

文章编号:1004-7220(2012)04-0369-06

## 静态姿势下均匀负重和非负重时 躯干和表面肌电活动

黄强民, 王凤湖, 范 帅

(上海体育学院 运动医学教研室, 上海 200438)

**摘要:** **目的** 观察躯干均匀负重和非负重状态下静态前屈和后伸时腰背部、腹部及臀中肌的肌电活动规律和运动学特征。**方法** 6位正常健康的男性受试者直腿站立于特殊设计的试验框架和平台内做静态前屈和后伸的负重和非负重动作,每次试验持续4 s,重复3次。动作时,记录双侧腰臀部的10块肌肉:腹直肌、腹外斜肌、竖脊肌、多裂肌、臀中肌的肌电活动,以及三维角度运动轨迹和足底力系。计算标准化肌电、腰部躯干角和足底中心压力的位移。将所得数据作常规的统计分析。**结果** 负重和非负重前屈时,都是背侧肌活动较大(10.47~16.94)。非负重后伸时,腹侧肌活动也较大;负重后,背侧肌(3.70~17.95)和臀中肌(6.64~11.52)活动增加,腹肌活动减少(10.66~4.18)。后伸时,躯干的闪动次数随负重增加而增多,在3D角上增加1.55次;负重后,足底中心压力向前后的移动多于侧方移动,前屈的前后方移动(14.60)多于后伸的移动(7.65)。**结论** 后伸状态增加了背侧肌的活动,而且多裂肌更明显;同时,腰部角位移度和闪动次数增加,特别在后伸提重时更为显著。

**关键词:** 肌电活动; 均匀负重; 生物力学; 运动学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## Movement of trunk and surface electromyography under symmetric loading and unloading with static posture

HUANG Qiang-min, WANG Feng-hu, FAN Shuai (*Shanghai Sports College, the Department of Sports Medicine, Shanghai 200438, China*)

**Abstract:** **Objective** To observe the electromyography (EMG) activities and kinematic characteristics of the back, abdomen and hip muscles under the static symmetric loading and unloading with the flexion and extension posture. **Methods** Six healthy male subjects stood on a specially designed testing platform, doing flexion/extension under symmetric loading and unloading, respectively. Each trial lasted 4 seconds and was repeated 3 times. The EMG activities of 10 muscles (rectus abdominis, obliquus externus abdominis, erector spinae, multifidus, gluteus Medius), the 3D angular movement, the plantar COP (center of pressure) were recorded during the trial. The normalized EMG, trunk angle and COP displacement were calculated, and statistical analyses of all data were made. **Results** Six healthy male subjects stood on a specially designed testing platform, doing flexion/extension under symmetric loading and unloading, respectively. Each trial lasted 4 seconds and was repeated 3 times. The EMG activities of 10 muscles (rectus abdominis, obliquus externus abdominis, erector spinae, multifidus, gluteus medius), the 3D angular movement, the plantar COP (center of pressure) were recorded during the trial. The normalized EMG, trunk angle and COP displacement were calculated, and statistical analyses of all data were made. **Results** Muscle activities of the back were greater (10.47~16.94) with flexion both under loading and unloading. Muscle activities of the abdomen were greater with extension under unloading, and those of the back (3.70~17.95) and hip (6.64~11.52) were increasing under loading, with muscle activities of the abdomen decreasing (10.66~4.18). The flashing trunk numbers was increased with the increase of loading, espe-

收稿日期:2011-08-10; 修回日期:2011-10-09

基金项目:上海市自然科学基金项目(09ZR1430300),上海市人类运动能力开发与保障重点实验室项目资助(11DZ2261100)。

通讯作者:黄强民,教授,主任医师,E-mail:huaqia404@yahoo.com.cn。

cially 1.55-time increase in the trunk angle. The COP displacement in anterior-posterior direction was shifted greater than that in lateral direction, and this shift was more during flexion (14.60) than that during extension (7.65). Conclusions Extension increases the activities of back muscles, especially for multifidus, and it also increases the torso angular displacement and flashing trunk numbers, especially under loading.

Key words: Electromyography (EMG) activity; Symmetric loading; Biomechanics; Kinematics

躯干肌是保持脊柱稳定和进行正常活动的主要因素之一。倪朝明<sup>[1]</sup>通过5年的调查研究发现,躯干肌(腰椎屈、伸和旋转的主动肌和拮抗肌)的肌力不平衡是导致下腰痛的危险因素之一。临床工作中发现,有很多患者的下腰痛是由于臀部肌肉劳损所致<sup>[2]</sup>。在躯干前屈或者后伸时,虽然腰椎受到压迫,但是神经肌肉骨骼系统的积极性活动会抵消这部分力,从而最大程度上降低对腰椎的压迫和缓解下腰痛的发生。但腰背部、腹部和臀部的肌肉不会全部地动员,而是按任务要求选择性地活动<sup>[3]</sup>。Zetterberg等<sup>[4]</sup>研究证明,躯干试图前屈时主要是腹侧肌活动较强,背侧肌活动较弱;试图后伸时背侧竖脊肌活动最大,腹侧肌也表现出一定的活动。

因此,本研究设计调查了通过上肢使躯干负重时的一些人类因素,这些因素包括在躯干负重时的脊柱闪动和不同负重位置的躯干肌的活动,以及可能的影响因子。

## 1 研究方法

### 1.1 实验对象

上海体育学院6位健康的男性受试者,平均年龄(23 ± 1.7)岁,身高(173.7 ± 3.1) cm,体重(66.8 ± 5.3) kg。

### 1.2 材料与方法

在执行任务期间,记录双侧腹直肌、腹外斜肌、竖脊肌、多裂肌、臀中肌的表面肌电图(16通道肌电图与生物信号测量分析系统, Biovision, 德国),软件为Dasylab 7.0,采样频率为1 kHz,肌电图电极位置见表1。同步记录足底在不同任务下三维力系的改变(Kistler, 瑞士,采样频率为1.2 kHz),并计算中心压力(center of pressure, COP)的位移。

VICON三维运动解析仪的摄像机同步记录脊柱的角运动(8台高解析度摄像机, MX 13, WORK-STATION 5.1, 英国;采样频率为120 Hz),摄像机的认证点见表2<sup>[5]</sup>。

表1 表面肌电电极的位置

Tab.1 Placement of sEMG electrodes

骨骼肌名称	位置
腹直肌	肚脐旁开3 cm
腹外斜肌	肚脐旁开15 cm
竖脊肌	躯干正中线旁开5 cm,与L2棘突相平
多裂肌	躯干正中线旁开2 cm,与L5和骶1棘突间相平
臀中肌	髂前上棘和骶骨连线的中1/3

表2 摄像机认证点的位置

Tab.2 Placement of camera identical points

位置	个数	位置	个数
左右髂嵴最高点	2	第12胸椎棘突	1
左右髂前上棘点	2	第3腰椎棘突	1
左右髂后上嵴点	2	第5腰椎棘突	1
左右大转子尖点	2	第1骶骨棘突	1
左右股骨内侧、外侧髁点	4	左右侧躯干跟踪点	2
第7颈椎棘突	1	左右肩峰点	2

实验前受试者做5 min热身运动,并且让受试者熟悉试验过程和流程。然后,做受试肌最大自主静态收缩,并记录和储存其肌电活动,以利后续的肌电分析。接下来做1~2次预试验,校准仪器后,受试者休息5 min,开始正式试验。试验时,受试者直膝,左、右脚的脚第1跖趾关节相距30 cm,站立于方型的自制试验平台内双手提重0.20 kg,执行尽可能最大躯干前屈和后伸的任务。要完成这些任务,利用滑轮和无拉伸绳将负载与手柄连接(见图1)。

当听到“开始”命令后,受试者提起手柄,在节拍器的控制下执行4 s的试验任务;同时,实验者按下同步信号器(将在肌电图、测力台所测数据和Vicon三维摄像运动轨迹中留下同步信号)。每个任务重复3次,若有数据不理想,则重复该动作任务直至符合试验要求。

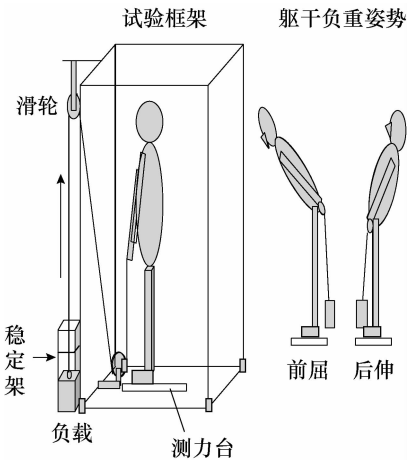


图1 实验方案的示意图  
 Fig.1 The diagram for experimental setup

### 1.3 数据处理

所有从试验仪器采集的参数通过 MicroCal Origin 7.0 软件处理,计算个体和总体平均值以及标准差,并进行单因素方差检验分析,显著性水平均定在 0.05。

**1.3.1 肌电资料的处理** 所有原始肌电信号通过 10~400 Hz 的带通滤波和正波化处理,做 50 点平均的平滑处理。取稳定 2 s 内的 MVC 肌电信号的平均值。每次试验的肌电图数据与对应肌肉的 MVC 平均值做标准化处理。将 3 次试验 MVC 百分比的各肌平均肌电信号再做平均,最后计算总体样本每块骨骼肌肌电活动的平均值和标准差。

**1.3.2 运动学资料的处理** 根据髂后上棘、第 1 骶骨和第 7 颈椎棘突点所成的角度计算躯干角位移,以 6 Hz 的低通滤波处理和计算 3 次试验的最大角位移均值和标准差,并认证在角位移中波动,或称为闪动(时间小于 0.5 s,波幅大于 0.5°)的个数和计算它们的均值和标准差。

**1.3.3 平衡资料的处理** 通过参数 3D 足底力矩和力计算出足底压力中心的前后和侧方位移曲线,做 5 点的平滑处理,计算测量最高幅度的积分值以及均值和标准差。

## 2 结果

### 2.1 肌电图

躯干保持最大前屈负重 0 和 20 kg 时,背部双侧的竖脊肌和多裂肌活动都显著地比腹侧肌多,臀

中肌活动最小,而负重时没有太多差别 ( $P < 0.05$ , 见表 3、图 2)。其原因可能是手部被臀部抬起造成腹侧肌无需用力,故腹侧肌活动也较小。躯干保持最大后伸负重 0 kg 时,腹侧肌的肌电活动高于背侧肌和臀中肌的肌电活动;但是在负重 20 kg 时,腹侧肌的肌电活动变小,臀中肌和背侧肌的活动增加,而且后伸时右侧背侧肌和臀中肌活动更明显 ( $P < 0.05$ , 见图 2、表 3)。左右两侧的肌电活动显示了同步增高的活动。

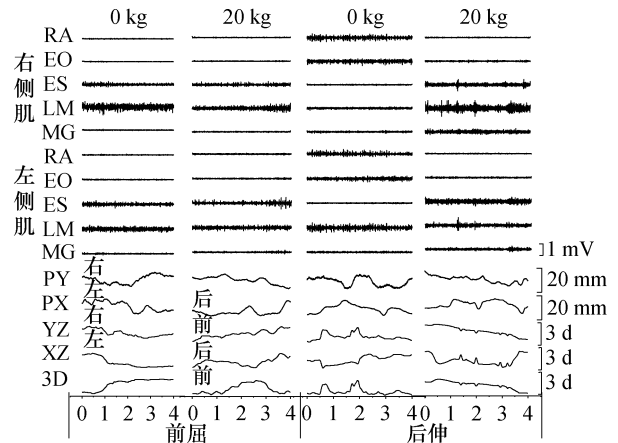


图2 受试者典型肌电图、躯干角度和 COP 示意图  
 Fig.2 Typical EMG, angular movement of trunk and COP displacements of the subject

图 2 中:纵坐标:mV 为肌电单位,mm 为 COP 单位,角度为躯干运动单位;横坐标轴:时间 s 为单位。同侧肌(右侧)和对侧肌(左侧)依次为腹直肌(RA)、腹外斜肌(EO)、竖脊肌(ES)、多裂肌(LM)、臀中肌(MG);PY 和 PX 为 COP 左右和前后的位移曲线;3D、YZ 和 XZ 分别为三维躯干 3D 角、侧方和前屈后伸位的角运动曲线

### 2.2 躯干角活动

在前屈和后伸、负重和非负重的任务下,尽管保持静态姿势,腰部仍有不同程度的前后和侧方活动,而且表现出腰部或脊柱的闪动现象。负重 0 kg (非负重)躯干前屈保持静止(重物在后)位时,躯干的 3D 角出现一定角度的波动(见图 2、表 4),分解 3D,躯干向前后(6.35°)和侧方(3.67°)的活动,出现较少的腰部闪动。负重 20 kg 时,躯干角的波动显著少于在 0 kg 时,但有稍微多的前后闪动(见图 2、表 4)。

负重 0 kg 下后伸(重物在前)位,3D 躯干活动尽管出现的波动稍大,但与前屈时无显著性差异;侧方和前后的活动角度也类同;腰部闪动较前屈时显

著更多(见表4)。负重20 kg时,无论是3D和分解3D的前后和侧方活动都显著大于前屈的情况,而且闪动次数也显著增多(见表4)。

### 2.3 中心压力的位移

在执行任务时,COP由于姿势的配合性调节会出现前后、侧方的位移。从表5可以看出,COP无论

在任何起始位置时,都会有显著向前的位移变化;而只有无负重后伸时,有偏右侧方位移。当观察最大COP位移时,无论是在非负重和负重情况前屈和后伸,向前方的位移都表现为显著大于侧方位移,而且前屈的位移总是大于后伸的位移,但是侧方位移仅在负重0 kg前屈时表现了显著的增大。

表3 静态均匀负重和非负重下标准化的平均肌电活动和标准差

Tab.3 Normalized average EMG and standard deviation under the static symmetric loading and unloading

骨骼肌	前屈		后伸		
	0 kg	20 kg	0 kg	20 kg	
右 侧	腹直肌	3.92 ± 1.30	4.09 ± 2.63	10.66 ± 1.24 * <sup>△</sup>	4.18 ± 2.09
	腹外斜肌	2.52 ± 1.91	2.29 ± 1.40	10.17 ± 2.13 * <sup>△</sup>	4.58 ± 1.23
	竖脊肌	9.91 ± 3.63 <sup>△</sup>	8.98 ± 4.96 <sup>△</sup>	4.07 ± 2.09	12.29 ± 4.21 * <sup>△</sup>
	多裂肌	16.94 ± 5.24 <sup>△</sup>	13.62 ± 6.50 <sup>△</sup>	7.41 ± 1.02	17.95 ± 1.50 * <sup>△</sup>
	臀中肌	3.80 ± 1.05	3.29 ± 1.86	6.95 ± 3.08	11.52 ± 3.23 <sup>△</sup>
左 侧	腹直肌	5.64 ± 3.26	6.09 ± 3.21	9.79 ± 1.77 <sup>△</sup>	4.92 ± 2.68
	腹外斜肌	4.43 ± 2.34	4.04 ± 0.87	8.00 ± 2.90	4.64 ± 2.42
	竖脊肌	11.77 ± 2.23 <sup>△</sup>	10.47 ± 3.90 <sup>△</sup>	3.70 ± 1.11	14.03 ± 1.87 * <sup>△</sup>
	多裂肌	14.68 ± 4.82 <sup>△</sup>	12.97 ± 3.04 <sup>△</sup>	10.89 ± 2.84 <sup>△</sup>	11.90 ± 1.11 <sup>△</sup>
	臀中肌	4.52 ± 1.87	4.13 ± 3.42	6.64 ± 3.90	8.97 ± 2.78

注: \*表示前屈或者后伸时,同名肌在负重20 kg与0 kg相比具有显著性差异,  $P < 0.05$ ;

<sup>△</sup>表示同一任务时,同侧肌或者对侧肌内5块肌肉相比具有显著性差异,  $P < 0.05$

表4 躯干最大平均角位移和闪动次数(平均值 ± 标准差)

Tab.4 Averaged maximum angular displacement and flashing trunk numbers

	躯干最大平均角位移幅度/(°)					
	3D		XZ		YZ	
	0 kg	20 kg	0 kg	20 kg	0 kg	20 kg
后伸	7.74 ± 3.25	6.04 ± 1.37 *	6.73 ± 3.45	8.09 ± 2.21 *	3.46 ± 1.23	6.06 ± 1.23 *
前屈	5.18 ± 2.36 <sup>▲</sup>	2.02 ± 0.75	6.35 ± 1.13 <sup>▲</sup>	2.57 ± 0.23	3.67 ± 1.34 <sup>▲</sup>	1.52 ± 0.73
躯干平均闪动次数						
后伸	8.23 ± 3.37 *	9.78 ± 2.15 *	9.6 ± 2.59 *	11.2 ± 2.26 *	8 ± 2.32 *	9 ± 1.39 *
前屈	2.05 ± 1.99	3.23 ± 2.51	2.33 ± 0.58 <sup>▲</sup>	1.4 ± 1.14	1.33 ± 0.47	1.2 ± 0.45

注: \*0 kg或20 kg前屈与后伸相对应角度间比较,  $P < 0.05$ ; <sup>▲</sup>0 kg与20 kg前屈或者后伸时3D、XZ、YZ角间比较,  $P < 0.05$

## 3 讨论

本文研究了均匀状态下躯干负重和非负重时主要躯干肌的活动规律,以及脊柱和姿势平衡有关的中心压力的活动变化。躯干肌无论在前屈或是后伸、负重或是无负重状态下都表现有竖脊肌和多裂

肌的较高的活动,除了无负重后伸时例外;而且左右侧明显存在协同活动。脊柱的闪动次数在所有后伸情况表现显著;表示躯体平衡稳定的COP有较大前后位的位移,而以前屈显著。

### 3.1 躯干位置和负重与肌电活动的关系

躯干负重后伸类似举重时或生活和工作中提起

表5 足底压力中心的位移(平均值±标准差)

Tab.5 Displacements of the plantar COP

COP	PX(前后)/mm	PY(左右)/mm	最大PX/mm	最大PY/mm
0 kg 后伸	8.69 ± 2.14 *	3.87 ± 1.17 *	8.69 ± 2.14 ▲	3.87 ± 1.17
	0.00	0.00		
0 kg 前屈	12.73 ± 3.61 *	4.77 ± 2.37 *	16.24 ± 4.20 ▲*	6.23 ± 3.63 *
	-3.51 ± 0.90	-1.74 ± 1.42		
20 kg 后伸	7.65 ± 3.13 *	0.94 ± 0.64	7.65 ± 3.13 ▲	2.69 ± 1.16
	0.00	-1.27 ± 0.71		
20 kg 前屈	8.73 ± 3.53 *	1.42 ± 0.73	14.60 ± 5.82 ▲*	2.43 ± 1.22
	-5.73 ± 2.71	-0.99 ± 0.40		

注:负值表示中心压力向后、向左移动。\*表示后伸或前屈时,前与后、左与右之间进行比较,  $P < 0.05$ 。▲表示0 kg或20 kg时,最大侧方和前后位移间均值的比较,  $P < 0.05$ 。\*表示0 kg或20 kg时,前屈与后伸位移间进行比较,  $P < 0.05$

重物的情况。躯干最大后伸增加了躯干上部机体的前方重力力矩,尤其在双手提重物的负重情况下,更需要较多作为主动肌的躯干背侧肌的活动。本研究观察到,负重时会有更多的竖脊肌和较多的多裂肌的积极活动。多数有关提重文献中都观察到躯干背侧的长肌积极活动,如竖脊肌等<sup>[6]</sup>;但是对于短肌,如多裂肌等,观察甚少,而在临床研究中常常提到重体力劳动者出现的腰痛常与多裂肌劳损有关<sup>[7]</sup>,实验间接证实了临床认识。因此,重体力工作中必须需要有某种程度上对腰部的保护。后伸还可见到较高的臀中肌活动,特别在负重后更加明显;这与骨盆和髋关节后倾,需要臀部肌维持必要的姿势平衡有关<sup>[8]</sup>。负重后伸时,为了提高对抗附加在躯干前方上的外力矩,除了有背侧肌的较大活动外,作为拮抗肌的腹侧肌会明显减少活动,以减轻背侧肌的负担<sup>[4]</sup>;但在无负重后伸的情况下,这种需求不再需要,反而出现了腹侧肌的高活动现象,似乎是为了稳定躯干保持维持后伸姿势的机体平衡<sup>[9]</sup>。在这种情况下,无负重后伸引起的牵张反射也会在某种程度上引起腹肌的高活动<sup>[10]</sup>。

观察双侧肌的活动情况,计算较大贡献肌肉的共活动比例。0和20 kg前屈时,竖脊肌84%、85%,多裂肌115%、105%,腹直肌69%、67%,腹外斜肌56%、56%;0和20 kg后伸时,竖脊肌33%、21%,多裂肌41%、96%,腹直肌108%、84%,腹外斜肌127%、98%。可见多裂肌不但在任何任务下有较大活动,而且在双侧的共活动贡献也较大;腹肌只在无负重后伸显现出大的共活动。但是这种双侧

肌肉的活动也并非均匀,故脊柱或躯干保持静态前屈或后伸状态会有某种程度闪动或波动。

### 3.2 躯干或脊柱的运动

躯干以个体自然地保持最大静态前屈和后伸的位置、均匀负重和非负重,维持4 s。这种情况需要脊柱周围的骨骼肌提供维持这种状态的姿势<sup>[11]</sup>。由于脊柱是一个多自由度的关节,要做到脊柱或躯干保持没有一点波动是不可能的。在本实验中,脊柱在保持任务姿势的同时还出现了一定程度的角位移,范围在 $1^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 。尽管3D角没有显示后伸时负重和负重间角位移的特别明显改变,同时负重后,侧方和前后位也仅倾向于稍微的角位移增加,但是后伸负重无论在3D、还是侧方和前后位移位都比前屈负重有显著增大;另一方面,无负重前屈有显著的大大的脊椎角位移,负重时反而减小。可以看出腰部脊椎的角位移与负重无关,而与躯干保持姿势的任务有关。尤其是在负重前屈时,手被臀部抬高,受力点的位置发生改变,造成作用于躯干上的力和力矩减少。由于生理结构的特征<sup>[12]</sup>,后伸时则不会发生。因此,后伸负重任务造成了肌肉必须有更大的用力和调节,以保持脊椎或躯干的稳定。同时,后伸无论在3D、还是侧方和前后位都表现了较多的脊椎闪动活动,进一步证实了这种与任务和解剖结构有关的力学关系。

躯干后伸提重的方式在工作环境中很常见。如果说通过宽厚的负重腰部皮带可以稳定腰部脊椎以减少腰部损伤<sup>[13]</sup>,那么,设计一个前部有一定厚度通过皮带固定的高垫,类似前屈时臀部抬高提重手

部的情况,可以一定程度地分流均匀提重受力点于耻骨联合的位置,不但可以减轻施加于躯干的力矩,同时还可以稳定躯干,保护重体力劳动者的工作健康。

### 3.3 姿势与任务的关系

由于实验中受试者必需保持直腿,所以利用膝关节来调节姿势的功能受到限制,髋关节和踝关节成为了姿势调节的关节<sup>[14]</sup>。但是到底髋关节和踝关节如何活动不是实验的主题,故只能通过足底COP和其他参数间接地来推论姿势的调节情况。无论在后伸还是前屈、负重还是非负重都表现了前移为主COP,躯干角运动也倾向于以XZ轴为大的表现,似乎只有保持重心向前才能维持整个机体的直立平衡。如果任务不需要膝关节伸直,降低重心,髋关节前屈也能使COP前移<sup>[15]</sup>。尽管有前移的COP以改变重心,但是保持直立的膝关节也必然带来一定的COP在YZ轴上的位移,而且负重20kg后伸的高臀中肌活动,说明踝关节和髋关节周围肌也可能参与到任务的姿势稳定当中。因此,较大的COP前后位移和稍微较小的COP侧方位移是踝关节维持机体姿势平衡的主要特征<sup>[16]</sup>。

## 4 结论

后伸状态增加了背侧肌的活动,而且多裂肌更明显;同时也增加了腰部角位移度和闪动次数,特别在后伸提重时这种增加更为显著。后伸负重时脊柱不稳定出现的微小运动,都将使躯干产生微小的摆动或闪动,这就使临床闪腰发生的风险增加。因此,在工作环境中,提重时设计在骨盆前方抬高的皮带也许可以增加脊柱提重时的稳定性,从而降低发生闪腰的风险机率。

### 参考文献:

[1] 倪朝明. 下腰痛康复研究进展—ISPRM-2003 布拉格会议报道[J]. 中国康复医学杂志, 2003, 18(11): 651-652.  
[2] 余洪俊, 吴宗耀, 刘宏亮. 急性下腰痛者竖脊肌和臀大肌功能变化的研究[J]. 中国康复医学杂志, 2003, 18(6): 342-344.  
[3] Lawrence BM, Mirka GA, Buckner GD. Adaptive system identification applied to the biomechanical response of the human trunk during sudden loading [J]. J Biomech, 2005, 38(12): 2472-2479.  
[4] Zetterberg C, Anderson GB, Schultz AB. The activity of in-

dividual trunk muscles during heavy physical loading [J]. Spine, 1987, 12(10): 1035-1040.  
[5] Silfies SP. Trunk muscle recruitment patterns in specific chronic low back pain populations [J]. Clin Biomech, 2005, 20(5): 465-473.  
[6] Koumantakis GA, Watson PJ, Oldham JA. Trunk muscle stabilization training plus general exercise versus general exercise only: Randomized controlled trial of patients with recurrent low back pain [J]. Phys Ther, 2005, 85(3): 209-225.  
[7] Kamaz M, Kiresi D, Oğuz H, et al. CT measurement of trunk muscle areas in patients with chronic low back pain [J]. Musculoskelet Imagine, 2007, 13(3): 144-148.  
[8] Sarabon N, Polona P, Burggraf S. Proposal for progressive loading of the hip abductors under mechanically unstable conditions: An electromyography study [J]. Eur J Transl Myol, 2010, 1(4): 187-192.  
[9] Hemborg B, Moritz U, Löwing H. Intra-abdominal pressure and trunk muscle activity during lifting. IV. The causal factors of the intra-abdominal pressure rise [J]. Scand J Rehabil Med, 1985, 17(1): 25-38.  
[10] Nelson JM, Walmsley RP, Stevenson JM. Relative lumbar and pelvic motion during loaded spinal flexion/extension [J]. Spine, 1995, 20(2): 199.  
[11] 孟庆华, 鲍春雨, 刘晋浩. 人体脊柱全颈椎三维有限元模型研究与应用[J]. 医用生物力学, 2009, 24(3): 178-182.  
Meng QH, Bao CY, Liu JH. Study on three-dimensional finite element model of cervical spine and its application [J]. J Med Biomech, 2009, 24(3): 178-182.  
[12] 姜永立, 邹远文, 黄学进, 等. 人体脊柱三维运动测量及力学加载进展[J]. 医用生物力学, 2009, 24(4): 311-316.  
Jiang YL, Zhou YW, Huang XJ. Advance in measuring and loading methods of 3-dimension human spine movement [J]. J Med Biomech, 2009, 4(4): 311-316.  
[13] Banerjee P, Brown SH, Howarth SJ, et al. Torso and hip muscle activity and resulting spine load and stability while using the ProFitter 3-D cross trainer [J]. J Appl Biomech, 2009, 25(1): 73-84.  
[14] Hodges PW, Gandevia SC. Changes in intra-abdominal pressure during postural and respiratory activation of the human diaphragm [J]. J Appl Physiol, 2000, 89(3): 967-976.  
[15] Jo S, Massaqui SG. A model of cerebrocerebello-spino-muscular interaction in the sagittal control of human walking [J]. Biol Cybern, 2007, 96(3): 279-307.  
[16] 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, Wan FT, et al. Influence of aging on neuromuscular reaction during lateral perturbation [J]. J Med Biomech, 2011, 26(3): 286-290.