

# 前伸实验中姿势稳定性的年龄差异研究\*

康湘莲<sup>1</sup> 王 威<sup>2</sup> 岳寿伟<sup>2</sup> 李 可<sup>1,3</sup>

## 摘要

**目的:**探究老化对人体站立平衡控制能力的影响。

**方法:**招募14例老年人和14例青年人进行站立前伸实验,计算稳定极限的保持过程中双足与单足的压力中心(center of pressure, COP)信号的95%置信椭圆面积、平均距离和平均移动速度,并对COP信号进行去趋势波动分析和交叉递归定量分析。

**结果:**相较于青年组,老年组双足和右足COP信号的95%置信椭圆面积,老年组的双足、左足和右足中的平均距离,以及平均速度均显著增大,老年组双足和左足的COP信号标度指数值均显著增大,老年组足内COP信号对中左足和右足的确定性值、左足的熵值、双足和右足的递归度,以及双足及左右单足的平均对角线长度显著增大;在老年组的足间COP信号对中这些参数均显著增大。

**结论:**老年人COP轨迹的路径偏差增大,平衡控制精度降低。老年人COP信号动力学结构更加规则,运动控制模式僵化,对于平衡扰动的适应性降低,跌倒概率增加。本研究揭示了老化对动态平衡稳定性的影响,为老年人站立平衡能力的准确客观评估和跌倒风险的预防提供了新的见解。

**关键词** 足底压力中心;前伸实验;老化;站立平衡;交叉递归定量分析;去趋势波动分析

**中图分类号:**R493,R563.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2022)-11-1471-07

Effects of aging on postural stability for standing in a reaching forward test/KANG Xianglian, WANG Wei, YUE Shouwei, et al//Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2022, 37(11): 1471—1477

## Abstract

**Objective:** To explore the effects of aging on human standing balance control ability.

**Method:** Fourteen elderly people and 14 young people were recruited for the reaching forward experiment. The 95% confidence ellipse area, mean distance and mean speed of the center of pressure (COP) signals of the whole body, left foot and right foot during the maintenance of the stability limit were calculated. The COP signal was analyzed by detrended fluctuation analysis and cross recurrence quantification analysis simultaneously.

**Result:** Compared with the youth group, the 95% confidence ellipse area of COP signal in the whole body and right foot, the mean distance and mean speed in the whole body, left foot and right foot in the elderly group increased significantly. The scale index values of COP signal in the whole body and left foot of the elderly group increased significantly. In the elderly group, the determinism of COP signal pairs in the left and right feet, the entropy in the left foot, the degree of recursion in the whole body and right foot, and the mean diagonal length in the whole body, left foot and right foot increased significantly; and these parameters were significantly increased in the inter foot COP signal pair in the elderly group.

**Conclusion:** The path deviation of COP trajectory increases and the balance control accuracy decreases in the elderly. The dynamic structure of COP signal in the elderly is more regular and determined, the motion control

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2022.11.006

\*基金项目:国家自然科学基金项目(62073195);山东省重点研发计划项目(2019GSF108164,2019GSF108127);山东省重大创新工程项目(2019JZZY021010)

1 山东大学控制科学与工程学院,山东省济南市,250000; 2 山东大学齐鲁医院; 3 通讯作者

第一作者简介:康湘莲,女,硕士研究生; 收稿日期:2022-02-17

mode is rigid, the adaptability to balance disturbance is reduced, and the probability of falling is increased. This study reveals the impact of aging on the stability of dynamic balance, and provides new insights for the accurate and objective evaluation of standing balance ability and the prevention of fall risk in the elderly.

**Author's address** School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, 250014

**Key word** center of pressure; forward reaching; aging; standing balance; cross recurrence quantification analysis; detrended fluctuation analysis

平衡指的是人体处在稳定状态下或受到外力作用时,能自动感知身体重心并通过肢体运动将重心控制在支撑面内的特性或行为。与衰老相关的生理过程会影响老年人应对意外平衡扰动的能力,从而导致跌倒风险增加<sup>[1]</sup>。世界卫生组织的调查表明,60岁以上成年人遭受致命跌倒的次数最多,跌倒已成为老年人受伤的第二大常见原因<sup>[2]</sup>。

目前研究者们已经提出了多种平衡测试方法,从简单的静态姿态测试<sup>[3]</sup>到更具挑战性的动态姿势测试<sup>[4-5]</sup>。研究表明,与简单的安静姿势测试相比,主动运动或外部扰动影响姿势平衡的测试具有更高的预测老年人跌倒的能力<sup>[6]</sup>。压力中心(center of pressure, COP)的轨迹与身体质心的运动密切相关,体现了脚下作用力的瞬时平均位置,可以作为平衡控制的有效指标。如今,传统的线性时频域分析方法已广泛应用于COP信号的分析。这些传统线性参数在过去20年中已被许多研究者验证,得到的结果也更为简单直观。但由于人体生理活动的复杂性,COP信号也表现出非平稳、非线性、时变的复杂特性。而传统线性分析方法易受到噪声和扰动的影响,在分析COP信号时存在一定局限性。因此,选择分析方法时应该兼顾到姿势摇摆的非线性和随时间演变的趋势。许多非线性动力学算法已经广泛应用于COP信号分析中,这些方法能够对信号的变化性和稳定性进行时变分析,提供更多关于控制过程的信息,并揭示在没有外界干扰情况下产生的姿态自发波动的重要结构,是量化姿势变化性和稳定性的一种相对较新的方法<sup>[7]</sup>。

本研究拟通过对手臂最大限度前伸过程中COP信号的线性时域分析以及非线性动力学分析探究老化对人体平衡控制能力的影响。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

本研究将受试者分为青年组和老年组,其中青年组的入组标准为:年龄在20—30岁之间,身体健康。老年组的入组标准为:年龄在60—70岁之间,身体健康,无影响站立平衡的基础疾病。受试者均无下肢神经、肌肉、骨骼系统疾病或损伤历史,无晕动症或前庭系统疾病,视力正常或矫正后视力正常,且近期末服用可能影响平衡能力的药物。最终招募了14例健康老年受试者以及14例健康青年受试者参与实验。样本量通过功效分析确定。受试者基本信息如表1所示。本研究符合赫尔辛基宣言,获得了山东大学伦理审查委员会批准[KYLL-2019(KS)-170],受试者均了解实验内容并在实验前签署知情同意书。

表1 受试者基本信息 ( $\bar{x}\pm s$ )

年龄组	性别 (男/女)	年龄 (岁)	身高 (cm)	体重 (kg)	BMI
老年组	8/6	65±5	165.75±13.75	69.25±13.75	22.39±1.29
青年组	6/8	24±3	171.5±13.5	63.75±16.25	21.02±1.85

### 1.2 实验仪器

本研究使用了德国Zebris公司生产的FDM-S压力平板(传感器总表面:540×330mm<sup>2</sup>,传感器个数:64×40),以60Hz的采样频率采集足底压力的分布数据。此外,本研究在压力平板周围铺放了海绵垫和扶手以免受试者跌倒受伤。

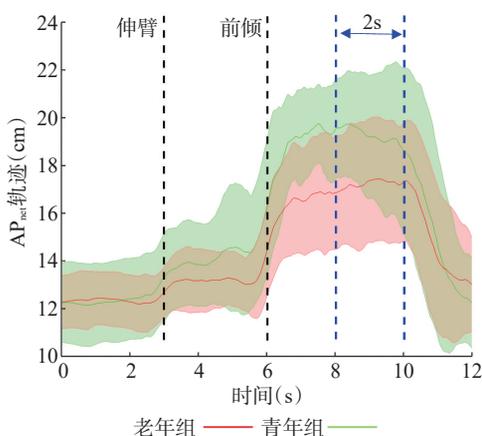
### 1.3 实验流程

受试者正直站立在压力平板上,在实验开始3s后收到“伸臂”命令,受试者将双臂向前平举,保持躯干直立。在实验开始6s后程序发出“前倾”命令,此时要求受试者在脚跟不离地的情况下手指尽量向前伸够,并在最大距离处保持3s直到实验结束(图1)。每个受试者进行3次实验,每次实验持续约10s,2次实验期间静坐休息30s。在实验开始之前,允许受试者进行一次练习以熟悉实验流程。

### 1.4 分析方法

选取前伸到达最大距离时较为平稳的2s数据为感兴趣区域(图1)。我们将COP信号分为前后(anterior-posterior, AP)方向和左右(medial-lateral, ML)方向2个一维信号进行后续分析。本研究分别计算了所有受试者双足、左足以及右足COP信号的传统时域参数:椭圆面积(area)<sup>[8]</sup>,平均移动距离(mean distance, MDIST)<sup>[9]</sup>和平均移动速度(mean velocity, MVELO)<sup>[10]</sup>。其中,椭圆面积由包含COP轨迹中95%的点的椭圆面积来表示,MDIST表示COP轨迹沿均值上下波动的距离之和,MVELO表示平均COP运动速度,这些参数值的增大均与平衡功能的下降密切相关。

图1 实验过程中受试者AP方向双足COP信号轨迹



由于COP信号具有非线性、非平稳、时变的复杂特性,传统的时频域分析方法易受到噪声、扰动等干扰,在使用时存在一定局限性。为使分析更加全面,我们还使用了非线性动力学方法:去趋势波动分析(detrended fluctuation analysis, DFA)以及交叉递归定量分析(cross recurrence quantification analysis, CRQA)对信号的确定性和随机性进行研究。DFA是分形分析中的一种,它能通过计算时间序列的标度指数提供有关信号相关特性的信息,即使在时间序列显然是非平稳的情况下,也可以揭示长程相关性的存在<sup>[11]</sup>,已被证明在测量COP信号标度时具有很高的可靠性<sup>[12]</sup>。而CRQA可以通过比较交叉图结构来分析2个不同系统之间的依赖关系<sup>[13]</sup>。目前,CRQA已成为评估非线性、非平稳神经生理信号动态协调的高级工具,并被用于分析AP和ML方向

之间的COP信号动力学耦合<sup>[12]</sup>。从CRQA得出的度量提供了对系统确定性或随机分量的结构复杂性和周期性模式的见解,这些都是AP和ML方向上动态COP信号协调的基础。

我们对所有受试者的3个足内信号对(双足:AP<sub>net</sub>-ML<sub>net</sub>,左足:AP<sub>left</sub>-ML<sub>left</sub>,右足:AP<sub>right</sub>-ML<sub>right</sub>)和2个足间同方向COP信号对(AP<sub>left</sub>-AP<sub>right</sub>和ML<sub>left</sub>-ML<sub>right</sub>),分别计算了4个常用的CRQA量化参数:递归度(recurrence rate, RR)、确定性(determinism, DET)、熵(entropy, ENT)和平均对角线长度(mean diagonal line length, L<sub>mean</sub>)<sup>[14]</sup>。其中,RR是递归图中递归点的百分比,其值越大代表信号间相关性越高;DET是递归图中构成45°对角线结构的递归点的百分比,能够反映轨道周期的递归程度,其值越大表明信号间动力学耦合的确定性越强;ENT能够度量系统结构的多样性,其值越大说明系统结构越复杂;L<sub>mean</sub>是递归图中所有对角线的平均长度,用于度量递归图的平均可预测时间,反映了系统的随机性。此外,本研究还使用DFA分别计算了受试者双足、左足和右足的COP信号在AP和ML方向的标度指数 $\alpha$ 以分析信号的长程相关性。

### 1.5 统计学分析

采用SPSS 23.0软件进行统计分析。分析前将3次测试的结果进行平均。使用Shapiro-Wilk检验分析数据的正态性,若数据符合正态分布则使用独立样本 $t$ 检验来进行各参数组间差异性的比较,反之则使用Mann-Whitney  $U$ 检验进行分析。所有统计图均使用OriginPro 2021b绘制。统计结果用均数 $\pm$ 标准差表示。当 $P<0.05$ 时认为结果存在显著性差异。

## 2 结果

传统时域参数的统计分析结果显示,老年组的COP轨迹拟合椭圆面积大于青年组,且在双足以及右足中观察到了显著性差异(双足: $t=2.675$ , $P=0.017$ ;右足: $P=0.039$ )。我们还发现,老年组双足、左足及右足的MDIST和MVELO均显著大于青年组(MDIST<sub>net</sub>: $t=2.832$ , $P=0.009$ ;MDIST<sub>left</sub>: $t=3.059$ , $P=0.005$ ;MDIST<sub>right</sub>: $t=2.302$ , $P=0.03$ ;MVELO<sub>net</sub>: $t=2.445$ , $P=0.022$ ;MVELO<sub>left</sub>: $t=2.235$ , $P=0.034$ ; $t=2.519$ , $P=0.018$ ),在其他情况下未观察到显著性差

异( $P>0.05$ )(图2)。

DFA的统计分析结果显示,在AP和ML方向,无论是左足、右足还是双足,老年组的COP信号标度指数 $\alpha$ 值均大于青年组,并在双足和左足中观察到了显著性差异( $AP_{net}: t=2.234, P=0.034; AP_{left}: t=3.001, P=0.006, ML_{net}: t=3.565, P=0.001; ML_{left}: t=2.649, P=0.014$ ),在其他情况下未观察到显著性差异( $P>0.05$ )(图3)。

受试者足内CRQA的统计分析结果显示:老年组的DET值在左足和右足上显著大于青年组( $AP_{left}-ML_{left}: t=3.460, P=0.002; AP_{right}-ML_{right}: t=4.137, P<0.001$ ),ENT值在左足和右足上显著大于青年组( $AP_{left}-ML_{left}: t=3.073, P=0.005; AP_{right}-ML_{right}: t=3.860, P=0.001$ ),老年组的双足和右足的RR值显著

高于青年组( $AP_{net}-ML_{net}: t=2.443, P=0.022; AP_{right}-ML_{right}: t=2.361, P=0.026$ );老年组双足、左足以及右足的 $L_{mean}$ 值显著高于青年组( $AP_{net}-ML_{net}: t=2.626, P=0.014; AP_{left}-ML_{left}: t=3.495, P=0.002; AP_{right}-ML_{right}: t=2.640, P=0.014$ ),在其他情况下未观察到显著性差异( $P>0.05$ )(图4)。

受试者足间CRQA的统计分析结果表明,老化对足间COP动力学耦合的影响十分显著。与青年相比,老年组无论在AP方向( $DET: t=3.517, P=0.002; ENT: t=2.933, P=0.007; RR: t=2.445, P=0.022; L: Z=-2.527, P=0.007$ )还是ML方向的DET值、ENT值、RR值和 $L_{mean}$ 值均显著增大( $DET: t=3.123, P<0.001; ENT: t=4.521, P<0.001; RR: t=2.204, P=0.037; L: t=4.348, P<0.001$ )(图4)。

图2 COP信号经典线性参数统计分析结果图

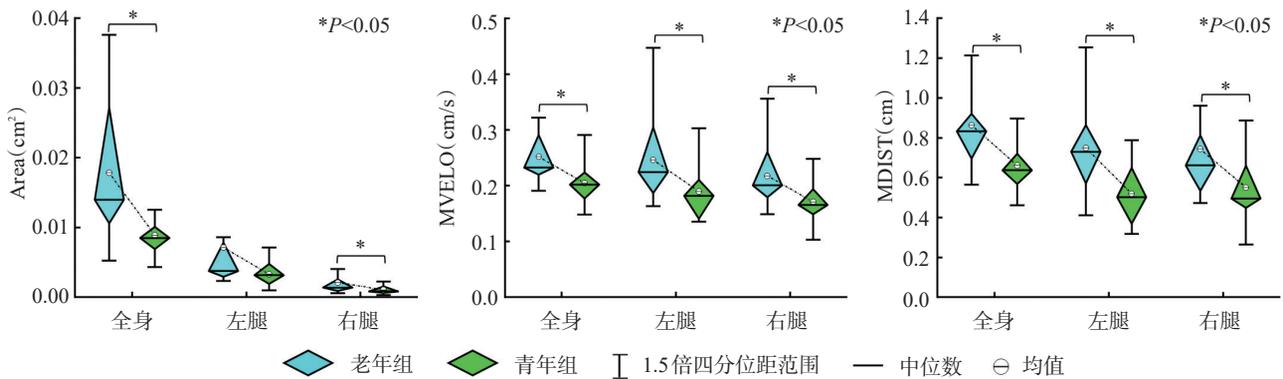


图3 COP信号的DFA统计分析结果图

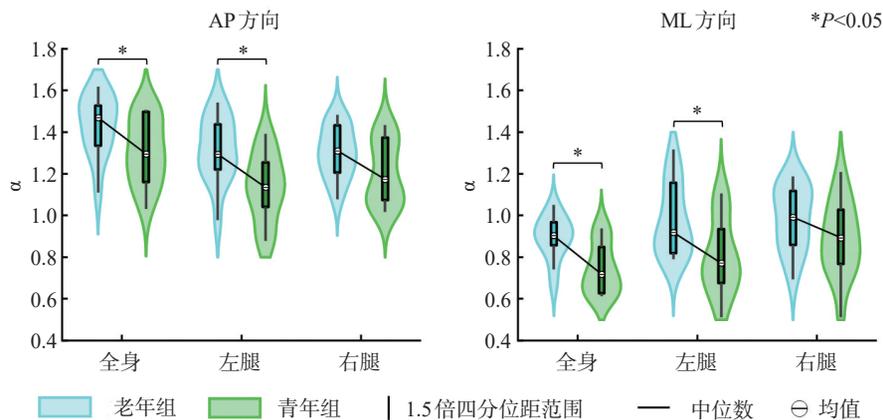
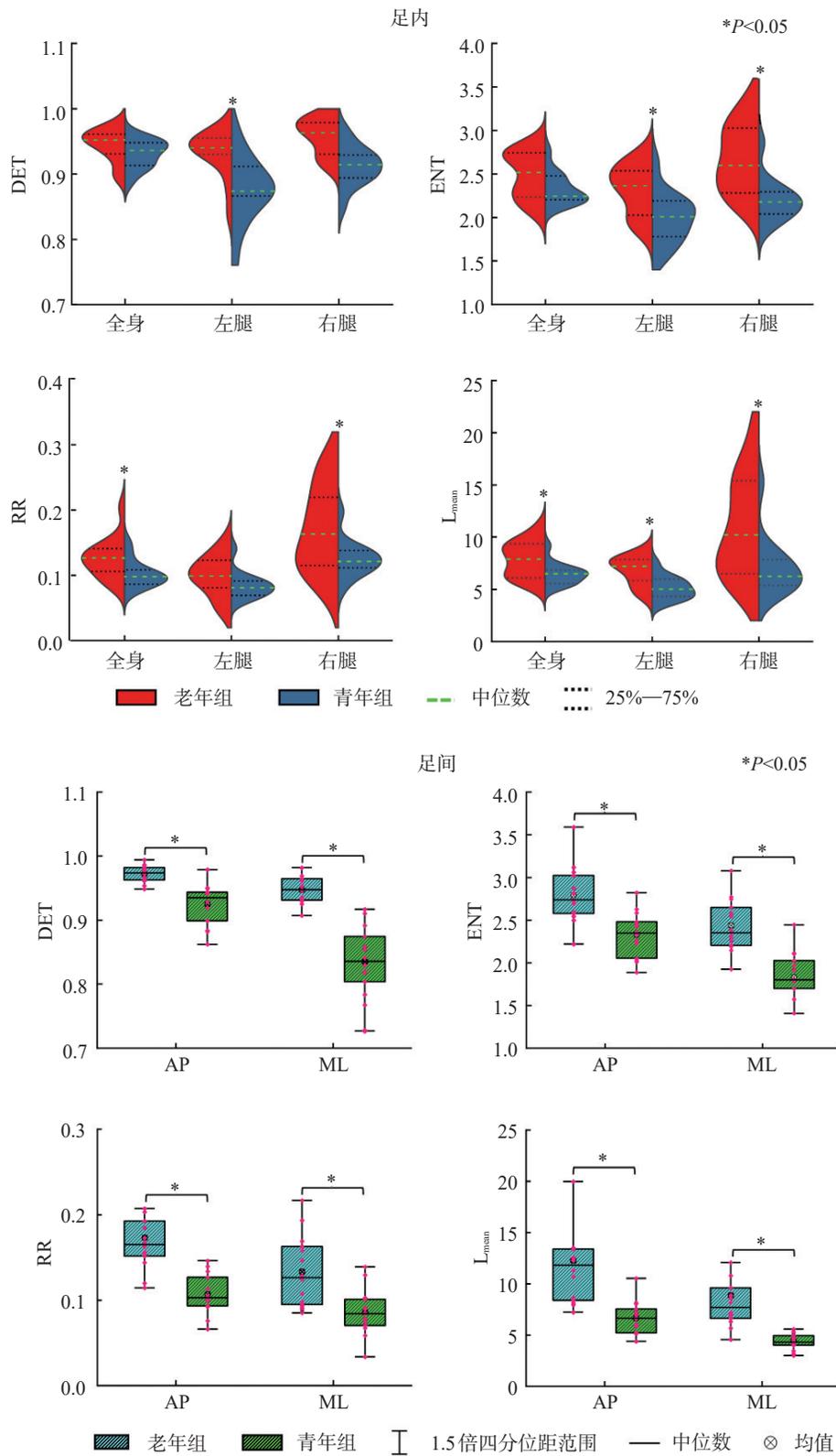


图4 足内、间 COP 信号对 CRQA 统计分析结果图



### 3 讨论

研究表明,17.3%的老年人跌倒发生在伸手或倾斜时。站立前伸任务涉及腿、髋关节和躯干关节的运动,是检测老年人跌倒风险的重要方法。Huang MH等<sup>[2]</sup>在对站立伸够任务过程中姿势平衡控制的年龄差异研究中发现,在站立在原地的向前伸手抓取任务中,COP路径偏差的年龄相关性增加,老年人在执行任务时的COP路径偏差较大。Huang MH等<sup>[15]</sup>研究了在站立在原地伸手到达不同高度的目标时姿势控制的年龄差异,研究结果表明,老年人可以通过改变预期姿势平衡来保持姿势稳定,但在运动执行过程中对COP的控制会随着年龄的增长而减弱。本研究探究了健康老年人与健康年轻人在站立前伸时平衡控制能力的年龄差异,我们使用了传统和非线性研究方法对保持稳定极限的姿势控制过程中采集到的COP数据进行分析。

传统参数的分析结果显示,老年人的COP信号拟合椭圆面积更大,运动总路程更长且平均运动速度更高。这体现了老年人COP信号的路径偏差增大,信号波动性增加。COP路径偏差与年龄相关的增加可能反映了生理系统随着衰老而下降的适应性调整<sup>[16]</sup>。这种与年龄相关的COP位移的增加可能用作获取用于姿势控制的感官信息的探索性策略<sup>[17]</sup>。较大的COP位移可以为视觉、前庭和体感系统提供持续的感觉流入,使中枢神经系统可以更好地整合感觉信息以准确表达身体姿势<sup>[17]</sup>。老化导致中枢神经系统衰退,可能使老年人需要更多的信息输入以维持平衡。因此,老年人可能会通过增加COP运动以获取额外的感官信息,为增强姿势稳定性做出努力。

对COP信号的标度指数 $\alpha$ 值进行分析时,我们发现老年组的 $\alpha$ 值相较于青年组显著升高。COP信号 $\alpha$ 值增大代表其动力学结构变异性降低,动力学结构变异性的降低与人体老化后的神经功能退化有关<sup>[18]</sup>,表明人体丢失了一部分运动灵活度<sup>[19]</sup>。因此,研究结果说明了老年人在动态平衡控制过程中感觉运动整合能力的不足以及平衡控制的神经功能缺陷,即皮层本体感觉处理能力衰退导致相关的平衡控制功能降低。此外,在DFA结果中,青年组与老年组单足的显著性差异主要出现在左足。Ge-

schwind N等<sup>[20]</sup>的研究发现,站立过程中优势足与优势手同侧,本研究招募的受试者均为右利手者,优势足应为右足。Haddad JM等<sup>[21]</sup>在对站立过程中的姿态不对称的研究中发现,非优势足在站立过程中会表现出更强的灵活性。King AC等<sup>[22]</sup>在对双足的对称性与不对称性研究中也发现,非优势足会表现出更高的灵活性以弥补优势足因承重而造成的灵活性降低。这些发现或许能够解释为何本研究在左足中观察到的组间差异比右足更明显。

对足内COP信号对的CRQA参数统计结果发现,老年组各参数均大于青年组,且在多种条件下观察到显著性差异,这说明老化会显著影响足内COP信号对在AP和ML方向间的动力学耦合。这些参数量化了COP信号对之间的时空特性和规律性, $L_{mean}$ 的增加表示信号动力学耦合可预测性增大,DET的增加表示其结构确定性提高,RR值的增加表示相空间中系统重现的概率变大<sup>[4]</sup>,ENT值增大代表系统内结构变异性升高<sup>[13]</sup>。因此,结果说明了老年人肢体内COP信号动力学结构更加规则和确定,耦合过程中确定性结果的复杂性增加<sup>[12]</sup>。

对足间COP信号对的CRQA参数统计结果表明,老年组各参数均显著大于青年组,这可能是由于老化影响了AP和ML方向上肢体间COP信号的动力学耦合。老年人 $L_{mean}$ 、RR、DET、ENT值的显著提高,说明在稳定极限站立过程中两足在冠状面和矢状面均表现出更一致的COP位移,足间运动协调性更加程序化,灵活性降低。更加严格的姿势约束迫使老年人更加注意当前平衡的维持,而不是为应对外来干扰做准备<sup>[12]</sup>,年龄相关的复杂性丧失使运动动态更规律,但适应性更差。僵化的姿势行为会导致扰动过程中平衡功能失调<sup>[23]</sup>,即老年人更难以应对突发的平衡问题,跌倒风险增大。

本研究结果表明:老化导致老年人平衡控制精度降低,运动控制模式僵化,对于平衡扰动的适应性更差导致跌倒概率增加。本研究揭示了老化对动态平衡稳定性的影响,为老年人站立平衡控制能力的准确客观评估和跌倒风险的预防提供了新的见解。本研究局限性在于:未曾检测生物学指标对受试者的老化程度进行更详细说明,后续研究中会注意采集受试者的生物学指标以提高研究的科学性。

## 参考文献

- [1] Lauzier L, Kadri MA, Bouchard E, et al. Vibration of the whole foot soles surface using an inexpensive portable device to investigate age-related alterations of postural control [J]. *Front Hum Neurosci*, 2021(15):719502.
- [2] Huang MH, Brown SH. Effects of task context during standing reach on postural control in young and older adults: a pilot study[J]. *Gait Posture*, 2015, 41(1):276—281.
- [3] Nardone A, Schieppati M. The role of instrumental assessment of balance in clinical decision making[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2010, 46(2):221—237.
- [4] Sarabon N, Zacirkovnik T, Rosker J, et al. Metric characteristics of the tests for dynamic balance evaluation[J]. *Physikalische Medizin, Rehabilitationsmedizin, Kurortmedizin*, 2013, 23(3):135—146.
- [5] Liu H, Xing Y, Wu Y. Effect of wii fit exercise with balance and lower limb muscle strength in older adults: a meta-analysis[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2022(9):812570.
- [6] Pai YC, Wang E, Espy DD, et al. Adaptability to perturbation as a predictor of future falls: a preliminary prospective study[J]. *J Geriatr Phys Ther*, 2010, 33(2):50—55.
- [7] Asghari M, Ehsani H, Cohen A, et al. Nonlinear analysis of the movement variability structure can detect aging-related differences among cognitively healthy individuals[J]. *Hum Mov Sci*, 2021(78):102807.
- [8] Prieto TE, Myklebust JB, Hoffmann RG, et al. Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 1996, 43(9):956—966.
- [9] Krawczyk-Suszek M, Martowska B, Sapuła R. Analysis of the stability of the body in a standing position when shooting at a stationary target—a randomized controlled trial[J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(1):368.
- [10] Šarabon N, Kozinc Ž, Marković G. Effects of age, sex and task on postural sway during quiet stance[J]. *Gait Posture*, 2022(92):60—64.
- [11] Kędziorek J, Błażkiewicz M. Nonlinear measures to evaluate upright postural stability: a systematic review[J]. *Entropy (Basel)*, 2020, 22(12):1357.
- [12] Li J, Zhang Y, Song S, et al. Dynamical analysis of standing balance control on sloped surfaces in individuals with lumbar disc herniation[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1):1676.
- [13] Marwan N, Romano MC, Thiel M, et al. Recurrence plots for the analysis of complex systems[J]. *Physics Reports*, 2007, 438(5—6):237—329.
- [14] McCamley J, Bergamini E, Grimpampi E. Balance on different unstable supports: a complementary approach based on linear and non-linear analyses[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2022, 60(3):863—873.
- [15] Huang MH, Brown SH. Age differences in the control of postural stability during reaching tasks[J]. *Gait posture*, 2013, 38(4):837—842.
- [16] Quijoux F, Nicolai A, Chairi I, et al. A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: algorithms and open-access code[J]. *Physiol Rep*, 2021, 9(22):e15067.
- [17] Ko JH, Newell KM. Aging and the complexity of center of pressure in static and dynamic postural tasks[J]. *Neurosci Lett*, 2016(610):104—109.
- [18] Moreno FJ, Caballero C, Barbado D. Postural control strategies are revealed by the complexity of fractional components of COP[J]. *J Neurophysiol*, 2022, 127(5):1289—1297.
- [19] Wang W, Xiao Y, Yue S, et al. Analysis of center of mass acceleration and muscle activation in hemiplegic paralysis during quiet standing[J]. *PLoS One*, 2019, 14(12):e0226944.
- [20] Geschwind N, Galaburda AM. Cerebral lateralization. biological mechanisms, associations, and pathology: III. a hypothesis and a program for research[J]. *Arch Neurol*, 1985, 42(7):634—654.
- [21] Haddad JM, Rietdyk S, Ryu JH, et al. Postural asymmetries in response to holding evenly and unevenly distributed loads during self-selected stance[J]. *J Mot Behav*, 2011, 43(4):345—355.
- [22] King AC, Wang Z, Newell KM. Asymmetry of recurrent dynamics as a function of postural stance[J]. *Exp Brain Res*, 2012, 220(3—4):239—250.
- [23] Raffalt PC, Spedden ME, Geertsen SS. Dynamics of postural control during bilateral stance: effect of support area, visual input and age[J]. *Hum Mov Sci*, 2019(67):102462.