

一次空中触发闪电通道光谱分析

张华明^{1,2}, 张义军^{1,3}, 吕伟涛¹, 张阳¹, 齐奇¹, 钱勇^{1,4}, 樊艳峰¹

1. 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
2. 山西省气象灾害防御技术中心, 山西 太原 030002
3. 复旦大学大气科学研究所, 上海 200438
4. 新疆气象灾害防御技术中心, 新疆 乌鲁木齐 830001

摘要 利用无狭缝光谱仪获得了一次空中触发闪电过程中 400~660 nm 的发射光谱, 对空中触发闪电小回击和上行正先导通道的发射光谱进行了分析, 讨论了人工触发闪电导线通道与空气通道光谱的差异, 发现导线段通道光谱持续了约 140 ms, 而空气段通道仅持续了 0.167 ms; 结合 Fe, N, O 等元素的电离能、激发能, 给出了导线通道亮度强、持续时间长的原因。在电流强度相同的情况下, 人工触发闪电通道的导线段有更多的粒子被激发, 能产生更多的光谱辐射, 导线段通道的亮度远强于空气段, 导线段通道的光谱强度也远强于空气段; 在随后的等离子体通道消散阶段导线段闪电通道的复合反应持续时间也更长。通过对小回击以及上行正先导导线通道上部、下部空气段光谱结构以及通道温度等参数与广东地区自然闪电特征谱线及温度等参数的比较, 发现小回击通道光谱主要由 N II 离子低激发态之间的跃迁组成, 具有 N II 444.7 nm, N II 517.9 nm, N II 616.8 nm 等广东地区一般强度自然闪电的特征谱线。上行正先导下部空气段通道具有高激发能的谱线开始消失, 出现了 H_{α} , H_{β} , O I 615.8 nm 等激发能较低的谱线, 具有闪电回击后期的光谱结构。小回击通道以及上行正先导通道下部空气段温度分别为 21 000 和 20 000 K, 通道温度低于自然闪电温度。

关键词 空中触发闪电; 导线通道; 空气通道; 闪电光谱

中图分类号: P427.32+1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2018)12-3673-05

引言

闪电是雷暴云对地面的放电, 常常会对地面的物体以及人、牲畜造成严重的伤害, 由于自然闪电发生、发展的随机性和瞬时性, 难以对其进行近距离的综合观测, 人工触发闪电技术实现了近距离的综合观测。人工触发闪电中的空中触发方式, 即火箭拖带的细金属导线不接地, 包括上行正先导, 上行正先导和下行负先导同时发展的双向先导, 连接过程, 小回击等过程, 其中下行先导的发展、传输以及接地过程, 在一定程度上能够模拟自然闪电的下行先导-回击过程, 对于雷电始发机制, 先导传输特征等研究具有重要的意义, 而双向先导过程, 对于飞行器雷电防护的设计也有重要的应用价值^[1-3]。

闪电通道的峰值电流高达几千安培, 大电流能瞬间将闪电通道热到数万度, 使得大气中的各种分子原子被瞬间分解电离。闪电通道中各种粒子之间的相互作用过程中会向外发出不同波段的光辐射, 波长范围覆盖 X 射线、紫外、可见光、红外等区域, 这些辐射谱线直接携带了闪电通道中的各种信息, 如通道温度、电子密度、粒子成份和浓度等多种状态参数, 而经过计算处理后还能反演出闪电通道中各种物理过程的特征。例如 Orville^[4] 根据闪电近紫外光谱的吸收特性, 估测了观测点与闪电之间存在的臭氧含量; Wang^[5] 等基于回击通道光谱与电场资料估算了闪电放电通道的半径和通道单位长度储存的能量并对其作了相关性分析。因此, 闪电光谱的观测对闪电过程物理机制的研究有重要意义。

本文利用无狭缝光谱仪获得的广东地区一次空中触发闪电过程的发射光谱, 对空中触发闪电小回击过程、上行正先

收稿日期: 2017-12-04, 修订日期: 2018-04-21

基金项目: 灾害天气国家重点实验室基金项目(2016LASW-B10), 国家重点研发计划项目(2017YFC1501501), 中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2015Z006), 山西省气象局项目(SXKMSTC20165224)资助

作者简介: 张华明, 1980 年生, 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高级工程师
e-mail: zhanghuaming980@163.com

导通道的光谱进行了对比分析。

1 试验与观测

光谱观测采用无狭缝光栅摄谱仪, 光谱观测点距离引雷点约 1.9 km, 记录系统是 PhotronSA5 高速照相机, 时间分辨率为 6 000 fps, 拍摄时长为 1.82 s, 空间分辨率为 $1\ 024 \times$

512, 分光装置是 $600\ \text{lines} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的光栅, 光栅置于摄像机物镜前, 光谱分辨率为 1.1 nm。同时利用 MotionPro HS-4 高速黑白相机进行闪电观测, 空间分辨率为 512×512 , 时间分辨率为 0.2 ms, 拍摄时长为 1.6 s。于 2017 年 6 月 15 日成功获得了一次负极性空中触发闪电小回击、上行正先导通道等的发射光谱。

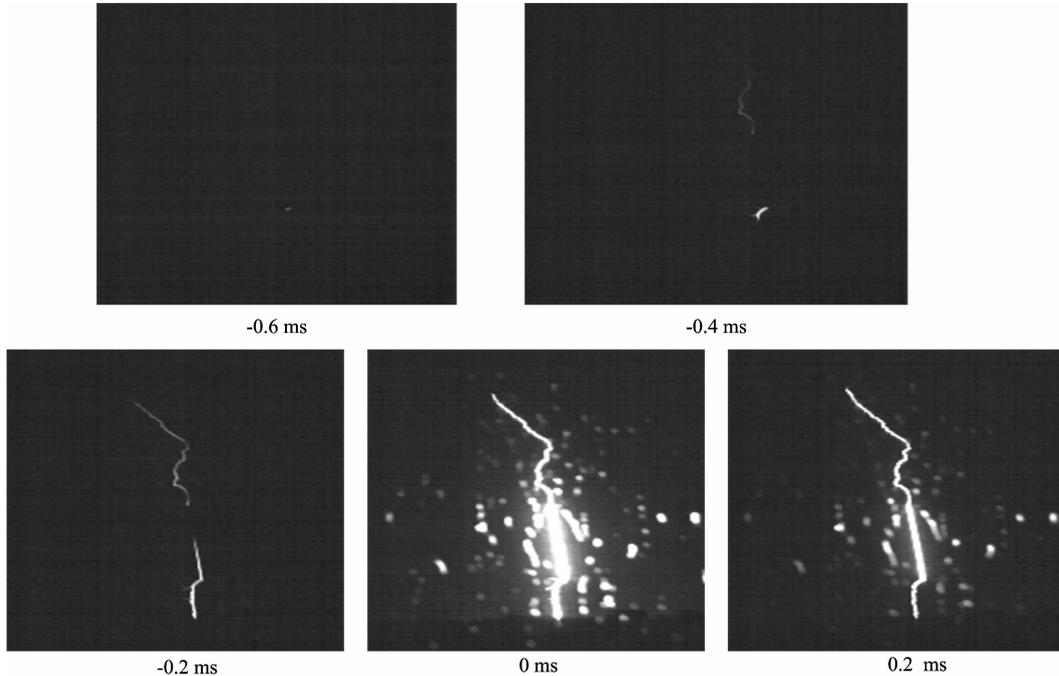


图 1 空中触发闪电双向先导的产生及发展过程

Fig. 1 Generation and development of the bidirectional leader process of altitude triggered lightning

2 通道辐射特性分析

由于光谱仪只拍摄到部分闪电通道, 为了更直观的分析闪电通道的光谱变化图 1 给出了利用 MotionPro HS-4 高速黑白相机拍摄的空中触发闪电的双向先导的产生及发展过程, 图 2 给出了光谱仪获得的通道原始光谱, 将上行正先导接地时刻定义为 0 ms。图 1 中 -0.6 ms 火箭拖带细金属导线升空, 细金属导线主要成份为铁。当金属导线被拉出大约 412 m 时导线下部断裂, 金属导线在空中形成孤立导体, 在其两端激发产生一个双向传输的先导, 其中下端距离地面大约 204 m, 在金属导线顶端激发向上的正先导, 并向云中传播, 导线的下端产生向下的负极性先导向地面传播, 如图 1 中 -0.4 ms, 图 2 中的 -0.334 ms (部分通道未进入图中), 此阶段未观测到光谱, 主要原因有两方面, 首先是先导通道的光辐射比较弱, 其次光谱仪距离引雷点较远, 光谱经摄谱仪分光后强度又会降低很多。

当负先导接近地面时, 地面将激发向上的连接正先导, 正负先导连接后形成一小回击过程如图 2 中的 -0.167 ms, 随着小回击的产生, 金属导线开始气化, 产生较强的金属谱线, 如图 2 中的 0 ms 中部以及 0.167 ms, 此导线段通道光

谱持续了约 140 ms, 而空气段通道仅仅持续了 1 张图, 即 0.167 ms。上行先导则继续向上发展, 此次空中触发闪电仅有初始阶段, 没有回击。实验中共获得了小回击以及上行正先导阶段两幅可分辨的光谱, 金属段由于亮度强, 分辨率较低无法标定。

表 1 氮、氧、铁的电离能^[6]

Table 1 Ionization energies of nitrogen, oxygen and iron			
电离能/eV	N	O	Fe
I	14.53	13.62	7.902
II	29.60	35.12	16.20
III	47.44	54.94	30.65

闪电通道的峰值电流高达几千安培, 可将闪电通道中分子原子瞬间分解电离, 由于大气以氮气、氧气为主, 因此, 通道等离子体中以 N I, N II, O I, O II 粒子为主, 目前 N III, O III 离子谱线的报道比较少^[7-9], 其中一些谱线的上激发能高于 30 eV, 例如 N II 517.9 nm 上激发能为 30.12 eV; O II 425.3 nm 上激发能为 34.23 eV; O II 419.0 nm 上激发能为 31.32 eV。表 1 给出了氮、氧、铁元素的电离能, 可以看到 Fe I, Fe II, Fe III 的电离能都远低于同级的氮、氧的电离

能, FeIII 的电离能也低于闪电通道中一些激发能高的谱线。实际上 N₂ 和 O₂ 离解为 N 和 O 还需要一定的离解能。其次, 导线通道气化后的粒子数密度也大于空气段。因此, 在电流强度相同的情况下, 人工触发闪电通道的导线段有更多的粒

子被激发, 能产生更多的光谱辐射, 即图 2 中 0 ms 闪电照片上导线段通道的亮度远强于空气段, 导线段通道的光谱强度也远强于空气段。同理在随后的等离子体通道消散阶段导线段闪电通道的复合反应持续时间也更长。

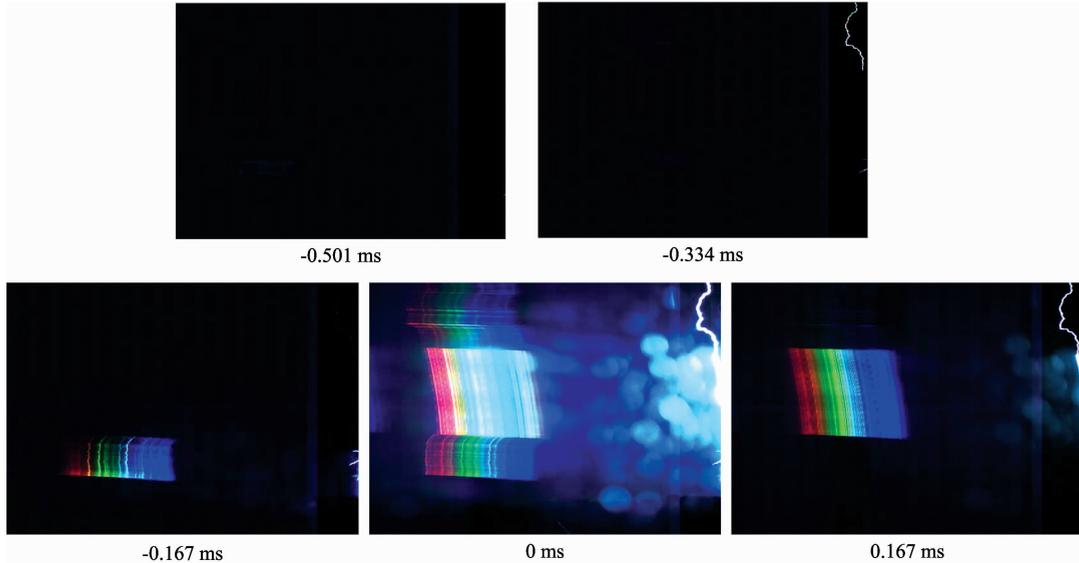


图 2 空中触发闪电产生及发展过程的原始光谱

Fig. 2 Spectra of bidirectional leader process of altitude triggered lightning

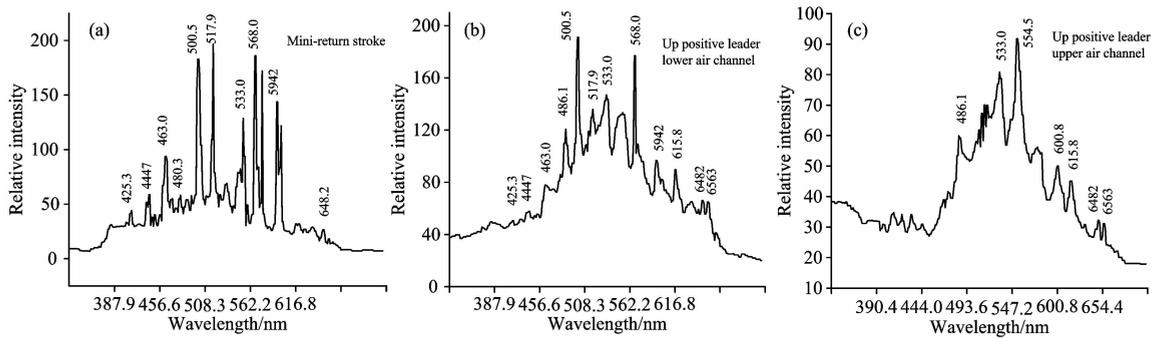


图 3 空中触发闪电小回击(a)、上行正先导导线段上部(b)、下部空气段光谱(c)

Fig. 3 Spectra of mini-return stroke (a) and the upper (b) and lower (c) air portion of upward positive leader channel

图 3 给出了小回击以及其后的上行正先导导线段上部及下部空气段某一高度的光谱图, 图中横坐标为波长, 纵坐标为谱线的相对强度, 其中, 小回击与上行正先导下部为同一高度。表 2^[10-11] 给出了主要光谱的跃迁参数, 小回击通道光谱主要由 N II 离子低激发态之间的跃迁组成, 同袁萍等给出的广东地区自然闪电光谱相比, 可以发现小回击不包含波长为 N II 407.5 nm, N II 436.9 nm 以及 N II 419.0 nm 等广东地区的强闪电特征谱线^[10-11], 具有 N II 444.7 nm, N II 517.9 nm, N II 616.8 nm 等广东地区一般闪电的特征谱线, 以及 N II 500.5 nm, N II 568.0 nm 等闪电的基本谱线。因此, 可以得出小回击同广东地区一般自然闪电有着相似的光谱结构。

同小回击阶段相比上行正先导阶段导线段上部、下部空

气段的连续背景辐射增强见图 3(a), (b)和(c), 短波段的线状谱线 O II 425.3 nm, N II 444.7 nm, N II 463.0 nm, N II 480.3 nm 等强度减弱, 即将湮没在背景辐射中。下部空气段激发能较高的谱线强度例如 N II 517.9 nm(30.14 eV), N II 616.8 nm (25.15 eV), N II 425.3 nm(34.23 eV)等有较大幅度的减弱, 开始出现了 H_α, H_β, O I 615.8 nm 等激发能较低的谱线。以上现象表明随着通道能量的减小, 谱线强度逐渐减小, 具有高激发能的谱线开始消失, 低激发能的谱线开始出现, 具有回击后期的光谱结构。

上行正先导导线通道上部空气段分辨出的谱线较少, 出现的谱线上激发能都比较低, 同其他两个通道相比出现了 N I 600.8 nm。目前关于闪电先导光谱的资料较少^[12-13], 闪电正先导通道的光谱基本未见报道。

表 2 人工触发闪电通道光谱参数
Table 2 Spectral parameters of artificial triggered lightning channel

谱线 /nm	小回击 (强度)	上行正先导(强度)		跃迁	$g_i A_k$	激发能/eV
		下部	上部			
425.3	44.12	—	—	$O II \ 2p^2(^1D) \ 4f^2 \ H_{11/2}-2p^2(^1D) \ 3d^2G_{9/2}$	—	34.233
444.7	58.81	57.9	—	$N II \ 2s^2 2p3p-2s^2 2p3d$	5.60×10^8	23.196 37
463.0	93.78	77.80	—	$N II \ 2s^2 2p3s-2s^2 2p3p$	3.70×10^8	21.159 914
480.3	58.04	—	—	$N II \ 2s^2 2p3p-2s^2 2p3d$	2.22×10^8	23.246 032
500.5	182.98	191.18	—	$N II \ 2s^2 2p3p-2s^2 2p3d$	1.03×10^9	23.141 958
517.9	196.68	126.09	—	$N II \ 2s^2 p2(^4P)3p-2s^2 p2(^4P)3d$	1.18×10^9	30.138 938
533.0	69.07	147.01	80.95	$O I \ 2p3(4S^o) \ 5d \ 5D^o-2p^3(^4S^o) \ 3p^5P_3$	0.244×10^8	13.066
568.0	185.99	177.03	—	$N II \ 2s^2 2p3s-2s^2 2p3p$	3.47×10^8	20.665 516
594.2	143.79	96.74	—	$N II \ 2s^2 2p3p-2s^2 2p3d$	3.83×10^8	23.246 032
616.8	31.953	—	—	$N II \ 2s^2 2p3d-2s^2 2p4p$	1.86×10^8	25.151 602
615.8	—	89.61	45.10	$O I \ 2p3(4S^o) \ 4d \ 5D^o-2p3(4S^o) \ 3p^5P_3$	0.686×10^8	12.754
648.2	26.66	66.052	32.19	$N II \ 2s^2 2p3s-2s^2 2p3p$	7.74×10^7	20.409 132
656.3	18.04	64.95	31.17	$H_a \ 3d^2D_{3/2}-2p^2P^o_{3/2}$	—	12.088
600.8	—	—	50.02	$N I \ 2p^2(^3P)3p^2S^o_{1/2}-2p^2(^3P)4d^2P_{3/2}$	7.160×10^{-2}	13.665
486.1	—	120.70	—	$H_{\beta} \ 2^2P^o-4^2D$	—	12.748

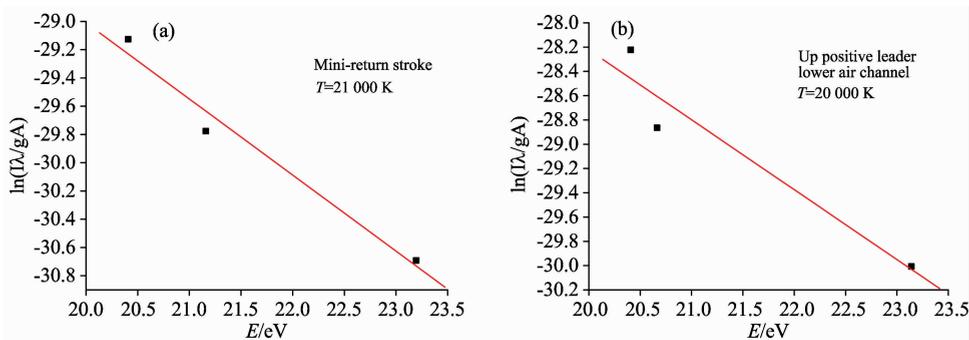


图 4 小回击及上行正先导上部通道温度

Fig. 4 Temperature of mini-return stroke (a) and (b) the upper air portion of upward positive leader channel

温度是闪电通道的基本参数，闪电通道的电离率、离子浓度、谱线辐射强度等都与温度有密切的关系。目前，闪电通道温度的计算方法主要有多谱线法^[14-15]，图 4(a)和(b)给出了依据多谱线法由 N II 444.7 nm, N II 463.0 nm, N II 648.2 nm 等氮离子谱线获得的通道温度，小回击通道以及上行正先导通道下部空气段温度分别为 21 000 和 20 000 K，上行正先导通道下部空气段由于谱线较少没有获得通道温度。有研究^[8]给出的广东地区自然闪电通道温度为 29 000~34 000 K，可以发现小回击通道温度低于自然闪电温度。

3 结 论

通过对广东地区一次空中触发闪电过程的小回击和上行

正先导通道的发射光谱的分析，得到以下结论：

(1) 在电流强度相同的情况下，人工触发闪电通道的导线段有更多的粒子被激发，能产生更多的光谱辐射，导线段通道的亮度远强于空气段，导线段通道的光谱强度也远强于空气段。在随后的等离子体通道消散阶段导线段闪电通道的复合反应持续时间也 longer。

(2) 空中触发闪电小回击通道具有 N II 444.7 nm, N II 517.9 nm, N II 616.8 nm 等广东地区一般闪电的特征谱线，同广东地区一般自然闪电有着相似的光谱结构，通道温度略低于自然闪电；上行正先导导线通道下部具有回击后期的光谱结构。

References

[1] ZHANG Yi-jun, LÜ Wei-tao, ZHANG Yang, et al(张义军, 吕伟涛, 张 阳, 等). High Voltage Engineering(高电压技术), 2013, 39 (2): 383.
[2] Zhang Yijun, Yang Shaojie, Lu Weitao, et al. Atmospheric Research, 2014, 135-136: 330.

- [3] Zhang Yijun, Lv Weitao, Chen Shaodong, et al. *China. J. Meteor. Res.*, 2016, 30(5): 800.
- [4] Orville R E. *J. Geophys. Res.*, 1967, 72: 3557.
- [5] Wang Xuejuan, Yuan Ping, Cen Jianyong, et al. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 033503.
- [6] YUAN Ping, LIU Xin-sheng, ZHANG Yi-jun, et al(袁 萍, 刘欣生, 张义军, 等). *Acta Geophysica Sinica(地球物理学报)*, 2004, 47(1): 42.
- [7] ZHANG Hua-ming, YUAN Ping, YANG Shi-gang, et al(张华明, 袁 萍, 杨世刚, 等). *Acta Photonica Sinica(光子学报)*, 2010, 39(6): 998.
- [8] Zhang Huaming, Yuan Ping, Zhang Yijun, et al. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(10): 998. (英文版)
- [9] Salanave L E, Orville R E, Richards C N. *J. Geophys. Res.*, 1962, 67: 1877.
- [10] YUAN Ping, LIU Xin-sheng, ZHANG Yi-jun, et al(袁 萍, 刘欣生, 张义军, 等). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2002, 51(11): 2495.
- [11] YUAN Ping, LIU Xin-sheng, ZHANG Yi-jun, et al(袁 萍, 刘欣生, 张义军, 等). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2003, 52(3): 561.
- [12] Warner T A, Orville R E, Marshall J L. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116(D12): 1248.
- [13] Chang Xuan, Yuan Ping, Cen Jianyong. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2017, 159: 41.
- [14] QU Hai-yan, YUAN Ping, ZHANG Hua-ming, et al(瞿海燕, 袁 萍, 张华明, 等). *Acta Geophysica Sinica(地球物理学报)*, 2012, 55(8): 2508.
- [15] ZHANG Hua-ming, ZHANG Yi-jun, LÜ Wei-tao, et al(张华明, 张义军, 吕伟涛, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(6): 1692.

The Spectra Characteristic of Altitude Triggered Lightning Channel

ZHANG Hua-ming^{1,2}, ZHANG Yi-jun^{1,3}, LÜ Wei-tao¹, ZHANG Yang¹, QI Qi¹, QIAN Yong^{1,4}, FAN Yan-feng¹

1. Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China
2. Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Shanxi Province, Taiyuan 030002, China
3. Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China
4. Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Xinjiang, Urumqi 830001, China

Abstract Spectra of altitude triggered lightning channel in the range of 400~660 nm had been obtained by Slit-less spectrograph. The spectra of mini-return stroke and upward positive leader channel were analyzed. The difference of the spectra between metal and air of the lightning channel was discussed. It is shown that duration of the spectra of metal channel was about 140 ms, while the air portion channel was only 0.167 ms. The reasons why the metal channel has high brightness and long duration were given through analyzing the excitation energy and ionization energy of Fe, N, O elements. When the current intensity is same, there are more excited particles in the metal than in the air channel which leads to trigger lightning channel to generate more radiation, brighter channel and stronger spectral intensities. And what is more, the duration of the recombination processes of metal channel was also longer in the subsequent phase of dissipating the plasma channel. Through comparing the spectra structure and temperature of mini-return stroke and lower and upper air portion of positive leader channel to the natural lightning in Guangdong, it depicted that the spectra of mini-return stroke channels were mainly composed of transitions between low excited states of N II ions, and had N II 444.7 nm, N II 517.9 nm, N II 616.8 nm which were the characteristic lines of the general intensity natural lightning in Guangdong area. The spectra with high excitation energy in the lower air portion channel of upper positive leader began to disappear. The spectral with low excitation energy such as H_α , H_β , and O I 615.8 nm appeared, and had spectral structure of the late stage of lightning return stroke. The temperature of the mini-return stroke and lower air portion upward positive leader channel were 21 000 and 20 000 K, lower than natural lightning temperature.

Keywords Altitude triggered lightning; Metal channel; Air channel; Lightning spectra

(Received Dec. 4, 2017; accepted Apr. 21, 2018)