

## 斜扳手法治疗腰椎小关节滑膜嵌顿的有限元分析

卢钰<sup>1,2</sup>, 向俊宜<sup>1,2</sup>, 尹本敬<sup>1,2</sup>, 保超宇<sup>1,2</sup>, 毕衡<sup>1,2</sup>, 李骥征<sup>1,2</sup>, 陈帅<sup>1,2</sup>, 何光雄<sup>1,2</sup>, 李具宝<sup>1,2</sup><https://doi.org/10.12307/2023.619>

投稿日期: 2022-06-28

采用日期: 2022-08-08

修回日期: 2022-08-23

在线日期: 2022-09-24

中图分类号:

R459.9; R318; O242.21

文章编号:

2095-4344(2023)27-04271-06

文献标识码: A

文章快速阅读: 三维有限元法分析斜扳手法治疗腰椎关节滑膜嵌顿的生物力学作用机制

建立L<sub>4-5</sub>三维有限元模型

在模型上模拟斜扳手法

观察L<sub>4-5</sub>节段各组织力学、形态以及腰椎小关节接触面积的变化

结论:

右侧关节突应力和应变会显著减少, 并且其接触面积会减少至0, 而左侧接触面积增大。

## 文题释义:

**斜扳手法:** 患者取侧卧位, 患侧在上, 患侧下肢呈屈髋屈膝体位, 并且使健侧下肢保持伸直, 术者正对患者, 一手掌按住其肩前部, 另一手用肘部(或手掌)抵住其臀部, 然后双手协同用力, 作相反方向上的缓慢推动, 使其腰椎被动扭动, 当旋转到最大限度时, 再做一个稍增大幅度的突发性扳动, 一般此时可听到“喀嗒”的弹响声, 表示手法成功。

**有限元分析:** 利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟。将复杂问题分解为简单而又相互作用的因素, 就可以用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统。

## 摘要

**背景:** 斜扳手法对于腰椎关节滑膜嵌顿的疗效可靠, 已被临床广泛应用, 但是斜扳手法治疗腰椎关节滑膜嵌顿的相关研究还比较欠缺。

**目的:** 利用三维有限元法分析斜扳手法治疗腰椎关节滑膜嵌顿的生物力学作用机制, 为斜扳手法治疗腰椎关节滑膜嵌顿提供理论依据。

**方法:** 采集腰椎关节滑膜嵌顿患者的腰椎CT数据, 利用Mimics和Ansys软件建立脊柱L<sub>4-5</sub>运动单元的三维有限元模型。模拟临床左侧卧位斜扳手法的操作过程, 分析斜扳手法对腰椎L<sub>4-5</sub>节段各组织结构生物力学、形态变化以及小关节接触面积的影响。

**结果与结论:** ①建立了腰椎L<sub>4-5</sub>节段三维有限元模型, 并验证了模型的有效性; ②在施加斜扳手法前后, 左侧小关节软骨应力从2.959 MPa增加到14.35 MPa, 应变从0.078 34增加到0.345 1, 关节软骨接触面积从20.806 2 mm<sup>2</sup>增加到94.872 7 mm<sup>2</sup>; 而右侧小关节软骨应力从3.127 MPa减小到0 MPa, 应变从0.081 96减小到0, 关节软骨接触面从16.705 3 mm<sup>2</sup>减小到右侧0 mm<sup>2</sup>; ③提示斜扳手法对于腰椎滑膜嵌顿患者具有良好的疗效, 其可以改变关节突的应力、应变、上下关节突的接触面积, 充分松解、打开关节突关节, 达到复位关节突关节、解除滑膜嵌顿的治疗目的。

**关键词:** 腰椎小关节; 三维有限元; 滑膜嵌顿; 斜扳手法; 生物力学

## Finite element analysis of oblique-pulling manipulation in the treatment of lumbar synovial incarceration

Lu Yu<sup>1,2</sup>, Xiang Junyi<sup>1,2</sup>, Yin Benjing<sup>1,2</sup>, Bao Chaoyu<sup>1,2</sup>, Bi Heng<sup>1,2</sup>, Li Jizheng<sup>1,2</sup>, Chen Shuai<sup>1,2</sup>, He Guangxiong<sup>1,2</sup>, Li Jubao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Yunnan Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan Province, China; <sup>2</sup>Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan Province, China

Lu Yu, Master, Attending physician, Yunnan Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan Province, China; Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan Province, China

**Corresponding author:** Li Jubao, MD, Associate chief physician, Yunnan Provincial Hospital of Traditional Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan Province, China; Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, Yunnan Province, China

## Abstract

**BACKGROUND:** Oblique-pulling manipulation has a reliable curative effect on lumbar synovial incarceration, and it has been widely used in the clinic. However, the related research on the treatment of lumbar synovial incarceration by oblique-pulling manipulation is still relatively lacking.

**OBJECTIVE:** To analyze the biomechanical mechanism and effect of oblique-pulling manipulation in the treatment of lumbar synovial incarceration by three-dimensional finite element method, and provide theoretical basis for the treatment of lumbar synovial incarceration by oblique-pulling manipulation.

<sup>1</sup> 云南省中医医院, 云南省昆明市 650500; <sup>2</sup> 云南中医药大学, 云南省昆明市 650500

第一作者: 卢钰, 男, 1989年生, 云南省永善县人, 汉族, 2019年昆明医科大学毕业, 硕士, 主治医师, 主要从事脊柱外科方面的研究。

通讯作者: 李具宝, 博士, 副主任医师, 云南省中医医院, 云南省昆明市 650500; 云南中医药大学, 云南省昆明市 650500

<https://orcid.org/0000-0002-3741-5643> (卢钰)

基金资助: 国家自然科学基金(81860862, 81460736), 项目负责人: 李具宝; 云南省应用基础研究计划面上项目(2011FB146), 项目负责人: 李具宝;

云南省中青年学术和技术带头人后备人才(云科人发[2019]7号), 项目负责人: 李具宝; 云南省高层次中医药人才学科带头人

及云南省卫生科技计划项目(2017NS161), 项目负责人: 李具宝; 云南省科技厅—云南中医学院应用基础研究联合专项青年项目(11372110236), 项目负责人: 卢钰

引用本文: 卢钰, 向俊宜, 尹本敬, 保超宇, 毕衡, 李骥征, 陈帅, 何光雄, 李具宝. 斜扳手法治疗腰椎小关节滑膜嵌顿的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(27):4271-4276.

引用本文: 卢钰, 向俊宜, 尹本敬, 保超宇, 毕衡, 李骥征, 陈帅, 何光雄, 李具宝. 斜扳手法治疗腰椎小关节滑膜嵌顿的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(27):4271-4276.



**METHODS:** The CT data of patients with lumbar synovial incarceration were collected, and the three-dimensional finite element model of L<sub>4-5</sub> motor unit of spine was established by using Mimics and Ansys software. The operation process of the oblique-pulling manipulation in the left lateral position was simulated, and the influence of the oblique-pulling manipulation on the biomechanics, morphological changes and facet joint contact area of each tissue structure of L<sub>4-5</sub> segment of lumbar spine was analyzed.

**RESULTS AND CONCLUSION:** (1) A three-dimensional finite element model of lumbar L<sub>4-5</sub> segment was established, and the validity of the model was verified. (2) Before and after the oblique-pulling manipulation was applied, the stress of left facet joint cartilage increased from 2.959 MPa to 14.35 MPa; the strain increased from 0.078 34 to 0.345 1, and the contact area of articular cartilage increased from 20.806 2 mm<sup>2</sup> to 94.872 7 mm<sup>2</sup>. On the other hand, the stress of the right facet joint cartilage decreased from 3.127 MPa to 0 MPa; the strain decreased from 0.081 96 to 0, and the articular cartilage contact surface decreased from 16.705 3 mm<sup>2</sup> to 0 mm<sup>2</sup> on the right. (3) It is concluded that oblique-pulling manipulation has a good effect on patients with lumbar synovial incarceration. It can change the stress and strain of the articular process and the contact area of the upper and lower articular processes, fully release and open the articular process, and achieve the therapeutic purpose of reducing the articular process and relieving the synovial incarceration.

**Key words:** lumbar facet joint; three-dimensional finite element; synovial incarceration; oblique-pulling manipulation; biomechanics

**Funding:** National Natural Science Foundation of China, No. 81860862, 81460736 (to LJB); Yunnan Province Applied Basic Research Program (General Project), No. 2011FB146 (to LJB); Young and Middle-Aged Academic and Technical Leaders in Yunnan Province Person Reserve Talent, No. [2019]7 (to LJB); Yunnan Provincial High-level Chinese Medicine Talent Discipline Leader and Yunnan Provincial Health Science and Technology Plan Project, No. 2017NS161 (to LJB); Yunnan Provincial Department of Science and Technology-Yunnan College of Traditional Chinese Medicine Applied Basic Research Joint Special Youth Project, No. 11372110236 (to LY)

**How to cite this article:** LU Y, XIANG JY, YIN BJ, BAO CY, BI H, LI JZ, CHEN S, HE GX, LI JB. Finite element analysis of oblique-pulling manipulation in the treatment of lumbar synovial incarceration. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2023;27(27):4271-4276.

## 0 引言 Introduction

腰背部疼痛在临床上十分常见, 据报道, 其患病率可达 70%–85%, 其中 10%–20% 的患者会转化为慢性腰背部疼痛, 长时间被该疾病困扰<sup>[1]</sup>。有文献认为, 15%–52% 的腰背痛患者是由于小关节引起的<sup>[2]</sup>, 而小关节囊在其中扮演了重要角色<sup>[3]</sup>。当体位忽然改变或腰部受到外力时, 部分患者由于小关节间隙张开过度, 关节内压力不均, 将小关节囊吸入关节腔内, 在关节回归正常位置时造成小关节囊的嵌顿<sup>[4]</sup>, 从而引发疼痛和肌肉痉挛, 造成局部充血肿胀, 产生无菌性炎症<sup>[5]</sup>, 严重者甚至出现滑膜坏死。急性腰椎关节滑膜嵌顿如果没有得到及时妥善治疗, 常常会慢性化, 发生小关节炎和退变<sup>[6]</sup>, 影响腰椎关节突关节的稳定性, 加速腰椎间盘的退变, 导致滑脱、椎管狭窄等疾病的发生。

腰椎关节滑膜嵌顿症在中医属于“筋出槽, 骨错缝”范畴, 中医学使用旋转复位手法打开、松解关节突关节, 解除滑膜的嵌顿<sup>[7]</sup>, 从而达到治疗效果。其中斜扳手法在该病的治疗中使用最为广泛, 能及时有效地复位关节突关节的错位, 解除滑膜嵌顿, 治疗效果确切、操作简便、起效快、价格低、得到广大患者和临床工作者的高度认可<sup>[8-9]</sup>。目前采用三维有限元的方法对斜扳手法进行的研究有较多方向, 包括其力学机制、对脊柱生物力学的影响、对椎间盘突出患者的治疗效果等<sup>[10-11]</sup>, 都取得了一定成果, 斜扳手法治疗腰椎滑膜嵌顿的治疗效果已有相关报道, 但是其力学机制研究还比较欠缺。此文建立了 L<sub>4-5</sub> 节段腰椎滑膜嵌顿患者的三维有限元模型, 并对模型加载斜扳手法, 通过有限元法分析斜扳手法治疗腰椎滑膜嵌顿的生物力学机制和疗效, 为斜扳手法治疗腰椎滑膜嵌顿症提供理论依据。

## 1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 单样本有限元分析, 计算机模拟实验。

1.2 时间及地点 实验于 2016 年 4 月至 2020 年 8 月在云南省中医医院完成。

1.3 对象 选择 2017 年 6 月云南中医药大学第一附属医院收治的一位女性 L<sub>4-5</sub> 节段滑膜嵌顿症患者, 年龄 32 岁, 身高 168 cm, 体质量 63 kg, 患者弯腰搬重物后导致腰背部疼痛 3 h 余, 查体: L<sub>4-5</sub> 节段棘突及周围压痛, 腰部活动受限, 活动时疼痛明显加重, 双下肢肌力、感觉无异常。X 射线片检查未见明显异常。既往无脊柱手术史、无脊柱创伤病史, X 射线片检查排除脊柱感染、脊柱肿瘤等相关疾病, 临床诊断: L<sub>4-5</sub> 腰椎滑膜嵌顿, 患者知情同意并签字, 研究已通过云南省中医医院伦理委员会批准。

1.4 材料 用 64 排 CT(Siemens 公司, 德国) 对患者腰椎进行扫描, 扫描厚度 0.3 mm, 扫描电压 120 kV, 电流 205.5 mA, 扫描矩阵 512×512, 获得轴位断层图像 376 层, 用 DICOM 格式保存图片。

1.5 试验设备: 计算机硬件 Intel(R)Core(TM)i9-9900CPU 3.6 GHz, 64 G 内存, Win10 64 位系统; 医学图像处理软件 Mimics 20.0(Materialis 公司, 比利时); Geomagic Studio 逆向工程软件(Geomagic 公司, 美国); Solidwords 2014 软件(Solidword 公司, 美国); 有限元分析软件 Ansys Workbench 14.5(Ansys 公司, 美国)。

### 1.5 方法

1.5.1 建立 L<sub>4-5</sub> 三维有限元模型 把患者腰椎 CT 图像导入 Mimics 20.0 软件中, 格式为 DICOM, 使用阈值分割、区域生长等功能获得 L<sub>4-5</sub> 初步模型, 对其进行进一步处理, 使其接近真实椎体, 将模型从 Mimics 20.0 软件导出, 输入 Geomagic Studio 软件, 进一步对模型进行处理, 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。然后将 L<sub>4-5</sub> 节段模型导入 Solidwords 2014 中进行组装。在 L<sub>4-5</sub> 椎体轮廓的基础上进一步完成脊柱各个附属结构的建模, 根据文献, 皮质骨厚度 0.4 mm, 终板厚度 0.25 mm<sup>[12]</sup>。椎间盘全部体积的 43% 为髓核。模型的韧带包括前、后纵韧带、黄韧带、横突间韧带、关节囊等, 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 [13], 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<sup>[14]</sup>。将以上模型导入 Ansys Workbench 14.5 软件, 进行装配、材料属性赋予等处理, 材料所赋予的属性见表 1, 2<sup>[15-16]</sup>。

表 1 | 材料属性表 1  
Table 1 | Material attribute 1

序号	材料	弹性模量 (MPa)	泊松比
1	椎体皮质骨	11 520	0.2
2	椎体松质骨	126	0.3
3	后部结构	3 230	0.25
4	椎间盘纤维环	92	0.45
5	椎间盘髓核	1	0.499
6	终板	32	0.25

表 2 | 材料属性表 2  
Table 2 | Material attribute 2

序号	材料	弹性模量 (MPa)	泊松比	面积 (mm <sup>2</sup> )	实常数号
7	前纵韧带	20	0.3	63.7	3
8	后纵韧带	70	0.3	20	4
9	黄韧带	50	0.3	40	5
10	棘间韧带	28	0.3	40	6
11	棘上韧带	28	0.3	30	7
12	关节囊	11.2	0.3	30	8
13	横韧带	58.7	0.3	3.6	9

1.5.2 腰椎 L<sub>4-5</sub> 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 L<sub>5</sub> 椎体下表面, 添加关节囊与椎体间的摩擦系数为 0.1, 对 L<sub>4</sub> 上表面施加 500 N 垂直压力模拟重力, 然后施加 6 N·m 扭矩, 模拟 L<sub>4-5</sub> 节段屈伸、旋转、侧倾基本运动, 获得的数据与文献数据结果对比<sup>[17-18]</sup>, 以验证模型的有效性。

1.5.3 边界及载荷条件 未施加手法时, 模拟加载 40% 体质量的重力; 侧卧位下斜扳手法的模拟, 模型处于左侧卧位, 根据文献 [19] 对模型进行力学加载, 于 L<sub>4</sub> 上缘右侧加载 246 N 向后的推扳力, 于 L<sub>5</sub> 下缘右侧加载 266 N 向前的推扳力, 以此来模拟临床斜扳手法的操作过程。

1.6 主要观察指标 腰椎斜扳手法过程中 L<sub>4-5</sub> 节段各个组织结构的生物力学、形态变化, 腰椎小关节接触面积的变化。

## 2 结果 Results

2.1 L<sub>4-5</sub> 有限元模型建立 获得的 L<sub>4-5</sub> 模型有 265 402 个节点, 178 708 个单元, 高度还原了 L<sub>4-5</sub> 节段结构。

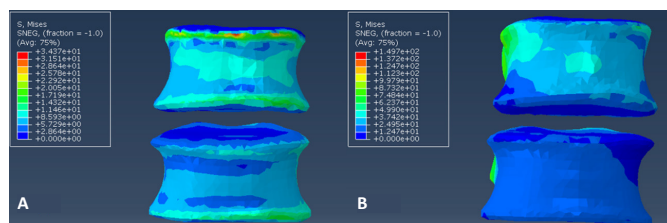
2.2 L<sub>4-5</sub> 有限元模型验证 将建立的 L<sub>4-5</sub> 节段模型在加载条件下的活动范围与既往研究相对比, 见表 3, 可以看出, 所建立的模型活动范围与既往研究结果基本相同, 因而, 此次研究中建立的 L<sub>4-5</sub> 节段模型有效。

2.3 斜扳手法对腰椎 L<sub>4-5</sub> 节段各组织结构的生物力学影响 从应力云图可见, 在模拟重力进行加载、未施加斜扳手法时, L<sub>4</sub> 椎体的上终板受到的应力最大, 其次为 L<sub>5</sub> 的下终板; 而

表 3 | 模型有效性验证  
Table 3 | Model validity verification

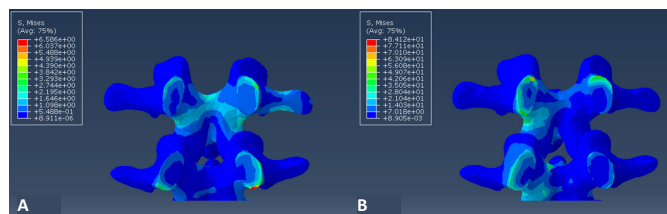
研究	前屈 + 后伸活动范围 (°)	左 + 右侧弯活动范围 (°)	左 + 右旋转活动范围 (°)
YAMATO 等 <sup>[17]</sup>	14.80±2.10	12.20±2.25	3.70±1.50
XIAO 等 <sup>[18]</sup>	14.2	13.23	4.23
此次研究	15.13	12.67	4.98

在施加斜扳手法时, 椎体应力的分布会在左侧明显增加 (图 1)。从脊柱后部结构 (去除了部分后方附件) 的应力情况来看, 未施加手法时, 应力主要集中在峡部及关节突位置, 双侧应力大小基本一致; 而在施加斜扳手法时, 后方结构的应力明显集中于左侧, 右侧的应力会明显减小, 后方结构的应变情况与应力结果相似 (图 2, 3); 小关节软骨情况, 未施加斜扳手法时, 左侧小关节软骨应力值大小为 2.959 MPa, 右侧为 3.127 MPa; 而施加斜扳手法后, 左侧小关节软骨应力值大小为 14.35 MPa, 右侧为 0 MPa (图 4), 在观察应变情况时, 可以得出与应力类似的结果, 在未施加斜扳手法时, 左侧小关节软骨应变值大小为 0.078 34, 右侧为 0.081 96, 两侧应变基本一致; 而在施加斜扳手法时, 左侧小关节软骨的应变会明显增大, 而右侧减小, 其中左侧小关节软骨应变值大小为 0.345 1, 而右侧为 0 (图 5)。上下关节突的关键软骨接触面积也与其应力和应变趋势一致, 在未施加斜扳手法时左侧小关节软骨接触面积为 20.806 2 mm<sup>2</sup>, 右侧为 16.705 3 mm<sup>2</sup>; 在施加斜扳手法时, 左侧小关节软骨接触面积为 94.872 7 mm<sup>2</sup>, 右侧 0 mm<sup>2</sup>。见表 4-6。



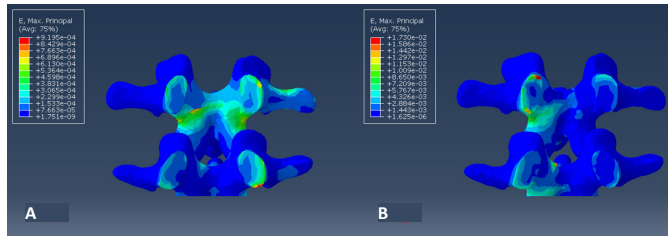
图注: 图 A 为未施加手法时椎体应力云图, B 为施加斜扳手法时椎体应力云图

图 1 | 未施加手法与斜扳手法时的椎体应力对比  
Figure 1 | Comparison of vertebral body stress when no manipulation is applied and when the oblique-pulling manipulation is used



图注: 已经去除部分椎体后方结构, 图 A 为未施加手法时椎体后方结构应力云图, B 为施加斜扳手法时椎体后方结构应力云图

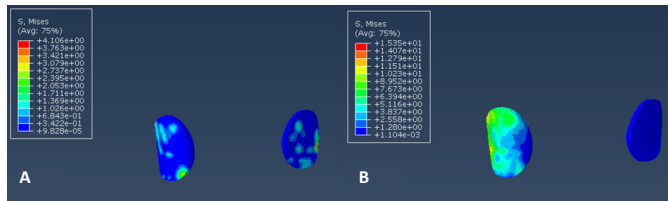
图 2 | 未施加手法与斜扳手法时的后方结构应力对比  
Figure 2 | Stress comparison of the rear structure when no manipulation is applied and when the oblique-pulling manipulation is used



图注：已经去除部分椎体后方结构，图A为未施加手法时椎体后部结构应变云图，B为施加斜扳手法时椎体后部结构应变云图

图3 | 未施加手法与斜扳手法时的后方结构应变对比

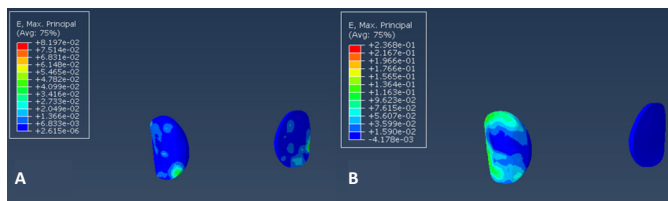
Figure 3 | Comparison of the rear structural strain when no manipulation is applied and when the oblique-pulling manipulation is used



图注：图A为未施加手法时关节面软骨应力云图，B为施加斜扳手法时关节面软骨应力云图

图4 | 未施加手法与斜扳手法时的关节应力对比

Figure 4 | Comparison of joint stress between no manipulation and oblique-pulling manipulation



图注：图A为未施加手法时关节面软骨应变云图，B为施加斜扳手法时关节面软骨应变云图

图5 | 未施加手法与斜扳手法时关节软骨应变对比

Figure 5 | Comparison of articular cartilage strain when no manipulation is applied and when the oblique-pulling manipulation is used

表4 | L<sub>4-5</sub>不同结构应力数值 (MPa)

组别	皮质骨	松质骨	后部结构	终板	纤维环	髓核	神经根	小关节面软骨	
								左	右
无加载时	34.590	0.693	9.564	1.347	0.593	0.087	1.126	2.959	3.127
斜扳手法	145.800	5.334	58.380	5.129	2.971	0.461	4.451	14.35	0.000

表5 | L<sub>4-5</sub>不同结构应变数值

组别	皮质骨	松质骨	后部结构	终板	纤维环	髓核	神经根	小关节面软骨	
								左	右
无加载时	0.003	0.006	0.001	0.054	0.140	0.187	0.016	0.078	0.082
斜扳手法	0.021	0.059	0.024	0.215	0.769	0.594	0.058	0.345	0.000

表6 | L<sub>4-5</sub>关节软骨接触面积 (mm<sup>2</sup>)

组别	关节软骨接触面积	
	左	右
无加载时	20.806	16.705
斜扳手法	94.873	0.000

### 3 讨论 Discussion

腰椎滑膜嵌顿症发病率较高，患者会出现剧烈的腰背部疼痛，严重影响患者的腰部活动和生活，给患者带来巨大困扰，如果治疗不及时，可能导致疾病慢性化，加速脊柱退变性疾病的发生，最终甚至需要手术治疗<sup>[20-21]</sup>。因此，腰椎滑膜嵌顿症及相关疾病在临床上越来越被重视，也出现了许多的治疗方案，西医既往常用局部注射的方式<sup>[22]</sup>，现在随着微创手术技术的进步，根据腰椎关节囊受到脊神经后支内、外侧支的双重支配<sup>[23]</sup>，可以采用经皮射频小关节囊去神经化<sup>[24]</sup>、内镜下小关节囊去神经化<sup>[25]</sup>、内镜下小关节囊部分切除等手术方式<sup>[26]</sup>，可在不影响关节突关节稳定性的前提下，完成对腰椎小关节突相关疾病的治疗，取得了良好疗效。

但是上述治疗手段都是有创性的，除了局部注射药物之外，其他治疗方案也不太适用于初次发生腰椎滑膜嵌顿症的患者，常常是作为慢性小关节综合征的治疗方法<sup>[27]</sup>，对于治疗初次发生的腰椎滑膜嵌顿症，中医的斜扳手法有着独特的优势，能简单、快速地解除滑膜嵌顿，纠正错位的小关节，缓解患者腰痛症状，减少远期并发症的发生率<sup>[28]</sup>，在临床上应用广泛，疗效显著。由于斜扳手法施力的复杂方式和脊柱复杂的结构，导致斜扳手法在作用于脊柱后产生了十分复杂的力学效应，传统的研究方法效果欠佳，三维有限元方法使用离散化的办法将弹性物体离散为有限的体单元，在脊柱生物力学研究中具有较高适用性<sup>[29]</sup>，是目前在脊柱生物力学方面采用较多的研究方法<sup>[30-32]</sup>。李民等<sup>[33]</sup>建立了L<sub>1-5</sub>的腰椎有限元模型，模拟正常生理曲度、过伸、过屈3种体位下的腰椎牵引，以探索不同体位下腰椎牵引对腰椎各个椎体的力学效应，发现相对于正常生理曲度，腰椎在过伸位牵引时能更有效地减少椎间盘等组织的压力，并且具备安全性。王辉昊等<sup>[11]</sup>通过建立颈椎三维有限元模型，并分别模拟定位与非定位旋转手法，发现相比非定位旋转手法，定位旋转手法具有更直接的力学作用及更高的安全性。这些研究说明，三维有限元的方法能有效、准确地分析中医手法的生物力学效应，实用价值较高，并且能对既往的手法进一步探索和改进，达到更好的临床疗效并提高其安全性。

斜扳手法通过近端和远端两个相反方向的力，使脊柱上下两端沿脊柱纵轴进行反向旋转，在这个过程中，椎体、椎间盘、韧带、关节突关节都会因为力学的变化产生应力、应变、位移等变化，而小关节作为脊柱的微动关节，与脊柱运动息息相关<sup>[34]</sup>，在斜扳手法的中心点附近会产生较为明显的应力、应变变化。因此，斜扳手法在临床上治疗腰椎滑膜嵌顿能取得良好疗效，但是针对其治疗机制和力学效应的研究还十分欠缺，此文对此进行了深入分析，结果显示：①在未施加斜扳手法时，脊柱后部结构的应力主要在峡部和关节突，左侧小关节软骨应力值大小为2.959 MPa，右侧为3.127 MPa，双侧应力大小相差不大；左侧小关节软骨应变值大小为0.078 34，右侧为0.081 96，两侧应变基本一致；左侧小关节软骨接触面积为20.806 2 mm<sup>2</sup>，右侧为16.705 3 mm<sup>2</sup>，接触

面积也比较相似。②而在施加斜扳手法后，左侧小关节的应力会从 2.959 MPa 增加至 14.35 MPa，而右侧小关节的应力会从 3.124 MPa 减小至 0 MPa；左侧的小关节应变也会出现类似的情况，从 0.078 34 增加至 0.345 1，而右侧小关节的应变会从 0.081 96 减小至 0；小关节软骨接触面积的变化也呈同样趋势，左侧从 20.806 2 mm<sup>2</sup> 增加至 94.872 7 mm<sup>2</sup>，右侧从 16.705 3 mm<sup>2</sup> 减少至 0 mm<sup>2</sup>。通过以上数据可以看出，在施加斜扳手法时，一侧的关节突应力和应变都会显著增加，并且其上下关节突的接触面积会显著增大，而另一侧则出现相反变化，说明在施加斜扳手法时，关节突关节能被完全打开，实现关节突关节的充分松解和复位，并且同时有助于接触关节滑膜的嵌顿。

通过以上研究可以发现，在一侧关节突关节被打开的同时，另一侧的关节突关节会咬合更紧，在临床中，由于疼痛范围较大，缺乏准确的定位点，腰椎滑膜嵌顿的患者往往不能准确定位其病变的位置，并不能准确判断患者症状来源于左侧或者右侧<sup>[35]</sup>，所以在实施斜扳手法时，最好能在左侧卧位和右侧卧位两个体位采用相同的手法各施术一次，这样才能保证双侧的关节突关节都达到松解、复位的目的，避免因定位不准确出现治疗效果欠佳甚至加重病情的情况<sup>[36]</sup>。

综上所述，斜扳手法对腰椎滑膜嵌顿患者具有良好的临床疗效，其通过相反方向的作用力导致脊柱近端和远端产生相反方向的旋转，从而改变关节突关节的应力、应变、上下关节突的接触面积，充分松解、打开关节突关节，达到复位关节突关节、解除滑膜嵌顿的治疗目的，此次有限元研究进一步阐释了其力学机制和治疗机制，证实了斜扳手法治疗腰椎滑膜嵌顿的科学性和有效性。

此研究还有局限性和不足之处：受限于目前三维有限元建模技术，实验中不能建立关节滑膜和关节囊模型，不能直观地观测到手法治疗前后关节滑膜和关节囊的变化情况，只能通过关节面软骨的应力、应变、接触面积间接推测关节滑膜和关节囊的变化情况；其次，实验中不能建立某些软组织模型，因此模型建立和实验结果与实际临床效果具有一定差异性。在未来的研究中，可以利用一些新的建模技术<sup>[37-44]</sup>，建立更加真实的模型，使研究结果更加真实和可靠。

**作者贡献：**课题设计和质控为卢钰，试验实施及文章撰写为卢钰，试验评估为贾涛，模型验证为保超宇，资料收集为张荆，协助建模为王琪。

**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。

**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。

**版权转让：**文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

**出版规范：**该文章撰写遵守了《观察性临床研究报告指南》(STROBE 指南)。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次文字和图表查重，文章经小同行外审专家双盲审稿，同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

#### 4 参考文献 References

- FABER F. Lumbar facet joint disease: Classification, clinical diagnostics, and minimally invasive treatment. *Orthopade*. 2019;48(1):77-83.
- YU X, ZHANG J, WANG MY, et al. Clinical Effects and Safety of the Use of Methylene Blue for the Treatment of Lumbar Facet Joint Syndrome. *Pain Physician*. 2022;25(1):E15-E26.
- JACOBSON RE, PALEA O, GRANVILLE M. Bipolar Radiofrequency Facet Ablation of the Lumbar Facet Capsule: An Adjunct to Conventional Radiofrequency Ablation for Pain Management. *Cureus*. 2017;9(9):e1635.
- 谢幸财. 腰椎小关节紊乱症的发病机理及手法治疗探讨 [J]. 中国中医骨伤科杂志, 2006,14(52):17-20.
- SAE-JUNG S, JIRARATTANAPHOCHAI K. Outcomes of lumbar facet syndrome treated with oral diclofenac or methylprednisolone facet injection: a randomized trial. *Int Orthop*. 2016;40(6):1091-1098.
- WU T, ZHAO WH, DONG Y, et al. Effectiveness of Ultrasound-Guided Versus Fluoroscopy or Computed Tomography Scanning Guidance in Lumbar Facet Joint Injections in Adults With Facet Joint Syndrome: A Meta-Analysis of Controlled Trials. *Arch Phys Med Rehabil*. 2016;97(9):1558-1563.
- 王志恒. 旋转复位法治疗急性腰椎后关节滑膜嵌顿症 186 例 [J]. 中国临床康复, 2002,6(8):1186.
- 王亚楠, 赵锦秀, 侯海涛, 等. 消肿止痛胶囊联合腰椎斜扳法治疗急性腰扭伤的临床观察 [J]. 中国中医急症, 2022,31(3):456-458.
- 祝波, 张卓, 蒋灼, 等. 体外冲击波联合手法复位治疗腰椎小关节紊乱疗效观察 [J]. 颈腰痛杂志, 2020,41(4):496-497.
- 卢钰, 郑太才, 王琪, 等. 不同体位下斜扳手法治疗腰椎间盘突出的三维有限元分析 [J]. 中国组织工程研究, 2021,35(36):5872-5877.
- 王辉昊, 王宽, 邓真, 等. 定位与非定位颈椎旋转手法应力作用比较: 三维有限元分析 [J]. 医用生物力学, 2019,34(5):55.
- ZHONG ZC, WEI SH, WANG JP, et al. Finite element analysis of the lumbar spine with a new cage using a topology optimization method. *Med Eng Phys*. 2006; 28(1):90-98.
- DU HG, LIAO SH, JIANG Z, et al. Biomechanical analysis of press-extension technique on degenerative lumbar with disc herniation and staggered facet joint. *Saudi Pharm J*. 2016;24(3):305-311.
- 黄学成, 叶林强, 梁德, 等. 三维有限元模型分析旋转手法中旋转方向对颈椎间盘位移和椎间孔容积的影响 [J]. 中国组织工程研究, 2018,22(3):404-408.
- LEE SH, IM YJ, KIM KT, et al. Comparison of cervical spine biomechanics after fixed- and mobile-core artificial disc replacement: a finite element analysis. *Spine*. 2011;36(9):700-708.
- MO Z, ZHAO Y, DU C, et al. Does location of rotation center in artificial disc affect cervical biomechanics? *Spine*. 2015;40(8):E469-E475.
- YAMAMOTO I, PANJABI MM, CRISCO T, et al. Three-dimensional movements of the whole lumbar spine and lumbosacral joint. *Spine*. 1989;14(11):1256-1260.
- XIAO Z, WANG L, GONG H, et al. Biomechanical evaluation of three surgical scenarios of posterior lumbar interbody fusion by finite element analysis. *Biomed Eng Online*. 2012;11:31.
- 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.
- PEROLAT R, KASTLER A, NICOT B, et al. Facet joint syndrome: from diagnosis to interventional management. *Insights Imaging*. 2018;9(5):773-789.
- DE ANDRÉS ARES J, GILSANZ F. Diagnostic nerve blocks in the management of low back pain secondary to facet joint syndrome. *Rev Esp Anestesiología Reanim (Engl Ed)*. 2019;66(4):213-221.
- KARKUCAK M, BATMAZ I, KERIMOGLU S, et al. Comparison of clinical outcomes of ultrasonography-guided and blind local injections in facet syndrome: A 6-week randomized controlled trial. *J Back Musculoskeletal Rehabil*. 2020;33(3):431-436.
- WON HS, YANG M, KIM YD. Facet joint injections for management of low back pain: a clinically focused review. *Anesth Pain Med (Seoul)*. 2020;15(1):8-18.
- MOUSSA WM, KHEDR W. Percutaneous radiofrequency facet capsule denervation as an alternative target in lumbar facet syndrome. *Clin Neurol Neurosurg*. 2016; 150:96-104.
- WALTER SG, STRUWE C, SCHEIDT S, et al. Endoscopic facet joint denervation for treatment of chronic lower back pain. *Clin Neurol Neurosurg*. 2020;195:105904.
- YUAN HJ, WANG CY, WANG YF. Endoscopic joint capsule and articular process excision to treat lumbar facet joint syndrome: A case report. *World J Clin Cases*. 2021;9(28):8545-8551.
- GÜNDOĞDU Z, ÖTERKUŞ M, KARATEPE Ü. Evaluation of the Effect of Radiofrequency Denervation on Quality of Life of Patients with Facet Joint Syndrome by Oswestry Disability Index Score and Visual Analogue Scale Score. *Prague Med Rep*. 2021;122(4):278-284.
- 刘德华. 腕踝针、芒针透刺结合腰部斜扳法治疗腰椎后关节滑膜嵌顿 40 例 [J]. 辽宁中医杂志, 2015,42(6):1317-1318.
- XIE Y, WANG X, JIAN Q, et al. Three dimensional finite element analysis used to study the influence of the stress and strain of the operative and adjacent segments through different foraminoplasty technique in the PELD: Study protocol clinical trial (SPIRIT Compliant). *Medicine (Baltimore)*. 2020;99(15):e19670.

[30] CAO S, CHEN Y, ZHANG F, et al. Clinical Efficacy and Safety of "Three-Dimensional Balanced Manipulation" in the Treatment of Cervical Spondylotic Radiculopathy by Finite Element Analysis. *Biomed Res Int.* 2021;2021:5563296.

[31] DEHGHAN-HAMANI I, ARJMAND N, SHIRAZI-ADL A. Subject-specific loads on the lumbar spine in detailed finite element models scaled geometrically and kinematic-driven by radiography images. *Int J Numer Method Biomed Eng.* 2019; 35(4):e3182.

[32] FAN W, GUO LX. Biomechanical comparison of the effects of anterior, posterior and transformal lumbar interbody fusion on vibration characteristics of the human lumbar spine. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2019;22(5): 490-498.

[33] 李民, 周灵, 汪桂珍, 等. 不同腰椎生理曲度下牵引的三维有限元分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2020,24(20):3162-3167.

[34] YIN J, LIU Z, LI C, et al. Effect of facet-joint degeneration on the in vivo motion of the lower lumbar spine. *J Orthop Surg Res.* 2020;15(1):340.

[35] URITS I, BURSHTEIN A, SHARMA M, et al. Low Back Pain, a Comprehensive Review: Pathophysiology, Diagnosis, and Treatment. *Curr Pain Headache Rep.* 2019;23(3):23.

[36] 贺志亮, 王德成, 张慧. 脊柱定点旋转复位法结合小针刀松解治疗腰椎小关节紊乱的临床疗效分析 [J]. *中国中西医结合外科杂志*, 2019,25(6):991-997.

[37] 刘慧, 沈国权, 张喜林, 等. 肌肉加载下腰椎间盘突出的有限元研究 [J]. *医用生物力学*, 2019,34(5):493-499.

[38] GALBUSERA F, CINA A, PANICO M, et al. Image-based biomechanical models of the musculoskeletal system. *Eur Radiol Exp.* 2020;4(1):49.

[39] GRAY RJ, THOM M, RIDDLE M, et al. Image-Based Comparison Between the Bilateral Symmetry of the Distal Radii Through Established Measures. *J Hand Surg Am.* 2019;44(11):966-972.

[40] MONTEFIORI E, MODENESE L, DI MARCO R, et al. An image-based kinematic model of the tibiotalar and subtalar joints and its application to gait analysis in children with Juvenile Idiopathic Arthritis. *J Biomech.* 2019;85:27-36.

[41] LANDGRAEBER S, PAULI J. Kinematic examination of the musculoskeletal system: Use of methods of image and image sequence analyses as well as shape and motion models. *Orthopade.* 2018;47(10):834-841.

[42] ESKANDARI AH, ARJMAND N, SHIRAZI-ADL A, et al. Hypersensitivity of trunk biomechanical model predictions to errors in image-based kinematics when using fully displacement-control techniques. *J Biomech.* 2019;84:161-171.

[43] ESKANDARI AH, ARJMAND N, SHIRAZI-ADL A, et al. Subject-specific 2D/3D image registration and kinematics-driven musculoskeletal model of the spine. *J Biomech.* 2017;57:18-26.

[44] BONARETTI S, SEILER C, BOICHON C, et al. Image-based vs. mesh-based statistical appearance models of the human femur: implications for finite element simulations. *Med Eng Phys.* 2014;36(12):1626-1635.

(责任编辑: GD, ZN, ZH)

(上接目次2“社长的话”)

表2 | 三种评分的具体内容

分类	评分标准
Tarlov	0分: 后肢无主动活动; 1分: 后肢可见很小活动但不能负重; 2分: 后肢活动频繁或有力, 不能负重和步行; 3分: 后肢可支持体重, 能走1-2步, 无正确步态; 4分: 可负重和行走, 仅有轻度障碍, 明显无力; 5分: 行走正常。
BBB	评分标准: 0分: 无可见后肢活动; 1分: 一个或两个关节轻微运动, 通常为髋和/或膝关节; 2分: 一个关节大幅活动或一个关节大幅活动且有另一关节轻微活动; 3分: 两个关节大幅活动; 4分: 后肢全部三个关节可轻微活动; 5分: 两个关节轻微活动, 第三个关节可大幅活动; 6分: 两个关节大幅活动, 第三个关节可轻微活动; 7分: 后肢全部三个关节可大幅活动; 8分: 非承重情况下可以爪掌面着地; 9分: 足底仅位于负重位, 或偶尔/频繁/持续以足背负重步行, 无足底负重步行。负重: 足底负重位时或仅在后躯干抬高时, HL伸肌收缩; 10分: 偶见爪掌面承重移动, 无前肢后肢协调动作; 11分: 可较多的见到掌面承重移动, 但无前肢后肢协调动作; 12分: 可较多的见到掌面承重移动, 偶见前后肢协调动作; 13分: 常见掌面承重移动, 可常见前后肢协调动作; 14分: 有持续性掌面承重移动和前后肢协调动作, 或出现常见的掌面移动, 持续性前后肢协调动作, 偶有爪背侧移动; 15分: 持续性掌面移动和持续性前后肢协调动作, 前肢前进过程中无或偶有抓地, 初接触时主动爪位置与身体平行; 16分: 步态中可见持续性掌面移动和持续性前后肢协调动作, 前肢前进过程中常见爪抓地, 初接触时主动爪位置与身体平行, 负重转移后旋转; 17分: 步态中可见持续性掌面移动和持续性前后肢协调动作, 前肢前进过程中常见爪抓地, 初接触时和负重转移后主动爪位置均与身体平行; 18分: 步态中可见持续性掌面移动和持续性前后肢协调动作, 前肢前进过程中可持续性爪抓地, 初接触时主动爪位置均与身体平行, 负重转移后旋转; 19分: 步态中可见持续性掌面移动和持续性前后肢协调动作, 前肢前进过程中可持续性爪抓地, 初接触时和负重转移后主动爪位置均与身体平行, 尾巴有时或总是下垂; 20分: 持续性掌面移动, 持续性协调步态, 足趾持续抓地, 初接触时和负重转移后主动爪位置均与身体平行, 躯干不稳定, 尾巴持续翘起; 21分: 持续性掌面移动, 持续性协调步态, 足趾持续抓地, 活动过程中主动爪位置始终与身体平行, 躯干持续稳定, 尾巴持续翘起。
联合行为评分	(1) 开放空间中运动能力分级, 即在1个桌面上铺上1层纸, 将鼠置于其上观察1 min内自发活动的情况; (2) 脚趾伸展能力分级, 即将鼠举起, 观察鼠腿不受任何影响的情况下脚趾伸展的情况; (3) 触地反应能力分级, 即将鼠持于一手中, 用其脚背或侧面擦碰桌边, 观察其将脚置于桌面的速度与精度; (4) 回缩反应能力, 即用两手指拉后肢, 或用针刺后脚底部或用食指、拇指挤压后足观察后肢回缩的速度与力度; (5) 矫正反射, 即将鼠翻成仰卧位, 观察其翻正的能力; (6) 斜坡实验, 即在斜坡上将鼠头朝上、下、左、右, 记录其保持5 s的最大角度; (7) 游泳实验, 即观察鼠在水中45 s后肢的活动情况。

3.4 运动诱发电位检测 (MEP) 运动诱发电位 (motor evoked potential, MEP) 是为运动神经系统功能而设计的一项神经电生理学检查方法, 作为一种无创伤性的检测手段, 已广泛应用于运动神经系统疾病的诊断和预后估计。MEP检测是一种定量、客观的脊髓电生理检测技术, 准确性好, 灵敏度高, 可完整评价术前、术后脊髓运动

神经传导束功能, 体现神经功能的恢复细节, 并具有其他方法不具有的“定量”优势。  
3.5 体感诱发电位检测 (SEP) 体感诱发电位 (somatosensory evoked potential, SEP) 是敏感的神经电生理学评价方法, 脊髓损伤后 SEP 及 MEP 均表现为低平, 继而出现潜伏期延长、波幅降低, 随着时间延续, 潜伏期开始缩短, 波幅开始逐渐升高, 因此, SEP 可客观且量化评价深感觉障碍, 结合 BBB 评分可以敏感地反映动物脊髓损伤程度和恢复情况。

3.6 斜坡实验 (inclined plane test) 斜坡实验装置主要由2个直角夹板构成, 通过铰链将夹板相互连接, 斜坡侧面设有角度板, 便于调整角度。方法是将实验动物置于斜坡上, 通过调整斜坡角度获取动物脊髓损伤后在斜坡上维持5 s的最大角度值。斜坡实验的设备制作简单、方法简便、重复性好、无创伤性, 且与脊髓损伤程度相关性强, 比较适用于轻中度脊髓损伤模型。此外, 还可将大鼠置于水平斜坡上 (0°), 然后逐渐升至 30° 作为起始角度, 随后以 2 (°)/s 的速度增大, 直到动物从斜坡上滑落, 记录最大角度值。

3.7 步态分析 (gait analysis) De Medinaceli 等最早于 1982 年建立了脚印分析 (footprint analysis) 方法, 并将其应用于大鼠神经运动功能评估, 后经 Metz 等进行诸多改良。该法是将实验动物爪子涂以不同颜色的墨汁, 并让其在木杆上行走, 以跨步距离、爪子负重以及爪子活动角度为指标进行分析。但由于动物跨步距离和爪子活动角度难以精确测量, 可靠性较差。Cat Walk 分析系统是继 BBB 法之后, 学术界广为推崇的一种研究动物步态的自动评价体系, 该法能够提供大量不同运动功能的分析数据, 包括着地时间、悬空时间、步长、左右脚间距、步序等, 克服了因动物快速运动而难以作出准确评估的缺陷, 适合前后肢协调性评价, 大大减少了人为因素的影响, 使得评价结果的可靠性显著提高。

3.8 网格爬行 (grid walking) 爬网格试验是检测动物脑或脊髓损伤后是否精确控制后爪放置能力的一种评价方法, 适用于猫、鼠等小型动物。根据网格放置角度不同, 可分为水平网格试验和倾斜网格试验。将实验动物置于水平或倾斜的网格上 (两杆之间距离 2.5 cm), 以训练动物在网格上方寻找食物与水, 记录在此过程中大鼠后爪失足落空次数, 发出脚步声次数以及通过这段距离的时间等行为学数据。缺点有网格线太细, 对后肢失足不易评价, 要求训练者把握评价的每个细节, 以便准确判别损伤与非损伤行为学变化, 人为因素影响较大, 耗时耗力, 并且费用高, 动物行走速度过快时不易观察。

3.9 平衡木行走 (beam walking) 平衡木行走可分为阶梯平衡木 (ladder beam test) 和狭窄平衡木 (narrow beam test) 两种试验。前者用来评价动物控制前后爪的放置能力, 方法是动物置于阶梯平衡木杆上, 记录前后肢滑落杆杆的次数; 而狭平衡木可评价大鼠脊髓损伤后身体平衡能力、失足次数等指标, 适应于脊髓损伤模型及颅脑感觉运动皮质损伤的行为学评估。

4 建立脊髓损伤模型的注意事项

在建立脊髓损伤动物模型时, 应尽量简化操作步骤, 同时要求损伤装置及致伤能量达到客观、准确、量化的标准, 以便复制出具有高度稳定性和重复性的动物模型。动物模型都有其优缺点, 完全理想化的模型是不存在的, 在今后相当长一段时间内, 进一步研究和完善脊髓损伤模型, 加深对其机制的理解, 并借此探索各种行为学评价标准及治疗的最佳途径, 推动脊髓损伤研究的不断深入, 最终使脊髓损伤后功能重建成为现实, 使脊髓损伤患者功能障碍减轻, 生活质量改善。

(编辑: 李俊阳)