·短篇论著·

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*

王 艳[1] 吴珊红[2] 戚 彪[3] 郭子楠[4] 张雪薇[2] 赵乐乐[2] 赵明月[2]

前交叉韧带(anterior cruciate ligament,ACL)损伤、断裂是一种临床常见的运动创伤性疾病[1]。关节镜下前交叉韧带重建术是恢复ACL组织学完整的主流方法[1],但同时手术创伤也在一定程度上破坏了韧带、肌腱上的本体感受器,影响膝关节的动态稳定性。Gross等[2]报道本体感觉的减弱会导致姿势的反射性不稳,增加了关节损伤的可能性。也有随访资料表明[3—4],不少ACL损伤患者经矫形外科术后,运动功能的恢复依旧差强人意。多表现为膝打软,运动时身体的自我感知及反射性保护能力差,快跑、转弯等运动能力下降,关节及周围组织的反复损伤,膝关节绞索感等,进而导致膝关节本体感觉的进一步损害,陷入恶性循环。因此,关注膝关节本体感觉的恢复,提高神经肌肉控制能力,强化关节动态稳定性是目前康复界的热点问题。Tsuda等[5]实验表明ACL重建术后机械感受器可以再生,并且其功能也可以恢复。Cheng WH[6]发现振动刺激以波能传导作用于韧带、肌腱等组织产生一系列的神经生理学效应,可改善ACL术后膝关节的本体感觉。故课题组在原有康复训练的基础上给予振动疗法以促进本体感觉的重建,结果表明两者结合更有利于ACL术后膝关节本体感觉重建进而改善关节动态稳定性,现报告如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2015年9月—2017年6月黑龙江中医药大学附属第二医院收治的60例膝关节ACL重建术后的患者为研究对象。其中男性34例,女性26例,年龄18岁—45岁。根据随机数表法分为两组,每组各30例。治疗组采用常规康复训练结合振动疗法,对照组给予常规康复训练。两组在性别、年龄、病程等方面比较均无显著性差异(P>0.05),具有可比性。

1.2 纳入标准及排除标准

1.2.1 纳入标准。①MRI检查显示为单纯性前交叉韧带断裂且重建术后韧带组织结构良好;②前交叉韧带重建术后2周;③患者知情,且自愿配合;④无精神、心理疾病且遵从医嘱;⑤患者年龄≤50岁;⑥单侧膝关节损伤;⑦测定视觉模拟评分(VAS)<4分;⑧纳入前交叉韧带重建患者均为胭绳肌肌腱自体移植。

1.2.2 排除标准。①关节内肿瘤、感染、骨折;②伴半月板损伤Ⅱ°以上者;③合并心、脑、肾等重要器官的病变,生命体征不稳定;④免疫性、代谢性疾病继发前交叉韧带损伤者;⑤骨质疏松严重;⑥合并静脉血栓的患者;⑦对振动过度敏感,产生强烈身体不适者;⑧妊娠或哺乳期妇女;⑨不能按要求完成评估及康复训练者。

1.3 治疗方法

1.3.1 对照组。治疗的第1—2周:以改善关节活动度和感觉输入为主。包括膝关节挤压;髌骨松动;对股四头肌及胭绳肌等肌群进行功能性电刺激;抬腿训练(可朝各个方向、各个角度抬腿),15次/组,3—4组/日;终末伸膝肌肉力量训练,在膝关节接近伸直的范围内(0—20°)进行膝关节力量锻炼,20个/组,4组/日;进行仰卧主动屈伸膝活动训练,运动范围在0°—90°,屈膝过程中足跟不离开床面,每周屈膝角度增加10°,活动速度要缓慢,不应产生疼痛,达到目标屈曲角度,停留10s,主动伸直到0°位,10个/次,3次/组,2组/日,活动后进行冰敷。

治疗的第3—4周:以肌肉的力量性训练为主。如股四头肌的离心收缩;指导患者做下肢的重心转移,这个过程要循序渐进,避免膝关节产生疼痛;指导患者做各个屈膝角度的训练,家属及治疗师应在旁注意保护;设计一些闭链运动,如:静力半蹲(注意避免膝盖内扣,髋关节的内旋,膝盖不要超过前脚尖,站起时尽量避免膝关节的内外翻及胫骨旋转)、弓箭步(下蹲角度约为120°左右,根据患者的耐力及适应程度逐渐延长)等。增强患者对关节的控制能力,强化膝关节稳定性。

治疗的第5—6周:以提高患者的本体感觉,增强关节动态稳定性为主。如曲线跨越;90°旋转步;睁眼、闭上眼睛站

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2021.07.019
*基金项目:国家自然科学基金面上项目(81674077)
1 黑龙江中医药大学附属第二医院,哈尔滨,150001; 2 黑龙江中医药大学; 3 深圳市宝安区石岩人民医院; 4 深圳大学总医院
第一作者简介:王艳,女,主任医师;收稿日期:2020-02-11

在平衡软榻上或抵抗弹力绷带进行单腿站立;同时也可以增加动作的阻力,提高运动难度,进行有外界干扰的反复上下肢协同训练等。促进膝关节本体感觉和稳定性的恢复。

1.3.2 治疗组。治疗组的康复训练同对照组,从治疗的第5周开始在原有康复训练的基础上加入振动治疗。

振动治疗操作如下:嘱患者站立在振动仪的平台上,脚尖向前,双脚分开与肩同宽,双膝微曲(屈曲角度范围10°—20°),收下颌,目视前方,双手紧抓仪器扶把,并用悬吊带固定上身。治疗师站立于患者旁边,保护患者,避免出现意外情况。振动频率:30Hz;振动幅度:3mm;训练周期:每次10min,每日1次,每周6次,持续2周。

1.4 评价指标

1.4.1 膝关节角度重现[7]: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°、45°、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,以上操作由专人实施,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。

1.4.2 膝关节被动活动察觉阈值[8]:患者带眼罩、耳塞,屏蔽视觉及听觉干扰,穿过膝的长筒袜,避免触觉干扰,用Biodex S4等速肌力训练仪进行膝关节被动伸直运动,速度设置为1°/s,初始角度为屈膝20°,当患者感觉患肢出现活动时停止机器运动,比较患肢终止角度与初始角度的差值,采用电子关节角度尺进行测量。以上操作重复3次,取平均值,差值越小说明患者对运动的感知能力越强。

1.4.3 Lysholm膝关节功能评分[9]: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。

1.5 统计学分析

采用SPSS 22.0统计软件进行处理,计量资料以平均值±标准差表示,受试者治疗前后评估指标采用配对样本t检验,组间评估指标的比较采用独立样本t检验,以$P<0.05$表示具有显著性差异。

2 结果

2.1 两组患者治疗前后膝关节角度重现比较

两组患者治疗前膝关节角度再现,无差异($P>0.05$),治疗后,与治疗前比较,两组均有所改善,差异有显著性意义($P<0.05$),其中治疗组优于对照组($P<0.05$),说明振动疗法结合常规康复训练更有利于改善膝关节的本体感觉(位置觉),见表1。

2.2 两组患者治疗前后膝关节被动活动察觉阈值比较

两组患者治疗前膝关节被动活动察觉阈值比较,无差异($P>0.05$),治疗后,与治疗前比较,两组均有所改善,差异有显著性意义($P<0.05$),其中治疗组优于对照组($P<0.05$),说明振动疗法结合常规康复训练更有利于改善膝关节的本体感觉(运动觉),见表2。

2.3 Lysholm膝关节功能评分比较

两组患者治疗前Lysholm膝关节功能评分比较,无差异($P>0.05$),治疗后,与治疗前比较,两组均有所改善,差异有显著性意义($P<0.05$),其中治疗组优于对照组($P<0.05$),说明振动疗法结合常规康复训练更有利于膝关节本体感觉及稳定性的改善(见表3)。

表1 两组患者治疗前后膝关节角度重现比较 ($\bar{x}\pm s$,°)

组别	30°		45°		60°	
	治疗前	治疗后	治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
治疗组	5.67±1.13	3.67±1.16①②	6.01±1.61	3.97±1.00①②	6.59±1.24	3.59±1.19①②
对照组	6.16±1.42	4.74±1.44①	5.98±1.03	4.78±1.29①	6.65±1.22	4.68±1.27①

注:①与治疗前比较$P<0.05$;②与对照组比较$P<0.05$

表2 两组患者治疗前后膝关节被动活动察觉阈值比较 ($\bar{x}\pm s$,°)

组别	治疗前	治疗后
治疗组	3.38±0.53	1.53±0.24①②
对照组	3.47±0.70	2.06±0.18①

注:①与治疗前比较$P<0.05$;②与对照组比较$P<0.05$

表3 两组患者治疗前后Lysholm膝关节功能评分比较 ($\bar{x}\pm s$,分)

组别	治疗前	治疗后
治疗组	77.13±3.93	85.43±3.64①②
对照组	78.03±3.77	82.27±3.65①

注:①与治疗前比较$P<0.05$;②与对照组比较$P<0.05$

3 讨论

前交叉韧带重建后,本体感觉不良是膝关节打软、动态稳定性差的主要原因。本体感觉作为一种特殊的感觉形式,包括关节的位置觉和运动觉。沙霖等[10]表明力学信号通过ACL本体感受器的介导,传入神经中枢后可提高神经肌肉控制能力,维持关节运动时的动态稳定,ACL本体感觉的传输是膝关节动态稳定的前提和基础。因此,膝关节动态稳定可通过本体感觉恢复的程度去评估。本次研究选择膝关节角

度重现比较与膝关节被动活动察觉阈值比较评估膝关节本体感觉恢复程度；以Lysholm膝关节功能评分对跛行、需要支持、绞锁、不稳定、疼痛、肿胀、上下楼和下蹲等8个方面评估判断膝关节动态稳定能力。研究结果显示，治疗后膝关节角度重现、膝关节被动活动察觉阈值、Lysholm膝关节功能评分三项观察指标均有改善，其中治疗组膝关节角度重现结果优于对照组；膝关节被动活动察觉阈值比较，治疗组优于对照组；Lysholm膝关节功能评分比较，治疗组高于对照组，差异均有显著性意义（$P < 0.05$）。说明振动疗法结合康复训练更加有利于ACL术后膝关节本体感觉重建进而增强关节动态稳定性。

前交叉韧带是维持膝关节稳定的重要组织，从结构上讲ACL起于股骨外侧髁内面后部止于胫骨髁间隆起前方骨面，连接股骨与胫骨，保证膝关节的静态稳定性，从功能上讲在ACL末端与骨连接的部分分布有大量机械感受器，ACL及关节周围组织上的机械感受器，通过脊髓水平、大脑活动和认知程序三种层次的神经肌肉反馈形式来参与膝关节的动态控制。因此，当ACL重建后，其本体感受器受到损伤，脊髓水平的反射保护功能减退，大脑活动水平的神经中枢整合功能紊乱，认知程序水平的运动记忆存储，及模块化输出障碍。故缺少神经调节的膝关节极易出现打软，反复损伤等现象。

Shimizu等[11]对家兔进行自体移植ACL重建，研究表明术后2—8周，移植物中有机械感受器再生，Ochi等[12]对移植物进行电刺激，发现移植物中不仅有神经再生，而且能将外来刺激以电信号的形式传给神经中枢，说明ACL的本体感觉功能可以恢复，以上发现为康复过程中本体感觉的训练提供了理论基础。

本次临床观察的常规康复训练在关注膝关节周围肌肉力量及改善关节活动度的同时，更加重视通过强化本体感觉重建大脑活动水平及认知程序水平的神经肌肉反馈机制。对于大脑活动水平神经反馈的重建主要通过膝关节挤压、不同屈膝角度的重心转移，反复的平衡训练等激活ACL及其周围组织器官的机械感受器，将关节位置、负荷、运动速度变化等信息传入神经中枢，并由神经中枢将这些信息与视觉、前庭传入的冲动进行不断的调节、整合，以此调节肌肉兴奋，保持身体姿势及动态平衡。以上述训练为基础，不断重复，可加强患者在认知程序水平的自我感知能力，包括躯体位置觉和认知觉，并建立新的平衡框架和模块化动作，将它们储存为中枢指令，从而使身体无需连续的意识控制也能高效、迅速地为膝关节稳定提供动态支持。Liu- Ambrose T[13]通过对韧带重建术后的患者进行分组研究，发现本体感觉训练组与力量训练组相比，两组峰力矩无差异，本体感觉训练组达到峰力矩的时间更短。由此推断，本体感觉训练不仅可以强化膝关节对位置、运动的感知能力，也可高效地增强下肢肌力，更大程度地强化神经肌肉反馈机制，从而提高膝关节的动态稳定性与训练效率。有研究也提出前交叉韧带损伤后膝关节感觉信息传入的改变会造成膝关节周围肌肉肌力的下降甚至是萎缩[14]。

由上可知，常规康复训练对于改善膝关节本体感觉进而增强关节动态稳定性具有重要意义。目前也有研究表明，振动疗法作为一种新兴的辅助治疗技术可以有效改善损伤后膝关节本体感觉、增强姿势控制以及稳定性[15]。

振动刺激以正弦波的能量传导，刺激肌肉、关节感受器、神经、血管等组织从而在人体产生复杂的生物学效应[8]。Kennedy等[16]及相关学者表明关节受到应力时，基于本体感觉信息传入后形成的脊髓水平的肌肉反射可为关节稳定提供动力性支持。笔者认为振动疗法为ACL重建术后患者提供了一个振动的不稳定平面，振动波从足底向人体传导，会不断对股骨、胫骨、髌骨的相对位置进行多样性的微小改变，患者无法预知这种突然性的膝关节相对位置的变化，为了保持身体平衡、保护膝关节，会依靠反射弧这一结构使肌肉反射性收缩[15]。有研究认为，振动刺激的训练能强化这种脊髓水平的神经肌肉反射，而且相对于其他强化该反射的训练来说，安全性更高。由于振动刺激对关节位置产生的是的微小改变，且反复、持续刺激，一方面会激活膝关节周围机械感受器的功能；另一方面能提高神经中枢对膝关节周围组织细小变化的敏感性，提高神经系统的应激能力。

针对ACL重建术后，振动刺激对脊髓水平神经肌肉反射的重建，众多学者也对相关反射弧进行了结构、功能上的研究来进行阐释。①有研究认为，振动刺激激活肌梭、腱梭等本体感受器的功能，尤其是肌梭传入神经纤维的兴奋，引起受神经支配的骨骼肌的反射收缩，包括股四头肌内侧头、股二头肌等维持膝关节稳定的重要肌肉，从而提高其神经肌肉反射能力。 有研究者发现在振动刺激促使肌肉反射性收缩的同时，也可激活高尔基腱器，使拮抗肌在原动肌快速有力收缩的同时及时舒张放松，增强中枢神经系统间的协调性，促进肌肉间的合作，从而强化关节的运动控制，而不仅仅是增强局部肌力[17]。②相关研究显示，ACL上的本体感受器与股四头肌和腘绳肌纤维通过大量的韧带-肌肉反射弧结构连接[18]，秦德安等指出[19]当ACL本体感受器在受到牵张刺激后，会将信息通过传入神经传到相应脊髓节段（L1—L4）进行整合，然后通过股四头肌内γ运动神经元作用于效应器，产生相应的动作效果。Krogsgaard及相关学者[20]试验表明机械刺激或电刺激作用在前交叉韧带上，会产生动作电位诱发腘绳肌的兴奋性收缩，证明了人体内ACL-腘绳肌反射的存在。Solomonow认为ACL-腘绳肌反射中枢位于L4—S3脊髓节段[19]。因此，笔者认为适当频率的振动刺激作用于ACL

机械感受器,激活ACL-肌肉反射通路,使相关肌群被反射性激活,在遇到应急情况时,协同收缩从而稳定膝关节,稳定性一旦加强,本体感觉也可以得到较好的恢复,进而可以预防ACL的再次损伤,形成良性循环。

相关研究表明振动治疗中,患者站立姿势的不同,如伸膝位或屈膝位,对治疗的效果也会产生差异性影响[21]。针对提高中枢神经系统的协调性、强化神经肌肉反射,学者们更青睐于屈膝位置接受振动刺激。本次临床观察,治疗组患者接受振动的体位为微屈膝位,角度在10°—20°之间。原因如下:①国外文献表明,肌肉的初长度影响振动效果,受到牵拉的肌肉对振动刺激更加敏感,收缩也更为强烈。屈膝使股四头肌抗重力拉长做功从而募集更多的运动单位,再加上接受振动刺激,相应的反射性收缩会更为明显[17]。而在股四头肌强化收缩的同时,振动台也会对人体施加向上的矢量冲击,使膝关节有伸的趋势,为了保持原有体位和姿势稳定,腘绳肌肌梭敏感程度提高、γ神经元活性提升,股后群肌肉收缩能力加强。另外,有学者认为屈膝位股前后群肌肉协同收缩,会增加下肢软组织阻抗,也可减低ACL的缓冲负荷[17,21]。由上可知,屈膝位接受振动治疗较完全伸直位效果会更佳。②对于较好屈膝角度范围的选择,北京体育大学经研究比较表明,屈膝45°下蹲动作配合振动刺激可较好激活屈-伸肌,增强中枢神经系统的同步性,强化肌肉协调反应能力[17]。但是由于本次临床观察设定的振动治疗时间为10min/次,振动时间较长,若屈膝角度偏大会使抗阻强度过大,则易使神经肌肉过度疲劳而产生反作用,患者也可能无法坚持。因此,本次研究选用屈膝角度10°—20°。另外有文献报道,屈伸膝负重过程中,在该角度范围内ACL承受的负荷较小,且此角度范围也具有较好的减震作用,可降低振动波对脑及脏器的冲击[22]。根据上表中各项指标结果显示,本次临床观察采用的屈膝角度对膝关节本体觉及稳定性的改善效果良好。张帆等[17]也提到振动中屈膝角度的选择要根据群体的训练需求,当前身体状况,训练时间等指标来定,不能一概而论。

从振动传递的力学结构来看,人体更像是由骨骼、肌肉、关节、韧带等组成的相当于质量-弹簧-阻尼的振动系统,每一个局部系统都有自己的共振频率,而一定频率范围内的正弦波能使高低不同阈值的运动单位同时激活,强化神经肌肉能力。因此振动频率的设置尤为重要。通过Eklund等[23]的研究结果表明10—200Hz频率的振动刺激可以使肌肉反射性收缩,募集大量运动单位,也可以防止肌肉萎缩。国外学者以肌电图对周围神经冲动进行研究,发现在22—50Hz的振动频率下,神经冲动发放频率加快,同步性增强,肌肉出现共振现象。而本院机器的最高频率为30Hz。Rosenkranz K等[24]及Zech A等[25]研究指出至少进行2周及以上,10—15min的振动刺激才可对机体产生持续性影响。故本次临床观察采用频率:30Hz,幅度:3mm的振动刺激进行治疗,每天10min,持续两周。Chak AF等[26]认为在前交叉韧带重建术后早期可以进行振动训练治疗,研究发现在进行常规康复训练四周后加入全身振动训练有利于膝关节本体感觉及稳定性的恢复。故本次临床观察根据患者功能的实际恢复情况于常规康复训练的第5周开始在原有康复训练的基础上加入振动治疗,指标显示膝关节本体感觉与稳定性的恢复良好。

振动刺激除了通过强化脊髓水平反射提高膝关节动态稳定性外,还可以增加神经血流量,进而加速支配前交叉韧带的颈后神经后侧关节神经的恢复,改善本体感觉。此外,振动的机械波有节律地作用在关节腔内,可以有效地改善关节代谢,对肌肉血流动力学也会产生一定影响,提高局部肌肉组织微循环。这些由振动刺激所带来的生理学效应都会对膝关节本体感觉及动态稳定性的改善起到一定的积极作用,在此不做重点阐述。

综上所述,康复训练与振动疗法结合,彼此互补,促通以上三个水平的神经肌肉反馈达到改善本本体感觉,进而达到提高膝关节动态稳定性目的。但是,本次临床观察由于条件及时间的限制,研究样本量较小,临床分析较为单一,仅对本体感觉中的部分作用进行分析,未进行随访,未来有机会希望可以针对振动疗法对本体感觉的影响进行多方位、大样本的临床研究,完善相关指标。关于振动疗法对前交韧带重建后本体感觉、稳定性的积极训练效益,更多取决于个性化试验方案的设计,其中涉及频率、姿势、时间等多种因素,而目前业内对于以上变量的设定还有争议。关于治疗变量的规范化、个体化仍需进行更深入的临床研究探讨。此外,虽然本文以前人相关实验为依据探讨了振动刺激可能是通过促通相关反射从而达到改善本体感觉的目的,但具体通路的相关分子机制仍不清楚,有待于通过动物实验研究进行深入阐述。

参考文献

[1] 陈家,魏世隽,王洪. 关节镜下韧带重建术治疗前交叉韧带损伤的研究进展[J]. 中国矫形外科杂志,2018,26(16):1489—1494.

[2] Gross MT. Effects of recurrent lateral ankle sprains on active and passive judgement of joint position[J]. Physical Therapy,1987,67(10):1505—1509.

[3] Noyes FR, Mooar PA, Matthews DS, et al.The symptomatic anterior cruciate- deficient knee.Part 1: The long - term functional disability in active individuals[J]. J Bone Joint Surg Am,1983,65(2):154—162.

[4] MacDonald PB, Hedden D, Pacin O, et al. Proprioception in anterior cruciate ligament - deficient and reconstructed knees[J].Am J Sports Med,1996,24(6):774—778.

[5] Tsuda E，Ishibashi Y，Okamura Y，et al. Restoration of anterior cruciate ligament- hamstring reflex arc after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc，2003，11(2)：63—67.

[6] Cheung WH，Li CY，Zhu TY，et al. Improvement in muscle performance after one- year cessation of low- magnitude high- frequency vibration in community elderly[J]. J Musculoskelet Neuronal Interact，2016，16(1)：4—11.

[7] Barrett DS. Proprioception and function after anterior cruciate reconstruction[J]. Journal of Bone & Joint Surgery British Volume，1991，73(5)：833—837.

[8] Roberts D，Ageberg E，Andersson G，et al. Effects of short-term cycling on knee joint proprioception in ACL- deficient patients [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrose，2004，12(5)：357—363.

[9] Lysholm J，Gillquist J. Evaluation of knee ligament surgery results with special emphasis on use of a scoring scale[J]. American Journal of Sports Medicine，1982，10(3)：150—154.

[10] 沙霖，赵金忠. 前交叉韧带胫骨侧残端中机械感受器的计数研究[J]. 中国修复重建外科杂志，2010，24 (11)：1318—1322.

[11] Shimizu T，Takahashi T，Wada Y，et al. Regeneration process of mechanoreceptors in the reconstructed anterior cruciate ligament [J]. Arch Orthop Trauma Surg，1999，119(7—8)：405—409.

[12] Ochi M，Iwasa J，Uchio Y，et al. The regeneration of sensory neurones in the reconstruction of the anterior cruciate ligament [J]. Bone Joint Surg Br，1999，81(5)：902—906.

[13] Liu- Ambrose T，Taunton JE，MacIntyre D，et al. The effects of proprioceptive or strength training on the neuromuscular function of the ACL reconstructed knee：a randomized clinical trial[J]. Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports，2003，13(2)：115—123.

[14] Eva Ageberg. Consequences of a ligament injury on neuromuscular function and relevance to rehabilitation - using the anterior cruciate ligament-injured knee as model[J]. Journal of Electromyography and Kinesiology，2002，12(3)：205—212.

[15] 吴博，张雷，庞文君，等. 全身振动训练对前交叉韧带损伤重建术后患者下肢运动控制的影响[J]. 中国康复医学杂志，2016，31(4)：421—425.

[16] Kennedy JC，Alexander IJ，Hayes KC.Nerve supply of the human knee and its functional importance[J].The American Journal of Sports Medicine，1982，10(6)：329—335.

[17] 张帆，王长生，袁艳，等.不同屈膝角度与g值全身振动刺激对下肢肌肉影响的研究[J].北京体育大学学报，2014，37(11)：86—92.

[18] Fremerey R，Freitag N，Wippermann B，et al. Sensorimotor potential of the intact and injured anterior and posterior cruciate ligaments——a neurophysiological study in an animal model[J]. Z Orthop Ihre Grenzgeb，2006，144 (2)：158—163.

[19] 秦德安，李晓东，宋洁富，等. 膝腱反射检查对前交叉韧带断裂和重建后本体感觉功能的评价[J]. 中国骨与关节损伤杂志，2008，23(11)：899—901.

[20] Krogsgaard MR，Poulsen PD，Rasmussen TF. Cruciate ligament reflexes [J]. J Electromyogr Kinesiol，2002，12(3)：177—182.

[21] Matsumoto Y，Griffin MJ. Dynamic response of the standing human body exposed to vertical vibration：influence of posture and vibration magnitude[J].Journal of Sound and Vibration，1998，212(1)：85—107.

[22] 熊道海，李玥莹，张云. 前交叉韧带重建术后康复治疗中开链与闭链运动的效果观察[J].南京医科大学学报，2013，33(7)：994—998.

[23] Eklund G，Hagbarty KE. Normal variability of tonic vibration reflexes in man[J]. Experimental Neurology，1966，16 (1)：80—92.

[24] Rosenkranz K，Rothwell JC. The effect of sensory input and attention on the sensorimotor organization of the hand area of the human motor cortex[J]. Journal of Physiology，2004，561(1)：307—320.

[25] Zech A，Hubscher M，Vogt L，et al. Neuromuscular training for rehabilitation of sports injuries：a systematic review [J]. Med Sci Sports Exerc，2009，41(10)：1831—1841.

[26] Chak AF，Shu PY，Kan BL，et al. The effect of early whole-body vibration therapy on neuromuscular control after anterior cruciate ligament reconstruction：A randomized controlled trial[J].Am J Sports Med，2013，41(4)：804—814.