

文章编号: 1004-7220(2023)05-1010-07

老年人下楼梯下肢关节做功模式分析

马刚¹, 闫士芳², 曹传宝², 卢朝霞^{3a}, 孙威^{3b}, 王疆娜^{3b}

(1. 武警后勤学院 卫生勤务系, 天津 300309; 2. 河北体育学院 武术系, 石家庄 050041;

3. 山东体育学院 a 体育传媒与信息技术学院, b 运动与健康学院, 济南 250100)

摘要:目的 探究下楼梯行走过程中老龄化对老年人下肢关节做功模式的影响, 丰富楼梯行走的防跌倒理论。方法 采用 Vicon 红外运动捕捉系统和 Kistler 三维测力台同步采集青年人和老年人下楼梯行走的运动学和动力学数据, 利用下肢关节角度、力矩、功率、做功贡献度指标对下肢关节做功模式进行量化评定。结果 下楼梯过程中, 青年组和老年组下肢三关节角度、力矩、功率的变化趋势一致。在优势腿的 1 个支撑相内, 老年人的屈髋力矩峰值、伸膝力矩第 1 峰值、第 2 峰值、跖屈力矩第 1 峰值、膝负功率第 1 峰值、第 2 峰值、踝负功率峰值以及髌、膝、踝关节净功均显著降低 ($P < 0.05$); 伸髋力矩峰值、髌负功率峰值、踝关节做功贡献度显著增加 ($P < 0.05$), 髌、膝关节做功贡献度并未出现显著性差异 ($P > 0.05$)。结论 在下楼梯过程中, 老年人下肢关节力学特征显著降低。老年人采取不同于青年人的下肢关节做功模式。老年人通过较大的伸髋姿势抵制躯干的过度前倾, 同时采取踝关节做功的代偿模式, 提高下楼梯行走的身体稳定性。建议老年人在锻炼时应以增加膝、踝关节肌肉力量的项目为主, 以维持下楼梯的姿势控制能力。

关键词: 老龄化; 下楼梯; 力矩; 功率; 关节贡献度

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.05.024

Analysis on Mechanical Work Patterns of Lower Extremity Joints in Older Adults During Stair Descent

MA Gang¹, YAN Shifang², CAO Chuanbao², LU Zhaoxia^{3a}, SUN Wei^{3b}, WANG Jiangna^{3b}

(1. Department of Health Services, Logistics University of Chinese People's Armed Police Forces, Tianjin 300309, China; 2. Department of Martial Arts, Hebei Sport University, Shijiazhuang 050041, China; 3a. College of Sports Media and Information Technology, 3b. College of Sports and Health, Shandong Sport University, Jinan 250100, China)

Abstract: Objective To investigate the effect of aging on mechanical work patterns of lower extremity joints in older adults during stair descent, so as to enrich the fall-prevention theory of stair walking. **Methods** Vicon infrared motion capture system and Kistler platform were synchronized to collect the kinematic and kinetic data. The mechanical work was quantified by using parameters such as joint angle, moment, power, and mechanical work contribution of lower joints. **Results** Older adults demonstrated a consistent trend in joint angle, moment and power of lower limbs with young adults during stair descent. Compared with young adults, older adults showed decreased peak hip flexion moment, the first peak and second peak of knee extension moment, the first peak of ankle plantarflexion moment, the first and second peak peak of knee negative power, peak ankle

收稿日期: 2022-09-24; 修回日期: 2022-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700815), 天津市重点实验室开放基金项目(SY-04-20203-002), 山东省社科规划研究项目(21CTYJ24)

通信作者: 王疆娜, 副教授, E-mail: tsjywjn2018@126.com

negative power, net mechanical work of hip, knee, and ankle joints ($P < 0.05$). Significant increase was found in peak hip extension moment, peak hip negative s power, and the mechanical work contribution of ankle joint among older adults ($P < 0.05$). There was no significant difference in mechanical work of hip and knee joints between two groups ($P > 0.05$). **Conclusions** The mechanical characteristics of lower extremity joints in older adults were significantly reduced during stair descent. Older adults adopted a strategy in mechanical work which was different from young adults. They would increase hip extension to resist the excessive trunk leaning forward, together with the mechanical work of ankle joint as the compensatory mode, so as to improve body stability during stair decent. It is suggested that older adults should mainly increase the strength of knee and ankle muscles during exercise to retain the postural stability during stair descent.

Key words: aging; stair descent; moment; power; joint contribution

我国老龄化进程日趋加快。因步态参数异常、身体稳定性下降导致的跌倒已经成为威胁老年人身体健康的重要因素^[1-2]。老年人身体机能随年龄的增加逐渐下降,如肌力流失^[3]、骨质疏松^[4]、身体柔韧性降低^[5]、下肢膝、踝本体感觉下降^[6]、平衡能力下降^[1]等,进而引起运动系统功能衰退,造成姿势控制等能力的下降。

楼梯行走是老年人必要的日常活动之一。由于楼梯行走需要更大的关节活动度和下肢力量,故相比于平地行走更具有挑战性^[7-8]。老年人由于身体机能出现退行性变化,故在楼梯行走时更容易发生跌倒。根据有关调查,发生在楼梯行走的跌倒占跌倒总数的 26%,而下楼梯占比高达 3/4^[9]。楼梯行走已经成为导致老年人跌倒的重要外部因素之一。有研究显示,与青年人相比,老年人在下楼梯过程中踝关节的活动度较大,膝、踝关节角冲量较低^[10-11]。因此,为了降低跌倒的风险,老年人常表现出与青年人不同的关节做功模式及步态特征。楼梯行走是下肢三关节相互协调完成的,关节做功贡献度可以评价环节间的协调程度,并有助于加深对下肢三关节的运动模式及代偿机制的理解^[12]。关节做功模式已应用于跑步^[13]、骑行^[14]等运动中,但关于老年人下楼梯时关节做功模式的研究较为少见。做功模式的改变或许能够降低老年人下楼梯时跌倒的风险。

基于此,本文通过探讨青年人和老年人下楼梯过程中下肢关节力矩、功率及做功模式的差异,丰富楼梯行走的防跌倒理论,为预防楼梯跌倒提供数据支撑。本研究假设:与青年人相比,老年人下肢关节峰值力矩、峰值功率显著较小;关节净功显著

较小;膝、踝关节的做功贡献度显著较大。

1 方法

1.1 研究对象

通过现场招募、微信宣传的方式随机选取健康的青年人与老年人各 20 名。要求受试者无规律锻炼习惯、近 6 个月无跌倒史、能够独立完成楼梯行走。排除心脑血管疾病、神经肌肉骨骼系统疾病、服用影响姿势控制能力的药物及认知功能障碍者。本研究已通过山东体育学院伦理委员会批准,受试者均熟悉测试流程并签署知情同意书。受试者基本资料如表 1 所示。

表 1 受试者基本资料

Tab. 1 Basic data of the subjects

分组	<i>n</i>	年龄/岁	身高/cm	体质量/kg	BMI/(kg·m ²)
青年组	20	24.6±3.2	162.5±4.6	57.6±6.5	22.3±2.5
老年组	20	67.6±6.5	160.6±4.4	60.1±7.3	24.4±2.7

1.2 仪器设备

1.2.1 模拟楼梯 选用 1 台模拟楼梯模拟日常上下楼梯活动,楼梯由 6 级台阶组成,每级台阶高度为 0.17 m,宽度为 1.5 m,长度为 0.3 m,楼梯倾斜角为 29.4°,符合日常生活中的楼梯标准^[15]。

1.2.2 Vicon 红外运动捕捉系统 本研究运动学数据采集选用 8 个红外摄像头的 Vicon 红外运动捕捉系统(Oxford Metrics Limited 公司,英国),同时配有 14 mm 直径的反光标记点以及配套的 Vicon Nexus 1.7.1 数据采集处理软件。采集频率为 100 Hz。

1.2.3 Kistler 三维测力台 采用 Kistler 9287BA 三维测力台(Kistler 公司,瑞士)对楼梯行走的动力学

数据进行采集。将测力台置于第 3 阶楼梯的凹槽内并固定。采集频率为 1 kHz。

1.3 测试流程

受试者身着紧身测试衣裤和测试鞋,先进行身体形态学指标及优势侧的测量,经测试受试者优势侧均为右侧。然后由工作人员按照 Visual 3D 提供的模型将直径为 14 mm 反光标记点粘贴于人体骨性标志点上。正式测试开始后,受试者在工作人员的指令下进行下楼梯行走,为保证优势腿踏上测力台,受试者需要优势腿先迈步并采用 1 步 1 个台阶的方式下楼梯行走。将下楼梯过程中无停顿、标记点无掉落记为 1 次有效测试,每名受试者保留 5 次有效测试,并随机选取 3 次进行数据分析,每次测试间隔 1 min。

1.4 数据处理

原始运动学与动力学数据利用 Vicon Nexus 1.7.1 软件进行标记点的重命名、截取,并将数据导入 Visual 3D 进行滤波、标准化、百分化操作。采用巴特沃斯四阶数字低通滤波器进行滤波处理,截止频率运动学数据 6 Hz^[14]、动力学数据 50 Hz^[14],运动学数据以身高标准化,动力学数据以体重标准化。将优势侧的支撑相定义为第 1 双支撑期(first double support phase, FDS)、单支撑期(single support phase, SSP)和第 2 双支撑期(second double support phase, SDS),FDS 定义为右脚脚跟着地开始,到左脚脚尖离地结束;SSP 定义为左脚脚尖离地开始,到左脚脚跟着地结束;SDS 定义为左脚脚跟着地开始,到右脚脚尖离地结束。将下肢髋、膝、踝关节角度^[16]定义为远端环节的延长线与近端环节的夹角。

采用逆向动力学方法计算下肢各关节周围由肌肉所产生的净力矩^[8]。关节功率为力矩与角速度的乘积^[17],计算公式为;

$$P_i = M_i \times \omega_i \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 帧的功率(W/kg); M_i 为第 i 帧的关节力矩(N·m/kg); ω_i 为第 i 帧的关节角速度(rad/s)。而关节做功为关节功率与时间的积分,优势腿支撑相内某关节所做净功为正功与负功之和^[18],计算公式为:

$$W_{\text{正}} = \int_{t_1}^{t_2} P dt, \quad P > 0 \quad (2)$$

$$W_{\text{负}} = \int_{t_1}^{t_2} P dt, \quad P < 0 \quad (3)$$

$$W_{\text{净}} = W_{\text{正}} + W_{\text{负}} \quad (4)$$

式中: $P > 0$ 时关节做正功; $P < 0$ 时关节做正功。在 1 个支撑相内某个关节所做的净功关节做功贡献度为下楼梯过程中 1 个支撑相内下肢某个关节做功与下肢所有关节做功之和的比值^[12],计算公式为:

$$\text{Cont}_{\text{Knee}} = \frac{|W_{\text{Knee净}}|}{|W_{\text{Hip净}}| + |W_{\text{Knee净}}| + |W_{\text{Ankle净}}|} \times 100\% \quad (5)$$

以膝关节为例, Con_{Knee} 为膝关节在优势腿的支撑相内的做功贡献度, $|W_{\text{Hip净}}|$ 为髋关节在此支撑相内所做净功的绝对值, $|W_{\text{knee净}}|$ 为膝关节在此支撑相内所做净功的绝对值, $|W_{\text{Ankle净}}|$ 为踝关节在此支撑相内所做净功的绝对值。

1.5 统计分析

采用 SPSS 20.0 数据分析软件进行统计学分析。通过 Shapiro-Wilk 检验数据的正态分布性;应用独立样本 t 检验对青年组和老年组下楼梯过程中下肢关节的力矩、功率、做功及关节做功贡献度进行组间比较。每名受试者随机选取 3 次有效数据取平均值,并以平均值 \pm 标准差表示。显著性水平设置为 0.05。

2 结果

2.1 下肢关节峰值力矩、峰值功率及做功

在下楼梯优势腿的支撑相内,与青年组相比,老年组屈髋力矩峰值($P = 0.002$)、伸膝力矩第 1 峰值($P = 0$)、第 2 峰值($P = 0$)、跖屈力矩第 1 峰值($P = 0.002$)、膝负功率第 1 峰值($P = 0.027$)、第 2 峰值($P = 0$)、踝负功率峰值($P = 0.001$)、髋关节($P = 0.002$)、膝关节($P = 0$)、踝关节($P = 0.033$)所做净功均显著较小;伸髋力矩峰值($P = 0$)、髋负功率峰值($P = 0.006$)显著较大;跖屈力矩第 2 峰值、髋正功率峰值及踝正功率峰值差异没有统计学意义($P > 0.05$),见表 1。

2.2 下肢关节做功及关节贡献度

在优势腿的 1 个支撑相内,青年组髋、膝、踝关节贡献度分别为 32.54%、61.58%、5.88%;老年组髋、膝、踝关节贡献度分别为 36.35%、58.78%、4.87%;与青年组相比,老年组的髋关节与膝关节做功贡献度未见显著性差异($P > 0.05$),而踝关节的做功贡献度显著较大($P = 0.037$),见图 1。

表 2 青年组与老年组下肢关节峰值力矩、峰值功率及做功对比

Tab. 2 Comparison of peak torque, peak power and work of lower limb joints between young group and older group

参数	青年组	老年组
屈髋力矩峰值	0.326±0.105	0.226±0.103 **
伸髋力矩峰值	-0.288±0.127	-0.708±0.121 **
伸膝力矩第 1 峰值	1.044±0.257	0.680±0.258 **
伸膝力矩第 2 峰值	1.194±0.202	0.882±0.165 **
跖屈力矩第 1 峰值	-1.097±0.222	-0.879±0.216 **
跖屈力矩第 2 峰值	-0.814±0.119	-0.820±0.121
髋正功率峰值	0.596±0.192	0.530±0.329
髋负功率峰值	-0.246±0.204	-0.466±0.302 **
膝负功率第 1 峰值	-2.107±1.108	-1.396±0.994 *
膝负功率第 2 峰值	-4.795±0.605	-3.288±0.871 **
踝正功率峰值	1.667±0.410	1.483±0.257
踝负功率峰值	-4.790±1.287	-3.425±1.325 **
髋关节净功	0.107±0.045	0.044±0.081 **
膝关节净功	-1.124±0.117	-0.839±0.107 **
踝关节净功	-0.597±0.126	-0.521±0.107 *

注:老年组与青年组相比,* $P<0.05$,** $P<0.01$ 。

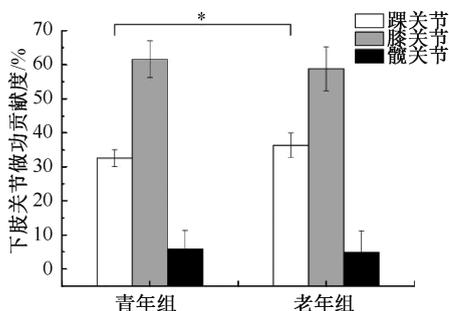


图 1 青年组与老年组优势腿支撑相内下肢关节做功贡献度对比

Fig. 1 Comparison of the contribution of lower limbs for the dominant leg in support phase between young group and older group

注:老年组与青年组相比,* $P<0.05$ 。

2.3 优势腿支撑相内下肢关节角度、力矩、功率

在优势腿的 1 个支撑相内,青年组与老年组下肢关节角度、关节力矩及关节功率的变化趋势基本一致,只是幅值上存在一定的差异性。关节角度:在优势腿的支撑相内,髋关节角度先减小后增大,膝关节角度持续增加,而踝关节角度先增加,到达 SSP 阶段末期逐渐减小;关节力矩:髋关节在支撑相的前半程主要表现为伸髋力矩,而后转变为屈髋力矩,膝关节主要为伸膝力矩,踝关节主要为跖屈力矩,膝关节和踝关节力矩均明显呈现出双峰趋势,且均在 SSP 初期到达第 1 峰值,而后在 SSP 末期到

达第 2 峰值;关节功率:老年组髋关节在第 1 双支撑期做负功、在第 2 双支撑期做正功;青年组髋关节做正功主要在第 2 双支撑期内,膝关节在支撑相内主要做负功,并呈现出双峰趋势,在 SSP 初期到达第 1 峰值,而后在 SSP 末期到达第 2 峰值,而踝关节在 FDS 阶段主要做负功,在 SDS 阶段功率较小,主要做正功(见图 2)。

3 讨论

本文旨在探讨老龄化对老年人下楼梯过程中下肢关节做功模式的影响。结果表明,老龄化显著降低受试者在下楼梯过程中的力学参数,且老年组采用不同于青年组的下肢关节做功模式进行下楼梯活动。

老龄化导致老年人在动态运动中的平衡能力下降^[19]。Hagen 等^[20]研究显示,与青年人相比,老年人在前后方向和内外侧方向的平衡能力分别下降 25.8% 和 3.8%,平衡能力的下降增加了老年人在楼梯等高风险环境中跌倒的风险。楼梯行走是人体下肢由高处落下着地时人体与外界环境产生的一种交互。此时,人们会通过感知觉系统所收集的信息调节下肢肌肉着地后反射收缩的神经反馈^[21],通过肌肉骨骼系统与感知觉系统的协同工作来更好的控制身体姿势。而下肢关节力学特征既能反映神经肌肉的控制特征,也是影响姿势控制能力的重要因素^[22]。本文结果显示,与青年组相比,老年组在下楼梯过程中的屈髋力矩峰值、伸膝力矩第 1、第 2 峰值以及跖屈力矩第 1 峰值显著降低,这与本文的研究假设一致。膝关节伸肌力量与老年人的跌倒密切相关,足够的膝关节伸肌力量可以有效的降低跌倒的风险^[23]。在下楼梯过程中,老年人的下肢关节力矩峰值显著较小。较小的关节力矩可能无法提供足够的支撑力矩完成下楼梯过程中的迈步动作,增加跌倒的风险。另外,髋关节与躯干姿势控制有关,膝踝关节与身体重心移动及下肢摆动有关^[24]。Lee 等^[25]研究显示,老年人的前倾角度显著大于年轻人,且老年人在下楼梯时的身体晃动距离较大,身体稳定性较差。而本研究中老年组的伸髋力矩峰值显著大于青年组,这可能是老年组采取保守的下楼梯策略。研究发现,楼梯行走中的跌倒常发生在前后方向^[11],而过大的躯干前倾角会

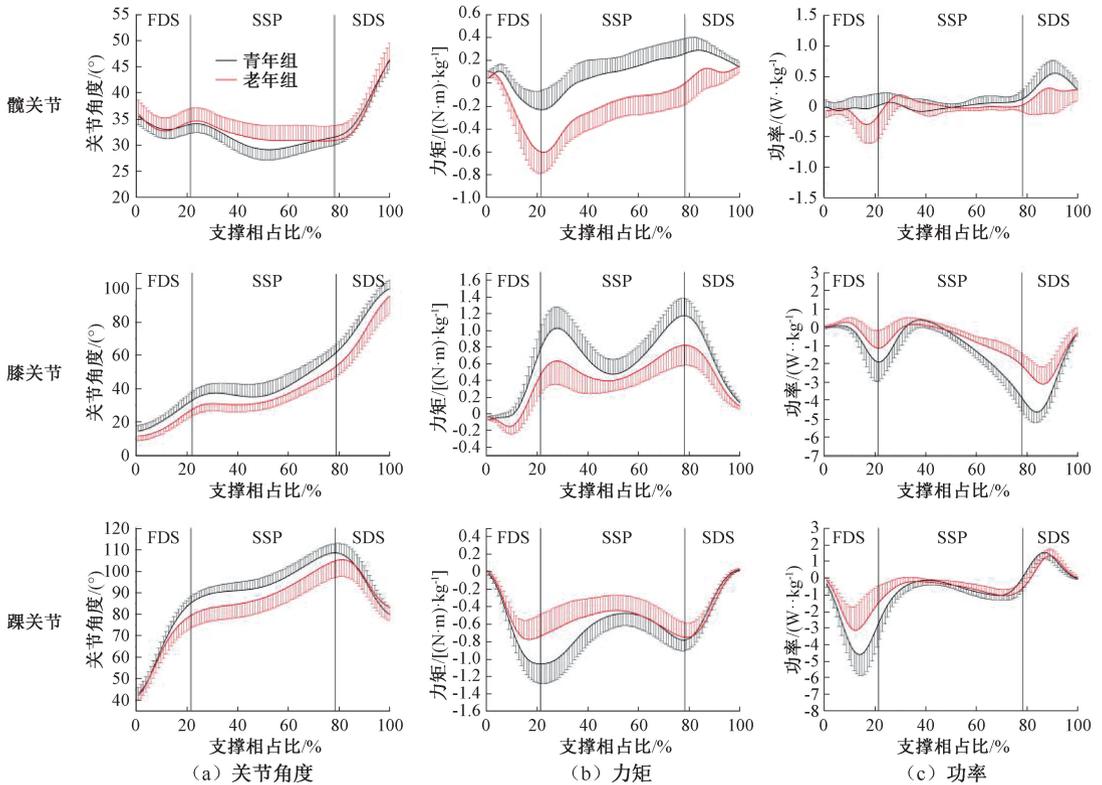


图2 青年组与老年组优势腿支撑相内下肢运动学参数变化曲线

Fig. 2 Change curves of kinematic parameters of lower limbs for dominant leg in support phase in young group and older group (a) Joint angle, (b) Moment, (c) Power

注:FDS、SSP、SDS分别为第1双支撑阶段、优势腿单支撑阶段、第2双支撑阶段。

导致身体重心前移,增加楼梯行走向前跌倒的风险^[26]。在FDS到SSP的过渡阶段,青年组利用较大的屈髋力矩使躯干前倾,以便于更好进行下楼梯步态转换,而老年组则利用较大的伸髋力矩控制躯干直立,虽然这种保守的策略不利于下楼梯的步态转换,但可以有效降低下楼梯向前跌倒的风险。张帆等^[27]研究同样指出,老年人常采取保守的策略进行楼梯行走,以降低因身体不稳导致的跌倒风险。

研究证明,增龄导致老年人膝、踝关节活动幅度下降,肌群预活化及能力肌肉间的协调能力下降,故老年人会采取不同于青年人的策略以弥补运动神经功能的不足^[28-29]。本文结果显示,在下楼梯过程中,下肢三关节优势腿的支撑相内做功主要以膝关节和踝关节为主,且主要做负功,吸收能量。与青年组相比,老年组的膝负功率第1、2峰值、踝负功率峰值都显著较小,说明老龄化降低了下肢膝、踝关节抵抗重力支撑体重及下肢肌肉吸收能量

的能力,这可能造成摆动腿在摆动期跨越楼梯台阶时抬脚高度降低,引发绊倒现象的发生^[17]。本文发现,在下楼梯过程中,与青年组相比,老年组下肢三关节所做净功显著较小。该结果提示,伴随着增龄,老年人下肢关节能量吸收功率显著降低,做功能力显著下降。即老年人可能采取一种较直、较硬的下楼梯方式,弥补因衰老导致的下肢肌肉力量下降。

下肢肌肉力量减弱是增加老年人跌倒风险的重要原因,尤其是膝关节伸肌力量与踝关节背屈力量与跌倒密切相关^[30]。Bickel等^[31]研究显示,与青年人相比,老年人伸膝肌肉力量下降了46.9%。膝关节肌肉力量的减弱或许改变了老年人的关节做功模式。本文结果显示,在优势腿的1个支撑相内,青年组髋、膝、踝关节贡献度分别为5.88%、61.58%、32.54%;老年组髋、膝、踝关节贡献度分别为4.87%、58.78%、36.35%。可以看出,下楼梯过

程中下肢关节起到主要动力作用的为膝关节,其次是踝关节。本文结果与 Nadeau 等^[32]研究一致:膝关节在楼梯行走过程中起到了主要的动力作用。另外,本文发现,与青年组相比,老年组的髌、膝关节贡献度降低,踝关节的贡献度明显增加,且出现显著性差异。虽然膝关节仍然起主要动力作用,但可以明显地看出,老年组采取了不同于青年组的关节做功模式。本文推测,伴随着增龄,老年人的下肢肌肉力量尤其是股四头肌肌力逐渐流失^[3],导致膝关节伸膝力量不足,无法完成楼梯行走时的迈步动作,故而主动采取踝关节做功的“代偿”模式。通过踝关节的代偿作用,弥补了膝关节伸膝力量的不足,维持了下楼梯的身体稳定性。因此,老年人可选择增强下肢肌肉尤其是膝、踝关节肌力的项目,提高下楼梯行走的身体稳定性。

本研究尚存在一定的局限性:①仅围绕两个较窄的年龄范围进行受试者的招募测试,今后的研究应扩大年龄范围及样本量;②受实验条件的限制,并未同步采集老年人平衡及肌力等相关数据,对关节动力学差异的解释主要基于前人研究结果,后续需要进一步深入探究;③仅采集了1条优势腿的数据进行分析,虽具有一定的代表性,但无法排除双侧下肢在运动控制中的差异对结果造成的影响,后续的研究将进行重点探讨。

4 结论

在下楼梯过程中,相比于青年人,老年人下肢关节力学参数显著降低,且表现出不同的下肢关节做功模式。老年人通过较大的伸髌姿势抵制躯干的过度前倾,降低下楼梯向前跌倒的风险;同时采取踝关节做功的代偿模式,弥补下楼梯过程中膝关节伸膝力量下降的不足,提高下楼梯行走的身体稳定性。因此,老年人应选择增加膝关节及踝关节肌肉力量的项目,以维持下楼梯的姿势控制能力,降低跌倒的风险。

参考文献:

[1] 司建华,董玲,王雯红. 高龄老年人跌倒伤害危险因素分析[J]. 齐鲁医学杂志, 2016, 31(1): 54-56.
[2] LAURENCE ZR. Falls in older people: Epidemiology, risk factors and strategies for prevention[J]. Age Ageing, 2006, 35(2): 37-41.

[3] BRUYERE O, BEAUDART C, LOCQUET M, et al. Sarcopenia as a public health problem[J]. Eur Geriatr Med, 2016, 7(3): 272-275.
[4] 唐海,陈浩. 骨质疏松的生物力学研究进展[J]. 中国骨质疏松杂志, 2005, 11(4): 136-141.
[5] TAMURA K, YOSHIE M, NISHI H, et al. The effects of strength and flexibility training on muscle strength and joint range of motion in middle-aged and older people[J]. J Health Sport Sci, 2003, 15(6): 12-23.
[6] CHENG WH, WEI HC, HENG HC, et al. Simple Tai Chi exercise for improving elderly postural stability via complexity index analysis[J]. Artif Life Robot, 2015, 20: 42-48.
[7] GONCALVES GH, SELISTRE LF, PETRELLA M, et al. Kinematic alterations of the lower limbs and pelvis during an ascending stairs task are associated with the degree of knee osteoarthritis severity[J]. Knee, 2017, 24(2): 295-304.
[8] NOVAK AC, BROUWER B. Sagittal and frontal lower limb joint moments during stair ascent and descent in young and older adults[J]. Gait posture, 2011, 33(1): 52-60.
[9] BLAZEWICK DH, CHOUNTHIRATH T, HODGES NL, et al. Stair-related injuries treated in United States emergency departments[J]. Am J Emerg Med, 2017, 36(4): 73-80.
[10] 任占兵,韩格格,杜兴兰,等. 老年人下楼梯行走的生物力学分析[J]. 成都体育学院学报, 2016, 42(2): 93-97.
[11] BOSSE I, KAI DO, SAVELBERG HH, et al. Dynamic stability control in younger and older adults during stair descent[J]. Hum Movement Sci, 2012, 31(6): 1560-1570.
[12] LUCI FT, SYLVIE N, MARIE HM, et al. Effects of cadence on energy generation and absorption at lower extremity joints during gait[J]. Clin Biomech, 2008, 23(6): 769-778.
[13] SATORU H, HIROAKI H, YOSHIYUKI K. Between-limb differences in running technique induces asymmetric negative joint work during running[J]. Eur J Sport Sci, 2019, 19(6): 757-764.
[14] RODRIGO RB, ALINE CT, CARLOS BM. Effects of saddle height, pedaling cadence, and workload on joint kinetics and kinematics during cycling[J]. J Sport Rehabil, 2010, 19(3): 301-314.
[15] FOUROUGH M, ARJAN E. Effect of dual task type on gait and dynamic stability during stair negotiation at different inclinations[J]. Gait Posture, 2015, 43(2): 114-119.
[16] 鞋中底屈曲刚度对跳跃动作下肢和跖趾关节生物力学及关节能量特征的影响[J]. 中国运动医学杂志, 2016, 35(6): 527-534.

- [17] SRIKANT V, CHI WT, MUKUL M, *et al.* Biomechanical analyses of stair-climbing while dual-tasking [J]. *J Biomech*, 2015, 48(6): 921-929.
- [18] 王勇, 梁雷超, 汤运启, 等. 鞍座高度对骑行时下肢三关节做功模式的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2019, 38(7): 553-560.
- [19] JIN HP. Is dual-task training clinically beneficial to improve balance and executive function in community-dwelling older adults with a history of falls? [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(16): 98-101.
- [20] MARCO H, SEBASTIAN S, DANIEL SB, *et al.* Associations between subtalar muscle strength and balance performance in healthy young and old adults [J]. *Gerontology*, 2020, 66(1): 15-23.
- [21] GOLLHOFER A. Different levels of preinformation for motor programming in reactive drop jump conditions[C]// *Proceedings of Second World Congress of Biomechanics*. Amsterdam: WCB, 1994.
- [22] REEVES ND, SPANJAARD M, MOHAGHEGHI AA, *et al.* Older adults employ alternative strategies to operate within their maximum capabilities when ascending stairs [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2009, 19(2): 57-68.
- [23] DANIEL BP, TATIANE S, CAROLINA TF, *et al.* Effect of a programme of muscular endurance, balance and gait exercises with and without the use of flexible and minimalist shoes in older women with medial knee osteoarthritis: Study protocol for a randomised controlled trial[J]. *BMJ Open*, 2022, 12(9): 612-617.
- [24] REEVES ND, SPANJAARD M, MOHAGHEGHI AA, *et al.* The demands of stair descent relative to maximum capacities in elderly and young adults [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2008, 18(2): 218-227.
- [25] HENG J, LEE, LI S, *et al.* Balance control during stair negotiation in older adults[J]. *J Biomech*, 2007, 40(11): 2530-2536.
- [26] NOVAK AC, KOMISAR V, MAKI BE, *et al.* Age-related differences in dynamic balance control during stair descent and effect of varying step geometry [J]. *Appl Ergon*, 2016, 52(1): 275-284.
- [27] 张帆, 王长生, 祝捷, 等. 上、下楼梯时认知任务介入对下肢协调性影响的研究[J]. *体育科学*, 2015, 35(1): 44-53.
- [28] HORTOBAGYI T, DEVITA P. Muscle pre- and coactivity during downward stepping are associated with leg stiffness in aging [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2000, 10(2): 117-126.
- [29] HORTOBAGYI T, DEVITA P. Altered movement strategy increases lower extremity stiffness during stepping down in the aged [J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 1999, 54(2): 63-70.
- [30] ROBBINS AS, RUBENSTEIN LZ, JOSEPHSON KR, *et al.* Predictors of falls among elderly people. Results of two population-based studies [J]. *Arch Intern Med*, 1989, 149(7): 1628-1633.
- [31] BICKEL CS, CROSS JM, BAMMAN MM. Exercise dosing to retain resistance training adaptations in young and older adults [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2011, 43(7): 1177-1187.
- [32] NADEAU S, MCFADYEN BJ, MALOUIN F. Frontal and sagittal plane analyses of the stair climbing task in healthy adults aged over 40 years: What are the challenges compared to level walking? [J]. *Clin Biomech*, 2003, 18(10): 950-959.