

侯淑梅,孙晶,郑怡,等,2020.山东省线状中尺度对流系统的天气学特征[J].气象,46(8):1053-1064. Hou S M, Sun J, Zheng Y, et al, 2020. Synoptic characteristics of linear mesoscale convective system in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 46(8): 1053-1064(in Chinese).

## 山东省线状中尺度对流系统的天气学特征\*

侯淑梅 孙晶 郑怡 韩永清

山东省气象台, 济南 250031

**提 要:** 按照如下标准确定一个线状中尺度对流系统(linear mesoscale convective system, LMCS): 40 dBz 以上反射率因子连续或准连续回波带尺度 $\geq 100$  km 并持续至少 1 h, 镶嵌着 40 dBz 回波的 35 dBz 回波要求严格连续, 线状或准线状的对流区域拥有一个共同的前边缘, 最大回波强度 $\geq 50$  dBz。从 2012—2016 年雷达资料中挑选出 27 个影响山东的 LMCS, 分析其天气学特征。结果表明: 影响山东的 LMCS 8 月出现次数最多, 形成时间集中在傍晚到前半夜, 生命史一般为 1~2 h, 大多数具有后向传播特征; 形成 LMCS 的初始对流单体绝大多数位于河北省, 单体生成后一般向东偏南方向移动; LMCS 大多数是东北—西南向, 尺度一般介于 100~200 km。文章提炼了形成 LMCS 的后倾槽、前倾槽和冷涡等三类天气学模型。850 hPa 伴有暖温度脊或暖中心是形成 LMCS 的一个重要特征, 冷涡和前倾槽类 500 hPa 中空急流以及后倾槽类 700 hPa 以下低空急流在形成 LMCS 中起着重要作用。当 850 hPa 比湿 $> 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 沙氏指数和抬升指数均为负值时, 可能出现 LMCS。若对流有效位能 $> 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 对流抑制较小, 且 850 hPa 与 500 hPa 气温差大于 25℃, 出现 LMCS 的概率达 80%。LMCS 出现时均伴有短时强降水, 70.4% 的 LMCS 造成雷暴大风、冰雹或强降水灾害。冰雹和大风比短时强降水需要大气层结的不稳定度更高, 仅有短时强降水出现时, 0℃层和-20℃层的高度明显比冰雹和大风出现时的高度高。

**关键词:** 线状中尺度对流系统(LMCS), 天气学模型, 物理量指标, 灾害

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.08.005

## Synoptic Characteristics of Linear Mesoscale Convective System in Shandong Province

HOU Shumei SUN Jing ZHENG Yi HAN Yongqing

Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

**Abstract:** The synoptic characteristics of LMCS (linear mesoscale convective system) were analyzed based on 27 selected LMCSs affecting Shandong from the 2012—2016 radar data. The filter conditions are as below: the contiguous or quasi-contiguous echo band larger than 40 dBz is over 100 km and lasts for at least 1 h, the 35 dBz echo embedded with the 40 dBz echo is strictly contiguous, the linear or quasi-linear convection area shares a common leading edge, and the maximum echo intensity is over 50 dBz. The characteristics of the study are concluded as follows. The LMCS affected Shandong has a high frequency in August, and the formation time is concentrated in the dusk to the first half of the night, lifespan is generally 1—2 h, and most of them have characteristics of backward propagation. Most of the initial convective cells are generated in Hebei and generally move eastward by southward. Most of the LMCSs are in a northeast—southwest trend, and the scale is between 100 and 200 km. Three types of synoptic models of LMCS formation

\* 山东省自然科学基金项目(ZR2016DM20)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-041)和山东省气象局课题(2016sdqxz01, 2014sdqxm21)共同资助

2019年5月20日收稿; 2020年6月19日收修定稿

第一作者: 侯淑梅, 主要从事灾害性天气预报及机理分析研究. E-mail: shmh0808@163.com

are constructed, including forward-tilting trough, backward-tilting trough and cold vortex. The warm temperature ridge or warm center at 850 hPa is the important feature of LMCS formation. The mid-level jet stream at 500 hPa in cold vortex and forward-tilting trough category, and the low-level jet stream below 700 hPa in backward-tilting trough category all play very important roles in the LMCS formation. LMCS constantly occurs when 850 hPa specific humidity is greater than  $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  and the Lift Index (LI) and Showalter Index (SI) are both negative. The probability of LMCS occurrence is up to 80% when  $T_{850-500} > 25^\circ\text{C}$  and  $\text{CAPE} > 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  with small CIN. When LMCS appears, it is usually accompanied by short-duration heavy precipitation, 70.4% LMCS contributes to disasters of thunderstorm gale, hail and severe precipitation. The hail and gale require higher stratification instability than short-duration severe precipitation. When only the short-duration heavy precipitation occurs, the heights of  $0^\circ\text{C}$  and  $-20^\circ\text{C}$  layers are significantly higher than those when hail and gale occur.

**Key words:** linear mesoscale convective system (LMCS), synoptic models, physical quantity indicator, disaster

## 引 言

研究表明,中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)是产生暴雨、冰雹、雷暴大风和龙卷等灾害性天气的重要系统(Maddox, 1980; Doswell III et al, 1996; Shibagaki et al, 2000; Schumacher and Johnson, 2005),一直以来受到气象工作者的关注(卓鸿等, 2004; 王晓芳和崔春光, 2012)。许多研究者对其统计特征(Meng et al, 2013; Zheng et al, 2013)和形成机理(何立富等, 2009; Rotunno et al, 1988; Chu and Lin, 2000; Chen et al, 2012)开展了分析研究。在中纬度地区,大地形的下风方是MCS的易发区,例如青藏高原下风方的盆地地区(Miller and Fritsch, 1991)。也有研究指出,黄河下游地区虽然距离青藏高原较远,但也是东亚MCS的多发区之一(马禹等, 1997),并且黄河下游地区的降水主要是由MCS造成的(卓鸿等, 2012)。海、陆、山地的热力性质差异导致MCS不同的气候分布特点(郑永光等, 2008),低层暖湿的条件不稳定大气层结和低空西南急流是产生MCS的基本条件(郑永光等, 2002)。

国内外许多研究者根据组织形态将MCS进行分类,常用的分类标准是根据红外云图冷云盖的椭圆率(短轴和长轴之比)将其分为块状和线状(Anderson and Arritt, 1988; 马禹等, 1997; Jirak et al, 2003)。中国东部地区MCS中线状的比例远远大于块状,伴有中尺度对流涡旋(mesoscale convective vortex, MCV)的MCS中,线状的比例也远远大于

块状(王微等, 2011)。Blanchard(1990)把中尺度对流系统按雷达回波形态分为线型、无规则型和锢囚型,其中线型占68%。统计结果显示,线状中尺度对流系统(linear mesoscale convective system, LMCS)相比其他类型的MCS能造成更高频率的大风和冰雹(Jirak et al, 2003; 岳治国等, 2008)。Gallus et al(2008)统计各种形态的MCS与龙卷、冰雹、强降水和大风的关系中发现,各类线性系统与灾害性天气的相关性明显高于孤立单体、对流单体群和非线性系统。近几年来,由LMCS造成强降水、冰雹和雷暴大风的个例层出不穷(孙继松等, 2012; 赵宇等, 2017),给各地造成严重的经济损失。

丁一汇等(1982)根据我国18个飊线个例,研究总结了飊线发生的天气背景、触发条件和形成的物理条件,指出冷锋、切变线、低涡、高空急流、露点锋和低空风场不连续线等都可以触发飊线系统并对其起组织作用,还按照系统发生前的环境流场的主要特征,将其分为槽前型、槽后型、高后型和台风倒槽型,对指导我国强对流天气的预报有重要意义。在有利的大尺度环流背景下,大范围降水在近地面形成水平出流,与降水云系移动的近前方的暖湿气流之间形成辐合,导致对流单体移近后逐渐组织化成为LMCS(孙靖和王建捷, 2010)。

山东省是MCS较为活跃的区域(郑永光等, 2008; 卓鸿等, 2012),近10年来,几乎每年都有强LMCS的发生,如2007年7月18日大暴雨(卓鸿等, 2011)、2009年6月2—3日的强飊线过程(孙虎林等, 2011)、2012年8月18日飊线引发的龙卷天气过程(侯淑梅等, 2018)、2016年6月13—14日连

续飊线影响山东的天气过程(张琴等,2017)都造成了严重的财产损失和人员伤亡。随着多普勒天气雷达在天气预报业务中的广泛应用,日常业务中能够及时监测到 LMCS 的出现。但由于影响 LMCS 发生发展变化的因素非常复杂(张弛等,2019;公衍铎等,2019;孙凌等,2019;陶局等,2019),LMCS 的预报仍是现代天气预报业务中面临的巨大挑战。现有的研究成果典型个例分析较多(徐燕等,2018;盛杰等,2019;郑淋淋等,2019),针对 LMCS 的天气学分析较少,对 LMCS 的预报需要进一步研究分析。本文通过普查近几年影响山东的 LMCS,分析其时间、空间的分布特征,提炼产生 LMCS 的天气学模型和预报指标,为提高对 LMCS 的预报预警能力提供技术支撑。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

济南多普勒天气雷达组合反射率因子产品(时间分辨率为 6 min,其中 37 号产品空间分辨率为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ,有效探测半径为 230 km,38 号产品空间分辨率为  $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ ,有效探测半径为 460 km),主要用于确定初始对流单体和 LMCS 生成、消散的时间、地点以及 LMCS 的尺度、走向等等。欧亚地区高空和东亚地区地面等常规观测资料,用于天气学模型的分类和物理量场指标的普查。上述资料由山东省气象台提供。另外还使用了中央气象台提供的华北区域雷达组合反射率因子产品拼图资料(时间分辨率:2016 年 6 月 14 日之前为 10 min,15 日之后为 6 min),该产品为图片格式,主要用于辅助单站雷达产品确定 LMCS 的生命史,弥补单站雷达远距离探测能力下降的不足。

统计时间为 2012—2016 年,共 5 年,每年 4—10 月。时间均为北京时。

### 1.2 方法

Parker and Johnson(2000)研究美国中纬度地区中尺度对流系统的组织模态时定义飊线的标准是:(1)40 dBz 以上反射率因子连续或准连续回波带尺度  $\geq 100\text{ km}$  并持续至少 3 h;(2)线状或准线状的对流区域拥有一个共同的前边缘。该标准被国内外许多学者广泛参考使用(王晓芳和崔春光,2012;

Meng et al,2013)。Meng and Zhang(2012)在研究中国东部的台前飊线时参考了该标准,对该标准做了微调:40 dBz 回波带可以不连续,但是 40 dBz 回波镶嵌于其中的 35 dBz 回波带必须是连续的。Meng et al(2013)在研究中国东部的飊线时又将标准调整为 40 dBz 回波带必须是连续的。

王俊(2017)普查山东省 LMCS 时定义标准为:40 dBz 以上对流回波长宽之比  $> 5$ ,长度  $> 50\text{ km}$ ,最大回波强度  $> 50\text{ dBz}$ ,结果表明 LMCS 的典型尺度为  $100 \sim 150\text{ km}$ , $> 50\text{ km}$  的  $\beta$  中尺度 LMCS 约占总个例数的 80%。本文着重分析影响山东省的 LMCS,综合上述研究,根据单站雷达组合反射率因子产品和华北区域雷达拼图产品,规定按如下标准定义 LMCS:(1)40 dBz 以上反射率因子连续或准连续回波带尺度  $\geq 100\text{ km}$  并持续至少 1 h,40 dBz 回波镶嵌于其中的 35 dBz 回波要求严格连续;(2)线状或准线状的对流区域拥有一个共同的前边缘;(3)最大回波强度  $\geq 50\text{ dBz}$ 。筛选标准中增加第 3 条“最大回波强度  $\geq 50\text{ dBz}$ ”,目的是挑选出具有明显强对流特征的 LMCS,而不是普通的积层混合性降水回波。该标准比侯淑梅等(2020)的普查标准中增加了持续时间、严格连续等限制,确保筛选的个例达到一定的强度,具有产生灾害性天气的潜势。通过人工普查挑选,共筛选出 27 个 LMCS 个例(表 1)。

表 1 2012—2016 年 LMCS 个例统计表(单位:次)

Table 1 LMCS cases from 2012 to 2016 (unit: times)

年份	5月	6月	7月	8月	9月	合计
2012	0	2	4	1	0	7
2013	0	0	4	6	0	10
2014	0	1	0	0	0	1
2015	0	0	0	3	0	3
2016	0	6	0	0	0	6
合计	0	9	8	10	0	27

初始对流单体的形成时间是指形成 LMCS 的初始回波( $\geq 15\text{ dBz}$ )出现的时刻。LMCS 的形成时间为达到 LMCS 标准的时刻,LMCS 消亡时间是不满足 LMCS 条件的时刻,二者之间的时间差即为 LMCS 的生命史。

## 2 LMCS 的时间分布特征

从 LMCS 的年际变化可见(图 1a),2012—2016 年

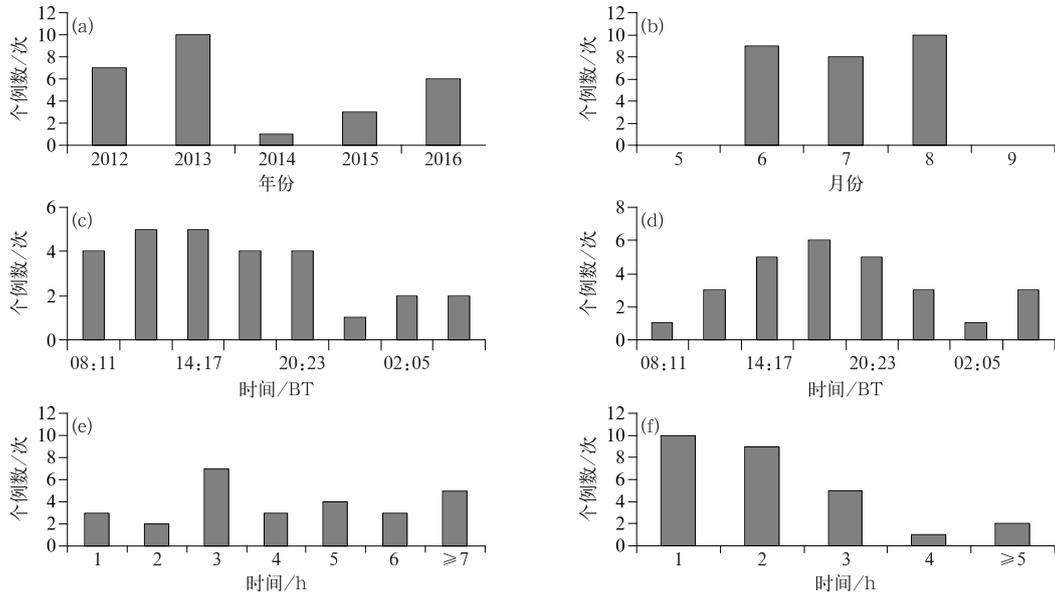


图 1 2012—2016 年影响山东的 LMCS 频次的时间分布特征

(a) 年变化, (b) 月变化, (c) 初始单体形成时间的日变化, (d) LMCS 形成时间的日变化

(e) LMCS 形成时间滞后于初始单体形成的时间, (f) LMCS 生命史

Fig. 1 Time distribution features of Shandong LMCS frequency

(a) interannual variation, (b) inter-monthly variation, (c) daily variation of the initial cell

start time, (d) daily variation of the LMCS formation time, (e) time between the initial

cell and the formation of the corresponding LMCS, (f) LMCS life

5 年中, 2013 年出现次数最多, 为 10 次, 其次是 2012 年(7 次), 2014 年最少, 只有 1 次。从月分布上看(图 1b), 只有 6—8 月出现了 LMCS, 其中 8 月最多, 出现了 10 次, 其次是 6 月, 出现了 9 次。初始对流单体生成时间(图 1c)主要为白天到前半夜, 后半夜出现次数较少。高峰期为 11—14 时和 14—17 时, 分别出现了 5 次, 其次是 8—11 时、17—20 时和 20—23 时, 分别出现了 4 次。LMCS 的形成时间(图 1d)主要集中在傍晚到前半夜, 高峰期为 17—20 时, 出现了 6 次, 次高峰有两个, 分别为 14—17 时和 20—23 时, 这与 Meng et al(2013)的结论相似。LMCS 的形成时间与初始对流单体之间的时间差表明(图 1e), LMCS 滞后初始对流单体的时间最多的是 3 h, 有 7 次, 滞后时间最长的是 8 h 56 min, 此过程初始对流单体在河南省生成组织化程度低, 结构比较松散, 进入山东以后, 经过多次合并加强, 渐趋组织化, 逐渐发展成为 LMCS。

LMCS 的生命史(图 1f)大多数为 1~2 h, 分别出现了 10 次和 9 次。生命史最长的为 7 h 52 min, 出现在 2012 年 7 月 22 日, 初始对流单体在山西省

生成, 在向东北方向移动的过程中, 呈后向传播特征, 渐趋组织化, 于 22 日 01:47 在河北省东部逐渐发展为东北—西南向的 LMCS。该 LMCS 在向东北方向移动的过程中, 其尾部不断产生新的对流单体并与之合并, 导致其生命史较长。

### 3 LMCS 的空间分布特征

形成 LMCS 的初始对流单体绝大多数位于河北省, 少数位于河南、山西和山东省(图 2)。原地位于山西和河北省的初始对流单体生成后, 一般向东偏南方向移动, 在邻近山东或进入山东境内后组织化为 LMCS。原地位于河南省的初始对流单体向东北方向移动, 进入山东后组织化为 LMCS。而原地位于山东省境内初始对流单体, 发展迅速, 但移动方向没有明显规律。相较于初始位置位于山东省外的对流单体, 产生于山东省境内的对流单体其初始位置与 LMCS 形成位置之间的距离一般更近。

6 月初始对流单体没有位于河南省的, LMCS 形成后, 大多向东南方向移动, 影响山东大部分地区。

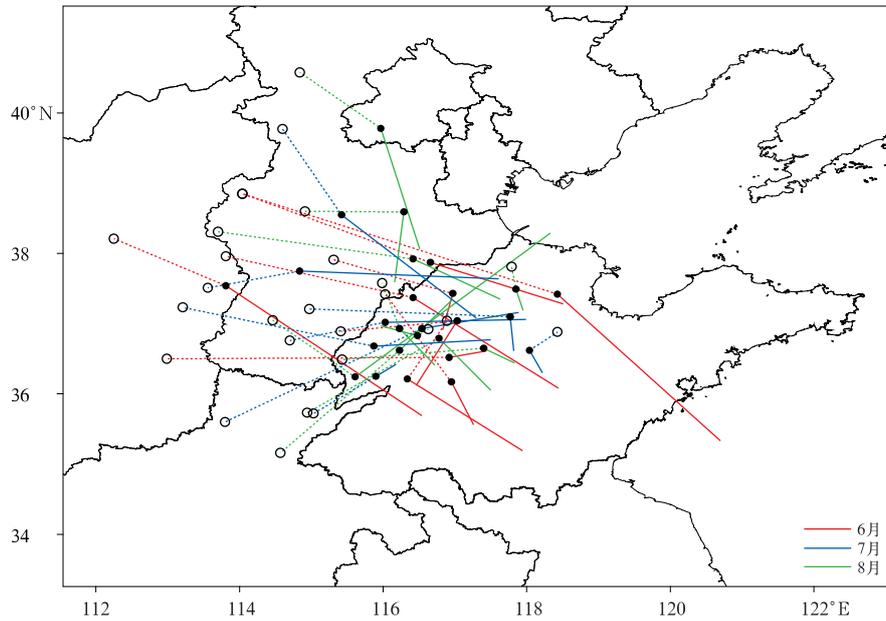


图 2 2012—2016 年影响山东的 LMCS 路径  
 (空心圆:初始对流单体生成位置,实心圆:LMCS 形成位置中心点,  
 虚线:LMCS 形成之前路径,实线:LMCS 形成之后路径)

Fig. 2 Shandong LMCS tracks during 2012—2016  
 (hollow circle: generation position of the initial convective cell, solid circle: the centroid of the LMCS formation position, dashed line: tracks before LMCS formation, solid line: tracks after LMCS formation)

其中 1 例 LMCS 在东营形成后,一直移动到黄海中部才逐渐消失,生命史高达 7 h 36 min。7 月和 8 月初始对流单体在河北、河南、山西和山东省均有出现,因此 LMCS 形成后,其移动方向主要为东南和东北两个方向。

LMCS 的走向最多的是东北—西南向,共有 14 例(51.8%),其次是东西向,共有 5 例,其他还有南北、西北—东南等走向。LMCS 的走向不是一成不变的,有 1 例 LMCS 在河北省形成时是南北向的弓形,向东北方向移动进入渤海减弱,其长轴的走向也由南北向转为西北—东南向。27 例 LMCS 中有 16 例(59.3%)的尺度介于 100~200 km,尺度最大的为 300 km,发生在 2016 年 6 月 13 日。

#### 4 LMCS 的形成方式

在中纬度,飚线可能有多种形成方式,Bluestein and Jain(1985)根据美国俄克拉何马州 11 年中 40 次飚线总结出四种类型:不连续线型(broken line),后部新生型(back building),不连续区域型(broken areal)和镶嵌对流区域型(embedded areal)(图 3)。

参考上述分类标准,本次普查的 27 个个例中,不连续线型有 9 例,后部新生型有 8 例,不连续区域型和镶嵌对流区域型分别有 6 例、4 例。其中不连续线

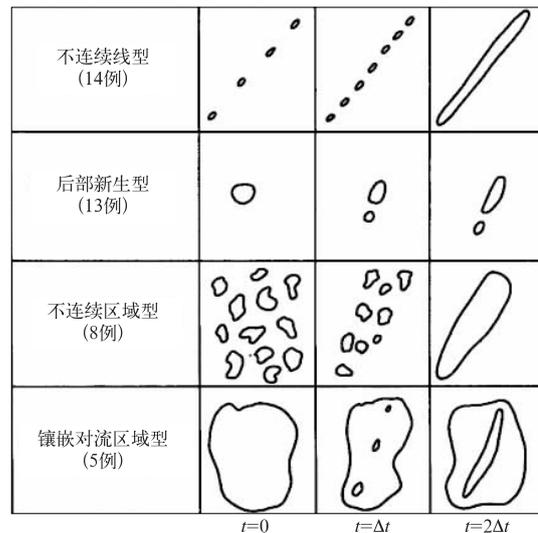


图 3 飚线形成方式的模型  
 (Bluestein and Jain, 1985)

Fig. 3 Idealized depiction of squall-line formation  
 (Bluestein and Jain, 1985)

型大部分个例与后部新生型相似,也呈现后向传播特征,因此,影响山东的 LMCS 大多数为后向传播雷暴。

## 5 产生 LMCS 的天气学模型

### 5.1 天气系统分类标准

本文按高空影响系统,将 27 个历史个例进行分类,分类标准如下:

高空:将 500、700 和 850 hPa 高空槽垂直或前倾的归为前倾槽类,其他高空槽影响时归为后倾槽类,将冷涡中带有横槽转竖的归为横槽类,没有横槽的归为冷涡类,低涡往往是切变线后期加强演变生成,所以将低涡和切变线归为低涡切变线类。

地面影响系统:地面有气旋的定义为气旋类,有低压或低压槽的定义为低压类,有冷锋的定义为冷锋类,有倒槽的定义为倒槽类,无上述明显系统,但有小范围风向风速辐合的定义为辐合线,此类辐合线一般是降水下沉气流造成的地面冷池产生的。

将 500 hPa  $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  范围内西北风速  $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  定义为中空急流,700 hPa 以下  $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  范围偏南风速  $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  定义为低空急流。

### 5.2 产生 LMCS 的天气系统

根据上述天气系统的分类标准,造成山东 LMCS 的天气系统中(表 2),前倾槽个例最多,共有 12 例,占 44.5%,其次是后倾槽类,共有 7 例(25.9%),再次是冷涡类,有 4 例(14.8%),横槽和切变线类各有 2 例。可见,LMCS 容易发生的天气背景是前倾槽和后倾槽。

27 例 LMCS 过程中,850 hPa 均伴有暖温度脊或暖中心,说明低层的增暖,有利于 LMCS 的形成,也说明热力因子是产生 LMCS 的重要因素。27 例中,500 hPa 伴有中空急流的共有 12 例,除了低涡切变线类,其他四类均有部分个例伴有中空急流,其中冷涡、横槽类占比较大,横槽 2 例均有中空急流,冷涡类一半的个例伴有中空急流,说明冷涡和横槽类对流层中层的干侵入对 LMCS 的形成起着较为重要的作用。

另外,27 例中 700 hPa 以下伴有低空急流的有 8 例,切变线类 2 例均伴有低空急流,后倾槽类有

表 2 造成 LMCS 的天气系统

层次	天气系统特征	个例数/次	百分比/%
高空	冷涡	4	14.8
	横槽	2	7.4
	后倾槽	7	25.9
	前倾槽	12	44.5
	低涡切变线	2	7.4
地面	气旋	1	3.7
	冷锋	6	22.2
	倒槽(或低压或低压槽)	16	59.3
	辐合线	4	14.8
850 hPa	有暖脊或暖中心	27	100
700 hPa	以下有低空急流	8	29.6
500 hPa	有中空急流	12	44.5

3 例(占后倾槽 42.9%)伴有低空急流,说明对于后倾槽和切变线类,水汽输送对于 LMCS 的形成作用较大。

造成 LMCS 的地面影响系统,最多的是倒槽,共有 16 例(59.3%),其次是冷锋,共有 6 例(22.2%)。说明 LMCS 与地面辐合关系密切。6 例辐合线类中有 5 例雷暴初生时没有辐合线,辐合线是雷暴下沉气流形成的冷池与地面暖湿空气形成的,持续时间较短,与倒槽类长时间持续有地面辐合不同。

### 5.3 产生 LMCS 的天气学模型

在 5.2 节分析的基础上,根据天气系统的空间配置特征,将产生 LMCS 的天气学模型提炼为三种类型:后倾槽、前倾槽和冷涡。

#### 5.3.1 后倾槽

高空 500、700 和 850 hPa 西风槽随高度向后倾斜(图 4),高空三层山东省均受槽前偏南风气流控制,低层槽前西南气流有时能达到低空急流强度。850 hPa 槽前有暖温度脊,一般比湿  $> 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。地面有低压槽、低压或辐合线。LMCS 位于地面辐合线东侧偏南风气流内、低层低空急流左前方、850 hPa 暖温度脊西侧。LMCS 随着地面辐合线移动,在辐合线前沿西南风水汽输送方向不断有新生雷暴产生,呈后向传播特征。

#### 5.3.2 前倾槽

500 hPa 或 700 hPa 高空槽超前于 850 hPa 高空槽(图 5),500 hPa 槽后有较强的西北气流,携带干冷空气入侵 850 hPa 暖温度脊。地面有锋面或辐合线。LMCS 上空,500 hPa 受槽后西北气流控制,850 hPa 受槽前西南暖湿气流控制,属典型的下暖

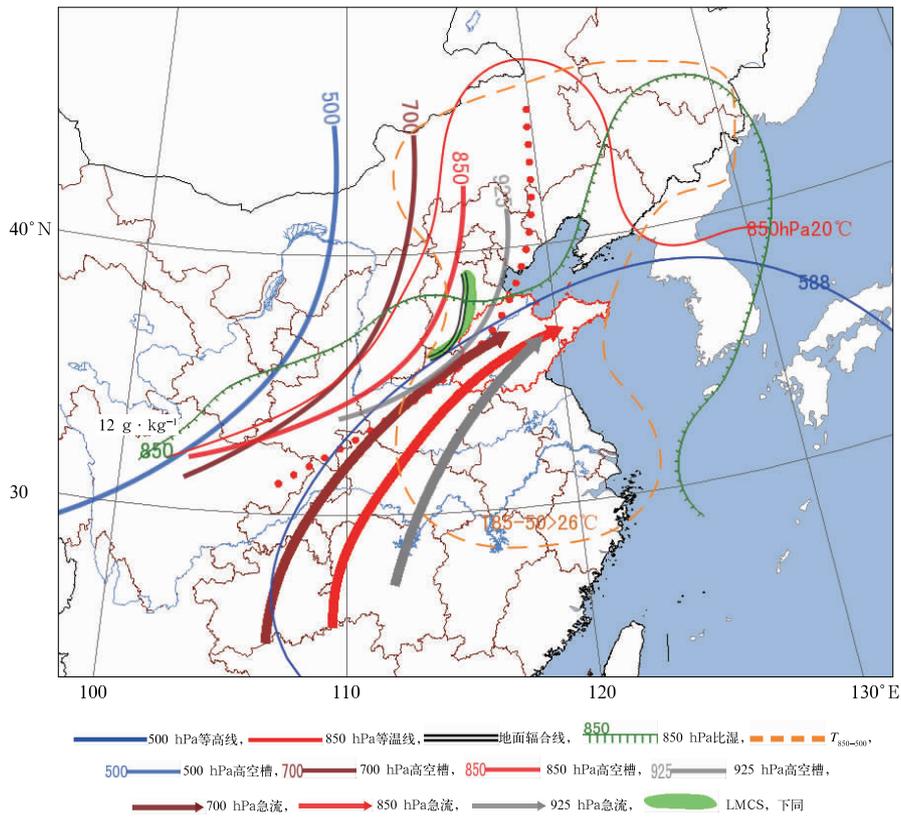


图 4 后倾槽类 LMCS 天气学模型

Fig. 4 The LMCS synoptic model of backward-tilting trough

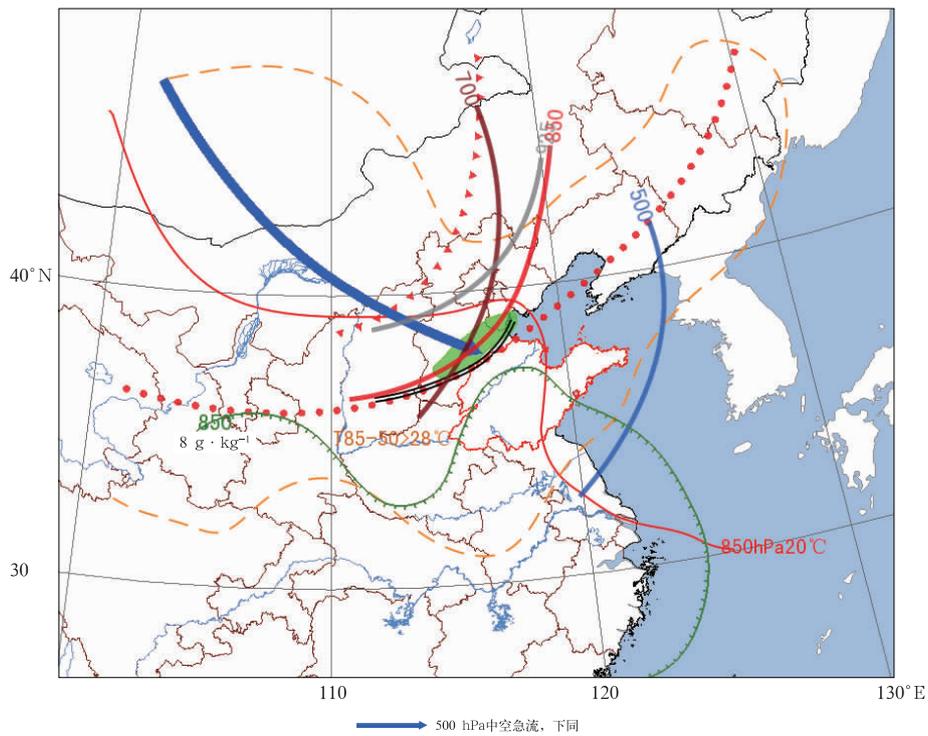


图 5 同图 4, 但为前倾槽类

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the model of forward-tilting trough

湿上干冷的不稳定大气层结的结构。850 hPa 槽过境,或地面辐合线过境时触发产生对流。LMCS 处于 850 hPa 暖温度脊线、地面辐合线附近。

### 5.3.3 冷涡

华北冷涡位于内蒙古、山西、河北省三省(区)交界处(图 6),涡后强劲的西北气流携带冷空气侵入到山东,850 hPa 山东境内有暖温度脊。LMCS 处于冷涡的东南象限、850 hPa 冷温度槽与暖温度脊之间、500 hPa 西北气流侵入 850 hPa 暖温度脊的路径上、地面辐合线附近。

可见,850 hPa 伴有暖温度脊或暖中心是产生 LMCS 的一个重要指标,造成 LMCS 的天气系统前倾槽类最多,其次是后倾槽类。冷涡或前倾槽影响时,500 hPa 伴有中空急流是导致出现 LMCS 的一个重要因素,切变线和后倾槽类,低空急流的水汽输送对于 LMCS 的形成作用较大。

## 6 产生 LMCS 的环境场物理量特征

中尺度对流系统的持续一般与气团的稳定度有关,故选取与大气稳定度有关的动力、热力参数,分析 LMCS 发生前高空各层物理量特征,寻找有利于 LMCS 发展的预报指标。

选取距离 LMCS 最近的探空站,取其没发生对流时刻的要素。当 LMCS 发生在下午时,用探空站 14 时(或 11 时)气温和露点温度对 08 时的探空资料进行订正(王秀明等,2014)。选取的物理量参数见表 3,其中 0~6 km 垂直风切变用 500 hPa 与地面的风矢量差表示。

### 6.1 物理量特征

分析发现,产生 LMCS 的环境条件对水汽要求较高,27 例中有 25 例 850 hPa 比湿  $> 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其中有 7 例超过  $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。两个 850 hPa 比湿  $< 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的个例,分别为 2012 年 6 月 13 日夜间和 2015 年 8 月 22 日下午,地面影响系统分别为气旋和倒槽,这两个个例的 850 hPa 与 500 hPa 气温差  $T_{850-500}$  均大于  $30^\circ\text{C}$ 。初步分析表明,2012 年 6 月 13 日夜间冷涡后部横槽转竖,LMCS 随天气系统移动进入山东并增强,地面有气旋配合。2015 年 8 月 22 日,受前倾槽影响,500、850、925 hPa 高空槽与 850 hPa 暖温度脊几乎重合,对流有效位能(CAPE)高达  $2989 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。下午对流单体在山东境内初生后渐趋组织化,发展为 LMCS,属典型的强对流天气。可见,在动力条件足够强的条件下,配合有利的不稳定大气层结,即使水汽条件稍微差一点,触发对

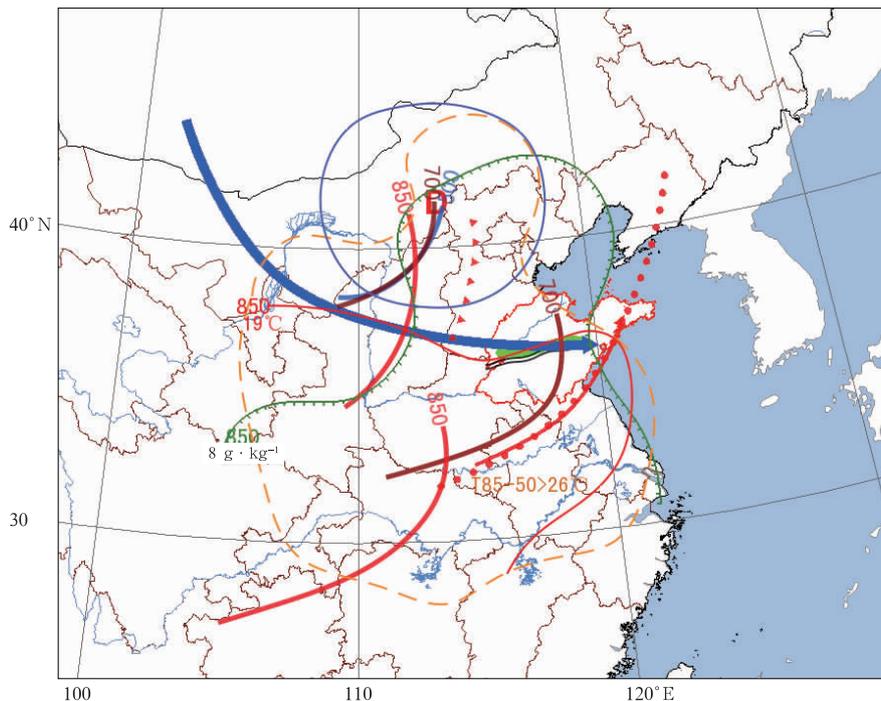


图 6 同图 4,但为冷涡类

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for the model of cold vortex

流后也可能产生 LMCS。

分析沙氏指数(SI)发现,27 例中有 18 例  $SI < 0^{\circ}\text{C}$ ,最小值为 2013 年 8 月 13 日 20 时北京 ( $-6.12^{\circ}\text{C}$ )。分析抬升指数(LI)发现,27 例中有 26 例  $LI < 0^{\circ}\text{C}$ ,最小值为 2013 年 8 月 13 日 20 时北京 ( $-8.04^{\circ}\text{C}$ )。只有 1 例 LI 是正值,为 2013 年 8 月 28 日。分析天气系统的配置发现,此例受冷涡影响,500 hPa 中空急流有增大的趋势,2013 年 8 月 28 日 08 时济南站的 CAPE 为  $1255 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而对流抑制能量(CIN)为  $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,850 hPa 比湿为  $11.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,是非常有利于产生强对流的天气形势。当天午后在山东境内产生初始对流,逐渐组织化形成 LMCS,但移动较快,强度较弱。可见,尽管探空站的 LI 为正值,但当层结不稳定逐渐增强时,也可能产生 LMCS。

24 例 LMCS 的  $CAPE > 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,另外 3 例中有 2 例  $> 900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,说明需要有较大的 CAPE 才能形成 LMCS。只出现大风的案例中,600 hPa 起始下沉对流有效位能  $DCAPE_{600} > 1300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,仅有强降水的案例中  $DCAPE_{600} < 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,说明  $DCAPE_{600} > 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 可能是预报雷暴大风的比较好用的物理量指标。

### 6.2 物理量指标

为更好地提炼预报指标,将 LMCS 按灾害种类进行组合分类,统计每类 LMCS 发生前的物理量指

标。27 例 LMCS 个例中有 19 例(70.4%)产生了灾害,灾害性天气种类有雷暴大风、冰雹和强降水,其他没有产生灾害的 8 例均产生了短时强降水。因此,将仅有强降水灾害的 1 例与另外无灾害的 8 例合并为强降水类,其他有灾害的 18 例按照产生的灾害不同进行分类(表 3)。

根据统计结果,将每种类型中 80%个例的物理量参数特征作为该类型的预报指标,从表 3 可见,对于冰雹、大风和强降水并存的个例,多数个例总指数达  $46^{\circ}\text{C}$  以上; $0^{\circ}\text{C}$ 层高度  $H_0$  为  $4.1 \sim 4.6 \text{ km}$ , $-20^{\circ}\text{C}$ 层高度  $H_{-20}$  在  $7.1 \sim 7.7 \text{ km}$ ;850 hPa 与 500 hPa 气温差  $T_{850-500} > 27^{\circ}\text{C}$ ;对流温度  $T_g > 30^{\circ}\text{C}$ ;强天气威胁指数(SWEAT)多数个例为 160 以上,最大达 700;抬升凝结高度(LCL)一般低于 900 hPa; $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变多数  $shear_{0-6 \text{ km}}$  为  $10 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于冰雹和大风同时发生的个例,K 指数一般为  $24 \sim 32^{\circ}\text{C}$ ,波动幅度较大; $H_0$  在 4 km 左右, $H_{-20}$  为  $7 \sim 8 \text{ km}$ ;  $T_{850-500} > 30^{\circ}\text{C}$ ;  $T_g > 35^{\circ}\text{C}$ ;  $SWEAT > 160$ ;  $LCL < 900 \text{ hPa}$ ; 风暴强度指数(SSI)为 250 左右; $shear_{0-6 \text{ km}}$  为  $10 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于大风和强降水同时发生的个例,总指数大多数为  $45 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ;K 指数较大,在  $30 \sim 38^{\circ}\text{C}$ ;  $H_0$ ,  $H_{-20}$  分别为  $4.7 \sim 5.6, 8 \sim 9 \text{ km}$ ;  $T_{850-500} > 25^{\circ}\text{C}$ ;  $T_g > 35^{\circ}\text{C}$ ;  $SWEAT > 160$ ;  $LCL$  均低于 900 hPa;  $SSI > 250$ ;  $shear_{0-6 \text{ km}}$  为  $10 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 3 LMCS 产生前环境物理量特征

Table 3 Physical quantity characteristics before LMCS generation

灾害性天气	冰雹、大风、强降水(7 例)	冰雹、大风(3 例)	大风(3 例)	大风、强降水(5 例)	强降水(9 例)
总指数 $TT/^{\circ}\text{C}$	$>46$	$>46$	$47 \sim 57$	$45 \sim 50$	$41 \sim 50$
K 指数 $KI/^{\circ}\text{C}$	$25 \sim 40$	$24 \sim 32$	$20 \sim 43$	$30 \sim 38$	$30 \sim 48$
沙氏指数 $SI/^{\circ}\text{C}$	$<0.7$	$<1$	$<-1$	$<1$	$<-1$
$0^{\circ}\text{C}$ 层高度 $H_0/\text{km}$	$4.1 \sim 4.6$	4	$4.8 \sim 5.5$	$4.7 \sim 5.6$	$5.1 \sim 5.6$
$-20^{\circ}\text{C}$ 层高度 $H_{-20}/\text{km}$	$7.1 \sim 7.7$	$7 \sim 8$	$8 \sim 9$	$8 \sim 9$	$8.6 \sim 8.9$
850 hPa 与 500 hPa 气温差 $T_{850-500}/^{\circ}\text{C}$	$>27$	$>30$	$>27$	$>25$	$>23$
对流温度 $T_g/^{\circ}\text{C}$	$>30$	$>35$	$>35$	$>35$	$>33$
强天气威胁指数 SWEAT	$>160$	$>160$	$>230$	$>160$	$>230$
抬升凝结高度 $LCL/\text{hPa}$	$>900$	$>900$	$850 \sim 960$	$>900$	$>900$
对流有效位能 $CAPE/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$>1200$	$1500 \sim 3000$	$>1400$	$>1800$	$>800$
600 hPa 起始下沉对流有效位能 $DCAPE_{600}/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$>800$	$800 \sim 1700$	$>1200$	$>600$	$>600$
风暴强度指数 SSI	$>250$	$>250$	$>260$	$>250$	$>250$
抬升指数 $LI/^{\circ}\text{C}$	$<-1$	$-7 \sim 0$	$<-5$	$<-1$	$<-1$
$0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变 $shear_{0-6 \text{ km}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$10 \sim 20$	$10 \sim 16$	$5 \sim 21$	$10 \sim 15$	$8 \sim 12$

对于只有大风发生的个例,总指数较大,在 47~57℃;  $H_0$  较高,为 4.8~5.5 km,  $H_{-20}$  为 8~9 km;  $T_{850-500} > 27^\circ\text{C}$ ;  $T_g > 35^\circ\text{C}$ ;  $SWEAT$  多数为 230 以上,最大达 420;  $LCL$  波动较大,介于 850~960 hPa;  $DCAPE_{600}$  较大,均  $> 1200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $SSI > 260$ ;  $shear_{0-6 \text{ km}}$  跨度较大,为 5~21  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于只有强降水发生的个例,总指数介于 41~50℃;  $K$  指数较大,在 30~48℃;  $H_0 > 5 \text{ km}$ ,  $H_{-20} > 8.6 \text{ km}$ ;  $T_{850-500} > 23^\circ\text{C}$ ;  $T_g > 33^\circ\text{C}$ ;  $SWEAT > 230$ ;  $LCL$  低于 900 hPa;  $SSI > 250$ ;  $shear_{0-6 \text{ km}}$  跨度较大,最小值 6.35  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大值 22.59  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但绝大多数个例的值在 8~12  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

综上所述,在有利于产生强对流的天气形势下(朱乾根等,2007;曹钢锋等,1988),当 850 hPa 比湿  $> 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $SI$  和  $LI$  均为负的情况下,可能出现 LMCS。若  $CAPE > 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $CIN$  较小,且  $T_{850-500} > 25^\circ\text{C}$ ,出现 LMCS 的概率较大。当预报可能出现 LMCS 时,均需预报短时强降水。此外,若  $DCAPE_{600} > 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,可能出现大风灾害。若  $H_0$  在 4 km 左右,  $H_{-20}$  在 7~8 km,  $shear_{0-6 \text{ km}} > 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,则可能产生冰雹和大风;若  $KI > 30^\circ\text{C}$ ,可考虑有强降水并存。  $H_0 > 5 \text{ km}$ ,  $H_{-20} > 8 \text{ km}$ ,  $KI > 30^\circ\text{C}$ ,  $T_g > 35^\circ\text{C}$ ,  $LCL < 900 \text{ hPa}$ ,则可能出现强降水和大风。仅有强降水发生时,对  $T_{850-500}$  要求不是太高,而对于有大风或冰雹出现时,则要求  $T_{850-500} > 25^\circ\text{C}$ ,可见冰雹和大风对于大气的不稳定层结要求更高。

## 7 结 论

本文分析了影响山东的 LMCS 时间和空间分布的气候特征,提炼了形成 LMCS 的后倾槽、前倾槽和冷涡 3 类天气学模型,普查了有利于形成 LMCS 的环境物理量特征,凝练了预报指标,得出以下几条结论:

(1)影响山东的 LMCS 出现在 6—8 月,其中 8 月最多,出现了 10 次,其次是 6 月。LMCS 的生成时间集中在傍晚到前半夜,高峰期为 17—20 时。LMCS 滞后初始对流单体的时间一般是 3 h,滞后时间最长的可达 8 h 56 min。LMCS 生命史一般为 1~2 h,最长可达 7 h 52 min。影响山东的 LMCS 大多数为后向传播雷暴。

(2)形成 LMCS 的初始对流单体绝大多数位于

河北省,少数位于河南、山西和山东省。原位于山西和河北省的初始对流单体生成后,一般向东偏南方向移动,原位于河南省的初始对流单体向东北方向移动,原位于山东省境内初始对流单体,发展迅速,但移动方向没有明显规律。相较于初始位置位于山东省外的对流单体,产生于山东省境内的对流单体其初始位置与 LMCS 形成位置之间的距离一般更近。LMCS 大多数是东北—西南走向,尺度一般介于 100~200 km。

(3)构建了发生 LMCS 的三类天气学模型图:后倾槽、前倾槽和冷涡。850 hPa 伴有暖温度脊或暖中心是产生 LMCS 的一个重要指标,冷涡或前倾槽影响时,500 hPa 伴有中空急流是导致出现 LMCS 的一个重要因素,对于切变线和后倾槽类,低空急流的水汽输送对于 LMCS 的形成作用较大。

(4)当 850 hPa 比湿  $> 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $SI$  和  $LI$  均为负值的情况下,可能出现 LMCS。若  $CAPE > 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $CIN$  较小,且  $T_{850-500} > 25^\circ\text{C}$ ,出现 LMCS 的概率达 80%。

(5)LMCS 出现时,均伴有短时强降水,70.4% 的 LMCS 造成雷暴大风、冰雹或强降水灾害。若  $DCAPE_{600} > 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,可能出现大风灾害。若  $H_0$  在 4 km 左右,  $H_{-20}$  为 7~8 km,  $shear_{0-6 \text{ km}} > 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $T_{850-500} > 27^\circ\text{C}$ ,则可能产生冰雹和大风;若  $K$  指数  $> 30^\circ\text{C}$ ,可考虑有强降水并存。若  $H_0 > 5 \text{ km}$ ,  $H_{-20} > 8 \text{ km}$ ,  $KI > 30^\circ\text{C}$ ,  $T_g > 35^\circ\text{C}$ ,  $LCL < 900 \text{ hPa}$ ,则可能出现强降水和大风。冰雹和大风比短时强降水需要大气层结的不稳定度更高。

本文主要对 LMCS 的天气学特征进行了分析,并根据不同灾害提炼了物理量指标。天气尺度的环境只是为 LMCS 发生提供了有利的背景条件,只有中小尺度天气系统的配合才能真正产生 LMCS。下一步,将对不同天气类型的典型 LMCS 进行深入剖析,以进一步探索多尺度天气系统之间相互作用对 LMCS 形成、发展过程中所起的作用。

## 参考文献

- 曹钢锋,张善君,朱官忠,等,1988. 山东天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社:161-162. Cao G F, Zhang S J, Zhu G Z, et al, 1988. Weather Analysis and Forecast in Shandong Province[M]. Beijing: China Meteorological Press: 161-162 (in Chinese).
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,等,1982. 我国飚线发生条件的研究[J]. 大气科学, 6(1): 18-27. Ding Y H, Li H Z, Zhang M L, et al, 1982. A study on the genesis conditions of squall-line in China [J].

- Chin J Atmos Sci, 6(1):18-27(in Chinese).
- 公衍铎,郑永光,罗琪,2019.冷涡底部一次弓状强飑线的演变和机理[J].气象,45(4):483-495. Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q, 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the south side of a cold vortex[J]. Meteor Mon, 45(4):483-495(in Chinese).
- 何立富,许爱华,陈涛,2009.“泰利”台风低压大暴雨过程冷空气与地形的作用[J].气象科技,37(4):385-391. He L F, Xu A H, Chen T, 2009. Cold air activities and topographic forcing in severe torrential rainfall in landing typhoon depression (Tailim)[J]. Meteor Sci Technol, 37(4):385-391(in Chinese).
- 侯淑梅,闵锦忠,刁秀广,等,2018.飑线发展过程中回波合并的特征分析[J].大气科学学报,41(3):367-376. Hou S M, Min J Z, Diao X G, et al, 2018. Analysis of echoes merging characteristics during squall line development process[J]. Trans Atmos Sci, 41(3):367-376(in Chinese).
- 侯淑梅,周成,韩永清,等,2020.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,40(1):57-65. Hou S M, Zhou C, Han Y Q, et al, 2020. Characteristics of merging between linear mesoscale convective system and multi-cell storm in Shandong[J]. J Mar Meteor, 40(1):57-65. (in Chinese).
- 马禹,王旭,陶祖钰,1997.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,7(6):701-706. Ma Y, Wang X, Tao Z Y, 1997. General survey and spatio-temporal distribution characteristics of mesoscale convective systems over China and its vicinity [J]. Prog Nat Sci, 7(6):701-706(in Chinese).
- 盛杰,郑永光,沈新勇,等,2019.2018年一次罕见早春飑线大风过程演变和机理分析[J].气象,45(2):141-154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al, 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018[J]. Meteor Mon, 45(2):141-154(in Chinese).
- 孙虎林,罗亚丽,张人禾,等,2011.2009年6月3—4日黄淮地区强飑线成熟阶段特征分析[J].大气科学,35(1):105-120. Sun H L, Luo Y L, Zhang R H, et al, 2011. Analysis on the mature-stage features of the severe squall line occurring over the Yellow River and Huaihe River basins during 3—4 June 2009[J]. Chin J Atmos Sci, 35(1):105-120(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).
- 孙靖,王建捷,2010.北京地区一次引发强降水的中尺度对流系统的组织发展特征及成因探讨[J].气象,36(12):19-27. Sun J, Wang J J, 2010. Investigation on systematic development of mesoscale convective systems in a torrential rain event over Beijing[J]. Meteor Mon, 36(12):19-27(in Chinese).
- 孙凌,陈志雄,徐燕,等,2019.北京一次强飑线过程的闪电辐射源演变特征及其与对流区域和地面热力条件的关系[J].大气科学,43(4):759-772. Sun L, Chen Z X, Xu Y, et al, 2019. Evolution of lightning radiation sources of a strong squall line over Beijing metropolitan region and its relation to convection region and surface thermodynamic condition[J]. Chin J Atmos Sci, 43(4):759-772(in Chinese).
- 陶局,易笑园,赵海坤,等,2019.一次飑线过程及其受下垫面影响的数值模拟[J].高原气象,38(4):756-772. Tao J, Yi X Y, Zhao H K, et al, 2019. Numerical simulation on the influence of Bohai Sea to a squall line process[J]. Plateau Meteor, 38(4):756-772 (in Chinese).
- 王俊,2017.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,37(4):25-33. Wang J, 2017. Study on Doppler radar features of linear mesoscale convective systems[J]. J Mar Meteor, 37(4):25-33(in Chinese).
- 王微,潘益农,束宇,2011.中国东部夏季中尺度对流系统以及中尺度对流涡旋的特征[J].南京大学学报(自然科学),47(6):692-702. Wang W, Pan Y N, Shu Y, 2011. The characteristics of mesoscale convective system and mesoscale convective vortex in summers over eastern China[J]. J Nanjing Univ (Nat Sci), 47(6):692-702(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).
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,2014.雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J].气象,40(4):389-399. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2014. Discussion on basic issues of thunderstorm potential forecasting[J]. Meteor Mon, 40(4):389-399(in Chinese).
- 徐燕,孙竹玲,周筠珺,等,2018.一次具有对流合并现象的强飑线系统的闪电活动特征及其与动力场的关系[J].大气科学,42(6):1393-1406. Xu Y, Sun Z L, Zhou Y J, et al, 2018. Lightning activity of a severe squall line with cell merging process and its relationships with dynamic fields[J]. Chin J Atmos Sci, 42(6):1393-1406(in Chinese).
- 岳治国,牛生杰,梁谷,2008.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,31(3):395-402. Yue Z G, Niu S J, Liang G, 2008. Structure models and disaster analyses of mesoscale convective systems in Weibei Area of Shaanxi Province [J]. J Nanjing Inst Meteor, 31(3):395-402(in Chinese).
- 张弛,王咏清,沈新勇,等,2019.东北冷涡背景下飑线发展机制的理论分析和数值研究[J].大气科学,43(2):361-371. Zhang C, Wang Y Q, Shen X Y, et al, 2019. Theoretical analysis and numerical study on the development mechanism of squall line in the Northeast cold vortex[J]. Chin J Atmos Sci, 43(2):361-371 (in Chinese).
- 张琴,孟伟,朱敏,等,2017.2016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,37(4):101-112. Zhang Q, Meng W, Zhu M, et al, 2017. Characteristics and cause analysis of the strong convection weather processes in

- Shandong during 13–14 June 2016[J]. *J Mar Meteor*, 37(4): 101-112(in Chinese).
- 赵宇,裴昌春,杨成芳,2017. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统触发和组织化的观测分析[J]. *气象学报*, 75(5): 700-716. Zhao Y, Pei C C, Yang C F, 2017. Observational analysis of initiation and organization of mesoscale convective systems in a heavy rainfall event associated with Meiyu front[J]. *Acta Meteor Sin*, 75(5): 700-716(in Chinese).
- 郑淋淋,邱学兴,钱磊,2019. 同化雷达反射率资料对一次飑线过程的模拟研究[J]. *气象*, 45(1): 73-87. Zheng L L, Qiu X X, Qian L, 2019. Simulation study of a squall line case based on assimilation radar reflectivity data[J]. *Meteor Mon*, 45(1): 73-87(in Chinese).
- 郑永光,陈炯,朱佩君,2008. 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*, 53(4): 471-481. Zheng Y G, Chen J, Zhu P J, 2008. Climatological distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its vicinity during summer[J]. *Chin Sci Bull*, 53(4): 471-481(in Chinese).
- 郑永光,陶祖钰,王洪庆,等,2002. 黄海及周边地区  $\alpha$  中尺度对流系统发生的环境条件[J]. *气象学报*, 60(5): 613-619. Zheng Y G, Tao Z Y, Wang H Q, et al, 2002. Environment of meso- $\alpha$  scale convective system development in Yellow Sea Region[J]. *Acta Meteor Sin*, 60(5): 613-619(in Chinese).
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2007. 天气学原理和方法:第 4 版[M]. 北京:气象出版社:432-435. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Principles and Methods of Synoptic Meteorology[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press: 432-435(in Chinese).
- 卓鸿,姚秀萍,郑永光,等,2004. 黄河下游春季一次  $M\alpha CS$  暴雨过程的综合分析[J]. *气象学报*, 62(4): 504-511. Zhuo H, Yao X P, Zheng Y G, et al, 2004. The synthetical analysis of a spring  $M\alpha CS$  heavy rain in the lower reaches of the Yellow River[J]. *Acta Meteor Sin*, 62(4): 504-511(in Chinese).
- 卓鸿,赵平,李春虎,等,2012. 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*, 36(6): 1112-1122. Zhuo H, Zhao P, Li C H, et al, 2012. Analysis of climatic characteristics of mesoscale convective system over the lower reaches of the Yellow River during summer[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(6): 1112-1122(in Chinese).
- 卓鸿,赵平,任健,等,2011. 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*, 69(2): 263-276. Zhuo H, Zhao P, Ren J, et al, 2011. A study of the permanently elongated convective system during the heavy torrential rain event over Jinan on 18 July 2007[J]. *Acta Meteor Sin*, 69(2): 263-276(in Chinese).
- Anderson C J, Arritt R W, 1998. Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993[J]. *Mon Wea Rev*, 126(3): 578-599.
- Blanchard D O, 1990. Mesoscale convective patterns of the southern high plains[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 71(7): 994-1005.
- Bluestein H B, Jain M H, 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: severe squall lines in Oklahoma during the spring[J]. *J Atmos Sci*, 42(16): 1711-1732.
- Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al, 2012. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm season based on radar mosaic climatology[J]. *J Geophys Res Atmos*, 117(D20): D20115.
- Chu C M, Lin Y L, 2000. Effects of orography on the generation and propagation of mesoscale convective systems in a two-dimensional conditionally unstable flow[J]. *J Atmos Sci*, 57(23): 3817-3837.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. *Wea Forecasting*, 11(4): 560-581.
- Gallus W A Jr, Snook N A, Johnson E V, 2008. Spring and summer severe weather reports over the Midwest as a function of convective mode: a preliminary study[J]. *Wea Forecasting*, 23(1): 101-113.
- Jirak I L, Cotton W R, McAnelly R L, 2003. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development[J]. *Mon Wea Rev*, 131(10): 2428-2449.
- Maddox R A, 1980. Mesoscale convective complexes[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 61(11): 1374-1387.
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J, 2013. General features of squall lines in east China[J]. *Mon Wea Rev*, 141(5): 1629-1647.
- Meng Z Y, Zhang Y J, 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China[J]. *Mon Wea Rev*, 140(2): 445-470.
- Miller D, Fritsch J M, 1991. Mesoscale convective complexes in the western Pacific region[J]. *Mon Wea Rev*, 119(12): 2978-2992.
- Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 128(10): 3413-3436.
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L, 1988. A theory for strong, long-lived squall lines[J]. *J Atmos Sci*, 45(3): 463-485.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 133(4): 961-976.
- Shibagaki Y, Yamanaka M D, Shimizu S, et al, 2000. Meso- $\beta$  to - $\gamma$  Scale wind circulations associated with precipitating clouds near Baiu front observed by the MU and meteorological radars[J]. *J Meteor Soc Jpn*, 78(1): 69-91.
- Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al, 2013. Organizational models of mesoscale convective systems over central east China[J]. *Wea Forecasting*, 28(5): 1081-1098.