

Yuan P, Liu X S, Zhang Y J, et al. Spectral study on lightning return stroke in plateau area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47 (1): 42 ~ 46

# 高原地区云对地闪电首次回击的光谱研究

袁萍<sup>1,2</sup> 刘欣生<sup>1</sup> 张义军<sup>1</sup> 郅秀书<sup>1</sup> 张广庶<sup>1</sup> 王怀斌<sup>1</sup>

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

2 西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070

**摘要** 用无狭缝光栅摄谱仪, 获得了青海西宁地区云对地闪电首次回击过程 400 ~ 700nm 波长范围的光谱, 并首次在闪电的单次回击光谱中记录到了波长为 604.6nm 和 619.4nm 的谱线. 将原子结构的理论应用于闪电光谱的研究, 用多组态 Dirac-Fock 方法, 计算了有关光谱线的波长、振子强度以及相应的激发态能量等参数, 理论与试验观测资料进行比较分析后发现, 高原地区闪电首次回击光谱的结构及跃迁特性与其他地区有明显的区别, 除 NII 离子  $n=3$  的低激发态产生的跃迁谱线外, 激发能量为 13 ~ 14eV 左右的中性 NI 和 OI 的跃迁增多, 但很难观测到 OII 离子的跃迁谱线.

**关键词** 闪电光谱 NI, OI, NII 离子 MCDF 方法

文章编号 0001-5733(2004)01-0042-05 中图分类号 P427 收稿日期 2003-01-10, 2003-09-10 收修定稿

## SPECTRAL STUDY ON LIGHTNING RETURN STROKE IN PLATEAU AREA

YUAN Ping<sup>1,2</sup> LIU Xin-Sheng<sup>1</sup> ZHANG Yi-Jun<sup>1</sup> QIE Xiu-Shu<sup>1</sup> ZHANG Guang-Shu<sup>1</sup> WANG Huai-Bin<sup>1</sup>

1 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

**Abstract** The spectra in the range of 400 ~ 700nm for first return strokes of CG lightning flashes have been obtained in the Qinghai plateau using a slit-less spectrograph, and new lines of 604.6nm and 619.4nm are recorded. Applying the Large-scale multi-configuration Dirac-Fock wave functions, we calculated the parameters such as wavelength, oscillator strengths and excited energy for the transitions related to lightning spectra. The most important effects of relativity, correlation, and relaxation are included in the computational model. Comparison of the calculated results with experimental spectra shows that the spectra in plateau area have a distinctive characteristic. Beside the lines of lower excited state with  $n=3$  in NII ions, transitions of NI and OI are increased, their excited energy is around 13 ~ 14eV, and there are rarely lines from OII ion.

**Key words** Lightning spectra, NI, OI, NII ions, MCDF method.

## 1 引言

闪电光谱作为反映通道内部物理信息的重要途径之一, 一直是雷电物理研究领域所关心的课题. 早期闪电光谱的研究工作仅限于通过对光谱线的识别<sup>[1,2]</sup>, 了解通道中等离子体的成分. 无狭缝摄谱仪

的问世实现了对单次回击光谱的观测后, 人们的注意力逐渐转移到光谱与通道特性以及闪电物理过程的关系. Orville<sup>[3~6]</sup>和 Weidman 等人<sup>[7]</sup>在这方面做了许多工作, 并报道了利用观测数据推得的闪电通道内的平均温度、电子密度等代表通道基本特性的参

基金项目 中国科学院知识创新重大项目 (KZCX2-201) 和 (KZCX1-SW-04), 国家自然科学基金 (40135010, 10274062).

作者简介 袁萍, 女, 1963 年生, 在读博士, 主要从事原子结构和雷电物理方面的研究. E-mail: yuanping 66@163.com

数. 由于自然闪电发生的随机性和瞬时性, 给闪电光谱的试验观测和研究带来了一定的困难和局限性. 近年来, 雷电物理的研究取得了很大进展, 国内也做了许多工作<sup>[8,9]</sup>, 但闪电光谱的研究进展缓慢, 至今为止, 关于闪电光谱特性的分析以及光电同步的观测资料仍非常少. 并且, 以往有关闪电光谱的工作主要集中在雷电活动比较强烈的沿海地区和内陆, 高原地区雷电的光谱研究还是一个空白. 雷电的发生和发展与纬度、地理环境、季节和天气形势、电荷分布等多种因素有关. 不同地区以及同一地区不同强度和极性的闪电放电, 其光谱结构和特性都有一定的差别, 高原地区由于特殊的地理位置和气候条件, 云底比较低, 雷电活动有时很频繁, 其激发和发展具有独特的性质. 闪电形成和发展过程的物理机制是这一领域研究工作中一个非常重要的基本依据, 给出与闪电通道的特性有关的基本参数, 对探讨雷电中发生的微观物理过程有重要意义. 为了了解高原闪电的物理特性, 本工作用无狭缝摄谱仪, 观测了青藏高原东北西宁地区云对地闪电首次回击过程的光谱. 将原子结构理论应用于闪电光谱的研究, 用多组态 Dirac-Fock (MCDF) 方法, 系统考虑相对论效应、电子关联、弛豫效应等重要贡献, 计算了有关光谱线的波长、振子强度和相应的激发能量等参数. 并将理论和试验结果进行比较, 分析了这一地区闪电回击过程的光谱特征, 为雷电物理的研究以及闪电的光电相关特性的探讨提供了参考数据.

## 2 理论方法

激发态能量和跃迁参数的计算分别采用程序 GRASP92<sup>[10]</sup> 和 REOS99<sup>[11]</sup>, 它们基于完全相对论下的多组态 Dirac-Fock 方法<sup>[12]</sup>, 且系统考虑了电子关联和弛豫效应的贡献. 在原子结构的相对论理论中, 对于具有  $N$  个电子的原子或离子体系, Dirac-Coulomb 哈密顿用原子单位可表示为

$$H_{DC} = \sum_{i=1}^N \left( c \hat{\alpha} \cdot \hat{p} + c^2 - \frac{Z}{r_i} \right) + \sum_{i,j}^N \frac{1}{r_{ij}}, \quad (1)$$

其中,  $r_i$  是第  $i$  个电子的位置,  $r_{ij}$  为第  $i$  和  $j$  个电子之间的距离,  $c$  是光速,  $\hat{p} = -i \nabla$  为动量算符, 算符  $\hat{\alpha}$  和  $\hat{\beta}$  是  $4 \times 4$  阶 Dirac 矩阵. 在中心势场近似下, 单电子 Dirac 轨道波函数为

$$\psi_{n\mu} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} P_n(r) Y_{\mu}(\theta, \phi) \\ i Q_n(r) Y_{\mu}(\theta, \phi) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中,  $n$  是 Dirac 量子数,  $\mu$  为总角动量  $J$  的投影,

$P_n(Q_n)$  是径向波函数的大(小)分量,  $Y_{\mu}$  是一个二分量子自旋角函数. 在 MCDF 方法中, 原子态  $\alpha$  的波函数可近似表示为具有相同宇称和总角动量的组态波函数(CSF)的线性组合, 即

$$|\alpha\rangle (PJM) = \sum_{r=1}^{n_c} C_r(\alpha) |r\rangle (PJM), \quad (3)$$

其中  $C_r(\alpha)$  是组态混合系数,  $n_c$  是 CSF 的数目, 它反映了计算中考虑电子关联效应的程度. 组态波函数  $|r\rangle (PJM)$  由相应组态的所有可能的 Slater 行列式波函数的线性组合构成

$$|r\rangle (PJM) = \sum_p B_p |r_p\rangle, \quad (4)$$

其中,  $B_p$  是展开系数,  $|r_p\rangle$  表示由单电子自旋轨道波函数  $\psi_{n\mu}$  构成的  $N$  阶 Slater 行列式. 为了有效地考虑关联效应, 本文采用了最早用于量子化学的活动空间方法来产生组态状态列表, 然后通过逐渐扩大所考虑的 CSF 数目, 对跃迁初、末态波函数进行多步优化, 直到得到理想的能量和波函数值. 另外, 计算中还考虑了 Breit 相互作用(对两个电子库仑相互作用的修正)、量子电动力学(QED)效应以及原子核有限体积产生的效应等因素对能级和波函数的重要贡献.

根据含时微扰理论, 单位时间量子体系从激发态  $\alpha$  到较低的  $\beta$  态的跃迁振子强度可以表示为

$$f_{\alpha\beta} = \frac{mc^2}{4e^2(2J_\alpha + 1)} \sum_M \sum_{M'} |M^{(L)}|^2, \quad (5)$$

其中,  $m$  是电子质量,  $e$  是电子所带电量,  $\lambda$  为跃迁波长,  $J$  是激发态  $\alpha$  的总角动量,  $M$  和  $M'$  分别为激发态  $\alpha$  和  $\beta$  的总角动量分量,  $M^{(L)}$  是从激发态  $\alpha$  到较低的  $\beta$  态跃迁的矩阵元, 可以表示为

$$\begin{aligned} M^{(L)} &= \langle \beta (PJM) | O^{(L)} | \alpha (PJM) \rangle \\ &= \sum_{r,s} C_r(\alpha) C_s(\beta) \langle r (PJM) | \\ &\quad \times O^{(L)} | s (PJM) \rangle, \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $O^{(L)}$  是辐射电磁场的  $L$  阶张量算符.

## 3 试验观测及资料分析

2002 年 7~8 月在青海省西宁市大通县山区进行了自然闪电光谱观测试验, 观测地点位于青藏高原东北边缘, 东经 101°34'57"、北纬 37°03'47", 海拔高度 2534m. 所用无狭缝摄谱仪的记录系统是 SONY 数码摄像机, 它采用专业蔡司镜头,  $f = 4.3 \sim 51.6$ mm, 数字成像系统具有 3 组 CCD 阵列(电荷耦合器件), 其感光灵敏度远远高于以往采用感光胶片

的摄谱仪. 为了得到 400 ~ 700nm 波长范围的谱线, 分光装置采用每毫米 600 条的平面透射光栅, 闪耀波长为 500nm. 光栅置于摄像机的物镜前, 其平面与物镜面成 23 左右的夹角, 一级光谱的色散约为 1.3nm/pixel. 拍得闪电光谱后, 以高压汞灯为标准光源进行谱线波长观测值的标定.

试验期间, 共记录到 36 次云对地闪电的回击光谱. 通过与电学观测资料的对比分析发现, 与以往其他地区的闪电回击光谱<sup>[2~6,13]</sup>相比, 高原闪电的回击光谱有其独特的结构和性质, 波长为 500.5nm、568.0nm 以及 648.2nm 的线和 H 线(656.3nm)在各种不同强度的闪电回击中都能观察到, 将它们称作基本谱线. 除此之外, 不同闪电回击过程中记录到的谱线有一定差异. 强闪电过程中, 激发能量较高的跃迁谱线出现的几率较大; 而较弱闪电放电中观测到的大多是 NI 激发能量较低的谱线. 图 1, 图 2 (图版) 给出了 8 月 15 日的一次系统雷暴过程中拍摄到的 2 次云对地闪电首次回击过程的 400 ~ 700nm 波长范围的光谱, 当天气压为  $757.3 \times 10^2$  Pa. 对无狭缝摄谱仪而言, 闪电通道可以看作是无限远的线光源, 光谱线的形状和实际的闪电通道完全相同, 图 1, 图 2 中竖直方向为通道的高度. 可以看出, 闪电通道与地面接近垂直的部分, 由于平面光栅的刻线基本上与光源平行, 谱线的质量较好; 相反, 在

通道水平方向发展的局部地方, 光栅已不能正常分光, 这些位置在光谱中对应的是一道水平的亮光. 光谱的特点是, 线状谱叠加在弱连续光谱的背景上, 线状谱主要由 OI、NI 和 NII 离子低激发态之间的跃迁形成, 较强的谱线集中在 500nm 以上的波长范围, 400 ~ 500nm 的谱线非常弱. 为了使这方面的定量研究更为准确, 用原子结构计算程序 GRASP92 和 REOS99 计算了光谱跃迁的参数, 并与试验观测的闪电光谱相比较, 在表 1 中列出了波长观测值以及相应的跃迁波长、振子强度和跃迁上激发态的能量(上激发能)计算值. 由于理论计算可以详细给出光谱线的精细结构, 一般, 试验观测到的每一条光谱线都是相应的一组多重态跃迁的贡献, 中心波长在最强的谱线附近. 所以, 对应于每一个观测谱线, 表 1 只列出了一组多重态谱线中振子强度最大的跃迁. 波长为 500.5nm 附近有两组跃迁, 其中,  $2p3d^3F-2p3p^3D$  跃迁的振子强度很大, 上能级寿命较长<sup>[14]</sup>; 波长为 568.0nm 的谱线对应的跃迁上能级寿命较长、振子强度较大, 在激发态离子密度足够大时, 容易形成比较强的辐射跃迁; 对波长为 648.2nm 的谱线有贡献的有两组跃迁, 其中 NII  $2p(^2P)3p^1P_1-2p(^2P)3s^1P_1$  的上能级寿命很长. 这些谱线对应的上能级激发能量大多在 20 ~ 23eV 左右, 它们是回击通道基本物理特性的反映.

表 1 试验观测的回击光谱与理论计算的谱线波长、振子强度  $gf$  以及上激发能的比较

Table 1 Observed lightning spectra compared with calculated wavelength, oscillator strengths  $gf$  and upper excited energies

obs/nm	cal/nm	跃 迁	$gf$	上激发能/eV
500.5	500.669	NII $2p(^2P)3d^3F_4-2p(^2P)3p^3D_3$	3.87350	23.142
	500.876	NII $2p(^2P)3d^3P_2-2p(^2P)3p^3S_1$	1.34607	23.415
568.0	568.117	NII $2p(^2P)3p^3D_3-2p(^2P)3s^3P_2$	1.68368	20.665
571.0	571.069	NII $2p(^2P)3p^3D_2-2p(^2P)3s^3P_2$	0.30658	20.653
648.2	648.209	NII $2p(^2P)3p^1P_1-2p(^2P)3s^1P_1$	0.57156	20.409
	648.429	NI $2p(^3P)4d^4F_{7/2}-2p(^3P)3p^4D_{5/2}$	0.21045	13.668
656.3	656.286	H $3d^2D_{5/2}-2p^2P_{3/2}$	2.50591	12.088
463.0	463.077	NII $2p(^2P)3p^3P_2-2p(^2P)3s^3P_2$	1.19082	21.160
517.9	517.952	NII $2s2p^2(^4P)3d^5F_5-2s2p^2(^4P)3p^5D_4$	4.72651	30.139
	517.931	NII $2s2p^2(^4P)3d^5D_4-2s2p^2(^4P)3p^5P_3$	3.13984	30.373
594.2	594.318	NII $2p(^2P)3d^3D_3-2p(^2P)3p^3P_2$	2.02881	23.246
600.8	600.838	NI $2p(^3P)4d^2P_{3/2}-2p(^3P)3p^2S_{1/2}$	0.07682	13.665
616.8	616.798	NII $2p(^2P)4p^3D_3-2p(^2P)3d^3F_4$	1.05893	25.151
480.3	480.469	NII $2p(^2P)3d^3D_3-2p(^2P)3p^3D_3$	0.81433	23.246
533.0	533.071	OI $2p^3(^4S)5d^5D_4-2p^3(^4S)3p^5P_3$	0.10785	13.066
	532.856	NI $2s^2p^2(^3P)4p^4D_{5/2}-2s2p^4P_{3/2}$	0.00701	13.250
543.6	543.627	OI $2p^3(^4S)6s^5S_2-2p^3(^4S)3p^5P_3$	0.03978	13.021
604.6	604.640	OI $2p^3(^4S)6s^3S_1-2p^3(^4S)3p^3P_2$	0.02913	13.039
619.4	619.428	NI $2p^2(^3P)5d^2D_{3/2}-2p^2(^3P)3p^2D_{3/2}$	0.00281	14.001

注:  $obs$  和  $cal$  分别是谱线波长的观测值和计算值.

除基本谱线外,不同闪电的回击过程中,光谱结构有一定的差异,这正反映了每次闪电放电的特征。图1(见图版 )是发生在8月15日19:24:16的一次闪电首次回击的光谱,左边是没有分光的闪电通道,从云底和接地点可以看出,这是一幅云外全通道的光谱。图中可以清楚地看到波长为594.2nm、600.8nm及616.8nm的谱线,与表1的理论计算结果比较,594.2nm对应的跃迁振子强度远大于600.8nm的谱线,但在图1中,这两条相邻的谱线亮度基本相同,说明通道等离子体中NI的浓度很高。文献[2]中,将 $\text{NII } 2p^2(^2P^{\circ}) 4p^1S-2p^2(^2P^{\circ}) 3d^1P^{\circ}$ 也归于616.8nm的谱线,由理论计算可知,这一跃迁的波长为595.4nm,对616.8nm的谱线没有贡献。从图1的光谱中还可以看出,波长为517.9nm的谱线比它附近500.5nm的谱线要弱,虽然对这条线有贡献的两组多重态跃迁的振子强度都很大,但它们对应的跃迁上激发能量都已高达30eV,根据光谱线的特性推断,在这次闪电的回击通道中,激发态离子在这个能量附近的几率很小。根据理论计算,在400~500nm的波长范围内还有几条激发能量在30eV左右的OII离子跃迁谱线,由于受通道能量的限制,加上OII离子的密度远远小于NII离子,所以,难以在高原闪电中观察到这些跃迁的谱线。

图2(见图版 )记录的是8月15日19:31:12发生的一次闪电的首次回击光谱。在这次回击过程中,除上述几条基本谱线外,中性NI、OI的跃迁谱线较多,并且没有观察到激发能量比基本谱线更高的跃迁。波长为604.6nm和619.4nm的谱线是高原闪电中记录到的两条新谱线,结合理论计算可以辨认出,它们分别是 $\text{OI } 2p^3(^4S^{\circ}) 6s^3S^{\circ}-2p^3(^4S^{\circ}) 3p^3P$ 和 $\text{NI } 2p^2(^3P^{\circ}) 5d^2D-2p^2(^3P^{\circ}) 3p^2D$ 的多重态跃迁形成的谱线,对应的上激发能量在13~14eV范围,根据光谱结构和跃迁特性推断,在这一次闪电的回击通道等离子体中,激发态处在这个能量范围的几率很大。

激发能量是表示光谱跃迁特性的一个基本参数,它和通道内等离子体的密度、温度以及通道电流、电磁场的变化等参量直接相关。从光谱的结构以及相应的跃迁参量来分析,图1对应的闪电通道的平均温度应高于图2中的闪电。从快电场变化和闪电定位系统的观测资料可知,这两次闪电均为负地闪,图1记录的是这一地区一次比较强的闪电放电过程,距离观测点6km,共有3个回击,首次回击与继后回击的时间间隔为48ms,通道峰值电流为

$35.1 \times 10^3 \text{ A}$ ;图2中的闪电距观测点3km,有4次回击,首次回击与继后回击的时间间隔为96ms,通道峰值电流为 $4.3 \times 10^3 \text{ A}$ 。根据本工作对闪电的光谱观测和理论计算发现,在高原地区闪电的首次回击过程中,通道的光谱辐射除NII离子 $n=3$ 的低激发态产生的跃迁谱线外,NI和OI的跃迁增强,它们对应的激发能量为13~14eV。OII离子的密度非常小,相应的跃迁谱线也很难在光谱中观测到。光谱结构及特性是通道温度的一个标志,不同强度的闪电放电过程,对应的通道温度差别很大,以往关于通道温度的估算都是以NII离子谱线的强度、振子强度以及激发能量等参数为依据进行的<sup>[3,15]</sup>。结合光谱特性和雷电定位系统的观测资料推断,高原闪电回击通道的平均温度要低于其他地区。另外,光谱的特性参数和电磁场变化、通道电流之间的对应关系是揭示雷电形成和发展的物理机制的关键,这一方面进一步的工作对雷电物理的研究将有十分重要的意义。

## 4 结 论

通过对青海西宁地区云对地闪电首次回击过程可见光范围的光谱的研究,结合理论分析发现,通道等离子体的特性与地理环境和闪电放电的强度密切相关。与其他地区的回击光谱相比,高原地区的光谱有明显的特征,跃迁上激发能量为13~14eV的中性NI和OI的跃迁增多,并且,通道峰值电流越小,中性NI和OI的谱线越多,而沿海地区强闪电中容易出现的OII离子的跃迁谱线在高原闪电光谱中很难观测到。根据光谱特性和雷电定位系统的观测资料推断,高原闪电的通道温度一般低于其他地区。

## 参考文献

- [1] Wallace L. The spectrum of lightning. *Astrophys. J.*, 1964, **139**: 994~998
- [2] Salanave L E, Orville R E, Richards C N. Slitless spectra of lightning in the region from 3850 to 6900 angstroms. *J. Geophys. Res.*, 1962, **67**: 1877~1884
- [3] Orville R E. A high-speed time-resolved spectroscopic study of the lightning return stroke: part . A quantitative analysis. *J. Atmos. Sci.*, 1968, **25**: 839~851
- [4] Orville R E. A high-speed time-resolved spectroscopic study of the lightning return stroke: part . A qualitative analysis. *J. Atmos. Sci.*, 1968, **25**: 827~838
- [5] Orville R E. Daylight spectra of individual flashes in the 370~690nm region. *J. Appl. Meteor.*, 1980, **19**: 470~473

- [ 6 ] Orville R E. Absolute spectral irradiance measurements of lightning from 375 to 880nm. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**(21): 3180 ~ 3187
- [ 7 ] Weidman C, Boye A, Crowell L. Lightning spectra in the 850 to 1400nm near-infrared region. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**: 13249 ~ 13257
- [ 8 ] 张义军, P R Krehbiel, 刘欣生. 雷暴中的反极性放电和电荷结构. *科学通报*, 2002, **47**(15): 1192 ~ 1195  
Zhang YJ, P R Krehbiel, Liu X S. Polarity inverted intracloud discharges and electric charge structure of thunderstorm. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2002, **47**(15): 1192 ~ 1195
- [ 9 ] 张义军, 董万胜, 张广庶等. 空中引发雷电先导的物理过程研究. *地球物理学报*, 2003, **46**(4): 446 ~ 449  
Zhang YJ, Dong W S, Zhang G S, et al. Characteristic of the leading processes to the artificial induced lightning in the air. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(4): 446 ~ 449
- [ 10 ] Parpia F A, Fischer C F, Grant I P. GRASP92: A package for large-scale relativistic atomic structure calculations. *Comput. Phys. Commun.*, 1996, **94**: 249 ~ 271
- [ 11 ] Fritzsche S, Fischer C F, Dong C Z. A revised program for transition probability calculation including relativistic, correlation, and relaxation effects. *Comput. Phys. Commun.*, 2000, **124**: 340 ~ 352
- [ 12 ] Grant I P, McKenzie B J, Norrington P H. An atomic multiconfigurational Dirac-Fock package. *Comput. Phys. Commun.*, 1980, **21**(2): 207 ~ 231
- [ 13 ] 袁萍, 刘欣生, 张义军等. 闪电首次回击过程的光谱特性. *高原气象*, 2003, **22**(3): 235 ~ 238  
Yuan P, Liu X S, Zhang YJ, et al. Spectral properties of the lightning return stroke. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22**(3): 235 ~ 238
- [ 14 ] 袁萍, 刘欣生, 张义军等. 与闪电过程有关的 NII 离子能级寿命的理论计算. *物理学报*, 2002, **51**(11): 2495 ~ 2502  
Yuan P, Liu X S, Zhang YJ, et al. Theoretical calculation for the lifetimes of NII related to lightning process. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2002, **51**(11): 2495 ~ 2502
- [ 15 ] Uman M A. The peak temperature of lightning. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1964, **26**: 123 ~ 128

## 欢迎订阅《地球物理学报》(中、英文版)

《地球物理学报》是有关地球物理学的综合性学术期刊,刊登固体地球物理、应用地球物理、空间地球物理和大气、海洋地球物理,以及与地球物理密切相关的交叉学科的研究论文,主要报道创新性研究成果。

《地球物理学报》于 1999 年荣获首届国家期刊奖,2000 年获中国科学院优秀期刊特别奖,2001 年入围“中国期刊方阵”被评为“双高期刊”,2003 年获第二届国家期刊奖。是中国科技信息研究所信息分析中心、中国科学院引文数据库等的统计源期刊和 SCI 等国际检索机构的统计源期刊。

《地球物理学报》中、英文版均为双月刊。中文版于单月中旬出版,英文版(网络版)由美国地球物理学家联合会(简称 AGU)向世界发行,双月底 Online。

中文版 国内邮发代号:2-571 刊号:ISSN 0001-5733

国外发行代号:BM 76 定价:50.00 元/期

英文版 刊号:ISSN 0898-9591 定价:100 元/年(6 期)

学生和中国地球物理学会会员可按优惠价订阅。

联系地址:北京 9825 信箱《地球物理学报》编辑部 邮编 100029

邮 编:100029

电 话:010-62007700,62007696,62007709 传真:62007709

E-mail:actageop@mail.igcas.ac.cn



图1 一次地闪首次回击的光谱（波长单位：nm）

闪电发生时间2002-08-15 19:24:16（北京时间），左边是没有分光的闪电通道

Fig.1 Spectrum for first return strokes of CG lightning happened at 2002-08-15 19:24:16 (wavelength in nm)

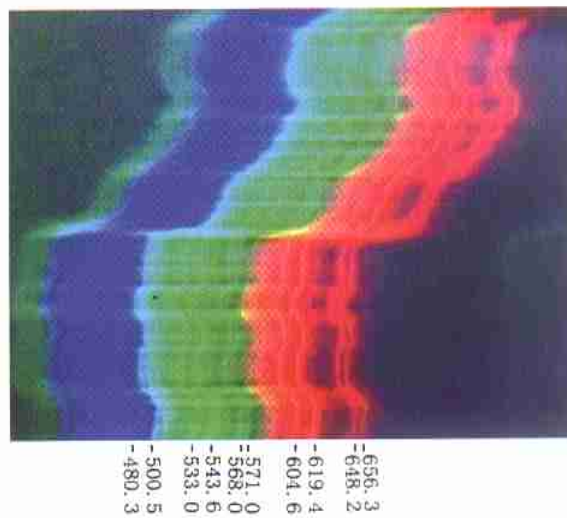


图2 闪电首次回击的光谱（波长单位：nm）

闪电发生时间2002-08-15 19:31:12（北京时间）

Fig.2 Spectrum for first return strokes of CG lightning happened at 2002-08-15 19:31:12