

文章编号: 1004-7220(2023)06-1107-07

有无跌倒史老年人步态生物力学特征对比分析

张庆来, 孟站领, 李瑞宁, 王利红
(郑州大学体育学院, 郑州 450044)

摘要: **目的** 通过对有、无跌倒史老年人进行步态运动学和动力学同步测量,对比步态生物力学特征,为老年人跌倒预防提供理论及实践依据。**方法** 在居民社区及老年公寓招募 284 名 60 岁以上老年人作为测试对象,严格按照纳入和排除标准,按照既往 12 个月跌倒史分为跌倒组(有跌倒史)和非跌倒组(无跌倒史)。采用三维录像解析和动态足底压力测量获取受试者自然行走步态的运动学和动力学参数。测试数据采用独立样本 t 检验进行组间各因素差异性对照分析。**结果** 跌倒组老年人自然行走步态过程中左足第 1 跖骨峰值力、双足足跟外侧冲量、右足大拇趾冲量等动力学参数与非跌倒组相比,差异均有统计学意义($P < 0.05$);跌倒组老年人自然行走步态过程中右足第 2 跖骨受力面积、左足缓冲期接触时间、右足前脚掌触地时间、右足横向压力中心(center of pressure, COP)轨迹、左足触地髌角、双足峰值压力点重心位移等运动学参数与非跌倒组相比,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。**结论** 与无跌倒史老年人相比,有跌倒史老年人行走过程中第 2 跖骨受力面积减小,足底触地时间延长,过渡期支撑稳定性下降,COP 横向位移增大,行进方向 COM 位移减小,意味着老年人下肢肌力下降,足侧向摆动增大,步行推进力减小,可导致姿势控制策略发生代偿性改变,潜在跌倒风险增大。在临床评估中,应重点关注有跌倒史老年人群步态足底压力及运动学特征。

关键词: 老年人; 跌倒史; 步态; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.008

Comparative Analysis on Biomechanical Characteristics of Gait in Older Adults with or without Falling History

ZHANG Qinglai, MENG Zhanling, LI Ruining, WANG Lihong

(Physical Education College of Zhengzhou University, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: **Objective** Through the simultaneous measurement on gait kinematics and dynamics of older adults with and without a history of falling, the biomechanical characteristics of gait were compared, so as to provide theoretical and practical basis for the prevention of falling in older adults. **Methods** A total of 284 older adults over 60 years old were recruited in residential communities and apartments for the elderly. According to the inclusion and exclusion criteria, the subjects were divided into falling group (with a falling history) and non-falling group (without a falling history) according to their falling history in the past 12 months. The kinematics and dynamics parameters of the subjects' natural walking gait were obtained by three-dimensional (3D) video analysis and dynamic plantar pressure measurement. The test data were analyzed by independent sample t -test for the differences of various factors between groups. **Results** The dynamic parameters of left foot first metatarsal peak

收稿日期: 2023-03-09; 修回日期: 2023-04-05

基金项目: 国家社会科学基金项目(22BTY074)

通信作者: 张庆来, 教授, E-mail: qinglaizhang@163.com

force, lateral heel impulse, right toe impulse in falling group were significantly different from those in non-falling group ($P < 0.05$). The force bearing area of the 2nd metatarsal bone of the right foot, the contact time of the left foot in buffer period, the contact time of the right front foot, the right foot transverse COP (center of pressure) track, the left foot contact hip angle, the displacement of the peak pressure point COM (center of mass) of both feet were significantly different from those of non-falling group ($P < 0.05$). **Conclusions** Compared with the older adults without a history of falling, the force area of the 2nd metatarsal bone decreases during walking, the time of foot touching the ground lengthens, the support stability decreases during the transition period, the lateral displacement of COP increases, and the displacement of the center of gravity in the direction of walking decreases, indicating that muscle strength of the lower limb of the older adults decreases, the lateral swing of the foot increases, and the walking propulsion decreases, which may lead to compensatory changes in posture control strategy, with the the potential falling risk increasing. In clinical evaluation, the plantar pressure and kinematics characteristics of the gait of the older adults with a history of falling should be focused on.

Key words: older adult; falling history; gait; biomechanics

步行是人类最基本的运动形式之一,它需要在复杂的环境中通过感觉信息的输入控制身体姿势并做出适应步态,需要多环节肌肉间的协调。行走也是老年人独立活动和生活自理的基本保障。然而,随着年龄的增长,老年人普遍存在感觉功能衰退、站立及行走晃动不稳、关节运动幅度减小、韧带弹性和绝对肌力下降以及足部结构和功能发生改变等现象,导致步态改变,纵向及侧向控制能力减弱,调整步态来避开障碍物和在必要时改变速度和方向的能力相对不足,从而诱发老年人跌倒^[1-2]。步态异常是诱发老人跌倒的重要因素之一^[3]。Shumway-Cook等^[4]研究表明,有跌倒史的老年人下肢肌肉力量和行走时的稳定性均呈现明显下降趋势,发生第2次跌倒的几率增加。15%~20%社区老年人有平衡和步态障碍问题,特别是步速和步幅波动性变化大的老年人,跌倒的机率会显著升高^[3,5-6]。跌倒所造成的继发性损伤可降低老年人的生活质量,严重者会导致老年人失能或死亡,它已成为严重妨害老年人健康的公共卫生问题。伴随“健康中国2030规划纲要”和“主动健康和老龄化科技应对”理念的提出,加强老年人群跌倒风险防控研究尤为重要。本研究对有无跌倒史老年人步态进行动力学和运动学测量分析,围绕矢状面和冠状面的步态控制策略问题,初步探讨有、无跌倒史老人步态参数的差异性及其预测性指标,为老年人跌倒预防提供指导与借鉴。

1 对象与方法

1.1 测试对象

随机招募某市社区和老年公寓的老年人为测试对象。根据纳入标准和排除标准,最终284名老年人入选。郑州大学体育学院伦理委员会批准本研究。

入选标准:①符合1987年Kellogg国际老年人跌倒预防工作组的跌倒定义,即无意图摔倒在地上或一些更低的平面上,但不包括暴力、意识丧失、偏瘫或癫痫发作所致的跌倒;符合1992年世界卫生组织颁布的《国际疾病分类(第10版)》(ICD-10)中跌倒倾向(编码为R29.6)的定义^[7];②年龄超过60岁;③在既往12月中跌倒过1次及以上;④测试期间,身体健康状况良好,行动均无受限,均能独立完成所规定的测试任务;⑤所有受试者都是在自愿知情的前提下参加测试,并填写知情同意书。

排除标准:①有明显影响姿势控制的创伤和疾病;②正在服用神经松弛剂或支气管治疗剂或抗抑郁药物;③存在严重认知障碍或心理疾患;④有严重心脏病或心脑血管疾病或存在较高运动风险;⑤不能独立完成实验测试。

1.2 测试分组

根据跌倒史的调查结果,分为跌倒组(有跌倒史)和非跌倒组(无跌倒史)。结果表明,有过跌倒经历的为78人,无跌倒经历的为206人,跌倒者占调查人数的27.46%。跌倒组与非跌倒组年龄差异无统计学意义($P > 0.05$),通过卡方检验跌倒组与非

跌倒组中男女性别比例以及惯用肢比例差异无统计学意义($P>0.05$),跌倒组身高、体质量略低于非跌倒组,但组间差异无统计学意义($P>0.05$),跌倒组体脂率略高于非跌倒组,但差异无统计学意义($P>0.05$)。

表1 受试者基本特征比较

Tab.1 Comparison of basic characteristics for subjects

| 指标 | 跌倒组($n=78$) | 非跌倒组($n=206$) | t | P |
|--------|---------------|-----------------|--------|-------|
| 年龄/岁 | 74.12±6.34 | 72.58±6.32 | 1.828 | 0.069 |
| 性别比例 | M(28),F(50) | M(83),F(123) | 0.459 | 0.498 |
| 惯用肢 | L(12),R(66) | L(29),R(177) | 0.523 | 0.358 |
| 体质量/kg | 64.64±9.37 | 65.90±11.26 | -0.874 | 0.383 |
| 身高/m | 1.61±0.09 | 1.62±0.08 | -0.926 | 0.355 |
| 体脂率/% | 25.26±2.96 | 24.99±2.85 | 0.709 | 0.479 |

注:M、F 分别代表女性和男性;L、R 分别代表左肢和右肢。

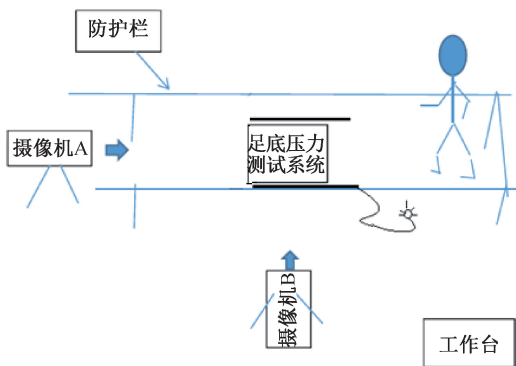
1.3 实验测试方法

1.3.1 基本形态测试 采用身高计、电子体重计、体成分测量仪(InBody 公司,韩国)等仪器对所有受试者进行身高、体质量、体脂率等基本形态测试。

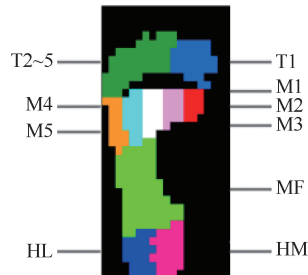
1.3.2 步态运动学、动力学同步测量 采用立体定点相机对老年人自然行走步态过程中双脚接触测力板足跟着地、放平缓冲、足尖离地动作时相进行三维运动录像拍摄与解析[见图 1(a)]。使用两台摄像机(DCR-VX2100E,索尼公司,日本)进行同步拍摄,采用遥控同步开机,足底压力测试区域布设同步装置,通过电子光幕检测足着地并触发灯光作为同步信号。拍摄频率为 50 Hz,摄像机距离压力平板中心约 10 m,两摄像机主光轴扇形夹角约为 90°。爱捷 001-A 型三维 DLT 立体辐射框架, X 方向指向行走矢状面方向,采用美国 APAS 运动生物力学分析系统进行解析,选用系统自带的美国丹姆斯特(Dempster)模型,经过数字化计算得到老年人步态过程中的各环节运动学参数,采用低通数字滤波法对数据进行优化,截断频率为 6 Hz^[8]。

采用 Footscan Usb2 足底压力测试系统(RsScan® International 公司,比利时)(尺寸规格为 578 mm×418 mm×12 mm,传感器密度为 4 个/cm²)进行老年人自然行走步态的动力学测量。数据采集频率为 250 Hz。如图 1(b)所示,足底压力分区为第 1 趾(T1)、第 2~5 趾(T2~5)、第 1 跖骨(M1)、第 2 跖骨(M2)、第 3 跖骨(M3)、第 4 跖骨(M4)、

第 5 跖骨(M5)、足中部或足弓(middle foot,Mf)、足跟内侧(heel medial, HM)、足跟外侧(heel lateral, HL)。本研究采用“一步法”进行测试^[9]。为了保证老年人的测试安全,步道两边加装防护栏(宽度 100 cm,高度 80 cm)。受试者每只脚测试 3 次,足底各区域峰值压力和冲量值均进行体重(body weight, BW)的标准化处理。



(a) 步态运动学和动力学同步测试



(b) 足底压力分区

图1 步态测试及足底压力分区示意图

Fig.1 Schematic diagram of gait test and plantar pressure zoning

(a) Gait kinematics and dynamics synchronization test,

(b) Plantar pressure zoning

1.4 统计学分析

将测试对象按照既往跌倒史分为跌倒组和非跌倒组。应用统计学软件 SPSS 22.0 对正态分布数据采用假设检验中的独立样本 t 检验和卡方(χ^2) 检验进行组间各因素差异性对照分析。当影响因素为连续性变量时,用独立样本 t 检验进行统计分析。

2 结果

2.1 跌倒组与非跌倒组受试者步态动力学指标比较

跌倒组左足第 1 跖骨峰值力大于非跌倒组,差

异有统计学意义($P<0.05$)。跌倒组右足大拇趾冲量大于非跌倒组,差异有统计学意义($P<0.05$),左足足跟外侧冲量和右足足跟外侧冲量,两组之间差异均有统计学意义($P<0.01$)。

跌倒组右足第2跖骨受力面积小于非跌倒组,差异有统计学意义($P<0.01$)。在峰值压力点时相,跌倒组峰值压力点左足COM位移明显小于非跌倒组;跌倒组的峰值压力点右足COM位移小于非跌倒组;跌倒组右足横向COP轨迹明显大于非跌倒组,差异均有统计学意义($P<0.01$),见表2、图2。

表2 跌倒组与非跌倒组步态动力学指标比较

Tab. 2 Comparison of gait dynamics indexes between falling group and non-falling group

| 参数 | 跌倒组($n=78$) | 非跌倒组($n=206$) |
|--------------------------------|----------------|-----------------|
| 第1跖骨 | L 1.50±0.75 | 1.20±0.76* |
| 峰值力/($N\cdot kg^{-1}$) | R 1.78±0.97 | 1.98±0.86 |
| 足跟外侧 | L 1.10±0.62 | 0.73±0.37* |
| 冲量/($N\cdot s\cdot kg^{-1}$) | R 1.12±0.64 | 0.84±0.35* |
| 大拇趾 | L 0.45±0.35 | 0.45±0.37 |
| 冲量($N\cdot s\cdot kg^{-1}$) | R 0.49±0.44 | 0.38±0.25* |
| 第2跖骨 | L 9.19±1.17 | 9.21±1.85 |
| 受力面积/ cm^2 | R 11.00±2.37 | 12.90±1.47* |
| COP 横向 | L 32.18±9.86 | 31.38±12.05 |
| 轨迹/mm | R 35.61±7.26 | 29.30±10.71* |
| 峰值压力点 | L 210.53±11.78 | 300.67±12.23* |
| COM 位移/mm | R 220.66±11.89 | 280.12±14.34* |

注:L,R 分别表示左、右足。*表示与跌倒组比较, $P<0.05$ 。COP 为压力中心,COM 为重心。

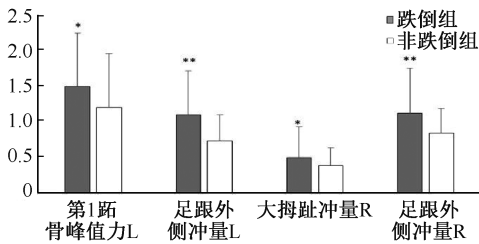


图2 跌倒组与非跌倒组老年人步态动力学差异性显著变量对照
Fig. 2 Comparison of significant variables for gait dynamics differences between falling group and non-falling group

注:L,R 分别表示左、右足。* $P<0.05$,** $P<0.01$ 。

2.2 跌倒组与非跌倒组受试者步态运动学指标比较

跌倒组左足缓冲期接触时间明显大于非跌倒组;跌倒组右足前脚掌着地接触时间明显大于非跌

倒组,差异均有统计学意义($P<0.01$)。在着地期,只有左足触地髌角跌倒组明显大于非跌倒组,组间存在非常显著性差异($P<0.01$),见表3、图3。

表3 跌倒组与非跌倒组步态运动学指标比较

Tab. 3 Comparison of gait kinematics indexes between falling group and non-falling group

| 参数 | 跌倒组($n=78$) | 非跌倒组($n=206$) |
|---------|-----------------|-----------------|
| 缓冲期 | L 394.91±199.73 | 312.64±142.55* |
| 接触时间/ms | R 356.13±137.13 | 361.41±170.22 |
| 前脚掌着地 | L 113.76±3.80 | 102.01±77.80 |
| 接触时间/ms | R 108.69±61.69 | 88.34±57.32* |
| 触地 | L 170.31±5.52 | 166.46±4.11* |
| 髌角/(°) | R 162.90±23.18 | 164.41±22.71 |

注:L,R 分别表示左、右足。*表示与跌倒组比较, $P<0.05$ 。

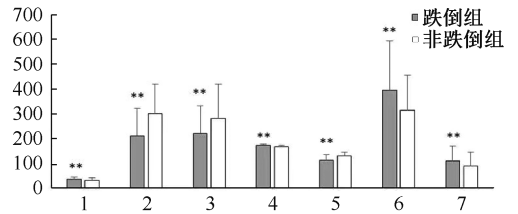


图3 跌倒组和非跌倒组老年人步态运动学差异性显著变量对照
Fig. 3 Comparison of significant variables for gait kinematics difference between falling group and non-falling group

注:1—右足横向COP轨迹;2—左足COM位移;3—右足COM位移;4—左足触地髌角;5—右足第2跖骨受力面积;6—左足缓冲期接触时间;7—右足前脚掌着地接触时间;** $P<0.01$ 。

3 讨论

人类步行的控制十分复杂,任何环节的失调都可能影响步态,而异常也有可能被代偿或掩盖。步态分析可通过生物力学和运动学手段,揭示步态异常的关键环节及影响因素。步态异常与老年人跌倒密切相关,被视为重要的生物标志物^[10]。研究发现,有跌倒史的老年人步态变异性明显升高^[3]。步态参数的定量评估有益于老年人跌倒风险预测。

本文结果显示,跌倒组与非跌倒组第1跖骨峰值压力、大拇趾冲量以及足跟冲量等指标存在差异性,且均表现出右足第1跖骨峰值压力大于左足的现象,这些指标的异常可能与老年人行走过程中的姿势控制能力下降有关,第1跖骨是压力中心(center of pressure, COP)轨迹的必经之路,它是重要的足部支撑点和行走中的推进点。霍洪峰等^[11]

研究表明,不同行走方式下第1跖骨区域都表现出较高的峰值压力,健步走第1跖骨压力高于自然行走;步速增加会引起足的生物力学代偿机制,导致压力向前、后足转移,同时为适应速度的增加,相应增加足内侧压力以维护足的稳定。Menz等^[12]研究发现,第1跖趾关节下的负荷与该关节的活动范围相关,受试者活动范围增大,导致该区域足底被施加了更多的力。足的结构和功能的改变会造成足底局部压力升高,随着年龄增长,老年人下肢肌力衰退,导致步态结构的改变,势必会影响某区域足底压力的变化。Howcroft等^[13]研究表明,少数指标的测量就可以解释步行中足跟和第1跖骨峰值压力约35%的方差;第1跖骨的峰值压力比足跟峰值压力的预测成功率更高(38% vs 31%)。目前,在糖尿病足的研究中,跖趾关节的峰值压力是最重要的预测变量^[14]。由此可见,第1跖骨峰值压力是异常步态的一个重要观测变量,对老年人跌倒风险评估与预测有实践意义。足底各区域的冲量表示地面支撑反作用力在一定时间内对足底区域连续作用产生的积累效应。局部冲量增大可导致疲劳积累,造成慢性损伤。梁玉等^[15]研究表明,随着年龄增大,老年人足跟、足弓部位的冲量显著增大。这进一步说明足跟冲量增高,可能与老年人本体感受器改变和肌肉、足底脂肪垫萎缩等导致步态异常有关。

本文发现,跌倒组与非跌倒组右足第2跖骨受力面积差异有统计学意义($P < 0.01$)。且表现为跌倒组受力接触面积要小于非跌倒组,左足无明显差异。跌倒组右足横向COP轨迹明显大于非跌倒组($P < 0.01$)。局部支撑面积减小可能预示着其足部的控制能力减弱,支撑稳定性下降^[16]。理论上,当局部受力面积减小,可能会引起该部位压强的增大,表现为局部的压力升高^[17]。Murat等^[18]研究指出,老年人由于足底表面本体感受器发生改变,踝关节活动度减小,足底肌肉、脂肪垫萎缩,鹰状趾、锤状趾增多,在行走过程中可能会促进局部足底压力升高。另外,研究证实了行走过程中足跟和第2跖骨是最主要的峰值压力区,足跟、第2跖骨和拇趾是足与地面的主要支撑力点^[14,19]。因此,若单侧第2跖骨的接触面积减小,可能意味着老年人行走过渡期支撑稳定性下降,局部压力增高,是导致

跌倒风险增大及足部慢性损伤的潜在因素。

本文结果显示,跌倒组右足横向COP轨迹明显大于非跌倒组($P < 0.01$)。跌倒组足着地达峰值力点时的重心(center of mass, COM)明显小于非跌倒组($P < 0.01$)。Winter^[20]认为,COP是人体整体垂直反力作用等效的一点。COP代表了表面受力的加权平均值,可以评估在两个平面(矢状面和冠状面)的姿势控制稳定性和使用策略问题。本文发现,跌倒组横向COP位移明显大于非跌倒组,该结果与李萍等^[21]针对有跌倒史和健康老年人进行对照研究的结果一致。从本文结果看,非跌倒组左、右足在行走过程中横向和纵向COP的轨迹变化都较为均衡,说明其行走过程中的身体稳定性保持较好,而跌倒组老年人纵向COP轨迹双侧比较均衡,但在横向双侧存在明显的不均衡现象。陈岩等^[22]指出,有跌倒史老年人COP曲线在横向(X轴)移动范围增大,意味着足侧向摆动增大,足内外翻程度增加,一旦超出人体的控制能力会失去平衡导致跌倒。张庆来等^[2]研究表明,老年人步态移动稳定性普遍存在随年龄增长而下降的趋势,尤其在纵向直线移动控制能力方面,表现出明显的年龄相关性。COP曲线的变化与下肢关节周围肌肉的变化及整个身体COM运动相关^[23-24]。因此,COP在老年人跌倒风险评估方面具有重要实践意义。人类步态主要可分为支撑站立相和摆动相,一般成人大约有60%的迈步周期用在站立相,40%用在摆动相^[25]。从以往文献研究来看,有跌倒史老年人COM位移较低可能是行走过程中的一种代偿性反应,主要是由运动功能减退而导致。Hortobagyi等^[26]提出步行中身体COM位移最小化可以节省能量的观点。Aboutorabi等^[27]研究发现,减少垂直位移并不能降低步行中的能量消耗,但可以使机械能的转移保持动力学顺畅,从而降低步行中的能量消耗。由此可见,COM变化对行走中能量有较大影响,有跌倒史老年人可能由于下肢肌力的衰退,步行中推进力会降低,并且处于一种保护性调节机制,其尽量保持低COM完成支撑过渡。Winter等^[28]研究指出,老年人行走中蹬地推进力较弱有两种解释:一是踝跖屈肌肌力减退;二是为确保更加安全地迈步进行了适应性改变。因为大的推进力会使足在前后方向移动幅度增大,增加行走的不稳定性。本文结果提

示,有跌倒史老年人行走过程中 COP 横向轨迹增大,同时 COM 位移提升能力下降,COP、COM 是老年人跌倒风险评估的重点观测指标。

本文结果显示,跌倒组左足缓冲期接触时间、右足前脚掌着地接触时间以及着地期左足触地髌角与非跌倒组差异有统计学意义($P < 0.01$)。Hortobagyi 等^[26]比较了年轻人和老年人在自然行走和快速行走时髌、膝、踝等关节的运动学特征。结果发现,由于老年人步长缩短,在着地瞬间支撑点与 COM 的投影点距离也相应缩短,大腿与躯干的夹角必然增大,即髌关节角度会增大。DeVita 等^[29]从动力学角度探讨老年人行走过程中髌关节角度的变化特征,得出老年人关节力矩和能量减少与步行速度以及步态模式之间的关系。当以相同速度行走时,老年人较多地使用髌、膝伸肌,而踝关节的跖屈肌使用较少。本文认为,步行中髌角增大可能表征了老年人步态模式改变,身体姿势的控制力减弱是老年人跌倒风险的一个重要潜在观测变量。

4 结论

有跌倒史老年人步态动力学和运动学特征与无跌倒史老年人部分指标存在明显差异,特别是足跟冲量增高、第 2 跖骨接触面积减小、COP 横向轨迹增大、COM 位移提升能力下降以及行走着地时髌角增大等指标,对老年人行走过程中姿势控制能力有重要的影响。这些参数的变化可能意味着老年人行走过渡期支撑稳定性下降,是导致跌倒风险增大及足部慢性损伤的潜在因素。本文建议,在临床评估中对有跌倒史老年人群步态足底压力及运动学特征应重点关注。

参考文献:

[1] 游永豪,邵梦霓,胡燕杰,等.基于步态特征的老年人跌倒风险预警模型[J].医用生物力学,2020,35(4):489-495.
YOU YH, SHAO MN, HU YJ, *et al.* Early warning model of fall risk for the elderly based on gait characteristics [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(4): 489-495.

[2] 张庆来,张林.老年人步态移动稳定性的增龄特征研究[J].中国运动医学杂志,2017,36(7):599-604.

[3] 谢恩礼,詹建国.步态生物力学大数据分析研究进展[J].医用生物力学,2021,36(6):984-989.
XIE EL, ZHAO JG. Progress of big data analysis in gait biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(6): 984-

989.

[4] SHUMWAY-COOK A, PATELA A, STEWART AL, *et al.* Assessing environmentally determined mobility disability: Self-report versus observed community mobility [J]. *J Am Geriatr Soc*, 2005, 53(4): 700-704.

[5] 王少君,苏丽娜,李静先,等.老年男性和年轻男性行走时足底动力学特征差异[J].医用生物力学,2021,36(2):304-308.
WANG SJ, SU LN, LI JX, *et al.* Comparison of the characteristics of plantar kinetics in older and young male adults during walking [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2): 304-308.

[6] STEPHANIE C, MANUEL MO, LOUIS B, *et al.* Guidelines for gait assessments in the Canadian consortium on neurodegeneration in aging (CCNA) [J]. *Can Geriatr J*, 2018, 21(2): 157-165.

[7] 北京协和医院世界卫生组织疾病分类合作中心.疾病和有关健康问题的国际统计分类 ICD-10[M].北京:人民卫生出版社,1996:839-841.

[8] 张庆来.基于姿势控制能力的老年人跌倒风险评估研究[D].苏州:苏州大学,2017.

[9] STURNIEKS DL, MENANT J, VANRENTERGHEM J, *et al.* Sensorimotor and neuropsychological correlates of force perturbations that induce stepping in older adults [J]. *Gait Posture*, 2012, 36: 356-360.

[10] PIERRUCCINI-FARIA F, MONTERO-ODASSO M, HAUSDORFF JM. Gait variability and fall risk in older adults: The role of cognitive function [M]//Falls and cognition in older persons. Cham: Springer, 2020: 107-138.

[11] 霍洪峰,吴艳霞,高峰,等.男性老年人健步走足底压力分布与步态特征[J].中国康复医学杂志,2009,24(12):1119-1121.

[12] MENZ HB, MORRIS ME. Clinical determinants of plantar forces and pressures during walking in older people [J]. *Gait Posture*, 2006, 24: 229-236.

[13] HOWCROFT J, KOFMAN J, LEMAIRE ED, *et al.* Analysis of dual-task elderly gait in fallers and non-fallers using wearable sensors [J]. *J Biomech*, 2016, 49(7): 992-1001.

[14] MICHAEL MJ, HASTINGS M, COMMEANB PK, *et al.* Forefoot structural predictors of plantar pressures during walking in people with diabetes and peripheral neuropathy [J]. *J Biomech*, 2003, 36: 1009-1017.

[15] 梁玉,霍洪峰,杨静怡,等.老年人步行时足底压力及步态特征的增龄性变化[J].中国老年学杂志,2013,33(7):3038-3040.

[16] 孟站领,张庆来,苑玲伟,等.不同跌倒风险老年人跨越障碍前后足底压力特征[J].医用生物力学,2022,37(4):741-747.

- MENG ZL, ZHANG QL, YUAN LW, *et al.* Plantar pressure characteristics of the elderly with different fall risks before and after obstacle crossing [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(4): 741-747.
- [17] 张庆来, 刘学贞, 陈丰才, 等. 脑力、体力劳动者足底压力参数分布特征及评定[J]. *体育学刊*, 2008, 15(11): 100-105.
- [18] MURAT B, HAKAN T. The evaluation of plantar pressure distribution in obese and non-obese adults [J]. *Clin Biomech*, 2004, 19: 1055-1059.
- [19] STEWART S, DALBETH N, VANDAL AC, *et al.* Spatiotemporal gait parameters and plantar pressure distribution during barefoot walking in people with gout and asymptomatic hyperuricemia: Comparison with healthy individuals with normal serum urate concentrations [J]. *J Foot Ankle Res*, 2016, 9: 15.
- [20] WINTER D. *Biomechanics and motor control of human movement* [M]. New York: Wiley, 2005: 8.
- [21] 李萍, 邹晓峰, 程磊, 等. 有跌倒史的老年人群足底压力特征研究[J]. *中国老年学杂志*, 2011, 31(7): 1122-1124.
- [22] 陈岩, 孙威, 杨帆, 等. 有跌倒史老年人在不同行走状态下足底压力特征研究[J]. *山东体育学院学报*, 2014, 30(3): 57-60.
- [23] STREEPEY JW, ANGULO-KINZLER RM. The role of task difficulty in the control of dynamic balance in children and adults [J]. *Hum Mov Sci*, 2002, 21(4): 423-438.
- [24] CHANDRAMOULI K, EDWARD PW, COURTNEY ER, *et al.* Learning new gait patterns: Age-related differences in skill acquisition and interlimb transfer [J]. *Exp Gerontol*, 2018, 111(1): 45-52.
- [25] SHUMWAY-COOK A, WOOLLACOTT MH 著, 毕胜等译. *运动控制与实践* (第3版) [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2009: 260.
- [26] HORTOBAGYI T, RIDER P, GRUBER AH, *et al.* Age and muscle strength mediate the age-related biomechanical plasticity of gait [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2016, 116(4): 805-814.
- [27] ABOUTORABI A, ARAZPOUR M, BAHRAMIZADEH M, *et al.* The effect of aging on gait parameters in able-bodied older subjects: A literature review [J]. *Aging Clin Exp Res*, 2016, 28(3): 393-405.
- [28] WINTER DA, PATELA AE, FRANK JS, *et al.* Biomechanical walking pattern changes in the fit and healthy elderly [J]. *Phys Ther*, 1990, 70(6): 340-347.
- [29] DEVITA P, HORTOBAGYI T. Age causes a redistribution of joint torques and powers during gait [J]. *J Appl Physiol*, 2000, 88(5): 1804-1811.