

张义军, 张阳. 雷暴闪电放电活动对电离层影响的研究进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 570-576.
doi:10.11898/1001-7313.20160506

雷暴闪电放电活动对电离层影响的研究进展

张义军* 张 阳

(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081)

摘 要

雷暴中的闪电放电能够产生强静电场以及电磁辐射场, 从而对空间电离层产生重要影响, 引起电离层电子密度分布的扰动。研究表明: 闪电放电引起电离层扰动的方式有两种: 直接耦合和间接耦合。其中, 直接耦合主要来自于闪电产生的准静电场及电磁场的作用, 在甚低频 (VLF) 反射信号上表现出快 VLF 事件, 而间接耦合主要是闪电低频电磁波在传播过程中与磁层相互作用, 在辐射带产生闪电诱导电子沉降 (LEP) 现象。雷暴闪电活动能够改变电离层从 D 层到 F 层的电子密度分布, 影响对流层大气和电离层之间的场, 导致中高层瞬态放电淘气精灵 (elves) 及红闪 (sprite) 等现象的激发。闪电 VLF 传输反射信号可用于反演电离层密度的变化, 目前已成为一种探测电离层扰动的常用方法, 而引起电离层扰动的强度不但和闪电放电参量密切相关, 也和闪电放电过程、类型有关。该文重点阐述了闪电放电与电离层直接耦合和间接耦合作用以及导致的相关现象。

关键词: 雷暴; 闪电放电; 电离层; 影响

引 言

由于受地球以外射线(主要是太阳辐射)对中性原子和空气分子的电离作用, 距地表 60 km 以上的整个地球大气层都处于部分电离或完全电离的状态, 其中部分电离的大气区域为电离层。电离层从低到高依次分为 D 层、E 层和 F 层, 是无线通讯信号传输、航空航天导航的重要媒介, 能够对长波进行反射, 对短波进行吸收, 受电离层影响的波段从极低频 (ELF) 直至甚高频 (VHF)。电离层变化能够引起无线通讯电磁环境的变化, 从而影响无线通讯信号的质量和航空航天导航的精度。随着通讯和航空航天事业的飞速发展, 对电离层影响因素的研究引起了越来越多的关注。

影响电离层的因素有很多, 其中地球低层大气中的过程, 如雷电活动、火山喷发、剧烈天气过程、声重力波等, 能够以不同方式影响电离层。这种低层

大气和电离层之间通过动力学、电学和光化学的相互作用问题成为近年来人们非常感兴趣但并未十分了解的重要课题^[1], 雷暴及其闪电对放电电离层的影响就是其中的一个热点。雷暴中的闪电放电, 主要分为云闪、正地闪^[2]和负地闪, 包含初始击穿、先导、回击、M 分量等多种不同尺度的放电过程^[3-10], 具有大电流、强电磁辐射的放电特征, 其产生的辐射场峰值在电离层高度能达到甚至超过 15 V/m^[11], 大大超过了大气中某些成分的电离和激发光辐射阈值, 从而对电离层产生显著影响。目前已经发现电离层的不同层 (D 层、E 层、F 层等) 均能够受到雷暴中闪电放电的影响^[12-14], 而电离层 D 层作为电离层最底部的部分, 受到对流层中雷暴的扰动作用更为显著, 一些观测中已经发现电离层 D 层在雷暴条件下闪电放电的强扰动现象^[15] (电子密度的变化高达 100%)。

目前, 国际上尤其是美国已经开展了雷电对电离层影响的广泛研究, 主要涉及到雷电引起的电离

2016-05-17 收到, 2016-07-05 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目 (91537209, 41205002), 中国气象科学研究院基本科研业务费 (2015Z006), 国家重点基础研究发展计划 (2014-CB441406, 2014CB441405)

* email: zhangyj@camscma.cn

层变化特征、观测方法、相互作用模式以及引起的中高层大气放电现象等方面^[16-21]。然而,我国在这方面的研究仍较少,研究主要集中在雷电和电离层相互作用引起的中高层大气放电方面^[22-23]以及雷电磁脉冲对电离层影响的模拟研究^[13,24]。目前基于站网记录闪电 VLF/LF 信号的电离层 D 层探测技术和方法也已经开始在国内构建,其初步观测结果清晰展示了电离层 D 层对太阳耀斑活动的响应^[25],未来有望开展雷暴放电对电离层影响的试验观测研究。本文综述了雷暴中闪电放电对电离层的广泛影响,重点阐述了闪电放电与电离层直接耦合和间接耦合效果以及导致的相关放电现象。

1 闪电和电离层的间接耦合作用

1.1 闪电放电诱导的电子沉降现象

闪电和中层大气、低电离层的耦合有两种方式:间接耦合和直接耦合。其中间接耦合的典型代表为闪电诱导电子沉降(LEP)现象。LEP 是闪电影响电离层的最直接表现之一,也是最早发现并研究最为广泛的闪电对电离层影响事件,表现为闪电发生时电离层电子密度的明显变化。

通过火箭及卫星的探测已观测发现了 LEP 和闪电放电的相关性。采用火箭携带的探测装置, Rycroft^[26]在 Petrel 火箭飞行过程中观测得到了能量电子密度在投掷角 $6^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 瞬态增加,增加倍数为准稳态密度的 20 倍,发现电子密度的增加和哨声紧密联系,从而佐证了闪电和辐射带电子的相关性。Goldberg 等^[27]利用火箭同步观测了晚间闪电放电和电子沉降数据,发现闪电引起的大于 40 keV 的电子沉降能量和通量远远大于由于 21.4 kHz VLF 信号传输引起的电子沉降,结果证实了闪电能够激活磁层的电离辐射源,从而影响局部中层大气电结构。进一步利用卫星全天候观测的优势,卫星上携带的观测设备对 LEP 事件给出了更多的观测结果。Voss 等^[28]首次报道了低轨 S81-1/SEEP 卫星从地球辐射带观测到大量的闪电引起的电子沉降的个例,这些事件和 Palmer 地基观测站观测到的哨声一一对应,证实了全球的强 LEP 事件分布是和闪电活动紧密相关的,电子通量超过背景能量(45~200 keV)两个数量级。他们于 1998 年进一步研究发现 LEP 事件被哨声引起,一次 LEP 事件能够消耗影响区域 0.001% 的粒子^[29]。Blake 等^[30]使用 SAMPEX 卫星

观测资料研究发现,在 150 keV~1 MeV 能量范围内的损失锥电子通量直接和雷暴相关。Inan 等^[31]使用 DEMETER 卫星的观测资料发现,LEP 在 100~300 keV 范围内直接和地基观测系统探测到的闪电数据相关,当卫星经过雷暴上方时,LEP 的通量会显著提高。

1.2 LEP 的 VLF 探测

闪电放电产生的 VLF 信号在地球-电离层传输过程中能够携带传输路径的信息。最初很多研究人员发现 VLF 信号的扰动和磁暴相关。后来, Helliwell 等^[32]发现长距离传输的 VLF 信号幅度和信号突然变化,常常伴随着闪电引起的哨声。他们认为哨声能量传输进入电离层时,电离并改变了地球-电离层波导特性。当 VLF 信号通过电离层传播时,电离层由于 LEP 导致的电子密度改变必将导致 VLF 传输路径的电特征发生变化,从而改变了 VLF 反射信号幅度和相位,因此,可以利用发射的信号、接收到的信号以及传输路径特征来反演 LEP。该探测方法具有成本低、容易实现的优势。Inan 等^[33]利用 VLF 信号探测首次发现了几十例 LEP 事件和单独云地闪电放电事件存在的直接的相关性。Burgess 等^[34]在南北半球进行了电离层扰动的同步观测,结果显示两个半球都能够被同样的闪电事件影响。

采用 VLF 信号对电离层进行探测的最著名的大型探测装置是电离层闪电全息成像阵列^[35],通过分布式多个 VLF 测站,对闪电伴随的电离层的扰动进行深入研究。该阵列覆盖了美国中西部雷暴影响的绝大部分区域,连续观测华盛顿、缅因州、夏威夷、波多黎各等发射站发射的 VLF 信号,从而对 LEP 事件进行成像研究。目前,作为大型科学装置,该阵列已经获得了丰富的科研成果,给出了 LEP 事件特征的定量估计。Johnson 等^[36]使用电离层闪电全息成像阵列(holographic array for ionospheric lightning, HAIL)精确测量了沉降区的尺度和位置,伴随着纬度的增加,电子沉降和闪电回击的延迟也增加,该观测结果为斜向哨声传输提供了证据。Clilverd 等^[37]使用南极地区的 VLF 信号接收阵列研究估计得到的沉降带的尺度为纬度方向 600 km,经度方向 1500 km。斯坦福大学的 Peter 等^[38]使用 HAIL 研究了飓风伴随的 LEP 事件,并未发现相比于伴随其他雷暴系统的闪电,伴随飓风的闪电更能引起 LEP 事件。Peter 等^[39]通过比较 HAIL 探测到的 LEP 事件和模式模拟的 LEP 对应的电子密度的扰动,发现

85 km 处 D 层电子密度提高约为 15%。

1.3 LEP 发生物理过程

LEP 现象与闪电低频 VLF 信号传输过程中磁层相互作用密切相关。闪电放电激发的宽带 VLF 信号,该信号大部分在地球-电离层波导中传播,也有部分能量能够渗透进入电离层并沿着地球磁场线传播进入磁层,与磁层高能粒子辐射带的高能电子相互作用,使高能电子产生回旋运动,并逃逸进入大气顶层(60~120 km)与中性大气分子碰撞,形成电子沉降,引起局部电子密度异常。

目前,对闪电引起的电子沉降过程已有了比较成功且较为一致的描述^[40]。普遍认为,闪电产生的电磁脉冲在地球-电离层波导中传播,一小部分能量穿透电离层进到磁层。在磁层,低频哨声波以 0.01~0.1 倍光速以倾斜于等离子球或沿着波导的轴向传输。在轨道区域,1~10 kHz 范围的哨声能量与辐射带中 100~300 keV 的高能电子相互作用,导致投掷角及能量散射。在大气层上部(60~120 km)由于和中性分子碰撞,电子从捕获的轨道散射进入锥形的反弹损失区域。这种爆发式沉降将引起电离层的扰动,表现为电子密度的提高。这种电子密度的提高能够通过电离层对 VLF 传播信号相位和幅度的改变来探测,或通过火箭(200~300 km)和卫星(300~700 km)测量。VLF 哨声波传播到赤道带以及能量电子从赤道区域传输到低电离层需要较长的时间,一般从闪电回击到 VLF 幅度及相位开始发生改变的时间延迟大约为 1 s,这也成为了采用 VLF 信号探测辨别 LEP 的一个关键参量。其中,哨声波的传播方式能够一定程度上影响电子诱导沉降位置。当哨声波倾斜传播时,电子沉降位置一般在闪电放电正上方为中心的一个宽范围内,而当哨声波沿着波导传播时,电子沉降区域可以不在闪电放电正上方。

1.4 LEP 和闪电放电参量之间的关系

当前,闪电引起 LEP 已获得了较为一致的认识,闪电引起的电子沉降和闪电放电参量有很紧密的联系,但 LEP 与雷暴及闪电放电参量的定量关系以及时空精细化相关性研究仍比较有限。Clilverd 等^[41]发现仅仅超过 70 kA 的回击能够产生可探测的 LEP 事件,探测到的 VLF 波动信号幅度、沉降通量和闪电电流成正相关。Rodger 等^[42]估计了全球闪电导致的电子沉降的效果,他们使用沉降通量的估计值和全球闪电频次估计了全球的平均沉降速度

为 $3 \times 10^{-4} \text{ ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, 激活区域的峰值是 $6 \times 10^{-3} \text{ ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2 闪电和电离层的直接耦合作用

2.1 快 VLF 事件现象及物理机制

相比于闪电引起的 LEP 事件(其反射信号延迟时间大于 1 s),快(早)VLF 事件是对流层闪电产生的 VLF 信号与电离层底部直接耦合的结果。Armstrong^[43]首次报道了这种闪电反射信号延迟时间小于 100 ms 的事件,后来 Inan 等^[33]称之为快(或早)VLF 事件,这种事件被认为和闪电诱导的电离层扰动直接相关。Peter 等^[39]比较了 LEP 事件和快 VLF 事件,相比于 LEP 事件的 VLF 信号的负向变化,该事件的 VLF 信号正向变化,上升时间从小于 50 ms 到 2 s。

已有研究表明,快的 VLF 事件与闪电和电离层之间的第 2 种耦合方式——直接耦合相关。与 LEP 的产生机制不同,闪电和电离层的直接耦合主要是闪电产生的电磁脉冲(electromagnetic pulse, EMP)和准静电场(quasi electrostatic, QE)直接作用于电离层。

发生于雷暴与地面之间的地闪回击具有大电流特征,可产生强电磁辐射,对电离层的影响最早被揭示,Cheng 等^[44-45]使用闪电回击前后的宽带 VLF 信号通过散射方式探测了闪电电磁脉冲作用下的电离层电子的密度的波动。Cheng 等^[44]推测在美国东海岸,由于高强度的负地闪占主导地位,电磁脉冲(EMP)引起的电离层 D 层的扰动更明显。而发生在云内的闪电相对地闪产生的电磁辐射要弱,但其发生位置高,因此,Marshall 等^[19]提出云内闪电电磁脉冲(EMP)能够在电离层 D 层产生累计的电流效果。这种机制能够解释快和慢的 VLF 事件。2010 年他们提供了更深入的云内电磁脉冲和电离层相互作用的模式,使用 VLF 传输信号的有限频域差分法给出了电离层的扰动,进一步说明了云闪产生的电磁脉冲也能够导致快的 VLF 事件^[11]。Marshall 等^[11]模拟了由于地闪放电引起的 VLF 信号波动,结果显示只有大幅度的电场(大于 30 m/V)才能够产生 VLF 扰动。

另一方面,闪电放电后产生的 QE 场,在夜间低电离层的一些高度上,甚至会大于该区域的大气击穿电场,引起大气的雪崩电离,使这一区域的电子

浓度发生很大变化。黄文耿等^[13]采用自洽的准静电场(QE)模型,计算雷暴云电荷突然对地放电后 QE 场大小在 0~90 km 高度上的分布,结果表明:在 63~83 km 高度上,电子平均能量为 $3 \text{ eV} < E < 6 \text{ eV}$; 计算的电子数密度的峰值扰动表明,在 65~78 km 高度上,电子的数密度增加,最大的电离峰值约在 74 km 处,大约增加了 3 个数量级,比电磁脉冲(EMP)的电离效果大得多。电离层电子密度的变化将影响低电离层大地波导中 VLF 的传播,增加电波的吸收和降低 VLF 的反射高度,这种现象已经在试验中得到了验证。Inan 等^[46]使用人工发射的 100 kW VLF 信号直接加热电离层,其作用效果和闪电引起的电离层变化效果相似,但闪电引起的电离层加热更强。在此过程中,快 VLF 事件的慢恢复时间表明有电离现象产生,这可能来源于加热外的其他机理。Cheng 等^[44]研究推测在美国大平原,由于转移电荷量较大的正地闪常常占优,应该以准静电场(QE)影响为主,上述结论并未得到广泛证实。在电离层底部,雷暴放电的准静电场(QE)对电子的持续加热作用可以引起几百公里区域的电子浓度和电导率变化,持续时间低于 100 ms、幅度为 5~20 V/m(归一化到 100 km)的电磁脉冲会极大提升电离层 D 区的电子密度,从而导致了最知名的淘气精灵(elves)现象。

2.2 中高层大气放电

中高层大气光学现象发生在高度 50~90 km,持续时间约为毫秒量级,两类发光现象 elves 和红闪(sprite)被 Franz 等^[47]和 Boeck 等^[48]首次观测到,这些大气发光现象进一步激发了科研人员对闪电和电离层直接耦合的兴趣。

2.2.1 淘气精灵(elves)

淘气精灵(elves)是发生在低电离层 85~95 km 高度、水平扩展达到 200~600 km 的圆盘状瞬态光学事件,呈红色,是迄今发现的发生高度最高、水平尺度最大的中层大气放电现象。已有的观测和研究表明,elves 和雷暴及闪电放电密切相关^[20],其中和闪电电磁脉冲的耦合作用关系更为紧密。为了进一步验证 elves 是否由对流层闪电的电磁脉冲诱发,1996 年美国斯坦福大学一个研究组^[49]利用一套阵列光学系统首次揭示了 elves 光学亮度以超过光速的速度向周边扩展的现象,并推测 elves 只与对流层诱导地闪回击的电磁脉冲场强度有关而与极性无关^[50]。Cho 等^[51]的两维模型以及 Marshall 等^[11]的

三维模型显示闪电电磁脉冲明显改变下部电离层密度,扰动持续时间为 10~100 s。三维模式也进一步显示三维云内水平放电也可能影响下部电离层。Wu 等^[52]建立了雷暴放电产生的电磁场在对流层-低电离层之间耦合的时变模式,并用模式研究了 elves 现象的时空特征。模拟结果表明:雷暴放电产生的电场包括准静电场和辐射场,其中由放电电流脉冲产生的辐射场是产生 elves 现象的直接原因。辐射场的电场强度分布与偶极辐射产生的电场强度的分布相似,在雷暴放电的正上方电场较弱,在地面附近辐射电场较强。Mende 等^[53]在多个频段观测到 elves 现象,估计在 elves 区域电场降低 200 Td ($1 \text{ Td} = 10^{-21} \text{ V/m}^2$),从而在 150 km 半径、10 km 厚的范围内形成 200 电子/cm³ 的电离。这是首次测量闪电电磁脉冲直接作用下的下部电离层电离。

2.2.2 红闪(sprite)

闪电电磁脉冲和电离层的相互作用也是另外一种中高层大气放电现象红闪(sprite)的一个形成原因。Inan 等^[21]发展了第 1 个研究闪电作用下电离层的加热和电离的模型,在该模型中电场归一化到 100 km 处的峰值幅度设定为 5~20 V/m,考虑了麦克斯韦电子能量分布和由于闪电电磁脉冲的修饰,推测闪电电磁脉冲和电离层相互作用将导致 sprite 发光。他们于 1995 年讨论了 sprite 和快 VLF 事件的相关性,建议导致 sprite 准静电场加热的物理过程也导致了底部电离层电导率的变化^[54]。事实上,除了上述准静电场因素外,加热方式也部分导致了 sprite 的产生^[55]。Taranenko 等^[56-57]首次计算闪电在电离层的直接耦合效应,使用一维的动力模型解释了由于闪电电磁脉冲加热电子导致的电子能量分布特征,并进一步计算了由于电磁脉冲导致的光辐射 sprite 现象。其他大气瞬态光学事件还有蓝色喷流(blue jets)、巨大喷流(gigantic jets)等,研究发现这些事件的发生均与雷暴的闪电放电密切相关,是电离层扰动的影响所致。

3 闪电对电离层 E 层和 F 层的影响

上述电离层直接耦合对电离层底部(常常在 D 层)的作用比较明显,大多数研究也集中在闪电引起的电离层 D 层的扰动方面。而最近的研究表明,闪电对电离层的作用也能够延伸到更高的高度,对电离层 E 层和 F 层产生相应的影响。Davis 等^[58]报

道了具有统计意义的在雷暴上方电离层 E 层明显增强和减弱。因为电离层 E 层对无闪电的低压系统没有响应,因此,可以认为 E 层的变化是由闪电引起的。他们于 2008 年进一步建议,闪电和电离层 E 层的波动能够部分归因于闪电向电离层的能量转换或者垂直放电^[14]。Kumar^[59]研究了雷暴对电离层 F 层的影响。他们利用 2003—2004 年 8 月观测到的中高度的多普勒速度、极光电喷流指数和云地闪回击研究了伴随雷暴的 F 层垂直移动的问题。结果显示,在闪电发生后 3 h, F 层垂直移动速度减小 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。虽然 F 层的变化一定也会受到太阳风磁场、热层风的影响,但研究表明,雷暴电场也对 E 层、F 层变化起一定作用。关于雷暴及闪电放电与 E 层、F 层的关系仍需要进一步深入探讨。

4 结 论

本文综述了雷暴闪电放电活动对电离层扰动的作用。闪电放电和电离层的间接耦合导致了 LEP 现象的产生,而雷暴及闪电的静电场和电磁脉冲是直接耦合作用的重要原因,导致了 elves 和 sprite 等大量中高层大气发光现象。无论是间接耦合还是直接耦合,雷暴及其中的闪电放电都会对电离层的特性,包括电子密度分布、廓线等产生影响,从而一定程度上改变航空、航天及卫星通讯的空间电环境。到目前为止,其研究成果集中体现在闪电放电能够一定程度上改变电离层的特性,多为单点的观测或者模拟结果,大范围的闪电导致电离层扰动的三维成像结果却很少,已成为了一个前沿研究领域。基于对中高层大气发光现象机理的探究,闪电对电离层底部(D 层)的影响研究较多,而由于观测的困难,闪电对电离层 E 层及 F 层的观测及机制研究还很少,需要进一步探讨。国外对闪电在电离层 D 层的影响方面研究较深入,虽然已对闪电能够引起电离层尤其是电离层底部电子密度改变的现象有了一定了解,但由于电离层 D 层扰动观测和对应闪电放电特征观测的高时空同步资料的欠缺,导致两者相互关系方面的研究还很不充分,而国内相关研究很少,只是在中高层大气放电方面有一定的观测研究,应进一步加强这一方向的研究工作。

参 考 文 献

- [1] 萧佐. 50 年来的中国电离层物理研究. 物理, 1999, 28(11): 661-667.
- [2] 张阳,张义军,孟青,等. 北京地区正地闪时间分布及波形特征. 应用气象学报, 2010, 21(4): 442-449.
- [3] Zhang Y, Zhang Y J, Zheng D, et al. Preliminary breakdown, following lightning discharge processes and lower positive charge region. *Atmos Res*, 2015, 161-162: 52-56.
- [4] Zhang Y, Zhang Y J, Li C, et al. Simultaneous optical and electrical observations of "chaotic" leaders preceding subsequent return strokes. *Atmos Res*, 2016, 170: 131-139.
- [5] Zhang Y, Zhang Y J, Xie M, et al. Characteristics and correlation of return stroke, M component and continuing current for triggered lightning. *Electric Power System Research*, 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2015.11.024.
- [6] 谢盟,张阳,张义军,等. 两种类型 M 分量物理特征和机制对比. 应用气象学报, 2015, 26(4): 451-459.
- [7] 肖桐,张阳,吕伟涛,等. 人工触发闪电 M 分量的电流与电磁场特征. 应用气象学报, 2013, 24(4): 446-454.
- [8] 张义军,周秀骥. 雷电研究的回顾和进展. 应用气象学报, 2006, 17(6): 829-834.
- [9] 张义军,杨少杰,吕伟涛,等. 2006—2011 年广州人工触发闪电观测试验和应用. 应用气象学报, 2012, 23(5): 513-522.
- [10] 张义军,孟青,马明,等. 闪电探测技术发展和资料应用. 应用气象学报, 2006, 17(5): 611-620.
- [11] Marshall R A, Inan U S, Glukhov V S. Elves and associated electron density changes due to cloud-to-ground and in-cloud lightning discharges. *J Geophys Res*, 2010, 115: A00E17.
- [12] Xiao Z, Yu S M, Shi H, et al. A brief of recent research progress on ionospheric disturbances. *Sci China: Info Sci*, 2013, 56: 122304: 1-122304: 9.
- [13] 黄文耿,古士芬. 雷暴云准静电场对夜间电离层 D 区的影响. 地球物理学报, 2003, 46(2): 162-166.
- [14] Davis C J, Lo K H. An enhancement of the ionospheric sporadic-E layer in response to negative polarity cloud-to-ground lightning. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L05815.
- [15] Shao X M, Lay E H, Jacobson A R. Reduction of electron density in the night-time lower ionosphere in response to a thunderstorm. *Nature Geoscience*, 2013, 6: 29-33.
- [16] Johnson M P. VLF Imaging of Lightning-induced Ionospheric Disturbance. Stanford: Stanford University, 2000.
- [17] Kuchеров K I, Nikolaenko A P. Heating of electrons in the lower ionosphere by horizontal lightning discharges. *Radio Physics and Quantum Electronics*, 1979, 22(7): 621-623.
- [18] Lay E H, Shao X M. High temporal and spatial-resolution detection of D-layer fluctuations by using time-domain lightning waveforms. *J Geophys Res*, 2011, 116: A01317.
- [19] Marshall R A, Inan U S, Chevalier T W. Early VLF perturbations caused by lightning EMP-driven dissociative attachment. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L21807. doi: 10.1029/2008GL035358.
- [20] Marshall R, AmNewsome R T, Inan U S. Fast photometric imaging using orthogonal linear arrays. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46(11): 3885-3893.
- [21] Inan U S, Bell T F, Rodriguez J V. Heating and ionization of the lower ionosphere by lightning. *Geophys Res Lett*, 1991, 18

[1] 萧佐. 50 年来的中国电离层物理研究. 物理, 1999, 28(11):

- (4):705-708.
- [22] 郟秀书,吕达仁,卞建春,等.中高层大气瞬态发光事件(TLEs)及可能的影响.地球科学进展,2009,24(3):286-296.
- [23] 祝宝友,陶善昌,谭涌波.雷暴云顶之上的大气放电研究进展.高原气象,2006,25(3):549-555.
- [24] 易铁铮.从雷电脉冲谱推算出低电离层等效结构.地球物理学报,1987,30(3):236-245.
- [25] 秦子龙,祝宝友,吕凡超,等.利用雷暴闪电事件监测电离层D层日间波动.科学通报,2015,60(7):654-663.
- [26] Rycroft M J. Enhanced energetic electron intensities at 100 km altitude and a whistler propagating through the plasmasphere. *Planet Space Sci*, 1973, 21(2): 239-251.
- [27] Goldberg R A, Barcus J R, Hale L C, et al. Direct observation of magnetospheric electron precipitation stimulated by lightning. *J Atmos Terr Phys*, 1986, 48(3): 293-299.
- [28] Voss H D, Imhof W L, Walt M, et al. Lightning induced electron precipitation. *Nature*, 1984, 312: 740-742.
- [29] Voss H D, Walt M, Imhof W L, et al. Satellite observations of lightning-induced electron precipitation. *J Geophys Res*, 1998, 103: 11725-11744.
- [30] Blake J B, Inan U S, Walt M, et al. Lightning-induced energetic electron flux enhancements in the drift loss cone. *J Geophys Res*, 2001, 106(A12): 29733-29744.
- [31] Inan U S, Golkowski M, Casey M K, et al. Subionospheric VLF observations of transmitter-induced precipitation of inner radiation belt electrons. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L02106, doi: 10. 1029/2006GL028494.
- [32] Helliwell R A, Katsufakis J P, Trimpi M. Whistler-induced amplitude perturbation in VLF propagation. *J Geophys Res*, 1973, 78(22): 4679-4688.
- [33] Inan U S, Shafer D C, Yip W P, et al. Subionospheric VLF signatures of nighttime D region perturbations in the vicinity of lightning discharges. *J Geophys Res*, 1988, 93(A10): 11455-11472.
- [34] Burgess W C, Inan U S. The role of ducted whistlers in the precipitation loss and equilibrium flux of radiation belt electrons. *J Geophys Res*, 1993, 98(A9): 15643-15665.
- [35] Chen J T, Inan U S, Bell T F. VLF strip holographic imaging of lightning-associated ionospheric disturbances. *Radio Sci*, 1996, 31(2): 335-348.
- [36] Johnson M P, Inan U S, Lauben D S. Subionospheric VLF signatures of oblique (nonducted) whistler-induced precipitation. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(23): 3569-3572.
- [37] Clilverd M A, Nunn D, Lev_Tov S J, et al. Determining the size of lightning induced electron precipitation paths. *J Geophys Res*, 2002, 107(A8): 1168, doi: 10. 1029/2001JA000301.
- [38] Peter W B, Inan U S. Electron precipitation events driven by lightning in hurricanes. *J Geophys Res*, 2005, 110: A05305, doi: 10. 1029/2004JA010899.
- [39] Peter W B, Inan U S. A quantitative comparison of lightning induced electron precipitation and VLF signal perturbations. *J Geophys Res*, 2007, 112: A12212, doi: 10. 1029/2006JA012165.
- [40] Lauben D S, Inan U S, Bell T F. Precipitation of radiation belt electrons induced by obliquely propagating lightning-generated whistlers. *J Geophys Res*, 2001, 106: 29745-29770.
- [41] Clilverd M A, Rodger C J, Nunn D. Radiation belt electron precipitation fluxes associated with lightning. *J Geophys Res*, 2004, 109: A12208, doi: 10. 1029/2004JA010644.
- [42] Rodger C J, Clilverd M A, Thomson N R, et al. Lightning driven inner radiation belt energy deposition into the atmosphere: Regional and global estimates. *Ann Geophys*, 2005, 23: 3419-3430.
- [43] Armstrong W C. Recent advances from studies of the Trimp effect. *Antarct J U S*, 1983, 18: 281-283.
- [44] Cheng Z, Cummer S A. Broadband VLF measurements of lightning-induced ionospheric perturbations. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L08804.
- [45] Cheng Z, Cummer S A, Su H T, et al. Broadband very low frequency measurement of D region ionospheric perturbations caused by lightning electromagnetic pulses. *J Geophys Res*, 2007, 112: A06318.
- [46] Inan U S. VLF heating of the lower ionosphere. *Geophys Res Lett*, 1990, 17(6): 729-732.
- [47] Franz R C, Nemzek R J, Winckler J R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system. *Science*, 1990, 249: 48-51.
- [48] Boeck W L, Vaughan O H, Blakeslee R, et al. Lightning induced brightening in the airglow layer. *Geophys Res Lett*, 1992, 19: 99-102.
- [49] Inan U S, Barrington-leigh C P, Hans S, et al. Rapid lateral expansion of optical luminosity in lightning-induced ionospheric flashes referred to as "elves". *Geophys Res Lett*, 1997, 24(5): 583-586.
- [50] Barrington-leigh C P, Inan U S. Elves triggered by positive and negative lightning discharges. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(6): 683-686.
- [51] Cho M, Rycroft M. Computer simulation of the electric field structure and optical emission from cloud-top to the ionosphere. *J Atmos Sol Terr Phys*, 1998, 60: 871-888.
- [52] Wu M L, Xu J Y, Ma R P. Simulation study on elves in the lower ionosphere. *Chin J Space Sci*, 2006, 26(2): 104-110.
- [53] Mende S B, Frey H U, Hsu R R, et al. D region ionization by lightning-induced electromagnetic pulses. *J Geophys Res*, 2005, 110: A11312, doi: 10. 1029/2005JA011064.
- [54] Inan U S, Bell T F, Pasko V P, et al. VLF signatures of ionospheric disturbances associated with sprites. *Geophys Res Lett*, 1995, 22(24): 3461-3464.
- [55] Adachi T, Fukunishi H, Takahashi Y, et al. Roles of the EMP and QE field in the generation of columniform sprites. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L04107, doi: 10. 1029/2003GL019081.
- [56] Taranenko Y N, Inan U S, Bell T F. Optical signatures of lightning-induced heating of the D region. *Geophys Res Lett*, 1992, 19(18): 1815-1818.
- [57] Taranenko Y N, Inan U S, Bell T F. The interaction with the lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning: Heating, attachment, and ionization. *Geophys Res Lett*, 1993, 20(15): 1539-1542.

- [58] Davis C J. Lightning-induced intensification of the ionospheric sporadic E layer. *Nature*, 2005, 435: 799-801.
- [59] Kumar V V. Thunderstorm-associated responses in the vertical motion of the mid-latitude F-region ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2009, 71: 787-793.

The Effect Research on Ionosphere in Response to Lightning Discharge During Thunderstorm

Zhang Yijun Zhang Yang

(*Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

Large current, strong electrostatic field and radiation field generated by lightning discharges during thunderstorm activity not only cause severe natural disaster, such as oil depot explosion, forest fire and personnel casualties on the earth surface, but also exert great effects on ionosphere which leads to the perturbation of electron intensity distribution. Lightning discharge affects ionosphere in two patterns: Direct coupling and indirect coupling. The direct coupling, which shows fast very low frequency (VLF) events in VLF reflected signal, is caused by the action of quasi-electrostatic field and electro-magnetic field generated by lightning, while the indirect coupling, which exhibits lightning induced electron precipitation (LEP) in the radiation belt, is caused by the interaction between the low frequency (LF) electromagnetic wave generated by lightning and the magnetosphere during the propagation. The amplitude of LEP is related with the current of return stroke and flash rate. The lightning discharge in thunderstorm can change the distribution of electron density from D layer to F layer, and can affect the electric field between the ionosphere and troposphere. As a result, some transient glowing, such as elves and sprite can be caused. The research of transient glowing in the middle and upper atmosphere is a hot topic. The VLF reflected signal during the electro-magnetic signal propagation of lightning discharge can be used to measure the change of ionosphere density, which is a common method to detect ionosphere disturbance. The strength of ionosphere disturbance is related with lightning discharge parameters and lightning discharge types. Many results show that positive cloud-to-ground flashes, negative cloud-to-ground with large return stroke current and discharges with large transferred charge often lead to obvious ionosphere change. Nowadays, the effect research on ionosphere in response to lightning discharge often focuses on the ionosphere bottom (often called D layer), but the observation and mechanism research of the effect on ionosphere E and F layers are still limited. As for ionosphere D, the analysis is mainly based on single point observation and simulation research, and the large scale 3-D imaging of ionosphere disturbance caused by lightning discharge needs further investigation. Effect researches on ionosphere in response to lightning discharge during thunderstorm in recent years are investigated, and the direct coupling and indirect coupling between the lightning discharge and ionosphere are introduced in detail, as well as the related phenomenon caused by the interaction between lightning discharge and ionosphere.

Key words: thunderstorm; lightning discharge; ionosphere; effects