

多模态生物力学评估在非特异性腰痛临床决策中的研究进展

林嘉琪^{1,2} 邵雨薇¹ 栾春亮¹ 舒晴¹ 田峻¹

【摘要】 非特异性腰痛(NSLBP)是常见的肌肉骨骼疾病,临床诊断依赖主观评估和传统影像学检查,存在主观性强、量化不足等局限。表面肌电图、超声、步态分析等多种生物力学评估技术,为从神经肌肉控制、运动模式和力学维度对NSLBP患者进行动态监测和定量分析提供了可能。本文综述了多模态生物力学评估在NSLBP临床决策中的研究进展,重点探讨各评估技术的应用价值与多模态数据融合的优势,并展望人工智能驱动下未来的发展路径。

【关键词】 非特异性腰痛; 生物力学; 多模态; 临床决策; 智能评估

Research progress of multimodal biomechanical assessment for clinical decision in non-specific low back pain Lin Jiaqi^{1,2}, Shao Yuwei¹, Luan Chunliang¹, Shu Qing¹, Tian Jun¹. ¹Department of Rehabilitation, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China; ²Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China

Corresponding author: Tian Jun, Email: tianjun@znhospital.cn

【Abstract】 Non-specific Low Back Pain (NSLBP) is a common musculoskeletal disorder. Currently, diagnosis relies on subjective evaluations and traditional imaging, which lack objectivity and quantitative precision. Multiple biomechanical assessment technologies, such as surface electromyography, ultrasound, and gait analysis, dynamically monitor and quantitatively analyze NSLBP patients from perspectives of neuromuscular control, movement patterns, and biomechanics. This paper summarizes the research progress of multiple biomechanical assessment in clinical decision-making for NSLBP. It focuses on discussing the application value of each assessment technology and the advantages of multimodal data fusion. It also prospects the future development path driven by artificial intelligence.

【Key words】 Non-specific low back pain; Biomechanics; Multimodal assessment; Clinical decision; Intelligent assessment

腰痛是最常见的肌肉骨骼疾病之一,具有高患病率、高复发率、高致残率以及高医疗负担等特点^[1-2]。各年龄段人群均面临腰痛致残的风险,且该风险随着年龄的增长而升高^[3]。根据全球疾病负担研究,腰痛已成为全球导致残疾的主要原因之一^[4],2021年全球腰痛病例数约为6.288亿^[5]。非特异性腰痛(non-specific low back pain, NSLBP)是最常见的腰痛类型,约占所有腰痛的80%~90%^[5]。多数成年人一生中至少经历一次急性腰痛^[6]。然而,尽管此类症状通常具有自限性,但部分病例仍可能逐渐进展为慢性腰痛^[7]。

NSLBP指没有明确病理学依据或影像学异常的腰痛,是一类以功能障碍为主要表现的综合性疾病,其病因可能与肌肉、韧带、椎间盘或关节等多种因素相关^[8]。NSLBP不仅造成疼痛、脊柱活动度受限、姿势稳定性下降等生理症状,还会影响患者的日常生活、社会参与以及心理健康,进而导致

生活质量显著下降^[9]。尽管目前各国尚未建立统一的诊断标准,但NSLBP的诊断一般包括三个方面:(1)疼痛主要发生在背部,位于腰椎第12根肋骨与臀沟之间;(2)病因难以明确;(3)没有与脊柱相关的疼痛^[8]。诊断核心在于排除特异性疾病(如感染、肿瘤、骨质疏松、骨折、腰椎间盘突出等)后,识别患者的功能障碍^[10]。

目前,NSLBP的诊断主要依据临床评估和影像学检查。临床评估通常依赖于患者的主诉和医生的经验,缺乏客观性和重复性。简单的体格检查难以精确量化患者的肌肉力量、协调性等功能性指标,而疼痛的主观性及心理因素的影响,又增加了评估的个体差异。传统的影像学检查(如X线、CT、MRI)虽然可以识别解剖结构的异常,但对于NSLBP这一无明显病理特征的疾病,其诊断价值有限。NSLBP患者的临床表现及功能障碍模式存在高度异质性,而现有诊疗策略却往往倾向于同质化处理。这不仅导致治疗效果欠佳,复发率高,患者满意度低,也造成医疗资源的严重浪费。

近年来,表面肌电图、步态分析、足底压力测试等评估技术从神经肌肉控制、运动模式以及力学维度动态监测和定量分析NSLBP患者的生物力学特征,帮助识别功能障碍的潜

DOI: 10.3877/cma.j.issn.2096-0263.2026.01.009

基金项目:湖北省自然科学基金(2025AFD635)

作者单位:430071 武汉大学中南医院康复医学科¹;430071 武汉大学中南医院²

通信作者:田峻, Email: tianjun@znhospital.cn

在原因,不仅弥补了传统影像学检查的局限,还为NSLBP的临床决策提供了科学依据。本文旨在综述多模态生物力学评估在NSLBP临床决策中的研究进展,重点探讨各评估技术的应用价值、多模态数据融合的优势并展望人工智能驱动下未来的发展路径,以期对相关研究提供参考。

一、多模态生物力学评估在NSLBP临床决策中的应用

(一)神经肌肉控制评估

1.表面肌电图:表面肌电图通过检测肌肉活动电信号,揭示了NSLBP患者存在神经肌肉控制异常。一种观点认为,NSLBP的潜在机制可能与神经肌肉控制不足导致的脊柱不稳定性有关^[11]。核心稳定肌群的激活延迟是脊柱稳定性不足的重要标志^[12]。正常人在肢体运动时,腰背部核心肌群通常会提前激活以维持脊柱稳定;而NSLBP患者的核心肌群呈现明显的延迟激活趋势,甚至倾向通过踝策略维持姿势稳定^[13]。在执行快速抬臂任务时,其腹肌激活也存在延迟^[14]。NSLBP患者的下肢肌肉控制异常则主要表现为髋关节稳定肌群激活不足与代偿性肌肉过度激活的协同失衡。俯卧髋伸展(prone hip extension, PHE)测试常被用于评估腰骶骨盆区域运动状态。背阔肌、臀大肌、竖脊肌与股二头肌构成的后斜肌链对维持腰骶骨盆区域稳定至关重要。正常情况下,臀大肌应在竖脊肌之前激活。而NSLBP患者臀大肌激活存在显著延迟,竖脊肌则表现为过早激活^[15]。这种失衡迫使腰椎在髋伸展过程中产生过度的代偿性运动,增加了椎体负荷,进而加重腰痛^[16]。

神经肌肉控制异常还会导致肌肉力量下降和疲劳度增加。表面肌电图通过分析肌电信号的均方根值与中位频率,客观量化肌肉募集水平和疲劳程度。研究显示,NSLBP患者患侧竖脊肌和多裂肌的均方根值与中位频率值出现不同水平的降低,提示肌肉激活不足与疲劳^[17],这可能是长期疼痛或神经适应性改变的结果。此外,表面肌电图还能捕捉具有辅助诊断价值的屈曲松弛现象(flexion relaxation phenomenon, FRP)。FRP指健康个体在躯干接近极限前屈状态时,腰部竖脊肌的肌电信号会显著降低,甚至出现短暂的静默状态^[18]。而NSLBP患者的FRP延迟或消失,即屈曲时竖脊肌松弛开始得更晚,伸展时结束得更早,且需要更大屈曲角度才能触发^[19],进一步揭示了患者的神经肌肉控制异常。综上,神经肌肉控制异常导致的稳定肌群激活延迟、肌肉力量下降与疲劳度增加,共同诱发脊柱-骨盆不稳定,进而导致腰痛。

2.超声:超声通过可视化肌肉结构与功能,为表面肌电图的发现提供了形态学和功能性佐证,二者相互印证了NSLBP的神经肌肉控制异常。结构评估方面,研究发现NSLBP患者的多裂肌和腹横肌厚度在静息及收缩状态下均显著小于健康人群^[20-21]。这种深层稳定肌的萎缩,为表面肌电图所观察到的核心肌群激活延迟、力量下降以及易疲劳提供了形态学解释。Perez等^[22]发现NSLBP患者的膈肌厚度增大,增厚功能增强。膈肌不仅是主要的呼吸肌,也是核心肌群的“穹顶”,参与调控腹压。NSLBP患者可能无意识地改变呼吸模式,通过过度使用膈肌来增加腹压,从而增强脊柱的稳定性。剪切波弹性成像技术能够定量评估肌肉及软组织

硬度变化,反映肌肉纤维的僵硬程度及筋膜紧张状态。胸腰筋膜具有丰富的伤害性神经支配,可能与慢性疼痛相关。Karine等^[23]采用肌筋膜技术对NSLBP患者进行干预,发现其竖脊肌硬度在干预后可显著降低,胸腰筋膜厚度也随之改变。这为从肌筋膜的角度理解NSLBP的病理结构改变提供了新的维度。功能评估方面,超声可动态捕捉肌肉的收缩能力。研究发现,NSLBP患者的腹横肌和多裂肌的收缩比显著低于健康人群,尤其在动态任务中显示出较高的标准误,表明患者的肌肉激活可能更不稳定^[24-25]。在主动直腿抬高试验中,NSLBP患者的多裂肌厚度变化显著低于健康人群,且患侧多裂肌厚度变化量对NSLBP的鉴别具有良好的诊断效能,为临床鉴别诊断提供了客观阈值^[26]。这直观地印证了表面肌电图检测到的肌肉激活不足,从肌肉形态动态变化的角度提供了肌电信号之外的量化证据。此外,NSLBP患者还常表现出腹肌活动失衡:深层腹横肌激活不足,而浅层腹直肌代偿性过度活跃。这种异常协同模式也可能影响脊柱的稳定性,增加脊柱负担^[27]。这与表面肌电图共同揭示了NSLBP患者为维持脊柱-骨盆稳定,存在深层核心肌群活动不足与浅层肌肉过度活动之间的失衡,核心肌群存在协调功能障碍。

(二)运动模式评估

1.步态分析:步行是人体最基本、最常见的日常活动之一。步态分析通过量化行走过程中的时空参数和运动学参数,能够敏锐捕捉NSLBP对步行功能的影响。NSLBP患者在步行过程中通常表现为步速减慢^[28]、步长缩短^[29]。当需要加速时,他们更倾向于增加步频而非步长。这是一种保护性策略,可避免髋关节和脊柱过度活动,减少身体受到的冲击力^[29]。此外,NSLBP患者步行时的支撑时间减少,提示患者可能通过延长摆动相、缩短支撑相来避免疼痛^[30]。步态运动学参数则揭示了NSLBP患者在行走中脊柱-骨盆-下肢链关节协调模式的紊乱及其代偿机制。在健康人群中,躯干和骨盆通常协同工作。然而,NSLBP患者由于疼痛和肌肉控制受限,躯干与骨盆的协调性受损。核心肌群的弱化使患者难以有效控制躯干和骨盆的运动^[31]。步态分析结果显示,NSLBP患者的腰椎前凸角度较健康人群减小^[31]。在平地行走时,骨盆横向旋转显著下降;而在不平坦地面上行走时,骨盆矢状面倾斜度增大。且无论地面条件如何,常表现出膝过伸现象^[32]。为了补偿核心稳定性不足和减轻疼痛,患者采取了特定的代偿策略。行走时,患者髋关节后伸、内收和内旋角度显著减小^[33-34]。这种受限与髋屈肌紧张和延展性下降密切相关。同时,由于髋关节伸展受限,患者会通过增加骨盆前倾来补偿这一运动限制,进一步影响步态的协调性^[34]。这些代偿策略虽然在短期内可能有助于维持步态稳定性和减轻不适,但长期的运动限制和肌肉活动增加可能导致代谢废物的积累,使疼痛慢性化^[35],这表明步态分析不仅能够揭示NSLBP患者运动模式的变化,还能为评估慢性疼痛的机制提供新的视角。总体而言,NSLBP患者在执行步态任务时可能采取了更多的代偿性策略,以保持步态稳定性并避免增加脊柱负荷。

2.三维运动捕捉:与步态分析相比,三维运动捕捉可以详细记录NSLBP患者在完成日常动作时的运动轨迹、关节角度及运动协调性,有效弥补了步态分析在非步行任务评估上的局限。Papi等^[36]的研究对比了健康对照者和NSLBP患者在功能性任务中脊柱及下肢的关节运动学。结果显示,NSLBP患者与健康人群的运动差异主要出现在功能性任务(如行走、抬举)的开始和结束阶段。表明患者的问题可能不仅仅是“动不了”,更多的是与运动启动、减速和控制相关的协调障碍。Peebles等^[37]研究了NSLBP患者在功能性伸手任务中的腰部与髋部协调性,发现患者腰部-髋部的运动比率减小。在执行“从坐到站”的任务中,也表现为较小的运动幅度和髋膝部扭矩^[38]。这意味着患者可能采用保护性策略(如限制运动幅度和力量输出)以减轻腰部负荷,揭示了代偿策略在不同任务中的共性表现。

(三)力学评估

1.足底压力测试:足底压力分布测试通过分析压力中心(center of pressure, COP)轨迹和足底区域负荷揭示了NSLBP患者存在姿势稳定性下降的特征。静止站立时,NSLBP患者的COP位移路径、前后及侧向位移长度和平均速度等参数显著增大^[21,39],这表明患者在维持静态平衡时身体的摆动增大、稳定性下降。在高要求条件下(如闭眼、单足站立等),NSLBP患者的COP摇摆幅度、摇摆面积及速度也均显著高于无症状对照组^[40-41]。这不仅表明患者在视觉依赖条件下平衡调控能力下降,还揭示其存在本体感觉受损。疼痛引起的肌肉紧张和关节不适当改变运动模式,影响姿势控制。NSLBP患者可能因疼痛而避免使用某些关节并通过减少活动或某些补偿性策略来维持平衡。核心肌群的激活延迟和力量下降,使得患者无法有效维持重心。在姿势调整中,患者更依赖踝关节策略,而髋关节策略使用受限^[42]。这种变化可能导致身体重心偏移,加剧COP摆动^[43]。疼痛和本体感觉受损的共同作用,使患者在高要求的姿势控制任务中难以有效整合感觉信息,表现出较大的姿势不稳定性。

2.等速肌力测试:等速肌力测试直接、精确地量化NSLBP患者的肌力水平及其失衡状态。NSLBP患者的躯干肌力学异常以伸肌无力和屈伸肌力失衡为核心特征。Lee等^[44]发现,与健康对照组相比,NSLBP患者在60°/s与90°/s角速度下的躯干屈肌与伸肌峰值扭矩显著降低,而屈伸肌峰力矩比(flexion/extension ratio, F/E)显著增高。F/E是区分NSLBP患者与正常人群的重要指标。正常人群向心运动时的F/E比值应在0.79到0.85之间,超出该范围可能导致腰椎曲度改变,引发腰痛^[45],而NSLBP患者的F/E比值普遍增高^[44]。Vanhaute等^[46]还发现,随着测试角速度的增加,伸/屈肌峰力矩比呈现下降趋势,这提示在更快的运动速度下,伸肌的相对弱势可能更为凸显。肌肉力量失衡不仅会降低脊柱稳定性,还可能引发肌肉疲劳,增加软组织损伤风险,形成恶性循环,导致腰痛症状的持续和加剧。因此,F/E比值的改善也成为衡量康复干预成功与否的关键。例如,在对比HUBER康复组与标准康复组时,研究发现仅有HUBER康复组在高角速度(120°/s)下实现了F/E比值的显著改善^[47],提示在HU-

BER平台上进行的锻炼可能在提升快速、动态的脊柱稳定能力方面更具优势。同样,一项比较不同训练负荷的研究发现,低负荷血流限制训练在高角速度(120°/s)下显著提升了伸肌力量并降低了F/E比值,而传统高负荷训练则在低角速度(30°/s)下效果更佳^[48]。这些发现强调了多速度测试的必要性,单一速度的评估可能无法全面捕捉不同康复方案的疗效。

除了肌肉力量,等速测试还能客观评估NSLBP患者常伴有的本体感觉功能障碍。腰部本体感觉是维持脊柱稳定性和姿势控制的重要功能,而NSLBP患者常伴有脊柱位置觉的缺陷^[49]。这与足底压力测试揭示的本体感觉缺陷相互印证。脊柱位置觉误差的增大表明患者在控制脊柱运动时存在困难。由于长期疼痛刺激,患者可能出现自我保护性反射增强,即通过增加腰背肌纤维的募集来维持脊柱稳定。这种过度激活干扰了正常的运动模式,导致脊柱位移角度增大,加重腰部负担,最终加剧疼痛^[49]。

二、多模态生物力学数据融合在NSLBP临床决策中的应用

通过整合表面肌电图、三维运动捕捉、超声等技术,多模态数据融合实现了NSLBP患者生物力学特征的多维评估。

运动功能评估方面,三维运动捕捉与表面肌电图的联合应用揭示了NSLBP患者的异常运动模式及其代偿机制。例如,Ryan等^[50]在PHE试验中检测到NSLBP患者上腰椎额状面和横切面的活动范围大于对照组,而下腰椎横切面活动范围呈现相反趋势;同时,表面肌电图检测显示患者臀大肌和腘绳肌在动作过程中平均激活水平更高,提示腰椎稳定性不足与肌肉代偿性过度激活的关联。另一项针对行走和步态终止的研究发现,NSLBP患者的运动变异性增加、腰椎横切面活动范围增大,在步态终止时表现出更高的双侧腰椎共激活,提示其存在神经肌肉协调紊乱^[51]。类似地,Tsang等^[52]发现NSLBP患者康复前腰椎与髋关节运动速度降低,屈曲阶段存在腰椎多裂肌和臀大肌激活不足,康复训练后肌肉募集显著增强。值得注意的是,心理因素也可能通过影响肌肉激活水平来影响运动控制。

肌肉功能评估方面,结合表面肌电图与等速测试可动态评估NSLBP患者躯干肌肉的激活模式与扭矩控制能力。例如,Arvanitidis等^[53]发现NSLBP患者在向心/离心收缩中表现出更高的扭矩波动和更差的稳定性;在躯干伸展过程中,腰椎竖脊肌的肌电-扭矩相关性在侧屈区域增强;屈曲期间腹部肌肉的肌电振幅较高,激活中心向侧屈偏移,揭示了NSLBP患者与无症状对照组肌肉激活模式的显著差异。表面肌电图与超声的结合则从功能与形态的交叉视角评估NSLBP:Hofste等^[54]综合应用表面肌电图、三维运动捕捉和超声,发现NSLBP患者躯干关节活动度和多裂肌厚度均小于健康对照组。虽然表面肌电图未检测到显著的电活动差异,但结合超声的形态学改变仍可揭示NSLBP患者多裂肌萎缩与功能代偿的潜在关联。

随着人工智能(artificial intelligence, AI)与机器学习(machine Learning, ML)技术的发展,其在NSLBP的临床决策中的应用逐渐显示出巨大的潜力。AI和ML可以高效处

理和分析来自不同设备的大量数据,发现潜在的关联和规律,揭示传统统计方法可能忽视的细微变化,有助于临床决策向智能化、自动化发展,进而提升决策的效率和准确性。例如, Hartley 等^[55]将计算机视觉和机器学习进行结合,针对 NSLBP 设计了自动临床分类模型——“BACK-to-MOVE”。该模型能够通过 2D 视频数据辨别 NSLBP 患者的脊柱运动和运动控制障碍,分类准确率超过 93%。Ryan 等^[50]将腰椎运动学变量与肌肉的肌电参数纳入逻辑回归模型,实现了 NSLBP 患者与健康人群的高精度区分。Robinaut 等^[56]基于高密度肌电图和运动捕捉数据,构建了高精度的 NSLBP 诊断模型。研究结果显示,使用不同数据子集(如仅使用人体测量数据或生物力学数据)进行的诊断模型均能准确区分健康个体与 NSLBP 患者,且生物力学和神经肌肉数据对于分类准确度的提升作用显著。Yu 等^[57]通过整合多部位 B 型超声图像特征与剪切波弹性成像特征实现了 NSLBP 患者的精准分类,并发现剪切波弹性成像弹性特征是 NSLBP 患者分类的关键因素。

三、讨论

NSLBP 作为一种病因复杂、缺乏明确病理学标志的常见疾病,其临床评估主要依赖主观经验,影像学检查的诊断价值也相对有限。这种评估模式导致 NSLBP 诊断模糊、分型困难、治疗靶点不明确以及康复效果个体差异大等问题。表面肌电图、步态分析、足底压力测试等技术,分别从神经肌肉控制、运动模式、力学平衡维度,为 NSLBP 提供了客观、动态、量化的生物力学数据。然而,仅应用单一技术评估难以全面捕捉 NSLBP 的复杂特征。例如,表面肌电图虽能有效监测浅层肌肉活动,但对深层核心肌群的敏感性不足,其信号易受电极放置位置、皮肤阻抗、肌肉脂肪浸润程度等因素干扰;超声虽可评估肌肉形态与动态收缩功能,但其结果易受操作者经验影响;步态分析、三维运动捕捉虽能捕捉外部运动特征,却无法直接解析肌肉激活的神经控制策略。等速肌力测试虽能精确量化肌力,但其结果高度依赖患者的主动配合程度。NSLBP 患者可能因疼痛恐惧而无法充分发力,导致峰力矩等参数出现误差,无法反映其真实的肌肉能力。由于单一评估模式的局限性,多模态生物力学数据的融合显得尤为重要。这种融合并非简单的数据叠加,而是通过综合不同维度的信息,实现信息的互补与交叉验证,从而更全面、更深入地揭示 NSLBP 的功能障碍本质。例如,当一位患者的等速肌力测试显示躯干伸肌力量正常,但表面肌电图分析却发现其在疲劳任务中的中位频率快速下降,同时超声检查发现其多裂肌存在明显的肌肉变薄与脂肪浸润。这三种模态的数据结合说明该患者并非无力,而是肌肉质量与耐力存在问题,其伸肌峰力量可能通过代偿性地过度募集浅层大肌群来维持。此时,康复的重点不应是单纯的力量训练,而应聚焦于深层稳定肌的激活、耐力训练并改善肌肉成分。此外, AI 与 ML 的引入为处理和解读海量、复杂的多模态数据提供了强大的支持,是提升多模态数据分析效率与临床转化潜力的关键。NSLBP 存在多种亚型,其病因及表现形式各异,传统诊断方法难以有效区分。AI 辅助系统在融合多模态数据后,有望揭示更深层次的生物标志物组合,为

NSLBP 的精准分型、预后预测甚至个性化治疗方案推荐提供数据驱动的智能支持,最终促进治疗效果提升与医疗资源利用效率的优化。

四、总结与展望

多模态生物力学数据融合推动 NSLBP 临床决策从经验依赖向数据驱动的精准医疗转型。借助 AI 和 ML 技术可以更深入地挖掘数据价值,提高诊疗的准确性和效率,为患者提供更优质的医疗服务。然而,尽管多模态技术展现出显著优势,其临床应用仍面临设备成本高、操作复杂性及数据标准化不足等挑战,这限制了多中心研究的可重复性,也阻碍了模型的训练与泛化。随着低成本设备和移动医疗技术的发展,可能会出现更多易于操作、成本更低的生物力学评估工具。未来应聚焦优化多模态数据融合,建立标准化数据采集与处理流程,构建动态评估体系与智能决策系统,推动开放共享数据库建设,通过跨学科协作统一标准并开发低成本解决方案,借助 AI 和 ML 技术挖掘数据潜在规律,开发更精准的临床决策模型,推动其向临床实践转化。此外,纳入心理、社会和环境因素的多维评估体系,将促进 NSLBP 的整体管理和精准治疗。最终目标是构建一个包括动态评估、智能分析和决策支持的闭环系统:该系统能够快速完成 NSLBP 患者的多模态数据采集,自动进行分析并生成一份可视化的、易于理解的功能障碍报告,并基于该报告推荐个性化的康复方案。

参 考 文 献

- 1 Trybulski R, Michał W, Małgorzata S, et al. Impact of isolated lumbar extension strength training on reducing nonspecific low back pain, disability, and improving function: a systematic review and meta-analysis [J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 6426.
- 2 Yue Li, Congying Zou, Weidong Guo, et al. Global burden of low back pain and its attributable risk factors from 1990 to 2021: a comprehensive analysis from the global burden of disease study 2021 [J]. *Frontiers in Public Health*, 2024, 12: 1480779.
- 3 Cheng M, Xue YK, Cui M, et al. Global, regional, and National burden of low back pain: findings from the global burden of disease study 2021 and projections to 2050 [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2025, 50(7): E128-E139.
- 4 Vos T, Lim SS, Abbafati C, et al. 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.
- 5 Chiarotto A, Koes BW. Nonspecific low back pain [J]. *N Engl J Med*, 2022, 386(18): 1732-1740.
- 6 OERTEL J, SHARIF S, ZYGOURAKIS C, et al. Acute low back pain: Epidemiology, etiology, and prevention: WFNS spine committee recommendations [J]. *World Neurosurg* X, 2024, 22: 100313.
- 7 Linda Karoliina Nieminen, Liisa Maria Pyysalo, Markku Juhani Kankaanpää. Prognostic factors for pain chronicity in low back pain: a systematic review [J]. *Pain Rep*, 2021, 6(1): e919.
- 8 国家卫生健康委能力建设和继续教育中心疼痛病诊疗专项能力提升项目专家组,程志祥,刘先国,等.中国慢性腰痛病诊疗指南

- (2024版) [J]. 中华疼痛学杂志, 2024, 20(1): 4-22.
- 9 Danilov A, Danilov A, Badaeva A, et al. State-of-the-Art personalized therapy approaches for chronic Non-Specific low back pain: understanding the mechanisms and drivers [J]. *Pain Ther*, 2025, 14(2): 479-496.
- 10 Wirth B, Schweinhardt P. Personalized assessment and management of non-specific low back pain [J]. *European Journal of Pain*, 2024, 28(2): 181-198.
- 11 Blanco-Giménez P, Vicente-Mampel J, Gargallo P, et al. Effect of exercise and manual therapy or kinesiotaping on sEMG and pain perception in chronic low back pain: a randomized trial [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2024, 25(1): 583.
- 12 Basak Cigdem Karacay, Tugba Sahbaz, Basak Gurtekin, et al. Effectiveness of whole-body vibration exercise and core stabilization exercise in chronic non-specific low back pain: A randomized-controlled study [J]. *Turk J Phys Med Rehabil*, 2022, 68(2): 184-194.
- 13 Zheng YL, Hu HY, Liu XC, et al. The effects of Whole-Body vibration exercise on anticipatory delay of core muscles in patients with nonspecific low back pain [J]. *Pain Res Manag*, 2021, 2021: 9274964.
- 14 NAKATA A, OSUKA S, ISHIDA T, et al. Trunk muscle activity and ratio of local muscle to global muscle activity during supine bridge exercises under unstable conditions in young participants with and without chronic low back pain [J]. *Health Care (Don Mills)*, 2024, 12(5): 514.
- 15 Wegner-Czerniak K, Mączyński J, Błaszczyk A, et al. Change in the order of activation of lower limb muscles relative to spinal extensors during the janda test and change in postural balance in patients with LBP after muscle energy techniques [J]. *J Clin Med*, 2025, 14(5): 1448.
- 16 Choi WJ, Kim WD, Park DC, et al. Comparison of compensatory lumbar movement in participants with and without non-specific chronic low back pain: A cross-sectional study [J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2022, 35(6): 1365-1372.
- 17 Suo MR, Zhou LN, Wang JZ, et al. The application of surface electromyography technology in evaluating paraspinal muscle function [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2024, 14(11): 1086.
- 18 Rose-Dulcina K, Dubessy M, Armand S, et al. Understanding the flexion-relaxation phenomenon in non-specific chronic low back pain patients through immersive virtual reality feedback approach [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 15936.
- 19 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.
- 20 CERVERA CM, LÓPEZ GL, VALCÁRCEL LD, et al. Core synergies measured with ultrasound in subjects with chronic Non-Specific low back pain and healthy subjects: a systematic review [J]. *Sensors*, 2022, 22(22): 8684.
- 21 Wang HJ, Zheng JX, Fan ZY, et al. Impaired static postural control correlates to the contraction ability of trunk muscle in young adults with chronic non-specific low back pain: A cross-sectional study [J]. *Gait Posture*, 2022, 92: 44-50.
- 22 Perez AM, Fernández-Carnero S, Sicilia-Gomez-de-Parada C, et al. Diaphragmatic activation correlated with lumbar multifidus muscles and thoracolumbar fascia by B-Mode and M-Mode ultrasonography in subjects with and without Non-Specific low back pain: a pilot study [J]. *Medicina (Kaunas)*, 2023, 59(2): 315.
- 23 Karine Devantéry, Mélanie Morin, Julien Grimard, et al. Effects of a Myofascial Technique on the Stiffness and Thickness of the Thoracolumbar Fascia and Lumbar Erector Spinae Muscles in Adults with Chronic Low Back Pain: A Randomized before-and-after Experimental Study [J]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(3): 332.
- 24 Sánchez Romero EA, Alonso Pérez JL, Muñoz Fernández AC, 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): 632.
- 25 Chang KV. Ultrasound Diagnosis and Guided Intervention of Musculoskeletal/Neuromuscular Pathology 2022 [J]. *Diagnostics*, 2023, 13(11): 1945.
- 26 Gustavo Plaza-Manzano, César Fernández-de-Las-Peñas, Joshua A Cleland, et al. Lumbar multifidus thickness changes during active leg raising with ultrasound imaging can detect patients with chronic non-specific low back pain [J]. *Musculoskelet Sci Pract*, 2022, 62: 102670.
- 27 Da Cuña-Carrera I, Alonso-Calvete A, Lantarón-Caeiro EM, et al. Ultrasonographic changes of abdominal muscles in subjects with and without chronic low back pain [J]. *Healthcare (Basel)*, 2022, 10(1): 123.
- 28 Bilhaut A, Ménard M, Roze O, et al. Locomotion behavior of chronic Non-Specific Low Back Pain (cNSLBP) participants while walking through apertures [J]. *Gait Posture*, 2023, 104: 140-146.
- 29 Demirel A, Onan D, Oz M, et al. Moderate disability has negative effect on spatiotemporal parameters in patients with chronic low back pain [J]. *Gait Posture*, 2020, 79: 251-255.
- 30 Castro-Méndez A, Requelo-Rodríguez I, Pabón-Carrasco M, et al. A Case-Control study of the effects of chronic low back pain in spatiotemporal gait parameters [J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(15): 5247.
- 31 Simonet E, Winteler B, Frangi J, et al. Walking and running with non-specific chronic low back pain: What about the lumbar lordosis angle? [J]. *J Biomech*, 2020, 108: 109883.
- 32 刘红, 侯美金, 黄武杰, 等. 基于步态轮廓评分分析青年慢性非特异性腰痛患者的步态模式 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2020, 42(3): 232-238.
- 33 Pizol GZ, Miyamoto GC, Cabral CMN. Hip biomechanics in patients with low back pain, what do we know? A systematic review [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2024, 25(1): 415.
- 34 Jiménez-Del-Barrio S, Mingo-Gómez MT, Estébanez-de-Miguel E, et al. Adaptations in pelvis, hip and knee kinematics during gait and muscle extensibility in low back pain patients: A cross-sectional study [J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2020, 33(1): 49-56.
- 35 Tanaka MSU, Török N, Tóth F, et al. Co-Players in chronic pain: neuroinflammation and the Tryptophan-Kynurenine metabolic pathway [J]. *Biomedicines*, 2021, 9(8): 897.
- 36 Papi ERA, Bull AMJ, McGregor AH. Alteration of movement patterns in low back pain assessed by Statistical Parametric Mapping [J]. *J Biomech*, 2020, 100: 109597.
- 37 Peebles AT, Van Der Veen S, Stamenkovic A, et al. Patients with chronic non-specific low back pain have altered movement coordination during functional reaching tasks [J]. *Gait Posture*, 2022, 91: 30-34.
- 38 Nyayapati P, Booker J, Wu PIK, et al. Compensatory biomechanics and spinal loading during dynamic maneuvers in patients with

- chronic low back pain [J]. *Eur Spine J*, 2022, 31(7): 1889-1896.
- 39 Nogueira JF, Carrasco AC, Pelegrinelli ARM, et al. Posturography comparison and discriminant analysis between individuals with and without chronic low back pain [J]. *J Manipulative Physiol Ther*, 2020, 43(5): 469-475.
- 40 Alshahrani A, Reddy RS, Ravi SK. Chronic low back pain and postural instability: interaction effects of pain severity, age, BMI, and disability [J]. *Front Public Health*, 2025, 13: 1497079.
- 41 Zhang CJ, Zhang Z, Li YL, et al. Pain catastrophizing is related to static postural control impairment in patients with nonspecific chronic low back pain: a Cross-Sectional study [J]. *Pain Res Manag*, 2020, 2020: 9629526.
- 42 Shokouhyan SM, Davoudi M, Hoviattalab M, et al. Distinction of non-specific low back pain patients with proprioceptive disorders from healthy individuals by linear discriminant analysis [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10: 1078805.
- 43 Dal Farra F, Arippa F, Arru M, et al. Effects of exercise on balance in patients with non-specific low back pain: a systematic review and meta-analysis [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2022, 58(3): 423-434.
- 44 Lee H, Lee S, Kim C, et al. A comparison of contractile properties and acute muscle fatigue response in adult females with Non-Specific chronic low back pain [J]. *Bioengineering (Basel)*, 2024, 11(12): 1202.
- 45 Lee H, Lee S, Kim C, et al. A comparison of Contractile properties of posterior chain muscles and trunk strength in females with non-specific chronic low back pain [J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2025, 38(4): 783-793.
- 46 Vanhauwer N, Van Erck A, Anciaux M, et al. Isometric and isokinetic muscle strength measurements of the lumbar flexors and extensors with Bionix Sim3 Pro in patients with chronic low back pain: A pilot study [J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2021, 34(3): 381-388.
- 47 Vincent LE Moal, Mélanie Tantot, Éric Mévellec, et al. Rehabilitation therapy using the HUBER platform in chronic non-specific low back pain: a randomized controlled trial [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2023, 59(5): 576-585.
- 48 Liu YX, Liu JH, Liu M, et al. The effect of blood flow restriction training on core muscle strength and pain in male collegiate athletes with chronic non-specific low back pain [J]. *Front Public Health*, 2024, 12: 1496482.
- 49 Yang QH, Wang XQ. Lumbar joint position sense measurement of patients with low back pain [J]. *EFORT Open Reviews*, 2023, 8(8): 639-650.
- 50 Ryan N, Bruno P. The clinical utility of the prone hip extension test in the diagnosis of motor control impairments associated with low back pain: A cross-sectional study using motion capture and electromyography [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2024, 118: 106317.
- 51 Rum L, Brasiliano P, Vannozzi G, et al. Non-specific chronic low back pain elicits kinematic and neuromuscular changes in walking and gait termination [J]. *Gait Posture*, 2021, 84: 238-244.
- 52 Tsang SMH, Szeto GPY, Yeung AKC, et al. Recovery of the lumbopelvic movement and muscle recruitment patterns using motor control exercise program in People with chronic nonspecific low back pain: A prospective study [J]. *PLoS One*, 2021, 16(11): e0259440.
- 53 Arvanitidis M, Jiménez-Grande D, Haouidji-Javaux N, et al. Low back Pain-Induced dynamic trunk muscle control impairments are associated with altered spatial EMG-Torque relationships [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2024, 56(2): 193-208.
- 54 Hofste A, Soer R, Groen GJ, et al. Functional and morphological lumbar multifidus characteristics in subgroups with low back pain in primary care [J]. *Musculoskelet Sci Pract*, 2021, 55: 102429.
- 55 Hartley T, Hicks Y, Davies JL, et al. BACK-to-MOVE: machine learning and computer vision model automating clinical classification of non-specific low back pain for personalised management [J]. *PLoS One*, 2024, 19(5): e0302899.
- 56 Lucien Robinault, Imran Khan Niazi, Nitika Kumari, et al. Non-Specific low back pain: an inductive exploratory analysis through factor analysis and deep learning for better clustering [J]. *Brain Sci*, 2023, 13(6): 946.
- 57 Yu XC, Xu XH, Huang QH, et al. Binary classification of non-specific low back pain condition based on the combination of B-mode ultrasound and shear wave elastography at multiple sites [J]. *Front Physiol*, 2023, 14: 1176299.

(收稿日期: 2025-06-05)

(本文编辑: 吕红芝)

林嘉琪, 邵雨薇, 栾春亮, 等. 多模态生物力学评估在非特异性腰痛临床决策中的研究进展 [J/CD]. *中华老年骨科与康复电子杂志*, 2026, 12(1): 59-64.