

云地闪电通道的径向结构及光辐射特征

刘国荣 代炎炎 朱维君 褚润通 袁萍 孙对兄 马云云

Radial structure and optical radiation characteristics of the cloud-ground lightning channel

LIU Guo-rong, DAI Yan-yan, ZHU Wei-jun, CHU Run-tong, YUAN Ping, SUN Dui-xiong, MA Yun-yun

引用本文:

刘国荣, 代炎炎, 朱维君, 褚润通, 袁萍, 孙对兄, 马云云. 云地闪电通道的径向结构及光辐射特征[J]. *中国光学*, 优先发表.

doi: 10.37188/CO.2024-0017

LIU Guo-rong, DAI Yan-yan, ZHU Wei-jun, CHU Run-tong, YUAN Ping, SUN Dui-xiong, MA Yun-yun. Radial structure and optical radiation characteristics of the cloud-ground lightning channel[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2024-0017

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

闪电等离子体连续光谱轮廓形成机理研究

Formation mechanism of the continuous spectral profile of lightning plasma

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1243 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0018>

纳流通道-谐振腔耦合结构测量荧光物质微位移

Nanofluidic channel-resonant cavity structure for measuring micro-displacement of fluorescent substances

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 145 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0076>

基于多尺度特征与通道特征融合的脑肿瘤良恶性分类模型

Classification model based on fusion of multi-scale feature and channel feature for benign and malignant brain tumors

中国光学 (中英文). 2022, 15(6): 1339 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0067>

面向空间激光干涉的多通道相位测量系统

Multi-channel phase measurement system for the space laser interferometry

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1089 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0258>

超光谱分辨率紫外双通道共光路成像光谱仪设计

Hyperspectral resolution ultraviolet dual channel common optical path imaging spectrometer

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 1029 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0125>

面向高通量的多通道复用数字全息成像技术

Multi-channel multiplexing digital holographic imaging for high throughput

中国光学 (中英文). 2022, 15(6): 1182 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0070>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-08

云地闪电通道的径向结构及光辐射特征

刘国荣^{1*}, 代炎炎¹, 朱维君¹, 褚润通¹, 袁萍², 孙对兄², 马云云³

(1. 兰州理工大学物理系, 甘肃兰州 730050;

2. 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃兰州 730070;

3. 兰州城市学院电子与信息工程学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 研究云地闪电通道的径向结构及光辐射特征, 可为揭示云地闪电通道形成和发展过程的微观物理机制提供参考依据, 为闪电防护提供科学指导。研究小组利用无狭缝高速摄谱仪, 在青海高原地区实施野外观测试验。在一次云地闪电中记录到了清晰可见的通道核心, 而且在通道核心的外边缘和外部发光通道之间发现有一个较弱的发光区。基于光谱观测, 对比分析了首次回击和第三次继后回击的光辐射特征。在实验上验证了闪电通道电晕鞘模型, 确定了连接点的位置, 估算得到两个回击的闪击距离分别为 57 m 和 53 m, 并证实了回击放电最强的点在连接点处。从而推断, 在回击初期, 云地闪电回击通道沿径向由内到外依次为通道核心-弱发光区-电晕鞘外层, 即闪电通道内沿通道径向的电荷分布是不均匀的; 闪电通道的光辐射特征与放电的强度和持续时间密切相关。

关键词: 闪电通道; 径向结构; 通道核心; 弱发光区; 电荷分布

中图分类号: O433.1; P416.2

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2024-0017

Radial structure and optical radiation characteristics of the cloud-ground lightning channel

LIU Guo-rong^{1*}, DAI Yan-yan¹, ZHU Wei-jun¹, CHU Run-tong¹, YUAN Ping²,

SUN Dui-xiong², MA Yun-yun³

(1. Department of Physics, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou,

Gansu 730070, China;

3. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

* Corresponding author, E-mail: liugr07@163.com

Abstract: The study of the radial structure and optical radiation characteristics of the cloud-ground lightning channel can provide a reference for the revealing the microphysical mechanism of the formation and development of the cloud-ground lightning channel, and provide scientific guidance for the lightning protection. The research team carried out field observation experiments in the Qinghai Plateau region using a slit-less high-speed spectrograph. The clearly visible channel core was recorded in a cloud-ground lightning, and a weak

收稿日期: 2024-01-17; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62065011)

Supported by National Natural Science Foundations of China (No. 62065011)

luminescent region was found between the outer edge of the channel core and the external luminescent channel. Based on the spectral observation, the optical radiation characteristics of the first return stroke and the third subsequent return stroke are compared and analyzed. The corona sheath model of the lightning channel is verified experimentally, the location of the connection point is determined, and the estimated striking distance of the two return strokes is 57 m and 53 m respectively, and the strongest point of the return discharge is confirmed at the connection point. It can be inferred that in the initial stage of the return stroke, the cloud ground lightning return stroke channel consists of the channel core, the weak luminescence region and the outer corona sheath from the inside to the outside, that is, the charge distribution along the radial direction of the lightning channel is uneven. The light emission characteristics of lightning channel are closely related to the intensity and duration of discharge.

Key words: lightning channel; radial structure; channel core; weak luminescent region; charge distribution

1 引言

随着现代科技的飞速发展,闪电防护工作显得尤为重要。研究云地闪电通道的径向结构及光辐射特征对揭示云地闪电通道形成和发展过程的物理机制,从而做到精准防雷具有重要科学意义。

一次闪电放电过程主要包括起始击穿、先导和回击等过程。Pierce^[1]根据对闪电放电发展过程的研究提出先导和回击通道都是由通道核心和其外围的电晕鞘组成,并把放电过程分成两部分:一是先导头部和先导核心上电荷的放电;二是储存在先导核心周围电荷的放电(电晕放电)。即认为回击通道中的电流是由通道核心中的击穿电流和电晕鞘中的电晕电流两部分组成。Cvetić 等人在闪电电晕鞘模型^[2]的基础上建立了电晕鞘放电模型^[3],该模型认为先导储存在窄而长的导电通道核心上的电荷产生一个超过空气击穿电场的径向电场,在电场力的推动下负电荷远离通道核心,直到径向电场小于击穿电场,最后导致先导通道由一个狭窄的通道核心和围绕在其周围的电晕鞘组成。这个击穿电场值的大小估计在 1~2 MV/m。通常认为电晕鞘的半径大约在 1~10 m,而高导电性的通道核心基本上携带所有的轴向电流。然而,这些理论工作一直没有在实验上得到证实。

便携式高速摄像机提供了广泛的帧速率,使人们能够更加详细地记录到闪电放电过程的发展变化情况。因闪电光谱能够反映放电通道内部的物理信息,高时间分辨光谱仪的使用使这方面的

研究工作取得了突飞猛进的发展^[4-8]。但是,有关云地闪电通道的径向结构及光辐射特征方面的报道却非常少见。

本工作中,我们在前面工作的基础上^[9],主要对比分析了首次回击和第三次继后回击的光辐射特征。然后,基于闪电电晕鞘放电模型,初步讨论了闪电通道的径向特征及其成因。最后,总结了目前基于光谱研究闪电通道径向结构所面临的挑战,并提出了未来的发展方向。研究结果可为揭示云地闪电回击通道形成和发展过程的微观物理机制提供参考依据,为雷电防护提供科学指导。

2 野外试验

在青海省大同县进行野外闪电观测试验,在观测点安装了三种仪器,以同时记录闪电放电产生的声、光和电场信号。本文分析的是发生在一座离观测点地面高度约 150 m 的山顶上的云地闪电,观测点海拔高度约 2550 m。用以高速摄像机 (Phantom M310) 为记录系统的无狭缝光谱仪记录了闪电光谱,高速相机的运行速度为每秒 8000 帧,图像分辨率为 1024×432,相应的曝光时间是 125 μ s,光谱响应范围为 400~900 nm。整个系统的光谱分辨率(波长分辨率)约为 4nm。根据闪电发出的光和声信号到达观测点的时间差,估算观测点到云地闪电通道的距离约为 1.44 km。在该闪电资料中记录到清晰可见的通道核心及其外围的电晕鞘,而且在通道核心的外边缘和外部发光通道之间发现有一个较弱的发光区。

3 结果与分析

3.1 首次回击通道核心及光辐射特征

首次回击梯级先导通道的最后一幅图片和首次回击通道的连续两幅图片如图 1 所示。为方便起见, 将首次回击发起的时间定义为 0 ms。从梯级先导通道的最后一幅图片可以看到, 先导头部的亮度明显较强, 而且从头到尾呈逐渐减弱的趋势。在首次回击的主通道的中心有一个亮而细的通道核心被记录到, 如图 1b 所示。闪电研究者们普遍认为闪电通道是由一个被称为电晕鞘的带电区域及其所包围的热核心组成^[1-3], 从而可以推断图 1b 所示的亮而细的通道就是闪电通道核心, 外围发光区域就是电晕鞘。从图 1a 和图 1b 可以看出, 先导的主通道和回击的通道核心不仅外形完全相同, 而且它们的底端也处于相同的位置。这说明首次回击与阶梯先导共享一个通道核心, 而且它们的底端是向下移动先导和向上连接先导完成最后连接的位置(即连接点)。从图 1a 中没有观测到外围发光区域是因为先导阶段电晕放电较弱的缘故。因通道核心处产生的大量热量快速沿通道径向传输, 所以在图 1c 中通道核心已无法分

辨。此外, 通常把向下移动先导的头部和地面结构之间击穿时的距离定义为闪击距离, 据此估算得到首次回击的闪击距离大约是 57 m。因高速摄像机在垂直方向的拍摄范围所限, 所以该图片没有记录到闪电通道上部与云连接的位置。

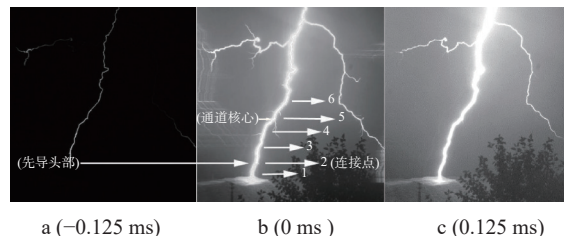


图 1 梯级先导通道的最后一幅图片和首次回击通道的连续两幅图片

Fig. 1 Last image of the stepped leader channel and the two successive images of the first return stroke channel

从图 1b 可以看到通道核心有一个明显的边界, 而且在它的外边缘和外部发光通道之间有一个较弱的发光区, 随着通道高度的增加弱发光区变得越来越明显。为了定量比较, 在不同通道高度处选择了如图 1b 所示的 6 个样品点, 沿着通道径向向灰度值的变化情况如图 2 所示, 样品点 2 是连接点的位置。

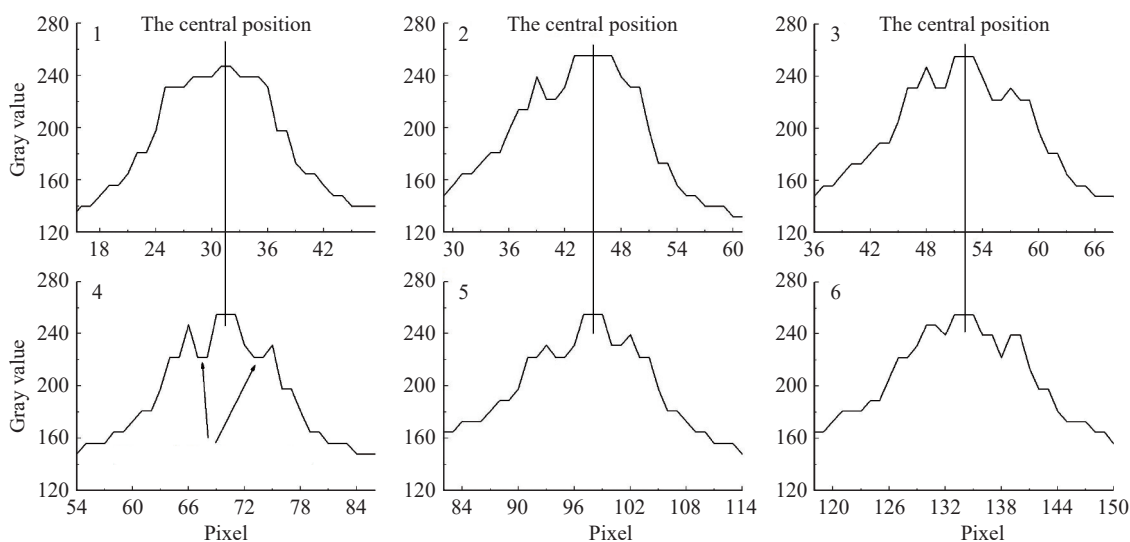


图 2 不同样品点沿通道径向的灰度值分布

Fig. 2 Gray value distribution of the different sample points along the radial channel

如图 2 所示, 在连接点以上, 沿通道径向的灰度值分布在通道中心位置有一个明显的峰值, 而且有一个较弱的发光区围绕在通道核心的外边

缘。在连接点以下, 灰度值峰值略小于其他样品点, 且其周围没有出现较弱的发光区。在通道中心位置处灰度值曲线呈平坦状是因为高速摄像机

记录图片的传感器达到饱和状态所致。

为比较同一回击不同时刻闪电通道的光辐射特征,图3所示的是首次回击相应图1中不同时刻的0级和1级光谱图。在 -0.125 ms 时,仅在近地段观测到近红外区的几条较弱的原子谱线,且几乎没有背景光。在 0 ms 时,可见区和红外区的离子谱线和原子谱线都非常强,整个图片的背景光也非常强,还能够清楚地看到通道接地点处被“烧”得特别亮。到 0.125 ms 时,虽然通道的亮度明显增强,背景光也再度增强,但离子谱线已大幅度减弱,原子谱线反而增强。同时还可以看到随着通道高度的增加,通道的可视直径也明显增大,通道接地点处被“烧”亮的区域已明显减小。

为了定量分析谱线强度,选择图1b中的4个(1、2、3和4)样品点为研究对象,然后把图3中的图e和图f上这些点的光谱图片转化成用谱线相对强度分布表示的谱线图。谱线图以波长为横坐标,以谱线相对强度为纵坐标。4个样品点分别在 0 和 0.125 ms 时、波长范围在 $400\sim 900\text{ nm}$ 的谱线图如图4所示。

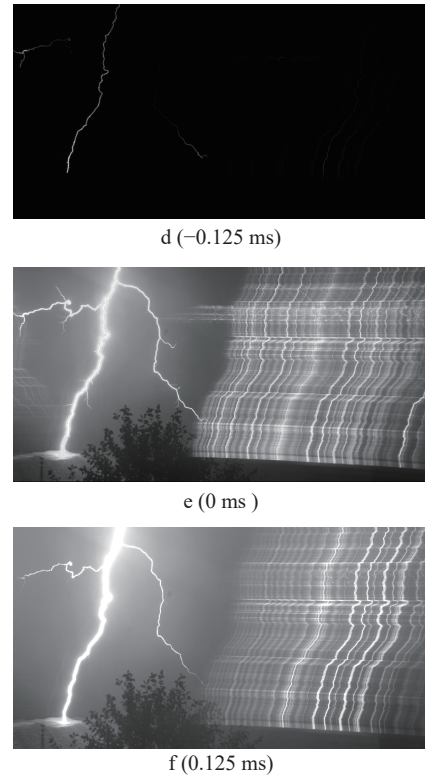


图3 首次回击不同时刻的原始光谱图
Fig. 3 Original spectrogram of the first return stroke at different times

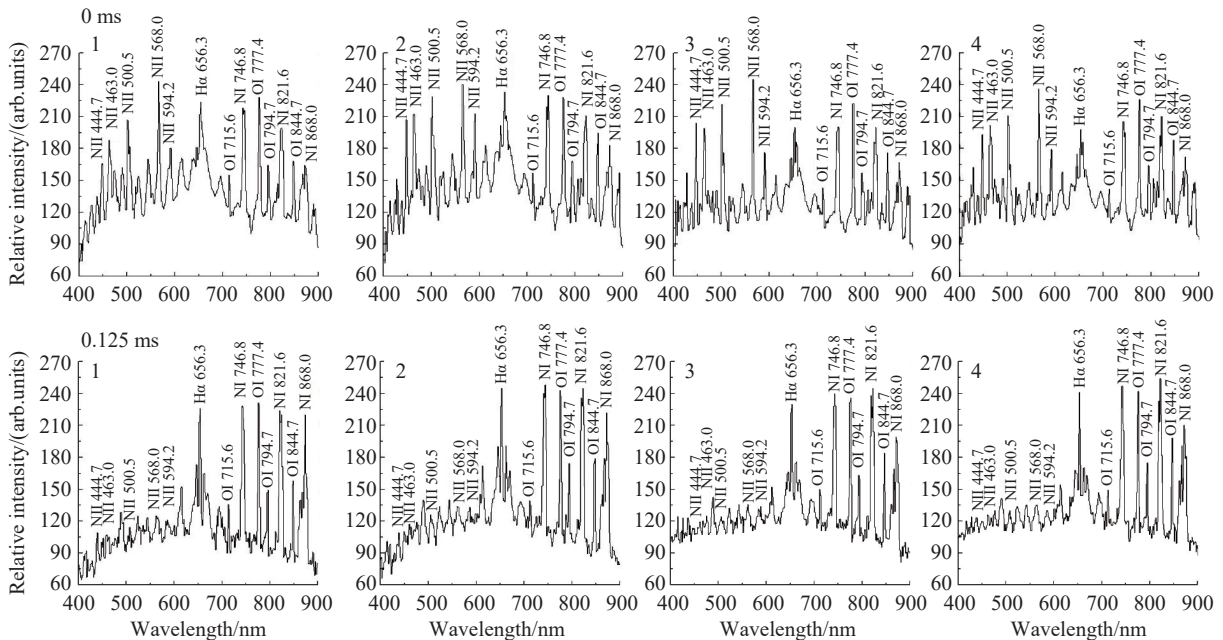


图4 首次回击通道上4个样品点分别在 0 和 0.125 ms 的谱线图

Fig. 4 Spectra of 4 sample points on the first return stroke channel at 0 and 0.125 ms , respectively

从图4可以看到,在 0 ms 时可见区的谱线主要是单电离的氮离子谱线(NII),近红外区的谱线主要是氧原子(OI)谱线和氮原子(NI)谱线,而且离子谱线和原子谱线都非常强。到 0.125 ms 时,

离子谱线已经非常弱了,但是原子谱线反而增强。正如图1b所示,在 0 ms 时,通道核心清晰可见,而到 0.125 ms 时就已经观测不到了。表1列出了在首次回击中已确认的谱线及其波长、相应

的激发能和跃迁几率, 这些参数都来自 NIST(National Institute of Standards and Technology) 数据库。可以看出, 氮离子线(NII) 的激发能在 20.665~23.239 eV 范围内, 氮(NI)、氧(O I) 和氢(H_{α}) 中性原子线的激发能在 10.740~14.460 eV 范围内。结合谱线图分析可知, 激发能较低的谱线相对强度较强, 激发能接近的谱线中跃迁几率较大的谱线相对强度较强。中性原子线的激发能(大多在 10 eV 左右)明显小于离子线的激发能(都在 20 eV 以上)。根据通道的光学特性和光谱特征综合分析可知, 具有较高激发能的离子谱线主要来自于通道核心的辐射, 具有较低激发能的原子谱线主要来自于外围通道(电晕鞘)的辐射。

表 1 观测的谱线波长、激发能和跃迁几率

Tab.1 Observed spectral line wavelength, excitation energy and transition probability

波长 (nm)	激发能 (eV)	跃迁几率 ($\times 10^8 s^{-1}$)
NII 444.7	23.196	1.12
NII 463.0	21.159	0.748
NII 500.5	23.141	1.14
NII 568.0	20.665	0.496
NII 594.2	23.239	0.547
H_{α} 656.3	12.087	0.441
O I 715.6	14.460	0.505
NI 746.8	11.995	0.196
O I 777.4	10.740	0.369
O I 794.7	14.100	0.373
NI 821.6	11.844	0.226
O I 844.6	10.988	0.322
NI 868.0	11.763	0.253

3.2 继后回击通道核心及光辐射特征

通道核心在该闪电发生于 87.138 ms 的第三次继后回击通道中也被记录到, 但是没有首次回击的通道核心那么清楚, 尤其是在通道的上半部分, 这可能是因为继后回击放电较弱。为了比较两个不同回击的通道核心, 图 5 将相关图片放在一起。从图 5 可以看到, 第三次继后回击的连接点比首次回击的连接点稍微低一些, 估算的闪击距离大约是 53 m, 比首次回击的闪击距离稍小。同时, 从图中也明显看到第三次继后回击通道的可视直径比首次回击的小。另外, 首次回击之前的梯级先导靠近头部的位置发光较强, 尾部发光

较弱, 而继后回击之前的直窜先导的情况正好相反。从整体上看直窜先导的发光强度比梯级先导强, 这可能是因为直窜先导是在热通道中向下发展的缘故。

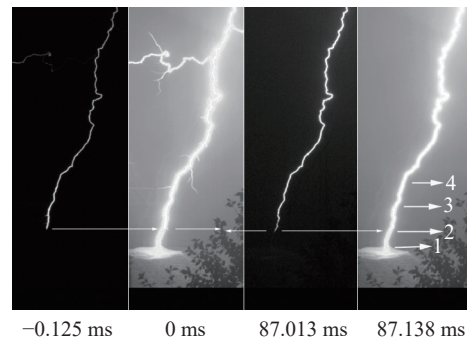


图 5 首次回击和第三次继后回击的通道图片

Fig. 5 Channel images of the first return stroke and the third subsequent return stroke

为比较同一回击不同时刻闪电通道的光辐射特征, 图 6 所示的是第三次继后回击不同时刻的 0 级和 1 级光谱图。在 87.013 ms 时, 除了在近红外区能够观测到原子谱线, 在可见区也可以观测到较弱的离子谱线, 而且能够清楚的区分 H_{α} 谱线。从上到下, 各条谱线的强度都有所减弱, 这与前面分析的直窜先导的发光特征是一致的。在 87.138 ms 时, 在可见区的离子谱线明显比红外区的原子谱线弱, 整个图片的背景光也较强。到了 87.263 ms 时, 虽然整个通道的亮度没有明显变化, 但通道的可视直径已明显减小, 背景光也弱了许多。离子谱线已大幅度减弱, 原子谱线则没有离子谱线衰减的幅度大。

为了定量研究, 在第三次继后回击不同通道高度处选择了如图 5 所示的 4 个 (1、2、3 和 4) 样品点, 然后把图 6 中的图 h 和图 i 上这些点的光谱图片转化成用谱线相对强度分布表示的谱线图 (如图 7 所示)。4 个样品点分别在 87.138 和 87.263 ms 时、波长范围在 400~900nm 的谱线图如图 7 所示。

从图 7 可以看到, 在 87.138 ms 时可见区的谱线也主要是单电离的氮离子线(NII), 近红外区的谱线主要是氧原子(O I) 谱线和氮原子(NI) 谱线, 而且离子谱线明显比原子谱线弱。到 87.263 ms 时, 离子谱线已经非常弱, 但原子谱线仍然较强。这也可以进一步证实具有较高激发能的离子谱线主要来自于通道核心的辐射, 具有较低激发能的

原子谱线主要来自于外围通道(电晕鞘)的辐射。

依据光谱信息,在 87.138 ms 时 4 个样品点的离子线总强度分别是 1669、1736、1370 和 1328,它们都比首次回击相应样品点弱。基于闪电光谱中的离子线总强度和峰值电流正相关的关系^[10],可知第三次继后回击的放电强度比首次回击的弱,这与回击峰值电流与闪击距离成正相关的关系一致。另外,可以看到第三次继后回击的离子线总强度也是在连接点最强。

对比分析发现,首次回击和第三次继后回击通道核心的光辐射特征主要存在以下三点不同:一、首次回击之前的梯级先导靠近头部的位置发光较强,尾部发光较弱,而继后回击之前的直窜先导的情况正好相反;从整体上看直窜先导的发光强度比梯级先导强。二、第三次继后回击通道核心的外边缘和外部发光通道之间可见的弱发光区域范围比首次回击小。三、两次回击的通道核心的下端离地面的距离(即闪击距离)不同。总体上看,闪电通道的光辐射特征与放电强度和放电持续时间密切相关。

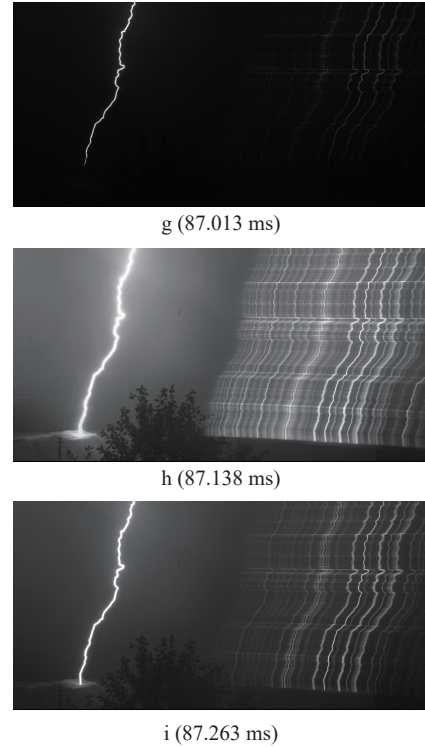


图 6 第三次继后不同时刻的原始光谱图

Fig. 6 Original spectrogram of the third subsequent return stroke at different times

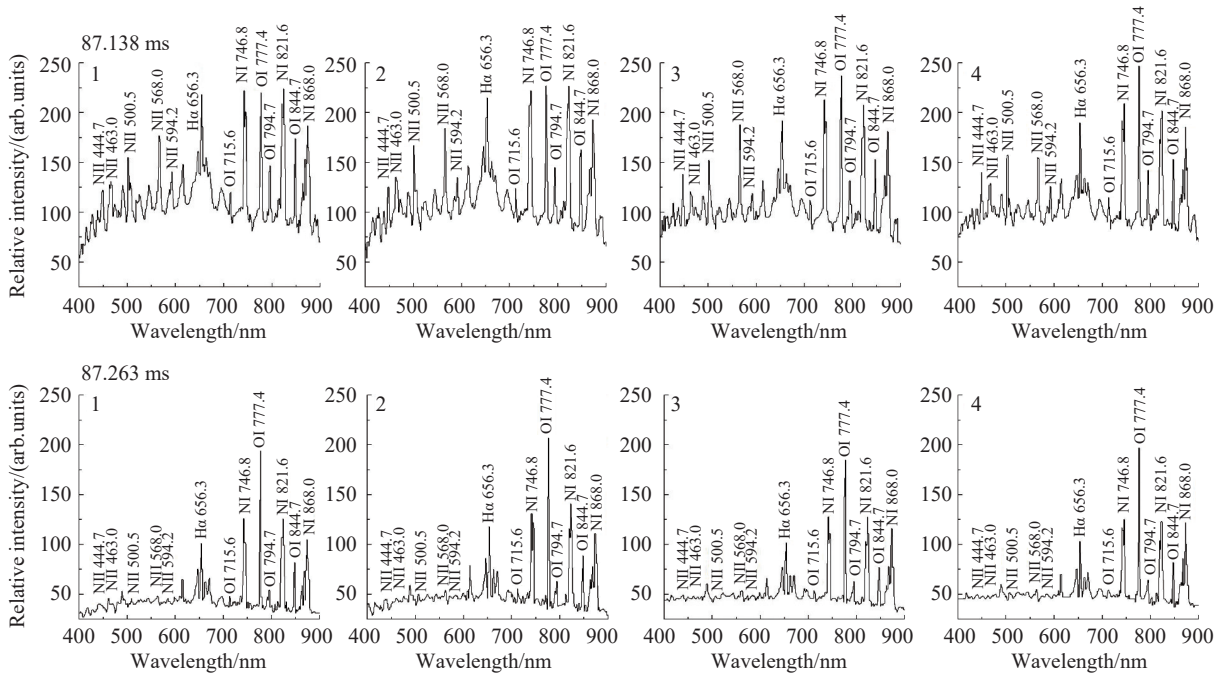


图 7 第三次继后回击 4 个样品点分别在 87.138 ms 的谱线图

Fig. 7 Spectra of 4 sample points of the third subsequent return stroke at 87.138 ms

4 讨论

根据闪电电晕鞘模型^[2-3],先导储存在狭窄通

道核心上的电荷产生一个超过空气击穿电场的径向电场,该电场推动电荷远离通道核心,最后导致先导通道由一个狭窄的通道核心和围绕在其周围的电晕鞘组成。当回击发起时,回击携带的电荷

与先导通道内储存的电荷异号, 所以放电很强, 这就是在图 1b 图中能清楚看到的非常亮的窄通道, 即通道核心。在连接点以下, 没有观测到亮而细的通道, 沿通道径向的灰度值分布在通道中心位置没有出现明显的峰值, 且中心附近也没有出现较弱的发光区。这可能是因为连接点以下的通道是由向上连接先导创建的, 电流在整个通道截面上传输所致。

由于受到储存在通道核心的电荷的排斥力的作用, 电晕鞘中的电荷被推到其的外边缘, 所以在靠近通道核心外缘区域的电荷较少, 这样放电就稍弱, 于是就在通道核心外边缘与外围发光通道之间出现了如图 1b 中的弱发光区。这个现象随着通道高度的增加越来越明显, 主要原因可能与先导通道的电荷分布有关。第三次继后回击通道核心的外边缘和外部发光通道之间可见的弱发光区范围比首次回击小。这可能是因为直窜先导传输速度比梯级先导的大, 向下传输的过程中在先导通道中储存的电荷较少, 从而产生的排斥力较小所致。从而可以推断, 在回击初期, 闪电回击通道沿径向由内到外大致可分为三个区域, 依次为通道核心-弱发光区-电晕鞘外层, 通道核心处电荷密度最大, 弱发光区电荷密度最小, 即闪电通道内沿通道径向的电荷分布是不均匀的。到回击后期, 整个通道内电荷急剧减少并分布趋于均匀, 此时的光辐射以中性原子辐射占主导。在 0.125 ms 时, 随着通道高度的增加, 通道的可视直径明显增大也应该是电晕鞘随时间在向外扩展造成的。

Saba 等人^[1]认为当向上连接先导与向下先导逐渐接近时, 它们头部的平均势梯度不断增加, 达到足够强时它们将完成最后的连接。连接时,

它们各自的头部携带大量电荷, 并产生最强的放电, 这与在连接点上离子线总强度最强的结论是一致的。两次回击的通道核心的下端离地面的距离(即闪击距离)不同, 是因为不同回击的放电强度不同。通道核心下端离地面的距离越大, 闪击距离越大, 放电越强。

5 结 论

在本工作中, 从记录到的清晰可见的云地闪电的通道核心以及通道核心外边缘与外围发光通道之间有一个弱发光区可以推断, 在回击初期, 闪电回击通道沿径向由内到外大致可分为三个区域, 依次为通道核心-弱发光区-电晕鞘外层, 即闪电通道内沿通道径向的电荷分布是不均匀的。通过比较梯级(直窜)先导通道的最后一张图片 and 回击通道的第一张图片, 连接点的位置被确定, 估算得到两个回击的闪击距离分别是 57 m 和 53 m, 并基于闪电光谱中的离子线总强度和峰值电流正相关的关系证实了回击放电最强的点在连接点处。同时, 通过对通道 0 级和 1 级光谱的比较分析, 进一步证实了具有高激发能的离子线主要是通道核心辐射的贡献。最后, 基于闪电电晕鞘放电模型, 讨论了通道核心和弱发光区域形成的原因, 解释了连接点以下没有出现通道核心的可能性以及连接点处放电最强的关键因素。然而, 由于目前获取光谱的时间分辨率较低, 闪电通道在微秒量级的径向结构、光辐射特征及其它们的演化过程等问题仍不是十分清晰。随着高速摄谱仪拍摄速度的大幅提升, 在闪电通道发展过程中一定会呈现许多更丰富的内容。

参考文献:

- [1] PIERCE E T. The development of lightning discharges[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1955, 81(348): 229-240.
- [2] MASLOWSKI G, RAKOV V A. A study of the lightning channel corona sheath[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D14): D14110.
- [3] CVETIC J, HEIDLER F, MARKOVIC S, et al.. Dynamics of a lightning corona sheath-A constant field approach using the generalized traveling current source return stroke model[J]. *Atmospheric Research*, 2012, 117: 122-131.
- [4] DENG H, YUAN P, AN T T, et al.. Time-evolution characteristics of spectrum and temperature of lightning discharge plasma[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(12): 3320-3328.
- [5] 刘国荣, 朱维君, 褚润通, 等. 依据不同波段光谱诊断闪电回击通道温度[J]. *物理学报*, 2022, 71(10): 109201.
LIU G R, ZHU W J, CHU R T, et al.. Diagnosis of lightning return stroke channel temperature according to different band spectra[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(10): 109201. (in Chinese).

-
- [6] WANG W SH, YUAN P, AN T T, *et al.*. The propagation characteristics of the return-stroke electric wave in consideration of corona sheath[J]. *Atmospheric Research*, 2023, 292: 106849.
- [7] AN T T, YUAN P, CEN J Y, *et al.*. Temperature of apparent natural ball lightning obtained by examination of the spectra[J]. *Physics of Plasmas*, 2022, 29(11): 113503.
- [8] WANG W SH, YUAN P, HUANG X, *et al.*. The initial radius of lightning return stroke channel and its relation with discharge intensity[J]. *Atmospheric Research*, 2022, 273: 106161.
- [9] LIU G R, YUAN P, AN T T, *et al.*. A visible channel core and the channel structure below the connection point for natural cloud-to-ground lightning[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(6): 064103.
- [10] WANG X J, YUAN P, CEN J Y, *et al.*. Correlation between the spectral features and electric field changes of multiple return strokes in negative cloud-to-ground lightning[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(9): 4993-5002.
- [11] SABA M M F, PAIVA A R, SCHUMANN C, *et al.*. Lightning attachment process to common buildings[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(9): 4368-4375.

作者简介:

刘国荣(1972—),男,博士,副教授,主要从事等离子体光谱及应用、雷电物理和雷电防护等相关研究。E-mail: liugr07@163.com