

文章编号:1004-4213(2010)06-0998-5

闪电放电通道的辐射演化特性*

张华明^{1,2}, 袁萍¹, 杨世刚², 郝孝智², 牛永波²

(1 西北师范大学 物理与电子工程学院, 兰州 730070)

(2 山西省雷电防护监测中心, 太原 030002)

摘要:用无狭缝红外光谱仪获得了山东地区云对地闪电回击过程的近红外光谱,并与可见光波长范围的闪电回击光谱进行了对比分析.根据近红外光谱的结构特征,讨论了闪电通道等离子体的光谱辐射顺序以及不同波段连续光谱的主要辐射机制,研究得出:可见光谱主要是闪电回击初期和发展阶段的辐射;近红外光谱主要是闪电发展后期的辐射;可见波段的连续光谱主要来自韧致辐射的贡献,而红外部分的连续光谱主要来自复合辐射的贡献.由分析结果推断:闪电通道等离子体的复合过程是闪电产生 O_3 、 NO_x 的主要途径,复合过程中的氧吸附作用和去吸附过程是近红外光谱中氧原子谱线增多的重要原因,也是 OI 777.4 nm 相对强度比较大的主要原因.

关键词:近红外光谱;连续光谱;辐射演化

中图分类号:P427.39

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103906.0998

0 引言

闪电在近红外区域产生大量的光辐射,并且有一些很强的光谱线,而且在近红外区域连续辐射比较弱、分子散射也比可见光范围的弱,所以红外光谱是研究闪电通道光薄的最好选择^[1-2],而红外光谱波段的 OI777.4 nm 和 NI868.3 nm 也成为星载雷电光学探测的首选谱线.目前,关于闪电通道红外波段的光谱观测很少,许多学者计算的闪电通道温度是使用回击前期产生的等离子体特征光谱获得的^[3-4],而闪电通道近红外光谱大部分是通道演化后期的中性原子辐射产生的,它们与通道中的各种化学反应密切相关^[5-6].因此,定量分析近红外光谱也可以提供在闪电电流减小、通道温度降低阶段的内部信息,对闪电过程物理机制的研究有重要的意义^[1].

本文给出了由无狭缝闪电红外光谱仪获得的 760~970 nm 波长范围的闪电近红外光谱,通过对近红外光谱与可见光谱的比较,分析了闪电通道等离子体光谱的辐射顺序,讨论了不同阶段连续光谱的主要辐射机制以及闪电通道等离子体辐射的演化特征,为进一步分析闪电产生 O_3 、 NO_x 提供了基础.

1 实验装置

无狭缝闪电红外光谱仪如图 1,本工作采用的光谱记录系统是红外数码摄像机,为了得到闪电通道等离子体的近红外光谱,将截至波长为 760 nm 的滤波片置于摄像机的物镜前,每毫米 600 条的透射光栅置于滤波片前,一级光谱的色散约为 1.7 nm/pixel.2006 年 6 月 16 日和 8 月 5 日两次成功获得了闪电通道等离子体的近红外发射光谱.

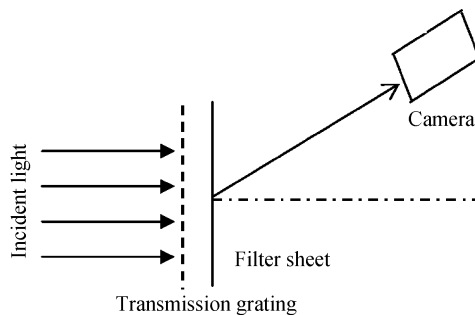


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup for lightning plasma spectroscopy

2 资料分析

闪电通道等离子体红外光谱资料比较少的主要原因首先是^[1]:以往用来记录闪电光谱的感光胶片对红外光谱不敏感,其光谱响应是波长、曝光时间、曝光时的湿度、温度、以及胶片的显影时间等因子的函数,并且胶片对不同波长的感光灵敏度呈非线性变化,这些对光谱的观测有很大的影响.本试验的光谱记录系统采用电荷耦合器件(CCD)构成数字成像

* 国家自然科学基金(40475007)和西北师范大学科技创新工程项目(NWNU-KJXCXGC-03-21)资助

Tel:029-88204271 Email:zhanghuaming980@163.com

收稿日期:2009-06-11

修回日期:2010-01-26

系统,其感光灵敏度远高于胶片,而且避免了胶片感光灵敏度随波长非线性变化造成的误差。其次,大气成份对红外光谱的吸收限制了可观测的光谱范围。大气中的水蒸气、二氧化碳和臭氧在红外波段有较强的吸收带,只有在这些吸收带之间形成一些可观测的窗口。有三个波段的红外辐射在大气中能够基本完全透过,称之为大气窗口,分别为近红外

(0.76~1.1 μm),中红外(3~5 μm),远红外(8~14)^[7]。我们观测到的闪电光谱在近红外窗口。

图2为试验获得的波长在760~970 nm范围的闪电通道等离子体的近红外光谱,有关光谱参量见表1。为了比较方便,图3给出了同一地区试验获得的波长在390~670 nm范围的闪电通道等离子体的光谱,简称为可见光谱。

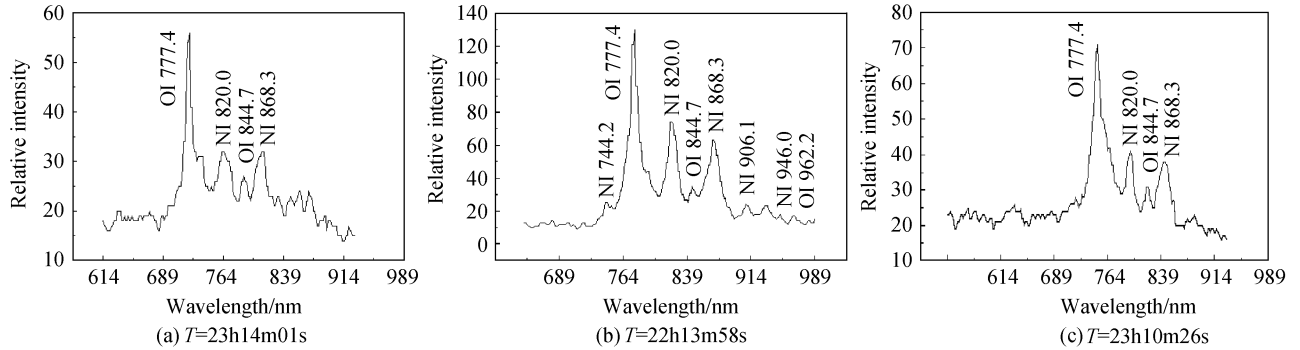


图2 山东地区闪电通道近红外光谱

Fig. 2 Near-infrared spectra of lightning channel in Shandong region

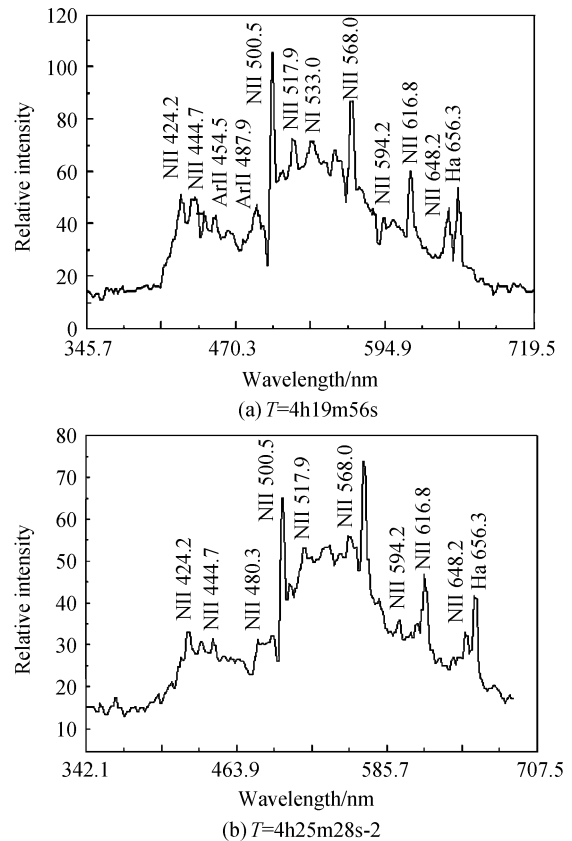
表1 闪电通道等离子体光谱参量

Table 1 Spectral parameters of lightning plasma

Emission line/nm	Pecies	Transitions	E_m/eV
777.4	OI	$2s^2 2p^3 (^4S^0) 3s - 2s^2, 2p^3 (^4S^0) 3p$	10.740
820.0	NI	$2s^2 2p^2 (^3P) 3s - 2s^2, 2p^2 (^3P) 3p$	11.837
844.7	OI	$2s^2, 2p^3 (^4S^0) 3s - 2s^2, 2p^3 (^4S^0) 3p$	10.989
868.3	NI	$2s^2, 2p^2 (^3P) 3s - 2s^2, 2p^2 (^3P) 3p$	11.758
906.1	NI	$2s^2, 2p^2 (^3P) 3p - 2s^2, 2p^2 (^3P) 3d$	12.971
946.0	NI	$2s^2, 2p^2 (^3P) 3s - 2s^2, 2p^2 (^3P) 3p$	12.000
962.2	OI	$2s^2 2p^3 (^4S^0) 4d - 2s^2 2p^3 (^2D^0) 3p$	14.047

比较图2与图3,发现,近红外波段的分立谱主要为氮、氧等的中性原子的辐射,而可见范围的分立谱主要是氮、氧一次电离的离子谱线^[8-9],并且连续谱分布也有明显差别,近红外光谱中的连续背景辐射明显要弱。这主要与通道等离子体辐射跃迁发生的时间顺序有关,有关时间分辨的闪电光谱研究发现,在回击通道等离子体的发射光谱中,首先出现的主要是一次电离离子的跃迁谱线,其次是连续谱,最后才是中性原子跃迁谱线^[10]。由于光谱仪时间分辨和感光范围的限制,不能一次记录到从可见到近红外波长范围的光谱。依据闪电放电的特性,回击过程中,电流通常在几微秒内达到峰值,使通道迅速电离、温度上升;放电后期,电流衰减、通道温度降低、离子复合占主导地位。从两个波段的光谱结构特征也可以看出:可见波段的光谱中,以具有较高激发能量的一次电离离子的辐射为主,而红外波段的光谱

主要是激发能量较低的中性原子的辐射。由此推断:可见光谱主要反映了通道等离子体在回击初期和发展阶段的辐射特性,而近红外光谱主要由回击通道发展后期的辐射产生。



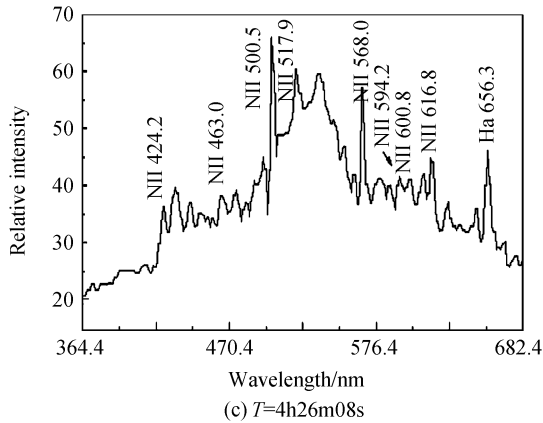


图3 山东地区闪电通道可见光谱
Fig. 3 Visible spectra of lightning channel in Shandong region

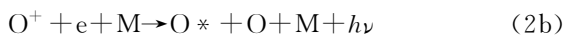
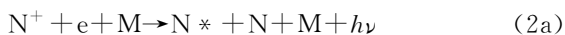
另外,根据回击过程的放电特性、通道热力学特征、以及温度、电子密度和电流的变化推断:可见光部分的连续光谱主要来自于通道等离子体中韧致辐射的贡献,红外部分的连续光谱主要是复合辐射的贡献。

韧致辐射是等离子体中高温自由电子与其它粒子碰撞而损失能量发出光子的过程,即

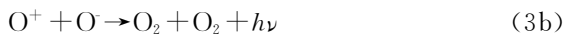
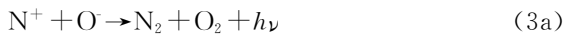
$$e(h) + M \rightarrow e(l) + M + h\nu \quad (1)$$

式中, $e(h)$ 和 $e(l)$ 分别为高温和低温自由电子, M 为第三体粒子, ν 为韧致辐射的频率。由于存在大量的自由电子碰撞过程,使闪电通道中聚集了大量中性原子、分子、电子和带正电的离子(主要包括 N^{++} 、 N^+ 、 N^* 、 N 、 O^{++} 、 O^+ 、 O^* 、 O 粒子等),从而形成典型的等离子体通道。

通道等离子体的复合辐射主要通过两种过程。一种是大气成分的离子与自由电子的解离复合过程,即



式中, N^+ 、 O^+ 分别为氮离子和氧离子, N^* 、 O^* 分别为激发态的氮原子和氧原子。另一种则是正离子和负离子的直接复合过程,即



复合辐射与韧致辐射对连续谱的贡献与等离子体温度密切相关^[11-15]。温度越高,电子的动能越大,越不容易被离子俘获,所以,复合辐射的几率越小,复合辐射的相对贡献越小。闪电回击产生的强大电流,通道峰值温度高达数万度,使得通道中的原子激发、电离。由于闪电通道温度是骤然上升然后再缓慢下降^[16]。所以,回击初期通道等离子体温度很高、电子密度很大,连续辐射主要由韧致辐射产生;随着时

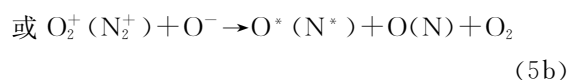
间的延续,放电通道的半径增大、等离子体温度降低、电子密度相对减弱,导致复合辐射逐渐增强。与此同时,由于等离子体在空间上的扩张运动,使粒子密度减小、电子的平均自由程增大,导致碰撞频率下降、韧致辐射减弱;另一方面,离子的复合也使得电子密度减小、韧致辐射进一步减弱,到回击后期,复合辐射的增强趋势远小于韧致辐射减弱的趋势,导致连续辐射继续衰弱,所以,红外部分的连续光谱要比可见部分明显要弱。

另外,还有一些过程会对连续谱产生贡献,而且与闪电产生 O_3 、 NO_x 过程有密切的关系,首先是各种化学反应产生的连续谱,其次是 O_3 、 NO_x 、 N^* 、 N 、 O^* 、 O ^[6,17]等各种粒子产生的分子光谱。各种反应产生的连续谱属于复合辐射的一种,但是其所占比例较小,而且与闪电过程产生的 O_3 、 NO_x 密切相关,所以为了进一步研究闪电产生 O_3 、 NO_x 等的机理而单独列为一种。

从红外和可见两个波段的光谱结构还可以看出,闪电通道等离子体线状谱的另外一个特点是:可见区域的线状谱线主要由氮和氧的离子谱线组成,而且氮离子的谱线居多^[8-9];红外区域的线状谱线中氧原子谱线明显增多、相对强度增大。初步分析,这主要是由于通道等离子体复合过程中的中性粒子激发态再集居所致。复合过程中会有一些氧分子吸附自由电子而形成负氧离子。即



这样,在通道等离子体中进一步引发“正离子-负离子”的复合过程,即



由于上述氧吸附和去吸附过程会产生大量激发态的氧原子,延长了氧原子的辐射寿命。这两种复合过程通常出现于闪电发展的后期,因此,导致闪电近红外光谱中氧原子谱线的增多、相对强度增大。这也是图2的近红外光谱中OI 777.4 nm谱线的相对强度比较大的主要原因。

3 结论

通过对山东地区闪电回击过程的红外光谱与可见光谱的分析,得到的结论为:

1)可见光谱主要是闪电回击初期和发展阶段的辐射,分立谱以氮、氧一次电离离子的谱线为主;近红外光谱主要是闪电发展后期的辐射,分立谱以氮、氧的中性原子的谱线为主。

2)可见波段的连续光谱主要来自韧致辐射的贡

献,而红外部分的连续光谱主要来自复合辐射的贡献。

3) 闪电通道等离子体中的复合是闪电产生 O_3 、 NO_x 的主要过程,复合过程中的氧吸附作用和去吸附过程是闪电近红外光谱中氧原子线状谱线增多的重要原因,也是 $OI\ 777.4\ nm$ 强度比较大的主要原因。

参考文献

- [1] WEIDMAN C, BOYE A, CROWELL L. Lightning spectra in the 850 to 1 400 nm near-infrared region[J]. *J Geophys Res*, 1989, **94**(D1):13249-13257.
- [2] UMAN M A, ORVILLE R E. The opacity of lightning[J]. *J Geophys Res*, 1965, **70**(22):5491-5497.
- [3] UMAN M A. The peak temperature of lightning[J]. *J Atmos Terr Phys*, 1964, **26**:123-128.
- [4] MELVIN L P. The excitation temperature of lightning[J]. *J Geophys Res*, 1963, **68**(3):803-811.
- [5] ORVILLE R E. A High-speed time-resolved spectroscopic study of the lightning return stroke: part II[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1968, **25**:827-838.
- [6] ORVILLE R E. Ozone production during thunderstorms measured by the absorption of ultraviolet radiation from lightning[J]. *J Geophys Res*, 1967, **72**(14):3557-3561.
- [7] ZHANG Jian-qi, FANG Xiao-ping. Infrared physics [M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2004.
张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004.
- [8] YUAN Ping, LIU Xin-sheng, ZHANG Yi-jun, et al. Spectral study on lightning return stroke in plateau area [J]. *Acta Geophysica*, 2004, **47**(1):42-46.
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[J]. 地球物理学报, 2004, **47**(1):42-46.
- [9] YUAN Ping, LIU Xin-sheng, ZHANG Yi-jun, et al. Spectral properties of the lightning return stroke [J]. *Plateau Meteorology*, 2003, **22**(3):235-238.
袁萍,刘欣生,张义军,等. 闪电首次回击过程的光谱特性[J]. 高原气象, 2003, **22**(3):235-238.
- [10] ORVILLE R E. A High-speed time-resolved spectroscopic study of the lightning return stroke: part I[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1968, **25**:839-851.
- [11] XIANG Zhi-lin, YU Chan-xuan. High temperature plasma diagnosis [M]. Shanghai: Shanghai science and Technology Press, 1982, 68-73.
项志遴,余昌旋. 高温等离子体诊断技术[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1982, 68-73.
- [12] HUANG Qing-ju. Studies on atomic and ion emission spectrum produced by pulsed laser ablation of copper[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12):1818-1822.
黄庆举. 激光烧蚀铜产生原子和离子光谱线的研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(12):1818-1822.
- [13] LI Ming, ZHANG Hong-chao, SHEN Zhong-hua H, et al. Physical analyses of optical breakdown and plasma formation in water induced by laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11):1610-1614.
李明,张宏超,沈中华,等. 激光导致水击穿和等离子体形成过程的物理分析[J]. 光子学报, 2005, **34**(11):1610-1614.
- [14] HUANG Qing-ju. The properties analysis of plume produced by pulsed laser ablation of metal Cu[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **35**(11):1636-1639.
黄庆举. 脉冲激光诱导 Cu 靶产生发光羽的特性分析[J]. 光子学报, 2006, **35**(11):1636-1639.
- [15] NI Xiao-chan, WANG Qing-yue. The plasma generation in the temporal/spatial ultrashort laser pulses ablation on dielectric materials[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9):1035-1039.
倪晓昌,王清月. 时空分布的超短激光脉冲烧蚀电介质材料时等离子体的产生[J]. 光子学报, 2004, **33**(9):1035-1039.
- [16] ZHANG Hua-ming, YUAN Ping, LÜ Shi-hua, et al. Electron density study on lightning return stroke [J]. *Plateau Meteorology*, 2007, **26**(2):264-269.
张华明,袁萍,吕世华,等. 闪电回击通道的电子密度研究[J]. 高原气象, 2007, **26**(2):264-269.
- [17] MEINEL A B, SLSNSVE L E. N_2^+ Emission in lightning [J]. *Journal of the Atmospheric sciences*, 1964, **21**:157-160.

Radiation Evolution Characteristic of Lightning Discharge Channel

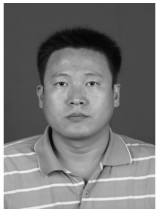
ZHANG Hua-ming^{1,2}, YUAN Ping¹, YANG Shi-gang², HAO Xiao-zhi, NIU Yong-bo²

(1 College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

(2 Thunder Prevention and Observation Center of Shanxi Province, Taiyuan 030002, China)

Abstract: Near-infrared spectra of lightning return strokes are obtained by Slit-less infrared spectrograph in Shandong region. Compared with the visible spectrum of lightning return strokes, the radiation order of lightning plasma is analyzed, and the main radiation mechanism of continuum spectra in the two wavelength range are also discussed. The obtained results show that: the visible spectrum of lightning is mainly radiation from early stages and development of lightning, and the line spectra of ionizing nitrogen and oxygen is the main spectra of the separation spectrum; the near-infrared spectrum is mainly radiation from the latter of the lightning, and the line spectra of neutral nitrogen and oxygen atoms is the main spectra of the separation spectrum; the visible spectral band is mainly from bremsstrahlung contribution and the infrared part of the continuous spectrum is mainly from the recombination radiation; loss of a photon for the free electronic of high-temperature and other energy particle collisions of the lightning plasma is the main course of bremsstrahlung process, there are a lot of free e-collision, the lightning channel gathered in a large number of neutral atoms, molecules, electronics, and with the positively charged ions (including N^{++} , N^+ , N^* , N , O^{++} , O^+ , O^* , O particles, etc.), thus forming a typical plasma channel; atmospheric ions and free electrons of the dissociation process and the positive ions and negative ion radiation process is the direct radiation of the two main ways. It is deduced from the results that the recombination in lightning plasma is the main process for lightning producing O_3 and NO_x , the sorption and desorption of oxygen during the recombination may be the main reason for increased lines of oxygen atom in near-infrared spectra, and also for relative strength of OI 777.4 nm that is larger than normal.

Key words: Near-infrared spectra; Continuum spectra; Radiation Evolution



ZHANG Hua-ming was born in 1980. Now he is an engineer and the Ph. D. degree candidate, and his research interests focus on lightning spectra.



YUAN Ping was born in 1963. Now she is a professor and Doctoral Supervisor, and her research interests focus on lightning physics and atomic and molecular physics.