

中国参考人孕妇模型的建立及其内照射剂量学研究

汤晓斌¹, 耿长冉¹, 谢芹^{1,2}, 陈达¹ (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:目的: 由于胎儿具有较高辐射敏感性, 对其进行内照射剂量学评估具有十分重要的意义。本研究通过建立基于中国人参考生理特征的中国孕妇参考人系列模型, 对其进行内照射剂量学的研究, 为孕妇等特殊人群内照射辐射防护工作提供技术及理论基础。方法: 在MIRD模型的基础上根据中国参考人生理特征建立了中国参考人数学模型——“NHMAN 1.0”, 然后在此模型基础上依据孕妇生理参考数据进行改进, 建立中国孕妇参考人模型。借助蒙特卡罗方法使用MIRD内照射计算模式对其进行内照射剂量学的研究。结果: 采用Monte Carlo方法模拟了10 keV~4 MeV范围内9种不同能量的光子在人体组织器官内的运输过程, 得出了各源器官不同能量的光子对胎儿及源器官自身的比吸收分数, 以肾脏和肺为源器官为例, 将结果与美国橡树岭模型(ORNL)的推荐值进行了比较; 计算结果表明, 计算发现靶器官对自身的SAF因子与ORNL孕妇模型总体相对差异较小基本吻合, 而靶器官对胎儿的SAF因子与其差异相对较大。同时还计算了 ^{192}Ir 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 在肾脏和肺部时, 源器官对胎儿的S因子。结论: 验证了该方法的可行性。基于中国参考人建立的孕妇模型与ORNL模型解剖结构有一定的差异, 并在内照射SAF等辐射防护量上也有相应的差别, 建议在国内进行辐射防护工作时使用基于中国参考人数据。

关键词: 孕妇模型; 剂量学; 蒙特卡罗方法; 比吸收分数; S因子

DOI 编码: doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2012.01.002

中图分类号: R144.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-202X(2012)01-3088-05

The Establishment of Chinese Pregnant Woman Model and Application on Internal Dosimetry Research

TANG Xiao-bin¹, GENG Chang-ran¹, XIE Qin^{1,2}, CHEN Da¹

(1. Nuclear Science and Engineering Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China; 2. Nuclear Science and Technology Division, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Objective: On account of elevated fetal radiosensitivity, estimates of internal and external dosimetry are very important for a pregnant woman and her fetus. By establishing Chinese reference of physiological characteristics based on China's pregnant women reference series model, this paper researches the internal dosimetry of pregnant women. **Methods:** Based on Chinese reference mathematical phantom——“NHMAN 1.0”, we build a radiation stylized pregnant phantom with Chinese physiological feature. Using MIRD scheme and montecarlo method do some research of internal dosimetry about pregnant woman. **Results:** SAF values to self and to fetus by several source organs were calculated individually. Kidney and lung as example were compared with previous data derived from ORNL phantoms. The S values of three radionuclides in kidney and lung were also calculated. **Conclusions:** SAF values to self by kidney and lung agree well with ORNL data, but to fetus are different between them, that maybe mainly because of the different phantom and different method.

Key words: pregnant woman model; dosimetry; Monte Carlo method; specific absorbed fraction; S-factor

收稿日期: 2011-10-29

基金项目: 江苏省博士后科学基金资助项目(No.1002012C), 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(No.Y1065-063)

作者简介: 汤晓斌(1978-), 男, 硕士生导师, 研究方向: 辐射防护仿真建模与粒子输运模拟计算。E-mail: ac2nt@nuaa.edu.cn。

前言

基于蒙特卡罗方法与人体辐射仿真模型相结合的剂量学计算已被广泛的应用于辐射防护、医学物理、航空航天安全等领域。随着医学影像技术及计算

机技术的发展,人体辐射仿真模型由最初的数学模型发展到当今的体素模型,而基于 NURBS 曲面建模的第三代仿真模型近几年也被陆续报道。虽然这些模型在很大程度上增加了人体解剖结构的真实性和精细度,但同时也增加了计算复杂度和计算时间。因此,建立针对孕妇、儿童等特殊人群的辐射仿真模型仍具有必要性,而目前国内开展的针对孕妇的辐射防护剂量学研究也鲜有报道。

众所周知,处于高度分裂增殖期的生物体相对于正常分裂及不能分裂的生物体有较高的放射敏感性,因此婴儿及胎儿的辐射防护更应该受到广大科学工作者的重视。为确定孕妇在遭受电离辐射时,特殊器官(包括胚胎或婴儿)所受到的剂量,一系列关于孕妇的辐射仿真模型也随之出现。1995 年 stabin 等人在 Cristy-Eekerman 所建立的人体数学模型(简称 C-E 模型)的基础上,建立了每隔 3 个月的孕妇模型^[1,2]。2003 年 Jing Chen 等人也在 ORNL 模型的基础上进行了孕妇模型的建立,其包括 8,13,26,38 周的胎儿模型^[3]。2009 年石成玉、徐榭等人建立了新的孕妇模型^[4,5],这种孕妇模型结合了 NURBS 建模和 VIP 模型。但是,这些模型均是在欧美高加索人种的基础上建立起来的,在某些方面的解剖结构并不符合中国人的人体特征^[6]。

本文的主要工作是基于作者所在研究团队已开发的“中国参考人”数学模型——“NHMAN 1.0”,并依据孕妇生理参考数据对模型进行了改进,建立了 3、6、9 个月的中国孕妇参考人模型,并进行了内照射剂量计算研究。

1 方法与材料

1.1 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法,也称统计模拟方法,是二十世纪四十年代中期,由于科学技术和电子计算机技术的发展,而被提出的一种以概率统计理论为指导的数值计算方法。蒙特卡罗方法主要应用于粒子输运过程中,通过跟踪单个粒子,记录这些粒子在某些方面的平均行为而得到问题的解。

MCNP 是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室编制的大型通用中子、光子输运程序,后来随着版本的不断改进也可用于计算电子的输运问题。目前已广泛应用于核能发电、辐射防护、医学剂量的计算和航天辐射的评估等领域。本研究基于 MCNP5 (PGI O3 模式编译)版本^[7]进行计算,整个计算工作在 IBM 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。

1.2 光子内照射剂量计算

内照射器官剂量通常通过 MIRD 模式求得(如图 1 所示)。MIRD 模式是美国核医学学会内照射剂量委员会 MIRD 提出并逐步完善的,其主要思想是将求得的

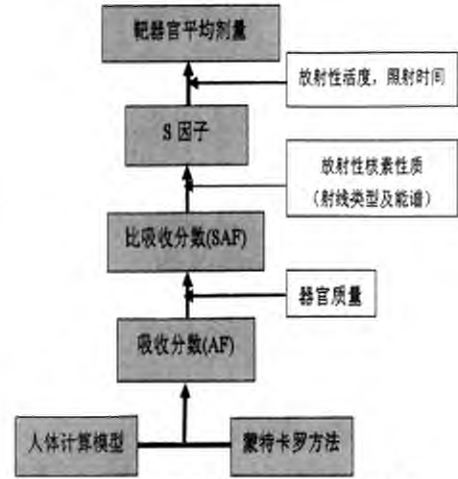


图 1 MIRD 小册子内照射计算流程图

Fig.1 Schema of internal dosimetry calculation

S-factor 乘以放射性活度及时间,即可求得靶器官所受的剂量^[8]。放射性核素发射不同能量光子的概率乘以对应能量,再乘以对应能量 SAF (Specific Absorbed fraction) 值得到 S-factor, S-factor 单位为 Gy/Bq/s, 其实际物理意义为放射性核素在源器官中衰变一次,靶器官的吸收剂量。S-factor 的计算公式如下,该量等同于 ICRP 报告中的比有效剂量。

$$S\text{-factor}(T \leftarrow S) = \sum_i \frac{\gamma_i E_i * AF(T \leftarrow S)}{\sum_i \gamma_i E_i * SAF(T \leftarrow S)} \quad (1)$$

式中, i 代表不同能量放射性粒子, E_i 指粒子能量, γ_i 指发出能量为 E_i 的射线的概率。

比吸收分数 SAF 也可用 Φ 表示,计算公式为:

$$\Phi(target \leftarrow source) = \frac{\Phi(target \leftarrow source)}{m_{target}} \quad (2)$$

式中 $\Phi(target \leftarrow source)$ 是粒子由源器官入射到靶器官时的沉积能量占出射能量的份额,称为吸收分数 AF (Absorbed fraction), 吸收分数除以靶器官的质量得到比吸收分数,比吸收分数的单位为 kg^{-1} 。

在计算比吸收分数的过程中,使用蒙特卡罗程序 MCNP 中 F_6 卡可直接计算沉积能量与靶器官质量之比,再除以入射能量即可得到比吸收分数。其中, F_6 卡的计算公式为:

$$F_6 = \rho_a / \rho_g \int_V \int_t \int_E H(E) \Phi(\vec{r}, E, t) dE dt \frac{dV}{V} \quad (3)$$

其中, ρ_a 是原子密度 (atoms/barn-cm), ρ_g 是质量密度 (g/cm^3), $H(E)$ 是加热函数,

$$H(E) = \sigma_T H_{avg}(E) \quad (4)$$

σ_T 是中子或光子的总截面,中子和光子 $H_{avg}(E)$ 的形式不同。

$$\text{对于光子, } H_{avg}(E) = \sum_{i=1}^3 p_i(E) (E - \bar{E}_{out}) \quad (5)$$

其中 $i=1, 2$ 和 3 , 分别表示非相干散射、对产生和光电

效应, $p_i(E)$ 是反应 i 的几率, $\bar{E}_{out}(E)$ 是平均光子出射能量。

1.3 体模的建立

(1) 中国女性模型

在作者所在课题组的前期工作中,已建立了符合中国人人体生理特征参数的“中国参考人”数学模型——“NHMAN 1.0”。该模型是在 ORNL 数学模型的基础上,根据王继先等所著《中国参考人解剖生理和代谢数据》中的中国及亚洲人体体征数据进行调整所建立的。“NHMAN 1.0”模型相对于 ORNL 数学模型而言,男性体模增加至 22 种组织器官,女性体模增加至 20 种组织器官,特别是针对骨组织部分进行了更为详细的区分,分为颅骨、面骨、脊柱、肋骨、骨盆、胸骨和成对的锁骨、肩胛骨、臂骨以及腿骨共 14 个部分。“NHMAN 1.0”模型的部分器官质量与 ORNL 模型对比,如图 2 所示。在此基础上,本文依据孕妇生理参考数据对女性模型进行改进,分别建立了 3、6、9 个月的中国孕妇参考人模型。

(2) 子宫及胎儿模型

模型的建立过程中,子宫胎儿模型的体积均取自 ICRP 89(2002)号报告,采用的数据如表 1 所示。同时将子宫、胎盘和胎儿作为一个整体进行考虑,几何描述是在经坐标转换之后的坐标系中进行的,将其放入母亲坐标系时进行相应的坐标变换,包括位置变换和角度变换。两个坐标系之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y-y_1 \\ z-z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\theta) & \sin(-\theta) \\ 0 & -\sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, y_1, z_1 分别表示在母亲坐标系中的 y, z 值。 θ 表示旋转角度。

子宫模型的建立如图 3 所示,子宫在 3 个月、6 个月、9 个月时的形状相同,但尺寸不同。其主要由内外两层的上下两个半球形和中间一段锥形环绕而成。在子宫壁和胎盘及胎儿之间的部分定义为羊水。胎盘在 3 个月、6 个月、9 个月的形状是相同的,但尺寸不同。由如图 3 中 403 号栅元所示的区域,胎儿模型主要分为三个部分——胎儿脑部、胎儿骨骼和其他组织。胎儿脑部在 3 个月时占其身体内组织的大部分,如图 3 中 405 号栅元所示,由两个半圆和一段圆柱组成;6 个月时由上下两半圆表示;9 个月时由下部一个圆球表示。3 个月时的胎儿骨骼因尚未发育而未被建立;在 6 个月和 9 个月时,如图 3(06 号栅元)所示,胎儿骨骼围绕在胎儿的外部。除脑部和骨骼外,胎儿的其他组织定义为内组织,即胎儿软组织。

1.4 内照射源模型的设置

蒙特卡罗程序 MCNP 中内照射源的描述是通过建立一圆柱体,然后将其限制在源器官栅元内进行抽样,从而实现源器官放射源的定义。这里以肾脏为源器官示例如下:

```
sdef pos=0 0 0 erg=1 rad=d1 ext=d2 axs=0 0 1 cel=160
ccc=160
si1 0 10
sp1 -21 1
```

表 1 模型不同孕期胎儿及子宫等的体积值

Tab.1 volumes of fetus and uterine wall at different stages of pregnancy

孕期	3 个月	6 个月	9 个月
体积 (cm ³)			
组织			
胎儿脑部	14.5	138	359
胎儿身体	91.6	1135	3431
胎儿骨骼	N/A	62	300
子宫壁	360	802	1052
胎盘	64.3	370	615

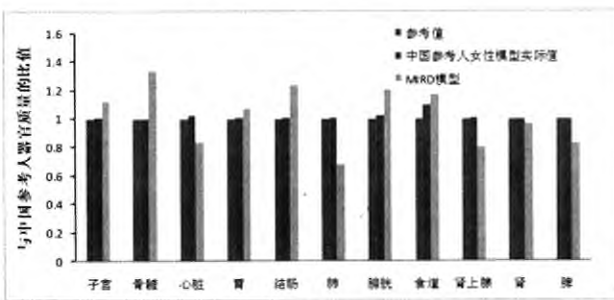


图 2 中国成年女性参考人与 MIRD 参考人器官质量对比示意图

Fig.2 Comparison of organ masses between Chinese reference female and the MIRD model

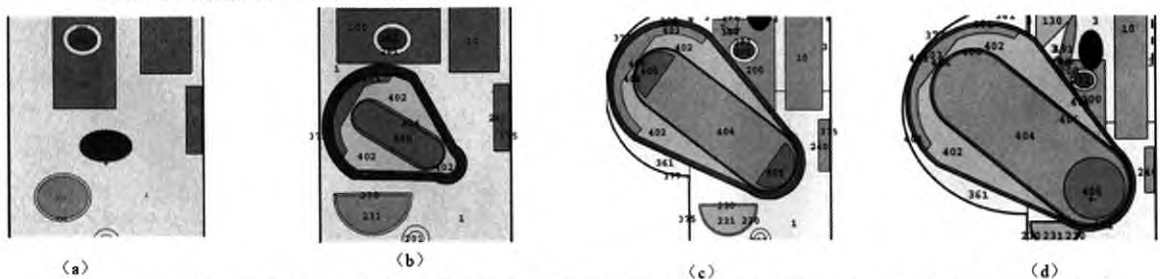


图 3 中国参考人孕妇模型示意图 (a)中国参考人成年女性模型(未孕)yz 平面示意图 (b)孕期三个月 yz 平面示意图 (c) 孕期六个月 yz 平面示意图 (d) 孕期九个月 yz 平面示意图

Fig.3 Chinese pregnant woman model at different pregnancy (a)three month (b)six month (c)nine month (d) non-pregnant

si2 -6 6
sp2 0 1

其中:cel=160 是指肾脏的栅元号即 160 号。

在 MCNP 中可查看几何形状,同时还可以验证源抽样的正确性,如下图 4 所示,验证了本研究所用源的正确性。

2 结果与结论

2.1 与 ORNL 孕妇模型对比

本研究计算了各源器官从 0.01 MeV~10 MeV 的 9 种不同能量对胎儿的 SAF 因子,以肾脏和肺作为源器官为例,对其与 ORNL 推荐值进行比较。经计算发现靶器官对自身的 SAF 因子与 ORNL 孕妇模型总体相对差异较小。在低能阶段有一定的差异,在高能段差异较小,并且都呈现出随射线能量增加 SAF 因子逐渐减小的趋势,即低能阶段具有较高的 SAF 因子。但是对胎儿的剂量影响则恰恰相反。随能量的增加,SAF 因子呈现增加的趋势,当达到 1MeV 附近时不再

增加。这是由光子的特性所决定的,在低能阶段,光子还不能到达胎儿所处的区域即被沉积,故而较低,随能量增加,穿透能力增强,呈增加的趋势,但当光子能量增加到一定程度后,光子沉积在这些区域的能量比例一定,故而不再增加。

同时发现源器官对自身的 SAF 值差异相对源器官对胎儿的差异较小,对胎儿的 SAF 值差异相对较大,并且当肺作为源器官时明显比肾脏作为源器官时的相对差异大。比较的这两种模型,肾脏与胎儿相对距离的差异小于肺部与胎儿相对距离的差异,经分主要由于在决定 SAF 值的因素中占主导地位的是器官之间的距离。

总结分析,SAF 值中国孕妇模型和 ORNL 孕妇模型的差异可能有以下几方面原因:

(1) 解剖结构的不一致;中国参考人孕妇模型是基于中国参考人模型所建立,在某些器官大小,相对位置上可能存在一定的差异,而且器官之间的距离及组织差异也是 SAF 值中重要的因素。

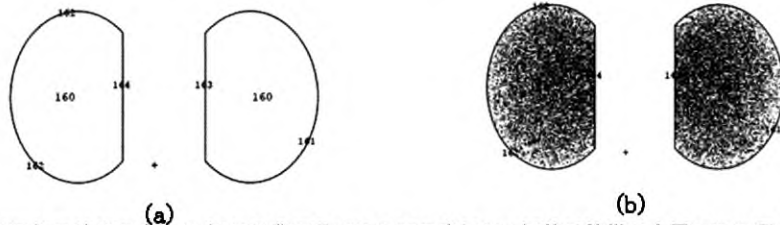


图 4 内照射源粒子抽样示意图(a) 栅元及曲面号(XZ 平面示意图)(b) 源粒子抽样示意图(XZ 平面示意图)
Fig.4 Schematic plot of radiation particles sampling in kidney (a)cell and surface number(XY plane)

(b)Particles sampling plot(XY plane)

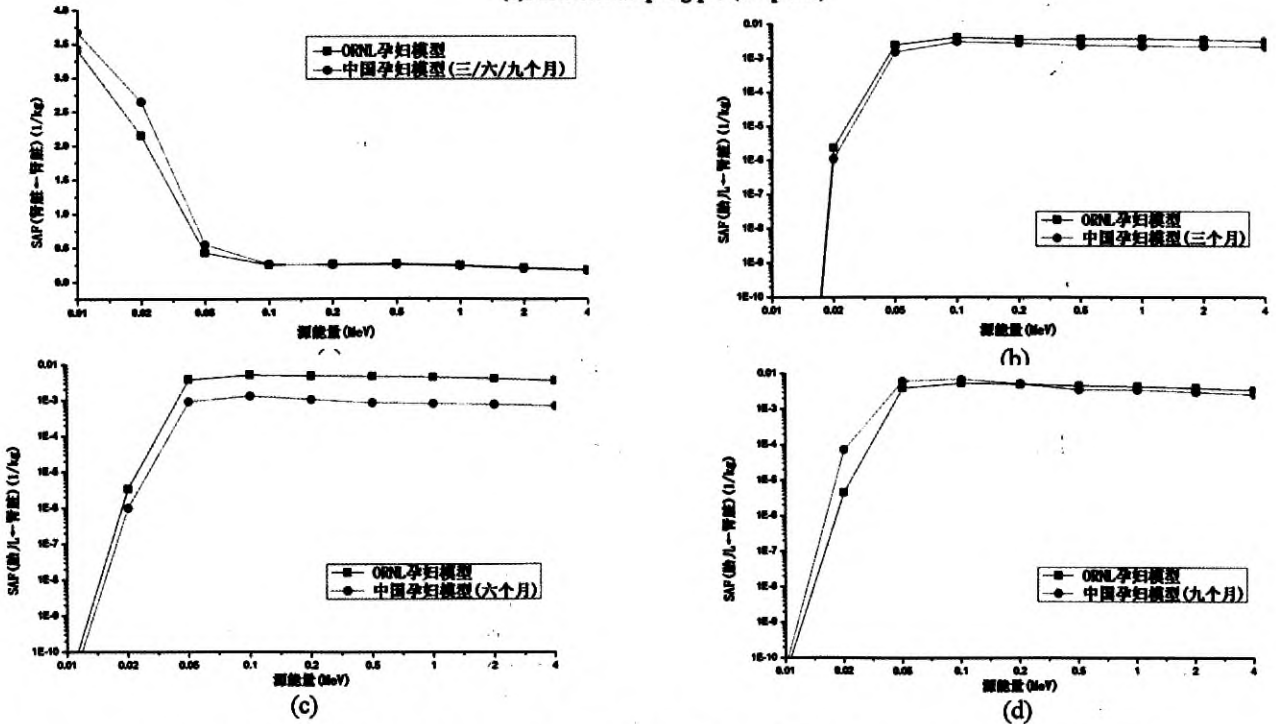


图 5 以肾脏为源器官,中国孕妇模型与 ORNL 孕妇模型 SAF 因子对比(a)靶器官为肾脏,(b)靶器官为胎儿(孕期三个月)
(c)靶器官为胎儿(孕期六个月)(d)靶器官为胎儿(孕期九个月)

Fig.5 Comparison of SAFs by different photon energy for kidneys as the source organ

表2 常用放射源在肺和肾脏处对胎儿的S因子(Gy/Bq/s)
Tab.2 S factors of three radionuclides in lung and liver to fetus (Gy/Bq/s)

放射源	肺(三个月)	肾(三个月)	肺(六个月)	肾(六个月)	肺(九个月)	肾(九个月)
Co-60	1.19E-16	1.25E-15	2.15E-17	3.13E-16	5.67E-17	1.30E-15
Ir-192	2.49E-17	4.03E-16	5.32E-18	1.19E-16	1.46E-17	5.49E-16
Cs-137	2.33E-17	2.77E-16	4.34E-18	7.92E-17	1.17E-17	3.51E-16

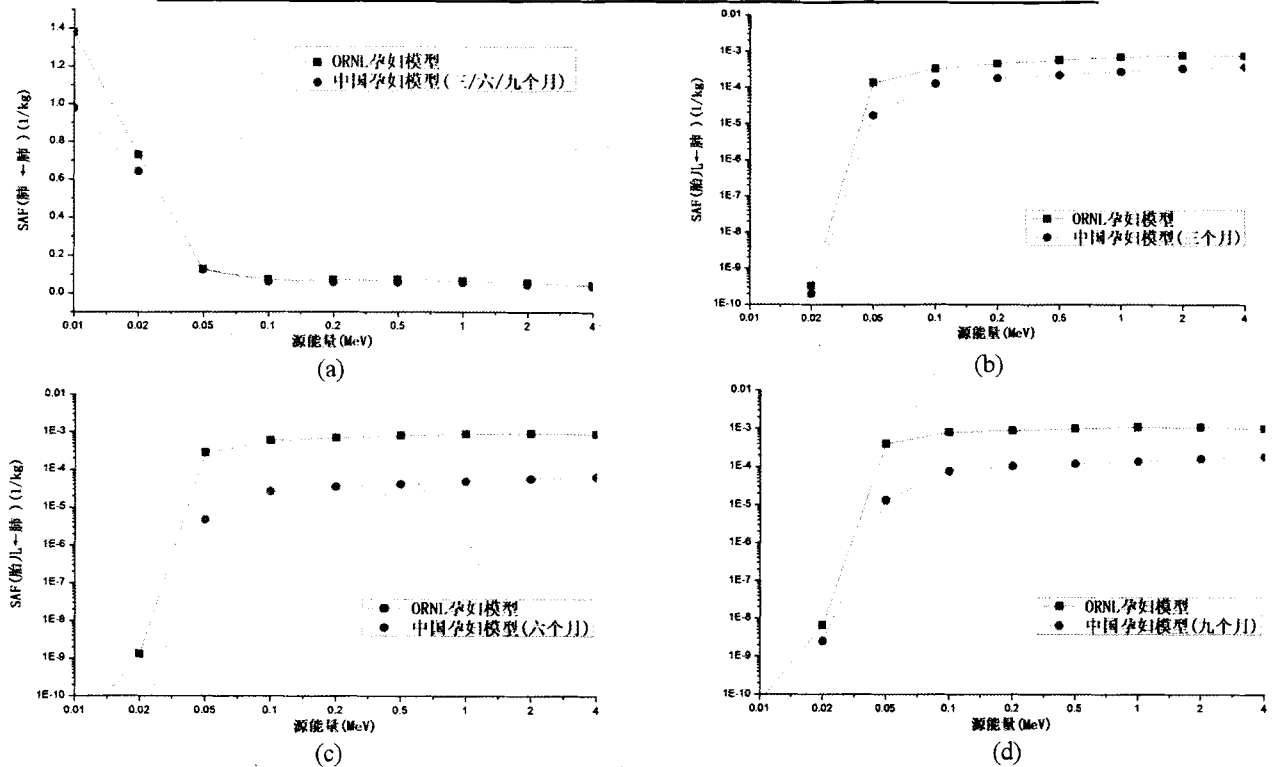


图6 以肺为源器官,中国孕妇模型与 ORNL 孕妇模型 SAF 因子对比

(a)靶器官为肾脏 (b)靶器官为胎儿(孕期三个月) (c)靶器官为胎儿(孕期六个月) (d)靶器官为胎儿(孕期九个月)

Fig.6 Comparison of SAFs by different photon energy for lungs as the source organ

(2) 在中国参考人成年女性模型中,根据ICRU46号报告采用了24种材料进行计算,而ORNL及其他数学模型则是采用软组织,肺,骨骼三种材料进行计算。

(3) 误差原因:模拟过程中,ORNL孕妇模型在低能阶段考虑了较少的物理过程,而本次的模拟中考虑了所有的物理过程,同时考虑到电子的在本文所计算能量范围内的短射程性,为节省时间而认为其直接沉积,可能会对结果有一定的影响。

2.2 S因子的计算

根据MIRD常用内照射剂量计算方法,吸收分数和比吸收分数计算得到后,由式1可进而计算源器官中各放射性核素对靶器官的S因子,进而指导内照射治疗及内照射辐射防护。本文以Ir¹⁹²,Cs¹³⁷,Co⁶⁰作为内照射源分别分布在肺和肾脏,计算了各自对胎儿的S因子,即放射性粒子衰变一次对胎儿的吸收剂量,如表2所示。

3 总结

综上所述,本研究基于中国参考人女性模型分别建立了孕期3、6、9个月的孕妇模型,此工作在国内外首

次进行。在此模型的基础上采用蒙特卡罗方法进行相应的描述,模拟了光子在人体及胎儿中的输运过程。根据MIRD内照射剂量学计算方法,计算了各源器官对胎儿及自身作为靶器官的比吸收分数,以肾脏和肺作为源器官为例将其与ORNL参考值进行了对比。同时计算了三种常用放射源分布在肺和肾脏时分别对胎儿的S因子。为我国孕妇内照射剂量学提供了理论比吸收分数数据库,并为下一步深入的探讨孕妇模型辐射防护等工作做了铺垫。

参考文献:

- [1] M. G. Stabin, E. E. Watson, M. Cristy, J. C. Ryman, K. F. Eckerman, J. L. Davis, D. Marshall, and M. K. Gehlen, Mathematical Models and Specific Absorbed Fractions of Photon Energy in the Nonpregnant Adult Female and at the End of Each Trimester of Pregnancy [S], Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-12907,1995.
- [2] M. Cristy and K. F. Eckerman, Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources. I. Methods [S], Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-8381/VI,1987.
- [3] Jing Chen, Mathematical models of the embryo and fetus for use in radiological protection[J],Health Phys,2004,86(3):285-95.
- [4] Guo, B., X. George Xu, et al. Specific absorbed fractions for internal electron emitters derived for a set of anatomically realistic reference

(下转第3095页)

表 3 两种算法机器跳数比较

Tab.3 Comparison of the MU in two algorithm

	AAA 平均值	PBC 平均值	t 值	P 值
MU	647.91-79.19	670.82-79.29	-4.79	0.000

本研究显示,在逆向调强放疗计划设计中,PGTV_{max}、PTV_{mean}、HI_{PGTV}、左肺_{mean}两种算法无显著差异($P>0.05$),PGTV_{min}、PGTV_{v95}、PTV_{min}、CI_{PTV}、心脏 V_{30} 、心脏_{mean}、脊髓_{max}、双肺 V_{20} 和 V_{30} 、机器跳数 AAA 算法的结果均明显小于 PBC 算法的结果($P<0.05$),PTV_{max}、HI_{PTV}、右肺_{mean}、双肺 V_5 和 V_{10} AAA 算法的结果均明显大于 PBC 算法的结果($P<0.05$)。

关于剂量计算算法的对比研究也有报道,Bragg 等人研究了采用 AAA 算法在前列腺癌、腮腺癌、鼻咽癌和肺癌中的应用,并与 PBC 算法结果进行了对比,同时也验证了 AAA 算法的计算结果^[3],结果表明,在前列腺癌中差别很小,采用 AAA 算法 PTV 的最小剂量稍微小一些;在腮腺计划中,AAA 稍微的增大了晶体和对侧腮腺的剂量;在鼻咽癌中降低了 $V_{95\%}$ 的体积,而在肺癌计划中产生了较大的变化,AAA 降低了 PTV 的最小剂量,相当大的降低了 $V_{95\%}$ 的体积,同时使得肺的平均剂量及 V_{20} 的体积有了较小的提高,并验证了 AAA 算法的计算结果与测量值一致。本研究结果与 Bragg 等用 AAA 算法对肺内肿瘤调强放疗计划的结果相似。

在进行不同密度介质分界面上的电子转移近似时,不同的放疗剂量算法都会遇到不同的困难。PBC 算法和 AAA 算法计算结果与蒙特卡罗算法均有差异,但误差均在 3%以内。虽然均能满足临床剂量学要求,但对低密度不均匀组织修正时两种方法的差别更

明显。

PBC 算法采用的是卷积技术和快速傅立叶变换,是一种一维能量非局部沉积算法,较为简单,大多数情况下能够较好地满足剂量计算的精度要求^[4],AAA 算法则是三维的笔型束卷积叠加算法,考虑了原射线、电子线污染以及准直器散射的影响,对不均匀介质中的剂量计算能够进行更准确的修正,因此是一种更精确的算法^[5]。

PBC 不能准确的体现射线穿过两种不同密度组织时的二次建成效应,而 AAA 算法考虑了原射线、电子线污染以及准直器散射的影响,则能够对不均匀组织给予更加准确的修正。研究结果表明,PBC 算法趋向于过高估计靶区内低密度肺组织的吸收剂量,同时欠估计肺组织内的低剂量区域。

综上所述,与 PBC 算法相比,AAA 算法对不均匀组织的修正更加准确,对于食管癌这种与不均匀组织肺相关的剂量计算,我们认为 AAA 算法是计划设计当中更合适的选择。

参考文献:

- [1] 胡逸民. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999:538-543.
- [2] 肖锋, 孙朝阳, 胡明民, 等. 三维适形及调强放疗摆位误差分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2008,25:641-642.
- [3] Bragg C M, Wingate K, Conway J. Clinical implications of the anisotropic analytical algorithm for IMRT treatment planning and verification [J]. Radiother Oncol, 2008, 86:276-284.
- [4] Knoos T, Ceberg C, Weber L, et al. The dosimetric verification of a pencil beam based treatment planning algorithms [J]. Phys Med Biol, 1994,39:169-1628.
- [5] Carlprile P, Venencia C D, Besa P. Comparison between measured and calculated dynamic wedge dose distributions using the anisotropic analytic algorithm and pencil-beam convolution [J]. J Appl Clin Med Phys, 2006,8:47-54.

(上接第 3092 页)

pregnant female models[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2010,138: 20-28.

- [5] Shi, C., X. G. Xu, et al. SAF values for internal photon emitters calculated for the RPI-P pregnant-female models using Monte Carlo methods[J]. Medical Physics, 2008,35: 3215.
- [6] 王海彦, 李君利, 等. 基于中国参考人人体数学模型的内照射剂量计算[J]. 核电子学与探测技术, 2006,915-918.
- [7] Cheatham, J. and F. Brown. Increasing MCNP5 calculation speed by

compiler optimization [M], Los Alamos National Laboratory. 2005.

- [8] Bolch, W. E., K. F. Eckerman, et al. MIRD pamphlet no. 21: a generalized schema for radiopharmaceutical dosimetry -- standardization of nomenclature [J].Journal of Nuclear Medicine , 2009,50(3): 477-84.
- [9] Parry, R. A., S. A. Glaze, et al. The AAPM/RSNA physics tutorial for residents[J]. Radiographics,1999,19(5):1289.

作者: 汤晓斌, 耿长冉, 谢芹, 陈达, TANG Xiao-bin, GENG Chang-ran, XIE Qin, CHEN Da
 作者单位: 汤晓斌, 耿长冉, 陈达, TANG Xiao-bin, GENG Chang-ran, CHEN Da (南京航空航天大学核科学与工程系, 江苏南京, 210016), 谢芹, XIE Qin (南京航空航天大学核科学与工程系, 江苏南京210016; 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃兰州730000)
 刊名: 中国医学物理学杂志 **ISTIC**
 英文刊名: Chinese Journal of Medical Physics
 年, 卷(期): 2012, 29(1)

参考文献(9条)

1. Parry, R. A.; S. A. Glaze [The AAPM/RSNA physics tutorial for residents](#) 1999(05)
2. Bolch, W. E.; K. F. Eckerman [MIRD pamphlet no. 21: a generalized schema for radiopharmaceutical dosimetry -- standardization of nomenclature](#) [外文期刊] 2009(03)
3. Guo, B.; X. George Xu [Specific absorbed fractions for internal electron emitters derived for a set of anatomically realistic reference pregnant female models](#) 2010
4. Jing Chen [Mathematical models of the embryo and fetus for use in radiological protection](#) [外文期刊] 2004(03)
5. M. Cristy; K. F. Eckerman [Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources. I. Methods](#), [Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-8381/VI] 1987
6. M. G. Stabin; E. E. Watson; M. Cristy; J. C. Ryman, K. F. Eckerman, J. L. Davis, D. Marshall, and M. K. Gehlen [Mathematical Models and Specific Absorbed Fractions of Photon Energy in the Nonpregnant Adult Female and at the End of Each Trimester of Pregnancy](#), [Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-12907] 1995
7. Cheatham, J.; F. Brown [Increasing MCNP5 calculation speed by compiler optimization](#) 2005
8. 王海彦; 李君利 [基于中国参考人人体数学模型的内照射剂量计算](#) 2006
9. Shi, C.; X. G. Xu [SAF values for internal photon emitters calculated for the RPI-P pregnant-female models using Monte Carlo methods](#) [外文期刊] 2008

本文读者也读过(10条)

1. 刘盛雄, 尹志勇, 赵辉, 杨光瑜, 陶代琴, 谢静茹, 车兴平, LIU Sheng-xiong, YIN Zhi-yong, ZHAO Hui, YANG Guang-yu, TAO Dai-qin, XIE Jing-ru, CHE Xing-ping [一种用于动物肝脏减速度撞击伤机制研究的装置及实验探讨](#) [期刊论文]-中国医学物理学杂志 2012, 29(1)
2. 王建华, 梁琦, 任常斌, 袁小燕, 杨国珍, 武建军, WANG Jian-hua, LIANG Qi, REN Chang-bin, YUAN Xiao-yan, YANG Guo-zhen, WU Jian-jun [医用电子直线加速器驻波加速管系统故障定位与安装调试方法研究](#) [期刊论文]-中国医学物理学杂志 2012, 29(1)
3. 郑建立, 张志伟, 聂生东, 杨培强, ZHENG Jian-li, ZHANG Zhi-wei, NIESheng-dong, YANG Pei-qiang [基于Ansoft的台式磁共振成像仪双平面梯度线圈的有限元分析](#) [期刊论文]-中国医学物理学杂志 2012, 29(1)
4. 高山, 陆立宇, 孙英新, 马显光, GAO Shan, LU Li-yu, SUN Ying-xin, MA Xian-guang [一种简易的眨眼动作检测方法](#) [期刊论文]-中国医学物理学杂志 2012, 29(1)
5. 姜忠, 王锋, 吴锦昌 131 I治疗甲状腺功能亢进效果与辐射吸收剂量的相关研究 [期刊论文]-南通医学院学报 2001, 21(4)
6. 贺长斌, 陈鹤, 朱勇, 茹晓莉, HE Chang-bin, CHEN He, ZHU Yong, RU Xiao-li [16层螺旋CT灌注成像在肝硬化中的临床应用研究](#) [期刊论文]-中国医学物理学杂志 2012, 29(1)
7. 石丽婉, 傅丽蓉, 哈晦明, 林勤, SHI Li-wan, FU Li-rong, HA Hui-ming, LIN Qin [胸中段食管癌根治性放疗三维适形放疗与调强放疗剂量学比较](#) [期刊论文]-中国医学物理学杂志 2012, 29(1)
8. 谭丽娜, 石梅, 柴广金, 孙晓欢, 马奎, 肖锋, TAN Li-na, SHI Mei, CHAI Guang-jin, SUN Xiao-huan, MA Kui, XIAO Feng [食管癌调强放疗计划中AAA算法与PBC算法的对比研究](#) [期刊论文]-中国医学物理学杂志 2012, 29(1)
9. 韩凤禹, 勾成俊, 侯氢, 吴章文, HAN Feng-yu, GOU Cheng-jun, HOU Qing, WU Zhang-wen [三维图像重建中基于GPU的轮廓插值加速方法](#) [期刊论文]-中国医学物理学杂志 2012, 29(1)
10. 冯俊榜, 刘玉红, 王运春, 王从辉, 袁春雪, 谭镇东, 孙林峰, 谢正祥, FENG Jun-bang, LIU Yu-hong, WANG Yun-chun, WANG Cong-hui, YUAN Chun-xue, TAN Zheng-dong, SUN Lin-feng, XIE Zheng-xiang [彩色背景下人类视觉对比度的测量](#) [期刊论文]-中国医学物理学杂志 2012, 29(1)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgyxw1xzz201201002.aspx