

# 一次多回击自然闪电的高速摄像观测<sup>\* 1</sup>

李俊<sup>1)</sup> 张义军<sup>1)2)</sup> 吕伟涛<sup>1)</sup> 董万胜<sup>1)</sup> 陈绍东<sup>1)3)</sup> 李斌<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室,北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

<sup>3)</sup>(广东省气象局,广州 510080) <sup>4)</sup>(广州市气象局,广州 510080)

## 摘 要

2006 年 8 月 1 日在广东省从化市利用成像率为 5000 幅/s 的高速摄像系统观测得到了一次包含有 13 个回击过程的自然负地闪,其梯级先导的传播速度为  $10^6$  m/s 的量级;一次企图先导的传播速度随高度的降低而减小;一次直窜先导的传播速度随高度的降低而增加。有 3 次继后回击相对积分亮度的峰值大于首次回击相对积分亮度的峰值。研究发现:此次自然闪电的继后回击及紧跟其后的连续电流过程的发光总量与该次继后回击之前闪电通道的截止时间有关,较大的发光总量对应于较长的截止时间,较小的发光总量对应于较短的截止时间,但两者没有固定的比例关系。

**关键词:** 地闪;多回击;高速摄像

## 引 言

闪电是自然大气中的一种超长距离的强放电过程,能产生强烈的发光现象,通常伴随着强对流天气过程发生。闪电特别是地闪常常引起严重的灾害,因此对地闪进行监测<sup>[1]</sup>,对其发生发展特性进行研究一直是大气电学领域的一个重点。过去人们利用多种光学方法对地闪先导-回击过程中云和地面之间的闪电通道进行观测,揭示出很多地闪放电过程的特征,如先导传播路径和传播速度,回击过程、连续电流随时间变化及接地点等。20 世纪 90 年代以前,人们主要采用条纹相机对云-地间放电通道进行观测。条纹相机的时间分辨率非常高<sup>[2-3]</sup>,可以达到微秒量级。利用条纹相机可以对地闪先导速度和回击速度进行分析研究,但是只有在地闪通道完全垂直时,条纹照片才可以真实地反映地闪先导速度和回击速度,利用条纹相机很难分析闪电通道在水平方向上的发展。近年来随着电子摄像技术的发展,对闪电的高速摄像观测通常采用下面两种系统:ALPS (Automatic Lightning Progression feature observation System) 系统和高速数字化摄像系统。

ALPS 是在 1990 年由 Yokoyama 专为记录闪电光学资料而设计的<sup>[4]</sup>,当其时间分辨率设置在 100 ns 时,记录时间为 1.6 ms,成像面阵为 256(16×16)阵列的光电二极管,利用 ALPS 可以对地闪的连接先导、直窜先导和回击的传播速度进行较好地研究。另外,Moreau 等<sup>[5]</sup>首创用 200 幅/s 的高速摄像机来观测在云中飞行的飞机引发闪电的过程。此后随着技术的不断发展,高速摄像的时间分辨率、空间分辨率和记录时间的长度都不断提高。1996 年在江西南昌和 1997 年在甘肃平凉进行的人工引雷试验中,王才伟等<sup>[6-7]</sup>使用的数字化高速摄像机(美国 EG&G Reticon 公司生产,拍摄时时间分辨率设置为 1 ms,空间分辨率为 256×256 个像素点,一次拍摄的记录时间为 2 s),观测到了 5 次人工引雷(3 次空中触发和 2 次地面触发)的高速摄像资料。

在过去的研究中人们揭示出很多地闪放电过程的物理特征,但受各种条件限制,对云-地间放电过程的一些细节还缺乏深入的观测和认识。自然闪电发生具有很大的随机性,这使得人们对其进行拍摄及分析研究存在一定困难。迄今为止,国内对多回击自然闪电光学特征方面的系统研究还比较欠缺。本文利用拍摄到的一次具有 13 个回击过程的自然

\* 国家科技部基础平台项目(2004DEA71070)和公益性行业科研专项(GYHY2007622)共同资助。

2007-07-23 收到,2008-04-03 收到再改稿。

闪电的高速摄像记录,对其先导、回击、连续电流和 M 分量的发生过程和物理特征进行详细分析,这将有利于人们对地闪先导-回击过程的进一步认识,为防雷工程的设计提供有价值的参考。

## 1 观测设备和资料选取

为了对闪电发生、发展的物理机制进行更加深入地研究,中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室于 2006 年夏季在广东省从化市进行了为期两个月的人工引雷和自然闪电观测试验<sup>[8]</sup>,观测使用的高速摄像系统为美国 Redlake 公司生产的 MotionPro HS-4 型数字化高速黑白摄像机,其时间分辨率设置为 0.2 ms,作为成像器件的 CMOS 面阵为 512×512 个像素点,记录时间长度为 1.6 s。利用该高速摄像机 8 月 1 日 16:52:51(北京时,下同)拍摄到了一次具有 13 个回击的自然闪电,闪电发生的位置距离观测点约 2.1 km。根据地面大气电场仪的观测记录,这是一次负地闪过程。本文对此次多回击自然闪电云-地间放电的过程进行分析。

## 2 资料分析和结果

图 1 为高速摄像记录得到的闪电通道相对积分亮度随时间的变化情况。在高速摄像的记录中,像素点亮度的强弱是用 0~255 的灰度值来表征的。为了消除背景噪声的影响,将高速摄像照片首先进行了消除背景的处理,也就是处理后的照片只剩下

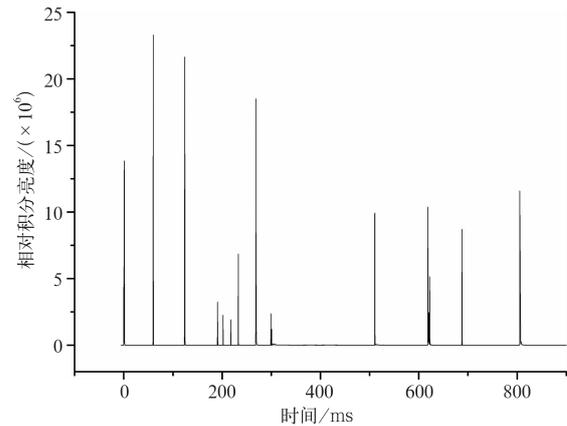


图 1 闪电通道相对积分亮度随时间变化  
Fig. 1 Relative integrated luminosity of the CG lightning channel versus time

闪电通道在发亮,其他位置的点的灰度值统一被设为 0,然后再对一张照片上所有点的亮度值进行相加,得到这一时刻闪电通道的相对积分亮度。在某个时刻闪电通道发光越强烈,那么这一时刻其相对积分亮度的值也就越大。表 1 中给出的是此次地闪各个物理量的值。截止时间是指两次回击过程之间闪电通道没有发光的时间,即从前一次回击之后闪电通道不再发光的时刻开始,到下一次回击以前先导出现的时刻间隔时间。回击间的时间间隔指的是回击亮度峰值出现时刻与前一次回击亮度峰值时刻之间间隔的时间。发光总量  $L$  是指从直窜先导接地的时刻开始算起,一直到闪电通道不再发光为止,这段时间内所有时刻高速摄像照片相对积分亮度的和。此次自然闪电总共持续了 822.4 ms,期间发生

表 1 2006 年 8 月 1 日地闪的一些物理特征

Table 1 List of some physical parameters of the CG lightning on August 1, 2006

回击次序	截止时间 $\Delta T/\text{ms}$	回击间的时间 间隔 $\Delta T_R/\text{ms}$	连续电流持续 时间 $T_{CC}/\text{ms}$	先导速度 $V_L/(10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	发光总量 $L$ (相对值)	M 分量 个数
1			3.2	16.47	45014834	1
2	54.8	58.8		>89.11	38419055	0
3	61.6	64.2		>88.16	53819911	0
4	59.4	66.6		>103.67	4963668	1
5	9.6	11.4		>81.55	2429095	0
6	13.6	15.8		44.22	3759165	0
7	14.2	15		>102.83	7594904	0
8	34.4	35.6	5.8	>112.83	48635308	0
9	23.6	31	157.6	31.67	7923664	5
10	52.4	211.4	221	>76.08	22242381	5
11	84.4	107.8	15	35.06	37361594	3
12	54.2	53.4		>69.19	11517796	0
13	116.2	117.4	16	9.18	58268340	2

了 13 次回击过程,只有一个接地点,所有继后回击过程之前出现的先导都是沿着同一条闪电通道向地面发展。在第 200 ms 时刻附近发生回击的次数最为频繁,总的来说,除去这一时刻附近的几次继后回击,在地闪过程的前期回击的亮度峰值要大于后期的亮度峰值。在 13 次回击之中,首次回击的峰值亮度并不是最大的,第 2 次回击、第 3 次回击和第 8 次回击相对积分亮度的峰值均大于首次回击相对积分亮度的峰值。有 6 次回击之后出现了较强的连续电流,其持续时间最长的是发生在第 9 次继后回击之后,共 221 ms,最短的发生在首次回击之后,持续时间为 2.4 ms。在 6 次连续电流过程中共有 17 个 M 分量发生,M 分量最多的两次连续电流过程是在第 8 次和第 9 次继后回击之后,各发生了 5 次 M 分量,其中第 8 次继后回击之后发生的连续电流其持续时间长度仅次于第 9 次,为 157.6 ms。

## 2.1 先导的传播

表 1 给出了先导的平均速度,观测所使用的数字化高速摄像机的时间分辨率为 0.2 ms,能够进行详细分析的先导过程有首次回击前的梯级先导,第 4 次回击前的企图先导以及第 13 次回击前的直窜

先导。其中,在表 1 中给出的是第 4 次回击前直窜先导的平均速度。

### 2.1.1 首次回击之前的梯级先导

图 2 给出的是从下行先导出现到首次回击发生的高速摄像照片。在  $-0.8$  ms,下行先导出云,同时云底有发亮,估测出云点高度为 1.84 km。在  $-0.6$  ms,梯级先导继续向下发展,但在  $-0.8$  ms 先导通道经过的区域出现较强的发光,可能是梯级先导在向下发展的过程中,与云下的电荷区之间较强的电荷中和过程,这一中和过程减弱了这一先导分叉中的电荷,使得这一先导不能继续向下发展。同时在亮区的右下侧出现了一个新的向下的先导分叉,在  $-0.4$  ms 的图像上,可以很清楚地看到闪电先导出现的左右两个分叉,分叉点距离地面 1.52 km,左分叉已经变暗,其尖端距离地面 0.98 km,而右分叉比左分叉亮,其尖端距离地面 0.6 km。在  $-0.2$  ms 通道的左分叉消失,通道右分叉的先导接地。在 0.0 ms 整个闪电通道强烈发亮,图像中心出现大面积的亮度饱和,是由于首次回击的大电流所导致。在这一过程中,闪电通道右分叉先导的平均速度约为  $2.23 \times 10^6$  m/s,闪电通道左分叉先导的平均速度约为  $1.07 \times 10^6$  m/s。

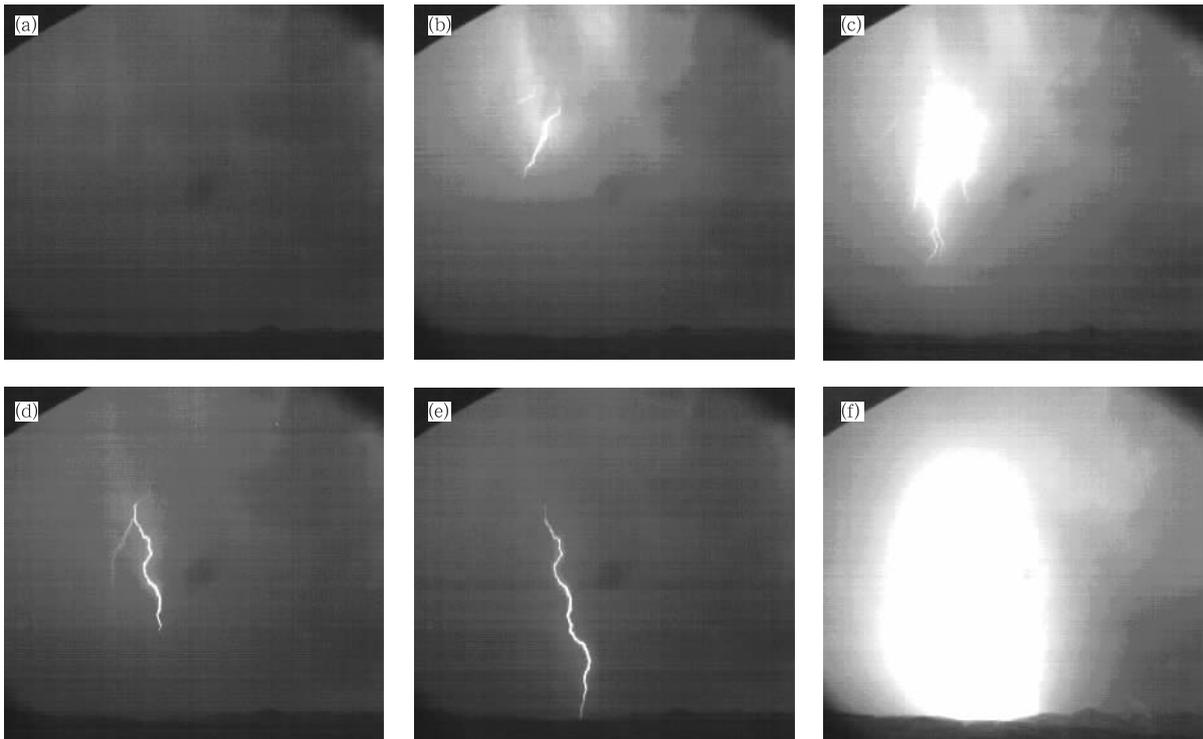


图 2  $-1.0 \sim 0.0$  ms 的高速摄像照片

(a)  $-1.0$  ms, (b)  $-0.8$  ms, (c)  $-0.6$  ms, (d)  $-0.4$  ms, (e)  $-0.2$  ms, (f) 0.0 ms

Fig. 2 Frame sequence of first leader/return stroke from  $-1.0$  ms to 0.0 ms

(a)  $-1.0$  ms, (b)  $-0.8$  ms, (c)  $-0.6$  ms, (d)  $-0.4$  ms, (e)  $-0.2$  ms, (f) 0.0 ms

根据首次回击前梯级先导的传播速度来判断,首次回击之前出现的梯级先导并不是通常所讲的 $\alpha$ 型先导(其速度量级为 $10^5$  m/s<sup>[9-10]</sup>),而是不常见的 $\beta$ 型先导。在早期的研究中<sup>[11]</sup>,研究者将观测到的梯级先导分为两个大类: $\alpha$ 型先导和 $\beta$ 型先导。总体来讲,拍摄到的先导中有55%到70%是 $\alpha$ 型先导。 $\alpha$ 型先导向地面的传播速度稳定,量级约为 $10^5$  m/s,梯级长度和发光亮度变化不大,但比 $\beta$ 型先导的长度短,而且亮度也比较弱。 $\beta$ 型先导在云外的发展过程分为两个阶段。它们从云的底部偶尔

也从云的侧面以较长、较亮的梯级开始,向地面传播的平均速度量级为 $10^6$  m/s,在云底会出现较多的分叉,图2中先导在云底附近的发展情况就与此特征相符合。当 $\beta$ 型先导其接近地面时,与 $\alpha$ 型先导类似,表现出的是相对较低的传播速度,短小和低亮度的梯级。在接近地面的过程中,两种先导都会出现平均速度和亮度的增加。

### 2.1.2 第4次回击前的企图先导

图3是第4次回击之前出现的企图先导的发展情况,由于企图先导本身亮度比较暗,所以将这些图

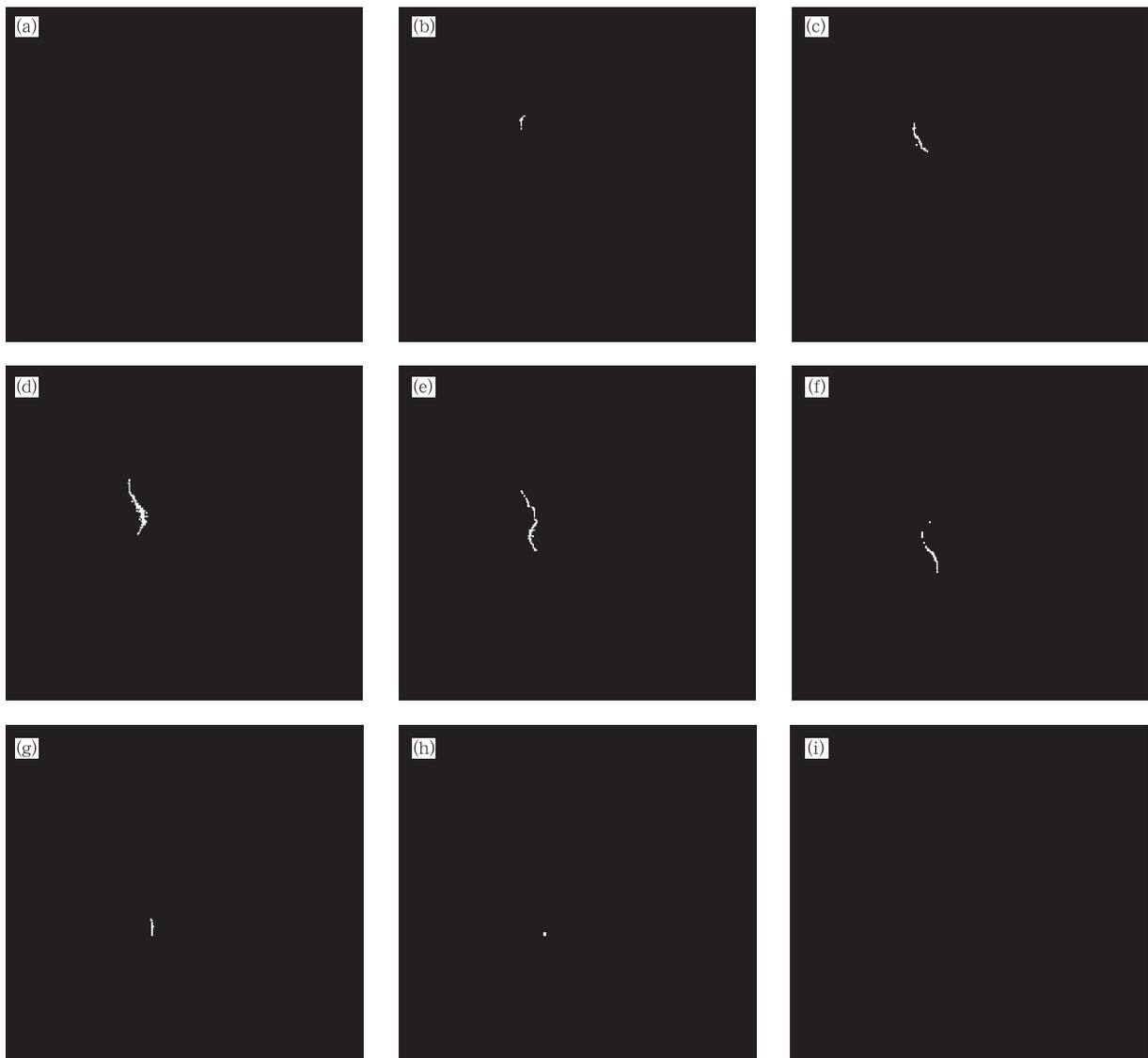


图3 经处理的184.6~186.2 ms高速摄像照片

(a) 184.6 ms, (b) 184.8 ms, (c) 185.0 ms, (d) 185.2 ms, (e) 185.4 ms, (f) 185.6 ms,  
(g) 185.8 ms, (h) 186.0 ms, (i) 186.2 ms

Fig. 3 Frame sequence processed from 184.6 ms to 186.2 ms

(a) 184.6 ms, (b) 184.8 ms, (c) 185.0 ms, (d) 185.2 ms, (e) 185.4 ms, (f) 185.6 ms,  
(g) 185.8 ms, (h) 186.0 ms, (i) 186.2 ms

片先消除背景之后再行亮化处理,这样就可以比较清楚地看到企图先导的传播过程。从图 3 可见,在 184.8 ms,先导出现,其尖部距离地面 1.49 km。在 185.0 ms,先导向右下方传播,其尖部距离地面 1.35 km。在 185.2 ms,先导的传播路径出现明显的弯折,传播方向变为左下方,尖部距离地面 1.15 km。在 185.4 ms,先导的路径再一次转弯,传播方向又变回右下方,此时刻其尖部距离地面 1.01 km。在 185.6 ms,先导的传播方向再次出现了改变,开始竖直向下传播,其尖部距离地面 0.86 km。在 185.8 ms,先导的尖部距离地面 0.82 km。在 186.0 ms,先导的尖部亮度变暗,距离地面 0.81 km。在 186.2 ms,先导已经消失,不再向下发展,成为企图先导。

图 4 是该企图先导在向地面发展的过程中速度随高度的变化。从图 4 中可以看出,随着先导向地面的发展,其速度呈现一种随高度降低而逐渐减小的趋势。其速度最大对应于图 3 中的 185.2 ms,达到了  $1.1 \times 10^6$  m/s。在此之后,也就是对应于图 4 中的高度大约 1.15 km 以下,企图先导越接近地面,它的速度就变得越小。当它发展到图 3 中的 186.0 ms 时,其速度降为  $1.15 \times 10^5$  m/s,之后先导消失,不再向地面发展。直到第 189.6 ms 直窜先导沿着企图先导通过的路径向地面发展接地后产生了第 4 次回击,中间有 3.6 ms 的间隔时间。

同首次回击之前出现的同样未能接地的通道左端分叉处的梯级先导相比较,第 4 次回击前企图先导的不同主要表现在 3 个方面:① 传播速度的差别,从平均速度上来讲,第 4 次回击之前的企图先导

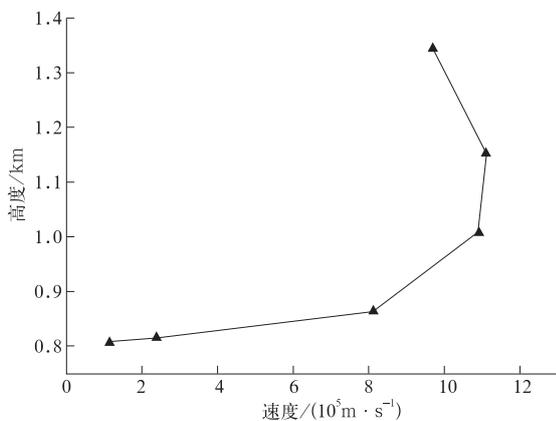


图 4 第 4 次回击前企图先导速度随高度变化

Fig. 4 Variation of speed of the attempted leader before the 4th RS with height

要明显慢于首次回击之前出现的梯级先导;② 传播路径的不同,首次回击前的梯级先导是沿闪电的左、右两个分叉向地面发展,最终左分叉处先导没能接地,右分叉处先导成功接地,第 4 次回击之前出现的企图先导是沿着前两次回击形成的闪电主通道向地面发展,也就是首次回击前出现的闪电右分叉;③ 云层亮度的差别,在首次回击之前梯级先导向地面发展的过程中,伴有明显的云层发亮,但是在第 4 次回击之前的企图先导向地面发展的过程中,没有观测到云层发亮的现象。

### 2.1.3 第 13 次回击前的直窜先导

图 5 是第 13 次回击前发生的直窜先导从云底传播到地面直至回击出现的全过程。由于先导在起始阶段发光比较弱,所以给出的 802.6 ms 到 803.4 ms 的图片(对应于图 5b~5f)经过了亮度增强。在 802.6 ms,直窜先导出云,其尖部距离地面 1.59 km,之后先导沿着前几次回击的闪电通道逐步向地面传播,在 802.8 ms,先导通过的路径出现第 1 次弯折,其尖部距离地面 1.47 km,速度为  $6.38 \times 10^5$  m/s。在 803.0 ms,先导的尖部距离地面 1.36 km,速度为  $7.9 \times 10^5$  m/s。在 803.2 ms,先导通过的路径出现第 2 次弯折,其尖部距离地面 1.26 km,速度为  $5.16 \times 10^5$  m/s。在 803.4 ms,其尖部距离地面 1.12 km,速度为  $8.5 \times 10^5$  m/s,传播方向为左下方。在 803.6 ms,其尖部距离地面 0.97 km,速度为  $9.31 \times 10^5$  m/s。在 803.8 ms,其尖部距离地面 0.81 km,速度为  $8.68 \times 10^5$  m/s,方向变为竖直向下。在 804.0 ms,先导经过的闪电通道的亮度进一步增加,其尖部距离地面 0.62 km,速度为  $1.06 \times 10^6$  m/s。在 804.2 ms,先导的传播路径出现了第 5 次弯折,其尖部距离地面 0.36 km,速度为  $1.68 \times 10^6$  m/s。在 804.4 ms,先导已经接地,速度大于  $2.0 \times 10^6$  m/s。这一过程中直窜先导的平均速度为  $9.18 \times 10^5$  m/s。在先导从云底向地面发展的过程中,可以看出随着高度的降低,先导的尖部亮度在逐渐地增强直至接地。

图 6 显示的是第 13 次回击前的直窜先导向地面传播的过程中其尖部高度和速度的对应变化关系,可以看出,随着先导尖部高度的逐渐下降,即先导朝向地面逐步传播,其速度总体上呈现一种增加的趋势,其尖部的亮度呈现一种逐步变亮的趋势(从图 5 中可以看出)。但是在这一过程中也出现了反复,如在 803.2 ms 和 803.8 ms,先导的传播速度较

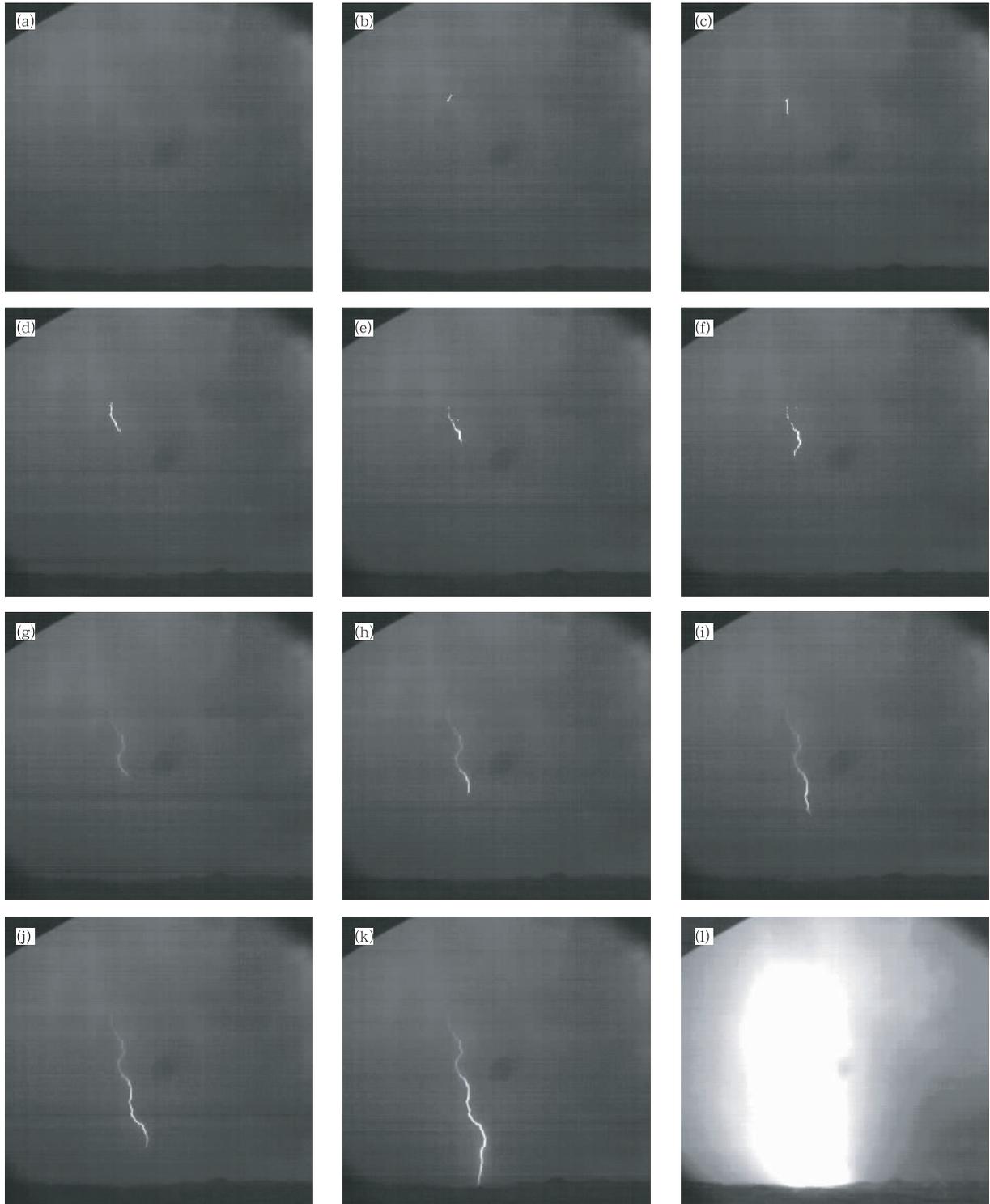


图 5 802.4~804.6 ms 的高速摄像照片 (其中图 b~f 经过了亮化处理)

(a) 802.4 ms, (b) 802.6 ms, (c) 802.8 ms, (d) 803.0 ms, (e) 803.2 ms, (f) 803.4 ms,  
 (g) 803.6 ms, (h) 803.8 ms, (i) 804.0 ms, (j) 804.2 ms, (k) 804.4 ms, (l) 804.6 ms  
 Fig. 5 Frame sequence from 802.4 ms to 804.6 ms (Fig. b—f have been enhanced in luminosity)  
 (a) 802.4 ms, (b) 802.6 ms, (c) 802.8 ms, (d) 803.0 ms, (e) 803.2 ms, (f) 803.4 ms,  
 (g) 803.6 ms, (h) 803.8 ms, (i) 804.0 ms, (j) 804.2 ms, (k) 804.4 ms, (l) 804.6 ms

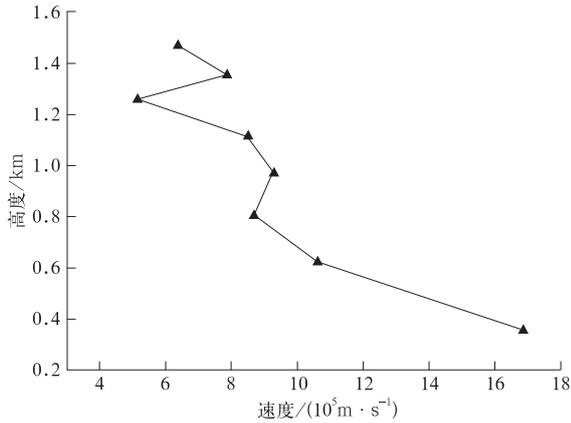


图6 第13次回击前先导速度随高度变化

Fig. 6 Variation of speed of the dart-stepped leader before the 13th RS with height

之前一时刻反而有所减小,这可能和闪电通道冷却程度的不均匀有关,也可能和先导自身的发展状况有关。总体来讲,随着第13次回击前的直窜先导逐渐接近地面,其尖部亮度和传播速度都在变大。

同首次回击之前出现的梯级先导相比,第13次回击之前出现的直窜先导具有很大不同:① 云层亮度的不同,首次回击之前出现的梯级先导在出现时伴随有云底部强烈的发亮,而第13次回击之前出现的直窜先导则没有出现明显的云层发亮的现象;② 传播速度的不同,在两次先导都沿着相同的路径向地面传播的情况下,首次回击之前出现的梯级先导的速度反而大于第13次回击之前出现的直窜先导,估计是因为在第13次回击发生之前,通道截止的时间过长,从表1可见,这次回击之前通道的截止时间最长,达到了116.2 ms,闪电通道冷却,导致了先导从云底向地面传播的过程中需要重新击穿。从先导通道的亮度分布可以推测,闪电通道的冷却度越接近地面则越大。

## 2.2 回击时间间隔、发光总量及回击前的截止时间

图7表示的是此次自然闪电各次回击之前闪电通道截止时间和回击及其后连续电流过程闪电通道的发光总量的变化情况。本文选取的截止时间是一次回击之后从闪电通道不再发光到下一次回击前先导出现的时刻这一段时间,发光总量是指从直窜先导接地的时刻开始,一直到回击及紧跟其后的连续电流截止,闪电通道不再发光为止,这段时间内所有时刻高速摄像照片相对积分亮度之和。截止时间和发光总量在表1中已经给出。闪电通道内通过的电流的大小和通道的发光强弱是紧密联系的。闪电通

道发光越亮,那么意味着通道内流过电流的强度越强。进一步分析,对通道内流过的电流进行积分可以得到此次回击及紧跟其后的连续电流过程所中和的电量,那么对这段时间内的光强进行累加就可以表征这段时间内放电过程中中和的电荷量的大小。相应地,表1中给出的发光总量 $L$ 可以表征此次回击及紧跟其后的连续电流过程所中和的电荷量的大小。图7中除首次回击以外,回击前截止时间的变化趋势和此次回击发光总量的变化趋势具有一致性,其中对首次回击没有办法给出截止时间,除掉这一个点以外,发现当一次回击之前时间间隔变大时,这次回击过程中整个闪电通道的发光总量也会随之变大,这意味着对一次回击过程来说,当继后回击之前闪电通道的截止时间变长时,此次继后回击所中和的电荷量将会相应地变大。但是值得注意的是,从两条曲线的比较可以发现,截止时间和发光总量的增减趋势具有很好的一致性,但是它们增减的幅度却不具有固定的比例关系,从第9次回击开始,回击前通道的截止时间和回击及其连续电流过程的发光总量才开始有了比较好的线性关系,这可能与闪电通道内空气的电离状况有关。但由于观测资料有限,现在还无法给出确定的依据。

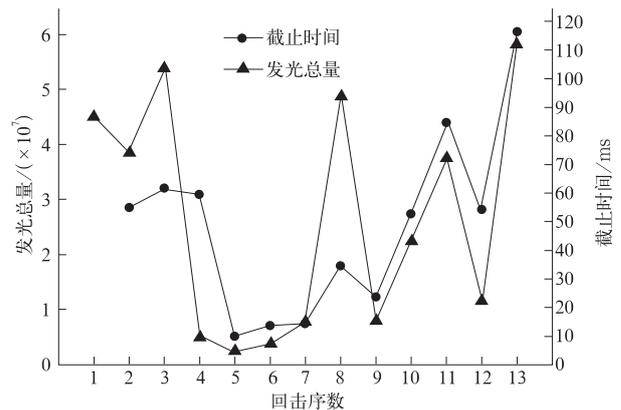


图7 回击前截止时间和回击及其后连续电流过程发光总量变化

Fig. 7 Variations of cut-off time and total luminosity with the order of return stroke

## 2.3 连续电流及M分量

闪电通道内通道电流的大小是可以用电流通道的亮度来表征的,本文根据高速摄像照片的相对积分亮度随时间的变化来划分此次自然闪电的连续电流过程和M分量。将回击后微秒量级上闪电通道出现的相对积分亮度突变划分为M分量,将回击之

后通道持续发亮的时间定义为连续电流持续时间,即从一次回击之后闪电通道的相对积分亮度出现极小值的时刻开始,到下一次回击之前闪电通道不再发光的时刻之间的这段时间。一般根据连续电流持续的时间长短将其分为3类<sup>[12]</sup>:①长连续电流过程,即连续电流持续时间在40 ms以上;②短连续电流过程,即连续电流持续时间在10~40 ms之间;③极短连续电流过程,即连续电流的持续时间在10 ms以下。Ballarotti等<sup>[13]</sup>对连续电流进行统计分析时,由于采用的高速摄像时间分辨率为1 ms,将极短连续电流持续时间定义在了3~10 ms,本研究所采用的高速摄像机的时间分辨率为0.2 ms,故也将持续时间在3~10 ms的连续电流定义为极短时间连续电流过程。

Livingston等曾经对连续电流的发生率进行了统计<sup>[9]</sup>,发现在Florida对于不同的雷暴连续电流发生率为29%~46%。Rakov等利用电场变化和其他资料对连续电流的发生率与每一闪电回击数、回击次序以及前一次的回击间隔进行了分析<sup>[14]</sup>,发现连续电流可以发生在任何一次回击之后,单次回击闪电和多次回击闪电发生长连续电流过程的几率分别为6%和49%,1.4%的首次回击之后跟随有长连续电流,对于次序为2~26的继后回击,连续电流发生的几率为3%到15%。根据Ballarotti等<sup>[13]</sup>的统计,28%的回击之后会跟随有连续电流过程,其对890次回击之后存在连续电流过程的统计表明,有553次的连续电流持续时间少于10 ms,即极短连续电流过程在发生连续电流过程的总数中所占的比例

为62%。但是从表1中可以看出,在此次自然闪电的13次回击之后,有6次回击后跟随有连续电流过程,占回击总数的46%,比Ballarotti等<sup>[13]</sup>的统计结果要高;对于极短连续电流过程的统计表明,仅仅有两次回击之后(首次回击和第7次继后回击)出现了极短连续电流过程,占发生连续电流过程总数的33%,远远少于Ballarotti等<sup>[13]</sup>的统计。

Fisher等<sup>[15]</sup>利用人工引雷数据将人工引雷中出现的长连续电流波形分为4类:类似幂级数的衰减;先出现峰值再衰减;缓慢的递增再递减;峰值后出现长稳定值。Campos等在其研究的基础上,增加了两类,把自然闪电的长连续电流过程中闪电通道的亮度波形分为了6类。增加的两类为:出现多个峰值;保持低亮度的稳定值<sup>[10]</sup>。图8是两次长连续电流的光学波形,图8a中第9次回击后的连续电流过程的波形属于第4类,波形在起伏之后总体上伴随长时间的高稳定值。根据Ballarotti等<sup>[13]</sup>的统计,此类情况在自然闪电的长连续电流中所占的比例为8%,属于出现比例较低的一类情况。图8b中连续电流波形接近于第1类,其波形在总体上看是呈幂级数递减的。根据Ballarotti等<sup>[13]</sup>的统计,此类情况在自然闪电的长连续电流中所占的比例为24%。

表2中给出的是此次自然闪电中出现的17次M分量各自的持续时间 $T_M$ ,以及同一个连续电流过程中出现的相邻M分量之间的时间间隔 $\Delta T_M$ ,从中可以看出,持续时间在0.8 ms的M分量出现的个数最多,总共有4个。此次自然闪电17个M

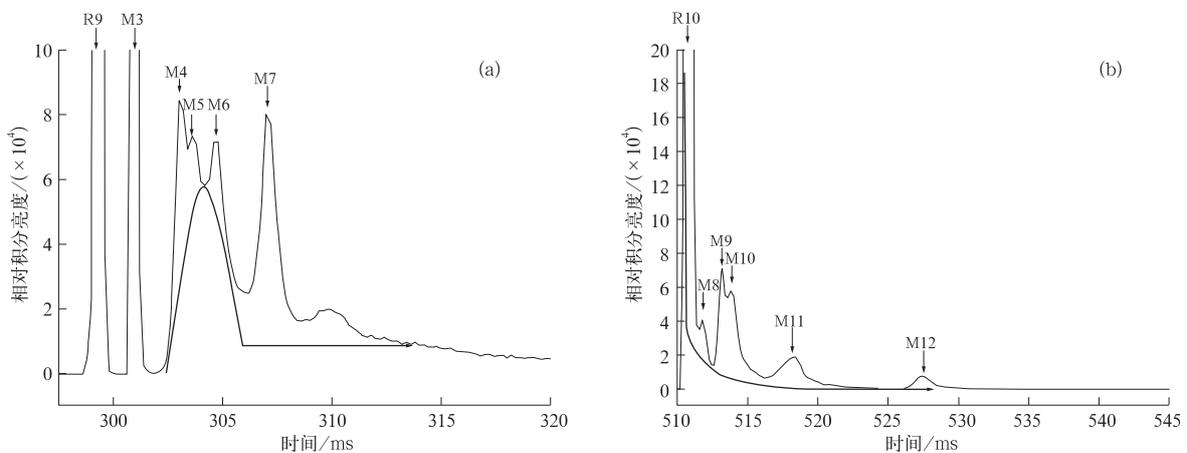


图8 第9次(a)和第10次(b)回击后长连续电流过程的亮度变化波形

Fig. 8 Waveshapes of long continuing current with M-components following the 9th (a) and the 10th (b) return stroke

表 2 此次自然闪电出现的 17 个 M 分量持续时间 (单位:ms)  
Table 2 Characteristics of M-components involved in the lightning (unit: ms)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$T_M$	0.8	0.6	0.8	1.2	1.6	1.6	1.8	0.8	1.0	2.6	4.0	2.0	1.0	1.4	1.4	0.8	1.2
$\Delta T_M$				2.0	0.6	1.4	2.0		1.4	0.6	4.6	9.0		1.2	1.6		1.4

分量的持续时间的算术平均值为 1.45 ms,几何平均值为 1.28 ms;相邻 M 分量之间时间间隔的算术平均值为 2.36 ms,几何平均值为 1.69 ms。根据 Thottappillil 等<sup>[16]</sup>和 Rakov 等<sup>[17]</sup>在 Florida 的观测,闪电的 M 分量的持续时间的几何平均值为 0.9 ms,M 分量之间的时间间隔的几何平均值为 2.1 ms。从几何平均值上比较,此次自然闪电 M 分量的持续时间偏大,时间间隔偏小。

#### 2.4 对一些问题的讨论

结合图 4 和图 6 可以看出,第 4 次回击之前出现的企图先导的传播速度随高度的降低其总趋势是减小的;第 13 次回击之前出现的直窜先导的传播速度随高度的降低其总趋势是增加的。但是在大约 0.9 km 到 1.4 km 高度上,第 4 次回击之前出现的企图先导和第 13 次回击之前出现的直窜先导的传播速度都出现了和总趋势不一致的变化,结合图 2 可以看出,两次先导在向地面传播的过程中恰好是经过 -0.6 ms 图像中云下方急剧发亮的区域时速度出现了异常。从 -0.6 ms 的图像上看可能在这一区域存在一个电荷区,首次回击之前的梯级先导经过这里时出现了一次大的电荷中和过程,但是之后几次回击之前出现的先导经过这一区域速度异常的具体原因则有待进一步的研究。

此次负地闪出现了长时间的连续电流过程。Krehbiel 等<sup>[18]</sup>认为产生连续电流过程要满足两个条件:①雷暴云中要有足够大的电荷量的积聚;②闪电通道要有良好的电流通过条件。张翠华等<sup>[19]</sup>对甘肃中川地区 103 次地闪和广东地区 98 次地闪的电场变化资料进行统计,发现连续电流的持续时间与其紧跟的回击和前一次回击之间的时间间隔呈反相关,短回击间的时间间隔则意味着长时间的连续电流过程。观测到的这次负地闪发生在广东从化地区,从表 1 中可以看出,这次闪电的回击间的时间间隔和连续电流时间长度上没有出现明显的反相关。但在回击前通道的截止时间和回击及其后的连

续电流的发光总量之间呈正相关,这可能是当回击之前闪电通道截止时间变大时,在这段时间内云内电荷不断积累,云中闪电通道继续延伸,当闪电通道再次导通时,从云中泻放到地面的电荷量则会增大,闪电通道的发光总量也会增大,详细的物理过程还有待于进一步的观测和理论分析。

### 3 小 结

通过以上的分析发现,观测到的此次多回击的自然闪电第 2 次、第 3 次和第 8 次回击相对积分亮度的峰值都大于首次回击相对积分亮度的峰值;首次回击之前出现的梯级先导的传播速度量级为  $10^6$  m/s;第 4 次回击之前出现的企图先导的传播速度随先导尖部高度的减小而减小,第 13 次回击之前直窜先导的传播速度随先导尖部高度的减小而增大;继后回击之前闪电通道的截止时间和此次回击及紧跟其后的连续电流过程的发光总量存在一致的变化趋势,但是不具有固定的比例关系;17 个 M 分量持续时间的几何平均为 1.28 ms,同一个连续电流过程中出现的相邻两 M 分量之间的时间间隔的几何平均为 1.69 ms。

由于观测条件的限制,对此次地闪发生时云内电荷变化的具体情况还不清楚,云内过程的很多发展情况还没有被了解,这些问题有待今后进一步观测数据积累。在今后的研究中,将继续关注多回击闪电过程中继后回击前通道的截止时间和继后回击及紧跟其后的连续电流过程的发光总量之间的相关性。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 陈渭民. 雷电学原理. 北京:气象出版社,2003:290-291.
- [3] Martin A Uman. The Lightning Discharge. Florida: Academic

- Press Inc, 1987;353-354.
- [4] Wang D, Takagi N, Watanabe T. Recent progress in the study of lightning propagation characteristics by using ALPS. *Journal of Atmospheric Electricity*, 2005, 25(2):69-77.
- [5] Morean J P, Alliot J C, Mazur V. Aircraft lightning initiation and interception from in situ electric measurements and fast video observations. *J Geophys Res*, 1992, 97: 15903-15912.
- [6] 王才伟,刘欣生,董万胜,等. 人工触发闪电通道的发光特征. 高原气象,1998,17(1):10-23.
- [7] 王才伟,刘欣生,董万胜,等. 正环境电场中闪电先导的始发和传播. 高原气象,1998,17(1):65-74.
- [8] 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.
- [9] 王道洪,郗秀书,郭昌明. 雷电与人工引雷. 上海:上海交通大学出版社,2000.
- [10] Qie X, Yu Y, Guo C, et al. Some features of stepped and dart-stepped leaders near the ground in natural negative cloud-to-ground lightning discharges. *Annales Geophysicae*, 2002, 20(6):863-870.
- [11] Rakov Vladimir A, Martin A Uman. *Lightning Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003:122-123.
- [12] Campos Leandro Z S, Marcelo M F Saba, Osmar Pinto Jr, et al. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observation. *Atmospheric Research*, 2006, doi:10.1016/j.atmosres.2006.09.002.
- [13] Ballarotti M G, Saba M M F, Pinto O Jr. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L23802, doi:10.1029/GL2005GL023889.
- [14] Rakov V A, Uman M A, Thottappillil R. Review of lightning properties from electric field and TV observation. *J Geophys Res*, 1994, 99: 10745-10750.
- [15] Fisher R J, Schnetzer G H, Thottappillil R, et al. Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama. *J Geophys Res*, 1993, 67: 637-647.
- [16] Thottappillil R, Rakov V A, Uman M A. K and M changes in close lightning ground lashes in Florida. *J Geophys Res*, 1990,95:18631-18640.
- [17] Rakov V A, Thottappillil R T, Uman M A. Electric field pulses in K and M changes of lightning ground flashes. *J Geophys Res*,1992, 97: 9953-9950.
- [18] Krehbiel P R, Brook M, McCrory R A. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground. *J Geophys Res*, 1979, 84: 2432-2456.
- [19] 张翠华,张义军,张广庶,等. 地闪连续电流特征的统计分析. 高原气象,2000,19(3):371-378.

## Observation of a Natural Cloud-to-ground Lightning with Multiple Return Strokes

Li Jun<sup>1)</sup> Zhang Yijun<sup>1)2)</sup> Lü Weitao<sup>1)</sup> Dong Wansheng<sup>1)</sup> Chen Shaodong<sup>1)3)</sup> Li Bin<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> (Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>3)</sup> (Guangdong Provincial Meteorological Bureau, Guangzhou 510080)

<sup>4)</sup> (Guangzhou Meteorological Bureau, Guangzhou 510080)

### Abstract

A field experiment on artificially rocket-triggered lightning and natural lightning observation is conducted in summer of 2006 in Conghua, Guangdong. The luminosity characteristics of lightning discharges are observed simultaneously by using a video camera and a Redlake MotionPro HS-4 high-speed camera which consists of a  $512 \times 512$  pin photodiode array module. A cloud-to-ground (CG) lightning with 13 return strokes (RS) is observed by using the high-speed camera with a frame rate of 5000 frames per second at 16:52:51 Aug 1, 2006. The distance from the high-speed camera to the flash is about 2.1 km. The record of the electric field on the surface of the earth shows that this CG lightning discharge transports the negative charge in cloud to the ground. All of the 13 strokes propagate along the same main channel and have one ground termination. The duration of this flash is 822.4 ms. The peak luminance of the 2nd, 3rd, and 8th return strokes are brighter than that of the first one, being 25% of all 12 subsequent return strokes. Of the 13 strokes, 6 (46%) present some luminosity persistence after the return stroke frame. The durations of 2 persistence luminosity are in excess of 40 ms (CC (continuing current) following 9th stroke: 157.6 ms; CC following 10th stroke: 221 ms). There are 17 M-components occurring during the 6 continuing current occurrences. The luminosity characteristics of 3 leaders are examined. The average speed of the stepped leader is  $2.23 \times 10^6$  m/s. It is a  $\beta$ -type leader according to the previous results which the stepped leader emerges from the cloud base and develops with a high average speed of the order of  $10^6$  m/s. The speed of the attempted leader before the 4th return stroke exhibits the decrease as it develops down toward the ground. The speed of the dart-stepped leader before the 13th return stroke appears to increase as it approaches the ground. Cut-off time is the time when the lightning channel shows no luminosity between two adjacent return strokes. In other words, it is the sum of the time from the frame that the previous return stroke and the CC followed disappears to the frame that the next return stroke is observed. Total luminosity is the sum of luminance of the frames including the return stroke and the CC followed. It is found that the cut-off time before a subsequent return stroke exhibits a consistent trend with the total luminosity of this subsequent return stroke and the CC followed (although there is no fixed proportionality between them), especially there is a proportionality relationship between them after the 9th return stroke. The geometric average of 17 M-components' lasting time is 1.28 ms, and that of 11 intervals between the consecutive M-components is 1.69 ms.

**Key words:** CG lightning; multi-return stroke; high-speed camera