

可穿戴振动反馈训练对前交叉韧带重建术后患者平衡及行走功能的影响*

袁丽^{1,2} 胥方元^{1,2} 钟大勇³ 胥泽华^{1,2} 林恒^{1,2} 刘曦^{1,2,4}

摘要

目的:观察自行研发的可穿戴振动反馈训练系统对前交叉韧带重建术后患者平衡及行走功能的影响。

方法:将符合入选标准的前交叉韧带损伤术后患者50例,随机分为对照组(n=25)与观察组(n=25),两组患者均接受常规的患肢关节松动、肌力训练、神经肌肉电刺激疗法和平衡训练。在此基础上,观察组每日增加1h的可穿戴振动反馈训练,每周5天,对照组在基础治疗上加上每日自行步行训练1h,每周5天。治疗前和治疗8周后,采用膝关节主动角度重现法(active angle repositioning, AAR)、膝关节功能Lysholm评分、Berg量表(Berg balance scale, BBS)、GAITRITE步态分析获得的步幅和步速值和等速运动中角速度为60°/s时的患侧膝关节屈伸肌群的峰力矩(peak torque, PT)进行评定。

结果:治疗前两组患者的AAR(30°)、AAR(60°)、Lysholm评分、BBS,以及步幅和步速、伸膝PT、屈膝PT差异均无显著性($P>0.05$)。治疗8周后,两组患者的Lysholm评分、BBS、步幅和步速、伸膝PT、屈膝PT指标较治疗前均有提高,AAR(30°)和AAR(60°)得分均降低,差异均有显著性意义($P<0.05$)。治疗后,观察组的Lysholm[(89.68±8.02)分]、BBS[(54.20±2.60)分]、步幅[(89.64±8.75)cm]、步速[(54.56±5.51)m/min]、伸膝PT[(74.16±8.88)N·m]、屈膝PT[(57.72±5.76)N·m]均显著优于对照组,AAR(30°)(3.57±1.64)、AAR(60°)(3.49±2.07)均显著低于对照组,差异均有显著性意义($P<0.05$)。

结论:可穿戴振动反馈训练能够显著提高前交叉韧带重建术后患者平衡及行走功能。

关键词 振动;反馈;前交叉韧带重建;平衡;步态

中图分类号:R493,R685 文献标识码:A 文章编号:1001-1242(2023)-03-0325-06

Effects of wearable vibration feedback training on patients' balance and walking function after anterior cruciate ligament reconstruction/YUAN Li, XU Fangyuan, ZHONG Dayong, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2023, 38(3):325—330

Abstract

Objective: To observe the effect of a self-developed wearable vibration feedback training system on the balance and walking ability of patients after anterior cruciate ligament reconstruction.

Method: Fifty patients after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) who met the selection criteria were randomly divided into control group(n=25) and observation group(n=25). The control group received routine joint mobilization, muscle strength training, neuromuscular electrical stimulation therapy and balance training, while the observation group received an additional vibration feedback system to the treatment. Patients were allowed to wear for 1 hour a day and 5 days a week for training. Before or 8 weeks after treatment, we used the active angle repositioning (AAR), knee function Lysholm score, Berg Balance Scale (BBS), and GAITRITE gait analysis system, peak torque of knee extension and knee flexion at 60°/s to make assessments.

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.03.007

*基金项目:2019年四川省科技厅重点研发项目(2019YFS0139)

1 西南医科大学附属医院康复医学科,四川省泸州市,646000; 2 西南医科大学康复医学系; 3 成都中医药大学附属医院推拿科;

4 通讯作者

第一作者简介:袁丽,女,主管技师; 收稿日期:2022-07-07

Result: Before treatment, there was no significant difference in AAR (30°), AAR (60°), Lysholm score, BBS, stride length, velocity, knee extension PT and knee flexion PT between the two groups ($P>0.05$). After 8 weeks treatment, the Lysholm score, BBS, stride length, velocity and knee extension PT of the two groups were improved compared with those before treatment, while the AAR (30°) and AAR (60°) were significantly reduced, and the differences were statistically significant ($P<0.05$).

Conclusion: Wearable vibration feedback training can significantly improve the balance and walking function of patients after anterior cruciate ligament reconstruction.

Author's address The Affiliated Hospital of Southwest Medical University, Luzhou, Sichuan, 646000

Key word vibration; feedback; anterior cruciate ligament reconstruction; balance; gait

前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)对维持膝关节的稳定性,协助人体完成行走及大量复杂、高难度的下肢动作非常重要。该韧带损伤在临床上极为常见,半数以上患者将接受手术治疗,多以关节镜下行自体患侧半腱肌腱和股薄肌腱移植的前交叉韧带重建术(anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR)为主^[1]。不少ACL损伤患者经手术治疗后,运动功能的恢复依旧不够理想,多表现为跛行、膝绞痛、上下楼梯等功能下降^[2]。

良好的运动控制状态需要完整的解剖结构和神经通路传导。ACL通过其本身的生理组织结构和神经肌肉反馈机制,对维持膝关节的静态稳定性起到了非常重要的作用^[3]。但是,ACL损伤破坏了韧带、肌腱上的本体感受器,即使重建,感觉纤维还是不能完全恢复,使得人体对自身关节位置和运动状态的感知减弱,影响了神经肌肉控制能力,进而降低了膝关节的动态稳定性,以及术后步态的改善,并容易造成膝关节再次损伤,以及日后的膝骨关节炎^[4]。

基于感觉是运动的前提,感觉功能的恢复可以促进患者运动功能改善的原理,如何有效恢复损伤的ACL本体感觉成为研究的热点^[5]。近年来的学者多以膝关节局部振动和全身振动疗法来增加本体感觉输入^[6-8],以期改善患者的平衡和稳定性,取得了较好的效果。但是他们的研究均为静态振动,并没有配合患者的行走步态,较为遗憾。基于大脑能广泛接受振动信号,以及在步行训练过程中,配合步态输入的本体感觉是最强的原理^[9],我们自行研发了一套可穿戴振动反馈系统,拟给前交叉韧带重建术后的患者增加配合步态的振动感觉输入,并观察是否能够增加膝关节的稳定性,改善平衡和行走功能。

1 资料与方法

1.1 一般资料和分组

纳入标准:①ACL断裂,经关节镜重建术8周后;②首次发病,年龄18—50岁;③移植物均选用患侧膝关节半腱肌肌腱和股薄肌肌腱,如有半月板损伤,行半月板修补术;④由同一组医生手术;⑤在不借助辅助器具的情况下,可以自主步行8m以上;⑥对侧下肢正常;⑦无认知障碍,可沟通;⑧入选患者及家属均对本研究知晓并签署知情同意书。

排除标准:①伴有严重的意识障碍及认知功能障碍,不能遵从治疗;②由小脑、脑干、脊髓、周围神经病变或颅脑外伤引起的平衡功能障碍;③有下肢骨折或骨关节疾病等影响下肢功能恢复、导致关节活动度受限的肌肉骨骼疾病;④既往有影响平衡的病史;⑤伴有严重的心血管疾病,或生命体征不稳定。

本研究经西南医科大学附属医院临床伦理委员会审批(KY2021268),选取2021年6月—2022年3月在西南医科大学附属医院康复医学科进行康复治疗的恢复期前交叉韧带重建术8周后患者50例,采用随机数字表法将上述患者分为观察组和对照组各25例。两组患者的性别、年龄、术侧和平均病程等一般资料组间比较,差异均无显著性意义($P>0.05$),具有可比性,见表1。

1.2 治疗方法

两组患者在经关节镜重建术后的8周内,均接受相同的治疗,包括关节持续被动运动、肌力训练、神经肌肉电刺激和患肢负重训练,在重建术后8周

表1 两组患者一般资料比较 ($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	性别(例)		年龄 ($\bar{x}\pm s$,岁)	术侧(例)		平均病程 ($\bar{x}\pm s$,周)
		男	女		左	右	
观察组	25	10	15	35.26±10.45	12	13	11.67±3.28
对照组	25	11	14	36.84±11.52	13	12	12.32±3.76

均达到可独立行走,但是行走的步态及稳定性较差。

重建术8周后,两组患者均接受常规康复训练,包括患肢关节松动、肌力训练、神经肌肉电刺激疗法和平衡训练,每日1次,共计80min,每周5次,疗程为8周。观察组在常规训练的基础上加上了可穿戴振动实时反馈训练,每天穿戴60min,每周5次,疗程为8周;为了保证训练时间的一致性,对照组在常规训练的基础上加上在监护下的自行步行训练,每日60min,每周5次,疗程为8周。

常规训练由4名高年资物理治疗师在统一培训后进行,振动反馈训练由另外2名接受专业训练的治疗师指导进行,对照组患者的自行步行训练均在治疗师的监护下进行。所有两组的50名患者在治疗前和治疗8周后,由1名没有参与训练的专业治疗师进行评定。

1.2.1 常规康复训练:①患侧髌骨松动、股胫关节松动、膝挤压,大腿绑沙袋直腿抬高训练。②采用Biodex System-4(Biodex公司,美国)等速肌力训练系统进行膝关节屈伸肌群离心-向心收缩训练。让患者坐在等速仪座椅上,股骨外侧髁与动力轴中心对齐,固定躯干和大腿,测量关节活动范围。选择慢速60°/s进行训练,作膝关节最大屈伸收缩各10次,中间休息30s。每天训练共完成两组,每组间休息5min^[10]。③神经肌肉电刺激疗法,选用北京耀洋康达生产,型号为KT-90A型的神经肌肉电刺激仪,双向脉冲波,频率0.5—5Hz,治疗部位选择:下肢股四头肌内外侧头、股直肌、腓绳肌等,每次治疗20min,每天1次,每周5次。④平衡训练包含快速重心转移训练、患肢负重训练、膝关节半屈曲位靠墙下蹲训练,平衡板训练,以及静态平衡仪辅助训练(XPH-B平衡仪,上海诺诚):让患者正视屏幕上方,在双脚站立、单足站立、坐位、坐站转移的情况下控制身体重心,跟踪进行多模块游戏训练^[11]。

1.2.2 配合人体步态的触觉振动反馈训练:系统组成:由西南医科大学附属医院康复医学科自主研发的可穿戴式振动反馈系统由一个控制主板(ST Microelectronics公司,CPU型号:STM32F103RET6)、五个长2.5cm,宽1cm,质量为1g的陀螺仪传感器(InvenSense公司,芯片型号:MPU6050)和四个长1.9cm,宽1.3cm,质量为1.5g的振动马达(深圳海润

微电子公司,型号TY1910,特别研制)组成,系统由充电宝供电,耗能小,10000mA的充电宝可让系统连续工作200h。系统结构图见图1。

穿戴及训练:将四个加速度传感器分别置于健侧和术侧大、小腿的相同高度位置,检测两条腿的前后摆动幅度;第五号传感器固定于术侧的足背,用于检测患脚平面是否内外侧翻。4个振动马达则位于术侧股四头肌肌腱、髌韧带肌腱和术侧髌骨内外侧。患者穿戴示意图见图2。

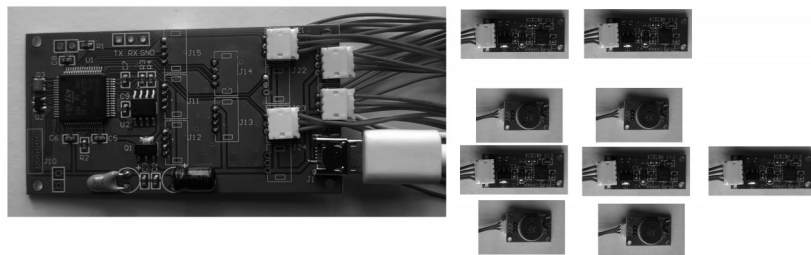
让患者自然行走,控制主板将每5s作为一个处理时间段,对五个陀螺仪传感器同步串口数据进行处理,提取各路传感器的波峰、波谷值,及波峰波谷的时间信息,实时进行数据处理。当系统检测患肢比健肢摆动过大时(取6°的差值),股四头肌腱的振动马达振动,提醒患者减小患侧的摆动幅度;当患肢比健肢摆动过小时,髌韧带处的振动马达振动,提醒患者加大患肢的摆动幅度;当患侧脚平面发生内翻或外翻,髌骨内外侧的振动马达将立即发出持续的振动,提醒患者调整内外翻。每5s对患者进行一次反馈。振动马达每次振动时间持续1s,速度为2200r/s。每天让患者穿戴1h,一周穿戴5天进行训练,以这样的方式可以让患者比较容易建立新的条件反射,并及时进行姿态的调节。经过简单的说明及培训,患者便能较好的理解并掌握该系统的原理及使用方法。

1.3 评定指标

两组患者分别于治疗前和治疗8周后,采用膝关节角度重现法进行本体感觉测试、膝关节功能Lysholm评分、Berg量表进行平衡和稳定性测试,利用GAITRITE步态分析系统进行步幅和步速评定,采用角速度为60°/s时的患侧膝关节屈伸肌群的峰值扭矩进行肌力恢复的评定。

1.3.1 膝关节角度重现^[12]:患者带眼罩、耳塞,屏蔽视觉及听觉的干扰,穿过膝的长筒袜,避免触觉干扰,采取坐位,以膝关节屈曲90°为起始位置,治疗师徒手依次将患膝被动屈曲至30°、60°,停留10s,回到起始位置,患者凭借感受和记忆主动将患膝再次屈曲到设定角度,停留10s,采用电子关节角度尺测量设定角度和模拟角度的差值,即为主动角度重现测试值(active angle repositioning, AAR)。以上操

图1 可穿戴式振动反馈系统结构



图左为系统的控制主板,图右第一、三排为陀螺仪传感器,图右第二、四排为振动马达

作由专人实施,每个角度重复3次,取平均值,差值越小,表明患者对位置的感知能力越好。

1.3.2 Lysholm膝关节功能评分^[13]:对跛行、需要支持、绞锁、不稳定、疼痛、肿胀、上下楼和下蹲等8项内容进行评分,满分为100分,分值越高,表明膝关节的本体感觉功能及动态稳定性恢复越好。

1.3.3 Berg量表(Berg balance scale,BBS)^[14]:主要包括独立站起、无支持的站、转身360°、坐下等14项内容,总分56分,得分越高,说明患者动态平衡功能越好。

1.3.4 步态分析:在治疗前和治疗8周后,使用美国产Gaitrite步态分析仪采集患者步态参数。首先让患者熟悉步态分析走道,在约7m的走道上,让患者以自然的步速反复行走多次,治疗师在走道外进行无接触的保护。采集患者熟悉走道后的3次步幅(行走时,由一侧足跟着地到该侧足跟再次着地所进行的距离^[15])和步速数据,取平均值进行分析。

1.3.5 角速度为60°/s时的患侧膝关节屈伸肌群的峰力矩(peak torque, PT)^[16]:峰值力矩指应用等速肌力测试训练系统,测量肌肉收缩时的最大力量输出,单位为N·m。角速度为60°/s属于慢速测试,适合用于肌力测试和患者人群。伸膝PT用于测试股四头肌等大腿前群肌力,屈膝PT用于测试腘绳肌等大腿后群肌力。

图2 前叉重建术后患者穿戴示意图



左腿为重建侧。从上向下,左腿的一、四号绑带内和右腿绑带内置4个加速度传感器,用于检测两条腿的前后摆动幅度;左侧足背内置第五号传感器,用于检测患脚平面是否内外侧翻。左侧第二、三号绑带内置4个振动马达,分别的位置是左侧股四头肌肌腱、髌韧带肌腱和术侧髌骨内外侧。

1.4 统计学分析

采用SPSS 26.0软件对数据进行分析,计量资料服从正态分布采用均数±标准差表示,治疗前后的疗效称为组内前后对照,用独立样本 t 检验;组间比较采用配对样本 t 检验。计数资料采用频数(百分比)表示, $P<0.05$ 为差异具有显著性意义。

2 结果

治疗前,两组患者的AAR(30°)、AAR(60°)、Lysholm评分、BBS评分,以及步幅、步速、伸膝PT、屈膝PT等指标组间比较,差异均无显著性意义($P>0.05$)。治疗8周后,2两组患者的Lysholm评分、BBS评分,以及步幅、步速、伸膝PT、屈膝PT均高于治疗前,AAR(30°)、AAR(60°)则低于治疗前,差异均有显著性意义($P<0.05$),观察组治疗8周后的各项指标较对照组治疗8周后比较亦显著改善,差异均有显著性意义($P<0.05$)。见表2。

3 讨论

振动可以刺激皮肤受体、肌腱受体、关节受体、骨

表2 观察组与对照组治疗前、后各项指标比较

($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	AAR(30°)	AAR(60°)	Lysholm(分)	BBS(分)	步幅(cm)	步速(m/min)	伸膝PT(N·m)	屈膝PT(N·m)
对照组	25								
治疗前		8.97±2.72	9.22±3.07	55.77±7.37	37.92±5.92	60.46±9.38	32.87±4.54	35.32±4.69	24.36±4.14
治疗8周后		5.64±2.02 ^①	5.72±2.38 ^①	76.12±10.17 ^①	48.20±4.22 ^①	84.20±8.13 ^①	51.64±4.43 ^①	63.56±6.98 ^①	51.04±7.58 ^①
观察组	25								
治疗前		9.15±2.94	9.43±3.20	56.32±7.31	37.64±5.79	62.10±9.83	33.04±4.23	34.76±5.07	24.40±4.92
治疗8周后		3.57±1.64 ^{①③}	3.49±2.07 ^{①③}	89.68±8.02 ^{①③}	54.20±2.60 ^{①③}	89.64±8.75 ^{①②}	54.56±5.51 ^{①②}	74.16±8.88 ^{①③}	57.72±5.76 ^{①③}

注:与组内治疗前比较,① $P<0.05$;与对照组同时时间点比较,② $P<0.05$;与对照组同时时间点比较,③ $P<0.01$ 。

内受体等多种类型感受器,这些感觉输入汇集后,经上行脊髓束传至皮层,共同向中枢神经系统发送信号;中枢神经系统接收并整合后,帮助改善躯体感觉功能^[17]。王艳等^[18]就利用振动疗法结合康复训练来促进 ACLR 术后膝关节本体感觉的恢复进而增强关节动态稳定性。我们给患者穿戴上振动反馈系统后,患者反映该系统灵敏性高,能够帮助他们很好地接收振动信号,并进行有针对性的步态调整,特别指出的是,该系统对患足内外翻的反馈也极为灵敏,是治疗师肉眼观察以及单纯的步态分析仪无法做到的,可以很好地帮助进行姿势控制和反射性神经肌肉控制。

本可穿戴振动反馈系统有别于传统康复治疗的地方在于,加入了配合步态的实时反馈振动,将感觉训练和运动训练整合在一起,达到双重疗效。四个振动的位置,我们参照了之前的文献报道,分别在术侧股四头肌肌腱^[19]、髌韧带处^[20]和术侧髌骨内外侧,且该处报道显示,振动刺激还对 ACLR 患者增强股四头肌力量有积极的效应。临床发现,ACLR 患者的股四头肌萎缩症状极为普遍,严重影响着膝关节稳定和步行能力的恢复。振动可以通过刺激肌梭和 α 运动神经元来启动肌肉收缩,产生类似于阻力训练的效果,帮助增强肌肉力量^[21]。且人体短时间暴露于低强度振动时,可触发肌肉牵张反射,引发高水平的肌肉纤维招募和收缩。这些均可帮助改善肌肉性能,对抗骨矿物质消耗,以及改进肢体姿势稳定性。Claire C 等^[22]也报道,在前交叉韧带重建术后康复中,振动疗法结合传统康复比单纯的传统康复能更好地增加股四头肌力量。Rieder 等^[23]指出,振动还可促进肌腱肥大,这有助于损伤或手术的恢复。肢体中的肌肉、肌腱、皮肤和关节结构包含大量的感受器,它们负责产生感觉信号和调节反射性肌肉活动,并诱发随意运动。由于振动可以刺激这些感受器,促进肌肉激活,帮助提高肌力力量和功能,改善膝关节控制。我们在慢速 60°/s 的状态下测试大腿前后肌群的峰力矩,发现治疗 8 周后,观察组的伸膝 PT(74.16 ± 8.88)N·m 比对照组(63.56 ± 6.98)N·m 显著提高,显示我们的可穿戴的振动训练能够帮助股四头肌力量的改善,同时,我们也观察到,治疗后,观察组的屈膝 PT(57.72 ± 5.76)N·m 比对照组(51.04 ± 7.58)N·m 也有显著提高,因为膝关节在进

行摆动时,需要股四头肌和腘绳肌协同收缩以维持关节的稳定^[24],膝关节周围的振动刺激和股四头肌增强的收缩均促进了腘绳肌力量的加强。

本试验结果提示,配合步态的振动对增强患膝的本体感觉有积极的意义,膝关节角度重现 30° 值和 60° 值在经过 8 周的训练后,离设定的角度更为接近,表明患者对患膝位置的感知能力提高了。学者发现站立平衡评分与振动感知阈值呈正相关^[25]。本研究结果显示,8 周的可穿戴振动训练后,患者的 Berg 评分较训练前及传统治疗 8 周后均有大幅提高。无支撑下双足交替踏台阶、一只脚向前迈步和无支撑下单脚站尽可能长的时间,这几项评分,可穿戴振动训练后显示出比较明显的优越性。

振动刺激能够影响该躯体感觉因素,从而帮助提高平衡能力和躯体的功能性活动^[26]。我们采用 Lysholm 量表对膝关节功能进行评分,发现患者在训练前,患膝功能障碍主要集中于跛行、绞痛、在日常生活中出现关节不稳、上下楼梯及下蹲困难,经可穿戴振动训练后,疼痛和关节稳定性均有了改善,以及上下楼及下蹲均更轻松。究其原因,应该也是股四头肌力量增强、以及关节稳定性提高后,行走的姿势也更加趋于正常,减少了肌肉的异常收缩以及行走的能耗,所以疼痛有所减轻,对关节稳定性要求更高的上下楼及下蹲等功能性活动也能更好地完成。

我们采用 Gaitrite 步态分析仪来分析患者的步幅和步速发现,在可穿戴训练 8 周后,步幅达(89.64 ± 8.75)cm,步速达(54.56 ± 5.51)m/min,而正常人的步幅值为 116—170cm、步速值为 60—100m/min。我们的训练让步幅和步速值向正常范围值更加靠近了。本研究的步幅及步速提高优于对照组(84.20 ± 8.13 , 51.64 ± 4.43),可能是因为本体感觉改善后促进关节稳定,帮助增加了关节反应速度和效率,能够更好地对运动中产生的关节应力做出反应,同时也帮助提高了患者的平衡功能^[27]。因此,患者的平衡功能与行走能力是密不可分的^[28]。

而本研究结果显示,可穿戴振动反馈训练对前交叉韧带重建术后的患者平衡和步态的改善有积极的意义。但本研究也有局限性,比如,样本量不是很大,且为单中心研究,日后将考虑更多地进行普及应用推广。该系统为充电宝供电,耗电少,待机时间

长,但是五个传感器和四个振动马达均靠红色软线和控制主板连接,穿戴后影响患者美观,如果不要红色软线连接,每个单独的传感器和振动马达就需要蓝牙 WIFI 和控制主板相连,每个系统需要单独充电,且极为耗电,待机时长大大缩短,如何兼具美观和实用性,也是需要继续考虑的地方。本实验对等速肌力部分的数据还不是很完善,以后的实验中,会加强对等速肌力各项指标的分析。还有,需要更多的基础实验来进行振动的机制研究。

参考文献

- [1] John CR. Anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Sports Med Arthrosc Rev, 2018, 26(4): 165—167.
- [2] George K, Nikolaos M, Georgios B, et al. Periodization in anterior cruciate ligament rehabilitation: A novel framework [J]. Med Princ Pract, 2021, 30(2): 101—108.
- [3] Skoglund S. Anatomical and physiological studies of knee joint innervation of the cat[J]. Acta Physiol Scand, 1956, 36(124): 1—101.
- [4] 张磊, 李义凯. 膝关节前交叉韧带本体感觉的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2017, 32(2): 245—247.
- [5] Aglaja B, Angela B, Frank M, et al. Alterations in sensorimotor function after ACL reconstruction during active joint position sense testing. A systematic review[J]. PLoS One, 2021, 16(6): doi: 10.1371/journal.pone.0253503.
- [6] Troy B, Darin AP, Brian P, et al. Vibration improves gait biomechanics linked to posttraumatic knee osteoarthritis following anterior cruciate ligament injury[J]. Orthop Res, 2020; DOI: 10.1002/jor.24821.
- [7] Coulondre C, Souron R, Rambaud A, et al. Local vibration training improves the recovery of quadriceps strength in early rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: A feasibility randomised controlled trial[J]. Ann Phys Rehabil Med, 2021, 65(4): 101441.
- [8] Maghbouli N, Khodadost M, Pourhassan S. The effectiveness of vibration therapy for muscle peak torque and postural control in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis of clinical trials[J]. Orthop Traumatol, 2021, 22(1): 28.
- [9] Migel KG, Wikstrom EA. The effect of laboratory and real world gait training with vibration feedback on center of pressure during gait in people with chronic ankle instability [J]. Gait Posture, 2021, 85: 238—243.
- [10] Beere M, Ebert JR, Joss B, et al. Isometric dynamometry, dependent on knee angle, is a suitable alternative to isokinetic dynamometry when evaluating quadriceps strength symmetry in patients following anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Knee, 2021, 34: 124—133.
- [11] 蒋拥军, 李克军, 王雪冰. 平衡促进训练对膝关节前交叉韧带损伤重建术后患膝本体感觉的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2011, 26(3): 251—253.
- [12] Li L, Ji ZQ, Li YX, et al. Correlation study of knee joint proprioception test results using common test methods[J]. Phys Ther Sci, 2016, 28(2): 478—482.
- [13] André LL, Alex C, Bruno L, et al. Association between Lysholm score and muscular torque deficit after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Orthop Surg (Hong Kong), 2020, 28(2): doi: 10.1177/2309499020933485.
- [14] 李岩, 何雯雯, 董燕飞, 等. 全身振动训练对脑卒中偏瘫患者本体感觉及平衡功能的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(6): 709—712.
- [15] 王玉龙. 康复功能评定学[M]. 第3版, 北京: 人民卫生出版社, 2020: 29.
- [16] Jiang H, Zhang L, Zhang RY, et al. Comparison of hamstring and quadriceps strength after anatomical versus non-anatomical anterior cruciate ligament reconstruction: a retrospective cohort study[J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2021, 22: 452.
- [17] Tamás O, Marieke JG, Csaba N, et al. Vibration detection: its function and recent advances in medical applications[J]. F1000Res, 2020; doi: 10.12688/f1000research.22649.1.
- [18] 王艳, 吴珊红, 戚彪, 等. 振动疗法结合常规康复训练对前交叉韧带重建术后膝关节本体感觉及动态稳定性的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(7): 858—862.
- [19] Takashi N, Nathaniel AB, Timothy EH, et al. Effects of localized vibration on knee joint position sense in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Clinical Biomechanics, 2018; doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.04.011.
- [20] John G, Jay H, Susan S, et al. The effects of patellar tendon vibration on quadriceps strength in anterior cruciate ligament reconstructed knees[J]. Physical Therapy in Sport, 2019; doi.org/10.1016/j.ptsp.2019.08.014.
- [21] Nitin KA, Saurabh S, Sana S, et al. Effects of combined whole body vibration and resistance training on lower quadrants electromyographic activity, muscle strength and power in athletes[J]. Foot (Edinb), 2021, 49: 101844.
- [22] Claire C, Robin S, Alexandre R, et al. Local vibration training improves the recovery of quadriceps strength in early rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: A feasibility randomised controlled trial[J]. Ann Phys Rehabil Med, 2021, 65(4): 101441.
- [23] Rieder F, Wiesinger HP, Kösters A, et al. Whole-body vibration training induces hypertrophy of the human patellar tendon[J]. Scand J Med Sci Sports, 2016, 26(8): 902—910.
- [24] Nakajima M, Kawamura K, Takeda I. Electromyographic analysis of a modified maneuver for quadriceps femoris muscle setting with co-contraction of the hamstrings[J]. J Orthopaedic Res, 2003, 21: 559—564.
- [25] Teresa P, Letizia P, Roberta LV, et al. The focal mechanical vibration for balance improvement in elderly: A systematic review[J]. Clin Interv Aging, 2021, 16: 2009—2021.
- [26] Mildren R, Bent L. Vibrotactile stimulation of fast-adapting cutaneous afferents from the foot modulates proprioception at the ankle joint[J]. Appl Physiol, 2016, 120(8): 855—864.
- [27] Ghai S, Matthew D, Ishan G. Effects of joint stabilizers on proprioception and stability: A systematic review and meta-analysis[J]. Physical Therapy in Sport, 2016; doi.org/10.1016/j.ptsp.2016.05.006.
- [28] Courtney N, Steven M, Johanna M, et al. ACL reconstructed individuals demonstrate slower reactions during a dynamic postural task[J]. Scand J Med Sci Sports, 2020, 30(8): 1518—1528.