

文章编号: 1004-7220(2022)06-1158-07

基于统计参数映射分析跑鞋跟掌落差对 下肢关节负荷的影响

张马森^a, 周兴龙^a, 刘 卉^b

(北京体育大学 a. 运动人体科学学院; b. 中国运动与健康研究院, 北京 100084)

摘要: **目的** 探讨在相同跑速下穿着不同落差跑鞋对下肢关节负荷的影响, 为跑鞋设计和跑步者选购跑鞋提供依据。 **方法** 18 名男性跑步者分别穿着零落差和 10 mm 落差跑鞋以 (4.0 ± 0.2) m/s 速度完成测试, 使用红外高速运动捕捉系统和三维测力台同步采集下肢运动学参数和地面反作用力 (ground reaction force, GRF)。使用统计参数映射法 (statistical parameter mapping, SPM) 分析跑鞋跟掌落差对支撑期垂直 GRF、下肢关节三维力矩的影响。 **结果** 跑鞋跟掌落差对垂直 GRF 无影响, 对下肢关节部分力矩-时间序列影响显著。与穿着零落差跑鞋相比, 穿着 10 mm 落差跑鞋在 27%~38% 支撑期髋关节内旋力矩增加, 在 47%~75% 支撑期膝关节伸展力矩增加, 在 16%~33%、25%~30%、12%~25% 支撑期踝关节跖屈力矩、外翻力矩和外旋力矩降低。 **结论** 与穿着零落差跑鞋相比, 穿着 10 mm 落差跑鞋在支撑前期髋关节负荷增加, 踝关节负荷降低, 在支撑中期膝关节负荷增加。建议跑步者结合自身特点及跑鞋跟掌落差对下肢关节负荷特征的影响, 选择适合自己的跑鞋。

关键词: 统计参数映射; 跟掌落差; 地面反作用力; 下肢关节负荷; 运动生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.06.029

Effects of Heel-to-Toe Drop of Running Shoes on Lower Limb Joint Loading Based on Statistical Parameter Mapping

ZHANG Masen^a, ZHOU Xinglong^a, LIU Hui^b

(a. School of Sport Science; b. China Institute of Sport and Health Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

Abstract: **Objective** To explore the effects of wearing running shoes with different heel-to-toe drops on lower limb joint loading at the same running speed, so as to provide references for the design of running shoes and for runners to buy running shoes. **Methods** A total of 18 male runners completed the running test by wearing shoes with 0 mm and 10 mm heel-to-toe drops at the speed of (4.0 ± 0.2) m/s, the kinematic parameters and ground reaction force (GRF) of lower limbs were collected synchronously by using infrared high-speed motion capture system and three-dimensional (3D) force plates. Statistical parameter mapping (SPM) was used to analyze the effects from heel-to-toe drop of running shoes on GRF as well as 3D moments of lower limb joints during stance phase. **Results** The heel-to-toe drop of running shoes had no effects on vertical GRF, but had significant effects on moment-time series of lower limb joints. Compared with wearing 0 mm heel-to-toe drop running shoes, wearing running shoes with 10 mm heel-to-toe drop increased the hip internal rotation moments in 27%-38% of stance phase and the knee extension moments in 47%-75% of stance phase, meanwhile decreased the plantar flexion moments, valgus moments and external rotation moments of ankle joints in 16%-33%, 25%-30% and 12%-25% of the stance phase, respectively. **Conclusions** Compared with wearing 0 mm heel-to-toe drop running shoes, wearing running shoes with 10 mm heel-to-toe drop increases the hip joint loading, decreases the ankle joint loading in early stance phase, and increases the knee joint loading in middle stance phase. It is suggested

收稿日期: 2021-10-11; 修回日期: 2021-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81572212)

通信作者: 刘卉, 教授, 博士生导师, E-mail: liuhuibupe@163.com

that runners choose running shoes according to their own characteristics and the effects of heel-to-toe drop of running shoes on lower limb joint loading.

Key words: statistical parameter mapping (SPM); heel-to-toe drop; ground reaction force (GRF); lower limb joint loading; sports biomechanics

跑步是最流行的健身项目,能有效改善心血管机能和身体素质,但跑步相关的损伤率居高不下^[1]。有研究统计,每年高达 79% 跑者遭受跑步相关损伤的困扰,其中 46% 跑者损伤易复发^[2]。跑步损伤多为过劳损伤,即由肌肉骨骼系统重复高负荷工作的累计效应导致^[3-4]。如果能降低下肢关节负荷,则长时间跑步对下肢关节的累计负荷效应将大大降低,进而有效降低下肢损伤率。为了预防跑步相关损伤,不仅要关注跑步者的人群特征、训练强度等,还需要考虑跑鞋的结构特点^[4-6]。跑鞋跟掌落差(鞋跟高度和前掌高度的差值)可能是影响下肢关节负荷和下肢损伤率的重要因素。现代跑鞋的跟掌落差多集中在 10 mm 左右。研究表明,在相同跑速下,穿着高落差跑鞋时更倾向于足跟先着地,且表现为跟掌落差和着地瞬间足地角(足底长轴与地面的夹角)正相关^[7-8]。与前足着地相比,足跟着地会增加地面冲击力,进而增加下肢关节负荷^[3]。一项前瞻性研究表明,与零落差跑鞋相比,穿着高落差跑鞋时膝关节损伤率较高,足踝损伤率较低^[9]。但是,目前尚不了解跑鞋跟掌落差对下肢关节负荷的影响,还不能判断跑鞋跟掌落差影响下肢损伤的机制,也就无法进一步对跑鞋的设计和选购提供理论依据。

在进行跑鞋功能评价的研究时,传统统计方法忽略了样本有序性,可能产生偏倚,而统计参数映射法(statistical parameter mapping, SPM)基于时空平滑及标准化后数据的检验,能够克服数据提取的偏倚,实现对一维连续性数据的统计分析^[10-12]。本文采用配对样本 *t* 检验和 SPM 分析跑鞋跟掌落差对支撑期垂直地面反作用力(ground reaction force, GRF)、下肢关节三维力矩峰值和时间序列的影响,为跑鞋的设计、选购以及下肢损伤的预防提供支持。本研究进行如下假设:① 与零落差跑鞋相比,穿着 10 mm 落差跑鞋时支撑期垂直 GRF 峰值降低,某些阶段的垂直 GRF 降低;② 支撑期髌、膝关节力矩峰值增加,某些阶段的髌、膝关节力矩增加;③ 支撑期踝关节力矩峰值降低,某些阶段的踝关节力矩降低。

1 研究方法

1.1 受试者

选取 18 名男性跑步爱好者为受试者,年龄(23.2±1.7)岁,身高(1.71±0.04) m,体重(65.1±3.9) kg。所有受试者周跑量均大于 20 km,半年内无明显下肢损伤。受试者在测试前被告知研究目的和注意事项,填写知情同意书,并自愿按照要求进行测试。

1.2 测试鞋

委托某体育用品公司研发中心设计制作 2 双跑鞋,鞋码为 41 码,中底材料为橡塑发泡材料(ethylene-vinyl acetate copolymer, EVA)。零落差跑鞋的前掌、鞋跟高度均为 12 mm,10 mm 落差跑鞋的前掌、鞋跟高度分别为 12、22 mm。两双跑鞋除跟掌落差不同外,其他结构形态完全一致(见图 1)。



图 1 不同落差跑鞋示意图

Fig. 1 Schematic diagram of running shoes with different heel-to-toe drops (a) 0 mm heel-to-toe drop, (b) 10 mm heel-to-toe drop

1.3 数据采集

首先,受试者进行 5 min 热身跑以更好地适应测试鞋和目标跑速,然后更换统一的紧身短裤,由同一名专业实验人员在相应位置粘贴反光标志点(左/右髌前上棘,髌后上棘中点,左/右大腿前侧,左/右股骨外侧髌,左/右股骨内侧髌,左/右胫骨粗隆,左/右腓骨外髌,左/右胫骨内髌,左/右足尖,左/右足跟)^[13-14]。正式测试时,受试者站在距离测力台 10 m 位置起跑,以(4.0±0.2) m/s 跑速完成测试。受试者以规定跑速、无明显步伐调整,并以右脚完整地踩在测力台上为 1 次有效数据^[14]。每双鞋采集 3 次有效数据,结果取 3 次平均值。

使用 8 镜头的红外高速运动捕捉系统 (Motion Analysis 公司, 美国) 采集受试者穿着不同鞋跑步时的三维运动学数据, 采集频率为 200 Hz。使用三维测力台系统 (Kistler Instrument AG 公司, 瑞士) 同步采集 GRF 数据, 采集频率为 1 kHz。使用便携式测速系统 (Newtest 公司, 芬兰) 监控跑速。大地坐标系 x 轴指向前进方向, y 轴指向跑道左侧, z 轴垂直指向上方。运动学和动力学数据采集由 Motion Analysis 系统同步触发。

1.4 数据处理

使用 Cortex 2.6 软件收集处理三维坐标数据。所有标志点的三维坐标采用 Butterworth 低通滤波法平滑, 截断频率为 12 Hz。骨盆、大腿、小腿和足部坐标系建立参照文献 [13] 的研究。髌关节中心点根据 Bell 等 [15] 研究数据和左/右髌前上棘、髌后上棘中点的坐标确定。膝关节转动中心为股骨内、外侧髁中点。踝关节转动中心为内、外踝中点。髌、膝、踝关节角度定义为相邻环节坐标系间的欧拉角。髌、膝和踝关节三维力矩通过逆动力学方法计算获得 [13, 16]。人体惯性参数采用 Leva 修正后的 Zatsiorsky-Seluyanovs 人体惯性参数 [17]。

本文着重分析跑步支撑期 (足跟着地到足尖离地) 下肢关节负荷相关的生物力学指标。垂直 GRF、下肢关节三维力矩按跑步支撑期进行归一化处理, 并以平均值绘制成曲线, 比较整个支撑期下肢关节负荷相关指标的变化差异。

1.5 统计分析

采用配对样本 t 检验分析跑鞋跟掌落差对步长、步频、足地角、垂直 GRF 峰值、下肢关节三维力矩峰值的影响。计算两组差异的 Cohen's d 效果量, 其标准为: 效果大 ($d \geq 0.80$)、效果中 ($0.80 > d \geq 0.50$) 和效果小 ($0.50 > d \geq 0.20$)。采用 SPM 分析跑鞋跟掌落差对支撑期垂直 GRF、下肢关节三维力矩-时间序列的影响。统计显著性水平设为 $P < 0.05$ 。 t 检验和 SPM 分别使用 SPSS 20.0 (IBM 公司, 美国) 和 MATLAB R2016a (MathWorks 公司, 美国) 完成。

2 结果

t 检验结果表明, 跑鞋跟掌落差对步长、步频无影响, 对足地角影响显著。与零落差跑鞋相比, 穿着 10 mm 落差跑鞋时足地角显著增加 $5.7^\circ \pm 3.2^\circ$

($P < 0.001$, Cohen's $d = 0.97$), 见表 1。

表 1 穿着不同落差跑鞋时步态参数及垂直地面反作用力比较

Tab. 1 Comparison of gait parameters and vertical ground reaction force for wearing shoes with different heel-to-toe drops

参数	零落差跑鞋	10 mm 落差跑鞋
步长/m	1.47±0.10	1.50±0.11
步频/(步·min ⁻¹)	164.1±12.6	161.7±9.6
足地角/(°)	22.6±8.5	28.3±7.6*
垂直 GRF 第 1 峰值/BW	2.05±0.40	2.03±0.35
垂直 GRF 第 2 峰值/BW	2.75±0.33	2.70±0.33

注: *表示与零落差跑鞋相比, $P < 0.05$; BW (body weight) 表示体重。

t 检验和 SPM 结果表明, 跑鞋跟掌落差对垂直 GRF 两个峰值及时间序列均无影响 (见表 1、图 2)。

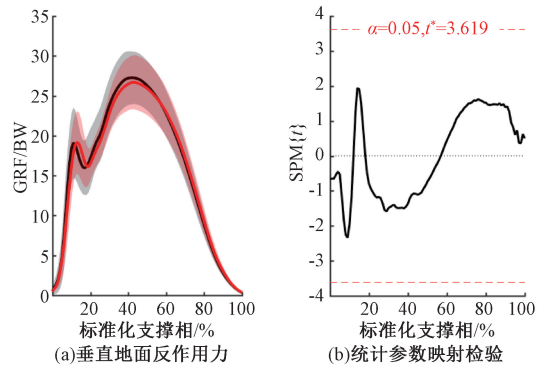


图 2 穿着不同落差跑鞋时垂直地面反作用力比较

Fig. 2 Comparison of vertical ground reaction force (GRF) for wearing shoes with different heel-to-toe drops (a) Vertical ground reaction force, (b) Statistical parameter mapping (SPM)

注: 黑色曲线为零落差跑鞋, 红色曲线为 10 mm 落差跑鞋。

t 检验结果表明, 与零落差跑鞋相比, 穿着 10 mm 落差跑鞋时髌关节三维力矩峰值无差异, 膝关节伸展力矩峰值显著增加 15.2% ($P = 0.003$, Cohen's $d = 0.84$), 踝关节外翻力矩峰值显著降低 25% ($P = 0.020$, Cohen's $d = 0.65$), 其他指标均未表现出统计学差异 (见表 2)。

SPM 结果表明, 与零落差跑鞋相比, 穿着 10 mm 落差跑鞋在 27%~38% 支撑期髌关节内旋力矩增加 ($t = 3.966$, $P < 0.05$), 在 47%~75% 支撑期膝关节伸展力矩增加 ($t = 3.871$, $P < 0.05$), 在 16%~33%、25%~30%、12%~25% 支撑期踝关节跖屈力矩 ($t = 3.662$, $P < 0.05$)、外翻力矩 ($t = 3.694$, $P < 0.05$) 和外旋力矩 ($t = 3.778$, $P < 0.05$) 降低 (见图 3)。

表2 穿着不同落差跑鞋时下肢关节负荷特征比较

Tab.2 Comparison of lower limb joint loading for wearing shoes with different heel-to-toe drops

参数	髋关节		膝关节		踝关节	
	零落差	10 mm 落差	零落差	10 mm 落差	零落差	10 mm 落差
屈曲力矩峰值/(N·m·kg ⁻¹)	0.67±0.27	0.69±0.25	0.49±0.16	0.50±0.19	2.85±0.44	2.71±0.48
伸展力矩峰值/(N·m·kg ⁻¹)	2.61±0.44	2.77±0.85	2.70±0.69	3.11±0.51*	0.20±0.12	0.25±0.11
内收力矩峰值/(N·m·kg ⁻¹)	0.52±0.18	0.45±0.16	0.37±0.23	0.32±0.24	0.10±0.06	0.12±0.05
外展力矩峰值/(N·m·kg ⁻¹)	1.77±0.35	1.71±0.41	0.55±0.22	0.51±0.27	0.64±0.32	0.48±0.14*
内旋力矩峰值/(N·m·kg ⁻¹)	0.47±0.16	0.47±0.19	0.15±0.10	0.12±0.06	0.02±0.03	0.03±0.03
外旋力矩峰值/(N·m·kg ⁻¹)	0.11±0.08	0.08±0.03	0.07±0.03	0.08±0.06	0.40±0.16	0.39±0.13

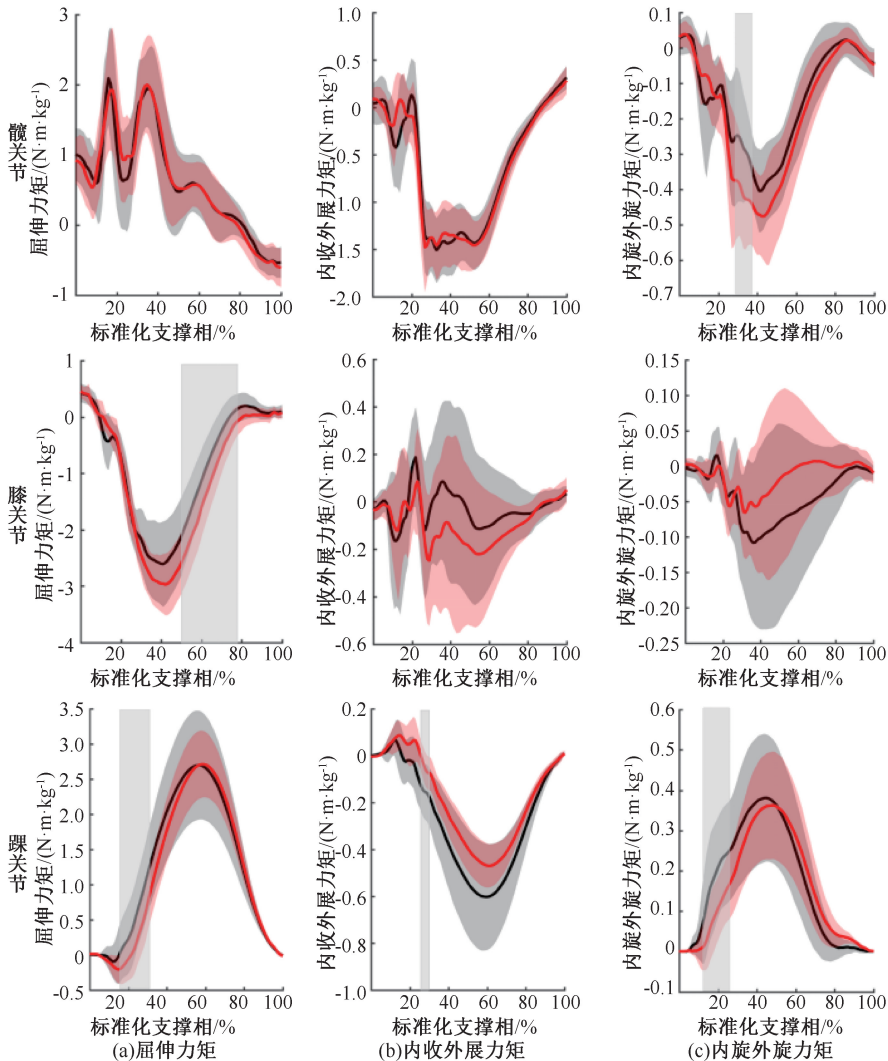
注: *表示与零落差跑鞋相比, $P < 0.05$ 。

图3 穿着不同落差跑鞋时下肢关节三维度力矩比较

Fig.3 Comparison of 3D moments of lower limb joints for wearing shoes with different heel-to-toe drops (a) Flexion-extension moment, (b) Adduction-abduction moment, (c) Internal-external rotation moment

注:黑色曲线为零落差跑鞋,红色曲线为10 mm 落差跑鞋。

3 讨论

本研究结果不支持第1个假设。 t 检验和SPM

结果都表明,穿着不同跟掌落差的跑鞋时受到的垂直GRF无显著差异。传统观点认为,现代跑鞋的后跟缓冲结构能够降低跑步时的GRF,对下肢起到缓

冲和保护作用,因而推断穿着高落差跑鞋对降低下肢关节负荷是有利的。但是,有研究表明,穿着高落差跑鞋在着地瞬间具有较大的足地角^[7-8]。本文也发现,穿着 10 mm 落差跑鞋时足地角显著增加 $5.7^{\circ} \pm 3.2^{\circ}$ 。足地角增加时,GRF 也相应增加,可能抵消了跑鞋缓冲结构对 GRF 的缓冲效果,使得 GRF 没有表现出显著差异。本文结果与针对男性跑步者的研究结果一致^[7]。但是, Besson 等^[18] 研究发现,女性跑步者穿着高落差跑鞋时受到的 GRF 显著大于穿着零落差跑鞋,提示女性跑步者穿着高落差跑鞋时下肢损伤率可能较高。现代跑鞋的跟掌落差一般为 10 mm,这可能是女性跑步者下肢损伤率高于男性跑步者的原因之一。

本研究结果部分支持第 2 个假设。与零落差跑鞋相比,穿着 10 mm 落差跑鞋时髌关节三维力矩峰值未表现出显著差异,但在支撑前期髌关节内旋力矩增加。目前多数研究表明,跑鞋结构特征的改变只能影响到足底以及踝、膝关节的负荷,对髌关节负荷没有影响^[14,18-21]。本文使用传统针对特征值的统计方法也支持这一结论,但是 SPM 结果提示,穿着 10 mm 落差跑鞋可能增加髌关节损伤风险,而穿着零落差跑鞋对降低髌关节损伤风险有益,这为后续进一步探究跑步相关损伤原理及防治措施奠定基础。此外,穿着 10 mm 落差跑鞋时膝关节伸展力矩峰值显著增加,而 SPM 结果未能在膝关节伸展力矩峰值区域达到显著性,提示对零维数据的统计方法为了控制 I 型误差,使用的显著性阈值可能过低^[22]。研究认为,*t* 检验使用零维随机模型,SPM 使用一维随机模型,零维随机模型不适用于根据一维数据得出概率结论^[11],因此,即使一维统计分析达不到显著性,零维统计分析也能达到显著性。Castro 等^[22] 分析跑步时承受 GRF 的性别差异研究表明,由于 GRF 呈现双峰特征,选取不同的峰值时得出相反的结论,而 SPM 能够一次性对整个支撑期的 GRF 进行统计分析,避免了上述缺陷。本文结果表明,穿着 10 mm 落差跑鞋在支撑中期膝关节伸展力矩增加,提示穿着高落差跑鞋在支撑中期可能增加膝关节损伤风险。穿着零落差跑鞋时倾向于全脚掌着地,跑步者采用软着陆的策略,通过跖屈踝关节和增加踝关节运动幅度等途径缓冲地面冲击力,从而降低传导至膝关节的负荷,而穿着高落差

跑鞋时更倾向足跟着地,支撑腿位置距离重心投影点更远,从而增加了膝关节伸肌力臂和力矩^[18-19]。较大的伸膝力矩意味着股四头肌活动增加,并可能增加髌腱和髌股关节受力^[3,23]。因此,高落差跑鞋可能是跑步者膝关节损伤率居高不下的的重要原因。

本研究结果部分支持第 3 个假设。穿着 10 mm 落差跑鞋与穿着零落差跑鞋相比,除了踝关节外翻力矩峰值显著增加以外,其他方向的力矩峰值均未表现出显著差异。SPM 结果显示,在踝关节三维力矩峰值区域未达到显著性,但穿着 10 mm 落差跑鞋在支撑前期踝关节跖屈、外翻和外旋力矩降低。零维统计分析仅能表明特征值的差异,而忽略了时间序列曲线上其他可能有意义的部分,所得结论也只能基于零维数据的统计结果,但以往的研究往往过度泛化,通过零维统计分析得出一维数据结论。SPM 通过随机场理论进行拓扑分析,克服传统统计方法的缺点,能够对时间序列(包含特征值)进行统计分析,所得结论更全面更有力^[12]。SPM 结果表明,穿着高落差跑鞋降低了支撑前期踝关节三维力矩,这与前人研究结果基本一致。穿着零落差跑鞋时,踝关节跖屈角度增加,足底屈肌的预激活程度更大^[18];而穿着高落差跑鞋时,踝关节跖屈角度减小,跟腱应力减小^[19]。类似地,Robert 等^[21] 研究表明,穿着高跟鞋走路时,踝关节背屈和外翻力矩峰值降低,长期穿高跟鞋能明显改善跟腱特征,提示穿着高落差跑鞋能有效缓解跟腱和小腿肌肉紧张,进而降低踝关节损伤风险。

Malisoux 等^[9] 进行为期 6 个月的前瞻性研究,结果表明,穿着 10 mm 落差跑鞋时膝关节损伤占跑步相关损伤的比例(26%)显著高于穿着零落差跑鞋(15%),足踝损伤占跑步相关损伤的比例(31%)显著低于穿着零落差跑鞋(41%)。本研究结果与上述前瞻性研究结果吻合。本文发现,穿着 10 mm 落差跑鞋在支撑中期膝关节伸展力矩增加,在支撑前期踝关节三维力矩降低,提示穿着高落差跑鞋可能增加髌股关节痛等膝关节损伤发生率,降低跟腱炎等足踝损伤发生率。有研究认为,人类足部结构的生物力学特征并未完全适应高落差跑鞋,跑步者长期穿着高落差跑鞋后,足踝部肌肉又不能适应即刻更换零落差跑鞋的肌力要求,习惯穿着高落差跑鞋跑步者更换零落差跑鞋后损伤率反而更高^[6,9]。

因此,更换不同跟掌落差的跑鞋均需要一段适应过程。基于上述研究结果,本文建议,体育用品公司设计制造跑鞋时充分考虑跟掌落差这一因素,把跟掌落差作为专业跑鞋品类细分的标准之一;跑步者结合自身特点及跑鞋跟掌落差对下肢关节负荷特征的影响,选择适合自己的跑鞋;有髌、膝关节损伤史的跑步者穿着零落差跑鞋运动,髌、膝关节损伤患者适宜穿着零落差鞋进行康复训练;有踝关节损伤史的跑步者穿着高落差跑鞋运动,踝关节损伤患者适宜穿着高落差的鞋进行康复训练;健康跑步者在经常更换不同跟掌落差跑鞋的前提下逐渐增加跑量,循序渐进地全面提高下肢肌肉力量和下肢关节的适应能力。

本文仅分析青年男性跑步者穿着零落差和 10 mm 落差跑鞋时下肢关节负荷特征的差异,增加跑鞋跟掌落差级数可能能够确定影响下肢负荷的最优落差,不同年龄、不同性别人群是否具有本研究所选人群类似的特征表现,还有待今后的进一步研究。

4 结论

穿着不同跟掌落差跑鞋时下肢关节负荷特征存在差异。与零落差跑鞋相比,穿着 10 mm 落差跑鞋不影响垂直 GRF,但在支撑前期髌关节负荷增加,踝关节负荷降低,在支撑中期膝关节负荷增加。跑步者应结合自身特点及跑鞋跟掌落差对下肢关节负荷特征的影响,选择适合自己的跑鞋。

参考文献:

[1] LEE DC, PATE RR, LAVIE CJ, *et al.* Leisure-time running reduces all-cause and cardiovascular mortality risk [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2014, 64(5): 472-481.

[2] VAN GENT RN, SIEM D, VAN MIDDELKOOP M, *et al.* Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: A systematic review [J]. *Brit J Sport Med*, 2007, 41(8): 469-480.

[3] 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.

[4] LOPES AD, HESPANHOL LC, YEUNG SS, *et al.* What are the main running-related musculoskeletal injuries? [J]. *Sports Med*, 2012, 42(10): 891-905.

[5] 杨一卓, 矫玮, 袁绍婷. 业余马拉松跑者跑步损伤调查及影响因素分析 [J]. *山东体育学院学报*, 2020, 36(3): 91-97.

[6] 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.

[7] CHAMBON N, DELATTRE N, GUEGUEN N, *et al.* Shoe drop has opposite influence on running pattern when running overground or on a treadmill [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2015, 115(5): 911-918.

[8] HORVAIS N, SAMOZINO P. Effect of midsole geometry on foot-strike pattern and running kinematics [J]. *Footwear Sci*, 2013, 5(2): 81-89.

[9] MALISOUX L, CHAMBON N, URHAUSEN A, *et al.* Influence of the heel-to-toe drop of standard cushioned running shoes on injury risk in leisure-time runners: A randomized controlled trial with 6-month follow-up [J]. *Am J Sport Med*, 2016, 44(11): 2933-2940.

[10] 刘卉, 于冰, 张力文, 等. 竞技体育运动生物力学研究现状与趋势 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(4): 491-501.

LIU H, YU B, ZHANG LW, *et al.* Research status and trends in competitive sports biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(4): 491-501.

[11] PATAKY TC, VANRENTERGHEM J, ROBINSON MA. Zero- vs. one-dimensional, parametric vs. non-parametric, and confidence interval vs. hypothesis testing procedures in one-dimensional biomechanical trajectory analysis [J]. *J Biomech*, 2015, 48(7): 1277-1285.

[12] 梅齐昌, 相亮亮, 李建设, 等. 基于一维统计参数映射分析跑者跑步地面反作用力差异 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(5): 684-691.

MEI QC, XIANG LL, LI JS, *et al.* Analysis of ground reaction forces during running based on one-dimensional statistical parametric mapping [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(5): 684-691.

[13] 杨辰, 曲峰, 刘卉, 等. 髌股关节痛业余跑者性别特异的下肢生物力学特征 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(6): 672-678.

YANG C, QU F, LIU H, *et al.* Sex-specific lower extremity biomechanics of amateur runners with patellofemoral pain [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(6): 672-678.

[14] 张马森, 周兴龙, 周长青. 鞋的前跷对下肢关节载荷的影响 [J]. *中国皮革*, 2016, 45(6): 17-21.

[15] BELL AL, BRAND RA, PEDERSEN DR. Prediction of hip joint centre location from external landmarks [J]. *J Biomech*, 1989, 20(1): 3-16.

[16] FRANKEL B, BRESLER J. The forces and moment in leg during level walking [J]. *Appl Mech*, 1950, 72(1): 26-27.

[17] LEVA PD. Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters [J]. *J Biomech*, 1996, 29

- (9): 1223-1230.
- [18] BESSON T, MORIO C, MILLET GY, *et al.* Influence of shoe drop on running kinematics and kinetics in female runners [J]. *Eur J Sport Sci*, 2019, 19(10): 1320-1327.
- [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] 王勇, 任慧, 汤运启, 等. 着鞋类型和步速对膝关节载荷的影响 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(5): 725-731.
WANG Y, REN H, TANG YQ, *et al.* Effects of shoe type and walking speed on knee joint loads [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(5): 725-731.
- [21] ROBERT C, MAGANARIS CN, SEYNNES OR, *et al.* On muscle, tendon and high heels [J]. *J Exp Biol*, 2010, 213(1): 2582-2588.
- [22] CASTRO MP, PATAKY TC, SOLE G, *et al.* Pooling sexes when assessing ground reaction forces during walking: Statistical parametric mapping versus traditional approach [J]. *J Biomech*, 2015, 48(10): 2162-2165.
- [23] ROOS PE, BARTON N, DEURSEN RWMV. Patellofemoral joint compression forces in backward and forward running [J]. *J Biomech*, 2012, 45(1): 1656-1660.
-
- (上接第 1157 页)
- [28] BELL AL, PEDERSEN DR, BRAND RA. A comparison of the accuracy of several hip center location prediction methods [J]. *J Biomech*, 1990, 23(6): 617-621.
- [29] KOHONEN T. An introduction to neural computing [J]. *Neural Networks*, 1988, 1(1): 3-16.
- [30] BINDER A, BACH S, MONTAVON G, *et al.* Layer-wise relevance propagation for deep neural network architectures [M]//*Information Science and Applications (ICISA) 2016*. USA: Springer, 2016: 913-922.
- [31] MONTAVON G, BINDER A, LAPUSCHKIN S, *et al.* Layer-wise relevance propagation: An overview [M]//*Explainable AI: Interpreting, explaining and visualizing deep learning*. USA: Springer, 2019: 193-209.
- [32] LAPUSCHKIN S, BINDER A, MONTAVON G, *et al.* The LRP toolbox for artificial neural networks [J]. *J Mach Learn Res*, 2016, 17: 3938-3942.
- [33] CHICCO D, JURMAN G. The advantages of the Matthews correlation coefficient(MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation [J]. *BMC Genomics*, 2020, 21(1): 1-13.
- [34] NIGG BM, BALTICH J, MAURER C, *et al.* Shoe midsole hardness, sex and age effects on lower extremity kinematics during running [J]. *J Biomech*, 2012, 45(9): 1692-1697.
- [35] SAMEK W, BINDER A, MONTAVON G, *et al.* Evaluating the visualization of what a deep neural network has learned [J]. *IEEE T Neur Net Lear*, 2016, 28(11): 2660-2673.
- [36] 曹方圆, 徐俊凯, 胡海, 等. 跑步时足偏角对胫骨冲击影响的探索性研究 [J]. *医用生物力学*, 2019, 34(2): 207-212.
CAO FY, XU JK, HU H, *et al.* Exploration study about influence of foot progression angle on tibial shock during running [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(2): 207-212.