

文章编号: 1004-7220(2020)06-0665-07

# 跑姿再训练对冲击力、下肢生物力学及刚度的影响

杨洋, 张希妮, 罗震, 王熙, 傅维杰

(上海体育学院 运动健身科技部共建教育部重点实验室, 上海 200438)

**摘要:**目的 通过建立12周跑姿再训练(gait retraining, GR)的干预模式(即通过一定的姿态目标改变跑者原有跑姿),确定GR前后跑步时垂直地面反作用力(vertical ground reaction force, vGRF)以及髋、膝、踝三关节运动学、动力学和下肢刚度特征的变化,探究跑姿转换对冲击力和下肢生物力学的影响。**方法** 采用Vicon运动捕捉系统和Kistler三维测力台同步采集30名跑步爱好者(GR组15人,对照组15人)GR前后穿着极简鞋以12 km/h $\pm$ 5%速度通过测力台的GRF以及标记点轨迹。**结果** 共17名受试者(GR组9人,对照组8人)完成训练。训练后两组最大负载率都显著下降,GR组相比对照组最大负载率更低;GR组足部触地角度显著减小,两组跖屈角度和髋关节蹬伸角速度都显著增加;GR组踝关节力矩增加;两组下肢刚度均显著增加。**结论** 成功建立12周GR运动干预模型(前掌着地转化率为78%)。GR能有效避免冲击力峰值、降低最大负载率、提高下肢刚度,进而在减小甚至避免由冲击力引起的跑步损伤风险的同时,为提高跑步经济性提供可能。

**关键词:**跑姿再训练;跑步姿态;触地方式;极简鞋

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.06.003

## Effects of Gait Retraining on Impact Forces, Lower Limb Biomechanics and Leg Stiffness

YANG Yang, ZHANG Xini, LUO Zheng, WANG Xi, FU Weijie

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

**Abstract:** **Objective** By establishing the intervention mode of 12-week gait retraining (GR) (with the specific aim of changing the habitual running gait), to determine the changes of vertical ground reaction force (vGRF), kinematics and dynamics of hip, knee, ankle joints, as well as stiffness of lower limbs in running before and after GR, and to explore the influence of running posture transformation on impact force and lower limb biomechanics. **Methods** Vicon motion capture system and Kistler 3D force measurement platform were used to collect the GRF and marker track of 30 runners (15 in experimental group and 15 in control group) before and after GR with the minimalist shoes at a speed of 12 km/h $\pm$ 5%. **Results** A total of 17 subjects (9 in experimental group and 8 in control group) completed the GR. After GR, the maximum loading rate of both groups decreased significantly, and the maximum loading rate of experimental group was lower than that of control group. The foot strike angle in experimental group decreased significantly after GR, and the plantarflexion angle and hip joint angular extension velocity increased in both groups. The force moment of ankle joint increased in experimental group, and the

收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(11772201, 81572213), 国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2019YFF0302100, 2018YFF0300500), 上海市科委科研计划项目(17080503300), 上海市教委“曙光学者”计划(19SG47), 上海市人才发展基金资助计划(2018107)

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

stiffness of lower limbs was significantly improved in both groups. **Conclusions** A 12-week GR exercise intervention model was successfully established, with 78% conversion rate (from rearfoot strike to forefoot strike). GR can effectively avoid the peak of impact force, reduce the maximum loading rate, increase the lower limb stiffness, and thus reduce or even avoid the risk of running injury caused by impact force and may provide a possibility for the improvement of running economy.

**Key words:** gait retraining (GR); running pattern; strike pattern; minimalist shoes

跑步作为当今最流行和常见的运动方式,受到越来越多的人关注<sup>[1]</sup>。但是,跑步时每一次着地会承受2~3倍体质量的冲击负荷,被认为是引起过用性损伤的主要风险因素<sup>[2-4]</sup>。因此,探究如何减小跑步时的冲击力以及由此带来的冲击损伤,一直是相关领域所关心的热点问题<sup>[5-6]</sup>。现阶段,运动鞋减小跑步时的冲击效果并不明显<sup>[7-8]</sup>。近50年间,跑步的损伤率并没有因运动鞋缓冲科技的进步而发生显著的转变<sup>[9]</sup>。本团队前期研究发现,穿着强缓冲功能的运动鞋并不能有效改变人体在主动着地时的冲击力表现以及下肢肌群的肌肉激活程度<sup>[10-12]</sup>。因此,研究者们开始从跑步着地时下肢姿态控制角度来重新审视这一问题。

Lieberman等<sup>[13]</sup>研究认为,通过调节足底与地面接触时的倾斜角度(如前掌着地)可以减小下肢的有效质量,从而降低冲击损伤的风险;Daoud等<sup>[14]</sup>研究发现,使用这种前掌触地的跑姿冲击损伤发生率则较低。后续研究采用裸足或极简鞋的训练方式,以期达到前掌触地,从而实现降低下肢冲击损伤风险的效果<sup>[15-16]</sup>。值得思考的是,裸足并非是影响冲击力的关键,由其带来的跑步姿态改变才是影响冲击力及下肢生物力学的主要原因,而这显然需要建立在长时间的跑姿转换(gait transition)基础上<sup>[17]</sup>。

本文建立12周跑姿再训练(gait retraining, GR)的干预模式,确定GR前后跑步时垂直地面反作用力(vertical ground reaction force, vGRF)以及髌、膝、踝三关节运动学、动力学和下肢刚度特征的变化,探究跑姿转换对冲击力和下肢生物力学的影响,以期进一步揭示跑姿控制模式与下肢外力冲击之间互动反馈的调控作用和发生、发展机理,为实现从源头上预防跑步冲击损伤提供新的理论和实践基础。

## 1 方法

### 1.1 研究对象

招募男性受试者30人( $n=30$ ),随机分为GR组以及对照组,各15人。标准为跑步爱好者,习惯穿缓冲跑鞋且为后跟触地,年龄18~40岁。近4周每周跑步距离大于20 km。从未使用(仿)裸足鞋、五指鞋和比赛用钉鞋。实验前3个月内没有明显的下肢损伤。

### 1.2 实验仪器

两块瑞士Kistler三维测力台(型号9287C, 90 cm×60 cm×10 cm),外置信号放大器,采样频率1 kHz。10台Vicon三维红外摄像头及运动捕捉系统(型号T40)配套直径14 mm红外反光球,采样频率100 Hz。Witty-Manual光栅测速系统,用于控制实验中受试者的跑速。INOV-8 Bare-XF 210 V2极简鞋,鞋底厚度3 mm,无鞋中底,前后跟落差0 mm,质量为227 g。Podoon压感智能鞋垫,厚度3 mm,内嵌柔性薄膜压力传感器,便于对本实验中训练干预部分的前掌触地进行监控(见图1)。



图1 实验场地布置和实验用极简鞋

Fig.1 Experimental set-up and shoe for experiment

### 1.3 实验流程与步骤

① 训练前,受试者基本信息登记,签署知情同意书,进行相关体质测试,并告知实验流程。② 更换统一测试服装及极简鞋。③ 受试者在跑步机上

以中等强度自定义速度进行热身 5 min,之后在 12 km/h 实验速度下适应 2 min;休息 5 min 同时实验人员贴放标记点。④ 拍摄静态模型。听到口令后,受试者以 12 km/h $\pm$ 5% 速度通过跑道,完成 3 次优势侧(以踢球腿为优势侧)成功采集,重复步骤②~③。⑤ 完成全部测试后,替换受试者,重复以上实验。

#### 1.4 GR 方案

GR 组:通过一定的姿态目标改变跑者原有跑步姿态。受试者穿着极简鞋采用中等强度自选速度跑步,要求其在着地时采用前掌触地的方式。受试者通过穿着定制压感鞋垫所提供的声效反馈获知其触地方式。整个训练时长为渐进式,每周 3 次,共 12 周,每周跑步时间分别为 5、10、15、20、25、30、35、40、42、44、46、48 min(最后 4 周为避免运动量超出受试者原有运动量,故递增减缓)。干预方案只是替代部分的训练量,受试者原本的每周总跑步距离保持不变。所有受试者需要记录训练日志,每次跑步都需要穿着发放的极简鞋及压感鞋垫,实验人员通过云端数据与训练日志核对。纳入标准:全部按要求完成;累计间断训练未超过 3 次,同时全部按要求完成最后 3 周训练。训练中,允许受试者因受伤或者个人原因推迟或者退出。

对照组:受试者穿着极简鞋按照习惯的跑姿进行跑步训练,训练的时长同 GR 组。

#### 1.5 实验参数

**1.5.1 vGRF 参数** 选取触地阶段的第 1 峰值(first peak, FP)及其到达时间( $t_p$ )、负载率(load rate, LR)。其中,负载率采用第 1 峰值 20%~80% 的斜率;而当没有第 1 峰值时,采用步态周期 13% 作为代表值进行负载率计算<sup>[18-19]</sup>。

**1.5.2 运动学参数** 运动学数据采用 Butterworth 二阶双向低通滤波,频率 7 Hz<sup>[20]</sup>。基于人体骨骼模型定义下肢髋、膝、踝关节角度<sup>[21]</sup>并计算各关节的运动学特征(见图 2)。① 触地时间(contact time, CT):同一只脚从触地到离地的时间;② 关节角度:足部触地角度( $\theta_f$ );髋、膝和踝三关节触地角度( $\theta_0$ )、最大关节角度( $\theta_{max}$ )。其中,踝关节以静态站立时的踝关节角度为 0°,跖屈为负,背屈为正;关节角速度:髋、膝和踝三关节的触地角速度( $\omega_0$ )、最大蹬伸角速度( $\omega_p$ )。

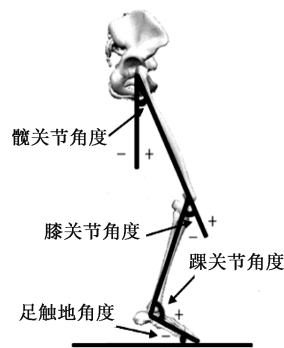


图 2 下肢关节角度示意图

Fig.2 Schematic of lower limb joint angle

**1.5.3 动力学参数** ① 关节力矩:在 V3D 软件中利用逆向动力学计算下肢髋、膝、踝关节由肌肉产生的净力矩,选取各关节蹬伸力矩峰值( $M_{max}$ )。② 关节蹬伸功率峰值( $P$ ):净关节力矩( $M$ )与关节角速度( $\omega$ )之积。

**1.5.4 刚度参数** 下肢刚度  $k_{leg} = GRF_i / \Delta y$ ,其中  $GRF_i$  为重心最低时刻的垂直地面反作用力, $\Delta y$  为离心期重心位移的垂直变化量<sup>[22]</sup>。

#### 1.6 统计方法

使用 SPSS 22.0 统计软件对数据进行分析,采用双因素重复测量方差分析比较时间因素(训练前、训练后)以及组别因素(GR 组、对照组)对上述主要参数变量的主效应和交互作用。存在交互作用时,使用配对样本和独立样本  $t$  检验进行具体分析<sup>[23]</sup>。显著性水平  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 受试者流失及损伤情况

表 1 所示为受试者具体信息。在训练干预过程中,有 2 人因伤退出(与训练无关),2 人因训练日志记录与云端数据无法匹配被排除,3 人失去联系,6 人因个人或其他原因退出或中断超过 1 周。最后共 17 人符合标准(GR 组  $n = 9$ ,对照组  $n = 8$ )纳入结果统计。

表 1 受试者基本情况 ( $n = 17$ )

Tab.1 Basic information of the subjects

分组	年龄/岁	身高/cm	体质量/kg	每周距离/km
GR 组( $n = 9$ )	32.4 $\pm$ 6.1	174.8 $\pm$ 5.3	70.2 $\pm$ 6.0	28.3 $\pm$ 11.2
对照组( $n = 8$ )	27.6 $\pm$ 5.2	173.9 $\pm$ 7.0	75.4 $\pm$ 11.7	26.9 $\pm$ 10.7
$P$	0.104	0.773	0.262	0.787

## 2.2 垂直地面反作用力

两组训练前后 vGRF 数据比较表明, GR 组 ( $P < 0.001$ ) 和对照组 ( $P = 0.017$ ) 在训练后负载率

都显著降低, 同时在训练后 GR 组 ( $P = 0.015$ ) 相比对照组的负载率更低。训练和组别对触地时间都没有显著影响(见表2)。

表2 训练前后地面反作用力对比

Tab.2 Comparison of ground reaction force before and after training

参数	GR 组		对照组	
	训练前	训练后	训练前	训练后
FP/BW	1.78±0.20	—	1.83±0.22	2.05±0.47
$t_{FP}/ms$	25.50±5.31	—	26.20±4.71	28.97±15.75
LR/(BW·s <sup>-1</sup> )	71.62±13.66 <sup>#</sup>	55.44±25.21 <sup>*</sup>	74.00±21.42 <sup>#</sup>	61.30±32.90
CT/ms	233.58±20.44	226.35±11.90	243.27±26.65	240.02±26.26

注: # 时间有显著影响; \* 该时间点下, 组别有显著影响,  $P < 0.005$

## 2.3 运动学结果

髋、膝、踝三关节矢状面运动学数据见表3。训练对足触地角度 ( $P = 0.026$ )、踝关节触地角度 ( $P = 0.011$ ) 以及髋关节蹬伸角速度 ( $P = 0.032$ ) 有显著主效应。其中, 踝关节触地时跖屈角度增大, 髋关节蹬伸角速度增大。对于足触地角度, 除了时间因素影响外, 还存在显著的时间×组别交互作用 ( $P = 0.013$ ), GR 组训练前后相比, 足部触地角度显著减小 ( $P = 0.015$ ), 而对照组没有差异。同时在训练后, GR 组的足部触地角度显著小于对照组 ( $P = 0.017$ ), 见图3。另外, 时间、组别对其

余参数都没有显著的主效应, 也没有任何显著的交互作用。

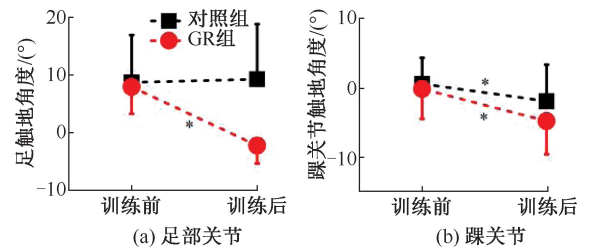


图3 训练前后关节触地角度对比

Fig.3 Comparison of foot strike angle before and after training

(a) Foot joint, (b) Ankle joint

表3 训练前后髋、膝、踝关节运动学变化

Tab.3 Kinematics changes of hip, knee and ankle before and after training

关节	参数	GR 组		对照组	
		训练前	训练后	训练前	训练后
踝	$\theta_f/(\circ)$	8.07±4.64 <sup>#&amp;</sup>	-2.21±3.09 <sup>#*</sup>	8.73±6.68	9.27±8.9
	$\theta_0/(\circ)$	-0.13±4.29 <sup>#</sup>	-4.73±4.79 <sup>*</sup>	0.61±3.76 <sup>#</sup>	-1.89±5.27
	$\theta_{max}/(\circ)$	17.48±4.76	16.92±4.78	15.91±2.51	16.58±3.38
	$\omega_0/[(\circ)\cdot s^{-1}]$	289.57±85.81	332.77±103.51	259.22±34.13	267.83±67.03
	$\omega_p/[(\circ)\cdot s^{-1}]$	-269.34±90.64	-245.00±60.65	-231.46±66.38	-213.37±44.05
膝	$\theta_0/(\circ)$	-13.56±5.60	-14.24±5.11	-14.17±4.01	-11.80±3.76
	$\theta_{max}/(\circ)$	-34.46±2.08	-35.41±4.75	-35.47±2.93	-36.15±4.62
	$\omega_0/[(\circ)\cdot s^{-1}]$	-96.83±35.33	-85.96±51.95	-85.80±39.66	-83.61±57.09
	$\omega_p/[(\circ)\cdot s^{-1}]$	103.52±34.96	109.21±26.37	90.68±40.83	74.21±22.57
	$\theta_0/(\circ)$	25.50±5.04	27.36±8.23	29.36±5.36	28.25±7.28
髋	$\theta_{max}/(\circ)$	-11.06±6.59	-10.74±7.30	-7.92±6.03	-9.73±6.71
	$\omega_0/[(\circ)\cdot s^{-1}]$	-82.08±29.88	-60.34±15.15	-64.37±43.64	-62.22±21.88
	$\omega_p/[(\circ)\cdot s^{-1}]$	95.49±39.13 <sup>#</sup>	109.99±26.54	100.45±26.82 <sup>#</sup>	125.73±28.51

注: # 时间有显著影响; & 时间×组别存在交互影响,  $P < 0.005$ ; \* 该时间点下, 组间存在显著性差异,  $P < 0.005$

## 2.4 动力学结果

时间对踝关节峰值力矩( $P<0.001$ )、膝关节峰值力矩( $P=0.004$ )、髌关节峰值功率( $P<0.001$ )存在显著主效应。训练后,两组膝关节峰值力矩与两组髌关节峰值功率显著减小。此外,时间 $\times$ 组别还对踝关节峰值力矩有显著的交互影响( $P=0.024$ ),GR组训练后踝关节峰值力矩显著增加( $P=0.001$ ),而对照组训练前后没有差异(见图4)。

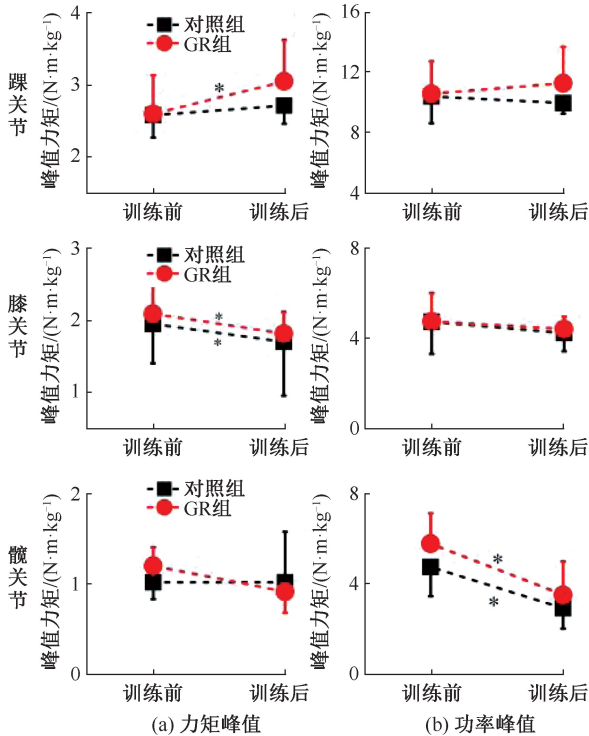


图4 训练前后髌、膝、踝三关节动力学参数对比

Fig.4 Comparison of dynamic parameters for hip, knee and ankle before and after training (a) Peak torque, (b) Peak power

## 2.5 下肢刚度

训练后,GR组(+17.2%)与对照组(+7.1%)的下肢刚度均显著增加( $P<0.05$ ),见图5。但是训练

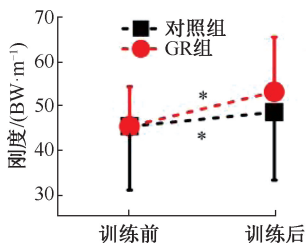


图5 训练前后两组下肢刚度对比

Fig.5 Comparison of lower limb stiffness between two groups before and after training

和组别对重心垂直位移和对应。GRF没有显著的主效应,同时不存在交互影响(见表5)。

表5 训练前后重心位移变化量( $\Delta y$ )以及最低点垂直地面反作用力

参数	GR组		对照组	
	训练前	训练后	训练前	训练后
GRF <sub>i</sub> /BW	2.61±0.30	2.71±0.31	2.55±0.28	2.60±0.27
$\Delta y/cm$	5.96±0.90	5.42±0.99	6.21±1.43	5.67±1.47

## 3 讨论

### 3.1 地面反作用力

冲击力被认为是下肢过用性损伤主要原因。本文研究表明,GR能有效改善冲击力,此结果支持文献[2-4]的研究结论。具体表现为:GR组( $n=9$ )中有7人转变为前掌触地。Lieberman等<sup>[13]</sup>认为,冲击力大小主要依赖于下肢的有效质量,而前掌触地可以通过调节足部触地时足部与地面的夹角来减小有效质量,从而避免由后跟触地带来的高冲击。另外,负载率是在跑步着地时十分敏感的冲击力指标<sup>[2-4]</sup>。在本研究中,两组的负载率在训练后都显著下降。对于GR组而言,推测原因是跑姿转换后,触地方式改变从而避免了冲击力第1峰值,进而减小了负载率,这与其他相关研究的结果类似<sup>[2-4,18-19,23-24]</sup>。而对照组在没有进行跑姿转换的情况下出现显著减小的负载率,推测与人体改变鞋条件后的适应策略有关<sup>[15-16]</sup>。在训练后,GR组的负载率相比对照组更低,表明即便可以通过适应鞋条件的训练方法来减小负载率,但是有明确“目标”的GR训练效果更为显著,提示GR能更好配合极简鞋在降低负载率同时,避免冲击力峰值。

### 3.2 运动学

从运动学来看,GR组会显现出更靠近足前掌的触地方式,具体表现为足部触地角度在训练后减小了约 $10.3^\circ$ ,但在对照组中并未发生类似的情况。对GR组而言,该结果符合前掌触地这一触地方式的特点,也是跑姿转换训练效果的体现<sup>[13]</sup>。GR组在经过12周的训练后,触地方式与裸足跑的人群更加接近。而对照组经过12周后,并没有因为鞋条件的改变而发生触地方式的改变。McCarthy等<sup>[16]</sup>研

究发现,所有后跟触地的受试者在采取极简鞋的适应性训练后都采用了非后跟触地的触地方式,其中包括前掌和中足触地。但是本研究中并没有出现类似结果,这可能是由于具体的训练方案和受试者性别、年龄等不同的原因而造成。虽然只有GR组的触地方式发生了显著改变,但训练后两组触地时都更倾向于踝关节跖屈。对GR组而言,更大的跖屈角度是前掌触地的自然表现<sup>[13,24-25]</sup>。而在本研究中,GR组的跖屈角度变化相对于触地角度的变化并不大(10.3° vs 4.8°),表明GR组受试者可能并非通过单纯增加跖屈角度来实现前掌触地。结合触地时膝、髌关节角度没有显著变化,提示GR组受试者在训练后除了增加踝关节的跖屈以外,可能同时通过调整足部落地时相对身体的位置以及躯干的前倾来达到前掌触地,而非单纯的“踮脚尖”跑步<sup>[13]</sup>。同时,该结果也提示在拥有明确“目标”的情况下,跑者的跑姿转换相比单纯适应鞋条件的方法要有效且快速,并且身体的其他部位可能会同时进行相应的调整,从而达到这一“目标”。

### 3.3 动力学和下肢刚度

从动力学角度而言,GR组在训练后踝关节力矩峰值显著上升,而对照组在训练前后没有显著差异。这一现象是由于GR组在训练后触地方式发生转变,在使用前掌触地的情况下,推测地面反作用力的压力中心更靠前足前部,从而使得力臂增加,进而使得踝关节力矩上升。Warne等<sup>[23]</sup>研究发现,跑姿转换训练后,踝关节在缓冲阶段的刚度没有显著变化,这说明虽然踝关节所承受的力矩峰值上升,但是人体通过在触地时踝关节跖屈增加了缓冲阶段的踝关节活动范围,从而保持与训练前相近的关节刚度。训练后,GR组和对照组的膝关节峰值力矩都发生明显下降。与穿鞋情况相比,极简鞋情况下,膝关节的力矩和刚度都会减小<sup>[23]</sup>,即在裸足情况下,跑者的膝关节更倾向于软着陆的方式。本研究中,训练后两组的髌关节峰值功率都显著下降。Williams等<sup>[26]</sup>研究发现,受试者采用穿鞋前掌跑和裸足跑时,髌关节功率相比穿鞋后跟跑时都显著下降,这与本研究训练后的结果十分相似,这一即刻影响在训练后依旧延续了下来。本研究发现,无论是对照组还是GR组,下肢刚度在训练后都显著提高,而下肢刚度被认为与跑步经济和能量利用

率有关<sup>[27]</sup>。研究认为,下肢刚度越高,能量利用率会越高。这一结果也提示训练可能会提升跑步时的运动表现。另外,本研究发现,重心位移和最低点vGRF在训练前后并没有显著性的变化,提示下肢刚度这一综合指标对评价训练效果具备更高的敏感性。另外,两组间踝关节动力学的差异较大,而膝、髌关节呈现类似的趋势,这与本文运动学结果中提到的训练效果十分相似,即GR组的明确“目标”促使他们的训练效果更好。

由于训练时间长,后期训练难度大,导致受试者流失较多。虽然训练采用云端数据监控,同时配合日志记录进行排查,但是每个人对动作的学习能力不同,导致训练效果存在一定个体差异。

## 4 结论

本文通过采用前掌着地方式配合极简鞋的穿着,成功建立了12周GR的运动干预模型,使原本后跟着地跑者转换为前掌着地(转化率为78%)。具体表现为:①GR能更有效地避免冲击力峰值、降低最大负载率,进而可以减小由冲击力所引起的跑步损伤的风险;②下肢刚度显著提高,提示GR为跑步经济性及相应能量利用率的提升提供可能;③GR更强的目的性使得其训练效果(即跑姿转换的效率)更高。

### 参考文献:

- [1] BRAMBLE DM, LIEBERMAN DE. Endurance running and the evolution of Homo [J]. *Nature*, 2004, 432(7015): 345-352.
- [2] MILNER CE, FERBER R, POLLARD CD, *et al.* Biomechanical factors associated with tibial stress fracture in female runners [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2006, 38(2): 323-328.
- [3] POHL MB, HAMILL J, DAVIS IS. Biomechanical and anatomic factors associated with a history of plantar fasciitis in female runners [J]. *Clin J Sport Med*, 2009, 19(5): 372-376.
- [4] GENT RN, SIEM D, MIDDELKOOP M, *et al.* Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: A systematic review [J]. *Br J Sports Med*, 2007, 41(8): 469-480.
- [5] FU W, LIU Y, ZHANG S. Effects of footwear on impact forces and soft tissue vibrations during drop jumps and unanticipated drop landings [J]. *Int J Sports Med*, 2013,

- 34(6): 477-83.
- [ 6 ] FU W, WANG X, LIU Y. Impact-induced soft-tissue vibrations associate with muscle activation in human landing movements: An accelerometry and EMG evaluation [ J ]. *Technol Health Care*, 2015, 23(s2): S179-S187.
- [ 7 ] DINATO RC, RIBEIRO AP, BUTUGAN MK, *et al.* Biomechanical variables and perception of comfort in running shoes with different cushioning technologies [ J ]. *J Sci Med Sport*, 2015, 18(1): 93-97.
- [ 8 ] THEISEN D, MALISOUX L, GENIN J, *et al.* Influence of midsole hardness of standard cushioned shoes on running-related injury risk [ J ]. *Br J Sports Med*, 2014, 48(5): 371-376.
- [ 9 ] NIGG BM. The role of impact forces and foot pronation: A new paradigm [ J ]. *Clin J Sport Med*, 2001, 11(1): 9-2.
- [ 10 ] WANG X, ZHANG S, FU W. Changes in impact signals and muscle activity in response to different shoe and landing conditions [ J ]. *J Hum Kinet*, 2017, 56(1): 5-18.
- [ 11 ] FU W, FANG Y, GU Y, *et al.* Shoe cushioning reduces impact and muscle activation during landings from unexpected, but not self-initiated, drops [ J ]. *J Sci Med Sport*, 2017, 20(10): 915-920.
- [ 12 ] 傅维杰, 刘宇, 魏书涛. 篮球鞋对主动与被动落地时冲击力特征和肌肉活化的影响 [ J ]. *医用生物力学*, 2012, 27(3): 317-323.
- FU WJ, LIU Y, WEI ST. Influence of basketball shoes on impact force and muscle activation during active and passive landing [ J ]. *J Med Biomech*, 2012, 27(3): 317-323.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] DAOUD AI, GEISLER GJ, 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.
- [ 15 ] MULLEN S, COTTON J, BECHTOLD M, *et al.* Barefoot running: The effects of an 8-week barefoot training program [ J ]. *Orthop J Sports Med*, 2014, 2(3): 1-5.
- [ 16 ] MCCARTHY C, FLEMING N, DONNE B, *et al.* 12 weeks of simulated barefoot running changes foot-strike patterns in female runners [ J ]. *Int J Sports Med*, 2014, 35(5): 443-450.
- [ 17 ] WILLSON JD, BJORHUS JS, WILLIAMS DS, *et al.* Short-term changes in running mechanics and foot strike pattern after introduction to minimalistic footwear [ J ]. *PM R*, 2014, 6(1): 34-43.
- [ 18 ] BLACKMORE T, WILLY RW, CREABY MW. The high frequency component of the vertical ground reaction force is a valid surrogate measure of the impact peak [ J ]. *J Biomech*, 2016, 49(3): 479-483.
- [ 19 ] SAMAAN CD, RAINBOW MJ, DAVIS IS. Reduction in ground reaction force variables with instructed barefoot running [ J ]. *J Sport Health Sci*, 2014, 3(2): 143-151.
- [ 20 ] 李路, 傅维杰, 王熙, 等. 鞋中底屈曲刚度对跳跃动作下肢和跖趾关节生物力学及关节能量特征的影响 [ J ]. *中国运动医学杂志*, 2016, 35(6): 527-534.
- [ 21 ] RUI X, ZHANG X, WANG X, *et al.* Effects of two fatigue protocols on impact forces and lower extremity kinematics during drop landings: Implications for non-contact anterior cruciate ligament injury [ J ]. *J Healthc Eng*, 2017, doi: 10.1155/2017/5690519.
- [ 22 ] LIU Y, PENG CH, WEI SH, *et al.* Active leg stiffness and energy stored in the muscles during maximal counter movement jump in the aged [ J ]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2006, 16(4): 342-351.
- [ 23 ] WARNE JP, SMYTH BP, FAGAN JO, *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.
- [ 24 ] 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 shoe conditions and foot-strike patterns on foot force characteristic during jogging [ J ]. *J Med Biomech*, 2017, 32(2): 154-160.
- [ 25 ] BONACCI J, SAUNDERS PU, HICKS A, *et al.* Running in a minimalist and lightweight shoe is not the same as running barefoot: A biomechanical study [ J ]. *Br J Sports Med*, 2013, 47(6): 387-392.
- [ 26 ] BLAISE WILLIAMS DS, GREEN DH, WURZINGER B. Changes in lower extremity movement and power absorption during forefoot striking and barefoot running [ J ]. *Int J Sports Phys Ther*, 2012, 7(5): 525-532.
- [ 27 ] PERL DP, DAOUD AI, LIEBERMAN DE. Effects of footwear and strike type on running economy [ J ]. *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(7): 1335-1343.