

内侧半月板损伤患者关节镜手术前后三维步态特征差异

李亚强, 张峻, 顾冬云, 曾一鸣

(上海交通大学医学院附属第九人民医院 骨科, 上海市骨科内植物重点实验室, 上海 200011)

摘要:目的 比较膝关节内侧半月板损伤患者关节镜手术前后的三维步态特征。方法 纳入 15 名内侧半月板损伤患者和 15 名健康人群作为研究对象,采集损伤组术前、术后及健康对照组的三维步态参数,包括步态时空参数、运动学以及动力学参数。结果 (1)损伤组术前步速和步长与对照组相比显著下降($P<0.05$),损伤组术后步速、步长与对照组相比无显著差异。(2)矢状面,损伤组术前膝关节屈伸活动范围、承重反应期和摆动相膝关节最大弯曲度较对照组显著下降($P<0.001$);术后承重反应期膝关节弯曲度较术前明显增加($P<0.05$),但术后摆动相膝关节最大弯曲角度和屈伸活动范围仍显著低于对照组($P<0.05$)。冠状面,损伤组术前内收外展活动范围和最大内收角度较对照组显著下降($P<0.001$);术后内收外展活动范围和最大内收角度较术前显著增加($P<0.05$),但也显著低于对照组($P<0.001$)。(3)矢状面,损伤组术后膝关节屈曲力矩第 1、第 2 峰值较术前增加($P>0.05$),但仍显著低于对照组($P<0.05$)。冠状面,损伤组术后内收力矩第 1、第 2 峰值较术前增加,但也显著低于对照组($P<0.05$)。结论 半月板损伤患者有其独特的步态特征,通常采取僵硬步态来降低膝关节负荷。关节镜下半月板成形术能显著改善膝关节步态特征,但患者步态仍不能在短期内恢复正常。

关键词:半月板; 关节镜; 步态分析; 动力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2019.03.013

Differences in Three-Dimensional Gait Characteristics of Patients with Medial Meniscus Injury before and after Arthroscopic Surgery

LI Yaqiang, ZHANG Jun, GU Dongyun, ZENG Yiming

(Shanghai Key Laboratory of Orthopaedics Implants, Department of Orthopaedics, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China)

Abstract: Objective To compare the three-dimensional (3D) gait characteristics of patients with medial meniscus injury of the knee before and after arthroscopic surgery. **Methods** Fifteen patients with medial meniscus injury and fifteen healthy subjects were included in the study. The 3D gait parameters were collected, including spatiotemporal parameters, kinematic parameters and kinetic parameters. **Results** (1) The preoperative walking speed and step length of the injury group were significantly lower than those of the control group. There was no significant difference in walking speed and step length after surgery between the injury group and the control group. (2) In the sagittal plane, the preoperative knee flexion-extension range of motion (ROM), the maximum flexion angle in load-bearing phase and swinging phase were significantly lower than those in the control group ($P<0.001$). The maximum knee flexion in load-bearing response phase was significantly increased after surgery

($P < 0.05$), but the maximum flexion angle in swing phase and the knee flexion-extension ROM after surgery were still significantly lower than those of the control group ($P < 0.05$). In the coronal plane, the preoperative knee adduction-abduction ROM and the maximum adduction angle in gait cycle were significantly lower than those of the control group ($P < 0.001$). The postoperative parameters significantly increased compared with the preoperative ones ($P < 0.05$), but they were still significantly lower than those of the control group ($P < 0.001$). (3) In the sagittal plane, the postoperative first and second peaks of knee flexion moment in stance phase of the injury group increased, compared with the preoperative ones ($P > 0.05$), but they were still significantly lower than those of the control group ($P < 0.05$). In the coronal plane, the postoperative first and second peaks of knee adduction moment in stance phase of the injury group increased, compared with preoperative ones, but they were also significantly lower than those of the control group ($P < 0.05$). **Conclusions** Patients with medial meniscus injury have their own unique gait patterns, usually with stiffening gait to reduce the knee load. Arthroscopic meniscusplasty can significantly improve knee gait characteristics, but patients still cannot return to normal gait in a short period of time.

Key words: meniscus; arthroscopy; gait analysis; kinetics

半月板组织是填充于膝关节股骨和胫骨之间的半月形纤维软骨组织,在增加膝关节接触面积、维持关节稳定、传递分散膝关节应力以及保护关节软骨等方面发挥重要的作用^[1-2]。由外伤导致的半月板撕裂损伤在临床较为常见,可导致患者膝关节疼痛及运动功能受限。由于半月板边缘无血液供应,自愈能力较差,故患者往往需要接受手术治疗^[3]。膝关节镜下半月板成形术是临床上治疗半月板损伤的常见手术方式,可有效地缓解患者膝关节疼痛,恢复患者膝关节正常运动功能^[4-5]。

尽管关节镜下半月板成形术可有效缓解患者疼痛,然而患者术后是否能够完全恢复膝关节正常的运动范围仍有待研究。研究发现,内侧半月板损伤患者术前步态特征异于常人,且术后膝关节活动度、支撑相和摆动相最大弯曲角度仍显著低于常人,膝关节仍存在僵直状态^[6-7]。朱水文等^[8]应用逆向工程技术模拟半月板损伤,研究半月板撕裂后膝关节应力、应变以及有效表面压力的分布情况。稻场齐^[9]运用尸体研究半月板切除对胫股关节接触压力的影响。目前活体研究缺乏,且仅分析膝关节在矢状面上的运动,鲜有关于冠状面运动特征的报道。迄今为止,国内针对内侧半月板损伤患者术前及术后膝关节在矢状面和冠状面上的运动学特征研究仍然缺乏。

本文比较内侧半月板损伤患者关节镜手术前及术后3个月的膝关节时空参数和运动学参数特征,分析与正常人群的差异性,评价关节镜术后患

者下肢生物力学的特征及恢复情况。

1 资料与方法

1.1 研究对象

受试者纳入标准为:①临床诊断为膝关节内侧半月板损伤,并经影像学和关节镜检查确诊(见图1);②膝关节内侧关节间隙疼痛和功能受限明显,符合手术指征;③仅在关节镜下行半月板成形术。排除标准为:①除有内侧半月板损伤外,同时合并有膝关节外侧半月板、交叉韧带及周围韧带损伤之一;②膝关节存在退行性病变及下肢力线内外翻畸形;③在关节镜下行半月板缝合或切除。本研究共纳入15例内侧半月板损伤患者,其中女性9例、男性6例,平均年龄(29.80 ± 3.62)岁,身高(167.73 ± 11.78)cm,体质量(66.47 ± 5.19)kg。招募年龄、身高、体质量相匹配的15例膝关节正常人群作为对照组。本研究得到上海交通大学生物医

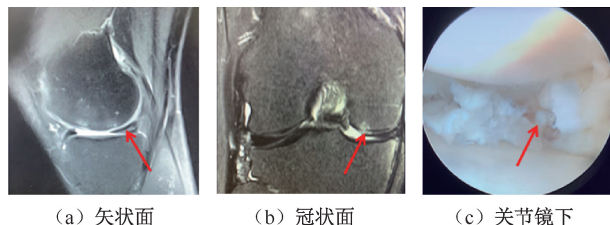


图1 膝关节内侧半月板损伤患者磁共振影像及关节镜下表现
Fig.1 Magnetic resonance imaging of patients with medial meniscus injury of the knee and arthroscopic findings (a) Sagittal plane, (b) Coronal plane, (c) Arthroscopic view

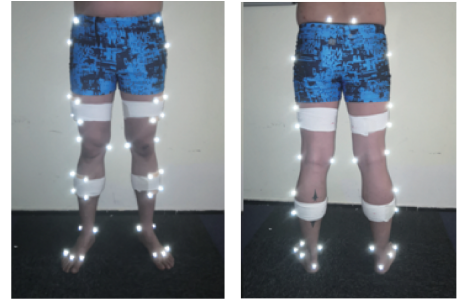
学工程学院伦理委员会批准(2019049),受试对象知情并签署同意书。

1.2 研究方法及随访

本实验步态测试分析于上海交通大学数字医学教育部工程研究中心步态测试分析中心进行。采用三维红外运动捕捉系统 Vicon T40 (Oxford Metrics Group, 英国)对受试者膝关节运动学数据进行采集,该三维运动捕捉系统由8个红外捕捉摄像头进行运动捕捉,运动采集频率为100 Hz。运动捕捉光标点贴放位置为双侧髌前上棘、髌后上棘、股骨大转子、膝关节股骨内外侧髁、内踝、外踝、足跟以及第1、2、5跖骨远端骨性标志(见图2),4个反射光标组成的刚性曲板分别由弹性绷带固定于受试者下肢大腿及小腿中段外侧。动力学参数由4块测力台 AMTI OR6-7 (Advanced Mechanical Technology Inc., 美国)进行采集,测力台采样频率为1 kHz。首先,采集受试者静态站立下的模型数据,采集3次保证无反射光标点丢失。让受试者采取自我舒适的速度脱鞋在测试区间行走3次,以适应双下肢贴放的反射光标点。待受试者完全适应后,要求受试者采取相同的起始位置行走,采集受试者步态数据。每名受试者采集至少6次有效数据,有效试验的标准为测试者足部第1次接触测力台时完全位于测力台上方。采集结束后,将数据导入 Visual 3D 软件进行数据处理和分析。患者在接受关节镜手术前及术后3个月接受步态测试。

1.3 手术过程

内侧半月板损伤患者均接受关节镜下内侧半月板成形术。手术具体过程为:患者取仰卧位,全身麻醉后于患侧大腿根部放置气囊止血带,膝关节



(a) 正面观

(b) 背面观

图2 受试者反射光标点贴放位置

Fig.2 Position of retroreflective marker placement on subjects

(a) Front view, (b) Back view

前外侧和前内侧关节镜常规手术入路。关节镜下行膝关节探查,利用蓝钳对内侧半月板损伤处修整成形,射频处理至边缘光整。术后患者2周内部分负重行走锻炼,2周后逐步恢复正常行走。

1.4 统计学分析

所有数据均采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。3组研究对象的步态参数统计分析采用方差分析(ANOVA)分析,组与组之间统计分析采取配对 t 检验。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学差异。

2 结果

2.1 内侧半月板损伤患者术前、术后与健康人群时空参数比较

内侧半月板患者术前步速及步长与对照组相比有显著性差异($P < 0.05$)。步频、支撑相和摆动相时间与对照组相比无显著性差异($P > 0.05$)。关节镜下半月板成形术后,患者步速、步长等时空参数与健康对照组相比无显著差异($P > 0.05$),见表1。

表1 损伤组术前术后时空参数比较

Tab.1 Comparison of spatiotemporal parameters before and after surgery in injury group

参数	损伤组		对照组	P_1	P_2	P_3
	术前	术后				
步速/($m \cdot s^{-1}$)	1.20±0.11	1.23±0.10	1.26±0.11	0.033	0.449	0.159
步长/m	0.64±0.04	0.66±0.03	0.67±0.03	0.006	0.187	0.121
步频/(步· min^{-1})	114.39±6.29	115.11±6.53	116.60±6.90	0.380	0.551	0.776
支撑相时间/s	0.62±0.06	0.63±0.04	0.64±0.04	0.315	0.649	0.580
摆动相时间/s	0.43±0.04	0.43±0.05	0.44±0.04	0.691	0.447	0.715

注: P_1 损伤组术前和对照组比较, P_2 损伤组术后和对照组比较, P_3 损伤组术前和术后比较

2.2 内侧半月板损伤患者术前、术后与对照组运动学参数比较

矢状面上,与对照组相比,损伤组术前膝关节屈曲伸展活动度(range of motion, ROM)、承重反应期最大弯曲角度、支撑相末期弯曲角度以及摆动相最大弯曲角度显著降低($P<0.05$)。损伤组术后屈曲伸展 ROM、承重反应期最大弯曲角度以及支撑相末期弯曲角度较术前显著改善

($P<0.05$)。然而,与对照组相比,损伤组术后膝关节 ROM 以及摆动相最大弯曲角度仍显著减小($P<0.05$)。冠状面上,与对照组相比,损伤组膝关节内收外展 ROM 以及最大内收角度显著降低($P<0.001$),最大外翻角度无显著差异($P>0.05$)。损伤组术后内收外展 ROM 及最大内收角度得到显著改善($P<0.05$),但仍恢复不到正常($P<0.001$),见表 2。

表 2 损伤组术前术后运动学参数比较

Tab.2 Comparison of kinematic parameters before and after surgery in injury group

参数	损伤组		对照组	P1	P2	P3	
	术前	术后					
矢状面	屈曲伸展 ROM/(°)	56.64±3.94	60.28±3.51	64.61±3.59	<0.001	0.004	0.027
	初始着地弯曲角度/(°)	10.47±2.38	10.63±2.19	10.82±2.34	0.718	0.827	0.873
	承重反应期最大弯曲角度/(°)	20.56±2.82	24.05±2.37	25.36±2.58	<0.001	0.198	0.003
	支撑相末期最大伸展角度/(°)	7.52±2.12	10.76±2.14	9.72±2.07	0.019	0.210	0.001
	摆动相最大弯曲角度/(°)	63.29±3.24	65.75±2.98	68.50±3.12	<0.001	0.028	0.074
冠状面	内收外展 ROM/(°)	7.98±1.61	9.65±1.55	13.09±1.58	<0.001	0.001	0.022
	最大内收角度/(°)	3.12±1.39	5.01±1.24	8.79±1.23	<0.001	<0.001	0.012
	最大外展角度/(°)	3.95±1.59	4.01±1.43	3.66±1.40	0.708	0.636	0.948

注: P1 损伤组术前和对照组比较, P2 损伤组术后和对照组比较, P3 损伤组术前和术后比较

2.3 内侧半月板损伤患者术前、术后与对照组动力学参数比较

矢状面上,与对照组相比,损伤组膝关节屈曲力矩第 1、第 2 峰值显著降低($P<0.05$)。与术前相比,术后损伤组屈曲力矩升高,但无统计学差异

($P>0.05$)。但与对照组相比,术后屈曲力矩仍显著减小($P<0.05$)。冠状面上,与对照组相比,损伤组术前、术后内收力矩第 1、第 2 峰值均显著降低($P<0.05$)。损伤组术后膝关节内收力矩第 2 峰值较术前显著升高($P=0.001$),见表 3。

表 3 损伤组术前术后动力学参数比较

Tab.3 Comparison of kinetic parameters before and after surgery in injury group

参数	损伤组		对照组	P1	P2	P3
	术前	术后				
屈曲力矩第 1 峰值/[$(N\cdot m)\cdot kg^{-1}$]	0.67±0.11	0.78±0.09	0.90±0.11	0.001	0.009	0.138
屈曲力矩第 2 峰值/[$(N\cdot m)\cdot kg^{-1}$]	0.26±0.04	0.28±0.06	0.34±0.05	0.026	0.027	0.652
内收力矩第 1 峰值/[$(N\cdot m)\cdot kg^{-1}$]	0.52±0.09	0.60±0.06	0.71±0.08	<0.001	0.038	0.071
内收力矩第 2 峰值/[$(N\cdot m)\cdot kg^{-1}$]	0.19±0.06	0.34±0.07	0.58±0.06	<0.001	<0.001	0.001

注: P1 损伤组术前和对照组比较, P2 损伤组术后和对照组比较, P3 损伤组术前和术后比较

图 3 所示为内侧半月板损伤患者术前组、术后组与对照组膝关节矢状面、冠状面运动学和动力学曲线。

3 讨论

三维步态测试分析是用来评估下肢功能状态

的一种常用检查方式,可用于鉴定某一类特殊人群的步态特征,评估疾病病情的严重程度以及手术或康复方案的疗效^[10]。本研究应用 Vicon 被动光标式运动捕捉系统,对内侧半月板损伤患者术前和术后的膝关节功能状态进行评估。该运动捕捉系统可精确客观地评估关节运动功能,被广泛应用于膝

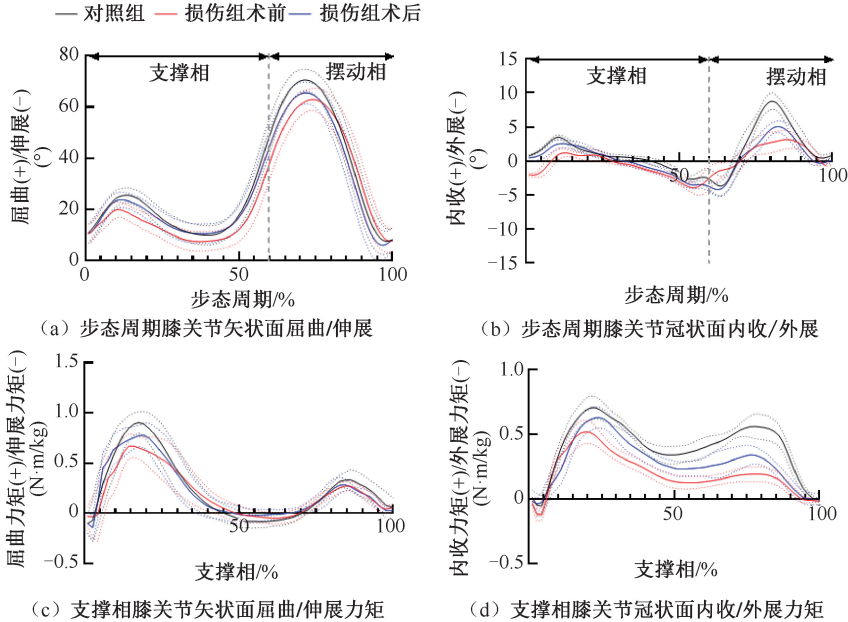


图3 受试者膝关节矢状面、冠状面运动学和动力学曲线

Fig.3 Kinematics and kinetic curves of the knee in sagittal and coronal plane (a) The flexion/extension angle of knee on sagittal plane, (b) The adduction/abduction angle of knee on coronal plane, (c) The flexion/extension moment of knee on sagittal plane, (d) The adduction/abduction moment of knee on coronal plane

关节骨性关节炎、韧带损伤等多种疾病的运动学评估^[11-12]。

在完整的膝关节步态周期中,包含支撑相和摆动相。其中,支撑相分为承重反应期、支撑相中期、支撑相末期和摆动相前期。初始着地瞬间,较大的膝关节弯曲角度有助于吸收下肢接触地面的瞬间力量,从而减小对膝关节的力学负荷。较高的初始着地膝关节弯曲度常见于膝关节炎人群^[13]。然而本研究发现,膝关节内侧半月板损伤患者膝关节弯曲度在初始着地瞬间与健康人群无差异,但其膝关节屈曲伸展 ROM 与健康人群相比显著下降,膝关节支撑相末期伸展运动增加,摆动相膝关节最大弯曲度降低,提示膝关节处于一种僵直状态。膝关节僵直步态在膝关节炎患者和韧带损伤等患者中也合并存在,减小的膝关节屈曲伸展 ROM 可降低患者膝关节的疼痛症状^[14]。Creaby 等^[15]针对 89 例内侧间室膝关节炎患者的研究发现,支撑相较小的膝关节弯曲和伸直运动可减轻矢状面上膝关节的应力负荷,从而减轻疼痛症状。冠状面上,内侧半月板损伤患者内收运动显著降低,从而降低对内侧间室的压力,减轻膝关节疼痛症状。然而,内侧半

月板损伤患者膝关节最大外展角度与健康人群相比无显著差异,故内侧半月板损伤患者内收运动降低并不增加对外侧间隙的应力负荷。此外,本研究对内侧半月板患者接受关节镜下半月板成形术后再次进行步态测试,发现尽管关节镜手术去除了患者内侧半月板损伤组织,患者临床疼痛症状明显改善,患者承重反应期膝关节最大弯曲角度得到改善,但患者术后膝关节摆动相最大弯曲度、屈曲伸展和内收外展 ROM 仍不能恢复至健康人群水平。Durand 等^[7]通过对 17 例内侧半月板损伤患者的膝关节矢状面运动进行研究发现,膝关节半月板损伤患者在接受半月板成形术后短期内膝关节仍处于自我保护状态,故膝关节 ROM 仍不能完全恢复至正常水平。

膝关节动力学数据与膝关节关节面的受力密切相关^[16]。本研究发现,内侧半月板损伤患者屈曲以及内收力矩第 1、第 2 峰值与健康人群相比显著下降。既往研究表明,膝关节屈曲力矩与关节内外侧间室的压力负荷密切相关,而膝关节内收力矩与膝关节内侧间室的压力负荷、内外侧间室负荷比紧密相关^[17-18]。Manal 等^[19]通过采集运动学和肌电

信号进行逆向动力学分析,其研究结果提示屈曲和内收力矩峰值共同可解释膝关节内侧间室压力负荷 85% 的改变。过高的膝关节内收力矩会增加内侧间室软骨的退变以及内侧半月板的外移^[20]。在内侧间室膝关节炎人群中发现,关节炎引起的疼痛显著降低患者屈曲和内收力矩,经非甾体类抗炎药物和镇痛药物治疗后,患者膝关节屈曲和内收力矩又会得到提高^[21]。因此,关节疼痛是影响膝关节屈曲和内收力矩的重要因素。内侧半月板损伤患者术前由于半月板组织撕裂卡压在运动的膝关节面中,患者膝关节疼痛症状明显,故术前患者屈曲和内收力矩峰值较健康人群显著下降。接受关节镜下半月板成形术治疗后,患者疼痛症状明显改善,其屈曲和内收力矩与术前相比得到改善。然而,进一步与健康人群比较发现,术后即使膝关节运动学得到明显改善,但患者的动力学参数仍处于较低水平,提示在术后短期内,患者的膝关节仍处于一种自我保护状态。矢状面上,尽管患者支撑相屈曲角度恢复至正常角度,但膝关节屈曲力矩仍处于较低水平,可能与患者膝关节周围股四头肌力量的改变相关^[22]。冠状面上,由于术后患者的内收运动与健康人群相比人处于较低水平,故其内收力矩小于健康人群,导致其内收力矩减小。低水平的屈曲和内收力矩可有效降低膝关节表面的应力分布,从而进一步改善患者的疼痛症状。但 Thorlund 等^[23]通过对 23 例内侧半月板成形术后患者随访 12 个月后发现,膝关节屈曲和内收力矩峰值在术后 12 个月均显著升高。术后增高的屈曲和内收力矩峰值提示内侧半月板成形术患者术后发生膝关节内侧骨关节炎的风险较高^[24-25]。

4 结语

本研究发现,内侧半月板损伤患者膝关节在冠状面、矢状面上运动范围显著减小,屈曲和内收力矩均显著降低,呈现僵硬步态。但膝关节弯曲度在初始着地瞬间与正常并无差异,故与前交叉韧带损伤患者和膝关节骨性关节炎患者步态模式不完全相同。患者接受关节镜下半月板成形术后,尽管膝关节屈曲伸展和内收外展 ROM 得到显著改善,但与对照组相比仍处于较低水平。同时,术后患者屈曲和内收力矩也显著小于对照组,提示尽管内侧半

月板损伤患者在接受关节镜手术治疗后疼痛等症状得到明显改善,但步态周期中膝关节运动学和动力学等指标仍未恢复至正常水平,患者在术后短时间内膝关节仍处于自我保护机制。术后针对性的康复锻炼及肌肉力量训练对半月板损伤患者术后关节功能恢复及避免发生膝关节骨性关节炎非常重要。

参考文献:

- [1] LI L, YANG X, YANG L, et al. Biomechanical analysis of the effect of medial meniscus degenerative and traumatic lesions on the knee joint [J]. *Am J Transl Res*, 2019, 11(2): 542-556.
- [2] MAKRIS EA, HADIDI P, ATHANASIOU KA. The knee meniscus: Structure-function, pathophysiology, current repair techniques, and prospects for regeneration [J]. *Biomaterials*, 2011, 32(30): 7411-7431.
- [3] BRINKER MR, O'CONNOR DP, PIERCE P, et al. Utilization of orthopaedic services in a capitated population [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2002, 84-a(11): 1926-1932.
- [4] ABRAMS GD, FRANK RM, GUPTA AK, et al. Trends in meniscus repair and meniscectomy in the United States, 2005-2011 [J]. *Am J Sports Med*, 2013, 41(10): 2333-2339.
- [5] EIJGENRAAM SM, REIJMAN M, BIERMA-ZEINSTRASMA, et al. Can we predict the clinical outcome of arthroscopic partial meniscectomy? A systematic review [J]. *Br J Sports Med*, 2018, 52(8): 514-521.
- [6] MAGYAR MO, KNOLL Z, KISS RM. The influence of medial meniscus injury and meniscectomy on the variability of gait parameters [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2012, 20(2): 290-297.
- [7] DURAND A, RICHARDS CL, MALOUIN F, et al. Motor recovery after arthroscopic partial meniscectomy. Analyses of gait and the ascent and descent of stairs [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1993, 75(2): 202-214.
- [8] 朱水文, 陈国平, 彭伟. 基于 ANSYS 的人体膝关节半月板撕裂数值模拟 [J]. *医用生物力学*, 2016, 31(2): 102-106. ZHU SW, CHEN GP, PENG W. Numerical simulation on meniscus tears of the knee joint based on ANSYS [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(2): 102-106.
- [9] 稻场齐. 半月板切除对股胫关节接触压力的影响 [J]. *医用生物力学*, 1994, 9(2): 67-77. DAO CQ. Effects of meniscectomy on the contact pressure of the femoro-tibial joint [J]. *J Med Biomech*, 1994, 9(2): 67-77.
- [10] DEBI R, ELBAZ A, MOR A, et al. Knee osteoarthritis, de-

- generative meniscal lesion and osteonecrosis of the knee: Can a simple gait test direct us to a better clinical diagnosis? [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2017, 103(4): 603-608.
- [11] AMEER MA, MUAIDI QI. Relation between peak knee flexion angle and knee ankle kinetics in single-leg jump landing from running: A pilot study on male handball players to prevent ACL injury [J]. *Phys Sportsmed*, 2017, 45(3): 337-343.
- [12] BECKWEE D, DEGELAEN M, EGGERMONT M, *et al.* Validity and test-retest reliability of the Stride Analyzer in people with knee osteoarthritis [J]. *Gait Posture*, 2016, 49: 155-158.
- [13] ZENG X, MA L, LIN Z, *et al.* Relationship between Kellgren-Lawrence score and 3D kinematic gait analysis of patients with medial knee osteoarthritis using a new gait system [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 4080.
- [14] FAVRE J, JOLLES BM. Gait analysis of patients with knee osteoarthritis highlights a pathological mechanical pathway and provides a basis for therapeutic interventions [J]. *EFORT Open Rev*, 2016, 1(10): 368-374.
- [15] CREABY MW, HUNT MA, HINMAN RS, *et al.* Sagittal plane joint loading is related to knee flexion in osteoarthritic gait [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2013, 28(8): 916-920.
- [16] ESCULIER JF, WILLY RW, BAGGALEY MW, *et al.* Sex-specific kinetic and kinematic indicators of medial tibiofemoral force during walking and running [J]. *Knee*, 2017, 24(6): 1317-1325.
- [17] MAROUANE H, SHIRAZI-ADL A. Sensitivity of medial-lateral load sharing to changes in adduction moments or angles in an asymptomatic knee joint model during gait [J]. *Gait Posture*, 2019, 70: 39-47.
- [18] RICHARDS RE, ANDERSEN MS, HARLAAR J, *et al.* Relationship between knee joint contact forces and external knee joint moments in patients with medial knee osteoarthritis; Effects of gait modifications [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2018, 26(9): 1203-1214.
- [19] MANAL K, GARDINIER E, BUCHANAN TS, *et al.* A more informed evaluation of medial compartment loading: The combined use of the knee adduction and flexor moments [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2015, 23(7): 1107-1111.
- [20] VANWANSEELE B, ECKSTEIN F, SMITH RM, *et al.* The relationship between knee adduction moment and cartilage and meniscus morphology in women with osteoarthritis [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2010, 18(7): 894-901.
- [21] HURWITZ DE, RYALS AR, BLOCK JA, *et al.* Knee pain and joint loading in subjects with osteoarthritis of the knee [J]. *J Orthop Res*, 2000, 18(4): 572-579.
- [22] SASAKI K, NEPTUNE RR. Individual muscle contributions to the axial knee joint contact force during normal walking [J]. *J Biomech*, 2010, 43(14): 2780-2784.
- [23] THORLUND JB, HOLSGAARD-LARSEN A, CREABY MW, *et al.* Changes in knee joint load indices from before to 12 months after arthroscopic partial meniscectomy: A prospective cohort study [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2016, 24(7): 1153-1159.
- [24] ENGLUND M, ROEMER FW, HAYASHI D, *et al.* Meniscus pathology, osteoarthritis and the treatment controversy [J]. *Nat Rev Rheumatol*, 2012, 8(7): 412-419.
- [25] BROPHY RH, GRAY BL, NUNLEY RM, *et al.* Total knee arthroplasty after previous knee surgery; Expected interval and the effect on patient age [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2014, 96(10): 801-805.