

文章编号: 1004-7220(2023)05-1017-07

# 老年人上下楼梯的步态特征以及下肢关节运动功能特点

周胜如, 盛慧媛, 黄招椽, 李旭鸿

(杭州师范大学 体育学院, 杭州 311121)

**摘要:**目的 探讨老年人上下楼梯的步态特征以及下肢关节运动的力学性能。方法 通过17名青年人、15名老年人自然速度上下5个台阶的楼梯测试与分析,并结合红外高速运动捕捉系统和三维测力台获取步态参数、下肢关节角度以及地面反作用力,通过逆向动力学方法计算关节力矩和功率,采取独立样本 $t$ 检验分析年龄对上述参数的影响。结果 与青年人相比,老年人上下楼梯步态周期较长,步速和步频则明显较低( $P<0.05$ );同时,老年人上下楼梯支撑相和摆动相分别明显延长和缩短( $P<0.05$ )。不论是青年人还是老年人,上下楼梯过程中下肢关节角度、力矩和功率的变化趋势较为一致。但老年人上楼主要是通过踝、膝关节功率的产生来维持,而青年人则是通过近端肢体的能量,特别动用了较多的膝关节功率。下楼过程中的能量吸收,两者皆是以膝关节为主。结论 随着年龄的增长,下肢机能下降和肌力不足,老年人害怕在上下楼梯时发生跌倒,试图通过减少摆动时间来弥补身体的不稳定。研究结果为临床上老年患者群体的康复管理以及预测跌倒的功能性评估提供参考。

**关键词:** 老年人; 上楼; 下楼; 步态; 跌倒

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.05.025

## Gait Characteristics and Functional Properties of Lower Extremity Joint Movement for Older Adults During Stair Ascent and Descent

ZHOU Shengru, SHENG Huiyuan, HUANG Zhaomeng, LI Xuhong

(School of Physical Education, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

**Abstract: Objective** To investigate gait characteristics of older adults during stair ascent and descent, and mechanical properties of lower extremity joint movement. **Methods** A total of 17 young adults and 15 older adults were required to ascend and descend a five-step staircase at natural walking speed. The gait parameters, lower limb joint angles and ground reaction force were obtained using infrared high speed motion capture system and three-dimensional force platform, the joint moments and powers were calculated by inverse dynamics approach, and the influence of age on those parameters was analyzed by independent samples  $t$ -test. **Results** Compared with young adults, older adults had a relatively longer gait cycle, as well as an obviously lower walking speed and frequency during stair ascent and decent ( $P<0.05$ ). Meanwhile, the support phase and swing phase in older adults during stair ascent and decent were obviously prolonged and shortened respectively ( $P<0.05$ ). The change trend for joint angle, moment and power of lower limbs during stair ascent and decent was consistent in both young and older adults. However, during stair ascent, older adults were mainly maintained by the generation of ankle and knee joint power, while young adults were mainly maintained by the energy at the proximal limb,

收稿日期:2022-11-13; 修回日期:2022-12-15

基金项目:浙江省基础公益研究计划项目(LGF18C100003)

通信作者:李旭鸿,教授,博士生导师,E-mail:lxhong928@163.com

especially more knee power was used. For older and young adults, energy absorption during stair decent played an important role in knee joints. **Conclusions** With aging, lower limb function and muscle strength will decrease. Older adults are afraid of falling down during stair ascent and decent, and try to compensate for the instability of the body by reducing swinging time. The research findings provide references for rehabilitation management and functional assessment on fall prediction of older patient populations in clinical practice.

**Key words:** older adult; stair ascent; stair descent; gait; fall

对于老年人而言, 不管上楼还是下楼, 都是一项功能性要求非常苛刻的身体活动<sup>[1-4]</sup>。其主要原因是伴随着老年人机体的老化和肌肉骨骼系统退化性疾病的出现, 继而导致老年人中枢和周围神经系统控制能力下降、本体感觉信息输入不对称、肌力流失和骨质疏松以及步态姿势不稳等生理性和生物力学问题的接踵而至, 造成老年人上下楼愈加困难, 甚至会出现跌倒<sup>[5-6]</sup>。研究指出, 楼梯上摔倒是致使老年人意外死亡的主要原因, 其中大约 80% 为 65 岁以上的老年人<sup>[7]</sup>。因此, 不少研究着手从运动机能的角度来探索老年人上下楼梯的生物力学功能需求, 旨在深入挖掘身体机能在人体上下楼梯过程中扮演的角色, 进而预防老年人跌倒风险的发生<sup>[8-12]</sup>。然而, 有研究发现, 中年人上下楼过程中时常也会发生跌倒<sup>[13-15]</sup>, 提示机体的老化并不是诱发老年人上下楼发生跌倒的关键因素。于是, 很多研究开始重新审视楼梯台阶尺寸的合理性<sup>[16-18]</sup>。鉴于众多研究采用的楼梯台阶尺寸(高×深×长)、坡度并不统一, 从而使楼梯台阶尺寸与生物力学功能需求的相互关系缺少一致性<sup>[19]</sup>。虽然上述研究取得一定进展, 但很少有研究同时对下肢 3 个关节和年龄组别上下楼梯行走进行全面、系统的生物力学分析<sup>[20-23]</sup>。老年人上下楼梯时下肢各关节的功能性角色以及相互之间的代偿机制尚不清晰。

本文从增龄性视角对青年人、老年人上下楼过程中下肢三关节矢状面内运动学、动力学和能量耗散以及相应的步态特征进行综合和比较研究, 以期进一步促进人们对老年人群上下楼梯困难或经常发生跌倒生物力学机制的理解和认知。同时, 研究结果在临床上也能为老年人功能性康复训练方案(上下楼梯)的制定以及预测跌倒的功能性评估提供一些参考依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

通过宣讲的方式在社区招募受试者(健康老年人群), 在杭州师范大学筛选健康青年人群, 要求其无视觉和前庭功能障碍, 选拔标准如下: ①能够在不需要扶手或其他辅助装备的情况下自如上下楼梯者; ②无任何骨科疾病、神经系统疾病、头晕或重大视力缺陷以及没有摔倒史。基于《受试者基本情况调查表》信息的筛选, 进一步掌握受试人群的健康状况及病史, 符合实验要求的受试者被告知测试目的和内容, 并签署知情同意书。

根据上述信息进行筛选和分组, 在统一对受试者进行讲解测试的要求和任务后, 再安排受试者现场熟悉测试流程。最终全部完成实验测试的青年人为 17 人(男 9, 女 8), 老年人为 15 人(男 8, 女 7)。不论性别, 青年人和老年人身高和体质量差异无统计学意义( $P>0.05$ ), 具体信息见表 1。

表 1 受试对象基本情况

Tab. 1 Basic information of the participants

受试者	性别	<i>n</i>	年龄/岁	身高/cm	体质量/kg
青年人	男	9	23.73±1.69	174.09±5.64	68.21±5.32
	女	8	23.32±1.70	159.30±6.45	55.36±7.59
老年人	男	8	64.53±2.19	172.59±5.24	67.81±8.32
	女	7	63.32±2.72	158.50±5.17	56.36±7.55

### 1.2 实验设备

红外高速运动捕捉系统 Qualisys Track Manager (QTM, Qualisys 公司, 瑞典) 和 Oqus300+ 型号的 9 台摄像头, 可以准确实现 2D、3D 动作捕捉和 6 自由度 (degree of freedom, DOF) 全方位观看, 延迟最长时间为 6 ms。其中, 采样频率为 200 Hz, 镜头采用数字 CMOS 传感器 (1 280×1 024 像素), 配套的标志点是直径为 19 mm 的红外反光球。

两块三维测力台 (9287C, 长 900 mm × 宽

600 mm×高 100 mm, Kistler 公司, 瑞士), 分别镶嵌在第 2 和第 4 个台阶上, 并与整个楼梯固定在一起。外置放大器采样频率为 1 kHz, 侧向和垂直方向上的最大承载分别为 10、20 kN。

1 个木制带有 5 台阶的楼梯提供给受试者完成上下楼动作, 其中楼梯的坡度为  $33.38^\circ$ , 每个台阶的高度、深度和宽度分别为 20、30、90 cm (见图 1)。

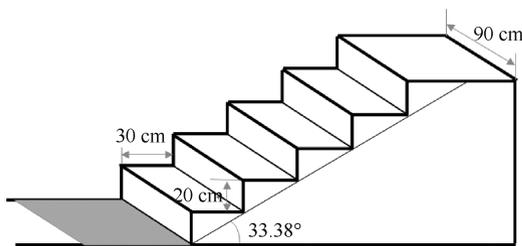


图 1 木制楼梯示意图

Fig. 1 Schematic of the wooden staircase

### 1.3 实验流程

(1) 校准红仪器设备以及三维空间的标定工作, 完成上述工作的同时, 安排受试者在跑台上做热身活动, 时间约为 5 min。实验人员负责讲解与示范动作, 并要求受试者多次上下楼来熟悉实验流程。

(2) 采用 24 个与 QTM 系统配套的直径为 19 mm 红外反光标志球和 4 块跟踪板 16 个反光标志点, 从 V3D 软件中定义骨盆、大腿、小腿和足等 7 个环节, 从而确定受试者下肢 3 个关节(踝、膝和髋关节), 并且在动作之前拍摄静态模型。

(3) 所有受试对象均是以自然的速度上楼, 并采集第 2、4 个台阶(自下至上)、下楼则是采集第 4、2 个台阶(自上而下)。即受试者均是在上楼时右脚接触第 2 个台阶开始, 当右脚再次接触第 4 个台阶结束; 下楼时则是右脚接触第 4 个台阶开始, 当右脚再次接触第 2 个台阶时则结束, 自选比较舒服的速度来完成。完成 5 次上楼测试后休息 5 min, 再完成 5 次下楼测试, 每个受试者以此类推。为了保证整个测试过程受试对象的安全, 要求在实验前熟练掌握对重心的控制, 并安排 1 名测试人员在楼梯附近进行必要的保护。

(4) 通过 QTM 信号采集和处理软件, 主要用来同步采集运动学和动力学的原始信号, 并对标志点的名称和位置进行确认、补充丢失的运动轨迹等前

期工作。采用 V3D 生物力学分析软件(C-Motion 公司, 美国), 根据获得的 QTM 运动学数据和 Kistler 测力台动力学数据进行低通滤波器过滤, 其截断频率分别为 12、50 Hz, 进行力学处理和逆向动力学的计算与分析。通过逆向动力学计算得到关节力矩, 关节功率为关节净力矩与角速度的乘积, 定义踝关节跖屈力矩、膝和髋关节伸展力矩为正值(+), 对应踝关节背屈力矩、膝和髋关节屈曲力矩为负值(-); 踝、膝和髋关节功率正值(+)表示能量产生, 负值(-)则表示能量吸收/耗散。另外, 整个步行周期需要归一化来计算摆动期和支撑期之间的比例, 关节力矩和关节功率则分别用自身体重完成相应的标准化处理。

### 1.4 统计分析

所有受试者 5 次采集的数据采用平均数±标准差表示, 利用 SPSS 17.0 中独立样本 *t* 检验分析年龄对上述参数的影响以及上下楼之间的差异,  $P < 0.05$  表示差异具有统计学意义。

## 2 研究结果

### 2.1 上下楼梯过程中青年人与老年人步态特征

不论是上楼还是下楼, 与青年人相比, 老年人步行周期、步速、步频以及支撑相和摆动相的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。其中, 老年人的步态时间较长, 步速和步频相对较慢。虽然, 青年人和老年人在支撑相和摆动相的差异具有统计学意义( $P < 0.05$ ), 但两者的单支撑相和双支撑相却并未出现显著性差异, 只是老年人在双支撑相的时间相对较多, 或许是要避免单腿支撑能力不足带来的跌倒风险。该结果说明, 增龄致使老年人楼梯运动功能性不足, 通常在上下楼梯过程中采取谨慎的态度, 故步行速度和步频较为缓慢。另外, 与下楼相比, 不论青年人还是老年人, 上楼的步态周期明显较长、同时步速和步频均明显较低( $P < 0.05$ ), 见表 2。

### 2.2 上下楼梯过程中青年人与老年人下肢关节角度

不论是上楼或下楼, 老年人髋关节的屈曲角度与青年人相比差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。其中, 上楼时老年人的髋关节屈曲角度较大, 而在下楼时则是青年人屈曲角度较大。虽然膝关节在上楼和下楼过程也出现类似的趋势, 但两者差异无统计学

表2 青年人与老年人上下楼梯时步态特征参数

Tab. 2 Gait parameters of young and older adults in ascending and descending stair

参数	上楼		下楼	
	青年人	老年人	青年人	老年人
步行周期*/s	1.22±0.14 <sup>#</sup>	1.37±0.19 <sup>△</sup>	1.03±0.08	1.20±0.10
步速*/(m·s <sup>-1</sup> )	0.55±0.06 <sup>#</sup>	0.48±0.09 <sup>△</sup>	0.66±0.05	0.55±0.07
步幅(cm)	67.01±1.54	65.71±1.97	68.00±3.31	65.97±2.78
步频*/(步·min <sup>-1</sup> )	99.68±7.96 <sup>#</sup>	90.15±11.08 <sup>△</sup>	116.58±8.76	103.21±8.19
支撑相*/%	61.88±2.26	63.94±2.45	60.13±1.97	61.64±2.40
单支撑相/%	39.03±1.95	39.80±2.07	41.25±1.74	38.15±2.16
双支撑相/%	22.86±1.13	24.13±1.34	19.41±1.50	23.49±2.03
摆动相*/%	38.11±1.76	36.07±1.25	40.00±1.93	38.25±2.26

注:双支撑相包括第1双支撑相和第2双支撑相,\*表示年龄之间比较, $P<0.05$ ;<sup>#,△</sup>分别表示青年人、老年人上楼和下楼之间比较, $P<0.05$ 。

意义( $P>0.05$ )。虽然老年人和青年人上楼和下楼下肢关节角度的变化趋势较为一致,但老年人和青年人踝关节跖屈和背屈的最大角度差异有统计学

意义( $P<0.05$ ),具体表现为青年人上楼的踝关节角度峰值均大于老年人,但下楼时则小于老年人(见图2)。

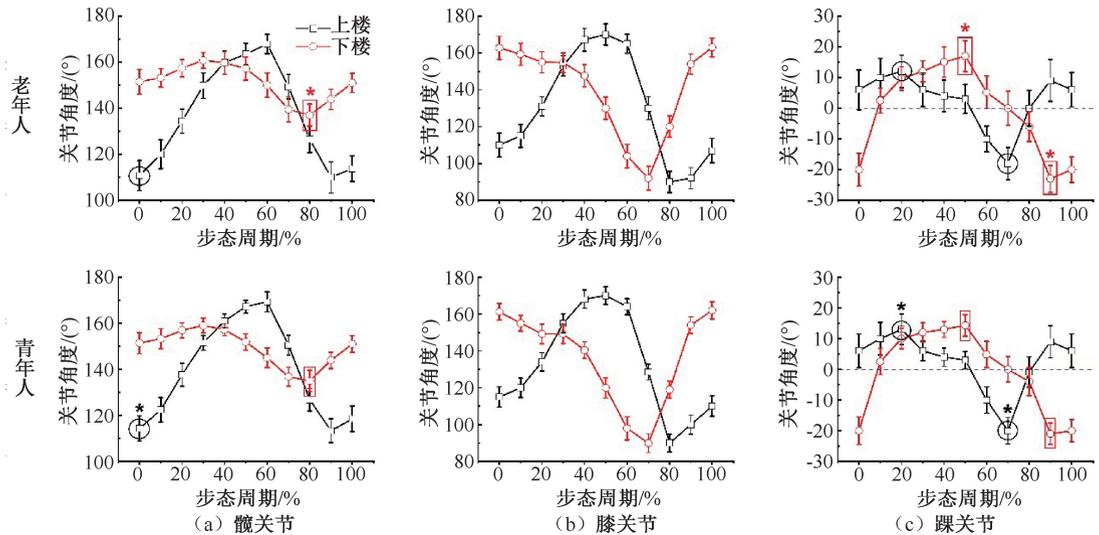


图2 青年人与老年人上下楼各阶段下肢关节角度比较

Fig. 2 Comparison of lower extremity joint angles during stair ascent and descent for young and older adults

(a) Hip joint, (b) Knee joint, (c) Ankle joint

注:\*表示在上楼和下楼过程中老年人与青年人下肢关节角度比较, $P<0.05$ 。其中,踝关节角度(+)表示背屈,(-)表示跖屈。

### 2.3 上下楼梯过程中青年人与老年人下肢关节力矩

不论是老年人还是青年人,其上楼和下楼过程中下肢关节力矩的变化趋势较为一致。但是,两者都是在上楼的支撑后期和下楼的支撑前期踝关节跖屈肌力矩出现峰值,且青年人明显高于老年人( $P<0.05$ )。上楼时老年人的膝关节伸展力矩峰值与青年人相比差异有统计学意义( $P<0.05$ ),但是下

楼时两者差异无统计学意义( $P>0.05$ )。另外,老年人上楼或下楼髋关节伸展/屈曲力矩均与青年人相比,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),见图3。

### 2.4 上下楼梯过程中青年人与老年人的下肢关节功率

总体来看,不论是上楼还是下楼,老年人和青年人的下肢关节功率变化趋势较为一致。其中,上楼过程中,下肢髋、膝和踝关节功率峰值分别出现

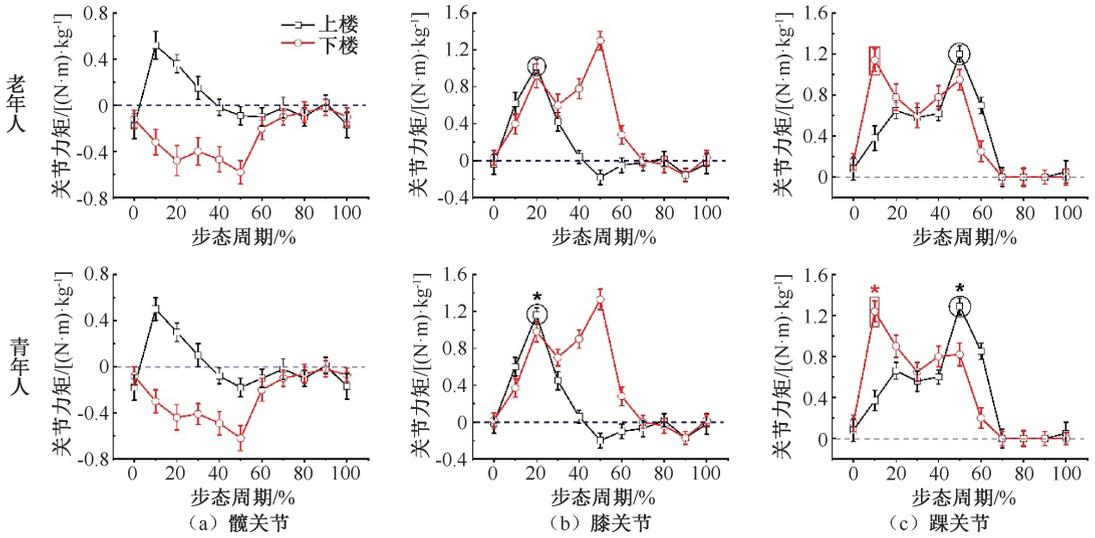


图3 青年人与老年人上下楼各阶段下肢关节力矩比较

Fig. 3 Comparison of lower extremity joint moments during stair ascent and descent for young and older adults

(a) Hip joint, (b) Knee joint, (c) Ankle joint

注: \*表示在上楼和下楼过程中老年人与青年人下肢关节力矩比较,  $P < 0.05$ 。(+)值表示伸展/跖屈, (-)值表示屈曲/背屈。

在步态周期 20%、20% 和 60% 左右, 而且青年人髋、膝关节的功率峰值都高于老年人, 踝关节功率峰值低于老年人, 但仅膝和踝关节的功率峰值与老年人比较差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。老年人下楼过

程与上楼较为相似, 膝、髋关节功率峰值都低于青年人 ( $P < 0.05$ )。虽然老年人的踝关节功率高于青年人, 但两者差异没有统计学意义 ( $P > 0.05$ ), 见图 4。

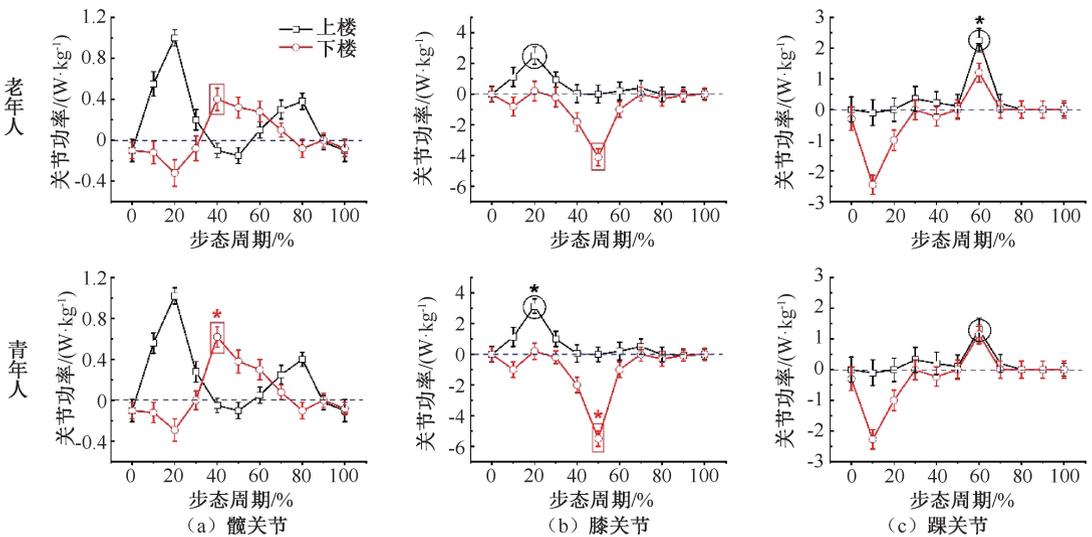


图4 青年人与老年人上下楼各阶段下肢关节功率比较

Fig. 4 Comparison of lower extremity joint powers during stair ascent and descent for young and older adults

注: \*表示在上楼和下楼过程中老年人与青年人下肢关节功率比较,  $P < 0.05$ 。(+)值表示能量产生, (-)值表示能量吸收。

### 3 讨论

本文发现,由于受楼梯台阶结构尺寸的限制,青年人和老年人上楼和下楼时步幅都相差无几,但总体上青年人的步幅都略比健康老年人长一些。老年人上下楼的步行时间均明显多于青年人,且步速和步频也与之呈现显著性差异。上述结果间接佐证了一个观点:老年人上下楼经常会采取较为谨慎的方式,避免出现楼梯跌倒的事故发生<sup>[8]</sup>。另外,随着年龄增长,老年人上下楼梯支撑相的比例较多、摆动相则明显较少,表明老年人由于身体机能的下降以及下肢肌肉力量的不足,害怕在上下楼梯时失去平衡,试图通过减少摆动期的时间来弥补身体姿势的不稳定<sup>[17-18]</sup>。该结果也证实了老年人试图通过增加双脚支撑的时间来提高身体的稳定性,进而避免出现身体失衡的状况<sup>[20-22]</sup>。

不论老年人和青年人,上楼和下楼时下肢关节角度变化趋势均比较一致,这与前期研究结果较为相似<sup>[1,6]</sup>。上楼的触地瞬间,膝、髋关节处于屈曲状态,踝关节则是背屈状态;随后膝、髋关节开始伸展,踝关节则进入跖屈阶段。相反,在下楼的触地瞬间,髋关节是轻微的屈曲状态,膝关节几乎完全伸展状态,踝关节则是跖屈状态。随后,膝、髋关节则进入屈曲状态,特别是在摆动初期或支撑末期达到屈曲最大值。其中,踝关节在下楼时的支撑阶段大部分都是保持背屈状况,在支撑末期开始跖屈。其实不管是膝关节还是髋关节的摆动阶段,老年人和青年人上楼时屈曲的最大角度都比下楼来得晚一些<sup>[12-14]</sup>。虽然在上下楼过程中老年人、青年人的下肢关节力矩变化趋势较为一致,比如上楼时,膝、髋关节的伸展力矩峰值出现在支撑中期,而踝关节的跖屈力矩峰值出现在支撑末期。但下楼时,膝、髋关节的伸展、屈曲力矩峰值出现支撑末期,而踝关节的跖屈力矩峰值则出现在支撑初期。但是,老年人上楼时的踝关节跖屈肌力矩峰值和膝关节伸展力矩峰值都明显低于青年人,前期有研究指出,老年人在上楼时踝、膝关节力矩峰值均低于青年人<sup>[12-14]</sup>,本文的研究结果也支持该观点。其实,踝关节跖屈肌力矩和膝关节伸肌是整个运动过程支撑力矩的主要组成,而髋关节主要负责控制身体姿势以及下楼过程中的能量吸收<sup>[17]</sup>。整体来看,不管

老年人还是青年人,在上楼时踝关节跖屈肌力矩峰值都高于下楼时,但上楼时膝关节伸肌力矩峰值都低于下楼时,主要原因是下楼时有一部分能量要控制身体姿势的平衡<sup>[18]</sup>。同时,上下楼的髋关节力矩峰值较为相似。

从能量吸收和耗散的角度看,在上楼时的支撑初期,髋关节是能量产生,踝关节是能量消耗/吸收;支撑中期,膝关节开始能量产生;在支撑末期,踝关节开始能量产生,主要用于蹬离、肢体向前加速摆动;在摆动中期,膝关节也有能量产生。下楼过程中,不论青年人还是老年人,髋关节功率都较小,而膝、踝关节功率比较大,特别是膝关节功率,都是能量消耗/吸收<sup>[21]</sup>。膝关节功率峰值出现在支撑末期,而踝关节功率峰值则出现在支撑初期。虽然老年人与青年人都是以自然爬楼的方式来完成,很明显老年人的步频更慢一些,致使青年人髋、膝关节功率峰值都高于老年人,踝关节功率峰值低于老年人,但仅膝、踝关节的功率峰值与老年人比较差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。该结果提示,老年人主要依靠踝关节的能量产生来保证正常的上楼动作,而青年人则未动用较多的踝关节能量,通过更多的近端肢体供能(特别是更多的膝关节功率)来维系正常的上楼动作。下楼过程中与上楼较为相似,青年人膝和髋关节功率峰值都高于老年人。虽然老年人的踝关节功率也高于青年人,但差异没有统计学意义( $P > 0.05$ )。本文认为,青年人动用更多的近端肢体能量来维持身体的姿势稳定性,而老年人肢体间的能量转移或补偿不足,使之必须付出更多的远端肢体能量,进而增加了其下楼发生跌倒的危险<sup>[16,20-21]</sup>。

本研究的局限性如下:①受试对象都是健康人群,且具有较好的活动能力,并未涉及患者康复领域步态研究<sup>[24]</sup>,故限制了研究结果的进一步推广;②虽然对老年人和青年人下肢3个关节上下楼梯矢状面内行走进行生物力学分析,但并未涉及额状面和水平面。在未来的研究中,希望更多的研究围绕爬楼速度<sup>[25]</sup>、携带重物质量和位置等方面展开,进而为丰富和预防老年人跌倒理论提供参考依据。

### 4 结论

增龄致使老年人上下楼梯的步态周期较长,而

步速和步频较低。同时,上下楼梯过程中老年人的支撑相延长,且摆动相则相对缩短。老年人上楼主要是通过踝、膝关节功率的产生来维持,而青年人则是通过近端肢体的能量,特别动用了较多的膝关节功率。而在下楼过程中,均是膝关节扮演着能量吸收的重要角色。

### 参考文献:

- [ 1 ] SAMUEL D, ROWE P, HOOD V, *et al.* The biomechanical functional demand placed on knee and hip muscles of older adults during stair ascent and descent [J]. *Gait Posture*, 2011, 34(2): 239-244.
- [ 2 ] SAMUEL D, ROWE P, NICOL A. The functional demand (FD) placed on the knee and hip of older adults during everyday activities [J]. *Arch Gerontol Geriatr*, 2013, 57(2): 192-197.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] REEVES N D, 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): e57-e68.
- [ 5 ] MASUD T, MORRIS RO. Epidemiology of falls [J]. *Age Ageing*, 2001, 30(S4): 3-7.
- [ 6 ] PEEL NM. Epidemiology of falls in older age [J]. *Can J Aging*, 2011, 30(1): 7-19.
- [ 7 ] STARTZELL JK, OWENS DA, MULFINGER LM, *et al.* Stair negotiation in older people: A review [J]. *J Am Geriatr Soc*, 2000, 48(5): 567-80.
- [ 8 ] ANDRIACCHI TP, ANDERSSON GBJ, FERMIER RW, *et al.* A study of lower-limb mechanics during stair-climbing [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1980, 62(5): 749-757.
- [ 9 ] MCFADYEN BJ, WINTER DA. An integrated biomechanical analysis of normal stair ascent and descent [J]. *J Biomech*, 1988, 21(9): 733-744.
- [ 10 ] RIENER R, RABUFFETTI M, FRIGO C. Stair ascent and descent at different inclinations [J]. *Gait Posture*, 2002, 15(1): 32-44.
- [ 11 ] 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): 54-60.
- [ 12 ] SONG Q, TIAN X, WONG D, *et al.* Effects of Tai Chi exercise on body stability among the elderly during stair descent under different levels of illumination [J]. *Res Sports Med*, 2017, 25(2): 197-208.
- [ 13 ] MALTA DC, SILVA MM, MASCARENHAS MD, *et al.* The characteristics and factors of emergency service visits for falls [J]. *Rev Saude Publica*, 2012, 46(1): 128-137.
- [ 14 ] TALBOT LA, MUSIOL RJ, WITHAM EK, *et al.* Falls in young, middle-aged and older community dwelling adults: Perceived cause, environmental factors and injury [J]. *BMC Public Health*, 2005, 5: 86.
- [ 15 ] KOOL B, AMERATUNGA S, HAZELL W, *et al.* Unintentional falls at home among young and middle-aged New Zealanders resulting in hospital admission or death: Context and characteristics [J]. *N Z Med J*, 2010, 123(1316): 75-84.
- [ 16 ] KUNZLER MR, DA ROCHA ES, DOS SANTOS CS, *et al.* Should we consider steps with variable height for a safer stair negotiation in older adults? [J]. *Work*, 2018, 59(1): 15-21.
- [ 17 ] ROYS MS. Serious stair injuries can be prevented by improved stair design [J]. *Appl Ergon*, 2001, 32(2): 135-139.
- [ 18 ] NEMIRE K, JOHNSON DA, VIDAL K. The science behind codes and standards for safe walkways: Changes in level, stairways, stair handrails and slip resistance [J]. *Appl Ergon*, 2016, 52(3): 309-316.
- [ 19 ] NIGHTINGALE EJ, POURKAZEMI F, HILLER CE. Systematic review of timed stair tests [J]. *J Rehabil Res Dev*, 2014, 51(3): 335-350.
- [ 20 ] PROTOPAPADAKI A, DRECHSLER WI, CRAMP MC, *et al.* Hip, knee, ankle kinematics and kinetics during stair ascent and descent in healthy young individuals [J]. *Clin Biomech*, 2007, 22(2): 203-210.
- [ 21 ] REID SM, LYNN SK, MUSSELMAN RP, *et al.* Knee biomechanics of alternate stair ambulation patterns [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2007, 39(11): 2005-2011.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] 张峻霞, 窦树斐, 苏海龙, 等. 上、下楼梯步态参数变化特征研究 [J]. *医用生物力学*, 2016, 31(3): 266-271.
- ZHANG JX, DOU SF, SU HL, *et al.* Variation characteristics of gait parameters during stair ascent and descent [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(3): 266-271.
- [ 24 ] 姚杰, 任韦燕, 蒲放. 康复领域步态研究的进展与展望 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(5): 787-788.
- YAO J, REN WY, PU F. Progress and prospect of gait research in rehabilitation field [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(5): 787-788.
- [ 25 ] 张红倩, 王巍, 代新年, 等. 衰弱状态和步行速度对老年人下载关节运动学特征的影响 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(5): 832-838.
- ZHANG HQ, WANG W, DAI XN, *et al.* Effects of frailty state and walking speed on kinematic characteristics of lower limb joints in older adults [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(5): 832-838.