

·运动人体科学·

## 跑姿再训练对跟腱形态学及等长收缩下跖屈力矩、 跟腱力学特性的影响

邓力勤, 张希妮, 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:** 探究 12 周跑姿再训练(GR)对等长收缩时踝关节跖屈力矩、跟腱形态学及力学特性的影响, 以期为提高跟腱传递力、预防和减少跑者跟腱损伤风险提供有效训练方法。将受试者随机分为 GR 组和对照组(CON 组), 完成干预的受试者共 34 人, 其中 GR 组 20 人, CON 组 14 人。GR 组穿着极简鞋进行前掌跑训练, CON 组穿着原有跑鞋并保持原有的跑姿及强度进行跑步。干预前后使用超声影像联合等长收缩量化受试者跟腱长度及横截面积、跖屈力矩、峰值跖屈发力率、跟腱力、应力和应变。使用双因素重复测量方差分析进行统计。结果: 12 周跑姿再训练后, 踝关节跖屈力矩存在时间的主效应( $P<0.01$ ), 其中训练后 GR 组跖屈力矩增大的比例比 CON 组高 17.1%; 跟腱横截面积存在组别主效应( $P<0.05$ ), 其中 GR 组的跟腱横截面积显著大于 CON 组横截面积, 训练后 GR 组横截面积增大的比例比 CON 组高 5.3%; 跟腱力峰值存在时间主效应( $P<0.01$ ), 其中训练后 GR 组跟腱力峰值增大的比例比 CON 组高 17.1%。结论: 12 周循序渐进的跑姿再训练可以作为一种有效的干预手段, 以增强踝关节屈肌力量, 提高跟腱承载负荷和传递力的能力。

**关键词:** 运动生物力学; 跑姿再训练; 超声影像; 跟腱; 跖屈力矩; 形态学; 力学特性  
**中图分类号:** G804.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7116(2021)01-0139-06

### The effect of gait retraining on achilles tendon morphology, plantar flexion moment and achilles tendon mechanical properties during isometric contraction

DENG Li-qin, ZHANG Xi-ni, XIAO Song-lin, YANG Yang, FU Wei-jie

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

**Abstract:** The effects of 12-week gait retraining(GR) on Achilles tendon (AT) morphology, the plantarflexion moment and AT mechanical properties during maximal voluntary isometric contraction were explored in this study in order to increase the ability to transmit force and provide effective training methods decreasing and preventing the AT injuries. Participants were randomly divided into the GR group and control (CON) group. In total, 34 participants completed the intervention, with 20 in the GR group and 14 in the CON group. The GR group ran with forefoot strike pattern (FFS) with minimal shoes, while the CON group was trained with their own original running shoes and keep the original foot strike pattern and exercising intensities. The morphological properties of AT, namely, length and cross-sectional area (CSA) were obtained by ultrasound, and the Con-Trex dynamometer was used simultaneously to measure and calculate plantarflexion torque, rate of torque development, stress and strain of AT before and after training. Two-way repeated ANOVA was used to analyze data. Results are as follows: after

收稿日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11772201,11932013); 上海市“曙光学者”计划(19SG47); 上海市人才发展基金资助计划(2018107); 上海市体育科技“全民健身计划”项目(20Q005)。

作者简介: 邓力勤(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 运动生物力学。E-mail: 920719006@qq.com 通信作者: 傅维杰

12-week gait retraining, the significant time effect of the plantarflexion torque was found ( $P < 0.01$ ), specifically, the rate of increase of plantarflexion torque in the GR was 17.1% more than it in the CON group; 2) the significant group effect of the CSA was observed ( $P < 0.05$ ), specifically, the CSA of the GR group was significantly larger than the CON group, the rate of increase of CSA in the GR was 5.3 % more than it in CON group; 3) the Achilles tendon force was found ( $P < 0.01$ ), specifically, the rate of increase of plantarflexion torque in the GR was 17.1% more than it in CON group. Conclusion are as follows: the step-by-step 12-week gait retraining could be considered as an effective training method to enhance the muscle strength of the ankle, AT mechanical properties, and the loading ability.

**Key words:** sports biomechanics; gait retraining; ultrasound; achilles tendon; plantarflexion torque; morphology; mechanical properties

近年来,随着“健康中国 2030”的颁布实施,大众对运动健康的需求与日俱增,其中,参与跑步的健身群体正飞速壮大。据中国田径协会发布的大数据分析报告显示,2019 年中国马拉松各项赛事的参与者达到了 712.56 万人次<sup>[1]</sup>。跑步有诸多益处,如增强心肺功能、减少心血管疾病发生的风险等<sup>[2]</sup>。然而,研究表明 79%以上的长距离跑者会经历损伤<sup>[3]</sup>,而跟腱损伤率为 10%,位居所有跑步相关损伤的第 2 位<sup>[4]</sup>。

跟腱作为人体最大的肌腱,一方面,它是足-鞋界面最大的弹性结构,能将小腿三头肌收缩产生的力量传递到足部,在走、跑时储存和释放能量<sup>[5]</sup>;另一方面,跑步过程中跟腱承受的重复高负荷<sup>[6]</sup>和非同源性载荷、跟腱过劳后没有充分恢复<sup>[7]</sup>、跑者踝关节力量和灵活性差<sup>[8]</sup>都与跟腱损伤息息相关。最新的研究表明:跟腱对力学环境敏感,负荷过大和不足都会对跟腱产生不利的影响,而“甜点(sweet spot)”范围内的力学刺激才能促进其胶原纤维的合成代谢以避免跟腱退化或损伤<sup>[6]</sup>。因此,制定针对跟腱的合理训练方案,将有利于改善跟腱的力学特性、提高跟腱承受负荷的能力<sup>[9]</sup>。

近年来,跑步着地方式以及跑姿再训练(gait retraining, GR)引起生物力学界的广泛关注,如前掌着地跑姿(forefoot strike pattern, FFS)有降低冲击力和负载率峰值、提高跑步经济性等益处<sup>[3, 10-13]</sup>。与此同时,使用 FFS 时,踝关节屈肌激活水平的提高会增加跟腱的负荷<sup>[14]</sup>,这对跟腱的适应性变化以及内平衡至关重要<sup>[3]</sup>。与此同时,本团队前期发现:12 周的跑姿控制训练能显著改善跑步时小腿三头肌的激活并提高跟腱力<sup>[7]</sup>。据此,进一步推测:循序渐进的跑姿再训练对跟腱力学特性能够产生适应性变化。

因此,本研究探究 12 周跑姿再训练对跟腱形态学特征和等长收缩时跖屈力矩及发力率、跟腱力学特性的影响,以期为提高跟腱传递力、跟腱承载负荷的能力、预防跑者跟腱损伤提供建议。研究假设:12 周跑姿再训练后,跑者的跖屈力矩及发力率、跟腱横截面

积,等长收缩时的跟腱力、应力、应变等均有显著性提高。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

采用 G\*power(版本:3.1.9.6)对样本量进行重复测量方差分析的事前估算,设定检验效能为 0.8,效应量为 0.25(ANOVA 中等效应),显著性水平为 0.05,计算出最低样本量为 34<sup>[15]</sup>。本研究共招募 42 名受试者,均自愿参与实验。受试者的纳入标准为近 3 个月无明显下肢损伤以及神经肌肉疾病,习惯穿着缓冲鞋进行后跟跑(rearfoot strike pattern, RFS),且从未尝试过穿着极简鞋进行前掌跑,近 3 个月周跑量大于 15 km。

共 34 名受试者完成 12 周跑姿再训练,其中 GR 组 20 人,年龄( $31.3 \pm 3.5$  岁),身高( $175.7 \pm 2.6$ )cm,体质量( $70.9 \pm 3.8$ )kg;对照(CON)组 14 人,年龄( $26.6 \pm 5.8$ )岁,身高( $175.6 \pm 2.3$ )cm,体质量( $72.7 \pm 4.3$ )kg。在前测中发现 1 人为前掌触地跑,即被排除。8 名受试者流失(GR 组 7 名,CON 组 1 名),流失率为 19%。其中 1 名受试者由于意外导致踝关节扭伤,4 名受试者缺席超过 1 周的训练而被排除,2 名受试者由于手机软件云记录与个人日记不符(训练时长、频率以及跑姿)而被排除。

### 1.2 实验流程

12 周跑姿再训练前,所有受试者需到实验室进行前测。受试者登记基本信息、填写《知情同意书》。实验开始之前,要求受试者更换短裤。

1)热身。要求受试者在跑台上以 12 km/h 的速度进行 5 min 热身。

2)静态跟腱形态学测试。测试时要求受试者俯卧于治疗台上,使其踝关节处于中立位(足与小腿夹角  $90^\circ$ )<sup>[7]</sup>。由一名指定测试人员使用 M7 Super 超声影像仪(Mindray, 中国)配合 ML6-15-D 线阵超声探头确定跟骨位置和跟腱起止点以测量其跟腱长度,并将探头置

于跟骨上 10 cm 位置, 获取跟腱横截面图像。

3) MVIC 时的跟腱形态学和力学特征的测试。要求受试者坐于 Con-Trex 等速肌力测试仪(Con-Trex Mj, 德国)上, 臀部和后背紧贴座位, 膝关节完全伸展, 踝关节处于中立位, 在固定大小腿后, 进行踝关节跖屈最大等长收缩, 采集 3 次, 每次测试保持 5 s<sup>[7]</sup>。同步采集踝关节跖屈力矩以及在体跟腱长度变化图像和数据。前测完成后, 随机将受试者分为 GR 组和 CON 组进行干预, 训练结束后重复上述测试。

### 1.3 跑姿再训练方案

GR 组受试者穿着 INOV-8 BARE-XF 210 极简跑鞋(平均质量 227 g, 3 mm 橡胶外底, 无中底, 前后落差 0 mm)进行训练, 要求受试者采用 FFS, 但允许后跟的随后落地, 尽量使得足落于髌关节下方<sup>[7]</sup>。通过内嵌传感器的 Podoon 压感智能鞋垫配套手机软件监测受试者的着地方式。要求受试者以中等自选速度进行跑步, 干预持续 12 周, 每周训练 3 次, 每次训练时长按阶梯式增长, 即初始训练时间为 5 min, 1~8 周训练时长每周增长 5 min, 8~12 周训练时长每周增长 2 min。受试者每周总跑步距离与训练前一致, 跑姿再训练仅代替一部分训练量, 其余时间按照平时训练的强度与习惯跑姿进行。上述具体训练方案以及监督措施可参考本团队以往研究<sup>[7, 10-11]</sup>。

CON 组受试者穿着自用运动鞋保持原有的跑姿和相应运动强度进行跑步。

### 1.4 实验参数

1) 踝关节最大跖屈力矩。使用 Con-Trex 等速肌力测试仪获取等长收缩时的踝关节最大跖屈力矩( $M_{max}$ )<sup>[7]</sup>。

2) 峰值跖屈发力率(RTD<sub>max</sub>)。其中跖屈发力率为等速肌力测试仪获取并计算踝关节跖屈力矩曲线的斜率, 即跖屈力矩的一阶导数<sup>[16]</sup>, 其计算公式为:  $RTD_{max}(t_i)$

$= (M(t_{i+1}) - M(t_i)) / ((t_{i+1}) - (t_i))$ 。其中:  $M$  为跖屈力矩,  $t_i$  为跖屈时的某个时刻。

3) 跟腱横截面积。采用超声影像仪获取跟腱横截面(CSA)图像, 并使用 Image J 软件(NIH, 美国)计算跟腱横截面积<sup>[17]</sup>。

4) 跟腱静息长度。采用超声影像仪确定跟腱插入点以及比目鱼肌-跟腱结合点的位置, 随后使用直尺测量跟腱插入点与比目鱼肌-跟腱结合点之间的距离(即跟腱静息长度,  $L_{AT}$ )<sup>[7]</sup>。

5) 跟腱长度变化量( $\Delta L$ )。从静息状态到跖屈最大等长收缩时肌肉-跟腱结合点的长度变化量。

6) 跟腱峰力。跟腱力( $F_{AT}$ )= $M_{max}/TA_{AT}$ , 其中  $TA_{AT}$  为跟腱力臂, 为 Komi 等人采用的跟腱力力臂默认值 0.05 m<sup>[17, 18]</sup>。取最大值为跟腱力峰值。

7) 跟腱应力( $\sigma$ )= $F_{AT}/CSA$ <sup>[7, 19]</sup>。

8) 跟腱应变( $\varepsilon$ )= $\Delta L/L_{AT}$ <sup>[7, 19]</sup>。

### 1.5 统计方法

所有数据均采用平均值  $\pm$  标准差表示。采用独立样本  $t$  检验比较前测时 GR 组和 CON 组的跖屈力矩、峰值跖屈发力率、跟腱横截面积、跟腱长度、长度变化量、应力、应变、跟腱力峰值。采用双因素(组别  $\times$  训练前后)重复测量方差分析(two-way repeated measures ANOVA, SPSS 21.0)分析 12 周跑姿再训练对跖屈力矩、跟腱横截面积、跟腱力、跟腱应力、应变等参数的影响。对于存在交互效应的参数, 事后检验采用简单效应分析。

## 2 结果与分析

训练前, GR 组和 CON 组的跖屈力矩、峰值跖屈发力率、跟腱横截面积、跟腱长度、长度变化量、应力、应变、跟腱力峰值均无显著性差异(见表 1)。

表 1 两组跖屈力矩、发力率、跟腱形态学、力学特性前测数据( $\bar{x} \pm s$ )比较

组别	跖屈力矩 (Nm·kg <sup>-1</sup> )	峰值跖屈发 力率/(Nm·s <sup>-1</sup> )	横截面 积/mm <sup>2</sup>	跟腱长 度/mm	跟腱长度变 化量/mm	跟腱应 力/MPa	跟腱应 变/%	跟腱力峰 值/BW
GR 组	1.6±0.5	273.5±79.7	61.9±9.5	77.4±18.1	15.9±6.5	38.6±13.8	21.9±11.6	3.4±1.2
CON 组	1.7±0.4	241.0±82.8	56.8±7.1	76.9±12.5	16.4±4.9	42.2±11.2	21.9±7.7	3.65±0.79
$P$ 值	0.540	0.258	0.094	0.940	0.839	0.423	0.998	0.540

12 周训练后, 等长收缩时踝关节跖屈力矩及发力率没有显著交互效应(见图 1)。踝关节跖屈力矩存在时间的主效应( $P < 0.01$ ), 其中, 训练后 GR 组跖屈力矩增大的比例比 CON 组高 17.1%(见图 1)。

12 周训练后, 所有跟腱形态学参数(跟腱长度、等

长收缩时的长度变化量和跟腱横截面积)均没有显著交互效应(见图 2)。跟腱横截面积存在组别主效应( $P < 0.05$ ): GR 组的跟腱横截面积显著大于 CON 组横截面积(见图 2), 其中, 训练后 GR 组横截面积增大的比例比 CON 组高 5.3%。

12 周训练后,等长收缩时的跟腱力学性质参数(跟腱力、应力和应变)没有显著交互效应(见图 3)。跟腱

力峰值存在时间主效应( $P<0.05$ ),其中,训练后 GR 组跟腱力增大的比例比 CON 组高 17.1%(见图 3)。

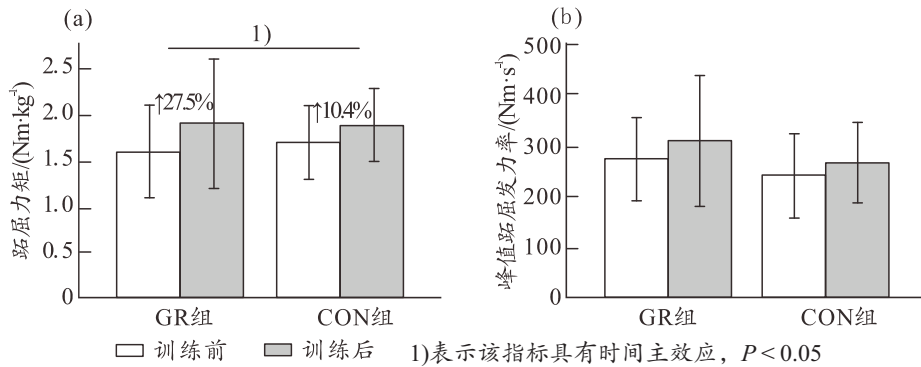


图 1 12 周跑姿再训练对踝关节跖屈力矩(a)及峰值发力率(b)的影响

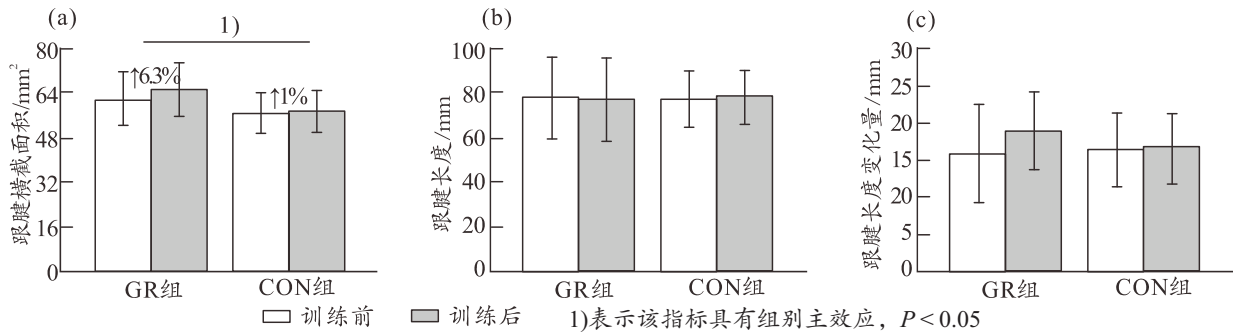


图 2 12 周跑姿再训练对踝关节跟腱横截面积(a)、跟腱长度(b)及跟腱长度变化量(c)的影响

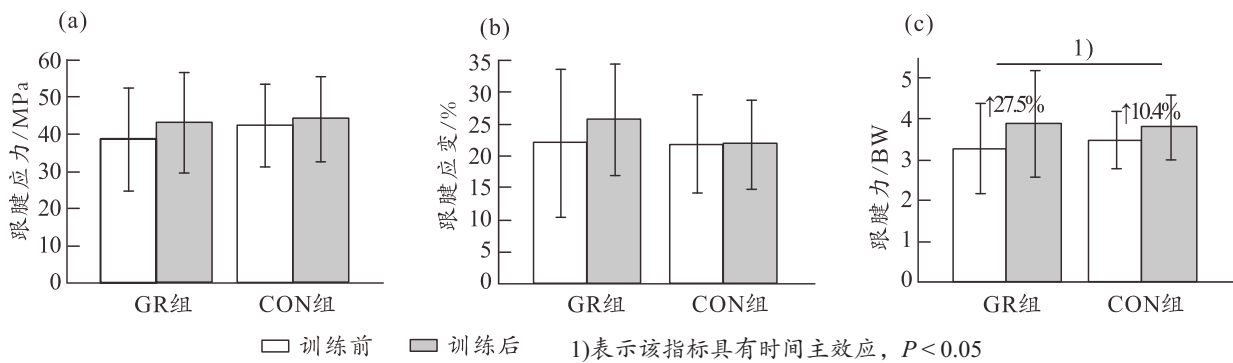


图 3 12 周跑姿再训练对跟腱应力(a)、应变(b)及跟腱力(c)的影响

### 3 讨论

本研究采用循序渐进 12 周跑姿再训练干预方案,以期增强踝关节屈肌力量、跟腱力学特性,提高跟腱承载负荷的能力,为提高跟腱传递力及预防跟腱损伤风险提供新视角。与研究假设一致,12 周跑姿再训练后跖屈力矩和跟腱力峰值有显著性提高,跑者的跖屈发力率、跟腱横截面积、等长收缩时跟腱应力有增加趋势( $P<0.1$ )。但跟腱长度、长度变化量和等长收缩时跟腱应变无显著性变化,这与研究假设并不一致。

本研究发现,12 周跑姿再训练后,跑者等长收缩

时的踝关节的跖屈力矩以及跟腱力峰值显著增加,其中 GR 组跖屈力矩和跟腱力峰值增加了 27.5%,而 CON 组仅增加 10.4%。该发现支持前人研究结果:跑姿再训练或裸足跑干预训练后,跑者的跖屈力矩、跟腱力显著增高<sup>[14, 20]</sup>。原因可能为:相比 RFS, FFS 模式下触地时小腿三头肌需收缩产生更大的跖屈力矩以抵抗地面反作用力产生的背屈力矩<sup>[3]</sup>。12 周跑姿训练后跖屈力矩的增加,表明训练可增加踝关节屈肌力量。踝关节力量薄弱是跟腱损伤的风险因素之一<sup>[8, 21]</sup>,踝关节屈肌力量的增加提示该训练方案能在一定程度上减少由于

踝关节力量薄弱而引起的跟腱损伤风险。此外, 作为评价爆发力的指标之一, 跖屈发力率与跑跳项目的运动表现(如纵跳高度、跑步时的最大速度)呈高度正相关<sup>[22]</sup>。本研究结果显示峰值跖屈发力率在训练前后有增加的趋势( $P=0.074$ ), 对于长跑跑者来说, 12 周跑姿再训练的负荷刺激能增加跖屈发力率, 这有利于提升蹬伸期踝关节肌肉的爆发力从而提升蹬伸效率, 而跟腱作为传递小腿三头肌力量的关键结构, 蹬伸效率的提高意味着跟腱传递力的效率可能更高。同时, 日常活动中跟腱承受的负荷不足以使跟腱产生适应性变化, 而在一定范围内的更高负荷才能对跟腱力学特性和内稳态产生积极影响并使跟腱进一步适应<sup>[23]</sup>。训练后跟腱力的增加提示, 12 周跑姿再训练为跟腱提供了更大的负荷刺激。但值得注意的是, 非后足触地跑步时跟腱负荷以及冲量会代偿性地增加, 这可能增加了跟腱损伤的风险<sup>[24]</sup>。在本研究中, 尽管训练后的峰值跟腱力有显著性增加, 但没有受试者因训练受伤。由此, 12 周跑姿再训练能有效提高跟腱的力学刺激<sup>[5]</sup>, 且循序渐进的训练强度一定程度上可以防止由于训练引起的跟腱损伤。

研究表明, 由于跑者承受的负荷刺激更大, 其胶原蛋白转率的增加可以引起跟腱的适应性肥大<sup>[25]</sup>, 所以相较于非跑者, 跑者的跟腱横截面积更大<sup>[26]</sup>。本研究证明, 12 周跑姿再训练后 GR 组跟腱横截面积显著大于 CON 组。这说明与保持原有跑姿的 CON 组相比, FFS 增加了 GR 组的跟腱负荷刺激, 这种重复的负荷会急剧增加胶原蛋白的标记物以及肌腱中 I 型胶原的净合成, 从而使跟腱产生适应性肥大<sup>[26]</sup>。Joseph 等<sup>[14]</sup>的研究表明 12 周前掌跑结合步频增加的干预训练后跟腱横截面积显著增加, 但是本研究结果显示跟腱横截面积的差异仅存在组别主效应, 训练前后的跟腱横截面积仅表明有变化的趋势, 结果的差异可能是干预训练强度方案的差异导致的。此外, 由于跟腱代谢速度较慢, 需要更长时间以及更大的负荷以引起横截面积的显著性改变<sup>[7]</sup>。Arampatzis 等<sup>[27]</sup>对跟腱进行等长收缩训练的系列研究证实了这点。

本研究显示, 训练前后等长收缩时跟腱应力及应变没有显著性变化。总体而言, 应力同时受跟腱力和跟腱横截面积的影响<sup>[7]</sup>。12 周跑姿再训练后, GR 组跟腱力峰值增加的同时跟腱横截面积也有显著增加的趋势, 而应力没有显著性变化可能与上述两者在数值上均增加有关。这也从另一个侧面说明: 训练后, 由于跟腱在受到长期力学刺激后产生的适应性变化, 同等应力条件下, 其可以承受更大的负荷, 即跟腱承载负荷的能力有所增强。此外, 应力和应变是跟腱损伤的

重要风险因素<sup>[28]</sup>, 过大的应力可能会导致跟腱退化以及跟腱胶原纤维的微断裂<sup>[29]</sup>。本研究中, 跟腱应力无显著性变化这一结果提示, 在循序渐进的 12 周跑姿再训练后, 即使跟腱力峰值有显著性增加, 跟腱也不会由于应力过大造成损伤。

值得注意的是, 12 周跑姿再训练未导致受试者损伤, 提示本研究中所采用的训练方案是一种安全的训练方案, 循序渐进地增加训练负荷可以避免由于前掌着地跑时增加的跟腱负荷而引起的损伤。相比于前人研究的离心训练有耗时长以及会引起踝关节疼痛等缺点<sup>[30]</sup>, 短期转变跑姿等训练方案会引起腓绳肌和小腿三头肌损伤<sup>[31]</sup>, 采用 12 周循序渐进的跑姿再训练方案可以相对安全且有效地改善跟腱承受负荷和传递力的能力。这为跑者提供了跟腱的预先强化、减少跟腱损伤风险的训练方案, 具有一定的理论和应用价值。

本研究通过超声影像联合等速肌力测试仪探讨跑姿再训练对跟腱形态学以及等长收缩下踝关节跖屈力矩和跟腱力学特性的影响。结果显示 12 周跑姿再训练后, 两组跖屈力矩和跟腱力峰值显著高于训练前, 且 GR 组的跟腱横截面积显著大于 CON 组, 其中 GR 组跖屈力矩、跟腱横截面积以及跟腱力峰值的增大百分比比 CON 组的高 17.1%、5.3%、17.1%。以上提示 12 周跑姿再训练方案可以作为一种有效的干预手段, 增强踝关节跖屈肌力量、提高跟腱承载负荷和传递力的能力。

## 参考文献:

- [1] 中国田径协会发布《2019 中国马拉松大数据分析报告》[EB/OL]. [2020-09-10]. <http://www.athletics.org.cn/marathon/news/2020/0501/320203.html>.
- [2] FRIES, JAMES F. Running and the development of disability with age[J]. *Ann Intern Med*, 1994, 121(7): 502.
- [3] DAVIS I S, RICE H M, WEARING S C. Why forefoot striking in minimal shoes might positively change the course of running injuries[J]. *J Sport Health Sci*, 2017, 6(2): 154-161.
- [4] FRANCIS P, WHATMAN C, SHEERIN K, et al. The proportion of lower limb running injuries by gender, anatomical location and specific pathology: A systematic review[J]. *J Sports Sci Med*, 2019, 18(1): 21-31.
- [5] CIGOJA S, ASMUSSEN M J, FIRMINER C R, et al. The effects of increased midsole bending stiffness of sport shoes on muscle-tendon unit shortening and shortening velocity: A randomised crossover trial in recreational male runners[J]. *Sports Med Open*, 2020, 6(1): 9.

- [6] PIZZOLATO C, LLOYD D G, ZHENG M H, et al. Finding the sweet spot via personalised achilles tendon training: The future is within reach[J]. *Br J Sports Med*, 2019, 53(1): 11-12.
- [7] 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.
- [8] WINNICKI K, OCHALA-KLOS A, RUTOWICZ B, et al. Functional anatomy, histology and biomechanics of the human achilles tendon-a comprehensive review[J]. *Ann Anat*, 2020, 22910.
- [9] 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.
- [10] YANG Y, ZHANG X, LUO Z, et al. Alterations in running biomechanics after 12 week gait retraining with minimalist shoes[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(3).
- [11] WANG B, YANG Y, ZHANG X, et al. Twelve-week gait retraining reduced patellofemoral joint stress during running in male recreational runners[J]. *Biomed Res Int*, 2020, 20209723563.
- [12] SANTOS-CONCEJERO J, TAM N, GRANADOS C, et al. Interaction effects of stride angle and strike pattern on running economy[J]. *Int J Sports Med*, 2014, 35(13): 1118-1123.
- [13] 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.
- [14] JOSEPH M F, 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.
- [15] FAUL F, ERDFELDER E, LANG A G, et al. G\*power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences[J]. *Behav Res Methods*, 2007, 39(2): 175-191.
- [16] STAFILIDIS S, SICKINGER C. Anterior subject positioning affects the maximal exerted isometric plantar flexion moment[J]. *PLoS One*, 2019, 14(7): e0219840.
- [17] 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.
- [18] KOMI P V. Relevance of in vivo force measurements to human biomechanics[J]. *J Biomech*, 1990, 23(Suppl): 123-34.
- [19] JOSEPH M F, LILLIE K R, BERGERON D J, et al. Measuring achilles tendon mechanical properties: A reliable, noninvasive method[J]. *J Strength Cond Res*, 2012, 26(8): 2017-2020.
- [20] PERL D P, DAOUD A I, LIEBERMAN D E. Effects of footwear and strike type on running economy[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(7): 1335-1343.
- [21] DAOUD A I, GEISSLER G J, WANG F, et al. Foot strike and injury rates in endurance runners: A retrospective study[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(7): 1325-1334.
- [22] GRINDSTAFF T L, PALIMENIO M R, FRANCO M, et al. Optimizing between-session reliability for quadriceps peak torque and rate of torque development measures[J]. *J Strength Cond Res*, 2019, 33(7): 1840-1847.
- [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] WEI Z, ZHANG Z, JIANG J, et al. Comparison of plantar loads among runners with different strike patterns[J]. *J Sports Sci*, 2019, 37(18): 2152-2158.
- [25] MAAS E, JONKERS I, PEERS K, et al. Achilles tendon adaptation and achilles tendinopathy in running[J]. *Oa Orthopaedics*, 2014.
- [26] MAGNUSSON S P, 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.
- [27] 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.
- [28] LYGHT M, NOCKERTS M, KERNOZEK T W, et al. Effects of foot strike and step frequency on achilles tendon stress during running[J]. *J Appl Biomech*, 2016, 32(4): 365-372.
- [29] THUESEN A H. Rearfoot biomechanics in achilles tendon function[D]. Salford: University of Salford, 2015.
- [30] GEREMIA J M, BARONI B M, BINI R R, et al. Triceps surae muscle architecture adaptations to eccentric training[J]. *Front Physiol*, 2019, 101456.
- [31] WARNE J P, SMYTH B P, FAGAN J O, et al. Kinetic changes during a six-week minimal footwear and gait-retraining intervention in runners[J]. *J Sports Sci*, 2017, 35(15): 1538-1546.