doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2024.14.014

基于三维有限元分析半腱肌转位对髋关节运动的影响 *

杨澜波[1,2] 李冬冬[1] 谢宝真[1] 万峰格[1] 李无阴[1] 王战朝[1] 王海彬[2△]

(1 河南省洛阳正骨医院(河南省骨科医院)运动医学中心 河南 洛阳 471000;
2 广州中医药大学第一附属医院骨科 广东 广州 510405)

摘要 目的:分析半腱肌转位对髋关节旋转与伸展运动的影响。**方法:**采集志愿者的 CT 与 MRI 影像数据,构建髋膝关节三维有限元模型,计算并建立髋关节旋转与伸展相关肌肉的弹簧模型,依次加载相关肌肉模拟半腱肌完整、转位与缺失状态下股骨的总体应力与总体形变,以评价对髋关节内旋与伸展功能的影响。**结果:**成功构建 CT 与 MRI 影像数据拟合的包含骨骼、韧带与肌肉的髋膝关节三维有限元模型,计算获得各相关肌肉弹簧模型的参数。在髋关节旋转有限元模型中,半腱肌完整的情况下,髋关节旋转肌群导致的股骨整体应力为 0.59057 MPa,半腱肌转位为 0.90023 MPa,半腱肌缺失为 0.48851 MPa;而半腱肌完整的情况下,髋关节旋转肌群导致的股骨整体形变为 4.1081 mm,半腱肌转位为 3.9998 mm,半腱肌缺失为 3.0244 mm。在髋关节伸展有限元模型中,半腱肌完整的情况下,髋关节伸展肌群导致的股骨整体应力为 2.8383 MPa,半腱肌转位为 2.1019 MPa,半腱肌缺失为 1.4665 MPa;而半腱肌完整的情况下,髋关节伸展肌群导致的股骨整体形变为 6.6956 mm,半腱肌转位为 6.314 mm,半腱肌缺失为 4.6261 mm。**结论:**半腱肌转位较半腱肌切取更好的保持了髋关节的内旋与伸展运动功能,而半腱肌切取对髋关节运动有显著影响,可能会带来相关的运动损伤风险。

关键词:半腱肌;髋关节;有限元分析

中图分类号:R686.5;R684 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2024)14-2677-06

Analysis of Influence of Semitendinosus Transposition on Hip Movement Based on Three-dimensional Finite Element*

YANG Lan-bo[1,2], LI Dong-dong[1], XIE Bao-zhen[1], WAN Feng-ge[1], LI Wu-yin[1], WANG Zhan-chao[1], WANG Hai-bin[2△]

(1 Sport Medicine Center, Luoyang Orthopedic-Traumatological Hospital of Henan Province, Henan Provincial Orthopedic Hospital, Luoyang, Henan, 471000, China; 2 Department of Orthopaedics, the First Affiliated Hospital of Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou, Guangdong, 510405, China)

ABSTRACT Objective: To analyze the effect of semitendinosus transposition on rotation and extension of hip. **Methods:** CT and MRI image data of volunteer were collected to construct a three-dimensional finite element model of hip and knee, and the spring model of the muscles related to hip rotation and extension was calculated and established. The relevant muscles were successively loaded to simulate the total stress and total deformation of the femur under the semitendinosus intact, transposition and missing, so as to evaluate the impact on the internal rotation and extension function of the hip. **Results:** The three-dimensional finite element model of hip and knee, which included bone, ligament and muscle, was successfully constructed by fitting CT and MRI image data, and the parameters of each muscle spring model were calculated. In the finite element model of hip rotation, when the semitendinosus was intact, the overall stress of femur caused by hip rotation muscle group was 0.59057 MPa, the semitendinosus transposition was 0.90023 MPa, and semitendinotomy was 0.48851 MPa. In the case of intact semitendinosus, the total femur deformation caused by hip rotators was 4.1081 mm, the semitendinosus transposition was 3.9998 mm, and semitendinotomy was 3.0244 mm. In the finite element model of hip joint extension, when the semitendinosus was intact, the overall stress of femur caused by hip joint extension muscle group was 2.8383 MPa, the semitendinosus transposition was 2.1019 MPa, and the semitendinotomy was 1.4665 MPa. In the case of intact semitendinosus, the total femur deformation caused by hip extension muscle group was 6.6956 mm, the semitendinosus transposition was 6.314 mm, and the semitendinotomy was 4.6261 mm. **Conclusion:** Semitendinosus transposition can better maintain the internal rotation and extension function of the hip than semitendinotomy, and semitendinotomy has a significant effect on hip movement, which may bring the associated risk of sports injury.

Key words: Semitendinous; Hip; Three-dimensional finite element

Chinese Library Classification(CLC): R686.5; R684 Document code: A

Article ID: 1673-6273(2024)14-2677-06

* 基金项目:河南省博士后科研项目启动经费(HN2022089);河南省中青年卫生健康科技创新杰青人才培养项目(JQRC2023013)

作者简介:杨澜波(1984-),男,副主任医师,在站博士后,研究方向:膝关节韧带生物力学,E-mail: ylb84@163.com

△ 通讯作者:王海彬,男,教授,博士生导师,研究方向:关节外科的基础与临床,E-mail: hipman@163.com

(收稿日期:2024-01-29 接受日期:2024-02-26)

前言

严重内侧副韧带损伤(III 级)的治疗存在争议,保守治疗常导致膝关节顽固性疼痛，同时残留膝关节外翻与旋转不稳定[1,2]。因此,很多学者更倾向通过重建来治疗严重内侧副韧带损伤,恢复膝关节内侧稳定性[3]。内侧副韧带重建多切取半腱肌作为移植物,编织后固定于原有内侧副韧带起止点恢复膝关节内侧稳定性[4]。半腱肌起点位于坐骨,止点位于胫骨近端鹅足,在髋关节运动中起着内旋、伸展的作用,理论上切取半腱肌对髋关节功能存在着一定的影响[5]。

我科临床应用半腱肌转位法治疗膝关节内侧不稳定多年,此方法保留半腱肌起止点,自股骨内上髁水平游离半腱肌并向前牵拉,转位至内侧副韧带股骨止点处固定替代失稳的内侧结构,是一种保留半腱肌起止点、主体结构与血运,即刻恢复膝关节内侧稳定性的方法。半腱肌转位在治疗膝关节内侧不稳定的同时,是否影响髋关节的运动功能,国内外尚无相关的生物力学研究。本研究计划构建髋膝关节三维有限元模型,模拟半腱肌完整,转位与缺失情况下,观察髋关节旋转与伸展运动的改变,评价半腱肌转位对髋关节功能的影响,为进一步临床推广应用打下实验基础。

1 材料与方法

1.1 数据来源

选取健康中青年男性志愿者 1 名,26 岁，体重 70.2 kg,身高 175 cm,无外伤、畸形、肿瘤、炎症性疾病等既往膝关节相关病史。采用 CT（64 排，层厚 1 mm，分辨率 512× 512，像素 0.705 mm)与 MRI(场强 3.0T,层厚 3 mm,分辨率 256× 256,像素 0.859 mm）对右侧髋膝关节进行扫描，获取的图像以 DICOM 格式输出并存储。本研究已通过河南省洛阳正骨医院(河南省骨科医院)医学伦理委员会批准(2023ZXKT0003-01),该志愿者知情同意并签署知情同意书，本研究于 2023 年 9 月在河南省洛阳正骨医院(河南省骨科医院)运动医学实验室完成。

1.2 仪器软件

CT(GE 公司,美国);MRI(西门子公司,德国);Mimics 21.0 软件(Materialise 公司,比利时)；Geomagic 2017(Geomagic 公司，美国)；SolidWorks 2017 软件（达索公司，法国)；Ansys 17.0 软件(Ansys 公司,美国)。

1.3 三维有限元模型构建

将采集获得的 CT 和 MRI 原始数据导入 Mimics 21.0 软件,通过控制灰度值覆盖目标对象分离骨骼、韧带等解剖结构。进一步去燥、分区、填充得到外轮廓完整的各部位模型蒙版,逐个实体化后依次导出为 STL 文件,初步建立包括骨盆、股骨、胫骨、腓骨、前交叉韧带、后交叉韧带、半月板、内侧副韧带、外侧副韧带、半腱肌、半膜肌、股二头肌长头及臀大肌的三维网格模型。将 STL 文件导入 3D 模型数据转换软件 Geomagic 2017,通过松弛,删除钉状物,去噪等命令优化模型特征进行表面光滑处理;使用精确曲面命令绘制轮廓线及曲面片并覆盖在模型外,进一步生成格栅并与外表面拟合,得到各部位的曲面实体文件,另存为 STP 格式。用 SolidWorks 2017 软件打开 STP 文件,装配骨、软骨、韧带和肌肉,成功构建髋膝关节三维有限元模型,排除干涉情况后保存为 x-t 文件,导入 Ansys 17.0 软件的 workbench 插件中。

1.4 三维模型中各部件的赋值与网格化

在 Ansys workbench 中创建 Mechanical 分析模块,根据文献,将之前导入到材料库里的髋膝关节各部件进行赋值,见表 1[6-8]。进一步采用四面体单元对三维模型进行网格划分。

表 1 三维模型中各部件的赋值

Table 1 Material parameters of the 3D model

Component	Elasticity Modulus(MPa)	Poisson's Ratio
Bone	17000	0.36
Ligament	390	0.4
Tendon	600	0.46
Meniscus	3	0.46
Cartilage	5	0.46

1.5 肌肉弹簧模型参数的计算

为更好模拟肌肉收缩力在髋膝关节旋转与伸展运动中的作用,需建立肌肉的弹簧模型。弹簧模型的基础是获取肌肉的刚度系数,计算公式为 $K=\frac{E*L}{A}$(K 为刚度系数,E 为肌肉的弹性模量,A 为肌肉的平均横截面积,L 为肌肉的长度)[9]。其中,弹性模量从相关文献中获取，肌肉长度自起止点测量得出,平均横截面积从三维重建的模型中计算得出。

1.6 构建模拟半腱肌完整、转位及缺失条件下的髋关节旋转与伸展模型

在髋膝关节有限元模型的基础上,正常加载内侧副韧带与半腱肌弹簧模型,获得模拟半腱肌完整模型;维持原半腱肌弹簧模型的起止点不变,将半腱肌的腱性部分向前绑定至股骨内侧髁内侧副韧带止点,同时去除内侧副韧带,获得模拟半腱肌转位模型;正常加载内侧副韧带,不加载半腱肌,获得模拟半腱肌缺失模型,见图 1。在上述三种模型基础上,当测试髋关节内旋运动时,加载半膜肌、臀大肌等旋转相关肌肉的弹簧模型;当测试髋关节伸展运动时,加载半膜肌、股二头肌长头、臀大肌等伸展相关肌肉的弹簧模型。

1.7 定义约束、接触条件

为突出反映肌肉对髋关节运动的影响,将髋膝关节设定为固定,各韧带、肌肉起点和止点与骨的接触为绑定。

1.8 施加载荷与观察指标

在模拟半腱肌完整、半腱肌转位及半腱肌缺失情况下，分别加载髋关节旋转与伸展运动相关的半腱肌（12 N）、半膜肌（21 N）、股二头肌长头（12 N）、臀大肌（42 N）的弹簧模型[10]。测定在相关肌肉收缩作用下股骨的总体应力与总体形变，了解半腱肌转位对髋关节内旋及伸展功能的影响。

2 结果

2.1 髋膝关节三维模型的构建

成功建立包含骨、软骨、半月板、主要韧带及涉及髋关节旋转与伸展运动相关肌肉的髋膝关节三维有限元模型，对解剖结构进行了生理学的还原，见图 2。髋关节旋转有限元模型包含的节点为 420041，网格数为 260385；髋关节伸展有限元模型包含的节点为 339397，网格数为 209428。

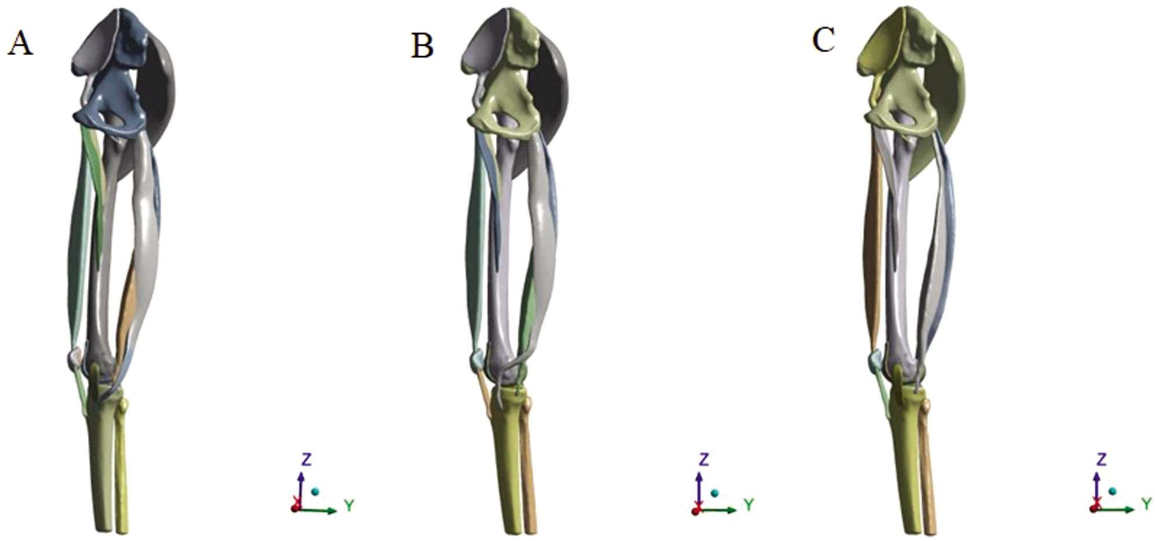

图 1 半腱肌完整、转位及缺失的模拟

Fig.1 Simulation of semitendinosus intact, transposition and absence

A:半腱肌完整；B:半腱肌转位；C:半腱肌缺失

A: semitendinosus intact; B: semitendinosus transposition; C: semitendinosus absence

2.2 肌肉弹簧模型刚度的计算结果

相关肌肉弹簧模型的参数、计算获得的刚度如下，见表 2。

2.3 半腱肌对髋关节旋转的影响

在髋关节旋转有限元模型中，半腱肌完整的情况下，髋关节旋转肌群导致的股骨整体应力为 0.59057 MPa，半腱肌转位为 0.90023 MPa，半腱肌缺失为 0.48851 MPa；而半腱肌完整的情况下，髋关节旋转肌群导致的股骨整体形变为 4.1081 mm，半腱肌转位为 3.9998 mm，半腱肌缺失为 3.0244 mm，见图 3。

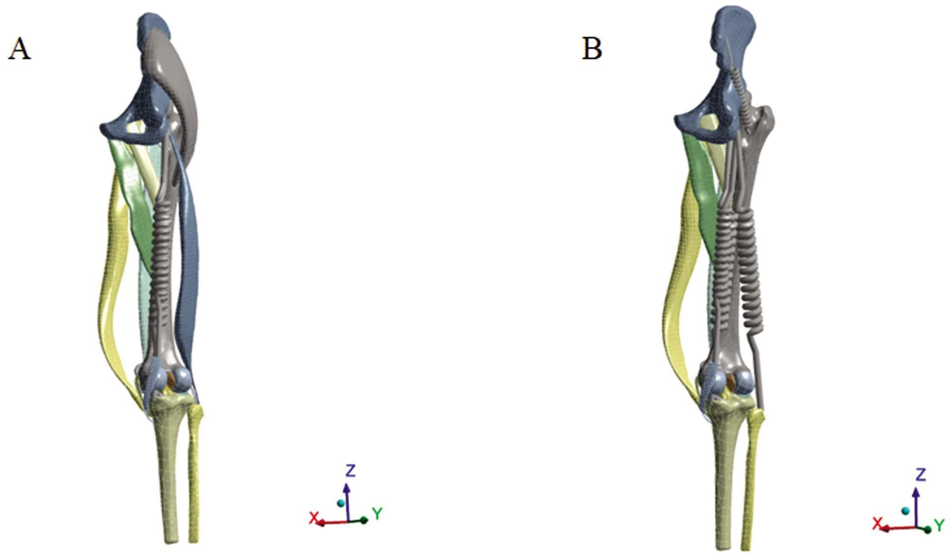

图 2 髋膝关节三维有限元模型

Fig.2 Three-dimensional finite element model of hip and knee

A: 髋关节旋转有限元模型；B: 髋关节伸展有限元模型

A: Finite element model of hip rotation; B: Finite element model of hip extension

表 2 相关肌肉弹簧模型的参数

Table 2 Parameters of the relevant muscle spring model

Muscle	Function	Elasticity Modulus (MPa)	Average cross-sectional area(mm²)	Muscle length (mm)	Stiffness (N/mm)
Semitendinosus	Extension Internal rotation	1.08	335.2	347.93	1.12
Semimembranosus	Extension Internal rotation	1.08	415.4	421.97	1.09
Biceps femoris long head	Extension	1.08	442.6	444.33	1.08
Gluteus maximus	Extension External Rotation	1.08	1627.2	224.19	0.149

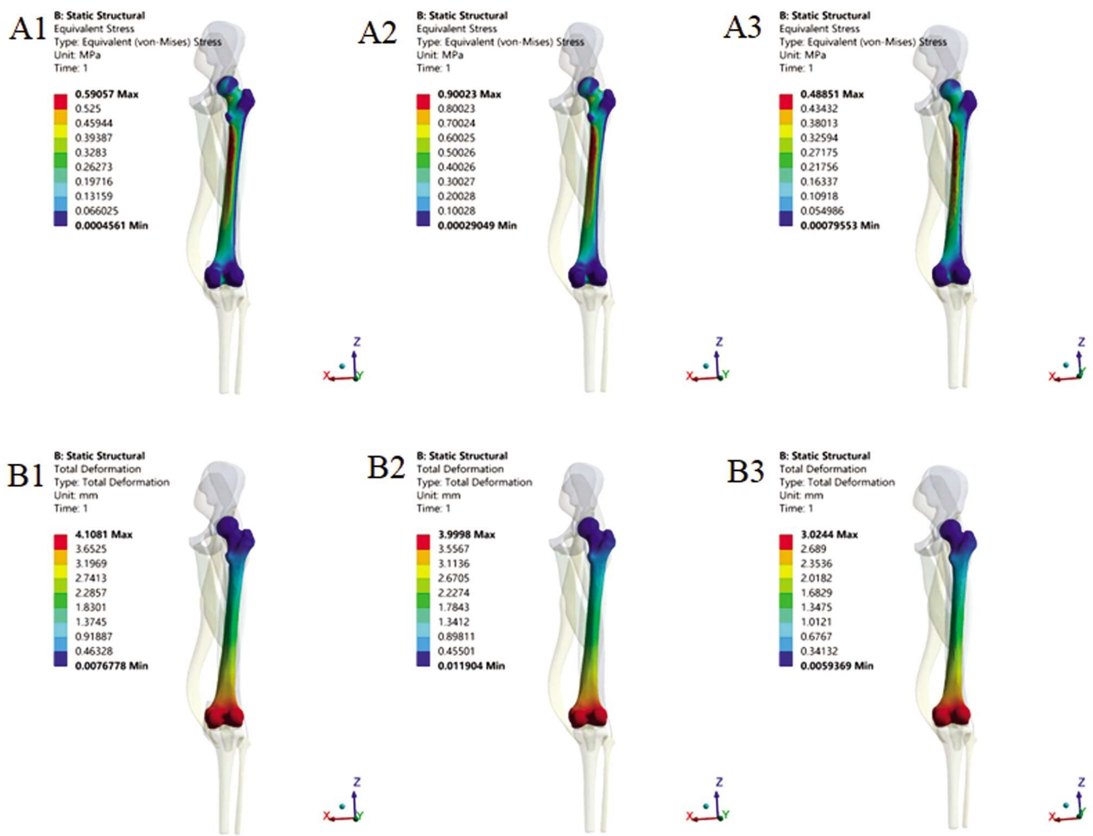

图 3 半腱肌完整、转位与缺失对髋关节旋转运动影响的应力与形变云图

Fig.3 Stress and deformation nephogram of the effect of semitendinosus intact, transposition and absence on hip rotation

A1: 半腱肌完整股骨应力;A1: 半腱肌转位股骨应力;A1: 半腱肌缺失股骨应力;

B1: 半腱肌完整股骨形变;B2: 半腱肌转位股骨形变;B3: 半腱肌缺失股骨形变

A1: femur stress of semitendinosus intact; A2: femur stress of semitendinosus transposition; A3: femur stress of semitendinosus absence; B1: femur deformation of semitendinosus intact; B2: femur deformation of semitendinosus transposition; B3: femur deformation of semitendinosus absence

2.4 半腱肌对髋关节伸展的影响

在髋关节伸展有限元模型中,半腱肌完整的情况下,髋关节伸展肌群导致的股骨整体应力为 2.8383 MPa,半腱肌转位为 2.1019 MPa,半腱肌缺失为 1.4665 MPa;而半腱肌完整的情况下,髋关节伸展肌群导致的股骨整体形变为 6.6956 mm,半腱肌转位为 6.314 mm,半腱肌缺失为 4.6261 mm,见图 4。

3 讨论

3.1 CT 与 MRI 影像数据拟合构建髋膝关节三维有限元模型

髋膝关节具有复杂的解剖结构和生物力学特性,传统方法研究其生物力学功能通常涉及施加关节外载荷和使用力学实验机,此类方法难以实现涉及两个关节的运动,亦无法分析关节内的应力分布[11]。因此,获取影像学数据并建立三维有限元模型,成为进一步研究髋膝关节生物力学特性的重要手段[12]。三维有限元分析应用于骨科已有 50 余年历史,目前已在关节、脊柱等领域的生物力学研究中广泛应用[13]。研究发现,尽管单独使用 CT 影像数据可以准确构建骨结构模型,但难以精确模拟软骨、韧带、半月板等软组织[14]。相比之下,单独使用 MRI 影像数据可以准确构建各种软组织结构的解剖模型,但无法实现骨骼的精确模拟[15]。因此,单独使用 CT 或 MRI 影像数据将显

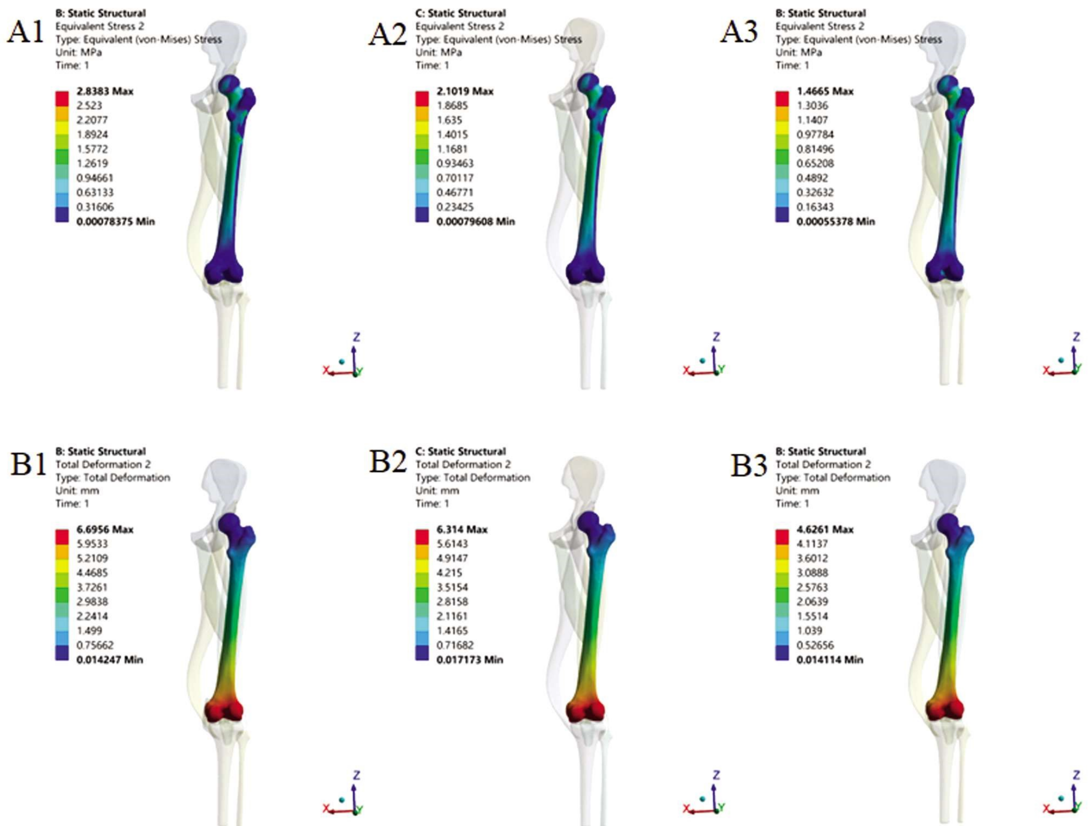

图 4 半腱肌完整、转位与缺失对髋关节伸展运动影响的应力与形变云图

Fig.4 Stress and deformation nephogram of the effect of semitendinosus intact, transposition and absence on hip extension

A1: 半腱肌完整股骨应力；A2: 半腱肌转位股骨应力；A3: 半腱肌缺失股骨应力；

B1: 半腱肌完整股骨形变；B2: 半腱肌转位股骨形变；B3: 半腱肌缺失股骨形变

A1: femur stress of semitendinosus intact; A2: femur stress of semitendinosus transposition; A3: femur stress of semitendinosus absence; B1: femur deformation of semitendinosus intact; B3: femur deformation of semitendinosus transposition; B3:femur deformation of semitendinosus absence

著降低此类模型的准确性，导致生物力学分析结果失真。目前，国内鲜有将 CT 与 MRI 影像数据拟合后共同应用于生物力学研究的报道。本研究通过采集同一志愿者的 MRI 与 CT 图像，通过 Mimics 软件对 CT 和 MRI 影像数据中提取的人体解剖结构模块进行组装，获得了包含骨、韧带与肌肉等多种结构的高质量、高精度的髋膝关节三维有限元模型，为精准完成生物力学有限元分析奠定了基础。该模型可用于测定不同韧带缺失情况及不同载荷下的应力、形变等生物力学指标，模拟不同手术条件对髋膝关节生物力学的影响，对临床有较大的指导意义。

3.2 切取半腱肌对髋关节活动的影响

目前，半腱肌肌腱已成为世界范围内最流行的用于韧带重建的移植物，具有较易切取、并发症较少及成本较低等诸多优势[16]。但半腱肌在髋关节运动中起着关键作用，尤其对于短跑等动态运动的表现非常重要[5,17]。Mai MT 等通过激光衍射分析髋膝关节运动，显示半腱肌对髋关节伸展的影响较膝关节屈曲更大[18]。Messer DJ 等通过功能核磁共振扫描发现，在髋关节伸展过程中，半腱肌呈高水平激活状态[19]。Lim W 则发现髋关节内旋时，半腱肌显示出更为明显的肌电活动，显著高于股二头肌[20]。Flies A 证实切取腘绳肌移植物(半腱肌与股薄肌)引起的的髋关节内旋扭矩丢失，与切取半腱肌肌腱密切相关，而与股薄肌关系不大[21]。如前所述，虽然半腱肌在髋关节内旋及伸展运动中的作用关键，但其在髋关节运动中的确切力学行为尚未完全明确[22]。本研究模拟髋膝关节在加载旋转肌肉力量的作用下，与半腱肌切取时相比，半腱肌完整时股骨的总体应力增加 20.89 %；整体形变增加 35.83 %。在加载伸展肌肉力量的作用下，与半腱肌切取时相比，半腱肌完整时的股骨的整体应力增加 93.54 %；整体形变增加 44.74 %。以上结果说明，在切取半腱肌后加载旋转与伸展肌力，会明显影响股骨上的整体应力以及在应力作用下产生的形变，而且这个变化在伸展运动中更为明显。由此可知，半腱肌在髋关节旋转与伸展运动中扮演着重要角色，切取半腱肌对髋关节伸展影响更大。

3.3 半腱肌转位在保留髋关节运动功能中的优势

下肢各关节通过运动链紧密连接，以可预测的模式将力和运动传递给相邻关节。当某一关节出现力学异常时，这种异常会依次转移到下一个关节[23]。研究显示，下肢任何部分的力学改变都可能会导致相关下肢关节的损伤[24]。因此，髋关节运动学的改变可能会潜在地干扰整个下肢的运动学[25]。Byrne A 等发现髋关节伸展力量的减弱，会引起非接触性前交叉韧带损伤的风险升高[26]。Leunig M 等的研究显示髋臼撞击与髋关节内旋受限密切相关[27]。Bedi A 等认为髋关节内旋的受限会导致运动中前交叉韧带承受的应力代偿性增加，显著升高断裂风险[28]。同时，另有其他学者发现运动员髋关节内旋力量的下降会导致肩肘关节与腰背部损伤风险升高[29,30]。本研究的结果显示，在髋关节旋转肌力的作用下，与半腱肌完整时相比，半腱肌转位的

股骨总体应力增加 52.43 %，半腱肌切取降低 17.28 %；与半腱肌完整时相比，半腱肌转位的股骨整体形变降低 2.64 %，半腱肌切取降低 26.38 %。在髋关节伸展肌力的作用下，与半腱肌完整时相比，半腱肌转位的股骨总体应力降低 25.95 %，半腱肌切取降低 48.33 %；与半腱肌完整时相比，半腱肌转位的股骨整体形变降低 5.70 %，半腱肌切取降低 30.91 %。以上结果说明，与半腱肌完整相比，半腱肌转位较半腱肌切取对髋关节旋转与伸展运动的影响更小，甚至因为转位改变了半腱肌止点，旋转力量直接作用于股骨远端后应力值明显升高，提示转位后髋关节内旋更加有力。以上分析表明，与半腱肌切取相比，半腱肌转位对髋关节内旋与伸展运动的影响较小，很有可能降低半腱肌切取带来的运动损伤风险。

本研究结果提示，与半腱肌完整状态相比，半腱肌转位较半腱肌切取更好的保持了髋关节原有的内旋与伸展运动功能，而半腱肌切取会显著影响髋关节运动，可能会带来相关的运动损伤风险。

参 考 文 献(References)

[1] Marchant MH Jr, Tibor LM, Sekiya JK, et al. Management of medial-sided knee injuries, part 1: Medial collateral ligament [J]. Am J Sports Med, 2011, 39: 1102-1113.

[2] Omar M, Petri M, Dratzidis A, et al. Biomechanical comparison of fixation techniques for MCL anatomical augmented repair [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2016, 24: 3982-3987.

[3] Mowers C, Jackson GR, Condon JJ, et al. Medial Collateral Ligament Reconstruction and Repair Show Similar Improvement in Outcome Scores, But Repair Shows Higher Rates of Knee Stiffness and Failure: A Systematic Review[J]. Arthroscopy, 2023, 39 (10): 2231-2240.

[4] Shultz CL, Poehlein E, Morriss NJ, et al. Nonoperative Management, Repair, or Reconstruction of the Medial Collateral Ligament in Combined Anterior Cruciate and Medial Collateral Ligament Injuries-Which Is Best? A Systematic Review and Meta-analysis [J]. Am J Sports Med, 2023: 3635465231153157.

[5] Schache AG, Dorn TW, Blanch PD, et al. Mechanics of the human hamstring muscles during sprinting [J]. Med Sci Sport Exerc, 2012, 44: 647-658.

[6] Li G, Lopez O, Rubash H. Variability of a three-dimensional finite element model constructed using magnetic resonance images of a knee for joint contact stress analysis[J]. J Biomech Eng, 2001, 123(4): 341-346.

[7] Palmer JE, Russell JP, Grieshober J, et al. A Biomechanical Comparison of Allograft Tendons for Ligament Reconstruction [J]. Am J Sports Med, 2017, 45(3): 701-707.

[8] Wu L. Nonlinear finite element analysis for musculoskeletal biomechanics of medial and lateral plantar longitudinal arch of Virtual Chinese Human after plantar ligamentous structure failures[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2007, 22(2): 221-229.

[9] Diffo Kaze A, Maas S, Arnoux PJ, et al. A finite element model of the lower limb during stance phase of gait cycle including the muscle forces[J]. Biomed Eng Online, 2017, 16(1): 138.

[10] Phillips AT, Pankaj P, Howie CR, et al. Finite element modelling of the pelvis: inclusion of muscular and ligamentous boundary conditions[J]. Med Eng Phys, 2007, 29(7): 739-748.

[11] Hinterwimmer S, Baumgart R, Plitz W. Tension changes in the collateral ligaments of a cruciate ligament-deficient knee joint: an experimental biomechanical study [J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2002, 122(8): 454-458.

[12] Abdel-Rahman EM, Hefzy MS. Three-dimensional dynamic behaviour of the human knee joint under impact loading[J]. Med Eng Phys, 1998, 20(4): 276-290.

[13] Brekelmans WA, Poort HW, Slooff TJ. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts [J]. Acta Orthop Scand, 1972, 43(5): 301-317.

[14] Chantarapanich N, Nanakorn P, Chernchujit B, et al. A finite element study of stress distributions in normal and osteoarthritic knee joints [J]. J Med Assoc Thai, 2009, 92: S97-103.

[15] Donahue TL, Hull ML, Rashid MM, et al. A finite element model of the human knee joint for the study of tibio-femoral contact [J]. J Biomech Eng, 2002, 124(3): 273-280.

[16] Boyer P, Villain B, Pelissier A, et al. Current state of anterior cruciate ligament registers [J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2014, 100 (8): 879-883.

[17] Genuario JW, Faucett SC, Boublik M, et al. A cost-effectiveness analysis comparing 3 anterior cruciate ligament graft types: bone-patellar tendon-bone autograft, hamstring autograft, and allograft[J]. Am J Sports Med, 2012, 40(2) 307-314.

[18] Mai MT, Lieber RL. A model of semitendinosus muscle sarcomere length, knee and hip joint interaction in the frog hindlimb [J]. J Biomech, 1990, 23(3): 271-279.

[19] Messer DJ, Bourne MN, Williams MD, et al. Hamstring Muscle Use in Women During Hip Extension and the Nordic Hamstring Exercise: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study[J]. J Orthop Sports Phys Ther, 2018, 48(8): 607-612.

[20] Lim W. Effects of hip rotation on the electromyographic activity of the medial and lateral hamstrings and muscle force [J]. J Back Musculoskelet Rehabil, 2021, 34(6): 1023-1029.

[21] Flies A, Scheibel M, Kraus N, et al. Isolated gracilis tendon harvesting is not associated with loss of strength and maintains good functional outcome [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2020, 28(2): 637-644.

[22] Askling CM, Heiderscheit BC. Acute hamstring muscle injury: types, rehabilitation, and return to sports. In: Doral M, Karlsson J, editors. Sports injuries: prevention, diagnosis, treatment and rehabilitation [M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015, p. 2137-2147.

[23] Loudon JK, Reiman MP. Lower extremity kinematics in running athletes with and without a history of medial shin pain[J]. Int J Sports Phys Ther, 2012, 7(4): 356-364.

[24] Souza RB, Powers CM. Predictors of hip internal rotation during running an evaluation of hip strength and femoral structure in women with and without patellofemoral pain [J]. Am J Sports Med, 2009, 37 (3): 579-587.

[25] Mohammad WS, Elsais WM. Association Between Hip Rotation and Activation of the Quadriceps and Gluteus Maximus in Male Runners [J]. Orthop J Sports Med, 2020, 8(11): 2325967120962802.

(下转第 2676 页)

一定影响，且与 RA 患者疾病活动度和骨代谢指标密切相关。血清 NLRP3、ASC 及 Caspase-1 水平三项联合检测对 RA 疾病活动严重程度进具有较好的诊断效能，值得临床关注。

参考文献(References)

[1] 邓颖,金瓅,段志豪,等. 类风湿关节炎骨破坏的细胞网络调控及治疗研究进展[J]. 中国现代医学杂志, 2023, 33(15): 62-68.

[2] Lin YJ, Anzaghe M, Schülke S. Update on the Pathomechanism, Diagnosis, and Treatment Options for Rheumatoid Arthritis[J]. Cells, 2020, 9(4): 880.

[3] 曾仙月, 王东军, 孙璇, 等. 国内类风湿关节炎临床诊疗指南与专家共识方法学质量系统评价 [J]. 世界科学技术 - 中医药现代化, 2023, 25(4): 1425-1433.

[4] 许博, 郑福增, 刘畅. 基于生物信息学探讨类风湿关节炎与骨关节炎相关分子机制及免疫细胞浸润分析 [J]. 中国医科大学学报, 2023, 52(8): 718-723, 735.

[5] 于倩文, 韦雨颂, 李芬. 类风湿关节炎治疗药物的机制研究进展[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2020, 12(11): 4-8.

[6] Cush JJ. Rheumatoid Arthritis: Early Diagnosis and Treatment [J]. Rheum Dis Clin North Am, 2022, 48(2): 537-547.

[7] 吕艳倮, 李子安, 阿祥仁, 等. 抗 Sa 抗体和抗氨甲酰化蛋白抗体对类风湿性关节炎的诊断价值 [J]. 中华医学杂志, 2023, 103(37): 2947-2951.

[8] Wu CY, Yang HY, Lai JH. Anti-Citrullinated Protein Antibodies in Patients with Rheumatoid Arthritis: Biological Effects and Mechanisms of Immunopathogenesis [J]. Int J Mol Sci, 2020, 21(11): 4015.

[9] Wu CY, Yang HY, Luo SF, et al. From Rheumatoid Factor to Anti-Citrullinated Protein Antibodies and Anti-Carbamylated Protein Antibodies for Diagnosis and Prognosis Prediction in Patients with Rheumatoid Arthritis[J]. Int J Mol Sci, 2021, 22(2): 686.

[10] Gao J, Zhang H, Yang Y, et al. Therapeutic Potential of Targeting the NLRP3 Inflammasome in Rheumatoid Arthritis [J]. Inflammation, 2023, 46(3): 835-852.

[11] 中华医学会风湿病学分会. 2018 中国类风湿关节炎诊疗指南[J]. 中华内科杂志, 2018, 57(4): 242-251.

[12] Osipova D, Janssen R, Martens HA. Rheumatoid arthritis: more than a joint disease[J]. Ned Tijdschr Geneeskd, 2020, 18(164): 4166-4167.

[13] McDermott G, Gill R, Gagne S, et al. Demographic, Lifestyle, and Serologic Risk Factors for Rheumatoid Arthritis (RA)-associ ated Bronchiectasis: Role of RA-related Autoantibodies [J]. J Rheumatol, 2022, 49(7): 672-679.

[14] Choulaki C, Papadaki G, Repa A, et al. Enhanced activity of NLRP3 inflamasome in peripheral blood cells of patients with active rhcumatoid arthritis[J]. Arthritis Res Ther, 2015, 10(17): 257-258.

[15] Ridgley LA. Anderson AE. Pratt AG. What are the dominant cytokines in early rheumatoid arthritis? [J]. Curr Opin Rheumatol, 2018, 30(2): 207-214.

[16] Li Z, Guo J, Bi L. Role of the NLRP3 inflammasome in autoimmune diseases[J]. Biomed Pharmacother, 2020, 130: 110542.

[17] Zhu JN, Nie LY, Lu XY, et al. Meta-analysis: compared with anti-CCP and rheumatoid factor, could anti-MCV be the next biomarker in the rheumatoid arthritis classification criteria? [J]. Clin Chem Lab Med, 2019, 57(11): 1668-1679.

[18] 李宏一, 罗业浩, 黄安. 类风湿关节炎血管翳的形成及治疗的研究进展[J]. 广西医学, 2022, 44(15): 1786-1790.

[19] 吴晓丹,沈洪远,涂爽,等. 类风湿性关节炎患者血清 1,25- 二羟基维生素 D3 水平及其临床意义 [J]. 临床与病理杂志, 2020, 40(12): 3116-3120.

[20] 张佳琦, 鲁芙爱, 张文兰, 等. 抗瓜氨酸蛋白抗体与类风湿关节炎继发骨质疏松的相关性 [J]. 中国骨质疏松杂志, 2022, 28(8): 1115-1120.

[21] 张迪, 樊冰, 刘英, 等. 基于 OPG/RANKL/RANK 信号通路探讨清热利湿活血法对活动期类风湿关节炎骨代谢的影响及临床疗效观察[J]. 中国新药杂志, 2022, 31(23): 2333-2337.

[22] 严家妮, 杨梅, 张航, 等. 血清 PTH 及肿瘤标志物在类风湿关节炎患者合并骨质疏松症诊断价值分析 [J]. 现代生物医学进展, 2022, 22(23): 4560-4564.

[23] 高月,唐芳,马武开,等. Wnt/OPG 信号通路轴在类风湿关节炎骨破坏中的研究进展[J]. 中国老年学杂志, 2023, 43(22): 5604-5607.

[24] Guo C, Fu R, Wang S, et al. NLRP3 inflammasome activation contributes to the pathogenesis of theumatofd arthritis [J]. Clin Exp lnmunol, 2018, 194(2): 231-243.

[25] Kelley N, Jeltema D, Duan Y, et al. The NLRP3 Inflammasome: An Overview of Mechanisms of Activation and Regulation [J]. Int J Mol Sci, 2019, 20(13): 3328-3329.

[26] 王甲河,邹淑娟,谢静,等. NLRP3 炎性小体与骨及关节疾病发生的研究进展[J]. 四川大学学报(医学版), 2023, 54(3): 679-684.

(上接第 2682 页)

[26] Byrne A, Lodge C, Wallace J. Intrarater Test-Retest Reliability of Hip Abduction, Internal Rotation, and External Rotation Strength Measurements in a Healthy Cohort Using a Handheld Dynamometer and a Portable Stabilization Device: A Pilot Study [J]. Arch Rehabil Res Clin Transl, 2020, 2(2): 100050.

[27] Leunig M, Beaulé PE, Ganz R. The concept of femoroacetabular impingement: current status and future perspectives [J]. Clin Orthop Relat Res, 2009, 467(3): 616-622.

[28] Bedi A, Warren RF, Wojtys EM, et al. Restriction in hip internal rotation is associated with an increased risk of ACL injury [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2016, 24(6): 2024-2031.

[29] Laudner K, Wong R, Onuki T, et al. The relationship between clinically measured hip rotational motion and shoulder biomechanics during the pitching motion[J]. J Sci Med Sport, 2015, 18: 581-584.

[30] Vad VB, Bhat AL, Basrai D, et al. Low back pain in professional golfers: The role of associated hip and low back range-of-motion deficits[J]. Am J Sports Med, 2004, 32: 494-497.