

基于上层大气数值模型的 X 射线传输特性*

吕致辉^{1,2,3} 韦 飞^{1,2,3} 张轩谊^{1,2,3}
彭松武^{1,3} 冯鹏远^{1,3}

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

摘 要 核爆炸的大部分能量是以 X 射线形式释放的, 研究 X 射线辐射特性对于天基核爆事件监测, 当量反演都具有一定参考价值。根据核爆炸 X 射线能谱特性, 构建了黑体辐射模型; 根据 NRLMSIS 大气模型成分数据和高度密度数据, 构建大气分层数值模型, 并结合 NIST 数据库, 构建分层大气质量吸收系数模型, 提高了大气模型与大气质量吸收系数模型准确度。使用数值模拟程序对 X 射线在大气中的传输特性进行研究, 模拟在临近空间高度核爆炸产生的 X 射线经过大气吸收后的能谱特性以及不同海拔高度点位的能注量。结果表明, 在检测点高度恒定的情况下, 斜径角变小会增大 X 射线传输路径, X 射线经过的大气吸收路径越长, 能谱峰值越往高能处偏移。在相同高度下, 爆炸点的正上方处能注量最大, 其他位置随着斜径角减小能注量呈指数级衰减。

关键词 大气数值模型, X 射线, 大气吸收, 能谱, 能注量

中图分类号 P351, O434.1

X-ray Transmission Characteristics Based on Numerical Model of Upper Atmosphere

LÜ Zhihui^{1,2,3} WEI Fei^{1,2,3} ZHANG Xuanyi^{1,2,3}
PENG Songwu^{1,3} FENG Pengyuan^{1,3}

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190)

Abstract Most of the energy of a nuclear explosion is released in the form of X-ray. It is important to understand the characteristics of the X-ray radiation for the monitoring of space-based nuclear explosion

* 国家重点研发计划项目资助 (2021 YFA0718600)

2022-11-03 收到原稿, 2023-03-10 收到修定稿

E-mail: lvzh311@163.com

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

events and the calculation of explosion yield. In this paper, the blackbody radiation model is constructed based on the X-ray energy spectrum characteristics of nuclear explosion, and a stratified atmospheric numerical model is constructed based on the NRLMSIS atmospheric model composition data and height density data. The stratified atmospheric mass absorption coefficient model is combined with the NIST database to improve the accuracy of the atmospheric model and the atmospheric mass absorption coefficient model. The transmission characteristics of X-ray in the atmosphere are studied using the code, and the energy spectral characteristics of X-ray generated by nuclear explosions at near-space altitude were simulated, after atmospheric absorption and assuming the energy injection at different altitude points. The results show that the height of the detection point is constant, the smaller the slant angle the larger the ray transmission path, *i.e.*, the longer the atmospheric absorption path that the ray passes through, and thus the more the peak of the energy spectrum will shift to the higher energy. At the same height, the energy fluence is the largest directly above the explosion point, and the energy fluence at other positions decays exponentially as the angle decreases.

Key words Atmospheric numerical model, X-ray, Atmospheric absorption, Energy spectrum, Energy injection

0 引言

核爆炸可以按照爆炸发生的位置分为地下, 地面, 低空和高空这 4 种类型。一般情况下, 爆高 30 km 以下的核爆认定为低空核爆, 30 km 以上的爆炸被认定为高空核爆^[1], 其中在高空范围内低于 100 km 的核爆又被称为临近空间核爆。核爆炸产生的能量其中约 70%~85% 以 X 射线形式释放^[2], 并且绝大部分是软 X 射线。高空核爆发生时 X 射线以球形向四周辐射, 部分高能 X 射线经过大气时被空气吸收, 导致空气温度迅速上升形成核爆火球, 向上辐射并且未被吸收的 X 射线向外层空间辐射出去。大气的成分较为复杂, 在不同高度下, 大气各成分所占比例均有变化, 因此 X 射线从不同高度与角度经过大气层后, 大气对于不同能量的光子吸收率也不同, 导致 X 射线能谱峰值偏移以及能注量变化。

目前国外相关研究主要集中在核爆炸的火球演变过程以及爆炸环境损伤与杀伤力等方面^[3-5], 中国的相关研究主要集中在火球以及辐射传递等方面^[6]。关于 X 射线在大气中的衰减, Zhang^[1]等重点使用公式来进行描述, 没有给出计算数值以及能量分布; Xu^[7]等对大气模型的构建采用公式分段拟合大气密度的方法, 在 X 射线与物质相互作用的研究中, 仅考虑 N 原子的不同电离态, 忽略了散射造成的影响。

本文以 20~80 km 高度, 10 kt 当量核爆炸为

X 射线源, 根据爆炸的能谱特性构建黑体辐射模型, 并根据 NRLMSIS 大气模型成分数据和高度密度数据, 构建大气数值分层模型, 考虑的大气成分更加全面。结合 NIST 数据库, 构建分层大气质量吸收系数模型, 考虑散射与吸收所造成的影响, 使用数值模拟程序模拟了临近空间高度核爆的 X 射线经过大气衰减后的能谱, 计算 30 km 爆高, 10 kt 当量爆炸在不同高度和斜径角情况下的射线能注量, 分析能谱特征以及能注量分布特征。研究结果对临近空间核爆炸的天基监测, 实现核爆当量的反演具有一定参考价值。

1 核爆炸辐射特性

核爆炸发生后, 会形成超高温等离子团, 其温度可以达到 10^7 K, 并且核爆炸超过 70% 的总能量以 X 射线的形式向外辐射, 其能谱可近似看作温度为 T 的黑体辐射谱^[6]。黑体辐射出的光子频率 ν 随温度 T 的分布符合普朗克黑体辐射定律^[8,9]。普朗克黑体的辐射率符合

$$I_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (1)$$

辐射率单位为 $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{J}^{-1}$ 。若转换为光子能量 u 和温度 T 的关系, 则有

$$I_u(u, T) = \frac{2u^3}{c^2 h^3} \frac{1}{e^{u/kT} - 1}. \quad (2)$$

其中, h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, c 为光速。 $I_u(u, T)$ 为在温度 T 时黑体表面单位面积在单位时间及单位立体角上辐射出的光子能量为 u 的能量。黑体辐射在几何上符合朗伯余弦定律^[10], 可得辐出度^[11] 为

$$B(u, T) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_u(u, T) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{2\pi u^3}{c^2 h^3} \frac{1}{e^{u/kT} - 1}. \quad (3)$$

辐出度单位为 $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{J}^{-1}$ 。核爆炸的 X 射线的等效黑体温度 T 与爆炸过程, 设计细节和尺寸都有关, 无法细论。50 kt 以上大当量核爆炸 X 射线能谱可以近似为等效温度为 3~8 keV 的黑体谱; 50 kt 以下小当量核爆炸 X 射线能谱采用约 1~3 keV 的黑体谱, 核爆炸当量与等效黑体温度对照如表 1 所示^[12]。

将普朗克黑体的辐射率进行归一化处理, 可得到归一化黑体谱公式^[7,13] 为

$$b(u, T) = \frac{I_u(u, T)}{\int_0^\infty I_u(u, T) du}. \quad (4)$$

归一化后的黑体谱如图 1 所示, 可以看出 X 射线的能谱特性与核爆温度密切相关, 对于不同当量的核爆炸 X 射线产物, X 射线流量软、硬部分的占比具有显著区别, 核爆当量越大, 硬 X 射线占比越大, X 射线能谱

表 1 爆炸当量与等效黑体温度对照

Table 1 Explosion equivalent versus equivalent black body temperature

当量 / kt	1	10	100	1000
等效黑体温度 / keV	1	2	5	8

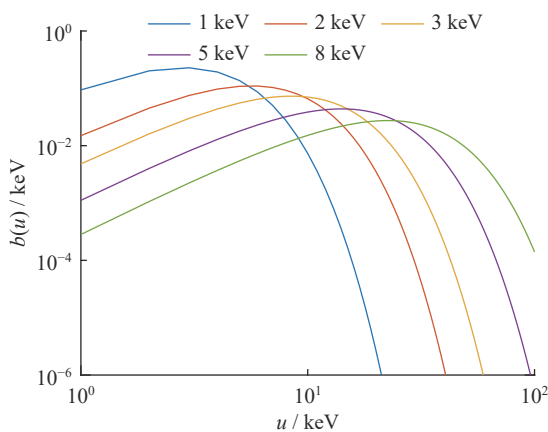


图 1 归一化黑体谱

Fig. 1 Normalized blackbody spectrum

分布的拐点往高能端偏移。

2 模型构建

核爆高度发生在 86 km 以上时 X 射线的传播几乎不受大气吸收作用的影响, 而核爆高度在 86 km 以下时 X 射线在传播过程中受到中高层大气的吸收, 存在较强的衰减效应。空中核爆产生的 X 射线在到达卫星前, 要穿过大气层, 有相当一部分会被大气吸收, 因此可以通过建立大气模型来计算大气对 X 射线的吸收。

2.1 大气模型

大气是一个复杂的化学系统, 其主要成分主要是氮、氧以及其他微量的化合物, 惰性气体等^[14]。大气中各成分比例以及密度随海拔高度变化。低海拔高度下, N_2 , O_2 , Ar 占大气总体积分数的 99.97%; 高海拔高度下, 原子氧和原子氮等占有较大比例, 对于 200 km 之上, 气体密度很小, 可认为是真空^[15,16]。

本文在计算中只考虑 0~200 km 高度范围的大气, 把这个范围内的大气分为 2000 层, 每层的厚度为 100 m, 认为每一层内各处气体密度相同, 各成分所占比例也一致。不同高度大气及各成分密度数据来自 NRLMSIS 大气模型^[17]。

大气中各成分密度与海拔高度关系如图 2 所示, N_2 在海平面处的密度约为 $9.76 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, O_2 在海平面处的密度约为 $2.99 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 随着高度增加, 其密度快速减小, 在 200 km 处, N_2 与 O_2 的密度已下降至 $5.95 \times 10^{-14} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $4.84 \times 10^{-15} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。在 50,

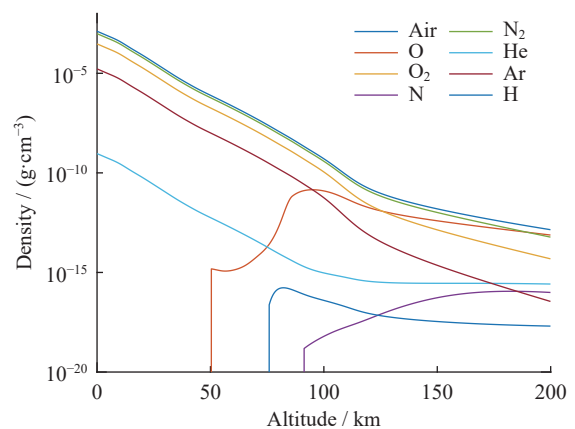


图 2 大气中各成分密度与海拔高度关系

Fig. 2 Relationship between composition density and altitude

76, 91 km 处, 原子氧, 原子氢, 原子氮密度迅速增加, 在大气模型中需要对其进行考虑。

大气中各成分的质量分数与海拔高度关系如图 3 所示, 可以看到 N_2 质量分数在 100 km 高度以下基本保持在 75% 左右, 100 km 以上开始迅速下降, 在 200 km 处下降至 42%。 O_2 在 95 km 以下质量分数维持在约 23%, 200 km 处下降至 3.5% 左右。原子氧质量分数在 87 km 处开始迅速上升, 200 km 处上升至 54%。

2.2 大气质量吸收系数模型

由于物质对射线的吸收, X 射线穿透物质后, 其强度将被衰减。其能量损失一般有光电效应, 康普顿效应, 电子对效应, 瑞利散射及光核反应等。海拔高度会对大气温度, 压强等造成影响, 并导致大气密度的变化, 使用质量吸收系数进行计算可以排除密度变化的影响。

质量吸收系数考虑了射线与物质作用的主要效应, 系数 μ/ρ 在很大程度上依赖于每个原子的总横截面 σ_{tot} 的理论值, 有

$$\mu/\rho = \sigma_{tot}/uA. \quad (5)$$

其中, μ 为原子质量单位, A 为相对原子质量目标元素的总横截面, σ_{tot} 为光子相互作用的总横截面^[18]。

总横截面可写为主光子相互作用贡献的总和, 即

$$\sigma_{tot} = \sigma_{pe} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair} + \sigma_{trip} + \sigma_{ph.n.}, \quad (6)$$

其中, σ_{pe} 为原子光效应截面, σ_{coh} 和 σ_{incoh} 为瑞利散射和康普顿散射截面, σ_{pair} 和 σ_{trip} 为电子-正电子在原子核和原子电子场中产生的截面, $\sigma_{ph.n.}$ 为光子核截面。

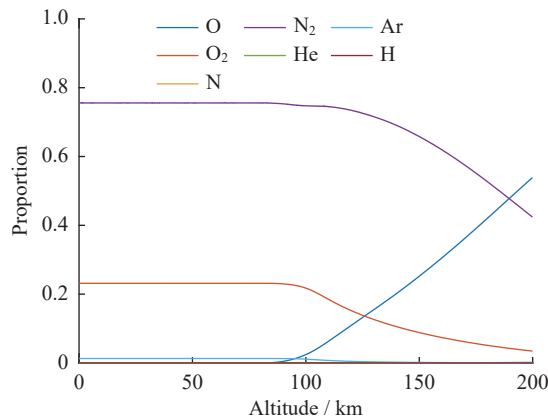


图 3 大气中各成分质量分数与海拔高度关系

Fig. 3 Relationship between ingredient mass fraction and altitude

大气为混合物, 其质量吸收系数的计算通过各元素成分质量百分数计算求得^[19], 假设大气中共有 n 种元素, 则有

$$\mu_{air}(u) = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i(u). \quad (7)$$

其中, x_i 为第 i 号元素质量百分数, $\mu_i(u)$ 为光子能量为 u 时第 i 号元素质量吸收系数。

各元素在不同光子能量下的质量吸收系数数据来自美国国家标准与技术研究所(NIST)数据库^[20]。大气元素的质量吸收系数曲线如图 4 所示, 由于质量吸收系数与吸收物质的原子序数近似为三次指数幂关系, 因此原子序数越大, 其质量吸收系数越大。可以看到, 氮, 氧, 氩的系数较大; 氢, 氦的系数较小, 并且同一元素下, 光子能量越低, 其质量吸收系数越大。

计算得到在不同高度下的不同光子能量下的大气质量吸收系数 (见图 5)。由图 5 可以看出, 在光子能量接近 0 keV 的时候, 质量吸收系数最大, 并且在同一能量下, 高度不同其质量吸收系数也有所不同。

2.3 计算模型

核爆炸发生时, 假设 X 射线辐射以球对称的方式向四周辐射, 其产生的 X 射线一部分被大气层吸收, 点位说明如图 6 所示, H_e 为核爆高度, H_s 为能量沉积点高度, α 为斜径角, R 为能量沉积点与爆炸点之间的距离。

从图 6 可以看出, 爆炸点 B 产生的 X 射线经过距离 R 到达 O 点 (单位为 m), 在不考虑大气衰减的情况下, 其射线强度为

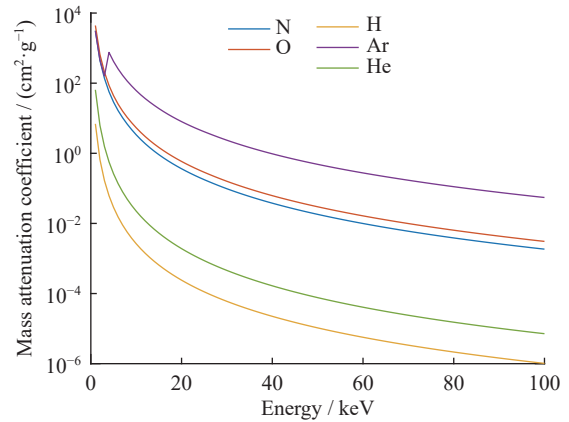


图 4 光子能量与元素质量吸收系数关系

Fig. 4 Relationship between photon energy and element mass attenuation coefficient

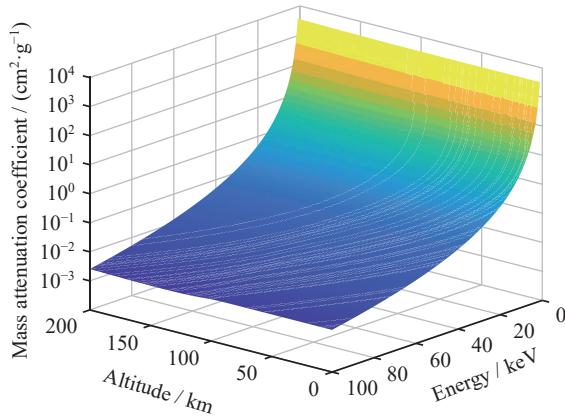


图5 大气质量吸收系数与高度和光子能量关系

Fig. 5 Relationship between photon energy, altitude and element mass attenuation coefficient

$$I_0(u, T) = \frac{B(u, T)r_e^2}{R^2}. \quad (8)$$

其中, r_e 为爆炸火球半径, 在计算中假设为 0.1 m。

假设大气总层数为 k , 经过大气衰减后的 X 射线强度^[21] 为

$$I(u, T) = I_0(u, T) \times e^{-\sum_{i=1}^k \mu_i(u) \rho_i x_i}. \quad (9)$$

其中, $\mu_i(u)$ 为第 i 层大气光子能量为 u 的质量吸收系数, ρ_i 为第 i 层大气的密度, x_i 为第 i 层大气的厚度。

图 6 中 O 点的能注量为

$$E(T) = t_e \int I(u, T) du. \quad (10)$$

能注量单位 $\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中 t_e 为估计的爆炸时间, 其计算方式为^[22]

$$t_e = \frac{QK_0P}{4\pi r_e \sigma T^4}. \quad (11)$$

当量-能量换算因子 K_0 取 $4.18 \times 10^{12} \text{ J} \cdot \text{kt}^{-1}$; Q 为爆炸当量, 单位为 kt; 释放的能量中 X 射线所占份额 P 在 0.5~0.8 范围, 通常取 0.7; σ 为斯特凡玻尔兹曼常数^[23]; T 为等效黑体温度。

3 计算结果

3.1 X 射线频谱特性模拟结果

计算中光子能量取 1~100 keV, 核爆高度分别取 20, 40, 60, 80 km, 斜径角分别取 90°, 120°, 150°, 180°, 斜径角为 180° 时核爆点距离 O 点处最近。假设核爆的温度为 2 keV, 当量为 10 kt, 斜径角为 180°, 高度 H_s 取 20000 km。

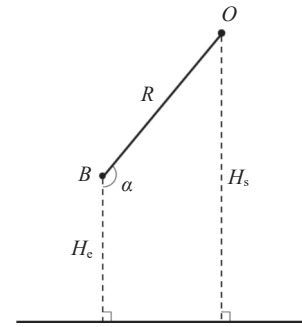


图6 点位说明

Fig. 6 Schematic diagram of point description

不同爆炸高度下到达 H_s 高度的 X 射线能谱分布如图 7 所示。图 7 中的 Origin 曲线是在 H_s 高度且斜径角 180° 情况下, 未经大气吸收的 X 射线谱, 其余曲线是指在斜径角为 90°, 120°, 150°, 180° 情况下, 经过大气吸收的 X 射线谱。

从图 7 可以看出, 在 H_s 高度一定的情况下, 斜径角越小, 其能谱峰值越往高能处偏移。图 7(a) 中在 180° 下, 能谱峰值在 35 keV 附近; 在 120° 下, 能谱峰值在 41 keV 附近; 在 90° 下, 能谱峰值在 81 keV 附近。其原因在于当高度一定时, 角度越小其射线传输距离以及大气所吸收的射线能量会增大, 并且大气质量吸收系数在低能量处较大, 更易受到大气吸收效应影响。

结合图 7 中的四幅图可以看出, 爆炸高度越高, 其经过大气衰减的能谱曲线越接近原始曲线, 原因是在高度越高的情况下, 经过大气的传输路径越短, 大气所吸收的射线能量也越小。

3.2 X 射线能注量模拟结果

X 射线能注量的模拟中, 假设核爆温度 2 keV, 当量为 10 kt, 爆炸高度为 30 km 时, 其在 1000 km 海拔高度, 斜径角 90°~180° 位置处的能注量分布如图 8 所示。图 8 中曲面为 1000 km 海拔高度等高面。

可以看出, 在固定高度下, 斜径角的减小增加了射线在大气中的传输距离, 导致能注量减小。表 2 给出了在 600, 1000, 10000, 20000 km 高度, 斜径角为 90°, 120°, 150°, 180° 下未经大气吸收的能注量数值, 表 3 为经过大气吸收的能注量数值。

对比表 2 表 3 的数值可以更清晰看到能量吸收与角度, 高度的关系, 绝大部分射线能量被大气吸收。综合各高度来看, 180° 时能注量下降约 3~4 个数量级, 120° 时下降约 4~5 个数量级, 90° 时下降约 10~11 个数量级。

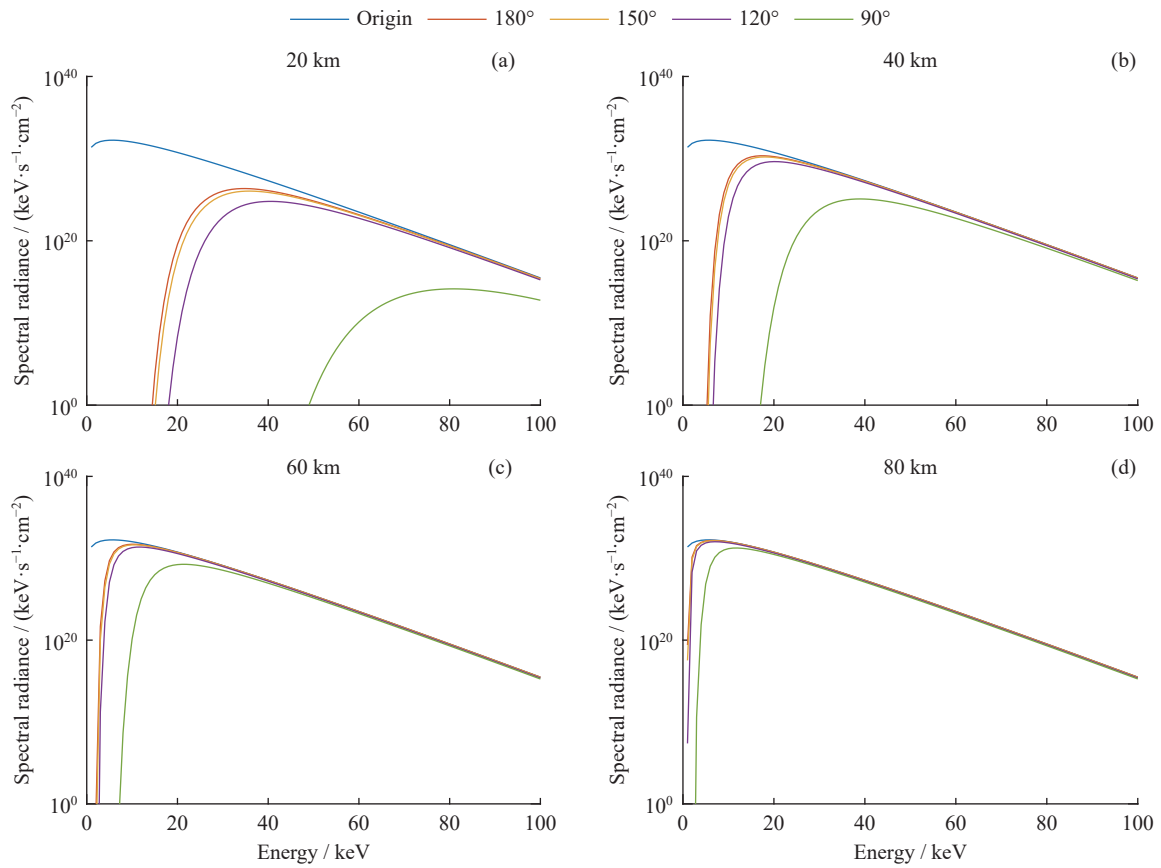
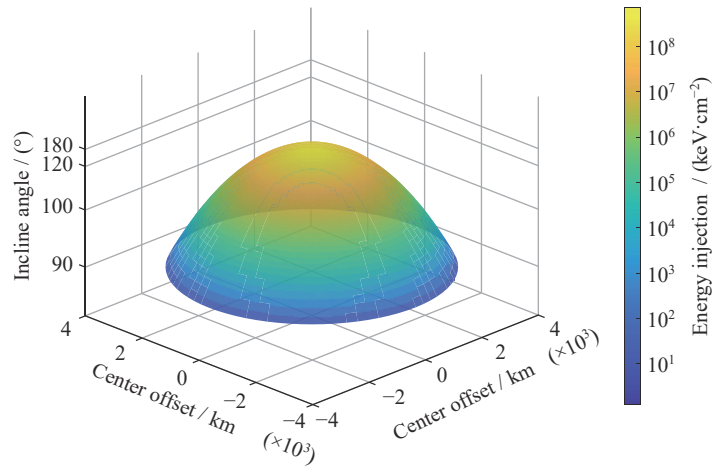
图 7 不同爆高在 H_s 高度处的能谱Fig. 7 Energy spectra of different explosion heights at H_s height

图 8 海拔 1000 km 等高面上能注量分布

Fig. 8 Energy fluence distribution on the 1000 km contour surface

4 结论

计算并给出了不同爆炸高度, 不同斜径角下 X 射线能谱图, 以及等高面上的射线能注量分布。从计算结果可以看出, X 射线经过大气吸收后, 由于低能量

光子的质量吸收系数较大, 在通过相同大气传输距离时, 低能光子能量衰减更大, 导致能谱峰值向高能量处偏移, 并且爆炸高度越高, 其能谱曲线越接近原始未衰减曲线。从等高面上的能注量分布图可以看到, 当斜径角为 180° 时, 等高面上能注量最大, 在其他位

表 2 未经大气吸收后的能注量数值 (单位 $\text{keV}\cdot\text{cm}^{-2}$)Table 2 Energy fluence value without atmospheric absorption (Unit $\text{keV}\cdot\text{cm}^{-2}$)

高度 / km	斜径角 / ($^{\circ}$)			
	90	120	150	180
600	1.89×10^{11}	1.37×10^{12}	3.42×10^{12}	4.44×10^{12}
1000	1.08×10^{11}	5.25×10^{11}	1.20×10^{12}	1.53×10^{12}
10000	6.36×10^9	9.70×10^9	1.31×10^{10}	1.45×10^{10}
20000	2.21×10^9	2.83×10^9	3.39×10^9	3.62×10^9

表 3 经过大气吸收后的能注量数值 (单位 $\text{keV}\cdot\text{cm}^{-2}$)Table 3 Energy fluence value after atmospheric absorption (Unit $\text{keV}\cdot\text{cm}^{-2}$)

高度 / km	斜径角 / ($^{\circ}$)			
	90	120	150	180
600	2.22	7.88×10^7	1.08×10^9	2.09×10^9
1000	1.27	3.02×10^7	3.77×10^8	7.22×10^8
10000	0.07	5.57×10^5	4.11×10^6	6.84×10^6
20000	0.03	1.63×10^5	1.07×10^6	1.70×10^6

置处,随着斜径角减小,大气吸收路径增加,能注量指数级衰减。

参考文献

- [1] ZHANG Dawei. Theoretical and Laboratorial Studies of Radiative Characteristics of Soft X-Rays from High-Altitude Nuclear Explosions[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006
- [2] OUYANG Jianming, MA Yanyun, SHAO Fuqiu, *et al.* Numerical simulation of temporal and spatial distribution of X-ray ionization with high-altitude nuclear explosion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(24): 242801 (欧阳建明, 马燕云, 邵福球, 等. 高空核爆炸X射线电离的时空分布数值模拟[J]. *物理学报*, 2012, **61**(24): 242801)
- [3] AGENCY U S D A. The Effects of Nuclear Weapons[M]. Washington: U. S. Atomic Energy Commission, 1962
- [4] HOERLIN H. Artificial Aurora and Upper Atmospheric Shock Produced by Teak[R]. Los Alamos: Los Alamos Scientific Laboratory, 1961
- [5] HOERLIN H. United States High-altitude Test Experiences. A Review Emphasizing the Impact on the Environment[R]. Los Alamos: Los Alamos National Lab, 1976
- [6] QIAO Dengjiang. Introduction to Nuclear Explosion Physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1988
- [7] XU Heng. Research on the Energy Deposition of X-Rays and Characteristic of Thermal Radiation in the High Altitude Nuclear Detonation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020
- [8] RYBICKI G B, LIGHTMAN A P. Radiative Processes in Astrophysics[M]. Hoboken: Wiley, 2008
- [9] TAYLOR B N. The International System of Units (SI)[M]. Washington: US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2002
- [10] PEDROTTI F L, PEDROTTI L M, PEDROTTI L S. Introduction to Optics[M]. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017
- [11] State Bureau of Technical Supervision. GB/T 3102.6-1993 Quantities and Units—Light and Related Electromagnetic Radiations[S]. Beijing: State Bureau of Technical Supervision, 1993
- [12] WANG Jianguo, NIU Shengli, ZHANG Dianhui, *et al.* Manual of Parameters for High-Altitude Nuclear Explosion Effects[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010
- [13] GAO Fen, AN Ying, DONG Wei. Calculation of the blackbody radiation quantity based on MATLAB[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(5): 30-32 (高芬, 安莹, 董威. 基于MATLAB的黑体辐射量计算[J]. *光学与光电技术*, 2005, **3**(5): 30-32)
- [14] SINGH H B. Composition, Chemistry, and Climate of the Atmosphere[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1995
- [15] National Oceanic and Atmospheric Administration of China, National Aeronautics and Space Administration and United States Air Force Department. U. S. Standard Atmosphere, 1976[M]. REN Xian, QIAN Zhimin, trans. Beijing: Science Press, 1982
- [16] ZHAO Jiuzhang. Physics of the Upper Atmosphere: Volume I[M]. Beijing: Science Press, 1965
- [17] JIA Yue, NASA. NRLMSIS atmosphere model[EB/OL]. (2020-09)[2023-01-14]. <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/NRLMSIS~v2.0>
- [18] HUBBELL J H, SELTZER S M. X-Ray Mass Attenuation Coefficients[EB/OL]. (2004-07)[2023-01-14]. <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>
- [19] ATTIX F H. Energy-absorption coefficients for γ -rays in compounds or mixtures[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 1984, **29**(7): 869-871
- [20] CHANTLER C T, OLSEN K, DRAGOSET R A, *et al.* X-Ray Form Factor, Attenuation, and Scattering Tables [EB/OL]. (2005-01)[2023-01-14]. <https://www.nist.gov/pml/x-ray-form-factor-attenuation-and-scattering-tables>
- [21] OUYANG Jianming, MA Yanyun, SHAO Fuqiu, *et al.* Numerical simulation of X-ray ionization and atmospheric temporal evolutions with high-altitude nuclear explosions[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(8): 135-140 (欧阳建明, 马燕云, 邵福球, 等. 高空核爆炸下大气的X射线电离及演化过程数值模拟[J]. *物理学报*, 2012, **61**(8): 135-140)
- [22] CAO Dinghan. Stefan-Boltzmann radiation law and applications[J]. *Infrared Technology*, 1994(3): 46-48 (曹鼎汉. 斯特藩-玻尔兹曼辐射定律及其应用[J]. *红外技术*, 1994(3): 46-48)
- [23] MOHR P J, TAYLOR B N. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2000, **72**(2): 351-495