

汪开斌,江海萍.安徽省南陵县一次雷灾雷暴过程地闪参数分布特征研究[J].陕西气象,2025(1):42-49.

文章编号:1006-4354(2025)01-0042-08

安徽省南陵县一次雷灾雷暴过程地闪参数分布特征研究

汪开斌,江海萍

(芜湖市气象局,安徽芜湖 241000)

摘要:利用2022年8月26日安徽ADTD闪电定位数据、地面风向风速数据、雷灾过程视频图像,采用数理统计方法,分析了2022年8月26日南陵雷灾雷暴过程地闪参数分布特征。结果表明:(1)负极性回击占回击总数97.6%;回击频率平均1.24次/min,最大为8次/min。第1次闪电跃增之后12 min发生了雷电灾害;在雷暴途经区域伴有风向切变、风速突增的现象。(2)多回击负地闪占地闪总数37.3%,回击频率平均为2.48次/个。(3)雷电流幅值 I_{peak} 的算术平均值(简称AM)和几何平均值(简称GM)约为-43 kA和-41 kA;多回击负地闪持续时间 T_{dur} 的AM(GM)为272 ms(213 ms),相邻回击时间间隔 T_{int} 的AM(GM)为183 ms(137 ms);回击点间距 d 的AM(GM)为616 m(313 m)。(4)多回击负地闪中,首次回击RS1的 $I_{\text{peak}} >$ 第1次继后回击RS2的 I_{peak} 占45.2%,各次回击 I_{peak} 出现极值的频数没有明显优势; T_{int} 与其相邻回击 I_{peak} 的相关性微弱;雷暴消散阶段的 d 值比成熟阶段的 d 值总体要大。

关键词:雷电灾害;地闪;回击;统计参数;闪电特征

中图分类号:P427:P49

文献标识码:A

地闪活动危害人们的生命安全。据报道,2001—2017年云南省每年每一百万人中有0.99人死于雷击,有1.7人在雷灾中受伤^[1]。在雷电灾害成因分析和特征研究中,人们发现雷电流幅值等地闪活动参数与雷电灾害具有一定的关系^[2-5]。为认识地闪活动规律,冯桂力等^[6]研究了山东地区地闪特征,发现地闪中负闪占绝大多数,正闪的平均强度大于负闪;崔雪东等^[7]分析了浙江省地闪活动,认为正、负多回击地闪电流强度的算术平均值分别为72.06 kA和-36.89 kA,正、负地闪回击间隔时间AM分别为125.47 ms和138.14 ms,几何平均值分别为56.73 ms和98.95 ms;鞠晓雨等^[8]统计安徽省闪电定位数据后得出,负地闪占地闪总数的94.02%,地闪回击电流峰值平均为36.74 kA,且年际变化没有明显规律性;王凯等^[9]则认为皖南山区地闪电流强度主要集中在10~50 kA,正地闪平均强度为

45 kA,负地闪平均强度为-36 kA,均略低于安徽全省的平均值;其他还有王学良等^[10]对湖北省、刘向科等^[11]对泰山景区、周路遥等^[12]对±800 kV宾金线浙江段地闪活动参数进行统计分析,等等。梳理这些研究可以看出:各地区基于一定时期/时段内地闪活动参数的气候统计值,其地闪参数分布特征不尽相同,同时气候统计值包含了该时段内的所有地闪活动,而大部分地闪并没有产生雷电灾害。郑栋等^[13]指出,灾害性雷暴、一般雷暴和台风雷暴中地闪活动具有一定的差异性。因此,有针对性分析雷灾雷暴过程的地闪参数分布,可进一步认识雷灾雷暴地闪活动规律,为防雷减灾提供参考。

2022年8月26日19:25安徽南陵发生了一起重大雷电灾害事件^[14],雷击造成2人当场死亡、1人重伤、1人轻伤,地面石块拱起破碎,距离灾害点62.0 m的监控摄像机记录了雷击发生的

收稿日期:2023-11-15

作者简介:汪开斌(1966—),男,汉族,安徽南陵人,本科,高级工程师,从事雷电灾害防御及相关研究。

基金项目:安徽省重点研究与开发标准化专项(202004h07020001);安徽省地方标准修订项目(2024-3-131)

完整过程。基于该次事件,利用安徽 ADTD 闪电定位数据、地面风向风速数据和雷灾过程视频图像,采用数理统计方法,分析了雷灾雷暴过程地闪参数分布特征,指出了本次过程地闪参数统计值与本地及国内部分地区统计值的差异性;同时,结合本次雷灾事件讨论了闪电定位数据在雷电灾害预报预警、雷电灾害调查、雷电防护工程方面的应用。

1 数据与方法

1.1 数据来源

2022 年 8 月 26 日的闪电定位数据来源于安徽 ADTD 闪电定位系统,由安徽省气象灾害防御技术中心提供;地面风向风速数据来源于安徽省气象业务系统,由芜湖市气象局提供;雷灾发生过程的视频图像数据由监控设备管理单位提供。

1.2 分析方法

雷电流幅值用 I_{peak} 表示,单位为 kA。回击简称 RS,首次回击简称 RS1。RS $_n$ 中 n 是指同一个地闪中的回击序号,只有 1 次回击的地闪称单回击地闪,有 2 次或 2 次以上回击的地闪称多回击地闪。继后回击是指同一个多回击地闪中 RS1 之后的回击。持续时间是指 RS1 到最后 1 次继后回击之间的时间,用 T_{dur} 表示,单位为 ms。时间间隔是指两个相邻回击之间的时间,用 T_{int} 表示,单位为 ms。回击归集为一个地闪是指同时满足^[15-16]:回击极性相同, $T_{\text{dur}} < 1.0 \text{ s}$, $T_{\text{int}} < 500 \text{ ms}$,首次回击与继后回击之间的间距 $d <$

7 000 m 的所有回击。

闪电跃增事件采用田野等^[17]使用的“ σ (标准差)算法”,回击频数变化率 D_t 和标准差 σ 的时间间隔为 2 min,计算公式及过程详见该文献。回击点间距 d (单位为 m)采用文献[14]中的计算公式和计算工具。

采用数理统计法,应用 Excel 中的函数公式、数据分析等计算工具,得出 I_{peak} 、 T_{dur} 、 T_{int} 、 d 等地闪参数的算术平均值(arithmetic mean, AM)、几何平均值(geometric mean, GM)、中值、极值等统计特征值,绘制相应参数分布的直方图和正态分布拟合曲线,分析地闪参数分布特征。

2 结果与分析

2.1 回击极性和频数

统计 2022 年 8 月 26 日安徽 ADTD 闪电定位数据,结果表明:在雷灾雷暴生命周期 19:02—20:42 内共产生回击 126 次,其中:正极性回击(简称正回击)有 3 次,负极性回击(简称负回击)占回击总数的 97.6%;闪电活动期内回击频率平均 1.24 次/min,最大值为 8 次/min(出现在 19:58)。

通过计算得到了 D_t 和 σ ,其演变情况见图 1。图 1 表明:19:13 和 19:26 满足闪电跃增条件,即 $D_{19:13} = 2.25$,大于 $\sigma(1.96)$; $D_{19:26} = 2.25$,大于 $\sigma(2.02)$ 。雷灾起止时间为 19:25,雷灾发生在第 1 次闪电跃增之后 12 min,第 2 次闪电跃增之前 1 min。

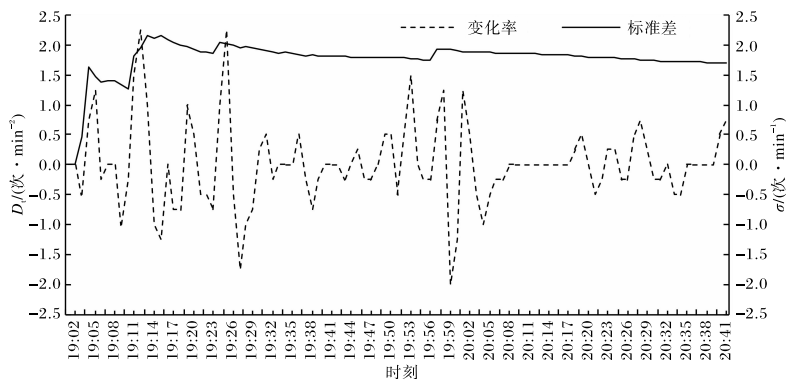


图1 2022-08-26T19:02—20:42 安徽南陵雷灾雷暴过程回击频数变化率 D_t 和标准差 σ 的演变情况

雷灾雷暴过程以负回击为主,其所占百分比与安徽省^[8-9,18]以及福建省^[19]、浙江省^[20]、湖北省^[10]等地区的研究结果非常接近,说明雷灾雷暴符合经典三极性电荷结构雷暴的特征^[21-23]。雷灾雷暴途经范围内 16 个气象站的风向风速资料显示,天官站的风速从 19:14 的 2.2 m/s 呈线性增加到 19:20 的 12.1 m/s,南陵站从 19:25 的 2.2 m/s 呈线性增加到 19:29 的 8.7 m/s,且风向均有切变,而其他站点风向风速无明显突变。这意味着地面风场对雷电灾害具有预示性。在雷电灾害预报预警中,当出现闪电跃增并伴有风速突增、风向切变时应予以关注。

2.2 地闪归集

根据地闪归集定义,雷灾雷暴过程共有 83 个地闪,单回击地闪和多回击负地闪(本次过程无多回击正地闪)基本是相隔交替出现,分布相对均匀,其中多回击负地闪约占 37.3%(31/83),高于

福建省^[19]、浙江省^[20]的统计值。在多回击负地闪中,含有 2 次回击负地闪的约占多回击负地闪总数的 64.5%(20/31)。雷灾雷暴过程每个地闪平均有 1.52 次回击,其中每个多回击负地闪平均有 2.48 次回击。

2.3 雷电流幅值 I_{peak}

雷灾雷暴过程正地闪 I_{peak} 的 AM(GM) 为 75.66 kA(70.40 kA),负地闪 I_{peak} 统计值见表 1。表 1 数据表明:雷灾雷暴过程单回击负地闪 I_{peak} 的 AM(GM) 是多回击负地闪 I_{peak} 的 1.10 倍(1.10 倍)。在多回击负地闪中,首次回击 RS1 的 I_{peak} 的 AM(GM) 是继后回击 RS2 * RS6(即 RS2、RS3、RS4、RS5 和 RS6 的缩略写法,其他同理)的 1.05 倍(1.06 倍)。雷灾雷暴过程总地闪 I_{peak} 的 AM 或 GM 与程向阳等^[18]研究的安徽省总地闪 I_{peak} 的统计均值基本一致,但比王凯等^[9]得出的安徽省和皖南山区总地闪 I_{peak} 的统计均值略大一些。

表 1 2022-08-26 南陵雷灾雷暴过程负地闪 I_{peak} 统计值

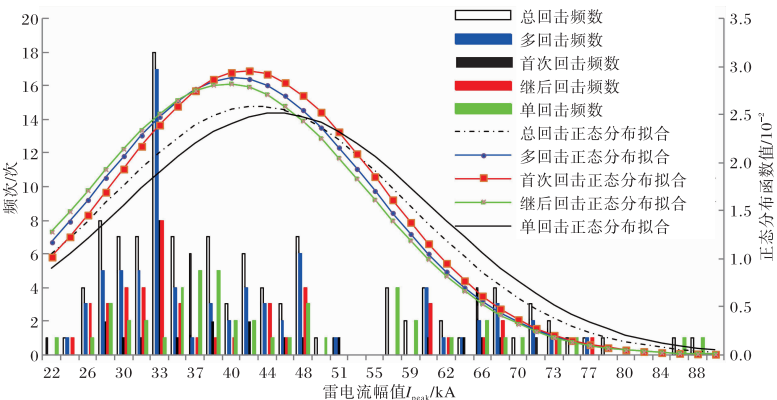
统计参数	总地闪 $I_{\text{peak}}/\text{kA}$	单回击 $I_{\text{peak}}/\text{kA}$	多回击 $I_{\text{peak}}/\text{kA}$			致灾地闪 $I_{\text{peak}}/\text{kA}$		
			RS1 * RS6	RS1	RS2 * RS6	RS1 * RS4	RS1	RS2 * RS4
算术平均值	-42.99	-45.01	-40.79	-41.94	-40.01	-38.18	-65.49	-29.07
几何平均值	-40.57	-42.53	-38.78	-40.11	-37.91	-35.49	-65.49	-28.93
中值	-38.05	-38.77	-34.68	-38.05	-33.49	-30.83	-65.49	-29.03
最大值	-86.78	-86.78	-74.98	-70.85	-74.98	-65.49	-65.49	-32.64
最小值	-22.24	-22.24	-23.36	-27.22	-23.36	-25.55	-65.49	-25.55

注:RS1 * RS6 为 RS1、RS2、RS3、RS4、RS5 和 RS6 的缩略写法,其他同理。

图 2 给出了负地闪的总回击、单回击、多回击、首次回击和继后回击 I_{peak} 的频数分布直方图和正态分布拟合曲线。图 2 表明: I_{peak} 的频数分布呈“M 形”,即两个频数峰值对应的 I_{peak} 值分别位于 25 kA~47 kA(约占 71%)和 56 kA~73 kA(约占 22%)区间;正态分布拟合结果显示, I_{peak} 对应的频数分布呈现一定的峰度和偏度。

统计多回击负地闪中各次回击 I_{peak} 的分布情况,结果表明:有 45.2%(14/31) RS1 的 $I_{\text{peak}} >$ RS2 的 I_{peak} ,其中:含有 2 次回击负地闪有 45%(9/20) RS1 的 I_{peak} 的 AM(GM) 是 RS2 的 1.23(1.24) 倍,其余 55%(11/20) 的 RS1 的 I_{peak} 的

AM(GM) 是 RS2 的 0.72(0.73) 倍;含有 3 次回击负地闪有 66.7%(6/9) RS1 的 I_{peak} 的 AM(GM) 是 RS2 的 1.31(1.30) 倍,其余 33.3%(3/9) 的 RS1 的 I_{peak} 的 AM(GM) 是 RS2 的 0.71 倍(0.75 倍);含有 4 次回击负地闪(为致灾地闪)有 1 个,其 RS1 的 I_{peak} 是 RS2 的 2.26 倍,是 RS2 * RS4 的 AM(GM) 的 2.25 倍(2.26 倍);含有 6 次回击负地闪有 1 个,其 RS1 的 I_{peak} 是 RS2 的 1.82 倍,是 RS2 * RS6 的 AM(GM) 的 1.56 倍(1.70 倍)。进一步统计多回击负地闪 RS1 * RS6 各次回击出现极值的频次,发现:各次回击 I_{peak} 没有明显的极值优势。



I_{peak} 组距为 1.82 kA。总回击:频数 $n=123$ 次,平均值 $u=42.99$ kA,标准差 $\sigma=15.11$ kA,峰度 $K=-0.209$,偏度 $S_k=0.913$;多回击: $n=77$ 次, $u=40.79$ kA, $\sigma=13.81$ kA, $K=-0.169$, $S_k=1.003$;首次回击: $n=31$ 次, $u=41.94$ kA, $\sigma=13.48$ kA, $K=-0.159$, $S_k=1.029$;继后回击: $n=46$ 次, $u=40.01$ kA, $\sigma=14.13$ kA, $K=-0.039$, $S_k=1.047$;单回击: $n=46$ 次, $u=45.01$ kA, $\sigma=15.85$ kA, $K=0.110$, $S_k=0.900$ 。

图 2 2022-08-26 安徽南陵雷灾雷暴过程负地闪电电流幅值 I_{peak} 分布直方图及正态分布拟合曲线

2.4 持续时间 T_{dur} 和时间间隔 T_{int}

多回击负地闪 RS1 * RS6 的 T_{int} 的 AM (GM)为 183.092 3 ms(136.477 3 ms),其余 RS*n* * RS*n* 的 T_{int} 统计值以及多回击负地闪 T_{dur} 的统计值见表 2。统计数据表明:致灾地闪 T_{dur} 的 AM (GM)是多回击负地闪的 2.318 倍(2.960 倍);致灾地闪 RS1 * RS2 的 T_{int} 是其本身 RS1 * RS4 的 AM(GM)的 0.504 倍(0.565 倍),是 RS2 * RS4 的 AM(GM)的 0.404 倍(0.424 倍)。

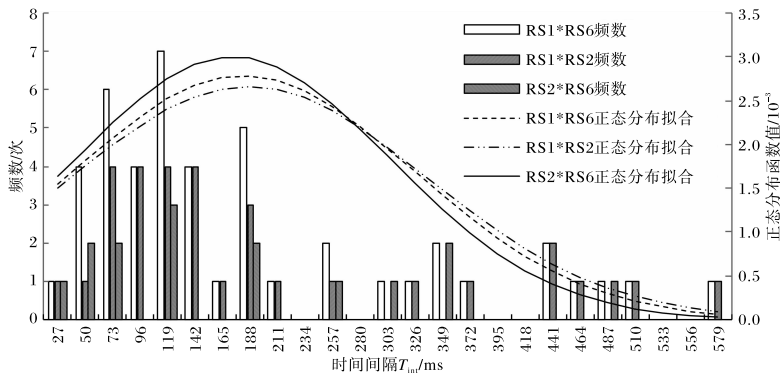
表 2 2022-08-26 安徽南陵雷灾雷暴过程多回击负地闪和致灾地闪 T_{dur} 和 T_{int} 统计值

统计参数	多回击负地闪			致灾地闪		
	T_{dur}/ms	RS1 * RS2 的 T_{int}/ms	RS2 * RS6 的 T_{int}/ms	T_{dur}/ms	RS1 * RS2 的 T_{int}/ms	RS2 * RS4 的 T_{int}/ms
算术平均值	271.685 4	187.345 8	174.301 8	629.391 9	105.839 4	261.776 3
几何平均值	212.626 6	140.690 5	128.165 5	629.391 9	105.839 4	249.525 7
中值	179.754 2	134.539 5	117.690 0	629.391 9	105.839 4	261.776 3
最大值	676.078 0	578.779 3	469.522 2	629.391 9	105.839 4	340.920 1
最小值	67.220 2	27.427 4	27.483 1	629.391 9	105.839 4	182.643 4

注:RS2 * RS6 为 RS2、RS3、RS4、RS5 和 RS6 的缩略写法,其他同理。

图 3 给出了多回击负地闪 RS1 * RS6、RS1 * RS2、RS2 * RS6 的 T_{int} 频数分布直方图和正态分布拟合曲线。正态分布拟合表明: T_{int} 的分布呈现出一定的峰度和偏度。 T_{int} 频数分布累积 95% 的区间:RS1 * RS6 为 27~226 ms,RS1 * RS2 为 27~242 ms,RS2 * RS6 为 27~248 ms。

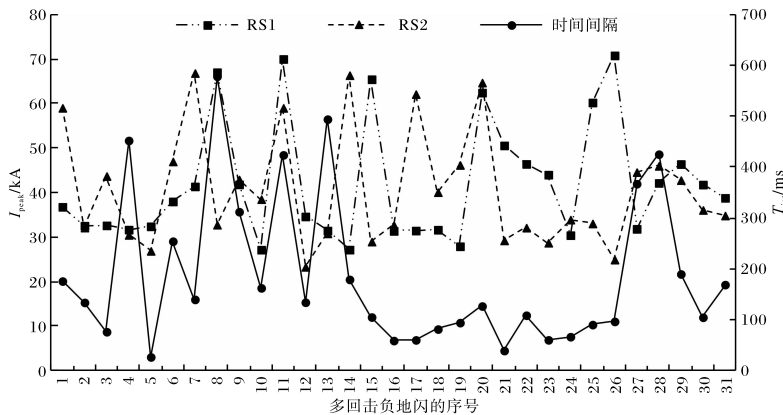
比较国内相关研究^[12,19-20,24-25]得出的结论,雷灾雷暴过程无论是多回击负地闪 T_{int} 还是致灾地闪 T_{int} 的 AM(GM),都要明显大于上述地区 T_{int} 的统计值。多回击负地闪 T_{int} 与回击连接点距离地面的高度关系不大^[26],郅秀书等^[24]认为它是雷暴正、负地闪宏观特征的反映。受雷暴类型、尺度或触发机制等因素影响,雷灾雷暴过程多回击负地闪 T_{int} 比一定时段内闪电活动的统计值要大,这是否为雷灾雷暴的特有特征有待于进一步研究。



T_{int} 组距 27.427 4 ms。RS1 * RS6: 频数 $n=46$ 次, 平均值 $u=183.092\ 3$ ms, 标准差 $\sigma=143.317\ 5$ ms, 峰度 $K=0.386$, 偏度 $S_k=1.170$ 。RS1 * RS2: $n=31$ 次, $u=187.345\ 8$ ms, $\sigma=150.011\ 0$ ms, $K=0.523$, $S_k=1.272$ 。RS2 * RS6: $n=15$ 次, $u=174.301\ 8$ ms, $\sigma=132.954\ 7$ ms, $K=-0.053$, $S_k=0.901$ 。

图 3 2022-08-26 安徽南陵雷灾雷暴过程多回击负地闪时间间隔 T_{int} 分布直方图和正态分布拟合曲线

为探究雷灾雷暴过程中多回击负地闪 RS1、RS2 的 I_{peak} 与 T_{int} 的关系, 图 4 给出了 RS1 和 RS2 的 I_{peak} 、 T_{int} 的对应关系, 计算相关系数并进行 t 检验。结果表明: T_{int} 与两个相邻回击 I_{peak} 的相关性微弱。



相关系数 r : T_{int} 与 RS1 的 I_{peak} 的 $r=0.158$; T_{int} 与 RS2 的 I_{peak} 的 $r=0.079$; RS1 与 RS2 的 I_{peak} 的 $r=-0.063$ 。 t 检验结果: $p<0.05$, 参量之间有显著差异。

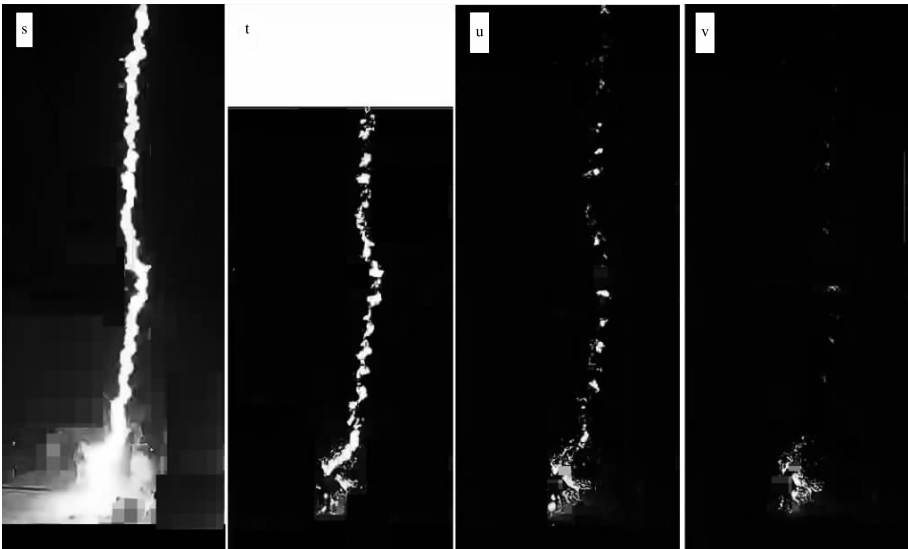
图 4 2022-08-26 安徽南陵雷灾雷暴过程多回击负地闪 RS1、RS2 雷电流幅值 I_{peak} 与时间间隔 T_{int} 对应关系

在雷电防护工程中, I_{peak} 影响滚球半径, I_{peak} 越大滚球半径就越大, 拦截效率就越低; I_{peak} 能使接地地网的电压升高或传输到用户端, 导致雷击电磁脉冲防护失效。建筑物防雷设计规范中, I_{peak} 取值为首次回击是继后回击的 2 倍, 以第三类防雷建筑物为例, 继后回击 I_{peak} 取值为 25 kA。有研究表明: 多回击地闪在短时间内的连续冲击可导致氧化锌电涌保护器的热脱扣装置损坏^[27]。

图 5 为 RS4 之后的 4 帧连续监控视频帧照片, RS4“击地”之后地面“火球”增大、增亮, 可能是上行未连接的闪电先导^[14], 或球状闪电^[14,28]。通过对闪电通道亮度进行灰度值积分, RS4 之后连续电流持续时间至少为 108.386 9 ms, RS4 的 I_{peak} 为 -25.554 1 kA, 出现了被称为“禁区^[27]”的对应值(即 $I_{\text{peak}}>25$ kA, 此后通常不会出现持续时间大于 40 ms 的连续电流)。本次雷灾的致灾地

闪又是一个4次回击连续雷击的地闪,且 T_{int} 的值又相对较大^[12,19-20,24-25]; I_{peak} 值RS1仅是RS2×RS6的1.05倍,继后回击 I_{peak} 的统计值明显大于

设计规范的取值。在雷电防护工程设计中,应关注到设计规范中继后回击 I_{peak} 的取值可能偏小,必要时应提高相关参量的取值标准。



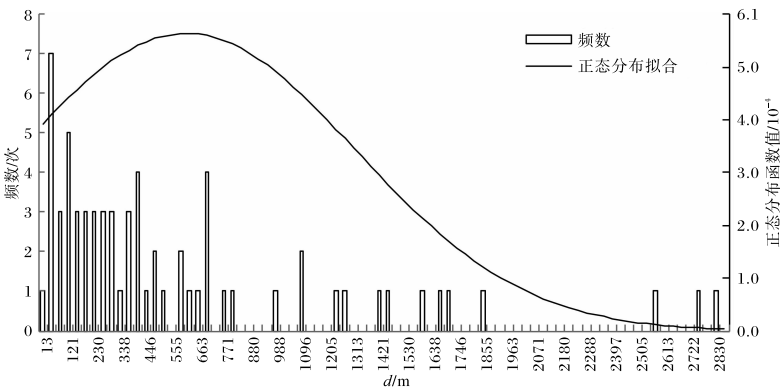
视频帧照片的时间分辨率为41.6666667 ms; s为19:25:02.500000, t为19:25:02.5416667, u为19:25:02.5833333, v为19:25:02.6250000。图t上部白色为曝光。

图5 2022-08-26 安徽南陵雷灾致灾地闪RS4之后的视频图像

2.5 回击点间距(d)

雷灾雷暴过程多回击负地闪 d 的统计结果表明: d 在13~2866 m范围内,AM(GM)为616 m(313 m),中位数为366 m,剔除继后回击间

的 d ,其频数分布累积95%的区间为13~808 m;致灾地闪 d 的AM(GM)^[14]为371 m(348 m)。图6给出了 d 的频数分布直方图和正态分布拟合曲线,结果表明: d 的分布呈现一定的峰度和偏度。



d 的组距为36 m。频数 $n=68$ 次,平均值 $\mu=615$ m,标准差 $\sigma=708$ m,峰度 $K=2.876$,偏度 $S_k=1.820$ 。

图6 2022-08-26 安徽南陵雷灾雷暴过程多回击负地闪回击点间距 d 分布直方图和正态分布拟合曲线

雷灾雷暴过程中,雷暴消散阶段的 d 比雷暴成熟阶段的总体要大。在雷暴消散阶段,有

87.5%(7/8)多回击负地闪中至少有1个 $d>808$ m;而在雷暴成熟阶段,有78%的 d 分布在13~808 m

区间内。根据 d 的分布特征,在雷电灾害调查时,应关注雷灾发生的时间和雷灾点是否存在同点多次回击;在计算地闪密度时,应考虑减小地闪归集 d 的取值。

3 结论和讨论

利用安徽 ADTD 闪电定位数据,采用数理统计方法,分析了一次雷电灾害雷暴过程地闪活动参数分布,结论如下。

(1)负回击占回击总数 97.6%;回击频率平均 1.24 次/min,最大为 8 次/min;闪电活动期间产生了 2 次闪电跃增,雷电灾害发生在第 1 次闪电跃增之后 12 min、第 2 次闪电跃增之前 1 min;雷电灾害发生前,在雷暴途经区域出现了风向切变、风速突增现象。

(2)多回击负地闪(均为负地闪)占地闪总数 37.3%,回击频数平均为 2.48 次/个。

(3)负地闪 I_{peak} 的 AM(GM)约为 -43 kA (-41 kA),区间频数分布呈“M 形”,两个频数峰值对应的 I_{peak} 值分别位于 25~47 kA(约占 71%)和 56~73 kA(约占 22%)区间。单回击负地闪 I_{peak} 的 AM(GM)是多回击负地闪的 1.10 倍(1.10 倍);在多回击负地闪中,首次回击 I_{peak} 的 AM(GM)是继后回击的 1.05 倍(1.06 倍),但只有 45.2%(14/31)的首次回击 $I_{\text{peak}} >$ 第 1 次继后回击 I_{peak} ;多回击负地闪中各次回击 I_{peak} 出现极值的频次没有明显优势。正地闪 I_{peak} 的 AM(GM)约为 76 kA(70 kA)。

(4) T_{dur} 的 AM(GM)约为 272 ms(213 ms),分布范围为 67~676 ms;总 T_{int} 的 AM(GM)为 183 ms(137 ms), T_{int} 频数分布累积 95% 的区间:RS1 * RS6 为 27~226 ms,RS1 * RS2 为 27~242 ms,RS2 * RS6 为 27~248 ms,拟合曲线均为正偏态分布; T_{int} 与两个相邻回击 I_{peak} 的相关性微弱。致灾地闪 T_{int} 的 AM(GM)约为 210 ms(187 ms), T_{int} 区间分布约为 106~341 ms;最后 1 次回击 RS4 的 $I_{\text{peak}} >$ 25 kA,回击之后电流持续时间至少有 108 ms。

(5)多回击负地闪 d 的 AM(GM)为 616 m(313 m);雷暴成熟阶段,有 78% 的 d 分布在 13~808 m 区间内;雷暴消散阶段的 d 比成熟阶段的

总体要大。

(6)本文讨论的地闪参数分布特征与已有研究的气候统计值相比,既有相似性又有差异性。因资料来源于一次地闪成灾的雷暴过程,更为全面的雷灾雷暴过程地闪参数分布特征需要从更多的雷电灾害案例中加以总结和验证。

参考文献:

- [1] 刘雪涛,谢屹然,许迎杰,等. 2001—2017 年云南雷电灾害中人员伤亡特征[J]. 灾害学,2019,34(1): 128-134.
- [2] 程向阳,朱浩,周昆,等. 安徽地区一次雷灾雷暴过程的闪电特征分析[J]. 暴雨灾害,2018,37(3): 265-273.
- [3] 徐耕,白铎,焦美玲,等. 庆阳市闪电活动与雷电灾害特征分析[J]. 陕西气象,2020(4):40-44.
- [4] 汪开斌. 一次雷电灾害成因分析及防御对策[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2012,35(6): 572-576.
- [5] 陈洁,曹继军,苏炳彦,等. 2008—2016 年陕西省雷电灾害特征分析[J]. 陕西气象,2019(4):33-36.
- [6] 冯桂力,陈文选,刘诗军,等. 山东地区闪电的特征分析[J]. 应用气象学报,2002,13(3):347-355.
- [7] 崔雪东,张卫斌,顾媛,等. 基于 ADTD 资料的浙江地区多回击地闪特征分析[J]. 气象科技,2021,49(3):491-497.
- [8] 鞠晓雨,王凯,朱浩. 2011—2021 年安徽省闪电时空分布特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2022,16(5): 110-117.
- [9] 王凯,朱浩,鞠晓雨,等. 安徽省皖南山区地闪特征对比分析[J]. 气象与环境学报,2016,32(3):83-88.
- [10] 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.
- [11] 刘向科,康宁,邱黎,等. 泰山景区地闪分布特征及与海拔高度关系研究[J]. 海洋气象学报,2021,41(4):102-108.
- [12] 周路遥,李特,王少华,等. ± 800 kV 宾金线浙江段正负地闪多重回击特征分析[J]. 中国电力,2019,52(5):113-118.
- [13] 郑栋,张文娟,姚雯. 雷暴闪电活动特征研究进展

- [J]. 热带气象学报, 2021, 37(3): 289-297.
- [14] 汪开斌. 基于一次雷电灾害的安徽 ADTD 定位精度分析[J]. 陕西气象, 2024(5): 77-82.
- [15] 王东方, 郗秀书, 袁善锋, 等. 北京地区的闪电时空分布特征及不同强度雷暴的贡献[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 225-238.
- [16] 余蓉, 杜牧云, 晏紫淙, 等. 湖北省两套闪电定位网地闪数据的对比分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(6): 646-654.
- [17] 田野, 姚雯, 尹佳莉, 等. 不同闪电跃增算法在北京地区应用效果对比[J]. 应用气象学报, 2021, 32(2): 217-232.
- [18] 程向阳, 陶寅, 邱阳阳. 安徽省雷电易发区域划分[J]. 气象科技, 2018, 46(4): 785-791.
- [19] 曾金全, 朱彪, 曾颖婷, 等. 福建省多回击闪电特征参数的统计分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(6): 573-578.
- [20] 崔雪东, 顾媛, 徐震宇, 等. 基于浙江省三维闪电监测系统的多回击闪电参数的特征分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9706-9712.
- [21] 谭涌波, 梁忠武, 师正, 等. 雷暴云底部正电荷区对闪电类型影响的数值模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(12): 2743-2752.
- [22] 林辉, 谭涌波, 马宇翔, 等. 雷暴云内电荷水平分布形式对闪电放电的影响[J]. 应用气象学报, 2018, 29(3): 374-384.
- [23] 张廷龙, 余海, 王军, 等. 青海地区一次雷暴的地闪活动及云内的电场探空观测[J]. 地球物理学报, 2019, 62(5): 1591-1602.
- [24] 郗秀书, 余晔, 王怀斌, 等. 中国内陆高原地闪特征的统计分析[J]. 高原气象, 2001, 20(4): 395-401.
- [25] 张义军, 吕伟涛, 张阳, 等. 广州地区地闪放电过程的观测及其特征分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 383-392.
- [26] 陈绿文, 吕伟涛, 张义军, 等. 不同高度建筑物上的下行地闪回击特征[J]. 应用气象学报, 2015, 26(3): 311-318.
- [27] 张义军, 吕伟涛, 陈绍东, 等. 广东野外雷电综合观测试验十年进展[J]. 气象学报, 2016, 74(5): 655-671.
- [28] 岑建勇, 曹增丽. 自然界中一次球状闪电的产生过程分析[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2018, 32(2): 48-51.