

空中核爆炸电离效应的数值模拟^{*}

赵正予^{1)†} 王 翔^{2)‡}

(武汉大学电子信息学院, 武汉 430079)

(2006 年 8 月 23 日收到, 2006 年 12 月 14 日收到修改稿)

根据电离平衡方程组和射线在大气中的能量沉积方程, 在完善中性大气层模型基础上, 通过数值模拟方法得到了空间核爆炸电离效应的时空分布. 数值分析结果表明: 低空核爆炸产生的自由电子的密度最大值要高于高空核爆炸, 对于瞬发核辐射的影响, 低空核爆炸和高空核爆炸有着显著的差异, 而缓发核辐射的持续时间、影响范围, 高空核爆炸情况要大于低空核爆炸.

关键词: 核爆炸, 低空, 高空, 电离效应

PACC: 9420V, 2870

1. 引 言

核爆炸能量威力的 10%—75% 将消耗在空间大气电离中, 其比例大小取决于爆炸的高度. 假设有 10% 的能量消耗于大气电离中, 如果在大气中产生一个离子对需要 33 eV, 那么 100 万吨量级的核爆炸将产生大约 10^{32} 个自由电子^[1-4]. 这与整个自然电离层的自由电子数目大致相当. 因此, 在一定的空间范围内(例如火球附近), 这种由核爆炸引起的电离效应要比太阳事件(太阳耀斑爆发、日冕物质抛射事件(EMC)等)所引起的电离效应要剧烈的多.

核爆炸所释放出来的辐射射线按照事件发生的先后可分为两类^[3]: 一类是瞬发核辐射(如 X 射线、中子流、 γ 射线等), 是在核爆炸发生的瞬间释放出来的, 占据了核爆炸的大部分能量, 因此可以在大气层中形成很高的电离. 另一类是缓发核辐射(如 γ 射线、 β 粒子等), 是核辐射的裂变产物在很长一段时间内逐渐释放出来的, 虽然这类辐射仅占核爆炸释放能量的很少一部分, 但是由于它的持续时间长, 因此会对大气层造成长时间的电离效应.

空中核爆炸按照爆点的高度可以划分为低空核爆炸和高空核爆炸. 核爆炸消耗在大气电离上的能量比例与爆炸高度相关, 例如高空爆炸可以高达

75% 以上. 大气电离的范围是相当广泛的, 对于高空核爆炸几乎可以引起全球范围内的大气电离, 对于低空核爆炸可以引起距火球几百米以及到达电离层 D 层的电离, 具体的影响范围要视爆炸高度而定. 电离的持续时间也是很长的, 即使仅考虑对电波传播具有影响的时间, 对于低空爆炸, 可以持续数小时, 对于高空核爆炸则可以长达几天, 如果把高空核爆炸产生的人造辐射带也包括在内, 则可长达数年^[4-7].

由于进行核试验受到诸多限制, 因此利用理论分析和计算机数值模拟方法, 结合相关数据研究核爆炸效应, 进而获取核爆炸发生时产生的空间效应信息, 可以为核爆炸效应研究提供一条新的研究路径. 本文主要讨论在根据已公布的研究结果的基础上, 建立空间核爆炸电离效应的物理模型, 依据 MSISE-00 模型建立背景大气模型, 通过数值模拟分析, 讨论低空和高空核爆炸的电离效应.

2. 理论模型

2.1. 瞬发核辐射产生的电子密度的时空分布

瞬发核辐射是在核爆炸发生的瞬间由核武器所释放出来的, 因此释放这些射线的源点位于核爆炸

^{*} 国家高技术研究发展计划(863)计划批准号 2005AA733108 资助的课题.

[†] E-mail: dicilab@yahoo.com.cn

[‡] E-mail: wangxiang6211@yahoo.com.cn

爆心的位置.根据标准传输理论,瞬发核辐射在爆炸瞬间在大气中产生的电子数密度的分布可由下式计算^[8]:

$$N_e = \frac{6.3 \times 10^{21} W f_i(\rho R)}{R^2} \times \int_0^\infty \mu(E) P(E) \exp[-\mu(E)M] dE, \quad (1)$$

式中 ρR 是观测点的大气密度,单位是 g/cm ; R 是源点与观测点之间的距离,单位是 km ; W 是核爆炸的总当量,单位是 Mt TNT; f_i 是相应的射线所占总当量的比例; $\mu(E)$ 是相应射线在大气中的质量吸收系数,单位是 cm^2/g ; $P(E)$ 是相应射线的能量分布函数; M 是大气贯穿质量,单位是 g/cm^2 .

考虑不同射线的具体情况,根据(1)式可以得到计算中所用到的几种射线在爆炸瞬间的大气电离:

1) 瞬发 γ 射线和瞬发中子流

对于瞬发 γ 射线和瞬发中子流,能量分布函数的积分为^[9],有

$$N_\gamma = \frac{6.3 \times 10^{21} W f_\gamma \mu(\rho R)}{R^2} \mu_\gamma \exp(-\mu_\gamma M). \quad (2)$$

2) 瞬发 X 射线

对于瞬发 X 射线,能量分布函数^[9]为

$$P_X(E) = \frac{15}{(\pi k T_X)^2} \cdot \frac{E^3}{\exp(E/kT_X) - 1}, \quad (3)$$

式中 k 是波尔兹曼常数.将(3)式代入(1)式中即可求得瞬发 X 射线产生的单位体积的自由电子数目.

2.2. 缓发核辐射产生的电子密度的时空分布

缓发核辐射在大气中形成电离的机制和瞬发核辐射的基本相同.所不同的是,由于它是放射烟云在爆后数小时内逐渐释放出来的,因此可以在大气层中不断电离大气.体现在大气电离上,它们将在大气中产生一个附加的电子生成率.

1) 缓发 γ 射线的电子生成率

根据辐射传输理论^[4,5,9],可得缓发 γ 射线的电子生成率为

$$J_\gamma = \frac{6.3 \times 10^{21} \eta_\gamma W_F q_\gamma(t)}{R^2} \times \mu_\gamma(\rho R) \exp(-\mu_\gamma M), \quad (4)$$

式中 η_γ 是缓发 γ 射线占裂变当量的比例, $q_\gamma(t)$ 是爆后 t 秒时缓发 γ 射线的能量释放率,具体取值见文献[4], W_F 是爆炸当量的 0.5 倍.

2) 缓发 β 粒子的电子生成率

由于缓发 β 粒子带有电荷,因而要受到地磁场

的影响.在大气中 β 粒子产生的电离分布取决于爆炸后裂变碎片的时空分布以及磁场几何位置^[4,9].

因此缓发 β 粒子的电子生成率为

$$J_\beta = \frac{7.9 \times 10^{22} \eta_\beta W_F q_\beta(t)}{2A \sin \phi} \times \mu_\beta(\rho R) \exp(-\mu_\beta M), \quad (5)$$

式中 ϕ 是电离层处的磁偏角, A 是 β 粒子电离的大气面积,其取值见文献[3], η_β 是缓发 β 粒子占裂变当量的比例, $q_\beta(t)$ 是爆后 t 秒时缓发 β 粒子的能量释放率,具体取值见文献[4].缓发 γ 射线和缓发 β 粒子的电子生成率代入如下电离平衡方程组:

$$\begin{aligned} \frac{dN_e}{dt} &= J - \alpha_d N_e N_+ - AN_e + DN_-, \\ \frac{dN_-}{dt} &= -\alpha_i N_+ N_- + AN_e - DN_-, \\ \frac{dN_+}{dt} &= J - \alpha_i N_- N_+ - \alpha_d N_e N_+, \\ N_+ &= N_e + N_-, \end{aligned} \quad (6)$$

即可得到缓发辐射引起的附加电子密度的时空分布.式中 N_e 是电子数密度, N_- 是负离子数密度, N_+ 是正离子数密度, J 是某种射线的电子生成率, α_i 是正离子和负离子复合系数, α_d 是电子和正离子复合系数, A 是电子附着系数, D 是光致分离系数.这个方程组很难求出解析解,但是可以采用数值积分法、近似级数解方法或等 α 近似法等方法求解.在这里我们采用 Bogusch 研究得到的近似级数解方法求解各种射线产生的电子密度^[10].

其初始条件由 IRI-2000 模型^[11]给出.

2.3. 背景模型

核爆炸电离区的形成、区域范围、位置及电离特性取决于核爆炸的当量和爆炸高度,如大气密度、温度和大气成分等.因此,我们需要关注大气模型.本文中大气模型则采用 MSISE-00 模型^[12].与一般的经验模型相比,MSISE-00 模型所得到的参量更加精确;与旧的模型相比,MSISE-00 模型增加了 O^+ 离子成分,更加接近真实的大气状况.

3. 数值模拟结果

利用上述模型,本文计算了 1Mt TNT 当量的核武器在 30 km(低空)和 400 km(高空)高度上爆炸时所产生的电子密度的时空分布.爆炸点磁倾角取 30° ,爆炸时间为地方时间 2100,由此确定背景模型

参数.

3.1. 低空核爆炸的模拟结果

图 1 给出了瞬发核辐射产生的电子密度分布, 图中的色条是核辐射产生的电子密度的常用对数值, 单位是 $:10^n$ 个/cm³(以下各图同). 由图可见, 瞬发核辐射在电离层的 D 区形成了附加电离区, 此附加电离区主要由瞬发 γ 射线和中子流来决定; 瞬发 X 射线的贡献比较小. 在瞬发核辐射射线中, 瞬发 X 射线占了核武器当量的 50% 以上, 而瞬发 γ 射线和

中子流仅占核武器当量的千分之一到百分之一之间. 虽然瞬发 X 射线占了核武器当量的大部分, 但是因为它在大气层中传输时自由程很小, 它的作用范围就受到了限制, 在大气密度比较稠密的下层大气层中, 它只能在爆心附近形成高温等离子体. 而对于瞬发 γ 射线和中子流, 虽然它们所占核武器当量的比例很小, 但它们在大气层中的自由程却是远大于 X 射线的自由程, 因此瞬发 γ 射线和中子流可以在较大范围内造成大气电离.

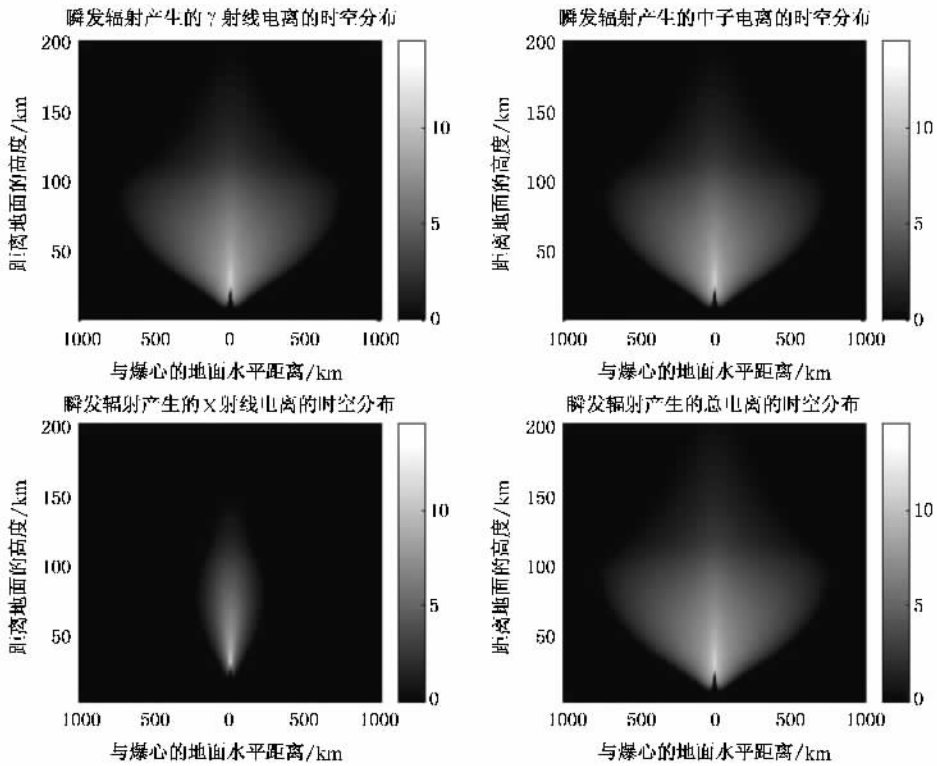


图 1 低空核爆炸瞬发核辐射电离效应的时空分布(爆高 30 km)

图 2 是缓发 γ 射线产生的电子密度的时空分布. 从图中可以看到, 附加电离区的下边界约在 30 km 附近, 电子数密度随距下边界高度递增, 到峰值后又递减, 峰值出现的高度随水平距离增加而递减, 变化范围在 70—120 km. 高度越高衰减越快. 在爆后 12 h, 附加电离区依然具有很大的范围. 在这里没有考虑电离层的日变化, 因此得到的附加电离的持续时间会较真实值大.

图 3 是缓发 β 粒子产生的电子密度的时空分布. 由于 β 粒子本身是带电荷的, 因此, 当它们在大

气中运动时, 要受到地磁场的影响. 因此, 放射性烟云释放出来的 β 粒子主要沿着两个方向传输, 一是向烟云下方沿着磁力线传输, 一是向烟云上方沿着地磁力线传输. 向下传输的 β 粒子所形成的附加电离由于高大气密度和高碰撞频率, 所以附加电子密度不会很大; 向上传输的 β 粒子则在本地电离层 D 区形成附加电离. 由于 β 粒子在磁力线内近似均匀的向下传输, 因此, 在它产生的离化区内电子密度的水平密度是均匀的, 即在同一水平位置各点的电子数密度是一致的, 电子密度仅随高度和时间变化.

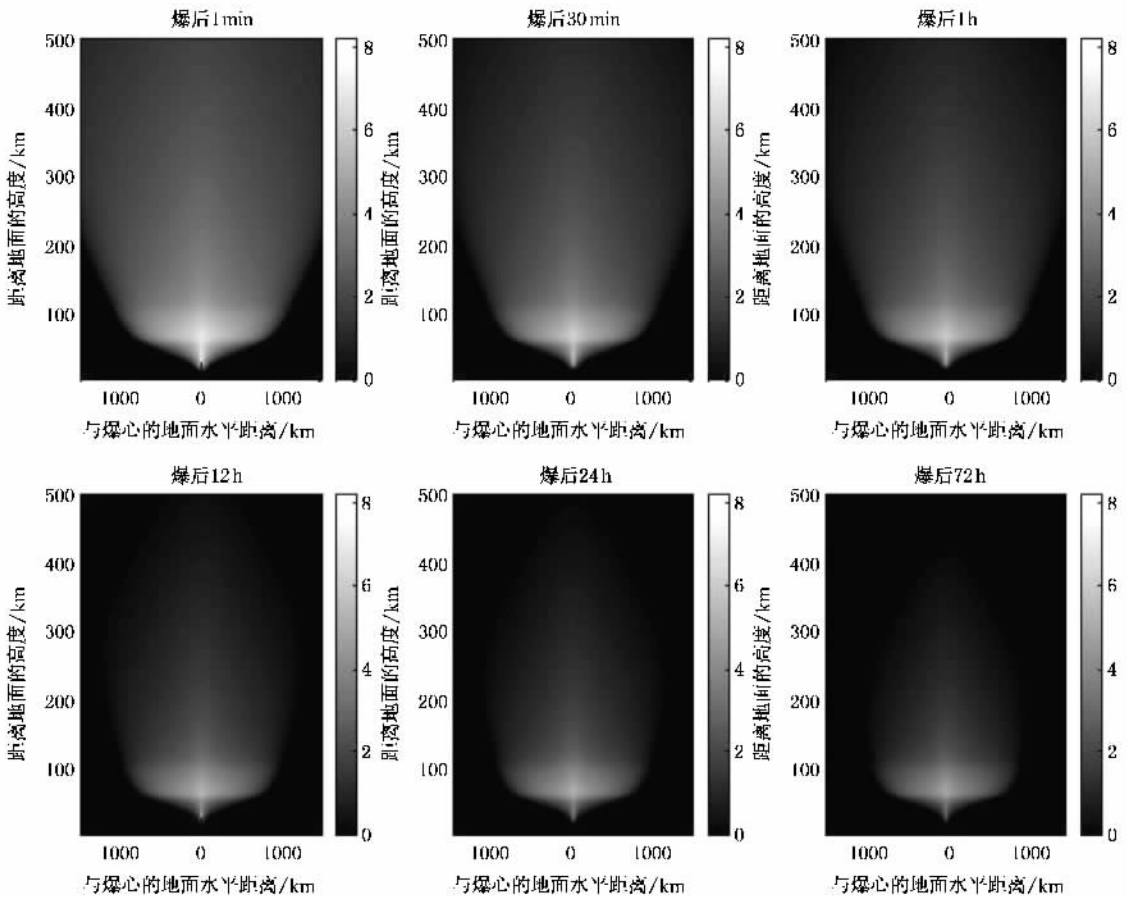


图 2 低空核爆炸缓发 γ 射线产生电离的时空分布(爆高 30 km)

3.2. 高空核爆炸的模拟结果

图 4 是瞬发核辐射产生的电子密度的分布.瞬发核辐射所形成的附加电离区主要由瞬发 X 射线所决定,瞬发 γ 射线和中子流属于次要瞬发源.原因在于,高空大气层的密度很低,使得占爆炸当量 50% 以上的 X 射线具有较大的自由程,可以在大范围内形成高温等离子体.当核爆炸发生在高空时,瞬发核辐射造成的附加电离区将出现双峰值:一个峰值出现爆点附近;另一个峰值出现在 100 km 左右,主要是由瞬发 X 射线产生的,瞬发 γ 射线和中子流也有贡献.同时,由于瞬发 γ 射线和瞬发中子流的自由程较 X 射线大,所以前两者在约 70 km 高度处出现峰值.在图中可以看到,由瞬发 γ 射线和瞬发中子流形成的峰值远小于瞬发 X 射线引起的电离峰值.

图 5 是缓发 γ 射线产生电离的时空分布.从图

中可以看到,附加电离区的下边界约在 30 km 附近,电子数密度随距下边界高度递增,到峰值后又递减,峰值出现的高度随水平距离增加而递减,变化范围在 70—120 km.在 D 层高度上,这个附加电离区可以存在几天^[1].但是由于电离体积很大,所以电离浓度较低.

图 6 是缓发 β 射线产生电离的时空分布.缓发 β 粒子产生的电子密度的空间分布比较稳定,基本上是水平均匀分布的;其产生的电子密度峰值出现在大约 70 km 左右,厚度大约为 16 km.这个电子密度的空间分布会持续几天时间^[9].由于缓发 β 粒子会在源区和共轭区都产生附加电离,在 D 区附近 β 粒子遇到稠密大气,足以把它们吸收并产生电离.于是会出现两个共轭的电离区域,每半球一个.在每一个电离区内,电子密度大约等于如果碎片云出现在这个高度上可望产生的电子密度值的一半.

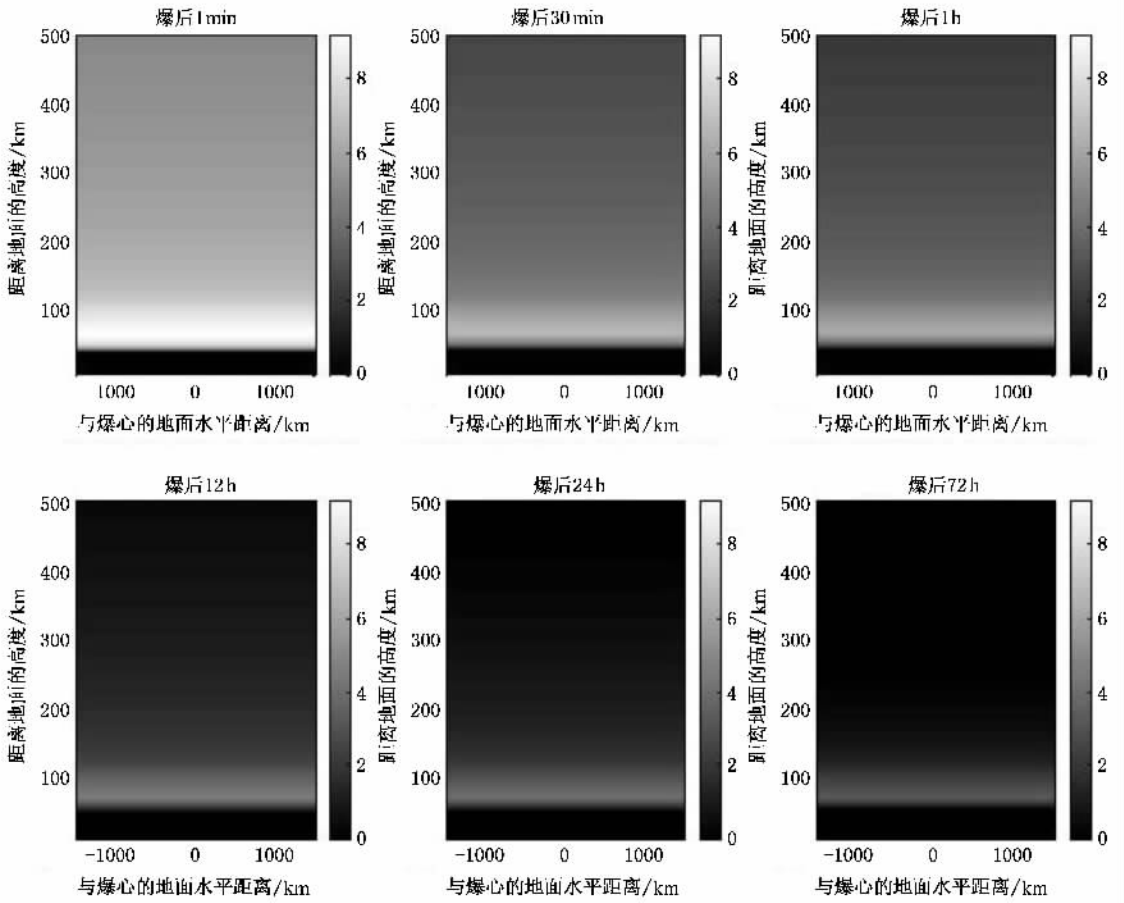


图 3 低空核爆炸缓发 β 粒子产生电离的时空分布(爆高 30 km)

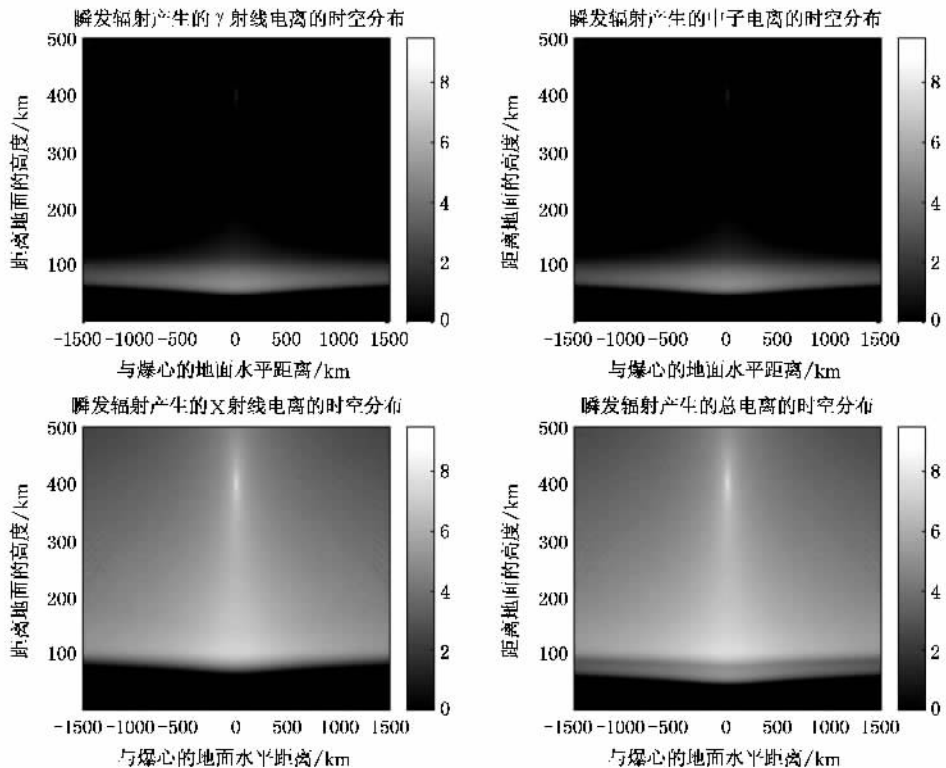


图 4 高空核爆炸瞬发核辐射产生电离的分布(爆高 400km)

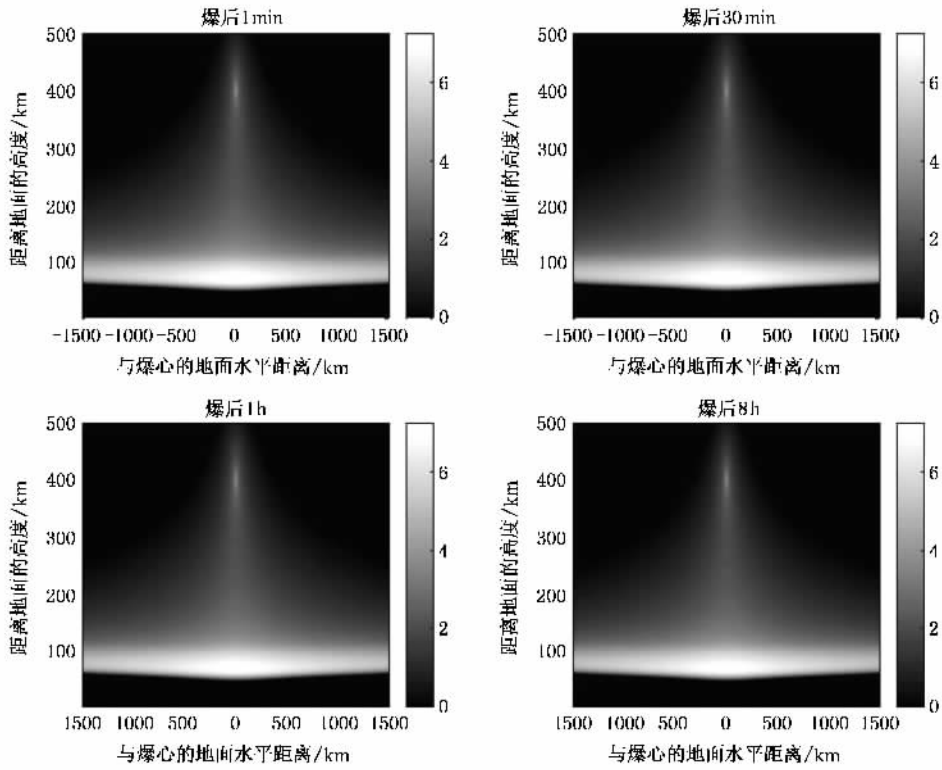


图 5 高空核爆炸缓发 γ 射线产生电离的时空分布(爆高 400 km)

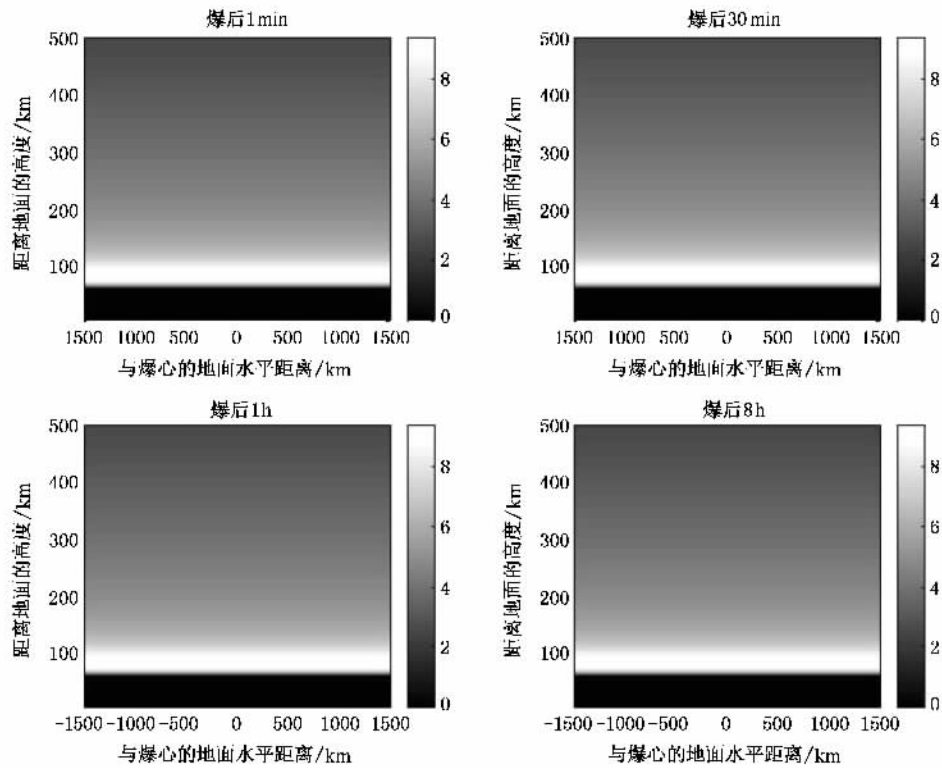


图 6 高空核爆炸缓发 β 粒子产生核辐射的时空分布(爆高 400 km)

4. 结果和讨论

通过上面的计算及分析,可以得到以下结论.

1. 高空核辐射产生的电子密度最大值要比低空核辐射产生的电子密度最大值要低,这是因为在高空的大气密度要比低空小很多,核爆炸的能量可以在更大的范围内传播,单位面积上可以沉积的能量就将减少,造成的大气的附加电离的密度就将减小.

2. 瞬发核辐射产生的附加电离中,低空核爆炸主要是由瞬发 γ 射线和中子流决定的,而高空核爆炸则是主要由瞬发 X 射线决定,这是因为在 100 km 高度上 X 射线的平均自由程会大大增加,在高空的第大气密度不会对 X 射线的扩散造成很大的阻碍.

3. 在瞬发核辐射产生的电离中,低空核爆炸只出现一个峰值,出现在爆炸点附近区域,主要是由瞬发 γ 射线和中子流产生的.而高空核爆炸的电离效应中有两个峰值,一个峰值出现爆点附近,另一个峰值出现在 100 km 左右,主要是由瞬发 X 射线产生的,瞬发 γ 射线和中子流也有贡献.

4. 缓发核辐射产生的电子密度的持续时间,高空核爆炸要明显长于低空核爆炸;也即缓发核辐射产生的电子的衰减速度高空核爆炸明显慢于低空核爆炸.

5. 低空核爆炸所引起的附加电离区主要是由

缓发 γ 射线决定的,瞬发核辐射以及本地的缓发 β 粒子的附加电离对其影响不大;而高空核爆炸造成的附加电离区主要是由本地的缓发 β 粒子决定的,瞬发核辐射和缓发 γ 射线影响不大.

本文的数值模拟工作仅给出了爆点附近区域的电离效应,并未涉及到磁共轭点,因此不能直接从本文的模拟结果看到磁共轭点的电离效应的时空分布,但是在磁共轭点所产生的地球物理现象,例如人造极光,可以证明缓发 β 粒子在源区和磁共轭区都会产生附加电离.此外,本文考虑的电离层背景环境较为简单,仅考虑了夜间电离层的情况,没有考虑电离层白天的复杂情况.有关工作的结果将在以后的文章中给出.

在世界上为数不多的几次高空核试验中,Starfish 试验是具有代表性的,其地球物理效应非常丰富.但当时限于观测和诊断条件,未能直接给出实验时产生的大气层电离效应,不过通过雷达波衰减测量以及其他间接方法仍可以推算出爆炸时的电离效应^[13].本文用于高空核爆炸模拟的核爆炸数据(爆高、当量、爆炸点位置和时间)即参照 Starfish 试验.研究表明,本文所获模拟结果与实验结果基本一致^[13],由此表明本文选用的物理模型和数值计算方法是正确的.本文工作目前只是给出了高空和低空核爆炸产生的典型电离效应,其他有关研究工作(如磁共轭区的电离效应、在不同爆炸当量、不同高度和不同纬度区的电离时空效应等)将在另文中讨论.

[1] Hill F L 1965 *The Radio and Electronic Engineer* **30**(2) 89

[2] Kenney J F, Willard H R 1963 *JGR* **68** 2053

[3] Bowman G G 1962 *Australian J. Phys.* **15** 405

[4] Glasstone Samuel, *The Effects of Nuclear Weapons*, Washington D. C.: United States Department of Defense and the Energy Research and Development Administration, 1966

[5] Qiao D J 2003 *The Introduction to Nuclear Explosion Physics*, (Beijing: National Defense Industry Press) (in Chinese [乔登江 2003 核爆炸物理概论(北京:国防工业出版社)])

[6] Guan R S, Li Q 1997 *Wuhan University Journal* **43**(30) 381 (in Chinese [管荣生, 李钦 1997 武汉大学学报 **43**(30) 381])

[7] Li Q, Guan R S, Long X L 1990 *Wuhan University Journal of*

Natural Sciences **35**(2) 39 (in Chinese [李钦, 管荣生, 龙咸灵 1990 武汉大学学报(自然科学版) **35**(2) 39])

[8] Phenomena Affecting Electromagnetic Propagation, AD-A955392, Chapter 8, 1989

[9] Latter R, Lelevier R E 1963 *JGR* **68**(8) 1634

[10] Bogusch R L, *Approximate series solutions of the three-species atmospheric deionization differential equations* (Series solutions of atmospheric deionization differential equations - nuclear explosion effect on electromagnetic wave propagation), AD 613199

[11] Bilitz D 2001 *Radio Sci.* **36** 261

[12] Picone J M, Hedin A E, Drob D P 2002 *JGR* **107**(A12) 1468

[13] Titheridge J E 1962 *New Zealand J. Geophys* **5** 1003

Numerical simulation of the ionization effects of low- and high-altitude nuclear explosions^{*}

Zhao Zheng-Yu^{1)†} Wang Xiang^{2)‡}

(*Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430079, China*)

(Received 23 August 2006; revised manuscript received 14 December 2006)

Abstract

Low-altitude and high-altitude nuclear explosions are sources of intensive additional ionization in ionosphere. In this paper, in terms of the ionization equilibrium equation system and the equation of energy deposition of radiation in atmosphere, and considering the influence of atmosphere, the temporal and spacial distribution of ionization effects caused by atmospheric nuclear detonation are investigated. The calculated results show that the maximum of additional free electron density produced by low-altitude nuclear explosion is greater than that by the high-altitude nuclear burst. As to the influence of instant nuclear radiation, there is obvious difference between the low-altitude and the high-altitude explosions. The influence range and the continuance time caused by delayed nuclear radiation is less for the low-altitude nuclear detonation than that for the high-altitude one.

Keywords : nuclear explosion, low-altitude, high-altitude, ionization effects

PACC : 9420V, 2870

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2005AA733108).

[†] E-mail : dicilab@yahoo.com.cn

[‡] E-mail : wangxiang6211@yahoo.com.cn