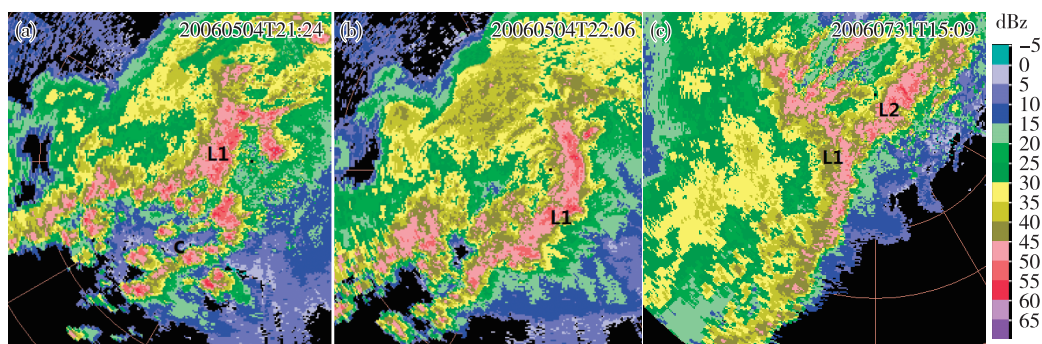


图4 回波合并个例的组合反射率(a,b. 2006年5月4日 LMCSs 与对流回波群合并,c. 2006年7月31日 LMCSs 与对流回波带间的合并个例)

Fig.4 Composite reflectivity during echo merger (a,b.merger between LMCSs and convective echo groups on 4 May 2006,c.merger between LMCSs and convective echo bands on 31 Jul. 2006)

## 2.8 初始回波源地

图5是 LMCSs 初始回波源地分布图。可以看出,大部分区域都可以开始出现线状中尺度对流系统,但是也存在一些比较集中的区域,说明在这些区域更容易开始产生 LMCSs。源地1位于广灵—五台一带,有近30个个例。源地2位于昔阳—左权一带以及以西的区域,有23个个例。这两个源地都位于太行山附近。源地3位于济南东西两侧,东面的区域在济南—莱芜—章丘附近,位于鲁中山区的北麓,共有9个个例,而西面5个个例位于鲁中山区西北侧且沿黄河一带。另外,沿静海—南宫一带有20多个个例,也是比较集中的区域。

Morel and Senest<sup>[32]</sup>对4—9月欧洲6000个 MCSs 的统计结果表明,其大多形成于山脉附近,地形是触发 MCSs 的重要因素。马禹等<sup>[13]</sup>统计表明,黄河和长江中下游地区是 MCSs 的多发区。郑永光等<sup>[14]</sup>利用10a资料统计35°N以北 MCSs 的活动频率发现,河套地区向东 MCSs 的活动频率逐渐增加,在山东中东部、渤海与黄海一带达到极值。这些结果是根据卫星资料分析成熟时 MCSs 分布规律得出的结论,并不能完全指示 MCSs 起源的详细位置,而雷达回波资料可以较为准确地分析形成 MCSs 的初始回波形成的地点和时间。上述资料分析表明,一半以上的个例初始回波出现在山地地形附近,特别

是太行山脉附近处于分析区域的上游,也是位于西风槽影响路径上,所以在有利的天气系统影响下,加上地形作用,利于触发形成 MCSs 的初始回波。

利用 38 号产品分析初始回波的出现时间和初始位置存在不足,由于雷达仰角和地球曲率的影响,在  $0.5^\circ$  仰角的情况下,昔阳和五台对应的最低高度分别超过 7 km 和 10 km,因此,这些区域出现的初始回波可能已经发展到一定的高度和强度,所以初始回波出现的位置应该更远,而在时间上更早。

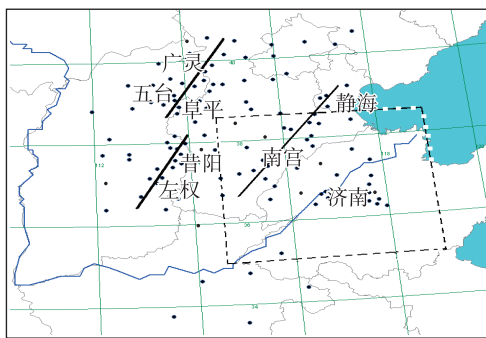


图5 初始回波发生源地图(图中虚框是分析区域)  
Fig.5 Source area of initial echoes (the dashed frame indicates the analysis area)

## 2.9 移动速度方向统计

统计分析了 LMCSs 在成熟期前后的移动速度、方向(图略),结果表明,LMCSs 移动速度为 5~90 km/h,具有比较大的范围,其中 25~70 km/h 之间出现 101 次,占总数的 84.2%,35~40 km/h、45~50 km/h 两个区间分别出现 17 次、16 次,具有最大和次大的出现频率。

LMCSs 的移动方向比较集中,出现在  $168^\circ \sim 101^\circ$  之间(顺时针),特别是  $281^\circ \sim 326^\circ$  之间是明显的峰值,共有 59 次,占总数的 49.2%,也就是说,西偏北和西北是 LMCSs 的主要来向。

系统的移动速度、方向并不是固定的,而是存在变化,特别是方向的变化更加明显。

## 3 结论与讨论

利用新一代多普勒雷达产品资料,统计分析了 2004—2015 年约 15 万  $\text{km}^2$  区域内发生的 148 个线状中尺度对流系统的多普勒雷达回波特征。

1) 线状中尺度对流系统的年、月分布特征表明,LMCSs 存在明显的年际变化,最多一年有 23 例,而最少仅有 3 例。不同月份 LMCSs 的出现频次也有明显差别,7 月最多,6 月次之,这两个月份出现的 LMCSs 约占总数的 69.7%。

2) 大于 50 km 的中- $\beta$  尺度 LMCSs 个例约占总数的五分之四,中- $\alpha$  尺度个例约占五分之一。97.3% 的最大回波强度出现在 55~70 dBz 间,而 43.2% 的最大回波强度在 60~65 dBz 之间。

3) 线状中尺度对流系统初始回波出现时间统计表明,10—22 时之间易开始形成 LMCSs,14—16 时是峰值,而凌晨不易形成 LMCSs。LMCSs 持续时间在 2~18 h 之间,6~8 h 是峰值,总的来说,线状中尺度对流系统的雷达回波持续时间在 7 h 左右。

4) 成熟时期线状中尺度对流系统主要是 TS 型,约占总数的 61.5%; LS 型和 PS 型分别占 18.2%、20.3%。而 13.5% 的线状中尺度对流系统在后期演变成大范围积层混合云,产生较大范围的弱降水。

5) 一半的线状中尺度对流系统演变过程出现回波合并,合并过程可以分为与孤立对流单体合并、与对流回波群合并和与对流回波带合并三类。地形对 LMCSs 的触发有重要影响,太行山脉、鲁中山区的北麓和西麓易触发形成 LMCSs。

本文对线状中尺度对流系统的雷达回波特征进行了初步统计分析,还有许多方面没有涉及或者没有深入研究,如仅根据层状云区的位置进行了分类,还可以根据最强回波在 LMCSs 中的位置进行分类研究,而这种研究对于地面灾害的临近预报更有意义。另外,下一步需要与卫星、天气资料、地面灾情等各种资料结合,分析产生 LMCSs 的有利天气形势、地面灾害分布以及 LMCSs 的卫星云图特征等。

## 参考文献:

- [1] Bluestein H B, Jain M H. Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring [J]. *J Atmos Sci*, 1985, 42(16): 1711-1732.
- [2] Geerts B. Mesoscale convective systems in the southeast United States during 1994-95: A survey [J]. *Wea Forecasting*, 1998, 13(3): 860-869.
- [3] 俞小鼎. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警 [J]. *气象科技进展*, 2011, 1(3): 31-41.
- [4] Schiesser H H, Houze R A Jr, Huntrieser H. The mesoscale structure of severe precipitation systems in Switzerland [J]. *Mon Wea Rev*, 1995, 123(7): 2070-2097.
- [5] Rigo T, Llasat M C. Analysis of mesoscale convective systems in Catalonia using meteorological radar for the period 1996-2000 [J]. *Atmos Res*, 2007, 83(2/4): 458-472.



- [6] 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.
- [7] 岳治国, 牛生杰, 梁谷. 陕西渭北中尺度对流系统组织模型及灾害分析[J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(1): 395-402.
- [8] Houze R A Jr, Smull B F, Dodge P. Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma [J]. *Mon Wea Rev*, 1990, 118(3): 613-654.
- [9] Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(10): 3413-3436.
- [10] 丁一汇, 李鸿洲, 章名立, 等. 我国飊线发生条件的研究[J]. *大气科学*, 1982, 6(1): 18-27.
- [11] 岳治国, 梁谷, 李燕, 等. 陕西渭北带状中尺度对流雷达回波统计特征[J]. *气象*, 2010, 36(6): 66-72.
- [12] 段鹤, 严华生, 王晓君. 滇南飊线的发生环境及其多普勒雷达回波特征[J]. *热带气象学报*, 2012, 28(1): 68-76.
- [13] 马禹, 王旭, 陶祖钰. 中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征[J]. *自然科学进展*, 1997, 7(6): 701-706.
- [14] 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征[J]. *科学通报*, 2008, 53(4): 471-481.
- [15] 卓鸿, 赵平, 李春虎, 等. 夏季黄河下游地区中尺度对流系统的气候特征分布[J]. *大气科学*, 2012, 36(6): 1112-1122.
- [16] 龚佃利, 吴增茂, 傅刚. 一次华北强对流风暴的中尺度特征分析[J]. *大气科学*, 2005, 29(3): 453-464.
- [17] 王俊, 朱君鉴, 任钟冬. 利用双多普勒雷达研究强飊线过程的三维风场结构[J]. *气象学报*, 2007, 65(2): 241-251.
- [18] 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.
- [19] 朱君鉴, 刁秀广, 曲军, 等. 4.28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析[J]. *气象*, 2008, 34(12): 21-26.
- [20] 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.
- [21] 梁建宇, 孙建华. 2009 年 6 月一次飊线过程灾害性大风的形成机制[J]. *大气科学*, 2012, 36(2): 316-336.
- [22] 张婷婷, 王培涛, 王凤娇. 一次长寿命超级单体风暴雷达回波特征分析[J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(1): 98-103.
- [23] 高帆, 张永婧, 李瑞, 等. 2015 年 8 月 3 日山东西北部暴雨过程的中尺度特征分析[J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(2): 96-101.
- [24] Houze R A Jr, Rutledge S A, Biggerstaff M I, et al. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1989, 70(6): 608-619.
- [25] 王晓芳, 胡伯威, 李红莉, 等. 梅雨期一个伴有前导层状降水对流线的结构特征[J]. *高原气象*, 2011, 30(4): 1052-1066.
- [26] Parker M D, Johnson R H. Structures and dynamics of quasi-2D mesoscale convective systems [J]. *J Atmos Sci*, 2004, 61(5): 545-567.
- [27] Pettet C R, Johnson R H. Airflow and precipitation structure of two leading stratiform mesoscale convective systems determined from operational datasets [J]. *Wea Forecasting*, 2003, 18(5): 685-699.
- [28] Parker M D. Simulated convective lines with parallel stratiform precipitation. Part I: An archetype for convection in along-line shear [J]. *J Atmos Sci*, 2007, 64(2): 267-288.
- [29] Parker M D. Simulated convective lines with parallel stratiform precipitation. Part II: Governing dynamics and associated sensitivities [J]. *J Atmos Sci*, 2007, 64(2): 289-313.
- [30] 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.
- [31] Metz N D, Lance F B. Derecho and MCS development, evolution, and multiscale interactions during 3-5 July 2003 [J]. *Mon Wea Rev*, 2010, 138(8): 3048-3070.
- [32] Morel C, Senest S. A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery, Part II: Characteristics of European mesoscale convective systems [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2002, 128(584): 1973-1995.