

步态再训练对前交叉韧带重建术后患者的生物力学特征影响

洪 靖¹, 黄宇杰², 刘文渊³

(1. 泉州工艺美术职业学院 通识教育学院, 福建 泉州 362500; 2. 暨南大学 生命科学技术学院, 广东 广州 510032; 3. 中南民族大学 体育学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为探寻步态再训练干预是否对前交叉韧带重建患者的生物力学特征产生影响, 以供后续研究与治疗参考。基于 PubMed 等生物医学相关数据库, 检索时间截至 2024 年 12 月, 中文检索词为“前交叉韧带重建, 步态再训练”等, 英文检索词为“gait retraining, ACL reconstruction”等。由 2 名研究者进行文献筛选和质量评价, 以运动学、动力学和步态参数作为结局指标使用统计分析软件进行 Meta 分析。结果表明, 共纳入 7 项研究, 均为高质量文献, 共 256 例患者, 6 个生物力学指标。其中, 膝关节活动范围 ($SMD=0.62$, $95\% CI: 0.36 \sim 0.88$, $p<0.05$)、膝关节冲量 ($SMD=-0.68$, $95\% CI: -1.03 \sim -0.33$, $p<0.05$) 和步行速度 ($SMD=-1.40$, $95\% CI: -1.88 \sim -0.92$, $p<0.05$) 在步态再训练干预后均出现显著改善。但是, 膝关节力矩、步长和步频的变化均不具有统计学意义 ($p>0.05$)。因此, 步态再训练可以作为前交叉韧带重建术后患者的康复治疗手段, 但需要根据患者的不同情况进行个体化定制计划, 才能最大限度地改善其运动能力与生活质量。

关键词: 生物力学; 步态再训练; 前交叉韧带重建术; 膝关节; 运动数据科学

中图分类号: G804.6 文献标识码: A 文章编号: 1003-983X(2025)06-0055-06

DOI: 10.20185/j.cnki.1003-983X.2025.06.009

Effects of Gait Retraining on Biomechanical Characteristics of Patients After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Surgery

HONG Jing¹, HUANG Yujie², LIU Wenyan³

(1. Quanzhou Arts and Crafts Vocational College, General Education College, Quanzhou Fujian, 362500; 2. Jinan University, College of Life Science and Technology, Guangzhou Guangdong, 510032; 3. Central South University for Nationalities, College of Physical Education and Sports, Wuhan Hubei, 430074)

Abstract: To explore whether gait retraining intervention has an effect on the biomechanical characteristics of patients with anterior cruciate ligament reconstruction for subsequent research and treatment. A search of biomedical databases, including PubMed, was performed up to December 2024. The search terms used were "anterior cruciate ligament reconstruction, gait retraining" in Chinese and "gait retraining, ACL reconstruction" in English. Two researchers then performed literature screening and quality assessment. Subsequently, meta-analysis was performed using statistical analysis software, with kinematics, kinetics, and gait parameters serving as outcome indicators. The results showed that a total of 7 studies were included and all 7 were high quality literature with a total of 256 patients and 6 biomechanical indicators. Among them, knee range of motion ($SMD=0.62$, $95\% CI: 0.36 \sim 0.88$, $p<0.05$), knee impulse ($SMD=-0.68$, $95\% CI: -1.03 \sim -0.33$, $p<0.05$), and walking speed ($SMD=-1.40$, $95\% CI: -1.88 \sim -0.92$, $p<0.05$) showed significant improvement in gait retraining. All showed significant improvement after the intervention. However, the changes in knee moments, step length and step frequency were not statistically significant ($p>0.05$). Therefore, gait retraining can be used as a rehabilitation therapy for patients after ACL reconstruction, but individualized and customized programs are needed to maximize the improvement of their exercise capacity and quality of life.

Keywords: biomechanics; gait retraining; anterior cruciate ligament reconstruction; knee; sports data science

前交叉韧带重建手术 (Anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR) 是一种常见的骨科手术, 其流行病学研究表明发病率高达 0.7%^[1]。术后患者会出现肌肉力量下降^[2]、运动功能受限^[3]和继发性疾病^[4-5], 特别是膝骨关节炎和二次断裂等并发症。因此, 对 ACLR 患者术后的康复与指导干预尤其重要。然而, 由于 ACLR 患者在功能上存在障碍且膝关节长期承

收稿日期: 2025-06-10

第一作者简介: 洪 靖 (1999~), 男, 福建南安人, 硕士, 助教, 研究方向: 运动生物力学, E-mail: vchj15@163.com。

受较高的负荷,超过六成的患者术后表现出不良的地面反作用力变化与膝关节僵硬组合而成的异常步态^[6-8]。降低患者术后出现的步态非对称性是一个挑战,传统的术后康复似乎无法满足其需求,亟需新的手段与方法供医师与康复学家进行有效干预。

运动数据科学为解决长期存在的临床问题提供了创新的方法^[9-10]。例如步态再训练,这是一种通过强化肌肉、改善神经发育技术和跑步机训练等改善异常步态的生物力学方法^[11]。这类方法需要大量异构数据的支持,以整合神经运动控制、感觉信息、和环境约束,实现协调的运动技能学习与控制^[12-14]。步态再训练最早应用于脑卒中后遗症患者^[15],随后被广泛用于解决肌骨系统损伤相关的问题^[16-17]。尽管如此,目前尚无定论关于步态再训练在 ACLR 患者康复治疗中的有效性,因此,旨在表征 ACLR 患者在步态干预过程中的力学响应,是值得评估该手段作为术后护理计划一部分的重要原因。本研究系统归纳了 ACLR 患者在步态再训练干预下的生物力学特征变化,为评估 ACLR 患者潜在的康复治疗手段、路径及其益处提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

经前期调研发现 2024 年前未出现符合研究的相关文献。因此,使用 PubMed、Web of Science、Scopus、Embase、中国知网数据库、维普数据库和万方数据库对 2004 年至 2024 年 12 月的现有文献进行检索,语种仅包括中、英文。

中文检索策略:

#1 前交叉韧带 OR 前交叉韧带重建
#2 步态再训练 OR 步态训练 OR 步态
#3 #1 AND #2

英文检索策略:

#1 anterior cruciate ligament OR ACL reconstruction
#2 gait retraining OR gait training OR gait
#3 #1 AND #2

1.2 纳入和排除标准

仅纳入以中文和英文撰写并设计的原始研究文献,对所有检索的文献进行标题和摘要的阅读,并筛选出纳入标准的文献,在全文阅读之后按纳入与排除标准进行筛选。纳入标准内容包括:①参与者是诊断为 ACL 重建患者,包括男性和女性;②至少有一组患者进行了步态再训练;③结局指标中需包含生物力学参数。排除标准内容包括:①所有非中、英文文献,综述、Meta 分析、会议摘要、重复文献或未包含全文文献;②无法提取具体结局指标;③不以步态再训练作为主要干预手段的研究。

1.3 资料筛选与收集

筛选过程中,由 2 名研究者对选定文章进行独立审查与评估,在下载后阅读全文并按照纳入和排除标准进行筛选文献。如果存在分歧,则通过第三方意见与讨论做出最终决定。最终纳入文献并提取相关内容包括:第一作者、发表年份、国家、样本量、干预手段、年龄、结局指标和实验测量仪器。

1.4 文献质量评价

基于 Jadad 评分表对文献质量进行评价,定义 1—3 分为低质量文献,4—7 分为高质量文献。

基于 Cochrane 偏倚风险评估工具对纳入的文献进行偏倚风险评估,包括随机序列的产生、分配序列的隐藏、参与者、实施者以及结局指标的盲法、结局指标的完整性、选择性报告研究接举和其他偏倚来源。低偏倚风险用“是”表示,高偏倚风险用“否”表示,无法提供足够确定的信息用“不清楚”表示。

1.5 Meta 分析

采用 Stata/MP 18.0 统计分析软件对所纳入的文献数据进行定量分析。其中,效应量(Effect size, ES)是对照组与干预组间的标准化平均差,是基于 Hedges、Olkin 计算 95%置信区间内的每个效应量使用标准均数差(Standard mean difference, SMD)权衡前后均差获得合并效应量^[18-19],并进行异质性检验。从多级模型中提取 I 代表研究间相关性的异质性,若 $p>0.1$ 且 $I^2<50\%$,视为研究具有同质性,应使用固定效应模型进行分析;若 $p<0.1$ 且 $I^2>50\%$,视为研究具有异质性,使用随机效应模型进行分析。已有发现证明在 Meta 分析中随机效应模型结果更加保守可靠,因此本研究使用随机效应模型,且所有分析计算 95%置信区间。

2 结果

2.1 文献检索结果

基于数据库,共检索相关文献 1 290 篇;使用 EndNote X9 学术信息市场化和开发学术软件整理文献,去除重复和未包含全文文献得到 1 120 篇;通过阅读标题和摘要除去与主题无关的文献 1 102 篇;在剩余的 18 篇文献中,6 篇干预措施不以步态训练为主,4 篇不包含生物力学测试结果,1 篇干预对象不符合,最终共纳入 7 篇文献进行 Meta 分析。

2.2 纳入文献的基本特征

所纳入的 7 项实验中包括 256 例前交叉韧带重建患者,年龄 18~60 岁,其中 124 名患者采用自体腘绳肌肌腱移植术,40 名患者采用髌腱自体移植术,其余未知。纳入文献的基本信息如表 1 所示。值得注意的是,多数研究均采用运动捕捉系统、跑步机、测力台等工具采集步态参数、关节力矩、关节活动度(Range of Motion, ROM)等生物力学指标,对于 iEMG、关节扭矩和扭矩时间等参数仅在一项研究中出现,将其排除在纳入结局指标之外。

2.3 文献质量评价结果

图 1 和图 2 是纳入的文献偏倚风险评估结果,由于结局指标分散不一,各指标对应文献数量单一,未做漏斗图分析。所有纳入的研究均为高质量文献,有 5 篇文献对随机序列的产生、分配隐藏方法、对结局指标的盲法和选择性报告均做出了解释。

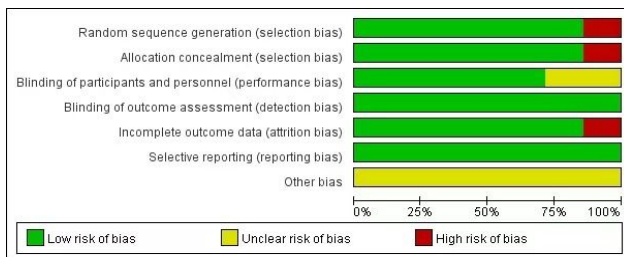


图 1 文献偏倚风险评价图

表 1 纳入文献的基本特征

研究	人数/名	干预方式	结局指标	测试仪器	干预周期与频率
Decker 等 ^[20] (2004)美国	24(16名患者和8名健康者)	有节拍 vs 无节拍步态训练	步态参数、下肢关节 ROM、下肢关节冲量	测力台、高清摄像机、跑步机	3 次/周,3个月
Collin 等 ^[21] (2017)美国	18(9名男性和9名女性)	110% vs 100%步频的步态训练	下肢关节 ROM、膝关节力矩、膝关节冲量	Bertec 分体式跑步机、Qualisys 运动捕捉系统、测力板	未注明
Hartigan 等 ^[22] (2017)英国	38(24名女性和14名男性)	50%负重 vs 无负重步态训练	膝关节伸展冲量	Qualisys 运动捕捉系统、AMTI 测力台、等速测力计	未注明
Garcia 等 ^[23] (2024)美国	28(12名男性和16名女性)	110% vs 100%步频的步态训练	膝关节 ROM、膝关节力矩、步态参数	Tractronix 红外计时门、Qualisys 运动捕捉系统、Bertec 分体式跑步机	未注明
沈梅等 ^[24] (2011)中国	32	1.6 m/s 步态训练 vs 无	步态参数、膝关节 ROM	DVMC 步态分析系统、ECON 运动平板	2 次/天,2个月
赵卫卫等 ^[25] (2019)中国	60	20%~60%步态训练 vs 无	膝关节 ROM	被动运动器	2 次/天,3个月
葛娜等 ^[26] (2021)中国	64(41名男性和23名女性)	20%~60%减重的步态训练 vs 无	膝关节 ROM	EIINK 上下肢综合功能康复评估与训练系统	2 次/天,3个月

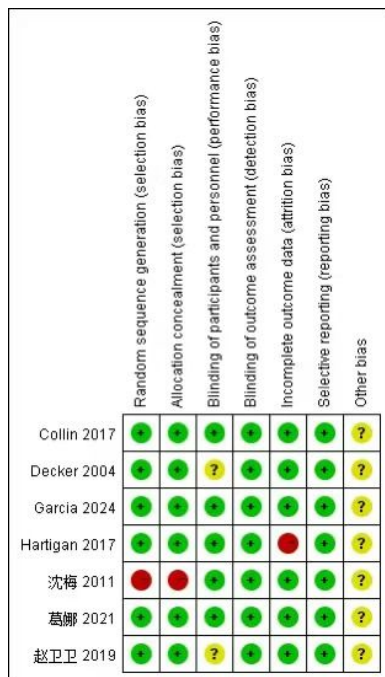


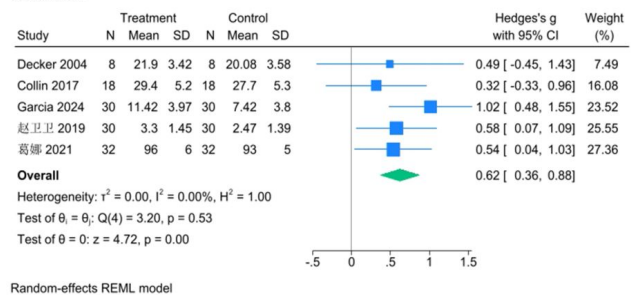
图 2 文献偏倚风险总结图

2.4 Meta 分析结果

Meta 分析结果中步态再训练对 ACLR 患者的生物力学影响以 SMD 表示。其中,干预过后的膝关节 ROM($SMD=0.62, 95\%CI: 0.36\sim0.88, p<0.05$)、膝关节冲量($SMD=-0.68, 95\%CI: -1.03\sim-0.33, p<0.05$)和步速($SMD=-1.40, 95\%CI: -1.88\sim-0.92, p<0.05$)具有统计学意义。

如图 3 所示,步态再训练对 ACLR 患者的运动学影响以膝关节 ROM 为主,在纳入的 5 篇文献中,共计实验组 118 例,控制组 118 例,合并效应量位于无效竖线右侧,说明干预的运动学影响具有显著性意义。其中,Garcia($ES=1.02, p<0.05$)、赵卫卫($ES=0.58, p<0.05$)和葛娜($ES=0.54, p<0.05$)的研究通过限定步频或减重的步态再训练具有统计学意义。

Knee ROM

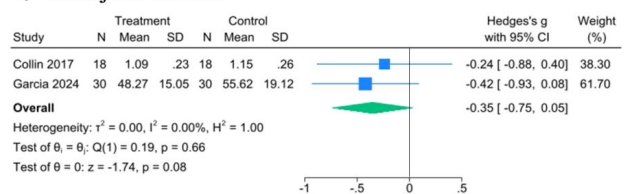


Random-effects REML model

图 3 步态再训练的运动学影响

步态再训练对 ACLR 患者的动力学影响如图 4 所示,在所纳入的 4 篇文献中,共计实验组 94 例,控制组 94 例。对膝关节力矩的干预结果未出现统计学意义($SMD=-0.35, 95\%CI: -0.75\sim0.05, p>0.05$),合并效应量处于无效线上;对膝关节冲量的干预结果具有统计学意义,合并效应量位于无效线的左侧。其中,Hartigan($ES=-0.78, p<0.05$)的研究通过负重步态再训练纠正其异常步态,并改善异常膝关节冲量。

1) Knee joint moment



2) Knee joint impulse

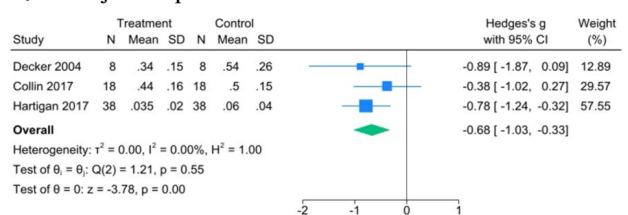
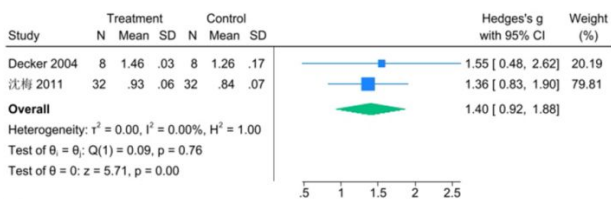


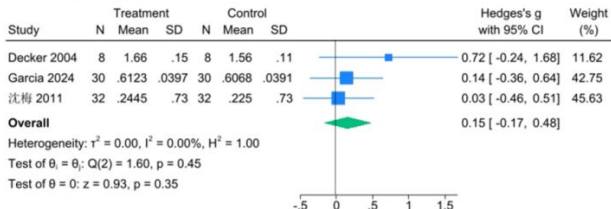
图 4 步态再训练的动力学影响

研究步态再训练对 ACLR 患者的步态参数影响主要采集了步速、步长和步频 3 个指标(图 5),共纳入实验组 70 例,对照组 70 例。对步速的干预合并效应量位于无效线的右侧,说明干预结局指标具有统计学意义,在仅纳入 2 项采取限定步频或结合本体感觉训练的步态再训练结果中均表现出统计学意义($ES=1.55, p<0.05$; $ES=1.36, p<0.05$)。然而,步长和步频 2 个指标的合并效应量均处于无效线上,说明在干预下未表现出统计学意义($p>0.05$)。

1) Speed



2) Step length



3) Frequency

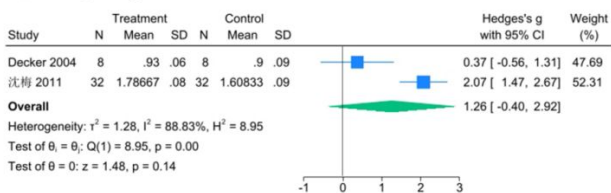


图5 步态再训练的步态参数影响

3 讨论

3.1 运动学

综上,减少负重或增加步频的步态再训练可以显著改善 ACLR 患者的膝关节 ROM($p<0.05$)。从生物力学角度分析,膝关节屈曲角度和 ROM 的增大直接关联于更高的膝关节伸展力矩,这意味着可能需要募集更多的肌纤维以产生更大的肌肉力量。相关研究已证实^[20],长期步态再训练有助于股四头肌肌力的增强,还可以缓解疼痛并预防移植物的再损伤。这类现象可能的解释是行走支撑阶段的垂直位移增加,进而要求较大的膝关节 ROM 作支撑。值得注意的是,膝关节伸肌可能在力—长度曲线的上升支发挥作用^[27],膝关节 ROM 则被解释为行走支撑阶段观察到的膝关节屈曲角度。在早期的步态再训练过程中减少负重正意味着提升患者的步频,由于负重减轻,膝关节稳定性在额状面上发生改变,使得关节内外侧更均匀地分配负载在关节上的压力^[28],引导 ACLR 患者在着地时采取更大范围的伸展膝关节或屈曲着地,以实现蹬伸阶段更大范围伸展膝关节。这也合理解释了减轻总负荷、改变运动学参数和缓解疼痛的综合效应能够优化膝关节的力学环境^[29]。

Garcia 的研究进一步揭示^[23],矢状面上膝关节运动学变化受到步态节奏的影响($SMD=-1.02$)。在一项跑步的生物力

学实验中提到,步速增加 10%可以减少下肢关节在跑步或者步行过程中受到的冲击载荷,特别是膝关节对此变化最为敏感,这可能与膝关节外展力矩和内收力矩的减少有关^[30-31]。然而,以高于首选步速的步态再训练,能够降低膝关节在矢状面上运动的生物力学需求^[23]。因此,在步态再训练的长期干预过程中应根据 ACLR 患者的身体情况选择不同的步速,通过实时反馈最大限度提升患者的关节活动能力与肌肉力量。

3.2 动力学

生物力学机制剖析出 ACL 断裂是膝关节活动度高导致较大外展力矩的结果^[32]。然而,步态再训练并未直接影响到 ACLR 患者的膝关节力矩。缺乏显著性差异可能是结局指标数量有限,并且研究间由于步态再训练手段不同、地表差异或非标准化的着地方式所导致^[33-34]。尽管如此,已有多项研究表明^[35-36],步态再训练可以改善膝关节炎患者的内收力矩。例如在个体化的训练计划中,医师与学者们调整了膝骨关节炎患者的行进间外展角度与足部放置位置,通过补偿机制影响膝关节的旋转运动^[37-38],这或许可以解释步态再训练与膝关节力矩之间的关联。当前膝关节力矩指标研究数量有限且干预缺乏标准化,未来需扩大样本量、规范干预方案,重点探究步态再训练对 ACLR 患者关节力矩的影响。

50%负重的步态再训练也有效降低了 ACLR 患者的膝关节冲量($p<0.05$)。在负重训练期间患者为保持关节稳定性会降低原有步长。这与一项健康跑者的生物力学实验相契合^[39],即减少 10%步长会减少髌股关节力及其冲量,对于 ACLR 患者是有益的。但是,在动物实验中发现^[40],机械负荷过量与不足都会导致关节组织代谢的有害变化,最终致关节软骨发生病变。一项形态学研究指出^[41],膝关节在损伤后的形态学和生物学变化会分散关节内部受到的剪切力和摩擦力。基于冯元桢的应力—生长关系与沃尔夫定律,膝骨关节结构和 ACL 结构可能会适应这样的力学环境。考虑到机械负荷刺激与膝关节软骨退化之间的关系,ACLR 患者的关节压力降低且两侧受力出现非对称性,易造成其诱发退行性疾病膝骨关节炎^[42]。Hartigan 的负重步态再训练考虑到该隐患^[22],50%负重既控制了患者的训练步长,又增加了患侧的膝关节冲量,使得患侧股四头肌肌力最大化,即可恢复关节扭矩的对称性与步态的对称性。因此,个体化设计步态再训练才能更好地满足 ACLR 患者间的不同需求,使膝关节二次损伤的风险最小化。

3.3 步态参数

步态分析系统和跑步机可以精准采集 ACLR 患者的自然步态。基于结构与功能统一原则,医师与学者可以通过足底压力分布获得患者对全身控制的信息并及时调整策略,如根据步态差异,优化其步态参数^[43-44]。其中,步速与步态再训练干预表现出显著性相关($p<0.05$)。这表明步态再训练有效提高 ACLR 患者的步速。尽管在训练初期,减缓步速可能更有利于患者对关节的控制以及身体稳定性的提升,有助于患者重建正常的步态模式^[45-46]。但是,长期较慢的步速不利于 ACLR 患者的步态适应性发展^[20]。并且,异常步态生物力学会加速膝关节内部有害组织的代谢,影响患者的垂直地面反作用力和膝关节伸展力矩^[47],这或许同样可以解释步态再训练干预后的膝关节力矩不具有统计学意义的现象。相反,步态再训练干预后

的步速提升或许可以与股四头肌肌力的激活以及运动控制能力的增加相联系。

尽管步长和步频与步态再训练干预未展现出显著相关性,但这可能恰恰说明了步态再训练的目的在于获得步态模式的对称性。由于患者的损伤程度^[48]、身体结构^[44]和恢复程度^[49]等差异,ACLR患者为获得最小偏侧性的自然步态,会根据自身差异进行调整。但这一过程也导致了步长与步频不具备统计学上的差异。事实上,现有的步态再训练研究中均表明患者在干预后的步态参数明显改善,包括步长与步频在内^[20,23-24]。这可能是步态再训练改善关节能力与肌肉感受器刺激的结果^[50]。因此,个体化的步态再训练计划能够帮助 ACLR 患者实现步态对称性,患者在干预过程中会接受不对称信息反馈使自己更加注意自身的运动模式。值得注意的是,在这一过程中,不仅可以使跑步机和步态分析系统,轻便且成本效益高的惯性技术系统同样值得考虑。

本研究仍具有一定局限性。第一,纳入研究的受试者为18~60岁患者,老年人在进行前交叉韧带重建术后的康复手段是否涉及步态再训练,这可能会影响干预后的结局指标;第二,纳入的步态再训练手段不统一,且对训练期间的足部穿着条件和接触表面没有进行标准化处理。采用不同负重、频率、步长等多种形式下的干预可能会对 ACLR 患者的生物力学指标产生不同的影响;第三,部分研究未报告 Meta 分析所需的所有信息,需要从全文或计算结果中重新获得信息,这可能会引入一些错误;第四,数据来源以近20年的部分电子数据库进行检索,尽管进行了偏倚风险评估,但仍可能遗漏部分高质量文献。

4 结语

ACLR 患者的术后恢复是一个漫长的过程,未及时进行康复训练可能会诱发二次断裂或膝关节关节炎等继发性疾病。步态再训练可以作为一种非侵入性运动干预手段,通过提升或减少负重结合实时视觉、听觉反馈,在对身体提出不同要求的同时,有效改善 ACLR 患者的关节力学行为和步态参数。从运动技能学习与控制的角度来看,步态再训练依托积极强化和增强反馈,通过实践与经验发生永久性内化的过程。未来研究应进一步探寻步态再训练如何有效改善 ACLR 患者的膝关节力矩、步长等可能对 ACLR 患者造成影响的力学指标。为医师与学者在应对不同患者制定个体化的步态再训练计划,提供可量化个体与生物反馈交互时的生物力学参数,达到促进术后康复与运动表现的改善,加速重返日常健康生活的目的。

参考文献:

- [1] HERZOG M M, MARSHALL S W, LUND J L, et al. Trends in Incidence of ACL Reconstruction and Concomitant Procedures among Commercially Insured Individuals in the United States, 2002–2014 [J]. *Sports Health*, 2018, 10(6): 523–531.
- [2] BIRCHMEIER T, LISEE C, KANE K, et al. Quadriceps Muscle Size Following ACL Injury and Reconstruction; a Systematic Review [J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2020, 38(3): 598–608.
- [3] 陈建, 汪学红, 汤一铸. 膝关节前交叉韧带损伤后肌肉功能变化

的观察与分析[J]. *湖北体育科技*, 2014, 33(1): 29–31.

- [4] CLARE L A, NICHOLAS F T, JULIAN A F, et al. Sports Participation 2 Years After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Athletes Who Had Not Returned to Sport at 1 Year [J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2015, 43(4): 848–856.
- [5] CAPIN J J, WILLIAMS J R, NEAL K, et al. Slower Walking Speed Is Related to Early Femoral Trochlear Cartilage Degradation after ACL Reconstruction [J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2020, 38(3): 645–652.
- [6] LUC-HARKEY B A, FRANZ J, HACKNEY A C, et al. Immediate Biochemical Changes after Gait Biofeedback in Individuals with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction [J]. *Journal of Athletic Training*, 2020, 55(10): 1106–1115.
- [7] PIETROSIMONE B, LOESER R F, BLACKBURN J T, et al. Biochemical Markers of Cartilage Metabolism Are Associated with Walking Biomechanics 6–Months Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction [J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2017, 35(10): 2288–2297.
- [8] HATTON A L, CROSSLEY K M, CLARK R A, et al. Between-Leg Differences in Challenging Single-Limb Balance Performance One Year Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction [J]. *Gait & Posture*, 2017, 52: 22–25.
- [9] BULLOCK G S, WARD P, KLUZEK S, et al. Paving the Way for Greater Open Science in Sports and Exercise Medicine: Navigating the Barriers to Adopting Open and Accessible Data Practices [J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2024, 58(6): 293–295.
- [10] 洪靖, 卢从飞, 黄晨宾, 等. 材料生物力学研究热点与态势的可视化分析[J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28(15): 2358–2363.
- [11] CHEUNG R T H, AN W W, AU I P H, et al. Control of Impact Loading during Distracted Running before and after Gait Retraining in Runners [J]. *Journal of Sports Sciences*, 2018, 36(13): 1497–1501.
- [12] DE SOUZA JÚNIOR J R, RABELO P H R, LEMOS T V, et al. Effects of Two Gait Retraining Programs on Pain, Function, and Lower Limb Kinematics in Runners with Patellofemoral Pain: a Randomized Controlled Trial [J]. *PLoS One*, 2024, 19(1): e0295645.
- [13] KNOBLOCH A C. Running Gait Retraining: a Sports Medicine Training Gap in Family Medicine [J]. *Family Medicine*, 2022, 54(5): 384–388.
- [14] GAUDETTE L W, BRADACH M M, DE SOUZA JUNIOR J R, et al. Clinical Application of Gait Retraining in the Injured Runner [J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2022, 11(21): 6497.
- [15] WINSTEIN C J, GARDNER E R, MCNEAL D R, et al. Standing Balance Training: Effect on Balance and Locomotion in Hemiparetic Adults [J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1989, 70(10): 755–762.
- [16] DA SILVA NETO W C, LOPES A D, RIBEIRO A P. Gait Retraining with Visual Biofeedback Reduces Rearfoot Pressure and Foot Pronation in Recreational Runners [J]. *Journal of Sport Rehabilitation*, 2022, 31(2): 165–173.
- [17] DAVIS I S, TENFORDE A S, NEAL B S, et al. Gait Retraining as an Intervention for Patellofemoral Pain [J]. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 2020, 13(1): 103–114.
- [18] MORRIS S B. Estimating Effect Sizes from Pretest–Posttest–Control Group Designs [J]. *Organizational Research Methods*, 2008, 11(2): 364–386.

- [19] HEDGES L V, OLKIN I. Statistical Methods for Meta-Analysis[M]. Amsterdam: Elsevier, 1985.
- [20] DECKER M J, TORRY M R, NOONAN T J, et al. Gait retraining after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. 2004: 848-856.
- [21] BOWERSOCK C D, WILLY R W, DEVITA P, et al. Reduced Step Length Reduces Knee Joint Contact Forces during Running Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction but Does Not Alter Inter-Limb Asymmetry[J]. Clinical Biomechanics, 2017, 43: 79-85.
- [22] HARTIGAN E, AUCOIN J, CARLSON R, et al. Relationships between Knee Extension Moments during Weighted and Unweighted Gait and Strength Measures that Predict Knee Moments after ACL Reconstruction[J]. Sports Health, 2017, 9(4): 356-363.
- [23] GARCIA S A, JOHNSON A K, ORZAME M, et al. Biomechanical Effects of Manipulating Preferred Cadence during Treadmill Walking in Patients with ACL Reconstruction[J]. Sports Health, 2024, 16(3): 420-428.
- [24] 沈梅, 金可心, 毛世刚, 等. 前交叉韧带重建后本体感觉训练前后步行参数变化的计算机辅助三维步态分析系统比较[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(48): 8947-8950.
- [25] 赵卫卫, 邵晨兰, 付鹏, 等. 早期减重步行训练对前交叉韧带重建术后功能恢复及骨隧道改变的影响研究[J]. 中国全科医学, 2019, 22(29): 3643-3647+3652.
- [26] 葛娜, 赵瑾莹. 早期减重步行训练对前交叉韧带重建术后功能恢复及骨隧道改变的作用[J]. 实用医技杂志, 2021, 28(8): 1032-1034.
- [27] ANDERSON D E, MADIGAN M L, NUSSBAUM M A. Maximum Voluntary Joint Torque as a Function of Joint Angle and Angular Velocity: Model Development and Application to the Lower Limb[J]. Journal of Biomechanics, 2007, 40(14): 3105-3113.
- [28] LI J S, TSAI T Y, CLANCY M M, et al. Weight Loss Changed Gait Kinematics in Individuals with Obesity and Knee Pain[J]. Gait & Posture, 2019, 68: 461-465.
- [29] SUTTER E G, WIDMYER M R, UTTURKAR G M, et al. In Vivo Measurement of Localized Tibiofemoral Cartilage Strains in Response to Dynamic Activity[J]. The American Journal of Sports Medicine, 2015, 43(2): 370-376.
- [30] HEIDERSCHEIT B C, CHUMANOV E S, MICHALSKI M P, et al. Effects of Step Rate Manipulation on Joint Mechanics during Running[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2011, 43(2): 296-302.
- [31] DERRICK T R, HAMILL J, CALDWELL G E. Energy Absorption of Impacts during Running at Various Stride Lengths[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 1998, 30(1): 128-135.
- [32] LUCIDI G A, ZSIDAI B, GIUSTO J D, et al. Lateral Meniscus Root Tear in Anterior Cruciate Ligament Injured Patients Is Not Associated with Increased Rotatory Knee Laxity: a Quantitative Pivot Shift Analysis[J]. Journal of ISAKOS, 2024, 9(6): 100319.
- [33] ZHOU W, YIN L, JIANG J, et al. Surface Effects on Kinematics, Kinetics and Stiffness of Habitual Rearfoot Strikers during Running[J]. PLoS One, 2023, 18(3): e0283323.
- [34] 李瑞宁. 健康青年人赤足与穿鞋步态的正向动力学与有限元分析[D]. 福建师范大学, 2021.
- [35] SHULL P B, SILDER A, SHULTZ R, et al. Six-Week Gait Retraining Program Reduces Knee Adduction Moment, Reduces Pain, and Improves Function for Individuals with Medial Compartment Knee Osteoarthritis[J]. Journal of Orthopaedic Research, 2013, 31(7): 1020-1025.
- [36] WANG S, CHAN P P K, LAM B M F, et al. Sensor-Based Gait Retraining Lowers Knee Adduction Moment and Improves Symptoms in Patients with Knee Osteoarthritis: a Randomized Controlled Trial[J]. Sensors, 2021, 21(16): 5596.
- [37] SKOURAS A Z, KANELLOPOULOS A K, STASI S, et al. Clinical Significance of the Static and Dynamic Q-Angle[J]. Cureus, 2022, 14(5): e24911.
- [38] HUNT M A, CHARLTON J M, KROWCHUK N M, et al. Clinical and Biomechanical Changes Following a 4-Month Toe-out Gait Modification Program for People with Medial Knee Osteoarthritis: a Randomized Controlled Trial[J]. Osteoarthritis and Cartilage, 2018, 26(7): 903-911.
- [39] WILLSON J D, RATCLIFF O M, MEARDON S A, et al. Influence of Step Length and Landing Pattern on Patellofemoral Joint Kinetics during Running[J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2015, 25(6): 736-743.
- [40] CASTROGIOVANNI P, DI ROSA M, RAVALLI S, et al. Moderate Physical Activity as a Prevention Method for Knee Osteoarthritis and the Role of Synovocytes as Biological Key[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(3): 511.
- [41] ELSAID K A, MACHAN J T, WALLER K, et al. The Impact of Anterior Cruciate Ligament Injury on Lubricin Metabolism and the Effect of Inhibiting Tumor Necrosis Factor α on Chondroprotection in an Animal Model[J]. Arthritis & Rheumatism, 2009, 60(10): 2997-3006.
- [42] SU F, HILTON J F, NARDO L, et al. Cartilage Morphology and T1 ρ and T2 Quantification in ACL-Reconstructed Knees: a 2-Year Follow-up[J]. Osteoarthritis and Cartilage, 2013, 21(8): 1058-1067.
- [43] ZHANG L, LIU T, ZHOU X, et al. Gait Characteristics and Deviation Factors of Backward Walking in Patients with Chronic Ankle Instability[J]. Sports Health, 2025, 17(4): 815-823.
- [44] FAN Y, FAN Y, LI Z, et al. Natural Gaits of the Non-Pathological Flat Foot and High-Arched Foot[J]. PLoS One, 2011, 6(3): e17749.
- [45] 石梦妮, 朱清广, 李树屏, 等. 膝关节关节炎患者的步态分析及动力学特征研究[C]//2024年国际竞技体育生物力学论坛暨第二十三届全国运动生物力学学术交流会论文摘要集, 2024: 778-780.
- [46] 王颖鹏, 王虎军, 李瑛琦, 等. 前交叉韧带重建术后患者不同速度行走时步态运动学特征及其变异性研究[J]. 中国骨与关节杂志, 2024, 13(4): 267-274.
- [47] PFEIFFER S J, SPANG J, NISSMAN D, et al. Gait Mechanics and T1 ρ MRI of Tibiofemoral Cartilage 6 Months after ACL Reconstruction[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2019, 51(4): 630-639.
- [48] 林星瑾, 欧建林, 谢文浩, 等. 不同严重程度的双侧膝关节关节炎患者步态及足底压力分析[J]. 康复学报, 2023, 33(5): 436-441+448.
- [49] 周易文, 钟亚平, 魏梦力, 等. 基于运动员前交叉韧带重建术后步态数据分析重返运动的风险[J]. 中国康复理论与实践, 2024, 30(8): 948-956.
- [50] 郑洁皎, 俞卓伟, 夏汶, 等. 本体感觉神经肌肉促进技术对脑卒中患者膝关节运动控制功能的影响[J]. 中国康复理论与实践, 2010, 16(2): 115-117.