

文章编号: 1004-7220(2021)05-0725-07

## 着鞋类型和步速对膝关节载荷的影响

王勇<sup>1,2</sup>, 任慧<sup>3</sup>, 汤运启<sup>3</sup>, 梁雷超<sup>4</sup>, 邹利民<sup>5</sup>, 刘宇<sup>2</sup>, 黄灵燕<sup>2</sup>

(1.聊城大学体育学院, 山东聊城 252000; 2.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;

3.陕西科技大学设计与艺术学院, 西安 710021; 4.上海健康医学院康复学院, 上海 201318;

5.井冈山大学体育学院, 江西吉安 343000)

**摘要:目的** 探讨着鞋类型(裸足、普通鞋、极简鞋)与步行速度(快步走、常速行走)对膝关节生物力学指标的影响,为科学健身提供理论参考。**方法** 采用Vicon三维运动捕捉系统、Kistler三维测力台同步采集10名男性在裸足、穿着不同鞋常速行走与快步走时下肢运动生物力学指标。采用双因素(2种行走方式×3种鞋类型)重复测量方差分析对各指标进行统计分析。**结果** 相对于快步走,常速行走时足底压力中心(center of pressure, COP)向外偏移较大,额状面膝关节力臂、膝关节内收外力矩和第1峰值负载率均较小,但额状面膝关节冲量矩较大;相对于穿着普通跑鞋,裸足或穿着极简鞋时,步幅变小,COP向外偏移较大,额状面膝关节力臂、膝关节内收外力矩、第1峰值负载率和额状面膝关节冲量矩较小。**结论** 为降低额状面膝关节冲量矩以及峰值负载率,建议着极简鞋采用小步幅进行快步走锻炼。

**关键词:** 极简鞋; 行走速度; 膝关节; 内收外力矩; 压力中心; 运动生物力学

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2021.05.010

## Effects of Shoe Type and Walking Speed on Knee Joint Loads

WANG Yong<sup>1,2</sup>, REN Hui<sup>3</sup>, TANG Yunqi<sup>3</sup>, LIANG Leichao<sup>4</sup>, ZOU Limin<sup>5</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>, HUANG Lingyan<sup>2</sup>

(1. Department of Physical Education, Liaocheng University, Liaocheng 252000, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 3. College of Art and Design, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 4. College of Rehabilitation, Shanghai University of Medicine and Health Sciences, Shanghai 201318, China; 5. Department of Physical Education, Jinggangshan University, Ji'an 343009, Jiangxi, China)

**Abstract: Objective** To investigate the effects of shoes type (barefoot, ordinary running shoes, minimalist shoes) and walking speed (jogging, walking at normal speed) on biomechanical parameters of knee joint, so as to provide theoretical reference for scientific fitness. **Methods** Vicon three-dimensional (3D) motion capture system and Kistler 3D force plate were used to collect biomechanical parameters of lower limbs from 10 subjects during walking at different speed with different shoes. Two-way (2 walking conditions × 3 shoe conditions) repeated measures analysis of variance was used to statistically analyze each dependent variable. **Results** Compared with jogging, the lateral excursion of plantar center of pressure (COP) was greater, the moment arm in frontal plane, the adduction moment and peak loading rate of knee joint were smaller, but the angular impulse of knee joint in frontal plane was greater. Compared with ordinary running shoes, the stride length

收稿日期:2020-10-17; 修回日期:2020-12-23

基金项目:科技冬奥国家重点研发计划(2018YFF0300500),国家自然科学基金项目(11932013,31701041),教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJCZH115,21YJAZH092),聊城大学科研基金项目(321021947),大学生创新创业项目(S201910447045,CXC2020Y140,S202010708004)

通信作者:黄灵燕,讲师,E-mail:alice37yn@163.com

was decreased, the lateral excursion of COP was greater, and the moment arm of knee joint in frontal plane, the knee adduction moment, the peak load rate and the angular impulse of knee joint in frontal plane were smaller. **Conclusions** In order to reduce the angular impulse and peak loading rate of knee joint in frontal plane, it is recommended to jog with small strides for ordinary people with minimalist footwear.

**Key words:** minimalist shoes; walking speed; knee adduction moment; center of pressure (COP); sports biomechanics

行走可以分为常速行走与快步走,是目前比较流行的健身运动,然而行走也可能导致膝关节过用损伤<sup>[1-2]</sup>。研究发现,膝关节内收外力矩(knee adduction moments, KAM)与膝关节损伤关系密切, KAM 每增加 1%, 患膝骨关节炎风险就增加 6.46 倍<sup>[3-4]</sup>。研究表明,针对重复性运动的损伤风险,不应当仅考虑峰值力矩,还应当考虑力矩的时间累计效应,即冲量矩<sup>[5-6]</sup>。因此,探讨由常速行走变为快步走时其 KAM 冲量矩的变化,更有助于理解膝关节过用损伤发生的原因。

此外,着鞋类型可以影响 KAM<sup>[7-8]</sup>。相对于穿着普通运动鞋,裸足行走时具有较小的 KAM<sup>[9]</sup>;然而,相对于穿着极简鞋,裸足时地面反作用力(ground reaction force, GRF)峰值负载率(loading rate, LR)较大,从而增加冲击损伤风险<sup>[10-12]</sup>。跑步时足部触地方式对 LR 影响较大,而着鞋类型间 LR 差异不具有显著性<sup>[13]</sup>。不同刚度鞋底会影响行走时足底压力中心(center of pressure, COP)离足中线距离,即 COP 偏移<sup>[14]</sup>。研究发现, COP 位置从内侧向外侧移动会使 KAM 减小<sup>[15]</sup>。然而,穿着不同类型鞋行走时 COP 是否会产生差异,还有待研究。

Keenan 等<sup>[16]</sup>研究发现,裸足比着鞋行走时的步幅显著减小,而步幅改变通常伴随足部触地方式的改变,步幅减小可能更多地采用前足触地模式<sup>[17]</sup>。Lieberman 等<sup>[18]</sup>认为,采用前足触地模式可以有效降低触地时 LR。由常速行走变为快步走时,可以采取增加步幅或者增加步频实现。从降低 KAM 以及 LR 出发,快步走应该采用何种形式还有待探讨。

本文通过受试者裸足或者穿着不同类型鞋采用常速或者快步走,探讨鞋与速度对 KAM 以及 LR 的影响,为健身行走人群预防膝关节损伤提供理论参考。本文研究假设:①与常速行走相比,快步走时 COP 向内侧偏移,额状面膝关节力臂(knee lever

arm, KLA)和 KAM 增加,冲量矩减小,GRF 峰值 LR 增加;②与普通鞋相比,裸足或穿着极简鞋行走时,步幅减小, COP 向外侧偏移,额状面 KLA、KAM 以及冲量矩减小,矢状面第 1 峰值 LR 增加。

## 1 研究对象和方法

### 1.1 受试者

招募上海体育学院 10 名男性健康大学生参与本研究,年龄(22.7±1.9)岁;身高(1.75±0.06) m;体重(65.65±5.83) kg。纳入标准:①身体健康的男性,近半年内无下肢损伤史;②无穿极简鞋经历;③身体质量指数(body mass index, BMI)为 18~25 kg/m<sup>2</sup>;④行走时习惯后跟着地。测试前研究人员告知受试者全部的实验流程和注意事项。所有受试者均签署知情同意书。

### 1.2 材料与仪器

实验用鞋分别为:①阿迪达斯普通跑鞋 Ultra Boost 19 w,质量 320 g,中底厚度:后跟 32.2 mm,前掌 22.2 mm,弯折刚度 0.138 N·m/(°)(Exeter 变速弯折刚度试验机 FLEX II 测试, Exeter Resreach 公司,美国);②极简鞋,帮面材质为弹性飞织材料,质量 170 g,鞋底厚度:前掌 8 mm,后跟 18 mm,弯折刚度 36 mN·m/(°)(见图 1)。



图 1 实验用鞋

Fig.1 Experimental shoes (a) Standard running shoe, (b) Minimalist shoe

使用运动捕捉系统(T40S, Vicon 公司,瑞典)和三维测力台(9287B, Kistler 公司,瑞典)同步测量

受试者在行走和快步走时的运动学和动力学数据,采样频率分别为 0.2、1 kHz。

### 1.3 实验方案

测试前,将 35 个反光标记点分别贴在受试者的骨性标记点位置处<sup>[19]</sup>。左右大腿及小腿外侧分别绑定追踪板,大腿和小腿追踪板上的反光标记点数量分别为 4、3 个。

步道长度为 15 m,测力台位于步道中间。两组光电门分别放置于测力台两侧,间距设定为 2 m。用光电门测试行走和快步走速度,要求行走速度为 1.5、2.0 m/s,严格控制速度误差在 5% 以内。如果速度超出此范围,需要重新测试。受试者随机完成裸足及不同着鞋状态下的行走、快步走测试。

### 1.4 数据处理

使用 Visual 3D 软件进行逆向动力学计算,使用巴特沃斯 4 阶低通滤波器对运动学和动力学进行滤波处理,截止频率分别为 12、50 Hz<sup>[15]</sup>。参考 Solomonow-Avnon 等<sup>[14]</sup>的研究方法,计算步幅、矢状面 GRF 峰值、矢状面 GRF 第 1 峰值、触地角、矢状面第 1 峰值 LR、COP 偏移量、额状面 KLA、KAM、KAM 最大时刻 COP 位置、KAM 最大时刻 KLA 以及额状面膝关节冲量矩等指标。其中,COP 偏移为 COP 离足中线距离;额状面 KLA 为膝关节中心到 GRF 在额状面投影的垂直距离(见图 2)。

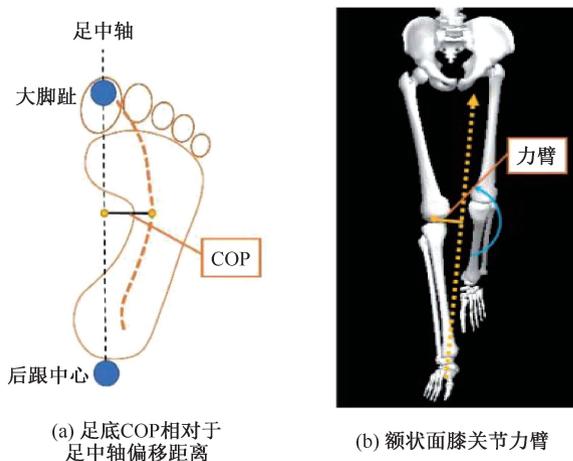


图 2 COP 偏移及膝关节能力臂示意图

Fig.2 Schematic for COP deviation and knee arm of force

- (a) Distance between the plantar COP and the foot axis,  
(b) Knee arm of force in frontal plane

根据三维测力台最小阈值 10 N 确定足跟着地

和足尖离地时刻,由此确定支撑期时间。由于支撑初期和支撑末期 COP 和 KLA 等指标变异较大,故仅计算支撑中期(16.6%~83.3% 支撑期)各个指标的最大值。其中,触地角定义为着地时足部和地面之间的夹角,触地角越小,表明人体越倾向于前掌着地姿态(见图 3)。

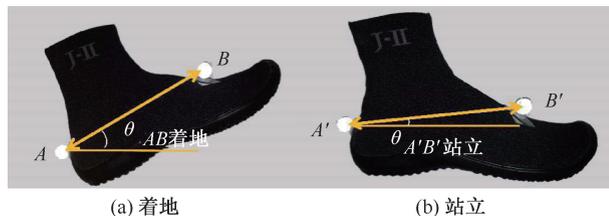


图 3 触地角定义

Fig.3 Definition of foot strike angle (a) Foot strike,  
(b) Standing

为规避体重(body weight, BW)和身高(height, Ht)对实验结果造成影响,数据处理时将 LR 和 GRF 峰值等指标用受试者自身 BW 进行标准化处理,峰值 GRF 和峰值 LR 的单位分别为 BW 和 BW/s;对力矩和冲量矩进行 Ht 和 BW 标准化处理,其单位分别为  $N \cdot m \cdot (BW \cdot Ht\%)^{-1}$  和  $N \cdot m \cdot s \cdot (BW \cdot Ht\%)^{-1}$ 。

### 1.5 统计分析

各样本数据的正态分布用 Shapiro-Wilk 进行检验,并采用 Levene's 检验各样本方差齐性。采用双因素(2 种行走方式×3 种着鞋状态)重复测量方差分析,对各指标进行统计分析。方差分析动作和着鞋状态两种主效应交互显著后,则进行简单效应分析;若交互效应不显著,则进行主效应检验,并使用 Bonferroni 法进行事后检验。显著性水平设为 0.05。采用统计软件 SPSS 21.0 (IBM 公司,美国)处理数据。各指标均采用均值±标准差表示。

## 2 研究结果

### 2.1 整个支撑期主要统计指标

无论行走或者快步走,穿着极简鞋与普通运动鞋,在足触地后 COP 几乎全部处于足中轴外侧,而裸足时 COP 处于足内侧后逐渐移向外侧;KLA 在足触地后有轻微的波动,之后在支撑前期快速达到峰值,后缓慢下降,在足离地前突然下降接近 0;KAM 在整个支撑期内呈现出典型的双峰曲线,第 1 峰值出现在支撑前期,且大于第 2 峰值(见图 4)。

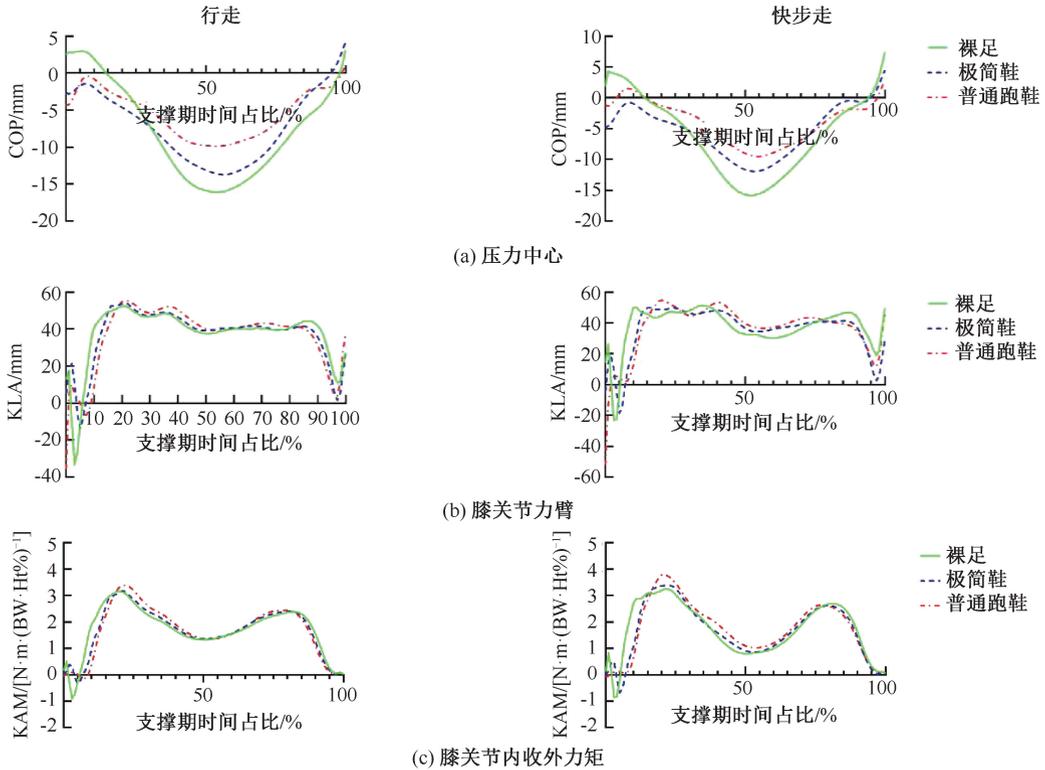


图4 不同着鞋条件下步行与快步走时支撑时相主要统计指标曲线

Fig.4 COP, KLA and KAM curves during walking and jogging under different shoe conditions

(a) Plantar COP, (b) KLA, (c) KAM

## 2.2 支撑时相各生物力学指标

表1所示为不同着鞋条件下步行与快步走支撑时相各生物力学参数对比。动作(步行与快步走)与着鞋类型的交互作用对步幅 [ $F(2, 18) = 1.132, P = 0.344$ ]、矢状面GRF峰值 [ $F(2, 18) = 1.027, P = 0.378$ ]、矢状面GRF第1峰值 [ $F(2, 18) = 3.044, P = 0.073$ ]、触地角 [ $F(2, 18) = 3.460, P = 0.054$ ]、COP [ $F(2, 18) = 0.984, P = 0.393$ ]、KLA [ $F(2, 18) = 0.573, P = 0.574$ ]、KAM [ $F(1.619, 14.572) = 1.779, P = 0.197$ ]、KAM最大时刻COP位置(COP-KAM) [ $F(2, 18) = 1.349, P = 0.284$ ]、KAM最大时刻KLA(KLA-KAM) [ $F(2, 18) = 1.692, P = 0.212$ ]以及额状面膝关节冲量矩 [ $F(2, 18) = 0.413, P = 0.668$ ]的影响均无统计学意义。

步行比快步走时的步幅、触地角、KLA以及KAM等指标均要小,而比快步走时的额状面膝关节冲量矩大。

裸足、穿着极简鞋与普通鞋间的矢状面GRF峰

值差异不具有显著性,但步幅、触地角、KLA、KAM以及额状面膝关节冲量矩差异均具有显著性。相对于穿着极简鞋和普通跑鞋,裸足时的步幅、触地角、COP、KLA、KAM以及额状面膝关节冲量矩都要小( $P < 0.05$ );着极简鞋时触地角、COP、KLA比着普通跑鞋时的要小( $P < 0.05$ ),而着极简鞋与着普通跑鞋间的步幅、KAM、额状面膝关节冲量矩差异无显著性( $P > 0.05$ );着普通跑鞋时的矢状面GRF第1峰值最大( $P < 0.05$ ),而着极简鞋时的矢状面GRF第1峰值最小( $P < 0.05$ )。

动作(常速步行与快步走)与着鞋类型的交互作用对垂直GRF峰值LR [ $F(1.21, 10.886) = 9.462, P = 0.002$ ]的影响具有统计学意义。单因素重复测量方差分析发现,裸足、穿着极简鞋以及普通跑鞋在行走与快步走间的LR都存在显著性差异( $P < 0.05$ ),穿着普通跑鞋行走时LR最小( $P < 0.05$ ),裸足快步走时LR最大( $P < 0.05$ )。

表1 不同着鞋条件下步行与快步走支撑时相各生物力学参数对比( $n=10$ )

Tab.1 Comparison of biomechanical parameters in stance phase under different shoe conditions during walking and jogging

参数	行走			快步走		
	裸足	极简鞋	普通鞋	裸足	极简鞋	普通鞋
步幅 <sup>b,c</sup> /m	1.50±0.06	1.55±0.05	1.57±0.06	1.71±0.11	1.76±0.11	1.75±0.12
矢状面 GRF 峰值 <sup>b</sup> /BW	1.29±0.08	1.27±0.06	1.26±0.07	1.47±0.14	1.33±0.26	1.41±0.05
矢状面 GRF 第1峰值 <sup>b,c</sup> /BW	0.75±0.19	0.63±0.14	1.22±0.10	1.00±0.13	0.94±0.19	1.38±0.07
LR <sup>a</sup> /(BW·s <sup>-1</sup> )	139.45±46.05	58.29±19.85 <sup>d</sup>	18.97±3.18 <sup>d,e</sup>	191.86±29.86	103.74±32.07 <sup>d</sup>	26.46±3.56 <sup>d,e</sup>
触地角 <sup>b,c</sup> /(°)	21.90±3.59	25.62±3.95	27.71±4.78	23.13±2.59	27.87±3.74	32.44±3.70
COP <sup>b,c</sup> /mm	-18.03±8.07	-14.14±5.73	-11.12±6.13	-16.21±7.62	-12.76±6.30	-10.45±4.78
KLA <sup>b,c</sup> /mm	54.97±5.55	57.51±4.60	58.83±5.01	57.44±5.96	58.46±4.28	61.92±4.80
KAM <sup>b,c</sup> /[N·m·(BW·Ht%) <sup>-1</sup> ]	3.35±0.49	3.36±0.54	3.57±0.73	3.62±0.55	3.86±0.88	4.07±0.76
COP_KAM <sup>b,c</sup> /mm	-6.11±2.33	-4.42±1.96	-2.30±2.31	-4.22±1.87	-2.63±1.51	-1.31±1.06
KLA_KAM <sup>b,c</sup> /mm	51.23±6.58	53.81±7.96	57.52±7.04	56.03±4.99	57.00±6.21	59.32±7.50
冲量矩 <sup>b,c</sup> /[N·m·s·(BW·Ht%) <sup>-1</sup> ]	0.99±0.17	1.05±0.17	1.10±0.20	0.88±0.16	0.89±0.12	0.96±0.20

注:<sup>a</sup>代表动作×着鞋类型具有交互作用;<sup>b</sup>代表动作效应;<sup>c</sup>代表着鞋类型效应,具有统计学意义( $P<0.05$ );<sup>d</sup>代表做简单效应分析时,与裸足间的差异具有显著性,<sup>e</sup>代表与着极简鞋间的差异具有显著性, $P<0.05$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 不同步速下各统计指标

本文结果表明,快步走时 COP、额状面 KLA、额状面膝关节内收外力矩以及垂直 GRF 峰值 LR 均大于常速步行,但额状面膝关节冲量矩却小于步行(见表1),这验证了原假设①。

研究表明,COP 向内偏移会造成 KLA 增加,而引起 KAM 增加<sup>[7]</sup>,本文也验证了这一点。本文发现,快步走时 COP 向内偏移增加,并引起 KLA、KAM 增加,且 KAM 最大值时刻的 COP 位置更加向内,并具有更大的 KLA,提示速度的增加能够引起 COP 向内偏移,以保持高速时身体的平衡<sup>[20-21]</sup>。有研究认为,KAM 增加,与速度增加而导致 GRF 的增加有关<sup>[22-24]</sup>;而本文也发现,快步走比常速行走时,具有更大的 GRF 峰值,这可以从 GRF 角度解释。Telfer 等<sup>[25]</sup>发现,步行速度每增加 0.1 m/s,KAM 约增加 0.18% BW·Ht。本研究中,步行和快步走的速度分别为 1.5、2.0 m/s,这可以从速度方面解释快步走时的 KAM 较行走时大的原因;而 Radzimski 等<sup>[23]</sup>认为,额状面膝关节冲量矩的降低,主要是由于速度增加减小了步态周期支撑时相的时间,这与本研究发现相似。

针对不同的膝骨关节炎患者,有研究认为应当降低患者步速,以降低 KAM。然而,也有研究认为,虽然降低步速确实会使 KAM 降低,但是却增加了额状面膝关节冲量矩,并且相对于峰值力矩,高重

复性运动中力矩的累积效应更能够解释过用损伤的原因<sup>[6]</sup>。本文发现,快步走时额状面膝关节冲量矩小于常速行走,故从降低额状面膝关节冲量矩角度出发,建议采用快步走进行锻炼。然而,本文同时发现,快步走比常速行走时具有更大的第1峰值 LR,从降低峰值 LR 角度出发,显然应该采用常速行走进行锻炼。Lieberman 等<sup>[18]</sup>研究发现,足部触地方式对 LR 的影响较大,相对于后足触地模式,前足触地模式具有较小的 LR;而本研究中由常速行走变为快步走时触地角增加,说明快步走时足部触地模式更接近于后足模式;同时,本研究的受试者由常速行走变为快步走,是通过增加步幅实现,而增加步幅往往会导致更多的后足触地<sup>[17]</sup>。因此,快步走时具有较大的峰值 LR 可能与步幅过大和后足触地模式有关,而要想降低快步走时较大的峰值 LR,可能需要减小步幅,采用更多的前足触地模式。基于以上分析,从降低额状面膝关节冲量矩以及峰值 LR 出发,本文认为采用小步幅的快步走,可能会降低膝关节过用损伤风险。

#### 3.2 不同着鞋条件下各统计指标

本文结果表明,裸足时 COP、KLA 以及 KAM 最小,额状面膝关节冲量矩最小,步幅最小,而垂直 GRF 峰值 LR 最大,但矢状面 GRF 峰值差异不具有显著性(见表1),这部分验证了原假设②。

Shakoor 等<sup>[26]</sup>发现,相对于穿着普通运动鞋,裸足时 KAM 最小。此外,有研究发现,随着鞋底刚度的增加,COP 向内侧偏移增加<sup>[25]</sup>。而 COP 偏移与

KLA 高度相关, COP 向内侧偏移会导致 KLA 增加, 并引起 KAM 增大<sup>[7]</sup>, 这与本研究发现一致, 推测本研究中极简鞋的鞋底刚度要小于普通运动鞋。Keenan 等<sup>[16]</sup> 研究也发现, 在相同步速下, 相对于穿着运动鞋, 裸足时具有最小的 KAM, 认为这是由于步幅以及 GRF 的改变引起。本研究中, 着鞋类型间的 GRF 无显著性差异, 而裸足时具有较小的步幅, 这与部分研究发现裸足时步幅变小一致<sup>[27]</sup>。因此, 本文认为, 这种差异主要来自步幅的改变, 因为采用小步幅可能改变足的触地模式, 即裸足时倾向于前足触地。本文还发现, 裸足时的额状面膝关节冲量矩最小, 这也与 Trombini-Souza 等<sup>[28]</sup> 的研究结果“长期穿着极简鞋能够很好缓解膝关节炎患者的疼痛、僵硬, 并降低膝关节内收外力矩”一致。由此, 相对于穿着普通运动鞋, 裸足或者穿着极简鞋能够减小膝关节内收外力矩。然而, 本文发现, 裸足时的峰值 LR 显著大于其他两种情况, 而过大的峰值 LR 与冲击性损伤有密切关系<sup>[4,29]</sup>。因此, 从降低膝关节损伤风险考虑, 本文建议采用小步幅穿着极简鞋进行行走或者快步走。

## 4 结论

行走或快步走时, 裸足能够有效减小额状面膝关节冲量矩, 但具有较大的峰值 LR。穿着普通跑鞋虽然具有较小的峰值 LR, 但具有较大的额状面膝关节冲量矩。综合考量, 穿着极简鞋相对适中。而无论裸足还是穿着极简鞋或普通跑鞋, 快步走能够减小额状面膝关节冲量矩; 由常速行走变为快步走时, 增大步幅可能导致更多的后足触地模式, 从而增加峰值 LR。据此, 从降低额状面膝关节冲量矩以及峰值 LR 出发, 本文建议穿着极简鞋采用小步幅进行快步走锻炼。

## 参考文献:

[ 1 ] 顾耀东, 孙冬, GUSZTÁV F, 等. 裸足运动方式对下肢生物力学功能调整的研究进展 [J]. 中国体育科技, 2019, 55 (1): 61-74.

[ 2 ] FOROUGH N, SMITH R, VANWANSEELE B. The association of external knee adduction moment with biomechanical variables in osteoarthritis: A systematic review [J]. Knee, 2009, 16(5): 303-309.

[ 3 ] ERHART JC, DYRBY CO, D'LIMA DD, et al. Changes in

*in vivo* knee loading with a variable-stiffness intervention shoe correlate with changes in the knee adduction moment [J]. J Orthop Res, 2010, 28(12): 1548-1553.

[ 4 ] MIYAZAKI T, WADA M, KAWAHARA H, et al. Dynamic load at baseline can predict radiographic [J]. Ann Rheum Dis, 2002, 61(7): 617-622.

[ 5 ] NIGG B. Biomechanical considerations on barefoot movement and barefoot shoe concepts [J]. Footwear Sci, 2009, 1(2): 73-79.

[ 6 ] WANG Y, LIANG L, WANG D, et al. Cycling with low saddle height is related to increased knee adduction moments in healthy recreational cyclists [J]. Eur J Sport Sci, 2020, 20(4): 461-467.

[ 7 ] FERRIGNO C, WIMMER MA, TROMBLEY RM, et al. A reduction in the knee adduction moment with medial thrust gait is associated with a medial shift in center of plantar pressure [J]. Med Eng Phys, 2016, 38(7): 615-621.

[ 8 ] PATERSON KL, BENNELL KL, WRIGLEY TV, et al. Effects of footwear on the knee adduction moment in medial knee osteoarthritis: Classification criteria for flat flexible vs stable supportive shoes [J]. Osteoarthritis Cartilage, 2017, 25(2): 234-241.

[ 9 ] RADZIMSKI A O, MUNDERMANN A, SOLE G. Effect of footwear on the external knee adduction moment-A systematic review [J]. Knee, 2012, 19(3): 163-175.

[ 10 ] WALLACE IJ, KOCH E, HOLOWKA NB, et al. Heel impact forces during barefoot versus minimally shod walking among Tarahumara subsistence farmers and urban Americans [J]. R Soc Open Sci, 2018, 5(3): 180044.

[ 11 ] KERIN AJ, COLEMAN A, WISNOM MR, et al. Propagation of surface fissures in articular cartilage in response to cyclic loading *in vitro* [J]. Clin Biomech, 2003, 18(10): 960-968.

[ 12 ] MUNDERMANN A, DYRBY CO, ANDRIACCHI TP. Secondary gait changes in patients with medial compartment knee osteoarthritis: increased load at the ankle, knee, and hip during walking [J]. Arthritis Rheum, 2005, 52(9): 2835-2844.

[ 13 ] 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.

[ 14 ] SOLOMONOW-AVNON D, HERMAN A, WOLF A. Mechanism of reducing knee adduction moment by shortening of the knee lever arm via medio-lateral manipulation of foot center of pressure: A pilot study [J]. J Biomech, 2019, 83: 143-149.

[ 15 ] LEWINSON RT, MADDEN R, KILLICK A, et al. Foot structure and knee joint kinetics during walking with and

- without wedged footwear insoles [J]. *J Biomech*, 2018, 73: 192-200.
- [16] KEENAN GS, FRANZ JR, DICHARRY J, *et al.* Lower limb joint kinetics in walking: The role of industry recommended footwear [J]. *Gait Posture*, 2011, 33(3): 350-355.
- [17] BOYER ER, DERRICK TR. Select injury-related variables are affected by stride length and foot strike style during running [J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43(9): 2310-2317.
- [18] 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.
- [19] YANG Y, FANG Y, ZHANG X, *et al.* Does shoe collar height influence ankle joint kinematics and kinetics in sagittal plane maneuvers? [J]. *Sports Sci Med*, 2017, 16(4): 543-550.
- [20] CHIU MC, WU HC, CHANG LY. Gait speed and gender effects on center of pressure progression during normal walking [J]. *Gait Posture*, 2013, 37(1): 43-48.
- [21] ORENDURFF MS, SEGAL AD, KLUTE GK, *et al.* The effect of walking speed on center of mass displacement [J]. *J Rehabil Res Dev*, 2004, 41(6A): 829-834.
- [22] LANDRY SC, MCKEAN KA, HUBLEY-KOZEY CL, *et al.* Knee biomechanics of moderate OA patients measured during gait at a self-selected and fast walking speed [J]. *J Biomech*, 2007, 40(8): 1754-1761.
- [23] RADZIMSKI AO, MÜNDERMANN A, SOLE G. Effect of footwear on the external knee adduction moment: A systematic review [J]. *Knee*, 2012, 19(3): 163-175.
- [24] BEJEK Z, PAROCZAI R, ILLYES A, *et al.* The influence of walking speed on gait parameters in healthy people and in patients with osteoarthritis [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006, 14(7): 612-622.
- [25] TELFER S, LANGE MJ, SUDDUTH ASM. Factors influencing knee adduction moment measurement: A systematic review and meta-regression analysis [J]. *Gait Posture*, 2017, 58: 333-339.
- [26] SHAKOOR N, SENGUPTA M, FOUCHER K C, *et al.* Effects of common footwear on joint loading in osteoarthritis of the knee [J]. *Arthritis Care Res*, 2010, 62(7): 917-923.
- [27] RAO S, RIPA R, LIGHTBOURNE K. Predictors of walking speed and stride length in high- and low-heeled footwear [J]. *Footwear Sci*, 2013, 5(3): 179-184.
- [28] TROMBINI-SOUZA F, MATIAS AB, YOKOTA M, *et al.* Long-term use of minimal footwear on pain, self-reported function, analgesic intake, and joint loading in elderly women with knee osteoarthritis: A randomized controlled trial [J]. *Clin Biomech*, 2015, 30(10): 1194-1201.
- [29] WANG TM, WU KW, CHEN CR, *et al.* Loading rates during walking in adolescents with type II osteonecrosis secondary to pelvic osteotomy [J]. *J Orthop Res*, 2016, 34(12): 2199-2206.