

姜苏麟,王振会,刘超,等.地基微波辐射计遥感人工触发闪电的观测研究[J].热带气象学报,2023,39(4): 497-506.

文章编号: 1004-4965(2023)04-0497-10

地基微波辐射计遥感人工触发闪电的观测研究

姜苏麟^{1,2,3},王振会^{1,2},刘超^{1,2},雷连发^{2,4},潘赞^{2,5},李青^{1,2}
张义军⁵,吕伟涛⁶,陈绍东⁷,卢建平⁴

- (1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心中国气象局气溶胶-云-降水重点实验室,江苏 南京 210044;
2. 南京信息工程大学大气物理学院,江苏 南京 210044; 3. 南京气象科技创新研究院,江苏 南京 210041;
4. 西安电子工程研究所,陕西 西安 710100; 5. 复旦大学大气与海洋科学系,上海 210000;
6. 中国气象局气象科学研究院,北京 100000; 7. 中国气象局广州热带海洋气象研究所,广东 广州 510641)

摘要: 为了深入研究雷电产生的微波热辐射特征,从2016年初夏开始利用地基微波辐射计在中国气象局雷电场外科学实验基地开展了连续4年的观测实验,根据雷电热效应的特征,制定了观测方案,并为地基微波辐射计设置了“引雷观测模式”。结果表明,地基微波辐射计具有对雷电热效应产生响应的能力。2017—2019年,辐射计一共成功捕获了30次人工触发闪电,观测效率逐年增长,平均为71.4%;微波亮温脉冲幅度的最大值约125 K。结合其中28次触发事件的雷电流数据,分析了亮温脉冲幅度和雷电流积分量之间的相关性,并发现了最大亮温脉冲幅度与总电流作用积分之间可能存在指数关系。根据亮温观测数据估算了雷电热效应的持续时间,平均约0.5 s,其中25次触发事件的雷电热效应持续时间与雷电流持续时间变化较为一致,相关系数约0.73。

关键词: 地基微波辐射计;人工触发闪电;雷电热效应;亮温脉冲;雷电流积分量

中图分类号: P407.7 **文献标志码:** A **Doi:** 10.16032/j.issn.1004-4965.2023.045

1 引言

雷电热效应是指在雷电放电过程中引起大气温度升高的现象,局部升温可达数万度,长时间持续的雷电热效应是导致森林火灾和其他许多直击闪电灾害的主要根源^[1-6]。雷电击中人或物体时,可将人体灼伤,导致金属熔化,建筑物燃烧,微电子技术产品的损坏,引发火灾从而对当地生态系统具有改造性影响^[7-9]。根据雷电化学方程式,闪电放电引起的高温高压是 NO_x 产生的条件^[10]。因此,在引起闪电灾害的同时,放电路径中的离子和电子在高温下会发生复杂的化学反应,从而大气中的 NO_x 浓度增加^[11-12],并且雷电引起的气压(闪

电放电路径中的高温导致气压迅速升高)越高,闪电放电路径越长, NO_x 的产量越高^[13]。在对流层上部,除少量 NO_x 是由人类活动引起外,其余主要是由闪电活动引起的,氮氧化物在该区域内具有很长的生命周期^[14],影响着全球大气环境和气候变化。在这段时间内,不仅涉及与空气质量相关的氮氧化物合成的主要过程,并且与许多雷电灾害密切相关,因此雷电热效应(雷电流引起的高温)及其持续时间是雷电的重要特征参数,对研究闪电放电过程中能量传输特性、雷电防护等相关领域有着重要作用^[15]。

由于雷击是小概率事件,其出现地点与发展过程的随机性很大,且具有冲击电流大、放电时间短(一般持续不到1 s)、冲击电压高等特征,对其

收稿日期:2022-05-07;修订日期:2023-06-28

基金项目:国家自然科学基金(41675028);国家重点研发计划(2017YFC1501501);中国气象科学研究院基础研究基金(2018Z003);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX19_1030);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)共同资助

通讯作者:姜苏麟,女,江苏省人,博士,主要从事大气探测与遥感研究。E-mail: 892125940@qq.com

直接测量非常困难。人工引雷技术则为雷电的观测实验研究开辟了一条新途径^[16-19]。目前,光谱分析是等离子体诊断的唯一途径,它为了解闪电放电过程的物理机制提供了重要信息^[20],通过发射光谱的观测和分析可获得闪电放电路径温度^[21-23]。Zhivlyuk等^[24]利用NII和OII谱线的相对强度估算出放电路径温度约为 $21\ 000\pm 5\ 000\text{ K}$ 。Weidman等^[25]根据人工触发闪电在 $850\sim 1\ 400\text{ nm}$ 波段的光谱辐射特性推算出闪电放电路径的温度约 $16\ 000\text{ K}$ 。袁萍等^[26]利用多谱线法计算出青海地区的闪电放电路径温度范围在 $22\ 000\sim 30\ 000\text{ K}$ 之间,并且发现同一个回击过程中的放电路径温度随高度增加,略微有下降的趋势。还有一些研究给出了放电路径温度随时间的演变特征,如赵学燕等^[27]通过建立数学模型研究了闪电回击过程后的消散过程,发现放电路径半径相同的情况下,前期放电路径的温度随时间衰减更快,而后期衰减较慢,并且初始温度越高,衰减越快。Dong等^[28]研究了回击峰值电流阶段放电路径沿径向的温度分布以及传热特性。结果表明,距离闪电放电路径核心越近,温度梯度越大,沿放电路径径向传递的热量越多。当电流达到峰值后,放电路径温度缓慢下降,传热系数呈单调下降函数变化。目前雷电放电路径的温度,主要是依赖可见光(含近红外)波段的光谱学方法观测,由于热辐射在可见光波段的持续时间较短,受光谱仪时间分辨率的限制,因此仅能获得回击电流上升至峰值阶段(通常为几微秒),峰值电流过后较短时间内(通常为几百微秒)的光谱信息来推算闪电放电路径温度、热导率等相关参数。Orville^[2]利用可见光波段的时间分辨光谱研究了回击初期 $50\ \mu\text{s}$ 放电路径温度的变化特征。由于雷电流对放电路径的持续加热,Mu等^[29]和张国强等^[30]发现峰值电流之后,放电路径温度的衰减比雷电流的变化更缓慢。直到峰值电流之后的 $700\ \mu\text{s}$ 左右,放电路径温度仍然维持在 $20\ 000\text{ K}$ 左右。因此这种方法估计出的温度主要代表放电路径的最高温度,难以代表雷电热效应的持续时间。瞿海燕等^[31]研究了闪电放电路径的近红外光谱,结果表明近红外光谱主要是峰值电流过后、放电后期的辐射,辐射持续时间较长。根据普朗克热辐射定律,在峰值电流过后,闪电放电路径的热辐射在微波波段持续时间更长,

更有利于揭示雷电热效应的变化特征,进一步研究与热效应有关的雷电灾害与防雷设备的设计。但针对雷电进行微波遥感观测的可行性还需进一步验证,因此开展雷电热效应的微波辐射计观测实验具有重要意义。

地基微波辐射计,作为一种基于微波遥感原理的观测仪器,已经越来越多地用于连续观测大气温度、湿度、水汽密度和液态水廓线^[32-34],生成多种大气对流参数,对强对流天气及其产生的雷电的预警预报有良好的应用前景^[35-38]。其中,Pan等^[35]利用地基微波辐射计观测反演得到的大气层结计算分析了雷电发生前大气对流参数的变化特征,孙京等^[36]发现地基微波辐射计的水汽密度与云闪数之间的相关系数可达0.97,Chan^[37]发现闪电活动与不稳定指数之间有很好的相关性,苟阿宁等^[38]分析了一次雷电过程中微波辐射计的观测特征,并提取与雷电活动相关性较高的参数作为预报因子。还有一些研究结合天基微波遥感数据来分析其与闪电活动的相关性和在实况预报应用中的重要性^[39-41],但直接利用雷电“热”效应产生的微波辐射信号来探测雷电特性的研究很少。许多其他研究也表明,地基微波遥感可以提供对流层低层温度结构中有价值的信息。Güldner等^[42]研究了微波辐射计探测大气热力学状态的能力,结果表明:其反演的温度廓线精度从地表附近的 0.6 K 变化到 7 km 处的 1.6 K 。Sánchez等^[43]对比了瓜达拉马山脉(西班牙)的MP-3000A微波辐射计和 50 km 外发射的探空仪的温度廓线,相关系数达到0.99以上。Massaro等^[44]在地形复杂的因河河谷(奥地利)使用近距离无线电探空仪对辐射计使用不同反演算法获得的温度廓线进行了评估,结果表明辐射计能够以可接受的精度获得连续的温度和湿度廓线,且利用仰角扫描模式可以在地面最低 $1\ 200\text{ m}$ 处获得更精确的温度廓线。微波辐射计对温度变化的响应使其观测雷电热效应成为可能。

2016—2019年,在中国气象局雷电野外科学试验基地开展了连续4年的地基微波辐射计观测试验。本文概述了这次实验研究进展,主要包括地基微波辐射计及其他观测仪器简介、微波辐射计观测闪电放电形成的高温气柱的亮温响应理论基础、2016—2019年的观测实验及数据概况、初步

研究结果等几个方面。

2 地基微波辐射计及其它观测仪器简介

MWP967KV型地基微波辐射计被动地接收大气在K波段(22~30 GHz)和V波段(51~59 GHz)的微波辐射亮温,在机箱顶部安装的红外辐射计的工作波长为11 μm,可以得到云底红外温度,内置的地表温度,湿度和压力传感器可以提供地表大气状况。辐射计天线的俯仰扫描角度分辨率为0.1°,波束宽度范围从59 GHz的2°到22 GHz的4°。根据观测需求,辐射计相邻采样脉冲之间的前、后沿时间间隔可以被缩短,进一步提高时间分辨率。其他详细说明可参考文献[45]和[46]。

江苏无线电研究所提供的风向风速传感器安装在引雷场附近约10 m高的气象观测塔上。传感器电路中装有防雷器件。风速精确度为±(0.3+0.02v) m/s,风向精确度为±3°,起动风速 $v_0 \leq 0.5$ m/s。

引雷场布置了6个用于触发闪电的火箭发射架,引雷火箭下部拖曳的金属导线与5 m高的引流杆顶部直接相连。引流杆底部和法拉第笼内的同轴分流器连接,用于测量雷电流。同轴分流器电阻为1 mΩ,电流测量范围为100 kA,带宽约为200 GHz^[47]。隔离数字化仪(HBM HV6600)将同轴分流器两端的电压信号转换为光信号,然后通过光纤传输到远程记录系统。记录系统采用HBM Uen5i瞬态记录仪,最大采样率为100 MS/s。

3 微波辐射计观测实验的理论基础

为了探索地基微波辐射计资料在雷电热效应研究方面的可能性,本团队^[48]基于微波辐射传输理论,提出了地基微波辐射计观测到闪电放电引起的柱状高温区时的亮温响应表达式:

$$\Delta T_b = \varepsilon \Delta T(R) \Gamma(R) \quad (1)$$

其中, ε 是高温气柱的表观发射率, $\Delta T(R)$ 是距离辐射计 R 处的闪电引起的温度增量,以及 $\Gamma(R)$ 是从距离 R 处到辐射计天线($R=0$)处的大气透过

率。根据推导出的亮温响应表达式进行模拟计算发现灵敏度为0.5 K的微波辐射计观测到闪电热柱是很有可能^[49]。

如果闪电热柱不能充满辐射计波束,且雷电流热效应持续时间很短、不足以在亮温采样期间一直存在,则亮温增量观测值必须进行“空间填充订正”与“时间填充订正”^[48]:

$$\Delta T_b^c = C_s \times C_t \times \Delta T_b \quad (2)$$

其中, C_s 和 C_t 分别为空间填充订正因子与时间填充订正因子。空间填充订正因子 C_s 表示高温气柱在天线主波束截面的占据比,时间填充订正因子 C_t 表示雷电热效应持续时间与亮温采样时间之比。

4 观测实验状况概述

4.1 观测方案

为了对2017—2019年项目执行期间的观测实验积累经验,2016年5月26日—2016年7月16日在中国气象局雷电野外科学试验基地进行针对人工触发闪电的“预研阶段”观测试验。2016年辐射计安装在距离人工引雷基地2 km处、高约10 m的房顶上,仰角设置为12°。遗憾的是,2016年虽然辐射计有亮温脉冲产生,但在时间上难以找到和人工闪电发生时间能很好匹配的数据。为此,我们从观测距离、时间分辨率及精确度等方面进行了定量计算和原因分析,用于指导后续实验。

2017—2019年地基微波辐射计的安装位置如图1所示。辐射计位于引流杆北侧约99 m处,位于控制室东侧约10 m处。微波辐射计等各种观测仪器的记录系统放置在控制室中。

2017—2019年试验期间,微波辐射计采用2种观测模式,即气象观测模式和引雷观测模式。在常规的气象业务观测中,微波辐射计的天线波束指向天顶方向(仰角为90°),依次对22个观测频率(8个大气湿度遥感频率,14个大气温度遥感频率)进行亮温采样,单个频率的亮温采样对应一个采样脉冲,一个完整的采样周期约2~4分钟,并利用亮温观测值实时反演大气温度、湿度、水汽含量和液态水含量等廓线,为引雷观测提供实验背景数据,本研究称此为“气象观测模式”。为了确

定微波辐射计对雷电热效应的观测能力,在雷电热效应的特征和遥感理论的指导下,为地基微波辐射计提出了“引雷观测模式”,以便不失去雷电热效应的观测机会。“引雷观测模式”与“气象观测模式”的区别主要分为两点:(1)天线波束的指向:调整地基微波辐射计的方位使其主波束对准人工

引雷基地,并以指定仰角对准引雷基地上空、雷暴云之下进行观测,期望主波束能包含闪电高温气柱,如图2所示。(2)采样方式:选取特定的一个或几个观测频率对亮温进行串行采样,且相邻采样脉冲之间的前、后沿时间间隔为0 s,以便连续探测雷电热效应的变化特征。

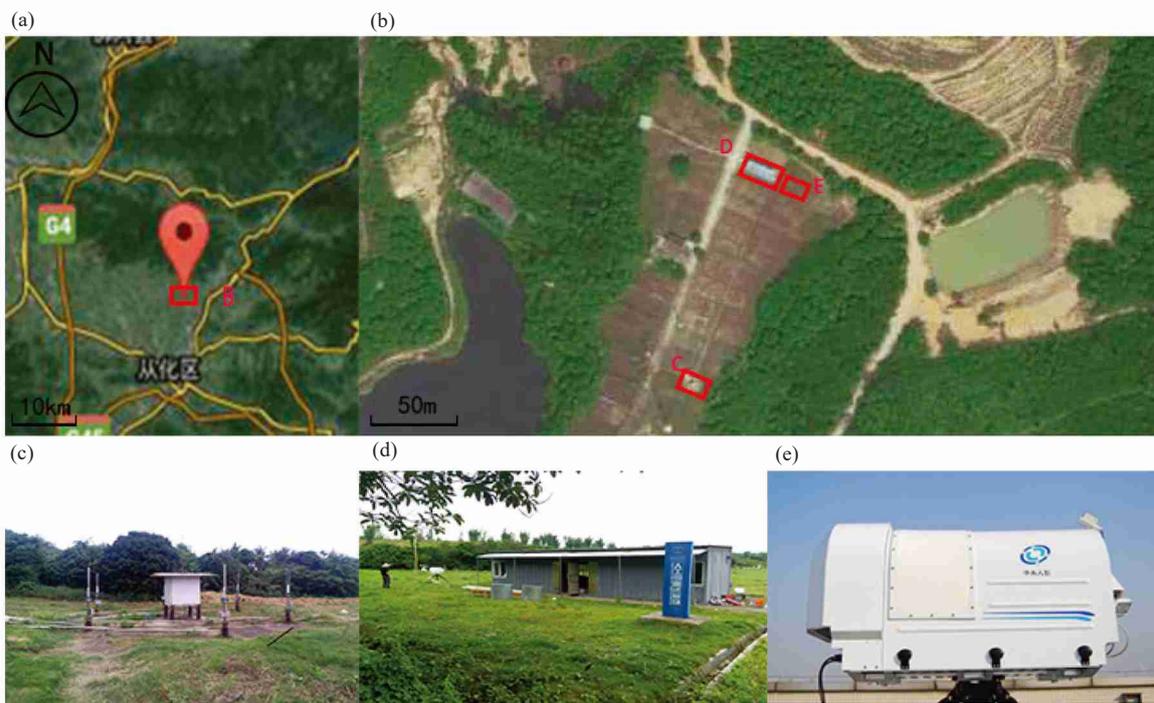


图1 地基微波辐射计的安装位置示意^[50] a. 实验地点(B); b. 引雷场(C), 控制室(D)和地基微波辐射计(E); c. 引雷场; d. 控制室; e. 地基微波辐射计。

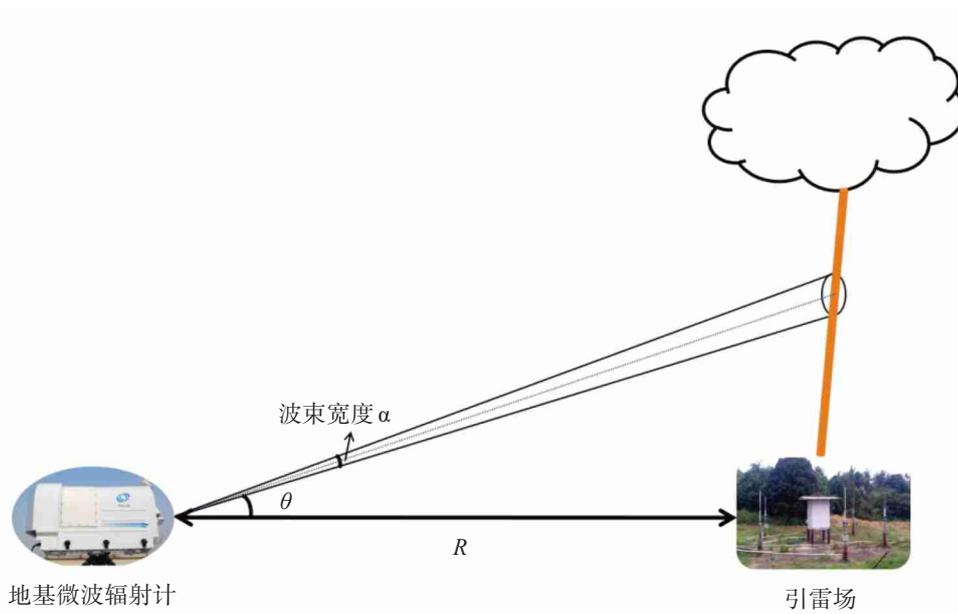


图2 辐射计遥感人工触发闪电示意

为了改进观测方案,并获取更多雷电热效应的相关信息,2017—2019年辐射计在引雷观测模式下的工作参数不断修改优化,具体参数如表1所示。微波辐射计的观测效率从2017年的63.6%逐年增长到2019年的77.8%,三年平均为

71.4%,如表2所示。经理论模拟与数据分析发现,天线仰角为30°,观测频率接近大气窗区(28、30、51.25和51.75 GHz),尤其是28~30 GHz,辐射计能够很好地观测到雷电热效应。

表1 2017—2019年引雷观测模式下辐射计的工作参数

年份	日期	采样脉冲宽度(s)		观测频率 (GHz)	仰角(°)	目的
		单频	地面气象要素			
2017	06/03-06/16	0.15	2.4	22.5; 30; 51.25; 56.66	30	1、寻求最佳仰角与最佳观测频率; 2、提高时间分辨率
	06/16	0.17	0.19	26.235; 30; 51.25; 56.66	66	
	06/16-07/16	0.17	0.19	28; 30; 51.25; 51.75	73.5	
2018	05/26-07/26	0.15	0.17	30	30	1、进一步提高时间分辨率; 2、减小地面气象要素采样频次及影响
2019	06/04-07/07	0.15	0.17	26.235;30	30	获取闪电距离信息 ^[48]

表2 2017—2019年辐射计的观测效率

年份	成功触发事件 次数	辐射计产生响 应的事件次数	辐射计观测 效率(%)
2017	11	7	63.6
2018	13	9	69.2
2019	18	14	77.8
2017—2019	42	30	71.4

4.2 亮温脉冲特征

电流是雷电放电过程中热辐射效应的来源,雷电流作用积分(电流平方对时间的积分值)代表了雷电流传输引起的热效应,也是研究雷电物理机制和雷电防护的重要参数之一^[51]。本研究结合2017—2019年在中国气象局雷电野外科学实验基地开展外场实验中获得的28次人工触发闪电电流数据,对比分析辐射计产生的亮温脉冲幅度与雷电流作用积分。表3中分别给出了2017—2019年最大亮温脉冲幅度、所有观测频率的平均脉冲幅度和总电流作用积分的平均值,可以看到最大亮温脉冲幅度可达到125 K,平均脉冲幅度分别为12.2 K,29.8 K,8.8 K,其中2017、2019年平均脉冲幅度偏小的原因可能有3点:(1)触发事件的总电流作用积分(热效应)较小,如表3中最后一列所示;(2)2017年采用了四个观测频率依次进行亮温采样,2019年采用了双频交替观测,其中非接近窗区的观测频率(如26.235,56.66 GHz)的大气透过率较小,产生的亮温脉冲幅度也较小;V波段的观

测频率,由于波束宽度较窄,高温气柱倾斜时空间填充因子减小更快,其平均亮温脉冲幅度小于K波段。(3)观测距离不变的情况下,辐射计仰角越高,空间填充因子越小,从而亮温脉冲幅度减小。从脉冲幅度的统计结果可知,合适的观测频率与仰角使微波辐射计产生的亮温响应更加明显。

表3 2017—2019年亮温脉冲的脉冲幅度统计表

年份	最大亮温脉冲 幅度(K)	平均亮温脉冲 幅度(K)	总电流作用积分 的平均值(A ² s)
2017	73.8	12.2	42341
2018	125.4	29.8	42590
2019	48.9	8.8	27317
2017—2019	82.4	16.9	37416

本研究分析了亮温脉冲幅度与雷电流积分量的相关性^[52],在同一次闪电过程中,雷电流作用积分($\int i^2 dt$)、电荷量($\int idt$)与亮温脉冲幅度之间的变化趋势较为一致,且连续电流与回击引起的雷电热效应都有可能使微波辐射计产生亮温脉冲,如图3所示。

雷电流作用积分代表了一次闪电过程中电流传输引起的热效应,而亮温观测值代表微波辐射计接收的热辐射,因此图4给出了28次触发事件的最大亮温脉冲幅度与总电流作用积分,发现两者之间可能存在指数关系,相关系数约0.68。

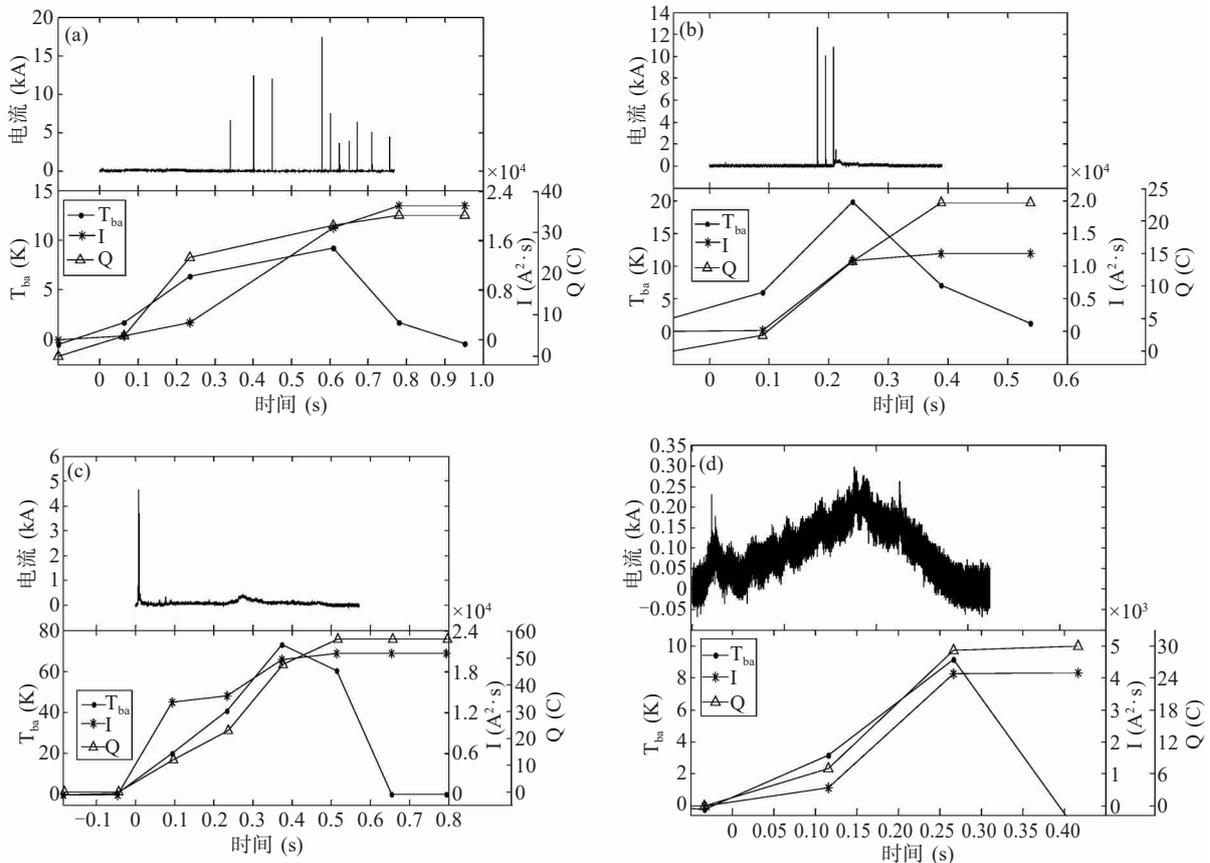


图3 4次人工触发闪电事件中闪电电流、亮温脉冲的脉冲幅度(T_{ba})、雷电流作用积分(I)和电荷量(Q)的时间序列图^[52]
 a. 2017/07/10 15:07:22.368;b. 2018/07/07 16:25:39.622;c. 2018/06/26 11:48:18.580;d.2019/06/11 13:14:31.312。

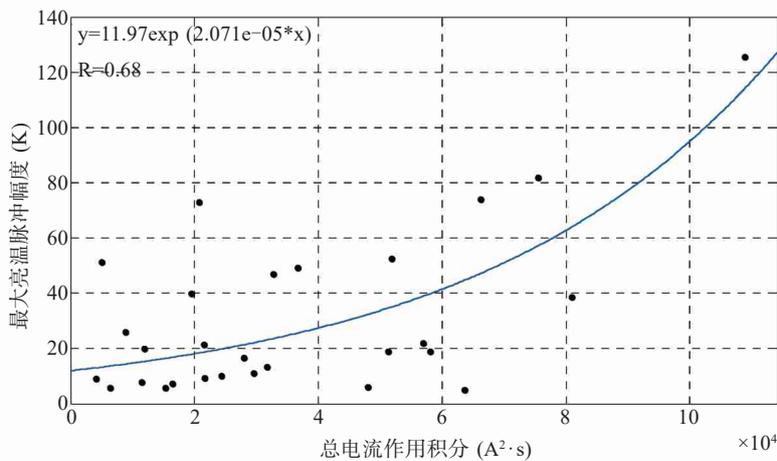


图4 2017—2019年总电流作用积分与最大亮温脉冲幅度关系

4.3 雷电热效应持续时间

引雷观测模式下,微波辐射计的亮温观测数据中包含了各个观测频率的亮温观测值及其采样时间,时间精确到毫秒。当辐射计因雷电热效应产生连续亮温脉冲时,根据产生亮温脉冲的观测频率个数和亮温采样的时间间隔,可估算出雷

电热效应持续时间 t_l 。从图5中可以看出,雷电热效应一定在 $[t_1, t_2]$ 内持续存在,并且可能在 (t_0, t_3) 内存在。本研究估算的雷电热效应持续时间 t_l (即 $t_2 - t_1$)为最小值,且估算结果最多偏小2个脉冲宽度,在此次触发事件中大约为 $0.15 \times 2 = 0.3 s$ 。

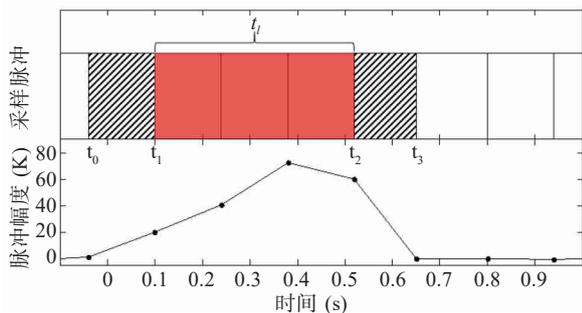


图5 雷电热效应持续时间的估算个例
(2018/06/26 11:48:18.580)

30次人工触发闪电的雷电热效应持续时间在0.1~1.1 s之间,平均持续时间约0.5 s。对于其中

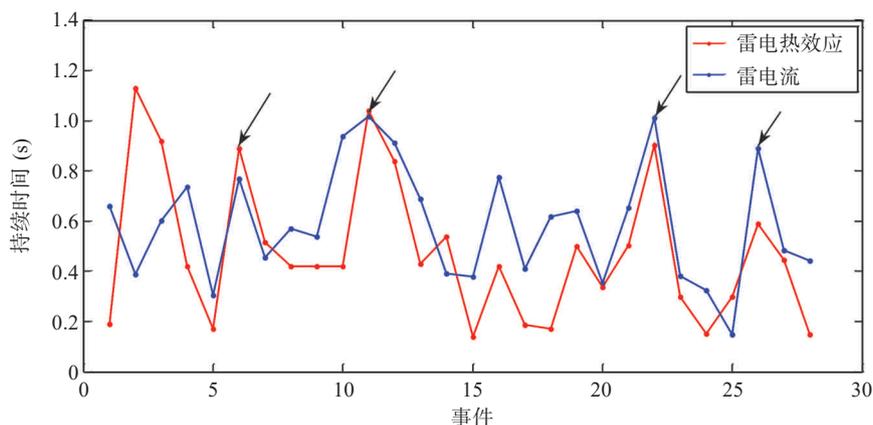


图6 2017—2019年28次人工触发闪电事件的雷电热效应持续时间与雷电流持续时间对比

5 结 语

介绍了地基微波辐射计于2016—2019年连续4年在广东从化人工引雷基地进行雷电观测的探索性研究。观测资料表明:微波辐射计具有对雷电放电形成的高温气柱产生响应的能力,并能获得雷电热效应的信息。2017—2019年,辐射计观测方案不断改进,观测效率从2017年的63.6%逐年增长到2019年的77.8%,三年平均观测效率约71.4%;辐射计的最大亮温脉冲幅度可达到125 K,结合雷电流数据,最大亮温脉冲幅度与总电流作用积分之间正相关且可能存在指数关系,相关系数约0.68;雷电热效应的持续时间在0.1~1.1 s之间,平均约0.5 s,且微波辐射计测得的雷电热效应持续时间与雷电流持续时间变化一致,这是由于雷电流的传输产生了热量,对放电路径的持续加热使温度衰减缓慢,因此雷电流的持续时间越

的28次触发事件,雷电热效应持续时间与雷电流持续时间之间的相关系数约0.51(如图6),但可以看到前三次触发事件降低了相关性,这3次事件发生在2017年6月16日之前微波辐射计对观测频率和仰角的调整阶段,剔除这3次事件后,25次触发事件的雷电流持续时间与估算的雷电热效应持续时间之间的相关系数约0.73。可见雷电流持续时间与雷电热效应持续时间之间的变化较为一致,雷电流持续时间较长的事件,对应的雷电热效应持续时间也长。反之,微波辐射计测得的雷电热效应持续时间越长,代表着雷电流持续时间也越长。

长,雷电热效应的持续时间也越长,说明微波辐射计在本研究提出的引雷观测模式下可以观测到雷电热效应并估算其持续时间。

回击电流的变化是微秒级的(如8/20 μs , 10/350 μs 波形),而本研究中采用的微波辐射计仅改变了采样方式,未做硬件上的改动,并非完整意义上的雷电观测专用辐射计,其积分时间是毫秒级的。微波辐射计接收到的是积分时间段内的热辐射,由于相对较低的采样率,亮温观测值包含了子放电过程与连续电流的持续贡献,因此基于目前的观测资料还不能单独分析子放电过程中微波热辐射的特征。

本研究基于验证微波辐射计观测雷电热效应的能力、观测方案研究、闪电高温气柱的微波热辐射特征分析等目的,为了增加捕获雷电热效应特征的可能性,需要考虑空间填充因子和时间填充因子,因此微波辐射计的波束宽度既不能太宽也不能太窄,各频点采样尽可能连续而采样脉冲应

该尽可能短。在本研究的观测实验中(仰角为 30°),辐射计的波束内包含了钢丝(以及钢丝汽化)的通道部分,但火箭拖曳的钢丝非常细(直径约 0.2 mm),并且在大约 1 ms 内燃烧、汽化,因此,钢丝(以及钢丝汽化)的空间填充因子与时间填充因子都很小,从而亮温增量很小,对本研究的观测结果没有影响。在微波辐射计有限的波束宽度内,辐射计只能获取引雷场上空闪电高温气柱与主波束相交部分的信息。近距离观测时波束内的热柱长度较短,但辐射计的观测距离越远,空间填充因子越小,从而亮温响应量会逐渐减小,这不利于成功观测。因此,如果未来研究不同高度范围的闪电高温气柱的微波热辐射特征变化,可以考虑多台地基微波辐射计或者专门设计多波束天线以便采用不同观测仰角进行联合探测。

关于该项研究未来发展,期望主要体现在如下4个方面:(1)如何验证这一新技术所给出的观测结果。利用本研究给出的亮温响应表达式,可反演闪电高温气柱的温度增量,此反演方法与光谱法基于不同的原理,因此结果难以直接对比、评价;(2)对观测实验的各种影响因素进一步定量考

虑。有一些因素(例如引雷火箭倾斜、不同回击的放电路径、局地风^[53])会影响闪电高温气柱在波束内的位置以及本文的数据处理和计算结果,有待于以后积累数据并深入研究;(3)从硬件和控制软件方面考虑微波辐射计改造。例如,采用高性能电子技术进一步改善采样方式,设计多波束天线以便多仰角同时观测,等等;(4)进一步开展观测、深化研究。希望以后可以在同一次闪电过程中,结合高时间分辨率的光谱信息及其他同步闪电观测数据、微波辐射计在引雷观测模式下的亮温观测数据,研究闪电高温气柱随时间的温度变化,这一工作对更深入的探讨研究闪电放电过程中能量传输以及闪电发展过程的物理机制有重要的意义。

致 谢:感谢西安电子研究所在微波辐射计的技术研究方面提供的帮助,感谢广东野外雷电实验基地提供观测现场场地,感谢中国气象科学研究院和广东省气象局提供有关支持。感谢中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室雷电科研团队提供闪电电流数据。

参 考 文 献:

- [1] ORVILLE R E. A high-speed time-resolved spectroscopic study of the lightning return stroke: Part I. A qualitative analysis.[J]. *J Atmos Sci*, 1968, 25(5): 827-838.
- [2] ORVILLE R E. A high-speed time-resolved spectroscopic study of the lightning return stroke: Part II. A quantitative analysis.[J]. *J Atmos Sci*, 1968, 25(5): 839-851.
- [3] ORVILLE R E. A high-speed time-resolved spectroscopic study of the lightning return stroke: Part III. A time-dependent model[J]. *J Atmos Sci*, 1968c, 25(5): 852-856.
- [4] 冯桂力, 郗秀书, 吴书君. 山东地区冰雹云的闪电活动特征[J]. *大气科学*, 2008, 32(2): 289-299.
- [5] 刘冬霞, 郗秀书, 冯桂力. 华北一次中尺度对流系统中的闪电活动特征及其与雷暴动力过程的关系研究[J]. *大气科学*, 2010, 34(1): 95-104.
- [6] KONG X, YANG Z, ZHANG T, et al. Optical and electrical characteristics of in-cloud discharge activity and downward leaders in positive cloud-to-ground lightning flashes[J]. *Atmos Res*, 2015, 160: 28-38.
- [7] LITTELL J S, MCKENZIE D, PETERSON D L, et al. Climate and wildfire area burned in western U. S. ecoprovinces, 1916-2003[J]. *Ecological Applications*, 2009, 19: 1 003-1 021.
- [8] FLANNIGAN M, CANTIN A S, DE GROOT W J, et al. Global wildland fire season severity in the 21st century[J]. *Forest Ecology & Management*, 2013, 294, 54-61.
- [9] GIGLIO L, RANDERSON J T, VAN D W G R, et al. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6: 957-974.
- [10] BORUCKI W J, CHAMEIDES W L. Lightning: Estimates of the rates of energy dissipation and nitrogen fixation[J]. *Reviews of Geophysics*. 1984, 22: 363-372.
- [11] FRANZBLAU E. Electrical discharge involving the formation of NO , NO_2 , HNO_3 and O_3 [J]. *J Geophys Res*, 1991, 96: 22 337-22 345.
- [12] COORAY V, RAHMAN M. Efficiencies for production of NO_x and O_3 by streamer discharges in air at atmospheric pressure[J]. *Journal of Electrostatics*, 2005, 63: 977-983.
- [13] WANG Y, DESILVA A, GOLDENBAUM G, et al. Nitric oxide production by simulated lightning: Dependence on current, energy, and

- pressure[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 149-159.
- [14] LEVY II H, MOXIM W J, KLONECKI A A, et al. Simulated tropospheric NO_x: Its evaluation, global distribution and individual source contributions[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104(D21): 26279-26306.
- [15] 周筠珺, 郗秀书, 言穆弘, 等. 雷暴过程中闪电产生NO_x的地面观测研究[J]. *高原气象*, 2003, 22(3): 275-280.
- [16] FIEUX R P, GARY C H, HUTZLER B P, et al. Research on artificially triggered lightning in France[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1978, PAS-97(3): 725-733.
- [17] DEPASSE P. Statistics on artificially triggered lightning[J]. *J Geophys Res Atmos*, 1994, 99(D9): 18 515-18 522.
- [18] 刘欣生, 张义军, 郗秀书. 人工引雷及其在雷电防护中的应用[J]. *电网技术*, 1997, 5: 31-35.
- [19] 樊艳峰, 陆高鹏, 蒋如斌, 等. 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*, 2017, 41(5): 1 027-1 036.
- [20] 瞿海燕, 张廷龙, 潘慧玲. 回击电流及热效应与闪电光谱和通道温度的相关性分析[J]. *干旱气象*, 2014, 32(1): 10-16.
- [21] 王瑞燕, 袁萍, 岑建勇, 等. 闪电通道温度诊断中观测距离的影响[J]. *物理学报*, 2014, 63(9): 099203-7.
- [22] 李青, 雷连发, 王振会, 等. 雷电流热效应的遥感观测研究进展[J]. *地球科学进展*, 2017(5): 481-487.
- [23] ZHANG H, YUAN P, ZHANG Y, et al. Plasma characteristic of lightning discharge channel[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(10): 2 452-2 458.
- [24] ZHIVLYUK Y N, MANDEL S S L. On the temperature of lightning and force of thunder[J]. *Soviet Phys JETP*, 1961, 13(2): 338-340.
- [25] WEIDMAN C, BOYE A, CROWELL L. Lightning spectra in the 850- to 1400-nm near-infrared region[J]. *J Geophys Res Atmos*, 1989, 94 (D11): 13 249-13 257.
- [26] 袁萍, 欧阳玉花, 吕世华, 等. 青海地区闪电回击通道的温度特性[J]. *高原气象*, 2006, 25(3): 503-508.
- [27] 赵学燕, 袁萍, 王杰, 等. 闪电消散过程等离子体温度衰减规律的理论研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(5): 3 243-3 247.
- [28] DONG C, YUAN P, CEN J, et al. The heat transfer characteristics of lightning return stroke channel[J]. *Atmos Res*, 2016: 178-179: 1-5.
- [29] MU Y, YUAN P, WANG X, et al. Temperature distribution and evolution characteristic in lightning return stroke channel[J]. *Journal of Atmospheric & Solar Terrestrial Physics*, 2016, 145, 98-105.
- [30] 张国强, 袁萍, 岑建勇, 等. 闪电首次回击过程中通道温度与电导率的演化特征[J]. *原子与分子物理学报*, 2015, 32(6): 1 078-1 084.
- [31] 瞿海燕, 袁萍, 张华明, 郗秀书. 闪电放电过程的近红外光谱及温度沿放电通道的演化特征[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(8): 2 508-2 513.
- [32] MADHULATHA A, RAJEEVAN M, VENKATRATNAM M, et al. Nowcasting severe convective activity over southeast India using ground-based microwave radiometer observations[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118: 1-13.
- [33] 郭丽君, 郭学良. 利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究[J]. *气象学报*, 2015, 73(2): 368-381.
- [34] 雷连发, 陈婷, 杨柳, 等. 微波辐射计在西安一次强对流天气过程的分析应用[J]. *火控雷达技术*, 2017, 46(4): 63-66.
- [35] Pan Y, Shuang Z, Qing L, et al. Analysis of convective instability data derived from a ground-based microwave radiometer before triggering operations for artificial lightning. [J]. *Atmos Res*, 2020, 243: 105005.
- [36] 孙京, 蔡然, 柴健, 等. 基于微波辐射计和闪电观测资料估算对流性降水方法初探[J]. *干旱气象*, 2018, 36(3):438-446.
- [37] CHAN W P. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather[J]. *Meteorol Z*, 2009, 18(3): 253-265.
- [38] 苟阿宁, 韩芳蓉, 张文刚, 等. 地基微波辐射计观测资料在一次雷电潜势预报中的应用分析[J]. *热带气象学报*, 2018, 34(2): 126-136.
- [39] 曹治强, 刘辉志, 李万彪, 等. 中尺度对流系统的微波辐射和闪电特征分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(5): 731-739.
- [40] KATSANOS D K, LAGOUVARDOS K, KOTRONI V, et al. The relationship of lightning activity with microwave brightness temperatures and spaceborne radar reflectivity profiles in the central and eastern Mediterranean[J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2009, 46(11): 2 700-2 708.
- [41] MAGI B I, WINESETT T, CECIL D J. Estimating lightning from microwave remote sensing Data[J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2016, 55(9): 2 021-2 036.
- [42] GÜLDNER J, SPÄNKUCH D. Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2001, 18(6): 925-933.
- [43] SÁNCHEZ J L, POSADA R, GARCÍA-ORTEGA E, et al. A method to improve the accuracy of continuous measuring of vertical profiles of temperature and water vapor density by means of a ground-based microwave radiometer[J]. *Atmos Res*, 2013, 122(3): 43-54.
- [44] MASSARO G, STIPERSKI I, POSPICHAL B, et al. Accuracy of retrieving temperature and humidity profiles by ground-based microwave radiometry in truly complex terrain[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(3): 3 355-3 368.
- [45] 张北斗. 地基多通道微波辐射计的反演算法及应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [46] 朱磊, 卢建平, 雷连发, 等. 新型多通道微波辐射计及大气观测分析[J]. *火控雷达技术*, 2014, 43(1): 84-88.
- [47] 张义军, 吕涛涛, 陈绍东, 等. 广东野外雷电综合观测试验十年进展[J]. *气象学报*, 2016, 74(5): 655-671.
- [48] WANG Z, LI Q, HU F, et al. Remote sensing of lightning by a ground-based microwave radiometer[J]. *Atmos Res*, 2014, 150: 143-150.

- [49] 曹雪芬. 地基微波辐射计亮温观测数据处理及对闪电高温的响应探讨[D]. 南京:南京信息工程大学, 2013.
- [50] JIANG S, PAN Y, LEI L, et al. Remote sensing of the lightning heating effect duration with ground-based microwave radiometer[J]. Atmospheric Research, 2018, 205 (2018): 26-32.
- [51] 钱勇. 人工触发闪电上行先导的观测研究[D]. 南京:成都信息工程大学, 2016.
- [52] JIANG S, WANG Z, LEI L, et al. Preliminary study on the relationship between the brightness temperature pulses observed with a ground-based microwave radiometer and the lightning current integral values[J]. Atmos Res, 2020, 245: 105072.
- [53] COORAY V. An Introduction to Lightning [M]. Netherlands: Springer Netherlands, 2015.

REMOTE SENSING OF ARTIFICIALLY TRIGGERED LIGHTNING WITH GROUND-BASED MICROWAVE RADIOMETER

JIANG Sulin^{1,2,3}, WANG Zhenhui^{1,2}, LIU Chao^{1,2}, LEI Lianfa^{2,4}, PAN Yun^{2,5}, LI Qing^{1,2},
ZHANG Yijun⁵, LYU Weitao⁶, CHEN Shaodong⁷, LU Jianping⁴

- (1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, CMA Key Laboratory of Aerosol-Cloud-Precipitation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
3. Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210041, China;
4. Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100, China;
5. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai 210000, China;
6. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100000, China;
7. Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to study the characteristics of microwave thermal radiation produced by lightning, we used ground-based microwave radiometer to carry out 4-year observation experiments at the Guangzhou Field Experiment Site for Lightning Research and Testing since the early summer of 2016. According to the general characteristics of lightning heating effect, the observation scheme and the lightning observation mode are established. The results show that the ground-based microwave radiometer has the ability to respond to the lightning heating effect. From 2017 to 2019, the radiometer has successfully captured 30 artificially triggered lightning events, the observation efficiency has increased year by year, with an average of 71.4 %, and the maximum amplitude of microwave brightness temperature pulse can reach about 125K. Based on the lightning current data of 28 triggered lightning events, the correlation between the brightness temperature pulse amplitude and the lightning current integral value is analyzed, and there may be an exponential relationship between the maximum brightness temperature pulse amplitude and the total current action integral. Based on the observational data of brightness temperature, the duration of lightning heating effect is estimated to be about 0.5s on average. It is found that the lightning heating effect duration of 25 triggered lightning events is consistent with the change of lightning current duration, and the correlation coefficient is about 0.73.

Key words: ground-based microwave radiometer; artificially triggered lightning; lightning heating effect; brightness temperature pulse; lightning current integral value