

前交叉韧带重建术后股四头肌萎缩的发生机制及康复治疗

苏明莉^{1,2} 张葆欣³ 刘西纺⁴ 朱平² 杨艳妮⁵

¹甘肃中医药大学针灸推拿学院康复基础教研室,兰州 730000; ²西安体育学院研究生院,西安 710068; ³西安体育学院运动与健康科学学院,西安 710068; ⁴西安交通大学附属红会医院骨科康复病区,西安 710054; ⁵陕西中医药大学研究生院,咸阳 712046

通信作者:刘西纺,Email:42529695@qq.com

【摘要】 股四头肌萎缩是前交叉韧带损伤重建术后最常见的临床症状,并在术后长期存在,严重影响患者的功能恢复并可引起再次损伤及骨性关节炎的早发。因此,为最大限度降低并发症,应在及时预防肌萎缩的同时,采用综合康复措施优化和加速其肌力恢复。本文主要综述前交叉韧带重建术后股四头肌萎缩的发生机制及其康复策略,以期临床康复干预提供新思路。

【关键词】 前交叉韧带重建; 肌萎缩; 肌力; 康复治疗

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.07.019

前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤是最常见的膝关节运动损伤,据统计,ACL 在外伤群体中损伤率高达 20.9%^[1]。关节镜下重建术可较好地恢复膝关节的稳定性,是其目前主要治疗手段^[2],但其术后股四头肌萎缩、肌力下降,严重影响患者的功能恢复,并可引起骨性关节炎的早发^[3]。由于术后早期疼痛、肿胀以及移植物需要一定的时间进行功能重塑,致使对肌力恢复有效的传统高负荷训练在术后早期受到限制。因此,肌力康复是 ACL 术后患者康复的关键和难点所在。本文主要对 ACL 术后肌萎缩的发生机制及康复治疗方法展开综述,旨在为临床提供基于证据的参考。

ACL 术后肌肉功能变化

ACL 术后下肢出现肌肉萎缩,肌力下降,并长期存在^[3]。Thomas 等^[4]采用磁共振图像测量 ACL 术后 6 个月内患者的股四头肌峰值横截面积,发现患侧较健侧少 15%。另有证据显示,ACL 术后股四头肌肌力下降高达 40%,腓绳肌下降 9%~27%^[5]。更有大量研究表明,膝关节伸肌肌力通常在恢复运动前无法解决^[3,5]。

影响术后肌力康复的主要因素

ACL 术后早期康复的基本原则是保护移植物,在此基础上尽可能早地介入科学有效的肌力康复手段。而根据美国运动医学会建议,在进行以增强肌力为目的的抗阻训练时,阻力负荷至少应达到单次重复最大负荷(1-repetition maximum, 1RM)的 60%~70%以上^[6]。但由于术后疼痛、肿胀、移植物类型及张力变化、骨道愈合等主要因素,这一高负荷对 ACL 术后早期患者难以实现^[7-11]。

一、疼痛和肿胀

疼痛与肿胀是 ACL 损伤及重建手术均无法避免的临床症状。一方面,疼痛和肿胀可通过相应节段的脊髓前角细胞传出信号,保护性抑制关节周围肌肉功能活动形成关节源性肌肉抑制,使其肌力下降^[7];另一方面,疼痛和肿胀引起一定程度的患

肢制动,导致股四头肌产生废用性肌萎缩^[3]。而对肌力康复有效的高负荷训练会加重术后早期患者的疼痛与肿胀,进一步对股四头肌产生抑制,形成恶性循环。因此,疼痛、肿胀是影响术后肌力康复的首要原因。

二、移植物类型

ACL 重建移植物目前主要有自体移植物、同种异体移植物和人工韧带三类,按照来源移植物主要有骨-髌腱-骨和腓绳肌腱。由于不同来源移植物的生物学特性、手术方式、术后并发症均有异,早期肌力康复的介入时间、侧重点、禁忌训练动作等存在差别^[8]。相较于异体移植物对供体创伤小,但有排异反应的特点,自体移植物无排异反应,可较早实现骨道愈合,为及时介入积极有效的肌力康复手段创造条件^[12]。自体移植物因对供区造成不可避免的损伤,肌力康复方案因移植物来源而异。其中,自体骨-髌腱-骨由于髌腱强度和刚度均良好,且两端带有骨块可产生目前最可靠的骨性愈合,可较早进行康复训练,但存在髌骨骨折、髌腱断裂和髌前疼痛等并发症^[13],故早期康复应避免引起髌腱张力过高的动作。自体腓绳肌腱并发症相对较少,是目前临床上最为常见的自体移植物^[8]。研究显示,自体腓绳肌腱重建 ACL 术后股四头肌和腓绳肌肌力皆明显下降^[5]。因此,在行股四头肌肌力康复的同时应适时加强腓绳肌的训练。此外,人工韧带强度大、稳定性好,且无感染和传播疾病的风险,术后早期便可进行肌力训练,适用于年轻及运动员等有早期恢复运动需求的人群^[8]。

三、移植物张力变化

ACL 是防止胫骨相对于股骨前移和内旋的主要静态稳定器,占抗前移总力的 86%^[14],由于术后早期需要保护移植物,即在不增加移植物张力的情况下进行训练,肌力康复因此受到诸多限制。首先,不同时期移植物抗张力不同,肌力训练强度因此受限。有证据显示,术后 1~4 周由于移植物原有细胞大量凋亡坏死,细胞增殖程度低,而在术后 5~12 周,移植物细胞大量增殖,周围血管长入,原有纤维结构遭到破坏,移植物力学性能逐渐下降,并在术后 6~8 周进入蠕变期,生物力学下降可达 30%~50%,因此,在此期间不宜采用高强度抗阻训练^[9]。其

次,不同的膝关节屈曲角度可使移植物张力产生不同变化。已有证据显示,当膝关节屈曲角度在 0~50° 范围时,股四头肌收缩使 ACL 所受负荷逐渐增高,而当屈曲超过 50° 以后 ACL 所受负荷将逐渐下降^[10]。因此,肌力训练时膝关节角度范围亦因此而受限。

四、腱骨愈合

腱骨是否愈合是影响早期肌力康复的又一因素。而影响腱骨愈合的因素主要有移植物的类型、骨道的位置、移植物在骨道中的应力、康复训练的强度等,而总结分析这些因素都与是否增加肌腱与骨道的相对运动有关。研究表明,过早的高负荷阻力训练可增加肌腱在骨道内的相对运动,加重关节内的炎症反应,延迟腱骨愈合,甚至扩大骨髓道^[11]。因此,对肌力恢复有效的高负荷阻力训练同样受到限制。

术后肌萎缩发生机制

ACL 术后股四头肌出现持续性功能障碍,其发生机制目前尚未完全统一,但有证据显示主要与股四头肌激活障碍和废用性肌萎缩有关^[3,7,15]。关节源性肌肉抑制被认为是其主要原因^[7]。术后疼痛、肿胀使得对应节段的脊髓前角细胞发出信号对股四头肌进行保护性抑制,由于 ACL 上分布有 Ruffini 小体、Pacinian 小体、Golgi 腱器官等机械感受器和游离神经末梢,术后来自 ACL 的本体感受信息中断导致 α 运动神经元的募集和反射功能降低,使得股四头肌无法完全自主地进行肌肉收缩,导致其功能部分被抑制^[4,7]。也有学者认为,ACL 术后髌、踝关节周围肌群被过度激活,也可导致股四头肌功能被抑制^[15]。另一方面,废用性肌萎缩是导致股四头肌功能障碍的又一重要因素。由于术后早期疼痛、肿胀以及需要足够的时间进行组织修复、移植物愈合,故无法进行对肌力恢复有效的高负荷训练,使

得下肢肌肉出现一定程度的废用^[3]。有证据显示,废用状态下的肌肉其蛋白质合成减弱而降解增加,使得肌纤维类型由 I 型向 II 型转变,肌肉质量下降、体积减小,进而影响其肌力显著下降^[16]。此外,有报道显示,ACL 重建侧肢体的皮质脊髓束兴奋性较健侧低^[17],而证据同样显示肌肉废用状态可影响皮层和脊髓水平的运动神经功能,使得该水平的静默期延长,进而影响股四头肌主动收缩时运动神经元的募集和反射,导致股四头肌功能下降^[16]。

有最新研究显示,肌内代谢水平及术后下肢生物力学的变化与股四头肌功能下降有一定相关性。研究发现,ACL 损伤后肌肉量下降的原因很可能是肌生成抑制素的增加所致^[18]。肌生成抑制素促进了肌肉成纤维改变,而股四头肌的纤维化会限制肌肉功能的恢复,导致股四头肌功能的进一步减退,而对这一说法目前还需更多的研究加以验证。有报道称 ACL 术后不良的下肢生物力学可能与股四头肌功能障碍有关,结果显示,与未受伤的肢体相比,重建侧肢体的股骨内侧髌软骨更薄,股骨软骨横截面积更小,且股四头肌力量与股骨内侧髌软骨厚度和横截面积之间存在弱到中等的相关性^[19],这与之前的一项研究结果一致,作者解释认为,股四头肌力量与软骨丢失后在行走过程中关节对齐和膝关节内收力矩改变有关,并提出 ACL 术后股四头肌功能和软骨厚度之间的纵向关系还需更进一步研究^[20]。如图 1 所示。

康复治疗

ACL 术后肌力康复的基本原则为保护移植物,在结合移植物重塑化生物学特性的基础上,分期制订科学有效的康复手段,最大限度限制术后肌肉萎缩的同时,最大程度促进其肌力恢复。

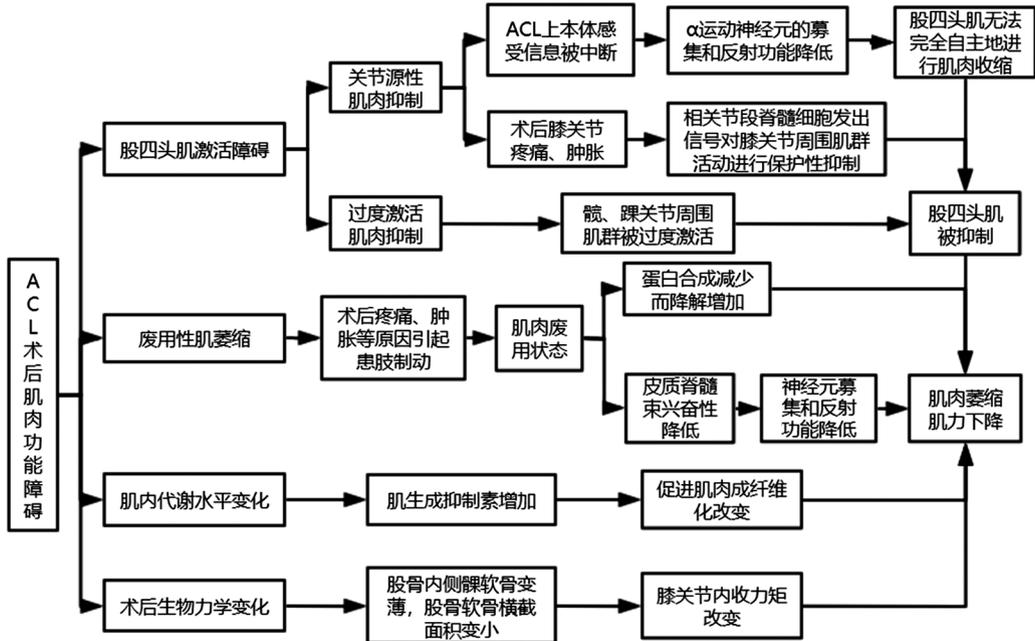


图 1 ACL 术后肌萎缩发生机制

一、术前康复干预

术前肌力康复不仅可以为最佳手术做准备,而且能提高术后患者功能。多项研究表明以恢复肌力为主的术前康复计划可以提高术后膝关节功能^[21-22]。而 Lepley 等^[22]在研究股四头肌术前激活程度与术后激活程度的关系中发现,术前股四头肌激活更好的患者表现出更好的术后激活,而术前肌肉强度更高的患者也表现出更好的术后强度。对于术前肌力恢复的最佳水平,有研究者建议恢复至对侧肢体的 90% 以上,但对这一观点目前尚未明确^[23]。因此,术前对股四头肌进行肌力训练对其术后功能表现及预后极为重要。

二、术后患侧肌力康复

1. 控制疼痛和肿胀:疼痛和肿胀是 ACL 术后常见症状,不仅刺激移植体并对肌肉萎缩和关节功能产生持续影响,故控制疼痛、肿胀成为术后早期康复的首要目标。急性期应遵守 POLICE 原则。对于 ACL 术后疼痛及肿胀的治疗方法,Secrist 等^[24]总结了关于 ACL 术后疼痛控制的 77 个随机对照实验发现,对于控制疼痛及肿胀有效的治疗方法主要包括对疼痛区域的关节腔注射和神经阻滞、冷疗和肌效贴、接受冷疗后立即进行康复锻炼。此外,伸膝不足也可导致术后膝关节疼痛^[25]。有研究表明,被动关节活动训练在改善关节活动度的同时也可少量减轻疼痛^[26],但持续被动运动(continuous passive motion, CPM)装置的使用目前存在争议,有研究发现,CPM 对 ACL 术后疼痛改善不明显,并可能导致移植体变性,骨隧道扩大,对膝关节的稳定性产生不利影响。因此,有学者不建议早期使用 CPM 装置,可在视觉模拟评分反馈下的可承受疼痛范围内由治疗师进行被动关节活动训练^[10]。支具的使用虽然有学者认为 ACL 术后佩戴护具并不能改善患者膝关节功能^[27],但从早期保护移植体的角度,也有研究发现术后佩戴护具可保持膝关节伸直位,减少疼痛、防止移植体应变^[28]。

2. 预防和改善肌萎缩:研究显示,ACL 术后早期肌肉质量和力量都将快速下降^[3]。因此,术后早期肌萎缩的预防对患者功能预后极其重要,主要以功能性电刺激结合肌肉等长收缩训练、等速肌力训练和血流限制训练为主。

神经肌肉电刺激是临床常用的预防肌萎缩的物理因子治疗,其通过低频脉冲电流刺激肌肉使其收缩,通过易化作用和提高运动单位兴奋性,保持肌肉蛋白合成,防止由于肢体长时间制动造成的肌萎缩^[29]。多项研究表明,相比单纯的标准物理治疗,神经肌肉电刺激结合物理治疗对 ACL 术后股四头肌肌力和功能的恢复均有明显改善^[30]。而肌电生物反馈在电刺激肌肉的同时,要求患者主动收缩肌肉,并通过生物反馈使患者对运动进行控制,以此提高肌力。陆琳等^[31]比较了电刺激和肌电生物反馈疗法对 ACL 术后股四头肌肌力和关节活动度恢复速度的效果后发现,虽然 2 组在影响膝充分伸展的恢复速度方面没有显著性差异,但生物反馈组在健侧股四头肌峰值力矩恢复百分率上明显大于电刺激组。

肌肉等长收缩训练主要有直腿抬高练习和绷腿练习。直腿抬高练习时注意患肢与床面呈 30°~40° 夹角,保持 5~10 s。随着膝关节疼痛肿胀的控制以及关节活动度的改善,可以借助一定的器具或人为给予阻力负荷在膝关节屈曲 60°~90° 范围内进行多角度等长抗阻伸膝训练^[32]。有研究结果显示,开链运动和闭链运动对 ACL 术后膝关节稳定性及下肢步行功能方面均

能达到较为满意的效果,但闭链训练下双脚固定于地面,协同肌和拮抗肌的共同收缩,可以有效控制胫骨过度前移,使 ACL 上施加的压力更小,更加安全可靠,因此更适合术后早期康复^[33]。

等速肌力训练可使肌肉以恒定的角速度进行最大力度的收缩,并且肌肉收缩产生的力等于阻力,是较传统肌力训练更安全、有效的一种提高肌肉力量的有效手段^[34]。研究显示,等速肌力训练不仅可以增加膝关节屈伸的最大肌力、爆发力和肌耐力,而且能有效改善膝关节的位置觉^[35]。而对于 ACL 术后等速肌力训练开始的时间对术后肌力恢复水平的影响, Sekir 等^[34]报道称术后第 3 周开始等速肌力训练较第 9 周开始股四头肌改善更为迅速有效。

相比传统的肌力训练方法,血流限制训练被认为是改善肌力的一种新方法,将加压袖带置于肢体近端并充气至指定压力,肢体在血流限制基础上进行不同程度的抗阻训练,其优势在于血流限制结合低负荷(20%~30% 1RM)的抗阻训练便可达到高负荷(60% 1RM 以上)抗阻训练相类似的效果^[36]。目前认为,其作用机制主要是低氧环境下代谢应激水平和应力刺激增加所致^[37]。Takarada 等^[38]研究观察了无阻力负荷下血流限制对 ACL 重建术后患者第 3 天~第 14 天的下肢肌肉萎缩变化,结果发现血流限制性刺激的周期性应用可有效减少术后膝关节伸肌萎缩,但迄今为止其在 ACL 术后早期的研究较少见报道。

3. 强化肌力:ACL 术后中后期,随着移植体逐渐愈合,应加强肌力训练。不同移植体重塑化时间不同,相比愈合时间约 8 周的自体髌腱移植,腓绳肌肌腱愈合时间稍长(约 12 周)^[39]。阻力负荷是肌力强化的决定性因素,但在移植体未愈合时间内应避免对患者进行肌力抗阻训练。相较于术后早期肌力训练在阻力负荷、训练方式、膝关节角度等方面的诸多限制,移植体愈合后的肌力康复可根据患者恢复情况调整阻力负荷至 60%~70% 1RM 以增强肌力的标准要求^[40]。研究表明,开链训练和闭链训练相结合比单纯的开链或闭链训练更有益于 ACL 术后股四头肌肌力的恢复^[33]。而神经肌肉控制训练不仅能减小双下肢股四头肌力量差异,还能改善膝关节本体感觉^[30,41]。有证据显示,低负荷血流限制训练在 ACL 术后中后期的应用中对股四头肌肌力及横截面积的增加均有显著影响^[42]。

三、健侧及核心肌力训练

已有证据显示,ACL 术后不仅患侧肌力下降,健侧膝关节周围肌力也有所下降^[5,43]。因此,在注重患侧肌力训练的同时,应加强健侧肌力训练。对于健侧肌力训练的形式,有学者建议与患侧执行相同的训练方案^[3]。

此外,有研究显示 ACL 术后存在髋部肌肉力量不足^[5]。而核心和髋部肌肉无力是 ACL 受伤的危险因素,这一点已为人们所接受^[44]。有学者将躯干核心肌力训练加入到 ACL 术后的康复计划中,经过一段时间训练后,不仅腰部核心肌群显著增加,膝关节动态平衡能力也有所增加^[45]。因此,术后核心肌力训练应作为肌力训练的一部分加入患者术后康复计划中。ACL 术后不同阶段肌力康复方案根据相关研究结果提取汇总见表 1。

综上所述,ACL 重建术后肌肉质量和力量快速下降并长期存在,严重影响患者功能恢复,肌萎缩的预防及康复对促进患者功能恢复、预防再次损伤及骨性关节炎的早发现至关重要。

表 1 术后不同阶段肌力康复方案

术后时间	康复目标	康复治疗方案
术后 0~4 周	①控制疼痛、肿胀 ^[7] ;②保护移植术 ^[10] ;③膝关节保持伸直并进行关节活动度训练达屈膝 90° ^[26] ;④患肢部分负重 ^[10] ;⑤预防肌肉萎缩 ^[3,7]	①冷疗、肌内效贴、抬高患肢、伸直位支具保护 ^[24] ;②关节被动活动训练 ^[10,24] ;③功能性电刺激、肌肉等长收缩训练、支具保护下部分负重训练、限制性闭链运动 ^[28-32]
术后 4~8 周	①训练过程中轻度疼痛、肿胀 ^[10] ;②膝关节主动伸直并且屈曲达 120° ^[26] ;③患肢完全负重 ^[10] ;④预防肌肉萎缩、肌力下降 ^[7,30]	①肌内效贴、抬高患肢、0°~90°支具保护 ^[24] ;②关节被动活动训练 ^[24] ;③功能性电刺激、肌肉等长收缩训练、限制性开链与闭链运动、支具保护下渐进负重训练、等速肌力训练、低负荷血流限制训练 ^[28-32,35,42]
术后 8~12 周	①训练过程中无疼痛、肿胀 ^[10] ;②膝关节活动度达正常范围 ^[26] ;③提高患肢肌力 ^[40] ;④提高核心肌力 ^[45]	①功能性电刺激 ^[29] ;②肌肉等长收缩训练、限制性开链运动与闭链运动、等速肌力训练、低负荷血流限制训练 ^[32,35,42] ;③核心肌力训练 ^[45]
术后 12 周后	①强化双下肢肌力 ^[40] ;②强化核心稳定性及患膝动态稳定性 ^[45]	①低负荷血流限制训练、中等负荷抗阻训练(开链和闭链运动)、等速肌力训练 ^[35,38,42] ;②神经肌肉控制训练 ^[39,41] ;③其它

因此,术后应采用多种康复手段进行科学合理的康复干预以最大限度减轻术后早期肌萎缩并加快肌力恢复。其中,血流限制结合低强度抗阻训练被认为是加速 ACL 术后肌力恢复的有效新方法,尤其是在术后早期多种康复训练受限的情况下使用有潜在优势,但由于目前研究较少,其作为标准推荐到 ACL 术后的常规康复中还需更多的多样本多中心的高质量研究,以证实其安全性和有效性。

参 考 文 献

- [1] 丁兆明,陈兵.膝关节前交叉韧带损伤的外伤原因流行病学调查[J].滨州医学院学报,2020,43(1):27-29. DOI:10.19739/j.cnki.issn1001-9510.2020.01.007.
- [2] Tapasvi S, Shekhar A. Revision ACL reconstruction: principles and practice[J]. Indian J Orthop, 2021, 55(2):263-275. DOI:10.1007/s43465-020-00328-8.
- [3] Baron JE, Parker EA, Duchman KR, et al. Perioperative and postoperative factors influence quadriceps atrophy and strength after ACL reconstruction: a systematic review[J]. Orthop J Sports Med, 2020, 8(6):2325967120930296. DOI:10.1177/2325967120930296.
- [4] Thomas AC, Wojtys EM, Brandon C, et al. Muscle atrophy contributes to quadriceps weakness after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. J Sci Med Sport, 2016, 19(1):7-11. DOI:10.1016/j.jsams.2014.12.009.
- [5] Thomas AC, Villwock M, Wojtys EM, et al. Lower extremity muscle strength after anterior cruciate ligament injury and reconstruction[J]. J Athl Train, 2013, 48(5):610-620. DOI:10.4085/1062-6050-48.3.23.
- [6] American College of Sports Medicine. American college of sports medicine position stand progression models in resistance training for healthy adults[J]. Med Sci Sports Exerc, 2009, 41(3):687-708. DOI:10.1249/MSS.0b013e3181915670.
- [7] Krishnan C, Washabaugh EP, Dutt-Mazumder A, et al. Conditioning brain responses to improve quadriceps function in an individual with anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Sports Health, 2019, 11(4):306-315. DOI:10.1177/1941738119835163.
- [8] Yucens M, Aydemir AN. Trends in anterior cruciate ligament reconstruction in the last decade: a Web-based analysis[J]. J Knee Surg, 2019, 32(6):519-524. DOI:10.1055/s-0038-1655764.
- [9] Graf-Alexiou L, Karpysyn J, Baptiste JJ, et al. Biomechanical strength of all-inside ACL reconstruction grafts using side-to-side and backup

- fixation[J]. Orthop J Sports Med, 2021, 9(5):23259671211006521. DOI:10.1177/23259671211006521.
- [10] Zhu J, Marshall B, Tang X, et al. ACL graft with extra-cortical fixation rotates around the femoral tunnel aperture during knee flexion[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2022, 30(1):116-123. DOI:10.1007/s00167-021-06703-8.
- [11] 刘书芳,矫玮.运动员前交叉韧带重建术后康复程序对其骨髓道影响的研究进展[J].广州体育学院学报,2014,34(2):95-99. DOI:10.13830/j.cnki.cn44-1129/g8.2014.02.027.
- [12] Yao S, Fu BS, Yung PS. Graft healing after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR)[J]. Asia Pac J Sports Med Arthrosc Rehabil Technol, 2021, 25(7):8-15. DOI:10.1016/j.asmart.2021.03.003.
- [13] Smith AH, Capin JJ, Zarzycki R, et al. Athletes with bone-patellar tendon-bone autograft for anterior cruciate ligament reconstruction were slower to meet rehabilitation milestones and return-to-sport criteria than athletes with hamstring tendon autograft or soft tissue allograft: secondary analysis from the ACL-sports trial[J]. J Orthop Sports Phys Ther, 2020, 50(5):259-266. DOI:10.2519/jospt.2020.9111.
- [14] Imhoff FB, Comer B, Obopilwe E, et al. Effect of slope and varus correction high tibial osteotomy in the ACL-deficient and ACL-reconstructed knee on kinematics and ACL graft force: a biomechanical analysis[J]. Am J Sports Med, 2021, 49(2):410-416. DOI:10.1177/0363546520976147.
- [15] Buckthorpe M. Optimising the late-stage rehabilitation and return-to-sport training and testing process after ACL reconstruction[J]. Sports Med, 2019, 49(7):1043-1058. DOI:10.1007/s40279-019-01102-z.
- [16] 周永战,陈佩杰,郑莉芳,等.废用性肌萎缩的发生机制及治疗策略[J].中国康复医学杂志,2017,32(11):1307-1313. DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2017.11.023.
- [17] Nuccio S, Vecchio AD, 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]. J Physiol, 2021, 599(22):5103-5120. DOI:10.1113/JP282014.
- [18] Conceição MS, Ugrinowitsch C. Exercise with blood flow restriction: an effective alternative for the non-pharmaceutical treatment for muscle wasting[J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle, 2019, 10(2):257-262. DOI:10.1002/jcsm.12397.
- [19] Pamukoff DN, Montgomery MM, Moffit TJ, et al. Quadriceps function and knee joint ultrasonography after ACL reconstruction[J]. Med Sci Sports Exerc, 2018, 50(2):211-217. DOI:10.1249/MSS.

000000000001437.

- [20] Lansdown DA, Podoia V, Zaid M, et al. Variations in knee kinematics after ACL injury and after reconstruction are correlated with bone shape differences[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2017, 475(10): 2427-2435. DOI: 10.1007/s11999-017-5368-8.
- [21] Grindem H, Granen LP, Risberg MA, et al. How does combined preoperative and postoperative rehabilitation programme influence the outcome of ACL reconstruction two years after surgery? A comparison between patients in the Delaware-Oslo ACL Cohort and the Norwegian National Knee Ligament Registry[J]. *Br J Sports Med*, 2015, 49(6): 385-389. DOI: 10.1136/bjsports-2014-093891.
- [22] Lepley LK, Wojtys EM, Palmieri-Smith RM. Combination of eccentric exercise and neuromuscular electrical stimulation to improve quadriceps function post-ACL reconstruction[J]. *Knee*, 2015, 22(3): 270-277. DOI: 10.1016/j.knee.2014.11.013.
- [23] Hägglund M, Waldén M, Thomeé R. Should patients reach certain knee function benchmarks before anterior cruciate ligament reconstruction? Does intense 'prehabilitation' before anterior cruciate ligament reconstruction influence outcome and return to sports[J]. *Br J Sports Med*, 2015, 49(22): 1423-1424. DOI: 10.1136/bjsports-2015-094791.
- [24] Secrist ES, Freedman KB, Ciccotti MG, et al. Pain management after outpatient anterior cruciate ligament reconstruction; a systematic review of randomized controlled trials[J]. *Am J Sports Med*, 2016, 44(9): 2435-2447. DOI: 10.1177/0363546515617737.
- [25] Marques FDS, Barbosa PHB, Alves PR, et al. Anterior knee pain after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Orthop J Sports Med*, 2020, 8(10): 2325967120961082. DOI: 10.1177/2325967120961082.
- [26] Lepley AS, Pietrosimone B, Cormier ML. Quadriceps function, knee pain, and self-reported outcomes in patients with anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *J Athl Train*, 2018, 53(4): 337-346. DOI: 10.4085/1062-6050-245-16.
- [27] Chen Z, Liu L, Xiao T. Knee bracing after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Orthopedics*, 2016, 39(4): 1-8. DOI: 10.3928/01477447-20170302-01.
- [28] Perrone GS, Webster KE, Imbriaco C, et al. Risk of secondary ACL injury in adolescents prescribed functional bracing after ACL reconstruction[J]. *Orthop J Sports Med*, 2019, 7(11): 2325967119879880. DOI: 10.1177/2325967119879880.
- [29] 陈建, 周敬滨, 解强, 等. 神经肌肉电刺激对前交叉韧带重建术后腘绳肌功能的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2016, 35(8): 750-753. DOI: 10.16038/j.1000-6710.2016.08.010.
- [30] 韩琼, 李强, 张楠心, 等. 神经肌肉电刺激联合早期康复训练对关节镜下前交叉韧带重建术后康复的影响[J]. *中外医学研究*, 2021, 19(27): 121-123. DOI: 10.14033/j.cnki.cfmr.2021.27.037.
- [31] 陆琳, 陆廷仁, 高丽洁, 等. 肌电生物反馈疗法在膝关节前交叉韧带重建术后功能康复中的应用[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2010, 32(5): 395-396. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2010.05.026.
- [32] 于惠贤, 陈亚平, 何蕾, 等. 前交叉韧带重建术后闭链训练结合多角度等长肌力训练增强膝关节稳定性的研究[J]. *现代医学与健康研究(电子杂志)*, 2017, 1(1): 1-3.
- [33] 董伊隆, 钱约男, 刘良乐, 等. 有限开链加闭链运动对前交叉韧带重建术后功能恢复的意义[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2016, 38(4): 292-296. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2016.04.012.
- [34] Sekir U, Gur H, Akova B. Early versus late start of isokinetic hamstring-strengthening exercise after anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendo graft[J]. *Am J Sports Med*, 2010, 38(3): 492-500. DOI: 10.1177/0363546509349490.
- [35] 王富鸿, 张金梅, 程亮, 等. 等速训练对前交叉韧带重建运动员膝关节肌力和位置觉的影响[J]. *环境与职业医学*, 2018, 35(8): 716-720. DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2018.17735.
- [36] 苏明莉, 刘西纺, 张葆欣, 等. 血流限制训练在膝关节功能康复中的应用现状[J]. *中国康复医学杂志*, 2021, 36(3): 375-382. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2021.03.025.
- [37] 李新通, 潘玮敏, 覃华生, 等. 血流限制训练: 加速肌肉骨骼康复的新方法[J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23(15): 2415-2420. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.1142.
- [38] Takarada Y, Takazawa H, Ishii N. Applications of vascular occlusion diminish disuse atrophy of knee extensor muscles[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2000, 32(12): 2035-2039. DOI: 10.1097/00005768-200012000-00011.
- [39] Kim SJ, Choi CH, Kim SH, et al. Bone-patellar tendon-bone autograft could be recommended as a superior graft to hamstring autograft for ACL reconstruction in patients with generalized joint laxity: 2- and 5-year follow-up study[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2018, 26(9): 2568-2579. DOI: 10.1007/s00167-018-4881-y.
- [40] 杨伟毅, 练文兴, 曹学伟, 等. 肌力强化训练对膝关节前交叉韧带重建术后伴股四头肌萎缩患者肌力恢复的疗效[J]. *实用医学杂志*, 2012, 28(13): 2221-2223. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5725.2012.13.046.
- [41] Kaya D, Guney-Deniz H, Sayaca C, et al. Effects on lower extremity neuromuscular control exercises on knee proprioception, muscle strength, and functional level in patients with ACL reconstruction[J]. *Biomed Res Int*, 2019, 2019: 1694695. DOI: 10.1155/2019/1694695.
- [42] Hughes L, Rosenblatt B, Haddad F, et al. Comparing the effectiveness of blood flow restriction and traditional heavy load resistance training in the post-surgery rehabilitation of anterior cruciate ligament reconstruction patients; a UK national health service randomised controlled trial[J]. *Sports Med*, 2019, 49(11): 1787-1805. DOI: 10.1007/s40279-019-01137-2.
- [43] Patterson BE, Crossley KM, Perraton LG, et al. Limb symmetry index on a functional test battery improves between one and five years after anterior cruciate ligament reconstruction, primarily due to worsening contralateral limb function[J]. *Phys Ther Sport*, 2020, 44: 67-74. DOI: 10.1016/j.ptsp.2020.04.031.
- [44] De Blaiser C, Roosen P, Willems T, et al. Is core stability a risk factor for lower extremity injuries in an athletic population? A systematic review[J]. *Phys Ther Sport*, 2018, 30(1): 48-56. DOI: 10.1016/j.ptsp.2017.08.076.
- [45] 吴斌, 郑松, 蔡震海, 等. 核心力量训练对前交叉韧带重建术后功能影响的病例对照研究[J]. *中国骨伤*, 2017, 30(8): 716-720. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2017.08.007.

(修回日期: 2022-04-12)

(本文编辑: 汪玲)