

倒盖金被手法在腰椎间盘生物力学中的三维有限元分析

https://doi.org/10.12307/2022.055

李雁婷^{1,2}, 陈剑^{1,2}, 刘梦兰^{1,2}, 任蔓蔓^{1,2}, 仲卫红^{1,2}, 陈长兴^{1,2}

投稿日期: 2021-05-06

送审日期: 2021-05-08

采用日期: 2021-05-30

在线日期: 2021-06-23

中图分类号:

R496; R318; R244

文章编号:

2095-4344(2022)03-00340-04

文献标识码: A

文章快速阅读:

文章特点一

△根据南少林“倒盖金被”手法操作特点,在已验证的腰椎三维有限元模型上垂直于L₃棘突施加载荷,模拟顶推高度,计算、分析不同顶推高度下正常人全腰椎各椎间盘的应力值及分布情况的变化。

腰椎模型重建:

- (1) 采集健康志愿者腰椎CT数据;
- (2) 构建全腰椎三维有限元模型。

腰椎模型处理:

- (1) 划分有限元网格;
- (2) 设定材料参数;
- (3) 假定边界条件;
- (4) 验证模型有效性。

有限元分析:

- (1) 于L₃棘突施加载荷,使其产生10 cm位移变化;
- (2) 模拟不同位移下各腰椎间盘的应力变化情况。

文题释义:

腰椎间盘突出症:是指因腰椎间盘变性、纤维环破裂和髓核组织突出刺激或压迫相应节段脊神经根或马尾神经,从而产生腰部疼痛、一侧或双侧下肢麻木及神经功能损害的一系列临床症状和体征,是腰腿痛常见的原因之一。

有限元分析法:是将一个物体或系统分解为由多个相互联结的、简单、独立的点组成的几何模型,在此模型上应用线性代数的方法求解复杂问题。

摘要

背景:南少林手法将武术精华运用于整骨理筋和按摩手法中,形成了独特的中国骨伤治疗技术,研究发现南少林理筋整脊手法治疗腰椎间盘突出症有显著疗效。

目的:运用三维有限元法分析倒盖金被手法作用于腰椎间盘的生物力学效应。

方法:选择一名健康青年男性志愿者,根据其CT扫描结果构建全腰椎(L₁-L₅)三维有限元模型。在已验证有效性的全腰椎模型上模拟加载倒盖金被手法,计算不同顶推高度下腰椎间盘的应力分布及变化情况。

结果与结论:①当L₃椎体被顶推10 cm总位移后,各椎间盘平均应力最大值约9.2 MPa,其中L_{4,5}椎间盘存在部分单元的应力集中现象。②随着顶推高度的增加,各椎间盘的应力呈现近似线性增长的趋势,各椎间盘应力值范围分别为:L_{1,2}椎间盘1.36-7.36 MPa, L_{2,3}椎间盘1.64-7.82 MPa, L_{3,4}椎间盘1.52-9.20 MPa, L_{4,5}椎间盘1.25-8.71 MPa;应力分布情况为:L_{3,4}>L_{4,5}>L_{2,3}>L_{1,2}。③腰椎间盘应力变化以髓核为中心向边缘递增,应力最大处为纤维环前侧。④结果表明,倒盖金被手法操作时腰椎间盘总体应力分布规律前后一致、逐渐递增,提示手法操作应循序渐进,以确保其安全性。

关键词:倒盖金被手法;腰椎间盘;生物力学;三维有限元;腰椎模型;脊柱过伸位;正常腰椎;应力

Three-dimensional finite element analysis of Daogaijinbei manipulation on lumbar intervertebral disc biomechanics

Li Yanting^{1,2}, Chen Jian^{1,2}, Liu Menglan^{1,2}, Ren Manman^{1,2}, Zhong Weihong^{1,2}, Chen Changxing^{1,2}

¹Rehabilitation Hospital Affiliated to Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350003, Fujian Province, China; ²Fujian Key Laboratory of Rehabilitation Technology, Fuzhou 350003, Fujian Province, China

Li Yanting, Master, Attending physician, Rehabilitation Hospital Affiliated to Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350003, Fujian Province, China; Fujian Key Laboratory of Rehabilitation Technology, Fuzhou 350003, Fujian Province, China

Abstract

BACKGROUND: The South Shaolin technique uses the essence of martial arts in bone and tendon and massage techniques to form a unique Chinese bone injury treatment technique. Research has found that the South Shaolin tendon and chiropractic technique has a significant effect on the treatment of lumbar disc herniation.

OBJECTIVE: To analyze the biomechanical effects of Daogaijinbei manipulation on the lumbar intervertebral disc by using the three-dimensional finite element method.

METHODS: A healthy young male volunteer was selected to construct a three-dimensional finite element model of the lumbar spine (L₁-L₅) based on the CT scan results. The stress distribution and variation of lumbar intervertebral disc under different jacking heights were calculated by simulating loading Daogaijinbei manipulation on the validated lumbar spine model.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) The maximum average stress of each lumbar intervertebral disc was about 9.2 MPa after being pushed by a total displacement of 10 cm in L₃, and there was stress concentration in some units of the L_{4,5} intervertebral disc. (2) With the increase of the jacking height, the stress of each

¹ 福建中医药大学附属康复医院, 福建省福州市 350003; ² 福建省康复技术重点实验室, 福建省福州市 350003

第一作者: 李雁婷, 女, 1991年生, 汉族, 福建省福州市人, 硕士, 主治医师, 主要从事骨关节疾病的康复研究。

https://orcid.org/0000-0002-7284-1576 (李雁婷)

基金资助: 中央引导地方科技发展专项(2018L3009); 福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JT180248), 项目负责人: 李雁婷

引用本文: 李雁婷, 陈剑, 刘梦兰, 任蔓蔓, 仲卫红, 陈长兴. 倒盖金被手法在腰椎间盘生物力学中的三维有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(3):340-343.



intervertebral disc presented an approximate linear growth trend. The stress values of each intervertebral disc were: 1.36–7.36 MPa in L_{1-2} intervertebral disc, 1.64–7.82 MPa in L_{2-3} intervertebral disc, 1.52–9.20 MPa in L_{3-4} intervertebral disc, and 1.25–8.71 MPa in L_{4-5} intervertebral disc. The stress distribution was: $L_{3-4} > L_{4-5} > L_{2-3} > L_{1-2}$. (3) The stress variation of lumbar intervertebral disc increased from nucleus pulposus to the edge, and the maximum stress was in the anterior side of annulus fibrosus. (4) During *Daogajinbei* manipulation, the overall stress distribution of the lumbar intervertebral disc is consistent and gradually increasing, which suggests that manipulation should be done little by little to ensure patients' safety.

Key words: *Daogajinbei* manipulation; lumbar intervertebral disc; biomechanics; three-dimensional finite element; lumbar model; spinal hyperextension; normal lumbar spine; stress

Funding: Central Guide to Local Science and Technology Development Project, No. 2018L3009; Young and Middle-Aged Teacher Education Research Project of Fujian Education Department, No. JT180248 (to LYT)

How to cite this article: LI YT, CHEN J, LIU ML, REN MM, ZHONG WH, CHEN CX. Three-dimensional finite element analysis of *Daogajinbei* manipulation on lumbar intervertebral disc biomechanics. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2022;26(3):340-343.

0 引言 Introduction

脊柱是支撑人体质量和运动的重要结构，腰椎作为脊柱主要的承重部位，不仅承担着人体质量、肌肉应力，更具有维持脊柱稳定性的功能^[1]。其中，腰椎间盘在腰椎各种载荷的承载、传递和缓冲中起着关键性作用^[2]，腰椎间盘生物力学的改变也是腰椎疾病特别是腰椎间盘突出症好发的原因之一。

南少林手法作为中国传统医学的一大瑰宝，将武术精华运用于整骨理筋和按摩手法中，形成了独特的中国骨伤治疗技术^[3]。研究发现，南少林理筋整脊手法治疗腰椎间盘突出症有显著疗效^[4-5]。南少林“倒盖金被”手法选自《功夫整脊》一书^[6]，其操作手法如下：患者双膝微屈坐于医师前方，十指交叉置于上腹部，医师半蹲位，双膝顶在患者腰背部，双手紧扣患者前臂，身体逐渐后倾，顺势带动患者后仰使其腰椎处于过伸状态，医师以双膝支撑患者体质量。该操作需要一定技术及操作经验，使其在临床应用中受限。

近年来随着计算机技术的发展，三维有限元法分析脊柱生物力学成为研究热点，因其具有科学、客观、可重复性等优点，可模拟、计算复杂情况下脊柱不同节段各结构的生物力学特点，被广泛应用于脊柱的力学研究中^[7-11]。研究利用三维有限元技术对南少林“倒盖金被”手法进行计算机模拟，分析该手法作用于腰椎间盘的生物力学变化，为临床安全有效应用该手法提供理论依据。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 三维有限元分析。

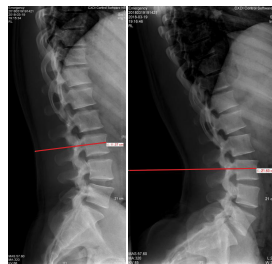
1.2 时间及地点 于2020年3至4月在福建中医药大学附属康复医院骨伤康复二科完成腰椎相关数据采集。

1.3 对象 1名健康男性志愿者，30岁，身高170 cm，体质量65 kg，既往身体健康，无腰部外伤手术史，经临床体格检查、腰椎X射线片及MRI检查排除腰椎疾病。告知志愿者研究相关内容，签署《知情同意书》。研究方案的实施获得福建中医药大学附属康复医院伦理委员会批准，批准号：2018KS-039-01。

1.4 方法

1.4.1 获取“倒盖金被”手法下 L_3 椎体的位移 以志愿者 L_3 椎体为中心，行X射线扫描（日本东芝，DR机）获取“倒盖金被”手法操作前后志愿者腰椎中立位和最大过伸位的侧位片，见图1。在图1中，过 L_3 椎体前缘中点作一垂线，测量出该点至腰部外侧缘的距离 $S_1=11.37$ cm；过臀部最高点沿人

体纵轴方向作一直线，测量出 L_3 椎体前缘与该直线的垂直距离 $S_2=21.63$ cm，根据上述结果即可得出“倒盖金被”手法下 L_3 椎体的位移 $S=S_2-S_1=10.26$ cm。



图注：左侧为手法操作前X射线侧位片，过 L_3 椎体前缘中点作一垂线，测量出该点至腰部外侧缘的距离为11.37 cm；右侧为手法操作后X射线侧位片，过臀部最高点沿人体纵轴方向作一直线，测量出 L_3 椎体前缘与该直线的垂直距离为21.63 cm

图1 | “倒盖金被”手法操作前后志愿者腰椎X射线侧位片

Figure 1 | X-ray lateral views of lumbar spine of the volunteer before and after the *Daogajinbei* manipulation

1.4.2 构建腰椎三维有限元模型 志愿者取仰卧位，对其 T_{12} - S_1 节段进行CT扫描（德国西门子，16排螺旋CT机），取得383幅断层扫描二维图像，以DICOM格式保存。用Mimics 16.0软件处理DICOM文件，对扫描图像进行分割和处理，再用Geomagic Studio 2014软件对所得结果进行修补、降噪、曲面化，建立腰椎三维实体几何模型，最后使用Pro/E5.0软件对腰椎模型进行结构补充（如：韧带、椎间盘、关节突关节等），构建出正常、完整的 L_1 - L_5 全腰椎三维有限元模型。

1.4.3 划分网格 将 L_1 - L_5 腰椎结构模型数据导入Hypermesh 13.0软件进行网格划分，而后在MSC.Patran/Nastran2012软件中完成有限元网格的二次处理和其他组织的网格划分，最终划分结果为：59 172个节点(nodes)，275 652个四面体单元(Tet4 elements)；采用实体单元网格组成腰椎各椎体、椎间关节、椎间盘；关节摩擦系数定义为0.2；采用1D两节点非线性Spring弹簧单元组成各韧带；全腰椎各结构之间的网格节点协调对应，完全接触。

1.4.4 设定材料参数 建立腰椎模型各结构组织的材料属性见表1^[12-15]。

1.4.5 验证模型正确性 将 L_5 椎体的下表面约束固定，来限制该椎体各方向的自由度。在 L_1 椎体上表面垂直均匀加载400 N载荷，以模拟体质量负荷，选取腰椎旋转中心上方作为施力点，在该点施加10 N·m的运动附加力，模拟计算全腰椎在前屈、后伸、左右侧弯和左右旋转6种工况下的生物力学特性。比较各运动状态下腰椎椎体的相对活动度，结果显示与PANJABI等^[16]、XIAO等^[17]过往研究者的研究数据在趋势和数值上相近，说明此次模型是有效、正确的。

表 1 | 全腰椎 (L₁-L₅) 各结构组织材料参数

Table 1 | Material parameters of all structures and tissues of L₁-L₅ lumbar spine

结构组织	弹性模量 (MPa)	泊松比
椎体皮质骨	12 000	0.30
椎体松质骨	100	0.20
椎体终板	2 000	0.20
后端结构	3 500	0.30
纤维环纤维	92	0.45
纤维环基质	4.2	0.45
髓核	1.0	0.499
前纵韧带	7.8	0.30
后纵韧带	10	0.30
棘上棘间韧带	8	0.30
囊间韧带	15	0.30
黄韧带	10	0.30
横突间韧带	10	0.30
椎体间关节	10	0.30

1.4.6 加载负荷进行力学分析 腰椎占人体质量的 13.9%^[18], 根据模型来源者的体质量 (65 kg) 计算出腰椎的质量为 90.35 N, 同时考虑软组织牵伸产生的压力, 设定施加于 L₃ 椎体棘突的顶推力大小为 100 N。结合生物力学研究经验, 从定性定量分析的角度简化边界, 用滑动支座约束 L₁ 椎体上表面及 L₅ 椎体下表面的对应节点, 允许其在前屈后伸方向移动。在 L₃ 棘突处垂直施加顶推力, 并在 L₃ 椎体前纵面上释放不等的位移边界, 以保证 L₃ 椎体的位移大于 L₁、L₅ 的位移, 在 L₁ 椎体上表面及 L₅ 椎体下表面上施加与顶推力等效的力与弯矩, 完成顶推 L₃ 椎体 10 cm 总位移的变化。以 2 cm 作为间隔步长, 模拟计算出各节段腰椎间盘在 L₃ 椎体 0-10 cm 位移过程中的 Von Mises 应力分布及变化情况。

1.5 主要观察指标 ①研究基于正确、有效的 L₁-L₅ 全腰椎有限元模型, 观察各节段腰椎间盘的应力值大小。②通过模型在正常曲度到脊柱过伸位的 Von-Mises 应力变化, 比较分析腰椎各椎间盘的应力大小变化。

2 结果 Results

2.1 不同顶推高度下各腰椎间盘应力云图 见图 2。

2.2 数据汇总结果 见表 2、图 3。

对 L₃ 椎体施加顶推力以完成不同位移时, 计算分析全腰椎各椎间盘的等效应力值可以发现: ①当 L₃ 椎体被顶推至 10 cm 最大位移后, 各椎间盘平均应力最大值为 9.2 MPa, 其中 L₄₋₅ 椎间盘部分单元存在应力集中的现象。②由不同顶推高度时各椎间盘对应的 Von Mises 应力-顶推高度绘制的折线图可知, 随着顶推高度的不断增加, 各节段椎间盘的应力也逐渐增大, 呈现近似线性增长的趋势。0-10 cm 顶推高度下各椎间盘应力最大值范围为: L₁₋₂ 椎间盘 1.36-7.36 MPa, L₂₋₃ 椎间盘 1.64-7.82 MPa, L₃₋₄ 椎间盘 1.52-9.20 MPa, L₄₋₅ 椎间盘 1.25-8.71 MPa; 应力分布情况为: L₃₋₄ > L₄₋₅ > L₂₋₃ > L₁₋₂。③椎间盘应力于髓核处最小, 以此为中心向边缘递增, 在纤维环前侧应力达到最大。

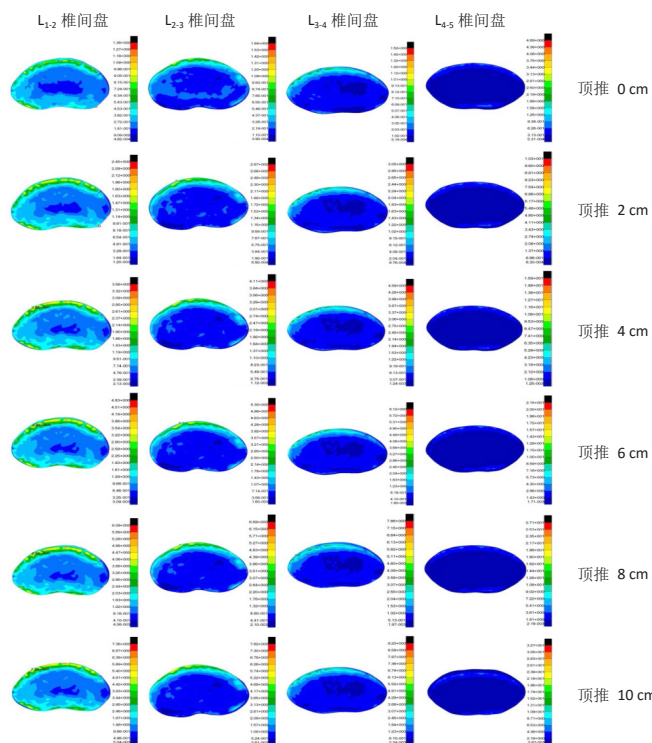


图 2 | 顶推 0-10 cm 下各椎间盘应力云图

Figure 2 | Stress nephogram of each intervertebral disc when jacking 0-10 cm heights

表 2 | 各节段腰椎间盘在 L₃ 椎体顶推 0-10 cm 位移中的 Von Mises 应力最大值 (MPa)

Table 2 | The maximum stress of each intervertebral disc during displacement of 0-10 cm heights in L₃

腰椎间盘	顶推位移					
	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	10 cm
L ₁₋₂ 椎间盘	1.36	2.45	3.56	4.83	6.09	7.36
L ₂₋₃ 椎间盘	1.64	2.87	4.11	5.35	6.59	7.82
L ₃₋₄ 椎间盘	1.52	3.05	4.59	6.12	7.66	9.20
L ₄₋₅ 椎间盘	1.25	2.74	4.23	5.73	7.22	8.71

表注: 随着顶推高度的不断增加, 各节段椎间盘的应力也逐渐增大, 呈现近似线性增长的趋势

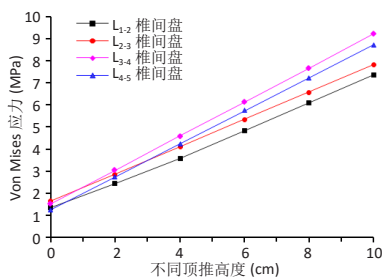


图 3 | 不同顶推高度下各椎间盘的应力对比

Figure 3 | Stress comparison of each intervertebral disc at different jacking heights

3 讨论 Discussion

中国传统推拿手法在腰椎间盘突出症的治疗中应用普遍, 效果显著, 常用的手法主要有腰部推法、揉法、拍捶法、振法、扳法、拔伸法等^[19]。研究表明, 腰椎后伸状态下的拔伸手法治疗作用类似于腰椎牵引, 能增宽椎间隙、降低椎间盘内压、改善椎间盘的力学平衡、改变突出椎间盘与神经根之间的位移, 从而减轻神经根的机械刺激、缓解腰部疼痛症状^[20-21]。南少林“倒盖金被”手法在操作时借助医师自身



重力使患者腰椎后伸牵引,起到放松腰部紧张肌肉、增大椎间隙及解除神经根受压、缓解腰部症状的作用。长期以来,进行该手法治疗往往依赖操作医师个人经验技术,缺乏生物力学方面的理论支撑,使其在临床中不能广泛应用。

近年随着计算机技术的发展,应用三维有限元分析腰椎各结构的生物力学特性已成为一种科学高效的研究方法,被广泛应用^[22]。三维有限元法可精确地模拟腰椎各个复杂的结构,赋予各种组织材料不同属性,模拟计算出不同工况下各结构的生物力学变化情况,具有易调整、可重复等优点。越来越多的研究人员利用有限元分析脊柱手法作用下腰椎各组织结构的应力及应变情况。田强等^[23]研究发现,提拉旋转斜扳法操作时应力集中于后侧关节突关节,椎间盘应力变化幅度不大,椎间盘应变最大处位于右外侧缘纤维环,最小处为髓核。陈忻等^[24]应用三维有限元法研究坐位旋转手法时 L_{4-5} 椎间盘的力学情况,结果发现手法作用时旋转对侧椎间盘位移增加,与应力增长趋势一致,有利于解除神经根粘连,缓解临床症状。

研究结果显示,椎间盘应力随着顶推高度增加逐渐增大,未出现爆发式增长情况,同时不同顶推高度下各椎间盘前后应力分布情况基本一致,提示正常的椎间盘具有稳定的生物力学特性。各应力云图显示,全节段椎间盘纤维环前侧应力最大、髓核处最小,由于腰椎后伸状态时椎间盘前侧所受的应力为拉应力,椎间盘后侧为压应力,考虑前侧拉应力较大可使后突的椎间盘位移发生变化,扩大椎间盘与神经根之间的空间。研究结果显示,各椎间盘应力分布为 $L_{3,4} > L_{4,5} > L_{2,3} > L_{1,2}$,提示与“倒盖金被”手法施加顶推力于 L_3 棘突处有相关性,且下段椎间盘应力大于上段椎间盘,表明自身重力作用下下半部分椎间盘所受拉应力更大,可进一步使椎间隙增宽,减轻神经根压迫。研究显示,当 L_3 椎体被顶推至10 cm最大位移后,椎间盘应力最大值为9.2 MPa,其中 $L_{4,5}$ 椎间盘部分单元存在应力集中现象,有可能造成椎间盘受力过大而致纤维环破裂、髓核脱出,故对 $L_{4,5}$ 椎间盘突出患者进行手法治疗时需注意顶推高度的把握。

综上所述,研究利用三维有限元法分析南少林“倒盖金被”手法不同顶推高度下腰椎间盘的力学变化情况,结果显示手法操作时腰椎间盘总体应力分布规律前后一致、逐渐递增,提示手法操作应循序渐进,避免突然增加的应力造成腰椎间盘损伤。研究主要关注正常腰椎间盘的生物力学特性,后期研究会构建疾病模型来进一步分析。该文属于纯理论研究,其边界条件约束、材质属性等假设与腰椎实际受力和实验等存在一定的差异,之后的研究会考虑大量实验佐证和临床验证,为临床安全有效地应用中医学推拿手法提供理论指导。

作者贡献:李雁婷负责试验设计和文章撰写,陈剑负责三维有限元数据分析,刘梦兰、任蔓蔓负责志愿者招募、三维有限元模型的建立,仲卫红负责文章修改,陈长兴负责倒盖金被手法操作。

经费支持:该文章接受了“中央引导地方科技发展专项(2018L3009)及福建省教育厅中青年教育科研项目(JT180248)”的资助。所有作者声明,经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突:文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

机构伦理问题:试验经福建中医药大学附属康复医院伦理委员会批准,批准号:2018KS-039-01。

知情同意问题:参与试验的受试者对试验过程完全知情同意,在充分了解试验方案的前提下签署《知情同意书》。

写作指南:该研究遵守国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。

文章查重:文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。
文章外审:文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发表稿宗旨。

文章版权:文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。
开放获取声明:这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容进行编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

- [1] 李民,董竑麟,汪桂珍,等.有限元分析不同牵伸时长相邻腰椎节段和椎间盘应力及位移的变化[J].中国组织工程研究,2020,24(21):3281-3286.
- [2] ZHU QQ, GAO X, LEVENE HB, et al. Influences of Nutrition Supply and Pathways on the Degenerative Patterns in Human Intervertebral Disc. Spine (Phila Pa 1976). 2016;41(7):568-576.
- [3] 王和鸣,王诗忠.南少林理筋整脊手法图谱[M].北京:中国中医药出版社,2015:1-2.
- [4] 陈福建,李永军,苏丽君.南少林整脊手法治疗腰椎间盘突出症的疗效观察[J].深圳中西医结合杂志,2019,29(12):43-45.
- [5] 刘发元,翁霞萍,吴超雄,等.南少林理筋整脊手法治疗腰椎间盘突出症89例临床观察[J].风湿病与关节炎,2019,8(10):28-31.
- [6] 张大勇,张凌岚.功夫整脊[M].福州:福建科学技术出版社,2011:31.
- [7] MASINI-AZIAN, MASAO T. Biomechanical investigation on the influence of the regional material degeneration of an intervertebral disc in a lower lumbar spinal unit: A finite element study. Comput Biol Med. 2018;98:26-38.
- [8] SHEN H, FOGEL GR, ZHU J, et al. Biomechanical analysis of different lumbar interspinous process devices: A finite element study. World Neurosurg. 2019;127:1112-1119.
- [9] 张瑜,李忠海.三维有限元法在脊柱生物力学中的应用现状[J].中国骨与关节杂志,2020,9(3):220-224.
- [10] XU M, YANG J, LIEBERMAN I, et al. Stress distribution in vertebral bone and pedicle screw and screw-bone load transfers among various fixation methods for lumbar spine surgical alignment: A finite element study. Med Eng Phys. 2019;63:26-32.
- [11] SPINA NT, MORENO GS, BRODKE DS, et al. Biomechanical effects of laminectomies in the human lumbar spine: a finite element study. Spine J. 2021;21(1):150-159.
- [12] 苏晋.腰椎有限元模型的建立与生物力学分析[D].大连:大连医科大学,2016.
- [13] 邓海峰.腰骶椎三维有限元建模及三种内固定方式生物力学分析[D].沈阳:中国医科大学,2011.
- [14] 沈永乐.新型腰椎后路动态内固定系统固定腰椎滑脱有限元分析[D].沈阳:中国医科大学,2012.
- [15] LO CC, TSAI KJ, ZHONG ZC, et al. Biomechanical differences of Coflex-F and pedicle screw fixation combined with TLIF or ALIF--a finite element study. Comput Methods Biomech Biomed Eng. 2011;14(11):947-956.
- [16] PANJABI MM, OXLAND TR, YAMAMOTO I, et al. Mechanical behavior of the human lumbar and lumbosacral spine as shown by three-dimensional load-displacement curves. J Bone Joint Surg Am. 1994;76(3):413-424.
- [17] XIAO ZT, WANG LY, GONG H, et al. Biomechanical evaluation of three surgical methods of posterior lumbar interbody fusion by finite element analysis. Biomed Eng Online. 2012;11(1):1-11.
- [18] ROBERTSON DGE, CALDWELL GE, HAMILL J, et al. Research Methods in Biomechanics. 2013:69.
- [19] 吕立红,金叶道,郑如云,等.不同作用方向的整复手法治疗腰椎间盘突出症临床疗效观察[J].中国骨伤,2009,22(4):257.
- [20] 王强,孙波.整骨类手法治疗腰椎间盘突出症研究概况[J].按摩与康复医学,2014(11):25-27.
- [21] 尚永,张人文,莫灼锚,等.腰椎退变影响拔伸按压手法生物力学作用的有限元研究[J].山东中医药大学学报,2019,43(2):151-154.
- [22] 庞胤,尹帅,赵长义,等.脊柱腰段三维有限元模型的构建与椎间盘应力分析[J].河北医科大学学报,2019,40(12):1368-1371.
- [23] 田强,钟侨霖,赵家友,等.提拉旋转斜扳法操作时腰椎椎间盘应力及应变的有限元研究[J].中国临床解剖学杂志,2019,37(1):83-86.
- [24] 陈忻,于杰,冯敏山,等.坐位旋转手法治疗退行性腰椎滑脱的椎间盘生物力学分析[J].中华中医药杂志,2019,34(4):1395-1400.

(责任编辑:GW, ZN, ZH)