

负地闪CPT放电事件的发生规律研究*

周威¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 张阳^{2)3)4)†} 张义军²⁾³⁾⁴⁾ 吕伟涛²⁾³⁾⁴⁾ 郑栋²⁾³⁾⁴⁾
陈绍东⁴⁾ 潘汉波⁵⁾

1)(成都信息工程学院, 成都 610225)

2)(中国气象科学研究院, 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

3)(中国气象科学研究院, 雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081)

4)(广州野外雷电试验基地, 从化 510925)

5)(从化市气象局, 广州从化 510925)

(2013年8月3日收到; 2013年9月17日收到修改稿)

本文分析了2012年广州地区6次雷暴过程的负地闪中不规则脉冲簇(chaotic pulse trains, CPT)放电事件的发生规律. 结果表明: CPT是负地闪整个放电过程中普遍存在的放电现象, 在323次负地闪中有243次出现了CPT放电事件, 比例达到了75.2%, 并且能够发生在负地闪的首次回击之前、回击之间以及最后一次回击之后, 其中有66.7%的继后回击之前和11.5%的最后一次回击之后发生了CPT. 研究也发现, CPT在继后回击之前有四种分布类型: 单独出现一次CPT-c(与继后回击相连的CPT)、单独出现一次CPT-i(与继后回击有一定时间间隔的CPT)、同时出现CPT-c和CPT-i以及同时出现多次CPT-i, 其中, 单独出现一次CPT-c类型最为多见, 39.4%的继后回击之前为此类型, 而在第一次和第二次继后回击之前更容易出现多次CPT的现象, 分别占到对应次序回击总数的9.4%和7.7%. 而随着继后回击次序的增加, 其之前发生CPT的概率呈减小的趋势, 并且除了第一次和第二次继后回击以外, 其他继后回击之前CPT-c的出现频次大于CPT-i. 另外, CPT-i和最后一次回击之后的CPT均叠加在K变化上, 部分回击间的CPT也能够发生在J过程中.

关键词: 负地闪, CPT, 普遍现象, 发生规律

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta

DOI: 10.7498/aps.63.019202

1 引言

闪电是大气中一种瞬时高电压、强电流、强电磁辐射的发光、发热放电现象^[1-4]. 随着闪电探测技术的不断发展与更新^[5,6], 研究者发现闪电过程中伴随着许多微秒甚至亚微秒量级的窄脉冲序列放电现象, 通常都是以爆发式窄脉冲簇的形式出现, 前人通过大量的观测和研究发现, 这些爆发式的窄脉冲序列都具有比较规律的脉冲结构, 并对其相关特征做了一定的统计和分析^[7-11]. 伴随着脉冲簇事件研究的深入, 近年来在负地闪继后回

击之前发现了一种初始极性、脉冲宽度、脉冲间隔以及振幅都毫无规律的脉冲簇放电现象——不规则脉冲簇(chaotic pulse trains, CPT), 如图1所示. CPT的典型持续时间在400—500 μs , 分布在几十至一千多微秒不等, 典型的脉冲宽度为1—2 μs , 脉冲间隔为1—10 μs ^[12,13], 且伴随有很强的高频辐射^[13-16].

不规则脉冲簇是由Weidman等^[17]首先发现的, 他们发现叠加在直窜先导和直窜梯级先导上并且与两者存在明显差异的不规则脉冲序列, 将其称作不规则先导. 而Gomes等^[12]发现有的不规则脉冲簇出现在继后回击之前, 并与继后回击有

* 国家自然科学基金(批准号:41205002, 41030960)、中国气象科学研究院基本科研业务费专项(批准号:2012Y006)和科技部科研院所技术开发专项(批准号:2011EG137226)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangyang@cams.cma.gov.cn

一定的时间间隔, 这些间隔在几百微妙至几十毫秒不等, 认为此类不规则脉冲簇和之前的不规则先导统称为不规则脉冲簇 (CPT) 更为合适, 本文也将沿用 CPT 这一术语. 就 CPT 的发生规律研究方面, 前人也做了一定的研究. Bailey 和 Rakov 等 [18,19] 发现不规则先导伴随着比直窜先导或者直窜梯级先导更大的峰值电场回击. Gomes 等 [12] 发现有 26% 的继后回击之前发生了 CPT 事件, 而 Makela 和 Lan 等 [13,14] 发现有更高的比例, 分别为 31% (选取继后回击前 500 μs 窗口以内) 和 46.5%, Lan 等 [13] 还发现随着继后回击次序的增加, 其之前发生 CPT 的概率也随之增加. 另外, 一些研究者 [7] 在 K 变化中观测到了 CPT, 但是并没有进一步深入研究.

次序的相关关系, 以及与负地闪中其他放电事件的相关关系等发生规律的研究还是十分欠缺的. 鉴于此, 本文主要针对整个负地闪放电过程中 CPT 事件的发生规律进行了研究分析.

2 数据资料

本文所用数据资料是闪电发生时的电场快、慢变化资料, 取自于 2012 年广州野外雷电综合观测试验, 由架设在广州从化市气象局三楼观测实验室楼顶 (23°34'N, 113°36'E), 距离地面 10.55 m 的电场快、慢变化测量系统获取的. 电场快、慢变化测量系统简称为快、慢天线, 是由圆形平板天线、积分电路、采集器和同步 GPS 模块组成. 其中快天线 RC 时间常数为 2 ms, 带宽为 1 kHz—2 MHz; 慢天线 RC 时间常数为 6 s, 带宽为 3.5 MHz; 系统采样率为 2.5 MHz/s, 记录时间长度为 809 ms, 输出动态范围为 -10 V—10 V, 并且系统可以根据雷暴距离的远近进行触发调节.

考虑到 CPT 本身是一类初始极性、脉冲宽度、脉冲间隔以及振幅都毫无规律的微秒尺度脉冲簇放电现象, 随着探测距离的增加, 其探测效率随之减低, 因此远距离的 CPT 在快天线波形上很容易被背景噪声脉冲所干扰, 从而影响数据统计分析结果 [20]. 于是本文选取声光差均在 44 s 以内的近距离 (< 15 km) 触发的闪电数据, 能够保证对回击和 CPT 都具有较高的探测效率, 最大程度减小由于探测效率造成的误差, 使我们的结果更接近真实情况. 并将快电场相对值大于 3 倍背景噪声且持续时间在 50 μs 以上的 CPT 纳入统计范围. 表 1 给出了本文所使用的 6 次近距离雷暴过程中记录比较完整的负地闪信息.

表 1 不同雷暴过程中负地闪次数、发生有 CPT 的负地闪次数及比例

时间	负地闪		比例/%
	次数 n	发生有 CPT 的负地闪次数 n	
20120613	39	23	59.0
20120623-1	81	68	84.0
20120623-2	75	59	78.7
20120706	26	21	80.8
20120812	91	63	69.2
20120904	11	9	81.8
总计	323	243	75.2

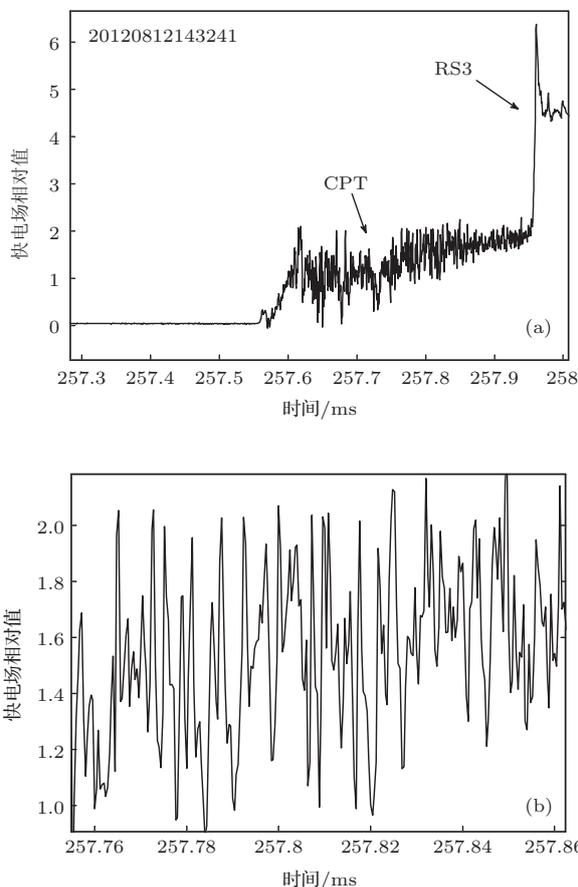


图 1 (a) 连接继后回击的 CPT 快电场波形; (b) CPT 的细节展开

综上所述, 前人大多关注与继后回击相连的 CPT, 即将其等同于不规则先导, 而对整个负地闪中的 CPT 的发生规律研究不够详细, 尤其是 CPT 在继后回击前的具体分布类型和发生在这次闪电过程其他位置的 CPT, 还有 CPT 与回击次数、回击

3 继后回击前 CPT 的发生规律

3.1 继后回击前 CPT 的分布

负地闪中的 CPT 绝大部分发生在继后回击之前, 其中一部分与继后回击直接相连接, 叠加在直窜梯级先导或者直窜先导上, 还有一部分与继后回击存在一定的时间间隔, 间隔为几百微秒至几十毫秒不等. 我们把与继后回击相连接的 CPT 统称为 CPT-c(connecting with subsequent strokes, CPT), 如图 2(a) 所示. 在继后回击之前与继后回击有一定时间间隔的 CPT 统称为 CPT-i (CPT occurring with an interval between CPT and return stroke), 如图 2(b) 所示.

分析发现, 继后回击之前 CPT 的分布可以分为四种类型, 如图 2 所示. 第一种类型是继后回击之前单独出现了一次 CPT-c(图 2(a)), 单独的 CPT-c 是所有继后回击之前出现比例最高的, 39.4% 的继后回击之前发生了单独的 CPT-c; 第二种类型是继后回击之前单独出现了一次 CPT-i(图 2(b)), 也有较高的发生比例, 21.9% 的继后回击之前发生了单独的 CPT-i. 以上两种分布的

CPT 尤其是 CPT-c, 前人已经做了较多的相关研究, 而更多的是将它和直窜先导和直窜梯级先导联系在一起, 推测是由于企图先导产生的^[12], 但目前还没有明确结论. 第三种类型是同一继后回击之前同时出现了多次 CPT-i(图 2(c)), 第四种类型是同一继后回击之前同时出现了 CPT-i 和 CPT-c(图 2(d)), 后两种类型出现的比例较小, 5.4% 的继后回击之前出现了后两种 CPT 分布类型.

在前人的研究结果中, 继后回击之前发生多次 CPT 事件的类型鲜有提及. 而本文发现了 44 次同一继后回击前出现了 2 次及 2 次以上的 CPT(包括同时出现多次的 CPT-i、以及同时出现 CPT-c 和 CPT-i 的类型). 结果发现, 有 35 次继后回击之前出现了 2 次 CPT 事件, 占继后回击之前的多次 CPT 类型的绝大多数. 另外, 有 6 次继后回击之前出现了 3 次 CPT 事件, 2 次继后回击之前出现了 4 次 CPT 事件, 最多的一次继后回击之前出现了 5 次 CPT 事件. 同时, 我们发现出现多次 CPT 的现象主要集中在第一次和第二次继后回击之前, 具体分布类型见表 2. 前两次继后回击之前一共出现了 37 次多次 CPT 的类型, 占出现多次 CPT 现象的继后回击总数的 84.1%.

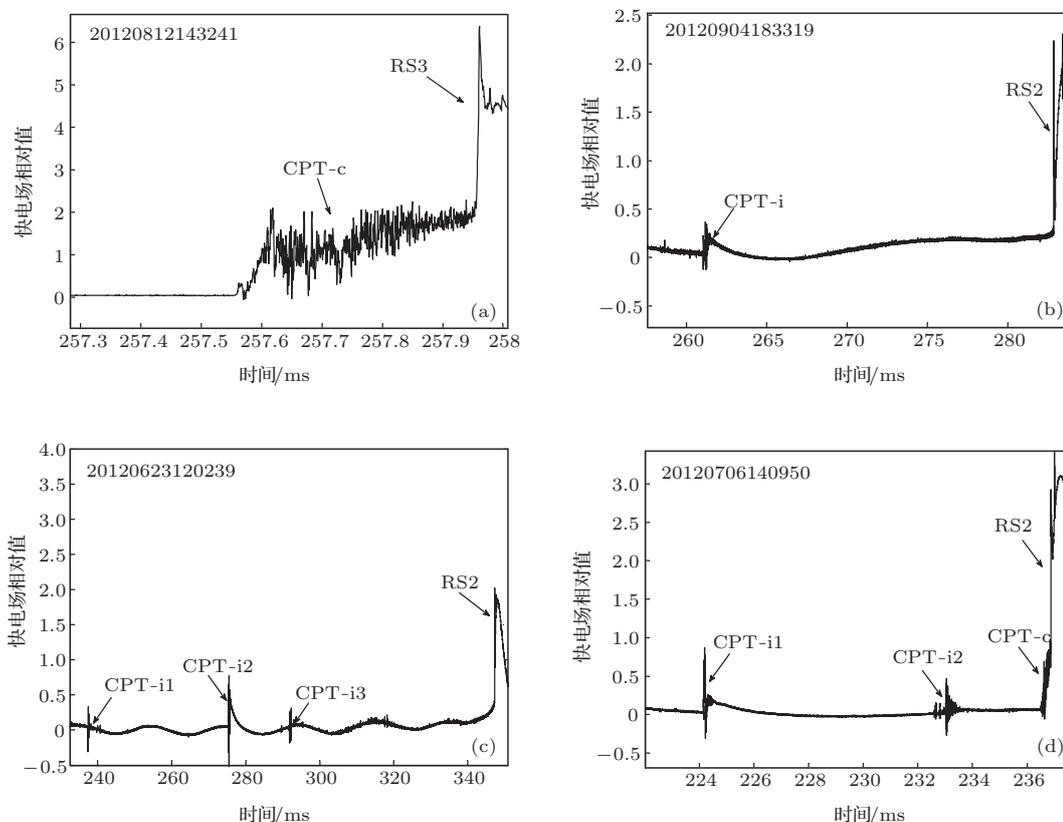


图 2 继后回击之前 CPT 的分布类型 (a) 单独出现一次 CPT-c; (b) 单独出现一次 CPT-i; (c) 同时出现多次 CPT-i; (d) 同时出现 CPT-i 和 CPT-c

表2 各继后回击前多次 CPT 的分布类型

	继后回击		CPT	
	发生多次 CPT 的继后回击次数 n	占对应次序继后回击的比例/%	多次 CPT 类型的总 CPT 次数 n	占对应次序继后回击前总 CPT 的比例/%
第一次继后回击前	22	9.4	53	25.5
第二次继后回击前	15	7.7	34	20.2
第三次继后回击前及以上	7	1.8	14	6.3
总计	44	5.4	101	16.7

3.2 CPT 与继后回击次数的关系

图 3 给出了 6 次雷暴过程中负地闪回击次数的分布情况. 由图可见, CPT 在包含不同回击次数的负地闪中都有发生, 主要分布在回击次数为 2—6 的负地闪中, 且包含有 3 次回击的负地闪发生 CPT 的概率更大(图 3(a)). 另外, 没有发生 CPT 的负地闪则主要以单次回击闪电为主(图 3(b)).

表 3 给出了负地闪继后回击次数和发生 CPT

次数的统计分析结果. 可见, 伴随有 CPT 的继后回击占到了总继后回击的 66.7%, 进一步说明了 CPT 是继后回击之前一种普遍存在的放电现象, 虽然在不同的雷暴过程中继后回击之前出现 CPT 的闪电的比例存在一定差异^[21], 但是最低比例也达到了 57.9%. 在我们的研究中一共观测到了 337 次 CPT-c 和 262 次 CPT-i, CPT-c 和 CPT-i 占了总 CPT 的绝大多数, 并且两者具有可比性. 因此, 以往认为 CPT 就是不规则先导的结论^[14] 值得商榷.

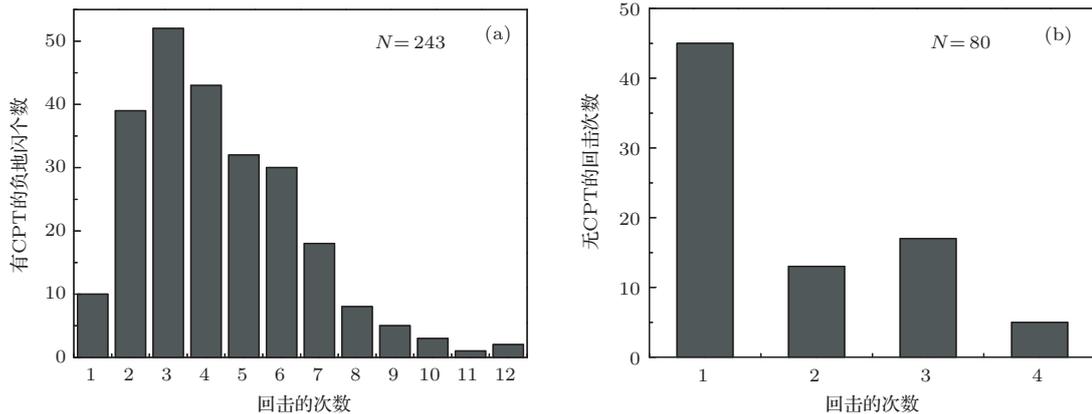


图3 (a) 伴随 CPT 的负地闪回击次数分布; (b) 无 CPT 的负地闪回击次数分布

表3 不同雷暴过程中继后回击个数、伴随 CPT 的继后回击个数, 不同类型的 CPT 个数

雷暴时间	继后回击次数 n	伴随有 CPT 的继后回击次数 n	伴随 CPT 的继后回击占总继后回击比例/%	CPT-c 次数 n	CPT-i 次数 n
20120613	95	55	57.9	27	32
20120623-1	244	170	69.7	112	68
20120623-2	235	146	62.1	88	69
20120706	48	30	62.5	21	12
20120812	156	117	75	70	72
20120904	35	24	68.6	19	9
总计	813	542	66.7	337	262

3.3 CPT与继后回击次序的关系

从前面的研究结果知道, CPT是负地闪继后回击之前有着较高发生比例的一类放电事件. 在不同次序的继后回击前, CPT的发生也呈现一定的规律性, 表4给出了继后回击之前的CPT次数和继后回击次序的关系. 可以看出, 随着继后回击次序

表4 不同次序的继后回击前CPT的发生比例类型

	第一次继后回击	第二次继后回击	第三次继后回击	第四次继后回击	第五次继后回击	第六次继后回击	第七次继后回击及以上	总计
对应次序继后回击的次数 n	233	194	142	99	67	37	41	813
伴随CPT对应次序继后回击的次数 n	177	149	91	51	33	17	24	542
发生比例/%	76.0	76.8	64.1	51.5	49.3	45.9	58.5	66.7

为了进一步深入了解CPT在继后回击前的分布情况, 我们对各继后回击前的CPT-c和CPT-i进行了对比分析, 如图4所示. 结果显示, 除了第一次继后回击之前的CPT-i的次数明显多于CPT-c, 以及第二次继后回击之前的CPT-i与CPT-c的次数相近以外, 其余继后回击之前的CPT-i次数则明显少于CPT-c. 由前面的结果知道, 在第一次和第二次继后回击之前容易出现多次CPT的现象, 这是前两次继后回击前CPT-i偏多的主要因素.

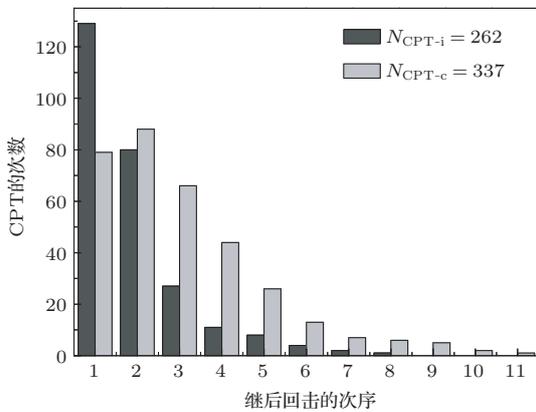


图4 各继后回击之前的CPT-c和CPT-i次数的关系

3.4 继后回击前CPT与闪电放电过程的关系

统计研究发现, 继后回击之前的CPT-i均叠加在回击间的K变化上. 图5给出了一次典型的继后回击之前伴随有3次CPT-i的负地闪放电过程电场变化波形. 图5(a)为负地闪放电过程的快、慢电场同步波形. 图5(a)下面方框部分是叠加在首次回

击和第一次继后回击之间K变化上的三次CPT-i事件的快电场波形, 它们的波形放大结果分别如图5(b), (c), (d)所示, 三个CPT-i都叠加在K变化上, 表现为非常密集且极性不规则的脉冲簇. 然而, 也并不是所有的K变化都叠加有可探测的CPT-i, 叠加CPT-i的往往是回击间具有较大强度的K变化, 而较小幅度的K变化往往更容易出现单极性或者双极性的脉冲以及爆发式的窄脉冲序列(regular pulse trains, RPB) [7-10]. 进一步研究发现, 一些叠加CPT-i的K变化过程对应有慢电场明显的梯级变化, 如图6所示. 图6(a)中快电场方框部分中的K变化对应有慢电场中明显的梯级状变化, 属于典型的J过程变化 [22,23]. 图6(b)是图6(a)图中快电场方框中叠加有CPT-i的K变化过程的放大部分.

击和第一次继后回击之间K变化上的三次CPT-i事件的快电场波形, 它们的波形放大结果分别如图5(b), (c), (d)所示, 三个CPT-i都叠加在K变化上, 表现为非常密集且极性不规则的脉冲簇. 然而, 也并不是所有的K变化都叠加有可探测的CPT-i, 叠加CPT-i的往往是回击间具有较大强度的K变化, 而较小幅度的K变化往往更容易出现单极性或者双极性的脉冲以及爆发式的窄脉冲序列(regular pulse trains, RPB) [7-10]. 进一步研究发现, 一些叠加CPT-i的K变化过程对应有慢电场明显的梯级变化, 如图6所示. 图6(a)中快电场方框部分中的K变化对应有慢电场中明显的梯级状变化, 属于典型的J过程变化 [22,23]. 图6(b)是图6(a)图中快电场方框中叠加有CPT-i的K变化过程的放大部分.

4 非继后回击之前的CPT

研究发现, 并不是所有的CPT都发生在负地闪继后回击之前. 本文还发现了最后一次回击之后的CPT, 简称CPT-a(CPT after the last return stroke)和首次回击之前的CPT, 简称CPT-b(CPT before the first return stroke), 分别如图7和图9所示. 目前为止, 国内外关于这两个位置的CPT鲜有提及.

4.1 最后一次回击之后的CPT

与继后回击前的CPT-i相似, 最后一次回击之后的CPT(CPT-a)放电事件也是以叠加在K变化上的形式出现. 图7给出了一次典型的发生CPT-a

的负地放电过程的电场变化波形. 此次CPT-a发生在第三次回击之后的首个K变化上, 如图7(a)方框部分, 与第三次回击有53 ms左右的时间间隔. 图7(b)是(a)中方框部分的放大, 可以清楚的看到CPT-a和回击之间的CPT-i一样叠加在K变化上. 图7(c)是经过滤波之后的CPT-a完整波形(只滤除K变化过程, 不影响CPT本身), 其持续时间约为0.37 ms. 从图7(d)CPT-a的部分细节展开来看, 无论极性、振幅还是脉冲间隔和宽度都是毫无规律的脉冲簇.

本文一共发现了28例CPT-a, 且全部叠加在较大的K变化上, 应该与CPT-i的发生机理是一致的, 但明确的机理还需进一步探讨. 另外, 研究过程中还发现, CPT-a绝大多数都出现在回击次数较少的闪电中, 占到了发生CPT的负地闪总数的11.5%. 图8给出了最后一次回击之后出现CPT-a的次数和闪电回击次数的关系分布图. 结果表明, CPT-a容易出现在回击次数为1—3次的闪电的最后一次回击之后.

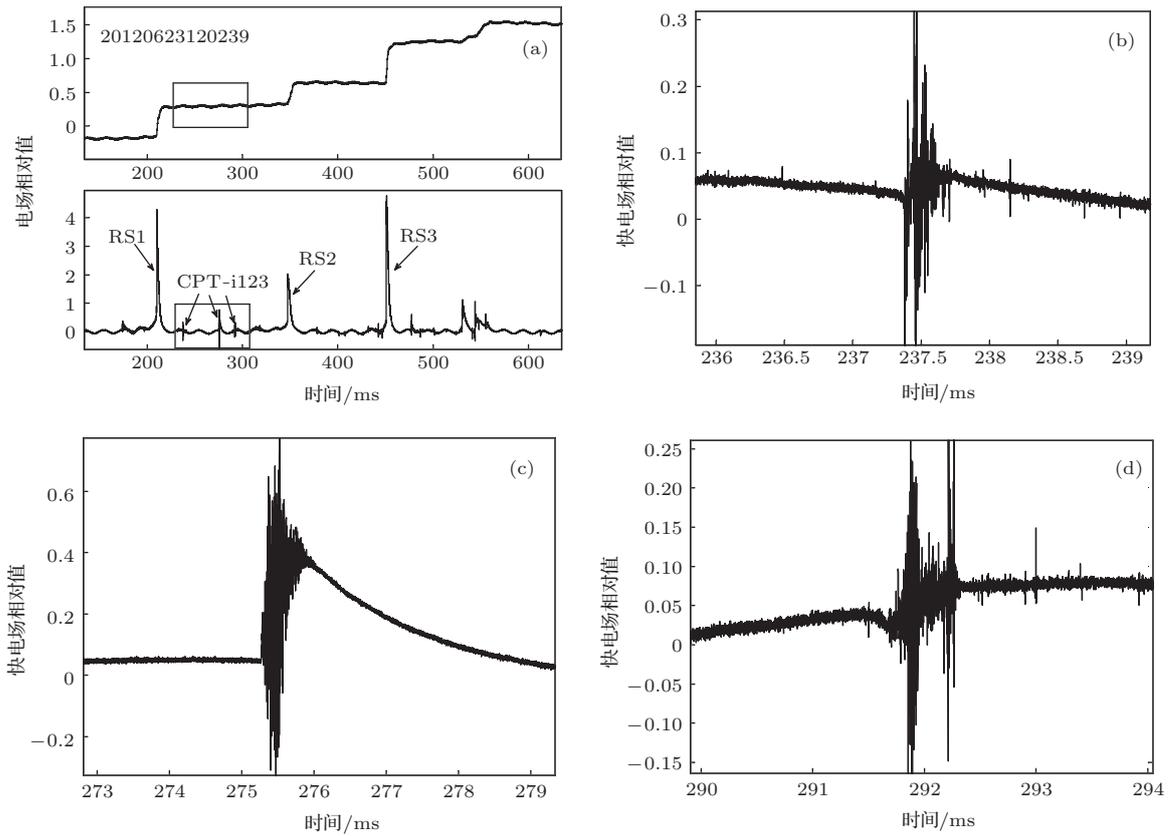


图5 (a) 伴有CPT且无J过程的快、慢电场波形; (b) 叠加在K变化上的CPT-i; (c) 叠加在K变化上的CPT-i2; (d) 叠加在K变化上的CPT-i3

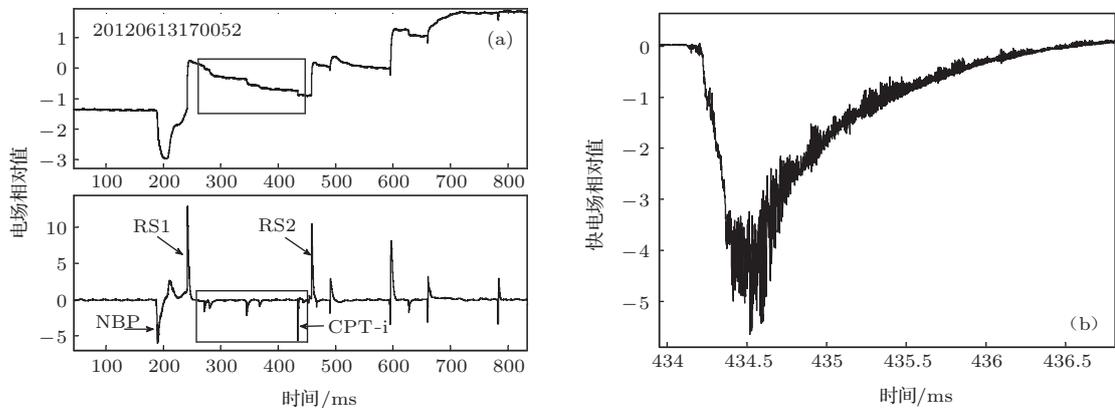


图6 (a) 伴有CPT并且有J过程的快、慢电场波形; (b) 叠加在K变化上的CPT-i

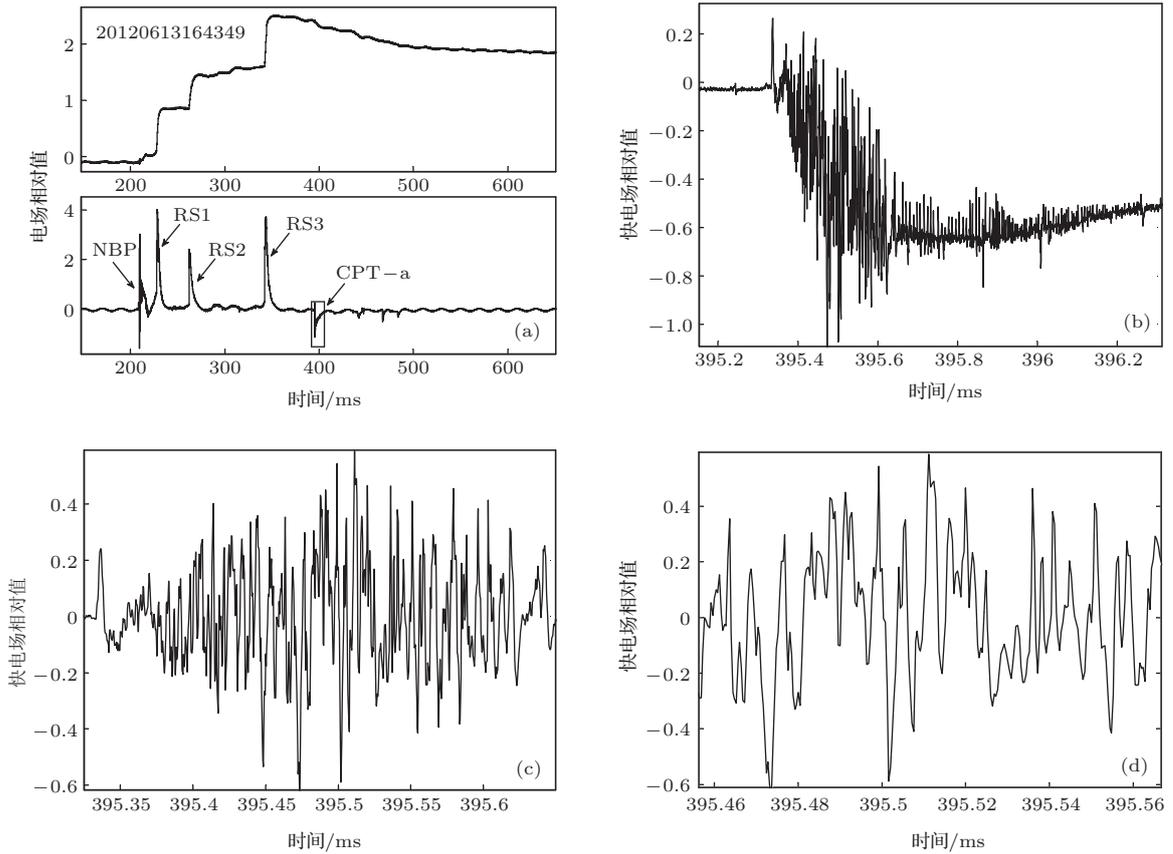


图7 (a) 伴有CPT-a的快、慢电场波形; (b) 叠加在K变化上的CPT-a; (c) 滤波之后的CPT-a; (d) 滤波后CPT-a的部分细节展开波形

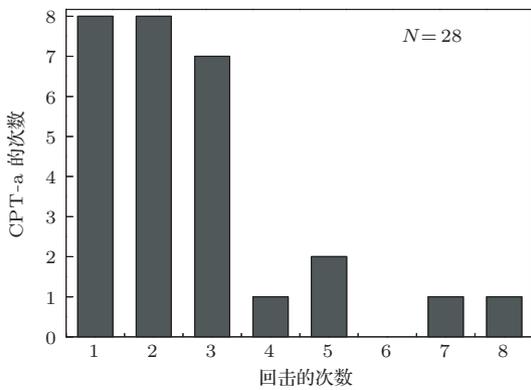


图8 CPT-a 次数与回击次数的关系

4.2 首次回击之前的CPT

CPT-b(首次回击之前的CPT放电事件)在整个负地闪放电过程中是极其罕见的, 到目前为止国内外还没有关于CPT-b的相关报道. 本文发现了2例CPT-b放电事件, 图9给出了一次发生CPT-b的负地闪放电电场变化波形, CPT-b发生在离首次回击约35.28 ms处, 与初始击穿过程大约有175 ms左右的间隔. 图9(b)是(a)的局部放大图, 可以看出不规则脉冲簇叠加在一个较大的电场变化上.

图9(b)滤波后的波形如图9(c)所示(同样只滤除大的变化过程), 其持续时间约为0.33 ms. 图9(d)是CPT-b的细节展开, 无论从极性、振幅还是脉冲间隔和宽度同样表现出毫无规则性, 与负地闪中其余位置的CPT特征是完全类似的.

5 结论与讨论

本文对负地闪放电过程中的CPT放电现象的发生规律进行了详细分析, 得到如下结论;

CPT能够发生在首次回击之前、各个回击间以及最后一次回击之后, 是负地闪放电过程中普遍存在的一种放电现象.

66.7%的继后回击之前发生了CPT(CPT-c和CPT-i), 并且随着继后回击次序的增加, 继后回击之前发生CPT的概率呈减小的趋势; 11.5%的负地闪最后一次回击之后发生了CPT(CPT-a), 并且这些CPT绝大多数都发生在回击次数为1—3的回击之后; 2次首次回击之前发生的CPT(CPT-b), 是负地闪中极其罕见的. CPT-i和CPT-a可能具有相似的物理机理, 它们都叠加在负地闪的K变化上.

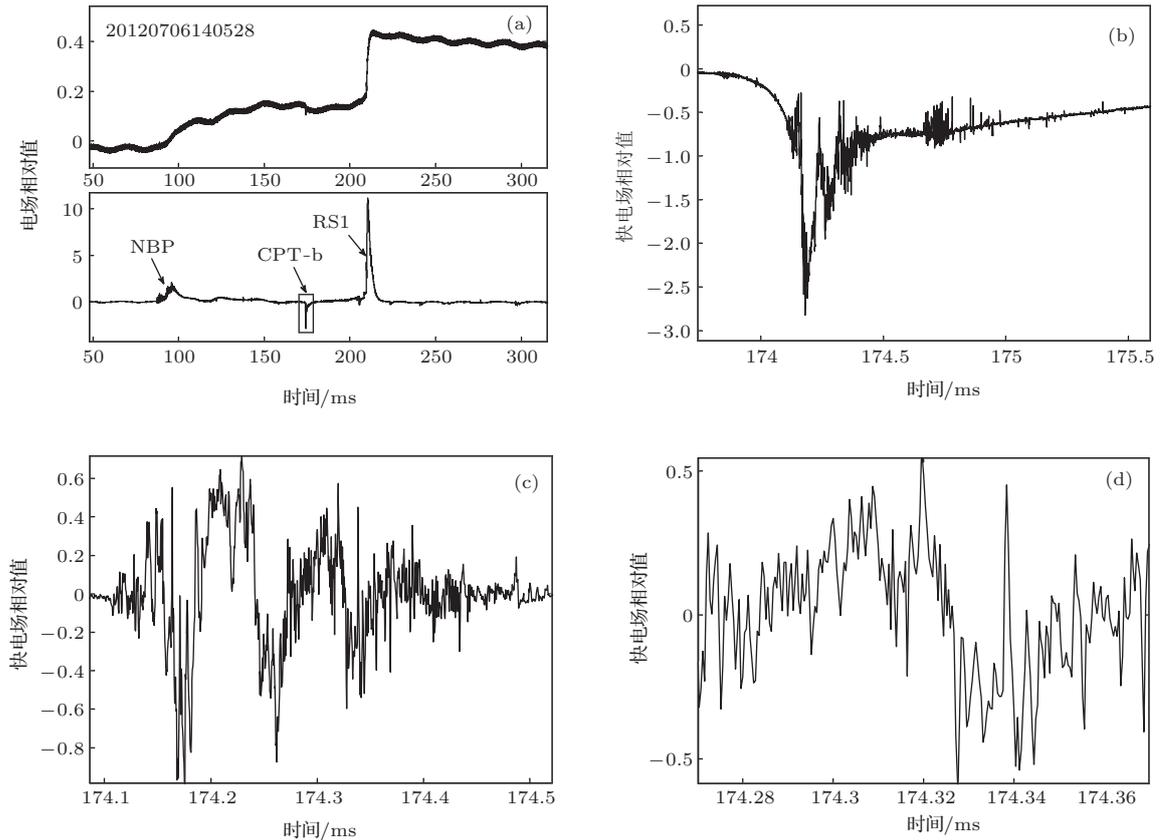


图9 (a) 伴随着CPT-b的快、慢电场波形; (b) 叠加在一个大的变化上的CPT-b; (c) 滤波之后的CPT-b; (d) 滤波后CPT-b的部分细节展开波形

CPT在继后回击之前有四种分布类型; 第一种类型是单独出现一次CPT-c, 其出现比例最高, 39.4%的继后回击之前发生了单独的CPT-c; 第二种类型是单独出现一次CPT-i, 其也有较高的发生比例, 21.9%的继后回击之前发生了单独的CPT-i; 第三种类型是同一继后回击之前同时出现了多次CPT-i, 第四种类型是同一继后回击之前同时出现了CPT-i和CPT-c, 后两种类型出现的比例相对较小, 5.4%的继后回击之前出现了后两种分布类型. 另外, 除了第一次继后回击之前发生的CPT-i明显多于CPT-c和第二次继后回击之前发生的CPT-i次数略少于CPT-c外, 其余继后回击之前发生的CPT-i次数则明显少于CPT-c, 而在第一次和第二次继后回击之前容易出现多次CPT的现象, 分别占到对应回击总数的9.4%和7.7%.

本文利用闪电快、慢电场数据着重分析CPT在闪电放电过程中的发生规律, 目的是揭示CPT在自然闪电尤其是负地闪中的普遍存在性, 同时发现了首次回击之前和最后一次回击之后也出现了一定比例的CPT, 还发现了CPT与闪电子物理过程的关系. 由于观测资料的限制, 本文没有对CPT

的特征参量进行深入地量化分析和物理过程探讨, 这也是我们当前仍在开展的观测和研究工作, 我们将在原有的观测基础上结合宽带干涉仪、甚高频辐射以及高速摄像等观测手段进行同步观测, 希望能够获得CPT确切的位置信息、通道的发展信息以及速度、高度等物理参数, 对CPT进行详细的定量研究分析, 从而对CPT的形成物理机理进行深入地探讨.

感谢广州野外雷电试验基地、广东省防雷中心、从化市气象局对我们试验的大力支持.

参考文献

- [1] Yang J, Qie X S, Wang J G, Chao Y, Zhang Q L, Yuan T, Zhou Y J, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1968 (in Chinese)[杨静, 鄒秀书, 王建国, 赵阳, 张其林, 袁铁, 周筠珺, 冯桂力 2008 物理学报 **57** 1968]
- [2] Chao Y, Qie X S, Kong X Z, Zhang G S, Zhang T, Yang J, Feng G L, Zhang Q L, Wang D F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6616 (in Chinese)[赵阳, 鄒秀书, 孔祥贞, 张广庶, 张彤, 杨静, 冯桂力, 张其林, 王东方 2009 物理学报 **58** 6616]

- [3] Yang B, Zhou B H, Meng X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8978 (in Chinese)[杨波, 周璧华, 孟鑫 2010 物理学报 **59** 8978]
- [4] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, Zhang T L, Xue S M, Zhao J C, Xu H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 109201 (in Chinese)[王雪娟, 袁萍, 岑建勇, 张廷龙, 薛思敏, 赵金翠, 许鹤 2013 物理学报 **62** 109201]
- [5] Zhang Y J, Zhou X J 2006 *Journal of Applied Meteorological Science* **17** 829 (in Chinese) [张义军, 周秀骥 2006 应用气象学报 **17** 829]
- [6] Zhang Y J, Meng Q, Ma M, Dong W S, Lü W T 2006 *Journal of Applied Meteorological Science* **17** 611 (in Chinese) [张义军, 孟青, 马明, 董万胜, 吕伟涛 2006 应用气象学报 **17** 611]
- [7] Vladimir A. Rakov, Rateev Thottappillil, Martin A. Uman 1992 *Journal of Geophysical Research* **97** 9935
- [8] Rakov V A, Uman M A, Hoffman G R, Masters M W, Brook M 1996 *IEEE Transactions EMC* **38** 156
- [9] Wang Y H, Zhang G S, Zhang T, Zhao Y X, Li Y J 2009 *Plateau Meteorology* **28** 1018 (in Chinese)[王彦辉, 张广庶, 张彤, 赵玉祥, 李亚珺 2009 高原气象 **28** 1018]
- [10] Zhu B Y, Lü F C, Ma M, Zhou H L 2010 *Plateau Meteorology* **29** 688 (in Chinese)[祝宝友, 吕凡超, 马明, 周鹤林 2010 高原气象 **29** 688]
- [11] Wu B, Zhang G S, Wang Y H, Li Y J, Fan X P, Yu H, Zhang R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 189202 (in Chinese)[武斌, 张广庶, 王彦辉, 李亚珺, 范祥鹏, 余海, 张荣 2013 物理学报 **62** 189202]
- [12] Gomes C, Cooray V, Fernando M, Montano R, Sonnadara U 2004 *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **66** 1733
- [13] Lan Y, Zhang Y J, Dong W S, Lu W T, Liu H Y, Zheng D 2011 *J. Geophys. Res.* **116** 17109
- [14] Makela J S, Edirisinghe M, Fernandob M, Montanoc R, Coorayc V 2007 *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **69** 707
- [15] Willett J, Bailey J, Leteinturier C, Krider E 1990 *J. Geophys. Res.* **95** 20367
- [16] Liu H Y, Dong W S, Zhang Y J, Zheng D, Yan B W, Shi Y H, Wu T 2013 *Plateau meteorology.* **32** 1186 (in Chinese)[刘恒毅, 董万胜, 张义军, 郑栋, 严碧武, 石玉恒, 吴亭 2013 高原气象 **32** 1186]
- [17] Wiedman C D 1982 *Ph. D. Dissertation* (University of Arizona.)
- [18] Bailey J, Willett J C, Krider E P, Leteinturier C 1988 *paper presented at 8th International Conference on Atmospheric Electricity* Uppsala, Sweden 13-16
- [19] Rakov V A, Uman M A 1990 *J. Geophys. Res.* **95** 5447
- [20] Cao D J, Qie X S, Duan S, Xuan Y J, Wang D F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 069202 (in Chinese) [曹冬杰, 郗秀书, 段树, 宣越建, 王东方 2012 物理学报 **61** 069202]
- [21] Li W L, Liu D X, Qie X S, Fu S M, Duan S, Chen Y C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 059202 (in Chinese)[李万莉, 刘冬霞, 郗秀书, 傅慎明, 段树, 陈羿辰 2012 物理学报 **61** 059202]
- [22] Wang D H, Qie X S, Guo C M 2000 *Lightning and artificial triggering lightning.* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press) P133 (in Chinese) [王道洪, 郗秀书, 郭昌明 2000 雷电与人工引雷 (上海: 上海交通大学出版社) 第 133 页]
- [23] Chen W M 2003 *Principles of lightning* (second edition)(Beijing: China Meteorological Press P195 (in Chinese) [陈渭民 2003 雷电学原理 (第二版)(北京: 气象出版社) 第 195 页]

Occurrence regularity of CPT discharge event in negative cloud-to-ground lightning*

Zhou Wei¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ Zhang Yang^{2)3)4)†} Zhang Yi-Jun²⁾³⁾⁴⁾ Lü Wei-Tao²⁾³⁾⁴⁾
Zheng Dong²⁾³⁾⁴⁾ Chen Shao-Dong⁴⁾ Pan Han-Bo⁵⁾

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

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

3) (Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

4) (Guangzhou Field Experiment Site for Lightning Research and Testing, Conghua 510925, China)

5) (Conghua Meteorological Bureau, Conghua 510925, China)

(Received 3 August 2013; revised manuscript received 17 September 2013)

Abstract

Occurrence regularity of chaotic pulse trains (CPT) discharge event in negative cloud-to-ground (CG) lightning during six thunderstorms are analyzed in this paper. Results show that CPT is a common phenomenon throughout the negative CG lightning discharge process, 243 times of CPT discharge events occurs during 323 negative CG lightning, a proportion reaching 75.2%. CPT in negative CG can occur before the first return stroke, between the strokes, and after the last stroke. The proportion of 66.7% of the total subsequent strokes is preceded by CPT, and CPT occurs after 11.5% of the total last strokes. It is also found that there are four distributions prior to subsequent strokes: single CPT-c (CPT connecting with subsequent strokes), single CPT-i (CPT occurring in an interval between CPT and return strokes), CPT-c and CPT-i occur concurrently, and several CPT-is appear concurrently. Single CPT-c is the most common, 39.4% of subsequent strokes are preceded by single CPT-c, and several CPTs are easier to occur before the first and second subsequent strokes, which are respectively the corresponding strokes 9.4% and 7.7% of the total number. With the increase of the order of subsequent stroke, there is a decreasing trend for the occurrence of CPT, and in addition to the previous two subsequent strokes, the number of CPT-c is obviously greater than CPT-i before the others. In addition, CPT-i and CPT-a both occur to add on the negative CG K-change, and some also correspond to the process of J-change in the slow electric field wave.

Keywords: negative CG lightning, CPT, common phenomena, occurrence regularity

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta

DOI: 10.7498/aps.63.019202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41205002, 41030960), the Special Project by the Chinese Academy of Meteorological Sciences for Basic Research(Grant No. 2012Y006), and the Ministry of Science and Technology Research Institutes technology development project(Grant No. 2011EG137226).

† Corresponding author. E-mail: zhangyang@cams.cma.gov.cn