

依据光谱研究闪电放电通道的半径及能量传输特性*

王雪娟¹⁾ 袁萍^{1)†} 岑建勇¹⁾ 张廷龙²⁾ 薛思敏¹⁾ 赵金翠¹⁾ 许鹤¹⁾

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) (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730070)

(2012年11月13日收到; 2012年12月17日收到修改稿)

利用无狭缝摄谱仪获得的云对地闪电回击过程的光谱, 结合同步辐射电场变化资料, 计算了闪电放电通道的温度、线电荷密度、通道的初始半径和扩张后的半径以及回击通道单位长度储存的能量. 结果与文献报道的其他方法得到的结果符合很好. 这些物理量的相关性分析表明: 电弧通道的初始半径主要取决于回击电流的持续时间; 通道温度越高, 半径越大; 通道初始半径、单位长度储存的能量与光谱总强度正相关, 通道单位长度储存的能量与初始半径的平方成正比.

关键词: 闪电放电通道, 半径, 能量, 光谱总强度

PACS: 92.60.Pw, 52.80.Mg, 92.60.-e

DOI: 10.7498/aps.62.109201

1 引言

闪电的危害一直是人们关注的问题, 放电通道的物理特性是雷电防护和预警的理论依据^[1,2]. 电弧通道半径与放电电流及能量的传输密切相关, 闪电的光辐射也主要来自于电弧通道. 实验上, 电弧通道半径主要通过闪电对物体的破坏来测量, 文献^[3,4]根据闪电对金属的熔孔得到电弧通道半径的估计值. 由于闪电击中某一固定目标物的概率很低, 人们也通过建立各种理论模型来研究闪电放电的电弧通道半径^[5-8]. 依据光谱信息推算电弧通道半径的工作非常少.

能量及其传输是反映闪电放电特性的重要参数, 也与闪电产生氮氧化物的量密切相关, 目前这方面研究报道较少. Rakov 和 Uman^[9]运用气体动力学模型计算了回击发生几十微秒时通道单位长度储存的能量; Jayakumar 等^[10-15]也做了相关计算.

本文利用闪电回击光谱和同步辐射电场变化资料, 计算了回击通道内线电荷密度、通道半径及其单位长度储存的能量, 初步分析了多回击闪电中

电弧通道半径与回击电流持续时间的关系, 以及各回击光谱特征与放电通道半径、通道单位长度储存能量的相关性, 为雷电物理过程及伴随化学效应的研究提供了参考数据.

2 理论方法

2.1 电弧通道半径

Borovsky^[16]假定闪电回击通道为柱状的均匀电磁场, 提出了闪电的电力学模型. 依据此模型, 先导过程在通道中储存静电能. 之后, 强回击电流使通道迅速加热、分子离解和原子电离, 释放存储的能量. 通道在径向扩展之前的能量主要有三部分^[7]:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{disso}} + \mathcal{E}_{\text{thermal}} + \mathcal{E}_{\text{ioniz}}, \quad (1)$$

$\mathcal{E}_{\text{disso}}$ 为分子离解能, $\mathcal{E}_{\text{thermal}}$ 为通道扩展之前的内能, $\mathcal{E}_{\text{ioniz}}$ 为原子电离能.

$$\mathcal{E}_{\text{disso}} = \pi r_{\text{init}}^2 L n_{\text{molec}} \tau_{\text{disso}}, \quad (2)$$

$$\mathcal{E}_{\text{thermal}} = \pi r_{\text{init}}^2 L (1+f) \frac{3}{2} n_{\text{atomic}} k_B T_{\text{init}}, \quad (3)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 40905001)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yuanyan@nwnu.edu.cn

$$\varepsilon_{\text{ioniz}} = \pi r_{\text{init}}^2 L n_{\text{atomic}} f \tau_{\text{ioniz}}, \quad (4)$$

(2)—(4) 式中, r_{init} 为通道初始半径, L 为通道总长度, T_{init} 为通道扩展前的温度, 电离度 $f = 0.97$ [17], 玻尔兹曼常量 $k_B = 1.38 \times 10^{-16}$ erg/K, $\tau_{\text{disso}} = 9.8 \text{ eV} = 1.57 \times 10^{-11}$ erg 为 N_2 的离解能, $\tau_{\text{ioniz}} = 14.5 \text{ eV} = 2.33 \times 10^{-11}$ erg 为 NI 的第一电离能. n_{molec} , n_{atomic} 分别为通道未扩展时的分子和原子数密度, $n_{\text{molec}} = 0.5 n_{\text{atomic}}$ [7].

由能量守恒得闪电通道单位长度储存的能量为 [7]

$$\frac{\varepsilon}{L} = \lambda_q^2 \left[\frac{1}{2} + \lg \left(\frac{E_{\text{break}}}{E_{\text{cloud}}} \right) \right], \quad (5)$$

将 (1)—(4) 式代入 (5) 式, 得到

$$\begin{aligned} & r_{\text{init}} \\ &= \lambda_q \left[\frac{1}{2} + \lg \left(\frac{E_{\text{break}}}{E_{\text{cloud}}} \right) \right]^{1/2} (\pi n_{\text{atomic}})^{-1/2} \\ & \times \left[(1+f) \frac{3}{2} k_B T_{\text{init}} + \frac{1}{2} \tau_{\text{disso}} + f \tau_{\text{ioniz}} \right]^{-1/2}, \quad (6) \end{aligned}$$

其中, λ_q 为通道内线电荷密度, 空气的击穿电场值 $E_{\text{break}} = 2.0 \times 10^6$ V/m, 取雷暴云的背景电场值 $E_{\text{cloud}} = 5.0 \times 10^4$ V/m [7].

通道由于高压扩张后半径变大, 最终半径与初始半径的关系为 [7]

$$r_{\text{final}} = r_{\text{init}} \left[\frac{2}{5} + \frac{6}{5} (1+f) \frac{T_{\text{init}}}{T_{\text{atoms}}} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

式中, T_{atoms} 为通道外部空气的温度.

2.2 通道线电荷密度

回击通道内线电荷密度 λ_q 为

$$\lambda_q = Q/L. \quad (8)$$

基于闪电传输线模式下回击通道辐射峰值电场和峰值电流的关系 [18,19], 并结合负地闪回击峰值电流与通道中输送的总电荷量 Q 的半经验公式 [20], 得到

$$Q = \left(\frac{2\pi\varepsilon_0 c^2 S}{10.6v} E_{\text{max}} \right)^{10/7}, \quad (9)$$

其中 E_{max} 为辐射峰值电场, ε_0 为真空介电常数, c 为光速, S 为通道与地面观测站间的水平距离, v 为回击电流在地面附近沿通道传播的速度, 取 $v = 1.0 \times 10^8$ m/s [21–23].

2.3 通道温度

利用光谱信息计算闪电放电通道温度, 需建立在两个基本假设 [24,25]: 1) 通道是光学薄的; 2) 通道满足局部热力学平衡条件 (LTE). NII 离子是闪电回击通道中的主要成分, Uman 和 Orville [26] 通过对时间累积和时间分辨的闪电光谱的研究证实: 对 NII 闪电通道光薄. Griem [27] 的研究也表明: NII 的准平衡时间、闪电回击中的电子和离子动能的平衡时间都在 $0.01 \mu\text{s}$ 数量级, 所以相对于回击通道物理参数变化的时间而言, 通道满足局部热力学平衡.

在 LTE 模型下, 基于回击光谱, 利用多谱线法计算通道温度 [28]

$$\ln \left(\frac{I\lambda}{gA} \right) = -\frac{E_n}{kT} + c, \quad (10)$$

其中 c 为常数, λ 为跃迁波长. 选取 NII 的多条谱线, 依据观测的谱线强度 I 及跃迁参数 g, A, E_n . 以 E_n 为横坐标, $\ln(I\lambda/gA)$ 为纵坐标做图, 用最小二乘法拟合直线, 由直线的斜率 $-1/kT$ 得到通道温度 T .

3 资料分析

选取了青海 4 次地闪的 11 幅光谱观测资料, 光谱由无狭缝光栅摄谱仪获得, 其记录系统是 3CCD 数码摄像机, 分光装置是每毫米 600 条的光栅, 一级谱的色散约为 1.3 nm/像素 [29]. 同步的电学观测资料通过快、慢电场变化仪得到.

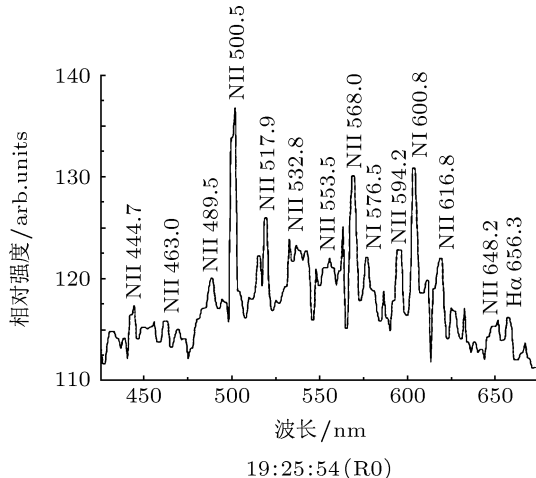
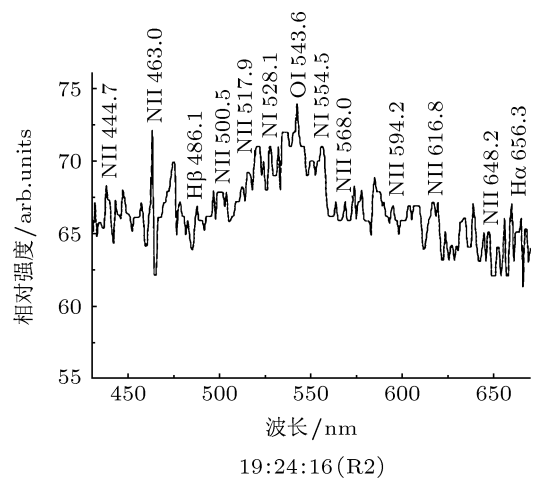
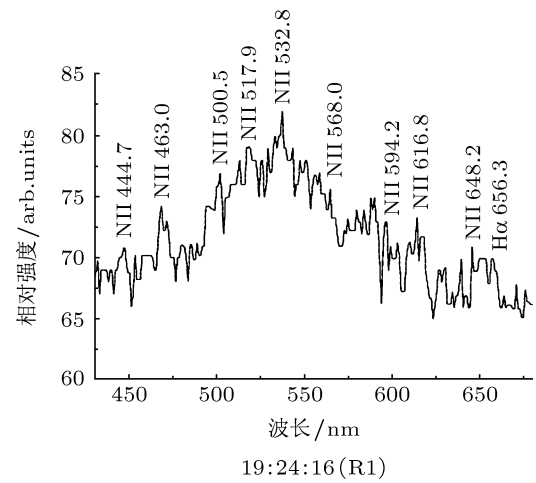
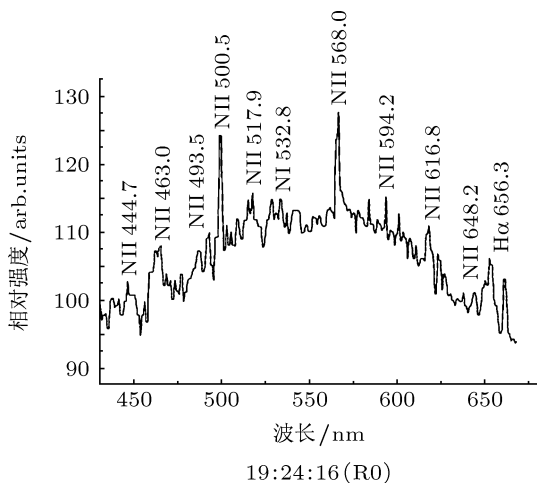
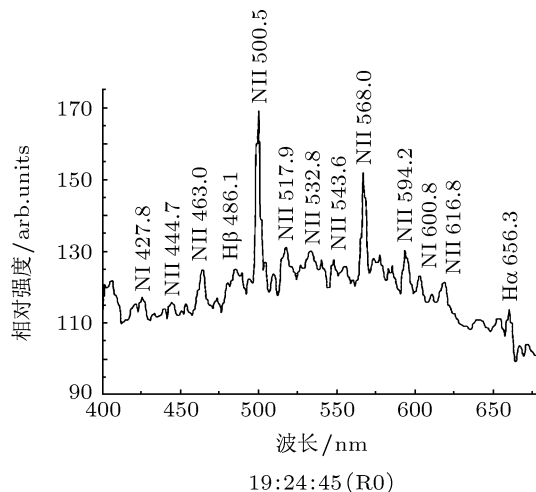
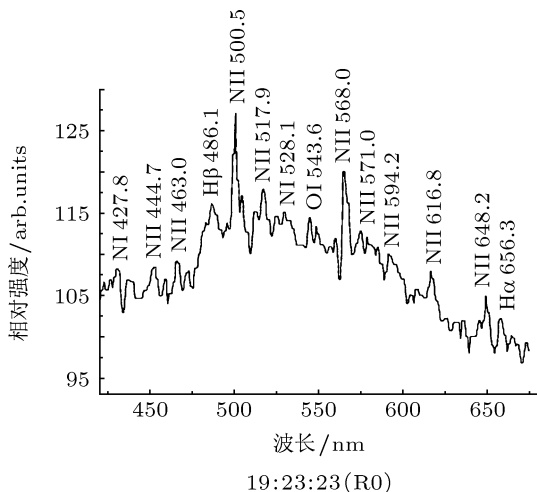
原始光谱是对闪电云外全通道分光图片, 取通道上光谱分辨较好的一些位置, 将其转化为谱线相对强度表示的光谱图. 图 1 是各回击通道某一高度处的光谱, 每张光谱以闪电发生的时间和回击次序命名, R0 表示首次回击, R1 和 R2 表示相应的继后回击. 可以看出, 不同地闪或同一地闪的不同回击, 谱线轮廓和相对强度有明显差别, 反映了不同回击放电特性的差异. 依据谱线相对强度等信息, 利用 (10) 式可以计算出回击通道在不同位置的温度. 由于地闪通道不同位置的温度变化不大, 所以最终所给值是在通道多个位置取平均的结果.

图 2 是这 4 次地闪引起的慢电场变化, 纵坐标表示电场变化, 横坐标表示时间. 由电场变化的幅度和记录的闪电发生距离, 以及每个闪电回击通道的长度, 依据 (8) 式推算出通道内线电荷密度, (6), (7) 式计算出通道的初始半径和最终半径, (1) 式计

算出通道单位长度储存的能量.

表 1 列出了观测和计算得到的这 4 次闪电放电过程的一些特性参数, 其中 S 为闪电距观测站的距离, L 为通道长度, I_{tot} 为光谱总强度, T 为温度,

E_{max} 为归一化到 100 km 的辐射峰值电场, t 为回击电流的持续时间, λ_q 为线电荷密度, ϵ 为单位长度储存的能量, r_{init} , r_{final} 为初始半径和最终半径.



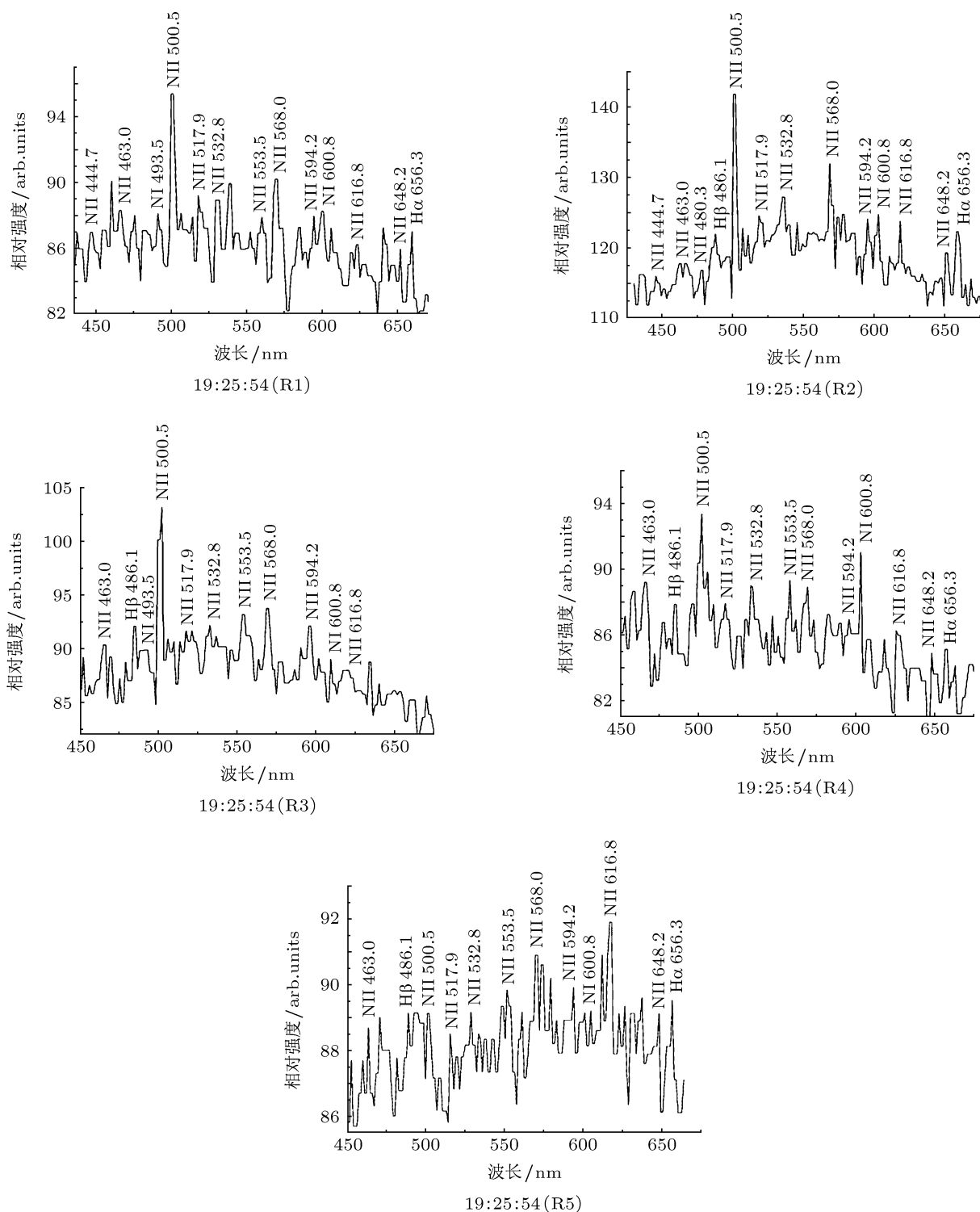


图1 用谱线相对强度表示的各回击通道某一位置处的光谱

4次闪电通道初始半径为0.08—0.71 cm, 最终半径为1.04—9.99 cm. Hill^[3]和Jones^[4]通过闪电对铜和铝的放电熔孔得到闪电通道半径为0.03—0.52 cm; Taylor^[30]用树杆的伤痕判断的结果为

0.05—0.3 cm, 1—8 cm; Oetzel^[5]用电路模式得到通道半径为0.2—0.5 cm, 1—4 cm; Plooster^[6]用火花放电模式所得结果为0.33—1.76 cm. 表1给出的初始半径和最终半径都在文献报道的数值范围内.

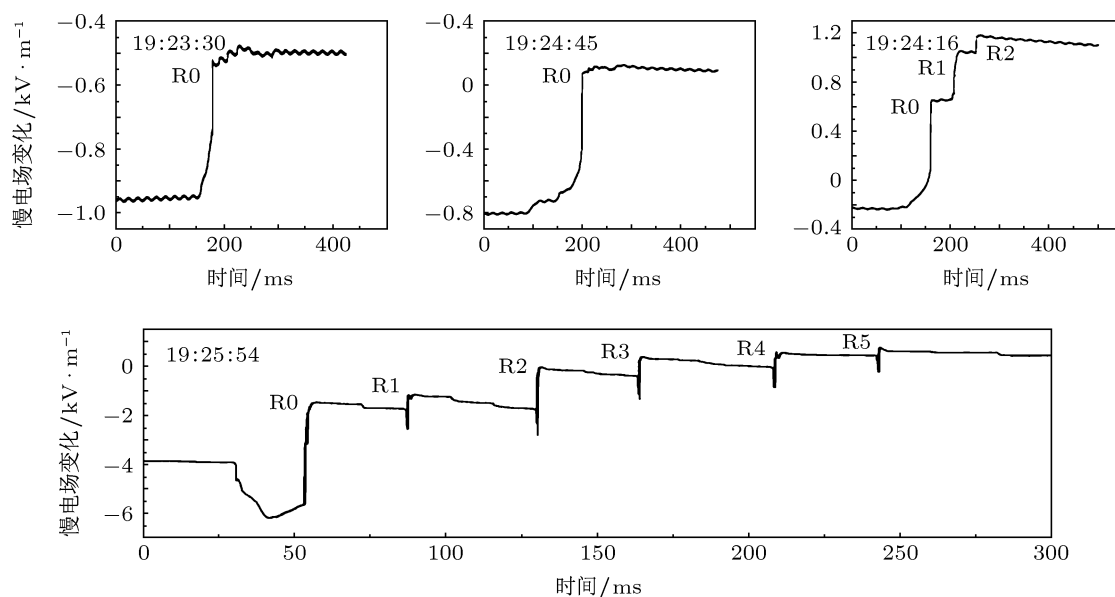


图2 地闪引起的地面慢电场变化波形

表1 四次闪电各回击的物理特性参数

闪电名称	S/km	回击	L/km	t/ms	T/K	$E_{max}/V \cdot m^{-1}$	$\lambda_q/10^4 C \cdot m^{-1}$	r_{init}/cm	r_{final}/cm	$\epsilon/10^4 J \cdot m^{-1}$	$I_{tot}/arb.units$
19:23:30	7.48	R0	3.397	2.52	28330	5.498	5.75	0.56	7.79	1.20	28911
19:24:45	5.44	R0	4.015	3.65	27730	4.417	2.37	0.23	3.20	0.21	33293
19:24:16	5.94	R0	5.474	4.01	28840	5.019	3.13	0.30	4.27	0.37	27492
		R1		2.48	28590	1.782	1.42	0.12	1.95	0.08	20005
		R2		2.16	28430	1.158	0.77	0.08	1.04	0.02	18746
19:25:54	3.40	R0	5.580	4.18	28760	5.664	7.30	0.71	9.99	2.03	23696
		R1		2.24	28030	4.192	4.75	0.40	6.32	0.82	16250
		R2		3.25	28710	5.634	7.24	0.67	9.53	1.84	22852
		R3		2.38	28330	4.794	5.75	0.49	7.69	1.21	18785
		R4		2.18	27420	3.403	3.53	0.33	4.49	0.42	15306
		R5		1.08	27140	2.999	2.94	0.29	3.59	0.27	14791

表1给出的回击通道单位长度储存的能量在 2.20×10^2 — $2.03 \times 10^4 J/m$ 范围内. 文献 [6, 10—13] 依据气体动力学模型得到闪电通道单位长度储存的能量为 10^3 数量级; Borovsky^[7] 报道的值为 2×10^2 — $1 \times 10^4 J/m$; Krider 等^[14] 和 Uman^[15] 得到的先导和首次回击两个过程的总能量范围为 10^5 — $10^6 J/m$, 略大于回击过程的能量. 4次闪电首次及继后回击的线电荷密度也在常见的数值范围内 [7].

研究表明^[31]: 电弧通道半径主要取决于回击电流的持续时间. 图3(a)和(b)给出了闪电

19:24:16和19:25:54各次回击的通道初始半径与电流持续时间的变化关系, 横坐标为各回击发生的时间. 如: 闪电19:24:16, 首次回击R0通道半径最大, 相应的回击电流持续时间也最长, 其次是R1, R2; 闪电19:25:54, 首次回击R0的半径最大, R2次之, 以后依次是R3, R1, R4, R5, 而相应的电流持续时间也是R0最大, R2次之, R3, R1, R4, R5依次减小. 由此证实: 多回击闪电电弧通道的半径主要取决于回击电流的持续时间.

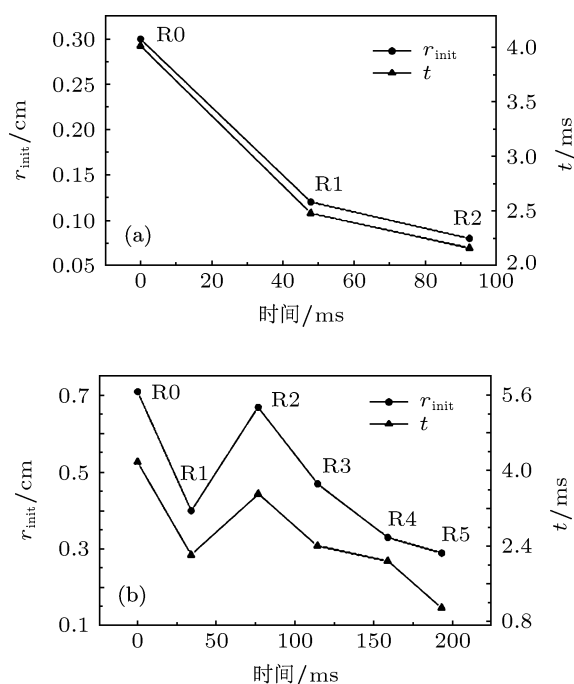


图3 回击通道初始半径与电流持续时间的变化关系 (a) 闪电 19:24:16; (b) 闪电 19:25:54

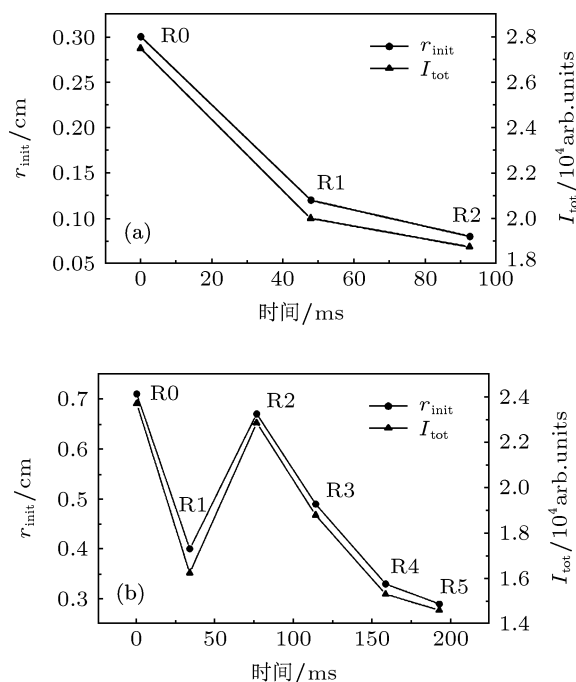


图4 通道初始半径与光谱总强度的关系 (a) 闪电 19:24:16; (b) 闪电 19:25:54

由 (6) 和 (9) 式可知通道初始半径与线电荷密度成正比, 线电荷密度与辐射峰值电场成正比. 由此推断: 同一闪电的不同回击通道的初始半径与辐射峰值电场成正比. 对于多回击闪电, Qu 等 [28] 证实: 辐射峰值电场与通道光谱总强度成正比. 所以,

回击通道的初始半径与光谱总强度也正相关. 图 4(a) 和 (b) 给出了闪电 19:24:16 和 19:25:54 各次回击的通道初始半径与光谱总强度的变化关系, 可以看出它们的变化具有很好的一致性.

Uman 和 Voshall [32] 认为在闪电通道中心, 温度为通道半径的函数, 半径越大, 温度越高. 图 5(a) 和 (b) 分别给出了闪电 19:24:16 和 19:25:54 各次回击通道初始半径和最终半径随温度的变化关系, 可以看出: 同一闪电的不同回击, 通道的初始半径与最终半径均随温度的升高而增大, 进一步证实了文献 [32] 的结论.

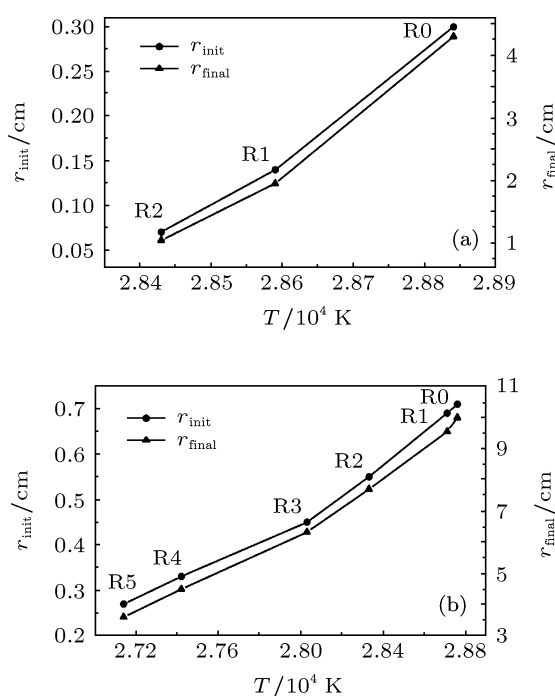


图5 通道初始半径和最终半径随温度的变化 (a) 闪电 19:24:16; (b) 闪电 19:25:54

在相同的观测距离和曝光参数下, 光谱总强度反映闪电通道的发光强度. Wang 等 [33] 关于人工触发闪电光学观测的研究表明, 电流上升到峰值的阶段, 电流和光信号正相关. 闪电回击过程传输的能量大小可以由电流的积累效应来反映, 由于对电流积累效应的主要贡献在电流上升到峰值的阶段 [28], 又依据闪电放电的特性, 回击电流通常在很短的几微秒内达到峰值, 因此可以推断在同一闪电不同回击中, 通道单位长度存储的能量与光谱总强度相关. 图 6(a) 和 (b) 给出了闪电 19:24:16 与 19:25:54 各次回击的通道单位长度储存能量与光谱总强度的变化关系, 可以看出, 它们具有相同的变化趋势.

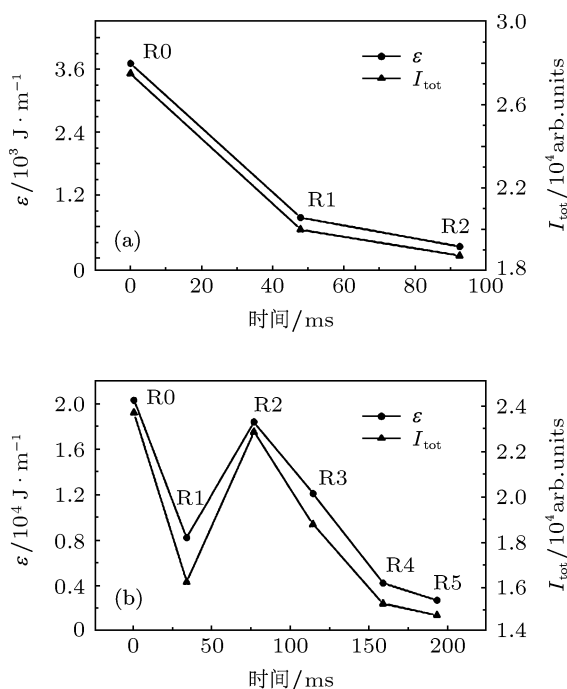


图 6 通道单位长度储存能量与光谱总强度的关系 (a) 闪电 19:24:16; (b) 闪电 19:25:54

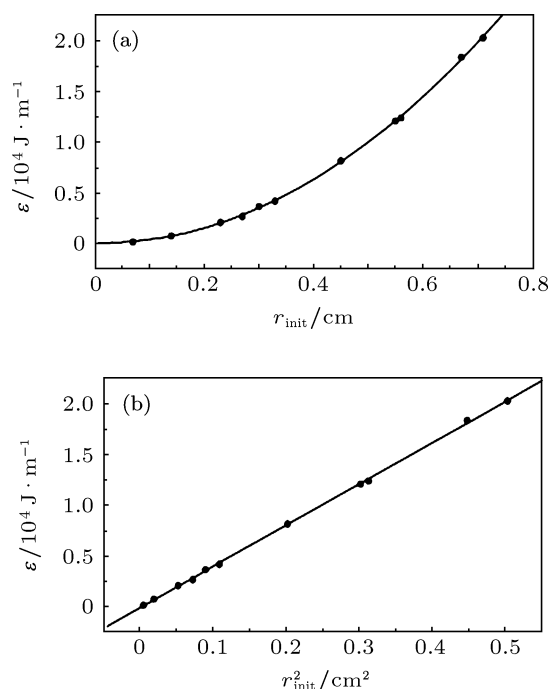


图 7 (a) 单位长度储存的能量与初始半径的关系; (b) 单位长度储存的能量与初始半径平方的关系

图 7(a) 给出了 11 个回击通道单位长度储存的能量与初始半径的关系, 可以看出通道单位长度储存的能量随通道初始半径的增大而增大。

由 (1) 式看出, 回击通道中储存的能量包括分子离解、原子电离和热运动三部分, 它们分别都与回击通道内的粒子数密度成正比, 因此推断, 通道单位长度储存的能量与通道半径的平方成正比。为了验证这一结论, 图 7(b) 给出了通道单位长度储存的能量与初始半径平方的关系, 可以看出二者线性相关。

4 结论

依据闪电光谱信息和同步电学观测资料计算的 4 次闪电首次回击通道初始半径为 0.23—0.71 cm, 最终半径为 3.20—9.99 cm; 继后回击通道初始半径为 0.08—0.67 cm, 最终半径为 1.04—9.53 cm。通道单位长度储存的能量为 2.20×10^2 — 2.03×10^4 J/m。电弧通道半径主要取决于回击电流的持续时间; 温度越高, 半径越大; 通道光谱总强度与半径、单位长度储存的能量正相关; 通道半径越大, 通道单位长度储存的能量越高。

[1] Jiang 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, 邴秀书, 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]
 [2] Wang C X, Qie X S, Jiang R B, Yang J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 039203 (in Chinese) [王彩霞, 邴秀书, 蒋如斌, 杨静 2012 物理学报 **61** 039203]
 [3] Hill R D 1963 *J. Geophys. Res.* **68** 1365
 [4] Jones R G 1968 *J. Geophys. Res.* **73** 809
 [5] Oetzel G N 1968 *J. Geophys. Res.* **73** 1889
 [6] Plooster M N 1971 *Phys. Fluids* **14** 2124
 [7] Borovsky J E 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 11537
 [8] 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]
 [9] Rokov V A, Uman M A 2003 *Lightning: Physics and Effects* (New York: Cambridge University Press) p687
 [10] Jayakumar V, Rakov V A, Miki M, Uman M A, Schnetzer G H, Rambo K 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L05702
 [11] Hill R D 1977 *J. Geophys. Res.* **82** 4967
 [12] Paxton A H, Gardner R L, Baker L 1986 *Phys. Fluids* **29** 2736
 [13] Dubovoy E I, Mihailov M S, Ogonkov A L, Pryazhinsky V I 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 1497
 [14] Krider E P, Dawson G A, Uman M A 1968 *J. Geophys. Res.* **73** 3335
 [15] Uman M A 1987 *The Lightning Discharge* (New York: Elsevier) p377
 [16] Borovsky J E 1995 *J. Geophys. Res.* **10** 2697
 [17] Wang J, Yuan P, Guo F X, Qie X S, Ouyang Y H, Zhang Y J 2010 *Chin. J. Geophys.* **53** 1295 (in Chinese) [王杰, 袁萍, 郭凤霞, 邴秀书,

- 欧阳玉花, 张义军 2010 地球物理学报 **53** 1295]
- [18] Uman M A, McIn D K, Krider E P 1975 *Am. J. Phys.* **43** 33
- [19] Rachidi F, Bermudez J L, Rubinstein M, Rakov V A 2004 *J. Electrostat.* **60** 121
- [20] Berger K 1972 *Bull. Schweiz Elektrotech. Ver.* **63** 1403
- [21] Wang D H, Qie X S, Guo C M 2000 *Lightning and Artificial Triggering Lightning* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press) p121 (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 121 页]
- [22] Shao X M, Kribbiel P R 1996 *J. Geophys. Res.* **101** 26641
- [23] Wang D, Takagi N, Watanabe T, Rakov V A, Uman M A 2000 *J. Atmos. Elec.* **20** 91
- [24] Prueitt M L 1963 *J. Geophys. Res.* **68** 803
- [25] Uman M A J 1964 *Atmos. Terr. Phys.* **26** 123
- [26] Uman M A, Orville R E 1965 *J. Geophys. Res.* **70** 5491
- [27] Griem H R 1964 *Plasma Spectroscopy* (New York: Mc Graw Hill Book Company) p580
- [28] Qu H Y, Yuan P, Zhang T L, Chang Z S 2011 *Phys. Plasmas* **18** 013504
- [29] Yuan P, Liu X S, Zhang Y J 2003 *Proceedings of 12th International Conference on Atmospheric Electricity* Versailles France, June 9–24 2003, p565
- [30] Taylor A R 1965 *J. Geophys. Res.* **70** 5693
- [31] Golde R H (Translated by Zhou S J, Sun J X) 1981 *Lightning* (Beijing: Electric Power Industry Press) p120 (in Chinese) [Golde R H 著, 周诗健, 孙景群译 1981 雷电 (北京: 电力工业出版社) 第 120 页]
- [32] Uman M A, Voshall R E 1968 *J. Geophys. Res.* **73** 497
- [33] Wang D, Takagi N, Watanabe T, Rakov V A, Uman M A, Rambo K J, Stapleton M V 2005 *Atmos. Res.* **76** 412

Study on the radius and energy transmission properties of lightning discharge channel by the spectra*

Wang Xue-Juan¹⁾ Yuan Ping^{1)†} Cen Jian-Yong¹⁾ Zhang Ting-Long²⁾
Xue Si-Min¹⁾ Zhao Jin-Cui¹⁾ Xu He¹⁾

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) (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730070, China)

(Received 13 November 2012; revised manuscript received 17 December 2012)

Abstract

Combining the spectra of could-to-ground lightning discharge processes obtained by a slit-less spectrograph with the synchronous electrical information, the temperature, the linear charge density, the channels initial radius, the final radius and the energy per unit length are calculated. The results of these parameters are in agreement with the values reported in other work. The correlative analysis indicates that the arc initial radius mainly depends on the duration of the discharge current, the radius increases with temperature rising, and the total intensity of spectra is correlated positively with initial radius and energy per unit length. The energy per unit length is directly proportional to the square of initial radius.

Keywords: lightning discharge channel, radius, energy per unit length, total intensity of spectra

PACS: 92.60.Pw, 52.80.Mg, 92.60.-e

DOI: 10.7498/aps.62.109201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40905001).

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