

doi:10.19677/j.issn.1004-7964.2020.02.007

鞋履对人体平衡稳定性的影响研究进展

雷焱¹, 田苗^{1,2,3*}, 李俊^{1,2,3}

(1. 东华大学服装与艺术设计学院, 上海 200051; 2. 同济大学上海国际设计创新研究院, 上海 200092;
3. 东华大学功能防护服装研究中心, 上海 200051)

摘要:鞋履是人体足部和路面之间的关键介质,通过影响人体下肢关节、骨骼及肌肉的功能性,进而影响人体步行期间的平衡稳定性。良好的鞋履结构设计可降低穿着者的滑跌风险。目前,相关文献主要关注鞋履穿着舒适性,对于其影响人体步行期间平衡稳定性关注较少。因此,本研究对该主题进行系统检索,主要分析鞋跟高度、鞋底厚度和硬度、鞋底防滑设计、鞋跟特殊设计及鞋帮设计对步行期间人体平衡稳定性的影响。研究发现,低跟、硬底鞋有助于人体保持步行过程中的平衡稳定性,摩擦系数较大的鞋底设计、鞋跟几何形态设计以及鞋帮高度设计对人体平衡稳定性的影响还需结合步态特征,选用更为丰富的生物力学参数深入分析。

关键词:鞋履特征;生物力学;人体平衡

中图分类号:TS 943.1 文献标志码:A

Research Progress on the Effect of Footwear and Related Factors on Body Human Balance

LEI Ye¹, TIAN Miao^{1,2,3*}, LI Jun^{1,2,3}

(1. College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Key Laboratory of Clothing Design and Technology, Donghua University, Ministry of Education, Shanghai 200051, China; 3. Protective Clothing Research Center, Fashion Institute, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: Footwear is a key medium between the human foot and the road surface, and it can affect the functional stability of the lower limb joints, bones and muscles. It can also affect the balance stability of the human body during walking. A good footwear structure design reduces the wearer's risk of slipping. At present, the relevant literature mainly focuses on the wearing comfort of shoes, and pays less attention to the balance stability of the human body during walking. Therefore, this study systematically searches the subject, and it mainly analyzes the influence of heel height, sole thickness and hardness, sole slip design, sole geometry design and upper design on the balance stability of the human body during walking. The study found that low-heel, hard-soled shoes help the body maintain balance stability during walking. The design of the sole with a large coefficient of friction, the special sole and the height of the upper can balance the stability of the human body, which also need to be combined with gait. For analysis, more abundant biomechanical parameters were selected for further analysis.

Key words: footwear characteristics; biomechanics; body human balance

收稿日期:2019-05-08

基金项目:上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“晨光计划”项目(18CG76);中央高校基本科研业务费专项基金(2232019G-08)

第一作者简介:雷焱(1995-),女,硕士研究生;服装功能与舒适性研究。

*通信联系人:田苗(1989-),女,东华大学讲师,博士,功能服装数值模拟及人体工效学方向,邮箱:tianmiao@dhu.edu.cn。

1 前言

美国针对社区老年人的一项研究发现,近1/3超过65岁的老年人有过摔倒的经历^[1]。卫生部数据显示^[2],中国每年因滑跌摔伤事件约500万件,由此住院的人群占每年因意外事故住院人群的35%。其中,鞋履已被确定为引起跌倒的重要因素之一^[3-4]。鞋履的主要作用是保护足部及便于人体前行^[5],但作为足部和地面之间的介质,鞋履的功能已经发展到足以改善下肢的功能,通过影响人体下肢关节、骨骼及肌肉的功能性来影响姿势稳定性,同时带来潜在的跌倒风险。

相关研究的技术手段及方法主要包括:临床观察法、量表评估法及仪器定量测试法。一方面,通过临床观察法、量表评估法以及仪器定量测试中的测力台来分析鞋履对人体站立平衡的影响^[6];另一方面,利用仪器定量测试法中的步态分析,结合生物力学参数,探究鞋履因素差异对步行中人体下肢功能的影响,讨论下肢生物力学特征的改变,包括步态时空参数、运动学参数、动力学参数和肌电参数的变化^[7],进一步分析影响人体步行期间平衡保持的鞋履关键因素。

多数跌倒发生在人体运动过程中^[8],而步行作为最常见的运动形式,在日常活动中不可或缺^[9-10]。目前国内针对步行期间鞋履对人体平衡稳定性的研究较少,对步行中人体下肢功能的相关研究多是以探讨鞋履舒适性为目的。鞋履舒适性是评估鞋履性能的重要性能之一,而鞋履安全性能的重要性也日趋显著。研究指出有较高跌倒风险的老年人选购鞋履产品时,由于对鞋履安全性的考虑远低于对鞋履舒适性,加大了老年人的跌倒风险^[11]。因此本文将着重分析与平衡稳定性相关的鞋履因素研究进展,探究其对人体步行期间下肢生物力学特征的影响。

2 检索

针对研究主题,利用计算机检索中文期刊全文数据库(包括CNKI数据库、维普数据库、万方数据库、中国科学引文数据库等)、Web of Science核心合集数据库(包括CSCD、Science Citation Index Expanded (SCIE)、SciELO Citation Index、Medline等)中2008年至2019年间的期刊论文。以研究型文章为主,重要的综述性文章亦纳入讨论。中文检索词为

平衡(稳定)、鞋、步态、足底压力、表面肌电、生物力学。英文检索词为balance(stability)、shoe(footwear)、gait、foot pressure、surface electromyography (sEMG)、biomechanics。

主要的参考文献和结果汇总如表1。

3 综述结果

3.1 鞋跟高度

穿着高跟鞋时,人体COM(Center of Mass,质心)发生前移,减少人体用于恢复平衡的时间,增加跌倒风险^[12]。相关研究为探讨鞋跟因素对人体步行期间平衡稳定性的影响,聚焦于穿着高跟鞋后人体步态时空参数、运动学参数、动力学参数和肌电参数的变化。

3.1.1 步态时空参数

Menant等人针对青年和老年的研究表明,鞋跟增加会带来侧向不稳定,受试者倾向于选择更为谨慎的步行模式,双支撑相时间显著增加,步速显著减小^[13-14]。细化鞋跟高度(3、5、7 cm)对14名女性步行期间支撑相的影响,发现全掌着地时期占比随跟高的增加而显著减小,而支撑末期(摆动前期)则表现出相反的结论。可见鞋跟越高,人的平衡稳定性越低^[15-16]。此外,尽管步速显著减小,但随着鞋跟增加,足部着地时鞋跟水平面速度加大^[14],且在光滑路面行走时更易于引发滑跌事件^[17]。

与年轻人相比,穿着高跟鞋的中老年人单足支撑相占比较大,且随年龄增加,会延长支撑相占比以调节自身平衡。左右足支撑相占比表明,跟高为1 cm时,左右足支撑相和摆动期数据接近,平衡性较好;跟高为2 cm时次之;跟高为3 cm时,平衡表现最差^[18]。此外,长期穿着高跟鞋的女性与无高跟鞋穿着经验的女性相比,会采用特定的控制策略应对高跟鞋带来的重心变化,同时具有更小的步速、步长、步宽,及更大的步频^[19]。

3.1.2 运动学参数

研究发现,人体通过改变下肢运动应对鞋跟增加带来的COM前移^[20-21]。Ebbeling等人比较了跟高为1.25、3.81、5.08和7.62 cm的鞋对15名年轻女性下肢运动的影响,发现随着跟高增加,踝关节跖屈增加,特别在足跟着地以及脚尖离地期间变化显著^[20]。Snow和Williams, Ucanok和Peterson也发现了类似结论^[12,22]。相应地,足外翻随之减弱^[12]。

表 1 主要的参考文献和结果汇总
Tab.1 Summary of the main references and results

| 文献题目 | 文献来源 | 主要内容及结果 |
|---|--|---|
| 高跟鞋鞋跟结构对步态周期和下肢运动的影响 | 冉美玲等, 中国皮革, 2016, 45(6):9-12. | 鞋跟高度增加 (3、5、7 cm) 对 14 名女性步行期间支撑相的影响, 其中, 全掌着地期时间占比随跟高的增加而显著减小, 而支撑末期 (摆动前期) 则表现出相反的结论, 鞋跟越高, 人的平衡稳定性越低。 |
| 高跟鞋鞋跟结构对步态周期和下肢运动的影响 (续) | 冉美玲等, 中国皮革, 2016, 45(7) | |
| 鞋跟高度对中老年女性步态及下肢受力的影响 | 费锐等, 中国皮革, 2013, 42(14):124-126. | 与年轻人相比, 穿着高跟鞋的中老年的单足支撑相占比较大; 中老年会延长支撑相占比来调节自身平衡; 穿着跟高为 1 cm 时, 左右足支撑相和摆动期数据接近, 平衡性较好, 跟高增加, 平衡降低。 |
| 不同硬度鞋底对下肢步行运动学的影响 | 宋雅伟等, 医用生物力学, 2013, 28(4). | 分析不同邵氏硬度 A-51 (软底)、A-62 (中硬)、A-69 (硬底鞋对脚后跟高度、脚尖高度、膝角度以及踝角度影响)。 |
| 不同硬度鞋底在人体行走中的足底肌电变化 | 宋雅伟等, 中国康复医学, 2010, 25(12):1157-1160. | 分析不同邵氏硬度 A-51 (软底)、A-62 (中硬)、A-69 (硬底鞋对胫骨前肌、股外侧肌、腓肠肌和股二头肌肌肉电信号的积分肌电值 (IEMG) 发现, 穿软底鞋 IEMG 总体高于其他两种硬度的鞋, 其中腓肠肌的表现显著。 |
| Effects of walking surfaces and footwear on temporo-spatial gait parameters in young and older people | Menant J C et al, Gait and Posture, 2009, 29(3):0-397. | 探究鞋跟高度、鞋底硬度、鞋帮设计、鞋底胎面花纹、鞋跟设计对青年及老年步态时空参数的影响。 |
| Effects of shoe characteristics on dynamic stability when walking on even and uneven surfaces in young and older people | Menant et al, Arch Phys Med Rehabil 2008;89(10): 1970-6. | 比较鞋跟高度、鞋底硬度、鞋帮设计、鞋底胎面花纹、鞋跟设计对青年及老年动态稳定性的影响差异。 |
| Kinetics of High-Heeled Gait | Esenyel M et al, Journal of the American Podiatric Medical Association, 2003, 93(1):27-32. | 对比穿着高跟与低跟鞋时人体下肢关节动力学的变化, 发现, 在支撑相期间髌关节内收增加。 |
| Footwear and postural stability in older people | Menz HB et al, J Am Podiatr Med Assoc. 1999;89(7):346-57. | 综述了对于影响人体平衡能力的鞋履特征, 对于帮助提高人体的平衡稳定性的一系列鞋履特征提出改进意见。 |

除踝关节外, 学者们还对膝关节和髌关节的变化展开研究。Ebbeling 等人发现, 穿着 1.25 cm 跟高的鞋时最大膝关节屈曲为 $21.1 \pm 6.0^\circ$, 当跟高变为 7.62 cm 时, 屈曲增大到 $24.9 \pm 7.1^\circ$ [20]。Ucanok 和 Peterson 的研究 [22] 发现, 随着鞋跟高度增加, 最大膝关节屈曲角度增加, 与 Ebbeling 等人的一致。针对髌关节运动, Ebbeling 等人发现髌关节角度在摆动期和支撑期均没有变化 [20], 而 Esenyel 等人发现在支撑相期间髌关节内收增加 [23]。可见, 鞋跟高度增加引起的踝关节跖曲增加, 进而影响膝关节和髌关节, 但以膝关节变化为主。膝关节通过增加屈曲作为运动补偿策略维持人体步行期间的稳定性, 相对而言, 髌部距离足部较远, 因此其变化较小 [24], 这也与前文提及的 Ebbeling 等人和 Esenyel 等人结论一致 [12, 20, 23]。

应对鞋跟增加带来的 COM 变化, 是否经常穿着高跟鞋采用的运动补偿策略不同。研究表明经常穿着高跟鞋, 会利用屈颈、屈髌、伸膝和踝关节外翻来调整 COM 前移, 而较少穿着的人, 主要通过屈膝和踝关节背屈来调整身体 COM 变化 [25-26]。

3.1.3 动力学参数

Ebbeling 等人发现, 当鞋跟高度为 3.81、5.08 cm 时, 女性脚踝达到中度背屈, 当高度增加为 7.62 cm 时, 脚踝无法达到背屈, 导致足部自身缓冲地面垂直反作用力的能力大大减弱 [20]。Opeila 等人持有类似结论, 高跟鞋带来更为谨慎的步态, 针对缺乏经验的高跟鞋穿着者更是如此 [27]。针对老年女性, 费锐等人利用测力板测得的地面三轴向反作用力进行分析, 发现当穿着 2 cm 高度的鞋时人体整体控制力

较好,在蹬腿阶段所需力最小,最省力,而 1 cm 跟高的鞋在单腿支撑初期缓冲人体重心所需的缓冲力最小^[18],易于保持平衡。

膝关节屈是维持身体平衡的代偿机制。为进一步分析人体如何通过膝关节屈曲应对鞋跟高度增加带来的不稳定性,有研究比较 12 名年轻女性穿着 6 cm 高跟鞋与赤足状态下膝关节三维力矩作用情况。基于逆向动力学法,利用 Vicon 系统捕捉的运动学参数,AMTI 测力台采集的动力学参数,结合人体环节参数,输入逆向动力学公式计算膝关节力矩。研究发现,穿着高跟鞋显著改变行走时膝关节原有力矩特征,表现为内收力矩的增加,而这会增加膝关节内侧关节囊负荷,这种补偿性牵拉可能会破坏膝关节原有的平衡控制能力^[28]。针对老年女性的研究发现,随着鞋跟高度的增加,膝关节内翻矩第 1 峰值越来越大。鞋跟高度对膝关节内翻矩第 2 峰值影响较小^[18]。

相关研究中还通过 COP (Center of Pressure, 足底压力中心) 轨迹研究鞋跟高度对人体平衡稳定性的影响。研究发现穿 4 cm 中跟走路时,足底压力和 COP 轨迹与穿平底鞋相比没有显著差异;但穿 10 cm 高跟走路时,COP 轨迹活动范围显著增加^[29]。结合步态周期,研究对比老年女性穿着 1、2 以及 3 cm 的鞋履时的 COP 轨迹变化,发现在单腿支撑期间,穿着 1 cm 时人体较为稳定。穿鞋初期,COP 轨迹由内侧向外侧移动,并很快出现极值。鞋跟越高,单腿支撑初期鞋底压力中心轨迹的最大移动量越大。穿 2 cm 跟高鞋和 3 cm 跟高鞋时,平均最大移动量分别比穿 1 cm 增大 7.2% 和 15.9%^[18]。对于经常穿着高跟鞋的人,COP 轨迹的活动范围则较小,表明长期穿着高跟鞋的女性平衡控制能力提高,尤其对前后方向上的平衡能力改善显著^[19]。

3.1.4 肌电参数

穿着高跟鞋改变人体膝关节力矩,如在支撑阶段的前 80% 时相,穿高跟鞋增加 19% 屈曲力矩,增加 39% 伸展力矩,多出的屈曲与伸展力矩会增加股四头肌拉力负荷,进而将压力施加给髌骨关节。可见,鞋跟高度增加对相关下肢肌肉会带来一定影响^[30]。

研究表明鞋跟高度增加带来的足底受力位置的改变,引起肌肉长度-张力关系发生变化,导致腓肠肌活动下降^[30-31],进而降低下肢活动性,加大滑动风险。Esenyel 等的研究结果表明^[23],穿着高跟鞋

会促使腿部肌肉纤维缩短,而踝关节位置和脚背弯曲程度变化使小腿比目鱼肌长期处在收缩状态,易使得足部在行走时推力减少。此外, Lee 等人发现胫骨前肌活动随着足跟高度增加而增加,有助于踝关节稳定性和减少内旋力矩^[32]。

结合步态分析,研究穿着高跟鞋行走过程中人体肌肉疲劳情况,结果显示支撑初期和支撑中期,胫骨前肌、腓肠肌外侧肌活动相比穿着平底鞋大,易造成小腿疲劳,进而引发小腿酸胀^[33]。Gefen 等人发现,对于习惯穿着高跟鞋的人而言,腓骨长肌和侧腓肠肌更易于疲劳^[34]。有研究发现,在疲劳状态下腓肠肌外侧肌与腓肠肌内侧活动的不平衡,这多与鞋跟高度增加带来的穿着者足底或鞋底 COP 的侧向移位相关^[37]。

综上,鞋跟高度增加会导致人体的 COM 前移,为应对变化,人体往往采取更为谨慎的步态模式,加大双支撑相时间,降低步速,通过髌、膝、踝关节旋转作为运动补偿策略保持人体平衡,而这带来如膝关节内收矩的变化,进而引起下肢肌肉如胫骨长肌以及侧腓肠肌的疲劳。目前的研究针对不同对象展开,从青年到老年,以及长期穿着高跟鞋的人群。对人体稳定性影响结论的不一致往往由于鞋履选择的差异,以及未统一鞋跟高度以外的鞋履特征。总体而言,穿着较高鞋跟会在一定程度上降低人体平衡稳定性已被证实。有针对老年女性的研究指出,高于 2.5 cm 的鞋跟高度会使老年人跌倒的风险提高近一倍,因此建议老年人鞋跟高度低于 2.5 cm^[35]。未来的研究可从鞋跟高度出发,研究内增高鞋垫带来的变化^[36];或聚焦特殊群体的需要,如鞋跟高度对老年人平衡稳定性的影响^[14]。

3.2 鞋底硬度

早期,Robbins 等人利用横梁法观察得出,对于青年和老年男性,软底鞋不利于人体保持平衡^[37-38]。后续研究发现,鞋底硬度对人体平衡的影响与人体足部位置的感知差异相关,足部最大旋后角的感知随年龄的增加而减小,老年的感知误差要比青年约大 200%,因此,针对老年和青年应当选择不同的鞋履优化方案^[39]。

Robbins 等人^[37-39]将生物力学方法和人体感知结合,探究鞋底硬度对人体平衡的影响,表明硬底鞋有助于人体平衡保持,但穿着舒适度较差。然而,研究所采用的横梁法、测量最大旋后角等方法测得

的数据有限,未涉及更为深入的生物力学参数的探讨。此外,对鞋底硬度的影响探究与鞋底厚度结合,未对硬度因素做独立分析。这些均对结论产生一定影响,后续学者利用更为全面的生物力学参数、完善实验变量水平设计,对其研究进行补充^[14,42-46]。

3.2.1 步态时空参数

Menant 等人引入步态分析^[44],研究鞋底硬度对步行期间青年和老年步态时空参数的影响。研究发现,硬底鞋(邵氏硬度 A-58)与标准鞋(邵氏硬度 A-40)相比,双支撑相较较大,可见,穿着硬底鞋更易于保持稳定,与 Robbins 等人的结论一致^[37-38]。考虑该研究中涉及的路面因素,发现在潮湿表面,穿着软底鞋的受试者步长和足地接触角均显著减小,说明受试者会采用迈步更少及采用更平缓的迈步方式行走。步行模式的调整与人体足部对地面的感知相关,穿着软底鞋要进行步态调整以更适应身体平衡的变化,降低滑跌风险^[40]。

3.2.2 运动学参数

宋雅伟等人结合步态周期,通过 Vicon 红外摄影系统采集不同硬度(邵氏硬度 A-51(软底鞋)、A-62(中等硬度鞋)、A-69(硬底鞋))下人体下肢脚后跟高度、脚尖高度、膝角度以及踝角度变化。研究发现,穿着软底鞋时小腿前摆角度最小,踝关节角度最小,内踝与足背高度明显降低,这与软底鞋底接触面积最大,外侧力偏大相关;穿着硬底鞋的大腿前摆角度最大,利用踝关节伸展促进肢体进行支撑-摆动交替运动。软底鞋适合短距离行走,可提供较高的舒适度;长距离行走则可考虑硬底鞋,但注意鞋底过硬可能带来更大的足底冲击力,因此可选用中等硬度鞋(邵氏硬度 A-62)^[41]。

3.2.3 动力学参数

有学者探讨鞋底硬度对人体足底压力的影响,发现鞋底硬度对足底 9 个压力分区均有影响,硬底鞋最大,软底鞋次之,中等硬度鞋最小^[42]。穿着鞋履时足底总压强与裸足行走时相比,硬底鞋明显增加,软底和中等硬度鞋均减小。行走过程中,硬底鞋与地面接触面积最小,且随时间增长呈“升高-下降”的趋势^[43]。

研究中还涉及鞋底硬度对 COP 轨迹影响的探究,发现随鞋底硬度增加,COP 轨迹从内侧的第一跖骨向外依次移动。与裸足行走时相比,穿着软底鞋时,COP 轨迹缩短;穿着中等硬底鞋和硬底鞋时,

COP 轨迹长度均变长^[44]。结合步态周期,研究发现软硬鞋底分区受力存有差异,具体表现为软底鞋内侧力值增加,外侧力值降低;硬底鞋内侧力值降低,外侧力值增加。因此,建议穿着者在进行长时间运动时穿着中等硬度鞋,且在穿着软底鞋时注意鞋外翻现象,穿着硬底鞋时注意鞋内翻现象^[43-44]。

还有学者结合特定鞋型如高跟鞋,研究高跟鞋前掌中底材料硬度对人体平衡稳定性的影响。研究结果表明,鞋前掌中底材料硬度对 COP 轨迹有显著性影响。鞋前掌中底材料硬度过小时,COP 在内外方向的摆动增加,足部稳定性下降;中底材料硬度过大,会引起跖屈不足而增大摔倒的风险^[44]。

3.2.4 肌电参数

肌电方面,通过人体行走中的肌电变化来评价不同硬度鞋底的功能特性。研究发现穿软底鞋的 IEMG(Integrated Electromyogram, 积分肌电值)高于其他两种硬度的鞋,且腓肠肌表现最为显著。穿着软底鞋行走,在全掌着地,脚跟离地,脚尖离地期,胫骨前肌收缩消耗的时间较其他两种硬度的鞋长。穿着中等硬度鞋时,股外侧肌肌肉收缩时长最短。由此可知,鞋底的软硬程度对人体在行走过程中下肢肌电变化具有一定影响,硬底鞋关节缓冲较差,耗能小,对关节保护比较差,足弓不易塌陷^[45]。另有研究发现,与穿着硬鞋中底相比,受试者穿着柔软鞋中底时在步行中止阶段的稳定控制能力更低,需要更大的肌肉活动水平保持稳定^[46]。

综上,运动学参数、动力学参数以及肌电参数研究表明,为保持人体的平衡稳定性,长期行走硬底鞋效果优于软底鞋,但在短时间行走过程中,穿着软底鞋,能够吸收更多地面带来的冲击力。未来研究,可增加鞋底硬度变量设计梯度,以确定合适的鞋底硬度,在保证人体平衡的情况下,提供较为舒适的穿着感受。

3.3 其它鞋履因素

3.3.1 鞋底防滑性能设计

在鞋底防滑性能设计方面,结合生物力学方法进行真人实验的研究尚少,多数学者利用仪器模拟进行探究。Gao 等人^[47]比较了四种不同材质和鞋底、硬度和粗糙度的鞋履的防滑性,发现鞋底粗糙度和防滑性之间存在显著的正相关关系。一系列关于橡胶鞋底在潮湿地板、受油污染的表面和结冰表面的防滑性研究表明,增加鞋底的粗糙度可降低滑倒风险^[48]。

对于潮湿表面,鞋底花纹减少了鞋跟接触潮湿表面的润滑效果,提高人体稳定性^[49]。对受油污污染表面研究发现,鞋底花纹有更为安全的摩擦系数^[50-51]。具体而言,增加鞋底花纹沟槽深度(1~5 mm),有助于鞋履在潮湿表面起防滑效果,且不受油污表面影响^[52]。合理利用鞋底纹样可增加人体稳定性,需注意,防滑性能并非越高越好,过度防滑可能导致受试者绊倒或失去平衡^[53]。

Menant 等人的研究发现,穿着胎面鞋在不稳定表面行走时会加快步速,加大跨步长,但在步态稳定性方面没有太大的区别。同时表明,在一定程度上,干燥表面增加的摩擦系数有利于减小鞋地接触面间的鞋底剪切力,促进人体前进^[54]。

目前的研究多是通过仪器模拟测试获取结果,缺乏在人体步态和心理生理方面的模拟,因此存在一定的局限性^[48]。在配备安全设施的真人实验中评估不同鞋底花纹对人体稳定性的影响,能够更加真实地模拟人体的运动状态。

3.3.2 鞋跟几何形态

为探究鞋跟跟型与跟高对人体下肢运动的交互影响^[15-16],研究设定跟型因素水平为细跟、粗跟和坡跟,跟高因素水平为 3、5、7 cm,定制实验用鞋。结果表明,穿着坡跟鞋时,相比于其他两种鞋型,COP 向内侧移动较大,从而增加膝关节和踝关节的力矩。人体为抵消 COP 的偏移,会加大肌肉作用力度以维持身体和关节的稳定性。这些改变增加了人体行走的不稳定性、肌肉疲劳感以及膝关节和踝关节疾病的风险^[55]。

鞋跟几何形态的变化,除常见的粗细变化外,还包括细节设计上的外展和内切设计。部分研究针对外展型鞋跟对人体平衡稳定性的影响展开,发现此类型鞋跟可减少鞋内滑动^[56]。同时,通过增加支撑面,改善内-外侧稳定性^[57]。Menant 等人研究外展型鞋跟对老年人平衡控制和步进反应时间的影响,发现与标准鞋跟之间没有显著差异^[57]。外展型鞋跟对青年及老年步态时空参数的研究发现^[14],此类鞋跟并未带来利于平衡的步态参数的改变,类似的结论也存在于内切型鞋跟的鞋中。然而,也有学者认为此类鞋跟几何形态的改变能够提供更大的支撑面积,对于改善步行期间的稳定性起促进作用^[52,57-58]。

因此,有必要引入更多的生物力学参数,对于跟型几何形态变量进行更细致的设定,深入探究其

影响机制。

3.3.3 鞋帮高度

已有静态平衡方面的研究证实,鞋帮高度会降低人体平衡^[59]。在鞋帮高度对人体步行期间的平衡影响方面,Menant 等人对 29 名男性展开研究。结果表明,低帮鞋和高度为 11 cm 的高帮鞋在平衡表现和步进反应时间方面均无显著差异,但证实高帮鞋的步进反应时间大于低帮鞋,表明高帮鞋在一定程度上提高人体的平衡稳定性。帮面高度的增加提高了接触面积,进而增加了人体脚踝处的触觉感知以及减少了人体的足部摆动间隙,更易于控制平衡^[57]。

也有研究发现,牛仔靴对于年轻女性的平衡的控制有削弱作用,反映在 COP 呈现前后摆动。产生相反结论的原因可能是牛仔靴除了具有高鞋帮的特点,穿着者的平衡能力还会受牛仔靴鞋跟影响,而鞋跟会降低人体的平衡保持^[60]。Menant 等人后续研究发现,高帮鞋同时具有中等硬度,可以在不规则和潮湿的地板上提供最佳稳定性^[14]。

综上所述,基于高帮鞋对于人体平衡保持的潜在优势,未来可在排除其余鞋履因素的干扰,结合步态分析,从运动学、动力学、肌电学等方面进行更细致的分析,以提供更为多样的鞋履优化建议。

4 结论与展望

本文通过分析鞋履对人体下肢关节、骨骼及肌肉功能性的影响,解析鞋履对人体步行期间的平衡稳定性的作用机制。文献研究表明低跟鞋相较于高跟鞋,更有助于人体保持平衡;长时间步行时硬底鞋更易于人体平衡,软底鞋则适用于短距离行走中人体平衡的保持;鞋底防滑性能设计,鞋跟粗细、内切、外展等鞋跟几何形状设计,以及鞋帮高度设计均会对人体的平衡稳定性造成一定影响,但对于促进人体保持平衡的因素水平还未有统一论。

鞋履的优化设计能够提高对人体的安全保障,相关研究已取得一定进展。未来可选用更细致的变量梯度设计(如鞋履硬度水平),确定既能提供安全性,又具有良好舒适度的鞋履要素。同时,引入更丰富生物力学参数,对鞋底防滑性能、鞋跟几何形状及鞋帮高度等鞋履因素进行深入研究,剖析影响机制。此外,安全鞋可作为老年人预防跌倒的重要干预手段,针对老年人的研究也应引起重视。

参考文献:

- [1] Tinetti M E, Speechley M, Ginter S F. Risk Factors for Falls among Elderly Persons Living in the Community—NEJM[J]. *N Engl J Med*, 1988, 319(26):1701–1707.
- [2] 李晶, 段晓霞, 孙世彧. 鞋履防滑性能影响因素及评价研究进展[J]. *皮革科学与工程*, 2014, 24(5):27–31.
- [3] Berg W P, Alessio H M, Mills E M, et al. Circumstances and consequences of falls in independent community-dwelling older adults[J]. *Age & Ageing*, 1997, 26(4):261–268.
- [4] 谢萌萌, 应楚楚. 儿童橡塑拖鞋防滑性能研究与风险评估[J]. *皮革科学与工程*, 2019, 29(4):58–63.
- [5] 高文静, 周晋. 人行道路面铺装与鞋底防滑性的关系探讨[J]. *皮革科学与工程*, 2018, 28(5):49–52.
- [6] Aboutorabi A, Bahramizadeh M, Arzpour M, et al. A systematic review of the effect of foot orthoses and shoe characteristics on balance in healthy older subjects[J]. *Prosthetics & Orthotics International*, 2016, 40(2):170.
- [7] Landorf KB, Keenan AM. Efficacy of foot orthoses. What does the literature tell us?[J]. *J Am Podiatr Med Assoc*, 2000, 90:149–58.
- [8] Hill K, Schwarz J, Flicker L, Carroll S. Falls among healthy, community-dwelling, older women: A prospective study of frequency, circumstances, consequences and prediction accuracy[J]. *Aust N Z J Public Health*, 1999, 23(1):41–48.
- [9] Winter DA. Energy generation and absorption at the ankle and knee during fast, natural, and slow cadences[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1983, 147–54.
- [10] Schuna JM Jr and Tudor-Locke C. Step by step: accumulated knowledge and future directions of step-dependent ambulatory activity[J]. *Res Exerc Epidemiol*, 2012, 14:107–116.
- [11] Menant J C, Steele J R, Menz H B, et al. Optimizing footwear for older people at risk of falls [J]. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 2008, 45(8):1167.
- [12] Snow RE, Williams KR. High heeled shoes: their effect on center of mass position, posture, three-dimensional kinematics, rearfoot motion, and ground reaction forces [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 1994, 75(5):568–76.
- [13] Menant JC, Perry SD, Steele JR, Menz HB, Munro BJ, Lord SR. Effects of shoe characteristics on dynamic stability when walking on even and uneven surfaces in young and older people[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2008, 89(10):1970–6.
- [14] Menant J C, Steele J R, Menz H B, et al. Effects of walking surfaces and footwear on temporo-spatial gait parameters in young and older people [J]. *Gait and Posture*, 2009, 29(3):0–397.
- [15] 冉美玲, 纪晓楠, 杨璐铭, 等. 高跟鞋鞋跟结构对步态周期和下肢运动的影响[J]. *中国皮革*, 2016, 45(6):9–12.
- [16] 冉美玲, 纪晓楠, 杨璐铭, 等. 高跟鞋鞋跟结构对步态周期和下肢运动的影响(续)[J]. *中国皮革*, 2016, 45(7).
- [17] Lockhart TE, Spaulding JM, Park SH. Age-related slip avoidance strategy while walking over a known slippery floor surface[J]. *Gait Post*, 2007, 26(1):142–9.
- [18] 费锐, 李松竹, 付景恒. 鞋跟高度对中老年女性步态及下肢受力的影响[J]. *中国皮革*, 2013, 42(14):124–126.
- [19] Chien HL, Lu TW, Liu MW. Effects of long-term wearing of high-heeled shoes on the control of the body's center of mass motion in relation to the center of pressure during walking[J]. *Gait Posture*, 2014, 39(4):1045–1050.
- [20] Ebbeling C J, Hamill J, Crussemeyer J A. Lower Extremity Mechanics and Energy Cost of Walking in High-Heeled Shoes [J]. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 1994, 19(4):190–196.
- [21] Lee C M, Jeong E H, Freivalds A. Biomechanical effects of wearing high-heeled shoes[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2001, 28(6):321–326.
- [22] Ucanok G M, Peterson D R. Knee and Ankle Deviations during High-heeled Gait [C]//Bioengineering Conference, 2006. Proceedings of the IEEE 32nd Annual Northeast. IEEE, 2006.
- [23] Esenyel M, Walsh K, Walden J G, et al. Kinetics of High-Heeled Gait [J]. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 2003, 93(1):27–32.
- [24] De Lateur B. Footwear and posture. Compensatory strategies for heel height [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 1991, 70(5):246–254.
- [25] Weitkunat T, Buck FM, Jentsch T, et al. Influence of high-heeled shoes on the sagittal balance of the spine and the whole body[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(11):3658–3665.
- [26] Farrag A, Elsayed W. Habitual Use of High-Heeled Shoes Affects Isokinetic Soleus Strength More Than Gastrocnemius in Healthy Young Females[J]. *Foot Ankle Int*, 2016, 37(9):1008–1016.
- [27] Opila-Correia K A. Kinematics of High-Heeled Gait with Consideration for Age and Experience of Wearers [J]. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 1990, 71(11):905–909.
- [28] 刘娜, 刘海斌, 朱振楠, 等. 高跟鞋对女大学生行走时膝关节力矩的影响 [J]. *成都体育学院学报*, 2018, (4):116–120.
- [29] Ko DY, Lee HS. The Changes of COP and Foot Pressure after One Hour's Walking Wearing High-heeled and Flat Shoes [J]. *J Phys Ther Sci*, 2013, 25(10):1309–1312.
- [30] Lee K H, Shieh J C, Matteliano A, et al. Electromyographic changes of leg muscles with heel lifts in women: Therapeutic

- implications[J].Archives of Physical Medicine and Rehabilitation,1990,71(1):31-33.
- [31] Lee K H,Mattelliano A,Medige J,et al.Electromyographic changes of leg muscles with heel lift:Therapeutic implications[J].Archives of Physical Medicine and Rehabilitation,1987;68(5 Pt 1):298-301.
- [32] Lee CM,Jeong EH,Freivalds A.Biomechanical effects of wearing high-heeled shoes[J].Int J Ind Ergon,2001,28(6):321-26.
- [33] 许大学.穿高跟鞋行走的生物力学特征实验研究[A].中国体育科学学会运动生物力学分会.第十八届全国运动生物力学学术交流大会(CABS 2016)论文集[C].中国体育科学学会运动生物力学分会:中国体育科学学会运动生物力学分会,2016:1.
- [34] Gefen A,Megido-Ravid M,Itzhak Y,et al.Analysis of muscular fatigue and foot stability during high-heeled gait[J].Gait&Posture,2002,15(1):56-63.
- [35] Menz HB,Morris ME.Footwear characteristics and foot problems in older people[J].Gerontology,2005,51(5):346-51.
- [36] Park S Y,Park D J.Changes of gait pattern,muscle activity, and perceived comfort in response to variations of height-elevating insoles in young adults[J].Journal of Exercise Rehabilitation,2018,14(1):100-105.
- [37] Robbins S,Gouw G J,McClaran J.Shoe Sole Thickness and Hardness Influence Balance in Older Men [J].Journal of the American Geriatrics Society,1992,40(11):1089-1094.
- [38] Robbins S,Waked E,Gouw G J,et al.Athletic footwear affects balance in men. [J].British Journal of Sports Medicine,1994,28(2):117-122.
- [39] Robbins S,WAKED,EDWARD,MCCLARAN,JACQU-,E-LINE.Proprioception and Stability:Foot Position Awareness as a Function of Age and Footware[J].Age&Ageing,1995,24(1):67-72.
- [40] Cham R,Redfern MS.Changes in gait when anticipating slippery floors[J].Gait Post,2002,15(2):159-71.
- [41] 宋雅伟,滕津汝,张曦元.不同硬度鞋底对下肢步行运动学的影响[J].医用生物力学,2013,28(4).
- [42] 宋雅伟,孙天瑜,蔡奕玺,等.不同硬度的鞋底对人体行走中足底力值变化的影响 [J].首都体育学院学报,2010,22(6):89-92.
- [43] 宋雅伟,蔡奕玺,寇恒静,等.鞋底硬度与人体行走中足底压力的变化 [J].中国组织工程研究与临床康复,2009,13(46).
- [44] 冉美玲,刘子煜,杨璐铭,等.中底硬度与步态周期对足底压力中心轨迹的影响 [J].皮革科学与工程,2018,28(4):23-26.
- [45] 宋雅伟,寇恒静,张曦元.不同硬度鞋底在人体行走中的足底肌电变化 [J].中国康复医学杂志,2010,25(12):1157-1160.
- [46] Perry S D,Radtke A,Goodwin C R.Influence of footwear mid-sole material hardness on dynamic balance control during unexpected gait termination[J].Gait Posture,2007,25(1):94-98.
- [47] Gao C,Abeysekera J,Hirvonen M,et al.Slip resistant properties of footwear on ice[J].Ergonomics,2004,47(6):710-16.
- [48] Manning D P,Jones C.The effect of roughness,floor polish, water,oil and ice on underfoot friction:Current safety footwear solings are less slip resistant than microcellular polyurethane [J].Applied Ergonomics,2001,32(2):185-96.
- [49] Lloyd D,Stevenson M G.Measurement of slip resistance of shoes on floor surfaces—Part 2:Effect of a beveled heel[J].International Journal of Occupational Health and Safety,1989,5(3):229-35.
- [50] Li KW,Chen C J.The effect of shoe soling tread groove width on the coefficient of friction with different sole materials,floors, and contaminants [J].Applied Ergonomics,2004,35(6):499-507.
- [51] Li K W,Chen C J.Effects of tread groove orientation and width of the footwear pads on measured friction coefficients [J].Safety Science,2005,43(7):391-405.
- [52] Li K W,Wu H H,Lin Y C.The effect of shoe sole tread groove depth on the friction coefficient with different tread groove widths,floors and contaminants [J].Applied Ergonomics,2006,37(6):743-48.
- [53] Menz H B,Morris M E,Lord S R.Footwear Characteristics and Risk of Indoor and Outdoor Falls in Older People[J].Gerontology,2006,52(3):174-180.
- [54] Menant J C,Steele J R,Menz H B,et al.Effects of Footwear Features on Balance and Stepping in Older People[J].Gerontology,2008,54(1):18-23.
- [55] Chiu M C,Wu H C,Chang L Y.Gait speed and gender effects on center of pressure progression during normal walking[J].Gait&posture,2013,37(1).
- [56] Stacoff A,Steger J,Stussi E,Reinschmidt C.Lateral stability in sideward cutting movements [J].Med Sci Sports Exerc,1996,28(3):350-58.
- [57] Menz HB, Lord SR.Footwear and postural stability in older people[J].J Am Podiatr Med Assoc,1999,89(7):346-57.
- [58] Menz HB, Lord ST,McIntosh AS.Slip resistance of casual footwear:implications for falls in older adults[J].Gerontology 2001,47(3):145-9.
- [59] Lord SR,Bashford GM,Howland A,Munroe BJ.Effects of shoe collar height and sole hardness on balance in older women [J].J Am Geriatr Soc,1999,47:681-4.
- [60] Brecht J S,Chang M W,Price R,et al.Decreased balance performance in cowboy boots compared with tennis shoes [J].Archives of Physical Medicine&Rehabilitation,1995,76(10):940-6.