

郑天雪, 陆高鹏, 谭涌波, 等. 2018. 人工引雷上行正先导传播过程中爆发式磁场脉冲极性反转现象的观测与分析 [J]. 大气科学, 42 (1): 124–133.
Zheng Tianxue, Lu Gaopeng, Tan Yongbo, et al. 2018. Observation and analysis of polarity reversal for the burst-type magnetic pulses during the propagation of upward positive leader in rocket-triggered lightning [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 124–133, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17114.

人工引雷上行正先导传播过程中爆发式磁场脉冲 极性反转现象的观测与分析

郑天雪¹ 陆高鹏^{1,2} 谭涌波¹ 樊艳峰³ 蒋如斌^{1,2} 张鸿波³
刘明远² 郝秀书^{1,2}

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/中国气象局溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100049

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 为了进一步理解人工引雷上行正先导的传播过程及相关的爆发式电磁辐射脉冲, 本文分析了 2014 年 8 月 23 日山东沾化人工触发闪电实验 (SHATLE) 中获得的三次上行正先导通道含有明显向下传播过程的个例。结果表明, 在初始连续电流阶段观测到的爆发式磁场脉冲极性反转现象与正先导头部发展方向相对于观测位置投影方向的变化密切相关。因此可以推断, 爆发式磁场脉冲是由正先导头部较小空间尺度放电过程辐射出的, 就本文分析的个例而言, 爆发式磁场脉冲辐射源的放电尺度约为 2 m, 放电强度的最大值达到 2.49 kA。爆发式磁场脉冲的辐射机制不同于人工引雷先导始发阶段初始脉冲电流产生的磁场脉冲的辐射机制, 可能与正先导通道头部的梯级形式发展过程相关。

关键词 人工引雷 正极性上行先导 初始连续电流 爆发式磁场脉冲 极性反转

文章编号 1006-9895(2018)01-0124-10

中图分类号 P427.32

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17114

Observation and Analysis of Polarity Reversal for the Burst-type Magnetic Pulses during the Propagation of Upward Positive Leader in Rocket-triggered Lightning

ZHENG Tianxue¹, LU Gaopeng^{1,2}, TAN Yongbo¹, FAN Yanfeng³, JIANG Rubin^{1,2},
ZHANG Hongbo³, LIU Mingyuan², and QIE Xiushu^{1,2}

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/ Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100049

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

收稿日期 2017-1-23; **网络预出版日期** 2017-05-27

作者简介 郑天雪, 男, 1994 年出生, 硕士研究生, 主要从事闪电观测以及积云模式研究。E-mail: 13813006359@163.com

通讯作者 陆高鹏, E-mail: gaopenglu@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2014CB441405, 中国科学院“百人计划”项目 2013068, 国家自然科学基金优秀青年基金项目 41622501

Funded by The National Basic Research Program (973 Program) (Grant 2014CB441405), “The One Hundred Talent” Program of Chinese Academy of Sciences (Grant 2013068), Natural Science Foundation of Excellent Youth Program of China (Grant 41622501)

Abstract In order to understand the propagating process of upward positive leader and related burst-type electromagnetic pulses, in this paper we analyze three cases of downward propagation of positive leader channels obtained by SHATLE (SHandong Triggering Lightning Experiment) on August 23, 2014. The results show that the reversals in the polarity of magnetic pulses observed in the stage of initial continuous current are related to the variation of projection direction of positive leader head relative to the observation position. Thereby it can be inferred that the burst-type magnetic pulses are emitted by small spatial scale discharge process of positive leader head. For the cases analyzed in this paper, the discharge scale is about 2 m, and the maximum discharge intensity reaches 2.49 kA. The radiation mechanism for these magnetic pulses is different to the radiation mechanism for the magnetic pulses generated by the initial pulse current in the channel measured at the initial stage of rocket-triggered lightning, which may be related to the stepped propagation of positive leader.

Keywords Artificially triggered lightning, Upward positive leader, Initial continuous current, Burst-type magnetic pulses, Polarity reversal

1 引言

随着现代电子信息系统的迅速发展, 雷电电磁脉冲造成的损失日益显著, 认识并掌握该现象的物理本质对雷电防护技术的发展至关重要。但是由于自然闪电的发生和发展带有很强的时空随机性, 对它的直接观测十分困难。因此人工引雷这种在一定时空范围内可控的放电实验已成为雷电科学研究的重要手段, 推动了雷电物理过程及雷电与地面物体相互作用机理的研究 (Horii, 1982; Uman et al., 2000; Rakov et al., 2005; Qie et al., 2007, 2011)。传统的人工引雷实验利用火箭牵引钢丝升空, 在雷暴云底强电场的作用下, 接地钢丝头部和周围环境之间的电势差越来越大, 达到一定阈值时, 钢丝头部进行尝试性的电晕流光放电, 随着火箭不断上升, 电晕流光放电逐步增强并汇聚成连续发展的先导过程 (陈绍东等, 2009)。先导初始传播是以梯级形式前进的 (Rakov and Uman, 2003; Wang et al., 2016), 其二维算数平均速度在 10^5 m s^{-1} 量级, 与高塔始发的上行闪电的发展速度相当 (周忠华和刘欣生, 1993; 张义军等, 1997; 王彩霞等, 2012)。一般在先导始发 5~10 ms 之后, 先导通道在高速摄像上持续可见, 即对地的电荷传输进入初始连续电流阶段, 该阶段还伴随有爆发式的磁场脉冲辐射 (Lu et al., 2014; 樊艳峰等, 2017)。但受到观测设备探测能力的限制, 目前对初始连续电流过程的认识还比较缺乏, 而该过程又与正先导的梯级形式发展密切联系, 因此初始连续电流过程已成为雷电物理研究的一大热点。

目前对于上行先导初始连续电流过程的观测主要从电流、光学、电场和磁场这几个方面开展 (Qie et al., 2009; Schoene et al., 2010; Yang et al.,

2010; Jiang et al., 2014)。Fuchs et al. (1998) 根据对 Peissenberg 塔上始发的上行闪电的多年研究发现, 初始连续电流脉冲的平均峰值为 3.9 kA, 远小于回击电流平均峰值。Miki et al. (2005) 通过对比建筑物始发和人工引雷始发的上行闪电, 发现建筑物始发上行闪电的初始连续电流脉冲相比于人工引雷始发的具有更大的峰值, 更短的上升时间以及更短的半峰值宽度。张义军等 (2016) 分析 2008~2014 年广东人工引雷实验时得到初始连续电流过程的持续时间在 300 ms 左右, 平均强度 150 A, 转移电荷量均值 44 C。Miki et al. (2002) 利用自制的电场传感器, 对 9 次人工触发闪电初始连续电流过程进行测量发现, 闪电通道附近 0.1 m 处的垂直电场强度均值为 48 kV m^{-1} 。Lu et al. (2014) 在山东沾化人工引雷实验中, 利用高灵敏度宽带低频磁天线 (20~400 kHz) 观测到初始连续电流阶段同上行正先导 (UPPL) 相关的爆发式磁场脉冲序列。通过对该数据的分析得到了爆发式磁场脉冲的部分特征参数。但由于缺乏相应的光学观测, 无法确定磁场脉冲序列的辐射源位置及辐射源的放电电流强度, 因此也就无法对爆发式磁场脉冲的物理本质做出进一步的说明。

本文利用 2014 年夏季在山东测得的三次人工引雷数据, 对上行正先导初始连续电流过程的特征做出描述; 在对爆发式磁场脉冲的辐射源做出合理推测的基础上, 通过光学观测结果和磁场数据的结合分析, 对爆发式磁场脉冲的极性反转现象做出合理解释; 并利用偶极子辐射理论对爆发式磁场脉冲辐射源的放电电流强度进行估算, 从而进一步认识初始连续电流过程中产生的爆发式磁场脉冲现象, 并对该现象的物理本质进行初步的探讨。

2 实验和数据

山东人工引雷实验点设在山东省滨州市沾化地区，由发射场，主观测站和电磁定位网组成。实验主要观测项目包括通到底部电流、高速光学、近距离电场和磁场等。实验中对雷电流的测量采用直接测量和间接测量两种方式，直接测量是将带宽为 0~3.2 MHz 的 5 mΩ 同轴分流器串联在闪电电流通道中，间接测量则是利用带宽为 0.9 Hz~1.5 MHz 的 Pearson 线圈上感应到的电磁场来反演得到雷电流（郇秀书等，2010, 2012）。高速摄像系统是记录闪电通道发展情况的重要手段，实验采用的是帧速为 50000 幅/秒、分辨率设置为 256×512 像素的 V711 型高速摄像。闪电产生的电场变化测量使用带宽分别为 5 MHz 和 2 MHz，时间常数分别为 0.1 ms 和 6 s，采样率都为 5 MHz 的快慢天线系统。磁场的测量采用的是高灵敏度宽带低频磁天线，该磁场测量系统的 3 dB 带宽为 6~340 kHz，本文磁场数据的相关说明可以参考樊艳峰等（2017）。低频磁天线主要应用在人工引雷回击过程磁场的测量上（Uman et al., 2002; Schoene et al., 2003; Yang et al., 2010），近几年 Lu et al.（2014, 2016）将其用于人工引雷先导近距离辐射场的测量。测量的结果显示，高灵敏度低频磁天线可用在近距离处（如 100 m 内）测量上行先导发展过程中微小脉冲电流辐射出的磁场脉冲。

本文使用的数据来自 2014 年 8 月 23 日山东沾化地区一次雷暴天气过程中成功触发的三次闪电个例。图 1 为三次个例中上行先导发展的通道情况。表 1 给出了三次先导发展过程的相关参数。结合三次个例中相关过程的基底电流、磁场、电场和光学数据（其中电场上虽存在与磁场对应的脉冲现象，但由于数据噪声较大，不利于进一步分析），可以发现在光学图像上，第一个例子中正先导发展入云，云下通道短，下折不明显，通道电流极性在整个过程中保持一致，磁场脉冲的极性虽呈现有反转特征，但先导通道光学亮度较低，无法可靠识别，因此无法与磁场数据做对应分析；第二个例子的通道下折明显，磁场数据与光学数据对应良好，但缺少基底电流数据；第三个例子的通道下折发展不明显，通道电流极性在整个过程中保持不变，磁场脉冲的极性反转很难判断。综合比较下，本文选取个例 2 为主要讨论对象，其它两次个例作为补充，对

初始连续电流过程中爆发式磁场脉冲极性反转现象进行深入分析。

表 1 三次人工触发上行正先导发展过程参数统计
Table 1 Statistics of parameters for the upward positive leader in three triggered lightning flashes during SHATLE

时间 (UTC)	$H_{inception}$ /m	$H_{reversal}$ /m	爆发式磁场脉 冲持续时间/ms	通道底部 电流类型	光学观测 数据
16:11:06 (个例 1)	360	523	6.1	ICC	M310, V711
16:26:20 (个例 2)	222	582	12.1	~	M310, V711
16:29:52 (个例 3)	152	592	9.0	ICC	M310, V711

注： $H_{inception}$ 为上行先导始发高度， $H_{reversal}$ 为先导反转的高度，ICC 表示初始连续电流，M310 和 V711 为高速摄像机，~表示底部电流数据缺失。

图 2a 给出了个例 1 中人工引雷通道底部电流与光学相对亮度的相关性比较（光学相对亮度选取的是每个时刻图片除钢丝段总亮度的均值）。结果显示电流变化和光学亮度变化具有一定的正相关性，相关性系数高达 0.8244，这和周恩伟（2010）从空气离化通道和气化通道两个方面来分析连续电流过程中闪电通道的积分亮度和电流的关系时，得到两种情况下亮度和电流都存在显著的正相关的结论一致（张义军等，1998; Diendorfer et al., 2002; Wang et al., 2005）。图 2b 给出了该个例在 970 m 距离上获得的低频磁场测量数据（以闪电通道接地点为原点的柱坐标中方位角分量，以逆时针指向为正）。需要注意的是，低频磁天线两个方向（即南北方向和东西方向获得的磁场）的通道获得的波形完全不同，说明磁场传感器在该距离上不受闪电通道产生的电场影响。同图 2a 对比，可以发现爆发式磁场脉冲出现在钢丝熔断前后数毫秒的初始连续电流过程中，而其他时段也有类似的爆发式磁场脉冲。结合另外两次个例可知，在该次雷暴过程中，爆发式磁场脉冲现象只出现在上行正先导发展到特定高度之上（如大于 500 m）。

3 分析和结果

结合上述结论，本节重点分析个例 2 中观测到的上行正先导辐射出的爆发式磁场脉冲现象，拟从爆发式磁场脉冲的产生及该阶段上行正先导的特征，爆发式磁场脉冲的辐射源，爆发式磁场脉冲放电过程强度估算这三方面进行展开。

3.1 爆发式脉冲磁场特征分析

自火箭升空至先导入云一般会经历先导前脉冲过程，梯级先导发展过程和初始连续电流过程这

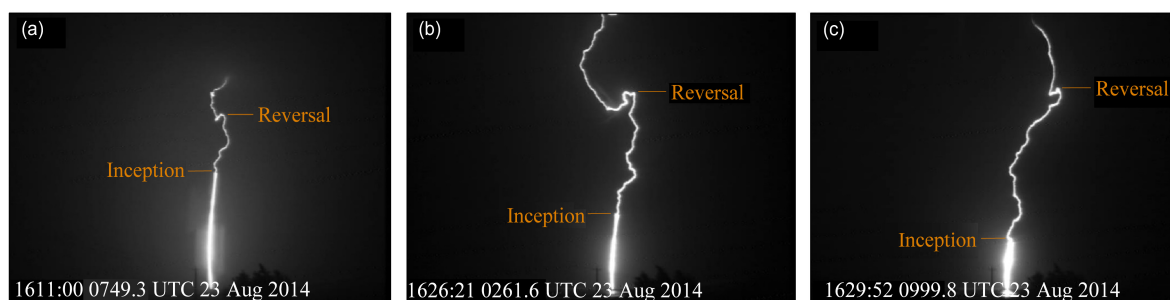


图1 2014年夏季山东人工引雷实验中成功触发的三次闪电个例（闪电通道在不同高度处均出现向下弯折）

Fig. 1 Three cases of triggered lightning flashes during SHATLE (SHAndong Triggering Lightning Experiment) in the summer of 2014, in which the lightning channel appeared to bend down at different heights

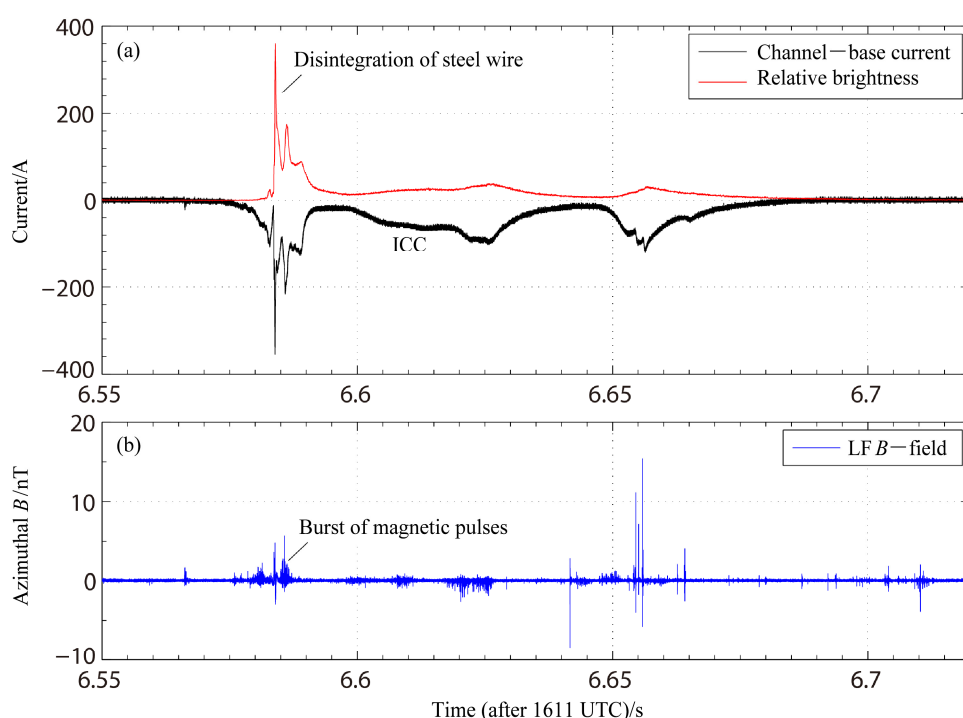


图2 个例1中人工引雷测量结果：（a）通道基底电流波形与光学相对亮度曲线的比较；（b）主观测场处磁场测量波形

Fig. 2 Measurements of the triggered lightning in case 1: (a) Comparison of current at the bottom of the channel and optical relative brightness; (b) magnetic field signal at the subjective site

三个阶段（陈绍东等，2009）。先导前脉冲过程和梯级先导过程产生的磁场脉冲由脉冲式脉冲和波纹型脉冲组成（樊艳峰等，2016；Lu et al., 2016），此类脉冲是由正先导始发阶段初始脉冲电流沿钢丝通道传输时辐射产生的。根据图2可知本文讨论的爆发式磁场脉冲产生于初始连续电流过程阶段，时间上和前两个过程相互间隔。图3a是上行正先导发展过程的静态图，通过光学数据对上行正先导的传播速度进行估算，得出正先导的二维平面瞬时速度在 $6.50 \times 10^4 \sim 1.31 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$ 之间，平均速度

约为 $1.74 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$ ，这和 Wang et al. (2016) 在北京气象塔上观测到的正先导的二维平均速度一致。且随着高度的上升，正先导的传播速度不断增大（Biagi et al., 2009, 2011；Yoshida et al., 2010；Jiang et al., 2013）。

图3b标出了火箭牵引钢丝升空的轨迹及先导传播过程的几个关键位置。A点是钢丝头部开始出现电晕流光的位置，对应上行正先导的始发；B点是上行正先导头部开始持续发光的位置，对应上行正先导开始进入初始连续电流阶段；C点是光学图

像上正先导头部开始下折的位置; D 点是光学图像上正先导头部再次上行发展的位置; E 点是正先导头部离开高速视野的位置。根据图 2 给出的通道底部电流和光学相对亮度的相关性, 将图 3c 中的相对亮度曲线等效为通到底部电流曲线。图中相对亮度增大区域对应着初始连续电流过程, 通道突然增亮至最大值可能与钢丝气化断裂有关, 此过程在磁场上反应为两个缓慢的脉冲变化。本文分析的爆发式磁场脉冲对应着图中的亮度增大区即初始连续电流过程, 有关初始连续电流的产生, 陈绍东等 (2009) 认为其与正先导发展入云, 转移云中电荷有关; 不过近年来在山东人工引雷实验中多次观测到先导在云下传播时即产生初始连续电流, 这在一定程度上说明了初始连续电流产生所需要的条件有时在云底之下的大气环境中也存在, 与先导梯级方式击穿发展密切相关, 且和正先导的发展是相互统一的。

表 2 爆发式磁场脉冲的特征统计
Table 2 Characteristic statistics of burst-type magnetic pulses

阶段	磁场脉冲特征量			
	持续时 间/ms	脉冲间 隔/ μ s	单个脉冲 时长/ μ s	磁场脉 冲数目
初始连续电流前段 (20.9580 s 到 20.9639 s)	6	32.0	6.8	126
初始连续电流后段 (20.9639 s 到 20.9739 s)	10	34.0	7.3	228
初始连续电流阶段 (20.9580 s 到 20.9739 s)	16	33.0	7.1	354

注: 脉冲间隔列的数值是指脉冲间隔的中值, 即文中的典型值。

图 4 给出了爆发式磁场脉冲极性及其脉冲间隔的定义。对 B 到 E 段磁场脉冲的特征进行统计, 得到该区域共辐射出 126 次磁场脉冲, 脉冲间隔典型值为 32 μ s, 每个脉冲间隔对应的空间尺度约为 5 m, 这和 Lu et al. (2014) 得到的脉冲间隔典型值 30 μ s 相吻合; 图 3c 显示 E 点之后的 10 ms 时间内, 低频磁天线共接收到 228 次磁场脉冲, 脉冲间隔典型值为 34 μ s, 两段间隔内的磁场辐射特征如表 2 所示, 脉冲间隔大小一致。除此之外, 从图 3c 可以看出, 两段时间间隔内的磁场脉冲在时间上连续, 都处在初始连续电流阶段; 而且参考图 2a 中得出的电流和光学相对亮度的相关性, 可知两段爆发式磁场脉冲序列都是由正先导头部局部区域的击穿过程产生。由此推断该区域和本文重点讨论区域的

辐射机制一致。将上述结果和 Lu et al. (2016) 讨论的正先导始发阶段辐射出的磁场脉冲时间间隔进行比较, 发现始发阶段产生的脉冲平均间隔小于 20 μ s, 远小于初始连续电流阶段正先导辐射出的爆发式磁场脉冲的时间间隔。这在一定程度上说明两种磁场脉冲的激发机制存在差别。

3.2 爆发式磁场脉冲的辐射机理

本节将 B 到 E 段的磁场数据和光学数据结合, 根据光学图像上正先导头部方向的变化, 将磁场数据分成三段。如图 5 所示正先导头部的发展方向经历了上升, 下折和再次上升三个阶段, 曲线 $BCDE$ 代表的是正先导头部垂直高度随时间变化的情况。对本次雷暴过程中触发的其它闪电个例及 2014 年夏季其它雷暴过程触发的闪电个例进行分析, 并未出现通道下折现象, 这说明雷暴环境因素和雷暴电荷分布共同决定先导通道的发展, 相关的问题会在以后的工作中进一步讨论。图 5 标出了爆发式磁场脉冲的极性, 红色对应正极性脉冲, 蓝色对应负极性脉冲, 相关特征统计如表 3 所示。

表 3 正先导初始连续电流过程中各阶段特征统计
Table 3 Characteristic statistics of various stages during the initial continuous current process of positive leader

阶段	时间/s	先导传播方向 的垂直分量	磁场脉冲极 性 (数量)	脉冲间 隔/ μ s	单脉冲 时长/ μ s
B 到 C	20.9581~20.9617	向上	正 (55)	39.5	6.8
C 到 D	20.9617~20.9628	向下	负 (36)	26.0	7.1
D 到 E	20.9628~20.9639	向上	正 (35)	31.0	6.4

实验中电流方向定义向下传输负电荷为负, 磁场方向取逆时针方向为正, 因此正先导头部传播方向向上时产生的磁场脉冲极性为正。根据表 3 得出, 正极性脉冲间隔的典型值略大于负极性脉冲, 脉冲时长与极性没有明显相关性; 正先导发展过程中辐射出的磁场脉冲极性和正先导头部传播方向变化有关, 即与正先导头部微小空间尺度放电电流的极性有关。由于通道中脉冲电流极性不变 (个例 1 和 3 中电流均为负), 通道中电流辐射出的磁场脉冲极性也应不变, 因此排除爆发式磁场脉冲源自通道中初始连续电流脉冲的可能。综上可知初始连续电流过程中产生的爆发式磁场脉冲是由正先导头部较小空间尺度放电电流辐射出的, 与正先导始发阶段初始脉冲电流产生的磁场脉冲的辐射机制相互区别, 可能与正先导的梯级形式发展相关。对个例 1 和 3 的分析也验证了上述结论。

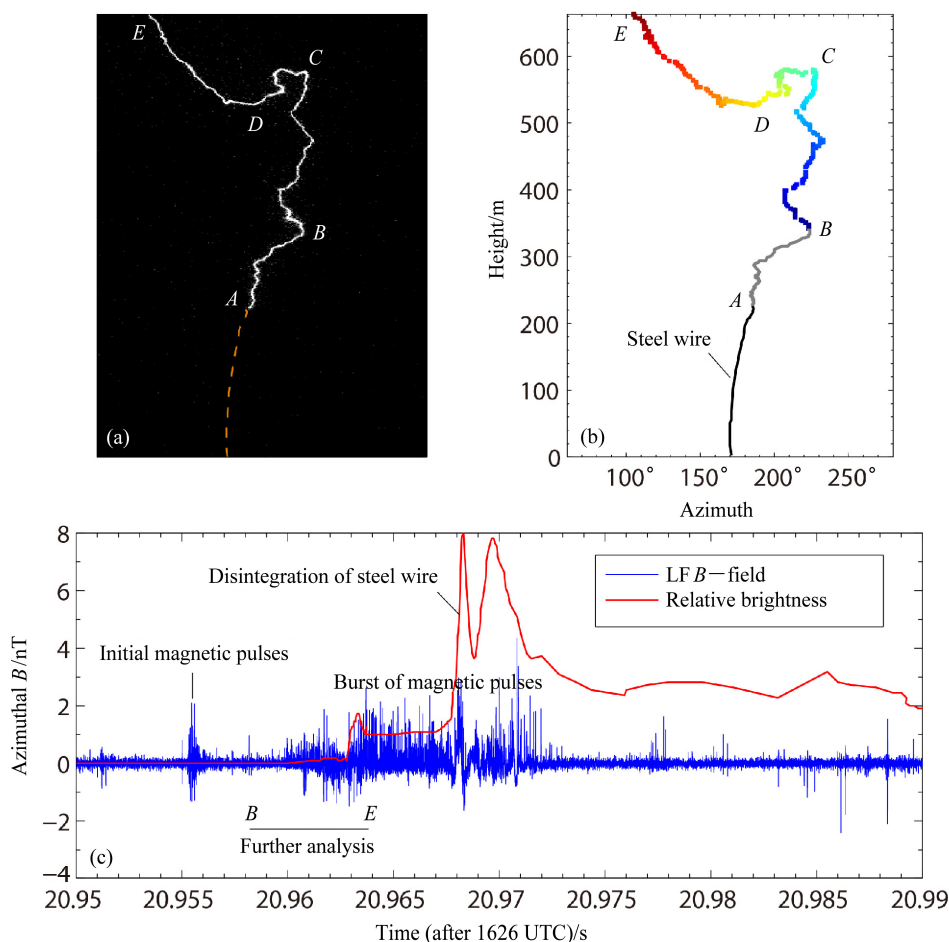


图3 个例2中上行正先导的综合观测结果：(a) 高速摄像拍摄的上行正先导传播轨迹；(b) 正先导传播过程示意图，其中黑色曲线代表火箭牵引钢丝升空的轨迹，A到E是正先导发展的几个重要时间节点，B到E的是正先导通道持续发光的过程；(c) 磁场数据与光学灰度数据叠加的结果，B到E段是本文讨论的爆发式磁场脉冲阶段

Fig. 3 Combined observations of the upward positive leader in case 2: (a) Propagation trajectory of the upward positive leader shot by high-speed camera; (b) propagation process diagram of the positive leader (black curve represents the trajectory of rocket traction wire off, B to E show the continuous glowing process of positive leader channel, and A to E are several important time nodes of positive leader propagation); (c) superposition result of magnetic field data and grayscale data. B to E display the burst-type magnetic field pulses, which are the focus of the present study

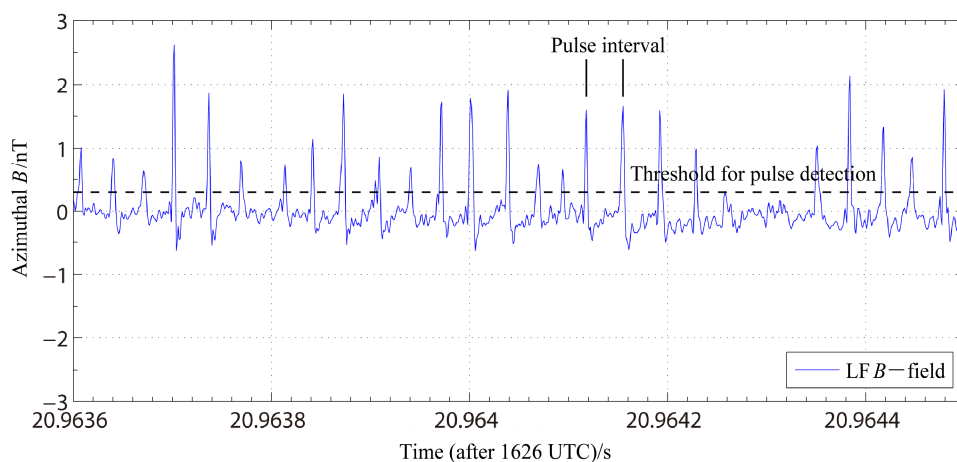


图4 爆发式磁场脉冲示意图。定义脉冲峰值大于0.3 nT为一次脉冲；脉冲先正后负为正极性脉冲，先负后正为负极性脉冲；两个相邻脉冲峰值之间的时间间隔为脉冲间隔

Fig. 4 Schematic diagram of burst-type magnetic field pulses. A pulse is defined when the pulse peak is greater than 0.3 nT; a pulse that is first positive and then negative is defined as positive polarity pulse, otherwise it is negative polarity pulse; the time interval between the two adjacent pulse peaks is the pulse interval

图 5 显示出磁场脉冲的规律性,即大小脉冲交替出现,且时间间隔一致,这和先导头部电晕流光放电到梯级击穿的过程相符。随着高速光学设备分辨率的提高,近年来的几次观测也表明正先导的发展有时是梯级的(Rakov and Uman, 2003; Wang et al., 2016)。Wang et al. (2016) 在北京气象塔上观测到的正先导梯级的平均间隔为 $55 \mu\text{s}$, 与文中磁场脉冲平均间隔 $46 \mu\text{s}$ 相近。Gao et al. (2014) 通过对广州高塔上始发的上行连接先导进行分析,得到先导的三维平均速度是二维平均速度的 1.3 倍。利用此系数将本文得到的正先导二维平均速度转化为

三维平均速度,并和单个脉冲时长相乘,估算出先导头部的放电尺度约为 2 m 。

3.3 爆发式磁场脉冲放电过程强度估算

本节在上文得到的磁场脉冲的时长以及正先导头部放电电流尺度的基础上,假设正先导头部辐射出的磁场脉冲波形为正弦波,进而对产生爆发式磁场脉冲的辐射源强度做出估算。

如图 6,自由空间中有一个长度为 dl 的无穷小垂直偶极子源,设其上载有频率为 ω 的时变电流源

$$i(l, t) = I_H(t - \frac{l}{v}), \text{ 频域表达式为 } I_\omega = I_{H\omega} e^{-j\omega(\frac{l}{v})} \quad (\text{视})$$

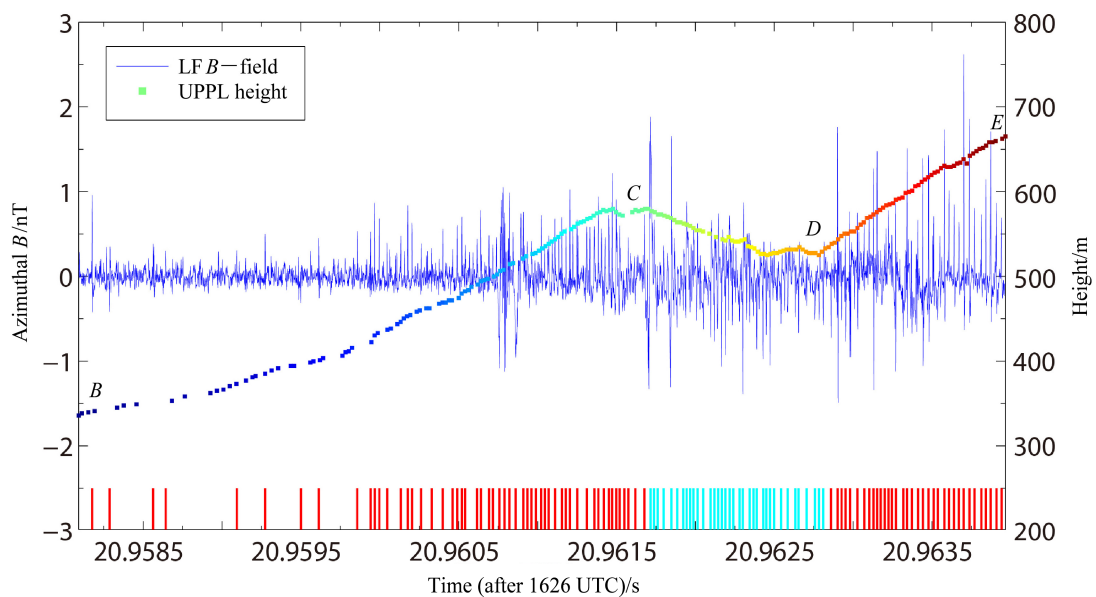


图 5 正先导初始连续电流过程中磁场—光学资料联合分析结果。图中彩色曲线代表正先导头部高度随时间的变化情况,蓝色和红色短线分别表示磁场脉冲的极性(负性脉冲用蓝色短线表示,正性脉冲用红色短线表示),B、C、D和E四点分别对应图 3b 中相应的四个点

Fig. 5 Comparison of magnetic field data and optical data during the initial continuous current process of the positive leader. Color curve represents the change of top height for the positive leader. Blue and red dashes in the figure indicate the polarity of the magnetic field pulses respectively (the blue dash represents the negative polarity pulse, the red dash represents positive polarity pulse). B, C, D and E correspond to the four points in Fig. 3b respectively

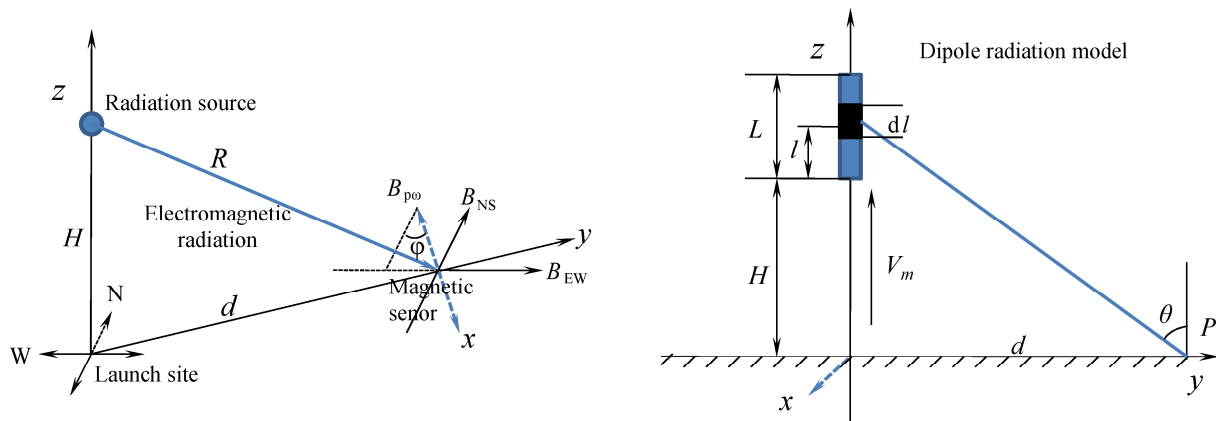


图 6 磁场辐射示意图

Fig. 6 Schematic diagram of magnetic field radiation

表 4 正先导头部放电电流强度估算参数表

Table 4 Parameter table of positive leader head discharge current estimation

正先导二维												
参数	波数 k	瞬时速度 v_m	光速 c	R	d	H	φ	真空磁导率 μ_0	$\sin(kR)$	$\sin\varphi$	$\sin\theta$	B_{EWmax}
数值	0.003 m^{-1}	$1.01 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$	$3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$	1146 m	970 m	610 m	76.8°	$4\pi \times 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$	-0.292	0.9736	0.8464	-2.216 nT

宝友等, 2004; Thottappillil and Rakov, 2007)。偶极子的长度 dl 远远小于波长以及偶极子到磁天线的距离 R , 且先导头部的放电尺度很小, 因此可以忽略偶极子上各点产生的辐射场在大小和相位上的差别, 得到 P 点的磁矢位为

$$A_{P\omega} = \frac{\mu_0 I_\omega}{4\pi R} e^{-jkR} dl, \quad (1)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, k 为波数, 且 $\omega = kc$, 其中 c 为真空中光速, v 是电流在通道中的传播速度。结合上文分析, 在 P 点只考虑辐射场, 对磁矢位 $A_{P\omega}$ 求旋度得到 P 点处的磁感应强度。考虑镜像原理, P 点处实际的磁感应强度 $B_{P\omega}$ 为

$$B_{P\omega} = jk \frac{\mu_0 \sin(\theta) I_\omega dl}{2\pi R} e^{-jkR}. \quad (2)$$

公式 (2) 得到的是偶极子元 dz' 在 P 点的磁感应强度, 本段估算的是正先导头部较小空间尺度的放电强度, 则该小尺度放电在 P 点处的辐射场可视作各个偶极子源的辐射和, 当 dl 足够小时, 用积分代替求和, 且只考虑辐射场, 放电尺度 L 远小于辐射波长, 电流速度 v 和观测距离, 因此忽略电流在通道中的差别, 得到

$$B_{P\omega} = \frac{j\mu_0 L \sin(\theta) I_{H\omega}}{\lambda R} e^{-jkR}. \quad (3)$$

假设正先导发展过程中辐射出的磁场脉冲为正弦波, 且文中使用的磁场数据是东西方向磁线圈测得的, 因此将实际辐射出的磁感应强度 $B_{P\omega}$ 进行方向投影, 如图 6 所示, 可以得到 B_{EW} :

$$B_{EW} = j \frac{\mu_0 L I_{H\omega} \sin(\theta) \sin(\phi)}{\lambda R} e^{-jkR}, \quad (4)$$

根据已经测得的磁感应强度 B_{EW} 反推出先导头部较小尺度放电电流的强度 $I_{H\omega}$:

$$I_{H\omega} = \frac{c \cdot R B_{EW}}{\mu_0 v_m \sin(\theta) \sin(\phi) \sin(kR)}. \quad (5)$$

从公式 (5) 可以得到放电强度 $I_{H\omega}$ 与放电尺度无关, 这也是与实际情况相符合的。

计算得到先导头部较小尺度放电的最大值为

2.49 kA, 这和 Wang et al. (1999) 得到的脉冲电流典型值在同一量级, 说明该方法对头部较小尺度放电的强度估算具有一定的参考价值。

4 总结

自 2013 年夏季利用低频磁天线在山东沾化人工引雷实验中观测到初始连续电流阶段的爆发式磁场脉冲之后 (Lu et al., 2014), 2014~2016 年夏季的人工引雷实验中均观测到爆发式磁场脉冲现象。本文通过对 2014 年 8 月 23 日凌晨的一次人工引雷个例 (个例 2) 进行深入分析后得出, 在正先导初始连续电流过程中产生了约 380 次磁场脉冲, 脉冲间隔典型值为 33 μs , 脉冲间隔对应的空间尺度约为 5 m, 正先导发展的二维平面速度为 6.50×10^4 到 $1.31 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$, 平均速度约为 $1.74 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$, 且随着高度的上升, 正先导发展速度逐渐增大。正先导传播过程中辐射出的爆发式磁场脉冲是由头部的较小空间尺度放电电流产生的, 放电尺度约为 2 m, 放电强度的最大值达到 2.49 kA。该辐射机制与正先导始发阶段通道中初始脉冲电流的辐射机制相互区别, 可能与正先导的梯级形式发展相关。

本文结合高速摄像数据对人工引雷正先导发展过程中爆发式磁场脉冲的辐射源给出了合理的解释, 且对产生这种爆发式磁场脉冲的微小尺度放电现象的原因给出了合理的猜想。但在估算先导头部放电强度时使用的是先导的二维平面速度, 和先导三维实际速度相比偏小 (Gao et al., 2014), 这会导致电流的估算结果较实际情况偏大。对于正先导自始发至进入云端的整个过程, 许多现象也还不能解释, 比如爆发式磁场脉冲前后数十毫秒都没有集中的脉冲磁场辐射, 正先导梯级产生的气象条件, 先导下折发展的雷暴环境等。除此之外建筑物始发的上行先导是否也会产生爆发式磁场脉冲现象, 正先导始发阶段产生的脉冲磁场是否也具有极性反转现象等, 这些都是我们下一步研究的方向。针对

这些亟待解答的问题,除了要继续开展相关的实验外,后面还考虑要进行一些模式工作,模拟建筑物和火箭始发的上行先导过程,争取实验和理论相结合对这些现象进行进一步分析和解释。

致谢 感谢山东省滨州市气象局及沾化县久山村盐务管理站有关工作人员对山东沾化人工引雷实验基地一系列工作的大力支持;感谢中国科学院大气物理研究所、山东省防雷中心、南京信息工程大学以及中国气象科学研究院和成都信息工程大学参加野外实验的全体人员。

参考文献 (References)

- Biagi C J, Jordan D M, Uman M A, et al. 2009. High-speed video observations of rocket-and-wire initiated lightning [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (15), doi:10.1029/2009GL038525.
- Biagi C J, Uman M A, Hill J D, et al. 2011. Observations of the initial, upward-propagating, positive leader steps in a rocket-and-wire triggered lightning discharge [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38 (24), doi:10.1029/2011GL049944.
- 陈绍东, 张义军, 杨少杰, 等. 2009. 两次仅有连续电流的负极性人工引发雷电特征分析 [J]. *中国电机工程学报*, 29 (1): 113–119. Chen Shaodong, Zhang Yijun, Yang Shaojie, et al. 2009. Characteristics of analysis of two negative artificially triggered lightning discharges with only continuous current [J]. *Proc. CSEE (in Chinese)*, 29 (1): 113–119, doi:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2009.01.013.
- Diendorfer G, Mair M, Schulz W. 2002. Detailed brightness versus lightning current amplitude correlation of flashes to the Gaisberg tower [C]//26th International Conference on Lightning Protection. Cracow, Poland: ICLP, 8–13.
- 樊艳峰, 陆高鹏, 张鸿波, 等. 2016. 人工触发闪电实验中初始电流脉冲辐射磁场的观测与模拟 [J]. *高电压技术*, 42 (2): 987–993. Fan Yanfeng, Lu Gaoping, Zhang Hongbo, et al. 2016. Observations and simulations of magnetic fields radiated by initial current pulses in rocket-triggered lightning [J]. *High Volt. Eng. (in Chinese)*, 42 (2): 987–993, doi:10.13336/j.1003-6520.hve.20160524001.
- 樊艳峰, 陆高鹏, 蒋如斌, 等. 2017. 利用低频磁场天线遥感测量人工引雷中的初始连续电流 [J]. *大气科学*, 41 (4): 1027–1036. Fan Yanfeng, Lu Gaopeng, Jiang Rubin, et al. 2017. Application of low-frequency magnetic sensor for remote measurement of the initial continuous current in rocket-triggering lightning [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41 (4): 1027–1036, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16248.
- Fuchs F, Landers E U, Schmid R, et al. 1998. Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes to tall structures relating to interference of electronic systems [J]. *IEEE Trans. Electrom. Compatib.*, 40 (4): 444–451, doi:10.1109/15.736205.
- Gao Yan, Lu Weitao, Ma Ying, et al. 2014. Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in Guangzhou [J]. *Atmos. Res.*, 149: 193–203, doi:10.1016/j.atmosres.2014.06.008.
- Horii K. 1982. Experiment of artificial lightning triggered with rocket [J]. *Mem. Fac. Eng. Nagoya Univ.*, 34 (1): 77–112.
- Jiang R B, Qie X S, Wang C X, et al. 2013. Propagating features of upward positive leaders in the initial stage of rocket-triggered lightning [J]. *Atmos. Res.*, 129–130: 90–96, doi:10.1016/j.atmosres.2012.09.005.
- Jiang R B, Qie X S, Wu Z J, et al. 2014. Characteristics of upward lightning from a 325-m-tall meteorology tower [J]. *Atmos. Res.*, 149: 111–119, doi:10.1016/j.atmosres.2014.06.007.
- Lu G P, Jiang R B, Qie X S, et al. 2014. Burst of intracloud current pulses during the initial continuous current in a rocket-triggered lightning flash [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 41 (24): 9174–9181, doi:10.1002/2014GL062127.
- Lu G P, Zhang H B, Jiang R B, et al. 2016. Characterization of initial current pulses in negative rocket-triggered lightning with sensitive magnetic sensor [J]. *Radio Sci.*, 51 (9): 1432–1444, doi:10.1002/2016RS005945.
- Miki M, Rakov V A, Rambo K J, et al. 2002. Electric fields near triggered lightning channels measured with Pockels sensors [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D16): ACL 2-1–ACL 2-11, doi:10.1029/2001JD001087.
- Miki M, Rakov V A, Shindo T, et al. 2005. Initial stage in lightning initiated from tall objects and in rocket-triggered lightning [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D2), doi:10.1029/2003JD004474.
- Qie X S, Zhang Q L, Zhou Y J, et al. 2007. Artificially triggered lightning and its characteristic discharge parameters in two severe thunderstorms [J]. *Sci. China Ser. D: Earth Sci.*, 50 (8): 1241–1250, doi:10.1007/s11430-007-0064-2.
- Qie X S, Zhao Y, Zhang Q L, et al. 2009. Characteristics of triggered lightning during Shandong artificial triggering lightning experiment (SHATLE) [J]. *Atmos. Res.*, 91 (2–4): 310–315, doi:10.1016/j.atmosres.2008.08.007.
- 鄢秀书, 杨静, 蒋如斌, 等. 2010. 新型人工引雷专用火箭及其首次引雷实验结果 [J]. *大气科学*, 34 (5): 937–946. Qie Xiushu, Yang Jing, Jiang Rubin, et al. 2010. A new-model rocket for artificially triggering lightning and its first triggering lightning experiment [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (5): 937–946, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.09.
- Qie X S, Jiang R B, Wang C X, et al. 2011. Simultaneously measured current, luminosity, and electric field pulses in a rocket-triggered lightning flash [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D10), doi:10.1029/2010JD015331.
- 鄢秀书, 杨静, 蒋如斌, 等. 2012. 山东人工引发雷电综合观测实验及回击电流特征 [J]. *大气科学*, 36 (1): 77–88. Qie Xiushu, Yang Jing, Jiang Rubin, et al. 2012. Shandong artificially triggering lightning experiment and current characterization of return stroke [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (1): 77–88, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.07.
- Rakov V A, Uman M A. 2003. Artificial initiation (triggering) of lightning by ground-based activity [M]// Rakov V A, Uman M A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press, 265–307.
- Rakov V A, Uman M A, Rambo K J. 2005. A review of ten years of triggered-lightning experiments at Camp Blanding, Florida [J]. *Atmos. Res.*, 76 (1–4): 503–517, doi:10.1016/j.atmosres.2004.11.028.
- Schoene J, Uman M A, Rakov V A, et al. 2003. Statistical characteristics of

- the electric and magnetic fields and their time derivatives 15 m and 30 m from triggered lightning [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D6), doi:10.1029/2002JD002698.
- Schoene J, Uman M A, Rakov V A. 2010. Return stroke peak current versus charge transfer in rocket-triggered lightning [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D12), doi:10.1029/2009JD013066.
- Thottappillil R, Rakov V A. 2007. Review of three equivalent approaches for computing electromagnetic fields from an extending lightning discharge [J]. *J. Lightn. Res.*, 1: 90–110.
- Uman M A, Rakov V A, Schnetzer G H, et al. 2000. Time derivative of the electric field 10, 14, and 30 m from triggered lightning strokes [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D12): 15577–15595, doi:10.1029/2000JD900046.
- Uman M A, Schoene J, Rakov V A, et al. 2002. Correlated time derivatives of current, electric field intensity, and magnetic flux density for triggered lightning at 15 m [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D13): ACL 1-1–ACL 1-11, doi:10.1029/2000JD000249.
- 王彩霞, 郗秀书, 蒋如斌, 等. 2012. 一次人工触发闪电上行正先导的传输特征 [J]. *物理学报*, 61 (3): 039203. Wang Caixia, Qie Xiushu, Jiang Rubin, et al. 2012. Propagating properties of an upward positive leader in a negative triggered lightning [J]. *Acta Phys. Sinica (in Chinese)*, 61(3): 039203, doi:10.7498/aps.61.039203.
- Wang D, Rakov V A, Uman M A, et al. 1999. Characterization of the initial stage of negative rocket-triggered lightning [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D4): 4213–4222, doi:10.1029/1998JD200087.
- Wang D, Takagi N, Watanabe T, et al. 2005. A comparison of channel-base currents and optical signals for rocket-triggered lightning strokes [J]. *Atmos. Res.*, 76 (1–4): 412–422, doi:10.1016/j.atmosres.2004.11.025.
- Wang Z C, Qie X S, Jiang R B, et al. 2016. High-speed video observation of stepwise propagation of a natural upward positive leader [J]. *J. Geophys. Res.*, 121 (24): 14307–14315, doi:10.1002/2016JD025605.
- Yang J, Qie X S, Zhang G S, et al. 2010. Characteristics of channel base currents and close magnetic fields in triggered flashes in SHATLE [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D23), doi:10.1029/2010JD014420.
- Yoshida S, Biagi C J, Rakov V A, et al. 2010. Three-dimensional imaging of upward positive leaders in triggered lightning using VHF broadband digital interferometers [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (5), doi:10.1029/2009GL042065.
- 张义军, 刘欣生, 肖庆复. 1997. 中国南北方雷暴及人工触发闪电特性对比分析 [J]. *高原气象*, 16 (2): 113–121. Zhang Yijun, Lin Xinsheng, Xiao Qingfu. 1997. A analysis of characteristics of thunderstorm and artificially triggered lightning in the north and south of China [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 16 (2): 113–121, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1997.02.001.
- 张义军, 言穆弘, 郗秀书, 等. 1998. 人工引发雷电对雷暴特性可能影响的观测与分析 [J]. *高原气象*, 17 (4): 412–419. Zhang Yijun, Yan Muhong, Qie Xiushu, et al. 1998. Observation and analysis of influences of artificially triggered lightning on characteristics of thunderstorm [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 17 (4): 412–419, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1998.04.010.
- 张义军, 张阳, 郑栋, 等. 2016. 2008–2014 年广东人工触发闪电电流特征 [J]. *高电压技术*, 42 (11): 3404–3414. Zhang Yijun, Zhang Yang, Zheng Dong, et al. 2016. Current Characteristics of triggered lightnings in Guangdong from 2008 to 2014 [J]. *High Volt. Eng. (in Chinese)*, 42 (11): 3404–3414, doi:10.13336/j.1003-6520.hve.20160412005.
- 周恩伟. 2010. 触发闪电放电过程的光电同步观测与分析 [D]. 中国科学技术大学硕士学位论文. Zhou Enwei. 2010. Simultaneous optical and electrical observations and analysis of rocket-triggered lightning [D]. M. S. thesis (in Chinese), University of Science and Technology of China.
- 周忠华, 刘欣生. 1993. 人工触发闪电放电电流的间接测量及其特征分析 [J]. *高原气象*, 12 (1): 67–76. Zhou Zhonghua, Lin Xinsheng. 1993. Indirect measurement of artificially triggered lightning discharge current and its characteristic analysis [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 12 (1): 67–76.
- 祝宝友, 陶善昌, 马明, 等. 2004. 用远场辐射场反演云闪放电参数 [J]. *气象学报*, 62 (4): 498–503. Zhu Baoyou, Tao Shanchang, Ma Ming, et al. 2004. Evaluation of in-cloud lightning discharge parameters from remote electromagnetic fields [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 62 (4): 498–503, doi:10.11676/qxxb2004.051.