

## 闪电连续电流的光谱分析及通道温度特性研究

王雪娟<sup>1,2</sup>, 许伟群<sup>1,2</sup>, 化乐彦<sup>1</sup>, 王海通<sup>1</sup>, 吕伟涛<sup>2</sup>, 杨静<sup>3</sup>, 袁萍<sup>4</sup>, 张其林<sup>1</sup>, 张袁瞰<sup>1</sup>

1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081
3. 中国科学院中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029
4. 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃省原子分子物理与功能材料重点实验室, 甘肃 兰州 730070

**摘要** 连续电流是闪电放电过程中的一个重要子物理过程, 它是指雷暴云局部电荷中心在回击之后沿原通道对地的持续放电过程。在连续电流阶段, 原本发光微弱的通道其亮度有时会突然增强, 这种现象被称为叠加了M分量, 自20世纪连续电流被发现以来, 国内外学者进行了许多观测研究。目前主要是利用电磁学和光学的观测手段揭示其放电和发光的宏观特征, 利用光谱观测对其通道内部微观的发光信息和物理特性等的研究还很缺乏。如关于连续电流阶段放电通道内的温度特性参数目前鲜有报道, 而温度是研究闪电连续电流放电通道物理特性所必需的基本参量, 也是预防连续电流引起的雷电灾害事故所关心的参数。依据由无狭缝高速光谱仪观测的一次云对地闪电首次回击后叠加三个M分量的连续电流过程的光谱资料, 分析了整个放电过程中光谱的演化特征, 计算了连续电流放电过程电流核心通道和外围电晕通道的温度, 研究了两者随通道高度的变化特性。结果表明, 在初始回击阶段, 通道的光辐射主要是激发能较高的一次电离的氮离子辐射, 在之后连续电流阶段, 通道的光辐射则主要是激发能较低的中性氮、氧原子辐射。离子线辐射在回击初期时最强, 氢H $\alpha$ 线和红外波段的中性原子线在M1时最强, 连续谱在M2时最强。近红外波段的四条线O I 777.4, N I 746.8, 821.6和868.3 nm在整个放电过程都可以被观测到。在连续电流阶段, 电流核心通道温度为42 060~43 940 K, 比相应回击核心通道温度高6 020~7 900 K; 外围电晕通道温度为16 170~20 500 K; 通道核心温度和电晕温度均随时间变化不大; 通道核心温度随通道上升呈减小趋势, 而外围电晕温度随通道上升呈增大趋势。

**关键词** 闪电连续电流; 光谱; 电流核心通道; 电晕通道; 温度

**中图分类号:** O536 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2069-07

### 引言

由于自然闪电发生的时空随机性和瞬时性, 光谱分析成为研究闪电放电通道内部微观物理特性的有效途径。随着摄像技术的发展, 尤其是高速摄像机的发展, 近年来闪电光谱观测取得了很大进展, 不仅限于对回击过程的光谱研究, 也扩展到了对闪电其他放电过程的光谱研究, 如先导、连续电流和M分量。Warner等<sup>[1]</sup>2011年报道了利用高速无狭缝摄谱仪观测的闪电先导过程的光谱图片。高速摄谱仪是以高速

摄像机为记录系统, 由于其高感光灵敏度、记录时长和拍摄速率, 为连续电流和先导这些弱放电过程的光谱观测提供了技术保障。Xue等<sup>[2]</sup>2015年报道了利用高速无狭缝摄谱仪首次观测到一次双极性自然闪电两次回击放电后发生的长连续电流过程的光谱, 定性分析了其光谱特征。王雪娟等<sup>[3]</sup>2016年报道了连续电流过程的光谱特征与电场特征之间的相关性。

通常, 存在连续电流过程的闪电被称为热闪电, 这类闪电产生的危害是平常没有连续电流闪电的好几倍, 所以研究闪电连续电流过程放电通道内部的微观物理特性参数至关重要。尤其研究放电通道的温度对预防连续电流引起的雷电灾

收稿日期: 2021-04-10, 修订日期: 2021-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(42005065), 江苏省自然科学基金项目(BK20180805), 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2020LASW-B14), 中国科学院中层大气和全球环境探测重点实验室(LAGEO)开放课题(LAGEO-2019-07), 南京信息工程大学人才启动基金项目(2017r065), 南京信息工程大学大学生创新创业训练计划项目(XJDC202110300018)资助

作者简介: 王雪娟, 1988年生, 南京信息工程大学大气物理学院讲师 e-mail: wxj@nuist.edu.cn; wangxuejuan6@163.com

害事故可提供重要的科学依据。Wang 等<sup>[4]</sup>利用一次闪电首次回击后连续电流过程叠加的三个 M 分量的光谱资料,与相应回击对比,研究了 M 分量放电通道的温度和电子密度特性。但迄今为止,关于整个连续放电过程中通道内部物理参数随时间演化特性的研究工作还非常少。本文利用由高速无狭缝摄谱仪观测得到的一次闪电连续电流过程的光谱资料,依据等离子体理论,计算了闪电连续电流放电过程中电流核心通道和周围电晕通道的温度,研究了它们在整个持续放电过程中随时间的演化特征,并分析了沿通道的变化。为探讨闪电连续电流过程的物理机制以及通道的电流传输特性都具有重要意义。

## 1 理论方法

将等离子体理论运用在闪电通道中,需建立以下两个基本假设:(1) 闪电辐射光谱中的一些主要谱线,如一次电离的氮离子线(N II)、中性氮、氧原子线(N I 和 O I),满足光学薄。这已被 Uman 和 Orville<sup>[5]</sup>研究证实。(2) 通道满足局部热力学平衡状态(LTE)。研究表明<sup>[6]</sup>,闪电回击通道内各离子和电子达到准静态平衡的时间在 0.01  $\mu$ s 的量级。因此,闪电通道可以近似利用 LTE 来描述。

基于以上基本假设,闪电单位立体角内辐射的谱线强度可表示为<sup>[7]</sup>

$$I = \frac{h\nu}{4\pi} N_0 \frac{g_i A_i}{g_0} e^{-E_i/kT} \quad (1)$$

式(1)中, $h$ ,  $k$ ,  $\nu$ ,  $N_0$  和  $g$  分别为普朗克常量、玻尔兹曼常数、谱线频率、基态粒子数和统计权重, $E_i$  是  $i$  激发态原子或者离子具有的能量, $A_i$  为电子从基态跃迁到激发态  $i$  的跃迁几率, $T$  为温度。

将式(1)可改写为

$$\frac{I\lambda}{g_i A_i} = \frac{hN_0 c}{4\pi g_0} e^{-E_i/kT} \quad (2)$$

两边取常用对数,进一步可得

$$\ln\left(\frac{I\lambda}{g_i A_i}\right) = \ln\left(\frac{hN_0 c}{4\pi g_0}\right) + \ln e^{-E_i/kT} \quad (3)$$

对于同种元素的多条离子或者原子谱线,可将  $\ln\left(\frac{hN_0 c}{4\pi g_0}\right)$  看作常数  $c_1$ ,所以由式(3)可得多谱线计算温度的表达式<sup>[4]</sup>

$$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right) = -\frac{E}{kT} + c_1 \quad (4)$$

因此,选取同一元素的多条离子或者原子谱线,依据谱线相对强度  $I$ 、波长  $\lambda$ 、统计权重  $g$ 、跃迁几率  $A$ 、激发能  $E$ ,以  $E$  和  $\ln(I\lambda/gA)$  为横、纵坐标轴拟合直线,便可由直线斜率得到温度。

## 2 资料分析及结果

由于闪电是一个窄而长的发光体,且观测距离远远大于放电通道的直径,因此在观测试验中,将闪电通道直接看作有效狭缝,保证摄谱仪有充足的进光量,这样便能够清楚记录到远处的闪电光谱。且所记录的谱线形状和原始放电通道的形状一致,因此可以根据谱线外形研究各物理量沿通道的变化特性。本资料是由无狭缝摄谱仪在青海大通拍摄到的一次云对地自然闪电首次回击后的连续电流过程,持续时间约为 60 ms<sup>[3]</sup>。高速摄谱仪的记录速度为 6 500 帧  $\cdot$  s<sup>-1</sup>,分辨率为 1 280  $\times$  400。所得光谱的波长范围为 400~1 000 nm,分辨率约为 1.1 nm。

在此连续电流的初期有三个较强的 M 分量,M 分量是指在连续电流阶段通道微弱发光时亮度突然增强的现象。图 1 给出了这次闪电首次回击和回击后连续电流初期 2.46 ms 内的原始通道变化图。图 1 中,R 表示回击,M1—M3 表示三个 M 分量。规定回击的起始时间为 0 ms,三个 M 分量的发生时间分别为 0.154, 0.770 和 1.386 ms,每两个相邻 M 分量的时间间隔都为 0.616 ms。回击 R 之前只拍摄到了两张先导图片。第一张先导图片对应的时刻是 -2.618 ms,第二张先导图片对应的时刻是 -2.464 ms。由闪电回击通道的分支方向向下,得出此闪电先导为下行先导。可以发现,在 -2.618 ms 时对应的先导通道长度明显大于在 -2.464 ms 时对应的先导通道长度,同时在 -2.618 ms 时的先导通道发光也更强。将 M1 和 M2 发生时的放电通道与回击 R 发生时的放电通道进行比较,可以看出,在 M1 和 M2 发生时,靠近地面的通道亮度和径向发光范围均小于靠近云端通道的亮度和径向发光范围。

图 2(a)给出了此闪电首次回击及连续电流过程对应通道某一高度的谱线图,波长范围为 400~1 000 nm。可以看出,在整个连续电流放电过程中,辐射光谱结构整体一致,

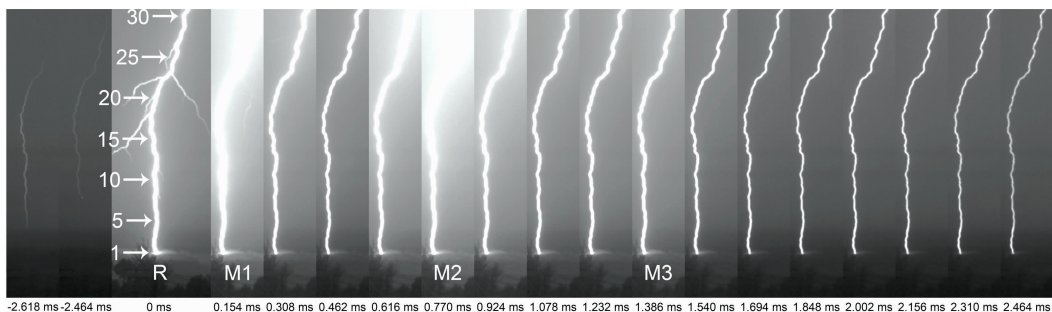


图 1 回击和连续电流过程的原始发光图片

Fig. 1 The original pictures of the return stroke and the continuing current process

谱线图的构成大体相同。激发能较高(20 eV 以上)的 N II 线是可见波段谱线的主要组成部分, 激发能较低(10 eV 左右)的 N I 和 O I 线是近红外波段谱线的主要组成部分。同时也可以看出, 在回击 0 ms 时, 光谱中可见波段的离子线强度较强, 红外波段的原子线强度相对较弱; 在之后的连续电流过程, 光谱中红外原子线强度大于可见波段的离子线强度, 且随时间强度缓慢减弱。上述分析说明: 在闪电回击之后的连续电流过程中, 通道发光主要由红外波段的原子辐射贡献。这对闪电的光学观测等研究有一定的指导作用。

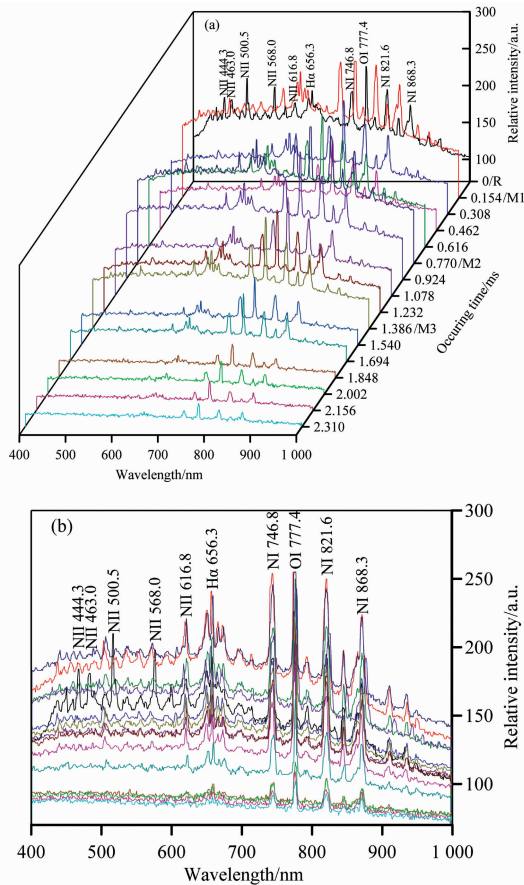


图 2 (a) 整个放电过程通道某一高度处的谱线图;  
(b) 图(a)的正面投影图

Fig. 2 (a) The spectra at a given height during the discharge process; (b) The front Projection of Fig. 2(a)

为了更清晰地分析整个放电过程中各发射谱线随时间的变化, 给出了对应图 2(a)的正面投影图 2(b)。从图 2 中可以看出, 可见波段激发能较高的 N II 线在回击 R 放电时最强, 在之后连续电流阶段, 随着云对地通道的持续放电, 离子线强度逐渐变弱, 直到 1.540 ms 后离子线基本消失(小于观测阈值)。相反, 连续谱、氢 H $\alpha$  线和红外波段的中性原子线 N I 或 O I 在回击时较弱, 回击后逐渐变强, 后期又逐渐变弱。氢 H $\alpha$  线和红外波段的中性原子线在 M1 时达到最强, 连续谱在 M2 时达到最强。但近红外波段的四条强线 O I 777.4, N I 746.8, 821.6 和 868.0 nm 在回击和连续电流的整个放电过程的光谱中都可以观测到。

闪电通道是由一个核心通道和其外围的电晕鞘组成<sup>[8]</sup>。电晕鞘也称作电晕通道。先导储存在窄而长的导电核心通道上的电荷会产生一个超过空气击穿场值的径向电场, 在此电场力的推动下电荷远离核心通道, 直到径向电场小于击穿场值, 最后导致闪电通道由一个窄的核心通道和围绕在其周围的电晕通道组成。Uman 和 Orville<sup>[5]</sup> 研究指出, 闪电辐射光谱中 N II 和 O II 离子线大部分是由通道核心辐射出。Orville<sup>[9]</sup> 报道了在闪电的发射光谱中包含 N II, O II, N I 和 O I 辐射的通道直径大于只包含 N II 和 O II 辐射的通道直径。Wang 等<sup>[3,10]</sup> 通过闪电光谱特征与电场的相关性分析, 也得出闪电光谱中离子线和中性原子线辐射来自其通道径向的不同区域, 具有较高激发能的离子谱线主要是通道核心的辐射, 具有较低激发能的原子谱线主要是外围通道(电晕鞘)的辐射。

因此, 依据等离子体理论, 根据式(4), 分别使用 N II 线和 O I 线计算了反映闪电首次回击及之后连续电流过程通道核心的温度和外围电晕鞘的温度。由于同一闪电在放电通道的不同位置, 其物理特性会有所差异。且为进一步分析温度沿通道的变化特征, 因此沿通道均匀选取了 30 个位置作为采样点, 如图 1 所示。表 1 给出了回击 R 和之后连续电流过程通道核心温度  $T_{core}$  和外围电晕温度  $T_{corona}$  在通道 30 个位置处的平均值。由于图 2(a)和图 2(b)中 1.540 ms 后辐射光谱中 N II 线基本消失(小于观测阈值), 因此表 1 中未给出 1.540 ms 后的核心通道温度。

表 1 回击 R 和之后连续电流过程通道核心温度  $T_{core}$  和外围电晕温度  $T_{corona}$  沿通道的平均值

Table 1 The average temperatures of the channel core  $T_{core}$  and the corona sheath  $T_{corona}$  along the channel for the return stroke R and subsequent continuing current process

Time/ms	$T_{core}/K$	$T_{corona}/K$
0(R)	36 040	19 410
0.154(M1)	43 940	20 050
0.308	42 470	17 220
0.462	43 370	16 170
0.616	42 060	17 740
0.770(M2)	42 560	18 370
0.924	42 480	16 940
1.078	42 650	17 470
1.232	42 610	17 180
1.386(M3)	43 350	17 210
1.540	42 110	16 450
1.694		16 780
1.848		17 360
2.002		17 370
2.156		18 870
2.31		20 500
2.464		18 520

由表 1 可以看出, 根据 N II 线得到的回击 R 放电通道核心温度在通道 30 个位置处的平均值为 36 980 K。Orville<sup>[11]</sup>

根据 N II 离子线计算的回击通道最高温度为 36 000 K。与表 1 中回击 R 的结果比较接近。表 1 中回击 R 之后，连续电流和 M 分量放电过程中通道核心的温度平均值为 42 060 ~ 43 940 K。由于回击 R 之后连续放电，通道持续加热，导致核心通道的温度升高，连续电流阶段核心通道的温度均高于回击 R，且达到 40 000 K 以上。Walker 和 Christian<sup>[12]</sup> 利用 N II 离子线计算的人工触发闪电回击通道的温度也达 40 000 K 以上。另外，表 1 中由 O I 线得到的回击 R 和之后连续电流过程外围电晕的温度平均值为 16 170 ~ 20 500 K。采用二谱线法<sup>[13]</sup>，Orville 和 Henderson<sup>[14]</sup> 利用中性 O I 线分析得到的回击通道温度在 13 000 ~ 17 000 K 之间。Weidman 等<sup>[15]</sup> 同样采用二谱线法，利用中性 N I 线得到的回击通道温度约为 16 000 K。以上文献报道的结果与表 1 中依据 O I 多谱线法计算得到的电晕温度的平均值较为一致。闪电放电通道的温度与其放电强度紧密联系，不同的闪电放电强度，其对应的通道温度也会有所不同。

图 3 给出了回击 R 和之后连续电流过程通道核心温度  $T_{core}$  和外围电晕温度  $T_{corona}$  在通道 30 个位置处的平均值随时间的演化。可以看出，回击 R 通道核心的温度低于回击之后连续电流阶段通道核心的温度。M1 放电引起通道核心温度明显增大。M1 之后，随着时间的增加，连续电流阶段通道核心的温度几乎保持不变。连续电流阶段外围电晕的温度随时间的变化也较小。除 M1 外，回击 R 外围电晕的温度稍高于之

后连续电流阶段外围电晕的温度。

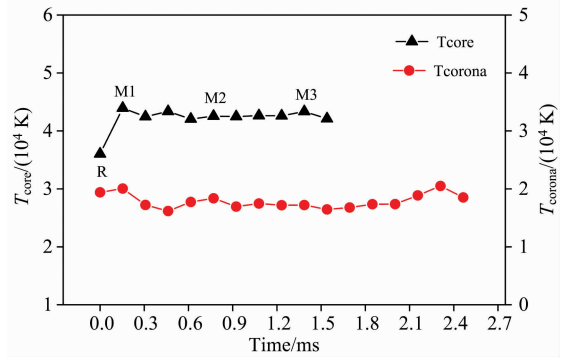


图 3 回击 R 和之后连续电流过程通道核心温度和外围电晕温度随时间的演化  
 Fig. 3 The evolutions with time of the temperatures of the channel core and the corona sheath for the return stroke R and the following continuing current process

图 4 给出了回击 R 和之后连续电流阶段通道核心温度  $T_{core}$  沿通道的变化趋势。由图 4 可见，回击 R 通道高度递增时，其通道核心的温度有上升的趋势。这与常规负极性下行闪电回击通道核心温度的变化规律有所不同。常规负极性下行闪电回击通道核心温度沿通道高度的增大而减小。由图 1 可见，回击 R 前的先导在 -2.618 ms 时，通道发展已接近地

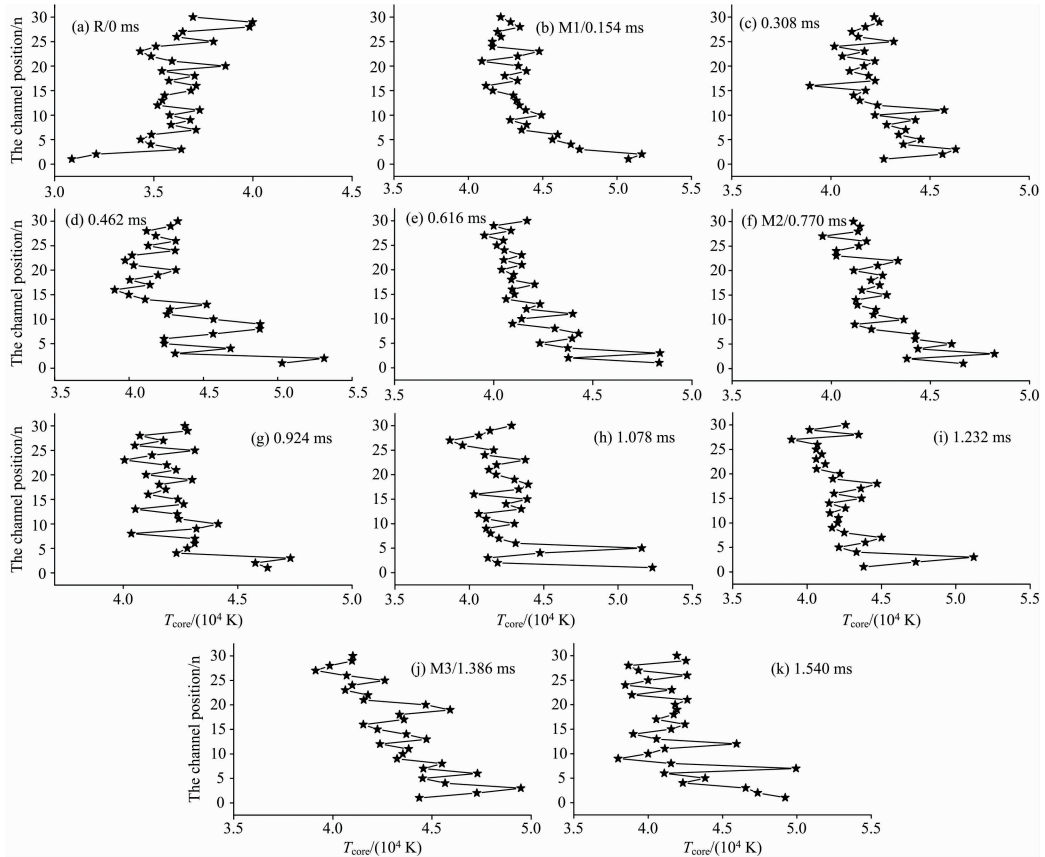


图 4 回击 R 和之后连续电流过程中通道核心温度沿通道高度的变化  
 Fig. 4 Variations of the  $T_{core}$  along the channel height for R and the continuing current process

面，而在 -2.464 ms 时，通道发展离地面较远，表明此时先导通道仅在上部被加热。这也许是引起回击 R 通道核心温度在底部较小的一个重要因素。相反，回击 R 之后，整个连续电流阶段(包括 M 分量)，随通道高度的递增，每一相应时刻通道核心的温度明显呈现下降的趋势。与常规负极性下行闪电回击通道核心的温度变化规律一致。

$T_{\text{corona}}$  随通道高度的变化趋势。明显看出，随通道高度的递增，回击 R 和之后连续电流阶段(包括 M 分量)的外围电晕温度均有上升的趋势。根据闪电通道的鞘层结构模型，电晕电流在先导向下发展时已经产生<sup>[8]</sup>。在整个闪电放电过程中，随着时间的发展，电晕鞘逐渐向外扩展，由于电晕电流的累积效应，使回击 R 与之后连续电流整个放电过程中电晕鞘温度在通道顶部均相对较高，这与图 5 所得的结果相同。

图 5 给出了回击 R 和之后连续电流阶段外围电晕温度

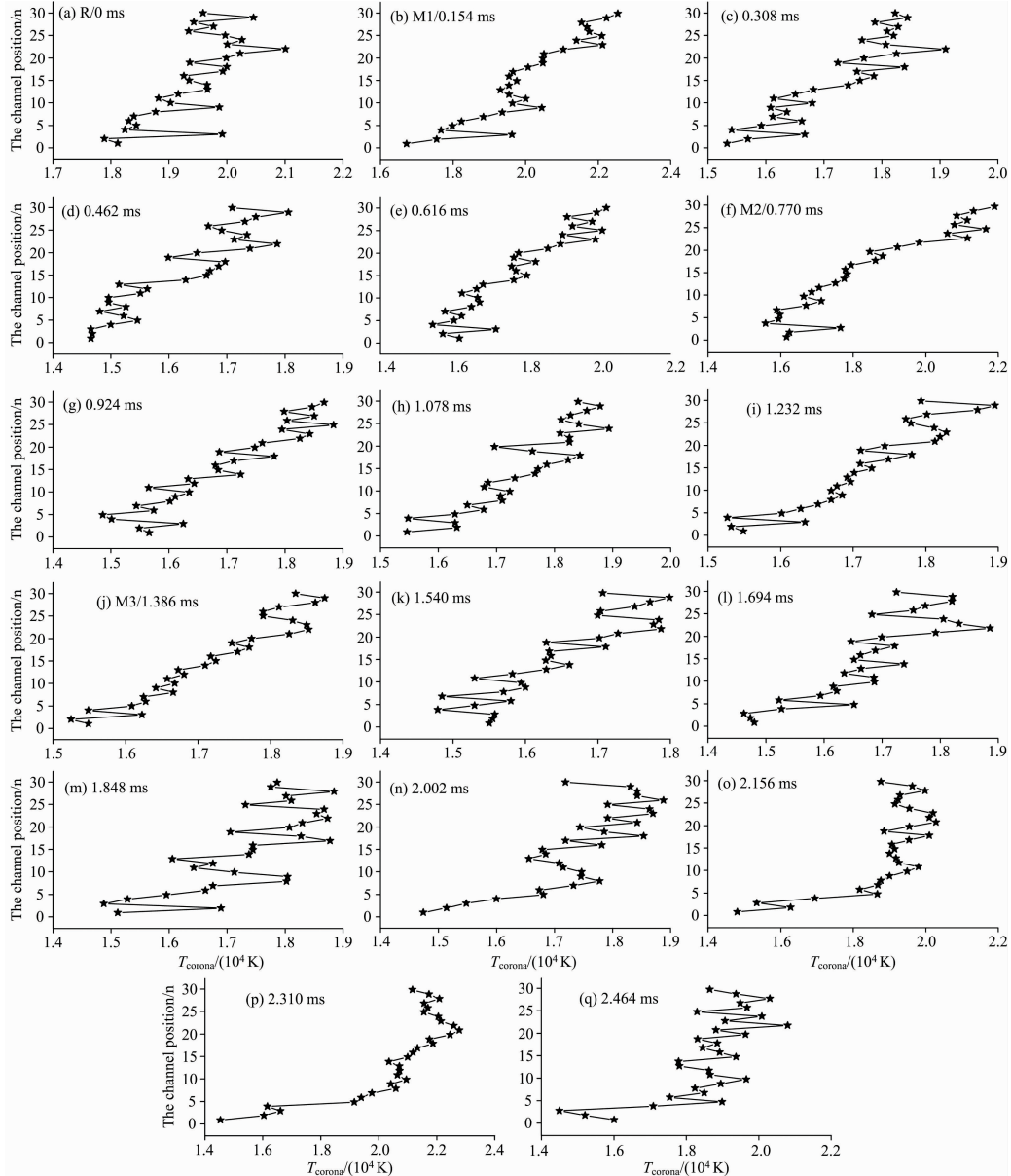


图 5 回击 R 和之后连续电流过程中外围电晕温度沿通道高度的变化

Fig. 5 Variations of the  $T_{\text{corona}}$  along the outer channel height for R and the continuing current process

### 3 结论

依据一次云地闪电首次回击后叠加三个 M 分量的连续电流过程的光谱分析发现，在回击放电阶段，通道的光辐射主要是激发能较高的 N II 辐射，在之后连续电流放电阶段，

通道的光辐射则主要为激发能较低的 NI 和 O I 辐射。并且计算得到此闪电连续电流阶段通道核心的温度为 42 060~43 940 K，高出相应回击通道核心温度 6 020~7 900 K。外围电晕温度为 16 170~20 500 K。随着时间的增加，回击之后连续电流阶段(包括 M 分量)通道核心温度几乎保持不变。在持续放电的几个毫秒内，通道均维持如此高的温度，长时

间高温产生的热效应是连续电流引发雷击灾害的主要根源。此外,连续电流阶段随着通道高度的递增,通道核心的温度

呈现明显下降的趋势,而外围电晕温度呈现明显上升的趋势。

## References

- [ 1 ] Warner T A, Orville R E, Marshall J L, et al. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116: D12210.
- [ 2 ] Xue S M, Yuan P, Cen J Y, et al. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2015, 120: 1972.
- [ 3 ] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, et al. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2016, 121: 8615.
- [ 4 ] WANG Xue-juan, XU Wei-qun, WANG Hai-tong, et al(王雪娟, 许伟群, 王海通, 等). *Acta Phys. Sin.* (物理学报), 2021, 70 (9): 099202.
- [ 5 ] Uman M A, Orville R E. *J. Geophys. Res.*, 1965, 70: 5491.
- [ 6 ] Uman M A. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74: 949.
- [ 7 ] QIU De-ren(邱德仁). *Atomic Spectral Analysis(原子光谱分析)*. Shanghai: Fudan University Press(上海: 复旦大学出版社), 2001. 37.
- [ 8 ] QIE Xiu-shu, ZHANG Qi-lin, YUAN Tie, et al(鄢秀书, 张其林, 袁铁, 等). *Thunder Physics(雷电物理学)*. Beijing: Science Press (北京: 科学出版社), 2013. 75.
- [ 9 ] Orville R E. *J. Geophys. Res.*, 1968, 73: 6999.
- [ 10 ] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, et al. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2017, 122: 4993.
- [ 11 ] Orville R E. *J. Atmos. Sci.*, 1968, 25(5): 839.
- [ 12 ] Walker T D, Christian H J. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2019, 124: 3930.
- [ 13 ] YAO Hong-bing, YANG Feng-xiao, YUAN Dong-qing, et al(姚红兵, 杨风潇, 袁冬青, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(12): 3851.
- [ 14 ] Orville R E, Henderson R W. *J. Atmos. Sci.*, 1984, 41: 3180.
- [ 15 ] Weidman C, Boye A, Crowell L. *J. Geophys. Res.* 1989, 94: 13249.

## Spectral Analysis and Study on the Channel Temperature of Lightning Continuing Current Process

WANG Xue-juan<sup>1,2</sup>, XU Wei-qun<sup>1,2</sup>, HUA Le-yan<sup>1</sup>, WANG Hai-tong<sup>1</sup>, LÜ Wei-tao<sup>2</sup>, YANG Jing<sup>3</sup>, YUAN Ping<sup>4</sup>, ZHANG Qi-lin<sup>1</sup>, ZHANG Yuan-kan<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China
3. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO) Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
4. Key Laboratory of Atomic and Molecular Physics and Functional Materials of Gansu Province, College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

**Abstract** Continuing current is an important sub-physical process of lightning discharge. It refers to the process in which the local charge center in the thunder cloud discharges to the ground through the original channel after the return stroke. It is also usually overlapped by the M-component, which is the phenomenon that the brightness of the glowing channel increases suddenly. Since the continuing current was discovered in the 20th century. Many kinds of research were made by domestic and foreign researchers. The present studies mainly reveal the macroscopic characteristics of the discharge and luminescence using electromagnetic and optical observations. There is a lack of studies on the microcosmic luminescence information and the physical characteristics used by spectral observation. There are few studies about the temperature in the discharge channel of the continuing current. However, the temperature is not only a basic parameter to analyze the physical properties of the continuing current discharge channel but also a concerned parameter to prevent lightning disasters caused by the continuing current. Based on the spectra of a first return stroke and the following continuing current process overlapped with three M-components for cloud-to-ground lightning recorded by a slit-less high-speed spectroscopy, the spectral evolution properties during the entire

discharge process have been analyzed. The temperatures in the channel core and the corona sheath have been calculated, and the variations of both along the channel height have been studied. The results show that in the stage of the return stroke, the channel optical radiations are mainly the N II lines with higher excitation energy. In the continuing current process, the channel optical radiations are mainly the N I and O I lines with lower excitation energy. The intensity of the ionic lines is strongest at the initial stage of the return stroke, while the intensities of the H $\alpha$  and the neutral atomic lines are strongest at M1, and the continuum spectrum is strongest at M2. Four lines of O I 777.4, N I 746.8, 821.6 and 868.3 nm in the near-infrared band were observed throughout the discharge process. During the continuing current, the temperatures in the channel core are 42 060 ~43 940 K, which are 6 020~7 900 K higher than the temperature in the channel core of the corresponding return stroke. The temperatures in the outside corona sheath are 16 170~20 500 K. The temperatures of the channel core, and the corona sheath both remain unchanged with time. The temperature of the channel core decreases with the increase of the channel height, while the temperature of the peripheral corona sheath increases with the increase of the channel height.

**Keywords** Continuing current; Spectrum; Current-carrying channel; Corona sheath; Temperature

(Received Apr. 10, 2021; accepted Dec. 5, 2021)

(上接 2062 页)

#### 会务组联系方式

毛慰明(会议稿件)

云南师范大学物理与电子信息学院

电话: 0871-65941168; 13529401604

e-mail: maoweiming3@126.com

欧全宏(会议咨询)

云南师范大学物理与电子信息学院

电话: 0871-65941168; 15908891183

e-mail: ouquanhong@163.com

王香凤(厂商联络)

北京师范大学分析测试中心

电话: 010-58807981; 13520034335

Email: xiangfeng@bnu.edu.cn

刘文广(厂商联络)

云南师范大学物理与电子信息学院

电话: 0871-65941168; 15987101479

e-mail: liuwgkm@qq.com

#### 支持媒体

会议官网: 光谱网: <http://www.sinospectroscopy.org.cn>(会议各类信息以光谱网发布为准)

#### 主办单位:

中国光学学会

中国化学会

中国光学学会光谱专业委员会

#### 承办单位:

云南师范大学物理与电子信息学院

第 22 届全国分子光谱学学术会议暨 2022 年光谱年会组委会

2021 年 12 月 28 日