

华北飚线系统中地闪活动与雷达回波 顶高的关系及预警指标

易笑园^{1,2,3} 宫全胜⁴ 李培彦⁵ 贾惠珍² 王庆元²

(1. 南京信息工程大学, 210044; 2. 天津市气象台; 3. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室; 4. 天津市防雷中心; 5. 天津气象科学研究所)

提 要: 选取代表华北地区经常出现的三类飚线系统——拖曳层状型(TS)、先导层状型(LS)、平行层状型(PS)的3次强雷暴过程为研究对象,利用天津塘沽多普勒雷达资料、京津冀ADTD型地闪监测网资料和北京探空资料,在对资料进行全面质量控制的基础上,运用粗网格化分析方法,分别以飚线系统整体和飚线系统上局部的强回波块为研究对象,探讨6分钟内地闪频数与雷达回波顶高的关系,找寻雷电预警指标。结果表明:3次过程中,出现在云顶达到8~12km对流云塔中的地闪频数分别为85.8%、78.9%和80.5%;无论是在飚线系统整体,还是飚线系统上强回波块中,6分钟内地闪频数与对流云回波顶高高于11km或12km的回波面积有正相关关系;而且在飚线系统内的地闪活跃区,回波顶高高于11km的回波面积对地闪活动激烈程度具有预警意义。

关键词: 飚线系统 地闪活动 回波顶高 雷电预警指标

Analysis of Correlation Between Cloud-to-Ground Lightning Activity and Echo Top of Doppler-radar Data in Squall Lines in North China

Yi Xiaoyuan^{1,2,3} Gong Quansheng⁴ Li Peiyan⁵ Jia Huizhen² Wang Qingyuan²

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, 210044; 2. Tianjin Meteorological Observatory;
3. National Key laboratory of the Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences;
4. Tianjin lightning Protection Center; 5. Tianjin Meteorological Science Institute)

Abstract: 3 squall line weather processes in North China were selected and studied, which represent three different types of typical squall line system with trailing stratiform (TS), leading

资助项目: 中国气象局新技术推广项目(GYHY200706042)、预报员专项(CMATG2006Y06)和天津市气象局2008年科研培育项目共同资助。

收稿日期: 2008年3月23日; 修定稿日期: 2008年9月28日

stratiform (LS) and parallel stratiform (PS). The used data include Doppler radar, cloud-to-ground lightning, radiosonde and the data by variable width net-grids. The relationship between cloud-to-ground lightning frequency every 6 minutes and echo top parameter was studied by using the top height of whole squall line and its upper part. The results show that cloud-to-ground lightning frequency in period of 6 minutes appeared a range above 8km are 85.8%, 78.9% and 80.5%, respectively for three squall processes, and they correlate positively to the areas of cloud tower height reaching above 11km or 12km (echo top above 11km). Especially, at part intense lightning activity range of squall line systems, the total areas of echo top above 11km can be used as an indicator of lightning warning. These results are meaningful to the lightning now-casting and to understanding of lightning activity in squall line system in North China.

Key Words: squall lines CG lightning activity echo top lightning now-casting

引 言

飚线是由同处于一个中尺度对流系统的多个雷暴单体逐渐发展排列而形成的,常常伴有雷电活动、冰雹、短时大风和强降水等天气现象。对流单体从发生到组织为线状的、有组织的带状对流系统,有多种形式。Parker 等^[1]对美国 1996—1997 年间 88 次飚线过程,以 2km 高度雷达反射率资料为基础,提出了拖曳层状型(TS)、先导层状型(LS)、平行层状型(PS)三类飚线系统的主要模型。作者对 2003 年以来华北飚线天气过程的雷达回波进行普查,认为 Parker 等的分类模型同样适用于华北地区。

1990 年代以来,随着中尺度理论和物理诊断方法的发展以及雷达、卫星资料的运用,对飚线的形成机制及其造成的各种灾害性天气的研究越来越多^[2-4]。然而,对于经常伴随着飚线天气过程中的闪电活动,分析探讨的还不多。近几年,随着闪电定位系统和雷达的布设,一些气象工作者开始综合运用闪电、雷达资料探索二者之间的关系;冯桂力等^[5]对雹暴系统中的云地闪总数/10min 与 Z 坐标下 6km 高度处雷达反射率进行对比分析,发现最高闪电次数出现在 35~40dBz 的区域,90%闪电集中发生在 15~50dBz 回波区间,其结论与曹治强等^[6]对 2 次 MCS 的研究结果基本一致;李建华等^[7]通过对北京地区暴雨和冰雹两类强雷暴中的闪电活动与极坐

标下雷达回波反射率的关系进行分析,结果认为闪电通常发生在 45dBz 以上的回波中;但是,上述研究中对于描绘对流云发展旺盛程度的重要雷达参量——回波顶高均未涉及。Krupp 等^[8]在分析中运用了回波顶高,但其研究对象是 3 个独立的超级单体雷暴,超级单体雷暴属于孤立雷暴,它的尺度和组织性与飚线系统相比仍存在着不少的差别。易笑园等^[9]、李楠等^[10]虽在分析中运用了回波顶高,但还只局限在个例上,也没有涉及飚线系统中局部的强回波块。因此分析这 3 次对华北飚线系统有代表性的强雷暴过程,对于认识地闪活动与对流系统结构和发展的关系、探索闪电活动与雷达产品之间的关系、寻找反映雷电强烈程度和落区方面的临近预报指标以及借助于较为成熟的雷达回波外推方法(如 TITAN、TREC)开展雷电预警业务具有重要的意义。

1 资料来源、质量控制和处理方法

1.1 资料来源

地闪监测资料来自中国气象局大气探测中心 ADTD 型定位系统,该系统以天津塘沽、北京、河北保定、张家口、承德 5 点定位,系统提供的每个地闪信号包括地闪发生的时间、位置、强度、极性等,理论探测中心地带定位误差约 500m,边缘地带定位分辨率为 1km。雷达资料来自天津塘沽 WSR-98D 新

一代多普勒天气雷达的监测资料,探空资料使用北京 08 和 20 时的探空资料。

根据探空资料探测到的 0℃、-10℃ 高度,选取 5km 高度处回波分布(图 1 所示),通过反射率 $\geq 40\text{dBz}$ 强回波所处于回波带(周边反射率=15dBz)中的位置分析:3 次过程分别为先导层状型(LS)即强回波对流云分布在整体回波之后——(a)2004 年 9 月 6

日天气过程;平行层状型(PS) 即强回波对流云分布在整体回波之中——(b)2007 年 7 月 7 日天气过程;拖曳层状型(TS) 即对流云强回波分布在整体回波之前——(c)2007 年 7 月 18 日天气过程。

1.2 资料质量控制

对资料的控制包括以下 3 方面:

首先,将雷暴过程中地闪落区与雷达回波所在位置进行实时图形叠加。考虑雷达产品生成间隔为 6 分钟,所以,选取雷达图生成时间前后 3 分钟共 6 分钟内的地闪资料与雷达资料进行对应。这样,就保证了全过程地闪资料无缝隙、无重复地与雷达资料对应。对于很少有地闪落在回波以外而且地闪落区与回波同步移动的过程则认为是有分析价值的过程。

其次,将地闪与雷达回波组合反射率进行网格数值处理后进行一一对应叠加,落在 0~5dBz 回波区域的地闪个数占全过程捕获的地闪总数的百分率在 10% 以下的过程。如表 1 表明,3 次过程落在 0~5dBz 以内的地闪百分率分别为 0.46%、9.61%、4.1%。值得一提的是:这 3 次过程中,正地闪频数极少,达不到研究要求。因此,我们研究的这 3 次过程的地闪基本指的是负地闪。

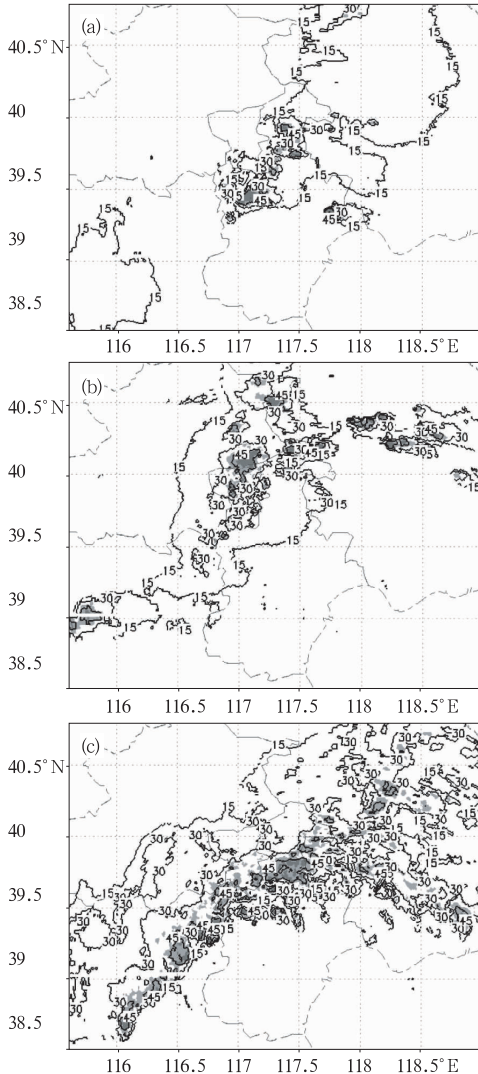


图 1 3 类飢线系统模型 5km 高度处回波反射率分布图(等值线反射率 $\geq 15\text{dBz}$, 间隔 15dBz;阴影区反射率 $\geq 40\text{dBz}$)

- a: 2004 年 9 月 6 日 10:22 时(BTS);
- b: 2007 年 7 月 7 日 19:35 时(BTS);
- c: 2007 年 7 月 18 日 08:00 时(BTS)

表 1 3 次飢线系统过程相关参数

	先导层状型	平行层状型	拖曳层状型
雷暴发生前 0℃层高度	3785m	4510m	5443m
雷暴过程前 -10℃层高度	5448m	6236m	6970m
雷暴过程前 -20℃层高度	7002m	7740m	8463m
地闪总数	4711 个	4860 个	13471 个
最大地闪 频数/6min	219 个	406 个	431 个
正地闪占总 数百分率	0.4%	1.1%	2.8%
落在 0~5dBz 以 内的地闪百分率	0.46%	9.61%	4.1%

第三,6 分钟内地闪个数达到分析所需的数目。2004 年 6 月 22 日强雷暴过程,其

表现的冰雹、强风、雷电现象非常强烈,但经分析其6分钟内获得的地闪频数经常在10个以内,很难认为其中的地闪活动有代表性。表1表明,3次过程的地闪个数均达到分析所需的数目,6分钟内地闪频数最大值分别达到了219个、406个、431个。

总之,满足上述三点的天气过程,我们才认为其数据质量达到分析要求。

1.3 资料处理方法

为了实现数字化定量分析雷达输出产品,首先对雷达产品进行处理,即将以极坐标为坐标的产品数据转化为以地球地理经纬度为坐标的数据,最小网格点为 $1' \times 1'$ ($1' = 1.852\text{km}$),即最小网格约为 $1.852\text{km} \times 1.852\text{km}$ 。网格设计为可变网格,实际选取网格是最小网格的N倍。雷达资料在网格化处理时,均采用最大原则:将网格内数值的最大值选出作为该格点的值。闪电资料在网格化时,地闪频数是将云内包含的所有网格内闪电个数的总和(负闪总和、正闪总和)作为该格点的地闪频数值。

网格化处理的优点在于它具有“粗化”的作用。“粗化”充分考虑中尺度对流系统尺度适应的范围和闪电定位系统设备精度和误差,同时使闪电数目达到分析所需的数量。“粗化”对于在纷杂的资料中发掘共性的规律非常必要。

雷达资料、地闪资料都是跟踪飊线系统或其上强回波块中的数据进行分析。

2 地闪活动与回波顶高的关系

文献[11]中解释回波顶(Echo Top)的定义是:16个数据级别的产品,它是在 $\geq 18\text{dBz}$ 反射率因子被探测到时,显示以最高仰角为基础的回波顶高度(不进行内插和外插)。回波顶是以海平面为参考的,它是在雷达230km内的 $4\text{km} \times 4\text{km}$ 笛卡尔网络上。回波顶(ET)可以通过对云顶高度的定位反映雷暴云的发展程度。Price^[12]发现闪电频

数(其选用10分钟内的闪电数)与云顶高度呈 $4.9 \sim 7.55$ 次方的关系。可见,云顶高度与地闪活动存在着密切的关系。

2.1 飊线系统的地闪活动与回波顶高的关系

将每张雷达回波图时间前后3分钟的地闪个数与相应的回波顶高进行网格点的对应叠加,将分别落在0km、2~3km、5~6km、8~9km、11~12km、14~15km高度内的地闪频数进行全过程累计。从图2中可见,云顶高度在3km之下的区域内很少发生地闪,3次过程该区域地闪频数的百分率均在1.5%以下,地闪个数微乎其微。由表1可知:3次飊线天气发生前探空资料表明3km之下环境温度基本在 0°C 层高度之下,云内存在的粒子以水滴为主,而且雨滴存在的高度没有

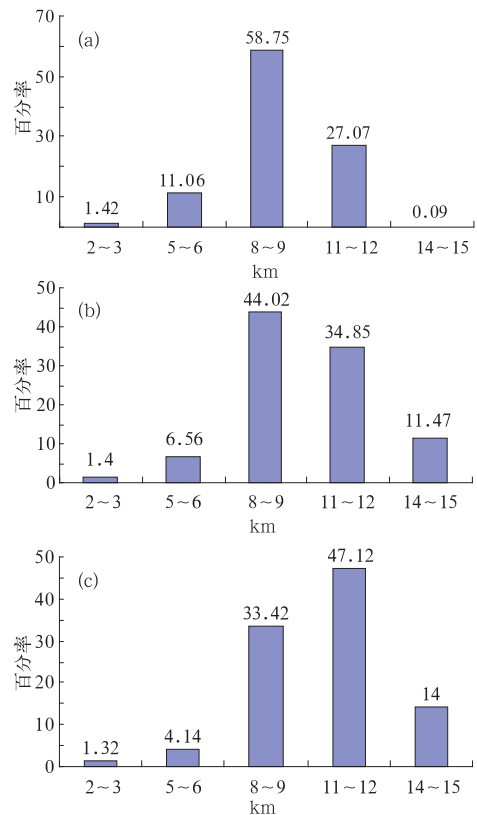


图2 3次飊线系统中地闪在各档次出现的个数占总数的百分率
a: 2004年9月6日;
b: 2007年7月7日;
c: 2007年7月18日

达到“起电地带”的高度^[13];对流云回波顶在 3km 之下存在的电粒子很可能是达到旺盛程度后塌陷减弱的云中的结果。3 次过程存在于 5~6km 云顶高度区域内的地闪占全部地闪频数的百分率分别为 11.6%、5.56%、4.14%;这个高度层的温度约在 -10~-20℃ 之间,这是所谓的“起点地带”高度^[13],其间的粒子主要为冰晶、过冷却水、霰。对流云顶高度达到 8~9km 的云塔内的地闪占全部地闪频数百分率 3 次过程分别为 58.75%、44.02%、33.42%。由表 1 可知,这个高度层的温度约在 -20℃ 以下。而云顶发展到 11~12km 时,温度有可能降到 -55℃。3 次过程中,约有地闪总数的 80% 的地闪集中出现在云顶达到 8~12km 的对流云中。对流云回波顶在 14km 之上的云塔中,地闪个数百分率低于地闪总数的 15%。

起电粒子主要由冰晶、霰、雪组成,当这些带电粒子有了更广阔的碰撞空间时,闪电活动就很活跃。云顶高度达到 8~12km 的云塔中,为带电粒子的形成提供了充足空间,因此,带电粒子急剧增加,地闪活动非常激烈。但是,回波顶为 14km 的云塔内,地闪少的原因之一:带电离子被抬升到较高高度,使带电粒子远离地面,更多的放电在云与云之间即云中闪电,而对地放电的云地闪电便少了;另一个原因是发展如此旺盛的云塔在飚线系统的整体过程中出现几率不多。

2007 年 7 月的两次过程均出现在盛夏,云的发展旺盛程度显然高于 2004 年夏末的那次过程,所以盛夏的两次过程在回波顶达到 14km 以上时对应的地闪频数百分率(7 月 7 日为 11.47%,7 月 18 日为 14%)略高于夏末那次过程。

雷暴云发展到某一个高度之上的范围大小是否与地闪活动的强弱有关呢?通过分析获得了非常好的答案。比较每一个时刻的回波顶高分别在 6km、9km、11km、12km 之上的网格数(网格数表征飚线系统在某一高度上的云体的水平面积范围的大小)与对应时刻地闪频数的时间序列,2004 年 9 月 6 日过

程回波顶高取 11km 时两条曲线对应关系较好(如图 3a);而 2007 年 7 月 7 日和 18 日的过程回波顶高取 12km 时两条曲线的对应关系比 11km 时更明显。图 3 表明:3 次飚线过程地闪活动与雷暴云顶达到 11km 或 12km 及以上的水平面积大小间存在着很好的正对应关系。

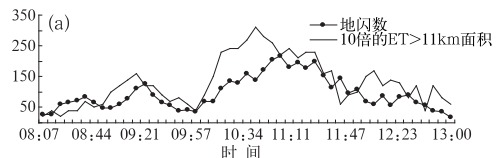


图 3a 2004 年 9 月 6 日 49 次体扫中地闪频数/6min(圆点线,单位:个)与回波顶高达到 11km 高度上网格数(实线,单位:个)的时间序列

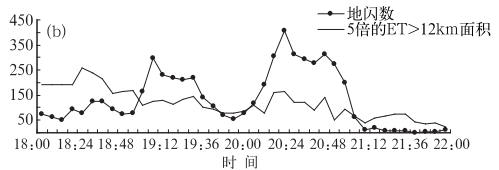


图 3b 2007 年 7 月 7 日 41 次体扫中地闪频数/6min(圆点线,单位:个)与回波顶高达到 12km 高度上网格数(实线,单位:个)的时间序列

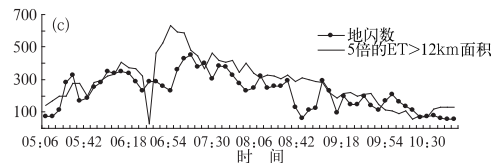


图 3c 2007 年 7 月 18 日 61 次体扫中地闪频数/6min(圆点线,单位:个)与回波顶高达到 12km 高度上网格数(实线,单位:个)的时间序列

6 分钟内地闪个数和地闪密集程度与 11km 高处雷暴云的范围大小正相关对应关系说明,地闪活动的剧烈程度不仅要求雷暴云体在垂直方向达到很高的高度,而且在水平范围上要广阔。与 Keighton 等^[14]认为对流区域面积愈大,上升气流愈强,电荷产生的区域便愈大,或者电荷的分离过程便愈有效的结论相似。

通过分析地闪总数/6 分钟与相应时次飚线系统内云塔最高值,即最高回波顶值的

关系,结果表明,它们之间没有明显的对应关系(图 4)。这可能与飊线系统内部各组成单体的相对独立性有关,某一个小范围单体的高度不足以代表大范围的发展情况。

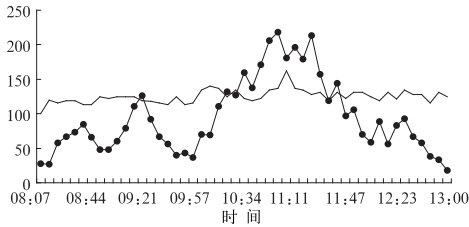


图 4 2004 年 9 月 6 日飊线过程中地闪频数/6min(圆点线,单位:个)与最高回波顶(实线,单位:km)的时间序列

2.2 飊线系统中局部强回波块内地闪活动与回波顶高的关系

图 5(见彩页)是地闪与相对应的雷达实时反射率回波图的叠加图,图中仰角为 1.5° 。由于闪电定位系统定位误差的影响,我们读取出现在飊线系统中局部强回波块中地闪时,要求地闪位置相对较集中,与周围的地闪有明显的分界,以便确立强回波块内的地闪分布。另外,考虑与天线扫描方式有关的体积模式(VCP)的限制,回波顶高雷达产品常常发生弧状的阶梯式回波,对读取强回波块的回波顶数据有干扰,考虑上述原因,我们只选取 2 个飊线系统上的局部区域加以分析。选取 2004 年 9 月 6 日过程,飊线系统北端位置;选取 2007 年 7 月 7 日过程飊线系统南端雷暴单体为分析对象,对应地面实况监测资料,两位置均出现短时暴雨天气。统计回波顶高达到 11km 高度的格点数(1 格 = $4\text{km} \times 4\text{km}$)和回波内地闪频数/6min 得到表 2、3。

由图 5(见彩页)可见,飊线局部强回波块中,6min 内地闪个数曲线落后于回波顶高高于 11km 格点总数曲线,两组数据具有正相关关系。表 2 表明:2004 年 9 月 6 日 9:21,地闪频数/6min 第一个峰值为 93 个,回波顶高高于 11km 格点总数第一个峰值为 16 个,出现时间为 9:15,提前 6 分钟;9:39,回波顶高高于 11km 格点总数第一个低谷值 0,6 分钟后的 9:46,地闪频数/6min 出现谷值

为 18 个;第二个低谷时,二者时间相同;10:15,回波顶高高于 11km 格点总数再次达到峰值为 18 个,而 12 分钟后 10:28,地闪频数/6min 达到第二个峰值为 78 个,提前 12 分钟。2007 年 7 月 7 日的两组数据同样说明:回波顶高高于 11km 格点总数对 6 分钟内地闪个数存在 6 分钟的预警意义,当该指标突变时,地闪个数并不立刻随之变化,而是表现出一定的滞后性。也说明:雷暴云发展高度和

表 2 2004 年 9 月 6 日降水雷暴中地闪频数与回波顶高 $\geq 11\text{km}$ 的格点数

时间	CG 个	M-ET 格	时间	CG 个	M-ET 格
9:03	43	14	10:03	31	5
9:09	52	16	10:09	41	13
9:15	63	16	10:15	63	18
9:21	93	12	10:21	67	17
9:27	63	9	10:28	78	12
9:33	42	2	10:34	78	12
9:39	29	0	10:40	74	11
9:46	18	3	10:46	67	8
9:51	24	8	10:52	62	2
9:57	18	3	10:59	76	0

表 3 2007 年 7 月 7 日降水雷暴中地闪频数与回波顶高 $\geq 11\text{km}$ 的格点数

时间	CG 个	M-ET 格	时间	CG 个	M-ET 格
18:00	4	9	19:00	84	63
18:06	6	27	19:06	96	71
18:12	9	36	19:12	146	55
18:18	21	37	19:18	91	40
18:24	7	33	19:24	88	43
18:30	12	37	19:30	93	41
18:36	26	37	19:36	75	32
18:42	44	55	19:42	56	23
18:48	53	62	19:48	42	28
18:54	53	67	19:52	20	2

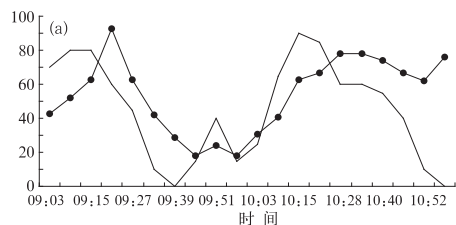


图 6a 2004 年 9 月 6 日北端强回波块中地闪频数(圆点线,单位:个)与 5 倍回波顶高达到 11km 高度的格点总数(单位: $4\text{km} \times 4\text{km}^2$)时间序列

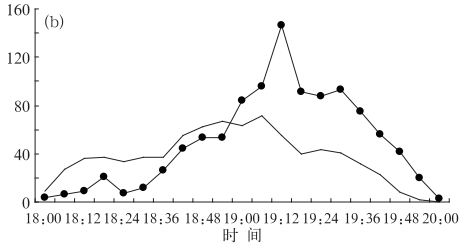


图 6b 2007 年 7 月 7 日北端强回波块中地闪频数(圆点线,单位:个)与 5 倍回波顶高达到 11km 高度的格点总数(单位:4km \times 4km 2)时间序列

一定高度上的范围与地闪活动激烈程度有关。

3 结语

(1) 针对目前国内闪电定位系统定位精度和中尺度对流系统的尺度考虑,粗网格化分析方法无疑是一种较好的处理资料。

(2) 3 次过程代表华北飊线系统的 3 类,集中出现在云顶达到 8~12km 对流云塔中的地闪频数 3 次过程分别为 85.8%、78.9% 和 80.5%;无论是对于飊线系统整体还是局部飊线系统上的强回波块,地闪总数/6min 与对流云回波顶高高于 11km 或 12km 的回波面积正相关;说明地闪活动的剧烈程度不仅要求雷暴云体在垂直方向达到很高的高度,而且在水平范围上要广阔。另外,对于在飊线系统上地闪活跃的强回波块中回波顶高高于 11km 的回波面积对地闪活动激烈程度具有预警意义。这些结论对认识具有一定组织结构的飊线系统中地闪活动提供了事实依据,同时为雷电预警预报业务工作进行了有价值的探索。

强雷暴天气具有尺度小、移速快、突发性强的特点,多普勒雷达具有高时空分辨率的强大优势,结合闪电定位、探空、卫星、自动站等多种资料,是我们认识了解飊线系统等强雷暴系统的结构和活动规律的有效工具。本

文由于资料所限,研究尚有待进一步深入。

参考文献

- [1] Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of mid-latitude mesoscale convective systems [J]. Monthly Weather Review, 2000, 128: 3413-3436.
- [2] 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等. 山东省 2006 年 4 月 28 日飊线天气过程分析[J]. 气象, 2007, 33(1): 74-80.
- [3] 刘淑梅,孙健,杨引明. 上海 2004 年 7 月 12 日飊线系统中尺度分析[J]. 气象学报, 2007, 65(1): 84-93.
- [4] 程麟生,冯伍虎. 中纬度中尺对流系统研究的若干进展[J]. 高原气象, 2002, 21(4): 337-347.
- [5] 冯桂力,郗秀书,袁铁,等. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究[J]. 中国科学 D 辑, 2007, 37(1): 123-132.
- [6] 曹治强,李万彪. 两个中尺度对流系统的降水结构和闪电特征[J]. 气象学报, 2005, 63(2): 243-248.
- [7] 李建华,郭学良,肖稳安. 北京强雷暴的地闪活动与雷达回波和降水的关系[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(2): 228-233.
- [8] Knupp K R, Paech S, Goodman S. Variations in Cloud-to-Ground lightning characteristics among three adjacent tornadic supercell storms over the Tennessee Valley Region[J]. Monthly Weather Review, 2003, 131(1): 172-188.
- [9] 易笑园,张义军,李培彦,等. MCS 中地闪活动与多普勒雷达资料间相互关系的个例分析[J]. 气象科技, 2007, 5: 665-669.
- [10] 李南,魏鸣,姚叶青. 安徽闪电与雷达资料的相关分析以及机理初探[J]. 热带气象学报, 2006, 22(3): 265-272.
- [11] 俞晓鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社, 2006: 185.
- [12] Price C, D Rind. A Simple lightning parameterization for calculating global lightning distribution [J]. J. Geophys. Res. Lett., 1992, 97 (D9): 9919-9933.
- [13] Solomon R, M Baker. Electrification of New Mexico thunderstorm[J]. Mon Wea Rev. 1994, 122: 1878-1886.
- [14] Keighton S J, H B Bluestein and D R Mangorinan. The evolution of a severe mesoscale convective system: Cloud-to-Ground lightning location and storm structure[J]. Monthly Weather Review, 1991, 119 (12): 533-1556.
- [15] 扈中慈,陆长荣,白乃英,等. 华北平原飊线与一般对流活动发生条件的对比[J]. 气象, 1987, 13(8): 8-13.

易笑园等：华北炮线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标

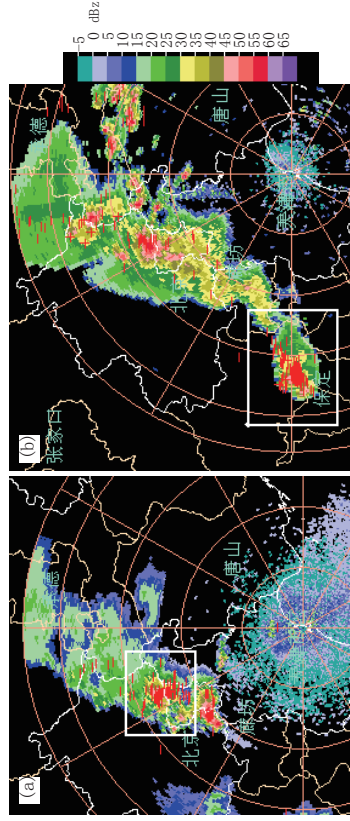


图 5 地闪与相应时刻 1.5° 雷达反射率叠加图
(白框为选定跟踪的地闪密集区;红色为“+”“-”地闪)

- a. 2004年9月6日09:21时 (BST) ;
- b. 2007年7月7日19:30时 (BST)