

王婷波, 郑栋, 张义军, 等. 基于大气层结和雷暴演变的闪电和降水关系. 应用气象学报, 2014, 25(1): 33-41.

基于大气层结和雷暴演变的闪电和降水关系

王婷波¹⁾ 郑 栋²⁾ 张义军^{2)*} 姚 雯²⁾ 张文娟²⁾

¹⁾(成都信息工程学院, 成都 610225) ²⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要

选取 2006—2008 年发生在北京及其周边地区的 28 次雷暴过程, 基于大气不稳定性参数和雷达参量对雷暴过程进行分类, 分析了不同分类条件下的总闪电活动(SAFIR3000 三维闪电定位系统观测)和对流降水(雷达反演)的关系。结果表明: 整体而言, 总闪对应降水量的平均值为 $1.92 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$ 。依据对流有效位能和抬升指数对雷暴进行分类的分析表明, 较强的不稳定状态对应了较小的总闪对应降水量, 同时总闪频次和对流降水量的相关性更好。基于雷达特征参数的分类分析表明, 总闪对应降水量在对流运动较弱情况下最小, 其次是对流运动较强的情况下, 而对流运动适中时最大。

关键词: 闪电; 降水; 大气层结; 雷达参量

引 言

闪电和降水关系是近年来被普遍关注的一个科学问题。一方面, 对于具有强对流特征的雷暴来说, 闪电活动与对流活动强度和云内的冰相过程关系密切; 同时, 对流活动也是雷暴产生强降水的关键原因, 因此, 从雷暴动力和微物理角度来说, 闪电和降水之间存在内在联系。另一方面, 作为对流天气过程的两个产物, 闪电和降水均为天气监测、预警和预报的重要对象。特别是随着闪电定位技术的发展以及闪电定位站网的普及, 闪电数据在强对流天气监测中的作用日益突出^[1]。基于闪电监测估测降水, 可以对现有降水观测和预警手段提供有益补充^[2], 闪电和降水关系研究对于闪电资料在数值天气预报模式中的同化也具有重要参考价值^[3]。

总闪对应降水量^[4]是体现闪电和降水关系的一个重要参数, 是单个闪电表征的对流降水量。已有研究表明, 该值在不同地区存在差异。如 Pineda 等^[5]分析了发生在地中海西北部区域的 9 个对流事件中的地闪和降水的关系, 总体上, 地闪对应降水量平均值为 $38.9 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{fl}^{-1}$, 变化范围为 $10.8 \times$

$10^3 \sim 87.2 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{fl}^{-1}$ 。Petersen 等^[6]统计了全球多个地方的降水与地闪的关系, 考虑的时间尺度为 1 个月, 空间尺度大约为 $10^4 \sim 10^5 \text{ km}^2$, 研究表明: 在美国中部大陆, 地闪对应降水量约为 $1 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$, 在美国西南部为 $6 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$, 在热带大陆为 $4 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$, 热带西太平洋地区为 $1 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$ 。周筠君等^[7]分析了 1997 年 6—8 月甘肃陇东地区的雷暴过程, 指出地闪对应降水量变化范围为 $1.4 \times 10^7 \sim 3.5 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$, 平均值为 $2.4 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$ 。郑栋等^[8]使用总闪资料分析了北京地区闪电活动与对流降水的关系, 发现总闪对应降水量为 $0.86 \times 10^7 \sim 6.57 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$, 其中值为 $2.26 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$, 平均值为 $2.65 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$ 。

闪电和降水关系的强弱也随气候带而变化。Petersen 等^[6]发现, 美国大陆地闪和对流降水的相关系数在东南、东北、中部和西南部分别为 0.71, 0.45, 0.87 和 0.90。Soriano 等^[9]对伊比利亚半岛闪电和降水关系分析表明, 半干旱区闪电和降水的相关系数为 0.75, 潮湿地区相关系数为 0.65。郑栋等^[10]分析了我国几个不同气候带的闪电和降水关系, 同样发现在相对干旱地区, 闪电与降水相关关系更为显著。

2013-02-05 收到, 2013-09-16 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41005006, 41030960), 国家科技支撑计划项目(2008BAC36B04), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2013Z006)

* 通信作者, email: zhangyj@cams.cma.gov.cn

也有研究给出了闪电和降水的拟合关系。Chang 等^[11]研究了闪电与 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星微波成像仪得到的对流降水之间的关系,指出当闪电频次 $S \geq 1/15$ min 时,降水强度 $R = 1.69 \times S^{0.46} - 1.1$ (单位: mm/h); 当 $S \leq 1/15$ min 时,无降水。周筠君等^[12]根据甘肃平凉地区地闪和降水得到降水强度和地闪频次的拟合关系,相关系数为 0.8641。郑栋等^[8]得到北京地区总闪和对流降水量的拟合关系为 $M_{CR} = 1.574 \times 10^7 F_{TL} + 2.956 \times 10^8$,其中 M_{CR} 表示对应闪电频次统计时段(为 6 min)的对流降水量, F_{TL} 表示 6 min 的总闪频次。

不同地区闪电和降水关系存在差异,但 Petersen 等^[6]和 Ziper^[13]指出,对一确定地区而言,两者关系相对稳定,因此,针对某一地区的闪电和降水关系的研究具有现实意义。同时,研究也表明,闪电和降水的关系随雷暴强度的变化而出现差异,如对比发现强对流雷暴倾向于对应弱降水^[4,13-14]。已有研究通常将不同类型雷暴综合统计,得到闪电和降水的平均关系。为了进一步理解闪电和降水的内在联系以及闪电和降水关系随对流活动特征的变化,从而为闪电和降水关系的潜在应用提供更为细化的研究结果,本文选取 2006—2008 年发生在北京及周边地区的 28 次雷暴过程,通过对不同雷暴过程对应的大气层结特征以及雷暴发展不同阶段对应的雷达特征将过程进行分类,探讨不同分类情况下闪电和降水的关系。

1 数据和方法

本研究选取了 2006—2008 年发生在北京及其周边地区的 28 次雷暴过程。过程选择通常要求雷暴是单体或具有明显的对流核,在可靠观测范围内发展过程较为完整。研究使用观测资料包括闪电资料、雷达资料和探空资料。

1.1 闪电资料

闪电数据由京津地区的 SAFIR3000 三维闪电定位系统获取。该系统包括 3 个探测子站(SAFIR3000 三维闪电定位系统子站)(图 1)和 1 个处理中心,其采用干涉法定位闪电击穿过程中的辐射源位置,工作频率 VHF 为 110~118 MHz,LF 为 300 Hz~3 MHz,200 km 内的探测效率可达到 90%,位置误差小于 2 km。将 SAFIR 辐射点数据

判别为闪电数据的方式如下:对于云闪,相邻辐射点在 100 ms 和 7 km 以内将被判别为属于同一次云闪;对于地闪,相邻辐射点在 500 ms 和 7 km 以内将被判别为属于同一次地闪。同时,为避免云闪被错误的判别为正地闪,按照通常做法^[15],认为正地闪的电流应大于 10 kA,低于 10 kA 的正极性数据则被判别为云闪。文中使用经过闪电判别后得到的总闪数据,不区分云闪和地闪。在雷暴过程选择中,要求雷暴位置在距离 SAFIR3000 站网中心 100 km 范围的区域,确保闪电探测的效率^[16]。

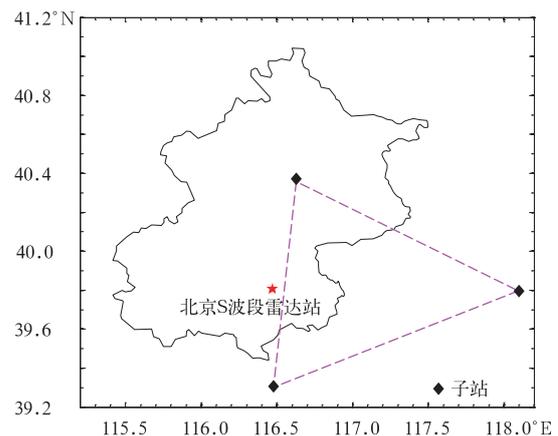


图 1 SAFIR3000 三维闪电定位系统
子站和雷达站分布

Fig. 1 The distribution of SAFIR3000 total lightning location system and radar station

1.2 雷达资料

雷达资料主要为北京 S 波段雷达(位置见图 1)的反射率因子观测数据。由于雷达资料在本分析中将被用来反演降水,所以选择的雷暴过程通常位于距离任何一部雷达 100 km 的范围内,从而确保对雷暴低层有较完整的观测。通过双线性插值,原始反射率因子极坐标数据被转换为 CAPPI(constant altitude plan position indicator)数据,水平分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,垂直方向共 38 层,从 500 m 高度到 20000 m 高度,间隔为 200 m 至 1000 m 不等(底层间隔较小,高层间隔较大)。雷达资料在本研究中主要发挥以下几个方面的作用:

①雷暴过程挑选和数据提取。使用组合反射率因子数据与 SAFIR3000 闪电数据(发生在相邻两次体扫之间的闪电)叠加图确定雷暴边界。当确定某一雷暴过程及其位置符合前面提到的选择条件时,将通过一个环绕雷暴的多边形提取出其内的雷达数

据和属于该雷暴的闪电数据。边界选择时,至少确保组合反射率因子大于 20 dBZ 的区域被选中,且在选择边界附近不存在连续的闪电活动。

②对流降水反演。考虑到雷暴起电、放电过程与对流活动的密切关系,及对流降水在雷暴降水过程中的主导地位,本研究将只关注在雷暴对流区产生的降水。雷暴对流区和层云区的判别采用 Steiner 等^[17]的方法。该方法是在 3 km 高度层上,以反射率因子 42.43 dBZ 为分界,将大于 42.43 dBZ 的网格点定义为对流中心,计算对流中心周围(反射率因子小于 42.43 dBZ)11 km 范围内背景的平均反射率因子(mean background reflectivity, MBR),即此范围内所有网格点的反射率因子平均值。随后计算雷暴所有网格点的反射率因子与背景的平均反射率因子差值,若差值大于 ΔM ,则此网格点被确定为对流中心。

$$\Delta M = \begin{cases} 10, & M_{bg} < 0; \\ 10 - M_{bg}^2/180, & 0 \leq M_{bg} \leq 42.43 \text{ dBZ}; \\ 0, & M_{bg} > 42.43 \text{ dBZ}. \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, M_{bg} 为背景平均反射率因子。然后确定对流中心的影响半径 r ,其大小会随着背景平均反射率因子而改变。

$$r = \begin{cases} 1 \text{ km}, & M_{bg} \leq 25 \text{ dBZ}; \\ 2 \text{ km}, & 25 \text{ dBZ} < M_{bg} \leq 30 \text{ dBZ}; \\ 3 \text{ km}, & 30 \text{ dBZ} < M_{bg} \leq 35 \text{ dBZ}; \\ 4 \text{ km}, & 35 \text{ dBZ} < M_{bg} \leq 40 \text{ dBZ}; \\ 5 \text{ km}, & M_{bg} > 40 \text{ dBZ}. \end{cases} \quad (2)$$

确定对流中心及其影响半径后,在其影响半径范围内的降水为对流降水,在其范围外的降水则为层状降水。

区对流降水区和层云降水区后,同样参考 Steiner 等^[17]的做法,选择 3 km 高度的反射率因子来计算降水率,这里采用经典的对流云反演降水计算方法:

$$Z = 300 \times I^{1.4}. \quad (3)$$

式(3)中, Z 为反射率因子,单位: mm^6/m^3 ; I 为降水强度,单位: mm/h 。对流降水量是 6 min 内对流雷达回波反演区域内所产生的地面降水总质量,单位: kg 。计算过程将对应雷达体扫时间内(取整为 6 min)的闪电频次与相应时间内的对流降水量对应起来。

③雷达参数计算。雷达数据同样被用来计算一些雷达参量,它们被用来作为对闪电和降水关系进行分类分析的参考。本文使用的雷达参量包括:20 dBZ 反射率因子最大高度,为避免奇异点造成的影响,从最高层(20 km)向下考虑,当某层首先满足反射率因子不小于 20 dBZ 的格点数不小于 10 个,则该层被选为 20 dBZ 反射率因子的最大高度层。该参数与云高(通常选择 18 dBZ)在意义上相同,体现了雷暴对流运动的强度。12 km 高度上的最大反射率因子,为避免奇异点影响,选择 12 km 高度上反射率因子最大的 10 个格点值,以这 10 个反射率因子的平均值作为该高度的最大反射率因子。该参数同样在一定程度上反映了雷暴对流运动的强弱。 0°C (由探空数据计算)层以上大于 40 dBZ 的反射率因子体积与大于 30 dBZ 的反射率因子体积的比值,40 dBZ 反射率因子的出现和高度发展经常被用作预警闪电发生的条件^[18-19],且与对流引起的较大尺度的冰相粒子相关,说明其与引起闪电的起电过程关系密切;在双偏振雷达分析中,与起电密切相关的冰相粒子,比如霰、小冰雹等在反射率因子数值上通常大于 30 dBZ^[20],在一定程度上反映了核心起电区体积在雷暴主体电荷区体积中所占的比例。

1.3 探空资料

北京探空站每日 08:00(北京时,下同)和 20:00 的探空数据被用来计算大气层结不稳定度的相关参数,并提供雷达参数计算中的环境大气 0°C 高度信息。08:00 的探空将与跨过该时间点和 08:00—20:00 之间发生的雷暴过程对应,20:00 的探空将与跨过该时间点和 20:00—次日 08:00 之间发生的雷暴过程对应。本文使用的不稳定度参数为对流有效位能和抬升指数,关于它们的定义和计算可参考文献^[21]。

2 闪电和降水的关系

2.1 整体关系

对 28 次雷暴过程综合统计,得到总闪对应降水量平均值为 $1.92 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$,最大值为 $7.91 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$,最小值为 $1.84 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$,中值为 $1.33 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$ 。累积分布 5% 和 95% 位置处的总闪对应降水量分别为 $2.69 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$ 和 $6.05 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$,累积分布 25% 和 75% 位置处的总闪对应降水量分别为 $6.56 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$ 和 $2.42 \times$

$10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$ 之间。郑栋等^[8]对相同地区分析得到的总闪对应降水量平均值为 $2.65 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$, 中值为 $2.26 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$ 。本研究结果与之相比偏小, 除了个例差异的原因外, 还由于所采用的对流区判别方法不同, 本研究判别的对流区可能相对偏小^[22-23]。

图2为所有体扫对应的雷暴总闪频次 F (单位: 个/6 min) 和对流降水量 R (单位: kg) 散点图及其线性拟合结果。两者的线性相关系数为 0.584。

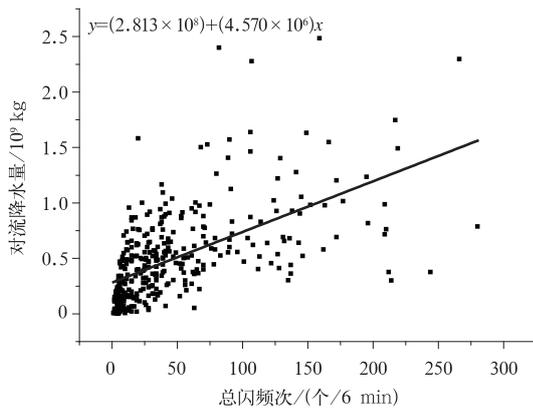


图2 雷暴过程总闪频次和对流降水量关系
Fig. 2 The relationship between total lightning frequency and convective precipitation

表1 不同 E_{CAP} 分类下总闪对应降水量的统计值

Table 1 Statistics of rain yields per flash based on the classification of E_{CAP}

E_{CAP} /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最小值 /($10^5 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$)	最大值 /($10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$)	算术平均值 /($10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$)	累积百分比分布/($10^6 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$)			
				5%	95%	25%	75%
$E_{\text{CAP}} < 1000$	1.84	6.81	1.98	2.37	59.90	7.41	25.50
$1000 \leq E_{\text{CAP}} < 1600$	6.80	11.50	2.02	3.08	66.00	5.74	23.10
$E_{\text{CAP}} \geq 1600$	5.00	5.37	1.50	3.13	37.60	7.08	19.70

对不同 E_{CAP} 分类情况下的闪电和降水关系进行线性拟合分析(表2)。由表2可以看到, 对应

2.2 基于大气不稳定性参数分类的闪电和降水关系

2.2.1 基于对流有效位能分类

通常, 具有较大对流有效位能的层结易产生更强烈的对流活动。依据不同雷暴对应的对流有效位能的大小, 同时考虑到不同分类情况下的样本分布, 该研究中将对流有效位能(E_{CAP})的阈值分为3类: $E_{\text{CAP}} < 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \leq E_{\text{CAP}} < 1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $E_{\text{CAP}} \geq 1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 样本量(占总样本比例)为 156(45%), 123(35%) 和 68(20%)。表1给出了基于不同 E_{CAP} 分类情况下, 总闪对应降水量的统计情况。从分布范围上看, $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \leq E_{\text{CAP}} < 1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 对应的总闪对应降水量范围最广, 其次为 $E_{\text{CAP}} < 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 $E_{\text{CAP}} \geq 1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 对应的总闪对应降水量范围最窄。从平均值看, $E_{\text{CAP}} < 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \leq E_{\text{CAP}} < 1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 对应的总闪对应降水量较为接近, 而 $E_{\text{CAP}} \geq 1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 所对应雷暴的总闪对应降水量相对较小。 E_{CAP} 与总闪对应降水量的这种关系 Buechler 等^[24]在 Tennessee 峡谷涉及 5 个雷暴日的闪电和降水关系分析中也指出, 当出现较大 E_{CAP} 时, 每个闪电对应的降水量偏小。

$E_{\text{CAP}} \geq 1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分类的总闪频次和对流降水量的线性关系最为明显。

表2 不同 E_{CAP} 分类下总闪频次和对流降水量的线性拟合关系

Table 2 Linear fitting between total lightning frequency and convective precipitation based on the classification of E_{CAP}

$E_{\text{CAP}}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	相关系数	F 检验	$F_{0.05}$	是否通过检验	回归方程
$E_{\text{CAP}} < 1000$	0.464	42.258	3.89	是	$R = (3.649 \times 10^8) + (3.413 \times 10^6)F$
$1000 \leq E_{\text{CAP}} < 1600$	0.505	41.371	3.92	是	$R = (2.683 \times 10^8) + (4.448 \times 10^6)F$
$E_{\text{CAP}} \geq 1600$	0.837	154.929	4.00	是	$R = (1.620 \times 10^8) + (5.478 \times 10^6)F$

2.2.2 基于抬升指数分类

此处抬升指数(I_L)的定义为 500 hPa 高度上, 气块状态曲线温度与层结曲线温度的差(不同定义可能相反), 这意味着正值表示正浮力, 而负值表示负浮力。考虑了抬升指数的分布和对应分类样本的数量, 此处的分类区间选择为 $I_L < 0 \text{ K}$, $0 \text{ K} \leq I_L <$

4 K 和 $I_L \geq 4 \text{ K}$, 样本量(占总样本比例)为 44(12%), 183(52%) 和 125(36%)。

表3给出了对应不同 I_L 分类情况下的总闪对应降水量统计结果。从分布范围上看, $0 \text{ K} \leq I_L < 4 \text{ K}$ 对应的总闪对应降水量范围最广, 其次是 $I_L < 0 \text{ K}$, 而 $I_L \geq 4 \text{ K}$ 对应的总闪对应降水量范围最窄。

从平均值看, $I_L < 0$ K 对应总闪对应降水量平均值最大, 其次是 $0 \leq I_L < 4$ K, 而 $I_L \geq 4$ K 对应的总闪对应降水量平均值最小。与对流有效位能类似,

较大的 I_L (意味着较强的不稳定) 对应了较小的总闪对应降水量平均值。

表 3 不同 I_L 分类下总闪对应降水量的统计值

Table 3 Statistics of rain yields per flash based on the classification of I_L

I_L/K	最小值 $/(10^5 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$	最大值 $/(10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$	算术平均值 $/(10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$	累积百分比分布/ $(10^6 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$			
				5%	95%	25%	75%
$I_L < 0$	35.80	9.09	2.26	4.55	66.90	8.73	22.80
$0 \leq I_L < 4$	1.84	8.66	1.98	2.73	63.80	5.80	25.30
$I_L \geq 4$	4.08	6.25	1.76	2.16	52.00	6.81	22.30

线性拟合分析(表 4)表明, 与 $I_L \geq 4$ K 分类对应的雷暴闪电与降水关系线性相关最好。同样, 与 $I_L < 0$ K 分类对应的线性拟合关系要比 $0 \leq I_L < 4$

4 K 显著, 这可能是由于 $I_L < 0$ K 的分类只有两次雷暴个例, 其个体差异性较小。

表 4 不同 I_L 分类下总闪频次和对流降水量的线性拟合关系

Table 4 Linear fitting between total lightning frequency and convective precipitation based on the classification of I_L

I_L/K	相关系数	F 检验	$F_{0.05}$	是否通过检验	回归方程
$I_L < 0$	0.719	44.971	4.08	是	$R = (3.580 \times 10^8) + (3.375 \times 10^6)F$
$0 \leq I_L < 4$	0.493	57.758	3.94	是	$R = (3.377 \times 10^8) + (4.469 \times 10^6)F$
$I_L \geq 4$	0.853	328.337	3.92	是	$R = (1.530 \times 10^8) + (6.276 \times 10^6)F$

2.3 基于雷达参量分类的闪电和降水关系

2.3.1 基于 20 dBZ 反射率因子最大高度分类

依据 20 dBZ 反射率因子最大高度($H_{20 \text{ dBZ}}$)参数分布状态以及相应分类下的样本分布(保证样本分布相对均匀), $H_{20 \text{ dBZ}}$ 被阈值 11.5 km 和 13.5 km 划分为 3 个区间。样本量(占总样本比例)为 97 (35%), 85 (31%) 和 94 (34%)。由于 20 dBZ 反射率因子发展高度在一定程度上体现了对流活动的强弱, 所以这样的划分将具有两个方面的含义: 第一, 不同强度的雷暴过程可能被区分; 第二, 雷暴发展过程不同阶段被区分。

表 5 给出了对应不同 20 dBZ 反射率因子最大高度分类下总闪对应降水量的统计情况。从分布范围看, $H_{20 \text{ dBZ}} < 11.5$ km 对应的总闪对应降水量范围最广, 其次是 $11.5 \text{ km} \leq H_{20 \text{ dBZ}} < 13.5$ km, 而 $H_{20 \text{ dBZ}} \geq 13.5$ km 对应的总闪对应降水量范围最窄。通过与平均值的对比可知, $11.5 \text{ km} \leq H_{20 \text{ dBZ}} <$

13.5 km 的分类对应的总闪对应降水量相对较大, 而 $H_{20 \text{ dBZ}} < 11.5$ km 和 $H_{20 \text{ dBZ}} \geq 13.5$ km 两个分类对应的总闪对应降水量相对较小。如果简单地与对流强度对应起来, 显然适中的对流强度倾向对应更大的总闪对应降水量。Williams 等^[4]指出, 具有更强闪电活动的雷暴或雷暴阶段总闪对应降水量相对偏小。考虑到更强的闪电活动往往对应更强的对流活动, 这与表 5 中显示的 $H_{20 \text{ dBZ}} \geq 13.5$ km 分类相比 $11.5 \text{ km} \leq H_{20 \text{ dBZ}} < 13.5$ km 分类对应较小的平均总闪对应降水量一致。但由表 5 也可知, 对应 $H_{20 \text{ dBZ}} < 11.5$ km 分类的总闪对应降水量相对更小。更强的对流相比适中对流对应较小的总闪对应降水量是由于强对流雷暴(或雷暴发展阶段)闪电具有较大的频次, 从而降低了总闪对应降水量的值, 而较弱对流对应较小的总闪对应降水量则可能是由于弱对流雷暴(或雷暴发展阶段)对应的对流性降水较少。

表 5 不同 $H_{20 \text{ dBZ}}$ 分类总闪对应降水量的统计值

Table 5 Statistics of rain yields per flash based on the classification of $H_{20 \text{ dBZ}}$

$H_{20 \text{ dBZ}}/\text{km}$	最小值 $/(10^5 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$	最大值 $/(10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$	算术平均值 $/(10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$	累积百分比分布/ $(10^6 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$			
				5%	95%	25%	75%
$H_{20 \text{ dBZ}} < 11.5$	1.84	17.30	2.09	0.94	65.20	4.74	22.30
$11.5 \leq H_{20 \text{ dBZ}} < 13.5$	17.00	10.00	2.83	4.80	78.50	10.70	38.20
$H_{20 \text{ dBZ}} \geq 13.5$	32.10	6.81	2.14	4.94	58.60	8.05	30.90

表6为 $H_{20\text{ dBZ}}$ 不同分类情况下总闪电频次和对流降水量的线性拟合结果。在 $H_{20\text{ dBZ}} < 11.5\text{ km}$ 的分类中,闪电与降水相关性更为显著,而另外两种分类情况下,两者的相关关系相对偏弱。郑栋等^[8]在分析闪电和降水关系时,指出闪电和降水很少同时达到峰值,且没有明显前后对应关系。文献^[8]将雷暴过程区分为闪电和降水共同增强的上升阶段、闪电

和降水共同减弱的下降阶段及中间阶段,在上升阶段和下降阶段,闪电和降水的相关关系要好于中间阶段。本文结论与上述研究结论有相通之处,较小的 $H_{20\text{ dBZ}}$ 可能意味着雷暴处于发展和消亡阶段,此时闪电和降水通常具有共增和共减的特征,往往关系更为明显。这样的结论也意味着,在雷暴的旺盛阶段,闪电和降水的关系可能更为复杂。

表6 不同 $H_{20\text{ dBZ}}$ 分类总闪电频次和对流降水量的线性拟合关系

Table 6 Linear fitting between total lightning frequency and convective precipitation based on the classification of $H_{20\text{ dBZ}}$

$H_{20\text{ dBZ}}/\text{km}$	相关系数	F 检验	$F_{0.05}$	是否通过检验	回归方程
$H_{20\text{ dBZ}} < 11.5$	0.804	174.041	3.95	是	$R = (1.168 \times 10^8) + (6.133 \times 10^6)F$
$11.5 \leq H_{20\text{ dBZ}} < 13.5$	0.588	43.830	3.97	是	$R = (2.522 \times 10^8) + (6.572 \times 10^6)F$
$H_{20\text{ dBZ}} \geq 13.5$	0.663	71.500	3.95	是	$R = (3.377 \times 10^8) + (4.893 \times 10^6)F$

2.3.2 基于12 km高度最大反射率因子分类

12 km高度的反射率因子状况通常也被用来反应雷暴的对流发展强度^[25]。此处选用12 km高度的最大反射率因子($f_{12\text{ km}}$)来对雷达体扫时段的数据进行分类,考虑 $f_{12\text{ km}}$ 的分布情况和分类区间体扫样本的均匀分布,最终选择25 dBZ和35 dBZ作为阈值,将对应体扫的闪电和降水分为3类,样本量(占总样本比例)为101(33%),114(37%)和91(30%)。

表7给出了基于雷暴12 km高度最大反射率

因子分类情况下,总闪对应降水量的统计情况。从分布范围看, $f_{12\text{ km}} \geq 35\text{ dBZ}$ 对应的总闪对应降水量范围最大,其次是 $25\text{ dBZ} \leq f_{12\text{ km}} < 35\text{ dBZ}$,而 $f_{12\text{ km}} < 25\text{ dBZ}$ 对应的总闪对应降水量范围最窄。从平均值对比来看, $f_{12\text{ km}} \geq 35\text{ dBZ}$ 分类对应的值要小于 $25\text{ dBZ} \leq f_{12\text{ km}} < 35\text{ dBZ}$ 分类,这与前面得到的强对流对应较小总闪对应降水量相一致。同时 $f_{12\text{ km}} < 25\text{ dBZ}$ 分类对应的总闪对应降水量最小,同样可能是由于弱对流雷暴的对流性降水较少的原

表7 不同 $f_{12\text{ km}}$ 分类总闪对应降水量的统计值

Table 7 Statistics of rain yields per flash based on the classification of $f_{12\text{ km}}$

$f_{12\text{ km}}/\text{dBZ}$	最小值 $/(10^5\text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$	最大值 $/(10^7\text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$	算术平均值 $/(10^7\text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$	累积百分比分布 $/(10^6\text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1})$			
				5%	95%	25%	75%
$f_{12\text{ km}} < 25$	1.84	4.81	1.43	1.29	45.20	5.89	39.40
$25 \leq f_{12\text{ km}} < 35$	37.00	7.85	2.26	4.65	60.60	9.05	30.80
$f_{12\text{ km}} \geq 35$	14.10	9.36	1.91	2.28	65.70	6.11	21.40

表8给出了对应不同分类的线性拟合结果。与20 dBZ反射率因子最大高度的相关分类对比,基于当前分类所获得的闪电和降水相关关系偏弱,特别是对于 $f_{12\text{ km}} > 35\text{ dBZ}$ 的分类,相关系数仅为0.375,为3类中最低。 $f_{12\text{ km}}$ 没有 $H_{20\text{ dBZ}}$ 对对流强度的表征性好。20 dBZ反射率因子高度演变可以

类比为云高的变化,它与对流强度显然有直接关系,而对流强度对12 km高度反射率因子演变的影响不仅体现在最大反射率因子特征上,可能还包括平均反射率因子、反射率因子面积等特征。虽然 $f_{12\text{ km}}$ 的分类效果没有 $H_{20\text{ dBZ}}$ 的分类效果显著,但同样也表现出在雷暴旺盛阶段,闪电和降水关系更为复杂。

表8 不同 $f_{12\text{ km}}$ 分类下总闪电频次和对流降水量的线性拟合关系

Table 8 Linear fitting between total lightning frequency and convective precipitation based on the classification of $f_{12\text{ km}}$

$f_{12\text{ km}}/\text{dBZ}$	相关系数	F 检验	$F_{0.05}$	是否通过检验	回归方程
$f_{12\text{ km}} < 25$	0.597	54.879	3.95	是	$R = (1.302 \times 10^8) + (5.988 \times 10^6)F$
$25 \leq f_{12\text{ km}} < 35$	0.609	66.011	3.93	是	$R = (2.749 \times 10^8) + (5.704 \times 10^6)F$
$f_{12\text{ km}} \geq 35$	0.375	14.518	3.96	是	$R = (5.360 \times 10^8) + (1.912 \times 10^6)F$

2.3.3 基于 0℃层以上大于 40 dBZ 和大于 30 dBZ 反射率因子的体积比分类

0℃层以上大于 40 dBZ 和大于 30 dBZ 反射率因子体积比 ($V_{40/30}$) 在一定程度上体现核心起电放电区在整个主要起电区域中的比例,它与雷暴对流强度也存在一定关系,如对于一般处于旺盛发展阶段的雷暴可能存在较大面积的云砧区,小的冰相粒子可能被输送到云砧区域,这样有可能增大大于 30 dBZ 反射率因子的体积,而 0℃层以上大于 40 dBZ 的反射率因子则总是倾向于出现在对流区及其周围或下沉气流区,此时,雷暴旺盛阶段的 $V_{40/30}$ 相比雷暴初始阶段可能偏小。从这个角度看, $V_{40/30}$ 并不是一个直接反映上升气流强度的量,还可能与云内水平气流的扩展存在关系。这里仅从主要放电区和潜在主要起电区比例的角度提出该参数。

考虑 $V_{40/30}$ 分布情况和样本在不同分类中的分

布,选择如下分类区间: $V_{40/30} < 0.39$, $0.39 \leq V_{40/30} < 0.48$ 和 $V_{40/30} \geq 0.48$, 样本量(占总样本比例)为 122 (38%), 100(31%) 和 98(31%)。表 9 给出了不同分类情况总闪对应降水量分布特征,从分布范围看, $V_{40/30} \geq 0.48$ 对应的总闪对应降水量范围最广,其次是 $V_{40/30} < 0.39$, 而 $0.39 \leq V_{40/30} < 0.48$ 对应的总闪对应降水量范围最小。从平均值对比看, $V_{40/30} \geq 0.48$ 分类对应的总闪对应降水量最大,而 $V_{40/30} < 0.39$ 分类对应的总闪对应降水量最小,同样可能与对流降水的判别标准有关。从整体看, $V_{40/30} \geq 0.48$ 分类对应明显较大的总闪对应降水量,如果从雷暴水平扩展的角度考虑,说明雷暴内小的冰相粒子没有被输送到较远的地方,那么这种情况更多地出现在雷暴发展阶段,则该分类中总闪对应降水量平均值的对比与前面基于对流强度分析指出的对流不是很强时总闪对应降水量较大的结论具有一致性。

表 9 不同 $V_{40/30}$ 分类下总闪对应降水量的统计值

Table 9 Statistics of rain yields per flash based on the classification of $V_{40/30}$

$V_{40/30}$	最小值 /($10^5 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$)	最大值 /($10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$)	算术平均值 /($10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$)	累积百分比分布/($10^6 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$)			
				5%	95%	25%	75%
$V_{40/30} < 0.39$	1.84	6.11	1.52	1.25	48.70	5.74	19.50
$0.39 \leq V_{40/30} < 0.48$	22.40	5.57	1.58	3.72	36.20	7.25	21.20
$V_{40/30} \geq 0.48$	18.10	9.09	2.56	3.59	68.90	7.78	39.90

表 10 显示了针对不同 $V_{40/30}$ 分类的闪电和降水关系拟合结果, $V_{40/30} < 0.39$ 分类情况下,相关性最

好, $V_{40/30} \geq 0.48$ 分类情况次之。

表 10 不同 $V_{40/30}$ 分类下总闪频次和对流降水量的线性拟合关系

Table 10 Linear fitting between total lightning frequency and convective precipitation based on the classification of $V_{40/30}$

$V_{40/30}$	相关系数	F 检验	$F_{0.05}$	是否通过检验	回归方程
$V_{40/30} < 0.39$	0.750	154.374	3.92	是	$R = (5.889 \times 10^7) + (9.230 \times 10^6)F$
$0.39 \leq V_{40/30} < 0.48$	0.596	54.102	3.97	是	$R = (3.133 \times 10^8) + (4.399 \times 10^6)F$
$V_{40/30} \geq 0.48$	0.663	71.500	3.95	是	$R = (4.289 \times 10^8) + (3.945 \times 10^6)F$

3 小 结

本文选取了北京及周边的 28 次雷暴过程,基于大气层结和雷暴雷达特征分别对雷暴和雷达体扫数据进行了分类,进而研究了 SAFIR3000 观测的总闪频次与雷达反演的对流降水之间的关系,得到如下主要结论:

1) 总闪对应降水量的分布范围为 $1.84 \times 10^5 \sim 7.91 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$, 平均值为 $1.92 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$, 中值为 $1.33 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$ 。总闪频次与对流降水量相关系数为 0.584。

2) 依据大气层结不稳定参数对流有效位能和抬升指数对雷暴过程进行分类,分析表明:随着大气层结的不稳定性增强,每个闪电对应的对流降水量有减小趋势。对应不同分类情况下的闪电和降水具有线性关系。从线性拟合结果看,更强不稳定层结下,总闪频次和对流降水相关关系更强。

3) 基于雷暴 20 dBZ 反射率因子最大高度和 12 km 高度最大反射率因子分类的闪电和降水关系表明,更强对流的雷暴(或雷暴的强对流阶段)对应的总闪对应降水量相对较小,这可能是由于强对流引起更多的闪电频次,而弱对流雷暴(或雷暴的弱对流阶段)对应的总闪对应降水量最小,可能是由于此

情况下对流降水较少。

在不同分类情况下,闪电和降水的关系包括总闪对应降水量以及拟合特性存在明显差异,说明闪电和降水关系的复杂性,这一点还需要从闪电活动和降水的动力、微物理机理上进一步解释。本研究通过分类,细化了闪电和降水关系,可为实际应用中基于不同情况下灵活使用不同的闪电和降水对应关系提供参考。

参考文献

- [1] 张义军,周秀骥.雷电研究的回顾和进展.应用气象学报,2006,17(6):829-834.
- [2] Soriano L R, Pablo F D. Analysis of convective precipitation in the western Mediterranean Sea through the use of cloud-to-ground lightning. *Atmos Res*, 2003, 66: 189-202.
- [3] Alexander G D, Weinman J A, Karyampudi V M, et al. The effect of assimilating rain rates derived from satellites and lightning on forecasts of the 1993 superstorm. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 1433-1457.
- [4] Williams E R, Geotis S G, Renno N, et al. A radar and electrical study of tropical "hot towers". *J Atmos Sci*, 1992, 49: 1386-1395.
- [5] Pineda N, Rigo T, Bech J, et al. Lightning and precipitation relationship in summer thunderstorms: Case studies in the North Western Mediterranean region. *Atmos Res*, 2007, 85: 159-170.
- [6] Petersen W A, Rutledge S A. On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall. *J Geophys Res*, 1998, 103(12): 14025-14040.
- [7] 周筠君,鄒秀书,王怀斌,等.利用对地闪的观测估算对流性天气中的降水.高原气象,2003,22(2):168-172.
- [8] 郑栋,张义军,孟青,等.北京地区雷暴过程闪电与地面降水的相关关系.应用气象学报,2010,21(3):287-297.
- [9] Soriano L R, de Pablo F, Diez E G. Relationship between convective precipitation and cloud-to-ground lightning in the Iberian Peninsula. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 2998-3003.
- [10] 郑栋,但建茹,张义军,等.我国地闪活动和降水关系的区域差异.热带气象学报,2012,28(4):569-576.
- [11] Chang D E, Weinman J A, Morales C A, et al. The effect of space borne microwave and ground-based continuous lightning measurements on forecasts of the 1998 Groundhog Day storm. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 1809-1833.
- [12] 周筠君,鄒秀书,张义军,等.地闪与对流性天气系统中降水关系的分析.气象学报,1999,57(1):103-111.
- [13] Zipser E J. Deep cumulonimbus cloud systems in the tropics with and without lightning. *Mon Wea Rev*, 1994, 122: 1837-1851.
- [14] Takayabu Y N. Rain-yield per flash calculated from TRMM PR and LIS data and its relationship to the contribution of tall convective rain. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L18705.
- [15] Kenneth L C, Martin J M, Edward A B, et al. A combined TOA/MDF technology upgrade of the US National Lightning Detection Network. *J Geophys Res*, 1998, 103: 9035-9044.
- [16] 张义军,孟青,马明,等.闪电探测技术发展和资料应用.应用气象学报,2006,17(5):611-620.
- [17] Steiner M, Houze R A, Yuter S E. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. *J Applied Meteor*, 1995, 34: 1978-2007.
- [18] 吴量,冯桂力,杨仲江,等.雷达资料在雷电临近预警中的应用研究.成都信息工程学院学报,2011,26(6):672-673.
- [19] 王飞,张义军,赵均壮,等.雷达资料在孤立单体雷电预警中的初步应用.应用气象学报,2008,19(2):153-160.
- [20] Straka J M, Zrnic D S, Ryzhkov A V. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations. *J Appl Meteor*, 2000, 39: 1341-1372.
- [21] 郑栋,张义军,吕伟涛,等.大气不稳定性参数与闪电活动的预报.高原气象,2005,24(2):196-205.
- [22] 孙明生,汪细明,罗阳,等.北京地区强对流天气展望预报方法研究.应用气象学报,1996,7(3):336-343.
- [23] 郑栋,孟青,吕伟涛,等.北京及其周边地区夏季地闪活动时空特征分析.应用气象学报,2005,16(5):638-644.
- [24] Buechler D E, Wright P D, Goodman S J. Lightning/Rainfall Relationships during COHMEX. Preprints, 16th Conf on Severe Local Storms, Amer Meteor Soc, 1990: 710-714.
- [25] Pessi A, Businger S, Cummins K L, et al. On the Relationship Between Lightning and Convective Rainfall over the Central Pacific Ocean. 18th International Lightning Detection Conference, 2004.

Relationship Between Lightning and Precipitation Based on Classification of Atmospheric Stratification and Development of Thunderstorm

Wang Tingbo¹⁾ Zheng Dong²⁾ Zhang Yijun²⁾ Yao Wen²⁾ Zhang Wenjuan²⁾

¹⁾ (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

²⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

A total of 28 thunderstorms occurring in and around Beijing area from 2006 to 2008 are picked to investigate the relationship between total lightning (observed by SAFIR3000) and convective precipitation (by radar inversion). These cases are classified according to parameters of the atmospheric stratification where they are generated and the reflectivity of radar. The quantitative results can provide a reference for the applications of lightning data on severe weather warning and precipitation estimation. The lightning forecast can also be improved by assimilating the relationship between the hydrometeors and the lightning activities to the numerical prediction models. The analysis can extend the application field of the lightning data.

The results show that the average convective rain yields per flash is $1.92 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{fl}^{-1}$ on the whole, while the linear correlation coefficient between the total lightning frequency and convective precipitation is 0.584. Total lightning frequency (expressed by F with the time space being 6 min) can be used to calculate the amount of convective precipitation with the equation $R = (2.813 \times 10^8) + (4.570 \times 10^6)F$. A total of 28 thunderstorms are classified according to the convective available potential energy (E_{CAP}) and lifting index I_L of the atmospheric stratification where they are generated. It is explored that strong instability of atmospheric stratification tends to be associated with smaller precipitation and more pronounced correlation between total lightning and precipitation. Of which, the classification of E_{CAP} no less than $1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ has the correlation coefficient of 0.837, the total lightning frequency can be used to calculate the amount of convective precipitation with the equation of $R = (1.620 \times 10^8) + (5.478 \times 10^6)F$. While the classification of I_L no less than 4 K has the correlation coefficient of 0.853, the total lightning frequency can be used to calculate the area of the amount of convective precipitation with the equation of $R = (1.530 \times 10^8) + (6.276 \times 10^6)F$. Another three parameters calculated from radar reflectivity, i. e., maximum height of 20 dBZ reflectivity, maximum reflectivity at 12 km level, and volume ratio of the reflectivity larger than 30 dBZ above 0°C to the reflectivity larger than 40 dBZ above 0°C , in terms of their radar volume scans. The most pronounced relationships between lightning and precipitation occur in the classification of $H_{20 \text{ dBZ}} < 11.5 \text{ km}$, $25 \text{ dBZ} \leq f_{12 \text{ km}} < 35 \text{ dBZ}$, and $V_{40/30} < 0.39$, when the correlation coefficients are 0.804, 0.609 and 0.750, respectively. The linear correlation between lightning and precipitation show obvious differences in different classifications. The fitting equations in different classifications are revealed, which will provide references for the application of relationships between lightning and precipitation according to the characteristics of thunderstorm processes.

Key words: lightning; precipitation; atmospheric stratification; radar parameters