

文章编号: 1004-7220(2023)06-1260-07

慢性非特异性腰痛腰椎屈伸生物力学特征研究进展

曹奔¹, 周鑫¹, 姚重界², 房敏³

(1. 上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院, 上海 200437; 2. 上海中医药大学 针灸推拿学院, 上海 201203;

3. 上海中医药大学附属曙光医院, 上海 201203)

摘要:慢性非特异性腰痛(nonspecific chronic low back pain, NSCLBP)是一种常见疾病,已经引起了广泛关注,但发病机制尚不明确。近年来,借助相关设备研究 NSCLBP 发生发展的生物力学机制越来越受到重视。本文以腰椎核心功能屈伸运动为重点,综述国内外关于 NSCLBP 腰椎屈伸生物力学特征的研究进展,通过对具体研究方法及观察指标的深入探讨及总结展望,发现患者运动学、动力学、表面肌电等参数存在异常征象,为探索 NSCLBP 发病机制及其科学防治开拓思路。

关键词:慢性非特异性腰痛; 屈伸; 生物力学; 运动学; 动力学; 表面肌电

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.031

Research Progress on Biomechanical Characteristics of Nonspecific Chronic Low Back Pain During Lumbar Flexion and Extension

CAO Ben¹, ZHOU Xin¹, YAO Chongjie², FANG Min³

(1. Yueyang Hospital of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 200437, China; 2. Institute of Acupuncture, Moxibustion and Tuina, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China; 3. Shuguang Hospital, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China)

Abstract: Nonspecific chronic low back pain (NSCLBP) is a common disease that has generated widespread attention, yet its pathogenesis remains unclear. In recent years, more and more attention has been paid to biomechanical mechanism of the occurrence and development of NSCLBP aided by relevant equipment. This review focused on core function of lumbar spine, i. e. flexion and extension movements, and summarized the progress on biomechanical characteristics of NSCLBP during lumbar flexion and extension both domestically and internationally. Through an in-depth discussion and summary of specific research methods and observation indexes, anomalous signs of kinematics, kinetics, surface electromyography were found in patients with NSCLBP, which opened up new ideas for exploring pathogenesis of NSCLBP and its scientific prevention and treatment.

Key words: nonspecific chronic low back pain; flexion and extension; biomechanics; kinematics; kinetics; surface electromyography

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(82030121, 82205304), 国家中医药管理局中医药创新团队及人才支持计划项目(ZYYCXTD-C-202008), 科技创新行动计划“医学创新研究专项项目(21Y21920300)

通信作者: 房敏, 教授, 主任医师, E-mail: fm-tn0510@shutcm.edu.cn

据权威统计,2019年,腰痛(low back pain, LBP)影响了全球约5.68亿人^[1]。一项包括56个国家的系统综述显示,LBP的终生患病率高达40%,是最常见的肌肉骨骼系统疾病之一^[2]。国际上通常将LBP分为特异性和非特异性,其中非特异性腰痛,即不能确定特定病理解剖学原因的LBP,占有所有LBP的80%~90%^[3];且超过60%的患者在发病1年后可出现疼痛与病情反复,进展为慢性非特异性腰痛(nonspecific chronic low back pain, NSCLBP),每年由此造成巨大的社会与经济负担^[4-6]。

NSCLBP尚无统一的诊断标准,通常通过详尽的病史采集与体格检查以排除特异性病因(包括脊柱与非脊柱源性疾病,如腰椎间盘突出症、肿瘤、感染或其他炎症性疾病等)来确定^[7]。因此,使用相关设备,探索NSCLBP发生发展的生物力学机制,从而明确诊断及发病机制,具有重要的现实意义与科学价值。作为腰椎核心功能之一,屈伸动作是实现其他腰部动作(如坐立、拾物等日常活动)的基础,屈伸功能受限也是NSCLBP患者最突出的特征之一^[8]。同时,屈伸动作的实现,涉及复杂的运动学(如关节角度、腰盆节律)、动力学(如关节力矩、运动功率),以及腰部屈伸肌力学性能的综合协调^[8-10]。因此,观察NSCLBP患者腰椎屈伸功能的异常改变,探索病变综合特征及内在生物力学机制,对改善患者功能障碍和指导NSCLBP临床施治具有重要意义。本文综述了近年来本领域的研究进展,以期为进一步开展LBP的生物力学研究开拓思路。

1 运动学

运动捕捉系统可对人体多关节活动角度、速度的动态变化行高频记录,逐帧、逐点解析。已有较多研究运用运动捕捉系统观察步行、坐立、屈伸等动作下人体运动模式^[11-13];而针对腰椎屈伸运动学的研究,较多集中于腰盆协调及关节活动度。

1.1 腰盆协调运动

腰盆协调运动是维持脊柱屈伸功能的重要环节,运动学研究为探索LBP患者异常的腰盆运动模式提供了直观生动的证据。Sharon等^[14]研究NSCLBP患者屈伸运动学特征,发现LBP组在不同

速度下多次屈伸,腰椎与髋关节的速度、加速度均显著下降,且保持“刻板”的腰-骨盆协调模式,而健康受试者可根据屈曲速度动态调整腰-骨盆协调运动。该研究认为,这种异常的运动模式可能在患者LBP慢性进程中起到关键作用。Elizabeth等^[15]将胸-腰-盆协调运动情况与患者症状评分相关联,结果发现,前屈时,腰部对胸腔运动贡献率较高、骨盆倾斜度较小的患者表现出更高的残疾与疼痛水平,这进一步印证了Sharon等^[14]的结论。国内已有学者通过坐立运动揭示了脊柱-骨盆-髋关节复合体的紧密联系^[16]。

1.2 关节活动度

关节活动度(range of motion, ROM)广泛应用于LBP患者运动学异常特征的评价。ROM受较多因素的影响,如受试者的柔韧性、运动恐惧-回避信念等,但其仍是LBP生物力学研究中使用最普遍的指标之一,对患者疼痛与功能的变化反应有较好的灵敏度^[17]。Zheng等^[8]系统回顾了LBP患者与非患者屈伸ROM比较的研究,发现患者腰椎前屈和侧屈ROM显著下降,认为这可能与患者腰椎本体感觉减退相关,该结果与Laird等^[19]的研究结果类似。

以ROM为基础,可展开进一步细化分析^[13]。如在时间维度上,可观察受试者达到最大ROM的起始时间、屈伸过程中达到90%最大屈曲角度以上的时间占比等;在角度定量观察方面,可分析屈曲、伸展过程中受试者腰椎屈曲的平均角度变化。Sanchez等^[17]通过对以上指标的观察,发现LBP患者屈伸过程中达到最大屈曲角度更晚、维持大幅度屈曲时间更短。躯干前屈时产生的弯曲力矩是腰椎损伤的主要原因之一,随着前屈幅度增大,即便是微小的角度变化也会引起弯曲力矩的大幅变化^[20]。这可能是LBP患者屈伸运动模式改变的深层原因,即通过减小腰椎弯曲程度及大幅屈曲的时长,降低屈曲峰值弯矩与在此弯矩下停留的时间,达到保护脊柱的目的^[17]。

机器学习(machine learning, ML)为评估NSCLBP患者的运动特征提供了新手段。研究发现,患者屈伸运动时样本熵(sample entropy)显著下降,表明LBP可降低其运动复杂性^[21]。通过观察屈伸运动时的角速度等指标,应用高斯朴素贝叶斯

算法鉴别 NSCLBP 患者,准确率可达 79%,提示 ML 或可成为 NSCLBP 临床诊断的重要参考之一。

2 动力学

腰椎动力学特征与机体功能活动息息相关,如前屈取物时 LBP 患者更倾向于采用蹲姿,增大膝盖峰值功率,减小腰部峰值剪切力以降低腰椎损伤风险^[22]。探索 NSCLBP 患者腰椎动力学特征,有助于分析腰椎受力、明确损伤原因,进一步预防腰椎急性慢性损伤并指导患者康复训练,具有重要的科学价值。

动力学参数常用采集设备包括三维测力台、等速肌力测试系统、足底压力系统。三维测力台对力、力矩、压力中心等指标可高敏定量采集,较多应用于运动科学研究;等速肌力测试系统可客观采集等长、等速条件下单关节的力矩及功率等指标,在康复医学领域应用广泛;足底压力系统可测量人体与支撑面之间的压强与压力中心变化,在研究人体步态与足部疾患中发挥积极作用^[23-24]。

2.1 三维测力台

Howarth 等^[9]采用美国 AMTI 三维测力台观察受试者腰椎屈伸时腰部载荷与屈伸力矩之间的关系,发现腰椎被动组织(椎体周围附着的韧带等)必须产生足够的伸展力矩以支持腰部载荷渐增导致的屈曲力矩提高,从而可实现腰肌屈曲松弛下的屈伸“平衡态”,认为动力学特征在介导腰肌屈曲松弛变化中起到关键作用。Junshi 等^[25]的研究同样发现,受试者进行屈伸取物动作时,提升物体重量,可显著增加拿取及放下阶段的腰部弯曲力矩;而提前告知物体信息,或可通过心理调节作用降低躯干的运动速度及弯曲力矩,从而降低发生 LBP 的风险。

2.2 等速肌力测试系统

使用等速肌力测试系统,观察腰椎屈伸肌动力学参数比值的异常,为探索 LBP 患者屈伸肌力学性能失衡、脊柱失稳提供客观证据。Bernard 等^[26]观察慢性青少年 LBP 患者屈伸肌最大力矩(maximal moment of force, MMF)、平均功率(mean power, MP)等指标,发现与健康受试者相比,青少年 LBP 患者伸肌较弱而屈肌较强,屈伸肌 MMF、MP 比值异常提高。应用等速肌力测试系统观察干预前后相关参数的动态变化,可为干预手段的疗效评估提供

客观依据。Sipaviciene 等^[27]观察核心稳定锻炼后 NSCLBP 患者屈伸肌峰值力矩(peak torque, PT)、多裂肌横截面积变化,发现为期 20 周的运动可显著改善患者 PT,增加多裂肌横截面积,且疗效在干预后 12 周仍持续存在,该研究证实了主动锻炼在治疗 NSCLBP 中的突出优势。国内已有学者应用等速肌力测试系统开展腰椎相关疾病力学性能的评价。周楠等^[28]观察推拿手法对腰突症的疗效,发现治疗后患者腰伸肌 PT、MP 及屈伸比显著改善,研究结果为推拿干预腰突症临床疗效提供了生物力学证据。

三维测力台与等速肌力测试系统可对运动中单关节或多关节受力、力矩等指标定量分析,然而动力学变化受到较多因素影响,如椎旁肌肉协同激活从而产生运动力矩,运动速度及运动幅度影响动力学参数。因此,进一步研究可与运动学、肌肉力学分析手段相结合,以探索脊柱运动过程中复杂的相互作用。同时,当前应用动力学方法评估 NSCLBP 干预疗效的研究相对缺乏,且多存在样本量较少、观察周期较短等不足,未来应开展大样本、长随访、高质量的临床研究,以进一步明确疗效及指导临床诊疗。

3 表面肌电

表面肌电(surface electromyography, sEMG)通过在目标肌肉的皮肤表面规范粘贴电极片并结合配套的采集分析系统,可间接量化分析肌肉运动单元的生物电活动,以评估肌肉疲劳程度、激活模式等^[29]。sEMG 具有无创、多靶点特性,相较于传统肌内采集方式,愈发被研究人员优先选择^[29]。

对 sEMG 信号进行标准化处理,是进行不同受试者、不同采集时间等条件下互相比较的前提条件,通常通过将肌肉激活程度表示为该肌肉参考收缩活动的百分比来实现^[30]。目前常用的标准化方法为最大自主收缩法(maximal voluntary contractions, MVC),但该操作常导致 LBP 患者疼痛加剧。近年来,较多学者支持使用亚极量 MVC 进行肌电标准化操作,认为该方法更稳定可靠^[30]。Gemma 等^[31]借助罗马椅进行水平位置、无阻力的改良 Sorensen 测试,认为该操作产生的亚极量 MVC 激活水平较高、个体间变异性较小,可作为肌电标

准化的良好参考。

测试动作及观察指标的选择是 sEMG 研究的重点环节。目前针对 NSCLBP 的研究,较多集中于腰椎屈伸运动^[32]。通过观察屈伸过程中核心肌群 sEMG 的激活强度、激活时序、屈曲-松弛现象,探索 LBP 发生发展的肌肉力学特征。

3.1 时域与频域分析

通过时域分析,观察 sEMG 的积分肌电、平均振幅、均方根振幅(root mean square, RMS)等,结合频域分析,观察中值频率、平均功率频率(mean power frequency, MPF)等指标,可综合客观评估受试者被测肌肉的力量、耐力、疲劳程度。Leinonen 等^[33]研究发现,NSCLBP 患者屈伸时臀大肌力量减弱且更易疲劳,这可能与疼痛导致的废用性萎缩相关,而髋部肌肉力学性能下降可能进一步导致腰肌代偿运动,改变原有的腰-骨盆运动模式,从而加剧腰背损伤风险。针对肌肉形态的影像学观察或可为 LBP 患者 sEMG 的变化提供进一步证据。研究发现,LBP 患者竖脊肌(erector spinae, ES)、多裂肌、腰大肌存在不同程度的肌肉萎缩及脂肪浸润现象^[34]。这种结构学改变可能是患者肌肉功能与力学性能下降的基础。

观察运动疗法干预前后目标肌群 sEMG 的动态变化,可客观呈现其干预疗效并探索起效途径。Pattanasin 等^[35]通过观察核心稳定与本体感觉训练前后 NSCLBP 患者核心肌群 RMS 的变化发现,干预后,患者神经肌肉控制能力得到改善,腹横肌、多裂肌的激活程度显著提高,故认为这可能是患者疼痛与功能障碍水平改善的起效机制。较多研究已证实,运动疗法可以改善 NSCLBP 患者 ES 的 MPF 斜率,有效增加肌肉耐力^[36-37]。这种疗效常可维持到干预结束后较长时间,且与患者腰背疼痛与功能障碍程度的改善关联密切^[37]。

3.2 屈曲松弛现象

与健康人相比,应用 sEMG 可观察到 NSCLBP 患者椎旁肌群神经肌肉控制的变化^[38]。其中,屈曲松弛现象(flexion relaxation phenomenon, FRP)研究较为深入。研究表明,在躯干完全屈曲时腰部 ES 肌电活动发生骤减或“沉默”改变,这种改变可能是由于重力引起的屈曲力矩与腰椎后纵韧带等牵伸形成的伸展力矩在腰椎完全屈曲时达到微妙的“动

态平衡”所致^[39-40]。FRP 减弱或消失普遍存在于 NSCLBP 患者中,且该指标具有良好的可靠性及可重复性,可客观反映患者的疼痛与功能障碍水平^[18,41]。鉴于 NSCLBP 诊断上的不确定性及 FRP 出色的临床与科研价值,已有学者建议将 FRP 作为 NSCLBP 的候选生物标志物^[42]。

运用 sEMG 评估 FRP,当前标准仍依赖于二元视觉确定,即通过视觉观察确定有无该现象,通常较为耗时且具有主观性。通过计算 sEMG 信号在屈曲与伸展过程中与完全屈曲状态下的比率确立的屈曲松弛比及伸展松弛比,日益受到人们的重视。该类指标具有连续、定量、客观性,且具有高度的灵敏度与特异性,可弥补视觉评估方法的不足,但未来仍需在不同人群中进一步验证^[10]。

结合运动学研究,可观察 FRP 开始及结束时受试者腰椎屈曲的角度,进一步判断 FRP 起止时间的变化。Sanchez 等^[17]研究发现,慢性腰痛患者 FRP 开始及结束时,髋关节与腰椎屈曲角度更大,即屈曲时患者 ES 松弛开始得更晚,伸展时结束得更早,充分说明 LBP 患者的 FRP 时间缩短甚至消失。已有研究关注到屈曲过程中 FRP 出现的时机及与腰椎载荷的关系。Kippers 等^[43]研究发现,FRP 常开始及结束于躯干完全屈曲的 2/3 位置处,使用重物增加受试者的腰椎载荷可使 FRP 延迟发生。有学者进一步探讨患有 LBP 的孕妇妊娠后期腹部载荷增加对腰屈伸肌群 sEMG 的影响,发现孕妇前屈时可出现 ES 激活异常增高、FRP 异常缩短等适应性改变,这可能是机体为对抗腹部载荷骤增所衍生的生物力学保护机制^[13]。研究表明,腰椎后纵韧带、棘上韧带等被动组织具备蠕变特性,该特性或可增加 FRP 出现时的腰椎屈曲角度^[44]。具体而言,腰椎载荷增加,被动组织发生蠕变,致使其应力-应变关系发生变化,则需要更大的屈曲角度以扩大组织伸长率,从而产生足够的力来对抗增加的屈曲力矩,这可能是腰部载荷与 FRP 关系的深层原因^[9]。

综合观察 NSCLBP 患者 sEMG 的相关研究,不难发现,当前仍缺乏统一的 sEMG 测量方法及标准化手段。并且因为该技术固有的缺陷,如深层肌肉观测不足、干扰因素过多等,限制了研究结果的可比性与可重复性。标准的测量方法与数据分析手段,同时结合其他测量技术以了解深层肌肉活动,

可为 NSCLBP 的发病机制提供更全面可靠的肌肉力学证据。

4 结论与展望

NSCLBP 发病的生物力学机制目前仍不十分清楚,可能是由于急慢性损伤导致的腰椎肌肉、关节、韧带等结构位置、功能异常综合作用的结果^[45]。运动学、动力学、sEMG 等生物力学评估设备为探索这一复杂机制提供了科学手段。运动学指标如 ROM、腰盆节律等是患者功能异常的直观体现;动力学指标如 MMF、MP 等通过人体受力与发力分析,可探索导致功能异常的动力原因;而应用 sEMG 可对运动、动力产生的根源——神经肌肉活动的特征客观量化评价。三者相辅相成,综合应用可深入全面探析人体生理、病理状态下功能活动的生物力学机制。

针对 NSCLBP 人群,开展腰椎屈伸功能的生物力学研究,具有广泛的拓展和实际应用价值,近年来已取得了一定的进展,但仍存在诸多不足:① 较多研究缺乏完整和精细的试验设计。探索人体生物力学机制,需要良好的外部因素控制,如体位、速度、负荷等,诸多混杂因素限制了结果的准确解读;② 躯干屈伸的复杂性与测量手段的单一性、多种测量手段的全面性与不同手段之间的误差与可比性问题,尚未良好统筹;③ 样本量的选择代表性不足,如过度依赖某一人群或样本数量不足,限制了研究结果的准确性与可靠性;④ 研究对象的个体差异尚不能良好统一。不同个体身体构造与运动模式相异,这些差异导致了研究结果的误差与不确定性;⑤ 与人工智能等新兴领域结合不足。人工智能算法与模型在生物力学数据采集、特征提取、分类与预测等方面已显示出光明前景^[46]。综上所述,精细的试验设计,全面的评估手段,充足且有代表性的样本量,科学的采集与分析方法以最大限度降低测量与个体误差,控制混杂因素干扰,同时应用人工智能手段贯穿研究数据采集、分析、预测的全过程,是未来研究 NSCLBP 人群生物力学特征的目标与方向。

参考文献:

- [1] Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 [J]. *Lancet*, 2020, 396(10258): 1204-1222.
- [2] HOY D, BAIN C, WILLIAMS G, *et al*. A systematic review of the global prevalence of low back pain [J]. *Arthritis Rheum*, 2012, 64(6): 2028-2037.
- [3] KOES BW, VAN TULDER MW, THOMAS S. Diagnosis and treatment of low back pain [J]. *Brit Med J*, 2006, 332(7555): 1430-1434.
- [4] ITZ CJ, GEURTS JW, van KLEEF M, *et al*. Clinical course of non-specific low back pain: A systematic review of prospective cohort studies set in primary care [J]. *Eur J Pain*, 2013, 17(1): 5-15.
- [5] Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 310 diseases and injuries, 1990-2015: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015 [J]. *Lancet*, 2016, 388(10053): 1545-1602.
- [6] KNEZEVIC NN, CANDIDO KD, VLAEYEN J, *et al*. Low back pain [J]. *Lancet*, 2021, 398(10294): 78-92.
- [7] CHIAROTTO A, KOES BW. Nonspecific low back pain [J]. *N Engl J Med*, 2022, 386(18): 1732-1740.
- [8] ZHENG Z, WANG Y, WANG T, *et al*. A systematic review and meta-analysis on comparative kinematics in the lumbopelvic region in the patients suffering from spinal pain [J]. *J Healthc Eng*, 2022: 7369242.
- [9] HOWARTH SJ, MASTRAGOSTINO P. Use of kinetic and kinematic data to evaluate load transfer as a mechanism for flexion relaxation in the lumbar spine [J]. *J Biomech Eng*, 2013, 135(10): 101004-101006.
- [10] GOUTERON A, TABARD-FOUGÈRE A, MOISSENET F, *et al*. Sensitivity and specificity of the flexion and extension relaxation ratios to identify altered paraspinal muscles' flexion relaxation phenomenon in nonspecific chronic low back pain patients [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2023, 68: 102740.
- [11] RAHIMI A, ARAB AM, NOURBAKSH MR, *et al*. Lower limb kinematics in individuals with chronic low back pain during walking [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2020, 51: 102404.
- [12] SADEGHISANI M, DEGHAN MANSHADI F, KHADEMI KALANTARI K, *et al*. Kinematics of the lumbar spine and hip joints in people with persistent low back [J]. *Med J Islam Repub Iran*, 2021, 35: 165.
- [13] BIVIÁ-ROIG G, LISÓN JF, SÁNCHEZ-ZURIAGA D. Effects of pregnancy on lumbar motion patterns and muscle responses [J]. *Spine J*, 2019, 19(2): 364-371.
- [14] TSANG S, SZETO G, LI L, *et al*. The effects of bending speed on the lumbo-pelvic kinematics and movement pattern during forward bending in people with and without

- low back pain [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2017, 18 (1): 157.
- [15] SALT E, WIGGINS AT, RAYENS MK, *et al.* The relationship between indicators of lumbo-pelvic coordination and pain, disability, pain catastrophizing and depression in patients presenting with non-chronic low back pain [J]. *Ergonomics*, 2020, 63(6): 724-734.
- [16] 周鑫, 朱清广, 孔令军, 等. 腰椎间盘突出症患者坐立时的运动学特征分析[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(4): 713-719.
- [17] SÁNCHEZ-ZURIAGA D, LÓPEZ-PASCUAL J, GARRIDO-JAÉN D, *et al.* A comparison of lumbopelvic motion patterns and erector spinae behavior between asymptomatic subjects and patients with recurrent low back pain during pain-free periods [J]. *J Manipulative Physiol Ther*, 2015, 38(2): 130-137.
- [18] MAYER TG, NEBLETT R, BREDE E, *et al.* The quantified lumbar flexion-relaxation phenomenon is a useful measurement of improvement in a functional restoration program [J]. *Spine*, 2009, 34(22): 2458-2465.
- [19] LAIRD RA, GILBERT J, KENT P, *et al.* Comparing lumbo-pelvic kinematics in people with and without back pain: A systematic review and meta-analysis [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2014, 15: 229.
- [20] DOLAN P, ADAMS MA. Influence of lumbar and hip mobility on the bending stresses acting on the lumbar spine [J]. *Clin Biomech*, 1993, 8(4): 185-192.
- [21] THIRY P, HOURY M, PHILIPPE L, *et al.* Machine learning identifies chronic low back pain patients from an instrumented trunk bending and return test [J]. *Sensors*, 2022, 22(13): 5027.
- [22] SARACENI N, CAMPBELL A, KENT P, *et al.* Exploring lumbar and lower limb kinematics and kinetics for evidence that lifting technique is associated with LBP [J]. *PLoS One*, 2021, 16(7): e254241.
- [23] 运动生物力学编写组. 运动生物力学[M]. 北京: 北京体育大学出版社, 2015: 217-221.
- [24] 杨倩倩, 孟宪中, 颜雯婷, 等. 慢性非特异性腰痛患者足底压力特征分析和平衡研究[J]. *医用生物力学*, 2023, 38 (1): 176-181.
- YANG QQ, MENG XZ, YAN TW, *et al.* Analysis on characteristics of plantar pressure and balance in patients with chronic nonspecific low back pain [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(1): 176-181.
- [25] LIU J, QU X, LIU Y. Influence of Load Knowledge on Biomechanics of Asymmetric Lifting[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(6): 3207.
- [26] BERNARD JC, BOUDOKHANE S, PUJOL A, *et al.* Isokinetic trunk muscle performance in pre-teens and teens with and without back pain [J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2014, 57(1): 38-54.
- [27] SIPAVICIENE S, KLIZIENE I. Effect of different exercise programs on non-specific chronic low back pain and disability in people who perform sedentary work [J]. *Clin Biomech*, 2020, 73: 17-27.
- [28] 周楠, 房敏, 朱清广, 等. 推拿手法治疗腰椎间盘突出症腰背伸肌群生物力学特性评价研究[J]. *中华中医药杂志*, 2012, 27(3): 562-566.
- [29] CHOWDHURY RH, REAZ MB, ALI MA, *et al.* Surface electromyography signal processing and classification techniques[J]. *Sensors*, 2013, 13(9): 12431-12466.
- [30] DANKAERTS W, O'SULLIVAN PB, BURNETT AF, *et al.* Reliability of EMG measurements for trunk muscles during maximal and sub-maximal voluntary isometric contractions in healthy controls and CLBP patients [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2004, 14(3): 333-342.
- [31] BIVIÁ-ROIG G, LISÓN JF, SÁNCHEZ-ZURIAGA D. Determining the optimal maximal and submaximal voluntary contraction tests for normalizing the erector spinae muscles [J]. *Peer J*, 2019, 7: e7824.
- [32] 曾菊, 邹智, 钟地养, 等. 运动疗法对慢性非特异性腰痛患者肌电特征影响的研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2022, 37(9): 1283-1288.
- [33] KANKAANPÄÄ M, TAIMELA S, LAAKSONEN D, *et al.* Back and hip extensor fatigability in chronic low back pain patients and controls [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 1998, 79(4): 412-417.
- [34] SEYEDHOSEINPOOR T, TAGHIPOUR M, DADGOO M, *et al.* Alteration of lumbar muscle morphology and composition in relation to low back pain: A systematic review and meta-analysis [J]. *Spine J*, 2022, 22(4): 660-676.
- [35] AREEUDOMWONG P, BUTTAGAT V. Comparison of core stabilisation exercise and proprioceptive neuromuscular facilitation training on pain-related and neuromuscular response outcomes for chronic low back pain: A randomised controlled trial [J]. *Malays J Med Sci*, 2019, 26(6): 77-89.
- [36] SO B, NG JK, AU K. A 4-week community aquatic physiotherapy program with Ai Chi or bad ragaz ring method improves disability and trunk muscle endurance in adults with chronic low back pain: A pilot study [J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2019, 32(5): 755-767.
- [37] KANKAANPÄÄ M, TAIMELA S, AIRAKSINEN O, *et al.* The efficacy of active rehabilitation in chronic low back pain. Effect on pain intensity, self-experienced disability, and lumbar fatigability [J]. *Spine*, 1999, 24(10): 1034-1042.
- [38] COLLOCA CJ, HINRICHS RN. The biomechanical and clinical significance of the lumbar erector spinae flexion-

- relaxation phenomenon: A review of literature [J]. J Manipulative Physiol Ther, 2005, 28(8): 623-631.
- [39] FLOYD WF SP. The function of the erector spinae muscles in certain movements and postures in man [J]. J Physiol, 1955(129): 184-203.
- [40] GUPTA A. Analyses of myo-electrical silence of erectors spinae [J]. J Biomech, 2001, 34(4): 491-496.
- [41] GOUTERON A, TABARD-FOUGÈRE A, BOURREDJEM A, *et al.* The flexion relaxation phenomenon in nonspecific chronic low back pain: prevalence, reproducibility and flexion-extension ratios. A systematic review and meta-analysis [J]. Eur Spine J, 2022, 31(1): 136-151.
- [42] PAQUET N, MALOUIN F, RICHARDS CL. Hip-spine movement interaction and muscle activation patterns during sagittal trunk movements in low back pain patients [J]. Spine, 1994, 19(5): 596-603.
- [43] KIPPERS V, PARKER AW. Posture related to myoelectric silence of erectors spinae during trunk flexion [J]. Spine, 1984, 9(7): 740-745.
- [44] SOLOMONOW M, ZHOU BH, BARATTA RV, *et al.* Biomechanics and electromyography of a cumulative lumbar disorder: Response to static flexion [J]. Clin Biomech, 2003, 18(10): 890-898.
- [45] MA K, ZHUANG ZG, WANG L, *et al.* The Chinese Association for the Study of Pain (CASP): Consensus on the assessment and management of chronic nonspecific low back pain [J]. Pain Res Manag, 2019, 2019: 8957847.
- [46] PHAN TC, PRANATA A, FARRAGHER J, *et al.* Machine learning derived lifting techniques and pain self-efficacy in people with chronic low back pain [J]. Sensors, 2022, 22(17): 6694.