

# 基于NURBS曲面的中国儿童参考人曲面模型的建立

章浩伟<sup>1\*</sup>, 任天钰<sup>1</sup>, 刘颖<sup>1</sup>, 路鹤晴<sup>2#</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2月13日; 录用日期: 2023年3月8日; 发布日期: 2023年3月15日

## 摘要

目的: 建立一组用于评测能谱CT下儿童受检者所受辐射剂量的中国儿童参考人曲面模型。方法: 基于上海市第一妇婴保健院提供的近年出生的中国儿童真实CT扫描影像, 采用NURBS曲面重构的方法构建组织和器官, 构建包括0.25岁、1岁、5岁和10岁中国儿童曲面模型, 其中5岁和10岁模型区分性别。结果: 体模各器官位置和形态符合中国儿童解剖学特征, 并且各组织和器官的质量与中国辐射防护用参考人参数相近, 可以体现当代儿童的体格特征。结论: 中国儿童曲面模型组可用于准确计算新能谱CT成像技术条件下儿童的辐射剂量, 这对于合理降低中国儿童受检者辐射剂量具有重要意义。

## 关键词

儿童体模, 中国参考人, 能谱CT, 曲面模型

# Establishment of Chinese Children's Reference Human Surface Model Based on NURBS Surface

Haowei Zhang<sup>1\*</sup>, Tianyu Ren<sup>1</sup>, Ying Liu<sup>1</sup>, Heqing Lu<sup>2#</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 Affiliated to Tongji University, Shanghai

Received: Feb. 13<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 8<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 15<sup>th</sup>, 2023

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 章浩伟, 任天钰, 刘颖, 路鹤晴. 基于 NURBS 曲面的中国儿童参考人曲面模型的建立[J]. 应用数学进展, 2023, 12(3): 953-961. DOI: 10.12677/aam.2023.123097

## Abstract

**Objective:** To establish a set of Chinese children reference human surface models for evaluating the radiation dose of child subjects under energy spectrum CT. **Methods:** Based on the real CT scan images of Chinese children born in recent years provided by Shanghai First Maternal and Infant Health Hospital, tissues and organs were constructed by using NURBS surface reconstruction method, and the surface models of Chinese children aged 0.25, 1, 5 and 10 were constructed, among which the 5 and 10 years old models were gender differentiated. **Results:** The position and shape of the organs of the body model are consistent with the anatomical characteristics of Chinese children, and the quality of the tissues and organs is similar to the parameters of the reference human for radiation protection in China, which can reflect the physical characteristics of contemporary children. **Conclusion:** The Chinese children curved surface model group can be used to accurately calculate the radiation dose of children under the condition of new energy spectrum CT imaging technology, which is of great significance for reducing the radiation dose of Chinese children.

## Keywords

Children's Body Model, Chinese Reference, Energy Spectrum CT, Surface Model

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

能谱 CT 成像技术已成为 CT 高级临床应用的发展方向, 能谱 CT 辐射源特性与常规 CT 不同, 还没有建立精准研究方法和评价标准及评价体系。目前能谱 CT 的辐射剂量与影像质量评价以及最优化匹配尚没有系统性的研究, 国内外研究仍处于起步阶段。电离辐射所致人体和器官剂量可直接表现射线对人体可能造成的损伤, 所以对辐射剂量进行准确评估具有重要意义[1]。而评估受检者辐射剂量是至关重要的, 由于难以通过探测器直接测量器官剂量, 因此借助计算机人体模型利用蒙特卡罗方法估算剂量成为准确评估剂量的重要手段。

儿童受检者作为辐射敏感特殊人群正处于生长发育的关键时期, 对辐射具有较高的敏感性[2]。国际放射防护委员会 ICRP102 号报告指出, 全球 CT 检查的应用频率在过去二十年迅速增长, 随着 CT 检查在儿童疾病诊断中应用更广泛, 其中儿童约占 CT 检查人群的 10% 以上[3]。目前新冠疫情进入疫情常态化阶段, 国内外感染新冠的儿童人数逐步增多, 放射学 CT 扫描技术成为诊断新冠确诊病例与无症状感染者及评价新冠患者病情的重要手段[4], 因此儿童将受到更多的医疗照射可能性。CT 检查引起的照射会增加发生潜在疾病的风险, 尤其是正处于生长发育期的儿童, 其对电离辐射也更加敏感, 同样的照射剂量下儿童存在更高的患病率与致死率[5]。评价受检者辐射剂量所采用的物理表征量是器官剂量与有效剂量, 而受检者辐射剂量多采用蒙特卡罗方法结合参考人曲面模型进行仿真模拟估算。

目前, 辐射防护用儿童人体模型已经有很大进展。国外已经建立了符合自己本国人群生理参数的儿童参考人曲面模型, 美国 Choonsik 等基于 CT 影像数据构建包含 1 岁、5 岁、10 岁和 15 岁儿童的 NURBS 表面模型库[6], UF family。日本 Tomoaki 在已有的成年人模型基础上, 通过变形技术建立身高和体重符合标准日本 3 岁、5 岁和 7 岁儿童的模型[7]。国际辐射防护委员会(ICRP)第 103 工作组完成了儿科网格

型参考计算模型(MRCP)的开发, 包括 10 个模型(新生儿、1 岁、5 岁、10 岁和 15 岁男性和女性) [8], 解决了 ICRP 出版物 143 的儿科参考计算模型的局限性, 这些模型采用体素格式。儿科 MRCP 是通过将体素型参考模型转换为高质量网格格式来构建的, 在小而复杂的器官和组织(如骨骼、淋巴结)的详细解剖结构中有显著增强。但是 ICRP 报告中参考人的数据是基于高加索人种得到的, 不符合中国儿童的生理参数, 并不适用于国人, 因此有必要建立符合中国儿童体格特征与器官位置的体模用于评估辐射剂量。

国内虽已有儿童参考人曲面模型, 但还未有系统的儿童参考人曲面模型的研究。中国科学技术大学将已建立的符合 ICRP 参考人数据的成年男女面元模型(RIP-AM、PIR-AF)进行分段缩放和调整, 建立了符合 GBZ/T200《辐射防护用参考人》标准的中国儿童参考人面元模型[9]。清华大学根据 1 岁儿童物理体模(Model 704-D)的 CT 扫描图像建立了符合中国儿童参考人特征的体素模型(CPP01) [10], 模型 CPP01 的器官和骨骼是通过缩放成年人得到的。由于儿童的骨骼发育水平、部分器官形态和相对位置与成人差距较大, 因此儿童体模 CPP01 不能准确表现中国儿童的解剖学特性。又基于中国儿童真实 CT 扫描图像建立了 10 岁中国儿童参考人面元体模[11], 该模型采用多边形网格模型与 NURBS 曲面模型相结合的方法构建了 85 个器官, 经过优化和调整, 各组织和器官质量与 GBZ/T200.2-2007 和亚洲参考人的参考值差异小于 1%, 各器官位置和形态符合中国儿童解剖学特征。接着其工作组开发了儿童参考模型系列, 包括 3 个月(CRC3m)、1 岁(CRC01)、5 岁(CRC05)、10 岁(CRC10)、15 岁男性(CRCM15)和 15 岁女性(CRCF15)模型, 图 1 为其开发的网格型中国儿童参考模型系列[12]。

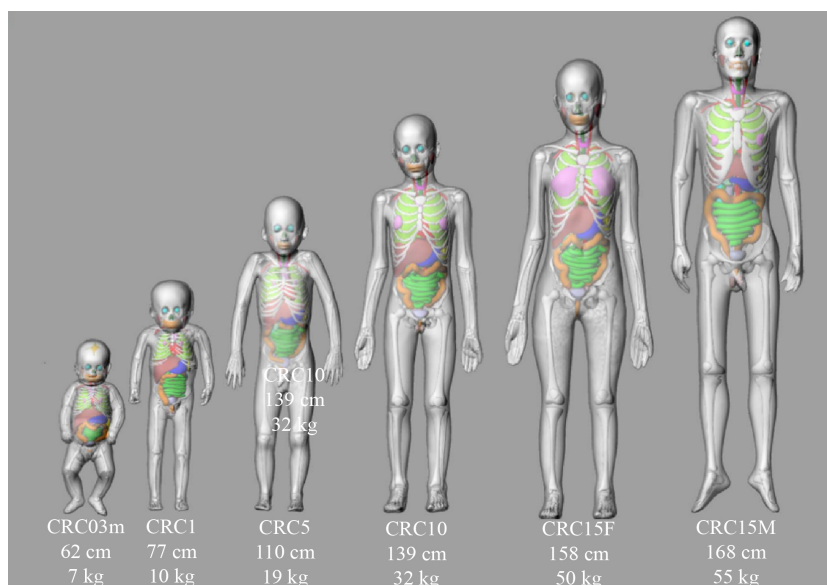
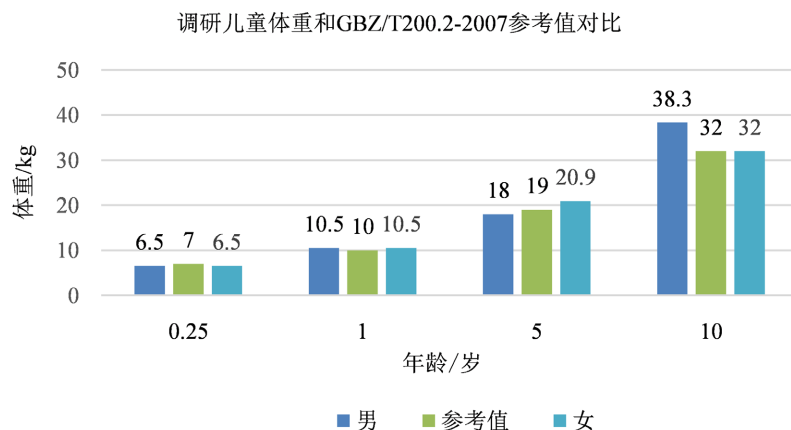


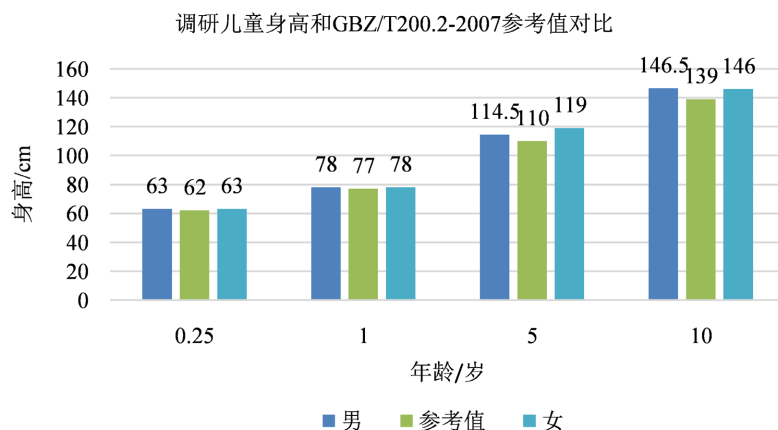
Figure 1. Schematic diagram of the child's reference human meta-model

图 1. 儿童参考人面元模型示意图

现有的儿童参考人模型均是基于较早年代的儿童生理参数建立的, 而当代同一年龄段儿童生理参数由于营养结构变化等因素而发生变化[13], 根据调研的儿童体格数据来看, 近几年儿童的体格数据与 GBZ/T200.2-2007 的参考值对比有小幅度增长, 因此现有的儿童参考人模型已经不能准确反映我国当代儿童的身体特征。本文调研的儿童体格数据来自上海市第一妇婴保健院, 其中 0.25 岁、1 岁、5 岁男孩、5 岁女孩、10 岁男孩和 10 岁女孩数据各 30 例, 0.25 岁和 1 岁儿童未区分性别。图 2 和图 3 为调研的儿童身高体重数据和 GBZ/T200.2-2007 参考值的对比。



**Figure 2.** Children's weight and GBZ/T200.2-2007 reference value comparison  
**图 2.** 儿童体重和 GBZ/T200.2-2007 参考值对比



**Figure 3.** Children's height and GBZ/T200.2-2007 reference value comparison  
**图 3.** 儿童身高和 GBZ/T200.2-2007 参考值对比

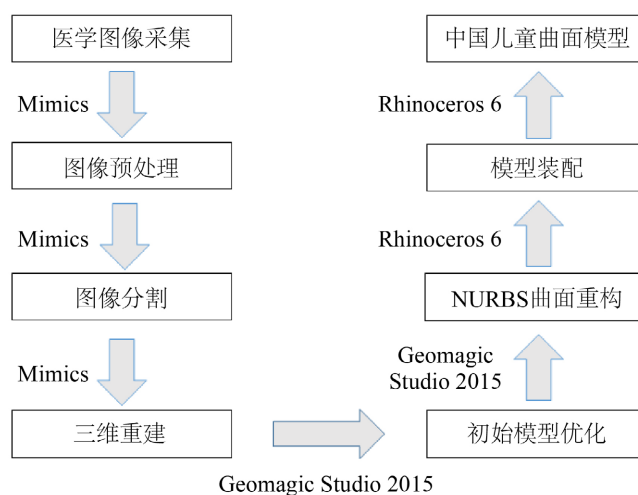
目前中国辐射防护用参考人中 10 岁以前(包括 10 岁)的身高体重男女并无差异,但图中体现出当代男女儿童体格数据上较参考值有所增长,并且 10 岁男童的体重数据较中国辐射防护用参考人有明显增加,因此需要重新构建中国儿童参考人模型。本文基于近几年的中国儿童 CT 影像构建一套不同年龄的中国儿童参考人曲面模型,包括新生儿 0.25 岁、1 岁、5 岁和 10 岁的男性和女性人体模型,后续可用于能谱 CT 所致儿童受检者的辐射剂量评估。

## 2. 体模构建

数字化虚拟参考人模型在为各类人群制定辐射防护方案的过程中,具有不可替代的作用。从发展历史和模型的性质来看,分为数学模型、体素模型和曲面模型。与使用圆柱体、封闭二次曲面建模的数学模型相比,曲面模型可真实反映人体器官形态和相对位置,在剂量评估中更高的精度。体素模型有局限性,任何实际尺寸的体素都无法再现精细结构,其中一些器官对于辐射防护非常重要,如眼睛的晶状体等,这些组织吸收剂量的计算必须依赖于专门的部分人体模型。相比于体素模型,曲面模型能很好地保证人体内部细微结构地高精度和部分结构由生理运动导致地可变性[14],易于通过灵活的变形操作反映人体在辐射场中的不同姿态和不同体格人的身体和器官形态,同时曲面模型也可描述呼吸道壁等使用体素

模型难以描述的组织，具有更高的精确性。

本文构建了一系列中国儿童参考人曲面模型，模型的器官质量和位置与中国参考儿童的解剖学特征一致。体模构建过程为 CT 图像分割、器官优化、NURBS 曲面重构、模型装配及微调，流程如图 4 所示。模型基于逆向工程的三维实体建模技术，对初始重建的器官进行优化并构建 NURBS 曲面模型，对所有的器官和组织的曲面模型进行调整和装配，从而得到中国儿童曲面模型，为后续能谱 CT 所致儿童受检者的辐射剂量估算做准备。



**Figure 4.** The construction process of Chinese children's curved surface model

**图 4.** 中国儿童曲面模型的构建流程

本研究拟建立一个符合我国当代儿童身体特征的参考人曲面模型组，包含 0.25 岁、1 岁、5 岁男性、5 岁女性、10 岁男性和 10 岁女性的曲面体模。ICRP103 工作组和清华实验室完成的儿科网格型参考计算模型中包括 15 岁的男性和女性，目前 15 岁儿童在外观上已接近成年人，故不在本研究对象范围。儿童 5 岁之前，性别器官不太明显，身体各器官的组成相似，因此，对于 5 岁之前的年龄组，本文儿童参考人曲面模型的构建与性别无关。

## 2.1. CT 扫描图像与分割

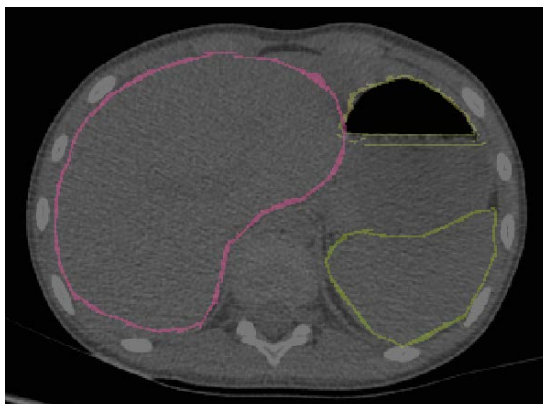
本文所用 CT 影像为同济大学附属第一妇婴保健院提供的不同年龄儿童不同体段的 CT 扫描图像。本文建立模型基础 CT 图像由不同儿童的头部、颈部、胸腹部、盆部和足部扫描图像分割拼接而成。

为使得本文建立的儿童体模具有代表性，在选取 CT 扫描图像时，所对应的儿童受检者身高、体重与中国辐射防护用参考人中提供的各年龄儿童参考人的数值差异并没有太大。同时，体模建立过程中应对身体轮廓、器官形态和质量进行一定的调整，通过调整优化使体模的体格参数及器官质量尽量符合中国儿童参考人的数值。

建立儿童体模首先进行图像分割，将 CT 扫描图像导入 MIMICS 软件，对 CT 影像文件进行阈值分割、蒙版编辑、区域生长、三维重建等操作。通过使用中值滤波操作以增加 CT 图像中器官的对比度，这提高了 CT 图像的质量，便于后续的器官手动分割。由于 CT 扫描对软组织的分辨能力弱，导致影像中器官边缘不明显，因此分割腹腔等部位器官时需要一定的解剖学知识和经验，本工作在专业医师指导下对器官进行准确分割。图 5 为腹腔 CT 图像的分割。将分割得到的器官轮廓利用 MIMICS 的三维重建功



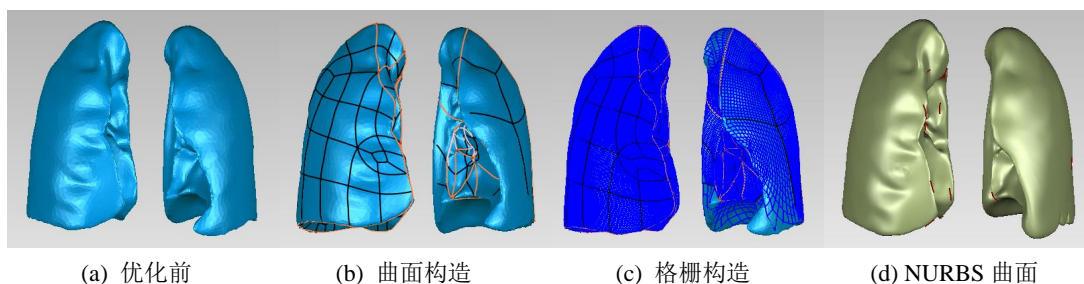
能导出 STL 格式的几何模型。



**Figure 5.** Segmentation of CT images of abdominal cavity  
**图 5.** 腹腔 CT 图像的分割

## 2.2. 器官优化

本文中使用了真实的中国儿童的 CT 图像并对其进行了三维重建，得到了不同器官和组织的几何模型。对于新生儿以及 1 岁儿童一些分割不清晰的器官，为了使模型更加精准，减少其对蒙特卡罗模拟计算的影响，主要通过 Geomagic Studio 2015 软件中多边形处理模块对不同器官和组织的几何模型进行优化。将前面所建立的三维几何模型导入 Geomagic Studio 2015 软件中，首先删除模型表面的钉状物和光滑三角网格；然后修复模型内部相交的区域、消除重叠的三角形；最后进行简化三角面片数量、松弛多边形以及创建流形等操作。在构造参数化曲面模块下，首先绘制器官模型的轮廓线，并对其进行松弛、收缩、合并、细分或者延伸等处理改变器官的轮廓使其更加接近真实器官；其次，探测器官模型的曲率线，并对其进行升级或约束处理；然后移动和修复曲面片；最后，对曲面片进行格栅构造、编辑以及简化处理，即可获得器官的 NURBS 曲面模型。图 6 所示为肺的 NURBS 曲面构建过程。



**Figure 6.** NURBS surface construction process of lung  
**图 6.** 肺的 NURBS 曲面构建过程

## 2.3. 器官装配

本文使用 Rhinoceros 6.0 软件来装配和整合这些模型，装配时保证人体处于正直站立状态，且使体模身高与参考人数据相同。将多个器官和组织的 NURBS 模型分别导入犀牛软件，并将其置于不同的图层中。皮肤、骨骼以及其他未建立的微小器官和组织直接利用犀牛软件强大的 NURBS 建模功能进行建模，并通过各种缩放工具进行调整，使其形状、质量均符合中国辐射防护用参考人的参数。肌肉和脂肪在本

研究中不是重点研究的对象，并且 CT 值较为近似，所以将其统一定义为其余组织。将以上所有器官、组织的相对位置进行调整和装配，并确保各个器官和组织之间没有重叠，进而得到中国儿童曲面模型，以 OBJ 格式保存导出。

### 3. 曲面体模构建结果

依照上述方法建立了中国儿童参考人的曲面模型。儿童男性和女性体模除生殖器官外，其他器官的差别较小。本文建立的所有儿童体模包含睾丸、卵巢、肺、胃、膀胱、胸腺、肝、食管、甲状腺、脑、心脏、肾、脾、唾液腺、胆囊、小肠、胰、眼球、晶状体、肾上腺、皮肤等器官或组织在内的人体脏器，同年龄的男女共用一套器官和身体外表面，5岁和10岁儿童体模只在涉及生殖器官处有不同。建立的中国儿童参考人体模的器官质量与 GBZ/T200.2-2007 确定的参考人器官质量相近，体模器官质量通过体积乘以该器官的密度得到。表 1 与表 2 列出了体模主要器官和 GBZ/T200.2-2007 确定的参考人器官质量对比。

**Table 1.** Body model and GBZ/T200.2-2007 organ quality comparison

**表 1.** 体模与 GBZ/T200.2-2007 器官质量的对比

| 器官  | 0.25 岁儿童体模质量/g |                 | 相对误差/% | 1 岁儿童体模质量/g |                 | 相对误差/% |
|-----|----------------|-----------------|--------|-------------|-----------------|--------|
|     | 体模             | GBZ/T200.2-2007 |        | 体模          | GBZ/T200.2-2007 |        |
| 睾丸  | 2.01           | 2.0             | 0.50   | 2.62        | 2.6             | 0.76   |
| 卵巢  | -              | -               | -      | -           | -               | -      |
| 肺   | 140.12         | 140             | 0.08   | 191.35      | 190             | 0.71   |
| 胃   | 23.02          | 23              | 0.08   | 31.26       | 30              | 4.20   |
| 膀胱  | 5.03           | 5               | 0.60   | 8.11        | 8               | 1.37   |
| 肝   | 231.10         | 230             | 0.47   | 330.14      | 330             | 0.04   |
| 食管  | 7.03           | 7               | 0.42   | 10.31       | 10              | 3.10   |
| 甲状腺 | 1.32           | 1.3             | 1.53   | 1.81        | 1.8             | 0.55   |
| 皮肤  | 322.75         | 320             | 0.85   | 451.86      | 450             | 0.41   |
| 骨骼  | 601.00         | 600             | 0.16   | 1300.54     | 1300            | 0.04   |
| 脑   | 650.29         | 650             | 0.04   | 951.42      | 950             | 0.14   |
| 心脏  | 35.47          | 35              | 1.34   | 50.79       | 50              | 1.58   |
| 肾   | 40.93          | 40              | 2.32   | 60.47       | 60              | 0.78   |
| 脾   | 19.04          | 19              | 0.21   | 35.09       | 35              | 0.25   |
| 唾液腺 | 13.27          | 13              | 2.07   | 16.48       | 16              | 3.00   |
| 胆囊  | 1.00           | 1               | 0.00   | 2.02        | 2               | 1.00   |
| 小肠  | 83.16          | 83              | 0.19   | 110.48      | 110             | 0.43   |
| 胰   | 10.41          | 10              | 4.10   | 20.16       | 20              | 0.80   |
| 眼   | 5.01           | 5               | 0.20   | 7.02        | 7               | 0.28   |
| 眼晶体 | 0.15           | 0.15            | 0.00   | 0.20        | 0.2             | 0.00   |
| 肾上腺 | 4.53           | 4.5             | 0.66   | 4.06        | 4.0             | 1.50   |
| 胸腺  | 25.14          | 25              | 0.56   | 27.32       | 27              | 1.18   |

**Table 2.** Body model and GBZ/T200.2-2007 organ quality comparison  
**表 2.** 体模与 GBZ/T200.2-2007 器官质量的对比

| 器官  | 5 岁儿童体模质量/g |                 | 相对误差/% | 10 岁儿童体模质量/g |                 | 相对误差/% |
|-----|-------------|-----------------|--------|--------------|-----------------|--------|
|     | 体模          | GBZ/T200.2-2007 |        | 体模           | GBZ/T200.2-2007 |        |
| 睾丸  | 3.16        | 3.1             | 1.93   | 4.71         | 4.7             | 0.21   |
| 卵巢  | 0.52        | 0.5             | 4.00   | 1.41         | 1.4             | 0.71   |
| 肺   | 363.42      | 360             | 0.95   | 583.20       | 580             | 0.55   |
| 胃   | 48.06       | 47              | 2.25   | 76.16        | 75              | 1.54   |
| 膀胱  | 13.26       | 13              | 2.00   | 21.42        | 21              | 2.00   |
| 肝   | 577.13      | 575             | 0.37   | 852.60       | 850             | 0.30   |
| 食管  | 13.40       | 13              | 3.07   | 25.10        | 25              | 0.40   |
| 甲状腺 | 3.51        | 3.4             | 3.23   | 8.00         | 7.9             | 1.26   |
| 皮肤  | 780.01      | 775             | 0.64   | 1210.56      | 1200            | 0.88   |
| 骨骼  | 2230.13     | 2200            | 1.36   | 4550.08      | 4500            | 1.11   |
| 脑   | 1203.14     | 1200            | 0.26   | 1352.13      | 1350            | 0.15   |
| 心脏  | 96.14       | 95              | 1.20   | 152.06       | 150             | 1.37   |
| 肾   | 116.12      | 115             | 0.97   | 176.03       | 175             | 0.58   |
| 脾   | 70.46       | 70              | 0.65   | 100.05       | 100             | 0.05   |
| 唾液腺 | 26.12       | 26              | 0.46   | 45.03        | 45              | 0.06   |
| 胆囊  | 3.01        | 3               | 0.33   | 4.03         | 4               | 0.75   |
| 小肠  | 191.23      | 190             | 0.64   | 325.89       | 325             | 0.27   |
| 胰   | 40.41       | 40              | 1.02   | 60.59        | 60              | 0.98   |
| 眼   | 13.12       | 13              | 0.92   | 14.10        | 14              | 0.71   |
| 眼晶体 | 0.35        | 0.35            | 0.00   | 0.35         | 0.35            | 0.00   |
| 肾上腺 | 5.02        | 5.0             | 0.40   | 6.05         | 6.0             | 0.83   |
| 胸腺  | 33.17       | 33              | 0.51   | 37.04        | 37              | 0.10   |

本文所建立体模的大部分器官和组织数据与中国辐射防护用参考人数值和亚洲参考人标准相对差异在 3% 以内。在器官构建过程中, 一些器官的体积和质量相较 GBZ/T200.2-2007 规定有一定程度增加, 以体现当代儿童身体素质所导致的体格变化。

#### 4. 结论

本文基于真实的中国儿童 CT 扫描图像, 建立了体格特征和器官质量符合当代中国儿童的参考人曲面模型。该体模组各年龄的曲面模型的身高、体重等体格数据与选取的儿童受检者一致, 将所有器官和组织调整到没有重叠, 在形态和相对位置上均符合中国儿童的解剖学特性。该体模的所有器官和组织的数据较中国辐射防护用特殊人群参考人都有不同程度的增加, 因此所建的中国儿童体模组更能准确表现当代儿童的体格特征。

儿童解剖特征真实准确的体模可以更精确评估受检者辐射剂量。由于儿童尚处于生长发育时期, 故儿童的部分器官在形态、相对大小、相对位置上较成年人有很大差别, 两者间的差异以腹腔器官尤为突



出。儿童肝脏占据腹腔空间的比例明显大于成年人，肝脏附近脏器大多紧密相连，本文通过直接分割儿童的 CT 图像建立的模型，在调整时改动较小，可以保持儿童器官的解剖学正确性。本文建立的 NURBS 曲面儿童模型可通过 NURBS 变形功能实现对体模器官的平滑微调，且调整过程在一定程度上反映了器官形变特性，为今后调整体模以适应不同的体格和姿态提供了有效的方法。

## 5. 讨论

本文的实验数据来自于上海市第一妇婴保健院，因此儿童体格数据多来自上海小孩，考虑儿童的身高生长和所在行政区的发展水平、人均可支配收入水平有关，因此在数据的选取上存在局限。

本文建立的中国儿童参考人曲面模型为能谱 CT 下儿童受检者辐射剂量的评估提供了重要工具，后续利用蒙特卡罗方法，可实现能谱 CT 扫描所致特殊人群受检者的器官剂量与有效剂量的快速估算。结合 NURBS 曲面模型具备精确的解剖结构和结构姿势的可变性，可实现对人体器官几何模型结构和轮廓的调整，使其满足中国辐射防护用参考人的参数标准。因此可以通过变形调整得到不同体格、不同姿势的体模，可以更加真实地模拟不同姿势下，不同年龄的儿童接受照射时的剂量。

## 参考文献

- [1] 张见, 边传振, 王颖, 杨明. 体型特异性剂量评估值用于儿童颈部 CT 检查辐射剂量[J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(4): 599-602.
- [2] 胡小素, 孙全富, 张文丽, 雷翠萍, 王颖, 郭嘉. 儿科医生辐射风险认知相关因素分析[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28(6): 621-623+627.
- [3] Valentin, J. (2007) Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT). *Annals of the ICRP*, 37, 1.
- [4] 王绍芳, 彭成东, 胡军武, 石明国, 夏黎明. CT 低剂量扫描技术在新型冠状病毒肺炎检查中的应用[J]. 中国医疗设备, 2020, 35(6): 22-24+34.
- [5] 邢点金, 范晨辉, 刘昊, 鲁雯. 儿童 CT 检查辐射剂量最优化问题初探[J]. 泰山医学院学报, 2020, 41(1): 72-75.
- [6] Choonsik, L., Daniel, L., Jorge, H., et al. (2010) The UF Family of Reference Hybrid Phantoms for Computational Radiation Dosimetry. *Physics in Medicine & Biology*, 55, 339. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/55/2/002>
- [7] Chakrothai, J., Kanako, W. and Watanabe, S. (2015) Evaluation of EM Absorption Characteristics in Realistic Adult and Child Models in Vicinity of Wireless Power Transfer Systems. 2015 *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Taipei, 26-29 May 2015, 448-451. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2015.7175401>
- [8] Choi, C., Shin, B., Yeom, Y.S., Nguyen, T.T., Han, H., Ha, S., Chung, B.S., Bolch, W.E. and Kim, C.H. (2021) Development of Paediatric Mesh-Type Reference Computational Phantom Series of International Commission on Radiological Protection. *Journal of Radiological Protection*, 41, S160-S170. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac0801>
- [9] Pi, Y., Zhang, L., Huo, W., et al. (2017) Development and Application of a Set of Mesh-Based and Age-Dependent Chinese Family Phantoms for Radiation Protection Dosimetry: Preliminary Data for External Photon Beams. *The European Physical Journal Conferences*, 153, Article ID: 04014. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201715304014>
- [10] 王栋, 邱睿, 潘羽晞, 郑钧正, 高林峰, 李君利. 基于物理体模 CT 图像的 1 岁儿童体素体模构建[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(4): 757-762.
- [11] 胡安康, 邱睿, 代明亮, 马锐垚, 武祯, 李春艳, 张辉, 李君利, 闫涓淳, 袁新宇. 10 岁中国儿童参考人面元体模的建立[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(1): 187-192.
- [12] Ma, R.Y., Qiu, R., Wu, Z., Ren, L., Hu, A.K., Li, W.B. and Li, J.L. (2021) Development of Chinese Mesh-Type Pediatric Reference Phantoms Series and Application in Dose Assessment of Chinese Undergoing Computed Tomography Scanning. *Physics in Medicine and Biology*, 66, Article ID: 195002. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac1ef1>
- [13] 王若素. 深圳市 6-14 岁在校儿童体格发育大数据分析[D]: [硕士学位论文]. 遵义: 遵义医科大学, 2021. <https://doi.org/10.27680/d.cnki.gzyyc.2021.000272>
- [14] Zhang, C. and Wang, B. (2018) A Calculation Method for Three-dimensional Cavity Shape Based on NURBS Surface Modeling. *Journal of Ballistics*, 30, 75-80.