

# 中国参考人系列模型的建立及 外照射剂量学特征的研究

耿长冉<sup>1</sup>, 汤晓斌<sup>1</sup>, 谢芹<sup>1,2</sup>, 陈达<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学核科学与工程系, 江苏南京 210016; 2. 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃兰州 730000)

**摘要:**为探讨不同人种、不同姿势及新的组织权重因子对人体剂量学的影响,建立了基于 GBZ/T200 的中国参考人系列模型(包括立姿、坐姿、走姿的男女模型);结合蒙特卡罗程序计算得到不同射线能量、6 种标准照射方式下的器官吸收剂量和有效剂量。结果表明,基于不同权重因子和不同种族参考模型可得到不同的有效剂量,尤其是低能阶段的差异较为明显;姿势的改变使得器官剂量和有效剂量有所变化,主要由于器官之间的屏蔽作用,体现在相对立姿时坐姿前后照射的有效剂量减小和走姿左右照射的有效剂量增加。进行辐射剂量学评估时,在低能阶段不同的影响因素对结果有较大的影响,而高能时不太明显,因此在进行医学影像等复杂辐射场的辐射防护工作时应注重实际情况的考虑。

**关键词:**蒙特卡罗方法;人体模型;有效剂量

中图分类号:R144.1

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)S0-0630-05

## A Series of Chinese Mathematic Phantom and Study of Its External Radiation Dosimetry Character

GENG Chang-ran<sup>1</sup>, TANG Xiao-bin<sup>1</sup>, XIE Qin<sup>1,2</sup>, CHEN Da<sup>1</sup>

(1. *Department of Nuclear Science and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;*

2. *School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** On the discussion of effect on dosimetry by different races, different postures, and different weighting factors, a series of Chinese reference human including two genders and three postures were constructed in accordance with GBZ/T 200. With Monte-Carlo method, absorbed dose of each organ and effective dose of several energy and geometries were calculated. With different tissue weighting factors, difference can be found in lower energies with all geometries. Also different races and different postures can bring about the different doses with the shielding of human organs, especially for the lower energy. As a conclusion, corresponding situation should be considered in radiation protection, especially in radiology and complexity radiation field.

收稿日期:2012-05-31;修回日期:2012-08-21

基金项目:江苏省博士后科研资助计划资助项目(1002012C);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(KFJJ20110231)

作者简介:耿长冉(1989—),男,山东滕州人,硕士研究生,辐射防护与环境保护专业

**Key words:** Monte-Carlo method; human phantom; effective dose

人体器官吸收剂量、剂量当量、有效剂量是辐射防护领域常用的物理防护量。吸收剂量反映了射线在组织器官中的能量沉积分布;当量剂量考虑了不同辐射类型对放射生物效应的影响(即辐射权重因子);有效剂量则是综合考虑了不同器官对人整体随机性辐射危害的贡献(即组织权重因子)<sup>[1]</sup>。准确地评估受照人员的剂量水平,对放射性事故应急处理和后期人体辐射损伤治疗具有重要意义。但人体的吸收剂量、当量剂量是无法通过直接测量得到的,通常采用的评估方法有两种:1)物理模型与电离室结合测量;2)仿真计算模型与蒙特卡罗或数值计算方法结合计算。测量物理模型剂量通常花费较大财力物力,浪费时间,且在较长时间实验过程中会对实验工作人员造成一定的辐射。因此,基于辐射仿真模型的蒙特卡罗计算方法成为了该领域研究的重要途径。

辐射仿真模型,从最初的球形模型发展到基于较简单几何的程式化模型,又随着计算机及成像技术的发展产生了体素模型,直到最新的基于NURBS/MESH等建模技术的新一代混合型模型<sup>[2]</sup>。每一种模型都具有其独特的优点,但同时也存在一定的局限。例如,程式化模型具有几何简单、不够真实的缺点,但它具有较易调整、较短计算时间的优点;体素模型具有较为真实的优点,但它的来源一般为单一的人,同时基于医学图像建立的模型通常为仰卧位病人扫描CT/MRI或尸体照片,容易造成器官变形和位移,因此代表性较差,且计算时间较长;新一代混合型模型结合了体素模型和数学模型较易调整尺寸和较真实的优点,但在实际的应用中,由于蒙特卡罗程序的限制还必须将其转换为体素模型进行计算,因而计算时间也是大幅增加<sup>[3]</sup>。

基于程式化模型易于调整和计算时间较短的优点,本工作在ORNL男女异体模型基础上,建立基于中国参考人生理数据(GBZ/T200)及部分亚洲人数据辐射仿真人体模型,此模型在ORNL男女异体模型基础上增加ICRP-103号报告中计算有效剂量的所需器官<sup>[4-5]</sup>。本工作将中国人参考人男/女立姿模型分别进行姿势的改进,分别建立走姿、坐姿的系列模型,并针对参考

模型进行光子外照射剂量转换系数的计算,分别探讨不同组织权重因子、不同姿势在不同照射方式时对人体剂量学的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 仿真人体模型的建立

本工作对ORNL模型进行了改进,根据ICRP-89号报告建议,GBZ/T200及ICRP-103号报告新增加的计算有效剂量的辐射敏感组织,增加了唾液腺、男性前列腺、胸骨以及男性乳腺等4个器官,建立中国参考人男/女立姿模型,然后进行姿势的改进,分别建立走姿、坐姿的系列模型。站立位模型的描述方法参照ORNL体模描述方法,各个组织器官的质量和体积基本符合中国参考人的标准;走路姿态时两腿分开与身体长轴各成 $30^\circ$ ;坐姿时两大腿与身体长轴成 $90^\circ$ <sup>[6]</sup>。

### 1.2 蒙特卡罗方法和MCNP程序

MCNP是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室编制的基于蒙特卡罗方法的大型通用中子光子输运程序<sup>[7]</sup>。本研究基于MCNP5进行计算,整个计算工作在高性能并行计算平台上完成,服务器的操作系统为Red Hat Enterprise Linux。

### 1.3 剂量计算方法

#### 1) 器官吸收剂量的计算

使用蒙特卡罗程序MCNP的F6卡通过光子截面和加热函数计算得出器官能量沉积,进而通过SD卡可直接得出沉积能量与靶器官质量之比,即吸收剂量。在人体剂量计算中,普通人体器官剂量可通过以上方法由器官总沉积能量除以器官质量直接得出;针对骨骼部位骨表面和骨髓的计算方法通常有很多种,在本工作中骨表面剂量采用骨骼剂量近似法,骨髓剂量则采用3CFs方法。本工作针对6组辐射仿真模型分别计算了6种标准照射方式<sup>[8]</sup>(AP(前后照射)、PA(后前照射)、LLAT(左侧照射)、RLAT(右侧照射)、ROT(旋转照射)、ISO(各项同性照射)),不同能量段下的人体器官的剂量。

#### 2) 有效剂量的计算

根据ICRP-103号报告最新建议,人体辐射防护用有效剂量计算公式为:

$$E = \sum_T w_T \left( \frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right) = \frac{\sum_T w_T \left( \frac{\sum_R w_R D_{T,R}}{2} \right)_M + \left( \frac{\sum_R w_R D_{T,R}}{2} \right)_F}{\frac{E_M + E_F}{2}}$$

其中:  $E$  为有效剂量;  $T, R$  分别为组织类型和辐射类型;  $w_T$  为组织权重因子;  $w_R$  为辐射权重因子;  $D_{T,R}$  为组织  $T$  在辐射  $R$  时的吸收剂量;  $H_T^M, H_T^F$  分别为男性、女性组织  $T$  的当量剂量;  $E_M, E_F$  分别为男性、女性有效剂量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 基于 ICRP-103 和 ICRP-60 号报告的有效剂量计算方法对比

20 世纪 60 年代初, 辐射防护量中定义的辐射权重因数是作为 LET 函数的辐射质因数  $Q$  相关联的, ICRP 第 60 号出版物委员会确立了 1 组被认为是适合于放射防护应用的通用辐射权重因数。2007 年最新发布 ICRP-103 号报告在 ICRP-60 报告基础上提出了关于辐射和组织权重因子的最新建议。针对辐射权重因子, 光子和电子仍取值 1; 中子则由分段型改为连续型, 考虑到次级光子对剂量的贡献, 将低能范围的权重调小; 质子的权重因子由原来的 5 降为 2。针对组织权重因子(表 1), ICRP-103 号报告增加了乳腺的权重系数, 由原来的 0.05 增加到 0.12, 而生殖器官权重系数由 0.2 调整为 0.08, 其余组织的定义也进行了改变。本工作分别计算了基于 ICRP-103 和 ICRP-60 号报告中国参考人模型在不同照射方式下的有效剂

表 1 ICRP-103 号报告与 ICRP-60 号报告建议组织权重因子对比

Table 1 Recommended tissue weighting factors based on ICRP-103 and ICRP-60

组织	$w_T$	
	ICRP-103	ICRP-60
红骨髓, 结肠, 肺, 胃	0.12	0.12
生殖器官	0.08	0.2
膀胱, 食道, 肝脏, 甲状腺	0.04	0.05
骨表面, 皮肤	0.01	0.01
乳房, 其余组织	0.12	0.05
脑, 唾液腺	0.01	
总计	1.00	1.00

量(图 1)。从图 1 可看出, 基于 ICRP-103 号报告辐射组织权重因子的有效剂量计算值较高, 在低能阶段这一情况尤其突出, 主要原因是新建议中给出的乳腺权重较高, 低能时乳腺直接暴露于射线中, 而其他权重降低的器官当量剂量比重较小。

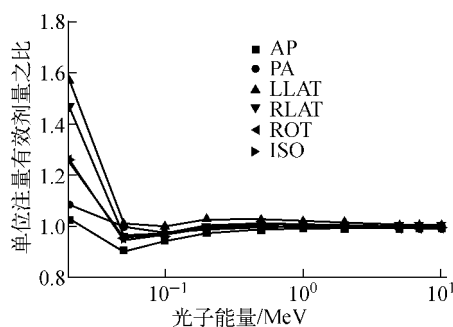


图 1 基于 ICRP-103 号与 ICRP-60 号报告的有效剂量之比

Fig. 1 Ratio of effective dose based on ICRP-103 to ICRP-60

### 2.2 中国参考人站立模型与 ICRP-74 号报告转换系数的差异

人体器官吸收剂量的计算方法均类似, 但针对骨骼部位骨表面和红骨髓的计算方法有多种。文献[9]对比分析了不同红骨髓剂量计算方法对剂量的影响, 并得出 3CFs 修正方法是较为精确的计算方法。3CFs 修正主要针对骨小梁对剂量建成的影响, 尤其在低能阶段引起了红骨髓的剂量增加。图 2、3 分别示出中国参考人平均有效剂量与 ICRP-74 报告有效剂量对比及中国参考人与 ICRP-74 单位注量有效剂量之比, 由图 2、3 可看出, 在低能阶段, 中国参考人有效剂量与 ICRP-74 号报告数据有较大区别, 尤其在左右照射时, 中国参考人有效剂量大约是 ICRP-74 报告的两倍。

### 2.3 不同姿势参考人模型有效剂量对比分析

本工作在中国参考人立姿模型的基础上, 又分别构建了坐姿和走姿的中国参考人模型, 并进行了不同姿态条件下的人体有效剂量计算(图 4)。在坐姿时, 对剂量影响比较大的照射方式主要是前后、后前两种照射方式。在低能阶段(0.02~0.1 MeV), 坐姿比立姿条件下有效剂量减少约 20%; 在 0.2~10 MeV 能量段,

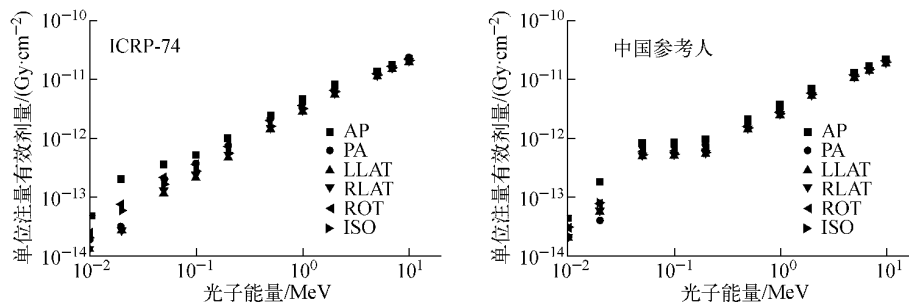


图 2 中国参考人平均有效剂量与 ICRP-74 报告有效剂量对比

Fig. 2 Effective dose per unit fluence of Chinese reference man and ICRP-74

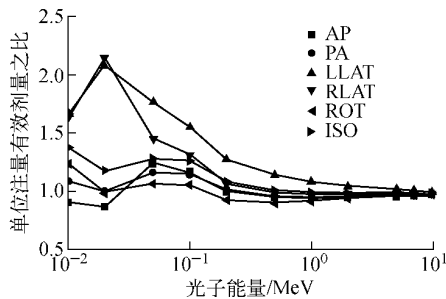


图 3 中国参考人与 ICRP-74 单位注量有效剂量之比

Fig. 3 Ratio of effective dose for Chinese reference man to ICRP-74 per unit fluence

可造成有效剂量 5%~15% 的减少。这主要是因为是在坐姿情况下,大腿与小腿成 90°,大腿对盆腔附近器官以及大腿骨骼具有一定的保护作用。由图 4 也可看出,在前后照射情况下膀胱的吸收剂量坐姿比立姿明显较低。

走姿条件下,对有效剂量影响较大的照射方式主要是左侧照射、右侧照射两种(图 5)。左、右侧照射时走姿有效剂量普遍高于立姿,但 0.01~0.02 MeV 能量范围以外的差异均在 5% 以内。其余照射方式下走姿比立姿条件下有效剂量的差异

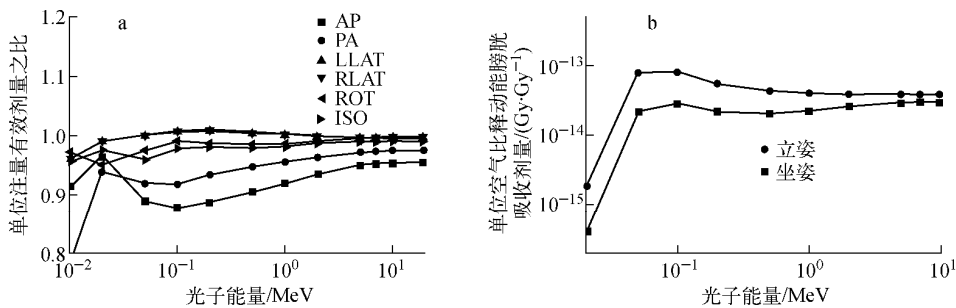


图 4 坐姿与立姿有效剂量之比 (a) 及坐姿与站立姿势膀胱吸收剂量 (b)

Fig. 4 Ratio of effective dose calculated for sit posture to stand posture (a) and absorbed dose per unit air kerma of bladder (b)

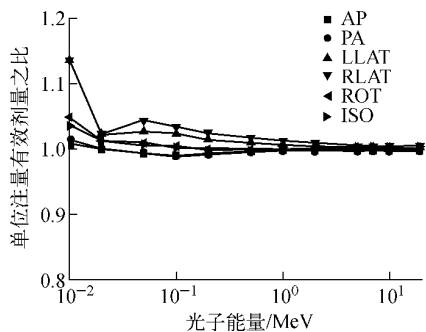


图 5 走路姿势与站立姿势有效剂量之比

Fig. 5 Ratio of effective dose calculated for walk posture to stand posture

在 2% 以内。这主要是因为左、右侧面照射时,在走路姿态两腿失去了相互之间的保护,而造成腿部骨骼组织的剂量增加,这种影响随外照射射线能量(射线穿透性)的增加逐渐减小。

### 3 结论

本工作在 ORNL 参考模型的基础上,根据 GBZ/T200 建议中国参考人生理参数,建立了中国参考人系列模型,包括男女立姿、走姿、坐姿模型;并将模型结合蒙特卡罗程序进行剂量计算研究,探讨了不同人种、不同姿势以及新的

组织权重因子对人体剂量学的影响。结果发现,在进行辐射剂量学评估时,根据 ICRP-60 和 ICRP-103 给出的不同组织权重因子,得出的有效剂量在低能阶段差异比较明显,在 0.1 MeV 以上基本差异在 4% 以内;中国参考人与高加索人种由于种族不同,同样造成有效剂量转换系数的不同,在低能阶段差异较大,在 0.1 MeV 以上二者差异在 5% 以内;姿势的改变主要由于器官之间的屏蔽作用,使得剂量有所变化,体现在相对立姿时坐姿前后照射的剂量减小和走姿左、右照射的剂量增加,并随能量增加这种趋势逐渐减小。因此在进行类似医学影像以及复杂辐射场辐射防护等应用领域应注重实际情况的考虑,同时,本工作所建模型以及计算结果可用于指导辐射防护领域的辐射剂量评估及研究。

#### 参考文献:

- [1] ICRP. 1990 recommendations of the international commission on radiological protection[R]. Oxford: Pergamon Press, 1991.
- [2] XU X G, ECKERMAN K F. Handbook of anatomical models for radiation dosimetry[M]. [S. l.]: [s. n.], 2009.
- [3] CASSOLA V, de MELOLIMA V, KRAMER R, et al. FASH and MASH: Female and male adult human phantoms based on polygon mesh surfaces: I. Development of the anatomy[J]. Physics in Medicine and Biology, 2010, 55: 133.
- [4] ICRP. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection, ICRP publication 103 [R]. Oxford: Pergamon Press, 2007.
- [5] 汤晓斌,耿长冉,谢芹,等. 中国参考人孕妇模型的建立及其内照射剂量学研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2012, 29(1): 3 088-3 092.
- TANG Xiaobin, GENG Changran, XIE Qin, et al. The establishment of Chinese pregnant woman model and application on internal dosimetry research [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2012, 29 (1): 3 088-3 092(in Chinese).
- [6] 陈萌,陈立平. 基于人机工效学的人体建模和运动仿真[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(4): 597-599.
- CHEN Meng, CHEN Liping. Ergonomics-based human modeling and motion simulation[J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(4): 597-599(in Chinese).
- [7] SHULTIS J, FAW R. A MCNP primer [M/OL]. 2006 [2010-12-12]. <http://www.mne.ksu.edu/~jks/MCNPprmr.pdf>.
- [8] ICRP. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation[M]. Oxford: Pergamon Press, 1996.
- [9] 高佚名,刘海宽,顾乃谷,等. 蒙特卡罗方法计算外照射所致红骨髓剂量方法的研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2011, 31(2): 225-228.
- GAO Yiming, LIU Haikuan, GU Naigu, et al. Monte Carlo simulation methods of determining red bone marrow dose from external radiation [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2011, 31(2): 225-228 (in Chinese).