

闪电放电特征和雷暴电荷结构研究^{*1}

郅秀书

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州, 730000)

张义军

(中国气象科学研究院, 北京, 100081; 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州, 730000)

张其林

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州, 730000)

摘 要

文章综述了近 10 年来对闪电物理过程和雷暴电荷结构等方面的主要研究进展。利用自行研制的高时间分辨率新型闪电探测和定位技术, 获得中国不同地区的闪电特征及放电参数, 组织首次青藏高原综合闪电观测实验, 揭示高原雷暴及其闪电活动的特殊性, 并利用数值模式探讨其成因; 将原子结构理论应用于闪电光谱研究, 并进行闪电光谱的实验观测和理论研究, 获得可见光频段的闪电光谱记录; 完善空中人工引发闪电技术, 解决近距离严酷电磁环境条件下闪电的光、电信号测量技术, 寻找闪电双向先导传输的光学和甚高频辐射证据, 并利用人工引发闪电技术对防雷设施进行试验研究; 另外, 在闪电与天气、气候关系的研究方面也进行了初步探讨。

关键词: 闪电, 雷暴, 电荷结构, 观测实验, 数值模拟。

1 引 言

闪电是发生于大气中的一种瞬时高电压、大电流、强电磁辐射灾害性天气现象。自 200 多年前富兰克林发明避雷针以来, 地面设施遭受直接雷击的几率已大大降低。但近年来, 随着社会经济的发展和现代化水平的提高, 特别是由于信息技术的快速发展, 闪电灾害的危害程度和造成的经济损失及社会影响已越来越大。闪电灾害已经被联合国列为“最严重的 10 种自然灾害之一”, 被中国国防电工委员会称为“电子时代的一大公害”。

近 10 年来, 中国闪电研究紧紧围绕闪电发生、发展的物理过程和机理等关键科学问题, 以及闪电探测、预警和闪电灾害的防护等国家需求, 在研制先进探测设备的基础上, 对中国一些典型地区的雷暴和闪电特征进行了详细研究, 在高原地区的闪电活动特征、闪电的光谱学研究、人工引发闪电技术及其

应用、闪电探测技术、闪电与天气、气候的关系等方面取得了一些重要的研究进展。本文概要介绍了闪电物理过程、雷暴电荷结构、人工引发闪电、闪电与天气和气候的关系等 4 个方面的主要研究结果。

2 闪电物理过程

2.1 闪电基本物理过程和放电参数研究

云对地闪电(简称地闪)过程主要包括云内预击穿过程、梯级先导、首次回击、回击间过程、直窜(或直窜梯级)先导、继后回击、连续电流等过程。这些放电过程的物理特性及其特征参数对理解雷电的发生发展机理和雷电灾害的防护十分重要。近 10 年来, 先后在甘肃、北京、上海、江西、广东、山东、青藏高原等不同地区进行了自然和人工雷电观测实验^[1-6]。图 1 给出了在甘肃中川一次负地闪产生的地面电场变化, 可以看出地闪回击和先导在不同时间尺度上的电场变化特征。表 1 给出了地闪回击辐

* 初稿时间: 2005 年 8 月 9 日; 修改稿时间: 2005 年 9 月 14 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(40135010, 49975003, 40325013)和中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04, KZCX2-201)。

作者简介: 郅秀书, 女, 河北人, 1963 年生, 研究员, 博士。主要从事大气电学研究。E-mail: giex@ns.lzb.ac.cn。

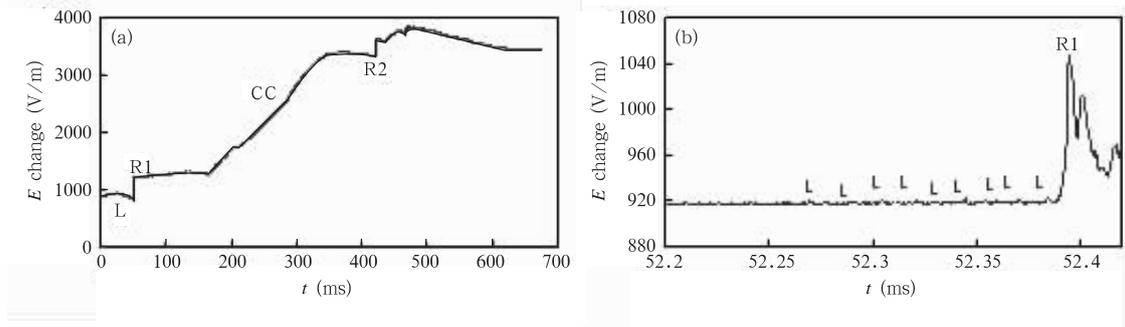


图 1 一次负地闪所产生的整体地面电场变化波形(a)和首次回击及其之前的梯级先导电场变化(b)
(R1:首次回击,R2:继后回击,L:先导,CC:连续电流)

Fig. 1 Electric field changes on the ground produced by a negative cloud-to-ground discharge
(a. Whole waveform, b. first return stroke and stepped leader; R1: return stroke,
R2: subsequent return stroke, L: stepped leader, CC: continuous current)

表 1 地闪回击辐射场波形的部分特征参量

Table 1 Part of characteristic parameters in the electric field waveform radiated from the return stroke

闪击类型		10%~90%上升时间(μs)	下降时间(μs)	过零时间(μs)	半峰值宽度(μs)
负地闪	首次闪击	4.7 ± 1.9	57.4 ± 23.6	10.2 ± 4.6	66.0 ± 19.0
	继后闪击	3.4 ± 1.5	42.1 ± 19.1	8.8 ± 3.7	47.0 ± 17.0
正地闪		11.5 ± 2.4	24.2 ± 22.0	63.0 ± 20.0	15.5 ± 4.8

射场波形特征参量的统计结果,负地闪回击 10%~90%的上升时间为 $(4.7 \pm 1.9) \mu\text{s}$,下降时间 $(57.4 \pm 23.6) \mu\text{s}$,半峰值宽度为 $(10.2 \pm 4.6) \mu\text{s}$ 。虽然通常认为,首次回击较继后回击要强,但郟秀书等^[7]研究发现,54%的负地闪有至少一次继后回击强度大于首次回击,而且有 20%的继后回击强度大首次回击强度。

2.2 可见光范围的闪电光谱特征

闪电过程所产生的强大回击电流,使闪电通道成为等离子体,其通道的光谱特征与放电通道内的等离子体特征、通道温度、放电能量等密切相关。国外在 20 世纪 70 年代就曾利用狭缝光栅摄谱仪对闪电的光谱进行了观测研究,得到了可见光谱频段的

光谱,并利用光谱观测数据推算出了闪电通道内的平均温度、电子密度等参数。

袁萍等^[8]自 2000 年开始利用无狭缝光栅摄谱仪,对中国广东和青藏高原等不同地区的闪电光谱进行了实际观测,获得了地闪首次回击 400~700 nm 波长范围的光谱,并根据闪电光谱的结构,将所观测到的谱线分为每个闪电过程都存在的基本谱线和反映各具体放电过程通道物理特性的特征谱线两大类。两地的基本谱线包括: NII(399.5 nm), NII(463.0 nm), NII(480.3 nm), $\text{H}\beta$ (486.1 nm), NII(500.5 nm), NII(568.0 nm), NII(594.2 nm), NI(648.2 nm), $\text{H}\alpha$ (656.3 nm) 等。图 2 给出了在

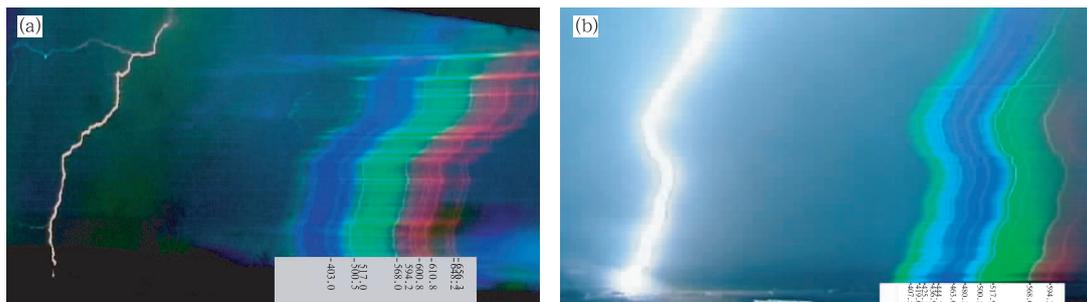


图 2 青海西宁(a)及广东佛山(b)地区一次地闪首次回击的光谱^[8]
(左面是没有分光的闪电通道;波长单位: nm)

Fig. 2 The optical spectrum^[8] of first return stroke in Xining(a), Qinghai province, and in Foshan(b), Guangdong province (left image is the unprismatic channel; unit of wave length: nm)

青海西宁及广东佛山地区所得到的一次地闪首次回击的光谱。可以发现广东佛山地区的光谱集中在相对较短的波长范围,而青海西宁则集中在较长的波长范围,反映了广东地区的闪电放电能量、通道温度较青海要高。

理论与观测研究发现^[9],高原地区闪电首次回击光谱的结构及跃迁特性与其他地区有明显的区别,除 NII 离子 $n=3$ 的低激发态产生的跃迁谱线外,激发能量为 13~14 eV 的中性 NI 和 OI 的跃迁增多,而 OII 离子的跃迁谱线很难观测到。

2.3 雷暴云中的辐射源探测定位和放电过程研究
闪电超高频/甚高频(VHF/UHF)辐射与闪电

的发生发展密切相关,自 20 世 80 年代以来,美国、法国和日本相继发展和完善了时间差法闪电辐射源定位系统、窄带干涉仪定位系统和宽带干涉仪闪电定位系统。在国外闪电探测系统的基础上,中国也相继发展了同类技术,如宽、窄带干涉仪闪电定位系统^[2],长、短基线时间差闪电定位系统^[10]等。图 3 是利用 VHF/UHF 宽带干涉仪得到的一次地闪电电场波形及辐射源定位结果。整个放电过程持续时间约为 300 ms,仅有一次回击过程,梯级先导之前有较长时间的预击穿过程,其电场变化波形中有明显区别于其他阶段的幅度较大的正极性脉冲;云内放电辐射源主要是水平发展。

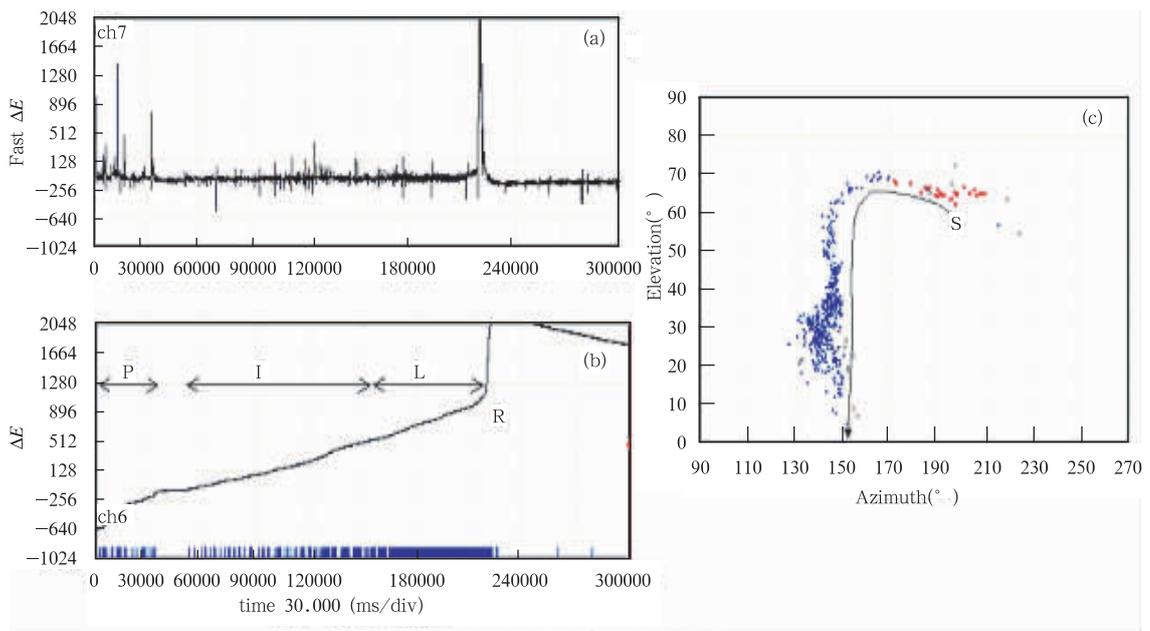


图 3 一次地闪电电场波形及辐射源定位结果

(a. 快电场变化, b. 慢电场变化, c. 宽带干涉仪定位结果^[2])

Fig. 3 The electric field change waveforms and radiation source location

(a. the fast electric field, b. the slow electric field, c. the radiation source locations in azimuth-elevation format)

张义军等^[11]利用美国 LMA(Lighting mapping array)于 2000 年在 STEPS 计划中所观测到的资料,对云内的放电过程进行了详细分析。图 4 是所得到的一次云内放电过程所对应的辐射源定位结果。可以看出,闪电放电过程首先自中部负电荷区击穿,并向上发展,到达上部正电荷区后,再同时在上下两个电荷区内水平发展,放电的最后阶段主要是在中部负电荷区的水平发展。放电的整体过程呈现出明显的双层结构特征,分别对应于上部和中部正、负电荷区。在具有正常三极性电荷结构的雷暴云中,云内放电不仅发生于上部正电荷区与中部主负电荷区之间,还存在着反极性放电过程。与正常

云闪放电不同的是,反极性云闪放电过程发生于云下部的正负电荷区之间,放电自中部的负电荷区向下部正电荷区发展。

2.4 地闪梯级先导发展的电学和光学特征

中国南方地区和北方地区的负地闪先导特征虽然在形态特征上基本相似,但是梯级先导辐射脉冲的时间间隔和强度有明显的不同。孔祥贞等^[12]利用高速摄像系统(1000 f/s)和快、慢天线电场变化测量仪等观测手段对广州和青海的多接地闪电进行了研究,发现在很多对地放电过程中,向下的梯级先导有可能出现多级分权现象,并有可能引发前后相差仅有几微秒的多个大电流回击过程。余晔^[13]、苟

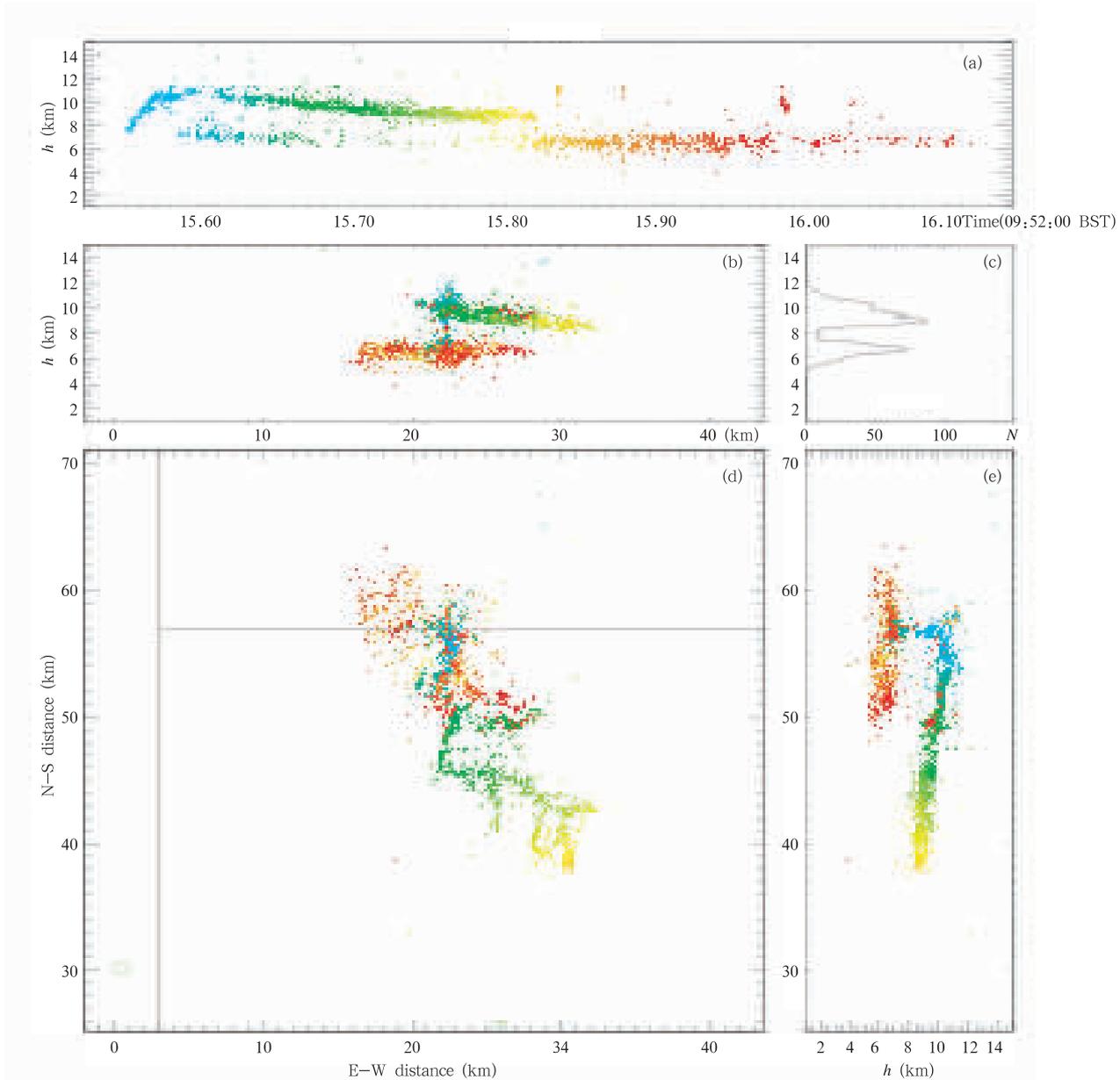


图 4 一次云内放电过程的观测结果

(a. 闪电 VHF 辐射源高度随时间的变化, b. 辐射源在南北方向上的投影, c. 辐射源数目(N) 随高度的直方图分布, d. 辐射源的平面投影, e. 辐射源的东西方向投影)

Fig. 4 A typical normal Intra-cloud discharge

(a. height-time plots of the lightning radiation sources, b. north-south vertical projections of the lightning radiation sources, c. height distribution of number (N) of radiation events, d. plan views of the lightning radiation sources, e. east-west vertical projections of the lightning radiation sources)

学强^[14]曾对地闪先导通道中的电荷密度梯级和先导的激发机制进行了数值模拟。图 5 是利用高速摄像系统在青海观测到的一次罕见的具有 4 个接地点的地闪梯级先导的向下发展图像。由于受地形及多种其他因素的影响,譬如雷暴云下部电荷屏蔽层的存在和下垫面的影响,地闪先导常以多分叉的形式快速向

地面行进,并有可能在地面形成两个或两个以上的接地点,从而增加了闪电防护的难度和复杂性。

3 雷暴电荷结构研究

3.1 高原雷暴的电荷结构

青藏高原具有特殊的地理环境和气候特点,雷

暴和闪电是青藏高原上十分常见的天气现象,但由于恶劣的环境条件,一直没能对青藏高原的闪电活动进行科学系统的观测研究。2002~2004年夏季,郅秀书等对青藏高原雷暴和雷电特征进行了综合观测试验,获得了海拔4500 m高度上的雷暴电学和闪电放电特征。研究发现^[15~17]青藏高原雷暴和闪电特征具有明显的特殊性,高原雷暴频繁,但闪电频数较低,平均为1次/min,比较低海拔地区的强雷暴闪电频数要少10倍多。图6为一次典型雷暴产生的地面电场随时间的演化,时间轴上箭头对应于负地闪发生的时间,此次雷暴没有正地闪发生。大部分情况下,在雷暴云当顶时,雷暴电场都为正电场,即由云中的正电荷所控制,负地闪发生于雷暴云发展的后期,云内放电过程绝大部分发生于云内下部正、负电荷区之间,是一种反极性的云内放电过程,只有个别云闪发生于上部正、负电荷区之间。



图5 高速摄像观测到的一次具有4个接地点的回击过程

Fig. 5 A return stroke with four ground contacting points observed by high-speed digital camera

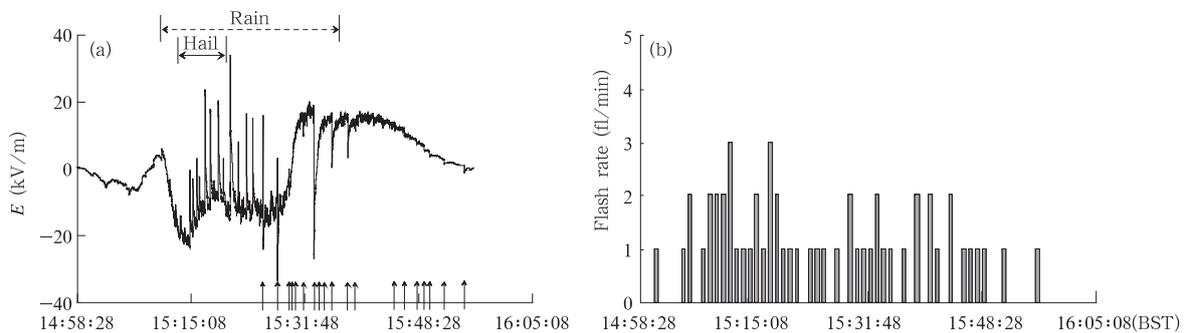


图6 强雷暴天气过程中的近地面平均电场(a,箭头表示地闪发生的时刻)及闪电频数(b)随时间的演变

Fig. 6 The time evolution of average surface electric field (a) under a severe thunderstorm (the up arrows representing the cloud-to-ground flash) and the flash rate (b)

观测表明,青藏高原大多数雷暴具有三极性的电荷结构,即下部和上部为正电荷区,中部为负电荷区,但高原雷暴下部的正电荷区比较低海拔地区常规雷暴的三极性电荷结构要大得多,并活跃地参与云内放电和云对地的放电过程。

3.2 不同雷暴电荷结构成因的数值模拟研究

郅秀书等先后发展和完善了一个三维强风暴动力-微物理-电耦合模式,并理论研究了雷暴云电荷结构的时空演变特征和成因^[18~21]。该模式包含了水气、云水、雨水、冰晶、雪、霰粒和冰雹等7种水成物粒子,26个预报变量(方程)、7大类微物理过程,考虑了电场力对宏观场和微观场的作用,即除运动方程、位温方程、水汽方程、各项水成物比水含量和

比浓度方程之外,还引入了各项水成物电荷浓度变化方程,并在运动方程中引入了电场力。

模式中主要考虑了其中3个优势因素:反转温度 T_r 、中心最大扰动位温值 $\Delta\theta_c$ 和扰动区域,模拟的结果表明:反转温度和中心最大扰动位温 $\Delta\theta_c$ 对雷暴云电荷结构的形成有着至关重要的作用,在相同层结条件下,较低的中心最大扰动位温 $\Delta\theta_c$ 对应较弱的雷暴云和准反极性电荷结构;较高的 $\Delta\theta_c$ 对应较强的雷暴云和偶极性电荷结构;介于强弱之间时,呈典型的三极性电荷结构。通常南方地区由于层结很不稳定,对流有效位能(CAPE)较大,主正电荷区电荷浓度范围大,主正、负电荷区中心高度抬升,偶极性结构明显;高原地区层结不稳定性较小,对流发展

弱,云顶高度低,准反偶极性结构较明显;北方地区层结不稳定性介于两者之间,雷暴多呈典型的三极性电荷结构。湿度对电荷结构也有一定的影响,增加中层平均相对湿度,会使整个雷暴云的不稳定度增加。偶极性电荷结构对应的中层平均相对湿度最大,准反极性对应的中层平均相对湿度最小。

4 人工引发闪电及其应用

所谓人工引发闪电就是在雷暴云电场环境下利用一定的装置和设施,人为地在某一指定地点和时间触发闪电^[22]。人工引发闪电有两种触发方式,一种称为“传统触发”方式,即向雷暴云发射拖带接地细金属丝火箭的人工引雷方式;另一种称为“空中触发”技术,即火箭拖带细金属丝的下端不直接接地,而是通过一段数十至数百米的绝缘尼龙线再和地面连接。自 1989 年以来,利用新型人工引雷专用火箭在中国甘肃永登和平凉、北京延庆、南昌新建、上海南汇、广州从化、西藏那曲、山东滨州等不同地区成功引雷 50 余次。

4.1 中国南、北方不同雷暴条件下人工引发闪电的特征

对不同地区的人工引雷实验资料研究发现,

中国南方和北方人工引发闪电特性具有明显的差异^[3,22,23]。北方人工触发闪电没有回击发生,仅有

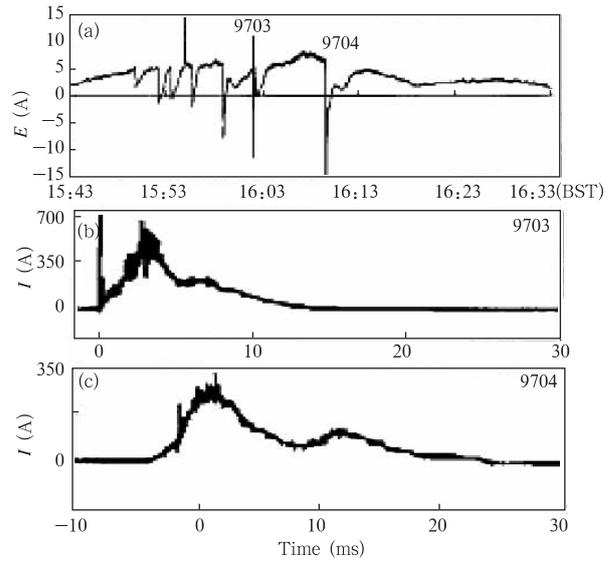


图 7 甘肃平凉两次人工引发闪电时的雷暴云地面电场 (a)和所测量到的通道底部电流波形^[23] (b, 对应于空中引雷方式, c, 对应于传统引雷方式)
Fig. 7 Record of electric field evolution during the lifetime of the thunderstorm (a), and the current of two triggered lightning flashes (b, c)

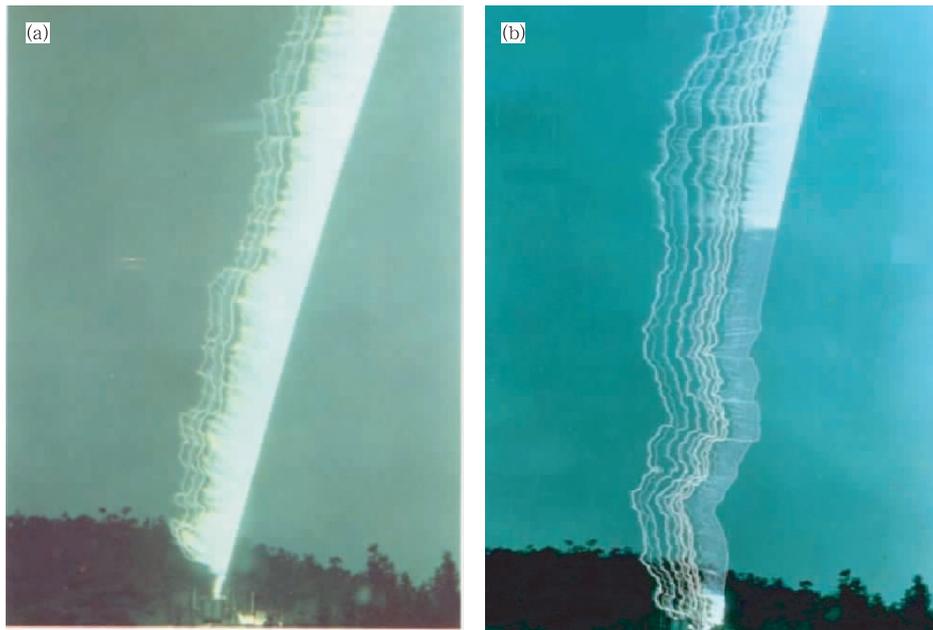


图 8 利用传统触发方式(a)和空中触发方式(b)在南昌新建成功引发的两次闪电放电过程(拍摄距离约 80 m)^[24]

Fig. 8 Two triggered lightning discharges^[24] in Nanchang photographed at a distance of about 80 m from discharge channel by using a kind of classical triggering technique (a) and by using a kind of altitude triggering technique(b)

持续时间只有十几到几十毫秒的连续电流,峰值电流一般为 1~2 kA,中和电荷量仅为几库仑;而南方人工引发闪电包含了长达几百毫秒的初始连续电流和为数不等的继后回击,一次强烈的闪电过程的持续时间可长达 1.5 s 以上。南方人工触发闪电的放电强度要比北方大得多,幅值电流一般为 10 kA 以上,比北方高一个量级,而且触发高度较低,约为 100~200 m,成功率较高(一般在 60%~70%)。图 7 是 1997 年在甘肃平凉地区的两次人工引发闪电时的雷暴云地面电场(图 7a)和所测量到的通道底部电流波形(图 7b 对应于空中引雷方式,图 7c 对应于传统引雷方式)。图 8a, b 分别为 1994 年利用传统引雷方式和空中引雷方式在南昌新建成功引发的两次闪电放电过程,由于受水平风场的影响,闪电通

道被水平分开,几次大电流回击过程清晰可见。

4.2 人工引发闪电先导双向传输的光学和甚高频辐射特征

王才伟等^[25]利用高速摄像系统(1000 f/s)和地面闪电电场变化测量仪等,在 100 m 内的距离上首次观测到了空中人工引发闪电中先导的双向传输现象(图 9)。正极性先导首先从火箭头部激发,并向上传输,随后负极性先导从钢丝下端激发,并向下传输,正、负先导两者相互促进。同时,董万胜等^[26]利用自行研制的宽带闪电干涉仪定位系统,首次观测到了人工触发闪电时正先导产生的电磁辐射,进一步证明了人工触发闪电发展过程中的先导的双向传输特性。



图 9 空中人工引发闪电的上行正先导(a)和下行负先导(b)^[25]

Fig. 9 The development^[25] of upward positive leader (a) and downward negative leader (b) during the altitude triggered lightning discharges

4.3 不同距离处闪电辐射特征及地闪连接过程机制研究

利用人工引发闪电电流、电网地电位升高、闪电快电场变化测量仪、慢电场变化测量仪、宽带闪电干涉仪、高速摄像等综合观测资料,张义军等^[3]对自然闪电和空中人工引发闪电的接地过程进行了细致的分析研究。图 10 为一次空中引发闪电时所观测到的两站电场变化同步记录。

董万胜等^[27]利用宽频带传感器对闪电的 25~100 MHz 频段内的频谱分布进行了研究,发现闪电不同放电过程的能量谱分布有较大的差异。地闪较低频段的辐射强于云闪;云闪、地闪预击穿过程和 K

变化过程峰值辐射能量处于相对较高的频段,表明这些过程可能以较小尺度的负极性击穿为主要特征,其击穿通道的发展速度为 3×10^5 m/s;梯级先导和直窜先导过程初始阶段辐射能量主要集中在较高频段,而接近地面时则集中在较低频段,表明先导在向地面发展过程中放电尺度逐渐增大。在人工触发闪电中观测到的正先导过程辐射能量主要集中在较低频。

4.4 闪电防护机理试验研究

人工引发闪电提供了最接近自然闪电的模拟源,并使得闪电在时间和空间都可知、可控的状态下进行,为研究各种防雷装置的作用机理及效能提供

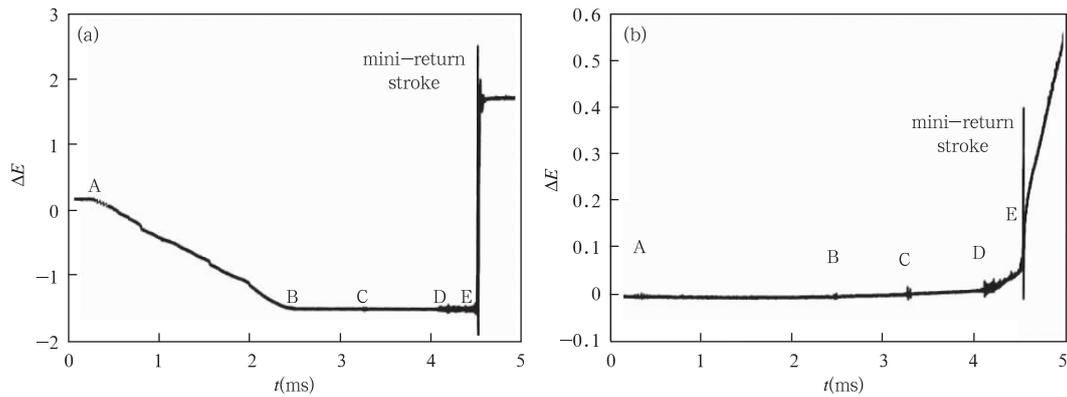


图 10 一次空中引发闪电的两站电场变化同步记录 (a. 60 m, b. 1300 m)^[3]

Fig. 10 The simultaneous record^[3] of surface electric field change of altitude triggered lightning at (a) 60 m and (b) 1300 m distances

了重要的技术手段。1998~2000 年,利用人工引发雷电技术对避雷针和半导体消雷器进行了试验研究,图11为人工闪电击中消雷器时的反应,结果表



图 11 人工引雷击中消雷器的照片

(9 针消雷器安装在一个 10 m 高的铁塔上)

Fig. 11 The photograph showing the reaction of semi-conductor lightning eliminator (SLE) stroked by an artificially triggered lightning (The SLE is installed on the top of a 10 m high iron tower)

明空中人工引雷技术很好地模拟了自然闪电的下行先导,在人工闪电击中消雷器时,可以看到半导体消雷器两针和三针之间的并联放电现象以及沿针体表面的闪络现象,通过这一试验,对避雷针和半导体消雷器在强电场下的响应特性有了较深入地了解。

5 闪电的气象、气候特征研究

5.1 中国及周边地区闪电活动的气候学特征研究

利用地面气象台站资料、地闪定位系统资料 and

卫星携带的闪电探测仪(LIS/OTD)资料等,对中国闪电活动的空间分布、季节变化和日变化等特征进行了分析^[28,29]。图 12 给出了中国及周边地区的闪电活动空间分布,可以发现,按照闪电活动的频繁程度在空间上可将中国大致分为与太平洋海岸平行的 4 条闪电活动带:即近海区域、中部区域、西部区域和西部边境区域,其中,东南近海区域是中国闪电活动最频繁的地区,并向西北地区逐渐减弱,而西部地区则是中国闪电活动最弱的地区。其闪电分布特征与降水分布特征呈现出很好的一致性。

Qie 等^[30,31]分别利用 LIS 原始轨道资料和 LIS/OTD 网格化资料,对独具特色的青藏高原闪电活动的时空分布特征以及闪电活动对地面热力学特性的响应进行了研究,并与全球典型区域的闪电活动进行了对比。发现了青藏高原的闪电活动有明显的日变化和季节变化,并对地形和地面热力学特征有强烈的响应,而对对流最大不稳定能量有非线性响应,青藏高原的闪电较其他地区要弱得多,其放电强度的差别可用对流最大不稳定能量来解释。

5.2 闪电活动与特殊天气、气候的关系

越来越多的研究表明,闪电与特殊天气、气候事件有明显的关系。马明等^[32]利用星载 OTD/LIS 闪电观测资料研究了我国东南部闪电活动对 1997/1998 年 ENSO 事件的响应关系,发现 ENSO 期间,印度洋和亚洲出现了闪电活动较为显著的正异常,闪电活动与 Nino3 区的 SSTA 间有较好的相关性。熊亚军等^[33,34]利用星载 OTD/LIS 闪电观测资料和 NCEP 气象资料,分析了全球或区域闪电活动对地表相对湿度变化的响应,图 13 给出了全球闪电密度

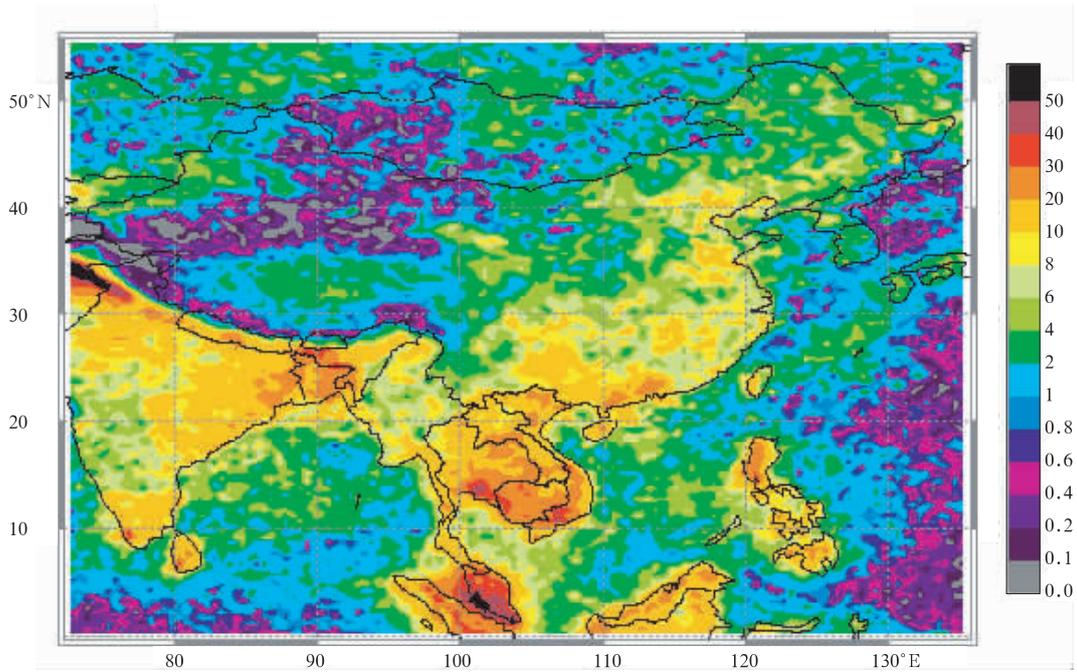


图 12 中国及周边地区的闪电密度分布($\text{fl}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$)

Fig. 12 The distribution of flash rate ($\text{fl}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$) in China and surrounding areas

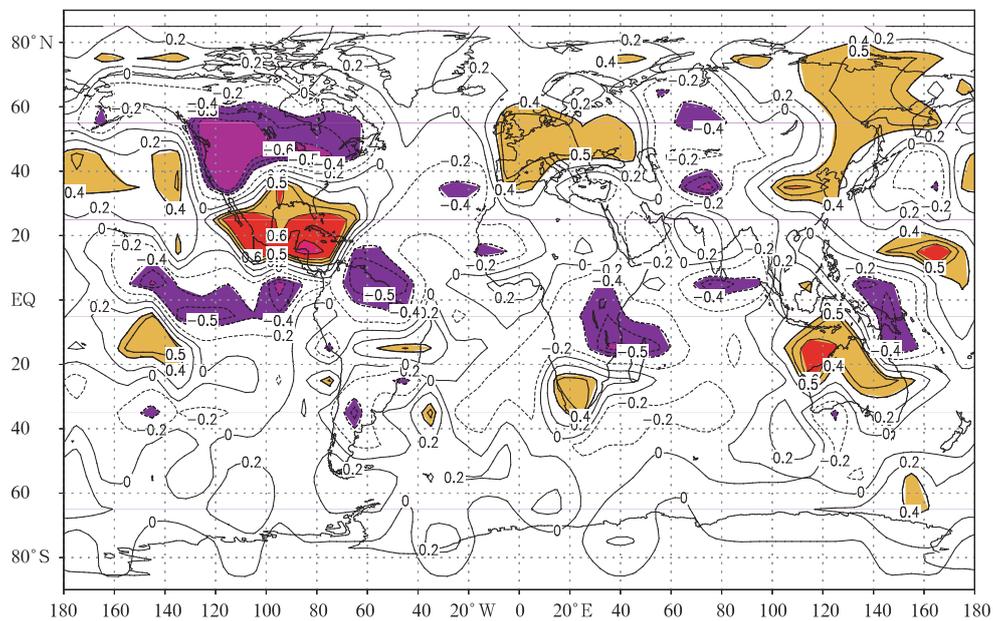


图 13 全球闪电密度与相对湿度相关系数分布^[34]

(深、浅阴影区为超过 99%, 95% 信度水平检验)

Fig. 13 The distribution of correlation coefficient between global flash rate and relative humidity

(The dark and light shaded areas have passed the confidence limit of 99% and 95% respectively)

与相对湿度相关系数分布, 可以发现闪电密度对地面相对湿度变化的响应大致分为两种情况: 在相对湿度较小的地方, 闪电密度距平与相对湿度距平呈正相关; 在相对湿度较大的地方, 闪电密度与相对湿

度呈负相关。衡量地面相对湿度条件是否有利于闪电活动产生的临界值区大约是 72%~74%。

对流风暴天气系统不仅能带来大量的降水、破坏性大风和冰雹等灾害性天气, 而且还伴有闪电, 闪

电作为强对流过程的“指示器”可被用于识别发展中的对流云。冯桂力等^[35]利用地面闪电定位系统、多普勒雷达和卫星观测资料,对一次冷涡天气系统的 3 个雹暴过程的地闪特征进行详细分析,结果表明,在同样的天气条件下,产生冰雹的 3 个强雷暴在不同的发展阶段表现出明显不同的地闪分布特征。图

14 给出了其中一雹暴在两个时刻的雷达回波及其前后 5 min 的地闪分布,结合地面降雹观测资料发现降雹发生在正地闪比较活跃的阶段,正地闪频数峰值略微超前降雹时刻。比较密集的正地闪发生,通常预示着强对流天气(如冰雹、大风等)的发生。

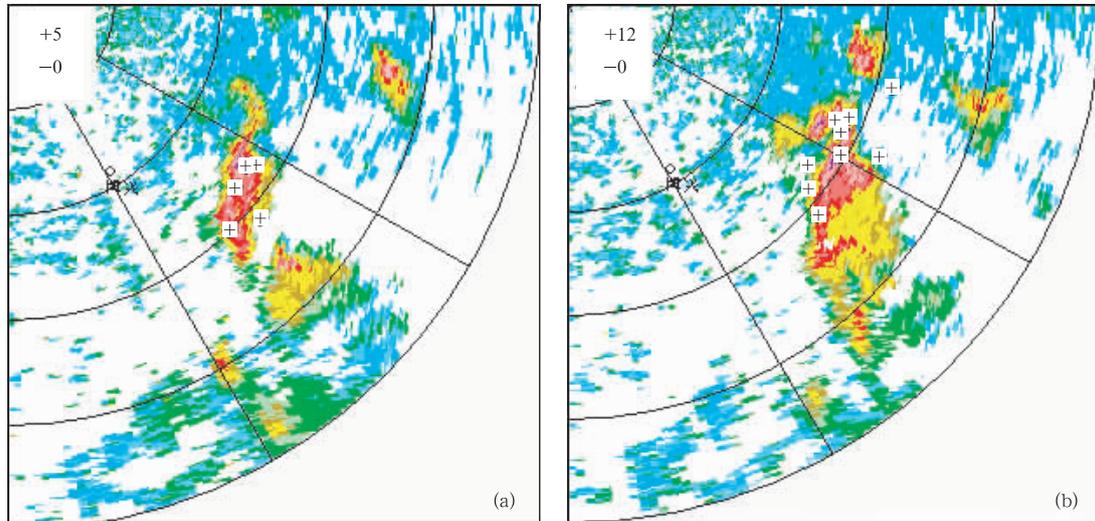


图 14 一典型冰雹云在前后相隔 10 min 两个时刻的雷达 PPI 强度图和叠加其上的地闪分布
(+ 代表回波扫描时刻前后 10 min 的正地闪, - 代表负地闪)

Fig. 14 Distribution of CG flashes superposed on two PPI scans with a time interval of 10 minutes during a typical hailstorm ('+' and '-' stands for the positive and negative CG lightning within 10 minutes around the radar scan time respectively)

5.3 闪电的发生位置时空演变及其与雷达回波的对比

鄒秀书等^[6]利用非线性最小二乘法对中国内陆高原地区的闪电所中和的电荷源位置进行了拟合,发现负地闪位于距离地面 2.5~5 km 的高度,正地闪中和的电荷源位置位于 2 km 左右的高度。通过地闪所中和的电荷源位置与雷达回波的对比如发现,负电荷源对应于大于 20 dBz 的区域或位于 40 dBz 的边缘,而正电荷区对应于大于 10 dBz 的弱回波区。

冯桂力等^[35]利用地面地闪探测网资料、多普勒雷达和卫星资料对一次典型的 MCS 过程的地闪分布特征进行了分析,结果表明在系统发展的最初阶段全为负地闪;在 MCS 的成熟阶段地闪频数一直较高(在 10 次/min 以上),负地闪占绝对优势;在消散阶段,地闪频数急速下降,同时正地闪所占比例越来越大,甚至超过负地闪。通过对雷暴成熟期的多普勒雷达回波与地闪发生位置的对比,发现负地闪集中发生在强对流区(>45 dBz),其持续时间和强

对流的维持时间几乎相当,说明负地闪可以很好地指示或有助于识别强对流区;而密集的正地闪也是对应着强回波区,而稀疏的正地闪多发生在系统后部的稳定性降水或云砧部位。与卫星云图的对比表明,地闪基本出现在低于-50℃的云区和前部大的温度梯度区内,集中发生于低于-60℃的云区,高于-40℃的云区没有地闪发生。

5.4 雷暴过程中闪电与降水的关系研究

利用地闪定位资料与雷达资料的相关分析发现,地闪频数与雷达回波具有一定的正相关性,利用地闪频数有可能对对流性降水进行估测。Zhou 等^[36]利用地闪资料与雷达、降水及探空资料的对比分析,发现闪电与对流性降水存在着较好的相关关系,地闪数目可用来对对流性降水量进行评估,平均雨强与对应时段内的地闪数之间的关系为 $R = 1.692 \ln F - 0.273$ 。同时发现,地闪频数比层结最大不稳定能量能够更好地指示对流性天气的发生和发展。在雷暴系统的强烈活动期间对流旺盛且闪电频数大,短时降水量高,这是对流性降水的主要特征。

6 结 语

通过近 10 年来在闪电物理过程和雷暴电荷结构方面的一些深入研究,对中国典型地区的一些闪电特征及放电参数有了较系统地了解,特别是通过首次青藏高原闪电实验,对高原雷暴和闪电活动的特殊性有了较清晰地认识;在闪电的光谱特征研究方面也取得了一些突破性的进展,并在人工引发闪电技术及其应用等方面取得了长足的进步。但是由于闪电发生的时空随机性、危险性、瞬时性,特别是不同地区之间闪电特征的差异性,都增加了对闪电放电活动规律认识的难度。到目前为止,对中国闪电活动规律的认识仍然是不全面的。随着中国经济的发展和电子技术的广泛应用,对闪电的防护提出了越来越高的要求,因此对中国雷电放电特征及其活动规律的研究,仍有待于今后进一步的试验和理论研究。

参考文献

- [1] Qie X, Yu Y, Guo C, et al. Some features of stepped and dart-stepped leaders near the ground in natural negative cloud-to-ground lightning discharges. *Annales Geophysicae*, 2002, 20(6): 863—870
- [2] Dong Wansheng, Liu Xinsheng, Zhang Yijun, et al. Observations on the leader-return stroke of cloud-to-ground lightning with broadband interferometer. *Sciences in China (series D)*, 2002, 45(3): 259—269
- [3] 张义军,董万胜,张广庶等. 空中人工引发闪电先导过程的特征分析. *地球物理学报*, 2003, 46(4): 446—449
Zhang Yijun, Dong Wansheng, Zhang Guangshu, et al. Characteristics of the leading processes to the artificial induced lightning in the air. *Chinese J Geophys (in Chinese)*, 2003, 46(4): 446—449
- [4] 张其林,鄒秀书,王怀斌. 高原雷暴地闪回击辐射场特征分析. *中国电机工程学报*, 2003, 9(23): 94—98
Zhang Qilin, Qie Xiushu, Wang Huaibin. Characteristics of the radiation fields from return stroke in Plateau thunderstorms. *Proceedings of the CESS (in Chinese)*, 2003, 23(9): 94—98
- [5] Qie X, Kong X, Zhang G, et al. The possible charge structure of thunderstorm and lightning discharges in northeastern verge of Qinghai-Tibetan Plateau. *Atmos Res*, doi:10.1016/j.atmosres. 2004.11.034
- [6] Qie X, Yu Y, Liu X, et al. Charge analysis on lightning discharges to the ground in Chinese inland plateau (Verge of Tibet). *Annales Geophysicae*, 2000, 18(10): 1340—1348
- [7] Qie X, Yu Y, Wang D, et al. Characteristics of cloud-to-ground lightning in Chinese Inland Plateau. *J Meteor Soc Japan*, 2002, 80(4): 745—754
- [8] 袁萍,刘欣生,张义军等. 高原地区云对地闪电首次回击的光谱研究. *地球物理学报*, 2004, 47(1): 42—46
Yuan Ping, Liu Xinsheng, Zhang Yijun, et al. Spectral study on lightning return stroke in plateau area. *Chinese J Geophys (in Chinese)*, 2004, 47(1): 42—46
- [9] 袁萍,刘欣生,张义军等. 与闪电过程有关的 NII 离子能级寿命的理论计算. *物理学报*, 2002, 51(11): 2495—2502
Yuan Ping, Liu Xinsheng, Zhang Yijun, et al. Theoretical calculation for the lifetime of NII related to lightning process. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 2002, 51(11): 2495—2502
- [10] 张泉,鄒秀书,张广庶. 短基线时间差闪电辐射源探测系统和初步定位结果. *高原气象*, 2003, 22(3): 226—234
Zhang Quan, Qie Xiushu, Zhang Guangshu. Short-baseline time-of-arrival lightning radiation detection system and preliminary location result. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 2002, 22(3): 226—234
- [11] Zhang Yijun, Krehbiel P R, Liu Xinsheng. Polarity inverted intracloud discharges and electric charge structure of thunderstorm. *Chinese Sci Bull*, 2002, 47(20): 1725—1729
- [12] 孔祥贞,鄒秀书,王才伟等. 首次回击具有双接地地点的地闪光学和电学特征的个例分析. *高原气象*, 2003, 22(3): 259—267
Kong Xiangzhen, Qie Xiushu, Wang Caiwei et al. Optical and electrical characteristics of the cloud-to-ground lightning flash with two-striking point in the first return stroke. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 2003, 22(3): 259—267
- [13] 余晔,鄒秀书. 地闪先导通道中电荷分布的数值模拟. *自然科学进展*, 2001, 11(7): 710—714
Yu Ye, Qie Xiushu. Numerical simulation of charge density in the leader channel. *Progress in Natural Science (in Chinese)* 2001, 11(7): 710—714
- [14] 苟学强,张义军. 脉冲电晕与地闪先导梯级性机制模式探讨. *高原气象*, 2002, 21(4): 408—413
Gou Xueqiang, Zhang Yijun. Pulse corona and a new mechanism of negative stepped leader in cloud-to-ground lightning discharges. *Plateau Meteorology (in Chinese)* 2002, 21(4): 408—413
- [15] Zhang Y J, Dong W S, Zhao Y, et al. Study of charge structure and radiation characteristic of intracloud discharge in thunderstorms of Qinghai-Tibetan Plateau. *Sciences in China (series D)*, 2004, 47 (Suppl): 108—114
- [16] Qie X S, Zhang T L, Chen C P, et al. The lower positive charge center and its effect on lightning discharges on the Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 2005, 32 (5): art. no. L05814
- [17] 赵阳,张义军,董万胜. 青藏高原那曲地区闪电特征初步分析. *地球物理学报*, 2004, 47(3): 405—410
Zhao Yang, Zhang Yijun, Dong Wansheng. Preliminary analysis of characteristics of lightning in the Naqu area of

- Qinghai-Xizang plateau. Chinese J Geophys (in Chinese), 2004, 47(3): 405-410
- [18] 言穆弘, 刘欣生, 安学敏等. 雷暴非感应起电机制的模拟研究: I 云内因子影响. 高原气象, 1996, 15(4): 425-437
Yan Muhong, Liu Xinsheng, An Xuemin, et al. A simulation study of non-inductive charging mechanism in thunderstorm. I affect of cloud factor. Plateau Meteorology (in Chinese), 1996, 15(4): 425-437
- [19] Zhang Y, Yan M, Liu X. Simulation study of discharge processes in thunderstorm. Chinese Sci Bull, 1999, 44(22): 2098-2102
- [20] 孙安平, 张义军, 言穆弘. 雷暴电过程对动力发展的影响研究. 高原气象, 2004, 23(1): 26-32
Sun Anping, Zhang Yijun, Yan Muhong. Study on influence of electrical processes on dynamical development in thunderstorm. Plateau Meteorology (in Chinese) 2004, 23(1): 26-32
- [21] 郭凤霞, 张义军, 鄒秀书等. 雷暴云不同空间电荷结构数值模拟研究. 高原气象, 2003, 22(3): 268-274
Guo Fengxia, Zhang Yijun, Qie Xiushu et al. Numerical simulation of different charge structures in thunderstorm. Plateau Meteorology (in Chinese), 2003, 22(3): 268-274
- [22] 王道洪, 鄒秀书, 郭昌明著. 闪电与人工引雷. 上海: 上海交通大学出版社, 2000
Wang Daohong, Qie Xiushu, Guo Changming, et al. Lightning and Triggered Lightning. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, December, 2000
- [23] 刘欣生, 鄒秀书, 张义军等. 中国内陆高原正极性闪电的观测实验研究. 高原气象, 1998, 17(1): 1-9
Liu Xinsheng, Qie Xiushu, Zhang Yijun, et al. Observation of positive lightning in the inland plateau of China. Plateau Meteorology (in Chinese), 1998, 17(1): 1-9
- [24] 刘欣生, 肖庆复. 人工引发雷电的静态摄影机特征分析. 高原气象, 1998, 17(1): 106-110
Liu Xinsheng, Xiao Qingfu. Still photograph and its characteristics analysis of artificially triggered lightning. Plateau Meteorology (in Chinese), 1998, 17(1): 106-110
- [25] 王才伟, 言穆弘, 刘欣生等. 论闪电先导的双向传输. 科学通报, 1998, 43(11): 1198-1201
Wai Caiwei, Yan Muhong, Liu Xinsheng, et al. On the bidirection leader. Chinese Sci Bull (in Chinese), 1998, 43(11): 1198-1201
- [26] Dong Wansheng, Liu Xinsheng, Zhang Yijun. Broadband interferometer observations of a triggered lightning. Chinese Sci Bull, 2001, 46(18): 1561-1565
- [27] 董万胜, 刘欣生, 张义军等. 25~100 MHz 频段闪电脉冲辐射能量频谱特征. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 104-107
Dong Wansheng, Liu Xinsheng, Zhang Yijun, et al. Lightning electromagnetic radiation field spectral in the interval from 25-100 MHz. Proceedings of the CESS (in Chinese), 2003, 23(3): 104-107
- [28] 张敏锋, 刘欣生, 张义军. 利用 GCM 模式对全球雷电活动的模拟分析. 大气科学, 2001, 25(5): 689-696
Zhang Minfeng, Liu Xinsheng, Zhang Yijun. Simulation experiments of global lightning distribution by a coupled GCM. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2001, 25(5): 689-696
- [29] Qie Xiushu, Ralf Toumi, Yuan Tie. Lightning activities on the Tibetan Plateau as observed by the lightning imaging sensor. J Geophys Res, 2003, 108(D17): 4551, doi: 10.1029/2002JD003304
- [30] Qie Xiushu, Ralf Toumi, Zhou Yunjun. Lightning activity on the central Tibetan Plateau and its response to convective available potential energy. Chinese Sci Bull, 2003, 48(4): 296-299
- [31] 袁铁, 鄒秀书. 青藏高原中部闪电活动与相关气象要素季节变化的相关分析. 气象学报, 2005, 63(1): 123-127
Yuan Tie, Qie Xiushu. Seasonal variation of lightning activities and related meteorological factors over the central Qinghai-Xizang plateau. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2005, 63(1): 123-127
- [32] 马明, 陶善昌, 祝宝友等. 1997/1998 El Nino 期间中国南部闪电活动的异常特征. 中国科学 D 辑, 2004, 34(9): 873-881
Ma Ming, Tao Shanchang, Zhu Baoyou, et al. Abnormal characteristics of lightning in South China during 1997/1998 El Nino. Sciences in China (series D) (in Chinese), 2004, 34(9): 873-881
- [33] 熊亚军, 鄒秀书, 郭凤霞. 南美闪电活动的时空分布特征及其与东太平洋海温的关系. 高原气象, 2005, 24(3): 396-403
Xiong Yajun, Qie Xiushu, Guo Fengxia. Temporal and spatial characteristics of South America lightning activities and their relationship with SST in East Pacific. Plateau Meteorology (in Chinese), 2005, 24(3): 396-403
- [34] 熊亚军, 鄒秀书, 周筠珺等. 区域闪电活动对地面相对湿度的响应. 地球物理学报, 待发表
Xiong Yajun, Qie Xiushu, Zhou Yunjun, et al. The regional response of lightning activities to the surface relative humidity. Chinese J Geophys (in Chinese). in press
- [35] 冯桂力, 鄒秀书, 袁铁等. 一次冷涡天气系统中雹暴过程的地闪特征分析. 气象学报, 待发表
Feng Guili, Qie Xiushu, Yuan Tie, et al. A case study of cloud-to-ground lightning activities in hailstorms under cold eddy synoptic situation. Acta Meteor Sinica (in Chinese), in press
- [36] Zhou Y, Qie X, Soula S. A study of the relationship between cloud-to-ground lightning and precipitation in the convective weather system in China. Annales Geophysicae, 2002, 20: 107-113

STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF LIGHTNING DISCHARGES AND THE ELECTRIC STRUCTURE OF THUNDERSTORM

Qie Xiushu

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000)

Zhang Yijun

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000)

Zhang Qilin

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000)

Abstract

The recent progresses in the study of the physical processes of lightning discharge and electric structure of thunderstorm in the last decade were reviewed. By using the self-developed lightning detecting and locating technology with the high time resolutions, the characteristics and parameters of the lightning discharges in different areas were obtained. The observation experiments on the lightning activity was conducted in Qinghai-Tibet plateau for the first time. The special characteristics of the thunderstorm and lightning activity were revealed and their cause of formation were studied by using the numerical simulation. The theory of atomic structure was introduced into the study of lightning spectrum, and the lightning spectrum in the bandwidth of visible light was recorded and identified. The technology of artificially triggered lightning wan altitude was developed and the measuring technologies of the optical and electric signal under the condition of rigorous electromagnetism were resolved. The results observed show the optical and VHF radiation evidence of bi-directional leader propagation. The experiments of lightning protection were conducted by means of the artificially triggered lightning. In addition, the relationship between lightning and weather and climate were studied preliminarily.

Key words: Lightning, Thunderstorm, Charge structure, Observation experiment, Numerical simulation.