

# 中国孕妇曲面辐射剂量模型的构建及外照射剂量学研究

夏明琛<sup>1</sup>, 章浩伟<sup>1</sup>, 路鹤晴<sup>2\*</sup>, 刘颖<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

<sup>2</sup>同济大学附属第一妇婴保健院设备科, 上海

收稿日期: 2023年4月28日; 录用日期: 2023年5月21日; 发布日期: 2023年5月31日

## 摘要

本文基于六个月孕妇MRI图像集并结合中国参考人数据, 通过Matlab对图像进行预处理操作, 使用手动分割和自动分割相结合的方法建立三维初始器官模型, 再对初始器官进行优化并且生成NURBS曲面, 通过逆向工程三维实体建模技术并依据解剖学分布数据对其进行装配构建起中国孕妇的曲面体模BREP-P6。该模型包含30多个器官, 胎儿主要的构建部分有大脑、骨骼及软组织部分。分别计算了在五种不同标准入射条件下体外中子源( $10^{-9}$  MeV~20 MeV)所致孕妇曲面模型中胎儿剂量转换系数, 并将其结果跟RPI-P6模型进行对比。在五种入射条件下, 随着中子源能量的增加, 吸收剂量转换系数在两种模型的增长趋势基本一致, 在 $10^{-9}$  MeV~1 MeV能量区域内, 系数增长缓慢且误差较小, 在1 MeV~20 MeV能量区域内, 该系数增长较快。吸收剂量转换系数随着光子能量的增加, 呈现正增长趋势。

## 关键词

中国孕妇模型, MRI图像, BREP构建法, 中子源, 标准入射条件

# Construction of a Surface Radiation Dose Phantom and External Exposure Dosimetry Study for Pregnant Women in China

Mingchen Xia<sup>1</sup>, Haowei Zhang<sup>1</sup>, Heqing Lu<sup>2\*</sup>, Ying Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>Department of Medical Equipment, Shanghai First Maternity and Infant Hospital, Tongji University, Shanghai

Received: Apr. 28<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 21<sup>st</sup>, 2023; published: May 31<sup>st</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 夏明琛, 章浩伟, 路鹤晴, 刘颖. 中国孕妇曲面辐射剂量模型的构建及外照射剂量学研究[J]. 应用数学进展, 2023, 12(5): 2553-2560. DOI: 10.12677/aam.2023.125256

## Abstract

In this paper, based on a six-month MRI image set of pregnant women and combined with Chinese reference human data, we used Matlab to pre-process the images, combined manual segmentation and automatic segmentation to build a 3D initial organ model, then optimized the initial organs and generated NURBS surfaces, and assembled them by reverse engineering 3D solid modeling techniques and based on anatomical distribution data to build surface model BREP-P6. The model contains more than 30 organs, and the main parts of the fetus are brain, bone and soft tissue. The fetal dose conversion coefficients in the surface model of pregnant women due to *in vitro* neutron sources ( $10^{-9}$  MeV~20 MeV) were calculated under five different standard incidence conditions, and the results were compared with the RPI-P6 model. Under the five incident conditions, the growth trends of the absorbed dose conversion coefficients with increasing neutron source energy are basically the same in both models, with slow growth and small errors in the  $10^{-9}$  MeV~1 MeV energy region and faster growth in the 1 MeV~20 MeV energy region.

## Keywords

Chinese Pregnant Woman Phantom, MRI Images, BREP Construction Method, Neutron Sources, Standard Incidence Conditions

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在辐射防护、医学成像和放射治疗等领域，利用解剖学和计算机构建人体计算机模型进行辐射剂量评估一直是研究者们常用的研究方法[1]。有些研究已经表明妇女在进行胸腹部 CT 检查时，过量吸收和累积 X 射线会增加诱发乳腺癌、宫颈癌等疾病的风险[2]。据估计，每年有成千上万的妊娠患者接受 CT 检查，在接受 CT 检查的全体妇女中，约有不到 1% 的人群为孕妇[3]。近年来，随着生活水平的提高以及现代科技的快速发展，民众对于辐射敏感人群(孕妇、胎儿、儿童及育龄妇女)所受辐射剂量的关注度越来越高[4]。从二十一世纪以来，国内外学者们对孕妇计算机剂量模型的建立以及辐射剂量问题的研究呈上升趋势。在辐射防护领域，利用人体解剖学模型计算辐射剂量一直是辐射防护、医学成像和放射治疗领域的一个重要课题，人体计算模型能用来解决许多关于辐射剂量学中的问题[5]。国际上对于孕妇这类辐射敏感人群的曲面模型的构建以及辐射剂量的研究相对非辐射敏感人群来说较少[6]，其中以中国人解剖学及图像数据构建的孕妇曲面模型还未有相关研究和报道。得到中国孕妇可靠的、准确的数据图像并且基于图像数据建立一组中国孕妇辐射剂量模型并且提出特定的辐射防护方案是非常有必要的，尽可能的避免电离辐射对胎儿的影响。

本文使用了一种基于边界表示(Boundary Representation, BREP)的实体几何构造方式，参考 GBZ/T 200.2 以及 ICRP89 号出版物中子宫及胎儿部分数据，并结合多组真实磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)图像集模拟怀孕后被挤压的器官位置及形态特征。构建了一个孕期为六个月的中国孕妇及胎儿模型(以下简称 BREP-P6)，并在五种不同标准入射条件下体外中子源( $10^{-9}$  MeV~20 MeV)所致孕妇曲面模型中胎儿剂量转换系数，并将其结果跟 RPI-P6 模型进行对比。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 图像的获取

常见的图像采集工具有 CT、MRI、超声成像、X 射线和核医学显像等[7]。由于不能对孕妇采取放射性医学检查即 CT 扫描,本研究结合成像分辨率、成像质量等信息,确定采取的成像工具为 MRI。为了使得所建立的孕妇模型具有代表性,选择孕期为六个月的受检者图像。所用 MRI 影像集来自于复旦大学附属妇产科医院的一名成年孕妇的产前检查。该女子年龄为 27 岁,孕周 26 周 4 天,并在扫描前签署了知情同意书。采集设备为 PHILIPS 公司的 Ingenia CX 3.0T,图像集由 841 张 DICOM 格式的图像组成。层厚 4 mm,分辨率  $560 \times 560$ ,图像储存格式均为 DICOM。图 1 显示该孕妇的矢状面、横断面和冠状面的图像。

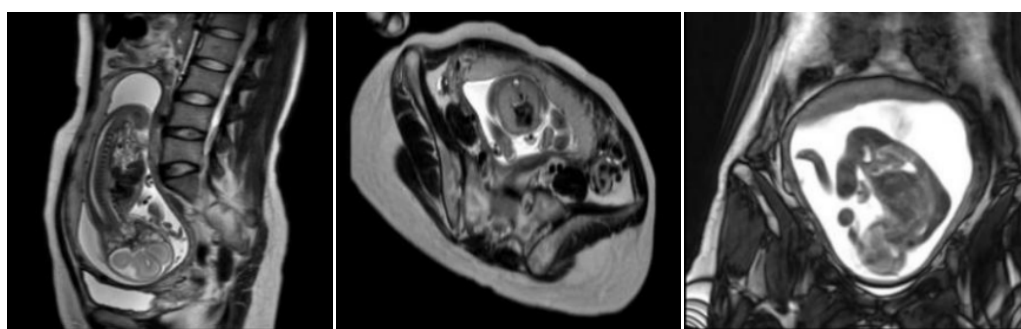


Figure 1. Different cross-sectional views of the pregnant women

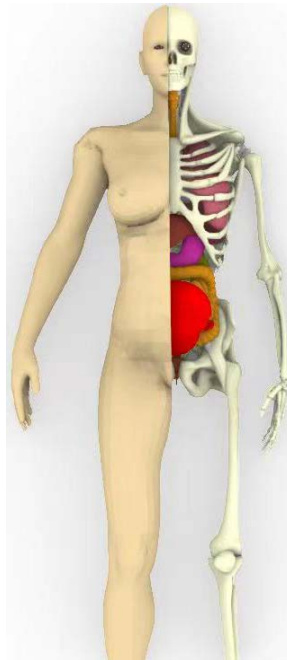
图 1. 孕妇的不同截面视图

### 2.2. 中国孕妇曲面模型的建立

首先在 Matlab 中对图像集进行了预处理操作,将处理好的图像导入到 Mimics Medical 20.0 中,利用自动和手动分割勾画器官轮廓相结合的方法,对器官或组织进行三维重建操作,本研究采取 PM 模型和 NURBS 曲面模型结合的方法构建初始器官模型。再进行初始器官装配,本研究使用手动胎儿装配方式,具体装配方法为:先将建立的胎儿脊柱、脑和软组织部分导入到 Rhinoceros7 中进行装配,装配时按照二维图像结构进行配准,再将装配好的胎儿插入子宫模型中,将子宫模型和胎儿看作一个整体单元;将胎儿整体单元手动装配进母体时,首先我们将在 MRI 图像集中分割出股骨头和脊柱作为标记点,该标记点将用来计算胎儿单元的平移和旋转,以使得 MRI 图像集中的标记点和 Rhinoceros7 装配过程中标记点的匹配,在完成胎儿单元和母体的装配后;将之前构建的 30 多个器官和组织的曲面模型分别导入到 Rhinoceros7 软件中,为了防止模型出错,将不同的器官组织分别放置在不同的图层中,再将每个器官和组织按照解剖学知识依次装入母体皮肤内,得到孕期为六个月的中国孕妇及胎儿模型(BREP-P6),渲染图如图 2 所示。

### 2.3. 蒙特卡罗方法和 MCNPX 程序

蒙特卡罗方法(Monte Carlo method)是一种统计实验方法或随机抽样技术[8],它是基于概率统计理论的模拟方法,可以更真实地模拟描述出某种随机性事件的特征[9],是按抽样调查法求取统计值来推定未知特性量的计算方法。在辐射防护领域,蒙特卡罗作为一种针对不确定事件的概率统计方法[10],能够模拟放射性粒子在人体内部各种器官组织中随机运动规律,最终得到人体某个器官或组织的能量沉积分布规律[11]。



**Figure 2.** The BREP-P6 phantom for Chinese pregnant women

**图 2.** 中国孕妇 BREP-P6 模型渲染图

MCNP 程序从诞生发展到现在, 最新的版本为 MCNP6 [12], 使用最频繁的版本为 MCNPX, 本研究用来计算中国孕妇曲面模型的外辐射剂量的程序为 MCNPX 2.5.0 版本。首先使用者需要编写一个 INP 输入文件, 将粒子源位置、运动方向、具有的能量、起始的栅元或者曲面、几何长度等信息编入 INP 输入文件内[13]。

#### 2.4. 吸收剂量计算方法

通过蒙特卡罗程序的模拟结果可以得到每个入射粒子下的器官沉积能量  $E_T$ (Gy/粒子), 通过 F6: p 记数卡记录体外光子源照射到器官或组织  $T$  的能量与质量的比值(MeV/g), 器官的体积在写入 MCNPX 程序时就已知, 再通过一定的数据处理, 即可得到器官吸收剂量转换系数和全身有效剂量转换系数。对于中子粒子, 通过单位源通量的器官吸收剂量来表示器官吸收剂量转换系数  $D_{T,R}$  (pGy·cm<sup>2</sup>) [14], 即

$$D_{T,R} = \frac{D_T}{\Phi} = 1.602 \times 10^2 \times \frac{E_T}{m_T} \times S \quad \text{式(1)}$$

式(1)中,  $D_T$  为经体外中子源照射后, 器官或组织  $T$  中吸收的剂量, Gy,

$\Phi$  为体外中子注量, cm<sup>-2</sup>,

$E_T$  为体外中子源积累在器官或组织  $T$  中的能量, MeV,

为器官或组织  $T$  的质量, g,

$S$  为平面源的面积, cm<sup>2</sup>,

$D_T/\Phi$  为注量到器官吸收剂量转换系数, pGy·cm<sup>2</sup>。

### 3. 结果与讨论

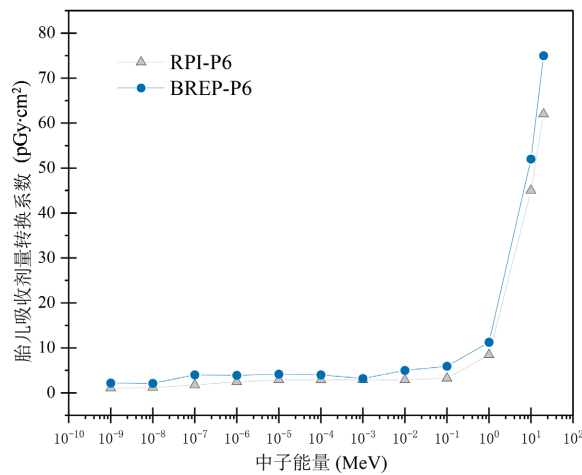
本实验主要论述体外中子源所致孕期六个月的中国孕妇曲面模型(以下简称 BREP-P6)的胎儿剂量转

换系数。表 1 为 BRER-P6 模型和 RPI-P6 模型的参数对比[15] [16] [17]。图 3 为五种标准体外入射条件下的剂量转换系数与 RPI-P6 模型的对比。本实验根据五种标准体外入射条件, 设置了 12 个中子能量点, 这些能量点分别为  $10^{-9}$  MeV、 $10^{-8}$  MeV、 $10^{-7}$  MeV、 $10^{-6}$  MeV、 $10^{-5}$  MeV、 $10^{-4}$  MeV、 $10^{-3}$  MeV、 $10^{-2}$  MeV、 $10^{-1}$  MeV、1 MeV、10 MeV 和 20 MeV, 利用蒙特卡罗的 MCNPX 程序得到了器官或组织的剂量沉积, 其中 LAT 条件下的值为 LLAT 和 RLAT 两种条件的平均值, 在通过上述计算得到吸收剂量转换系数。在同一种入射条件下, 误差与器官质量成反比, 器官质量越大, 误差往往越小。在五种入射条件下, 随着

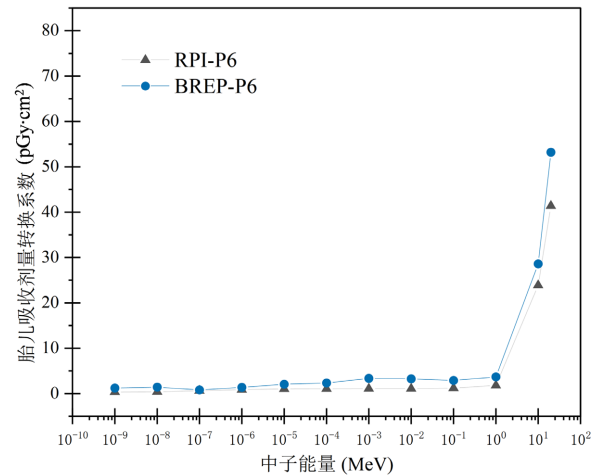
**Table 1.** Parameter comparison between the BRER-P6 model and the RPI-P6 model

**表 1.** BRER-P6 模型和 RPI-P6 模型的参数对比

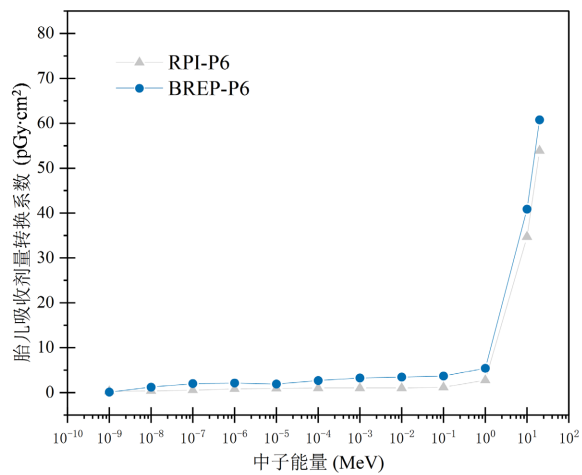
开发人员	模型名称	数据类型	实验对象	解剖学特征
X. G. Xu(2007)	RPI-P6 模型	CT 图像和网格模型	怀孕 6 个月的高加索人孕妇	基于解剖学和 ICRP89 号出版物的混合数据。调整了母体和胎儿的器官质量
Xia(2023)	BREP-P6 模型	MRI 图像集	中国孕妇, 怀孕 26 周	参考了中国孕妇的 MRI 图像, 具有中国人的体格特征, 使用了一种便于调整体积的 BREP 构建方法



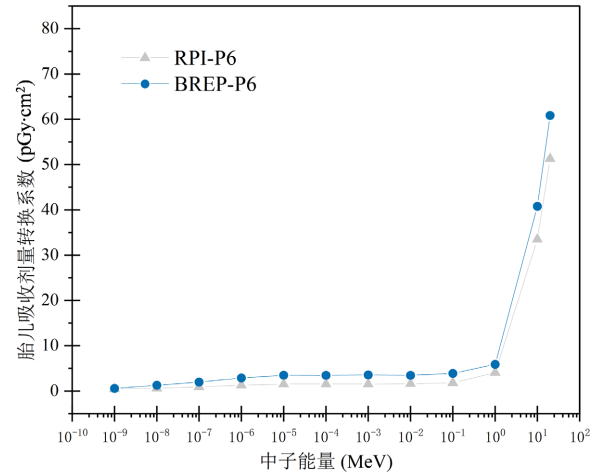
(a) AP



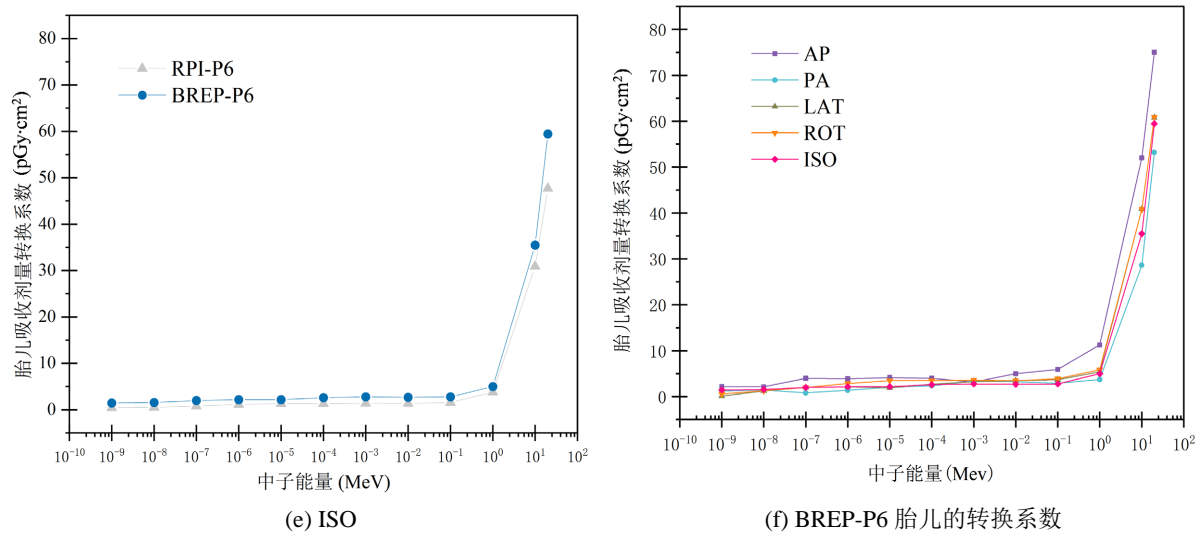
(b) PA



(c) LAT



(d) ROT



**Figure 3.** Comparison of the fetal absorption dose conversion coefficient of BREP-P6 and the RPI-P6 model

**图 3.** BREP-P6 胎儿吸收剂量转换系数与 RPI-P6 模型的对比

中子源能量的增加, 该系数在两种模型的增长曲线基本一致, 在  $10^{-9}$  MeV~1 MeV 区域内, 该系数增长缓慢, 且相对差值在 5% 左右; 在 1 MeV~20 MeV 区域内, 该系数增长迅速, 说明吸收剂量转换系数随着光子能量的增加, 呈现正增长趋势。中子能量为 20 MeV 时, 最大偏差值出现在 AP 照射条件下, 为 29.3%; 最小偏差值出现在 LAT 照射条件下, 为 13.2%。在所有照射条件下 BREP-P6 的系数均高于 RPI-P6, 导致这一原因的主要因素为模型体格差异, BREP-P6 相较于 RPI-P6 模型体型较小, 腹部脂肪层较薄。且在所有照射条件下 BREP-P6 与 RPI-P6 的最大差值均出现在 20 MeV 时, 这是由于中子随着能量的增加, 穿透力增强造成人体器官能量沉积增多所导致的。分析图 3(f) 可得, 体外中子源所致 BREP-P6 的剂量转换系数在前向入射条件下最大, 其余三种入射方式次之且趋势基本一致, 后向入射条件下转换系数最小。

#### 4. 结论

本文基于孕期六个月的孕妇 MRI 图像集, 构建了孕妇 BREP-P6 曲面模型, 还参考 MRI 图像构建了包含大脑、骨骼以及软组织的六个月大胎儿模型。进一步丰富了中国辐射剂量模型数据库, 为估算孕妇所受照射剂量提供模型。

文中孕妇曲面模型的胎儿吸收剂量转换系数与 RPI-P6 模型变化趋势基本一致, 证明本研究建立的曲面模型跟国外建立的模型相比, 一样满足体外中子源照射时的辐射防护相关研究的研究基础。由于胎儿在体内相对位置靠前, 故在前向入射条件下, 胎儿吸收剂量转换系数最大, 而在后向入射条件下, 胎儿吸收剂量转换系数最小。此外, 当中子能量高于 1 MeV 时, 该系数增长迅速, 两模型之间相对误差呈上升趋势, 这一现象主要原因与 BREP-P6 模型中碳、氢、氧和氮的百分比含量相对较高有关[18], 氢反冲核是快中子和高能中子在人体内产生相互作用的主要产物, 中子能量高于 1 MeV 时, BREP-P6 模型内的能量沉积相对较大。

孕妇的中子防护研究是非常重要的, 尤其是妊娠期刚开始的孕妇, 此时胎儿的细胞质量和活性属于旺盛时期[19], 有研究表明高能中子照射会显著提高胎儿细胞癌变的发生率, 且胎儿 DNA 片段会由于中子束的穿透而造成损伤从而导致胎儿发育畸变[20]。因此在日常生活中, 孕妇要重点注意对中子的辐射防护, 必要时可以穿戴防辐射服对粒子射线进行屏蔽。

## 基金项目

国家自然科学基金面上支持项目(82073474)。

## 参考文献

- [1] Saeed, M.K. (2021) Comparison of Estimated and Calculated Fetal Radiation Dose for a Pregnant Woman Who Underwent Computed Tomography and Conventional X-Ray Examinations Based on a Phantom Study. *Radiological Physics and Technology*, **14**, 25-33. <https://doi.org/10.1007/s12194-020-00598-9>
- [2] Li, X., Yang, K., Westra, S.J. and Liu, B. (2021) Fetal Dose Evaluation for Body CT Examinations of Pregnant Patients during All Stages of Pregnancy. *European Journal of Radiology*, **141**, Article ID: 109780. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109780>
- [3] Abadi, E., Segars, W.P., Tsui, B.M.W., et al. (2020) Virtual Clinical trials in Medical Imaging: A Review. *Journal of Medical Imaging*, **7**, Article ID: 042805. <https://doi.org/10.1117/1.JMI.7.4.042805>
- [4] Stabin, M.G., Xu, X.G., Emmons, M.A., et al. (2012) RADAR Reference Adult, Pediatric, and Pregnant Female Phantom Series for Internal and External Dosimetry. *Journal of Nuclear Medicine*, **53**, 1807-1813. <https://doi.org/10.2967/jnumed.112.106138>
- [5] Zhang, H., Sun, S., Lu, H. and Liu, Y. (2020) Construction and Application of Brep Phantom for Chinese Women of Childbearing Age in Radiation Protection. *Radiation Protection Dosimetry*, **189**, 407-419. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa056>
- [6] Shi, C. and Xu, X.G. (2004) Development of a 30-Week-Pregnant Female Tomographic Model from Computed Tomography (CT) Images for Monte Carlo Organ Dose Calculations. *Medical Physics*, **31**, 2491-2497. <https://doi.org/10.1118/1.1778836>
- [7] Xu, X.G., Taranenko, V., Zhang, J. and Shi, C. (2007) A Boundary-Representation Method for Designing Whole-Body Radiation Dosimetry Models: Pregnant Females at the Ends of Three Gestational Periods—RPI-P3, -P6 and -P9. *Physics in Medicine & Biology*, **52**, 7023-7044. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/52/23/017>
- [8] Nagaoka, T., Togashi, T., Saito, K., et al. (2007) An Anatomically Realistic Whole-Body Pregnant-Woman Model and Specific Absorption Rates for Pregnant-Woman Exposure to Electromagnetic Plane Waves from 10 MHz to 2 GHz. *Physics in Medicine & Biology*, **52**, 6731-6743. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/52/22/012>
- [9] Ange, E., Wellnitz, C.V., et al. (2008) Radiation Dose to the Fetus for Pregnant Patients Undergoing Multidetector CT Imaging: Monte Carlo Simulations Estimating Fetal Dose for a Range of Gestational Age and Patient Size. *Radiology*, **249**, 220-227. <https://doi.org/10.1148/radiol.2491071665>
- [10] Maynard, M.R., Long, N.S., Moawad, N.S., et al. (2014) The UF Family of Hybrid Phantoms of the Pregnant Female for Computational Radiation Dosimetry. *Physics in Medicine & Biology*, **59**, 4325-4343. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/15/4325>
- [11] Xie, T. and Zaidi, H. (2016) Development of Computational Pregnant Female and Fetus Models and Assessment of Radiation Dose from Positron-Emitting Tracers. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **43**, 2290-2300. <https://doi.org/10.1007/s00259-016-3448-8>
- [12] Rafat-Motavalli, L., Miri-Hakimabad, H. and Hoseinian-Azghadi, E. (2018) Hybrid Pregnant Reference Phantom Series Based on Adult Female ICRP Reference Phantom. *Radiation Physics and Chemistry*, **144**, 386-395. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.10.001>
- [13] Bozkurt, A., Chao, T.C., Xu, X.G., Bozkurt, A. and Chao, T.C. (2000) Fluence-to-Dose Conversion Coefficients from Monoenergetic Neutrons Below 20 MeV Based on The VIP-Man Anatomical Model. *Physics in Medicine & Biology*, **45**, 3059-3079. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/10/321>
- [14] Vaz, P. (2014) Radiation Protection and Dosimetry Issues in the Medical Applications of Ionizing Radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, **104**, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.02.007>
- [15] Taranenko, V. and Xu, X.G. (2008) Fluence to Absorbed Foetal Dose Conversion Coefficients for Photons in 50 keV-10 GeV Calculated Using RPI-P Models. *Radiation Protection Dosimetry*, **131**, 159-166. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncn163>
- [16] Taranenko, V. and Xu, X.G. (2008) Fluence-to-Absorbed-Dose Conversion Coefficients for Neutron Beams from 0.001 eV to 100 GeV Calculated for a Set of Pregnant Female and Fetus Models. *Physics in Medicine & Biology*, **53**, 1425-1446. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/5/017>
- [17] Taranenko, V. and Xu, X.G. (2009) Foetal Dose Conversion Coefficients for ICRP-Compliant Pregnant Models from Idealised Proton Exposures. *Radiation Protection Dosimetry*, **133**, 65-72. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncp020>
- [18] Yeom, Y.S., Griffin, K.T., Mille, M.M., et al. (2022) Fetal Dose from Proton Pencil Beam Scanning Craniospinal Ir-

radiation During Pregnancy: A Monte Carlo Study. *Physics in Medicine & Biology*, **67**, Article ID: 035003.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac4b38>

- [19] Karbalaee, M., Shahbazi-Gahrouei, D. and Tavakoli, M.B. (2017) An Approach in Radiation Therapy Treatment Planning: A Fast, GPU-Based Monte Carlo Method. *Journal of Medical Signals & Sensors*, **7**, 108-113.  
<https://doi.org/10.4103/2228-7477.205507>
- [20] Segars, W.P. (2001) Development and Application of the New Dynamic NURBS-Based CardiacTorso(NCAT) Phantom. University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, 110-156.