

复合运动对颈椎间盘生物力学影响的有限元分析

田甜¹ 秦明芳^{2△} 陈龙豪³ 韦贵康³ 兰秋敏¹ 周红海³

[摘要] 目的:建立 C_{5/6} 颈椎间盘的三维有限元模型并验证其有效性,探讨不同复合运动下颈椎间盘的生物力学变化。方法:建立 C_{5/6} 椎间盘突出有限元模型,依次加载前屈+左旋转、前屈+右旋转、后伸+左旋转及后伸+右旋转复合运动,观察颈椎间盘突出区域的纤维环位移和髓核压力变化。结果:前屈+右旋转、后伸+右旋转时,椎间盘左后外侧突出区域的纤维环呈顺时针的旋前方向移动;前屈+左旋转、后伸+左旋转时,椎间盘左后外侧突出区域的纤维环向逆时针的旋后方向移动;前屈+左旋转、前屈+右旋转载荷下,椎间盘突出区域的纤维环位移值分别为-0.545 9 mm 和 0.676 5 mm;后伸+左旋转、后伸+右旋转载荷下,突出区域的纤维环位移值分别为-0.663 1 mm 和 0.604 0 mm;前屈+左旋转、前屈+右旋转载荷下,髓核的压力值分别为 0.136 4 MPa 和 0.125 6 MPa;后伸+左旋转、后伸+右旋转载荷下,髓核的压力值分别为 0.193 7 MPa 和 0.147 8 MPa。结论:前屈向健侧旋转可有效缓解颈椎间盘突出患者的临床症状,而后伸向患侧旋转则可能会加重症状,不利于颈椎间盘突出患者的康复与治疗。

[关键词] 复合运动;颈椎;椎间盘突出;有限元;生物力学

[中图分类号] R681.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2023)10-0035-05

DOI:10.20085/j.cnki.issn1005-0205.231007

Finite Element Analysis of Biomechanical Effects of Compound Exercise on Cervical Disc Herniation

TIAN Tian¹ QIN Mingfang^{2△} CHEN Longhao³ WEI Guikang³ LAN Qiumin¹ ZHOU Honghai³

¹Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530200, China;

²Ruikang Hospital Affiliated to Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530011, China;

³College of Orthopedics and Traumatology, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530001, China.

Abstract Objective: To establish the three-dimensional finite element model of C_{5/6} cervical intervertebral disc and verify its validity, and to explore the biomechanical changes of cervical intervertebral disc under different compound movement.

Methods: The finite element model of C_{5/6} disc herniation was established. The flexion+left rotation, flexion+right rotation, extension+left rotation and extension+right rotation were loaded in turn to observe the displacement of annulus fibrosus and the change of nucleus pulposus pressure in the area of cervical disc herniation. **Results:** The annulus fibrosus in the left posterolateral herniated area of the intervertebral disc moved in a clockwise pronation direction under the loading

of flexion+right rotation and extension+right rotation. The annulus fibrosus of the left posterolateral herniated area of the intervertebral disc moved counterclockwise under the loading of flexion+left rotation, extension+left rotation. The displacement of the annulus fibrosus in the disc herniation area was 0.545 9 mm and 0.676 5 mm under the loading of flexion+left rotation and flexion+right rotation, respectively. The displacement values of the annulus fibrosus in the protruding area were 0.663 1 mm and 0.604 0 mm under the loading of extension+left rotation and extension+right rotation, respectively. The pressure values of nucleus pulposus under flexion+left rotation and flexion+right rotation were

基金项目:广西研究生教育创新计划资质项目(YCXJ2021113)

广西自然科学基金项目(2022JJA140723,
2022JJB140428)

广西高校中青年教师科研基础能力提升项目
(2022KY0272)

广西高等教育本科教学改革工程项目(2021JGZ129)

¹ 广西中医药大学(南宁, 530200)

² 广西中医药大学附属瑞康医院

³ 广西中医药大学骨伤学院

[△]通信作者 E-mail:1449214476@qq.com

0.136 4 MPa and 0.125 6 MPa under the loading of flexion+left rotation and flexion+right rotation, respectively. The pressure values of nucleus pulposus were 0.193 7 MPa and 0.147 8 MPa under the load of extension+left rotation and extension+right rotation, respectively. **Conclusion:** Rotating forward flexion forward to the healthy side can effectively alleviate the clinical symptoms of patients with cervical disc herniation, and then extending to the affected side may aggravate the symptoms, which is not conducive to the rehabilitation and treatment of patients with cervical disc herniation.

Keywords: compound movement; cervical vertebrae; disc herniation; finite element; biomechanics

颈椎间盘突出是指椎间盘承受异常应力或发生老化、变性,继而出现纤维环破裂、髓核突出,从而刺激或压迫血管、神经、脊髓,出现以头晕、颈肩臂疼痛以及肢体功能障碍为主的综合征^[1-2]。颈椎间盘不仅具备传导和缓冲应力的功能,还存在一定的运动学特征^[3],因此探讨在病理状态下的椎间盘在颈椎生理运动载荷下产生的应力和位移变化显得尤为重要。既往研究显示颈椎前屈位、向健侧轴向侧弯位、向健侧轴向旋转位可以使椎间盘突出侧的纤维环向前移动^[4]。本研究在前期研究的基础上,基于三维有限元仿真技术,建立 C_{5/6} 颈椎间盘突出模型,旨在观察纤维环和髓核在颈椎复合运动下的位移和压力变化,为临床诊疗决策提供依据,现报告如下。

1 材料和方法

1.1 几何模型的构建

颈椎有限元几何模型的建立流程和计算方法参照 Cai 等^[5]发表的文献内容,提取一名健康男性志愿者的颈椎 CT 薄层扫描数据,以 DICOM 格式储存,然后利用图像重建软件 Mimics 21.0 新建模板,设定合适的阈值提取出骨骼模型并分割出 C_{5/6} 节段,最后对模型内部的空隙进行填充后以 STL 格式保存;利用 Geomagic Studio 2021 软件,导入模型进行边界修复、删除丁状物、光滑表面、构造格栅、拟合曲面等处理,最后以 STP 格式保存并导入 Solidworks 2017 软件,在 Solidworks 中建立颈椎相应的结构、皮质骨、松质骨、椎间盘、髓核、软骨终板、小关节软骨,皮质骨和软骨终板厚度设置为 0.5 mm,小关节软骨厚度设置为

0.2 mm^[6]。

参考 Huang 等^[7]方法建立 C_{5/6} 椎间盘左后外侧突出模型,在 Solidworks 2017 中建立椎间盘几何外观,并分割出髓核和纤维环,最后将模型以 IGS 格式保存并导入到 Hypermesh 2021 进行网格划分,皮质骨、松质骨采用四面体,椎间盘、髓核、关节软骨采用六面体,用 3D Truss 单元模型韧带(前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间和棘上韧带、关节囊韧带),韧带材料设定受拉不受压,赋予椎间盘退变相关材料的结构属性后以 INP 格式保存,考虑临床上以椎间盘中度退变为多见,故本研究选用椎间盘中度退变材料属性,见表 1 和表 2。

表 1 正常椎体结构材料属性^[8]

材料类型	单元类型	弹性模量 /MPa	泊松比	截面积 /mm ²
皮质骨	四面体	10 000	0.29	
松质骨	四面体	100	0.29	
软骨终板	六面体	1 200	0.29	
纤维环基质	六面体	3.4	0.45	
纤维环纤维	Shell 单元	450	0.40	
髓核	六面体	1.0	0.49	
小关节软骨	六面体	10.4	0.40	
前纵韧带	Truss 单元	10.0	0.30	12
后纵韧带	Truss 单元	10.0	0.30	45
关节囊韧带	Truss 单元	10.0	0.30	14
黄韧带	Truss 单元	1.5	0.30	5
棘间韧带	Truss 单元	4.5	0.30	13
棘上韧带	Truss 单元	1.5	0.30	13

表 2 退变状态下纤维环和髓核的材料属性^[8]

材料属性	单元类型	弹性模量/MPa	泊松比
正常椎间盘	纤维环	3D solid(4 node)	2.50
	髓核	3D solid(4 node)	1.50
中度退变椎间盘	纤维环	3D solid(4 node)	2.50
	髓核	3D solid(4 node)	2.00
重度退变椎间盘	纤维环	3D solid(4 node)	5.00
	髓核	3D solid(4 node)	4.00

采用 Abaqus CAE 进行有限元仿真,将 INP 文件导入后设置相互连接关系,小关节软骨接触直接设置为 Surface to Surface,摩擦系数为 0,其余构件之间的连接设置为 Tie 绑定,然后依次设置边界条件和

求解。

1.2 模型验证

所建 C_{5/6} 节段模型从几何外观及加载运动工况两个方面进行验证,并分别与文献结果进行对比。具体

方法为完全固定 C₆ 下终板,在 C₅ 上终板施加垂直向下 50 N 载荷模拟头部重力,同时在各解剖平面(横断面、矢状面和冠状面)分别施加 1.0 N·m 扭矩模拟前屈、后伸、左右侧屈及左右旋转活动,计算模型的运动范围(Range of Motion,ROM)。

1.3 复合运动加载

本研究模拟颈椎 4 种复合运动:1)前屈+左旋转;2)前屈+右旋转;3)后伸+左旋转;4)后伸+右旋转。

1.4 观察指标

- 1)基于仿真结果矢量图观察纤维环位移的方向;
- 2)观察纤维环左后外侧突出区域在横断面上的位移;
- 3)复合运动下髓核压力的变化。

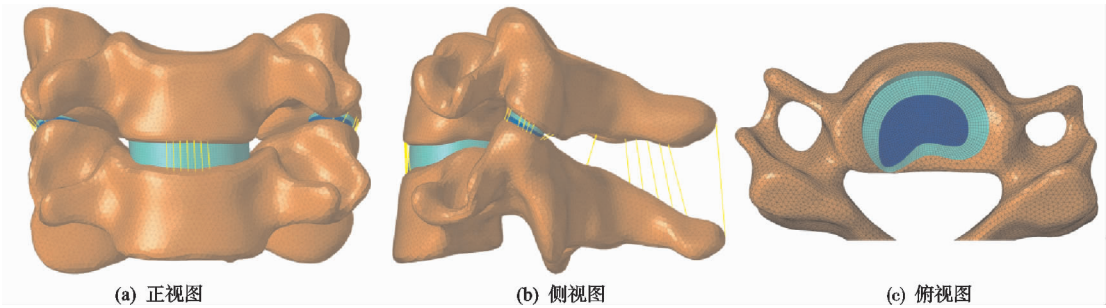


图 1 C_{5/6} 椎间盘左后外侧突出模型

2.2 复合运动下纤维环左后外侧突出区域位移方向

模拟加载前屈+右旋转及后伸+右旋转时,椎间盘左后外侧突出区域的纤维环呈顺时针的旋前移动;模拟

2 结果

2.1 模型验证结果

1)模型几何外观:本研究建立的 C_{5/6} 颈椎间盘左后外侧突出模型(见图 1),髓核突出到左右侧外纤维环并对纤维环进行挤压,而突出的纤维环包绕部分髓核形成突出物,与文献[9]所建的模型在外观上基本一致。2)加载运动工况:添加退变椎间盘的材料属性后,模型在 50 N 的垂直载荷和 1.0 N·m 的力矩下,C_{5/6} 颈椎节段在前屈、后伸、左右侧弯、左右旋转下的运动范围值分别为 4.3°,5.1°,4.8°和 4.6°,与文献的有限元数据及体测数据进行对比^[10],运动范围值明显降低,证明了建立的颈椎间盘突出模型的合理性,可进行下一步研究。

加载前屈+左旋转及后伸+左旋转时,椎间盘左后外侧突出区域的纤维环向逆时针的旋后移动,见图 2。

2.3 复合运动下纤维环左后外侧突出区域位移值

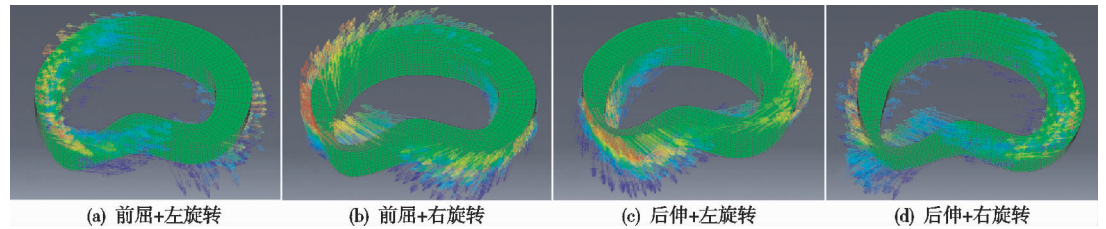


图 2 复合运动下纤维环左后外侧突出区域位移方向模拟

前屈+左旋转载荷下,椎间盘左后外侧突出区域的纤维环位移值为-0.545 9 mm,前屈+右旋转载荷下,突出区域的纤维环位移值为 0.676 5 mm;后伸+左旋转载荷下,突出区域的纤维环位移值为-0.663 1 mm,后伸+右旋转载荷下,突出区域的纤维环位移值为 0.604 0 mm,见图 3 和图 4。

2.4 复合运动下髓核压力值

前屈+左旋转、前屈+右旋转载荷下,髓核的压力值分别为 0.136 4 MPa 和 0.125 6 MPa;后伸+左旋转、后伸+右旋转载荷下,髓核的压力值分别为 0.193 7 MPa 和 0.147 8 MPa;前屈旋转运动下,髓核压力值小于后伸旋转运动,见图 5 和图 6。

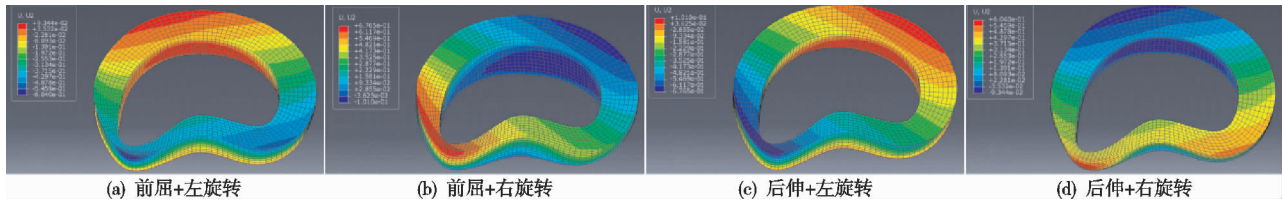


图 3 复合运动下纤维环左后外侧突出区域位移值模拟

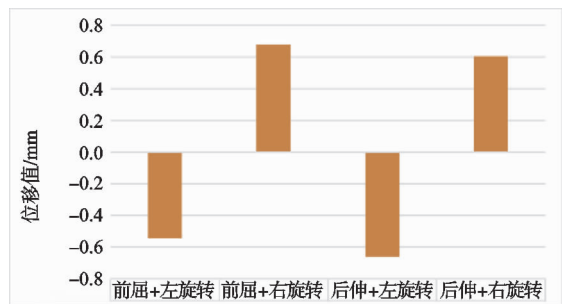


图4 复合运动下椎间盘左后外侧突出区域位移值比较

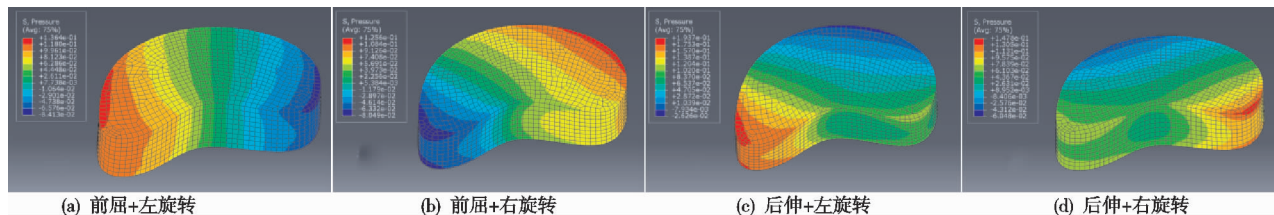


图5 复合运动下髓核压力模拟

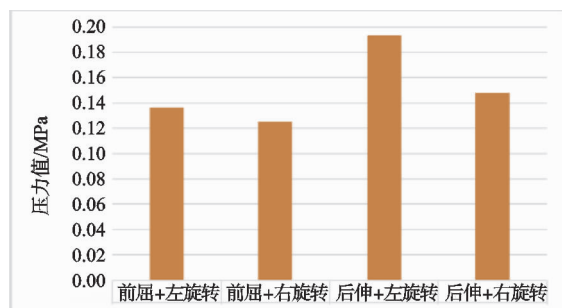


图6 复合运动下髓核压力值比较

木和功能障碍等临床症状^[11]。此外颈椎间盘也是颈椎运动节段的重要组成部分,可在外骨骼肌的驱使下产生耦合运动,不仅赋予颈椎的灵活性还展现了颈椎间盘的运动学特征,当出现颈椎间盘突出的病理性特征时,其内部环境将处于紊乱状态,而外在的生理运动载荷势必对颈椎间盘内部产生相应的生物力学影响,但根据文献可知对此类研究鲜有报道。

本研究基于三维有限元技术建立C_{5/6}节段颈椎间盘突出模型,在前屈、后伸、左右侧弯、左右旋转工况下活动度均低于健康的颈椎间盘,因此在模型几何外观和运动功能方面均符合颈椎间盘突出后的特征^[12]。当实施模拟加载前屈+右旋转及后伸+右旋转运动状态下时,椎间盘左后外侧突出区域的纤维环呈顺时针的旋前方向移动,而在前屈+左旋转及后伸+左旋转运动状态下时,椎间盘左后外侧突出区域的纤维环向逆时针的旋后方向移动,由于颈椎处于运动状态下时,胶原纤维组成的纤维环承载着大部分负荷^[13],因此椎体的运动会间接带动纤维环运动,尤其处于复合运动下,纤维环表现出旋前或旋后的位移趋势。

从位移数值的变化分析,前屈+左旋转载荷状态下,椎间盘左后外侧突出区域的纤维环位移值为-0.545 9 mm,前屈+右旋转载荷状态下,突出区

3 讨论

颈椎间盘是脊柱解剖学功能的重要结构,其由外层致密的纤维环、中央柔软的髓核和上下端的软骨终板组成,对于脊柱运动单元的稳定性和灵活性至关重要,具有传导应力、吸收震荡及分散压力的作用^[9]。颈椎间盘突出类型主要分为中央型、旁中央型和侧方型,其中以侧方型突出为多见,突出的颈椎间盘压迫邻近的神经根,因此在神经根所支配区域内产生疼痛、麻

域的纤维环位移值为0.676 5 mm;后伸+左旋转载荷下,突出区域的纤维环位移值为-0.663 1 mm,后伸+右旋转载荷状态下,突出区域的纤维环位移值为0.604 0 mm,因此向健侧旋转时,有利于减轻对神经根的压迫,缓解颈椎间盘突出患者的临床症状,反之处于后伸向患侧旋转体位时临床症状会随之加重,与临床实际相符。理论上解释中医的颈椎旋转手法,多是旋转在前屈且向健侧旋转为治疗体位的机制^[14],也可合理解释体格检查时的后伸向患侧旋转位会诱发躯体症状的原因^[15]。

良好的髓核压力可以支撑轴向压缩、分散椎间盘应力以及维持颈椎间盘内的静水压,然而髓核压力的增大,在一定程度上会导致颈椎间盘内的流体静水压力的失衡,其形成的张力将径向传递至纤维环及终板,从而会加速颈椎间盘的退变^[16]。本研究发现在屈伸旋转复合运动下,髓核的压力也会产生变化,在前屈+左旋转、前屈+右旋转载荷下,髓核的压力值分别为0.136 4 MPa和0.125 6 MPa;后伸+左旋转、后伸+右旋转载荷下,髓核的压力值分别为0.193 7 MPa和0.147 8 MPa;前屈旋转运动下的髓核压力值小于后伸旋转运动,且前屈右旋转时髓核的压力最小,可显著降低颈椎间盘的突出程度,而后伸左旋转时髓核压力最大,原因在于后伸时颈椎间隙降低,旋转所产生的扭转剪切力对左后外侧的突出物进行挤压,使其压力增高,从而增加继续突出的风险。除此之外,在弹性力学方面,物体位移越大时物体受到的应力也会越大,但本研究却显示前屈右旋转运动下产生的位移最大,而髓核的压力却最小,原因在于本研究仅观察颈椎间盘在横断面上的位移,未分析在冠状位和矢状位上的位移。

综上所述,本研究建立的C_{5/6}颈椎模型尽可能真实地模拟患者颈椎的几何特性和材料特征,可以模拟

特定颈椎节段在不同复合运动下的生物力学变化,对不同复合运动下 C_{5/6} 颈椎节段的生物力学变化进行分析。然而,本研究仍存在不足之处:1)本研究仅建立颈椎间盘突出在复合运动下的力学变化^[17];2)受到技术条件的限制,本研究未建立与之相关的肌肉模型^[18];3)本研究仅探究前屈+左右旋转、后伸+左右旋转的复合运动,未探讨其他生理运动(如侧屈运动等多种组合模式)对颈椎间盘突出的影响。后续研究可基于以上不足之处建立不同类型的椎间盘突出模型,并模拟多种复合生理运动,以获得更全面的研究数据。

参考文献

- [1] WU B, YANG L, PENG B. Ingrowth of nociceptive receptors into diseased cervical intervertebral disc is associated with discogenic neck pain[J]. *Pain Med*, 2019, 20(6): 1072-1077.
- [2] KHAN R R, AWAN W A, RASHID S, et al. A randomized controlled trial of intermittent cervical traction in sitting vs supine position for the management of cervical radiculopathy[J]. *Pak J Med Sci*, 2017, 33(6): 1333-1338.
- [3] CHANG V, BASHEER A, BAUMER T, et al. Dynamic measurements of cervical neural foramina during neck movements in a symptomatic young volunteers[J]. *Surg Radiol Anat*, 2017, 39(10): 1069-1078.
- [4] YE L Q, CHEN C, LIU Y H, et al. Effect of cervical spine motion on displacement of posterolateral annulus fibrosus in cervical spondylotic radiculopathy with contained posterolateral disc herniation: a three-dimensional finite element analysis[J]. *J Orthop Surg Res*, 2022, 17(1): 548.
- [5] CAI X Y, SANG D, YUCHI C X, et al. Using finite element analysis to determine effects of the motion loading method on facet joint forces after cervical disc degeneration[J]. *Comput Biol Med*, 2020, 116: 103519.
- [6] YUCHI C X, SUN G, CHEN C, et al. Comparison of the biomechanical changes after percutaneous full-endoscopic anterior cervical discectomy versus posterior cervical foraminotomy at C5-C6: a finite element-based study[J]. *World Neurosurg*, 2019, 128: e905-e911.
- [7] HUANG X, YE L, WU Z, et al. Biomechanical effects of lateral bending position on performing cervical spinal manipulation for cervical disc herniation: a three-dimensional finite element analysis[J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2018: 2798396.
- [8] HUSSAIN M, NATARAJAN R N, CHAUDHARY G, et al. Posterior facet load changes in adjacent segments due to moderate and severe degeneration in C5-C6 disc: a poroelastic C3-T1 finite element model study[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2012, 25(4): 218-225.
- [9] RAHMAN W U, JIANG W, ZHAO F, et al. Biomechanical effect of C5-C6 intervertebral disc degeneration on the human lower cervical spine (C3-C7): a finite element study[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2003, 26(7): 820-834.
- [10] 吴德升. 椎间盘退变干细胞生物学修复的临床研究进展与挑战[J]. *中国临床新医学*, 2023, 16(3): 201-206.
- [11] CORNIOLA M V, TESSITORE E, SCHALLER K, et al. Hernie discale cervicate-diagnostic et prise en charge[J]. *Rev Med Suisse*, 2015, 11(492): 2023-2029.
- [12] FEI Z, FAN C, NGO S, et al. Dynamic evaluation of cervical disc herniation using kinetic MRI[J]. *J Clin Neurosci*, 2011, 18(2): 232-236.
- [13] 袁德超, 陈竹, 冯大雄, 等. 组织工程椎间盘纤维环: 如何更接近于天然[J]. *中国组织工程研究*, 2015, 19(42): 6832-6837.
- [14] 周红海, 苏少亭, 田君明, 等. 四种颈椎正骨手法的技术操作及力学机制探索[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2019, 27(4): 74-76.
- [15] 邓真, 詹红生, 李国中, 等. 颈椎旋扳法对“骨错缝”颈椎应力作用的有限元分析[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2021, 29(10): 37-42.
- [16] VELÍSKOVÁ P, BASHKUEV M, SHIRAZI-ADL A, et al. Computational study of the role of fluid content and flow on the lumbar disc response in cyclic compression: replication of in vitro and in vivo conditions[J]. *J Biomech*, 2018, 70: 16-25.
- [17] GUO L X, LI W J. Finite element modeling and static/dynamic validation of thoracolumbar-pelvic segment[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2020, 23(2): 69-80.
- [18] 崔世海, 封笑丹, 李海岩, 等. 3 岁儿童颈部屈伸运动生物力学响应研究[J]. *天津科技大学学报*, 2020, 35(1): 67-71.

(收稿日期: 2023-04-01)