



短跑运动员跟腱生物力学特性的实验研究

沈勇伟¹, 张林¹, 齐红梅²

摘要: 通过对短跑运动员和非运动员跟腱弹性模量和刚度的比较研究, 探讨短跑运动对人体跟腱生物力学特性的影响。研究结果表明, 短跑训练后跟腱的弹性模量和刚度明显增加, 提示训练能够改善跟腱的力学性能, 表明训练后既能增加跟腱的体能储备, 又能使其承受更大的载荷, 并在一定程度上可减少跟腱疲劳损伤的发生。

关键词: 短跑运动员; 跟腱; 刚度; 弹性模量

中图分类号: G804.5 文献标志码: A 文章编号: 1006-1207(2013)02-0032-03

Experimental Researches on Achilles Tendon Biomechanical Characteristics of Sprinters

SHEN Yong-wei¹, ZHANG Lin¹, QI Hong-mei²

(School of Physical Education, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: By comparing the stiffness and modulus of elasticity of Achilles tendon of sprinters with those of non-athletes, the article tries to explore the effects of sprint on Achilles tendon biomechanical characteristics. The result discovers that stiffness and elastic modulus increase significantly after sprint training. This shows that training may improve tendon's physical reserves and make it capable for heavier load. This can reduce tendon fatigue injuries to some extent.

Key words: sprinter; Achilles tendon; stiffness; elastic modulus

跟腱作为体内最大最强壮的能量储存肌腱, 其主要功能使足跖屈、提踵, 在人体完成日常生活动作和运动训练中具有重要的作用。跟腱断裂是一种比较严重的运动损伤, 在体操、技巧、篮球、足球和田径等项目中较为常见。在骨-肌腱-肌肉运动系统中, 骨与肌肉的相关研究不断深入, 但肌腱的研究尚处于起步阶段, 尤其是国内较少有人涉及。因此, 明确肌腱在不同的应力作用模式下发生的改建的规律, 对于合理地制定训练计划, 防止肌腱损伤的发生非常重要。本研究以人作为试验对象, 探讨短跑训练对人体肌腱刚度和弹性模量的影响, 从而为今后肌腱的在体试验提供参考, 同

时也为运动训练中预防肌腱损伤的发生提供实验依据。

1 实验对象与方法

1.1 实验对象

以苏州市体育运动学校短跑专业运动员 24 名 (均为国家一级或二级运动员) 为实验组; 苏州市建设交通学校 24 名学生 (年龄和实验组在同一年龄段, 从未参加过任何体育专业训练) 为对照组, 具体情况见表 1。所有实验对象均无肌腱受伤或受损情况。

表 1 实验对象情况

Table 1 Information of the Subjects

组别	性别	N	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	训练年限/年
实验组	男	12	19 ± 1.02	179.5 ± 5.8	64.8 ± 4.7	5.0 ± 1.0
实验组	女	12	19 ± 1.01	165.6 ± 2.7	59.3 ± 4.2	5.0 ± 1.1
对照组	男	12	19 ± 1.04	174.1 ± 5.3	61.5 ± 5.3	5.0 ± 1.4
对照组	女	12	19 ± 1.03	159.1 ± 3.3	51.3 ± 3.9	5.0 ± 1.2

1.2 测试方法

1.2.1 身高、体重测量

用身高体重计测量每一受试者的身高 (cm)、体重 (kg)。

1.2.2 跟腱初长度和横截面积的测量

用 PHILIPS ENVISOR 超声诊断仪 (探头频率范围: 3-12MHz。由苏州市九龙医院提供) 测量每一受试者的跟腱初长度 L (mm)、跟腱截面积 S (mm²)。跟腱长度测

量: 俯卧位, 上端由三头肌纤维筋膜形成处开始, 下端于附着于跟骨结节处为止; 跟腱横截面积测量: 在跟骨结节上方 1 cm 处测量跟腱横截面 (重复操作 3 次, 取平均值)。

1.2.3 跟腱弹性模量的测量

1.2.3.1 踝关节跟腱上所受的力矩和跟腱长度变化的测量

用瑞士产 (加上型号) CON-TREX 等速肌力测试与训练系统 PM-MJ/LP/WS/TP 分别测试每一受试者右侧小腿三头肌等长收缩时任意最大用力的力矩 (M)。采用等长收缩的

收稿日期: 2013-03-10

基金项目: 江苏省社会发展项目 (BS2006020)

第一作者简介: 沈勇伟, 男, 副教授, 博士, 硕士生导师. 主要研究方向: 运动与肌腱研究.

作者单位: 1. 苏州大学 体育学院, 江苏 苏州 215021; 2. 南通大学体育科学学院, 江苏 南通 226019



测试方法,受试者俯卧于测试台上,上身固定,根据实验设计要求,胫骨和脚面成直角,定位后,受试者先进行2~3次有力跖屈(逐渐增大力度),即完成一个缓慢的逐步增加力度的等长收缩,作为肌肉-肌腱预处理,然后进行独立的踝部屈肌肌力20 s最大随意收缩,记录力矩。同时用超声波诊断仪测量相对应的跟腱的长度(方法同上),进而可得出该力矩下对应的跟腱长度的变化值(ΔL)。每人分别测试3次,测试前对测试系统进行校正,并严格按照操作程序进行,让受测者熟悉测试过程,鼓励受测者尽力完成测试。

1.2.3.2 测量踝关节处各力的力臂

跖屈时小腿三头肌收缩,跟腱所受力的力臂的测试方法是假定踝关节的表面是圆形,并利用几何规则获得了扭转中心(距骨中央)。跟腱的力臂就是从扭转中心(距骨中央)到跟腱的垂直距离。在测试者静止于测试台时候,用超声波进行测量,每一个受试对象测试3次,取平均值作为此时的力臂。

1.2.3.3 跟腱弹性模量和刚度的计算

根据弹性模量的计算公式 $E = (F \cdot L) / (S \cdot \Delta L)$,其中 F 为小腿三头肌加载在跟腱上的力, L 为跟腱的初长度, S 为跟腱的横截面积, ΔL 为跖屈时跟腱长度的变化值。刚度 $K = F / \Delta L$ 。每位受试者的弹性模量和刚度取3次的平均值。

1.3 统计学处理

所有数据均用均数±标准差表示,用SPSS14.0 for Windows 统计软件处理,跟腱弹性模量和刚度均用单因素方差分析。

2 研究结果

2.1 不同性别跟腱弹性模量、刚度指标比较

不同性别间无论是弹性模量、还是刚度指标都具有统计学显著性差异 ($P < 0.05$),结果见表2。

表2 不同性别跟腱弹性模量、刚度指标比较 ($X \pm S$)
Table II Comparison between the Indexes of the Elastic Modulus and Stiffness of the Different Gender Subjects ($\bar{x} \pm s$)

组别	性别	弹性模量/MPa	刚度/ ($N \cdot m^{-1}$)
实验组	男	677.0 ± 105.9	211.2 ± 30.6
实验组	女	479.2 ± 64.5*	141.0 ± 19.7*
对照组	男	592.2 ± 75.4	178.5 ± 28.9
对照组	女	408.7 ± 59.4*	117.6 ± 18.1*

注:不同性别组间比较,*表示 $P < 0.05$

2.2 短跑运动员和非运动员跟腱弹性模量、刚度指标比较

短跑运动员与非运动员跟腱弹性模量、刚度指标相比较,各对应组间运动员的弹性模量和刚度明显增大 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 弹性模量和刚度的关系

刚度描述的是结构抵抗整体变形的能力,与结构的几何性质和物理性质都有关系,是和材料特性及截面特性直接相关。而弹性模量描述的是材料抵抗变形的能力(物理性质),与结构或构件的几何性质无关,可视为衡量材料产生弹性变

形难易程度的指标。

肌腱有一定的外部特征,弹性模量更能描述材料抵抗变形的能力。在大多动物研究中,可能由于实验条件的限制,测得都是刚度而没有弹性模量,我们认为弹性模量较刚度更能反映肌腱的力学特性。

3.2 跟腱弹性模量和刚度的性别差异

国内外不同性别人体肌腱弹性模量和刚度等生物力学特性的研究报道不多,对弹性模量和刚度的不同性别的比较研究尚少见报道,本研究造成跟腱的弹性模量和刚度性别差异的主要原因,可能是由于男女间身体形态、机能、代谢特点的差异所致,也可能是运动训练的原因,这有待于进一步探讨。

3.3 短跑训练对跟腱弹性模量和刚度的影响

运动训练对肌腱弹性模量和刚度影响的研究也有一定的分歧。在动物研究中,一般认为肌腱对运动训练具有功能适应性,运动训练可以提高肌腱的刚度和最大载荷^[1-3]。而在人体研究中有不同的结果,S. Rosager 和 P. Aagaard^[4]在对人体小腿三头肌腱膜和肌腱性能的研究中发现,在过去5年中每周至少跑步80 km的跑步者和非跑步者相比,两者之间的刚度和弹性模量没有明显的变化,而横截面积却有所增加,作者认为刚度和弹性模量组间缺乏差异性可能是由于肌腱本身性能存在相当大的差异所导致,也不能排除训练导致改变其固有的属性,例如增加胶原交联等。也有学者在进行了人体内力量训练对肌腱力学性能的研究后有相反的观点,研究认为数周的力量训练即可改变肌腱的力学性能。使用超声方法 Kubo^[5]等的研究中,健康男性12周等长蹲举训练后股外侧肌腱-腱膜复合体的刚度增加,弹性模量增加,跟腱区域性肥大。这表明,训练有素的运动员比未经训练者有更大的肌腱刚度。本实验结果与之相一致,短跑训练使得各对应组之间的刚度和弹性模量发生了显著差异。这些结果和本研究结果综合提示负荷较大的力量运动和耐力运动相结合可能更易改变肌腱的力学性能。

动物通过训练来增加肌腱的负荷,从而增加肌腱的刚度早有报道^[6-10]。训练导致肌腱刚度增加的确切机制目前还没有报道。然而,根据动物研究结果表明,可能是两种胶原(I型和III型)更替和胶原纤维的密度增加而造成刚度的增加^[11]。此外,改建胶原纤维卷曲角度从而影响肌腱刚度,已在训练大鼠的肌腱中报告^[10],通过增加负荷来增加肌腱胶原含量减少造成卷曲的角度将增加肌腱刚度。如果为了适应训练,肌腱水分含量增加,这可能会进一步增加肌腱的拉伸刚度^[10-11]。一些研究者认为,肌腱胶原含量和其力学性能有关。Haut RC^[12]等报道,犬的髓腱胶原含量与弹性模量正相关。而任洪峰^[13]通过对大鼠强化训练后跟腱力学性能的研究发现,训练使其刚度增大但胶原总量没发生变化。Viidik A^[14]等对兔子进行40周训练后发现其胫骨后肌、腓骨长肌的肌腱与对照组相比刚度增加了10%,而胶原含量等未发生变化。任洪峰^[7]和艾进伟^[9]的研究中跑台训练豚鼠、大鼠跟腱的胶原I含量增加,胶原I是肌腱强度的承担者,其含量的增加会提高肌腱的强度。因而本研究中短跑训练跟腱的刚度和弹性模量的变化可能与胶原的总量关系不大,而是和胶原类型的比例的变化等有关。



3.4 训练后跟腱弹性模量和刚度指标变化的意义

肌腱不仅具有把应力传送到骨关节的功能,而且还能储存弹性和释放能量,有利于运动能力的发挥。跟腱刚度和弹性模量的增加使其能够承受更大的载荷,相同载荷条件下,刚度和弹性模量大的跟腱发生较少的应变,因而可以推出刚度和弹性模量增加,在一定程度上可减少跟腱疲劳及损伤的发生。

4 结论

4.1 跟腱弹性模量和刚度具有明显的性别差异,男性大于女性。

4.2 短跑训练后跟腱的弹性模量和刚度明显增加。

4.3 短跑训练后跟腱的弹性模量和刚度明显增加,提示训练能够增强跟腱的力学性质,表明训练后肌腱能够承受更大的载荷,其可能机制是通过内部结构改变来实现的。

4.4 短跑训练后弹性模量和刚度的增加,既能增加跟腱的体能储备,又能使其承受更大的牵张应力,在一定程度上可减少跟腱疲劳及损伤的发生。

参考文献:

- [1] 刘波. 运动锻炼对肌腱粘弹性影响的实验研究[J]. 体育科学, 1996, 6: 57-76.
- [2] 刘波, 尹立, 李雪梅等. 大强度训练对动物肌肉和结缔组织生物物理学力学性质的影响[J]. 中国运动医学杂志, 1996, 15: 87-91.
- [3] 刘波. 大强度训练与合成雄性激素类固醇对兔肌腱粘弹性的影响[J]. 体育科学, 1996, 6: 54-58.
- [4] S. Rosager, P. Aagaard et al. (2002). Load-displacement properties of the human triceps surae aponeurosis and tendon in runners and non-runners [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 12: 90-98.
- [5] Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, et al. (2000). Elastic properties of muscle-tendon complex in long-distance runners[J]. *Eur J Appl Physiol*, 81(3):181-187.
- [6] Buchanan CI, Marsh RL. (2001). Effects of long-term exercise on the biomechanical properties of the Achilles tendon of guinea fowl[J]. *J Appl Physiol*. 90(1):164-171.
- [7] Viidik A. (1967). The effect of training on the tensile strength of isolated rabbit tendons[J]. *Scand J Plast Reconstr Surg*, 1(2): 141-147.
- [8] Woo SL-Y, Gomez MA, Woo Y-K & Akeson WH. (1982). Mechanical properties of tendons and ligaments[J]. *Biorheology*, (19): 397-408.
- [9] Woo SL-Y, Ritter MA, Amiel D, Sanders TM, Gomez MA, Kuei SC, Garfin SR & Akeson WH. (1980). The biomechanical and biochemical properties of swine tendons long term exercise effects of exercise on the digital extensors[J]. *Connect Tissue Res*, (7):177-183.
- [10] Wood TO, Cooke PH & Goodship AE. (1988). The effect of exercise and anabolic steroids on the mechanical properties and crimp morphology of the rat tendon[J]. *Am J Sports Med*, (16): 153-158.
- [11] Woo SL, Ritter MA, Amiel D, Sanders TM, Gomez MA, Kuei SC, Garfin SR, Akeson WH. (1980). The biomechanical and biochemical properties of swine tendons-long term effects of exercise on the digital extensors[J]. *Connect Tissue Res*, (7):177-183.
- [12] Haut RC, Lancaster RL, Charles ED. (1992). Mechanical properties of the canine patellar tendon: Some correlations with age and the content of collagen[J]. *J.Biomech*, (2):163-173.
- [13] 任洪峰. 不同训练方式对大鼠跟腱改建影响的实验研究[D]. 第四军医大学. 2005
- [14] Viidik A, Nielsen HM, et al. (1996). Influence of physical exercise on aging rats: II. Life-long exercise delays aging of tail tendon collagen [J]. *Mechanisms of Aging and Development*, (3):139-148.

(责任编辑: 何聪)