

文章编号: 1004-7220(2024)01-0125-07

偏瘫患者下台阶过程下肢生物力学特征分析

周鲁星^{1a,2}, 孟庆华^{1a,1b,2}, 刘文红³, 张楠^{1a,2}, 崔帅琦^{1a,2}, 刘姣^{1a,2}

(1. 天津体育学院 a 运动健康学院; b 体育经济与管理学院, 天津 301617; 2. 天津市运动损伤与康复虚拟仿真实验教学中心, 天津 301617; 3. 中国人民解放军联勤保障部队 天津康复疗养中心, 天津 300191)

摘要:目的 对比分析偏瘫患者以不同方式下台阶过程中下肢生物力学特征, 为降低患者下台阶过程中的跌倒风险提供理论依据。方法 选取 10 名正常人和 20 名符合要求的偏瘫患者, 使用 Qualisys 动作捕捉系统和 Kistler 三维测力台对受试者下台阶过程中的运动学和动力学数据进行收集, 分析其在下台阶过程中的生物力学特征和跌倒风险。结果 相较于正常人和先用健足下台阶 (steps on the healthy side, SHS), 先用患足下台阶 (steps on the affected side, SAS) 时, 患侧下肢各关节屈伸活动幅度较小; SHS 降低了健侧膝关节屈伸活动幅度, 患侧下肢各关节屈伸活动幅度较 SAS 大; SAS 下台阶左右方向地面反作用力 (ground reaction force, GRF) 曲线变化与正常人较为一致, 患侧落地瞬间垂直 GRF 最大为 1.05 倍体重, 健侧为 1.25 倍体重, 低于正常人 (1.5 倍体重); SHS 下台阶健侧落地瞬间最大垂直 GRF 为 1.85 倍体重, 高于 SAS 和正常人。结论 相较于 SAS, 患者使用 SHS 下台阶患侧关节活动幅度和落地瞬间垂直 GRF 较大, 更难掌握。SAS 更符合偏瘫患者下台阶的生物力学特征。

关键词: 偏瘫; 下台阶; 跌倒; 关节角度; 地面反作用力

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.01.018

Analysis of Biomechanical Characteristics of Lower Limbs During Stair Descent in Patients with Hemiplegia

ZHOU Luxing^{1a,2}, MENG Qinghua^{1a,1b,2}, LIU Wenhong³, ZHANG Nan^{1a,2}, CUI Shuaiqi^{1a,2}, LIU Jiao^{1a,2}

(1a. Institute of Sport, Exercise & Health; 1b. School of Sports Economics and Management, Tianjin University of Sport, Tianjin 301617, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Sports Physiology and Sports Medicine, Tianjin 301617, China; 3. Tianjin Rehabilitation and Convalescent Center, the People's Liberation Army Joint Service Support Force, Tianjin 300191, China)

Abstract: Objective To conduct a comparative analysis of the biomechanical characteristics of the lower limbs during stair descent in patients with hemiplegia using different method to provide theoretical references for reducing fall risk during stair descent. **Methods** Ten healthy subjects and 20 patients with hemiplegia were selected, and their kinematic and dynamic data during stair descent were collected using the Qualisys Motion capture system and the Kistler three-dimensional dynamometer. Their biomechanical characteristics and fall risks were also analyzed. **Results** Compared with that of healthy subjects and patients that step on the healthy side (SHS), the range of motion (ROM) of the affected side in the lower-limb joints of patients that step on the affected side (SAS) was smaller. SHS reduced the flexion and extension ranges of the healthy side of the knee joint, and the ROM of the affected side in the lower-limb joints of SHS patients was greater than that of SAS

收稿日期: 2023-07-02; 修回日期: 2023-07-29

基金项目: 天津市自然科学基金项目 (18JCZDJC35900), 天津市研究生创新项目 (2020YJSB104)

通信作者: 孟庆华, 教授, E-mail: 745112962@qq.com

patients. The ground reaction force (GRF) curve changes of SAS patients in left and right directions during stair descent were relatively consistent with those of normal subjects. The maximum vertical GRF of the affected side in SAS patients at the moment of landing was 1.05 times the body weight, whereas that of the healthy side was 1.25 times the body weight, which was lower than that of normal subjects (1.5 times the body weight). The maximum vertical GRF of the healthy side in SHS patients at the moment of landing was 1.85 times the body weight, which was higher than that of SAS patients and normal subjects. **Conclusions** Compared with that of SAS patients, the affected limb side of SHS patients has a greater ROM and vertical GRF at the moment of landing during stair descent, making SHS difficult to master. SAS is most consistent with the biomechanical characteristics during stair descent of patients with hemiplegia.

Key words: hemiplegia; stair descent; fall; joint angle; ground reaction force (GRF)

“脑卒中”又称“中风”“脑血管意外”，偏瘫是后遗症之一，严重影响患者的身体健康^[1]。独立行走是衡量偏瘫患者整体自主性和生活质量的重要指标，以及中风康复的主要目标之一^[2]。偏瘫患者不仅需要在平坦地面行走，而且需要通过台阶等障碍物。Faria 等^[3]研究表明，上下楼梯需要增加与肌肉力量、平衡、协调和心肺健康相关的身体机能，上下楼梯能力是预测患者社区活动的最佳指标。

许多场所为中风等残障人士设置了无障碍通道，但是更多场所的无障碍设施设计并不合理，中风患者经常光顾的大多数场所通常都需要上下楼梯^[4]，至少有 1/3 中风受试者在中风发作后 6~12 月仍需要帮助来爬楼梯^[5-6]。

上下台阶的过程中，患者需要付出比平坦地面更多的努力来保持平衡，故大部分患者需要借助台阶扶手或者手杖上下台阶。正常人上下台阶跌倒次数占总跌倒次数的 26%，而下台阶跌倒次数约占台阶跌倒次数的 75%^[7]。由此可见，下台阶的难度相对较高。偏瘫患者在下台阶时需要克服重心做功，肌肉多为离心工作模式，需要更大的肌肉力量^[8]。偏瘫患者瘫痪侧肌肉力量下降，上下台阶过程中需要其他人帮助或者手扶台阶把手，在进行活动时需要健侧代偿，对全身起主要贡献的是健侧^[9]。偏瘫患者有两种下台阶的方式：先用患足下台阶 (steps on the affected side, SAS) 和先用健足下台阶 (steps on the healthy side, SHS)。研究表明，两种方式下台阶对于身体的负荷和下肢的做功不同，SAS 更有利于患者掌握^[10-11]。

下台阶作为偏瘫患者在生活中不可避免的运动模式，需要引起康复治疗师的关注，大部分患者

不仅需要克服对台阶的恐惧心理，而且需要通过台阶练习增强患者的平衡功能。本文主要对偏瘫患者下台阶过程中的运动生物力学数据进行收集和处 理，分析患者在下台阶过程中的生物力学特征和跌倒风险，为降低患者跌倒风险的运动训练提供实践与理论指导。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

参照 2019 年中华神经科学会制定的《中国各类主要脑血管病诊断要点 2019》的卒中诊断标准^[12]，选取 2020 年 10 月~2021 年 6 月在天津康复疗养中心进行康复治疗的脑卒中病人 20 例，纳入为实验组。实验组纳入标准：年龄 45~65 岁；病程 6 个月以上；能够不使用足部矫形器独立行走和独立上下台阶。排除标准：患有严重高血压、心脏病、骨关节疾病、认知障碍等并发症；关节活动范围严重受限，无法独立上下台阶；视觉、听觉、本体感觉存在严重障碍，影响实验评估效果。本文选取 10 名正常受试者作为对照组。对照组纳入标准：年龄 45~65 岁；没有严重的基础病（心脏病、高血压等）；能够不使用扶手独立上下楼梯。

本文共纳入实验组受试者 20 名，其中男性 15 名，女性 5 名，左侧患病 12 例，右侧患病 8 例；对照组受试者 10 名，其中男性 5 名，女性 5 名。本文研究过程中无受试者脱落。受试者详情见表 1。结果显示，实验组受试者身高、体质量均大于对照组 ($P < 0.05$)，其他数据差异均无统计学意义。

1.2 测试指标与方法

1.2.1 测试仪器与指标 采用 Qualisys Track

表1 受试者基本信息

Tab. 1 Basic information of the subjects

参数	实验组	对照组
年龄/岁	58.95±5.77	61.70±3.16
身高/cm	171.35±10.27	163.40±7.50*
体质量/kg	72.85±10.26	62.80±8.64*
BMI/(kg·m ⁻²)	24.75±2.51	23.49±2.49
病龄/月	20.40±10.22	—

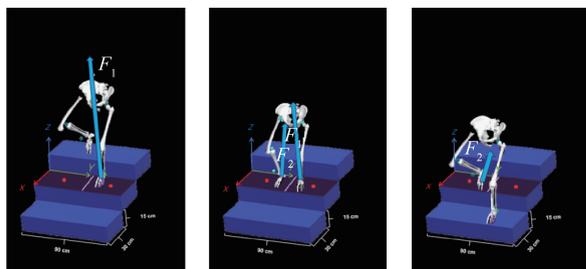
注: BMI 为身体质量指数, * $P < 0.05$ 。

Manager(QTM)光学动作捕捉系统(Qualisys公司,瑞典)分别对受试者下台阶过程中下肢各关节运动学数据进行测定。采用2块Kistler三维测力系统(型号9281B,Kistler公司,瑞士)对受试者下台阶过程中地面反作用力(ground reaction force,GRF)进行测定。

测试指标:收集受试者在下台阶过程中的运动学和动力学数据,对比受试者下台阶过程中的关节活动幅度、运动轨迹和力学变化。

1.2.2 测试方法 选用长90 cm、宽30 cm、高15 cm台阶进行测试,台阶两侧配有扶手,防止意外发生。测试过程如下:

SHS测试:受试者正常站立在台阶上,听到指令后,先抬健侧脚下台阶,然后患侧脚落于同一台阶(SHS),站稳后再使用同样方法下一台阶后停止测试;**SAS测试:**受试者患侧脚先下台阶,然后健侧脚落于同一台阶(SAS),站稳后再使用同样方法下一台阶后停止测试。测试共采用4阶台阶,三维测力台位于第3阶台阶,实验组受试者需要连续下3阶台阶,在完成1次下台阶保持稳定后再下一阶台阶(见图1)。对照组测试:受试者正常站立在台



(a) 左脚支撑GRF (b) 双脚支撑GRF (c) 右脚支撑GRF

图1 实验组受试者下台阶测试模型

Fig. 1 Stair descent test model for subjects of experimental group (a) GRF of left foot support, (b) GRF of bipedal support, (c) GRF of right foot support

注:模型为Visual3D 2020建模。 F_1 、 F_2 分别为左右脚支撑GRF。

阶上,听到指令后,左侧先下台阶然后右侧再下台阶至测试结束。测试过程中受试者不可以扶拐杖或者求助他人,要求整个下台阶过程连贯,不可以大幅度摇摆,否则记为实验失败,每种测试成功3次后换下一受试者进行测试。

在受试者测试期间,其主治医师全程陪同,并有1名测试人员全程保护,防止受试者跌落台阶受伤。测试结束后使用Visual 3D 2020软件识别QTM2020建立的骨骼模型,并进行数据分析。

1.3 统计方法

使用QTM 2020和Visual 3D 2020软件对原始数据进行处理,获得下肢运动学数据和动力学数据,运用SPSS 22.0统计软件对处理后的数据进行数据分析,对统计的所有参数进行S-W正态分布检验。符合正态分布,同一测试的健/患侧使用配对样本 t 检验;不同测试的同侧使用单因素方差分析;不符合正态分布的数据采用非参数检验。显著性水平 $P < 0.05$ (因为对照组受试者没有区分健/患侧,测试数据为两侧均值,进行显著性水平对比)。

2 研究结果

2.1 下台阶过程中运动学参数

选取一侧脚抬离台阶开始到另一侧脚落在下一级台阶为1个周期,共计选取下两节台阶为研究周期。

结果表明,SAS和SHS患侧踝关节屈伸活动幅度均显著小于健侧($P < 0.01$, $P < 0.05$)。SAS患侧踝关节屈伸活动幅度显著小于SHS($P < 0.05$),SAS双侧、SHS健侧踝关节屈伸活动幅度均显著小于对照组($P < 0.01$)。SAS健侧内外翻角度显著小于SHS和对照组($P < 0.01$, $P < 0.05$),SAS和SHS患侧内外旋角度显著小于对照组($P < 0.01$)。

SAS患侧膝关节屈伸活动幅度显著小于健侧($P < 0.01$),SHS健侧膝关节屈伸活动幅度显著小于患侧($P < 0.01$)。SAS患侧膝关节屈伸活动幅度显著小于SHS($P < 0.01$),SAS健侧膝关节屈伸活动幅度显著大于SHS和对照组($P < 0.01$, $P < 0.05$),SHS健侧膝关节屈伸活动幅度显著小于对照组($P < 0.01$),SAS患侧膝关节屈伸活动幅度显著小于SHS和对照组($P < 0.01$),SAS双侧和SHS双侧膝关节内外翻角

度和内外旋角度均显著小于对照组($P<0.01$)。

SAS 患侧髋关节屈伸活动幅度显著小于健侧($P<0.01$),SHS 患侧髋关节内外旋活动幅度显著大于健侧($P<0.01$)。SAS 患侧髋关节屈伸活动幅度

显著小于 SHS 和对照组($P<0.01$),SAS 和 SHS 患侧髋关节内外翻显著小于对照组($P<0.01$),SAS 双侧和 SHS 健侧髋关节内外旋角度显著小于对照组($P<0.01$),见表 2。

表 2 受试者下台阶过程中下肢关节活动幅度

Tab. 2 Range of motion of Lower limb joints for subjects during stair descent

活动范围/(°)	踝关节		膝关节		髋关节	
	健侧	患侧	健侧	患侧	健侧	患侧
SAS 屈伸	41.92±4.82	25.56±8.04**	95.92±14.09	38.78±10.80**	38.08±7.07	24.57±8.06**
SHS 屈伸	46.70±9.68	33.81±4.90*	62.69±7.79	83.41±12.70**	38.38±12.23	37.58±8.56
对照组屈伸	52.16±10.87		88.14±5.18		36.12±7.20	
P_1	0.10	<0.01###	<0.01###	<0.01##	0.92	<0.01###
P_2	<0.01##	<0.01###	0.02#	<0.01##	0.50	<0.01###
P_3	0.06	<0.01###	<0.01###	0.14	0.44	0.56
SAS 内外翻	13.82±2.77	12.98±3.14	9.22±3.82	7.54±4.47	10.67±3.71	8.81±2.47
SHS 内外翻	17.01±5.62	14.48±4.41	6.96±3.98	8.21±2.87	12.61±6.80	9.35±4.50
对照组内外翻	17.91±4.02		15.26±4.61		14.33±2.91	
P_1	0.02#	0.23	0.09	0.61	0.16	0.61
P_2	<0.01##	<0.01###	<0.01###	<0.01##	0.06	<0.01###
P_3	0.51	<0.01###	<0.01###	<0.01##	0.30	<0.01###
SAS 内外旋	14.23±6.87	12.28±4.46	12.97±3.22	13.92±3.01	10.24±1.86	10.66±4.52
SHS 内外旋	12.2±3.04	16.02±6.04	12.72±6.12	12.51±1.79	9.88±2.52	14.30±3.01**
对照组内外旋	15.63±2.97		20.9±5.97		15.68±4.37	
P_1	0.17	0.14	0.88	0.27	0.73	0.06
P_2	0.35	0.13	<0.01###	<0.01##	<0.01###	<0.01###
P_3	0.08	0.79	<0.01###	<0.01##	<0.01###	0.30

注: Δ 表示通过 S-W 检验后 $P<0.05$; * 表示通过配对样本 t 检验后 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$; # 表示通过单因素方差分析 $P<0.05$, ## 表示 $P<0.01$; P_1 为 SAS 与 SHS 对比结果, P_2 为 SAS 与对照组对比结果, P_3 为 SHS 与对照组对比结果。

相较于正常人和患者 SHS, SAS 患侧下肢各关节活动幅度较小, 健侧与正常人和 SHS 差别不大; SHS 健侧下肢各关节活动幅度较小, 患侧下肢各关节活动幅度较 SAS 大(见图 2)。

2.2 下台阶过程中 GRF

受试者在落地过程中一只脚先落地, 受试者 GRF 前后和左右方向均有正负值, 其中前后方向正值代表 GRF 方向向前(人体重心在支撑点前), 负值代表 GRF 方向向后(人体重心在支撑点后); 左右方向正、负值分别代表身体内外侧。测试过程中每个人的体重(body weight, BW)不一致, 采用标准化后的 GRF 百分比作为本研究指标:

$$\text{GRF}\% = (\text{GRF}/W) \cdot g^{-1}$$

式中: W 为受试者体重; g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ N/kg}$ 。

由受试者在落地过程中 GRF 变化详情可知, 正常人下台阶过程中两侧配合协调, 3 个方向 GRF 有

节奏变化, 垂直方向落地瞬间最大 GRF 为 1.5 BW。SAS 下台阶左右 GRF 曲线变化与正常人较为一致, 患侧落地瞬间最大 GRF 为 1.05 BW, 健侧为 1.25 BW; SHS 下台阶健侧落地瞬间最大 GRF 为 1.85 BW, 高于 SAS 和正常人(见图 3)。

3 讨论与分析

偏瘫患者相较于正常人跌倒概率更高, 步行和通过障碍物的步态稳定性更差^[3]。本文设计了两种偏瘫患者下台阶方式的实验, 对比患者以 SHS 和 SAS 不同方式下台阶的生物力学变化, 验证偏瘫患者和正常人下台阶的生物力学差异。

偏瘫是指患者一半的身体瘫痪, 包括头面部、躯干和上下肢^[1]。与下台阶息息相关的患侧臀部肌群、股四头肌、腓绳肌和小腿三头肌往往因偏瘫导致肌无力或痉挛, 严重损害了患者日常生活能力。正常人在下台阶过程中包含支撑相和摆动相,

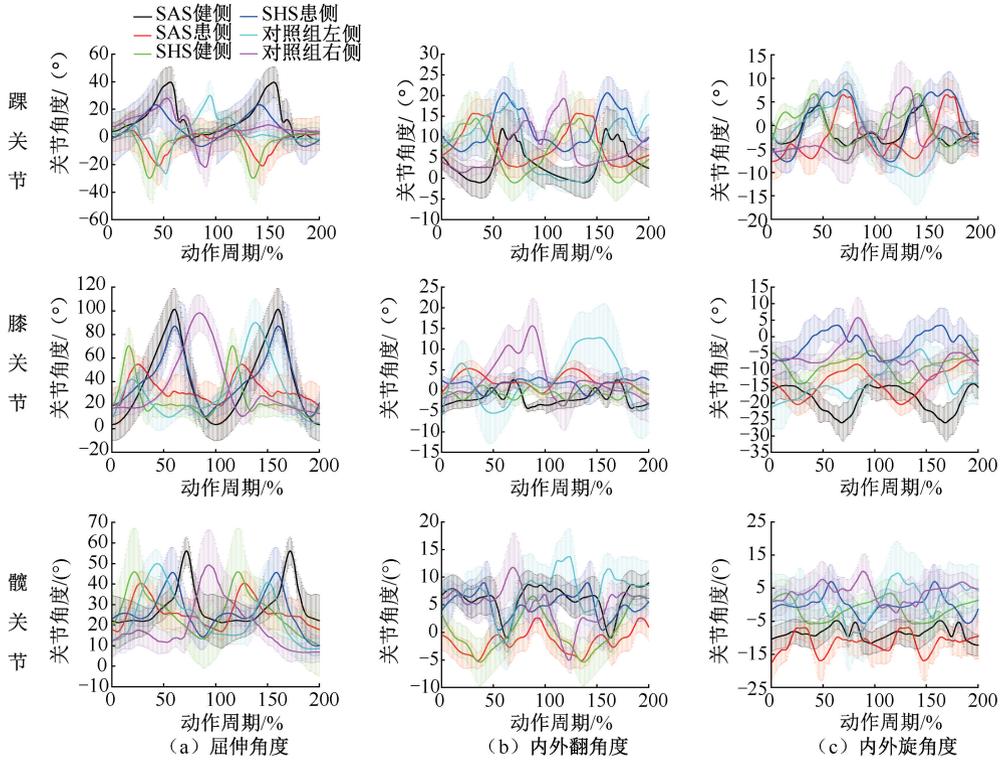


图2 下肢关节角度随下台阶过程变化

Fig. 2 Changes in lower limb joint angles during stair descent (a) Flexion and extension angle, (b) Varus and valgus angle, (c) Internal and external rotation angle

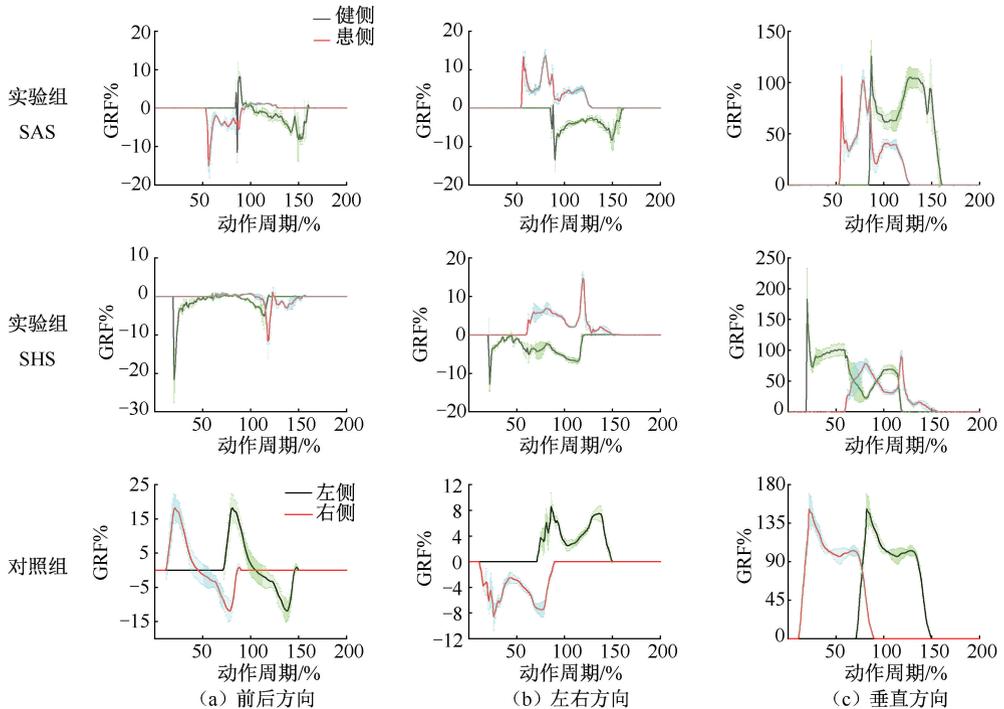


图3 GRF 随下台阶过程变化

Fig. 3 Changes in GRF during stair descent (a) In anteroposterior direction, (b) In left and right direction, (c) In vertical direction

整个下台阶过程左右侧肌肉协调配合,左右两侧下肢运动学和动力学参数基本一致,在下台过程中能够保持动态平衡,跌倒风险较低^[13]。偏瘫患者在下台阶时,因患侧肌肉痉挛导致其控制能力差,需要两步才能下一级台阶^[14],故偏瘫患者下台阶过程包括摆动相、支撑相和双脚支撑相。偏瘫导致的患侧肌肉力量减弱、肌肉痉挛或萎缩均会影响患者平衡功能,增加其跌倒风险^[9]。皮绍文等^[10]针对偏瘫患者上下楼梯的方式进行研究,结果表明,两种上下台阶的方式中,健上患下的方式更利于患者掌握。

本文发现,偏瘫患者 SAS 患侧下肢关节屈伸活动幅度均小于正常人和 SHS,与 SAS 相比,SHS 均增加了患侧的髌膝踝关节屈伸活动幅度,增加了患侧压力,相对于 SHS,患者在患病后使用较少时间掌握 SAS 方式^[10]。虽然使用 SAS 方式下台阶时,健侧膝关节屈伸活动幅度显著大于 SHS,但是对于肌肉力量更好的健侧而言,困难程度较小^[15]。为了深入了解患者下楼梯过程中的动力学因素,本文采用了两个下台阶周期进行动力学分析。结果发现,在 SAS 和 SHS 下台阶过程中,患者患侧支撑过程中均发生人体质心(center of mass, COM)失衡现象,此时需要依靠本体感觉保持平衡^[16]。

患者使用 SAS 方式下台阶时,健侧臀部肌群、大腿前侧肌群做退让性工作,为保持身体稳定和患侧软着陆落地,健侧膝关节和髌关节逐渐屈曲缓冲 COM 下降趋势,患者更容易保持平衡,防止用力过猛失衡跌倒。患者健侧屈髌肌群发力配合膝关节将健侧抬高地面,患者需要依靠患侧保持平衡防止跌倒,患侧垂直、前后和左右方向 GRF 均出现波动。为防止健侧足硬着陆跌倒,健足在触地前有明显跖屈趋势,健足落地速度快,落地瞬间垂直 GRF 高于患侧,约为 1.25 BW。

下肢膝关节的稳定性对偏瘫患者完成下台阶动作至关重要,对下台阶过程中的能量吸收有重要作用^[17]。患者下台阶过程中的偏瘫患者在正常站立时,患侧股四头肌和腓绳肌无力容易导致屈膝($>15^\circ$)或膝反张($<5^\circ$),其中股四头肌无力是患者无法在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 控制膝关节屈伸的主要原因^[18],患者在下台阶的过程中,膝关节的屈伸幅度最大,此时患侧膝关节力量差,患者下台阶时需要更加依赖髌关节力量保证完成动作的安全性。偏瘫患者通

常会小腿三头肌痉挛或者肌无力,容易导致患者下楼梯患足触地时无法有效屈伸缓冲重力或者造成踝内翻触地,对患者造成伤害。为了避免伤害发生,在 SAS 下台阶的初始阶段,健侧支撑有效的控制患侧下落的速度和力度,并保持骨盆稳定性,而且为患侧支撑提供了良好的过渡期,有利于患者在下台阶过程中保持稳定,降低跌倒风险^[19-20]。

SHS 方式下台阶时患侧支撑不稳定^[21],健足落地速度快,健侧足触地后膝关节缓冲幅度和速度大于 SAS 患侧,为了缓冲下落趋势,触地后踝关节跖屈角度较大,患侧下肢稳定肌支撑力量较小,健侧抬高地面后 COM 短暂失控,身体控制能力差导致健侧下肢刚度大^[22],最大垂直 GRF 约为 1.85 BW,高于 SAS 和对照组,患者在 SHS 方式下台阶过程中难以使用患侧支撑控制平衡,可能会增加受试者跌倒和股骨骨折的风险^[23]。SHS 健足落地时,速度很快,前庭对健侧的控制减弱,此时主要依靠患者视觉和本体感觉保持平衡,若患者两方面出现功能障碍,跌倒可能性会增加,这也是患者下楼梯恐惧心理的来源之一。健侧足下台阶时,患侧主要进行由膝关节股四头肌主导的退让性工作,为稳定骨盆,患侧髌关节在整个过程中一直处于伸髌状态。健足落地后,小腿跖屈肌无力导致髌关节代偿,提前结束髌关节屈曲并进行伸髌运动,主动触地防止膝踝关节无力失衡跌倒^[24]。SHS 方式下台阶时,患足在落地过程中髌关节有明显外旋动作增加足偏移角提高支撑半径,侧面证实了 SHS 方式下台阶相比于 SAS 更有难度。

4 结论

本研究对 10 名正常人和 20 名偏瘫患者两种不同方式下台阶过程中的生物力学因素进行分析,结果表明,相较于正常人,偏瘫患者下台阶过程中的节奏被打破,跌倒风险较高;相较于 SAS,患者使用 SHS 方式下台阶患侧关节活动幅度和落地瞬间垂直 GRF 较大,更难掌握,SAS 更符合偏瘫患者下台阶的生物力学。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:周鲁星负责研究实施、论文撰写和数据处理;孟庆华负责选题和实验设计;刘文红负责研究实施和论文修改;张楠、崔帅琦、刘姣负责部分数据处理。

参考文献:

- [1] 黄旭, 孟庆华, 鲍春雨, 等. 中风偏瘫患者坐-站转移过程中的生物力学分析 [J]. 医用生物力学, 2021, 36(3): 479-484.
HUANG X, MENG QH, BAO CY, et al. Biomechanical analysis of stroke hemiplegic patients during sit-to-stand transfer [J]. J Med Biomech, 2021, 36(3): 479-484.
- [2] KINOSHITA S, ABO M, OKAMOTO T, et al. Utility of the revised version of the ability for basic movement scale in predicting ambulation during rehabilitation in poststroke patients [J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2017, 26(8): 1663-1669.
- [3] FARIA CD, MACHADO GC. The ability to manage stairs for chronic stroke survivors improves with increases in physical activity levels [J]. J Nov Physiother, 2013, 3(3): 10159.
- [4] SIQUEIRA FCV, FACCHINI LA, SILVEIRA D SD, et al. Architectonic barriers for elderly and physically disabled people: An epidemiological study of the physical structure of health service units in seven Brazilian states [J]. Cien Saude Colet, 2009, 14(1): 39.
- [5] WADE DT, HEWER RL. Functional abilities after stroke: Measurement, natural history and prognosis [J]. J Neurol Neurosurg Psychiatry, 1987, 50(2): 177-182.
- [6] CAROD-ARTAL FJ, GONZÁLEZ-GUTIÉRREZ JL, HERRE-RO JAE, et al. Functional recovery and instrumental activities of daily living: Follow-up 1-year after treatment in a stroke unit [J]. Brain Inj, 2002, 16(3): 207-216.
- [7] 王疆娜, 郑慧芬, 孙威. 下楼梯行走执行手机任务时下肢动态稳定性、运动协调性及关节力学的变化 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(6): 837-843.
- [8] 王卓, 闫红光. 老年人上下楼梯时下肢平衡稳定性的对比分析 [J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 366.
- [9] 周鲁星, 孟庆华, 刘文红, 等. 偏瘫患者以不同步态模式通过障碍物的生物力学特征对比分析 [J]. 医用生物力学, 2022, 37(5): 805-811.
ZHOU LX, MENG QH, LIU WH, et al. Comparative analysis of biomechanical characteristics in hemiplegia patients passing through obstacles [J]. J Med Biomech, 2022, 37(5): 805-811.
- [10] 皮绍文, 尹萍. 偏瘫患者上下楼梯训练方法比较 [J]. 中国康复理论与实践, 2004, 10(4): 231-232.
- [11] 彭哲勋, 钟运健, 刘昌昊, 等. 偏瘫患者上下楼梯时下肢关节力矩及做功的动力学分析 [J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 384.
- [12] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国各类主要脑血管病诊断要点 2019 [J]. 中华神经科杂志, 2019, 52(9): 710-715.
- [13] 唐刚. 人体典型运动生物力学仿真分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [14] NATALIO MA, FARIA CDCM, TEIXEIRA-SALMELA LF, et al. Content validation of a clinical assessment instrument for stair ascent and descent in individuals with hemiparesis [J]. Braz J Phys Ther, 2014, 18(4): 353-363.
- [15] 张晶晶, 李艳. 脑卒中偏瘫步态特点及康复策略 [J]. 中国老年学杂志, 2019, 39(5): 1044-1047.
- [16] 张彪. 本体感觉训练对偏瘫患者平衡功能及感觉整合的影响 [D]. 西安: 中北大学, 2016.
- [17] 李丹, 王剑雄, 黄茂茂, 等. 健康中老年女性上下楼梯时下肢肌肉的表面肌电图表现 [J]. 中国康复理论与实践, 2023, 29(6): 731-737.
- [18] 董珍珍, 丁岩, 邢艳丽. 脑卒中后偏瘫患者膝关节控制障碍与本体感觉的研究现状 [J]. 中国康复医学杂志, 2013, 28(11): 1079-1082.
- [19] SHEIKH M, AZARPAZHOOH MR, HOSSEINI HA. The effect of immediate decreasing of weight bearing asymmetry on quiet standing postural control in individuals with chronic stroke [J]. Physiother Theory Pract, 2017, 33(10): 751-757.
- [20] ARAZPOUR M, BAHRAMIAN F, ABUTORABI A, et al. The effect of patellofemoral pain syndrome on gait parameters: A literature review [J]. Arch Bone Jt Surg, 2016, 4(4): 298-301.
- [21] HANDELZALTS S, MELZER I, SOROKER N. Analysis of brain lesion impact on balance and gait following stroke [J]. Front Hum Neurosci, 2019, 13: 149-153.
- [22] 张希妮, 傅维杰, 夏锐, 等. 不同疲劳诱导方案对落地时下肢关节力学、刚度和能量吸收的影响 [J]. 体育科学, 2017, 37(11): 48-55.
- [23] BUJANDA ED, NADEAU S, BOURBONNAIS D, et al. Associations between lower limb impairments, locomotor capacities and kinematic variables in the frontal plane during walking in adults with chronic stroke [J]. J Rehabil Med, 2003, 35(6): 259-264.
- [24] NADEAU S, GRAVEL D, ARSENAULT AB, et al. Plantarflexor weakness as a limiting factor of gait speed in stroke subjects and the compensating role of hip flexors [J]. Clin Biomech, 1999, 14(2): 125-135.