

文章编号:1004-7220(2021)05-0797-08

不同鞋条件对后跟着地跑者跟腱负荷特征的影响

张希妮, 邓力勤, 肖松林, 杨洋, 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:目的 探究不同鞋条件(极简鞋和传统跑鞋)对跑步时跟腱负荷特征的影响。方法 招募16名健康男性后跟着地跑步爱好者,要求其以3.16~3.50 m/s速度在两种鞋条件下完成跑步实验。采用超声影像仪获取跟腱横截面积成像。采用运动捕捉系统和三维测力台获取踝关节矢状面运动学和地面反作用力数据,并计算踝关节和跟腱的力学参数。采用配对样本 t 检验比较两种鞋条件对各因变参数(踝关节角度、触地角度、跟腱力、应力、应变等)的影响。结果 与传统跑鞋相比,穿着极简鞋时的足触地角度显著降低39.9%。同时,踝关节力矩、跟腱力峰值、跟腱负载率峰值和平均负载率均显著增加,而达到跟腱力峰值的时间显著减小。穿着极简鞋时的跟腱应力峰值、跟腱应变峰值及其应力率和应变率峰值也显著增加。结论 习惯穿着传统跑鞋并采用后跟着地的跑者在穿着极简鞋后显著增加了跟腱的负荷特征,建议该类跑者循序渐进地过渡至极简鞋,以适应性提高跟腱承受负荷的能力。

关键词:跟腱力;跟腱应力;极简鞋;传统跑鞋;后跟着地

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.05.021

Effects of Different Shoe Conditions on Achilles Tendon Loading in Runners with Habitual Rearfoot Strike Patterns

ZHANG Xini, DENG Liqin, XIAO Songlin, YANG Yang, FU Weijie

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

Abstract: Objective To investigate the mechanical properties of Achilles tendon (AT) during running under different shoe conditions (minimalist vs conventional shoes). **Methods** Sixteen healthy male runners with habitual rearfoot strike patterns were recruited to complete the running trials at the speed of 3.16~3.50 m/s under two shoe conditions. The cross-sectional area of the AT was obtained by ultrasound imaging. Sagittal plane ankle kinematics and ground reaction forces were recorded by motion capture system and three-dimensional force platform simultaneously. Mechanical properties of the ankle and AT were calculated. Paired t test was used to compare the effects of two shoe conditions on various parameters (ankle angle, strike angle, AT force, stress, strain, etc). **Results** Compared with conventional shoes, foot inclination angle was significantly reduced by 39.9% with minimalist shoes. Obvious increase in ankle moment, peak AT force, peak AT loading rate, average loading rate, and obvious decrease in time to peak AT force were observed with minimalist shoes. Peak AT stress, peak AT strain and corresponding stress rate, peak strain rate also increased significantly with minimalist

收稿日期:2020-09-07; 修回日期:2020-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(11932013,11772201),上海市“曙光学者计划”(19SG47),上海市青年拔尖人才计划,上海市体育科技“全民健身计划”项目(20Q005)

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

shoes. **Conclusions** Greater AT loading was observed when runners with habitual rearfoot strike pattern in conventional shoes begin to wear minimalist shoes. Therefore, a gradual transition to minimalist shoes was recommended for them so as to improve the ability to load adaptively.

Key words: Achilles tendon force; Achilles tendon stress; minimalist shoes; conventional running shoes; rearfoot strike pattern

跟腱作为人体最强壮的肌腱,是传递小腿三头肌肌力的关键结构,在走、跑、跳等动作中起着至关重要的作用。然而,无论是精英跑者还是业余爱好者,都被过高的跟腱损伤发生率(11%)和高达52%的终身患病风险所困扰^[1]。目前造成跟腱损伤的主要原因是跑步时的重复性受力反复牵拉跟腱,致使其过载后无法完全恢复,并随着病理过程的发展,跟腱力学性能减弱,跟腱力、跟腱刚度降低,进一步影响力的有效传递^[2]。因此,如何有效改善跟腱负荷特征是减小并预防跟腱损伤的关键。

近年来,裸足跑的回归使极简鞋再次进入跑者视野,不同跑鞋下的跑步生物力学及跟腱负荷特征备受关注^[3-5]。Histen等^[5]研究发现,与习惯穿普通跑鞋的跑者相比,习惯穿极简鞋跑者的跟腱横截面积、刚度和弹性模量都有所增加。同时,根据两者跟腱形态和负荷特征的差异,Perl等^[6]预测数百万年后,裸足跑者或习惯穿极简鞋的跑者具有更好的运动表现。通常来说,习惯穿传统跑鞋的跑者采用后跟着地方式,而习惯穿极简鞋的跑者倾向前掌着地的方式^[7]。因此,探讨在自然着地状态下跑者穿着极简鞋和传统跑鞋时的跟腱力学特性至关重要,并能为如何通过改变跑鞋条件来改善跟腱力学特性提供理论支撑。然而,不同跑鞋条件本身是否影响跟腱受力,从而潜在地影响跟腱损伤的风险,目前尚未明确。

最近的一项调查研究显示,鞋因素被跑步者和医疗保健专业人员普遍认为是预防跑步损伤的重要组成部分^[8]。然而,Fokkema等^[9]研究发现,近一半的跑者认为无法合理选择跑鞋是引起受伤的重要因素之一。此外,Hryvniak等^[10]研究表明,55%跑者在开始裸足/穿极简鞋跑步时经历过跟腱疼痛或足部疼痛。因此,探讨在自然着地状态下,跑者穿着极简鞋和传统跑鞋时的跟腱负荷特征至关重要,这对厘清鞋条件、跟腱力和跟腱损伤三者的生

物力学关系具有重要意义,并能为以期通过穿着极简鞋来改善跟腱负荷特征和减小跟腱损伤风险的跑者提供理论建议。本文重点探究习惯后跟着地的跑者穿着不同跑鞋条件(极简鞋和传统跑鞋)对跟腱负荷特征的影响。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

招募16名男性跑步爱好者,年龄(30.3±6.6)岁,身高(174.6±5.9)cm,体质量(72.1±10.1)kg。采用G*Power对样本量进行双尾t检验的事前估算,为了达到80%统计功效,显著性水平 $\alpha=0.05$,且效应量Cohen's $d>0.70$ (中等效应)。结果显示,要求的最低样本量为14。所有受试者均为习惯穿传统跑鞋的后跟着地跑者,且从未尝试过裸足跑或穿着极简鞋,近1个月的周跑量大于20km,近3个月内无明显下肢损伤。实验前告知受试者实验流程并让其签署知情同意书。

1.2 实验仪器

1.2.1 实验用鞋 如图1所示,选择INOV-8 BARE-XF 210极简跑鞋(3mm橡胶外底,无中底,前后落差0mm,平均质量227g)作为极简鞋,NIKE AIR ZOOM PEGASUS 34慢跑鞋(泡棉+气垫中底,前后落差12mm,平均质量285g)作为传统跑鞋,用于跑步实验。



图1 实验用鞋

Fig.1 Shoes for experiment (a) Minimalist shoes, (b) Conventional running shoes

1.2.2 运动捕捉系统 采用16台Vicon T40三维红外摄像头及运动捕捉系统(Vicon公司,英国)配

套直径 14 mm 红外反光球,采集下肢踝关节矢状面运动学参数,采样频率为 100 Hz。

1.2.3 三维测力台 采用 2 块瑞士 Kistler 9287C 三维测力台(90 cm×60 cm×10 cm)(Kistler 公司,瑞士)采集地面反作用力(ground reaction force, GRF),采样频率为 1 kHz。

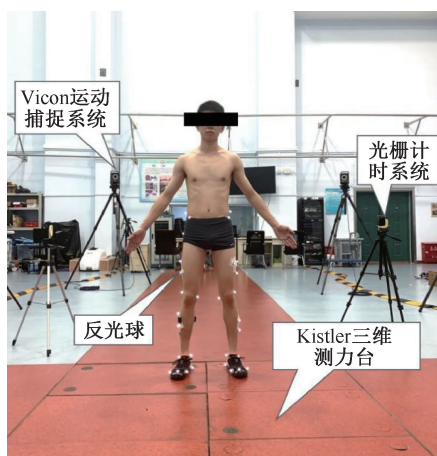
1.2.4 光栅计时系统 采用 Witty-Manual 光栅计时系统(Microgate 公司,意大利),测量受试者通过跑道的的时间以控制跑步平均速度。

1.2.5 超声影像 采用 M7 Super 超声影像仪(Mindray 公司,中国),选用 L6-14 线阵探头,测量跟腱横截面面积的影像学数据。

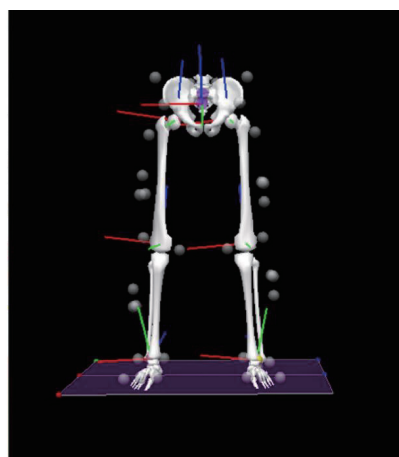
1.3 测试流程

首先进行超声影像学测试,利用超声影像仪获取跟腱横截面面积的成像。要求受试者俯卧于治疗台上,使踝关节处于中立位(90°),将 ML6-15-D

线阵探头垂直放置在跟骨上 10 cm 处以获取跟腱的横断面影像^[11]。随后进行跑步生物力学测试,跑步实验开始前,要求每名受试者更换实验背心、短裤、袜子和跑鞋(传统跑鞋和极简鞋,跑鞋顺序由随机表决定)后,在跑台上以 12 km/h 速度进行 5 min 热身。热身结束后,操作人员为其贴上反光球,采集受试者静态模型。反光球的位置为髌前上棘、髌脊上缘、髌后上棘、大转子、股骨内外髁、大腿追踪点 T 型架、踝内外、小腿追踪点 T 型架及第 1、第 5 跖趾关节、足尖、足跟等共 36 个标记点[见图 2(a)]。实验开始时,要求受试者以 3.16~3.50 m/s 速度通过跑道(利用光栅计时系统控制速度),并要求受试者优势侧成功踏上测力台 3 次,采集反光球轨迹等信号^[12]。随后更换鞋、休息 3 min 并重复上述实验。测试时,实验人员不会给予任何提示,由受试者自主选择跑姿。



(a) 本文实验设置



(b) Visual 3D软件中标记点位置

图 2 红外反光球放置位置

Fig.2 Set-up of the reflective markers (a) Set-up in the study, (b) Set-up of markers in Visual 3D software

1.4 实验指标

本实验研究的落地阶段为触地瞬间至脚尖离地的阶段。采用 Visual 3D 3.21.0 三维步态分析软件(C-Motion 公司,美国)对采集到的运动学以及 GRF 数据进行滤波和逆向动力学分析[见图 2(b)]。其中,膝关节中心定义为股骨内、外侧髁标记点连线的中点,踝关节中心定义为内、外踝标记点连线的中点,跖趾关节中心定义为第 1、5 跖趾关节标记点连线的中点。运动学的截止频率为 7 Hz^[13]。具体参数如下:

(1) 跟腱横截面积(mm^2)。使用 Image J 软件(NIH,美国)计算由超声影像仪获取的跟腱图像中的横截面积。

(2) 足触地角度($^\circ$)。定义为矢状面上足环节相对于地面的角度,其中足环节定义为踝关节中心与跖趾关节中心的连线,正值为后跟着地,负值为前掌着地。

(3) 踝关节角度($^\circ$)。定义为矢状面上足环节相对于小腿环节的角度,其中小腿环节定义为膝关节中心与踝关节中心的连线,取与跟腱力峰值对应

时刻的值。

(4) 踝关节力矩($N \cdot m/kg$)。通过逆动力学方法计算得到,取与跟腱力峰值对应时刻的值,并进行体重(body weight, BW)标准化。

(5) 跟腱力峰值(BW)。通过踝关节力矩除以跟腱力臂计算得到。其中,跟腱力臂的拟合公式,基于 Lyght 等^[11]用于计算小腿三头肌肌肉力臂的多项式算法及 Rugg 等^[14]在体跟腱影像学数据所得(见图3),并进行 BW 标准化。

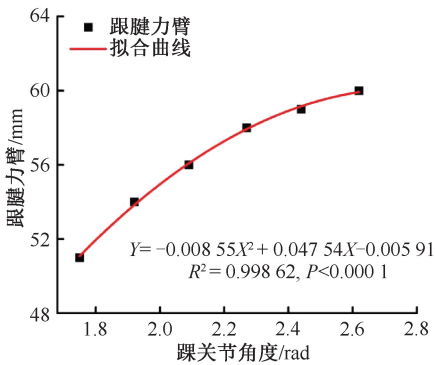


图3 踝关节角度与跟腱力臂长度的关系拟合曲线

Fig.3 Fitting curve for the relationship between ankle angle and length of the AT moment arm

(6) 跟腱力冲量($BW \cdot s$)。对时间-力曲线进行积分得到。

(7) 跟腱应力峰值(MPa)。由跟腱力峰值除以跟腱横截面积得到。

(8) 跟腱应变峰值(%)。由跟腱应力峰值除以弹性模量得到。其中,弹性模量参考 Wren 等^[15]和 Revak 等^[16]的报道。

(9) 到达跟腱力峰值时间(ms)。定义为从触地时刻到跟腱力峰值的时间。

(10) 跟腱力峰值负载率(BW/s)。由跟腱力-时间曲线的瞬时斜率得到。

(11) 跟腱力平均负载率(BW/s)。从触地时刻至跟腱力峰值的跟腱力变化除以到达峰值的时间来计算得到。

(12) 跟腱应力率峰值(MPa/s)。由应力-时间曲线的瞬时斜率计算得到。

(13) 跟腱应变率峰值($\%/s$)。由应变-时间曲线的瞬时斜率计算得到。

1.5 统计方法

所有参数均用平均值 \pm 标准差表示,Shapiro-Wilk 检验结果显示所有数据均呈正态分布。采用配对样本 t 检验比较两种鞋条件对各因变参数(踝关节角度、触地角度、跟腱力、应力、应变等)的影响。效应量用 Cohen's d 表示,其中: $d < 0.19$ 为弱效应、 $d = 0.20 \sim 0.79$ 为中效应、 $d > 0.8$ 为高效应。显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

表1所示为不同鞋条件下踝关节和跟腱力学参数的比较。

表1 不同鞋条件下踝关节和跟腱力学参数比较

Tab.1 Comparison of mechanical parameters of ankle and Achilles tendon under different shoe conditions

参数	鞋条件		P	95% 置信区间	效应量 Cohen's d
	极简鞋	传统跑鞋			
足触地角度/ $^{\circ}$	8.20 \pm 7.96	15.30 \pm 8.75	<0.001	[-10.22; -3.98]	0.850
踝关节角度/ $^{\circ}$	73.31 \pm 4.24	72.89 \pm 3.73	0.702	[2.94; 9.41]	0.099
踝关节力矩/ $(N \cdot m \cdot kg^{-1})$	2.55 \pm 0.46	2.34 \pm 0.44	0.003	[0.12; 0.27]	0.340
跟腱力臂/m	0.041 \pm 0.0019	0.041 \pm 0.0017	0.721	[-0.00082; 0.0012]	0.093
跟腱力峰值/BW	6.24 \pm 1.13	5.85 \pm 1.22	0.003	[0.16; 0.62]	0.390
跟腱力冲量/ $(BW \cdot s)$	0.70 \pm 0.13	0.65 \pm 0.13	0.002	[0.023; 0.085]	0.470
跟腱力峰值负载率/ $(BW \cdot s)$	118.84 \pm 26.62	109.94 \pm 9.33	0.050	[-0.012; 17.82]	0.320
跟腱力平均负载率/ $(BW \cdot s)$	54.90 \pm 17.47	48.42 \pm 15.64	0.004	[2.47; 10.49]	0.440
到达跟腱力峰值时间/ms	117.77 \pm 17.62	126.31 \pm 20.68	0.001	[-12.96; -3.87]	0.460
跟腱应力峰值/MPa	71.89 \pm 14.74	66.96 \pm 14.59	0.005	[1.75; 8.12]	0.400
跟腱应力率峰值/ $(MPa \cdot s^{-1})$	1370.03 \pm 350.66	1217.94 \pm 397.35	0.014	[35.88; 268.30]	0.450
跟腱应变峰值/%	8.78 \pm 1.80	8.19 \pm 1.77	0.005	[0.22; 0.96]	0.400
跟腱应变率峰值/ $(\% \cdot s^{-1})$	167.28 \pm 42.82	148.71 \pm 48.52	0.014	[4.38; 32.75]	0.450

注:踝关节角度和力矩取与跟腱力峰值对应时刻的值。

与传统跑鞋相比,穿着极简鞋时的足触地角度减小了 39.9% ($P < 0.001$),踝关节力矩增加了

8.3% ($P = 0.003$)。然而,不同鞋条件间踝关节角度和跟腱力臂不存在显著性差异(见图 4)。

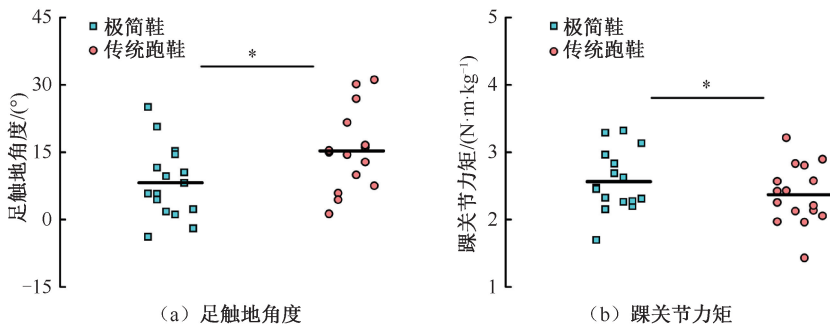


图 4 极简鞋和传统跑鞋对足触地角度和踝关节力矩的影响 (* $P < 0.05$)

Fig.4 Effects of minimalist and conventional running shoes on foot strike angle and ankle moment (a) Foot strike angle, (b) Ankle moment

与传统跑鞋相比,穿着极简鞋时的跟腱力峰值($P = 0.003$)、跟腱力冲量($P = 0.002$)、跟腱力峰值负载率($P = 0.050$)和平均负载率($P = 0.004$)均显著性增加,到达跟腱力峰值的时间显著性减小($P = 0.001$)。此外,跟腱应力峰值($P =$

0.005)、跟腱应变峰值($P = 0.005$),及其应力率和应变率峰值($P = 0.014$)也在穿着极简鞋条件下表现出显著性增加(见图 5)。在支撑期前 60% 阶段,穿着极简鞋时的跟腱力和跟腱应力均大于穿着传统跑鞋(见图 6)。

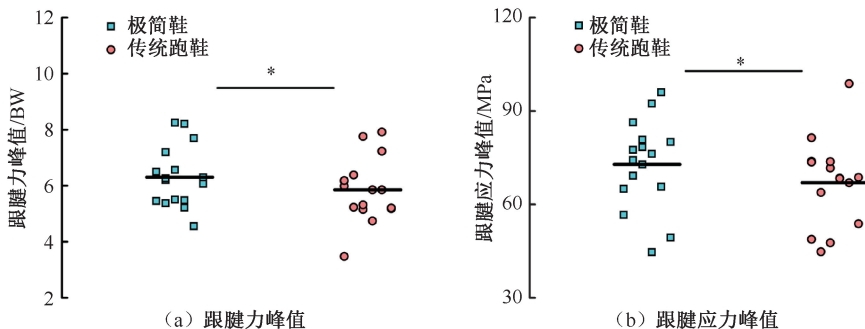


图 5 极简鞋和传统跑鞋对跟腱力峰值和跟腱应力峰值的影响 (* $P < 0.05$)

Fig.5 Effects of minimalist shoes and conventional running shoes on Achilles tendon peak force and peak stress (a) AT peak force, (b) AT pak stress

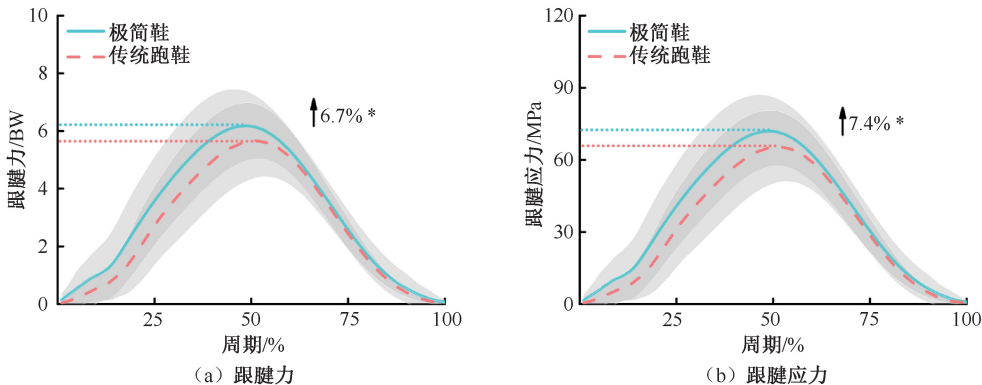


图 6 支撑期阶段极简鞋和传统跑鞋对跟腱力和跟腱应力的影响 (* $P < 0.05$)

Fig.6 Effects of minimalist shoes and conventional running shoes on Achilles tendon force and stress during stance phase (a) AT force, (b) AT stress

3 讨论

本文通过比较在跑步过程中穿着极简鞋和传统跑鞋对习惯后跟着地跑者跟腱负荷特征的影响发现,与传统跑鞋相比,穿着极简鞋时踝关节力矩、跟腱力峰值、跟腱负载率峰值和平均负载率均显著增加,而达到跟腱力峰值的时间显著减小,同时跟腱应力、跟腱应变及其应力率和应变率也显著变大。此外,穿着极简鞋的足触地角度显著小于传统跑鞋。

研究表明,鞋条件与跑步着地方式密切相关,具体而言,习惯穿着传统跑鞋的跑者倾向采用后跟着地的方式,而习惯穿极简鞋的跑者更倾向采用前掌着地的方式^[17-18]。同样地,本文结果表明,即使对于习惯穿着传统跑鞋并采用后跟着地的跑者而言,在穿着极简鞋时其足触地角度会即刻减小,这可能是由于极简鞋缺乏缓冲和额外的保护结构,采用后跟着地的方式会使受试者的足部感到明显疼痛,故跑者倾向采用更“平”的触地方式^[18]。

本文发现,相比于穿传统鞋,穿着极简鞋跑步时观察到跟腱力峰值显著增加 6.7%。这一结果支持 Sinclair 等^[19]的研究结论,与习惯穿着传统跑鞋的跑者相比,裸足跑者和习惯穿着极简鞋的跑者的跟腱力更大。由于根据踝关节角度计算得出的跟腱力臂没有显著性差异,本文推测,造成两种鞋条件下跟腱力差异的主要原因是踝关节力矩的改变。本文观察到,穿着极简鞋时踝关节力矩显著增加,这可能是由于极简鞋没有缓冲结构来吸收 GRF,就需要更多的肌肉力量来控制足部和踝关节的运动^[20]。此外,与传统跑鞋相比,穿着极简鞋时跟腱力峰值出现的时间更早,同时存在较大的跟腱峰值负载率,这可能与不同鞋条件下的肌肉激活程度有关^[16]。从跟腱力-时间曲线而言,无论是穿着传统跑鞋还是极简鞋,跟腱力峰值均出现在支撑相中期,推测跟腱力的增加并不是因为触地时的冲击力造成,更多的是由于蹬伸时小腿三头肌的主动发力,提示穿着极简鞋提升了跟腱传递力的能力^[20]。

Histen 等^[21]研究认为,与习惯穿着传统跑鞋的跑者相比,习惯穿着极简鞋的跑者具有更大的跟腱力是因为跟腱横截面积的增加。然而,本研究中,对于同一名受试者而言,其跟腱横截面积没有变

化,然而在穿着极简鞋时跟腱力显著大于传统跑鞋。此外,本团队的前期研究也发现,经过 12 周跑姿转换训练(从后跟着地过渡至前掌着地),跑者的跟腱横截面积没有显著性改变^[12]。由此可见,无论是即刻更换跑鞋还是经过长期跑姿干预,力学刺激对跟腱形态学影响较小。考虑到跟腱的形态特征和负荷特征之间的非同步性变化,本研究发现,对于习惯于穿传统跑鞋的跑者而言,穿着极简鞋时跟腱应力增加,即单位面积的跟腱受力会显著性增加。本文认为,应力的增加若超过跑者自身跟腱的可承受范围,则会增加损伤风险。此时,循序渐进地过渡至极简鞋以适应性提高跟腱承受负荷的能力,显得尤为重要。

跟腱力冲量反映了跟腱力在时间上的累积效应。Barcellona 等^[22]研究表明,穿着极简鞋的跑者触地时间更短。但本文结果表明,穿着极简鞋时在整个支撑相阶段的跟腱力冲量更大,即每步的冲量增加 7.7% 或 0.05 BW·s。在探讨不同着地方式对跟腱力冲量影响的研究中也发现类似的结果。Almonroeder 等^[23]研究发现,与后跟着地方式相比,裸足跑条件下非后跟着地时每步的跟腱力冲量增加 11.8% 或 0.09 BW·s; Rice 等^[4]研究表明,穿着极简鞋时,前掌着地时的跟腱力冲量显著大于后跟着地,然而在穿着传统跑鞋或裸足跑时,在不同的着地方式间没有发现显著性差异。虽然不同的跑步经验或实验方案可能会造成不同的结果,但综合本文和前人研究可知,跟腱力冲量受到鞋条件和足触地模式的双重影响。作为跑步时跟腱负荷的一个指标,跟腱力冲量的增加反映了跟腱承受负荷要求的提高。

由此可见,不同鞋条件对跟腱负荷特征确实存在明显影响。与传统跑鞋相比,穿着极简鞋时的跟腱力峰值、应力峰值、平均/峰值负载率等显著增加。目前多数研究认为,可以通过力学刺激来影响结缔组织(如跟腱等)的内稳态以调节跟腱对力的适应能力^[24]。其中,低应变量的训练不足以刺激并使跟腱产生适应性变化。同时,缺乏力学刺激甚至可能会导致跟腱力学特性的退化^[25-26]。而高负荷下的跟腱显然会增加跑步跟腱病的风险^[4,27]。综上所述,本文认为,不足和过度的负荷都会对跟腱产生不利影响,故亟须确定跟腱适应的最佳力学载荷

范围。然而,由于缺乏更长的适应过程,一方面,跑者可能并没有意识到穿着不同跑鞋所导致跟腱负荷的差异;另一方面,在穿着极简鞋时若继续保持后跟着地的方式,可能会由于缺少鞋后跟减震结构而增加损伤风险^[23]。由此,本文建议:若跑者熟悉当前的跑步方式,没有必要更换为极简鞋或改变跑步方式;若跑者需要使用极简鞋来优化跟腱的负荷特征,建议逐步过渡到极简鞋,同时应充分考虑强度和持续时间是否适合当前的跟腱特性。

本研究的局限性如下:① 尽管实验招募的跑者有相似的跑步经验并给予一定适应时间,但由于他们均为初次穿着极简鞋,其下肢生物力学反馈可能存在个体差异;② 受实验条件限制,后续研究可探索运动过程中跟腱形态学(如横截面积)和力学特性(如跟腱力)的实时测量方法,以获得更为直观的数据。

4 结论

对于习惯穿传统跑鞋并采用后跟着地的跑者而言,在穿着极简鞋后,跟腱的负荷特征产生明显变化,具体表现为跟腱力峰值、峰值/平均负载率、应力峰值、应变峰值及其应力率和应变率等显著增加,表明穿着极简鞋后跟腱承受负荷显著增加。因此,对于习惯穿着传统跑鞋的跑者而言,穿着极简鞋时,需要考虑循序渐进地过渡以适应性地提高跟腱承受负荷的能力。

参考文献:

- [1] ZAFAR MS, MAHMOOD A, MAFFULLI N. Basic science and clinical aspects of achilles tendinopathy [J]. *Sports Med Arthrosc Rev*, 2009, 17(3): 190-197.
- [2] INTZIEGIANNI K, CASSEL M, RAUF S, *et al.* Influence of age and pathology on achilles tendon properties during a single-leg jump [J]. *Int J Sports Med*, 2016, 37(12): 973-978.
- [3] HANNIGAN JJ, POLLARD CD. Differences in running biomechanics between a maximal, traditional, and minimal running shoe [J]. *J Sci Med Sport*, 2020, 23(1): 15-19.
- [4] RICE H, PATEL M. Manipulation of foot strike and footwear increases Achilles tendon loading during running [J]. *Am J Sport Med*, 2017, 45(10): 2411-2417.
- [5] HISTEN K, ARNTSEN J, L' HEREUX L, *et al.* Achilles tendon properties of minimalist and traditionally shod runners [J]. *J Sport Rehabil*, 2016, 26(2): 159-164.
- [6] 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.
- [7] 张力文, 马云茹, 朱晓兰, 等. 跑鞋与着地方式对跑步损伤的影响 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(1): 76-81.
- [7] ZHANG LW, MA YR, ZHU XL, *et al.* The influence of running shoes and foot-strike patterns on running injuries [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(1): 76-81.
- [8] DHILLON GK, HUNT MA. What are the perceptions of runners and healthcare professionals on footwear and running injury risk? [J]. *BMJ Open Sport Exerc Med*, 2020, 6(1): e000767.
- [9] FOKKEMA T, DE VOS RJ, BIERMA-ZEINSTRASMA, *et al.* Opinions, barriers, and facilitators of injury prevention in recreational runners [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2019, 49(10): 736-742.
- [10] HRYVNIAC D, DICHARRY J, WILDER R. Barefoot running survey: Evidence from the field [J]. *J Sport Health Sci*, 2014, 3(2): 131-136.
- [11] LYGHM 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.
- [12] 张希妮, 王俊清, 杨洋, 等. 基于跑姿控制训练模式下的跟腱生物力学研究 [J]. *体育科学*, 2019, 39(4): 63-70.
- [13] 张桑, 傅维杰, 刘宇. 不同着地冲击模式的下肢生物力学研究 [J]. *体育科学*, 2016, 36(1): 59-66.
- [14] RUGG SG, GREGOR RJ, MANDELBAUM BR, *et al.* In vivo moment arm calculations at the ankle using magnetic resonance imaging (MRI) [J]. *J Biomech*, 1990, 23(5): 499-497.
- [15] WREN TA, YERBY SA, BEAUPRE GS, *et al.* Mechanical properties of the human achilles tendon [J]. *Clin Biomech*, 2001, 16(3): 245-251.
- [16] REVAK A, DIERS K, KERNOZEK TW, *et al.* Achilles tendon loading during heel-raising and -lowering exercises [J]. *J Athl Training*, 2017, 52(2): 89-96.
- [17] 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.
- [18] LATORRE-ROMAN PA, GARCIA-PINILLOS F, SOTO-HERMOSO VM, *et al.* Effects of 12 weeks of barefoot running on foot strike patterns, inversion-eversion and foot rotation in long-distance runners [J]. *J Sport Health Sci*, 2019, 8(6): 579-584.
- [19] SINCLAIR J. Effects of barefoot and barefoot inspired footwear on knee and ankle loading during running [J].

- Clin Biomech, 2014, 29(4): 395-399.
- [20] LIEBERMAN DE, CASTILLO ER, OTAROLA-CASTILLO E, *et al.* Variation in foot strike patterns among habitually barefoot and shod runners in Kenya [J]. PLoS One, 2015, 10(7): 1-17.
- [21] 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.
- [22] BARCELONA MG, BUCKLEY L, PALMER LJM, *et al.* The effect of minimalist footwear and instruction on running: An observational study [J]. BMJ Open Sport Exerc Med, 2017, 3(1): e000160.
- [23] ALMONROEDER T, WILLSON JD, KERNOZEK TW. The effect of foot strike pattern on achilles tendon load during running [J]. Ann Biomed Eng, 2013, 41(8): 1758-1766.
- [24] 张希妮, 王俊清, 傅维杰. 跟腱运动功能与生物力学特征的研究进展 [J]. 医用生物力学, 2019, 34(1): 103-109.
- ZHANG XN, WANG JQ, FU WJ. Research advancements in motor function and biomechanical characteristics of Achilles tendon [J]. J Med Biomech, 2019, 34(1): 103-109.
- [25] ARAMPATZIS A, PEPER 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.
- [26] WANG JH, THAMPATTY BP. An introductory review of cell mechanobiology [J]. Biomech Model Mechan, 2006, 5(1): 1-16.
- [27] KERNOZEK TW, KNAUS A, RADEMAKER T, *et al.* The effects of habitual foot strike patterns on Achilles tendon loading in female runners [J]. Gait Posture, 2018, 66(9): 283-287.