

· 综述 ·

# 前交叉韧带本体感觉功能的临床认识

谷 莉<sup>1</sup>

前交叉韧带作为膝关节被动稳定性装置为膝关节提供保护、保证其功能完整性,这一作用早已被人们熟知并认可。膝关节前交叉韧带损伤后重建前交叉韧带的最初目的即在于恢复其解剖结构和机械力学稳定机制。

## 1 前交叉韧带在膝关节稳定性中的作用

早在 100 多年前<sup>[1]</sup>临床学家和研究者就发现了机械感受器在关节功能中的潜在作用。这些机械感受器在膝关节中广泛存在于关节囊、膝韧带、肌腱中,其中当然也包括前交叉韧带。在组织学研究中 Freeman、Wyke 两人将前交叉韧带中机械感受器按形态学分为 4 型:鲁菲尼小体、环层小体、高尔基腱器官和形态学未分类的游离神经末梢。四种机械感受器共占了前交叉韧带体积的 0.1%,它们大部分分布在接近韧带末端与骨连接的部分<sup>[2]</sup>,感受并向中枢传递关节角度、机械张力、加减速度的信息<sup>[3]</sup>。这些本体感觉信息和视觉、前庭觉一起经中枢,通过反馈作用调节肌肉的兴奋,进而参与到膝关节动态稳定性控制当中(图 1)。



图 1 关节的稳定机制<sup>[20]</sup>

在前交叉韧带机械感受器作为信号传入装置的膝关节动态稳定机制中,交叉韧带-肌肉反射理论作为最主要的内容不断被学者在动物或人体的研究中反复验证。前交叉韧带作为对抗胫骨前移的最特异性的装置可耐受 2000N 的负荷,而在没有拮抗肌即腓绳肌的情况下,股四头肌牵拉胫骨前移的拉力常超出 2000N<sup>[4]</sup>。因此从前交叉韧带到腓绳肌的保护性反射的存在是十分需要及合理的。Krogsgaard<sup>[5]</sup>总结了自这一理论提出后的大量研究,从早期在猫和羊身上进行的实验中已经可以得出,无论是机械还是电刺激作用在前交叉韧带上,都将引起腓绳肌的兴奋;而此后其他学者通过关节镜将电极植入人体,选择性刺激前交叉韧带,诱发出腓绳肌的收缩,证明了人体中这一反射同样存在。尽管反射的确切通路仍是未知,但多数学者认为肌梭、 $\gamma$  神经元、大脑皮质都可能参与到反射通路之中。膝关节只有在周围肌群的协调收缩下才能保持良好的动态稳定性。因此,临床提出<sup>[1,5]</sup>前交叉韧带断裂后特有的症状是由于韧带断裂后机械力学改变以及相应的感觉传入缺失所致,其中本体感觉的缺陷可能扮演了相当重要的角色。这一理论的提出使临床医生认识到,在以往

关于运动创伤疾病的康复中本体感觉的重建并没有得到应有的重视<sup>[6]</sup>。

## 2 本体感觉

### 2.1 本体感觉的形态和影响因素

所谓本体感觉是指肌、腱、关节等运动器官本身在不同状态(运动或静止)时产生的感觉,又称深感觉。在临床中,本体感觉与运动系统动静态功能相关的部分主要包括三方面的内容:①关节位置的静态感知能力;②关节运动的感知能力(关节运动或加速度的感知);③反射响应和肌张力调节回路的传出活动能力。前两者反映本体感觉的传入活动能力,后者反映其传出活动的能力<sup>[7]</sup>。

良好的本体感觉是获得准确高效的功能性运动的基础。个体的本体感觉水平并非是与生俱来、始终不变的。在人的一生中它会受到多种因素的影响。现被提出并已有研究验证的影响因素<sup>[8-10]</sup>包括:年龄、创伤、骨关节炎、渗出、运动训练等。在对兔子的研究中<sup>[9]</sup>,发现随年龄的增长,环层小体、鲁菲尼小体、高尔基腱器官数量将减少,其中鲁菲尼小体的减少尤为明显。同时机械感受器还会发生形态学改变,包括边缘不规则、结构扁平。已有学者<sup>[11]</sup>证实机械感受器的数量与膝关节本体感觉水平是正相关的。Oksendahl<sup>[12]</sup>在进行肌肉对外力反应的研究中指出,一定量的渗出会影响膝关节的感觉传入,从而抑制神经肌肉反应。此外创伤、骨关节炎、疼痛也均作为本体感觉的不利因素得到证实<sup>[9]</sup>,现唯一公认有效的可提高本体感觉的方法为适当的运动训练,训练方式多采用闭链运动<sup>[13-14]</sup>(自行车训练),还可进行“晃动训练”<sup>[15-16]</sup>(即不稳定平面上的站立练习)来协调神经肌肉功能。

### 2.2 本体感觉的临床测定

由于本体感觉形态的多样,使其测定方法在临床上并没有统一的规范,各研究之间可比性不强。综合近年来的研究,目前测定本体感觉的常用方法大致可概括为以下三种:

**2.2.1 膝关节主被动位置重现:**通过检查膝关节主被动模拟设定的屈伸角度,计算被检查者模拟角度与设定间的角度差,了解膝关节对自身位置的感知<sup>[9]</sup>。这种测定方法主要是评价了膝关节位置觉,可再细分为主动重现和被动重现。在主动重现中,患者通常采取负重站立位,通过抗重力的主动膝关节屈伸来重现设定的角度。有学者考虑负重位的位置重现更为优越,因为腓绳肌和股四头肌的共同收缩减小了 ACL 的张力,且更能代表下肢站立的功能模式<sup>[17-18]</sup>。但应注意的是在主动位置重现的测试中,前交叉韧带传入的信号所起作用可能较肌肉和关节囊的重要性小,且主动位置重现不能很好地

1 北京大学第三医院康复医学科,北京,100083

作者简介:谷莉,女,硕士,住院医师

收稿日期:2007-08-14

将视觉、前庭觉和其他信号的传入区分开来。已有临床试验发现,在不同负荷下被测者会表现出不同的主动位置重现能力。<sup>[19]</sup>反之在被动或不负重的位置重现中,由于肌肉的放松,可能会提供更敏感的位置觉指示,因其测试对前交叉韧带的受体更具针对性。

**2.2.2 膝关节被动运动感知阈值:**通常由静止开始,屏蔽视听觉和皮肤触觉,以0.5—2°/s的低角速度带动膝关节做被动屈或伸的动作<sup>[13,17,20—23]</sup>,在患者感知到运动后即停止,并记录膝节能感知到运动的最小角度位移。在国外被动运动感知阈值被认为是最为确定的<sup>[18]</sup>,同时又可能是最为敏感的本体感觉测验。但也有学者<sup>[8]</sup>指出,在发生被动运动时,速度越快,感知能力越强。为了获得较为准确的结果,更多学者倾向使用更慢的角速度。这就造成测定的效率相对较低,而对检测仪器和测试环境的要求较高。Weiler<sup>[22,24]</sup>为弥补被动运动感知阈值测定的缺陷,提出了感知阈搜索的方法,令被测者膝关节被动运动的角速度始终保持在可感知的水平上下波动,达到多次测定目的,减低了误差并提高了效率。虽然该方法还没有在临床研究中使用,但这一新的本体感觉测定思路,值得在临床研究中尝试。

**2.2.3 体感诱发电位:**通过对膝关节局部施加机械或电刺激后,测定表面肌电图和或大脑皮质的电位变化<sup>[16,20,21,25]</sup>,可以全面评价神经肌肉回路的各个部分。除少数研究中<sup>[14,12,25,26]</sup>是经植入电极选择性刺激前交叉韧带外,多数结果均是由外力扰动来获得待测电位变化的。这就使感觉信号的获得依赖于皮肤、关节囊、韧带、肌腱、肌肉受体甚至是视觉前庭的综合传入效果,且测得电位的潜伏期、振幅等数据和本体感觉的联系不具有直观性。但是,在比较患者和正常人在功能性运动中神经肌肉兴奋模式的差别时,此方法具有一定的优势。

在进行上述几种本体感觉测试时,都有赖于传向高级中枢系统的信息总和,因此,临床研究的原则是:尽量减少额外附加的本体感觉信息的干扰<sup>[23]</sup>。

### 3 前交叉韧带损伤后本体感觉的改变

#### 3.1 本体感觉改变的组织学基础

在Denti<sup>[27]</sup>对未经治疗的前交叉韧带断裂患者的机械感受器进行的研究中发现:前交叉韧带中的机械感受器的形态学正常可保持3个月。此后它们的数量逐渐减少。至伤后9个月,只剩下少量的神经末梢。在1年后的陈旧损伤中甚至游离神经末梢也几乎消失。此外,前交叉韧带断裂破坏了膝关节内部平衡,同样影响了后交叉韧带的张力和感受器。组织学研究证实<sup>[2]</sup>在前交叉韧带又断裂的膝关节中后交叉韧带的机械感受器也存在形态学的改变。同理推测关节囊和侧副韧带中的感受器也会受到相应的影响。这些传入装置的数量及形态学改变,影响着膝关节感觉信号的获取,也就影响了整体本体感觉的水平。

#### 3.2 本体感觉改变的临床特点

**3.2.1 本体感觉缺陷的持久性:**在未经治疗的前交叉韧带损伤患者中,本体感觉的缺陷是长期存在的。大量研究证明,在伤后的2年甚至20年<sup>[20]</sup>,通过位置觉运动觉的测定,患者仍然表现出较正常人更大的重现误差和更高的运动感知阈。尽

管一些患者经过训练可以提高运动的水平(通常称之为Coper)<sup>[15,20—21]</sup>,但Courtney<sup>[20—21]</sup>发现在这些患者中仍然存在着本体感觉的缺陷,他们功能的改善有可能是通过中枢的重组来完成,因为在这些Coper中,体感诱发电位较正常对照存在着P27电位的缺失,这在功能恢复不良的患者中是观察不到的。

**3.2.2 本体感觉缺陷的对称性:**一些学者在进行本体感觉测定时,习惯用对侧未受外伤的下肢作为对照。在这些研究中常得出的结论是两侧没有显著差异。但这并不一定意味着患侧膝关节的本体感觉已经恢复到了正常水平。在传入信息会同时影响同侧和对侧肢体的神经肌肉功能的理论提出后,经多项实验验证,现多数学者认为单侧的前交叉韧带损伤会使双下肢感觉受累<sup>[18]</sup>。Corrigan<sup>[7]</sup>应用被动运动感知阈和位置觉来测定本体感觉,发现单侧前交叉韧带断裂的运动员存在双侧本体感觉缺陷。David Roberts<sup>[17]</sup>也通过测定屈伸动作的被动运动感知阈、主动重现被动的位置改变和视觉下重现被动位置改变三项指标比较了患者和正常对照。结果显示,患者双侧膝关节在感知被动屈伸时的阈值均较正常对照高。Bonfim TR在更加全面地对比了重建术后患者双侧下肢和正常对照组的位置重现、运动感知、腓绳肌潜伏期和单腿双膝站立时的姿势控制后,发现,患者双侧位置重现的误差增大,运动感知阈值升高,腓绳肌潜伏期延长及姿势控制不良。此外Terese<sup>[28]</sup>发现了可能与本体感觉传入信号丧失有关的双侧股四头肌主动兴奋水平抑制,这在研究的100名患者中发生率达21%。因此,虽然相关看法仍不一致,但在测定本体感觉参数时,考虑到双侧可能均存在的本体感觉缺陷,应尽量使用正常对照。

#### 3.3 本体感觉对主观感受和功能性的影响

在膝关节的康复评定中,无论是评价肌肉力量还是本体感觉,都只是对膝关节运动动力学中某组成部分的单独评价。这些组成部分都在一定的比例上影响着膝关节的功能。它们和膝关节的实际功能的联系需要被进一步探讨。目前全面膝关节功能的评定一般包括Lysholm, Tegner等量表<sup>[28]</sup>或是功能性测试<sup>[30—31]</sup>,包括敏捷性测试及跳跃测试。由于主观功能分级和单腿跳有较好的灵敏度,且简单易行,是现临床上较多采用的方法<sup>[5,18,32]</sup>。本体感觉与膝关节功能正相关这一观点已得到了多数人的认可和证明<sup>[5]</sup>。D. Roberts<sup>[31]</sup>研究了经关节镜确诊的前交叉韧带断裂且未行手术治疗的患者。他以单腿跳和主观功能分级作为因变量,将本体感觉(被动运动感知)、松弛度、股四头肌腓绳肌肌力、年龄、性别分别作为自变量,做回归分析。发现高感知阈值,增加的松弛度,肌力差将明显预示着单腿跳距离缩短,而好的主观功能分级则与女性、较小的松弛度和更好的本体感觉相关。与此相似,Borsa也证明单腿跳和用运动感知阈方法测量的本体感觉间有重要的相关性。

此外另有报道<sup>[21,26]</sup>,随着本体感觉的缺失,现有的完整感觉反馈和运动模式将被打断,这导致了“打软腿”现象。这种前交叉韧带断裂后典型的临床症状会严重影响主观分级及相关量表的评定。虽然Roberts<sup>[31]</sup>认为:有不稳定的患者可能会通过改变他们的行为避免这样的事件发生,没有不稳定(打软腿)事件不等于良好的功能,但仍有研究发现<sup>[21]</sup>被动运动感



知阈值测定中的高阈值与“打软腿”具有相关性。

### 3.4 本体感觉对肌肉力量的作用

虽然临床认为前交叉韧带损伤患者的大腿肌力可通过功能训练恢复,但长时间的股四头肌力量减退在前交叉韧带损伤患者中仍是很常见的<sup>[9,28,30]</sup>。在接受前交叉韧带重建手术的患者中,由于手术带来的疼痛、制动、自体移植物截取等问题,特别是使用髌腱作为移植物,股四头肌的力量在术后相当一段时间内才能恢复至术前水平,至于达到正常水平则需要更长期的力量训练。虽然通过改变术式,腓绳肌作移植物对股四头肌力量的恢复有改进作用<sup>[9]</sup>,肌肉力量恢复慢仍一直困扰前交叉韧带损伤后患者的康复。

通过临床观察<sup>[18]</sup>,Elmqvist 发现前交叉韧带断裂患者伤侧的股四头肌横截面积、肌力、肌电图活跃程度都有所降低。Lorentzon 则指出股四头肌肌力的强度和横截面积没有相关性,在仅有轻微萎缩的情况下,肌力强度即可明显降低。Elmqvist 和 Lorentzon 都认为前交叉韧带损伤后股四头肌力量受损的现象是由膝关节感觉信息传入的改变造成的。Lorentzon 还提出,这种改变会引起正常的功能性肌纤维收缩的减少。因此主动肌肉兴奋不足(如关节源性的肌肉抑制或反射抑制)被认为是持续的股四头肌无力的原因之一<sup>[28]</sup>。但是主动兴奋不足没有在所有股四头肌研究中体现出来,文献报道的兴奋缺失变化范围也很大,从 0—40%不等。

为解释股四头肌兴奋不足的原因,有学者从前交叉韧带和股四头肌的关系进行分析<sup>[1]</sup>:前交叉韧带是最特异的抗股四头肌收缩引起的胫骨前移的装置,其中的机械感受器是唯一发出敏感有效的胫骨前移信号的感受器。因此,学术界提出的假设:前交叉韧带机械感受器的信号传出对股四头肌功能有特异的影响是有现实依据的。有学者进一步假设,当前交叉韧带的张力在一定范围内时,通过其中机械感受器的传出的信号调制主要由股四头肌参与的运动程序,可以促进股四头肌的兴奋。由于韧带感觉信号的传入不太可能直接影响 $\alpha$ 运动神经元,考虑是通过作用在 $\gamma$ 环路来影响 $\alpha$ 运动神经元的<sup>[10]</sup>。Konishi<sup>[10]</sup>用体表肌电图的改变证明了前交叉韧带重建术后存在着股中间肌和股外侧肌的异常 $\gamma$ 环路,在这种异常环路的基础上,他预测前交叉韧带感觉功能的恢复对提高肌肉力量是必须的。T.Liu-Ambrose<sup>[32]</sup>通过比较本体感觉训练和力量训练对重建术后神经肌肉功能的作用,得出单纯的本体感觉训练也可明显改善下肢肌力水平,特别是股四头肌向心收缩和腓绳肌离心收缩。和力量训练组相比,两组间峰力矩无差异,但本体感觉组峰力矩恢复时间较早(6周)。反之,也有人提出肌力训练可以改善本体感觉<sup>[14]</sup>。虽然本体感觉和肌力间是否存在联系及它们的因果关系尚有待进一步研究,但就当前结果看来,可以设想通过本体感觉训练不仅可以使患者在关节位置觉及运动觉中获益,更可协同肌肉力量训练,提高训练的收益,尤其是股四头肌的力量。

### 3.5 前交叉韧带重建术对本体感觉恢复的作用

前交叉韧带断裂后其参与的反馈环路被打乱,但手术重建是否能恢复本体感觉仍是未知。迄今为止,关于这一问题的研究所得的结果仍存在很大争议。虽然在前交叉韧带重建的过程中,并没有考虑到机械感受器,但 Denti<sup>[27]</sup>在动物试验

中发现,自体髌腱重建的前交叉韧带中出现了机械感受器,而人造移植物中则没能发现机械感受器。另在大鼠<sup>[4]</sup>实验中,前交叉韧带移植物在术后的几周时间内即可经神经肽染色方式着色,意味着其中的神经纤维已存在活性。此外<sup>[27]</sup>在两例腓绳肌移植重建前交叉韧带失败的患者中,移植物组织学检查发现了机械感受器(鲁菲尼和环层小体),但它们是否有神经支配,还是仅为移植物中脱神经的空壳还不清楚。在动物体内进行的电生理检查也证明了在术后 6 个月时有 1/3 的受试动物恢复了体感诱发电位<sup>[26]</sup>。

在临床研究中,Diana M、Co 和 Hattison<sup>[7]</sup>均指出在前交叉韧带重建术后 10 个月或是更长的时间,患者的位置重现、运动感知阈可恢复到正常水平。M.Ochi<sup>[26]</sup>则采用了 Pitman 提出的通过直接刺激前交叉韧带得到体感诱发电位的方法,排除了对周围其他机械感受器的电机械刺激,同时评价了从外周神经到中枢的体感通路全长。他得出在正常对照组和腓绳肌重建后 18 个月后组均可测出体感诱发电位,重建后的前交叉韧带体感诱发电位几乎与对照组一样。而损伤未重建组只有不到 50%可测出电位,且电压明显低于对照组。他同时测定关节位置觉,重建组虽有明显改善,但仍低于正常。还有研究通过验证韧带-腓绳肌反射的恢复支持了重建韧带感觉传入功能的恢复<sup>[25]</sup>。以上结果均支持无论是从位置觉或是运动觉的直接测定,还是体感诱发电位中神经通路的电位分析,抑或是组织学检查,前交叉韧带重建不仅在解剖学上复原了膝关节的力学稳定性结构,还促进了本体感觉的恢复。但临床尚有不同意见<sup>[7]</sup>,Roberts 研究认为用自体髌腱重建前交叉韧带后两年的时候,患者仍然存在着双侧本体感觉的缺陷。无论重建术对本体感觉恢复促进与否,考虑到本体感觉恢复所需的较长时间,关于术后保守及激进康复方案的讨论有必要考虑的更为全面<sup>[33]</sup>。

## 4 结论

前交叉韧带在膝关节功能中同时参与了静态和动态的稳定机制。前交叉韧带富含本体感觉的传入装置,其损伤对膝关节感觉信号传入的影响已从组织学、临床、电生理学得到证实。在前交叉韧带损伤后,患者会出现长期的双下肢本体感觉减退,并造成下肢功能及主观评价的不良,甚至还会影响肌肉力量的恢复。前交叉韧带重建术在恢复解剖学稳定的基础上,还可能有着促进本体感觉恢复的潜能。以上观点已得到多数学者的认可,其中的不完善之处,还有待于进一步的研究和探讨。

## 参考文献

- [1] Hogervorst T, Brand RA. Mechanoreceptors in joint function [J]. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 1998, 80,9:1365—1378.
- [2] Friemert B, Bach C, Schwarz W, et al. Benefits of active motion for joint position sense [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006, 14:564—570.
- [3] Aydog ST, Korkusuz P, Doral MN, et al. Decrease in the numbers of mechanoreceptors in rabbit ACL: the effects of ageing [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006, 14:325—329.
- [4] Krogsgaard RM, Poulsen PD, Rasmussen TF. Cruciate liga-

- ment reflexes [J]. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2002, 12: 177—182.
- [5] Katayama M, Higuchi H, Kimura M, et al. Proprioception and performance after anterior cruciate ligament rupture [J]. *International Orthopaedics*, 2004, 28: 278—281.
- [6] 王宁华. 常见骨科疾病康复问题的思考[J]. *中国康复医学杂志*, 2005, 20, 3: 163—164.
- [7] 黄红拾, 周谋望. 膝关节本体感觉康复的研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2003, 18, 9: 567—569.
- [8] Friden T, Roberts D, Zatterstrom R, et al. Proprioception in the nearly extended knee. Measurements of position and movement in healthy individuals and in symptomatic anterior cruciate ligament injured patients [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy*, 1996; 4: 217—224.
- [9] Kobayashi A, Higuchi T, Terauchi M, et al. Muscle performance after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *International Orthopaedics (SICOT)*, 2004, 28: 48—51.
- [10] Konishi Y, Fukubayashi T, Takeshita D. Mechanism of quadriceps femoris muscle weakness in patients with anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2002; 12: 371—375.
- [11] Adachi N, Ochi M, Uchio Y, et al. Mechanoreceptors in the anterior cruciate ligament contribute to the joint position sense [J]. *Acta Orthop Scand*, 2002, 73(3): 330—334.
- [12] Oksendahl HL, Fleming BC, Blanpied PR, et al. Intra-articular anesthesia and knee muscle response [J]. *Clinical Biomechanics*, 2007, 22: 529—536.
- [13] 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 Arthrosc*, 2004, 12: 357—363.
- [14] Boueët V, Gahery Y. Muscular exercise improves knee position sense in humans [J]. *Neuroscience Letters*, 2000, 289: 143—146.
- [15] Chmielewski TL, Hurd WJ, Rudolph KS, et al. Perturbation training improves knee kinematics and reduces muscle co-contraction after complete unilateral anterior cruciate ligament rupture [J]. *Health and Medical Complete*, 2005, 85(8): 740—749.
- [16] Hurd WJ, Chmielewski TL, Mackleer LS. Perturbation-enhanced neuromuscular training alters muscle activity in female athletes [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006, 14: 60—69.
- [17] Roberts D, Friden T, Stomberg A, et al. Bilateral proprioceptive defects in patients with a unilateral anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison between patients and healthy individuals [J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2000, 18(4): 565—571.
- [18] 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: 205—212.
- [19] 李放, 张蕙, 胡永善. 闭链测定负荷对健康成人下肢位置觉的影响 [J]. *中国康复医学杂志*, 2007, 22(10): 930.
- [20] Courtney CA, Rine RM. Central somatosensory changes associated with improved dynamic balance in subjects with anterior cruciate ligament deficiency [J]. *Gait and Posture*, 2006, 24: 190—195.
- [21] Courtney C, Rine R M, Kroll Penny. Central somatosensory changes and altered muscle synergies in subjects with anterior cruciate ligament deficiency [J]. *Gait and Posture*, 2005, 22: 69—74.
- [22] Weiler HT, Awiszus F. Characterisation of human knee-joint proprioception by means of a signal-detection theory [J]. *Exp Brain Res*, 2001, 138: 110—117.
- [23] Wikstrom EA, Tillman MD, Chmielewski TL, et al. Measurement and evaluation of dynamic joint stability of the knee and ankle after injury [J]. *Sports Med*, 2006, 36: 393—410.
- [24] Weiler HT, Awiszus F. Characterization of human joint proprioception by means of a threshold hunting paradigm [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 1998, 85: 73—80.
- [25] 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: 63—67.
- [26] Ochi M, Iwasa J, Uchio Y, et al. The regeneration of sensory neurons in the reconstruction of the anterior cruciate ligament [J]. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 1999, 81(5): 902—906.
- [27] Denti M, Monteleone M, Berardi A, et al. Anterior cruciate ligament mechanoreceptors [J]. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 1994, 308: 29—32.
- [28] Chmielewski TL, Stackhouse S, Axe MJ, et al. A prospective analysis of incidence and severity of quadriceps inhibition in a consecutive sample of 100 patients with complete acute anterior cruciate ligament rupture [J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2004, 22: 925—930.
- [29] Meighan AAS, Keating JF, Will E. Outcome after reconstruction of the anterior cruciate ligament in athletic patients [J]. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 2003, 85(4): 521—524.
- [30] Keaysa SL, Bullock-Saxtona J, Keays AC, et al. Muscle strength and function before and after anterior cruciate ligament reconstruction using semitendinosus and gracilis [J]. *The Knee*, 2001, 8: 229—234.
- [31] Roberts D, Ageberg E, Andersson G, et al. Clinical measurements of proprioception, muscle strength and laxity in relation to function in the ACL-injured knee [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2007, 15: 9—16.
- [32] 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]. *Scand J Med Sci Sports*, 2003, 13: 115—123.
- [33] 李云霞, 陈世益, 翟伟韬, 等. 自体腘绳肌腱重建前交叉韧带术后两种康复程序效果比较 [J]. *中国康复医学杂志*, 2008, 23(1): 16—18.