

文章编号:1004-7220(2019)01-00103-07

· 综 述 ·

跟腱运动功能与生物力学特征的研究进展

张希妮, 王俊清, 傅维杰

(上海体育学院 运动健身科技省部共建教育部重点实验室, 上海 200438)

摘要:跟腱是连接足跟和足跖屈肌的关键结构,主要承担运动时小腿三头肌肌力的传递,是下肢在跑、跳时有效完成力/能量储存和释放的关键。现阶段,着地过程中跟腱的非同源性载荷以及过载后的无法完全恢复是跟腱损伤的首要原因,然而,针对预防跟腱损伤的相关手段并不能达到完全康复的效果。针对跟腱的运动功能及其在国内外生物力学领域的应用进行综述,重新考量跟腱在人体跑、跳运动中所起的作用,包括运动中跟腱内/外力学因素的系统关系、训练跟腱的有效方案。积极提升跟腱的力学特性,改善跟腱承受力,使之在一个较优范围,并最终达到提高运动表现,从源头上减少跟腱损伤,将是未来探究跟腱力学运动功能的关键。

关键词:跟腱; 运动功能; 即刻影响; 训练效果; 生物力学

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2019.01.016

Research Advancements in Motor Function and Biomechanical Characteristics of Achilles Tendon

ZHANG Xini, WANG Junqing, FU Weijie

(Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: Achilles tendon is the key structure to connect the heel and foot plantar flexors and transmit the force from the leg triceps muscle, which is the key to storing and releasing energy storage during running and jumping. At present, the primary causes of Achilles tendon injury are non-homologous loading during stance phase and deficient recovery after overload. However, the relevant measures to prevent Achilles tendon injury cannot achieve full recovery. This paper reviewed the research progress of Achilles tendon's motor function and its application in biomechanics domestically and internationally, reconsidering the role of Achilles tendon in human running and jumping which included anatomical structure of the Achilles tendon, the relationship between internal force and external force, and the effective training program. The key for future research on motor function of Achilles tendon is to improve its mechanical properties, keep the increased load in a better range and ultimately improve motion performance and reduce sports injury from the source.

Key words: Achilles tendon; motor function; acute effects; training effect; biomechanics

从人类进化角度出发,现代人所具备的诸多形态(如骨盆狭窄、足弓出现等)是从200万年前为了

适应双足奔跑进化而来的^[1]。在这些衍生的功能结构中,跟腱是连接足跟和足跖屈肌的关键结构,

收稿日期:2018-02-09; 修回日期:2018-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(11772201, 1572202),上海市科委科研项目(17080503300)

通信作者:傅维杰,副教授,博士研究生导师,E-mail: fuweijie@sus.edu.cn

其主要承担运动时小腿三头肌肌力的传递,是下肢在跑、跳时有效完成力/能量储存(触地)和释放(蹬伸)的关键^[2-3]。

研究表明,作为人体最厚、最强壮的肌腱,每次跑步着地,人体都会在整个支撑期承受高达8倍体重的跟腱力^[4-5]。最新的流行病学调查显示,跟腱病是最常见且难以根治的跑步损伤,其发生率在中长跑跑中可达8%~15%^[7];且对于跑步者个体,其终身患病风险高达52%^[8]。跟腱损伤严重妨碍健身人群参与跑步运动,降低职业运动员的竞技成绩,并最终导致跟腱断裂或提前结束职业生涯^[9]。现阶段研究认为,着地过程中跟腱的非同源性载荷(non-homologous loading)以及长时间非正常受力后跟腱组织及结构的无法完全恢复是导致跟腱损伤(Achilles tendinopathy)的首要原因^[6]。然而,目前针对预防跟腱损伤的相关训练,如小腿三头肌离心训练^[10]、拉伸、平衡训练等^[11],由于干预耗时较长,不能完全解决跖屈肌肌力不足的问题,故跟腱损伤仍有复发的可能。前人主张用向心和离心力量训练改善跟腱功能,然而近期研究者提出了等张训练、功能训练以及跑姿转换训练^[12]。

本文针对跟腱的运动功能及其在国内外生物力学领域的应用展开综述,重新考量跟腱在人体跑、跳运动中所起的作用,包括运动中跟腱内/外力学因素的系统关系、训练跟腱的有效方案,从而积极影响跟腱承受载荷的能力,以达到预防运动损伤、提高运动健康/竞技水平的目的,为充分理解和理解跟腱的生物力学作用和在该研究领域的发展趋势提供参考。

1 跟腱的运动功能和力学特征

跟腱是典型的“肌-腱-骨”系统,由小腿三头肌在足跟上方约15 cm处融合形成,并附着在跟骨结节上。跟腱主要由腱纤维组成,其力量由肌腱纤维的数量和类型决定。由于跟骨上方2~6 cm处血管稀疏、供血能力差,故跟腱断裂多发于此处^[13]。临床上的跟腱损伤多以跟腱病的形式存在,尤其在中长跑运动员^[14]、足球运动员^[15]、羽毛球运动员^[16]等中更容易发生。

为了保持跑步时人体始终向前运动,触地前后的关节运动和肌肉活动决定了触地速度、下肢稳定性、能量吸收和作用于地面的力值大小^[17]。触地

后,力通过关节动力链向上传递,并通过骨组织和软组织进一步消耗能量^[18]。跟腱在这一过程中起到重要作用。下肢肌-腱复合体通过重复性的拉长和收缩作用形成拉长-收缩周期。作为具有弹性特性的软组织结构,跟腱在触地早期通过拉长储存能量,在支撑相后期通过释放能量产生推进力^[19]。Farris等^[20]通过对在体跟腱成分的测定发现,跑步期间跟腱在踝关节处的做功贡献度超过50%。因此,跟腱与提高跑步经济性(running economy,定义为对于给定速度的稳定耗氧量^[21])有着密切联系。较大的跟腱刚度可以显著减小耗氧量^[22],而较长的跟腱力臂可以通过减少所需的跟腱力和肌肉活动提高跑步经济性^[23]。

近期的生物力学研究主要利用超声波研究在体跟腱的特点,包括跟腱长度、横截面积等。Ueno等^[25]比较3种速度下运动员跟腱横截面积和3个不同位置(跟骨结节至腓肠肌内侧头/腓肠肌外侧头/比目鱼肌的肌腱结合处)的跟腱长度时发现,只有与腓肠肌内侧头相连的跟腱表现出能量消耗减少。而跟腱横截面积与跑步经济性无显著性相关。这些结果表明,较长的与腓肠肌内侧头相连的跟腱可能更有利于中长跑运动员实现优异的跑步性能。这与前人研究结果一致^[26]。训练后跟腱力学特性的提升主要不是通过肥大实现的,这可能是因为在跟腱中分布的血管较少,代谢速度慢,重塑需要更长的时间。而训练后弹性模量和刚度增加,说明跟腱在训练后会产生适应性变化以承受更大的应力^[27]。

由于跟腱不能单独做功,从本质上来讲,它与小腿三头肌和踝关节运动有直接联系,同时也与近端肌群及其关节运动有间接联系。与健康跑者相比,患有跟腱病的跑者,在刚触地时踝关节处于更加内翻的姿态,而后跟触地后,踝关节又表现出更外翻的姿态,其腓肠肌的肌肉激活程度在承重期减小^[28]。跟腱病似乎不会影响神经对肌肉的控制,但是可能会在支撑期影响下肢机械功率的输出,从而影响关节稳定性。因此,在探讨复杂的跟腱损伤时不能只考虑跟腱本身的力学性能和功能。

2 运动对跟腱力学的即刻影响

研究表明,跟腱等结缔组织力学性质的适应性变化受外部负荷影响(见表1)。在运动中跟腱需要承受较大的外力,经历较大的长度变化,故具有较

表1 运动对跟腱力学的即刻影响

Tab.1 Acute effects of exercise on Achilles tendon mechanics

文献	受试者			训练方案	参数				
	男/女	年龄	人群		跟腱应力/ MPa	跟腱应变/ %	跟腱刚度/ (N·mm ⁻¹)	弹性模量/ MPa	跟腱伸长量/ mm
[39]	18/17	22/20	健康	5 min 被动跖屈拉伸,重复3次,每次休息1 min			男 76.7 ± 7.5 vs. 68.3 ± 6.9* 女 49.6 ± 6.3 vs. 39.7 ± 5.4*		
[40]	12 男	27	业余跑者	12 km/h 在跑台上跑步 30 min		峰值; 1 min 后;3.5 ± 1.8 15 min 后;3.2 ± 1.8 30 min 后;3.8 ± 2	163 ± 41 vs. 147 ± 52		
[41]	17/14	24.6/23.6	适度体力活动者	1) 10 min 跑台步行 2) 100 次足尖 (20% BW)			女 530.6 ± 111.8 vs. 369.7 ± 91.7*	女 315.9 ± 109.2 vs. 214.4 ± 66.0*	女 5.9 ± 1.2 vs. 7.8 ± 1.5*
[40]	7 男	25.3	健康,有参加休闲体育活动	在 35° 背屈角度下进行 5 min 静态拉伸 (初始力矩 = 36.1 N·m)			22.9 ± 5.8 vs. 20.6 ± 4.6*		
[36]	男 前掌触地 7 足中触地 12 后跟触地 17	前掌触地 20.4 足中触地 20.6 后跟触地 20.6	高水平长跑运动员	以 14、16、18 km/h 的速度在跑台上分别跑 4 min		前掌触地: 6.8 ± 1.3 足中触地: 6.6 ± 1.1 后跟触地: 6.4 ± 0.9	前掌触地: 30.6 ± 9.6 足中触地: 29.8 ± 6.7 后跟触地: 32.5 ± 8.9		
[5]	19 女	21.5	健康跑者, 14 名习惯后跟触地跑, 5 名习惯前掌触地跑	以自选速度/±5% 自选速度, 分别采用前掌触地/后跟触地的方式跑过 20 m 跑道	+5% 自选步频时的峰值: 72.5 ± 1.7 (前掌触地) vs. 54.4 ± 15.2 (后跟触地)#	+5% 自选步频时的峰值: 7.1 ± 5 (前掌触地) vs. 5.4 ± 1.5 (后跟触地)#			
[42]	8 男	20.5	健康	在关节活动度极限位, 5 × 1 min 静态背屈拉伸			26.0 ± 5.1 vs. 34.2 ± 7.5*		10.66 ± 0.4 vs. 8.2 ± 0.5*

注: * 表示干预前后存在显著性差异; # 表示不同触地方式存在显著性差异

高的依从性。跟腱应变峰值在走路和跑步时分别增加 4.8% 和 5.6%^[29], 在单脚跳时甚至可以增加 8.2%^[30]。较高的依从性有利于小腿肌纤维通过改变长度和拉伸速度以更好地适应外力。近期不断有研究表明, 着地时较低的制动力、较高的垂直力和推进力^[31]以及较强的小腿三头肌内在肌力^[32], 均与降低跟腱病风险显著相关, 而这些表现通常来源于更优的跟腱力学和材料特性^[33], 并很可能是预防跟腱损伤的根本。

研究显示, 跑步时的着地方式可以影响跟腱性质^[5,34]。与后跟着地相比, 前掌着地时踝关节周围会产生更大的跖屈内力矩来对抗背屈外力矩, 这使跖屈肌能够更有效地储存和释放能量^[35]。Lyght 等^[5]研究发现, 后跟跑时跟腱应力和应变小于前掌

跑。另外, 与后跟跑相比, 前掌跑时质心与足跟距离更短, 相应地会产生更大的膝关节屈曲, 而这种弹簧状的跑步姿态更有利于减震。然而 Kubo 等^[36]的研究并没有发现差异。因此, 即刻更改跑姿对跟腱性质的影响较大, 未来需要进一步研究跑步姿态与跟腱力学的内在机制关系。另外, 在非拉伸收缩循环 (stretch-shortening circle, SSC) 训练, 例如等长收缩训练、静态拉伸训练等, 中跟腱刚度降低^[37-39], 而 SSC 训练, 例如跑步、单脚跳等, 对跟腱刚度变化不明显^[40]。该结果与活体动物实验研究结论类似, 认为针对生活中发生频率较高的负荷, 跟腱表现出较高的抗疲劳性。而女性在等长收缩运动后表现出更大的跟腱伸长率、较低的跟腱刚度, 这可能是对急性剧烈运动所产生的大强度负荷的保护性反

馈^[41]。但也有研究认为,跟腱刚度的即刻减小可能会在随后的运动中产生较高的应变,由此会增加损伤风险^[42]。

以上研究表明,不同跑姿或非 SSC 训练均可造成跟腱刚度的降低。拉伸刚度的瞬间减小可能会增加跟腱损伤的风险,同时会影响肌腱复合体的力学性质。相反,SSC 训练等并没有对跟腱性质产生即刻的影响^[39]。然而,运动达到何种程度才会对跟

腱力学性质产生即刻影响仍不明朗,这种变化主要来自肌肉还是跟腱本身仍需要探究。

2 跟腱的长期训练效果

虽然运动训练会对跟腱产生即刻影响,但一次过量或强度过大训练均会使跟腱存在较高的损伤风险。基于这一点,已经有不少学者提出长期的跟腱训练计划(见表2)。

表2 跟腱的长期训练效果

Tab.2 Long-term effects of exercise on Achilles tendon

文献	受试者		人群	训练方案				参数/%				
	男/女	年龄		训练类型	重复次数	组数	次数/周	周数	跟腱刚度	弹性模量	跟腱横截面积	肌力
[12]	11男	23.9	大学生	1 s,55% MVC 重复等长收缩 1 s,90% MVC 重复等长收缩	20 12	5 5	4 4	14 14	-5.2 +17.1*	-4.8 +16.9*	1.3 +0.5	
[45]	7/14	29.1	未有力量训练经历的大学生;训练组(11)/对照组(10)	3 s,55% MVC 重复等长收缩 3 s,90% MVC 重复等长收缩	7 4	5 5	4 4	14 14	+7.9 +36.0*	-1.6 +22.9*	+4.3 +9.6*	跖屈力矩 (MVC) +20.4* 跟腱力 +28.4* 跖屈力矩 (MVC) +31.6* 跟腱力 +43.6*
[48]	39男	27.5	有日常训练但未有高强度运动经历者;增强式训练组(14)/等长训练组(12)/对照组(13)	约0.26 s,90% MVC 重复等长收缩 3 s,90% MVC 重复等长收缩	72 4	5 5	4 4	14 14	增加*	+23.9 +18.0*	+2.5 +5.5*	
[49]	19男	18.8	定期参加体育锻炼;干预组(9)/对照组(10)	递进式跳跃训练方案			2~3	14	+24.1*			跖屈力矩 (MVC)+5.2* 跳跃高度 +4*(SJ) +3*(CMJ)+8.3*(RJ)
[22]	12男	24.5	高水平男子中长距离跑者;训练组(6)/对照组(6)	20 s,80% MVC 重复等长收缩	1	4	3	8	+18.6			跖屈力矩 (MVC) +21.6
[43]	11男	29	未有训练经历的健康者	30~50 min 跑步			2~3	34	+7.3			
[47]	15男	21	板球运动员;训练组(7)/对照组(8)	增强式训练方案	4~10	2~6	1.9	8	-9.4	-19.2	+12.8*	跳跃高度 +9~11.0*
[33]	7/15	21.1/ 22.4	穿传统跑鞋跑者	跑姿转换训练	-	-	-	12	+5.8 (男:12周后)+	+2.5 (男:12周后)+	+2.7 (男:12周后)+	跟腱力 +5.9(男:12周后) +6.5(男:6个月)
[46]	10男	22	未有训练经历者	40% RM 增强式训练 4 s,80% RM 向心-离心负重训练	10 10	5 5	4 4	12 12	+19.4 +29.7*	+3.3 -1.2		跖屈力矩 (MVC) +13.3* 跳跃高度 +28.5*(SJ) +35.3*(CMJ)+42.0*(DJ) 跖屈力矩 (MVC) +18.0* 跳跃高度 +11.3*(SJ) +3.4 (CMJ) +5.4 (DJ)
[39]	8男	21	未有训练经历者	70% RM 向心-离心负重训练 70% RM 向心-离心负重训练 +45 s 拉伸	10 10+5	5 5+1	4 4+7	8 8	+31.3* +23.8*	-3.3 +3.4		跖屈力矩 (MVC) +20.8* 跖屈力矩 (MVC) +18.1*

注:MVC为最大自主等长收缩(maximal voluntary contraction);SJ为蹲跳(squat jump);CMJ为反向跳(counter-movement jump);RJ为重复跳(repeated jump);DJ为跳深(drop jump)

Hanse 等^[43]对从未有过跑步训练的受试者进行为期 9 周的跑步干预,结果发现,跟腱刚度和横截面积并没有产生显著性变化。而 Joseph 等^[33]对从未经历过前掌跑的跑步爱好者进行 12 周跑姿再训练计划,结果发现,干预后男性跟腱横截面积、刚度均表现出显著增加,而女性则没有表现出显著性变化。因此,男性对于跟腱训练具有较好的适应性,这与前人研究一致。跟腱的黏弹性能可以使受试者在向前掌跑过渡时,由于更短的触地时间和跖屈肌收缩速度而表现出跟腱刚度增加,跑步经济性得以提高^[44]。

目前研究表明,跟腱由于受到重复性力学负荷影响而表现出的适应性变化具有一致性。研究发现,经过 14 周 90% 最大自主等长收缩(maximal voluntary contraction, MVC)等张干预后,在高应变级与低应变频率下,跟腱刚度、弹性模量、横截面积和跟腱力均表现出显著性增加^[12,45]。Fletcher 等^[22]研究表明,经过 8 周 80% MVC 等张训练后,跟腱刚度和跖屈力矩有增加的趋势。上述研究显示,每次收缩时,较高的肌腱应变量和持续时间会使跟腱产生适应性变化。

递进式肌肉力量训练也会对跟腱适应性产生显著影响,但目前研究结果的差异较大。Kubo 等^[46]发现,长期训练后跟腱刚度增加了 19.4%,而 Houghton 等^[47]发现减少了 9.4%;Bohm 等^[48]发现跟腱弹性模量增加了 23.9%,而 Houghton 等^[47]发现减少了 19.2%;Fouré 等^[49]发现跟腱刚度显著增加了 24%,而也有研究表明跟腱刚度仅在动态训练和等张训练中显著增加^[39,46-47]。

上述研究多在 12 周以上训练中发现跟腱有显著性改变,表明跟腱在 3 个月内会对增加的机械负荷产生相应反馈。而 Warne 等^[44]研究发现,跟腱在 4 周训练之后有显著变化,但这种经济性的变化究竟来自跟腱本身的适应性反应还是肌肉力量的提高仍有待探究。

3 跟腱的适应性变化

各种体育活动或训练都会使跟腱在生物力学上产生适应性的变化,如横截面积的增加、跟腱刚度的增加等。目前研究普遍认为,由于循环应变所引起的力传导机制会影响结缔组织(跟腱、韧带等)

的内稳态,以调节其适应过程,从而通过力学刺激的调节影响跟腱对运动的适应性反馈^[50]。

研究发现,男性跑者具有较大的跟腱横截面积^[51]。此外,与非负重运动项目的运动员相比,经常进行负重运动(跑步、跳跃)的男性运动员具有更大的跟腱横截面积^[52]。究其原因,可能是由于高负荷训练可以使跟腱产生适应性肥厚^[53]。与耐力项目跑者相比,短跑运动员具有更大的远端跟腱横截面积、跟腱刚度、跟腱力^[46]和弹性模量^[27],这可能是由于短跑训练加强了肌腱胶原纤维的排列,使跟腱适应应力的需要。较高的跟腱刚度在给定的跟腱力值下会减小跟腱应变,这可能会减小损伤风险,因为应变是控制跟腱累积性损伤的主要力学参数。而有较高肌肉力量的个体可能会由于其更高的刚度而承受更高的机械负荷^[54]。

就不同着地方式而言,与传统跑者(后跟着地)的跟腱相比,仿裸足跑者(足中着地/前掌着地)增加的横截面积可以减小应力,而增加的刚度可以更有效地传递力^[55],从而提高其跑步经济性,降低损伤风险。已经有研究从人类下肢进化角度预测数百万年后,自然的选择会使裸足跑者/仿裸足跑者具有更好的运动表现。从仿裸足跑和穿鞋跑的差异来看,仿裸足跑者具有更高的经济性也是情理之中的,因为确实有证据证明人体下肢这些特殊的结构可以提高他们的跑步经济性^[24]。

较大的跟腱横截面积、弹性模量和刚度是个体长期进行体育锻炼(跑步、跳跃等运动)时受机械负荷影响而产生的适应性变化。同时,不同的运动项目间跟腱适应性变化的差异较大。

4 总结与展望

虽然跟腱是人体最大、最强壮的肌腱,但在运动员及体育爱好者中,跟腱依然是最易受伤的肌腱之一。研究表明,运动会对跟腱的力学性质和形态学性质产生即刻或长期的影响。但目前,跑、跳时跟腱的内、外力学因素及其所受载荷的生物力学机理仍不清晰,跟腱病的真正发病机制不明。因此,如何提升跟腱的力学特性,改善跟腱承受力,使之处在一个较优范围,从而更有效地储存和释放能量,并最终提高运动表现,从源头上减少跟腱损伤,将是未来探究跟腱力学运动功能的关键。

参考文献:

- [1] DAVIS IS, RICE HM, WEARING SC. Why forefoot striking in minimal shoes might positively change the course of running injuries [J]. *J Sport Health Sci*, 2017, 6(2): 154-161.
- [2] BRAMBLE DM, LIEBERMAN DE. Endurance running and the evolution of Homo [J]. *Nature*, 2004, 432(7015): 345-352.
- [3] LORIMER AV, HUME PA. Stiffness as a risk factor for achilles tendon injury in running athletes [J]. *Sports Med*, 2016, 46(12): 1921-1938.
- [4] LORIMER AV, HUME PA. Achilles tendon injury risk factors associated with running [J]. *Sports Med*, 2014, 44(10): 1459-1472.
- [5] LYGH T M, NOCKERTS M, KERNOZEK TW, *et al.* Effects of foot strike and step frequency on achilles tendon stress during running [J]. *J Appl Biomech*, 2016, 32(4): 365-372.
- [6] KHAN KM, COOK JL, KANNUS P, *et al.* Time to abandon the "tendinitis" myth: Painful, overuse tendon conditions have a non-inflammatory pathology [J]. *BMJ*, 2002, 324(7338): 626-627.
- [7] MUNTEANU SE, BARTON CJ. Lower limb biomechanics during running in individuals with achilles tendinopathy: A systematic review [J]. *J Foot Ankle Res*, 2011, doi: 10.1186/1757-1146-4-15.
- [8] DE VOS RJ, WEIR A, SCHIE HT, *et al.* Platelet-rich plasma injection for chronic Achilles tendinopathy: A randomized controlled trial [J]. *JAMA*, 2010, 303(2): 144-149.
- [9] O'NEILL S, WATSON PJ, BARRY S. A delphi study of risk factors for achilles tendinopathy- opinions of world tendon experts [J]. *Int J Sports Phy Ther*, 2016, 11(5): 684-697.
- [10] O'NEILL S, WATSON P, BARRY S. 76 Eccentric exercises for achilles tendinopathy do not fully resolve plantarflexor muscle power deficits [J]. *Brit J Sport Med*, 2014, 48(2): 49-50.
- [11] BAYLISS AJ, WEATHERHOLT AM, CRANDALL TT, *et al.* Achilles tendon material properties are greater in the jump leg of jumping athletes [J]. *J Musculoskeletal Neuro*, 2016, 16(2): 105-112.
- [12] ARAMPATZIS A, PEPPER A, BIERBAUM S, *et al.* Plasticity of human Achilles tendon mechanical and morphological properties in response to cyclic strain [J]. *J Biomech*, 2010, 43(16): 3073-3079.
- [13] 魏家森, 陈哲, 王军. 跟腱断裂的治疗进展 [J]. *中医正骨*, 2015, 27(7): 44-47.
- [14] 何国荣. 中长跑运动员急性慢性跟腱腱围炎的治疗 [J]. *中国运动医学杂志*, 1998, 17(3): 264-265.
- [15] 金赞, 张亚, 成耀东. 男足运动员踝关节跟腱韧带损伤的康复治疗与监测研究 [J]. *体育科技文献通报*, 2006, 27(6): 62-65.
- [16] 傅维杰, 魏勇, 刘宇. 穿不同鞋与裸足对羽毛球蹬地动作下肢及跖趾关节运动协调特征的影响 [J]. *医用生物力学*, 2015, 30(2): 159-166.
- FU WJ, WEI Y, LIU Y. Effects of footwear and barefoot on movement coordination of lower extremities and metatarsophalangeal joints during push-off in badminton footwork [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(2): 159-166.
- [17] MULLER R, SIEBERT T, BLICKHAN R. Muscle preactivation control: Simulation of ankle joint adjustments at touchdown during running on uneven ground [J]. *J Appl Biomech*, 2012, 28(6): 718-725.
- [18] ZHANG SN, BATES BT, DUFEK JS. Contributions of lower extremity joints to energy dissipation during landings [J]. *Med Sci Sport Exer*, 2000, 32(4): 812-819.
- [19] SCOTT SH, WINTER DA. Internal forces of chronic running injury sites [J]. *Med Sci Sport Exer*, 1990, 22(3): 357-369.
- [20] FARRIS DJ, TREWARTH G, MCGUIGAN MP. Could intra-tendinous hyperthermia during running explain chronic injury of the human Achilles tendon? [J]. *J Biomech*, 2011, 44(5): 822-826.
- [21] KUBO K, TABATA T, IKEBUKURO T, *et al.* A longitudinal assessment of running economy and tendon properties in long-distance runners [J]. *J Strength Cond Res*, 2010, 24(7): 1724-1731.
- [22] FLETCHER JR, ESAU SP, MACINTOSH BR. Changes in tendon stiffness and running economy in highly trained distance runners [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2010, 110(5): 1037-1046.
- [23] KUNIMASA Y, SANO K, ODA T, *et al.* Specific muscle-tendon architecture in elite Kenyan distance runners [J]. *Scan J Med Sci Sport*, 2014, 24(4): 269-274.
- [24] PERL DP, DAOUD AI, LIEBERMAN DE. Effects of footwear and strike type on running economy [J]. *Med Sci Sport Exer*, 2012, 44(7): 1335-1343.
- [25] UENO H, SUGA T, TAKAO K, *et al.* Relationship between Achilles tendon length and running performance in well-trained male endurance runners [J]. *Scan J Med Sci Sport*, 2017.
- [26] HUNTER GR, KATSOUKIS K, MCCARTHY JP, *et al.* Tendon length and joint flexibility are related to running economy [J]. *Med Sci Sport Exer*, 2011, 43(8): 1492-1499.
- [27] 沈勇伟, 张林, 刘劲松. 短跑训练对跟腱横截面积和弹性模量的影响 [J]. *体育学刊*, 2010, 17(1): 92-95.
- [28] BAUR H, MULLER S, HIRSCHMULLER A, *et al.* Comparison in lower leg neuromuscular activity between runners with unilateral mid-portion Achilles tendinopathy and healthy individuals [J]. *J Electromyogr Kines*, 2011, 21(3): 499-505.
- [29] LICHTWARK GA, WILSON AM. Interactions between the

- human gastrocnemius muscle and the Achilles tendon during incline, level and decline locomotion [J]. *J Exp Biol*, 2006, 209(21): 4379-4388.
- [30] LICHTWARK GA, WILSON AM. *In vivo* mechanical properties of the human Achilles tendon during one-legged hopping [J]. *J Exp Biol*, 2005, 208(24): 4715-4725.
- [31] 杨洋, 王熙, 傅维杰. 着鞋和触地方式对慢跑时足部受力特征的影响[J]. *医用生物力学*, 2017, 32(2): 154-160.
YANG Y, WANG X, FU WJ. The influence of shod conditions and foot-strike patterns on foot force characteristics during jogging [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(2): 154-160.
- [32] HENRIKSEN M, AABOE J, BLIDDAL H, *et al.* Biomechanical characteristics of the eccentric Achilles tendon exercise [J]. *J Biomech*, 2009, 42(16): 2702-2707.
- [33] JOSEPH MF, HISTEN K, ARNTSEN J, *et al.* Achilles tendon adaptation during transition to a minimalist running style [J]. *J Sport Rehabil*, 2017, 26(2): 165-170.
- [34] KULMALA JP, AVELA J, PASANEN K, *et al.* Forefoot strikers exhibit lower running-induced knee loading than rearfoot strikers[J]. *Med Sci Sport Exer*, 2013, 45(12): 2306-2313.
- [35] LIEBERMAN DE, VENKADESAN M, WERBEL WA, *et al.* Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners[J]. *Nature*, 2010, 463(7280): 531-535.
- [36] KUBO K, MIYAZAKI D, TANAKA S, *et al.* Relationship between Achilles tendon properties and foot strike patterns in long-distance runners [J]. *J Sport Sci*, 2015, 33(7): 665-669.
- [37] OBST SJ, BARRETT RS, NEWSHAM-WEST R. Immediate effect of exercise on achilles tendon properties: Systematic review [J]. *Med Sci Sport Exer*, 2013, 45(8): 1534-1544.
- [38] BURGESS KE, GRAHAM-SMITH P, PEARSON SJ. Effect of acute tensile loading on gender-specific tendon structural and mechanical properties [J]. *J Orthop Res*, 2009, 27(4): 510-516.
- [39] KUBO K, KANEHISA H, KAWAKAMI Y, *et al.* Influence of static stretching on viscoelastic properties of human tendon structures in vivo [J]. *J Appl Physiol*, 2001, 90(2): 520-527.
- [40] FARRIS DJ, TREWARTHA G, MCGUIGAN MP. The effects of a 30-min run on the mechanics of the human achilles tendon [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2012, 112(2): 653-660.
- [41] JOSEPH MF, LILLIE KR, BERGERON DJ, *et al.* Achilles tendon biomechanics in response to acute intense exercise [J]. *J Strength Cond Res*, 2014, 28(5): 1181-1186.
- [42] MORSE CI, DEGENS H, SEYNNES OR, *et al.* The acute effect of stretching on the passive stiffness of the human gastrocnemius muscle tendon unit [J]. *J Physiol*, 2008, 586(1): 97-106.
- [43] HANSEN P, AAGAARD P, KJAER M, *et al.* Effect of habitual running on human Achilles tendon load-deformation properties and cross-sectional area [J]. *J Appl Physiol*, 2003, 95(6): 2375-2380.
- [44] WARNE JP, WARRINGTON GD. Four-week habituation to simulated barefoot running improves running economy when compared with shod running [J]. *Scan J Med Sci Sport*, 2014, 24(3): 563-568.
- [45] ARAMPATZIS A, KARAMANIDIS K, MOREY-KLAPSING G, *et al.* Mechanical properties of the triceps surae tendon and aponeurosis in relation to intensity of sport activity [J]. *J Biomech*, 2007, 40(9): 1946-1952.
- [46] KUBO K, MORIMOTO M, KOMURO T, *et al.* Effects of plyometric and weight training on muscle-tendon complex and jump performance [J]. *Med Sci Sport Exer*, 2007, 39(10): 1801-1810.
- [47] HOUGHTON LA, DAWSON BT, RUBENSON J. Effects of plyometric training on achilles tendon properties and shuttle running during a simulated cricket batting innings [J]. *J Strength Cond Res*, 2013, 27(4): 1036-1046.
- [48] BOHM S, MERSMANN F, TETTKE M, *et al.* Human achilles tendon plasticity in response to cyclic strain: effect of rate and duration [J]. *J Exp Biol*, 2014, 217(Pt 22): 4010-4017.
- [49] FOURE A, NORDEZ A, CORNU C. Plyometric training effects on Achilles tendon stiffness and dissipative properties [J]. *J Appl Physiol*, 2010, 109(3): 849-854.
- [50] WANG JH, THAMPATTY BP. An introductory review of cell mechanobiology [J]. *Biomech Model Mechan*, 2006, 5(1): 1-16.
- [51] ROSAGER 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]. *Scan J Med Sci Sport*, 2002, 12(2): 90-98.
- [52] ARAMPATZIS A, KARAMANIDIS K, ALBRACHT K. Adaptational responses of the human Achilles tendon by modulation of the applied cyclic strain magnitude [J]. *J Exp Biol*, 2007, 210(915): 2743-2753.
- [53] MILGROM Y, MILGROM C, ALTARAS T, *et al.* Achilles tendons hypertrophy in response to high loading training [J]. *Foot Ankle Int*, 2014, 35(12): 1303-1308.
- [54] MAGNUSSON SP, KJAER M. Region-specific differences in Achilles tendon cross-sectional area in runners and non-runners [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2003, 90(5-6): 549-553.
- [55] HISTEN K, ARNTSEN J, L'HEREUX L, *et al.* Achilles tendon properties of minimalist and traditionally shod runners [J]. *J Sport Rehabil*, 2017, 26(2): 159-164.