

文章编号: 1004-7220(2024)06-1182-07

# 年龄对人体在不同方向转弯时身体动态稳定性的影响

薄煜龙<sup>1</sup>, 车呈章<sup>1</sup>, 吴云枝<sup>1</sup>, 潘昱含<sup>2</sup>, 张翠<sup>1,3</sup>

(1. 山东体育学院 研究生教育学院, 济南 250102; 2. 上海财经大学 金融学院, 上海 200433; 3. 山东省体育科学研究中心, 济南 250102)

**摘要:目的** 研究完成不同方向连续转弯行走时老年人与青年人身体动态稳定性差异,为老年人连续转弯时预防跌倒提供理论依据。**方法** 使用三维动作捕捉系统采集15名健康老年人和15名青年人在逆时针和顺时针两方向8字转向行走时身体43个标记点的运动学数据,使用V3D软件提取人体步态和质心速度等数据,再计算特征时刻人体向前和内侧方向的动态稳度。**结果** 与顺时针转弯相比,青年人在逆时针转弯时内侧腿步宽显著增大,内侧腿足尖离地时刻向前的动态稳度显著减小,而老年人以上指标差异无统计学意义。**结论** 年龄和转弯方向会同时影响内侧腿足尖离地时刻身体向前的动态稳定性。与青年人不同,健康老年人在转弯行走时采取更谨慎的策略,以保持身体的向前和向内的动态稳定性。建议老年人日常生活中增加连续转向行走锻炼,从而提高侧向稳定控制能力及自信心。

**关键词:** 8字转向行走; 动态稳度; 连续转向行走; 衰老; 老年人

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2024.06.024

## The Influence of Age on Body Dynamic Stability During Turning in Different Directions

BO Yulong<sup>1</sup>, CHE Chengzhang<sup>1</sup>, WU Yunzhi<sup>1</sup>, PAN Yuhan<sup>2</sup>, ZHANG Cui<sup>1,3</sup>

(1. Graduate School, Shandong Sport University, Ji'nan 250102, China; 2. School of Finance, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China; 3. Shandong Sports Science Research Center, Ji'nan 250102, China)

**Abstract: Objective** To study the differences in dynamic stability characteristics between older and young adults during continuous turning and walking in different directions. **Methods** Fifteen healthy older adults and 15 healthy young adults were recruited to complete continuous clockwise and counterclockwise figure-of-8 walk. A three-dimensional motion capture system was used to collect kinematic data based on 43 bone markers. The gait and velocity of the center of mass parameters were determined using V3D software. The margins of stability in both the anterior and medial direction at characteristic moments were calculated. **Results** Compared with clockwise turning, the step width of the inner leg increased and the anterior margin of stability of the inner leg at the toe-off instant decreased during counterclockwise turning in young adults. Meanwhile, there were no significant differences in the above parameters for older adults. **Conclusions** Both the age and turning direction affected the forward dynamic stability of the inner leg at the toe-off instant. Healthy older adults adopted more cautious strategies to maintain anterior and medial stability during continuous walking. It is recommended that older adults should increase turning training in daily life to improve their medial-lateral control capability and confidence in turning.

**Key words:** figure-of-8 walk; margin of stability; continuous turning walking; aging; older adults

收稿日期: 2024-05-08; 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(12102235)

通信作者: 张翠, 副研究员, E-mail: gracejoyzc@163.com

在日常活动中,转弯行走占日常行走的 20% ~ 50%<sup>[1]</sup>。行走时,身体前进方向不断变换,双侧肢体运动和发力变得不对称,增加了人体运动控制的难度<sup>[2-3]</sup>。转弯行走引起的跌倒大多发生于矢状面和冠状面,造成髌部骨折的可能性是直线行走时的 7 倍<sup>[3-4]</sup>。同时,随着年龄增长,人体肌肉、骨骼、神经系统发生退化,表现为步态异常,身体稳定性下降,增加了跌倒风险<sup>[5-8]</sup>。因此,研究年龄对人体在连续转弯过程中身体稳定性的影响,有助于评估老年人群在转弯时的跌倒风险。

目前,国内外有关老年人转弯时身体稳定性特征的研究已经开展,常采用两足间的距离<sup>[9]</sup>、步幅<sup>[10]</sup>、质心与支撑面边界之间的距离<sup>[11]</sup>等指标。但是,这些研究忽略了行走速度对身体稳定性的影响。Hof 等<sup>[12]</sup>使用动态稳度(margin of stability, MoS)这个指标,通过计算外推质心(考虑速度补偿后人体质心可以到达的位置)与人体支撑面的位置关系来判断身体的动态稳定性。向前(anterior margin of stability, MoS<sub>a</sub>)/向内(medial margin of stability, MoS<sub>m</sub>)的动态稳度被定义为外推质心与支撑面前/内边界的距离<sup>[13]</sup>。目前该指标已用于直线/楼梯行走<sup>[14]</sup>以及转弯行走<sup>[15]</sup>时身体动态稳定性评估中,并认为足触地和离地时刻是行走中身体稳定性较差的时刻<sup>[16]</sup>。8 字转向行走是一种有代表性的连续转弯测试,包括顺时针(右腿作为内侧腿)和逆时针(右腿作为外侧腿)两个方向绕圆行走<sup>[17]</sup>。目前,关于年龄对人体连续转弯行走时足触地和足离地时刻动态稳度变化影响,还鲜有报道。

本文通过与青年人比较,描述老年人完成不同方向连续转弯的足触地和离地时刻身体动态稳定性的特征及差异,分析可能存在的危险因素,从而为预测老年人连续转弯时的跌倒风险提供理论依据。本研究假设:与顺时针转弯相比,青年人逆时针转弯时步宽、步长、步速增加、动态稳度降低,但老年人没有显著性差异。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

应用 G\*Power 3.1 软件,取  $\eta^2=0.11$ ,  $\alpha=0.05$ ,

power 为 0.80<sup>[18]</sup>,计算出最小总样本量为 20 人。最终,从学校和社区招募了青年和老年受试者各 15 名,基本信息见表 1。纳入标准:① 青年组 18~30 岁,老年组 65~75 岁;② 能够独立完成连续转弯行走;③ 近 1 年内无跌倒史<sup>[19]</sup>。排除标准:① 视力障碍<sup>[20]</sup>;② 无法独立行走 20 m 以上;③ 简易智能精神状态检查量表(MMSE)得分小于 24 分<sup>[11]</sup>;④ 存在肌肉骨骼疼痛或其他影响平衡或步态的障碍<sup>[2]</sup>。所有受试者均签订知情同意书,并告知注意事项。本研究获得山东体育学院运动科学伦理委员会批准(2022025)。

表 1 受试者基本信息

Tab. 1 Basic information of participants

参数	青年组	老年组	P
	(n=15)	(n=15)	
性别(男/女)	9/6	9/6	—
年龄/岁	23.9±1.2	68.8±3.5	0.000
身高/cm	174.1±8.7	164.3±7.2	0.002
体质量/kg	65.7±11.5	63.9±11.3	0.283
BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )	22.8±3.7	23.6±2.6	0.470

注: BMI 为身体质量指数。

### 1.2 仪器设备

采用 12 个摄像头红外三维运动捕捉系统(Vicon Motion System 公司,英国)和 Vicon Nexus 1.7.1 软件采集运动学数据,采集频率为 100 Hz。

### 1.3 测试流程

受试者抵达实验室后,先签署知情同意书,更换测试服并测量形态学和优势腿(将随意踢球的腿定义为优势腿<sup>[21]</sup>,经测试所有受试者的优势腿均为右腿)。随后,工作人员将 43 个直径为 14 mm 红外反光标记点粘贴于受试者全身的骨性标志上[见图 1(a)],并为受试者讲解实验流程。最后,受试者进行热身和正式测试。正式测试时,当工作人员发出“开始”指令后,受试者以自己舒适的步速绕 8 字形轨迹(由两个直径为 1.66 m 圆形相切组成<sup>[22]</sup>,轨迹总长度为 10.4 m)完成连续转弯行走 3 次,每次间歇 30 s[见图 1(b)]。每次受试者从起点(两圆相切处)出发,沿轨迹行走 3 圈,其间包括顺时针和逆时针。共采集 3 次有效数据,反光标记点不掉落,受试者顺利完成行走,为有效数据。

### 1.4 数据处理

采用 Vicon Nexus 软件对反光标记点命名,并

对标记点数据进行查缺补漏,生成 c3d 文件。将 c3d 文件导入 Visual 3D 3.26.0 软件(C-Motion 公司,美国),使用截断频率为 10 Hz 的 Butterworth 四阶低通滤波对反光标记点三维坐标数据进行平滑处理<sup>[23]</sup>。将行走时靠近圆心一侧的腿定义为内侧腿,远离圆心一侧的腿定义为外侧腿。选取受试者进入 8 字轨迹的外侧半圆的第 1 个步态周期进行分析。根据足跟和大脚趾标记点在 Visual 3D 中垂直方向上的数值定义步态周期。1 个步态周期定义为一侧足跟着地到该侧足跟再次着地,包括内侧足跟触地、内侧足尖离地、外侧足跟触地和外侧足尖离地 4 个关键时刻。足跟触地时刻定义为足跟标记点垂直方向数值最接近于 0 值的时刻,足尖离地时刻定义为大脚趾标记点垂直方向数值最接近于 0 值的时刻<sup>[24]</sup>。

### 1.5 测试指标

将步速定义为 1 个步态周期中两个单步长之和与步态周期时间的比值。将内/外侧腿步长定义为内/外侧足跟标记点触地到该足跟标记点再次触地时两标记点之间的距离与身高的比值<sup>[25]</sup>。将内/外侧腿步宽定义为内/外侧足跟标记点的触地位置到外/内侧足跟标记点连续两次触地时的位置组成的直线的垂直距离与身高的比值<sup>[25]</sup>[见图 1(c)]。

选取内外侧腿足跟接触地面之前和足尖离开地面之后的瞬间时刻,计算 MoS<sup>[12]</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: $\omega_0$  为人体倒置钟摆模型的频率, $g$  为重力加速度, $l$  为人体质心到内踝标记点的垂直距离;外推质心 (centre of mass, CM) 位置表示质心在水平面的垂直投影位置加上质心速度与因子  $\omega_0$  的比值;质心位置 ( $d_{CoM}$ ) 表示某时刻质心的位置;质心速度 ( $v_{CoM}$ ) 表示某时刻质心的速度;最大边界 ( $B_{max}$ ) 表示支撑面某一方向边界的最大值;MoS<sub>a</sub> 表示某个时刻 CM 与支撑面前边界之间的最小距离,支撑面前边界由大脚趾位置确定;MoS<sub>m</sub> 为某个时刻 CM 与支撑面内侧边界之间的最小距离,支撑面内侧边界由第 1 跖骨位置确定[见图 1(d)]。将靠近第 1 跖骨远离第 5 跖骨的方向定义为内侧方向,将靠近第 5

跖骨远离第 1 跖骨的方向定义为外侧方向,MoS<sub>m</sub> 为正值表示 CM 位于第 1 跖骨标记点的外侧,MoS<sub>a</sub> 为负值表示 CM 位于第 1 跖骨标记点的内侧。

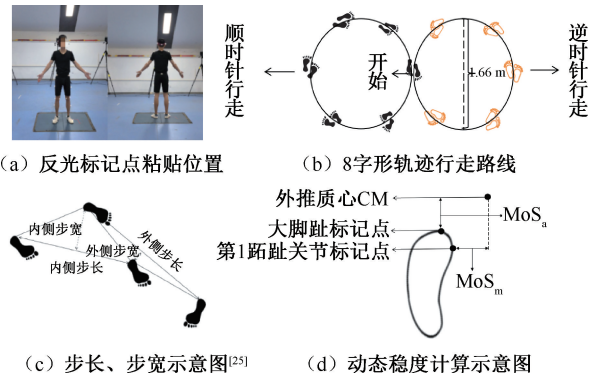


图 1 测试相关示意图

Fig. 1 Schematic of the test (a) Placement of reflective markers, (b) Walking trajectory of figure-of-8 walk, (c) Schematic of step length and step width, (d) Schematic of margin of stability

### 1.6 统计分析

使用 SPSS 25.0 (IBM 公司, 美国) 统计软件进行统计学分析。采用 Shapiro-Wilk 检验验证数据是否符合正态分布。采用独立  $t$  检验, 观察两组人群身高、体质量等基线数据的差异; 采用双因素重复性方差分析 (two-way repeated ANOVA) 分别观察组间 (老年人和青年人) 和组内 (顺时针和逆时针转弯) 因素对因变量的影响, 若存在交互效应, 则应用 Bonferroni 进行事后检验, 若存在组间主效应, 则使用独立  $t$  检验, 观察两组人群对应指标的差异。结果以 (均数  $\pm$  标准差) 表示,  $P < 0.05$  表示差异有统计学意义。

## 2 研究结果

### 2.1 步态参数结果

老年人和青年人在两种行走条件下的内侧腿步宽存在显著交互作用 ( $P = 0.048$ ,  $F = 4.285$ ,  $\eta_p^2 = 0.133$ )。事后检验结果表明, 与顺时针转弯相比, 青年人在逆时针转弯时的内侧腿步宽显著增大 ( $P = 0.017$ ,  $F = 6.458$ ,  $\eta_p^2 = 0.187$ ), 老年人则无显著差异 ( $P = 0.443$ )。步速、内/外侧腿步长指标均无显著交互或主效应差异 (任务效应  $P > 0.231$ , 人群效应  $P > 0.146$ 、交互效应  $P > 0.181$ )。

外侧腿步宽结果存在组间主效应 ( $P=0.049$ )。独立  $t$  检验结果表明, 与青年人相比, 老年人在转

弯时外侧腿步宽明显更大 ( $P=0.012, F=1.178$ ), 见图 2。

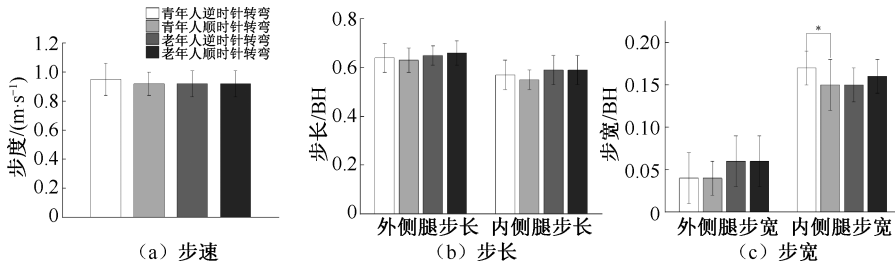


图 2 老年人和青年人完成顺时针和逆时针转弯时步态参数比较

Fig. 2 Comparison of gait parameters for older and young adults during clockwise and counterclockwise turning

(a) Gait velocity, (b) Step length, (c) Step width

注: BH 表示身高; \*  $P < 0.05$ 。

## 2.2 动态稳度结果

老年人和青年人在顺时针和逆时针连续转弯条件下, 内侧腿足尖离地时刻的  $MoS_a$  存在显著交互作用 ( $P=0.025, F=5.645, \eta_p^2=0.168$ )。事后检验结果表明, 与顺时针转弯相比, 青年人逆时针转弯时该时刻的  $MoS_a$  显著下降 ( $P=0.031, F=5.174, \eta_p^2=0.156$ ), 而老年人则无显著差异 ( $P=0.287$ )。内侧腿足跟着地时刻  $MoS_a$ , 外侧腿足尖离地时刻  $MoS_m$ , 以及外侧腿足跟着地时刻

$MoS_a$  和  $MoS_m$  均无显著交互或主效应差异 (任务效应  $P > 0.062$ , 人群效应  $P > 0.411$ 、交互效应  $P > 0.059$ )。

内侧腿足尖离地时刻 ( $P=0.024$ ) 和内侧腿足跟着地时刻 ( $P=0.031$ ) 的  $MoS_m$  存在组间主效应。独立  $t$  检验结果表明, 与青年人相比, 老年人转弯时内侧腿足尖离地时刻 ( $P=0.002, F=0.868$ ) 和内侧腿足跟着地时刻 ( $P=0.004, F=0.657$ ) 的  $MoS_m$  均明显更大。

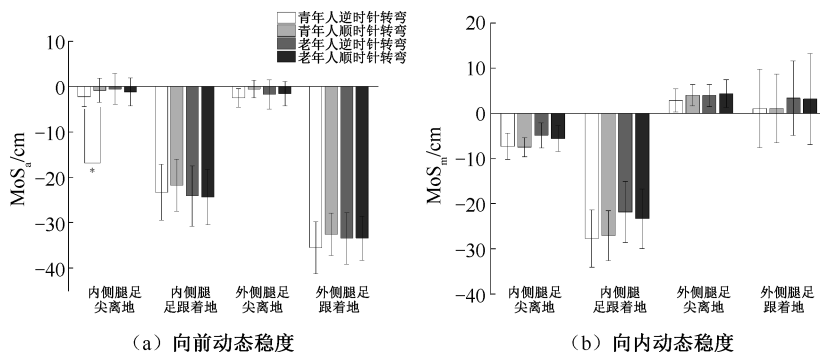


图 3 老年人和青年人在顺时针和逆时针转弯行走动态稳度比较

Fig. 3 Comparison of margin of stability for older and young adults during clockwise and counterclockwise turning

(a) Anterior margin of stability ( $MoS_a$ ), (b) Medial margin of stability ( $MoS_m$ )

## 3 讨论

本文发现, 两组人群在两种行走条件下, 步速、内/外侧腿步长均无明显差异; 与顺时针转弯相比, 青年人在逆时针转弯时的内侧腿步宽显著增大, 内侧腿足尖离地时刻的  $MoS_a$  显著下降, 而老年人无显著差异; 不论转弯方向, 老年人的外侧腿步宽及内侧腿足跟着地和足尖离地时刻  $MoS_m$  均大于青年

人。本研究在前人研究基础上, 获得老年人和青年人在 8 字转向行走两个不同方向的身体动态稳定性特征及差异结果, 为分析老年人转弯时的跌倒风险提供了理论依据。

### 3.1 年龄和方向对转弯时人体动态稳定性的影响

本文发现, 两组人群在两种行走条件下, 步速、内/外侧腿步长均无明显差异, 与研究假设不一致。



Shkuratova 等<sup>[26]</sup>研究显示,老年人 8 字转向行走时的平均速度为 0.96 m/s,平均步幅为 1.11 m,与本文结果相似。该研究还发现,与直线行走相比,老年人在 8 字转向行走时步速、跨步长显著减少,与本研究结果不一致,推测与直线行走和 8 字转向行走差异较大,而不同方向 8 字转向行走间差异较小有关。步速、步长常用来评估老年人直线行走时身体稳定性<sup>[27]</sup>,但是老年人和青年人在不同方向连续转弯行走时,这些指标差异无统计学意义。

本文还发现,与顺时针转弯相比,青年人在逆时针转弯时的内侧腿步宽显著增大,而老年人该指标无显著变化,与研究假设一致。Bland 等<sup>[28]</sup>研究发现,老年人 8 字转向行走时的平均步宽为 0.11 m,与本研究结果相似。本研究中,内侧腿步宽定义为外侧支撑腿到内侧支撑腿两次着地间足后跟连线的垂直距离<sup>[25]</sup>,即身体质心向圆心方向运动时足部的运动宽度。转弯时人体质心向转弯内侧移动<sup>[29-31]</sup>,且该过程中人体重心容易移到支撑面外<sup>[32]</sup>,为了保持转弯时内外侧方向的稳定性,人体需要根据质心侧向位移的变化不断调节步宽,通常采用增大步宽的方法来增加内-外侧方向上的支撑面<sup>[12,33]</sup>。逆时针转弯是现实生活中常用的转弯方向<sup>[34]</sup>。由于本测试中所有受试者的优势腿均为右腿,故逆时针转弯时受试者左腿(非优势腿)在内侧,右腿(优势腿)在外侧。因此,本文认为,逆时针转弯影响了青年人内侧腿步宽,即逆时针转弯时青年人选择了增大向圆心方向运动的步宽,增大了该阶段的支撑面;而老年人却保持了原有步宽,未进行调整。该结果也在一定程度上表明,年轻人在不同方向连续转向行走时能够更灵活地调整步宽以增大支撑面积,来适应转向行走时遇到的困难,而老年人却没有调整。

本文还发现,与顺时针转弯相比,青年人在逆时针转弯时内侧腿足尖离地时刻的  $MoS_a$  显著下降,而老年人无显著变化,与研究假设一致。与 He 等<sup>[35]</sup>研究青年人在  $45^\circ$  转弯时足尖离地时刻  $MoS_a$  结果相似。足尖离地时刻被认为是行走过程中身体动态稳定性相对较差的时刻<sup>[12]</sup>,该时刻支撑面面积的急剧减少会使该时刻身体稳定性控制的难度增加。逆时针转弯时的内侧腿的离地时刻是右腿(优势腿)作为外侧腿单支撑相的开始时刻,身体的

重量从左腿转到右腿(优势腿)。刘玉娇<sup>[36]</sup>研究显示,非优势腿在运动过程中对维持身体的动态平衡有着重要作用,故优势腿的灵活性可能较非优势腿更强,但是维持身体平衡的能力不一定优于非优势腿。因此,本文认为,逆时针转弯影响了青年人优势腿单支撑时身体前后方向的动态稳定性,使其在身体质心向圆心反方向运动时的前后稳定性降低,容易产生向前的跌倒。而老年人则更加谨慎,基本保持了原有前后方向稳定性。

### 3.2 年龄对转弯时人体动态稳定性的影响

本文发现,不论在顺时针还是逆时针转弯时,老年人的外侧腿步宽、内侧腿足尖离地时刻和内侧腿足跟着地时刻  $MoS_m$  均显著大于青年人,与研究假设不一致。Madrid 等<sup>[25]</sup>研究发现,老年人转弯时的外侧腿步宽显著大于青年人,与本文结果一致。本研究中, $MoS_m$  为负数表示身体外推质心在支撑面以外,位于内侧支撑边界的内侧方向;数值越小,说明距离支撑边界越近。不论是在哪个方向的连续转弯,老年人在内侧腿足跟着地和内侧腿足尖离地时,都将身体外推质心保持在离外侧支撑腿的内侧边界更近的位置;同时,增加了身体远离圆心运动时的步宽,增大了该阶段身体内-外侧方向上的支撑面积。因此,本文认为,与青年人相比,老年人在连续转弯行走时,采用了迅速向已站定外侧支撑腿移动重心,减缓向未站定内侧支撑腿移动重心和增加外侧腿支撑面积的多重维稳策略。

### 3.3 不足与展望

本研究存在一定的局限性:① 仅分析老年人与青年人在执行连续转向单任务时的身体稳定性的特征及差异,而探索老年人认知-动作的组合任务的姿势控制和身体稳定性特征可能有更多发现;② 青年受试者为有运动习惯的青年人群,可能使步态和动态稳定性结果更优,后续建议增加久坐青年受试者人群。

## 4 结论

(1) 年龄和转弯方向会同时影响内侧腿步宽和内侧腿足尖离地时刻的身体向前的动态稳定性;年龄主要影响连续转弯时的人体外侧腿步宽、内侧腿足尖离地时刻和内侧腿足跟着地时刻的向内的动态稳定性。

(2) 健康老年人在转弯行走环境下采取了更谨慎的策略, 且有能力保持身体在前和内侧方向的稳定性。

(3) 建议老年人在日常生活中多进行类似 8 字转向的连续转弯锻炼, 有助于提高身体侧向稳定性控制能力, 降低对于转弯时跌倒的恐惧心理。

**利益冲突声明:** 无。

**作者贡献声明:** 薄煜龙负责数据采集、数据分析、论文撰写; 车呈章、吴云枝负责数据采集、数据分析; 潘昱含负责数据分析、论文撰写; 张翠负责研究设计、实验统筹、数据分析、论文修改、资金支持。

### 参考文献:

- [ 1 ] GLAISTER BC, BERNATZ GC, KLUTE GK, et al. Video task analysis of turning during activities of daily living[J]. *Gait Posture*, 2007, 25(2): 289-294.
- [ 2 ] ZANCAN A, SOZZI S, SCHIEPPATI M. Basic spatiotemporal gait variables of young and older healthy volunteers walking along a novel figure-of-8 path [J]. *Front Neurol*, 2021(12): 698160.
- [ 3 ] COURTINE G, SCHIEPPATI M. Human walking along a curved path. II. Gait features and EMG patterns [J]. *Eur J Neurosci*, 2003, 18(1): 191-205.
- [ 4 ] CUMMING RG, KLINEBERG RJ. Fall frequency and characteristics and the risk of hip fractures [J]. *J Am Geriatr Soc*, 1994, 42(7): 774-778.
- [ 5 ] MCGIBBON CA. Toward a better understanding of gait changes with age and disablement: Neuromuscular adaptation [J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2003, 31(2): 102-108.
- [ 6 ] WU Y, DONG Y, TANG Y, et al. Relationship between motor performance and cortical activity of older neurological disorder patients with dyskinesia using fNIRS: A systematic review [J]. *Front Physiol*, 2023(14): 1153469.
- [ 7 ] BRACH JS, STUDENSKI S, PERERA S, et al. Stance time and step width variability have unique contributing impairments in older persons[J]. *Gait Posture*, 2008, 27(3): 431-439.
- [ 8 ] VERVOORT D, BUURKE TJW, VUILLERME N, et al. Adaptive control of dynamic balance across the adult lifespan [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2020, 52(10): 2270-2277.
- [ 9 ] MELLONE S, MANCINI M, KING LA, et al. The quality of turning in Parkinson's disease: A compensatory strategy to prevent postural instability? [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2016(13): 39.
- [ 10 ] CONRADSSON D, PAQUETTE C, LÖKK J, et al. Pre-

and unplanned walking turns in Parkinson's disease—Effects of dopaminergic medication [J]. *Neuroscience*, 2017(341): 18-26.

- [ 11 ] CONRADSSON D, PAQUETTE C, FRANZÉN E. Medio-lateral stability during walking turns in older adults [J]. *PLoS One*, 2018, 13(6): e0198455.
- [ 12 ] HOF AL, GAZENDAM MG, SINKE WE. The condition for dynamic stability [J]. *J Biomech*, 2005, 38(1): 1-8.
- [ 13 ] SIVAKUMARAN S, SCHINKEL-IVY A, MASANI K, et al. Relationship between margin of stability and deviations in spatiotemporal gait features in healthy young adults [J]. *Hum Mov Sci*, 2018(57): 366-373.
- [ 14 ] 郑慧芬, 孙威, 宋祺鹏, 等. 手机任务介入对下楼梯行走动态稳定性的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2021, 40(7): 528-535.
- [ 15 ] HOF AL. The 'extrapolated center of mass' concept suggests a simple control of balance in walking [J]. *Hum Mov Sci*, 2008, 27(1): 112-25.
- [ 16 ] OHTSU H, YOSHIDA S, MINAMISAWA T, et al. Investigation of balance strategy over gait cycle based on margin of stability [J]. *J Biomech*, 2019(95): 109319.
- [ 17 ] HESS RJ, BRACH JS, PIVA SR, et al. Walking skill can be assessed in older adults: Validity of the figure-of-8 walk test [J]. *Phys Ther*, 2010, 90(1): 89-99.
- [ 18 ] GRIMMER M, RIENER R, WALSH CJ, et al. Mobility related physical and functional losses due to aging and disease: A motivation for lower limb exoskeletons [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16(1): 2.
- [ 19 ] YEH TT, LIANG PJ, LEE SC. Differences in walking-to-turning characteristics between older adult fallers and nonfallers: A prospective and observational study using wearable inertial sensors [J]. *Int J Rehabil Res*, 2022, 45(1): 53-57.
- [ 20 ] 汤惠如, 高庆, 王疆娜, 等. 老年人搀膝拗步动作的下肢运动协调特征分析 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(5): 798-804.
- [ 21 ] TANG HR, GAO Q, WANG JN, et al. Analysis of lower limb motor coordination characteristics during brush knee and twist step in older adults [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(5): 798-804.
- [ 22 ] 许楠, 郭瑞彬, 杨丹, 等. 间歇时间再分配训练对离心运动动力学表现的影响 [J]. *成都体育学院学报*, 2023, 49(4): 76-84.
- [ 23 ] BELLUSCIO V, CASTI G, FERRARI M, et al. Modifications in prefrontal cortex oxygenation in linear and curvilinear dual task walking: A combined fNIRS and IMUs study [J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(18): 6159.
- [ 23 ] 姚英策, 赵建斌, 杨晓巍, 等. 肌肉电刺激联合肌力训练对髌股关节痛患者膝关节生物力学特征的影响 [J]. *医用生物*

- 力学, 2024, 39(5): 677-684.
- YAO YC, ZHAO JB, YANG XW, *et al.* Effects of muscle electrical stimulation combined with muscle strength training on biomechanical characteristics of knee joint in patients with patellofemoral pain [J]. *J Med Biomech*, 2024, 39(5): 677-684.
- [24] 胡飞, 顾冬云, 戴尅戎, 等. 基于非线性时间序列法研究人体步行稳定性[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(1): 51-57.
- HU F, GU DY, DAI KR, *et al.* Nonlinear time series analysis of gait stability during walking [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(1): 51-57.
- [25] MADRID J, ULRICH B, SANTOS AN, *et al.* Spatiotemporal parameters during turning gait maneuvers of different amplitudes in young and elderly healthy adults: A descriptive and comparative study [J]. *Gait Posture*, 2023(99): 152-159.
- [26] SHKURATOVA N, MORRIS ME, HUXHAM F. Effects of age on balance control during walking [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2004, 85(4): 582-8.
- [27] FAN Y, LI Z, HAN S, *et al.* The influence of gait speed on the stability of walking among the elderly [J]. *Gait Posture*, 2016(47): 31-36.
- [28] BLAND K, LOWRY K, KRAJEK A, *et al.* Spatiotemporal variability underlying skill in curved-path walking [J]. *Gait Posture*, 2019(67): 137-141.
- [29] IMAI T, MOORE ST, RAPHAN T, *et al.* Interaction of the body, head, and eyes during walking and turning [J]. *Exp Brain Res*, 2001, 136(1): 1-18.
- [30] COURTINE G, SCHIEPPATI M. Human walking along a curved path. I. Body trajectory, segment orientation and the effect of vision [J]. *Eur J Neurosci*, 2003, 18(1): 177-190.
- [31] TURCATO AM, GODI M, GIORDANO A, *et al.* The generation of centripetal force when walking in a circle: Insight from the distribution of ground reaction forces recorded by plantar insoles [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2015, 12(1): 4.
- [32] ORENDURFF MS, SEGAL AD, BERGE JS, *et al.* The kinematics and kinetics of turning; Limb asymmetries associated with walking a circular path [J]. *Gait Posture*, 2006, 23(1): 106-111.
- [33] BAUBY CE, KUO AD. Active control of lateral balance in human walking [J]. *J Biomech*, 2000, 33(11): 1433-1440.
- [34] KRAFFT FC, ECKELT M, KÖLLNER A, *et al.* Reproducibility of spatio-temporal and dynamic parameters in various, daily occurring, turning conditions [J]. *Gait Posture*, 2015, 41(1): 307-312.
- [35] HE C, XU R, ZHAO M, *et al.* Dynamic stability and spatiotemporal parameters during turning in healthy young adults [J]. *Biomed Eng Online*, 2018, 17(1): 127.
- [36] 刘玉娇. 快速力量训练对优势侧与非优势侧腿力量素质影响效果的研究[D]. 西安: 西安体育学院, 2010.