

文章编号: 1004-7220(2021)05-0718-07

# 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

张彦龙<sup>1</sup>, 陈思<sup>2</sup>, 张愉<sup>1</sup>, 黄春艳<sup>3</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 518000;  
3. 牡丹江医学院 体育部, 黑龙江 牡丹江 157012)

**摘要:**目的 考察太极拳运动姿势对膝关节载荷的影响及肌肉协调收缩策略。方法 募集20名具有3年以上健康太极拳习练者,借助红外高速运动捕捉系统和三维测力台,采集太极拳上步弓步动作支撑腿内收角、胫骨角、关节力、关节力矩等参数,通过仿真方法获取股四头肌和腓肠肌肌肉力。比较惯用步、外展步和内收步肌肉力表现、募集模式和激活方式特征。**结果** 外展步胫骨角和内收力增大,而内收步不变;外展步股内肌、半膜半腱肌及外侧腓肠肌力增大;内收步股外肌和内侧腓肠肌力增强,腓肠肌比股四头肌被优先激活,肌群募集方式发生改变。**结论** 太极拳运动姿势改变肌肉力募集方式,影响膝关节功能,规范动作可作为骨性关节炎运动疗法借鉴,具有临床应用意义。

**关键词:** 太极拳; 步态; 仿真; 肌肉力; 膝关节

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.05.009

## Influences of Foot Progression Angle during the Tai Chi Step Lunge Movement on Knee Joint Load and Strategy of Coordinated Muscle Contraction

ZHANG Yanlong<sup>1</sup>, CHEN Si<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, HUANG Chunyan<sup>3</sup>

(1. Institute of Sports and Health Science, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157011, Heilongjiang, China; 2. Institute of Physical Education, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, China; 3. Department of Sports, Mudanjiang Medical College, Mudanjiang 157012, Heilongjiang, China)

**Abstract: Objective** To investigate the influence of Tai Chi posture on knee joint load and the strategy of coordinated muscle contraction. **Methods** Twenty Tai Chi practitioners with more than 3 years of Tai Chi practice was recruited. By using high-speed motion capture system and three-dimensional force plate, the adduction angle, tibial angle, joint force, joint torque of the supporting leg during the Tai Chi step lunge movement were collected, and the quadriceps and gastrocnemius muscle strength were obtained through simulation method. The muscle strength performance, recruitment mode and activation method of baseline step, toe-out step and toe-in step were compared. **Results** The tibial angle and adduction force increased in the toe-out step but those parameters in the toe-in step remained unchanged; the strength of the medial femoris, semimembranosus, semitendinosus and lateral gastrocnemius muscle increased in the toe-out step; the external femoral muscle and

收稿日期: 2020-12-07; 修回日期: 2021-01-03

基金项目: 黑龙江省教育厅基金项目(1352MSYYB009, SJGY20190701)

通信作者: 陈思, 助理教授, E-mail: chensicoolgirl@163.com

medial gastrocnemius muscle increased in the toe-in step. The gastrocnemius muscle was preferentially activated than the quadriceps muscle, and the way of muscle recruitment changed. **Conclusions** Tai Chi posture will change the way of muscle force recruitment and affect the knee joint function. Standardized movements can be used as the reference for osteoarthritis exercise therapy and have some significance in clinical application.

**Key words:** Tai Chi; gait; simulation; muscle strength; knee joint

太极拳运动因其普适性受到广泛关注。研究表明,太极拳在调节中老年人身体平衡能力、增强肌肉力以及定期练习对半月板和软骨的应力影响等方面具有积极作用,成为减轻膝骨性关节炎患者疼痛、改善步态表现的治疗手段<sup>[1-5]</sup>。然而调查发现,初学至中等水平阶段的太极拳练习人群中,膝关节疼痛症状人数呈上升趋势<sup>[6]</sup>。原因可能与太极拳动作标准欠规范有关,提示运动姿势影响膝关节功能<sup>[7-8]</sup>。

以往研究将膝关节内收力矩(knee adduction moment, KAM)作为评判指标<sup>[9]</sup>。KAM升高与膝关节内侧室接触力和内侧总力矩增大密切相关,被认为是膝关节载荷与关节炎关联的证据<sup>[10-11]</sup>。足前进角(foot progression angle, FPA)作为考量支撑条件下身体姿势的重要指标被广泛应用于走跑研究。FPA由支撑足跟骨中心至第2跖骨末端连线与膝关节运动方向在水平面的夹角所构成。一般认为,FPA改变导致关节压力中心横移是引发KAM增大的原因<sup>[12]</sup>。

由于太极拳循环步态与走、跑步态周期具有相似性,以往针对太极拳的相关研究更多集中于比较两者关节受力状况、肌肉活动水平、激活持续时间以及运动速度对腿部肌肉的影响<sup>[13-15]</sup>。仅有个别研究,从人为界定角度比较太极拳正误动作姿态对膝关节负荷的影响<sup>[16]</sup>。运用FPA指标控制太极拳运动姿势,从肌肉激活方式、募集模式、力量表现角度探讨运动姿势对膝关节载荷的影响,以及应对运动姿势变化神经肌肉系统做出哪些协调收缩策略,尚缺乏足够认识。鉴于太极拳各门派、套路招式中动作运用频次以及与膝关节活动的关联度,且反映动态期间足着地方式,为了量化运动姿势差异对膝关节功能的影响,本文选取太极拳中的上步弓步动作作为研究对象,确定太极拳步态下股四头肌和腓肠肌力在应对运动姿势改变时的协同收缩模式。本文假设,运动姿势变化影响KAM,并伴有肌肉调整策略。

## 1 对象与方法

### 1.1 实验对象与分组

招募20名具有3年以上、每周练习3次以上太极拳运动的健康中年志愿者,年龄(42.5±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1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。

测试者按照惯用步、外展步和内收步完成测试。依据Bencke等<sup>[17]</sup>的定义方式确定步态基准线和膝关节运动方向。基准线由跟骨中心与第2跖骨末端连线构成。以膝关节运动方向与基准,将基准线与膝关节运动方向在水平面投影夹角为0°定义为惯用步;将基准线向膝关节运动方向内收10°定义为内收步;将基准线向膝关节运动方向外展10°定义为外展步。不同FPA步态测试时间间隔7d。

依据Helen Hayes方案粘贴19个反光标志(两侧第2跖骨头末端、两侧足跟、两侧外踝、两侧内踝,两侧大腿前侧,两侧股骨外上髁,两侧股骨内上髁,两侧胫骨粗隆,两侧髌前上棘、髌后中棘),采用8镜头红外高速运动捕捉系统(Qualisys公司,瑞典,采样频率200Hz)与三维测力台(BP400600, AMTI公司,美国,采样频率1kHz),同步采集膝关节内收角、胫骨角、膝外旋角、膝关节角等运动学参数。

为了统一太极拳练习时的身体高度,采用标准化中架势完成,受试者完成动作高度=[(受试者身高×0.89)-8.0]cm<sup>[18]</sup>,此时膝关节角度为135.16°±3.71°。设置水平视高标志供受试者观察。测试前受试者反复演练惯用步、外展步和内收步动作,待受试者能够根据要求自主控制姿势后,开始正式测试。按FPA与身体姿势的要求,分别采集每

位受试者惯用步、外展步和内收步动作各10次,通过影像数据筛选误差小于 $1^\circ$ 的3次动作技术参数作为分析样本。

## 1.2 建模与仿真

### 1.2.1 建立人体模型流程

以ADAMS/Lifemod规范,输入受试者性别、年龄、身高和体质量等人体形态学参数与惯性参数,执行创建个性化环节模型。其次,创建膝关节3个基本轴运动功能的被动关节模型。根据太极拳动作特点及本次研究任务,建立以希尔模型为特征的肌肉结构。该结构包括:串联弹簧阻尼器、收缩元和记忆元。收缩元是伺服线性力执行器,调用外部驱动程序—运动代理(动作捕捉数据),诱导人体骨架上的力复制;记忆元是数据采集器,记录运动过程中肌肉的收缩历史。

### 1.2.2 运动仿真流程

现有模型是被动模型,必须由外力驱动。①将Qualisys动作捕捉(MOCAP)运动学数据C3D文件,以时间顺序依次整理为ADAMS/Lifemod支持的“\*.slf”格式文件加载到模型上,使人体模型按照运动代理的轨迹运动。②进行逆向动力学仿真,计算出人体运动过程中关节位置、速度等运动学参数。③进行正向动力学仿真,获得肌肉力的时序、大小等动力学参数。本文获取参数为膝关节内收力、内收力矩、屈伸力、屈伸力矩等动力学参数及股直肌、股二头肌、股内肌、股外肌、内侧腓肠肌、外侧腓肠肌和半膜半腱肌力。

## 1.3 仿真检验

借助Qualisys Track Manager(QTM)采集软件和AMTI BP400600三维测力台(AMTI公司,美国)以1 kHz频率记录地面反作用力(ground reaction force, GRF)。按照相关系数( $R$ )检验方法,比较仿真GRF曲线与测力台实测GRF曲线<sup>[19-20]</sup>。结果显示: $R=0.868$ ,仿真模型参数具有可靠性。

## 1.4 统计处理

依据文献[21-22]中的计算方法,提取胫骨角(tibia angle)等参数。按照 $N \cdot (BW \cdot HT\%)^{-1}$ 和 $N \cdot m \cdot (BW \cdot HT\%)^{-1}$ 方式标准化处理。以(内侧肌力-外侧肌力)/(内侧肌力+外侧肌力) $\times 100\%$ 统计方法,计算每块肌肉力在关节内外侧的力量分配。采用SPSS 21.0统计软件对所界定的指标进行组间配对 $t$ 检验,显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 膝关节姿态参数

与惯用步相比,胫骨角、小腿内外倾角、膝外旋角、内收角在外展步明显增大( $P < 0.01$ ),内收步仅有内收角明显改变(见表1)。

表1 膝关节最大内收力矩时刻姿态参数( $n=20$ )

Tab.1 Posture parameters at the moment of maximum adduction moment of knee joint

角度/ $(^\circ)$	外展步	惯用步	内收步
小腿内外倾角	$-23.23 \pm 3.65^{**}$	$-13.86 \pm 3.36$	$-12.11 \pm 2.88$
膝外旋角	$11.81 \pm 2.32^{**}$	$19.51 \pm 3.33$	$20.51 \pm 3.45$
胫骨角	$-15.66 \pm 3.25^{**}$	$-5.54 \pm 3.36$	$-3.73 \pm 2.21$
内收角	$-18.53 \pm 3.56^{**}$	$-5.63 \pm 3.69$	$-12.36 \pm 3.68^{**}$
屈伸角	$119.83 \pm 3.55$	$117.93 \pm 3.25$	$118.23 \pm 2.97$

注:与惯用步态相比,  $^{**}P < 0.01$ 。

### 2.2 膝关节力矩

与惯用步相比,外展步和内收步的共性特点是内收力矩、屈伸力矩、内收力臂均升高,不同之处是外展步内收力升高,而内收步屈伸力升高(见图1、表2)。

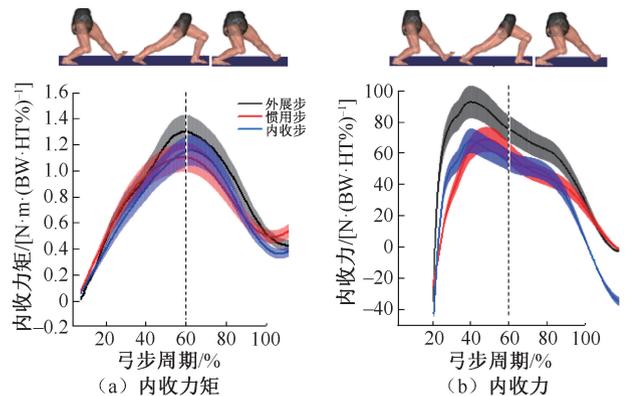


图1 不同步态下膝关节动力学参数

Fig.1 Knee joint dynamic parameters under different gaits

(a) Adduction moment, (b) Adduction force

### 2.3 膝关节肌肉力

太极拳肌肉力总体呈现股四头肌大于腓肠肌,关节内侧大于外侧。外展步中,股内肌、半膜半腱肌力增大;内收步中,股外侧肌和内侧腓肠肌力增大,外展或内收步均未改变股直肌力(见表3)。太极拳肌肉应激启动时间和达到最大峰值的速率表现为:在所有步态中腓肠肌优先于股四头肌达到最大值,且时间更短、速率更快(见图2)。

表 2 不同步态下关节力、力矩 ( $n=20$ )

Tab.2 Joint force and moment under different gaits

参数	外展步	惯用步	内收步
内收力矩/[ $N \cdot m \cdot (BW \cdot HT\%)^{-1}$ ]	1.28±0.13**	1.09±0.11	1.17±0.11*
屈伸力矩/[ $N \cdot m \cdot (BW \cdot HT\%)^{-1}$ ]	2.27±0.34*	2.35±0.33	2.28±0.17*
内收力/[ $N \cdot (BW \cdot HT\%)^{-1}$ ]	88.03±26.22**	67.67±25.34	65.83±22.63
内收力臂/mm	14.55±2.63*	16.18±2.42	17.82±2.35*
屈伸力/[ $N \cdot (BW \cdot HT\%)^{-1}$ ]	423.23±26.65	429.86±25.36	447.11±23.55*
屈伸力臂/mm	5.53±1.32	5.48±1.34	5.51±1.45

注:与惯用步态相比,\* $P<0.05$ ,\*\* $P<0.01$ 。

表 3 不同步态下肌肉峰值和时间 ( $n=20$ )

Tab.3 Peak muscle strength and time under different gaits

肌肉	峰值力/[ $N \cdot (BW \cdot HT\%)^{-1}$ ]			到达峰值力时间/s		
	外展步	惯用步	内收步	外展步	惯用步	内收步
半膜、半腱肌	89.28±23.32**	74.07±20.36	70.54±18.66	3.66±1.47	3.59±1.36	3.58±1.35
股二头肌	161.54±22.64	169.29±22.44	165.27±20.46	2.81±1.35	2.85±1.42	2.86±1.67
股直肌	169.77±18.33	165.12±13.56	167.89±19.57	2.68±1.42	2.63±1.51	2.65±1.77
股内侧肌	266.57±20.61**	246.83±22.72	240.31±20.33	3.81±1.34	3.67±1.73	3.61±1.37
股外侧肌	213.26±20.32	207.51±18.72	222.38±15.36**	3.78±1.33	3.75±1.72	3.76±1.65
内侧腓肠肌	116.30±19.67	117.27±21.63	129.61±16.66*	2.75±1.78	2.76±1.63	2.75±1.75
外侧腓肠肌	78.29±20.33	69.77±22.54	65.12±20.21	2.08±1.66	2.13±1.54	2.12±1.44

注:与惯用步态相比,\* $P<0.05$ ,\*\* $P<0.01$ 。

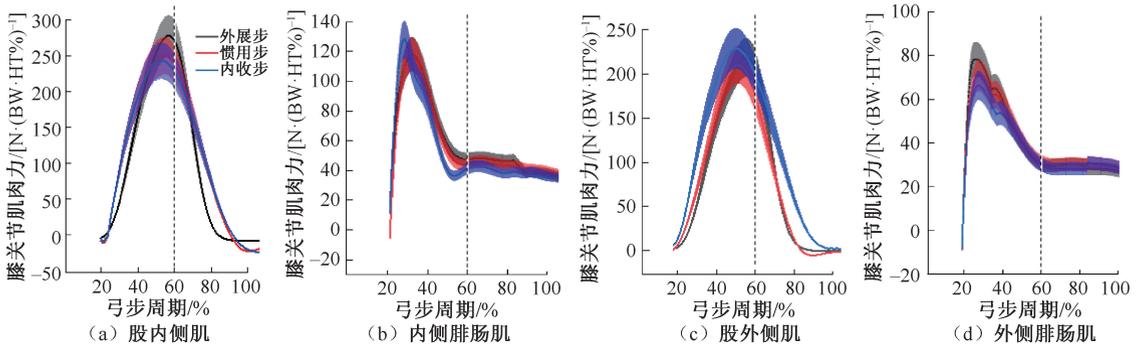


图 2 不同步态下膝关节肌肉力曲线

Fig.2 Muscle force curve of the knee joint under different gaits (a) Vastus Medialis, (b) Medial gastrocnemius, (c) Vastus Lateralis, (d) Lateral gastrocnemius

### 3 讨论

本文考察了太极拳运动姿势对膝关节功能的影响。结果表明,运动姿势改变时,肌肉缺乏统一的肌肉力量应对策略。

FPA 对运动姿势的影响表现为:外展步使胫骨角、小腿内外倾角、膝外旋角增大,而内收步无明显变化,原因可能与膝关节转动方式有关。外展步强化了膝内旋,使小腿内倾角增大;而内收步则强化了膝外旋,使小腿扭转角增大。小腿内外倾角 ( $R =$

0.753)、膝外旋角 ( $R = 0.663$ )、胫骨角 ( $R = 0.855$ ) 变化幅度及与 FPA 相关系数支持该判断。胫骨角与小腿内外倾角和膝外旋角具有趋同的变化趋势,而胫骨角变化最为明显,提示胫骨角可以综合反映膝运动姿势。考虑到胫骨角还具有间接反映动态期间膝内外翻状态,而膝内翻程度与 KAM 的增加有关,这为解释运动姿势改变对 KAM 的影响提供参考。太极拳外展步 KAM 增大与膝内翻有关,而内收步 KAM 变化与胫骨角减小有关<sup>[23]</sup>。

运动姿势是导致 KAM 增大的原因,体现在额

状面内与惯用步相比,外展步 KAM 的增幅(17%)明显大于内收步(7%)。太极拳动作以屈膝弓步为核心任务,屈膝时股骨内外侧髁后部进入关节窝,嵌锁关系解除,股胫关节旋转幅度增加。本文发现,外展步关节内收力升高,而内收步屈伸力升高,该结果支持“胫骨错位导致内侧室接触力增加,所施加的力指向内侧”的观点<sup>[24-25]</sup>。

在肌肉力表现上,尽管太极拳所有步态中总体呈现为:股四头肌最大力大于腓肠肌,关节内侧肌最大力大于外侧肌,股直肌力未改变,这可能与股四头肌与腓肠肌在纤维维度和肌肉生理横断面及肌肉分布明显差异有关;而内侧肌力大于外侧肌力,与屈膝弓步动作固有步态中重心偏重于支撑腿内侧有关。有研究提出,人类通常采用一致的肌肉力量策略应对运动姿势的改变<sup>[26]</sup>。但太极拳外展步股内肌、半膜半腱肌及外侧腓肠肌表现出更大的收缩力;而在内收步中,股外肌和内侧腓肠肌力得到明显强化。以往有关肌肉缺乏统一调节策略的原因有多种解释,包括负荷压力<sup>[27]</sup>、神经肌肉系统的不成熟<sup>[28]</sup>、改善关节运动姿势<sup>[29]</sup>等。本文结果表明,尽管受试者在所有步态中肌肉活动趋势一致,但太极拳缺乏统一肌肉力量调节策略,这可能归因于运动姿势。

肌肉力选择性募集是应对运动姿势变化的反映。研究表明,在走、跑任务期间,当股四头肌力增强时,内侧腓肠肌的贡献增大<sup>[30]</sup>。膝关节屈伸过程中,股四头肌比腓肠肌更早达到肌力峰值,腓肠肌仅充当着辅助角色,提示股四头肌发挥主导作用<sup>[12]</sup>。而本文发现,太极拳步态腓肠肌启动时间及达到肌力峰值的时间早于股四头肌。这从外展步外侧腓肠肌力峰值时间明显短于股内肌和半膜半腱肌,在内收步中股外肌明显大于内侧腓肠肌中可以体现。该结果提示,太极拳运动中腓肠肌被优先激活,其作用可能不是补偿,而是先导。

腓肠肌被优先激活可能与太极拳踝关节运动方式有关。太极拳全足着地运动方式限制踝关节跖屈是腓肠肌被优先激活的条件。研究表明,在健康人群和膝关节炎人群中存在整体肌肉共激活和选择性肌肉共激活两种策略<sup>[31]</sup>。膝关节运动时,股内侧肌早于或晚于股外侧肌激活,会导致髌股关节疼痛<sup>[32]</sup>。在下楼梯过程中,胫骨前肌和内侧腓肠肌

是下肢肌群中最先激活的肌肉<sup>[33]</sup>。活动方式、震动频率、负荷量对肌肉激活程度产生不同的影响<sup>[34]</sup>;足外翻可导致在跑步后内、外侧腓肠肌的激活度比跑步前更大<sup>[35]</sup>。由此可见,运动姿势与肌肉激活方式有关。太极拳外展步中,外侧腓肠肌因膝内翻增大,关节内侧半膜半腱肌被激活,以应对外侧腓肠肌力升高现象,反映了肌肉存在自主调整策略。因为当 KAM 增大时,这些肌肉具有支撑内翻/外翻旋转的力矩,并且已被证明可以选择性地激活以支持这些力矩<sup>[29]</sup>。从这个意义而言,优先发挥腓肠肌是太极拳动作下肢肌肉活动的基本特征。运动姿势而引发募集改变,可能是造成肌肉力量缺乏统一调整策略的原因。

本研究的局限性如下:① 本文发现,肌肉激活方式是导致肌肉募集改变的原因,从而引发肌肉协调策略改变。目前肌肉激活模式研究多采用表面肌电(sEMG)方法确定肌肉激活状态并量化,故本文结果的精确性需进一步量化验证。② 后续研究应考虑踝关节因素,将踝与膝关节纳入一体,综合分析两者之间的关系。③ 针对健康人群的研究结果仅提供数据借鉴,在应用于临床时须谨慎使用。

## 4 结论

优先激活腓肠肌是太极拳动作下肢肌肉活动的基本特征,腓肠肌的作用可能不是补偿,而是先导。踝关节运动方式可能是触发腓肠肌被优先激活的原因之一。运动姿势变化是引发肌肉力募集改变的原因。本文结果提示,太极拳外展步存在膝内翻加剧风险,运动姿势调节可起到降低风险作用。

## 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] HONG Y, LI JX, ROBINSON PD. Balance control, flexibility, and cardiorespiratory fitness among older Tai Chi practitioners [J]. Br J Sports Med, 2002, 34(1): 29-34.
- [3] 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.
- [4] LAUCHE R, LANGHORST J, DOBOS G, *et al.* A systematic review and meta-analysis of Tai Chi for osteoarthritis of the knee [J]. *Complement Ther Med*, 2013, 21(4): 396-406.
- [5] 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.
- [6] 朱东, 李立, 邱丕相, 等. 上海市区太极拳练习者膝关节疼痛调查分析[J]. *中国运动医学杂志*, 2011, 30(9): 820-823.
- [7] 李海鹏, 刘宇, 伍颢. 膝关节关节炎患者的太极拳干预——选择还是放弃? [J]. *中国体育科技*, 2014, 50(4): 85-90.
- [8] 赵双印, 张旭东, 齐文华, 等. 杨氏太极拳运动引发练习者膝关节疼痛的原因[J]. *中国临床康复*, 2005, 9(16): 182-183.
- [9] SHARMA L, SONG J, DUNLOP D, *et al.* Varus and valgus alignment and incident and progressive knee osteoarthritis [J]. *Arthritis Rheumatol*, 2010, 69(11): 1940-1945.
- [10] SHULL PB, SHULTZ R, SILDER A, *et al.* Toe-in gait reduces the first peak knee adduction moment in patients with medial compartment knee osteoarthritis [J]. *J Biomech*, 2013, 46(1): 122-128.
- [11] MARITA C, EMMA S, DAMIAN H, *et al.* The global burden of hip and knee osteoarthritis: Estimates from the global burden of disease 2010 study [J]. *Ann Rheum Dis*, 2014, 73(7): 1323-1330.
- [12] 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.
- [13] LIU W, KOVALESKI J, MCCORMICK J, *et al.* External knee adduction moment during Tai Chi gait in patients with knee osteoarthritis [J]. *Osteoarthr Cartilage*, 2014, 22(S): S125-S126.
- [14] 刘庆广, 黄强民. 太极拳白鹤亮翅对下肢肌电活动的影响[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(3): 263-268.
- LIU QG, HUANG QM. EMG characteristics of lower extremities during movement of white crane spreads its wings in Tai Chi Quan [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(3): 263-268.
- [15] WU G, REN X. Speed effect of selected Tai Chi Chuan movement on leg muscle activity in young and old practitioners [J]. *Clin Biomech*, 2009, 24(5): 415-421.
- [16] 陶萍, 于璐. 太极拳基础动作“野马分鬃”膝关节运动学、关节负荷及肌肉活动的特征比较[J]. *体育科学*, 2014, 34(9): 49-55.
- [17] BENCKE J, CHRISTIANSEN D, JENSEN K, *et al.* Measuring medial longitudinal arch deformation during gait. A reliability study [J]. *Gait Posture*, 2012, 35(3): 400-404.
- [18] 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.
- [19] 李旭鸿, 郝卫亚, 于佳彬, 等. 基于LifeMod对跳马过程中体操运动员-落地垫动力学关系的计算机仿真[J]. *体育科学*, 2013, 33(3): 81-87.
- [20] 彭迎虎, 陈琪贤, 胡家渝, 等. 人体足地接触模型的步速适用性[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(5): 514-521.
- PENG YH, CHEN ZX, HU JY, *et al.* Applicability of foot-ground contact model at different gait speed [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(5): 514-521.
- [21] GROOD ES, SUNTAY WJ. A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: Application to the knee [J]. *J Biomech Eng*, 1983, 105(2): 136-144.
- [22] GE W, SORIN S, PAUL A, *et al.* ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—Part I: ankle, hip, and spine [J]. *J Biomech*, 2002, 35(4): 543-548.
- [23] NOORT JC, SCHAFFERS I, SNIJDERS J, *et al.* The effectiveness of voluntary modifications of gait pattern to reduce the knee adduction moment [J]. *Hum Movement Sci*, 2013, 32(3): 412-424.
- [24] LERNER ZF, DEMERS MS, DELP SL, *et al.* How tibiofemoral alignment and contact locations affect predictions of medial and lateral tibiofemoral contact forces [J]. *J Biomech*, 2015, 48(4): 644-650.
- [25] BARRIOS JA, DAVIS IS, HIGGINSON JS, *et al.* Lower extremity walking mechanics of young individuals with asymptomatic varus knee alignment [J]. *J Orthop Res*, 2010, 27(11): 1414-1419.
- [26] ACKERMANN M, BOGERT AJVD. Optimality principles for model-based prediction of human gait [J]. *J Biomech*, 2010, 43(6): 1055-1060.
- [27] WALTER JP, D' LIMA DD, COLWELL CW, *et al.* Decreased knee adduction moment does not guarantee decreased medial contact force during gait [J]. *J Orthop Res*, 2010, 28(10): 1348-1354.
- [28] KORFF T, JENSEN JL. Effect of relative changes in anthropometry during childhood on muscular power production in pedaling: A biomechanical simulation [J]. *Pediatr Exerc Sci*, 2008, 20(3): 292-304.
- [29] BOOIJ MJ, RICHARDS R, HARLAAR J, *et al.* Effect of walking with a modified gait on activation patterns of the knee spanning muscles in people with medial knee

- osteoarthritis [J]. *Knee*, 2019, 27(1): 198-206.
- [30] KVIST J, GILLQUIST J. Anterior positioning of tibia during motion after anterior cruciate ligament injury [J]. *Med Sci Sport Exerc*, 2001, 33(7): 1063-1072.
- [31] 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.
- [32] TIGGELEN D, COWAN S, COOREVITS P, *et al.* Delayed vastus medialis obliquus to vastus lateralis onset timing contributes to the development of patellofemoral pain in previously healthy men [J]. *Am J Sport Med*, 2009, 37(6): 1099-1105.
- [33] 金成敏, 曲峰, 赵享楠, 等. 双任务下楼梯行走时对下肢肌肉活动表现及加速度近似熵指数的影响[J]. *天津体育学院学报*, 2018, 33(4): 362-368.
- [34] 胡斌, 吴飞, 田丹丹, 等. 24种瑞士球练习对腰部竖脊肌和多裂肌激活程度的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2010, 29(5): 525-529.
- [35] 梅齐昌, 相亮亮, 孙冬, 等. 长距离跑后“足外翻”姿态增加膝关节内侧接触力: 基于OpenSim肌骨建模及机器学习预测的研究[J]. *体育科学*, 2019, 39(9): 51-59.