

利用近红外波段光谱研究闪电回击通道温度的演化特性

穆亚利 袁萍 王雪娟 董彩霞

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 依据 3 个闪电回击过程的时间分辨光谱, 采用不同的方法计算闪电核心电流通道温度及外围发光通道温度, 研究了回击电流衰减过程中通道温度随时间的演化特性。结果表明, 核心电流通道温度比外围发光通道温度高 4000~5000 K。在峰值电流之后, 相比于电流的变化, 通道温度的衰减更为缓慢。峰值电流之后约 400 μs 时, 通道温度仍维持在 20000 K 左右, 如此长时间的高温导致的热效应是许多闪电灾害的主要根源。

关键词 光谱学; 闪电通道温度; Saha 方程; Stark 加宽

中图分类号 O427 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0630001

Study on Evolution of Lightning Return Stroke Channel Temperature by Near-Infrared Spectroscopy

Mu Yali Yuan Ping Wang Xuejuan Dong Caixia

Gansu Provincial Key Laboratory of Atomic and Molecular Physics and Functional Materials, College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract According to the time-resolved spectra of three lightning return stroke processes, the temperature of the arc core channel and the peripheral luminous channel is calculated with different methods, and the evolution of channel temperature with time in the process of current decay is studied. The results show that the temperature of the core current channel is about 4000~5000 K higher than that of the peripheral luminous channel. The decrease of the channel temperature with time is very slow compared with that of the discharge current after the peak value occurs. Up to about 400 μs after the peak current occurs, the channel temperature still stays at about 20000 K, and the heat effect resulting from high temperature for such a long time is the main source of most lightning disasters.

Key words spectroscopy; lightning channel temperature; Saha equation; Stark broadening

OCIS codes 300.6500; 260.6580; 300.6170; 300.6210

1 引言

闪电过程的强电流使得放电通道的温度瞬间达到 30000 K 左右。通道内的高温及其热效应是森林火灾和其他许多闪电灾害的主要根源^[1-3]。云对地闪电通常包括多次放电(回击), 回击通道的温度及其随时间的演化特性是闪电防护领域重点关注的问题, 利用光谱信息是获得通道等离子体温度等相关特性的有效途径^[4]。Orville^[5-6]和 Uman^[7]最早利用光谱信息计算得到闪电回击通道的温度。Cen 等^[8]计算了闪电回击通道的峰值温度并讨论了该峰值温度与电流作用积分的相关性。但是, 早期的研究工作受摄谱仪时间分辨率和感光范围所限, 很难获得高分辨率的闪电光谱, 且只能对不同光谱仪记录的可见波段和红外波段光谱分别进行分析。关于闪电回击通道温度的研究工作大多基于回击阶段可见波段或红外波段的时间积分光谱,

收稿日期: 2015-12-28; **收到修改稿日期:** 2016-02-04

基金项目: 国家自然科学基金(11475139, 11365019)

作者简介: 穆亚利(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事光谱分析与雷电物理等方面的研究。

E-mail: muyali2009@126.com

导师简介: 袁萍(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事应用光谱分析和雷电物理等方面的研究。

E-mail: yuanp@nwnu.edu.cn(通信联系人)

仅有 Orville^[6]报道了基于时间分辨光谱的研究,利用可见波段的光谱来研究回击初始 50 μs 的通道温度及演化特性。回击电流由峰值开始衰减的过程一般持续数百微秒,这一阶段的通道温度特征对热效应导致的雷电灾害研究以及防雷设备设计都具有重要意义。迄今为止,这方面的研究工作非常少。

本文提出了一种利用近红外波段光谱研究闪电回击通道温度时间演化特性的方案。利用高速摄谱仪获得波长范围为 400~900 nm 的云对地闪电回击过程的光谱,运用不同的方法计算放电通道的温度,为进一步研究闪电回击通道的热量、能量传输和闪电防护提供了参考数据。此外,计算中用到的 O I 777.4 nm 是闪电光谱中最强的谱线之一,该谱线在整个闪电过程中始终能观测到,是星载闪电探测和定位系统的首选谱线^[9]。由其强度变化得到的通道温度、电子密度等参量对探讨闪电发生、发展过程的物理机制以及通道的导电、电流传输特性都具有重要意义。

2 基本原理

利用光谱信息计算闪电放电通道的温度和电子密度,需两个基本假设:1)通道是光学薄的;2)通道满足局部热力学平衡(LTE)条件。Uman 等^[10]通过对闪电光谱的研究证实,针对 N II, O I, N I 和 H α 谱线,闪电放电通道是光学薄的。同时, Griem^[11]的研究结果也表明,闪电通道 N II 离子的准平衡时间、电子和离子动能的平衡时间都在 0.01 μs 数量级,因此相对于回击物理参数变化的时间,闪电通道满足局部热力学平衡。

2.1 多谱线法

当闪电光谱可以同时记录同一元素的多条谱线时,多谱线法是诊断通道温度最有效的方法^[6,12]。

$$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right) = -\frac{1}{kT}E + c, \quad (1)$$

式中 c 为常数, λ 为谱线波长,依据观测的谱线强度 I 和跃迁参数 g 、 A 、 E ,以 E 为横坐标, $\ln(I\lambda/gA)$ 为纵坐标拟合直线,根据直线的斜率 $-1/kT$ 可得到通道温度 T 。

当闪电光谱中记录的谱线较少时,可以用某一条谱线的 Stark 加宽得到闪电通道的电子密度,再依据表达电子密度与温度相关性的 Saha 方程获得通道温度。

2.2 Stark 加宽

在 LTE 条件下,H α 656.3 nm 谱线的 Stark 加宽表示为^[13]

$$\Delta\lambda_{1/2} = 0.549 \times \left(\frac{N_e}{10^{17} \text{ cm}^{-3}}\right)^{0.67956}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda_{1/2}$ 为谱线的半峰全宽(FWHM), N_e 为电子密度。

氧原子谱线 Stark 加宽的半经验公式为^[14-15]

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega \frac{N_e}{10^{16}}, \quad (3)$$

式中 ω 为加宽参数^[16]。

2.3 Saha 方程

在 LTE 近似条件下,带电离子和中性原子满足 Saha 分布,闪电通道的电子密度可由 Saha 方程得到^[17]:

$$N_e = 4.83 \times 10^{15} \left(\frac{I_a}{I_i}\right) \left(\frac{gA}{\lambda}\right)_i \left(\frac{\lambda}{gA}\right)_a T^{3/2} 10^{-5040(V+E_i-E_a)/T}, \quad (4)$$

式中 I_a 和 I_i 分别为原子谱线和离子谱线强度, E_a 和 E_i 分别为原子谱线和离子谱线相应的上激发能, V 为电离能。

3 实验装置

闪电光谱由无狭缝光栅摄谱仪获得,其记录系统为 M310 型高速摄像机,波长范围为 400~1000 nm,分

光装置是每毫米 600 条的光栅^[18],记录的光谱是对原始通道直接分光后的图片,利用 VB 程序,将其转化为用相对强度表示的谱线图进行定量分析。

4 结果与讨论

选取在青海地区获得的 3 个闪电回击过程的时间分辨光谱,如图 1 所示。为方便起见,3 个闪电回击分别记作 A、B、C,它们的持续发光时间均为 440 μs 左右,摄谱仪的记录速度为 9110 frame/s,每个回击分别记录 5 张清晰的光谱。定义每个回击的第一张光谱对应的时间为 0。由图 1 可以看出,在整个回击过程中,光谱结构发生了明显的变化。其中,氮离子(N II)线只在回击的初始(峰值电流)阶段可以清晰记录,之后离子线强度迅速减弱。除此之外,在近红外波段,中性原子的光谱线在整个回击过程中均可以清晰地记录。由于闪电回击电流一般在 5 μs 内上升到峰值,而在 30~50 μs 内降到半峰值,之后缓慢衰减,因此,光谱结构的演化规律,尤其是离子线强度的变化与闪电电流的变化密切相关。

图 1 中同一时刻的光谱中记录了可见波段和红外波段的谱线。N I、O I 谱线的上激发能为 10~14 eV,而 N II 谱线的上激发能为 20~30 eV。从光谱结构特征和相应谱线的激发能可以推断,中性原子线和离子线的辐射分别来自闪电放电通道径向的不同位置。离子线主要来自核心电流通道的辐射,而中性原子线主要来自外围发光通道的辐射。根据闪电通道研究的相关报道可知,闪电的核心电流通道的接近完全电离,且其直径远小于光学可视直径^[19]。因此,由多条 N II 谱线计算得到的温度反映电流核心通道的状态^[20],而由多条 O I 谱线计算得到的结果则反映外围发光通道的温度。

为了进一步分析闪电放电过程的物理特性,利用不同的方法计算闪电放电通道的温度及其随时间的演化特性。由于 O I 谱线的强度在整个闪电回击过程中相对较强,因此根据 O I 777.4,794.7,844.6,926.6 nm 谱线的强度和相应的跃迁参数,利用(1)式得到回击过程不同时刻对应的通道温度;而 N II 谱线的强度只在初始时刻较强,之后,由于回击电流的减小,其强度迅速衰减,无法继续用于通道温度的计算,因此只能由 N II 463.0,480.6,517.9,568.0,594.2 nm 谱线的相应参数计算回击初始时刻(对应峰值电流阶段)的温度。另外,根据谱线轮廓选取 H α 656.3 nm 和 O I 777.4 nm 两条谱线,根据谱线加宽分别利用(2)式和(3)式得到放电通道的电子密度。据此,进一步选取强度较其他离子线强的 N II 568.0 nm 谱线和线形较好的原子线 N I 868.3 nm,利用(4)式得到不同时间对应的闪电通道温度。

图 2 所示为拟合多条 O I 谱线的玻尔兹曼图。图 2 中纵坐标值与谱线的强度呈正相关。结合图 1 可以看出,尽管在所有回击的零时刻,O I 线相对最弱(N II 线最强),但辐射源温度主要与不同激发能的同种元素谱线的相对强度有关,所以,由多条 O I 谱线计算得到的零时刻的通道温度值仍然是最高的。另外,由图 2 中不同时刻直线斜率的变化也可以推断,温度随时间的变化非常缓慢。

图 3 所示为回击 A 的 H α 656.3 nm 和 O I 777.4 nm 谱线的典型轮廓及其拟合曲线。

表 1 列出了闪电回击过程的相关参数,其中 t 为演化时间, T_a 为根据多条 O I 谱线计算得到的通道温度, T_{OI} 和 $T_{\text{H}\alpha}$ 分别为通过 O I 777.4 nm 和 H α 656.3 nm 谱线的 Stark 加宽得到的通道温度。由多条 N II 谱线计算得到的回击 A、B、C 的通道在回击初始时刻($t=0$)的温度分别为 25650、26580、25940 K,与同一时刻由 O I 777.4 nm 谱线加宽分别得到的结果 26380、27270、26800 K 非常接近。峰值电流之后,通道持续发光,对应回击电流的下降阶段,N II 谱线强度迅速减弱,无法利用其多条谱线计算温度。表 1 中,依据 3 个闪电光谱信息,通过 O I 777.4 nm 谱线的 Stark 加宽得到通道温度 T_{OI} 为 22730~27270 K,对应的回击电流峰值阶段温度约为 26500 K。Orville^[21] 得到闪电回击通道的峰值温度为 26000~31000 K。另外,Orville 等^[20] 依据中性原子 O I 777.4 nm/794.7 nm 和 O I 844.7 nm/794.7 nm 谱线的参数,得到通道温度为 13000~17000 K,与表 1 中利用氧原子的多谱线法得到的温度($T_a=18000\sim 22000$ K)比较接近。通道温度与闪电放电强度密切相关,不同强度的闪电放电,产生的通道温度会有一定差异。此外,早期的研究结果都是基于二谱线法得到的,比较而言,多谱线法的计算结果更加可靠^[14]。

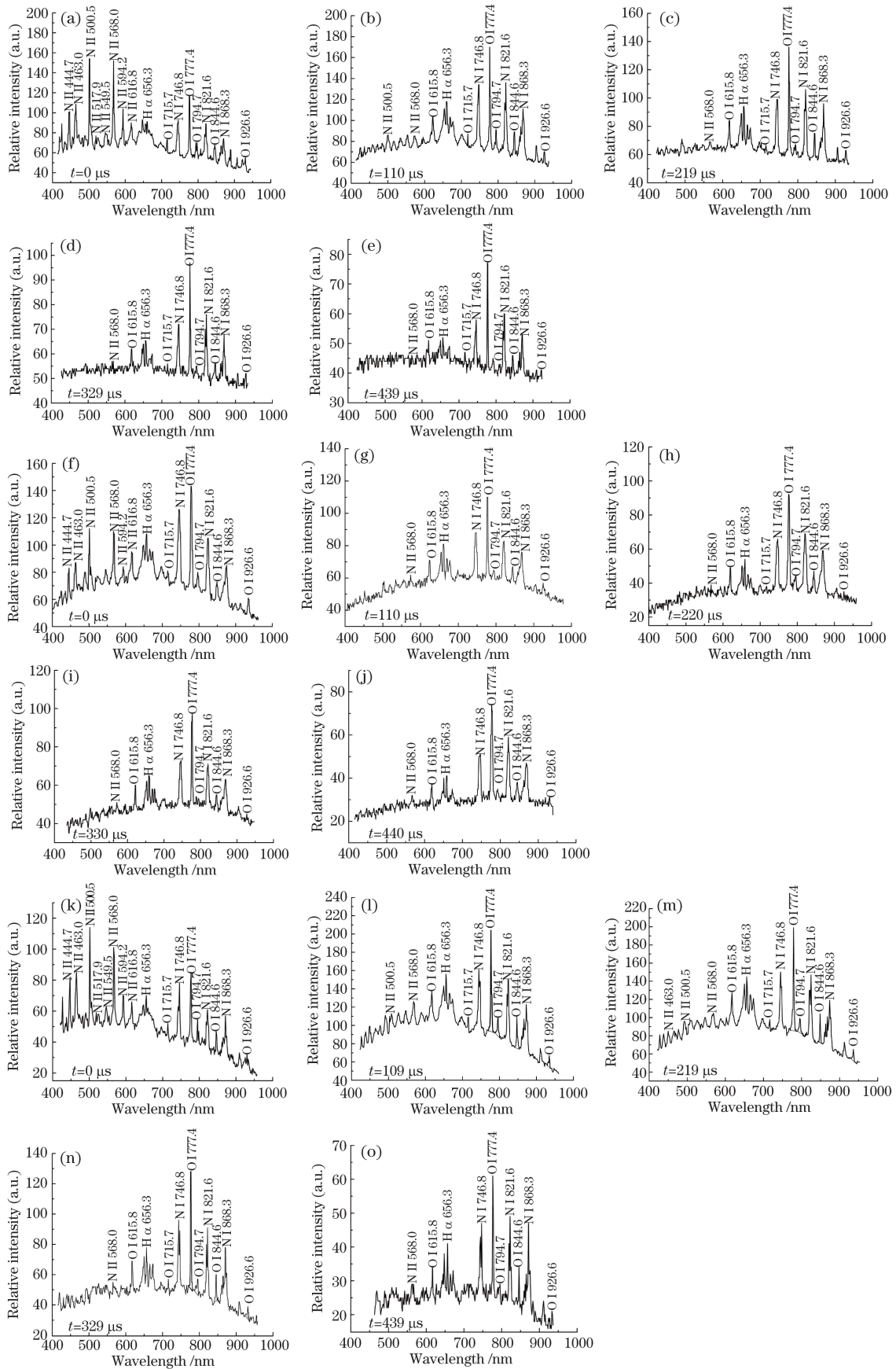


图 1 各闪电回击在不同时刻的光谱。(a)~(e)回击 A;(f)~(j)回击 B;(k)~(o)回击 C

Fig. 1 Spectra of each lightning return stroke at different moment. (a)~(e) Flash A; (f)~(j) flash B; (k)~(o) flash C

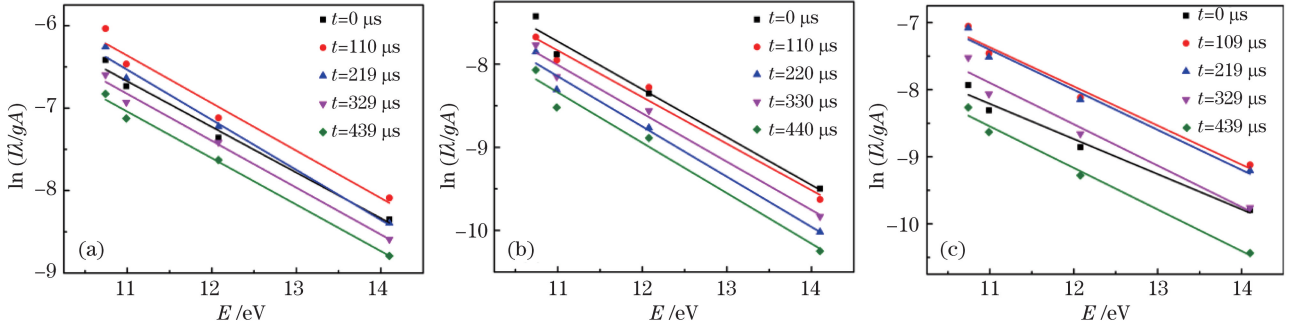


图 2 拟合回击不同时刻多条 O I 谱线的玻尔兹曼图。(a)回击 A;(b)回击 B;(c)回击 C

Fig. 2 Typical Boltzmann plots of multiple O I lines at different moment. (a) Flash A; (b) flash B; (c) flash C

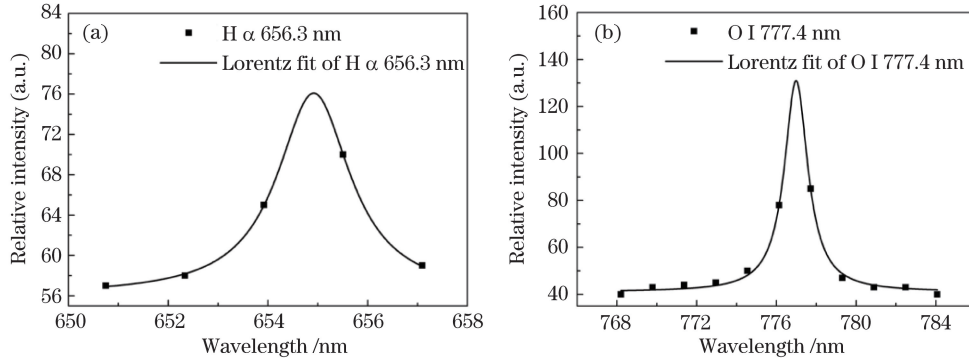


图 3 回击 A 在通道某一高度处 H α 656.3 nm 和 O I 777.4 nm 谱线的轮廓及 Lorentz 拟合

Fig. 3 Profiles and Lorentz fit results of H α 656.3 nm and O I 777.4 nm lines of flash A at a certain height

表 1 3 个闪电回击的物理特性参数

Table 1 Physical characteristic parameters at different time in three lightning return strokes

Flash	Time $t / \mu\text{s}$	FWHM $\Delta\lambda_{1/2} / \text{nm}$		Electron density $N_e / (10^{18} \text{ cm}^{-3})$		Core channel temperature		Peripheral channel temperature	
		H α	O I	H α	O I	T_i / K	T_{OI} / K	T_a / K	$T_{\text{H}\alpha} / \text{K}$
		656.3 nm	777.4 nm	656.3 nm	777.4 nm				
A	0	1.475	2.632	0.196	2.58	25650	26380	21500	21580
	110	2.030	2.612	0.243	2.56		24960	20700	20960
	219	1.964	1.806	0.238	1.77		24650	20500	20700
	329	1.796	1.568	0.224	1.54		24260	20120	20620
	439	2.383	1.767	0.271	1.73		24130	20080	20030
B	0	2.699	3.788	0.293	3.72	26580	27270	21350	22260
	110	2.742	3.266	0.298	3.21		25670	20800	21430
	220	2.572	3.235	0.284	3.17		25560	20570	21290
	330	2.735	3.284	0.297	3.08		25560	20530	21260
	440	2.289	2.862	0.262	2.81		25400	20400	21220
C	0	2.112	2.576	0.249	2.53	25940	26800	22100	22300
	109	2.138	2.527	0.252	2.48		24760	20700	20880
	219	1.450	2.008	0.194	1.97		23980	20240	20280
	329	1.939	1.684	0.236	1.65		23300	19340	20280
	439	1.921	1.184	0.234	1.16		22730	18900	20230

从表 1 还可以看出, $T_{\text{H}\alpha}$ 和 T_a 的数值比较接近, 分别为 20230~22300 K 和 18900~22100 K, 而 T_{OI} 的数值(22730~27270 K)比前者高约 4000 K。依据光谱结构变化特征可以推断, 电流核心通道温度应高于外围发光通道温度; 由多条 N II 谱线得到的是电流核心通道温度, 依据 O I 777.4 nm 谱线加宽得到的温度与同一时刻核心通道温度非常接近, 反映的是邻近核心通道温度; 而由多条 O I 原子谱线或激发能较低的 H α

656.3 nm 谱线加宽得到的是外围发光通道温度。回击后期,虽然电流远小于峰值电流,但由于其持续作用,核心通道仍然维持高温。核心通道能量沿径向的传输是外围通道发光的主要原因,所以通道温度应该沿径向逐渐降低。早期关于闪电光谱的工作无法同时记录可见波段和红外波段的光谱,关于通道温度沿径向分布的研究报道非常少,因此,这方面还需要进行深入探究。

图 4 为通道温度的时间演化。从图中可以看出,在 3 个回击的整个发光阶段,邻近核心电流通道温度总比外围发光通道温度高 4000~5000 K。在回击阶段的数百微秒内,核心通道维持 20000 K 以上的高温。根据回击电流波形的相关研究,电流在几微秒内达到峰值,之后约在几十微秒内降到半峰值^[22-24]。从通道温度的时间演化特征可以看出,通道处于高温的时间远大于电流到达半峰值的时间。从理论上分析,通道的高温是放电电流热效应的结果。在回击的初始阶段,强电流作用使通道瞬间加热到 20000~30000 K,在接下来的几百微秒内,尽管电流快速减小,但通道仍被持续加热,并在较长时间内维持高温状态。Orville^[6]利用横向狭缝截取 10 m 长的闪电通道,通过高速旋转感光胶片获得可见光范围的高时间分辨闪电光谱;依据 N II 500 nm/463 nm 两条谱线的信息研究了回击初期 50 μs 内通道的温度特性,认为通道温度变化与电流波形基本一致,通道温度在 5~10 μs 内达到峰值,之后单调减小,到 50 μs 时,通道温度降至 10000 K 左右,由于 N II 500 nm 谱线是 3 组不同激发能跃迁的共同贡献,基于二谱线法计算温度时误差较大。本文中光谱时间分辨率虽然无法得到几微秒内的温度变化,但是,依据不同方法从 50 μs 之后的光谱得到的温度均高于 10000 K。另外,Weidman 等^[25]研究了人工触发闪电在 850~1400 nm 波段的光谱辐射特性,根据 N I 868.0 nm/1011.3 nm 谱线得到的通道温度为 16000 K 左右,略低于本文得到的回击后期外围通道温度。通常,人工触发闪电的放电强度也低于自然闪电的放电强度。

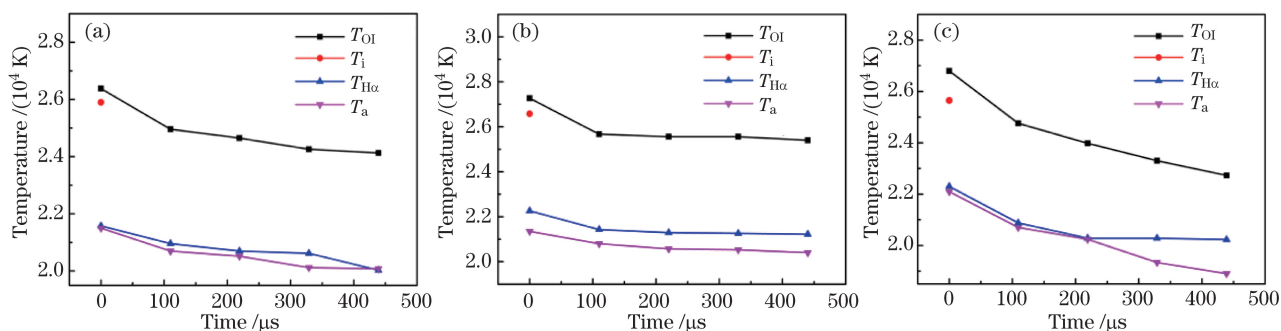


图 4 各回击通道温度随时间的演化。(a)回击 A;(b)回击 B;(c)回击 C

Fig. 4 Variation in temperature with time. (a) Flash A; (b) flash B; (c) flash C

温度是研究闪电放电通道导电、能量等特性时必需的基本参量。由于闪电光谱在自然环境下远距离拍摄,背景光、观测距离和通道形状等因素都会影响谱线强度和轮廓,尽管计算中考虑了许多因素的影响,但计算精度仍无法与实验室等离子体光谱诊断相比。无狭缝摄谱仪可以得到闪电放电全通道的高时间分辨光谱,这对研究放电电流、能量等特性沿通道的传输、随时间的演化,以及探讨闪电发展过程的物理机制都具有重要价值。作为闪电放电等离子体特性诊断的唯一手段,闪电光谱分析在雷电物理的研究中是不可或缺的。

5 结 论

依据近红外波段的闪电光谱,利用不同方法计算闪电回击通道温度,用 H α 656.3 nm 谱线的 Stark 加宽结合 Saha 方程得到的结果与中性氧原子多谱线法的计算结果具有很好的一致性,反映了核心电流通道外围的状态。由 O I 777.4 nm 谱线的 Stark 加宽结合 Saha 方程得到的邻近电流核心通道温度比外围发光通道温度高 4000~5000 K。在回击过程的几百微秒时间内,通道均维持 20000 K 左右的高温,如此长时间的高温产生的热效应是许多闪电灾害的主要根源。

参 考 文 献

- 1 Feng Guili, Qie Xiushu, Wu Shujun. Cloud-to-ground lightning characteristics of hail cloud in Shandong Province[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(2): 289-299.

- 冯桂力, 郗秀书, 吴书君. 山东地区冰雹云的闪电活动特征[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 289-299.
- 2 Kong X Z, Zhao Y, Zhang T, *et al.*. Optical and electrical characteristics of in-cloud discharge activity and downward leaders in positive cloud-to-ground lightning flashes[J]. Atmospheric Research, 2015, 160: 28-38.
- 3 Liu Dongxia, Qie Xiushu, Feng Guili. Evolution characteristics of the lightning and the relation with dynamical structure in a mesoscale convective system over North China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(1): 95-104.
刘冬霞, 郗秀书, 冯桂力. 华北一次中尺度对流系统中的闪电活动特征及其与雷暴动力过程的关系研究[J]. 大气科学, 2010, 34(1): 95-104.
- 4 Sun Chengqi, Gao Yang, Yang Deming, *et al.*. Spectroscopic method for measuring electron temperature and electron density of thermal spray plasma[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 043001.
孙成琪, 高 阳, 杨德明, 等. 光谱法测量低压热喷涂等离子体的电子温度和电子密度[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 043001.
- 5 Orville R E. A high-speed time-resolved spectroscopic study of the lightning return stroke: Part I. A qualitative analysis [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1968, 25(5): 827-838.
- 6 Orville R E. A high-speed time-resolved spectroscopic study of the lightning return stroke: Part II. A quantitative analysis [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1968, 25(5): 839-851.
- 7 Uman M A. Lightning[M]. New York: McGraw-Hill, 1969: 138.
- 8 Cen J Y, Yuan P, Qu H Y, *et al.*. Analysis on the spectra and synchronous radiated electric field observation of cloud-to-ground lightning discharge plasma[J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(11): 113506.
- 9 Zhao J C, Yuan P, Cen J Y, *et al.*. Characteristics and applications of near-infrared emissions from lightning[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(16): 163303.
- 10 Uman M A, Orville R E. The opacity of lightning[J]. Journal of Geophysical Research, 1965, 70(22): 5491-5497.
- 11 Griem H R. Plasma spectroscopy[M]. New York: McGraw-Hill, 1964: 580.
- 12 Hu Zhenhua, Zhang Qiao, Ding Lei, *et al.*. Temperature and electron number density of liquid jet double-pulse laser induced breakdown Ca plasma[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0430004.
胡振华, 张 巧, 丁 蕾, 等. 液体射流双脉冲激光诱导击穿 Ca 等离子体温度和电子数密度研究[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0430004.
- 13 Gigosos M A, Gonzalez M A, Cardenoso V. Computer simulated Balmer-alpha, -beta and -gamma Stark line profiles for non-equilibrium plasmas diagnostics[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2003, 58(8): 1489-1504.
- 14 Hegazy H. Oxygen spectral lines for diagnostics of atmospheric laser-induced plasmas[J]. Applied Physics B, 2010, 98 (2): 601-606.
- 15 Lei Lan, Cao Na, Cao Liang, *et al.*. Investigation on plasma electron density distribution with finite holographic interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102008.
雷 岚, 曹 娜, 曹 亮, 等. 有限宽全息干涉技术对等离子体电子密度的诊断[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102008.
- 16 Griem H R. Spectral line broadening by plasma[M]. New York: Academic Press, 1974.
- 17 Qiu Deren. Atomic spectral analysis[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2001: 37.
邱德仁. 原子光谱分析[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001: 37.
- 18 Cen J Y, Yuan P, Xue S M. Observation of the optical and spectral characteristics of ball lightning[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(3): 035001.
- 19 Golde R H. Lightning[M]. Zhou Shijian, Sun Jingqun, Transl. Beijing: Electric Power Industry Press, 1981: 117-120.
Golde R H. 雷电[M]. 周诗健, 孙景群, 译. 北京: 电力工业出版社, 1981: 117-120.
- 20 Orville R E, Henderson R W. Absolute spectral irradiance measurements of lightning from 375 to 880 nm[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1984, 41(21): 3180-3187.
- 21 Orville R E. Daylight spectra of individual lightning flashes in the 370-690 nm region[J]. Journal of Applied Meteorology, 1980, 19: 470-473.
- 22 Zhang Yijun, Lü Weitao, Zhang Yang, *et al.*. Observations of the cloud-to-ground lightning discharge process and analysis on its characteristic in Guangzhou[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 383-392.
张义军, 吕伟涛, 张 阳, 等. 广州地区地闪放电过程的观测及其特征分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 383-392.
- 23 Zhou H, Rakov V A, Diendorfer G, *et al.*. A study of different modes of charge transfer to ground in upward lightning [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2015, 125-126: 38-49.
- 24 Maslowski G, Rakov V A. A study of the lightning channel corona sheath[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: D14110.
- 25 Weidman C, Boye A, Crowell L. Lightning spectra in the 850 to 1400 nm near-infrared region[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(D11): 13249-13257.