

# 正极性人工触发闪电的向上负先驱脉冲放电过程研究

吕冠霖<sup>1,2</sup> 蒋如斌<sup>2</sup> 李宗祥<sup>3</sup> 袁善锋<sup>2</sup> 张鸿波<sup>2</sup>

李晓<sup>5</sup> 刘昆<sup>1</sup> 陈睿凌<sup>2,4</sup> 刘明远<sup>2,4</sup>

1 成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225

2 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

3 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205

4 中国科学院大学, 北京 100049

5 中国科学技术大学, 合肥 230026

**摘要** 利用人工触发正极性闪电的综合同步探测资料, 对引雷火箭上升过程中发生于金属导线顶端的向上负先驱脉冲放电过程进行了研究。除常规认识的峰值电流为十几到几十安培的先驱脉冲放电以外, 高垂直分辨率电流探测系统记录到丰富的弱脉冲放电过程。所有孤立发生的脉冲放电, 均为弱脉冲, 且在所有常规强度的先驱脉冲(簇)放电之前约 20  $\mu\text{s}$ , 均识别到这种弱脉冲。对测量到的弱脉冲、脉冲型脉冲和波纹型脉冲进行统计, 得到了各自的峰值电流 (3.6 A、32.2 A、11.1 A)、上升时间 (0.39  $\mu\text{s}$ 、0.9  $\mu\text{s}$ 、3.2  $\mu\text{s}$ )、持续时间 (2.8  $\mu\text{s}$ 、5.1  $\mu\text{s}$ 、12.7  $\mu\text{s}$ ) 和转移电荷量 (4.7  $\mu\text{C}$ 、50.8  $\mu\text{C}$ 、83.2  $\mu\text{C}$ )。常规强度的先驱脉冲形成了可探测的发光通道, 簇状先驱脉冲的放电通道具有与自持先导初始阶段相一致的梯级发展传输特征, 二维平均速度在  $10^5$  m/s 量级。分析相邻先驱脉冲发光通道的时空关系, 发现后一次先驱脉冲放电通道的起始高度一般位于前一次先驱脉冲放电通道的顶端, 通道梯级延伸时电荷分布的调整降低了通道区域的电场强度。先驱脉冲放电是金属导线顶端形成了先导但又由于条件不足而熄灭的过程。

**关键词** 人工触发闪电 负极性先驱脉冲 击穿 先导

稿件编号 2022009B

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2203.22009

---

**收稿日期** 2022-6-21; **网络预出版日期**

**作者简介** 吕冠霖, 男, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事雷电物理过程特征与机制研究。

E-mail: 1603978387@qq.com

**通讯作者** 蒋如斌, E-mail: jiangrubin@mail.iap.ac.cn

**项目资助** 国家重点研发计划 (2017YFC1501502)、国家自然科学基金 (41775012)、四川省重点研发计划 (2019YFG0104)

**Funded by** The National Key R&D Program of China (2017YFC1501502), National Natural Science Foundation of China (41775012), and Key R&D Projects of Sichuan Province (2019YFG0104).

# Discharge characteristics of upward negative precursors in positive triggered lightning

Lyu Guanlin<sup>1,2</sup>, Jiang Rubin<sup>2</sup>, Li Zongxiang<sup>3</sup>, Yuan Shanfeng<sup>2</sup>, Zhang Hongbo<sup>2</sup>, Li Xiao<sup>5</sup>,  
Liu Kun<sup>1</sup>, Chen Ruiling<sup>2,4</sup>, Liu Mingyuan<sup>2,4</sup>

1. Chengdu University of Information Technology, Colloge of Electronic Engineering, Chengdu 610225
2. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
3. State Key Laboratory of Nuclear Biological and Chemical Protection for Civilian, Beijing 102205
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
5. University of Science and Technology of China, Hefei 23026

**Abstract** By using comprehensive data obtained in rocket-triggered lightning experiment, upward negative precursors at the triggering wire tip during the ascent of the rocket were studied. Except for those typical precursors with peak current of tens of amperes, abundant of weak current pulses were recognized, attributed to the high vertical resolution current detection. All the isolated current pulses were found to be of the weak ones, and all those typical-intensity precursors (or clustered precursors) were preceded by the weak current pulses, involving a time interval of about 20  $\mu\text{s}$ . For the weak pulses, the impulsive pulses and ripple pulses, we obtained their geometric mean values of peak current (3.6 A, 32.2 A, 11.1 A), risetime from 10% peak to 90% peak (0.39  $\mu\text{s}$ , 0.9  $\mu\text{s}$ , 3.2  $\mu\text{s}$ ), duration (2.8  $\mu\text{s}$ , 5.1  $\mu\text{s}$ , 12.7  $\mu\text{s}$ ) and charge transfer (4.7  $\mu\text{C}$ , 50.8  $\mu\text{C}$ , 83.2  $\mu\text{C}$ ). The typical-intensity precursors formed visible discharge channels that can be detected by optical means, and the channel development of those clustered precursors involved stepwise features consistent with the initial sustained upward leaders, with average 2-D speed in the order of  $10^5$  m/s. The temporal and spatial relationship of adjacent precursor-producing channels was analyzed. The new precursor channel was found to initiate at the height of the previous channel tip. The significant adjustment of charge distribution due to the stepped channel extension reduced the electric field intensity in the channel region. The precursors were actually un-sustained leader development, which produced initial leader channel segment at the triggering wire tip but eventually extinguished due to the insufficient conditions.

**Keywords** Rocket-triggered lightning; negative precursors; breakdown; leader

# 1 引言

自然闪电的发生具有显著的瞬时随机特征,对其准确定量探测存在很大困难(郟秀书等,2013; Tan et al., 2018)。火箭人工触发闪电技术通过向已带电的雷暴云发射拖拽金属导线的专用火箭实现对闪电的人为诱发(Newman et al., 1967; 张义军等,1999; 郟秀书等,2010),其发生具有一定的时空可控性,为开展针对性的综合探测进而认识闪电的发展传输和放电机理创造了良好的条件(Sun et al., 2014; Zhang et al., 2017)。

绝大多数人工触发闪电为负极性,将云中的负电荷传输至大地,其始发过程为上行正先导(王彩霞等,2012)。Lalande et al. (1998; 2002)和 Willett et al. (1999)给出了自持正先导起始阶段的电流脉冲簇及随之逐渐增大的背景连续电流,脉冲的幅值为几十到几百安培,时间间隔在 20~25  $\mu\text{s}$ ,认为其与正先导的非连续传输有关。Biagi et al. (2011)和 Jiang et al. (2013)观测获得了与电流脉冲簇同步的先导通道发展高速光学图像,证实了正先导在起始阶段的梯级传输特征,给出了正先导梯级步长范围分别为 0.4~2.2 m 和 1~4 m。樊艳峰等(2017)和 Fan et al. (2018)发现正先导电流脉冲可划分为脉冲型和波纹型,分析表明它们均源于先导头部的梯级过程,波纹型脉冲主要是由于高阻抗先导通道对电流脉冲产生的衰减作用所导致。最近, Jiang et al. (2020)发现上行正先导梯级间歇期间,先导头部前方存在残余流光结构,认为其对正先导的梯级传输具有关键作用。

人工触发正极性闪电比较罕见,为数不多的个例为其始发时的上行负先导传输特征研究提供了宝贵的资料。上行负先导梯级发展过程形成的电流脉冲与正先导电流脉冲波形相似,脉冲时间间隔相当。但是,负先导单次梯级对应的电流幅值、转移电荷量明显大于正先导(Pu et al., 2017; Jiang et al., 2020)。高速摄像系统捕捉到了负先导梯级间歇过程中出现于先导头部前方的空间先导(space leader)发光片段(Jiang et al., 2020; 李宗祥等,2021)。李宗祥等(2021)对上行负先导的梯级步长进行了统计,其范围在 0.8~8.7 m,平均值为 3.9 m。

根据对传统负极性人工引雷的研究,在火箭上升的过程中、自持上行正先导形成之前,引雷导线的顶端会发生相对孤立的脉冲放电现象, Willett et al. (1999)将其命名为先驱脉冲(precursor),他们发现,先驱脉冲之间的时间间隔在几毫秒,期间电流处于“安静”状态,测量值为零。研究表明,正极性先驱脉冲的电流波

形与自持正先导初始脉冲的电流波形基本一致，但电流幅值和转移电荷量偏小 (Zhang et al., 2017; Li et al., 2021)。少数情况下，先驱脉冲可以成簇出现，脉冲数量不多，一般在 2 到 5 个之间，脉冲间隔与自持正先导的脉冲间隔一致，亦为 20~25  $\mu\text{s}$ 。鉴于先驱脉冲与先导脉冲的波形一致性，并考虑到先驱脉冲无法持续激发后续放电，Willett et al. (1999)推测其属于流光向先导转化失败的放电过程。Biagi et al. (2012)发现很多先驱脉冲发生时，高速摄像系统记录到引雷导线顶端的发光现象，有的甚至已经形成长达几米的发光通道，证实先驱脉冲是在强电场作用下，于引雷导线顶端处发生的空气击穿放电。Zhang et al. (2017)利用甚高频辐射源定位系统对先驱脉冲和自持上行正先导脉冲进行了对比研究，发现二者的击穿放电行为特征不存在明显区别。

在人工触发闪电实验中，导线顶端区域由于强烈的电场畸变而导致超过空气击穿阈值的强电场。空气击穿从不稳定、非持续的先驱脉冲放电过渡为稳定自持的先导过程，是决定闪电能被成功触发的关键。所以，研究先驱脉冲放电的特征及其与自持先导过程的异同、探索先驱脉冲放电向自持先导过渡的环境条件和物理参量，将有助于揭示闪电先导起始和维持的相关物理机制。本文利用鲜少成功的正极性人工触发闪电的电流、高速摄像、电磁场变化等同步探测资料，对上行负先导的先驱脉冲放电过程进行研究，着重针对簇状先驱脉冲进行探讨并与自持上行负先导进行对比，以期增进对空气击穿放电和先导始发的认识。

## 2 实验与数据

本文利用山东人工引雷实验基地 (SHandong Triggering Lightning Experiment, 简称 SHATLE) 获得的综合观测数据开展研究。实验基地设有引雷点与主观测站两个主要观测平台，并架设了以引雷点为中心的 8 站组网低频闪电定位网络 (其中两站设有短基线甚高频干涉仪)，基线长度 10~15 km，通过电磁辐射信号探测对人工触发闪电以及发生于站网有效探测范围内的自然闪电进行三维定位成像。三者协同观测，可获取闪电的通道底部电流、不同距离处电磁场变化、光学通道演变图像和闪电放电辐射源等多手段综合同步数据。

本文研究的样本均为当引雷点上方的雷暴云由正电荷占主导时，利用引雷导线良好接地的传统方式成功触发的正极性闪电。闪电放电电流通过引雷导线 (或

者引雷导线熔断后的电离通道), 流向以绝缘方式固定到法拉第笼上的引流杆, 并经过置于法拉第笼内的电流探测传感器, 最终泄散至大地。实验采用的电流传感器为阻值  $5\text{ m}\Omega$  和  $0.5\text{ m}\Omega$  的同轴分流器, 一般设置  $2\text{ kA}$  和  $40\text{ kA}$  的电流探测量程, 针对少数个例, 为探测微弱电流信号, 设置  $200\text{ A}$  的量程。通过 ISOBE5600 光纤系统将电流信号进行“电-光-电”转换和传输, 最终由 DL850 数字示波器进行采集, 采集速率为  $20\text{ MS/s}$ , 每例数据记录时长  $2\text{ s}$ 。距法拉第笼  $60\text{ m}$  处设有不同增益的地面快慢电场天线以及  $dE/dt$  天线, 天线带宽分别为  $1.5\text{ kHz}\sim 1\text{ MHz}$ 、 $0.7\text{ Hz}\sim 320\text{ kHz}$  和  $110\text{ kHz}\sim 700\text{ kHz}$ , 采样率为  $5\text{ MS/s}$ 。低频磁场天线位于距法拉第笼  $90\text{ m}$  处, 带宽为  $2\text{ kHz}\sim 800\text{ kHz}$ , 采样率为  $10\text{ MS/s}$ 。

主观测站与引雷点相距约  $1\text{ km}$ , 同样设置了一整套完善的闪电电磁辐射探测设备, 并安装了高灵敏度常速微光摄像机、雷电高速光度计, 以及多台高速摄像机。微光摄像机的最低照度为  $0.0001\text{ Lux}/f1.4$ , 能够捕捉火箭飞行过程中尾焰(光源面积小)产生的微弱发光, 从而记录火箭的飞行轨迹。其图像分辨率为  $720\text{ 像素}\times 576\text{ 像素}$ , 在  $1\text{ km}$  探测距离时, 每像素对应  $1.4\text{ m}\times 1.4\text{ m}$  空间范围, 帧率为  $25\text{ f/s}$ 。所架设的高速摄像机包括 Phantom M310、V711 和 V1612, 本文主要利用 V1612 获得的图像进行分析, 其拍摄速率为  $90000\text{ f/s}$ , 逐帧图像的时间间隔为  $11.1\text{ }\mu\text{s}$ , 图像的曝光时间为  $5.3\text{ }\mu\text{s}$ 、分辨率为  $224\text{ 像素}\times 640\text{ 像素}$ , 在  $1\text{ km}$  探测距离时, 每像素对应  $0.78\text{ m}\times 0.78\text{ m}$  空间范围。

### 3 分析与结果

#### 3.1 负极性先驱脉冲放电的电流波形特性

图 1 给出了一次正极性人工触发闪电(编号 1906)在火箭上升阶段所测的电流波形, 由于该次电流测量设置的量程为  $200\text{ A}$ , 垂直分辨精度较以往  $2\text{ kA}$  量程的电流测量提高了 10 倍, 综合考虑传感器单元、信号传输单元等引入的测量噪声, 其最小可分辨电流值为  $0.9\text{ A}$ , 这种设置导致示波器在电流值相对较低时即触发记录, 所以未能记录到闪电触发时的上行先导以及整个闪电放电过程的电流信号。但是, 由于其是被火箭上升过程中的微弱电流脉冲所触发, 因此很好地记录了先驱脉冲放电过程, 获得了以往难以分辨的微弱脉冲放电信号, 有利于开展相应的研究。图 1 可以看到, 整个过程中所测得背景电流为 0, 期间间歇性地发

生放电脉冲，包含常规认识的几十安培电流幅值的先驱脉冲，同时，也发现很多幅值不足 10 A 的脉冲现象。

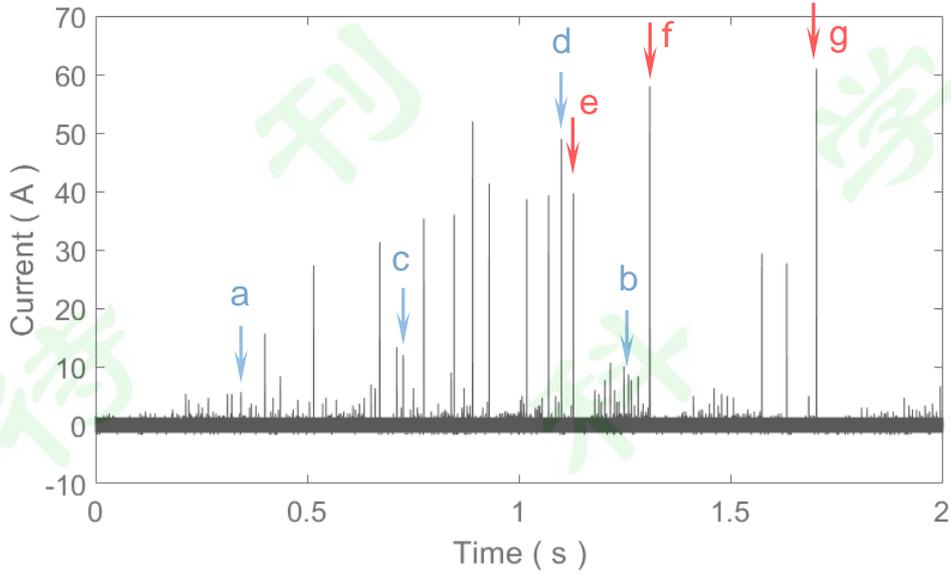


图 1 一次正极性人工触发闪电（1906）在火箭上升阶段所测的电流波形

Fig. 1 Current waveform measured during the ascent phase of the rocket in the triggering lightning event 1906.

对图 1 中的脉冲进行时间展开，发现其既可以呈现为单脉冲形式，也可以呈现为时间间隔为十几微秒到几十微秒的两个或几个脉冲。图 2 给出了图 1 中蓝色箭头所标示脉冲的展开波形（分别对应 a、b、c、d）。可以看到，图 2a、2b 脉冲的电流幅值仅分别为 5.7 A 和 8.7 A，二者电流从 10% 峰值到 90% 峰值的上升时间分别为 0.25  $\mu\text{s}$  和 0.2  $\mu\text{s}$ ，二者的脉冲持续时间分别为 2.4  $\mu\text{s}$  和 4.3  $\mu\text{s}$ 。由于脉冲幅值较小，在以往针对负极性触发闪电所产生的向上正极性先驱脉冲相关研究中，这些脉冲会被淹没于背景噪声中而无法分辨，但就脉冲的电流波形特征而言，它们实际上与已有研究中先驱脉冲或初始先导脉冲非常一致。图 2c、2d 为双脉冲组，其共同特征为先发生一个电流幅值 5 A 左右的脉冲，并在约 15  $\mu\text{s}$  之后发生幅值较大的脉冲。分析可知，在以往较粗垂直分辨率的测量中，这些双脉冲组，会由于第一个脉冲无法分辨而表现为单脉冲形式。最近，Li et al. (2021) 仔细辨别测量到的电流信号，认为孤立或成簇的先驱脉冲发生之前约 25  $\mu\text{s}$ ，存在一个电流偏转（small deflection）信号。根据本文的测量，这种电流偏转实际上是小脉冲放电的模糊测量结果，除电流幅值以外，其真实波形与已认识的先驱脉冲放电具有一致性。

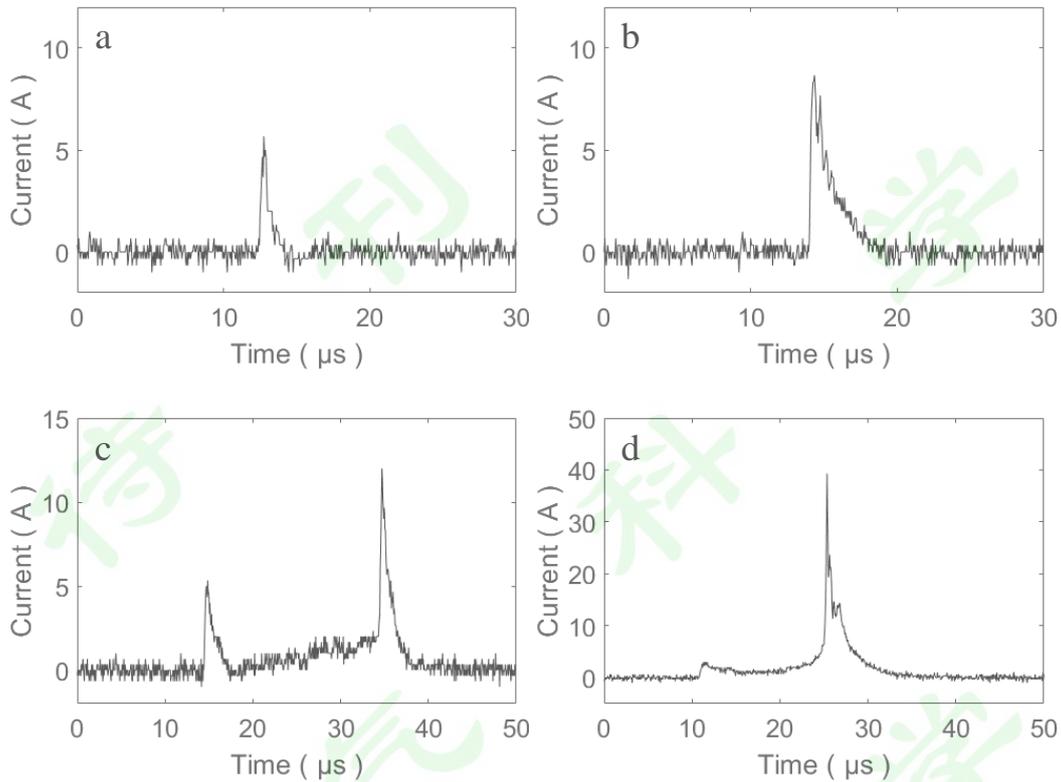


图2 电流脉冲展开波形（对应于图1中蓝色箭头所标示的脉冲）

Fig. 2 Zoomed-in current waveform of the pulses marked by the blue arrows in Fig. 1

值得注意的是，以往研究中，由于不易分辨峰值为几安培的电流脉冲，因此它们一般并未被计入到先驱脉冲电流波形的统计当中。钱勇等(2016)得到的单极性正先驱脉冲电流峰值在 13~131 A 之间，几何平均值为 28 A。Li et al. (2021)同样对正极性先驱脉冲进行统计，发现其峰值范围为 20 ~ 60 A，平均峰值为 36.1 A。仔细分析图 1 中所有脉冲，本文发现：孤立出现的脉冲，通常峰值较小；而当脉冲峰值达到或接近以往研究获得的先驱脉冲放电强度，在其发生前，均伴随出现与孤立脉冲基本一致的弱脉冲，时间间隔为十几到几十微秒，这与先导传输时的梯级时间间隔相当。亦即，强度较大的脉冲实际上是弱脉冲发生后，在一定条件下的后续放电现象。为此，本文以脉冲的展开波形具有图 2a、2b 的波形特征、且峰值大于 2A 为筛选标准，在图 1 的电流记录结果中共识别出孤立电流脉冲 111 个，电流峰值的几何平均值为 4A，范围在 2.3 A~10.7 A。同时，识别出双脉冲组 9 个，其中强脉冲的电流峰值几何平均值为 29.6 A，范围在 12 A~49 A，双脉冲组中弱脉冲的特征与孤立脉冲一致（平均峰值 3.4 A）。根据这一结果，可将 10 A 作为孤立脉冲和双脉冲组中强脉冲的电流幅值分界。

除孤立脉冲和双脉冲组以外，对图 1 中的电流脉冲做波形展开，还发现了以大约  $20 \mu\text{s}$  为时间间隔的簇状脉冲序列，如图 3 所示，对应于图 1 的 g。图中共识别出电流脉冲 19 个，从第一个脉冲开始，到最后一个脉冲的电流降为 0，整个脉冲序列的持续时间为  $438 \mu\text{s}$ ，将电流对时间进行积分，得到其整体转移的电荷量为  $2.1 \text{ mC}$ 。图中可以看到，第一个弱脉冲的峰值为  $3.7 \text{ A}$ ，之后第二个脉冲峰值大幅跃增至  $28.3 \text{ A}$ ，实际上，该脉冲簇的前 6 个脉冲峰值依次增大，最大达到  $61 \text{ A}$ 。脉冲簇中，单个脉冲的持续时间  $6.5 \mu\text{s} \sim 17.5 \mu\text{s}$ ，平均  $11.1 \mu\text{s}$ ，单个脉冲转移的电荷量范围为  $31 \mu\text{C} \sim 204 \mu\text{C}$ ，平均  $105.4 \mu\text{C}$ 。这些结果，无论是整体的电流波形演变，还是单个电流脉冲的特征，抑或是脉冲时间间隔等参量，都与 Pu et al. (2017)、李宗祥等(2021)研究发现的人工触发正极性闪电上行负先导始发阶段对应的初始电流脉冲具有非常一致的特征，而且除极性不同及强度偏大以外，其与正先导初始电流脉冲也非常相似。此外，其还表现出与先导初始电流脉冲相类似的时间演变特征，即：从脉冲型脉冲向波纹型脉冲过渡和转变(Fan et al., 2018; Lu et al., 2016)。图 3 中，从第八个脉冲起，后续脉冲的宽度和上升沿时间均偏大、而峰值则偏小。簇状先驱脉冲与先导始发过程的电流波形区别在于，其放电强度最终降为 0，电流截止，而先导始发后，随着先导的持续发展，电流脉冲簇叠加于逐渐增大的背景电流之上。此外，图 3 中还可以看到，箭头所标示的脉冲表现出双峰结构，峰值时间间隔  $2.5 \mu\text{s}$ ，根据 Pu et al. (2017)和李宗祥等(2021)的研究，初始先导电流波形中类似的双峰结构是由于上行负先导通道发生分叉所导致。

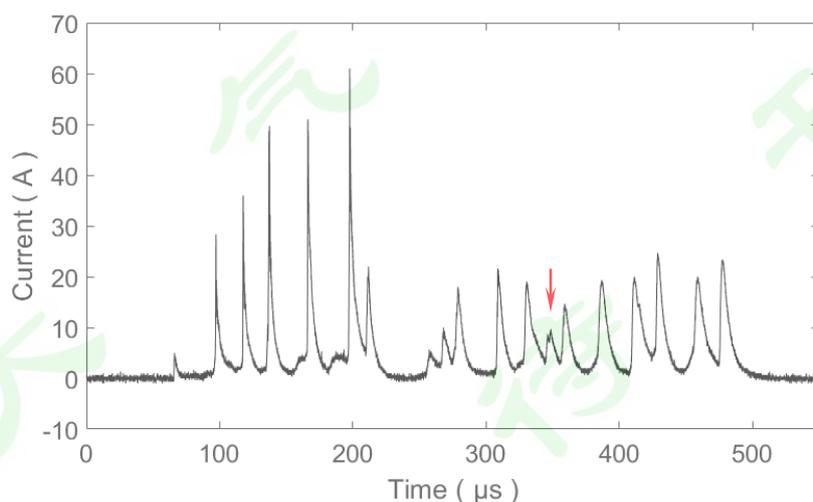


图 3 簇状先驱脉冲展开波形（对应于图 1 中的 g）

Fig. 3 Zoomed-in current waveform of the precursor cluster marked by “g” in Fig. 1

针对图 1 记录到的火箭上升过程中所有可识别的电流脉冲，进行了电流波形参量统计，将孤立的脉冲或者多脉冲的第一个脉冲划归为弱脉冲类型，双脉冲组或者簇状脉冲中除第一个脉冲以外的脉冲划归为其他脉冲，并区分脉冲型脉冲和波纹型脉冲。表中统计结果进一步表明，除弱脉冲以外的其他先驱脉冲与先导起始阶段的电流脉冲具有一致性，而对于弱脉冲，其电流峰值和转移电荷量均明显偏小，很短的电流上升时间和持续时间则表明了其显著的脉冲属性。

表 1 火箭上升阶段先驱脉冲放电参量统计

Table1 The discharge parameters of precursors during the ascent of the rocket

脉冲类型	统计参量	电流峰值 (A)	上升时间* ( $\mu$ s)	转移电荷量 ( $\mu$ C)	持续时间 ( $\mu$ s)	脉冲间隔# ( $\mu$ s)
弱脉冲	范围	1.3~10.7	0.15~1.4	0.71~19.7	0.6~9.1	--
	几何平均	3.6	0.39	4.7	2.8	--
脉冲型脉冲	范围	12~61	0.3~4.6	13.5~204.2	2~16	9.25~74.5
	几何平均	32.2	0.9	50.8	5.1	22.1
波纹型脉冲	范围	5.3~24.7	1.2~14.4	30.9~196.4	7.5~26.5	10.25~33.4
	几何平均	11.1	3.2	83.2	12.7	19.2

\*上升时间指电流从 10%峰值上升到 90%峰值的时间；

#脉冲间隔指当前脉冲峰值时刻与前一脉冲峰值时刻的时间差，弱脉冲要么为孤立脉冲、要么为多脉冲的第一个脉冲，因此不涉及该参量。

### 3.2 簇状负极性先驱脉冲序列形成的放电通道传输特征

由于闪电 1906 整体发光强度较弱，高速摄像系统未能有效触发记录该次闪电的光学演变。图 4 给出了另一次正极性人工触发闪电（编号 1907）在火箭上升阶段先驱脉冲放电产生的通道光学图像。这里定义自持上行负先导的起始时刻为 0，对应图中的 g 子图。由于该次闪电的电流测量采用常规的 2 kA 量程，较粗的垂直分辨率无法很好地显示 10 A 以下的弱脉冲，所以先驱脉冲 a、b、d、f 在电流波形上表现为单脉冲形式，并在脉冲之前出现电流偏折信号，根据前文分析，它们实际上均属于弱脉冲后发生强脉冲的双脉冲组。此外，c 和 e 的电流表现为簇状先驱脉冲，记录到的脉冲数量（不包含偏折信号对应的弱脉冲）分别为

7 和 4，相应图像中通道发生延伸的帧数分别为 11 帧和 6 帧、可识别通道亮度的图像帧数分别为 16 帧和 11 帧。可以看到，在当前高速摄像系统的拍摄设置下，弱电流脉冲（即粗垂直分辨率测得的偏折信号）发生时，并未记录到可识别的通道发光，这可能是由于弱电流脉冲并未形成热电离通道而辐射可见光，也可能是由于其辐射的可见光比较微弱，在降水条件以及 1 km 探测距离上，受到散射、折射等影响，未能达到高速摄像系统可分辨的探测阈值。在图 4 中，负极性先驱脉冲产生的发光通道，长度在 0.8~12.5 m 范围，平均长度为 5.5 m，尽管由于受到光散射等影响，通道长度存在一定的不确定性，但其与已有研究用相似方法得到的结果具有可比性，Biagi et al. (2011)根据高速光学图像，得到正极性先驱脉冲形成的光学通道长度在 3~8 m，与本文结果相近。

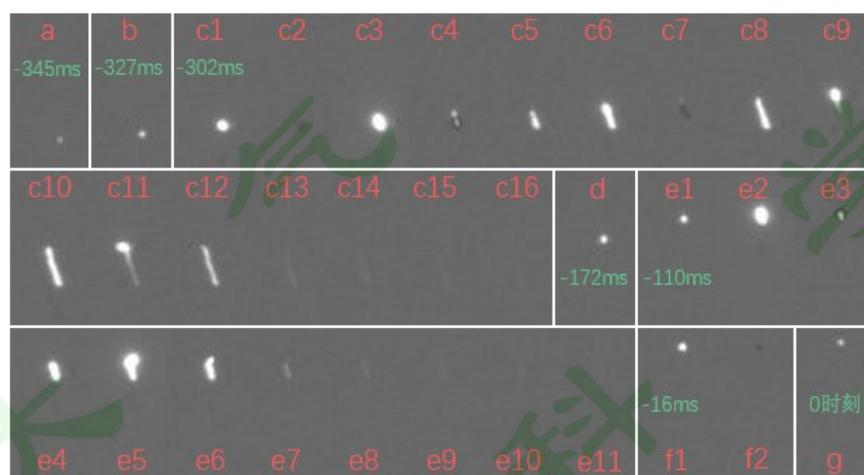


图 4 一次正极性人工触发闪电（1907）在火箭上升阶段先驱脉冲放电产生的通道光学图像。图像拍摄的拍摄速率为 90000  $f/s$ （时间分辨率 11.1  $\mu s$ ）

Fig. 4 High-speed images of the luminous channels produced by the precursors during the ascent phase of the rocket in the triggering lightning event 1907. The frame rate was 90 kfps with a time resolution of 11.1  $\mu s$ .

图 4 中的 c1 ~ c16 与 e1 ~ e11 记录到两簇先驱脉冲序列对应的发光通道向上发展并逐渐熄灭的过程。可以看到，二者均呈现出不连续的间歇性特征，例如，c2、c4、c7、e3 等图像中，通道的发光亮度相较于其前一帧明显降低，个别图像的通道甚至已淹没于背景光强中；而 c9、c11、e5 等图像中，通道头部的发光亮度明显强于其后部通道，且相较于前一帧中通道相对均匀发光的状态，后部通道的发光明显变弱。这些特征，与人工引雷中上行负先导起始阶段的通道发展情况

非常相似(Jiang et al., 2020; 李宗祥等, 2021), 这既表明簇状先驱脉冲对应的物理过程具有热电离先导的性质, 也表明其形成的通道具有梯级传输的特征。根据通道延伸图像的对比, 我们得到簇状先驱脉冲所形成先导通道的梯级步长为 1.56~3.9 m, 平均 2.7 m。根据逐帧图像的通道延伸长度和图像的时间间隔, 本文估算了先驱脉冲对应的通道发展局部速度, 结果如图 5 所示, 可以看到, 通道发展的速度在  $10^5$  m/s 量级。对于簇状先驱脉冲 c 和 e, 其所形成通道的二维平均速度分别为  $1.64 \times 10^5$  m/s 和  $1.68 \times 10^5$  m/s。Zhou et al. (2012)统计了起始于奥地利 Gaisberg 高塔的上行负先导, 发现梯级先导的发展速度范围是  $0.8 \times 10^5$  m/s ~  $4.5 \times 10^5$  m/s。Heidler et al. (2015)观测中得到上行负先导平均发展速度是  $2.3 \times 10^5$  m/s。Pu et al. (2017)获得人工触发正极性闪电上行负先导二维发展局部速度为  $0 \sim 4.46 \times 10^5$  m/s。李宗祥等(2021)则给出上行负梯级先导以二维平均速度  $1.85 \times 10^5$  m/s 向上传输。本文中 c、e 簇状脉冲序列形成热电离发光通道的二维发展速度与这些研究关于上行负先导的二维发展速度基本一致, 这在一定程度上表明先驱脉冲的放电机理与自持先导的放电机理可能是相似的。

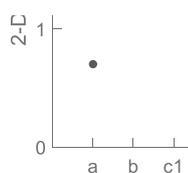


图 5 负极性先驱脉冲所形成发光通道的二维速度估计

Fig. 5 Two-dimensional velocity estimation of the luminous channel formed by the negative precursors

### 3.3 前后先驱脉冲之间的时空关系

由于先驱脉冲之间存在一定的时差, 期间火箭保持向上飞行, 其拖拽的引雷导线被持续拉伸, 因此, 发生于导线顶端的先驱脉冲放电位置也相应升高。为

了分析前后先驱脉冲之间的时空关系，本文将图 4 所示光学图像中各组先驱脉冲的通道位置信息进行提取并绘于图 6。由于该次闪电的电流测量采用常规的 2 kA 量程，绘制整体电流波形时，不能很好地体现出弱脉冲，而电场波形则记录到一些弱脉冲信号，因此，图 6 中采用电场波形与光学图像信息进行时间匹配。从图中可以看到，先驱脉冲放电通道的起始高度（黑色点所示）基本上与前一次先驱脉冲放电通道的末端高度（红色点所示）一致。特别值得注意的是，图中的 S 脉冲，在电流、电磁场波形中属于比较显著的一次先驱脉冲，而遗憾的是在光学图像中并没有识别出发光点或通道，可能是由于其发光太弱或者发光时高速摄像系统恰处于非曝光期（每帧图像的闭门非曝光时间为  $5.8 \mu\text{s}$ ），根据火箭上升的轨迹曲线，图中的空心点标示了当时引雷导线顶端的位置，亦即先驱脉冲放电的发生位置，可以看到，其与前一次先驱脉冲放电 d 的通道末端高度正好基本一致。

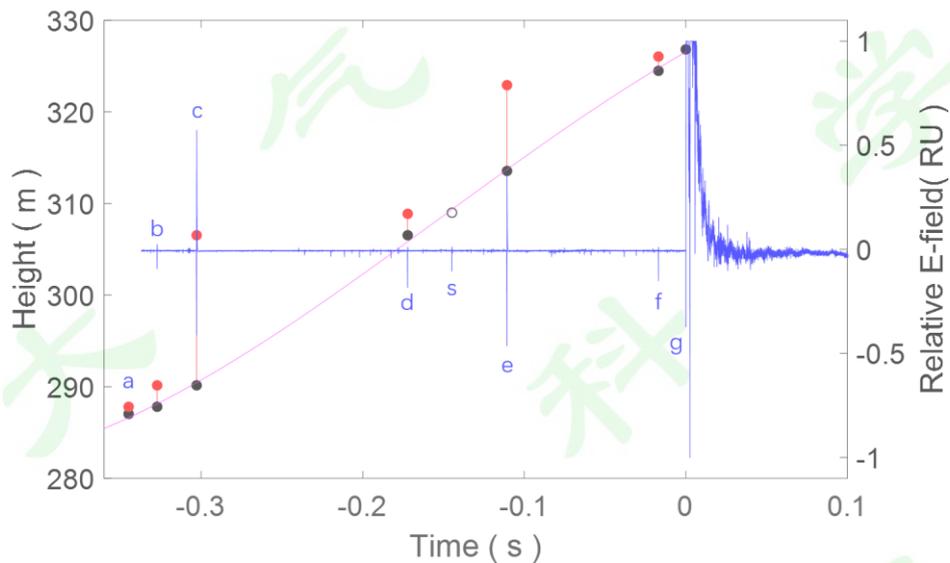


图 6 正极性触发闪电（1907）先驱脉冲放电对应的通道参量及地面电场变化。图中黑色点表示脉冲放电通道的起始高度，红色点表示脉冲放电通道的顶端高度，粉色线表示火箭上升过程中随时间的高度曲线，蓝色线表示地面电场变化。图中空心点对应 S 脉冲，但光学上未探测到通道，根据火箭位置，标示了其所在高度。

Fig. 6 The ground electric field change (blue curve) of the triggered lightning event 1907. The pink curve represents the rocket height over time during the ascent of the rocket. The black and red dots respectively represent the lower and upper heights of the luminous channels produced by precursors. For the pulse of “S”, no channel was captured by the high-speed camera, and the dot marked the height of the rocket at the time.

仔细分析发现,图 6 中 c 和 e 发生之后,均经历较长时间之后才发生了下一次可被探测到发光通道且电磁辐射信号比较显著的先驱脉冲放电,这一定程度上表明,前一次先驱脉冲形成的放电通道,对于之后形成发生新的先驱脉冲放电具有抑制作用,需要火箭拖拽引雷导线的顶端上升到这种抑制作用影响较小的区域,下一次先驱脉冲放电才得以发生。实际上,在图 1 中的电流波形也表明,其脉冲 e、f、g 之后,均经历了较长的时间没有发生幅值足够大的先驱脉冲放电,对这些脉冲进行展开发现,它们均对应于簇状脉冲,图 1 的 e 脉冲序列持续时间为  $84.5\ \mu\text{s}$ , f 脉冲序列的持续时间为  $677.5\ \mu\text{s}$ , g 脉冲序列的持续时间为  $438.0\ \mu\text{s}$ 。尽管该次触发闪电个例没有记录到高速光学图像,但根据前面的分析,可以合理推测这些脉冲序列形成了相较于一般先驱脉冲放电更长的放电通道。

#### 4 讨论

已有针对负极性人工触发闪电的研究已经表明,向上正先驱脉冲与初始上行正先导具有相似性,在正先驱脉冲放电过程中捕捉到了光学通道(Biagi et al., 2012),利用点电荷模型处理计算导线尖端放电在 80 m 处的电场变化与实际测量有很好的对应关系(张阳等, 2017),VHF 辐射源定位结果表明先驱脉冲的辐射源演变特征与初始先导的辐射源演变特征无明显区别(Zhang et al., 2017),而电流波形特征方面,二者也有较高的一致性(Li et al., 2021)。本文的研究发现,在正极性人工触发闪电中,向上负先驱脉冲与初始上行负先导同样具有各方面的相似性、一致性。与上行初始负先导一样,簇状先驱脉冲的整体电流波形也表现为从脉冲型脉冲向波纹型脉冲的过渡,其形成的发光通道也表现为间歇性梯级跳跃传输的特征,相应的传输速度、梯级步长等与自持上行负先导也是一致的。因此可以认为,先驱脉冲放电具有先导放电的物理属性,形成了击穿空气的放电通道,但是又由于条件不足以支撑后续的进一步发展而发生了熄灭。

从电流信号与发光通道的时空关系上看,一个先驱脉冲对应一次通道梯级延伸。我们发现,前一次先驱脉冲电流截止、通道熄灭后,需要当火箭拖拽引雷导线到达之前的通道顶端位置,才会发生下一次能够形成先导通道的先驱脉冲放电。这表明在金属导线顶端发生的这种具有先导击穿属性的先驱脉冲,实际上是一个能量以相对缓慢的形式聚集之后被瞬间释放的过程。先导通道的形成本质上消耗

了能量，使得所在区域的电荷分布发生瞬态调整，在先导通道头部（即最末端）区域聚集大量的电荷，这就必然会显著降低先导通道头部以下、引雷导线顶端以上区域的电场强度，从而对金属导线顶端再次发生击穿放电产生明显的抑制作用。

进一步开展定性分析可以推测，当金属导线被引雷火箭拖拽上升至已熄灭的先导通道头部区域，其上方区域的电场，除因电场畸变导致的强电场以外，还将额外增加原先导头部区域所聚集电荷产生的电场，有利于再次发生击穿空气放电。此外，在理论上，先驱脉冲发生一次先导梯级跳跃后，其通道头部以上区域的电场，既受到当时头部区域所聚集电荷的影响，也受到其下方引雷导线引起一定范围内电场畸变的影响，当二者叠加足以支撑后续的击穿放电时，通道才得以进一步发展延伸。

本文研究表明，以往认为的先驱脉冲之前发生的电流偏转信号，实际上是波形特征与先驱脉冲具有很高相似度的弱脉冲放电，这种放电既出现于常规强度的先驱脉冲放电之前，也出现于自持先导始发的最初阶段，考虑到先驱脉冲具有先导的物理属性，所以，在金属导线尖端引起电场畸变使得电场强度达到先导形成条件的情形中，弱脉冲放电似乎是必须发生的，亦即：先导的形成，必然会先经历类似的弱脉冲过程。实际上，通过查看正、负极性触发闪电较高垂直分辨率的电流资料，这一结论对正、负先驱脉冲而言都是成立的。当然，目前本文的分析，仅能够确定弱脉冲放电的电流波形特征与先导一次梯级通道延伸所对应的电流波形特征是相似的，但尚无法明确其是否形成了热电离的通道。考虑到在当前光学探测手段下，在相邻发生的两个发光通道的时间间隔内，可以较为频繁的发生弱脉冲放电，但其似乎并没有对前后发光通道的时空对应关系产生影响，所以，弱脉冲很可能并未形成能够辐射可见光的热电离通道。由于除了峰值以外，其脉冲波形特征与先导梯级脉冲相似度高，电流上升沿小，且一定程度上与实验室长间隙放电时的电流脉冲也是一致的，所以其与先导的物理联系和物理性质异同，对于揭示先导真正的始发机制的条件，是至关重要的，未来在先导模型的完善和先导过程的模拟中应基于该重要观测事实对其予以重点考虑。

## 5 结论

本文对人工触发正极性闪电始发之前的向上负先驱脉冲放电进行了详细研

究。结果表明，常规强度的先驱脉冲（单个脉冲或脉冲簇）之前约  $20\ \mu\text{s}$ ，均会发生波形特征相似、但峰值电流在  $10\ \text{A}$  以下的弱脉冲放电过程。弱脉冲放电过程可以单独孤立出现，且出现的频次远高于常规强度的先驱脉冲。工作于可见光频段的高速摄像系统捕捉到常规强度的先驱脉冲所形成的发光通道，以及先驱脉冲簇所对应发光通道的梯级传输过程，先驱脉冲形成的梯级通道步长为  $1.6\sim 3.1\ \text{m}$ ，平均  $2.3\ \text{m}$ ，估算得到两次先驱脉冲簇的通道传输二维平均速度分别为  $1.6\times 10^5\ \text{m/s}$  和  $1.7\times 10^5\ \text{m/s}$ 。先驱脉冲簇的电流波形随时间的演变与初始上行负先导具有一致性，均表现为从脉冲型脉冲向波纹型脉冲的过渡。对记录到的弱脉冲、脉冲型脉冲和波纹型脉冲进行了电流波形特征统计，得到它们的电流峰值几何平均值分别为  $3.6\ \text{A}$ 、 $32.2\ \text{A}$ 、 $11.1\ \text{A}$ ，电流从  $10\%$  峰值上升至  $90\%$  峰值的上升时间几何平均值分别为  $0.39\ \mu\text{s}$ 、 $0.9\ \mu\text{s}$ 、 $3.2\ \mu\text{s}$ ，持续时间几何平均值分别为  $2.8\ \mu\text{s}$ 、 $5.1\ \mu\text{s}$ 、 $12.7\ \mu\text{s}$ ，脉冲转移电荷量几何平均值分别为  $4.7\ \mu\text{C}$ 、 $50.8\ \mu\text{C}$ 、 $83.2\ \mu\text{C}$ 。相邻的先驱脉冲发光通道存在前后衔接的特点，即后一次先驱脉冲放电通道的起始高度一般位于前一次先驱脉冲放电通道的顶端。综合分析表明，先驱脉冲具有先导的物理属性，是在金属导线顶端形成了先导但又由于条件不足而熄灭的过程。其通道的梯级延伸将之前相对缓慢聚集的能量瞬间释放，并使得通道区域的电场强度显著降低，对金属导线顶端再次发生击穿放电产生抑制作用。

## 参考文献

- Biagi C J, Uman M A, Gopalakrishnan J, et al. 2011. Determination of the electric field intensity and space charge density versus height prior to triggered lightning [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116: D15201, doi: 10.1029/2011JD015710
- Biagi C J, Uman M A, Hill J D, et al. 2012. Transient current pulses in rocket-extended wires used to trigger lightning [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117: D07205, doi: 10.1029/2011JD016161
- Fan Y F, Lu G P, Jiang R B, et al. 2018. Characteristics of electromagnetic signals during the initial stage of negative rocket-triggered lightning [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123: 11625–11636, doi: 10.1029/2018JD028744
- Heidler F H, Manhardt M, Stimper K. 2015. Characteristics of Upward Positive Lightning Initiated From the Peissenberg Tower, Germany [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 57(1): 102–111, doi: 10.1109/TEMPC.2014.2359584
- 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]. *Atmospheric Research*, 129–130: 90–96, doi: 10.1016/j.atmosres.2012.09.005
- Jiang R B, Qie X S, Li Z X, et al. 2020. Luminous Crown Residual Vs. Bright Space Segment: Characteristical Structures for the Intermittent Positive and Negative Leaders of Triggered Lightning [J]. *Geophysical Research Letters*, 47(21), doi: 10.1029/2020GL088107
- Lalande P, Bondiou-Clergerie A, Laroche P, et al. 1998. Leader properties determined with triggered lightning techniques [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(D12): 14109–14115, doi: 10.1029/97JD02492
- Lalande P, Bondiou-Clergerie A, Bacchiega G, et al. 2002. Observations and modeling of lightning leaders [J]. *Comptes Rendus Physique*, 3(10): 1375–1392, doi: 10.1016/S1631-0705(02)01413-5
- Li X, Lu G P, Jiang R B, et al. 2021. On the transition from precursors to the initial upward positive leader in negative rocket-triggered lightning [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126: e2020JD033926, doi:10.1029/2020JD033926
- 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 Science*, 51: 1432–1444, doi:10.1002/2016RS005945
- Newman M M, Stahmann J R, Robb J D, et al. 1967. Triggered Lightning Strokes at Very Close

- Range [J]. *Journal of Geophysical Research*, 72(18): 4761–4764. doi: 10.1029/JZ072i018p04761
- Pu Y J, Jiang R B, Qie X S, et al. 2017. Upward negative leaders in positive triggered lightning: Stepping and branching in the initial stage [J]. *Geophysical Research Letters*, 44(13): 7029–7035, doi: 10.1002/2017GL074228
- Sun Z L, Qie X S, Jiang R B, et al. 2014. Characteristics of a rocket-triggered lightning flash with large stroke number and the associated leader propagation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119: 13388–13399, doi:10.1002/2014JD022100
- Tan Y B, Zheng T X, Zheng S, 2018. Improved lightning model: Application to discuss the characteristics of upward lightning [J]. *Atmospheric Research*, 217: 63–72, doi: 10.1016/j.atmosres.2018.10.011
- Willett J C, Davis D A, Laroche P. et al. 1999. An experimental study of positive leaders initiating rocket-triggered lightning [J]. *Atmospheric Research*, 51: 189–219, doi: 10.1016/S0169-8095(99)00008-3
- Zhang Y, Krehbiel P R, Zhang Y J, et al. 2017. Observations of the initial stage of a rocket-and-wire-triggered lightning discharge [J]. *Geophysical Research Letters*, 44: 4332–4340, doi: 10.1002/2017GL072843
- Zhou H, Diendorfer G, Thottappillil R, et al. 2012. Characteristics of upward positive lightning flashes initiated from the Gaisberg Tower [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117: D06110, doi: 10.1029/2011JD016903
- 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(5): 1027–1036. Fan Y F, Lu G P, Jiang R B, et al. 2017. Application of low-frequency magnetic sensor for remote measurement of the initial continuous current in rocket-triggering lightning [in Chinese]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 41(5): 1027–1036. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16248
- 李宗祥, 蒋如斌, 吕冠霖, 等. 2021. 人工引发闪电上行负先导的发展传输特征 [J]. *物理学报*, 70(19): 344–357. Li Z X, Jiang R B, Lyu G L, et al. 2021. Characteristics Of Rocket-triggered Positive Lightning Flashes and Propagation Properties Of their Initial Upward Negative Leaders [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 70(19): 344–357, doi: 10.7498/aps.70.20210283
- 钱勇, 张阳, 张义军, 等. 2016. 人工触发闪电先驱电流脉冲波形特征及模拟 [J]. *应用气象学报*, 27(6): 716–724. Qian Y, Zhang Y, Zhang Y J, et al. 2016. Characteristics and Simulation of Artificially Triggered Lightning Precursor Current Pulse [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 27(6): 716–724, doi: 10.11898/1001-7313.20160608

- 郟秀书, 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 X S, Yang J, Jiang R B, 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.
- 郟秀书, 张其林, 袁铁, 等. 2013. 雷电物理学 [M], 北京: 科学出版社. Qie X S, Zhang Q L, Yuan T, et al. 2013. Lightning Physics (Chinese Edition) [M], BeiJing: Science Press (in Chinese).
- 王彩霞, 郟秀书, 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): 561–568. Wang C X, Qie X S, Jiang R B, et al. 2012. Propagating properties of a upward positive leader in a negative triggered lightning[J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 61(3): 561–568, doi: 10.7498/aps.61.039203
- 张阳, 钱勇, 张义军, 等. 2017. 人工触发闪电上行正先导起始阶段放电特征 [J]. 高电压技术, 43(5): 1602–1608. Zhang Y, Qian Y, Zhang Y J, et al. 2017. Discharge Characteristics of Upward Positive Leaders in Initial Stage of Artificially Triggered Lightning [J]. High Voltage Engineering. 43(5): 1602–1608, doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.20170428028
- 张义军, 刘欣生, 1999. 南方人工引雷试验及电流特征 [J]. 中国电机工程学报, 4(19): 60–63. Zhang Y J, Liu X S. 1999. Experiment of Artificially Triggered Lightning and Its Current Characteristics in The South Of China [J]. Proceedings of the CSEE (in Chinese), 19(4): 60–63, doi: 10.3321/j.issn:0258-8013.1999.04.014