

石玉恒,张义军,郑栋,等. 北京地区雷暴的雷达回波特征与闪电活动的相关关系[J]. 气象,2012,38(1):66-71.

# 北京地区雷暴的雷达回波特征 与闪电活动的相关关系<sup>\*1</sup>

石玉恒<sup>1</sup> 张义军<sup>1,2</sup> 郑 栋<sup>1</sup> 孟 青<sup>1</sup> 姚 雯<sup>1</sup> 刘恒毅<sup>1</sup>

1 中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室,北京 100081

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

**提 要:** 基于雷达资料以及 SFAIR 3000 闪电定位资料分析了北京地区 14 次雷暴过程,研究了闪电活动与雷暴的雷达回波反射率体积的相关性。结果表明:反射率体积与总闪频次有着较好的相关性,其中 $-15^{\circ}\text{C}$ 层以上超过 30 dBz 的反射率体积与总闪频次的相关系数为 0.89,其指数拟合优度为 0.83。北京地区雷暴的单个闪电表征回波体积(VPF)在闪电活动开始时期有较高的水平,但在闪电活动结束时期较小。VPF 还可作为闪电活动消亡的指示因子。

**关键词:** 闪电总闪频次,反射率体积,指数拟合,雷暴,回波特征

## The Relationship Between Lightning Activity and Radar Echo Characteristics of Thunderstorm in Beijing Area

SHI Yuheng<sup>1</sup> ZHANG Yijun<sup>1,2</sup> ZHENG Dong<sup>1</sup> MENG Qing<sup>1</sup> YAO Wen<sup>1</sup> LIU Hengyi<sup>1</sup>

1 Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract:** Based on the WSR-98D Doppler weather radar data and SAFIR 3000 lightning locating data, the relationship between lightning activity and radar echo characteristics of 14 thunderstorms in Beijing area is investigated. The studied period spans from 2006 to 2008 and focuses on the events with the most important lightning activity. It was found that the total lightning frequency has a strong linear correlation with the echo volume above  $-15^{\circ}\text{C}$  level with reflectivity exceeding 30 dBz. And the correlation coefficient is 0.89. Its curve fitting value is 0.83. Furthermore, the echo volume per flash (VPF) has higher values in the beginning of lightning, while has lower values at the end of the period of lightning.

**Key words:** lightning total lightning frequency, echo volume, curve fitting, thunderstorm, echo characteristics

## 引 言

从冰晶和软雹碰撞的雷暴非感应起电机可以  
看出<sup>[1-7]</sup>,闪电活动与雷暴动力以及微物理参数关系  
较为密切<sup>[8]</sup>,而闪电活动信息不仅可以作为天气预

警的参考资料<sup>[9]</sup>,还可以提高数值天气预报的准确  
度<sup>[10-11]</sup>,因此研究闪电活动与雷暴的动力微物理参  
数间的关系具有重要意义。

研究表明,如果在 8 km 高度以上,雷暴的对流剧  
烈或 8 km 附近的上升气流速度有显著增大,在此 5  
~10 min 后,雷暴的闪电活动就会显著增强<sup>[12-18]</sup>。

\* 国家自然科学基金项目(41030960 和 41005006)、国家科技支撑计划项目(2008BAC36B04)和中国气象科学研究院基本科研业务费专项项目共同资助

2011 年 1 月 25 日收稿; 2011 年 11 月 16 日收修定稿

第一作者:石玉恒,主要从事雷电物理、雷暴电学研究。Email:syh878@163.com

MacGorman 等<sup>[19]</sup> 分析发现,在 10~12 km 处,云闪频次与该层的反射率面积无明显相关性(不相关),但云闪频次与 8 km 处的最大反射率相关性较好(相关系数为 0.8)。Knupp 等<sup>[20]</sup> 在研究 3 个产生龙卷的超级单体的地闪特征时发现,有 1 个雷暴的地闪频次与雷达回波超过 65 dBz 的反射率面积呈负相关(相关系数为 -0.74),其他 2 个雷暴相关性很差。但 Carey 等<sup>[21]</sup> 也对产生龙卷的超级单体进行了研究,使用雷暴超过 40 和 55 dBz 的反射率体积与地闪频次做相关性分析,结果表明超过 40 dBz 的反射率体积与地闪频次有较好的相关性。从以上研究来看,讨论分析大多使用地闪资料,但地闪特征不能表征总闪活动的特点,得到的结论为闪电频次与所用的雷达参数有正相关、负相关以及不相关,存在不确定性,这也是资料所带来的局限性;选用的个例较少,存在不能全面反映闪电活动特征的问题;分析结果主要是定性的结论,定量的结果较少。由于不同地区雷暴存在明显的地域差异,其闪电活动特征也会

有所不同<sup>[8,21-23]</sup>,所以在选取个例时,针对某一地区来选择更有利于认识这一地区的闪电活动特征。

本文主要研究雷暴的闪电活动与雷达回波特征的相关性以及得到闪电活动结束的初步预警步骤,从而完善现有的预警系统<sup>[24-27]</sup>。其中所使用的雷达资料是北京地区 SA 波段 WSR-98D 多普勒雷达所观测的北京地区雷暴资料,总闪资料使用的是北京地区的 SAFIR 3000 观测的资料。选用 2006 和 2008 年所发生的 14 个雷暴个例,对雷暴的闪电活动和雷达资料进行相关性分析。

## 1 资 料

雷达位于北京的大兴(39°48′32″N,116°28′19″E),有效探测半径均为 150 km,体扫周期为 5~6 min。闪电探测系统是覆盖北京大部分地区的 SAFIR 3000,该系统包括三个探测子站和一个中心站。

图 1a 给出的是三个探测子站和北京雷达的空

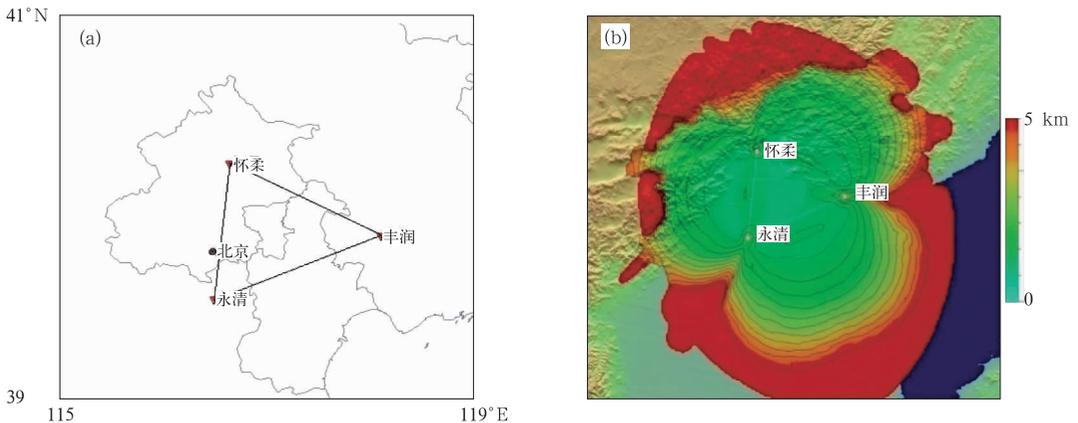


图 1 北京雷达以及 SAFIR 3000 探测站点分布(a),SAFIR 3000 闪电定位系统理论探测精度分布(b)

Fig. 1 The distribution of Beijing Radar Station and SAFIR 3000 Stations (a) and the distribution of the location accuracy of SAFIR 3000 (b)

间位置,图 1b 为该闪电探测系统的理论探测精度分布。SAFIR(surveillance et alerte founder par interferometric radioelectrique) 三维闪电定位系统为多站定位的甚高频(VHF)闪电探测系统,工作频段为 110~118 MHz。由于该系统的 VHF 频段包含的闪电信息更为丰富,覆盖了整个闪电的放电过程,因而具备了探测云闪的能力<sup>[28-29]</sup>,该系统探测天线除了由 5 支偶极子天线组成的阵列外还包括一个工作在低频(LF)的电场天线,所以同时兼有地闪定位功能,站网中心理论定位精度为 500 m,两者结合使用可区分云内放电与云-地放电。

为保证分析结果的可靠性,本文在选择个例时主要考虑以下两点:(1)选择的雷暴个例包括孤立单

体、多单体以及超级单体这三种类型,这些个例在北京地区具有一定的普遍性;(2)所用的雷暴资料要在雷达有效探测的最大范围内以及 SAFIR 3000 探测系统误差 3 km 以内,如果在某一时段,雷暴超过这个区域就不使用该时段内的资料。综合上述两点,本文挑选了 2006 和 2008 年北京地区 14 个雷暴个例,个例的描述可参考表 1。表 1 第三列为雷暴的类型;第四列为雷达体扫数目。本文剔除了雷暴经过雷达盲区,以及没有闪电发生的体扫;第五列为雷暴的持续时间(世界时);第六列为雷暴的简短描述。在统计中,闪电频次的计算为雷达体扫开始时间到下一次雷达体扫开始时间内所发生的闪电个数。

表 1 个例说明

Table 1 Description of the 14 thunderstorm cases

日期	编号	雷暴类型	体扫数目	持续时间/UTC	简短描述
060720	1	孤立单体雷暴	20	06:42—08:42	不包含闪电活动开始时期
060803	2	孤立单体雷暴	25	05:48—08:12	
060806	3	孤立单体雷暴	29	06:47—09:35	
060806	4	多单体雷暴	18	07:11—08:53	包含闪电活动完整生命期
060806	5	孤立单体雷暴	16	08:17—09:47	
060808	6	多单体雷暴	14	14:42—16:36	
060808	7	超级单体雷暴	53	16:36—21:48	
060809	8	孤立单体雷暴	17	16:54—18:31	
060810	9	孤立单体雷暴	18	03:15—04:59	不包含闪电活动消亡时期
060810	10	多单体雷暴	29	04:41—07:39	包含闪电活动完整生命期
060812	11	多单体雷暴	70	13:53—20:58	不包含闪电活动开始时期和消亡时期
060812	12	多单体雷暴	38	15:49—19:34	不包含闪电活动消亡时期
060812	13	孤立单体雷暴	25	19:16—22:22	不包含闪电活动开始时期
080729	14	多单体雷暴	25	01:00—03:24	包含闪电活动完整生命期

## 2 方法

### 2.1 雷达资料的三维格点化

雷达基数据资料,以极坐标方式存储,为方便计算和分析,在使用时将基数据插值转化成笛卡尔坐标下的数据。目前该插值方法较多,文献[30]评估了几种常用的插值方法后发现,在雷达资料格点化过程中,径向和方位上的最近邻居法和垂直方向的线性内插法结合是一种有效的雷达资料分析方法,该方法得到的反射率场在水平和垂直方向都比较连续,同时也较好地保留了体扫资料中原有的反射率结构特征,具体算法参考文献[30]。本研究采用上述方法,将基数据插值成为水平分辨率为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ ,高度分辨率为  $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$  的三维格点场数据。

### 2.2 SAFIR 资料处理方法

SAFIR 3000 系统的探测资料是以三维辐射点的空间信息进行记录,使用时,可按一定的判断标准将辐射点转化成闪电(云闪、正地闪和负地闪)信息,不同标准得到的闪电总数会有差别。本文按照下述方法转化,将时间相距 100 ms 内、距离间隔相差 7 km 的辐射点作为同一次放电过程处理<sup>[31-32]</sup>。

## 3 分析和结果

### 3.1 闪电活动与雷暴反射率体积相关性分析

Williams 等<sup>[33]</sup>与 Gilmore 等<sup>[34]</sup>分析发现 40 dBz 达到的最大高度能很好地表征雷暴中的上

升气流的强弱。Carey 等<sup>[19]</sup>认为,冻结层以上的回波体积,由于包含了反射率能达到的高度信息,也可以在一定程度上用于表征雷暴上升气流的强弱。某一格点的反射率强度是这一格点处云中粒子的大小与浓度的综合体现,因此冻结层以上的反射率体积能在一定程度上反映雷暴中的冰相粒子的大小与浓度。研究认为,闪电活动和雷暴的动力与冰相粒子有着密切的关系,因此可以利用反射率体积来研究闪电活动。

雷暴的起电过程与温度有着密切的关系,在分析时,将 14 个个例中每个雷暴分为 0, -5, -10 和 -15℃ 的 4 个温度层(温度信息由当天探空资料计算得出),统计这 4 个温度层以上超过 30, 40 和 50 dBz 的体积(分别用符号  $V_{30t00}$ ,  $V_{40t00}$ ,  $V_{50t00}$ ,  $V_{30t-5}$ ,  $V_{40t-5}$ ,  $V_{50t-5}$ ,  $V_{30t-10}$ ,  $V_{40t-10}$ ,  $V_{50t-10}$ ,  $V_{30t-15}$ ,  $V_{40t-15}$  和  $V_{50t-15}$  来表示,用  $r$  加这些符号下标表示对应的项与雷暴闪电总闪频次的相关系数)和闪电总闪频次的相关系数,结果参见表 2。

用  $V_{30}$  代表  $V_{30t00}$ ,  $V_{30t-5}$ ,  $V_{30t-10}$  以及  $V_{30t-15}$  的集合,  $V_{40}$  和  $V_{50}$  与之类似。从统计结果来看,  $V_{30}$  与  $V_{40}$  与闪电总闪频次有着较好的相关性。其中  $V_{30t-15}$  闪电总闪频次相关性最好,为 0.89;  $V_{50t-15}$  与闪电总闪频次相关性较差,仅为 0.18; 总的来说,  $V_{30}$  与闪电总闪频次的相关性最好,  $V_{40}$  次之,  $V_{50}$  最小。计算 -15℃ 层以上 30~40 dBz, 40~50 dBz 以及 50 dBz 以上的反射率体积与闪电总闪频次的相系数分别为 0.88, 0.75 和 0.18。通常,反射率强度反映了云中粒子的大小和浓度, -15℃ 层以上超过 30 dBz 区域粒子包含了冰晶、霰以及冰雹粒子;而

在  $-15^{\circ}\text{C}$  层以上,超过 50 dBz 区域的粒子一般为较大的雹粒子,从与闪电活动的关系好坏来看,雷暴中

的雹粒子与闪电活动相关性较差。

表 2 不同反射率体积参数与闪电频次的相关系数

**Table 2 The correlation coefficients between different echo volume parameters and total lightning frequency**

体积参数	$V_{30\pm 0}$	$V_{40\pm 0}$	$V_{50\pm 0}$	$V_{30\pm 5}$	$V_{40\pm 5}$	$V_{50\pm 5}$	$V_{30\pm 10}$	$V_{40\pm 10}$	$V_{50\pm 10}$	$V_{30\pm 15}$	$V_{40\pm 15}$	$V_{50\pm 15}$
相关系数	0.86	0.83	0.45	0.88	0.80	0.30	0.89	0.77	0.23	0.89	0.74	0.18

注:表中数据为原始数据四舍五入并保留 2 位小数

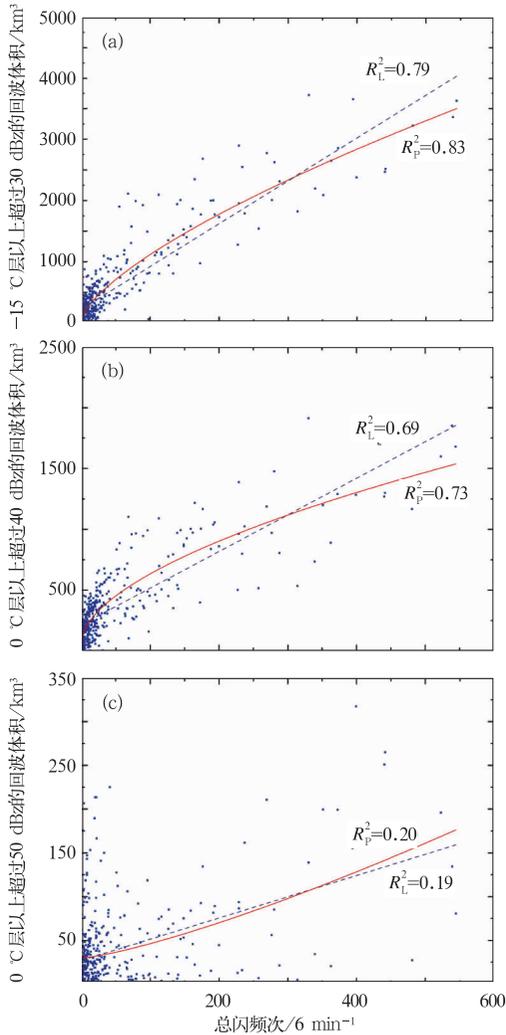


图 2 (a)、(b)和(c)分别为  $V_{30\pm 15}$ 、 $V_{40\pm 0}$ 、 $V_{50\pm 0}$  与闪电总闪电频次的散点图、线性拟合以及指数拟合

[虚线为线性拟合(拟合优度为  $R_L^2$ ),

实线为指数拟合(拟合优度为  $R_P^2$ )]

Fig. 2 Scatter plots with linear fitting (dashed line) and power fitting (solid line) of  $V_{30\pm 15}$  (a),  $V_{40\pm 0}$  (b) and  $V_{50\pm 0}$  (c) as a function of the total lightning per 6 minutes

为了进一步分析反射率体积与总闪电频次的关系,选取  $V_{30}$  中相关系数最高的项( $V_{30\pm 15}$ )做线性拟

合和指数拟合,并使用  $V_{40}$  和  $V_{50}$  中相关系数最高的项( $V_{40\pm 0}$  和  $V_{50\pm 0}$ )作对比分析,比较拟合的结果。图 2 给出了超过 30 dBz,超过 40 dBz 以及超过 50 dBz 的反射率体积与总闪电频次的散点图以及其线性拟合与指数拟合。其拟合结果可参考表 3,从结果可以看出,总闪电频次与三个参数都有较好的拟合,其拟合的方程均通过了  $F_{0.001}$  的检验; $V_{30\pm 15}$  的拟合结果最好,其中指数拟合的  $R^2$  (拟合优度)高达 0.83,线性拟合的  $R^2$  最高为 0.79, $V_{50\pm 0}$  的线性拟合  $R^2$  最小,为 0.19;从使用的拟合方法来看,各项使用指数拟合的拟合优度均要高于线性拟合。

表 3  $V_{30\pm 15}$ 、 $V_{40\pm 0}$ 、 $V_{50\pm 0}$  与总闪电频次的线性拟合和指数拟合  
Table 3 The linear fitting and power fitting between total lightning frequency and  $V_{30\pm 15}$ ,  $V_{40\pm 0}$  and  $V_{50\pm 0}$

	回归方程	拟合方式	F 显著度	$F_{0.001}$	拟合优度( $R^2$ )
$V_{30\pm 15}$	$V=7.00F+222.08$	线性	1565.11	10.99	0.79
$V_{40\pm 0}$	$V=3.00F+216.53$	线性	861.49	10.99	0.68
$V_{50\pm 0}$	$V=0.24F+26.94$	线性	97.73	10.99	0.19
$V_{30\pm 15}$	$V=44.99F^{0.69}+39.48$	指数	1134.73	10.99	0.83
$V_{40\pm 0}$	$V=39.87F^{0.57}+81.16$	指数	982.34	10.99	0.73
$V_{50\pm 0}$	$V=0.06F^{0.23}+2.89$	指数	137.68	10.99	0.20

### 3.2 单个闪电表征的回波体积

与 RPF (rainyields per flash) 类似,定义 VPF (echo volume per flash) 为回波体积除以闪电频次,用来表征每个闪电所对应的回波体积,在一定程度上反映雷暴的微物理条件。表 4 给出了个例中 VPF 与闪电活动的时间差关系,从表 4 中可以看出 VPF 最大值出现在闪电活动开始时刻较多。在 11 个包含闪电消亡的个例中,有 8 个个例在闪电活动结束后 12~30 min 内出现 VPF 最小值,并且在出现最小值后最多 12 min 后闪电频次都低于每 6 min 30 个。从表 4 中可以发现以下规律:当 VPF 出现最小值后,观察后 6 或 12 min 后的闪电频次数目,如果大于每 6 min 30 个,则说明闪电活动不会即将结束,需要对下一次的 VPF 最小值做判断,如果小于每 6 min 30 个,则说明闪电活动在此之后的大

表 4 个例中 VPF 与闪电活动的时间差关系(单位: min)

Table 4 The relationship of time difference between VPF and lightning activity (unit: min)

雷暴编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
最大值出现时间	—	18	0	0	0	0	0	6	6	0	—	0	—	24
最小值出现在闪电结束前的时间	30	0	12	12	12	18	24	—	—	0	—	—	12	12
在 VPF 最小值出现后 12 min 内闪电频次小于每 6 min 30 个出现在闪电活动结束前的时间	18(27)	24(8)	6(24)	6(23)	6(26)	12(15)	18(25)	—	—	6(9)	—	—	6(4)	6(11)

注:最后一行中括号内的数值为当时的每 6 min 的闪电数量

约 24 min 内结束。

为了更进一步讨论 VPF 与闪电活动的关系,选择闪电活动资料完整的 7 号雷暴做个例分析,图 3 给出了 7 号雷暴总闪频次、 $V_{30t-15}$  与 VPF 的双 Y 轴图,从图 3 可以看出,闪电频次与  $V_{30t-15}$  有较好的相关性,但在闪电活动前期反射率体积变化略比闪电频次超前(大约超前 10 min),而在此之后,闪电频次与  $V_{30t-15}$  变化较为一致。导致这一现象的原因为闪电活动前期,雷暴处于发展阶段,上升气流不断增大,随后雷暴才发生起电过程以及电荷分离过程,最后表现出闪电频次增加,而之后的闪电活动时期,由于雷暴中上升气流减弱,雷暴的起电过程减弱,这种超前性表现的不为明显。

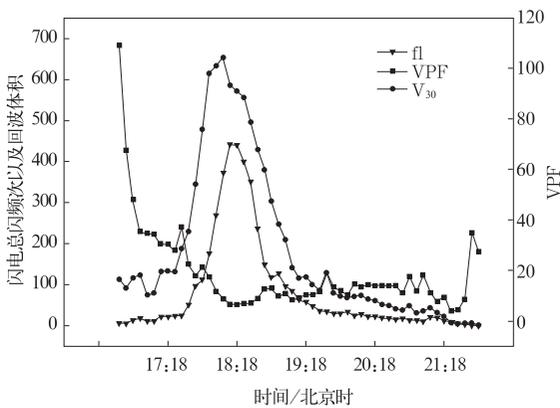


图 3 7 号雷暴闪电总闪频次[单位:  $(6 \text{ min})^{-1}$ ]、 $-15^\circ\text{C}$  超过 30 dBz 反射率体积(单位:  $10 \text{ km}^3$ ) 和 VPF 的时序变化图

Fig. 3 Time series of the total lightning frequency [unit:  $(6 \text{ min})^{-1}$ ], the echo volume (unit:  $10 \text{ km}^3$ ) above  $-15^\circ\text{C}$  level with reflectivity exceeding 30 dBz and VPF of thunderstorm No. 7

从 VPF 的时序变化来看,较大的闪电频次(fl)时刻对应着较小的 VPF,两者呈负相关。如果将闪电活动开始后 18 min 和闪电活动结束前 18 min 分别定义为闪电活动开始和结束时期,则在闪电活动开始时期,由于闪电频次较低,但产生闪电需要雷暴

有较强的上升气流来增强起电,从而表现出雷暴有较大的超过一定反射率体积,因此这一时期的 VPF 水平较高。在闪电活动结束倒数第 5 个 6 min 内,由于回波体积减小,而闪电频次变化不太大,导致 VPF 值出现最小值。在闪电活动结束时期,由于这一时期雷暴处于消亡阶段,反射率体积减小,即使与开始时期有着同样低的闪电频次,VPF 水平却较低,例如,在第一个 6 min 内的闪电频次为 26 个,对应的 VPF 为  $131 \text{ km}^3 \cdot \text{fl}^{-1}$ ,而在闪电活动结束倒数第 3 个 6 min 内的闪电频次为 25 个,对应的 VPF 仅为  $5.16 \text{ km}^3 \cdot \text{fl}^{-1}$ 。从以上的分析来看,雷暴的 VPF 变化与闪电活动有一定的相关关系,并且 VPF 结合闪电频次可以较好地对闪电活动结束进行预测。

## 4 结论与讨论

本文利用雷达与 SFARI 3000 闪电定位资料,分析讨论了 2006 和 2008 年发生在北京地区 14 次雷暴的总闪活动与雷暴的反射率体积的关系,得出了以下结论。

北京地区的雷暴中,相比超过 40 和 50 dBz 的反射率体积,超过 30 dBz 的反射率体积与总闪频次的相关性更好,其中相关系数最高的为  $-15^\circ\text{C}$  层以上的超过 30 dBz 反射率体积,其相关系数为 0.89。对雷暴的各反射率体积参数做线性拟合与指数拟合,从结果来看,所有的回归方程指数拟合的效果要优于线性拟合,其中  $-15^\circ\text{C}$  层以上,超过 30 dBz 的反射率体积参数拟合优度高达 0.83,其拟合的方程为  $V = 44.99F^{0.69} + 39.48$ ,其中  $V$  为  $-15^\circ\text{C}$  层以上的超过 30 dBz 反射率体积(单位:  $\text{km}^3$ ),  $F$  为总闪频次[单位:  $\text{个} \cdot (6 \text{ min})^{-1}$ ]。

从雷电短时临近预警来看,由于回波体积在闪电频次增加时期有一个超前时间,因此在这一时期可以使用回波体积的变化来对闪电频次变化做预警,从 7 号雷暴的个例可以看出,当回波体积变化达到最大值后,闪电频次在后来的几个时刻也达到了

最大值,但在闪电频次减小的时段内,不存在超前的现象,不能使用回波体积对闪电活动进行预警。在雷暴末期,可借助 VPF 对闪电活动的结束进行预警。目前对雷暴闪电活动预警的方案还不完善,需要进一步分析讨论,这也是下一步的工作重点。

## 参考文献

- [1] Reynolds S E, Brook M, Gourley M F. Thunderstorm charge separation[J]. *J Meteorol*, 1957, 14(5): 163-178.
- [2] Takahashi T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms[J]. *J Atmos Sci*, 1978, 35(8): 1536-1548.
- [3] Jayaratne E R, Saunders C P R, Hallett J. Laboratory studies of the charging of soft hail during ice crystal interactions [J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1983, 109(461): 609-630.
- [4] Saunders C P R, Keith W D, Mitzeva R P. The effect of liquid water on thunderstorm charging[J]. *J Geophys Res*, 1991, 96(D6): 11007-11017.
- [5] Saunders C P R, Peck S L. Laboratory studies of the influence of the rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupel collisions[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(D12): 13949-13956.
- [6] Takahashi T, Miyawaki K. Reexamination of riming electrification in a wind tunnel[J]. *J Atmos Sci*, 2002, 59(5): 1018-1025.
- [7] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110, D12101, doi: 10.1029/2004JD005287.
- [8] Deierling W, Petersen W A. Total lightning activity as an indicator of updraft characteristics[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113, D16210, doi:10.1029/2007JD009598.
- [9] Goodman S J, Blakeslee R, Christian H, et al. The North Alabama lightning mapping array: Recent severe storm observations and future prospects[J]. *Atmos Res*, 2005, 76(1-4): 423-437.
- [10] McCaul E W, Lacasse Jr K M, Goodman S J, et al. Use of high resolution WRF simulations to forecast lightning threat, in Preprints of the 23rd Conference on Severe Local Storms, November 5-10, 2006[C]. St. Missouri, CD-ROM, AMS.
- [11] Mansell E R, Ziegler C L, MacGorman D R. A lightning data assimilation technique for mesoscale forecast models[J]. *Mon Wea Rev*, 2007, 135(5): 1732-1748.
- [12] Christian H, Holmes C R, Bullock J W, et al. Airborne and ground-based studies of thunderstorms in the vicinity of Langmuir Laboratory[J]. *Q J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 159-174.
- [13] Dye J E, Jones J J, Winn W P, et al. Early electrification and precipitation development in a small, isolated Montana cumulonimbus[J]. *J Geophys Res*, 1986, 91: 1231-1247.
- [14] Dye J E, Jones J J, Winn W P, et al. Correction to "Early electrification and precipitation development in a small, isolated Montana cumulonimbus"[J]. *J Geophys Res*, 1986b, 91: 6747-6750.
- [15] Krehbiel P R. The electrical structure of thunderstorms[J]// *The Earth's Electrical Environment*. Washington D C: National Academy Press, 1986:90-113.
- [16] Lhermitte R, Krehbiel P R. Doppler radar and radio observations of thunderstorms[J]. *IEEE Trans Geosci Electron*, GE-17, 1979:162-171.
- [17] 张一平,王新敏,牛淑贞,等.河南省强雷暴地闪活动与雷达回波的关系探析[J]. *气象*, 2010, 36(2): 54-61.
- [18] 宋清芝,孙景兰,吕晓娜.河南省一次暴雪伴雷电天气的形成机理[J]. *气象*, 2011, 37(5): 583-589.
- [19] MacGorman D R, Burgess D W, Mazur V, et al. Lightning rates relative to tornadic storm evolution on 22 May 1981 [J]. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 221-250.
- [20] 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]. *Mon Wea Rev*, 2003, 131(1): 172-188.
- [21] Carey L D, Petersen W A, Rutledge S A. Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998[J]. *Mon Wea Rev*, 2003, 131: 1811-1831.
- [22] Zajac B A, Rutledge S A. Cloud to ground lightning activity in the contiguous United States from 1995 to 1999[J]. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 999-1019.
- [23] 王学良,刘学春,黄小彦,等.湖北地区云地闪电时空分布特征分析[J]. *气象*, 2010, 36(10): 91-96.
- [24] 吕伟涛,张义军,孟青,等.雷电临近预警方法和系统研发[J]. *气象*, 2009, 35(5): 10-17.
- [25] 孟青,张义军,吕伟涛,等.雷电临近预警系统的运行试验[J]. *气象*, 2009, 35(4): 20-24.
- [26] 马颖,孟青,吕伟涛,等.雷电临近预警产品评估方法及其软件[J]. *气象*, 2009, 35(11): 101-106.
- [27] 孟青,吕伟涛,姚雯,等.地面电场资料在雷电预警技术中的应用[J]. *气象*, 2005, 31(9): 30-33.
- [28] 刘恒毅,董万胜,王涛,等.闪电电场变化波形时域特征分析及放电类型识别[J]. *气象*, 2009, 35(3): 49-59.
- [29] 孟青,葛润生,朱小燕. SAFIR 闪电监测和预警系统[J]. *气象科技*, 2002, (3): 135-138.
- [30] 肖艳姣,刘黎平.新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. *气象学报*, 2006, (5): 647-657.
- [31] Montanya J, Pineda N, Soula S, et al. Total Lightning Activity and Electrostatic Field in a Hail-bearing Thunderstorm in Catalonia[C]. // 19th Int Lightning Detection Conf, Tucson, Arizona, USA, 2006.
- [32] Zheng Dong, Zhang Yijun, Meng Qing, et al. Total Lightning characteristics and electric structure evolution in a hailstorm[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 23(2): 233-249.
- [33] Williams, E R, Bddi B, Matlin A, et al. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms[J]. *Atmos Res*, 1999, 51: 245-265.
- [34] Gilmore M S, Wicker L J. Influences of the local environment on supercell cloud-to-ground lightning, radar characteristics, and severe weather on 2 June 1995 [J]. *Mon Wea Rev*, 2002, 130, 2349-2372.