

本文引用:李棋龙,陈芯仪,吕倩忆,郑慧娥,何灏龙,卢小叶,田浩梅,陈楚淘. 基于有限元模型探讨不同角度肘按法对腰椎间盘突出位移的影响[J]. 湖南中医药大学学报,2021,41(8):1223-1229.

基于有限元模型探讨不同角度肘按法对 腰椎间盘突出位移的影响

李棋龙,陈芯仪,吕倩忆,郑慧娥,何灏龙,卢小叶,田浩梅,陈楚淘*
(湖南中医药大学,湖南 长沙 410208)

〔摘要〕目的 观察不同角度肘按法下腰椎间盘突出生物力学的改变情况,以探讨肘按法的作用机制及肘按法治疗腰椎间盘突出症的最适宜角度,为临床治疗本病提供部分实验依据。**方法** 根据健康成人腰椎运动节段(L4-5)的CT影像学资料,运用 Mimics 17.0、Geomagic 10.0 软件,构建正常的腰椎间盘突出模型及突出腰椎间盘突出(L4-5)模型,利用 Abaqus 软件模拟正常腰椎间盘突出和突出腰椎间盘突出(L4-5)于轴向、扭转压力下前屈、后伸、侧屈、旋转载荷下生物力学参数,即时显示不同角度肘按法下正常腰椎间盘突出和突出腰椎间盘突出(L4-5)的位移变化。**结果** 不同角度肘按法下,正常腰椎间盘突出与突出腰椎间盘突出分布趋势基本一致;与正常腰椎间盘突出相比,突出腰椎间盘突出位移量小,位移范围较集中。与正常腰椎间盘突出相比,应用 15°~60°的按压角度,腰椎间盘突出突出部位向右、向前方位移;应用 75°按压时,腰椎间盘突出突出部位向前位移;应用 90°~165°按压时,腰椎间盘突出突出部位向左、向前方位移。不同角度肘按法下,正常模型与突出模型的腰椎间盘突出突出部位的位移值,组间比较差异无统计学意义($P>0.05$);但是组内比较,采用 15°按压时与运用 30°~150°按压时相比较,腰椎间盘突出突出部位的位移值差异均有明显统计学意义($P<0.01$)。**结论** 肘按法发挥作用的机制可能与腰椎间盘突出后部的相对位移有关,且不同的按压角度会对腰椎间盘突出产生不一样的位移效果。

〔关键词〕 腰椎间盘突出症;腰椎间盘突出位移;肘按法;有限元模型;生物力学

〔中图分类号〕 R244;R681

〔文献标志码〕 A

〔文章编号〕 doi:10.3969/j.issn.1674-070X.2021.08.014

Influence of Different Angle Elbow Press Method on the Displacement of Lumbar Disc Based on Finite Element Model

LI Qilong, CHEN Xinyi, LV Qianyi, ZHEN Huie, HE Haolong, LU Xiaoye, TIAN Haomei, CHEN Chutao*
(Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China)

〔Abstract〕 Objective To observe the changes of biomechanics of lumbar intervertebral disc under different angles of elbow press, in order to explore the mechanism of action of elbow press and the best angle of treatment of lumbar intervertebral disc protrusion, to provide some experimental basis for clinical treatment of this disease. **Methods** According to CT imaging data of lumbar motion segment (L4-5) in healthy adults, normal lumbar disc models and prolapsed lumbar disc models (L4-5) were established by using Mimics 17.0 and Geomagic 10.0 software. Abaqus software was used to simulate the biomechanical parameters of normal lumbar intervertebral disc and protruded lumbar intervertebral disc (L4-5) under axial, torsional pressure, flexion, extension, lateral flexion and rotation load, the displacement changes of normal and protruded lumbar intervertebral discs (L4-5) were observed through elbow press method at different angles. **Results** Under different angles of elbow press, the displacement of normal lumbar disc was similar to that of protruded lumbar disc, and the displacement of protruded lumbar disc was

〔收稿日期〕 2021-03-07

〔基金项目〕 国家自然科学基金面上项目(81874508);推拿学国家中医药管理局重点学科开放基金(2015-003);湖南省教育厅科学研究项目(19K068);湖南省研究生教育创新工程和专业能力提升工程项目(CX20200780)。

〔作者简介〕 李棋龙,男,在读硕士研究生,研究方向:针灸推拿临床应用及机制研究。

〔通信作者〕 * 陈楚淘,男,博士,副教授,硕士研究生导师, E-mail:314458702@qq.com。

smaller and more concentrated than that of normal lumbar disc. Compared with the normal lumbar intervertebral disc, the position of lumbar intervertebral disc protrusion moved to the right and forward at the pressing angle of $15^{\circ}\sim 60^{\circ}$; the position of lumbar intervertebral disc protrusion moved to forward at the pressing angle of 75° ; and the position of lumbar intervertebral disc protrusion moved to the left forward at the pressing angle of $90^{\circ}\sim 165^{\circ}$. There was no significant difference in displacement values of lumbar intervertebral disc protrusion between the normal model and the protrusion model ($P>0.05$); there were statistically significant differences in the displacement values of lumbar disc herniation when pressing at 15° compared with pressing at $30^{\circ}\sim 150^{\circ}$ ($P<0.01$). **Conclusion** The mechanism of elbow press method may be related to the relative displacement of the posterior part of the lumbar intervertebral disc, and different pressing angles have different displacement effects on the lumbar intervertebral disc.

[**Keywords**] lumbar disc herniation; displacement of lumbar intervertebral disc; elbow press method; finite element model; biomechanics

腰椎间盘突出症(lumbar disc herniation, LDH)是指腰椎间盘发生退行性病变后,纤维环部分或全部破裂,髓核单独或者连同纤维环、软骨终板向外突出,刺激或压迫窦椎神经和神经根引起的以腰腿痛为主要症状的一种综合征^[1]。据相关报道,LDH的发病率为2%~3%,而35岁以上的男性发病率约为4.8%,女性约为2.5%。至少95%的LDH发生于L4-5和L5-S1^[2-3],患者多伴有不同程度的腰骶部疼痛、下肢疼痛等不适症状,严重影响了患者的生活质量,威胁着人类的健康。LDH的发病机制目前尚不完全清楚,主流观点有神经机械压迫机制、炎症化学性刺激机制、自身免疫反应机制等^[4]。推拿是中医常用的外治方法,肘按法是推拿治疗中常用的基础手法之一,其着力面小、刺激量大,具有行气通络、消肿止痛、调节脏腑等功效。现代医学研究^[5]证实,肘按法可以促进炎症物质吸收;改善椎间盘与神经根、硬膜囊及血管的毗邻关系,使受压神经根与周围组织的粘连得到充分松解,减轻或解除脊髓、神经所受机械压迫;缓解肌肉紧张,调节失稳腰椎小关节的位置,松解小关节的嵌顿、扭曲或半脱位状态,纠正脊柱生理弧度及侧弯,恢复脊柱的正常生物力学状态。

有限元分析(finite element analysis, FEA)是一种有效的离散化数值计算方法,把一个复杂的弹性实体可以当作是由无限个质点组成的集合体,用这种离散化的有限单元模型可以替代实体来进行椎体及退变腰椎间盘的生物力学研究^[6],相较于传统的实验方法,它能够模拟多种载荷施加情况,且可获得骨骼内部的应力分布^[7]。近年来,有限元技术被也越来越多的引入到手法治疗LDH作用机制的研究中^[8-10],

基于此,本研究拟选取LDH好发部位L4-5为研究对象,构建L4-5 LDH三维有限元模型,以推拿常用手法肘按法为干预手段,观察在此运动节段中L4-5腰椎间盘的位移情况,探讨肘按法的作用机制及肘按法治疗LDH的最适宜角度,为临床治疗本病提供部分实验依据。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象

选择一例无腰椎间盘突出疾病病史的25岁男性健康志愿者,志愿者对本实验研究知情同意。

1.2 研究方法

1.2.1 数据采集 采用64排螺旋CT(美国GE Medicalhealthcare公司)对受试者腰椎L4-5运动节段横断面扫描,获取断层医学图像资料,以DICOM格式储存,扫描条件:管电压80~140 kVp,管电流230 mA,层厚0.625 mm,共272层。

1.2.2 建模工具 计算机配置:intel(R)Core(TM)i7-7500 U,2.90 GHz,4 G内存,显卡intel(R)HD Graphics 620,显存容量2 G,Windows 10操作系统。软件包括:医学图像处理软件Mimics 17.0(比利时Materialise公司);逆向工程软件Geomagic Studio 12.0(美国Geomagic公司)、Solidworks 2016(美国Dassault Systemes公司);有限元前处理软Hyperworks(美国Altair公司);有限元分析软件Abaqus(美国Dassault Systemes公司)^[8]。

1.2.3 L4-5椎间盘、椎体正常模型及突出模型的建立 由mimics 17.0软件生成各层面组织窗轮廓线(骨组织的灰度阈值1 250~2 401 Hounsfield unit),定位L4-5图像,分割出L4-5椎体骨组织,建立L4-5

3D椎体几何模型,光滑处理,建成全腰椎几何模型,后利用逆向工程软件,填充搭桥,建立正常L4-5节段的椎间盘几何模型(见图1),通过改变髓核和纤维环的弹性模量和泊松比^[9],建立L4-5节段椎间盘向左后突出三维几何模型(见图2)。最后,在Solidworks 2016软件中进行合并及优化处理,形成L4-5运动节段正常腰椎间盘及突出腰椎间盘三维几何模型(见图3-4)。

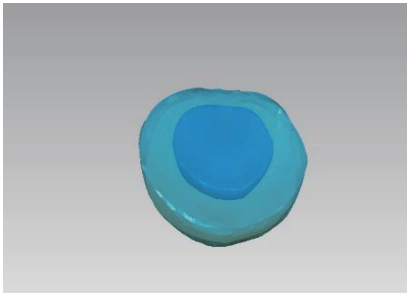


图1 L4-5节段正常腰椎间盘三维实体模型

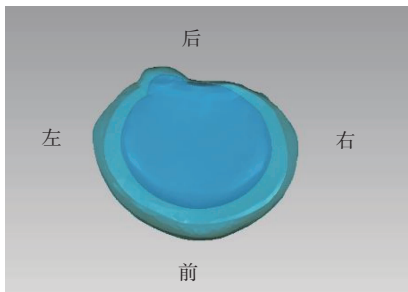


图2 L4-5节段腰椎间盘向左后突出三维实体模型

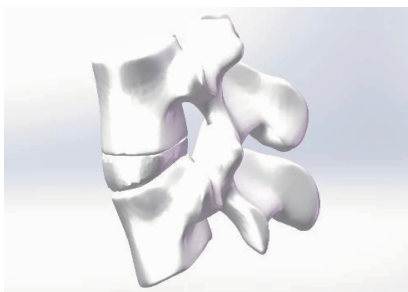


图3 完整L4-5节段正常有限元模型

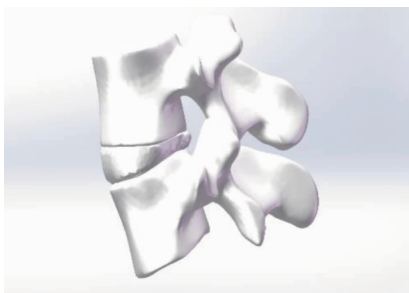


图4 完整L4-5节段椎间盘突出有限元模型

1.2.4 设置材料参数及载荷加载 利用Abaqus,依据文献^[7,9,11]设置材料参数,具体参数见表1,参照离体实验标本测试条件,固定L5椎体下终板,于L4椎体上均匀施加500 N、1 000 N、1 500 N、2 000 N轴向载荷,观察模型的轴向位移,在腰椎L4上部指定一特定节点,将其与L4上表面所有节点刚性连接,并对该特定节点按照右手法则在3个解剖主平面上分别施加10 N·m的力矩,模拟脊柱节段的4种生理运动状态,分别为前屈、后伸、侧屈和旋转,观察关节活动度及椎间盘的应力及形变,结果与Guo LX等^[12-14]体外实验及理论研究数据一致,模型验证有效。

表1 L4-5节段有限元模型参数

材料	弹性模量/MPa	泊松比/%
皮质骨	12 000.00	0.30
松质骨	100.00	0.20
后部结构	3 500.00	0.25
终板	25.00	0.25
髓核	1.00	0.49
髓核(突出)	1.66	0.40
纤维环基质	4.20	0.45
纤维环基质(突出)	12.29	0.35
纤维环外层	550.00	0.30
纤维环第2层	490.00	0.30
纤维环第3层	440.00	0.30
纤维环第4层	420.00	0.30
纤维环第5层	385.00	0.30
纤维环最内层	360.00	0.30
前纵韧带	7.80	0.30
后纵韧带	10.00	0.30
黄韧带	15.00	0.30
棘间韧带	10.00	0.30
棘上韧带	8.00	0.30
横突间韧带	10.00	0.30
关节囊韧带	7.50	0.30

1.2.5 不同角度肘按法的模拟与加载 固定L5椎体下终板,使其在底面节点的6个自由度为0,模拟的按压部位设定在L4椎板左侧,同时向终板轴施加400 N的按压力度,受力面积约为2 cm×2 cm,按压角度以按压部位为中心,从左向右,每隔15°模拟按压1次。

1.3 观察指标

1.3.1 不同角度肘按法下,腰椎间盘位移分布 均选取2张腰椎间盘的位移云图及腰椎间盘的位移矢量图以观察正常模型与突出模型在不同按压角度下

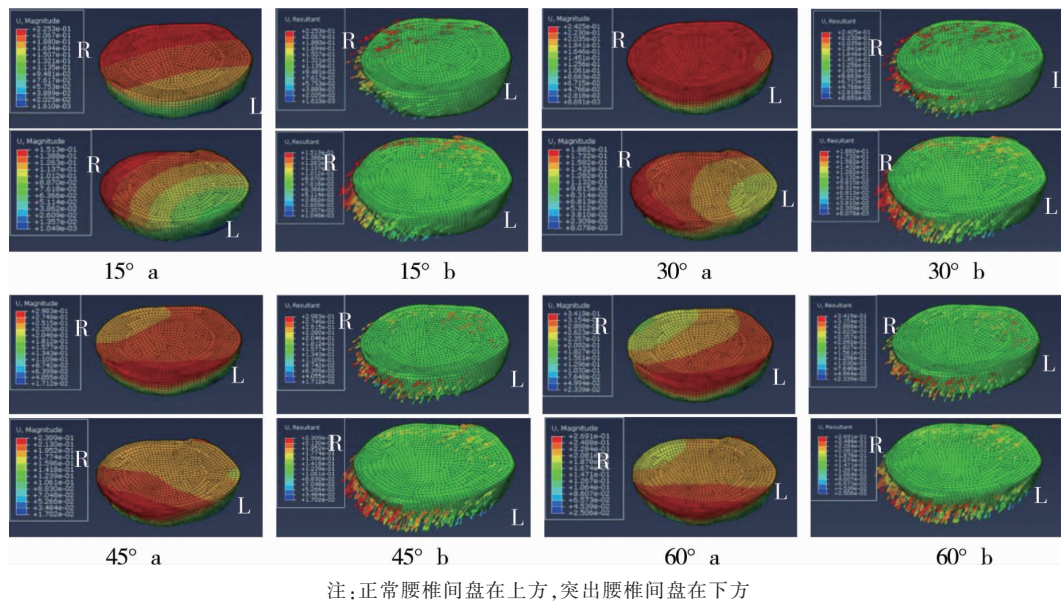


图 5 15°~60° 按压下的腰椎间盘位移云图(a)及位移矢量图(b)

的位移分布状况,比较不同按压角度下正常模型与突出模型腰椎间盘位移分布的差异,及相同按压角度下,正常模型与突出模型的腰椎间盘位移分布的差异。

1.3.2 不同角度肘按法下,腰椎间盘突出部位的位移值 分别于正常有限元模型与突出有限元模型腰椎间盘前、后、左、右、中 5 个区域随机选取 2 个点,共 10 个节点,读取其在不同角度下的位移值。

1.4 统计学处理

所有数据使用 SPSS 22.0 软件进行统计处理。数据行正态性检验后,符合正态分布的数据用“ $\bar{x} \pm s$ ”进行统计描述,不满足正态分布者,采用非参数检验,用“M(Q)”进行统计描述。满足正态分布的数据行方差齐性检验:方差齐者,采用重复测量方差分析,行 *Mauchly* 球形性检验后,不满足 *Mauchly* 球形性检验者,用 *Greenhouse-Geisser* 法或 *Huynh-Feldt* 法对结果进行校正,组内不同角度之间两两比较用 *Bonferroni* 法;方差不齐者,用非参数检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 不同角度肘按法下腰椎间盘的位移分布情况

2.1.1 15°~60° 区间按压下的腰椎间盘位移分布情况 按压角度在 15°~60° 区间时,正常腰椎间盘位移集中在椎间盘上方,位移量由上向下、由右往

左逐渐递减,突出腰椎间盘位移主要集中在椎间盘右上部,位移方向呈现由右向左、由上向下、由后向前均匀递减,相比正常腰椎间盘,突出腰椎间盘的位移量小、范围较集中,伴随按压角度的增大,腰椎间盘突出部位的位移会逐渐增大,在 15°~60° 按压区间,正常腰椎间盘及突出腰椎间盘整体位移方向呈现向右、向前的趋势。见图 5。

2.1.2 75° 按压下的腰椎间盘位移分布情况 以 75° 按压时,正常腰椎间盘位移集中在椎间盘的左前上方,位移量由左向右、由前向后、由上方向下方逐渐递减。突出腰椎间盘位移分布状况与正常腰椎间盘的位移分布状况基本一致。但相较于正常腰椎间盘,突出腰椎间盘的位移量较大,且集中范围减小。正常腰椎间盘整体方向向右、向前,突出腰椎间盘整体方向从后部位移向前。见图 6。

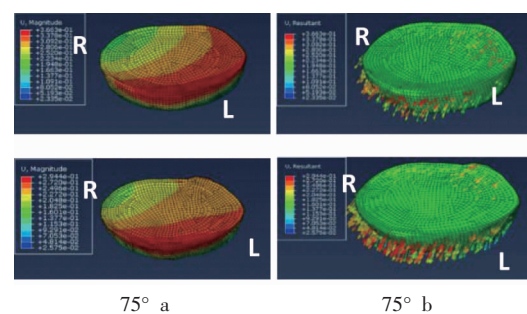


图 6 75° 按压下的腰椎间盘位移云图(a)及位移矢量图(b)

2.1.3 90°~165°区间接压下的腰椎间盘突出位移分布情况 按压角度在90°~165°区间时,正常腰椎间盘突出集中在椎间盘左上方,位移量由左往右、由上向下逐渐递减。突出腰椎间盘突出分布状况与正常腰椎间盘的位移分布状况基本一致。相较于正常腰椎间盘突出,突出腰椎间盘的位移集中范围减小,伴随按压角度的扩大,腰椎间盘的突出部位位移也会逐渐增大。在90°~165°按压区间,正常腰椎间盘突出及突出腰椎间盘突出整体位移方向呈现向左、向前的趋势。见图7。

2.2 不同角度肘按法下腰椎间盘突出部位的位移值

组间比较:不同角度肘按法下,正常有限元模型与突出有限元模型,腰椎间盘突出部位的位移值差异没有统计学意义($P>0.05$)。组内比较:在正常有限元模型中,采用15°按压时与运用30°、45°、60°、75°、90°、105°、120°、135°、150°、165°按压时相比较,腰椎间盘突出部位的位移值差异有明显统计学意义($P<0.01$);在腰椎间盘突出部位的有限元模型中,采用15°按压时与运用30°、45°、60°、75°、90°、105°、120°、135°、

150°按压时相比较,腰椎间盘突出部位的位移值差异有明显统计学意义($P<0.01$)。见表2。

表2 15°~165°区间肘按法下腰椎间盘突出部位的位移值($\bar{x}\pm s, \text{mm}$)

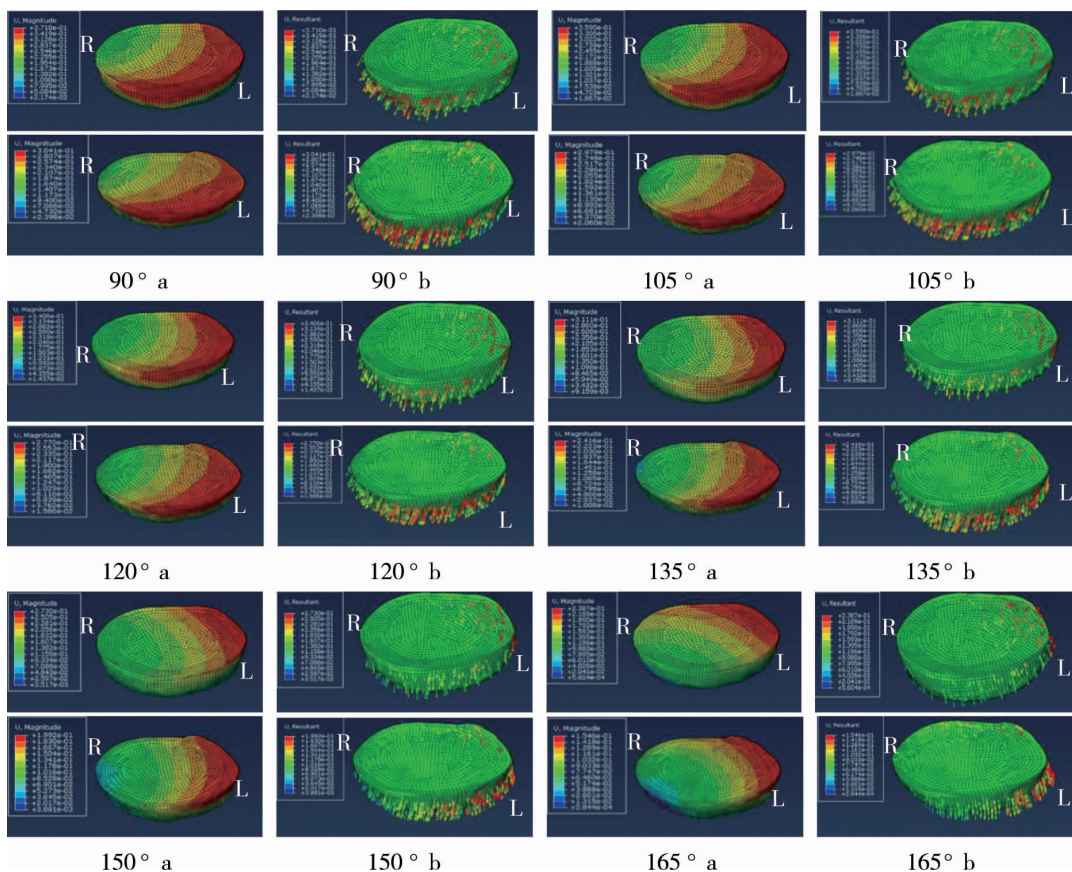
角度	n	正常有限元模型	突出有限元模型
15°	10	0.142±0.043	0.108±0.013
30°	10	0.157±0.043 ^{○○}	0.138±0.018 ^{○○}
45°	10	0.183±0.045 ^{○○}	0.170±0.024 ^{○○}
60°	10	0.210±0.047 ^{○○}	0.196±0.029 ^{○○}
75°	10	0.233±0.049 ^{○○}	0.213±0.032 ^{○○}
90°	10	0.245±0.051 ^{○○}	0.219±0.034 ^{○○}
105°	10	0.248±0.051 ^{○○}	0.213±0.034 ^{○○}
120°	10	0.238±0.050 ^{○○}	0.195±0.031 ^{○○}
135°	10	0.219±0.047 ^{○○}	0.168±0.027 ^{○○}
150°	10	0.193±0.045 ^{○○}	0.136±0.021 ^{○○}
165°	10	0.166±0.043 ^{○○}	0.107±0.016

注:与15°角度相比,○○ $P<0.01$

3 讨论

3.1 肘按法在LDH治疗中的应用

中医学认为,LDH多属于“腰痛”“痹症”范畴。肝



注:正常腰椎间盘突出在上方,突出腰椎间盘突出在下方

图7 90°~165°按压下的腰椎间盘突出位移云图(a)及位移矢量图(b)

肾不足、气血亏虚、筋骨关节失于濡养而发生的腰腿疼痛,称为“不荣则痛”;“邪之所凑,其气必虚”,因虚致外邪侵袭,合而为痹引起的腰腿疼痛,称为“不通则痛”^[15],《医宗金鉴正骨心法要旨》曰:“按其经络,以通郁闭之气”。但目前,肘按法治疗 LDH 机制尚处于探究阶段。临床上,方周林^[16]用肘按法治疗 LDH 疗效显著;胡军飞等^[17]研究认为,以 45°角按压治疗 LDH 可以明显的提高疗效。以上文献并未就肘按法治疗 LDH 机制进行详细探讨。目前,与肘按法相关的实验研究鲜有报道,尚不能全面指导临床治疗。此外,在临床中运用肘按法治疗各种软组织病变时,存在按压不到位的情况,包括按压力度的不同、按压的角度差异,这种情况下,往往需要操作者根据自己的经验进行调整。

3.2 有限元分析在中医推拿手法研究中的应用

推拿,是在人体体表上运用各种手法以及做某些特定的肢体活动来防治疾病的中医外治法,是中医特有的绿色疗法。随着科学技术的进步,FEA 被越来越多地引入到脊柱生物力学研究领域,近年来,部分研究者^[18-21]开始将 FEA 与脊柱推拿手法的研究相结合,以期进一步探讨手法的作用机制。李延红等^[18]构建的 L3-S1 三维有限元模型,证明了拔伸按压手法治疗 LDH 的机制是由于手法作用时,可能改变破裂椎间盘与神经根的相对位置,松解神经根与突出椎间盘的粘连或相互之间发生位移而减轻对神经根的压迫。此外,推拿手法的施治也存在一定差异,鉴于此,部分学者围绕手法作用的要素、安全性、有效性、规范性展开研究^[19]。徐海涛等^[20]运用三维有限元模型模拟腰椎斜扳法对腰椎内部结构的变化,结果证明腰椎斜扳手法对椎间盘是安全的,并且在腰椎间盘突出的对侧进行手法操作更为合理。张晓刚等^[21]研究显示,在拔伸按压状态下,腰椎前屈 30°椎间盘组织的位移、应变和应力变化最明显。总之,FEA 可以很好地模拟各种腰部推拿手法的状态,包括载荷的施加情况、应力的分布情况等,并得到与生物力学实验基本一致的结论,FEA 重复性强、设计性强、可操作性强,作为离体实验的必要补充,其作用是其他力学实验无法替代的^[22]。因此,应用三维

有限元建模,可为临床治疗的安全性、有效性提供实验支持,也为推拿手法的定量研究提供了新思路。本研究构建了人体正常 L4-5 运动节段有限元模型及 L4-5 运动节段椎间盘突出有限元模型,并在以往大量研究^[18]基础上进行了补充,完成了纤维环纤维的构建。此外,本研究设定了椎体、纤维环基质、纤维环纤维、髓核、终板、韧带等均以共节点连接,确保了模型间力的传导。

3.3 模拟不同角度肘按法下,腰椎间盘的位移分析

肘按法治疗 LDH 的机制,杨舟等^[23]认为按压改善了椎间盘与神经根、硬膜囊及血管的毗邻关系,使受压神经根与周围组织的粘连得到充分松解,减轻或解除脊髓、神经所受机械压迫。杨学锋等^[23]通过构建腰椎运动节段三维有限元模型,模拟不同角度下按压手法的生物力学状况,发现在手法干预下治疗 LDH,椎间盘的后侧和神经根的相邻处的位移具有明显变化。本次研究结果显示,在不同角度肘按法下,突出椎间盘的突出部位位移明显增大,究其原因可能是当椎间盘发生旋转时,破裂纤维环带动了整个突出部位的移动,使得椎间盘后部与神经根产生了相对位移,使得神经根、突出椎间盘及其周围软组织的粘连得以松解,从而取得一定的疗效,同时我们还发现在不同的按压角度下,治疗效果也不尽相同。

本实验结果显示,不同角度肘按法下,正常模型与突出模型的椎间盘突出部位的位移值虽然组间比较差异不明显,但是组内比较差异显著。应用 15°~60°的按压角度,椎间盘突出部位向右、向前方位移;应用 75°按压时,椎间盘突出部位向前位移;应用 90°~165°按压时,椎间盘突出部位向左、向前方位移。当按压角度为 15°~30°时,突出部位的位移方向趋向于向右,大小为 0.17 mm;当按压角度为 45°与 60°时,突出部位的位移方向趋向于向前,大小为 0.20 mm。本研究建立的椎间盘突出有限元模型其方向为向左、向后,椎间盘的远离神经根方向位移值最大,理论上可以最大程度上改善神经根、突出部位及周围软组织的位置关系,达到最佳治疗效果。

本次研究基于有限元模型的成功构建,从生物力学角度观察不同角度肘按法下椎间盘突出位移相关

参数变化,为临床治疗提供了部分实验依据,本次有限元研究只采用了单个样本,未对肌肉组织等影响脊柱运动的其他因素进行模拟且模型中未包含神经根结构,试验结果可信度有待提高。因此,在今后的研究当中,扩大样本量,积极寻找更好的定义材料参数的方法,将软组织和骨性结构结合起来构建模型,是接下来的重点和难点^[24]。目前,推拿手法的有限元研究尚处于起步阶段,其实验结果仍需用临床疗效加以验证。

参考文献

- [1] 中华医学会疼痛学分会脊柱源性疼痛学组.腰椎间盘突出症诊疗中国疼痛专家共识[J].中国疼痛医学杂志,2020,26(1):2-6.
- [2] MANCHIKANTI L, HIRSCH J A. Clinical management of radicular pain[J]. Expert Review of Neurotherapeutics, 2015, 15(6): 681-693.
- [3] 王国基,王国军,彭健民,等.腰椎间盘突出症致病因素的流行病学研究[J].现代预防医学,2009,36(13):2401-2403.
- [4] 吴攀龙.腰椎关节松动术治疗腰椎间盘突出症的临床研究[D].济南:山东中医药大学,2017.
- [5] 杨舟,艾坤,于隽,等.浅谈点按法的临床应用现状[J].中华中医药杂志,2015,30(6):2026-2028.
- [6] 文毅,苏峰,刘肃,等.L4-5椎体有限元模型建立及退变椎间盘力学分析[J].中国组织工程研究,2019,23(8):1222-1227.
- [7] 黄菊英,李海云,吴浩.腰椎间盘突出症力学特征的仿真计算方法[J].医用生物力学,2012,27(1):96-101.
- [8] 陈芯仪.不同角度肘按法对椎间盘突出腰椎应力作用的有限元分析[D].长沙:湖南中医药大学,2020.
- [9] 冯勇,刘道志.不同腰椎融合器对邻近节段影响的生物力学研究[J].中国生物医学工程学报,2010,29(5):717-723.
- [10] 方新果,赵改平,王晨曦,等.基于CT图像腰椎L4L5节段有限元模型建立与分析[J].中国生物医学工程学报,2014,33(4):487-492.
- [11] FAIZAN A, SAIRYO K, GOEL V K, et al. Biomechanical rationale of ossification of the secondary ossification center on apophyseal bony ring fracture: A biomechanical study[J]. Clinical Biomechanics (Bristol, Avon), 2007, 22(10): 1063-1067.
- [12] GUO L X, LI R, ZHANG M. Biomechanical and fluid flowing characteristics of intervertebral disc of lumbar spine predicted by poroelastic finite element method[J]. Acta of Bioengineering and Biomechanics, 2016, 18(2): 19-29.
- [13] 王宏卫,刘新宇,万熠.人体腰椎L4~L5段有限元模型建立及力学有效性验证[J].医学与哲学(B),2017,38(5):50-53.
- [14] MARKOLF K L, MORRIS J M. The structural components of the intervertebral disc: a study of their contributions to the ability of the disc to withstand compressive forces[J]. JBJS,1974, 56(4): 675-687.
- [15] 毛磊.牵引推拿配合单拇指顶推复位法治疗腰椎间盘突出症的疗效观察[J].中国实用医药,2020,15(1):169-171.
- [16] 方周林.肘按法为主治疗腰椎间盘突出症临床分析[J].按摩与导引, 2005(1):10-11.
- [17] 胡军飞,范炳华.指按法不同作用力方向治疗腰椎间盘突出症132例疗效观察[J].现代康复,2001,5(20):97-98.
- [18] 李延红,张晓刚,李具宝,等.腰椎拔伸手法三维有限元模型分析[J].浙江中医杂志,2010,45(12):879-880.
- [19] 周鑫,朱清广,孔令军,等.推拿手法生物力学研究方法的基本方向[J].中华中医药杂志,2019,34(3):1120-1123.
- [20] 徐海涛,李松,刘澜,等.腰椎斜扳手法时椎间盘的有限元分析[J].中国组织工程研究与临床康复,2011,15(13):2335-2338.
- [21] 张晓刚,秦大平,宋敏,等.拔伸按压手法对退变腰椎节段应力分布影响的有限元分析[J].中华中医药杂志,2013,28(10):3108-3114.
- [22] TSAI P I, HSU C C, CHEN S Y, et al. Biomechanical investigation into the structural design of porous additive manufactured cages using numerical and experimental approaches[J]. Computers in Biology and Medicine, 2016, 76: 14-23.
- [23] 杨学锋,李具宝,李延红,等.模拟按压手法腰椎运动节段三维有限元模型分析[J].中国中医骨伤科杂志,2009,17(10):18-19,22.
- [24] 刘潇,刘耀升,刘蜀彬.有限元法分析腰椎融合与非融合后的应力分布[J].中国组织工程研究,2018,22(3):409-414.

(本文编辑 匡静之)