

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2023.02.008

## 基于足底压力对人体平衡能力的定量评估研究进展

郭潘靖<sup>1</sup>, 吕杰<sup>2</sup>, 王多多<sup>1</sup>, 李雨珉<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 上海健康医学院康复学院, 上海 201318)

**【摘要】目的** 探索足底压力对人体平衡能力的定量评估研究, 寻求行之有效、简单易行、可靠性高的描述人体平衡能力的参数指标。**方法** 基于疾病平衡障碍患者的康复与评估、不同生理状态、不同体育运动, 对平衡能力的定量评估研究进行综述。**结果** 梳理得出基于足底压力对人体平衡能力的定量评估研究中参数指标的不同情形, 总结并提出了两组参数指标, 一是动力学参数指标, 二是运动学参数指标, 用以定量评估平衡能力。**结论** 基于足底压力的定量评估参数指标在大多数情况下能对人体平衡能力的评价提供依据, 从而通过锻炼、治疗等手段进一步改善人体平衡能力, 减少人体跌倒损伤风险, 并有望为足底压力平衡量化分析和相关医疗器械研制提供一定帮助。

**【关键词】** 足底压力; 平衡能力; 定量评估; 参数指标

**【中图分类号】** R318.01

**【文献标志码】** A

文章编号: 1674-1242 (2023) 02-0168-08

## Research Progress on Quantitative Assessment of Human Balance Ability Based on Plantar Pressure

GUO Panjing<sup>1</sup>, LYU Jie<sup>2</sup>, WANG Duoduo<sup>1</sup>, LI Yumin<sup>1</sup>(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. College of Rehabilitation Sciences, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China)

**【Abstract】 Objective** To explore the quantitative evaluation of plantar pressure on balance ability of human body and to find the effective, simple and reliable parameter index for describing balance ability of human body. **Methods** Research on quantitative evaluation of balance ability based on rehabilitation and evaluation of patients with disease balance disorder, different physiological states and different sports were reviewed. **Results** Different situations of parameter indexes for quantitative evaluation of plantar pressure on balance ability were sorted out, and two groups of evaluation parameter indexes were summarized and put forward, one is dynamic parameter index, the other is kinematic parameter index, which can be used for quantitative evaluation of balance ability. **Conclusion** In most cases, the quantitative evaluation parameter index based on plantar pressure can provide a basis for the evaluation of human balance ability, so as to further improve human balance ability and reduce the risk of human fall injury through exercise, treatment and other means, which is expected to provide certain help for the quantitative analysis of plantar pressure balance and the development of related medical instruments.

**【Key words】** Plantar Pressure; Balance Ability; Quantitative Evaluation; Parameter Index

收稿日期: 2022-05-16。

基金项目: 上海市高水平地方高校建设培育项目(2021)。

作者简介: 郭潘靖(1998—), 男, 上海市人, 硕士研究生, 从事生物力学研究工作。

通信作者: 吕杰, 男, 副教授, 硕士生导师, 电话(Tel.): 18521351878, E-mail: lvj@sumhs.edu.cn。

## 0 引言

平衡控制调节是保持直立姿势、维持稳定的一种能力,是日常活动所必需的功能。因此,临床医生和研究人员经常检查姿势控制<sup>[1]</sup>。足部的解剖区域已被证明可以支撑大部分的身体重量并调节身体平衡。测量这些区域的力的分布、峰值压力和峰值压强,将提供有关足、下肢和整个身体的生理学、结构及功能的丰富信息<sup>[2]</sup>。平衡能力是人体正常的生理功能,对保持人体的正常站立和各种运动姿态起着至关重要的作用。年龄<sup>[3]</sup>、肥胖<sup>[4]</sup>、身体疾病<sup>[5]</sup>和足形<sup>[6,7]</sup>等生理条件,以及着鞋类型<sup>[8]</sup>等习惯将导致肌肉肌群的核心力量减弱,降低人体平衡能力,从而导致站立和行走姿势不正确,增加人体跌倒风险<sup>[9]</sup>。根据世界卫生组织的数据,全球每年有42.4万起与跌倒有关的致命伤害,超过3730万起与跌倒有关的伤害是需要医疗护理的<sup>[10]</sup>。此外,跌倒也是65岁及以上人群遭受意外伤害的主要原因之一,65岁以上人群的跌倒风险约为15%,80岁以上人群的跌倒风险上升至25%。这类人群跌倒后也会对未来再次跌倒产生恐惧,从而导致生理和心理上的不适,增加巨大的医疗成本。

如今对人体平衡能力的研究大致有以下几部分:平衡障碍康复训练,人体的跌倒预测,基于肌电信号、动态摄像头、足底压力的平衡实验研究,基于各疾病诊疗前后的平衡能力研究,基于不同体育运动的人体平衡能力研究<sup>[9]</sup>。但在国内外仅通过足底压力对平衡功能进行客观定量评估的研究仍较少见<sup>[10]</sup>。人们广泛关注各种实验方法和测试设备在平衡能力评估与检测中的应用,并将其作为诊断运动障碍、评估平衡障碍的康复效果等的科学依据<sup>[11]</sup>。在国内外的研究中,在临床环境中测试和评估人体平衡的方法以观察法和量表法为代表,还有一种方法是实验室研究中用于平衡测试的设备检测法。观察法包括闭目直立检查法<sup>[12]</sup>、足尖接足跟站立法<sup>[13]</sup>、原地闭目踏步法<sup>[14]</sup>等。量表法主要评估患者的主观平衡感受,常见的评估量表有Berg平衡量表、Tinetti步态和平衡量表、Lindmark运动功能评估量表等<sup>[9]</sup>。随着科研设备的进步,设备检测法成为主流的检测方法,此种方法客观性强,受试人员的主观性弱,定量化程度较高,便于之后进一步研究分析和评估<sup>[9]</sup>。

此外,常用的平衡测试仪器较多,以色列 Sunlight

公司的 Tetrax 平衡测试系统被广泛使用。但这种系统对某些疾病、某类人群及运动的平衡能力评估并不适用。由于人的身体姿态、平衡位置的变化会直接导致足底压力的变化,应考虑采用足底压力数据的测试和分析,因为足底压力测试系统能够简单、可靠、高效地呈现足底的整个变化过程。设备主要包含足底压力测试鞋垫和足底压力测试平板。测力鞋垫包括德国 Novel 公司 Pedar-X 鞋垫式足底压力测量系统、美国 Tekscan 公司 F-scan Lite VersaTek System 足底压力分析系统等。测力平板包括比利时平板足底压力测试系统 Footscan insole、美国 Bertec 三维测力板等<sup>[15]</sup>。

运用上述现代化科学技术手段对足底压力进行量化研究是现代化研究发展的必经之路,其中就包括根据足底压力数据来进行平衡能力的研究。但根据足底压力对不同平衡能力类别的研究,其研究方法、目的、评估平衡能力的指标、定量评估的方法均不相同。对此,我们在中国知网数据库中输入“足底压力”“平衡”“步态”等关键词,在 ScienceDirect、Web of Science 数据库中输入“Plantar pressure”“Balance”“Gait”等关键词,检索根据足底压力研究平衡能力的相关文献,根据文章标题、摘要、主题、设计及结果指标等进行筛选,梳理总结后,从疾病平衡障碍患者的康复与评估、不同生理状态、不同体育运动3个研究方面,基于足底压力对人体平衡能力的定量评估研究进行综述,期望了解该领域相关研究现状,并得到行之有效、简单易行、可靠性高的平衡能力定量评估指标。

## 1 基于疾病平衡障碍患者的康复与评估研究

目前对各类疾病治疗前后的平衡研究多见于脑部疾病、糖尿病、足部损伤研究。许丹丹等<sup>[16]</sup>研究脑卒中患者赤足状态静态站立时的足底压力,并使用 FootScan 足底压力测试系统对健患足压力分布、患足前足与后足压力分布和比值、健患足外展角等指标进行分析。作者指出,脑卒中患者的站立平衡主要依赖健足负重,并占体重约一半以上。且患足的负重比健足在整个足部位置有所前移,前足负重比例有所增加,导致患者前后足的平衡能力显著下降,大大增加了跌倒风险。类似地,胡荣亮等<sup>[17]</sup>使用的指标更全面,采用前后足足底压力指标(前后半足压力峰值、前后半足平均压力)、平衡能力指标(足底压力中心偏移椭圆的面积、轨迹长度、轨迹长度与面积的比值),以

及步行能力指标(进行计时向上走测试(TUGT)的用时、6min步行距离),有效评估对脑卒中偏瘫患者进行平衡姿势锻炼指导对其足底压力、平衡能力和步行能力的影响。Sheng等<sup>[18]</sup>使用德国ZEBRIS步态评估系统,对中风后足部下垂患者评估受累侧的10米步行测试、计时向上走测试、步幅、站立阶段、摆动阶段和脚旋转步态。测试发现两组患者在治疗后的步态步幅、站立期、摆动期的足旋转有显著改善。

随着此方面的研究不断深入,各种各样的指标被用于实验研究,林强等<sup>[19]</sup>采用运动学参数(球长度、椭圆面积、平均速度、平均X/Y、椭圆倾斜角、椭圆偏心角、最大/最小摆动)、动力学参数(双侧下肢的最大压强、平均压强、面积、前足面积、后足面积、负荷、整体负荷、前后足负荷),以及足底压力中心(Center of Pressure, COP),并根据人体平衡提出了3个创新指标:相应对称性指数、对称性角度和Romberg商。作者对脑卒中患者及正常人在睁、闭眼情况下的平衡能力进行了研究,指出视觉因素对脑卒中偏瘫患者的平衡控制有一定作用,并且运动学参数比动力学参数更敏感;COP、足底负荷和面积参数可以作为脑卒中后偏瘫化评估的敏感指标,且COP在X轴(左右)的运动轨迹比在Y轴的运动轨迹(前-后)能更好地预测跌倒事件。这证实了在跌倒过程中,影响平衡能力甚至发生跌倒主要是由于足底左右径下的波动和轴向不稳导致的,因此观察COP的轨迹状态格外重要。同样,Yang等<sup>[20]</sup>采用平衡训练系统通过COP和COP运动轨迹客观评估脑卒中患者的平衡能力,为脑卒中患者的术后整体恢复提供了帮助。Shim等<sup>[21]</sup>采用测力板进行实验,指出在痉挛性脑瘫儿童动静态、睁闭眼情况下所测量的各种压力中心参数中,总路径长度和平均路径位移是较优的。考虑到每次坐姿(静态平衡)和站立(动态平衡)试验,中外侧位移和速度是评估坐姿平衡控制的更优参数,前后位移和速度是评估站立平衡控制的更优参数。而关于COP中外侧数据,目前,Sozzi等<sup>[22]</sup>经过初步研究,指出通过长时间的不对称COP中外侧扰动进行新颖且简单的本体感觉训练,进行一种量身定制的干预训练,能够具体影响COP朝向所需方向的位置,有助于矫正患者的垂直姿势,并平衡体重分布,为老年人及中风患者提供了一个潜在有效的治疗方案。

此外,足底压力的平衡功能研究在糖尿病的治疗和预防中也有积极的意义。胡伊玟等<sup>[23]</sup>使用糖尿病患者的足底压力、步态稳定曲线、足溃疡发生率、冲量等指标对治疗组和对照组进行分析,发现前后足底压力均无明显变化,即动力学参数指标不敏感。但根据足部稳定曲线,发现对照组患者COP分布稳定曲线略有波动,曲线欠光滑,即COP分布不均衡,步态稳定性欠佳,有内外翻的可能,治疗组则体现出显著优势。类似地,孙洁等<sup>[24]</sup>在评估发育性髋关节发育不良患儿手术前后的平衡研究中,使用了椭圆摇摆区域面积、COP路径长度,以及COP平均移动时间和速度,并指出以上指标的数值越小,表明身体平衡能力越强。

## 2 基于不同生理状态的人体平衡能力研究

研究人员对不同生理状态下的人体平衡能力展开了较多新颖且有意义的研究工作。林强等<sup>[25]</sup>采用FreeMed足底压力分析系统,针对正常年轻人在睁、闭眼状态下的姿势平衡状态,使用运动学参数(球长度、椭圆面积、平均速度、平均X、平均Y、椭圆倾斜角、椭圆偏心角、最大摆动、最小摆动)、COP、足底压力分布等参数(负荷程度)来评估视觉因素的输入对静态平衡功能是否有影响。Cho等<sup>[26]</sup>为探讨楼梯行走稳定性的原因,使用了Pedar-X系统,将足底划分成7个区域,测量鞋内足底压力,包括峰值压力、压力-时间积分,以及每种步行方式在整个步态周期中7个区域的压力,分析在步态周期内楼梯上下行走与水平行走的平衡能力。研究发现楼梯行走比水平行走需要更多的运动,会加重足部不适,降低稳定性。Kang等<sup>[27]</sup>进一步探究了楼梯上下行走的差异性,通过Pedar-X系统测量了40名健康成年男性的鞋内足底压力,包括峰值压力、压力-时间积分。研究指出,在下楼梯行走过程中,中足区不适加剧的风险增加,前脚内侧区域承受高压载荷;在上楼梯行走过程中,前脚外侧区域和中足区域承受高压载荷。王新亭等<sup>[28]</sup>为了探究人体背向行走过程中足底压力和步态平衡能力的变化,在4种行走速度下收集COP中心轨迹、足底压力、足-地接触时间等参数的变化情况。研究发现,背向行走时COP从足前部向足跟部过渡,从内侧向外侧过渡,但接触时间增加了,得以保持步态平衡稳定性。

为探讨人体足部压力分布与平衡特性的关系。Chen等<sup>[29]</sup>基于行走时足底生物力学特性,依据人体在

触地时的足底触地作用点,提出了一种新的足底三分区方法,将足底分为足底内侧、足底外侧及后跟区域,并结合一种新的分布力测量方法,运用单位时间力调整量作为姿势稳定性评估变量,并指出其与压力轨迹中心平均速度呈中度正相关,验证了其是一种有效、可靠的基于足底分布力测量的姿势稳定性评估变量。Asmi等<sup>[30]</sup>使用力电阻传感器对足底压力和垂直地面反作用力分布进行研究,得出的结论是,足底压力分布通常集中在前足,其次是后足和中足,但由于体重指数、性别、足弓类型、进行性足畸形等原因,导致压力分布有明显变化,可能导致失衡状况。类似地,金宗学等<sup>[31]</sup>采用LorAn足底压力分布测试系统对受试者凝视手机10分钟后的正常站立和行走时的足底压力情况进行测试,使用足底重心轨迹线的波动速度、位移和轨迹面积来评价静态与动态平衡能力,并使用各区域的接触面积、压力峰值、平均压强、时空参数等评价其足底压力的相关差异性。张先熠等<sup>[32]</sup>使用压力板与鞋垫双设备测量大学生穿戴增高鞋垫前后板鞋行走时的压力参数,在足底的7个分区内比较接触时间、峰值压强与冲量,以及后跟内外侧压力差值。研究指出,穿戴鞋垫后,足底各区域接触时间延长,大多数区域峰值压强降低,部分冲量由前脚转移至后跟,后跟部位内外翻加剧,降低了平衡稳定能力。Dulai等<sup>[33]</sup>根据足部解剖区域进一步总结得出,儿童功能性和区域性的冲量的年龄标准化可作为日常评估各种足部畸形儿童的比较基准。

### 3 基于不同体育运动的人体平衡能力研究

足底压力的参数分析可用于不同体育运动中的平衡能力研究。李立等<sup>[34]</sup>分析了长期行太极拳运动老年人的足底压力指标,包括重心动摇轨迹长度、包络面积、X轴与Y轴的偏移、摆动速度、重心动摇速度。无论是在单足睁眼还是在单足闭眼的情况下,太极拳组稳定性参数和普通组的数据都有显著差异,并且显著较小,提示长期进行太极拳运动的老年人对身体姿势的控制能力得到有效提高,接近青年人水平,平衡能力逐步提升。在其他运动锻炼中,李墨逸等<sup>[35]</sup>为了研究正常人经八段锦训练前后平衡相关指标的变化,使用了Prokin平衡训练系统对受试者进行评估,能有效且方便地得出相应的研究结果。

然而,一些高水平运动员在整个体育运动过程中

也使用足底压力分析系统探索平衡状态,以减少损伤的发生。樊霄燕等<sup>[2]</sup>采用F-Scan三维动态足底压力分析系统分析健康青少年足球运动员左右足力的峰值、负荷冲量、压力时间积分和重心轨迹,分析在正常步态下足底压力分布的规律,以找到最佳平衡状态,减少足部受损。Garcia等<sup>[36]</sup>采用Novel Pedar-X系统采集右脚的鞋内足底压力,对经验丰富的和新手排球运动员跳跃后落地时的足底分区压力分布、垂直地面反作用力做了分析,判断着陆过程中的稳定状态。研究指出,与平足着地相比,应降低垂直地面反作用力的峰值来减少伤害的发生。Farzami等<sup>[37]</sup>研究了有无单侧踝关节跳跃和落地损伤史的青少年排球运动员足底压力和静态平衡的变化,测量了足底最大压力、平均压力、压力分布、表面积,并结合使用了睁眼和闭眼RomBerg平衡量表。研究指出,下肢肌肉疲劳与运动员的平衡能力呈负相关,随着肌肉疲劳程度的提升,总侧向COP运动、总摆动路径偏移和摆动面积变量增加,平衡能力逐渐减弱,不同方向的影响和严重程度不同。

对一些极其需要身体稳定性的体育运动而言,保持身体稳定、维持良好的平衡能力是日常训练的一部分。张秀丽<sup>[38]</sup>采用Footscan足底压力平衡测试系统,对国家射箭运动员进行平衡稳定性的测量,运用了3个指标(COP前后及左右晃动幅度、晃动面积)来描述身体稳定性。这3个指标的值越大,身体平衡能力就越差。但这并不能精准地反映高水平射击运动员平衡稳定性的特点,因此运用了一个派生指标“单位面积轨迹长”(轨迹总长度与晃动面积的比值)来评价平衡稳定性及身体姿态调节能力。该指标的值越大,表明身体姿态调节能力越强;频率越高,平衡稳定性越好<sup>[39]</sup>。先前的研究都将运动学参数(COP轨迹、运动范围和足底压力负荷)作为关键指标广泛运用在足底压力的平衡能力测试与身体姿态调节的评估中,说明其准确性和有效性是可以被验证的。但在某些特殊运动中,对足底压力的分析仅提供一部分的客观证据。娄彦涛等<sup>[40]</sup>通过对自由式滑雪空中技巧运动员的不同落地姿势进行足底压力研究,指出地面反作用力这一指标能够较好地评判全脚掌落地姿势的稳定性优于正常落地姿势。但考虑到整个滑雪运动过程的复杂性,足底压力的运动学和动力学参数提供的证据不够充足,因此需要结合关节动力学、运动学和肌肉募集

的相关分析，才能全面评价地面反作用力对足及人体平衡能力的影响。

#### 4 总结与展望

##### 4.1 基于疾病、生理状态、运动研究评估指标的总结

(1) 基于疾病平衡障碍患者的足底压力分析评估与康复，在对疾病的康复治疗组和对照组及后期治疗等的研究中，患者足底压力的某些动力学参数并不能成为较优的评价指标，但患者足底的运动学指标，如 COP 轨迹、时间、位移、椭圆面积等，对动静态平衡实验较敏感，能够作为评价指标，对疾病治疗前后的足底压力进行定量评估。

(2) 对人体在不同生理状态下的平衡能力有多项研究，旨在探寻单纯足底的稳定机制，或者与其他生理条件下对比得出人体的平衡能力受哪些因素的制约。这些研究使用了运动学参数（COP 轨迹、速度、位移）、动力学参数（地面反作用力峰值、接触面积、平均压强、冲量）和时间参数，均有较高的敏感性和有效性。此外，部分学者使用一些参数指标建立了新型指标，用以评价人体平衡和稳定能力，这也是未来的一个研究方向。

(3) 基于一些简单的日常运动，常见的足底压力指标均能够描述人体足底的平衡稳定情况。但由于某些高水平体育过程运动是极其复杂的，仅凭足底压力运动学和动力学指标并不能充分评估运动过程中姿态的整体平衡能力。此时需借助额外高效而可靠的测试设备，考虑对足踝、下肢、上半身等的姿态变化进行定量描述，并结合足底压力的情况，整体分析人体平衡状况。

##### 4.2 足底压力量化参数指标

目前，无论是基于疾病平衡障碍患者、不同生理状态还是不同体育运动的平衡能力研究，对人体平衡能力的测试大多基于运动学参数、动力学参数，或者使用肌电参数、时空参数相结合来进行平衡能力的定量评估<sup>[41]</sup>。但肌电信号涉及肌电测试仪，时空参数往往会使用实时摄像头采集数据，操作相对烦琐，而且对定量分析并不友好。而动力学参数和运动学参数可以仅凭足底压力测试系统实现，简单便捷。此外，在大多数人体平衡稳定实验中，两者均为必测指标，运动学参数往往比动力学参数更加敏感，并且运动学参数中的单位时间内 COP 摇摆面积及前后、径向 COP

摇摆平均速度是最优的传统特征<sup>[42]</sup>。但不同研究所用的参数不同，评估效果略有差异。因此，足底压力的平衡能力需要被量化，一种简单而有效的足底压力量化指标应该被提出，并进行可靠性评估和推广实施。基于此，结合上述论证，本文提出了基于足底压力的动力学和运动学参数指标，如表 1 和表 2 所示，可用于人体平衡能力、落地稳定性的研究。

表 1 动力学参数指标

Tab. 1 Dynamic parameter index

名称	定义
足底压力在足底各分区的分布情况	将足底按预期分区，呈现各个分区的足底压力
垂直地面反作用力与压力峰值出现时间	垂直地面反作用力即地面给人体垂直向上的反作用力，计算其值及最大值出现时间
落地瞬时峰值压强所在位置的集合	落地瞬时某时刻存在最大压强的峰值，将所有时刻的点取平均值得出中心点，计算并累加中心点到所有点的距离平方和，用以描述离散程度

表 2 运动学参数指标

Tab. 2 Kinematic parameter index

名称	定义
落地瞬时压力中心轨迹散点图	在落地瞬时，COP 会发生偏移，记录 COP 轨迹的散点位置
落地至站定 COP 的总路径长度	某时间段内，落地瞬时至 COP 不发生明显变化的那个时刻内的所有 COP 点折线相连的距离
落地至站定的总时间	落地瞬间至 COP 不发生明显变化的一段时间
落地至站定 COP 的调整速率	COP 变化总路径长度与落地至站定总时间的比值
落地至站定 COP 的轨迹的椭圆面积	落地至站定每一时刻的 COP 位置存在位移（计算某一时刻区域合力的重心位置、横纵坐标，将其连接），用一最小能够包围的椭圆进行描绘

##### 4.3 结语

将足底压力量化参数指标运用于 3 个不同方面的实验研究，并使用这些指标来分析人体平衡稳定性是行之有效的，能够为在临床诊疗、日常活动、运动中客观并定量评估平衡功能提供一种新的思路和方法，并有望改善患者和正常人的平衡功能，减少落地不稳，降低跌倒损伤风险，以便更合理地指导人体运动。

需要对这些指标进行可靠性分析。Kim 等<sup>[1]</sup>根据

《健康测试仪器可靠性检查表选择共识基础标准》对 COP、足底压力、足底屈曲等距强度等指标进行可靠性研究,指出最可靠的实验指标为 COP 摇摆面积和路径长度、足底平均压力、体重百分比分布、接触面积、等距强度。未来我们也将进一步结合动、静态平衡实验,有针对性地对评估指标进行综合分析,并希望能够为足底压力平衡量化研究发展和相关医疗器械研制提供一定的帮助。

#### 参考文献

- [1] KIM HL, LAURALEE M. Reliability of centre of pressure, plantar pressure, and plantar-flexion isometric strength measures: A systematic review[J]. *Gait & Posture*, 2020, 75: 46-62.
- [2] 樊霄燕, 周军杰, 曹成福, 等. 基于 F-Scan 三维动态足底压力分析系统的动静态足底压力分析[J]. *中国组织工程研究*, 2011, 15(50): 9406-9409.  
FAN Xiaoyan, ZHOU Junjie, CAO Chengfu, *et al.* Dynamic and static plantar pressure analysis based on F-Scan three-dimensional dynamic plantar pressure analysis system [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2011, 15(50): 9406-9409.
- [3] ZHANG G, WONG DWC, WONG IKK, *et al.* Plantar pressure variability and asymmetry in elderly performing 60-minute treadmill brisk-walking: Paving the way towards fatigue-induced instability assessment using wearable in-shoe pressure sensors[J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 3217.
- [4] NADERI A, BALOOCHI R, ROSTAMI KD, *et al.* Obesity and foot muscle strength are associated with high dynamic plantar pressure during running[J]. *The Foot*, 2020, 44: 101683.
- [5] CARDOSO J, DE BAPTISTA C R J A, SARTOR CD, *et al.* Dynamic plantar pressure patterns in children and adolescents with Charcot-Marie-Tooth disease[J]. *Gait & Posture*, 2021, 86: 112-119.
- [6] MICKLE KJ, MUNRO BJ, LORD SR, *et al.* Gait, balance and plantar pressures in older people with toe deformities[J]. *Gait & Posture*, 2011, 34(3): 347-351.
- [7] 白啸天, 霍洪峰. 不同足型男性行走时压力中心轨迹曲线特征[J]. *中国运动医学杂志*, 2021, 40(7): 523-527.  
BAI Xiaotian, HUO Hongfeng. Characteristics of center of pressure trajectory curve during walking in men with different foot shapes[J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2021, 40(7): 523-527.
- [8] ZHANG X, LI B. Influence of in-shoe heel lifts on plantar pressure and center of pressure in the medial-lateral direction during walking[J]. *Gait & Posture*, 2014, 39(4): 1012-1016.
- [9] 庞晨瑶. 基于 Kinect 及足底压力传感的人体动平衡检测评估系统 [D]. 保定: 河北大学, 2019: 1-6.  
PANG Chenyao. Human dynamic balance detection and evaluation system based on Kinect and plantar pressure sensing [D]. Baoding: Hebei University, 2019: 1-6.
- [10] 马荣. 站姿平衡与步态稳定性的评价指标应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 2-13.  
MA Rong. Application of evaluation indicators for stance balance and gait stability [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017: 2-13.
- [11] 金晟, 罗志增, 严志华. 基于足底压力中心和脑肌电相干性特征的人体平衡能力评估方法[J]. *航天医学与医学工程*, 2020, 33(1): 52-58.  
JIN Sheng, LUO Zhizeng, YAN Zhihua. Evaluation of human balance ability based on the characteristics of plantar pressure center and electromyography coherence [J]. *Aerospace Medicine and Medical Engineering*, 2020, 33(1):52-58.
- [12] 陈欢欢. 跆拳道运动对儿童平衡能力影响的实验性研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2016: 1-20.  
CHEN Huanhuan. Experimental study on the effect of taekwondo on children's balance ability [D]. Suzhou: Soochow University, 2016:1-20.
- [13] 刘钟扬. 轮滑对学龄前儿童平衡能力影响的实验研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015: 1-30.  
LIU Zhongxing. Experimental study on the effect of roller skating on balance ability of preschool children [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015:1-30.
- [14] 肖春梅, 梁晓杰. 体育锻炼对老年人平衡能力的影响[J]. *现代康复*, 2001, 5(11): 45-46.  
XIAO Chunmei, LIANG Xiaojie. The effect of physical exercise on the balance ability of the elderly [J]. *Modern Rehabilitation*, 2001, 5(11): 45-46.
- [15] 刘畅. 人体站姿平衡能力和步态稳定性的相关性分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 2-13.  
LIU Chang. Correlation analysis of human posture balance ability and gait stability [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017: 2-13.
- [16] 许丹丹, 闫振壮, 曹伟伟, 等. 脑卒中后恢复期站立时足底压力分布观察[J]. *双足与保健*, 2019, 28(19): 108-109.  
XU Dandan, YAN Zhenzhuang, CAO Weiwei, *et al.* Plantar pressure distribution during standing in recovery stage after stroke[J]. *Foot and Health Care*, 2019, 28(19):108-109.
- [17] 胡荣亮, 容健成, 方健斌, 等. 对脑卒中后偏瘫患者进行姿势控制

- 训练指导对其足底压力、平衡能力和步行能力的影响[J]. **当代医药论丛**, 2020, 18(9): 46-48.
- HU Rongliang, RONG Jiancheng, FANG Jianbin, *et al.* Effects of postural control training on plantar pressure, balance ability and walking ability in hemiplegic patients after stroke [J]. **Journal of Contemporary Medicine**, 2020, 18(9):46-48.
- [18] SHENG Y, KAN S, WEN Z, *et al.* Effect of kinesio taping on the walking ability of patients with foot drop after stroke[J]. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, 2019, 2019:1-7.
- [19] 林强, 郑煜欣, 廖婉晨, 等. 脑卒中患者静态平衡的足底压力分析[J]. **中国康复理论与实践**, 2021, 27(3): 290-296.
- LIN Qiang, ZHENG Yuxin, LIAO Wanchen, *et al.* Plantar pressure analysis of static balance in stroke patients[J]. **Chinese Rehabilitation Theory and Practice**, 2021, 27(3): 290-296.
- [20] YANG W, WANG H, XU Y. Effect of balance evaluation and training system on early trunk control ability of patients with cerebral apoplexy[J]. **Rehabilitation Medicine**, 2017, 27(2): 766-768.
- [21] SHIM D, PARK D, YOO B, *et al.* Evaluation of sitting and standing postural balance in cerebral palsy by center-of-pressure measurement using force plates: comparison with clinical measurements[J]. **Gait & Posture**, 2022, 92: 110-115.
- [22] SOZZI S, NARDONE A, CORNA S, *et al.* Post-effect on the centre of feet pressure during stance by continuous asymmetric mediolateral translations of a supporting platform: a preliminary study in healthy young adults[J]. **Applied Sciences**, 2020, 10(17): 5969.
- [23] 胡伊玢, 孟晓静. 平衡足底压力及稳定步态在早期糖尿病足防治中的意义[J]. **中国全科医学**, 2013, 16(17): 1959-1963.
- HU Yibin, MENG Xiaojing. Significance of balance plantar pressure and stable gait in the prevention and treatment of early diabetic foot[J]. **Chinese Journal of General Practice**, 2013, 16(17): 1959-1963.
- [24] 孙洁, 王楠, 李燕华. DDH 患儿手术前后足底压力分布及平衡功能的研究[J]. **实用骨科杂志**, 2021, 27(1): 37-39.
- SUN Jie, WANG Nan, LI Yanhua. Plantar pressure distribution and balance function in children with DDH before and after surgery [J]. **Journal of Practical Orthopedics**, 2021, 27(1): 37-39.
- [25] 林强, 陈武德, 郑煜欣, 等. 基于足底压力下睁眼对静态平衡功能的影响[J]. **康复学报**, 2021, 31(1): 17-23.
- LIN Qiang, CHEN Wude, ZHENG Yuxin, *et al.* Effect of eye opening and closing on static balance function based on plantar pressure [J]. **Journal of Rehabilitation**, 2021, 31(1): 17-23.
- [26] CHO YJ, LEE C, LEE JH, *et al.* The difference of in-shoe plantar pressure between level walking and stair walking in healthy males[J]. **Journal of Biomechanics**, 2021, 122: 110446.
- [27] KANG HW, KIM DY, CHO YJ, *et al.* The Difference of in-shoe plantar pressure between level walking and stair walking[J]. **Foot & Ankle Orthopaedics**, 2020, 5(4): 2473011420S00276.
- [28] 王新亭, 任静, 苏海龙, 等. 背向行走足底压力分布特征对平衡能力的影响[J]. **医用生物力学**, 2016, 31(6): 506-512.
- WANG Xinting, REN Jing, SU Hailong, *et al.* Effect of plantarsole pressure distribution characteristics on balance ability of walking backward [J]. **Medical Biomechanics**, 2016, 31(6): 506-512.
- [29] CHEN B, MA X, DONG R, *et al.* Postural stability assessment method and its validation based on plantar three-partition distributed force measurement[J]. **Measurement**, 2022, 203: 111940.
- [30] ASMI AN, OTHMAN N, ZAIN M ZM, *et al.* A study on human foot pressure behaviour and balancing characteristics[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 884(1): 012001.
- [31] 金宗学, 何辉, 阮槟, 等. 凝视手机对青年男性静态平衡、足底压力步态及下肢关节的影响[J]. **中国组织工程研究**, 2017, 21(28): 4454.
- JIN Zongxue, HE Hui, RUAN Bing, *et al.* Effects of staring at mobile phone on static balance, plantar pressure gait and lower limb joints in young males [J]. **Chinese Journal of Tissue Engineering**, 2017, 21(28): 4454.
- [32] 张先熠, 李悦, 李罗浩, 等. 增高鞋垫对足底压力分布及后跟平衡的影响[J]. **皮革科学与工程**, 2013, 23(1): 56-59.
- ZHANG Xianyi, LI Yue, LI Luohao, *et al.* Effect of increasing insole on plantar pressure distribution and heel balance [J]. **Leather Science and Engineering**, 2013, 23(1): 56-59.
- [33] DULAI S, RAMADI A, LEWICKE J, *et al.* Functional characterization of plantar pressure patterns in gait of typically developing children using dynamic pedobarography[J]. **Gait & Posture**, 2021, 84: 267-272.
- [34] 李立, 陈玉娟, 翟凤鸣, 等. 长期从事太极拳运动老年人足底压力分布特征及平衡能力研究[J]. **中国康复医学杂志**, 2016, 31(9): 984-988.
- LI Li, CHEN Yujuan, ZHAI Fengming, *et al.* Study on the distribution characteristics of plantar pressure and balance ability of elderly people engaged in Taichi exercise for a long time [J]. **Chinese Journal of Rehabilitation Medicine**, 2016, 31(9): 984-988.
- [35] 李墨逸, 蓝秀芦, 鄢行辉, 等. “健身气功·八段锦”对大学生平衡功能的影响[J]. **康复学报**, 2015, 25(1): 14-18.
- LI Moyi, LAN Xiulu, YAN Xinghui, *et al.* Effect of “Fitness Qigong Baduanjin” on balance function of college students [J]. **Rehabil Med**, 2015, 25(1): 14-18.

- [36] GARCIA S, RAO G, BERTON E, *et al.* Foot landing patterns in experienced and novice volleyball players during spike jumps[J]. **Footwear Science**, 2021, 13(sup1): 76-78.
- [37] FARZAMI A, ANBARIAN M. The effects of fatigue on plantar pressure and balance in adolescent volleyball players with and without history of unilateral ankle injury[J]. **Science & Sports**, 2020, 35(1): 29-36.
- [38] 张秀丽. 国家射箭队运动员足底压力中心平衡稳定指标的研究[C]. 2007 广东省体育科学研究论文选, 2007: 47-48.  
ZHANG Xiuli. Research on the balance and stability index of the pressure center of the foot of the national archery team [C]. 2007 Guangdong Sports Science Research Papers, 2007: 47-48.
- [39] 张秀丽, 王向东, 刘学贞. 国家优秀射击运动员平衡稳定性特点及评价指标[J]. **体育学刊**, 2007 (2): 99-102.  
ZHANG Xiuli, WANG Xiangdong, LIU Xuezhen. Characteristics and evaluation index of balance and stability of national elite shooters [J]. **Sports Tribune**, 2007(2): 99-102.
- [40] 娄彦涛, 郝卫亚, 范祎, 等. 自由式滑雪空中技巧运动员落地稳定性的生物力学研究进展[J]. **中国运动医学杂志**, 2021, 40 (3): 237-244.  
LOU Yantao, HAO Weiya, FAN Yi, *et al.* Research progress of biomechanics on landing stability of freestyle skiing aerials[J]. **Chinese Journal of Sports Medicine**, 2021, 40(3): 237-244.
- [41] 张峻霞. 步态分析与行走稳定性研究[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2019: 26-31.  
ZHANG Junxia. Gait analysis and walking stability research [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2019: 26-31.
- [42] QUIJOUX F, VIENNE-JUMEAU A, BERTIN-HUGAULT F, *et al.* Center of pressure displacement characteristics differentiate fall risk in older people: A systematic review with meta-analysis[J]. **Ageing Research Reviews**, 2020, 62: 101117.