

郅秀书, 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.

山东人工引发雷电综合观测实验及回击电流特征

郅秀书¹ 杨静¹ 蒋如斌¹ 王彩霞¹ 冯桂力² 吴书君³ 张广庶⁴

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 山东省气象科学研究所, 济南 250031

3 山东省滨州市气象局, 滨州 256600

4 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

摘要 山东人工引发雷电实验 (SHATLE) 自 2005 年开始, 六年来共成功引发负极性雷电 22 次, 包含大电流回击过程 88 次, 实验获取了包括雷电放电通道底部电流、近距离电磁场、高速摄像等在内的高质量同步观测资料。对 36 次实测回击电流的统计分析表明, 回击峰值电流的几何平均值为 12.1 kA, 最大值为 41.6 kA, 最小值为 4.4 kA。回击电流波形的半峰值宽度范围在 1~68 μs 之间, 电流 10%~90% 峰值的上升时间几何平均值为 1.9 μs , 中和电荷量为 0.86 C, 作用积分 (action integral, 或称比能量) 为 $2.6 \times 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ 。人工触发闪电峰值电流约 16.5 kA 的回击在 30 m 处产生的电场变化可达 56.0 kV/m, 60 m 处的磁场几何平均值为 52 μT 。一些强烈的 M 分量可以具有与回击相当的电流峰值和中和电荷量。人工引雷初始阶段上行正先导的发展速度约为 $0.96 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。

关键词 人工引发雷电 回击 放电电流 近距离电磁场 光学特征

文章编号 1006-9895 (2012) 01-0077-12

中图分类号 P427

文献标识码 A

Shandong Artificially Triggering Lightning Experiment and Current Characterization of Return Stroke

QIE Xiushu¹, YANG Jing¹, JIANG Rubin¹, WANG Caixia¹,
FENG Guili², WU Shujun³, and ZHANG Guangshu⁴

1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Shandong Research Institute of Meteorology, Jinan 250031

3 Binzhou Meteorology Bureau, Binzhou 256612

4 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

Abstract Shandong Artificially Triggering Lightning Experiment (SHATLE) has been conducted continuously since the summer of 2005. During the six years from 2005 to 2010, twenty-two negative lightning flashes containing eighty-eight return strokes were successfully triggered. Channel base currents, close electromagnetic fields, and high-speed camera images were obtained simultaneously for some of the strokes. Based on directly measured currents for thirty-six return strokes, the geometric mean of return stroke peak current was about 12.1 kA with a max-

收稿日期 2010-12-07, 2011-05-15 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-206, 国家自然科学基金资助项目 41175002、40930949, 中国科学院“百人计划”专项经费

作者简介 郅秀书, 女, 1963 年出生, 研究员, 主要从事闪电物理与雷暴电学研究。E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

imum of 41.6 kA and a minimum of 4.4 kA, the half peak width of current varied from 1 to 68 μs , and the geometric mean values of 10%–90% risetime, charge transfer, and action integral were about 1.9 μs , 0.86 C, and $2.6 \times 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$, respectively. The surface electric field at 30 m away from the discharge channel caused by a return stroke with peak current of 16.5 kA reached 111.9 kV/m. The geometric mean of magnetic field at 60 m away from the discharge channel was about 52 μT . The peak current and charge transfer of some large M components were comparable with those of return stroke. The speed of upward positive leaders in the initial stage of triggered flashes was about $0.96 \times 10^5 \text{ m/s}$.

Key words artificially triggered lightning, return stroke, discharge current, close electromagnetic field, optical characteristics

1 引言

随着现代社会电子信息技术的迅速发展,雷电造成的危害日趋增加,如何对电子设备进行科学的雷电防护成为现代防雷设计亟待解决的问题。雷电放电电流和近距离电磁场不仅是进行科学的雷电防护所必需了解的关键参量,而且对雷电物理过程及雷电与地面物体相互作用机理的研究也十分重要。自然雷电由于发生的时空随机性,对其进行直接测量十分困难。20 世纪 60 年代发展起来的人工引发雷电技术可以使雷电在一定的时空可控范围内发生,从而为雷电放电通道底部电流和近距离电磁场的同步测量提供了条件,对此国内外已有大量的研究成果(如: Fieux et al., 1975; Horii, 1982; Liu et al., 1994; Wang et al., 1999; Uman et al., 2000; 张义军等, 2003; Rakov et al., 2005; 郅秀书等, 2007; Schoene et al., 2009; Yang et al., 2010a)。目前较为成熟的人工引发雷电技术是火箭—导线技术,即在合适的雷暴起电条件下,向雷暴云发射拖带细金属导线的小火箭从而引发雷电。根据火箭拖带的导线与地面连接方式的不同,又分为传统引发和空中引发两种方式。传统引发方式是火箭拖带的导线通过引流杆与大地直接相连(引雷导线下端直接与接地的引流杆相连,上端接引雷火箭);空中引发方式中火箭拖带的导线通过一段尼龙线与引流杆相连,空中引发方式可以更好地模拟自然雷电的下行先导过程。

我国早在 1977 年就曾利用防雹土火箭开展了人工引发雷电实验(夏雨人等, 1979), 1989 年中国科学院寒区旱区环境与工程研究所(原兰州高原大气物理研究所)研制了人工引雷专用火箭,并在甘肃永登引雷成功(刘欣生等, 1990)。自 1989 年

起,又先后在北京、江西、上海、广东、山东等地引雷成功,得到了人工引发雷电的基本过程以及南、北方人工引发雷电的差别等一批研究成果(如: Liu et al., 1994; 郅秀书等, 1998; Chen et al., 2003; 张义军等, 2003),并实现了传统和空中两种引雷方式。火箭所携带的导线与引流杆之间连接方式的不同会导致放电过程的差异。在空中引雷方式中,我国采用的尼龙线长度一般是 80 m 左右,而法国采用的尼龙线长度则为 400 m (Lalande et al., 1998)。在 2005 年以前,我国传统引雷实验中引雷导线与引流杆之间连接了一段 5 m 的尼龙线,5 m 尼龙线的长度远小于空中引发雷电所需的尼龙线长度。Yang et al. (2009) 对连接有 5 m 尼龙线的引发雷电和传统引发雷电导致的放电过程差异进行了细致分析。连接 5 m 尼龙线的引发雷电电流波形与 Wang et al. (1999) 得到的美国 Florida 的电流波形类似,但是放电过程初始阶段却不同。Wang et al. (1999) 认为电流波形中的初始大脉冲是由导线熔化产生的,而接有 5 m 尼龙线引发雷电波形中的初始大脉冲由 5 m 空气间隙被击穿导致,导线熔化发生在连续电流阶段。

山东人工引发雷电实验(Shandong Artificially Triggering Lightning Experiment, 简称 SHATLE)自 2005 年夏季开始(杨静等, 2006; 郅秀书等, 2007),实验地点设在山东滨州地区,该地区位于南北天气系统的交汇处,夏季常有十分强烈的雷暴系统过境。实验目的主要包括以下几个方面:

(1) 测量雷电流波形和极近距离上的电磁场,为雷电防护提供基础数据;

(2) 研究雷电的电磁辐射和传播效应及其与雷电流的关系;

(3) 研究雷电的物理过程和雷击机理;

(4) 研究雷电与云动力过程和降水过程的关系;

(5) 研究雷电产生的高能辐射及机理;

(6) 研究雷电对电子设备的影响。

2005~2010 年期间, 所用实验设备经升级更新, 性能逐步提高, 目前已形成了较为完善的人工引雷实验设施和高性能的测量设备, 以此为基础, 获取了通道底部完整的雷电流波形及同步近距离电磁场和光学观测数据。本文对山东人工引发雷电实验 6 年期间的实验情况和主要研究结果进行总结。

2 实验介绍

山东人工引发雷电实验主要观测项目包括通道底部雷电流、近距离电场、磁场、高速摄像光学观测等, 滨州市气象局的多普勒天气雷达为引雷实验提供参考。实验设有 2 个观测点 (Qie et al., 2009), 一个是近距离观测点, 在距离火箭发射架 30 m 和 60 m 处都架设有观测设备; 另外一个远距离观测点, 即主观测点, 与火箭发射架的距离一般在 1000 m 以内; 引雷发射控制室设在 60~70 m 处。火箭发射架共有 8 个, 环绕在引雷杆 (引流杆) 四周 [图 1 (见文后彩图)]。性能良好的引雷火箭是开展人工引雷实验的基础。2005 至 2008 年期间, 沿用中国科学院寒区旱区环境与工程研究所引雷火箭, 箭体为不锈钢金属材料, 整个火箭重约 5 kg。2008 年中国科学院大气物理研究所与中国航天总公司陕西中天火箭技术有限责任公司合作, 研制开发了新型人工引发雷电专用火箭, 该火箭采用新型复合材料, 使箭体重量减少到 2.4 kg, 从而具备了更高的安全性, 有关新火箭的详细参数及实验结果可参见郅秀书等 (2010)。另外, 火箭发射点火技术也是人工引发雷电实验中的一项重要技术。2005~2007 年期间, 发射火箭采用气动点火方式。2008~2010 年, 采用了光纤点火方式^①, 提高了火箭发射的可靠性, 并降低了点火延迟时间, 为引雷时机的准确把握提供了保障。在山东人工引发雷电实验中, 采用了导线与引流杆直接相连的传统引发和空中引发两种方式。

2005~2008 年, 雷电流的测量采用两种方式, 一是使用 2 个带宽为 300 Hz~1 MHz 的 Rogowski

线圈, 量程分别为 2 kA 和 100 kA, 用于测量不同强度的电流。同时, 德国生产的电阻值为 1 mΩ 的同轴分流器也用于电流的直接测量, 其可测量的最大电流为 100 kA, 记录系统采用 8 通道 DL708 高速数字化示波器, 采样频率设定为 1 MHz (郅秀书等, 2007; 赵阳等, 2009)。2009 年, 雷电流测量采用了直接和间接两种方式, 直接测量使用带宽为 3.2 MHz、阻值为 0.5 mΩ 的同轴分流器, 间接测量使用带宽为 0.9 Hz~1.5 MHz 的 Pearson 线圈 (参见图 1); 信号传输采用 ISOBE5600 光纤系统, 该系统共包括 4 个发射机和一个接收机, 带宽为直流到 20 MHz (Yang et al., 2010a)。2010 年, 为了更好地测量通道底部电流中的小信号, 新购置了阻值为 5 mΩ 的同轴分流器, 信号传输仍采用 2009 年的光纤系统。2009~2010 年, 电流信号的采样率都是 10 MHz, 记录设备为 16 通道高速数字化示波器 DL750。

2005~2008 年期间, 近距离电、磁场的测量设在距火箭发射架 60 m 处, 远距离电场的测量设在距火箭发射架 550 m 处的主观测点。2009~2010 年, 近距离电场的测量分别设在距离火箭发射架 30 m 和 60 m 处, 在距离火箭发射架 60 m 处仍设有磁场测量, 远距离电、磁场仍然设在距离火箭发射架 550 m 处的主观测点。2005~2010 年, 闪电产生电场变化的测量均采用平板天线型快、慢电场变化测量仪, 所不同的是, 2005~2008 年, 快、慢电场变化测量仪的带宽分别为 5 MHz 和 2 MHz, 时间常数分别为 2 ms 和 6 s, 以 2.5 MHz 采样率记录到计算机上 (赵阳等, 2009); 2009 年, 快、慢电场变化测量仪的带宽分别为 5 MHz 和 2 MHz, 时间常数分别为 1 ms 和 6 s, 采样率提高为 5 MHz (郅秀书等, 2010)。为了更好地反映闪电产生的电场变化, 2010 年, 快、慢电场变化测量仪的带宽为 5 MHz 和 2 MHz, 时间常数改为 1 ms 和 3 s, 记录采样率仍为 5 MHz。采用大气平均电场仪实现对雷暴电场的连续监测, 其电场大小是火箭发射的重要参考。2005~2008 年磁场和电流信号同时记录在示波器上, 因此, 采样率和电流信号的采样率相同。2009~2010 年, 磁场与电场信号一起记录, 二者采样率相同。有关磁场测量系统的详细介绍和其

① 王怀斌, 人工诱发雷电火箭光纤发控点火系统, 专利申请号: 200410073342.2。

标定实验可参见 (Yang et al., 2008)。

高速摄像系统是详细记录闪电通道发展演化的重要手段。2005~2007 年,所用高速摄像系统的时间分辨率为 1000 幅/秒。2008 年引进了 Photron 公司生产的高速摄像系统 FAST Camera SA1,其时间分辨率最高可达到 150000 幅/秒,在 1024×1024 像素分辨率情况下,时间分辨率可以达到 5400 幅/秒。2009 年引雷实验中高速摄像的时间分辨率设为 6000 幅/秒,2010 年为 10000 幅/秒。

3 结果和分析

在 SHATLE 2005~2010 年期间,共成功引发雷电 22 次,其中 18 次为传统引发,4 次为空中引发,共包含 88 次大电流回击过程,所有回击均将云内的负电荷转移到地面。表 1 给出了 2005~2010 年引发雷电的总体情况。22 次引发雷电中,持续时间最长为 1900.0 ms,最短为 145.5 ms,其中 3 次只有初始连续电流过程而无回击过程。包含回击过程的 19 次闪电中,回击数分布在 1~11 次

之间。从表 1 可以看出,在同一次雷暴过程中,相邻两次引发雷电的时间间隔比较小,最短为 144 s,最长为 938 s,这表明如果在某一时段内时机合适,则能够连续引发雷电成功。基于表 1 中的观测数据,从通道底部雷电流、近距离电磁场和光学特征等几个方面对引发雷电进行讨论。

3.1 人工引发雷电通道底部电流波形特征

2005~2010 年实验期间,共直接测量到 36 次回击过程的电流波形,图 2 是 2010 年 8 月 20 日测量到的触发闪电 1004 的雷电流波形,由初始连续电流 (ICC) 过程和 9 次回击 (RS) 过程组成,9 次回击的峰值电流分布在 4.4 kA 到 15.2 kA 之间。对 36 次回击过程的电流波形特征参量进行了统计分析,包括:回击电流峰值,半峰值宽度,10%~90% 上升时间,回击在 1 ms 内转移的电荷量,相应参量的定义方法参见图 3。值得注意的是,本文统计的转移电荷量是 1 ms 内转移的电荷量,为显示清楚,图 2 中转移电荷量部分未画到 1 ms。此外,还统计了回击持续时间,回击间隔,电流波形

表 1 2005~2010 年山东人工引发雷电实验总体情况

Table 1 Basic features of the triggered flashes in the SHATLE during 2005 - 2010

日期	闪电编号	时间 (北京时)	持续时间/ms	触发方式	回击数	记录到电流的回击数
2005 年 6 月 28 日	0501	22:29:25	837.6	传统	7	/
	0502	22:33:30	732.0	传统	5	/
2005 年 8 月 2 日	0503	00:04:02	1120.0	传统	10	10
	0504	00:19:40	750.4	空中	5	/
	0505	00:24:12	518.0	空中	1	/
2006 年 7 月 5 日	0601	21:01:11	1900.0	传统	1	/
2006 年 8 月 3 日	0602	19:41:49	584.0	传统	2	2
2007 年 7 月 9 日	0701	23:08:29	990.0	传统	2	2
2008 年 6 月 29 日	0801	14:59:47	1125.7	传统	3	/
	0802	15:06:29	956.8	传统	4	/
	0803	15:08:45	978.8	传统	6	6
	0804	15:11:26	1362.7	空中	4	1
	0805	15:15:11	951.8	空中	11	/
2009 年 8 月 5 日	0901	14:35:52	428.6	传统	2	2
	0902	14:39:16	622.2	传统	4	4
2009 年 8 月 15 日	0903	13:58:46	145.5	传统	0	/
2010 年 7 月 8 日	1001	01:14:09	196.0	传统	0	/
2010 年 7 月 19 日	1002	18:44:54	792.0	传统	8	/
2010 年 8 月 20 日	1003	04:11:16	/	传统	2	/
	1004	23:01:32	478.0	传统	9	9
	1005	23:08:24	347.0	传统	0	/
	1006	23:11:20	/	传统	2	/

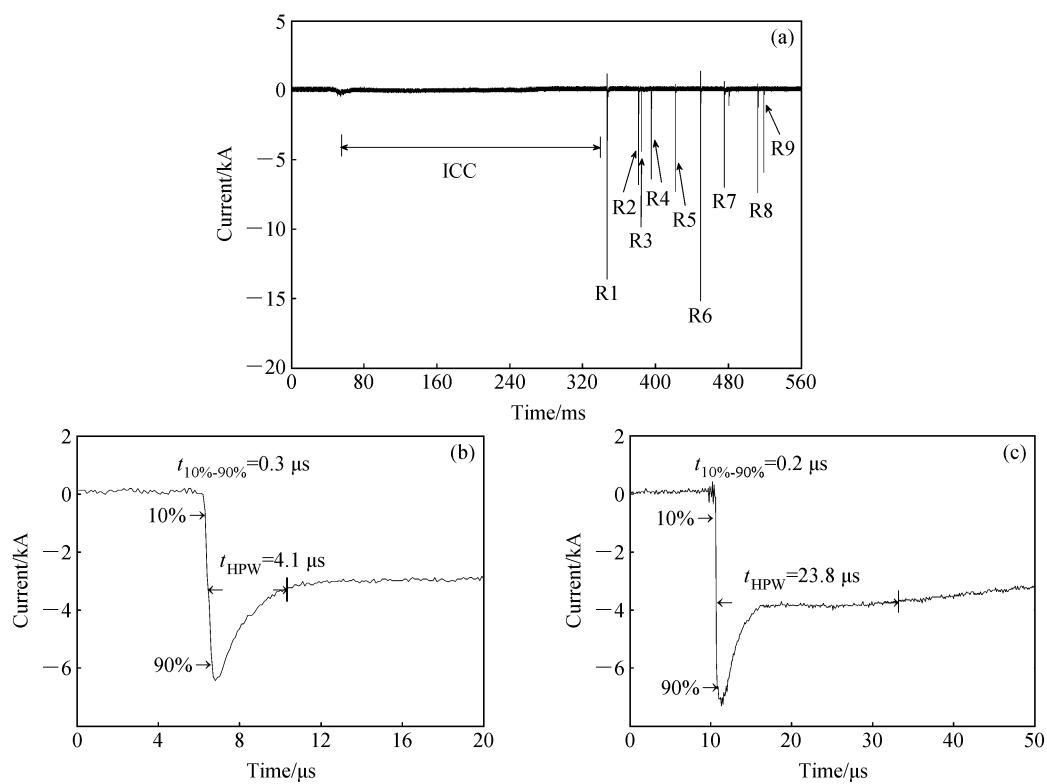


图 2 2010 年 8 月 20 日测量到的触发闪电 1004 的雷电流波形：(a) 整体波形；(b) R4 的时间展开图；(c) R5 的时间展开图

Fig. 2 The current waveforms of triggered flash 1004 measured on 20 Aug 2010: (a) Overall current waveform; (b) time-expanded waveform of R4; (c) time-expanded waveform of R5

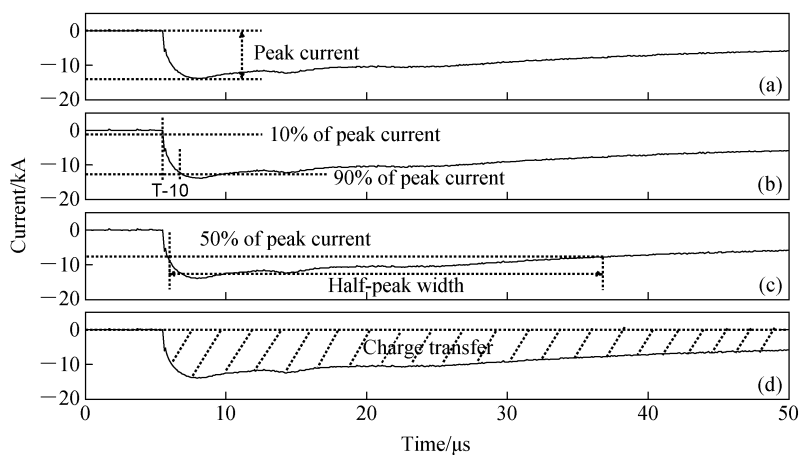


图 3 回击电流波形参数定义：(a) 回击峰值电流；(b) 回击 10%~90% 上升时间；(c) 半峰值宽度；(d) 1 ms 内转移电荷量

Fig. 3 Definitions of the parameters of channel base current. The following return-stroke current parameters are illustrated: (a) peak current, (b) 10%–90% risetime, (c) half-peak width, and (d) charge transfer

10%~90% 上升陡度，电流 30%~90% 上升时间，回击在 1 ms 内的作用积分（action integral，或称比能量），这些参量的定义方法与 Fisher et al. (1993) 相同，限于文章篇幅，这些参量定义图将不

再给出。

表 2 给出了 SHATLE 2005~2010 年所获取的电流波形特征参量统计结果以及和其他作者的比较。为了对波形特征参量的分布规律有一个清楚的

认识,图 4 给出了这些参量的柱状分布图。从表 2 中可以看出,回击电流峰值的分布范围很广,最大值为 41.6 kA,最小值为 4.4 kA,几何平均值为 12.1 kA,除了比 Schoene et al. (2003) 所得的结果偏小之外,本文所得结果与绝大多数作者得到的回

击电流峰值类似,尤其与 Schoene et al. (2009) 利用 165 个样本得到的回击电流几何平均值 12.2 kA 接近。实测回击电流峰值的最大值为 41.6 kA,与巴西一次空中引发雷电回击电流峰值的最大值 44 kA 接近 (Saba et al., 2005)。赵阳等 (2009) 和

表 2 2005~2010 年山东人工引发雷电电流波形特征参量以及与其他作者的比较

Table 2 Comparison of current waveform parameters obtained from the SHATLE 2005 – 2010 experiment with results from other studies

实验	电流峰值/kA						
	样本数	最小值	最大值	算术平均值	标准偏差	几何平均值	标准偏差 (lg <i>x</i>)
SHATLE, 2005 – 2010 (本文)	36	4.4	41.6	14.3	9.2	12.1	0.23
SHATLE, 2005 – 2009 (Yang et al., 2010a), 磁场反演	48	5.8	45.7	16.3	9.8	14.1	0.22
SHATLE, 2005 – 2008 (赵阳等, 2009)	21	6.6	41.6	17.2	10.5	14.6	0.24
Camp Blanding, Florida, 1999 – 2004 (Schoene et al., 2009)	165	2.8	42.3	13.9	6.9	12.2	0.22
Camp Blanding, Florida, 1999 – 2000 (Schoene et al., 2003)	64	5.0	36.8	16.2	7.6	14.5	0.21
Camp Blanding, Florida, 1998 (Uman et al., 2000)	25	5.9	33.2	14.8	7.0	13.5	0.19
Camp Blanding, Florida, 1997 (Crawford, 1998)	11	5.3	22.6	12.8	5.6	11.7	0.20
Camp Blanding, Florida, 1993 (Rakov et al., 1998)	37	5.3	44.4	15.1	/	13.3	0.23
KSC, Florida 1990 and Alabama 1991 (Fisher et al., 1993)	45	/	/	/	/	12.0	0.28
France, Saint-Privat d'Allier 1986, 1990 – 1991 (Depasse, 1994)	54	4.5	49.9	11.0	5.6	/	/
KSC, Florida 1985 – 1991 (Depasse, 1994)	305	2.5	60.0	14.3	9.0	/	/

实验	电流 10%~90%上升时间/ μ s						
	样本数	最小值	最大值	算术平均值	标准偏差	几何平均值	标准偏差 (lg <i>x</i>)
SHATLE, 2005 – 2010 (本文)	36	0.2	8.4	2.0	2.1	1.9	0.47
SHATLE, 2005 – 2009 (Yang et al., 2010a) 磁场反演	27	0.4	8.4	2.7	2.1	2.0	0.34
SHATLE, 2005 – 2008 (赵阳等, 2009)	21	0.4	8.4	3	2.2	2.3	0.33
Camp Blanding, Florida, 1999 – 2004 (Schoene et al., 2009)	81	0.2	5.7	1.2	0.8	0.9	0.32
KSC, Florida 1990, Alabama 1991 (Fisher et al., 1993)	43	/	2.9	/	/	0.37	0.29
France, Saint-Privat d'Allier 1990 – 1991 (Depasse, 1994)	37	0.25	4.9	1.14	1.1	/	/
Camp Blanding, Florida, 1997 (Crawford, 1998)	11	0.3	4.0	0.9	1.2	0.6	0.39

实验	电流半峰值宽度/ μ s						
	样本数	最小值	最大值	算术平均值	标准偏差	几何平均值	标准偏差 (lg <i>x</i>)
SHATLE, 2005 – 2010 (本文)	36	1	68	23.7	17.1	14.8	0.52
SHATLE 2005 – 2009 (Yang et al., 2010a) 磁场反演	27	1	68	27	13.8	21.4	0.38
SHATLE, 2005 – 2008 (赵阳等, 2009)	21	1	68	26	16.6	17	0.51
Camp Blanding, Florida, 1999 – 2004 (Schoene et al., 2009)	142	4	93	23	17	19	0.30
France, Saint-Privat d'Allier 1990 – 1991 (Depasse, 1994)	24	14.7	103.2	49.8	22.4	/	/
KSC, Florida, 1990, Alabama 1991 (Fisher et al., 1993)	41	/	/	/	/	18	0.30
Camp Blanding, Florida, 1997 (Crawford, 1998)	11	6.5	100	35.7	24.6	29.4	0.29

实验	回击 1 ms 内转移的电荷量/C						
	样本数	最小值	最大值	算术平均值	标准偏差	几何平均值	标准偏差 (lg <i>x</i>)
SHATLE, 2005 – 2010 (本文)	36	0.18	4.2	1.1	0.76	0.86	0.31
SHATLE, 2005 – 2009 (Yang et al., 2010a) 磁场反演	27	0.3	4.2	1.2	0.7	1.1	0.22
SHATLE, 2005 – 2008 (赵阳等, 2009)	21	0.3	4.2	1.4	0.8	1.2	0.21
Camp Blanding, Florida, 1999 – 2004 (Schoene et al., 2009)	151	0.3	8.3	1.4	1.4	1.0	0.35

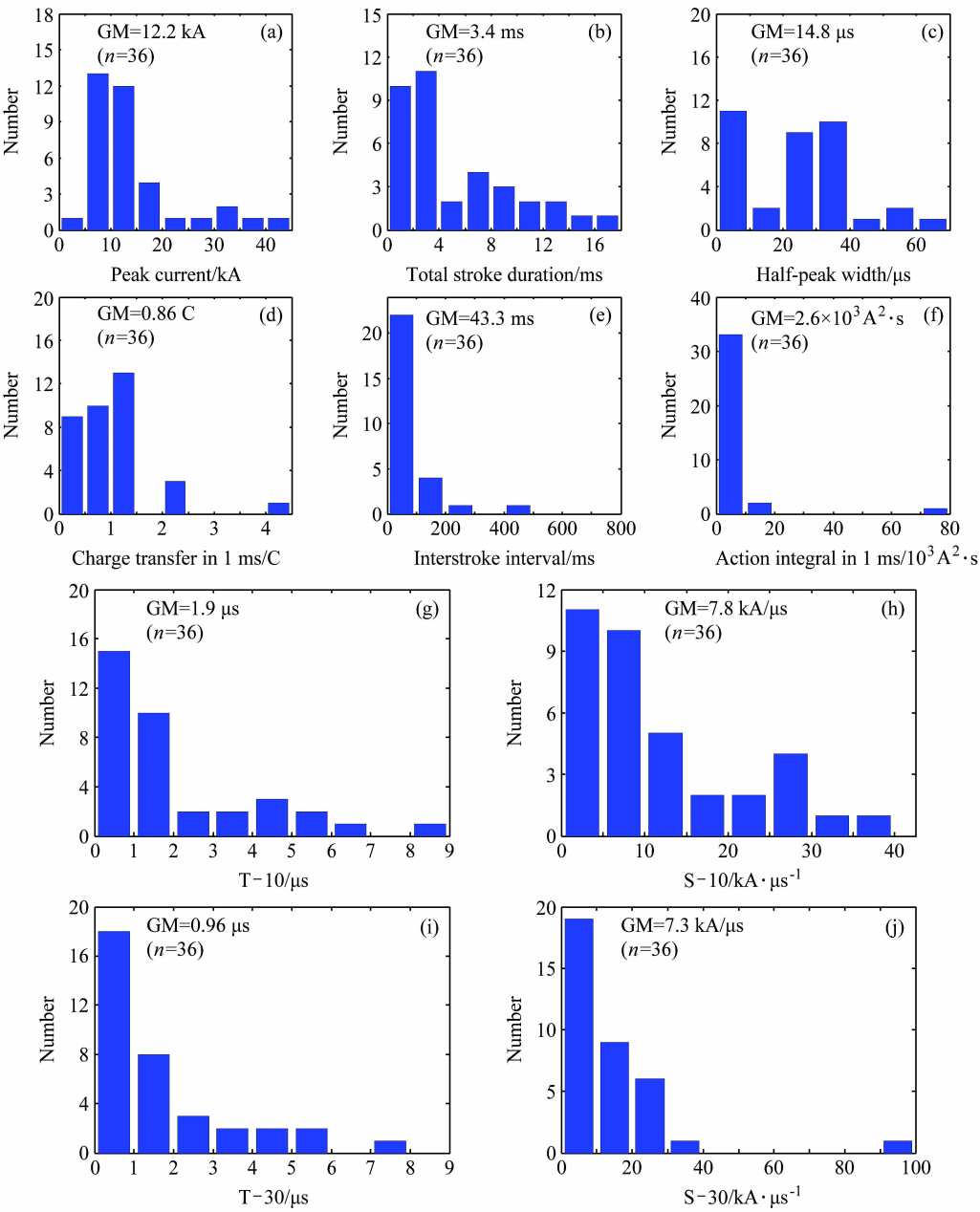


图 4 回击电流波形特征参量柱状图：(a) 电流峰值；(b) 持续时间；(c) 半峰值宽度；(d) 回击在 1 ms 内转移的电荷量；(e) 回击间隔；(f) 回击在 1 ms 内的作用积分 (action integral)；(g) 10%~90% 上升时间；(h) 10%~90% 上升陡度；(i) 30%~90% 上升时间；(j) 30%~90% 上升陡度

Fig. 4 Distributions of return stroke current waveform parameters: (a) Peak current; (b) total stroke duration; (c) half-peak widths; (d) charge transfer within 1 ms; (e) interstroke interval; (f) action integral within 1 ms; (g) 10%-90% risetime ($T-10$); (h) 10%-90% front steepness ($S-10$); (i) 30%-90% risetime ($T-30$); (j) 30%-90% front steepness ($S-30$)

Yang et al., (2010a) 曾分别对 2005~2008 年实测资料和 2005~2009 年近距离磁场反演资料对雷电流波形特征进行了统计。值得注意的是, Yang et al. (2010a) 利用近距离磁场反演得到的电流峰值最大值为 45.7 kA, 本文仅利用直接测量的雷

电流结果, 这也是本文回击电流峰值样本数比 Yang et al., (2010a) 少的原因。

相对于其他作者而言, 本文得到的电流 10%~90% 上升时间分布范围较广, 其中最大值 8.4 μ s 大于 Schoene et al. (2009) 得到的最大值 5.7 μ s, 几

何平均值和算术平均值也都偏大,原因可能来自两个方面,一方面可能是接地体的反射,由于实验中所用的引流杆并不是一个整体,而是由几段组成,这样在连接处必然引起反射,Schoene et al. (2009)认为反射可能是导致较大上升时间的一个原因;另外一个原因可能来自 Rogowski 线圈的带宽,线圈的上限截止频率是 1 MHz,不能较好地反映高频成分,这些也会对上升时间产生一定的影响(Yang et al., 2010a)。由电流波形特征参量分布柱状图可以看出,电流 10%~90% 上升时间分布在 1~2 μs 与绝大多数作者得到的结果是一致的(Depasse, 1994; Schoene et al., 2009)。本文得到电流半峰值宽度的算术平均值 23.7 μs 与 Depasse (1994) 和 Fisher et al. (1993) 相比结果偏小,但与 Schoene et al. (2009) 利用较多的样本数得到的结果 23 μs 接近。本文得到回击转移电荷量的最小值为 0.18 C,比 Schoene et al. (2009) 得到的最小值 0.3 C 小。张其林等(2007)曾对人工引发雷电回击电流峰值和自然雷电回击电流峰值进行了详细对比分析,表明人工引发雷电与自然雷电继后回击具有很大的相似性。

3.2 人工引发雷电的近距离电磁场及影响

自然雷电由于发生时间和位置的不确定性,很难对其近距离电磁环境进行测量和研究。人工引发雷电由于在一定时空尺度上的可控性,为研究近距离电磁环境提供了条件。2005~2010 年实验期间,我们利用自行研制的交叉环天线磁场测量系统(Yang et al., 2008)对人工引发雷电产生的近距离磁场进行了测量。对 48 次回击的测量结果表明,60 m 处峰值磁场的几何平均值为 52 μT ,最小值为 18 μT ,最大值为 148 μT ,磁场波形 10%~90% 上升时间分布范围为 0.4~8.4 μs ,主要分布在 1~2 μs 之间,几何平均值和算术平均值分别为 2.5 μs 和 3.2 μs (Yang et al., 2010a)。磁场半峰值宽度的几何平均值和算术平均值分别为 2 μs 和 2.7 μs ,是 Schoene et al., (2003) 在 15 m 和 30 m 处得到磁场半峰值宽度的 6 倍和 7 倍。

图 5 (见文后彩图)给出了 0902 引发雷电通道底部第 2 次和第 4 次回击电流和对应的 30 m 处的箭式先导—回击过程在地面产生的垂直电场变化波形。两次回击的电流峰值分别为 16.5 kA 和 13.5 kA,电场变化由慢天线闪电电场变化测量仪得到,呈不

对称的 V 形特征,V 形的底部对应先导的结束和回击的开始。图 5 中两次下行负极性直窜先导产生的电场变化分别为 53.2 kV/m 和 50.3 kV/m,随后的回击过程产生的电场变化分别为 111.9 kV/m 和 52.7 kV/m。鄧秀书等(2007)曾对 0503 雷电箭式先导—回击过程在地面 60 m 和 550 m 处产生的垂直电场变化波形进行研究,发现 60 m 和 550 m 处的先导电场的几何平均值分别为 17.8 kV/m 和 1.2 kV/m,回击过程电场变化的几何平均值分别为 16.7 kV/m 和 1.65 kV/m,先导电场以水平距离 $r^{-1.18}$ 衰减。张其林等(2006)得到的 60 m 和 550 m 处先导—回击电场变化对应的半峰值宽度分别为 13 μs 和 102 μs ,不同距离上的半峰值宽度差异可以用源电荷先导模式来解释(Zhang et al., 2009)。对比可以发现,在较近的距离范围内,电场随距离的衰减是很快,遗憾的是 0902 闪电测量中对应的 60 m 和远方观测点的电场变化测量饱和,无法得到电场随距离的衰减。

当雷电击中建筑物时,接地系统将雷电流导入大地,由于接地体接地电阻的存在,会导致地电位升高。在人工引雷实验中,引流杆相当于接地体,接地电阻和通过接地体的电流都可以通过实验的方法来获得。因此,借助人引雷实验,可以研究雷电流引起的地电位升高。Yang et al., (2010b) 基于人工引发雷电实验获取的通道底部电流和地电位升高观测数据,得到峰值为 41.6 kA 和 29.6 kA 的回击电流产生的地电位升高分别为 302.8 kV 和 141.3 kV,地电位升高波形的下降时间和半峰值宽度远大于电流波形的相应参量。

3.3 放电通道光学演化的高速摄像观测和强 M 分量特征

一次雷电的持续时间非常短,用普通摄像机很难拍摄其发生发展的详细过程。高速摄像以其较高的时间分辨率,为研究雷电这种快速放电事件提供了重要手段。图 6 是 2009 年利用高速摄像系统拍摄到的一次人工引雷 0902 上行正先导的发展过程,两幅之间的时间间隔为 167 μs ,据此推算得到的上行先导发展速度约为 $0.96 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。吕伟涛等(2007)曾经利用 2000 幅/秒的高速摄像对空中引雷 0504 上行先导的发展过程进行了研究,发现在初始阶段上行正先导的二维速度为 $3.8 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^4 \text{ m/s}$,当钢丝下端接地后,上行正先导的速度

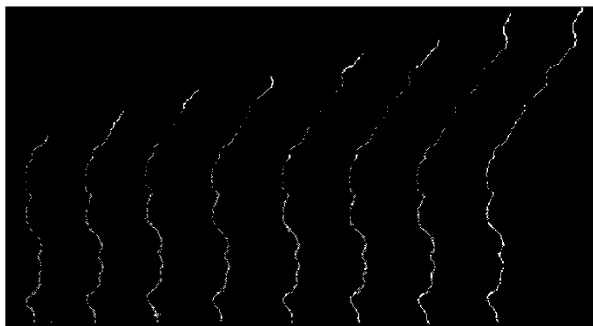


图6 利用高速摄像系统拍摄到的人工引发雷电 0902 的上行正先导发展过程

Fig. 6 The development of upward positive leaders of triggered flash 0902 obtained from high-speed camera images

为 $1.6 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$ m/s, 0902 上行正先导发展速度介于二者之间。

Rakov et al. (2001) 将云对地闪电的电荷转移过程大致分为三类: 先导—回击过程、连续电流过程和 M 分量过程。先导—回击过程是目前人们研究最多也是了解最多的放电过程。连续电流是在闪电回击之后沿闪电通道持续的云对地放电过程, 而 M 分量则是叠加在连续电流上的脉冲过程, 并使闪电通道的发光亮度发生瞬间增强。相对于连续电流而言, 先导—回击过程和 M 分量过程都是持续时间比较短而峰值电流比较大的放电过程。通常情况下, M 分量电流幅值仅有几百安培 (Thottappillil et al., 1995), 仅有少数 M 分量的峰值电流可达到几千安培量级 (Rakov et al., 1998)。山东 0902 人工触发闪电包含了 7 次峰值电流达到几千安培量级的与 M 分量有关的放电事件, 电流脉冲峰值最大为 7.0 kA。强烈的 M 分量可以具有与回击相当的电流峰值、中和电荷量以及作用积分 (Qie et al., 2011), 是十分罕见的强烈 M 分量放电事件。蒋如斌等 (2010) 利用通道底部电流、电场以及高速摄像资料, 分析了其中 6 次强 M 分量的波形特征, 并利用 Rakov et al. (1995) 提出的“双波”理论进行了数值模拟, 发现 M 分量的电流脉冲峰值都滞后于电场峰值, 且电场脉冲峰值都滞后于电流开始的时间, 数值模拟认为大 M 分量基本上可以由双波理论来解释, 即起始于由上向下发展的人射过程, 该过程在接地后仍继续发展增强, 并在地面发生反射过程, 但是下行过程和反射过程的相互作用可能随高度而变化。Wang et al. (2010) 基于电流和高

速摄像资料对引发雷电 0902 所包含的 26 个 M 分量的特征进行了分析, 发现 M 分量的发光呈对称分布, 回击前通道底部存在可探测到的微弱发光, 预示着在回击发生之前通道底部仍可能有连续电流存在。

4 总结和讨论

2005~2010 年夏季, 山东人工引发雷电实验 (SHATLE) 共成功引发负极性雷电 22 次, 包含大电流回击过程 88 次。通过实验观测获取了一批人工触发闪电通道底部电流直接测量资料、同步近距离电磁场和高速摄像观测资料。对 36 次实测回击电流的统计分析发现, 回击峰值电流的几何平均值为 12.1 kA, 最大值为 41.6 kA, 最小值为 4.4 kA。回击电流波形的半峰宽度范围在 $1 \sim 68 \mu\text{s}$ 之间, 电流 10%~90% 峰值的上升时间几何平均值为 $1.9 \mu\text{s}$, 中和电荷量为 0.86 C, 作用积分 (action integral) 为 $2.6 \times 10^3 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ 。人工触发闪电峰值电流约 16.5 kA 的回击在 30 m 处产生的电场变化可达 56.0 kV/m, 60 m 处的磁场几何平均值为 $52 \mu\text{T}$ 。利用高速摄像和电流、近距离电磁场的同步观测对闪电放电过程, 特别是大电流云地电荷转移过程——回击和 M 分量的研究发现, 强烈的 M 分量可以具有与回击相当的电流峰值、中和电荷量以及作用积分 (action integral)。人工引雷初始阶段上行正先导的发展速度约为 $0.96 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。

山东人工引发雷电实验自 2005 年夏季实施 6 年来, 引雷火箭由箭体较重的不锈钢火箭改进为以新型复合材料为箭体的新一代引雷专用火箭, 点火系统由原来的气动点火发展为光纤点火, 使得引雷的成功率大大提高。雷电流传感器、电磁场传感器、资料的光纤传输系统、数据采集记录系统、雷电高速摄像系统等设备也都进行了较大改进。目前, 人工引发雷电实验设施已经比较完善, 为获取高质量的观测数据提供了保障。今后将进一步改善近距离电磁场测量系统, 并补充多距离观测, 以了解雷电电磁波的传输特征和沿地表的衰减特征。同时将继续改进高能粒子观测设备, 以研究高能粒子与闪电过程的关系。

致谢 感谢山东省气象局、滨州市气象局和沾化县气象局对实验的大力支持; 感谢中国科学院大气物理研究所、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、山东省防雷中心、南京信息工程大学、中国气象科学研究院和成都信息工程学院参加野外实验的全体人员。

参考文献 (References)

- Chen M, Watanabe T, Takagi N, et al. 2003. Simultaneous observations of optical and electrical signals in altitude-triggered negative lightning flashes [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D8), doi: 10.1029/2002JD002676.
- Crawford D. 1998. Multiple-station measurements of triggered lightning electric and magnetic fields [D]. Masters thesis, University of Florida, Gainesville.
- Depasse P. 1994. Statistics on artificially triggered lightning [J]. *J. Geophys. Res.*, 99 (D9): 18515–518522.
- Fieux R, Gary C, Hubert P. 1975. Artificially triggered lightning above land [J]. *Nature*, 257: 212–214.
- Fisher R J, Shnetzer G H, Thottapillil R, et al. 1993. Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama [J]. *J. Geophys. Res.*, 72: 22887–22902.
- 蒋如斌, 鄒秀书, 王彩霞, 等. 2011. 峰值电流达几千安量级的闪电 M 分量放电特征及机制探讨 [J]. *物理学报*, 60 (7): 079201.
- Jiang Rubin, Qie Xiushu, Wang Caixia, et al. 2010. Lightning M-components with peak currents of kilo amperes and their Mechanism [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 60 (7): 079201.
- Horii K. 1982. Experiment of artificial lightning triggered with rocket [C] // *Memoirs of the Faculty of Engineering*. Nagoya Univ. Japan, 34, 77–112.
- Lalande P, Bondiou-Clergerie A, Laroche P. et al. 1998. Leader properties determined with triggered lightning techniques [J]. *J. Geophys. Res.*, 103: 14109–14115.
- Liu X, Wang C, Zhang Y, et al. 1994. Experiment of artificially triggering lightning in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 99 (D5): 10727–10731.
- 刘欣生, 郭昌明, 肖庆复, 等. 1990. 人工引发雷电试验及其特征的初步分析 [J]. *高原气象*, 9 (1): 64–73.
- Liu Xinsheng, Guo Changming, Xiao Qingfu, et al. 1990. Experiment of atrificially triggered lightning and preliminary analysis of its discharge characteristics [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 9 (1): 64–73.
- 吕伟涛, 张义军, 周秀骥, 等. 2007. 火箭触发闪电通道的亮度特征分析 [J]. *气象学报*, 65 (6): 983–993.
- Lü Weitao, Zhang Yijun, Zhou Xiuji, et al. 2007. Analysis of channel luminosity characteristics in rocket-triggered lightning [J]. *Acta Meterologica Sinica (in Chinese)*, 65 (6): 983–993.
- 鄒秀书, 刘欣生, 余晔, 等. 1998. 地面电晕离子对空中引雷始发过程的影响 [J]. *高原气象*, 17 (1): 84–94.
- Qie Xiushu, Liu Xinsheng, Yu Ye, et al. 1998. Influence of corona ions near the ground on the initiation of altitude triggering lightning [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 17 (1): 84–94.
- 鄒秀书, 张其林, 周筠珺, 等. 2007. 两次强雷暴系统中雷电的人工引发及其特征放电参量的测量与估算 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 37 (4): 564–572.
- Qie Xiushu, Zhang Qilin, Zhou Yunjun, et al. 2007. Artificially triggered lightning and its characteristic discharge parameters in two severe thunderstorms [J]. *Science in China (Ser. D)*, 50 (8): 1241–1250.
- Qie X, Zhao Y, Zhang Q, et al. 2009. Characteristics of triggered lightning during Shandong artificial triggering lightning experiment (SHATLE) [J]. *Atmos. Res.*, 91: 310–315.
- 鄒秀书, 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 J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34 (5): 937–946.
- 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, D10102, doi: 10.1029/2010JD015331.
- Rakov V A, Thottapillil R, Uman M A. 1995. Macheanism of the lightning M component [J]. *J. Geophys. Res.*, 100 (D12): 25701–25710.
- Rakov V A, Uman M A, Rambo K J, et al. 1998. New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D12): 14117–14130.
- Rakov V A, Crawford D E, Rambo K J, et al. 2001. M-component mode of charge transfer to ground in lightning discharges [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 22817–22831.
- Rakov V A, Uman M A, Rambo K J. 2005. A review of ten years of triggered-lightning experimets at Camp Blanding, Florida [J]. *Atmos. Res.*, 76: 503–517.
- Saba M M F, Pinto O Jr, Solórzano N N, et al. 2005. Lightning current observation of an altitude-triggered flash [J]. *Atmos. Res.*, 76: 402–411.
- Schoene J, Uman M A, Rakov V A, et al. 2003. Test of the transmission line model and the traveling current source model with triggered lightning return strokes at very close range [J]. *J. Geophys. Res.*, 108, 4737, doi: 10.1029/2003JD003683.
- Schoene J, Uman M A, Rakov V A, et al. 2009. Characterization of return-stroke currents in rocket-triggered lightning [J]. *J. Geophys. Res.*, 114, D03106, doi: 10.1029/2008JD009873.
- Thottapillil R, Goldberg J D, Rakov V A, et al. 1995. Properties of M components from currents measured at triggered lightning channel base [J]. *J. Geophys. Res.*, 100: 25711–25720.
- Uman M A, Rakov V A, Shnetzer 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.
- Wang C, Qie X, Yang J, et al. 2010. The luminosity and current characteristics of M-component from triggered-lightning in Shandong [C]. 2010 Asia–Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1303–0306.
- 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.
- 夏雨人, 肖庆复, 吕永振. 1979. 人工触发闪电的试验研究 [J]. *大气科学*, 3 (1): 94–97. Xia Yuren, Xiao Qingfu, Lü Yongzhen. 1979. The experiment study of the artificial triggering of lightning [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 3 (1): 94–97.
- 杨静, 郗秀书, 张其林, 等. 2006. 人工触发闪电直窜先导-回击放电参量的估算 [J]. *中国电机工程学报*, 26 (25): 125–130. Yang Jing, Qie Xiushu, Zhang Qilin, et al. 2006. Parameters of dart-leader return stroke in artificially-triggered lightning [J]. *Proceedings of the CSEE (in Chinese)*, 26 (25): 125–130.
- Yang J, Qie X S, Zhang G S, et al. 2008. Magnetic field measuring system and current retrieval in artificially triggering lightning experiment [J]. *Radio. Sci.*, 43, RS2011, doi: 10.1029/2007RS003753.
- Yang J, Qie X S, Zhang Q L, et al. 2009. Comparative analysis of the initial stage in two artificially-triggered lightning flashes [J]. *Atmos. Res.*, 91: 393–398.
- Yang J, Qie X S, Zhang G S, et al. 2010a. Characteristics of channel base currents and close magnetic fields in triggered flashes in SHATLE [J]. *J. Geophys. Res.*, 115, D23102, doi: 10.1029/2010JD014420.
- Yang J, Wang J, Zhao Y, et al. 2010b. Observation of ground potential rise caused by artificially-triggered lightning [C]. 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1297–1300.
- 张其林, 郗秀书, 周筠珺, 等. 2006. 人工引发雷电先导-回击过程的电场变化特征 [J]. *强激光与粒子束*, 18 (12): 2004–2010. Zhang Qilin, Qie Xiushu, Zhou Yunjun, et al. 2006. Electric field characteristics of leader and return in triggered lightning [J]. *High Power Laser and Particle Beams (in Chinese)*, 18 (12): 2004–2010.
- 张其林, 郗秀书, 孔祥贞, 等. 2007. 人工引发闪电和自然闪电回击电流波形的对比分析 [J]. *中国电机工程学报*, 27 (6): 67–71. Zhang Qilin, Qie Xiushu, Kong Xiangzhen, et al. 2007. Comparative analysis of return stroke current of triggered and natural lightning flashes [J]. *Proceedings of the CSEE (in Chinese)*, 27 (6): 67–71.
- Zhang Q L, Qie X S, Wang Z H, et al. 2009. Simultaneous observation on electric field changes at 60 m and 550 m from altitude-triggered lightning flashes [J]. *Radio. Sci.*, 44, RS1011, doi: 10.1029/2008RS003866.
- 张义军, 董万胜, 张广庶, 等. 2003. 空中人工引发雷电先导过程的特征分析 [J]. *地球物理学报*, 46 (4): 446–449. Zhang Yijun, Dong Wansheng, Zhang Guangshu, et al. 2003. Characteristics of the leading process to the artificial induced lightning in the air [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 46 (4): 446–449.
- 赵阳, 郗秀书, 孔祥贞, 等. 2009. 人工触发闪电电流波形特征参数分析 [J]. *物理学报*, 58 (9): 6616–6626. Zhao Yang, Qie Xiushu, Kong Xiangzhen, et al. 2009. Analysis on the parameters of the current waveforms of triggered lightning [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 58 (9): 6616–6626.



图 1 (a) 法拉第笼及周围的火箭发射架; (b) 法拉第笼内的雷电流测量设备 Pearson 线圈; (c) 法拉第笼内的雷电流测量设备同轴分流器。 (b、c) 蓝色盒子为数据光纤传输系统的发射机

Fig. 1 (a) Faraday cage surrounded by the rocket launchers; (b) Pearson coil in the Faraday cage; (c) shunt in the Faraday cage. The blue box in (b) and (c) is a fiber optical transmitter unit

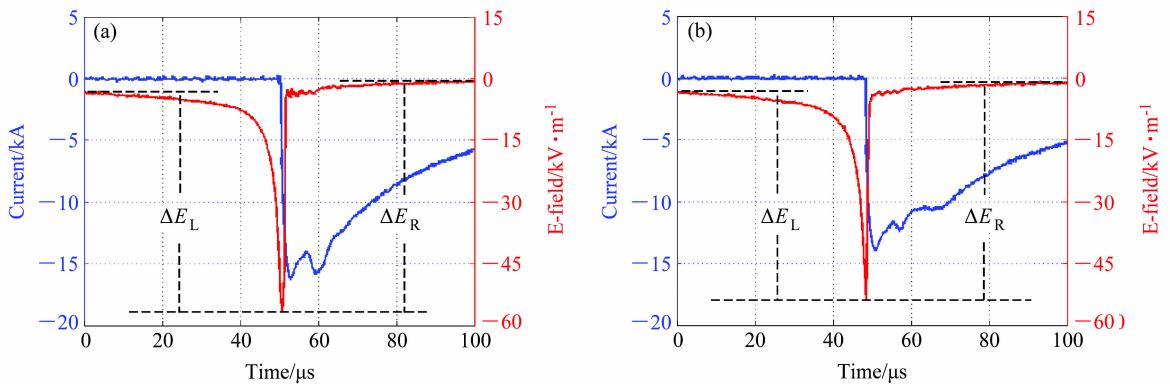


图 5 引发雷电 0902 通道底部 (a) 第 2 次和 (b) 第 4 次回击电流与对应的 30 m 处的箭式先导—回击过程在地面产生的垂直电场变化波形

Fig. 5 Waveforms of channel base currents and electric fields at 30 m for triggered flash 0902: (a) The second return stroke; (b) the fourth return stroke