

闪电通道温度诊断中观测距离的影响*

王瑞燕¹⁾ 袁萍^{1)†} 岑建勇¹⁾ 王雪娟¹⁾ 王杰²⁾

1) (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, 兰州 730070)

2) (中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

(2013年12月12日收到; 2014年1月14日收到修改稿)

利用无狭缝光栅摄谱仪获得了青海高原地区云对地闪电首次回击过程的光谱, 运用比尔-朗伯定律, 考虑传播过程中谱线强度的衰减, 计算讨论了观测距离对通道温度诊断结果的影响. 结果表明, 不同观测距离下得到的光谱诊断放电通道温度, 其结果有一定差异; 远距离观测得到的温度小于近距离观测的结果; 观测距离越远, 所得温度的误差越大. 因此, 在远距离观测的情况下, 修正更为重要. 由计算结果, 得到了温度修正的半经验公式, 由此, 可以扣除观测距离对闪电通道温度诊断结果的影响.

关键词: 闪电光谱, 观测距离, 通道温度, 比尔-朗伯定律

PACS: 92.60.pw, 78.35.+c, 92.60.-e

DOI: 10.7498/aps.63.099203

1 引言

雷电灾害及其防护一直是人们关注的问题^[1-3], 闪电放电通道物理特性的研究是雷电预警、防护工作的理论依据. 目前人们对闪电的研究方法主要包括多站点的电磁辐射场观测^[4,5]、光学观测^[6,7], 发射光谱的观测和分析^[8,9]等. 通过多站点的电磁辐射场观测不仅可以估算放电电流, 还可以确定闪电发生的位置. 光学观测可得到闪电放电通道的发展情况, 但是通道内部的物理特性只能通过发射光谱诊断. 闪电放电通道是典型的等离子体通道, 温度是反映等离子体特性的基本参数之一^[10-12]. 依据光谱信息是目前获取通道温度的唯一途径^[13]. Orville和Henderson^[14] (1984)利用中性原子谱线777.4/794.7 nm (OI)和844.7/794.7 nm (OI)计算了闪电发展后期的通道温度. Weidman^[15] (1989)等研究了人工触发闪电在850—1400 nm近红外波段的光谱辐射特性, 根据中性原子的谱线868.0/1011.3 nm (NI)推得通

道平均温度. 王雪娟^[16], Cen等^[17]用光谱可见范围的谱线计算了闪电在峰值电流阶段的通道温度. Qu等^[18]将闪电光谱与电学资料相结合, 分析了闪电通道温度与电流作用积分的相关性. 与实验室光谱观测不同, 自然闪电的光谱观测距离一般在10 km以内, 由于光在大气中传播至观测点的过程中其强度有一定的衰减, 以往对通道温度的研究都是直接利用了试验观测的光谱信息, 没有考虑观测距离对计算结果的影响.

本工作依据云对地闪电首次回击过程的光谱, 运用比尔-朗伯定律, 考虑传播过程中谱线强度的衰减, 计算讨论了观测距离对通道温度诊断结果的影响, 为闪电通道物理特性的定量研究提供了参考依据.

2 理论方法

2.1 光的衰减

依据比尔-朗伯定律, 一束光强为 I_0 的单色平行光束垂直照射均匀介质并在其内传播, 传播一段

* 国家自然科学基金(批准号: 11365019)和中国科学院环境光学与技术重点实验室开放基金(批准号: 2005DP173065-13-01)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yuanyan@nwnu.edu.cn.

距离后的光强为

$$I_x = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

其中 I_0 为初始光强, I_x 为光辐射传播一段距离后的强度, α 表示衰减系数, x 为传输的距离. 根据散射和吸收的不同作用机理, α 可写成^[19,20]

$$\alpha = \sigma_m + k_m + \sigma_a + k_a, \quad (2)$$

上式中 σ_m , k_m 为分子散射系数和分子吸收系数, σ_a , k_a 为气溶胶散射系数和气溶胶吸收系数.

2.1.1 分子衰减

分子散射系数 σ_m 为^[21,22]

$$\sigma_m = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3N_V\lambda^4} \left(\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right), \quad (3)$$

式中, n 为空气折射率, N_V 为单位体积内气体分子数, λ 为波长. δ 为散射辐射的退偏振因子, 一般取 $\delta = 0.035$ ^[23]. 从 (3) 式中可以看出, 散射系数 σ_m 与 λ^4 成反比, 分子散射对可见光和紫外波段贡献较大.

分子的吸收系数 k_m 随波长的变化相当复杂, 由于气体分子吸收带的复杂性导致大气对光的吸收随波长呈现振荡的形式^[19]. 大气中主要成分氧气、氮气、水分子在可见光波段的吸收都很弱, 而本论文主要涉及可见波段, 大气成分引起的吸收损耗可以不考虑.

2.1.2 气溶胶衰减

大气气溶胶对光的衰减包含散射与吸收两部分. 当散射粒子的半径增大到一定尺度时, 为气溶胶散射. 气溶胶衰减系数 β_a 为^[24]

$$\beta_a = \frac{3.912}{V_M} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q, \quad (4)$$

其中 $\beta_a = \sigma_a + k_a$, 包括气溶胶散射系数和吸收系数. V_M 为大气能见度^[25], q 为波长的修正因子, 与能见度有关 ($V_M \leq 6$ km 时 $q = 0.585V_M^{1/3}$; 平均能见度 (10—12 km) 时 $q = 1.3$; 能见度特别良好 (23 km) 时 $q = 1.6$). 依据当地气象局的观测资料, 能见度取值为 10 km.

2.2 闪电放电通道温度

利用光谱信息计算放电通道温度, 需两个基本假设: 1) 闪电放电通道是光学薄的; 2) 通道满足局部热力学平衡条件 (LTE)^[26-28]. Uman 等^[29] 对

闪电光谱的研究证实闪电通道对 NII 离子线是光薄的. Griem^[30] 的研究, 也表明闪电通道内 NII 离子的准平衡时间、电子和离子动能的平衡时间都在 0.01 μ s 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.

在局部热力学平衡的条件下, 谱线强度可写成^[31]

$$I = \frac{h\nu gA}{4\pi Z} N e^{-\frac{E}{kT}}, \quad (5)$$

其中, I 为光谱线强度, h 为普朗克常数, ν 为谱线频率, g , A , Z 和 E 分别表示统计权重, 跃迁概率, 配分函数和相应跃迁的上激发能, k 为波尔兹曼常数. N 为辐射离子激发态的布局数, T 为温度.

对同种元素的谱线, 方程 (5) 可改写为^[18]

$$\ln \left(\frac{I\lambda}{gA} \right) = -\frac{E}{kT} + c, \quad (6)$$

其中, c 为常数, λ 为跃迁波长. 以 E 为横坐标, $\ln \left(\frac{I\lambda}{gA} \right)$ 为纵坐标作图, 用最小二乘法拟合直线, 由直线的斜率 $-\frac{E}{kT}$ 得到温度 T .

3 数据分析

闪电光谱由无狭缝光栅摄谱仪获得, 其分光元件是每毫米 600 条刻痕的透射光栅, 记录系统是高速摄像机, 记录速度为每秒 3000 帧, 每帧曝光时间为 333.3 μ s, 波长范围为 400—1000 nm^[32]. 本文选取 2012 年 7 月 19 日青海省大通县一次雷暴过程中六次闪电首次回击的光谱来进行研究. 原始光谱是对闪电云外全通道分光的图片, 选取通道上光谱分辨较好的一些位置, 将其转化为谱线相对强度表示的光谱图. 图 1 是各回击通道某一高度处的光谱, 每张光谱以闪电发生的时间命名, R0 表示首次回击.

以往, 对通道温度的研究都是直接利用了试验观测的光谱信息, 由于光在大气中传播的吸收衰减, 依据远距离观测的光谱计算的通道温度会有一定误差. 试验观测中, 光在传播路径上没有障碍物遮挡, 若忽略对流等因素, 可将周围大气近似看作均匀介质. 通过 (2), (3), (4) 式可以计算出闪电通道温度诊断中常用谱线所对应的分子散射系数 σ_m , 气溶胶衰减系数 β_a 以及总的衰减系数 α , 其数值在表 1 中列出.

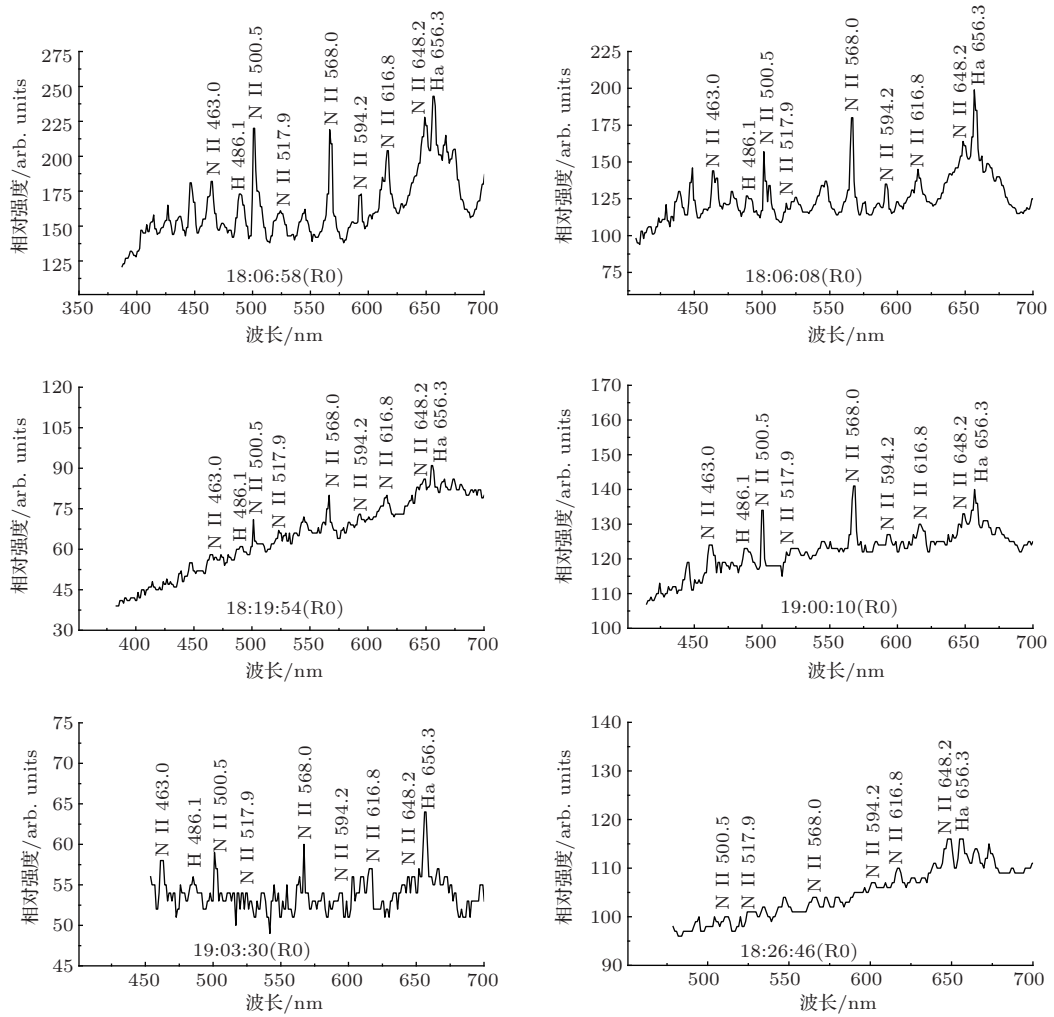


图1 用谱线相对强度表示的放电通道的光谱图

表1 不同波长的谱线对应的衰减系数

波长/nm	463.0	500.5	517.9	568.0	594.2	616.8	648.2
$\sigma_m/10^{-2}km^{-1}$	2.3845	1.7463	1.5231	1.0527	0.8790	0.7571	0.6207
β_a/km^{-1}	0.4893	0.4422	0.4230	0.3751	0.3538	0.3370	0.3159
a/km^{-1}	0.5132	0.4597	0.4382	0.3857	0.3625	0.3446	0.3221

表1给出衰减系数随波长的变化,可以看到,随着波长的增大,衰减系数逐渐减小.依据试验光谱上的谱线强度和衰减系数,由(1)式,可得到每条谱线在不同距离的强度.方便起见,以6个闪电的观测距离、以及0.01 km, 1 km, 9 km为参考,讨论了闪电光谱中7条NII离子谱线的强度随距离的衰减,如图2所示.可以看出,所有谱线的强度在3 km处已衰减为源附近(0.01 km)的1/3—1/4,而且波长较短的谱线衰减更快,到9 km处谱线强度已衰减到一个很小的数值.

基于光谱信息^[18,33],选择NII离子的多条跃迁谱线,依据谱线相对强度及相应的跃迁参数,由(6)式计算得到回击通道的温度.根据闪电回击通道的光谱特征,选取通常容易观测到的谱线、采用三种不同的谱线组合(表2)计算温度.

表2 不同的谱线组合

谱线组合	谱线/nm
a	463.0, 517.9, 568.0, 594.2, 616.8, 648.2
b	500.5, 517.9, 568.0, 594.2, 616.8, 648.2
c	463.0, 500.5, 517.9, 568.0, 594.2, 616.8, 648.2

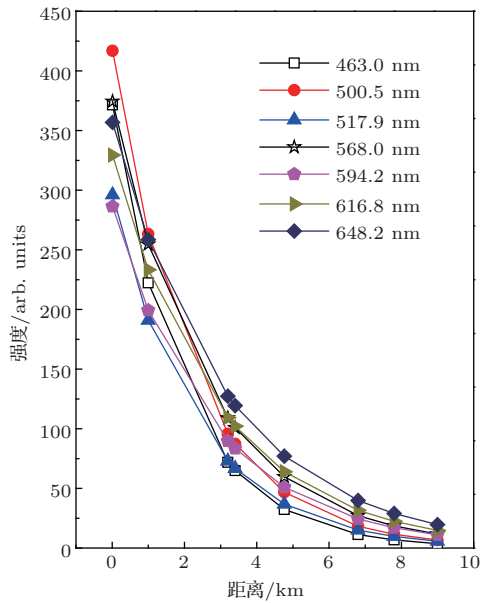


图2 (网刊彩色) 不同波长谱线的强度随着观测距离的变化

图3给出在不同的观测距离下, 分别采用三种谱线组合得到的通道温度(闪电18:26:46中没有观测到谱线463.0 nm). 可以看出, 选取不同的谱线组合, 计算结果略有差异, 组合a, c的一致性较好; 另外, 计算得到的通道温度随观测距离的增大而减小; 并且, 不同闪电的温度变化规律有较好的一致性. 依据图3不同距离计算的通道温度, 在上述三种组合下, 分别对每个闪电拟合曲线, 并对拟合参数取平均, 得到半经验公式为

$$T(x) = T'_0 / (1 + \bar{\gamma}x), \quad (7)$$

其中 T'_0 表示在光源附近(0.01 km)得到的通道温度, x 为观测点与闪电通道的水平距离, $T(x)$ 为由距离闪电 x 处观测的光谱得到的通道温度, $\bar{\gamma}$ 是与谱线有关的参数, 通过拟合计算, 其数值由表3给出.

表3 每一种谱线组合的参数 $\bar{\gamma}$

谱线组合	a	b	c
$\bar{\gamma}$	0.006432	0.018322	0.00589

表4给出不同闪电的通道温度及修正, 第一列是回击发生的时间; 第2列是闪电通道与观测点的水平距离, 试验中通过测定雷声与光的时间差得到. $T_{\text{实}}$ 表示由实测光谱得到的通道温度, T_0 表示用由衰减(1)式推出的0.01 km处的谱线强度计算得到的通道温度, T'_0 表示用半经验公式计算得到的距离闪电通道0.01 km处的通道温度, e_1 表示 $T_{\text{实}}$ 相对于 T_0 的误差, e_2 表示 $T_{\text{实}}$ 相对于 T'_0 的误差.

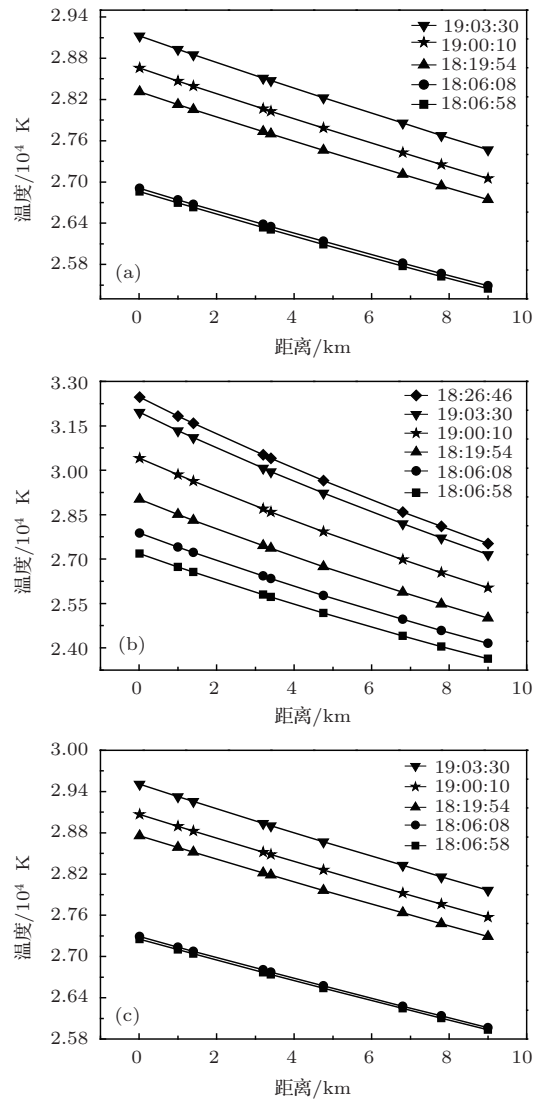


图3 不同谱线组合下闪电通道温度随距离的变化((a), (b), (c)分别由组合a, b, c得出)

表4中, 由实测光谱计算的六次闪电的通道温度在26380—28320 K之间, 由于选择的谱线不同, 计算得到的结果有一定差异, 三组结果的最大相对误差在1.60%以内. 通过分析表4可知, 同一谱线组合中, 相对误差 e_1 与 e_2 的变化规律基本一致, 都是随着观测距离的增大而增大. 相比于其他五次闪电, 闪电18:26:46的观测距离最远(7.8 km), 对应的两个相对误差均是最大, 分别为13.43%和12.50%. 因此在远距离观测的情况下, 对温度的修正更为重要. 另外, 组合a, c的相对误差比较接近, 并且都比组合b的相对误差小. b, c中都用了谱线500.5 nm进行分析, 这条谱线是NII离子激发能为23.142 eV, 23.415 eV, 20.940 eV的多重态跃迁的共同贡献. 因此, 在实际应用中, 选用谱线组合a进行计算更合理. 依据上述结果, 利用观测光谱和半经验公式可以直接得到修正后的通道温度.

表4 不同闪电的通道温度及修正

闪电	观测距离/km	谱线组合	通道温度/K			相对误差/%	
			$T_{\text{实}}$	T_0	T'_0	e_1	e_2
18:06:58	1.4	a	26630	26850	26869	0.82	0.88
		b	26560	27170	27241	2.24	2.49
		c	27040	27250	27262	0.77	0.81
18:06:08	3.2	a	26380	26900	26922	2.26	2.01
		b	26420	27870	27969	5.20	5.53
		c	26800	27290	27305	1.79	1.84
18:19:54	3.4	a	27690	28120	28295	1.52	2.13
		b	27360	29010	29064	5.68	5.86
		c	28180	28750	28744	1.98	1.96
19:00:10	4.76	a	27780	28650	28630	3.03	2.96
		b	27920	30400	30354	8.15	8.01
		c	28250	29060	29042	2.78	2.72
19:03:30	6.8	a	27850	29120	29068	4.36	4.19
		b	28190	31950	31702	11.76	11.07
		c	28320	29500	29454	4.00	3.85
18.26.46	7.8	b	28100	32460	32115	13.43	12.50

4 结 论

由于光在传播过程中的衰减, 由远距离观测的光谱诊断的温度小于实际值. 而且, 观测距离越远, 误差越大. 依据三种谱线组合下的诊断温度随距离变化的规律, 得到了温度计算值的半经验修正公式, 为闪电过程物理特性的研究及相应的实验资料分析提供了参考.

参考文献

[1] Zhang J C, Yuan P, Ouyang Y H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8287 (in Chinese)[张景川, 袁萍, 欧阳玉花 2010 物理学报 **59** 8287]

[2] Jang R B, Qie X S, Wang C X, Yang J, Zhang Q L, Liu M Y, Wang J F, Liu D X, Pan L X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 079201 (in Chinese)[蒋如斌, 郗秀书, 王彩霞, 杨静, 张其林, 刘明元, 王俊芳, 刘冬霞, 潘伦湘 2011 物理学报 **60** 079201]

[3] Ouyang Y H, Yuan P, Jia X D, Wang X Y, Xue S M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084303 (in Chinese)[欧阳玉花, 袁萍, 贾向东, 王小云, 薛思敏 2013 物理学报 **62** 084303]

[4] Zhang G S, Wang Y H, Qie X S, Zhang T, Zhao Y X, Li Y J, Cao D J 2010 *Sci. China Earth Sci.* **40** 523 (in Chinese)[张广庶, 王彦辉, 郗秀书, 张彤, 赵玉祥, 李亚珺, 曹冬杰 2010 中国科学 **40** 523]

[5] Zhou B H, Guo J M, Qiu S, Li Y X, Zhu K E 2012 *Chinese J. Geophys.* **55** 1114 (in Chinese)[周璧华, 郭建明, 邱实, 李炎新, 朱凯鄂 2012 地球物理学报 **55** 1114]

[6] Kong X Z, Qie X S, Zhao Y, Zhang T, Zhang G S, Dong W S 2006 *Chinese J. Geophys.* **49** 993 (in Chinese)[孔祥贞, 郗秀书, 赵阳, 张彤, 张广庶, 董万胜 2006 地球物理学报 **49** 993]

[7] Lu W T, Chen L W, Ma Y, Rakov V A, Gao Y, Zhang Y, Yin Q Y, Zhang Y J 2013 *Geophys. Res. Lett.* **40** 5531]

[8] Qu H Y, Yuan P, Zhang H M, Qie X S 2012 *Chinese J. Geophys.* **55** 2508 (in Chinese)[瞿海燕, 袁萍, 张华明, 郗秀书 2012 地球物理学报 **55** 2508]

[9] Zhao J C, Yuan P, Cen J Y, Liu J G, Wang J, Zhang G S 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 163303

[10] Zhao X Y, Yuan P, Wang J, Shen X Z, Guo Y X, Qiao H Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3243 (in Chinese)[赵学燕, 袁萍, 王杰, 申晓志, 郭逸萧, 乔红贞 2009 物理学报 **58** 3243]

[11] Li M, Wu J, Wang L P, Wu G, Han J J, Guo N, Qiu M T 2012 *Chin. Phys. B* **22** 125202

[12] Nakimana A, Tao H Y, Hao Z Q, Sun C K, Gao X, Lin J Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014209

[13] Wang D H, Qie X S, Guo C M 2000 *Lightning and artificial triggering lightning* (Shanghai: Shanghai jiao tong university Press) p10 (in chinese) [王道洪, 郗秀书, 郭昌明 2000 雷电与人工引雷(上海: 上海交通大学出版社) 第 10 页]

[14] Orville R E, Henderson R W 1984 *J. Atmos. Sci.* **41** 3180

- [15] Weidman C, Boye A, Crowell L 1989 *J Geophys Res.* **94** 13249
- [16] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, Zhang T L, Xue S M, Zhao J C, Xu H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 109201 (in Chinese)[王雪娟, 袁萍, 岑建勇, 张廷龙, 薛思敏, 赵金翠, 许鹤 2013 物理学报 **62** 109201]
- [17] Cen J Y, Yuan P, Qu H Y, Zhang T L 2011 *Phys. Plasmas* **18** 113506
- [18] Qu H Y, Yuan P, Zhang T L, Chang Z S 2011 *Phys. Plasmas* **18** 013504
- [19] Song Z F 1988 *laser journal* **9** 1 (in Chinese) [宋正方 1988 激光杂志 **9** 1]
- [20] Yang R K, Ma C L, Han X E, Su Z L, Jian T J 2007 *Infrared and Laser Engineering* **36** 415 (in Chinese) [杨瑞科, 马春林, 韩香娥, 苏振玲, 鉴佃军 2007 红外与激光工程 **36** 415]
- [21] Gan X J, Guo J, Wang B, Fu Y Y 2006 *Journal of Changchun University of Science and Technology* **29** 8 (in Chinese) [甘新基, 郭劲, 王兵, 付有余 2006 长春理工大学学报 **29** 8]
- [22] McCartney E J (translated by Pan N X) 1988 *Optics of the atmosphere* (Beijing: Science Press) pp122–334 (in Chinese) [麦卡特尼 E J 著 (潘乃先译) 1988 大气光学 (北京: 科学出版社) 第 122—334 页]
- [23] Li D, Chen H 2011 *Electronic Design Engineering* **9** 1 (in Chinese)[李娣, 陈辉 2011 电子设计工程 **9** 1]
- [24] Jia J Z, Song D A, Jia R Y, Si G S 2010 *Electronic Information Warfare Technology* **25** 73 (in Chinese) [贾建周, 宋德安, 贾仁耀, 司贯生 2010 电子信息对抗技术 **25** 73]
- [25] Kwon T M 2004 *Atmospheric Visibility Measurements Using Video Cameras: Relative Visibility* p1
- [26] Prueitt M L 1963 *J Geophys Res.* **68** 803
- [27] Uman M A 1964 *J. Atmo. Terr Phys.* **26** 123
- [28] Uman M A, Orville R E, Salanave L E 1964 *Atmos. Sci.* **21** 306
- [29] Uman M A, Orville R E 1965 *J Geophys Res.* **70** 5491
- [30] Griem H R 1964 *Plasma Spectroscopy*(New York: McGraw Hill Book Company) p580
- [31] Lochte-Holtgreven W 1995 *Plasma Diagnostics* (AIP, California) p178
- [32] Cen J Y, Yuan P, Xue S M 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 035001
- [33] Warner T A, Orville R E, Marshall J L, Huggins K 2011 *J Geophys Res.* **116** D 12210

Influence of the observation distance on the lightning channel temperature studied by means of spectroscopic diagnosis*

Wang Rui-Yan¹⁾ Yuan Ping^{1)†} Cen Jian-Yong¹⁾ Wang Xue-Juan¹⁾ Wang Jie²⁾

1) (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)

2) (Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 12 December 2013; revised manuscript received 14 January 2014)

Abstract

The spectra for first return strokes of cloud-to-ground lightning discharge were obtained by a slit-less spectrograph at the Qinghai plateau of China. In this paper, the effect of the observation distance on diagnosis results of channel temperature was calculated and discussed by applying the Beer-Lambert law and considering the attenuation of spectral line intensity in transmission. Results show that there is some difference in channel temperature obtained at different observation distances. The observation distance is further enlarged, then the temperature obtained will be lower. Furthermore, at further increased distance we take observation, the bigger the error will be. So the correction for the temperature is more important for longer observation distance. According to our calculation and analysis, a semi-empirical formula has been obtained, which shows a relationship between the lightning channel temperature and the observation distance. The influence of the observation distance on lightning channel temperature could be eliminated by using the semi-empirical formula.

Keywords: lightning spectra, observation distance, channel temperature, Beer-Lambert law

PACS: 92.60.pw, 78.35.+c, 92.60.-e

DOI: [10.7498/aps.63.099203](https://doi.org/10.7498/aps.63.099203)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11365019), and the Open Fund of Key Laboratory of Environmental Optics and Technology of Chinese Academy of Science (Grant No. 2005DP173065-2013-01).

† Corresponding author. E-mail: yuanp@nwnu.edu.cn.