

瞿海燕,张廷龙,潘慧玲. 回击电流及热效应与闪电光谱和通道温度的相关性分析[J]. 干旱气象,2014,32(1):10-16, [QU Haiyan, ZHANG Tinglong, PAN Huiling. Analysis on Correlation Between Return Stroke Current, Its Thermal Effects and Lightning Spectra, Channel Temperature[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(1):10-16], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-01-0010

## 回击电流及热效应与闪电光谱 和通道温度的相关性分析

瞿海燕<sup>1</sup>,张廷龙<sup>2,3</sup>,潘慧玲<sup>4</sup>

- (1. 中国科学院国家科学图书馆兰州分馆/中国科学院资源环境与科学信息中心,甘肃 兰州 730000;  
2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,甘肃 兰州 730000;3. 海南省气象局,海口 570203;  
4. 甘肃省交通职业技术学院,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**依据在青海地区由无狭缝光栅摄谱仪获得的2次多回击云对地闪电的光谱,结合同步辐射电场变化资料,计算了放电等离子体的温度、光谱总强度以及回击通道的峰值电流和作用积分。对观测结果和这些参数进行对比分析,结果表明:(1)同一次地闪的不同回击过程中,光谱总强度与放电电流的大小呈正相关;(2)相邻2次回击的时间间隔较长时,等离子体通道的温度与电流作用积分基本成正比;当相邻2次回击的时间间隔较短时,通道温度与作用积分不再线性相关。

**关键词:**云地闪电;光谱;通道温度;回击电流;作用积分

**文章编号:**1006-7639(2014)-01-0010-07 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-01-0010

**中图分类号:**P427.39

**文献标识码:**A

### 引言

闪电是大气中 $\text{NO}_x$ 的重要自然源之一,也是对流层臭氧的重要产生源,其回击电流是一个非常重要的参数。由于闪电放电时具有冲击电流大、放电时间短、雷电流变化梯度大、冲击电压高等特征<sup>[1]</sup>,以及自然闪电发生在时间和空间上的随机性、瞬时性,对其直接测量非常困难,目前以高塔测量和人工触发闪电的直接测量为主。闪电发生的瞬间放电通道附近的空气被迅速加热到30 000 K,气压达到几个大气压,回击电流峰值高达几十千安培,通道内的 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 被完全电离<sup>[2]</sup>,使得通道的温度高达数万度从而聚集大量的离子、电子、原子和分子,形成典型的等离子体通道。闪电光谱与放电通道内部发生的微观物理过程密切相关,光谱分析作为诊断放电通道内等离子体行为的唯一有效方法,可以为研究闪电放电过程的物理特性提供重要信息,大量的研究已经给出很多结果<sup>[3-9]</sup>,基本上都是基于放电等离子体特性参数的研究。

闪电光谱与放电特性的相关性是揭示闪电过程物理机制的重要途径,但目前对地闪回击过程的研究大多集中在闪电高速摄像和声、光、电、磁的综合观测以及回击模式的发展方面<sup>[10-16]</sup>,将光谱与闪电放电特征结合起来的分析非常少。Brook等<sup>[17]</sup>利用高空飞行对一个含有5次回击过程的自然闪电进行了同步的光、电和光谱观测,由于记录到的光谱信息有限,没有做进一步的定量分析。瞿海燕等<sup>[18]</sup>利用闪电光谱和同步辐射电场变化资料,初步分析了西藏那曲地区多回击自然闪电过程中等离子体温度与放电特性的相关性。这方面的工作将为雷电物理的研究和闪电防护工作提供理论依据。本文选取在青海地区拍得的2次地闪回击过程的光谱,结合同步电学观测资料,计算了闪电放电等离子体的温度,光谱总强度,并依据传输线模式计算了放电电流及其作用积分(action integral,或称比能量<sup>[15]</sup>),分析了回击电流及热效应与闪电光谱和通道温度的相关性,以期为进一步推断通道其他

收稿日期:2013-10-18;改回日期:2013-11-13

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41375011、41175092)资助

作者简介:瞿海燕(1983-),男,甘肃永靖人,助理馆员,主要从事原子结构和雷电物理/学科信息服务方面研究. E-mail: quhy@llas.ac.cn

物理特性参数的变化提供参考依据。

## 1 理论方法

### 1.1 温度的计算

温度是描述等离子体特性的基本参量,而依据光谱信息是目前获得通道温度的唯一途径。利用光谱信息计算闪电放电等离子体通道温度,建立在 2 个基本假设<sup>[3-4]</sup>的前提下:(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)。NII 离子是闪电回击通道中的主要成分,Uman 和 Orville<sup>[19]</sup>通过对时间累积和时间分辨的闪电光谱的研究证实:闪电通道对于 NII 离子以及连续的低温过程是光薄的。Griem<sup>[20]</sup>的研究也表明,NII 离子的准平衡时间、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。

在局部热力学平衡的条件下,谱线强度  $I$  可以写为<sup>[21]</sup>:

$$I = \frac{h\nu}{4\pi} \frac{gA}{Z} N e^{-E/kT} \quad (1)$$

其中  $I$  为光谱线强度, $\nu$  为谱线频率, $k$  为波尔兹曼常数; $g$ 、 $A$ 、 $Z$  和  $E$  分别表示统计权重、跃迁几率、配分函数和相应跃迁的上激发能; $N$  为辐射离子激发态的布局数, $T$  为温度。在局部热力学平衡条件下,由原子及离子动能所决定的气体温度,由自由电子动能所决定的气体温度,由不同能级上的布局数所决定的激发温度以及由电离平衡过程所决定的电离温度在数值上是相等的。由此,方程(1)可以进一步改写为:

$$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right) = -\frac{E}{kT} + c \quad (2)$$

其中  $c$  为常数, $\lambda$  为跃迁波长。(2)式中,选取 NII 离子的多条谱线,依据观测的谱线相对强度  $I$  以及用多组态 Dirac - Fock (MCDF) 方法<sup>[22-23]</sup> 计算得到谱线跃迁参数  $\lambda$ 、 $g$ 、 $A$ 、 $E$ 。以  $E$  为横坐标, $\ln(I\lambda/gA)$  为纵坐标作图,用最小二乘法拟合直线,由直线的斜率  $-E/kT$  得到通道的温度  $T$ 。

### 1.2 回击电流的计算

地闪回击电流是一个非常重要的参数,由于自然闪电发生在时间和空间上的随机性、瞬时性,对地闪回击电流的直接测量非常困难。利用地闪产生的辐射电场变化的信息、基于相应的理论模型是估算和研究放电电流的有效途径。在传输线模式假定下<sup>[24-25]</sup>,回击通道峰值电流与辐射峰值电场之间的关系为:

$$i_{\max} = \frac{2\pi\epsilon_0 c^2 D}{v} E_{\max} \quad (3)$$

其中  $i_{\max}$  为回击通道的峰值电流, $E_{\max}$  为辐射峰值电场, $\epsilon_0$  为真空介电常数, $c$  为光速, $D$  为闪电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<sup>[19-22]</sup>。

## 2 试验和资料分析

### 2.1 试验仪器

试验在青海省西宁市大通县山区进行,观测点位于青藏高原东北边缘,东经  $101^\circ 35' 17.04''$ 、北纬  $37^\circ 03' 53.10''$ ,海拔高度为 2 593.77 m。光谱观测采用无狭缝光栅摄谱仪,其记录系统是 3CCD 数码摄像机。采用专业蔡司镜头,12 倍光学变焦, $f=4.3 \sim 51.6$  mm,视角  $\Phi=52^\circ$ ,分光装置是 600 条刻痕/mm 的平面透射光栅,光栅置于摄像机物镜前,其平面与物镜面成  $23^\circ$  左右的夹角,实际光谱中一级谱的色散约为每像素  $1.3$  nm<sup>[26]</sup>。同步的电学观测资料通过地面快、慢天线得到,在闪电拍摄时,将光谱仪和快慢电场的时钟都调整到与 GPS 时间同步。通过快、慢电场变化仪可以反映闪电放电的发生过程,其中快、慢电场的带宽分别为 5 MHz 和 2 MHz,时间常数分别为 2 ms 和 6 s,测量的闪电电场变化模拟信号经 16 bits 的 A/D 模数转换以  $0.4 \mu\text{s}$  的时间间隔存入微机记录。

### 2.2 资料分析

资料分析选取发生在同一雷暴过程中 2 个多回击闪电(分别命名为闪电 A 和闪电 B,电场变化特性显示它们都是负地闪)的 6 幅光谱。原始光谱是对云外全部放电通道分光图片,为了定量分析,在通道上选取光谱分辨比较好的一些位置,并将其转化为用谱线相对强度表示的光谱图。图 1、图 2 分别给出闪电 A 和闪电 B 各回击在通道同一高度处的光谱图;图 3 为对应这 2 次地闪引起的快、慢天线电场变化记录。将光谱拍摄时间和电场变化对应的时间间隔对比,可推知每张光谱对应的回击,其中 R0 表示首次回击,R1 ~ R9 表示相应的继后回击。从图 1、图 2 可以看出,不同地闪或同一地闪的不同回击中,光谱线轮廓和相对强度有明显差别,这正反映了不同回击中放电特性的差异。将首次回击 R0 发生的时刻定义为零时刻,闪电 A 整个放电过程持续时间为 338.4 ms,共发生了 10 次回击,由于相邻回击时间间隔较小、有些回击较弱,只清晰拍到首次回击、继 2 和继 5 回击的光谱(图 1);闪电 B 整个放电过程持续时间为

112.8 ms,共发生了3次回击,每次回击均拍到了光谱(图2)。从图3可以看出,这2次闪电过程中,首

次回击引起的电场变化均较大,通道发光较强,其它继后回击引起的电场变化较首次回击小。

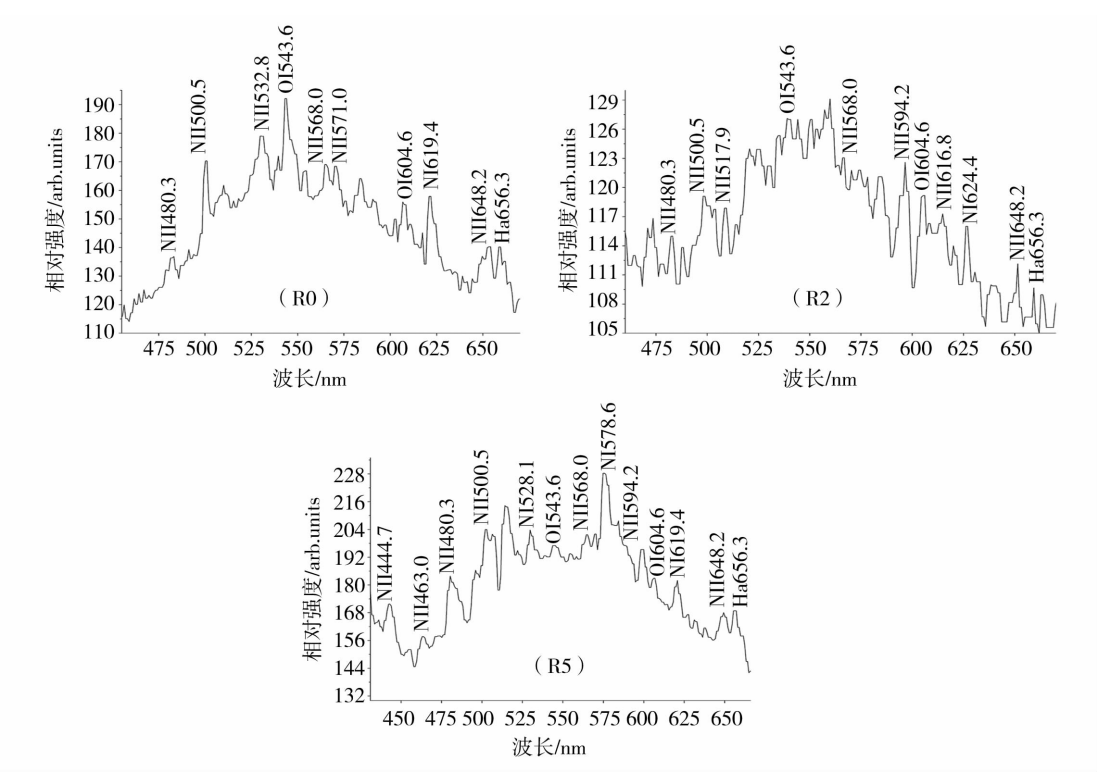


图1 用谱线相对强度表示的闪电 A 各回击通道某一高度处的光谱

Fig.1 The relative intensity of spectra lines at a given height for each return stroke of lightning A

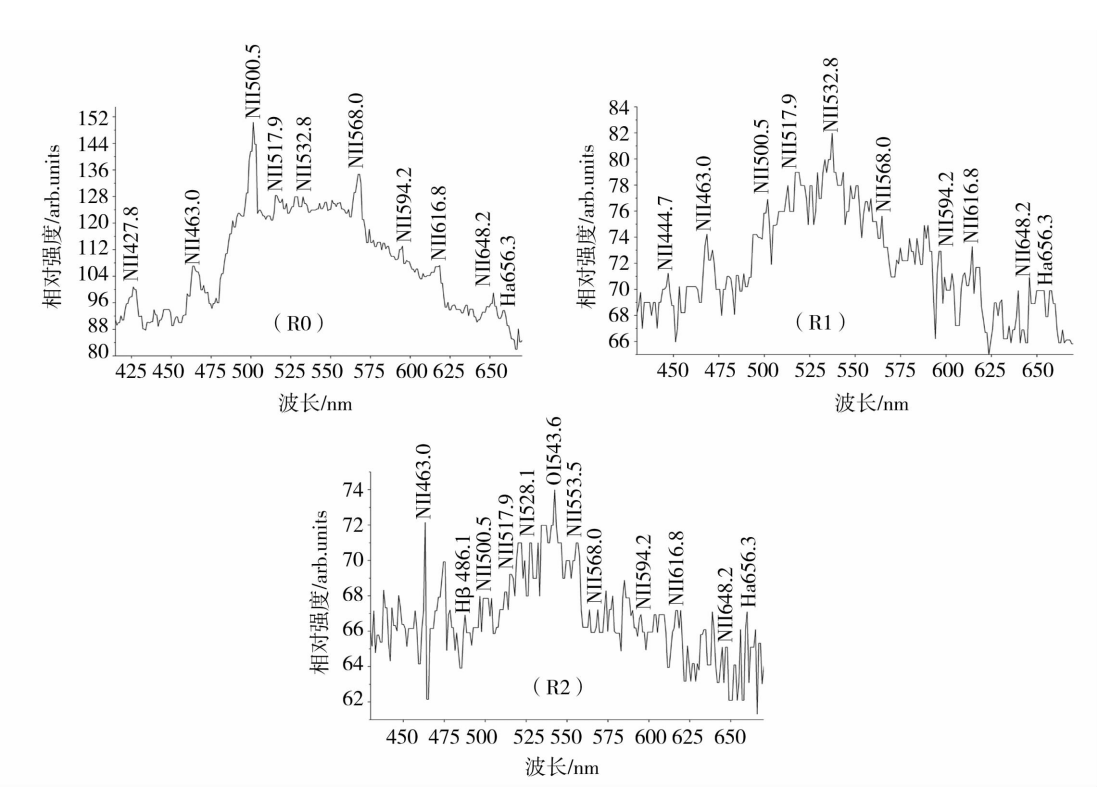


图2 用谱线相对强度表示的闪电 B 各回击通道某一高度处的光谱

Fig.2 The relative intensity of spectra lines at a given height for each return stroke of lightning B

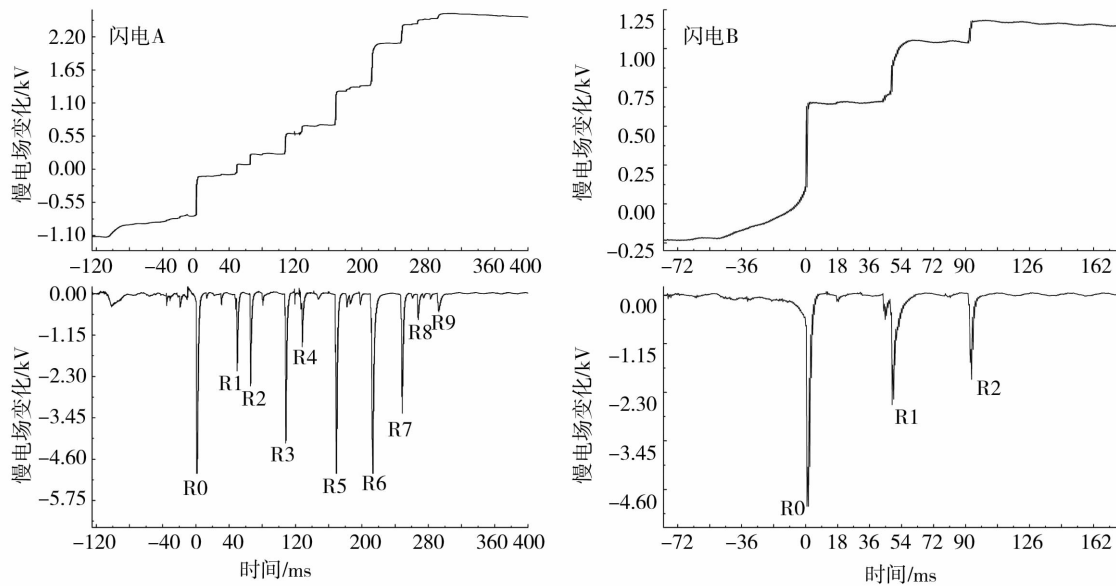


图 3 闪电 A 和闪电 B 引起的地面快(下)、慢(上)电场变化波形

Fig. 3 Variations of the electric field on the ground caused by lightning A and lightning B

通道温度和回击电流是反映放电通道物理特性的基本参数,依据谱线相对强度等信息,利用(2)式计算出回击通道在不同位置的温度,并且由电场变化的幅度和记录的闪电发生距离,依据公式(3)可以推算出通道的峰值电流。表 1 列出了观测和计算得到的这 2 次闪电放电过程的一些特性参数,其中  $D$  为闪电距测站的距离,由看到闪电与听到第一次雷声之间的时间间隔(声光差)来估算; $T$ 为通道温

度,由于地闪通道不同位置的温度变化不大,表中列出的是沿通道多个位置处得到的温度取平均的结果; $S$ 为电流的作用积分( $\int i^2 dt$ ),也反映了回击过程中传输的能量; $I_{tot}$ 为光谱总强度; $t$ 为回击电流持续时间,Fisher 等<sup>[27]</sup>将它定义为回击电流开始变化到降至背景值的时间;为了便于比较不同闪电回击过程辐射特性, $E_{max}$ 为归一化到 100 km 的辐射峰值电场; $i_{peak}$ 为回击通道的峰值电流。

表 1 2 次闪电各回击的物理特性参数

Tab. 1 The physical characteristic parameters of each return stroke of lightning A and lightning B

闪电名称	$D$ /km	回击序列	$T$ / $10^4$ K	$S$ / $10^5$ A <sup>2</sup> s	$I_{tot}$ / $10^5$ arb. units	$t$ /ms	$E_{max}$ V/m	$i_{peak}$ /kA
闪电 A	2.97	R0	2.437	3.45	3.931	4.01	3.923	19.63
		R2	2.641	0.14	3.019	2.48	0.95	4.75
		R5	2.389	3.04	4.216	2.16	4.74	23.71
闪电 B	5.94	R0	2.884	4.92	2.749	3.12	5.019	25.11
		R1	2.854	0.63	2.001	3.18	1.782	8.91
		R2	2.843	0.21	1.875	2.54	1.158	5.79

郟秀书等人<sup>[15]</sup>在对人工引发雷电 36 次实测回击电流的统计分析中表明,回击峰值电流的几何平均值为 12.1 kA,最大值为 41.6 kA,最小值为 4.4 kA。刘维成等<sup>[1]</sup>对甘肃和广东闪电的电流强度对比分析发现,甘肃地区闪电平均电流强度为 10.95 kA,广东地区闪电平均电流强度为 25.83 kA。表 1

中计算的 2 次闪电首次回击及继后回击的辐射峰值电场和峰值电流均在常见的数值范围内<sup>[28]</sup>。大多数情况下,负地闪首次回击的放电电流大于继后回击,辐射也最强,但继后回击放电比首次回击强的情况也时常发生,如闪电 A,继后回击 R5 的峰值电流和光谱总强度都强于首次回击。闪电 B 各回击光

谱总强度和电流有着一定的对应关系:首次回击 R0 峰值电流最大,对应的光谱总强度也是最大,继后回击 R1、R2 的峰值电流和光谱总强度依次减弱。通常地,随着放电电流的增大,光信号也在增多,Idone and Orville<sup>[29]</sup>分析了新墨西哥州的 2 次人工闪电后发现峰值电流对应着最大的发光强度。Wang 等<sup>[12]</sup>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,光信号和电流正相关。即:等离子体通道的发光强度与放电电流正相关。光谱总强度(背景强度和谱线强度)除了与放电等离子体通道

的发光强度有关外,也受观测距离和摄像机曝光参数的影响。同一次闪电不同回击过程的光谱是在相同的观测距离和曝光参数下拍得的,所以,光谱总强度可以反映光源发光强度,即:对同一闪电的不同回击,光谱总强度与放电电流正相关。为了证实这一结论,图 4 分别给出了闪电 A 和闪电 B 各次回击的光谱总强度和峰值放电电流的变化,可以看出它们的变化趋势具有很好的一致性。由于电流的观测比较困难,可以通过光谱总强度的变化研究一次闪电过程中电流的变化特征。

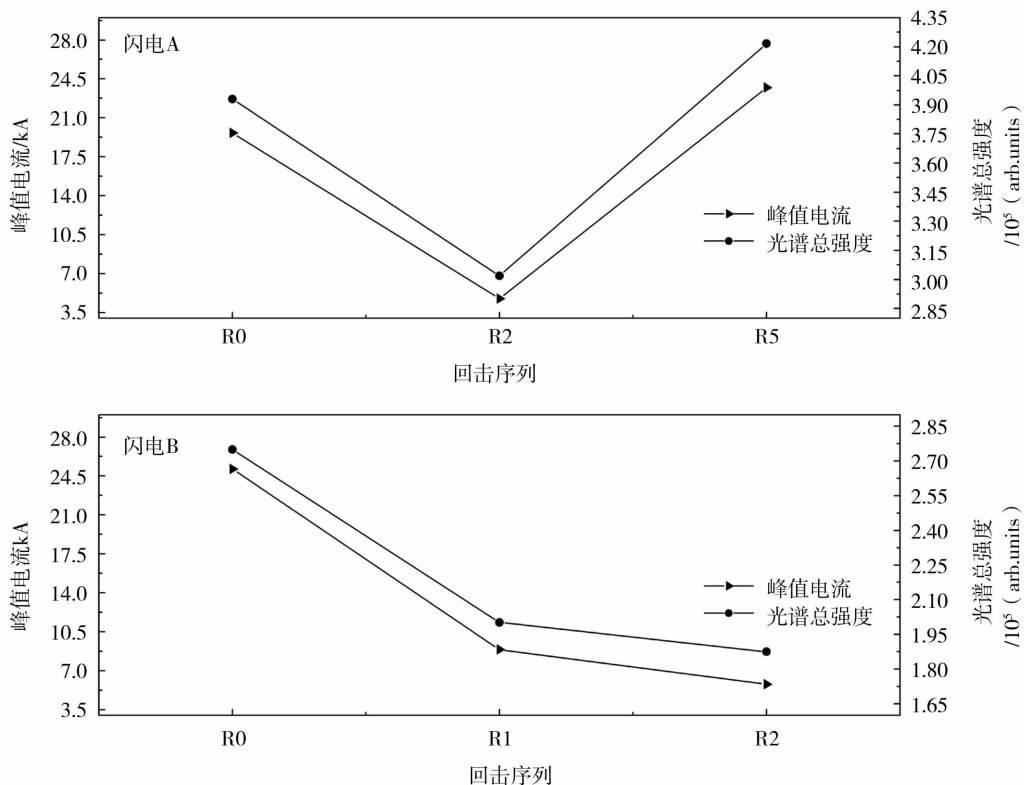


图4 光谱总强度与峰值电流的关系

Fig. 4 The variation of the total intensity of spectra and the peak current

回击过程中,作用积分 $\int i^2 dt$ 反映了电流传输引起的热效应,与等离子体通道温度的变化量成正比<sup>[30]</sup>。图 5 给出了闪电 A 和闪电 B 的各次回击通道温度和电流作用积分的变化关系。可以看出,闪电 A 的 3 个回击中, R2 温度最高,而作用积分却是最小,二者出现了非正相关的情况,这与继后回击和前一次回击之间的时间间隔有关。Uman 和 Voshall<sup>[31]</sup>关于通道温度随时间变化的研究发现,回击电流之后,通道的温度迅速衰减,经过几十毫秒后,通道温度仍高于环境温度约一个数量级。如果一次闪电过程中,相

邻 2 次回击的时间间隔比较小,就会使通道在没有完全冷却时再次升温,这种情况下,通道温度与作用积分不再线性相关。从电场变化资料可知,闪电 A 的 R2 与 R1 时间间隔只有 16 ms,通道没有冷却又开始放电,使通道温度继续升高,导致 R2 过程中温度较高,而温度的变化量相对较小,对作用积分的贡献也较小,从电学的角度解释,R2 的放电电流小(仅 4.75 kA)、且作用时间短,所以作用积分较小。闪电 B 的各次回击的间隔均在 44 ms 以上,其温度和作用积分基本上正相关。

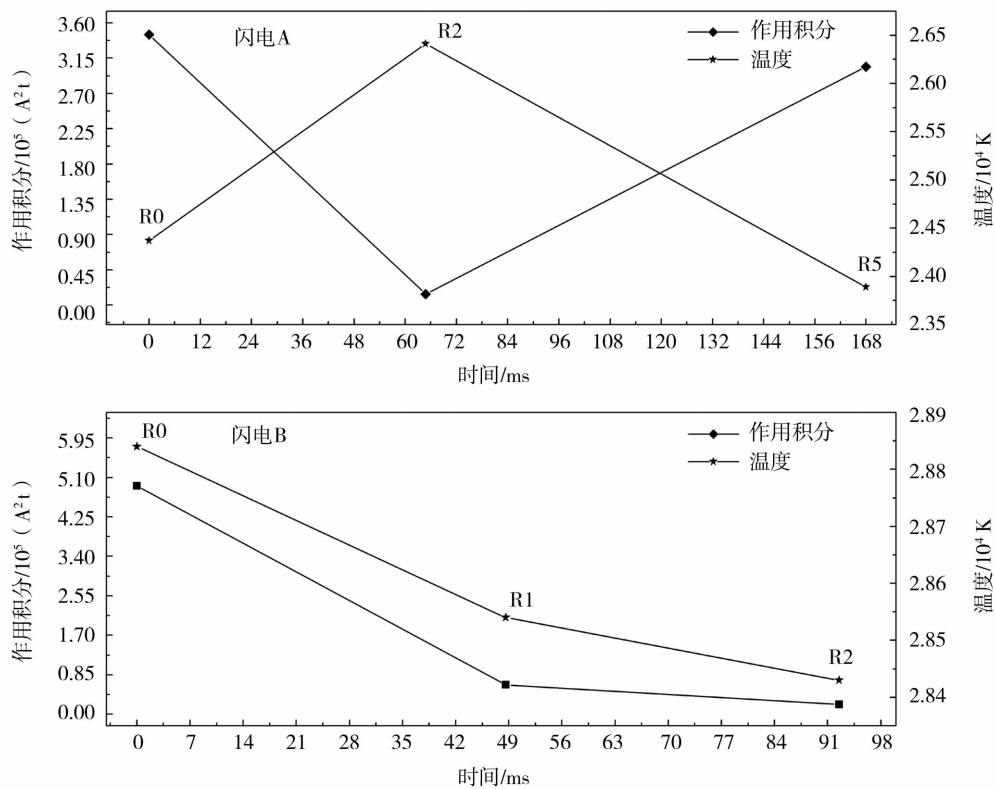


图5 通道温度与作用积分的关系

Fig. 5 The relationship between the channel temperature and action integral

### 3 结论

依据光谱和同步电学观测资料,计算了青海高原地区2次多回击闪电回击通道的温度、光谱总强度、放电等离子体通道的峰值电流及其作用积分,并分析了它们之间的相关性,结果表明:同一次地闪的不同回击中,光谱总强度与放电电流的大小正相关。不同地闪的回击,相邻2次回击的时间间隔较长时,等离子体通道的温度与电流作用积分成正比;相邻2次回击的时间间隔较短时,通道温度与作用积分不再线性相关。

#### 参考文献:

[1] 刘维成,陶建红,邵爱梅. 甘肃和广东2008-2011年闪电特征对比[J]. 干旱气象,2012,30(4):588-592.  
 [2] 郗秀书. 全球闪电活动与气候变化[J]. 干旱气象,2003,21(3):69-73.  
 [3] Prueitt M L. The excitation temperature of lightning[J]. J Geophys Res, 1963,68:803-811.  
 [4] Uman M A, Orville R E, Salanav L E. The mass density, pressure, and electron density in three lightning stroke near peak temperature [J]. J Geophys Res, 1964,69:5423-5424.

[5] Hill R D. Channel heating in return stroke lightning[J]. J Geophys Res, 1971,76:637-654.  
 [6] 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):264-268.  
 [7] 王杰,袁萍,郭凤霞,等. 云闪电通道内的粒子密度及分布特征[J]. 地球物理学报,2010,53(6):1295-1301.  
 [8] Chang Z S, Yuan P, Guo Y X. Transport coefficients of lightning discharge plasma on plateau area in china[J]. IEEE Trans. Plasma Sci, 2010. doi:10.1109/TPS. 2010.2051430.  
 [9] 瞿海燕,袁萍,张华明,等. 闪电放电过程的近红外光谱及温度沿放电通道的演化特征[J]. 地球物理学报,2012,55(8):2508-2513.  
 [10] Rakov V A, Uman M A, Thottappillil R. Review of lightning properties from electric field and TV observation[J]. J Geophys Res, 1994,99:10,745-10,750.  
 [11] Chen M L, Watanabe T, Takagi N, et al. Simultaneous observations of optical and electrical signals in altitude-triggered negative lightning flashes[J]. J Geophys Res, 2003,108:4240-4256.  
 [12] Wang D, Takagi N, Watanabe T, et al. A comparison of channel-base currents and optical signals for rocket-triggered lightning strokes[J]. Atoms Res, 2005,76:412-422.  
 [13] 李俊,张义军,吕伟涛,等. 一次多回击自然闪电的高速摄像观测[J]. 应用气象学报,2008,19(4):401-411.  
 [14] Saba M M F, Campos L Z S, Krider E P, et al. High-speed Vid-

- eo observations of positive ground flashes produced by intracloud lightning[J]. *Geophys Res Lett*, 2009,36:L12811
- [15] 郗秀书,杨静,蒋如斌,等. 山东人工引发雷电综合观测实验及回击电流特征[J]. *大气科学*,2012,36(1):77-88.
- [16] 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]. *高压电技术*,2013,39(2):383-392.
- [17] Brook M, Rhodes C, Vaughan O, et al. Nighttime observations of thunderstorm electrical activity from a high-altitude airplane[J]. *J Geophys Res*, 1985,90:6111-6120.
- [18] Qu H Y, Yuan P, Zhang T L, et al. Analysis on the correlation between temperature and discharge characteristic of cloud-to-ground lightning discharge plasma with multiple return strokes[J]. *Phys Plasmas*, 2011,18:013504-1-0134504-7.
- [19] Uman M A, Orville R E. The opacity of lightning[J]. *J Geophys Res*, 1965,70(22):5491-5497.
- [20] Griem H R. *Plasma Spectroscopy*[M]. New York: Mc Graw Hill Book company, 1964. 580-580.
- [21] Lochte-Holtgreven W. *Plasma Diagnostics*[M]. Amsterdam: North-holland Publishin company, 1968. 178-178.
- [22] Grant I P, Mckenzie B J, Norrington P H. An atomic multiconfigurational Dirac-Fock package[J]. *Comput Phys Commun*, 1980,21(2):207-231.
- [23] 袁萍,刘欣生,张义军. 与闪电有关的 NII 离子光谱[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004,24(3):288-291.
- [24] 郗秀书,郭昌明,张翠华,等. 地闪回击的微妙级辐射场特征及近地面过程分析[J]. *高原气象*,1998,17(1):44-53.
- [25] Rachidi F, Bermudez J L, Rubinstein M, et al. On the estimation of lightning peak currents from measured fields using location systems[J]. *J Electrost*, 2004,60:121-129.
- [26] 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):235-239.
- [27] Fisher R J, Schnetzer G H. Parameters of Triggered-Lightning Flashes in Florida and Alabama[J]. *J Geophys Res*, 1993,98:22887-22902.
- [28] 王道洪,郗秀书,郭昌明. 雷电与人工引雷[M]. 上海:上海交通大学出版社,2000.
- [29] Idone V P, Orville R E. Correlated peak relative light intensity and peak current in triggered lightning subsequent return strokes[J]. *J Geophys Res*, 1985,90:6159-6164.
- [30] Golde R H. 周诗健,孙景群,译. 雷电(上卷)[M]. 北京:电力工业出版社,1981.
- [31] Uman M A, Voshall R E. Time interval between lightning strokes and the initiation of dart leaders[J]. *J Geophys Res*,1968,73:497-506.

## Analysis on Correlation Between Return Stroke Current, Its Thermal Effects and Lightning Spectra, Channel Temperature

QU Haiyan<sup>1</sup>, ZHANG Tinglong<sup>2,3</sup>, PAN Huiling<sup>4</sup>

(1. Lanzhou Branch of the National Science Library/Scientific Information Center for Resources and Environment, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Hainan Meteorological Bureau, Haikou 570203, China; 4. Gansu Vocational and Technical College of Communications, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The spectrum of cloud-to-ground lightning flashes with two-multiple return strokes have been obtained in the Qinghai Plateau by using a slitless spectrograph, the channel temperatures, the total intensity of spectrum, the peak value of current and its action integral have been calculated combining the information of synchronous radiated electric field. According to the observation results and analysis on them, the conclusions are as follows: (1) The total intensity of spectra has a positive correlation with the discharge current in different strokes of one cloud-to-ground lightning. (2) During the lightning process, if the time interval between two adjacent return strokes is relatively long, the temperature and action integral of current are close to positive correlation. Whereas if the time interval between two adjacent strokes is relatively short, the temperature and action integral had non-linear correlation each other.

**Key words:** cloud-to-ground lightning; lightning spectra; channel temperature; return stroke current; action integral