

·运动人体科学·

不同极简指数跑鞋对髌股关节受力特征的影响

杨宸灏, 杨洋, 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: 聚焦跑步时髌股关节生物力学特征, 探究穿着不同极简指数(MI)跑鞋对髌股关节接触力、应力等的即刻影响。选取 15 名习惯后跟着地的健康男性跑者, 分别穿着两种 MI 跑鞋(MI 86% 极简跑鞋和 MI 26% 缓冲跑鞋), 使用 Vicon 红外运动捕捉系统、Kistler 三维测力台同步采集 3.33 m/s(速度变化范围 $\pm 5\%$)跑速下的膝、踝关节运动学和地面反作用力, 通过逆向动力学等计算股四头肌肌力、髌股关节接触力、髌股关节接触面积以及髌股关节接触应力。结果显示: 两种跑鞋条件下的冲击力峰值和蹬地力峰值均无明显差异。与缓冲跑鞋相比, 穿着极简跑鞋跑步时, 膝关节最大屈曲角度显著降低($P < 0.01$); 髌股关节接触面积显著减小($P < 0.01$); 膝关节伸肌峰值力矩显著下降($P < 0.01$); 髌股关节接触力和应力峰值均显著减小($P < 0.05$)。研究表明, 相比缓冲跑鞋, 穿着极简跑鞋在未影响触地后冲击力峰值的同时, 通过降低伸膝力矩大幅度减少髌股关节接触力(下降 17.02%)、降低髌股关节接触应力, 从而有效改善支撑期髌股关节负荷, 为进一步减小髌股关节疼痛综合征风险提供可能。

关 键 词: 运动生物力学; 髌股关节; 髌股关节疼痛综合征; 髌股关节应力; 运动鞋
中图分类号: G804.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7116(2020)01-0132-07

Effects of running shoes with different minimalist indexes on the biomechanical characteristics of the patellofemoral joint

YANG Chen-hao, YANG Yang, ZHANG Xi-ni, WANG Jun-qing, FU Wei-jie

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

Abstract: In order to study the biomechanical characteristics of the patellofemoral joint during running, and to probe into the instant effects of running shoes with different minimalist indexes on the contact force and stress etc of the patellofemoral joint, the authors selected 15 healthy male runners who were used to heel landing, respectively wearing running shoes with two minimalist indexes (minimalist running shoes with a minimalist index of 85%, and cushioned running shoes with a minimalist index of 26%), used the Vicon infrared motion capture system and Kistler 3D force platform to simultaneously acquire the kinematic data of the knee and ankle joint and ground reaction forces under a running speed of 3.33m/s (speed varying range: $\pm 5\%$), and calculated quadriceps strength, patellofemoral joint contact force, patellofemoral joint contact area, and patellofemoral joint contact stress by means of reverse dynamics etc. The results show the followings: the peak impact forces and peak ground hitting forces under the conditions of the two types of running shoes had no significant differences; as compared to cushioned running shoes, when running with minimalist running shoes: 1) the maximum flexion angle of the knee joint decreased significantly ($P < 0.01$); 2) the knee joint contact area decreased significantly ($P < 0.01$); 3) the peak torque of the knee joint extensor decreased significantly ($P < 0.01$); 4) the peak values of the patellofemoral joint contact force and stress decreased significantly ($P < 0.05$). This study indicates that as compared to cushioned running shoes, wearing

收稿日期: 2019-07-15

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(17050503300); 上海市人才发展基金资助计划(2018107)。

作者简介: 杨宸灏(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 运动生物力学。E-mail: slimch@qq.com 通讯作者: 傅维杰

minimalist running shoes significantly decreases patellofemoral joint contact force (by 17.02%) and reduces patellofemoral joint contact stress by reducing knee joint extensor torque, while not affecting the peak impact force after ground contracting, thus effectively improving patellofemoral joint loads in the supporting period, and providing a possibility to further reduce the risk of patellofemoral joint pain syndrome.

Key words: sports biomechanics; patellofemoral joint; patellofemoral joint pain syndrome; patellofemoral joint stress; sports shoes

随着人民生活水平不断提高,《“健康中国 2030”规划纲要》颁发实施,标志着全民健身时代的到来。数以亿计公民参与到体育运动中来,跑步则是其中最受热捧的一项运动^[1]。近几年马拉松赛事数量以及参与人数持续走高,随着跑步热潮的到来随之而来的损伤不可避免。最近的统计表明,膝关节疼痛依然是跑步中最常见的损伤:在参加上海国际马拉松 800 名跑者的调查中^[2],膝关节损伤的总发病率高达 23%。Taunton 等^[3]对 2 002 名跑步损伤患者的调查发现,过劳性损伤——髌股关节疼痛综合征(patellofemoral joint pain syndrome, PFPS)的发病率最高,为 16.5%,而髌股关节应力(patellofemoral joint stress, PFJS)增大是重要的致病因素之一^[4]。膝关节结构复杂,周围肌肉软组织共同维持髌骨的稳定性,而任何力学的改变均有可能使髌股关节周围受力分配产生改变。研究指出,具有髌股关节痛的患者具有不同跑步生物力学特征^[5]。所以,跑步时膝关节力矩以及髌股关节接触力和应力的改变可能影响 PFPS 的发病率。相应地,过劳损伤的机理是由于肌肉与骨骼重复高负荷工作的累积效应^[6],这就意味着若是膝关节负荷有一定程度的降低,则长时间跑步对膝关节累积效应可能将大大减小。

随着科技的不断发展,各种新材料与新设计运用于运动鞋特别是中底结构之中,并声称能够减小对下肢的负荷。诚然,不同运动鞋的特殊力学结构可改变人体的受力特点。对于健康跑者,穿着不同运动鞋能影响步频、触地角度、垂直负载率、关节受力等下肢生物力学特征^[7]。而近年来裸足跑逐渐流行,诸多跑者选择能够达到仿裸足效果的极简跑鞋,实际上这种运动鞋没有太多的缓冲结构,仅起到基本保护作用。大量研究已经证明极简跑鞋能改变下肢着地姿态,但主要集中在足踝关节的适应上,如触地时足与地面夹角改变、触地方式更趋向于前掌触地以及踝关节的肌肉和韧带适应性变化,如小腿三头肌和跟腱^[8-11]。目前针对膝关节负荷的研究则相对较少,进而限制了理解运动鞋与膝关节,特别是与髌股关节受力特征之间的关系。因此,本研究聚焦跑步时髌股关节的生物力学特征,探究穿着不同极简指数^[12](minimalist index, MI)跑鞋(MI 86%极简跑鞋和 MI 26%缓冲跑鞋)对髌股关节接触力

(patellofemoral contact force, PFCF)、应力(PFJS)等的即刻影响,以期通过改变跑鞋条件来降低 PFPS 的发病风险。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

实验招募受试者 15 名,受试者均为健康男性业余跑者(年龄 (31.4 ± 6.6) 岁、身高 (174.7 ± 6.3) cm、体质量 (73.2 ± 9.8) kg、平均周跑量 (30.6 ± 9.5) km),近一个月内周跑量均大于 20 km,跑姿均为后跟着地。另外,所有跑者均习惯穿着具有缓冲功能的运动鞋,并且没有裸足跑或穿着其他特殊运动鞋的经历(如五指鞋、极简跑鞋、比赛用钉鞋等)。实验开始之前,为确保受试者 3 个月之内没有骨骼肌肉损伤病史,每名受试者都需要自愿填写基本信息问卷并签订知情同意书。

1.2 研究方法

1) 运动鞋选取。

Esculier 等^[12]为跑鞋的简易程度制定了标准,提出 MI 以区分不同跑鞋的极简程度。根据指南,通过质量、鞋跟厚度、前掌与后跟落差、辅助稳定结构、柔韧性 5 个方面评分对跑鞋 MI 进行计算。其中,辅助稳定结构包括:多密度中底、中底热塑材料、硬质后跟、足弓支持结构内底、鞋面中部收紧支持结构、中底外扩结构;柔韧性包括卷曲柔韧性与扭转柔韧性。MI 越高则反映跑鞋的简易程度越高。

本实验中,极简跑鞋使用 INOV-8 Bare-XF 210 V2 系列,该运动鞋的外底采用 Inov 公司专利黏性橡胶,厚度约 3 mm,无任何中底缓冲结构。鞋面为网状合成材料,轻盈透气且贴合脚面,利于跑步时脚趾的运动。该鞋前掌、后跟落差为 0 mm,42 码质量为 227 g,MI=86%。缓冲跑鞋使用 Nike Air Zoom Pegasus 34 轻质运动鞋,该运动鞋的中底采用 EVA 泡棉并在前掌和后跟中设置有 Zoom Air 气垫,鞋前掌与后跟的落差为 7 mm,42 码质量为 285 g,MI=26%。跑者穿着两种运动鞋时袜子均穿着 Nike Dri-FIT 运动袜,以排除其他足底缓冲条件带来的干扰。两种实验跑鞋具体 MI 对比如表 1 所示。

表 1 两种跑鞋规格和极简指数比较

| 鞋类 | 42 码鞋质量 | | 鞋跟 | | 前掌与后跟 | | 辅助稳定结构 | | 柔韧性 | | | MI ²⁾ /% |
|----|---------|-----|-------|-----|-------|-----|-------------------|-----|--------|--------|-----|------------------------|
| | 质量/g | 子评分 | 厚度/mm | 子评分 | 落差/mm | 子评分 | 有或无 | 子评分 | 卷曲/(°) | 扭转/(°) | 子评分 | |
| 极简 | 227 | 2 | 3 | 5 | 0 | 5 | 无 | 5 | 360 | 360 | 4.5 | 86 |
| 缓冲 | 285 | 1 | 30 | 1 | 7 | 2 | 4 种 ¹⁾ | 1 | 45~90 | 0~45 | 1.5 | 26 |

1) 4 种辅助稳定结构为: 多密度中底、硬质后跟、鞋面中部收紧支持结构、中底外扩结构; 2) MI=子评分和 $\times 4 \times 100\%$

2) 实验仪器。

(1) 瑞士生产 Kistler 三维测力台 2 台, 型号 9287B, 90 cm \times 60 cm \times 10 cm, 外置信号放大器。该测力台可测量跑步时三维地面反作用力(ground reaction force, GRF)。本研究使用的采样频率为 1 000 Hz(见图 1)。

(2) 英国产 VICON 三维高速红外摄像捕捉系统。本研究使用 10 台三维红外摄像头(型号 T40)同步记录受

试者下肢髌、膝、踝 3 关节骨性标志处的反光球轨迹(见图 1), 用于计算运动学参数。本研究使用的采样频率为 100 Hz 并与测力台同步采集。

(3) 跑速测量采用意大利 Micro gate 公司生产的 Witty-Manual 光栅测速系统。光栅计时起点与终点距离 4 m, 跨越测力台区域(见图 1)。

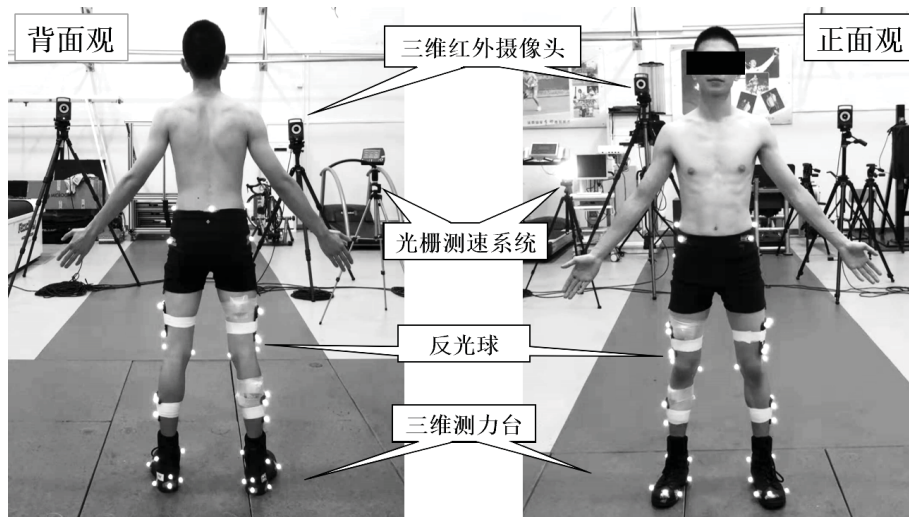


图 1 实验环境及红外反光球的放置位置

3) 实验流程。

首先, 受试者了解实验流程并签署相关问卷与知情同意书。更换统一的运动服装后, 在骨盆和下肢关节骨性标志点设置反光 marker 球。跑步实验前受试者穿着实验用鞋以自选跑速在跑步机上进行 5 min 热身跑, 之后进行 1 min 的 3.33 m/s 实验跑速适应。准备活动完成后, 受试者根据生成的随机表穿着极简跑鞋与缓冲跑鞋中的一种, 以目标速度跑过 4 m 长的实验跑道, 之后换另一双鞋完成相同测试。跑道中设置有两块 Kistler 测力台, 并由光栅测速系统测量其跑速。满足以下 3 种情况时, 视为一次成功实验: (1) 通过测速区间速度为 3.33 m/s(速度变化范围 $\pm 5\%$); (2) 测得受试者优势腿后跟触地到离地整个过程均在同一块测力台上; (3) 运动鞋触地采集 GRF 过程中与台面相对滑

动。2 种鞋各成功采集 3 次数据并用其平均值进行后续数据分析。

1.3 参数计算与统计学方法

1) 评价参数与计算方法。

一般通过膝关节伸肌力矩峰值、髌股关节接触力(PFCF)和髌股关节应力(PFJS)峰值的大小来评估跑步时膝关节负荷^[13-15]。本研究使用采集的地面反作用力与反光球轨迹数据在 Visual 3D v3 软件中建立三维模型, 以计算跑者触地阶段垂直 GRF 的冲击力和蹬地力、膝关节力矩等动力学参数, 以及膝关节屈曲角度 θ 、踝关节角度和足与地面的夹角等运动学参数, 并根据足触地角度确定跑者触地方式。支撑期的相关参数进行时间上的标准化(0~100%), 并以平均值绘制成曲线, 比较整个支撑期不同极简指数跑鞋条件下膝关

节各力学参数的变化差异情况。另外, PFCF、PFJS 以及相关参数通过参考文献[13, 15]进行计算, 具体方法如下:

“髌股关节接触面积(S_{PFCA} , 单位: mm^2)为矢状面膝关节角度函数:

$$S_{PFCA} = 0.0781 \times \theta_i^2 \times \theta_i + 151.75$$

其中, θ_i 为膝关节矢状面屈曲角度。”

股四头肌有效力臂(L_A , 单位: m)为矢状面膝关节角度函数:

$$L_A = \begin{cases} 0.036\theta_i + 3.0 & (0^\circ \leq \theta_i < 30^\circ) \\ -0.043\theta_i + 5.4 & (30^\circ \leq \theta_i < 60^\circ) \\ -0.027\theta_i + 4.3 & (60^\circ \leq \theta_i < 90^\circ) \\ 2.0 & (90^\circ \leq \theta_i) \end{cases}$$

股四头肌肌力(F_Q , 单位: N):

$$F_Q(\theta_i) = \frac{M_{EXT}(\theta_i)}{L_A(\theta_i)}$$

其中, M_{EXT} 为膝关节伸膝力矩(单位: $\text{N}\cdot\text{m}$)。

髌股关节接触力(F_{PF} , 单位: N):

$$F_{PF} = 2F_Q \cdot \sin(\beta/2)$$

其中, $\beta = (30.46 \pm 0.53) \cdot \theta_i$, β (单位: $^\circ$)为股四头肌肌力线与髌韧带拉力线之间的夹角(见图 2)。

髌股关节接触应力(P_{PFIS} , 单位: MPa):

$$P_{PFIS} = F_{PF} / S_{PFCA}(\theta_i)$$

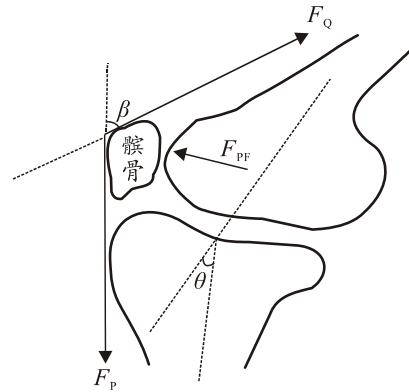


图 2 髌股关节受力示意图¹⁾

1) F_Q 为股四头肌肌力(单位: N); F_{PF} (N)为髌股关节接触力(PFCF); F_p 为髌韧带拉力线; β (单位: $^\circ$)为股四头肌肌力线与髌韧带拉力线之间的夹角; θ (单位: $^\circ$)为膝关节屈曲角度。

2) 统计学方法。

所有数据使用 SPSS 25.0 统计学软件, 使用配对样本 T 检验比较同一受试者分别穿着两种跑鞋下各参数差异水平, 显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 地面反作用力

所有跑者穿着两种运动鞋的垂直地面反作用力(vGRF)均具有 2 个峰值。如表 2 所示, 无论穿着极简跑鞋还是缓冲跑鞋, 支撑期 vGRF 的冲击力峰值(即第 1 峰值 FP)和蹬地力峰值(即第二峰值 SP)均无明显差异($P > 0.05$)。

表 2 使用不同鞋类支撑期膝、踝关节矢状面力学参数($\bar{x} \pm s$)

| 鞋类 | FP/BW ¹⁾ | SP/BW | 最大屈曲角度/ $^\circ$ | 髌股关节接触面积峰值/ mm^2 | 峰值伸膝力矩/ $(\text{Nm}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 髌股关节接触力峰值/BW | 髌股关节接触应力峰值/MPa |
|-------|---------------------|-----------|------------------|---------------------------|--|--------------|----------------|
| 极简跑鞋 | 1.78±0.16 | 2.61±0.25 | 33.93±1.74 | 265.08±10.20 | 2.07±0.47 | 4.34±0.97 | 12.08±3.27 |
| 缓冲跑鞋 | 1.74±0.23 | 2.59±0.31 | 36.29±3.41 | 280.10±21.96 | 2.36±0.41 | 5.23±1.12 | 13.48±2.64 |
| P 值 | 0.701 | 0.559 | 0.008 | 0.008 | <0.001 | <0.001 | 0.015 |

1)vGRF 的第 1 峰值(FP)、第 2 峰值(SP)以及髌股关节接触力均经过体重标准化(Body Weight, BW)处理

2.2 运动学

如表 3 所示, 穿着 2 种鞋时足与地面的夹角均为正值, 说明跑者均采用后跟触地跑姿, 并且触地时刻膝关节与踝关节角度无统计学差异($P > 0.05$), 但穿着极简跑鞋时足与地面夹角显著降低 35.6%($P < 0.05$)。穿着极简跑鞋时, 支撑期膝关节最大屈曲角度以及髌股关

节接触面积峰值均显著低于缓冲跑鞋($P < 0.01$)(见表 2), 其中膝关节屈曲角度峰值降低 6.5%, 髌股关节接触面积峰值减小 5.4%。并且穿着极简跑鞋时整个支撑期间, 膝关节屈曲角度曲线在支撑中后期多低于缓冲跑鞋(见图 3 A)。

表 3 使用不同鞋类触地时刻膝、踝关节矢状面运动学参数($\bar{x} \pm s$)

| 鞋类 | 膝关节屈曲角度/ $^\circ$ | 踝关节跖屈角度/ $^\circ$ | 足与地面夹角/ $^\circ$ |
|-------|-------------------|-------------------|------------------|
| 极简跑鞋 | 13.56±5.60 | 0.13±4.29 | 8.07±4.64 |
| 缓冲跑鞋 | 12.64±4.56 | 0.13±7.92 | 12.54±2.18 |
| P 值 | 0.637 | 0.835 | <0.001 |

2.3 动力学

穿着极简跑鞋时伸膝力矩峰值、髌股关节接触力、髌股关节接触应力峰值均显著小于穿着缓冲跑鞋 ($P<0.05$) (见表 2)。其中: 伸膝力矩峰值降低 12.3%, 髌

股关节接触力降低 17.0%, 髌股关节接触应力峰值降低 10.4%。与膝关节屈曲角度曲线一致, 在穿着极简跑鞋时整个支撑中后阶段, 上述反映膝关节负荷的曲线均多低于穿着缓冲跑鞋 (见图 3B、C、D)。

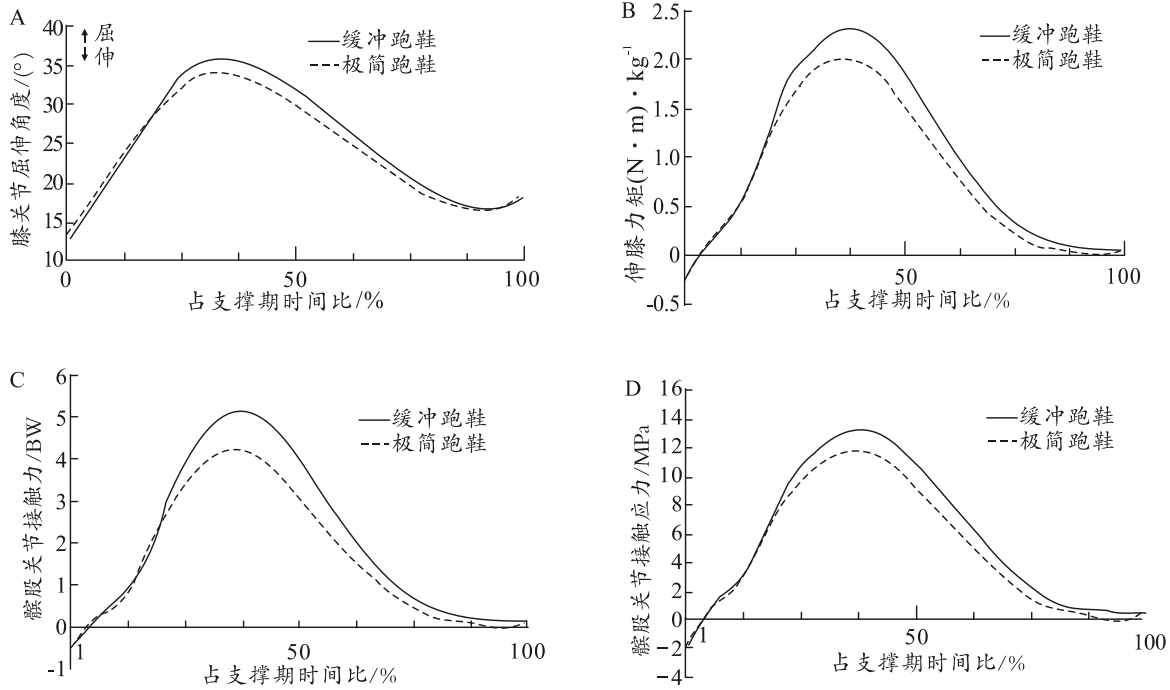


图 3 支撑期不同鞋条件下膝关节角度、伸膝力矩、髌股关节接触力、应力对比¹⁾

1) $P<0.05$

3 讨论

本研究的目的是探究穿着不同极简指数跑鞋对髌股关节生物力学的即刻影响, 以期通过直接更换跑鞋降低膝关节负荷、减少 PFPS 的风险。传统观念认为, 跑鞋的缓冲结构能降低跑步时的冲击力, 对下肢起到缓冲和保护作用。而本研究观察到, 与穿着极简跑鞋相比, 穿着缓冲跑鞋并未改变触地后的冲击力大小, 且未影响触地时刻踝与膝关节的屈伸角度。相反, 在支撑期的过渡阶段和蹬地阶段(20%~100%), 穿着极简跑鞋通过改变屈膝范围、伸膝力矩等参数有效降低髌股关节接触力及应力, 而 PFPS 症状产生的机制正是髌股关节承受过于频繁的高负荷^[14, 16-17]。因此, 本研究结果推测跑者穿着高 MI 极简跑鞋可能对降低 PFPS 风险有益。

上述发现与前人的部分研究^[6, 18-19]一致, Sinclair 与 Esculier 等^[7-8]认为穿着极简跑鞋改变了下肢策略, 即步频更高, 触地时刻足与地面夹角更低, 膝关节屈曲峰值和关节活动范围(range of motion, ROM)降低。此外, 本研究中跑者穿着极简跑鞋跑步支撑期间, 虽

然根据屈膝角度与髌股关节接触面积函数, 膝关节的 ROM 降低使得髌股关节接触面积降低, 这对降低髌股关节接触应力是不利的。然而, 另一方面, 跑者穿着极简跑鞋在蹬地期表现出更小的伸膝力矩, 使得髌股关节接触力大幅减小, 最终使髌股关节接触应力显著下降 10.4%。进一步探究极简跑鞋对跑步支撑期髌股关节接触应力、应力特点发现: 在支撑期 0~20% 阶段, 不同跑鞋条件曲线基本重合, 而极简跑鞋带来的改变约出现在支撑期 20% 时间点之后。首先, 支撑期前 20% 为冲击阶段, 此阶段下肢承受触地带来的冲击, vGRF 达到第一峰值, 即冲击力峰值。本实验结果显示, 不论是缓冲阶段冲击力峰值还是蹬地阶段峰值, 缓冲跑鞋与极简跑鞋并无显著差异。同时, 冲击阶段仅占整个支撑期的 1/4, 而本研究认为穿着极简跑鞋在时间占比更多的过渡阶段和蹬地阶段(20%~100%)展现出较低的膝关节负荷可能更有价值。近年来支持裸足跑的学者们认为, 跑鞋并不是简单地减小冲量、降低冲击阶段负载率和过滤高频冲击信号, 而是对下肢提供不同的感觉输入从而产生不同的肢体应答, 改变下肢策

略^[20-22]。正如本实验中穿着极简跑鞋时最大屈膝角度减小、伸膝力矩下降等在较长时间占比的非冲击阶段的主动改变,提示这对降低髌股关节负荷的重要性。

基于对极简跑鞋进行的分级^[12],本研究对比了 MI86%极简跑鞋与 MI26%缓冲跑鞋,以期进一步探究膝关节负荷及下肢生物力学特征与 MI 的关系。Esculier 等^[7]对不同 MI 鞋进行了对比,发现当运动鞋的极简指数越高时,触地时足与地面角度越小、髌股关节接触力峰值越小。此外, Sinclair 等^[8]对比了极简跑鞋、缓冲跑鞋与极缓冲跑鞋(maximalist shoes)对膝关节生物力学的影响,同样发现穿着极简跑鞋时膝关节 ROM 减小,但在穿着极缓冲跑鞋时髌股关节负荷参数比其他 2 种跑鞋情况更大。上述结论与本实验的结果相似:MI 低的跑鞋尽管中底更厚,却不会降低髌股关节负荷。与之相反,越强缓冲带来的感觉输入会造成屈膝角度更大、伸膝力矩更大的下肢运动控制策略,反而可能会增加膝关节负荷和 PFPS 的发病风险。

在本研究之前的同类研究中,招募受试者时并没有对其跑步时着地模式进行限制,也没有排除受试者先前是否有穿着极简跑鞋的习惯^[20]。而事实上在长距离跑者中,大约 70%以上的跑者均采用后跟着地模式^[23-24]。Horvais 等^[25]发现在跑者更换极简跑鞋的适应过程中,后跟跑者会趋向足中或前掌着地模式(midfoot or fore-foot strike pattern)。本研究中垂直 GRF 均呈现两个峰值,并且着地时足与地面的夹角为正值,说明跑者穿着极简跑鞋后仍然为后跟着地^[26]。但值得注意的是,穿着极简跑鞋后足与地面的夹角减少 35.6%。此外,穿着极简跑鞋在坚硬地面上采用后跟着地模式会导致足跟疼痛,跑者会主动尝试使用足中或前掌着地模式来避免疼痛^[27],诸多原因导致从穿缓冲跑鞋过渡到穿极简跑鞋时触地模式会发生变化。而众多研究已经发现,前掌着地模式亦能有效降低髌股关节接触力与应力,也能起到降低膝关节负荷、减少 PFPS 疼痛的作用^[6, 28-29]。因此,分析改穿高 MI 极简跑鞋带来的后续效应仍然有待丰富。

另外,更换为高 MI 极简跑鞋需要一个适应过程^[30]。穿着极简跑鞋类似裸足跑,对足底屈肌群的力量和功能有一定要求^[31]。Lieberman 等^[32]认为足在上万年的进化过程中,其功能均是为了适应裸足走或跑这一特征,且人类最近百年才开始穿着具有缓冲作用的鞋。足部结构的生物力学特点可能未完全适应现在的缓冲跑鞋,而长期穿着缓冲跑鞋的跑者,其足部肌肉又不能满足或适应即刻穿着极简跑鞋时的肌力要求,导致足底肌肉易疲劳甚至过劳性损伤。其次,极简跑鞋促使跑者着地模式趋于向前掌改变,而前掌着地模式跑步

时小腿三头肌肌力的要求更高。因此,在更换为高 MI 极简跑鞋的过程中,建议跑者基于以前的跑量,采用替换方式逐渐增加穿着极简跑鞋跑步的时间,从而逐渐提升相关肌肉力量以及下肢与足部的适应能力。

基于实验结果,本研究发现后跟着地时穿着不同极简指数跑鞋对髌股关节受力特征存在差异,具体表现为:相比缓冲跑鞋,穿着极简跑鞋在未影响触地后冲击力峰值的同时,通过降低伸膝力矩大幅度减少髌股关节接触力(下降 17.02%)、降低髌股关节接触应力,从而有效改善支撑期髌股关节负荷,为进一步减小髌股关节疼痛综合征风险提供可能。

参考文献:

- [1] 傅维杰,刘宇,李路,等. 跑步中不同运动表面对下肢冲击和足底压力特征的影响[J]. 上海体育学院学报, 2013, 37(5): 89-94.
- [2] 胡浩宇,郑依莉,王雪强,等. 上海国际马拉松跑者膝关节损伤情况及其影响因素分析[J]. 中国康复医学杂志, 2019, 34(3): 297-302.
- [3] TAUNTON J E, RYAN M B, CLEMENT D B, et al. A retrospective case-control analysis of 2002 running injuries[J]. Br J Sports Med, 2002(2): 95-101.
- [4] 张益民,姜鑫,郭永智,等. 髌股关节疼痛综合征诊断与治疗[J]. 国际骨科学杂志, 2008(4): 227-228+232.
- [5] BRADLEY S, CHRISTIAN J, ROSA G, et al. Runners with patellofemoral pain have altered biomechanics which targeted interventions can modify: A systematic review and meta-analysis[J]. Gait & Posture, 2016(45): 69-82.
- [6] KULMALA J, AVELA J, PASANEN K, et al. Forefoot strikers exhibit lower running-induced knee loading than rearfoot strikers[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2013(12): 2306-2313.
- [7] ESCULIER J, DUBOIS B, BOUYER L J, et al. Footwear characteristics are related to running mechanics in runners with patellofemoral pain[J]. Gait & Posture, 2017(54): 144-147.
- [8] SINCLAIR J, RICHARDS J, SELFE J, et al. The influence of minimalist and maximalist footwear on patellofemoral kinetics during running[J]. Journal of Applied Biomechanics, 2016(4): 359-364.
- [9] ROBERTO S, RENATO R, JOSEPH H, et al. Acute effect of different minimalist shoes on foot strike pattern and kinematics in rearfoot strikers during running[J].

- Journal of Sports Sciences, 2015(11): 1196-1204.
- [10] RICE H M, S T JAMISON, DAVIS I S. Footwear matters: Influence of footwear and foot strike on load rates during running[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2016(12): 2462-2468.
- [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] ESCULIER J, DUBOIS B, DIONNE C E, et al. A consensus definition and rating scale for minimalist shoes[J]. *Journal of Foot and Ankle Research*, 2015, 8: 42.
- [13] 王勇, 梁雷超, 王东海, 等. 鞍座高度对骑行时髌股关节力学特征影响的研究[J]. *体育科学*, 2018, 38(6): 60-66.
- [14] BRECHTER H, JACKLYN, POWERS, et al. Patellofemoral stress during walking in persons with and without patellofemoral pain[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2002(10): 1582-1593.
- [15] DOS SANTOS A F, NAKAGAWA T H, SERRAO F V, et al. Patellofemoral joint stress measured across three different running techniques[J]. *Gait & Posture*, 2019(68): 37-43.
- [16] LABELLA C. Patellofemoral pain syndrome: evaluation and treatment[J]. *Prim Care Clin Office Pract*, 2004(4): 977-1003.
- [17] BESIER T F, GOLD G E, BEAUPRÉ G S, et al. A modeling framework to estimate patellofemoral joint cartilage stress in vivo[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2005(11): 1924-1930.
- [18] SINCLAIR J, ATKINS S, TAYLOR P J, et al. Effects of conventional and minimalist footwear on patellofemoral and achilles tendon kinetics during netball specific movements[J]. *Wageningen Academic*, 2015(3): 191-199.
- [19] SINCLAIR J. Effects of barefoot and barefoot inspired footwear on knee and ankle loading during running[J]. *Clinical Biomechanics*, 2014(4): 395-399.
- [20] 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.
- [21] GENT R, SIEM D, MIDDELKOOP M, et al. Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: A systematic review [J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2007(8): 469-480.
- [22] HOLOWKA N B, WYNANDS B, DRECHSEL T J, et al. Foot callus thickness does not trade off protection for tactile sensitivity during walking[J]. *Nature*, 2019, 571(7764): 261-264.
- [23] HASEGAWA H, YAMAUCHI T, KRAEMER W J. Foot strike patterns of runners at the 15-km point during an elite-level half marathon[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2007(3): 888-893.
- [24] KASMER M E, LIU X C, ROBERTS K G, et al. Foot-strike pattern and performance in a marathon[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2013(3): 286-292.
- [25] HORVAIS N, SAMOZINO P. Effect of midsole geometry on foot-strike pattern and running kinematics[J]. *Footwear Science*, 2013(2): 81-89.
- [26] PAQUETTE M R, ZHANG S, BAUMGARTNER L D. Acute effects of barefoot, minimal shoes and running shoes on lower limb mechanics in rear and forefoot strike runners[J]. *Footwear Science*, 2013(1): 9-18.
- [27] HAMILL J, RUSSELL E, GRUBER A, et al. Impact characteristics in shod and barefoot running[J]. *Footwear Science*, 2011(1): 33-40.
- [28] VANNATTA, CHARLES NATHAN, KERNOZEK, et al. Patellofemoral Joint Stress during Running with Alterations in Foot Strike Pattern[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2015(5): 1001-1008.
- [29] ROPER J L, HARDING E M, DOERFLER D, et al. The effects of gait retraining in runners with patellofemoral pain: A randomized trial[J]. *Clinical Biomechanics*, 2016: 14-22.
- [30] ERVILHA U F, MOCHIZUKI L, FIGUEIRA A, et al. Are muscle activation patterns altered during shod and barefoot running with a forefoot footfall pattern[J]. *Journal of Sport Science*, 2017(17): 1697-1703.
- [31] HOLOWKA N B, WALLACE I J, LIEBERMAN D E. Foot strength and stiffness are related to footwear use in a comparison of minimally-vs. conventionally-shod populations[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 3679-3687.
- [32] TOMOYA T, MUTSUAKI E, MASATOSHI N, et al. Gender differences associated with rearfoot, midfoot, and forefoot kinematics during running[J]. *European Journal of Sport Science*, 2017(10): 1289-1296.