

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.

陕西渭北带状中尺度对流雷达回波统计特征^{*}

岳治国 梁谷 李燕 左爱文 田显

陕西省人工影响天气办公室, 西安 710015

提 要: 根据雷达回波的形态, 把陕西渭北 2000—2006 年 71 次带状 MCS 个例分为拖曳层状、先导层状、平行层状和断裂带状 MCS 等 4 种类型, 并分析了 4 类带状 MCS 的雷达回波统计特征。结果显示: 各类带状 MCS 发生频次的年际变化较大, 断裂带状 MCS 发生的次数最多; 拖曳层状 MCS 的平均最大带长最长, 平行层状 MCS 的平均最大带长最小; 带状 MCS 的移动方向主要为东南; 带状 MCS 在不同朝向上的移动速度差异较大, 朝向东南移动的拖曳层状 MCS 的平均速度最大; 拖曳层状 MCS 降雹概率 62%, 位居各类 MCS 之首, 造成的灾害最为严重。

关键词: 带状回波, 中尺度对流, 统计特征

Statistical Characteristics of Radar Echoes of Linear Mesoscale Convection in the Weibei Area of Shaanxi Province

YUE Zhiguo LIANG Gu LI Yan ZUO Aiwen TIAN Xian

Weather Modification Office of Shaanxi Province, Xi'an 710015

Abstract: Based on the 711-digital weather radar data of 71 linear MCS cases in Weibei area of Shaanxi Province between May and September from 2000 to 2006, these linear MCS systems were classified into four categories (trailing stratiform (TS), leading stratiform (LS), parallel stratiform (PS) and broken linear MCS). The characteristics of each MCS class were statistically analyzed. The results show that linear MCS has the greater frequency of changes, and the broken linear MCS occurs in the most cases; the mean scale of TS MCS is the greatest and that of PS MCS is the least; the dominant moving direction of linear MCS is southeast; the moving speed of linear MCS in different direction has large differences and the mean moving speed of TS MCS which moves southeastward is the fastest. On the other hand, the TS MCS has the most hail probability (62%), and tends to have more severe weather reports, areal hail, heavy disasters than other kinds of MCS.

Key words: radar echoes, linear mesoscale convection, statistical characteristics

引 言

带状对流是渭北主要对流组织模型之一, 伴随带状对流天气的冰雹、大风给陕西渭北地区的优质果业生产造成了严重的影响。

国外利用雷达回波对带状 MCS 组织模型研究开展较早, 对中纬度带状 MCS 的组织模型有了相

当全面的认识。Bluestein 等^[1]给出了 4 种飑线演变的雷达回波特征, 即断裂线型(Broken line)、后部扩建型(Back building)、破碎区域型(Broken areal)、嵌入区域型(Embedded areal)。Blanchard 等^[2]分析了带状对流系统(Linear convective)、锢囚对流系统(Occluding convective)、混乱对流系统(Chaotic convective)三类对流的雷达反射率演变模型。Parker 等^[3]研究了 1996 年 5 月和 1997 年 5 月期间

^{*} 本文得到陕西省气象局科技创新基金计划项目(2009M-59)和陕西省气象局研究型业务重点科研项目(2009Z-4)资助
2008 年 12 月 3 日收稿; 2009 年 10 月 26 日收修定稿
第一作者: 岳治国, 主要从事云雾物理和人工影响天气研究工作. Email: yue_zhiguo@163.com

出现在美国中部的带状 MCS,提出了一种包含有拖曳层状(Trainling stratiform)、先导层状(Leading stratiform)和平行层状(Parallel stratiform)的带状对流新分类法。Jirak 等^[4]联合使用卫星和雷达数据分析把中尺度对流系统分为嵌入(embedded)、非嵌入(not embedded)、线性(line)、区域(areal)、组合(combination)、孤立(isolated)、合并(merger)、非合并(non-merger),并研究了这几类回波之间的演变方式。

近年来,国内也对中尺度强对流个例雷达回波特征进行了一系列研究^[5-10],岳治国等^[11]利用 7 年雷达回波资料对陕西渭北地区中尺度对流系统的组织模型和灾害进行了分类分析,丁明星等^[12]对重庆地区强对流天气雷达回波特征进行了统计分析,李淑玲等^[13]分析了一次飑线过程的多普勒雷达回波特征。这些研究多为强对流天气的个例研究,加深了对强对流天气雷达回波特征的认识。

带状对流常常给陕西渭北带来区域性的冰雹灾害,研究渭北带状回波对流的演变规律和机理,对提高渭北苹果优生区冰雹灾害的预警、识别和防御能力有重要意义。本文根据 711 型(波长 3 cm)数字化雷达带状中尺度对流(Mesoscale Convective Systems, MCS)回波资料,分析其统计特征。

1 资料简况及分析方法

本文研究区域为陕西省延安市以南、渭河以北(渭北)(35°~37°N、108°~111°E)的地区,洛川雷达站(35°49'N、109°30'E,海拔 1159.1 m)地处渭北苹果优生区的中部,每年采用固定目标物进行雷达标定,其积累的资料时段长,较完整,因此主要利用洛川雷达 2000—2006 年 5—9 月的 PPI 和 RHI 回波资料,参考其他雷达站回波资料,结合各防雷作业点收集的降雹实况、气象站的降雹记录和民政部门的灾情统计进行分析。

分析回波尺度时没有考虑雷达反射率 5~10 dBz 的回波。MCS 的初生阶段指对流初始发展阶段 PPI 上雷达反射率 15 dBz 回波面积达 5 km×5 km 的时刻;MCS 经过发展和成熟阶段,整体雷达反射率开始减弱,当回波强度≤25 dBz 时记为消散时刻;MCS 的生命史指 1 次 MCS 个例从初生时刻到消散时刻所经历的时间。在 0.5°仰角 PPI 上,MCS 初生回波移动方向的前沿(15 dBz)与消散时刻回波

移动前沿(15 dBz)之间的距离除以 MCS 的生命史,可得 MCS 回波的移动速度。

分析的着眼点是描述孤立对流云在雷达回波上发生、发展和成熟过程的典型特征。分类时仅考虑雷达反射率的形态,没有考虑其他因素(如速度、环境场等)。雷达回波资料分析时以一次对流系统回波发生、发展和消亡的整个过程记为一次个例,同一天不同时段出现的对流演变过程,则分别记为不同的个例。普查 7 年雷达探测资料后,选择了 71 例的带状 MCS 雷达回波资料进行分类分析。

2 带状对流云演变模型

带状 MCS 的主要特征是多个对流单体排成一条带状,这些单体可相互紧密排列,也可按一定间隔排列,排列方向一般与回波的运动方向垂直。根据渭北地区雷达实际观测到的带状对流的特点,沿用 Parker 等^[2]对带状 MCS 的分类,即拖曳层状、先导层状和平行层状 MCS,和 Bluestein 等^[1]的断裂带状的概念,对渭北地区的带状 MCS 进行分类分析。

按图 1 所示的雷达回波组织演变模型,把 71 例

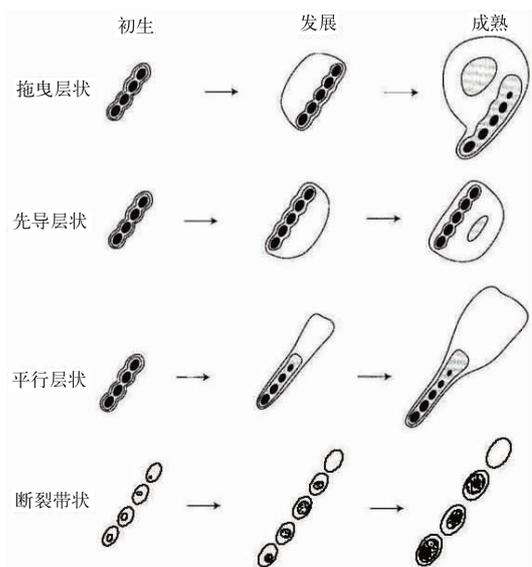


图 1 渭北带状 MCS 演变概念模型
(其拖曳层状、先导层状和平行层状
的 MCS 取自 Parker^[3])

Fig. 1 Idealized depiction of the linear MCS development as seen by radar in Weibei Area of Shaanxi Province (Levels of shading roughly correspond to 20, 40, and 50 dBz respectively from outside to inside, TS, LS and PS linear convective systems from Parker 2000)

带状 MCS 分为 4 类,即拖曳层状、先导层状、平行层状、断裂带状 MCS。

2.1 拖曳层状

拖曳层状 MCS 初生阶段,在 PPI 上有 1~4 块尺度约 5 km 的回波,其相互分离或连接,发展过程中逐渐组织成带状,45~70 dBz 的强回波带镶嵌在 15~35 dBz 相对弱的回波中,位于移向的前部,回波宽度 5~20 km,长 60~120 km,带状回波一般为东北—西南走向,有一个弓状前向或近似直线的先导边界,整体向东南方向移动。成熟阶段时 45~70 dBz 的强回波带变宽加长(宽约 20~40 km,长约 80~160 km),回波带在移向前部边缘有非常强的反射率梯度(图 2a)。

2.2 先导层状

先导层状 MCS 初生、发展阶段与拖曳层状 MCS 相似,但 PPI 上 45~70 dBz 的强回波带镶嵌在 15~35 dBz 相对弱的回波中,位于移向的后部。成熟阶段强对流带状回波(45~70 dBz,宽 10~40 km,长 60~140 km)移向的前方有层状云降水回波

(宽约 10~40 km,长约 40~100 km),其后方的回波反射率梯度较大(图 2b)。

2.3 平行层状

平行层状 MCS 从发展到成熟,在 PPI 上表现为强对流带状回波(45~70 dBz,宽约 10~20 km,长约 40~80 km),常为东北—西南走向。弱回波区(15~40 dBz,宽约 10~30 km,长约 20~50 km)紧接强对流带状回波一端,近似在强对流带状回波的延长线上,整体向同一方向移动(图 2c)。

2.4 断裂带状

断裂带状 MCS 初生时,在 PPI 上为几块回波尺度 2~5 km、相距 5~10 km 的小对流块排列成一条断裂的直线,发展过程中小对流块向同一方向移动,各自生消。成熟阶段互相分离的对流单体组成长约 60~120 km 的断线,这些单体的回波尺度为 5~10 km,中心强度 45~65 dBz,外围是 15~40 dBz 的弱回波区,其中有些单体的弱回波区不明显。这些对流单体在发展过程中互相分离,但整体始终保持为断裂的带状(图 2d)。

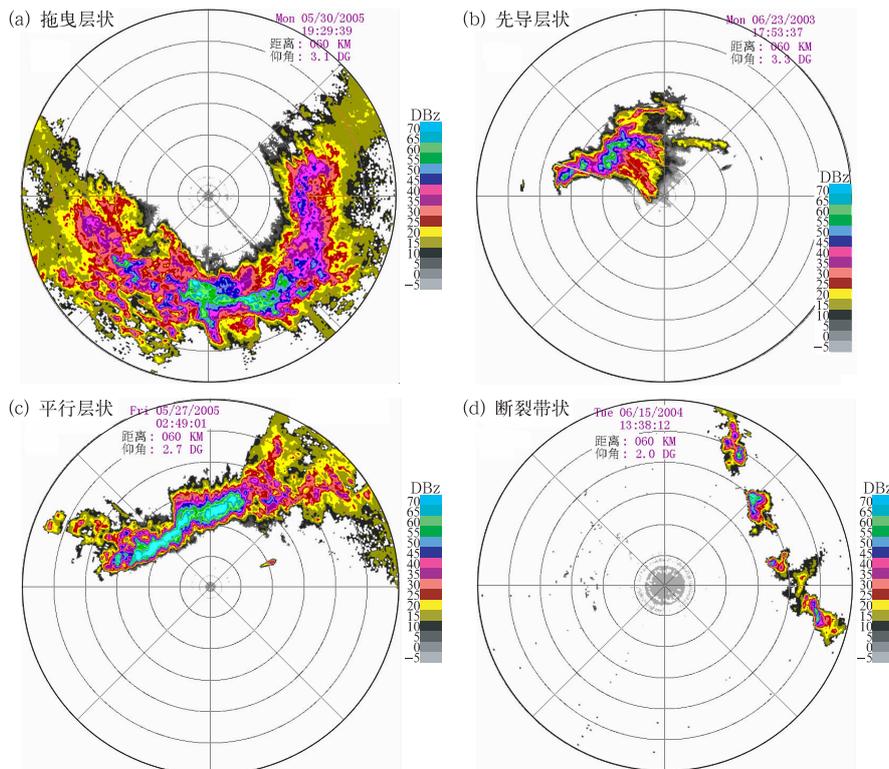


图 2 渭北带状 MCS 雷达回波个例

Fig. 2 Radar imagery of linear MCS in Weibei Area

3 回波特征分析

3.1 发生频次

7 年中渭北各类带状 MCS 的发生次数统计见表 1。先导层状 MCS 发生的次数最少(4 次), 断裂带状 MCS 发生的次数最多(33 次)。各类带状 MCS 发生频次的年际变化较大, 先导层状 MCS 在有些年份没有出现。2002 年带状 MCS 共发生 17 次, 为近年之最, 其他年份带状 MCS 的总数在 10 次左右。

表 1 2000—2006 年 5—9 月渭北地区带状 MCS 出现次数

Table 1 Linear MCS cases in Weibei Area between May and September from 2000 to 2006

类别	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	合计
拖曳层状	2	6	2	2	1	3	16	
先导层状	1	1	1	2			4	
平行层状	1	1	4	5	3	1	18	
断裂带状	5	4	7	3	1	7	33	

3.2 天气形势

渭北带状 MCS 主要发生在西北气流型和低槽天气形势下(表 2)。在西太平洋副热带高压(副高)和高压脊的高值系统下断裂带状 MCS 出现的频次较高, 其他带状 MCS 在高值系统下发生的频次较少, 且发生时的雷达回波顶高度和强度比在其他天气系统下都较低较弱。

表 2 2000—2006 年 5—9 月带状 MCS 发生当日 08 时 500 hPa 渭北不同天气形势的次数

Table 2 Synoptic system of 500 hPa at 0800 BT in Weibei Area during linear MCS active periods

类别	西北气流	低涡	切变线	低槽	副高	高脊	合计
拖曳层状	7			6		2	15
先导层状	3			1			4
平行层状	8		1	7	1		17
断裂带状	7		2	11	6	6	32

3.3 初生位置

带状 MCS 初生阶段回波所在的位置称为初生位置。洛川县西北方向 30~80 km(富县的张家湾镇沿葫芦河至北道德乡一线)和北方 30~60 km(甘泉县城沿洛河至富县县城)是带状 MCS 初生回波频繁发生的位置, 这两个方位初生的带状 MCS 占

总带状 MCS 的 61%。洛川以南的地区少有带状 MCS 初始生成(图 3、表 3)。

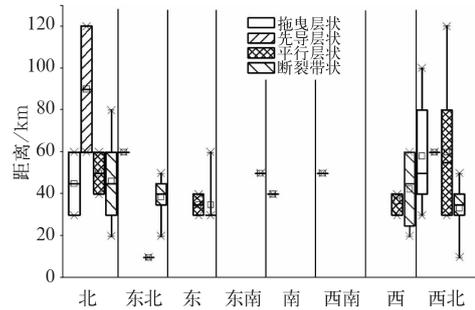


图 3 带状 MCS 相对洛川站初生的方位和距离 (顶部* 为最大值, 底部* 为最小值, 最小值到下部须的下端之间包含 5% 样本, 到上部须的顶端之间包含 95% 样本, 到大框下沿和上沿分别包括 25% 和 75% 的样本, 大框中的小框(□)为平均值, 大框中短横线(—)为中值)

Fig. 3 Initial direction and distance of linear MCS from Luochuan Station

The boxes represent the interquartile range, from the 25th to the 75th percentile, little box in big box represents the mean, and the line through this box represents the median. The “whiskers” extend from the box to the minimum and maximum values of the sample

表 3 2000—2006 年 5—9 月带状 MCS 相对洛川站在各方位上的初生次数

Table 3 Initial generation cases of linear MCS in all directions from Luochuan Station

类别	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北	合计
拖曳层状	2	1			1	1		11	16
先导层状	2							2	4
平行层状	2	1	2				3	10	18
断裂带状	8	8	6	1			4	6	33

3.4 日变化

图 4 为渭北地区带状 MCS 初始时刻的日变化分布图。带状 MCS 发生的主要时段为 12—20 时, 凌晨 2 时至上午 10 时也有少量带状 MCS 活动。可

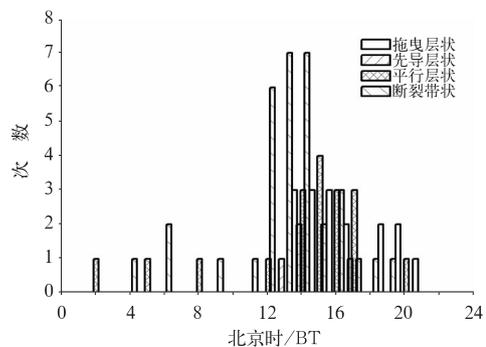


图 4 带状 MCS 初生时刻日变化(北京时)

Fig. 4 Diurnal variation of linear MCS of initiation time in Weibei (BT)

见,太阳辐射加热是带状 MCS 活动的重要因素,而凌晨到午前初始发生的带状 MCS 常常与大尺度天气系统的活动有关。

3.5 生命史

图 5 为带状 MCS 的生命史分布图。各类带状 MCS 生命史较接近,拖曳层状、先导层状、平行层状和断裂带状 MCS 的平均生命史分别为 3.0 h、3.8 h、2.7 h 和 3.7 h。带状 MCS 生命史最长的一次是 2006 年 7 月 31 日的断裂带状 MCS,维持了 7.5 h。

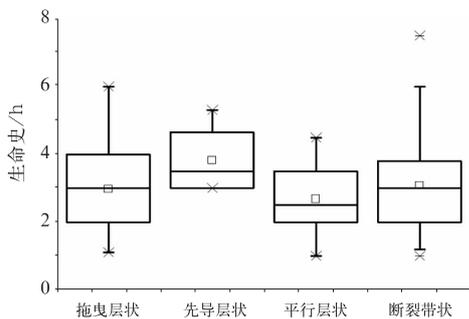


图 5 带状 MCS 的生命史
(图框示意同图 3)

Fig. 5 Lifecycle of linear MCS
Legends are the same as Fig. 3

3.6 最大带长

MCS 的最大带长指 1 次带状 MCS 生消过程中, PPI 上带状回波的最大长度。拖曳层状 MCS 的平均最大带长最长,为 92.5 km,平行层状 MCS 的平均最大带长最小,为 73.9 km(图 6),可见拖曳层状 MCS 一般影响的区域比较大。

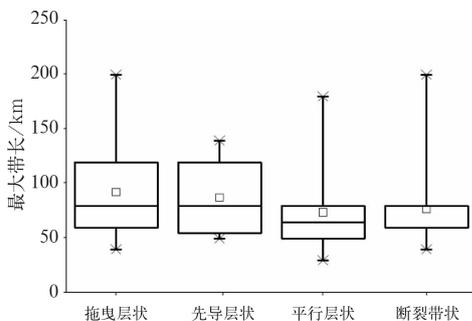


图 6 带状 MCS 回波的最大带长
(图框示意同图 3)

Fig. 6 Maximum length of linear MCS
Legends are the same as Fig. 3

3.7 最大回波顶高度

最大回波顶高指 1 次带状 MCS 的生命史中,

在 RHI 上强回波外围 15 dBz 强度回波出现的最大高度。拖曳层状、先导层状、平行层状和断裂带状 MCS 的平均最大回波顶高为 10.9 km、11.3 km、8.6 km 和 8.4 km,各类带状 MCS 中降雹个例的平均最大回波顶高与其所在类别的最大回波顶高差异较小(图 7)。带状 MCS 最大回波顶高的最大值出现在 2005 年 8 月 11 日的断裂带状 MCS 过程中, RHI 上的雷达回波顶高为 16 km。

降雹的带状 MCS 一般最大回波顶高比较高,大于 8 km,但有些回波顶高非常高,却不一定降雹,如 2004 年 6 月 15 日为典型的 TS 类型 MCS,最大回波顶高 13 km,却无降雹报告。

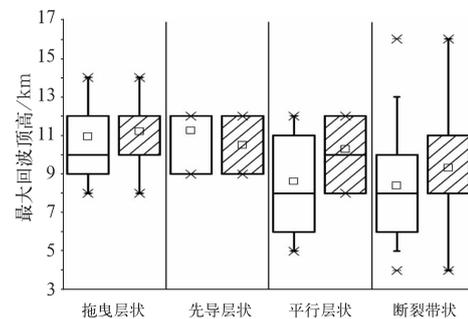


图 7 带状 MCS 的最大回波顶高
(白框为个例的总体,阴影框为各类单体中的降雹个例(图框示意同图 3))

Fig. 7 Maximum echo top of linear MCS
white box represents total cases, and shadow box presents hail cases. Legends are the same as Fig. 3

3.8 回波移动特征

渭北地区带状 MCS 的移动方向主要为东南、南和西北方向(表 4),朝向其他方向移动的带状 MCS 极少出现,向东南移动的对流出现的降雹次数最多(17 次),没有出现某个移动方向上的带状 MCS 100%降雹。

表 4 2000—2006 年 5—9 月渭北线状 MCS 在各移动方向上出现的次数(括号内为该移动方向降雹的次数)

Table 4 Linear MCS cases in different move direction between May and September from 2000 to 2006
It represents hail cases of this direction in bracket

类别	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北
拖曳层状	1(1)	1(1)	11(7)	3(1)				
先导层状			4(2)					
平行层状	1		1(1)	7(3)	1			8(3)
断裂带状	3	1(1)	4(1)	10(5)	9(5)	2	1	3(1)

带状 MCS 在不同朝向上的移动速度差异较大(图 8),朝向东南移动的带状 MCS 中拖曳层状 MCS 的平均速度最大($36.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)。拖曳层

状、先导层状、平行层状和断裂带状 MCS 的平均移动速度为 $33 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $31.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $30.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $21.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 9)。

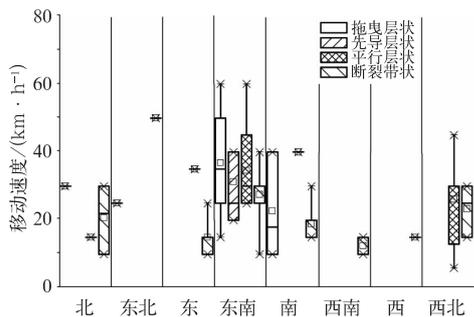


图 8 带状 MCS 向各方位的移动速度
(图框示意同图 3)

Fig. 8 Moving speed of linear MCS in all directions
Legends are the same as Fig. 3

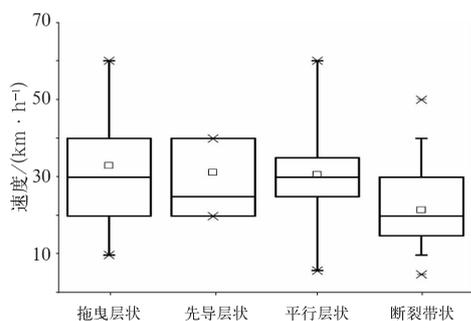


图 9 带状 MCS 的移动速度
(图框示意同图 3)

Fig. 9 Moving speed of linear MCS
Legends are the same as Fig. 3

3.9 回波带的走向

带状 MCS 回波带最常见的走向为东北—西南, 占带状 MCS 的 52%, 其次为西北—东南走向, 占 28%。断裂带状 MCS 中西北—东南走向的个例最多, 占断裂带状 MCS 的 42%。有些回波带在移动的过程中带的走向会发生变化, 如 2002.06.28 最初回波带的走向为西北—东南走向, 当回波移过洛川后, 回波带的走向变为东北—西南走向。

3.10 降雹及灾情

防雷作业点或气象站报告降雹, 记为一次降雹对流云, 无降雹报告时(可能降雹地点处无人区)作为非降雹对流云。1 天内有 3 个以上的县区出现降雹, 称为此次降雹过程为区域性降雹过程。带状 MCS 出现降雹的次数见表 5。

表 5 2000—2006 年 5—9 月渭北地区带状 MCS 降雹次数

Table 5 Linear hail MCS cases between May and September from 2000 to 2006

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	合计
拖曳层状		2	1	2	1	1	3	10
先导层状		1			1			2
平行层状			2	1	1	2	1	7
断裂带状	1	1	5	1		3	2	13

拖曳层状 MCS 降雹概率 63%, 位居各类 MCS 之首。5 县以上的区域强降雹出现 5 次(2002 年 5 月 15 日、2002 年 6 月 28 日、2002 年 7 月 2 日、2005 年 5 月 30 日、2006 年 6 月 25 日), 都是当年破坏力最强的天气过程。如 2005 年 5 月 30 日午后陕西省从北向南出现了一次全省范围伴有大风、冰雹、暴雨的强对流天气, 雷达回波为拖曳带状 MCS, 共 4 市 17 县的大部分乡镇受灾, 旬邑县冰雹最大直径达到 60 mm, 这次冰雹大风过程给全省造成的直接损失超过了 3 亿, 是陕西省近年来受灾面积最广、损失最严重的一次雹灾。近年来, 在渭北几乎每年都有此类 MCS 活动, 68% 的拖曳层状 MCS 在西北生成, 呈东北—西南走向的带状回波, 以极快的速度(平均 $33 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)向东南移动, 所经地区几乎都受到冰雹狂风的袭击。

先导层状 MCS 共出现 4 次, 其中 2 次降雹, 1 次降软雹, 无灾害, 1 次(2004 年 6 月 16 日)区域降雹, 局地重灾。

平行层状 MCS 共出现 18 次, 降雹 7 次, 其中 1 次区域降雹(重灾, 2003 年 7 月 6 日)。

断裂带状 MCS 总共出现 33 次, 13 次降雹, 其中 9 次局地轻灾或无灾, 1 次局地风灾, 2 次区域轻灾, 1 次区域降雹(重灾, 2002 年 7 月 2 日)。此类 MCS 冰雹直径普遍为 4~15 mm, 雹灾较轻。

4 小 结

通过对 2000—2006 年 5—9 月渭北带状 MCS 雷达回波资料分析后可得以下结论。

(1) 陕西渭北地区带状 MCS 可分为 4 类, 即拖曳层状、先导层状、平行层状、断裂带状 MCS。

(2) 各类带状 MCS 发生频次的年际变化较大, 先导层状 MCS 发生的次数最少, 断裂带状 MCS 发生的次数最多。

(3) 渭北带状 MCS 主要发生在西北气流型和

低槽天气形势下;带状 MCS 发生的主要时段为 12—20 时;各类带状 MCS 生命史较接近,拖曳层状、先导层状、平行层状和断裂带状 MCS 的平均生命史分别为 3.0 h、3.8 h、2.7 h 和 3.7 h。

(4) 拖曳层状 MCS 的平均最大带长最长,为 92.5 km,平行层状 MCS 的平均最大带长最小,为 73.9 km;拖曳层状、先导层状、平行层状和断裂带状 MCS 的平均最大回波顶高为 10.9 km、11.3 km、8.6 km 和 8.4 km,各类带状 MCS 中降雹个例的平均最大回波顶高与其所在类别的最大回波顶高差异较小。

(5) 渭北地区带状 MCS 的移动方向主要为东南、南和西北方向;带状 MCS 在不同朝向上的移动速度差异较大,朝向东南移动的带状 MCS 中拖曳层状 MCS 的平均速度最大($36.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$);带状 MCS 回波带最常见的走向为东北—西南,占带状 MCS 的 52%,其次为西北—东南走向,占 28%。

(6) 拖曳层状 MCS 降雹概率为 62%,位居各类 MCS 之首,造成的灾害最为严重。

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] Blanchard D O. Mesoscale convective patterns of the Southern High Plains[J]. *B Am Meteorol Soc*, 1990, 71(7): 994-1005.
- [3] Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(10): 3413-3436.
- [4] 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.
- [5] 寿亦萱,许健民. “05.6”东北暴雨中尺度对流系统研究 II: Mcs 动力结构特征的雷达卫星资料分析[J]. *气象学报*, 2007, 65(02): 171-182.
- [6] 张腾飞,段旭,鲁亚斌,等. 云南一次强对流冰雹过程的环流及雷达回波特征分析[J]. *高原气象*, 2006, 25(03): 531-538.
- [7] 付双喜,王致君,张杰,等. 甘肃中部一次强对流天气的多普勒雷达特征分析[J]. *高原气象*, 2006, 25(05): 932-941.
- [8] 冯晋勤,童以长,罗小金. 一次 β 中尺度局地大暴雨对流系统的雷达回波特征[J]. *气象*, 2008, 34(10): 50-54.
- [9] 牛淑贞,鲍向东,乔春贵,等. 强对流风暴新一代雷达产品特征分析[J]. *气象*, 2008, 34(07): 92-100.
- [10] 王伏村,李耀辉,牛金龙,等. 甘肃河西走廊两次强对流天气对比分析[J]. *气象*, 2008, 34(01): 48-53.
- [11] 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(03): 395-402.
- [12] 江玉华,丁明星,陈群,等. 重庆地区强对流天气雷达回波统计特征[J]. *气象*, 2005, 31(03): 36-40.
- [13] 李淑玲,刁秀广,朱敏,等. 一次飊线过程多普勒雷达资料分析[J]. *气象*, 2009, 35(3): 60-65.