

·运动人体科学·

短跑训练对跟腱横截面积和弹性模量的影响

沈勇伟¹, 张林¹, 刘劲松²

(1.苏州大学 体育学院, 江苏 苏州 215006; 2.溧阳市外国语学校 体育部, 江苏 常州 213300)

摘 要: 通过对短跑运动员和非运动员跟腱横截面积和弹性模量的研究后发现, 短跑运动员和非运动员相比, 跟腱的横截面积无显著性变化, 弹性模量则明显增加, 其差异有显著性, 表明短跑训练后肌腱能够承受更大的应力可能是通过内部结构的改变而不是通过增粗、肥大来实现的。

关 键 词: 运动生理学; 短跑训练; 跟腱横截面积; 跟腱弹性模量

中图分类号: G804.2 文献标识码: A 文章编号: 1006-7116(2010)01-0092-04

Effects of sprint training on the cross-sectional area and modulus of elasticity of the Achilles tendon

SHEN Yong-wei¹, ZHANG Lin¹, LIU Jin-song²

(1.School of Physical Education, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2.Department of Physical Education, Liyang Foreign Language School, Changzhou 213300, China)

Abstract: By making a comparative study of the cross-sectional area and modulus of elasticity of the Achilles tendon of sprinters and non-athletes, the authors found that as compared with non-athletes, sprinters' Achilles tendon's cross-sectional area is not significantly different, but their Achilles tendon's modulus of elasticity is significant larger, and the difference is significant, which indicates that the tendon being able to bear greater pressure after sprint training may be realized through the change of the internal structure in stead of though thickening and fattening.

Key words: sports physiology; sprint training; cross-sectional area of the achilles tendon; modulus of elasticity of the Achilles tendon

跟腱作为人体最大最强壮的能量储存肌腱, 在人体完成日常生活动作和运动训练中具有非常重要的作用。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, 以及戏剧武功演员中较为常见, 在北京奥运会上刘翔跟腱损伤, 就是典型的例子。在高等院校体育专业中, 跟腱损伤率近年有逐渐增大的趋势。在欧洲大型运动创伤中心, 由于过度活动造成的肌腱损伤几乎占了所有运动创伤的30%~50%。因此, 明确肌腱在不同的应力作用模式下改建的规律, 对于合理制定训练计划, 防止肌腱损伤的发生非常重要。

目前, 关于运动对肌腱影响的研究较少, 大多数还停留在动物研究上, 而且在离体情况下进行。方法上多数采用拉伸试验对肌腱的力学性能进行研究^[1-3],

这种方法被认为是充分模仿了活体内负荷施加在肌腱上。然而, 问题是体外试验的结果是否可直接推断其在体内的功能, 这些问题在动物被杀死或被麻醉后, 在体外进行肌腱的试验中被回避^[4]。本研究通过对人体在体跟腱形态特征及生物力学特性的测定, 探讨短跑训练对人体跟腱横截面积和弹性模量的影响, 为今后肌腱的在体试验提供前期的实验依据。

1 实验对象与方法

1.1 实验对象

苏州市体育运动学校短跑专业运动员 24 名(男、女各 12 名, 训练年限 4~6 年, 均为国家 1 级或 2 级运动员)为运动员组; 苏州市建设交通学校 24 名学生(男、女各 12 名, 年龄和实验组在同一年龄段, 从未参加过

收稿日期: 2009-09-07

基金项目: 江苏省社会发展项目(BS2006020)。

作者简介: 沈勇伟 (1961-), 男, 副教授, 博士研究生, 研究方向: 运动生理、生化。

任何体育专业训练)为非运动员组。所有实验对象均无肌腱受伤或受损情况。

1.2 测试方法

1) 身高、体重的测量。

用身高体重计测量每一受试者的身高(单位: cm)、体重(单位: kg)。

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: 3~12 MHz。由苏州市九龙医院提供)测量每一受试者的跟腱截面积 S (单位: mm^2)和跟腱长度 L (单位: mm)。跟腱长度测量方法: 被试者取俯卧位, 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; 跟腱横截面积测量方法: 在跟骨结节上方 1 cm 处测量跟腱横截面(重复测 3 次, 取平均值)。

3) 跟腱杨氏弹性模量的测量。

(1) 踝关节跟腱上所受力的力矩和跟腱长度变化的测量: 用瑞士产 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。同时用超声诊断仪测量相对应的跟腱的长度(方法同 1.2 节之 2)), 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, 让受试者熟悉测试过程, 鼓励受试者尽力完成测试。

(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的时候, 用超声波进行测量, 每一个受试者测试 3 次, 取平均值作为此时的力臂(L_3)^[6]。本实验的测试原理见图 1 所示。等速测试仪上记载的力矩(M)为受试者在跖屈时脚对踏板的作用力(F_0)与该力臂(L_1)的乘积, 即 $M=F_0L_1$, 可得 $F_0=M/L_1$ 。根据杠杆原理可得 $F_0L_2=FL_3$, 即可推得 $F=ML_2/L_1L_3$ 。

(3) 跟腱弹性模量和刚度的计算: 根据杨氏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。每位

受试者的弹性模量取 3 次的平均值。

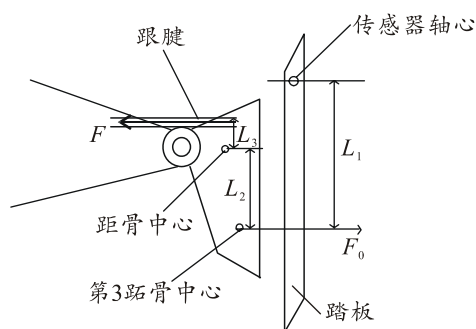


图 1 踝关节处各力力臂示意图

3) 测试时间。

测试于 2008 年 9 月在苏州大学体育学院中心实验室进行。

4) 统计学处理。

所有数据均用(均数 \pm 标准差)表示, 用 SPSS14.0 for Windows 统计软件处理, 用单因素方差进行分析。

2 研究结果及分析

2.1 跟腱横截面积变化

1) 男性跟腱横截面积: 运动员为 $(65.6 \pm 2.9) \text{mm}^2$, 非运动员为 $(62.2 \pm 6.2) \text{mm}^2$; 2) 女性跟腱横截面积: 运动员为 $(49.6 \pm 1.9) \text{mm}^2$, 非运动员为 $(47.1 \pm 4.5) \text{mm}^2$ 。跟腱横截面积男性明显大于女性, 差异有非常显著性 ($P < 0.01$); 运动员与非运动员, 对应组间比较, 差异无显著性 ($P > 0.05$)。

2.2 跟腱弹性模量比较

1) 男性跟腱弹性模量: 运动员为 $(677.0 \pm 105.9) \text{MPa}$, 非运动员为 $(592.2 \pm 75.4) \text{MPa}$; 2) 女性跟腱弹性模量: 运动员为 $(479.2 \pm 64.5) \text{MPa}$, 非运动员为 $(408.7 \pm 59.4) \text{MPa}$ 。跟腱弹性模量男女间比较差异有显著性 ($P < 0.05$); 运动员与非运动员比较, 差异也有显著性 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 跟腱横截面积变化

1) 跟腱横截面积的性别差异。

对于跟腱横截面积在性别间的比较少见报道, 本研究表明, 跟腱的横截面积具有明显的性别差异, 这可能与他们的身体形态结构、生理机能水平及生物化学特点有关, 其机制有待于进一步研究。

2) 短跑训练对跟腱横截面积的影响。

运动训练对跟腱横截面积影响以往的研究结果存在分歧, 在动物模型实验中, 有研究表明运动可诱发跟腱肥厚^[5-7]; 而人体研究则显示, 运动员的跟腱与非

运动员相比具有较大的横截面积^[8-12]。不管是动物实验还是人体研究,运动训练都能引起跟腱横截面积增大,这是一种运动负载下的跟腱适应性肥大的表现,其机制目前还没有完全了解,但大多数研究支持是“由胶原合成增加所致”的观点。另外有些研究认为运动训练没有使跟腱的横截面积增大^[13],鉴于目前国内还没有对在体肌腱成分分析的条件,其机制尚不明确。

本实验结果显示:长期进行短跑训练可使得跟腱的横截面积有增加的趋势,但没有统计学的意义,表明反复跟腱载荷与运行造成了跟腱适应性增生。训练后跟腱能够承受更大的应力,但不会不断增粗,否则会影响跟腱的滑动。在现代竞技体育训练中,肌腱韧带和骨的负荷大大超过日常生活的需要,因此在训练的初期,剧烈运动打破了组织的优化结构,使得组织易于损伤,正是由于这些损伤和长期反复训练,刺激组织从生化成分和结构上加以适应,以承受竞技体育中超常应力的负荷。已有学者证明训练可以改变胶原结缔组织中糖胺多糖(GAG)的合成和种类,从而使小胶原直径纤维增多,生物力学性质增强^[14]。综合各项研究表明,短跑训练可使得跟腱的横截面积有增加的趋势,可能与大多数研究支持的是由胶原成分增加有关,但其不是影响跟腱力学性质改变的主要原因。

3.2 短跑训练对人体跟腱弹性模量的影响

1)跟腱弹性模量的性别差异。

国内外不同性别人体跟腱弹性模量等生物力学特性的研究报道不多,对弹性模量的不同性别的比较研究尤为少见,本研究结果发现跟腱的弹性模量存在性别差异,主要原因可能是由于男女身体形态、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。

2)短跑训练对跟腱弹性模量的影响。

运动训练对肌腱弹性模量影响以往的研究也有一定的分歧。在动物实验中,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。如刘波等^[15, 17]对加尼福利亚兔进行跳跃奔跑训练(电刺激),结果发现肌腱的弹性、蠕变增大,滞后性减小,作者认为肌腱力学上性能增加以适应剧烈运动的需要。而在人体研究中有不同的结果,S. Rosager 和 P. Aagaard^[18]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 年中每周只少跑步 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。

在 Kubo 等^[19]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。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。

一些研究者认为,肌腱胶原含量和其力学性能有关。Haut RC^[20]等报道,犬的髌腱胶原含量与弹性模量呈正相关。而任洪峰^[21]通过对大鼠强化训练后跟腱力学性能的研究发现,其刚度增大但胶原总量没发生变化。艾进伟^[22]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。本研究中短跑训练跟腱的刚度和弹性模量的变化和胶原的总量关系不大,其机理可能与上述研究的结果相同,即和胶原类型的比例的变化等有关。

3.3 跟腱横截面积和弹性模量的关系

本实验中训练后肌腱刚度和弹性模量增加而肌腱没有发生肥厚与动物研究的结果相同,在人体实验研究中也报道,在成年人中肌腱刚度增加而肌腱的大小不变^[22],而不成熟的肌腱通过肌腱的肥厚来适应负荷的增加^[23],肌腱胶原含量和其力学性能相关。Haut 等^[20]报道,犬的髌腱胶原含量与弹性模量正相关。任洪峰^[21]的研究中,大鼠经过强化训练后跟腱的力学性能虽然升高但胶原重量未发生变化。Viidik 等^[24]对兔子进行 40 周训练后发现,胫骨后肌、腓骨长肌的肌腱与对照组相比刚度增加约 10%,而胶原的含量未发生变化。

从本研究的结果看,短跑训练的队员与对照组相比较,跟腱的横截面积无明显差异,但短跑训练可以增强跟腱的弹性模量等力学性质。训练后跟腱的弹性模量、刚度等力学性质增大,说明训练后肌腱能够承受更大的应力,而肌腱的横截面积不会象肌肉、骨骼那样不断增粗,这与临床实践相一致。我们推测训练后肌腱强度增高不是主要通过肌腱肥大来实现的,可能与以下因素有关:(1)肌腱胶原纤维之间存在着复杂的编制排列,存在着三维空间结构,以使肌腱适应各方面应力的需要,训练后能加强这种复杂的排列;(2)为了与功能相适应,训练后肌腱的胶原、蛋白多糖的成分和含量发生了改变;(3)通过训练,肌腱横截面积可适度增加,但并不起主要作用;(4)因肌腱是血供细胞成分较少的组织,代谢速度较慢,塑性改建需要的时间比肌肉等组织的改建要长。

参考文献:

- [1] Viidik A. Functional properties of collagenous tissues[J]. *Int Rev Connect Tissue Res*, 1973, 6: 127-215.
- [2] Butler D L, Goods E S, Noyes F R, et al. Biomechanics of ligaments and tendons[J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 1978, 6: 125-181.
- [3] Ker R F. Tensile fibres: strings and straps[M]//Vincent JFV *Biomechanics-Materials: A Practical Approach*[M]. Oxford University Press, New York, 1992: 75-97.
- [4] Lieber R L, Leonard M E, Brown C C, et al. Frog semitendinosus tendon load-strain and stress-strain properties during passive loading[J]. *Am J Physiol*, 1991, 30: C86-C92.
- [5] Birch H L, McLaughlin L, Smith R K, et al. Treadmill exercise-induced tendon hypertrophy. assessment of tendons with different mechanical functions[J]. *Equine Vet J Suppl*, 1999, 30: 222-226.
- [6] Woo S L, Gomez M A, Amiel D, et al. The effects of exercise on the biomechanical and biochemical properties of swine digital flexor tendons[J]. *J Biomech Eng*, 1981, 103(1): 51-56.
- [7] Zantop, Thore, Tillmann, et al. Quantitative assessment of blood vessels of the human Achilles tendon: an immunohistochemical cadaver study[J]. *Archives of Orthopaedic & Trauma Surgery*, 2003, 123(9): 501-504.
- [8] Nagakawa Y, Ikegawa S, Abe T, et al. The morphology and SEW in Achilles tendon[J]. *J Phys Fitness Sports Med*, 1989, 38: 424.
- [9] Rossager S, Aagaard P, Dyhre-Poulsen P, et al. Load-displacement properties of the human triceps surae aponeurosis and tendon in runners and non-runners[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2002, 12(2): 90-98.
- [10] Kongsgaard M, Aagaard P, Kjaer M, et al. Structural Achilles tendon properties in athletes subjected to different exercise modes and in Achilles tendon rupture patients[J]. *J Appl Physiol*, 2005, 99(5): 1965-1971.
- [11] Langberg H, Skovgaard D, Petersen L J, et al. Type I collagen synthesis and degradation in peritendinous tissue after exercise determined by microdialysis in humans[J]. *J Physiol*, 1999, 521: 299-306.
- [12] Langberg H, Rosendal L, Kjaer M. Training induced changes in peritendinous type I collagen turnover determined by microdialysis in humans[J]. *J Physiol(Lond)*, 2001: 297-302.
- [13] 艾进伟. 强化训练对跟腱塑形改建影响的动物实验和人群干预研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2005.
- [14] Woo L Y, Buchwatter J. Injury and repair of musculoskeletal and soft tissue[M]. Park Ridge, IL: American Academy of Surgeons, 1988.
- [15] 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, 16(6): 57-76.
- [16] 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(5): 87-91.
- [17] 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, 16(6): 54-58.
- [18] Rosager S, Aagaard P. Load-displacement properties of the human triceps surae aponeurosis and tendon in runners and non-runners[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2002, 12: 90-98.
- [19] Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, et al. Elastic properties of muscle-tendon complex in long-distance runners[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2000, 81(3): 181-187.
- [20] Haut R C, Lancaster R L, Charles E D. Mechanical properties of the canine patellar tendon: Some correlations with age and the content of collagen[J]. *J Biomech*, 1992(2): 163-173.
- [21] 任洪峰. 不同训练方式对大鼠跟腱改建影响的实验研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2005.
- [22] Rollhauser H. Funktionelle anpassung der sehnenfaser im submikroskopischen bereich[J]. *Anat Anz Ergänzungsheft*, 1954(51): 318-322.
- [23] Elliott D H. Structure and function of mammalian tendon[J]. *Biol Rev*, 1965(40): 392-421.
- [24] Viidik A. Tensile strength properties of Achilles tendon systems in trained and untrained rabbits[J]. *Acta Orthop Scand*, 1969, 40(2): 261-272.

[编辑: 周威]