

文章编号: 1004-7220(2024)02-0278-07

扁平足患者足底压力与足底感觉特征

冯亮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, 河北 石家庄 050024)

摘要:目的 探究不同足型人群足底压力与足底感觉之间的关系, 为扁平足患者损伤评价以及运动恢复提供理论参考。方法 通过三维足型扫描仪, 对招募的受试者进行初步筛查; 根据足弓指数进行组别划分, 正常足组 16 人, 扁平足组 16 人。使用 Footscan 高频足底压力测试系统和 Semmes-Weinstein Monofilaments 单丝测试分别进行组别间的足底压力和足底感觉测试。对测试结果进行统计描述和相关性分析。结果 扁平足组左右足弓与左右足跟内侧区域的足底压力冲量相较于正常足组存在显著增加的趋势 ($P < 0.05$); 扁平足组第 1 跖骨以及足弓位置的足底感觉阈值相较于正常足组更低 ($P < 0.05$); 扁平足组左脚 ($P = 0.012, R = 0.500$) 和右脚 ($P = 0.021, R = 0.341$) 足弓位置的足底感觉与足底压力之间存在显著的正相关。结论 扁平足人群足弓降低和过度外翻的结构特点, 导致其足弓和足跟内侧位置的足底压力冲量增大, 足底感觉敏感性阈值降低; 同时, 足底感觉与足底压力之间存在相关性, 足弓足底压力冲量负荷越大, 足底感觉阈值越低。

关键词: 扁平足; 足底压力; 足底感觉; 相关性分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.02.013

Plantar Pressure and Plantar Sensory Characteristics in Patients with Flat Foot

FENG Liang¹, HUO Hongfeng^{1,2}

(1. School of Physical Education, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Human Sports Bioinformation Evaluation, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: **Objective** To investigate the relationship between plantar pressure and plantar sensation in people with different foot types and provide theoretical references for injury evaluation and sports recovery in patients with flat feet. **Methods** Recruited participants were initially screened using a three-dimensional (3D) foot scanner. They were divided according to the arch index as follows: 16 in the normal foot group and 16 in the flat foot group. Plantar pressure and sensation tests were performed in different groups using the Footscan high-frequency plantar pressure test system and the Semmes-Weinstein monofilament test, respectively. The test results were analyzed for statistical descriptions and correlations. **Results** The plantar pressure impulses of the left and right arches and the medial area in the flat foot group increased significantly compared with those in the normal foot group ($P < 0.05$). The plantar sensory thresholds of the first metatarsal bone and arch position in the flatfoot group were lower than those in the normal foot group ($P < 0.05$). There was a significant positive correlation between left foot sole sensation, right foot arch position, and plantar pressure in the flat foot group. **Conclusions** The structural features of reduced arches and excessive valgus in people with flat feet result in increased plantar pressure impulses and lower thresholds of plantar sensory sensitivity in the arch and medial heel positions. Meanwhile, there is a correlation between plantar sensation and plantar pressure; the greater the load of plantar pressure, the lower the threshold of plantar sensation.

Key words: flat foot; plantar pressure; plantar sensation; correlation analysis

收稿日期: 2023-10-04; 修回日期: 2023-10-09

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

扁平足是以足弓塌陷为形态特征,足部缓冲能力弱化、足踝刚度降低为功能特性的一种足部疾患^[1]。由于足弓的降低或者完全丧失,导致足底承受更大的压力,改变足底结构,增加了该人群下肢的损伤风险^[2]。当前,随着足部健康意识的提高,越来越多的研究开始关注扁平足深层次的问题,包括扁平足的病因、发病机制和治疗方法,以提高人们的足部健康水平^[3]。扁平足不仅会影响足部的外观和功能,还可能引发其他相关的健康问题。足底压力和足底感觉是评估和研究扁平足的重要指标,对于了解扁平足的病因、发病机制以及预防和治疗具有重要意义^[4-5]。

足底压力是指在行走、跑步和站立等活动中足底所承受的力量分布情况^[6]。扁平足的足弓降低或失去,导致足底的压力分布不均匀,可能导致足部疼痛、韧带和肌肉损伤,甚至影响整个身体的姿势和运动功能^[7]。足底感觉是指足底对外界刺激的感知能力^[8]。足底感觉的准确性和灵敏度对于维持足部的平衡和姿势稳定至关重要。对老年群体的调查结果表明,足底感觉会随着年龄的增长而出现感觉阈值升高的趋势,并且与老年人跌倒风险增加存在相关性^[9]。扁平足足弓结构和下肢力学特性改变是否会影响该人群的足底感觉,目前还鲜有相关的报道^[10]。足底感觉异常可能增加足部受伤的风险,同时也可能影响整个身体的运动协调能力^[11]。因此,研究足底感觉在扁平足中的变化和影响,有助于深入了解扁平足的神经生理机制,为预防和治疗提供新的思路和方法。本文探讨扁平足患者足底压力以及足底感觉之间的关系,并进一步研究其对足部功能和健康的影响。

1 对象与方法

1.1 受试者选取与分组

受试者均来自于河北师范大学。通过三维足型扫描仪对受试者足型(见图1)进行调查,使用足弓指数对扫描结果进行划分^[12]:0.21~0.26为正常足型(对照组),0.28~0.30为柔韧性扁平足(实验组),大于0.3为刚性扁平足(不作为纳入对象)。实验组柔韧性扁平足志愿者接受脚趾抬高试验和踮脚实验检验,结果均为阳性。

最终纳入32名志愿者,其中正常足组16人

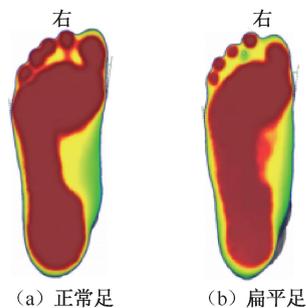


图1 足型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of foot pattern

(男性9人,女性7人),扁平足组16人(男性6人,女性10人)。所有受试者无心脑血管、神经类疾病;半年内无关节与肌肉损伤,近1年内没有手术行为;均签署知情同意书。受试者基本情况见表1。

表1 受试者基本身体情况

Tab. 1 Basic physical condition of the subjects

参数	正常足组(n=16)	扁平足组(n=16)
年龄/岁	20.30±2.37	21.78±3.43
身高/cm	163.08±4.21	160.52±3.43
体重/kg	59.32±2.20	60.87±3.14
BMI/(kg·m ⁻²)	21.63±3.72	22.23±2.35

1.2 实验仪器

① 三维足型扫描仪(PODOMED 3D Scanner, 350 mm×150 mm×150 mm,北京海德美业科技有限公司);② 足底压力测试系统(RSscan International公司,比利时),板长2 m,采集频率126 Hz,最小分辨率为25 g;③ Semmes-Weinstein Monofilaments 单丝测试工具(North Coast Medical公司,美国)。

1.3 实验流程与方法

1.3.1 足底压力测试 ① 准备阶段:包括测试者的培训以及执行训练,以此保证实验的顺利开展和数据呈现的准确。测试前设备调试,与受试者沟通清楚实验的流程以及需要完成的任务。每位受试者在正式测试之前均有3次的练习机会,避免因为新的环境以及任务压力影响受试者的正式步行状态。② 试验过程:使用三维足型扫描仪对受试者进行足型扫描,获取受试者的足型特征,根据足弓指数作为组别划分依据;其次使用Footscan高频足底压力测试系统,录入受试信息,并准备记录测试结果。Footscan测力平板被平放在地板上,并且在平板的两端放置了延长垫,允许受试者在行走中,把

最平稳的状态留在测力板上。每位受试者均以自己的最适速度进行行走测试,测试中留存3次平稳的步行特征。③ 数据处理阶段:采用测力板配套软件 Footscan 7.0 对数据进行解析,该软件把足底划分为10个区域:第1趾骨、第2~5趾骨、第1跖骨、第2跖骨、第3跖骨、第4跖骨、第5跖骨、足弓、足跟外侧、足跟内侧(见图2)。根据不同区域触地的时间、强度、压力计算相应的指标,反映步行过程中足底压力状态。本文主要讨论足底压力与足底感觉之间的关系,故仅选择冲量来反映足底压力。

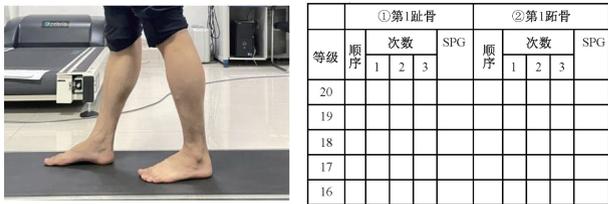


图2 足底压力测试示意图与足底感觉调查记录表格(部分)

Fig. 2 Schematic diagram of plantar pressure test and record form of plantar sense survey (part)

1.3.2 足底感觉测试 ① 准备阶段:每个参与足底皮肤感觉的评估人员均接受了使用塞姆斯-温斯坦压力感觉测量仪的培训。对测试者的测试信度进行评估($\alpha = 0.670$; $P = 0.005$; 95% CI [0.166, 0.726]),根据相关的研究确认为良好^[13]。足部感觉测试工具由20个直径不同但长度相同的尼龙单丝组成。每根单丝都可以反映固定的力值,垂直按压在足底表面时使其弯曲,以此来量化足底感觉。在5个足底区域测试足底皮肤感觉,分别为第1趾骨、第1跖骨、第5跖骨、足弓、足跟(见图3);测量位置的选择,根据足底感觉的密度分布以及扁平足人群的足型特点确定,以及使用初步实验和之前的研究作为参考^[14]。② 测试过程:测试前每个受试者均熟悉了单丝刺激的一般感觉。测试者将1根



图3 足底感觉测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of plantar sensory measurement

注:① 第1趾骨;② 第1跖骨;③ 第5跖骨;④ 足弓;⑤ 足跟。

2.0 g 的单丝压在参与者的手掌上,以减轻任何对疼痛或不适的焦虑。在测试过程中,受试者平躺在测试房间,脚悬在测试床的边缘,测试者将单丝垂直按在每个指定的足底部位。参与者的右脚和左脚被按随机顺序进行测试,以抵消任何顺序效应。测试中,随机测试足底的不同位置,并施加压力约1.5 s,直到单丝形成“C”形。测试力量总是从随机添加了零刺激,以确保参与者不能预期单丝的应用。最初足跟使用11级(丝4.56),其他部位使用7级(丝3.84),刺激3次。如果等级在所有3个试验中都能被感知到,那么下一个刺激等级会小两个等级;如果等级在所有3个试验中都不能被感知,下一个刺激等级就会大两个等级。如果等级不能被感知一或两次,下一个成绩就会大一个等级。通过重复此过程来确定每个位置的最小感觉等级(smallest perceivable grade, SPG)。当他们感知到刺激时,参与者被要求提供一个关于被测试区域的定位的口头回应。足底的感觉灵敏度阈值由正确检测到的最小单丝所代表的力值来表示。

1.4 数据统计

统计分析包括描述性分析和相关性分析。计量数据以(平均值 \pm 标准差)表示,分别使用SPSS 24.0、OriginPro 2021 Excel、进行数据汇总、统计学分析和绘图。采用Shapiro-Wilk法对数据进行正态分布检验。采用独立样本 t 检验法检验组别间的足底压力与足底感觉评价结果的差异性;采用相关性分析检验组别间的足底压力与足底感觉评价结果的相关性, $P < 0.05$ 认为差异具有统计学意义。

2 研究结果

足底压力冲量是与足底接触地面的速度、力量、姿态等因素有关的重要生物力学参数,足底压力冲量的大小与人体健康密切相关^[15]。通过 t 检验对比正常足与扁平足人群的正常步态过程中的足底压力冲量,结果发现,扁平足人群足弓与足跟内侧区域的足底压力冲量相较于正常足型人群存在显著增加的趋势($P < 0.05$);其中,左右足弓的统计结果分别为 $P = 0.001$, $t = 19.686$ 和 $P = 0.001$, $t = 36.014$;左右足跟内侧的统计结果分别为 $P = 0.001$, $t = 41.755$ 和 $P = 0.001$, $t = 50.706$;其他各部位的足底压力冲量占比不存在统计学差异($P > 0.05$),见表2。

表2 足底不同区域冲量分布

Tab. 2 Distribution of impulse in different areas of foot floor

单位: N·s

部位	正常足组($n=16$)		扁平足组($n=16$)	
	左足	右足	左足	右足
第1趾骨	22.31±9.22	19.62±12.53	18.28±14.18	16.48±12.85
第2~5趾骨	3.12±3.02	3.76±1.22	1.36±1.01	1.64±0.98
第1跖骨	29.31±19.03	30.85±27.71	23.93±19.52	32.23±20.97
第2跖骨	44.87±33.45	45.63±28.87	44.63±27.01	42.33±24.82
第3跖骨	37.86±21.38	39.08±19.98	40.45±21.81	39.45±10.82
第4跖骨	22.41±9.04	23.65±12.23	30.54±21.01	29.87±8.82
第5跖骨	13.34±11.82	11.98±9.02	22.81±8.12	23.53±14.82
足弓	18.58±12.94	13.39±10.29	60.04±41.22 ^a	54.78±24.49 ^a
足跟内侧	46.67±22.18	37.69±19.32	88.32±33.19 ^b	92.21±21.23 ^b
足跟外侧	37.33±17.82	34.67±21.33	51.32±11.91	44.12±13.83

注:^{a,b}表示扁平足型与正常足型相比,左右足弓和足跟内侧部位的冲量分布差异具有显著性, $P<0.05$ 。

足底感觉是指人体足底的神经末梢对外界刺激的感知能力^[16]。足底感觉对于人体的运动控制和平衡至关重要。通过 t 检验对比正常足与扁平足人群不同区域的足底感觉发现,扁平足人群与正常足人群相比,右脚第1趾骨($P=0.001, t=59.54$)、第1跖骨($P=0.004, t=9.87$)以及足弓($P=0.001,$

$t=128.35$)位置的足底感觉阈值相较于正常足型人群更低($P<0.05$);左脚第1跖骨($P=0.004, t=23.52$)以及足弓($P=0.001, t=55.08$)位置的足底感觉阈值相较于正常足型人群更低($P<0.05$);其他各部位的足底感觉不存在统计学差异($P>0.05$),见表3。

表3 足底感觉结果变量的描述性特征

Tab. 3 Descriptive characteristics of the plantar sensory outcome variables

单位:分

部位	正常足组($n=16$)	扁平足组($n=16$)	P	t
右脚				
第1趾骨	3.22±0.60(2.36,4.17)	2.39±0.04(2.36,4.17)	0.001	59.54
第1跖骨	3.10±0.48(2.36,4.08)	2.53±0.20(2.36,4.17)	0.004	9.87
第5跖骨	2.86±0.33(2.44,4.17)	2.62±0.41(2.44,4.31)	0.183	1.88
足弓	3.07±0.19(2.36,4.17)	2.41±0.03(2.36,4.08)	0.001	128.35
足跟	2.71±0.18(2.36,4.31)	2.74±0.39(2.36,4.31)	0.155	1.71
左脚				
第1趾骨	2.92±0.74(2.36,4.17)	2.85±0.04(1.65,4.17)	0.709	0.709
第1跖骨	2.41±0.03(2.36,4.31)	2.35±0.67(2.36,4.17)	0.001	23.52
第5跖骨	2.36±0.02(2.36,4.31)	2.49±0.67(2.36,4.31)	0.243	0.731
足弓	2.98±0.37(2.36,4.08)	2.41±0.03(2.36,4.08)	0.001	55.08
足跟	2.53±0.20(2.36,4.08)	2.68±0.22(2.36,4.08)	0.581	0.313

注:括号中分别为足底感觉最大和最小分数。

足底压力属于物理性足功能的评价指标;而足底感觉属于感觉性足功能评价指标,其定量评价既可以反映足底的物理功能,也可以反映主观的感觉功能。足底压力和足底感觉均可以描述足底的功能,两者应当存在某种关联。为了验证这一假设,对两个变量之间进行相关性分析。结

果表明,正常足组仅有左脚第1趾骨位置的足底感觉与足底压力之间存在显著的负相关性($P=0.001, R=-0.596$);扁平足组左脚($P=0.012, R=0.500$)和右脚($P=0.021, R=0.341$)足弓位置的足底感觉与足底压力之间存在显著的正相关(见表4)。

表4 足底压力与足底感觉的相关性分析结果

Tab. 4 Results of the correlation analysis of plantar pressure and plantar sensation

部位	正常足组 (n=16)	P	扁平足组 (n=16)	P
右脚				
第1趾骨	0.489	0.090	0.089	0.772
第1跖骨	0.298	0.331	0.059	0.848
第5跖骨	-0.485	0.093	0.521	0.068
足弓	0.265	0.381	0.500	0.012
足跟	0.009	0.976	-0.183	0.549
左脚				
第1趾骨	-0.596	0.031	-0.283	0.350
第1跖骨	0.517	0.070	0.282	0.350
第5跖骨	-0.106	0.731	-0.397	0.243
足弓	0.308	0.306	0.341	0.021
足跟	-0.065	0.833	0.018	0.952

3 讨论

3.1 足底压力特征分析

足底压力冲量与人体健康密切相关^[17]。冲量可以直接反映足底压力作用在地面而形成的应答关系,受到足底不同区域压力与接触时间的影响^[18]。本文通过对比正常足与扁平足人群的足底压力冲量发现,扁平足人群在足弓和足跟内侧区域足底压力冲量明显增加。足底部分区域的压力冲量增加,代表该区域在步态过程中相较于正常步态功能分区而言,扁平足人群该区域贡献增加。扁平足人群由内侧纵弓的韧带松弛,会改变其关节、韧带和肌腱的力学机制以及足部的对齐方式^[19]。在行走或奔跑时,人的足底会不断地接触地面,产生一系列的压力变化。高强度的足底压力冲量会对骨骼、肌肉、关节造成损伤,增加受伤的风险。因此,扁平足人群的足底压力冲量的分布变化,也可以解释扁平足人群易出现足底疲劳和动作模式异常的生理现象^[20-21]。Williams等^[22]研究认为,足的高弓与低弓结构与跑步者不同的损伤模式有关。例如,高弓跑步者的踝关节损伤、骨损伤和外侧损伤的发生率较高,而低弓跑步者则是膝关节损伤、软组织损伤和内侧损伤的发生率更高^[23]。足的外侧,包括第5跖骨,可能在维持姿势方面发挥重要作用,扁平足人群足底内侧区间压力负荷增大,会导致足底压力曲线内移,使得运动控制错误或姿势扰动,导致姿势的丧失^[24]。此时,第5跖骨头的压

力贡献占比可能特别重要,可以避免脚踝受伤。如果第1和第5跖骨压力分布均匀,会减少慢性踝关节不稳定患者的损伤风险和增强姿势控制能力^[25]。

3.2 足底感觉特征分析

足底感觉是指人体足底的神经末梢对外界刺激的感知能力。足底是人体与地面直接接触的部位,通过足底感觉,人体能够感知到地面的硬度、温度、纹理等信息,并将这些信息传达给大脑,从而协助身体维持平衡、调整姿势、控制步态等日常活动行为^[26]。本文对比了正常足型与扁平足人群的足底5个区域的足底感觉,结果发现:相较于正常足型人群,扁平足人群在第1趾骨、第1跖骨以及内侧足弓位置的感觉阈值显著低于正常足型人群。本实验纳入的受试者均为在校大学生,测量的足底各部位的感觉阈值均较低;相关研究表明,足底感觉阈值会随着年龄的增长出现明显升高的趋势。上述结果提示,与年龄相关的足底触觉敏感性阈值升高,会损害人体直立姿态中感受姿势方向微小变化的能力,进而增加老年人跌倒的风险^[27]。但年轻受试者体质量并不存在年龄因素所导致的足底感觉阈值升高的现象。扁平足人群第1趾骨、第1跖骨以及足弓位置感觉阈值降低,可能与该足型人群的足型特点有关系;扁平足人群足弓塌陷,允许足底有更大的接触面积,尤其是足弓和足跟内侧区域,足底可能因此产生更多的感觉信息来源。Lirani-Silva等^[28]假设,长期刺激对足底感觉改善可能是由于引起了初级躯体感觉皮层力学感受器的应力性扩张与应答所导致。进一步的研究发现,当站在有纹理的表面或穿着有纹理的鞋垫时,增加脚部的体感信息会产生对老年人有益的急性或慢性长期的姿势控制的影响,并可能降低摔倒的风险^[29]。也有研究假设,赤脚站立和行走引起的足底表面力学感受器的刺激增加可以促进足底神经敏感性的提升,这可以被认为是解释力学感觉系统可塑性的一种机制。以上例证均可以解释扁平足人群为何第1趾骨、第1跖骨以及足弓位置感觉阈值会降低^[30]。

3.3 足底压力与足底感觉的相关性分析

健康个体根据足底、关节和下肢肌肉的感觉信息调节下肢刚度,做出姿势调整。足底主要通过压力和感觉来收集环境反馈信息,其中足底压力直观反映人体的力学状态,属于结果解释型指标^[31];足

底感觉可以定量描述足底的感觉阈值,是足底输入性信号源头。本文对比正常足型与扁平足人群足底压力与足底感觉的关系,结果发现:扁平足人群足弓部位的压力与感觉之间存在显著的相关性;扁平足人群足弓部位的足底压力冲量水平增加,足弓部位与地面的接触面积增大,足底感觉阈值降低,更加敏感。Franklin 等^[32]研究发现,当足底承受更大的周期性力学负荷的刺激时,足底压力、足底感觉以及皮肤组织厚度会产生功能性适应。足底皮下层中有默克尔细胞(Merkel cells)和支配它们的Aβfibers 神经纤维以及真皮层内其他缓慢和快速适应的力学感受器,如鲁菲尼(Ruffin)、迈斯纳(Meissner)和帕西尼安小体(Pacinian corpuscles)均会产生功能应答^[33]。足底表皮层的角蛋白丝的腱组织和空间上特殊的序列特征,会对表皮的力学需求进行调节,以此控制足底触觉的敏感性。扁平足人群足弓与足跟的压力冲量的增大以及引起的足弓部位的感觉阈值的降低,是足底功能自适应的结果^[34]。在其他一些实践训练的案例中也证明,足底感觉训练可以改变足底区域的压力分布以及增加姿势稳定性,原因在于足底感觉具有编码由压力运动中心变化引起的足底压力变化信息的能力^[35]。扁平足人群,由于特殊的足型结构,增加了足底接触地面的面积,暴露更多的足底皮肤,足底感觉的获取面积增大,也形成了更多的足底感觉适应^[36];也有相关报道表明,年龄以及体质量对足底压力以及感觉会有适应性的影响,例如足底感觉会钝化、增大感觉阈值等^[37]。本研究群体均为青年学生,体质量水平均属于正常范畴,故研究结果会与肥胖人群的结果不同;足底感觉和足底压力之间存在相关性,但由于人群以及其他变量的不同,会产生不同的相关趋势。

3.4 研究局限与不足

本研究受试者纳入数量以及年龄层面不够丰富,扁平足人群也主要选择了柔性扁平足人群。未来需要扩大研究人数以及年龄层次,深度分析包括年龄、性别、体质量、运动经验、刚性扁平足等多因素条件对足底压力以及足底感觉的影响。同时,也需要展开相关的干预实验。

4 结论

扁平足人群足弓降低和过度外翻的结构特点,

导致其足弓和足跟内侧位置的足底压力冲量增大,足底感觉敏感性阈值降低;同时,足底感觉与足底压力之间存在相关性,足弓足底压力冲量负荷越大,足底感觉阈值越低。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:冯亮负责实验测量、数据处理、统计分析和论文撰写;霍洪峰负责实验设计、论文撰写以及修改。

参考文献:

- [1] MCKEON PO, HERTEL J, BRAMBLE D, et al. The foot core system: A new paradigm for understanding intrinsic foot muscle function [J]. *Br J Sports Med*, 2015, 49(5): 290.
- [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] GEYER HL, KOSIOREK H, DUECK AC, et al. Associations between gender, disease features and symptom burden in patients with myeloproliferative neoplasms: An analysis by the MPN QOL International Working Group [J]. *Haematologica*, 2017, 102(1): 85-93.
- [4] LIN S, ZHENG R, ZHAO W, et al. Statistical analysis on multi-factors of dynamic plantar pressure to normal subjects [J]. *Biomed Signal Proces*, 2023(84): 104995.
- [5] REUTER-LORENZ PA. New visions of the aging mind and brain [J]. *Trends Cogn Sci*, 2002, 6(9): 394-400.
- [6] 冯玉蓉, 张翠, 冯遵鹏. 老年女性正常行走与跨越不同高度障碍物足底压力特征比较研究[J]. *北京体育大学学报*, 2010, 33(9): 63-65.
- [7] 朱瑶佳, 霍洪峰. 不同负荷类型运动对大学生足型的影响研究[J]. *中国运动医学杂志*, 2021, 40(1): 12-18.
- [8] 冯亮, 张雅飞, 霍洪峰. 足踝复合本体感觉的测量与评价[J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28(20): 3259-3264.
- [9] BOK SK, LEE TH, LEE SS. The effects of changes of ankle strength and range of motion according to aging on balance [J]. *Ann Rehabil Med*, 2013, 37(1): 10-16.
- [10] 冯亮, 龚树辉, 霍洪峰. 短足训练对扁平足患者足踝功能影响的 Meta 分析与系统评价[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(5): 799-804.
- [11] KORCHI K, NOE F, BRU N, et al. Optimization of the effects of physical activity on plantar sensation and postural control with barefoot exercises in institutionalized older adults: A pilot study [J]. *J Aging Phys Act*, 2019, 27(4): 452-465.

- [12] 来章琦. 基于足部核心系统探究足部肌肉功能训练对老年人姿势控制的影响[D]. 上海: 上海体育学院, 2023.
- [13] MACHADO AS, SILVA CBPD, ROCHA ESD, *et al.* Effects of plantar foot sensitivity manipulation on postural control of young adult and elderly [J]. *Rev Bras Reumatol*, 2017, 57(1): 30-36.
- [14] DO MC, BUSSEL B, BRENIERE Y. Influence of plantar cutaneous afferents on early compensatory eactions to forward fall [J]. *Exp Brain Res*, 1990, 79(2): 319-324.
- [15] ZHONG H, WANG B, GUO L, *et al.* The changes of plantar pressure under different walking speeds [J]. *Med Sport*, 2016, 69(2): 267-280.
- [16] DOG H, CALTEKIN MD. Plantar sensation, proprioception, and balance levels in pregnant women with gestational diabetes mellitus [J]. *Clin Biomech*, 2023 (107): 106016.
- [17] 贾品茹, 成慧, 张静, 等. 青少年特发性脊柱侧弯矢状位平衡与足底压力的相关性[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(5): 846-850.
- JIA PR, CHENG H, ZHANG J, *et al.* Correlation between sagittal balance and plantar pressure in adolescent idiopathic scoliosis [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(5): 846-850.
- [18] 聂茂丹, 张敏, 祁昕征, 等. 扁平足与退化性膝关节炎的相关性研究[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(S1): 219.
- [19] SHIBUYA N, JUPITER DC, CILIBERTI LJ, *et al.* Characteristics of adult flatfoot in the United States [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2010, 49(4): 363-368.
- [20] REDMOND AC, CROSBIE J, OUVRIER RA. Development and validation of a novel rating system for scoring standing foot posture: The foot posture index [J]. *Clin Biomech*, 2006, 21(1): 89-98.
- [21] DIGIOVANNI CW, GREISBERG J. Foot and ankle: Core knowledge in orthopaedics [M]. Philadelphia: Elsevier Health Sciences, 2007.
- [22] WILLIAMS III DS, MCCLAY IS, HAMILL J. Arch structure and injury patterns in runners [J]. *Clin Biomech*, 2001, 16(4): 341-347.
- [23] WILLIAMS III DS, DAVIS IMC, SCHOLZ JP, *et al.* High-arched runners exhibit increased leg stiffness compared to low-arched runners [J]. *Gait Posture*, 2004, 19(3): 263-269.
- [24] PERRY SD, RADTKE A, MCILROY WE, *et al.* Efficacy and effectiveness of a balance-enhancing insole [J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2008, 63(6): 595-602.
- [25] BURCAL CJ, WIKSTROM EA. Plantar cutaneous sensitivity with and without cognitive loading in people with chronic ankle instability, copers, and uninjured controls [J]. *J Orthop Sport Phys*, 2016, 46(4): 270-276.
- [26] POWELL MR, POWDEN CJ, HOUSTON MN, *et al.* Plantar cutaneous sensitivity and balance in individuals with and without chronic ankle instability [J]. *Clin J Sport Med*, 2014, 24(6): 490-496.
- [27] WELLS C, WARD LM, CHUA R, *et al.* Regional variation and changes with ageing in vibrotactile sensitivity in the human footsole [J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2003, 58(8): B680-B686.
- [28] DETTMER M, POURMOGHADDAM A, LEE BC, *et al.* Associations between tactile sensory threshold and postural performance and effects of healthy aging and subthreshold vibrotactile stimulation on postural outcomes in a simple dual task [EB/J]. *Curr Gerontol Geriatr Res*, 2016, doi: 10.1155/2016/9797369.
- [29] LIRANI-SILVA E, VITÓRIO R, BARBIERI FA, *et al.* Continuous use of textured insole improve plantar sensation and stride length of people with Parkinson's disease: A pilot study [J]. *Gait Posture*, 2017(58): 495-497.
- [30] HATTON AL, DIXON J, ROME K, *et al.* Standing on textured surfaces: Effects on standing balance in healthy older adults [J]. *Age Ageing*, 2011, 40(3): 363-368.
- [31] ANNINO G, PALAZZO F, ALWARDAT MS, *et al.* Effects of long-term stimulation of textured insoles on postural control in health elderly [J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2016, 58(4): 377-384.
- [32] FRANKLIN S, GREY MJ, HENEGHAN N, *et al.* Barefoot vs common footwear: A systematic review of the kinematic, kinetic and muscle activity differences during walking [J]. *Gait Posture*, 2015, 42(3): 230-239.
- [33] SHECHTER R, BARUCH K, SCHWARTZ M, *et al.* Touch gives new life: Mechanosensation modulates spinal cord adult neurogenesis [J]. *Mol Psychiatry*, 2011, 16(3): 342-352.
- [34] MORITZ CT, FARLEY CT. Human hopping on very soft elastic surfaces; Implications for muscle pre-stretch and elastic energy storage in locomotion [J]. *J Exp Biol*, 2005, 208(5): 939-949.
- [35] SWENSSON O, LANGBEIN L, MCMILLAN JR, *et al.* Specialized keratin expression pattern in human ridged skin as an adaptation to high physical stress [J]. *Brit J Dermatol*, 1998, 139(5): 767-775.
- [36] TORRES EB, TORRES-PRADILLA M. Cutaneous manifestations in children with diabetes mellitus and obesity [J]. *Actas Dermosifiliogr*, 2014, 105(6): 546-557.
- [37] ÖZDEMİR H, SÖYÜNCÜ Y, ÖZGÖRGEN M, *et al.* Effects of changes in heel fat pad thickness and elasticity on heel pain [J]. *J Am Podiatr Med Assoc*, 2004, 94(1): 47-52.