

文章编号:1004-7220(2025)02-0316-07

动作任务与认知任务干扰对老年人下楼梯行走 身体动态稳定性的影响

付倩^{1a}, 闫晓芹^{1a}, 王疆娜^{1b}, 马刚², 孙威^{1b}

(1. 山东体育学院 a. 研究生教育学院; b. 运动与健康学院, 济南 250102; 2. 武警后勤学院, 天津 300309)

摘要:目的 探讨动作任务与认知任务干扰对老年人下楼梯行走身体稳定性的影响。方法 共招募 52 名老年受试者,使用 Vicon 红外动作捕捉系统与 Kistler 测力台,同步采集老年人下楼梯行走时单任务(single task, ST)、动作任务(manual task, MT)和认知任务(cognitive task, CT)3种模式下的运动学与动力学数据。通过引入动态稳度(margin of stability, MoS)算法,对老年人下楼梯行走的身体稳定性进行量化评定。应用重复测量方差分析比较不同任务各指标组内差异。结果 相比于 ST,老年人在 MT 和 CT 中步速显著减小($P<0.001$),步频显著降低($P<0.001$);老年人在 CT 中步长显著减小($P=0.037$)。前后方向身体动态稳定性指标方面,相比于 ST,老年人在 MT 和 CT 中质心速度显著增大($P<0.001$),外推质心的位置显著增大($P<0.001$),MoS 显著减小($P<0.001$);相比于 CT,老年人在 MT 中质心位移显著增大($P=0.011$),质心速度显著增大($P=0.014$),外推质心的位置显著增大($P<0.001$)。内外方向身体动态稳定性指标方面,相比于 ST,老年人在 MT 和 CT 中质心位移显著减小($P<0.001$);相比于 ST,老年人在 MT 中外推质心位置显著减小($P=0.001$),MoS 显著增大($P=0.038$)。结论 老年人下楼梯行走受到双任务干扰时,通过“减慢步速、降低步频、减小步长”的步态调整策略,内外方向的动态稳定性能够得到维持,但前后方向的动态稳定性仍显著降低,跌倒风险增大。

关键词: 双任务干扰; 老年人; 下楼梯; 动态稳度; 姿势控制

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2025.02.009

Effects of Motion and Cognitive Task Interventions on Dynamic Stability of the Body for Older Adults During Stair Descent

FU Qian^{1a}, YAN Xiaoqin^{1a}, WANG Jiangna^{1b}, MA Gang², SUN Wei^{1b}(1a. Graduate School; 1b. College of Sports and Health, Shandong Sport University, Ji'nan 250102, China;
2. Logistics University of People's Armed Police Force, Tianjin 300309, China)

Abstract: Objective To investigate how interference from motor and cognitive tasks affects the postural stability of older adults during stair descent. **Methods** A total of 52 elderly subjects were recruited. Using the Vicon infrared motion capture system and Kistler force plate, the kinematic and dynamic data were collected simultaneously during stair descent under three conditions: single task (ST), motor task (MT), and cognitive task (CT). The body stability during stair descent was assessed quantitatively using the margin of stability (MoS) algorithm. Repeated measures ANOVA was applied to compare differences across conditions. **Results** Compared to the ST condition, both step speed ($P<0.001$) and step frequency ($P<0.001$) were significantly

收稿日期:2024-08-23; 修回日期:2024-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(12402373,31700815),国家体育总局科技创新项目(24KJCX065)

通信作者:孙威,副教授,E-mail:sunwei841024@163.com

reduced under MT and CT conditions. Step length ($P = 0.037$) was also significantly reduced under the CT condition compared to those under the ST condition. In the aspect of anterior-posterior dynamic stability, compared to the ST condition, centroid velocity ($P < 0.001$) and extrapolated centroid position ($P < 0.001$) were significantly increased, while MoS ($P < 0.001$) was significantly decreased under both MT and CT conditions. In comparison to the CT condition, centroid displacement ($P = 0.011$) and velocity ($P = 0.014$), as well as extrapolated centroid position ($P < 0.001$), were significantly greater those under the MT condition. In the aspect of medial-lateral dynamic stability, compared to the ST condition, centroid displacement ($P < 0.001$) was significantly reduced under MT and CT conditions. Additionally, the extrapolated centroid position ($P = 0.001$) was significantly reduced, and MoS ($P = 0.038$) was significantly increased under the MT condition compared to those under the ST condition. **Conclusions** Older adults adjust their gait in response to dual-task interference during stairs descent by ‘slowing down step speed, reducing step frequency, and shortening step length’. This adjustment helps maintain medial-lateral dynamic stability, but significantly decreases anterior-posterior dynamic stability, thereby increasing the risk of falls.

Key words: dual-task interference; older adults; stair descent; margin of stability; postural control

流行病学调查显示,跌倒是 65 岁以上老年人的主要非致命伤害之一,且女性发生率高于男性,随年龄增长而增加^[1,2]。约 30% 的老年女性每年至少跌倒 1 次^[3]。在美国平均每年发生 1 076 558 例楼梯相关损伤^[4],其中下楼梯跌倒风险是上楼梯的 3 倍^[5],成为老年人日常生活的高危活动。因此,探究下楼梯时身体稳定控制下降问题对预防跌倒、降低损伤的发生至关重要。

老年人行走过程中身体稳定性控制已成为影响楼梯跌倒的首要因素^[6]。目前已有研究应用压强(center of pressure, CoP)相对于支撑面的位移^[7]、压强-质心(center of mass, CoM)的差值^[8]等指标来评估身体稳定性。静止时,维持平衡需要满足身体 CoM 的垂直投影落在支撑面内(base of support, BoS)^[9]。运动时,人体质心位置、质心速度、支撑面的组合是影响人体动态稳定性的关键因素^[10]。本文通过引入动态稳度(margin of stability, MoS)算法对老年人下楼梯行走的身体稳定性进行量化评定^[11]。该指标综合考虑了支撑面、质心位置以及速度联合因素对身体稳定性控制的影响,已经被用于膝骨关节炎患者平地行走^[12]、青年人下楼梯行走^[13]等研究。然而目前很少有研究使用 MoS 算法分析老年人下楼梯行走时身体动态稳定性的变化。

第二任务干扰是影响身体动态稳定性的重要因素。动作任务(motor task, MT)和认知任务(cognitive task, CT)是常用的第二任务,均会不同程

度地占用认知资源,影响人体稳定性控制^[14]。注意资源竞争模型认为注意资源容量有限,姿势控制和认知活动会竞争注意资源,如果两个任务资源需求总和超过了资源容量,将会导致姿势控制或认知活动的绩效下降^[15]。探究老年人在双任务范式中楼梯行走时的动态稳定性,有利于更好认识认知-姿势控制特征,为老年人高效地预防跌倒训练提供有效支撑。人体在执行双任务时导致身体稳定性下降^[16],然而在下楼梯过程中 CT 与 MT 对身体动态稳定性影响的差异尚不明确^[11,13]。

本文对比老年人在单任务(single task, ST)、MT 以及 CT 条件下下楼梯行走时身体动态稳定性指标的差异,探讨双任务干扰对老年人下楼梯行走身体动态稳定性的影响,为预防老年人下楼梯跌倒提供理论支持。本研究假设:双任务介入会显著降低下楼梯行走的步态参数及身体动态稳定性。

1 研究方法

1.1 研究对象

通过传单、手机微信以及现场招募宣传等方式招募 52 名老年受试者,年龄(66.8 ± 3.6)岁,身高(161 ± 4.3)cm,体重(61.6 ± 4.2)kg,简易精神量表(MMSE)得分(27.5 ± 1.7)分,均为认知功能正常,教育年限(10.8 ± 2.7)年,所有受试者优势腿均为右腿。受试者均了解实验目的、实验流程和潜在风险并签署知情同意书。本研究获得了山东体育学院伦理委员会的批准(2017103)。

1.2 纳入和排除标准

纳入标准:① 65岁以上健康老年女性;② 近半年无跌倒史;③ 双眼矫正视力1.0以上;④ 能够独立完成上下楼梯行走;⑤ 无任何神经系统类药物史,如安眠药、镇痛药、抗抑郁药等。排除标准^[16]:① 有严重心脑血管系统、呼吸系统疾病、神经系统疾病以及肌肉骨骼系统疾病;② 有视觉、前庭功能异常等影响姿势控制的疾病;③ 服用影响姿势控制能力的药物;④ MMSE得分<25分;⑤ 受教育年限≤5年。

1.3 仪器设备

1.3.1 模拟楼梯 模拟楼梯坡度约为30°,长约200 cm,宽约150 cm,高约100 cm,共包含6级台阶。其中每级台阶高约17 cm,深约29 cm。

1.3.2 三维测力台 两台 Kistler 测力台(9287BA和9281CA, Kistler 公司,瑞士)分别被安装在模拟楼梯第3、4台阶的凹槽内,用于采集动力学数据,采集频率设置为1 kHz。

1.3.3 红外运动捕捉系统 应用8个摄像头 Vicon 三维运动捕捉系统(Vicon Motion System 公司,英国)采集运动学数据,采样频率为100 Hz。实验过程中,将直径为14 mm 红外反光标记点(marker)粘贴于各解剖学标志点,并通过 Vicon Nexus 软件实现运动学和动力学数据的同步采集。

1.4 测试流程

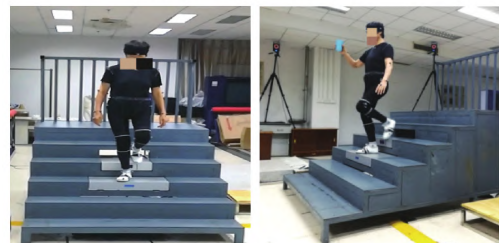
在实验前,受试者穿着统一测试服和鞋,完成身高、体重及优势腿测定。随后实验员参照 Visual 3D 模型为其粘贴41个直径14 mm 的反光球。热身5 min后,受试者在ST、MT、CT模式下进行随机下楼梯行走测试,受试者站在距离第6台阶前15 cm处准备,听到“开始”的口令后,先迈优势腿即右腿,按适宜速度采用“一步一台阶”的方式下楼梯,直至距离第1阶1 m处停止。

实验包括3种任务模式:① ST。无干扰下楼梯行走;② MT。受试者在楼梯行走的过程中优势侧手持一杯质量约为0.53 kg、水面距离杯口边缘的垂直距离为1 cm 盛水水杯,单次楼梯行走完成后,水杯中水量被重新标定^[17];③ CT。受试者在下楼梯过程中进行100~999之间随机3位数连续减3的数字运算^[18],测试人员给受试者观看3 s 随机生成的3位数,随后以“开始”口令,要求受试者同时进

行楼梯行走和数字运算,单次下楼梯行走完成后将重新更换3位数。受试者优势腿完全踏上测力台且测试中途未停顿、标记点无脱落为有效测试。在每个任务条件下,受试者均需进行3次有效测试。



(a) 红外反光球放置位置



(b) 单任务楼梯行走测试 (c) 动作任务楼梯行走测试

图1 实验测试

Fig. 1 Experimental measurement (a) Placement of infrared reflective balls, (b) Stair walking test for single task, (c) Stair walking test for motor task

1.5 数据处理

将采集的原始运动学与动力学数据经 Vicon Nexus 软件进行标记点的重命名、建模和删补等处理。随后导入 Visual 3D 数据处理软件,采用 Butter Worth 四阶数字低通滤波对数据进行滤波处理,截止频率分别为6、10 Hz^[18]。为保证数据的可靠性,受试者每次任务均选取3次有效的数据取平均值分析。

1.6 测试指标

1.6.1 MoS MoS 是评价稳定性控制能力的指标,为支撑面最远边界($B_{\max}$)到外推质心位置(extrapolated center of mass position, CM)的距离。描述的是人体质心位置-速度状态与动态稳定区域之间的关系^[10]。研究发现,摆动腿触地瞬间为最不稳定的时刻^[9]且由于步态的交替性和身体重心的转移,优势腿会承担更多的力量和稳定性控制^[19]。因此选取右脚触地时刻作为 MoS 比较分析。MoS 的值越大,表示 CM 与 CoP 之间的距离越长,稳定

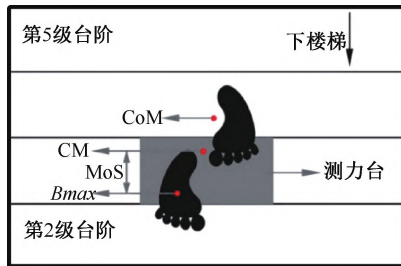


图2 下楼梯动态稳定示意图
Fig.2 Schematic diagram of dynamic stability during stair descent

注:CoM 为人体质心;CM 为外推质心; B_{max} 为支撑面最远边界;MoS 为动态稳定度。

性则越好。MoS 的计算公式如下^[9]:

$$\omega_0 = \sqrt{g/l} \quad (1)$$

$$CM = D_{CoM} + v_{CoM}/\omega_0 \quad (2)$$

$$MoS = B_{max} - CM \quad (3)$$

式中: ω_0 为人体倒置钟摆模型频率; g 为重力加速度; l 为人体质心到地面的垂直距离;CM 为外推质心; D_{CoM} 为质心位置; v_{CoM} 为质心速度; B_{max} 为支撑面最远边界,通过 CoP 的位置表示^[9,12]。

1.7 统计学分析

应用 SPSS 26.0 软件进行统计学分析,所有数据均采用(平均数±标准差)表示。本研究,自变量为 3 种任务模式(ST、MT、CT),因变量为 3 组受试者右脚触地时刻的 D_{CoM} 、 v_{CoM} 、CM、MoS 等身体稳定性指标及步态指标。应用单因素重复性方差分析对身体稳定性、步态指标进行统计学分析,若各指标存在任务模式(组内)间显著差异,则应用 Bonferroni 进行事后检验。显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

2 研究结果

2.1 步态指标

重复测量方差分析结果显示,受试者在 3 种任务条件下楼梯行走时,步速($P<0.001$, $\eta_p^2=0.401$)、步长($P=0.019$, $\eta_p^2=0.076$)、步频($P<0.001$, $\eta_p^2=0.311$)差异具有显著性。事后分析结果表明,受试者下楼梯行走中与 ST 相比,CT 和 MT 介入后老年人步速显著减小($P<0.001$, Cohen's $d=0.855$; $P<0.001$, Cohen's $d=1.117$),步频显著降低($P<0.001$, Cohen's $d=0.742$; $P<0.001$, Cohen's

$d=0.965$);与 ST 相比,CT 介入后老年人步长显著减小($P=0.037$, Cohen's $d=0.447$),见图 3。

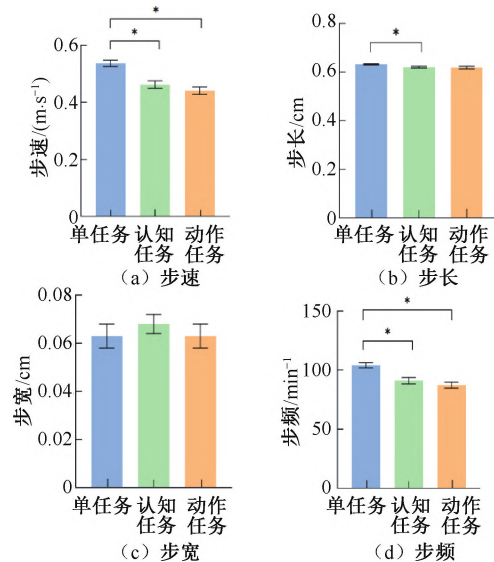


图3 老年人下楼梯行走步态指标对比

Fig.3 Comparison of gait indicators for older adults during stair descent (a) Step speed, (b) Step length, (c) Step width, (d) Step frequency

注:与 ST 相比,* $P<0.05$ 。

2.2 下楼梯前后方向身体动态稳定性指标

重复测量方差分析结果显示,受试者在 3 种任务下楼梯行走时的 CoM_{ap} ($P=0.002$, $\eta_p^2=0.118$)、 v_{CoM-ap} ($P<0.001$, $\eta_p^2=0.434$)、 CM_{ap} ($P<0.001$, $\eta_p^2=0.363$)、 MoS_{ap} ($P<0.001$, $\eta_p^2=0.167$) 差异具有显著性。事后分析结果表明,受试者下楼梯行走中与 ST 相比,CT 和 MT 介入后老年人 v_{CoM-ap} 显著增大 ($P<0.001$, Cohen's $d=0.826$; $P<0.001$, Cohen's $d=1.218$), CM_{ap} 显著增大 ($P=0.001$, Cohen's $d=0.356$; $P<0.001$, Cohen's $d=0.856$), MoS_{ap} 显著减小 ($P=0.002$, Cohen's $d=0.427$; $P=0.001$, Cohen's $d=0.592$);与 CT 相比,MT 介入后老年人 CoM_{ap} 显著增大 ($P=0.011$, Cohen's $d=0.426$), v_{CoM-ap} 显著增大 ($P=0.014$, Cohen's $d=0.478$), CM_{ap} 显著增大 ($P<0.001$, Cohen's $d=0.521$),见图 4。

2.3 下楼梯内外方向身体动态稳定性指标

重复测量方差分析结果显示,受试者在 3 种任务下楼梯行走时的 CoM_{ml} ($P<0.001$, $\eta_p^2=0.178$)、 CM_{ml}

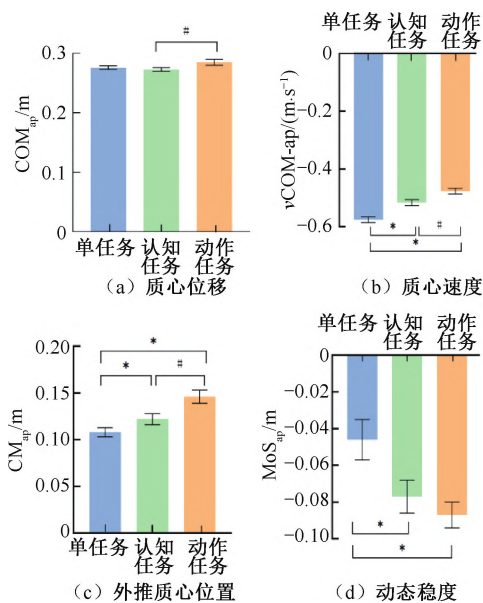


图4 老年人下楼梯行走右脚触地时刻前-后方向身体动态稳定性指标对比

Fig. 4 Comparison of the dynamic stability index in anterior-posterior (AP) direction for older adults at the moment of touching the ground with right foot during stairs descending (a) Center of mass displacement, (b) Center of mass velocity, (c) Extrapolated center of mass position, (d) Margin of stability

注: CoM_{ap} 、 v_{CoM-ap} 、 CM_{ap} 、 MoS_{ap} 分别表示前后方向上质心位移、质心速度、外推质心位置、动态稳度;与ST相比,* $P<0.05$;与CT相比,# $P<0.05$ 。下同。

($P=0.001$, $\eta_p^2=0.124$)、 MoS_{ml} ($P=0.020$, $\eta_p^2=0.074$) 差异具有显著性。事后分析结果表明,受试者下楼梯行走中与ST相比,CT和MT介入后老年人 CoM_{ml} 显著减小 ($P=0.012$, Cohen's $d=0.361$; $P<0.001$, Cohen's $d=0.598$);与ST相比,MT介入后老年人 CM_{ml} 显著减小 ($P=0.001$, Cohen's $d=0.510$), MoS_{ml} 显著增大 ($P=0.038$, Cohen's $d=0.384$),见图5。

3 讨论

本文探讨了在双任务模式介入下对老年人下楼梯时步态特征及右脚着地时刻前后和内外方向MoS的影响。结果显示,与ST相比,CT与MT介入后步速、步频显著降低,前后方向MoS显著减小。双任务模式降低了老年人下楼梯时前后方向的稳定性,提示老年人下楼梯行走受到双任务干扰时前后方向跌倒风险更大,该结果部分支持本文假设。

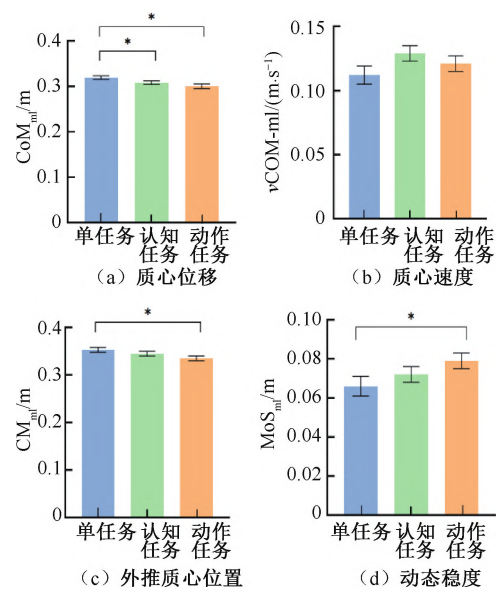


图5 老年人下楼梯行走右脚触地时刻内外方向身体动态稳定性指标对比

Fig. 5 Comparison of the dynamic stability index in medial-lateral (ML) direction for older adults at the moment of touching the ground with right foot during stair descent (a) Center of mass displacement, (b) Center of mass velocity, (c) Extrapolated center of mass position, (d) Margin of stability

身体的动态稳定性是指人体在运动过程中抵抗外部干扰、保持身体处于稳定状态而不跌倒的能力^[9,20]。MoS考虑了速度对稳定性的影响,通过量化运动中支撑面、质心位置及速度三者的实时关系来评价人体动态稳定性,可以反映瞬时时刻的动态稳定性^[9,21]。MoS为正值,表明人体处于稳定状态,且MoS越大,稳定性则越好^[9];MoS为负值,表明人体处于不稳定状态。本文发现,老年人在前后方向下楼梯行走中与ST相比,CT与MT介入后 v_{com} 、 CM 显著增大;MoS显著减小且为负值。与曹传宝等^[13]研究结果一致,在双任务介入后,MoS为负值,此时CM超出支撑面的前边界,下楼梯行走时身体稳定性显著降低。CM综合考虑了质心位置和速度对动态稳定性的影响,当质心速度增大时,会导致CM增大;根据倒立钟摆模型,MoS是CM到最远前边界的最小距离^[9],因此,CM增大会导致前后方向MoS降低,使人体处于不稳定状态,增大向前跌倒的风险。本文结果显示,老年人在前后方向下楼梯行走中与CT相比,MT介入后 CoM 、 v_{com} 、 CM 显著增大。双重

任务类型及负荷对姿势控制产生的影响不同^[22],低负荷双重任务介入时,与 CT 相比,MT 的介入对姿势控制产生消极影响。本文推测,低负荷 MT 介入后不足以诱发步态调整策略,但由于 MT 与下楼梯行走之间的注意资源竞争,姿势控制表现会因为注意资源不足而下降。

本文结果显示,老年人在内外方向下楼梯行走中与 ST 相比,CT 与 MT 介入后 CoM 显著减小。侧向姿势控制需要更为精细的质心调控能力,CoM 减小通常代表质心在内外侧方向上偏移减少,身体稳定性增强。该结果与 Zhang 等^[23]发现执行双任务使内外侧方向稳定性增加的结果一致。本文结果符合“姿势优先”的原理。该理论认为,当姿势控制和认知活动之间存在竞争关系时,注意资源优先被分配到姿势控制中,进而提高身体稳定性^[24]。本文还发现,老年人在内外方向下楼梯行走中与 ST 相比,MT 介入后 CM 显著减小、MoS 显著增大,而 CT 介入后 MoS 无显著性差异,提示 MT 介入会增加内外侧身体稳定性。人体侧向质心的稳定通过踝、髋关节的外展力矩相互配合来实现^[25],当 MT 介入时,踝、髋关节的外展肌群在神经肌肉系统的调控下协同工作。踝关节外展肌群首先产生外展力矩,快速调整足部位置以增大侧向支撑面积;髋关节外展肌群产生外展力矩,进一步调整骨盆和大腿的位置,以维持整个身体的侧向稳定性。

步态速度是衡量老年人身体稳定性的一个关键指标,步态速度每降低 0.1 m/s,老年人的跌倒风险会相应上升^[26-27]。本文结果显示,在下楼梯过程中,与 ST 相比,CT 与 MT 介入后步速显著下降,这与前人的研究结果一致,即双任务模式的介入会导致步速显著下降^[28-29]。Hollman 等^[30]研究表明,双任务影响楼梯行走时的步态特征,造成步态速度下降。老年人的姿势控制能力难以应对双任务需求,故主动采取“降低步速”策略进行下楼梯活动,以更好地控制身体稳定性,降低楼梯行走时的跌倒风险。刘鑫玥等^[31]研究发现,相比于 ST,CT 与 MT 介入后步频显著增加,该结果与本文结果不一致,推测与研究对象的差异有关。本研究对象为老年人,而刘鑫玥等^[31]研究对象为青年人。步频由脑干和脊髓控制的,反映了下肢神经肌肉的控制能力^[32],增龄易导致肌肉力量、骨骼密度和神经肌肉控制能

力逐渐下降。老年人在下楼梯行走时采用了“降低步频”的步态策略,以增强身体稳定性防止跌倒发生。本文结果显示,与 ST 相比,CT 介入后步长显著减小,有助于身体控制。老年人受到第二任务干扰时表现出“步速、步频下降,步长减小”,可能是一种旨在增加身体稳定性、防止跌倒的代偿性策略。

本研究存在一定的局限性:① 招募的受试者均为老年女性,未考虑存在的性别差异。后续可以招募不同性别、年龄段的老年人,以探究双任务干扰对老年人下楼梯行走身体动态稳定性的影响;② 认知任务和动作任务的类型较为单一,后续的研究可以探索不同类型和负荷双任务对老年人姿势控制的影响。

4 结论

老年人下楼梯行走受到双任务干扰时,通过“减慢步速、降低步频、减小步长”的步态调整策略,内外方向的动态稳定性能够得到维持,但前后方向动态稳定性仍显著降低,跌倒风险增大。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:孙威负责试验设计、论文修改;付倩、闫晓芹、马刚负责试验实施与数据分析处理;付倩负责论文撰写;王疆娜、孙威负责数据和论文校对。

参考文献:

- [1] 王疆娜,孙威. 老年女性太极拳锻炼者行走楼梯时身体姿势控制特征:双任务范式的生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(3): 383-389.
- [2] PENG K, TIAN M, ANDERSEN M, et al. Incidence, risk factors and economic burden of fall-related injuries in older Chinese people: A systematic review [J]. Inj Prev, 2019, 25(1): 4-12.
- [3] AKANDE-SHOLABI W, OGUNDIPE FS, ADEBUSOYE LA. Medications and the risk of falls among older people in a geriatric centre in Nigeria: A cross-sectional study [J]. Int J Clin Pharm, 2021, 43(1): 236-245.
- [4] BLAZEWEICK DH, CHOUNTHIRATH T, HODGES NL, et al. Stair-related injuries treated in United States emergency departments [J]. Am J Emerg Med, 2018, 36(4): 608-614.
- [5] 马刚,闫士芳,曹传宝,等. 老年人下楼梯下肢关节做功模式分析[J]. 医用生物力学, 2023, 38(5): 1010-1016.
MA G, YAN SF, CAO CB, et al. Analysis on mechanical

- work patterns of lower extremity joints in older adults during stair descent [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(5): 1010-1016.
- [6] KARAMANIDIS K, ARAMPATZIS A. Altered control strategy between leading and trailing leg increases knee adduction moment in the elderly while descending stairs [J]. *J Biomech*, 2011, 44(4): 706-711.
- [7] SHIMBA T. An estimation of center of gravity from force platform data [J]. *J Biomech*, 1984, 17(1): 53-60.
- [8] ABDUL YAMIN NAA, BASARUDDIN KS, ABU BAKAR S, *et al.* Quantification of gait stability during incline and decline walking: The responses of required coefficient of friction and dynamic postural index [J/OL]. *J Healthc Eng*, 2022, doi: 10.1155/2022/7716821.
- [9] HOF AL, GAZENDAM MG, SINKE WE. The condition for dynamic stability [J]. *J Biomech*, 2005, 38(1): 1-8.
- [10] 李世明, TANVI BHATT. 人体动态稳定性理论及防跌倒扰动性训练进展 [J]. *体育科学*, 2011, 31(4): 67-74.
- [11] 刘鑫玥, 霍洪峰. 不同类型和负荷双任务对健康人动态姿势控制的影响 [J]. *医用生物力学*, 2023, 38(4): 791-796.
- LIU XY, HUO HF. Effects of dual tasks with different types and loads on dynamic postural control in healthy adults [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(4): 791-796.
- [12] 梁雷超, 黄灵燕, 伍颢, 等. 膝关节关节炎对女性老年人步行动态稳定性的影响 [J]. *体育科学*, 2016, 36(3): 61-66.
- [13] 曹传宝, 马刚, 马敏卿, 等. 认知与动作任务介入对人体下楼梯姿势控制和身体动态稳定性的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2023, 42(3): 184-190.
- [14] HAUSDORFF JM, YOGEV G, SPRINGER S, *et al.* Walking is more like catching than tapping: Gait in the elderly as a complex cognitive task [J]. *Exp Brain Res*, 2005, 164(4): 541-548.
- [15] 张芷, 王健, 冯金升. 认知与姿势控制的神经心理学研究进展 [J]. *航天医学与医学工程*, 2013, 26(4): 333-337.
- [16] 孙威. 太极拳运动对老年女性双任务模式楼梯行走姿势控制能力的影响 [D]. 上海: 上海体育学院, 2020.
- [17] MADEHKHAKSAR F, EGGES A. Effect of dual task type on gait and dynamic stability during stair negotiation at different inclinations [J]. *Gait Posture*, 2016(43): 114-119.
- [18] SONG Q, LI L, ZHANG C, *et al.* Long-term Tai Chi practitioners have superior body stability under dual task condition during stair ascent [J]. *Gait Posture*, 2018(66): 124-128.
- [19] 聂文良. 跑步经济性相关下肢刚度与神经肌肉力量训练适应性研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [20] MCANDREW YOUNG P, DINGWELL J. Voluntary changes in step width and step length during human walking affect dynamic margins of stability [J]. *Gait Posture*, 2012, 36(2): 219-224.
- [21] MERSMANN F, BOHM S, BIERBAUM S, *et al.* Young and old adults prioritize dynamic stability control following gait perturbations when performing a concurrent cognitive task [J]. *Gait Posture*, 2013, 37(3): 373-377.
- [22] 刘鑫玥, 霍洪峰. 双重任务介入对人体静态平衡和动态稳定性的影响 [J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(4): 581-584.
- [23] ZHANG C, SONG Q, SUN W, *et al.* Dynamic stability of older adults under dual task paradigm during stair descent. [J]. *Motor Control*, 2020, 24(1): 113-126.
- [24] BLOEM BR, GRIMBERGEN YA, VAN DIJK JG, *et al.* The "posture second" strategy: A review of wrong priorities in parkinson's disease [J]. *J Neurol Sci*, 2006, 248(1): 196-204.
- [25] MACKINNON CD, WINTER DA. Control of whole body balance in the frontal plane during human walking [J]. *J Biomech*, 1993, 26(6): 633-644.
- [26] VERGHESE J, HOLTZER R, LIPTON RB, *et al.* Quantitative gait markers and incident fall risk in older adults [J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2009(64): 896-901.
- [27] CESARI M, KRITCHEVSKY SB, PENNINX BW, *et al.* Prognostic value of usual gait speed in well-functioning older people-results from the health, aging and body composition study [J]. *J Am Geriatr Soc*, 2005(53): 1675-1680.
- [28] LEE K. Effects of single and dual tasks during walking on spatiotemporal gait parameters of community-dwelling older [J]. *J Phys Ther Sci*, 2017, 29(10): 1874-1877.
- [29] 梁明前. 老年人运动及认知双任务步行的步态时空参数及双任务成本研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2021.
- [30] HOLLMAN J, KOVASH F, KUBIK J, *et al.* Age-related differences in spatiotemporal markers of gait stability during dual task walking [J]. *Gait Posture*, 2007, 26(1): 113-119.
- [31] 刘鑫玥, 霍洪峰. 不同任务介入对青年行走动态稳定性及双任务成本的影响 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(5): 851-856.
- LIU XY, HUO HF. Effects of different task interventions on dynamic stability and dual-task cost of young adults during walking [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(5): 851-856.
- [32] 赵依双, 公维军, 范小伟, 等. 双任务步行对缺血性卒中患者步态参数影响的研究 [J]. *中国卒中杂志*, 2021, 16(10): 1006-1010.