

• 综述 •

内减张技术在辅助前交叉韧带重建中的研究进展



徐飞^{1,2}, 李彦林^{1,2}, 王国梁^{1,2}, 刘德健^{1,2}

1. 昆明医科大学(昆明 650000)

2. 昆明医科大学第一附属医院运动医学科(昆明 650032)

【摘要】 目的 对内减张技术辅助肌腱移植物重建前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 的研究进展进行综述。方法 广泛查阅近年来国内外关于使用内减张技术辅助 ACL 重建的体内外生物力学研究、动物实验和临床研究, 分析总结该技术对于移植物生物力学、组织学结果以及临床效果的影响。结果 基于不可降解高强度缝线带的内减张技术, 可通过增强肌腱移植物的体内外生物力学强度, 降低其松弛和断裂风险; 组织学方面表现出良好的生物相容性, 并支持肌腱移植物的术后韧带化和直接腱-骨界面愈合; 临床研究显示其改善了术后关节稳定性、活动度和功能评分, 配合术后加速康复能促进患者恢复至伤前运动水平, 未见严重并发症。结论 目前研究结果初步证实了内减张技术辅助肌腱移植物重建 ACL 的有效性和安全性, 具备一定意义和应用前景, 但还需要更多研究进一步优化内减张装置性能和相关手术技术, 并明确该技术对于移植物结构重塑、生物力学功能以及临床远期效果的具体影响。

【关键词】 关节镜; 前交叉韧带; 重建; 内减张技术; 内支撑

Research progress of internal tension relieving technique in assisting anterior cruciate ligament reconstruction

XU Fei^{1,2}, LI Yanling^{1,2}, WANG Guoliang^{1,2}, LIU Dejian^{1,2}

1. Kunming Medical University, Kunming Yunnan, 650000, P.R.China

2. Department of Sports Medicine, the First Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming Yunnan, 650032, P.R.China

Corresponding author: LI Yanling, Email: 852387873@qq.com

【Abstract】 Objective To review the research progress of internal tension relieving technique in assisting anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction with tendon grafts. **Methods** The *in vivo* and *in vitro* biomechanical tests, animal experiments, and clinical studies on the use of internal tensioning relieving technique assisted ACL reconstruction in recent years were extensively reviewed, the impact of this technology on the biomechanics, histological changes of grafts, and the clinical effectiveness were analyzed and summarized. **Results** The internal tensioning relieving technique based on non-absorbable high-strength sutures can reduce the risk of relaxation and rupture by enhancing the biomechanical strength of tendon grafts *in vitro* and *in vivo*, it shows good biocompatibility and support for the ligamentation of the tendon grafts and the establishment of the direct tendon-bone interface in terms of histology. This technique improves postoperative initial joint stability, range of motion, and functional scores in clinical practice, when combining with the enhanced recovery after surgery can effectively promote patients to return to pre-injury exercise level without serious complications. **Conclusion** The preliminary research results have confirmed the efficacy and safety of the internal tension relieving technique on assisting ACL reconstruction, then shows some degree of significance and prospect, but more research is needed to further optimize tension-relieving devices and related surgical techniques, and clarify the specific effects of this technique on graft's structure remodeling, biomechanical function, and long-term clinical results.

【Key words】 Arthroscopy; anterior cruciate ligament; reconstruction; internal tension relieving technique; internal bracing

DOI: 10.7507/1002-1892.202106080

基金项目: 云南省骨关节疾病临床医学中心项目 (ZX-2019-03-04); 云南省陈世益专家工作站项目 (2018IC102); 云南省领军人才资助项目 (L-201601)

通信作者: 李彦林, Email: 852387873@qq.com

Foundation items: Project of Clinical Medical Center for Bone and Joint Diseases of Yunnan Province (ZX-2019-03-04); CHEN Shiyi Expert Workstation Project of Yunnan Province (2018IC102); Leading Talent Funding Project of Yunnan Province (L-201601)

前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 的主要作用是维持膝关节稳定性, 损伤后可出现关节失稳和骨关节炎; ACL 损伤在运动员和青年人群中高发, 常见于急性运动创伤^[1-2]。因韧带的再生和愈合能力受限, ACL 重建成为临床治疗 ACL 损伤的主要手段, 通过自体、同种异体肌腱和人工韧带重建关节的稳定性和力学功能, 提高了患者整体满意度^[3-4]。自体肌腱移植虽然存在供区并发症, 但组织同源性的优势仍使其成为 ACL 重建中使用最广泛的移植物, 主要有骨-髌腱-骨复合体、腓绳肌腱、股四头肌腱^[5]; 同种异体肌腱通过制备技术的优化增强了移植物性能, 能够表现出与自体肌腱相似的临床疗效, 并避免了供区并发症^[6-7]; 而人工韧带移植物 LARSTM 目前在临床使用日益广泛且效果瞩目^[4]。

尽管 ACL 重建技术在不断进步, 但仍有不少患者出现了移植物再破裂和运动功能恢复不理想的情况^[8], 部分与术后导致移植物张力异常的危险因素相关, 主要包括: ①“高危人群”。青年患者和运动员群体 ACL 高损伤率和重建术后的高失败率, 均与较高运动负荷相关^[9-10]。②移植物生物性因素。肌腱移植物本身的材料黏弹性和术后 6~12 周“增殖期”内胶原纤维崩解, 导致移植物即使在低于生理水平的急性和慢性负荷下, 均存在塑性变形、松动甚至破裂的风险^[11-12]; 而同种异体肌腱可能存在更漫长的韧带重塑过程^[13]。③移植物尺寸。肌腱移植物横截面过小, 会导致其所能承受的极限负荷下降, 以及在相同负荷下应力上升^[14], 可在术前结合患者身高、体质量和影像学结果综合评估肌腱尺寸^[15-16]。④加速康复理念。1990 年 Shelbourne 等^[17]提出了 ACL 重建后加速康复方案, 相比常规康复方案更加激进, 旨在预防术后关节僵硬、运动功能受限等并发症, 改善整体预后。但受术后韧带化影响, 加速或常规康复方案均可能导致术后早期关节失稳, 诱发骨关节炎^[9, 18-19]。

针对以上风险, 近年来有研究提出可使用高强度内减张装置辅助肌腱移植物重建 ACL, 以期在术后通过负荷分担缓解张力导致的移植肌腱松弛和微动, 配合加速康复方案改善整体预后, 即“内减张技术”^[20], 这与国外学者提出的“内支撑 (internal bracing) 技术”属于同一概念范畴^[4, 21]。

本文将对近年使用内减张技术辅助 ACL 重建的体内外研究进行系统总结, 通过体内外生物力学、组织学结果以及临床 ACL 重建效果, 综合评估该技术的实际意义。

1 内减张技术的概念

1980 年 Kennedy 等^[22]提出使用韧带增强装置通过负荷分担保护移植物, 进而提高手术成功率, 但材料问题导致的并发症使该技术逐渐退出临床^[4]。随着医用生物材料的发展, 诸如 FiberTapeTM、EthibondTM 等高强度缝线带联合挤压螺钉、衬钢板成为内减张技术在运动系统中应用的基础, 表现出良好的力学性能和生物相容性; 而除了 ACL 重建外, 此类装置同样被广泛使用于踝关节外侧不稳定重建、跟腱修复、肘尺侧副韧带修复、后交叉韧带撕脱骨折修复、内侧副韧带重建等治疗中^[23]。

从组织工程角度看, 内减张技术辅助 ACL 或其他韧带重建, 是通过使用人工内减张线暂时替代移植物部分结构和功能, 来保护术后早期移植物愈合过程; 而作用机制和材料均与之相似的 LARSTM 人工韧带则属于完全性结构和功能取代装置, 术后逐渐被宿主再生韧带组织所替代^[4]。虽然内减张技术相关的临床研究数据较少且研究周期短, 但大量 LARSTM 人工韧带相关中长期随访研究显示, 与肌腱移植物相比, 其临床疗效并无显著差异且并发症发生率较低, 也印证了 ACL 重建中使用该类人工材料增强装置进行早期韧带结构和功能替代的有效性^[24-25]。

2 内减张技术在 ACL 重建中的应用研究

目前, ACL 断裂主要治疗方式为断端缝合修复或移植物重建。断端缝合后, 在缝合处存在力学薄弱点, 但广泛研究明确了内减张技术在辅助近端 ACL 撕裂修复时, 可有效限制缝合修复处的缝线扩大, 降低再损伤风险, 并改善术后关节功能评分^[26-27]。在 ACL 重建中, 肌腱移植物在韧带化进程中因原有胶原纤维崩解, 会导致移植物整体力学强度下降, 在康复活动中同样面临力学薄弱点断裂的风险^[12, 28]。近年来, 已有学者对内减张技术在 ACL 重建中使用的可行性和有效性进行了研究, 以下分别



从体内外生物力学研究、组织学和临床研究三个方面进行分析。

2.1 体内外生物力学

体外生物力学测试是通过建立特定的结构模型和力学测试参数,来明确内减张线对重建 ACL 初始力学性能的影响。Bachmaier 等^[29]使用 2 股 FiberTape™ 分别对 4 股牛伸肌腱和代表小直径移植物的 3 股牛伸肌腱进行了增强,模拟人 ACL 重建术中移植物 3 mm 的等长拉伸和 250、400 N 的术后康复早晚期循环张力,给予 3 000 个循环的拉伸负荷后,发现内减张线将 3 股和 4 股肌腱的形变量分别降低了 50% 和 16%,该作用在小直径肌腱移植上更明显;同时在正常 ACL 力学参数范围内提升了刚度和极限负荷,意味着该技术并未导致应力遮挡。而后 Noonan 等^[30]在保持测试力学参数和其他结构不变的情况下,将胫骨端固定装置由钛钢板更换为界面螺钉后,在内减张技术对肌腱移植力学性能的强化作用上得到了相似结论,说明该技术在目前两种主流固定方式下均适用。在另外 2 项相似研究中,研究者均使用人骨-髌腱-骨移植物在猪胫骨和股骨上建立 ACL 重建模型,2 股 FiberTape™ 的内减张作用使移植物在经历 50 ~ 250 N 循环负荷后,伸长量分别降低了 18%^[31]和 31%^[32],并且极限负荷和刚度不同程度提高;2 股 Ultrabraid™ 在猪跟腱上起到了相似的生物力学增强作用^[33]。

动物体内生物力学测试能够在生理结构下,进一步明确内减张技术在术后各个时期对于移植物自身力学性能重建的影响。Soreide 等^[34]使用单股 FiberTape™ 辅助自体半腱肌腱移植重建 ACL,术后 8 周移植物的极限负荷和刚度分别达到单纯肌腱重建组的 1.7 倍和 1.4 倍。在另一项多时间点研究中,Buma 等^[35]使用 2 股编织的聚对二氧环己酮 (polydioxanone, PDS) 编织带辅助山羊自体髌腱重建 ACL,术后生物力学分析发现 PDS 编织带显著增加了移植物的初始力学强度,但在随后 6 周内迅速减弱,而术后 12 周时 PDS 编织带强度基本丢失。作者认为该内减张装置对移植物生物学重建所产生的负面影响,可能与早期应力遮挡和 6 ~ 12 周时因材料降解导致的内减张作用快速失效有关。

生物力学研究明确了内减张线的使用可显著增强体外肌腱移植和体内 ACL 重建后初始力学强度,但在动物体内研究的后续观察中,不同材料内减张线却出现了差异性结果,提示内减张技术的

有效性依赖于装置强度的持久性,结合移植肌腱的腱-骨界面重建和韧带化过程分析,内减张作用应至少维持至增殖期后,即保持内减张线高强度状态至术后 3 个月以上。

2.2 组织学

ACL 重建后移植物良好的结构重塑是建立生物力学强度的基础,因此内减张技术对于移植物的韧带化和腱-骨界面愈合的影响,同样是决定其有效性的关键。Cook 等^[36]建立了关节镜下犬 ACL 重建模型,通过 2 股 FiberTape™ 增强同种异体股四头肌肌腱移植,术后 6 个月时可见移植肌腱的韧带重塑和隧道内直接腱-骨连接的建立,关节稳定性和功能与正常 ACL 对照组无明显差异,且未见早发骨关节炎表现。在后续研究中 Cook 等在相同的犬 ACL 重建模型中发现,经内减张技术强化的同种异体股四头肌肌腱联合富血小板血浆 (platelet-rich plasma, PRP) 能够实现更高效的腱-骨界面愈合及移植物韧带化,两种技术协同促进了 ACL 重建^[37]。但一项使用 PDS 编织带辅助山羊自体髌腱重建 ACL 的研究发现,术后 12 周内减张带已基本失效,同时伴有纤维束重塑、腱-骨界面愈合延迟和生物力学强度迅速下降,组织学的不良表现可能是术后早期内减张线应力遮挡和随后失效造成的移植物微动及过张导致^[35]。

除了移植物重塑以外,内减张装置植入后的生物相容性也是组织学研究要点,而在上述研究中所使用的内减张线在动物 ACL 重建中均表现出良好的生物相容性^[34, 36-37];甚至有研究分别将完整和切断后残端暴露的 FiberTape™ 植入犬关节腔内,均未引起严重的炎症和免疫反应^[38]。但一项研究发现^[34],兔股骨隧道内位于隧道壁和移植物之间的 FiberTape™,在术后 8 周时内部出现空洞,未见组织长入,而不可降解的内减张线与宿主组织间的不良整合可能会影响后期腱-骨界面愈合质量,该问题尚需在更长周期的动物研究中进行观察。从组织学结果看,ACL 重建中 FiberTape™ 内减张线的使用表现出良好的生物相容性,同时可支持肌腱移植物的韧带化和腱-骨界面愈合,这是内减张装置可用于 ACL 重建的前提条件。

2.3 临床研究

目前,临床开展内减张技术辅助 ACL 重建的研究较少,且随访周期较短。其中一部分研究仅介绍了各手术方案的可行性和创新性,手术方案均是使用高强度线带进行移植物内减张的关节镜下单束 ACL 解剖重建技术,所使用的移植物包括同种

异体肌腱^[39-40]、自体 3 股或 4 股腓绳肌腱^[41-43]、自体股四头肌肌腱^[44]和自体骨-髌腱-骨复合体^[45-47]。无论使用何种内减张线和移植肌腱,手术的关键是把握两者之间合理的张力关系,在不限制关节活动度和对移植肌腱造成明显应力遮挡的前提下发挥内减张效应,移植物和内减张线的固定方式是决定两者张力关系的关键。首先是在股骨端的固定位置,相较于将移植肌腱和内减张线共同挂于祥上,有学者更倾向于将后者独立固定于钢板上^[39, 41-44, 47](图 1),认为独立悬挂可以通过独立的张力调节,更好地把握它们之间的负荷分担关系^[21]。其次是胫骨端固定时的膝关节屈曲角度,通常在相同牵拉张力下分别于屈膝 30°和膝伸直位固定移植物和内减张线^[39, 41, 43],或是固定内减张线时在其下放置血管钳预留空间^[40, 44],目的是使移植物张力高于内减张线,从而承担主要的负载角色。通过上述手术技术,研究者在术后关节镜下均探测到了满意的移植物和内减张线张力,并获得了良好的初始关节活动度和稳定性。

在一项早期临床研究中, Peterson 等^[48]经过 4 年随访发现,经 3 股编织聚己内酯带增强的自体骨-髌腱-骨移植物与单独肌腱移植组相比,在关节稳定性和功能评分上无显著差异,该结果可能与内减张装置的可降解性和非独立固定有关。在随后的研究中,有学者分别使用了 4 股不可吸收华尔康TM缝线^[20]、2 股 EthibondTM缝线^[49]和 2 股其他缝线(缝线类型未明确)^[50]辅助自体腓绳肌腱进行 ACL 重建,经术后 6~12 个月随访,获得了良好的关节稳定性和功能评分,并且能有效支持早期康复功能锻炼,未见明显并发症。李彦林团队利用 2 股 Ortho-

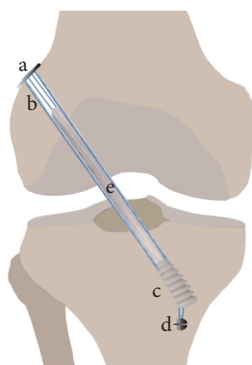


图 1 独立悬挂的内减张技术辅助 ACL 重建 a: 祥钢板 b: 内减张线 c: 界面螺钉 d: 锚钉 e: 肌腱移植物

Fig.1 Independent hanging internal tension relieving technique assists ACL reconstruction a: Endobutton b: Internal tension relieving suture c: Interface screw d: Anchor e: Tendon graft

cord^{TM[51]}或 Ethibond^{TM[52]}结合自主创新的“三角编织技术”^[53]制造了具备特殊编织结构的内减张线,体外研究证实该编织线相比 2 股独立缝线,具备更高的极限负荷以及更接近肌腱移植的刚度;通过 12 个月随访发现,使用该编织内减张线辅助自体腓绳肌腱 ACL 重建联合术后加速康复方案,显著改善了患者膝关节稳定性、功能评分及步态。Bodendorfer 等^[54]使用 2 股 FiberTapeTM辅助自体 4 股腓绳肌腱进行 ACL 重建,经过 30 个月随访发现,该技术显著改善了术后膝关节疼痛和功能评分,提高了恢复至伤前运动水平患者的比例,同时缩短了恢复时间,疗效理想。在另外 2 项联合技术研究中,学者们通过 2 股 EthibondTM缝线辅助自体腓绳肌腱进行内减张 ACL 重建,获得了良好的关节稳定性和功能评分,在此基础上分别联合具备再生潜能的 PRP^[55]和有利于本体感觉恢复的“残端袖套”技术^[56],进一步改善了手术疗效。

临床研究发现内减张技术在操作上具备可行性,且大部分研究结果显示其能够改善 ACL 重建后关节功能、稳定性和患者主观评分,甚至提高了恢复至伤前运动水平患者的比例。见表 1。但不适合的材料和手术技术同样导致了结果的差异,这与动物研究结果相似。

3 总结与展望

内减张技术对于辅助自体或同种异体肌腱重建 ACL 起到了积极作用,体现在以下几方面:①增强移植物的初始生物力学性能,包括在循环负荷下的位移降低和极限强度增强;②支持自体或同种异体移植物在术后的韧带化和直接腱-骨界面愈合;③改善术后移植物的生物力学功能重建;④未导致明显的应力遮挡和关节活动受限;⑤具备良好的生物相容性。但在动物或临床研究中发现,内减张装置和手术方式的选择对手术结果产生显著影响。在材料选择上,基于可降解材料的 PDS 编织带^[35]和聚己内酯带^[48]因为内减张维持周期较短而效果欠佳;而基于不可降解材料的 FiberTape^{TM[34, 36, 54]}和 Ethibond^{TM[49, 52, 55-56]}等内减张线,因具有更长周期和更稳定的内减张作用,在体内外研究中获得较好结果,但材料在体内的远期整合和安全性还需进一步研究明确。

对于手术技术而言,一方面应该通过移植肌腱和内减张线在股骨和胫骨端固定方式上的差异化,达到以肌腱负荷为主、内减张线负荷为辅的张力状态。另一方面,关节内骨隧道位点的选择同样应被

表 1 内减张技术辅助 ACL 重建的临床研究

Tab.1 Clinical study of internal tension relieving technique assisted ACL reconstruction

作者 Author	手术方式 Surgical technology	移植物 Graft	移植物固定 Graft fixation	内减张线 Internal tension relieving suture	内减张线固定 Suture fixation	内减张线位置 Suture position	结果 Result
Lavender 等 ^[39]	单束解剖重建	同种异体肌腱	近端: 钢板祥 远端: 钢板祥	2 股 InternalBrace™	近端: 钢板 远端: 锚钉	肌腱外部	关节初始活动度和稳定性良好
Smith 等 ^[40]		同种异体肌腱	近端: 钢板祥 远端: 钢板祥	2 股 FiberTape™	近端: 钢板祥 远端: 锚钉	肌腱束间	关节初始活动度和稳定性良好
Aboalata 等 ^[41]		自体 4 股半腱肌腱	近端: 钢板祥 远端: 钢板祥	2 股 FiberTape™	近端: 钢板 远端: 锚钉	肌腱束间交叉	关节初始活动度和稳定性良好
Daggett 等 ^[42]		自体 3 股半腱肌腱	近端: 钢板祥 远端: 界面螺钉	2 股 LabralTape™	近端: 钢板 远端: 锚钉	肌腱外部	关节初始活动度和稳定性良好
Aboalata 等 ^[43]		自体 4 股腓绳肌腱	近端: 钢板祥 远端: 界面螺钉	2 股 FiberTape™	近端: 钢板 远端: 锚钉	肌腱束间交叉	关节初始活动度和稳定性良好
Saper ^[44]	单束解剖重建	自体股四头肌肌腱	近端: 钢板祥 远端: 钢板祥	2 股 FiberTape™	近端: 钢板 远端: 锚钉	肌腱外部	关节初始活动度和稳定性良好
McGee 等 ^[45]	单束解剖重建	自体骨-髌腱-骨	近端: 钢板祥 远端: 界面螺钉	2 股 FiberTape™	近端: 股骨块 远端: 锚钉	肌腱内部	关节初始活动度和稳定性良好
Anderson 等 ^[46]	单束解剖重建	自体骨-髌腱-骨	近端: 界面螺钉 远端: 界面螺钉	2 股 InternalBrace™	近端: 股骨块 远端: 金属扣	肌腱外部	关节初始活动度和稳定性良好
Benson 等 ^[47]	单束解剖重建	自体骨-髌腱-骨	近端: 界面螺钉 远端: 界面螺钉	2 股 FiberTape™	近端: 钢板 远端: 锚钉	肌腱外部	关节初始活动度和稳定性良好
Peterson 等 ^[48]	单束非解剖重建	自体骨-髌腱-骨	近端: 界面螺钉 远端: 界面螺钉	3 股编织聚己内酯带	近端: 股骨块 远端: 胫骨块	肌腱束间	201 例; 随访 4 年; 关节稳定性和功能评分与对照无显著差异
马俭凡等 ^[20]	单束解剖重建	自体 4 股腓绳肌腱	近端: 界面螺钉 远端: 界面螺钉	4 股 0# 华尔康™ 缝线	桩钉	肌腱内部	32 例; 随访 6 ~ 12 个月; 内减张技术支持早期功能锻炼
齐勇等 ^[49]	单束解剖重建	自体 4 股腓绳肌腱	近端: 钢板祥 远端: 界面螺钉+门型钉	2 股 5#Ethibond™ 缝线	近端: 钢板祥 远端: 门型钉	肌腱外部	26 例; 随访 12 个月; 显著改善膝关节稳定性和功能评分
韦宝堂等 ^[50]	单束解剖重建	自体腓绳肌腱	近端: 钢板祥 远端: 界面螺钉+门型钉	2 股未指明缝线	近端: 钢板祥 远端: 门型钉	肌腱外部	42 例; 随访 12 个月; 显著改善患膝关节活动度和功能评分
毛健宇等 ^[51]	单束解剖重建	自体 4 股腓绳肌腱	近端: 横穿钉 远端: 界面螺钉+门型钉	2 股 Orthocord™ 缝线经“三角编织”	近端: 牵引线 远端: 门型钉	肌腱束间	80 例; 随访 12 个月; 显著改善患膝关节活动度和功能评分
刘德健等 ^[52]	单束解剖重建	自体 4 股腓绳肌腱	近端: 横穿钉 远端: 界面螺钉+门型钉	2 股 Ethibond™ 缝线经“三角编织”	近端: 牵引线 远端: 门型钉	肌腱束间	80 例; 随访 12 个月; 显著改善膝关节稳定性
Bodendorfer 等 ^[54]	单束解剖重建	自体 4 股腓绳肌腱	近端: 钢板祥 远端: 钢板祥	2 股 FiberTape™	近端: 钢板祥 远端: 锚钉	肌腱外部	60 例; 随访 30 个月; 显著改善疼痛症状、功能评分, 促进患者恢复至伤前运动水平
侯晓伟等 ^[55]	单束重建	自体 4 股腓绳肌腱	近端: 钢板祥 远端: 界面螺钉+门型钉	2 股 5# Ethibond™ 缝线	近端: 钢板祥 远端: 门型钉	肌腱外部	64 例; 随访 12 个月; PRP 显著改善膝关节功能和影像学评分
韦钊岚等 ^[56]	单束非解剖重建	自体 5、6 股腓绳肌腱	近端: 钢板祥 远端: 界面螺钉+门型钉	2 股 5# Ethibond™ 缝线	近端: 钢板祥 远端: 门型钉	肌腱外部	83 例; 随访 24 个月; “残端袖套”技术显著改善膝关节功能评分

关注, 因为内减张技术的本质存在约束性, 理论上只有在尽量等长的环境中才能够稳定发挥内减张作用, 而不造成过度限制或过早内减张失效。绝大部分研究采用了具备良好等长性的股骨、胫骨足印区解剖位点进行 ACL 重建^[57], 虽然术后观察到内减张线在不限制关节屈伸活动情况下保持了适度张力, 但不同隧道位点选择可能导致手术效果差异, 尚需进一步研究探索。

综上所述, 内减张技术可用于辅助肌腱移植进行 ACL 重建, 其类似“安全带”的内减张装置可对移植物进行应力保护, 具备临床使用前景。但鉴于目前可供参考的研究结果有限, 未来还需更多研究明确该技术对于术后肌腱移植物的组织学、生物力学变化以及关节功能恢复的具体影响。

作者贡献: 徐飞负责综述构思、文献查阅及文章撰写; 李彦

林、王国梁、刘德健负责审核并修改论文。

利益冲突:所有作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。课题经费支持没有影响文章观点。

参考文献

- Knurr KA, Kliethermes SA, Stiffler-Joachim MR, *et al.* Running biomechanics before injury and 1 year after anterior cruciate ligament reconstruction in division I collegiate athletes. *Am J Sports Med*, 2021, 49(10): 2607-2614.
- Zebis MK, Aagaard P, Andersen LL, *et al.* First-time anterior cruciate ligament injury in adolescent female elite athletes: a prospective cohort study to identify modifiable risk factors. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2021. doi: 10.1007/s00167-021-06595-8.
- Kohn L, Rembeck E, Rauch A. Anterior cruciate ligament injury in adults: Diagnostics and treatment. *Orthopade*, 2020, 49(11): 1013-1028.
- 陈天午, 陈世益. 人工韧带用于前交叉韧带修复重建: 目前产品与经验. *中国修复重建外科杂志*, 2020, 34(1): 1-9.
- Arnold MP, Calcei JG, Vogel N, *et al.* ACL Study Group survey reveals the evolution of anterior cruciate ligament reconstruction graft choice over the past three decades. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2021. doi: 10.1007/s00167-021-06443-9.
- Vopat BG, Gross DJ, Wong J, *et al.* Terminal sterilization of anterior cruciate ligament (ACL) allografts: A systematic review of outcomes. *Kans J Med*, 2020, 13: 23-28.
- Hulet C, Sonnery-Cottet B, Stevenson C, *et al.* The use of allograft tendons in primary ACL reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2019, 27(6): 1754-1770.
- Rahardja R, Zhu M, Love H, *et al.* Rates of revision and surgeon-reported graft rupture following ACL reconstruction: early results from the New Zealand ACL Registry. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2020, 28(7): 2194-2202.
- Law MA, Ko YA, Miller AL, *et al.* Age, rehabilitation and surgery characteristics are re-injury risk factors for adolescents following anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther Sport*, 2021, 49: 196-203.
- Barber-Westin S, Noyes FR. One in 5 athletes sustain reinjury upon return to high-risk sports after ACL reconstruction: A systematic review in 1239 athletes younger than 20 years. *Sports Health*, 2020, 12(6): 587-597.
- Orr J, Saphien A, Diaz MA, *et al.* Viscoelastic and failure properties of two configurations of triple-folded hamstring tendons used for anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction. *Knee*, 2021, 29: 174-182.
- Yung PS, Lee YW, Fu SC, *et al.* Differential MMP 1 and MMP 13 expression in proliferation and ligamentization phases of graft remodeling in anterior cruciate ligament reconstruction. *Connect Tissue Res*, 2020. doi: 10.1080/03008207.2020.1862806.
- Zhang CL, Fan HB, Xu H, *et al.* Histological comparison of fate of ligamentous insertion after reconstruction of anterior cruciate ligament: autograft vs allograft. *Chin J Traumatol*, 2006, 9(2): 72-76.
- Haupt E, OKeefe KJ, Clay TB, *et al.* Biomechanical properties of small-size hamstring autografts. *Cureus*, 2020, 12(6): e8728. doi: 10.7759/cureus.8728.
- Truong PN, Toan NV, Nam VH, *et al.* Preoperative determination of the size of the semitendinosus and gracilis tendon by multidetector row CT scanner for anterior cruciate ligament reconstruction. *J Knee Surg*, 2021. doi: 10.1055/s-0041-1727112.
- Heijboer WMP, Suijkerbuijk MAM, van Meer BL, *et al.* Predictive factors for hamstring autograft diameter in anterior cruciate ligament reconstruction. *J Knee Surg*, 2021, 34(6): 605-611.
- Shelbourne KD, Nitz P. Accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*, 1990, 18(3): 292-299.
- Beynon BD, Johnson RJ, Naud S, *et al.* Accelerated versus nonaccelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective, randomized, double-blind investigation evaluating knee joint laxity using roentgen stereophotogrammetric analysis. *Am J Sports Med*, 2011, 39(12): 2536-2548.
- Culvenor AG, Patterson BE, Guermazi A, *et al.* Accelerated return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction and early knee osteoarthritis features at 1 year: An exploratory study. *PM R*, 2018, 10(4): 349-356.
- 马俭凡, 李泳高, 阮良峰, 等. 关节镜下前交叉韧带重建术中应用减张线的临床康复研究. *实用中西医结合临床*, 2014, 14(7): 30-32.
- Smith PA. Editorial commentary: Anterior cruciate ligament graft reinforcement: A new era supported by science. *Arthroscopy*, 2019, 35(7): 2123-2126.
- Kennedy JC, Roth JH, Mendenhall HV, *et al.* Presidential address. Intraarticular replacement in the anterior cruciate ligament-deficient knee. *Am J Sports Med*, 1980, 8(1): 1-8.
- Lewis TL, Joseph A, Patel A, *et al.* Modified Broström repair with suture tape augmentation for lateral ankle instability: A systematic review. *Foot Ankle Surg*, 2021, 27(3): 278-284.
- Su M, Jia X, Zhang Z, *et al.* Medium-term (least 5 years) comparative outcomes in anterior cruciate ligament reconstruction using 4SHG, allograft, and LARS ligament. *Clin J Sport Med*, 2021, 31(2): e101-e110.
- Sun J, Wei XC, Li L, *et al.* Autografts vs synthetics for cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis. *Orthop Surg*, 2020, 12(2): 378-387.
- Bachmaier S, DiFelice GS, Sonnery-Cottet B, *et al.* Treatment of acute proximal anterior cruciate ligament tears-part 2: The role of internal bracing on gap formation and stabilization of repair techniques. *Orthop J Sports Med*, 2020, 8(1): 2325967119897423. doi: 10.1177/2325967119897423.
- Barnaš M, Kentel M, Morasiewicz P, *et al.* Clinical assessment and comparison of ACL reconstruction using synthetic graft (Neoligaments versus FiberTape). *Adv Clin Exp Med*, 2021, 30(5): 491-498.
- Frangie R, Warth RJ, Harner CD. Editorial commentary: Will suture tape augmentation prove to be the answer to anterior cruciate ligament graft remodeling, ultimate strength, and safe return to play? *Arthroscopy*, 2020, 36(2): 490-491.
- Bachmaier S, Smith PA, Bley J, *et al.* Independent suture tape reinforcement of small and standard diameter grafts for anterior cruciate ligament reconstruction: A biomechanical full construct model. *Arthroscopy*, 2018, 34(2): 490-499.
- Noonan BC, Bachmaier S, Wijdicks CA, *et al.* Independent suture tape reinforcement of tripled smaller-diameter and quadrupled grafts for anterior cruciate ligament reconstruction with tibial

- screw fixation: A biomechanical full construct model. *Arthroscopy*, 2020, 36(2): 481-489.
- 31 Matava MJ, Kosco J, Melara L, *et al*. Suture tape augmentation improves the biomechanical performance of bone-patellar tendon-bone grafts used for anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy*, 2021, S0749-8063(21)00445-X. doi: 10.1016/j.arthro.2021.04.053.
 - 32 Smith PA, Bradley JP, Konicek J, *et al*. Independent suture tape internal brace reinforcement of bone-patellar tendon-bone allografts: Biomechanical assessment in a full-acl reconstruction laboratory model. *J Knee Surg*, 2020, 33(10): 1047-1054.
 - 33 常晗,唐翔宇,曲峰,等. 前交叉韧带重建肌腱移植体内预置高强度缝线预防蠕变的实验研究. *中国修复重建外科杂志*, 2017, 31(1): 42-45.
 - 34 Soreide E, Denbeigh JM, Lewallen EA, *et al*. *In vivo* assessment of high-molecular-weight polyethylene core suture tape for intra-articular ligament reconstruction: an animal study. *Bone Joint J*, 2019, 101-B(10): 1238-1247.
 - 35 Buma P, Kok HJ, Blankevoort L, *et al*. Augmentation in anterior cruciate ligament reconstruction—a histological and biomechanical study on goats. *Int Orthop*, 2004, 28(2): 91-96.
 - 36 Cook JL, Smith P, Stannard JP, *et al*. A canine arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction model for study of synthetic augmentation of tendon allografts. *J Knee Surg*, 2017, 30(7): 704-711.
 - 37 Smith PA, Stannard JP, Bozynski CC, *et al*. Patellar bone-tendon-bone autografts versus quadriceps tendon allograft with synthetic augmentation in a canine model. *J Knee Surg*, 2020, 33(12): 1256-1266.
 - 38 Smith PA, Bozynski CC, Kuroki K, *et al*. Intra-articular biocompatibility of multi-stranded, long-chain polyethylene suture tape in a canine ACL model. *J Knee Surg*, 2019, 32(6): 525-531.
 - 39 Lavender C, Bishop C. The fertilized anterior cruciate ligament: An all-inside anterior cruciate ligament reconstruction augmented with amnion, bone marrow concentrate, and a suture tape. *Arthrosc Tech*, 2019, 8(6): e555-e559.
 - 40 Smith PA, Bley JA. Allograft anterior cruciate ligament reconstruction utilizing internal brace augmentation. *Arthrosc Tech*, 2016, 5(5): e1143-e1147.
 - 41 Aboalata M, Elazab A, Halawa A, *et al*. The crossing internal suture augmentation technique to protect the all-inside anterior cruciate ligament reconstruction graft. *Arthrosc Tech*, 2017, 6(6): e2235-e2240.
 - 42 Daggett M, Redler A, Witte K. Anterior cruciate ligament reconstruction with suture tape augmentation. *Arthrosc Tech*, 2018, 7(4): e385-e389.
 - 43 Aboalata M, Elazab A, Halawa A, *et al*. Internal suture augmentation technique to protect the anterior cruciate ligament reconstruction graft. *Arthrosc Tech*, 2017, 6(5): e1633-e1638.
 - 44 Saper MG. Quadriceps tendon autograft anterior cruciate ligament reconstruction with independent suture tape reinforcement. *Arthrosc Tech*, 2018, 7(11): e1221-e1229.
 - 45 McGee R, Daggett M, Jacks A, *et al*. Patellar tendon graft anterior cruciate ligament reconstruction technique with suture tape augmentation. *Arthrosc Tech*, 2019, 8(4): e355-e361.
 - 46 Anderson SR, Youssefzadeh KA, Limpisvasti O. Anterior cruciate ligament reconstruction with suture tape augmentation: A surgical technique. *Arthrosc Tech*, 2019, 8(12): e1579-e1582.
 - 47 Benson DM, Hopper GP, Wilson WT, *et al*. Anterior cruciate ligament reconstruction using bone-patellar tendon-bone autograft with suture tape augmentation. *Arthrosc Tech*, 2021, 10(2): e249-e255.
 - 48 Peterson L, Eklund U, Engström B, *et al*. Long-term results of a randomized study on anterior cruciate ligament reconstruction with or without a synthetic degradable augmentation device to support the autograft. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2014, 22(9): 2109-2120.
 - 49 齐勇,樊粤光,孙鸿涛. 关节镜下内减张技术重建膝关节前交叉韧带的临床研究. *中国修复重建外科杂志*, 2016, 30(2): 138-142.
 - 50 韦宝堂,韦力,邹亮. 关节镜下内减张技术重建膝关节前交叉韧带的效果分析. *微创医学*, 2019, 14(5): 577-579.
 - 51 毛健宇,李彦林,王国梁,等. 减张技术解剖重建前交叉韧带结合术后快速康复治疗前交叉韧带断裂. *中华创伤骨科杂志*, 2018, 20(1): 38-44.
 - 52 刘德健,李彦林,毛健宇,等. 内减张技术辅助前交叉韧带重建的运动学分析. *中华关节外科杂志(电子版)*, 2020, 14(1): 17-23.
 - 53 李彦林,王国梁,毛健宇,等. 一种用于交叉韧带重建的减张线及其编织方法: 中国, CN107280809A. 2017-10-24.
 - 54 Bodendorfer BM, Michaelson EM, Shu HT, *et al*. Suture augmented versus standard anterior cruciate ligament reconstruction: A matched comparative analysis. *Arthroscopy*, 2019, 35(7): 2114-2122.
 - 55 侯晓伟,宿显良. 减张技术联合自体富血小板血浆在前交叉韧带重建术的应用及对膝屈曲角度的影响. *实用医药杂志*, 2021, 38(3): 212-216.
 - 56 韦钊岚,易伟宁,谢能峰. 前交叉韧带“袖套”保残重建联合关节内减张术对膝关节功能恢复疗效的对照研究. *临床医药文献电子杂志*, 2020, 7(87): 30, 34.
 - 57 Forsythe B, Lansdown D, Zuke WA, *et al*. Dynamic 3-dimensional mapping of isometric anterior cruciate ligament attachment sites on the tibia and femur: Is anatomic also isometric? *Arthroscopy*, 2018, 34(8): 2466-2475.

收稿日期: 2021-06-20 修回日期: 2021-10-10

本文编辑: 王雁