

# 高空核爆炸 X 射线电离的时空分布数值模拟

欧阳建明<sup>†</sup> 马燕云 邵福球 邹德滨 刘建勋

(国防科学技术大学理学院, 长沙 410073)

(2012 年 5 月 25 日收到; 2012 年 6 月 18 日收到修改稿)

利用数值模拟程序模拟了高空核爆炸辐射的 X 射线对不同高度大气的电离及演化过程, 给出了电子的时空分布曲线. 结果表明: 在 80 km 爆高 1 kt 小当量高空核爆炸情况下, 电子数密度随高度只出现一个极大值, 而在 80 km 以上爆高情况下, 电子数密度出现两个极大值, 一个位于爆点附近, 另一个位于 90 km 高度附近, 在这个高度电离的影响范围最大; 高空核爆炸辐射的 X 射线在 70 km 高度附近截止, 对 70 km 以下高度没有电离影响; 随着辐射角度的增加, 电子数密度出现第二个极大值的高度有所上升, X 射线截止高度也有所上升.

**关键词:** 高空核爆, 电子分布, 数值模拟

**PACS:** 28.70.+y, 34.50.Fa, 52.25.Os

## 1 引言

高空核爆炸是指爆点位于海拔 30 km 以上的核爆炸. 高空核爆炸主要以 X 射线、 $\gamma$  射线、 $\beta$  射线、中子流等形式向外辐射能量, 其中 X 射线辐射的能量占到释放总能量的 70%—85%<sup>[1,2]</sup>. 由于高空空气稀薄, 核爆炸产生的辐射场能在很大的范围内电离大气, 电离效应分为瞬发电离和缓发电离. 瞬发电离源主要包括核爆炸产生的 X 射线、瞬发  $\gamma$  射线和中子流. 缓发电离源则主要包括缓发  $\gamma$  射线以及射线与空气中的原子或分子作用产生的高能电子等, 其中高能电子对高空核爆炸辐射电离的效果具有重要影响<sup>[3]</sup>. 不同的电离源具有不同的电离效应, 其中 X 射线主要以光电效应为主,  $\gamma$  射线主要是康普顿散射效应和电子对效应, 中子和高能电子主要是碰撞电离效应.

大气的结构和成分十分复杂, 随着高度的不同, 大气的温度、压强以及各种成分的数密度等参数都有所变化. 一般来说, 大气的辐射电离及演化过程主要可以分为以下几个阶段: 射线与大气中的原子或分子发生作用 (例如光电效应、康普顿散射效应、电子对效应、中子的碰撞电离效应等), 产生高

能电子; 高能电子再次与大气中的原子或分子发生碰撞电离作用, 产生大量的低能电子; 低能电子附着于原子和分子之上形成负离子, 或与正离子发生复合反应, 最终达到平衡. 在这个过程中, 高能电子的产生和消耗速率以及低能电子的附着和复合速率等都与大气的温度和粒子数密度等参数相关, 因此高空核爆炸对不同高度气层的电离过程以及气层电离后的演化过程也会有所不同.

本文以较为完善的高空核爆炸下大气的辐射电离及演化过程模拟程序<sup>[4]</sup>为基础, 充分考虑大气的结构特征<sup>[5]</sup>, 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辐射的 X 射线对大气的电离及演化过程, 分析了电子的时空分布特征. 研究结果对于高空核爆炸对通讯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等方面都具有参考价值.

## 2 数值模型和模拟条件

模型假设核爆炸发生以后, 射线呈球对称分布向外发射. 射线在大气的传输过程中, 一方面, 由于球对称分布的影响, 光子数密度与传输距离的平方成反比; 另一方面, 射线在传输过程中会被大气成

<sup>†</sup> E-mail: oyjm@nudt.edu.cn

分吸收,随着传输距离的增加,光子数密度呈 e 指数衰减,对于不同高度的气层,衰减不同.高空核爆炸辐射的 X 射线在穿过距离 x 时,强度 I 可以表示为

$$I = \frac{I_0}{x^2} \exp\left(-\sum \mu \Delta x\right)^{(1)}, \quad (1)$$

其中  $I_0$  与 X 射线辐射功率相关,  $\Delta x$  为 X 射线传播的空间距离微元,吸收系数  $\mu$  与不同高度气层的数密度有关.模型中考虑了大气的 36 种主要组分 [4],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

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

模型中充分考虑了高空核爆炸辐射的 X 射线电离 [4],高能电子的碰撞电离 [3],电离后大气的演化过程 [6].

数值模拟中假设高空核爆释放的总能量中 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  $10^7 \text{ K}$  [1],光子能谱采用普朗克分布,即

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

光子的时间分布采用参考文献 [9] 中的时间分布函数

$$f = \frac{2\beta}{\pi} \frac{\exp[\beta(t - t_p)]}{1 + \exp[2\beta(t - t_p)]}, \quad (4)$$

其中归一化后  $\beta$  取  $1.7 \times 10^8$ ,峰值时间  $t_p$  取 100 ns.

不同高度的大气本底参数由《标准大气》 [5] 提供.初始时间步长  $t_0$  为  $10^{-12} \text{ s}$ ,程序采用可变步长方法,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  $10^{-12} \text{ s}$  不变,以保证精度.

### 3 结果分析

#### 3.1 高空核爆炸 X 射线辐射电离产生的电子的时空分布

图 1—图 4 分别给出了在 80, 120, 160, 200 km 高度发生 1 kt 小当量核爆炸条件下,爆点上下方(如图 1 所示  $\theta=0$ ) 不同高度大气中电子的时空分布曲线.其中横坐标为时间  $t$  (X 射线到达的时刻为时间零点) 的对数,纵坐标为大气高度,曲线表示电子数密度的对数,电子数密度单位为  $\text{cm}^{-3}$ .从图 1 中可以看出,在 80 km 高度发生核爆炸条件下,

对于不同高度的大气,电子数密度只在爆点附近存在一个极大值,其电子数密度约为  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  量级,达到极大值的时间约为  $3 \mu\text{s}$ .在其它高度处,电子数密度随时间也存在一个峰值.在爆点上方,电子峰值数密度随高度的增加而减小,在 90 km 高度电子峰值数密度约为  $10^9 \text{ cm}^{-3}$ ,在 97 km 高度电子峰值数密度约为  $10^8 \text{ cm}^{-3}$ ,在 105 km 高度电子峰值数密度约为  $10^7 \text{ cm}^{-3}$ ,在 115 km 高度电子峰值数密度约为  $10^6 \text{ cm}^{-3}$ .随着高度的增加电子数密度峰值持续的时间有所增加,在 115 km 高度电子峰值持续时间能达到 10 s.在爆点的下方电子数密度随高度急剧减小,在 70 km 以下 X 射线对大气基本没有电离作用,这与高空大气数密度随着高度的增加而减小有关,在 80 km 以上高空,大气稀薄,大气对 X 射线的吸收较弱, X 射线能传播较长的距离,引起较大范围的大气的电离,而在 80 km 以下,大

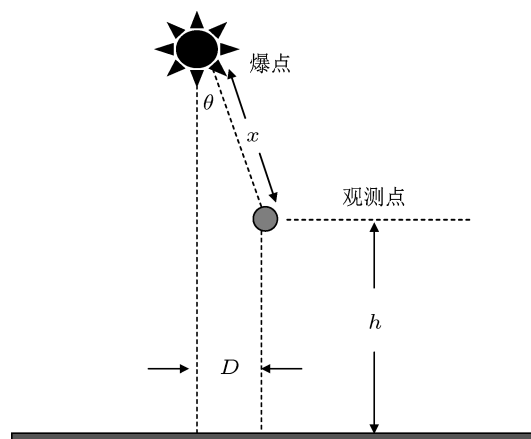


图 1 爆点及观测点位置示意图

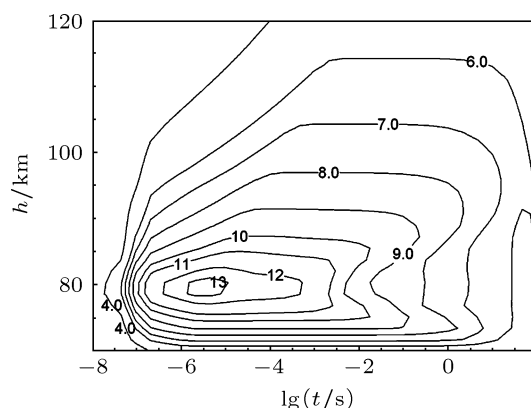


图 2 在 80 km 爆高 1 kt 当量核爆炸情况下,爆点上下方 ( $\theta = 0$ ) 电子数密度的时空分布曲线(横坐标为时间  $t$ (s) 的对数,纵坐标为大气高度 (km),曲线:电子数密度 ( $\text{cm}^{-3}$ ) 的对数)

气较稠密, 大气对 X 射线的吸收较强, X 射线存在有截止高度<sup>[2]</sup>, 截止高度约为 70 km. 从图 2—图 4 可以看出, 在 80 km 以上高度发生核爆炸条件下, 电子数密度随高度出现两个极大值, 第一个极大值位于爆点附近, 第二个极大值都位于 90 km 左右, X 射线的截止高度都处于 70 km 左右.

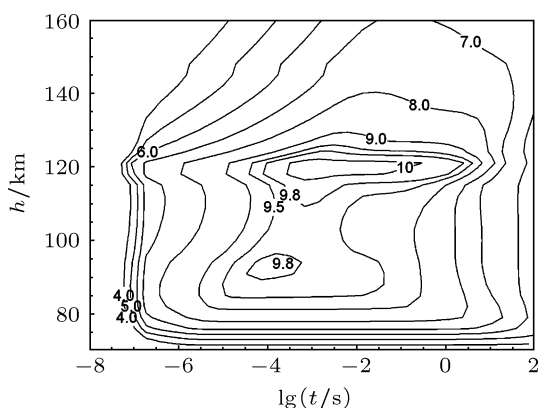


图 3 在 120 km 爆高 1 kt 当量核爆炸情况下, 爆点上下方电子数密度的时空分布曲线

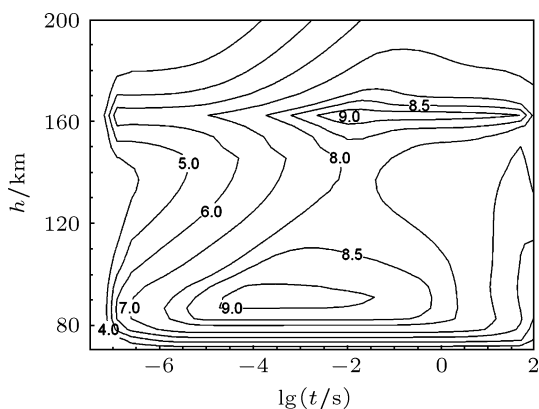


图 4 在 160 km 爆高 1 kt 当量核爆炸情况下, 爆点上下方电子数密度的时空分布曲线

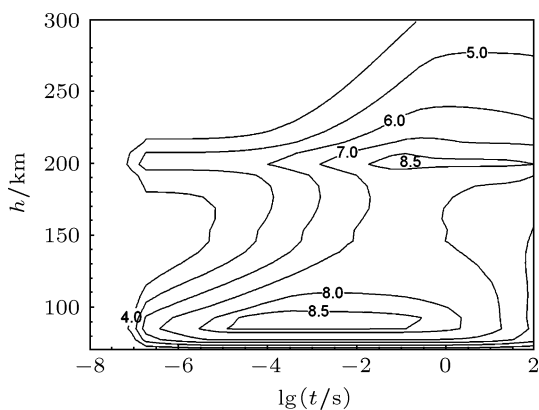


图 5 在 200 km 爆高 1 kt 当量核爆炸情况下, 爆点上下方电子数密度的时空分布曲线

### 3.2 X 射线辐射角度 $\theta$ 对电子数密度时空分布的影响

图 6、图 7 给出了在 120 km 高空发生 1 kt 当量核爆炸条件下, X 射线辐射角  $\theta$  (如图 1 所示,  $\theta$  为辐射方向与竖直方向的夹角) 分别为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  情况下, 电子数密度随时间和随高度的变化曲线. 从图中可以看出, 对于不同的辐射角  $\theta$ , 在 120 km 爆高条件下, 电子数密度随高度都存在两个极大值, 第一个极大值位于爆点附近, 第二个极大值都位于爆点下方, 但随着 X 射线辐射角  $\theta$  的增加, 电子数密度出现第二个极大值的高度有所上升, 在辐射角  $\theta$  为  $30^\circ$  情况下出现第二个极大值的高度约为 95 km, 在  $\theta$  为  $60^\circ$  情况下出现第二个极大值的高度约为 100 km. 同时, 随着辐射角  $\theta$  的增加, X 射线截止高度也有所上升, 在辐射角  $\theta$  为  $30^\circ$  情况下截止高度约为 70 km, 在  $\theta$  为  $60^\circ$  情况下截止高度约为 80 km.

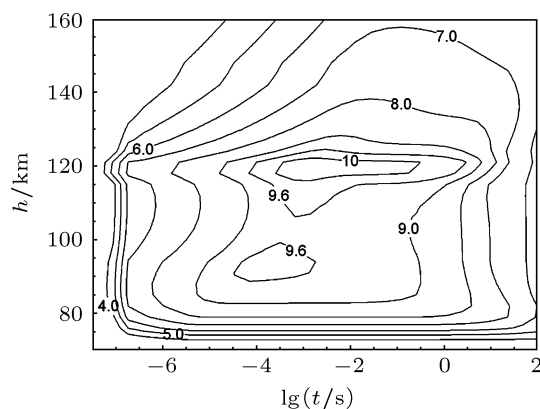


图 6 在 120 km 爆高 1 kt 当量核爆炸情况下, 辐射角  $\theta$  为  $30^\circ$  条件下, 电子数密度的时空分布曲线

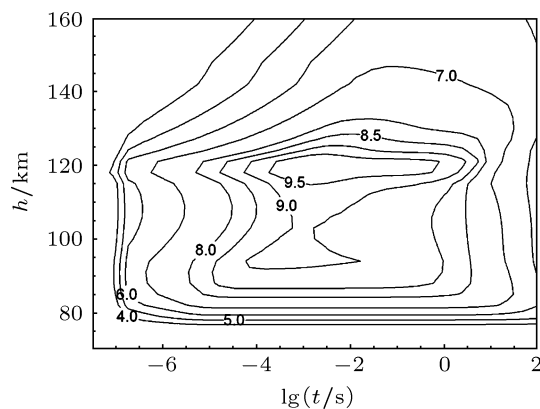


图 7 在 120 km 爆高 1 kt 当量核爆炸情况下, 辐射角  $\theta$  为  $60^\circ$  条件下, 电子数密度的时空分布曲线

### 3.3 电子峰值数密度空间分布曲线

图 8 给出了在 120 km 高空发生 1 kt 当量核爆炸条件下, 电子峰值数密度随高度  $h$  和爆点与观测点投影间距  $D$  (如图 1 所示) 的二维空间分布曲线. 从图中可以看出, 高空核爆炸辐射的 X 射线能引起较大空间范围内的电离, 对于 120 km 高空发生的核爆炸, 在大约 95 km 的高空电离的影响范围最大, 在半径为 20 km 的范围内, 电子的峰值数密度高于  $3 \times 10^9/\text{cm}^{-3}$ , 在半径为 40 km 的范围内, 电子的峰值数密度高于  $10^9/\text{cm}^{-3}$ . 核爆炸产生的 X 射线对于 70 km 以下的空间不会产生电离影响, X 射线的截止高度随着  $D$  的增加有所上升.

## 4 结论

本文利用改进后的高空核爆炸下大气的辐射电离及演化过程模拟程序数值模拟了不同高度核爆炸辐射的 X 射线对大气的电离及演化过程, 分析了电子的时空分布特征. 结果表明: 在 80 km 爆高 1 kt 小当量高空核爆炸情况下, 电子数密度随高度只出现一个极大值, 极大值位于爆点附近, 而在 80 km 以上爆高情况下, 电子数密度出现两个极大值, 一个位于爆点附近, 另一个位于 90 km 高度附近, 在这个高度核爆炸的电离影响范围最大; 高空核爆炸辐射的 X 射线在 70 km 附近截止; 随着辐

射角度  $\theta$  的增加, 电子数密度出现第二个极大值的高度有所上升, X 射线截止高度也有所上升.

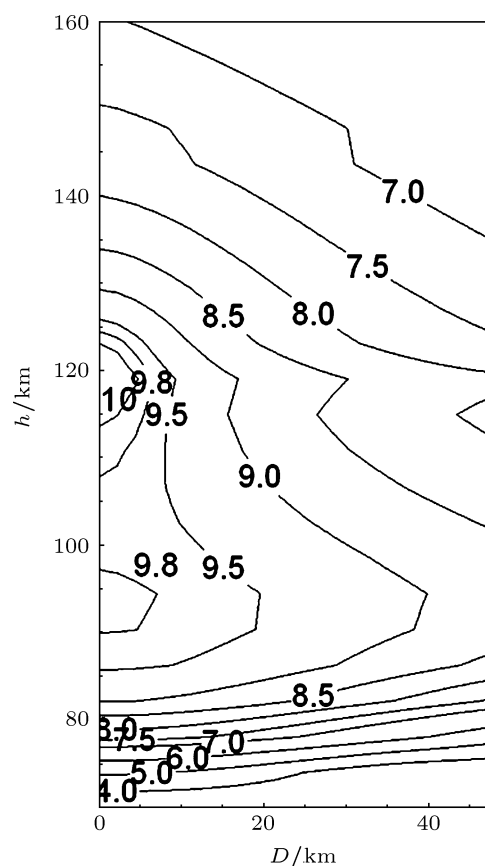


图 8 在 120 km 爆高 1 kt 当量核爆炸情况下, 电子峰值数密度的空间分布曲线

- [1] 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) p31 (in Chinese) [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 31 页]
- [2] Tao Y L, Wang J G, Niu S L, Zhu J H, Fan R Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5915 (in Chinese) [陶应龙, 王建国, 牛胜利, 朱金辉, 范如玉 2010 物理学报 **59** 5915]
- [3] Ouyang J M, Ma Y Y, Shao F Q, Zou D B *Acta Phys. Sin.* (in Chinese) [欧阳建明, 马燕云, 邵福球, 邹德滨 物理学报 已接收]
- [4] Ouyang J M, Ma Y Y, Shao F Q, Zou D B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 083201 (in Chinese) [欧阳建明, 马燕云, 邵福球, 邹德滨 2012 物理学报 **61** 083201]
- [5] Ren X M, Qian Z M 1982 *U.S. Standard Atmosphere, 1976* (Beijing: Science Press) p50 (in Chinese) [任现森, 钱志民 1982 标准大气 (译本) (北京: 科学出版社) 第 50 页]
- [6] Ouyang J M, Guo W, Wang L, Shao F Q 2004 *Chin. Phys.* **13** 2174

# Numerical simulation of temporal and spatial distribution of X-ray ionization with high-altitude nuclear explosion

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

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

(Received 25 May 2012; revised manuscript received 18 June 2012)

## Abstract

The X-ray radiation ionization processes at different altitudes of atmosphere with high-altitude nuclear explosions are numerically simulated, and the temporal and spatial distribution curves of electrons are shown in this paper. The electron density has one maximal point with 1 kt equivalent explosion at 80 kilometers, which is near the explosion point. It is different from the explosion point above 80 kilometers, and the electron density has two maximal points in that case. One is near the explosion point, and the other is near 90 km altitude, where the ionization effect range of high-altitude nuclear explosion is widest. The X-ray of high-altitude nuclear explosion has no effect at below 70 km altitude. With the increase of radiation angle, the altitude of the second electron density maximal point increases, and the cut-off altitude of X-ray increases too.

**Keywords:** high-altitude nuclear explosions, electron distribution, numerical simulation

**PACS:** 28.70.+y, 34.50.Fa, 52.25.Os

---

<sup>†</sup> E-mail: oyjm@nudt.edu.cn