

文章编号: 1004-7220(2023)06-1100-07

# 太极拳转体动作中下肢关节活动顺序性和肌肉力表现及肌肉激活特征

张彦龙<sup>1</sup>, 陈思<sup>2</sup>, 毕耕超<sup>1</sup>, 张蓓<sup>1</sup>, 李在军<sup>3</sup>, 黄春艳<sup>4</sup>

(1. 牡丹江师范学院 体育与健康科学学院, 黑龙江 牡丹江 157011; 2. 深圳大学 体育学院, 广东 深圳 518061;

3. 吉林体育学院, 长春 130022; 4. 牡丹江医学院, 黑龙江 牡丹江 157012)

**摘要:**目的 分析太极拳转体与弓步动作中下肢关节活动顺序性、肌肉力表现和肌肉激活程度的差异,揭示太极拳转体动作的特征。**方法** 募集20名练习时长超过3年的健康太极拳练习者,采用三维运动捕捉系统、测力台和表面肌电同步采集转体与弓步两种动作运动学、动力学和肌肉激活信息,并通过OpenSim仿真软件获取下肢肌力。**结果** 与弓步相比,转体动作髋、踝关节外旋幅度显著增大;膝关节外展和外旋力矩显著增大,股二头肌、半腱肌和内外侧腓肠肌峰值肌力显著增强,股二头肌、内外侧腓肠肌峰值肌力时刻显著提前,而股内外侧肌和胫骨前肌峰值肌力显著减小,胫骨前肌肌力最早达到峰值;股二头肌、股内外侧肌和内侧腓肠肌的平均激活水平和激活时间显著增加。**结论** 太极拳转体动作由踝、髋关节依次转动组成,肌肉力表现的独特性在于重心两次转移致使支撑腿股内外侧肌力曲线呈双峰型,因为全足着地延迟方式引发了腓肠肌与股四头肌激活顺序和肌肉平均激活水平改变。研究结果提示全足着地延迟方式具有调节肌肉激活顺序的作用,合理利用有助于提升临床康复效果。

**关键词:** 太极拳; 转体动作; 弓步动作; 肌肉力表现; 肌肉激活

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.007

## Lower Limb Joint Activity, Muscle Strength Performance and Muscle Activation of Tai Chi Twist Movement

ZHANG Yanlong<sup>1</sup>, CHEN Si<sup>2</sup>, BI Gengchao<sup>1</sup>, ZHANG Bei<sup>1</sup>, LI Zaijun<sup>3</sup>, HUANG Chunyan<sup>4</sup>

(1. Institute of Sports and Health Science, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157011, Heilongjiang, China; 2. Institute of Physical Education, Shenzhen University, Shenzhen 518061, Guangdong, China; 3. Jilin Sport University, Changchun 130022, China; 4. Mudanjiang Medical College, Mudanjiang 157012, Heilongjiang, China)

**Abstract: Objective** To analyze the differences of activity sequence, muscle force performance and muscle activation in lower limb joints between Tai Chi lunge and twist movement, so as to reveal the characteristics of Tai Chi twist movement. **Methods** Twenty healthy Tai Chi practitioners who have practiced Tai Chi for more than 3 years were recruited. The kinematic, kinetic and muscle activation of two movements were collected simultaneously using a three-dimensional (3D) motion capture system, force platform and surface electromyography, and the lower limb muscle force was obtained by OpenSim simulation software. **Results** Compared with lunge movement, there was a significant increase in lateral rotation amplitude of hip and ankle

收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-04-17

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(23YJA890047)

通信作者: 陈思, 助理教授, E-mail: chensi2020@szu.edu.cn

joint in twist movement. The knee abduction and external rotation torque increased significantly. The peak muscle strength of biceps femoris, semitendinosus and medial and lateral gastrocnemius increased, and the time of peak muscle strength of biceps femoris and medial and lateral gastrocnemius was significantly advanced, while the peak muscle strength of vastus medialis, vastus lateralis and tibial anterior muscles decreased, the tibialis anterior muscle strength reached its earliest peak. The average activation levels and activation time of biceps femoris, vastus medialis, vastus lateralis, and medial and lateral gastrocnemius significantly increased.

**Conclusions** Tai Chi twist movement is composed of ankle and hip joint rotation in turn. The uniqueness of muscle strength lies in that the center of gravity is shifted twice, which makes muscle strength curve of the vastus medialis and vastus lateralis of the supporting leg to be bimodal. The activation sequence and average activation level of gastrocnemius and quadriceps femoris are changed due to the delay of full foot landing. The results indicate that the full foot landing delay mode has the effect of regulating the sequence of muscle activation, and rational use is helpful to improve the clinical rehabilitation effect.

**Key words:** Tai Chi; twist movement; lunge movement; muscle performance; muscle activation

太极拳在姿势控制、增强肌肉力量、发展柔韧性以及调节中老年人身体平衡能力等方面发挥着重要作用,成为改善步态表现的辅助康复和治疗手段<sup>[1-2]</sup>。研究表明,膝关节疼痛症状患者普遍存在下肢肌力下降、肌群收缩不协调等现象,致使肌肉激活的时序性、共激活模式及大腿内外侧肌群肌电(electromyography, EMG)改变<sup>[3-4]</sup>。肌肉共激活模式存在整体肌肉共激活和选择性肌肉共激活两种激活策略,被认为是调节关节稳定性、关节负荷分配和运动控制的主要机制<sup>[5]</sup>。

太极拳动作主要以各种步法和旋转组成,在整套动作中,弓步和转体动作出现的频次最多,而转体是联结其他步法关节活动链的核心动作。研究显示,太极拳动作大腿外侧肌的激活能力增强<sup>[6]</sup>。与行走相比,太极拳步态中EMG均方根峰值显著升高,肌肉激活水平存在差异<sup>[7]</sup>。此外,太极拳下肢关节转动方式有别于走、跑、蹲起和上下楼梯<sup>[8-9]</sup>。这些激活特征可能与太极拳转体动作的独特性相关,然而有关转体动作的生物力学特征目前尚缺乏足够认识。评估健康太极拳练习者肌肉激活特征,揭示太极拳转体动作的特性,有助于根据不同康复需要合理选择锻炼转体或是弓步动作,对丰富临床康复训练手段具有借鉴意义。

太极拳步法转换以足跟为轴和受力点的转体动作,多以重心落在前支撑腿的“实腿转体”为主。因此,为了量化运动姿势对下肢关节活动顺序性、肌肉力表现及肌肉激活特征的影响,依据太极拳

套路中转体动作运用频次,结合揭示太极拳转体动作独特性的需要,本文选取太极拳搂膝拗步中弓步和转体动作前支撑腿为研究对象,考察下肢关节活动顺序性、肌肉力表现、肌肉激活水平等特征。

## 1 对象与方法

### 1.1 实验对象

招募20名每周至少练习3次太极拳、具有3年以上太极拳练习经历的健康中年志愿者,年龄(43.5±2.6)岁。其中,男性12人,身高(175.5±4.3)cm,体质量(72.8±6.6)kg;女性8人,身高(162.1±3.3)cm,体质量(57.8±4.5)kg。受试者近2年下肢无损伤,足部解剖结构和机能正常,近3年内无病理步态。所有受试者实验前均被告知实验具体流程事项,并签署知情同意书。

### 1.2 测试方案

测试者按照太极拳技术规范要求,依次完成“搂膝拗步”中的弓步和转体动作。依据Plug-in-Gait方案粘贴25个反光骨性标志点(双侧第1、2、5跖趾关节、双侧足跟、双侧外踝、双侧内踝、双侧大腿外侧、双侧股骨外侧髁、双侧股骨内侧髁、双侧胫骨粗隆、双侧髂前上棘、双侧髂后上棘、左右髂后上棘连线中点)。参照国际电生理学和运动机能学学会指南,表面肌电(surface electromyography, sEMG)传感器分别粘贴于股直肌、股内侧肌、股外侧肌、半腱肌、股二头肌、胫骨前肌、内侧腓肠肌、外侧腓肠肌的肌腹位置。分别采用8镜头红外高速动作捕

捉系统(采样频率 100 Hz, Qualisys 公司, 瑞典), 三维测力台(采样频率 1 kHz, BP400600, AMTI 公司, 美国)和无线 16 通道表面肌电(采样频率 2 kHz, Delsys 公司, 美国), 同步采集实验动作的运动学、动力学和肌电信息。不同采集频率的实验装置采用 Qualisys 软件与外置数模转换器触发实现同步。采用标准化的“中架势”规范身体高度, 受试者完成动作高度 =  $[(\text{受试者身高} \times 0.89) - 8.0] \text{ cm}^{[10]}$ 。设置水平视高标志供每名受试者观察, 各采集 3 次成功的弓步动作和转体动作数据, 每次间隔时间 30 s。

### 1.3 仿真与数据处理

**1.3.1 仿真流程** 将采集到的运动学和动力学数据从 Qualisys 动作捕捉系统中以 C3D 文件格式导出, 使用 MATLAB 软件调用 OpenSim 目录中的 c3dExport.m 函数对导出数据进行空间坐标转化, 再对转换后的数据进行低通道滤波处理<sup>[11]</sup>, 转换为 OpenSim 仿真软件识别的 trc 和 mot 文件, 再导入 OpenSim 仿真软件中进行仿真计算。本研究基于 Gait2392\_Simbody 模型仿真, 模型包括 12 个环节、23 个自由度和 92 个肌肉执行器。导入的数据通过缩放模型(scale)、逆向运动学(inverse kinematics)、逆向动力学(inverse dynamics)、残差计算(residual reduction algorithm)、计算肌肉控制(computed muscle control, CMC)等运算过程, 成功仿真出弓步和转体动作(见图 1)。获取胫骨前肌、内侧腓肠肌、外侧腓肠肌、股二头肌、半腱肌、股内侧肌、股外侧肌和股直肌肌力等参数。

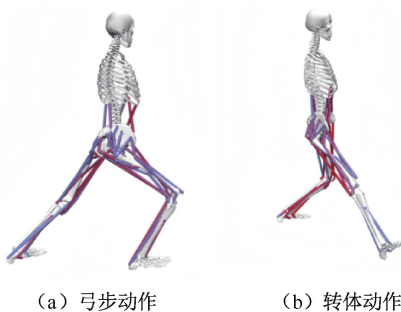


图 1 弓步和转体动作模拟仿真结果

Fig. 1 Simulation results of lunge and twist movement

(a) Lunge movement, (b) Twist movement

**1.3.2 仿真验证** 将实验采集的 EMG 线性包络线与 OpenSim CMC 肌肉激活水平进行对比, 验证模拟仿真结果的可靠性<sup>[12]</sup>。具体而言, 使用 EMG 信

号反映肌肉激活水平, 与 OpenSim CMC 动态优化获得的肌肉激活结果在同一纵轴范围内进行比较, 若两者之间相关性非常高, 则说明模拟仿真所得到的肌力可靠。本文随机选取 1 名受试者弓步动作的股直肌进行两种结果验证。结果表明, OpenSim CMC 动态优化肌肉激活水平和 sEMG 系统采集的 EMG 线性包络线形态与峰值时刻基本一致, 说明本文仿真结果具有较好的可信度。

**1.3.3 EMG 处理** 使用 MATLAB(R2019a) 程序, 对原始 EMG 信号进行滤波、整流和标准化处理。首先, 为了降低传感器相对于肌肉表面移动等因素的干扰, 使用四阶巴特沃斯(butterworth)滤波器从 20~500 Hz 进行带通滤波, 之后采用二阶巴特沃斯 50 Hz 低通滤波器去除电信号对肌电信号的影响。其次, 对滤波后的肌电信号进行全波整流<sup>[13]</sup>。最后, 采用最大自主等长收缩(maximal voluntary isometric contraction, MVIC)法进行标准化(%MVIC)处理, 即肌肉活动水平除以最大自主等长收缩<sup>[14]</sup>, 提取 EMG 均方根(root mean square, RMS)。按照 Hug 等<sup>[15]</sup>方法, 将 EMG 信号标准化处理后达到峰值 20% 的 EMG 值定义为肌肉激活状态, 以此确定肌肉激活开始和结束时刻, 计算肌肉激活持续时间和平均激活水平 RMS(%MVIC)

### 1.4 统计分析

采用 SPSS 21.0 统计软件对所界定的指标进行统计分析, 显著性水平设为  $\alpha = 0.05$ 。数据以平均值 $\pm$ 标准差表示, 首先采用 Shapiro-Wilk 进行正态分布检验, 符合正态分布的数据采用配对  $t$  检验, 不符合正态分布的数据采用非参数检验。

## 2 结果

### 2.1 关节活动表现

从足着地至最大屈膝时刻, 与弓步相比, 转体具有较大的屈角、外展角和外旋角( $P < 0.01$ )。其中, 膝关节在两种动作中均存在由外展转为内收; 踝关节在弓步中无显著外旋, 而转体中外旋幅度显著增大( $P < 0.01$ ); 髋关节在弓步中内收和内旋幅度显著增大, 而转体中外展和外旋幅度显著增大( $P < 0.01$ ), 见表 1。

### 2.2 关节肌肉力表现

由转体与弓步动作膝关节屈伸、外展、外旋关

表1 转体与弓步动作屈膝峰值时刻下各角度比较

Tab.1 Comparison of knee flexion angle between twist and lunge movement at peak movements 单位:(°)

关节角度	弓步	转体
髋关节屈(-)/伸(+)	85.2±8.8	108.7±7.5**
髋关节外展(-)/内收(+)	-9.1±3.3	1.8±2.1**
髋关节外旋(-)/内旋(+)	3.1±2.2	-6.7±3.2**
膝关节屈(-)/伸(+)	90.6±8.3	112.9±7.6**
膝关节外展(-)/内收(+)	26.6±2.8	35.4±3.6**
膝关节外旋(-)/内旋(+)	-1.2±2.1	-14.4±2.3**
踝关节跖屈(-)/背屈(+)	23.4±4.7	31.6±4.5**
踝关节外展(-)/内收(+)	-5.9±4.5	-14.1±3.6**
踝关节外旋(-)/内旋(+)	-2.8±1.1	-49.6±1.3**
小腿外旋(-)/内旋(+)	-9.1±2.3	-73.6±5.3**

注:与弓步比较,\* $P<0.05$ ,\*\* $P<0.01$ 。

节力矩曲线可见,从足着地至膝关节屈曲峰值时刻,与弓步相比,转体动作膝关节外展和外旋力矩

峰值显著增大( $P<0.01$ ),伸膝力矩峰值显著减小( $P<0.01$ ),但外旋力矩达到峰值时刻经历时间显著提前(见图2)。

从肌肉力表现看,与弓步相比,转体过程中股二头肌、半腱肌和内/外侧腓肠肌峰值肌力显著增大;而股内/外侧肌和胫骨前肌峰值肌力显著减小( $P<0.05$ ),但达到峰值时刻经历的时间股内/外侧肌显著增加,而胫骨前肌显著减少( $P<0.05$ );股内/外侧肌力曲线呈双峰型,全足着地时刻与膝关节最大屈曲时刻重叠并对应于双峰之间的波谷;半腱肌、内/外侧腓肠肌及股二头肌达到峰值肌力的时刻显著增加( $P<0.01$ ),且转体峰值肌力显著大于弓步( $P<0.05$ );在所测肌肉中胫骨前肌最早达到峰值时刻(见图3)。

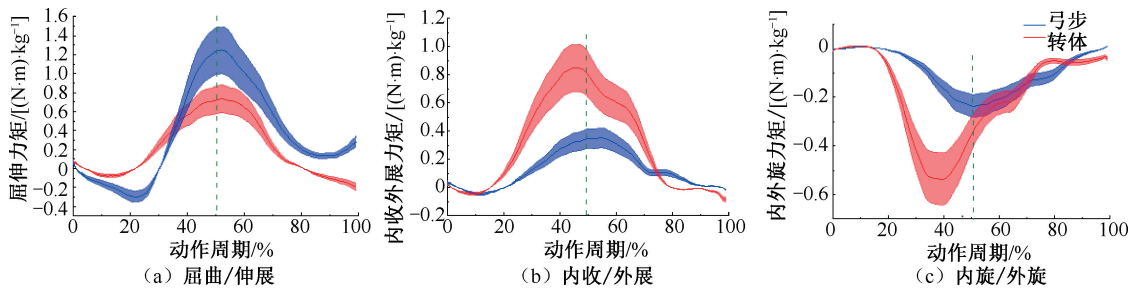


图2 转体和弓步膝关节力矩比较

Fig.2 Comparison of knee torque between twist and lunge movement (a) Flexion/extension, (b) Adduction/abduction, (c) Internal/external rotation

注:竖线为膝关节最大屈曲时刻;屈曲(-)/伸展(+),内收(-)/外展(+),外旋(-)/内旋(+)。

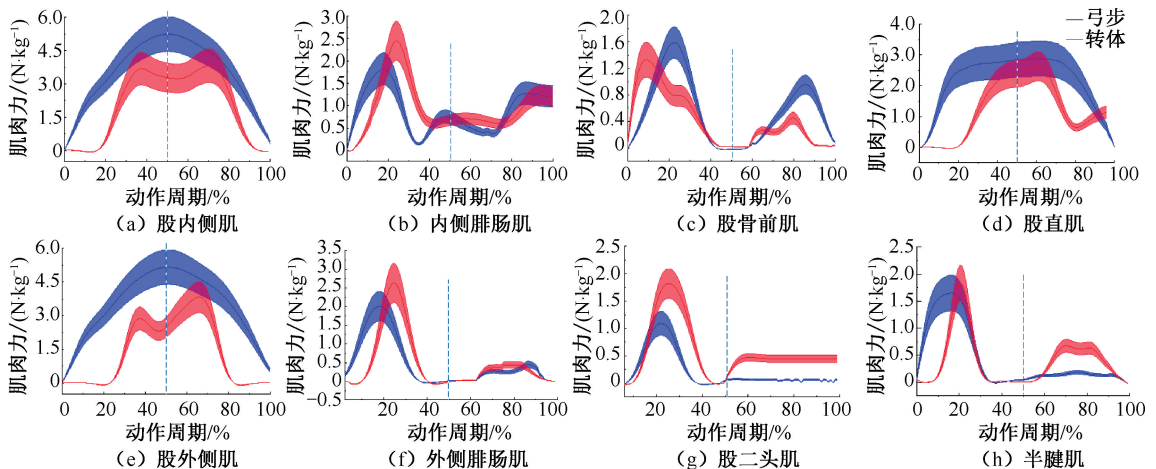


图3 转体与弓步动作肌肉力变化曲线比较

Fig.3 Comparison of muscle force change curves between twist and lunge movement (a) Vastus medialis, (b) Medial gastrocnemius, (c) Tibial anterior, (d) Rectus femoris, (e) Vastus lateralis, (f) Lateral gastrocnemius, (g) Biceps femoris, (h) Semitendinosus

注:竖线为膝关节最大屈曲时刻。

### 2.3 肌肉激活表现

与弓步相比,转体动作中股二头肌、股内/外侧肌和内侧腓肠肌激活持续时间显著增大( $P<0.01$ ),而胫骨前肌激活持续时间显著减少( $P<0.01$ )。弓步动作中的半腱肌(6.6%)和腓肠肌(3.6%)最先

被激活,与弓步相比,转体动作中的腓肠肌(33.8%)激活时刻显著延迟;在肌肉平均激活水平RMS(%MVIC)上,转体动作中的股二头肌、股内/股外侧肌和外侧腓肠肌显著大于弓步( $P<0.05$ ),股直肌和内侧腓肠肌显著小于弓步( $P<0.01$ ),见表2。

表2 转体与弓步动作肌肉持续激活时间、均方根(%MVIC)比较

Tab. 2 Comparison of muscle activation duration and root mean square (%MVIC) between twist and lunge movement

肌肉	激活持续时间/s		RMS(%MVIC)	
	弓步	转体	弓步	转体
股二头肌	4.53±0.49(10.4%)	4.97±0.54(13.6%)*	13.67±1.18	19.35±2.49**
股直肌	3.88±0.58(30.8%)	4.32±0.66(27.4%)	10.02±2.50	8.95±0.67**
半腱肌	4.63±0.56(6.6%)	4.98±2.57(16.6%)	9.06±0.79	8.82±2.06
股内侧肌	2.46±0.69(27.4%)	4.26±0.84(21.9%)**	18.75±1.39	23.67±1.55**
股外侧肌	3.61±0.72(24.8%)	5.31±0.40(21.4%)**	21.62±2.06	23.19±3.01*
内侧腓肠肌	4.38±0.87(3.6%)	5.03±0.59(28.6%)*	9.26±1.73	8.53±1.08*
外侧腓肠肌	3.71±0.89(4.9%)	3.98±0.98(39.0%)	8.71±2.68	9.11±1.67*
胫骨前肌	3.77±0.65(16.4%)	2.57±0.77(19.4%)**	7.76±1.76	6.33±1.87*

注:激活持续时间栏括号里标注的是时间百分比(%);\* $P<0.05$ ,\*\* $P<0.01$ 。

### 3 讨论

本文通过比较太极拳两种步态关节活动顺序性、肌肉力表现和肌肉激活程度的差异,揭示转体动作的特征。结果显示,转体动作由踝、膝和髋关节运动链依次转动完成,因重心发生两次转移致使全足着地模式延迟,股内/外侧肌肌力曲线呈双峰型,引发腓肠肌与股四头肌激活顺序变化,屈膝肌和伸膝肌平均激活水平发生改变。

太极拳弓步动作上步腿以全足着地方式形成前弓后蹬的双支撑步态;而转体动作的上步腿则以足跟为轴外旋约 $60^\circ$ ,重心前移呈单支撑步态构成。本文发现,在两种步态中下肢各关节屈伸形式并无显著差异,该结果与汤惠如等<sup>[16]</sup>报道的结果相似;但在足着地至最大屈膝时刻,弓步髋关节呈现外展和内旋,转体则呈现内收和外旋活动表现形式;而踝关节仅在外旋幅度上差异显著。鉴于髋关节运动方式差异归因于动作技术模式对身体姿态要求,本文认为,踝关节外旋方式可能是诱发转体动作下肢关节活动顺序性改变的动因。

远端踝关节是构成弓步和转体动作中闭链运动的基础。为此,本文考察了踝关节与小腿从足着地至最大屈膝时刻两者的联动关系。结果发现,踝关节外旋幅度与小腿在弓步( $9.1^\circ$ )和转体( $73.6^\circ$ )中的转动幅度相一致;但与弓步的全足着地方式相

比,转体出现全足着地时刻延迟现象。该结果提示,全足着地模式延迟与踝关节外旋方式有关,这与“加大踝关节自由度更有利于控制重心和稳定姿势”<sup>[16]</sup>的观点相一致。

比较踝关节外旋对膝关节力矩的影响发现,转体中膝关节外展和外旋力矩显著增大。但该力矩与Wen等<sup>[17]</sup>报道的走、跑膝关节峰值力矩相当,其中太极拳屈伸峰值力矩大于行走,小于慢跑;内收和旋转载力矩大于行走和慢跑。针对太极拳的研究显示,改变足前进角使膝关节力矩增大;调整足着地姿态或改变胫骨角影响膝关节力矩<sup>[18]</sup>。由此本文认为,转体动作膝关节力矩增大的原因来自于踝关节外旋因素,较低水平的膝关节力矩可降低运动过程中慢性损伤风险,提示该动作在健身过程中具有安全性。

转体动作踝关节跖屈受限决定了太极拳肌肉力表现,总体呈现腓肠肌优先于股四头肌达到峰值肌力特征。研究表明,太极拳与走、跑运动中股四头肌比腓肠肌更早达到峰值<sup>[19]</sup>的肌力表现不同;太极拳与深蹲动作中股四头肌肌力增强,有利于稳定膝关节,足跟提起深度屈膝动作,胫骨前肌显著激活防止小腿过度前屈<sup>[20]</sup>的肌肉需求不同。转体动作踝关节跖屈受限,肌肉以远固定收缩是导致腓肠肌被优先激活的原因。本文结果提示,就优先发展下肢腓肠肌肌力而言,太极拳转体运动形式具有优

势,不失为临床康复应用的手段之一。

此外,本文发现,转体步态股内/外侧肌的肌力曲线呈双峰型,伸膝肌力峰值显著减小、屈膝肌力峰值显著增大。进一步观察发现,第1峰对应于踝关节外旋的双支撑阶段,而第2峰对应于髌关节转动的单支撑阶段,全足着地时刻位于两峰之间的谷底。太极拳转体步态的特点在于双关节肌参与依次转动;鉴于踝关节的外旋伴有重心后移,而髌关节的外旋伴有重心前移,致使转体动作支撑腿呈现两次承载,并引发伸膝肌中的股内/外侧肌肉力曲线呈双峰型,体现出太极拳肌肉力曲线形态与支撑腿承载方式密切相关。有关转体过程中腓肠肌肌力增大而胫骨前群肌力减小的作用,符合“腓肠肌肌力升高是为了限制膝关节内外翻”<sup>[21]</sup>的观点。因此,本文认为,重心两次转移致使支撑腿伸膝肌力曲线呈双峰型特征,是太极拳转体动作肌肉力表现的独特性所在。

在激活持续时间与肌肉平均激活水平 RMS (%MVIC)上,转体步态中股二头肌、股内/外侧肌和外侧腓肠肌显著大于弓步,股直肌和内侧腓肠肌显著小于弓步。该结果表明,全足着地延迟方式决定了肌肉平均激活水平的差异。另外,太极拳肌肉激活顺序与肌肉平均激活水平关联,弓步中内侧腓肠肌(3.6%)和外侧腓肠肌(4.9%)最早被激活,股内侧肌(27.4%)和股外侧肌(24.8%)显著延迟,但转体中股内侧肌(21.9%)和股外侧肌(21.4%)先于腓肠肌(内侧28.6%、外侧39.0%)被优先激活。因此,该结果提示肌肉激活顺序为弓步表现为腓肠肌和股四头肌,而转体表现为股二头肌、半腱肌、股四头肌和腓肠肌。

当前研究表明,太极拳两种动作全足着地方式存在差异。其中,弓步的肌肉平均激活水平与“太极拳屈膝状态下伸膝肌活动水平较高,而屈膝肌活动水平较低”<sup>[22]</sup>相似,符合腓肠肌与股四头肌优先激活顺序;而转体中股二头肌、半腱肌、股四头肌和腓肠肌的激活顺序特征,似乎与胫骨外旋、全足着地延迟方式,可能会预先激活这些肌肉并增加张力,从而抵抗外部负荷有关。该结果与“当小腿扭转力增大时,可通过增加股二头肌和半腱肌和腓肠肌肌力来补偿,足外旋能够改变股二头肌和半腱肌的相对激活”<sup>[23]</sup>的观点相一致。因

此,肌肉激活顺序与全足着地延迟方式有关。基于此,本文认为,转体着地延迟方式具有调节肌肉激活顺序的作用。临床康复应用中可借鉴该作用并加以利用。

本文探讨了转体动作关节活动顺序性和肌肉力表现及肌肉激活的特征,但仍然存在如下的局限性:①太极拳全套动作除弓步动作还有其他步法,转体动作还存在少量支撑腿内旋的转体,同时缺乏肌肉力对关节力贡献的关联性分析;②受试者选取健康人群,可能导致结果的解读缺乏临床应用性,后续应增加针对不同康复患者的其他步法与转体动作研究,如慢性肌骨病执行不同步法与转体步态干预措施比较,这可能对后续应用于临床康复具有指导意义。

## 4 结论

太极拳转体与弓步动作的踝关节活动顺序性、肌肉力表现、肌肉激活模式存在差异。转体动作由踝、髌关节依次转载转动构成,肌肉力表现的独特性在于重心两次转移致使支撑腿股内外侧肌力曲线呈双峰型,转体动作全足着地延迟方式是引发腓肠肌与股四头肌激活顺序和肌肉平均激活水平改变的原因。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] ZHU Q, HUANG L, WU X, et al. Effects of Tai Ji Quan training on gait kinematics in older Chinese women with knee osteoarthritis: A randomized controlled trial [J]. J Sport Health Sci, 2016, 5(3): 297-303.
- [3] WINBY CR, GERUS P, KIRK TB, et al. Correlation between EMG-based co-activation measures and medial and lateral compartment loads of the knee during gait [J]. Clin Biomech, 2013, 28(9-10): 1014-1019.
- [4] ACUÑA SA, TYLER ME, DANILOV YP, et al. Abnormal muscle activation patterns are associated with chronic gait deficits following traumatic brain injury [J]. Gait Posture, 2018, 62(5): 510-517.
- [5] SMITH SL, ALLAN R, MARREIROS SP, et al. Muscle co-activation across activities of daily living in individuals with

- knee osteoarthritis [J]. *Arthritis Care Res*, 2019, 71(5): 651-660.
- [6] 庞博, 纪仲秋, 张子华, 等. 基于 AnyBody 仿真的太极拳不同步型特征[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(6): 916-922.  
 PANG B, JI ZQ, ZHANG ZH, *et al.* Characteristics of different Tai Chi step types based on AnyBody simulation [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(6): 916-922.
- [7] LI JX, XU DQ, HONY Y. Changes in muscle strength, endurance, and reaction of the lower extremities with Tai Chi intervention [J]. *J Biomech*, 2009, 42(8): 967-971.
- [8] LI Y, WANG K, WANG LJ, *et al.* biomechanical analysis of the meniscus and cartilage of the knee during a typical Tai Chi movement-brush-knee and twist-step [J]. *Math Biosci Eng*, 2019, 16(2): 898-908.
- [9] WU G, LIU W, HITT J, *et al.* Spatial, temporal and muscle action patterns of Tai Chi gait [J]. *J Electromyogr Kines*, 2004, 14(3): 343-354.
- [10] 周雷, 王健, 吴飞, 等. 太极拳3种高度架势的确定及控制[J]. *中国体育科技*, 2005, 41(3): 103-104.
- [11] SASAKI K, NEPTUNE RR. Individual muscle contributions to the axial knee joint contact force during normal walking [J]. *J Biomech*, 2010, 43(14): 2780-2784.
- [12] 王凡嘉, 周晨磊, 罗丽娜, 等. 亚洲蹲和西方蹲的下肢关节运动学和肌肉激活比较[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(5): 705-711.  
 WANG FJ, ZHOU CL, LUO LN, *et al.* Comparison of the lower limb kinematics and muscle activation between Asian squat and western squat [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(5): 705-711.
- [13] CHARLTON JM, HATFIELD GL, GUENETTE JA, *et al.* Toe-in and toe-out walking require different lower limb neuromuscular patterns in people with knee osteoarthritis [J]. *J Biomech*, 2018, 76(5): 112-118.
- [14] HUBLEY KCL, ROBBINS SM, RUTHERFORD DJ, *et al.* Reliability of surface electromyographic recordings during walking in individuals with knee osteoarthritis [J]. *J Electromyogr Kines*, 2013, 23(2): 334-341.
- [15] HUG F. Can muscle coordination be precisely studied by surface electromyography? [J]. *J Electromyogr Kines*, 2011, 21(1): 1-12.
- [16] 汤惠如, 高庆, 王疆娜, 等. 老年人撘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.  
 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.
- [17] WEN C, CAO XY, ZHANG YY, *et al.* Knee biomechanics of selected knee unfriendly movement elements in 42-form Tai Chi [J]. *Int J Perform Anal Sport*, 2018, 18(6): 1050-1066.
- [18] 张彦龙, 陈思, 张愉, 等. 太极拳上步弓步动作足前进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.
- [19] GUO M, AXE MJ, MANAL K. The influence of foot progression angle on the knee adduction moment during walking and stair climbing in pain free individuals with knee osteoarthritis [J]. *Gait Posture*, 2007, 26(3): 436-441.
- [20] STAYNOR JMD, NICHOLAS JC, WEIR G, *et al.* Targeting associated mechanisms of anterior cruciate ligament injury in female community-level athletes [J]. *Sports Biomech*, 2017, 16(4): 501-513.
- [21] FUKAYA T, MUTSUZAKI H, MORI K. Relations between external moment and movement of the knee joint during the stance phase in patients with severe knee osteoarthritis [J]. *J Orthop*, 2019, 16(1): 101-104.
- [22] TSENG SC, LIU W, FINLEY M, *et al.* Muscle activation profiles about the knee during Tai-Chi stepping movement compared to the normal gait step [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2007, 17(3): 372-380.
- [23] HALL M, DIAMOND LE, LENTON GK, *et al.* Immediate effects of valgus knee bracing on tibiofemoral contact forces and knee muscle forces [J]. *Gait Posture*, 2019, 68(2): 55-62.