

文章编号:1004-7220(2017)02-0154-07

着鞋和触地方式对慢跑时足部受力特征的影响

杨 洋, 王 熙, 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:目的 探讨穿鞋和裸足跑在不同触地方式下对足部受力特征的影响。方法 利用 Medilogic 鞋垫式足底压力测试系统和 Kistler 三维测力台采集 12 名健康男性受试者在着鞋与裸足情况下分别进行后跟触地与前掌触地慢跑(3 m/s)时的受力特征,包括地面反作用力、冲击力峰值、最大负载率、足底压力峰值以及冲量。结果 (1)后跟触地时,穿着运动鞋可以显著降低最大负载率,并且延缓冲击力峰值出现的时间。前掌触地时,穿鞋时的最大蹬地力量要显著大于裸足;(2)不同触地方式对于足底各区域压力峰值参数的影响相较于着鞋条件更多,主要表现为两种触地方式之间对于足中区和足后区足底压力峰值和出现时间的差异。结论 不同触地方式对慢跑时的足部受力影响更为显著。穿鞋后跟触地跑能降低冲击负荷,而裸足前掌触地跑则会使足底压力过度集中于足前部,提示慢跑时无论采用何种触地方式均可以通过选择合理的运动鞋来减小足部受力。

关键词: 运动鞋; 裸足; 触地方式; 冲击力; 足底压力

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2017.02.009

The influence of shod conditions and foot-strike patterns on foot force characteristics during jogging

YANG Yang, WANG Xi, FU Wei-jie (Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: Objective To investigate the influence of barefoot running and shod running with different foot-strike patterns on characteristics of plantar pressures and ground reaction force (GRF). **Methods** Kistler force plates and Medilogic insole plantar pressure system were used to collect the kinetic data from a total of 12 healthy male volunteers under shod and barefoot conditions with heel strike and forefoot strike at the speed of 3 m/s, including the GRF, the peak impact force, the maximum loading rate, the peak plantar pressure and impulse. **Results** (1) Shod running with heel strike significantly reduced the maximum loading rate and extended the time to reach the peak impact force. Under forefoot strike pattern, shod running significantly increased the maximum push-off force than barefoot running. (2) More plantar pressure parameters were influenced by the foot-strike patterns as compared to those under the shod conditions, and there was a significant difference in the peak pressure and the time to reach the peak pressure in the mid-foot and heel region between two foot-strike patterns. **Conclusions** The foot-strike pattern shows a more obvious influence on plantar pressure during jogging than the shod conditions. Shod running with heel strike can reduce the impact load, while barefoot running with forefoot strike can cause an excessive concentration of plantar pressure on the forefoot region, indicating that a suitable pair of sports shoes is needed for both foot-strike patterns to reduce the plantar pressure during jogging.

Key words: Footwear; Barefoot; Foot-strike pattern; Impact force; Plantar pressure

收稿日期:2016-04-14; 修回日期:2016-05-12

基金项目:国家自然科学基金项目(11302131),教育部博士点基金资助项目(20123156120003),上海市教育委员会科研创新项目(14YZ125)。

通信作者:傅维杰,副教授,硕士研究生导师,Tel:(021)51253239;E-mail:fuweijie@sus.edu.cn。

跑步作为一种简单有效的健身方式,越来越受到运动爱好者的喜爱^[1]。据统计,约75%的跑者在慢跑时习惯以足后跟触地^[2],这种触地方式会在足后跟产生相应的冲击力并传递至下肢^[3],而此重复的冲击被认为能够对下肢的肌-骨系统造成损伤^[4-5]。因此,现代运动鞋在鞋中底加入EVA等材料对其进行缓冲,希望能够减小冲击,进而预防可能产生的损伤^[6]。但遗憾的是,近50年间,跑步损伤的发生率并没有因此而产生明显的改变^[7]。

现阶段,部分跑者开始使用前掌触地的跑步方式,以避免后跟触地时所带来的反复冲击。Lieberman等^[2]研究认为,采用前掌触地可以减小下肢的有效质量,从而降低下肢损伤发生的风险。值得注意的是,在习惯裸足跑的人群中,绝大多数人都使用前掌触地,故裸足跑被认为可以避免冲击力,进而减小损伤率;但是肌肉产生疲劳的速率会加快,导致小腿三头肌痉挛的几率增加^[8]。因此,对于足部受力而言,究竟是着鞋与否重要还是触地方式更为重要;同时,这两个因素与足部乃至下肢的损伤是否存在必然联系,以及是否存在既可以减小冲击同时改善蹬离效果和跑步经济性的运动鞋或运动方式,上述一系列问题仍然值得深究。

本文通过比较裸足和穿鞋跑在不同触地方式下(后跟和前掌触地)冲击力、足底压力、冲量的情况,探讨着鞋条件和触地方式对跑步时足部受力的影响,为跑步方式与运动鞋功能设计提供新思路。

1 研究方法

1.1 实验对象

选取12名上海体育学院非体育系男性学生,年龄(21.0 ± 1.3)岁,身高(177.1 ± 4.2)cm,体重(68.1 ± 7.4)kg,受试者的习惯均为穿鞋跑且为后跟触地。受试者确定其下肢和足部半年内无明显损伤,解剖结构和机能正常,身体状况良好,并于实验前自愿签订知情同意书。

1.2 实验方法

1.2.1 测力台 瑞士Kistler公司生产的Kistler 9287C三维测力台(长×宽:90 cm×60 cm),外置信号放大器,采样频率为1.2 kHz。

1.2.2 鞋垫式足底压力测试系统 使用德国Medilogic鞋垫式足底压力测试系统,测试穿着跑鞋

和裸足跑时足底各分区的压力数据。鞋垫由64个矩阵分布的共225个0.6 cm×0.4 cm压力传感器组成(见图1),压力范围为0~640 kPa,采样频率为120 Hz。所采用的压力鞋垫大小根据受试者的鞋码分别选择,厚度为1.2 mm。

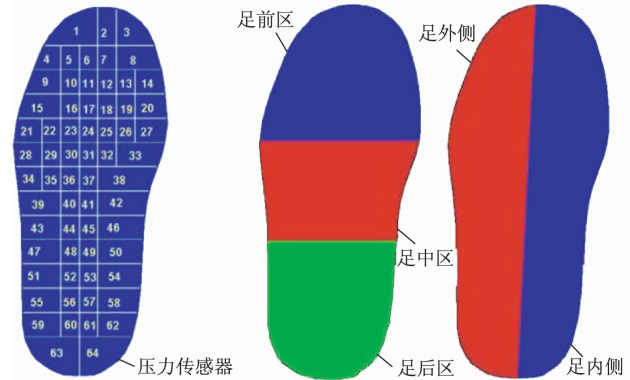


图1 鞋垫压力传感器组成和足底区域划分

Fig.1 Insole pressure sensors and plantar regions

1.2.3 光栅计时测速系统 采用意大利Microgate公司生产Witty-Manual光栅计时系统,测量受试者通过测力台的时间,从而控制平均速度。

1.3 测试方法和评价参数

1.3.1 实验用鞋 选用Nike Air Max 2014全掌气垫慢跑鞋,尺码为US 9或9.5码,袜子选用Nike Dri-FIT面料制作的跑步袜用以配合包裹固定穿鞋和裸足跑时足底压力鞋垫,便于足底压力数据的采集(见图2)。



(a) 实验用鞋

(b) 裸足

图2 不同着鞋条件下足底压力鞋垫安置图

Fig.2 Setting-up of the plantar pressure system under different shod conditions (a) Experimental shoes, (b) Barefoot

1.3.2 测试方法 先让受试者以8 km/h的速度在跑步机上热身3 min,休息30 s,再以11 km/h的速

度慢跑 1 min, 以适应测试时的跑速。受试者以着鞋后跟 (shod running in heel-toe, SR_HT)、着鞋前掌 (shod running in toe-toe, SR_TT)、裸足后跟 (barefoot running in heel-toe, BR_HT)、裸足前掌 (barefoot running in toe-toe, BR_TT) 的方式 (见图 3), 以 3 m/s ($\pm 5\%$) 的跑速通过 Kistler 三维测力台^[9], 并利用光栅计时系统控制上述速度, 成功实验 3 次。采集地面反作用力和足底压力数据, 在确认数据无误后更换条件, 重复以上测试直到所有测试结束 (见图 4)。



图 3 受试者着鞋和触地方式示意图

Fig. 3 Schematic of the shod conditions and strike patterns for subjects (a) Shod running in heel-toe (SR_HT), (b) Shod running in toe-toe (SR_TT), (c) Barefoot running in heel-toe (BR_HT), (d) Barefoot running in toe-toe (BR_TT)

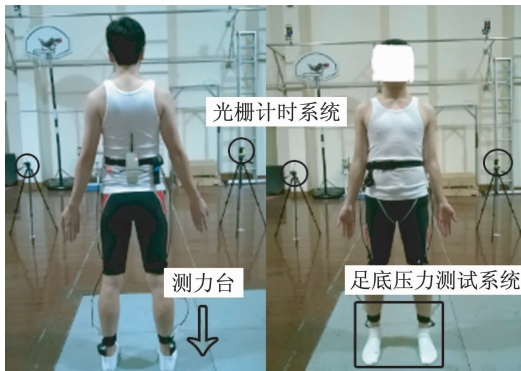


图 4 实验现场布置

Fig. 4 Setting-up of experimental site

1.3.3 评价指标 指标主要包括两个方面: ① 垂直地面反作用力 (ground reaction force, GRF), 其参数包括冲击力峰值即第 1 峰值 (first peak, FP) 和到达 FP 的时间 (t_{FP})、最大负载率 (loading rate, LR) 和到达 LR 的时间 (t_{LR})、最大蹬地力量即第 2 峰值 (second peak, SP) 和到达 SP 的时间 (t_{SP})、整个触地时间 (contact time, CT); ② 足底压力, 包括足底各区域 (全足、足前区、足中区、足后区、足内侧、足外侧)

压力峰值 (peak pressure, PP) 和到达峰值的时间 (t_{PP}); 足底压力冲量 (impulse, I_{50}), 即触地后 50 ms 内足底各区域压力-时间积分。Nigg 等^[7]研究表明, 慢跑过程中的被动冲击阶段发生在足与地面碰撞后的前 20% 阶段, 故仅计算触地后 50 ms 内的足底压力-时间积分。

1.4 数据统计

各参数值采用均值 \pm 标准差表示, 所有数据资料利用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 软件进行统计分析。采用 2×2 双因素 (着鞋与否 \times 触地方式) 重复测量方差分析 (repeated-measure ANOVA), 观察比较 4 种不同条件对足部受力情况 (GRF 与足底压力) 的影响; 采用 LSD 最小差异分析法进行事后两两比较, 显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 研究结果

在 3 m/s ($\pm 5\%$) 的跑速下, 后跟触地时所受的被动 FP 约为体重的 2 倍, 主动 SP 可达体重的 2.5 倍; 然而裸足时 t_{FP} 发生在支撑期的 5% ~ 10% 阶段, 相比穿鞋时更早 (见图 5)。在前掌触地时, 由于触地部位的改变, 避免了 FP 的产生, 故只有 SP; 裸足时 SP 约为体重的 2.5 倍, 而穿鞋时更大, 可达体重的 3 倍。

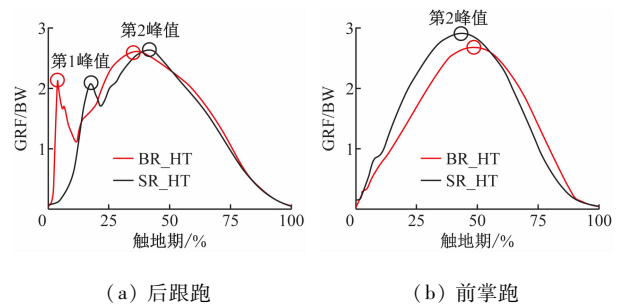


图 5 3 m/s 跑速下不同触地方式下垂直地面反作用力-时间曲线
Fig. 5 The vertical GRF-time curve at the speed of 3 m/s under different foot-strike patterns (a) Heel-toe running, (b) Toe-toe running

2.1 冲击力特性

裸足在后跟触地时的 FP 要大于穿鞋, 但两者间并没有统计学上的差异。然而, 裸足跑时 t_{FP} 要显著小于穿鞋跑, 同时 LR 及 t_{LR} 也显著大于和早于穿鞋跑 (见图 6, $P < 0.001$)。

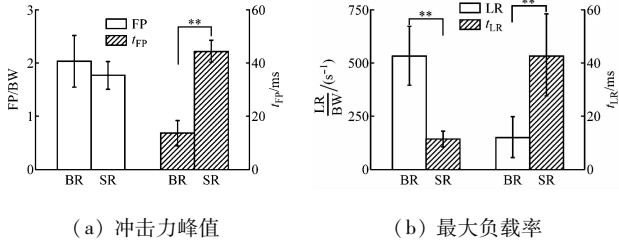


图6 不同鞋条件在后跟触地时冲击力特性及出现时间比较
 Fig.6 Comparison of impact force and occurrence time under different shod conditions (a) The first peak (FP), (b) The maximum loading rate (LR)

2.2 最大蹬地力量和触地时间

2.2.1 最大蹬地力量 在前掌触地时,穿鞋时 SP 要显著大于裸足 ($P = 0.008$)。同时,在后跟触地时,穿鞋时 t_{SP} 要显著晚于裸足 ($P < 0.001$)。

触地方式和着鞋条件对 SP 无明显交互作用,但对 t_{SP} 存在非常显著的交互影响 ($P < 0.001$)。但同为裸足的情况下,后跟触地时 t_{SP} 相比前掌触地更短 ($P = 0.001$);在同为穿鞋情况下,后跟跑时 t_{SP} 更长 ($P = 0.028$)。

2.2.2 触地时间 在后跟触地时,裸足跑时 CT 显著比穿鞋跑时更短 ($P = 0.024$)。同时,触地方式对于 CT 有显著性影响,即前掌跑时 CT 显著比后跟跑时更短 ($P < 0.001$)。

表1 所示为不同着鞋条件和触地方式下 SP 和 CT 的比较。

2.3 足底压力分布和压力冲量

2.3.1 足底压力分布 着鞋条件与触地方式的交互作用只在足后区压力峰值 ($P < 0.001$)、足内侧压力峰值 ($P = 0.049$) 以及到达足内侧压力峰值的时间 ($P = 0.049$) 上存在显著性影响。

着鞋条件对足中区压力峰值 ($P = 0.013$)、足后区压力峰值 ($P < 0.001$) 以及到达足前区压力峰值的时间 ($P = 0.039$) 有显著性的影响。其中,同为后跟触地时,穿鞋情况下的足中区压力峰值显著大于裸足情况下 ($P = 0.008$),足后区压力峰值也是同样情况 ($P < 0.001$)。

触地方式对全足压力峰值 ($P = 0.012$)、足前区压力峰值 ($P = 0.003$)、足中区压力峰值 ($P < 0.001$)、足后区压力峰值 ($P < 0.001$)、足外侧压力峰值 ($P = 0.004$) 有显著性影响。其中在同为裸足的情况下,前掌触地的足前区压力峰值显著大于足后区触地 ($P = 0.003$),后跟触地的足中区压力峰值要大于前掌触地 ($P = 0.001$)。在同为穿鞋的情况下,后跟触地的全足压力峰值要显著大于前掌触地 ($P = 0.003$),足中区压力峰值和足后区压力峰值也大于前掌触地 ($P < 0.001$)。

触地方式因素对到达足前区压力峰值的时间 ($P < 0.001$)、到达足中区压力峰值的时间 ($P = 0.038$)、到达足后区压力峰值的时间 ($P = 0.001$) 以及到达足内侧压力峰值的时间 ($P = 0.002$) 存在显著性影响。其中,在到达足前区压力峰值的时间和到达足中区压力峰值的时间上,前掌触地时出现的时间显著早于后跟触地,而在到达足后区压力峰值的时间和到达足内侧压力峰值的时间上,前掌触地时的出现时间显著晚于后跟触地。

2.3.2 压力冲量 在足后部冲量上,触地方式和着鞋条件之间存在显著性的交互影响。

表2 所示为不同着鞋条件和触地方式下各分区足底压力和触地后 50 ms 足底冲量比较。着鞋条件对足前区 ($P = 0.024$) 和足后区 ($P = 0.002$) 冲量显

表1 不同着鞋条件和触地方式下 SP 及 CT 的比较

Tab.1 Comparison of second peak (SP) and contact time (CT) between different shod conditions and foot-strike patterns

参数	BR		SR	
	HT	TT	HT	TT
SP/BW ^{a,e}	2.49 ± 0.13	2.54 ± 0.34	2.62 ± 0.20	2.81 ± 0.14
$t_{SP}/ms^{a,c,d,f,g}$	100.3 ± 5.4	113.1 ± 7.7	116.6 ± 10.9	108.8 ± 7.1
CT/ms ^{b,d,g}	255.5 ± 19.7	241.3 ± 18.2	272.1 ± 17.5	242.1 ± 13.4

注:BW(body weight);^a 着鞋条件存在显著性影响;^b 触地方式存在显著性影响;^c 着鞋条件与触地方式存在显著性交互影响;^d 同为后跟触地时,不同着鞋条件存在显著性差异;^e 同为前掌触地时,不同着鞋条件存在显著性差异;^f 同为裸足时,不同触地方式存在显著性差异;^g 同为着鞋时,不同触地方式存在显著性差异

表2 不同着鞋条件和触地方式下各分区足底压力和触地后50 ms足底冲量的比较

Tab.2 Comparison of the plantar pressure (PP) and I_{50} between different shod conditions and foot-strike patterns

足底 各分区	PP/[N · cm ⁻² · kg ⁻¹]				t_{pp}/ms				I_{50} [(N · ms) · kg ⁻¹]			
	BR		SR		BR		SR		BR		SR	
	HT	TT	HT	TT	HT	TT	HT	TT	HT	TT	HT	TT
全足	0.10 ^{b,g} ±0.02	0.09 ±0.02	0.11 ±0.01	0.09 ±0.02	98.9 ±10.7	109.5 ±18.4	108.9 ±11.5	111.3 ±21.8	1.8 ^{b,g} ±0.6	1.6 ±0.4	2.0 ±0.5	1.5 ±0.5
足前区	0.17 ^{b,f} ±0.05	0.22 ±0.05	0.17 ±0.03	0.19 ±0.05	136.0 ^{a,b} ±14.7	120.2 ±13.7	149.0 ±18.7	127.7 ±16.0	1.1 ^{a,b,f,g} ±0.9	3.7 ±0.8	0.4 ±0.4	3.3 ±1.0
足中区	0.05 ^{a,b,d,f,g} ±0.02	0.02 ±0.02	0.07 ±0.02	0.03 ±0.02	104.6 ^b ±14.4	98.0 ±42.4	111.9 ±11.1	86.6 ±16.7	0.5 ±0.3	0.26 ±0.19	0.5 ±0.3	0.5 ±0.4
足后区	0.12 ^{a,b,c,d,f,g} ±0.04	0.00 ±0.00	0.18 ±0.03	0.00 ±0.00	63.4 ^b ±16.8	0.0 ±0.0	54.8 ±15.9	0.0 ±0.0	3.7 ^{a,b,c,d,f,g} ±1.2	0.05 ±0.07	5.0 ±1.1	0.3 ±0.3
足外侧	0.10 ^{b,g} ±0.03	0.08 ±0.03	0.11 ±0.01	0.07 ±0.02	96.6 ^{b,c} ±16.1	111.5 ±45.4	101.2 ±11.3	101.2 ±22.4	2.2 ±0.6	2.0 ±0.6	2.2 ±0.4	1.8 ±0.6
足内侧	0.10 ^{c,d} ±0.03	0.11 ±0.02	116.1 ±13.4	122.6 ±20.9	105.7 ±11.9	131.8 ±16.5	116.1 ±13.4	122.6 ±20.9	1.5 ^{b,g} ±0.8	1.2 ±0.4	1.8 ±0.5	1.3 ±0.4

注：^a 着鞋条件存在显著性影响；^b 触地方式存在显著性影响；^c 着鞋条件与触地方式存在显著性交互影响；^d 同为后跟触地时，不同着鞋条件存在显著性差异；^e 同为前掌触地时，不同着鞋条件存在显著性差异；^f 同为裸足时，不同触地方式存在显著性差异；^g 同为着鞋时，不同触地方式存在显著性差异

著性影响，其中裸足时的足前区冲量显著大于穿鞋时($P < 0.001$)，而裸足时足后部冲量要显著小于穿鞋时($P < 0.001$)。

触地方式对全足($P = 0.014$)、足前区($P < 0.001$)、足后区($P < 0.001$)以及足内侧冲量($P = 0.021$)都有显著性影响。其中，同为穿鞋时，后跟触地的全足冲量显著大于前掌触地($P = 0.020$)，足后区($P < 0.001$)和足内侧($P = 0.027$)冲量也都显著大于前掌触地，而足前区冲量则是前掌触地要显著大于后跟触地($P < 0.001$)。

3 讨论

现阶段，尽管有关跑步的研究已经有很多，但由于各种功能运动鞋、仿裸足鞋的出现，对于跑步和运动鞋生物力学的研究仍相当热门。控制跑速在3 m/s ($\pm 5\%$)的情况下，比较裸足和穿鞋跑在不同触地方式下(前掌和后跟触地)GRF和足底压力、冲量的情况。结果发现，着鞋条件对后跟触地时的FP虽然没有显著性影响，但是穿运动鞋可以显著降低LR，并且延缓到达最大FP和LR的时间。而相较于着鞋条件，不同触地方式对于跑步时的足部受力影

响更为显著，且对于足底各区域压力峰值参数的影响相较于着鞋条件更多(13:5)，主要表现为两种触地方式之间对于足中区和足后区足底压力峰值和出现时间的差异。

从力学角度看，冲击力是指两个物体碰撞所产生的力。而在生物力学领域中，早期研究者们把作用于人体的GRF分为低频段的“主动力”和高频段的“被动力”，其中主动力指动作过程中主要依靠肌肉自主活动而产生的力，而被动力指触地时/初期地面对人体肌-骨骼系统产生的被动反作用力^[10]。在本研究中，FP指触地初期的被动力峰值(第1峰值)，而SP指蹬离地面时产生的主动蹬地力峰值(第2峰值)(见图5)。冲击负荷对人体的影响是一个复杂的问题。早期研究认为，反复的冲击力是造成过度使用性运动损伤的主要原因^[4-5]，诸如应力性骨折、髌骨疼痛综合征等。虽然过度的被动冲击可以对人体肌-骨骼系统造成破坏，但这并不意味着冲击力就是造成急、慢性损伤的主要原因。承受适当的负荷对于人体健康是有益的，如对于骨组织而言，反复冲击力在人体生理承受的范围内能够对骨小梁的重建产生积极作用^[11]。然而，过多、过频繁的冲

击与损伤的发生也有着密切的关系,而长时间高强度的跑步显然属于此类。运动鞋的缓冲设计主要是为了减小上述过频、过多的重复冲击力,从而预防可能由此带来的损伤^[12-13]。从本研究结果来看,在后跟触地时,穿鞋与否对 FP 并没有显著影响,这一结果也支持大部分有关冲击力的研究,即鞋的缓冲能力并不会显著影响 FP^[14]。但值得指出的是,在冲击力被广泛研究的情况下,LR 作为代表冲击特征的另一敏感指标,同样被认为是引起过用性损伤的原因^[15]。Hreljac 等^[16]研究认为,在高 LR 下的高冲击力可能会增加过用性损伤的风险,在无法减小冲击力的情况下,降低 LR 也可以降低损伤的风险,达到预防损伤的效果。结合本研究结果,虽然 FP 没有显著性差异,但是穿着运动鞋对于降低 LR 以及延缓到达 FP 的时间的效果却很显著,提示后跟跑并不适合于裸足,同时还证明高缓冲的运动鞋对后跟跑者确实会在减小冲击方面带来益处。

对于前掌触地,由于触地方式的改变,前掌触地不会产生后跟触地时的第 1 峰值,仅会呈现主动蹬地力量的峰值(见图 5)。因此,不少研究者认为,由于前掌触地的跑步方式避免了后跟触地时的冲击力,前掌触地可以减小由被动冲击力所引起的运动损伤的发生率^[2,17]。Ryan 等^[18]对足底筋膜炎跑者进行 12 周传统跑鞋与裸足鞋的运动干预,研究结果表明,前掌跑组的整体疼痛水平降低。然而,近年来更多的临床研究和损伤调查表明,裸足跑和穿鞋跑在对比损伤方面数据的差距并不大^[19-20],且更多证据指向尽管裸足跑或前掌跑可以减小重复冲击力所造成的损伤风险,但是上述跑步选择并不能解决或者减轻所有的跑步损伤;同时,触地方式的转换以及对于损伤的预防要考虑到跑者的个体差异性。Cibulka 等^[21]研究发现,一位习惯前掌触地的跑步者在物理治疗师的指导下转换为后跟触地的方式后,明显减轻了之前的胫骨疼痛。进一步对蹬地力量以及 CT 进行分析比较发现,无论是何种触地方式,在着鞋条件下都会有更大的蹬地力量;而在 CT 方面,无论是穿鞋还是裸足,前掌触地时的 CT 都更短。Squadrone 等^[19]对比有经验的裸足跑者在裸足、穿 vibram 五趾鞋(VF)和穿传统跑鞋情况下的动力学和运动学参数发现,相比传统跑鞋,穿 VF 跑的垂直 GRF 明显更低,并且有比裸足跑更大的峰值推动

力,而在时空参数上 VF 跑相比裸足跑则更接近传统跑鞋。上述结果部分支撑了本文的研究结果,即采用穿鞋前掌跑的组合在避免后跟跑的冲击力的同时,又能产生更大的蹬地力量和更短的 CT,可降低冲击损伤及提高运动表现。

通过比较足底压力峰值和足底冲量结果发现,由于触地部位的不同,触地方式对足底压力的影响十分显著。后跟触地时,压力中心从足后区开始向足前区移动^[22]。而前掌触地时,压力集中于足前区,其他部位不着地,故足中区和足后区的压力很小。从影响具体参数个数来看,触地方式对 18 个参数中的 13 个有显著性影响,而着鞋条件只对其中 5 个有显著性影响,故触地方式对于足底压力各个分区的影响范围更为广泛。值得一提的是,前掌触地的足部平均压力峰值和平均冲量相对于后跟触地显著减小,其中穿鞋前掌跑时这两项数据均最小,且与穿鞋后跟跑相比存在显著差异。由此结合之前冲击力和蹬地力的结果可知,穿鞋前掌跑避免冲击力的同时又有提高运动表现的可能。上述结果提示,现阶段对于裸足跑所表现出来的益处可能源于前掌触地而并非是裸足本身,且由于压力较长时间集中于足前部,裸足前掌触地可能会增加跖骨区域的疲劳性损伤等疾病的风险^[23]。由此可见,对于前掌触地的跑步方式也同样需要选择合理的运动鞋。

本研究虽然采用前人的实验方案,利用运动袜包裹足底压力测试鞋垫测试裸足跑时的足底压力^[24],但由于缺少了鞋的固定和支撑作用,相比穿着运动鞋,裸足跑时鞋垫很可能会更易产生与足底或是运动袜之间的相对滑动。同时,出于研究目的的需要,实验仅选用了缓冲型运动鞋作为着鞋的条件,并控制了跑速(3 m/s),在后续研究中,会考虑针对不同跑速和不同鞋类型对足部负荷的影响,进行更全面的探索。此外,未采集运动学和肌电数据。由于触地方式和着鞋条件的改变导致受试者可能出现的神经肌肉调控等因素,例如触地前肌肉的预激活等^[14],希望在将来的研究中对该问题加以探讨。

4 结论

触地方式相比着鞋条件对于跑步时的足部受力影响更为显著,特别表现为对足底各区域压力峰值和冲量的影响更大。一方面,后跟触地的跑步方式

会对足后跟产生明显的被动冲击载荷,而穿着运动鞋会显著降低LR,延缓FP出现的时间。另一方面,虽然前掌触地可以避免后跟触地所带来的冲击,但是由于足底压力较长时间集中于足前部,也可能会增加此部位(如跖/趾骨等)损伤的风险;而此时穿着运动鞋,足前部所受的压力相比后跟触地时更小,相比裸足还可获得更大的蹬地力量,提示采用前掌触地的跑步方式同样需要通过选择合理的运动鞋来减小足部受力,同时提高运动表现。

参考文献:

- [1] BRAMBLE DM, LIEBERMAN DE. Endurance running and the evolution of Homo [J]. *Nature*, 2004, 432(7015): 345-352.
- [2] 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.
- [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] KONRADSEN L, HANSEN EM, SONDERGAARD L. Long distance running and osteoarthritis [J]. *Am J Sports Med*, 1990, 18(4): 379-381.
- [5] VAN MECHELEN W, HLOBIL H, KEMPER HC. Incidence, severity, aetiology and prevention of sports injuries. A review of concepts [J]. *Sports Med*, 1992, 14(2): 82-99.
- [6] 傅维杰, 魏勇, 刘宇. 穿不同鞋与裸足对羽毛球蹬地动作下肢及跖趾关节运动协调特征的影响 [J]. *医用生物力学*, 2015, 30(2): 159-166.
FU WJ, WEI Y, LIU Y. Effects of footwear and barefoot on movement coordination of lower extremities and metatarsophalangeal joints during push-off in badminton footwork [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(2): 159-166.
- [7] NIGG BM. The role of impact forces and foot pronation: A New Paradigm [J]. *Clin J Sport Med*, 2001, 11(1): 9-2.
- [8] MILGROM C, RADEVA-PETROVA DR, FINESTONE A, *et al.* The effect of muscle fatigue on *in vivo* tibial strains [J]. *J Biomech*, 2007, 40(4): 845-850.
- [9] FU WJ, FANG Y, LIU DMS, *et al.* Surface effects on in-shoe plantar pressure and tibial impact during running [J]. *J Sports Health Sci*, 2015, 4(4): 384-390.
- [10] NIGG BM. Impact forces in running [J]. *Curr Opin Orthop*, 1997, 8(6): 43-47.
- [11] HEINONEN A, KANNUS P, SIEVANEN H, *et al.* Randomised controlled trial of effect of high-impact exercise on selected risk factors for osteoporotic fractures [J]. *Lancet*, 1996, 348(9038): 1343-1347.
- [12] CHIU HT, SHIANG TY. Effects of insoles and additional shock absorption foam on the cushioning properties of sport shoes [J]. *J Appl Biomech*, 2007, 23(2): 119-127.
- [13] CLARKE TE, FREDERICK EC, COOPER LB. Effects of shoe cushioning upon ground reaction forces in running [J]. *Int J Sports Med*, 1983, 4(4): 247-251.
- [14] 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.
- [15] CLANSEY AC, HANLON M, WALLACE ES, *et al.* Effects of fatigue on running mechanics associated with tibial stress fracture risk [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(10): 1917-1923.
- [16] HRELJAC A, MARSHALL RN, HUME PA. Evaluation of lower extremity overuse injury potential in runners [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2000, 32(9): 1635-1641.
- [17] KNAPIK DM, PERERA P, NAM J, *et al.* Mechanosignaling in bone health, trauma and inflammation [J]. *Antioxid Redox Signal*, 2014, 20(6): 970-985.
- [18] RYAN M, FRASER S, MCDONALD K, *et al.* Examining the degree of pain reduction using a multielement exercise model with a conventional training shoe versus an ultraflexible training shoe for treating plantar fasciitis [J]. *Phys Sportsmed*, 2009, 37(4): 68-74.
- [19] SQUADRONE R, GALLOZZI C. Biomechanical and physiological comparison of barefoot and two shod conditions in experienced barefoot runners [J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2009, 49(1): 6-13.
- [20] BISHOP M, FIOLEKOWSKI P, CONRAD B, *et al.* Athletic footwear, leg stiffness, and running kinematics [J]. *J Athl Train*, 2006, 41(4): 387-392.
- [21] CIBULKA MT, SINACORE DR, MUELLER MJ. Shin splints and forefoot contact running: A case report [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1994, 20(2): 98-102.
- [22] DIVERT C, MORNIEUX G, BAUR H, *et al.* Mechanical comparison of barefoot and shod running [J]. *Int J Sports Med*, 2005, 26(7): 593-598.
- [23] SHAKOOR N, BLOCK JA. Walking barefoot decreases loading on the lower extremity joints in knee osteoarthritis [J]. *Arthritis Rheum*, 2006, 54(9): 2923-2927.
- [24] MEI Q, FERNANDEZ J, FU W, *et al.* A comparative biomechanical analysis of habitually unshod and shod runners based on a foot morphological difference [J]. *Hum Mov Sci*, 2015, 42: 38-53.