

·学科进展·

雷电物理与人工引发雷电研究进展

刘欣生 郝秀书 王才伟 张义军 言穆弘

(中国科学院兰州高原大气物理研究所,兰州 730000)

[摘要] 叙述了国家自然科学基金重点项目“雷电物理及人工引发雷电研究”所取得的主要成果。项目发展了雷电的空中引发新技术,并在我国南、北方进行了人工引雷实验及综合观测,揭示了南北方人工引发雷电的特征及差异;建立了雷暴下空间电荷演化的数值模式,提出了雷电成功引发的空中电场判据;研究了雷电流及辐射电磁场的关系,提出了改进的地闪传输线模式;用高速摄像系统研究了人工引发雷电的发光特征,首次观测和证实了闪电通道发展中双向先导传输现象,光、电同步观测揭示了先导接地时的物理过程;与日本学者合作进行了高原雷电的综合观测,发现了云下部闪电放电起始于云内负电荷区;首次发现人工引发雷电有抑制冰雹、增加降水的作用,用积云动力和电数值模式解释了利用电催化原理进行强风暴人工影响的可能性。

[关键词] 人工引发雷电,雷电物理,雷暴电结构,雷暴的人工影响

雷电产生的高电压、大电流、强电磁辐射等对电力、通信和航空航天等部门造成很大危害。由于雷电发生的时间和空间随机性很大,雷电的激发及发展过程又涉及到电磁学、分子物理学、等离子物理学等一系列复杂问题,所以迄今对雷电物理的许多方面认识还很不清楚,从而也影响了对雷害过程机理的研究进展。人工引发雷电不仅为雷电物理的研究开辟了一条新途径,而且也为雷电防护研究提供了良好的手段。

“八五”期间,国家自然科学基金重点项目“雷电物理和人工引发雷电研究”,由中国科学院兰州高原大气物理研究所刘欣生研究员主持。项目以人工引发雷电技术为手段,采用最先进的观测设备,着重对雷电的人工引发条件和判据及其与雷暴类型、电结构以及发展演变的关系,雷电放电的电流特征及其与辐射电磁场的关系,流光激发和发展的物理图像及其连接过程物理学以及雷害机理,雷电和降水的关系以及雷暴天气过程的人工影响等进行研究。经5年的野外实验和研究,完成了预定的全部研究内容,于1997年3月21日通过了专家验收。项目取得的主要成果有:

1 发展和完善了人工引发雷电技术

在1989年首次采用新型引雷火箭人工引雷实验成功的基础上,对人工引雷技术进行了一系列改进及发展,解决了火箭安全抛伞、轨道稳定性、安全型压力开关气动点火装置及拖带导线等关键技术问题,使人工引雷技术逐步实用化。1996年又成功地发展了导线不接地的空中触发闪电技术,从而为研究地面建筑物在下行先导高电位作用下的放电行为以及二者之间的相互作用提供了更加接近自然的条件,对于研究先导接地的物理过程和检验雷电防护设施的有效性具有重要的科学意义和应用价值。国家电力总公司已确定由我们作为主要参加单位,利用本项目的人工引发雷电技术和观测手段,对防雷设施进行检验。

为了提高人工触发闪电成功率,在实际观测的基础上建立了考虑地面尖端放电过程的云地间空间电荷演化的数值模式,提出了人工引发雷电条件的空中电场判据。对于中国南方雷暴,由于对应于火箭头部正流光的激发和传输,雷电引发成功所需的环境电场为15—20 kV/m;而在北方由于对应于火

国家自然科学基金重点项目,批准号49235090.

本文于1998年6月9日收到.

箭头部负流光的激发和传输,雷电引发成功所需的环境电场要高 3—4 倍。引雷成功条件的定量研究,对掌握准确触发时机及提高引雷成功率有重要意义。国际上还未见有类似的报导。

2 研制和改进了雷电参数的测量设备和手段

大多数闪电的持续时间不超过 1s,其中包含了从亚微秒到毫秒量级的多种时间尺度子过程,其高电压、大电流及强电磁辐射给闪电参数的获取带来了困难,需要发展专门的探测设备对雷电参数进行测量。本项目发展完善的主要探测设备有:能在恶劣天气条件下正常工作的倒置式大气平均电场仪(已在西昌卫星发射中心布网,对发射安全保障起到了重要作用)、测量闪电电场变化的慢天线系统、测量闪电磁通量变化的磁天线系统、用同轴分流器及霍尔效应器件以及利用数据采集系统直接测量记录雷电流的装置、雨强及雨滴谱的测量装置、多通道高速大容量雷电参数数据采集系统以及雷电光辐射测量装置等。这些测量手段及获取的资料,大多在国内具有首创性,特别是 1994 年由中国科学院资助 16 万美元从国外引进的高速 CCD 阵列数字化摄像系统及多通道高速大容量数据采集处理系统,已成为雷电研究的重要技术手段。

3 不同雷暴电结构下人工触发闪电的特征

由于我国南、北方雷暴电结构的差异,所引发的闪电放电特性也有很大差异:北方地区(甘肃和北京)雷暴由于云下部经常存在大范围正电荷区,人工引发闪电是没有回击的短暂的连续电流放电过程,其持续时间从十几到几十毫秒、峰值电流不过 1—2 kA,触发时火箭高度为 300—400 m;与此相反,南方地区(南昌和上海)雷暴下部一般是负电荷为主,人工触发闪电由多次回击组成,一次强烈的闪电过程的持续时间可达 1.5 s 以上,峰值电流达 10 kA 以上,触发高度约 100—200 m,触发成功率可高达 60%—70%。上述差异一方面说明了南北方雷暴云电结构的不同,同时也表明了云中正电荷区的电环境和微物理条件不利于先导在云中的发展和闪电过程的延续。尽管由于北方雷暴云独特的电结构特征很难得到强烈的人工引发雷电,但它却提供了一个研究正极性雷电激发放电机理的良好机会。一般说来,由于正极性自然雷电释放出巨大的电荷量,所以比负极性雷电造成更大的危害,在雷害防护中心必

须引起足够的重视。

4 雷电放电电流与闪电辐射场特征的理论研究

从理论上讨论了二者之间的物理联系,分析了闪电通道和地表的电磁特性,并进一步研究了地闪回击模式。地闪回击除包含静电场和感应场成分外,其电流的快速变化还产生强的辐射场,对于后者地表不能等效为良导体;回击速度和放电电流传播速度是两个不同的概念,后者更近似于光速,而一般用光学方法测量出的回击速度只是由电流激发的电子雪崩波前的传播速度。据此建立了一个远场近似回击模式,比国际上原回击模式能更好地解释电场和电流的同步观测结果。这一研究成果将对由易于测量的电磁场来计算雷电放电电流有重要实用价值。

5 人工引发雷电光学特征的研究

利用具有 90 年代先进水平的高速数字化摄像系统(每秒 1 000 幅),首次在极近的距离对人工触发闪电全过程的发光特征和闪道的形态变化进行了观测研究。结果表明闪电通道周围的亮度截面基本上呈对称型。亮度变化与闪电电流和地面电场变化有很好的对应关系。人工引发闪电的发光可分为四个阶段:起始光脉冲、初始连续发光、初始 M 分量和回击 M 分量光脉冲序列。它们分别与特定的物理过程相联系(在自然雷电中 M 分量是指地闪放电过程中连续电流阶段通道发光度的突然增加,并伴随电场的突变脉冲)。起始光脉冲由上行先导逐渐增强并传播入云所引起;初始连续发光及其后期的光脉冲(初始 M 分量)反映了先导入云后在云中的发展和传播过程,在此期间云-地之间有连续的和叠加于其上的脉冲性质的电流流过;初始连续发光停息后的光脉冲序列则来自于回击电流脉冲和叠加于其后随的连续电流上的电流脉冲。M 分量是人工引发闪电中一个十分活跃的成分,它们与雷暴的活动性和电荷分布的不均匀性有关。M 分量出现之前闪电通道仍在可观地发光,而回击光脉冲出现前闪道的发光已经停息或变得十分微弱,说明闪道的弱导电性是形成回击的必要条件。

6 人工引发雷电先导的“双向”传输特征研究

通过对高速摄像、闪道电流和地面电场变化的

资料分析,证明了空中触发闪电时先导的双向传输现象:上行先导和下行先导分别发源于空中绝缘导线的上、下两端。在负的环境电场中,上行正先导的出现先于下行负先导;当环境电场为正时,下行正先导的始发超前于上行负先导。不论在哪一种情况下,下行先导接地瞬间都会产生类似于回击的快速高电流脉冲。上行先导和下行先导在前进过程中都会出现不同程度的曲折和分支,上行先导可以有两个或多个分支分别从不同部位进入云中,而下行先导只有一个分支能与大地相连接。地面突出物体对下行先导的传播行为有重要影响,在一定范围内,下行先导都趋向以接地良好的物体为连接点。

7 高原地闪放电过程研究

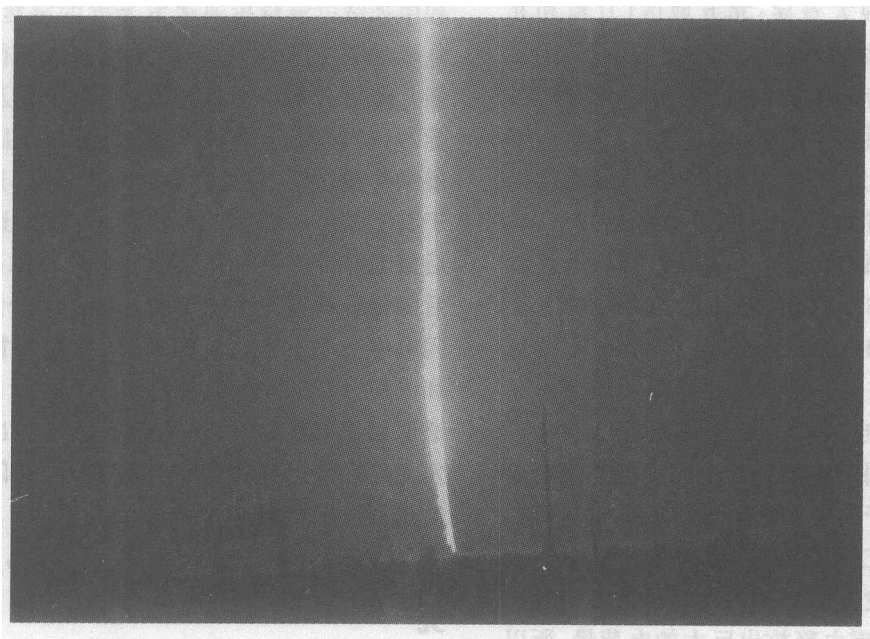
与日本科学家合作利用 GPS 同步的 $1 \mu\text{s}$ 时间分辨率慢天线电场变化仪,对自然雷电的辐射场特征进行观测,发现地闪首次回击发生之前常有持续 170—300 ms 的云内放电过程发生,其间可有数量不等的 K 变化(K 变化是指放电在云内发展传播中碰到极性相反的电荷集中区所产生的类似于回击的放电过程,一般伴随有时间尺度小于 1 ms 的快速电场变化脉冲)。个例分析对 K 变化过程中的一系列脉冲进行定位后发现,K 变化以负流光的形式起始于云中部的负电荷区,并以 $1.5 \times 10^7 \text{ m/s}$ 的速度向下部正电荷区域传播。正、负电荷离地高度分别为 2.5—3.5 km 和 5.0—6.0 km,云内放电过程建立的良好电离通道对负地闪的发生起了重要作用。

正地闪首次回击向大地释放的电荷量、峰值电流以及闪击距离均大于负地闪首次回击,说明正地闪危害更大。与雷达回波的对比发现,负地闪发生在雷暴大于 20 dBz 的强回波区或强回波区域的边缘,而正地闪却发生在回波相对较弱的区域。这些研究进一步证实和丰富了过去的观测结果,深化了对高原雷电的认识。

8 雷电和降水的关系以及雷暴天气过程的人工影响

建立了一个包括起电和放电过程的雷暴动力和电二维时变轴对称模式。模式中考虑了 10 种包括冰相的微物理过程以及包括非感应起电的 5 种起电过程。模式计算发现,在雷暴中电场力是一个不可忽视的参数。这是国内第一次用数值模拟方法研究积云的动力过程、微物理过程和电过程以及它们之间的物理联系。

对人工引发闪电前后地面电场、地面降雨和雷达资料的初步分析表明,人工引发雷电有可能影响雷暴的电特征:人工引发雷电后地面降雨有短时间的增强,人工引发雷电在雷暴消散期可能加速雷暴云的消散。在我国北方的实验还表明,对冰雹云进行人工引雷后有冰雹变弱、降水增加的作用,并从理论上对此进行了解释。利用人工引发雷电的“电催化”作用,对雷暴进行人工影响,在雷害防护和减轻冰雹灾害方面有潜在的应用前景。



这是课题组 1995 年 8 月 20 日在上海南江县引发雷电时的情景

9 其 他

本项目执行期间,在国内外核心期刊上发表论文 55 篇,其中国际学术期刊上发表论文 6 篇,国际学术会议论文专集上发表论文 6 篇,国际会议报告

论文 3 篇。现已有 4 篇论文被科学引文索引(SCI)收录。通过本项目研究锻炼和培养了一批高素质的年轻科研人员,已有 2 名获博士学位,一批博士研究生和硕士研究生在本项目中发挥了重要作用。

ADVANCE IN RESEARCH OF LIGHTNING PHYSICS AND ARTIFICIALLY TRIGGERED LIGHTNING

Liu Xinsheng Qie Xiushu Wang Caiwei Zhang Yijun Yan Muhong

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Lanzhou 730000)

Abstract In this paper, the main results of the project "Study on lightning physics and artificial triggering of lightning" sponsored by NSFC are described. The experiments were conducted with traditional triggering techniques as well as newly developed one called "altitude-triggering".

The discharge processes of triggered lightning show great differences in Northern and Southern China. In order to increase the rate of success of lightning triggering, a numerical model has been established to simulate the evolution of space charge between cloud base and the ground. As a result, a criterion for successful triggering of lightning was put forward in terms of the magnitudes of ambient electric field. The relationship between return stroke current and radiation fields was studied, and an improved model of transmission line was derived.

The luminous characteristics of artificially triggered lightning flashes were studied by use of a high-speed digital camera system. Bi-directional propagation of leader in "altitude-triggered" lightning has been observed and verified. The physical processes of downward leader approaching the ground were revealed by using high-speed camera and simultaneous measurements of current and electric field. The thunderstorms in the inland plateau of China were studied in cooperation with Japanese scientists. The results indicate that ground discharges in the area originate in the main negative charge region in the middle part of cloud and propagate towards the lower positive charge layer. In addition, there is evidence to show that triggered lightning may have effects on hail suppression and rain intensification. The possibility of modification of thunderstorm by triggered lightning was studied using a two dimensional, axisymmetric and time-dependent dynamic-electric cloud model.

Key words artificially triggered lightning, lightning physics, electric structure of thunderstorm, modification of thunderstorm