

论著

Biomechanical Study of the Effect of Spontaneous Labor on Pelvic and Ligament Tension*

ZHOU Lin-xi, YAN Chen*.

Department of Radiology, Zhongshan Hospital, Fudan University / Shanghai Institute of Imaging Medicine, Shanghai 200000, China

ABSTRACT

Objective To investigate the biomechanics of pelvis and ligament and the maximum stress point of pelvis and ligament during spontaneous delivery, a female pelvic model was established by finite element method, and different abdominal pressure was applied to the pelvis to simulate the effect of spontaneous delivery on pelvic floor. **Methods** Female pelvic floor finite element models including sacrum, coccyx, sacroiliac joint, iliac bone, pubic symphysis, sacroiliac joint ligament, sacrospinal ligament, sacrotubercular ligament, pubic arch ligament, and suprapubic ligament were constructed. In Abaqus 17.0, the pelvic model with abdominal pressure of 0.5, 1, 1.5, 3, 5, and 8 KPa was analyzed by finite element method, and the corresponding forces were obtained. Then stress and displacement nephograms are generated in the form of contour maps. **Results** In spontaneous labor, the largest displacement were the tip of coccyx, superior articular process and the upper edge of S1 vertebral body. The largest stress were the great sciatic notch, acetabulum, and sacral wing. **Conclusion** Through the finite element analysis of pelvis and ligament, the injured Parts of pelvis and ligament during spontaneous delivery are sacrum, coccyx, sciatic notch, and sacroiliac joint ligament, which can provide some reference for clinical work.

Keywords: Spontaneous Labor Abdominal Pressure; Pelvic; Ligament; CT; Compressive Stress

骨盆是一个由前环和后环组成的环状结构，其中前环和后环分别提供了30%和70%的稳定性^[1]。顺产对女性造成的伤害非常大，损伤常见部位是骨盆后环。骨盆后环包括左右髂骨翼、骶骨、骶髂关节和周围的韧带和肌肉，统称为“骶髂关节复合体”^[2]，是骨盆环的后部张力带，占骨盆稳定作用的60%。骶髂关节是骨盆后环重要的组成部分，骶髂关节错位是指因外力造成骶骨和髂骨移动^[3]。由于顺产，女性患病率要远高于男性。大于15mm的骶髂关节移位会造成骨盆疼痛，临幊上常见并发症有下腰痛、臀后痛、迟发性腰骶神经损伤、骨盆关节痛和骶髂关节炎等^[4]。顺产是多因素损伤，所以在临幊上极难实现分析。近年来多名学者开展了盆底的生物力学研究，陈倩倩^[5]提出了利用CT数据对骨盆骨进行自动分割的研究；李宁等^[6]利用非线性材料的特性生成了人体骨盆、骶髂关节和骶髂韧带的有限元模型，研究腰背痛的原因；刘慧等^[2]由肌肉韧带边界条件支撑骨盆，发现含肌肉韧带的边界条件能降低皮质内应力集中的发生。

本研究根据我院提供的CT图像建立了一个女性骨盆模型，通过模拟不同腹压施加不同的载荷，模拟外部受力对人体骨盆及韧带的影响，分析骨盆及韧带的受损情况。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取1名健康女性志愿者(年龄26岁、身高160cm、体重60kg)的腰骶关节-耻骨下缘部位为研究对象。受试者既往无怀孕、盆底疾病及手术史，X线检查该志愿者骨盆无损伤状况。使用Philips 64排螺旋CT对志愿者自腰骶关节至耻骨下缘进行扫描，层厚为1mm。利用Mimics 19.0软件对扫描的DICOM图像数据进行处理，建立三维数字化女性骨盆模型，见图1。

再通过Geomagic 14.0对骨盆进行三角面片细分、模型降噪、光顺化处理，并通过精确曲面等过程对其进行曲面化，最终形成三维实体模型。用Abaqus 17.0软

基于CT图像研究骨盆及韧带的损伤*

复旦大学附属中山医院放射科/上海市影像医学研究所(上海200000)

周琳夕 严 诚*

【摘要】目的为了探究骨盆及韧带的生物力学及顺产时骨盆、韧带最大受力点，采用有限元的方法，建立女性骨盆模型，对骨盆施加不同的腹压，模拟顺产对盆底产生的影响。**方法**构建包括骶骨、尾骨、骶髂关节、髂骨、耻骨联合、骶髂关节韧带、骶棘韧带、骶结节韧带、耻骨弓韧带、耻骨上韧带的女性盆底有限元模型。在Abaqus 17.0中对施加0.5、1、1.5、3、5、8KPa腹压的骨盆模型进行有限元分析，得出相应的力，然后以等值线图的方式生成应力和位移云图。**结果**在顺产状态下，位移最大的是尾骨尖、上关节突、S1椎体上缘、应力最大的是坐骨大切迹、髋臼、骶翼。**结论**通过对骨盆及韧带进行相关有限元分析，初步确定了顺产时骨盆及韧带的损伤部位是骶骨、尾骨、坐骨大切迹和骶髂关节韧带，可为临床工作提供一些参考。

【关键词】顺产腹压；骨盆；韧带；CT；压应力

【中图分类号】R323.5; R322.7+3; R445.3

【文献标识码】A

【基金项目】国家自然科学基金重大研究计划(培育项目)(91859107)，上海市科学技术委员会“科技创新行动计划”产学研医合作领域项目(18DZ1930102)，上海市科学技术委员会医学引导类(中、西医)科技支撑项目(19411965500)，复旦大学附属中山医院临床(2018ZSLC22)，上海市临床重点专科项目经费资助(W2019-018)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2021.03.046

【第一作者】周琳夕，女，初级技士，主要研究方向：医学影像学。E-mail: tamadexiong@qq.com

【通讯作者】严 诚，男，主管技师，主要研究方向：医学影像学。E-mail: yancheng03yj@163.com

件建立正常骨盆和韧带模型(图2A)及模拟产妇生产时不同腹压状况对骨盆各部位影响的图(图2B-2D)。

通过Hypermesh17.0采用四面体实心单元C3D4划分,骨盆模型共有220934个单元、115323个节点,把模型导入Abaqus 17.0,用弹簧单元模拟韧带,施加对骨盆的约束,建立骨盆及韧带的有限元网格模型,各部分材料属性见表1^[7-9]。

1.2 模型的验证 模拟双脚站立位骨盆受力,于S1椎体上终板

设置刚性面,在几何中心给予载荷,模拟站立位时重力的方向,大小为600N^[10]。测量点如下(综合相关文献对骨盆应力分布研究方法)^[11-13]: 1: S1椎体上缘; 2: 髋髂关节髂骨侧平S1椎体水平; 3: 弓状线起点; 4: 坐骨大切迹最高点; 5: 髖窝; 6: 髖臼内板中央; 7: 耻骨上支; 8: 坐骨耻骨支; 9: 坐骨下支近坐骨结节; 10: 髖臼前上方; 11: 髖臼正上方; 12: 髖臼后上方。

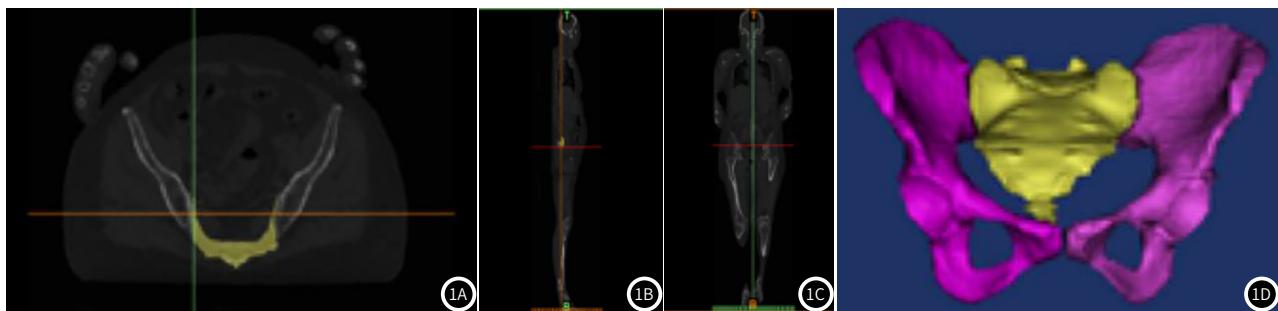


图1 建立的骨盆模型

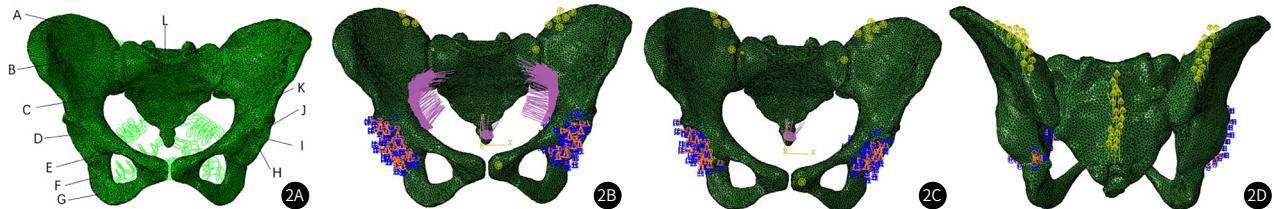


图2 女性实验者骨盆韧带模型。A: 髋髂关节髂骨测平S1椎体水平; B: 髖窝; C: 弓状线起点; D: 髖臼内板中央; E: 坐骨耻骨支; F: 耻骨上支; G: 坐骨下肢近坐骨结节; H: 髖臼前上方; I: 髖臼正上方; J: 髖臼后上方; K: 坐骨大切迹最高点; L: S1椎体上缘。2A: 正常骨盆模型; 2B: 模拟正常胎头下降模型; 2C: 添加载荷及受力模型(前); 2D: 添加载荷及受力模型(后)。

边界条件:为了与正常生理状态接近,不对骨盆进行约束,对股骨近端截面进行约束,限制6个方向的自由度,计算模型在各个节段的活动度,并与姬涛等^[9]测得的数据进行对比(图3)。

骨盆入口前后径为 $(108.99 \pm 14.21) \text{ mm}$,横径为 $(114.95 \pm 8.64) \text{ mm}$ ^[14],本研究所建模型在Abaqus 17.0软件中测得骨盆入口前后径为106.56mm,横径为118.57mm,证明模型符合人体特征。

综上表明,本研究设计的有限元模型基本达到了设计要求,可以应用于实验研究。

1.3 载荷及边界条件 在Abaqus 17.0中进行模拟加载和应力分析。产妇顺产时仰卧位:约束骶骨和髋臼内表面6个自由度,在髂后上棘处施加100N由后向前的力^[15],用来模拟床面

对骨盆的反作用力,分析骨盆应力及相对位移,即骶骨耳状面与髂骨耳状面之间的应变。

表1 骨盆模型及骨盆相关韧带的材料属性						
位置	E(MPa)	μ	K(N/mm)	S(mm ²)	N	
骶骨	17000	0.3	—	—	—	
髂骨	17000	0.3	—	—	—	
尾骨	13000	0.3	—	—	—	
骶髂关节韧带	—	—	5000	1391	10×4	
骶棘韧带	—	—	1500	112	5×2	
骶结节韧带	—	—	1500	539	5×2	
耻骨上韧带	—	—	500	97	5×2	
耻骨弓韧带	—	—	500	156	5×2	

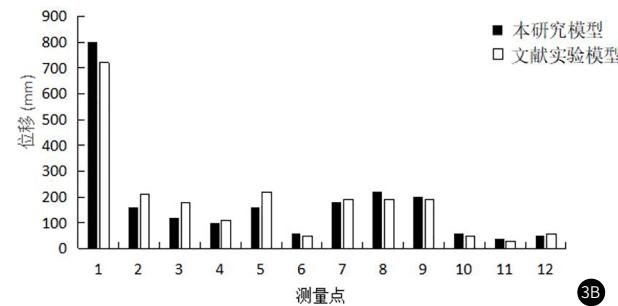
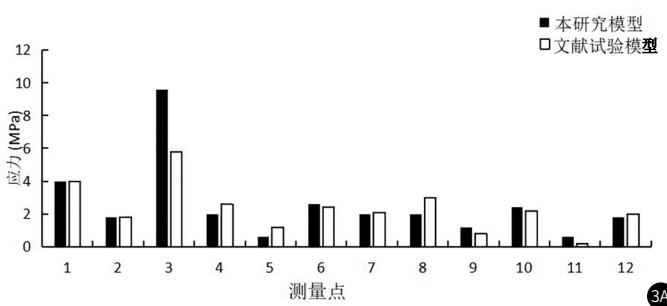


图3 单纯力矩下本研究模型与文献实验模型应力和位移的比较。3A: 本FEA与Reference的应力比较; 3B: 本FEA与Reference的位移比较。

根据医院提供的生产腹压图,在骨盆的坐骨大切迹及骨盆后环处施加0.5、1、1.5、3、5、8KPa^[16]的压力来模拟顺产和静息状态下的腹压,然后以等值线图的方式生成应力和位移分布云图。

2 结 果

2.1 位移分析 在产妇仰卧位下,正常骨盆的位移分布左右对称,其中在静息状态下,骶中正嵴的位移最大,为13.30mm。骨盆以骶中正嵴为中心,以逐渐减弱的波浪形向外传导。在静息状态下骨盆位移较大部位是S1椎体上缘,随着腹压的增加,位移明显增大。当腹压为3KPa时,S1椎体上缘、骶髂关节、上关节突、尾骨、尾骨尖、髂后上棘相对于1.5KPa腹压的增长率分别为59.3%、13.7%、81.1%、1149.5%、1400.2%、87.6%。其中尾骨和尾骨尖较之静息状态有显著上升,位移较大的部位是尾骨和髂后上棘。当腹压为3KPa和5KPa时,尾骨尖的位移最大,腹压为8KPa时,上关节突和尾骨尖的位移最大,这与文献实验结果相符^[17-18]。

静息状态下,S1椎体上缘、骶翼、上关节突、尾骨、尾骨尖和骶后上棘的位移呈缓慢增长趋势。顺产状态下,这6个部位中增长较为明显的是尾骨和尾骨尖,分别从27.73mm增长到39.35mm以及49.93mm增长到66.16mm(图4)。

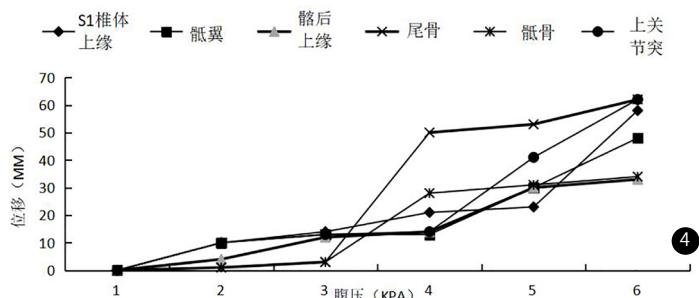


图4 S1椎体上缘, 骶翼, 上关节突, 尾骨, 尾骨尖和骶后上棘在不同腹压下的位移。

2.2 应力分析 在腹压为0.5、1、1.5KPa状态下,骨盆的应力主要从骶骨上表面沿骶骨翼传递,经骶髂关节传至髂骨,然后由坐骨大切迹和弓状线传至左右髋臼。骨盆两侧的应力分布基本对称,应力主要集中在骶翼,坐骨大切迹,弓状线,髋臼,尾骨处。整个骨盆最大应力约为12.10MPa,集中在坐骨大切迹附近。在静息状态下集中在骶翼和弓状线和髋臼上方。

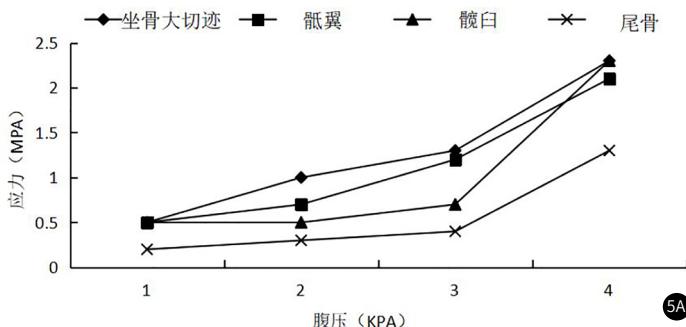


图5 静息状态与顺产状态下骨盆有限元模型应力分布图。5A: 骨盆部位在腹压下的应力趋势图。

在0.5KPa腹压下应力最大的位置是在髋臼和坐骨大切迹交界处,约为0.58MPa;在1KPa的腹压下应力最大的位置是在髋臼左上方,约为1.07MPa;在1.5KPa的腹压下应力最大的位置是在弓状线上方,约为1.56MPa;在3KPa的腹压(模拟顺产)下,应力最大的位置是在尾骨与骶骨交界处,约为3.64MPa,其次为弓状线位置,约为2.6MPa;在5KPa的腹压(模拟顺产)下,应力最大的位置是在左侧坐骨大切迹处,约为6.31MPa;在8KPa的腹压(模拟顺产)下,应力最大的位置也是在左侧坐骨大切迹处,约为9.08MPa(图5)。由此可知,骶骨、尾骨和坐骨大切迹部位损伤较大,这与文献中的研究结果一致^[19]。

选取骨盆模型应力变化较明显的部位:骶骨、坐骨大切迹、髋臼、尾骨、作出腹压与应力曲线图。在模拟静息状态下,以上部位的应力缓慢增长(图5A)。在模拟腹压状态下,坐骨大切迹、骶翼以及尾骨处有较大的应力集中现象(图5D-5F)。在3、5、8KPa的腹压下,骶翼和尾骨的应力急剧增长,坐骨大切迹在0.5、1、1.5、3KPa腹压下应力值最高。在5KPa腹压下,骶翼所受应力值较坐骨大切迹高0.63MPa。在8KPa腹压下,所受应力最大的部位是坐骨大切迹和髋臼。

骨盆受力对韧带会造成很大的影响,通过Abaqus 17.0模拟骨盆受力的同时也得到了韧带的应力变化。选取应力变化较大的部位:左侧骶髂后韧带、骨间韧带、骶结节韧带和骶棘韧带。不同韧带的所受应力与腹压成正比,所受应力值最高的是骨间韧带,即骶髂关节韧带前部,其次为左侧骶髂后韧带,骶结节韧带、骶棘韧带,应力峰值分别为70.72、113.10、27.92、17.27MPa,这与临床记载的顺产造成的韧带损伤部位一致^[20-22]。

3 讨 论

本研究主要讨论顺产状态下,骨盆及韧带的受力及损伤情况,通过与静息状态下的骨盆及韧带的所受应力及位移进行对比,从生物力学的角度找出顺产时骨盆及韧带损伤较大的区域。顺产造成的损伤机制一直未见报道,产妇骨盆的差异及胎儿大小都使产后损伤复杂化^[23]。其中最常见的损伤部位为骨盆后环损伤,通常产后恢复不当会造成一系列的并发症,需对顺产造成的损伤进行分析^[24]。对于骨盆韧带的生物力学研究模型主要有物理模型、尸体模型和基于计算机技术的三维有限元模型^[25]。三维有限元模型可以根据材料力学性能模拟软组织,取材相对尸体简单,实验可重复性高。顺产对女性盆底

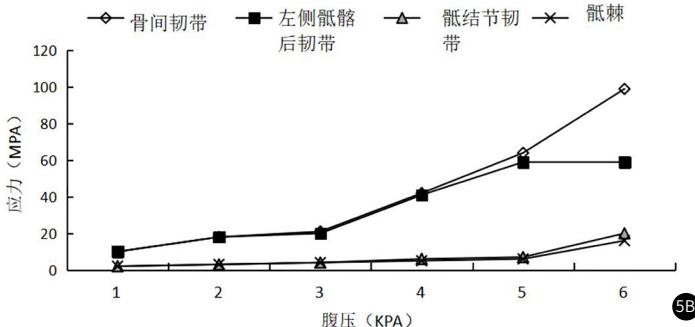


图5 静息状态与顺产状态下骨盆有限元模型应力分布图。5B: 韧带部位在腹压下的应力趋势图。

是一次较大的损伤，对其进行研究找出损伤高发区域是有必要的，但国内外对其的报道和研究都比较少，故本研究结果能够为临床医生根据产妇实际情况、胎儿大小、胎儿娩出的位置快速判断是否进行顺产以及确定顺产的姿势，减小顺产对产妇骨盆及韧带高发区域的损伤。

从位移和应力分析可以看出，顺产状态下位移较大的是尾骨尖、上关节突和S1椎体上缘，即尾骨和骶骨部位，由此推断顺产时易受损部位为尾骨和骶骨。由于骶尾椎之间连接薄弱，顺产时常因胎儿过大或骨盆狭窄向后挤压骶尾椎，骶尾椎在顺产时极易受伤，出现骶尾部关节错位和尾骨脱位。髂后上棘与骶骨通过骨间韧带相连，是维持骨盆稳定性的重要部位，常见的损伤有骶髂关节脱位，通过外科重建骨盆环的稳定性，能明显提高治疗效果。从应力水平来看，顺产状态下骶翼的应力增长较快，增长率为112.5%。在5KPa腹压下所受应力最大为骶翼，其次为坐骨大切迹、髋臼、尾骨。在8KPa腹压下，所受应力最大为坐骨大切迹，其次为髋臼、骶翼和尾骨。由此可以得出结论坐骨大切迹和髋臼损伤最大。临床证明，顺产对骨盆环的影响主要是因骶髂关节和周围组织非正常状态引起骨盆持续性疼痛，严重影响孕妇产后恢复和生活质量。本研究模拟的顺产情况，损伤较明显部位是骶髂关节，人类直立行走的应力分布变化为髋臼顶部坐骨大切迹至髂前下棘水平交汇从而产生致密的骨小梁交叉。主负荷的倾斜传递会在坐骨大切迹处产生集中，所以在顺产后如不能及时发现坐骨大切迹存在受伤隐患，在产妇下床活动的一段时间里极有可能出现坐骨疼痛，严重影响日常生活。髋臼的损伤会引发髋关节退行性变，严重的情况还会影响脊椎。

在静息状态和顺产状态下，左侧骶髂后韧带和骨间韧带的应力远大于骶结节韧带和骶棘韧带，且所受应力随着腹压的增加而增加。由此得出结论左侧骶髂后韧带和骨间韧带对骨盆移位起到重要作用。李勇等^[21]选取21例高能量损伤骨盆环不稳定骨折，收集患者影像数据，统计产后1天至4周的情况，得出结论骶髂关节韧带损伤会严重影响骨盆环的稳定性，由此证明实验数据与临床相符。

本研究的局限性如下：(1)对盆底模型进行一定程度的简化，没有考虑子宫、直肠等在顺产时对骨盆的影响。施加给骨盆的是瞬时的力，没有严格模拟顺产的连续过程。(2)对骨盆周围的韧带进行了一定程度的简化，选取较为重要的多条韧带，与真实临床数据相比会有一些差异。(3)本研究建立的是基于健康的女性患者CT的骨盆韧带模型，对产妇孕期分泌松弛素导致骨盆韧带有一定松弛现象没有考虑在内。

综上所述，本研究能给出科学的方法论证顺产时尾骨尖和上关节突、骶翼和坐骨大切迹以及左侧骶髂后韧带和骨间韧带所受损伤较之其他部位更大，这些部位主要集中在骨盆后环位置。利用有限元的方法能够模拟顺产时骨盆及其韧带的生物力学特性，为临床手术和产后恢复提供理论依据。

参考文献

- [1] 张伟, 王庆雷, 张铁良, 等. 3D打印技术在移位髋臼骨折合并不稳定型骨盆后环损伤治疗中的应用 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2017, 19(8): 696-702.
- [2] 刘慧, 张喜林, 周楠, 等. 步态仿真下腰椎间盘退变合并骶髂关节紊乱的有限元分析 [J]. 医用生物力学, 2017, 32(1): 46-53.
- [3] Phillips A T, Pankaj P, Howie C R, et al. Finite element modelling of the pelvis: inclusion of muscular and ligamentous boundary conditions [J]. Med Eng Phys, 2007, 29(7): 739-748.
- [4] Kim Y H, Yao Z, Kim K, et al. Quantitative investigation of ligament strains during physical tests for sacroiliac joint Pain using finite element analysis [J]. Man Ther, 2014, 19(3): 235-241.
- [5] 陈倩倩. 子宫附属韧带维持子宫正常位置的有限元仿真研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2014.
- [6] 李宁, 杨涵, 黄秋悦, 等. 3D打印钛合金个性化骨盆假体静态和步态有限元分析 [J]. 医用生物力学, 2017, 32(6): 487-493.
- [7] 陈鹏, 刘海波, 姚杰, 等. 太极拳运动下肢生物力学研究进展 [J]. 医用生物力学, 2017, 32(1): 92-97.
- [8] 郝卫亚. 运动损伤生物力学研究 [J]. 医用生物力学, 2017, 32(4): 299-306.
- [9] 姬涛, 高相飞, 郭卫, 等. 骨盆环三维有限元模型的建立 [J]. 中国组织工程研究, 2009, 13(9): 1625-1628.
- [10] 刘尚清, 李良育, 蔡容, 等. 耻骨联合的应用解剖学研究 [J]. 四川解剖学杂志, 2009, 17(4): 7-8, 11.
- [11] 杨先文, 谌祖江, 张少群, 等. 斜扳法作用下骶髂关节的三维有限元分析 [J]. 实用医学杂志, 2014(14): 2228-2230.
- [12] 雷建银, 刘海波, 王志华, 等. 站立位下骨盆与骨折内固定稳定性分析 [J]. 医用生物力学, 2014, 29(6): 517-523.
- [13] Phillips A T M, Pankaj P, Howie C R, et al. Finite element modelling of the pelvis: Inclusion of muscular and ligamentous boundary conditions [J]. Med Eng Phys, 2007, 29(7): 739-748.
- [14] Watson P J, Dostanpor A, Fagan M J, et al. The effect of boundary constraints on finite element modelling of the human pelvis [J]. Med Eng Phys, 2017, 43: 48-57.
- [15] Eichenseer P H, Sybert D R, Cotton J R. A finite element analysis of sacroiliac joint ligaments in response to different loading conditions [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2011, 36(22): E1446-E1452.
- [16] 柳小林, 赵平, 范宇, 等. 骨盆旋转尾骨定位复位法治疗损伤性骶尾部痛 129例 [J]. 中国中医骨伤科杂志, 2010, 18(10): 55-56.
- [17] 颜相周, 郭前进, 王亮, 等. 重建钢板经髂后上棘骨内置入内固定治疗不稳定骨盆骨折 [J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2013, 28(8): 746-747.
- [18] 胡芬娜, 王慧, 张三元. 妊娠相关骨盆环疾病研究进展 [J]. 中华临床医师杂志(电子版), 2017, 11(5): 834-836.
- [19] 丁海, 刘凤祥, 毛远清, 等. 压配型髋臼假体置换后骨性髋臼的微有限元分析 [J]. 医用生物力学, 2018, 33(3): 200-205.
- [20] 苏佳灿, 张春才. 髋臼的生物力学特征及其临床应用研究 [J]. 中国组织工程研究, 2004, 8(29): 6460-6461.
- [21] 李勇, 金学荣, 张涛, 等. 骶棘韧带损伤对高能量骨盆骨折骨盆环稳定性影响的影像学研究 [J]. 人民军医, 2017, 8(12): 1193-1196.
- [22] Geelen H V, Ostergard D, Sand P. A review of the impact of pregnancy and childbirth on pelvic floor function as assessed by objective measurement techniques [J]. Int Urogynecol J, 2018, 29(3): 327-338.
- [23] Ghil T, Dall'Asta A, Masturzo B, et al. Randomised italiam sonography for occiput POSition trial ante vacuum (R. I. S. POS. T. A.) [J]. Ultr Obstet Gynecol, 2018, 52(6): 628-630.
- [24] Lepage J, Jayyosi C, Lecomte-Grosbras P, et al. 2015. Biomechanical pregnant pelvic system model and numerical simulation of childbirth: Impact of delivery on the uterosacral ligaments, preliminary results [J]. Int Urogynecol J, 26(2): 497-504.
- [25] Carroll T, Lo M, Lanteri M, et al. Zika virus preferentially replicates in the female reproductive tract after vaginal inoculation of rhesus macaques [J]. Plos Pathogens, 2017, 13(7): 323-326.

(收稿日期: 2019-04-25)