

文章编号:1004-7220(2018)02-0163-05

# 长期太极拳和慢跑锻炼对侧向突发干扰下老年男性神经肌肉反应时和肌电达峰值时间影响

王少君<sup>1,3</sup>, 苏丽娜<sup>1</sup>, 李静先<sup>2</sup>, 徐冬青<sup>3</sup>

(1. 北方民族大学 体育学院, 银川 750021; 2. School of Human Kinetics, University of Ottawa, Ottawa, Canada;  
3. 天津体育学院 健康与运动科学系, 天津 300381)

**摘要:**目的 比较长期太极拳和慢跑锻炼对老年男性突发侧向姿势干扰下神经肌肉反应时和肌电达峰值时间的差异,探索提高老年男性侧向姿势挑战下神经肌肉反应和肌肉收缩效率的有效锻炼方式。方法 利用足底水平干扰触发平台对年轻男性、无规律锻炼的老年男性、长期慢跑锻炼的老年男性、长期太极拳锻炼的老年男性进行突发侧向姿势干扰。表面肌电测试和分析系统用于收集腓骨长肌、胫骨前肌、臀中肌和竖脊肌的肌电信号。结果 突发侧向干扰下,无规律锻炼老年男性腓骨长肌、胫骨前肌和臀中肌的神经肌肉反应时明显地慢于年轻男性,长期太极拳锻炼老年男性胫骨前肌和竖脊肌的神经肌肉反应明显地快于老年对照组;年轻男性腓骨长肌、胫骨前肌和臀中肌的收缩速度明显地快于3组老年人。结论 长期太极拳锻炼可以使老年男性踝关节和躯干肌的神经肌肉反应更加迅速以应对侧向的姿势挑战,而对于提高老年男性肌肉收缩效率的效果不明显。

**关键词:**老年人;姿势控制;太极拳;慢跑;神经肌肉反应时

**中图分类号:** R 318. 01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10. 16156/j. 1004-7220. 2018. 02. 012

## Effects of Long-Term Tai Chi and Jogging on Neuromuscular Latency and Time to Peak of EMG in Older Males during Lateral Sudden Perturbation

WANG Shaojun<sup>1,3</sup>, SU Lina<sup>1</sup>, LI Jingxian<sup>2</sup>, XU Dongqing<sup>3</sup>

(1. School of Physical Education, North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Human Kinetics, University of Ottawa, Ottawa, Canada; 3. Department of Physical Health and Exercise Science, Tianjin University of Sport, Tianjin 300381, China)

**Abstract: Objective** To compare the differences in long-term jogging and Tai Chi in terms of neuromuscular latency and time to peak of surface electromyography (EMG) in older males during lateral sudden perturbation. In addition, an effective means to enhance neuromuscular response and muscle contraction efficiency of older males during lateral postural challenges was investigated. **Methods** Postural reactions of young males, older sedentary male controls (without regular exercises), older male joggers (with long-term jogging practice), and older male Tai Chi participants (with long-term Tai Chi practice) were evoked by means of a sudden unpredictable lateral translation platform. Surface EMG signals of peroneus longus, anterior tibialis, gluteus medius, and erector spinae were collected by an EMG detection and analysis system. **Results** The latencies of peroneus longus, anterior

收稿日期:2017-07-01; 修回日期:2017-07-27

基金项目:天津市自然科学基金项目(15JCYBJC25800)

通信作者:徐冬青,教授,硕士研究生导师,E-mail: xudongqing54@163.com

or tibialis, and gluteus medius were delayed in the older sedentary male controls compared with those in young males. The neuromuscular reactions of anterior tibialis and erector spinae in older Tai Chi male participants were faster than those of older sedentary male controls. The contraction speeds of peroneus longus, anterior tibialis, and gluteus medius in young males were higher than those in three older groups during sudden lateral perturbations. **Conclusions** Long-term Tai Chi practice can enhance the responses of ankle and trunk muscles of older males during lateral postural challenges, but it has little effect on the muscle contraction efficiency of older males.

**Key words:** older adults; postural control; Tai Chi; jogging; neuromuscular latency

侧向姿势控制能力下降导致侧向跌倒是老年人髋部骨折发生的主要原因<sup>[1]</sup>。髋部骨折后期望寿命将减少,而且生活质量会显著下降<sup>[2]</sup>。因此,深入研究老年人侧向姿势控制能力下降的机制,并且在此基础上探究提高老年人侧向姿势控制的干预措施,对提升老年人生活质量以及减少相应医治、康复和护理成本具有极其重要的意义。

相较前后方向,人体侧向姿势控制还有待于深入研究。最初人体姿势控制的研究都集中于前后方向。Rietdyk等<sup>[3]</sup>研究显示,髋关节和躯干在侧向姿势控制中的贡献率约为85%,踝关节约为15%,该研究将人们的视野引向侧向姿势控制。Mille等<sup>[4]</sup>研究发现,老年人侧向迈步过程中躯干的倾斜角度明显增大,且反应时间延长,支撑腿髋关节表现出更大和延迟的髋关节外展稳定力矩,但是对于相关肌肉未做深入研究。Granacher等<sup>[5]</sup>研究证实,增加躯干肌的肌肉力量对老年人的动态姿势调控能力有益,躯干肌力越强,动态姿势调整的能力越强。Allum等<sup>[6]</sup>比较了年轻人和老年人在倾斜干扰下胫骨前肌和臀中肌的神经肌肉反应,但未涉及躯干肌和踝关节外翻肌肉。本课题组前期研究发现,在突发侧向姿势干扰下,老年人胫骨前肌、臀中肌和竖脊肌的神经肌肉反应时明显延迟,并且腓骨长肌、胫骨前肌和臀中肌肌电振幅达峰值的时间明显延长,提示老年人踝关节、髋关节和躯干肌肉反应延迟以及踝关节和髋关节肌肉收缩效率不高,可能是老年人侧向姿势控制能力下降的主要原因之一<sup>[7]</sup>。

运动可以延缓老年人神经肌肉反应的衰退,降低老年人在突发姿势干扰下的神经肌肉反应时<sup>[8]</sup>。然而由于运动形式的差异,不同运动对人体不同肌肉的神经肌肉反应可能有所不同。太极强调持续、缓慢、从小到大的动作形式,身体重心在单脚支撑与双脚支撑间的相互转换,缓慢柔和地屈膝下蹲,

躯干和头部旋转和脚部的外撇<sup>[9]</sup>,提示太极拳动作可以提高侧向稳定性<sup>[10]</sup>。慢跑也是老年人常见的运动锻炼方式之一。因此,本文将年轻人突发干扰下神经肌肉反应作为基准,比较无规律锻炼老年人、慢跑锻炼老年人和太极拳锻炼老年人在突发姿势干扰下的神经肌肉反应,探索提高老年人侧向姿势干扰的有效干预方式。

## 1 研究方法

### 1.1 受试者

57名男性受试者自愿参加本研究,按照年龄和锻炼习惯分为年轻组、老年对照组、老年慢跑组和老年太极拳组。年轻组要求年龄18~30岁,每天运动时间不少于1h。老年组的年龄均大于60岁。老年慢跑组要求每周锻炼时间不少于3次,每次锻炼时间不少于1h。老年太极拳组要求每周练习杨氏太极拳不少于3次,每次锻炼时间不少于1h。老年对照组要求未有规律性锻炼习惯,每次运动时间少于30min。排除标准还包括:过去1年中未患有心血管系统疾病、呼吸系统疾病、代谢系统疾病、运动系统和神经系统等影响人体姿势控制的相关疾病,过去3d内未饮酒以及服用消炎药、解热镇痛药等,老年受试者1年内未发生过跌倒。

### 1.2 实验方法

应用Dewesoft软件(Dewesoft GmbH,奥地利)和Noraxon表面肌电图仪(Noraxon Inc.,美国)同步记录干扰触发平台和表面肌电的信号。表面肌电采样频率为1kHz,带通滤波频率为0.01~1kHz。伺服电动机驱动的干扰触发平台可随机提供两个方向的水平干扰,振幅、速度和加速度分别为90mm、0.2m/s、2m/s<sup>2</sup><sup>[7]</sup>。

受试者穿着短袖、短裤和相同的运动鞋。测试人员在其左侧肢体的竖脊肌、臀中肌、胫骨前肌和

腓骨长肌肌腹处备皮,75% 医用酒精棉球将备皮处擦至微微发红,在肌肉收缩的隆起部位贴电极片,电极间距 2 cm,走向平行肌纤维方向。

受试者自然站立于触发平台中间,双足宽度为身高 20%,双眼注视前方 1 m 处的小插图。要求受试者受到干扰后,尽量不发生迈步。1 名测试者站在受试者身后进行保护。另外 1 名测试者待测试肌肉的表面肌电基线平稳后随机给予受试者左向或右向的干扰,干扰后 1 s 停止记录数据。左右每个方向随机各测试 5 次,每次测试间隔 30 s。

### 1.3 肌电参数

(1) 神经肌肉反应时:人体受到干扰后到肌肉产生反应的间隔时间,即为干扰触发信号到表面肌电产生反应的时间间隔。采用经验判断和计算机半自动处理相结合的方式,肌电信号整流后以 ASCII 码形式输出,用 Excel 计算统计干扰前 100 ms 平稳基线的均值和标准差。牵张反射引起的肌肉收缩活动不参与姿势调节,故评判标准确定为干扰信号后 50 ms 大于基线均值与 2 倍标准差之和的第 1 点<sup>[6]</sup>。该工作由

同 1 名经验丰富的实验人员完成。

(2) 肌电达峰值的时间:干扰信号至肌电振幅峰值的间隔时间,通过 Excel 程序直接计算得出。连续 5 次测试的均值为个体的神经肌肉反应时和肌电达峰时间测试结果。

### 1.4 统计学方法

所有数值均以均值 ± 标准差表示,通过统计学软件 SPSS 19.0 进行单因素方差分析,组间比较采用 Turkey 法,显著性水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果

受试者一般情况如表 1 所示。除年龄外,4 组受试者的身高、体重、身体质量指数 (body mass index, BMI) 均未有显著性差异。年轻组受试者为体育学院的在校生,每天锻炼时间均不少于 1 h。除雨雪天气外,慢跑组和太极拳组的老年人均每天坚持锻炼,每次锻炼时间不少于 1 h。对照组的老年人没有固定的锻炼形式,通常的活动方式为散步或桥牌,每次锻炼时间少于 30 min。

表 1 受试者的一般情况

Tab. 1 General information of the subjects

参数	年轻组 (n = 15)	老年对照组 (n = 14)	老年慢跑组 (n = 14)	老年太极拳组 (n = 14)
年龄/a	24.53 ± 2.13	72.43 ± 4.13	70.86 ± 4.15	70.14 ± 4.75
身高/cm	173.20 ± 6.16	169.95 ± 4.52	170.25 ± 7.70	168.52 ± 6.53
体重/kg	66.87 ± 11.43	67.54 ± 8.82	69.57 ± 10.62	68.17 ± 12.69
BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )	22.25 ± 3.84	23.38 ± 2.88	23.86 ± 2.36	24.09 ± 3.26

左、右向干扰下神经肌肉反应时比较结果见表 2。左向干扰下,臀中肌和竖脊肌未有显著性差异,腓骨长肌和胫骨前肌表现出显著性差异 ( $P < 0.05$ )。年轻组腓骨长肌的神经肌肉反应明显快于老年对照组和老年慢跑组 ( $P < 0.05$ );年轻组胫骨前肌的神经肌肉反应明显快于老年对照组 ( $P < 0.05$ );老年太极拳组竖脊肌的神经肌肉反应明显快于老年对照组 ( $P < 0.05$ );其他组间比较未有显

著性差异。右向干扰下,腓骨长肌未有显著性差异 ( $P > 0.05$ ),而胫骨前肌、臀中肌和竖脊肌皆表现出显著性差异 ( $P < 0.05$ )。老年太极拳组胫骨前肌神经肌肉反应明显地快于老年人对照组 ( $P < 0.05$ );年轻组臀中肌的神经肌肉反应时明显快于老年对照组、慢跑组和太极拳组 ( $P < 0.05$ );老年太极拳组竖脊肌的神经肌肉反应时明显短于老年对照组 ( $P < 0.05$ );其他组间比较未见有显著性差异。

表 2 左、右向干扰下神经肌肉反应时比较

Tab. 2 Comparison of neuromuscular latencies during left and right perturbation

分组	腓骨长肌		胫骨前肌		臀中肌		竖脊肌	
	左向干扰	右向干扰	左向干扰	右向干扰	左向干扰	右向干扰	左向干扰	右向干扰
年轻组	82.56 ± 16.64 <sup>ab</sup>	92.48 ± 14.86	106.06 ± 22.68 <sup>a</sup>	106.16 ± 15.49	130.53 ± 24.26	94.54 ± 8.92 <sup>abc</sup>	105.46 ± 25.99	107.34 ± 22.79
老年对照组	106.57 ± 18.57	99.51 ± 21.68	140.13 ± 40.59	123.40 ± 37.28 <sup>c</sup>	130.78 ± 37.71	111.71 ± 20.23	123.63 ± 27.79 <sup>c</sup>	119.78 ± 19.82 <sup>c</sup>
老年慢跑组	105.16 ± 18.07	100.68 ± 16.80	114.81 ± 27.80	108.67 ± 26.36	123.91 ± 28.40	114.88 ± 14.94	111.79 ± 24.30	108.84 ± 21.40
老年太极拳组	96.97 ± 12.18	88.47 ± 15.25	111.21 ± 24.64	91.77 ± 17.95	124.27 ± 25.10	117.64 ± 16.07	96.60 ± 20.32	90.43 ± 12.50

注: <sup>a</sup> $P < 0.05$ ,与老年对照组比较; <sup>b</sup> $P < 0.05$ ,与老年慢跑组比较; <sup>c</sup> $P < 0.05$ ,与老年太极拳组比较

左、右向干扰下肌电达峰时间比较结果见表3。左向干扰下仅臀中肌表现出显著性差异( $P < 0.05$ )。年轻组肌电达峰时间明显短于老年对照组( $P < 0.05$ )、慢跑组( $P < 0.05$ )和老年太极拳组( $P < 0.05$ )。右向干扰下,竖脊肌未见有显

著性差异( $P > 0.05$ ),而腓骨长肌、胫骨前肌和臀中肌皆表现出显著性差异( $P < 0.05$ )。年轻组腓骨长肌、胫骨前肌和臀中肌的神经肌肉反应明显地快于老年对照组( $P < 0.05$ )、慢跑组( $P < 0.05$ )和太极拳组( $P < 0.05$ )。

表3 左、右向干扰下肌电达峰时间比较

Tab.3 Comparison of time to peak of EMG during left and right perturbation

分组	腓骨长肌		胫骨前肌		臀中肌		竖脊肌		ms
	左向干扰	右向干扰	左向干扰	右向干扰	左向干扰	右向干扰	左向干扰	右向干扰	
年轻组	223.66 ± 56.02	213.57 ± 35.69 <sup>abc</sup>	213.12 ± 59.13	212.81 ± 42.84 <sup>abc</sup>	226.95 ± 36.29 <sup>abc</sup>	178.62 ± 35.77 <sup>abc</sup>	297.09 ± 42.66	239.22 ± 47.22	
老年对照组	235.14 ± 27.72	297.72 ± 65.34	237.35 ± 45.86	284.07 ± 44.24	277.52 ± 46.55	237.25 ± 43.51	321.81 ± 48.24	274.26 ± 77.67	
老年慢跑组	251.83 ± 50.30	318.01 ± 56.01	229.12 ± 41.13	261.81 ± 25.39	289.22 ± 42.39	227.87 ± 47.08	291.89 ± 45.97	281.77 ± 90.85	
老年太极拳组	222.37 ± 49.85	292.63 ± 32.30	222.21 ± 38.54	272.15 ± 47.84	277.45 ± 47.56	227.67 ± 51.66	284.92 ± 59.23	286.29 ± 50.50	

注:<sup>a</sup> $P < 0.05$ ,与老年对照组比较;<sup>b</sup> $P < 0.05$ ,与老年慢跑组比较;<sup>c</sup> $P < 0.05$ ,与老年太极拳组比较

### 3 讨论与结论

神经肌肉反应时是人体感受器受到刺激后由感觉传入神经将信息传递至中枢,再由中枢将调控指令由运动神经传达至骨骼肌进行姿势调控所用的时间。神经肌肉反应时常用于探索人体姿势控制的机制,如衰老<sup>[11]</sup>、药物<sup>[12]</sup>、酒精<sup>[13]</sup>、大脑思维活动<sup>[14]</sup>、运动干预<sup>[8]</sup>等对于人体姿势控制的影响,是人体生物力学研究中的重要评价指标。

受身体机能退行性改变的影响,无规律锻炼老年人左向干扰腓骨长肌、胫骨前肌和右向干扰臀中肌的神经肌肉反应出现明显延迟。胫骨前肌可以伸踝关节,使足内翻。腓骨长肌可以屈踝关节,使踝关节外翻。胫骨前肌和腓骨长肌的协同收缩为踝关节提供稳定力矩。臀中肌的主要作用是使髋关节外展的原动肌<sup>[6]</sup>。受实验条件限制,本研究未能获知在不同方向干扰时左侧踝关节的运动学参数以及稳定力矩的变化,不能明确在左向和右向干扰时腓骨长肌和胫骨前肌在姿势调控中的启动顺序。然而,4组受试者比较的结果可以肯定上述肌肉神经肌肉反应时的延迟。

Allum等<sup>[6]</sup>研究显示,后向倾斜干扰时年轻人和老年人胫骨前肌的神经肌肉反应时分别为114、132 ms;本研究中,年轻组左、右向干扰时胫骨前肌的神经肌肉反应时均为106 ms,而老年对照组左、右向干扰时胫骨前肌的神经肌肉反应时分别为140、123 ms。由于本研究采用和Allum等<sup>[6]</sup>同样的计算方法,故测试结果较为一致。Xu等<sup>[8]</sup>研究发

现,老年对照组、太极拳组和慢跑组的神经肌肉反应时分别为82、82、89 ms,该结果与本研究的测试结果差异较大。其原因可能是: Xu等<sup>[8]</sup>实验中采用了跌落式内翻干扰装置;神经肌肉反应时的判定通过实验者的视觉鉴别。

运动干预可以延缓老年人神经肌肉反应时的衰退。然而本研究发现,慢跑和太极拳锻炼的效果对于侧向干扰调控肌肉的神经肌肉反应却表现出不同。左向干扰下规律慢跑老年人腓骨长肌的神经肌肉反应明显地慢于年轻人,与无规律锻炼老年人比较未有显著性差异。而进行规律太极拳锻炼老年人在两个方向的姿势控制过程中竖脊肌的神经肌肉反应表现出明显的锻炼效果,明显地小于无规律锻炼老年人,并且胫骨前肌在右向干扰时同样表现出显著性差异,明显地快于无规律锻炼老年人。竖脊肌两侧同时收缩可使脊柱后伸,一侧收缩可使躯干向同侧侧屈。及时的神经肌肉反应会增强老年人侧向姿势调控。本研究结果提示,太极拳锻炼能提高老年人侧向姿势控制能力,而规律慢跑锻炼对于老年人侧向姿势控制能力提高的影响不显著。运动干预对于胫骨前肌和竖脊肌的神经肌肉反应的差异,可能与慢跑和太极拳动作特征和运动控制的差异有关。

运动学研究显示,慢跑在水平面和冠状面的活动范围明显地小于矢状面<sup>[15]</sup>。而太极拳不仅包括单脚负重和双脚负重,需要整个身体在脚、躯干相对于髋关节的扭转,而且需要头、上肢、下肢在三维空间运动的协调<sup>[16]</sup>。运动分析结果显示,太极拳习

练的关节角度大、动作舒展缓慢,身体重心在三维空间频繁地转换,足部包含6个方向的运动<sup>[9,17]</sup>。此外,慢跑是节律性运动,太极拳为非节律性运动。节律性运动能自动、协调地引起伸肌和屈肌运动神经元节律性传出兴奋,受脊髓中枢模式发生器的调控,只有动作开始和结束需要意识的支配。而太极拳在完成动作的过程中,全程需要大脑高位中枢的调节,将运动指令下达至效应器,感受器再将反馈信息上传,然后对动作指令进行调整。因此,太极拳练习的过程就是不断对整个运动控制回路强化的过程,慢跑对于神经调控回路的影响就要小很多。以上可能是太极拳对老年人神经肌肉反应锻炼效果更佳的原因。

姿势干扰下参与姿势调控肌肉的肌电达峰时间可以反映该肌肉的收缩效率。水平侧向两个方向的干扰结果皆显示3组老年人臀中肌的收缩效率下降,并且右向干扰腓骨长肌和胫骨前肌的收缩效率也出现下降,推测是老年人肌力下降引起。Chang等<sup>[18]</sup>研究发现,髋关节外展肌力的收缩效率与侧向稳定性相关。因此,要提高老年人踝关节和髋关节肌肉的收缩效率,仅练习太极拳还不够,可以设计针对上述肌肉的力量练习方案。

综上所述,规律太极拳锻炼可以使老年人踝关节和躯干肌的神经肌肉反应更加迅速,而对于提高老年男性肌肉收缩效率的效果不明显。

## 参考文献:

[1] HILLIARD MJ, MARTINEZ KM, JANSSEN I, *et al.* Lateral balance factors predict future falls in community-living older adults [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2008, 89(9): 1708-1713.

[2] 高纪明,王少君,徐冬青. 侧向稳定性与老年人跌倒研究进展 [J]. *中国老年学杂志*, 2010, 30(17): 2540-2542.

[3] RIETDYK S, PATLA AE, WINTER DA, *et al.* Balance recovery from medio-lateral perturbations of the upper body during standing [J]. *J Biomech*, 1999, 32(11): 1149-1158.

[4] MILLE ML, JOHNSON ME, MARTINEZ KM, *et al.* Age-dependent differences in lateral balance recovery through protective stepping [J]. *Clin Biomech*, 2005, 20(6): 607-616.

[5] GRANACHER U, LACROIX A, MUEHLBAUER T, *et al.* Effects of core instability strength training on trunk muscle strength, spinal mobility, dynamic balance and functional mobility in older adults [J]. *Gerontology*, 2013, 59(2): 105-113.

[6] ALLUM JH, CARPENTER MG, HONEGGER F, *et al.* Age-

dependent variations in the directional sensitivity of balance corrections and compensatory arm movements in man [J]. *J Physiol*, 2002, 542(Pt 2): 643-663.

[7] 王少君,徐纳新,万发桃,等. 衰老对侧向姿势干扰下神经肌肉反应的影响 [J]. *医用生物力学*, 2011, 26(3): 286-290.

WANG SJ, XU NX, FAN FT, *et al.* Influence of aging on neuromuscular reaction during lateral perturbation [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(3): 286-290.

[8] XU DQ, LI JX, HONG Y. Effect of regular Tai Chi and jogging exercise on neuromuscular reaction in older people [J]. *Age Ageing*, 2005, 34(5): 439-444.

[9] HONG Y, LI JX. Biomechanics of Tai Chi: A review [J]. *Sports Biomech*, 2007, 6(3): 453-464.

[10] MAKI BE, MCILROY WE. Control of rapid limb movements for balance recovery: Age-related changes and implications for fall prevention [J]. *Age Ageing*, 2006, 35 (Suppl 2): 12-18.

[11] SHOJAEI I, NUSSBAUM MA, BAZRGARI B. Age-related differences in trunk muscle reflexive behaviors [J]. *J Biomech*, 2016, 49(14): 3147-3152.

[12] NAKAMURA R, TSUJI I. Effect of antispastic drugs on rapid force generation of spastic muscle [J]. *Tohoku J Exp Med*, 1986, 150(4): 447-453.

[13] GOPALARATHINAM K, JEGANATHAN PS, ANANTHARAMAN V, *et al.* Effects of ethanol and methanol on spontaneous electromyographic signals and neuromuscular latency [J]. *Indian J Physiol Pharmacol*, 1987, 31(3): 178-183.

[14] TSANG WW, LEE KY, FU AS. Effects of concurrent cognitive task on pre-landing muscle response latency during stepping down activity in older adults with and without a history of falls [J]. *Disabil Rehabil*, 2009, 30(15): 1116-1122.

[15] LOHMAN EB, BALAN SACKIRIYAS KS, SWEN RW. A comparison of the spatiotemporal parameters, kinematics, and biomechanics between shod, unshod, and minimally supported running as compared to walking [J]. *Phys Ther Sport*, 2011, 12(4): 151-163.

[16] 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.

[17] 陈鹏,刘海波,姚杰,等. 太极拳运动下肢生物力学研究进展 [J]. *医用生物力学*, 2017, 32(1): 92-97.

CHEN P, LIU HB, YAO J, *et al.* Progress of biomechanical study on the lower extremity in Tai Chi movement [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(1): 92-97.

[18] CHANG SH, MERCER VS, GIULIANI CA, *et al.* Relationship between hip abductor rate of force development and mediolateral stability in older adults [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2005, 86(9): 1843-1850.