

文章编号: 1004-7220(2023)06-1093-07

不同站姿足底压力分布与足弓结构特征的相关性

刘涛^{1,2}, 杨永泰^{1,2,3}

(1. 福州大学 先进制造学院, 福建 晋江 362200; 2. 中国科学院海西研究院 泉州装备制造研究中心, 福建 晋江 362200;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: **目的** 探讨不同站姿时足底压力分布与足弓结构特征之间的相关性。 **方法** 对13名健康成年男性进行足底压力测试, 并进行足部CT扫描和足骨模型重构, 建立足弓数字化表征。在此基础上, 分析足底压力测量指标与足弓特征测量参数之间的相关性。 **结果** 前足峰值压力 (forefoot peak pressure, FPP) 在0°站姿时与内外侧纵弓高度、内外侧纵弓指数和体质量正相关, 与内外侧纵弓角负相关; 在30°站姿时与内外侧纵弓长度、内侧纵弓高度、足底三角形面积和体质量正相关; 在60°站姿时与内外侧纵弓高度和内侧纵弓指数正相关, 与内侧纵弓角负相关。中足峰值压力 (midfoot peak pressure, MPP) 在0°站姿时与内外侧纵弓长度和足底三角形面积正相关; 在30°站姿时与内外侧纵弓长度、内外侧纵弓角和足底三角形面积正相关, 与内外侧纵弓指数负相关; 在60°站姿时与内外侧纵弓长度、足底三角形面积和体质量正相关。后足峰值压力 (rearfoot peak pressure, RPP) 在0°站姿时与内外侧纵弓高度、内外侧纵弓指数和体质量正相关, 与内外侧纵弓角负相关; 在30°和60°站姿时仅与体质量正相关, 与足弓特征参数无关。 **结论** 不同站姿时的足底压力分布与足弓特征存在不同相关性。研究结果可为临床诊断、治疗和预防因不同站姿引起的足部病理提供理论基础。

关键词: 足底压力; 内侧纵弓; 外侧纵弓; 站姿

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.006

Correlation Between Plantar Pressure Distributions and Arch Structural Features in Different Standing Positions

LIU Tao^{1,2}, YANG Yongtai^{1,2,3}

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Jinjiang 362200, Fujian, China; 2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Jinjiang 362200, Fujian, China; 3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: **Objective** To explore the correlation between plantar pressure distributions and arch structural features in different standing positions. **Methods** Plantar pressures of 13 healthy adult males were tested, and foot CT scan and foot bone model reconstruction were then performed to establish arch digital characterization. On this basis, the correlation between plantar pressure measurement indexes and arch characteristics measurement parameters was analyzed. **Results** Forefoot peak pressure (FPP) was positively correlated with the medial/lateral longitudinal arch height, the medial/lateral longitudinal arch index and body weight, and negatively correlated with the medial/lateral longitudinal arch angle during standing with foot at 0°; it was positively correlated with the medial/lateral longitudinal arch length, the medial longitudinal arch height, the plantar triangle

收稿日期: 2023-02-08; 修回日期: 2023-03-03

基金项目: 福建省科技厅 STS 计划配套项目 (2022T3050), 福厦泉国家自主创新示范区协同创新平台专项 (2020FX01)

通信作者: 杨永泰, 高级工程师, 硕士生导师, E-mail: yangyongtai@fjirsm.ac.cn

area and body weight during standing with foot at 30° ; it was positively correlated with the medial/lateral longitudinal arch height and the medial longitudinal arch index, and negatively correlated with the medial longitudinal arch angle during standing with foot at 60° . Midfoot peak pressure (MPP) was positively correlated with the medial/lateral longitudinal arch length and the plantar triangle area during standing with foot at 0° ; it was positively correlated with the medial/lateral longitudinal arch length, the medial/lateral longitudinal arch angle and the plantar triangle area, and negatively correlated with the medial/lateral longitudinal arch index during standing with foot at 30° ; it was positively correlated with the medial/lateral longitudinal arch length, the plantar triangle area and body weight during standing with foot at 60° . Rearfoot peak pressure (RPP) was positively correlated with the medial/lateral longitudinal arch height, the medial/lateral longitudinal arch index and body weight, and negatively correlated with the medial/lateral longitudinal arch angle during standing with foot at 0° ; it was only positively correlated with body weight, but not with characteristic parameters of foot arch during standing with foot at 30° and 60° . **Conclusions** There is a different correlation between plantar pressure distributions and arch characteristics in different standing positions. The results can provide theoretical basis for clinical diagnosis, treatment and prevention of foot pathology caused by different standing positions.

Key words: plantar pressure; medial longitudinal arch; lateral longitudinal arch; standing position

人体足部 26 块骨骼通过关节、韧带、肌腱和足底筋膜等相互连接形成足弓。足弓的特殊结构使足部既可以作为稳定器,保持人体平衡和承受体重,也可以作为减震器,吸收静态和动态过程中产生的地面反作用力^[1]。内侧纵弓、外侧纵弓和横弓的结构差异影响站立和行走过程中的足底压力分布^[2-3]。足底压力可揭示人体的动力特征,用于评估和检测足部功能^[4]。根据足弓特别是内侧纵弓的结构特征,可将足部分为高弓足、正常足和扁平足,不同足弓类型将导致不同的足底压力分布,使足部具有不同损伤机制和损伤模式^[5]。因此,探究足部生物力学特性对预防下肢运动损伤或疾病,评价足部舒适性以及实现个性化制鞋/垫具有重要意义。

分析和评估足弓结构常用的方法包括足迹法、足底压力图、医学影像等。Chen 等^[6]使用足迹法和放射学成像测量研究了扁平足的几何参数和内侧纵弓参数之间的相关性。Maruyama 等^[7]阐明了成人内侧纵弓和横弓的 X 线成像测量参数和体表测量参数之间的关系。Lee 等^[8]分析了儿童的足姿指数(foot posture index, FPI)和足底压力模式与内侧纵弓医学图像测量参数的相关性。此外, Mun 等^[9]在研究足弓和姿势稳定性之间的关系时加入了外侧纵弓。研究发现,借助内外侧纵弓可有效评估足弓结构,医学图像测量是一种可靠的研究手段。针对足弓特征与足部舒适度^[10]、姿势稳定性^[11]、步幅特征^[12]和足底压力分布^[13]的关系研究已经大量开

展,但相关研究主要集中在比较高弓足和扁平足与正常足之间在性别、年龄、身体质量指数(body mass index, BMI)^[14]、FPI^[15]、足弓参数^[16]、运动学特征^[17]、动静态足底压力分布^[18-20]方面的差异性,缺乏关于不同站姿条件下足底压力分布与足弓结构之间关系的研究。

本文通过足底压力测试、足骨模型逆向重建和足弓数字化表征,探讨双脚呈 0° 、 30° 和 60° 站立时足底压力指标与足弓特征参数之间的相关性,为临床诊断、治疗和预防因不同站姿引起的足部病理提供理论基础。

1 对象和方法

1.1 研究对象

选取 13 名健康男性作为研究对象,年龄(28.77 ± 5.66)岁,体质量(68.20 ± 10.01)kg,无下肢疾病、足部畸形和创伤。受试者自愿参加本次实验,并在详细了解实验目的后签署书面知情同意书。所有受试者均进行足底压力测试和足部 CT 扫描。

1.2 研究方法

1.2.1 足底压力测试 采用德国 Zebris Medical GmbH 公司的 Zebris FDM-S 足底压力测试系统,测量受试者赤脚站立时的足底压力分布,该系统由足底压力测试平板和软件两部分组成。足底压力测试平板尺寸为 $1\ 370\ \text{mm} \times 535\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$,在有效传

感器区域(1 220 mm×474 mm)内共有 8 064 个传感器,采样频率为 120 Hz,测量精度为±5% (FS),测量范围为 0~1.2 MPa。

实验前,告知受试者实验内容和实验流程,并允许受试者熟悉测试条件和测试系统。测试前受试者脱去鞋袜,放松足部做好准备工作。测试过程中,受试者接收到开始指令后,双脚分别呈 0°、30°和 60°站立于测试平板中央,双手自然下垂,眼睛目视前方,保持身体直立 10 s。受试者收到结束指令后,离开测试平板,完成足底压力测试。在排除不适当的测试条件下,每位受试者重复测试 5 次,取 5 次测试的平均结果进行分析。

将所采集的足底压力分布图按足长比例划分为 3 个区域,前 42% 足长区域为前足区域,中间 27% 足长区域为中足区域,后 31% 足长区域为后足区域^[21](见图 1)。关键测量指标包括:① 前足峰值压力 (forefoot peak pressure, FPP);② 中足峰值压力 (midfoot peak pressure, MPP);③ 后足峰值压力 (rearfoot peak pressure, RPP)。

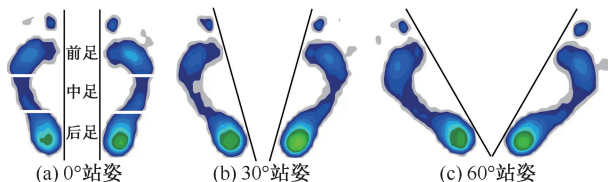


图 1 不同站姿时足底压力分布

Fig.1 Plantar pressure distributions in different standing positions (a) Standing with foot at 0°, (b) Standing with foot at 30°, (c) Standing with foot at 60°

1.2.2 足弓数字化表征 首先,采用 Philip Brilliance iCT 128 层螺旋 CT 获得足部扫描断层图像,设置扫描间距为 1 mm,扫描时受试者仰躺于扫描床上,医生调整足部呈站立位非负重状态后,从足底开始一直扫描至胫、腓骨上部结束,13 名受试者共获得 4 194 张 CT 断层图像;其次,基于 Mimics 20.0 对采集的医学图像进行蒙版创建和编辑,再由蒙版生成足骨的三维点云数据。然后,在 Geomagic Wrap 2017 中对点云数据进行多边形阶段和精确曲面阶段处理和优化,获得平滑清晰的足骨三维几何模型。最后,在 HyperMesh 2020 中经旋转、缩放和平移后选定多个固定坐标系,对几何重建的三维足骨模型进行立体动态数字化定义,建立足弓数字化

表征(见图 2)。其中,定义了足弓 5 个关键特征点^[22]:跟骨最低点(A),距舟关节最低点(B),第 1 跖骨远端最低点(C),跟骰关节最低点(D)和第 5 跖骨远端最低点(E)。关键足弓特征测量参数如下所述:① 内侧纵弓长度(\overline{AC})。跟骨最低点 A 到第 1 跖骨远端最低点 C 的距离;② 内侧纵弓高度(H)。

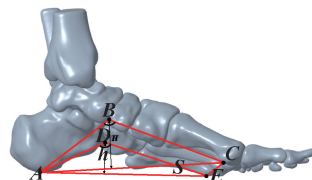


图 2 足弓数字化表征

Fig.2 Arch digital characterization

注:A 为跟骨最低点;B 为距舟关节最低点;C 为第 1 跖骨远端最低点;D 为跟骰关节最低点;E 为第 5 跖骨远端最低点; \overline{AC} 为内侧纵弓长度;H 为内侧纵弓高度; \overline{AE} 为外侧纵弓长度;h 为外侧纵弓高度; $\angle ABC$ 为内侧纵弓角; $\angle ADE$ 为外侧纵弓角; H/\overline{AC} 为内侧纵弓指数; h/\overline{AE} 为外侧纵弓指数;S 为足底 $\triangle ACE$ 的面积。

距舟关节最低点 B 到内侧纵弓长度 \overline{AC} 的垂直距离;③ 外侧纵弓长度 (\overline{AE})。跟骨最低点 A 到第 5 跖骨远端最低点 E 的距离;④ 外侧纵弓高度 (h)。跟骰关节最低点 C 到外侧纵弓长度 \overline{AE} 的垂直距离;⑤ 内侧纵弓角 ($\angle ABC$)。跟骨最低点 A 和第 1 跖骨远端最低点 C 分别与距舟关节最低点 B 连线形成的夹角;⑥ 外侧纵弓角 ($\angle ADE$)。跟骨最低点 A 和第 5 跖骨远端最低点 E 分别与跟骰关节最低点 D 连线形成的夹角;⑦ 内侧纵弓指数 (H/\overline{AC})。内侧纵弓高度 H 与内侧纵弓长度 \overline{AC} 的比值;⑧ 外侧纵弓指数 (h/\overline{AE})。外侧纵弓高度 h 与外侧纵弓长度 \overline{AE} 的比值;⑨ 足底三角形面积 (S)。跟骨最低点 A、第 1 跖骨远端最低点 C 和第 5 跖骨远端最低点 E 构成的面积 $\triangle ACE$ 。

1.3 分析方法

足底压力分布和医学成像参数在左右足之间并未发现显著性差异^[2,6],故本文采集的足底压力指标和足弓特征参数均来自受试者左足。采用 SPSS 26 对实验数据进行统计分析。其中,基于夏皮罗-维尔克检验进行数据正态性检验,符合正态分

布时以平均值±标准差表示,非正态分布时以中位数(4分位数)表示。采用单因素方差分析评估双脚分别呈0°、30°和60°站立时足底压力分布的组间差异,采用皮尔逊相关性分析评估足底压力和足弓特征之间的相关性,设定显著性水平为 $P < 0.05$,统计功效为0.8,相关系数 r 的绝对值介于0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1,分别表示相关程度为极弱相关或不相关、弱相关、中等相关、强相关、极强相关。

2 结果

2.1 足底压力分布

结果表明,双脚呈60°站立时FPP和MPP最大,双脚呈0°站立时次之,双脚呈30°站立时最小;双脚呈0°站立时RPP最大,双脚呈30°站立时次之,双脚呈60°站立时最小。不同站姿角度之间FPP、MPP和RPP均未表现出显著性差异($P > 0.05$),见表1。

表1 不同站姿时足底压力分布

Tab.1 Plantar pressure distributions in different standing positions

指标	0°	30°	60°
FPP/kPa	48±12	46±12	50±11
MPP/kPa	22±7	20±6	24±7
RPP/kPa	99±21	98±21	96±19
	0° vs 30°	0° vs 60°	30° vs 60°
P	0.641	0.665	0.370
	0.439	0.405	0.113
	0.954	0.773	0.818

2.2 足弓特征参数

受试者关键足弓特征参数测量结果显示,所有参数均符合正态分布($P > 0.05$),见表2。

表2 足弓特征参数

Tab.2 Arch characteristic parameters

参数	测量值	P
\overline{AC} /mm	147.5±7.0	0.729
H /mm	43.1±3.2	0.138
\overline{AE} /mm	133.1±7.3	0.267
h /mm	23.9±3.1	0.160
$\angle ABC/(\circ)$	117.2±3.7	0.441
$\angle ADE/(\circ)$	139.4±5.3	0.471
H/\overline{AC}	0.29±0.02	0.509
h/\overline{AE}	0.18±0.03	0.539
S/cm^2	44.2±4.5	0.483

2.3 足底压力分布与足弓特征参数之间的相关性

双脚呈0°站立时,FPP与内侧纵弓高度($r = 0.898$)、外侧纵弓高度($r = 0.781$)、内侧纵弓指数($r = 0.826$)、外侧纵弓指数($r = 0.639$)和体质量($r = 0.595$)呈正相关,与内侧纵弓角($r = -0.843$)和外侧纵弓角($r = -0.634$)呈负相关;MPP与内侧纵弓长度($r = 0.739$)、外侧纵弓长度($r = 0.673$)和足底三角形面积($r = 0.893$)呈正相关;RPP与内侧纵弓高度($r = 0.564$)、外侧纵弓高度($r = 0.709$)、内侧纵弓指数($r = 0.596$)、外侧纵弓指数($r = 0.604$)和体质量($r = 0.865$)呈正相关,与内侧纵弓角($r = -0.626$)和外侧纵弓角($r = -0.637$)呈负相关。

双脚呈30°站立时,FPP与内侧纵弓长度($r = 0.562$)、内侧纵弓高($r = 0.792$)、外侧纵弓长度($r = 0.586$)、足底三角形面积($r = 0.651$)和体质量($r = 0.622$)呈正相关;MPP与内侧纵弓长度($r = 0.778$)、外侧纵弓长度($r = 0.706$)、内侧纵弓角($r = 0.586$)、外侧纵弓角($r = 0.631$)和足底三角形面积($r = 0.789$)呈正相关,与内侧纵弓指数($r = -0.607$)和外侧纵弓指数($r = -0.642$)呈负相关;RPP与足弓特征参数($P > 0.05$)无相关性,但与体质量($r = 0.910$)呈强相关。

双脚呈60°站立时,FPP与内侧纵弓高度($r = 0.921$)、外侧纵弓高度($r = 0.700$)和内侧纵弓指数($r = 0.732$)呈正相关,与内侧纵弓角($r = -0.733$)呈负相关;MPP与内侧纵弓长度($r = 0.672$)、外侧纵弓长度($r = 0.713$)、足底三角形面积($r = 0.822$)和体质量($r = 0.711$)呈正相关;RPP与足弓特征参数($P > 0.05$)无相关性,但与体质量($r = 0.930$)呈强相关(见表3)。

3 讨论

国内外研究人员在利用足底压力测试平板测量静态足底压力分布时,所采用的站立姿势并不统一,包括人体解剖学姿势^[23]、双脚与肩平齐站立姿势^[19]、自身最自然站立姿势^[2,18]和军姿姿势等。考虑以人体解剖学姿势、自身最自然站立姿势和军姿姿势站立时双脚分开角度最接近0°、30°和60°,本文采用了双脚呈0°、30°和60°的站立姿势。虽然3种站立姿势的FPP、MPP和RPP未呈现显著性差异($P > 0.05$),但不同站立角度时足弓特征参数对足

表3 足底压力分布与足弓特征参数相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis between plantar pressure distribution and arch characteristic parameters

站姿	参数	\overline{AC}	H	\overline{AE}	h	$\angle ABC$	$\angle ADE$	H/\overline{AC}	h/\overline{AE}	S	m
0°	FPP	0.108	0.898**	0.203	0.781**	-0.843**	-0.634*	0.826**	0.639*	0.209	0.595*
	MPP	0.739**	0.096	0.673*	-0.167	0.329	0.397	-0.367	-0.410	0.893**	0.479
	RPP	-0.077	0.564*	0.066	0.709**	-0.626*	-0.637*	0.596*	0.604*	0.082	0.865**
30°	FPP	0.562*	0.792**	0.586*	0.464	-0.460	-0.201	0.446	0.211	0.651*	0.622*
	MPP	0.778**	-0.130	0.706**	-0.419	0.586*	0.631*	-0.607*	-0.642*	0.789**	0.303
	RPP	0.031	0.315	0.135	0.447	-0.333	-0.389	0.283	0.342	0.180	0.910**
60°	FPP	0.297	0.921**	0.306	0.700**	-0.733**	-0.500	0.732**	0.523	0.370	0.482
	MPP	0.672*	0.241	0.713**	0.022	0.130	0.222	-0.180	-0.249	0.822**	0.711**
	RPP	0.079	0.355	0.278	0.481	-0.337	-0.362	0.289	0.310	0.213	0.930**

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

底压力的影响并不一致。本文发现,不同站姿时足底压力分布与足弓特征存在不同相关性。站立时足中部几乎不承担压力,MPP常出现在中足靠近前足区域和中足靠近后足区域。双脚呈不同角度站立时,身体姿势发生变化导致身体重心发生偏移。足底压力分布可以间接反映人体的稳定性和姿势控制情况^[4],双脚呈0°站立时稳定性最差,且RPP最大,FPP、MPP在双脚呈60°站立时最大。

基于足部CT扫描数据,逆向重构足骨三维几何模型,并动态定义和测量足弓特征参数,建立足弓结构数字化表征。与传统基于放射学成像的足弓特征二维平面划线测量相比,足弓结构数字化表征更加准确和符合实际。基于三维动态测量获得的足部骨骼复杂形态更加直观、立体^[22]。在足弓特征二维划线测量中, Lee等^[8]研究表明,扁平足的4个角度(距骨角、跖骨角、外侧距骨-第1跖骨角和跟骨倾斜度)与足底不同分区峰值压力比值之间不存在相关性。足弓包括内侧和外侧纵弓,内外侧纵弓特征在姿势稳定性中的作用和贡献不同^[9]。本文发现,内外侧纵弓特征参数对不同站姿时足底压力分布造成不同程度的影响,进一步说明了内外侧纵弓在人类活动中具有独特作用。正常站立时,足部主要依靠跟骨最低点、第1跖骨远端最低点和第5跖骨远端最低点与地面间接接触,基于这三点形成的“三脚架”结构^[24]与关节、韧带、肌腱和足底筋膜等协同作用,使足弓具有良好的韧性和弹性,以使人体足部适应各种承载状态。跟骨最低点到第1跖骨远端最低点的距离反映内侧纵弓长度,跟骨最低点到第5跖骨远端最低点的距离反映外侧

纵弓长度。本文发现,FPP仅在30°站姿时与内外侧纵弓长度正相关;MPP在0°、30°和60°站姿时与内外侧纵弓长度正相关;RPP在0°、30°和60°站姿时与内外侧纵弓长度无关。该结果表明,站立时MPP最有可能受内外侧纵弓长度影响,内外侧纵弓长度越长,MPP越大,RPP最不可能受内外侧纵弓长度影响。此外,MPP也在0°、30°和60°站姿时与足底三角形面积正相关,即站立时MPP也大概率受足底三角形面积的影响,足底三角形面积越大,MPP越大。跟骨最低点、第1跖骨远端最低点和第5跖骨远端最低点彼此连线构成的三角形被定义为足底三角形,足底三角形面积能一定程度反映站立时足底与地面的接触面积,中足区域与地面接触面积越大,MPP越大。

内侧纵弓角正常范围为113°~130°,外侧纵弓角正常范围为130°~150°,扁平足的内侧纵弓角大于130°,同时外侧纵弓角大于150°^[21]。本文所测13名健康男性内侧和外侧纵弓角均在正常范围内。内外侧纵弓的高度和角度能够评价足弓的形态结构。本文发现,FPP在0°站姿时与内外侧纵弓角负相关,与内外侧纵弓高度正相关;在30°站姿时与内侧纵弓高度正相关;在60°站姿时与内侧纵弓角负相关,与内外侧纵弓高度正相关。MPP仅在30°站姿时与内外侧纵弓角正相关。RPP仅在0°站姿时与内外侧纵弓角负相关,与内外侧纵弓高度正相关。李鑫等^[25]研究发现,鞋垫的腰窝高度与足底压力分布显著相关,穿着不同腰窝高度的鞋垫间接改变了内侧纵弓高度和角度,这与本文内侧纵弓高度和角度与足底压力分布存在相关性的结论一致。

本文结果表明,站立时内侧纵弓高度最有可能会影响 FPP,内侧纵弓越高,FPP 越大,双脚分开的角度会影响足底压力分布与内外侧纵弓高度和角度之间的相关性。

内侧和外侧纵弓指数分别反映了人体足弓的扁平程度和足外缘的下降程度。本文发现,FPP 在 0°站姿时与内外侧纵弓指数正相关;在 60°站姿时与内侧纵弓指数正相关。MPP 仅在 30°站姿时与内外侧纵弓指数负相关。RPP 仅在 0°站姿时与内外侧纵弓指数正相关。该结果表明,站立时双脚分开的角度会影响足底压力分布与内外侧纵弓指数之间的相关性,内外侧纵弓指数对 FPP 和 RPP 的影响为正,对 MPP 的影响为负。由于内侧纵弓的减少,扁平足在足中部表现出较高的足底压力^[26],这与本文结果相似。

本研究受试者均为正常足,体质量并未对足弓结构造成破坏。虽然体质量对足底压力分布存在影响,但不是绝对性的,故受试者体质量标准差为 10.01 kg 对结果影响较小。本文发现,FPP 在 0°和 30°站姿时与体质量正相关;MPP 仅在 60°站姿时与体质量正相关;RPP 在 0°、30°和 60°站姿时与体质量正相关。本文认为,站立时体质量大概率会正向影响 RPP,对 FPP 和 MPP 的影响取决于站姿角度,而且在 60°站姿时,RPP 与足弓特征参数不存在相关性,仅与体质量相关。

本文探讨了健康男性双脚呈在 0°、30°和 60°站立时足底峰值压力与足弓结构特征参数的相关性,为下一阶段足底压力分布与足弓结构的具体映射关系研究奠定了基础,同时为足部生物力学的深入研究提供了一定理论依据。本研究存在以下局限性:① 样本量相对较少,受试者只选取了健康男性,女性和足弓异常者未纳入研究;② 仅测量了双脚呈 0°、30°和 60°站立时的足底压力,尚不涉及其他角度。后续研究可结合回归分析建立足底压力分布与足弓结构的回归模型,实现足底峰值压力和足弓特征参数的相互预测。

参考文献:

[1] ZHAO X, TSUJIMOTO T, KIM B, *et al.* Association of arch height with ankle muscle strength and physical performance in adult men [J]. *Biol Sport*, 2017, 34(2):

119-126.

- [2] BULDT AK, FORGHANY S, LANDORF KB, *et al.* Foot posture is associated with plantar pressure during gait: A comparison of normal, planus and cavus feet [J]. *Gait Posture*, 2018, 62: 235-240.
- [3] BULDT AK, ALLAN JJ, LANDORF KB, *et al.* The relationship between foot posture and plantar pressure during walking in adults: A systematic review [J]. *Gait Posture*, 2018, 62: 56-67.
- [4] 宋礼文, 向长城, 邱达, 等. 基于足底压力分布的足部运动特征提取[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(3): 431-436.
- SONG LW, XIANG CC, QIU D, *et al.* Feature extraction of foot movement based on plantar pressure distributions [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(3): 431-436.
- [5] 李波, 赵佳华, 仲映旭. 足弓结构对足部运动特性的影响[J]. *中国皮革*, 2016, 45(7): 52-55.
- [6] CHEN CH, HUANG MH, CHEN TW, *et al.* The correlation between selected measurements from footprint and radiograph of flatfoot [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2006, 87(2): 235-240.
- [7] MARUYAMA Y, ITSUKAICHI K, TANABE S, *et al.* Correlation between radiographic morphometry and body surface somatometry for foot arches [J]. *J Phys Ther Sci*, 2019, 31(11): 901-906.
- [8] LEE JS, KIM KB, JEONG JO, *et al.* Correlation of foot posture index with plantar pressure and radiographic measurements in pediatric flatfoot [J]. *Ann Rehabil Med*, 2015, 39(1): 10-17.
- [9] MUN KR, CHUN S, HONG J, *et al.* The relationship between foot feature parameters and postural stability in healthy subjects [J]. *Hum Factors*, 2019, 61(7): 1077-1085.
- [10] PUSZCZALOWSKA-LIZIS E, KOZIOL K, OMORCZYK J. Perception of footwear comfort and its relationship with the foot structure among youngest-old women and men [J]. *Peer J*, 2021, 9: e12385.
- [11] PUSZCZALOWSKA-LIZIS E, BUJAS P, OMORCZYK J, *et al.* Feet deformities are correlated with impaired balance and postural stability in seniors over 75 [J]. *PLoS One*, 2017, 12(9): e0183227.
- [12] 史洪飞. 基于 3 种足弓参数的足弓与步幅特征的相关性研究[J]. *中国人民公安大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(4): 10-17.
- [13] HELILI M, GENG X, MA X, *et al.* An Investigation of regional plantar soft tissue hardness and its potential correlation with plantar pressure distribution in healthy adults [J]. *Appl Bionics Biomech*, 2021, doi: 10.1155/2021/5566036. eCollection 2021.
- [14] ZHAO X, GU Y, YU J, *et al.* The influence of gender, age, and body mass index on arch height and arch

- stiffness [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2020, 59(2): 298-302.
- [15] WOŹNIACKA R, OLEKSY Ł, JANKOWICZ-SZYMAŃSKA A, *et al.* The association between high-arched feet, plantar pressure distribution and body posture in young women [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 17187.
- [16] BIBROWICZ K, SZURMIK T, MICHNIK R, *et al.* Application of Zebris dynamometric platform and arch index in assessment of the longitudinal arch of the foot [J]. *Technol Health Care*, 2018, 26(S2): 543-551.
- [17] 冯勇, 周皓, 汪爱媛. 不同足弓高度的足部运动学特征分析 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(S1): 441.
- [18] PERIYASAMY R, ANAND S. The effect of foot arch on plantar pressure distribution during standing [J]. *J Med Eng Technol*, 2013, 37(5): 342-347.
- [19] XIONG S, GOONETILLEKE RS, WITANA CP, *et al.* Foot arch characterization: A review, a new metric, and a comparison [J]. *J Am Podiatr Med Assoc*, 2010, 100(1): 14-24.
- [20] 向其鹏, 李紫豪, 吴秀清, 等. 足弓结构对足底压力分布的影响 [J]. *皮革科学与工程*, 2019, 29(3): 59-62.
- [21] FRANCIOSA P, GERBINO S, LANZOTTI A, *et al.* Improving comfort of shoe sole through experiments based on CAD-FEM modeling [J]. *Med Eng Phys*, 2013, 35(1): 36-46.
- [22] 窦永涛, 薛金娟, 刘鸿宇, 等. CT 评价跆拳道足部应力对足弓形态的影响 [J]. *中国医学影像学杂志*, 2014, 22(5): 346-349.
- [23] 金宗学, 何辉, 杨易, 等. 异常足弓男童的静态平衡能力与足底压力特征研究 [J]. *成都体育学院学报*, 2018, 44(1): 116-121.
- [24] 燕晓宇, 俞光荣. 正常足弓的维持及临床意义 [J]. *中国临床解剖学杂志*, 2005, 23(2): 219-221.
- [25] 李鑫, 徐波. 鞋垫腰窝高度对足底压力舒适性的影响 [J]. *中国皮革*, 2013, 42(10): 122-124.
- [26] MOON JH, LEE HS, JUNG KW, *et al.* Foot pressure distribution in normal subjects and patients with hallux valgus and pesplanus [J]. *Ann Rehabil Med*, 1996, 20: 778-786.