

文章编号:1004-7220(2017)01-0092-06

· 综述 ·

# 太极拳运动下肢生物力学研究进展

陈鹏, 刘海波, 姚杰, 王丽珍, 宫赫

(北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要:** 太极拳的保健和康复功能已经在全球得到认可,国内外的专家学者利用运动生物力学方法对太极拳保健作用的机制进行研究,其中大部分是针对人体下肢的研究。检索 2007 ~ 2015 年太极拳运动的下肢生物力学研究文献 20 篇(15 篇英文和 5 篇中文),根据研究目的和评价指标,从太极拳本身的运动学和动力学特点及其对下肢的影响、太极拳对下肢肌肉活动的影响、太极拳运动对人体下肢生物力学参数与其他系统参数相互作用的影响三个方面进行综述,并对太极拳运动下肢生物力学研究的展望和不足之处进行总结。

**关键词:** 太极拳; 下肢; 运动学; 动力学; 生物力学

**中图分类号:** R 318.01      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2017.01.016

## Progress of biomechanical study on the lower extremity in Tai Chi movement

CHEN Peng, LIU Hai-bo, YAO Jie, WANG Li-zhen, GONG He (*Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*)

**Abstract:** The function of health care and rehabilitation in Tai Chi has been recognized by the world. Studies on the mechanism of health care in Tai Chi have been conducted by domestic and international experts using the methods of sports biomechanics, most of which focus on human lower extremity. Twenty research literatures (15 articles in English and 5 articles in Chinese) during the year 2007-2015 about biomechanics of the lower extremity in Tai Chi were searched. According to the research purpose and evaluation index, this paper mainly reviewed from 3 aspects: the kinematic & kinetic characteristics of Tai Chi and its influence on the lower extremity, the effect of Tai Chi on muscle activity of the lower extremity, and the impact of Tai Chi movement on interaction between biomechanical parameters of the lower extremity and other system parameters. The prospects and limitations in biomechanical studies on the lower extremity in Tai Chi were also summarized.

**Key words:** Tai Chi; Lower extremity; Kinematics; Kinetics; Biomechanics

太极拳是中国传统的武术运动,它的保健功能逐渐得到认可,练习的人也越来越多。据统计,目前有近 3 亿遍布世界各地的太极拳练习者。研究表明,太极拳练习能够提高老年人的本体感觉<sup>[1]</sup>和平衡能力、防止跌倒<sup>[2-3]</sup>、改变大脑结构<sup>[4]</sup>,有助于膝

关节骨性关节炎<sup>[5-7]</sup>、中风<sup>[8]</sup>等慢性疾病的康复。2012 年,美国风湿病协会正式将太极拳推荐为治疗膝关节骨性关节炎的临床非药物疗法之一。然而,有关太极拳对上述慢性疾病康复作用的机制并不清楚,国内外许多学者试图利用运动生物力学的方法

收稿日期:2016-01-12; 修回日期:2016-03-09

基金项目:国家自然科学基金项目(11322223,81471753,11572029),教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0024)。

通信作者:宫赫,教授,博士研究生导师, E-mail: bmgonghe@buaa.edu.cn。

探讨太极拳练习对人体特别是下肢作用的情况,进而为太极拳练习提高人体各项功能研究提供理论依据。本文在 Web of Science 引文数据库以及中国知网的核心期刊数据库中,以“Tai Chi”、“Tai Chi Quan”、“Tai Chi Chuan”、“Kinematics”、“Dynamics”、“Biomechanics”、“EMG”和“太极拳”、“运动学”、“动力学”、“生物力学”、“肌电图”等关键词检索了 2007 ~ 2015 年国内外关于太极拳研究的相关文献,并搜集、整理、筛选其中涉及人体下肢生物力学的文献(不包括综述、Letter 和会议文献等),共查询到 20 篇具有代表性的相关文献。按照所查文献中主要考察的生物力学指标及结论,从太极拳的运动学和动力学特点及其对下肢的影响、太极拳运动过程对下肢肌肉活动的影响、太极拳运动对人体下肢生物力学参数与其他系统参数相互作用的影响三方面对所查文献进行综述。

## 1 太极拳的运动学和动力学特点及其对下肢的影响

### 1.1 太极拳运动学特点及其对下肢的影响

人体的运动学特征包括时间、空间和时空特征。通过对这些特征的测定能够描述动作技术的外貌特征和肢体运动规律,对于揭示运动的生物力学机制是必不可少的组成部分。

Law 等<sup>[9]</sup>对老年练习者的太极拳典型动作“倒卷肱”、“云手”和正常步行的下肢运动学参数进行测量,结果发现,太极拳运动的步宽相对正常步行更长,重心在内外方向上位移更大。“云手”动作中膝关节的屈伸和内外翻以及髌关节屈伸运动的范围相对正常步行更小,这有助于减小膝关节的压力。因此,“云手”和“倒卷肱”相比步行,上身重心和下肢关节的位置变化更舒缓流畅,对于老年人提高平衡能力、增强关节活动性、提高身体功能是安全的。

除了直接研究太极拳运动本身,也有学者研究太极拳练习对人体步态特征的影响。Wu 等<sup>[10]</sup>对太极拳练习者和非太极拳练习者的步态特征进行对比分析,通过测量两组受试者在有、无精神干扰的情况下前进步和后退步的起步、准备和足底接触等时间特征、步长和步幅等空间特征发现,精神干扰能够显著延缓两组受试者的迈步时间,并缩短步长。但是,太极拳组在抬脚时有更短的准备和足底接触时间。

在没有精神干扰的情况下,太极拳组后退步的步幅更宽,证明太极拳练习者在有、无精神干扰情况下都有更好的姿态控制能力,为太极拳练习能够降低老年人跌倒风险提供了依据。平衡能力的一个重要方面是能够通过快速、协调、准确的身体姿态调整来抵抗外界的干扰。研究表明,平衡能力受损的老年人练习太极拳后,在步行受到干扰的情况下能够通过摆动腿更灵活的活动来保持平衡,其身体重心在前后方向的位移增大,表明受试者维持身体稳定的能力增强,但同时也增加了髌关节的负荷<sup>[11]</sup>。

上述研究表明,除了太极拳动作本身,太极拳运动对各种条件下老年人步态特征的影响也是当前研究的热点。部分太极拳动作(云手、倒卷肱)具有舒缓流畅的特点,适合老年人练习。平衡建立在身体重心稳定的基础之上<sup>[12]</sup>,太极拳练习者步行过程中在重心变化较大情况下,能够更好更快地进行姿势调整来保证身体平衡。

### 1.2 太极拳运动的下肢动力学研究

在非器械运动中,地面是人与外部环境的直接接触面。人体足底压力分布及地面反力(ground reaction force, GRF)反映有关足的结构、功能及整个身体姿态控制等情况。足底压力分析常用的指标包括足底压力中心位移、压力峰值、冲量及压强。测试分析这些参数信息可以获取人体在各种体态和运动下的生理、病理学参数,对生物力学及康复研究均具有重要的意义<sup>[13]</sup>。

杨春荣<sup>[14]</sup>对优秀太极拳练习者的太极拳动作和正常步行的足底压力分布数据进行采集,结果发现,在太极拳动作中,脚底第 1 跖骨头和第 1 脚趾的压力载荷显著大于其他部位;太极拳动作的足底压力中心位移显著大于正常步行。该研究认为,太极拳运动的足底压力分布特征可能是导致太极拳运动提高平衡能力和控制肌肉力量的重要因素之一。

除了对传统太极拳套路招式的研究,许多学者对太极推手(Tai Chi Push Hands)运动足底压力情况进行了测量。Chen 等<sup>[15]</sup>测量了一位太极推手大师被对手以最大力气推的过程中双脚 GRF,结果发现,大师在太极推手运动中能够通过身体微小的姿态调整来改变推力的方向,并利用后腿抵挡外来的力,该研究初步获得了太极推手的动力学特点。Wong 等<sup>[16]</sup>对男性在有、无对手情况下的太极推手

动作 GRF、足底压力分布情况进行测量,结果表明,受试者产生的垂直 GRF 与体重相差不大,相对步行、弹跳和太极步态等运动更小,最大的足底压力分布在脚趾区,该结论与杨春荣<sup>[14]</sup>的研究结论相一致。Chang 等<sup>[17]</sup>研究也发现,太极推手闪避(ward-off)动作过程中练习者双脚产生的 GRF 合力等于体重,证明了练习者在太极推手运动中既不“推”也不“挡”他们的对手,不会承担对手额外的力。Wang 等<sup>[18]</sup>对太极拳练习者和非太极拳练习者的太极推手动作进行对比,发现前者受到的 GRF 在垂直方向的分力较大,内外和前后方向的剪切力较小。因此,太极拳练习者所受到的力在身体上的传递更有效,GRF 在垂直力方向的分力对维持平衡具有重要作用。

太极拳运动发展和演变出众多分支,其中就包括“太极气功十八式”。Leung 等<sup>[19]</sup>对一位太极大师在站立位和端坐位(坐在凳子上使膝关节成角 $90^\circ$ )两种姿态下的太极气功十八式的 GRF 进行测量,结果发现,在站立位时足底压力中心的最大位移在前后、内外方向的变化范围分别为受试者身高的 $2.6\% \sim 9.5\%$ 和 $0.3\% \sim 29.6\%$ ;而在端坐位时足底压力中心的最大位移更小,在前后、内外两个方向上的变化范围分别为受试者身高的 $0.7\%$ 和 $0.1\%$ 。上述结果能够为老年人练习太极拳进行平衡训练提供指导,建议有站立困难的老年人通过在端坐位练习太极气功十八式中足底压力中心变化小的招式进行平衡康复训练,待平衡能力提高后逐渐增加练习难度,直至进行站立位练习。

综上所述,太极拳运动的研究不再局限于传统套路,有关太极拳的应用套路“太极推手”及“太极气功十八式”的研究已经开展。通过对太极拳典型动作和太极推手足底压力分布的测量发现,受试者的最大足底压力分布在脚趾区,说明脚趾可能对保持平衡有重要的作用,是太极拳练习能够提高老年人平衡能力和降低跌倒风险的原因。此外,上述太极拳运动中受试者足底压力中心位移在内外及前后方向的变化显著大于正常步行。McCaw 等<sup>[20]</sup>研究表明,足底压力中心在水平面的位移会使踝、髌、膝关节的肌肉力矩发生变化,故太极拳运动有助于增强下肢肌肉力量,进而提高平衡能力。

足底压力分布、GRF 以及运动学轨迹可以通过

足底压力分布鞋垫、三维测力台、运动捕捉设备等直接测量得到,利用这些数据,根据逆向动力学原理,可以计算出下肢关节所受的力和力矩等信息,这是研究太极拳运动中下肢关节受力情况的一种常用方法。

Wu 等<sup>[21]</sup>采集了不同年龄太极拳练习者的太极步态和正常步态的运动学数据和 GRF,结果发现,两组受试者在太极步态中下肢关节所受到的剪切力和冠状面的力矩都比正常步态更大,老年练习者下肢关节所受到的剪切力小于年轻练习者,故建议患有关节退行性病变的老年人在练习太极拳时要小心谨慎,以免造成运动损伤。陶萍等<sup>[22]</sup>分析了一位太极拳大师“野马分鬃”的正确动作和错误动作的关节角度、关节力矩和肌肉活动等数据,结果发现,“野马分鬃”错误动作中膝关节的运动时间更长、运动幅度更大、所受到的外旋和外展力矩更大。上述结果证明,太极拳动作不规范会造成膝关节在运动学、动力学及肌肉活动特征上与规范动作的显著差异,是造成运动损伤的潜在危险因素。纪仲秋等<sup>[23]</sup>利用计算机建模仿真方法对太极拳运动中的弓步和马步动作进行研究,结果发现,完成马步动作时膝关节的主要发力肌肉为股直肌和股内侧肌。完成弓步动作时,比目鱼肌和股二头肌发力明显增加,且完成大幅度弓步动作时膝关节产生的压缩载荷和剪切载荷很大。因此,可以认为太极拳运动中膝关节屈曲幅度的增大会增加膝关节的载荷,增大损伤风险。

综合上述研究结果可知,太极拳运动可能造成运动损伤。相对正常步行,太极拳动作中膝关节所受到的载荷较大,太极拳动作错误会导致相关肌肉的活动度过大,而动作幅度越大膝关节所受的载荷也越大。因此,太极拳练习过程中要注意动作规范、选择适合的腿部姿势进行练习,避免造成运动损伤。此外,老年人的肌骨系统功能相对年轻人较弱,在练习太极拳的过程中更应该注意保护自己。

## 2 太极拳运动过程对下肢肌肉活动的影响

肌电 (electromyography, EMG) 测试是运动生物力学研究中的一个重要手段。测量并记录人体运动时的 EMG,通过分析不同肌肉在运动过程中所表现出来的时域、频域上不同特征,可以了解人体在运动过程中不同部位肌肉参与活动的强度、参与工作的

时间顺序及相互协作关系,为运动的分析提供依据。目前 EMG 测试已经被广泛应用到太极拳运动的研究中。

Tseng 等<sup>[24]</sup>测量了太极拳运动员的太极步态和正常步态站立相过程中膝关节 4 块主要肌肉 EMG, 结果发现,太极步态的股外侧肌和股内侧肌的归一化 EMG 信号均方根峰值和肌肉协同收缩显著高于正常步态,故太极拳练习者在太极步态中对膝关节肌肉的利用水平更高,肌肉的协同收缩更好。Wu<sup>[25]</sup>研究发现,不同年龄练习者在太极步态中下肢肌肉活动的差异主要表现在单腿支撑期,老年练习者的肌肉激活时间和协同作用时间相比年轻人更短,活动幅度也更小;相比正常步态,老年人在太极步态中下肢关节的活动幅度更大,下肢肌肉的激活时间和协同作用时间比正常步态更长,肌肉的活动幅度也更大。因此,太极拳动作相比步行对老年人肌骨系统的挑战性更高。Wu 等<sup>[26]</sup>研究了老年人和青年人以不同速度进行太极拳运动时腿部肌肉活动的情况,结果发现,腿部肌肉特别是膝关节伸肌的激活时间和功能受太极拳运动速度的影响非常显著,太极拳运动速度的快慢会改变肌肉在运动中的收缩形式及作用。刘庆广等<sup>[27]</sup>通过探究太极拳运动员和初学者“白鹤亮翅”动作过程中通过肌肉活动控制平衡的方式发现,运动员组支撑腿的胫骨前肌和骨直肌 EMG 活动显著高于初学者;运动员组下肢髌、膝、踝关节最大平均活动角比初学组大,支撑腿髌关节位移显著高于初学者;而运动员足底压力中心的位移显著小于初学者。因此,运动员可以通过肌肉活动增强来对抗足底压力中心位移,保持姿势平衡稳定;而初学者足底压力中心前后位移失控时并没有表现出积极的肌肉活动。该研究初步解释了太极拳练习提高人体下肢肌肉力量和平衡控制能力的原因。

上述研究均利用表面 EMG 信号来间接反映肌肉的活动情况。Li 等<sup>[28]</sup>利用等速肌力测试仪研究太极拳训练对老年人下肢肌肉力量、耐力及反应时间的影响。该研究将老年人分成太极拳组和教育对照组,在 16 周试验的开始和结束时分别测量受试者膝关节屈肌、伸肌最大同轴收缩力和动态耐力以及踝关节跖屈肌、背屈肌的最大同轴收缩力。结果表明,经过 16 周的太极拳训练,太极拳组的膝关节屈

肌力量增加了 19.9%,相比对照组有显著提高;太极拳组半腱肌的潜伏时间比对照组也显著缩短。

综上所述,针对太极拳运动过程中下肢肌肉活动情况的研究,已从直接(等速肌力测试)和间接(EMG 测量)两个方面展开。太极拳运动能够更好地锻炼下肢肌肉,对肌肉系统的要求相对步行较高,肌肉的协同收缩能力也更好。太极拳运动相对正常步行对老年人的肌骨系统要求较高,下肢肌肉在太极拳动作中的作用会受到太极拳运动速度的影响。不同年龄练习者在太极步态中的下肢肌肉活动有明显差异。这些研究再次证明了太极拳能够提高下肢的肌肉力量,进而提高身体的平衡能力。

### 3 太极拳运动对人体下肢生物力学参数与其他系统参数相互作用的影响

传统的基于运动学、动力学数据及下肢 EMG 信号测量来研究太极拳,是对人体运动系统的研究,然而人体是由包括下肢运动系统在内的八大系统相互协调配合来维持生命活动的正常进行。也有许多学者研究了太极拳对运动系统和其他人体系统的相互作用。

为检测太极拳蹬腿动作中支撑腿和动作腿的协调活动,揭示神经中枢双重命令下的下肢 EMG 运动控制的特征,黄强民等<sup>[29]</sup>采集了太极拳运动员和初学者太极蹬腿动作的下肢 EMG、双下肢关节运动角、足底压力中心的位移,结果发现,运动员和初学者都可以用踝-髌策略来调节单腿直立的姿势平衡,但是运动员能够启动一个根据任务需要的前馈控制技术,通过下肢肌肉的积极活动,预先形成一个对抗蹬腿反作用力干扰的姿势稳定控制;然而在持续降低重心时,初学者的蹬腿和支撑两任务出现了相互冲突。因此,通过太极拳训练可以获得这个前馈控制技术。

Zorzi 等<sup>[30]</sup>对太极拳熟练者和初学者太极拳动作的运动学特征、下肢肌肉的协同收缩时间、新陈代谢数据进行比较发现,两组受试者的运动学数据有很大差异,熟练者的动作时间更长、动作频率更低,其动作的范围更广,速度、加速度和急动导(加速度的导数值)显著低于初学者;两组受试者运动过程中通气量和耗氧量的比率(换气效率)有显著差异,太极拳熟练者的呼吸频率更低,潮气量更高;肌肉的

协同收缩时间在两组之间的差异并不显著。这些结果证明,除了呼吸的形式,太极拳熟练者和初学者的新陈代谢和肌肉活动情况无明显差异。因此,动作频率和呼吸形式是区分太极拳初学者和熟练者的主要特征。

为了保持直立平衡,姿态控制系统需要补偿由于人的呼吸造成的身体重心变化。为了研究太极拳练习对人体呼吸系统和姿态控制系统耦合作用的影响,Helmes等<sup>[31]</sup>将62名老年人分为太极拳组和教育对照组,进行为期12周的随机对照试验,记录试验开始以及结束后两组受试者在闭眼和睁眼情况下站立时的姿态摆动和呼吸情况,对比试验数据发现,受试者呼吸对足底压力中心的影响主要表现在前后方向上。该研究主要考察指标是姿态-呼吸同步指数(posturo-respiratory synchronization index, P-RSI), P-RSI值越小,姿态控制和呼吸的耦合作用越低。结果表明,在试验开始阶段两组受试者的P-RSI值相近,但是实验后续阶段,太极拳组的P-RSI值比对照组显著减小,两组受试者在后续阶段相比开始阶段的P-RSI都显著降低,当闭眼时两组受试者的P-RSI都上升,故12周的太极拳训练降低了老年人呼吸和姿态摇摆的耦合作用。

综上所述,太极拳运动的研究不应只局限于其提高平衡能力、防止跌倒的运动生物力学方面,下肢运动系统和神经系统、呼吸系统等的相互作用将成为太极拳研究的新方向。

#### 4 总结与展望

通过对2007~2015年的相关文献进行综述发现,近年来针对太极拳下肢生物力学研究相比之前又有了新的进展<sup>[32]</sup>。然而,现有研究也存在许多问题。在针对太极拳下肢生物力学的研究中,对照动作通常是正常步态,没有与其他康复运动开展对照研究,故不能从下肢生物力学角度证明太极拳训练在保健功能上的优势。同时,鲜有研究关注受试者性别差异对太极拳运动中下肢生物力学的影响;虽然已有研究针对多式太极拳动作<sup>[14]</sup>进行探讨,但针对一类太极拳全部动作中下肢生物力学特征的基础定量研究鲜有报道。

目前针对太极拳运动下肢生物力学研究中,测量的生物力学参数主要包括人体重心位置、足底压

力中心、足底压力分布、GRF、EMG以及下肢关节力、关节力矩、肌肉力,随着计算机仿真技术的发展,未来太极拳运动人体下肢生物力学研究将从更加深入的力学分析入手(如有限元方法),也可将这些参数与其他生理学参数相结合,进行跨领域的研究。在研究目的上,大多数研究试图证明太极拳在保健及康复方面的作用,也有部分学者研究了太极拳运动的安全性,可见太极拳运动存在一定的风险因素,故寻找更加安全的太极拳康复套路也是未来太极拳下肢生物力学研究的一个方向。

#### 参考文献:

- [1] XU D, HONG Y, LI J, *et al.* Effect of tai chi exercise on proprioception of ankle and knee joints in old people [J]. *Br J Sports Med*, 2004, 38(1): 50-54.
- [2] LI F, HARMER P, FISHER KJ, *et al.* Tai Chi and fall reductions in older adults: A randomized controlled trial [J]. *J Gerontol A Biol*, 2005, 60A(22): 187-194.
- [3] FONG SM, NG GY. The effects on sensorimotor performance and balance with Tai Chi training [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2006, 87(1): 82-87.
- [4] WEI GX, XU T, FAN FM, *et al.* Can Taichi reshape the brain? A brain morphometry study [J]. *PLoS One*, 2013, 8(4): e61038.
- [5] WANG C, SCHIMID CH, HIBBERT PL, *et al.* Tai Chi is effective in treating knee osteoarthritis: A randomized controlled trial [J]. *Arthritis Rheum*, 2009, 61(11): 1545-1553.
- [6] YAN JH, GU WJ, SUN J, *et al.* Efficacy of Tai Chi on pain, stiffness and function in patients with osteoarthritis: A meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2013, 8(4): e61672.
- [7] 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.
- [8] TAYLOR-PILIAE RE, HOKE TM, HEPWORTH JT, *et al.* Effect of Tai Chi on physical function, fall rates and quality of life among older stroke survivors [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2014, 95(5): 816-824.
- [9] LAW NY, LI JX. The Temporospacial and kinematic characteristics of typical Tai Chi movements: Repulse monkey and wave-hand in cloud [J]. *Res Sports Med*, 2014, 22(2): 111-123.
- [10] WU G. Biomechanical characteristics of stepping in older Tai Chi practitioners [J]. *Gait Posture*, 2012, 36(3): 361-366.

- [11] GATTS SK, WOOLLACOTT MH. How Tai Chi improves balance: Biomechanics of recovery to a walking slip in impaired seniors [J]. *Gait Posture*, 2007, 25(2): 205-214.
- [12] PAI YC, PATTON J. Center of mass velocity-position predictions for balance control [J]. *J Biomech*, 1997, 30(4): 347-354.
- [13] 王军, 徐新智, 刘亚平, 等. 动态足底压应力测试分析及骨科临床应用[J]. *医用生物力学*, 1997, 12(3): 170-174.  
WANG J, XU XZ, LIU YP, *et al.* Dynamic foot-pressure measurements and its application to clinical orthopaedics [J]. *J Med Bioemch*, 1997, 12(3): 170-174.
- [14] 杨春荣. 太极拳运动中的足底压力分布研究[J]. *北京体育大学学报*, 2007, 30(5): 645-647.
- [15] CHEN HC, CHENG KY, LIU YJ, *et al.* The defence technique in Tai Chi Push Hands: A case study [J]. *J Sport Sci*, 2010, 28(14): 1595-1604.
- [16] WONG SH, JI T, HONG Y, *et al.* Foot forces induced through Tai Chi Push-Hand exercises [J]. *J Appl Biomech*, 2013, 29(4): 395-404.
- [17] CHANG YT, CHANG JH, HUANG CF. Ground reaction force characteristics of Tai Chi push hand [J]. *J Sport Sci*, 2014, 32(18): 1698-703.
- [18] WANG LH, LO KC, SU FC. Posture and ground reaction force related influences on Tai Chi pushing movement [J]. *J Mech Med Biol*, 2013, 13(1), DOI: 10.1142/S0219519413500073.
- [19] LEUNG ES, TSANG WW. Comparison of the kinetic characteristics of standing and sitting Tai Chi forms [J]. *Disabil Rehabil*, 2008, 30(25): 1891-1900.
- [20] MCCAWE ST, DEVITA P. Errors in alignment of center of pressure and foot coordinates affect predicted lower extremity torques [J]. *J Biomech*, 1995, 28(8): 985-988.
- [21] WU G, MILLON D. Joint kinetics during Tai Chi gait and normal walking gait in young and elderly Tai Chi Chuan practitioners [J]. *Clin Biomech*, 2008, 23(6): 787-795.
- [22] 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(8): 49-55.
- [23] 纪仲秋, 李旭龙, 姜桂萍, 等. AnyBody 仿真和验证的太极拳训练中下肢生物力学特征[J]. *中国康复医学杂志*, 2014, 29(9): 799-805.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] LI JX, XU DQ, HONG Y. Changes in muscle strength, endurance, and reaction of the lower extremities with Tai Chi intervention [J]. *J Biomech*, 2009, 42(8): 967-971.
- [29] 黄强民, 刘庆广, 张胜年, 等. 太极拳蹬腿动作的下肢肌电活动规律、关节运动类型和平衡控制特征[J]. *体育科学*, 2009, 29(7): 55-60.
- [30] ZORZI E, NARDELLO F, FRACASSO E, *et al.* A kinematic and metabolic analysis of the first Lu of Tai Chi in experts and beginners [J]. *Appl Physiol Nutr Me*, 2015, 40(10): 1082-1085.
- [31] HOLMES ML, MANOR B, HSIEH WH, *et al.* Tai Chi training reduced coupling between respiration and postural control [J]. *Neurosci Lett*, 2016, 610: 60-65.
- [32] HONG Y, LI JX. Biomechanics of Tai Chi: A review [J]. *Sports Biomech*, 2007, 6(3): 453-464.