

点辐射场中骨微观结构对其能量沉积特性的影响

周莹莹¹, 王德麾², 吴骏翔³, 樊庆文¹, 虞学军⁴, 蒋睿⁴

1. 四川大学制造科学与工程学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学空天科学与工程学院, 四川 成都 610065; 3. 四川大学原子核科学技术研究所, 四川 成都 610065; 4. 航天医学基础与应用国家重点实验室, 北京 100000

【摘要】目的: 由于骨微观结构复杂, 难以进行数字化建模, 在进行模拟计算时多用简单模型代替真实模型。针对这一现状, 我们运用蒙特卡罗方法通过简单模型模拟不同骨微观结构中红骨髓的能量沉积, 以评估该方法的合理性。**方法:** 运用蒙特卡罗软件, 采用单一变量原则, 建立一系列单腔体到多腔体骨模型, 模拟伽马射线在该结构中的运输过程, 分别分析对比光子能量相同时在不同模型中红骨髓的能量沉积和光子能量不同时在相同模型中红骨髓的能量沉积。**结果:** 光子能量相同时, 在不同模型中红骨髓的能量沉积基本持平; 光子能量不同时, 在相同模型中红骨髓的能量沉积随着光子能量的增加成递增趋势。**结论:** 在其他条件相同的情况下, 辐射所致红骨髓剂量主要取决于辐射源的能量; 在源能量相同的情况下, 骨髓模型对红骨髓的影响较小, 因此初步论证了在做骨髓剂量模拟时可用简单模型代替真实模型。

【关键词】点辐射场; 骨; 微观结构; 蒙特卡罗方法; 红骨髓; 能量沉积

【中图分类号】R852.7; 312

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2015)06-0912-05

Influences of bone microstructure in point radiation field on energy deposition characteristics

ZHOU Ying-ying¹, WANG De-hui², WU Jun-xiang³, FAN Qing-wen¹, YU Xue-jun⁴, JIANG Rui⁴

1. School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. School of Aeronautics Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Institution of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 4. State Key Laboratory of Aerospace Medicine and Application, Beijing 100000, China

Abstract: Objective Bone microstructure is complex and difficult to establish digital model, so the simple model is always applied in the simulation calculation, instead of real model. In order to validate its rationality, based on simple models, Monte Carlo method is used to simulate the energy deposition of red marrow in different bone microstructures. **Methods** Based on the principle of single variable, Monte Carlo software was applied to establish a series of bone structure models from single-cavity to multi-cavity, simulating the transport process of the gamma rays. The energy deposition of red marrow in different models with the same photon energy, and the energy deposition of red marrow in the same model with different photon energies were analyzed and compared. **Results** With the same photon energy, the energy deposition of red marrow in different models were basically flat. However, the energy deposition of red marrow in the same model increased with the increased photon energy. **Conclusion** With the same conditions, the red marrow dose caused by radiation mainly depends on the energy of the radiation source. With the same source energy, the red marrow model has less effect on the energy deposition. It is preliminarily demonstrated that the simple model can replace the real model in marrow dose simulation.

Key words: point radiation field; bone; microstructure; Monte Carlo method; red marrow; energy deposition

前言

随着对电离辐射计量学的深入研究, 数字化仿

真人体模型得以迅速发展, 被用于评估放射性材料对组织器官的辐射剂量。在辐射防护的体系中, 数字化仿真人体模型实现了大部分器官和组织的建立, 而一些微观结构, 如辐射敏感组织红骨髓的模型, 由于建模困难, 均用单一均匀组织代替, 并假定每一部位骨骼中的红骨髓是均匀分布的^[1]。红骨髓

【收稿日期】2015-06-25

【基金项目】航天医学基础与应用国家重点实验室开放基金(SMFA12B03)

【作者简介】周莹莹(1990-), 硕士, 主要研究方向: 人机工程仿生学等。Tel: 18380204696; E-mail: 997901163@qq.com。

是生成全部红细胞、大部分白细胞和全部血小板的人体组织, 对人体的造血功能、免疫功能, 以及凝血功能有着重要作用; 并且红骨髓的辐射敏感性较高, 因而在辐射防护的体系中, 红骨髓受到辐射剂量的计算, 无论是对外照射还是误摄入放射性核素的内照射情况, 都是人们十分关心的一个重点^[2]。

随着对辐照粒子在物质材料传输过程及作用机理的逐步了解, 目前计算射线在物质中的能量沉积, 可以通过两种方法: 理论公式计算法和蒙特卡罗模拟法^[3]。考虑到物质材料形状的复杂性、材质的不均匀性、散射各项异性、核反应截面与位置、能量的关联性等方面, 理论公式计算法难以实现能量沉积的精确计算, 通常采用蒙特卡罗模拟的方法来实现计算^[4]。

为了验证目前骨髓模型方法的合理性, 本文运用蒙卡软件^[5], 采用单一变量原则, 建立了一系列单腔体到多腔体模型, 模拟了伽马射线在该结构中的运输过程, 分析对比了不同模型中光子的能量沉积。

1 实现方法及原理

1.1 伽玛射线与物质作用机理

本文研究的是光子射线(γ 射线)在人体组织材料(骨微观结构)中产生电离辐射的过程, 射线在人体组织传输的过程中, 会与人体发生一系列效应, 主要的3种效应为光电效应、康普顿效应、电子对效应。

(1)光电效应: 当一个光子和物质材料中原子的一个核外电子发生碰撞作用时, 光子将全部的能量传递给了核外电子而自己被原子吸收掉, 同时核外电子转变为光电子从原子的束缚中释放出来, 如图1所示; (2)康普顿效应: 康普顿效应指的是入射光子和原子核的外层电子发生了非弹性碰撞, 将一部分能量传递给电子并以角 θ 的方向散射出来, 电子获得能量后变为反冲电子, 以角 Φ 飞出, 其中 θ 称作散射角, Φ 称作反冲角, 如图2所示; (3)电子对效应: 入射光子在受到原子核库仑场作用下, 能量被完全吸收并转化为一对正负电子的过程即为电子对效应, 如图3所示。

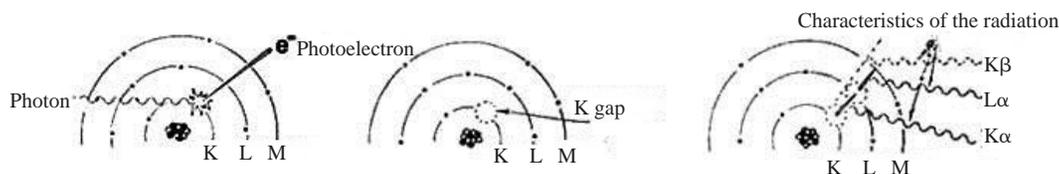


图1 光电效应的发生原理图

Fig.1 Principle diagrams of photoelectric effects

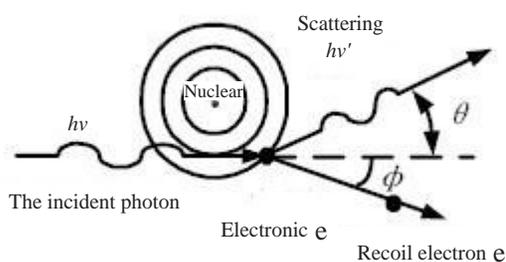


图2 康普顿效应的发生原理图

Fig.2 Principle diagram of Compton effects

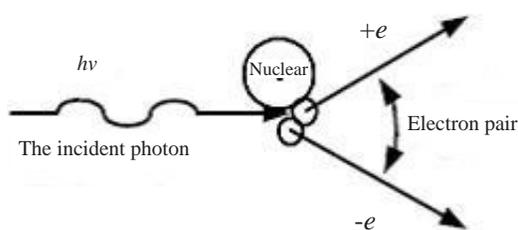


图3 电子对效应的发生原理图

Fig.3 Principle diagram of electron pair effects

此外, 还有光核反应、相干散射等效应。一定能量的光子射线与物质相互作用的过程中, 会发生上述5种效应中的1种或多种, 产生影响最大的是前3种效应: 光电效应、康普顿效应和电子对效应, 使射线强度发生衰减, 并在物质中产生一定的能量沉积^[6]。3种效应发生的概率与光子照射能量和物质原子系数的关系如图4所示。

1.2 伽玛射线仿真方法和原理

随着剂量计算方法的发展, 根据上述伽马射线与物质的作用机理, 通过对粒子运输过程的计算, 可以获得描述某些生物效应的辐射量及射线在物质中的能量沉积, 这种方法在辐射剂量学中已得到了较为广泛的应用, 即理论公式计算法。实际计算过程中, 由于物质材料形状的复杂性、材质的不均匀性、散射各项异性、核反应截面与位置、能量的关联性等方面, 理论公式计算法很难实现能量沉积的精确计算, 因而一种新的计算方法应运而生, 即蒙特卡罗模拟方法。

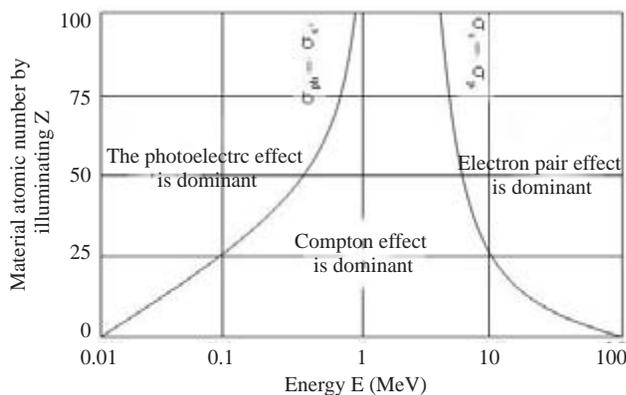


图4 光子射线3种效应概率与照射能量和物质原子系数的关系图
Fig.4 Relationship of three kinds of Photon radiation effect probabilities with radiation energy and material atoms coefficient

蒙特卡罗方法是一种以概率和统计理论为基础的计算方法,又可以称作统计模拟法。在蒙特卡罗方法计算中,将随机数与经过实验获得的概率函数相关联,客观地反映伽马射线与物质相互作用的统计规律。蒙特卡罗模拟软件,即是通过追踪单个粒子在介质中的运动轨迹与反应过程来实现的。在模拟光电效应时,认为光子已经“死亡”,其全部能量都沉积在介质中,则终止此光子过程,随后模拟下一个出射光子运动轨迹;在模拟康普顿散射时,先追踪初始入射光子的运动轨迹,碰撞后再追踪散射光子的运动轨迹,直至散射光子能量(消失)沉积在介质中或穿出介质为止;在模拟电子对效应时,认为入射光子携带的能量一部分用于产生两个湮没光子,其余能量均沉积在介质中,再分别对每个湮没光子进行追踪直至光子能量(消失)沉积在介质中或穿出介质为止。由于蒙特卡罗方法能逼真地模拟真实物理过程,因此在实际应用领域中得到普遍采用。本研究使用Geant4程序软件包进行模拟计算^[7]。

1.3 骨微观结构建模方法

真实骨微观结构复杂,主要包括骨和骨髓。骨髓是存在于长骨(如肱骨、股骨)的骨髓腔,扁平骨(如胸骨、肋骨)和不规则骨(髌骨、脊椎骨等)的松质骨间网眼中的一种海绵状的组织。为简便算法,本研究中骨微观结构中外围骨用圆柱代替,内挖圆柱体空腔代表骨髓腔,建立了一系列单腔体到多腔体模型。为了实验的合理性,遵循单一变量原则,不同模型中骨髓腔体总体积一定,并且使空腔位置在骨中均匀分布。

几何模型建立要求:

(1) 等体积

$$V_n = n \times \pi \times r_n^2 \times h \quad (1)$$

式(1)即为骨髓腔体数量为 n 时腔体总体积的计算公式。其中, r_n 为圆柱腔体底面半径,且不同模型中腔体高度 h 一定。当单一骨髓腔模型的腔体半径 r_1 确定后,根据等体积要求,即可求解出多腔体模型的腔体半径 r_n 。

(2) 腔体分布规格

a. 优先在2条正交直径上分布:在2条正交直径上,等间距设置腔体,且尽量保证每条直径上腔体数量一致。

b. 其余孔随机分布,不重叠:首先以均匀分布概率随机确定一个腔体圆心点位置;判断以此点为圆心的腔体,是否与周围腔体重叠;如果没有,则确定此腔体位置,重复上一个步骤,直到获得指定数量的腔体;如果发生重叠,取消此腔体位置,重复上一个步骤。

2 实现与结果分析

2.1 计算模型与方法

本模拟选取胫骨,单一骨髓腔模型用中心相同的圆柱体代替,底面直径为20 cm、高为50 cm的外层圆柱体代表骨骼,底面直径为12 cm、高为30 cm的内层单一圆柱体代表骨髓腔,如图5所示。

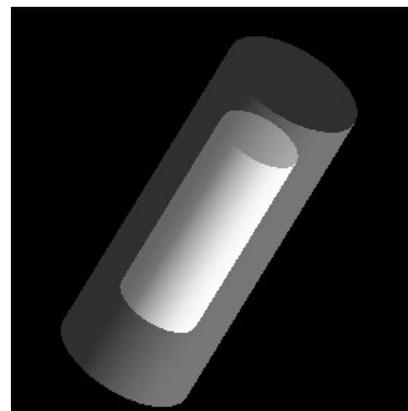


图5 单一骨髓腔模型

Fig.5 Single bone marrow cavity model

骨骼的元素组成及比例:由于在应用MEAC计算红骨髓剂量时,必须考虑到骨骼整体的质量吸收系数和红骨髓的质量吸收系数的比例,所以要确定骨骼和红骨髓的元素组成和比例,以便于计算质量吸收系数。真实人体躯干骨和红骨髓的元素组成及质量百分比,如表1所示。该数据来源于国际辐射单位与测量委员会(ICRU)第46号报告^[8-9]。

表1 真实人体躯干骨和红骨髓的元素质量百分比和密度值

Tab.1 Elements quality percentage and density values of the real human trunk bone and red marrow

Item	Elements (%)											Density (g/cm ³)
	C	H	O	N	Na	Mg	P	S	Cl	K	Ca	
Trunk bone	40.13	8.66	40.35	2.58	0.08	0.06	2.30	0.46	-	0.23	4.97	1.27
Red marrow	47.48	10.18	39.67	2.18	0.01	-	0.03	0.15	0.10	0.17	-	-

本模拟中骨骼成分选取躯干骨数据。因人体组织特别是软组织中含有大量的水,使得水对X(γ)射线、电子束的散射和吸收几乎与软组织和肌肉的近似;水不仅在世界各地都能得到,而且各地水的辐射特性几乎不变,因此水是最易得到、最廉价的组织替代材料^[10];由于报告中红骨髓密度没有给出,因此其成分用水代替。

在骨髓腔体积一定的情况下,对比几何模型骨髓腔数量从1~10个、12个、16个、18个、36个、40个、50个、72个,随机均匀分布在骨骼模型内。骨髓腔数目为3个、12个、72个时的模型界面图,如图6所示。

本实验使用Geant4.10.0程序软件包进行模拟计算,辐射源选取 γ 射线,方向如图6箭头所示,记录辐射场中所有骨髓腔里总的能量沉积。

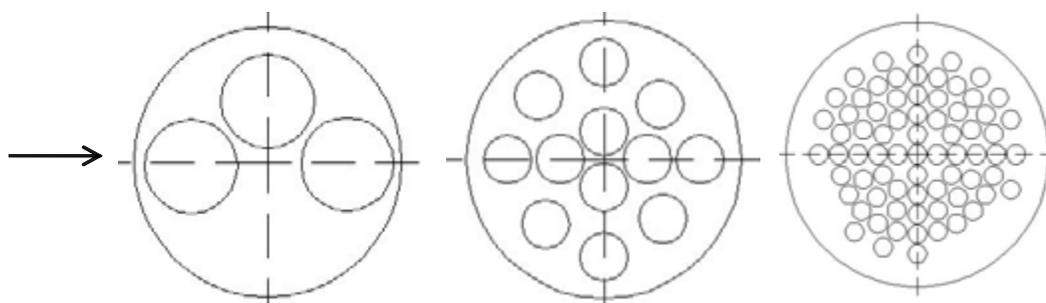


图6 骨髓腔数量为3个、12个、72个时的模型截面图

Fig.6 Model sectional views with 3, 12 or 72 marrow cavities

2.2 计算结果与分析

能量为6 MeV的光子在不同数量骨髓腔模型中

总的能量沉积模拟结果如图7所示。结果显示微观结构在辐射场中对辐射剂量影响不大。

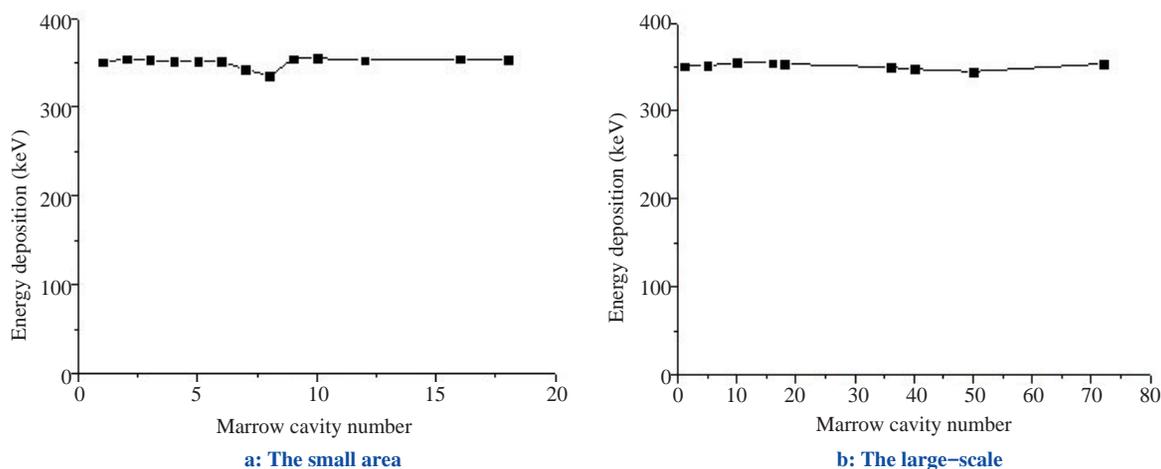


图7 能量为6 MeV的光子在不同模型中红骨髓剂量模拟结果

Fig.7 Dose simulation results of 6 MeV photons in different red marrow models

不同能量光子(能量分别为0.025 MeV、0.05 MeV、0.11 MeV、0.3 MeV、0.661 MeV、1.25 MeV、3

MeV、6 MeV和10 MeV)在72个骨髓腔模型中的辐射剂量模拟结果,如图8所示。

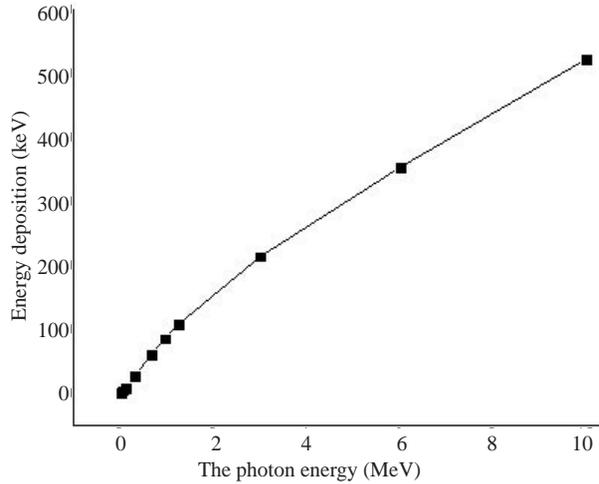


图8 不同能量的光子在相同模型中红骨髓剂量模拟结果

Fig.8 Dose simulation results of photons with different energies in the same red marrow model

3 结语

在其他条件相同的情况下,辐射所致红骨髓剂量主要取决于辐射源的能量;在源能量相同的情况下,骨髓模型对红骨髓的影响较小,因此初步论证了在做骨髓剂量模拟时可用简单模型代替真实模型。由于不同种类射线的基本组成不同,它们与物质相互作用的辐射机理也有本质区别,且实验中骨髓腔的数量也没有达到足够多,因此在日后的研究中该实验结论还可作进一步的精确验证。

【参考文献】

[1] 刘伯学,李湘葆,毛用泽. Y射线外照射条件下体模红骨髓剂量及剂量深度分布的蒙特卡罗计算[J]. 辐射防护, 1990, 10(2): 92-101.

Liu BX, Li XB, Mao YZ. Calculation of red bone marrow dose and dose depth distribution in phantom from external gamma radiation [J]. Radiation Protection, 1990, 10(2): 92-101.

- [2] 刘海宽,高侠名,顾乃谷,等. 用蒙特卡罗方法模拟计算CT扫描所致红骨髓剂量[R]. 中国科学技术进展报告(第二卷), 2011: 19-21.
Liu HK, Gao YM, Gu NG, et al. Monte carlo simulation of red bone marrow dose from CT examination[R]. Progress Report on China Nuclear Science & Technology(Vol.2), 2011: 19-21.
- [3] 路伟,王同权,王尚武,等. GEANT4SPE质子屏蔽和半导体材料辐射效应模拟[J]. 计算物理, 2009, 26(4): 591-596.
Lu W, Wang TQ, Wang SW, et al. GEANT4-based simulation on shielding and radiation effects of SPE protons in semiconductors[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(4):591-596.
- [4] Chiu-Tsao ST, Duckworth TL, Hsiung CY. Thermoluminescent dosimetry of the sourceTech medical model[J]. Med Phys, 2003, 18(3):449-452.
- [5] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 第2版.北京: 原子能出版社, 2006.
Xu SY. Monte carlo method application in the nuclear physics experiment [M]. 2nd ed. Beijing: Atomic Energy Press, 2006.
- [6] 魏志勇. 辐射剂量学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
Wei ZY. Radiation dosimetry[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010.
- [7] Geng CR, Tang XB, Hou XX, et al. Development of Chinese hybrid radiation adult phantoms and their application to external dosimetry[J]. Science China: Technological Sciences, 2014, 57(4): 713-719.
- [8] 卫生部卫生标准委员会. 放射卫生防护标准应用指南[M]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
The Health Standards Committee of Health Ministry. Radiological protection standards application guide[M]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [9] ICRU Report 46. Photon, electron, proton and neutron interaction data for body tissues[R]. 1992.
- [10] 胡逸民. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999.
Hu YM. The tumor radiation physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999.