

DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2018.03.008

## 针灸缓解肌肉疲劳的肌电分析

朱昭苇<sup>1</sup>, 许东<sup>2</sup>, 项燕<sup>3</sup>, 丁立<sup>1,\*</sup>

(1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100191; 2. 航天员科研训练中心, 北京 100094; 3. 北京中医药大学针灸推拿学院, 北京 100029)

**摘要:** 目的 探究针灸刺激对于肱二头肌疲劳产生和恢复的影响, 以及能否通过肌电信号来量化针灸刺激的影响。方法 利用 BTE PrimusRS 运动康复系统, 令受试者肱二头肌达到疲劳状态, 针刺足三里、内关穴, 进行肌电时频域分析、幅频联合分析、疲劳阈分析。结果 在疲劳产生阶段, 针灸能使肌肉疲劳产生的时刻延后; 针灸刺激能提高肌肉疲劳恢复的能力。结论 针灸刺激可用于解决肌肉疲劳问题; 可以通过肌电信号来量化针灸刺激的影响。

**关键词:** 航天员训练; 肌肉疲劳; 针灸; 肌电**中图分类号:** R857.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-0837(2018)03-0347-06

*Electromyography Analysis of Muscle Fatigue Relieving by Acupuncture.* Zhu Zhaowei, Xu Dong, Xiang Yan, Ding Li. Space Medicine & Medical Engineering, 2018, 31(3): 347-352

**Abstract:** **Objective** To explore the effect of acupuncture stimulation on biceps muscle fatigue and recovery was explored, and to study the ability to quantify the effect of acupuncture stimulation through the EMG signal. **Methods** The BTE PrimusRS rehabilitation system was used to make the biceps brachii reach the fatigue state, acupuncture at Zusanli and Neiguan. Electromyography time frequency domain analysis, amplitude frequency analysis and fatigue threshold analysis were performed. **Results** The results indicated that acupuncture could postpone the appearance of muscle fatigue during the fatigue formation period, and acupuncture stimulation could improve the recovery ability of muscle fatigue. **Conclusion** Acupuncture stimulation does have an effect on biceps fatigue and can be used to solve the problem of muscle fatigue; the effect of acupuncture stimulation can be quantified by EMG signals.

**Key words:** astronaut training; muscle fatigue; acupuncture; EMG

**Address correspondence and reprint requests to:** Ding Li. School of Biomedical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

航天活动的成功与否,很大程度上取决于航天员<sup>[1]</sup>。即使航天器上电子设备集成度极高,仍有很多操作需要航天员去手动完成<sup>[2]</sup>,有些操作甚至直接决定着航天活动的成败。

为确保航天员能够在太空中准确、高效地完成预设动作,航天员需要在地面进行大量的针对性训练。有训练就存在着效率问题,对于航天员来讲,训练的效率非常重要<sup>[3]</sup>,因为航天员的地面训练需要投入大量的人力、物力和财力<sup>[4-5]</sup>。

航天员的训练效率必然会和肌肉疲劳产生关联<sup>[6-11]</sup>,对肌肉疲劳的研究通常关注两个方面:一方面是选取何种标准判定航天员达到了疲劳状态;航天员的主观表述还是客观的生理数据;另一

方面是如何延缓航天员疲劳产生的过程以及如何增强航天员疲劳恢复的能力。这也是目前航天员训练中尚未得到有效解决的重要问题。

研究表明针灸对于疾病治疗、疲劳恢复、修身养性具有重要作用。Sun 等<sup>[12]</sup>研究发现通过温和灸和拔火罐相结合的方法可以有效地缓解由于一次性大强度运动或周期性的大强度运动所引起的血清肌酸激酶活性的增强效果,从而达到缓解疲劳的目的。

针灸疗法相对而言是一种高效,且基本无毒副作用的疗法。目前已有的研究都采用激素指标来评价针灸的对于疲劳的效果<sup>[13-14]</sup>。肌肉疲劳的机制可以归结到神经电信号的改变,已有大量

收稿日期: 2017-06-21 修回日期: 2018-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(51175021); 国家科技支撑计划(2014BAK01B05); 国防基础科研计划(JCKY2016601B009); 国家重点研发计划(2017YFC0110503、2017YFC0110501)。

第一作者: 朱昭苇,男,硕士研究生,研究方向为人体工效学。E-mail: 364630550@qq.com

\* 通讯作者: 丁立,男,博士,教授,研究方向为人体工效学。E-mail: ding1971316@buaa.edu.cn

研究表明肌电信号可以有效的反映肌肉疲劳的状态。肌电信号表征疲劳的原理也是基于对人体肌肉电位信号的特征提取来判断肌肉的状态。表征肌肉疲劳时,肌电相对于生化指标而言,具有无创,快捷、准确而且操作简便的优势。因而国际上评价肌肉疲劳的金标准是肌电信号<sup>[15-16]</sup>。

航天员进行舱外作业时 90% 的动作涉及上肢,而上肢动作中主要发挥作用的肌肉有肱二头肌、肱三头肌、三角肌、背阔肌和胸大肌等<sup>[10]</sup>。其中,使用频率最高、用力最大的是肱二头肌,在测试中也便于肌电信号的测量,因此,本文选定肱二头肌进行测试研究。由于需要让受试者达到疲劳状态,即令肱二头肌达到疲劳状态。

本文的目的是探索能否用肌电信号来客观评价针灸的效果以及研究针灸对疲劳产生和疲劳恢复的影响。本研究结果对航天员训练计划的精确设计,有效提高训练效率有着重要意义。

## 1 方法

### 1.1 受试者

受试者为 10 名在读大学生,7 名男性,3 名女性,身体健康情况均为正常。实验时对受试者右手臂进行测量,受试者在实验前 24 h 内未做过剧烈运动,且均在实验中配合良好。

### 1.2 实验设备

使用 BTE PrimusRS 提供上肢作业所需的准确的阻力矩;采用 ZJE-II 型肌电仪采集肌电信号,采样频率设定为 1000Hz,电极片采用一次性 Ag/AgCl 皮肤表面电极;使用 0.25 × 40 mm 的针型进行针灸。

### 1.3 疲劳实验

实验中采用的方法是首先利用 BTE PrimusRS 测量每名受试者最大的肱二头肌屈肘力矩,然后以各自最大力矩的 70% 进行转动手柄的操作。各受试者最终选取力矩见表 1。评价肱二头肌达到疲劳的标准是受试者无法完成更多一次的转动手柄操作。此外,转动手柄频率的设置也是因受试者而异,原则是让受试者在 2 min 之内达到疲劳状态。

对于疲劳实验的内容,本文设计了四种工况:①不扎针时肌肉疲劳产生,②不扎针时肌肉疲劳恢复,③扎针时肌肉疲劳产生,④扎针时肌肉疲劳

表 1 各受试者最终选取转矩阈值(N · m)

Table 1 Torque threshold selected for participants(N · m)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T	10	15	15	10	20	15	15	15	8	15

Note: T is 70% of maximum torque per person.

恢复。这样的工况设计方案可以让我们对扎针和不扎针情况下的肌肉疲劳产生和肌肉疲劳恢复情况分别进行对比。实验中 4 种工况顺序采取随机化原则,排除序列效应。

### 1.4 穴位选择和针灸方法

根据针灸理论,内关穴是络穴、八脉交会穴之一,可以疏通经络治疗心包经及前臂诸疾。足三里穴是足阳明胃经的合穴,四总穴之一,是人体最重要的保健穴位。足三里穴对大脑皮层的功能有调节的作用,对心血管功能,胃肠蠕动和内分泌功能都有良性的促进作用。他们对于肱二头肌疲劳的恢复具有正向作用。

如图 1 所示,在针灸时,让受试者处于仰卧位,探寻足三里和内关穴的位置,以毫针直刺一寸,并适当提插捻转以得气。

### 1.5 肌电测试

测试前,如果受试者体毛较长,使用剃须刀将电极安放处(肱二头肌)的体毛刮干净。然后使用脱脂酒精棉球对该部位的皮肤进行反复擦拭进行去脂处理;接着安放电极,使三个电极(一个参考电极,两个测量电极)相互交错,但不能覆盖带有导电膏的部位;最后连接导线和肌电采集设备、计算机。

### 1.6 实验过程

每名受试者需完成 4 种工况。开始前首先采集受试者在静息状态下的肌电信号。

工况 1: 受试者在不扎针条件下,完成疲劳试



图 1 扎针位置示意图

Fig. 1 Location of acupuncture

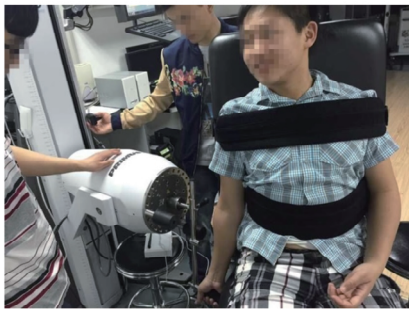


图 2 实验场景图  
Fig. 2 Experiment scenario

验,并采集疲劳产生过程中(2 min)的肌电信号。

工况 2: 受试者在不扎针的条件下,完成疲劳试验达到疲劳状态后(要采集疲劳产生过程中的肌电信号),休息 2 min,然后开始采集之后疲劳恢复过程中 2 min 的肌电信号。

工况 3: 按前述针灸方法扎针后,让受试者仰卧位留针 15 min,起针,开始肌肉疲劳试验,采集疲劳产生过程中(2 min)的肌电信号。

工况 4: 受试者在不扎针情况下,完成肌肉疲劳试验达到疲劳状态(要采集疲劳产生过程中的肌电信号),休息 2 min(在这 2 min 内要完成内关和足三里的扎针),开始采集之后疲劳恢复过程中 2 min 肌电信号。

完成每种工况后,要给予受试者充分的休息时间,以便恢复到静息状态,确保每次进行实验前受试者处于同一生理状态,消除误差。

1.7 数据处理

将采集到的肌电信号使用 Matlab 软件消除工

频干扰,并且进行带通滤波,求出 4 个指标值 IEMG、RMS、MPF、MF。

实验数据以  $\bar{x} \pm s$  表示。利用 Microsoft Excel 2010 软件和 Matlab R2012a,用配对  $t$  检验对针灸和不针灸工况进行检验,  $P < 0.05$ ,认为差异具有显著性。

2 结果

2.1 肌电时频域指标数据

从表 2 可以看出,在疲劳产生时扎针和不扎针相比,积分肌电值 IEMG 和均方根值 RMS 增加的程度减小,但扎针工况和不扎针工况具有显著性差异( $P < 0.01$ );而平均功率频率 MPF 和中位频率 MF 降低的程度也减小,同样扎针工况和不扎针工况具有显著性差异( $P < 0.01$ )。

从表 2 中可以看出,疲劳恢复时,扎针和不扎针相比积分肌电值 IEMG 和均方根值 RMS 的减小的幅度都增大,但扎针工况和不扎针工况具有显著性差异( $P < 0.01$ ),而平均功率频率 MPF 和中位频率 MF 的增加的幅度也增大,同样扎针工况和不扎针工况具有显著性差异( $P < 0.01$ )。

2.2 幅频联合分析(JASA)

幅频联合分析法是 Alvin 等<sup>[17]</sup>提出的一种同时考虑振幅和频谱变化的肌肉疲劳测量方法。

该方法以 IEMG 变化率为横坐标,以 MPF 变化率为纵坐标。4 个象限对应肌肉的四种状态,第一象限为肌力增加,第二象限为肌肉疲劳恢复,第三象限对应肌力下降,第四象限对应肌肉疲劳。

表 2 不同工况下疲劳产生时肌电信号时频域指标平均值( $n = 10$ )  
Table 2 Mean time-frequency domain indices of EMG under different conditions upon appearance of fatigue ( $n = 10$ )

Indices	Resting-state	Without-acupuncture	With-acupuncture
IEMG( V. s)	0.04 ± 0.007	0.06 ± 0.006	0.05 ± 0.003 **
RMS( mV/s)	4.84 ± 0.74	8.46 ± 0.92	6.51 ± 0.80 **
MPF( Hz)	183.32 ± 2.18	169.99 ± 6.49	180.93 ± 5.29 **
MF( Hz)	90.78 ± 1.46	82.99 ± 4.36	86.18 ± 2.57 **

Note: \*\*  $P < 0.01$ , as compared with without-acupuncture.

表 3 不同工况下疲劳恢复时肌电信号时频域指标平均值( $n = 10$ )  
Table 3 Mean Time-frequency domain indices of EMG under different conditions upon recovery of fatigue ( $n = 10$ )

Indices	Fatigue-state	Without-acupuncture	With-acupuncture
IEMG( V. s)	0.06 ± 0.003	0.05 ± 0.005	0.04 ± 0.006 **
RMS( mV/s)	9.45 ± 1.17	8.21 ± 0.46	6.84 ± 0.51 **
MPF( Hz)	165.77 ± 7.20	172.55 ± 4.72	183.08 ± 4.17 **
MF( Hz)	78.13 ± 5.02	86.05 ± 3.26	92.66 ± 1.46 **

Note: \*\*  $P < 0.01$ , as compared with without-acupuncture.

本研究将疲劳产生和疲劳恢复阶段测量的120 s肌电信号分为6段,每段20 s,求得每20 s内IEMG和MPF的平均值,然后计算其较上一个20 s内IEMG和MPF均值的变化率,做图并观察点分布情况。

图3可以看出点大多分布在第四象限,说明肌肉疲劳,验证了疲劳产生工况的有效性。

图4可以看出数据点大多分布在第二象限,说明此阶段肌肉疲劳后处于恢复状态,验证了疲劳恢复工况的有效性。

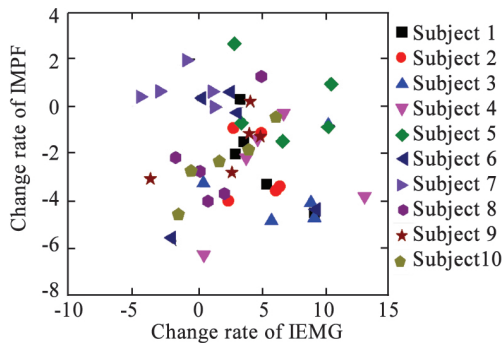


图3 疲劳产生过程JASA分析  
Fig. 3 JASA analysis during appearance of fatigue

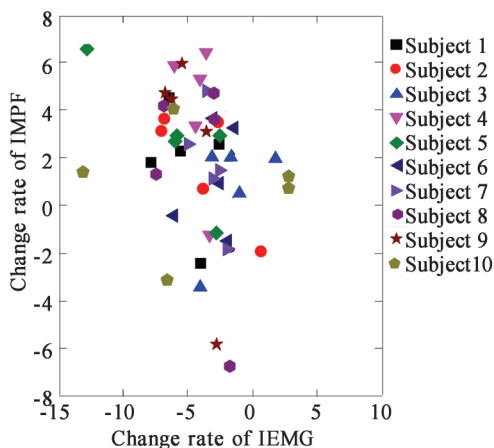


图4 疲劳恢复过程JASA分析  
Fig. 4 JASA analysis during recovery of fatigue

JASA分析验证了实验设计的有效性,可以发现受试者在疲劳产生和疲劳恢复工况下,肌肉所处的状态确实不同。

### 2.3 肌电疲劳阈分析

Matsumoto<sup>[18]</sup>提出在IEMG斜率—时刻坐标系上,直线与时刻坐标轴的交点,即IEMG斜率为零的点是疲劳产生的临界点,也就是 $EMG_{FT}$ 。

使用 $EMG_{FT}$ 作为试验指标有几个要求,首先要保证在不同负荷下,积分肌电值随着时间推移

呈正增长趋势;其次要确保在不同负荷情况下,积分肌电值的斜率不同。

对于10名受试者,在完成疲劳产生任务时(分两种情况:扎针和不扎针进行对比),分别测量2 min的信号。将120 s数据划分为6段,每段20 s。计算每秒的IEMG值,线性拟合每20 s内的IEMG的散点图,并计算拟合直线的斜率。按照Matsumoto提出的方法检测 $EMG_{FT}$ 。以此来评价受试者在肌肉疲劳过程中是否达到疲劳状态。其关系曲线如图3、图4所示。

图5中可以看出,随着时间推移,IEMG的斜率呈现增长趋势,而且拟合直线均与时间轴有交点,交点的平均纵坐标值为 $(53.35 \pm 5.36)$  s,意味着受试者的平均疲劳时刻为53.35 s。从图6可以看出,随着时间推移,IEMG的斜率呈现增长趋势,而且拟合直线均与时间轴有交点,交点的平均纵坐标值为 $(66.34 \pm 4.42)$  s。

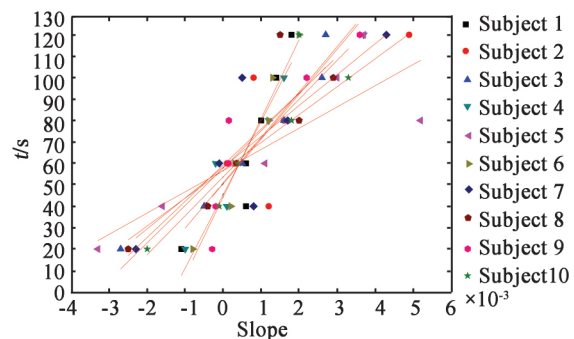


图5 不扎针时肌电疲劳阈  
Fig. 5  $EMG_{FT}$  without acupuncture

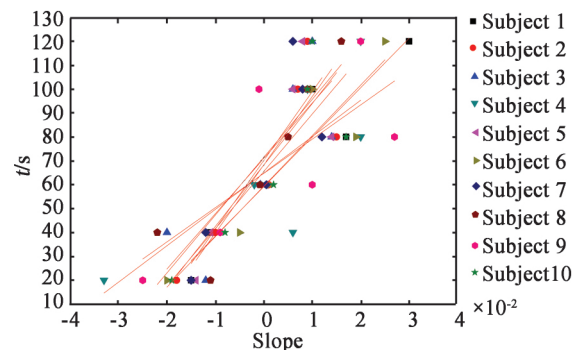


图6 扎针时肌电疲劳阈  
Fig. 6  $EMG_{FT}$  with acupuncture

与不扎针工况相比,受试者疲劳出现的时刻推迟,说明针灸对于肌肉疲劳产生是具有缓解作用,也说明扎针和不扎针的情况存在着明显差异。



### 3 讨论

#### 3.1 结果讨论

对肌电数据进行滤波后,进行时频域的分析可以发现 IEMG、RMS、MPF、MF 随着疲劳产生和疲劳恢复有着明显的变化。其中在疲劳产生阶段,IEMG 和 RMS 随着疲劳产生而增大,MPF 和 MF 随着疲劳产生而减小;在疲劳恢复阶段,IEMG 和 RMS 随着疲劳恢复而减小,MPF 和 MF 随着疲劳恢复而增大。

在疲劳产生阶段,有针灸的 IEMG 和 RMS 的增幅要小于无针灸时的增幅,而有针灸的 MPF 和 MF 的降幅要小于无针灸时的降幅。在疲劳恢复阶段,有针灸的 IEMG 和 RMS 的降幅要高于无针灸时的降幅,同时有针灸的 MPF 和 MF 的增幅要高于无针灸时的增幅。

根据  $EMG_{FT}$  的结果看出,所有的受试者在疲劳产生阶段均较好的完成了预期任务,即达到了疲劳状态,意味着实验的数据是可靠有效的。

对比扎针和不扎针时肌肉疲劳产生的  $EMG_{FT}$  可以看出,扎针时疲劳产生的时刻较不扎针时疲劳产生的时刻晚。这从侧面验证了 2) 中的结果是正确的。但是不能简单的认为扎针与不扎针时每一个参数的变化率和整体的  $EMG_{FT}$  延迟的比率是呈线性相关的,原因是肌肉疲劳的机理涉及到复杂大脑皮层活动,神经肌肉接头传导等一系列复杂的问题,实验所选取的四个参数只是从一个方面来评价肌电信号,而  $EMG_{FT}$  是从宏观层面来评价肌肉疲劳的。

幅频联合分析以肌电信号时域和频域结合的方法验证了疲劳产生和疲劳恢复阶段的肌肉状态确实分别达到了疲劳和恢复的状态,验证了实验设计的有效性,确保了实验结果的可信性。

#### 3.2 方法讨论

研究表明,运动负荷与运动单元的募集量相关。随着运动负荷增加,IEMG 值也会增加,标志着有更多的运动单元被募集。运动单元被募集后,会出现特定水平和种类的肌肉收缩活动,意味着新的运动单元被激活。

在中等运动强度下,IEMG 与持续时间和工作的强度呈正相关关系。就募集过程而言,首先放电频率最低的运动单元会被募集,随着持续时

间和运动强度的增大,放电频率会逐渐增加。直到达到某一特定频率后,第二运动单元在兴奋收缩中也开始起作用。在实际工况中,需要肌肉力量继续增加时,会导致第一和第二运动单元的放电频率继续增加,同时会有更多的运动单元在收缩中发挥作用,最后极限数量的运动单元都参与到肌肉收缩的活动中。当运动强度达到一定阈值后,人体不能仅靠增加参与活动的肌纤维的数量来维持机体需求。在这种情况下,能维持机体需求的另一种途径是提高运动单元放电的同步性。这会导致神经刺激的产生频率上升。直观的体现是 IEMG 值的进一步升高<sup>[19]</sup>。

就频域参数而言,将采集到的肌电信号进行傅里叶变换得到频域信号,再计算得出 MPF 和 MF。与时域指标相比,频域指标更能体现整个运动过程中人体的状态,并且灵敏度较高,抗外界干扰能力强。有研究证实肌肉在中枢神经控制下进行运动时,sEMG 频谱频率会下降,其原因是在肌肉活动时,运动单元放电频繁程度会下降,随之而来的是频谱频率的下降,当下降趋势达到平衡时标志着人体中枢疲劳的产生。

$EMG_{FT}$  的原理是基于 IEMG 斜率为零时判定人体肌肉开始疲劳。通过绘制 IEMG 曲线图能够得出斜率为零的时刻,所获得的值即为  $EMG_{FT}$ 。经研究证明这种处理方法能有效的、无创的判定肌肉的疲劳程度。

不同于药物治疗,针灸疗法不需要补充机体必不可少的化学成分,而是通过调整机体的生理功能,激发机体固有的自我恢复的能力,以达到医疗和保健作用。

根据已有研究表明,针灸能提高肌肉交感神经的兴奋性,具体表现是皮肤双边电传导率的增加以及针刺入后末梢皮肤温度的降低<sup>[20]</sup>。

另一方面,受试者对于针灸诱发的疼痛的恐惧作用在一定程度上和生理状态激发相关,这能够增加针灸时交感神经的兴奋性<sup>[21]</sup>。

有研究表明对内关和足三里穴的针灸刺激会增强肌乳酸的清除作用,会缓解肌肉疲劳。

### 4 结论

本研究表明,针灸刺激内关穴和足三里穴对受试者的肱二头肌的疲劳产生和疲劳恢复会产生

显著的影响,而且这种影响可以通过肌电信号来反映,但针灸对于不同受试者的影响存在差异。主要结论包括:①针灸对于肌肉疲劳的效果可以通过肌电信号来表示。②疲劳产生阶段,针灸刺激能延缓肌肉疲劳的产生,并且针灸刺激下的肌肉疲劳程度要低于无针灸刺激时的程度。③在疲劳恢复阶段,针灸刺激能使疲劳恢复效果更佳。④本研究方法为解决航天员训练时肌肉疲劳产生和恢复问题提供了参考依据,并对航天员具体训练方案的制定有着指导意义。

### 【参考文献】

- [1] Mouriaux P, Varnoteaux P, Alexandre Ananoff (1910 - 1992): 30 years to promote astronautics before sputnik [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93(1): 266-278.
- [2] Cheng J, Fan X. Dynamic Model of an astronaut equipped with a manned maneuvering unit in virtual reality [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 23(2): 139-145.
- [3] 张进武, 张宜静, 张相, 等. 训练对航天操作任务复杂度与操作时间相关性的影响 [J]. *航天医学与医学工程*, 2012, 25(2): 98-101.
- [4] Zhang JW, Zhang YJ, Zhang X, et al. Effects of training-degree on correlation between operation complexity and operation time during space mission [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2012, 25(2): 98-101.
- [4] Kramer A, Ritzmann R, Gruber M, et al. Four weeks of training in a sledge jump system improved the jump pattern to almost natural reactive jumps [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2012, 112(1): 285-293.
- [5] Richter J. Traces of the gods: Ancient astronauts as a vision of our future [J]. *Numen*, 2012, 59(2): 222-248.
- [6] Yang Z, Wu Q, Fu S. Spectral analysis of surface EMG based on empirical mode decomposition [J]. *Optik*, 2014, 125(23): 7045-7052.
- [7] Goto K, Furukawa Y, Hatta H, et al. Fatigue behavior of 2D laminate C/C composites at room temperature [J]. *Composites Science & Technology*, 2005, 65(7): 1044-1051.
- [8] Choi S, Baek S, Choi S. The effects of endurance training and thiamine supplementation on antifatigue during exercise [J]. *J Exerc Nutrition Biochem*, 2013, 17(4): 189-198.
- [9] Jarraya M, Chtourou H, Aloui A, et al. The Effects of music on high-intensity short-term exercise in well trained athletes [J]. *Asian Journal of Sports Medicine*, 2012, 3(4): 233-238.
- [10] 张楠楠, 田寅生, 丁立, 等. 航天员舱外活动中典型动作的分类统计与分析 [J]. *航天医学与医学工程*, 2011, 24(5): 366-368.
- [11] Zhang NN, Tian YS, Ding L, et al. Classified statistics and analysis of astronauts typical actions during extravehicular activity [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2011, 24(5): 366-368.
- [11] Ogai R, Yamane M, Kosaka M. Effects of petrissage massage on fatigue and exercise performance following intensive cycle pedalling [J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2008, 42(10): 834-838.
- [12] Li SD, Bao ZA, Ming X, et al. Study on the effect of mild moxibustion combined with cupping therapy on serum creatine kinase in gym-athletes [J]. *Chinese Acupuncture & Moxibustion*, 2007, 27(1): 6-8.
- [13] FC Tür, Aksay E, TY Kılıç. Therapeutic effects of acupuncture on obesity and HbA1c [J]. *European Journal of Integrative Medicine*, 2015, 7(2): 88-93.
- [14] Sun D, Zhang Y, Chen D, et al. Effect of moxibustion therapy plus cupping on exercise-induced fatigue in athletes [J]. *Journal of Acupuncture & Tuina Science*, 2012, 10(5): 281-286.
- [15] Zhang J, Sun D. Surface EMG observation and isokinetic test on pressing-kneading manipulations for exercise fatigue of anterior tibial muscle [J]. *Journal of Acupuncture and Tuina Science*, 2011, 9(1): 62-66.
- [16] Marri K, Swaminathan R. Identification of onset of fatigue in biceps brachii muscles using surface EMG and multifractal DMA algorithm [J]. *Biomedical Sciences Instrumentation*, 2015, 51(1): 107-114.
- [17] Matsumoto T, Ito K, Moritani T. The relationship between anaerobic threshold and electromyographic fatigue threshold in college women [J]. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 1991, 63(1): 1-5.
- [18] Luttmann A, Jäger M, Sökelland J, et al. Electromyographical study on surgeons in urology. II. Determination of muscular fatigue [J]. *Ergonomics*, 1996, 39(2): 298-313.
- [19] 杨晓晔. 表面肌电图对青年男子股四头肌的疲劳评价 [D]. 北京: 北京体育大学, 2004.
- [19] Yang XY. Evaluation of adolescents' quadratus femoris fatigue based on Seng [D]. Beijing: Beijing Sport University, 2004.
- [20] Paulson K, Shay B. Sympathetic nervous system responses to acupuncture and non-penetrating sham acupuncture in experimental forearm pain: A single-blind randomised descriptive study [J]. *Acupuncture in Medicine Journal of the British Medical Acupuncture Society*, 2013, 31(2): 178-184.
- [21] Lee I, Jo H, Lee S, et al. Fear of acupuncture enhances sympathetic activation to acupuncture stimulation [J]. *Acupuncture in Medicine*, 2013, 31(3): 276-281.

(责任编辑: 刘洪涛)