

青藏高原东北部闪电 M 变化多参量观测*武斌^{1)2)†} 张广庶¹⁾ 王彦辉¹⁾ 李亚珺¹⁾ 范祥鹏¹⁾ 余海¹⁾ 张荣¹⁾

1) (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000)

2) (贵州省防雷减灾中心, 贵阳 550002)

(2013年4月3日收到; 2013年6月18日收到修改稿)

利用闪电光通道高速摄像、地面电场变化和峰值辐射强度同步资料, 对比分析了负地闪连续电流阶段和人工触发闪电放电过程中 M 变化特征. 结果表明, 通道亮度资料能够辅助地面电场波形来准确判断是否为真实的 M 过程. 在经典 M 变化产生前及其过程中会产生很多快速电场变化 MP (称为预 M 变化) 变化, 大量 MP 促成了 M 变化. MP 变化和 K 变化在脉冲特征上没有太多差别, 产生的物理机制是相似的. MP 变化是连续电流阶段快速电场变化, 是击穿过程引起的电荷快速流动的结果, 并伴有通道突然增亮和高强度辐射. M 变化脉冲波形多数为单极性, 有正有负, 少数呈现不规则变化, 持续时间在 0.1 ms 之内. 而经典 M 变化的 U 形结构只适用于近闪, 波形是静电场所致, 持续时间约 0.2—0.8 ms. MP 和 K 变化都是击穿所致, 只是 MP 变化有电荷流入原回击通道, 而 K 变化没有.

关键词: 青藏高原, M 变化, MP 变化, K 变化

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta, 91.60.Mk

DOI: 10.7498/aps.62.189202

1 引言

闪电是大气中发生的瞬态剧烈放电现象, 利用多种探测仪器同步观测来分析闪电的电学和光学特征^[1-6] 已经成为研究闪电放电过程的重点. 闪电回击后连续电流阶段产生的脉冲波形特征研究始于 20 世纪 40 年代. Malan 等^[7], Rakov 等^[8], Thottappilliet 等^[9] 认为在几公里以内距离上的闪电以持续时间较长的 U 形 (或钩形) 电场变化为主要特征; M 过程实际上是一个没有明显回击的先导过程, 并把一次完整的 M 过程称为小型继后回击; 对多次地闪做统计分析, 得出整个 M 分量持续时间 200—800 μ s. Kitagawa 等^[10] 认为“远闪”的 M 分量电场脉冲多为单极性, 伴随有通道亮度增加. Fisher 等^[11] 利用光学和电学同步观测研究了人工引发闪电的回击连续电流和 M 分量的性质, 认为 M 分量是形成长连续电流的必要条件. 蒋如斌等^[12] 认为人工引发闪电的 M 分量起始于由上向下发展的过程. 电流波形和近距离电场波形均呈

较为对称的 V 形, 且波形的上升时间均为几十微秒.

但是由于以上研究中没有同步定位资料, 闪电发生的准确位置不能确定. 同时由于摄像机时空分辨率的限制, 也不能精细地反映回击后连续电流阶段通道亮度的明暗变化. 对 M 过程的物理机制至今尚未完全搞清楚.

同时, 对 M 分量的物理机制以及 M 变化与 K 变化之间的关系认识也存在分歧. Kitagawa 等^[10] 认为发生于多次回击之间或之后通道发光期间的快速 K 变化与 M 变化有关, 并且还认为与 M 变化有关的 K 变化和回击通道不发光时发生的 K 变化之间没有本质的区别. Thottappillil 等^[13] 对发生在 12 km 以内的多次近距离闪电进行统计分析后发现: M 分量的脉冲波型都是钩状波形, 而 K 变化的脉冲波型并不总是 U 形结构; 并且获取的资料不能证明 K 变化和 M 变化之间有相似性. Rakov 等^[14] 认为 M 变化和 K 变化在微妙量级电场脉冲波形特征上有差异, 并且二者产生的物理机制也不同. Shao 等^[15] 利用宽带干涉仪定位系统发现这些

* 国家自然科学基金 (批准号: 41075002, 40775004)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 41030960) 和公益性行业科研专项 (批准号: GYHY201006005-03) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: rgyxtq2009@126.com

微秒量级的脉冲发生在通道的顶端. 曹东杰等^[16]利用闪电甚高频 (VHF) 辐射源短基线定位资料和同步快、慢电场变化资料, 认为 K 过程主要是流光沿之前已电离通道的传输.

利用高时空分辨率的高速摄像机 (0.1 ms) 可以很好地捕捉 M 过程通道的突然增亮的现象, 并且利用闪电 VHF 辐射源定位和窄带干涉仪定位资料, 可以确定 M 过程在闪电通道的发生位置, 得到闪电回击通道离观测中心站的空间距离, 以及闪电各阶段放电通道辐射源时空位置和传输过程, 以此来确定不同距离闪电 M 过程产生的波形特征, 分析 M 分量在闪电通道内的传输特征, 同时结合地面电场和辐射场观测能够分析 M 分量的物理机制. 本文利用同步测量 M 分量引起的地面电场快速变化, 击穿辐射强度以及相应通道亮度资料, 个例分析不同回击之间和之后的 M 分量脉冲波形特征, 提出了预 M 变化 (即 MP) 新概念, 讨论了 MP 变化产生的物理机制及其与 M 之间的差异, 以及 MP 变化和 K 变化之间的联系.

2 资料获取与分析

2.1 资料获取

实验场地在青藏高原东北麓青海省西宁市大通县 (36.926974°N, 101.685621°E), 共设置 7 个同步观测站, 以下旧庄明德小学为主观测站. 每个站点均安装有射频 (RF) 辐射脉冲接收系统 (中心频率 270 MHz 3 dB 带宽 6 MHz) 和基于高精度 GPS 时钟同步的闪电 VHF 辐射源三维定位系统, 可以测量闪电辐射强度和放电通道辐射源时空位置. 主站架设有闪电 VHF 窄带干涉仪系统, 可对闪电进行高分辨率二维 (1 μ s) 定位^[17]. 在子站苗圃站设置高速摄像系统 (photron fastcam SA5), 进行闪电光通道同步观测. 摄像机成像率设置为 10000 幅/s, 摄像机物镜焦距为 28 mm, 拍摄的每幅图像由 768 \times 648 个像素组成, 记录时间长度为 1.14 s. 此外, 7 个站点上都设有快电场测量仪、慢电场测量仪以及大气平均电场仪, 测量闪电不同放电过程引起的地面电场变化, 详细测量系统见文献 [18, 19].

利用该闪电探测网对 2010 年和 2011 年大通县境内夏季发生的多次雷暴过程进行了综合同步观测, 下面以一次同时拥有 VHF 辐射源定位、高速摄像和地面电场同步资料的闪电 (发生时间为 2010 年 8 月 7 日 15 时 43 分 59 秒, 命名为 154359)

为例, 重点分析连续电流阶段 M (或 MP) 过程的脉冲特征和物理机制, 并讨论 M 变化与 K 变化之间的联系. 同时分析了两次远闪 (发生时间为 2011 年 8 月 12 日 20 时 40 分 02 秒, 命名为 204002; 发生时间为 2011 年 8 月 12 日 20 时 53 分 53 秒, 命名为 205353)、一次近闪 (发生时间为 2011 年 8 月 12 日 20 时 10 分 22 秒, 命名为 201022) 以及一次人工触发闪电 (触发时间为 2008 年 6 月 29 日 15 时 11 分 26 秒, 命名为 151126) M 过程的相似特征.

为得到闪电通道亮度 (平均灰度值) 随时间变化的波形, 需对拍摄到的通道图像进行处理, 人为选定面积相等的闪电通道区域和校准区域, 计算两个区域像素亮度的算术平均值, 然后做差 (剔除回击时曝光量过大通道像素饱和的照片), 去除背景亮度造成的影响, 从而获得不同时刻通道亮度值, 得到通道亮度随时间的变化特征. 同时, 利用闪电 VHF 辐射源三维定位系统 (简称 LLR)^[20], 得到同步的闪电发生发展过程的三维时空分布图, 通过三维图又得到了闪电 154359, 204002, 205353 和 201022 回击通道离观测站的距离.

2.2 M 过程放电通道多参量分析 (闪电 154359 个例)

2.2.1 双接地闪电 154359 个例分析

本文分析以电场负向变化时对应头顶正电荷减少为准. 图 1 是负地闪 154359 引起的地面电场快、慢变化波形和通道发光亮度同步变化波形 (文中的快电场波形是设在苗圃站的快电场变化测量仪接收到的). 从图可见, 负地闪 154359 的地面快慢电场变化与通道亮度变化有很好的对应关系. 结合图 1 和同步光通道高速摄像图像可知, 负地闪持续时间约 536.4 ms, 共有四次回击, 产生了两个接地点 (相距约 5 km, 投影距离), 这是一次特殊的负地闪过程; R_1 , R_3 和 R_4 构成一次主通道 (接地点距离主站约 15.5 km), R_2 是在 R_1 后, R_3 前形成的一个新的接地通道 (接地点距离主站约 11.8 km), 生命期较短, 只有一次回击. 图 1(a) 和 (b) 是整个闪电放电过程的电场变化波形, 持续时间长, 图 1(b) 中 R_1 , R_2 , R_3 和 R_4 包含回击过程和之后连续电流过程. R_1 , R_2 , R_3 和 R_4 四次连续电流持续的时间分别为: 5.1, 7.4, 7.1 和 6.8 ms. 从图 1 中可以看出 R_1 , R_2 , R_3 和 R_4 波形峰值呈现的是回击后连续电流脉冲的幅值.

从图 1(a) 可见, 首次回击 R_1 和 R_2 连续电流脉冲电场强度变化 (ΔE) 和回击脉冲电场强度变化相

差不多, 继后回击 R_3 和 R_4 连续电流脉冲的电场强度变化都大于两次回击脉冲的电场强度变化. 从图 1(c) 可见, R_1 通道的亮度峰值最小; R_2 通道的亮度峰值大于其他所有回击的亮度峰值, 这主要是因为 R_2 通道长度和持续的时间相对较长.

从闪电通道高速摄像照片发现, 除了 R_2 外, 三次回击 (R_1, R_3 和 R_4) 之后存在通道亮度突然增加的现象, 结合同步的地面电场资料, 确定为连续电流阶段发生的 M 过程, 并且发现在 M 变化脉冲上叠加有许多微秒量级的小脉冲. 四次回击 (R_1, R_2, R_3 和 R_4) 后连续电流阶段小脉冲的个数分别为 4, 7, 5 和 6.

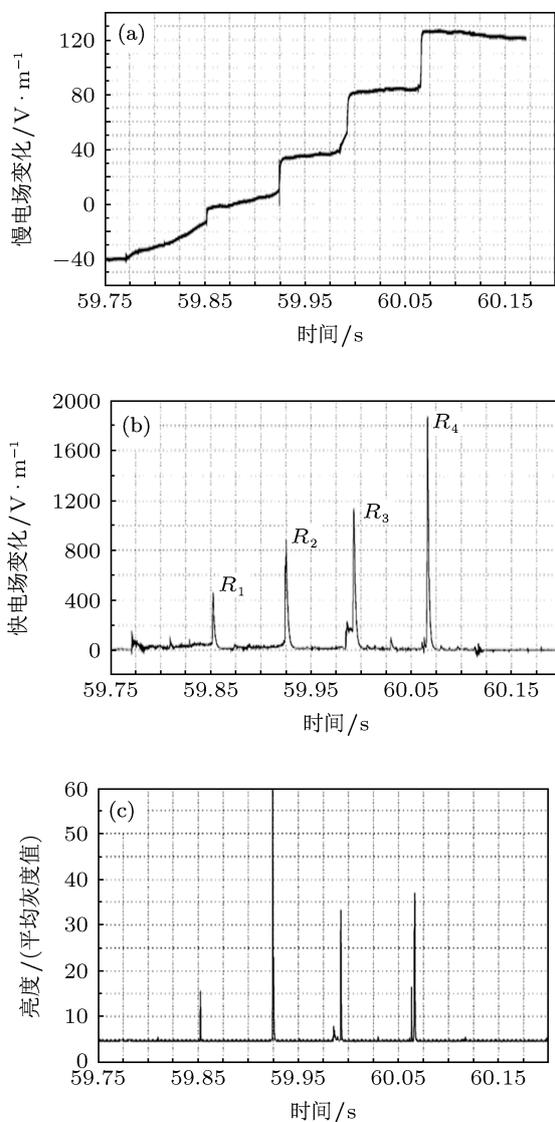


图 1 闪电 154359 地面电场变化及通道的发光亮度变化 (a) 慢电场变化波形; (b) 快电场变化波形; (c) 亮度变化波形

有关负地闪 154359 击穿和传输过程的时空演变见文献 [21], 本文主要讨论回击后连续电流阶段

M 过程的特征. 图 2, 图 4, 图 6 和图 8 是四次回击后叠加的脉冲和亮度同步波形扩展图.

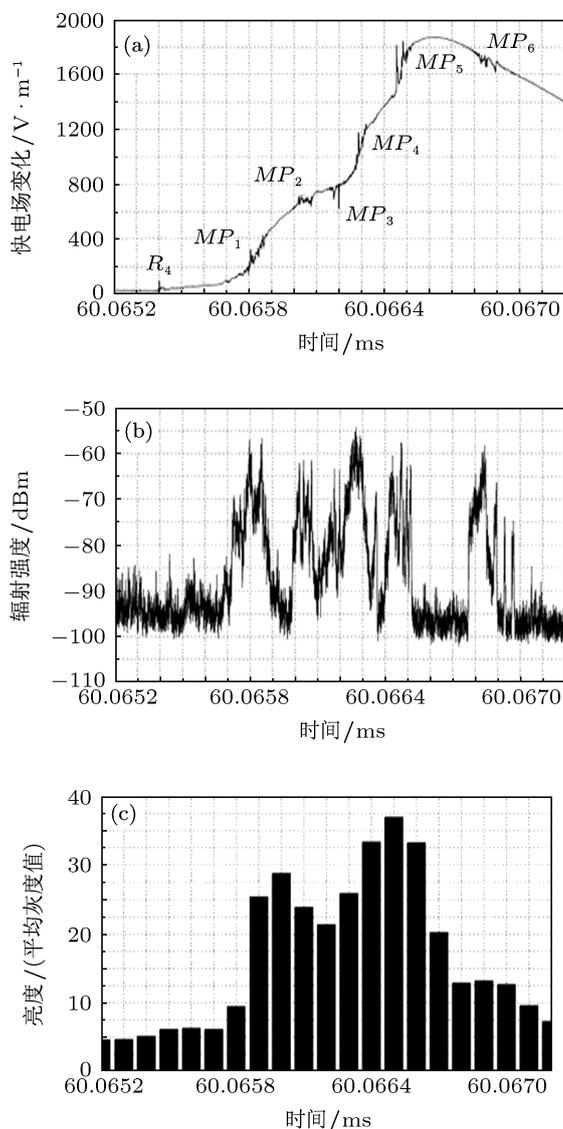


图 2 R_4 回击后多参量时间同步记录 (a) 快电场变化波形; (b) 辐射变化波形; (c) 亮度变化波形

图 2 是 R_4 之后地面快电场变化、通道辐射强度和亮度变化同步记录. 从图可见, 继后回击引起地面电场正性变化的幅度远小于此后连续电流阶段引起的电场正向变化幅度, 说明在连续电流阶段从云中向地面输送的负电荷量远高于回击. 回击之后, 云中负电荷持续流向原回击通道顶端, 并进入通道最终入地, 形成连续电流. 这是一个缓慢的电荷输送过程, 原回击通道维持一定亮度 (图 2(c) 中相应时段), 并且由于云中负电荷减少, ΔE 呈现缓慢正性变化. 从图 2(a) 可见, 连续电流阶段出现了 6 次较明显的脉冲波形 (图 2(a) 中标注 MP_1 — MP_6), 同时对应出现了辐射强度的峰值 (图 2(b)), 因此这

些脉冲是由连续电流阶段中发生的击穿过程而形成,也就是说,在负电荷连续流动过程中出现了击穿过程,例如,流动途中遇到反极性电荷堆(K 变化),或遇到局地高浓度负电荷区域(电场达到击穿值),都会产生局部击穿过程,导致运动着的电荷被加速.当这些加速电荷流入回击通道时,使通道电流强度剧增,于是通道亮度突增.通道亮度的快速变化过程称为 M 过程,相应电场变化称为 M 变化.图2(a)中, $MP_1—MP_6$ 脉冲波形中, MP_1, MP_4, MP_5 是正变化, MP_3, MP_6 是负变化, MP_2 变化幅度很小,持续时间都在0.1 ms以内.这是 M 变化之前及其中产生的快速脉冲,与 K 变化的差别是:这些脉冲能为通道提供流动电荷.对照图2(c)可见,从60.0654—60.0657 s时段通道亮度较弱,这是回击后连续电流初始阶段;60.0658 s时亮度开始增大,到60.0660 s达到最大,这是 MP_1 作用;在60.0658—60.0660 s时段内,亮度增大很多,此后亮度略有上升和下降,但变化不大,维持到约60.0666 s,这是

$MP_2—MP_5$ 波形的作用,它们伴随有电荷快速流入原回击通道,维持通道持续增亮. $MP_1—MP_6$ 是产生 M 变化的原因.显然 MP 越多越强,随后产生的 M 变化也强.由于闪电通道离观测站较远,静电场已很弱, $MP_1—MP_6$ 基本上是辐射场,而经典 M 变化的U形结构则是由于静电场分量未被观测到.

图3是此时段对应的高速摄像通道照片(图中0.2 ms对应60.0654 s),规定0.2 ms是继后回击 R_4 ,此时回击后通道亮度已很小,且持续减弱,这是连续电流维持作用(图中0.2—0.5 ms).0.6 ms出现亮度(相应于图2(c),亮度值增大),在0.8 ms照片亮度增大(相应于图2(c),亮度值达到峰值),一直持续到1.6 ms,回击后连续电流阶段通道亮度突然增加的现象正是 M 过程的光学特征.整个过程通道亮度变化不大,即在0.7 ms—1.6 ms时段内,照片通道亮度一直出现,和图2(c)有较好的对应,这显然是 $MP_1—MP_5$ 的作用.此后照片通道亮度逐渐减弱,但在1.8 ms又增强,这是 MP_6 的作用.

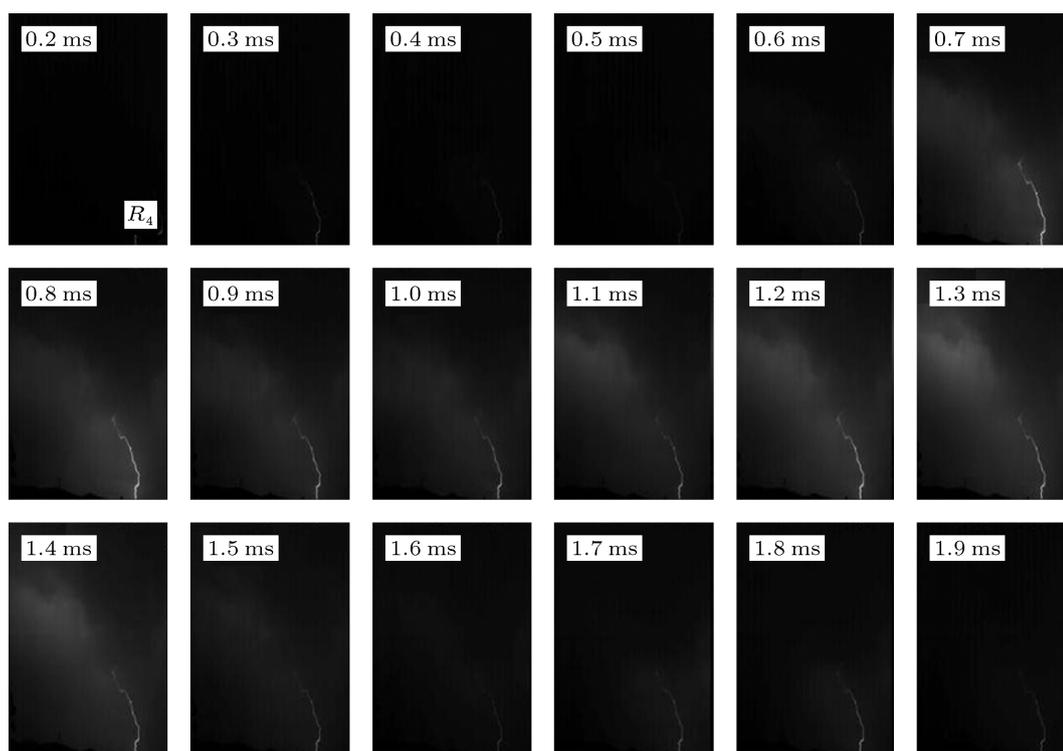


图3 R_4 回击通道高速摄像照片(图中0.2 ms对应60.0654 s,规定0.2 ms为 R_4 回击时刻)

图4和图6是 R_3 和 R_1 回击之后快电场变化波形及同步通道辐射和通道亮度变化图.从图4可见,有5个快电场变化脉冲波形 $MP_7—MP_{11}$,变化同样不规则,极性正、负都有,持续时间也在0.1 ms之内,这也是击穿过程产生的脉冲,对应也有辐射峰

值,通道亮度也随之增大.从图6可见, R_1 之后有4个较强脉冲波形 $MP_{12}—MP_{15}$,都是正极性,且对应也有辐射峰值和通道亮度增加.

图5和图7分别是 R_3 和 R_1 相应通道高速摄像照片(图5中0.2 ms对应59.9924 s,图7中0.2 ms

对应 59.8523 s). 图 5 和图 7 中规定, 两图中 0.2 ms 分别是继后回击 R_3 和首次回击 R_1 , R_3 回击后通道亮度呈现先增强后减弱的变化特征, R_1 回击后通道亮度呈现增强—减弱—再增强—再减弱的变化特征, 对应此时段的电场变化分析, 这种在回击后连续电流阶段通道又突然增亮的现象正是 M 过程

特有的光学特征.

图 4(a) 和图 6(a) 中回击后的脉冲波形与图 2(a) 中的 MP 脉冲相似. 正是由于这些快速脉冲的作用, 使得通道在较长持续时间内维持有电流流过, 保持了通道较高的电导率, 从而为直窜先导的产生提供了通道条件, 最后触发继后回击.

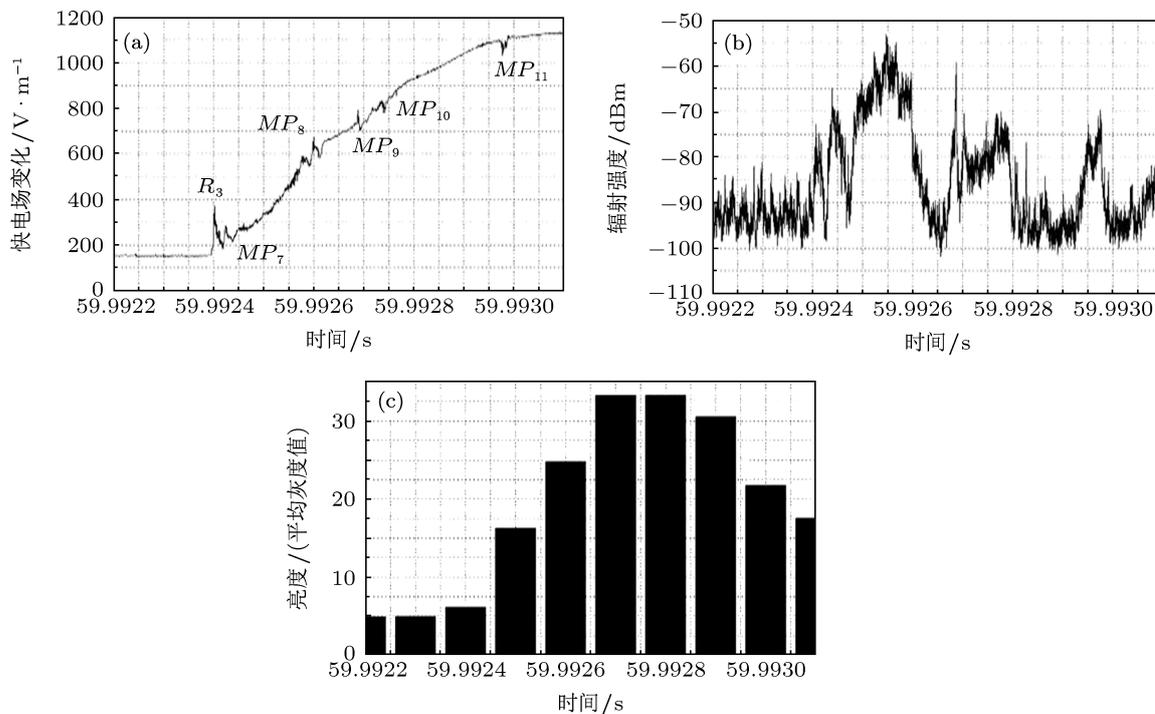


图 4 R_3 回击后多参量时间同步记录 (a) 快电场变化波形; (b) 辐射变化波形; (c) 亮度变化波形

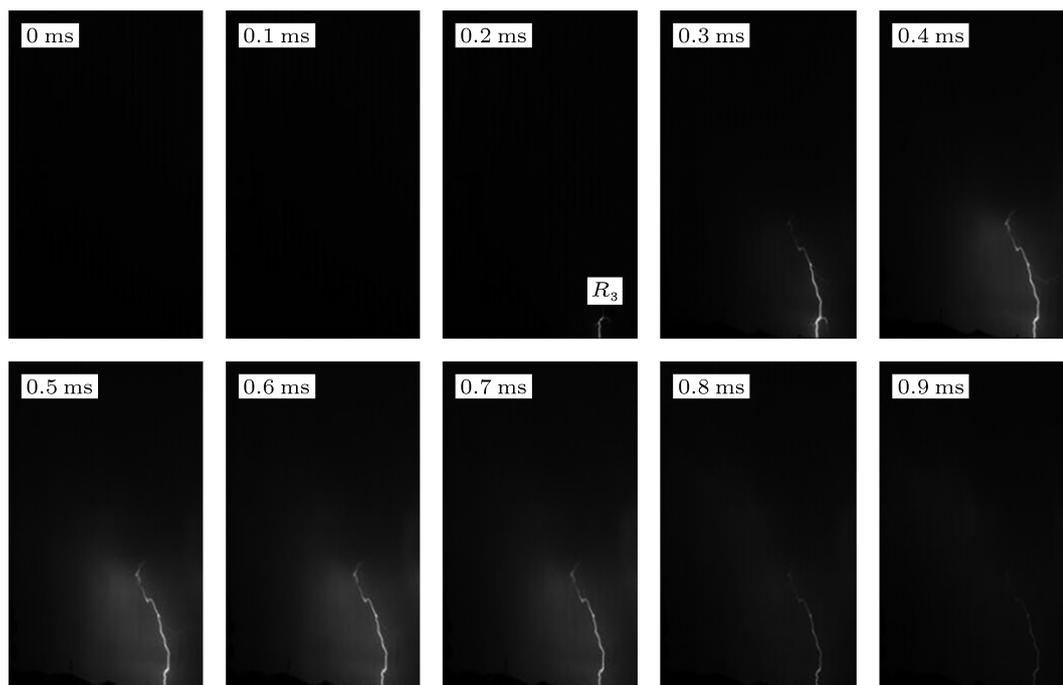


图 5 R_3 回击通道高速摄像照片 (图中 0.2 ms 对应 59.9924 s, 规定 0.2 ms 为 R_3 回击时刻)

图 8 为 R_2 之后的快电场变化及同步通道辐射和通道亮度变化. 从图 8 可见 R_2 之后也有很多击穿脉冲波形, 也对应脉冲辐射峰值, 但是通道亮度持续减小, 从同步的通道高速摄像图像 (图 9 中 0.2 ms 对应 59.9246 s) 可见, 0.2 ms 通道已亮, 0.3 ms 最亮, 此后持续减弱, 直至消失, 通道亮度呈现回击

后一直减弱的特征, 和图 8(c) 有很好的对应. 这些脉冲是一种击穿放电, 属于 K 变化类型, 脉冲也呈现不规则变化, 基本上是单极性, 有正有负, 持续时间也小于 0.1 ms. 因此分析认为 K 变化和 M 变化属于同一种物理过程, 脉冲波形特征基本相似, 只是 K 变化击穿所产生的电荷没有流入 R_2 通道.

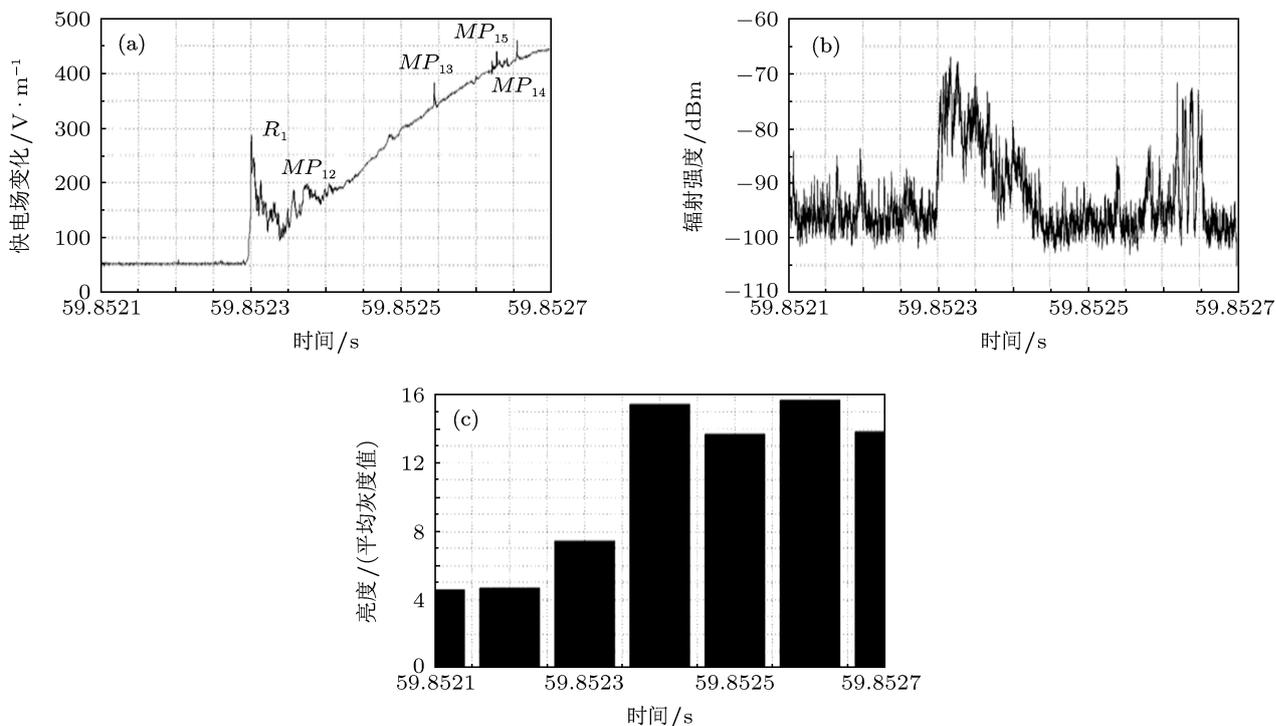


图 6 R_1 回击后多参量时间同步记录 (a) 快电场变化波形; (b) 辐射变化波形; (c) 亮度变化波形

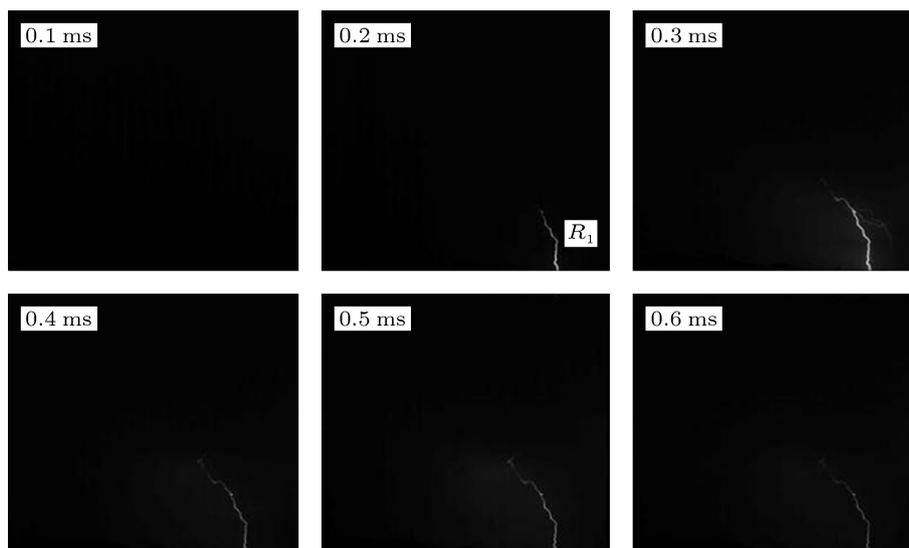


图 7 R_1 回击通道高速摄像照片 (图中 0.2 ms 对应 59.8523 s, 规定 0.2 ms 为 R_1 回击时刻)

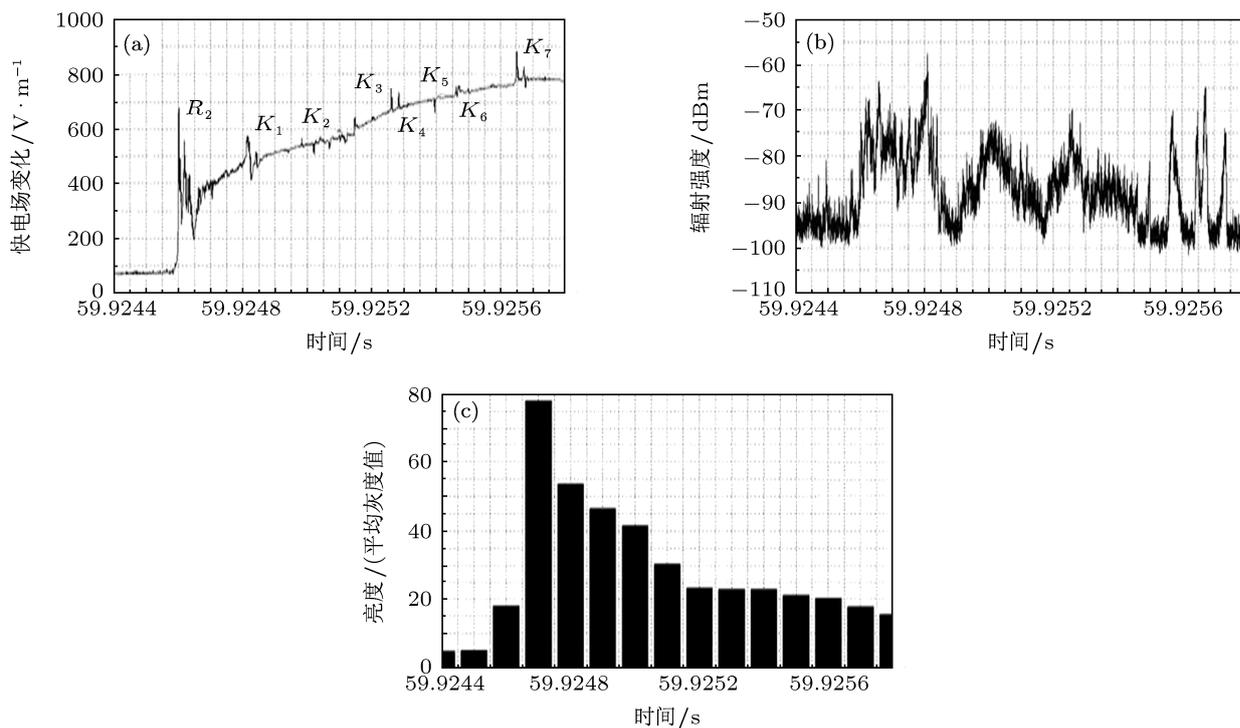


图 8 R_2 回击后多参量时间同步记录 (a) 快电场变化波形; (b) 辐射变化波形; (c) 亮度变化波形

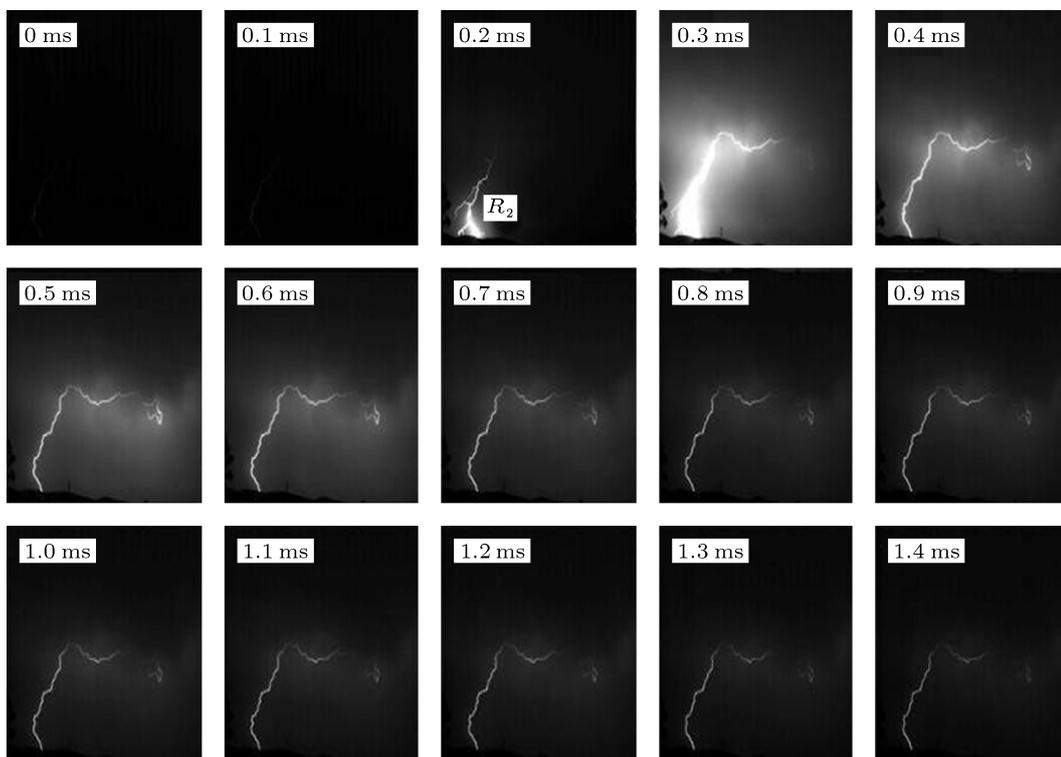


图 9 R_2 回击通道高速摄像照片 (图中 0.2 ms 对应 59.9246 s, 规定 0.2 ms 为 R_2 回击时刻)

由上面分析可知, MP_1 — MP_{15} 共 15 次脉冲波都使通道电流明显增大, 从而维持了通道较高的电离度, 为触发直窜先导提供了通道条件. 根据经典

概念, 定义 M 分量所产生的电场变化为 M 变化. 对于近距离 M 变化波形具有 U 形结构, 即开始通道是负变化, 接着是一个略大的正变化, 且平均持续

时间 0.2—0.8 ms^[22]. 但上文分析的 M 变化波形很复杂, 不具有 U 形变化结构, 并且波形不规则, 极性有正有负, 且持续时间很短, 小于 0.1 ms. 因此分析 U 形结构其实是针对“近处闪电”而言, 支配地面电场变化的源是回击通道电流变化, 且地面测量的是静电场. 当负电荷从云流入通道到地是“负变化”, 此后大地正电荷通过通道入云, 是“正变化”. Rakov 等^[23]曾提出 M 分量的物理机制是下行入射波和随后向上发展的反射波组成, 且下行波不存在通道几何沉积, 其实就是上述正、负电荷运动的结果. 此外, 由于测量的是静电场, 其变化比较缓慢, 所以波形持续时间相对较长.

本文所分析的 M 变化不同于 M 变化经典概念: M 变化是 M 分量电场变化的反映, 而 MP 变化是 M 变化中的快速电场变化部分. 为了区分, 我们定义 MP 为预 M 变化, 它产生于 M 之前和之中, 其频数和强度决定了 M 分量的强度, 其脉冲波形叠加在 M 变化波形上. MP 引起地面电场变化以辐射场为主, 能直接反映击穿过程产生的快速电场变化. 由于云中产生击穿及其流光传输的因素很多, 所以波形显得不规则, 极性有正有负, 持续时间也短, 是被回击之后通道附近的击穿过程所引起, 且伴随有电荷快速流向原回击通道, 持续时间小于 0.1 ms.

MP 变化和 K 变化从物理概念上没有差别, 都是一种击穿脉冲波形, 只是 MP 变化伴随有通道亮度增大, 而 K 变化没有. K 变化脉冲波形有时和 M 变化脉冲波形相似. 仅依据闪电连续电流过程的地面电场资料无法判断是 M 变化还是 K 变化. 利用闪电光学通道的亮度有无瞬态增强, 再结合同步的电场变化, 可以准确判断 M 变化还是 K 变化. 经典文献中对于 M 变化和 K 变化之间的异同讨论分歧较大, 我们认为二者是完全不同的物理过程.

表 1 统计了 15 次 MP 变化和 7 次 K 变化波形特征参数. 由表中数据可知, 对于 15 次 MP 变化, 脉冲持续时间都在 100 μs 以内, 只有一次 (MP_1) 为 208 μs , 最小一次为 6 μs , 平均为 62.2 μs ; 快电场变化正、负极性都有, 其中正变化为 10 次, 负变化为 4 次, 二次为不规则变化, 其变化幅值 $\overline{\Delta E}$ (ΔE 的平均值) 在 1.0—10.0 之间, 有不到 1 个量级的变化差异; 相应通道亮度都有增大趋势 (MP_1 — MP_6 , MP_7 — MP_{11} , MP_{12} — MP_{15}). 表 1 中 K_1 — K_7 也是相应快电场变化波形, 称为 K 变化, 其幅值和 MP_1 — MP_{16} 接近, 持续时间最大 104 μs , 最小 9 μs , 平均 56.7 μs . 极性也有正有负, 但正极性多, 和 MP 变化不同之处是通道亮度持续减小 (对照图 8), 说明 K 变化没有电荷流入原回击通道, 之后通道逐渐熄灭.

表 1 M 变化和 K 变化特征参数

特征值	MP_1	MP_2	MP_3	MP_4	MP_5	MP_6	MP_7	MP_8	MP_9	MP_{10}	MP_{11}
$\overline{\Delta E}$ 变化/ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$	276.61	682.76	771.37	1105.96	1650.57	1708.64	267.98	550.14	731.32	822.58	1084.24
极性 (正、负、不规则)	正	不规则	负	正	正	负	正	正	正	负	负
持续时间/ μs	208	80	40	53	101	106	57	74	29	51	37
亮度值 (平均灰度值)	13.65	26.39	21.34	25.91	35.27	13.05	11.21	24.77	33.22	33.31	21.78
辐射强度/ dBm	-72.01	-74.34	-82.61	-66.13	-74.86	-78.11	-81.74	-62.13	-79.87	-77.45	-77.67

附表 1 M 变化和 K 变化特征参数

特征值	MP_{12}	MP_{13}	MP_{14}	MP_{15}	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7
$\overline{\Delta E}$ 变化/ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$	158.83	343.48	405.63	434.16	489.25	560.60	621.29	678.71	706.68	737.50	783.55
极性 (正、负、不规则)	正	正	正	正	正	不规则	正	正	负	正	正
持续时间/ μs	63	6	26	8	61	104	69	52	9	50	52
亮度值 (平均灰度值)	15.42	14.67	15.67	14.75	50.14	41.55	26.90	23.01	22.97	21.27	19.12
辐射强度/ dBm	-82.61	-92.62	-87.06	-78.16	-76.05	-82.39	-89.12	-79.62	-88.86	-93.74	-80.43

2.2.2 闪电 204002 和 205353 个例

图 10 和图 12 是 2011 年 8 月 12 日青海大通地区一次雷暴过程中获得的负地闪 204002 (发生时间为 20 时 40 分 02 秒, 回击通道距离主站 10.2 km) 和负地闪 205353 (发生时间为 20 时 53 分 53 秒, 回击通道距离主站 12.2 km) 的同步通道亮度、辐射强度和地面电场变化图 (由于宽带电场增益高,

地面电场变化采用了宽带电场资料, 同时宽带电场测量仪并不是放置在地面, 电场强度用相对值表示). 图 11 中规定 0.6 ms (对应时间 2.7966 s) 为闪电 204002 第十五次回击 R_{15} 时刻, 图 13 中规定 0.1 ms (对应时间 53.0189 s) 为闪电 205353 首次回击 R_1 时刻. 图 12 和图 13 中在回击后通道亮度都呈现增强—减弱—再增强—再减弱变化特征, 这与

图 7 中 R_3 后通道亮度变化特征相同, 可见这都是典型的 M 过程. 结合图 10(a) 和图 12(a) 可见, 在回击之后连续电流阶段都出现了与 154359 个例相似的脉冲波形, 并且这些脉冲同样有很强的辐射, 同

时通道也有明显的亮度变化. 这些波形是 MP 变化, 它产生了 M 分量, 但由于距离远, 看不到 U 形结构的 M 变化.

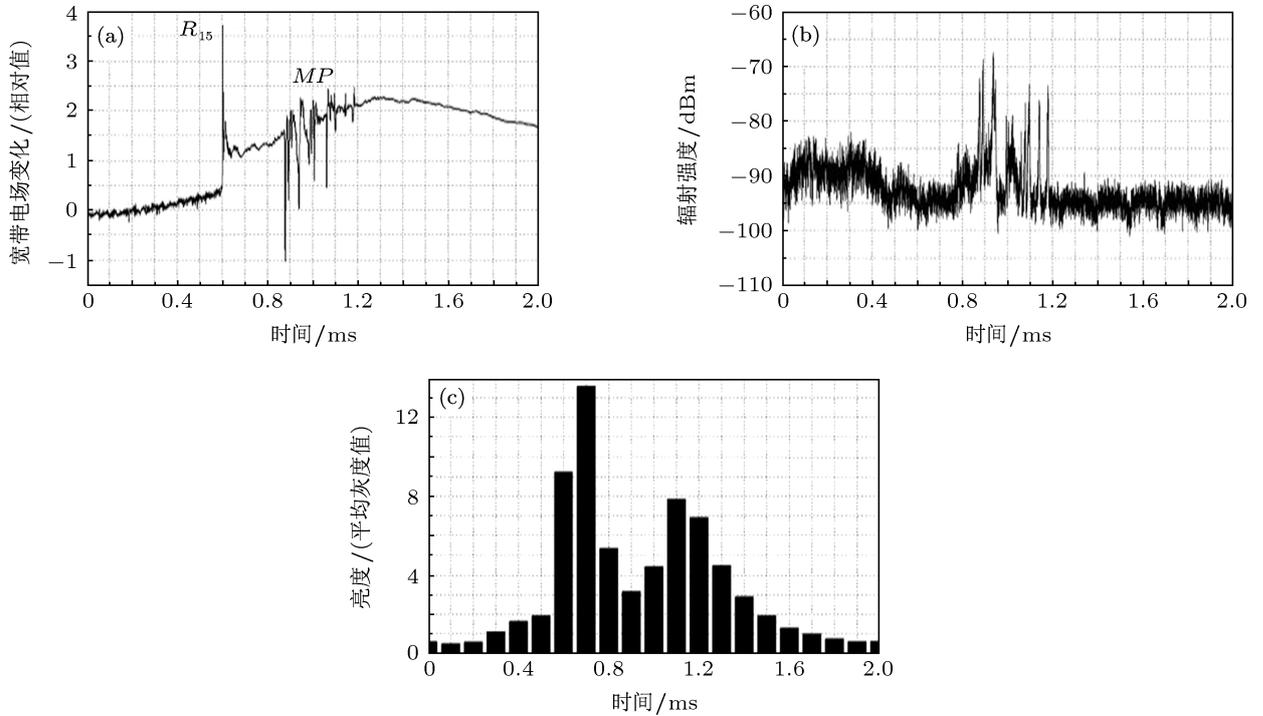


图 10 闪电 204002 第十五次回击 R_{15} 后多参量时间同步记录 (图中 0.6 ms 对应 2.7966 s) (a) 宽带电场变化波形; (b) 辐射变化波形; (c) 亮度变化波形

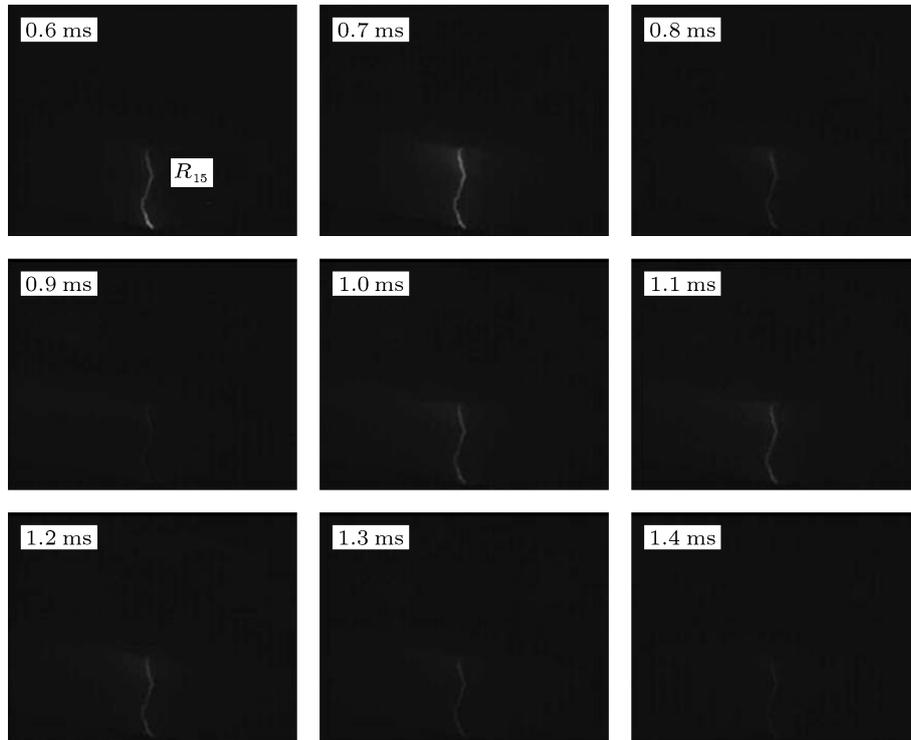


图 11 闪电 204002 第十五次回击 R_{15} 通道高速摄像照片 (图中 0.6 ms 对应 2.7966 s, 规定 0.6 ms 为 R_{15} 回击时刻)

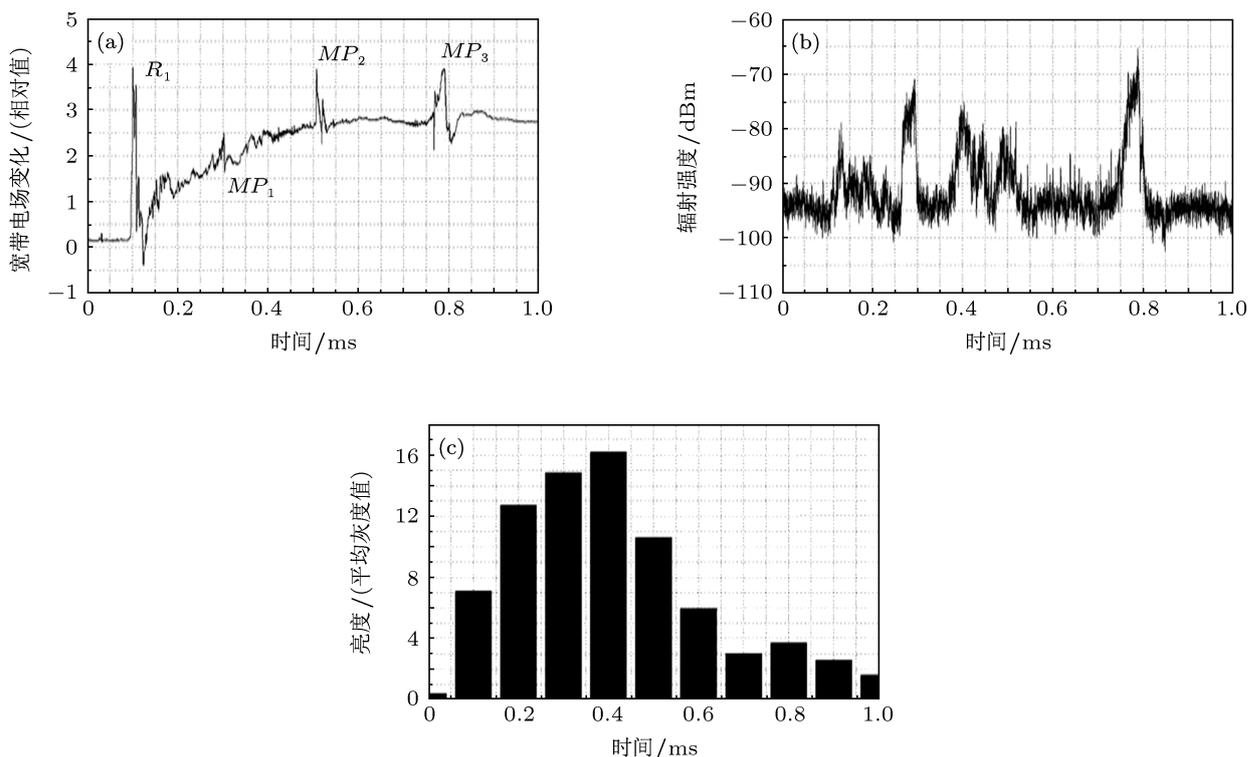


图 12 闪电 205353 首次回击 R_1 后多参量时间同步记录 (图中 0.1 ms 对应 53.0189 s) (a) 宽带电场变化波形; (b) 辐射变化波形; (c) 亮度变化波形

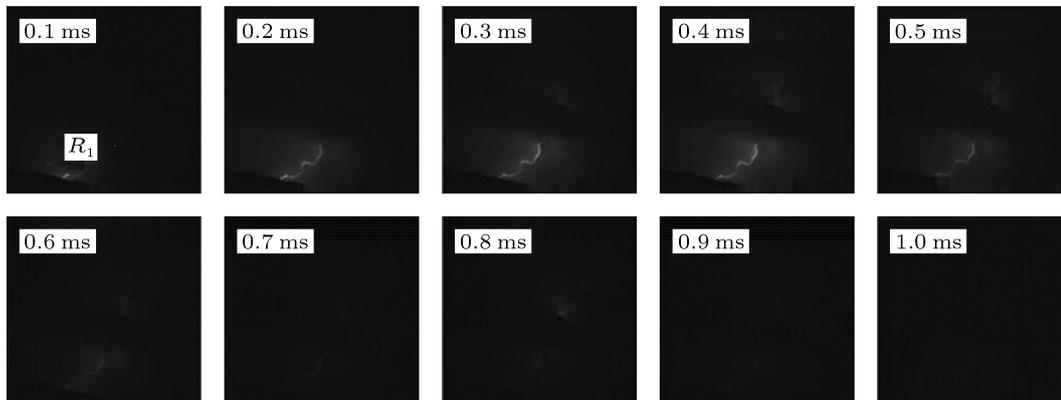


图 13 闪电 205353 首次回击 R_1 通道高速摄像照片 (图中 0.1 ms 对应 53.0189 s, 规定 0.1 ms 为 R_1 回击时刻)

2.2.3 闪电 201022 个例

图 14 是发生在 2011 年 8 月 12 日雷暴过程中的一次闪电 201022 (发生时间为 20 时 10 分 22 秒, 回击通道距离主站 10.7 km, 图中 2 ms 对应 22.1977 s) 第三次回击后的宽带电场变化、通道辐射和通道亮度时间同步记录. 图 15 和图 16 是首次回击 R_1 和第三次回击 R_3 相应通道亮度高速摄像, 首次回击通道亮度大于第三次回击通道亮度. 从图 16 可见, 在回击后连续电流阶段有两次通道亮度突然增加的过程, 这是两次典型的 M 过程 (M_1

和 M_2), 而对应地面宽带电场波形 (图 14(a)) 能看出为 U 形结构, 表示已能接收到 M 分量的静电场分量, 但持续时间较短, 约为 200 μ s. 并且在第一个 U 形脉冲上叠加有持续时间更短的辐射场小脉冲, 这些小脉冲对应有很强的辐射. 这些小脉冲是 MP 变化, U 形波是 M 变化, 大量的 MP 叠加于 M 波形上. 对此次闪电首次回击和第三次回击通道进行定位后 (图 17) 分析, 这些小脉冲的辐射源分布在通道顶部 (图 17(b)). 此结果说明, MP 变化产生大量电荷流向通道顶端, 并进入通道, 从而产生 M 分量.

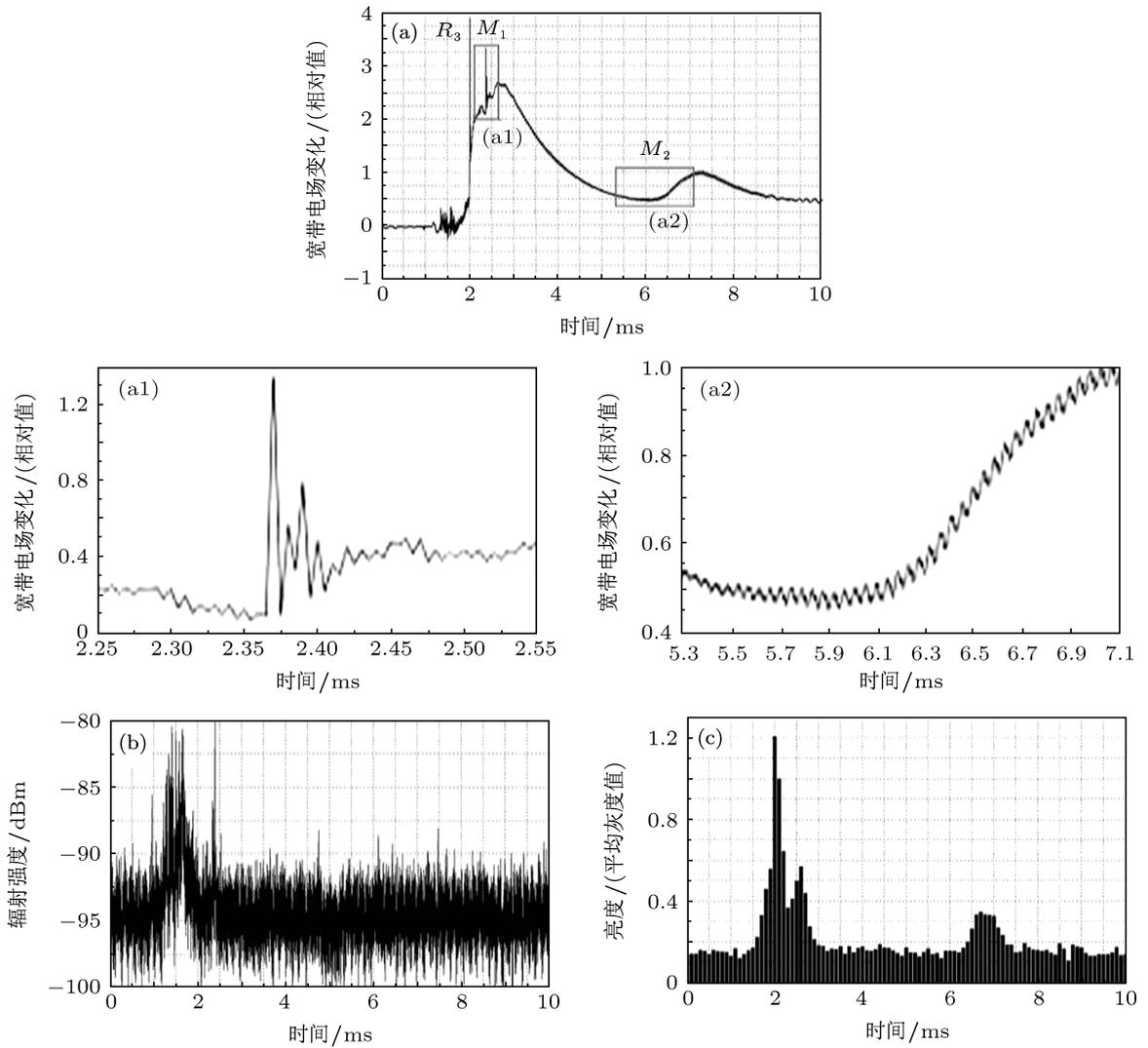


图 14 闪电 201022 第三次回击 R_3 后多参量时间同步记录 (图中 2 ms 对应 22.1977 s) (a) 宽带电场变化波形; (b) 辐射变化波形; (c) 亮度变化波形

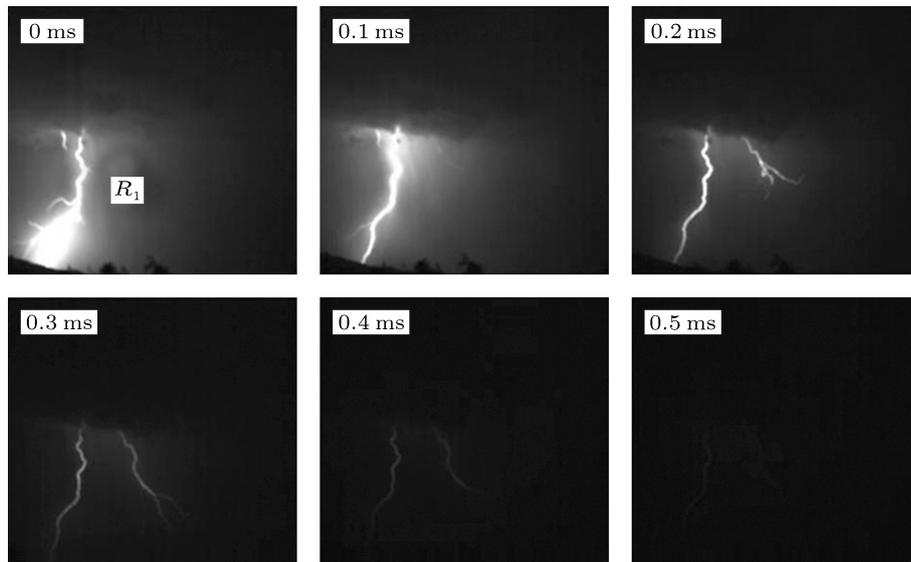


图 15 闪电 201022 首次回击 R_1 通道高速摄像照片 (图中 0 ms 对应 22.1604 s, 规定 0 ms 为 R_1 回击时刻)

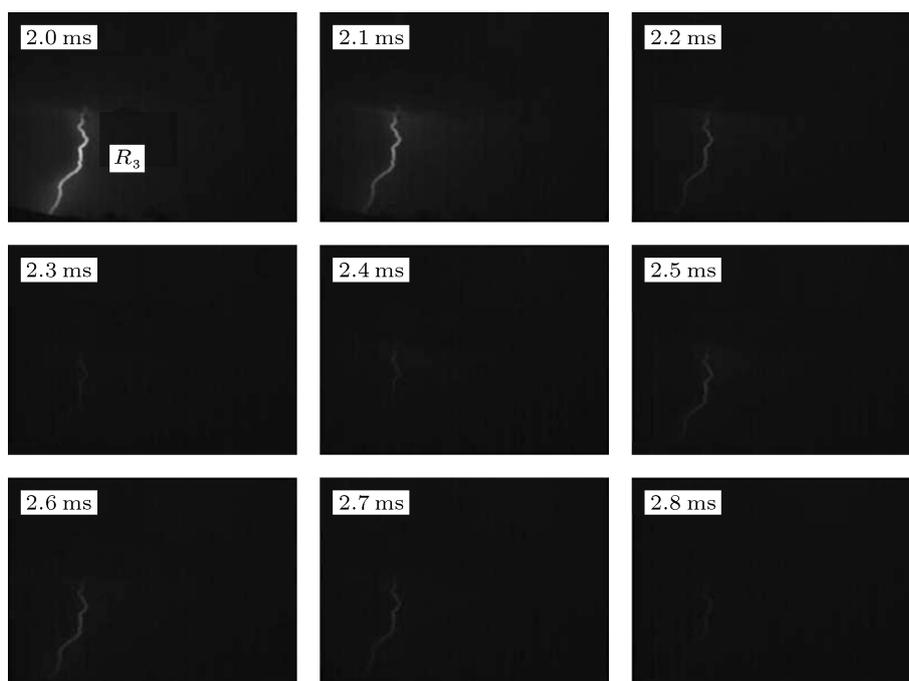


图 16 闪电 201022 第三次回击 R_3 后 M_1 过程高速摄像照片 (即图 14(a) 中叠加有小脉冲 M 变化, 图中 2.0 ms 对应 22.1977 s, 规定 2.0 ms 为 R_3 回击时刻)

从图 17(a) 可见, $L1_B1$ 的辐射源只出现在仰角 $2.5^\circ\text{--}10^\circ$ 的范围内, 这是由于 $L1_B1$ 与云内的 $L1_B2$ 同时发展. 从图 17(b) 可见, R_3 在仰角 5°--

15° 的范围内辐射源出现较 R_1 过程辐射源少, 这是由于 R_2 与 R_3 时间间隔仅为 15.34 ms, 通道还未冷却, 仍保持较高的电导率.

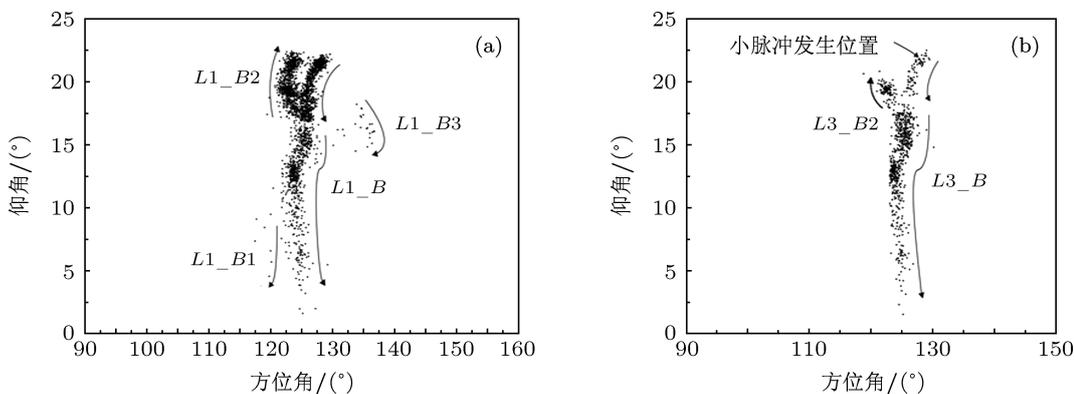


图 17 闪电 201022 干涉仪定位结果 (a) 首次回击 R_1 过程干涉仪定位结果; (b) 继后回击 R_3 过程干涉仪定位结果; 图中 $L1_B, L1_B1, L1_B2$ 和 $L1_B3$ 为 R_1 通道辐射源分支通道, $L3_B2$ 和 $L3_B$ 为 R_3 通道辐射源分支通道

2.2.4 人工触发闪电 M 变化对比分析

图 18 是 2008 年在山东滨州地区一次空中人工触发闪电 (触发时间为 2008 年 6 月 29 日 15 时 11 分 26 秒, 引雷点距离测站约 700 m) 的快电场变化波形, 标号 R_1 是首次回击, R_2, R_3, R_4, R_5 是继后回击. 在两次回击间有长达 680 ms 的连续电流过程, 其间有很多变化幅度较大的脉冲, 为了判别这些脉冲的性质, 需分析通道亮度变化. 图 19 是此次

人工闪电通道摄像照片, 每帧照片之间间隔 40 ms. 由于摄像是手工控制, 故无法对应首次回击时刻. 但从图 19 亮度趋势分析可见, 标号 N.1, N.18, N.27, N.29, N.35 照片分别对应的是 R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 的回击通道. 而在 N.1 和 N.15 之间约 560 ms 时段内, 通道一直维持较高亮度, 此时段对应于图 18 中出现很多幅度较大的脉冲, 这些脉冲具有显著的 U 形结构, 是 M 变化. 即先是负电场变化, 然后以更大

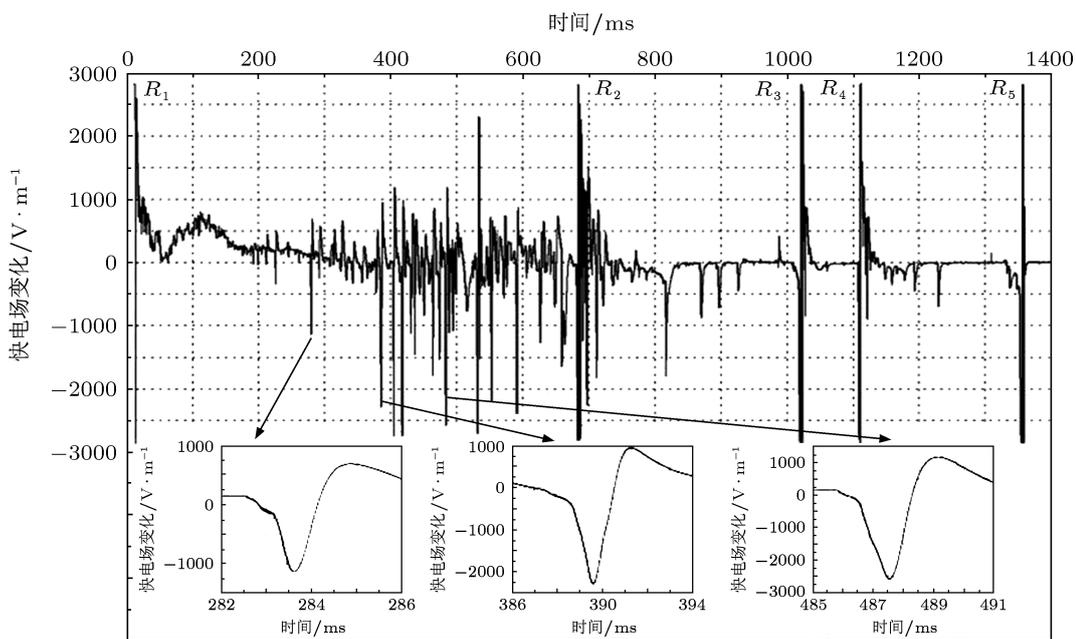


图 18 闪电 151126 (空中人工触发闪电) 快电场变化波形

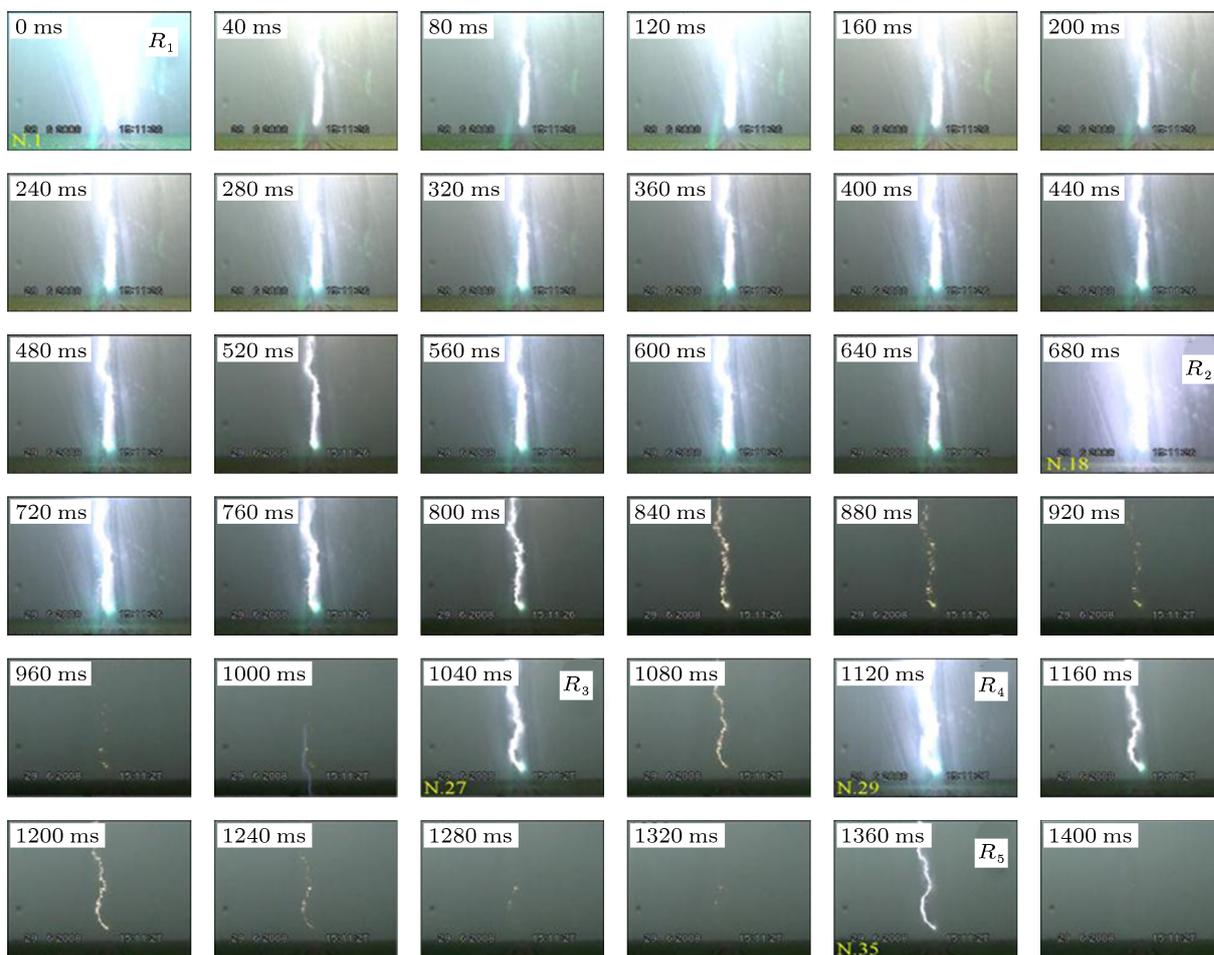


图 19 闪电 151126 (空中人工触发闪电) 光通道摄影图像

的正电场变化结束. 持续时间约 1 ms, 与经典概念一致. 这是“近处闪电”的 M 变化特征, 测量的电场主要是静电场. 与上节分析的 MP 变化特征比较, 二者结构完全不同. 在 M 变化波形上叠加了大量 MP 脉冲波形, 大量的 MP 变化造就了 M 变化, 大量的 M 变化为触发直窜先导提供了通道条件, 最后触发继后回击. 蒋如斌等^[9] 观测到人工触发闪电 M 分量电流脉冲波形. 持续时间短, 与我们观测到的远距离自然闪电 MP 变化持续时间的结果类似.

3 讨论与结论

利用负地闪回击之后放电过程的快电场变化, 击穿辐射强度以及通道亮度高速摄像的同步资料, 研究了 M 变化的波形特征, 同时比较分析了人工触发闪电 M 变化特征, 并讨论了 M 变化与 K 变化之间的联系, 得到以下结论.

1) 经典概念 M 变化是 M 分量的电场变化反映, 本文提出预 M 变化 (MP 变化), 是叠加于 M 脉冲波形中的快速电场变化, 是击穿过程所致, 大量 MP 合成, 产生了 M 变化.

2) MP 变化是回击之后连续电流阶段中出现的快速电场变化, 同时伴有通道增亮, 是被云内击穿过程触发, 产生高速运动负电荷, 流向原回击通道的过程. 快速电场变化必伴随有高强度辐射和通道电流激增, 三者在上有很好的对应.

3) M 变化电场极性有正有负, 也有不规则变化, 主要是辐射场, 脉冲持续时间较短, 在 0.1 ms 之内. 经典 M 变化只适用于“近处闪电”(例如人工触

发闪电), 电场变化为 U 形结构, 即先是负变化, 然后是以较快的正变化结束, 主要是静电场, 持续时间较长, 约 0.2—0.8 ms.

4) MP 变化和 K 变化在脉冲特征上没有太多差别, 其产生的物理机制是相似的, 都是通过击穿过程产生电荷快速移动, 只是 MP 变化的电荷流经原回击通道, 而 K 变化没有. 但是通过持续 K 变化, 不断打通新的电离通道, 可以为 MP 变化电荷流动不断提供新的电荷源. M 变化和 K 变化之间无可比性, 二者是不同的物理概念. M 变化和直窜先导的波形和物理过程很相似, 只是 M 变化强度弱, 不断发展的 M 变化, 尤其是在继后回击前数毫秒内发生的 M 群 (chaotic pulse trains, 简称 CPT), 最后可以转化成直窜先导. 上述结论需更多的统计分析来验证.

本文提出 MP 概念, 目的是区分 M 变化, MP 变化和 K 变化产生于相同物理过程后, 二者时空尺度差不多, 有可比性. 而 M 是大量 MP 的合成结果, 与 K 变化之间无可比性. 当然大量 K 变化的合成, 在较大时间尺度上可以和 M 变化比较. 本文的重点分析较精细时间尺度上的 MP 变化和 K 变化. 严格地说, 该精细时间尺度上的脉冲波形也可能是多次击穿合成结果. 深入研究有待于测量仪器的改进.

感谢 2008 年山东滨州人工引雷实验的全体人员和山东省防雷中心和滨州市气象局对人工引雷实验的大力支持. 感谢 2009—2011 年青海大通雷电观测实验的全体人员和青海省气象局人影办以及大通县人影办在野外实验中给予的支持.

- [1] Zhao 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, 郗秀书, 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]
- [2] Wang C X, Qie X S, Jiang R B, Yang J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 039203 (in Chinese) [王彩霞, 郗秀书, 蒋如斌, 杨静 2012 物理学报 **61** 039203]
- [3] Hou Y L, Zhang G S, Lü S H, Yuan P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 059201 (in Chinese) [火元莲, 张广庶, 吕世华, 袁萍 2013 物理学报 **62** 059201]
- [4] Wang J F, Qie X S, Lu H, Zhang J L, Yu X X, Shi F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 159202 (in Chinese) [王俊芳, 郗秀书, 卢红, 张吉龙, 于晓霞, 石峰 2012 物理学报 **61** 159202]
- [5] Yang B, Zhou B H, Meng X 2012 *Acta Phys. Sin.* **59** 8978 (in Chinese) [杨波, 周璧华, 孟鑫 2012 物理学报 **59** 8978]
- [6] Xu B, He H, Yang X Y, Bie Y G, Lü Q H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 175203 (in Chinese) [徐斌, 贺华, 杨晓艳, 别业广, 吕清花 2012 物理学报 **61** 175203]
- [7] Malan D J, Schonland B F J 1947 *Proc. R. Soc. London Ser. A* **191** 485
- [8] Rakov V A, Uman M A, Thottappillil R 1994 *J. Geophys. Res.* **99** 10745
- [9] Thottappillil R, Goldberg J D, Rakov V A 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 25711
- [10] Kitagawa N, Brook M, Workman E J 1962 *J. Geophys. Res.* **67** 6378
- [11] Fisher R J, Schnetzer G H, Thottappillil R, Rakov V A, Uman 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 22887
- [12] Jiang R B, Qie X S, Wang C X, Yang J, Zhang Q L, Wang J F, Liu D X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 079201 (in Chinese) [蒋如斌, 郗秀书, 王彩霞, 杨静, 张其林, 王俊芳, 刘冬霞 2011 物理学报 **60** 079201]
- [13] Thottappillil R, Rakov V A, Uman M A 1990 *J. Geophys. Res.* **95** 18631
- [14] Rakov V A, Thottappillil R, Uman M A 1992 *J. Geophys. Res.* **97** 9935

- [15] Shao X M, Krehbiel D N, Thomas R J, Rison W 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 2749
- [16] Cao D J, Qie X S, Duan S, Xuan Y J, Wang D F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 069202 (in Chinese) [曹东杰, 鄒秀书, 段树, 宣越建, 王东方 2012 物理学报 **61** 069202]
- [17] Zhang G S, Zhang T, Qie X S, Chen C P 2003 *Plateau Meteorol.* **22** 301 (in Chinese) [张广庶, 张彤, 鄒秀书, 陈成品 2003 高原气象 **22** 301]
- [18] Zhang T, Zhang G S, Qie X S 2003 *Plateau Meteorol.* **22** 306 (in Chinese) [张彤, 张广庶, 鄒秀书 2003 高原气象 **22** 306]
- [19] Zhang G S, Zhao Y X, Qie X S, Zhang T, Wang Y H 2008 *Sci. China D* **38** 1 (in Chinese) [张广庶, 赵玉祥, 鄒秀书, 张彤, 王彦辉 2008 中国科学 (D 辑) **38** 1]
- [20] Zhang G S, Wang Y H, Qie X S, Zhang T, Zhao Y X, Li Y J, Cao D J 2010 *Sci. China D* **40** 523 (in Chinese) [张广庶, 王彦辉, 鄒秀书, 张彤, 赵玉祥, 李亚珺, 曹冬杰 2010 中国科学 (D 辑) **40** 523]
- [21] Wu B, Zhang G S, Wang Y H, Li Y J, Zhang T, Fan X P, Lü W T 2013 *Plateau Meteorol.* **32** 519 (in Chinese) [武斌, 张广庶, 王彦辉, 李亚珺, 张彤, 范祥鹏, 吕伟涛 2013 高原气象 **32** 519]
- [22] Wang D H, Qie X S, Guo C M 2000 *Lightning and Artificially Triggered Lightning* p134 (Shanghai: Shanghai Jiaoda Press) (in Chinese) [王道洪, 鄒秀书, 郭昌明 2000 雷电与人工引雷 (上海: 上海交通大学出版社) 第 134 页]
- [23] Rakov V A, Thottappillil R, Uman M A 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 25701

The multi-parameter observation of lightning M changes in northeastern part of the Qinghai-Tibet Plateau *

Wu Bin^{1)2)†} Zhang Guang-Shu¹⁾ Wang Yan-Hui¹⁾ Li Ya-Jun¹⁾
Fan Xiang-Peng¹⁾ Yu Hai¹⁾ Zhang Rong¹⁾

1) (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

2) (Guizhou Lightning Protection and Disaster Reduction Center, Guiyang 550002, China)

(Received 3 April 2013; revised manuscript received 18 June 2013)

Abstract

The M change characteristics in continuing current process of negative cloud-to-ground lightning discharge and artificially triggering lightning discharge are comparatively analyzed using the synchronous data of optical channel high-speed video camera pictures, electric field changes on ground and the peak very high frequency radiation. The results indicate that M process could be identified accurately from synchronous data of optical channel luminance and electric field changes on ground. There are lots of rapid changes of electric field (MP) prior to and during classic M change. And the M changes caused by lots of MP changes. There is mostly no difference in waveform characteristics between M changes and K changes and their generated physical mechanisms are similar. MP change is a rapid change of electric field corresponding to the rapid flow of charge caused by the breakdown process in the stage of continuous current process and accompanied with channel sudden brightening and high intensity radiation. Most of the M changes are unipolar, positive or negative and a few are irregular and last within 0.1 ms. Only M change in close lightning discharge exhibits a classic U -shaped structure because of its waveform mostly caused by static electric field, and its duration is about from 0.2 to 0.8 ms. MP and K changes are all caused by the breakdown. The difference between MP and K changes is that the electric charges flow into the original return stroke channel in the process of MP change, but not in the process of K change.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau, M changes, MP changes, K changes

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta, 91.60.Mk

DOI: 10.7498/aps.62.189202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41075002, 40775004), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41030960), and the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No. GYHY201006005-03).

† Corresponding author. E-mail: rgyxtq2009@126.com