

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2023.03.004

神经肌肉电刺激对躯干稳定肌影响的研究进展

黄潇楠¹, 方凡夫²

(1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 海军军医大学第一附属医院, 上海 200093;

2. 海军军医大学第一附属医院, 上海 200433)

【摘要】该文从神经肌肉电刺激作用于躯干稳定肌的效果与参数及对不同人群的应用效能等角度, 阐述了躯干稳定肌的组成与功能, 以及神经肌肉电刺激招募躯干稳定肌的作用机制与参数, 并分析探讨了其临床效果。未来的临床研究可能集中在健康人群的长期随访队列研究和运动损伤人群躯干稳定肌萎缩的机制与临床研究方面, 同时神经肌肉电刺激联合运动康复的研究也是发展趋势。该文预判相关便携式 NMES 设备的研发与应用具有较大的临床意义。

【关键词】神经肌肉电刺激; 躯干稳定肌; 下背痛; 腰椎多裂肌; 腹横肌

【中图分类号】R496, R493

【文献标志码】A

文章编号: 1674-1242 (2023) 03-0244-09

Progress of Research on the Effect of Neuromuscular Electrical Stimulation on Trunk Stabilizer Muscle

HUANG Xiaonan¹, FANG Fanfu²

(1. School of Health Science and Engineering, Shanghai University of Technology, The First Affiliated Hospital of the Naval Medical University, Shanghai 200093, China; 2. The First Affiliated Hospital of the

Naval Medical University, Shanghai 200433, China)

【Abstract】This review discusses the effects and parameters of neuromuscular electrical stimulation (NMES) on the stability muscles of the trunk, as well as its application efficacy in different populations. The composition and function of the trunk stability muscles are described, along with the mechanism and parameters of NMES recruitment of these muscles, and an analysis and discussion of its clinical effects are presented. Future clinical research may focus on long-term follow-up studies of healthy populations and the mechanism and clinical research of trunk stability muscle atrophy in exercise-induced injury populations. Additionally, combined exercise rehabilitation research is also a developing trend, and the development and application of related portable NMES devices are anticipated to have broad clinical significance.

【Key words】Neuromuscular Electrical Stimulation; Trunk Stabilizer Muscle; Low Back Pain; Lumbar Multifidus; Transverse Abdominis

收稿日期: 2023-05-13

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2019YFC1711803); 军队高层次人才工程项目 [(2020)QN06128]; 上海申康医企融合创新成果转化专项 (SHDC2022CRD004)。

作者简介: 黄潇楠 (2000—), 男, 江苏省丹阳市人, 硕士研究生, 从事康复工程研究。

通信作者: 方凡夫, 男, 副教授, 硕士生导师, 电话 (Tel.): 15800719913, E-mail: fangfanfu@126.com。

0 引言

神经肌肉电刺激 (Neuromuscular Electrical Stimulation, NMES) 是一种替代或辅助自主运动的电刺激疗法, 可用于维持或增加肌力, 防止肌肉萎缩^[1,2]。NMES 使用高强度、间歇性的低频电刺激并通过施加多个表面电极于肌肉运动点^[3]来刺激肌肉内的神经分支, 从而产生肌肉收缩^[4-7]。NMES 能激活蛋白激酶 B (Protein Kinase B, PKB) 信号转导^[8,9]、丝裂原活化蛋白激酶 (Mitogen-Activated Protein Kinase, MAPK) 信号通路^[10]及增加卫星细胞的增殖和分化^[11,12], 以促进肌肉蛋白的合成^[13], 并阻止肌生成抑制蛋白表达^[14]和抑制泛素-蛋白酶系统水解蛋白质^[14], 也能诱导轴突再生和促进神经生长^[1,15,16]。此外, NMES 对于肌肉纤维的招募没有特定的顺序, 并且是同步的^[17-19], 这与自主运动优先招募小的 I 型运动纤维不同^[20], 因此肌肉容易产生疲劳。

核心稳定训练和运动控制训练 (Motor Control Exercise, MCE) 是目前锻炼核心躯干稳定肌的主要方法之一^[21-24], 然而稳定性训练需要较长的治疗周期, 且需要治疗师的监督与指导。假设在躯干稳定肌上施加 NMES 能恢复或增加其力量和耐力, 以改善临床症状, 这将减少患者的治疗成本并缓解社会压力。

现有研究表明, NMES 能够招募躯干稳定肌^[25-27], 但对于其相关参数和电极片的摆放位置尚存在争议。随着研究人员对躯干稳定肌的日益重视, 在躯干稳定肌上施加 NMES 的试验逐年增多。因此, 本文就 NMES 作用于躯干稳定肌的效果与参数, 以及对健康人、老年人和下背痛患者等不同人群的应用效能, 梳理了近 15 年的相关文献研究结果, 探讨目前研究的局限性和进展, 以期为后续研究提供方向。

1 躯干稳定肌的组成与功能

躯干稳定肌主要由腹横肌 (Transversus Abdominis, TrA)、腹内斜肌 (Obliquus Internus Abdominis, OI) 和腰椎多裂肌 (Lumbar Multifidi, LM) 等肌肉构成。TrA 位于腰腹部深层, 它与胸腰筋膜和腰椎相连, 环绕躯干^[28]。TrA 受中枢神经的控制, 以前馈方式使其在活动开始前被激活收缩, 使重心更稳定, 以更好的姿势开始动作。其收缩方向不因肢体运动方向的改变而改变^[29]。OI 位于腹外斜肌和 TrA 之间, 肌肉纤维走行由外下到内上^[30], 可使躯干向另一侧旋转。OI 也会

受到中枢神经的控制而以前馈方式提前激活收缩^[31]。有研究发现, 两侧 TrA 和 OI 收缩存在偏侧反应, 即非收缩侧的 TrA 和 OI 先被激活, 随后收缩侧的 TrA 和 OI 被激活^[29,31], 产生此机制的原因可能是收缩侧产生的动作发生一个轴向旋转力, 对侧 TrA 和 OI 会预收缩以抵消这一旋转力从而稳定躯干^[29,32]。LM 是位于人体下背部深层靠近脊柱的肌肉, 跨越腰臀交界区^[33]。LM 分为深层和浅层^[34], 深层主要控制椎体节段间的运动, 浅层帮助控制脊柱的运动方向^[35]。LM 相比其他腰部肌肉有着更短的肌纤维, 从而使它的肌纤维长度始终在长度-张力曲线的上升侧, 同时拥有更大的生理横截面积, 此设计可使它增加较短的肌纤维长度而产生较大的力, 使脊柱在前倾时获得更大的力以保持脊柱稳定^[36]。它为肌肉收缩产生的脊柱稳定性贡献 2/3 的力^[33]。

躯干稳定肌的萎缩^[37]、不对称^[38]及延迟激活等^[39]是导致慢性下背痛 (Low Back Pain, LBP) 的重要原因^[40-43]。因此, 预防躯干稳定肌受伤或促进其功能恢复是预防和改善 LBP 及提升核心稳定性的重要措施。

2 NMES 能否成功招募躯干稳定肌

由于腰部肌肉众多、重叠且接近, 因此要判断 NMES 是否真的能够招募脊柱深层的躯干稳定肌, 首先需要通过某些方法来探测该肌肉。TrA 和 OI 能够被表面和肌内肌电图探测^[32,44]。但 Stokes 等^[45,46]发现表面电极对浅层的最长肌较敏感, 与肌内电极相比, 对 LM 的测量效果欠佳。Gibbon 等^[47]、Sánchez 等^[48]证实了 TrA 和 OI 能成功被超声探测。同样, Sions 等^[49,50]的实验结果表明用超声测量健康人和 LBP 患者 LM 厚度的方法可靠。Beak 等^[25]、Coghlan 等^[51]在 NMES 刺激躯干稳定肌期间使用实时超声成像 (Real-Time Ultrasound Imaging, RUSI) 观察到该肌肉厚度较静息时发生了变化。Won 等^[52]用近红外光谱分析 (Near-Infrared Spectroscopy, NIRS) 探测到 LM 的血流在 NMES 刺激躯干稳定肌期间增加, 且与肌电图比较, 结果显示有高度的相关性。

综上, 通过 RUSI 和 NIRS 证实 NMES 能够招募躯干稳定肌。目前大多数研究使用 RUSI 观察在 NMES 刺激躯干稳定肌期间 LM 厚度变化的过程。肌内电极和表面电极均不推荐在 NMES 刺激躯干稳定肌期间使用, 因为在使用肌电图时, NMES 产生的电效应可能

会干扰其准确性。虽然目前使用 NIRS 探测躯干稳定肌的研究很少,但其为测定躯干稳定肌的激活提供了新的评估思路和方法。

3 NMES 招募躯干稳定肌的相关参数

虽然 NMES 能招募躯干稳定肌,但它的参数设置决定了对躯干稳定肌的效果。NMES 可调节的参数是频率、脉宽、电流强度、持续时间及电流的占空比等。长期以来,研究者们不断调整参数,试图诱发最大肌力,并降低电流带来的不适感,减少电刺激导致的肌肉疲劳^[5]。有证据表明,NMES 对肌肉的效果仅与它所诱发的肌肉产生的力呈正相关,而不取决于 NMES 本身的参数^[13,53,54]。电流越大,它所诱发的力就越大,但个体对电流强度的耐受性存在较大的差异。因此,在将电流施加于患者身上时,应将电流强度逐渐增加至患者所能承受的最大限度并观察到患者明显的肌肉收缩。电流强度随着 NMES 使用次数的增加而耐受,需要患者增加电流强度以适应耐受^[55]。频率能影响肌肉的张力。有研究表明,在 50~100Hz 频率下可使肌肉产生强直性收缩,使用 100~400 μ s 的脉宽可兴奋神经纤维^[19,56]。斜坡时间是指从打开 NMES 至达到所需频率的时间,常用的斜坡时间为 1~3s,较长的坡道时间一般用于对刺激敏感的患者^[57]。NMES 持续时间一般为 20~30min。NMES 相较于自主运动的限制是,NMES 招募的肌肉纤维是同步的,且没有依次招募的过程,这表明肌肉更容易产生疲劳,只有将频率降低,才能减轻肌肉疲劳^[58],因此临床上常用的占空比为 1:3,以延缓肌肉疲劳出现的时间。电极片应放置于肌肉的运动点。刺激所用的电极片越大,电流的密度越小,造成不适的可能性就越小。相反,电极片越小,电流的密度越大,所产生的单位面积的力就越大^[59]。此外,多通道的异步刺激比同步刺激和单通道刺激在延缓疲劳方面的表现更好,因为肌肉的肌纤维不是同时被激活的^[60]。

Back 等^[25]在受试者的 L4-L5 棘突水平线两侧 1cm 处放置 4 个 5cm \times 5cm 的电极片,分别使用 20Hz、50Hz、80Hz 的频率,将电流强度提高至看到明显的肌肉收缩。20Hz 的频率使 90% 的受试者产生烧灼感,80Hz 较 50Hz 使肌肉收缩阶段消耗更多的腺嘌呤核苷三磷酸 (Adenosine Triphosphate, ATP)^[61],从而更易造成肌肉疲劳。因此,可选 50Hz 的频率作用于 LM。

Back 等^[26]研究发现,将活动电极施加于髂前上棘上 2cm、内侧 2cm 处,并将参比电极施加于腋中线,髂前上棘上 1cm 处,可使 TrA 和 OI 的厚度较静息时变化最大。采用 50Hz 频率的 NMES 刺激 TrA 和 OI 的综合效果更好^[27]。有趣的是,NMES 在腹壁前侧刺激 TrA 和 OI 时,发现 LM 的厚度轻微增加,这可能是因为 NMES 使 TrA 和 OI 收缩时牵拉了胸腰筋膜,从而间接导致 LM 的收缩^[26]。

4 在躯干稳定肌上应用 NMES 的临床效果

最早将 NMES 应用于躯干稳定肌的是 Coghlan 等^[62],其使用实时超声探测技术测量 TrA 和 OI 在静息和收缩时的厚度,发现 TrA 和 OI 收缩时的比静息时的有所增加,但都不显著。这是首次在该方面的研究。NMES 可能会激活浅层肌肉而无法充分激活躯干稳定肌,因此 NMES 的参数和电极片的摆放位置有待商榷。于是,在后续的研究中,Coghlan 等设计用下肢抬腿激活 TrA 和 OI,且在测量核心躯干稳定肌时加入对疼痛的测量。实验发现 TrA 和 OI 的厚度明显增加,疼痛明显缓解^[51],表明 NMES 有可能预防躯干核心肌萎缩和缓解 LBP 患者症状。Cho 等^[27]研究 NMES 作用于躯干稳定肌的具体频率参数和电极片的摆放位置对肌肉激活的影响,使 TrA 和 OI 尽可能被激活,从而提升 NMES 的效果。首次考虑将 NMES 作用于 LM 的是 Coghlan 等^[51],但由于相关参数和位置的限制,此次试验结果显示 LM 厚度变化不明显,原因可能是 LM 在解剖学上的限制。Back 等^[25]在研究 TrA 和 OI 时加入了 LM,试图确认在 LM 上使用 NMES 的可行性和相关参数设置。在随后的研究中,为证明将 NMES 施加于 LM、TrA 及 OI 的效果能否比施加于单一肌肉的效果好,Back 分别招募了腰椎退行性后凸 (Lumbar Degenerative Kyphosis, LDK) 患者和 LBP 患者。结果表明,同时将 NMES 施加于 LM、TrA 及 OI 可有效增加肌肉厚度^[63,64],且刺激 TrA 和 OI 可间接拉伸胸腰筋膜而使 LM 产生轻微收缩^[64]。Sions 等^[65]也对 LM 施加了 NMES,并使用 RUSI 测量 LM 肌肉厚度的变化,其将受试者对 NMES 的耐受程度分为耐受组和低耐受组,低耐受可能是由于脊柱旁区域的感觉阈值降低而非年龄性别等缘故^[66]。低耐受组所能忍受的电流强度明显低于耐受组,导致 LM 的厚度变化比耐受组低,但与无负重下腿后伸时产生的 LM 厚度变化相

近, 这表明低耐受组的电流强度对训练 LM 有一定意义。然而, 只有少数人所选的电流强度能引起明显的 LM 厚度变化。研究显示, 受试者需要 58 ~ 67mA 的电流才能使 LM 肌肉厚度变化最大^[65]。因此, 为提升 NMES 治疗的效果, 需要将受试者选择的电流强度再稍微增加, 然后随着耐受性的增加逐步加至所要求的强度。

Jung 等^[67]测定 NMES 在作用于 LDK 患者的躯干稳定肌时的步态参数, 发现其骨盆前倾减少, 髋关节内旋增加, 步长和步速衰减变慢, 因为 LDK 患者的腰椎曲度变直, 所以会有骨盆、脊柱前倾及髋关节外旋等姿势以保持步行时重心的平衡^[68]。这表明在躯干稳定肌上施加 NMES 可使步态稳定性增加, 从而减少步行时的代偿, 增加步行的时间和距离^[67]。

近年来, 越来越多的研究将 NMES 与运动康复联合。Alrwaily 等^[69]首次将 NMES 与核心稳定训练联合。核心稳定训练已被证明能用于缓解 LBP^[22,24], 那么能否将两者联合从而更好地缓解患者的症状呢? 研究显示, 核心稳定训练组和联合组在进行 6 周的治疗后, 测量指标均有显著改善, 但组间无明显差异^[69]。然而这不能说明 NMES 与核心稳定训练联合没有效果, 因为此次试验所进行的 NMES 疗程为一周两次, 且每次仅刺激 20 分钟, NMES 的治疗次数和时间可能远没有达到能起效的量。另外, 研究者将 NMES 只施加于 LM, 没有将 NMES 放置于腹壁前侧以刺激 TRA 和 OI, 且电极片较大, 可能会使电流密度分散而激活浅层腹肌, 进而导致效果不显著。上述几点可能是导致 NMES 与核心稳定训练联合没有取得显著效果的其中几个因素。与此同时, 有研究将核心稳定训练与 NMES 联合且额外设立单 NMES 组^[70]。经过 4 周的治疗, 其大部分指标均较基线有显著改善, 其中联合组的效果更好, 且在 6 个月后的随访中, 该组的评价指标要明显优于其他两组, 并显著高于基线水平^[70]。然而, 这项试验不仅将 NMES 施加在 TRA 上, 还将其施加在腹直肌、臀大肌上, 这可能会增加对躯干稳定肌效果的偏倚, 且为期 4 周的治疗周期可能无法使 NMES 的治疗效果最大化。6 个月后的回访数据显示, 单核心稳定训练和单 NMES 组的治疗效果几乎消失殆尽。这项试验证明 NMES 与核心稳定训练联合对 LBP 患者症状的缓解有积极的作用。有一项针对老年女性 LBP 患者的个案

研究也说明, 躯干核心稳定训练联合 NMES 能改善患者的生活质量, 减少疼痛^[71]。

MCE 和核心稳定训练不同, MCE 更注重对骨盆和整体的控制^[72]。Songjaroen 等^[73]探索了将 MCE 联合 NMES 对 LBP 患者的 LM 激活的影响。其将最大自主等长收缩 (Maximum Voluntary Isometric Contraction, MVIC) 联合在 LM 上使用 NMES 时产生的 LM 厚度设为最大值, 再单独测量 MVIC 时的 LM 的厚度, 都减去静息时的 LM 厚度, 最后相除得到一个百分比为 LM 的激活率。结果显示, 经过训练, 受试者的 LM 激活率显著提升, 同时 MCE 联合 NMES 比单 MCE 所产生的 LM 的激活率和运动表现都显著提升, 且 LM 的激活率和运动表现存在显著的正相关^[73]。研究表明, 在一次 MCE 训练后可短暂提升 LM 的激活率和运动表现, 证明 NMES 能在此基础上继续提升 LM 的激活率, 但其只得出了训练后的短期效果, 还需进行一个周期性的治疗做对比, 以观察能否长期提升 LM 的激活率, 从而改善运动表现并减轻疼痛。临床上将 NMES 与 RUSI 联合有可能用于预测 LBP 患者复发 LBP 的可能性^[74]。使用同样的方法对健康人和反复性 LBP 患者进行该项测试, 结果显示, 反复性 LBP 患者的 LM 激活率明显低于健康人。LM 的激活不足可能是受到了关节源性的抑制, 用于减少腰椎和周围结构的负荷^[75,76]。这项研究的结果表明, NMES 可用于确认 LM 激活的缺陷程度, 且可能预测 LBP 患者复发或亚健康人群发生 LBP 的可能性。与此同时, 该研究实施了一项将 NMES 与 MCE 联合的个案研究^[77], 此次研究增加了运动学测量。结果显示, 在实施治疗前进行索伦森测试, 胸椎、腰椎的角速度变化出现不稳定的中断; 在治疗后再进行测试, 结果显示中断次数明显减少。该研究中的患者同样进行了上述 LM 的激活测试, 结果显示, 两侧 LM 的激活率在经过 NMES 与 MCE 联合治疗后显著提升, 且在之后的一周内没有发生 LBP。两种治疗方法的联合有可能提升 LM 内部运动单位的募集或增加神经冲动发放的频率^[78], 使躯干稳定肌控制椎体的能力提升, 从而使受试者胸腰椎的角速度在测试时变化比之前平稳, 因此两种治疗方法的联合有可能提升 LBP 患者的运动表现和核心控制。

随着年龄的增加, 人体的肌肉量逐渐下降, 且罹患腰椎间盘突出概率逐渐增加^[79], 使腰椎 LM 逐渐

萎缩,进而影响步态和稳定性等。Jandova 等^[80]研究 NMES 对老年人的股外侧肌和 LM 的影响。在 8 周的 NMES 治疗后,与空白对照组相比,试验组两侧 LM 的横截面积均显著增加,同时发现横截面积更少的一侧 LM 经过 8 周 NMES 治疗,肌肉横截面积的变化比另一侧大,这可能是由天花板效应导致的。LM 的横截面积增加能在一定程度上改善老年人的功能和姿势^[82]。此外,有研究发现空白对照组在 8 周后出现 LM 横截面积少量减少。该研究数据表明,NMES 能有效缓解甚至改善老年人因年龄增加而导致的肌肉萎缩^[81]。

5 总结与展望

近 10 年来,对于 NMES 施加于躯干稳定肌上的效果的研究,其研究对象主要集中于慢性腰背痛^[51,64,65,69-71,73,74,77]和退行性腰椎后凸的患者^[63,69],对于健康人、运动员、长期制动人群及潜在 LBP 高发人群的相关研究非常少。同时,现有研究大多限于刺激 LM,而对环绕腰腹部的 TrA 和 OI 的临床研究很少。然而,这些肌肉需要相互协作来维持躯干的稳定性,因此共同刺激它们可能是比较有效的方法^[83]。

综上,未来的临床研究可能集中在两个方面。①健康人群的长期随访队列研究,以探索 NMES 对躯干稳定肌的长效机制影响。运动员是出现 LBP 的主要群体之一^[83],将 NMES 作用于躯干稳定肌能否改善或预防运动员 LBP 及提高其运动表现是值得深入回顾与设计的前瞻性研究。②NMES 对运动损伤人群躯干稳定肌的短期疗效和长期康复效应。在损伤早期介入 NMES 如能缓解或预防躯干稳定肌的萎缩,则可缩短康复周期。此外,探讨将 NMES 应用于长期久坐人群和老年人群并进行临床观察与评估,可提高躯干稳定肌的耐力,预防摔倒和 LBP 等问题。

NMES 联合运动康复的研究也是一个发展趋势。已有很多研究将 NMES 与核心稳定训练或 MCE 联合^[69,70,73,77],能改善 LBP 患者的疼痛及其 LM 的激活率。普拉提和悬吊训练等^[84,85]能提升核心肌力,将其与 NMES 联合使用是未来研究的方向之一。可将 NMES 与腰椎徒手治疗^[86]等康复措施联合,以提升治疗效果和依从性;也可将其与其他传统物理因子疗法联合使用,以评估治疗的效果和持久性;还可将 NMES 联合中医传统运动疗法,如太极^[87]等,以验证能否更快地提升研究对象整体的稳定性和协调性等。此外,

NMES 也是一种便携、简单和经济的治疗选择,开发功能性便携式 NMES 设备具有实际的临床意义与良好的应用前景。

参考文献

- [1] GUO Y, BETHAN E P, ATHERTON P J, *et al.* Molecular and neural adaptations to neuromuscular electrical stimulation: implications for ageing muscle[J]. *Mech Ageing Dev*, 2021, 193: 111402.
- [2] MATOS F, AMARAL J, MARTINEZ E, *et al.* Changes in muscle thickness after 8 weeks of strength training, electromyostimulation, and both combined in healthy young adults[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(6): 3184.
- [3] HAINAUT K, DUCHATEAU J. Neuromuscular electrical stimulation and voluntary exercise[J]. *Sports Med*, 1992, 14(2): 100-113.
- [4] PAILLARD T. Muscle plasticity of aged subjects in response to electrical stimulation training and inversion and/or limitation of the sarcopenic process[J]. *Ageing Res Rev*, 2018, 46: 1-13.
- [5] MAFFIULETTI N A, GONDIN J, PLACE N, *et al.* Clinical use of neuromuscular electrical stimulation for neuromuscular rehabilitation: what are we overlooking?[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2018, 99(4): 806-812.
- [6] BANERJEE P, CAULFIELD B, CROWE L, *et al.* Prolonged electrical muscle stimulation exercise improves strength, peak VO₂, and exercise capacity in patients with stable chronic heart failure[J]. *J Card Fail*, 2009, 15(4): 319-326.
- [7] THÉRIAULT R, THÉRIAULT G, SIMONEAU J A. Human skeletal muscle adaptation in response to chronic low-frequency electrical stimulation[J]. *J Appl Physiol* (1985), 1994, 77(4): 1885-1889.
- [8] HU F, LI N, LI Z, *et al.* Electrical pulse stimulation induces GLUT4 translocation in a Rac-Akt-dependent manner in C2C12 myotubes[J]. *FEBS Lett*, 2018, 592(4): 644-654.
- [9] LEE I H, LEE Y J, SEO H, *et al.* Study of muscle contraction induced by electrical pulse stimulation and nitric oxide in C2C12 myotube cells[J]. *J Exerc Nutrition Biochem*, 2018, 22(1): 22-28.
- [10] ROTH R J, LE A M, ZHANG L, *et al.* MAPK phosphatase-1 facilitates the loss of oxidative myofibers associated with obesity in mice[J]. *J Clin Invest*, 2009, 119(12): 3817-3829.
- [11] MOON Y S, KWON D R, LEE Y J. Therapeutic effect of microcurrent on calf muscle atrophy in immobilized rabbit[J]. *Muscle Nerve*, 2018, 58(2): 270-276.
- [12] GUO B S, CHEUNG K K, YEUNG S S, *et al.* Electrical stimulation influences satellite cell proliferation and apoptosis in unloading-induced muscle atrophy in mice[J]. *PLoS One*, 2012, 7(1): e30348.

- [13] GIBSON J N, SMITH K, RENNIE M J. Prevention of disuse muscle atrophy by means of electrical stimulation: maintenance of protein synthesis[J]. **Lancet**, 1988, 2(8614): 767-770.
- [14] DIRKS M L, WALL B T, SNIJDERS T, *et al.* Neuromuscular electrical stimulation prevents muscle disuse atrophy during leg immobilization in humans[J]. **Acta Physiol (Oxf)**, 2014, 210(3): 628-641.
- [15] WILLAND M P, ROSA E, MICHALSKI B, *et al.* Electrical muscle stimulation elevates intramuscular BDNF and GDNF mRNA following peripheral nerve injury and repair in rats[J]. **Neuroscience**, 2016, 334: 93-104.
- [16] WENJIN W, WENCHAO L, HAO Z, *et al.* Electrical stimulation promotes BDNF expression in spinal cord neurons through Ca(2+) and Erk-dependent signaling pathways[J]. **Cell Mol Neurobiol**, 2011, 31(3): 459-467.
- [17] GREGORY C M, BICKEL C S. Recruitment patterns in human skeletal muscle during electrical stimulation[J]. **Phys Ther**, 2005, 85(4): 358-364.
- [18] JUBEAU M, GONDIN J, MARTIN A, *et al.* Random motor unit activation by electrostimulation[J]. **Int J Sports Med**, 2007, 28(11): 901-904.
- [19] VANDERTHOMMEN M, DUCHATEAU J. Electrical stimulation as a modality to improve performance of the neuromuscular system[J]. **Exerc Sport Sci Rev**, 2007, 35(4): 180-185.
- [20] HENNEMAN E. Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge[J]. **Science**, 1957, 126(3287): 1345-1347.
- [21] VAN MIDDELKOOP M, RUBINSTEIN S M, VERHAGEN A P, *et al.* Exercise therapy for chronic nonspecific low-back pain[J]. **Best Pract Res Clin Rheumatol**, 2010, 24(2): 193-204.
- [22] OWEN P J, MILLER C T, MUNDELL N L, *et al.* Which specific modes of exercise training are most effective for treating low back pain? Network Meta-analysis[J]. **Br J Sports Med**, 2020, 54(21): 1279-1287.
- [23] FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ R, ÁLVAREZ-BUENO C, CAVERO-REDONDO I, *et al.* Best exercise options for reducing pain and disability in adults with chronic low back pain: pilates, strength, core-based, and mind-body. a network Meta-analysis[J]. **J Orthop Sports Phys Ther**, 2022, 52(8): 505-521.
- [24] HAYDEN J A, ELLIS J, OGILVIE R, *et al.* Exercise therapy for chronic low back pain[J]. **Cochrane Database Syst Rev**, 2021, 9(9): Cd009790.
- [25] BAEK S O, AHN S H, JONES R, *et al.* Activations of deep lumbar stabilizing muscles by transcutaneous neuromuscular electrical stimulation of lumbar paraspinal regions[J]. **Annals of Rehabilitation Medicine**, 2014, 38(4): 506-513.
- [26] BAEK S O, CHO H K, JUNG G S, *et al.* Verification of an optimized stimulation point on the abdominal wall for transcutaneous neuromuscular electrical stimulation for activation of deep lumbar stabilizing muscles[J]. **Spine Journal**, 2014, 14(9): 2178-2183.
- [27] CHO H K, JUNG G S, KIM E H, *et al.* The effects of neuromuscular electrical stimulation at different frequencies on the activations of deep abdominal stabilizing muscles[J]. **J Back Musculoskeletal Rehabil**, 2016, 29(1): 183-189.
- [28] HODGES P W, ERIKSSON A E, SHIRLEY D, *et al.* Intra-abdominal pressure increases stiffness of the lumbar spine[J]. **J Biomech**, 2005, 38(9): 1873-1880.
- [29] HODGES P W, RICHARDSON C A. Contraction of the abdominal muscles associated with movement of the lower limb[J]. **Phys Ther**, 1997, 77(2): 132-142.
- [30] URQUHART D M, BARKER P J, HODGES P W, *et al.* Regional morphology of the transversus abdominis and obliquus internus and externus abdominis muscles[J]. **Clin Biomech (Bristol, Avon)**, 2005, 20(3): 233-241.
- [31] ALLISON G T, MORRIS S L, LAY B. Feedforward responses of transversus abdominis are directionally specific and act asymmetrically: implications for core stability theories[J]. **J Orthop Sports Phys Ther**, 2008, 38(5): 228-237.
- [32] MASSÉ-ALARIE H, BEAULIEU L D, PREUSS R, *et al.* Task-specificity of bilateral anticipatory activation of the deep abdominal muscles in healthy and chronic low back pain populations[J]. **Gait Posture**, 2015, 41(2): 440-447.
- [33] MACINTOSH J E, VALENCIA F, BOGDUK N, *et al.* The morphology of the human lumbar multifidus[J]. **Clin Biomech (Bristol, Avon)**, 1986, 1(4): 196-204.
- [34] MACINTOSH J E, BOGDUK N. The biomechanics of the lumbar multifidus[J]. **Clin Biomech (Bristol, Avon)**, 1986, 1(4): 205-213.
- [35] MOSELEY G L, HODGES P W, GANDEVIA S C. Deep and superficial fibers of the lumbar multifidus muscle are differentially active during voluntary arm movements[J]. **Spine (Phila Pa 1976)**, 2002, 27(2): E29-36.
- [36] WARD S R, KIM C W, ENG C M, *et al.* Architectural analysis and intraoperative measurements demonstrate the unique design of the multifidus muscle for lumbar spine stability[J]. **J Bone Joint Surg Am**, 2009, 91(1): 176-185.
- [37] WONG A Y L, PARENT E C, FUNABASHI M, *et al.* Do various baseline characteristics of transversus abdominis and lumbar multifidus predict clinical outcomes in nonspecific low back pain? A systematic review[J]. **Pain**, 2013, 154(12): 2589-2602.

- [38] LINEK P, NOORMOHAMMADPOUR P, MANSOURNIA M A, *et al.* Morphological changes of the lateral abdominal muscles in adolescent soccer players with low back pain: a prospective cohort study[J]. **J Sport Health Sci**, 2020, 9(6): 614-619.
- [39] JACOBS J V, HENRY S M, NAGLE K J. Low back pain associates with altered activity of the cerebral cortex prior to arm movements that require postural adjustment[J]. **Clin Neurophysiol**, 2010, 121(3): 431-440.
- [40] HIDES J, GILMORE C, STANTON W, *et al.* Multifidus size and symmetry among chronic LBP and healthy asymptomatic subjects[J]. **Manual Therapy**, 2008, 13(1): 43-49.
- [41] HODGES P W, DANNEELS L. Changes in structure and function of the back muscles in low back pain: different time points, observations, and mechanisms[J]. **J Orthop Sports Phys Ther**, 2019, 49(6): 464-476.
- [42] LARIVIERE C, GAGNON D H, HENRY S M, *et al.* The effects of an 8-week stabilization exercise program on lumbar multifidus muscle thickness and activation as measured with ultrasound imaging in patients with low back pain: an exploratory study[J]. **PM R**, 2018, 10(5): 483-493.
- [43] MACDONALD D, MOSELEY L G, HODGES P W. Why do some patients keep hurting their back? Evidence of ongoing back muscle dysfunction during remission from recurrent back pain[J]. **Pain**, 2009, 142(3): 183-188.
- [44] HERMENS H J, 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.
- [45] STOKES I A, HENRY S M, SINGLE R M. Surface EMG electrodes do not accurately record from lumbar multifidus muscles[J]. **Clin Biomech (Bristol, Avon)**, 2003, 18(1): 9-13.
- [46] XIE H, LIU J, HE Y, *et al.* Surface electromyography study on asymmetry in paravertebral muscle degeneration in patients with degenerative lumbar scoliosis[J]. **Sci Rep**, 2022, 12(1): 18675.
- [47] GIBBON K C, DEBUSE D, HIBBS A, *et al.* Reliability and precision of sonography of the lumbar multifidus and transversus abdominis during dynamic activities[J]. **J Ultrasound Med**, 2017, 36(3): 571-581.
- [48] SÁNCHEZ ROMERO E A, ALONSO PÉREZ J L, MUÑOZ FERNÁNDEZ A C, *et al.* Reliability of sonography measures of the lumbar multifidus and transversus abdominis during static and dynamic activities in subjects with non-specific chronic low back pain[J]. **Diagnostics (Basel)**, 2021, 11(4).
- [49] SIONS J M, VELASCO T O, TEYHEN D S, *et al.* Ultrasound imaging: intraexaminer and interexaminer reliability for multifidus muscle thickness assessment in adults aged 60 to 85 years versus younger adults[J]. **J Orthop Sports Phys Ther**, 2014, 44(6): 425-434.
- [50] SIONS J M, VELASCO T O, TEYHEN D S, *et al.* Reliability of ultrasound imaging for the assessment of lumbar multifidus thickness in older adults with chronic low back pain[J]. **J Geriatr Phys Ther**, 2015, 38(1): 33-39.
- [51] COGHLAN S, CROWE L, MCCARTHYPERSSON U, *et al.* Neuromuscular electrical stimulation training results in enhanced activation of spinal stabilizing muscles during spinal loading and improvements in pain ratings[J]. **Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc**, 2011, 2011: 7622-7625.
- [52] WON S, ARDY W, AHMAD P, *et al.* Near infrared spectroscopy confirms recruitment of specific lumbar extensors through neuromuscular electrical stimulation[J]. **Physiother Theory Pract**, 2020, 36(4): 516-523.
- [53] LIEBER R L, KELLY M J. Factors influencing quadriceps femoris muscle torque using transcutaneous neuromuscular electrical stimulation[J]. **Phys Ther**, 1991, 71(10): 715-721. discussion 722-713.
- [54] LAI H S, DOMENICO G D, STRAUSS G R. The effect of different electro-motor stimulation training intensities on strength improvement[J]. **Aust J Physiother**, 1988, 34(3): 151-164.
- [55] MAFFIULETTI N A. Physiological and methodological considerations for the use of neuromuscular electrical stimulation[J]. **Eur J Appl Physiol**, 2010, 110(2): 223-234.
- [56] LAKE D A. Neuromuscular electrical stimulation: an overview and its application in the treatment of sports injuries[J]. **Sports Med**, 1992, 13(5): 320-336.
- [57] BARBARA M, DOUCET, AMY L, LISA G. Neuromuscular electrical stimulation for skeletal muscle function[J]. **Yale Journal of Biology and Medicine**, 2012, 85(2): 201-215.
- [58] GORGEY A S, BLACK C D, ELDER C P, *et al.* Effects of electrical stimulation parameters on fatigue in skeletal muscle[J]. **J Orthop Sports Phys Ther**, 2009, 39(9): 684-692.
- [59] SHA N, KENNEY L P, HELLER B W, *et al.* A finite element model to identify electrode influence on current distribution in the skin[J]. **Artif Organs**, 2008, 32(8): 639-643.
- [60] 周斌, 严洪立, 黄林科, 等. 不同神经肌肉电刺激方法对肌肉疲劳影响的研究[J]. **生命科学仪器**, 2021, 19(2): 35-39.
ZHOU Bin, YAN Hongli, HUANG Linke, *et al.* A study on the effects of different neuromuscular electrical stimulation methods on muscle fatigue [J]. **Life Science Instruments**, 2021, 19(2): 35-39.
- [61] RUSS D W, ELLIOTT M A, VANDENBORNE K, *et al.* Metabolic

- costs of isometric force generation and maintenance of human skeletal muscle[J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2002, 282(2): E448-457.
- [62] COGHLAN S, CROWE L, MCCARTHYPERSSON U, *et al.* Electrical muscle stimulation for deep stabilizing muscles in abdominal wall[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2008, 2008: 2756-2759.
- [63] KIM S Y, KIM J H, JUNG G S, *et al.* The effects of transcutaneous neuromuscular electrical stimulation on the activation of deep lumbar stabilizing muscles of patients with lumbar degenerative kyphosis[J]. *Journal of Physical Therapy Science*, 2016, 28(2): 399-406.
- [64] BAEK S O, CHO H K, KIM S Y, *et al.* Changes in deep lumbar stabilizing muscle thickness by transcutaneous neuromuscular electrical stimulation in patients with low back pain[J]. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, 2017, 30(1): 121-127.
- [65] SIONS J M, CRIPPEN D C, HICKS G E, *et al.* Exploring neuromuscular electrical stimulation intensity effects on multifidus muscle activity in adults with chronic low back pain: an ultrasound imaging-informed investigation[J]. *Clin Med Insights Arthritis Musculoskelet Disord*, 2019, 12: 1179544119849570.
- [66] GUIRRO R R, GUIRRO E C, DE SOUSA N T. Sensory and motor thresholds of transcutaneous electrical stimulation are influenced by gender and age[J]. *PM R*, 2015, 7(1): 42-47.
- [67] JUNG G S, CHANG M C, SEO S W, *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]. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, 2018, 31(2): 267-274.
- [68] SARWAHI V, BOACHIE-ADJEI O, BACKUS S I, *et al.* Characterization of gait function in patients with postsurgical sagittal (flatback) deformity: a prospective study of 21 patients[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2002, 27(21): 2328-2337.
- [69] ALRWAILY M, SCHNEIDER M, SOWA G, *et al.* Stabilization exercises combined with neuromuscular electrical stimulation for patients with chronic low back pain: a randomized controlled trial[J]. *Braz J Phys Ther*, 2019, 23(6): 506-515.
- [70] DIMER DA LUZ R, DA SILVA SANTOS M, STEFFEN EVALDT A, *et al.* Neuromuscular electrical stimulation associated with core stability exercises in nonspecific postural low back pain: a randomized clinical trial[J]. *Mltj-Muscles Ligaments and Tendons Journal*, 2019, 9(3): 446-456.
- [71] PUGLIESE J M, SIONS J M, VELASCO T O, *et al.* Use of trunk muscle training and neuromuscular electrical stimulation to reduce pain and disability in an older adult with chronic low back pain: a case report[J]. *Physiother Theory Pract*, 2019, 35(8): 797-804.
- [72] SARAGIOTTO B T, MAHER C G, YAMATO T P, *et al.* Motor control exercise for nonspecific low back pain: a cochrane review[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2016, 41(16): 1284-1295.
- [73] SONGJAROEN S, SUNGNAK P, PIRIYAPRASARTH P, *et al.* Combined neuromuscular electrical stimulation with motor control exercise can improve lumbar multifidus activation in individuals with recurrent low back pain[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 14815.
- [74] WATTANANON P, SUNGNAK P, SONGJAROEN S, *et al.* Using neuromuscular electrical stimulation in conjunction with ultrasound imaging technique to investigate lumbar multifidus muscle activation deficit[J]. *Musculoskeletal Science and Practice*, 2020, 50: 102215.
- [75] RUSSO M, DECKERS K, EL DABE S, *et al.* Muscle control and non-specific chronic low back pain[J]. *Neuromodulation*, 2018, 21(1): 1-9.
- [76] VAN DIEËN J H, REEVES N P, KAWCHUK G, *et al.* Motor control changes in low back pain: divergence in presentations and mechanisms[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2019, 49(6): 370-379.
- [77] WATTANANON P, SONGJAROEN S, SUNGNAK P, *et al.* Neuromuscular responses to combined neuromuscular electrical stimulation and motor control exercises in a patient with recurrent low back pain: a single subject research report[J]. *Physiother Theory Pract*, 2022: 1-6.
- [78] Gabriel D A, Kamen G, Frost G. Neural adaptations to resistive exercise: mechanisms and recommendations for training practices[J]. *Sports Med*, 2006, 36(2): 133-149.
- [79] CHEN Z N, YAO X M, LV Y, *et al.* Morphology of the lumbar multifidus muscle in lumbar disc herniation at different durations and at different ages[J]. *Exp Ther Med*, 2018, 15(5): 4119-4126.
- [80] JANDOVA T, NARICI M V, STEFFL M, *et al.* Muscle hypertrophy and architectural changes in response to eight-week neuromuscular electrical stimulation training in healthy older people[J]. *Life (Basel)*, 2020, 10(9).
- [81] ABE T, LOENNEKE J P, THIEBAUD R S. Morphological and functional relationships with ultrasound measured muscle thickness of the lower extremity: a brief review[J]. *Ultrasound*, 2015, 23(3): 166-173.
- [82] HODGES P W, RICHARDSON C A. Inefficient muscular stabilization of the lumbar spine associated with low back pain. a motor control evaluation of transversus abdominis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1996, 21(22): 2640-2650.
- [83] THORNTON J S, CANEIRO J P, HARTVIGSEN J, *et al.* Treating low back pain in athletes: a systematic review with Meta-analysis[J].

Br J Sports Med, 2021, 55(12): 656-662.

- [84] FONG S S, TAM Y T, MACFARLANE D J, *et al.* Core muscle activity during trx suspension exercises with and without kinesiology taping in adults with chronic low back pain: implications for rehabilitation[J]. **Evid Based Complement Alternat Med**, 2015, 2015: 910168.
- [85] PENG M S, WANG R, WANG Y Z, *et al.* Efficacy of therapeutic aquatic exercise vs physical therapy modalities for patients with chronic low back pain: a randomized clinical trial[J]. **JAMA Netw**

Open, 2022, 5(1): e2142069.

- [86] PAIGE N M, MIAKE-LYE I M, BOOTH M S, *et al.* Association of spinal manipulative therapy with clinical benefit and harm for acute low back pain: systematic review and meta-analysis[J]. **Jama**, 2017, 317(14): 1451-1460.
- [87] WAN R, SHI J, HU K, *et al.* Effect of different weekly frequencies of Chen-style Tai Chi in elders with chronic non-specific low back pain: study protocol for a randomised controlled trial[J]. **Trials**, 2022, 23(1): 951.