

文章编号:1004-7220(2024)05-1005-06

前交叉韧带重建后单腿落地反跳生物力学研究进展

赵建伟¹, 刘艺², 庄海英¹

(1. 聊城市人民医院 康复医学科, 山东 聊城 252000; 2. 聊城市第四人民医院 精神科, 山东 聊城 252000)

摘要:前交叉韧带重建(anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR)是恢复患者原有活动水平的首选治疗方法。单腿落地反跳动作不仅可以识别高风险运动策略,而且能为 ACLR 康复过程提供标准。通过中国知网、PubMed、Embase 等数据库对“单腿落地反跳”“前交叉韧带重建”“生物力学”进行组合检索,总结 ACLR 术后单腿落地反跳生物力学变化及相关干预方法。研究结果有助于 ACLR 术后调整康复策略,避免二次损伤的高风险动作。通过分析 ACLR 术后单腿落地反跳动作,能指导临床医生、康复治疗师制定和调整康复治疗计划,提高 ACLR 术后康复效率,帮助患者早日重返运动。

关键词:前交叉韧带重建;单腿落地反跳;生物力学

中图分类号:R 318.01 文献标志码:A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.05.030

Advances in Biomechanical Research on Single-Leg Drop Jump after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

ZHAO Jianwei¹, LIU Yi², ZHUANG Haiying¹

(1. Department of Rehabilitation Medicine, Liaocheng People's Hospital, Liaocheng 252000, Shandong, China;

2. Department of Psychiatry, Liaocheng Fourth People's Hospital, Liaocheng 252000, Shandong, China)

Abstract: Anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) is the preferred treatment to restore the original activity level of patients. The single-leg drop jump can not only identify high-risk exercise strategies, but also provide a standard for the rehabilitation process of ACLR. In this review, a combined search of 'single-leg drop jump' 'anterior cruciate ligament reconstruction' 'biomechanics' was conducted through CNKI, PubMed, Embase and other databases, and the biomechanical changes of single-leg drop jump after ACLR and related intervention method are summarized. The research findings will help adjust rehabilitation strategies after ACLR and avoid high-risk actions with secondary injuries. The analysis of single-leg drop jump after ACLR can guide clinicians and rehabilitation therapists to formulate and adjust rehabilitation treatment plan, improve the postoperative rehabilitation efficiency of ACLR, and help patients return to exercise early.

Key words: anterior cruciate ligament reconstruction; single-leg drop jump; biomechanics

前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤是最常见和最具破坏力的运动损伤之一。ACL损伤不仅会导致运动员时间的损失和运动成绩的下降,甚至会造成运动生涯的终止;长期的后果可能更严重,会造成早期骨关节炎风险增加,膝关节

功能下降等^[1]。外科前交叉韧带重建(anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR)是ACL断裂最常见且经济有效的治疗方法,也是恢复患者原有活动水平的首选治疗方法。这种方法可以恢复膝关节的稳定性,从而减少对半月板和软骨的潜在损

伤^[2]。据统计,即使运动员进行康复训练以后,仍有约 1/3 的运动员无法恢复到受伤前的运动水平,多达 1/3 的年轻运动员再次遭受 ACL 损伤,表明传统康复仍有一定的局限性尚需要更成熟重返运动的标准^[3]。有研究指出, ACLR 预后与下肢肌肉大小、力量、激活以及落地运动期间下肢生物力学的改变相关^[4-5]。最新发表的 ACLR 临床实践指南中指出,落地阶段髌膝踝关节生物力学分析可作为重返运动的指标之一^[6]。

运动分析评估在研究中普遍存在,并逐渐成为临床实践和运动决策的组成部分。Fidai 等^[7]对男女运动员进行落地反跳测试,结果发现,与疲劳前相比,疲劳后落地阶段膝关节外翻角度显著增加,使运动员面临更大的 ACL 损伤风险。本文认为,落地反跳测试是一种低成本和可重复的筛选工具,可用于识别受益于 ACL 损伤预防策略的高危运动员。双腿落地反跳任务虽然可以提供有价值的信息,但是不能充分取代更具挑战性单腿落地反跳(single-leg drop jump, SLDJ)任务^[8]。系统综述表明, ACLR 术后 ACL 再损伤率为 15%,其中同侧再损伤率为 7%,对侧再损伤率为 8%^[9]。ACLR 术后的二次损伤彰显受伤肢体需要更好康复,以及对未受伤肢体实施预防策略的必要性。因此,康复专业人士需要更好地筛查个体,以确定谁最有可能再次遭受 ACL 损伤,并建立有效的干预措施,以减少再次损伤的发生和加速康复过程。SLDJ 任务可单独评估每侧肢体的功能,且可以与对侧肢体和标准数据进行比较分析,为康复过程提供相应参考标准^[10]。

跳跃高度和水平距离主要与跳跃任务的向心阶段有关,主要区别在于跳跃的方向。Kotsifaki 等^[11]比较了单腿水平反跳和单腿垂直落地反跳的生物力学差异。结果发现,在进行垂直跳跃时,髌、膝和踝关节在推进和落地阶段方面的贡献大致相似;水平跳跃距离在推进阶段主要由髌部和踝关节决定,但落地阶段主要由膝关节决定,髌部和踝关节的贡献较小,表明这两种测试衡量了不同的功能结构。进一步研究发现,在单腿垂直落地反跳落地向心运动阶段,膝关节贡献约占 30%^[12];而在水平跳跃的向心阶段,膝关节对总下肢功的贡献仅为 10%,表明有膝关节损伤的患者在垂直跳跃时比在水平跳跃时更容易出现性能缺陷^[13]。单腿垂直落

地动作时,下肢髌、膝、踝部位贡献基本相同,其中任何一个关节有功能障碍都可能相对平等地影响跳跃性能。SLDJ 应该反映整个下肢的功能,而不是特定的部位。因此,相较于水平跳跃,垂直跳跃可能更有助于识别下肢关节的不对称,并且更好代表膝关节的功能。

目前,鲜有研究对 ACLR 术后单腿垂直落地反跳测试生物力学指标的变化进行汇总分析。为了指导临床实践,本文总结了 ACLR 术后与健侧或正常人相比 SLDJ 生物力学变化,以及对影响 ACLR 预后的因素进行分析。采用“单腿落地反跳”“前交叉韧带重建”“生物力学”等检索词在中国知网、PubMed、Embase 等数据库进行组合检索,主要关注中英文论著的研究。总结 ACLR 术后 SLDJ 过程中运动学、动力学、肌肉力量、下肢对称性等指标的变化,同时探讨支具、疲劳、核心稳定训练对 ACLR 术后 SLDJ 运动中生物力学指标的影响。研究结果能指导临床医生、康复治疗师制定和调整康复治疗计划,提高 ACLR 术后康复效率、帮助患者早日重返运动。

1 生物力学改变

1.1 运动学和动力学

ACL 的损伤风险不仅与矢状面指标相关,也与冠状面的指标相关。研究发现,髌关节横断面运动学、膝关节矢状面运动学和冠状面动力学被确定为可能预测落地期间二次损伤的危险因素^[14-16]。Kotsifaki 等^[12]研究发现,在单腿垂直落地反跳动作中,落地阶段存在矢状面运动学差异,主要表现为与健侧相对比, ACLR 重建侧躯干屈曲、骨盆前倾、髌关节峰值屈曲、踝关节跖屈角度显著增大,而膝关节峰值屈曲角度显著减小,膝关节屈曲力矩降低。King 等^[17]对单腿垂直落地反跳任务分析发现,与标准侧(健侧和优势侧)对比,重建侧肢体髌关节屈曲角度,踝关节跖屈角度和外旋力矩显著增大。Breen 等^[18]探讨 ACLR 术后单腿垂直落地动作时,在落地阶段与优势侧相对比, ACLR 侧髌关节屈曲角度更大。King 等^[19]探讨落地任务中生物力学的差异,结果发现, ACLR 侧膝关节内外翻力矩显著减小; ACLR 术后,发生健侧断裂与未断裂的男性运动员的生物力学和临床指标的差异表明,与未断裂肢体相比,断裂侧肢体主要表现为膝关节屈曲减

小、踝关节背伸减小。综上所述, ACLR 术后患侧为髌关节屈曲角度增大, 膝关节屈曲减小, 膝关节内外翻力矩减小, 落地时呈现不对称性。落地时膝关节屈曲角度较小与 ACL 损伤相关^[20-21]。ACLR 术后落地时膝关节屈曲角度减小, 表明患侧肢体功能仍未完全恢复。膝关节外翻负荷与 ACL 应变增加的相关性已被证实^[14-15]。患侧肢体的膝关节内翻力矩较低, 在自然条件下, 肢体更容易受到外翻力矩的影响, 表明在 ACLR 术后存在康复不理想和潜在的损伤风险。

1.2 肌肉激活

落地过程中的肌肉激活对于稳定下肢关节和避免动态膝外翻等损伤性运动模式至关重要。Kotsifaki 等^[6]研究发现, 与健侧肢体和对照组相比, 患侧肢体的腓绳肌贡献更大, 而 ACLR 组双侧比目鱼肌的贡献低于对照组。Sheikhi 等^[22]探讨 ACLR 术后躯干和下肢肌肉激活程度, 结果发现, 在初始接触地面和最大屈曲角度时, 健康组股内侧肌、腹直肌、背阔肌激活程度均高于 ACLR 组; 在最大膝关节屈曲时, 健康组胸大肌表现出更大的激活, 而 ACLR 组股外侧肌和臀大肌肌肉激活更明显, 但健康对照组的优势侧、非优势侧躯干和下肢肌肉激活均无统计学意义。肌肉激活被认为对预防损伤和运动表现很重要, 低水平的激活可能导致损伤^[23]。ACLR 术后患者的肌肉激活不对称, 表明肌肉协调策略发生了改变。躯干的神经肌肉控制不良与下肢损伤风险增加相关^[16]。ACLR 患者髌关节屈曲增加可能源于躯干控制的缺陷, 这可能会增加再发 ACL 损伤的风险。该结果与肌肉的激活也相对应, 髌、膝关节的动态稳定性受髌部和躯干肌肉激活的影响。神经肌肉控制缺陷被认为是 ACL 损伤的主要原因。躯干肌肉先于下肢肌肉激活, 核心稳定性下降也可能导致 ACL 损伤^[22], 且增大腓绳肌激活程度是 ACL 损伤患者和 ACLR 术后患者的一种常见策略^[24]。

1.3 肢体对称指数

肢体对称指数 (limb symmetry index, LSI) 是评估肌肉力量和跳跃表现最常报道的数据, 一般使用受累侧肢体与未受累侧肢体比值来计算, $LSI \geq 90\%$ 常被用作重返运动的标准^[25]。研究表明, ACLR 组跳跃高度, 做功方面对称指数为 77% 和 70%, 对照

组跳跃高度对称指数为 100% 和 99%^[6]。Kotsifaki 等^[10]研究发现, 与对照组比较, ACLR 术后运动员的离心冲量及向心冲量对称性显著降低。ACLR 组反跳高度显著低于正常组, 且在各项性能指标中, 重建肢体和健侧肢体均未达到对照组的性能值。ACLR 组膝关节屈曲角度和膝关节伸肌力矩以及地面反作用力不对称情况更严重^[12]。Crotty 等^[26]研究显示, 膝关节伸肌不对称、跳跃高度不对称、反应强度不对称呈显著正相关。膝关节伸肌力量在 ACLR 术后尤为重要, 并且与膝关节屈肌力量相比, 与最终的膝关节功能和活动水平有更强的相关性^[27]。Birchmeier 等^[28]研究认为, SLDJ 动作中反跳高度和膝关节伸展力量是跳跃表现的显著预测因素, 可通过训练消除下肢不对称改善肢体功能。Teichmann 等^[29]研究发现, 健康对照组与 ACLR 组落地过程中反应时间和反应强度有明显差异, ACLR 组下肢不对称更明显。研究表明, 运动员在 ACLR 术后尽管实现了几乎对称的跳跃距离, 但仍然存在膝关节功能障碍^[30]。与刚刚重返运动相比, 在重返运动两年以后, 在单腿落地时, 膝关节屈曲对称性指数较高, 而躯干屈曲对称性指数较低, 但是主要变量始终没有差异, 表明单腿落地对称性并没有得到改善^[31]。运动任务中, 肢体功能不对称可能是下肢损伤, 尤其是二次 ACL 损伤的潜在危险因素^[32]。在个性化康复的框架下, 检测和纠正不对称落地策略高度相关, 这需要在临床中应用复杂的生物力学分析。在康复过程中, 达到对称是一个重要的目标, 但同样重要的是运动员回到损伤以前水平。因此, 在 ACLR 患者中针对其不对称的缺陷可通过训练伸肌力量做相应的功能锻炼, 是重要且必不可少的。

2 干预方法

2.1 支具

支具常用于治疗膝关节问题, 以减轻疼痛, 改善膝关节控制, 降低损伤或再损伤的风险。使用软性膝关节支架已被证明可以改善本体感觉^[25], 这已被确定为治疗膝关节不稳定和 ACL 损伤的重要机制。Hanzlíková 等^[27]研究表明, 在健康个体中, 支具显著减少了单腿垂直落地反跳动作时膝关节的外翻和内翻活动度, 但在 ACLR 患者中未观察到这种

效果。随后, Hanzlíková 等^[33]探讨本体感觉支具对膝关节控制的影响。结果发现, 支具对冠状面运动学无影响, 然而在横断面和矢状面有显著差异; 在 SLDJ 过程中使用支具, 膝关节屈曲角速度增加了 $40.5^\circ/\text{s}$, 且受试者表示使用支具比不使用支具更容易完成任务。该结果可能是由于 ACLR 术后由股四头肌离心收缩控制的快速膝关节屈曲运动中, 腘绳肌的动态膝关节稳定能力有限造成^[34]。Dickerson 等^[35]研究发现, 在佩戴膝关节支具不影响任何性能指标情况下, 重返运动 3 个月内敏捷性和垂直跳跃高度均可以得到改善。使用支具不仅能增强 ACLR 患者膝关节功能, 同时也能减少运动恐惧。运动员在运动时佩戴支具可能会更自信, 从而提高成绩^[36]。

2.2 疲劳

近年来, 疲劳被认为是下肢损伤的主要原因之一。疲劳状态下会导致运动模式的改变, 进而落地时缺乏稳定性。Watanabe 等^[37]研究发现, 疲劳不仅使落地阶段垂直地面反作用力峰值降低了 3.6%, 而且使垂直地面反作用力达峰时间缩短 10%, 可能会增加非接触性 ACL 损伤的风险。在落地期间, 膝关节外翻角增大是 ACL 再次损伤的依据^[38]。Lessi 等^[39]研究表明, 与疲劳前男性相比, 女性疲劳后的膝关节峰值外翻角更大。此外, 疲劳后重建肢体的膝关节峰值外翻角大于健侧肢体, 肌肉疲劳引起的运动学改变可能会增加女性运动员二次 ACL 损伤的风险。ACLR 运动员和未受伤运动员对疲劳有相似的生物力学和神经肌肉反应, 而且 ACLR 术后运动员在疲劳时落地缺陷会变得更明显^[40]。疲劳可能在 ACL 损伤中起着至关重要的作用, 抗疲劳训练是预防损伤中一个被低估的方面。疲劳是产生高危动态落地动作的影响因素之一, 在 ACL 损伤预防模型中, 应考虑测量和监测疲劳影响下的神经肌肉反应, 并制定损伤风险决策, 包括认知处理速度的训练^[41]。在 ACLR 手术后降低运动引起的疲劳感, 可防止膝关节和股四头肌内本体感觉和神经肌肉改变^[42]。

2.3 核心稳定训练

核心稳定性定义为在休息和运动期间实现和维持躯干和髋部区域控制的能力^[43]。核心稳定性是通过神经肌肉协调、本体感觉、躯干和髋关节肌

肉组织的力量和耐力的复杂相互作用实现的^[44]。它在能量传递和下肢和上肢之间的运动连接中起着重要作用。Ana 等^[44]发现通过 8 周的核心训练, 在单腿落地动作中, 显著增加了膝关节屈曲角度和反跳的高度, 显著降低动态落地时额状面投影角度; 表明核心训练不仅可改善 ACL 损伤的危险因素, 而且可以提高跳跃功能。Saki 等^[45]探讨 8 周核心稳定性训练对 ACLR 运动员耐力、髋关节力量和膝关节运动学的影响发现, 训练完成后, 与基线测试相比, 训练组的核心耐力、髋关节外展和外旋肌肉力量、膝关节屈曲角度显著增加, 单腿落地时膝关节外翻角度显著降低, 表明核心稳定性训练似乎对降低高风险落地生物力学危险因素和预防原发性 ACL 损伤有效。力量训练被认为是控制潜在有害运动模式的可能途径。运动控制是多因素的, 除了力量之外, 还可能受到其他成分的影响, 如肌肉弹性、神经、解剖成分等。因此, 在 ACLR 康复过程中核心力量训练是需要重点关注的内容, 快速且不耗时的动作可以减少二次受伤的风险, 正确的运动指导在促进运动模式的有效改变中发挥重要作用。

3 总结与展望

ACLR 术后生物力学主要显现为髋关节屈曲角度增大, 膝关节屈曲减小, 膝关节内翻力矩减小, 肌肉激活降低, 落地时呈现不对称性; 表明在 ACLR 术后, 重建侧肢体功能仍未完全恢复。因此, 在 ACLR 术后, 需要制定个性化康复的框架, 可通过增加辅具、减少患者疲劳、进行核心训练等干预手段提高 ACLR 术后康复效率, 减少高危人群的二次损伤, 帮助患者早日重返运动。为了改善患者的预后并降低再损伤的风险, 必须通过最新的研究来挑战 ACL 损伤后普遍的康复观念。目前, 针对 ACLR 术后 SLDJ 的文献研究相对较少, 未来可以总结最新研究, 并结合直接的临床数据, 为 ACLR 恢复提供一个临床基准的康复策略。本文提供了损伤风险系数高的动作表现出的证据特点, 对指导临床医生、康复治疗师制定和更改康复治疗计划具有重要意义。

利益冲突声明: 无。

作者贡献声明: 赵建伟负责选题和论文写作; 庄海英负责论文修改指导; 刘艺负责搜集论文数据并整理。

参考文献:

- [1] KROSSHAUG T, STEFFEN K, KRISTIANSUND E, *et al.* The vertical drop jump is a poor screening test for acl injuries in female elite soccer and handball players: A prospective cohort study of 710 athletes[J]. *Am J Sports Med*, 2016, 44(4): 874-883.
- [2] FILBAY SR, GRINDEM H. Evidence-based recommendations for the management of anterior cruciate ligament (ACL) rupture [J]. *Best Pract Res Clin Rheumatol*, 2019, 33(1): 33-47.
- [3] CHAABAN CR, TURNER JA, PADUA DA. Think outside the box: Incorporating secondary cognitive tasks into return to sport testing after ACL reconstruction [J]. *Front Sports Act Living*, 2022(4): 1089882.
- [4] LEPLEY AS, KUENZE CM. Hip and knee kinematics and kinetics during landing tasks after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Athl Train*, 2018, 53(2): 144-159.
- [5] JOHNSTON PT, MCCLELLAND JA, WEBSTER KE. Lower limb biomechanics during single-leg landings following anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis [J]. *Sports Med*, 2018, 48(9): 2103-2126.
- [6] KOTSIFAKI R, KORAKAKIS V, KING E, *et al.* Aspetar clinical practice guideline on rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Br J Sports Med*, 2023, 57(9): 500-514.
- [7] FIDAI MS, OKOROHA KR, MELDAU J, *et al.* Fatigue increases dynamic knee valgus in youth athletes: results from a field-based drop-jump test [J]. *Arthroscopy*, 2020, 36(1): 214-222. e212.
- [8] TAYLOR JB, FORD KR, NGUYEN AD, *et al.* Biomechanical comparison of single- and double-leg jump landings in the sagittal and frontal plane [J]. *Orthop J Sports Med*, 2016, 4(6): 2325967116655158.
- [9] WIGGINS AJ, GRANDHI RK, SCHNEIDER DK, *et al.* Risk of secondary injury in younger athletes after anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis[J]. *Am J Sports Med*, 2016, 44(7): 1861-1876.
- [10] KOTSIFAKI R, SIDERIS V, KING E, *et al.* Performance and symmetry measures during vertical jump testing at return to sport after ACL reconstruction [J]. *Br J Sports Med*, 2023, 57(20): 1304-1310.
- [11] KOTSIFAKI A, KORAKAKIS V, GRAHAM-SMITH P, *et al.* Vertical and horizontal hop performance: contributions of the hip, knee, and ankle [J]. *Sports Health*, 2021, 13(2): 128-135.
- [12] KOTSIFAKI A, VAN ROSSOM S, WHITELEY R, *et al.* Single leg vertical jump performance identifies knee function deficits at return to sport after ACL reconstruction in male athletes [J]. *Br J Sports Med*, 2022, 56(9): 490-498.
- [13] GLATTKE KE, TUMMALA SV, CHHABRA A. Anterior cruciate ligament reconstruction recovery and rehabilitation: A systematic review [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2022, 104(8): 739-754.
- [14] FUKUDA Y, WOO SL, LOH JC, *et al.* A quantitative analysis of valgus torque on the ACL: A human cadaveric study[J]. *J Orthop Res*, 2003, 21(6): 1107-1112.
- [15] KANAMORI A, WOO SL, MA CB, *et al.* The forces in the anterior cruciate ligament and knee kinematics during a simulated pivot shift test: A human cadaveric study using robotic technology [J]. *Arthroscopy*, 2000, 16(6): 633-639.
- [16] PATERNO MV, SCHMITT LC, FORD KR, *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.
- [17] KING E, RICHTER C, FRANKLYN-MILLER A, *et al.* Back to normal symmetry? Biomechanical variables remain more asymmetrical than normal during jump and change-of-direction testing 9 months after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Am J Sports Med*, 2019, 47(5): 1175-1185.
- [18] CLARKE SB, KENNY IC, HARRISON AJ. Dynamic knee joint mechanics after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2015, 47(1): 120-127.
- [19] KING E, RICHTER C, FRANKLYN-MILLER A, *et al.* Whole-body biomechanical differences between limbs exist 9 months after ACL reconstruction across jump/landing tasks [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2018, 28(12): 2567-2578.
- [20] LEPPÄNEN M, PASANEN K, KROSSHAUG T, *et al.* Sagittal plane hip, knee, and ankle biomechanics and the risk of anterior cruciate ligament injury: A prospective study [J]. *Orthop J Sports Med*, 2017, 5(12): 2325967117745487.
- [21] 张美珍, 刘瑞瑞, 刘卉, 等. 性别和动作对排球运动员前交叉韧带损伤危险因素的影响 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 309-316.
- ZHANG MZ, LIU RR, LIU H, *et al.* Effects of gender and maneuvers on ACL injury risk factors for volleyball players [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2): 309-316.
- [22] SHEIKHI B, LETAFATKAR A, THOMAS AC. Comparing myofascial meridian activation during single leg vertical drop jump in patients with anterior cruciate ligament

- reconstruction and healthy participants [J]. *Gait Posture*, 2021(88): 66-71.
- [23] OKUBO Y, KANEOKA K, SHIINA I, *et al.* Abdominal muscle activity during a standing long jump[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2013, 43(8): 577-582.
- [24] SMEETS A, VERHEUL J, VANRENTERGHEM J, *et al.* Single-joint and whole-body movement changes in anterior cruciate ligament athletes returning to sport[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2020, 52(8): 1658-1667.
- [25] THOMÉ R, KAPLAN Y, KVIST J, *et al.* Muscle strength and hop performance criteria prior to return to sports after ACL reconstruction [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2011, 19(11): 1798-1805.
- [26] CROTTY NMN, DANIELS KAJ, MCFADDEN C, *et al.* Relationship between isokinetic knee strength and single-leg drop jump performance 9 months after ACL reconstruction [J]. *Orthop J Sports Med*, 2022, 10(1): 23259671211063800.
- [27] PUA YH, HO JY, CHAN SA, *et al.* Associations of isokinetic and isotonic knee strength with knee function and activity level after anterior cruciate ligament reconstruction: A prospective cohort study [J]. *Knee*, 2017, 24(5): 1067-1074.
- [28] BIRCHMEIER T, LISEE C, GEERS B, *et al.* Reactive strength index and knee extension strength characteristics are predictive of single-leg hop performance after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *J Strength Cond Res*, 2019, 33(5): 1201-1207.
- [29] TEICHMANN J, HÉBERT-LOSIER K, TAN R, *et al.* Reactive strength as a metric for informing return-to-sport decisions: A case-control study [J]. *J Sport Rehabil*, 2022, 31(1): 47-52.
- [30] KOTSIFAKI A, WHITELEY R, VAN ROSSOM 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]. *Br J Sports Med*, 2022, 56(5): 249-256.
- [31] ITHURBURN MP, PATERNO MV, THOMAS S, *et al.* Change in drop-landing mechanics over 2 years in young athletes after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Am J Sports Med*, 2019, 47(11): 2608-2616.
- [32] MYER GD, SCHMITT LC, BRENT JL, *et al.* Utilization of modified NFL combine testing to identify functional deficits in athletes following ACL reconstruction [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2011, 41(6): 377-387.
- [33] HANZLÍKOVÁ I, RICHARDS J, HÉBERT-LOSIER K, *et al.* The effect of proprioceptive knee bracing on knee stability after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Gait Posture*, 2019(67): 242-247.
- [34] AAGAARD P, SIMONSEN EB, MAGNUSSON SP, *et al.* A new concept for isokinetic hamstring: quadriceps muscle strength ratio [J]. *Am J Sports Med*, 1998, 26(2): 231-237.
- [35] DICKERSON LC, PEEBLES AT, MOSKAL JT, *et al.* Physical performance improves with time and a functional knee brace in athletes after ACL reconstruction [J]. *Orthop J Sports Med*, 2020, 8(8): 2325967120944255.
- [36] HARPUR G, ULUSOY B, OZER H, *et al.* External supports improve knee performance in anterior cruciate ligament reconstructed individuals with higher kinesiphobia levels [J]. *Knee*, 2016, 23(5): 807-812.
- [37] WATANABE S, AIZAWA J, SHIMODA M, *et al.* Effect of short-term fatigue, induced by high-intensity exercise, on the profile of the ground reaction force during single-leg anterior drop-jumps[J]. *J Phys Ther Sci*, 2016, 28(12): 3371-3375.
- [38] HEWETT TE, MYER GD, FORD KR, *et al.* Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: A prospective study [J]. *Am J Sports Med*, 2005, 33(4): 492-501.
- [39] LESSI GC, SILVA RS, SERRÃO FV. Comparison of the effects of fatigue on kinematics and muscle activation between men and women after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Phys Ther Sport*, 2018(31): 29-34.
- [40] SMEETS A, VANRENTERGHEM J, STAES F, *et al.* Are anterior cruciate ligament-reconstructed athletes more vulnerable to fatigue than uninjured athletes? [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2020, 52(2): 345-353.
- [41] BENJAMINSE A, WEBSTER KE, KIMP A, *et al.* Revised approach to the role of fatigue in anterior cruciate ligament injury prevention: A systematic review with meta-analyses [J]. *Sports Med*, 2019, 49(4): 565-586.
- [42] KIM S, GLAVIANO NR, PARK J. Exercise-induced fatigue affects knee proprioceptive acuity and quadriceps neuromuscular function more in patients with ACL reconstruction or meniscus surgery than in healthy individuals [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2023, 31(12): 5428-5437.
- [43] HUXEL BLIVEN KC, ANDERSON BE. Core stability training for injury prevention[J]. *Sports Health*, 2013, 5(6): 514-522.
- [44] FERRI-CARUANA A, PRADES-INSA B, SERRA-AÑÓ P. Effects of pelvic and core strength training on biomechanical risk factors for anterior cruciate ligament injuries [J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2020, 60(8): 1128-1136.
- [45] SAKI F, SHAFIEE H, TAHAYORI B, *et al.* The effects of core stabilization exercises on the neuromuscular function of athletes with ACL reconstruction [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 2202.