

# 理筋提髌手法治疗髌股关节炎力学机制的有限元分析

赵勇<sup>1</sup> 韦俊余<sup>1</sup> 秦伟凯<sup>1</sup> 刘广伟<sup>1</sup> 侯成志<sup>1</sup> 陈彦飞<sup>2</sup>

**[摘要]** **目的:**通过三维有限元技术,解析理筋提髌手法通过改善髌骨的运动轨迹治疗髌股关节炎的力学机制。**方法:**以一名早期髌股关节炎患者的右膝为初始资料,根据 CT 扫描图像,应用有限元相关软件完成膝关节有限元模型构建。加载条件为对股四头肌腱施以 200 N 拉力,根据理筋提髌手法治疗髌股关节炎临床研究获得的影像学数据进行相关模型数值的干预,分别于膝关节屈曲 90°、60°和 30°位,对比干预前后髌股关节面应力分布和应力大小变化情况。**结果:**膝关节屈曲 90°、60°和 30°时,髌骨软骨关节面的应力峰值干预组较未干预组分别下降了 0.47、0.99 和 1.81 MPa;股骨滑车软骨关节面的应力峰值干预组较未干预组分别下降了 0.72、0.73 和 1.64 MPa;髌股关节面应力分布的面积有所增大,应力集中的异常情况有所改善。**结论:**理筋提髌手法可通过改善髌股关节面异常的应力大小和应力分布治疗早期髌股关节炎。

**[关键词]** 髌股关节炎;有限元法;理筋提髌手法;机制;生物力学

**[中图分类号]** R684.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2021)08-0025-04

## Finite Element Analysis on the Mechanical Mechanism of Treating Patellofemoral Osteoarthritis with Tendon-Regulating and Kneecap-Moving Manipulation

ZHAO Yong<sup>1</sup> WEI Junyu<sup>1</sup> QIN Weikai<sup>1</sup> LIU Guangwei<sup>1</sup>  
HOU Chengzhi<sup>1</sup> CHEN Yanfei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Wangjing Hospital, Chinese Academy of Traditional Chinese Medicine, Beijing 100102, China;

<sup>2</sup>Honghui Hospital Affiliated to Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China.

**Abstract Objective:** To analyze the mechanical mechanism of treating patellofemoral osteoarthritis by improving the patella movement track through the three-dimensional finite element technology. **Methods:** A finite element model of patellofemoral joint was constructed based on CT images of the right knee of a patient with early patellofemoral osteoarthritis. The loading condition was 200 N tension on the quadriceps tendon, and the relevant model value intervention was carried out according to the image data obtained from the clinical study of treating patellofemoral osteoarthritis with tendon manipulation. The stress distribution and changes of the patellofemoral joint surface were studied before and after intervention at 90°, 60° and 30° flexion of the knee respectively. **Results:** The stress peak value of the articular surface of patellar cartilage in intervention group decreased 0.47, 0.99 and 1.81 MPa respectively compared with non-intervention when the knee flexion was 90°, 60° and 30°. The peak stress of the articular surface of the femoral trochlea in intervention group decreased by 0.72, 0.73 and 1.64 MPa compared with non-intervention group respectively, and the area of the stress distribution of the patellofemoral surface increased and the abnormality of the stress concentration improved. **Conclusion:** The manipulation of regulating tendon and moving kneecap can improve the stress magnitude and distribution of abnormal patellofemoral joint surface on treatment of early patellofemoral osteoarthritis.

**Keywords:** patellofemoral osteoarthritis; finite element methods; tendon manipulation; mechanism; biomechanics

基金项目:中国中医科学院基本科研业务费自主选题项目

院内联合创新专项项目(ZZ11-034)

<sup>1</sup> 中国中医科学院望京医院(北京, 100102)

<sup>2</sup> 西安交通大学附属红会医院

髌股关节炎是以股骨与髌骨所构成关节之间软骨的磨损、剥脱、软骨下骨硬化和滑膜增生肥厚等为主要病理改变的退行性骨关节疾病<sup>[1-2]</sup>。研究表明髌骨异

常的运动轨迹造成髌股关节生物力学紊乱,是导致髌股关节炎的主要原因之一,而髌股关节周围的肌肉、韧带等软组织是维持髌骨正常运动轨迹稳定性的关键因素<sup>[3-5]</sup>。基于前期的临床研究和实践,理筋提髌手法可通过改善髌骨的异常运动轨迹缓解患者的临床症状,但该手法具体的生物力学机制尚不明确。本研究通过三维有限元技术,进一步解析理筋提髌手法的力学机制,以期为该手法的临床应用和推广提供力学依据。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

选取 2019 年 1 月至 2019 年 6 月就诊于中国中医科学院望京医院骨伤中心门诊的 1 例早期髌股关节炎患者。

### 1.2 诊断标准

参照《中国髌股关节骨关节炎诊疗指南》<sup>[6]</sup> (2020 年版)。

### 1.3 纳入标准

1)符合早期髌股关节炎的诊断标准。2)签署知情同意书。3)髌股关节的活动性较正常髌骨运动轨迹差,即 Merehant 轴位所测量的髌股吻合角应满足髌股吻合角 $<6^{\circ}$ 或为正值。4)年龄在 40~55 岁之间。5)经 X 线检查排除外伤史和先天发育不良等情况。

### 1.4 方法

**1.4.1 实验材料与设备** 螺旋电子计算机断层扫描机(螺旋 CT)基本信息:64 排,德国西门子公司生产;提供单位为中国中医科学院望京医院放射科。

联想计算机工作站:计算机属性为 windows8.0 CPU Inter pentium P6000,CPU 主频为 1.86 GHz,显存为 8 GB。

医学影像处理系统:比利时 Materialise 公司 Mimics10.01(交互式医学影像控制系统),32 位;美国达索 SIMULIA 公司 Solidworks2016 软件。

有限元分析处理软件:美国 ANSYS 公司 ANSYS Workbence18.0 软件和美国 Altair 公司 Hypermesh12.0 软件。

**1.4.2 初始数据的采集** 美国 GE 公司的电子计算机断层扫描机配置的 Brightspeed 扫描仪,对早期髌股关节炎患者的膝关节进行图像采集。扫描范围:以髌骨为中心,膝关节向上向下各 10 cm;层距和层厚均为 1 mm,最终获得断层扫描图像 354 张,并将此图像以 DICOM 格式保存于刻录光盘中。

**1.4.3 膝关节三维有限元模型的建立** 针对理筋提髌手法治疗早期髌股关节炎的力学分析,主要观测髌股关节面应力的大小变化及应力分布区域的改变。本实验所干预的是髌骨外移的距离,故对膝关节相应的韧带组织做了简化处理,即以简化的弹簧模型替代了

相应的韧带,尤其是髌骨的内外侧支持带和内外侧副韧带。本模型总计构建 12 组解剖结构单元,其中主要包括其支撑与组成结构的髌骨、股骨远端、腓骨近端和胫骨近端 4 组骨性结构;髌韧带、股四头肌肌腱、内外侧支持带、内外侧半月板和内外侧副韧带 8 组软组织结构;并查阅相关文献赋予相应骨性和软组织结构的材料属性<sup>[7-8]</sup>,以便使其更接近于真实的人体生物组织结构,经过数据的提取与处理、图像分割(阈值分割、区域增长和手动分割)、几何重建、逆向处理、网格划分、材料属性赋值、约束边界条件等操作,完成了膝关节三维有限元模型的构建,为进一步负荷加载分析做好相应的准备(见图 1 和图 2)。本模型共构建总网格数 767 507 个,总节点数 219 349 个(见表 1)。

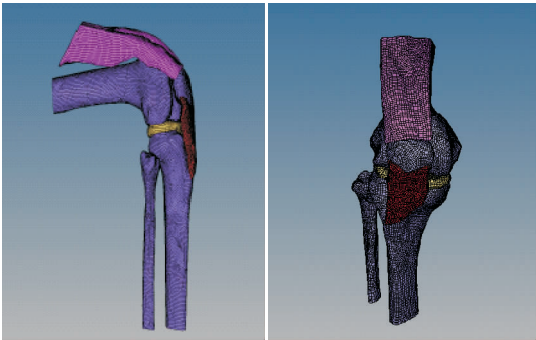


图 1 模型侧位 图 2 模型正位

表 1 膝关节三维有限元模型相关参数

名称	节点数 /个	网格数 /个	单元类型及数量
髌骨	10 871	31 422	C3D8(6 805)、C3D6(220)、C3D4(24 397)
股骨	83 620	281 493	C3D8(44 761)、C3D6(465)、C3D4(236 267)
胫骨	63 306	204 807	C3D8(35 876)、C3D6(519)、C3D4(168 412)
腓骨	21 202	65 467	C3D8(12 236)、C3D6(387)、C3D4(52 844)
半月板	9 870	43 812	C3D8(3 064)、C3D4(40 748)
股四头肌腱	16 711	78 084	C3D8(4 395)、C3D4(73 689)
髌韧带	13 769	62 422	C3D8(3 950)、C3D4(58 472)

**1.4.4 负荷加载条件的确立** 研究表明<sup>[9]</sup>从膝关节屈曲 90°位到逐渐伸直的过程中,股四头肌肌腱平均受到的拉力约为 200 N。本研究模型的建立正是基于患膝屈曲 90°位采集的,故给予股四头肌肌腱的牵拉力为 200 N。在股四头肌肌腱末端建立 RP 点,RP 点与股四头肌肌腱建立 Coupling 连接关系;在 RP 点上添加 200 N 拉力载荷(见图 3)。

**1.4.5 有限元模型的干预** 本研究主要是基于前期临床研究的数据,进一步解析理筋提髌手法的力学作用机制,即理筋提髌手法改善髌骨运动轨迹的影像学数据(髌骨外移的距离)进行相关的模型数值干预。前

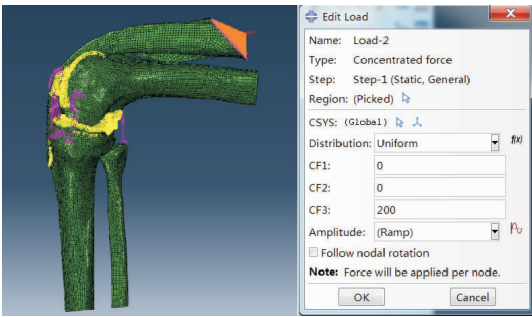


图 3 膝关节屈曲 90°有限元模型股四头肌肌腱负荷的加载

期临床研究表明,早期髌股关节炎经理筋提髌手法治疗后,髌骨的外移距离会减小。经统计学数据分析,减小距离的平均值约为 0.2 cm。故有限元模型研究的干预就是基于该数据在膝关节屈曲的不同角度进行髌骨外移距离的改变。根据是否进行髌骨外移手法的干预分为干预组和未干预组,分别在膝关节屈曲 90°、60°和 30°的状态下,进行应力大小和应力分布区域改变的分析,总计共 6 种工况。以膝关节屈曲 30°为例,见图 4 和图 5。

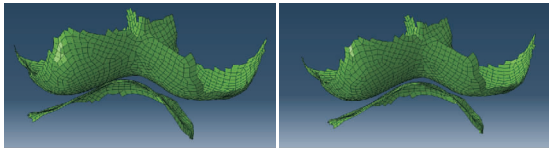


图 4 屈曲 30°干预前 图 5 屈曲 30°干预后

2 结果

2.1 髌股关节软骨面应力峰值的改变

膝关节屈曲 90°、60°和 30°时工况模型的髌骨软骨关节面的应力峰值,干预组较未干预组分别下降了 0.47、0.99 和 1.81 MPa;股骨滑车软骨关节面的应力峰值干预组较未干预组分别下降了 0.72、0.73 和 1.64 MPa(见表 2)。随着膝关节逐渐伸直,髌股关节面软骨的应力峰值减小更明显。通过未干预组和干预组的对比,还可以得出屈曲 90°未干预>屈曲 90°干预>屈曲 60°未干预>屈曲 60°干预>屈曲 30°未干预>屈曲 30°干预。随着膝关节屈曲角度的增大,髌股关节面的应力也增大(屈曲不超过 90°)。

表 2 不同工况下髌骨软骨关节面和股骨滑车软骨关节面应力峰值(MPa)

工况	髌骨软骨	股骨滑车软骨
	关节面	关节面
屈曲 90°未干预	12.92	12.73
屈曲 90°干预	12.45	12.01
屈曲 60°未干预	11.27	9.61
屈曲 60°干预	10.28	8.88
屈曲 30°未干预	9.36	8.43
屈曲 30°干预	7.55	6.80

2.2 髌股关节软骨面应力分布的改变

从应力云图(图 6 和图 7)可以看出:经理筋提髌

手法干预后,髌股关节面应力集中区域的面积有不同程度的增大,尤其是髌股关节面的股骨和髌骨内侧关节面的应力接触面积有所增加。根据压强等于压力除以相应的面积可知:随着髌股关节面应力峰值的降低,髌股关节面应力接触面积的增大,髌股关节面异常的应力分布和应力集中的异常状态在手法干预后得到了明显的改善(以膝屈曲 60°为例)。

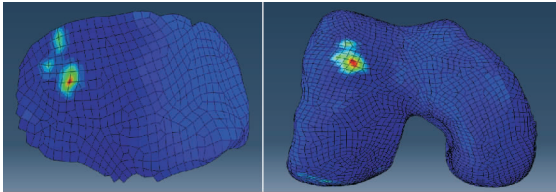


图 6 膝屈曲 60°未干预组髌股关节面软骨应力分布云图

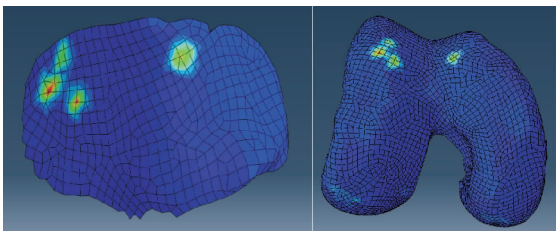


图 7 膝屈曲 60°干预组髌股关节面软骨应力分布云图

3 讨论

3.1 髌骨异常运动轨迹与早期髌股关节炎的发病

临床上早期髌股关节炎多见于髌骨脱位、半脱位和髌骨外移等髌骨运动轨迹异常的患者,且以髌骨外移引起者更为常见<sup>[10]</sup>。髌骨外移一方面导致髌股关节面外侧应力集中,另一方面导致髌股关节面内侧应力不足,两者均不利于软骨的代谢,均会加速软骨的退变。研究表明<sup>[11]</sup>关节的异常负荷会破坏软骨细胞的正常修复过程,并可诱导炎症因子的释放,激活相关信号通路,促使基质降解和破坏。刘文华等<sup>[12]</sup>通过关节间应力变化的研究表明:应力过于集中或者应力过于分散,无论是间歇性的还是持续性的,均会引起软骨细胞的病理性凋亡。

3.2 理筋提髌手法对髌骨异常运动轨迹的影响

理筋提髌手法主要包括理筋和提髌两部分,膝周软组织的松解即理筋,其主要包括股四头肌、腓肠肌、腓肠肌、内外侧支持带、髌韧带和筋结点等的松解;髌骨的推移和提拿即提髌,是本手法的关键。理筋提髌手法主要作用于髌骨和内外侧支持带,尤以髌骨和外侧支持带为要。在中医理论“筋束骨”的指导下,通过提髌手法操作,将髌骨向内推移至极限而间接地松解外侧支持带,从而改善髌骨外移的病理状态。理筋提髌手法通过改善髌骨异常的运动轨迹,减缓了早期髌股关节炎的病理进程。

3.3 膝关节有限元分析的应用及其优势

随着现代计算机技术和医学影像学的发展,有限

元分析逐渐渗透到骨科的各个领域<sup>[13]</sup>。近年来应用推拿手法治疗髌股关节炎取得了一定的临床疗效,对其力学作用机制的研究也越发受到重视,通过有限元法解析手法的力学作用机制也成为新的研究方向之一。通过膝关节有限元模型可以模拟不同手法作用下,膝关节的屈曲、髌骨的位移和韧带的松解等情况,进而获得不同工况下髌股关节面的应力大小和应力分布区域<sup>[14-15]</sup>,这是尸体实验所无法达到的。有限元分析与传统的尸体实验相比具有以下优势:1)可以逼真地模拟人体的生理和病理状态;2)可重复操作性强且无创,可以模拟不同的干预条件而获得相应的结果<sup>[16]</sup>;3)结合了现代计算机和医学影像学技术,结果更加精确;4)价格相对低廉。

### 3.4 理筋提髌手法作用时髌股软骨面的有限元分析及其意义

从本研究的结果看,早期髌股关节炎患者的应力分布区域集中在髌骨和股骨滑车软骨面的中外侧(见图6);股骨滑车软骨面应力峰值为9.61 MPa,髌骨软骨面应力峰值为11.27 MPa(见表2)。在理筋提髌手法干预后,髌股关节面的应力集中分布区域有所分散,主要在髌股关节软骨面的内侧和外侧(见图7);股骨滑车软骨面应力峰值为8.88 MPa,髌骨软骨面应力峰值为10.28 MPa(见表2)。在理筋提髌手法干预后,髌股关节面的应力有所减小。这主要是由于该手法一方面通过理筋操作使股四头肌、内外侧支持带等髌周软组织得以松解;另一方面通过提髌操作,推移和提拿髌骨使髌周软组织得以间接松解,尤其是外侧支持带的被动拉伸;两者共同起到松解髌周软组织的作用。这提示针对髌骨外移的患者,在手法临床操作过程中应循序渐进,从筋出发,重视“筋”之功能,尤其是通过向内推移髌骨,间接松解外侧支持带。最终通过恢复髌周软组织之间的力学平衡,达到经筋治骨的目的。此外,无论是干预前还是干预后,随着膝关节屈曲角度的逐渐减小,髌股关节软骨面的应力峰值也逐渐减小(见表2)。这对于早期髌股关节炎的防治具有重要的指导意义,即应减少膝关节屈曲的运动,如上下楼梯、下蹲等。此外,当膝关节屈曲30°时,股骨滑车和髌骨软骨面的应力峰值在干预后下降最明显,这可能是因为在在此角度髌骨与股骨滑车关节面刚开始接触的缘故。

通过膝关节有限元模型,可以解析理筋提髌手法治疗髌股关节炎的力学机制。但该手法不仅作用于髌骨和内外侧支持带,还作用于膝关节周围肌群等软组织,因有限元分析的局限性,其所建立的模型也只能是接近膝关节解剖结构,并不能完全代表人体的生物组织特性,因此本研究也只是从髌骨运动轨迹这一个角度阐述了该手法的作用机制。关于理筋提髌手法的其他生物学作用机制,有待实验和临床的进一步探索和研究,以

期为临床的推广和应用提供更有力的数据支持。

### 参考文献

- [1] 孙琪,勾禹,刘光源,等. 髌股关节炎病因及发病机制的相关研究进展[J]. 华北理工大学学报(医学版),2018,20(3):246-252.
- [2] 李念虎,周英祝,邓晋丰. 髌股关节骨性关节炎概况[J]. 中国中医骨伤科杂志,2004,12(6):59-61.
- [3] 张礼平,程飞,刘德玉,等. 生物力学在膝骨性关节炎中的应用进展[J]. 中华中医药学刊,2016,34(7):1644-1647.
- [4] 安丙辰,戴尅戎. 影响膝关节炎发病及进展的生物力学因素[J]. 国际骨科学杂志,2012,33(3):153-156.
- [5] VANDENNEUCKER H, LABEY L, VANDER S J, et al. Isolated patellofemoral arthroplasty reproduces natural patellofemoral joint kinematics when the patella is resurfaced[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc,2016,24(11):3668-3677.
- [6] 国家老年疾病临床医学研究中心. 中国髌股关节骨关节炎诊疗指南(2020年版)[J]. 中华骨科杂志,2020,40(18):1227-1234.
- [7] PENA E, CALVO B, MARTINEZ M A, et al. A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint[J]. J Biomech,2006,39(9):1686-1701.
- [8] INNOCENTI B, TRUYENS E, LABEY L, et al. Can medial-lateral baseplate position and load sharing induce asymptomatic local bone resorption of the proximal tibia? A finite element study[J]. J Orthop Surg Res,2009,4:26.
- [9] GROOD E S, SUNTAY W J, NOYES F R, et al. Biomechanics of the knee extension exercise[J]. J Bone Joint Surg Br,1984,66A:725-733.
- [10] 蒋黎明,陶莹,于小明,等. 髌骨运动轨迹异常导致膝骨关节炎的病因机制及治疗研究进展[J]. 中国康复,2020,35(11):605-608.
- [11] PRASADAM I, CRAWFORD R, XIAO Y. Aggravation of ADAMTS and matrix metalloproteinase production and role of ERK1/2 pathway in the interaction of osteoarthritic subchondral bone osteoblasts and articular cartilage chondrocytes: possible pathogenic role in osteoarthritis[J]. J Rheumatol,2012,39(3):621-634.
- [12] 刘文华,刘亚,王韶峰,等. 压应力下兔软骨细胞凋亡的实验性研究[J]. 潍坊医学院学报,2007,29(6):443-445.
- [13] 陈彦飞,赵勇,鲁超. 有限元分析技术在膝关节生物力学研究中的应用现状[J]. 中国中医骨伤科杂志,2019,27(8):81-83.
- [14] 马雪梅,张春秋,高丽兰,等. 骑行时不同屈曲角度膝关节软骨受力分析[J]. 中国生物医学工程学报,2016,35(1):119-123.
- [15] 金哲峰,刘爱峰,王平,等. 膝关节骨性关节炎生物力学模型及其软骨表面应力分析[J]. 中国组织工程研究,2015,19(29):4629-4633.
- [16] 张玉华,蔡宗熙,熊五一,等. 颈前路植骨高度对相邻节段影响的三维有限元分析[J]. 中华骨科杂志,2017,37(24):1540-1548.

(收稿日期:2021-03-04)