

· 基础研究 ·

不同体位下按压手法治疗腰椎间盘突出症的三维有限元分析

尹本敬^{1,2}, 卢钰^{1,2}, 吉富涛¹, 邱荣能¹, 谢元洋¹, 陈葛¹, 徐天利¹, 保超宇^{1,2}, 李具宝^{1,2}

(1. 云南中医药大学, 云南 昆明 650500; 2. 云南中医药大学第一附属医院 云南省中医医院骨四科, 云南 昆明 650100)

【摘要】 目的: 通过有限元分析法比较不同体位下按压手法治疗腰椎间盘突出症(lumbar disc herniation, LDH)三维模型的生物力学作用。方法: 收集 1 例 48 岁 LDH 女性患者(身高 163 cm, 体重 53 kg)的腰椎 CT 图像, 使用 Mimics 20.0、Geomagic Studio、Solidworks 等软件建立 L_{4,5} 节段 LDH 患者的三维有限元模型。分别模拟水平位置、前屈 30°、后伸 10° 体位下的按压手法, 在施加按压力之后, 观察不同体位下按压手法对椎间盘、神经根各个组织的应力、应变、位移的影响。结果: 成功建立 L_{4,5} 节段的有限元模型, 并验证模型有效, 分别在水平位置、前屈 30°、后伸 10° 体位下进行按压手法时, 纤维环应力大小分别为 0.732、5.929、1.286 MPa, 髓核应力大小分别为 0.190、1.527、0.295 MPa, 纤维环应变大小分别为 0.097、0.922、0.424, 髓核应变大小分别为 0.153、1.222、0.282; 椎间盘在 Y 方向上的整体位移距离分别为 -3.707、-18.990、-4.171 mm, 神经根在 Y 方向上的位移距离分别为 +7.836、+5.341、+3.859 mm; 神经根和椎间盘在 Y 方向上的相对位移距离分别为 11.543、24.331、8.030 mm。结论: 按压手法能使突出的椎间盘产生收缩和回纳趋势, 通过增加突出椎间盘和神经根之间的距离, 达到减轻神经压迫症状, 达到对 LDH 的治疗目的, 其中在前屈 30° 时按压手法作用效果更佳。

【关键词】 腰椎间盘突出症; 三维有限元; 按压手法; 不同体位

中图分类号: R274.9

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.20230148

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Three-dimensional finite element analysis of lumbar disc herniation under different body positions

YIN Ben-jing^{1,2}, LU Yu^{1,2}, JI Fu-tao¹, QIU Rong-neng¹, XIE Yuan-yang¹, CHEN Ge¹, XU Tian-li¹, BAO Chao-yu^{1,2}, LI Ju-bao^{1,2}

(1. Yunnan University of Traditional Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan, China; 2. The Fourth Department of Orthopaedics, the First Affiliated Hospital of Yunnan University of Traditional Chinese Medicine, Yunnan Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine, Kunming 650100, Yunnan, China)

ABSTRACT Objective To compare biomechanical effects of different postural compression techniques on three-dimensional model of lumbar disc herniation (LDH) by finite element analysis. **Methods** Lumbar CT image of a 48-year-old female patient with LDH (heighted 163 cm, weighted 53 kg) was collected. Mimics 20.0, Geomagic Studio, Solidworks and other software were used to establish three-dimensional finite element model of LDH on L_{4,5} segments. Compression techniques under horizontal position, 30° forward bending and 10° backward extension were simulated respectively. After applying the pressure, the effects of compression techniques under different positions on stress, strain and displacement of various tissues of intervertebral disc and nerve root were observed. **Results** L_{4,5} segment finite element model was successfully established, and the model was validated. When compression manipulation was performed on the horizontal position, 30° flexion and 10° extension, the annular stress were 0.732, 5.929, 1.286 MPa, the nucleus pulposus stress were 0.190, 1.527, 0.295 MPa, and the annular strain were 0.097, 0.922 and 0.424, the strain sizes of nucleus pulposus were 0.153, 1.222 and 0.282, respectively. The overall displacement distance of intervertebral disc on Y direction were -3.707, -18.990, -4.171 mm, and displacement distance of nerve root on Y direction were +7.836, +5.341, +3.859 mm, respectively. The relative displacement distances of nerve root and intervertebral disc on Y direction were 11.543, 24.331 and 8.030 mm, respectively. **Conclusion** Compression manipulation could make herniated intervertebral disc produce contraction and retraction trend, by increasing the distance between herniated interverte-

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 81860862); 青年岐黄学者[编号: 国中医药人教函(2022)256号]; 云南省高层次中医药人才学科带头人[编号: 云卫中医发展发(2021)1号]

Fund program: National Natural Science Foundation of China (No.81860862)

通讯作者: 李具宝 E-mail: 354964077@qq.com

Corresponding author: LI Ju-bao E-mail: 354964077@qq.com

bral disc and nerve root, to reduce symptoms of nerve compression, to achieve purpose of treatment for patients with LDH, in which the compression manipulation is more effective when the forward flexion is 30°.

KEYWORDS Lumbar disc herniation; Three-dimensional finite element; Compression manipulation; Different body positions

腰椎间盘突出症 (lumbar disc herniation, LDH) 是由于椎间盘退变后突出的髓核刺激或直接压迫神经根导致的一组综合征, 常见症状有腰痛、坐骨神经痛等^[1]。LDH 是脊柱外科和疼痛科的常见疾病, 发病率为 2%~3%, 在成年人的脊柱手术中, LDH 患者占比最高^[2]。LDH 会严重影响患者的生活质量, 同时, 手术治疗和手术后的康复增加了患者的社会医疗费用^[3]。随着对 LDH 研究的不断深入, 非手术治疗已成为目前 LDH 的首选方案^[4], 许多 LDH 患者经过规范、科学的保守治疗, 能够延缓甚至避免手术^[5]。中医手法治疗 LDH 具有疗效好、安全性高、无创等优势^[6], 不同地域也有许多不同的中医手法流派^[7], 其中按压手法操作简便安全, 临床应用广泛。实施按压手法时, 患者通常取俯卧位, 随着中医手法的发展和进步, 出现了许多辅助手法床^[8], 能在不同体位下完成按压手法治疗, 但是不同体位下的疗效差异和生物力学机制还缺乏深入研究。本研究拟构建 L_{4,5} 运动节段 LDH 的三维有限元模型, 分别模拟不同体位下的按压手法作用, 分析不同体位下按压手法对腰椎功能单元各个组织的应力、应变和位移的影响, 及其生物力学机制特点和疗效差异, 以期为临床寻找更佳的手法操作方案。

1 材料与方法

1.1 实验仪器与设备

实验仪器: 采用德国西门子公司 64 排 CT 机对患者腰椎进行扫描, 扫描厚度 0.3 mm, 扫描电压 120 kV, 电流 205.50 mA, 扫描矩阵 512×512, 获得轴位断层图像 376 层, 图像以 DICOM 格式存储。计算机硬件 Intel (R) Core (TM) i9-9900 CPU 3.6 GHz, 64 G 内存, Radeon (TM) RX460 Graphics 显卡, 16 G 显存, Windows 10 64 位操作系统; 医学图像处理软件 Mimics 20.0 (Materialise 公司, 比利时), Geomagic-Studio 逆向工程软件 (Geomagic 公司, 美国), Solidworks 2014 软件 (Solidworks 公司, 美国), 有限元分析软件 Ansys Workbench 14.5 (Ansys 公司, 美国)。

1.2 观察对象

选择 2017 年 11 月收治的 1 例女性 LDH 患者, 年龄 48 岁, 身高 163 cm, 体重 53 kg, 既往无脊柱手术史和创伤病史。拍摄 X 线片进一步排除脊柱感染、脊柱肿瘤、半椎体、移行椎、脊柱侧弯等疾病, 临床诊断为 L_{4,5} 椎间盘突出症, 患者自愿参加研究并签署知情同意书。

1.3 试验方法

1.3.1 有限元模型建立 采用单样本有限元分析, 计算机模拟方式, 建立 L_{4,5} 三维有限元模型, 先将患者腰椎所有 CT 图像以 DICOM 格式导入 Mimics 20.0 软件中, 选取需要研究的部分, 使用阈值分割、擦除、填充、区域生长等功能提取 L_{4,5} 椎体骨组织得到初步模型, 对其进行修整、打磨, 使模型更加光滑、平整、接近真实椎体, 将模型以点云格式文件从 Mimics 20.0 软件导出, 输入 Geomagic Studio 软件中进一步对模型进行修补、打磨、曲面化等处理, 经过点云阶段、多边形阶段、曲面生成阶段后生成椎体和椎间盘几何实体, 导出 stp 格式文件。然后将 L_{4,5} 椎体及椎间盘模型导入 Solidworks 2014 中进行组装。在 L_{4,5} 椎体轮廓的基础上进一步完成皮质骨、纤维环、髓核、软骨终板、关节突关节软骨及韧带等附属结构的建模, 根据文献, 皮质骨厚度为 0.4 mm, 终板厚度为 0.25 mm^[9]。椎间盘全部体积的 43% 为髓核, 纤维环体积的 20% 为纤维环, 纤维走行呈“交叉状”^[10-11]。模型的韧带包括前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、横突间韧带、棘间韧带、棘上韧带、关节囊, 根据韧带的受力特性, 韧带定义为只承受拉力不承受压力和剪切力, 每种韧带的横截面积取自文献^[11]。小关节面视为非线性的三维接触, 采用面与面接触单元来模拟, 摩擦系数为 0.1^[9]。将以上模型导入有限元分析软件 Ansys Workbench 14.5 中并进行装配、材料属性赋予、相互关系定义和网格划分, 材料所赋予的属性见表 1^[12-13]。

1.3.2 干预措施 施加边界及载荷条件, 模拟按压手法, 作用力为 200 N, 方向沿 Y 轴方向, 由背侧指向腹侧。模型体位取 3 个体位: 水平位置, 前屈 30° 和后伸 10°。

1.4 检测项目与方法

1.4.1 L_{4,5} 三维有限元模型有效性验证 对模型添加边界条件与约束, 固定 L₅ 椎体下表面, 添加关节囊与椎体间的摩擦系数为 0.1, 对 L₄ 上表面施加 500 N 的垂直压力模拟重力, 然后施加 6 N·M⁻¹ 扭矩, 以模拟 L_{4,5} 节段前屈、后伸、左倾、右倾、左旋转、右旋转 6 个方向的基本运动。在软件中获得 L_{4,5} 节段的力学性状, 并与相关文献^[14-15] 数据进行比较, 以验证模型的有效性。

1.4.2 各部位生物力学变化 在边界条件施加完成后, 主要观察和计算水平位置、前屈 30°、后伸 10°

表 1 材料属性
Tab.1 Material attribute

| 序号 | 材料 | 杨氏模量/ MPa | 泊松比 | 面积/ mm ² | 实常数 号 |
|----|--------|--------------|-------|------------------------|----------|
| 1 | 椎体皮质骨 | 11 520.0 | 0.200 | | |
| 2 | 椎体松质骨 | 126.0 | 0.300 | | |
| 3 | 后部结构 | 3 230.0 | 0.250 | | |
| 4 | 椎间盘纤维环 | 92.0 | 0.450 | | |
| 5 | 椎间盘髓核 | 1.0 | 0.499 | | |
| 6 | 终板 | 32.0 | 0.250 | | |
| 7 | 前纵韧带 | 20.0 | 0.300 | 63.7 | 3 |
| 8 | 后纵韧带 | 70.0 | 0.300 | 20 | 4 |
| 9 | 黄韧带 | 50.0 | 0.300 | 40 | 5 |
| 10 | 棘间韧带 | 28.0 | 0.300 | 40 | 6 |
| 11 | 棘上韧带 | 28.0 | 0.300 | 30 | 7 |
| 12 | 关节囊 | 11.2 | 0.300 | 30 | 8 |
| 13 | 横韧带 | 58.7 | 0.300 | 3.6 | 9 |

体位下进行按压手法时,纤维环应力大小、髓核应力大小、纤维环应变大小和髓核应变大小;椎间盘在 Y 方向上的整体位移距离,神经根在 Y 方向上的位移距离;神经根和椎间盘在 Y 方向上的相对位移距离。按压手法作用过程中 L_{4,5} 节段各个组织结构、生物力学、形态变化,椎间盘和神经根之间的相对位移距离。

2 结果

2.1 L_{4,5} 三维有限元模型的建立

最终所建腰椎 L_{4,5} 节段三维有限元模型共有 265 402 个节点,178 708 个单元,高度模拟了 L_{4,5} 节段的结构与材料特性,所建 L_{4,5} 节段三维有限元模型见图 1。

2.2 L_{4,5} 三维有限元模型的验证

将建立的 L_{4,5} 模型在前屈、后伸、侧屈、轴向旋转加载条件下的活动范围与既往研究^[14-15]结果比较。见表 2。本研究所建立的腰椎模型前屈+后伸活动范围为 15.13°,左右侧弯为 12.67°,左右旋转为 4.98°,表明所建立的模型活动范围与既往研究^[14-15]结果基本相同。因此,本研究建立的 L_{4,5} 模型有效。

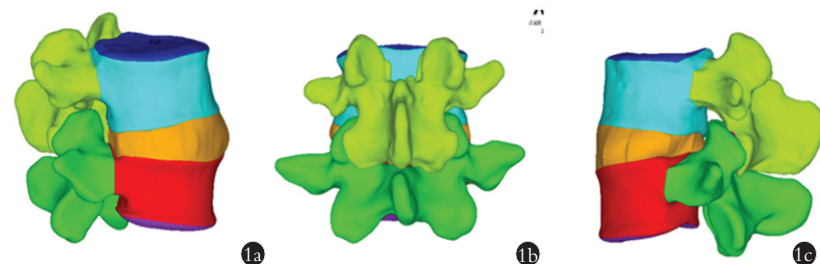


图 1 L_{4,5} 椎体模型图 1a. 右侧面观 1b. 后面观 1c. 左侧面观
Fig.1 L_{4,5} vertebral body model diagram 1a. Right side view 1b. Rear view 1c. Left side view

表 2 模型有效性验证
Tab.2 Model validity verification

| 研究项目 | 单位:° | | |
|----------------------------|----------|----------|---------|
| | 前屈+后伸 | 左侧弯+右侧弯 | 左旋+右旋 |
| YAMAMOTO 等 ^[14] | 14.8±2.1 | 12.2±2.3 | 3.7±1.5 |
| XIAO 等 ^[15] | 14.20 | 13.23 | 4.23 |
| 本研究 | 15.13 | 12.67 | 4.98 |

2.3 不同体位下椎间盘应力情况

通过椎间盘受力云图可以看出,在不同体位下进行按压手法时,椎间盘的纤维环应力大于髓核应力,并且椎间盘前方所受应力较椎间盘后方明显更大,见图 2。在 3 种体位中,取前屈 30°体位时,应力较其他 2 种体位变化更大。见表 3。

表 3 各种体位下椎间盘应力大小
Tab.3 Stress magnitude of intervertebral disc under different positions

| 组织结构 | 单位:MPa | | |
|------|--------|--------|--------|
| | 水平体位 | 前屈 30° | 后伸 10° |
| 纤维环 | 0.732 | 5.929 | 1.286 |
| 髓核 | 0.190 | 1.527 | 0.295 |

2.4 不同体位下椎间盘应变情况

在进行按压手法时,在水平体位和前屈 30°体位时,椎间盘的应变都是髓核应变大于纤维环的应变,从应变的矢量图可以看出这 2 个体位下椎间盘应变趋势较为一致,在椎间盘的后方都是向前方应变,在椎间盘的中部则是向前、向左、向右应变,而在椎间盘的前方及左右两侧则是向中部应变,这可能与纤维环及周围的韧带产生的反作用力有关。在前屈 30°和后伸 10°体位中,前屈 30°的应变明显大于水平体位的应变。在后伸 10°体位时,其髓核应变小于纤维环的应变,其应变方向也不相同,在椎间盘的中部和后部,应变方向指向后方,而在椎间盘的前部应变方向则是指向前方。见图 3、图 4 和表 4。

2.5 各种体位下椎间盘总位移情况

根据椎间盘的位移云图显示,3 种体位下椎间盘的位移趋势具有相似性,椎间盘整体都向前移动,其中前方位移最大,中部次之,后方突出部位位移最小。在 3 种体位中,前屈 30°体位时,椎间盘位移较其他 2 种体位明显更大,水平体位次之,而后伸 10°体位时位移最小。见图 5。

2.6 神经根和椎间盘相对位移情况

Y 方向代表了人体前后方向,

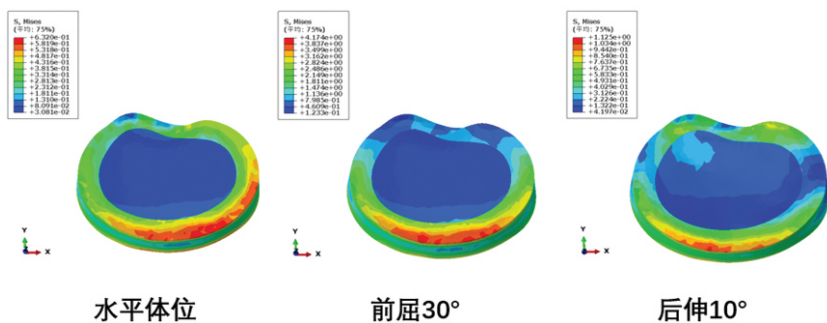


图 2 各种体位下椎间盘应力云图

Fig.2 Stress nephogram of intervertebral disc under different positions

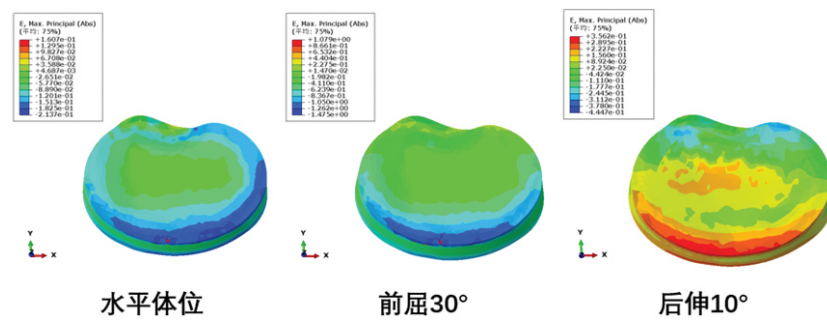


图 3 各种体位下椎间盘应变云图

Fig.3 Strain nephogram of intervertebral disc under different positions

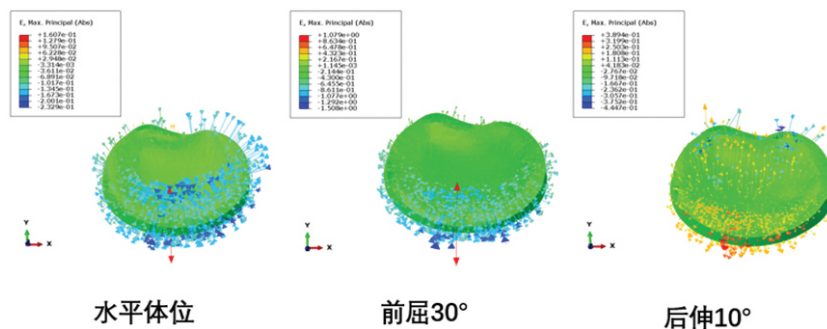


图 4 各种体位下椎间盘应变矢量图

Fig.4 Vectors of intervertebral disc under different positions

表 4 各种体位下椎间盘应变值

Tab.4 Strain value of intervertebral disc under different positions

| 组织结构 | 水平体位 | 前屈 30° | 后伸 10° |
|------|-------|--------|--------|
| 纤维环 | 0.097 | 0.922 | 0.424 |
| 髓核 | 0.153 | 1.222 | 0.282 |

椎间盘和神经根在 Y 轴上的位移,特别是相对位移对于治疗效果具有决定性意义,在 3 种体位下,椎间盘和神经根的位移趋势一致,椎间盘向前移动,神经根向后移动,都具有增加两者相对距离的作用,其中前屈 30°体位相对位移最大(24.331 mm),水平体位次之(11.543 mm),后伸 10°体位最小(8.030 mm)。见图 6、图 7 和表 5。

3 讨论

3.1 手法治疗 LDH 的优势

随着 LDH 患者的逐年增加,高龄和低龄患者也越来越常见,这两类患者对于手术治疗都有诸多限制,因此,LDH 的治疗面临新的挑战和要求^[16],保守治疗的方法越来越被重视^[17]。中医传统手法治疗 LDH 具有无创、费用低、恢复快、疗效好等优点,临床应用越来越广泛。同时对手法的基础研究也更加充分,其中包括生物力学方面的研究^[18],也有手法对人体分子生物学方面影响的研究^[19]。LDH 的治疗手法众多,在各种推拿、整脊手法中,按压手法比较常用,是治疗 LDH 的重要手法。对于其中部分手法也有文献进行了研究,张晓刚等^[20]对拔伸按压手法进行了有限元分析,证明了拔伸按压手法对于 LDH 治疗的有效性和安全性,同时也对体位进行了初步分析。但是既往研究尚未对单独按压手法进行研究,对于各个组织的位移状况也阐释不清。基于此,本研究构建了 L_{4/5} 节段 LDH 患者的三维有限元模型,分别模拟水平位、前屈 30°、后伸 10°不同体位时按压手法下椎间盘和神经根的应力、应变、位移情况,对按压手法的力学机制和治疗机制进一步进行分析。

3.2 按压手法治疗 LDH 的生物力学机制

本研究结果发现在 3 种体位下进行按压手法时,纤维环的应力都大于髓核应力,这样的应力分布能增加纤维环张力,进一步促进突出椎间盘的回缩,减轻患者的临床症状。3 种不同体位下,椎间盘都整体向前移动,其中前方位移最大,中部次之,后方突出部位位移最小,表明按压手法能有效减轻后部的椎间盘突出,后方突出部位椎间盘位移最小,可能是因为突出部位纤维环薄弱,张力变化最小,导致后方椎间盘回纳收缩最小。在 3 种不同体位下,椎间盘和神经根的位移趋势一致,椎间盘都向前移动,神经根都向后移动,都具有增加两者相对距离的作用。突出的椎间盘对神经根的压迫或刺激是导致患者坐骨神经痛的关键因素^[21],按压手法能有效增加突出椎间

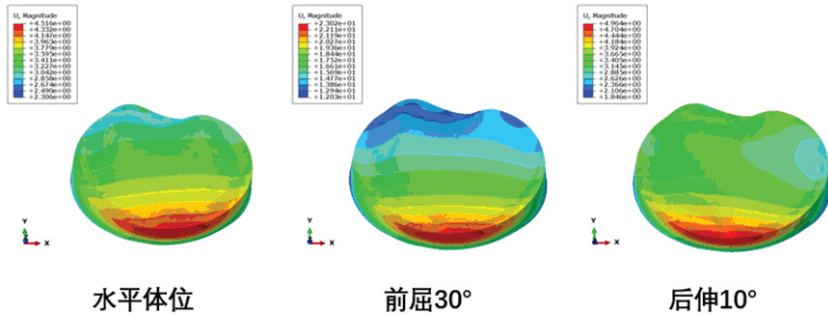


图 5 各种体位下椎间盘总位移云图

Fig.5 Nephogram of total disc displacement under different positions

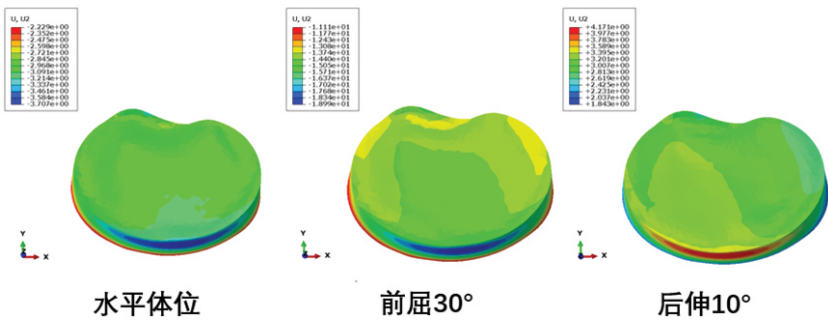


图 6 各种体位下椎间盘 Y 方向位移云图

Fig.6 Nephogram of Y-direction displacement of intervertebral disc under different positions

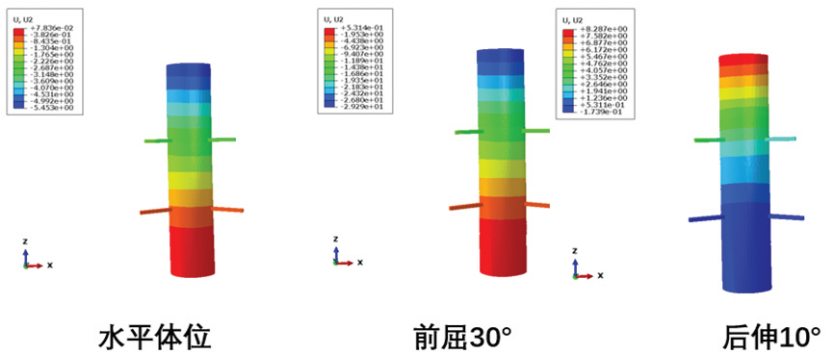


图 7 各种体位下神经根 Y 方向位移云图

Fig.7 Nephogram of Y-direction displacement of nerve root under different positions

表 5 各种体位下椎间盘和神经根 Y 方向位移大小
Tab.5 Displacement of intervertebral disc and nerve root on Y direction under different positions

| 组织结构 | 单位:mm | | |
|------|--------|---------|--------|
| | 水平体位 | 前屈 30° | 后伸 10° |
| 椎间盘 | -3.707 | -18.990 | -4.171 |
| 神经根 | +7.836 | +5.341 | +3.859 |

注：“-”为前方，“+”为后方

盘和神经根之间的相对距离，减轻神经根的压迫症状，并且对粘连起到一定的松解作用，从而达到对 LDH 的治疗目的^[22-23]。

3.3 前屈 30°时按压手法的生物力学分析

本研究结果发现前屈 30°体位能更好地发挥按

压手法的生物力学效应，让椎间盘获得最大形变和位移，能更有效地增加椎间盘和神经根之间的相对距离，取得更好的治疗效果。

从生物力学的角度分析，按压手法将瞬间的按压力作用于腰椎的后方组织结构，通过后方的组织结构将力向前方传导，引起肌肉、骨骼、韧带、关节囊、椎间盘及神经束在三维空间内的应变和位移，起到调整神经根与突出椎间盘之间位置关系，并且改善局部的应力集中状态。不同体位下的生物力学效应差异的原因可能是力学分布的差异，在前屈 30°时，人体呈“拱形”结构，其特点是能将受到的压力分解成向下的压力和向外的推力^[24]。因此，在前屈 30°受到按压手法作用力时，人体除了受到向下的压力以外，按压节段的两端还能受到向外的推力，产生类似于牵引一样的效果，牵引也是治疗 LDH 的重要手段之一，这也是前屈 30°时椎间盘能产生更大向前位移的原因。此外，有限元分析目前还有一定的局限性，人体体位改变会导致组织结构张力变化，在前屈 30°时，后方肌肉、关节囊、棘间韧带、棘上韧带、后纵韧带、后方纤维环张力都大于前方张力，而在后伸 10°时，则情况相反。但目前由于条件所限，并不能很好地模拟这一过程

的真实变化，这也是以后需要探索的研究方向。

参考文献

- [1] CHEN X L, SANDHU H S, VARGAS CASTILLO J, et al. The association between pain scores and disc height change following discectomy surgery in lumbar disc herniation patients: a systematic review and meta-analysis[J]. Eur Spine J, 2021, 30(11): 3265-3277.
- [2] VIALLE L R, VIALLE E N, HENAO J E S, et al. Hérnia discal lombar[J]. Rev Bras Ortop, 2010, 45(1): 17-22.
- [3] GIAMPAOLO L D, CANO E, MISTICONI G F, et al. Lumbar discopathies: correlation between pathology, work eligibility and recognition of technopathy[J]. G Ital Med Lav Ergon, 2021, 43(2): 118-125.
- [4] AMIN R M, ANDRADE N S, NEUMAN B J. Lumbar disc herniation [J]. Curr Rev Musculoskelet Med, 2017, 10(4): 507-516.
- [5] BENZAKOUR T, IGOUMENOU V, MAVROGENIS A F, et al. Current concepts for lumbar disc herniation[J]. Int Orthop, 2019, 43

- (4):841-851.
- [6] 吕立江,李景虎,杨超,等. 杠杆定位手法治疗腰椎间盘突出症疗效及对 Cobb 角影响[J]. 中国骨伤,2021,34(1):86-90.
LYU L J,LI J H,YANG C, et al. Clinical effect of lever positioning manipulation for lumbar disc herniation and its influence on Cobb angle[J]. China J Orthop Traumatol,2021,34(1):86-90. Chinese.
- [7] 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.
LI M,DONG H L,WANG G Z, et al. Effect of different stretching durations on adjacent lumbar segments:changes in intervertebral disc stress and displacement[J]. Chin J Tissue Eng Res,2020,24(21):3281-3286. Chinese.
- [8] 张卉. 核心肌群稳定训练联合脊柱牵伸手法床治疗脊柱源性慢性腰腿痛[J]. 颈腰痛杂志,2019,40(1):123-125.
ZHANG H. Treatment of chronic lumbago and leg pain caused by spine by core muscle group stability training combined with spine stretching and stretching bed method[J]. J Cervicodynia Lumbodynia,2019,40(1):123-125. Chinese.
- [9] ZHONG Z C,WEI S H,WANG J P, et al. Finite element analysis of the lumbar spine with a new cage using a topology optimization method[J]. Med Eng Phys,2006,28(1):90-98.
- [10] MO Z J,ZHAO Y B,WANG L Z, et al. Biomechanical effects of cervical arthroplasty with U-shaped disc implant on segmental range of motion and loading of surrounding soft tissue[J]. Eur Spine J,2014,23(3):613-621.
- [11] DU H G,LIAO S H,JIANG Z, et al. Biomechanical analysis of press-extension technique on degenerative lumbar with disc herniation and staggered facet joint [J]. Saudi Pharm J,2016,24(3):305-311.
- [12] LEE S H,IM Y J,KIM K T, et al. Comparison of cervical spine biomechanics after fixed-and mobile-core artificial disc replacement:a finite element analysis[J]. Spine,2011,36(9):700-708.
- [13] MO Z J,ZHAO Y B,DU C F, et al. Does location of rotation center in artificial disc affect cervical biomechanics [J]. Spine,2015,40(8):E469-E475.
- [14] YAMAMOTO I,PANJABI M M,CRISCO T, et al. Three-dimensional movements of the whole lumbar spine and lumbosacral joint [J]. Spine,1989,14(11):1256-1260.
- [15] XIAO Z T,WANG L Y,GONG H, et al. Biomechanical evaluation of three surgical scenarios of posterior lumbar interbody fusion by finite element analysis[J]. Biomed Eng Online,2012,11:31.
- [16] HARRIS A,WILKENING M,MARRACHE M, et al. Adult lumbar disk herniation;diagnosis,treatment,complications,outcomes,and evidence-based data for patient and health professional counseling [J]. Instr Course Lect,2020,69:607-624.
- [17] CHENG Z X,ZHENG Y J,FENG Z Y, et al. Chinese Association for the Study of Pain:expert consensus on diagnosis and treatment for lumbar disc herniation[J]. World J Clin Cases,2021,9(9):2058-2067.
- [18] 李雁婷,陈剑,刘梦兰,等. 倒盖金被手法在腰椎间盘突出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.
LI Y T,CHEN J,LIU M L, et al. Three-dimensional finite element analysis of Daogaijinbei manipulation on lumbar intervertebral disc biomechanics[J]. Chin J Tissue Eng Res,2022,26(3):340-343. Chinese.
- [19] 吕立江,毛凌宇,李景虎,等. 杠杆定位手法结合脉冲电场对腰椎间盘突出症患者镇痛效应及 IL-1 β 、TNF- α 的影响[J]. 中国骨伤,2021,34(8):780-784.
LYU L J,MAO L Y,LI J H, et al. Lever positioning manipulation combined with pulsed electric field on the analgesic effect of patients with lumbar disc herniation and its influence on IL-1 β and TNF-A[J]. China J Orthop Traumatol,2021,34(8):780-784. Chinese.
- [20] 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.
ZHANG X G,QIN D P,SONG M, et al. Effects of stress distribution of the degenerative intervertebral disc during lumbar pulling and pressing manipulation by Finite element analysis[J]. China J Tradit Chin Med Pharm,2013,28(10):3108-3114. Chinese.
- [21] BERRA L V,RITA A D,LONGHITANO F, et al. Far lateral lumbar disc herniation part 1:imaging,neurophysiology and clinical features[J]. World J Orthop,2021,12(12):961-969.
- [22] 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力学分析[J]. 中华中医药杂志,2019,34(4):1395-1400.
CHEN X,YU J,FENG M S, et al. Mechanical analysis of intervertebral disc in the treatment of degenerative lumbar spondylolisthesis by sitting rotation manipulation[J]. China J Tradit Chin Med Pharm,2019,34(4):1395-1400. Chinese.
- [23] 张雷,郑移兵. 肾着汤结合手法、小针刀、腰椎牵引治疗腰椎间盘突出症的疗效分析[J]. 中草药,2019,50(9):2151-2153.
ZHANG L,ZHENG Y B. Clinical analysis of Shenzhuo Decoction combined with massage manipulation,acupotomy and lumbar traction in treatment of lumbar disc herniation[J]. Chin Tradit Herb Drugs,2019,50(9):2151-2153. Chinese.
- [24] 赵剑,彭芳. 浅析拱形结构的力学特点[J]. 内蒙古石油化工,2011,37(2):32.
ZHAO J,PENG F. Analysis on mechanical characteristics of arch structure[J]. Inn Mong Petrochem Ind,2011,37(2):32. Chinese.

(收稿日期:2023-10-11 本文编辑:李宜)