

# 有限元分析在正骨手法治疗腰椎疾病研究中的应用进展

洪双威, 吕智桢, 胡会杰, 田雨, 吕立江

(浙江中医药大学第三临床医学院, 浙江 杭州 310053)

**摘要** 临床上采用正骨手法治疗腰椎疾病取得了良好效果,但仍存在作用机制尚未明确、安全性存在争议、规范化进程缓慢等不足。有限元分析具备准确性、定量性、经济性及可重复性等多重优势,成为腰椎生物力学研究的首选实验方法。然而,在正骨手法治疗腰椎疾病的作用机制研究及安全性研究方面,不同研究的结论尚存在差异;而在规范化研究方面,相关研究尚存在一定的局限性。本文对腰椎有限元分析进行了概述,并从作用机制、安全性及规范化 3 个方面就有限元分析在正骨手法治疗腰椎疾病研究中的应用进展进行了综述,对目前研究中存在的问题进行了分析。

**关键词** 正骨手法;腰椎;限定因素分析;综述

腰椎是人体活动量和负载最大的结构,在肌肉、韧带、关节囊等组织的协同作用下维持着动态平衡<sup>[1]</sup>。生物力学失衡是诱发腰椎疾病的重要原因之一。临床上采用正骨手法治疗腰椎疾病取得了良好的效果<sup>[2]</sup>,但由于正骨手法的作用机制尚未完全明确,且缺少完整的量化标准,国际上对正骨手法的认可度不高<sup>[3]</sup>。有限元分析具有准确性、定量性、经济性、可重复性等多重优势,成为腰椎生物力学研究的首选实验方法,在正骨手法治疗腰椎疾病的相关研究中发挥了重要作用。本文对腰椎有限元分析进行了概述,并从作用机制、安全性及规范化 3 个方面就有限元分析在正骨手法治疗腰椎疾病研究中的应用进展进行了综述,对目前研究中存在的问题进行了分析。

## 1 腰椎有限元分析概述

有限元分析是将连续体离散化为若干有限大小的单元体,进而对实际问题进行模拟求解的分析方法<sup>[4]</sup>。Brekelmans 等<sup>[5]</sup>于 1972 年首次将有限元分析与脊柱生物力学相结合,Liu 等<sup>[6]</sup>于 1975 年采用有限元分析建立了世界上第一个腰椎三维模型。国内学者戴力扬等<sup>[7]</sup>于 1989 年构建了第一个退行性腰椎有限元模型,该研究发现腰椎间盘退变导致腰椎上的应力分布与载荷传递出现明显改变,为临床上研究腰椎疾病的发病机理提供了生物力学基础。Zander 等<sup>[8]</sup>

研究发现腰椎有限元模型中有无肌肉对椎间盘的应力分布影响显著,进而提出在腰椎有限元分析中,应加入肌肉组织以提高模型的完整性与真实性。吕立江等<sup>[9]</sup>对比分析了杠杆定位手法作用于有肌肉腰椎模型和无肌肉腰椎模型的力学数据,结果显示后者的力学数据较为集中,不能反映腰椎结构的真实变化。有限元分析可用于传统实验方法无法开展的研究,且可用于模拟时间跨度较长的研究<sup>[10]</sup>。随着有限元分析建模精度的不断提高、模型内容的不断丰富,其已成为研究腰椎生物力学的重要方法。

## 2 有限元分析在正骨手法治疗腰椎疾病作用机制研究中的应用

正骨手法治疗腰椎疾病作用机制研究主要包括体内研究和体外研究。体内研究受限于影像技术,发展较为缓慢;体外研究是目前主要的研究方式,常用的实验模型包括动物模型、人类尸体模型、有限元模型等。然而,动物的腰椎结构与人体存在一定的差异,实验结论的适用性尚需进一步验证;人类尸体具有保存难、生物力学特性易改变、操作环境苛刻等局限性<sup>[11]</sup>。因此,有限元分析逐渐成为研究正骨手法治疗腰椎疾病作用机制的主要方法。吕立江等<sup>[9]</sup>采集健康成人志愿者的腰椎影像信息,构建了网格单元形状规则、几何精度高的完整的有肌肉腰椎有限元模型,并利用该模型分析杠杆定位手法对腰椎生物力学的影响,研究结果显示杠杆定位手法增加了腰椎曲度, $L_4\sim L_5$ 椎间盘的前后缘位移明显,推测杠杆定位手法治疗腰椎疾病的作用机制是通过重塑腰椎的生理曲度、促进椎间盘突出部分回纳而解除神经根压迫。

基金项目:国家自然科学基金项目(81774442);浙江省 2022 年度“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C03123);浙江省中医药现代化专项项目(2020ZX010)

通讯作者:吕立江 E-mail:731577158@qq.com

张仁倩等<sup>[12]</sup>等构建了  $L_4 \sim L_5$  有限元模型,分析三小定点整脊法对  $L_4 \sim L_5$  的生物力学影响,结果显示三小定点整脊法对椎体所产生的位移和应力均大于对椎间盘产生的位移和应力,进而提出正骨手法的主要机制是调整椎体的位置以恢复腰椎的生物力学平衡。张晓刚等<sup>[13]</sup>建立了正常腰椎和椎间盘突出腰椎的有限元模型,比较分析了拔伸按压手法对 2 种模型的生物力学影响,结果显示拔伸按压手法能改变退变腰椎节段椎间盘内的应力分布,减轻神经根受压情况并且不会增加小关节受损风险。陈忻等<sup>[14]</sup>应用有限元模型分析坐位腰椎旋转手法对退变腰椎产生的生物力学影响,结果显示应力主要集中在纤维环,引起椎间盘向前上方拉伸移位进而促使神经根粘连松解。李延红等<sup>[15]</sup>建立了健康男性  $L_3 \sim S_1$  有限元模型,并在腰椎前屈、后伸、中立位分别施以拔伸手法,结果显示与神经根相邻的椎间盘后外侧发生了  $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$  的位移,提示正骨手法通过改变神经根与椎间盘的相对位置而减轻神经根压迫。

### 3 有限元分析在正骨手法治疗腰椎疾病安全性研究中的应用

正骨手法治疗腰椎疾病存在疼痛加重、马尾神经受损甚至瘫痪等风险<sup>[16-17]</sup>。治疗师对正骨手法认识不足而选择错误的手法是导致这些并发症的主要原因。采用有限元分析研究正骨手法对腰椎各结构的生物力学影响对于正骨手法治疗腰椎疾病的安全性研究具有重要意义。徐海涛等<sup>[18]</sup>分别构建了正常腰椎和退变腰椎有限元模型以分析坐位旋转手法对腰椎生物力学的影响,结果显示施以坐位旋转手法后退变腰椎的最大位移约是正常腰椎的 4 倍。叶淦湖等<sup>[19]</sup>采用有限元分析比较了退变腰椎与正常腰椎在施以正骨手法后小关节的应力分布情况,结果显示在多种运动状态下退变腰椎小关节的负载均大于正常腰椎小关节,而且小关节面上的应力在腰椎前屈与旋转时迅速增大,提示临床上采用正骨手法治疗腰椎退变患者,应注意控制力度,尤其在腰椎前屈与旋转时。

在正骨手法治疗腰椎疾病安全性研究中,手法作用下椎间盘内压的变化是关注的另一核心问题<sup>[20]</sup>。椎间盘内压的增大会增加椎间盘突出风险,对于椎间盘突出患者则会加重病情,而对于腰椎椎管狭窄患者则可能导致因相应节段脊髓受压而发生瘫痪的风险增加。然而,目前关于正骨手法作用下椎间盘内压

的变化,不同研究结果尚存在差异。椎间盘内压的大小由髓核内压决定,毕胜等<sup>[21]</sup>采用 1 步加载求解的方式分析斜扳手法对腰椎有限元模型应力的影响,结果显示髓核内压升高,因此作者认为斜扳手法存在一定的安全隐患。Shu 等<sup>[22]</sup>采用 2 步加载的方式在有限元模型上模拟斜扳手法,第 1 步施以轴向压缩载荷以模拟自身体重对椎间盘的影响,第 2 步施以轴向压缩载荷与旋转力矩以模拟斜扳手法,结果显示第 2 步加载后椎间盘的应力和位移均小于第 1 步加载后,提示斜扳手法能够降低椎间盘内压(椎间盘的应力和位移与椎间盘内压呈正相关)。张人文等<sup>[23]</sup>比较了 2 步加载分步求解与 1 步加载求解分析直腰旋转手法对腰椎间盘的影响,结果显示 2 种分析方法  $L_{4-5}$  椎间盘左后方的应力和位移的组间差异有统计学意义;其提出施加手法前椎间盘已受到轴向的压力从而产生了一定的应力与位移,忽略已有的轴向压力是导致不同研究结果差异的主要原因,2 步加载分步求解在阐述正骨手法对腰椎的生物力学效应时更加科学和准确。

在关于正骨手法对椎间盘压力影响的研究中,少数正骨手法能够降低髓核内压<sup>[9,22]</sup>,多数正骨手法会导致髓核内压不变或升高<sup>[20-21,24-26]</sup>。然而,临床上并不能依据这些结果评估手法的安全性,导致这些结果差异的原因可能是有限元分析未采用 2 步加载分步求解的方式<sup>[23]</sup>。我们认为不同手法亦会对髓核内压产生不同的影响,这与手法的发力方向有一定的关系,如果手法中蕴含了纵向的拔伸力,则可能导致髓核内压降低;如果手法中没有蕴含纵向的拔伸力,则会导致髓核内压增加或不变。在临床上面对腰椎椎管狭窄或腰椎间盘突出症患者我们可以优先考虑如杠杆定位手法等蕴含纵向拔伸力的正骨手法,以提高正骨手法的安全性。

### 4 有限元分析在正骨手法治疗腰椎疾病规范化研究中的应用

随着科技的发展和社会的进步,规范化在诸多领域成为一种趋势,而标准化则成为一门学科成熟的标志,传统中医也不能例外<sup>[27]</sup>。然而,由于正骨手法缺少客观的量化标准与疗效评价标准,其在国际上的认可度并不高。因此,正骨手法治疗腰椎疾病的规范化和标准化是其发展的重要方向,同时也是传统医学面临的新挑战。目前,临床上应用有限元分析进行正骨

手法治疗腰椎疾病规范化研究主要集中在 2 个方面,其一是比较不同手法对腰椎的生物力学影响,其二是比较不同体位或不同角度同一手法对腰椎的生物力学影响。Zhang 等<sup>[28]</sup>比较了腰椎定点斜扳法与传统斜扳法对正常型、轻度退变型、中度退变型腰椎有限元模型产生的生物力学影响,结果显示施以腰椎定点斜扳法的正常型、轻度退变型、中度退变型椎体的平均前移距离均大于施以传统斜扳法,提示腰椎定点斜扳法的疗效更佳。吴山等<sup>[29]</sup>比较了定点旋转手法与直腰旋转手法对腰椎生物力学的影响,结果显示施以定点旋转手法后椎体、关节突关节、椎间孔的位移更大,提示定点旋转手法的疗效更佳。卢钰等<sup>[30]</sup>比较了在腰椎前屈 30°位、中立位及后伸 10°位施以腰椎斜扳手法对腰椎生物力学的影响,结果显示腰椎前屈 30°位后外侧椎间盘与神经根的距离最大,腰椎后伸 10°位髓核内应力最小,纤维环应力最大;作者提出可以通过先于后伸 10°位施以腰椎斜扳手法,再于前屈 30°位施以腰椎斜扳手法来提高临床疗效。陈芯仪<sup>[31]</sup>在腰椎有限元模型上自左至右每隔 15°施以 1 次肘按手法以比较不同角度施以肘按手法对腰椎生物力学的影响,结果显示在左侧 30°~45°施以肘按手法, L<sub>4</sub>~L<sub>5</sub> 关节突关节的位移较大,且椎体的负荷较小,提示以该角度施以肘按手法疗效最佳。

## 5 有限元分析应用于正骨手法治疗腰椎疾病研究中存在的问题

采用有限元分析研究正骨手法对腰椎生物力学的影响,可利用计算机图像技术实现数据的可视化,并可通过改变参数探究不同因素对腰椎生物力学的影响<sup>[32]</sup>。因此,利用有限元分析开展正骨手法治疗腰椎疾病的相关基础研究,具有显著的优势。然而,目前国内外建立的有限元模型尚存在未考虑椎体其他病变、模型参数过于理想化、模型腰椎节段较少、缺少动态模拟分析、模型生理反应不真实等不足。此外,关于应用有限元分析开展正骨手法治疗腰椎疾病的相关研究虽已取得了初步成果,但在作用机制、安全性及规范化方面仍存在以下问题:①相关研究多集中在不同手法作用机制的有限元分析,缺少针对同一手法治疗不同腰椎疾病或不同证型的作用机制的深入研究;②现有研究多集中于正骨手法对腰椎安全性的有限元分析,而对于神经、血管及脏腑等层面的研究较少,比如正骨手法引起的生物力学改变是否会损

伤神经、是否会导致血栓脱落、是否会损伤脏腑等均是值得深入探讨的问题;③目前正骨手法治疗腰椎疾病的规范化研究较为局限,多集中在 2~3 种同类型的正骨手法的分析比较,而不同类型正骨手法间的比较研究较少,而对于正骨手法标准化的研究则更为稀少。

## 6 小 结

随着建模精度的不断提高、模型内容的不断丰富,有限元分析已成为腰椎生物力学研究的重要方法。有限元分析在正骨手法治疗腰椎疾病作用机制研究、安全性研究及规范化研究方面显示出独特的优势,并取得较大进展。但在正骨手法治疗腰椎疾病作用机制研究及安全性研究方面,不同研究间尚存在差异;而在规范化研究方面,相关研究尚存在一定的局限性。因此,对于正骨手法治疗腰椎疾病,还需应用有限元分析开展更加深入、全面的高质量研究。

## 参考文献

- [1] 杨华元. 生物力学[M]. 北京:人民卫生出版社,2012:85.
- [2] ZHANG S, KONG L, ZHU Q, et al. Efficacy of tuina in patients with chronic low back pain: Study protocol for a randomized controlled trial[J]. *Trials*, 2020, 21(1):271.
- [3] 梁龙, 朱立国, 于杰, 等. 中医手法量化及生物力学研究探析[J]. *世界中西医结合杂志*, 2020, 15(6):1165-1168.
- [4] LEWIS G S, MISCHLER D, WEE H, et al. Finite element analysis of fracture fixation[J]. *Curr Osteoporos Rep*, 2021, 19(4):403-416.
- [5] BREKELMANS W A, POORT H W, SLOOFF T J. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts[J]. *Acta Orthop Scand*, 1972, 43(5):301-317.
- [6] LIU Y K, RAY G, HIRSCH C. The resistance of the lumbar spine to direct shear[J]. *Orthop Clin North Am*, 1975, 6(1):33-49.
- [7] 戴力扬, 屠开元, 徐印坎, 等. 椎间盘退变腰椎活动节段力学模型的研究[J]. *第二军医大学学报*, 1989, 10(5):480.
- [8] ZANDER T, ROHLMANN A, CALISSE J, et al. Estimation of muscle forces in the lumbar spine during upper-body inclination[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2001, 16(Suppl 1):S73-S80.
- [9] 吕立江, 冯喆, 廖胜辉, 等. 杠杆定位手法对椎间盘影响的有限元分析[J]. *中华中医药学刊*, 2014, 32(5):

- 971-973.
- [10] HU B W, LV X, CHEN S F, et al. Application of finite element analysis for investigation of intervertebral disc degeneration: from laboratory to clinic [J]. Curr Med Sci, 2019, 39(1): 7-15.
- [11] 徐浩翔, 文王强, 张泽佩, 等. 腰椎间盘突出生物力学体内外研究的新进展 [J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(15): 2425-2432.
- [12] 张仁倩, 赵志恒, 王剑歌, 等. 三小定点整脊法对腰椎间盘突出症的有限元分析 [J]. 湖南中医杂志, 2014, 30(8): 90-92.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 刘兰椿, 秦天歌, 鲁梦倩. 推拿手法安全性的研究进展 [J]. 世界中医药, 2020, 15(12): 1832-1835.
- [17] 张世民, 王宏, 黎作旭, 等. 腰椎间盘突出症推拿致马尾神经损伤 21 例临床分析 [J]. 中医正骨, 2002, 14(2): 47.
- [18] 徐海涛, 徐达传, 张美超, 等. 坐位旋转手法时 L<sub>4-5</sub> 变形和位移的研究 [J]. 中国临床解剖学杂志, 2008, 26(3): 321-324.
- [19] 叶淦湖, 张美超, 李义凯. 模拟推拿时腰椎小关节有限元模型的生物力学分析 [J]. 广州中医药大学学报, 2003, 20(3): 195-197.
- [20] 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.
- [21] 毕胜, 李义凯, 赵卫东, 等. 腰部推拿手法生物力学和有限元比较研究 [J]. 中华物理医学与康复杂志, 2002, 24(9): 525-528.
- [22] SHU X N, MU W Z, CHEN J F, et al. Comparison of biomechanical effect between oblique ban - pulling manipulation and lumbar erection - rotation manipulation in sitting position for lumbar intervertebral disc herniation [J]. J Acupunct Tuina Sci, 2017, 15(5): 317-321.
- [23] 张人文, 莫灼锚, 李冬, 等. 二步加载分步求解在手法治疗腰椎间盘突出症有限元分析中的应用 [J]. 中国中医骨伤科杂志, 2019, 27(1): 1-5.
- [24] 王国林, 李义凯, 张美超, 等. 坐位腰椎旋转手法时椎间盘单元内在应力和位移的实时监测 [J]. 中国骨伤, 2007, 20(3): 173-175.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 王晓宇, 李华南, 张玮, 等. 推拿国际化的关键因素——手法标准化建设 [J]. 中华中医药杂志, 2020, 35(4): 1658-1662.
- [28] ZHANG R, MO Z, LI D, et al. Biomechanical comparison of lumbar fixed - point oblique pulling manipulation and traditional oblique pulling manipulation in treating lumbar intervertebral disk protrusion [J]. J Manipulative Physiol Ther, 2020, 43(5): 446-456.
- [29] 吴山, 张美超, 李义凯, 等. 两种坐位旋转手法腰椎应力及位移的有限元分析 [J]. 广东医学, 2010, 31(8): 992-994.
- [30] 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症的三维有限元分析 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(36): 5872-5877.
- [31] 陈忠仪. 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.
- [32] ZHOU M, LIM S, O'CONNELL G D. A robust multiscale and multiphase structure - based modeling framework for the intervertebral disc [J/OL]. Front Bioeng Biotechnol, 2021, 9 [2021-11-25]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8215504/>.

(收稿日期: 2021-12-30 本文编辑: 吕宁)

(上接第 41 页)

- [36] 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症的三维有限元分析 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(36): 5872-5877.
- [37] 吕立江, 谢云兴, 陈涯峰, 等. 杠杆定位手法治疗腰椎间盘突出症疗效与骨盆参数影响的研究 [J]. 浙江中医药大学学报, 2019, 43(7): 640-644.
- [38] 刘鲲鹏, 吉登军, 顾非, 等. 斜扳法对腰椎间盘突出症患者软组织张力的影响 [J]. 上海中医药杂志, 2017, 51(7): 54-56.
- [39] 燕翔琳. 不同腰椎扳法对腰部肌群表面肌电效应的研究 [D]. 天津: 天津中医药大学, 2021.

(收稿日期: 2022-01-19 本文编辑: 吕宁)