

文章编号: 1004-7220(2024)05-0939-07

# 老年人使用优势腿或非优势腿跨越不同高度障碍时 跌倒风险的差异性

杨晨<sup>1,2</sup>, 孙威<sup>1</sup>, 陈岩<sup>1</sup>

(1. 山东体育学院 运动与健康学院, 济南 250102; 2. 曲阜师范大学 体育科学学院, 山东 曲阜 273100)

**摘要:** **目的** 研究老年人以优势腿或非优势腿跨越不同高度障碍时的跌倒风险, 为老年人跨越障碍防跌倒措施的开发提供参考。 **方法** 16名老年人分别以优势腿和非优势腿随机跨越15%、30%、45%腿长高度的障碍, 使用三维动作捕捉系统和三维测力台记录运动学与动力学数据。 **结果** 老年人使用非优势腿跨越障碍时, 30%腿长高度的后腿前后方向动态稳度显著小于15%腿长高度 ( $P < 0.05$ , Cohen's  $d = 0.628$ ); 后腿垂直足趾间隙显著小于优势腿跨越 ( $P = 0.041$ , Cohen's  $d = 0.516$ ), 前腿垂直足趾间隙 ( $P < 0.001$ , Cohen's  $d = 0.685$ )、前腿前后足趾间隙 ( $P = 0.043$ , Cohen's  $d = 0.616$ ) 显著大于优势腿跨越。 **结论** 相较于使用优势腿跨越, 老年人使用非优势腿跨越时在障碍前的前后方向身体稳定性较差, 跌倒风险更大; 在跨越不同高度障碍时, 后腿被障碍绊倒的风险更大。

**关键词:** 老年人; 跨越障碍; 跌倒风险; 优势腿; 非优势腿

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.05.021

## Differences of Fall Risk in Older Adults Crossing Obstacles at Different Heights with the Dominant or Non-Dominant Leg

YANG Chen<sup>1,2</sup>, SUN Wei<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>1</sup>

(1. College of Sports and Health, Shandong Sport University, Jinan 250102, China; 2. College of Sports Science, Qufu Normal University, Qufu 273100, Shandong, China)

**Abstract:** **Objective** To study the fall risk of older adults stepping over obstacles of different heights with their dominant or non-dominant legs and provide references for developing fall prevention measures for the elderly during obstacle-crossing. **Methods** Sixteen older adults randomly stepped over obstacles at 15%, 30%, and 45% of their leg heights with their dominant and non-dominant legs. A three-dimensional (3D) motion capture system and 3D force platform were used to record kinematic and kinetic data. **Results** When older adults used their non-dominant leg to step over obstacles, the dynamic stability in the anterior-posterior direction of the trailing leg at 30% of leg length height was significantly lower than that at 15% of leg length height ( $P < 0.05$ , Cohen's  $d = 0.628$ ); the vertical toe clearance of the trailing leg was significantly smaller than that of the dominant leg ( $P = 0.041$ , Cohen's  $d = 0.516$ ), and the vertical toe clearance ( $P < 0.001$ , Cohen's  $d = 0.685$ ) and anterior-posterior toe clearance ( $P = 0.043$ , Cohen's  $d = 0.616$ ) of the leading leg were significantly greater than those of the dominant leg. **Conclusions** Compared to stepping over obstacles with the dominant leg, older adults have a greater risk of falling in the anterior-posterior direction before obstacles when using the non-dominant leg. There is also a greater risk of the trailing leg tripping over obstacles of different heights.

**Key words:** older adult; crossing obstacles; fall risk; dominant leg; non-dominant leg

收稿日期: 2024-04-10; 修回日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(12102235), 山东省自然科学基金项目(ZR2022MH163), 国家体育总局科技创新项目(23KJCX058)

通信作者: 陈岩, 教授, E-mail: 215755583@qq.com

第七次全国人口普查数据显示,我国60岁以上老年人已经占总人口的13.5%,预计到2030年,老年人口比例将达到25%<sup>[1]</sup>。在我国,65~70岁以上的老年人的跌倒率约20%,老年人跌倒导致髋部和腰部骨折几率最高可达90%<sup>[2]</sup>,更严重者导致死亡和残疾。据统计,跨越障碍引起的跌倒约占所有跌倒总数的1/3,甚至更高<sup>[3]</sup>。

在步行中,优势腿与非优势腿的步态时空参数存在不对称现象,并与跌倒风险存在关联<sup>[4]</sup>。但是,关于跨越障碍的研究结论不一致。研究发现,以非优势腿跨越障碍时,老年人的步速更慢,步宽、步长更大,呈现出不对称现象<sup>[5]</sup>。也有研究认为,障碍能够作为线索,提升前额叶大脑皮质的激活水平,有意识地控制步态,不对称现象表现得不明显<sup>[6]</sup>。Guadagnin等<sup>[7]</sup>研究认为,当完成挑战性任务时,步态的不对称性受到与任务相关的变量影响,例如步速、步高以及步态任务中的额外信息。优势腿和非优势腿跨越障碍时不对称与跌倒之间的关系主要体现在两个方面:①跨越时,足趾间隙不同。足趾间隙是脚与障碍的距离,反映足与障碍发生接触的可能性<sup>[8]</sup>。足趾间隙越小,被障碍绊倒的风险越大。②身体稳定性不同,通常用动态稳度进行评价<sup>[9]</sup>。动态稳度是考虑速度的情况下人体质心与压力中心之间的距离,距离减小,身体对扰动的反应时间缩短,身体稳定性下降,跌倒风险增大。在日常生活中,老年人每天需要跨越不同高度的障碍,障碍的高度变化可能会对不对称性产生影响。然而,目前缺乏研究考察不对称性与障碍高度对跌倒风险的合并影响。本文分析老年人以优势腿与非优势腿跨越15%、30%、45%腿长高度障碍时

动态稳度、足趾间隙和下肢关节活动度,探讨老年人跨越不同高度障碍时双腿不对称性导致跌倒风险的差异。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

在山东体育学院周围社区招募了16名男性老年受试者,年龄( $67.20 \pm 2.20$ )岁,身高( $167.32 \pm 4.50$ )cm,体质量( $67.30 \pm 6.90$ )kg。纳入标准为:①优势腿为右腿;②体力能够支持至少30次测试;③近1年内无跌倒史。排除标准为:①中风史;②患有下肢关节类慢性疾病(如膝关节关节炎);③测试前6h内饮用酒精。本研究得到山东体育学院运动科学伦理委员会的批准(2019008),每名受试者在实验前签署知情同意书,实验流程符合赫尔辛基宣言。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 实验方案** 首先对受试者身高、体质量、腿长(股骨大转子至踝关节中心距离)等参数进行测量。然后更换紧身衣裤,在全身粘贴41个反光标记点[见图1(a)]。参照Ozkaya等<sup>[10]</sup>所使用的72个标记点协议,考虑本研究中步态动作速度较慢,移除了31个未放置在骨性结构的标记点。12个红外光学摄像头(采样频率100 Hz, Vantage V5, Oxford公司,英国)分布在场地区域,两块三维测力台(采样率1 kHz, BP600900, AMTI公司,美国)放置在场地区域中央,障碍由2个可调高度的支架和1根非固定的铝制长棍(长1.4 m,直径0.8 cm)组成,位于测力台之间[见图1(b)]。

测试时,为了使得步态模式趋于稳定,控制

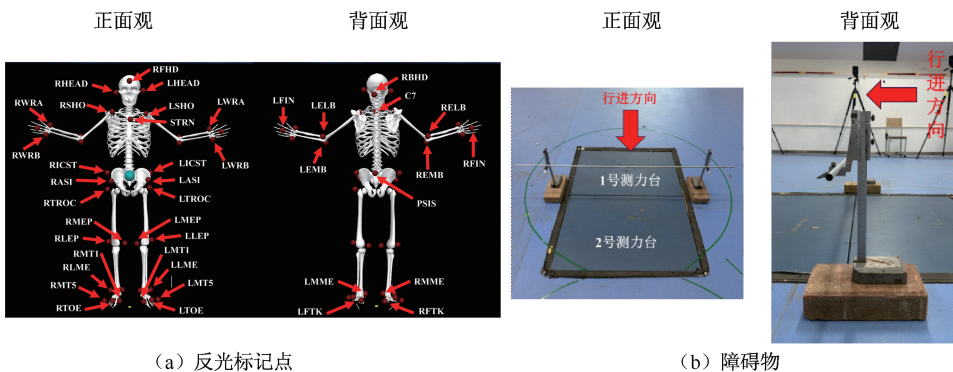


图1 反光标记点和障碍放置

Fig. 1 Placement of the reflective markers and obstacles (a) Reflective markers, (b) Obstacles

数据的变异性,受试者从距离障碍 15 m 的位置出发<sup>[11]</sup>。障碍的高度有 3 种,分别是腿长的 15%、30% 和 45%,每种高度的布置顺序随机。在每种高度下,受试者以自然步态行走完成 10 次跨越,其中优势腿跨越 5 次、非优势腿跨越 5 次,完成后休息 6 min 进行下一个高度的测试。当优势腿踩到 1 号测力台,非优势腿跨越障碍踩到 2 号测力台时,将非优势腿定义为前腿,优势腿定义为后腿;当非优势腿踩到 1 号测力台,优势腿跨越障碍踩到 2 号测力台时,将优势腿定义为前腿,将非优势腿定义为后腿。测力台、动作捕捉系统之间通过同步器相连。实验室的坐标系设置为 X 轴为前后方向、Y 轴为左右方向、Z 轴为上下方向。

**1.2.2 测试指标计算** 将补点后的数据导入 Visual 3D(C-Motion 公司,美国),标记关键事件点, $T_1$  为后腿触地时刻、 $T_2$  为前腿触地时刻、 $T_3$  为后腿离地时刻、 $T_4$  为后腿再次触地时刻,将  $T_1 \sim T_4$  定义为跨越障碍的步态周期[见图 2(a)]。采用 4 阶 10 Hz 低通滤波器滤波<sup>[12]</sup>。最后,计算足趾间隙、动态稳度以及关节活动范围并保存。

**足趾间隙:**后腿前后足趾间隙<sup>[13]</sup>,指跨越前后腿触地脚尖标记点与障碍之间的前后方向距离;前腿垂直足趾间隙<sup>[13]</sup>,指跨越时前腿脚尖标记点与障碍之间的最大垂直方向距离;前腿前后足趾间隙<sup>[13]</sup>,指跨越后前腿触地脚跟标记点与障碍之间的前后方向距离;后腿垂直足趾间隙,指跨越后收回后腿时脚尖标记点与障碍之间的最大垂直方向距离[见图 2(b)]。

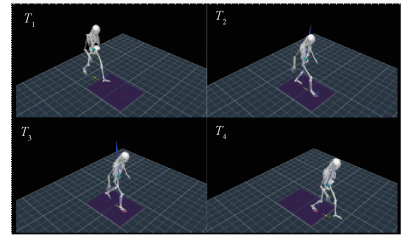
**动态稳度:**为全面评估跨越障碍时身体稳定性,本研究计算了前腿、后腿单支撑期前后、左右方向动态稳度。计算方程如下<sup>[9]</sup>:

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

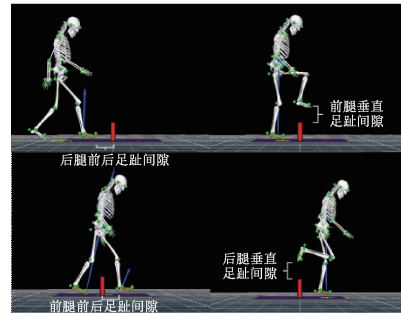
$$CM = D_{com} + v_{com}/\omega_0 \quad (2)$$

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

式中: $\omega_0$  为一阶倒立摆模型的倒钟摆频率; $g$  为重力加速度常数, $g = 9.81$ ;  $l$  为人体质心与地面的垂直距离;  $CM$  为考虑当前速度下的质心位置,即外推质心;  $D_{com}$  为质心空间位置;  $v_{com}$  为质心速度;  $Mos$  为动态稳度;  $B_{max}$  为支撑面边界的最大值,在本研究中为双脚压心的位置。障碍前,前后方向动态



(a) 动作周期



(b) 足趾间隙

图 2 动作周期与足趾间隙的定义

Fig. 2 Definition of gait cycle and toe clearance

(a) Gait cycle, (b) Toe clearance

稳度由 1 号测力台测得的压心 X 轴坐标减去质心 X 轴坐标求得,左右方向动态稳度由 1 号测力台测得的压心 Y 轴坐标减去质心 Y 轴坐标求得。障碍后的计算同理,但压心坐标的来源更换为 2 号测力台。

**关节活动范围:**跨越障碍步态周期内双侧下肢髋、膝、踝关节在矢状面上的活动范围,使用关节屈曲/伸展最大值减去最小值求得。

**1.2.3 数理统计法** 使用 SPSS 26.0 (IBM 公司,美国),采用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene 检验考察数据的正态性和方差齐性,如果数据符合正态分布和方差齐性,采用两因素重复测量方差分析,优势腿与否、障碍高度为自变量。当交互效应存在时,进行 Bonferroni 校正的事后两两比较,当交互效应不存在时,报告主效应。效应量以  $\eta_p^2$  和 Cohen's  $d$  表示。如果数据不符合正态分布和方差齐性,采用非参数检验。数据以(均值±标准差)表示。显著性水平  $P < 0.05$ 。

对本研究进行后验统计功效分析,选择后腿前后方向动态稳度(效应量  $\eta_p^2 = 0.122$ ),采用 G\* Power 3.19(德国杜塞尔斯多夫大学)软件,样本量 16,任务数为 2,测量次数为 3,计算得到真实统

计功效为 0.88, 满足同类研究统计功效大于 0.80 的标准<sup>[14]</sup>。

## 2 研究结果

### 2.1 足趾间隙统计结果

优势腿与否和障碍高度对后腿前后足趾间隙 ( $F=2.626, P=0.077, \eta_p^2=0.047$ )、前腿垂直足趾间隙 ( $F=1.022, P=0.363, \eta_p^2=0.015$ )、前腿前后足趾间隙 ( $F=1.320, P=0.271, \eta_p^2=0.020$ )、后腿垂直足趾间隙 ( $F=2.642, P=0.075, \eta_p^2=0.040$ ) 的交互效应不显著。

优势腿与否对后腿垂直足趾间隙 ( $P=0.041, \text{Cohen's } d=0.329$ )、前腿垂直足趾间隙 ( $P<0.001, \text{Cohen's } d=0.766$ )、前腿前后足趾间隙 ( $P=0.043, \text{Cohen's } d=0.229$ ) 的主效应显著, 非优势腿跨越时, 后腿垂直足趾间隙显著小于优势腿跨越, 前腿垂直足趾间隙、前腿前后足趾间隙显著大于优势腿

跨越。优势腿与否对后腿前后足趾间隙的主效应不显著 ( $P=0.156, \text{Cohen's } d=0.337$ )。

障碍高度对后腿前后足趾间隙 ( $F=3.268, P=0.042, \eta_p^2=0.058$ )、前腿垂直足趾间隙 ( $F=6.320, P<0.001, \eta_p^2=0.268$ )、前腿前后足趾间隙 ( $F=5.959, P=0.003, \eta_p^2=0.084$ )、后腿垂直足趾间隙 ( $F=2.288, P=0.045, \eta_p^2=0.035$ ) 的主效应显著, 跨越 45% 腿长高度的障碍时, 后腿前后足趾间隙 ( $P<0.001, \text{Cohen's } d=0.332$ ) 显著大于跨越 15% 腿长高度, 前腿垂直足趾间隙显著小于跨越 30% ( $P<0.001, \text{Cohen's } d=0.171$ ) 与 15% 腿长高度 ( $P<0.001, \text{Cohen's } d=0.264$ ), 前腿前后足趾间隙显著小于跨越 30% ( $P=0.047, \text{Cohen's } d=0.231$ ) 与 15% 腿长高度 ( $P=0.003, \text{Cohen's } d=0.464$ ), 后腿前后足趾间隙显著小于跨越 30% ( $P=0.049, \text{Cohen's } d=0.431$ ) 与 15% 腿长高度 ( $P=0.036, \text{Cohen's } d=0.382$ ), 见表 1。

表 1 跨越障碍时足趾间隙统计结果

Tab. 1 Statistical results of toe clearance during obstacle crossing

指标	非优势腿			优势腿		
	15% 腿长	30% 腿长	45% 腿长	15% 腿长	30% 腿长	45% 腿长
后腿前后足趾间隙/cm	28.36±6.18	27.93±5.28	30.13±8.22	27.55±6.31	30.25±7.22	31.30±7.09
前腿垂直足趾间隙/cm	24.28±7.33	24.05±4.36	22.19±5.66	23.14±6.03	22.58±4.69	18.27±5.64
前腿前后足趾间隙/cm	43.08±7.56	42.01±7.37	41.69±6.52	41.22±5.02	40.68±6.34	38.53±4.28
后腿垂直足趾间隙/cm	24.08±6.39	23.78±6.88	23.64±5.27	26.39±8.64	25.64±6.02	23.17±4.58

### 2.2 动态稳度统计结果

优势腿与否和障碍高度对后腿前后方向动态稳度 ( $F=4.950, P=0.009, \eta_p^2=0.122$ ) 的交互效应显著, 使用非优势腿跨越 30% 腿长高度的障碍时, 后腿前后方向动态稳度显著小于跨越 15% 腿长高度 ( $P=0.011, \text{Cohen's } d=$

0.628)。优势腿与否和障碍高度对后腿左右方向动态稳度 ( $F=0.133, P=0.947, \eta_p^2=0.001$ )、前腿前后方向动态稳度 ( $F=1.453, P=0.238, \eta_p^2=0.024$ )、前腿左右方向动态稳度 ( $F=0.947, P=0.610, \eta_p^2=0.008$ ) 的交互效应不显著 (见表 2)。

表 2 跨越障碍时动态稳度统计结果

Tab. 2 Statistical results of dynamic stability margin during obstacle crossing

指标	非优势腿			优势腿		
	15% 腿长	30% 腿长	45% 腿长	15% 腿长	30% 腿长	45% 腿长
后腿单支撑前后方向/cm	29.12±4.53	26.93±4.89	28.36±7.11	29.74±4.55	29.58±4.91	27.57±6.99
后腿单支撑左右方向/cm	3.75±1.30	3.91±1.31	4.58±1.72	7.22±2.82	7.06±2.70	7.03±2.36
前腿单支撑前后方向/cm	35.47±3.23	34.78±2.97	34.08±5.72	35.35±3.37	34.45±3.53	32.95±7.08
前腿单支撑左右方向/cm	7.77±2.05	8.90±2.93	7.97±3.03	5.43±2.56	6.05±2.63	5.64±2.09

### 2.3 关节活动范围统计结果

优势腿与否和障碍高度对前腿膝 ( $F=10.817, P<0.001, \eta_p^2=0.128$ )、髌 ( $F=17.347, P<0.001,$

$\eta_p^2=0.315$ )、踝 ( $F=8.045, P<0.001, \eta_p^2=0.098$ ) 关节活动范围的交互效应显著, 采用非优势腿跨越 30% 腿长高度的障碍时, 膝 ( $P=0.002, \text{Cohen's } d=$



0.405)、髌( $P=0.022$ ,Cohen's  $d=0.364$ )、踝( $P<0.001$ ,Cohen's  $d=0.583$ )关节活动范围显著大于15%腿长高度,跨越45%腿长高度的障碍时,膝( $P=0.001$ ,Cohen's  $d=0.510$ )、髌( $P=0.029$ ,Cohen's  $d=0.416$ )、踝( $P<0.001$ ,Cohen's  $d=0.547$ )关节活动范围显著大于30%腿长高度;采用优势腿跨越30%腿长高度的障碍时,膝( $P=0.005$ ,Cohen's  $d=0.626$ )、髌( $P<0.001$ ,Cohen's  $d=0.375$ )、踝( $P<0.001$ ,Cohen's  $d=0.429$ )关节活动范围显著大于15%腿长高度,跨越45%腿长高度的障碍时与30%腿长高度没有差异。优势腿与否和障碍高度对后腿膝( $F=1.089$ , $P=0.339$ , $\eta_p^2=$

0.015)、髌( $F=0.246$ , $P=0.782$ , $\eta_p^2=0.003$ )、踝( $F=3.514$ , $P=0.052$ , $\eta_p^2=0.035$ )关节活动范围的交互效应不显著。

障碍高度对后腿膝( $F=15.204$ , $P<0.001$ , $\eta_p^2=0.255$ )、髌( $F=4.393$ , $P<0.05$ , $\eta_p^2=0.056$ )、踝( $F=17.763$ , $P<0.001$ , $\eta_p^2=0.392$ )关节活动范围的主效应显著,跨越30%腿长高度的障碍时,膝( $P<0.001$ ,Cohen's  $d=0.506$ )、踝( $P<0.001$ ,Cohen's  $d=0.896$ )关节活动范围显著大于15%腿长高度,跨越45%腿长高度的障碍时,膝( $P<0.001$ ,Cohen's  $d=0.346$ )、髌( $P=0.011$ ,Cohen's  $d=1.067$ )关节活动范围显著大于30%腿长高度。

表3 跨越障碍时双侧下肢关节活动范围

Tab.3 Range of motion of bilateral lower limb joints during obstacle crossing

单位:(°)

关节	非优势腿			优势腿		
	15%腿长	30%腿长	45%腿长	15%腿长	30%腿长	45%腿长
后腿膝关节	113.12±16.99	121.18±12.98	124.33±15.98	113.51±12.01	118.90±10.36	124.69±11.07
后腿髌关节	61.41±6.73	62.42±6.83	63.49±9.52	60.33±9.87	60.98±13.55	63.29±9.17
后腿踝关节	48.90±9.32	57.98±11.26	56.92±12.14	49.34±9.34	61.04±10.81	63.70±10.78
前腿膝关节	105.57±10.53	111.52±11.06	113.64±10.88	114.36±15.68	108.66±8.88	118.38±16.47
前腿髌关节	88.99±9.79	93.44±11.03	97.25±12.33	61.57±6.91	94.67±9.66	95.75±11.76
前腿踝关节	56.71±9.90	8.90±2.93	7.97±3.03	5.43±2.56	6.05±2.63	5.64±2.09

### 3 讨论

#### 3.1 非优势腿跨越不同高度障碍时障碍前的身体稳定性较差

动态稳度反映在失去平衡前身体质心在前后或左右方向上能承受的偏移量,偏移量越小,距离失去平衡的阈值越低,跌倒风险越大<sup>[15]</sup>。结果显示,以非优势腿跨越腿长30%高度的障碍时,前后方向动态稳度较15%腿长高度显著减少。老年人优势腿与非优势腿的肌力不对称性在15%~20%<sup>[4]</sup>,很大程度上导致老年人双腿产生不对称的功能表现。老年人非优势腿髌关节外展肌和屈肌的收缩程度减少,髌关节功率降低,导致骨盆下垂,走路时脚拖拉,跨越时难以抬高腿,跨越高度降低<sup>[16]</sup>。同时,各关节的活动度也非常重要。老年人踝关节背伸以及髌关节屈曲、内旋、外展活动范围是跌倒风险的预测因子<sup>[17]</sup>。本文发现,使用非优势腿跨越障碍时对跨越腿关节活动范围的要求更高,髌、膝、踝关节活动范围随障碍高度增加而显著增大,但使用优势腿跨越障碍时,仅30%和15%腿长

障碍高度间存在差异。老年人非优势腿的柔韧性通常差于优势腿<sup>[18]</sup>,使用非优势腿跨越时,关节活动范围不足可能带来挑战。在肌力和关节活动范围不足的情况下,身体质心随前腿向前运动的风险增大。老年人采用将质心维持在后腿附近的策略<sup>[19]</sup>,待前腿提升超过障碍高度甚至越过障碍后再向前移动质心,障碍前质心与后腿压心的前后距离减少,前后方向动态稳度降低。这与先前55~83岁老年人跨越障碍研究一致,支撑腿单支撑期前后方向动态稳度随年龄增长而减少<sup>[20]</sup>。这种策略的好处是当平衡扰动发生时,由于身体更为直立,有充足的反应时间使跨越腿着地,扩大身体的支撑面,尽可能保持身体平衡<sup>[21-22]</sup>。因此,老年人使用非优势腿跨越障碍时,障碍越高,在障碍前的跌倒风险越大。

#### 3.2 非优势腿跨越时障碍后身体稳定性较差

以非优势腿作为前腿跨越时,前腿前后足趾间隙更大,前腿放置在障碍后更远的地方,质心向障碍后移动时,身体向前倾斜的程度增加,可能导致对姿势扰动来不及做出反应。此外,后腿前后足趾

间隙增加,说明障碍前后腿距离障碍更远,该结果这与之前的研究一致<sup>[23]</sup>。更大的前腿和后腿前后足趾间隙说明非优势腿跨越障碍时步长更大,前后腿与障碍的距离增加,转移重心时上身的倾斜幅度和角动量更大,如果发生姿势扰动,维持平衡会非常困难<sup>[26]</sup>。因此,使用非优势腿跨越障碍时,不管障碍高度如何,在障碍后的跌倒风险均大于优势腿跨越。

### 3.3 障碍高度增加时后腿被绊倒的风险增大

非优势腿跨越时,后腿垂直方向足趾间隙小于优势腿跨越。当障碍高度增加时,后腿垂直方向足趾间隙减少,说明老年人收回后腿时与障碍的距离更近,该结果与之前的研究结论一致<sup>[24]</sup>,这可能与老年人下肢的柔韧性与力量水平下降有关。本文发现,障碍高度增加对后腿髋、膝、踝关节的活动范围要求更高。同时,老年人的髋关节外展力矩、踝关节跖屈力矩及足底屈肌力量发生衰退<sup>[25]</sup>。力量及柔韧性下降难以满足增大的关节活动范围需求,导致行走时后腿抬高程度不足,与障碍的距离减少,被障碍绊倒的可能性增加。此外,与 Kulkarni 等<sup>[26]</sup>研究结果相似,本文发现,当障碍高度增加时,前腿前后足趾间隙减少,在障碍前老年人脚离障碍物更近,可能因为随障碍高度增加,老年人需要减少步长和降低步速,收集与障碍相关的信息以增强计划运动的能力,称之为“短步策略”<sup>[27]</sup>;而步长减少,使脚更接近障碍。但由于跨越腿在障碍前产生运动方向的改变,即由水平方向摆动转向垂直方向提升,此时支撑脚距离障碍更近,可能无法保证平滑转变,给全身姿势控制带来威胁<sup>[28]</sup>。

## 4 结论

相较于使用优势腿跨越,老年人使用非优势腿跨越时在障碍前的前后方向身体稳定性较差,跌倒风险更大;在跨越不同高度障碍时,后腿被障碍绊倒的风险更大。

**利益冲突声明:**无。

**作者贡献声明:**杨晨负责实验实施、数据分析和撰写论文;孙威负责数据解读和指导论文修改;陈岩负责实验设计、资金支持和指导论文修改。

### 参考文献:

- [1] 刘厚莲. 世界和中国人口老龄化发展态势[J]. 老龄科学研究, 2021, 9(12): 1-16.
- [2] PIERUCCINI-FARIA F, MONTERO-ODASSO M. Obstacle negotiation, gait variability, and risk of falling: Results from the “gait and brain study” [J]. J Gerontol Ser A, 2018, 74(9): 1422-1428.
- [3] 孟站领, 张庆来, 苑玲伟, 等. 不同跌倒风险老年人跨越障碍前后足底压力特征[J]. 医用生物力学, 2022, 37(4): 741-747.
- [4] MENG ZL, ZHANG QL, YUAN LW, *et al.* Plantar pressure characteristics of the elderly with different fall risks before and after obstacle crossing [J]. J Med Biomech, 2022, 37(4): 741-747.
- [5] PERRY MC, CARVILLE SF, SMITH IC, *et al.* Strength, power output and symmetry of leg muscles: Effect of age and history of falling [J]. Eur J Appl Physiol, 2007, 100(5): 553-561.
- [6] 张峻霞, 邵洋洋, 王喆豪, 等. 跨越水平障碍物时的步态特征[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(7): 745-749.
- [7] ORCIOLI-SILVA D, BARBIERI FA, DOS SANTOS PCR, *et al.* Double obstacles increase gait asymmetry during obstacle crossing in people with Parkinson’s disease and healthy older adults: A pilot study [J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 2272.
- [8] GUADAGNIN EC, BARBIERI FA, SIMIELI L, *et al.* Is muscular and functional performance related to gait symmetry in older adults? A systematic review [J]. Arch Gerontol Geriatr, 2019(84): 103899.
- [9] ZHAO C, LI KW, LU J, *et al.* Risk of tripping, minimum foot clearance, and step length when crossing a barrier [J]. Int J Ind Ergon, 2021(83): 103138.
- [10] 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.
- [11] OZKAYA G, JUNG HR, JEONG IS, *et al.* Three-dimensional motion capture data during repetitive overarm throwing practice [J]. Sci Data, 2018, 5(1): 180272.
- [12] GALNA B, LORD S, ROCHESTER L. Is gait variability reliable in older adults and Parkinson’s disease? Towards an optimal testing protocol [J]. Gait Posture, 2013, 37(4): 580-585.
- [13] CRENNNA F, ROSSI GB, BERARDENGO M. Filtering biomechanical signals in movement analysis [J]. Sensors, 2021, 21(13): 4580.
- [14] CHEN N, XIAO X, HU H, *et al.* Identify the alteration of balance control and risk of falling in stroke survivors during obstacle crossing based on kinematic analysis [J]. Front Neurol, 2019(10): 813.
- [15] HUANG SJ, YU XM, WANG K, *et al.* Short-step

- adjustment and proximal compensatory strategies adopted by stroke survivors with knee extensor spasticity for obstacle crossing [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2020(8): 939.
- [15] HAK L, HOUDIJK H, BEEK PJ, *et al.* Steps to take to enhance gait stability: The effect of stride frequency, stride length, and walking speed on local dynamic stability and margins of stability [J]. *PLoS One*, 2013, 8(12): e82842.
- [16] MCFADYEN BJ, PRINCE F. Avoidance and accommodation of surface height changes by healthy, community-dwelling, young, and elderly men [J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2002, 57(4): B166-174.
- [17] CHIACCHIERO M, DRESELY B, SILVA U, *et al.* The relationship between range of movement, flexibility, and balance in the elderly [J]. *Top Geriatr Rehabil*, 2010, 26(2): 148-155.
- [18] MACEDO LG, MAGEE DJ. Differences in range of motion between dominant and nondominant sides of upper and lower extremities [J]. *J Manipulative Physiol Ther*, 2008, 31(8): 577-582.
- [19] HUANG SC, LU TW, CHEN HL, *et al.* Age and height effects on the center of mass and center of pressure inclination angles during obstacle-crossing [J]. *Med Eng Phys*, 2008, 30(8): 968-975.
- [20] HAK L, HETTINGA FJ, DUFFY KR, *et al.* The concept of margins of stability can be used to better understand a change in obstacle crossing strategy with an increase in age [J]. *J Biomech*, 2019(84): 147-152.
- [21] KARAMANIDIS K, EPRO G, MCCRUM C, *et al.* Improving trip- and slip-resisting skills in older people: Perturbation dose matters [J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2020, 48(1): 40-47.
- [22] REN X, LUTTER C, KEBBACH M, *et al.* Lower extremity joint compensatory effects during the first recovery step following slipping and stumbling perturbations in young and older subjects [J]. *BMC Geriatrics*, 2022, 22(1): 656.
- [23] LU TW, CHEN HL, CHEN SC. Comparisons of the lower limb kinematics between young and older adults when crossing obstacles of different heights [J]. *Gait Posture*, 2006, 23(4): 471-479.
- [24] CHOU LS, DRAGANICH LF. Placing the trailing foot closer to an obstacle reduces flexion of the hip, knee, and ankle to increase the risk of tripping [J]. *J Biomech*, 1998, 31(8): 685-691.
- [25] ANDERSON DE, MADIGAN ML. Healthy older adults have insufficient hip range of motion and plantar flexor strength to walk like healthy young adults [J]. *J Biomech*, 2014, 47(5): 1104-1109.
- [26] KULKARNI A, CHO H, RIETDYK S, *et al.* Step length synergy is weaker in older adults during obstacle crossing [J]. *J Biomech*, 2021(118): 110311.
- [27] DI FABIO RP, GREANY JF, ZAMPIERI C. Saccade-stepping interactions revise the motor plan for obstacle avoidance [J]. *J Mot Behav*, 2003, 35(4): 383-397.
- [28] MUIR BC, HADDAD JM, HEIJNEN MJ, *et al.* Proactive gait strategies to mitigate risk of obstacle contact are more prevalent with advancing age [J]. *Gait Posture*, 2015, 41(1): 233-239.