

# Voxel体素模型在辐射防护的应用和进展

刘倩倩<sup>1</sup>, 刘海宽<sup>1</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 孔燕<sup>2</sup>, 胡盼盼<sup>1</sup>, 卓维海<sup>1</sup>

1. 复旦大学放射医学研究所, 上海 200032; 2. 江南大学无锡市第四人民医院, 江苏 无锡 214062

**【摘要】**当机体接受放射性物质或放射线的主动或被动照射时,不可避免地受到一定的辐射损害。器官剂量和有效剂量是评估机体受到辐射危害的重要指标;然而由于其无法直接测量得到,并且不同的组织/器官对于射线的辐射敏感性不同,引起的放射性损伤程度各异,因此越来越多的研究者致力于开发计算机人体乃至动物体的仿真模型,并结合蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)统计软件模拟真实照射条件下受照者的辐射剂量在体内的分布情况。尤其是近年来根据真实机体的解剖数据构建的体素模型的迅猛发展,使得辐射防护研究水平得到较大提高。该模型结合CT断层扫描技术,由尸体的冷冻切片照片数据构建而成,更加接近真实的机体。本文简要阐述了近年来人体和动物体素模型在国内外的应用及其在国内外辐射防护领域的应用,就体素模型在该领域的研究进行了较为全面的综述,并对其面临的科研困境予以深入探讨。旨在指导后续工作能够利用更为逼真的模型更加准确地模拟计算得到真实机体无法测量的实验数据,从而更好地开展辐射防护工作。

**【关键词】**体素模型;辐射防护;剂量转换系数;辐射剂量学

**【中图分类号】**R144.1;R814.2;R312

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2015)05-0629-06

## Development and application of voxel model in radiation protection

LIU Qian-qian<sup>1</sup>, LIU Hai-kuan<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, KONG Yan<sup>2</sup>, HU Pan-pan<sup>1</sup>, ZHUO Wei-hai<sup>1</sup>

1. Institute of Radiation Medicine, Fudan University, Shanghai 200032, China; 2. Wuxi Fourth People's Hospital, Jiangnan University, Wuxi 214062, China

**Abstract:** The body will inevitably suffer some radiation damages when the body is accepting radioactive materials or radiation of active or passive exposure. Organ dose and effective dose are important indicators to assess the radiation hazards to the body. However, organ dose and effective dose cannot be measured directly, and different tissues and organs show different radiosensitivities, causing different degrees of radiation injury. More and more researchers have been dedicated to develop computational human and animal simulation models. Combined with Monte Carlo (MC) statistical software, the irradiation dose distributions of the body in the real conditions are simulated. The rapid development of the voxel model based on the anatomy data of the real body in recent years greatly improves the research on radiation protection. The voxel model is closer to the real body, because the model is combined with CT tomography and constructed by corpse frozen sections photo data. The recent development of domestic and international human and animal voxel models and their applications in radiation protection were briefly introduced, while the researches on the voxel model were comprehensively reviewed and the research difficulties were deeply discussed in this paper. The experimental data that the real body cannot be measured were more accurately simulated and calculated by applying a more accurate model in the follow-up work in order to achieve a better radiation protection.

**Key words:** voxel model; radiation protection; dose conversion coefficient; radiation dosimetry

## 前言

随着核科技在医疗卫生事业应用的不断发展,

电离辐射在造福人类的同时也带来了潜在风险。机体在主动或被动受照时,各组织器官的受照辐射剂量及其风险评估逐渐成为研究热点。而如何精确获得机体内不同器官的剂量分布,仍是辐射防护领域一项亟待攻关的难题。为了研究各种照射情形下机体的真实情况,研究者在早期尝试用各种简化的几

**【收稿日期】**2015-03-02

**【基金项目】**国家自然科学基金(11475047)

**【作者简介】**刘倩倩(1988-),女,硕士,E-mail: 13211140005@fudan.edu.cn。

**【通信作者】**刘海宽,助理研究员,E-mail: liuhk@fudan.edu.cn。

何模型来模拟生物有机体。纵观体模的发展历史,是向着越来越精细、越接近真实机体结构的方向发展的。最早由ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements)建立了ICRU球或ICRU板来近似人体;之后美国核医学会内照射剂量委员会开发了内照射剂量 (Medical Internal Radiation Dose, MIRD)模型,即数学模型,主要由均匀的规则几何如长方体、椭球体和圆柱体等构成,但仍与真实人体存在较大差距;直至近年来体素模型的出现,将人体模型在几何方面的精细程度大幅提高,它是通过CT和MRI等影像手段,将断层照片在三维尺度上重组构成的模型,能更准确模拟人体各个部位,也因而使辐射剂量评价变得更精确。利用蒙特卡罗 (Monte Carlo)计算方法和体素模型能得到更加准确的器官剂量。除了对人体模型构建外,随着人们对非人类物种辐射生物效应的关注,以及基于动物的辐射效应研究等对于辐射剂量学精度的要求,非人类体素模型的构建也开始重视起来。本文简要阐述了体素模型的发展及其在国内外辐射防护领域的应用,就体素模型在该领域的研究进行了较为全面的综述,并对其面临的科研困境予以深入探讨。

1 体素模型的发展简史

近年来飞速发展的CT断层扫描技术和计算机图形学,是体素模型开发构建的技术基础。体素 (Voxel)是指三维立体微型长方体或正方体。体素模型以体素为几何单元,根据人体解剖结构堆积而成,每个体素都代表特定的组织,并定义特定的密度和物质组成,相同物质组成的体素就构成了特定器官,成为相应组织/器官剂量计算的结构基础。

1.1 国内外人体体素模型的研究概况

随着体素模型研究的不断深入,大多数学者的关注焦点还是在辐射对人体的伤害效应上。首先从1982年开始,德国HZM研究院率先陆续建立了一系列不同年龄段、身高、体质量的体模——Donna、Baby、Golem,开创了体素模型新纪元。随后,体素越来越精细,改进的模型也更加完善,并尝试得到各种不同类别的人体模型,适用范围也更加广泛。目前已构建的体素模型见表1。

本文没有详尽地罗列所有体素模型,仅粗略地给出了近年来构建相对完善且应用相对更多的体模,为后续研究提供有利参考。另外,不同国家和机构相继进行了本土体模的研发工作,使得体素模型越来越具有代表性。有些机构建立的体模系列较全

表1 2000年以后国内外人体体素模型的研究概况  
Tab.1 Research survey of domestic and international human voxel model after 2000

Year	Author	Model type	Application
2000	Xu X <sup>[1]</sup> , et al	VIP-Man	Radioprotection
2001	Saito K <sup>[2]</sup> , et al	Adult male Otoko	Radioprotection
2004	Nagaoka T <sup>[3]</sup> , et al	Adult male and female	Radiofrequency electromagnetic field
2004	Lee C <sup>[4]</sup> , et al	Adult male KORMAN	Radioprotection
2003	Kramer R <sup>[5]</sup> , et al	Adult male MAX	Radioprotection
2004	Kramer R <sup>[6]</sup> , et al	Adult female FAX	Radioprotection
2004	Shi CY <sup>[7]</sup> , et al	Pregnant female	Radioprotection
2005	Dimbylow P <sup>[8]</sup> , et al	Adult female NAOMI	Radioprotection
2006	Kramer R <sup>[9]</sup> , et al	MAX06 and FAX06	Correction about bones
2004	Zeng Z <sup>[10]</sup> , et al	Adult male CVP	Dose assessment of space staff
2005	Zhang BQ <sup>[11]</sup> , et al	Chinese adult male	Radioprotection
2006	Lee C <sup>[12]</sup> , et al	children	Radioprotection
2007	Zhang GZ <sup>[13]</sup> , et al	Adult male VCH	Radioprotection
2007	Anonymous <sup>[14]</sup>	Reference man	Radioprotection
2010	Ferrari P <sup>[15]</sup> , et al	NUDEL	Radioprotection
2012	Liu LY <sup>[16]</sup> , et al	Adult male CRAM and adult female CREAM	Radioprotection
2012	Tang XB <sup>[17]</sup> , et al	Pregnant female	Internal radiation dosimetry of special populations
2013	Sun WJ <sup>[18]</sup> , et al	Astronauts VCH-F	Space radiation dosimetry
2013	Xu YH <sup>[19]</sup> , et al	Adult male VPCF	Radiation dosimetry
2013	Sun WJ <sup>[20]</sup> , et al	Chinese adult male	Radiation dosimetry

面地考虑了各个年龄段的儿童体模、孕妇体模、成年男性和女性体模、不同肥胖程度的成人体模,为日后个性化治疗的实现提供了可能。

1.2 国内外动物体素模型的研究概况

动物实验作为医学实验研究的基础,已经成为毒理学、基因遗传学、肿瘤病因学、药物疗效以及新药的研发等研究领域不可或缺的研究方法之一<sup>[21]</sup>。除了构建并应用人体的体素模型外,对非人类体素模型的探索也形成一大趋势。动物模型较之人体模型体积小,构建相对简单,可以更高效地进行更多的

电离辐射计量学的模拟计算和生物辐射效应评价以及肿瘤靶向治疗的实验室研究。

张晓敏、Sakae Kinase 等研究者成功地将实验小鼠体素化,探究辐射防护问题或药物的治疗效果。动物体素模型也越来越多样化,很多研究者构建了犬类体素模型、鱼类体素模型、青蛙体素模型甚至螃蟹体素模型。体素模型在辐射防护领域的应用也日益广泛。国内外现已构建的非人类物种体素模型及其应用汇总于表2。

表2 国内外动物体素模型的研究概况  
Tab.2 Research survey of domestic and international animal voxel model

Year	Author	Model type	Application
2004	Segars WP <sup>[22]</sup> , et al	4-D digital mouse	Molecular imaging study
2007	Bitar A <sup>[23]</sup> , et al	Mouse	Internal radiation dose calculation
2008	Wu L <sup>[24]</sup> , et al	Rat	Organ dose calculation
2008	Laura P <sup>[25]</sup> , et al	Canine anatomic phantom	Targeted therapy clinical dose study
2009	Boutaleb S <sup>[26]</sup> , et al	Mouse	Targeted therapy clinical dose study
2010	Zhang XM <sup>[27]</sup> , et al	Nude mouse	Internal radiation dose calculation
2010	HUST group	Rat	Internal radiation dose calculation
2010	Mohammadi A <sup>[28]</sup> , et al	Mouse	Internal radiation dose calculation
2011	Kinases <sup>[29]</sup> , et al	Mouse and frog	Internal radiation dose calculation
2013	Caffrey EA <sup>[30]</sup> , et al	Crab	Internal radiation dose calculation

2 体素模型在辐射防护领域的应用

2.1 医疗卫生领域应用

2.1.1 剂量评价

2.1.1.1 外照射——辐射剂量模拟计算 由于体素模型依照复杂的解剖学图谱得到,它的出现大大提高了辐射剂量模拟计算的准确性。对于医疗照射包括X射线摄影诊断、CT检查和牙科诊疗等,可以通过蒙卡程序设定各种体位的照射条件,模拟计算各条件下器官剂量和体表剂量<sup>[31]</sup>,用以计算得到全身有效剂量,得到辐射剂量转换系数,进而评估医疗辐射对受检者的危害。另外,当发生核(放射性)突发事件后,也可以应用体素模型模拟个体的受照情形,计算其所受辐射剂量,从而为医疗救治过程制定和采取相应应急措施提供参考。

2.1.1.2 内照射——核医学与放射性治疗 在核医学领域,放射性药物的应用是肿瘤治疗一个不可或缺的环节。靶向治疗即选择性地照射并杀伤肿瘤细胞,从而达到治疗疾病的目的。然而患者体内各组织器官的放射性核素的吸收剂量无法直接测量,加

之不同组织器官的辐射敏感性不同,用药剂量常常无法精确确定。将药代动力学模型和蒙卡模拟相结合,蒙卡程序结合体素模型可以跟踪粒子在组织器官的输运并记录其在组织器官中的能量沉积,从而可以计算出吸收分数AFs和S值,用于估算得到核医学辐射剂量<sup>[32]</sup>以及放射性药物的临床前评估<sup>[29]</sup>。另一方面,在新研发的药物试用于人体之前,通常在鼠类中开展临床前试验,确保其安全性和疗效,并重点探讨放射性药物的毒副作用。而临床前核素靶向治疗(Targeted radionuclide therapy, TRT)的试验阶段,动物体素模型架构起了吸收剂量和辐射生物效应之间联系的桥梁<sup>[23]</sup>。Jiang等<sup>[33]</sup>采用VIP-Man模型估算器官剂量,并对于质子放射治疗后发生继发肿瘤的风险性进行评估。

2.1.2 放射成像 通过构建真实几何情形和图像接收器(如IP成像板等),利用体素模型与蒙特卡罗模拟计算技术,得到受检者不同体位在成像区域的剂量分布。Ding等<sup>[34]</sup>开发了10种不同肥胖程度的人体模型,目的在于优化肥胖患者的成像质量。无疑对于



肥胖患者的剂量估算有重要意义。Gu 等<sup>[35]</sup>应用 VIP-Man 模型模拟计算图形指导下的放射治疗的器官剂量,旨在清晰成像的前提下降低器官剂量,从而优化治疗方案。

## 2.2 核物理及环境工程应用

**2.2.1 事故性外照射** 核突发事件或其他意外接触放射性物质的情况时,需要模拟接触者收到的辐射剂量,以确定辐射危害。Han 等<sup>[36]</sup>使用行走的体模来计算浓度为  $30 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$  的  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{60}\text{Co}$  平行或各向同性平面源的环境照射。发现行走的体模与静止体模相比,器官剂量高出 78%。Chao 等<sup>[37]</sup>利用蒙卡模拟外照射电子束所致机体的器官剂量。

**2.2.2 事故性内照射** 放射性核素进入机体内主要通过 3 种途径:食入、吸入或通过伤口进入。历史上发生过很多误食放射性物质的案例。然而不同的放射性物质具有特异的物理半衰期,进入机体后代谢规律和分布滞留的组织器官不同,造成的辐射危害也有很大差异。为了确定内照射的剂量分布和代谢规律,必须开发与机体动态代谢相结合的仿真模型,才能有效估算真实情况下机体的器官剂量和辐射风险,从而制定救治方案。

## 2.3 转换系数的计算

在辐射防护体系中定义了两类量:国际放射防护委员会 (International Commission on Radiation Protection, ICRP) 定义的防护量和国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 定义的实用量。有效剂量和当量剂量为防护量,在医疗照射和公众照射的防护中,经常需要估计这些防护量以评价防护策略。然而,事实上这些防护量都是无法直接测量得到的<sup>[38]</sup>。需要将防护量与空气比释动能、粒子通量等可测量的量联系起来,即将防护量与实用量及物理量(如注量等)联系起来的转换系数。如,在反应堆、高能电子加速器、质子和重离子束加速器以及深太空探测领域中,中子的辐射防护非常重要。邱睿等<sup>[39]</sup>学者开展了对中子剂量转换系数的相关研究。

# 3 体素模型存在的问题及可能的解决方案

## 3.1 红骨髓和骨表面的剂量估算

红骨髓是较为重要的辐射敏感性组织。ICRP 第 30 号出版物 (1979) 明确指出,在电离辐射照射下,骨骼中的造血干细胞以及骨内膜细胞和邻近骨表面的某些上皮细胞,存在较高致癌风险。在模拟计算这部分剂量时,假定成年人的造血干细胞不规则地分

布在骨小梁的红骨髓中,因此这部分细胞所受到的剂量,可按充满骨小梁腔体内的组织平均计算,而骨皮质给予骨髓的剂量可以忽略不计。然而这种估算必然存在一定误差,无法绝对精确地再现真实情况下红骨髓和骨表面的吸收剂量。

闫聪冲<sup>[16]</sup>采用 Site-specific 非均匀骨骼方法建立了更加合理的骨骼结构,分割出了皮质骨和松质骨,并分割出了更为精确的红骨髓和骨小梁。有研究应用直接法、MEAC 法、DRF 法和 K-S 因子法进行了红骨髓剂量的模拟计算,比较得到 K-S 因子法直接应用红骨髓的质量吸收系数计算红骨髓剂量更为合理<sup>[40]</sup>。对骨表面的剂量转换因子,徐玉海等<sup>[19]</sup>的 VPCF 模型和 ICRP74 号报告中的数学模型分别采取骨松质近似法和骨骼近似法进行计算。对于红骨髓的精确剂量研究,值得更加深入探讨。

## 3.2 眼晶体剂量估算

眼晶体位于体表浅层,对辐射较为敏感,机体长期处于辐射状态下容易引发眼晶体的放射性损伤,如眼晶体浑浊甚至白内障<sup>[41]</sup>。目前,放射工作人员在开展介入放射学手术时,对于眼晶体的防护及其屏蔽效果越来越引起研究者的关注<sup>[31]</sup>。近年来,对于放射工作人员眼晶状体剂量的相关研究主要包括对眼晶状体剂量的累积测量、对某一种铅眼镜防护效果的实际测量和模拟计算等<sup>[42]</sup>。而体素尺寸的大小,对眼晶体的模拟结果影响很大<sup>[28]</sup>。加之眼晶体结构中又分为敏感区域和非敏感区域,两者的解剖学界限无法准确界定。而类似眼晶体大小的组织在体素模型中同样存在无法精确测量的问题,如机体的淋巴结分布于全身各处,但组织权重因子较小,在模拟计算过程中误差较大。

## 3.3 皮肤剂量估算

目前普遍采用的“厚皮肤”剂量计算方法低估了 30 keV 以下能量的皮肤剂量,而高估了 400 keV 以上能量的皮肤剂量。闫聪冲等<sup>[16]</sup>在光子外照射皮肤剂量计算方面,提出了更为简单的“等效质量厚度”(Equivalent Mass-Thickness, EMT) 计算方法,将体素模型、ICRP 生物动力学模型以及 Monte Carlo 模拟计算结合起来,建立了等效活体测量的动态虚拟刻度方法,弥补了目前国际上普遍采用的“厚皮肤”直接计算方法的不足。然而,皮肤这一器官在不同的身体部位厚度不同,如皮肤最厚处是脚底,最薄处为眼睑,因此其剂量估算的准确度仍有待商榷。

## 3.4 代表性和准确性

体素模型的构建复杂繁琐,虽然在人群中有一

定的代表性,但无法真实地反映个体间的差异对辐射剂量的影响。个体间本身具有一定的差异性,器官的大小和位置及其形状因人而异,根据不同人体构建的体素模型得到的模拟结果必定有所差别。而且构建模型的体素尺寸的大小不同,会影响模拟计算结果的准确性,体素越小越接近真实情形<sup>[28]</sup>。

### 3.5 动态模拟

最后,生命有机体有着复杂的防御和免疫系统,能对外来射线的伤害做出趋利避害的自我保护效应,然而体素模型是静止不动的,无法再现机体动态变化的复杂生命过程。一旦进入机体,会由呼吸系统和循环系统的参与分布于身体各个部位,并符合药代动力学,随着时间的推移和代谢过程致使浓度发生变化。进而对机体各组织器官产生的损伤是一个动态变化的过程。然而大多数模型模拟内照射时均采用的是均匀放射源<sup>[16]</sup>,无法达到动态变化的内照射情形,与机体真实情况有不可避免的差异。潘羽晞等<sup>[42]</sup>将体素模型、生物动力学模型和蒙特卡罗模拟计算相结合进行动态虚拟刻度,并开展了人体内核素不均匀分布对全身计数器和肺部计数器测量结果的影响研究。

## 4 展望

体素在分割过程中存在不可避免的分析误差,经过各种处理后可能会使误差增大。另外应尽可能地缩小体素大小,使其更加接近真实人体,模拟结果也会更加精确。但是随着体素尺寸变小,构成机体的体素数目、模型构建的工作量和难度会相应增大,也会延长蒙特卡罗计算的时间。因此,计算机技术的发展直接关系了体素模型的计算成本。

体素模型是应辐射卫生防护标准要求并在辐射防护实践中估算内外照射剂量的强烈需求下而兴起和发展起来的。研究者最初仅考虑到了特定的职业环境和单一的参考模型,随着核技术和医疗卫生事业的飞速发展,体素模型的开发也涉及了不同的地域和一系列不同年龄段不同性别的参考人体素模型。在此基础上,越来越多的动物体素模型也应用于实验研究,为肿瘤的放射治疗和药代动力学研究提供强有力的实践基础。此外,ICRP参考人模型仅代表特定人群,随着社会的进步,考虑到全世界各个国家的地理地形、生活规律、饮食结构和体质体型不同,将会有越来越多的国家致力于开发符合自身民族特点的参考人体素模型,从而更加真实可靠地估算辐射剂量。而且人与人生理结构有很大差异,在放射诊疗中,尤其注重患者的个性化治疗,亟待解决

模型个体化的难题。

## 【参考文献】

- [1] Xu XG, Chao TC, Bozkurt A. VIP-Man: An image-based whole-body adult male model constructed from color photographs of the visible human project for multi-particle Monte Carlo calculation[J]. Health Phys, 2000,78: 476-486.
- [2] Saito K, Wittmann A, Koga S, et al. Construction of a computed tomographic phantom for a Japanese male adult and dose calculation system[J]. Radiat Environ Biophys, 2001, 40: 69-76.
- [3] Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, et al. Development of realistic high resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight and application of models to radio-frequency electromagnetic field dosimetry[J]. Phys Med Biol, 2004, 49: 1-15.
- [4] Lee C, Lee J, Lee C. Korean adult male voxel model Korman segmented from magnetic resonance images[J]. Med Phys, 2004, 31(5): 1017-1022.
- [5] Kramer R, Vieira JW, Khoury HJ, et al. All about MAX: a male adult voxel phantom for Monte Carlo calculations in radiation protection dosimetry[J]. Phys Med Biol, 2003, 48(10): 1239-1262.
- [6] Kramer R, Khoury HJ, Vieira JW, et al. All about FAX: a female adult voxel phantom for Monte Carlo calculation in radiation protection dosimetry[J]. Phys Med Biol, 2004, 49(23): 5203-5216.
- [7] Shi CY, Xu XG. Development of a 30-week-pregnant female tomographic model from computed tomography (CT) images for Monte Carlo organ dose calculations[J]. Med Phys, 2004, 31(9): 2491-2497.
- [8] Dimbylow P. Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields[J]. Phys Med Biol, 2005, 50(6): 1047-1070.
- [9] Kramer R, Khoury HJ, Vieira JW, et al. MAX06 and FAX06: update of two adult human phantoms for radiation protection dosimetry[J]. Phys Med Biol, 2006, 51(14): 3331-3346.
- [10] 曾志, 李君利, 邱睿, 等. 质子剂量微分谱预估空间辐射剂量[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(3): 374-376.  
Zeng Z, Li JL, Qiu R, et al. Differential spectra of proton dose of space radiation dose estimates[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science), 2006, 46(3): 374-376.
- [11] Zhang BQ, Ma JZ, Liu LY, et al. CNMAN: A Chinese adult male voxel phantom constructed from color photographs of a visible anatomical data set[J]. Radiat Prot Dosim, 2007, 124(2): 130-136.
- [12] Lee C, Lee C, Williams JL, et al. Whole-body voxel phantoms of paediatric patients-UF series B[J]. Phys Med Biol, 2006, 51(18): 4649-4661.
- [13] Zhang GZ, Luo QM, Zeng SQ, et al. The development and application of the visible chinese human model for Monte Carlo dose calculations[J]. Health Phys, 2008, 94(2): 118-125.
- [14] Anonymous. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP publication 103[J]. Annals of the ICRP, 2007, 37: 2-4.
- [15] Ferrari P. Development of an integrated couple of anthropomorphic models for dosimetric studies[J]. Radiat Prot Dosim, 2010, 142(2-4): 191-200.
- [16] 闫聪冲, 邱睿, 刘立业, 等. 中国参考人数字体素体模及其在辐射防护领域的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(7): 911-916.

- Yan CC, Qiu R, Liu LY, et al. The development and application of Chinese reference digital voxel phantom for radiation protection[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science), 2012, 52(7): 911-916.
- [17] 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): 3088-3092.
- Tang XB, Geng CR, Xie Q, et al. The development of Chinese reference pregnant female phantom and application in internal radiation dosimetry[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2012, 29(1): 3088-3092.
- [18] Sun WJ, Jia XH, Xie TW, et al. Construction of boundary-surface-based Chinese female astronaut computational phantom and proton dose estimation[J]. J Radiat Res, 2013, 54(2): 383-397.
- [19] 徐玉海, 李桃生. 一个中国成年女性体素模型的建立及辐射剂量学应用[J]. 辐射防护, 2013, 33(1): 8-15.
- Xu YH, Li TS. The development and application of a Chinese adult female voxel phantom for radiation protection[J]. Radiation Protection, 2013, 33(1): 8-15.
- [20] 孙文娟, 谢添武, 韩 道, 等. 中国数字人体男性数学模型建立及外辐射模拟[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(1): 182-188.
- Sun WJ, Xie TW, Han D, et al. The development of Chinese adult male digital voxel phantom for external radiation simulation[J]. Laser and Particle Beams, 2013, 25(1): 182-188.
- [21] 白雪岭, 刘 谦, 余 雳, 等. 适于小动物研究的断层解剖成像系统[J]. 航天医学与医学工程, 2006, 19(1): 62-65.
- Bai XL, Liu Q, Yu L, et al. Sectional anatomy imaging system suitable for small animal studies[J]. Space Medicine and Medical Engineering, 2006, 19(1): 62-65.
- [22] Segars WP, Tsui B, Frey EC, et al. Development of a 4-D digital mouse phantom for molecular imaging research[J]. Mol Imaging Biol, 2004, 6(3): 149-159.
- [23] Bitar A, Lisbona A, Thedrez P, et al. A voxel-based mouse for internal dose calculations using Monte Carlo simulations (MCNP)[J]. Phys Med Biol, 2007, 52(4): 1013-1025.
- [24] Wu L, Zhang G, Luo Q, et al. An image-based rat model for Monte Carlo organ dose calculations[J]. Med Phys, 2008, 35(8): 3759.
- [25] Laura P. Canine anatomic phantom for preclinical dosimetry in internal emitter therapy[J]. J Nuclear Med, 2008, 49(3): 446-452.
- [26] Boutaleb S, Pouget JP, Hindorf C, et al. Impact of mouse model on preclinical dosimetry in targeted radionuclide therapy[J]. Proc IEEE, 2009, 97(12): 2076-2085.
- [27] 张晓敏, 潘 洁, 谢向东, 等. 利用MC方法计算小鼠体内辐射剂量的体素模型的建立[J]. 军事医学科学院院刊, 2010, 34(1): 43-45.
- Zhang XM, Pan J, Xie XD, et al. A voxel model constructed for calculating mouse internal radiation dose using MC method[J]. Journal of Military Medical Science, 2010, 34(1): 43-45.
- [28] Mohammadi A, Kinase S. Influence of voxel size on specific absorbed fractions and S-values in a mouse voxel phantom[J]. Radiat Prot Dosim, 2011, 143(2-4): 258-263.
- [29] Kinase S, Mohammadi A, Takahashi M, et al. Computer simulations for internal dosimetry using voxel models[J]. Radiat Prot Dosim, 2011, 146(1-3): 191-194.
- [30] Caffrey EA, Higley KA. Creation of a voxel phantom of the ICRP reference crab[J]. J Environ Radioact, 2013, 120: 14-18.
- [31] Kong Y, Struelens L, Vanhavere F, et al. Influence of standing positions and beam projections on effective dose and eye lens dose of anaesthetists in interventional procedures[J]. Radiat Prot Dosim, 2015, 163(2): 181-187.
- [32] Lamart S, Bouville A, Simon SL, et al. Comparison of internal dosimetry factors for three classes of adult computational phantoms with emphasis on I-131 in the thyroid[J]. Phys Med Biol, 2011, 56(22): 7317.
- [33] Jiang H, Wang B, Xu XG, et al. Simulation of organ-specific patient effective dose due to secondary neutrons in proton radiation treatment[J]. Phys Med Biol, 2005, 50(18): 4337-4353.
- [34] Ding A, Mille MM, Liu T, et al. Extension of RPI-adult male and female computational phantoms to obese patients and a Monte Carlo study of the effect on CT imaging dose[J]. Phys Med Biol, 2012, 57(9): 2441-2459.
- [35] Gu J, Bednarz B, Xu XG, et al. Assessment of patient organ doses and effective doses using the VIP-Man adult male phantom for selected cone-beam CT imaging procedures during image guided radiation therapy[J]. Radiat Prot Dosim, 2008, 131: 431-443.
- [36] Han B, Zhang J, Na YH, et al. Modelling and Monte Carlo organ dose calculations for workers walking on ground contaminated with Cs-137 and Co-60 gamma sources[J]. Radiat Prot Dosim, 2010, 141(3): 299-304.
- [37] Chao TC, Bozkurt A, Xu XG. Conversion coefficients based on the VIP-Man anatomical model and EGS4-VLSI code for external monoenergetic photons from 10 keV to 10 MeV[J]. Health Phys, 2003, 84(3): 389-398.
- [38] International CORP. Con-version coefficients for use in radiological protection against external radiation[J]. Annals of the ICRP, 1996, 26(3-4): 205.
- [39] 邱 睿, 李 华, 李君利, 等. 基于中国人体素模型CVP的中子剂量转换系数[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(7): 906-910.
- Qiu R, Li H, Li JL, et al. Neutron dose transform coefficient based on Chinese voxel phantom (CVP) [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science), 2012, 52(7): 906-910.
- [40] Farah J. A correlation study of eye lens dose and personal dose equivalent for interventional cardiologists[J]. Radiat Prot Dosim, 2013, 157(4): 561-569.
- [41] 胡盼盼, 卓维海, 孔 燕, 等. 铅眼镜对介入放射工作人员眼晶状体的防护效果研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2014, 34(12): 927-930.
- Hu PP, Zhuo WH, Kong Y, et al. Shielding effect of lead glasses on eye lens exposure in interventional radiologists[J]. Chinese Journal of Radiological Protection, 2014, 34(12): 927-930.
- [42] 潘羽晞, 邱 睿, 刘立业, 等. 辐射防护用中国参考人体素模型建立、应用及最新进展[J]. 辐射防护, 2014, 34(4): 199-205.
- Pan YX, Qiu R, Liu LY, et al. The build, application and the latest development of Chinese reference adult voxel phantom for radiation protection[J]. Radiation Protection, 2014, 34(4): 199-205.