

文章编号: 1004-7220(2022)03-0538-06

揉膝拗步膝踝关节预激活与共收缩的表面肌电分析

于浩^{1a}, 高庆^{1a}, 宋祺鹏^{1b}, 张翠², 孙威^{1b}

(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 250102)

摘要: **目的** 分析长期太极拳练习者进行揉膝拗步和正常行走时下肢膝、踝关节肌群预激活与共收缩的表面肌电 (surface electromyography, sEMG) 特征, 探讨太极预防跌倒的神经肌肉控制策略。 **方法** 采用 Vicon 运动捕捉系统、Kistler 测力板和 Noraxon 表面肌电图系统同步采集揉膝拗步和正常行走时股直肌、股二头肌、胫骨前肌、外侧腓肠肌的 sEMG 信号和体位信息。通过股直肌和股二头肌、胫骨前肌和外侧腓肠肌两对肌肉的积分肌电分别计算膝、踝关节预激活和共收缩。 **结果** 与正常行走相比, 揉膝拗步在 4 个阶段的平均用时显著增加; 揉膝拗步在 4 个阶段内时间百分比存在显著性差异; 揉膝拗步膝关节共收缩水平和预激活水平降低, 踝关节共收缩水平和预激活水平升高。 **结论** 长期的太极拳练习可能使膝关节周围肌肉的激活水平提高, 增强肌肉群之间的协同作用, 以帮助稳定关节。研究结果为神经肌肉控制障碍疾病的康复评估和训练提供参考。

关键词: 揉膝拗步; 太极拳; 共收缩; 预激活

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.03.024

Surface EMG Analysis on Pre-Activation and Co-Contraction of Knee and Ankle Joint in Brush-Knee Twist-Step

YU Hao^{1a}, GAO Qing^{1a}, SONG Qipeng^{1b}, ZHANG Cui², SUN Wei^{1b}

(1a. Graduate School, 1b. College of Sports and Health, Shandong Sport University, Jinan 250100, China; 2. Shandong Sports Science Research Center, Jinan 250102, China)

Abstract: **Objective** To analyze muscle pre-activation and surface electromyography (sEMG) characteristics of knee and ankle joints of long-term Tai Chi practitioners during brush-knee twist-step and normal walking, and explore the neuromuscular control strategies of Tai Chi to prevent falls. **Methods** Vicon motion capture system, Kistler force plate, and Noraxon sEMG system were synchronously used to collect the EMG signals of the rectus femoris, biceps femoris, tibialis anterior muscle, lateral head of gastrocnemius and body posture information during brush-knee twist-step and normal walking. The pre-activation and co-contraction of knee and ankle joints were calculated by integrated EMG of the rectus femoris/biceps femoris, tibial anterior/lateral gastrocnemius muscles. **Results** Compared with normal walking, the average time of brush-knee twist-step in four phases was significantly increased. There was a significant difference in the percentage of time in four phases. The knee joint co-contraction level and pre-activation level decreased, and the ankle joint co-contraction level and pre-activation level increased. **Conclusions** Long-term Tai Chi exercises may increase the activation level of the muscles around knee joints and enhance the synergy in muscle groups to help stabilize the joint. The results provide references for rehabilitation assessment and training of neuromuscular control disorders.

Key words: brush-knee twist-step; Tai Chi; co-contraction; pre-activation

收稿日期: 2021-06-12; 修回日期: 2021-08-17

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)

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

全国第7次人口普查数据显示,中国60岁及以上人口占总人口的比例达到18.7%,人口正在迅速老龄化^[1]。衰老会导致行动能力和步态表现下降,从而降低在日常生活中产生有效和安全的步态模式^[2]。长期的体育锻炼可以有效地改善老年人群的平衡和步态能力,并减少跌倒和跌倒相关的伤害^[3]。

太极拳正在成为一项改善老年人平衡和防止跌倒的流行运动^[3-4]。太极的间接训练效果也反映在正常行走上^[5-6]。正常行走是老年人最基本的日常活动之一,被视为老年人平衡运动的一种形式^[7]。相关研究开始利用表面肌电(surface electromyography, sEMG)信号探索太极拳提高老年人平衡能力的神经肌肉控制策略。Wu等^[8]通过研究正常行走和太极拳下肢肌肉活动的模式发现,太极拳的肌电均方根峰值明显高于正常行走时。此外,多数研究只考察了太极拳运动过程中下肢肌肉的激活程度,缺乏主动肌和拮抗肌的耦合特征。太极拳和正常行走之间的差异可能会为更深入了解神经肌肉控制策略提供更多的信息。

肌肉共收缩和预激活被定义为主动肌和拮抗肌的同时激活,是运动控制的一种手段^[9]。老年人共收缩或预激活水平增加被认为是弥补姿势控制和感觉处理减少的一种策略^[10]。肌肉共收缩和预激活的变化与运动控制的退化有关,并与衰老、中风、脑瘫、帕金森氏病和关节置换有关^[9,11-14]。尽管肌肉共收缩和预激活是了解衰老和病理对肌肉控制策略影响的公认临床措施,但缺乏证据表明长期练习太极的肌肉共收缩和预激活水平会降低。本文运用肌肉共收缩和预激活方法,评估太极拳步态和正常行走过程中主动肌和拮抗肌的耦合特征,并探

讨太极拳的神经肌肉控制策略。本文研究假设如下:与正常行走相比,太极拳步态在膝、踝关节具有更低的共收缩和预激活水平。

1 方法

1.1 受试者

通过问卷调查和随访访谈的方式,在济南某小区内招募22名60岁及以上的社区居民参与研究,受试者太极拳练习年限在5年以上,每周至少练习3次。排除标准包括:过去12个月内可能影响姿势控制和肌肉反应的心血管、肺、代谢、肌肉骨骼和神经系统疾病。每位受试者均熟知测试流程,并签署知情同意书。受试者身高(161.01±6.63)cm,年龄(66.77±5.97)岁,体重(61.64±9.34)kg,太极拳练习年限(12.75±5.49)年。

1.2 测试仪器

应用8摄像头VICON红外摄像运动分析系统采集运动学数据,2台三维测力台(600m×900m, Kistler公司,瑞士)采集地面反作用力(ground reaction force, GRF),16通道无线遥测表面肌电系统(NORAXON公司,美国)采集sEMG信号。

1.3 测试流程

受试者进入实验室穿上统一的测试服,并进行身体形态学参数采集。根据VICON运动捕捉系统的操作手册,把直径为14mm的41个反光标记点贴在皮肤或衣服上。根据欧洲sEMG图推荐指南^[15],对优势侧股直肌、股二头肌、腓肠肌外侧头和胫骨前肌进行备皮处理,将成对的一次性表面电极放置在每块肌肉的肌腹最高处,电极距离2cm,与肌纤维方向一致,并用弹力绷带缠绕。表1所示为sEMG的粘贴位置。

表1 表面肌电的位置

Tab.1 Location of surface EMG

肌肉	电极片粘贴位置	电极片粘贴方向	MVC测试
股直肌	髌前下棘与髌骨上部连线的1/2处	与髌前下棘到髌骨上部连线平行	仰卧位,膝关节屈曲90°置于床边,阻力施加在踝关节前面,嘱受试者伸膝
股二头肌	坐骨结节和胫骨外侧髁连线的1/2处	与坐骨结节和胫骨外侧髁连线平行	仰卧位,阻力施加在踝关节背面,屈膝90°,嘱受试者屈膝
胫骨前肌	腓骨头顶端与踝关节内侧髁连线近端1/3处	与腓骨头顶端到踝关节内侧髁连线平行	仰卧位,阻力施加在脚前掌背面,脚部与小腿呈90°,嘱受试者背屈
外侧腓肠肌	根骨结节与股骨外上髁连线近端1/3处	与根骨结节到股骨外上髁连线平行	仰卧位,阻力施加在脚前掌底部,脚部与小腿呈90°,嘱受试者屈

在试验前,研究人员测试受试者4块肌肉的最大等长收缩(maximal voluntary contraction, MVC),MVC期间记录的EMG信号用于两种动作的EMG信号值归一化^[16]。受试者首先被要求进行5 min 太极拳动作热身演练,然后进行太极拳揉膝拗步与正常行走动作的正式数据采集,动作测试顺序按照随机化原则,各动作采集3次有效数据。为确保数据有效性,受试者被要求双脚分别踏到两块测力台,每次完成1个步态周期的数据采集。

1.4 数据处理

所有信号使用 Nexus 2.7.0 采集软件进行同步,运动学、动力学和 sEMG 参数均在 Visual 3D 中进行预处理并以 C3D 格式导出,sEMG 信号采用美国 Noraxon 公司 MR3.14 软件进行预处理。利用 MR 软件自带的信号处理程序对原始肌电信号进行处理,包括滤波、整流、平滑过滤、数据标准化等环节。本实验将揉膝拗步和正常行走按照步态周期分成4个阶段:双支撑I、单支撑I、双支撑II和单支撑II(见图1)^[17]。1个成功的步态周期被定义为优势脚从脚跟着地到该脚跟再次着地。定义运动起始的时刻为足与测力台接触后垂直 GRF 首次达到 20 N,运动结束的时刻为足与地面再次接触^[18]。

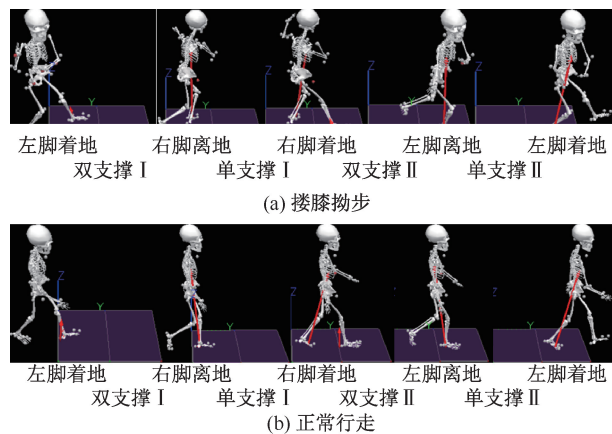


图1 不同步态周期示意图

Fig.1 Schematic diagram of the asynchronous gait cycle

(a) Brush-knee twist-step, (b) Normal walking

本研究分析的参数包括4个阶段标准化的股直肌、股二头肌、胫骨前肌、腓肠肌外侧头运动开始前50 ms 预激活和两种运动4个阶段的共收缩。

(1) 预激活是指关节周围肌肉的同时活动,肌肉共激活与关节稳定性有关,也是导致人体运动效

率低下的重要因素^[19]。根据文献[18]的研究,本文测量揉膝拗步和正常行走动作预激活阶段(首次着地前50 ms)。预激活的计算公式如下^[20]:

$$\text{预激活} = \sqrt{\frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \text{EMG 拮抗肌}^2(t) dt}{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \text{EMG 主动肌}^2(t) dt}} \times 100\%$$

(2) 共收缩反映了关节主动收缩时拮抗肌的比例以及主动肌与拮抗肌之间的协调功能,主动肌和拮抗肌的适当配合有助于关节的稳定性、运动协同作用和运动能力,过度的共收缩可能会限制运动能力^[21]。共收缩计算公式如下^[22]:

$$\text{共收缩} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \text{EMG 拮抗肌}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} \text{EMG 主动肌}(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \text{EMG}(t) dt} \times 100\%$$

1.5 统计学分析

选取受试者每个动作3次有效数据取其平均值进行统计学分析,所有数据结果以均值±标准差的形式表示。本研究中,自变量为动作类型(揉膝拗步、正常行走)和动作阶段(双支撑I、单支撑I、双支撑II和单支撑II)。采用双因素重复测量方差分析(ANOVA)观察膝关节(股直肌、股二头肌)和踝关节(胫骨前肌、外侧腓肠肌)预激活及共收缩的主效应与交互效应分析,应用 Bonferroni 进行事后检验。所有数据采用 SPSS 19.0 进行统计分析。显著性水平设置为 0.05。

2 结果

2.1 动作时间

由图2可见,在每个阶段内,揉膝拗步的平均用时均显著大于正常行走($P < 0.01$);正常行走4个阶段内平均用时没有显著性差异($P > 0.05$);揉膝拗步在双支撑I与单支撑I、双支撑I与单支撑II、单支撑I与双支撑II、双支撑II与单支撑II的平均用时存在显著性差异($P < 0.001$)。

由图3可见,揉膝拗步在双支撑I和双支撑II内的时间百分比均显著大于正常行走($P < 0.01$),在单支撑I、II内的时间百分比均显著小于正常行走($P < 0.01$);揉膝拗步在双支撑I与单支撑I、双支撑I与单支撑II、单支撑I与双支撑II、双支撑II与单支撑II的时间百分比存在显著性差异($P < 0.001$)。

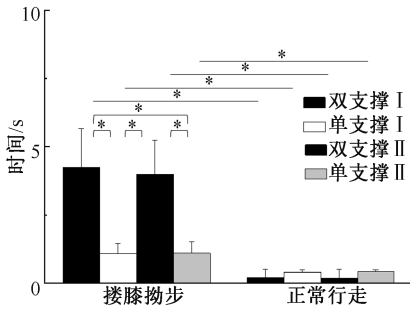


图2 在4个阶段内搂膝拗步和正常行走平均用时比较 (* $P<0.05$)

Fig.2 Comparison of average time between brush-knee twist-step and normal walking in four phases

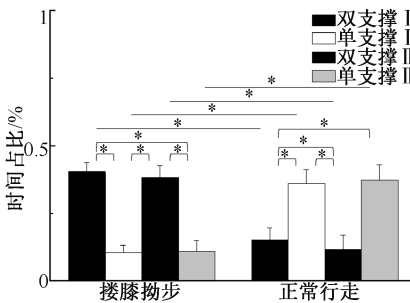


图3 在4个阶段内搂膝拗步和正常行走时间百分比比较 (* $P<0.05$)

Fig.3 Comparison of the percentage of time between brush-knee twist-step and normal walking in four phases

2.2 共收缩

由图4可见,双支撑 I ($P=0.006$)、单支撑 I ($P=0.017$)和双支撑 II ($P<0.001$),搂膝拗步膝关节肌肉共收缩水平明显低于正常行走 ($P<0.001$)。在双支撑 I ($P=0.010$)和单支撑 I ($P=0.017$)中,搂膝拗步踝关节肌肉共收缩水平明显高于正常行走 ($P=0.010$),单支撑 I 和单支撑 II 踝关节肌肉共

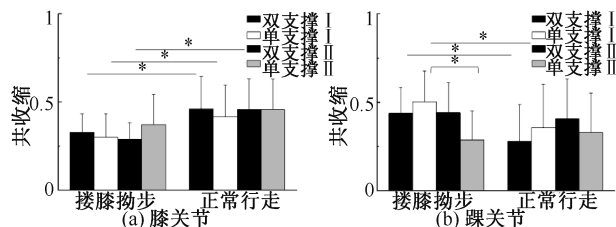


图4 在4个阶段内搂膝拗步和正常行走关节共收缩比较 (* $P<0.05$)

Fig.4 Comparison of joint co-contraction of the brush-knee twist-step and normal walking in four phases

(a) Knee joint, (b) Ankle joint

收缩水平有显著性差异 ($P=0.003$)。

2.3 预激活

由图5可见,搂膝拗步膝关节的肌肉预激活水平明显低于正常行走 ($P<0.001$),搂膝拗步踝关节肌肉预激活水平高于正常行走,但差异无统计学意义 ($P=0.384$)。

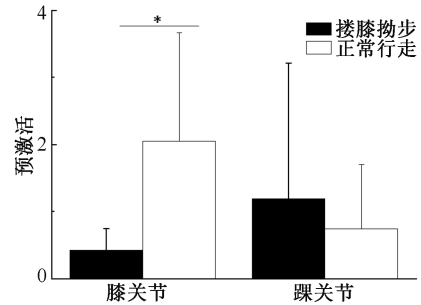


图5 搂膝拗步和正常行走关节预激活比较 (* $P<0.05$)

Fig.5 Comparison of joint co-contraction of the brush-knee twist-step and normal walking

3 讨论

本文分析太极拳搂膝拗步中膝、踝关节 sEMG 信号特征,探讨太极拳动作中的神经肌肉控制策略。结果表明,搂膝拗步膝关节共收缩水平比正常行走时降低,而在搂膝拗步中踝关节共收缩水平比正常行走时增加。搂膝拗步膝关节预激活水平与正常行走相比降低,而踝关节的预激活水平升高。该结果部分支持了本文的第1个假设,搂膝拗步中膝关节的共收缩和预激活程度比正常行走时要低。

本文发现,搂膝拗步在4个阶段内的平均用时均显著大于正常行走,双脚支撑的平均用时显著大于单脚支撑,而且搂膝拗步在4个阶段内的时间百分比与正常行走正好相反。受试者进行搂膝拗步动作时通过增加双支撑的时间或减少单支撑的时间来锻炼下肢的肌肉。单腿支撑是一项具有挑战性的平衡任务,太极步态中的单腿支撑比静态单腿支撑、正常行走的单腿支撑更具挑战性。因此,缩短单腿站立时间似乎是一个实用的解决方案,以保持功能平衡。

肌肉共收缩是量化人类神经肌肉控制和运动效率的临床指标。肌肉共收缩程度高表明神经肌肉控制效率较低^[9]。本文表明,搂膝拗步的膝关节共收缩水平比正常行走时的膝关节共收缩要低。

有经验的太极拳练习者在太极步站立阶段观察到的肌肉活动需求的特点是膝关节伸肌的活动水平相对较高,而膝关节屈肌的活动水平相对较低^[16]。在熟练的动作中,主动肌和拮抗肌通过最佳收缩激活,从而在关节处产生净扭矩^[23]。肌肉收缩对关节的稳定性和运动表现至关重要。Wu等^[17]研究发现,太极运动需要更多的踝关节背屈和膝关节伸展,而不是对抗肌肉。根据本研究结果,太极拳锻炼可能有利于膝关节的稳定。本文发现,搂膝拗步踝关节的共收缩水平比正常行走时显著增加。在健康老年人中,胫骨前肌在安静站立时经常被激活,这直接导致跖屈肌和背屈肌之间频繁的共收缩^[24]。踝关节较高的共收缩水平表明,老年人可以通过踝关节肌肉更高的共收缩来确保任务的实现。在日常活动中,较高的共收缩可能会增加下肢关节的刚度^[21]。研究发现,关节刚度增加提供了更大的稳定性,从而降低受伤的风险^[25]。因此,踝关节共收缩水平的增高可能会增加踝关节稳定性。长期太极拳锻炼可以增强老年人踝关节的神经肌肉功能,踝关节较强的神经肌肉功能增强了踝关节姿势矫正的策略^[26-27]。本文推测,长期太极拳练习可能需要更大的脚踝稳定性和刚度。

肌肉的预激活是肌肉预先对高冲击力做好准备,并在肌肉和肌腱中发挥储存弹性能量的作用^[28]。本文发现,搂膝拗步膝关节的预激活水平与正常行走相比显著降低。腿部肌肉的预激活可以增加伸展-缩短周期运动向下阶段的力量产生^[29]。因此,腿部肌肉的高水平预激活可能会提高腿部的肌肉力量。研究表明,在矢状面任务中股四头肌和腓绳肌的预激活可以调节腿部的僵硬,而且预激活可以在跑步改变方向时稳定膝关节^[30]。因此,肌肉预激活在关节刚度和降低损伤风险方面可以发挥重要作用。踝关节预激活水平升高,可能是由于老年人踝关节共收缩明显增加,加重踝关节刚度,是中枢神经系统为避免跌倒风险而发起的保护性补偿措施。有研究认为,提出增加预激活水平可能是因为关节预先调整对神经肌肉控制,减少了在地面收缩时对矫正性肌肉激活的需求,即对关节施加的负荷力^[31]。肌肉预测活动需要调整或衰减的力可能会优化关节稳定^[32]。因此,踝关节肌肉预激活的增加可以被解释为一种补偿策略,以弥补肌肉力量和

姿势控制随着年龄的增长而下降。本文结果表明,长期练习太极拳可能会导致老年人首先充分调动踝关节附近肌肉的兴奋性,从而降低下肢关节的刚度和肢体运动时的姿势偏差,从而避免跌倒的发生。

4 结论

与正常行走相比,长期练习太极拳降低了膝关节的预激活和共收缩水平,可能导致关节周围肌肉的激活水平提高,增强肌肉群之间的协同作用,以帮助稳定关节。相反,长期练习太极拳导致踝关节肌肉的预激活和协同收缩水平增加。本文推测,长期的太极拳练习可能需要更大的脚踝稳定性和刚度。本文结果表明,神经肌肉控制策略在支持肌肉骨骼系统,优化运动功能和调节损伤风险等方面,为神经肌肉控制障碍患者的康复训练提供参考。

参考文献:

- [1] 第七次全国人口普查主要数据公布 人口总量保持平稳增长 [J]. 西北人口, 2021, 42(3): 127.
- [2] EPRO G, MCCRUM C, MIERAU A, *et al.* Effects of triceps surae muscle strength and tendon stiffness on the reactive dynamic stability and adaptability of older female adults during perturbed walking [J]. *J Appl Physiol*, 2018, 124(6): 1541-1549.
- [3] 张猛, 王凤, 宋旭, 等. 常用锻炼方式对老年女性静态平衡能力的影响 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(3): 267-272.
ZHANG M, WANG F, SONG X, *et al.* Influence of common exercise methods on static balance ability in elderly women [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(3): 267-272.
- [4] 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.
- [5] CHAN AWK, CHAIR SY, LEE DTF, *et al.* Tai Chi exercise is more effective than brisk walking in reducing cardiovascular disease risk factors among adults with hypertension: A randomised controlled trial [J]. *Int J Nurs Stud*, 2018, 88(8): 44-52.
- [6] SUN W, MA X, WANG L, *et al.* Effects of Tai Chi Chuan and brisk walking exercise on balance ability in elderly women: A randomized controlled trial [J]. *Motor Control*, 2019, 23(1): 100-114.
- [7] CRUZ-JIMENEZ M. Normal changes in gait and mobility

- problems in the elderly [J]. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 2017, 28(4): 713-725.
- [8] WU G, LIU W, HITT J, *et al.* Spatial, temporal and muscle action patterns of Tai Chi gait [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2004, 14(3): 343-54.
- [9] CHANDRAN VD, CALALO JA, DIXON PC, *et al.* Knee muscle co-contractions are greater in old compared to young adults during walking and stair use [J]. *Gait Posture*, 2019, 73(12): 315-322.
- [10] BENJUYA N, MELZER I, KAPLANSKI J. Aging-induced shifts from a reliance on sensory input to muscle cocontraction during balanced standing [J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2004, 59(2): 166-171.
- [11] FREYLER K, WELTIN E, GOLLHOFER A, *et al.* Improved postural control in response to a 4-week balance training with partially unloaded bodyweight [J]. *Gait Posture*, 2014, 40(2): 291-296.
- [12] NAGAI K, YAMADA M, TANAKA B, *et al.* Effects of balance training on muscle coactivation during postural control in older adults; A randomized controlled trial [J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2012, 67(8): 882-889.
- [13] NAGAI K, YAMADA M, UEMURA K, *et al.* Differences in muscle coactivation during postural control between healthy older and young adults [J]. *Arch Gerontol Geriatr*, 2011, 53(3): 338-343.
- [14] ZENI JA, RUDOLPH K, HIGGINSON JS. Alterations in quadriceps and hamstrings coordination in persons with medial compartment knee osteoarthritis [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2010, 20(1): 148-154.
- [15] HEMENS HJ, FRERIKS B, DISSELHORST-KLUG C, *et al.* Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2000, 10(5): 361-374.
- [16] TSENG SC, LIU W, FINELY 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.
- [17] WU G. Age-related differences in Tai Chi gait kinematics and leg muscle electromyography: A pilot study [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2008, 89(2): 351-357.
- [18] 袁鹏, 许贻林, 王丹, 等. 不同助跑速度条件下45°急停变向动作的膝和踝关节肌肉激活特征分析[J]. *体育科学*, 2018, 38(8): 49-58.
- [19] SERPELL BG, BALL NB, SCARVELL JM, *et al.* Muscle pre-activation strategies play a role in modulating Kvert for change of direction manoeuvres: An observational study [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2014, 24(5): 704-710.
- [20] DA SILVA RA, VIEIRA ER, LEONARD G, *et al.* Age- and low back pain-related differences in trunk muscle activation during one-legged stance balance task [J]. *Gait Posture*, 2019, 69(1): 25-30.
- [21] IWAMOTO Y, TAKAHASHI M, SHINKODA K. Differences of muscle co-contraction of the ankle joint between young and elderly adults during dynamic postural control at different speeds [J]. *J Physiol Anthropol*, 2017, 36(1): 32-33.
- [22] XU K, MAI J, HE L, *et al.* Surface electromyography of wrist flexors and extensors in children with hemiplegic cerebral palsy [J]. *PM R*, 2015, 7(3): 270-275.
- [23] HORTOBAGYI T, DEVITA P. Mechanisms responsible for the age-associated increase in coactivation of antagonist muscles [J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2006, 34(1): 29-35.
- [24] VETTE AH, SAYENKO DG, JONES M, *et al.* Ankle muscle co-contractions during quiet standing are associated with decreased postural steadiness in the elderly [J]. *Gait Posture*, 2017, 55(4): 31-36.
- [25] BUTLER RJ, CROWELL HP, DAVIS IM. Lower extremity stiffness: Implications for performance and injury [J]. *Clin Biomech*, 2003, 18(6): 511-517.
- [26] LIU J, WANG XQ, ZHENG JJ, *et al.* Effects of Tai Chi versus proprioception exercise program on neuromuscular function of the ankle in elderly people; A randomized controlled trial [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2012, doi:10.1155/2012/265486.
- [27] WANG SJ, XU DQ, LI JX. Effects of regular Tai Chi practice and jogging on neuromuscular reaction during lateral postural control in older people [J]. *Res Sports Med*, 2017, 25(1): 111-117.
- [28] SCHMID S, MOFFAT M, GUTIERREZ GM. Effect of knee joint cooling on the electromyographic activity of lower extremity muscles during a plyometric exercise [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2010, 20(6): 1075-1081.
- [29] ARAI A, ISHIKAWA M, ITO A. Agonist-antagonist muscle activation during drop jumps [J]. *Eur J Sport Sci*, 2013, 13(5): 490-498.
- [30] HOBARA H, INOUE K, MURAOKA T, *et al.* Leg stiffness adjustment for a range of hopping frequencies in humans [J]. *J Biomech*, 2010, 43(3): 506-511.
- [31] TAM N, TUCKER R, SANTOS-CONCEJERO J, *et al.* Running economy: Neuromuscular and joint stiffness contributions in trained runners [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 2018, 29(5): 1-22.
- [32] BOYER KA, NIGG BM. Muscle activity in the leg is tuned in response to impact force characteristics [J]. *J Biomech*, 2004, 37(10): 1583-1538.