

文章编号:1004-7220(2021)02-0304-05

# 老年男性和年轻男性行走时足底动力学特征差异

王少君<sup>1</sup>, 苏丽娜<sup>1</sup>, 李静先<sup>2</sup>, 徐冬青<sup>3</sup>(1.北方民族大学 体育学院, 银川 750021; 2.加拿大渥太华大学 健康科学学院, 渥太华 K1N 6N5;  
3.天津体育学院 研究生处, 天津 300381)

**摘要:**目的 比较老年男性和年轻男性在行走时足底动力学特征的差异,探讨增龄对足底动力学的影响。**方法** 应用鞋垫式压力测试系统比较13名老年男性和14名年轻男性在串联行走时左脚的受压时长、受压支撑百分比、开始受压支撑百分比、结束受压支撑百分比、最大压强、最大压强支撑百分比、平均最大压强、时间压强积分、最大压力、最大压力支撑百分比、平均压力和时间压力积分的差异。**结果** 老年组除内侧足弓外所有分区的受压时长明显大于年轻组,同时外侧足跟、外侧足弓开始受压支撑百分比明显大于年轻组,而内侧足跟、第2、3跖骨受压结束百分比明显小于年轻组;老年人整个足底最大压力和平均压力以及第2、3跖骨平均最大压强和最大压力明显小于年轻组。老年人整个足底、第4、5跖骨和4个小脚趾的时间压强积分以及整个足底、足跟和4个小脚趾的时间压力积分明显大于年轻组。**结论** 前后脚串联行走时,足底筋膜机能减退可能是老年人姿势控制能力下降的主要原因之一,趾长屈肌和趾短屈肌的屈趾作用增强对老年人姿势稳定性提高有一定的代偿作用。

**关键词:**足底压力; 串联行走; 动力学; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.02.021

## Comparison of the Characteristics of Plantar Kinetics in Older and Young Male Adults during Walking

WANG Shaojun<sup>1</sup>, SU Lina<sup>1</sup>, LI Jingxian<sup>2</sup>, XU Dongqing<sup>3</sup>

(1. School of Physical Education, North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Human Kinetics, University of Ottawa, Ottawa K1N 6N5, Canada; 3. Graduate Student Division, Tianjin University of Sport, Tianjin 300381, China)

**Abstract; Objective** To compare the differences in plantar kinetics between older male adults and young male adults during walking, and to explore the influences of aging on plantar kinetics. **Methods** The in-shoe plantar sensory measurement system was used to collect and compare left foot parameters of 13 older men and 14 young men during tandem walk, including contact time, beginning of contact in percentage of roll over process (% ROP), and end of contact in % ROP, peak pressure, instant of peak pressure in % ROP, maximum mean pressure, pressure-time integral, maximum force, instant of maximum force in % ROP, mean force and force-time integral. **Results** Beside media arch, the contact time on all regions of older men was longer, whereas, the beginning of contact in % ROP on lateral heel, lateral arch was greater, and the end of contact in % ROP on medial heel and 2<sup>nd</sup>-3<sup>rd</sup> metatarsal head was smaller compared with young men. The maximum force and mean force on the whole foot region, and the maximum mean pressure and maximum force on 2<sup>nd</sup>-3<sup>rd</sup> metatarsal head of older people were

收稿日期:2020-02-18; 修回日期:2020-04-12

基金项目:天津哲学社会科学规划课题重点项目(TJTY19-002)

通信作者:徐冬青,教授,E-mail:xudongqing54@163.com

significantly lower; the pressure-time integral on the whole foot region, the 4<sup>th</sup>-5<sup>th</sup> metatarsal head, the 2<sup>nd</sup>-5<sup>th</sup> toes, and the force-time integral on the whole foot region, medial heel, lateral heel and 2<sup>nd</sup>-5<sup>th</sup> toes were significantly higher compared with young men. **Conclusions** During tandem walking, plantar fascia dysfunction might be one of the main reasons for the decline of postural control ability, and the contraction enhancement of flexor digitorum longus and flexor digitorum brevis could compensate for postural stability improvement in older men.

**Key words:** plantar pressure; tandem walking; kinetics; biomechanics

足底动力学退行性变化影响老年人的姿势稳定性。研究增龄对足底动力学影响的变化规律,能为老年人姿势控制干预方案的设计提供理论支持。国内关于老年人足底动力学的研究多采用压力测试平板,而鲜有关于鞋垫式压力测试系统的报道,并且研究结论存在明显的差异。研究显示,老年人足底不同分区的最大压力明显小于年轻人<sup>[1]</sup>。老年人足底最大压力、足底压力冲量、负荷加载率均低于年轻人<sup>[2]</sup>。但也有研究表明,老年人正常行走时,左脚第1跖骨、左右脚第4跖骨的最大压力出现明显增大<sup>[3]</sup>;老年人除第1趾骨最大压力减小外,其余分区的最大压力均出现明显的增加<sup>[4]</sup>。相比之下,国外研究虽然取得一定成果,但仍需深入。一项使用压力平板的研究表明,老年人的行走速度下降,足弓部位的负荷明显小于年轻人,并且足底接触面积增加,接触时长减小<sup>[5]</sup>。Gimunová等<sup>[6]</sup>应用足底压力平板发现,老年人足底动力学存在性别差异<sup>[6]</sup>。Hessert等<sup>[7]</sup>应用鞋垫式压力测试系统研究6名老年受试者正常行走时的足底动力学特征,结果发现,老年人内侧足跟的平均压力和平均压强出现明显减小,并且在整个内侧分区的足底负荷出现明显减小。

综上所述,国内关于老年人足底动力学的研究多采用压力平板,不同的研究结果存在明显的差异,并且足底动力学的评价指标单一。国外有学者应用鞋垫式压力测试系统比较老年人和年轻人的足底动力学差异,但研究样本较小,统计的效应值较低。因此,本文选用鞋垫式足底压力测试系统比较老年男性和年轻男性在前后脚串联行走模式下足底压力、压强、受压时长、时间压力积分等参数,全面探讨老年人足底相关参数的变化规律,从足底动力学的视角进一步分析老年人出现姿势控制难度增加的原因。

## 1 研究方法

### 1.1 受试者

14名年轻男性和13名老年男性自愿参加本研究。根据实验要求对受试者进行筛选,要求受试者为正常足弓,无拇外翻、踝关节扭伤、膝关节炎等下肢运动系统疾病,神经肌肉控制功能正常,无内分泌、前庭等系统相关疾病。受试者参加实验前均签署知情同意书。

### 1.2 测试仪器

采用足底压力测试系统(Pedar公司,德国)采集受试者运动中的足底压力测试数据。根据受试者足长,选择相应的足底压力测试鞋垫放置于测试鞋内,数据由采集装置经蓝牙实时传输至计算机的采集软件。每个测试鞋垫含有99个压力传感器,两个鞋垫同时采集数据,采样频率为100 Hz。实验前,采用压力标定系统对所有的测试鞋垫进行标定。

### 1.3 测试流程

受试者热身并熟悉测试流程后,穿着统一的棉袜,选择适合自己尺码的测试鞋。测试者放置对应尺码的鞋垫于测试鞋内,将Pedar数据采集装置固定于受试者的后腰部,并将数据传输线固定于受试者的下肢上,防止其影响受试者的测试动作。然后,要求受试者沿1条10 m长直线采用脚尖脚后跟串联的形式,从起点尽快走到终点。如果落脚位置偏离中间线则视为实验失败,重新开始测试。

### 1.4 测试指标

参考文献[8]中的研究,应用Groupmask Evaluation分析软件将测试鞋垫分为如图1所示的9区,分别为:整个足底(Total)、内侧足跟(M1)、外侧足跟(M2)、内侧足弓(M3)、外侧足弓(M4)、第1跖骨(M5)、第2、3跖骨(M6)、第4、5跖骨(M7)、大脚趾(M8)和4个小脚趾(M9)。

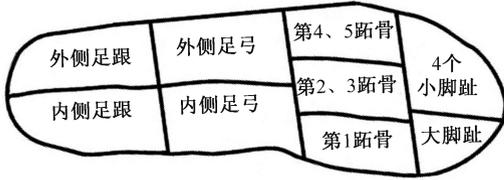


图1 足底压力分区示意图

Fig.1 Schematic diagram for in-shoe plantar pressure

计算上述分区的受压时长、受压支撑百分比、开始受压支撑百分比、结束受压支撑百分比、最大压强、最大压强支撑百分比、平均最大压强、时间压强积分、最大压力、最大压力支撑百分比、平均压力和压力积分。受压时长为足底分区从开始产生压力到压力结束所用的时间；受压支撑百分比为足底分区受压时长占整个支撑期的百分比；开始受压支撑百分比为支撑期开始时刻至足底分区开始接受压力时刻的间隔时长占整个支撑期的百分比；结束受压支撑百分比为支撑期开始时刻至足底分区压力结束时刻的间隔时长占整个支撑期的百分比；最大压强为足底分区在受压过程中的压强峰值；最大压强支撑百分比为支撑期开始时刻至足底分区最大压强出现时刻的间隔时长占整个足底支撑期的百分比；平均最大压强为足底分区在受压过程中每个采样最大压强的平均值；时间压强积分为足底分区在单位面积内压力在时间上的累积；最大压力为足底分区在受压过程中压力的峰值；最大压力支撑百分比为支撑期开始时刻至足底分区最大压力出现时刻的间隔时长占整个足底支撑期的百分比；平均压力为足底分区在受压过程中每个采样压力的均值；时间压力积分为足底分区所受压力在时间上的积累，即足底分区所受到的冲量。

### 1.5 统计学方法

所有数据以均值±标准差表示，采用Shapiro-Wilk检验数据的分布形式，符合正态分布且方差齐性的测试结果采用独立样本 *t* 检验方法进行分析，对于非正态分布的数据采用 Mann-Whitney *U* 检验比较两组间的差异，显著性差异水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果

受试者的一般情况如表1所示，两组受试者身

高、体重 (body weight, BW) 和体质量指数 (body mass index, BMI) 比较均未有显著性差异。

表1 受试者基本情况

Tab.1 General information of the subjects

组别	人数	年龄/岁	身高/cm	体质量/kg	BMI/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )
年轻组	14	24.50±2.21	173.48±6.08	66.79±11.86	24.50±2.21
老年组	13	71.67±3.94	170.07±4.85	68.12±8.89	23.21±2.92

两组间受压支撑百分比、最大压强、最大压强支撑百分比和最大压力支撑百分比各个分区间比较，没有显著性差异。除内侧足弓外，老年组各个分区受压时长皆明显大于年轻组 (见表2)。

表2 年轻组和老年组受压时长 (\*  $P < 0.05$ )

Tab.2 Contact time for young group and elderly group 单位:ms

足底分区	年轻组	老年组
Total	776.87±178.93*	1065.72±271.97
M01	726.20±172.21*	930.93±297.72
M02	691.55±170.69*	942.19±269.94
M03	446.33±188.66	578.14±267.85
M04	669.27±168.25*	835.56±217.22
M05	613.50±216.70*	834.76±217.86
M06	742.38±182.69*	990.28±239.19
M07	764.89±169.44*	1029.81±259.83
M08	672.61±210.53*	947.84±264.61
M09	666.74±201.82*	949.59±270.53

老年组在外侧足跟和外侧足弓开始受压支撑百分比明显慢于年轻组。老年组在内侧足跟和第2、3跖骨的足底受压结束支撑百分比明显早于年轻组 (见表3)。

老年组仅第2、3跖骨的平均最大压强明显小于年轻组 ( $P = 0.022$ )。老年组整个足底 ( $P = 0.005$ )、第4、5跖骨 ( $P = 0.036$ ) 和4个小脚趾 ( $P = 0.026$ ) 的时间压强积分明显大于年轻组，其他分区间的比较未有显著性差异。老年组整个足底 ( $P = 0.040$ ) 和第2、3跖骨 ( $P = 0.046$ ) 的最大压力明显小于年轻组，其他分区间的比较未见有显著性差异。老年组除整个足底 ( $P = 0.010$ ) 的平均压力明显小于年轻组外，其他分区比较未见有显著性差异。老年组整个足底 ( $P = 0.003$ )、内侧足跟 ( $P = 0.030$ )、外侧足跟 ( $P = 0.016$ ) 和4个小脚趾 ( $P = 0.026$ ) 时间压力的积分明显大于年轻组，其他分区之间比较未见有显著性差异 (见图2)。

表3 年轻组和老年组足底开始、结束时刻受压支撑百分比(与老年组比较, \* $P<0.05$ )

Tab.3 Beginning and End of contact in % ROP between young group and elderly group

单位:%

足底分区	开始		结束	
	年轻组	老年组	年轻组	老年组
M01	0.03(0~0.22)	0.26(0.02~0.82)	93.71±5.21*	88.38±9.56
M02	0(0~0.29)*	0.15(0.05~1.09)	89.81±10.47	89.32±8.30
M03	13.93(5.26~22.91)	17.23(8.59~26.97)	76.33±8.39	76.48±7.20
M04	4.92(0.87~7.96)*	9.09(4.81~16.81)	94.05±4.96	90.53±6.84
M05	4.39(1.08~19.70)	11.53(4.93~17.11)	91.30±10.89	89.18±7.22
M06	1.82(0.22~5.63)	4.06(1.57~10.79)	99.59±0.75*	98.78±1.10
M07	0.20(0~1.65)	0.93(0.02~4.09)	100(99.56~100)	100(99.32~100)
M08	9.89(3.49~20.00)	7.93(0.64~11.56)	99.72(99.08~100)	99.68(95.64~100)
M09	8.44(5.30~23.48)	7.57(5.37~19.76)	100(99.64~100)	99.92(98.26~100)

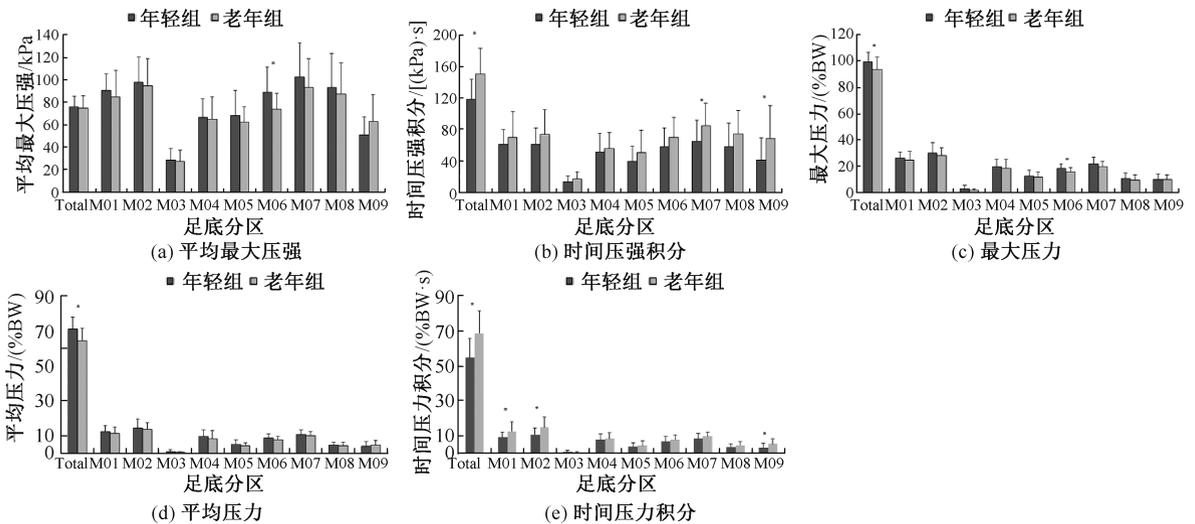


图2 年轻组和老年组足底动力学参数比较

Fig.2 Comparison of plantar kinetics parameters in young group and elderly group (a) Maximum mean pressure, (b) Pressure-time integral, (c) Maximum force, (d) Mean force, (e) force-time integral

### 3 讨论

本文发现,老年人前后脚串联行走的支撑时间明显增加,其主要原因是姿势挑战难度的增加,使得老年人在完成动作时更加谨慎,导致其支撑时间的增长。文献[5]中的结论也支持本文结果,老年人行走的速度出现明显的减慢。因此,前后脚串联行走时支撑时间增加是老年人姿势稳定性下降的指征之一。同时,老年人外侧足跟、外侧足弓的开始受压百分比较大,内侧足跟、第2、3跖骨的受压结束百分比较小,推测与老年人足部的运动控制有关,老年人运动机能的退行性变化可能是导致该变化发生的原因<sup>[9]</sup>。

老年人整个足底最大压力和平均压力出现明

显下降,而最大压强和平均最大压强并未表现出显著性差异。老年人整个足底压力参数的减小与老年人行走动作较为缓慢、下肢垂直运动的加速度较小有关。除第2、3跖骨平均最大压强和最大压力出现明显下降外,其他8个分区压力和压强相关参数比较,皆未有显著性差异。孙天赦<sup>[10]</sup>研究发现,老年人在以不同速度行走时,压力峰值主要集中在第2跖骨处。章浩伟等<sup>[11]</sup>通过有限元分析发现,足底筋膜应力集中分布在第2、3、4根筋膜上,且第3根筋膜所承受应力最大,裸足情况下第3跖骨头部位的应力最高。因此,结合第2、3跖骨受压结束百分比减小的结果,本文推断足底筋膜机能减退可能是导致老年人第2、3跖骨区域负荷减小的原因。此外,压力和压强相关参数显性结果较少,而国内前

述研究中老年人和年轻人不同足底分区的比较有较大差异,推测导致实验结果明显不同的原因与测试动作和实验采集装置有关。日常生活绝大多数活动均在穿鞋情况下进行,鞋垫式压力测试系统在测量中更加贴近生活实际<sup>[12]</sup>。因此,本文认为,鞋垫式测试系统的测量结果更加具有说服力。

老年人整个足底、第4、5跖骨和4个小脚趾的时间压强积分以及整个足底、足跟和4个小脚趾的时间压力积分明显大于年轻组。时间压力的积分即为冲量,它表示力在一定时间内对足底各区域连续作用所产生的累计效应<sup>[13]</sup>。根据动量定律可知,足底产生的动量向上传导需要踝、膝关节周围肌肉的收缩作用将其吸收,故时间压力积分的增加将增加下肢神经肌肉控制的难度。时间压强积分将压力、时间和受力面积3个因素综合在一起考虑,可反映足底不同分区单位面积上力在时间上的累计效应<sup>[14]</sup>。综合时间压力积分和时间压强积分的比较结果发现,老年人在蹬离地面时4个小脚趾部的负荷出现明显增加,推测与趾长屈肌和趾短屈肌的屈趾作用增强有关。增强的屈趾作用可以代偿第2、3跖骨足底筋膜机能的减退,增强前掌的蹬伸效果,并且增加足底的本体感觉反馈,提高老年人的姿势稳定。在传统健身气功、太极拳的练习中要求练习者“五趾抓地”,这样可以起到稳定身体的功效,而脚趾屈曲对于人体姿势控制的影响还鲜有报道,希望有更多的循证研究揭示其背后的机制。

## 4 结论

完成相同的姿势挑战时,足底筋膜机能减退可能是老年人姿势控制能力下降的主要原因之一,趾长屈肌和趾短屈肌的屈趾作用增强对老年人姿势稳定性提高有一定的代偿作用。

## 参考文献:

- [1] 许晓峰,李世森,邸建勇. 老年男性足底压力分布特征测试与分析[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(28): 5237-5240.  
 [2] 刘程程,元香南,张立新,等. 老年人与健康大学生平地行

走时足底压力特征比较[J]. 中国康复理论与实践, 2015, 21(5): 544-548.

- [3] 李立,陈玉娟,翟凤鸣,等. 老年人与青年人足底压力分布特征比较[J]. 中国老年学杂志, 2011, 31(23): 4574-4576.  
 [4] 马新颖,满喜. 不同年龄段人群行走足底压力特征分析[J]. 医用生物力学, 2020, 35(1): 108-113.  
 MA XY, MAN X. Analysis on characteristics of plantar pressures in different age groups during walking [J]. J Med Biomech, 2020, 35(1): 108-113.  
 [5] KERNOZEK TW, LAMOTT EE. Comparisons of plantar pressures between the elderly and young adults [J]. Gait Posture, 1995, 3(3): 143-148.  
 [6] GIMUNOVÁ M, ZVONA ŘM, MIKESKA O. The effect of aging and gender on plantar pressure distribution during the gait in elderly [J]. Acta Bioeng Biomech, 2018, 20(4): 139-144.  
 [7] HESSERT MJ, VYAS M, LEACH J, et al. Foot pressure distribution during walking in young and old adults [J]. BMC Geriatr, 2005, 5: 8.  
 [8] HONG Y, WANG SJ, LAM WK, et al. Kinetics of badminton lunges in four directions [J]. J Appl Biomech, 2013, 30(1): 8-13.  
 [9] SCHUH R, SALZBERGER F, WANIVENHAUS AH, et al. Kinematic changes in patients with double arthrodesis of the hindfoot for realignment of planovalgus deformity [J]. J Orthop Res, 2013, 31(4): 517-524.  
 [10] 孙天赦. 老年人常速与快速行走足底压力分布特征分析 [D]. 长春: 东北师范大学, 2007.  
 [11] 章浩伟,李磊,刘颖,等. 个性化足跟痛缓冲鞋垫的生物力学研究[J]. 医用生物力学, 2018, 33(1): 30-36.  
 ZHANG HW, LI L, LIU Y, et al. Biomechanical study of personalized buffer insoles for heel pain [J]. J Med Biomech, 2018, 33(1): 30-36.  
 [12] 杨阳,蒲放,钱雅君,等. 日常运动时足底压力实时检测方法研究[J]. 医用生物力学, 2011, 26(4): 299-304.  
 YANG Y, PU F, QIAN YJ, et al. Real-time plantar pressure measurement for monitoring exercise load in daily life activities [J]. J Med Biomech, 2011, 26(4): 299-304.  
 [13] 宁梓涵,高熈祺,陈志遥,等. 后仰跌倒人体撞击加速度及冲量分析[J]. 医用生物力学, 2018, 33(6): 551-557.  
 NING ZH, GAO MQ, CHEN ZY, et al. Analysis on impact acceleration and impulse during backward falling [J]. J Med Biomech, 2018, 33(6): 551-557.  
 [14] 潘永雄,陈锦,王大伟,等. 足底压力测试系统的常用步态分析指标[J]. 临床医学工程, 2018, 25(9): 1267-1269.