

# 老年人撘膝拗步动作的下肢运动协调特征分析

汤惠如<sup>1a</sup>, 高庆<sup>1a</sup>, 王疆娜<sup>1b</sup>, 宋祺鹏<sup>1b</sup>, 张翠<sup>2</sup>, 孙威<sup>1b</sup>

(1. 山东体育学院 a 研究生教育学院, b 运动与健康学院, 济南 250100; 2. 山东省体育科学研究中心, 济南 250100)

**摘要:**目的 探讨 65 岁以上健康老年人进行太极拳撘膝拗步动作时下肢运动的协调性和稳定性。方法 30 名太极拳练习者随机完成步行和撘膝拗步动作, 采用 Vicon 三维动作捕捉系统收集下肢运动学数据。结果 撘膝拗步动作时, 矢状面关节角度和髌-膝和膝-踝关节相位值变换频繁, 髌-膝和膝-踝关节的平均相对相角绝对值以及髌、膝关节平均标准差显著小于步行。结论 与步行相比, 太极拳撘膝拗步动作时髌-膝和膝-踝关节呈现出更协调稳定的关节间运动模式。太极拳锻炼可能会为老年人提供一种特定的协调训练方式, 提高姿势稳定性, 预防跌倒发生。

**关键词:** 老年人; 跌倒; 撘膝拗步; 下肢协调

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2022.05.005

## Analysis of Lower Limb Motor Coordination Characteristics During Brush Knee and Twist Step in Older Adults

TANG Huiru<sup>1a</sup>, GAO Qing<sup>1a</sup>, WANG Jiangna<sup>1b</sup>, SONG Qipeng<sup>1b</sup>, ZHANG Cui<sup>2</sup>, SUN Wei<sup>1b</sup>

(1a. School of Graduate Education, 1b. School of Sports and Health, Shandong Sport University, Jinan 250100, China; 2. Shandong Sports Science Research Center, Jinan 250100, China)

**Abstract:** **Objective** To explore the lower limb motor coordination and stability of older adults over 65 years old during Tai Chi brush knee and twist step. **Methods** A total of 30 Tai Chi practitioners randomly completed walking and brush knee and twist step. The lower limb kinematics data were collected by Vicon three-dimensional (3D) motion capture system. **Results** During brush knee and twist step, the joint angle in sagittal plane and continuous relative phase (CRP) values of hip-knee and knee-ankle joints during brush knee and twist step changed frequently. The mean absolute relative phase (MARP) for hip-knee and knee-ankle joint and the mean deviation phase (DP) for hip-knee joint were significantly lower than those during walking. **Conclusions** Compared with walking, the hip-knee and knee-ankle joints present a more coordinated and stable segment motion pattern during Tai Chi brush knee and twist step. Tai Chi exercise may provide a specific coordination training method for older adults, enhance posture stability and prevent falls.

**Key words:** older adults; falls; brush knee and twist step; lower limb coordination

世界卫生组织报告显示, 跌倒在老年人意外伤害中的发生率和致死率均居首位<sup>[1]</sup>。中国每年约有 30% 的 65 岁以上老年人发生跌倒, 严重影响老

年人的日常活动, 甚至给老年人带来心理创伤<sup>[2-3]</sup>。太极拳是老年人群较普及的体育活动形式。研究证实, 规律的太极拳训练可以改善老年人下肢本体

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-04-05

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2020QC091), 国家自然科学基金项目 (12102235, 31700815), 山东省重点研发计划项目 (2019GSF108211, 2020CXGC010902)

通信作者: 孙威, 副教授, E-mail: sunwei841024@163.com

感觉,增强下肢肌力,提高姿势稳定性、关节灵活性、平衡能力和增强心肺耐力,预防和降低老年人跌倒风险<sup>[4-5]</sup>。

人体平衡能力随年龄的增长而下降,是导致老年人跌倒的主要诱因之一<sup>[6]</sup>。预防跌倒需要人体稳定的平衡控制能力,平衡控制由多关节的协调运动实现<sup>[7]</sup>。协调的关节运动模式有助于人体对外界扰动造成的身体失衡状态做出神经肌肉控制调整,以保持身体姿势稳定,预防跌倒发生<sup>[8]</sup>。

目前分析多关节协调运动的评价方法主要包括矢量编码和连续相对相位(continuous relative phase, CRP)<sup>[9]</sup>。其中,矢量编码由包含两个关节或环节位置空间信息的角度-角度相位图导出;CRP由包含两个关节或环节空间和时间信息的角速度-角度相位图导出<sup>[10]</sup>。相对于单个关节的生物力学测量,两个关节或环节的随时间变化的角速度-角度相位图所导出的相对相位差异或变化可以提供足够灵敏的测量数据,更好评价下肢各环节的协调变化<sup>[7]</sup>。因此,CRP被推荐为量化关节协调的有用工具<sup>[11]</sup>。

研究表明,相比于青年人,老年人由于多关节协调控制能力下降,导致身体稳定性控制能力下降,跌倒风险增大,具体表现在下肢多关节耦合运动指标运动等效和非运动等效比值的降低<sup>[7]</sup>。当前,有关太极拳的生物力学研究主要集中于太极拳对平衡、肌力、防跌倒等方面的积极作用<sup>[12]</sup>。然而,太极拳改善下肢协调能力的生物力学机制尚未明确。现有研究多偏重手眼协调控制,而下肢协调运动在日常生活活动中也扮演着重要的角色。分析比较单个关节的运动学、动力学或质心-压心控制,无法提供关于下肢协调的足够信息<sup>[13]</sup>。搂膝拗步是杨式太极拳中比较重要的典型动作之一,并且是太极前进步的代表动作。本文通过应用相对相位等相关指标,探讨太极拳搂膝拗步动作时下肢关节的协调特征,以期帮助指导制定预防老年人跌倒策略,提高老年人生活质量。本研究假设:与步行相比,搂膝拗步动作时下肢关节间具有更协调和稳定的运动模式。

## 1 对象与方法

### 1.1 研究对象

选取30名65岁以上长期练习太极拳的老年人

作为研究对象,年龄( $65.9 \pm 5.2$ )岁,身高( $161.4 \pm 6.1$ ) cm,体重( $62.6 \pm 8.7$ ) kg,练习时间( $12.0 \pm 5.1$ )年。所有受试者均无神经肌肉骨骼系统疾病、无认知障碍、无视觉及前庭功能障碍,近6个月内无下肢肌肉或骨骼相关疾病与损伤,能够独立生活,实验前24 h未进行剧烈活动。所有受试者了解实验流程,并签署知情同意书。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 实验仪器与参数** 应用8摄像头Vicon红外高速动作捕捉系统(T40, Vicon公司,英国),采集受试者人体运动学数据,采集频率为100 Hz<sup>[14]</sup>。

**1.2.2 实验步骤与方法** 受试者进入实验室,告知其实验流程及注意事项并签署知情同意书,更换统一测试服装(紧身短袖、短裤和标准鞋),测量身高、体重等基本资料。将41个14 mm红外反光球依据Vicon动作捕捉系统操作手册提供的全身标志点方案,通过双面胶粘贴在受试者皮肤或衣服的指定位置上<sup>[15]</sup>。定义躯干、上肢和下肢。分别使用L-frame和T型校正架进行运动捕捉系统的静态和动态标定,以笛卡尔右手坐标系为原则,在测试空间建立全局坐标系。正式实验前,受试者有充足的时间进行热身和适应实验环境。实验开始,受试者在测试范围内进行测试,要求受试者以自选舒适自然的步伐和速度进行搂膝拗步与步行动作的试验,同时收集41个反光球空间坐标数据(见图1)。



图1 红外反光球粘贴位置

Fig. 1 Position of infrared reflective markers

搂膝拗步动作分解如图2所示。两个步态动作共计采集3次有效数据,两次间隔为3 min,取3次数据的平均值用于数据分析。

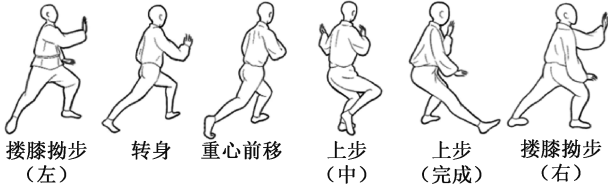


图 2 捋膝拗步动作分解

Fig. 2 Decomposition of brush knee and twist step

**1.2.3 数据处理** 将 Vicon 采集的原始运动学数据经过建模、截取、删补点等处理后,导入 Visual 3D (C-Motion 公司,美国) 数据处理软件,使用 Butterworth 低通滤波进行平滑化处理,截止频率为 10 Hz<sup>[14]</sup>。计算髋、膝、踝关节角度与角速度<sup>[16]</sup>。为了量化关节间协调的稳定性,将 1 个完整步态周期内各时刻运动学数据插值为 100 个数据点进行标准化处理。本文选取的动作周期定义为左脚足跟着地后至该侧足跟再次着地。

### 1.3 测试指标

**1.3.1 关节角度** 计算出髋、膝、踝三关节在运动过程中 3 个解剖平面的最大( $\theta_{\max}$ )和最小关节角度( $\theta_{\min}$ ),并计算出其相应的关节活动范围(range of motion, ROM)。髋关节角度正值代表屈曲、外展、外旋,负值代表伸展、内收、内旋;膝关节角度正值代表伸膝、外展、外旋,负值代表屈膝、内收、内旋;踝关节角度正值代表跖屈、外翻、外旋,负值代表背屈、内翻、内旋。

**1.3.2 相位图** 相位图显示了速度与位移的函数关系,水平轴为角位移,垂直轴为角速度。为了计算相位角和使不同运动振幅和频率的影响降到最小,需要对相位图进行标准化<sup>[10]</sup>。定义相位角为相位图中从原点到当前数据点( $\theta_i, \omega_i$ )与右侧水平线所形成的夹角。将矢状面下肢关节角度,角速度标准化。这种标准化将原点(0,0)放于中间,将最小值标准化为-1,最大值标准化为 1。 $\theta_i, \omega_i$  计算公式如下<sup>[10]</sup>:

$$\theta_i = \left( \frac{2[\theta_i - \min(\theta_i)]}{\max(\theta_i) - \min(\theta_i)} \right) - 1 \quad (1)$$

$$\omega_i = \frac{\omega_i}{\max\{|\omega_i|\}} \quad (2)$$

式中: $\theta$  为角度; $\omega$  为角速度; $i$  代表动作过程中某一点。

将标准化后的角度和角速度代入式(3)计算出相角值( $\psi$ )。

$$\psi_i = \tan^{-1} \left( \frac{\bar{\omega}_i}{\bar{\theta}_i} \right) \quad (3)$$

**1.3.3 CRP** 下肢各环节间的相对相位变化可以反映肢体间同步和稳定状况<sup>[17]</sup>。其计算方式为用近端关节减去远端关节的相角值得到相对相角值(如 $\psi_{\text{髋-膝}}$ 、 $\psi_{\text{膝-踝}}$ )。

若 $\psi > 0$ ,则为近端关节引导远端关节运动;若 $\psi < 0$ ,则为远端关节引导近端关节运动<sup>[9]</sup>。当所得结果越接近 $2\pi$ ( $0^\circ$ 或 $360^\circ$ )时为同相,所得结果越接近 $\pi$ ( $180^\circ$ )时为反相, $\pm 30^\circ$ 为可接受范围<sup>[18]</sup>。

**1.3.4 耦合关系** 为统计检验相对相位曲线之间的关系,计算出测量周期中所有时刻的相对相角的平均值的绝对值的平均值(mean absolute relative phase, MARP)和标准差的平均值(deviation phase, DP)<sup>[17]</sup>:

$$\text{MARP} = \frac{\sum_{i=1}^P |\varphi|}{P} \quad (4)$$

$$\text{DP} = \frac{\sum_{i=1}^P \text{SD}}{P} \quad (5)$$

较低的 DP 值表明两个关节之间的关系更稳定,较低的 MARP 值表明两个关节之间的动作一致性较好<sup>[17]</sup>。

### 1.4 样本量

使用 GPower 软件进行样本量计算。研究表明,平地跑步时小腿-大腿间矢状面 MARP 为 $50.40 \pm 7.27$ ,跑步跨越身体高度 10%的障碍物时小腿-大腿间矢状面 MARP 为 $43.83 \pm 10.24$ <sup>[19]</sup>。通过配对进行双尾检验,将显著性水平设置为 0.05,统计效应为 0.80,计算出效应量为 0.72,样本总量为 23。

### 1.5 统计分析

本研究中,自变量为动作类型(太极拳和步行),因变量为髋膝踝关节角度、MARP、DP。将受试者经数据处理后 3 次测试数据平均化后取均值。统计学分析采用统计软件 SPSS 20.0,所得因变量参数值均用平均值 $\pm$ 标准差表示。采用配对样本  $t$  检验,观察太极拳捋膝拗步动作和步行时下肢关节各因变量参数值的影响,设置显著性水平  $P < 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 关节角度

擦膝拗步动作时,髋关节在3个解剖面的最大、最小角度和ROM均大于步行,其中额状面和水平面最小角度无显著性差异( $P>0.05$ );膝关

节在各个面的最大角度和ROM以及矢状面的最小角度显著大于步行( $P<0.05$ ),但额状面和水平面的最小角度小于步行且无显著性差异;踝关节在各解剖面的最大角度和ROM显著大于步行( $P<0.05$ ),最小角度明显小于步行( $P<0.05$ ),见图3。

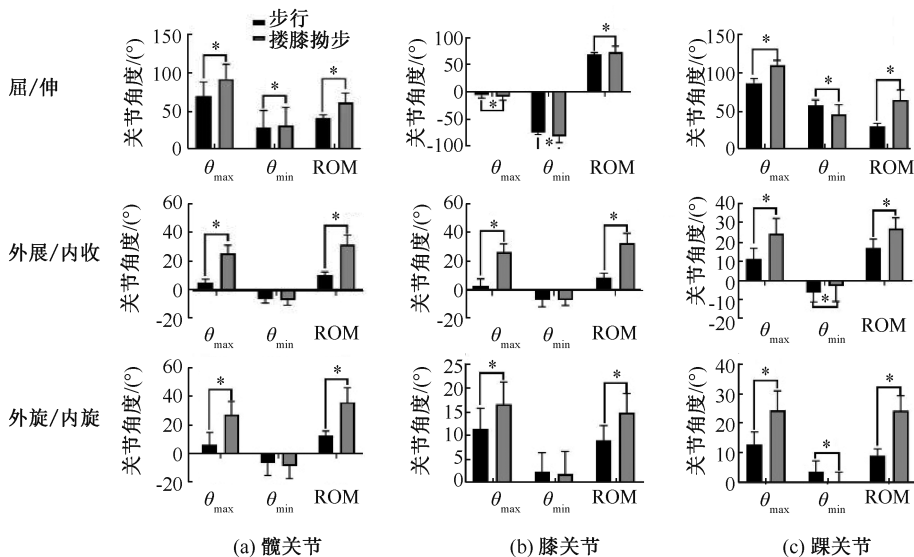


图3 不同步态下左侧下肢关节最小、最大关节角度及总关节活动度比较(\* $P<0.05$ )

Fig. 3 Comparison of minimum, maximum joint angles and total ROM for left lower limb joints under different gaits (a) Hip joint, (b) Knee joint, (c) Ankle joint

由步行和擦膝拗步动作时左侧下肢关节角度变化可见,步行和擦膝拗步动作时三关节起始和终末角度近似。从几何形状上看,步行中,膝、踝关节角度整体变化趋势相近,但两关节角度变化不同步,膝关节落后于踝关节;在擦膝拗步动作周期30%~80%,膝、踝关节角度整体变化趋势差异较明显,剩余部分趋势相近(见图4)。

面相位图可见,步行时下肢三关节的运动轨迹形状饱满,髋关节运动轨迹近似于1个闭合的周期性的圆,而擦膝拗步动作时下肢三关节的运动轨迹则是形状不规则。与步行相比,擦膝拗步的运动轨迹更复杂(见图5)。

### 2.3 CRP

由步行和擦膝拗步时左侧下肢髋-膝-踝关节矢状面CRP图可见,两个动作开始及结束时,髋-膝关节同处于正值,膝-踝关节同处于负值,说明髋-膝关节中髋关节为主导关节,膝-踝关节中踝关节为主导关节,动作过程中近端关节引导和远端关节引导切换频繁(见图6)。

### 2.4 耦合关系

表1所示为左侧下肢矢状面髋-膝和膝-踝关节的MARF和DP。与步行相比,擦膝拗步动作时髋-膝关节的MARF和DP均具有显著性差异( $P<0.05$ ),两者皆显著小于步行( $P<0.01$ );膝-踝关节的MARF显著小于步行( $P=0.049$ )。

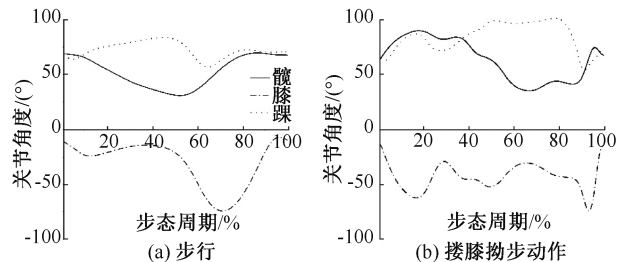


图4 不同步态下左侧下肢关节矢状面角度变化

Fig. 4 Changes of left lower limb angles in sagittal plane under different gaits (a) Walking, (b) Brush knee and twist step

### 2.2 相位图

由步行和擦膝拗步动作左侧下肢三关节矢状

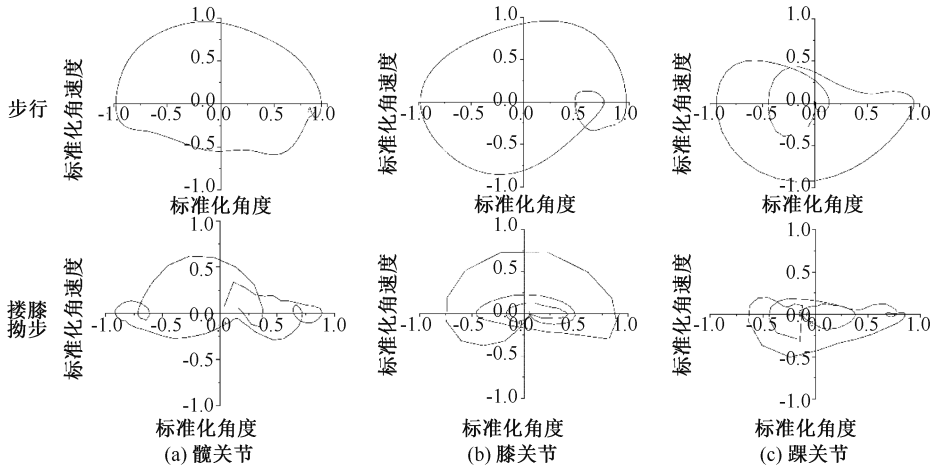


图 5 不同步态下左下肢关节矢状面集合平均相位图

Fig. 5 Ensemble-averaged phase plots for left lower limb joints in sagittal plane under different gaits

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

注:纵轴为标准化的角速度,横轴为标准化的角度。

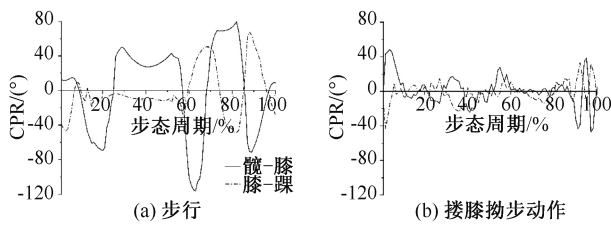


图 6 不同步态下左下肢矢状面相对相位

Fig. 6 Continuous relative phase of left lower limb in sagittal plane under different gaits (a) Walking, (b) Brush knee and twist step

表 1 左侧下肢矢状面肢体内耦合关系

Tab. 1 Internal coupling relationship of left lower limb in sagittal plane

指标	步行	撩膝拗步	$t$	$P$
髌膝 MARP/( $^{\circ}$ )	55.44 $\pm$ 3.84	36.18 $\pm$ 6.11	14.49	<0.001
膝踝 MARP/( $^{\circ}$ )	35.54 $\pm$ 5.12	32.64 $\pm$ 5.09	2.06	0.049
髌膝 DP/( $^{\circ}$ )	0.64 $\pm$ 0.03	0.50 $\pm$ 0.06	12.14	<0.001
膝踝 DP/( $^{\circ}$ )	0.49 $\pm$ 0.06	0.46 $\pm$ 0.05	1.75	0.091

### 3 讨论

评估关节间协调提供了关节运动学的附加信息,有助于了解运动系统是如何协作完成运动任务<sup>[17,19]</sup>。随着年龄的增长,外周和中枢感觉输入传导通路功能下降(神经传导速度下降等),不能实时提供关于身体位置和运动的反馈,引起下肢神经肌肉控制减弱,从而导致运动协调和平衡能力下降,

这可能与老年人跌倒的高发生率有关<sup>[20]</sup>。本文结果显示,撩膝拗步动作中下肢髌、膝、踝关节在 3 个解剖面关节 ROM 均增大,矢状面关节角度频繁增减(见图 3、4)。关节 ROM 增大,表明关节运动更接近始末范围。肌肉主动收缩或受到牵拉时,带动所附关节的 ROM 发生相应变化<sup>[21]</sup>;肌肉拉力和张力增加时,肌肉中感觉神经末梢受到的刺激增强,引起运动神经元放电,将神经冲动传入中枢,产生并强化本体感觉<sup>[22]</sup>;当关节活动趋近于始末端时,刺激超过阈值,感觉末梢会进行反馈抑制神经元,使肌肉放松<sup>[21]</sup>。关节角度频繁增减表明老年人在演练撩膝拗步动作过程中,需要反复调整并精准控制身体重心和肢体位置。这可能有助于调节机械感受器的输入-输出关系,诱发中枢神经系统的可塑性变化,如突触连接强度的增加,从而强化信息传导通路,增强本体感觉<sup>[20]</sup>。本体感觉外周和中枢通路功能的增强,增加了对神经系统控制能力的需求,调节姿势控制策略,使人体更多地依赖关节间的协调来控制肢体的运动轨迹<sup>[22]</sup>。

从图形上看,撩膝拗步动作与正常步行相比,下肢三关节集合平均相位图都出现了额外的闭合图形,这可能与撩膝拗步的动作特征密不可分(见图 5)。步行为连续向前的动作,撩膝拗步动作先上步,然后后移重心转向,蹬离。这也解释了撩膝拗步动作过程中关节屈伸角度的频繁变化,和 CRP 曲

线主导关节的频繁切换。太极拳步动作时,髌、膝、踝关节几何平均相位图图形的纵轴变化幅度反映了下肢三关节离心运动角速度相比步行减小,膝关节更为明显,这可能是一种关节保护机制,通过限制关节离心运动角速度,降低关节损伤<sup>[23]</sup>。

观察受试者 CRP 曲线发现,与正常步行相比,受试者在演练太极拳步动作过程中主导关节变换更为频繁,表明近端和远端关节引导运动模式的变化(见图 6)。太极拳太极拳步动作周期开始时近端关节作为主动关节引导运动,上步屈髌屈膝形成前弓步,髌-膝关节、膝-踝关节协调由反相逐渐变为同相状态来维持重心稳定;在太极拳步动作结束阶段,髌-膝关节和膝-踝关节协调处于反相状态,主要是近端关节主导运动,此时左腿蹬离,屈髌屈膝背屈脚完成一个类似跨过障碍物的动作,对关节协调模式和重心稳定的控制难度增大。近端关节在姿势控制中起着重要的作用,近端关节主动调整可能会增加人体不稳定性<sup>[24]</sup>。然而肢体内耦合关系结果显示,太极拳步动作过程中髌-膝关节和膝-踝关节的 MARP 和 DP 均小于步行(见表 1)。MARP 越小,说明两环节间的运动越近于同相或协同运动;DP 越小,说明动作变异性越小,动作越稳定<sup>[16]</sup>。本文结果提示,太极拳步动作过程中下肢关节间的动作更加同步和稳定,各关节的独立动作减少。本文推测,老年人在演练太极拳步时采取的步态策略更谨慎,通过频繁调整相邻环节运动幅度、速度使关节间的动作更协调一致。关节协调在保持步态稳定方面起着至关重要的作用<sup>[25]</sup>。这种频繁调整可能有利于优化人体本体感觉信息传导,进而促进髌-膝和膝-踝关节间适应性的关节协调模式的形成。因此,太极拳步可能反映了一种协调稳定的步态控制策略,即在具有挑战性的动作任务中保持姿势稳定,可能有利于减少人体跌倒的风险<sup>[11]</sup>。

本研究存在一定局限性:① 太极拳步动作是由整个身体协调配合完成的连贯动作,应综合考虑躯干、上肢以及视觉对下肢协调性的影响。② 本实验中受试者以自己舒适的速度进行步行和太极拳动作测试,可能会对试验结果产生一定影响。目前的研究结果局限于矢状面关节间的协调模式和稳定性,建议进一步研究可涉及其他解剖面的不同步行阶段,以求更全面反映太极拳动作的下肢运动协调特征。

## 4 结论

与步行相比,太极拳步中下肢髌、膝、踝关节在 3 个解剖面的关节 ROM 均增大,整个动作周期内髌-膝和膝-踝关节的 MARP 和 DP 较低,关节间具有较同步和稳定的动作控制特征。因此,太极拳锻炼可能提供一种独特的协调训练方式,特别是针对两关节间的协调配合,可能有助于姿势控制,进而起到预防跌倒的功效。

## 参考文献:

- [1] WHITE UE, BLACK AA, WOOD JM, et al. Fear of falling in vision impairment [J]. *Optom Vis Sci*, 2015, 92(6): 730-735.
- [2] 史晓红, 杨泽, 宋岳涛, 等. 中国老年人跌倒风险评估专家共识(草案) [J]. *中国老年保健医学*, 2019, 17(4): 47-48.
- [3] 孟站领. 不同跌倒风险老年人跨越障碍的步态特征研究 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2017.
- [4] 张彦龙, 陈思, 张愉, 等. 太极拳上步弓步动作足前角对膝关节载荷的影响及肌肉协调收缩策略 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(5): 718-724.  
ZHANG YL, CHEN S, ZHANG Y, et al. Influences of foot progression angle during the Tai Chi step lunge movement on knee joint load and strategy of coordinated muscle contraction [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(5): 718-724.
- [5] ZHAO Y, WANG Y. Tai Chi as an intervention to reduce falls and improve balance function in the elderly: A meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Front Nurs*, 2016, 3(1): 28-33.
- [6] 谭琳. 中国人口老龄化发展趋势预测报告 [J]. *中国妇运*, 2007(2): 15-18.
- [7] WEILI H, KWANHWA L, RONGSEN Y, et al. Use of motor abundance in old adults in the regulation of a narrow-based stance [J]. *Eur J of Appl Physiol*, 2014, 114(2): 261-271.
- [8] HUANG Q, HU M, XU B, et al. The coordination of upper and lower limbs in curve-turning walking of healthy preschoolers: Viewed in continuous relative phase [J]. *Gait Posture*, 2020, 75(3): 1-7.
- [9] 林辉杰, 严波涛, 刘占锋, 等. 运动协调的定量方法以及在专项技术分析领域的研究进展 [J]. *体育科学*, 2012, 32(3): 81-91.
- [10] CHIU S, CHOU L. Effect of walking speed on inter-joint coordination differs between young and elderly adults [J]. *J Biomech*, 2012, 45(2): 275-280.
- [11] MEHDIZADEH S, ARSHI AR, DAVIDS K. Quantifying coordination and coordination variability in backward versus

- forward running: Implications for control of motion [J]. *Gait Posture*, 2015, 42(2): 172-177.
- [12] 沈以昕, 朱冬奇, 牛文鑫. 太极拳的平衡维持作用及其生物力学研究进展 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(4): 372-377. SHEN YX, ZHU DQ, NIU WX. Research progress on balance control and biomechanics of Tai Chi [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(4): 372-377.
- [13] CORDO PJ, GURFINKEL VS. Motor coordination can be fully understood only by studying complex movements [J]. *Prog Brain Res*, 2004, 143: 29-38.
- [14] SONG Q, WANG S, WONG DP, *et al.* Long-term Tai Chi exercise increases body stability of the elderly during stair ascent under high and low illumination [J]. *Sports Biomech*, 2017, 17(3): 1-12.
- [15] ZHANG C, SUN W, SONG Q, *et al.* Performance of older adults under dual task during stair descent [J]. *J Exerc Sci Fit*, 2018, 16(3): 99-105.
- [16] 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.
- [17] STERGIOU N, JENSEN JL, BATES BT, *et al.* A dynamical systems investigation of lower extremity coordination during running over obstacles [J]. *Clin Biomech*, 2001, 16(3): 213-221.
- [18] TUNGWU L, HSIAOCHING Y, HAOLING C. Comparisons of the inter-joint coordination between leading and trailing limbs when crossing obstacles of different heights [J]. *Gait Posture*, 2008, 27(2): 309-315.
- [19] CHIU S, LU T, CHOU L. Altered inter-joint coordination during walking in patients with total hip arthroplasty [J]. *Gait Posture*, 2010, 32(4): 656-660.
- [20] RIBEIRO F, OLIVEIRA J. Aging effects on joint proprioception: The role of physical activity in proprioception preservation [J]. *Eur Rev of Aging Phys Act*, 2007, 4(2): 71-76.
- [21] MACEFIELD VG. Physiological characteristics of low-threshold mechanoreceptors in joints, muscle and skin in human subjects [J]. *Clin Exp Pharmacol Physiol*, 2005, 32(1-2): 135-144.
- [22] TUTHILL JC, AZIM E. Proprioception [J]. *Curr Biol*, 2018, 28(5): 187-207.
- [23] YEADON MR, KING MA, CASSIE W. Modelling the maximum voluntary joint torque/angular velocity relationship in human movement [J]. *J Biomech*, 2006, 39(3): 476-482.
- [24] RAHIMZADEH S, GHANAVATI T, POURREZA S, *et al.* Inter-joint coordination during obstacle crossing in people with diabetic neuropathy [J]. *J Biomech*, 2020, 105(3): 109765.
- [25] IPPERSIEL P, ROBBINS SM, DIXON PC. Lower-limb coordination and variability during gait: The effects of age and walking surface [J]. *Gait Posture*, 2021, 85(3): 251-257.