

基于表面肌电信号分析的退行性腰椎后凸患者手术前、后椎旁肌肉功能变化研究

李永忠 朱一霄 陈文君 戴洁 周玲 李建华

【摘要】 目的 观察退行性腰椎后凸畸形(LDK)患者手术前、后椎旁肌肉表面肌电(sEMG)信号特征。**方法** 共纳入符合临床诊断标准的LDK患者30例,均给予椎弓根减压截骨术治疗。于手术前、手术后3个月时分别采用sEMG技术评估患者椎旁肌肉肌电变化情况,分析患者弯腰拾物过程中椎旁肌平均肌电值(AEMG)及平均功率频率斜率(MPFs)变化,并与同龄健康人群(对照组)进行对比。**结果** 术前LDK组患者在静态站立时,其椎旁肌AEMG值明显高于对照组水平($P<0.05$),术后明显低于术前水平($P<0.05$),但仍显著高于对照组水平($P<0.05$)。术前LDK组患者在躯干伸展时,其L_{1,2}节段椎旁肌AEMG值明显低于对照组水平($P<0.05$),术后明显高于术前水平($P<0.05$),此时与对照组间差异无统计学意义($P>0.05$)。术前LDK组L_{4,5}节段椎旁肌AEMG值明显低于对照组水平($P<0.05$);术后较术前无明显变化($P>0.05$),仍显著低于对照组水平($P<0.05$)。术前LDK组患者拾物保持阶段其椎旁肌MPFs值显著低于对照组($P<0.05$),术后显著高于术前水平,但仍显著低于对照组水平($P<0.05$)。**结论** LDK患者存在明显椎旁肌肉无力及严重疲劳,椎弓根减压截骨术可在短期内显著改善患者椎旁肌肉功能状态。

【关键词】 腰椎退行性后凸; 表面肌电图; 神经肌肉功能; 椎旁肌

The functional status of the paraspinal muscles among patients with degenerative lumbar kyphosis before and after surgery

Li Yongzhong*, Zhu Yixiao, Chen Wenjun, Dai Jie, Zhou Ling, Li Jianhua. * Department of Rehabilitation Medicine, The Sir Run Run Shaw Hospital, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China

Corresponding author: Li Jianhua, Email: zjdxsyfjkf@126.com

【Abstract】 Objective To study any changes in the surface electromyography of the paraspinal muscles before and after surgery in patients with degenerative lumbar kyphosis. **Methods** Thirty patients with lumbar degenerative kyphosis (LDK) were enrolled and underwent pedicle subtraction osteotomy. Surface electromyograms were recorded before the operation and 3 months afterward to observe the myoelectric activity of the paraspinal muscles. The electromyograms were also compared with those of healthy counterparts. **Results** The preoperative average EMG (AEMG) values in the LDK group in static standing were significantly higher than those of the control group. After the operation the values had decreased significantly, but were still significantly higher than in the control group. The preoperative AEMG values of the LDK group from the L₁₋₂ segment during torso stretching were significantly lower than those of the control group. They increased significantly after the operation and were no longer significantly different from the control groups' readings. The pre- and post-operative AEMG values from the L_{4,5} segment were not significantly different and remained significantly lower than in the control group. During lifting and holding the mean power frequency slopes of the LDK group were significantly lower than those of the controls both before and after the operation, though the postoperative slopes were significantly higher than the preoperative ones. **Conclusion** Patients with lumbar degenerative kyphosis have obvious paraspinal muscle weakness and severe fatigue. Early pedicle subtraction osteotomy can significantly improve the functional status of the paravertebral muscles in the short term.

【Key words】 Lumbar degenerative kyphosis; Kyphosis; Surface electromyography; Neuromuscular function; Paraspinal muscles

腰椎退行性后凸畸形(lumbar degenerative kypho-

sis, LDK)是一种脊柱矢状面失平衡表现,主要因腰椎后凸变形或前凸显著减少引起,是平背综合征的一种亚型。流行病学调查研究发现 LDK 主要见于亚洲人^[1],特别多见于中老年妇女,常因蹲伏、弯腰生活方式或工作姿势导致^[2]。椎间盘缩小变窄、骨质疏松导致椎体塌陷、腰部伸肌群过度萎缩等是诱发 LDK 的主要病因。随着年龄增加,后凸畸形进展会

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2018.04.012

作者单位:310000 杭州,浙江大学医学院附属邵逸夫医院康复医学科(李永忠、陈文君、戴洁、周玲、李建华);杭州市拱墅区小河湖墅街道社区卫生服务中心康复科(朱一霄)

通信作者:李建华,Email:zjdxsyfjkf@126.com

进一步影响患者站立平衡功能并促使背部疼痛加重^[3]。当背部疼痛明显影响到患者日常生活且导致步行障碍或站立困难时,手术治疗不可避免^[4]。临床针对 LDK 患者多采用椎弓根减压截骨术进行矫正,目的是使腰椎矢状面获得满意平衡,促使椎体稳定融合、减轻背部疼痛、预防畸形进一步发展^[5]。

生物力学研究显示脊柱本身是一种不稳定结构,无法承受较大负荷^[6-7]。在日常生活中维持姿势及肢体运动时,椎旁肌肉组织及神经肌肉控制系统对稳定躯干具有重要作用^[8]。既往有学者通过使用超声波、CT 和 MRI 影像学技术去评估椎旁肌肉组织学和形态学变化,发现 LDK 患者多裂肌、竖棘肌有较明显萎缩及脂肪浸润^[1,9-10]。然而静态椎旁肌肉评估仅能体现结构上的改变,更多与患者日常工作生活相关的神经肌肉控制方面的动态评估还有待进一步研究。

表面肌电(surface electromyography, sEMG)评估技术是通过采集、分析肌肉活动时的生物电信号特征来反映肌肉功能变化,可有效评估神经肌肉功能状况^[11]。有大量研究发现,sEMG 在诊断、评估下背痛患者肌肉功能状态、神经肌肉控制及康复疗效方面有较广泛应用^[12-14]。国内关于 LDK 患者椎旁肌神经肌肉功能是否存在障碍及障碍严重程度目前还鲜见报道,手术是否可改善 LDK 患者椎旁肌神经肌肉功能及改善程度如何也还未知。基于此,本研究目的是应用 sEMG 技术去分析 LDK 患者手术前、后椎旁肌功能变化,现将结果报道如下。

对象与方法

一、研究对象

患者入选标准包括:①性别为女性,有典型 LDK 临床特征^[15],如弯腰、步行困难、无法拾起重物、在不平路面上步行障碍;②以前未经历过脊柱手术;③疾病诊断为腰椎退行性后凸畸形^[16],脊柱侧凸 Cobb 角 $\leq 20^\circ$,矢状面垂直轴(sagittal vertical axis, SVA) ≥ 5 cm,胸椎后凸角 $\geq 60^\circ$,骨盆倾斜 $> 25^\circ$;④具有室内平地短距离步行能力;⑤年龄 > 45 周岁;⑥患者对本研究知情同意。患者剔除标准包括:①患有髌、膝关节退变性关节炎;②因神经或血管性病引起间歇性跛行;③存在活动性感染或肿瘤;④合并自身免疫系统疾病等。

选取 2015 年 1 月至 2017 年 8 月期间在我院骨科就诊的 30 例 LDK 患者并纳入 LDK 组,同时选取 30 例健康成人纳入对照组。所有受试者一般资料情况详见表 1,表中数据经统计学比较,发现组间差异均无统计学意义($P > 0.05$),具有可比性。

表 1 入选时 2 组受试者一般资料情况比较($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	年龄(岁)	身高(cm)	体重(kg)
LDK 组	30	68.3 \pm 5.1	158 \pm 5	57.9 \pm 8.8
对照组	30	65.2 \pm 6.1	160 \pm 6	58.1 \pm 5.5
组别	例数	身体质量指数(kg/m ²)	腰椎前凸角($^\circ$)	
LDK 组	30	24.7 \pm 3.3	2.9 \pm 2.2	
对照组	30	25.1 \pm 1.1	45.3 \pm 3.3	

二、治疗方法

所有 LDK 患者均由同一组外科医生执行后路椎弓根减压截骨术(pedicle subtraction osteotomy, PSO),行 T₁₀到 L₅节段融合^[17],用椎弓根螺钉和刚性棒进行椎旁固定。如患者有退行性腰椎管狭窄伴神经源性跛行或放射性腰腿痛需要减压,则行后路腰椎椎间融合(posterior lumbar interbody fusion, PLIF)。术后使用胸腰骶矫形支具 3 个月,允许进行日常活动,但不进行任何形式的锻炼及工作。

三、椎旁肌 sEMG 检测

肌电测试时环境温度保持 25~28 $^\circ\text{C}$,受试者充分暴露腰部肌群,使用酒精对局部皮肤进行脱脂处理以减小皮肤与电极间阻抗。本研究统一采用 Ag/AgCl 电极,导电区直径 10 mm,测试电极对 1、3 分别贴于受试者 L_{1,2}椎体平对脊柱中线左、右侧旁开 2 cm 竖脊肌肌腹最饱满处,测试电极对 2、4 则分别贴于 L_{4,5}椎体平对脊柱中线左、右侧旁开 2 cm 多裂肌肌腹最饱满处,参考电极均置于相应测试电极对平行外侧方 3 cm 处^[18]。在表面肌电测试前,先采用视觉模拟评分法(visual analogue scale, VAS)对患者腰背部疼痛情况进行评分。

采用绍兴产 UMI-SE-I 型肌电图仪采集术前及术后 3 个月时受试者抬物动作测试^[19]三阶段的椎旁肌肉 sEMG 信号,并通过配套的 MyElectric2016 软件进行肌电数据分析。阶段一,受试者取站位,双下肢伸直与肩同宽,放松静态休息 1 min,去除前 5 s 和最后 5 s 数据,取中间 50 s 平均肌电值(average electromyography, AEMG)。阶段二,指导受试者躯干缓慢前屈 90 $^\circ$,双臂缓慢下垂,抓握起预先置于受试者足前重约 2 kg 的方木凳,随后躯干伸展(要求躯干后伸时间控制在 5 s 左右),取躯干伸展时中间 3 s 的 AEMG 值。阶段三,受试者双臂维持水平位,直至受试者不能耐受(以双臂向下偏离水平面 $> 10^\circ$ 为准)即停止实验,取第 30 s 开始持续 1 min 的平均功率频率斜率值(mean power frequency slope, MPFs)。所得数据左、右侧无显著性差异,取两侧平均值。休息约 5 min 或受试者自述要求休息更长时间后重复上述实验,取两次测试平均值进行分

析。上述测试操作及数据收集均由同一名有经验的物理治疗师完成。

四、统计学分析

本研究所得计量数据以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示,采用 SPSS 19.0 版统计学软件包进行数据分析,计量资料组内比较采用配对 t 检验,计量资料组间比较采用独立样本 t 检验,计数资料比较采用卡方检验, $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义;本研究同时运用 Graphpad prism 7 软件进行图表制作。

结 果

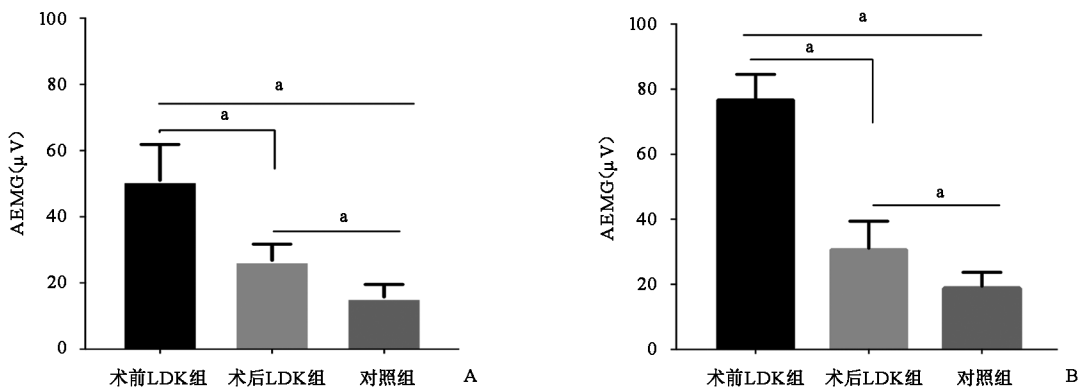
一、2 组受试者抬物测试阶段一椎旁肌 sEMG 分析

术前 LDK 组 L_{1-2} 和 L_{4-5} 椎旁肌 AEMG 分别为 $(51.05 \pm 2.62) \mu V$ 和 $(77.21 \pm 1.79) \mu V$, 术后分别为 $(26.86 \pm 1.18) \mu V$ 和 $(31.16 \pm 1.99) \mu V$ 。对照组相应节段椎旁肌 AEMG 分别为 $(15.77 \pm 0.91) \mu V$ 和 $(19.48 \pm 1.03) \mu V$ 。经统计学比较发现,术前 LDK 组

L_{1-2} 和 L_{4-5} 椎旁肌 AEMG 值均显著高于对照组 ($P < 0.05$); 术后 LDK 组椎旁肌 AEMG 值较术前明显降低 ($P < 0.05$), 但仍显著高于对照组水平, 组间差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。具体情况见图 1。

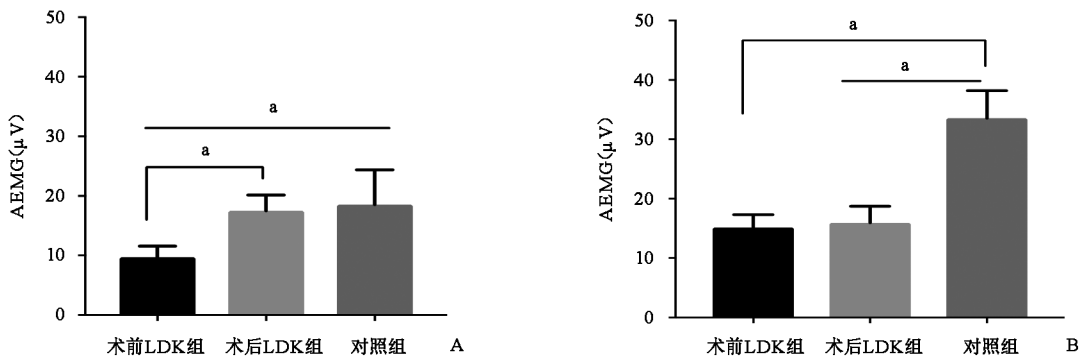
二、2 组受试者抬物测试阶段二椎旁肌 sEMG 分析

术前 LDK 组 L_{1-2} 和 L_{4-5} 椎旁肌 AEMG 分别为 $(9.71 \pm 0.45) \mu V$ 和 $(15.15 \pm 0.52) \mu V$, 术后分别为 $(17.5 \pm 0.64) \mu V$ 和 $(15.92 \pm 0.68) \mu V$ 。对照组相应节段椎旁肌 AEMG 分别为 $(18.53 \pm 1.42) \mu V$ 和 $(33.57 \pm 1.12) \mu V$ 。经统计学比较发现,术前 LDK 组 L_{1-2} 和 L_{4-5} 椎旁肌 AEMG 值均明显低于对照组水平 ($P < 0.05$); 术后 LDK 组 L_{1-2} 椎旁肌 AEMG 值明显高于术前水平 ($P < 0.05$), 与对照组间差异无统计学意义 ($P > 0.05$); 而术后 LDK 组 L_{4-5} 椎旁肌 AEMG 值较术前无显著变化 ($P > 0.05$), 仍显著低于对照组水平, 组间差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。具体情况见图 2。



注:图 1A、图 1B 显示术前 LDK 组 L_{1-2} 和 L_{4-5} 节段椎旁肌 AEMG 值明显高于对照组, 术后该组椎旁肌 AEMG 值较术前明显下降, 但仍显著高于对照组水平

图 1 2 组受试者抬物测试阶段一椎旁肌 AEMG 值比较



注:图 2A 显示术前 LDK 组 L_{1-2} 节段 AEMG 值明显低于对照组, 术后明显高于术前水平, 与对照组间差异无统计学意义; 图 2B 显示术前 LDK 组 L_{4-5} 节段 AEMG 值明显低于对照组, 术后较术前无明显变化, 仍显著低于对照组水平

图 2 2 组受试者抬物测试阶段二椎旁肌 AEMG 值比较

三、2 组受试者抬物测试阶段三椎旁肌耐力信号分析

术前 LDK 组 L_{1-2} 和 L_{4-5} 椎旁肌 MPFs 分别为 (-8.812 ± 0.214) Hz/s 和 (-7.206 ± 0.341) Hz/s, 术后分别为 (-2.941 ± 0.250) Hz/s 和 (-5.294 ± 0.372) Hz/s。对照组相应节段椎旁肌 MPFs 分别为 (-1.018 ± 0.123) Hz/s 和 (-1.608 ± 0.173) Hz/s。经统计学比较发现, 术前 LDK 组 L_{1-2} 和 L_{4-5} 椎旁肌 MPFs 值均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 术后 LDK 组 L_{1-2} 和 L_{4-5} 椎旁肌 MPFs 值均较术前明显降低 ($P < 0.05$), 但仍显著高于对照组水平, 组间差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。具体情况见图 3。

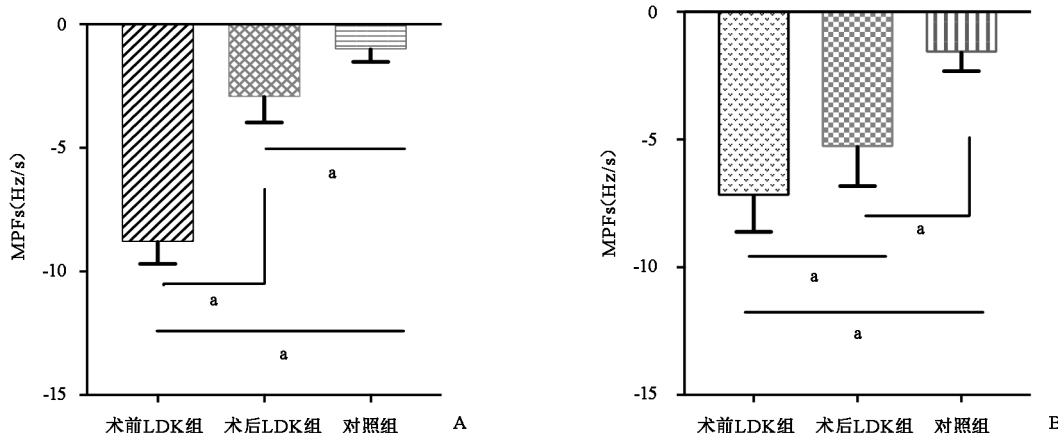
讨 论

LDK 是一种常见脊柱畸形, 多发于亚洲人群。长期跪地姿势或弯腰劳作是导致腰椎后凸主要诱因, 椎旁肌肉脂肪浸润及躯干前倾的蹲伏步态是常见临床特点^[20]。为提高 LDK 患者生活质量, 近年来临床不断寻求新的治疗手段^[21], 目前多节段减压和长节段融合术已成为最常见 LDK 手术治疗方式。大量临床证实手术对 LDK 患者矢状面腰椎畸形具有明显改善效果, 同时还能促进椎体稳定融合^[22-24]。然而脊柱稳定性不仅仅与椎体、椎间关节等被动系统有关, 由躯干肌群组成的主动系统、协调肌肉活动以应对外力干扰的神经肌肉控制系统也在脊柱稳定性维持中发挥重要作用^[25]。LDK 患者经长节段融合术治疗后其躯干生物力学可能会发生改变, 并引起椎旁肌功能适应性变化, 但当前很少有研究涉及 LDK 患者经脊柱融合术治疗后其椎旁肌神经肌肉控制功能是否发生变化。本研究采用 sEMG 评估 LDK 患者椎旁肌肉功能, 目的是探讨 LDK 患者经椎体融合术治疗前、后其椎旁肌神经肌

肉控制功能变化。

本研究选用的 sEMG 分析指标包括 AEMG 和 MPFs。AEMG 为 sEMG 中常用的时域分析指标, 是一段时间内瞬间肌电活动的平均振幅, 也是反映 sEMG 信号振幅变化的特征性指标^[26]。本研究结果发现, LDK 组患者在静息站立时其椎旁肌电值明显高于对照组, 提示腰椎后凸畸形对患者椎旁肌肉活动有明显影响, 后凸畸形可能激活椎旁肌肉使其处于高张力状态。如有文献报道, 脊柱后凸及排列紊乱可明显增加肌群间压力, 导致椎旁肌肉活动增强^[27]。此外 LDK 患者多伴有明显腰部疼痛, 疼痛或许会引起椎旁肌保护性收缩, 进一步增加椎旁肌群间压力^[4], 使静息站立时肌肉激活增加。术后 LDK 患者椎旁肌电活动明显减弱, 且与对照组间无显著性差异, 表明手术对 LDK 患者脊柱排列及疼痛的改善作用可明显降低椎旁肌群间压力, 有助于减轻肌肉张力、提高肌肉做功效率。

腰椎后凸发病机制不仅包括来自于椎体表面垂直压力和椎间盘退变, 更直接的原因是脊椎旁肌肉萎缩^[1]。如 Kang 等^[15]通过使用 MRI 评估 LDK 和慢性下背痛患者椎旁肌肉变化, 发现 LDK 患者多裂肌、竖棘肌有更加明显的萎缩及脂肪浸润。Takemitsu 等^[1]使用 CT 测量 LDK 患者 L_{1-2} , L_{2-3} 和 L_{4-5} 椎旁肌肉横截面积, 发现随着年龄增加, 受试者椎旁肌肉伸肌群横截面积较屈肌群明显减少。手术可改善脊柱关节排列紊乱, 提高矢状面平衡度^[21-22], 但肌肉萎缩无法通过手术解决。本研究发现 LDK 组躯干伸展过程中其肌电活动明显不及对照组, 术后 L_{1-2} 椎旁肌电活动明显增强。这可能与腰椎曲度改变影响机体背伸肌臂长短有关, 如腰椎曲度减小或反弓将导致背伸肌群功能紊乱^[28]。由于 LDK 患者上腰段及下胸段竖脊肌被过度



注: 图 3A、3B 显示术前 LDK 组 L_{1-2} 和 L_{4-5} 节段椎旁肌 MPFs 值均显著低于对照组水平, 术后明显升高, 但仍显著低于对照组水平

图 3 2 组受试者抬物测试阶段三椎旁肌耐力信号分析

拉长,能促使肌肉失能及退变。在躯干伸展运动中,LDK 患者 L₁₋₂ 椎旁肌低活动性表明腰椎前凸曲度减小能显著影响椎旁肌最适初长度,并引起肌肉收缩能力下降。术后患者 L₁₋₂ 椎旁肌电活动增加表明手术在改善腰椎曲度同时,还能重建背伸肌群有效力臂,提高躯干运动过程中椎旁肌肉收缩能力。此外患者术后 L₁₋₂ 椎旁肌肌电活动水平仍明显低于对照组,可能与 LDK 患者椎旁肌有明显萎缩及脂肪浸润,在相同时间内瞬间可募集的肌纤维数量减少有关。本研究未发现手术对 L₄₋₅ 椎旁肌肌电活动有明显改善作用,可能是因为腰椎后凸畸形导致骨盆倾斜及骨盆代偿机制丧失,能诱发多裂肌无力、退变^[29],当过度萎缩、退变使肌纤维数量和质量明显降低时,仅依靠手术干预可能无法达到提高目的。因此进一步的腰部核心肌群训练或椎旁肌群电刺激^[30]也许对重建 LDK 患者神经肌肉功能、防止或逆转肌肉萎缩具有重要作用。

LDK 患者在站立位时由于重心前移使得椎旁肌肉长期处于过度激活状态以保持身体直立姿势。长期激活使肌肉疲劳程度明显增加^[31]。平均功率频率(MPF)是常用的 sEMG 频域分析指标,多用于分析信号频率特征,其高低与外周运动单位动作电位传导速度等有关^[32]。MPFs 值为一定时间内 MPF 变化,即斜率值,其负值越大表示动作电位传导速度下降越快,肌肉疲劳程度越严重^[33-34],该指标尤其适用于肌肉疲劳程度组间对比^[35]。本研究发现 LDK 患者在持物负重时 MPFs 值明显低于对照组,表明其椎旁肌肉存在严重疲劳。可能是因为脊柱结构异常导致椎旁肌肉功能障碍。术后 LDK 患者持物保持时间明显超过术前水平,且 MPFs 值显著提高,表明术后患者椎旁肌抗疲劳能力明显增强。但与对照组比较,LDK 组患者术后椎旁肌抗疲劳能力仍较低。可能是由于椎旁肌肉明显萎缩,在相同负荷状态下可募集的肌纤维明显减少,肌肉放电频率明显增多;当持续负重时间过长,有效放电频率不足以支持肌肉做功时,将导致动作电位传导速度快速下降,MPFs 值显著降低,肌肉疲劳程度明显增加。另外腰椎长期畸形也可能使椎旁肌肉组织发生改变,导致可收缩性肌纤维减少,同时伴随非收缩性结缔组织明显增多^[33],这可能也是术后 LDK 患者无法获得与对照组相同抗疲劳能力的原因之一。

综上所述,本研究结果表明,与正常人群比较,LDK 患者处于静态直立时其椎旁肌肉明显激活,在躯干伸展时椎旁肌肉活动能力明显下降,在水平持物时肌肉疲劳程度较严重。手术可明显改善 LDK 患者立位时肌肉做效率,提高椎旁肌肉抗疲劳性。

腰椎融合术通过矫正 LDK 患者脊柱结构,可能有助于椎旁肌肉功能改善,从而进一步提高椎旁神经肌肉控制能力。另外 LDK 患者术后状态与正常人群还存在明显差异,因此,积极介入术后康复训练以进一步提高 LDK 患者神经肌肉功能具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Takemitsu Y, Harada Y, Iwahara T, et al. Lumbar degenerative kyphosis. Clinical, radiological and epidemiological studies [J]. Spine, 1988, 13(11): 1317-1326.
- [2] Jang JS, Lee SH, Min JH, et al. Lumbar degenerative kyphosis: radiologic analysis and classifications [J]. Spine, 2007, 15, 32(24): 2694-2699. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31815a590b.
- [3] Choi CJ, Lim HW, Park MK, et al. Does the kyphotic change decrease the risk of fall [J]. Clin Exp Otorhinolaryngol, 2011, 4(3): 118-121. DOI: 10.3342/ceo.2011.4.3.118.
- [4] Enomoto M, Ukegawa D, Sakaki K, et al. Increase in paravertebral muscle activity in lumbar kyphosis patients by surface electromyography compared with lumbar spinal canal stenosis patients and healthy volunteers [J]. Spinal Disord Tech, 2012, 25(6): E167-173. DOI: 10.1097/BSD.0b013e31825d63c4.
- [5] Smith Js, Klineberg E, Schwab F, et al. Change in classification grade by the SRS-Schwab adult spinal deformity classification predicts impact on health-related quality of life measures: prospective analysis of operative and nonoperative treatment [J]. Spine, 2013, 38(19): 1663-1671. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31829ec563.
- [6] Ladin Z, Murthy Kr, De Luca Cj. Mechanical recruitment of low back muscles. theoretical prediction and experimental validation [J]. Spine, 1989, 14(9): 927-938.
- [7] Quint U, Wilke Hj, Shirazi-Adl A, et al. Importance of the intersegmental trunk muscles for the stability of the lumbar spine. A biomechanical study in vitro [J]. Spine, 1998, 23(18): 1937-1945.
- [8] McGill Sm, Norman Rw. Partitioning of the L4-L5 dynamic moment into disc, ligamentous, and muscular components during lifting [J]. Spine, 1986, 11(7): 666-678.
- [9] Kang CH, Shin MJ, Kim SM, Lee SH, et al. MRI of paraspinal muscles in lumbar degenerative kyphosis patients and control patients with chronic low back pain [J]. Clin Radiol, 2007, 62(5): 479-486. DOI: 10.1016/j.crad.2006.12.002.
- [10] Lee JC, Cha JG, Kim Y, et al. Quantitative analysis of back muscle degeneration in the patients with the degenerative lumbar flat back using a digital image analysis [J]. Spine, 2008, 33(3): 318-325. DOI: 10.1097/BRS.0b013e318162458f.
- [11] Lu WW, Hu Y, Luk KD, et al. Paraspinal muscle activities of patients with scoliosis after spine fusion: an electromyographic study [J]. Spine, 2002, 27(11): 1180-1185.
- [12] Humphrey AR, Nargol AV, Jones AP, et al. The value of electromyography of the lumbar paraspinal muscles in discriminating between chronic-low-back-pain sufferers and normal subjects [J]. Eur Spine J, 2005, 14(2): 175-184. DOI: 10.1007/s00586-004-0792-3.
- [13] Hu Y, Kwok JW, Tse JY, et al. Time-varying surface electromyography topography as a prognostic tool for chronic low back pain rehabilitation [J]. Spine J, 2014, 14(6): 1049-1056. DOI: 10.1016/j.spinee.2013.11.060.

- [14] Hu Y, Mak JN, Luk KD. Effect of electrocardiographic contamination on surface electromyography assessment of back muscles [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2009, 19(1): 145-156. DOI: 10.1016/j.jelekin.2007.07.001.
- [15] Kang CH, Shin MJ, Kim SM, et al. MRI of paraspinal muscles in lumbar degenerative kyphosis patients and control patients with chronic low back pain [J]. *Clin Radiol*, 2007, 62(5): 479-486. DOI: 10.1016/j.crad.2006.12.002.
- [16] Fu KM, Bess S, Shaffrey CI, et al. Patients with adult spinal deformity treated operatively report greater baseline pain and disability than patients treated nonoperatively; however, deformities differ between age groups [J]. *Spine*, 2014, 39(17): 1401-1407. DOI: 10.1097/BRS.0000000000000414.
- [17] Lamartina C, Berjano P. Classification of sagittal imbalance based on spinal alignment and compensatory mechanisms [J]. *Eur Spine J*, 2014, 23: 1177-1189. DOI: 10.1007/s00586-014-3227-9.
- [18] Hermens HJ, Freriks B, Disselhorst-Klug C, et al. Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2000, 10(5): 361-374.
- [19] Roman-Liu D, Tokarski T, Kamińska J. Assessment of the musculoskeletal load of the trapezius and deltoid muscles during hand activity [J]. *Int J Occup Saf Ergon*, 2001, 7(2): 179-193. DOI: 10.1080/10803548.2001.11076485.
- [20] Lee JH, Kim JU, Jang JS, et al. Analysis of the incidence and risk factors for the progression of proximal junctional kyphosis following surgical treatment for lumbar degenerative kyphosis: minimum 2-year follow-up [J]. *Br J Neurosurg*, 2014, 28(2): 252-258. DOI: 10.3109/02688697.2013.835369.
- [21] Goh TS, Shin JK, Youn MS, et al. Surgical versus nonsurgical treatment of lumbar degenerative kyphosis [J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(8): 2153-2159. DOI: 10.1007/s00586-017-5008-8.
- [22] Le Huec JC, Faundez A, Dominguez D, et al. Evidence showing the relationship between sagittal balance and clinical outcomes in surgical treatment of degenerative spinal diseases: a literature review [J]. *Int Orthop*, 2015, 39(1): 87-95. DOI: 10.1007/s00264-014-2516-6.
- [23] O'Shaughnessy BA, Ondra SL. Measuring, preserving, and restoring sagittal spinal balance [J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2007, 18(2): 347-356. DOI: 10.1016/j.nec.2007.02.008.
- [24] Le Huec JC, Charosky S, Barrey C, et al. Sagittal imbalance cascade for simple degenerative spine and consequences: algorithm of decision for appropriate treatment [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(5): S699-703. DOI: 10.1007/s00586-011-1938-8.
- [25] Panjabi MM. The stabilizing system of the spine [J]. *Spinal Disord*, 1992, 5(4): 383-389.
- [26] Kleine BU, Schumann NP, Stegeman DF, et al. Surface EMG mapping of the human trapezius muscle: the topography of monopolar and bipolar surface EMG amplitude and spectrum parameters at varied forces and in fatigue [J]. *Clin Neurophysiol*, 2000, 111(4): 686-693.
- [27] Konno S, Kikuchi S, Nagaosa Y. The relationship between intramuscular pressure of the paraspinal muscles and low back pain [J]. *Spine*, 1994, 19(19): 2186-2189.
- [28] Tveit P, Daggfeldt K, Hetland S, et al. Erector spinae lever arm length variations with changes in spinal curvature [J]. *Spine*, 1994, Jan 15; 19(2): 199-204.
- [29] Lee CS, Lee CK, Kim YT, et al. Dynamic sagittal imbalance of the spine in degenerative flat back: significance of pelvic tilt in surgical treatment [J]. *Spine*, 2001, 26(18): 2029-2035.
- [30] Jung GS, Chang MC, Seo SW, et al. Transcutaneous neuromuscular electrical stimulation applied to optimal points on the lower abdomen and lumbar paraspinal region changes gait parameters in patients with lumbar degenerative kyphosis [J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2017, 8. DOI: 10.3233/BMR-169638.
- [31] Takahashi I, Kikuchi S, Sato K, et al. Effects of the mechanical load on forward bending motion of the trunk: comparison between patients with motion-induced intermittent low back pain and healthy subjects [J]. *Spine*, 2007, 32(2): E73-78. DOI: 10.1097/01.brs.0000252203.16357.9a.
- [32] 齐瑞, 严隽陶, 房敏, 等. 脑卒中偏瘫患者肱二、三头肌表面肌电特征的研究 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2006, 28(6): 399-401.
- [33] Dederer A, Harms-Ringdahl K, Nemeth G. Back extensor muscle fatigue in patients with lumbar disc herniation. Preoperative and postoperative analysis of electromyography, endurance time and subjective factors [J]. *Eur Spine J*, 2006, 15(5): 559-569. DOI: 10.1007/s00586-005-0934-2.
- [34] Dederer A. Lumbar muscle fatigue and subjective health measurements in patients with lumbar disc herniation 2 years after surgery [J]. *Eur Spine J*, 2012, 21(4): 646-654. DOI: 10.1007/s00586-011-2109-7.
- [35] Ramos LAV, Franca FJR, Callegari B, et al. Are lumbar multifidus fatigue and transversus abdominis activation similar in patients with lumbar disc herniation and healthy controls? A case control study [J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(5): 1435-1442. DOI: 10.1007/s00586-015-4375-2.

(修回日期: 2018-02-25)

(本文编辑: 易浩)