

Study of anatomical differences between six-year-old child and adult based on CT images

LV Wen-le¹, RUAN Shi-jie¹, LI Hai-yan¹, WANG Chun-xiang², CUI Shi-hai¹

¹*Center for Injury Biomechanics and Vehicle Safety Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, China, 300222, ²Department of Radiology, Tianjin Children's Hospital, Tianjin, China, 300222*
Email:lvwenle_86@126.com

Abstract:

Background: In recent years, many intact finite element models of different percentile adults have been successfully constructed by many domestic and foreign researchers, while the development of finite element models for children was restricted by ethical and other factors, CT data, material parameters and verification data used for modeling were difficult to obtain, which was a major obstacle for the development of children's finite element models.

Objective: This paper is aimed to illustrate and study quantitatively the anatomical differences between a six-year-old child and adult, which provided new data reference and basis for model construction and children injury studies.

Method and Material: The anatomical features of head, chest, hip and knee were observed and measured by using medical software MIMICS based on CT images of a six-year-old child and adult. The relevant structural data of the main bones and soft tissues was measured and compared.

Results: The area ratios between the six-year-old child and adult were 86.79% for the skull and 79.90% for the brain, respectively. For the child head, differences existed in anatomical dimension; degree of body development, in the anterior-posterior direction was more developed than in superior-inferior direction. The occipital lobes were more mature than the frontal lobes. The joints of the six-year-old child exhibited with thicker cartilages, indicating the ossification process was not yet completed as adult bones.

Conclusions: The differences in development of various tissues sizes and directions between six-year-old children and adults indicated that children are not simply smaller versions of adults, so the finite element models of children obtained by scaling adult model had limitations. The present paper provides new reference and evidence for model construction and children injury studies.

Keywords: Six-year-old child; Adult; CT images; Anatomical differences

基于 CT 图像的六岁儿童与成人解剖学结构差异的量化对比研究

吕文乐¹, 阮世捷¹, 李海岩¹, 王春祥², 崔世海¹

¹*天津科技大学损伤生物力学与车辆安全工程中心 300222, 天津, 中国*

²*天津市儿童医院影像科, 300222, 天津, 中国*

Email:lvwenle_86@126.com

摘要:

研究背景: 近年来, 国内外研究人员已成功构建出不同百分位的完整成人有限元模型, 而儿童有限元模型的开发则受到伦理道德等因素的限制, 用于建模的 CT 数据、材料参数及验证数据难以获取, 使得儿童模型的开发存在很大的困难。

目的：本文旨在研究六岁儿童与成人之间的解剖学结构的量化差异程度，为儿童损伤建模研究提供了新的数据参考和依据。

方法与材料：基于 1 例六岁儿童和成人的 CT 图像，应用医学软件 MIMICS 观察头部、胸部、臀部及膝关节的解剖学特点，对主要的骨骼及软组织的相关结构数据进行测量对比。

结果：六岁儿童与成人的脑颅轮廓面积比和大脑轮廓面积比分别为 86.79% 和 79.90%，两者在解剖学几何上存在着差异性；六岁儿童头部前后方向发育比竖直方向相对成熟，大脑的枕叶发育比额叶成熟，其组织在不同方向的发育程度存在差异性；六岁儿童骨骼不同部位存在着较厚软骨，成人时这些软骨已部分骨化成骨。

结论：六岁儿童与成人各个组织的尺寸和不同方向的发育程度都存在差异性，说明儿童不是成人的简单缩小，所以通过缩放成人有限元模型获得的儿童有限元模型具有局限性。本研究为儿童损伤建模研究提供了新的数据参考和依据。

关键字：六岁儿童；成人；CT 图像；解剖学差异

1 引言

儿童在日常生活中属于弱势群体，容易遭受各种不同类型的伤害，其中儿童的跌伤发生率在伤害发生类型中占首位^[1]，交通事故对儿童的致死率处于各种死因的第二位^[2]。为了更好地研究伤害发生过程中儿童损伤情况，更为有效地保护儿童，研究儿童各组织结构的解剖学特点显得尤为重要。国内外学者对于成人解剖学结构的研究已日趋成熟，而儿童解剖学的相关研究显得相对匮乏。其中具有代表性的有 Ogden 及廖亚平的儿童解剖学研究著作，Ogden^[3]著作中简要地描述了儿童骨骼的发育过程及解剖学结构，并借助患者的 CT 图像进行儿童骨折方面的研究。廖亚平^[4]著作中对成人解剖学结构进行了简单的概述，并阐述了儿童各组织器官的生长发育过程。另外随着医学影像技术的发展，CT 图像已广泛应用于人体解剖学结构方面的研究^[5-6]。

本文基于六岁儿童和成人的 CT 图像，应用 MIMICS 对主要的骨骼和软组织结构数据进行测量及对比分析，研究二者之间的解剖学结构差异程度，为儿童有限元模型的构建及损伤机理研究提供科学的数据参考。

2 材料与方法

2.1 材料

本文采用的 CT 图像来源于 1 名健康六岁儿童和成人。应用 CT 机以 1mm 层厚对六岁儿童进行扫描并重构图像，最终以 DICOM 格式保存。

2.2 方法

将 CT 图像导入到 MIMICS 软件中，应用阈值分割方法并适当调整对比度，使得各组织之间的边界更加清晰，以便于骨骼及软组织结构数据的测量。本文所需观察测量的对象为：头部尺寸、颅骨、大脑、胸骨、肋骨、髋骨、髌骨和股骨。

2.2.1 头部尺寸

六岁头部所需测量的尺寸数据共有 4 个，如图 1 所示，分别为头围（a）、头高（b）、头长（c）和头宽（d）。其中头高、头宽和头长在 MIMICS 中可直接测量获得，而头围的获得则需将待测位置的外轮廓应用曲线命令提取，并导入到三维软件中，应用其强大的测量功能测得。根据所测的儿童头部尺寸数据，在国家标准 GB/T 26158《中国未成人人体尺寸》中选取尽可能近似的百分位头部尺寸数据^[7]，并参考国家标准 GB/T 10000《中国成年

人人体尺寸》，选取相应百分位的成人头部数据^[8]。

2.2.2 颅骨与大脑

颅骨分为后上部的脑颅和前下部的面颅，二者以眶上缘和外耳门上缘连线为分界线^[9]。脑颅和面颅所支持的器官不同，而有着各自不同的发展过程。脑颅骨的发育与脑的发育相适应，从胚胎开始脑颅骨得到快速的发育，出生以后反而减慢^[4]，六岁时的脑颅发育已比较接近成人脑颅。应用 MIMICS 软件提取六岁儿童和成人颅骨的中矢状面外轮廓线（如图 2 所示），并将所得轮廓线导入到三维软件中，调整颅骨使其处于竖直方向且鼻骨尖端位于同一水平线上。

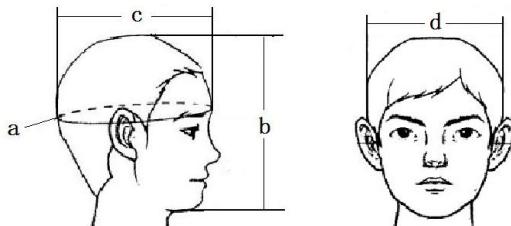
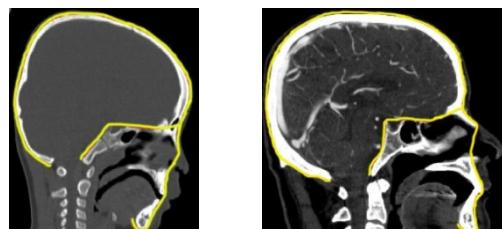


Figure 1. Schematic diagram of the head measurement

图 1. 头部测量项目示意图



(a)

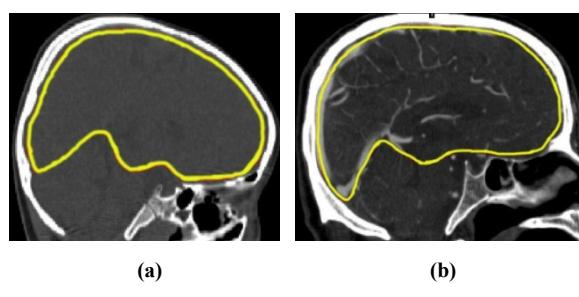
(b)

Figure 2. Skull contour (a) skull contour of six-year-old-child

(b) skull contour of adult

图 2. 颅骨轮廓线 (a) 六岁儿童颅骨轮廓线；(b) 成人颅骨轮廓线

应用上述方法提取六岁儿童和成人大脑的轮廓线，如图 3 所示，并用大脑轮廓所围面积表示其发育程度，并计算获得两者间的比值。



(a)

(b)

Figure 3. Brain contour (a) brain contour of six-year-old-child (b) brain contour of adult

图 3. 大脑轮廓线 (a) 六岁儿童大脑轮廓线；(b) 成人大脑轮廓线

2.2.3 胸骨与肋骨

胸骨是由胸骨柄、胸骨体和剑突三部分构成。图 4 (a) 所示 CT 图像为六岁儿童胸骨中矢状面，胸骨柄与胸骨体间由软骨连接，图 4 (b) 为通过阈值分割方法提取的胸骨几何模型。

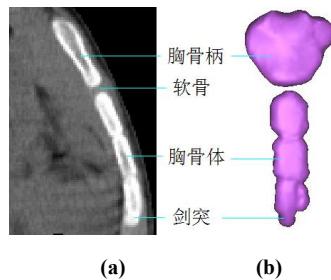


Figure 4. Sternum of six-year-old child (a) CT image of sternum (b) geometrical model of sternum

图 4. 六岁儿童胸骨 (a)胸骨 CT 图像; (b)胸骨几何模型

肋骨是弓形的带状扁骨。儿童八岁之前，肋骨后端的肋头和肋结节是由软骨组成，随后各出现一个次级骨化中心，逐渐实现肋头和肋结节关节面的骨化^[4]。图 5 所示为六岁儿童和成人胸椎、肋骨的 CT 图像，观察可以发现：成人肋头、肋结节处完全骨化，而六岁儿童的肋头、肋结节处存在不同厚度的软骨，并应用 MIMICS 测量其厚度。

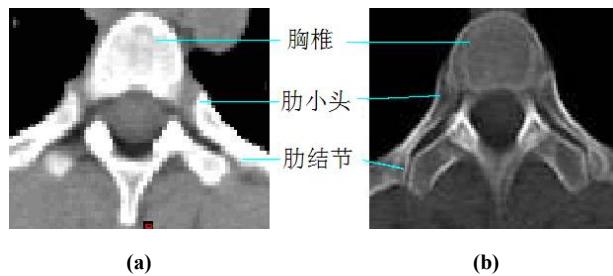


Figure 5. Thoracic vertebrae and ribs CT image of six-year-old child and adult (a) Thoracic vertebrae and ribs CT image of six-year-old child (b)Adult CT image of thoracic vertebrae and ribs

图 5. 六岁儿童和成人胸椎、肋骨 CT 图像 (a)六岁儿童胸椎和肋骨 CT 图像 (b)成人胸椎和肋骨 CT 图像

2.2.4 髋骨

成人髋骨是一块完整的不规则形状的扁骨，而儿童的髋骨由独立的髂骨、坐骨和耻骨组成，它们之间通过“Y”型的软骨连接^[4]。图 6 (a) 为六岁儿童髋骨 CT 图像，其中曲线所围区域为软骨。图 6 (b) 为 MIMICS 中提取的髋骨几何模型，其中 3 块独立骨块间的“Y”型间隙为软骨部分，并分别测量出软骨 3 个端部的宽度、厚度以及 3 个分支的面积。

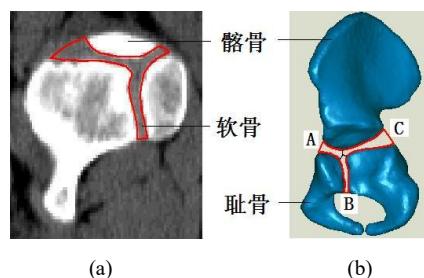


Figure 6. Hip of six-year-old child (a) CT image of hip
(b) geometrical model of hip

图 6. 六岁儿童髋骨 (a)髋骨 CT 图像; (b)髋骨几何模型

2.2.5 髋骨和股骨

新生儿的髋骨完全是软骨，且髋骨属于软骨内成骨。随着年龄的增长，软骨由内向外进行骨化，直到青春期才完成骨化过程^[4]。图 7 为六岁儿童和成人髋骨 CT 图像，图 8 为六岁儿童和成人髋骨几何模型的剖视图。

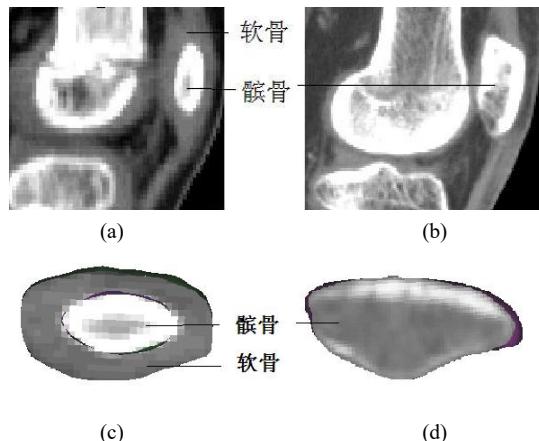


Figure 7. Patella (a) CT image of a six-year-old child's patella (b) CT image of adult patella (c) sectional view of the patellar geometrical model of six-year-old child (d) sectional view of the patellar geometrical model of adult

图 7. 髌骨 (a)六岁儿童髌骨 CT 图像;(b)成人髌骨 CT 图像;
(c)六岁儿童髌骨几何模型剖视图;(d)成人几何模型剖视图

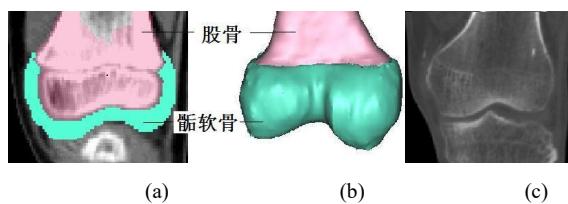


Figure 8. Femur (a)CT image of six-year-old child's femur

(b)geometrical model of six-year-old child's femur

(c) CT image of adult femur

图 8. 股骨 (a)六岁儿童股骨 CT 图像; (b)六岁儿童股骨几何模型;
(c)成人股骨 CT 图像

六岁儿童胫骨上端、股骨下端均有一层骺软骨，其随着年龄的增长逐渐钙化变薄，直至完全钙化。本文以股骨为例，图 8 (a) 为六岁儿童股骨 CT 图像，通过手动描绘的方法区分股骨与骺软骨，图 8 (b) 为 MIMICS 应用阈值分割方法提取的股骨几何模型，图 8 (c) 为成人股骨 CT 图像。

3 结果与讨论

3.1 头部尺寸

表 1 为所测六岁儿童头部数据及国标中相应百分位的儿童与成人头部数据，其中的成人头部尺寸参考了国家标准 GB/T 10000《中国成年人人体尺寸》，其给出了第 50 百分位和第 90 百分位头高尺寸分别为 223mm 和 237mm^[8]，未能给出第 75 百分位成人头高，则应用线性插值方法获得其值为 231.75mm。从表格数据可知，六岁儿童头长占成人的 94.05%，头高占成人的 91.91%，说明儿童与成人的头长差异小于头高差异，即六岁儿童头部沿前后方向发育比竖直方向相对成熟。总体上看，六岁儿童头部尺寸占成人的比例都达到了 91% 以上，其发育程度比较接近成人。表 1 中 Pn 表示第 n 百分位，百分位表示具有某一人体尺寸和小于该尺寸的人占统计对象总人数的百分比，Pn 表示有 n% 人某尺寸等于或小于该尺寸。

3.2 颅骨与大脑

六岁儿童和成人中矢状面颅轮廓对比（见图 9），分别用虚线和实线来表示（颅轮廓分为脑颅和面颅轮廓），

可以看出儿童的颅轮廓小于成人的颅轮廓，为了准确地表达六岁儿童与成人间的差异，本文用颅轮廓所围面积表示其发育程度，并计算出相应颅轮廓面积间的比值。如表 2 所示，六岁儿童与成人的脑颅轮廓面积比与面颅轮廓面积比分别为 86.79% 和 83.05%，且比值越大表示六岁儿童与成人颅骨发育程度的差异越小，由此可知脑颅间的差异小于面颅间的差异。脑颅轮廓面积比大于面颅轮廓面积比，也说明了六岁儿童的脑颅骨发育较面颅骨相对成熟，较为接近成人的发育程度。

Table 1. Head dimensions of six-year-old child and adults

表 1. 六岁儿童和成人头部尺寸

	头围/mm	头长/mm	头宽/mm	头高/mm
6岁儿童 CT	539.44	174.91	165.12	215.28
GB/T 26158	511.00(P50)	174.00(P50)	152.00(P50)	206.00(P50)
4-6岁儿童	536.00(P90)		167.00(P99)	213.00(P75)
GB10000	560.00(P50)	185.00(P50)	153.00(P50)	223.00(P50)
成人 36-60岁	580.00(P90)		167.00(P99)	231.75(P75)
6岁儿童尺寸/成人尺寸(Pn)	96.33%(P50) 92.41%(P90)	94.05%(P50)	107.92%(P50) 98.87%(P99)	96.54%(P50) 91.91%(P75)

Table 2. Cranial contour area and brain contour area of six-year-old child and adult

表 2. 六岁儿童和成人的颅轮廓面积及大脑轮廓面积

	脑颅轮廓面积/mm ²	面颅轮廓面积/mm ²	颅轮廓面积/mm ²	大脑轮廓面积/mm ²
6岁儿童	17361.37	5907.10	23268.47	10461.44
成人	20003.35	7112.82	27116.17	13092.89
6岁儿童/成人	86.79%	83.05%	85.81%	79.90%

六岁儿童和成人大脑的矢状面轮廓线分别用虚线和实线表示（见图 10），可以看出大脑发育程度差异最小和最大分别出现在枕叶和额叶，说明大脑不同部位的发育程度存在着差异，且这种差异与年龄增长呈非线性变化^[10]。由表 2 可知六岁儿童和成人大脑轮廓面积间的比值为 79.90%，小于二者间的脑颅轮廓面积比值 86.79%，说明脑颅骨发育较大脑发育相对成熟，颅骨发育为大脑发育提供了更为广阔的发展空间。

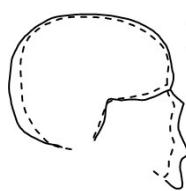


Figure 9. Cranial contours of six-year-old child and adult

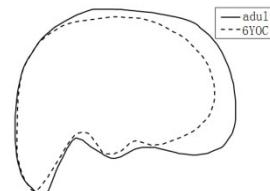


Figure 10. Brain sagittal contours of six-year-old child and adult

图 9. 六岁儿童颅和成人颅轮廓 **图 10. 六岁儿童与成人大脑矢状面轮廓**

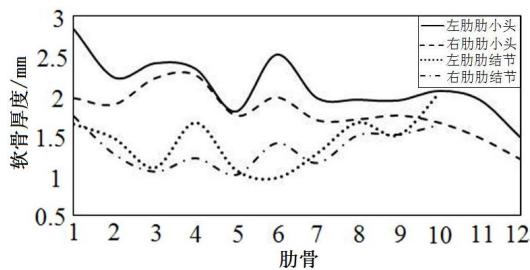
3.3 肋骨

应用 MIMICS 测得的六岁儿童的肋头、肋结节处软骨厚度（见表 3），其中第 11、12 肋骨没有肋结节，所以没有给出肋结节软骨厚度。图 11 为不同肋骨肋头、肋结节的软骨厚度曲线对比情况，可以看出第 1-12 肋骨的肋头软骨厚度总体上呈减小趋势，左肋肋头软度厚度比相应右肋肋头软骨厚度大，且在第 4、5 肋骨处二者间的

差异最小；左右肋肋结节软骨厚度值交替变化，第4、6肋骨处二者间的差异最大；肋头处软骨厚度比肋结节处软骨厚度大。肋骨不同部位软骨的厚度差异，说明了这些软骨间骨化程度和骨化速度的差异性。

**Table 3. Cartilage thickness of costal head and costal tubercle
表 3. 肋头、肋结节处软骨厚度**

肋骨	肋头处软骨厚度/mm		肋结节处软骨厚度/mm		肋骨	肋头处软骨厚度/mm		肋结节处软骨厚度/mm	
	左肋	右肋	左肋	右肋		左肋	右肋	左肋	右肋
Rib1	2.85	1.98	1.65	1.75	Rib7	1.98	1.70	1.28	1.16
Rib2	2.24	1.90	1.47	1.27	Rib8	1.96	1.71	1.67	1.51
Rib3	2.42	2.23	1.10	1.05	Rib9	1.95	1.76	1.51	1.52
Rib4	2.35	2.27	1.67	1.22	Rib10	2.07	1.67	2.04	1.64
Rib5	1.81	1.76	1.07	1.01	Rib11	1.96	1.48	—	—
Rib6	2.53	1.99	0.97	1.41	Rib12	1.49	1.21	—	—



**Figure 11. Cartilage thickness of costal head and costal tubercle of different ribs
图 11. 不同肋骨肋头、肋结节软骨厚度**

3.4 胸骨与髓骨

胸骨柄与胸骨体之间是通过软骨连接的（见图4），且胸骨是软骨内成骨。随着年龄的增长，胸骨软骨的骨化使得骨化中心逐渐接近，最终实现胸骨柄和胸骨体之间的骨化愈合。髓骨的发育过程与胸骨相似，六岁儿童的髓骨通过“Y”形软骨连接为一体。随着儿童的生长发育，软骨的骨化使得髓骨各部分的骨化中心相互靠近，成年时“Y”形软骨完全骨化成骨，最终连结形成一块完整的髓骨。由表4可以看出，软骨A端和C端的宽度相近，约为B端宽度的2倍；软骨A端和B端的厚度相近，约为C端厚度的一半；A分支和B分支的面积相近，约为C分支面积的2/3。

**Table 4. Relevant data of hip cartilage of six-year-old child
表 4. 六岁儿童髓骨软骨的相关数据**

	宽度/mm	厚度/mm		面积/mm ²
A 端	12.41	4.20	A 分支	148.06
B 端	6.09	5.03	B 分支	162.62
C 端	12.52	14.12	C 分支	260.40

3.5 髌骨与股骨

六岁儿童髌骨的外围包裹着一层髌骨软骨（见图 7 (a)），结合其几何模型的剖视图，可以看出骨化髌骨与软骨的位置关系类似于鸡蛋的蛋黄与蛋清。成人骨已完全骨化，其表面不存在软骨（见图 7 (b)）。

为了准确地表达六岁儿童与成人髌骨的发育程度差异，应用 MIMICS 对其进行尺寸测量，包括竖直方向、前后方向和水平方向的最大尺寸（见表 5）。

由表 5 中可以看出，六岁儿童髌骨在各个方向的骨化程度有差异，前后方向上髌骨骨化程度最低（49.56%），竖直方向和水平方向骨化程度几乎相等（59.99% 和 59.56%）；从六岁儿童髌骨软骨尺寸与成人髌骨尺寸比值可知，儿童髌骨在前后方向上的发育程度最高（70.83%），水平方向上的发育程度最低（55.17%）。

图 8 (a) 中红色区域表示股骨，蓝色区域表示髌软骨，股骨内侧髁、髁间窝和外侧髁处的髌软骨厚度分别为 4.97mm, 4.78mm 和 5.64mm。图 8 (b) 中的股骨几何模型可以直观形象地表达股骨与髌软骨的相互关系，髌软骨紧密地包裹着股骨下端。髌软骨随着儿童的生长发育不断骨化，成人时完全骨化成骨（见图 8 (c)）。

Table 5. Patellar dimension of six-year-old child and adult
表 5. 六岁儿童髌骨与成人髌骨尺寸

	竖直方向	前后方向	水平方向
	/mm	/mm	/mm
6岁儿童骨化髌骨(a)	16.82	7.87	15.66
6岁儿童髌骨软骨(b)	28.04	15.88	26.27
成人髌骨(A)	46.78	22.42	47.62
a/b	59.99%	49.56%	59.61%
b/A	59.94%	70.83%	55.17%

4 结论

本研究基于 1 例六岁儿童和成人的 CT 图像，应用医学软件 MIMICS 观察主要骨骼及大脑的解剖结构特点，对其进行相关结构数据的测量及对比分析，直观地说明了两者之间的解剖结构差异，且文中的六岁儿童仅表示此例儿童，并不是代表全部的六岁儿童。通过以上研究，本研究得到以下结论：

(1) 六岁儿童的骨骼和大脑的尺寸都小于成人，但整体上已比较接近成人尺寸；六岁儿童的各个组织发育程度存在着差异性，例如脑颅骨发育较面颅骨相对成熟，脑颅骨发育较大脑发育相对成熟。

(2) 六岁儿童各个组织在不同方向的发育程度存在差异性，如六岁儿童头部沿前后方向发育比竖直方向相对成熟，大脑的枕叶发育比额叶成熟，髌骨的水平、竖直方向发育比前后方向发育成熟。

(3) 六岁儿童骨骼不同部位存在着软骨，随着儿童的生长发育软骨不断的骨化，成人时这些软骨已部分骨化成骨。如胸骨柄与胸骨体间的软骨连接，髌骨通过“Y”形软骨连接成为一个整体，肋骨肋头和肋结节处覆盖一层软骨，髌骨和股骨下端表层都包裹着一层软骨。

六岁儿童与成人各个组织的尺寸和不同方向的发育程度都存在差异性，说明儿童不是成人的简单缩小，所以通过缩放成人有限元模型获得的儿童有限元模型具有局限性，与真实儿童解剖学结构存在着较大差异。本研究为儿童有限元模型的构建及损伤机理研究提供了数据参考和理论依据。

致 谢

衷心感谢天津科技大学损伤生物力学与车辆安全工程中心的各位老师和同学在文章编写过程中提出的宝贵建议。

参考文献

- [1] 李丽萍, 黄革, 马小红, 等. 2553 名 7-16 岁儿童伤害的现状分析[J]. 中国流行病学杂志, 1999, 20(1): 27-30.
- [2] 张晓霞. 大陆交通安全社会行动: 12 岁以下儿童必须坐在汽车后[EB/OL].<http://www.cheyoo.com/active/report/200512/266.html>, 05-12-27.
- [3] JOHN A. OGDEN. Skeletal Injury in the Child[M]. Lea and Febiger: Philadelphia, 1982:128-130.
- [4] 廖亚平. 儿童解剖学[M]. 上海: 上海科学技术出版社 1987:69-85.
- [5] 段春岳, 吕红斌, 胡建中. 基于影像学及计算机图像处理方法研究活体腰椎小关节结构三维分布[J]. 医用生物力学, 2012, 27(2):159-165.
- [6] 龚伟华, 曾一鸣, 唐坚, 等. 髋部骨折的发生与股骨近端三维几何解剖形态的相关性研究[J]. 医用生物力学, 2013, 28(1):109-114.
- [7] B/T 26158-2010, 中国未成年人人体尺寸[S]. 2011.
- [8] GB 10000-88, 中国成年人人体尺寸[S]. 1988.
- [9] 柏树令, 应大君. 系统解剖学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2007:19-20.
- [10] ROTH, S., RAUL, J.S., RUAN, J. and WILLINGER, R., Limitation of scaling methods in child head finite element modelling. J. Vehicle Saf. 2007, 2(4): 404-421.