

文章编号:1004-7220(2019)05-0507-07

外侧半月板后根部损伤不同缝合位置对膝关节生物力学的影响

张鹏飞¹, 齐岩松¹, 包呼日查¹, 王永祥¹, 魏宝刚¹, 马秉贤¹, 李筱贺², 徐永胜¹

(1. 内蒙古自治区人民医院 骨关节科(运动医学中心), 呼和浩特 010010; 2 内蒙古医科大学 基础医学院, 人体解剖教研室, 呼和浩特 010010)

摘要:目的 对损伤的外侧半月板后根部进行不同位置的修复固定, 比较不同缝合方式时膝股关节的生物力学结果, 探讨外侧半月板后根部损伤最佳缝合术式。**方法** 使用 8 例人体尸体膝关节, 胫腓骨固定装置维持膝关节在 0° 位, 在 1 kN 压缩载荷下, 采用 Tek-scan 压力感测片收集膝关节外侧半月板后根部完整、外侧半月板后根部断裂、将外侧半月板后根部分别缝合至中心点、中心点偏后 5 mm、中心点偏前 5 mm、中心点偏外 5 mm 位置下的平均接触压力、峰值压力以及接触面积。**结果** 在外侧间室, 与完整状态相比半月板后根部损伤断裂后会导致平均接触压力和峰值压力明显增加 ($P < 0.01$), 接触面积减少 ($P < 0.05$)。4 种缝合固定方法均可减少平均压力和峰值接触压力, 接触面积较根部断裂时均有增加。在半月板后根部中心点偏外 5 mm 缝合时, 生物力学结果更接近完整膝关节 ($P < 0.05$)。比较缝合位点在根部中心点和中心点偏后 5 mm 时, 平均接触压力影响差别微小, 峰值接触压力、接触面积均无统计学差异 ($P > 0.05$)。在内侧间室, 生物力学指标各组间均无统计学差异 ($P > 0.05$)。**结论** 外侧半月板后根部发生撕裂后会导致膝关节外侧间室的平均接触压力、峰值压力以及接触面积相比正常膝关节发生显著改变; 半月板缝合位置在原根部中心点偏外 5 mm 时, 其生物力学功能更接近完整膝关节。

关键词: 膝关节; 外侧半月板; 根部损伤; 缝合位置; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2019.05.009

Influences of Lateral Meniscus Posterior Root Tear with Different Suture Methods on Knee Biomechanics

ZHANG Pengfei¹, QI Yansong¹, BAO Huricha¹, WANG Yongxiang¹, WEI Baogang¹, MA Bingxian¹, LI Xiaohe², XU Yongsheng¹

(1. Department of Bone and Joints (Center of Sports Medicine), Inner Mongolia People's Hospital, Huhhot 010010, China; 2. Human Anatomy Teaching and Research Section, Basic Medical College, Inner Mongolia Medical University, Huhhot 010010, China)

Abstract: Objective To evaluate the biomechanical effects of lateral meniscus posterior root (LMPR) tears fixed at different suture positions, so as to investigate the optimal suture method for repairing LMPR tears. **Methods** Eight fresh cadaveric knees were used. Each knee was tested under 6 conditions: intact knee, rupture of LMPR, suture of LMPR to the center point of root insertion, suture of LMPR posterior, interior and later 5 mm to the center point of root insertion, respectively. The peak contact pressure, the average contact pressure and contact

收稿日期:2018-07-02; 修回日期:2018-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(81560374,81460330),内蒙古自治区科技计划项目(20140149),内蒙古自治区自然科学基金项目(2014MS08131,2014BS0811)

通信作者:徐永胜,主任医师,E-mail:dlxyf@163.com

area were evaluated using a Tek-scan sensor positioned between the meniscus and tibial plateau, under 1 kN compressive loading, at 0 degree knee extension. **Results** In the lateral compartment, the average contact pressure and peak pressure significantly increased under rupture of LMPR compared with the intact state ($P<0.01$), and the contact area decreased significantly ($P<0.05$). For LMPR tears fixed by four different suture methods, both the average pressure and peak contact pressure reduced, and the contact area increased. The average contact pressure, peak pressure and contact area were closer to the knee joint in the intact state when the suture position of LMPR tears was posterior 5 mm to the center point of root insertion ($P<0.05$). In the medial compartment, there were no significant differences in contact pressure, peak contact pressure and contact area with the knee joint at 0 degree ($P>0.05$). **Conclusions** The average contact pressure, the peak contact pressure and the contact area between the lateral meniscus and the tibial plateau changed obviously due to the LMPR tears. When the suture position was 5 mm lateral to the center point of root insertion, similar biomechanical function with the intact knee could be obtained.

Key words: knee; lateral meniscus; root injury; suture position; biomechanics

膝关节半月板根部附着于胫骨平台髁间区,在传递胫股轴向载荷和维持半月板功能中发挥重要作用^[1-2]。压力载荷传递时通过半月板根部形成环形张力^[3],起到吸收冲击、保护关节软骨以及调节关节运动等作用^[4]。半月板根部的这些功能既能帮助机体避免行为伤害,又能协助预防关节软骨的变性,其完整性对于维持膝关节机械稳定性意义重大^[5]。

半月板根部损伤(meniscal root tear, MRT)是指半月板胫骨附着点1 cm以内的撕裂,位于半月板后角及骨性止点之间。其中,内侧半月板后根部损伤(medial meniscal root tear, MMRT)多见于中老年患者的退行性膝关节骨关节炎,而外侧半月板后根部损伤(lateral meniscal root tear, LMRT)多见于前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤的年轻患者^[6]。研究发现,外侧半月板后根部完全损伤病例中的63.5%合并体部放射状撕裂;当后根部完全撕裂时,如果损伤累及半月板股骨韧带或者半月板体部纤维环则会导致半月板外突,胫股关节挤压作用导致半月板向外侧突出超过3 mm时,就会引起膝关节软骨发生退行性改变^[7-8]。Allaire等^[9]研究表明,MMRT生物力学特性与半月板全切除术后类似,通过修复MMRT可恢复半月板的生物力学功能,LMRT亦然。改变膝关节的接触力学会影响膝关节退变的程度及进程,故研究ACL伴MRT的生物力学特性十分必要^[10]。一项膝关节运动学实验结果表明,外侧半月板根部损伤会进一步降低ACL损伤膝关节的稳

定性^[11]。目前,关节镜下修复损伤半月板根部进而修复其生物力学特性的观点逐渐被临床手术医生所接受,其相关生物力学研究也成为运动医学与骨科基础研究的热点。

平均接触压力、峰值压力、接触面积的测量已被证实是完整评价根部损伤以及根部损伤修复后半月板生物力学特性的有效指标^[12]。半月板根部损伤会使平均接触压力增加、接触面积减少,相应的生物力学改变将会进一步导致关节软骨发生退变^[13]。LMRT以放射状损伤和撕脱伤多见,7.0%~12.4% LMRT会伴随ACL损伤^[14-15]。一项关于559例膝关节核磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)与关节镜手术相关性的研究发现,单纯LMRT占总体MRT发病率的2.9%^[16]。目前,有关LMRT不同缝合位置对半月板生物力学特性影响的研究鲜有报道,可能与单纯LMRT的发病率较低有关。本文探讨LMRT不同缝合位置对膝关节生物力学产生的影响,为临床关节镜下半月板后根部缝合位置的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 尸体膝关节标本制备

8具新鲜冷冻尸体膝关节(由内蒙古医科大学基础医学院人体教研室提供,伦理批号:YKD2014032),平均死亡年龄40岁,排除膝关节外伤、手术史,实验前影像学方法排除膝关节相关韧带、半月板损伤以及严重的骨关节炎(Outerbridge III~IV级)。手术刀剔除距膝关节中心近端、远端

10 cm 以外的肌肉、骨骼组织,标本保留股骨、胫骨、腓骨、腓肌腱、前后交叉韧带、内外侧副韧带以及半月板等。-20 ℃冰柜保存新鲜标本,测试前室温下自然解冻 24 h,并行关节镜下膝关节探查术,排除韧带、半月板及软骨等损伤,如有异常及时更换标本。

1.2 测试条件

实验硬件采用膝关节压力感应装置 (Model 4010, Tek-scan 公司, 美国)。膝关节伸直位(0°位)固定,将压力感测片经膝关节前方插入到半月板与胫骨之间,使内、外侧半月板完整地覆盖到压力感测片上方,覆盖胫骨平台比例 80% 以上(见图 1)。采用膝关节固定夹具将标本的股骨、胫腓骨坚强固定,并与微机控制电子万能试验机 (WDW-200 型, 长春科新试验仪器有限公司, 中国) 相连;测试前常规进行校正、调零及灵敏度调节,实验中严格遵守操作流程^[10]。

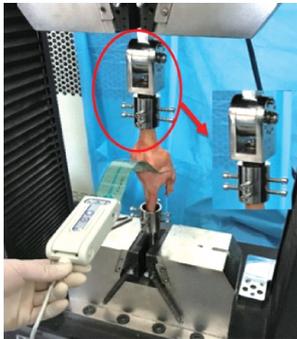


图 1 生物力学装置

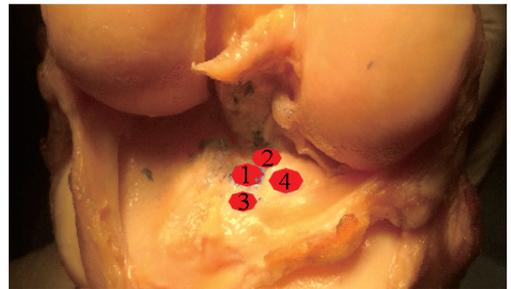
Fig.1 Biomechanical testing device

Kohn 等^[17]通过半月板解剖发现,外侧半月板前根部止点面积为(93 ± 25) mm²,后根部止点面积为(115 ± 51) mm²。根据止点面积得到外侧半月板后根部直径为 4.3~7.3 mm。本实验中取外侧半月板后根部平均直径为 5 mm,且各个半月板根部固定点之间的距离也为 5 mm。

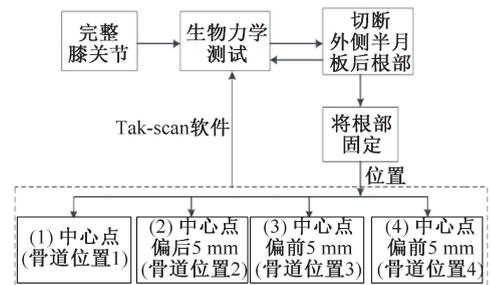
1.3 生物力学测试

对 LMRT 进行 4 个不同位置的缝合修复来验证其生物力学特性,用准备好的美蓝试剂在膝关节外侧胫骨平台半月板后根部以 footprint 的中心点为初始位置,偏后 5 mm、偏前 5 mm、偏外 5 mm 分别标记定位点,随后用 2 根高强度 fast fix 半月板缝合线 (Smith & Nephew 公司, 美国) 从半月板根部向内

5 mm 位置缝合半月板根部,并在缝合端双环打结固定^[18-19]。分别测量 4 种位置下的平均接触压力、峰值压力和接触面积。即,条件 1:外侧半月板后根部完整;条件 2:将根部固定于中心点;条件 3:固定于中心点偏后 5 mm;条件 4:固定于中心点偏前 5 mm;条件 5:固定于中心点偏外 5 mm;条件 6:外侧半月板后根部完全断裂(见图 2)。



(a) 不同缝合位点 (右膝)



(b) 生物力学测试流程

(1)~(4) 依次为中心点以及外侧半月板后根中心点后移、前移、外移 5 mm

图 2 单例尸体膝关节标本生物力学测试

Fig.2 Single case of cadaveric knee joint biomechanical test

(a) Different suture positions (right knee),

(b) Flowchart of biomechanical test

测试开始前,先将压力感测片受力分布调至均匀^[1,9,20],正式实验时采用 20 N/s 加载速度将 0~1 kN 轴向压缩载荷施加到股骨上,在最大力 1 kN 时持续 30 s,记录平均接触压力、峰值压力以及接触面积。同一高年资骨科医生在不损伤标本其他附属结构的同时依次制作 LMRT 模型,随后使用 60° 点对点 ACL 胫骨骨道定位器建立胫骨骨道,用来固定外侧半月板后根部。每具标本的测试尽可能在相同的条件下进行。对不同的缝合位置进行测量时必须将压力感测片移出关节腔,待根部固定完毕后可参考内、外侧半月板前角位置重新将压力感测片放置到相同位置^[11]。

正式实验开始前,2例预实验的结果表明,将断裂后的外侧半月板后根部固定于原中心点偏前5 mm,并且应力加载至700 N时,外侧半月板根部会发生撕裂,导致实验无法进行。在后期正式实验开始之前,将外侧半月板后根部缝合至原中心点偏前位置时,会明显增加外侧半月板环形张力,导致胫股接触位置前移,且对传导胫股之间的载荷无明显改善。因此,舍弃对这一缝合固定位置(条件6)的进一步研究。

Wilharm等^[21]研究表明,Tek-scan测得的数据会随着测试次数增多,出现约0.6%稳定的线性下降。因此,为了减少与实验条件相比产生的干扰,每次重新测试前进行微调参数是可行的^[1,22]。

1.4 统计学分析

使用SPSS 24.0进行数据处理。平均接触压力、峰值压力和接触面积的差异组间比较采用单因素方差分析,若Levene检验符合方差齐性,进一步行LSD-*t*检验多重比较,置信区间为95%。

2 结果

2.1 平均接触压力

实验测得完整半月板根部中,外侧半月板与胫骨平台间的平均压力为 (0.45 ± 0.03) MPa。在外侧间室,外侧半月板后根部损伤后平均接触压力较根部完整时显著增加($P < 0.01$);平均接触压力较完整状态时上升约2.5倍($P < 0.01$);且胫股之间接触点向后方移动。不同位置的缝合固定均可不同程度地恢复半月板功能,内外侧半月板平均接触压力较外侧半月板根部损伤时均有所下降,缝合在中心点向外偏移5 mm(条件5)时压力下降最明显($P < 0.01$),但较半月板根部完整时平均接触压力有所上升,胫股间接触点更接近半月板根部完整时的状态。当缝合位置位于中心点(条件3)或中心点向后移动(条件4)时,对内外侧半月板整体平均接触压力的影响程度无显著差异(见图3、表1)。

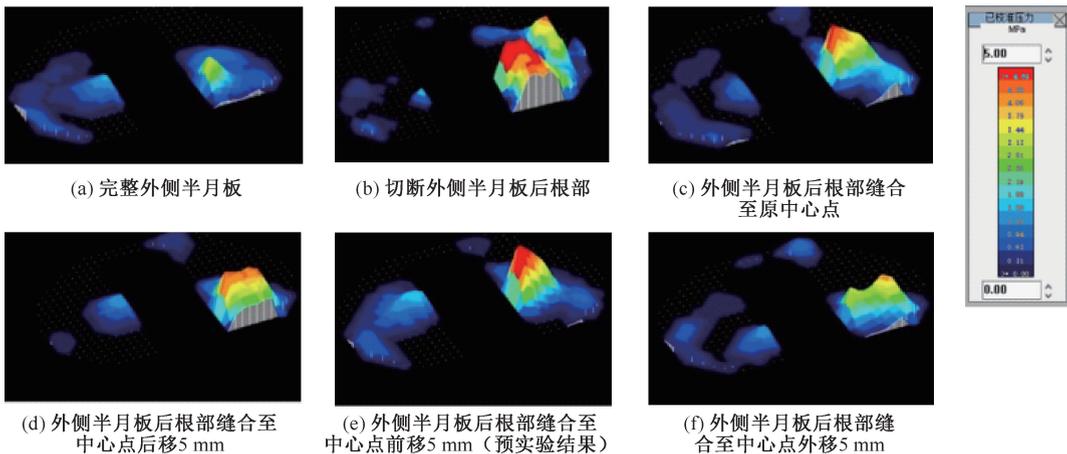


图3 不同缝合位点半月板压力分布

Fig.3 Pressure distributions on lateral meniscus at different suture positions (a) Intact lateral meniscus, (b) Rupture of LMPR, (c) Suture of LMPR to the center point of root insertion, (d) Suture posterior 5 mm to the center point of root insertion, (e) Suture anterior 5 mm to the center point of root insertion, (f) Suture lateral 5 mm to the center point of root insertion 5 mm

2.2 峰值压力

当外侧半月板后根部断裂后,峰值压力较根部完整时明显增加($P < 0.01$)。使用条件5的方法进行修复后,外侧间室的峰值压力明显下降($P <$

0.01)。然而,条件3、4对内侧及外侧间室的峰值压力影响甚微,但差异有统计学意义($P < 0.05$)。内侧关节间室在不同条件下峰值压力无明显改变(见表2)。

表1 内、外侧关节间室平均接触压力

Tab.1 Average contact pressure of lateral and medial compartment MPa

0°位时半月板情况	条件1		条件2		条件3			条件4			条件5		
	完整	下限	Δ%	上限	下限	Δ%	上限	下限	Δ%	上限	下限	Δ%	上限
内侧	0.54	48	53*	57	20	29*	37	11	21*	31	-2	4*	9
外侧	0.51	253	256*	259	133	140*	147	125	139*	153	35	43*	51

注:Δ%表示内、外侧关节间室在完整条件和下限及上限95%的置信区间,Δ%>0表示与完整膝关节相比时平均接触压力大,*表示与完整状态下相比,P<0.05

表2 内、外侧关节间室峰值接触压力

Tab.2 Peak contact pressure of lateral and medial compartment MPa

0°位时半月板情况	条件1		条件2		条件3			条件4			条件5		
	完整	下限	Δ%	上限	下限	Δ%	上限	下限	Δ%	上限	下限	Δ%	上限
内侧	2.6	-4	8*	12	-2	-6*	-10	-1	-4	-7	-4	-7*	-10
外侧	2.5	108	112*	116	68	72*	76	64	68*	72	40	42*	44

注:Δ%表示内、外侧关节间室在完整条件和下限及上限95%的置信区间,Δ%>0表示与完整膝关节相比时峰值接触压力大,*表示与完整状态下相比,P<0.05

2.3 接触面积

根部断裂后,外侧半月板和胫骨平台之间的平均接触面积明显下降(P<0.01)。不同缝合术后,外侧半月板和胫骨平台之间的接触面积相对于根部断裂时(条件2)增加,差异有统计学意义(P<

0.05)。3种缝合位置均无法达到正常半月板根部时的接触面积,组间比较差异无统计学意义(P>0.05)。内侧关节间室在不同条件下接触面积均无明显改变(见表3、图4)。

表3 内、外侧半月板和胫骨平台接触面积

Tab.3 Contact area of lateral, medial meniscus and compartment mm²

0°位时半月板情况	条件1		条件2		条件3			条件4			条件5		
	完整	下限	Δ%	上限	下限	Δ%	上限	下限	Δ%	上限	下限	Δ%	上限
内侧	448	-5	-4	-2	-14	-9	-4	-1	-5	-9	1	-3	-7
外侧	440	-27	-29*	-31	-17	-19*	-18	-8	-9*	-10	-12	-14*	-15

注:Δ%表示内、外侧关节间室在完整条件和下限及上限95%的置信区间,Δ%>0表示与完整膝关节相比时接触面积小,*表示与完整状态下相比,P<0.05

3 讨论

本实验结果表明,当膝关节外侧半月板后根部发生损伤后,外侧间室的生物力学特性会发生明显改变,导致外侧半月板和胫骨之间的平均接触压力和峰值压力明显增加,接触面积明显减少,进一步加快软骨损伤及关节退变。当对损伤的外侧半月板后根部在原中心点向外移动5mm左右距离进行缝合修复后,外侧半月板和胫骨之间的平均接触压力以及峰值压力明显下降,接触面积有所上升。但是,当缝合位置位于中心点、中心点向后移动5mm进行组间比较时,平均接触压力、峰值压力以及接触面积的差异均无统计学意义(P>0.05)。这些结果均表明,外侧半月板根部是保持外侧半月板生物

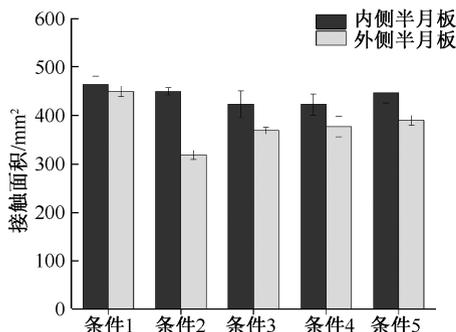


图4 内、外侧关节间室在各种实验条件下接触面积(*P<0.05)

Fig.4 Peak contact pressure of medial and lateral compartment under different test conditions

力学功能的重要结构。Chillhammer 等^[23]研究外侧半月板后根部损伤对外侧关节间室的影响,选取8例人体膝关节,对外侧半月板根部损伤进行修复,结果发现当外侧半月板根部撕裂后,股股之间的接触压力显著增加。Tan 等^[24]研究认为,任何半月板根部缝合固定位置均可以改善半月板功能,降低半月板平均接触压力、峰值压力,提高接触面积,从而改善膝关节的生物力学功能但任何位置的半月板根部修复都无法完全恢复正常膝关节的功能,特别是外侧半月板根部损伤后,将会导致半月板承受的平均接触压力明显增加,接触面积明显减少。一项关于6例新鲜冰冻男性尸体膝关节生物力学特性的研究发现,与完整膝关节相比,半月板根部解剖修复导致接触面积减少17%,平均和峰值接触压力分别增加13%和26%;但解剖修复与非解剖修复相比,产生了几乎完整的接触面积,平均压力和峰值接触压力增加相对较小^[2]。上述研究结果也符合本实验结果,验证了本研究的可靠性。因此,修复外侧半月板根部损伤、恢复半月板环形张力是恢复膝关节生物力学功能和延缓骨性关节炎发生的重要因素之一。

研究发现,在内侧关节间室,外侧半月板后根部损伤后会导致接触面积减少,但平均接触压力及峰值压力变化甚微,这是膝关节间室压力重新分配的结果^[25]。内侧半月板损伤后会导致膝关节外翻以及膝关节间室峰值压力和平均接触压力发生变化,但对接触面积的影响较小^[9]。这与本文研究的结果有所不同,可能是由不同人种关节间室的特性差异所决定。当外侧半月板后根部发生撕裂后,在膝关节0°位,损伤后的外侧半月板可能会继续承担部分载荷,维持内侧关节间室的压力分布,使其接近生理学状态;然而一旦超过其能够代偿的最大限度,内侧关节间室的接触压力以及峰值压力分布也会发生改变。目前有关这一结论的相关临床研究报道偏少,还需进一步验证。

目前鲜有临床研究对外侧半月板后根部损伤修复后的临床效果进行评估^[26],多数学者专注于内侧半月板的研究^[2,9,22]。本实验中,虽然1 kN 载荷是国内外文献报道中公认、普遍可以接受的轴向载荷,但是它并不能代表运动康复以及剧烈活动时人体膝关节所承受的载荷,更完整的实验应该包括动

态的轴向载荷、旋转载荷以及剪切力等。额外增加的这些载荷在实验过程中可以模拟演示外侧半月板根部损伤及撕裂的过程,并实时记录实验所需的数据,使数据更加接近真实情况。相关报道指出,即使一些细微变化也会对长期结果造成巨大影响,因为循环载荷会使软骨出现疲劳,影响数据的真实性^[27-28]。本研究的局限性如下:①因为尸体膝关节标本的稀缺,导致本实验研究的样本量小^[12];②压力感测片插入膝关节后可能会产生一定压力,对实验数据造成偏差。

4 结论

本研究结果表明,修复撕裂的外侧半月板后根部可有效降低平均接触压力、峰值压力,增加接触面积;在外侧半月板根部中心点偏外侧5 mm 缝合时能最大限度恢复外侧半月板根部的生物力学特性;缝合于中心点或中心点偏后位置时,对于恢复半月板功能无明显效果。对于临床外侧半月板根部损伤撕裂患者,最佳的手术方式是将其损伤的半月板根部固定于中心点偏外5 mm 左右的位置,这样既可有效降低股股之间的平均接触压力以及峰值压力,还可缓解外侧半月板与胫骨平台之间面积的缺失,达到延缓关节及软骨退变的目的。

参考文献:

- [1] LAPRADE CM, JANSSON KS, DORNAN G, *et al.* Altered tibiofemoral contact mechanics due to lateral meniscus posterior horn root avulsions and radial tears can be restored with *in situ* pull-out suture repairs [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2014, 96(6): 471-479.
- [2] LAPRADE CM, FOAD A, SMITH SD, *et al.* Biomechanical consequences of a nonanatomic posterior medial meniscal root repair [J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43(4): 912-920.
- [3] 包呼日查. 内、外侧半月板后根部完全撕裂对膝关节生物力学影响的有限元分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [4] LAPRADE RF, MATHENY LM, MOULTON SG, *et al.* Posterior meniscal root repairs: Outcomes of an anatomic transtibial pull-out technique [J]. *Am J Sports Med*, 2017, 45(4): 884-891.
- [5] KALE A, KOPUZ C, DIKICI F, *et al.* Anatomic and arthroscopic study of the medial meniscal horns' insertions [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2010, 18(6): 754-759.

- [6] KOPF S, COLVIN AC, MURIUKI M, *et al.* Meniscal root suturing techniques: Implications for root fixation [J]. *Am J Sports Med*, 2011, 39(10): 2141-2146.
- [7] 沈杰威, 洪雷, 冯华, 等. 外侧半月板后根部损伤对半月板外突的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2014, 33(6): 499-504.
- [8] FURUMATSU T, KAMATSUKI Y, FUJII M, *et al.* Medial meniscus extrusion correlates with disease duration of the sudden symptomatic medial meniscus posterior root tear [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2017, 103(8): 1179-1182.
- [9] ALLAIRE R, MURIUKI M, GILBERTSON L, *et al.* Biomechanical consequences of a tear of the posterior root of the medial meniscus. Similar to total meniscectomy [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2008, 90(9): 1922-1931.
- [10] GEESLIN AG, CIVITARESE D, TURNBULL TL, *et al.* Influence of lateral meniscal posterior root avulsions and the meniscomfemoral ligaments on tibiofemoral contact mechanics [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2016, 24(5): 1469-1477.
- [11] SHYBUT TB, VEGA CE, HADDAD J, *et al.* Effect of lateral meniscal root tear on the stability of the anterior cruciate ligament-deficient knee [J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43(4): 905-911.
- [12] PEREZ-BLANCA A, ESPEJO-BAENA A, AMAT TD, *et al.* Comparative biomechanical study on contact alterations after lateral meniscus posterior root avulsion, transosseous reinsertion, and total meniscectomy [J]. *Arthroscopy*, 2016, 32(4): 624-633.
- [13] FORKEL P, HERBORT M, SPRENGER F, *et al.* The biomechanical effect of a lateral meniscus posterior root tear with and without damage to the meniscomfemoral ligament: Efficacy of different repair techniques [J]. *Arthroscopy*, 2014, 30(7): 833-840.
- [14] BHATIA S, LAPRADE CM, ELLMAN MB, *et al.* Meniscal root tears: Significance, diagnosis, and treatment [J]. *Am J Sports Med*, 2014, 42(12): 3016-3130.
- [15] ANZ AW, BRANCH EA, SALIMAN JD. Biomechanical comparison of arthroscopic repair constructs for meniscal root tears [J]. *Am J Sports Med*, 2014, 42(11): 2699-2706.
- [16] SMET AA, BLANKENBAKER DG, KIJOWSKI R, *et al.* MR diagnosis of posterior root tears of the lateral meniscus using arthroscopy as the reference standard [J]. *Am J Roentgenol*, 2009, 192(2): 480-486.
- [17] KOHN D, MORENO B. Meniscus insertion anatomy as a basis for meniscus replacement: A morphological cadaveric study [J]. *Arthroscopy*, 1995, 11(1): 96-103.
- [18] BRANCH EA, MILCHTEIM C, ASPEY BS, *et al.* Biomechanical comparison of arthroscopic repair constructs for radial tears of the meniscus [J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43(9): 2270-2276.
- [19] HOSPODAR SJ, SCHMITZ MR, GOLISH SR, *et al.* Fast-fix versus inside-out suture meniscal repair in the goat model [J]. *Am J Sports Med*, 2009, 37(2): 330-333.
- [20] 张绪树, 郭媛, 安美文, 等. 操作鼠标时鼠标和腕部接触压力的 TekScan 测量[J]. *医用生物力学*, 2017, 32(5): 469-475.
- ZHANG XS, GUO Y, AN MW, *et al.* Contact pressure measurement of the computer mouse and wrist during mouse operations by TekScan [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(5): 469-475.
- [21] WILHARM A, CH H, DERMITAS T, *et al.* Use of Tekscan K-scan sensors for retropatellar pressure measurement avoiding errors during implantation and the effects of shear forces on the measurement precision [J]. *Biomed Res Int*, 2013, 2013: 829171.
- [22] PADALECKI JR, JANSSON KS, SMITH SD, *et al.* Biomechanical consequences of a complete radial tear adjacent to the medial meniscus posterior root attachment site: *In situ* pull-out repair restores derangement of joint mechanics [J]. *Am J Sports Med*, 2014, 42(3): 699-707.
- [23] CHILLHAMMER CK, WERNER FW, SCUDERI MG, *et al.* Repair of lateral meniscus posterior horn detachment lesions: A biomechanical evaluation [J]. *Am J Sports Med*, 2012, 40(11): 2604-2609.
- [24] TAN PL, LEE TL, TWEED WA. Carbon dioxide absorption and gas exchange during pelvic laparoscopy [J]. *Can J Anaesth*, 1992, 39(7): 677-681.
- [25] PEREZ-BLANCA A, ESPEJO-BAENA A, AMAT TD, *et al.* Comparative biomechanical study on contact alterations after lateral meniscus posterior root avulsion, transosseous reinsertion, and total meniscectomy [J]. *Arthroscopy*, 2016, 32(4): 624-633.
- [26] FEUCHT MJ, BIGDON S, MEHL J, *et al.* Risk factors for posterior lateral meniscus root tears in anterior cruciate ligament injuries [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2015, 23(1): 140-145.
- [27] KIM JG, LEE YS, BAE TS, *et al.* Tibiofemoral contact mechanics following posterior root of medial meniscus tear, repair, meniscectomy, and allograft transplantation [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2013, 21(9): 2121-2125.
- [28] 李锋, 王成焘. 关节软骨的微摩擦接触力学特性[J]. *医用生物力学*, 2016, 31(2): 124-128.
- LI F, WANG CT. Micro-frictional contact force properties of articular cartilage [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(2): 124-128.