

# 半月板部分切除后膝关节接触面积及生物力学变化

张元民, 王国栋, 张玉革, 赵晓伟, 王雷, 李炳亮, 孔颖(济宁医学院附属医院关节与运动医学科, 山东省济宁市 272029)

## 文章亮点:

课题建立了内侧半月板损伤的生物力学模型, 进一步模拟内侧半月板损伤行半月板部分切除术不同的切除范围, 研究半月板切除后膝关节接触力学的变化; 将半月板的切除范围与膝关节的接触面积、应力、应变变化联系起来, 证实半月板切除术后膝关节接触面积减少, 接触压力增大, 进一步可引起早期的膝关节退行性变。

## 关键词:

组织构建; 组织工程; 植入物; 关节植入物; 半月板; 生物力学; 损伤; 半月板切除术; 膝关节; 接触面积; 接触压力; 应变; 生物力学

## 主题词:

半月板, 胫骨; 生物力学; 压力; 稳态应变

## 基金资助:

济宁市科技局资助项目(济科字[2011]57号)

## 摘要

**背景:** 生物力学实验有助于阐明为何半月板切除后会导致进行性的软骨病变。关节软骨退行性变的原因复杂, 包括生物学、力学以及结构通路等。

**目的:** 研究内侧半月板后角撕裂行半月板部分切除后膝关节接触面积、压力及半月板应变的变化。

**方法:** 取 8 具新鲜冷冻的混合品种的狗后肢膝关节标本, 序贯进行以下半月板切除操作, 采取百分比来计算每一样本半月板切除的范围: ①内 30%的内侧半月板后角撕裂。②内 75%的内侧半月板后角撕裂。③内侧半月板后角完全切除。用双轴液压伺服生物材料测试实验机(MTS 858)进行生物力学测试。统计学比较采用 SPSS 18.0 软件进行组间比较。

**结果与结论:** 半月板组织切除越多, 内侧和外侧膝关节接触面积下降越明显, 内侧半月板后角切除 75%和全切后, 内侧接触面积差异无显著性意义( $P > 0.05$ ); 内侧半月板后角完全切除之后, 外侧接触面积显著减少。内侧半月板后角切除 75%和全切之后, 内侧间室的接触压力显著升高, 与对照组相比差异有显著性意义( $P < 0.05$ ), 内侧半月板后角完全切除后外侧间室接触压力显著降低( $P < 0.05$ )。因为半月板组织的切除, 其相应的应变下降, 但是各组间差异无显著性意义。说明半月板切除多少决定术后半月板的生物力学功能; 对于半月板撕裂, 尤其是“红区”损伤, 应尽量选择半月板缝合术, 减少半月板切除范围, 以避免或者延缓膝关节的退行性变。

张元民, 王国栋, 张玉革, 赵晓伟, 王雷, 李炳亮, 孔颖. 半月板部分切除后膝关节接触面积及生物力学变化[J]. 中国组织工程研究, 2014, 18(24):3779-3784.

## Tibiofemoral joint contact area and biomechanical changes after partial meniscectomy

Zhang Yuan-min, Wang Guo-dong, Zhang Yu-ge, Zhao Xiao-wei, Wang Lei, Li Bing-liang, Kong Ying  
(Department of Joint and Sports Medicine, Affiliated Hospital of Jining Medical College, Jining 272029, Shandong Province, China)

## Abstract

**BACKGROUND:** Biomechanical experiments contribute to elucidate the progressive cartilage lesions following meniscectomy. The causes of articular cartilage degeneration are very complex, including biology, mechanics and structural pathway.

**OBJECTIVE:** To observe the changes of tibiofemoral joint contact area, pressure and strain after serial meniscectomies of the caudal pole of the medial meniscus.

**METHODS:** Unpaired pelvic limbs were harvested from eight hybrid adult dogs. All specimens underwent sequential meniscectomy, and the range of resected meniscus in each specimen was calculated as the percentage: a 30% radial width partial meniscectomy, a 75% radial width partial meniscectomy, and a segmental caudal pole hemi-meniscectomy. Biomechanical tests were performed using MTS 858. The difference between groups was compared with statistical analysis using SPSS 18.0 software.

**RESULTS AND CONCLUSION:** More tissues removed after meniscectomy, more obviously the medial and lateral tibiofemoral joint contact area declined. After a 70% radial width meniscectomy and total meniscectomy, the medial contact area showed no significant difference ( $P > 0.05$ ); after the total meniscectomy, the lateral contact area was significantly reduced. After a 70% radial width meniscectomy and total meniscectomy, the

张元民, 男, 1972年生, 山东省济宁市人, 汉族, 2002年天津医科大学毕业, 硕士, 主任医师, 主要从事关节置换与运动医学方面的研究。

doi:10.3969/j.issn.2095-4344.2014.24.002  
[http://www.crter.org]

中图分类号:R318  
文献标识码:A  
文章编号:2095-4344  
(2014)24-03779-06  
稿件接受:2014-05-15

medial contact pressure was significantly increased, showing significant differences compared with control group ( $P < 0.05$ ); after the total meniscectomy, the lateral contact pressure was significantly decreased ( $P < 0.058$ ). A meniscectomy resulted in a decrease in medial meniscal strain, but there was no significant difference between groups. The range of meniscectomy determines the biomechanical function post-operation; as for the meniscus tear, we suggest meniscal suture, to reduce the range of meniscectomy, avoid or delay the degeneration of knee joint.

**Subject headings:** menisci, tibial; biomechanics; pressure; allostasis

**Funding:** a grant from Jining Municipal Science and Technology Bureau, No. 201157

Zhang YM, Wang GD, Zhang YG, Zhao XW, Wang L, Li BL, Kong Y. Tibiofemoral joint contact area and biomechanical changes after partial meniscectomy. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2014;18(24):3779-3784.

## 0 引言 Introduction

半月板具有重要的生物力学功能<sup>[1-3]</sup>。在不负重时, 胫骨与股骨不接触, 全由半月板衬垫两者之间。在负重时有约70%的负重区域在半月板上, 这就显著降低了胫骨平台上的应力, 从而保护了软骨。如果将半月板切除, 则胫骨平台上的峰压力可上升2倍, 并将引起软骨退变。在负重时, 半月板接受轴向应力, 由于半月板前、后角胫骨韧带限制了半月板向侧方膨出, 就使轴向应力转化为其内部的箍应力, 如果这两个韧带断裂, 则其负重能力完全丧失。

临床工作中, 半月板损伤是膝关节运动损伤中比较常见的类型, 尤其是合并前交叉韧带损伤或者功能不足常导致膝关节内侧半月板后角损伤。但半月板无血液供应区损伤经缝合手术后不能愈合, 从而使之成为膝关节外科中的一个难题。分析其原因, 主要与以下因素有关<sup>[4-8]</sup>: ①半月板无血运区没有血供, 不能给损伤的半月板提供修复所需的足够营养。②半月板软骨细胞本身的惰性以及创口处处于有丝分裂状态的软骨细胞数量较少, 使损伤处不能通过自身软骨细胞增殖、分泌基质和胶原纤维来填充缺损。③滑膜中的滑膜细胞在裂伤部位的积聚及演变可形成少量肉芽组织, 但由于滑膜细胞数量少, 滑液中没有纤维蛋白原, 不能形成纤维支架, 使新生细胞不能移行生长且易被关节液冲洗掉, 达不到愈合目的。

随着对半月板解剖、生物力学研究的发展, 半月板损伤的治疗经历了半月板全切除、半月板部分切除和半月板修复等3个阶段<sup>[9]</sup>。在实验室中, 人们发现了许多方法可促进这种损伤的愈合, 如钻孔, 凝血块移植, 滑膜移植, 应用内皮细胞生长因子, 电磁治疗, 激光治疗等<sup>[10-12]</sup>。

切除损伤的半月板能显著缓解膝关节疼痛、交锁等不适, 改善短期内的临床症状, 但是半月板切除术后毕竟或多或少损害了半月板的生物力学功能, 导致关节内接触压力以及关节软骨的损害, 加速膝关节的退行性变, 但这种术式依然在临床得到广泛应用。将半月板前、后角胫骨韧带切断引起的软骨退变与半月板全切除引起的软骨退变类似。可以推断, 在半月板横裂时, 半月板的承重功能完全丧失。半月板切除的多少与胫骨平台上的峰应力成正比, 与胫骨平台的退变呈正比, 这就要求医生在半月板部分切除时要尽量少切<sup>[13-14]</sup>。

半月板切除术后残余实质组织会或多或少保留半月板

的环张力及负荷传递功能<sup>[15]</sup>, 这依赖于半月板的切除范围及程度。然而, 损伤发生在“红区”的远轴桶柄样撕裂切除术后明显降低了半月板组织的环张力, 损害了其承担负荷的功能。许多学者进行了不少基于此的尸体研究, 但针对半月板损伤治疗的临床研究较少。

半月板血液供应区的损伤, 特别是纵形裂伤, 可行缝合手术使其愈合, 最大程度的挽救半月板的功能, 该手术预后良好, 这已为许多临床研究证实<sup>[16-17]</sup>。不过以上临床研究的结果依然未被实验所证实, 评估半月板修复术与切除术两种治疗方式对恢复半月板功能的能力及其两者之间的差异, 以便指导临床术式的选择, 具有重要的意义。半月板撕裂以内侧半月板后角损伤多见, 本课题即通过生物力学试验, 研究内侧半月板后角撕裂行部分切除术后胫股关节接触面积、压力及半月板应变的变化。

## 1 材料和方法 Materials and methods

**设计:** 体外实验, 样本生物力学测试。

**时间及地点:** 实验于2013年5至7月由济宁医学院附属医院关节与运动医学科完成。

**材料:**

**标本:** 8具新鲜冷冻的混合品种的狗后肢膝关节标本, -20 °C保存, 购自济宁医学院实验动物中心。

**实验用仪器:** 双轴液压伺服生物材料测试实验机(858 Mini BionixII, MTS Systems, Corp., Eden Prairie, MN); 微型差动可变磁阻传感器(Microstrain Inc., Williston, VT); 压阻式压力传感器(Tekscan Inc., SouthBoston, MA)。

**方法:**

**标本制备及处理:** 实验前4.5 °C过夜解冻, 然后剔除膝关节囊以外的软组织, 关节线以上10 cm截断股骨, 关节线以下10 cm截断胫腓骨, 胫腓骨远端用聚甲基丙烯酸甲酯(polymethylmethacrylate, PMMA)包埋固定, 生理盐水纱布包裹后-20 °C冷冻保存。

测试前在室温下解冻标本, 生理盐水湿敷以保证标本湿润。在胫骨平台水平沿关节内侧面横行切开关节囊, 一直到髌韧带, 向后延长切口直至可以显露出后交叉韧带的胫骨附着点。自胫骨止点近端横断内侧副韧带以便植入传感器, 但应保留内侧半月板在内侧副韧带上的附着部; 自

股骨止点远端再次横断内侧副韧带, 以便于手术操作模拟半月板损伤及修复。检查膝关节内侧间室排除原发的膝关节疾病。实验结束后, 离断膝关节, 再次检查膝关节有无原发疾病, 若有, 则排除。

**安放传感器:** 压阻式压力传感器记录胫股关节接触面积及压力。传感器规格: 30.9 mm×12.0 mm, 厚度为0.08 mm, 每一传感器含有2个传感区域, 每一传感区域包含6行15列的传感元件, 其压力敏感度为0.01 MPa, 范围为0.5-30.0 MPa, 每一个新的传感器用10 mm直径压头在15 N的作用力下校准, 每一具标本测试前均记录接触图及校正曲线。校正后, 水平切开内外侧膝关节间室的内、外侧关节囊, 关节切开的范围起自髌韧带内侧, 向后延长切口直至可以显露出交叉韧带的胫骨附着点, 以便显露膝关节内、外侧间室。将传感器的2个传感区域置于膝关节内、外侧半月板底部, 使其整个宽度全部位于关节间隙内, 最后缝合、修补侧副韧带, 放置传感器是应握住传感器头端和尾端的边缘部分, 以免造成传感器的损坏。

**半月板切除模型的制备:** 每一具标本均序贯进行以下半月板切除操作, 因为不同标本的半月板轴径不一致, 故采取百分比来计算每一样本半月板切除的范围: ①横向宽度内30%的内侧半月板后角撕裂, 模拟发生在“白区”的损伤(menisectomy 30, M<sub>30</sub>)。②内75%的内侧半月板后角撕裂, 模拟发生在“红区”的损伤(menisectomy 75, M<sub>75</sub>)。③内侧半月板后角完全切除(CPH)。半月板关节囊接合处作为半月板的边界。切除前, 先用记号笔作切除范围的标记, 用11#刀片行半月板切除, 切除范围为半月板胫骨韧带尾端1 mm到内侧副韧带头端(图1)。

**生物力学测试:** 用材料试验机进行生物力学测试。底座钻孔, 使之能自由的多向运动, 胫骨包埋在上述平台上, 能进行3个方向的运动(头尾、内外平移及旋转)。头尾方向并平行于关节线在股骨截骨面1 cm远端钻孔, 用直径6 mm的斯氏针牢固固定于股骨夹具, 一旦膝关节标本置于屈曲135°, 将限制股骨的屈伸、旋转; 而仅仅限制胫骨屈伸, 允许胫骨在头尾和内外平面上平移运动、旋转。

首先测试正常的半月板, 再依次测试内侧半月板切除30%、内侧半月板切除75%及内侧半月板后角全切3种不同的工况。6 mm长度微型差动可变磁阻传感器用来测量不同的半月板切除方式下, 加载负荷前后半月板后角的应变。传感器的敏感度为1.5 μm, 范围可达6 mm, 分辨率为0.6 μm。传感器插入内侧和外侧半月板后角的边缘, 平行于胫骨平台, 加载复合过程中自动记录应变。内侧半月板后角全切前, 需要取下传感器, 加载速率为0.1 mm/s, 最大负荷为200 N, 记录上述每一个工况的胫股关节接触面积(CA)、接触压力(包括PCP、MCP)以及内外侧半月板的应变。

**主要观察指标:** 不同半月板切除范围下, 胫股关节间隙的接触面积、接触压力、接触压力差异。

**统计学分析:** 统计学比较采用SPSS 18.0软件(Sigma Stat 18.0 for Windows, SPSS, Chicago, IL), 重复测量的一般线性模型被用来评估不同的胫股关节接触面积、接触压力以及半月板应变, 采用单因素方差分析。统计学有意义时, 进一步行多重比较程序(Bonferroni法), 统计学有意义规定为 $P < 0.05$ 。

## 2 结果 Results

**2.1 半月板部分切除后胫股关节接触面积(CA)的改变** 每一种半月板切除工况的内侧和外侧胫股关节间隙的接触面积见表1。

半月板组织切除越多, 内侧和外侧接触面积下降越明显, 内侧半月板后角切除75%及内侧半月板后角全切时, 内侧接触面积比较差异无显著性意义( $P > 0.05$ ); 内侧半月板后角完全切除之后, 外侧接触面积显著减少( $P < 0.01$ ), 内侧半月板后角切除30%时内侧接触面积下降为21.6%, 内侧半月板后角切除75%时下降为33.1%, 与对照组相比差异均有显著性意义( $P < 0.01$ )。

**2.2 半月板部分切除后胫股关节接触压力(PCP和MCP)的改变** 每一种半月板切除工况的内侧和外侧胫股关节的接触压力见表1。

内侧半月板后角切除75%及内侧半月板后角全切之后, 内侧间室的PCP显著升高, 与对照组相比差异有显著性意义( $P < 0.05$ ), 上升范围分别为内侧半月板后角切除30%时的2.6%, 内侧半月板后角切除75%时的39.4%, 内侧半月板后角全切时的78.9%; 外侧间室内侧半月板后角全切后PCP显著降低( $P < 0.05$ ), 与对照组相比降低约为18.9%, MCP显著升高(与对照组相比升高约35.2%)。

**2.3 半月板部分切除术后应变的改变** 每一种半月板切除工况的内侧和外侧半月板应变值见表1。

因为半月板组织的切除, 其相应的应变下降; 但是各组间比较差异无显著性意义( $P > 0.05$ )。内侧半月板后角切除30%和75%分别会导致半月板应变下降38.5%和69.2%, 但是与对照组相比, 差异无显著性意义。内侧半月板切除后外侧半月板应变会随之升高, 内侧半月板后角切除30%时升高为85.7%, 内侧半月板后角切除75%时升高为42.9%, 但差异无显著性意义。

## 3 讨论 Discussion

生物力学实验证实, 内侧半月板边缘部分切除会导致膝关节内侧间室接触面积和压力MCP的升高。因此在膝关节负重时, 半月板边缘部分起到更重要的作用。研究还发现, 内侧半月板后角全切可导致膝关节内侧和外侧间室明显的接触力学改变, 意味着内侧半月板切除会影响整个关节的生物力学。所以正常的外周半月板组织有利于维持半月板正常的接触力学功能以及环向应变。

大块的半月板切除, 如内侧半月板后角全切, 或者完

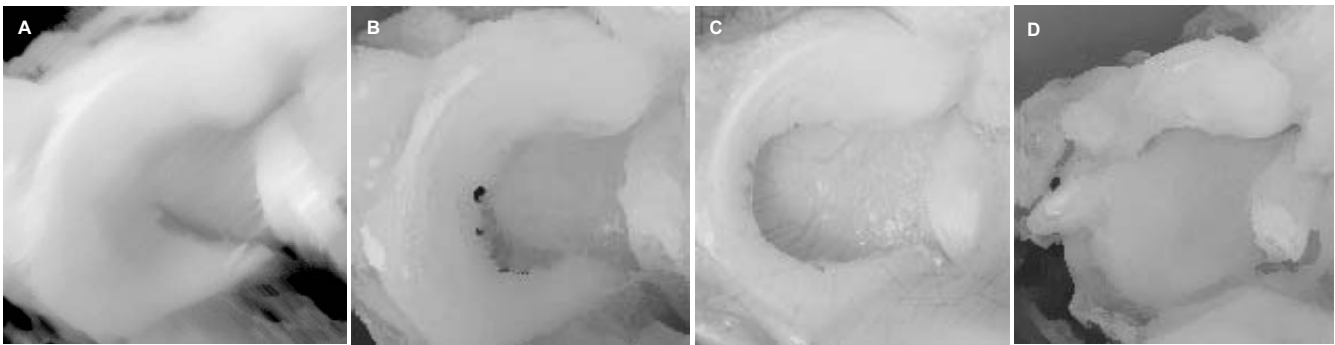


图 1 犬半月板切除模型制备

Figure 1 Establishing a dog model of meniscectomy

图注: 图中 A 为完整半月板; B 为内侧半月板切除 30%(M<sub>30</sub>); C 为内侧半月板切除 75%(M<sub>75</sub>); D 为内侧半月板后角全切(CPH)。

表 1 不同半月板切除范围的接触力学、应变比较

Table 1 Comparison of contact mechanics and strain after different ranges of meniscectomy

(x±s)

变量	对照组	M <sub>30</sub>	M <sub>75</sub>	CPH	P <sub>2-3</sub>	P <sub>2-4</sub>	P <sub>3-4</sub>
接触面积(mm <sup>2</sup> )							
内侧	121.0±7.4	94.8±10.8 <sup>a</sup>	81.0±5.3 <sup>a</sup>	71.3±5.7 <sup>a</sup>	0.03		0.24
外侧	129.8±9.0	127.0±12.7	128.8±6.4	78.2±8.3 <sup>a</sup>	> 0.05	< 0.01	< 0.01
PCP(MPa)							
内侧	3.8±0.2	3.9±0.3	5.3±0.2 <sup>a</sup>	6.8±0.5 <sup>a</sup>	< 0.01	< 0.01	
外侧	3.7±0.3	3.7±0.1	3.6±0.2	3.0±0.2 <sup>a</sup>	> 0.05	< 0.01	< 0.01
MCP(MPa)							
内侧	1.7±0.1	1.7±0.2	1.8±0.1	1.7±0.2	> 0.05	> 0.05	> 0.05
外侧	1.7±0.2	1.8±0.2	1.9±0.1	2.3±0.2 <sup>a</sup>	> 0.05	0.001	0.003
应变							
内侧	0.012±0.004	0.008±0.004	0.007±0.003				
外侧	0.007±0.003	0.010±0.004	0.012±0.004				

表注: ①对照组为正常半月板, M<sub>30</sub>为内侧半月板后角切除 30%组, M<sub>75</sub>为内侧半月板后角切除 75%组, CPH 为内侧半月板后角完全切除组。②P<sub>2-3</sub>为侧半月板后角切除 30%与 75%组间比较的 P 值, P<sub>2-4</sub>为侧半月板后角切除 30%与全切除组间比较的 P 值, P<sub>3-4</sub>为侧半月板后角切除 75%与全切除组间比较的 P 值, 与对照组比较, <sup>a</sup>P < 0.01。

全性的弧形半月板切除, 与半月板全切类似, 丧失了半月板承载负荷的功能<sup>[18]</sup>。本研究结果类似, 内侧半月板后角切除 75%和全切有相似的接触力学改变, 原因可能是内侧半月板后角切除 75%消除了半月板的间隔效应, 导致股骨髁和胫骨平台软骨直接接触。半月板主要承受的是压缩负荷, 膝关节承受负荷时, 拉伸强度和环张力共同对抗半月板向外“挤出”, 内侧半月板后角切除 75%后半月板组织的残余部分体积太小, 无法起到胫股关节间隙“间隔器”的作用, 因此丧失了其承担负荷的功能。应变实验证实了内侧半月板后角切除 75%后环张力的丢失。承担负荷时, 半月板部分切除术(M<sub>75</sub>)较完整半月板和内侧半月板后角切除 30%应变低, 各组间差异无统计学意义应该与样本量小有关。

研究表明, 半月板部分切除术能维持接近于正常的接触力学, 但这依赖于切除半月板组织的部位和数量。有限元分析表明, 半月板切除的部位影响接触压力, 因为半月板压力的正态分布是不一致的<sup>[19]</sup>。因此可以推断出, 切除高压区域的半月板组织(后角)一般不会明显影响到接触面积, 但是会导致接触压力的明显变化。本实验研究结果类似, 因为半月板部分切除术后接触面积没有明显变化,

而PCP显著升高。进一步讲, 内侧半月板后角切除 75%对膝关节接触力学产生的效应大小, 依赖于切除范围和切除部位。在该实验中, 内侧半月板后角切除 75%的切除范围延伸到半月板的中间部分, 而这部分对组织的去除明显敏感于后角<sup>[19,20]</sup>。

生物力学实验有助于阐明为何半月板切除术后会导致进行性的软骨病变。关节软骨退行性变的原因复杂, 包括生物学、力学以及结构通路等<sup>[21-23]</sup>。在膝关节正常负荷时, 内侧半月板切除后胫股接触面积变小, 并引起内侧压力中心转移, 负荷因此通过关节软骨、软骨下骨和骨小梁向下传导, 对关节面内侧骨皮质部分产生了一个应力遮挡效应, 负荷通过内侧平台下的骨小梁向下传递至于胫端的骨皮质, 致使该处的张力升高, 通过骨的切面结构。胫骨近端末梢部分几乎均为海绵状骨, 包裹着一层薄薄的皮质骨。小梁在内外侧平台的前侧分布均匀, 形成一个直角的支柱, 与胫端的皮质汇合, 形成两支柱间的海绵状骨质。而矢状面上骨小梁自皮质骨起, 由前向后形成拱廊状结构。研究发现, 内侧半月板切除对胫骨近端皮质骨表面张力造成影响, 与未损伤膝相比, 内侧半月板部分切除和全切除可

引起近端50 mm以内压力减少, 70 mm以外压力则明显增大, 中间部分和胫骨内后部分在任何情况下均无变化, 分析轴向力可见, 部分切除半月板引起的内侧近端压力减少, 50 mm处压力升高, 而在胫骨外侧该两处压力均减少。以上提示内侧半月板是一个重要的负荷分散结构, 去除后不仅会影响关节面, 而且会影响软骨下骨、胫骨下端骨小梁及胫骨的皮质骨。

Andriacchi等<sup>[24]</sup>将关节软骨的退变分为包括有2个阶段的结构体系, 在初始时相, 异常的关节运动起主要作用, 导致软骨承担负荷区域的变化; 随之而来的是关节软骨的龟裂、破坏。本课题研究表明, 内侧半月板后角切除75%和全切导致的峰值应力明显高于对照组, 意味着半月板切除程度可能是关节软骨退行性变的危险因素, 半月板损伤和切除会加速膝关节退变的病理进程。何种术式来治疗半月板损伤, 应该结合临床实验的结果, 但是, 不稳定的、退变的以及撕裂的半月板组织应切除, 正常的半月板组织应该保留, 以尽可能的保留半月板功能。

半月板的几何形状和胶原纤维的排列方向非常适合, 以承受来自不同方向的负荷<sup>[25-26]</sup>。半月板为楔形, 靠近滑膜缘厚, 越往关节腔内越薄, 使其在胫骨平台和股骨髁间有向外挤出的趋势, 但是因为大部分胶原纤维是指向周围的, 这样就使半月板具备极强的环向拉伸刚度。半月板作为一个楔形填充物, 必然有一个限制内外翻和旋转的功能。切除了内侧半月板后膝内翻程度明显增大, 外翻则无异常, 从而使膝关节略僵硬, 稳定度却加强了, 胫股接触面也增大。X射线片及直接测量标本发现, 内侧关节间隙变窄而外侧间隙未变, 因此内翻度变大不能仅归因于外侧副韧带的松弛, 空间压缩因素占很大的比重。单独切除外侧半月板也引起类似的后果。膝关节屈曲时伴有外旋和外展, 若有旋转不稳定, 会导致胫骨在股骨上不正常的外旋。限制膝外旋的组织首先是内侧关节囊、侧副韧带, 这些组织也最易受损, 此时半月板的功能就体现出来了<sup>[27]</sup>。

半月板应变下降, PCP升高, 承担负荷时, 半月板部分切除术(M<sub>75</sub>)的应变较内侧半月板后角切除30%和正常半月板小, 这与半月板部分切除术后环张力的丧失有关。半月板周围组织的保留不足以承担负荷和维持环张力。内侧半月板后角切除30%和75%后外侧半月板应变和MCP升高, 意味着内侧半月板组织切除后, 外侧半月板承受负荷增加, 导致外侧间室压力增高, 内侧半月板后角全切后这种改变更加明显。正是因为内侧半月板后角全切对接触压力的这种效应, 会导致膝关节内、外侧间室易于发生退行性病变。

内侧半月板的后1/3有阻止膝外旋的功能, 在负重时作用更大。当正常阻碍胫骨外旋的韧带松弛时, 未损伤的内侧半月板后角几乎可以替代韧带的作用。然而, 反复撞击后内侧半月板后角也会逐渐在胫骨平台上移开,

导致后角的继发性撕裂。撕裂到一定程度而不得不切除半月板时, 阻碍功能消失, 旋转的不稳定就非常明显。完整的半月板在受冲击时不是被推开, 而是发生形变, 通过缓冲吸收的能量要远远大于其他组成部分吸收的能量。半月板受压后形变是逐渐的, 随着形变率上升, 半月板变硬, 能量吸收能力下降。当半月板撕裂时, 冲击压力可上升一倍多, 随着部分切除、单侧切除, 压力也进一步升高, 这说明无论半月板情况如何, 均有冲击-压力吸收功能。临床上即使是半月板严重退变或骨关节炎者, 也是如此。半月板切除还会导致恶性循环: 冲击压力升高使软骨下骨发生微型骨折, 以使冲击压力进一步升高, 关节退变也随之更快<sup>[28-30]</sup>。

综上所述, 半月板作为膝关节的一个不可缺少的组成部分, 可以使膝关节的关节面成为最理想的轻度不吻合界面, 它扩大了胫股接触面积, 减少了胫股接触压力, 降低了摩擦系数, 吸收了较多的冲击能量, 降低了冲击压力, 增强了膝关节的稳定度。故轻易的切除半月板会导致关节不稳定, 进一步引起早期退变并引起患者一系列不适症状。因此, 应尽可能保护半月板, 能够缝合则尽量缝合, 能部分切除解决问题的就不要全切。

**作者贡献:** 课题设计及评估为第一作者张元民, 张元民对文章负责; 第二作者王国栋负责具体实施及书写论文; 赵晓伟负责审校; 王雷、孔颖协助实验实施; 张玉革、李炳亮负责资料收集。

**利益冲突:** 文章及内容不涉及相关利益冲突。

**伦理要求:** 实验过程中对动物的处置符合2009年《Ethical issues in animal experimentation》相关动物伦理学标准的条例。

**学术术语:** 半月板部分切除术-半月板损伤的重要治疗方式; 本课题研究内侧半月板后角撕裂行半月板部分切除后胫股关节接触面积、压力及半月板应变的变化, 说明半月板切除多少决定术后半月板的生物力学功能; 对于半月板撕裂, 尤其是“红区”损伤, 应尽量选择半月板缝合术, 减少半月板切除范围, 以避免或者延缓膝关节的退行性变。

**作者声明:** 文章为原创作品, 无抄袭剽窃, 无泄密及署名和专利争议, 内容及数据真实, 文责自负。

#### 4 参考文献 References

- [1] Taylor SA, Rodeo SA. Augmentation techniques for isolated meniscal tears. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2013;6(2): 95-101.
- [2] Laible C, Stein DA, Kiridly DN. Meniscal repair. *J Am Acad Orthop Surg.* 2013;21(4):204-213.
- [3] Jung YH, Choi NH, Oh JS, et al. All-inside repair for a root tear of the medial meniscus using a suture anchor. *Am J Sports Med.* 2012;40(6):1406-1411.
- [4] Brucker PU, Favre P, Puskas GJ, et al. Tensile and shear loading stability of all-inside meniscal repairs: an in vitro biomechanical evaluation. *Am J Sports Med.* 2010;38(9): 1838-1844.

- [5] Freymann U, Endres M, Goldmann U, et al. Toward scaffold-based meniscus repair: effect of human serum, hyaluronic acid and TGF- $\beta$ 3 on cell recruitment and re-differentiation. *Osteoarthritis Cartilage*. 2013;21(5):773-781.
- [6] Buchcic P, Domzalski M, Masłoń A, et al. Reliability of clinical evaluation of meniscus repair with the all-inside technique. *Ortop Traumatol Rehabil*. 2013;15(2):131-137.
- [7] Maher SA, Rodeo SA, Doty SB, et al. Evaluation of a porous polyurethane scaffold in a partial meniscal defect ovine model. *Arthroscopy*. 2010;26(11):1510-1519.
- [8] Choi NH, Kim TH, et al. Meniscal repair for radial tears of the midbody of the lateral meniscus. *Am J Sports Med*. 2010;38(12):2472-2476.
- [9] Johnson KA, Francis DJ, Manley PA, et al. Comparison of the effects of caudal pole hemi-menisectomy and complete medial menisectomy in the canine stifle joint. *Am J Vet Res*. 2004;65:1053-1060.
- [10] Nepple JJ, Dunn WR, Wright RW. Meniscal repair outcomes at greater than five years: a systematic literature review and meta-analysis. *J Bone Joint Surg Am*. 2012;94(24):2222-2227.
- [11] Osawa A, Harner CD, Gharaibeh B, et al. The use of blood vessel-derived stem cells for meniscal regeneration and repair. *Med Sci Sports Exerc*. 2013;45(5):813-823.
- [12] Ruiz-Ibán MÁ, Diaz-Heredia J, Elías-Martín E, et al. Repair of meniscal tears associated with tibial plateau fractures: a review of 15 cases. *Am J Sports Med*. 2012;40(10):2289-2295.
- [13] Abrams GD, Frank RM, Gupta AK, et al. Trends in meniscus repair and menisectomy in the United States, 2005-2011. *Am J Sports Med*. 2013;41(10):2333-2339.
- [14] Dave LY, Caborn DN. Outside-in meniscus repair: the last 25 years. *Sports Med Arthrosc*. 2012;20(2):77-85.
- [15] Pozzi A, Tonks C, Ling H. Femorotibial contact mechanics and medial meniscal strain after serial menisectomies in the dog stifle. *Vet Surg*. 2010;39(4):482-488.
- [16] Logan M, Watts M, Owen J, et al. Meniscal repair in the elite athlete results of 45 repairs with a minimum 5-year follow-up. *Am J Sports Med*. 2009;37:1131-1134.
- [17] Pozzi A, Kim SE, Lewis DD. Effect of transection of the caudal menisco-tibial ligament on medial femorotibial contact mechanics. *Vet Surg*. 2010;39(4):489-495.
- [18] Pozzi A, Litsky AS, Field J, et al. Pressure distributions on the medial tibial plateau after medial meniscal surgery and tibial plateau levelling osteotomy in dogs. *Vet Comp Orthop Traumatol*. 2008;21:8-14.
- [19] Zielinska B, Donahue TL. 3D finite element model of menisectomy: changes in joint contact behavior. *J Biomech Eng*. 2006;128:115-123.
- [20] Kisiday JD, Vanderploeg EJ, Mcllwraith CW, et al. Mechanical injury of explants from the articulating surface of the inner meniscus. *Arch Biochem Biophys*. 2010;494(2):138-144.
- [21] Metcalfe AJ, Stewart C, Postans N, et al. The effect of osteoarthritis of the knee on the biomechanics of other joints in the lower limbs. *Bone Joint J*. 2013;95-B(3):348-353.
- [22] Wright T. Biomechanical factors in osteoarthritis: the effects of joint instability. *HSS J*. 2012;8(1):15-17.
- [23] Haba Y, Lindner T, Fritsche A, et al. Relationship between mechanical properties and bone mineral density of human femoral bone retrieved from patients with osteoarthritis. *Open Orthop J*. 2012;6:458-463.
- [24] Andriacchi TP, Mundermann A, Smith RL, et al. A framework for the in-vivo pathomechanics of osteoarthritis at the knee. *Ann Biomed Eng*. 2004;32:447-457.
- [25] Cho JH. A Modified Outside-in Suture Technique for Repair of the Middle Segment of the Meniscus Using a Spinal Needle. *Knee Surg Relat Res*. 2014;26(1):43-47.
- [26] Jones RS, Keene GC, Learmonth DJ, et al. Direct measurement of hoop strains in the intact and torn human medial meniscus. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 1996;11:295-300.
- [27] McNulty MA, Loeser RF, Davey C, et al. Histopathology of naturally occurring and surgically induced osteoarthritis in mice. *Osteoarthritis Cartilage*. 2012;20(8):949-956.
- [28] [Nishimuta JF, Levenston ME. Response of cartilage and meniscus tissue explants to in vitro compressive overload. *Osteoarthritis Cartilage*. 2012;20(5):422-429.
- [29] Buck RJ, Wyman BT, Hellio Le, et al. Using ordered values of subregional cartilage thickness change increases sensitivity in detecting risk factors for osteoarthritis progression. *Osteoarthritis Cartilage*. 2011;19(3):302-308.
- [30] Wirth W, Buck R, Nevitt M, et al. MRI-based extended ordered values more efficiently differentiate cartilage loss in knees with and without joint space narrowing than region-specific approaches using MRI or radiography—data from the OA initiative. *Osteoarthritis Cartilage*. 2011;19(6):689-699.