

闪电放电通道等离子体成分及相关特性的研究

王杰¹, 袁萍^{1,2*}, 张华明¹, 申晓志¹

1. 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000

摘要 以无狭缝摄谱仪获得了青海和西藏地区的云对地闪电回击过程的光谱, 依据谱线波长和相对强度等信息, 结合等离子体相关理论, 得到了放电通道温度和电子密度; 在此基础上, 根据 Saha 方程、电荷守恒方程和粒子数守恒方程计算了闪电通道主要元素各级电离的离子数密度, 进而得到通道质量密度、压强及平均电离度, 并分析了不同强度闪电放电通道的电离度、粒子数密度及其分布特征。结果表明: 回击通道接近于完全电离, 一次电离离子占主要地位, 且 N II 离子数密度最高; 不同强度的闪电放电通道中, N II 和 O II 离子的相对浓度值变化不大; 计算过程中考虑带电离子间库仑相互作用以后, 原子电离能的计算值降低, 中性原子以及一次电离离子数密度的计算值变小, 高次电离离子数密度的计算值变大。

关键词 粒子数密度; 压强; 电离度

中图分类号: P427.3 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2008)09-2003-06

引言

闪电过程是自然界产生奇氮化合物的主要途径之一, 闪电放电通道及其周围的高温会引起大气中 N_2 , O_2 , CO_2 以及 H_2 等成分的分解, 形成 NO, CO, OH, N, O 等物质。目前, 闪电产生氮氧化物的物理机制仍不很清楚, 对其主要传输过程的认识也还存在很多争议。闪电过程伴随的化学反应与通道的温度变化和 NI, NII, OI, OII 离子以及 CN, H 等成分的浓度有关^[1,2]。因此, 通道等离子体成分及其相关特性的研究将为闪电产生氮氧化物机制的研究和有关理论估算提供参考数据^[3-6]。

关于等离子体成分及相关物理特性的研究, 在很早以前就已开始。Burkhardt^[7] 研究了一个大气压下由电子, N_2 , O_2 , NO, NI, NII, NIII, OI 和 OII 组成的等离子体, 首次对温度低于 25 000 K 的等离子体成分进行了理论计算。Lochte Holtgreven^[8] 对一个大气压下氮等离子体中粒子数密度随温度的变化规律进行了研究。Burhorn 和 Wienech^[9] 的工作讨论了压强对粒子浓度的影响。Uman 利用闪电回击过程的光谱得到放电通道温度^[10], 并首次获得了闪电放电通道的粒子数密度与电子密度^[11], 同时, 也由 H α 线的 Stark 加宽直接计算出电子密度^[12]。

目前为止, 关于不同强度的闪电放电通道内部粒子分布规律及相关特性的研究仍然非常少。本工作利用无狭缝摄谱仪获得的青海和西藏那曲地区云对地闪电回击过程的光谱资料, 计算了闪电回击通道等离子体的温度和电子密度、通道主要元素 (N, O 和 Ar) 各级电离的离子数密度等参数, 为闪电过程的物理机制的研究以及闪电产生氮氧化物和闪电通道等离子体热力学性质的探讨提供了参考数据。

1 方法

依据光谱信息研究闪电放电通道等离子体性质, 建立在以下几个基本假设的前提下: (1) 通道处于局部热力学平衡状态 (LTE); (2) 通道是光薄的; (3) 忽略水分子对通道热力学性质的影响^[11]。另外, 计算各组分数密度时, 忽略微量及痕量成分。闪电通道温度一般都可以达到 24 000 K^[12], 在这样的温度下, 放电通道呈等离子体状态。

根据 Saha 方程, 得到电离平衡方程^[13]

$$\frac{n_{A_{i+1}} n_e}{n_{A_i}} = 2(2\pi m_e kT / h^2)^{3/2} \times \frac{Z_{A_{i+1}}}{Z_{A_i}} e^{-I_{A_i}/kT} e^{-\Delta I_{A_i}/kT} \quad (1)$$

其中, n_{A_i} 为 i 级电离的 A 离子数密度, n_e 为电子数密度, Z_{A_i} 为 i 级电离的 A 离子的配分函数, I_{A_i} 为 i 级电离的 A 离子的电离能, ΔI_{A_i} 为 Debye Hückel 理论对电离能的修正。

收稿日期: 2007-06-11, 修订日期: 2007-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40475007) 和西北师范大学科技创新工程项目 (nwnu kjcxgc 03-21) 资助

作者简介: 王杰, 1982 年生, 西北师范大学物理与电子工程学院在读硕士研究生 e-mail: wangjie1023@163.com

* 通讯联系人 e-mail: yuanp@nwnu.edu.cn

由光谱线相对强度和跃迁参数得到通道等离子体温度及电子密度后, 结合电荷守恒方程、粒子数守恒, 首先求解未考虑等离子体中带电粒子间的相互作用时 N, O, Ar 元素各级电离离子的数密度。实际上, 由于带电离子间的库仑相互作用, 在高电子密度的等离子体中, 每个离子处在与大量离子的相互作用之中^[14]。因此, 进一步的计算考虑了离子周围

的自由电子对库仑场的屏蔽, 这种相互作用可用 Debye Hückel 理论描述。引入 Debye 半径

$$\lambda_D = \left[\frac{e^2}{\varepsilon_0 kT} \left(n_e + \sum_{i=1, A}^Z i^2 n_{i, A} \right) \right]^{-1/2} \quad (2)$$

其中: ε_0 为真空电容率, e 为电子电荷量, n_e 为电子密度, $n_{i, A}$ 为 i 级电离的 A 离子的数密度。

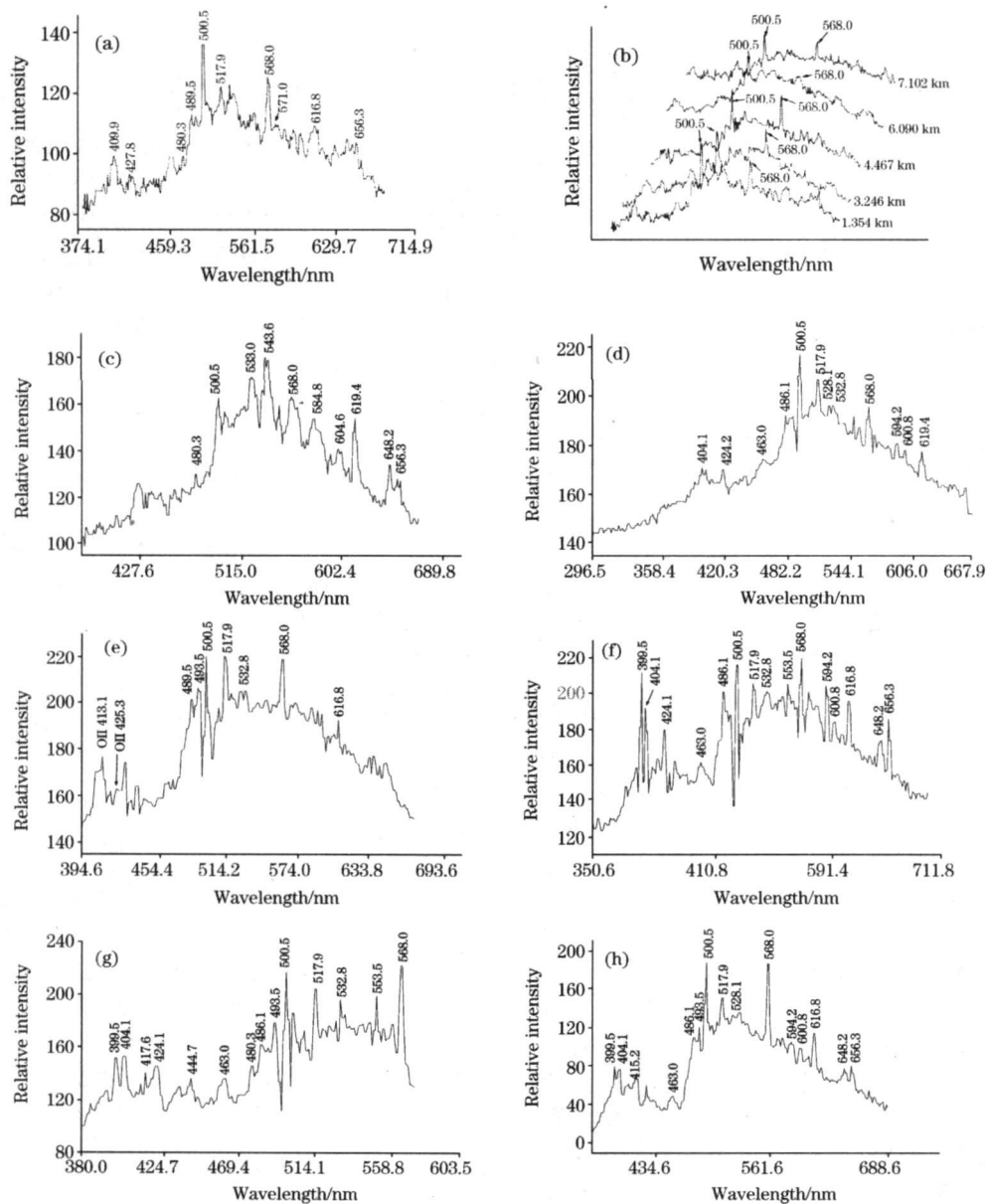


Fig 1 Spectra at given heights in each discharge channel

- (a): Spectrum of discharge B at a given height (place: Qinghai, 19: 24: 16, 08 15, 2002);
- (b): Spectrum of discharge B at a different heights;
- (c): Spectrum of discharge A at a given height (place: Qinghai, 19: 31: 12, 08 15, 2002);
- (d): Spectrum of discharge C at a given height (place: Naqu of Xizang, 11: 16: 37, 07 15, 2004);
- (e): Spectrum of discharge D at a given height (place: Naqu of Xizang, 01: 13: 08, 08 11, 2003);
- (f): Spectrum of discharge E at a given height (place: Naqu of Xizang, 19: 32: 47, 07 11, 2004);
- (g): Spectrum of discharge F at a given height (place: Naqu of Xizang, 19: 40: 04, 07 28, 2004);
- (h): Spectrum of discharge G at a given height (place: Naqu of Xizang, 21: 31: 30, 08 11, 2003)

电离能的修正值

$$\Delta I_{A_i} = \dot{I}_{A_i} - I_{A_i} = \frac{-ie^2}{4\pi\epsilon_0\lambda_0} \tag{3}$$

其中： I_{A_i} 为原子 i 级电离的电离能， $\dot{I}_{A_i}$ 为考虑库仑相互作用的 i 级电离的电离能^[15]。

依据上述理论，首先在不考虑 Debye 修正情况下计算 N、O 和 Ar 元素各级电离的离子数密度，并将其作为初始值代入方程(2) 求出 Debye 半径，进而得到电离能的修正值 ΔI_{A_i} ，用修正后的电离能 $\dot{I}_{A_i}$ 代替(1) 式中的电离能 I_{A_i} ，计算出修正后的离子数密度，并重新对电离能进行修正，进行下一步迭代，最后得到考虑了 Debye Hückel 理论修正后的粒子数密度。

Table 1 The particle densities of stroke A and B before and after considering Debye Hückel corrections

粒子浓度 / cm^{-3}	回击 A $T=24\,700\,\text{K}$, $n_e=9.03\times10^{17}\,\text{cm}^{-3}$		回击 B $T=28\,000\,\text{K}$, $n_e=1.75\times10^{18}\,\text{cm}^{-3}$	
	修正前	修正后	修正前	修正后
$n_{\text{N I}}$	2 261(16)	2 071(16)	3 161(16)	2 827(15)
$n_{\text{N II}}$	6 935(17)	6 909(17)	1 287(18)	1 270(18)
$n_{\text{N III}}$	7 283(15)	8 588(15)	4 322(16)	5 192(16)
$n_{\text{N IV}}$	3 210(09)	4 874(09)	1 721(11)	2 777(11)
$n_{\text{O I}}$	9 004(15)	8 267(15)	1 223(16)	1 100(16)
$n_{\text{O II}}$	1 842(17)	1 840(17)	3 490(17)	3 465(17)
$n_{\text{O III}}$	4 174(14)	4 935(14)	3 259(15)	3 938(15)
$n_{\text{O IV}}$	4 892(07)	7 447(07)	4 660(09)	7 564(09)
$n_{\text{Ar I}}$	1 271(14)	1 147(14)	1 531(14)	1 318(14)
$n_{\text{Ar II}}$	8 378(15)	8 225(15)	1 336(16)	1 297(16)
$n_{\text{Ar III}}$	7 580(14)	8 809(14)	3 622(15)	4 186(15)
$n_{\text{Ar IV}}$	1 007(11)	1 507(11)	3 088(12)	4 793(12)
$n_{\text{Ar V}}$	1 765(03)	3 701(03)	8 805(05)	2 025(06)

注：括号中的数字表示 10 的幂次，如 2 261(16) = 2 261 × 10¹⁶

2 数据分析

近年来，利用无狭缝摄谱仪在我国沿海、高原不同地区进行了自然闪电的光谱观测实验，得到了一些闪电回击过程的光谱。本工作以青海、西藏那曲得到的部分光谱为例，依据谱线波长、相对强度及谱线跃迁参数等^[16, 17]，计算了放电通道内各组分的粒子数密度，并对粒子分布特点及相关特性进行了分析。

图 1 是用谱线相对强度表示的放电通道某一高度处的光谱图，同时也给出了回击 B 在不同高度处的光谱图，谱线右侧数据为所取光谱对应的通道实际高度。由于温度和电子密度随通道高度的变化不大^[18, 19]，在进一步的计算中，采用了它们在通道不同高度处的平均值。

利用电子温度和密度的计算值，可以进一步求得各组分的数密度。表 1 以回击 A 和 B 为例，给出了通道内主要元素各级电离离子的数密度，为了比较 Debye Hückel 修正对计算结果的影响，表中同时列出了未考虑 Debye Hückel 修正的计算值。可以看出，对于同一回击通道，考虑 Debye Hückel 修正以后，N I，N II，O I，O II 和 Ar I，Ar II 离子数密度有所降低。可以解释为：Debye 屏蔽作用主要是离子附近电子的贡献，平均来说，等离子体环境中，在离子附近总有电子与之形成离子-电子对，且形成离子-电子对的同时要放出一部分能量。考虑 Debye 修正后，原子电离能的计算值降低，由于等离子体内部必须满足电中性条件，这必将导致修正后的低次电离离子数密度变小，而高次电离粒子数密度变大。

表 2 列出了 7 个回击通道的各组分的粒子数密度，可以看出，闪电放电通道中电子密度为 10¹⁸ cm⁻³ 数量级，且温度越高的通道内电子密度越大；一次电离的离子占主要地位，比中性原子数密度高 1~2 个数量级，N II 离子数密度最大，

Table 2 The particle densities in different lightning discharge channels

	回击 A	回击 B	回击 C	回击 D	回击 E	回击 F	回击 G
T/K	24 700	28 000	28 100	28 700	29 000	29 900	30 700
n_e	9 030(17)	1 750(18)	1 068(18)	1 752(18)	1 810(18)	1 534(18)	3 267(18)
$n_{\text{N I}}$	2 071(16)	2 827(15)	1 014(16)	2 332(16)	2 256(16)	1 258(16)	4 818(16)
$n_{\text{N II}}$	6 909(17)	1 270(18)	7 417(17)	1 238(18)	1 262(18)	9 960(17)	2 230(18)
$n_{\text{N III}}$	8 588(15)	5 192(16)	4 894(16)	6 975(16)	8 089(16)	1 067(17)	1 709(17)
$n_{\text{N IV}}$	4 874(09)	2 777(11)	4 202(11)	6 186(11)	8 952(11)	2 407(12)	3 495(12)
$n_{\text{O I}}$	8 267(15)	1 100(16)	4 024(15)	9 093(15)	8 802(15)	4 996(15)	1 851(16)
$n_{\text{O II}}$	1 840(17)	3 465(17)	2 065(17)	3 415(17)	3 498(17)	2 840(17)	6 212(17)
$n_{\text{O III}}$	4 935(14)	3 938(15)	3 802(15)	5 592(15)	6 660(15)	9 478(15)	1 554(16)
$n_{\text{O IV}}$	7 447(07)	7 564(09)	1 177(10)	1 873(10)	2 853(10)	8 745(10)	1 368(11)
$n_{\text{Ar I}}$	1 147(14)	1 318(14)	4 189(13)	1 016(14)	9 540(13)	4 585(13)	2 002(14)
$n_{\text{Ar II}}$	8 225(15)	1 297(16)	6 712(15)	1 178(16)	1 163(16)	7 850(16)	1 983(16)
$n_{\text{Ar III}}$	8 809(14)	4 186(15)	3 493(15)	5 155(15)	5 745(15)	6 358(15)	1 128(16)
$n_{\text{Ar IV}}$	1 507(11)	4 793(12)	6 386(12)	9 183(12)	1 237(13)	2 597(13)	3 891(13)
$n_{\text{Ar V}}$	3 701(03)	2 025(06)	4 277(06)	7 102(06)	1 255(07)	5 944(07)	9 273(07)

其次是 O II 离子，三次以上电离的离子数密度已经非常小。高温通道中，二次及以上电离离子数密度比低温通道中高一个甚至几个数量级；不同温度的放电通道中，中性原子和一次电离离子数密度的绝对值相差不大。另外，B 和 C 是发生在不同地区温度最接近的两次回击，回击 B 发生在青海地区，回击 C 发生在西藏那曲，且回击 C 通道中各组分总数密度均比回击 B 中低，由此导致回击 C 通道内平均压强低于回击 B。地域差异对放电通道内部粒子数密度及分布产生的影

响将导致放电特征的差异，高海拔地区的闪电放电过程相对较弱。

表 3 列出了各回击通道中组分浓度占同种元素总浓度的百分比。可以看出，高温通道中中性原子和一次电离离子所占浓度百分比比低温通道中低，而二次及更高次电离离子所占比例相对较高，这主要是由于离子浓度同时受通道温度和压强的影响。在高温通道中，尽管低次电离离子浓度绝对值较高，但浓度百分比略有降低。

Table 3 The percentages of particles densities in different lightning discharge channels

	回击 A	回击 B	回击 C	回击 D	回击 E	回击 F	回击 G
<i>T</i> / K	24 700	28 000	28 100	28 700	29 000	29 900	30 700
<i>n</i> _{N I} / <i>n</i> _{N tot}	0.288(-01)	0.209(-01)	0.127(-01)	0.175(-01)	0.165(-01)	0.113(-01)	0.197(-01)
<i>n</i> _{N II} / <i>n</i> _{N tot}	0.959(00)	0.941(00)	0.926(00)	0.930(00)	0.924(00)	0.893(00)	0.911(00)
<i>n</i> _{N III} / <i>n</i> _{N tot}	0.119(-01)	0.384(-01)	0.611(-01)	0.524(-01)	0.593(-01)	0.956(-01)	0.698(-01)
<i>n</i> _{N IV} / <i>n</i> _{N tot}	0.677(-08)	0.206(-06)	0.525(-06)	0.465(-06)	0.656(-06)	0.216(-05)	0.143(-05)
<i>n</i> _{O I} / <i>n</i> _{O tot}	0.429(-01)	0.304(-01)	0.188(-01)	0.255(-01)	0.241(-01)	0.167(-01)	0.283(-01)
<i>n</i> _{O II} / <i>n</i> _{O tot}	0.955(00)	0.959(00)	0.963(00)	0.959(00)	0.958(00)	0.952(00)	0.948(00)
<i>n</i> _{O III} / <i>n</i> _{O tot}	0.256(-02)	0.109(-01)	0.177(-01)	0.157(-01)	0.182(-01)	0.318(-01)	0.237(-01)
<i>n</i> _{O IV} / <i>n</i> _{O tot}	0.386(-09)	0.209(-07)	0.549(-07)	0.526(-07)	0.781(-07)	0.293(-06)	0.209(-06)
<i>n</i> _{Ar I} / <i>n</i> _{Ar tot}	0.124(-01)	0.762(-02)	0.409(-02)	0.596(-02)	0.546(-02)	0.321(-02)	0.639(-02)
<i>n</i> _{Ar II} / <i>n</i> _{Ar tot}	0.892(00)	0.750(00)	0.655(00)	0.691(00)	0.665(00)	0.550(00)	0.633(00)
<i>n</i> _{Ar III} / <i>n</i> _{Ar tot}	0.955(-01)	0.242(00)	0.341(00)	0.303(00)	0.329(00)	0.445(00)	0.360(00)
<i>n</i> _{Ar IV} / <i>n</i> _{Ar tot}	0.163(-04)	0.277(-03)	0.623(-03)	0.539(-03)	0.708(-03)	0.182(-02)	0.124(-02)
<i>n</i> _{Ar V} / <i>n</i> _{Ar tot}	0.401(-12)	0.117(-09)	0.417(-09)	0.417(-09)	0.718(-09)	0.416(-08)	0.296(-08)

图 2 表示了不同回击通道中等离子体各组分的粒子数分布，图中各点对应粒子浓度占同种元素总浓度的百分比，横轴按照回击通道温度由低到高排列。结合表 3 可以看出，放电通道中一次电离的离子数密度比率最高，并且对于不同温度的放电通道，N II 和 O II 离子的数密度比率变化不大，这与文献[7-9]在其他等离子体环境下得到的结论一致；另外，温度越高的回击通道中，中性原子的数密度比率越低，二次电离离子的数密度比率越高。

$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，则对闪电通道来说，密度 ρ 约为 $10^{-2} \rho_0$ ，压强为几个到几十个大气压。相关的声学以及冲击波理论得出，闪电通道的峰值压强大约为 30~50 大气压^[20]。由于本工作得到的是一次闪电回击过程的时间积分光谱，由此推得的电子密度、粒子数密度及压强都是一次回击过程的平均值，应该低于峰值。一般情况下，同一地区的闪电，温度较高的放电通道对应的压强也较高；对于回击 F，由于所摄光谱中长波段被雨滴遮挡，只能使用短波部分进行计算，对计算结果有一定影响，得到的电子密度以及粒子数密度偏低。另外，表 4 还可以看出，对于温度相近的回击 B 和 C，压强相差很大，这两个闪电发生的地区海拔高度相差近 2 km，西藏那曲的闪电放电强度要低于青海地区。

3 结 论

以青海、西藏那曲地区云对地闪的光谱为依据，计算了闪电通道的温度及电子密度，并由此计算出通道中氮、氧、氩原子及各级电离离子数密度。考虑了带电离子间库仑相互作用以后，原子的电离能的计算值降低，中性原子以及一次电离离子数密度变小，高次电离离子数密度变大。回击通道接近于完全电离，一次电离离子占主要地位，且 N II 离子数密度最高；不同强度的闪电放电通道中，N II 和 O II 离子的浓度占同种元素总粒子数的百分比变化不大；同一地区的闪电放电，通道温度越高，平均压强也越大，对应电子密度及主要元素二次以上电离的离子所占比率越高，中性原子所占

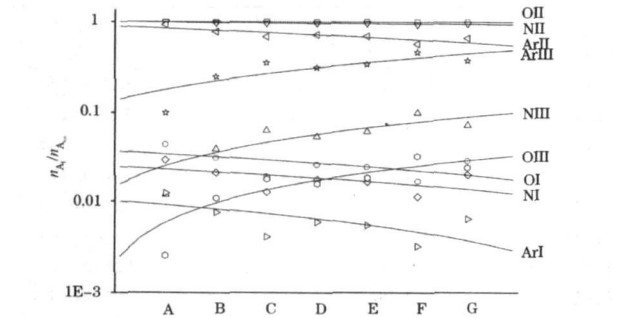


Fig 2 Particle distributions in different lightning discharge channels

在获得闪电通道等离子体组分的基础上，以 Dalton 定律和 Debye-Hückel 理论为依据，计算了通道等离子体密度、压强和平均电离度，结果在表 4 中给出。可以看出，闪电通道的平均电离度接近于 1，即：通道已接近完全电离，且温度较高的放电通道平均电离度也较高。若取空气密度 $\rho_0 = 1.29$

比率越低。闪电通道等离子体密度比标准状态下大气密度低 2 个数量级，通道压强从几个到几十个大气压。

Table 4 The characteristic parameters of lightning discharge channels

	通道温度 T / K	电子密度 n_e / cm^{-3}	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	压强 P / atm	平均电离度
回击 A	24 700	9.030×10^{17}	2.249×10^{-2}	6.056	0.968
回击 B	28 000	1.750×10^{18}	4.217×10^{-2}	13.048	0.977
回击 C	28 100	1.068×10^{18}	2.501×10^{-2}	7.889	0.986
回击 D	28 700	1.752×10^{18}	4.156×10^{-2}	13.281	0.981
回击 E	29 000	1.810×10^{18}	4.262×10^{-2}	13.833	0.982
回击 F	29 900	1.534×10^{18}	3.482×10^{-2}	11.854	0.987
回击 G	30 700	3.267×10^{18}	7.640×10^{-2}	26.198	0.979

参 考 文 献

[1] Salanave L E. Science, 1961, 134: 1395.

[2] Uman M A. Lightning. New York: Cambridge University Press, 1969. 264.

[3] Borucki W J, Chameides W L. Rev. Geophys., 1984, 22(4): 363.

[4] Borucki W J, McKay C P, Whitten R C. Icarus, 1984, 60: 260.

[5] Orville R E. Journal of the Atmospheric Sciences, 1968, 25: 839.

[6] Orville R E. J. Geophys Res., 1967, 72: 3557.

[7] Burkhardt V G. Z. Naturforsch., A, 1948, 3: 603.

[8] Lochte Holtgreven W. Rep. Prog. Phys., 1958, 21: 312.

[9] Burhorn F, Wienech R. Z. Phys. Chim., 1960, 213: 37.

[10] Uman M A. J. Atmos. Terr. Phys., 1964, 26: 123.

[11] Uman M A, Orville R E, Salanave L E. Journal of Atmospheric Science, 1964, 21: 306.

[12] Uman M A, Orville R E. J. Geophys. Res., 1964, 69: 5151.

[13] JIN Your min, FAN Your san(金佑民, 樊友三). Physical Properties of Low-Temperature Plasma (低温等离子体物理基础). Beijing: Tsinghua University Press(北京: 清华大学出版社), 1983. 71.

[14] Gress B, et al. Plasma Techniques. Beijing: Science Press, 1980. 27.

[15] Lochte Holtgreven W. Plasma Diagnostics. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1968. 17.

[16] YU AN Ping, LIU Xir sheng, ZHANG Yr jun(袁萍, 刘欣生, 张义军). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(3): 288.

[17] YU AN Ping, QIE Xir shu, LÜ Shi hua, et al(袁萍, 鄒秀书, 吕世华, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(4): 733.

[18] OUYANG Yir hua, YU AN Ping, QIE Xir shu, et al(欧阳玉花, 袁萍, 鄒秀书, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(11): 1988.

[19] ZHANG Hua ming, YUAN Ping, SU Ma o gen, et al(张华明, 袁萍, 苏茂根, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(10): 1929.

[20] Hill R D. J. Geophys. Res., 1971, 76: 637.

The Study on the Characteristics and Particle Densities of Lightning Discharge Plasma

WANG Jie¹, YUAN Ping^{1, 2*}, ZHANG Huaming¹, SHEN Xiaozhi¹

1. 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 730000, China

Abstract According to the wavelengths, relative intensities and transition parameters of lines in cloud to ground lightning spectra obtained by a slitless spectrograph in Qinghai province and Xizang municipality, and by theoretical calculations of plasma, the average temperature and electron density for individual lightning discharge channel were calculated, and then, using Saha equations, electric charge conservation equations and particle conservation equations, the particle densities of every ionized state, the mass density, pressure and the average ionization degree were obtained. Moreover, the average ionization degree and characteristics of particle distributions in each lightning discharge channel were analyzed. Local thermodynamic equilibrium and an optically thin emitting gas were assumed in the calculations. The result shows that the characteristics of lightning discharge plasma have strong relationships with lightning intensities. For a certain return stroke channel, both temperatures and electron densities of different positions show a trend of falling away with increasing height along the discharge channel. Lightning channels are almost completely ionized, and the first ionized particles occupy the main station while N II has the highest particle density. On the other hand, the relative concentrations of N II and O II are near a constant in lightning channels with different intensities. Generally speaking, the more intense the lightning discharge, the higher are the values of channel temperature, electron density and relative concentrations of highly ionized particles, but the lower the concentration of the neutral atoms. After considering the Coulomb interactions between positive and negative particles in the calculations, the results of ionization energies decrease, and the particle densities of atoms and first ionized ions become low while high ionized ions become high. At a temperature of 28 000 K, the pressure of the discharge channel due to electrons, atoms and ions is about 10 atmospheric pressure, and it changes for different lightning stroke with different intensity. The mass density of channel is lower and changes from 0.01 to 0.1 compared to the mass density of air at standard temperature and pressure (STP).

Keywords Particle density; Pressure; Ionization degree

(Received Jun. 11, 2007; accepted Sep. 16, 2007)

* Corresponding author