

文章编号: 1004-7220(2024)01-0132-07

# 不同跑步着地习惯对跟腱形态学及其负荷特征的影响

张希妮<sup>1,2</sup>, 邓力勤<sup>2</sup>, 肖松林<sup>2</sup>, 傅维杰<sup>2</sup>

(1. 宁波大学 体育学院, 宁波 315211; 2. 上海体育大学 运动健康学院, 上海 200438)

**摘要:**目的 探究不同着地模式对跟腱形态学和负荷特征的影响。方法 招募习惯后跟着地跑者和习惯前掌着地跑者各 14 人, 利用超声医学影像仪采集受试者的跟腱形态学特征(跟腱长度、横截面积、厚度); 利用三维测力跑台采集并计算受试者穿着缓冲跑鞋以 10 km/h 速度跑步时的跟腱负荷特征(跖屈力矩、跟腱力、负载率、冲量、应力等)。结果 与习惯后跟着地跑者相比, 习惯前掌着地跑者踝关节跖屈力矩峰值、跟腱力峰值、平均负载率、峰值负载率均显著增加( $P < 0.05$ ), 但两组跑者跟腱长度、跟腱横截面积和跟腱厚度差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。结论 长期的前掌着地模式可以适应性地提高跟腱在重复性的“拉长-收缩”循环刺激中的力学特性。

**关键词:** 跟腱; 前掌着地; 后跟着地; 着地模式

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.01.019

## Effects of Different Habitual Foot Strike Patterns During Running on Achilles Tendon Morphology and Mechanical Loading

ZHANG Xini<sup>1,2</sup>, DENG Liqin<sup>2</sup>, XIAO Songlin<sup>2</sup>, FU Weijie<sup>2</sup>

(1. Faculty of Sports Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. School of Exercise and Health, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

**Abstract:** **Objective** To investigate the effects of different foot strike patterns during running on Achilles tendon (AT) morphology and mechanical loading. **Methods** Fourteen habitual rearfoot strike runners and 14 habitual forefoot strike runners were recruited. Morphological characteristics (tendon length, cross-sectional area, and thickness) of the AT were collected using ultrasound imaging. The AT loading characteristics (plantar flexion moment, tendon force, load rate, impulse, and stress) of subjects wearing cushioned running shoes while running at a speed of 10 km/h were collected and calculated using a three-dimensional force measurement treadmill. **Results** Compared to habitual rearfoot strike runners, habitual forefoot strike runners showed a significant increase in peak plantar flexion moment of ankle joint, AT peak force, average loading rate, and peak loading rate ( $P < 0.05$ ). However, the differences in AT length, cross-sectional area, and thickness between the two groups were not statistically significant ( $P > 0.05$ ). **Conclusions** Long-term forefoot strike patterns can adaptively enhance the mechanical loading characteristics of the AT during repetitive stretch-shortening cycles.

**Key words:** Achilles tendon; forefoot strike; rearfoot strike; foot strike pattern

收稿日期: 2023-07-17; 修回日期: 2023-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(12272238, 11772201, 12302416), 上海市“曙光学者”计划(19SG47), 上海市青年拔尖人才开发计划, 宁波市自然科学基金项目(2023J129)

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

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<sup>[1]</sup>。然而,随着跑步的逐渐流行,跑步所导致的跟腱损伤居高不下。数据显示,跟腱的损伤发生率(10.3%)在跑者中所占比例最高<sup>[2]</sup>,且跑者个体的终身患病风险高达52%<sup>[3]</sup>。因此,了解跟腱的形态学和负荷特征对于优化训练策略和最大限度降低损伤风险非常重要。

随着一项关于裸足跑的研究在 *Nature* 发表后<sup>[4]</sup>,越来越多的研究开始关注到后跟着地模式会使跑者足部在着地时刻经历更大的冲击力和负载率,这会增加跑步相关的损伤风险,如足底筋膜炎、应力性骨折和髌股关节疼痛综合征等。因此,建议跑者向前掌着地模式过渡,从而减少由于冲击力而导致的损伤风险。根据肌腱负荷模型,过度或不足的负荷对跟腱都是有害的。具体而言,跟腱过度负荷可能会产生反应性病变,进而产生修复不良等问题,最终导致退行性病变;跟腱负荷不足,可能会产生“应力遮挡”,导致跟腱弱化<sup>[5]</sup>。研究发现,前掌着地模式的负荷会对跟腱产生有利的适应性变化,即与习惯穿着普通跑鞋进行后跟着地模式的跑者相比,习惯穿着极简鞋进行前掌着地模式的跑者具有更大的跟腱横截面积、刚度和弹性模量<sup>[6]</sup>。因此,除降低冲击力外,前掌着地模式可以为肌腱提供有利的负荷刺激使其发生适应性变化,以减小损伤风险。

Rice 等<sup>[7]</sup>研究发现,与后跟着地相比,即刻采用前掌着地模式在支撑相的离心收缩阶段,可以更大程度地激活小腿三头肌,以更有效地储存和释放弹性应变能。本文由此推测,不同着地模式存在不同的跟腱负荷特征,前掌着地的跑步模式通过跟腱传递跖屈力量,增加的跟腱负荷可能有利于改善跟腱的力学特性<sup>[8]</sup>。然而,目前针对不同着地模式跑者的跟腱特性研究多集中在等长收缩和即刻改变着地模式下的力学/负荷特征,尚不清楚习惯不同着地模式下的跟腱负荷特征,特别是跑步过程中的负荷特征是否依然存在差异。

本文旨在比较习惯后跟着地跑者和习惯前掌着地跑者的跟腱形态学特性和跑步时的跟腱负荷特征差异,以期进一步明确跑步着地过程中跟腱的适应性变化,为预防和减小运动损伤风险提供新的

思路和视角。本研究假设,与习惯后跟着地模式的跑者相比,习惯前掌着地模式的跑者会表现出更大的跟腱横截面积和跟腱力。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

招募习惯后跟着地跑者(对照组)和习惯前掌着地跑者(实验组)各14人(见表1)。要求所有跑者近4周每周跑步里程大于20 km。其中,习惯后跟着地跑者习惯穿着缓冲跑鞋(带有减震和缓冲结构的跑鞋,且有硬质外底)进行后跟着地模式跑步,排除有裸足跑或穿过极简鞋跑步经历的跑者;习惯前掌着地跑者习惯进行前掌着地模式跑步。所有受试者均为男性,优势腿为右腿,且在实验前1年内无任何下肢损伤。在测试前2 h内禁止食用含咖啡因、酒精的食物,测试前24 h内未进行过剧烈和力竭性运动。受试者在测试前了解实验流程及实验意图,签署知情同意书。本研究获得上海体育学院伦理委员会批准。

表1 受试者基本信息

Tab. 1 Basic information of the subjects

参数	对照组(n=14)	实验组(n=14)
年龄/岁	33.9±8.0	32.4±10.8
身高/cm	173.8±6.5	173.5±5.6
体质量/kg	70.2±8.4	69.9±8.1
跑量/(km·周 <sup>-1</sup> )	39.6±14.1	38.2±17.4
跑步年限/年	4.9±2.2	6.0±3.6

### 1.2 实验仪器

**1.2.1 uSmart 3300 便携式彩色超声系统** 美国 Terason 公司 uSmart 3300 超声波诊断仪,采用12L5A 线性探头(采样频率5~12 MHz),用于测量跟腱长度、厚度和横截面积,动态超声视频的采样率为25 Hz。

**1.2.2 Bertec 测力跑台** 美国 Bertec 公司三维测力跑台,由两块独立的测力跑台(长175×宽50 cm)组成,采集跑步过程中地面反作用力(ground reaction force, GRF)数据,采样频率为1 kHz。

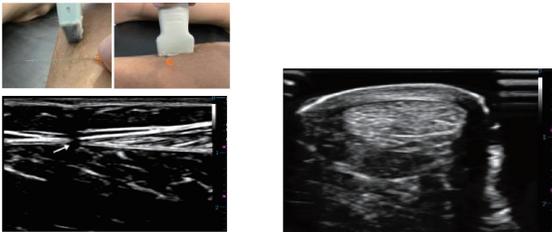
**1.2.3 Vicon 运动捕捉系统** 8台英国 Vicon T40 三维红外摄像头及运动捕捉系统,配套直径14 mm 红外反光球,采集下肢髌、膝、踝三关节矢状面运动学参数,采样频率为200 Hz。

### 1.3 实验用鞋

选取某大众运动品牌缓冲跑鞋(泡棉+气垫中底,前后跟差 12 mm,平均质量 285 g,鞋码 41~45 码)用于跑步实验。

### 1.4 测试流程

**1.4.1 跟腱形态学测试** 要求受试者俯卧在治疗台上,使踝关节处于中立位( $90^\circ$ ),膝关节和髌关节保持伸展状态( $180^\circ$ ),涂抹耦合剂后将 12L5A 线阵探头分别垂直放置于腓肠肌内侧头与跟腱结合点处和跟腱在跟骨的插入点。实验人员在超声探头和皮肤表面之间插入 25 号针,在超声图像中作为标记投影[见图 1(a)],并在皮肤上将标记针和超声探头相交处进行标记,定义为腓肠肌内侧头与跟腱结合点处。相同的操作标记跟腱在跟骨的插入点,利用软尺测量两点的长度<sup>[9]</sup>。而后,将超声探头垂直于皮肤表面的方向,采集与内、外踝水平一致处的跟腱横截面积[见图 1(b)]<sup>[10]</sup>。上述测量过程重复 3 次,以减小误差。



(a) 腓肠肌内侧头与跟腱结合点位置 (b) 跟腱横截面积超声影像

图 1 跟腱长度和横截面积测量流程

**Fig. 1 Measurement process of Achilles tendon length and cross-sectional area** (a) Position of the medial head of the gastrocnemius muscle at its conjunction with the Achilles tendon, (b) Ultrasound imaging of Achilles tendon cross-sectional area

**1.4.2 跑步生物力学测试** 受试者更换实验服装(运动背心、短裤),要求受试者穿着自己习惯的跑鞋以自选速度在跑台上进行 5 min 热身运动。热身结束后,操作人员为其贴上反光球标记点。反光球的位置为髂前上棘、髂脊上缘、髂后上棘、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 型架和第 1、第 5 跖趾关节、足尖、足跟等共 36 个点。首先采集受试者静态模型,而后要求受试者穿着同一双缓冲跑鞋以 10 km/h 速度进行自选跑姿的跑步,待受试者跑姿稳定后开始采集数据,采集

时间为 10 s,同步采集反光球轨迹、GRF 等信号。

### 1.5 数据处理和实验参数

本实验研究的跑步阶段为支撑相阶段,即优势侧触地时刻至离地时刻的阶段。其中,触地瞬间定义为  $GRF > 30$  N。采用美国 C-Motion 公司开发的 Visual 3D 三维步态分析软件(版本 3.21.0),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。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<sup>[11]</sup>。前期的信效度检验结果已表明影像学指标的组内相关系数(intra-class correlation coefficients, ICC)为良好至优异( $ICC = 0.895 \sim 0.996$ )<sup>[12]</sup>。

#### 1.5.1 跟腱形态学与符号特征指标

(1) 跟腱静息长度:采用超声影像仪获取跟腱与腓肠肌内侧头结合点、跟骨插入点的影像,并在皮肤表面进行标记,而后使用软尺测量两点长度,确定为跟腱长度。

(2) 跟腱横截面积:采用超声影像仪获取跟腱横截面积成像,并通过 Image J 软件手动追踪跟腱横截面积图像周围的回声边界来评估。

(3) 跟腱厚度:采用超声影像仪获取跟腱横截面积成像,使用 Image J 软件确定跟腱厚度,定义为横截面积内上下方向上的最大直径。

(4) 跟腱力峰值( $F_{AT\_peak}$ ):跟腱所承受的最大力值,其计算公式为

$$F_{AT\_peak} = M_{ankle} / L_{AT} \quad (1)$$

式中: $M_{ankle}$  为跑步时的矢状面踝关节力矩,由逆向动力学计算获得,并进行体重(body weight, BW)标准化; $L_{AT}$  为跟腱力臂长度,其拟合公式基于 Lyght 等<sup>[13]</sup>用于计算小腿三头肌肌肉力臂的多项式算法及 Rugg 等<sup>[14]</sup>在体跟腱影像学数据所得,具体方法可参考本团队前期研究<sup>[8]</sup>。

(5) 跟腱平均负载率:支撑相阶段,由跟腱力-时间曲线下到达跟腱力峰值时的平均斜率获得。

(6) 跟腱负载率峰值:支撑相阶段,由跟腱力-时间曲线下到达跟腱力峰值时的瞬时斜率获得。

(7) 跟腱应力峰值:由跟腱力峰值除以跟腱横截面积得到。

(8) 跟腱力冲量( $I_{AT}$ ):支撑相阶段,跟腱所受

到的力的总变化量,计算公式为

$$I_{AT} = \int_{t_0}^{t_1} F_{AT}(t) \cdot dt \quad (2)$$

式中: $F_{AT}(t)$ 为支撑相阶段中的跟腱力-时间曲线; $t_0$ 为触地时刻; $t_1$ 为离地时刻。

### 1.5.2 矢状面踝关节运动学与动力学指标

(1) 足触地角度:足跟与第1足趾连线与地面的夹角,由触地时刻( $GRF > 30$  N)的足地夹角减去静态时的足地夹角获得。前掌着地定义为夹角 $< -1.6^\circ$ ,足中着地定义为夹角 $-1.6^\circ \sim 8^\circ$ ,后跟着地定义为夹角 $> 8^\circ$ [15]。

(2) 踝关节角度:通过计算相邻两个环节局部坐标之间的欧拉角来得到支撑期内踝关节的触地角度、最大(背屈)/最小(跖屈)角度和关节活动度。其中,下肢三关节以静态站立时的关节角度为 $0^\circ$ ,正值代表踝关节背屈;负值代表踝关节跖屈。

(3) 踝关节最大/最小力矩:支撑相阶段,由踝关节周围肌群产生跖屈/背屈运动的扭矩。

(4) 踝关节刚度( $k_{joint}$ ):在外力的作用下,踝关节活动度与所施加的力矩之间的关系。

$$k_{joint} = \Delta M / ROM \quad (3)$$

式中: $\Delta M$ 为支撑相阶段踝关节力矩的变化量;ROM为踝关节角度的变化量。

表2 两组跑者踝关节运动学和动力学差异

Tab. 2 Differences of ankle kinematics and kinetics between two groups of runners

参数	对照组( $n=14$ )	实验组( $n=14$ )	$P$	Cohen's $d$	95%置信区间
足触地角度/ $(^\circ)$	13.4 $\pm$ 3.2	-4.5 $\pm$ 3.1	<0.001	5.709	[15.528; 20.421]
背屈角度峰值/ $(^\circ)$	15.1 $\pm$ 3.5	11.4 $\pm$ 6.1	0.057	0.744	[-0.122; 7.621]
跖屈角度峰值/ $(^\circ)$	12.6 $\pm$ 6.0	17.5 $\pm$ 8.9	0.098	-0.645	[-0.967; 10.809]
关节活动度/ $(^\circ)$	27.7 $\pm$ 4.6	28.9 $\pm$ 5.0	0.525	-0.250	[-4.912; 2.569]
背屈力矩峰值/ $(N \cdot m \cdot kg^{-1})$	0.5 $\pm$ 0.4	0.1 $\pm$ 0.1	0.011	1.372	[0.074; 0.528]
跖屈力矩峰值/ $(N \cdot m \cdot kg^{-1})$	2.8 $\pm$ 0.3	3.5 $\pm$ 0.4	<0.001	-2.155	[-0.991; -0.466]
关节刚度/ $[N \cdot m \cdot (kg \cdot ^\circ)^{-1}]$	0.10 $\pm$ 0.03	0.10 $\pm$ 0.02	0.356	0.355	[-0.010; 0.028]
功率峰值/ $(W \cdot kg^{-1})$	10.4 $\pm$ 2.1	13.2 $\pm$ 2.4	0.003	-1.237	[-4.595; -1.051]

## 2.2 跟腱形态学

实验组和对照组跟腱长度( $t_{(26)} = -0.474, P = 0.640, d = -0.179$ )、跟腱横截面积( $t_{(26)} = -0.621,$

(5) 踝关节功率峰值:由踝关节力矩与角速度的乘积获得。

## 1.6 统计方法

所得的参数值均采用(平均值 $\pm$ 标准差)表示。通过Shapiro-Wilk's检验数据是否符合正态分布。采用独立样本 $t$ 检验比较习惯后跟着地跑者组和习惯前掌着地跑者组的跟腱形态学、负荷特征(跟腱力、负载率峰值、冲量和应变峰值等)、矢状面踝关节运动学和动力学的差异,显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 踝关节运动学、动力学特征

实验组和对照组足触地角度均达到前掌着地和后跟着地的定义标准,即前掌着地定义为足触地角度 $< 1.6^\circ$ ,后跟着地定义为足触地角度 $> 8^\circ$ ,且习惯前掌着地跑者足触地角度显著小于习惯后跟着地跑者( $t_{(26)} = 15.104, P < 0.001, d = 5.709$ )。结果表明,习惯前掌着地跑者踝关节背屈力矩峰值( $t_{(26)} = 2.728, P = 0.011, d = 1.372$ )显著小于习惯后跟着地跑者,跖屈力矩峰值( $t_{(26)} = -5.702, P < 0.001, d = -2.155$ )和功率峰值( $t_{(26)} = -3.274, P = 0.003, d = -1.237$ )显著大于习惯后跟着地跑者。此外,其他踝关节指标差异均无统计学意义( $P > 0.05$ ),见表2。

$P = 0.540, d = -0.235$ )和跟腱厚度( $t_{(26)} = -0.778, P = 0.443, d = -0.294$ )的差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),见表3。

表3 两组跑者跟腱形态学差异

Tab. 3 Morphological differences of Achilles tendon between two groups of runners

参数	对照组( $n=14$ )	实验组( $n=14$ )	$P$	Cohen's $d$	95%置信区间
跟腱长/cm	19.8 $\pm$ 3.0	20.3 $\pm$ 2.5	0.640	-0.179	[-2.670; 1.670]
跟腱横截面积/ $mm^2$	61.0 $\pm$ 5.4	63.3 $\pm$ 9.6	0.443	-0.235	[-0.462; 0.248]
跟腱厚度/mm	4.8 $\pm$ 0.2	4.9 $\pm$ 0.6	0.540	-0.289	[-8.347; 3.761]

## 2.3 跟腱负荷特征

与习惯后跟着地跑者相比,习惯前掌着地跑者的跟腱力峰值( $t_{(26)} = -3.513, P = 0.002, d = -1.328$ )、平均负载率( $t_{(26)} = -4.266, P < 0.001, d = -1.612$ )、峰值

负载率( $t_{(26)} = -3.795, P < 0.001, d = -1.434$ )分别显著增加 26.1%、27.2%、47.2% 和 88.7% (见图 2)。此外,跟腱应力峰值和冲量在对照组和实验组之间差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),见表 4。

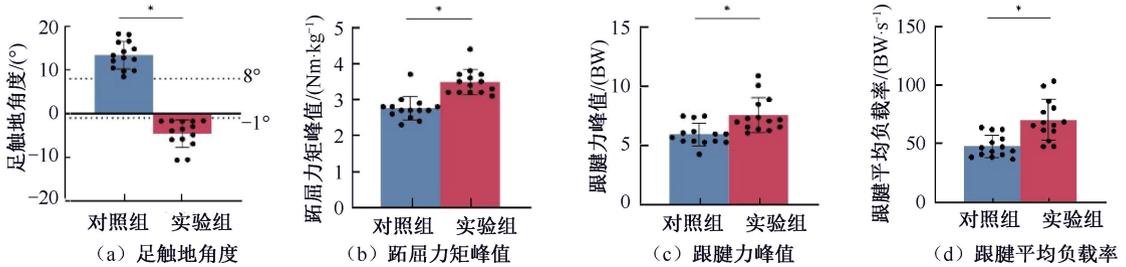


图 2 两组跑者跟腱负荷特征差异

Fig. 2 Differences in loading characteristics of Achilles tendon between two groups of runners (a) Foot strike angle, (b) Peak plantarflexion moment, (c) Peak force of Achilles tendon, (d) Average loading rate of Achilles tendon

注:足触地角度 $< 1.6^\circ$ 表示前掌着地,足触地角度 $> 8^\circ$ 表示后跟着地;圆点表示受试者个体数据点; \* $P < 0.05$ 。

表 4 两组跑者跑步时跟腱力学特性差异

Tab. 4 Mechanical differences of Achilles tendon between two groups of runners during running

参数	对照组 ( $n = 14$ )	实验组 ( $n = 14$ )	百分比变化量/%	$P$	Cohen's $d$	95% 置信区间
跟腱力臂/cm	4.9±0.3	5.1±0.1	—	0.002	-1.315	[-0.443; -0.114]
跟腱力峰值/BW	6.0±0.9	7.6±1.5	+27.2	0.002	-1.328	[-2.592; -0.679]
到达跟腱力峰值时间/ms	126.6±15.4	110.1±15.5	-13.1	0.009	1.068	[4.499; 28.529]
平均负载率/(BW·s <sup>-1</sup> )	47.8±9.4	70.3±17.4	+47.2	<0.001	-1.612	[-33.385; -11.672]
负载率峰值/(BW·s <sup>-1</sup> )	230.1±77.0	434.2±185.9	+88.7	<0.001	-1.434	[-314.720; -93.580]
跟腱应力峰值/MPa	70.3±7.3	77.8±17.7	+10.6	0.155	-0.554	[-17.998; 3.012]
跟腱冲量/(BW·s <sup>-1</sup> )	0.6±0.2	0.5±0.1	-14.9	0.198	0.499	[-0.476; 0.219]

注:百分比变化量为习惯前掌着地跑者组的跟腱参数比习惯后跟着地跑者组增加/减小的百分比。

## 3 讨论

本文比较了习惯后跟着地跑者和习惯前掌着地跑者的跟腱形态学特性与负荷特征差异。结果发现,与本研究假设一致,习惯前掌着地跑者的跖屈力矩、峰值跟腱力、平均/峰值负载率均显著大于习惯后跟着地跑者。而与本研究假设不一致的是,两组跑者的跟腱形态学特性,即跟腱长度、跟腱横截面积和跟腱厚度的差异无统计学意义。

Histen 等<sup>[6]</sup>研究发现,与习惯后跟着地跑者相比,习惯非后跟着地的跑步者表现出更大的跟腱横截面积。研究认为,与跑步相关的重复性肌腱负荷可以刺激肌腱的胶原蛋白等增加,从而使肌腱组织的纤维直径、纤维密度、蛋白多糖含量等发生变化,导致跟腱横截面积的增加<sup>[16-17]</sup>。然而,本文结果表明,习惯后跟着地跑者和习惯前掌着地跑者具有相似的跟腱形态学特性。这一结果支持 Kubo

等<sup>[18]</sup>的研究,他们通过比较习惯前掌着地跑者、习惯后跟着地跑者和习惯足中着地跑者的跟腱形态学发现,3组之间差异没有统计学意义。因此,在习惯前掌着地跑者中额外的跟腱负荷似乎不足以促进跟腱横截面积的显著性适应变化。此外,有研究发现,跟腱横截面积与体重呈正相关<sup>[16,19]</sup>,而本文纳入的受试者体重差异没有统计学意义。因此,两组跑者跟腱横截面积差异无统计学意义可能也受限于体重,即在一定的体重范围内,跟腱横截面积不会无限地增加。

本文进一步比较了跑步时不同着地模式下跟腱负荷特征,结果发现,以 10 km/h ( $\pm 5\%$ ) 的速度跑步时,跟腱力峰值范围在 6~8 BW 之间。这与 Almonroeder 等<sup>[20]</sup>在 3.7 m/s ( $\pm 5\%$ ) 速度下估计的跟腱力峰值(6~7 BW)和 Edwards 等<sup>[21]</sup>在 4.4 m/s ( $\pm 5\%$ ) 速度下估计的跟腱力峰值(7~8 BW)相似。

需要注意的是,上述研究在跑步过程中所计算得到的跟腱力主要是跖屈力矩(主动)所产生的结果。而跟腱力的准确计算受到着地过程中力矩的综合影响,包括主动产生的跖屈力矩以及背屈力矩的拮抗作用。虽然本文沿用了常见的跟腱力计算方法,但建议在未来的研究中更加细致地探究跟腱力的计算方法,以反映不同力矩在跑步着地中的综合影响。本文结果表明,习惯前掌着地跑者的跟腱力(+27.2%)、跟腱平均负载率(+47.2%)和峰值负载率(+88.7%)显著高于习惯后跟着地跑者。该结果与文献[20, 22]结果相似,即习惯非后跟着地跑者比习惯后跟着地跑者表现出更大的跟腱力。而增加的跟腱力被认为主要受到更大的跖屈力矩的影响。本文结果也表明,习惯前掌着地跑者在支撑相阶段的跖屈力矩显著增加了26.1%。尽管习惯不同着地模式对整个支撑相阶段踝关节活动度无显著性影响,但对支撑相前中期的踝关节角度变化较为明显。具体而言,与后跟着地跑时踝关节由背屈状态过渡至跖屈状态相比,采用前掌着地跑时踝关节在刚触地时就进入跖屈状态,使得小腿三头肌被更早且更大程度地激活<sup>[13]</sup>。本文结果也显示,习惯前掌着地跑者具有更高的踝关节功率峰值,这意味着在给定速度下,前掌着地跑者具有更高的产力能力。此时,跟腱随着小腿三头肌的收缩而拉长,并在随后的蹬伸阶段更有效地释放弹性势能。Arampatzis等<sup>[23]</sup>研究表明,施加在人体跟腱上的应变应该超过1个给定的阈值,才能对跟腱的力学和形态学特性产生适应性,而施加低强度应变(2.5%~3.0%)不足以刺激跟腱产生适应性。因此,长期的前掌着地跑步模式更可能通过重复性的“拉长-收缩”力学刺激以诱发跟腱在负荷上的适应性变化,表明前掌着地跑者可以承受更高的跟腱负荷。但与之相对应,当组织承受的负荷超过其能力时,可能会发生损伤<sup>[24]</sup>。由于前掌着地对小腿肌肉力量的要求更高,与其他损伤部位相比,习惯前掌着地跑者的小腿后侧肌群损伤(主要是小腿三头肌损伤)可能性要高2.6倍<sup>[25]</sup>。此外,需要注意的是,本文作为横断面研究,究竟是着地模式不同导致跟腱力的差异,还是具有更高跟腱力的跑者选择采用前掌着地模式,在未来研究中需要进一步明确。

考虑到跟腱对负荷的典型适应性,本文假设作

用于跟腱的更大的力学刺激会伴随跟腱横截面积的增加,从而导致跟腱应力的增加。然而,本研究中受试者并没有表现出这种适应性,尽管习惯前掌着地跑者具有更高的跟腱应力(+10.6%),但在统计学上两组之间差异的没有统计学意义。尽管本文仅招募男性跑者作为研究对象,但相似的结果也出现在Kernozek等<sup>[26]</sup>探讨女性跑者跟腱应力的研究中。此外,本文发现,尽管习惯前掌着地的跑者跟腱力峰值显著大于习惯后跟着地跑者,但两组跑者跟腱力冲量差异没有统计学意义。该结果与Rice等<sup>[7]</sup>的研究结果类似,在穿着极简鞋的条件下,前掌着地比后跟着地具有更大的跟腱力冲量,但在一般缓冲跑鞋或裸足中却没有观察到这一现象;而本研究中,受试者均穿着缓冲跑鞋。因此,综合本研究 and 先前的研究表明,跟腱力冲量受到鞋条件和足着地模式的双重影响。

本研究也存在一定的局限性:① 招募的所有受试者均为男性,未考虑性别差异对跟腱的影响,因而女性跑者是否会表现出同样的跟腱差异尚不清楚。② 跟腱横截面积在跑步过程中会发生较大的变化,无法在运动过程中实时测得跟腱横截面积的变化是目前跟腱相关研究所普遍面临的挑战。建议未来研究探索运动过程中跟腱形态学(如横截面积)的实时测量方法以获得更为直观的数据。③ 考虑到控制实验变量,选择了统一的实验跑鞋,而非跑者日常习惯穿着的跑鞋。尽管给予受试者充分的时间适应跑鞋,但在一定程度上可能会对实验结果产生影响。

## 4 结论

不同着地模式对跟腱形态学特征影响不显著,但是对跟腱负荷特征影响显著,具体表现为:习惯前掌着地跑者跑步时的跖屈力矩峰值、跟腱力、平均/峰值负载率均显著大于习惯后跟着地跑者。本研究结果提示,长期的前掌着地模式可以适应性地提高跟腱在重复性的“拉长-收缩”循环刺激中的力学特性,使其在支撑相阶段承受更高的负荷。对于健康跑者,建议制定科学合理的前掌跑训练计划,以加强跟腱的力学特性,从而有效降低跟腱损伤的风险。而对于已经存在跟腱损伤的跑者,采用后跟着地方式可以有效减轻着地时对跟腱的冲击和负荷,有助于降低跟腱受力,从而实现跟腱的保护作用。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:张希妮负责研究设计、数据统计分析和论文撰写;邓力勤、肖松林协助研究实施和数据采集;傅维杰负责论文指导和修改。

### 参考文献:

- [ 1 ] BRAMBLE DM, LIEBERMAN DE. Endurance running and the evolution of Homo [ J ]. Nature, 2004, 432 ( 7015 ): 345-352.
- [ 2 ] 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.
- [ 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 ] 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.
- [ 5 ] COOK JL, PURDAM CR. Is tendon pathology a continuum? A pathology model to explain the clinical presentation of load-induced tendinopathy [ J ]. Br J Sports Med, 2009, 43(6): 409-416.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] RICE H, PATEL M. Manipulation of foot strike and footwear increases Achilles tendon loading during running [ J ]. Am J Sports Med, 2017, 45(10): 2411-2417.
- [ 8 ] 张希妮, 邓力勤, 肖松林, 等. 不同鞋条件对后跟着地跑者跟腱负荷特征的影响 [ J ]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 797-804.
- ZHANG XN, DENG LQ, XIAO SL, *et al.* Effects of different shoe conditions on achilles tendon loading in runners with habitual rearfoot strike patterns [ J ]. J Med Biomech, 2021, 36(5): 797-804.
- [ 9 ] LAGAS IF, FOKKEMA T, VERHAAR JAN, *et al.* Incidence of Achilles tendinopathy and associated risk factors in recreational runners; A large prospective cohort study [ J ]. J Sci Med Sport, 2020, 23(5): 448-452.
- [ 10 ] 武楷承, 邓力勤, 张希妮, 等. 男性长跑跑者和非跑者内侧腓肠肌-跟腱复合体形态学差异 [ J ]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 374.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] ZHANG X, DENG L, YANG Y, *et al.* Acute shoe effects on Achilles tendon loading in runners with habitual rearfoot strike pattern [ J ]. Gait Posture, 2020, 82: 322-328.
- [ 13 ] 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.
- [ 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): 495-501.
- [ 15 ] SWINNEN W, HOOGKAMER W, DELABASTITA T, *et al.* Effect of habitual foot-strike pattern on the gastrocnemius medialis muscle-tendon interaction and muscle force production during running [ J ]. J Appl Physiol, 2019, 126 ( 3 ): 708-716.
- [ 16 ] MAGNUSSON SP, BEYER N, ABRAHAMSEN H, *et al.* Increased cross-sectional area and reduced tensile stress of the Achilles tendon in elderly compared with young women [ J ]. J Gerontol A Biol Sci Med Sci, 2003, 58(2): 123-127.
- [ 17 ] MAGNUSSON SP, KJAER M. The impact of loading, unloading, ageing and injury on the human tendon [ J ]. J Physiol, 2019, 597(5): 1283-1298.
- [ 18 ] KUBO K, MIYAZAKI D, TANAKA S, *et al.* Relationship between Achilles tendon properties and foot strike patterns in long-distance runners [ J ]. J Sports Sci, 2015, 33(7): 665-669.
- [ 19 ] KUDRON C, CARLSON M J, MERON A, *et al.* Using ultrasound measurement of the Achilles tendon in asymptomatic runners to assist in predicting tendinopathy [ J ]. J Ultrasound Med, 2020, 39(3): 491-496.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] EDWARDS WB, GILLETTE JC, THOMAS JM, *et al.* Internal femoral forces and moments during running: Implications for stress fracture development [ J ]. Clin Biomech, 2008, 23(10): 1269-1278.
- [ 22 ] KULMALA JP, AVELA J, PASANEN K, *et al.* Forefoot strikers exhibit lower running-induced knee loading than rearfoot strikers [ J ]. Med Sci Sports Exerc, 2013, 45 ( 12 ): 2306-2313.
- [ 23 ] 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( Pt 15 ): 2743-2753.
- [ 24 ] SHIH Y, LIN KL, SHIANG TY. Is the foot striking pattern more important than barefoot or shod conditions in running? [ J ]. Gait Posture, 2013, 38(3): 490-494.
- [ 25 ] HOLLANDER K, JOHNSON CD, OUTERLEYS J, *et al.* Multifactorial determinants of running injury locations in 550 injured recreational runners [ J ]. Med Sci Sports Exerc, 2021, 53(1): 102-107.
- [ 26 ] 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: 283-287.