

许伟群, 吕伟涛, 齐奇, 等. 一次触发闪电金属汽化通道的亮度与电流特征. 应用气象学报, 2023, 34(6): 739-748.
DOI: 10.11898/1001-7313.20230609

一次触发闪电金属汽化通道的亮度与电流特征

许伟群¹⁾ 吕伟涛^{1)*} 齐奇¹⁾ 樊艳峰¹⁾ 陈绿文²⁾
武斌¹⁾ 王雪娟³⁾ 马颖¹⁾ 夏登城⁴⁾

¹⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/中国气象局雷电重点开放实验室, 北京 100081)

²⁾(中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

³⁾(南京信息工程大学应急管理学院, 南京 210044)

⁴⁾(北京华创思源科技有限公司, 北京 100080)

摘 要

2022 年夏季在广州从化人工引雷试验场的一次触发闪电过程中, 获取了近距离的高分辨率图像、通道底部电流波形和高速摄像数据。此次触发闪电的高分辨率图像清晰展现了多回击过程金属汽化通道段的空间位移, 汽化通道在连续电流过程中呈现类似火焰的发光特征。结合高速摄像与通道底部电流数据, 研究回击与连续电流过程中金属汽化通道段亮度与电流强度的相关性, 结果表明: 相比于回击峰值电流, 其平方与回击峰值亮度的相关性更强, 相关系数分别为 0.940 和 0.955(均达到 0.001 显著性水平)。对于伴随长连续电流的回击过程, 回击下降部分与之后连续电流过程光电线性相关性拟合的斜率有明显差异。叠加在长连续电流过程上的多个 M 分量脉冲亮度峰值相对于电流峰值时间滞后, 较小的脉冲峰值电流对应较大的亮度峰值滞后时间。

关键词: 触发闪电; 金属汽化通道; 通道底部电流; 通道亮度; 相关性

引 言

通道电流是雷电放电的重要特征参量之一, 由于自然闪电发生的时空随机性, 自然闪电放电电流的直接测量较难实现, 而闪电放电通道的发光亮度则相对容易测量, 因此, 许多研究试图将闪电放电通道的发光亮度与放电电流联系起来, 通过研究它们之间的相关性探讨自然闪电的放电电流。如 Gomes 等^[1]在长火花放电实验中发现当电流幅度为 0.5~3.5 kA 时, 电流峰值与亮度峰值呈线性关系, 但当电流小于 0.5 kA 时, 两者之间的关系会偏离此线性关系。Amarasinghe 等^[2]发现当放电电流为 120~500 A 时, 火花放电主通道的亮度峰值与电流峰值存在线性关系。Diendorfer 等^[3]比较了几次高塔上行闪电的发光亮度与电流, 发现闪电通道亮

度在初始连续电流过程中与电流成正比。

人工触发闪电技术可实现雷击位置确定、发生时间在一定程度上可控^[4-8], 为研究地闪放电过程提供了便利条件。通过人工触发闪电不仅可以对放电电流进行直接测量, 还可以在近距离架设各种光学、电磁场设备对闪电进行观测^[9-15]。基于人工触发闪电光学和电流同步观测数据, 国内外学者对人工触发闪电通道底部电流与通道发光特征进行了一系列观测与分析。Idone 等^[16]对两次触发闪电中 39 次回击的分析发现峰值相对光强与峰值回击电流之间存在显著相关性。Wang 等^[17]发现只有在人工触发闪电回击的快速上升阶段, 电流与亮度呈线性关系, 一旦超过峰值, 线性关系消失。Zhou 等^[18]在对人工触发闪电 15 个初始连续电流脉冲以及 7 个回击的光电研究中发现, 峰值亮度与峰值电流的平方呈现较好线性相关, 而对于 16 个 M 分量, 峰值亮度与

2023-06-14 收到, 2023-09-17 收到再改稿。

资助项目: 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2021Z011, 2023Z008), 广东省自然科学基金项目(2022A1515010320)

* 通信作者, 邮箱: wtlyu@cma.gov.cn

峰值电流大致成正比。Carvalho 等^[19]发现在人工触发闪电回击和 M 分量两个过程中通道底部峰值亮度与峰值电流平方近似成正比。

因此,目前对自然闪电和人工触发闪电放电过程的光电相关性研究结果还不一致,即使同一闪电不同的放电过程光电相关性也不同,有必要对闪电放电过程的光电相关性进行深入细致研究。

人工触发闪电通道可分为金属导线汽化通道与空气离化通道^[20-22](分别简称为汽化通道与离化通道),二者的发光展现不同特征。汽化通道来自数百米的金属导线的燃烧汽化,汽化产生的通道成为随后的回击路径。汽化通道与离化通道的差异主要是汽化通道内金属粒子的存在^[23]。王才伟等^[20]利用高速数字化摄像系统,近距离对人工触发闪电汽化通道的发光特征进行观测与研究,发现离化通道和汽化通道的发光行为差别很大,在绝大多数时间中,汽化通道的亮度大于离化通道,且汽化通道的发光持续时间更长。Pilkey 等^[24]利用静态相机的长曝光记录了 2012 年一次人工触发闪电的金属铜丝汽化通道,发现汽化通道在闪电的不同过程中的发光特征差异明显,尤其是在初始连续电流及后续回击之后的长连续电流阶段,通道呈绿色发光。张华明等^[25]利用无狭缝光谱仪观测人工触发闪电波长范围为 400~700 nm 的光谱,比较闪电通道汽化通道与离化通道的差异,发现汽化通道的发射谱线中存在激发能较高的谱线,具有强闪电通道发射光谱的谱线结构,离化通道则具有弱闪电通道的谱线结构;回击电流对汽化通道的再加热使通道等离子体温度和电子密度进一步提高,从而使激发能较高的谱线被充分激发,导致汽化通道与离化通道呈现两种不同的光谱结构。

目前对人工触发闪电汽化通道部分特征的报道较为有限,而距离地面最近的汽化通道的亮度变化特征与通道底部电流变化特征相关紧密,本文基于 2022 年广州从化人工触发闪电试验,探讨触发闪电通道底部电流以及金属汽化通道发光亮度的特征参数及相关性。

1 人工触发闪电试验与观测

2022 年 6—9 月中国气象科学研究院在广州从化人工引雷试验场开展人工触发闪电试验,架设的一系列观测系统包括高速摄像系统、快/慢天线系

统、磁天线系统及同轴分流器电流测量系统。触发闪电引流杆和光学观测点位置如图 1 所示。

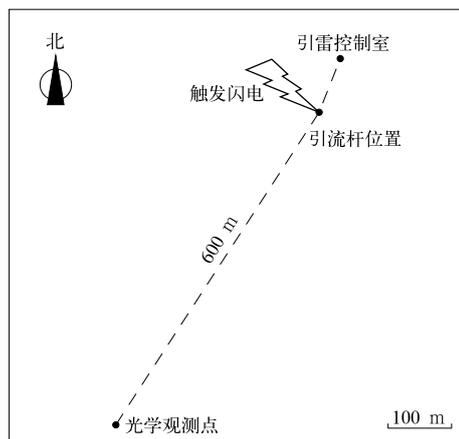


图 1 引流杆与光学观测点位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the location of lightning rod and optical observation site

电流测量系统以同轴分流器为探头,与引雷平台的引流杆相连。触发闪电电流通过同轴分流器后的输出电压信号经过电光转换器转化为光信号,通过光纤传输至引雷控制室;再经过光电转换器重新转化为电压信号,通过 Yokogama DL850 示波记录仪以 10 MHz 的采样率进行记录。除此之外,在试验场引雷控制室还架设了高分型闪电通道成像仪(LCI-HD),引雷控制室距离引雷位置约 90 m。LCI-HD 像元数为 6000×4000 ,像元尺寸为 $3.9 \mu\text{m} \times 3.9 \mu\text{m}$,镜头焦距为 35 mm,计算得到每个像元在闪电通道位置处对应的空间分辨率大约为 10 cm。本研究中高速摄像机架设在距离引雷平台约 600 m 的光学观测点,观测时设置帧率为每秒 20000 帧,记录时长为 1.2 s,像元数为 512×256 ,像元尺寸为 $17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$,镜头焦距为 5 mm,每个像元在闪电通道位置处对应的空间分辨率大约为 2 m。

2 闪电通道光学和电流数据处理

本次人工触发闪电于 2022 年 7 月 7 日 15:59 (北京时,下同)成功触发,编号为 T2211,整个过程共发生 15 次回击,分别命名为 R1~R15。高速摄像记录了前 13 次回击,电流测量系统完整记录了 15 次回击。

2.1 高速摄像数据

为了消除摄像系统本底平均噪声以及观测时的

背景噪声(假定背景亮度恒定),首先对高速摄像图像进行去噪处理:将触发闪电起始前的 6000 帧高速摄像图片进行平均,得到平均背景图像,再对所有高速摄像图像去除该平均背景噪声。降噪后的图像在 220 m 高度处的灰度值水平分布如图 2 所示,它具有良好的对称分布。由于在许多情况下,闪电通道中心亮度达到饱和值,因此,为了分析汽化通道亮度的特征及其变化^[2-3,26],本文综合考虑了通道及其附近

像元的灰度值,定义某一行像元的行相对积分亮度为灰度峰值沿两边下降到半峰值之间各像元灰度值之和,某高度范围内的相对积分亮度的定义为范围内各行像元的行相对积分亮度的平均值。文中给出的每帧相对积分亮度均为高速摄像图像中对应 126 ~ 220 m 高度的像元范围内的相对积分亮度。定义高速摄像数据第 1 次回击图像帧的曝光开始时间为 0 时刻。

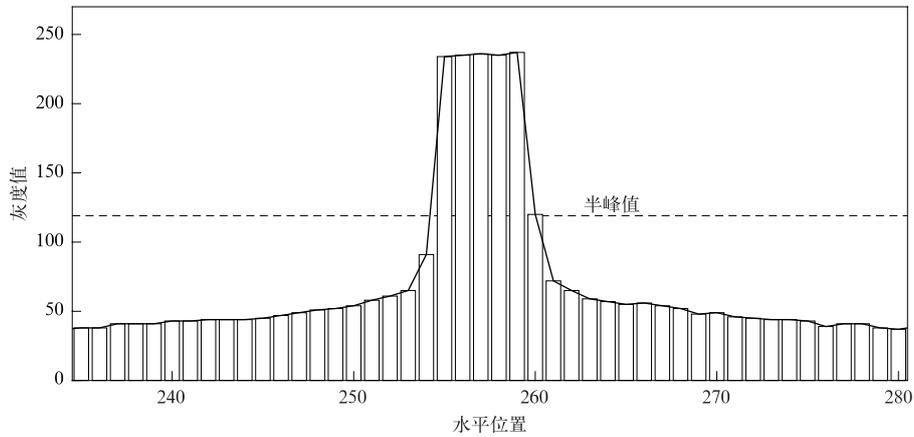


图 2 闪电 T2211 金属汽化通道在 220 m 高度处的灰度值水平分布

Fig. 2 Horizontal distribution of flash T2211 metal-vaporized channel gray values at 220 m height

2.2 通道底部电流

通道底部电流测量系统由两个不同灵敏度的电流测量通道组成,其中灵敏度较高的小量程电流测量通道的饱和值约为 2 kA,灵敏度较低的大量程电流测量通道的饱和值约为 50 kA。对于本文所涉及的通道底部电流,定义向下移动的负电荷或向上移动的正电荷为正电流。为了在相同的时间分辨率下分析亮度与电流的相关性,将原始测量电流进行分段平均处理,每段连续取 500 个电流采样点,分段积

分并取平均值,作为该段中间时刻的电流值,分段平均后的电流与高速摄像数据时间分辨率相同。图 3 分别为第 1 次回击的相对积分亮度变化与分段平均前后的电流。由图 3 可以看到,对于分段平均后的电流波形,通道电流中的快变化信息(如回击峰值部分)有一定损失,但能更好地反映通道电流中的慢变化(如 M 分量),且分段平均处理能够消除电流测量系统的随机噪声^[26]。

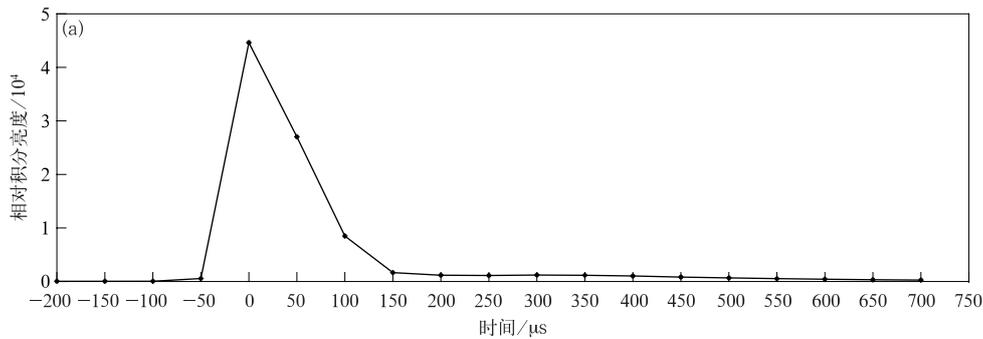
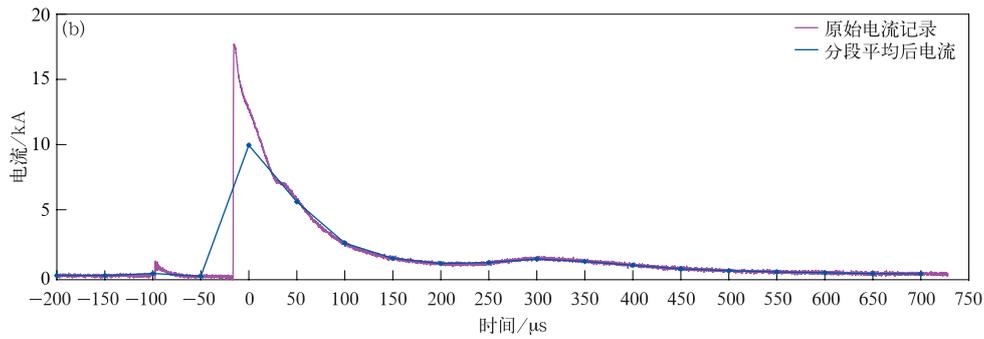


图 3 闪电 T2211 第 1 次回击过程的相对积分亮度(a)与电流变化(b)

Fig. 3 Relative integrated luminosity(a) and current(b) of the first return stroke of flash T2211



续图 3

3 通道电流与亮度特征

图 4 为由高速摄像获得的亮度变化数据以及两种不同灵敏度的底部电流数据,各回击序号标注见图 5。从图 4b 的小量程电流记录能够清晰辨认闪电初始阶段与在回击 R13, R14 之后的长连续电流 (分别命名为 R13-CC 与 R14-CC)。闪电初始阶段

由触发导线顶端始发的上行正先导与初始连续电流两个过程组成。此次人工触发闪电的闪电初始阶段持续时间约为 330 ms,其中未观测到明显的初始连续电流脉冲存在。Wang 等^[27]曾报道大多数触发闪电的闪电初始阶段都包含至少 1 个初始连续电流脉冲。R13-CC 持续时间约为 136 ms, R14-CC 持续时间约为 53 ms,在这两个长连续电流中叠加了多个 M 分量,估算得到回击 R13 转移至地面的电荷量约

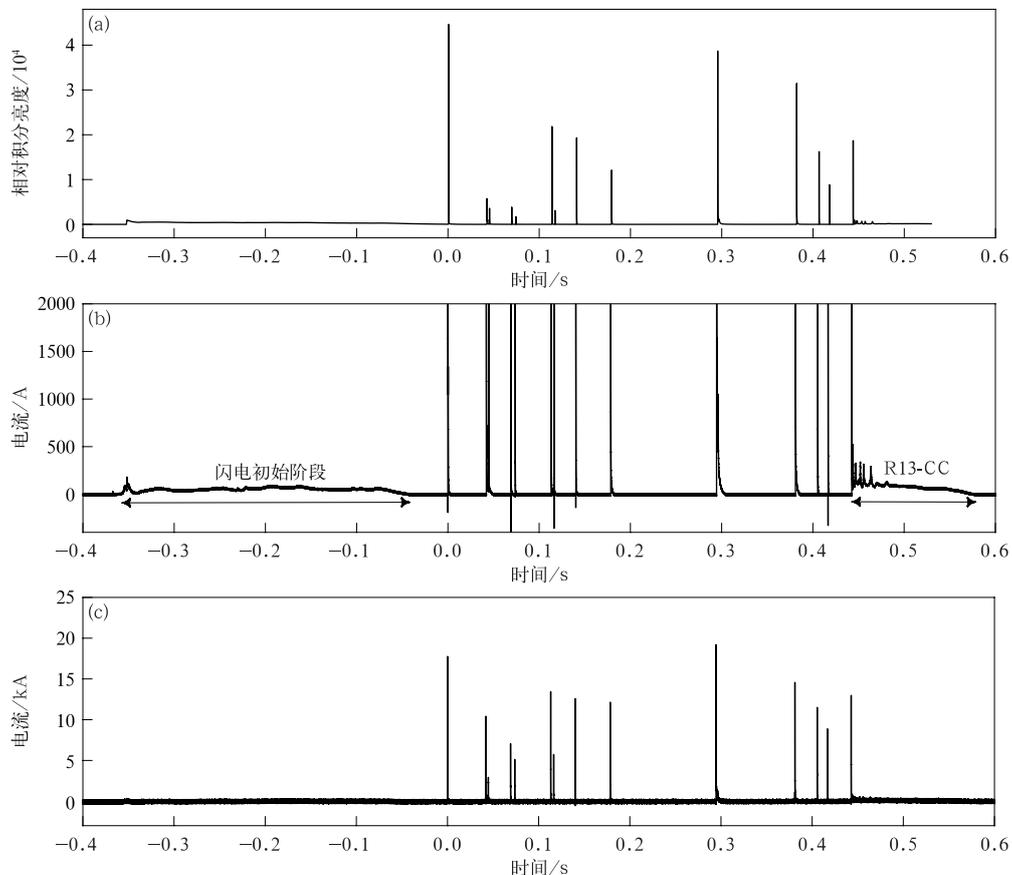


图 4 闪电 T2211 的亮度与电流同步观测 (a) 相对积分亮度, (b) 小量程测量电流, (c) 大量程测量电流
Fig. 4 Simultaneously measured luminosity and current of flash T2211 (a) relative integrated luminosity, (b) small-range measured current, (c) large-range measured current

为 10.7 C, 平均电流约为 78.53 A。回击 R14 的转移电荷量约为 4 C, 平均电流为 76.74 A。在 15 次回击中, 最大回击峰值电流为 19.1 kA, 最小回击峰值电流为 5.1 kA。15 次回击电流峰值的算术平均值为 11.5 kA。由较缓慢的电流上升速度可知, R2 发生后出现的小电流峰是 M 分量而不是回击。回击 R3, R5 和 R11 发生后, 分别有 1 次间隔时间非常短的回击 R4, R6 和 R12 发生, R3 与 R4 间隔时间约为 3.9 ms, R5 与 R6 间隔时间约为 3 ms, R11 与 R12 间隔时间约为 10.8 ms。

图 5 是 LCI-HD 获得的本次触发闪电的高分辨率图像(曝光时长为 1 s)。风造成闪电通道的水平移动, 长曝光使这种水平移动在静态图像中得以呈现。由于回击 R3 与 R4, R5 与 R6, 以及 R11 与 R12 间隔时间过短, 这些回击在图 5 中两两重叠, 无法单独展示。图 5 最左端的发光来自金属钢丝的汽化分解, 发生在上行先导上升期间。由图 5 可知, 在汽化通道从左至右的移动过程中, 对应闪电不同放电阶段的通道发光特征与形态特征均发生明显变化。由局部放大图可以看到, 每个回击对应的通道亮度较大, 在长曝光中基本均达到饱和亮度值, 而回击 R13

之后的长连续电流阶段对应的通道发光则相对较弱, 且无清晰的通道轮廓, 在长曝光图像中呈现出类似火焰的发光特征。

触发闪电金属汽化通道在连续电流阶段的长曝光图像中展现特殊发光特征, Pilkey 等^[24]和 Dayeh 等^[28]也曾记录到。

图 5 中由风引起汽化通道的水平移动, 并在初始连续电流与回击后的长连续电流过程中观察到类似的火焰特征。在初始连续电流阶段, 汽化通道的主要辐射成分来自金属光谱^[22-23], 且辐射亮度随电流变化波动。由于金属原子以及各电离态的金属离子的电离能远低于同水平的氮和氧的电离能, 因此在电流强度较小的初始连续电流过程中, 与离化通道相比, 汽化通道中更多的金属粒子被激发, 产生更多的光谱辐射。由于在长连续电流过程中叠加多个 M 分量的特性与初始连续电流相似^[27], 辐射也主要来自通道中残留的电离能较低的金属粒子激发, 其相对稳定、持续的辐射使得汽化通道在长曝光图像中呈现类似火焰的发光特征。汽化通道的辐射成分、辐射波长以及辐射强度的变化造成不同放电过程中发光特征的变化。

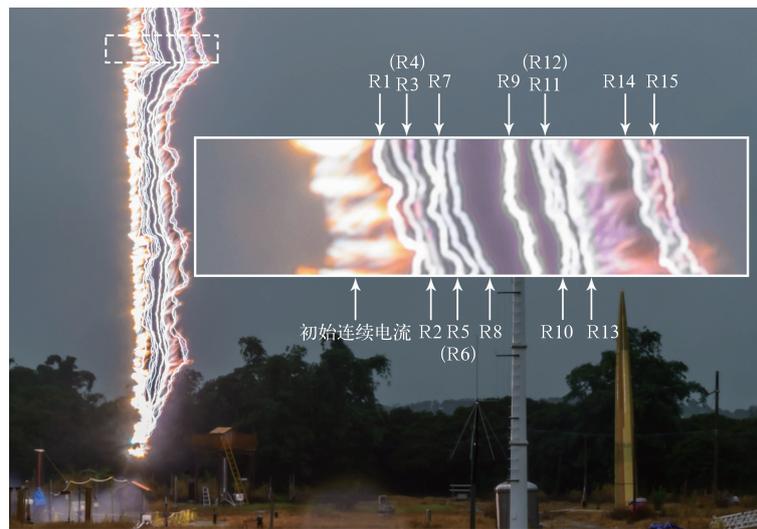


图 5 闪电 T2211 金属汽化通道静态图像(曝光时长为 1 s)
Fig. 5 Still image of the metal-vaporized channel of flash T2211
(the exposure time is 1 s)

3.1 回击阶段通道亮度与电流的相关性

触发闪电发生时, 汽化通道中含有大量被电离的金属离子, 而闪电的空气通道被电离的成分主要为氮和氧。电离过程中, 原子与离子的部分电子被激发到更高能级, 并在跃迁回基态时释放出光子。由于不同激发能级的原子和离子对应不同的辐射谱

线, 因此通道的发光谱线强度与电流特征间存在相关性。

图 6 为回击 R1 与回击 R3 在下降阶段的亮度与电流变化。由图 6 可知, 回击 R1 的通道亮度随电流下降而衰减的速度较为缓慢, 且当电流下降至零时, 通道仍明显保持一定亮度; 回击 R3 的通道亮

度随着电流下降而迅速降低,当电流下降至零时,通道亮度降低至较低水平。其他回击的情况与回击R3类似。这可能是由于在第1次回击发生之后,汽化通道内仍存在较多电离能较低的金属粒子,其复合反应的时间较长^[22],因此通道的发光持续时间也较长,当电流下降至零时通道仍持续发光。随后金属粒子消散减少,后续回击的通道发光持续时间也减少。

Zhou等^[18]在对触发闪电7个回击的光电研究

发现,峰值亮度与峰值电流的平方呈线性相关。Carvalho等^[19]发现人工触发闪电回击通道底部峰值亮度与峰值电流的平方近似成正比。Quick等^[29]对触发闪电通道的光辐射进行了包括紫外、可见光与近红外以及长波红外波长的宽带辐射测量,发现其中可见光与近红外波长辐射峰值与电流峰值的平方成正比。

图7为此次人工触发闪电前13个回击脉冲的峰值电流以及峰值电流的平方分别与汽化通道的峰

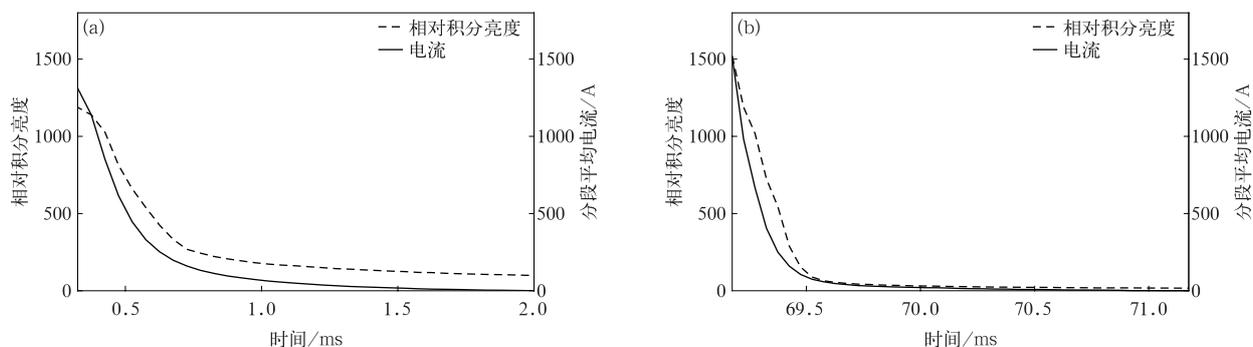


图6 回击R1(a)与回击R3(b)下降阶段的亮度与电流变化

Fig. 6 Luminosity and current variation during decay phase for return stroke R1(a) and return stroke R3(b)

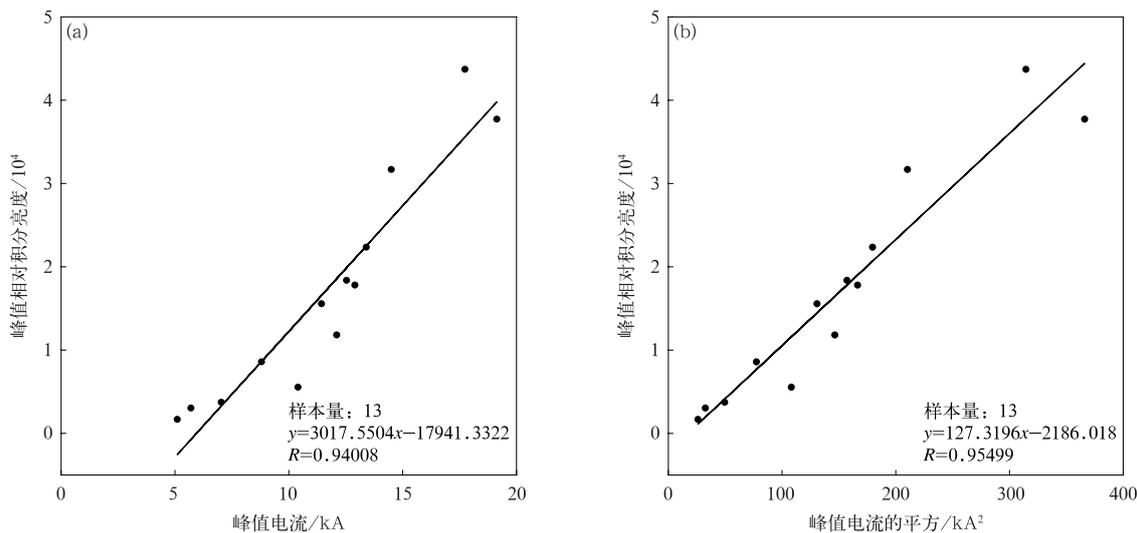


图7 回击峰值电流(a)及回击峰值电流平方(b)与峰值相对积分亮度散点图

Fig. 7 Scatter plots of peak current(a) and square of peak current(b) versus peak relative integrated luminosity for return strokes

值亮度散点图,图7中电流数据为大量程原始电流数据。由图7可知,与峰值电流相比,峰值电流的平方与汽化通道峰值亮度的相关性更强,相关系数分别为0.940和0.955(均达到0.001显著性水平),与文献^[18-19,29]报道的结论一致。

3.2 长连续电流亮度与电流的相关性

图8a为回击R13后长连续电流过程叠加的8个M分量的亮度及电流变化,其中电流记录为灵敏度较高的小量程测量电流。图8b为其分段平均电流与相对积分亮度的散点图。由图8可知,回击与

连续电流过程的电流与亮度皆表现出良好的线性关系,相关系数分别为 0.988 与 0.981(均达到 0.001 显著性水平),但它们的拟合直线斜率相差较大。

Zhou 等^[18]对 16 个 M 分量的光电相关分析发现,M 分量脉冲的峰值亮度与峰值电流大致成正比。

图 9 为 R13-CC 叠加 8 个 M 分量对应的峰值电

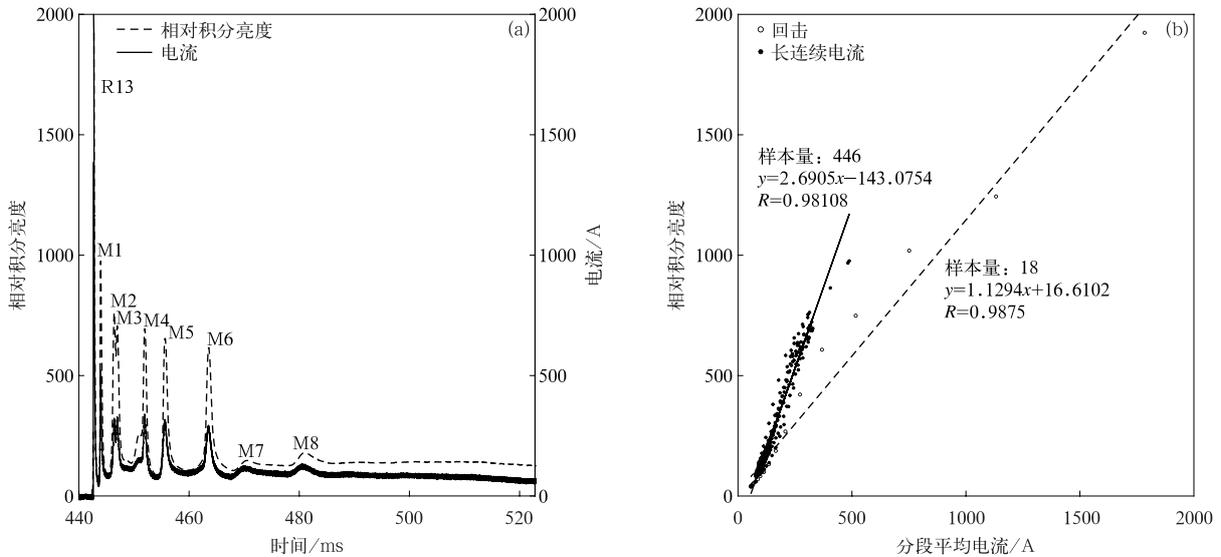


图 8 回击 R13 与连续电流过程的亮度与电流变化(a)及其散点图(b)

Fig. 8 Luminosity and current variation for return stroke R13 and its continuing current(a) with scatter plot(b)

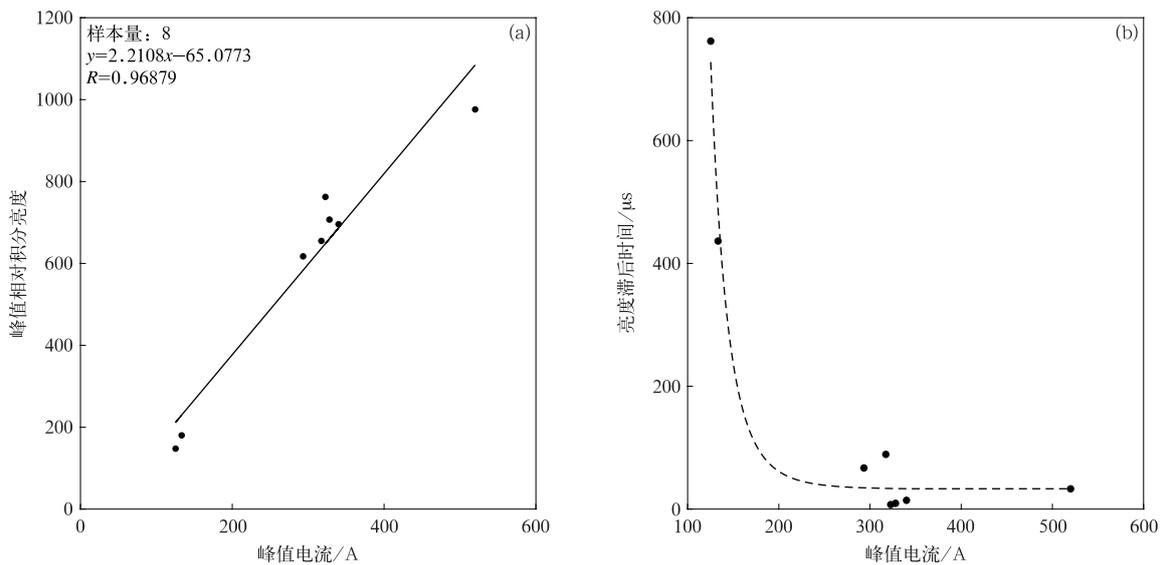


图 9 回击 R13-CC 中叠加的 M 分量脉冲峰值电流与峰值亮度(a)及峰值亮度滞后时间(b)散点图

Fig. 9 Scatter plots of peak current versus peak luminosity(a) and delay time of peak luminosity(b) for M components superimposed on R13-CC

流与峰值亮度的散点图及线性拟合。由图 9 可知, M 分量脉冲的峰值电流与峰值亮度呈现良好的相关性。这与文献[18]报道的结果一致。

分析发现对于上升速度较慢且电流强度较小的 M 分量脉冲,各脉冲的亮度峰值相对电流峰值存在

时间滞后。图 9b 为回击 R13 之后各 M 分量脉冲亮度峰值相对电流峰值的滞后时间与电流强度的关系,可以看到亮度峰值滞后时间与电流强度之间呈负相关。对于两个峰值电流小于 150 A 的 M 分量,亮度峰值时间相对电流峰值时间呈现明显滞后现

象;当峰值电流强度较大时,亮度峰值相对电流峰值的滞后时间较小。Zhou 等^[18]对 15 个初始连续电流脉冲以及 16 个 M 分量的光电同步观测分析发现,峰值亮度明显滞后于对应的峰值电流,且对于所有初始连续电流脉冲以及 M 分量脉冲均存在同样的时间滞后现象,对于不同的脉冲峰值电流,滞后时间不同,具有较小峰值的电流通常对应较大的滞后时间。Carvalho 等^[19]对 8 次触发闪电的 22 个回击的光电同步观测也发现了类似的时间滞后现象,同时发现亮度的滞后时间随着电流上升时间的增加而增加,但滞后时间似乎不依赖于电流峰值。

Liang 等^[30]对回击通道等离子体的数值模拟发现,由于电流波随高度的色散与衰减,焦耳加热功率也随高度减小,较小的加热速率意味着需要更长时间达到高温,因此通道的光辐射相对电流滞后。数值模拟分析还发现,随着初始温度降低,光辐射相对于底部电流的滞后时间增加。该工作模拟的是时间尺度为微秒的回击快速变化过程中的亮度相对电流的时间延迟现象,在该时间尺度下,热辐射是能量损失的主要机制,气体膨胀与热传导引起的能量损失可以忽略^[31-33]。然而对于变化较缓慢、电流较小的连续电流过程,通道发光亮度相对电流的延迟现象可能与通道气体和周围气体的热传导交换有关,随着等离子体中的原子、离子逐渐停止发射,热传导逐渐占主导。这两种不同的通道冷却机制可能导致通道温度相对电流呈现的关系不同,进而引起亮度相对电流的关系不同。对于初始连续电流和回击后连续电流过程的亮度相对电流的时间滞后成因还需更多观测与模拟分析。

4 结论与讨论

本文基于 2022 年 7 月广州从化人工触发闪电的通道底部电流以及金属汽化通道近距离光学数据,研究触发闪电回击和长连续电流过程的电流与发光亮度特征及其相关性,结果表明:

1) 触发闪电汽化通道在整个放电过程的发光特征变化明显,回击对应的汽化通道亮度达到饱和值,而初始连续电流和两次回击后的长连续电流阶段汽化通道发光相对较弱,在高分辨率长曝光图像中呈现类似火焰的发光特征。

2) 与其他回击相比,第 1 次回击的通道亮度随时间变化较为缓慢,当电流下降至零时,通道仍保持一定亮度;在回击峰值阶段,相比于回击峰值电流,

其平方与回击峰值亮度的相关性更强,相关系数分别为 0.940 和 0.955(均达到 0.001 显著性水平)。

3) 对于伴随长连续电流的回击过程,在回击电流下降过程(低于 2 KA)及其连续电流过程,通道电流与亮度均呈良好线性相关性,但回击下降部分与之后连续电流过程光电线性相关性拟合的斜率差异明显。

4) 对于长连续电流过程叠加的 M 分量脉冲,亮度峰值相对电流峰值存在不同的滞后时间,亮度峰值滞后时间与电流强度间呈负相关。对于两个峰值电流小于 150 A 的 M 分量,亮度峰值相对电流峰值呈现明显的时间滞后现象;当峰值电流强度较大时,亮度峰值相对电流峰值的滞后时间较小。

对于这次触发闪电过程,由于云层遮挡,无法获得空气离化通道的准确亮度信息,仅分析了金属汽化通道的亮度变化特征,未与空气离化通道的亮度变化特征展开对比分析;另外,高速摄像系统尚不能满足微秒量级通道底部电流分析的采样要求,特别是针对回击过程的电流快速变化。在后续的研究中,将架设具有微秒时间分辨率、长记录时间的光学仪器,获取金属汽化通道与空气离化通道完整的高时间分辨率亮度变化数据,深入探讨两种通道发光特征的差异及其成因。

参考文献

- [1] Gomes C, Cooray V. Correlation between the optical signatures and current wave forms of long sparks: Applications in lightning research. *J Electrostat*, 1998, 43(4): 267-274.
- [2] Amarasinghe D, Sonnadara U, Berg M, et al. Correlation between brightness and channel currents of electrical discharges. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2007, 14(5): 1154-1160.
- [3] Diendorfer G, Mair M, Schulz W. Detailed Brightness Versus Lightning Current Amplitude Correlation of Flashes to the Gaisberg Tower. 26th International Conference on Lightning Protection, Cracow, Poland, 2002.
- [4] 张义军, 杨少杰, 吕伟涛, 等. 2006—2011 年广州人工触发闪电观测试验和应用. *应用气象学报*, 2012, 23(5): 513-522. Zhang Y J, Yang S J, Lü W T, et al. Comprehensive observation experiments and application study of artificially triggered lightning during 2006—2011. *J Appl Meteor Sci*, 2012, 23(5): 513-522.
- [5] 马瑞阳, 郑栋, 姚雯, 等. 雷暴云特征数据集及我国雷暴活动特征. *应用气象学报*, 2021, 32(3): 358-369. Ma R Y, Zheng D, Yao W, et al. Thunderstorm feature dataset and characteristics of thunderstorm activities in China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 358-369.
- [6] 闫琳城, 张文娟, 张义军, 等. 南海雷暴大风时空分布及闪电和

- 对流活动特征. *应用气象学报*, 2023, 34(4): 503-512.
- Yan L C, Zhang W J, Zhang Y J, et al. Temporal and spatial distribution of thunderstorms and strong winds with characteristics of lightning and convective activities in the South China Sea. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(4): 503-512.
- [7] 吴啸天, 王晓妍, 郑栋, 等. 不同类型气溶胶对长三角地区闪电活动影响. *应用气象学报*, 2023, 34(5): 608-618.
- Wu X T, Wang X Y, Zheng D, et al. Effects of different aerosols on cloud-to-ground lightning activity in the Yangtze River Delta. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 608-618.
- [8] 关雨依, 吕伟涛, 齐奇, 等. 一次上行闪电中先导二维和三维发展特征的差异. *应用气象学报*, 2023, 34(5): 598-607.
- Guan Y N, Lü W T, Qi Q, et al. Difference between 2D and 3D development characteristics of an upward lightning leader. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 598-607.
- [9] 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. *气象学报*, 2016, 74(5): 655-671.
- Zhang Y J, Lv W T, Chen S D, et al. A review of lightning observation experiments during the last ten years in Guangdong. *Acta Meteor Sinica*, 2016, 74(5): 655-671.
- [10] 肖桐, 张阳, 吕伟涛, 等. 人工触发闪电 M 分量的电流与电磁场特征. *应用气象学报*, 2013, 24(4): 446-454.
- Xiao T, Zhang Y, Lü W T, et al. Current and electromagnetic field of M component in triggered lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2013, 24(4): 446-454.
- [11] 钱勇, 张阳, 张义军, 等. 人工触发闪电先驱电流脉冲波形特征及模拟. *应用气象学报*, 2016, 27(6): 716-724.
- Qian Y, Zhang Y, Zhang Y J, et al. Characteristics and simulation of artificially triggered lightning precursor current pulse. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(6): 716-724.
- [12] 王敬轩, 张阳, 陈泽方, 等. 人工触发闪电不同放电阶段电流特征关系. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 224-235.
- Wang J X, Zhang Y, Chen Z F, et al. Relationship between current characteristics of rocket-triggered lightning during different discharge stages. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 224-235.
- [13] 樊艳峰, 陆高鹏, 张阳, 等. 人工触发闪电初始连续电流的中低频磁场特征. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 213-223.
- Fan Y F, Lu G P, Zhang Y, et al. Characteristics of medium-low frequency magnetic fields of initial continuous current in rocket-triggered lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 213-223.
- [14] 张阳, 陈泽方, 王敬轩, 等. 一次多回击触发闪电全过程的连续干涉仪观测. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 197-212.
- Zhang Y, Chen Z F, Wang J X, et al. Observation of the whole discharge process during a multi-stroke triggered lightning by continuous interferometer. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 197-212.
- [15] 张悦, 吕伟涛, 陈绿文, 等. 基于人工引雷的粤港澳闪电定位系统性能评估. *应用气象学报*, 2022, 33(3): 329-340.
- Zhang Y, Lü W T, Chen L W, et al. Evaluation of GHMLLS performance characteristics based on observations of artificially triggered lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(3): 329-340.
- [16] Idone V P, Orville R E. Correlated peak relative light intensity and peak current in triggered lightning subsequent return strokes. *J Geophys Res Atmos*, 1985, 90(D4): 6159-6164.
- [17] Wang D, Takagi N, Watanabe T, et al. A comparison of channel-base currents and optical signals for rocket-triggered lightning strokes. *Atmos Res*, 2005, 76(1/2/3/4): 412-422.
- [18] Zhou M, Wang D, Wang J, et al. Correlation between the channel-bottom light intensity and channel-base current of a rocket-triggered lightning flash. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119(23): 13457-13473.
- [19] Carvalho F L, Uman M A, Jordan D M, et al. Lightning current and luminosity at and above channel bottom for return strokes and M-components. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120(20): 10645-10663.
- [20] 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.
- Wang C W, Liu X S, Dong W S, et al. The characteristics of the channel luminosity of triggered lightning flashes. *Plateau Meteor*, 1998, 17(1): 10-23.
- [21] 吕伟涛, 张义军, 周秀骥, 等. 火箭触发闪电通道的亮度特征分析. *气象学报*, 2007, 65(6): 983-993.
- Lu W T, Zhang Y J, Zhou X J, et al. Analysis of channel luminosity characteristics in rocket-triggered lightning. *Acta Meteor Sinica*, 2007, 65(6): 983-993.
- [22] Zhang H M, Zhang Y J, Lyu W T, et al. Analysis of the spectral characteristics of triggered lightning. *Adv Atmos Sci*, 2019, 36(11): 1265-1272.
- [23] Walker T D, Christian H J. Triggered lightning spectroscopy: Part 1. A qualitative analysis. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(15): 8000-8011.
- [24] Pilkey J T, Uman M A, Hill J D, et al. Rocket-and-wire triggered lightning in 2012 tropical storm Debby in the absence of natural lightning. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118(23): 13158-13174.
- [25] 张华明, 张义军, 吕伟涛, 等. 一次人工触发闪电通道光谱结构分析. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(6): 1692-1695.
- Zhang H M, Zhang Y J, Lü W T, et al. The spectra structure characteristic of triggered lightning channel. *Spectrosc Spectr Anal*, 2017, 37(6): 1692-1695.
- [26] Zhou E W, Lu W T, Zhang Y, et al. Correlation analysis between the channel current and luminosity of initial continuous and continuing current processes in an artificially triggered lightning flash. *Atmos Res*, 2013, 129/130: 79-89.
- [27] Wang D, Rakov V A, Uman M A, et al. Characterization of the initial stage of negative rocket-triggered lightning. *J Geophys Res Atmos*, 1999, 104(D4): 4213-4222.
- [28] Dayeh M A, Evans N D, Fuselier S A, et al. First images of thunder: Acoustic imaging of triggered lightning. *Geophys Res Lett*, 2015, 42(14): 6051-6057.
- [29] Quick M G, Krider E P. Optical power and energy radiated by natural lightning. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118(4): 1868-1879.

- [30] Liang C, Carlson B, Lehtinen N, et al. Differing current and optical return stroke speeds in lightning. *Geophys Res Lett*, 2014, 41(7):2561-2567.
- [31] Uman M A. Determination of lightning temperature. *J Geophys Res*, 1969, 74(4):949-957.
- [32] Walker T D, Christian H J. Triggered lightning spectroscopy: 2. A quantitative analysis. *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124(7):3930-3942.
- [33] da Silva C L, Sonnenfeld R G, Edens H E, et al. The plasma nature of lightning channels and the resulting nonlinear resistance. *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124(16):9442-9463.

Luminosity and Current Characteristics of Metal-vaporized Channel of an Artificially Triggered Lightning

Xu Weiqun¹⁾ Lü Weitao¹⁾ Qi Qi¹⁾ Fan Yanfeng¹⁾ Chen Lüwen²⁾
Wu Bin¹⁾ Wang Xuejuan³⁾ Ma Ying¹⁾ Xia Dengcheng⁴⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather & CMA Key Laboratory of Lightning, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080)

³⁾ (Emergency Management College, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

⁴⁾ (Beijing Artswan Tech Co., Ltd., Beijing 100080)

Abstract

Channel current is an important parameter of the lightning discharge, but it's difficult to be directly measured due to the randomness and instantaneity of the natural lightning. The channel luminosity, however, is relatively easier to obtain. If there is a definite relationship between channel current and luminosity, the channel current can be estimated based on its luminosity. The correlation between the current and luminosity of lightning channel can be obtained through artificially triggered lightning experiments, during which the channel current can be directly measured and close-range optical observations of the lightning channel can be carried out.

Base on observations of an artificially triggered lightning obtained at the Field Experiment Base on Lightning Sciences, China Meteorological Administration (CMA_FEBS) in 2022, characteristic parameters of the channel-base current, the luminosity of the metal-vaporized channel, and their correlation are analyzed. The spatial movement of the metal-vaporized channel during the multiple return stroke processes is distinguished using still image with high spatial resolution. Combined with the high-speed video camera images and the channel current data, the correlation between the luminosity of the metal-vaporized channel and the channel current in the process of return strokes, and M components are studied. The results show that compared with the peak current, its squared value has stronger correlation with the peak luminosity for 13 return strokes. For the return stroke followed by a long continuing current, as well as the return stroke decay stage, both the current and M components superimposed on it show good linear correlations with the channel luminosity, with correlation coefficients of 0.981 and 0.988, respectively. However, the slope values of correlation fitting lines for the channel current versus the channel luminosity of the return stroke decay stage and the subsequent continuing current are obviously different. For M components superimposed on the long continuing current, a time delay for the peak luminosity relative to the peak current is revealed, and it is found that a smaller pulse peak current corresponds to a larger delay time.

Key words: triggered lightning; metal-vaporized channel; channel-base current; channel luminosity; correlation