

· 临床研究 ·

慢性腰痛患者深层多裂肌非线性肌电信号的特征分析

张珊珊¹ 张振发¹ 黄诗敏¹ 伍盈¹ 樊亮花¹ 吴文² 王楚怀¹

¹中山大学附属第一医院康复医学科, 广州 510080; ²南方医科大学珠江医院康复医学科, 广州 510282

通信作者: 王楚怀, Email: rehab@163.com

【摘要】 目的 采用非线性动力学方法提取慢性腰痛(cLBP)患者与健康对照者深度多裂肌不同状态下肌电图(EMG)信号中所蕴含的非线性动力学信息,比较二者的非线性指标 Lempel-Ziv(LZ)复杂度的变化特点。**方法** 选取符合标准的cLBP患者25例设为cLBP组,另选取性别、年龄、教育程度等相匹配的正常受试者28例设为正常组。采用sEMG结合丝电极记录2组受试者腰部L₄深层多裂肌EMG信号,分析静息状态、最大肌力、耐力收缩、持续收缩后放松等4种不同状态下多裂肌非线性特征LZ复杂度的差异,并比较cLBP组腰部痛侧与非痛侧多裂肌LZ复杂度的差异性。采用Pearson相关分析cLBP组的疼痛持续时间、疼痛强度和功能障碍指数与LZ复杂度的相关性。**结果** cLBP组患者的VAS评分平均为(4.00±1.04)分,持续疼痛时间平均为(5.96±4.69)年,ODI指数平均为(17.12±10.49)。cLBP组患者肌电信号采集各时间点(进针时、退针后、肌肉收缩时和动作终止时)的VAS评分均显著高于正常组,差异均有统计学意义($P<0.01$)。cLBP组在肌力测试、耐力测试和持续收缩后放松的深层多裂肌LZ复杂度与正常组比较,差异均有统计学意义($P<0.01$)。2组受试者肌力测试、耐力测试和持续收缩后放松的深层多裂肌LZ复杂度与组内静息状态比较,差异均有统计学意义($P<0.01$);2组受试者持续收缩后放松的深层多裂肌LZ复杂度与组内肌力测试和耐力测试时比较,差异均有统计学意义($P<0.01$)。cLBP组疼痛持续时间与其深层多裂肌最大等长收缩(肌力测试时和耐力测试时)的LZ复杂度呈显著负相关($P<0.01$)。**结论** 持续的疼痛刺激会影响大脑对深层多裂肌的协调控制,进而导致中枢对核心稳定肌肉的控制能力下降,提示中枢参与核心稳定肌调控障碍可能是cLBP病因机制的关键因素。

【关键词】 腰痛; 深层多裂肌; 非线性肌电特征; LZ复杂度

基金项目: 国家自然科学基金(82172532、82102677)、广东省基础与应用基础研究基金(2019A1515110628)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.09.010

Nonlinear analysis of electromyography signals from the deep lumbar multifidus of patients with chronic low back pain

Zhang Shanshan¹, Zhang Zhenfa¹, Huang Shimin¹, Wu Ying¹, Fan Lianghua¹, Wu Wen², Wang Chuhuai¹

¹Department of Rehabilitation Medicine, The First Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510080, China; ²Department of Rehabilitation Medicine, Zhujiang Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510282, China

Corresponding author: Wang Chuhuai, Email: rehab@163.com

【Abstract】 Objective To explore any changes in the electromyographic (EMG) signals from the deep lumbar multifidus (DM) of patients with chronic low back pain (cLBP). **Methods** Twenty-five cLBP patients formed the cLBP group, while twenty-eight healthy counterparts similar in sex, age and education background were chosen as the control group. EMG signals were recorded during maximum isometric voluntary contraction of the DM. Two-way repeated measures analysis of variance was applied to compare the two groups' signals' Lempel-Ziv (LZ) complexity values at rest and during the maximum strength, strength endurance and relaxation stages of contraction. Pearson correlation coefficients were computed relating the LZ complexity to pain duration and intensity, as well as to Oswestry disability index (ODI) values in the cLBP group. **Results** The cLBP patients reported a mean symptom duration of 5.96±4.69 years, with an average VAS score of 4.00±1.04 and ODI of 17.12±10.49. They reported greater pain intensity during needle insertions, needle removal, muscle

contraction and relaxation than the healthy controls. There were significant differences in LZ complexity among the four stages of contraction with all of the subjects. The LZ complexity was significantly lower in the maximum strength and strength endurance states, but higher in the relaxation after contraction states in the cLBP group. Pain duration was negatively correlated with the nonlinear index of DM during contraction. **Conclusion** Continuous pain stimulation will affect the coordinated control of the deep multifidus muscle, leading to decreased control of core muscles via the central nervous system. That provides insight into the mechanisms underlying activation and coordinated control during chronic pain.

[Key words] Low back pain; Lumbar multifidus; Electromyography; Lempel-Ziv complexity
Funding: National Natural Science Foundation of China (82172532, 82102677), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2019A1515110628)
DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.09.010

腰痛(low back pain, LBP)是人类最常见的骨骼肌肉疼痛,终生患病率高达 84%,是患者至医院就诊的最常见原因之一^[1]。目前普遍认为,腰椎生物力学失调是导致慢性腰痛(chronic LBP, cLBP)的关键因素。深层多裂肌作为主动收缩控制系统的主要成分,对 L_{4/5} 节段的稳定性贡献高达 2/3^[2],其功能和形态对脊柱起着关键的稳定作用,而腰椎的稳定性还同时受中枢神经系统调控机制的影响^[2]。疼痛改变脑内各区域间的信息流动整合而影响大脑的功能和行为,进而影响腰椎核心肌肉控制系统^[3-4],提示中枢参与核心稳定肌姿势调控障碍可能是 cLBP 病因机制的关键因素。

本课题组既往的研究已采用表面肌电图(surface electromyography, sEMG)分析系统结合丝电极观察了 cLBP 患者深层多裂肌肌电图(electromyography, EMG)信号的时频特征变化,发现在最大等长收缩过程中,cLBP 的肌电时域和频域指标均存在明显异常^[5]。本课题组认为,这种线性分析方法只能反映多个运动单位的电变化,对数据的依赖性太强,对于干扰和噪声也太敏感,存在信号不准的问题;而非线性分析方法所需数据量少,且具有一定抗干扰能力,可以更准确地反映肢体活动时局部肌肉的活动和功能状态。

Lempel-Ziv(LZ)复杂度是一种新的对肌电信号进行量化并刻画其周期性的指标,主要用于非平稳性肌电信号的特征分析^[6]。LZ 复杂度主要是从神经调控的角度分析完成某个动作中枢调控机制的复杂性,可一定程度反映肢体活动时局部肌肉的活动状

态。本研究拟采用 sEMG 结合表面电极和丝电极技术采集深层多裂肌非线性肌电信号,分析 LZ 复杂度在四种状态下(静息、最大肌力、耐力及持续收缩后放松)的变化趋势,探讨 cLBP 腰部核心稳定肌在放松和收缩时中枢参与调控的复杂程度,以期进一步明确 cLBP 的病因机制。

对象与方法

一、研究对象

纳入标准:①腰痛病程≥3 个月,无根性症状,年龄在 20~55 岁,视觉模拟评分(visual analogue scale, VAS)^[7]为 3~6 分;②右利手;③体重指数(body mass index, BMI)在国际标准的±10%范围内;④无严重脊柱侧凸,无腰部外伤和手术史;⑤无严重心、肝、肾疾病及其他严重的躯体疾病;⑥无 MRI 检查禁忌证且脑内未见异常病灶。

排除标准:排除易出血体质、孕妇及女性行经者。完善 X 线检查排除脊柱侧凸畸形、椎弓峡部裂、骨质疏松、强制性脊柱炎及腰椎结核等引起的特异性腰痛。

选取符合上述标准的 cLBP 患者 25 例将其设为 cLBP 组,另选取性别、年龄、教育程度等相匹配的正常受试者 28 例设为正常组。2 组受试者的性别、平均年龄、平均受教育程度和平均 BMI 组间比较,差异均无统计学意义($P>0.05$),详见表 1。本研究经中山大学附属第一医院伦理委员会审核批准[(2017)250],所有受试者均签署知情同意书。

二、研究方法

(一)常规评估项目

表 1 2 组受试者的基本临床信息

组别	例数	性别(例)		平均年龄 (岁, $\bar{x}\pm s$)	平均受教育年限 (年, $\bar{x}\pm s$)	平均 BMI (kg/m^2 , $\bar{x}\pm s$)
		男	女			
cLBP 组	25	11	14	35.40±7.41	13.24±2.80	21.69±2.03
正常组	28	14	14	33.18±5.29	13.54±1.37	20.88±2.09

采用 VAS 评分和 Oswestry 功能障碍指数 (Oswestry disability index, ODI)^[7] 对 cLBP 组患者进行腰部疼痛和功能评价,并记录其疼痛持续的时间。另采用 VAS 评分评估 2 组受试者肌电信号采集各时间点 (进针时、退针后、肌肉收缩时和动作终止时) 的疼痛程度。

(二) 肌电信号采集和分析方法

采用绍兴产 UMI-SE-I 型表面肌电分析系统记录受试者腰部肌肉的肌电活动。受试者俯卧于治疗床上,双臂放松置于躯干两侧,深层多裂肌信号采集以 L₄ 棘突水平为中心,向外侧旁开 2 cm 为肌电记录点,两记录电极相距 0.5~1 cm,地电极位于记录电极外 4~5 cm 处。实验开始前 5 min,于电极定位皮肤表面涂抹一层复方利多卡因软膏进行局部麻醉,以减轻针头刺破皮肤时疼痛。皮肤用 75% 医用酒精消毒后,双侧记录电极于定位处快速刺入皮下,垂直进针 3~5 cm 导入丝电极至 L₄ 水平深层多裂肌,触及横突时缓慢将针头退 0.5 cm,用超声确定针尖位置后退出针头;双侧地电极于定位处垂直进针 2.0 cm 导入丝电极,稍退 0.3~0.5 cm 后退出针头。胶布固定皮肤外置丝电极后,采用鳄鱼夹电极线一端连接丝电极导电末端,一端连接肌电图机金属电极。原始肌电信号取样率>3000 Hz,分辨率为 0.1 μV,通频带宽为 15~1000 Hz,共模抑制比>110 db,噪音<1 μV。

采集受试者双侧腰部深层多裂肌静息和收缩时的 EMG 信号,包括静息状态、肌力测试 (最大肌力) 时、耐力测试时 (耐力收缩)、持续收缩后放松状态,依次进行。将检测过程中采集并存储的 EMG 信号经光纤传输至计算机,提取深层多裂肌在上述 4 种不同状态下的肌电信号的非线性动力学特征 LZ 复杂度,取平均值=(左侧 LZ 复杂度+右侧 LZ 复杂度)/2。具体步骤如下。

- 1. 静息状态:采集受试者多裂肌放松时的肌电值,持续 30 s,振幅<5 μV 进行下一步骤。
- 2. 肌力测试 (最大肌力):嘱受试者进行多裂肌最大随意等长收缩,即以最大力量做 Biering-Sorensen 实验 (Biering Sorensen test, BST),持续 5 s,休息 10 s,共记录 3 次,取其平均值。
- 3. 耐力测试 (耐力收缩):受试者于肌力测试后休

- 息 2~3 min,然后以最大力量做 BST 运动,持续 30 s。
- 4. 放松:嘱受试者保持动作,不能耐受时即放松休息,记录受试者肌肉放松 30 s 后的肌电信号数据。

三、统计学方法

采用 SPSS 17.0 版统计学软件对本研究所得数据进行分析。计量资料采用 ($\bar{x}\pm s$) 表示。方差齐时,组间比较采用单因素方差分析 (one-way ANOVA),多重比较采用 Bonferroni 校正;方差不齐时,组间比较采用 Kruskal-Wallis H 检验,多重比较采用 Tamhane's T2 校正。采用配对 *t* 检验比较 cLBP 组不同状态下腰部痛侧与非痛侧多裂肌 LZ 复杂度的差异性。为了进一步分析疼痛持续时间、疼痛强度和功能障碍对多裂肌非线性肌电信号的影响,采用 Pearson 相关分析对 LZ 复杂度与 cLBP 组的腰痛持续时间、VAS 评分、ODI 评分的相关性进行分析。所有数据统计结果均。以 *P*<0.05 为差异有统计学意义。

结 果

一、2 组受试者疼痛感知比较

cLBP 组患者的 VAS 评分平均为 (4.00±1.04) 分,持续疼痛时间平均为 (5.96±4.69) 年,ODI 指数平均为 (17.12±10.49)。cLBP 组患者肌电信号采集各时间点 (进针时、退针后、肌肉收缩时和动作终止时) 的 VAS 评分均显著高于正常组,差异均有统计学意义 (*P*<0.01) (表 2)。

二、2 组受试者各种状态下深层多裂肌非线性肌电信号 LZ 复杂度差异

cLBP 组在肌力测试、耐力测试和持续收缩后放松的深层多裂肌 LZ 复杂度与正常组比较,差异均有统计学意义 (one-way ANOVA, *F* = 27.89/117.93, *P*<0.05),详见表 3。

2 组受试者肌力测试、耐力测试和持续收缩后放松的深层多裂肌 LZ 复杂度与组内静息状态比较,差异均有统计学意义 (*P*<0.01);2 组受试者持续收缩后放松的深层多裂肌 LZ 复杂度与组内肌力测试和耐力测试时比较,差异均有统计学意义 (*P*<0.01);2 组受试者肌力测试时的深层多裂肌 LZ 复杂度与组内耐力测试时比较,差异均无统计学意义 (*P*>0.05),详见表 3。

表 2 2 组受试者肌电信号采集时的 VAS 评分比较 (分, $\bar{x}\pm s$)

组别	例数	进针时	退针后	肌肉收缩时	动作终止时
cLBP 组	25	3.92±1.26 ^a	1.08±0.86 ^a	3.36±1.66 ^a	3.72±1.54 ^a
正常组	28	2.54±0.84	0.42±0.21	0.64±0.46	1.57±1.13

注:与正常组比较,^a*P*<0.05

表 3 2 组受试者各种状态下多裂肌肌电 LZ 复杂度的差异($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	静息状态	肌力测试	耐力测试	持续收缩后放松
cLBP 组	25	0.58±0.09	0.69±0.06 ^{ab}	0.67±0.06 ^{ab}	0.49±0.11 ^a
正常组	28	0.57±0.09	0.73±0.04 ^{ac}	0.70±0.03 ^{ac}	0.39±0.11 ^{ac}

注:与组内静息状态比较,^a $P<0.05$;与组内持续收缩后放松比较,^b $P<0.05$;与 cLBP 组比较,^c $P<0.05$

三、cLBP 组各种状态下腰部痛侧与非痛侧多裂肌 EMG 信号 LZ 复杂度的差异性

cLBP 组静息状态、肌力测试、耐力测试和持续收缩后放松腰部痛侧的深层多裂肌 LZ 复杂度与组内非痛侧比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)(表 4)。

表 4 cLBP 组各种状态下痛侧与非痛侧多裂肌肌电 LZ 复杂度的差异($\bar{x}\pm s$)

组别	静息状态	最大肌力	耐力收缩	持续收缩后放松
痛侧	0.60±0.12	0.69±0.05	0.68±0.05	0.48±0.15
非痛侧	0.57±0.11	0.69±0.11	0.66±0.13	0.52±0.12

四、cLBP 组多裂肌肌电非线性指标与其行为学指标的相关分析

cLBP 组疼痛持续时间与其深层多裂肌最大等长收缩[(肌力测试时($r=-0.662$)和耐力测试时($r=-0.665$)]时的 LZ 复杂度(非线性肌电指标)呈显著负相关($P<0.001$),但与其深层多裂肌非收缩状态[静息状态($r=0.02$)和持续收缩后放松($r=0.02$)]的 LZ 复杂度无明显相关关系($P>0.05$)。

cLBP 组的 VAS 评分与其静息状态($r=0.35$)、肌力测试($r=-0.19$)、耐力测试($r=-0.16$)和持续收缩后放松($r=0.07$)的深层多裂肌的 LZ 复杂度均无明显相关关系($r=0.35/-0.19/-0.16/0.07, P>0.05$)。cLBP 组的 ODI 指数与其静息状态($r=0.20$)、肌力测试($r=0.22$)、耐力测试($r=-0.16$)和持续收缩后放松($r=0.01$)的深层多裂肌的 LZ 复杂度均无明显相关关系($P>0.05$)。

讨 论

运动神经系统是一个高度非线性的动力学系统,提取肌电信号中所蕴含的非线性动力学信息可以提供更多、更有效的量化分析指标,能更准确地反映肌肉的活动和功能状态。LZ 复杂度是一种表征时间序列里出现新模式速率的非平稳性肌电信号分析方法,其变化特征是参与肌肉活动的运动单元数量、运动单元放电频率、动作电位神经传导速度的综合反映^[6]。研究发现,LZ 复杂度对 LBP 和正常人有很好的区分度,cLBP 患者双侧腰部浅层肌肉纵轴 L₅/S₁ 节段的 LZ 复杂度降低^[8],但对腰部深层肌肉的 LZ 复杂度变化尚不清楚。基于本课题组既往的研究结果,sEMG 分析系统结合改良丝电极是一种可选择性评估单一靶向深

层肌肉活动水平和功能状态的有效方法,能够可靠、灵敏地检测出腰部深层多裂肌的电活动^[9];采用非线性肌电分析方法,可以解决线性分析方法对干扰和噪声敏感导致信号不准的问题,是对时、频域特征分析的补充。本研究结果显示,在等长运动负荷过程中,cLBP 患者深层多裂肌非线性指标——LZ 复杂度异常,提示持续伤害性刺激可能会影响大脑对核心稳定肌的调节和控制能力。通过解析 cLBP 大脑功能活动变化对腰部稳定肌运动调控的影响,有助于进一步明确 cLBP 病因机制中可能存在的因素。

深度多裂肌的功能状态变化对局部稳定肌群乃至腰椎的稳定起着关键作用,其功能受损可能是腰部功能紊乱的潜在和本质问题。本研究发现,cLBP 组的深层多裂肌最大随意收缩中(肌力测试时),其 LZ 复杂度显著低于正常组,提示疼痛可能引起多裂肌有序性信号减弱。导致这一结果的可能原因,是由于持续的疼痛刺激所引发的大脑抑制作用会影响大脑对深层多裂肌的协调控制,进而导致中枢对核心稳定肌肉的控制能力下降^[10]。同时,本研究还发现,疼痛持续时间与 cLBP 组深层多裂肌最大等长收缩时(耐力测试时)的 LZ 复杂度呈显著负相关,即疼痛持续时间越长,LZ 复杂度越低,提示随着病程延长,中枢对核心稳定肌肉的调节和控制能力下降,而肌肉功能的下降可能进一步影响身体姿势的整体控制。

cLBP 患者多裂肌 LZ 复杂度均值变化表现为最大收缩时最高,静息状态时次之,持续收缩后放松最低的变化规律趋势,这与既往本课题组针对正常人深层多裂肌非线性肌电特征的研究结果存在一致^[9]。本研究中,2 组受试者持续收缩后放松时的深层多裂肌 LZ 复杂度较静息状态均明显下降,提示 cLBP 患者深层肌肉持续收缩疲劳后仍存在瞬间放松效应。然而,cLBP 组深层多裂肌 LZ 复杂度在持续收缩后放松时仍显著高于正常组,提示长期疼痛刺激下,cLBP 患者的深层肌肉即使处于放松状态时,中枢对其的调控作用仍持续存在,这一结果进一步证明,持续疼痛刺激引起腰部核心稳定肌肉内在的收缩-放松功能失调,局部稳定肌失衡是引起腰痛的重要病因^[11]。

深层多裂肌在持续收缩时存在一定的对称性收缩,这对维持腰椎稳定性及控制腰椎活动起到最为重要的作用^[12]。研究发现,健康人群双侧多裂肌在最大

随意等长收缩运动中是对称收缩的^[12]。本研究显示, cLBP 组静息状态、肌力测试、耐力测试和持续收缩后放松腰部痛侧的深层多裂肌 LZ 复杂度与组内非痛侧比较, 差异均无统计学意义 ($P>0.05$), 这与既往的结果示“痛侧多裂肌激活程度和活动水平显著低于非痛侧不同^[2]”, 说明即使在非对称性疼痛刺激下, 中枢对深层多裂肌的调节与控制仍表现为整体的、对称性的, 与单侧疼痛的临床特征无明显关系。本研究结果中, VAS 评分、ODI 功能障碍指数与 cLBP 深层多裂肌各种状态下的 LZ 复杂度均无明显相关关系, 也更好地证明了这一点。

cLBP 患者的 VAS 评分均明显高于正常组, 提示其疼痛感知敏感性增高、阈值降低。慢性疼痛引发大脑不同区域功能改变, 影响了患者对疼痛的认知、情绪, 加上对疼痛的预期, 多维度角度影响疼痛加工脑区 (如岛叶、前额叶激活) 和神经环路, 使得大脑发出不准确或错误信号以尽可能地回避疼痛刺激, 导致患者对伤害性刺激的不同反应^[13-14]。本研究发现, 2 组受试者静息状态的深层多裂肌 LZ 复杂度均显著低于其肌肉收缩状态 (肌力测试和耐力测试时), 提示在静息状态下, 中枢对核心肌肉的控制较收缩时少, 这是一个节省能量现象——健康与日常活动之间的关系与生理系统适应刺激的能力有关^[15], 慢性疼痛会使 cLBP 患者的运动刺激不足, 导致其大脑效能下降^[15]。本研究结果还显示, cLBP 患者多裂肌持续收缩后放松的短期内 (放松时) LZ 复杂度仍存在明显降低的变化趋势, 且显著低于静息状态。本课题组认为, 这可能与肌肉持续收缩后的疲劳感引发大脑不同区域的反应以回避不适刺激有关, 可导致中枢对脊髓运动神经元调控水平明显降低, 其机制尚需进一步探讨。

本研究对非线性指标 LZ 复杂度在 cLBP 患者深层多裂肌不同状态的分布特征及其可能的中枢调节机制作了进一步分析, 探讨了中枢神经系统在肌肉收缩时起到重要的调控作用。本研究结果全面地反映了持续疼痛对腰部多裂肌活动和功能状态的影响和中枢参与核心稳定肌调控可能的病因机制, 揭示在持续疼痛刺激下, 中枢对腰部稳定肌的运动控制模式会发生改变, 而大脑功能活动的改变可能是腰椎运动障碍和疼痛持续存在的关键病因。这为我们更好地理解腰痛深层神经肌肉运动模式, 疼痛相关过程的中枢参与的可能机制及其对神经肌肉的调控机理, 加强和促进 cLBP 防治工作, 以及制定更具针对性, 且有效的康复方案提供了新的思路。后期, 本课题组将采用神经电生理技术将肌肉功能形态变化作为 cLBP 个性化运动方案的依据, 并将这些功能形态学参数作为客观指标进行疗效评价、功能转归预测和后期的跟踪随访。

参 考 文 献

- [1] Maher C, Underwood M, Buchbinder R. Non-specific low back pain [J]. *Lancet*, 2017, 389(10070): 736-747. DOI: 10.1016/S0140-6736(16)30970-9.
- [2] Freeman MD, Woodham MA, Woodham AW. The role of the lumbar multifidus in chronic low back pain: a review [J]. *PM R*, 2010, 2(2): 142-146. DOI: 10.1016/j.pmrj.2009.11.006.
- [3] Davis DA, Ghantous ME, Farmer MA, et al. Identifying brain nociceptive information transmission in patients with chronic somatic pain [J]. *Pain Rep*, 2016, 1(4): e575. DOI: 10.1097/PR9.0000000000000575.
- [4] Kregel J, Meeus M, Malfliet A, et al. Structural and functional brain abnormalities in chronic low back pain: a systematic review [J]. *Semin Arthritis Rheum*, 2015, 45(2): 229-237. DOI: 10.1016/j.semarthrit.2015.05.002.
- [5] Zhang SS, Xu Y, Han XL, et al. Functional and morphological changes in the deep lumbar multifidus using electromyography and ultrasound [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 6539. DOI: 10.1038/s41598-018-24550-5.
- [6] Otu HH, Sayood K. A new sequence distance measure for phylogenetic tree construction [J]. *Bioinformatics*, 2003, 19(16): 2122-2130. DOI: 10.1093/bioinformatics/btg295.
- [7] 李士春, 郭昭庆. 评分系统在腰椎疾患中的应用 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2005, 15(12): 758-761. DOI: 10.3969/j.issn.1004-406X.2005.12.015.
- [8] 王健, 方红光, Kankaanpää M. 基于表面肌电信号变化的慢性下背痛诊断和运动疗效评价 [J]. *航天医学与医学工程*, 2005, 18(4): 287-292. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0837.2005.04.012.
- [9] 张珊珊, 吴文, 许轶, 等. 不同性别健康人群腰部深层多裂肌肌电差异的研究 [J]. *中国康复医学杂志*, 2018, 33(4): 413-418. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2018.04.008.
- [10] Knox MF, Chipchase LS, Schabrun SM, et al. Anticipatory and compensatory postural adjustments in people with low back pain: a protocol for a systematic review and meta-analysis [J]. *Syst Rev*, 2016, 5: 62. DOI: 10.1186/s13643-016-0242-4.
- [11] Masse-Alarie H, Beaulieu LD, Preuss R, et al. Corticomotor control of lumbar multifidus muscles is impaired in chronic low back pain: concurrent evidence from ultrasound imaging and double-pulse transcranial magnetic stimulation [J]. *Exp Brain Res*, 2016, 234(4): 1033-1045. DOI: 10.1007/s00221-015-4528-x.
- [12] Mouthon A, Taube W. Intracortical inhibition increases during postural task execution in response to balance training [J]. *Neuroscience*, 2019, 401: 35-42. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2019.01.007.
- [13] Malfliet A, Coppiniers I, Van Wilgen P, et al. Brain changes associated with cognitive and emotional factors in chronic pain: a systematic review [J]. *Eur J Pain*, 2017, 21(5): 769-786. DOI: 10.1002/ejp.1003.
- [14] Buckner RL, DiNicola LM. The brain's default network: updated anatomy, physiology and evolving insights [J]. *Nat Rev Neurosci*, 2019, 20(10): 593-608. DOI: 10.1038/s41583-019-0212-7.
- [15] Raichlen DA, Alexander GE. Adaptive capacity: an evolutionary neuroscience model linking exercise, cognition, and brain health [J]. *Trends Neurosci*, 2017, 40(7): 408-421. DOI: 10.1016/j.tins.2017.05.001.

(修回日期: 2023-07-15)

(本文编辑: 阮仕衡)