

# 前交叉韧带重建术后膝关节运动分析研究进展

张 玲<sup>1</sup>, 蔡宗远<sup>2,3a</sup>, 王少白<sup>1</sup>, 蔡 斌<sup>1,3b</sup>

(1.上海体育学院 运动科学学院,上海 200438; 2.上海交通大学 生物医学工程学院,上海 200240;  
3.上海交通大学医学院附属第九人民医院 a.骨科,b.康复医学科,上海 200011)

**摘要:**膝关节前交叉韧带损伤是临床常见的严重影响膝关节稳定性的运动性损伤。尽管前交叉韧带重建(anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR)可以修复韧带结构,但却无法恢复膝关节正常的运动学与动力学。近年来,利用运动分析评估 ACLR 术后疗效是运动医学及康复医学领域的研究热点。目前运动分析主要应用于 ACLR 术后疗效评价、个性化康复方案制定,也是探讨 ACLR 术后继发性损伤和早发性骨性关节炎潜在危险因素的客观科学工具。未来 ACLR 术后的运动分析更多关注于优化手术方案和康复治疗方案。回顾近 10 年 ACLR 术后膝关节运动分析的观察性研究和随机临床试验,介绍光学运动捕捉和双平面透视追踪在 ACLR 术后运动分析中的应用进展。临床研究表明,无论选择何种移植体和术式重建前交叉韧带,术后膝关节在功能任务中仍表现出异常的运动学特征,但术后膝关节生物力学的改变与早发性膝关节骨性关节炎的关系仍不清楚。恢复膝关节的旋转稳定性是临床 ACLR 手术最大的挑战之一。未来研究应通过合理的研究设计与长期随访,探讨 ACLR 对膝关节生物力学机制的影响,帮助临床医生和物理治疗师制定更有效的干预措施。

**关键词:**前交叉韧带;重建术;运动分析;运动学;动力学

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2020.02.018

## Progress in Knee Joint Motion Analysis after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

ZHANG Ling<sup>1</sup>, TSAI Tsungyuan<sup>2,3a</sup>, WANG Shaobai<sup>1</sup>, CAI Bin<sup>1,3b</sup>

(1. School of Kinesiology, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2. School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. a. Department of Orthopedics, b. Department of Rehabilitation, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** Anterior cruciate ligament (ACL) deficiency is a common clinical injury that seriously affects the function of the knee. Although ACL reconstruction (ACLR) can rebuild the structure of the ACL, it does not restore the normal kinematics and dynamics of the knee. In recent years, motion analysis has been widely applied in sports science and rehabilitation. In clinics, motion analysis is mainly applied to the evaluation of clinical outcomes of the ACLR knee. It is also a scientific objective tool to assess the potential risk factors of secondary injury and early onset of osteoarthritis after ACLR. In-depth understanding of the knee functional kinematics and kinetics after ACLR will significantly improve the efficacy of current ACL deficiency treatment and rehabilitation regime. This

收稿日期:2019-01-23; 修回日期:2019-02-27

基金项目:国家重点研发计划(2018YFF0300504),国家自然科学基金项目(3177040100),上海市科委浦江人才计划(17PJ1405000),上海交通大学医工交叉研究基金(YG2017MS09)

通信作者:蔡斌,硕士生导师,E-mail: shrehab@163.com

paper reviewed studies of the knee joint motion analysis after ACLR in the past decade. The current knowledge of the ACLR knee motion from studies using optical motion capture and biplanar fluoroscopic imaging system based tracking technique was synthesized. Clinical studies have reported that regardless of the type of graft and surgical technique of the ACLR, the postoperative knee still exhibits abnormal kinematics in functional tasks, but the relationship between early-onset OA and the biomechanical changes in the ACLR knee remains unknown. Restoring the rotational stability of the knee is still one of the biggest challenges in clinical ACLR surgery. Future studies should explore the impact of ACLR on the biomechanical mechanisms of the knee joint through an appropriate research design and long-term follow-up, and help clinicians and physiotherapists to develop more effective interventions.

**Key words:** anterior cruciate ligament (ACL); reconstruction; motion analysis; kinematics; dynamics

前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 是维持膝关节稳定的重要组织, 主要限制胫骨的前移和内旋。ACL 损伤后膝关节稳定性明显下降, 严重影响正常的膝关节功能<sup>[1]</sup>。目前临床上通常采用膝关节镜下 ACL 重建 (anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR) 术和积极的康复以恢复损伤后膝关节稳定性<sup>[2]</sup>。然而, 在 ACLR 术后 2 年, 只有 41% 患者能够回归到受伤前的运动水平<sup>[3]</sup>。ACLR 术后易发生膝关节的继发性损伤, 如半月板和关节软骨退化; 术后 ACL 二次损伤的发生率为 32%<sup>[4]</sup>。初始 ACL 损伤后 10~15 年的影像学检查随访表明, 约有 50% 患者会罹患早发性膝关节骨性关节炎 (osteoarthritis, OA)<sup>[5]</sup>。因此, 预防 ACLR 术后 ACL 二次损伤和早发性 OA 成为维持 ACLR 术后膝关节长期健康的关键。尽管 ACLR 术后早发性膝关节 OA 的致病机制尚未明确, 但是 ACLR 术后膝关节运动学的改变被认为是一种潜在的机制导致 OA 发生<sup>[6]</sup>。

近年来, 利用运动分析评估 ACLR 术后的疗效是运动医学及康复医学领域的研究热点。光学运动捕捉技术和双平面透视追踪技术被用于 ACLR 术后膝关节的运动分析, 评估术后的疗效、二次损伤和早发性 OA 的发生机制和危险因素, 以及制定个性化康复方案。本文以关键词 Anterior cruciate ligament/ACL Reconstruction、Kinetics/Kinematics/Bio-mechanics、Gait/Gait analysis/Walking、Jogging/Running、Stair ascent/descent、Jumping/Squatting/Hopping 检索 Embase、Web of Science、PubMed 数据库, 将英文关键词组译成中文搜索 Google Scholar 数据库, 设定检索年限 2009~2018 年。根据 GRADE

(Grades of Recommendation, Assessment, Development, and Evaluation) 指南和影响因子对检索到的 1 565 篇文献进行筛选, 373 篇文献符合以下纳入标准: ① 观察性研究设计 (前瞻性队列研究、病例对照研究和横断面研究) 或随机临床试验 (randomized clinical trials, RCTs); ② 影响因子高于 2 分。排除 46 篇综述和 112 篇重复性研究; 标题浏览排除 82 篇和摘要浏览排除 68 篇文献; 根据全文对 65 篇潜在相关文章进行筛选, 排除 33 项研究 (无对照组 6 篇、受试者合并其他膝关节疾病 11 篇、离体实验和动物实验 12 篇、少于 10 例样本量 4 篇), 最终选择 32 篇全文文献用于综述。本文对比分析近 10 年有关 ACLR 术后运动分析的观察性研究和 RCTs, 介绍光学运动捕捉和双平面透视追踪在 ACLR 术后运动分析中的应用进展、限制以及未来可能的研究方向。

## 1 光学运动捕捉技术

### 1.1 光学运动捕捉原理

光学运动捕捉系统通过多部红外线摄影机记录下标记点的反射光线, 确定标记点在影像上的位置, 并对多个摄影机记录的标记点位置进行处理, 计算出标记点的三维空间坐标, 基于刚体与球窝关节的假设, 便可得到人体膝关节的运动参数<sup>[7]</sup>。根据运动参数、肢体段质量参数<sup>[8]</sup>、测力板测量的地面反作用力, 运用牛顿力学定律, 以逆向动力学分析计算得到各关节的合力与合力矩<sup>[9]</sup>。作为常用的运动分析, 方法光学运动捕捉技术在 ACLR 术后的运动分析中具有可重复性<sup>[10]</sup>, 目前研究中常用的三维运动捕捉系统有英国 VICON 系统、美国 Motion

Analysis 系统以及加拿大 NDI 系统等。近年来,有学者研发出易操作、便于小范围动作捕捉的便携式动作捕捉系统 Opti-Knee(上海逸动医学科技有限公司)。该系统使用立体红外线和高速摄像头连接到一个便携式工作站,可同时提供运动和视觉数据,临床上已经被用于 ACLR 术后的运动分析<sup>[11]</sup>。然而,由于两个摄影机相对位置固定,系统的有效测量范围有限,对膝关节进行较大范围运动测试(如侧切跑)的适用性小。

## 1.2 光学运动捕捉在 ACLR 术后运动分析的应用

### 1.2.1 步态分析

利用光学运动捕捉技术进行步态分析,不仅可以得到步行周期的时空参数,如步长、步频等形态指标,还可以量化膝关节的运动学与动力学参数,如关节角度、关节合力与合力矩等参数。相对于 ACLR 术后临床常用的疗效评价,包括 CT、MRI 影像学检查和膝关节松弛度测试,都只是反映关节静态情况下的结构和稳定性,不能反映膝关节运动状态下的功能表现。运动分析手段弥补了上述不足,故越来越多的骨科医生和物理治疗师意识到运动分析对于 ACLR 术后疗效和功能恢复评价的重要性。Stephanie 等<sup>[12]</sup>对 42 名 ACLR 术后 6 月的患者进行功能性测试(等速肌力测试、单腿跳和量表评估)和三维步态分析,发现没有通过功能性测试的患者表现出不对称的异常步行模式,在步态周期的摆动期患膝关节屈曲减小。研究发现,ACLR 术后膝关节会发生某些特定运动学的适应性改变,ACLR 术后 6 周内少数的 coper 患者(14%~20%)<sup>[13]</sup>表现出股四头肌避免步态(quadriceps avoidance gait)<sup>[14]</sup>,即在步行周期的支撑期膝关节伸展增加,摆动期膝关节屈曲减小。股四头肌避免步态可减少会造成胫骨向前移动的剪切力,从而避免膝关节出现不稳定<sup>[15]</sup>。与健康人群相比,ACLR 术后早期患者在步行周期的支撑期中膝关节内收力矩增大<sup>[16]</sup>。Gao 等<sup>[17]</sup>认为,ACLR 术后早期步行周期中膝关节内收力矩增加是早发性 OA 的潜在诱因。Webster 等<sup>[18]</sup>分别在 ACLR 术后 10 月和 3 年对患者进行步态分析,相比术后 10 月,术后 3 年患者在步行周期的终末支撑期中膝关节屈曲角度增加,说明患者的步态得到改善。

### 1.2.2 特殊动作分析

ACLR 术后的运动分析研究不仅局限于步态分析,还包含单腿跳、下蹲、上下

楼梯等功能性动作分析。Xergia 等<sup>[19]</sup>通过对 22 例 ACLR 术后 6~9 月男性运动员进行功能性跳跃测试发现,与对照组相比,实验组在功能性跳跃测试中表现出明显双膝运动的不对称。显然,运动分析的结果不能支持目前临床一般的认知,即让运动员在 ACLR 术后 6 月回归场上<sup>[20]</sup>。一项回顾性研究发现,30% ACLR 术后回归高水平运动患者两年内会出现 ACL 二次损伤<sup>[21]</sup>。为探讨 ACL 二次损伤的发生机制和危险因素,Ithurnburn 等<sup>[22]</sup>跟踪随访发现,单腿跳跃落地双膝运动学不对称患者 ACLR 术后 2 年时的膝关节功能明显下降,可能是由于跳跃落地时膝关节屈曲角度减小而使 ACL 张力增加,成为 ACL 二次损伤的潜在危险因素。Roos 等<sup>[23]</sup>研究了移植术类型对 ACLR 术后膝关节运动学改变的影响。Kulow 等<sup>[24]</sup>通过横断面研究对 34 例髌腱移植和 21 例半腱肌腱和股薄肌腱移植患者进行单腿下蹲的运动分析,结果表明,相比于对照组,不同移植术重建术后的患者均表现为伸膝力矩减少、屈膝角度以及髌内收角度减少,但是两组不同移植术重建术后膝关节运动学数据没有统计学差异。Ristanis 等<sup>[25]</sup>采取对照研究比较 11 例髌腱移植和 11 例腘绳肌腱移植患者下楼梯时膝关节的运动学表现,结果发现,两种 ACLR 术后膝关节恢复了正常的前后向稳定性,腘绳肌腱移植患者患侧胫骨最大旋转角度增加,而髌腱移植患者双侧胫骨最大旋转角度增加,且患侧胫骨最大旋转角度高于腘绳肌腱移植的患者,说明两种移植术均不能恢复膝关节正常的旋转稳定性,但腘绳肌腱移植重建术对于维持健侧膝关节正常的运动学有积极作用。因此,如何改进手术技术以最大程度实现 ACL 真实解剖位置和最大化恢复 ACL 正常功能,是骨科医生面临的主要问题。

### 1.2.3 神经肌肉控制分析

此外,光学运动捕捉系统还可以结合肌电分析 ACLR 术后神经肌肉控制的情况。尽管多数研究显示,ACLR 术后股四头肌力量下降,但仍未有确切机制可以解释伸肌力量减少的原因<sup>[26]</sup>。Leiter 等<sup>[27]</sup>研究认为,股四头肌力量下降作为一种保护性机制,可以减少胫骨的前移,从而减少 ACL 的张力。但是,膝周肌肉协调性的改变会导致关节接触面的负荷不均匀分布,可能是 ACLR 术后出现早发性 OA 的危险因素<sup>[28]</sup>。Patras

等<sup>[29]</sup>研究发现,在低、中强度的跑步活动中,男性运动员患侧股外侧肌的肌电活动增加,而在高强度的跑步活动中患侧股二头肌的肌电活动增加。临床上,多数物理治疗师会强调 ACLR 术后股四头肌的肌力训练,腘绳肌功能对膝关节功能恢复的影响常被忽视。Tsai 等<sup>[30]</sup>研究发现,在功能性活动中腘绳肌的肌电活动增加,而股四头肌的肌电活动减少,这可能是由于 ACLR 术后患膝为适应功能性活动而表现出神经肌肉代偿策略。对 ACLR 术后神经肌肉控制进行运动分析,可为物理治疗师制定个性化有效的康复方案提供客观依据。

### 1.3 光学运动捕捉技术的限制

光学运动捕捉技术是在人体表面粘贴标记物,通过求取标记物的运动来代表人体的运动。然而,软组织存在于皮肤与骨骼之间,人体运动时软组织发生形变,使得标记物与骨骼产生相对位移。因此,光学运动捕捉技术作为一种非侵入式的测评方法,其主要误差来自贴点时对骨标记的触诊误差和软组织移动误差<sup>[9]</sup>。侵入式的测量方法使用骨钉,把标记物直接固定在骨头上以精确测量骨骼运动<sup>[31]</sup>,但使受试者处于感染的风险中,故侵入式测量方法在活体运动学测量的应用受到限制。另外,逆向动力学计算得到的关节力和力矩均为净力、净力矩,是考虑地面反作用力和惯性力联合作用的结果。而进行逆向动力学计算时,由于无法测量到拮抗肌肉收缩的内力,关节净力会小于实际关节力<sup>[32]</sup>。

## 2 双平面透视追踪技术

### 2.1 双平面透视追踪的原理

通过 CT 或 MRI 获得的静态图像建立 ACLR 术后的膝关节 3D 模型,基于获取的 2D 动态 X 线透视影像,构建 3D 模型与 2D 影像的投射关系<sup>[33]</sup>,使用优化手段进行双平面的 3D 模型与 2D 影像比对,实现模型与影像的注册,在重建运动模型的基础上测量活体膝关节功能性活动时的 3D 运动参数。

### 2.2 双平面透视追踪在 ACLR 术后运动分析的应用

相比于光学运动捕捉技术,该方法避免软组织移动带来的实验误差,不但可以直接测量活体自然功能性运动时胫股关节运动学参数,还可以测量髌骨运动学参数,是目前 ACLR 术后较为精准的运动

分析方法。双平面透视追踪技术可用于 ACLR 术后的运动分析<sup>[34]</sup>,包括步行、跑步、下蹲、非负重屈伸、上下楼梯及弓箭步等,临床上主要用于评估 ACLR 术后的疗效。研究显示,ACLR 术不能恢复膝关节正常的运动学,尤其是在功能性活动期间<sup>[35]</sup>。Scott 等<sup>[34]</sup>研究发现,6 例单侧 ACLR 术后的患者在下坡跑时,均表现为患侧胫骨外旋和内收角增加,这些异常的运动学可能会导致 ACLR 术后长期的关节退化。由于膝关节旋转的运动学改变可能会对关节退化产生影响,旋转运动学已经成为 ACLR 术后重要的考虑因素。Hoshino 等<sup>[36]</sup>探讨双束和单束重建 ACL 术对术后膝关节运动学和关节接触机制恢复的影响,在跑步期间对比双侧胫骨的前移距离、轴向旋转角度和胫骨相对于股骨的内外滑动距离,双束和单束重建术后均表现为重建侧胫骨前移减小,轴向旋转角度增加以及胫骨向内滑动距离增加。因此,无论是单束还是双束重建 ACL 术,均不能恢复膝关节正常的运动学或关节接触机制<sup>[37]</sup>。更严重的是,异常的运动学可能会导致术后回归活动的水平降低、ACL 二次损伤的风险增高以及早发性 OA 发展<sup>[38]</sup>。研究认为,手术技术影响 ACLR 术后下肢正常的运动学恢复。双束重建 ACL 术在恢复膝关节前向稳定性及控制胫骨内、外旋方面均好于单束重建术<sup>[39]</sup>。高屈曲运动过程中膝关节的稳定性降低,Kidera 等<sup>[40]</sup>利用双平面透视追踪技术比较双束重建 ACL 术前后患者下蹲时的运动参数,发现术后患者下蹲时胫骨的前后稳定性和旋转稳定性得到很大提高。双束重建 ACL 术被证明对术后回归日常生活和重返受伤前的活动产生积极的效果。这些研究结果能够指导骨科医生进一步优化 ACLR 的手术过程,恢复正常的运动学和关节接触机制。

### 2.3 双平面透视追踪的局限性

双平面透视追踪技术操作过程较为复杂,后续数据处理工作量大,测试费用昂贵,且考虑到 X 射线的放射剂量,不宜多次重复测量。检测易受成像空间的限制,仅可测量膝关节的小范围活动(如步行、上下楼梯等),当膝关节进行大范围活动(如跳跃、侧切跑等)时,X 射线系统难以捕捉整个运动过程。此外,受限于成像平面的尺寸,该技术目前只能应用于局部关节运动的测量,无法同时观测全身关节运动。

### 3 结论

步态分析的研究结论支持 ACLR 术后膝关节能在一定程度上恢复膝关节的功能,但由于实验时间不同、实验设计缺陷和个别研究的统计学缺陷,所获研究的结果不一,尤其是关于步态周期中膝关节屈曲角度、屈曲力矩以及内收力矩的变化存在很多争议。ACLR 术后长期随访(2~8年)发现,患者的步态模式并没有随时间推移正常化,提示术后长期(6~12月)个性化康复的重要性<sup>[41]</sup>。单腿跳和单腿下蹲是临床常见的用于评估 ACLR 术后运动质量的功能性任务。与健膝相比,单腿跳跃落地时患膝屈曲角度减小、单腿下蹲时患膝伸膝力矩减少,ACLR 术后双膝运动学的不对称性增加了 ACL 二次损伤的风险。临床研究表明,无论选择何种移植物和术式重建,术后膝关节在功能任务中仍表现出异常的运动学特征。恢复膝关节的旋转稳定性是临床 ACLR 手术最大的挑战之一。由于运动分析设备和实验方案的不同,目前仍没有确凿证据可以证明双束重建术在膝关节旋转稳定性恢复方面优于单束重建术。有研究报道了腓绳肌腱移植和髌腱移植术后功能性任务中(如下坡跑、上下楼梯)膝关节能够恢复正常的前后向稳定性,但旋转稳定性仍存在异常,术后膝关节生物力学的改变与早发性 OA 的关系仍需进一步研究。

### 4 未来研究方向

光学运动捕捉系统能完成精确的全身动态运动测量,但受到软组织移动误差的限制;双平面透视追踪能精确测量骨骼运动,但设备昂贵、操作繁琐、后续数据处理耗时长、可观测范围小,限制了 ACLR 术后运动分析的应用。未来的运动分析系统需要更便携、易操作、数据易处理,可用于临床定期监测 ACLR 术后的治疗进展,实现从研究到临床应用的落地转化。未来 ACLR 术后运动分析可在以下几个研究方向开展:① 联合光学运动捕捉技术和双平面透视追踪技术,可以实现临床与研究的紧密结合;② 根据异常的运动学特征制定针对性的康复方案,探讨个性化康复对运动分析结果的影响;③ 进一步研究 ACLR 术后膝关节生物力学的长期变化与其与继发性损伤和早发性 OA 的关系,结合临床中

所遇问题,帮助临床医生和物理治疗师制定更有效的干预措施。

### 参考文献:

- [ 1 ] 白皓宇,王逍遥,宋晓晖,等. 胫骨平台后倾角在前交叉韧带损伤中的研究进展[J]. 现代医学, 2018, 28(5): 86-93.
- [ 2 ] SANDERS JO, BROWN GA, MURRAY J, *et al.* Treatment of anterior cruciate ligament injuries [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2016, 24(8): 181-189.
- [ 3 ] ARDERN CL, TAYLOR NF, FELLER JA, *et al.* Sports participation 2 years after anterior cruciate ligament reconstruction in athletes who had not returned to sport at 1 year: A prospective follow-up of physical function and psychological factors in 122 athletes [J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43(4): 848-863.
- [ 4 ] NEUSEL E, MAIBAUM S, ROMPE G. Five-year results of conservatively treated tears of the anterior cruciate ligament [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 1996, 115(6): 332-336.
- [ 5 ] JOSEPH G, NEVITT MC, SINGH N, *et al.* Early knee osteoarthritis is evident one year following anterior cruciate ligament reconstruction: A magnetic resonance imaging evaluation [J]. *Arthritis Rheum*, 2015, 67(4): 946-955.
- [ 6 ] CHAUDHARI MW, BRIANT PL, BEVILL SL, *et al.* Knee kinematics, cartilage morphology, and osteoarthritis after ACL injury [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2008, 40(2): 215-222.
- [ 7 ] 谭菁华,晏怡果. 光学式三维运动捕捉在运动系统相关研究中的应用[J]. 海南医学, 2018, 14(7): 206-212.
- [ 8 ] WINTER DA, PATLA AE, FRANK JS, *et al.* Biomechanical walking pattern changes in the fit and healthy elderly [J]. *Phys Ther*, 1990, 70(6): 340-347.
- [ 9 ] 蔡宗远,王少白,李国安. 人体运动分析的发展与应用回顾 [J]. 医用生物力学, 2016, 31(4): 362-368.  
CAI ZY, WANG SB, LI GA. Human motion analysis: A review of its development and applications [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(4): 362-368.
- [ 10 ] YEUNG MY, FU SC, CHUA EN, *et al.* Use of a portable motion analysis system for knee dynamic stability assessment in anterior cruciate ligament deficiency during single-legged hop landing [J]. *Asia Pac J Sports Med Arthrosc Rehabil Technol*, 2016, 5(6): 6-12.
- [ 11 ] SHAOBAI W, YU Z, HUANG WH, *et al.* Clinical significance of a novel knee joint stability assessment system for evaluating anterior cruciate ligament deficient knees [J]. *Orthop Surg*, 2016, 8(1): 75-80.
- [ 12 ] DI SS, LOGERSTEDT D, GARDINIER ES, *et al.* Gait patterns differ between ACL-reconstructed athletes who pass

- return-to-sport criteria and those who fail [J]. *Am J Sports Med*, 2013, 41(6): 1310-1318.
- [13] EASTLACK ME, AXE MJ, SNYDER ML. Laxity, instability, and functional outcome after ACL injury: Copers versus noncopers [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1999, 31(2): 210-215.
- [14] KNOLL Z, KISS RM, KOCSIS L. Gait adaptation in ACL deficient patients before and after anterior cruciate ligament reconstruction surgery [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2004, 14(3): 287-294.
- [15] HORTOBAGYI T, BARRIER J, TORRY M, *et al.* Gait adaptations before and after anterior cruciate ligament reconstruction surgery [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1997, 29(7): 853-859.
- [16] PATTERSON MR, DELAHUNT E, CAULFIELD B. Peak knee adduction moment during gait in anterior cruciate ligament reconstructed females [J]. *Clin Biomech*, 2014, 29(2): 138-142.
- [17] GAO B, ZHENG N. Alterations in three-dimensional joint kinematics of anterior cruciate ligament-deficient and -reconstructed knees during walking [J]. *Clin Biomech*, 2010, 25(3): 222-229.
- [18] WEBSTER KE, FELLER JA, WITTEWER JE. Longitudinal changes in knee joint biomechanics during level walking following anterior cruciate ligament reconstruction surgery [J]. *Gait Posture*, 2012, 36(2): 167-171.
- [19] XERGIA SA, PAPPAS E, ZAMPELI F, *et al.* Asymmetries in functional hop tests, lower extremity kinematics, and isokinetic strength persist 6 to 9 months following anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2013, 43(3): 154-162.
- [20] MCRAE SM, CHAHAL J, LEITER JR, *et al.* Survey study of members of the Canadian Orthopaedic Association on the natural history and treatment of anterior cruciate ligament injury [J]. *Clin J Sport Med*, 2011, 21(3): 249-256.
- [21] PATERNO MV, RAUH MJ, SCHMITT LC, *et al.* Incidence of second ACL injuries 2 years after primary ACL reconstruction and return to sport [J]. *Am J Sports Med*, 2014, 42(7): 1567-1573.
- [22] ITHURBURN MP, PATERNO MV, FORD KR, *et al.* Young athletes after anterior cruciate ligament reconstruction with single-leg landing asymmetries at the time of return to sport demonstrate decreased knee function 2 years later [J]. *Am J Sports Med*, 2017, 45(1): 1635-1642.
- [23] ROOS HP, SILBERNAGEL KG, THOMEÉ R, *et al.* Knee extension and flexion muscle power after anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon graft or hamstring tendons graft: A cross-sectional comparison 3 years post surgery [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2009, 17(2): 162-169.
- [24] KULOW SM, STIFFLER MR, SMITH MD. Squatting mechanics in people with and without anterior cruciate ligament reconstruction: the influence of graft type [J]. *Am J Sports Med*, 2014, 42(12): 2979-2987.
- [25] RISTANIS S, MORAITI C, STERGIU N, *et al.* Effectiveness of reconstruction of the anterior cruciate ligament with quadrupled hamstrings and bone-patellar tendon-bone autografts: An *in vivo* study comparing tibial internal-external rotation [J]. *Am J Sports Med*, 2007, 35(2): 189-196.
- [26] EITZEN I, HOLM I, RISBERG MA. Preoperative quadriceps strength is a significant predictor of knee function two years after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Br J Sports Med*, 2009, 43(5): 371-376.
- [27] LEITER JR, GOURLAY R, MCRAE S, *et al.* Long-term follow-up of ACL reconstruction with hamstring autograft [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2014, 22(5): 1061-1069.
- [28] KEAYS SL, NEWCOMBE PA, BULLOCK-SAXTON JE, *et al.* Factors involved in the development of osteoarthritis after anterior cruciate ligament surgery [J]. *Am J Sports Med*, 2010, 38(3): 455-463.
- [29] PATRAS K, ZAMPELI F, RISTANIS S, *et al.* Hamstring-dominant strategy of the bone-patellar tendon-bone graft anterior cruciate ligament-reconstructed leg versus quadriceps-dominant strategy of the contralateral intact leg during high-intensity exercise in male athletes [J]. *Arthrosc Surg*, 2012, 28(9): 1262-1270.
- [30] TSAI LC, MCLEAN S, COLLETTI PM, *et al.* Greater muscle co-contraction results in increased tibiofemoral compressive forces in females who have undergone anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *J Orthop Res*, 2012, 30(12): 2007-2014.
- [31] REINSCHMIDT C, AJV DB, NIGG BM, *et al.* Effect of skin movement on the analysis of skeletal knee joint motion during running [J]. *J Biomech*, 1997, 30(7): 729-732.
- [32] TENG HL, WU D, SU F, *et al.* Gait characteristics associated with a greater increase in medial knee cartilage T1ρ and T2 relaxation times in patients undergoing anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Am J Sports Med*, 2017, 36(15): 1772-1778.
- [33] CROSS JA, MCHENRY BD, MOLTHEN R, *et al.* Biplane fluoroscopy for hindfoot motion analysis during gait: A model-based evaluation [J]. *Med Eng Phys*, 2017, 43(13): 118-123.
- [34] SCOTT T, DAVID C, KYLE A, *et al.* Abnormal rotational knee motion during running after anterior cruciate ligament

- reconstruction [J]. *Am J Sports Med*, 2004, 32(4): 975-983.
- [35] FLEISCHLI JE, HUTCHINSON ID, ZHENG NN. Knee moment and shear force are correlated with femoral tunnel orientation after single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Am J Sports Med*, 2014, 42(10): 2377-2385.
- [36] HOSHINO Y, FU FH, IRRGANG JJ, *et al.* Can joint contact dynamics be restored by anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2013, 471(9): 2924-2931.
- [37] ARDERN CL, TAYLOR NF, FELLER JA, *et al.* A systematic review of the psychological factors associated with returning to sport following injury [J]. *Br J Sports Med*, 2013, 47(17): 1120-1126.
- [38] SCHMITT LC, FORD KR, RAUH MJ, *et al.* Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport [J]. *Am J Sports Med*, 2010, 38(10): 1968-1978.
- [39] 王健全, 敖英芳, 于长隆, 等. 单双束重建前交叉韧带的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2008, 23(2): 107-112.  
WANG JQ, AO YF, YU CL, *et al.* Biomechanical study of knee following anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *J Med Biomech*, 2008, 23(2): 107-112.
- [40] KIDERA K, YONEKURA A, MIYAJI T, *et al.* Double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction improves tibial rotational instability: Analysis of squatting motion using a 2D/3D registration technique [J]. *J Orthop Surg (Hong Kong)*, 2018, 13(1): 111-118.
- [41] CHU CR, ASAY JL, ANDRIACCHI TP. Longitudinal changes in knee gait mechanics between 2 and 8 years after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *J Orthop Res*, 2018, 36(5): 1478-1486.

(上接第 239 页)

- [15] TABU H, ASO T, MATSUHASHI M, *et al.* Parkinson's disease patients showed delayed awareness of motor intention [J]. *Neurosci Res*, 2015, 95(Supplement): 74-77.
- [16] LATASH ML, GOODMAN SR. An equilibrium-point model of electromyographic patterns during single-joint movements based on experimentally reconstructed control signals [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 1994, 4(4): 230-241.
- [17] PEADEN AW, CHARLES SK. Dynamics of wrist and forearm rotations [J]. *J Biomech*, 2014, 47(11): 2779-2785.
- [18] 李建峰, 肖焕波, 李海雷, 等. 拇指腕掌关节韧带的解剖力学分析及临床意义[J]. *医用生物力学*, 2017, 32(3): 284-287.
- LI JF, XIAO HB, LI HL, *et al.* Analysis on anatomy and biomechanics of ligaments in carpometacarpal joints of the thumb and clinical significance [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(3): 284-287.
- [19] DIDERIKSEN JL, FARINA D, BAEKGAARD M, *et al.* An integrative model of motor unit activity during sustained submaximal contractions [J]. *J Appl Physiol*, 2010, 108(6): 1550-1562.
- [20] HELMICH RC, DIRKX MF. Pathophysiology and management of parkinsonian tremor [J]. *Semin Neurol*, 2017, 37(2): 127-134.