

一次人工触发闪电上行正先导的传输特征*

王彩霞¹⁾²⁾³⁾ 郟秀书^{1)†} 蒋如斌¹⁾³⁾ 杨静¹⁾

1) (中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

2) (北京信息科技大学理学院, 北京 100192)

3) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2011年4月7日收到; 2011年5月16日收到修改稿)

利用山东一次人工触发闪电的高速摄像和 30 m, 60 m 和 480 m 的同步电场测量, 清晰显示了人工触发闪电上行正先导的传输特征. 上行正先导头部光强相对较强, 二维发展速度变化波动较大并呈现明显不规则性, 表明上行正先导发展具有明显的梯级特征. 在先导开始阶段从 340 m 到 705 m 高度之间上行正先导平均发展速度为 9.8×10^4 m/s, 起始速度是 3.8×10^4 m/s, 局部速度总体上随高度呈现增加趋势. 电场变化在近距离产生有规律的梯级状变化, 记录到的 28 个梯级相邻梯级间隔变化从 14 μ s 到 39 μ s, 几何平均值为 25.1 μ s. 估计的先导梯级长度分布在 0.9 m 到 3.7 m, 几何平均值为 1.7 m. 先导电场变化由慢的正向梯级状变化和脉冲变化组成, 结合光学和电场变化测量结果, 得出正先导头部通道发生弯曲可使其电场变化的梯级特征减弱或消失; 正负先导梯级形成机制可能类似, 均由其先导头部前端的双向流光发展而来.

关键词: 人工触发闪电, 上行正先导, 电场变化, 高速摄像

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta

1 引言

闪电是一种伴随有大电流、高温、冲击波、强烈的电磁辐射和发光发声等的瞬时放电现象^[1-4]. 先导是地闪放电的始发阶段, 是地闪的主要物理过程之一, 先导的起始、传输和辐射特征已成为人们研究的重点问题^[5-8]. 正先导发出的光、VHF 和 UHF 辐射相对于负先导来说较弱, 且正地闪发生比例较低, 目前对正先导的起始和传输特征及其机制认识相对较少. 对正先导的认识主要来自于对人工触发闪电^[9-12]、高建筑物触发的上行闪电^[13-15]及实验室火花放电实验^[16]的光学和电学观测与研究. 很多观测显示负先导通常具有明显的较亮的梯级发展, 而正先导很少有明显的梯级^[17,18]. Orville^[19]由拍摄到的先导光谱结果也得出, 负先导发光对应于单电离的离子发光, 故通常具有明显的较亮的梯级发展; 而正先导发光

来自于 20000 K 以下的中性原子发光, 在 12000 K 到 20000 K 之间, 温度改变对光输出具有较小的影响, 因此正先导或多或少具有连续性特征.

早期对正先导仅有的光学观测来自于 Berger 和 Vogelsanger^[14]的条纹相机, 但观测结果并不能看出明显的梯级, 只是表现出具有不规则的波动特征的弱发光现象. 近年来较少的几例研究结果显示正先导也具有梯级发展特征, 并具有某些和负先导相似的宏观特征. Rakov 和 Uman^[1]报道了 KFC 的经典触发闪电上行正先导条纹相机观测结果, 正先导具有明显的梯级特征, 在特定的情况下能连续传输, 并能够由梯级转换到连续再转回到梯级传输, 在 530 m 长的通道的平均速度为 3.6×10^5 m/s, 发光的时间间隔为 20 μ s. Kong 等^[9]结合下行正先导的电场特征和高速摄像光学特征得出下行正先导具有明显的梯级特征, 二维传播速度为 $0.1-3.8 \times 10^5$ m/s, 先导脉冲间的间隔为 17 μ s, 下行正先导头部

* 国家自然科学基金(批准号: 41175002, 40930949)、中国科学院“百人计划”专项经费和北京市属高等学校人才强教计划资助项目(批准号: PHR201008435)资助的课题.

† E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

相比于后面通道具有更强的发光强度, 类似于负梯级先导的光学特征. Saba 等^[8]的光学观测统计结果显示正先导和负先导的速度近似相等, 且得出正先导也具有丰富的多分叉发展特征. 然而相比于负先导, 人们对正先导及其梯级传输的特征和机制了解较少. 本文利用高速摄像结果结合同步亚微秒量级电场变化测量结果研究上行正先导的传输特征, 研究先导光强、发展速度、梯级间隔、梯级步长随时间的演变过程, 分析正梯级先导不同距离电场观测中的梯级电场特征, 并结合高速摄像和电场变化观测结果讨论正梯级先导的传输机制和电流特征.

2 实验方法和步骤

本文所用实验数据来自于 2009 年夏天在山东滨州的人工触发闪电实验 (SHATLE)^[20-22]. 人工触发闪电 0902 发生在 2009 年北京时间 8 月 5 日 14: 39: 16, 该闪电是火箭拖带金属丝的经典触发方式触发的. 使用 Photron FASTCAM SA1 高速摄像机进行光学观测, 帧速为 6000 幅/s, 分辨率为 640×1024 像素, 观测距离为 460 m, 摄像机镜头为 16 mm 鱼镜头. 使用平板快慢天线测量 30 m, 60 m 和 480 m 处的电场快慢变化, 快慢天线的时间常数分别是 0.1 ms 和 6 s, 带宽分别为 5 MHz 和 2 MHz. 30 m 电场经光纤传到室内由 DL750 数字示波器记录, 采样率为 10 MHz; 60 m 和 480 m 的电场数据经同轴电缆传输至室内由计算机记录, 采样率为 5 MHz. 电场信号由 GPS 进行同步.

3 资料分析结果及讨论

3.1 上行正先导光学特征

图 1 是由高速摄像机拍摄的 0902 闪电中连续 40 张图片按时间序列逐帧排列组成, 相邻两张图片间的时间间隔是 167 μ s (帧速 6000 幅/s). 图 1 中包含了从先导开始到金属丝熔断的所有图片, 显示了上行正先导随时间发展的整个过程和通道发光的亮度变化过程. 图中先导对应的高度从该闪电的触发高度 340 m 到 705 m, 先导开始约 6.5 ms 后钢丝被熔断. 图 2 是上行正先导 (对应图 1 中的 40 张图片) 相对光强随时间和高度的变化特征, 图中的箭头标示了先导的发展. 从图 1 和图 2 均能明

显看出先导头部相对较亮, 而其下面的通道相对光强较弱, 总体上相对光强随时间和高度的增加而增强. 由图还可看出相对光强局部变化具有不规则的波动特征, 这表明上行正先导具有梯级特征. 另由图 1 可以看出, 每一张图片中先导头部的方向都不同. 早在 1950 年, Schonland^[23]就提出对于负梯级先导, 每个梯级都和之前的梯级方向不同, 在新梯级的开始, 流光有时会形成分叉或分支, 先导处处都会沿不同路径连续产生分支. 上面描述说明了为什么负先导具有丰富的多分支结构, 也说明上行正先导头部特征类似于负梯级先导, 具有梯级发展特征. 正梯级先导没有负梯级先导发叉多, 一方面可能由于正先导发光相对较弱不易探测, Saba 等^[8]的光学观测结果是一个很好的证据; 另一方面可能如 Williams^[24]所说, 正负先导具有不对称性是由自由电子和正离子的迁移率不同所造成的.

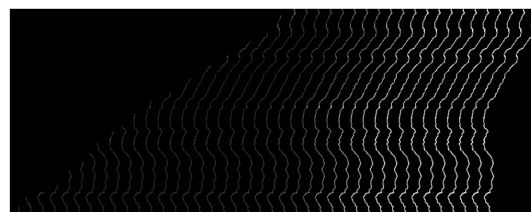


图 1 高速摄像机拍摄的上行正先导光学观测结果 该图由钢丝熔断前的四十张图片按时间顺序逐帧排列, 每两张图片间隔为 167 μ s

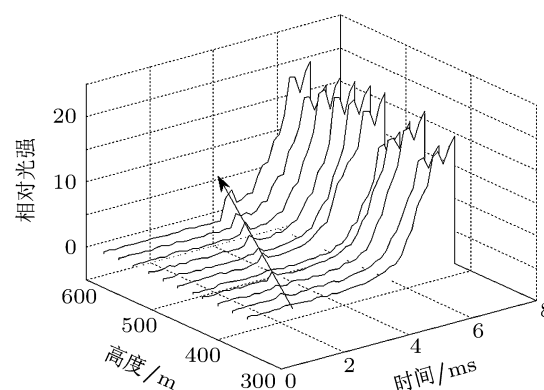


图 2 上行正先导相对光强值随时间和高度的变化 该图中的时间和高度对应于图 1 中 40 张图片的时间和高度值

根据高速摄像观测的先导发展、帧速和观测距离等, 估算出该先导的二维平均发展速度为 9.8×10^4 m/s, 局部速度变化范围为从 3.8×10^4 m/s 到 1.4×10^5 m/s, 来自于像素提取和高速摄像仰角、镜头标定等方面的误差应在 9% 之内. 图 3

是上行正先导的局部传播速度随高度的变化曲线, 图中的 19 个数据点由图 1 前 20 张图片每两张先导头部间的通道长度与两张图片间的时间 $167 \mu\text{s}$ 的比值得出, 每个数据点对应的高度为相邻两张图片中先导头部高度的中值. 由图 3 可见, 先导的局部速度呈明显的不规则变化, 波动较大, 起始速度只有 $3.8 \times 10^4 \text{ m/s}$; 第二张图片先导的速度增加到 $9.9 \times 10^4 \text{ m/s}$, 是起始速度的 2.6 倍; 第三张图片先导的速度又降到 $5.9 \times 10^4 \text{ m/s}$; 图中相邻两点的速度之比最大为 2.9 倍; 这说明上行正先导具有明显的梯级特征. 总体上先导速度随高度增加呈增加趋势, 先导加速与随着高度的增加先导不断加强有关. 随着先导的发展, 空气压力降低, 环境电场增强 [25], 先导从环境电场中获得的能量也越大, 其持续发展的能力也得到加强. 拟合出的先导速度随高度变化的趋势线标于图 3 之中. 上行正先导的起始速度是 $3.8 \times 10^4 \text{ m/s}$, 这个结果要比 Kito 等 [10] 报道的 $0.1 \times 10^5 \text{ m/s}$ 大, 可能是因为 Kito 等报道的是冬季人工触发闪电, 其触发高度较低, 且触发闪电时地面电场较小. 另外其报道的上行正先导的速度随时间呈指数增加, 产生这种差别的原因可能与他进行光学拍摄的时间分辨率较低 (1 ms) 有关, 另外我们拍摄到的仅是火箭头部先导开始发展的一部分.

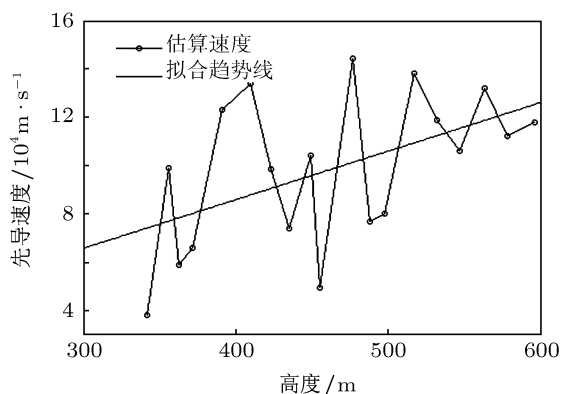


图 3 上行正先导局部速度随先导头部高度的变化 图中数据来自于图 1 中前 20 张图片, 每个速度值由相邻两张图片中先导头部新增通道长度与两张图片间时间间隔 $167 \mu\text{s}$ 的比值得到, 其对应的高度对这两张图片中先导头部高度的中值

3.2 上行正先导产生的地面电场随时间的变化

图 4 是使用快天线闪电电场变化仪测量到的 60 m 处上行正先导的电场变化曲线, 电场变化波形进一步表明该上行正先导具有明显的梯级传输特征, 每一个脉冲或梯级状电场变化对应于一

次先导的梯级发展. 所记录到的 28 个梯级脉冲使用 1, 2, …, 28 进行了标注, 第 28 个脉冲之后因记录饱和而呈直线变化, 时间零点对应于图 1 中高速摄像的第一张照片, 即上行正先导开始稳定传输的时刻. 由图 4 得到的梯级间隔变化从 $14 \mu\text{s}$ 到 $39 \mu\text{s}$, 几何平均值为 $25.1 \mu\text{s}$, 算术平均值为 $25.8 \mu\text{s}$. 从图 4 可以推断, 该上行先导稳定持续发展, 在前半段呈现非常明显的梯级特征, 在第 16 个梯级之后, 梯级特征不是很明显, 具有或多或少的连续特征, 但在第 24 个梯级之后, 梯级特征又相对明显,

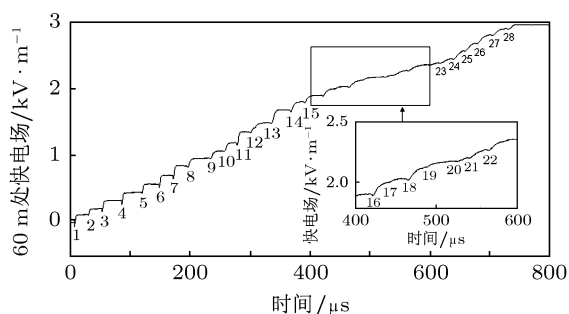


图 4 上行正梯级先导在距通道 60 m 处产生的电场快变化梯级脉冲由 1, 2, 3, …, 等数字进行了标记, 图中曲线上方框中的放大图见箭头所指, 该图时间零点与图 1 相同, 总时间对应图 1 中前面约 5 张图片的时间

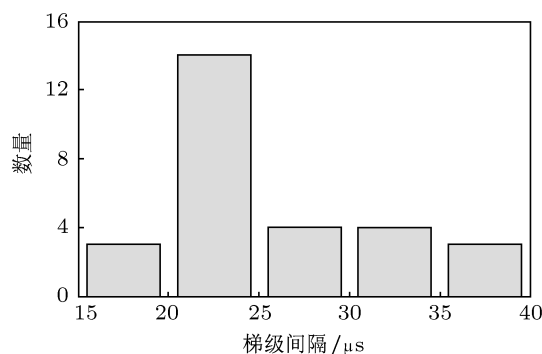


图 5 上行正先导梯级间隔的柱状分布图

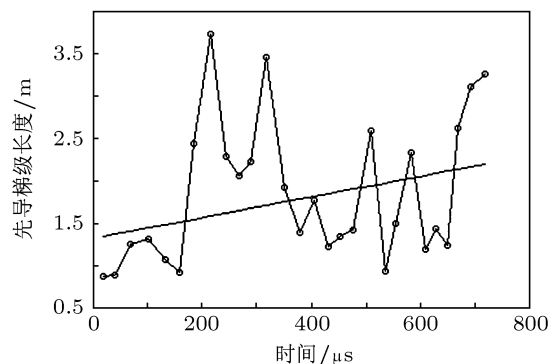


图 6 估算的上行正梯级先导的梯级长度 该图时间起点与图 1 相同, 总时间对应图 1 中前面约 5 张图片的时间

但没有前半段明显. 对比光学与电场变化波形, 梯级不明显时对应图 1 中的第 3 张后半部分和第四张图片前半部分, 而这部分时间正好对应先导头部通道发生弯曲的时间, 通道发展具有较大水平分量, 说明先导头部通道发生弯曲且具有较大水平发展分量可能是导致梯级不明显的其中一个原因; 先导头部通道发生弯曲也说明在该区域附近可能存在一个空间电荷区, 促使通道朝这个方向发展, 但过了该区域后, 先导头部通道不再受空间电荷区的影响, 水平分量变小, 此时梯级变得相对明显. 上述事实说明在空间电荷区或受局部电场影响条件下, 正先导通道会发生弯曲, 正先导电场变化能够由梯级转变到连续; 尔后当先导头部通过该区域后, 先导电场变化能再转变回梯级, 这与 Rakov 和 Uman^[1] 的观测结果一致. 总体上随着上行正先导的发展, 梯级特征减弱, 电场却一直同极性增大, 表明在越来越强的雷暴电场下, 梯级特征可能越来越不明显, 但上行正先导也有可能受到局部电场或空间电荷的影响而恢复其梯级特征.

图 5 显示了梯级间隔的柱状分布图, 从图中看出, 梯级间隔主要分布在 20 μs 到 25 μs 之间, 说明梯级间隔的分布比较规则. 由于梯级间歇时间越长, 梯级长度也越长^[19,26,27], 故梯级长度可使用梯级间隔乘以先导发展局部平均速度进行估算; 因每张高速摄像图片对应 167 μs (帧速 6000 fps), 在这 167 μs 内发生的梯级均对应由该帧所求的局部平均速度. 图 6 是按上述方法求得的梯级长度随时间的演变图, 先导梯级长度最小为 0.9 m, 最大为 3.7 m, 算术平均值为 1.8 m, 几何平均值为 1.7 m, 中值 1.4 m; 梯级长度随时间也呈现不规则变化, 但

总体上梯级长度随高度 (或随时间) 增加呈现弱增加趋势. Rakov 和 Uman^[1] 指出, 上行正梯级长度有随高度减小的趋势. 出现矛盾的原因, 一方面由于摄像时间分辨率较低, 计算步长时使用的是较大范围内的平均局部速度; 另一方面, 关于上行正先导的例子较少, 得到的结果还有待更多的观测事实来证明. 上行梯级先导步长变化特征的进一步研究对光学探测提出了更高的要求, 可能需要其时间分辨率达到亚微秒量级以上.

本文所测上行正先导平均速度、梯级间隔、梯级步长与其他研究者所测结果对比见表 1, 可以看出, 本文所得上行正梯级先导的速度与自然闪电正先导速度^[8,9]、人工触发闪电上行正先导速度^[5]、高建筑物激发的上行正先导的平均速度^[13-15]一致. 除了 Kong 等^[9]的结果以外, 本文所得的梯级间隔与其他研究者所得的正梯级先导的梯级间隔是一致的, 其平均值都分布在 20—30 μs . Kong 等所得结果相对较小, 原因可能是其所测的是下行正先导, 而其他研究者的均为上行正先导. 在地面附近, 上行正先导为发展前期, 下行正先导为发展后期, 下行正先导的头部电场比上行正先导应该要大得多, 越靠近地面, 头部积累电荷的时间也要短得多, 因此, 梯级间隔也会短一些. 由表 1 还可看出, 本文所得梯级步长比其他研究者所报道的人工触发闪电上行梯级先导的步长都小. 这可能是因为该先导开始阶段较弱, 梯级间隔长, 头部积累电荷时间较长, 一次梯级发展只能向前走较短的距离, 故梯级长度较短. 从表中还能看出, 高建筑物触发闪电明显比人工触发闪电的上行正先导梯级间隔和梯级长度大.

表 1 本文正梯级先导观测结果与其他研究者所得结果对比

	实验说明	速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	梯级间隔/ μs	梯级长度/m
本文	山东经典人工触发闪电, 上行正先导	0.38— 1.4×10^5	14—39(25.8)	0.9—3.7(1.7)
Biagi 等 ^[5]	Florida 人工触发闪电, 金属丝离地面几厘米, 上行正先导	5.6×10^4	—	—
杨静等 ^[7]	山东人工触发闪电, 金属丝下面有 5 m 尼龙绳, 上行正先导	—	18—25(21.6)	—
陈绍东等 ^[28]	广州经典人工触发闪电, 上行正先导	—	15.4—24(20)	7.16
			17.2—40.8(24)	8.59
McEachron ^[13]	Empire state Building, 自然闪电, 上行正先导	0.52— 6.4×10^5 (2.5×10^5)	20—100(30)	6.2—23(8.2)
Berger 等 ^[14,15]	Monte san Salvatore, 自然闪电, 上行正先导	4×10^4 — 1×10^6	40—120	4—40
Kong 等 ^[9]	自然闪电, 下行正先导	0.1 — 3.8×10^5	3—31(17)	—
Saba 等 ^[8]	自然闪电, 正先导	0.3 — 6×10^5 (2.7×10^5)	—	—

注: 括号中为平均值

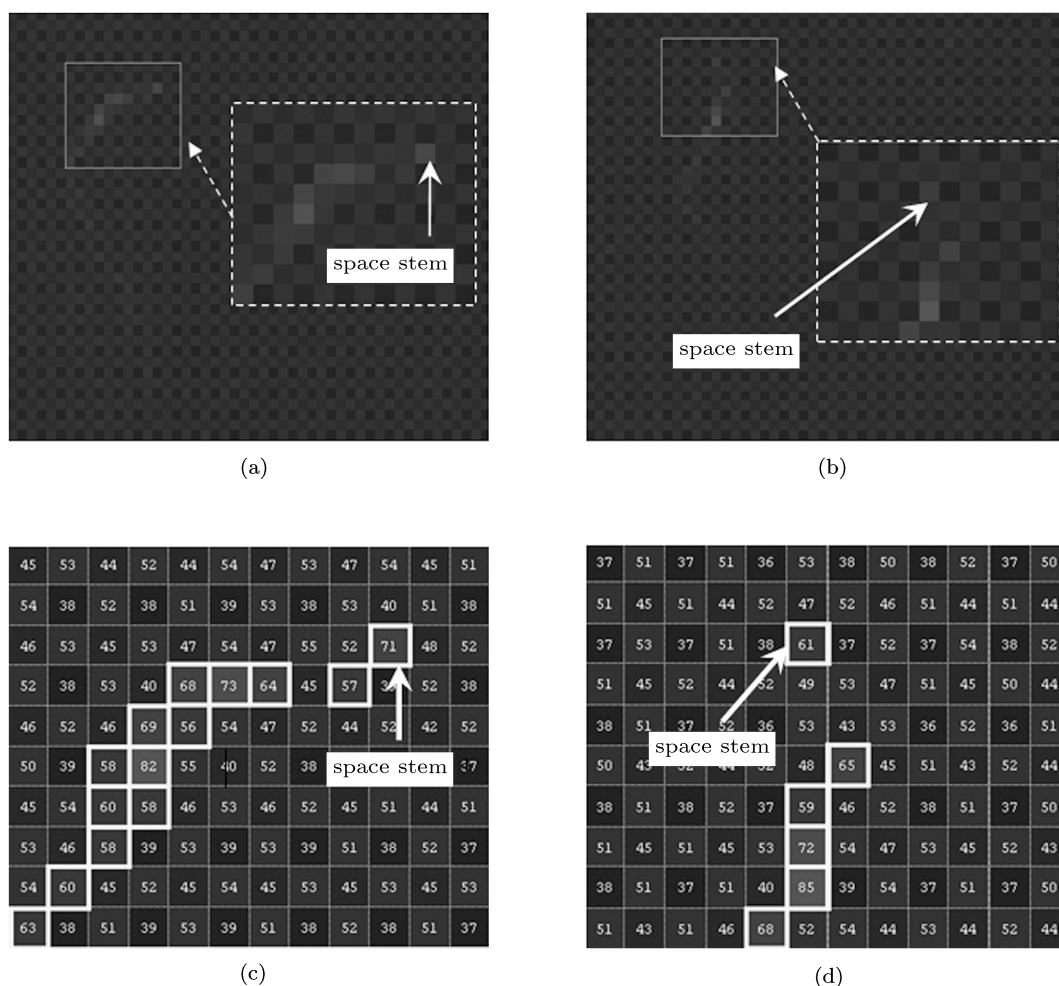


图 7 (a), (b) 图分别对应图 1 中第 3 和第 6 张先导通道的原始图片, 小方框中的先导头部的放大图分别见虚线框中所示; (c), (d) 图分别对应 (a), (b) 图的虚线框中先导头部放大部分像素的亮度值分布图, 亮度值超过 55 的像素均用正方形做了标记, 这些像素对应于先导通道

3.3 上行正先导的梯级形成机制

实验室火花放电表明^[16], 负梯级先导由一个双向发展的流光从先导头部的前面激发, 正流光向后扩展到先导头部, 负流光则向相反方向发展, 最终双向流光成为先导通道的一部分, 完成一个梯级的发展. 最近 Biagi 等^[5,29] 观测到负先导头部前面有一个或两个亮区, 说明闪电中的负先导梯级类似于实验室负先导梯级形成机制, 但对于正梯级的形成和发展机制目前还没有定论. 图 7 中 (a), (b) 图分别对应图 1 中第 3 和第 6 张先导通道的原始图片部分, 小方框中先导头部的放大图分别见虚线框中所示; 图 7(c), (d) 分别为图 7(a), (b) 图虚线框中先导头部放大部分像素的亮度值分布图, 亮度值超过 55 的像素均用正方形做了标记, 这些像素对应于先导通道. 图 7 显示出正先导头部前方有一发光区域 (见图中箭头所指), 该发光区明显由暗区与发

光的先导通道隔开, 估计出暗区约 1.7 m; 根据前面的叙述, 这两张图片均对应上行正先导的梯级传输阶段, 暗区加箭头所指发光区对应的空间尺度与前面所估计的梯级步长一致, 且该观测结果和 Biagi 等^[5,29] 的类似, 因此图中箭头所指发光区应是正梯级先导发展中的“space stem”, 以激发下一个向上传输的梯级. 这个观测事实说明闪电中的正先导和负先导的梯级形成机制可能是类似的, 即正先导的每一个梯级由一个从先导头部的前方激发的流光双向发展, 负流光向后扩展到先导头部, 正流光则向先导通道延伸的方向发展, 最终双向流光成为正先导通道的一部分, 完成一个梯级的发展.

3.4 上行正先导在不同距离上产生的地面电场变化特征

图 8 是 30 m, 60 m, 480 m 处的快天线闪电电

场变化仪测得的上行正先导前 200 μs 电场变化波形对比图, 图中已经消除了直流分量的影响. 由图 8 可以看出, 梯级先导在不同的距离上均表现出明显的梯级特征, 不同距离上梯级电场变化一一对应. 图中先导电场变化由两部分构成, 一部分对应于慢的变化或正向梯级状变化. 对于所测的 30 m, 60 m, 480 m 处相对近的距离电场, 慢变化主要应该对应于先导通道产生的静电场变化, 由于电场慢变化在不同距离处均呈正向变化, 表明先导中的正电荷在逐渐增加, 每一个梯级台阶比较平坦则表明在每一个台阶期间先导通道中正电荷以均匀速度在增加, 台阶逐步升高表明每增加一个梯级, 先导通道中正电荷增加的速度在增大, 由于电荷增加的速度正比于电流, 故可推得对应于梯级每一个台阶的先导电流也应呈现正向增大的梯级状变化, 这部分电流类似于负梯级先导中的连续电流. 先导电场变化的另一部分为短时间尺度的脉冲变化, 对应梯级的发展过程. 按上述分析的正先导梯级形成机制, 在梯级发展过程中双向流光的负流光与先导头部间的连接过程会产生快速的电荷流动, 这能够产生较强的辐射, 是导致梯级先导电场产生脉冲变化的主要原因.

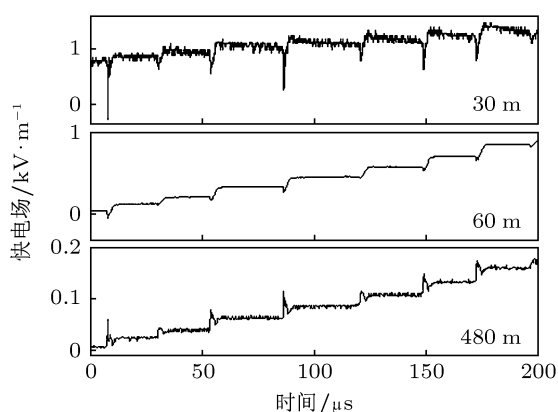


图 8 上行正先导在 30 m, 60 m, 480 m 处产生的快电场变化

根据上述上行正先导头部的光学特征和地面电场变化特征, 可知正先导的梯级传输过程如下: 在第一个梯级产生之前, 不同距离电场变化均为正向变化, 且电场变化较平缓, 说明此时先导通道中正电荷可能在以一定的速度积累; 当通道中的正电荷积累到一定程度以后, 先导头部电场足够强, 先导头部附近会产生一击穿区; 该击穿区在先导头部聚集的正电荷的强电场作用下, 击穿区的负电荷向先导头部方向发展, 而正电荷则向远离先导头部的

方向发展, 该过程还伴随着加热和电离, 整体表现为双向发展的流光即图 7 中的“space stem”; 当先导头部与向先导头部发展的负流光相接, 双向流光成为先导通道的一部分, 完成一个梯级的发展. 在梯级发展过程中, 负流光向先导头部的运动会产生较强的辐射脉冲, 使电场变化中出现脉冲变化. 故每一个电场脉冲变化对应一个梯级的发展, 当先导通道以梯级的形式向前扩展了一段距离后, 头部电场减弱, 先导需要进一步积累电荷才能使其头部电场逐渐增大, 当先导通道中的电荷积累到一定程度后, 其头部的电场得以恢复, 便会激发下一个梯级.

由上述分析, 还可推知上行正梯级先导中的电流也应由两部分组成, 一部分为连续电流, 对应电场变化中的慢变化, 且也呈台阶状变化; 一部分为脉冲电流, 对应电场变化中的脉冲变化. 另图 8 显示出 30 m, 60 m 处和 480 m 的梯级脉冲变化极性是相反的, 30 m, 60 m 处快电场脉冲为负向变化, 而 480 m 处快电场脉冲为正向变化. 这说明正先导梯级电流脉冲的电场在一定距离处会出现反相变化, 在小于反相距离时, 电场慢变化与电场脉冲变化极性相反, 而在反相距离以外, 电场慢变化与电场脉冲变化极性相同.

4 结论

本文结合一次经典人工触发闪电的上行正梯级先导的同步高速摄像光学测量和 30 m, 60 m, 480 m 处的电场测量, 得到了该次触发闪电中上行正梯级先导的传输特征: 先导向上发展过程中相对较亮但头部朝向可能变化, 而其下面的通道相对光强较弱, 局部变化具有不规则的波动特征, 总体上相对光强随时间和高度的增加而增强. 先导的二维平均发展速度呈现出明显的不规则性, 波动较大, 平均为 9.8×10^4 m/s, 局部速度变化从 3.8×10^4 m/s 到 1.4×10^5 m/s, 先导的局部速度随高度 (或时间) 增加呈现增加的趋势. 所有这些结果清楚地表明了先导的梯级传输特征. 该次人工触发闪电共记录到 28 个梯级, 梯级间隔变化范围是 14 μs 到 39 μs , 几何平均值为 25.1 μs , 梯级间隔主要分布在 20 μs 到 25 μs 之间. 先导梯级长度最小为 0.9 m, 最大为 3.7 m, 算术平均值为 1.8 m, 几何平均值为 1.7 m, 比其他作者报道的自然下行正先导接近地面时的结果要小, 原因可能是由于我们所分析的上行正先

导处于较低的初始发展阶段,这时先导相对较弱.上行正梯级先导较下行正梯级先导的梯级间隔要短,可能因为下行正梯级先导为发展后期,其头部电场比上行正先导应该要大得多,越靠近地面,头部积累电荷的时间也要短得多,故梯级间隔也会短一些.在空间电荷区或受局部电场影响条件下,正先导头部通道会发生弯曲,正先导电场变化能够由梯级转变到连续;而后当先导头部通过该弯曲区域后,先导电场变化能再转变回梯级;总体上随着上行正先导的发展,梯级特征减弱.

对不同距离处正梯级先导电场变化波形对比发现,不同距离处的梯级脉冲波形均表现出明显的梯级特征,先导电场变化有慢的变化或正向梯级状

变化和脉冲变化.结合高速摄像光学观测和电场变化测量结果,正梯级先导头部的前端有一击穿区,类似于负梯级先导,说明正负先导的梯级形成机制可能类似;正梯级先导电流由梯级状电流和脉冲电流组成,连续电流对应电场变化中的慢变化或梯级状变化,脉冲电流对应电场的脉冲变化.下一步工作将进一步获取人工触发闪电的通道电流和近距离电场、高速摄像的同步观测,并在此基础上,建立合理的物理模型,对正先导的发展机制进行定量分析模拟.

感谢山东省防雷中心和滨州市气象局对人工触发闪电实验的大力支持;感谢所有参与野外观测的实验人员.

- [1] Rakov V A, Uman M A 2003 *Lightning: Physics and Effects* (New York: Cambridge Univ. Press)
- [2] 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, 邴秀书, 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 J, Qie X S, Wang J G, Zhao Y, Zhang Q L, Yuan T, Zhou Y J, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1968 (in Chinese) [杨静, 邴秀书, 王建国, 赵阳, 张其林, 袁铁, 周筠珺, 冯桂力 2008 物理学报 **57** 1968]
- [4] 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, 邴秀书, 王彩霞, 杨静, 张其林, 王俊芳, 刘冬霞 2011 物理学报 **60** 079201]
- [5] Biagi C J, Jordan D M, Uman M A, Hill J D, Beasley W H, Howard J 2009 *Geophys. Res. Lett.* **36** L15801 doi: 10.1029/2009GL038525
- [6] Qie X S, Kong X Z 2007 *Geophys. Res. Lett.* **34** L06809 doi: 10.1029/2006GL028771
- [7] Yang J, Qie X S, Zhang Q L, Zhao Y, Feng G L, Zhang T L, Zhang G S 2009 *Atmos. Res.* **91** 393
- [8] Saba M M F, Cummins K L, Warner T A, Krider E P, Campos L Z S, Ballarotti M G, Pinto Jr O, Fleenor S A 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L07802 doi:10.1029/2007GL033000
- [9] Kong X Z, Qie X S, Zhao Y 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L05816 doi:10.1029/2007GL032764
- [10] Kito Y, Horii K, Higashiyama Y, Nakamura K 1985 *J. Geophys. Res.* **90** 6147
- [11] Idone V P 1992 *Res. Lett. Atmos. Electr.* **12** 23
- [12] Yang J, Qie X S, Zhang Q L, Zhou Y J, Feng G L, Kong X Z, Zhang T L, Xiao Q F, Zhang G S, Wang H B 2007 *Plateau Meteorology* **26** 556 (in Chinese) [杨静, 邴秀书, 张其林, 周筠珺, 冯桂力, 孔祥贞, 张廷龙, 肖庆复, 张广庶, 王怀斌 2007 高原气象 **26** 556]
- [13] McEachron K B 1939 *Franklin Inst.* **227** 149
- [14] Berger K, Vogelsanger E 1966 *Bull. Schweiz. Elektrotech.* **57** 599
- [15] Berge K, Vogelsanger E 1969 *New Results of Lightning Observations. In Planetary Electrodynamics* (New York: Gordon and Breach)
- [16] Les Renardieres Group 1977 *Electra* **53** 31
- [17] Schonland B F J 1956 *The Lightning Discharge. In Handbuch of Physics* **22** 576
- [18] Berger K 1977 *The Earth Flash. In Lightning. Vol.1. Physics of Lightning* (New York: Academic Press)
- [19] Orville R E 1968 *J. Geophys. Res.* **73** 6999
- [20] Qie X S, Zhang Q L, Zhou Y J, Feng G L, Zhang T L, Yang J, Kong X Z, Xiao Q F, Wu S J 2007 *Science in China D* **50** 1241 (in Chinese) [邴秀书, 张其林, 周筠珺, 冯桂力, 张廷龙, 杨静, 孔祥贞, 肖庆复, 吴书君 2007 中国科学 D **50** 1241]
- [21] Qie X S, Zhao Y, Zhang Q L, Yang J, Feng G L, Kong X Z, Zhou Y J, Zhang T L, Zhang G S, Zhang T L, Wang D F, Cui H H, Zhao Z K, Wu S J 2009 *Atmos. Res.* **91** 310
- [22] Qie X S, Yang J, Jiang R B, Wang J F, Liu D X, Wang C X, Xuan Y J 2010 *Chinese J. Atmos. Sin.* **34** 937 (in Chinese) [邴秀书, 杨静, 蒋如斌, 王俊芳, 刘冬霞, 王彩霞, 宣越健 2010 大气科学 **34** 937]
- [23] Schonland B F J 1950 *The Flight of Thunderbolts* (Oxford: Clarendon Press)
- [24] Williams E R 2006 *Sci. Technol.* **15** S91 doi:10.1088/0963-0252/15/2/S12
- [25] Stolzenburg M, Marshall T C, Rust W D, Bartels D L 2002 *J. Geophys. Res.* **107** D18 4352 doi:10.1029/2001JD000904
- [26] Ralph K, Tidman D A 1974 *J. Geophys. Res.* **79** 865
- [27] Wang D H, Qie X S, Guo C M 1999 *Lightning and Artificially Triggered Lightning* (Shanghai: Shanghai Jiaoda Press) (in Chinese) [王道洪, 邴秀书, 郭昌明 1999 雷电与人工引雷 (上海: 上海交大出版社)]
- [28] Chen S D, Zhang Y J, Yang S J, Dong W S, Huang Z H, Lü W T, Zheng D 2007 *Proceedings of the CSEE* **29** 113 (in Chinese) [陈绍东, 张义军, 杨少杰, 董万胜, 黄智慧, 吕伟涛, 郑栋 2009 中国电机工程学报 **29** 113]
- [29] Biagi C J, Uman A, Hill D, Jordan M, Rakov A, Dwyer J 2010 *J. Geophys. Res.* **115** D23215 doi:10.1029/2010JD014616

Propagating properties of a upward positive leader in a negative triggered lightning*

Wang Cai-Xia¹⁾²⁾³⁾ Qie Xiu-Shu^{1)†} Jiang Ru-Bin¹⁾³⁾ Yang Jing¹⁾

1) (*Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China*)

2) (*Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China*)

3) (*Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 7 April 2011; revised manuscript received 16 May 2011)

Abstract

Propagating properties of a upward positive leader are analyzed by using the data from the artificially triggered lightning experiment in Shandong 2009, including the high-speed camera records and simultaneous surface electric field fast change measurements at 30 m, 60 m and 480 m from the channel. The tip of the leader is brighter, and the leader's 2-D partial propagating speed along its channel irregularly changes in a wide range. This indicates that the upward positive leader exhibits obviously stepped characteristics. The average speed is 9.8×10^4 m/s from 340 m to 705 m at the beginning stage of the leader propagating. The upward positive leader is initiated at a speed of 3.8×10^4 m/s. The partial speed shows an increasing tendency with height increasing. The electric field change waveform of upward positive leaders has a regularly stepped shape. The step interval of 28 steps recorded ranges from 14 μ s to 39 μ s with a geometrical mean value of 25.1 μ s. The induced step length varies from 0.9 m to 3.7 m with a geometrical mean value of 1.7m. The electric field change of upward positive leaders includes the slowly stepped change and pulsed change. The high-speed camera records and electric field measurements show that the channel of the leader tip bending can eliminate or weaken the stepped property of the electric field change. The positive step leader has a similar propagating mechanism to that the negative leader has, that is a step of leader originates from a bi-directional streamer front end of the leader tip.

Keywords: rocket triggered lightning, positive leader, electric field change, high speed camera

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41175002, 40930949) the "Hundred Talent Project" of the Chinese Academy of Sciences, China, and the Funding Program for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning Under the Jurisdiction of Beijing Municipality of China (Grant No. PHR201008435).

† E-mail: qjex@mail.iap.ac.cn