

从下肢步态生物力学到功能评估：慢性非特异性下腰痛的康复研究进展

麻泽松¹ 覃兴乐² (通讯作者)

1.右江民族医学院 广西 百色 533000

2.柳州市人民医院康复医学科 广西 柳州 545001

【摘要】：慢性非特异性下腰痛（chronic nonspecific low back pain, CNSLBP）是临床常见的肌肉骨骼疾病。其功能受限不仅与疼痛及腰部活动减少有关，部分患者还可出现躯干、骨盆与下肢协调方式的改变。现阶段临床评估仍多依赖疼痛评分、功能障碍量表和腰椎活动度，这些指标能够反映症状及主观功能受限程度，但对患者实际运动表现的描述相对不足。随着步态分析及运动生物力学技术的应用，CNSLBP患者在步速、步频、步长、腰盆协调以及下肢负荷分配等方面的变化逐渐受到关注。已有研究提示，这些步态特征并不完全一致，患者之间存在较明显的个体差异，可能与疼痛状态、运动控制及代偿方式不同有关。本文结合近年相关研究，对CNSLBP患者的步态生物力学表现、功能评估方法及康复干预进展进行梳理，并对现有研究中人群异质性、评价方法差异及实验室测试与日常活动脱节等问题进行讨论，以期临床功能评估和个体化康复提供参考。

【关键词】：慢性非特异性下腰痛；步态；生物力学；运动控制；功能评估；康复

DOI:10.12417/2705-098X.26.18.052

1 引言

下腰痛是临床常见且疾病负担较重的肌肉骨骼问题。全球疾病负担研究显示，2020年全球约有6.19亿人受到下腰痛影响，随着人口老龄化及人口增长，其患病负担仍可能继续上升^[1]。临床上，不少患者缺乏能够充分解释症状的明确结构性病变，因此被归为非特异性下腰痛^[2-4]。当症状持续超过3个月后，患者的功能受限往往不再由疼痛单一决定，活动减少、运动恐惧、肌力和耐力下降以及运动控制改变等因素可能相互影响，逐渐形成较复杂的功能问题^[3-5]。因此，CNSLBP的康复也越来越重视活动能力和日常功能的恢复，而不仅是疼痛缓解。目前临床常用VAS、NRS、ODI和RMDQ等工具评价症状及功能受限，这些方法操作方便，但更多反映患者的主观感受，对实际动作表现的描述相对有限^[6-8]。步行是日常生活中最基本的负重活动之一，需要躯干、骨盆及双下肢持续配合，因此可用于观察整体运动功能。有研究发现，非特异性下腰痛患者可表现为步速、步频和步长下降，并伴有腰椎、骨盆活动及部分下肢运动参数的变化，但不同研究所得结果并不完全一致^[9-13]。由此来看，CNSLBP患者的步态表现具有较明显的个体差异，可能受到疼痛状态、运动控制、心理行为及体能水平等多种因素影响。本文从步态生物力学角度对相关研究进行梳理，并进一步讨论其在功能评估和康复干预中的应用。

2 理论基础

2.1 疼痛相关保护性运动策略

疼痛产生后，患者往往会主动或被动地调整关节活动、肌肉募集及负荷分配，以继续完成原有动作。这样的改变在短期内具有一定保护作用，但如果长期存在，也可能逐渐形成相对

固定的运动模式。现有研究显示，部分CNSLBP患者步行时可出现步速下降、步长缩短，同时伴有躯干—骨盆协调改变及椎旁肌活动增加，这些表现可能与疼痛状态下的保护性运动控制有关^[14-15]。但是，这类改变并不等同于单纯肌力不足。部分患者虽具备完成动作所需的基本力量，但在运动过程中仍可能减少腰部活动，并增加躯干肌共同收缩，以获得相对稳定的运动感觉。短时间内，这种方式可能减少疼痛诱发；若持续时间过长，则可能限制动作选择，并增加邻近节段的代偿负担。2023年的系统综述也显示，CNSLBP患者在功能任务中的运动变异性确有改变，但变化方向并不一致^[16]。因此，与其单纯判断运动变异性“增多”或“减少”，更值得关注的是患者能否根据任务要求调整动作，即其运动适应能力是否受到影响。

2.2 本体感觉与腰盆运动控制改变

稳定而有效的步态依赖视觉、前庭觉及本体感觉信息的持续整合。已有Meta分析发现，部分下腰痛患者腰部关节位置觉和被动运动觉存在下降，但不同测试体位所得结果并不完全一致^[17]。国内研究亦发现CNSLBP患者腰部本体感觉与肌力存在一定关联^[18]。当腰盆位置感觉精确性下降时，患者可能通过提高肌肉共同收缩或减少关节活动范围来获得主观上的稳定感。这种改变并不只发生在腰椎。步行过程中，骨盆需要在躯干与下肢之间完成负荷传递和姿势调整，腰椎、骨盆及髋关节也并非各自独立运动。当腰椎活动因疼痛受到限制后，身体可能通过调整骨盆及下肢关节的活动来维持步行和重心转移，部分运动需求因此转由髌、膝或踝关节承担。由此可见，CNSLBP所产生的功能影响可能涉及整个腰盆—下肢运动链，而不仅限于疼痛局部，这也为从下肢步态角度分析其功能障碍提供了依据。

2.3 心理行为因素与运动功能

慢性疼痛状态下,患者的运动表现不仅受到肌肉力量和组织负荷能力影响,还与疼痛相关认知及心理行为因素密切相关。疼痛灾难化、运动恐惧以及对腰部活动的负面认识,均可能改变患者对动作的选择方式^[3,19]。部分患者虽具备完成日常活动所需的基本运动能力,但由于疼痛预期及对再次损伤的担忧,在步行、弯腰和负重活动中可能主动调整动作方式,表现为速度降低、腰椎活动减少或回避部分动作。此类保护性运动策略在疾病早期具有一定代偿意义,可在一定程度上减少疼痛刺激带来的不适。然而,当该行为长期存在时,可能导致身体活动水平下降,并进一步影响肌肉耐力、心肺功能以及整体运动能力。由此可见,CNSLBP患者的步态改变并不能完全归因于单纯的生物力学异常,疼痛体验、心理因素和运动控制之间共同作用也有可能形成持续性的功能障碍。因此,对CNSLBP患者步态异常的理解不能仅停留在局部生物力学层面。相同的步速下降,在不同患者中可能对应不同原因:有的与疼痛刺激直接相关,有的则更多受到运动恐惧、疼痛预期或自我效能降低的影响。也就是说,步态变化不仅反映患者“是否能够完成”某项运动任务,还体现其“以什么方式完成”这一任务。前者可通过疼痛评分、功能障碍量表及表现性测试进行评价,而后者更依赖运动学、动力学及肌肉活动等客观指标加以识别。将两类信息结合起来,有助于更全面地判断患者的功能状态,也为后续制定针对性的康复方案提供依据。

3 步态生物力学特征

3.1 步态时空参数

步速、步频、步长及支撑时间等时空参数是步态分析中最基础的指标,能够从整体上反映患者的行走效率和节律变化。Dal Farra等^[9]纳入19项横断面研究开展系统评价和Meta分析,结果显示,非特异性下腰痛患者的步速平均下降约15.42 cm/s,同时伴有步频降低和步长缩短,而跨步长方面的差异并未表现出较好的一致性。总体来看,步速下降是目前相对常见的研究结果之一,但该综述同时指出,相关证据质量较低,因此现阶段尚不能将步速降低视为CNSLBP具有特异性的步态表现。在解释这种结果时,步行速度本身也是一个不能忽视的影响因素。Carvalho等^[20]发现,步速变化可对CNSLBP患者的时空参数及步态变异性产生明显影响。也就是说,如果患者组和健康对照组在自然步速上本身存在差异,那么随后观察到的步长、步频或支撑时间变化,不一定全部来源于腰痛本身,也可能部分受到速度变化的影响。因此,不同研究在步速控制方式、测试条件及受试者活动水平方面的差异,可能是现有结论不一致的重要原因。后续研究在比较CNSLBP患者与健康人群时,有必要同时考虑自选步速和统一步速条件,以尽量区分疾病相关改变与速度效应。国内研究提供了另一角度。陈晓兰等^[10]对青年CNSLBP患者进行足底压力步态测试,发现患者步

长、站立相和单支撑时间的左右对称性下降,并存在垂直地面反作用力不对称。罗卫等^[13]的三维步态研究则发现CNSLBP患者步频、跨步长及步速低于健康人。由此可见,与单纯观察绝对步长相比,步态对称性和双侧负荷分配可能更有助于识别部分患者的代偿方式。

3.2 躯干—骨盆运动学

正常步行过程中,腰椎和骨盆会随着步态周期发生一定程度的旋转、侧倾及前后方向运动,这些运动共同参与身体重心的转移,并有助于维持躯干与下肢之间的协调。已有研究发现,CNSLBP患者在步行时可出现腰椎或骨盆活动幅度减小,部分患者还表现出腰盆协调关系的改变^[9,14]。Bagheri等^[21]进一步观察到,慢性腰痛患者步行时躯干—骨盆运动变异性与躯干肌耐力之间存在一定相关性,这说明躯干肌功能可能参与步态过程中腰盆控制策略的调整。另外需要注意的是,腰椎活动范围减小并不能简单理解为结构性僵硬。对于慢性腰痛患者而言,减少腰部活动有时更像是一种长期形成的保护性运动方式。患者为了降低疼痛诱发的可能性,可能主动限制腰椎旋转或伸展,以获得相对稳定的运动感觉。Simonet等^[22]在对非特异性慢性腰痛患者步行和跑步进行分析时发现,其腰椎前凸角及部分运动范围存在减小趋势。结合现有研究来看,疼痛、躯干肌防御性募集以及腰盆活动受限之间可能存在一定联系,但目前尚缺乏足够证据证明腰椎活动减少是导致疼痛的直接原因。更合理的理解是,二者可能在慢性病程中相互影响。因此,在临床分析腰盆运动时,不能只看活动范围大小,还应结合疼痛程度、步行速度以及整体动作表现进行综合判断。

3.3 髋关节运动及其在运动链中的作用

髋关节位于骨盆与下肢之间,在步行中承担负荷传递、维持骨盆稳定和协助身体推进等作用。现有研究表示,下腰痛患者在髋关节活动度、肌力、肌肉激活及运动控制方面可能存在一定变化,但目前研究结果并不完全一致^[23]。这可能与患者个体差异有关,也可能与步速、测试任务和评价方法不同有关。当腰椎活动受到限制时,部分患者会通过调整髋关节活动范围或运动时序来完成步行;如果髋外展肌或髋伸肌功能不足,单支撑期骨盆稳定性也可能下降,进而增加腰盆区域的代偿。由此可见,腰椎与髋关节在功能上存在相互影响,并不能简单看成单向的代偿关系。Sadler等^[24]采用表面肌电观察步行过程中臀中肌活动,发现CNSLBP患者的肌肉激活存在一定个体差异,且部分肌电指标的重复测量稳定性低于健康人群。从这个研究结果可以知道,单独依据某一肌电指标升高或降低来判断功能异常并不合适。疼痛程度、步速、疲劳状态及动作策略均可能影响肌肉活动,因此仍需结合具体任务和整体运动表现进行分析。现有关于髋部的干预研究也从侧面支持了腰—髋功能联系的临床意义。Ceballos-Laita等^[25]的Meta分析显示,在腰部训练基础上加入髋肌强化或牵伸,短期内可能改善疼痛和功

能障碍,但总体证据确定性仍较低;另有研究也提示,常规康复联合髋肌强化可获得一定的疼痛和功能改善。由此可见,髋关节值得纳入 CNSLBP 的功能评估,但是否需要进行针对性训练,仍应结合髋部肌力、活动度、单腿支撑和步态表现综合判断。

3.4 膝、踝运动与足底负荷

与腰椎、骨盆及髋关节相比,目前关于 CNSLBP 患者膝、踝关节步态变化的研究结论相对分散。2025 年的系统综述并未发现具有较高一致性的下肢关节运动学改变^[9]。国内刘红等^[11]采用步态轮廓评分和运动分析剖面图对患者进行评估,也仅在部分膝关节参数上发现组间差异,而总体步态轮廓并未呈现广泛异常。由此来看,慢性非特异性下腰痛并不会必然引起整个下肢关节出现同一方向的变化。实际上,不同患者可能采用不同的代偿方式来完成步行。有的患者主要表现为腰盆活动减少,有的则可能通过髋、膝关节活动的重新分配来维持行走,而另一些患者关节角度变化并不明显,但双侧负荷分配已经发生改变。如果只是观察关节活动角度,可能仍不能反映患者下肢的负荷特点。杨倩倩等^[12]对 CNSLBP 患者进行足底压力和平衡测试,发现其足底负荷分布及平衡控制存在一定变化。步行时,足底压力可以反映身体重心转移和双侧支撑情况,出现左右负荷不均时,既可能与腰盆控制改变有关,也可能受到下肢功能差异的影响。目前对于足底压力改变与 CNSLBP 之间的关系尚不能明确是否存在因果关系。不过,与三维运动捕捉相比,足底压力测试操作相对来说更加简便,也便于重复测量,在临床中具有一定应用优势。对于缺乏复杂步态分析设备的康复机构,可结合足底压力分布、压力中心轨迹及左右负荷对称性,对患者的支撑特点和功能变化进行辅助评价。

3.5 动力学及肌肉活动特征

地面反作用力和关节力矩能够反映患者“如何承受负荷”。部分 CNSLBP 患者在双侧垂直地面反作用力上表现出不对称^[10],但疼痛减轻并不一定同步带来动力学恢复。黄武杰等^[12]观察针刺治疗后 CNSLBP 患者疼痛明显下降,但步速、跨步长和地面反作用力并未发生同步改善。这一结果具有较强的康复学意义:疼痛改善并不等同于运动功能恢复。肌电研究也呈现类似现象。陈景洲等^[12]发现 CNSLBP 患者躯干屈伸肌等速运动过程中存在肌电活动特点的改变。总体而言,CNSLBP 可能存在肌肉激活时序、共同收缩及疲劳特征变化,但这些变化受动作任务、运动速度、疼痛状态和肌电归一化方法影响较大,不宜将单块肌肉的 RMS 升高或降低直接解释为疾病机制。

4 功能评估

4.1 主观量表

疼痛强度和功能障碍量表仍然是 CNSLBP 临床评估不可替代的组成部分。VAS/NRS 适用于疼痛变化监测,ODI 和

RMDQ 则主要反映疼痛对日常活动造成的限制^[6-8,28]。国内改良 ODI 研究进一步支持其在腰痛患者中的应用^[29]。这些工具具有操作简单、成本低和便于随访的优势。问题在于,量表评价的是患者“认为自己受到多大限制”,而不是直接测量动作表现。疼痛认知、情绪和社会环境都可能影响评分。因此,ODI 降低不能自动推导出步态已经恢复正常,同样,步态参数异常也不意味着患者必然存在严重主观功能障碍。两类指标描述的是功能的不同层面,应当互补而不是相互替代。

4.2 表现性功能测试

在量表基础上加入步行、坐站转换、动态平衡、躯干肌耐力等表现性功能测试,可以提高功能评价的完整性。Y 平衡测试能够观察单腿支撑状态下躯干与下肢的动态控制,部分下腰痛患者表现出动态平衡下降^[30]。国内核心稳定训练研究也将 Y 平衡测试作为疼痛和 ODI 之外的客观结局指标,并发现训练后动态平衡能力改善^[31]。临床功能测试的选择还应考虑患者最主要的活动受限,而不宜采用完全相同的评价项目。对于以长距离步行困难为主要表现的患者,步速、步行耐力及步行过程中症状变化可能比单独测量腰椎活动度更能反映实际功能;而对于弯腰、搬抬物品后症状明显的患者,则可增加重复屈伸、提举及负重转移等任务,观察其完成动作时的疼痛反应和运动方式。也就是说,功能评估不仅要了解患者某项指标是否异常,还应尽可能与其日常活动中真正遇到的问题相对应。这样获得的结果,在后续运动处方制定和疗效评价中更具有实际意义。

4.3 三维运动捕捉、测力平台与表面肌电

随着运动生物力学技术的发展,三维运动捕捉、测力平台和表面肌电逐渐用于 CNSLBP 步态及功能评价。三维运动捕捉可记录躯干、骨盆及髋、膝、踝关节的运动变化,结合测力平台可进一步获得地面反作用力、关节力矩及机械功率等动力学指标^[11,14];表面肌电则用于观察相关肌群的激活特征。多种技术联合有助于从运动学、动力学和神经肌肉控制层面分析步态策略。但实验室高精度数据并不意味着所有指标都适用于常规临床,标志点定位、软组织伪影、肌电极位置及数据标准化方法均可能影响结果。此外,短距离实验室步行与日常长时间行走、转向和上下楼梯仍有差别。因此,三维步态分析更适用于复杂病例、科研或干预前后的精细比较,常规临床则需兼顾信息价值、操作时间和成本。

4.4 IMU 及可穿戴技术

与传统光学运动捕捉相比,惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)体积较小、对固定场地依赖较低,近年来逐渐用于腰椎运动和步态监测。McClintock 等^[32]的系统评价显示,IMU 测量腰椎运动具有一定效度和重复测量信度。可穿戴设备还可连续记录步速、步频、活动时间及躯干加速度等信息,使功能评价由实验室延伸到日常活动环境。部分患者在短时间测试中

可以完成接近正常的步行,但日常生活中可能因疼痛预期、运动恐惧或耐力不足而减少活动,连续监测有助于识别这种差异。RESTORE 研究还将运动传感器反馈用于慢性致残性下腰痛的认知功能疗法^[33]。因此,临床可先通过量表和基本表现性测试了解总体功能,对步态异常明显或常规干预后改善不理想者,再根据需要采用三维运动捕捉、表面肌电、足底压力或 IMU 进一步分析。

5 对康复干预的启示

现有研究表明,运动疗法仍是慢性非特异性下腰痛康复的重要组成部分,但其目标不应仅停留在减轻疼痛或增强某一肌群力量。WHO 指南及国内相关文献均指出,运动干预可改善慢性下腰痛患者的疼痛和功能状态,同时更强调教育、心理干预及多组分管理的重要性^[34-37]。结合步态生物力学研究来看,CNSLBP 患者常存在不同程度的躯干僵硬、步幅缩短、腰盆协调改变及下肢负荷重新分配,因此康复训练更应关注患者在不同任务下调整动作的能力,而不是单纯追求某一局部指标恢复“正常”。核心稳定和运动控制训练目前应用较为广泛,已有研究提示其对疼痛、功能障碍、躯干肌功能及动态平衡具有一定改善作用^[31,38-39]。但是,核心训练的目的并不是在所有活动中持续保持躯干紧张或刻意减少腰椎运动。步行、坐站和负重等日常任务本身就需腰、骨盆与髋关节之间保持一定协调,因此训练内容应由低负荷控制逐步过渡到坐站、跨步、单腿支撑和行走等功能性活动,使患者在保持必要稳定性的同时,也能恢复正常的运动范围和动作转换能力。对于髋外展肌功能不足、单支撑期骨盆控制较差或双侧负荷不对称较明显的患者,可根据情况增加髋部力量及下肢闭链训练。现有 Meta 分析提示,髋肌强化在短期内可改善部分患者的疼痛和功能,但目前证据尚不足以支持其作为所有 CNSLBP 患者的常规训练内容^[25]。所以下肢训练仍应根据实际步态和功能表现进行选择,而不是简单按照疼痛部位统一安排训练。步行训练操作相对简便,也较容易延伸至家庭和社区。已有研究表明,步行训练有助于改善慢性下腰痛患者的疼痛及功能障碍,但其效果受到步速、训练时间和个体耐受程度等因素影响^[40]。对步幅缩短、腰盆活动减少等保护性步态较明显的患者,可先从步幅和腰盆协调入手,再逐步增加步行速度和持续时间;对于主要表现为活动量不足和耐力下降者,则可将训练重点放在总体活动水平和有氧耐力的恢复。生物反馈及可穿戴设备也为个体化康复提供

了新的辅助方式。运动传感器、表面肌电及足底压力等能够反映患者的运动和负荷特点,为训练调整提供客观依据^[33,41]。但其作用仍应建立在功能评估基础上,不能脱离患者实际活动需求单独解释。总体来看,CNSLBP 康复应兼顾症状改善和功能恢复,并根据步态及功能变化及时调整训练方案。

6 当前问题与未来研究方向

目前 CNSLBP 患者的步态研究仍存在较明显的人群异质性。年龄、病程、疼痛程度、体力活动水平及运动恐惧等因素均可能影响步态表现,而现有研究样本量普遍有限,多以患者组与健康组的平均差异进行比较,可能掩盖患者之间真实存在的功能差异^[9,16]。今后除扩大样本量外,还应结合疼痛、心理行为和运动功能特征开展亚组分析。与此同时,现有步态生物力学证据仍以横断面研究为主,发现腰椎旋转减少并不能说明其直接导致疼痛,也可能是疼痛后的适应结果。尤其值得注意的是,疼痛下降后步态参数并不一定同步恢复^[12],后续仍需通过纵向研究观察症状与生物力学指标随康复过程的变化。实验室测试与真实生活之间也存在差距,短距离、平整地面行走难以模拟长距离步行、转弯、上下楼梯及复杂社区环境,可穿戴设备为自然环境下的连续监测提供了可能^[32]。此外,疼痛、ODI、步速、腰椎角度或单一肌电指标均难以独立代表整体康复效果。未来可根据患者主要问题,将患者报告结局、表现性功能、生物力学指标及日常活动水平结合起来。相比寻找统一的“腰痛步态”,明确不同功能表型,并判断相关指标能否帮助调整干预和监测恢复,可能更具临床意义。

7 小结与展望

CNSLBP 的功能障碍并不局限于腰部疼痛,其持续过程还涉及心理行为、神经肌肉控制以及躯干—骨盆—下肢运动链的共同变化。现有研究较一致地发现,患者可出现步速、步频和步长下降,并伴随腰盆运动策略及步态对称性改变,但髋、膝、踝等下肢关节的具体运动学特征仍缺乏一致结论。由此看,CNSLBP 更可能表现为不同患者在疼痛和威胁感知背景下形成的运动适应,而非一种固定的异常步态。临床评价可在 ODI、RMDQ 等患者报告结局基础上,结合步速、平衡及必要的运动学、动力学、肌电或可穿戴监测指标。未来若能进一步识别不同功能表型,并据此选择和调整康复方案,将有助于推动 CNSLBP 康复由症状导向向功能导向转变。

参考文献:

- [1] GBD 2021 LOW BACK PAIN COLLABORATORS.Global,regional,and national burden of low back pain,1990-2020,its attributable risk factors,and projections to 2050:a systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2021[J].Lancet Rheumatology,2023,5(6):e316-e329.
- [2] MAHER C,UNDERWOOD M,BUCHBINDER R.Non-specific low back pain[J].Lancet,2017,389(10070):736-747.

- [3] KNEZEVIC N N,CANDIDO K D,VLAHEYEN J W S,et al.Low back pain[J].Lancet,2021,398(10294):78-92.
- [4] 中国康复医学会脊柱脊髓专业委员会专家组.中国急/慢性非特异性腰背痛诊疗专家共识[J].中国脊柱脊髓杂志,2016,26(12):1134-1138.
- [5] GEORGE S Z,FRITZ J M,SILFIES S P,et al.Interventions for the management of acute and chronic low back pain:revision 2021[J].Journal of Orthopaedic&Sports Physical Therapy,2021,51(11):CPG1-CPG60.
- [6] GARG A,PATHAK H,CHURYUKANOV M V,et al.Low back pain:critical assessment of various scales[J].European Spine Journal,2020,29(3):503-518.
- [7] SHAFSHAK T S,ELNEMR R.The visual analogue scale versus numerical rating scale in measuring pain severity and predicting disability in low back pain[J].Journal of Clinical Rheumatology,2021,27(7):282-285.
- [8] 万丽,赵晴,陈军,等.疼痛评估量表应用的中国专家共识(2020 版)[J].中华疼痛学杂志,2020,16(3):177-187.
- [9] DAL FARRA F,LOPOMO N F,FASCIA M,et al.How non-specific low back pain affects gait kinematics:a systematic review and meta-analysis[J].Frontiers in Pain Research,2025,6:1693068.
- [10] 陈晓兰,王琳,等.青年慢性非特异性腰痛患者步态:时空和动力学参数特征[J].中国组织工程研究,2019,23(4):556-561.
- [11] 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.
- [12] 黄武杰,刘红,李雅萍,等.疼痛缓解对慢性非特异性腰痛患者步态特征的影响[J].中国康复理论与实践,2021,27(2):197-202.
- [13] 罗卫,钟陶,高燕,等.慢性非特异性腰痛患者的三维步态功能分析[J].中国疗养医学,2023,32(3):273-276.
- [14] KOCH C,HÄNSEL F.Chronic non-specific low back pain and motor control during gait[J].Frontiers in Psychology,2018,9:2236.
- [15] SMITH J A,STABBERT H,BAGWELL J J,et al.Do people with low back pain walk differently?A systematic review and meta-analysis[J].Journal of Sport and Health Science,2022,11(4):450-465.
- [16] ALSUBAIE A M,MAZAHARI M,MARTINEZ-VALDES E,et al.Is movement variability altered in people with chronic non-specific low back pain?A systematic review[J].PLoS One,2023,18(6):e0287029.
- [17] TONG M H,MOUSAVI S J,KIERS H,et al.Is there a relationship between lumbar proprioception and low back pain?A systematic review with meta-analysis[J].Archives of Physical Medicine and Rehabilitation,2017,98(1):120-136.e2.
- [18] 陈炳霖,郭佳宝,李欣,等.青年慢性非特异性腰痛患者腰部本体感觉及其与肌力的相关性[J].中国康复医学杂志,2017,32(2):187-191.
- [19] VLAHEYEN J W S,MAHER C G,WIECH K,et al.Low back pain[J].Nature Reviews Disease Primers,2018,4(1):52.
- [20] CARVALHO A R,BRIANI R V,BERTOR W R R,et al.Chronic low back pain and walking speed:effects on the spatiotemporal parameters and in gait variability[J].BrJP,2019,2(4):342-347.
- [21] BAGHERI R,EBRAHIMI TAKAMJANI I,POURAHMADI M R,et al.Trunk-pelvis kinematics variability during gait and its association with trunk muscle endurance in patients with chronic low back pain[J].Journal of Applied Biomechanics,2020,36(2):76-84.
- [22] 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].Journal of Biomechanics,2020,108:109883.
- [23] PIZOL G Z,MIYAMOTO G C,CABRAL C M N.Hip biomechanics in patients with low back pain,what do we know?A systematic review[J].BMC Musculoskeletal Disorders,2024,25(1):415.
- [24] SADLER S,SPINK M,CHUTER V.Gluteus medius muscle activity during gait in people with and without chronic nonspecific low back pain:a case control study[J].Gait&Posture,2021,83:15-19.
- [25] CEBALLOS-LAITA L,ESTÉBANEZ-DE-MIGUEL E,JIMÉNEZ-REJANO J J,et al.The effectiveness of hip interventions in patients with low-back pain:a systematic review and meta-analysis[J].Brazilian Journal of Physical Therapy,2023,27(2):100502.
- [26] 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).
- [27] 陈景洲,王惠娟,石真润,等.慢性非特异性腰痛患者躯干肌的等速力学特征和肌电信号研究[J].中国康复医学杂志,2021,36(1):51-56.
- [28] 岳寿伟.腰痛的康复评估与治疗[J].康复学报,2023,33(4):287-294.

- [29] 程继伟,王振林,刘伟,等.Oswestry 功能障碍指数的改良及信度和效度检验[J].中国脊柱脊髓杂志,2017,27(3):235-241.
- [30] HOOPER T L,JAMES C R,BRISMÉE J M,et al.Dynamic balance as measured by the Y-Balance Test is reduced in individuals with low back pain:a cross-sectional comparative study[J].Physical Therapy in Sport,2016,22:29-34.
- [31] 刘晓龙,何梦晓,尹贻锬,等.核心稳定康复训练系统对慢性非特异性腰痛干预效果研究[J].中国全科医学,2023,26(9):1064-1071.
- [32] MCCLINTOCK F A,CALLAWAY A J,CLARK C J,et al.Validity and reliability of inertial measurement units used to measure motion of the lumbar spine:a systematic review of individuals with and without low back pain[J].Medical Engineering&Physics,2024,126:104146.
- [33] KENT P,HAINES T,O'SULLIVAN P,et al.Cognitive functional therapy with or without movement sensor biofeedback versus usual care for chronic,disabling low back pain(RESTORE):a randomised,controlled,three-arm,parallel group,phase 3,clinical trial[J].Lancet,2023,401(10391):1866-1877.
- [34] HAYDEN J A,ELLIS J,OGILVIE R,et al.Exercise therapy for chronic low back pain[J].Cochrane Database of Systematic Reviews, 2021,9(9):CD009790.
- [35] WORLD HEALTH ORGANIZATION.WHO guideline for non-surgical management of chronic primary low back pain in adults in primary and community care settings[M].Geneva:World Health Organization,2023.
- [36] 王雪强,陈佩杰,矫玮,等.运动疗法治疗腰痛的专家共识[J].体育科学,2019,39(3):19-29.
- [37] 冯渊,何成奇,杨霖.运动疗法治疗慢性非特异性腰痛的临床研究进展[J].中华物理医学与康复杂志,2023,45(2):173-177.
- [38] 许思毛,张敬之,刘晓龙.核心稳定训练对慢性非特异性腰痛影响的 Meta 分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(2):150-156.
- [39] 张婵娟,李悦龙,张洲,等.运动控制训练改善慢性非特异性腰痛的 fMRI 研究[J].中国康复医学杂志,2022,37(3):303-310.
- [40] NÚÑEZ-CORTÉS R,SUSO-MARTÍL,SALAZAR-MÉNDEZ J,et al.How much walking is enough for chronic low back pain?A systematic review and dose-response meta-analysis[J].PM&R,2026.
- [41] 郑翔,张明兴,黄雅,等.生物反馈助力电刺激对慢性非特异性腰痛患者下肢步行功能的改善[J].中国组织工程研究,2025,29(3):547-553.