

# 高空核爆炸下大气的 X 射线电离及演化过程数值模拟

欧阳建明<sup>†</sup> 马燕云 邵福球 邹德滨

(国防科学技术大学理学院, 长沙 410073)

(2011 年 7 月 14 日收到; 2011 年 12 月 19 日收到修改稿)

利用数值模拟程序模拟了不同高度核爆炸下大气的 X 射线电离及演化过程. 结果表明: X 射线电离产生的电子数密度在射线到达后约 100 ns 时刻达到峰值, 峰值数密度随着到裸核区距离的增加而减小; 电子具有较长的寿命, 电子寿命随着到裸核区距离的增加而增大; X 射线电离空气产生正离子  $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ , 爆高为 120 km 情况下  $O^+$  的峰值数密度与  $O_2^+$  的相近, 能维持约 1 s. X 射线对空气的电离影响范围在数十千米以内, 在距裸核区较近的区域, 爆高为 80 km 时产生的电子峰值数密度比爆高为 120 km 时的电子峰值数密度高, 在距裸核区较远的区域则相反.

**关键词:** 高空核爆, X 射线电离, 数值模拟

**PACS:** 32.80.-t, 28.70.+y, 47.27.ek

## 1 引言

核爆炸按照爆炸的高度可以分为地下核爆炸、地面核爆炸、空中核爆炸和高空核爆炸<sup>[1]</sup>. 高空核爆炸爆点位于地面 30 km 以上, 其中高度在 80 m 以上的高空核爆炸产生的 X 射线自由程较长, 向上辐射的 X 射线逃逸出大气而不产生空中核爆炸的火球现象, 向下辐射的 X 射线的能量全部沉积在低层大气中<sup>[1]</sup>.

高空核爆炸在瞬间辐射出大量的 X 射线、中子、 $\gamma$  射线等, 其中 X 射线辐射的能量占释放总能量的 75%—85%. 高空核爆炸释放的射线能在很大的范围内电离大气分子或原子, 主要过程有瑞利散射、光电离、康普顿散射和电子对效应等<sup>[2]</sup>. 这种电离作用能对很大范围内的电离层结构产生重大影响, 从而影响通信和雷达等系统的工作性能.  $\gamma$  射线在高空的自由程很长, 能传播数千公里的距离, 影响范围大. X 射线的自由程相对较短, 能在一定的范围内迅速电离空气, 是空气电离的瞬时点源之一.

大气被电离之后的成分及成分之间的演化过

程十分复杂, 低能电子会吸附于原子和分子形成负离子, 也会与正离子发生复合反应, 高能电子能产生次级电离并使分子解离. 很多成分存在的时间很短, 一般难以直接测量. 数值模拟是研究大气电离及电离后的演化过程的一种较好方法. 本文以较为完善的大气等离子体物理化学过程模拟程序<sup>[3]</sup>为基础, 结合 X 射线对大气的电离过程, 对程序进行了改进. 利用改进后的程序数值模拟了不同高度核爆炸下大气的 X 射线电离及演化过程. 研究结果对于高空核爆炸对通信系统和雷达系统的影响评估、高空核爆炸对空间装备的影响评估、核电磁脉冲的研究等方面都具有参考价值.

## 2 物理模型和数值模拟方法

射线在大气中传输会被大气成分吸收, 在 X 射线波段, 这种吸收主要通过光电离产生高能电子, 电子一方面通过与原子或分子的反应将能量转换为空气热能, 另一方面通过回流运动产生核电磁脉冲. 在爆心附近的原子中的电子都会在核爆炸的瞬间被剥离, 形成裸核区, X 射线在该区域是透明的.

<sup>†</sup> E-mail: oyjm@nudt.edu.cn

我们关注的是离爆心较远的区域的大气电离及电离后的演化过程. 由于空气的吸收, X 射线通过距离  $x$  时, 光强  $I$  呈指数衰减

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \quad (1)$$

其中  $\mu$  为吸收系数. 模型中考虑了大气的多种主要成分, 对于组分  $i$ , 吸收系数  $\mu_i$  与吸收截面  $\sigma_i$  及组分  $i$  的数密度  $n_i$  的关系为

$$\mu_i = \sigma_i n_i. \quad (2)$$

由 (1) 式可以得到光子数密度  $n$  随时间  $t$  的变化率

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= - \sum n_0 \mu_i c \exp(-\mu_i x) \\ &\approx -n_0 c \sum \sigma_i n_i, \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $n_0$  为入射光子的数密度,  $c$  为光速. 计算过程中可以将时间步长设置得足够小, 使得一个时间步长内经过的空间距离足够小, 从而使得  $\exp(-\mu x) \approx 1$ . 不同频率的光子与原子之间的电离截面可以从数据库 EPDL97<sup>[4]</sup> 中查得.

大气成分复杂, 模型中考虑了 36 种组分, 其中包含有中性粒子 (O, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N, N<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H, H<sub>2</sub>, OH, He)、带正电粒子 (O<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sup>+</sup>, O<sub>4</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>·H<sub>2</sub>O, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>·OH, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>·H<sub>2</sub>O) 和带负电粒子 (e, O<sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sub>3</sub><sup>-</sup>, O<sub>4</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>4</sub><sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>·H<sub>2</sub>O, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>·H<sub>2</sub>O, CO<sub>4</sub><sup>-</sup>·H<sub>2</sub>O). 模型中考虑了组分之间的 229 个反应式, 各反应式的反应速率由资料<sup>[5-7]</sup> 查得. 此外, 模型中将 X 射线光子也视为一类组分, 光子与大气组分发生的光电离 (例如  $h\nu + O \rightarrow O^+ + e$ ) 也类似于二体反应. 光子的能量范围为 10—10000 eV.

组分  $i$  的数密度  $n_i$  随时间  $t$  的变化率满足

$$\frac{dn_i}{dt} = f_{1i}(n_1, n_2, \dots, n_i) + f_{2i}(h\nu) \quad (i = 1, 2, \dots, 36), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f_{1i} &= \sum_{j=1}^{36} \sum_{m=1}^{36} \varepsilon_{jm} k_{jm} n_j n_m \\ &+ \sum_{j=1}^{36} \sum_{m=1}^{36} \sum_{p=1}^{36} \varepsilon_{jmp} k_{jmp} n_j n_m n_p, \end{aligned} \quad (5)$$

$$f_{2i} = \sum_{j=1}^{36} \varepsilon_j n_j c \sum_{q=10\text{eV}}^{10000\text{eV}} \sigma_{jq} n_q. \quad (6)$$

这里,  $f_{1i}$  是组分  $i$  与化学反应相关的函数,  $k_{jm}$  和  $k_{jmp}$  分别为组分  $j$  和组分  $m$  之间的二体反应的反应速率和组分  $j$ 、组分  $m$  和组分  $p$  之间的三体反应的反应速率,  $\varepsilon_{jm}$  和  $\varepsilon_{jmp}$  为生成消耗系数,

当反应生成组分  $i$  时取 1, 消耗组分  $i$  时取 -1, 不存在二体反应和三体反应时则取 0;  $f_{2i}$  是组分  $i$  与光电离相关的函数,  $n_j$  为组分  $j$  的数密度,  $n_q$  为能量为  $q$  的光子数密度,  $\sigma_{jq}$  为能量为  $q$  的光子与组分  $j$  的光电离截面,  $\varepsilon_j$  为生成消耗系数, 当光电离生成组分  $i$  (电子和正离子) 时取 1, 消耗组分  $i$  时取 -1, 不存在光电离时则取 0.

### 3 模拟条件

数值模拟中假设高空核爆炸释放的总能量中 X 射线的能量占 85% 的份额. X 射线的能谱可以近似看成黑体辐射谱, 黑体温度为 10<sup>7</sup> K<sup>[8]</sup>, 光子能谱采用普朗克分布, 即

$$B(h\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/(k_B T)) - 1}. \quad (7)$$

光子的时间分布采用文献 [8] 中的时间分布函数

$$f = \frac{2\beta}{\pi} \frac{\exp(\beta(t - t_p))}{1 + \exp(2\beta(t - t_p))}. \quad (8)$$

归一化后  $\beta$  取 1.7×10<sup>8</sup>, 峰值时间  $t_p$  取 100 ns.

在本文模拟中裸核区半径设为 500 m<sup>[8]</sup>; 各组分的初始数密度设为正常的高空大气本底数密度, 可由资料<sup>[5-7]</sup> 查得; 初始时间步长  $t_0$  取为 10<sup>-12</sup> s. 本文所应用的程序中采用了可变步长方法, 在计算过程中随着带电粒子数密度的减小, 步长自动增大, 但在 X 射线照射阶段  $t_0$  保持 10<sup>-12</sup> s 不变, 以保证精度.

## 4 结果及分析

### 4.1 80 km 爆高核爆炸大气的 X 射线电离及演化

图 1—图 4 分别给出了在 80 km 爆高 1 Mt 当量核爆炸情况下, 到裸核区距离  $L$  分别为 100, 500 和 1000 m 处电子及主要离子数密度随时间的演化, 图中横坐标为时间  $t$ , 纵坐标为粒子数密度  $n$ . 为了便于对比分析不同区域的带电粒子的产生及演化过程, 时间坐标均以 X 射线到达该区域的时间作为零点. 从图 1 可以看出, 不同区域的电子数密度  $n_e$  达到峰值的时间都为 100 ns 左右, 这个时间也是模型中设定的 X 射线时间分布的峰值时间  $t_p$ . 这是由于光电离发生的过程很快, 光子到达的瞬时即产生电子, 在电离度不大的情况下电子数密度与入射光子数密度近似成正比.  $L$  为 100 m

处  $n_e$  的峰值约为  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ,  $L$  为 500 m 处  $n_e$  的峰值约为  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ,  $L$  为 1000 m 处  $n_e$  的峰值约为  $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . 由于高空空气稀薄, 电子与各组分的反应较慢, 电子寿命较长,  $L$  为 100 m 处电子寿命为 0.1 ms,  $L$  为 500 m 处电子寿命为 10 ms,  $L$  为 1000 m 处电子寿命达到 0.1 s, 电子寿命随着  $L$  的增加而增大. 低能电子与空气中的 O 及  $\text{O}_2$  发生附着反应产生负氧离子, 在高空核爆炸环境下这类反应不占主导, 产生的负氧离子数密度较小,  $\text{O}^-$  离子峰值数密度约为  $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\text{O}_2^-$  离子峰值数密度约为  $10^3 \text{ cm}^{-3}$ , 且负氧离子的峰值时间随着  $L$  的增加而延后. X 射线电离大气产生电子的同时, 也产生正离子  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{N}_2^+$ . 从图 2—图 4 可以看出, 正离子中占主导的是  $\text{O}_2^+$  和  $\text{N}_2^+$ , 其中  $\text{N}_2^+$  寿命较短, 很快转化为  $\text{N}_4^+$  和  $\text{NO}^+$ .  $\text{N}_2^+$  和  $\text{O}_2^+$  的寿命随着到  $L$  的增加而增大.

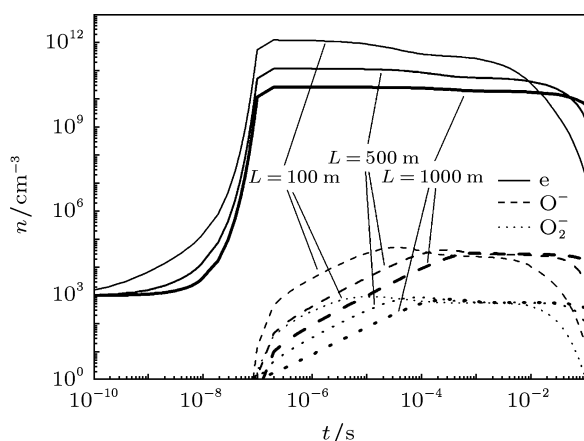


图 1 在 80 km 爆高 1 Mt 当量核爆炸情况下,  $L = 100, 500, 1000 \text{ m}$  处电子及主要负离子数密度  $n$  随时间  $t$  的演化

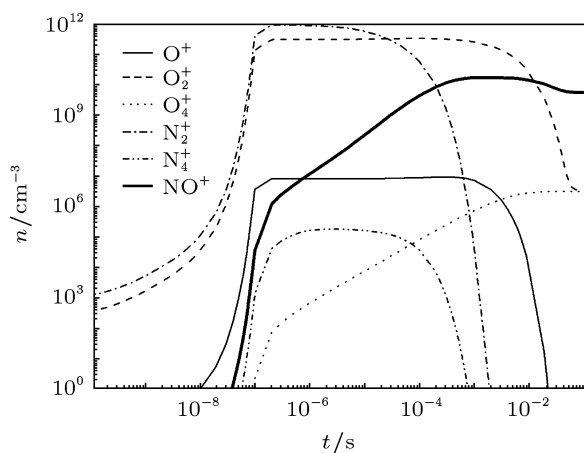


图 2 在 80 km 爆高 1 Mt 当量核爆炸情况下,  $L = 100 \text{ m}$  处主要正离子数密度  $n$  随时间  $t$  的演化

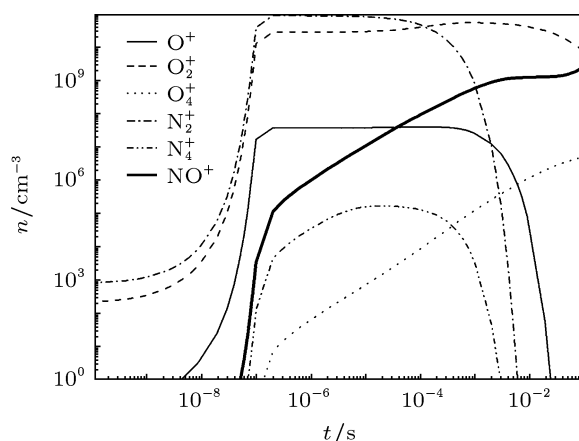


图 3 在 80 km 爆高 1 Mt 当量核爆炸情况下,  $L = 500 \text{ m}$  处主要正离子数密度  $n$  随时间  $t$  的演化

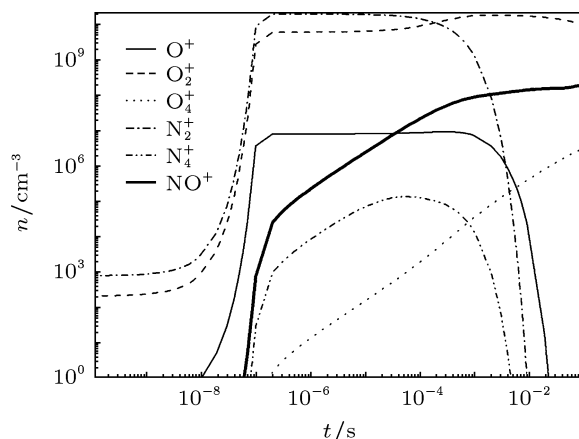


图 4 在 80 km 爆高 1 Mt 当量核爆炸情况下,  $L = 1000 \text{ m}$  处主要正离子数密度  $n$  随时间  $t$  的演化

## 4.2 120 km 爆高核爆炸大气的 X 射线电离及演化

图 5—图 8 给出了 120 km 爆高 1 Mt 当量核爆炸情况下, 到裸核区距离  $L$  分别为 100, 500 和 1000 m 处电子及主要离子数密度随时间的演化. 从图 5 可以看出: 由于大气分子数密度随着海拔高度的上升而减小, X 射线电离产生的电子数密度  $n_e$  较 80 km 爆高的  $n_e$  要小,  $L$  为 100 m 处峰值数密度为  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , 较 80 km 爆高的电子峰值数密度小两个数量级;  $L$  为 500 m 处峰值数密度为  $4 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ , 是 80 km 爆高的电子峰值数密度的 1/25 左右;  $L$  为 1000 m 处峰值数密度为  $2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ , 是 80 km 爆高的电子峰值数密度的 1/10 左右.  $n_e$  达到峰值后能维持较长的时间,  $L$  为 100 m 处电子寿命为 8 ms,  $L$  为 500 m 处电子寿命为 20 ms,  $L$  为 1000 m 处电子寿命达到 0.1 s.  $\text{O}^-$  为演化过程中生成的主要负离子, 峰值数密度

约为  $10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\text{O}^-$  达到峰值数密度所需的时间随着  $L$  的增加而增大. 电离过程中生成的正离子主要为  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{N}_2^+$ , 由于宇宙射线等的电离作用, 高空背景环境中  $\text{O}$  的数密度较高, 因此在 120 km 爆高条件下,  $\text{O}^+$  和  $\text{O}_2^+$  的峰值数密度基本相同, 且都能维持 1 s 左右的时间, 而后急剧衰减.

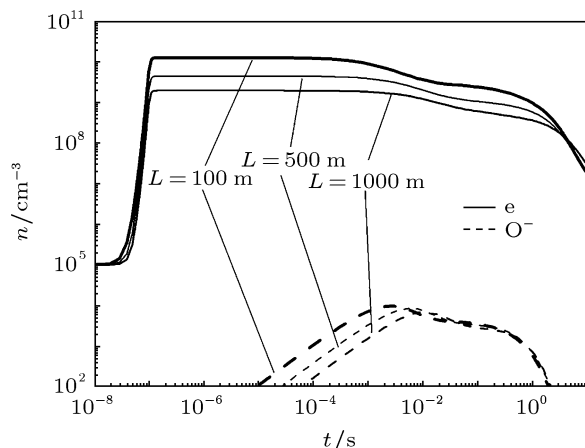


图 5 在 120 km 爆高 1 Mt 当量核爆炸情况下,  $L = 100, 500, 1000 \text{ m}$  处电子及主要负离子数密度  $n$  随时间  $t$  的演化

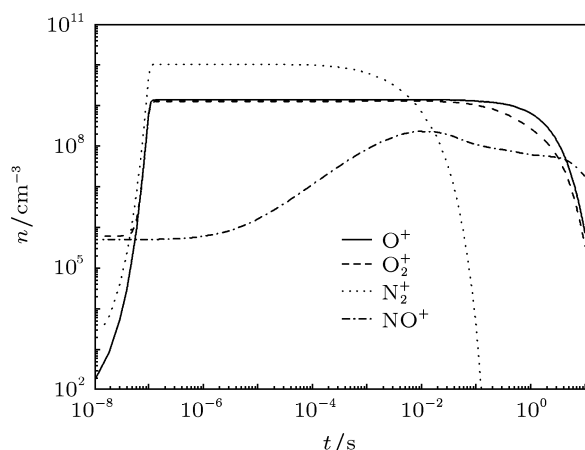


图 6 在 120 km 爆高 1 Mt 当量核爆炸情况下,  $L = 100 \text{ m}$  处主要正离子数密度  $n$  随时间  $t$  的演化

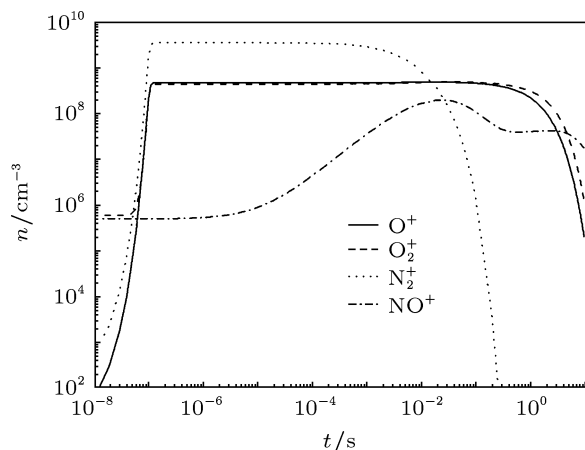


图 7 在 120 km 爆高 1 Mt 当量核爆炸情况下,  $L = 500 \text{ m}$  处主要正离子数密度  $n$  随时间  $t$  的演化

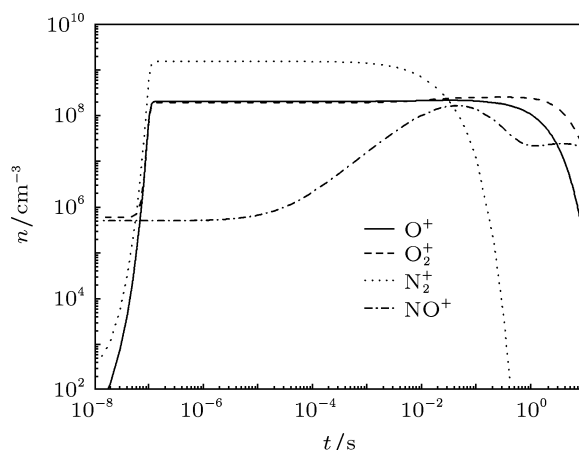


图 8 在 120 km 爆高 1 Mt 当量核爆炸情况下,  $L = 1000 \text{ m}$  处主要正离子数密度  $n$  随时间  $t$  的演化

### 4.3 电子峰值数密度与距离 $L$ 的关系

图 9 给出了 80 和 120 km 爆高 1 Mt 当量核爆炸情况下, 电子峰值数密度  $n_{e,\max}$  与  $L$  的关系, 图中实线为 80 km 爆高的结果, 虚线为 120 km 爆高的结果. 从图 9 可以看出, X 射线对空气的电离影响范围在数十千米以内, 在离裸核区较近的区域 (约 10 km 以内), 爆高越低,  $n_{e,\max}$  越大, 但  $L > 10 \text{ km}$  的区域则相反. 这是由于 120 km 高空的空气数密度较 80 km 高空的空气数密度小, 因而电离系数也小, 同时对 X 射线的衰减也小. 因此, 爆高越高, 电离范围越大. 80 km 爆高情况下  $n_{e,\max}$  与距裸核区的距离  $L$  近似满足如下关系:

$$n_{e,\max} = n_0 \frac{L^{-1.8}}{A + L^{-1.8}}; \quad (9)$$

120 km 爆高情况下则满足

$$n_{e,\max} = n'_0 \frac{L^{-1.5}}{A' + L^{-1.5}}. \quad (10)$$

这里  $n_0, n'_0, A, A'$  均为常数.

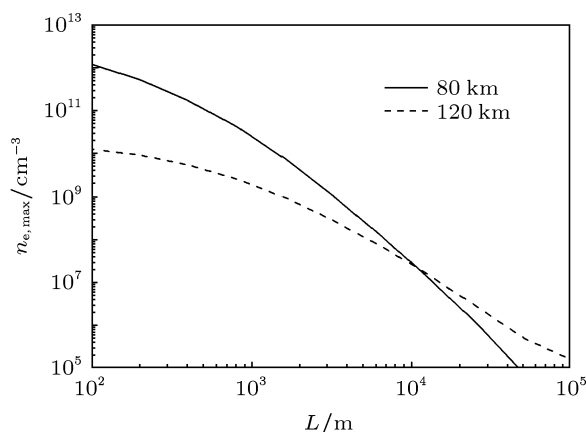


图 9 电子峰值数密度  $n_{e,\max}$  与到裸核区的距离  $L$  的关系

## 5 结论

本文以较为完善的大气等离子体物理化学过程数值模拟程序为基础, 结合 X 射线对大气的电离过程, 对程序进行了改进. 利用改进后的程序数值模拟了不同高度核爆炸下大气的 X 射线电离及演化过程. 结果表明: 高空核爆炸中由 X 射线电离产生的电子数密度在经过 100 ns 左右达到峰值, 电子峰值数密度随着到裸核区距离  $L$  的增加而减小; 电子具有较长的寿命, 其寿命随着  $L$  的增加而

增大, 120 km 爆高情况下的电子寿命较 80 km 爆高情况下的电子寿命长; X 射线电离空气产生正离子  $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ , 占主导的是  $O_2^+$  和  $N_2^+$ , 其中  $N_2^+$  寿命较短, 120 km 爆高情况下  $O^+$  峰值数密度与  $O_2^+$  峰值数密度相近, 能维持约 1 s 时间; X 射线对空气的电离影响范围在数十千米以内, 在离裸核区较近的区域, 80 km 爆高情况下产生的电子峰值数密度较 120 km 爆高情况下的电子峰值数密度大, 但在离裸核区较远的区域则相反.

- 
- [1] Qiao D J 2003 *The Introduction to Nuclear Explosion Physics* (Beijing: National Defense Industry Press) p3 (in Chinese) [乔登江 2003 核爆炸物理概论 (北京: 国防工业出版社) 第 3 页]
- [2] Tao Y L, Wang J G, Niu S L, Zhu J H, Fan R Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5914 (in Chinese) [陶应龙, 王建国, 牛胜利, 朱金辉, 范如玉 2010 物理学报 **59** 5914]
- [3] Ouyang J M, Guo W, Wang L, Shao F Q 2004 *Chin. Phys.* **13** 2174
- [4] Cullen D E, Hubbell J H, Kissel L 1997 *The Evaluated Photon Data Library* (Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory) UCRL-50400
- [5] Brasseur G, Solomon S 1984 *Aeronomy of the Middle Atmosphere* (Boston: D. Reidel Publishing Company) p213
- [6] Heicklen J 1976 *Atmospheric Chemistry* (New York: Academic Press) p7
- [7] Hesstvedt E, Hov O, Isaken 1978 *Int. J. Chem. Kinet* **10** 971
- [8] Wang J G, Niu S L, Zhang D H, Qiao D J 2010 *The Parameter Manual Book of High-Altitude Nuclear Explosion Effects* (Beijing: Atomic Energy Press) (in Chinese) p33 [王建国, 牛胜利, 张殿辉, 乔登江 2010 高空核爆炸效应参数手册 (北京: 原子能出版社) 第 33 页]

# Numerical simulation of X-ray ionization and atmospheric temporal evolutions with high-altitude nuclear explosions

Ouyang Jian-Ming<sup>†</sup> Ma Yan-Yun Shao Fu-Qiu Zou De-Bin

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 14 July 2011; revised manuscript received 19 December 2011)

## Abstract

The X-ray ionizations and the atmospheric temporal evolutions with different altitude nuclear explosions are numerically simulated in this paper. It is concluded that the density of electrons generated by X-ray ionization has a peak value at 100 ns after the X-rays have arrived, and the peak density reduced with the increase of distance from the stripped nucleus area. The life time of electrons is long, and increases with the distance from the stripped nucleus area.  $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $N_2^+$  are generated by X-ray ionization. The distance of X-ray ionization in atmosphere is within a few tens of kilometers. The peak density of explosion at 80 km high is larger than at 120 km high in the area close to stripped nucleus area, but the scenario is opposite in the area far from stripped nucleus area.

**Keywords:** high-altitude nuclear explosions, X-ray ionization, numerical simulation

**PACS:** 32.80.-t, 28.70.+y, 47.27.ek

---

<sup>†</sup> E-mail: oyjm@nudt.edu.cn