

文章编号: 1004-7220(2022)03-0525-06

个性化鞋垫对步行足部感知及足功能的影响

白啸天¹, 霍洪峰^{1,2}

(1.河北师范大学 体育学院, 石家庄 050024; 2.河北省人体运动生物信息测评重点实验室, 石家庄 050024)

摘要:目的 通过对主观舒适度和行走时足底压力的评测,整合主观感知和生物力学指标,探究个性化鞋垫对正常足型足部感知和足功能的影响。**方法** 招募16名具有正常足型的男性受试者,采用视觉模拟量表评价极简鞋和个性化鞋垫穿着鞋干环境下主观舒适度指标的差异;通过单因素重复测量方差分析赤足、极简鞋、个性化鞋垫3种着鞋条件支撑期各阶段时间和足底压力的变化;通过多重线性回归筛选极简鞋和个性化鞋垫下影响着鞋总体舒适性的主要指标。**结果** 在足底压力测评上,着鞋行走的步态支撑期缓冲阶段高于赤足和极简鞋($P<0.05$),个性化鞋垫的动态足弓指数(arch index, AI)大于极简鞋和赤足行走($P<0.05$),极简鞋动态 AI 大于赤足($P<0.05$),加入个性化鞋垫中足冲量占比高于赤足行走($P<0.05$),着鞋时压力中心(center of pressure, COP)轨迹的平均斜率低于赤足($P<0.05$),个性化鞋垫 COP 轨迹斜率低于极简鞋($P<0.05$);在主观舒适度测评上,加入个性化鞋垫后鞋总体舒适性、后跟缓冲、前足缓冲、足弓支撑性、前足包裹和足部控制性高于极简鞋($P<0.05$);线性回归结果显示,足弓支撑性和中足冲量占比对鞋总体舒适性有显著性影响($P<0.05$)。**结论** 个性化鞋垫主要通过对足弓的影响提高正常足的总体舒适性。加入个性化鞋垫后,步行的缓冲能力和足部控制能力提高,足部在冠状轴上受力的偏移减小。足-鞋垫-鞋共同影响人体足部感知,鞋垫要综合足型、着鞋条件和鞋垫材质等多方面进行选择。

关键词: 个性化鞋垫; 足功能; 主观舒适度; 步态

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.03.022

Effects of Personalized Insole on Foot Perception and Ankle Function in Walking

BAI Xiaotian¹, HUO Hongfeng^{1,2}

(1. College of Physical Education, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Hebei Key Laboratory of Human Motion Information Evaluation, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: **Objective** Through the evaluation of subjective comfort and plantar pressure during walking, with the integration of subjective perception and biomechanical indexes, to explore the effect of personalized insole on foot perception and ankle function of normal foot. **Methods** Sixteen male subjects with normal foot types were recruited, and the visual analog scale (VAS) was used to evaluate the differences of subjective comfort index under the intervention of minimalist shoes and personalized insoles, and changes of time and plantar pressures at each stage of barefoot walking and walking with minimalist shoes and personalized insoles were analyzed by single factor repeated measurement variance. Multiple linear regression was used to screen the main indexes which affected the overall comfort of shoes during walking with minimalist shoes and personalized insoles.

收稿日期: 2021-04-17; 修回日期: 2021-05-26

基金项目: 河北省科技支撑项目(16275709), 河北师范大学科研基金重点项目(S2017Z06), 河北省教育科学研究“十三五”规划课题(1703154), 河北师范大学在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZSS2021020)

通信作者: 霍洪峰, 硕士生导师, E-mail: hhf413@163.com

Results For measurement of plantar pressures, the gait support buffer stage of walking with shoes was higher than that of barefoot walking or walking with minimalist shoes ($P < 0.05$), and the dynamic arch index (AI) of walking with personalized insole was higher than that of walking with minimalist shoes and barefoot walking ($P < 0.05$). The dynamic AI during walking with minimalist shoes was higher than that of barefoot walking ($P < 0.05$), and the proportion of foot impulse during walking with personalized insoles was higher than that during barefoot walking ($P < 0.05$). When wearing shoes, the average slope for center of pressure (COP) trajectory was lower than that of barefoot walking, and the slope of COP trajectory of walking with personalized insoles was lower than that of walking with minimalist shoes ($P < 0.05$). For evaluation of subjective comfort, the overall comfort, heel cushioning, front foot cushioning, arch support, forefoot wrapping and foot control of walking with personalized insoles were higher than those of walking with minimalist shoes ($P < 0.05$). The results of linear regression showed that arch support and the proportion of middle foot impulse had significant influences on the overall comfort of walking with shoes ($P < 0.05$). **Conclusions** Personalized insoles can improve the overall comfort of normal foot mainly through the influence of foot arch. After personalized insole is added, the cushioning ability and foot control ability of walking are improved, and force deviation of the foot on coronal axis is reduced. Feet-insoles-shoes jointly affect the perception of human feet, and insoles should be selected in many aspects, such as foot types, shoe conditions and insole materials.

Key words: personalized insole; foot function; subjective comfort; gait

行走是人体最基本的运动之一,数百万年的进化使得人类步行具备了经济性、随意性和协调性的特点。作为行走时与地面直接接触的运动器官,足部的本体感受器不断感受张力和相对位置的变化以接收外界的信息,帮助人体调控自身运动^[1-2]。不同的着鞋条件改变足部本体感觉,影响人体足部的舒适度感知,足部舒适度的改变会影响人体运动时对姿势的调控策略,提高足部舒适性有助于在运动中保护足部,减缓疲劳^[3-5]。随着年龄的增长,足底肌肉和弹性结构功能的下降导致足部出现扁平趋势^[6]。目前鞋靴的设计通常将鞋内底制作为与足底形状相同的平面,忽略了足型的立体结构,不能有效地保护和支撑足部,预防足功能的下降。个性化鞋垫具有立体的结构,能够有效地贴合足型,多用于对扁平足或高弓足等异常足型的矫正^[7-8]。但足型正常的人群在自然站立时跟骨也存在一定程度的外翻,着鞋环境的改善对提高正常足型舒适性和足部控制能力有着重要作用。

有研究团队通过视觉模拟量表 (visual analog scale, VAS) 评价足部在着鞋状态下的舒适度,复测信度较高,具有将主观感受量化的优点,被广泛应用于鞋靴舒适度的研究^[9-10]。足底压力测试是测量步态常用的方法,反映了人体在行走过程中地面对足部的作用力。压力中心轨迹从步态支撑期变化

和足在冠状轴的水平位移两方面简化行走的受力特点,直观抽象地体现了行走时的足部控制能力,是探究足与地面、鞋与地面有效的客观指标^[11-13]。但仅用主观指标评价鞋靴无法对鞋的具体部位提供量化指导,仅用客观指标无法全面地结合足与人体的感知。因此,评测鞋靴和足功能需将客观的生物力学指标和人体主观的感知进行整合。本文通过对赤足、普通鞋垫、极简鞋和个性化定制鞋垫3种着鞋条件的评测,探究个性化鞋垫对正常人群足部感知和足功能的影响,为大众足踝健康和鞋靴舒适度设计提供研究方法和理论支持。

1 研究方法

1.1 受试者

选取男性受试者16名,身高(176.81±4.12) cm,年龄(25.82±3.01)岁,体重(72.24±2.31) kg,无运动障碍且近3个月无运动损伤。受试者鞋码均为欧码42号,优势侧足均为右侧足,足弓指数(arch index, AI)介于0.21~0.26之间^[11,14]。AI筛选采用3D PODOMED足型扫描仪(测量精度±1.0 mm,北京海德美业科技有限公司)。

1.2 个性化鞋垫定制

受试者赤足在高频足底压力板(RSscan International公司,比利时)按自身最适速度行走。

采集频率 126 Hz,传感器密度 4 个/cm²。根据行走时足底压力分布,采用 3D 打印技术制作单密度的乙烯醋酸乙酯(EVA)鞋垫,邵氏硬度为 40°,鞋码为欧码 42 号。

1.3 鞋参数测评

对自带鞋垫极简鞋和 EVA 鞋垫的极简鞋进行鞋尖翘度、鞋底屈曲刚度、鞋质量和鞋底厚度的测量。每种鞋测量 3 次取平均值,其中每种鞋鞋底厚度取后足中部、足弓中部和前足中部鞋底厚度的平均值。由于行走时蹬伸离地阶段跖趾关节被动伸展可到达 90°^[15],测量鞋底屈曲刚度时,将鞋跟垂直置于瑞士 Kistler 测力台(采集频率 1 kHz),施加垂直向下的压力,测量鞋底弯折至 90°时测力台的数值,其受力与弯折角度的比值为屈曲刚度^[16]。鞋靴测评参数见表 1。

表 1 鞋靴参数

Tab.1 Parameters of shoes and boots

参数	无鞋垫极简鞋	个性化鞋垫极简鞋
鞋底屈曲刚度/[N·(°) ⁻¹]	0.19±0.02	0.40±0.03
鞋底厚度/cm	2.25±0.54	3.85±0.88
鞋底材质	牛筋底	EVA+牛筋底
帮面材质	帆布	帆布
鞋尖翘度/(°)	13.54±0.51	13.12±0.44
鞋质量/g	193.50±3.50	225.80±1.20

1.4 数据采集与处理

1.4.1 足底压力测评 采用高频足底压力板测试赤足、极简鞋和加入个性化鞋垫 3 种着鞋条件下受试者步态特征,每名受试者被测时 3 种着鞋条件顺序均为随机,每次步态测试受试者均按照自身最适速度行走。

筛选标准:采用变异系数排除步速差异较大的测试结果,当任意两种着鞋条件步速的变异系数^[17](coefficient of variation, CV)均小于 0.10 时,本次测评结果视为有效。实验结果表明,赤足与极简鞋、赤足与鞋垫、极简鞋与鞋垫的步速 CV 分别为 0.02±0.01、0.03±0.02、0.02±0.01。

观测指标:足底压力测评包括对步态支撑期各阶段时间、动态 AI、足弓冲量占比和压力中心(center of pressure, COP)轨迹分析。

(1) 根据足执行的功能以后跟触地、足趾触地、后跟离地和足趾离地 4 个时刻将步态支撑期划分为缓冲、过渡和蹬伸 3 个阶段。各阶段时长按单

足支撑期周期百分比进行归一化处理。

(2) 动态 AI 为行走时足底压力足印中足部位占去脚趾足印面积的百分比,用于表达行走支撑期中足部位与地面相对接触面积^[11]。

(3) 足弓冲量占比为行走时中足部位冲量占整足冲量(去除足趾部位)的百分比,用于反映行走时支撑阶段压力在足弓部位的累积。

(4) 选取曲线平均斜率和曲线在冠状轴方向的偏移分析 COP 轨迹,将足底压力曲线置于二维平面坐标系中,其中足底 COP 第 1 个点纵坐标为 y 轴零点,足中线为 x 轴。COP 轨迹纵坐标负值表示足外侧,正值表示足内侧;COP 轨迹横坐标表示单足支撑期时间相对值(见图 1)。通过 Origin 2018 分析软件将 COP 轨迹线性插值至 300 个坐标点,平均斜率为曲线一阶导数的平均值;COP 轨迹横向偏移为该曲线与足中线(x 轴)的数学面积与单足支撑期周期长度的比值^[11]。

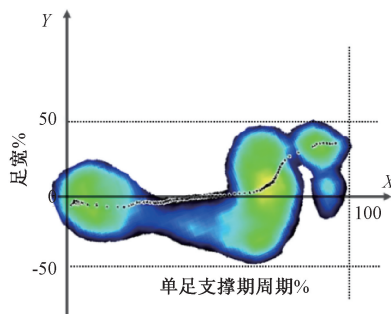


图 1 压力中心轨迹分析示意图

Fig.1 Schematic diagram of pressure center trajectory analysis

1.4.2 主观舒适度测评 受试者按随机顺序分别穿着两种鞋行走 15 min,实验人员为受试者进行舒适性评测的讲解,随后进行主观舒适度评测,舒适性量表选用量程为 150 mm 的 VAS 量表,评测范围为 0~10 分^[9-10]。舒适性问题的讲解包括:① 总体舒适性,② 后跟缓冲性,③ 前足缓冲性,④ 足弓支撑性,⑤ 后跟包裹性,⑥ 前足包裹性,⑦ 足部控制性,受试者结束行走后,在 150 mm VAS 量表选取对应刻度,其位置相对于最大量程等比例对应舒适度评分。

1.4.3 鞋总体舒适度影响指标筛选 将极简鞋和加入个性化鞋垫鞋的相关指标合并,以主观舒适度中总体舒适度为因变量,其他主观舒适度及足底压

力客观指标为自变量对两种着鞋方式进行多重线性回归,筛选出与总体舒适度相关性较高的指标。

1.5 统计方法

实验数据在 SPSS 25.0 进行分析,统计结果用均值±标准差表示。采用 Shapiro-Wilk 进行正态分布检验。对于极简鞋和加入鞋垫干预的主观舒适度评测,当数据符合正态分布时采用配对样本 *t* 检验,不符合正态分布则采用 Wilcoxon 符号秩进行非参数检验;对于足底压力测试,赤足、极简鞋和鞋垫干预 3 种着鞋条件采用单因素重复测量方差分析,事后检验采用 Bonferroni 法, $P < 0.05$ 为显著性水平。

在多重线性回归分析中,当拟合模型的显著性小于 0.05,则认为该模型具有统计学意义,自变量采用逐步回归法进行筛选,调整后 R^2 作为模型拟合度的判断标准, R^2 趋近于 1,则模型拟合度较好;当方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF) 小于 10,则认为模型自变量不存在共线性关系; Durbin-Waston (DW) 介于 1.5 ~ 2.5,则认为变量不存在自相关或序列相关。

2 结果

2.1 足底压力测评

2.1.1 单足支撑期各阶段差异 穿着极简鞋 [(28.46±8.41)%] 和穿着加入个性化鞋垫极简鞋 [(31.38±7.84)%] 行走时缓冲阶段相比于赤足 [(19.40±5.89)%] 显著性增加 ($P = 0.006$, $P = 0.013$),过渡阶段和蹬伸阶段 3 种着鞋条件行走支撑期百分比无显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.1.2 动态 AI 和中足冲量占比 相比于极简鞋 [(24.31±3.27)%] 和赤足 [(22.47±3.41)%],穿着加入个性化鞋垫鞋步行时动态 AI [(33.24±3.15)%] 显著性增加 ($P = 0.000$, $P = 0.000$),赤足和极简鞋动态 AI 无显著性差异 ($P > 0.05$)。

行走时中足冲量占比的结果显示,加入个性化鞋垫后 [(6.36±1.13)%] 相比于赤足中足部位的冲量 [(4.56±1.56)%] 显著性增加 ($P = 0.002$),赤足与极简鞋、极简鞋与加入个性化鞋垫鞋之间均无显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.1.3 COP 轨迹分析结果 在曲线横向偏移上,赤足、极简鞋和个性化鞋垫 3 种着鞋方式之间均无

显著性差异 ($P > 0.05$); 3 种着鞋方式 COP 轨迹平均斜率均存在显著性差异,穿着加入个性化鞋垫鞋行走时 COP 轨迹平均斜率 (0.14 ± 0.06) 显著性低于赤足 (0.28 ± 0.04) 和极简鞋 (0.21 ± 0.07) ($P = 0.002$, $P = 0.045$),赤足足底 COP 轨迹平均斜率显著性大于极简鞋 ($P = 0.011$)。

2.2 主观舒适度测评

对行走时鞋垫干预结果表明,加入个性化鞋垫后,鞋总体舒适性 ($P = 0.023$)、鞋后跟缓冲 ($P = 0.002$)、前足缓冲 ($P = 0.003$)、足弓支撑性 ($P = 0.002$)、前足包裹 ($P = 0.020$) 和足部控制性 ($P = 0.020$) 均显著性增加,加入个性化鞋垫后极简鞋的后跟包裹性并未发现显著性差异 ($P > 0.05$)。主观舒适度测评结果如图 2。

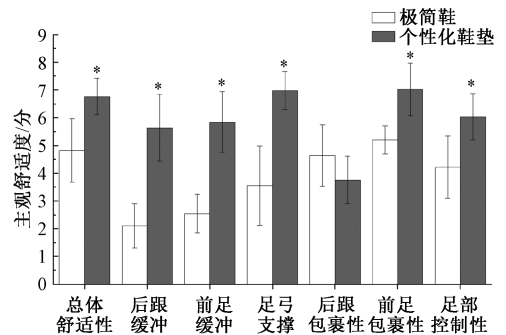


图 2 主观舒适度评分

Fig.2 Subjective comfort score

注: * 与极简鞋相比, $P < 0.05$ 。

2.3 鞋总体舒适度影响指标筛选

2.3.1 线性回归模型检验 由表 2 可知,逐步回归法得到的回归模型具有统计学意义, $DW = 1.5 \sim 2.5$,自变量不存在自相关或序列相关,拟合后的模型可解释 68.3% 的总体舒适度。

表 2 模型汇总 ($n = 32$)

Tab.2 Model summary

显著性	R^2	调整后 R^2	标准误差	Durbin-Waston
0*	0.714	0.683	0.851	1.646

注: * 表示多重线性回归模型具有统计学意义。

2.3.2 总体舒适度影响指标确定 由表 3 可知,主观指标中足弓支撑性、客观指标中足冲量占比对总体舒适性具有显著性影响 ($P = 0.000$, $P = 0.001$),其中足弓支撑性与总体舒适性呈正相关,中足冲量与总体舒适性呈负相关,两者 $VIF < 10$,不存在共线

性关系。线性回归方程如下:

$$\text{总体舒适性} = 6.437 + 0.504 \text{ 足弓支撑性} - 0.533 \text{ 中足冲量占比}$$

表3 指标筛选结果($n=32$)

Tab.3 Results of indicator screening

指标	系数	标准误差	显著性	VIF
常量	6.437	1.126	0.000*	—
足弓支撑性	0.504	0.100	0.000*	1.015
中足冲量占比	-0.533	0.142	0.001*	1.015

注: * 表示在该模型内具有统计学意义。

3 讨论

3.1 个性化鞋垫对足功能的影响

个性化鞋垫对足功能的影响主要在于触地时缓冲能力和足部控制能力,通过观测行走时鞋底与地面受力情况反映其足功能。着鞋后步态支撑期的缓冲阶段时长显著性高于赤足行走。在缓冲阶段,足部主要起承重和支撑的作用,对于自身体重造成的冲击,更长的缓冲时间表明着鞋相比于赤足在该阶段具有更好的减震性。分析地面对人体的COP轨迹发现,3种着鞋条件并未表现出COP轨迹整体在足底横向的偏移,但在曲线平均斜率上,着鞋状态下COP轨迹斜率显著性低于赤足,其曲线更趋近于直线,加入个性化鞋垫后这种趋势更为明显,COP轨迹的斜率主要是由于蹬伸时足部受力向内侧转移产生,故该轨迹趋于直线表明着鞋条件使得足部蹬伸发力模式改变^[18]。着鞋后,由于极简鞋外底为平面,使得足部作用在内底的压力均匀分布于地面,增加了中足接触面积,该结果解释了本研究中穿着极简鞋后动态AI增加的现象。个性化鞋垫使足弓获得支撑。研究发现,具有结构减震功能的跑鞋降低了前掌和足跟部位的峰值压强,使足底压力分布更为合理^[19]。该结果表明鞋内底中足部位分担更多的压力累积,而正常足型足弓刚性良好,在鞋垫中足的支撑部位,鞋垫对足弓结构改变较小,使得足底和鞋内底有着更明显的正压力,相比于极简鞋同样的外底,个性化鞋垫在足底压力板上表现出更大的中足冲量占比。行走时,足弓承重使得内侧纵弓下降,足部产生轻微的外翻,足底COP开始内移^[18];随后跖趾关节屈曲,足弓刚性增加,后足逐渐抬离地面进行蹬伸。在这一过程中,

COP轨迹进一步向内侧偏移,足旋内完成重心向对侧和前侧的推进。赤足行走的支撑期主要通过足自身结构变化执行相应的足功能。着鞋后,鞋底刚性辅助了足部功能,减小足部形变,有效地控制足部缓冲和蹬伸的姿态;在加入EVA鞋垫后,鞋底厚度和屈曲刚度都有所增加,这一辅助效果更为明显。个性化鞋垫对足弓的支撑作用减小了由于内侧纵弓下降造成的COP轨迹内移,降低了冠状轴方向的发力。

3.2 个性化鞋垫对足部感知的影响

足部感知主要反映足的本体感觉,良好的足部本体感觉有利于足功能的执行进而预防足踝损伤,故本文以主观舒适度反映足部感知^[20-21]。尽管个性化鞋垫通常用于对异常足型的矫正^[7,22],但对于正常足型,踝关节轴并非垂直于下肢中轴,正常站立位根骨仍存在7°左右的外翻^[23],贴合足型的内底有利于足部本体感觉器官感知外界信息。本文主观舒适度测评结果表明,对于正常足型,加入个性化鞋垫干预后足部整体舒适感明显提高,在功能性上具体表现为后跟、前足的缓冲性和足部整体控制性增加,在合脚性上具体表现为前足包裹性和足弓支撑性增加。个性化鞋垫的EVA材质和内底厚度的增加,可能是增加缓冲感知的重要原因,鞋垫3D设计使其更贴合足型,在增加缓冲的同时减少了异常足姿发生的风险,提高了合脚性和足部控制性。学者普遍认为,鞋的合脚性是鞋舒适感的决定性因素,这与个性化鞋垫设计的初衷一致^[24-25]。以往主观舒适度的研究缺少对重要指标的细化和客观结合,本文通过构建线性回归模型发现,极简鞋和个性化鞋垫两种着鞋条件下,人体对鞋足弓支撑性感知和鞋底中足冲量占比对着鞋总体舒适性有着显著性影响,所构建模型解释了68.3%的总体舒适感,内底足弓支撑性与足部舒适感知成正相关,外底中足冲量占比与整体舒适感呈负相关,表明个性化鞋垫主要通过对足弓的影响提高着鞋舒适度。对于鞋内底,合适的足弓支撑有助于足部感知的增加,减少运动损伤的风险;而外底材料或结构设计不当,会增大中足冲量占比,不利于舒适性提高。通过材料分布和结构调整适当垫高内底并降低外底的受力累积,有助于提高足部感知,以便足部更好地执行相应的功能。

4 结论

个性化鞋垫主要通过通过对足弓的影响提高正常的总体舒适性,加入个性化鞋垫后,步行的缓冲能力和足部控制能力提高,足部在冠状轴上受力的偏移减小;足-鞋垫-鞋共同影响人体足部感知,鞋垫要综合足型、着鞋条件和鞋垫材质等多方面进行选择。

参考文献:

- [1] JACQUELIN P. 步态分析[M].上海:上海科学技术出版社, 2017.
- [2] JAMES E. 行走的天性[M].北京:北京科学技术出版社, 2018.
- [3] MADELEINE P, MADSEN TMT. Changes in the amount and structure of motor variability during a deboning process are associated with work experience and neck-shoulder discomfort [J]. *Appl Ergon*, 2009, 40(5): 887-894.
- [4] 霍洪峰, 孟欢欢, 朱瑶佳, 等. 鞋垫类型对行走相关肌群肌电活动及足底压力的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2019, 34(4): 440-446.
- [5] 杨一卓. 业余跑者跑步损伤危险因素调查及长距离跑后足弓疲劳与纠正效果[D].北京:北京体育大学, 2018.
- [6] 张新语, 霍洪峰. 基于因子分析的男性青年足型特征指标体系研究[J]. *中国运动医学杂志*, 2020, 39(10): 780-788.
- [7] 苏宏伦, 郭俊超, 莫中军, 等. 个性化扁平足矫形鞋垫的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2016, 31(6): 490-494.
- [8] SU HL, GUO JC, MO ZJ, *et al*. Biomechanical study on the personalized orthopedic insoles for flatfoot [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(6): 490-494.
- [9] 张新语, 邢新阳, 霍洪峰. 矫正鞋垫的设计原理与生物力学功能[J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24(23): 3744-3750.
- [10] ANNE M, BENNO MN, DARREN JS, *et al*. Development of a reliable method to assess footwear comfort during running [J]. *Gait Posture*, 2002, 16(1): 38-45.
- [11] PRICE DD, MCGRATH AP, RAFII A, *et al*. The validation of visual analogue scales as ratio scale measures for chronic and experimental pain [J]. *Pain*, 1983, 17(1): 45-56.
- [12] 白啸天, 霍洪峰. 足踝功能的生物力学测评: 构建足静态和动态评价指标[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(17): 2747-2754.
- [13] 黄红拾, 邱健威, 于媛媛, 等. 健康女大学生步行和慢跑运动模式下足底压力中心轨迹相似度分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(6): 1035-1039.
- [14] 宋雅伟, 魏文仪. 不同硬度鞋底对人体步行过程中足底压力中心轨迹的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2010, 25(9): 875-878.
- [15] 张新语, 霍洪峰. 足型测量方法及足型特征研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2019, 34(7): 875-879.
- [16] 高士濂. 实用解剖图谱-下肢分册[M].上海:上海科学技术出版社, 2004.
- [17] 万祥林, 曲峰. 运动鞋屈曲刚度对舒适性及短跑表现的影响[J]. *体育科学*, 2013, 33(12): 59-64.
- [18] 戴金辉. 基于变异系数相同的异方差分析[J]. *统计与决策*, 2018, 34(9): 70-74.
- [19] 朱瑶佳, 霍洪峰. 走与跑运动模式下的足底压力中心轨迹特征[J]. *中国组织工程研究*, 2018, 22(31): 4987-4992.
- [20] 刘丽. 鞋底减震结构对足部减震系统影响的研究[D].西安:陕西科技大学, 2015.
- [21] 翟宏伟, 孙洁, 巩尊科, 等. 本体感觉训练对踝关节功能障碍恢复的影响[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2016, 38(2): 147-149.
- [22] 方华. 本体感觉训练对踝关节损伤史人群足底压力影响的研究[D].北京:北京体育大学, 2014.
- [23] ANNE M, BENNO MN, NEIL H, *et al*. Orthotic comfort is related to kinematics, kinetics, and EMG in Recreational runners [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2003, 35(10): 1710-1719.
- [24] 杨平, 蔡丽飞. 足过度旋前对人体力线的影响及治疗方法[J]. *中国康复理论与实践*, 2016, 22(1): 72-74.
- [25] AU EYL, GOONETILLEKE RS. A qualitative study on the comfort and fit of ladies' dress shoes [J]. *Appl Ergon*, 2007, 38(6): 687-696.
- [26] 张勤良, 倪朝民. 鞋靴对足底压力分布影响及其舒适度研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2012, 27(2): 180-183.