

# 前交叉韧带重建术后运动生物力学特征

代瑞兰<sup>1,2</sup>, 敖英芳<sup>1,2\*</sup>

1. 天津体育学院社会体育与健康科学学院, 天津 301600

2. 北京大学第三医院运动医学科, 北京大学运动医学研究所, 运动医学关节伤病北京市重点实验室, 北京 100191

**摘要** 回顾了前交叉韧带重建术(ACLR)后患者膝关节运动学、动力学改变与功能表现, 发现 ACLR 后患者运动生物力学特征改变主要发生在矢状面, 只有在合并其他严重损伤时才会出现冠状面与横断面运动学与动力学改变。ACLR 后患者还会存在本体感觉与神经肌肉控制改变, 提示 ACLR 后患者康复过程中除了常规康复外, 还要额外注重其本体感觉与神经肌肉控制训练。

**关键词** 前交叉韧带重建; 运动生物力学; 神经肌肉控制

膝关节前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)是稳定膝关节的重要结构, 主要限制胫骨过度前移与旋转。ACL 损伤是最常见的膝关节韧带损伤, 包括接触性与非接触性损伤<sup>[1]</sup>。在体育运动中尤其是落地时急停与加速旋转、暴力碰撞等动作, 是膝关节常见的损伤机制<sup>[2]</sup>。ACL 断裂后会诱发膝关节生物力学特征改变<sup>[3]</sup>, 造成膝关节结构改变与功能不稳。临床常通过前交叉韧带重建术(anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR)恢复膝关节结构稳定, 术后进行康复训练恢复膝关节功能稳定。

尽管手术帮助患者重建了 ACL, 但术后仍会存在运动学改变与功能缺陷, 如下肢肌肉萎缩、术侧和(或)健侧下肢运动学与动力学改变<sup>[4]</sup>, 主要体现

在手术侧肢体膝关节屈伸角度及峰值、膝关节屈伸力矩及峰值、膝关节内收与外展力矩峰值的改变, 手术侧肢体神经控制与平衡功能减弱等, 造成 ACLR 后下肢的动力学与功能表现不对称。

竞技冰雪运动的受伤率较高, 且多为韧带损伤, 而 ACL 损伤是冰雪运动中最常见的膝关节损伤<sup>[5]</sup>。奥地利滑雪联合会损伤监测系统对 1997—2019 年超过 22 个赛季的雪上项目进行数据分析, 发现 ACL 损伤在膝关节严重损伤中占比达 70.8%, 为雪上项目总重损伤的 48.6%<sup>[6]</sup>。虽然大量文献报道 ACLR 治疗 ACL 严重损伤, 但国内鲜有相关文献对 ACLR 后患者各运动平面的运动学与动力学特征进行整体描述, 本文综述 ACLR 后患者 3 个运动平面的运动学与动力学特征, 以探讨冬奥会运动员

收稿日期: 2021-10-23; 修回日期: 2021-12-07

基金项目: 张家口市科技冬奥技术集成应用与综合示范专项项目(21110006D); 国家自然科学基金青年项目(31900943)

作者简介: 代瑞兰, 博士研究生, 研究方向为运动损伤康复, 电子信箱: 851260247@qq.com; 敖英芳(通信作者), 教授, 研究方向为运动创伤与康复基础临床, 电子信箱: yingfang.ao@vip.sina.com

引用格式: 代瑞兰, 敖英芳. 前交叉韧带重建术后运动生物力学特征[J]. 科技导报, 2022, 40(2): 27-35; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.02.004

预防 ACL 损伤与 ACLR 后康复的措施。

## 1 前交叉韧带解剖与生物力学特点

ACL 是稳定膝关节的重要结构,包括前内侧束 (AM)、中间束 (I) 与后外侧束 (PL) (图 1)<sup>[7]</sup>。ACL 附着在胫骨,附着物形成一个指向后方的三角形。前内侧束插入胫骨髁间隆起的内侧,并形成该三角形的内侧角,附着于股骨的后方和上方。中间束附着在股骨上的后外侧束和前内侧束之间,在隆起的中线和外侧,形成三角形附着的外侧角。后外侧束表示三角形的后方顶端,附着在外侧髁的前方和下方,髁间隆起的中线侧面,在中间束最外侧附着点的侧面,股骨外侧髁的内表面。其中,前内侧束和后外侧束是主要功能束。当膝关节伸展时,后外侧束收紧,前内侧束适度松弛。当膝关节弯曲时,ACL 的股骨附着点变得更加水平,导致前内侧束收紧,后外侧束松弛,其主要作用是限制胫骨过度前移与旋转 (图 2)<sup>[7]</sup>。

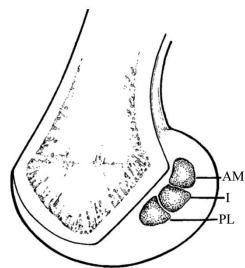


图 1 股骨前交叉韧带附着点的位置

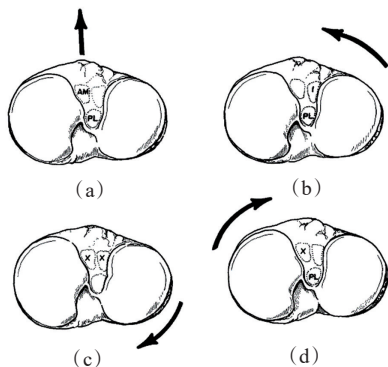
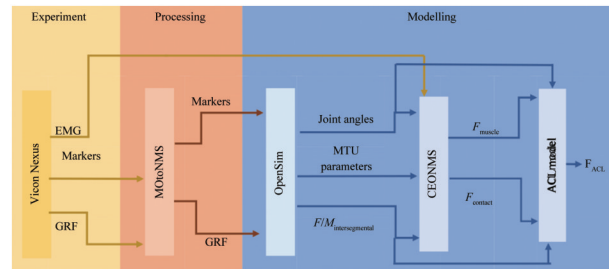


图 2 前交叉韧带在旋转不稳定中各束功能

运动时,ACL 所受力主要是由于膝关节肌群在矢状面产生。Nasseri 等发现在侧向跳跃落地过程

中,ACL 的大部分力通过矢状面传递,其次通过冠状面和横断面传递 (图 3、图 4)<sup>[8]</sup>。



运动实验数据采集 (黄色)、数据处理 (橙色)、肌电驱动的肌肉骨骼建模和 ACL 受力计算 (蓝色) 框块表示处理工具;箭头表示每个工具的输入、输出;ACL 为前交叉韧带;EMG 为肌电图;GRF 为地面反力;MTU 为肌肉募集单位

图 3 ACL 力计算流程示意

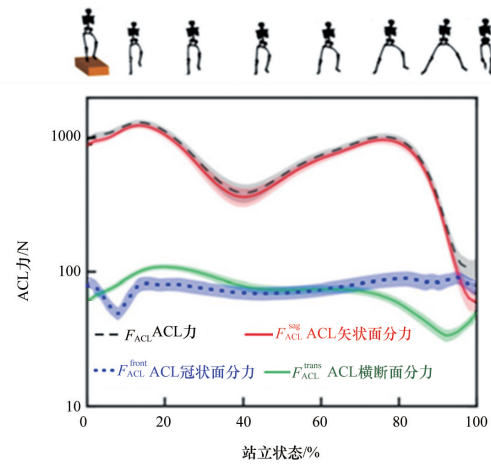


图 4 起跳后落地阶段 ACL 受力

Nasseri 等发现侧跳落地时,ACL 力有两个峰值,分别出现在足地期的第 13% 和 75%,第一个峰值出现在最初脚—地接触后不久的  $62.9 \pm 17.3$  ms。在矢状面上,肌肉是 ACL 力的主要贡献者,通过肌肉直接的前、后方力线将胫骨拉向前方,施加后面倾斜的胫骨接触力来产生 ACL 力。在冠状面上,肌肉产生膝关节外翻力矩,部分受到膝关节韧带的抵抗,但幅度较小。在横断面上,肌肉围绕膝关节产生的外旋力矩主要由膝关节韧带吸收抵抗。ACL 只要在附着点的足迹内活动,ACL 束就会随着膝关节的伸展而平行伸长,不会对 ACL 造成损害<sup>[9]</sup>。但当受到瞬间作用力尤其是扭转作用力过大时,就有可能造成膝关节 ACL 断裂。

## 2 前交叉韧带重建后下肢生物力学特点

ACL断裂是多重因素共同作用的结果。在体育运动中尤其是落地时急停与加速旋转、暴力碰撞等动作时,动态膝关节屈曲、外翻,对ACL产生显著的瞬时拉力,造成ACL断裂<sup>[10]</sup>。ACL断裂后常行ACLR,但术后会残存下肢肌群力量下降,在走、跑、跳等日常动作中,下肢生物力学常发生改变。研究ACLR后动态过程中膝关节运动学和动力学特征,对纠正ACLR后患者的步态异常及下肢运动学与动力学不对称、指导ACLR后患者康复,使其尽早重返运动很有必要。

### 2.1 矢状面运动学与动力学特点

膝关节在矢状面主要做屈伸运动。运动学通常测量关节屈曲、伸展角度及峰值,关节力矩及峰值,常与肌电、等速肌力测试等结合测得肌肉力量与激活顺序来显示膝关节活动度、肌肉募集水平与激活功能等。

ACLR后,常通过步态表现特点分析患者术后下肢生物力学,通过对比跳跃距离(单腿跳、双腿跳、三连跳)对称性及下肢肌肉动力学对称性来判定ACLR患者是否可以重返运动<sup>[11]</sup>。一般将手术侧与非手术侧单腿跳跃距离对称性达到90%以上作为重返运动的客观标准。Peebles等研究发现,ACLR后3.2~9.7个月的患者在做下蹲与落地任务时,会主观性卸载手术侧膝关节负荷,将更多的负荷转移到非手术侧肢体。在跳跃和下蹲任务中,非手术侧肢体最大伸膝力矩、最大垂直地面反作用力均大于手术侧肢体,但膝关节最大外展角度与活动范围没有明显的肢体间差异<sup>[12]</sup>。Kotsifaki等也发现ACLR后9.5±2.7个月的患者在起跳与落地时,下肢肌群力量明显不对称<sup>[13]</sup>,躯体产生髌关节与踝关节代偿模式,手术侧肢体在起跳后落地时,初始阶段表现出更多的髌关节屈曲和踝关节跖屈,髌关节屈曲角度峰值、骨盆前倾角度峰值和躯干屈曲角度峰值均高于非手术侧和对照组,膝关节屈曲角度峰值低于健侧及对照组。虽然ACLR患者9个月之后跳跃测试满足重返运动的跳跃距离标准,但患者手术侧与非手术侧在起跳及落地时段,双侧下肢的股四

头肌肌肉力量、膝关节做功与膝关节屈曲角度峰值存在明显的不对称性。这可能是身体的一种自我保护性机制,通过代偿将手术侧负荷转移到非手术侧,避免ACL再次损伤,这可能与担心再伤的心理因素有关<sup>[13]</sup>。

Shi等利用三维运动捕捉系统与表面肌电同步采集ACLR后10个月内患者步行周期过程中动态力学与肌电数据,发现与非手术侧相比,手术侧关节屈曲角度峰值与膝关节屈、伸角度范围均显著减小,支撑相髌关节最小屈曲角度较小,但支撑期髌关节外旋角度显著增加。手术侧支撑期股直肌、股二头肌与半腱肌在摆动前期的激活均大于非手术侧,患者表现出明显的步态僵硬<sup>[14]</sup>。在动态任务中,Stone等发现ACLR患者在早期步态周期中,出现肢体偏移与双支撑相时间、步长的不对称,后期会出现运动适应,不对称性降低<sup>[15]</sup>,但步态过程中仍存在姿势控制异常。Capin等假设ACLR后下肢运动不对称性会随着时间的推移而改善,设计了随机对照试验,对纳入受试者术后进行二级预防训练与干扰训练(一种特殊类型的神经肌肉训练,旨在改善神经肌肉激活模式,促进膝关节动态稳定),观察术后干扰训练对患者步行过程中生物力学(肌肉力量及敏感性)的影响,发现两组受试者手术侧膝关节屈曲角度峰值、步行过程中患侧髌关节与髌关节矢状面发生的偏移,在训练前、后1年均比健侧较差,无论是二级预防训练还是干扰训练均未改善ACLR后1~2年患者步行力学不稳特征<sup>[16]</sup>。ACLR后膝关节生物力学的变化与单束、双束重建也有不同。在膝关节屈曲0°至30°和0°至90°时,双束ACL重建后的接触应力高于单束ACL重建<sup>[17]</sup>。这些研究均表明,ACLR后一段时间内患者下肢生物力学与运动学特征均未完全恢复。但是,Georgoulis等发现,ACLR后6~12个月,ACLR和对照组之间的膝关节屈曲角度峰值没有显著差异<sup>[18]</sup>,表明ACLR患者的下肢表现还存在时间差异。

ACLR术后主观性卸载手术侧负载以保护移植植物,如果给予患者提供实时的视觉反馈,可以改善ACLR患者早期的下肢负荷不对称。也有研究发现,ACLR患者早期在手术侧表现出较低的膝关

节屈曲与伸展角度及较低的内收角度与内收力矩,但中期 ACLR 组与对侧或对照组相比并未呈现任何步态差异,晚期时, ACLR 组与对照组相比, ACLR 组矢状面关节负荷较小,手术侧与非手术侧相比,冠状面关节负荷较大。这可能是患者进行自发步态力学适应,也表明 ACLR 后不同时间阶段患者的步态生物力学表现不同<sup>[19]</sup>。Chen 等用核磁共振(magnetic resonance imaging, MRI)图像基于样条半自动分割算法,用 Matlab 程序计算 ACL 损伤和非损伤膝关节的胫股接触面积和前后轴心位置,发现与相应的健侧膝关节相比,受伤膝关节在胫骨内侧表面接触区明显缩小,位置更靠后。这些差异在 ACLR 后 6 个月持续存在<sup>[20]</sup>。Shi 等发现,手术侧与非手术侧相比,复杂行走任务时,在支撑相中、末期膝关节伸膝力矩峰值明显小于简单行走任务时的结果,患者双下肢支撑相中期膝关节外展力矩峰值也明显小于复杂任务下膝关节外展力矩峰值<sup>[14]</sup>。但是 Karimi 等发现, ACLR 后 6 个月手术侧膝关节屈膝、伸膝力矩与非手术侧没有差异,但与健康对照组相比有差异, ACLR 后关节屈曲与伸膝力矩峰值均小于健康对照组<sup>[21]</sup>。

有研究指出, ACLR 后 8 个月膝关节屈曲角度较健康对照组无显著差异,可能是随着时间的推移 ACLR 患者逐渐出现步态适应<sup>[21-22]</sup>。但也有研究表明, ACLR 后随着时间的增加,患者手术侧肢体与健康对照组肢体的生物力学差异并未改善,反而增加。表明 ACLR 后若不进行积极干预,双下肢的生物力学差异会进一步扩大<sup>[23]</sup>。Zabala 等发现 ACLR 后 22~36 个月患者手术侧膝关节屈曲峰值均小于非手术侧膝关节屈曲与伸展角度峰值<sup>[24]</sup>。 ACLR 后手术侧膝关节屈伸力矩相对减小,一方面,可能与 ACLR 后运动强度与运动频率降低,导致下肢肌肉萎缩、肌肉力量下降有关;另一方面,可能同手术侧关节运动学改变的原因相似,即 ACLR 后患者的自我保护意识,对 ACL 再伤的恐惧导致其主动降低膝关节活动范围,以降低患者 ACL 再次损伤的风险<sup>[13,25]</sup>。

## 2.2 冠状面运动学与动力学特点

膝关节在冠状面主要做内收(内翻)、外展(外

翻)运动。运动学常测量关节内收(内翻)与外展(外翻)角度,垂直地面反作用力、膝关节伸膝力矩及峰值等。黄红拾等采用三维动态分析评价了 ACL 断裂患者膝关节支撑相足跟触地、前足触地、全足支撑与前足蹬离 4 个阶段中手术前、后足底压力的动态变化,发现 ACLR 后双足支撑阶段占支撑相的百分比明显提高。这表明 ACLR 可显著改善足跟着地阶段足底压力双侧不对称性<sup>[26]</sup>,但未研究摆动相双侧足底压力的动态生物力学特点。Patterson 等发现 ACLR 后手术侧膝关节内收、外展角度与内收、外展力矩较非手术侧及健康对照组相比均无显著性差异<sup>[27]</sup>。但 Webster 等前期发现与健康对照组相比, ACLR 后 10 个月患者膝关节内收(内翻)角度较健康对照组显著降低,但是手术侧膝关节内收力矩与非手术侧无明显差异<sup>[28]</sup>, Webster 等后期发现不同类型的移植物膝关节内收力矩存在显著差异。 ACLR 后 9~11 个月腘绳肌腱组中较小的内收力矩与患者步行时膝内翻角度较少有关,在髌腱组中,较小的膝内收力矩与患者步行时垂直地面反作用力下降有关。不同的因素导致了膝关节内收力矩的降低。腘绳肌腱组显著减少了内翻角度,减少冠状面杠杆臂长,进而降低膝关节内收力矩的大小。在髌腱组,膝关节内收力矩的减少可能是由于垂直地面反作用力减少所致<sup>[29]</sup>。

## 2.3 横断面运动学与动力学特点

正常膝关节在横断面活动度几乎为 0,当合并较重骨关节炎及半月板损伤等严重异常时,可能会存在膝关节横断面的运动学差异<sup>[30]</sup>。Ren 等发现,与健康对照组相比, ACL 断裂合并半月板后角损伤的患者在步行周期摆动前阶段,胫骨外旋角度明显增加,站立末期旋转力矩明显降低,胫骨外旋力矩无明显变化<sup>[31]</sup>,在站立末期表现为伸展不足、胫骨外旋增加、伸展和内旋力矩降低,呈“僵硬步态”和“轴移步态”相结合的模式。在步行站立阶段, ACL 断裂组和 ACL 断裂合并半月板后角撕裂的患者膝关节步态参数没有显著差异。内侧半月板后角撕裂对 ACL 断裂膝关节站立行走时的步态模式没有显著影响。内侧半月板损伤增加了 ACL 断裂膝关节股骨相对于胫骨的前后平移,这是因为半月板通

过前角和后角固定在胫骨髁间区域,而内侧半月板则起到楔形保护作用,以控制胫骨的稳定性。膝关节屈曲 $60^{\circ}$ 前的活动范围对半月板移位影响不大,当屈曲角度大于 $60^{\circ}$ 则使半月板向后移位。由于半月板后角的活动度低于内侧半月板前角<sup>[32]</sup>,增加的平移可能会在半月板上施加有害应力,患者出现“轴移避免”步态是为了避免在站立末期阶段将膝关节置于可能导致前外侧旋转不稳定的位置。Ren等设计了试验,发现与健康对照组相比,ACL断裂组与ACL断裂合并半月板前角撕裂组,矢状面膝关节角度和力矩不对称性均显著高于对照组,且两组均出现膝关节伸展不足状态。此外,ACL断裂与ACL断裂合并半月板前角损伤组的膝关节屈曲角度和旋转力矩也出现不对称性<sup>[33]</sup>。两组手术侧腿由于外旋肌肉引起的力矩不平衡而表现出较低的外旋力矩和内旋力矩,但与对照组相比,ACL断裂组患者在行走过程中股二头肌的活动度更高,活动持续时间更长,这可能是旋转力矩减少的原因。两组膝关节伸展不足可能是一种保护策略,以避免ACL缺失的情况下胫骨过度前移位。Huang等发现,ACLR 2年后只有在合并严重的骨关节炎及半月板损伤等其他严重膝关节疾病时,才会出现下肢关节旋转力矩的改变<sup>[34]</sup>。ACLR后未合并其他严重膝关节病变时,膝关节横断面运动几乎为0,但Chen等发现膝关节前外侧重建增强的双束ACLR在弓步运动过程中导致膝关节前外侧重度过度<sup>[35]</sup>。

#### 2.4 下肢肌肉力量与激活

ACLR后,股四头肌的力量与激活直接影响下肢生物力学。ACLR后,患者常存在股四头肌肌肉萎缩,这受多种因素影响,包括肌肉体积减少、纤维类型组成的变化、神经兴奋和传导速度降低、肌肉脂肪含量增加、细胞外基质中的纤维组织增加等。而肌肉萎缩直接导致了术后股四头肌力量下降。此外,ACLR股四头肌神经激活受到影响,神经驱动减少,兴奋性和抑制性突触输入发生变化<sup>[36-37]</sup>。Rebel等发现,在跳跃任务中,与健康对照组相比,ACLR后1~3个月患者表现出明显的术侧股四头肌肌肉活动减少与激活延迟<sup>[38]</sup>,肌肉激活长期缺陷会损

害膝关节的力学性能,最终导致骨关节炎的发生。女性行ACLR后,下肢不对称的运动模式无论是否介入训练均会持续很长时间才会恢复,女性ACLR患者更应该注重股四头肌力量训练<sup>[39]</sup>。此外,Pratt等研究发现,ACLR后6个月时,手术侧膝关节屈曲幅度明显小于未手术侧,与股四头肌力量无关;在9个月时,只有股四头肌力量较低组表现出类似的肢间差异;在12个月时,无论股四头肌力量如何,膝关节屈曲幅度没有显著的肢间差异。这些研究表明,ACLR后康复期间1年内,应进行股四头肌力量训练与膝关节屈曲练习来改善ACLR后患者膝关节屈曲角度不对称<sup>[40]</sup>。Tourville等从细胞水平证实,ACLR后6个月随访时,患者下肢肌肉无力与ACLR后3周骨骼肌纤维功能缺陷有关,ACLR早期细胞收缩功能障碍,可能导致整体肌肉力量和患者运动与神经功能下降<sup>[41]</sup>。

ACLR后随着股四头肌的力量增强,ACLR患者跳跃测试的运动学指标较之前显著改善,功能表现有所改善,下肢生物力学对称性也逐步增强,股四头肌力量改善对下肢功能的影响在ACLR后2年仍持续存在<sup>[42]</sup>。Curran等建议力量评估应纳入ACLR恢复活动的标准,有必要关注康复期间恢复力量或新的训练方法,以允许ACLR后更好的力量恢复<sup>[42]</sup>。ACLR后股四头肌力量下降,除失用性肌萎缩原因外,还可能与ACLR后肌肉募集策略受损,肌膜兴奋性降低、肌放电率下降有关,提示我们针对ACLR后出现持续的神经肌肉缺陷,关注皮质内和皮质脊髓缺陷的康复策略可能会改善临床结果<sup>[43]</sup>。但是随着ACLR后肢四头肌力量不对称性增加,ACLR患者步态生物力学不对称性并未显著改善,ACLR后期康复过程中,下肢运动学改变可能受多因素影响,力量和性能测试可能不完全是评估患者术后康复效果的适当方法。

研究发现ACLR后数月内除了股四头肌力量减弱外,还存在股四头肌肌肉激活延迟,这是因为ACL经历断裂及重建后,来自ACL受体的传入纤维连接到股四头肌 $\gamma$ 和 $\alpha$ 运动神经元神经冲动减少,导致参与调节肌肉张力和肌肉力量的神经回路中断或受到影响<sup>[44]</sup>。此外,股四头肌还受到直接抑制

性反射的影响,这种反应通过关节囊受体介导,重建前交叉韧带手术对膝关节疼痛、肿胀和囊膜损伤做出抑制反应,这种抑制在 ACLR 后 6 个月依然存在<sup>[37]</sup>。因此,患者在手术后数月甚至数年都会出现持续性股四头肌无力与自主收缩障碍。ACLR 后相关的神经肌肉和感觉改变,不仅造成动态任务时股四头肌肌肉激活延迟,影响股四头肌的力量,而且影响膝关节肌肉对姿势控制过程中稳定膝关节的能力。即使 ACLR 患者在膝关节受到平衡干扰后屈、伸肌的肌肉激活与肌肉应答开始时间较早,但是下肢仍出现运动不协调,落地时膝关节屈曲角度仍低于健康人群,提示肌肉力量与激活也是 ACLR 后需要关注的方面。

### 2.5 功能表现

作为膝关节的内部稳定结构与机械本体感受器,ACL 断裂后造成膝关节不稳与感觉、平衡功能异常。ACLR 虽然帮助患者恢复了 ACL 结构完整。但术后患者除运动功能外,还存在神经功能改变。Zarzycki 等研究发现,运动员 ACLR 后早期表现出皮层易化不对称,术后恢复运动的患者存在皮质脊髓兴奋性改变,这可能与股四头肌力量改变有关<sup>[13]</sup>。而股四头肌力量的改变,长期情况下会导致神经肌肉控制策略改变<sup>[45]</sup>,可能增加 ACL 再次损伤的风险。Armitano-Lago 等发现 ACLR 的影响并非机械性仅限于关节,ACL 损伤和重建会影响神经机制个体平衡功能、感觉功能、股四头肌收缩的反应时间、神经肌肉控制能力<sup>[46]</sup>,这是因为 ACLR 患者膝关节屈伸时大脑激活模式发生了变化,对侧运动皮质、颞中回与颞下回,躯体感觉区的激活增加,而同侧运动皮质和小脑激活减少,患者从感觉—运动策略转向更多地依赖视觉—运动策略<sup>[47]</sup>。

ACLR 后膝关节动态关节一致性也发生变化,关节一致性是衡量骨关节面两个曲面配合程度的指标,与关节面接触部位、接触面积有关,Nagai 等研究发现 ACLR 后,运动学和动力学的改变影响下肢动态关节一致性,可能潜在地导致关节软骨负荷异常与关节退变<sup>[48]</sup>。Thomson 等发现,足球运动员 ACL 损伤重建术后,尽管进行了为期 9 个月的专业训练,但患者在运动过程中两足的足底压力分布仍出现明显不对称,下肢稳定性也受影响。且这种不

对称性似乎随着 ACLR 组运动员奔跑速度的增加而增加,健康对照组在加速奔跑过程中,这种不对称的趋势与手术组正好相反。这表明 ACLR 后患者下肢力量与本体感觉均受影响<sup>[49]</sup>,Jordan 等研究发现,ACLR 滑雪运动员在起飞早期与后期,起飞和着陆阶段表现出更高的地面反作用力不对称,恢复运动的 ACLR 滑雪运动员受影响的肢体表现出更多的腓绳肌着陆激活优势<sup>[50]</sup>,启示在关注 ACLR 后患者运动学改变之外,还要关注 ACLR 后患者的神经功能改变。此外,Sajovic 等发现不同移植术并不会影响 ACLR 后患者的功能表现,这与之前 Webster 等研究有出入<sup>[51]</sup>,Gupta 等也发现腓绳肌和髌腱移植术 ACLR 后两类患者术后功能表现并无显著差异,但是 7 年后随访发现,髌腱移植术后患者关节炎的患病率更高,故他们建议腓绳肌腱作为前交叉韧带重建的主要移植术选择<sup>[52]</sup>。

## 3 讨论

膝关节 ACLR 虽然重建了 ACL 结构,但还达不到真正的生物学解剖重建,术后仍存在运动学与动力学的改变,在 ACLR 早期较明显,主要分布在矢状面。体现在手术侧肢体地面反作用力、膝关节屈、伸角度范围,屈曲与伸展力矩峰值变化等,且髌、膝关节在术后仍未恢复正常的关节力矩特征,出现双下肢运动学与动力学不对称,进而造成患者步态与姿势控制功能异常<sup>[12, 14, 16, 39-40, 45-46, 53]</sup>。此外,由于 ACL 是膝关节重要的本体感受器,ACLR 后关节本体感觉与平衡功能也受影响,这提示除了关注 ACLR 后患者股四头肌力量训练与运动学、动力学的不对称外,还要关注 ACLR 后患者的本体感觉与神经肌肉控制,以促进 ACLR 患者的皮质功能连接<sup>[51, 54]</sup>,最终服务于 ACLR 后功能改善。可以利用三维运动捕捉与力学分析系统,获得 ACLR 患者运动时的实时信息,在测得数据同时,同步科学指导 ACLR 患者运动。针对 ACLR 后患者出现的平衡与本体感觉功能改变,术后还要介入相应的康复手段以促进 ACLR 患者的功能康复,使其安全重返运动并降低 ACLR 患者 ACL 再次损伤的风险。

## 4 结论

ACL R后运动学与动力学改变主要发生在运动平面的矢状面,当合并严重软骨损伤时才会出现少许冠状面与横断面力学特征改变。此外,ACL R后还会存在本体感觉与神经肌肉控制下降等功能缺陷,提示在平时训练及ACL R后康复过程中,也要注重本体感觉与神经肌肉控制训练。研究ACL R后运动生物力学改变,可为赛场训练与比赛的奥运健儿膝关节损伤预防以及ACL R后康复措施提供一定参考价值。例如在专项教练指导下或通过观看训练比赛视频及时调整运动动作,尽可能减少ACL在冠状面与横断面受力,同时加强平衡维持等神经肌肉控制训练,从而减少ACL再伤几率。

### 参考文献(References)

- [1] Kohn L, Rembeck E, Rauch A. Anterior cruciate ligament injury in adults: Diagnostics and Treatment[J]. *Der Orthopade*, 2020, 49(11): 1013-1028.
- [2] Majewski M, Susanne H, Klaus S. Epidemiology of athletic knee injuries: A 10-year study[J]. *The Knee*, 2006, 13(3): 184-188.
- [3] Huang H, Keijsers N, Horemans H, et al. Anterior cruciate ligament rupture is associated with abnormal and asymmetrical lower limb loading during walking[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2017, 20(5): 432-437.
- [4] Ardern C L, Webster K E, Taylor N F, et al. Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: A systematic review and meta-analysis of the state of play[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2011, 45(7): 596-606.
- [5] Westin M, Alricsson M, Werner S. Injury profile of competitive alpine skiers: A five-year cohort study[J]. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 2012, 20(6): 1175-1181.
- [6] Barth M, Platzer H-P, Giger A, et al. Acute on-snow severe injury events in elite alpine ski racing from 1997 to 2019: The Injury Surveillance System of the Austrian Ski Federation[J]. *British Journal of Sports Medicine*, doi: 2020-102752.
- [7] Norwood L A, Cross M J. Anterior cruciate ligament: Functional anatomy of its bundles in rotatory instabilities [J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 1979, 7(1): 23-26.
- [8] Nasser A, Lloyd D G, Bryant A L, et al. Mechanism of anterior cruciate ligament loading during dynamic motor Tasks[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2021, 53(6): 1235-1244.
- [9] Englander Z A, Wittstein J R, Goode A P, et al. Reconsidering reciprocal length patterns of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament during *in vivo* gait[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2020, 48(8): 1893-1899.
- [10] Willinger L, Athwal K K, Williams A, et al. An anterior cruciate ligament *in vitro* rupture model based on clinical imaging[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2021, 49(9): 2387-2395.
- [11] Kotsifaki A, Whiteley R, van Rossum S, et al. Single leg hop for distance symmetry masks lower limb biomechanics: Time to discuss hop distance as decision criterion for return to sport after ACL reconstruction? [J]. *British Journal of Sports Medicine*, doi: 2020-103677.
- [12] Peebles A T, Williams B, Queen R M. Bilateral squatting mechanics are associated with landing mechanics in anterior cruciate ligament reconstruction patients[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2021, 49(10): 2638-2644.
- [13] Zarzycki R, Failla M, Capin J J, et al. Psychological readiness to return to sport is associated with knee kinematic asymmetry during gait following anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 2018, 48(12): 968-973.
- [14] Shi H, Huang H, Yu Y, et al. Effect of dual task on gait asymmetry in patients after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12057.
- [15] Stone A E, Roper J A, Herman D C, et al. Cognitive performance and locomotor adaptation in persons with anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 2018, 32(6-7): 568-577.
- [16] Capin J J, Zarzycki R, Ito N, et al. Gait mechanics in women of the ACL-SPORTS randomized control trial: Interlimb symmetry improves over time regardless of treatment group[J]. *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, 2019, 37(8): 1743-1753.
- [17] Kim J G, Kang K T, Wang J H. Biomechanical difference between conventional transtibial single-bundle and anatomical transportal double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction using three-dimensional finite element model analysis[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2021, 10(8): 1625.
- [18] Georgoulis A D, Papadonikolakis A, Papageorgiou C D, et al. Three-dimensional tibiofemoral kinematics of the anterior cruciate ligament-deficient and reconstructed knee during walking[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2003, 31(1): 75-79.
- [19] Goetschius J, Hertel J, Saliba S A, et al. Gait biomechanics in anterior cruciate ligament-reconstructed knees at different time frames postsurgery[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2018, 50(11):

- 2209–2216.
- [20] Chen E, Amano K, Padoia V, et al. Longitudinal analysis of tibiofemoral cartilage contact area and position in ACL reconstructed patients[J]. *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, 2018, 36(10): 2718–2727.
- [21] Karimi M, Fatoye F, Mirbod S M, et al. Gait analysis of anterior cruciate ligament reconstructed subjects with a combined tendon obtained from hamstring and peroneus longus[J]. *The Knee*, 2013, 20(6): 526–531.
- [22] Ferber R, Osternig L R, Woollacott M H, et al. Gait mechanics in chronic ACL deficiency and subsequent repair[J]. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 2002, 17(4): 274–285.
- [23] Davis-Wilson H C, Pfeiffer S J, Johnston C D, et al. Bilateral gait 6 and 12 months post-anterior cruciate ligament reconstruction compared with controls[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2020, 52(4): 785–794.
- [24] Zabala M E, Favre J, Scanlan S F, et al. Three-dimensional knee moments of ACL reconstructed and control subjects during gait, stair ascent, and stair descent[J]. *Journal of Biomechanics*, 2013, 46(3): 515–520.
- [25] Paterno M V, Flynn K, Thomas S, et al. Self-reported fear predicts functional performance and second ACL injury after ACL reconstruction and return to sport: A pilot study[J]. *Sports Health*, 2018, 10(3): 228–233.
- [26] 黄红拾, 敖英芳, 郭秦炜, 等. 前交叉韧带重建术影响步行时足底压力时相特征初步研究[J]. *中国运动医学杂志*, 2014, 33(3): 189–192.
- [27] Patterson M R, Delahunt E, Caulfield B. Peak knee adduction moment during gait in anterior cruciate ligament reconstructed females[J]. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 2014, 29(2): 138–142.
- [28] Webster K E, Feller J A. The knee adduction moment in hamstring and patellar tendon anterior cruciate ligament reconstructed knees[J]. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, 2012, 20(11): 2214–2219.
- [29] Webster K E, Wittwer J E, O'Brien J, et al. Gait patterns after anterior cruciate ligament reconstruction are related to graft type[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2005, 33(2): 247–254.
- [30] Butler R J, Barrios J A, Royer T, et al. Frontal-plane gait mechanics in people with medial knee osteoarthritis are different from those in people with lateral knee osteoarthritis[J]. *Physical Therapy*, 2011, 91(8): 1235–1243.
- [31] Ren S, Yu Y, Shi H, et al. Three dimensional knee kinematics and kinetics in ACL-deficient patients with and without medial meniscus posterior horn tear during level walking[J]. *Gait & Posture*, 2018, 66: 26–31.
- [32] Vedi V, Williams A, Tennant S J, et al. Meniscal movement. An in-vivo study using dynamic MRI[J]. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 1999, 81(1): 37–41.
- [33] Ren S, Shi H, Yu Y, et al. Dynamic between-leg differences while walking in anterior cruciate ligament-deficient patients with and without medial meniscal posterior horn tears[J]. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 2020, 8(5): 2325967120919058.
- [34] Huang Y-L, Mulligan C M S, Johnson S T, et al. Explosive quadriceps strength symmetry and landing mechanics limb symmetry after anterior cruciate ligament reconstruction in females[J]. *Journal of Athletic Training*, 2021, 56(8): 912–921.
- [35] Chen J, Wang C, Xu C, et al. Effects of anterolateral structure augmentation on the *in vivo* kinematics of anterior cruciate ligament-reconstructed knees[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2021, 49(3): 656–666.
- [36] Nuccio S, Vecchio A D, Casolo A, et al. Deficit in knee extension strength following anterior cruciate ligament reconstruction is explained by a reduced neural drive to the vasti muscles[J]. *The Journal of Physiology*, 2021, 599(22): 5103–5120.
- [37] Konishi Y, Fukubayashi T, Takeshita D. Mechanism of quadriceps femoris muscle weakness in patients with anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2002, 12(6): 371–375.
- [38] Rebel M, Paessler H H. The effect of knee brace on coordination and neuronal leg muscle control: An early postoperative functional study in anterior cruciate ligament reconstructed patients[J]. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, 2001, 9(5): 272–281.
- [39] Pratt K A, Sigward S M. Detection of knee power deficits following anterior cruciate ligament reconstruction using wearable sensors[J]. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 2018, 48(11): 895–902.
- [40] Ishida T, Samukawa M, Suzuki M, et al. Improvements in asymmetry in knee flexion motion during landing are associated with the postoperative period and quadriceps strength after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Research in Sports Medicine*, 2021, 18: 1–11.
- [41] Tourville T W, Voigt T B, Choquette R H, et al. Skeletal muscle cellular contractile dysfunction after anterior cruciate ligament reconstruction contributes to quadriceps weakness at 6-month follow-up[J]. *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, 2021, doi: 10.1002/jor.25065.
- [42] Curran M T, Bedi A, Kujawa M, et al. A cross-sectional examination of quadriceps strength, biomechanical function, and functional performance from 9 to 24 months after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2020, 48(10): 2438–2446.
- [43] Zarzycki R, Morton S M, Charalambous C C, et al. Corticospinal and intracortical excitability differ between athletes early after ACLR and matched controls[J]. *Journal*

- of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society, 2018, 36(11): 2941–2948.
- [44] Nuccio S, Labanca L, Rocchi J E, et al. Neuromechanical response to passive cyclic loading of the ACL in non-professional soccer players: A pilot study[J]. *Physical Therapy in Sport: Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 2018, 32: 187–193.
- [45] Burland J P, Lepley A S, Frechette L, et al. Protracted alterations in muscle activation strategies and knee mechanics in patients after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction[J]. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, 2020, 28(12): 3766–3772.
- [46] Armitano-Lago C N, Morrison S, Hoch J M, et al. Anterior cruciate ligament reconstructed individuals demonstrate slower reactions during a dynamic postural task [J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2020, 30(8): 1518–1528.
- [47] Lepley A S, Ly M T, Grooms D R, et al. Corticospinal tract structure and excitability in patients with anterior cruciate ligament reconstruction: A DTI and TMS study [J]. *Neuroimage Clinical*, 2020, 25: 102157.
- [48] Nagai K, Gale T, Irrgang J J, et al. Anterior cruciate ligament reconstruction affects tibiofemoral joint congruency during dynamic functional movement[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2018, 46(7): 1566–1574.
- [49] Thomson A, Einarsson E, Hansen C, et al. Marked asymmetry in vertical force (but not contact times) during running in ACL reconstructed athletes <9 months post-surgery despite meeting functional criteria for return to sport[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2018, 21(9): 890–893.
- [50] Jordan M, Aagaard P, Herzog W. Asymmetry and thigh muscle coactivity in fatigued anterior cruciate ligament-reconstructed elite skiers[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2017, 49(1): 11–20.
- [51] Sajovic M, Strahovnik A, Komadina R, et al. The effect of graft choice on functional outcome in anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *International Orthopaedics*, 2008, 32(4): 473–478.
- [52] Gupta R, Kapoor A, Soni A, et al. No difference in outcome of anterior cruciate ligament reconstruction with "bone-patellar tendon-bone versus semitendinosus-gracilis graft with preserved insertion": A randomized clinical trial[J]. *Indian Journal of Orthopaedics*, 2020, 54(5): 665–671.
- [53] Rocchi J E, Labanca L, Laudani L, et al. Timing of muscle activation is altered during single-leg landing tasks after anterior cruciate ligament reconstruction at the time of return to sport[J]. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 2020, 30(6): e186–e193.
- [54] Grooms D R, Page S J, Nichols-Larsen D S, et al. Neuroplasticity associated with anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 2017, 47(3): 180–189.

## Characteristics of sports biomechanics after anterior cruciate ligament reconstruction

DAI Ruilan<sup>1,2</sup>, AO Yingfang<sup>1,2\*</sup>

1. College of Exercise and Health Sciences, Tianjin University of Sport, Tianjin 301600, China

2. Department of Sports Medicine, Peking University Third Hospital. Institute of Sports Medicine of Peking University.

Beijing Key Laboratory of Sports Injuries, Beijing 100191, China

**Abstract** To review the biomechanical characteristics of patients after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR), the kinematics, kinetics changes and the functional performances of the knee joint after ACLR are discussed. The changes of the biomechanical characteristics of the patients after ACLR are mainly observed in the sagittal plane, and the alterations of the frontal plane and the transverse plane are observed only accompanying other severe injuries after ACLR. In addition, for the patients after ACLR, one will also observe alterations in the proprioception and neuromuscular control, suggesting that in addition to the routine rehabilitation, the patients after ACLR should also pay extra attention to their proprioception and neuromuscular control training.

**Keywords** anterior cruciate ligament reconstruction; kinematics; neuromuscular control ●



(责任编辑 傅雪)