

# 膝骨关节炎患者下肢表面肌电信号特征及其运动康复的研究进展



邵云博<sup>1</sup>, 郭珈宜<sup>2</sup>, 李峰<sup>2</sup>, 李健强<sup>1</sup>, 姚可心<sup>1</sup>

1. 河南中医药大学洛阳平乐正骨学院 (郑州 410307)
2. 河南省洛阳正骨医院 (河南省骨科医院) 骨关节病科 (河南洛阳 471002)

**【摘要】**膝骨关节炎 (knee osteoarthritis, KOA) 是临床上常见的关节退行性病变, 长期 KOA 患者所出现的双下肢肌肉无力、关节不稳等导致运动功能受损的表现, 能够通过表面肌电技术进行捕捉, 表征形式以下肢肌肉的激活顺序、激活程度、协调运动模式和疲劳模式等方面的异常信号为主。运动康复治疗是改善 KOA 患者下肢运动功能、降低 KOA 复发几率的必要手段, 利用表面肌电技术拓展运动功能的评估方式, 能够为 KOA 患者制定长期、有针对性、高效率的康复锻炼疗法和肌力训练提供科学的参考依据, 进一步丰富 KOA 的康复锻炼方法。本文旨在对 KOA 患者肌肉的异常电-生理表征和运动康复方案进行综述, 以提升表面肌电在 KOA 运动康复领域的指导价值。

**【关键词】**膝骨关节炎; 关节退行性病变; 表面肌电信号; 运动康复; 股四头肌

## Characteristics of lower limb surface electromyography in patients with knee osteoarthritis and progress in their exercise rehabilitation

SHAO Yunbo<sup>1</sup>, GUO Jiayi<sup>2</sup>, LI Feng<sup>2</sup>, LI Jianqiang<sup>1</sup>, YAO Kexin<sup>1</sup>

1. Luoyang Pingle Orthopedic-Traumatological College, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 410307, China

2. Department of Osteoarthropathy, Luoyang Orthopedic-Traumatological Hospital of Henan Province (Henan Provincial Orthopedic Hospital), Luoyang 471002, Henan Province, China

Corresponding author: GUO Jiayi, Email: DoctorGuoJY@outlook.com

**【Abstract】**Knee osteoarthritis (KOA) is a common joint degenerative disease in clinical practice. The symptoms of lower limb muscle weakness, joint instability and other impaired motor function in long-term KOA patients can be captured by surface electromyography technology, and the representation form are mainly abnormal signals in the activation sequence, activation degree, coordinated movement pattern and fatigue pattern of lower limb muscles. Sports rehabilitation therapy is a necessary means to improve the lower limb motor function of KOA patients and reduce the recurrence rate of KOA. Using surface electromyography technology to expand the evaluation method of motor function can provide a scientific reference for KOA patients to develop long-term, targeted and efficient rehabilitation exercise therapy and muscle strength training, thereby further enriching the rehabilitation exercise methods of KOA. This article aims to review

DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202406111

基金项目: 中医药传承与创新人才工程 (仲景工程) 中医药拔尖人才 (豫卫中医函 [2021] 15 号)

通信作者: 郭珈宜, 主任中医师, 硕士研究生导师, Email: DoctorGuoJY@outlook.com

the abnormal electro-physiological characterization of KOA patients' muscles and exercise rehabilitation programs, to enhance the guiding value of surface electromyography in the field of KOA exercise rehabilitation.

**【Keywords】** Knee osteoarthritis; Degenerative joint disease; Surface electromyography; Sports rehabilitation; Quadriceps muscle

膝骨关节炎 (knee osteoarthritis, KOA) 是一种影响关节及其周围组织的慢性退行性、致残性疾病, 主要病理改变是关节软骨、滑膜及周围肌肉韧带的进行性损伤<sup>[1]</sup>。随着疾病的不断进展, KOA 患者基本都会出现肌力减退、关节肌肉失衡等神经-肌肉问题, 下肢肌肉力量下降是造成 KOA 患者关节负荷加剧、下肢力线改变, 引起步态异常、病情恶性发展的危险因素<sup>[2-3]</sup>。KOA 病因目前尚未明确, 但研究表明多种危险因素与其有关, 例如年龄、遗传、性别、体重、体力劳动强度、运动损伤、性激素和膝关节生物力学改变等<sup>[4]</sup>。基于 KOA 的临床表现, 药物治疗在缓解疼痛和消除炎症方面是必要的, 而在改善生活质量与日常活动方面, 明确 KOA 患者下肢关键肌群的病理改变及产生的影响, 并进行合适的运动康复治疗是关键, 这也是关节置换术后患者恢复关节功能所必须考虑的。

运动功能是人类活动生存的重要机能, 无论是行走、奔跑等大范围运动, 还是抓握、穿针、弹奏乐器等小范围精细运动, 运动功能的实现都有赖于神经系统对骨骼肌的动态调控<sup>[5]</sup>。而当神经肌肉系统受到损伤时, 尤其是脑部或脊髓型损伤疾病, 则会对人体运动机能产生严重影响, 降低患者的生活质量。因此, 研究人体各种运动模式下神经肌肉的动态调控状态及其机制, 是实现健康运动的必要过程, 同时, 也能够为临床关节-肌肉损伤、神经-肌肉病变的诊断和后续的康复治疗提供证据和指导, 具有重要的理论价值和现实意义。肌电信号是产生肌肉活力的信号根源, 它是肌肉中许多运动单元 (motor unit, MU) 的活动及其动作电位在时间和空间上的叠加, 是实现骨骼肌动态激活特性可视化的关键技术, 可以反映中枢神经系统对骨骼肌活动的动态调控过程<sup>[6]</sup>。最初的肌电信号是使用针电极插入肌肉来直接记录的肌内肌电信号 (intramuscular electromyography, IEMG), 这也是目前临床采集

肌电图的常用方式, 其优点是准确性较高、干扰小、好定位, 在明确中枢神经系统对单个 MU 的募集调控方面发挥了重要作用, 但作为有创性的测试, 一般不在临床试验中使用。表面肌电信号 (surface electromyography, sEMG) 是通过电极在皮肤表面采集得到的, 是神经肌肉系统活动时生物放电产生的变化经表面电极引导、放大、显示和记录所获得的电压时间序列信号, 该技术呈现的是肌肉内 MU 群体的活动特征<sup>[7]</sup>, 通过时域分析对目标肌肉的运动激活和协同进行评估, 通过频域分析对肌肉的疲劳过程和疲劳程度进行观察。sEMG 对肌肉活动状态的评估效果显著, 对于康复医学和运动科学等领域具有重要的研究价值和意义, 如判断肌肉的疲劳状态<sup>[8]</sup>、分析运动方式的科学性、制定合理的康复计划等, 并且该方法具有安全无创、测试范围广、限制小、易于操作等优势, 更易被研究者和受试者所接受。

因此, 利用表面肌电技术及其信号分析, 有助于进一步明确 KOA 对关节-肌肉层面产生影响的机制, 从电-生理角度发现膝关节退行性病变使下肢肌肉出现异常活动的具体表征, 从而有针对性地通过康复锻炼对异常目标肌肉或肌群进行干预, 为制定适合 KOA 患者的治疗和运动康复计划提供指导和参考。本文主要对 KOA 患者下肢肌群异常表面肌电特征与运动康复方案进行综述。

## 1 KOA患者下肢肌群表面肌电特征

### 1.1 KOA患者下肢肌肉的激活顺序

KOA 患者下肢肌肉参与活动的次序和收缩的协调性是患者行走、步态是否出现异常的要素<sup>[9]</sup>。有研究认为, 肌肉激活的开始需要激活阈值进行判定, 通常将受试者在静息状态肌电峰值信号作为肌肉激活阈值, 通过表面肌电的即时信号和振幅数值可观测到 KOA 患者肌肉开始激活的时刻, 帮助研判 KOA 患者下肢肌肉的活动顺序<sup>[10]</sup>。

膝关节在矢状轴方向上以关节的屈伸活动为主, 由股四头肌、腘绳肌、腓肠肌等共同完成,

各肌群通过等长收缩、等张收缩、向心收缩等方式共同完成膝关节屈伸活动。在 sEMG 的捕捉下发现, KOA 患者在关节活动中出现的不稳定现象和下肢无力是关节周围肌肉本体未能完全激活所致<sup>[11]</sup>, 该异常的发生以股四头肌的不完全激活为主。在等速 180 %s 的伸膝测试中, KOA 患者股内侧肌的启动顺序要延后于股外侧肌<sup>[12]</sup>; 在登梯活动中, KOA 患者股外侧肌启动出现了延迟现象<sup>[13]</sup>, 对于重度 KOA 患者, 在上台阶的动作过程中, 股四头肌的激活起点相对于腘绳肌出现了明显的延迟; 在坐位起立动作过程中, KOA 患者的股二头肌振幅增大, 在伸膝的活动中出现了先激活拮抗肌后激活主动肌的异常表现<sup>[14]</sup>。上述结论显示, KOA 病变会导致患者下肢肌群的运动激活次序发生改变: 股四头肌在相对于腘绳肌这一主动肌与拮抗肌的组合中发生激活延迟; 在股四头肌肌群组合中, 不同的活动会导致股外侧肌与股内侧肌这一平衡肌组合出现交替的延迟现象, 这些均代表了 KOA 与肌肉激活顺序的紊乱关系, 且这种无序的延迟激活现象, 很可能是 KOA 患者关节不稳定发生和膝周疼痛加剧的潜在因素。

## 1.2 KOA患者下肢肌肉的激活与协同模式

KOA 患者下肢肌肉的激活模式主要有两种: 一种是关节周围肌肉在活动整体组合性的高水平激活; 另一种是相对应的下肢主动肌、拮抗肌和股内外侧肌群的协同激活, 但激活的发生并不能完全同步<sup>[15]</sup>。肌肉激活程度代表着神经肌肉活动的兴奋性, 而肌肉激活程度的差异会导致运动稳定性的下降, 其中高水平的激活被认为是膝关节周围肌肉韧带组织的退变和松弛导致的代偿性激活, 这种激活方式在一定程度上导致更多的肌群被同时调动, 而加重关节僵硬程度, 进而导致关节压力的上升, 加重关节软骨磨损, 使 KOA 病情进一步发展<sup>[16-17]</sup>。相关研究表明, 在行走或上楼梯时, KOA 患者下肢多方位肌肉的高水平共激活比例要明显高于正常人, 且参与共激活的骨骼肌激活水平出现不对称<sup>[18-19]</sup>。在下肢肌群中, 膝关节活动的稳定性需要股四头肌和腘绳肌肌力拥有合适的协同激活比例<sup>[20]</sup>, KOA 患者由于关节退变导致力学结构出现异常, 在下肢活动时大概率出现不均衡的用力情况, 从而导致肌肉激活的失衡, 在表面肌电中常用时域分析的积分肌电值 (integrated electromyography, iEMG) 和均方根

值 (root mean square amplitude, RMS) 指标来了解肌肉的激活强度。有研究指出, KOA 患者在进行最大等长收缩和下蹲活动时, 患侧股外侧肌和股二头肌的激活程度小于健侧, 而腘绳肌的激活程度高于健侧<sup>[21]</sup>。在进行坐下-站立活动时, 由于患者骨盆前倾角度增大, 髌关节-膝关节-踝关节这一力线结构失稳, 使股四头肌下段与股二头肌的激活显著不平衡, 臀中肌、股外侧肌、股内侧肌、股直肌的 RMS 和 iEMG 值下降, 股二头肌的激活水平提升, 且踝关节背伸角度的减少使 KOA 患者的胫骨前肌存在激活缺陷, 而内、外侧腓肠肌的激活水平上升<sup>[22-23]</sup>。在上下楼梯这种难度性动作上, KOA 患者在上梯站立期, 膝内侧肌群 (股内侧肌-腓肠肌内侧头) 协同收缩程度较大; 在上梯摆动期, 股内外侧肌、膝外侧肌群 (股外侧肌-股二头肌) 协同收缩程度较小; 下梯站立期, 臀大肌激活水平较高; 下梯摆动期, 股直肌激活水平较高、腓肠肌内侧头激活水平较小<sup>[24]</sup>, 表明 KOA 患者在上下楼梯各个时相中均存在下肢肌肉的共同收缩比例和肌肉运动协调性的异常。

上述几种情况的出现被认为是 KOA 患者的患肢存在屈伸肌群快收缩纤维的萎缩及其活动能力下降、下肢不同活动中责任肌肉力量的平衡异常, 以及主动肌与拮抗肌的协同比例失衡所致<sup>[25-26]</sup>, 并且可以观察到在不同的动作任务下, KOA 患者的肌肉激活水平和协调异常存在差异。因此对于 KOA 患者康复训练计划的制定需要充分考虑下肢肌群的激活与协同收缩条件, 以提升肌肉激活效率、降低共激活水平、改善肌肉协同模式为主要目标。

## 1.3 KOA患者的肌肉疲劳与肌电信号分析

一般认为, 当肌肉不能继续维持要求动作所需的收缩力量或做功水平时即发生了疲劳。sEMG 所产出的功率频谱是评估肌肉疲劳的关键, 平均功率频率、中位频率是肌肉疲劳研究中的主要参数指标, 随着疲劳程度的加深, 肌肉纤维传导速度会由高频向低频产生偏移, 疲劳越重, 偏移越快、偏移幅度越大<sup>[27]</sup>。多项研究表明在肌肉疲劳时肌电信号的时域指标呈上升趋势, 而功率频谱则是由高频向低频进行转换<sup>[28-29]</sup>, 因此表面肌电是评估肌肉疲劳的重要手段。

KOA 患者更易出现肌肉疲劳和下肢肌力下降之间的相互影响。疼痛与关节结构变性往往是 KOA 患者日常活动明显减少、下肢肌肉失用

性萎缩的直接原因，下肢肌力和关节稳定性的下降则会导致 KOA 患者更容易出现下肢肌肉的疲劳，而疲劳状态反过来会加重下肢协同肌群的共收缩作用，导致肌肉过度调动，使肌力进一步受损<sup>[30]</sup>。在肌肉疲劳状态下，进行下肢间歇性等长收缩活动时，股外侧肌和股二头肌的频幅比值较正常下降了 11%<sup>[31]</sup>，提示在疲劳时段内，股外侧肌的过度激活使股内侧肌的激活效率下降，这在伸、屈膝肌群肌力不平衡的 KOA 患者上有更明显的表现。在肌电信号的分析中，确定肌肉出现疲劳的时刻是研究的难点、热点。有研究者认为，当肌肉的时域指标 RMS 和 iEMG 高于某一时值，其所对应的频域指标中位频率低于某一时值时，该对应关系所出现的时值可作为判断肌肉疲劳状态是否发生的点位<sup>[32]</sup>，这是由于在肌肉疲劳发生和发展的过程中会导致更多的 MU 被募集，并出现 MU 同步化的活动增强，这种现象会引起 RMS、iEMG 等时域指标呈线性上升趋势，但在该过程中运动神经元的放电频率会出现减弱，疲劳状态诱发的快肌纤维募集转变为慢肌纤维募集，具体表征即为频域指标的下降、频谱偏移的加快，这种估计方式采用时频分析相结合的方式可以更容易去实现和对比。Patsika 等<sup>[33]</sup>的研究证实，KOA 患者股四头肌的神经-肌肉利用效率较低，在疲劳状态下需要更高的激活水平来维持关节

稳定，从而出现时域指标上升、频域指标下降的联合趋势。Mehra 等<sup>[34]</sup>同样基于疲劳状态下肌肉功率频谱和时域尺度的变化特征，在预测肌肉达到深部疲劳所需时间的研究中取得进展，这对于评估 KOA 患者的活动时间，进一步提升康复治疗期望提供了更加直观的数据支持。

## 2 KOA患者运动康复的研究现状

KOA 患者下肢力学结构的改变是疾病恶性循环的关键因素，通过表面肌电技术能从深层次角度发现，KOA 所致股四头肌肌群的激活延迟与激活减弱是患者下肢肌肉萎缩的主要表征，而下肢主动-拮抗肌群的运动协调异常和肌肉疲劳是患者后期关节稳定性恢复缓慢的重要原因。尽管前期的药物治疗能够缓解疼痛和关节退变，但从长远来看，下肢肌肉的萎缩、易疲劳和关节的失衡依然会导致患者的疼痛和功能受限反复，无法从根本上改善生活质量，甚至由慢性发展到置换关节的阶段，而在置换关节之后依然需要下肢力学结构的恢复以支撑人工关节并重新开展运动，因此对于下肢肌群的康复锻炼是 KOA 治疗环节的关键一环，在确诊疾病并开始用药治疗的早期就需配合进行运动康复训练，根据 KOA 患者下肢异常肌电信息制定的肌力训练计划更具有科学性。目前，运动疗法已被国际和多国的骨关节炎治疗指南强烈推荐<sup>[35-36]</sup>，汇总的常见运动疗法详见表 1。

表1 KOA患者运动康复常见疗法

Table 1. Common therapies for exercise rehabilitation in KOA patients

运动康复方式	目标肌群	适宜患者人群	运动锻炼优势
<b>有氧运动</b>			
步行训练	下肢肌群	老年KOA患者	缓解关节疼痛，改善关节僵硬
水下步行训练	下肢肌群	老年KOA患者	缓解关节疼痛，改善关节僵硬
功率自行车	下肢肌群	青壮年KOA患者	改善关节炎症，缓解关节僵硬
<b>肌力锻炼</b>			
等速肌力训练	股四头肌、腘绳肌为主	多年龄段KOA患者（应评估关节情况）	恢复肌力，改善关节屈伸力矩，提升关节平衡性，降低膝关节力学负荷
抗阻肌力训练	股四头肌、腘绳肌、臀部肌群、髌部肌群为主	多年龄段KOA患者（应评估关节情况）	恢复肌力，改善膝关节疼痛，提升膝关节运动稳定性，完善下肢力学结构
日常性肌力训练	股四头肌、内收肌群为主	中老年KOA患者（中晚期）	恢复肌力；锻炼模式方便、易行，不受场地与器械限制，动作简单有效
<b>传统功能锻炼</b>			
太极拳	全身多肌群	早中期KOA患者（应评估关节情况）	改善关节本体感觉，改善肌力，缓解疼痛，改善关节活动度

续表1

运动康复方式	目标肌群	适宜患者人群	运动锻炼优势
八段锦	全身多肌群（下肢以股四头肌为主）	早中期KAO患者（应评估关节情况）	改善肌力，改善关节活动度
五禽戏	全身多肌群（下肢以股四头肌为主）	早中期KAO患者（应评估关节情况）	改善肌力，改善关节活动度

## 2.1 有氧运动

美国运动医学院的运动处方指南建议，有氧运动频率应为每周 3~5 d 左右，强度推荐中低强度的有氧运动，40%~60% 的储备摄氧量或储备心率强度能够适合大多数关节炎患者<sup>[37]</sup>。一项有氧运动的网状 Meta 分析显示，水下步行或者步行通过干预免疫应答和缩减炎症产生途径，在缓解疼痛方面优于其他有氧运动方式；功率自行车运动能减轻患者体重对关节的压迫，限制膝关节弯曲角度，在骑行过程中关节面压力产生的动态变化能够在合理范围内促进关节内抗炎物质的产生与加速血液循环，同时缓解炎症渗出和炎性增生，在减轻膝关节内压和改善关节僵硬方面具有一定优势，但骑行对于有基础疾病和关节条件较差的老年 KOA 患者来说应慎重考虑，而对于青壮年 KOA 患者，骑行可作为一种更为高效的有氧运动方式<sup>[38]</sup>。在改善膝关节整体运动功能方面，步行训练依旧是最佳选择<sup>[39]</sup>。步行非常适合老年人这类运动耐受力偏低的人群<sup>[40]</sup>，有研究指出合理的步行计划有利于 KOA 患者运动功能以及疼痛改善<sup>[41]</sup>。Wallis 等<sup>[42]</sup>建议对于 KOA 患者，每周 70 min 的中强度步行训练可缓解关节僵硬、恢复下肢肌肉功能，且安全可靠，在步行计划的基础上再进行步态矫正训练可增强恢复效果<sup>[43]</sup>。因此对于老年 KOA 患者来说，步行训练应为该人群首选的有氧运动方式，在专业的指导下进行步行距离、时间的合理安排，并联合步态矫正，能够进一步提升运动康复效率。

## 2.2 肌力锻炼

特化性的肌力训练能够改善 KOA 患者下肢关键运动肌肉的活性以及膝关节伸展、内收、屈曲力矩等机械因素异常，从而提升关节的稳定性和优化肌肉的协同作用模式，有助于预防和延缓 KOA 的发展<sup>[44]</sup>。股四头肌及其拮抗肌（腘绳肌、股二头肌）在膝关节周围肌群的训练最为常见和重要，这对肌群肌力的恢复能够提升 KOA 患者的关节稳定性、减缓关节退变压力，而肌肉收缩

力的强化也有助于膝关节组织的血液循环回流，对炎症的改善也有一定的帮助<sup>[45]</sup>。以膝关节肌力锻炼为方向的 Meta 分析指出，对股四头肌进行等速肌力训练或等速向心力训练，能同时活跃 KOA 患者的主动与拮抗肌群，在改善膝关节屈伸力矩方面效果显著，对关节活动度以及步行能力也有明显改善<sup>[46]</sup>。进行以肌力训练为核心的运动疗法能够同时满足 KOA 患者提升关节平衡性和降低膝关节生物力学负荷两个方面的锻炼目的，Moeka 等<sup>[47]</sup>认为其机制主要表现在膝关节第一峰值膝内收力矩（KAM）、峰值膝关节屈曲力矩（KFM）和最大膝关节压缩力（KCF）三个参数的改善。除膝关节周围肌群外，KOA 患者髋部和臀部的前屈肌、后伸肌、内外旋、臀中肌、臀小肌肌力都有一定程度的减退<sup>[30]</sup>，肌肉体积的明显降低是表明其出现萎缩的证据。重视对髋部肌群以及臀肌的锻炼对改善膝关节疼痛、提升膝关节运动稳定性、完善下肢力学结构模式方面会有更好的效果，在此基础上联合股四头肌的等速抗阻训练可以获得更显著的康复效果<sup>[48]</sup>。

在临床功能锻炼中开展等速肌力训练需要患者在院内进行相关器械的辅助指导，对场地和设备有严格要求，压缩了 KOA 患者切实参与锻炼的时长，对于 KOA 患者长期康复目标的实现不利，而在日常生活中进行的特定肌群训练计划常常受患者依从性的影响而导致锻炼效果不佳，因此为中老年人占比较大的 KOA 患者设计方便、易行的肌肉功能疗法和随访监督体系，对减少疾病反复几率、改善 KOA 患者生活质量、提升远期疗效十分重要。

## 2.3 传统功能锻炼

对于早中期疼痛与炎症控制良好的 KOA 患者来说，太极拳、易筋经、八段锦、五禽戏等传统养身功法对于 KOA 症状改善也是十分有效的。其中太极拳被多项骨关节炎指南推荐，认为太极拳能缓解膝关节疼痛、改善患者步行能力<sup>[49]</sup>。八段锦和五禽戏对于 KOA 同样有防治效果，以改善患

者股四头肌肌力和关节活动度为主<sup>[50-51]</sup>。但国内有研究者对多种传统功法的锻炼效果进行了对照试验,结果显示太极拳在疼痛改善、关节活动度、行走距离、日常活动状态以及本体感觉训练效果等方面均优于八段锦和五禽戏<sup>[52]</sup>,可能是因为太极拳所包含的动作广泛且动态运动模式较多,在微观上能更好地激发本体感觉对肌肉状态产生修复调控,但仍需更多的神经-肌肉层面的研究证据佐证。而对于 KOA 症状严重的老年患者来说,是否进行传统功能锻炼要根据自身关节条件和病情缓解情况慎重考虑。

### 3 结语

综上所述,表面肌电技术在关节-肌肉性疾病方面有着显著的应用价值,将表面肌电与 KOA 导致的关节-肌肉性病理变化相结合,能够在电-生理层面解释 KOA 引起关节肌肉退变的机制,明确 KOA 患者运动能力减退与下肢肌群、肌肉之间的异常活动关系,这对于针对性的 KOA 药物、物理治疗以及特化性的功能疗法制定有着重要的指导价值(图 1)。

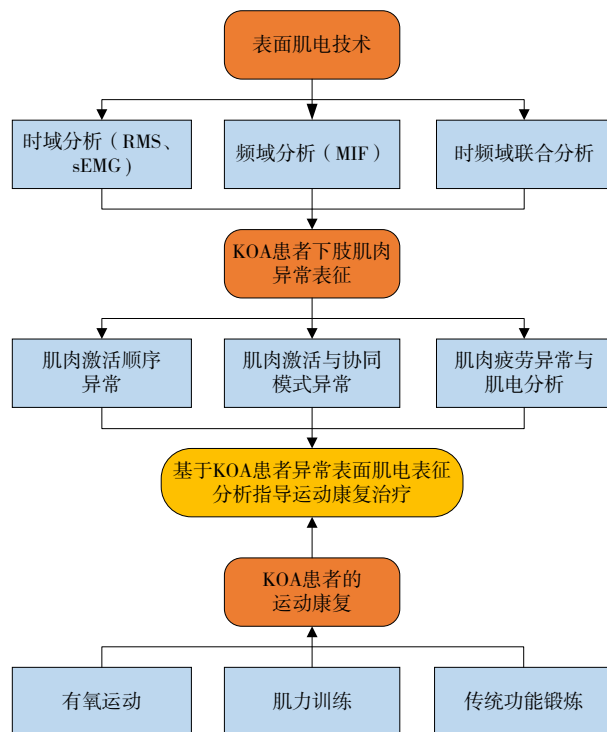


图1 KOA患者下肢表面肌电表征与运动康复治疗模式图

Figure1. Lower extremity sEMG and exercise rehabilitation model of KOA patients

因此,未来应增加表面肌电技术在 KOA 研究中的应用,以获取更多 KOA 电-生理机制的临床证据;进一步深化 sEMG 分析技术,使 MU 在时间空间上的协同作用或肌纤维的调配等更加精细的电生理信号获取成为可能;通过 sEMG 进行下肢肌力的估计具有敏感性更高的优势,但如何将肌电信号数值同具体的肌力标准进行对应评估,并设计相应算法仍存在技术难点;此外,关于 KOA 患者下肢肌肉疲劳改变的临床研究目前仍较少,对于 KOA 引起的关节周围肌群疲劳状态的改变有待更深入的研究,且通过表面肌电技术进行肌肉疲劳评估,尤其是针对单个肌肉的详细评估方法仍有待完善,需要更加精准的计算方式和评估策略以进一步明确 KOA 对于下肢肌肉疲劳状态的影响;最后,应进一步将表面肌电与运动康复疗法相结合,充分利用 KOA 患者下肢肌群的活动特征和运动表现,通过信号分析技术或算法,更多的从运动时间和运动方式上为 KOA 患者设计更加合理、细化的运动康复方案,提升 KOA 的远程康复疗效。

### 参考文献

- Sharma L. Osteoarthritis of the Knee[J]. N Engl J Med, 2021, 384(1): 51-59. DOI: 10.1056/NEJMc1903768.
- Li JT, Zeng N, Yan ZP, et al. A review of applications of metabolomics in osteoarthritis[J]. Clin Rheumatol, 2021, 40(7): 2569-2579. DOI: 10.1007/s10067-020-05511-8.
- Tayfur B, Charuphongsa C, Morrissey D, et al. Neuromuscular joint function in knee osteoarthritis: a systematic review and Meta-analysis[J]. Ann Phys Rehabil Med, 2023, 66(2): 101662. DOI: 10.1016/j.rehab.2022.101662.
- Cui A, Li H, Wang D, et al. Global, regional prevalence, incidence and risk factors of knee osteoarthritis in population-based studies[J]. EclinicalMedicine, 2020, 29-30: 100587. DOI: 10.1016/j.eclinm.2020.100587.
- Sponberg S, Abbott E, Sawicki GS. Perturbing the muscle work loop paradigm to unravel the neuromechanics of unsteady locomotion[J]. J Exp Biol, 2023, 226(7). DOI: 10.1242/jeb.243561.
- Merletti R, Farina D. Analysis of intramuscular electromyogram signals[J]. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 2009, 367(1887): 357-368. DOI: 10.1098/

- rsta.2008.0235.
- 7 Merletti R, Muceli S. Tutorial. Surface EMG detection in space and time: best practices[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2019, 49: 102363. DOI: [10.1016/j.jelekin.2019.102363](https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2019.102363).
  - 8 徐明伟, 金龙哲, 于露, 等. 长时间颈部前屈对颈部肌肉疲劳的影响 [J]. *工程科学学报*, 2019, 41(11): 1493–1500. [Xu MW, Jin LZ, Yu L, et al. Effect of long-term bowing of the head on neck muscle fatigue[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(11): 1493–1500.] DOI: [10.13374/j.issn2095-9389.2019.04.24.007](https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.04.24.007).
  - 9 Chai Y, Chen J, Hou M, et al. Gait strategies for individuals with knee osteoarthritis when transitioning between floor and stair walking [J]. *Front Physiol*, 2023, 14: 1026299. DOI: [10.3389/fphys.2023.1026299](https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1026299).
  - 10 王琨, 李小生, 宋娟, 等. 肌电图 (EMG) 在运动生物力学研究中的应用 [J]. *体育科研*, 2014, 35(1): 31–33, 38. [Wang K, Li XS, Song R, et al. Application of electromyography(EMG) in sports biomechanical researches[J]. *Sport Science Research*, 2014, 35(1): 31–33, 38.] DOI: [10.3969/j.issn.1006-1207.2014.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1207.2014.01.009).
  - 11 Murphy MC, Latella C, Rio EK, et al. Does lower-limb osteoarthritis alter motor cortex descending drive and voluntary activation? a systematic review and Meta-analysis[J]. *EFORT Open Rev*, 2023, 8(12): 883–894. DOI: [10.1530/EOR-23-0092](https://doi.org/10.1530/EOR-23-0092).
  - 12 师东良, 王宁华, 谢斌. 膝骨关节炎患者股内侧肌、股直肌和股外侧肌间的协调性 [J]. *中国康复理论与实践*, 2010, 16(5): 473–477. [Shi DL, Wang NH, Xie B. Coordination of vastus medialis, rectus femoris and vastus lateralis in patients with knee osteoarthritis[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice*, 2010, 16(5): 473–477.] DOI: [10.3969/j.issn.1006-9771.2010.05.031](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9771.2010.05.031).
  - 13 Iijima H, Shimoura K, Aoyama T, et al. Biomechanical characteristics of stair ambulation in patients with knee OA: a systematic review with Meta-analysis toward a better definition of clinical hallmarks[J]. *Gait Posture*, 2018, 62: 191–201. DOI: [10.1016/j.gaitpost.2018.03.002](https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.002).
  - 14 Petrella M, Selistre LFA, Serrão PRMS, et al. Kinetics, kinematics, and knee muscle activation during sit to stand transition in unilateral and bilateral knee osteoarthritis[J]. *Gait Posture*, 2021, 86: 38–44. DOI: [10.1016/j.gaitpost.2021.02.023](https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.02.023).
  - 15 李丹, 王剑雄, 黄茂茂, 等. 健康中老年女性上下楼梯时下肢肌肉的表面肌电图表现 [J]. *中国康复理论与实践*, 2023, 29(6): 731–737. [Li D, Wang JX, Huang MM, et al. Surface electromyography of lower limb muscles in healthy middle-aged and old women during stair ascent and descent[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice*, 2023, 29(6): 731–737.] DOI: [10.3969/j.issn.1006-9771.2023.06.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9771.2023.06.016).
  - 16 Smith SL, Allan R, Marreiros SP, et al. Muscle co-activation across activities of daily living in individuals with knee osteoarthritis[J]. *Arthritis Care Res (Hoboken)*, 2019, 71(5): 651–660. DOI: [10.1002/acr.23688](https://doi.org/10.1002/acr.23688).
  - 17 Smith SL, Woodburn J, Steultjens MPM. Sex-and osteoarthritis-related differences in muscle co-activation during weight-bearing tasks[J]. *Gait Posture*, 2020, 79: 117–125. DOI: [10.1016/j.gaitpost.2020.04.019](https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.04.019).
  - 18 Metcalfe AJ, Stewart C, Postans N, et al. The effect of osteoarthritis of the knee on the biomechanics of other joints in the lower limbs[J]. *Bone Joint J*, 2013, 95-B(3): 348–353. DOI: [10.1302/0301-620X.95B3.30850](https://doi.org/10.1302/0301-620X.95B3.30850).
  - 19 Liu S, Amiri P, McGregor AH, et al. Bilateral asymmetry in knee and hip musculoskeletal loading during stair ascending/descending in individuals with unilateral mild-to-moderate medial knee osteoarthritis[J]. *Ann Biomed Eng*, 2023, 51(11): 2490–2503. DOI: [10.1007/s10439-023-03289-9](https://doi.org/10.1007/s10439-023-03289-9).
  - 20 Duncan RC, Hay EM, Saklatvala J, et al. Prevalence of radiographic osteoarthritis—it all depends on your point of view[J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2006, 45(6): 757–760. DOI: [10.1093/rheumatology/kei270](https://doi.org/10.1093/rheumatology/kei270).
  - 21 Suzuki Y, Iijima H, Nakamura M, et al. Rate of force development in the quadriceps of individuals with severe knee osteoarthritis: a preliminary cross-sectional study[J]. *PLoS One*, 2022, 17(1): e0262508. DOI: [10.1371/journal.pone.0262508](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262508).
  - 22 Fu S, Duan T, Hou M, et al. Postural balance in individuals with knee osteoarthritis during stand-to-sit task[J]. *Front Hum Neurosci*, 2021, 15: 760960. DOI: [10.3389/fnhum.2021.760960](https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.760960).
  - 23 Pan J, Fu W, Lv J, et al. Biomechanics of the lower limb in patients with mild knee osteoarthritis during the sit-to-stand task[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2024, 25(1): 268. DOI: [10.1186/s12891-024-07388-z](https://doi.org/10.1186/s12891-024-07388-z).
  - 24 刘本科, 陈博, 熊凤, 等. 膝骨关节炎患者上下楼梯过

- 程中膝关节的稳定性特征分析[J]. 风湿病与关节炎, 2022, 11(4): 7-12. [Liu BK, Chen B, Xiong F, et al. Analysis of stability characteristics of knee joint in patients with knee osteoarthritis when going up and down stairs[J]. *Rheumatism and Arthritis*, 2022, 11(4): 7-12.] DOI: [10.3969/j.issn.2095-4174.2022.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4174.2022.04.002).
- 25 俞晓杰, 吴毅, 胡永善, 等. 膝关节骨关节炎患者膝屈伸肌的表面肌电信号研究[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2006, 28(6): 402-405. [Yu XJ, Wu Y, Hu YS, et al. Surface electromyography of knee flexor extensor muscle in patients with knee osteoarthritis[J]. *Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2006, 28(6): 402-405.] DOI: [10.3760/j.issn:0254-1424.2006.06.013](https://doi.org/10.3760/j.issn:0254-1424.2006.06.013).
- 26 Siqueira MS, Souto LR, Martinez AF, et al. Muscle activation, strength, and volume in people with patellofemoral osteoarthritis: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2022, 30(7): 935-944. DOI: [10.1016/j.joca.2022.01.013](https://doi.org/10.1016/j.joca.2022.01.013).
- 27 方博儒, 仇大伟, 白洋, 等. 表面肌电信号在肌肉疲劳研究中的应用综述[J]. 计算机科学与探索, 2024: 1-16. [Fang BR, Qiu DW, Bai Y, et al. Review of the application of surface electromyography signals in muscle fatigue research[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2024: 1-16.] DOI: [10.3778/j.issn.1673-9418.2312042](https://doi.org/10.3778/j.issn.1673-9418.2312042).
- 28 刘光达, 董梦坤, 许蓝予, 等. 手臂疲劳时表面肌电信号特征[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10690-10696. [Liu GD, Dong MK, Xu LY, et al. Characteristic of surface electromyography signal in arm fatigue[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(25): 10690-10696.] DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2021.25.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2021.25.017).
- 29 Bongiorno G, Biancuzzi H, Dal Mas F, et al. Evaluation of muscle energy in isometric maintenance as an index of muscle fatigue in roller speed skating[J]. *Front Sports Act Living*, 2023, 5: 1153946. DOI: [10.3389/fspor.2023.1153946](https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1153946).
- 30 Pethick J, Winter SL, Burnley M. Fatigue reduces the complexity of knee extensor torque during fatiguing sustained isometric contractions[J]. *Eur J Sport Sci*, 2019, 19(10): 1349-1358. DOI: [10.1080/17461391.2019.1599450](https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1599450).
- 31 Duchateau J, Baudry S. The neural control of coactivation during fatiguing contractions revisited[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2014, 24(6): 780-788. DOI: [10.1016/j.jelekin.2014.08.006](https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2014.08.006).
- 32 李世明, 许全盛, 翟佳丽, 等. 基于 sEMG 时频分析的递增负荷诱导肌肉周期动态疲劳估计[J]. 中国体育科技, 2016, 52(3): 48-55. [Li SM, Xu QS, Zhai JL, et al. Assessing increasing load induced muscle fatigue during periodic dynamic contractions based on time-frequency analysis of semg signals[J]. *China Sport Science and Technology*, 2016, 52(3): 48-55] DOI: [10.16470/j.csst.201603007](https://doi.org/10.16470/j.csst.201603007).
- 33 Patsika G, Kellis E, Amiridis IG. Neuromuscular efficiency during sit to stand movement in women with knee osteoarthritis[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2011, 21(5): 689-694. DOI: [10.1016/j.jelekin.2011.05.006](https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2011.05.006).
- 34 Mehra P, Cheung VCK, Tong RKY. Muscle endurance time estimation during isometric training using electromyogram and supervised learning[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2020, 50: 102376. DOI: [10.1016/j.jelekin.2019.102376](https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2019.102376).
- 35 NICE Clinical Guidelines. Osteoarthritis: care and management[M]. London: National Institute for Health and Care Excellence, 2020.
- 36 Moseng T, Vliet Vlieland TPM, Battista S, et al. EULAR recommendations for the non-pharmacological core management of hip and knee osteoarthritis: 2023 update[J]. *Ann Rheum Dis*, 2024, 83(6): 730-740. DOI: [10.1136/ard-2023-225041](https://doi.org/10.1136/ard-2023-225041).
- 37 罗曦娟, 李新, 张献博, 等. 慢性疾病运动处方新进展[J]. 中国运动医学杂志, 2023, 42(8): 658-664. [Luo XJ, Li X, Zhang XB, et al. Recent progress in exercise for chronic diseases[J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2023, 42(8): 658-664.] DOI: [10.3969/j.issn.1000-6710.2023.08.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6710.2023.08.013).
- 38 蔡明瑾, 侯朝铭, 高静, 等. 不同有氧运动对膝骨关节炎患者干预效果的网状 Meta 分析[J]. 中华护理教育, 2023, 20(6): 745-751. [Cai MJ, Hou CM, Gao J, et al. Intervention effect of aerobic exercise on knee osteoarthritis patients: a network Meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Nursing Education*, 2023, 20(6): 745-751.] DOI: [10.3761/j.issn.1672-9234.2023.06.019](https://doi.org/10.3761/j.issn.1672-9234.2023.06.019).
- 39 王小逸, 谢苏杭, 何成奇. 功率自行车运动治疗膝骨关节炎的临床研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(9): 1262-1267. [Wang XY, Xie SH, He CQ. Progress of clinical research on treatment of knee osteoarthritis by power cycling[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation*



- Medicine, 2022, 37(9): 1262–1267.] DOI: [10.3969/j.issn.1001-1242.2022.09.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1242.2022.09.021).
- 40 Brosseau L, Taki J, Desjardins B, et al. The Ottawa panel clinical practice guidelines for the management of knee osteoarthritis. Part three: aerobic exercise programs[J]. *Clin Rehabil*, 2017, 31(5): 612–624. DOI: [10.1177/0269215517691085](https://doi.org/10.1177/0269215517691085).
- 41 Deng X, Xu H, Hao X, et al. Effect of moderate exercise on osteoarthritis[J]. *EFORT Open Rev*, 2023, 8(3): 148–161. DOI: [10.1530/EOR-22-0119](https://doi.org/10.1530/EOR-22-0119).
- 42 Wallis JA, Webster KE, Levinger P, et al. The maximum tolerated dose of walking for people with severe osteoarthritis of the knee: a phase I trial[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2015, 23(8): 1285–1293. DOI: [10.1016/j.joca.2015.04.001](https://doi.org/10.1016/j.joca.2015.04.001).
- 43 张旻, 庞坚, 陈博, 等. 步态矫正训练治疗膝骨关节炎的研究进展 [J]. *中国康复医学杂志*, 2017, 32(9): 1078–1081. [Zhang W, Pang J, Chen B, et al. Research progress of gait correction training in the treatment of knee osteoarthritis[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2017, 32(9): 1078–1081.] DOI: [10.3969/j.issn.1001-1242.2017.09.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1242.2017.09.025).
- 44 LI S, NG WH, Abujaber S, et al. Effects of resistance training on gait velocity and knee adduction moment in knee osteoarthritis patients: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 16104. DOI: [10.1038/s41598-021-95426-4](https://doi.org/10.1038/s41598-021-95426-4).
- 45 邓程远, 周桂娟, 王甜甜, 等. 膝骨关节炎的物理治疗进展 [J]. *中国老年学杂志*, 2021, 41(8): 1756–1760. [Deng CY, Zhou GJ, Wang TT, et al. Progress of physical therapy for knee osteoarthritis[J]. *Chinese Journal of Gerontology*, 2021, 41(8): 1756–1760.] DOI: [10.3969/j.issn.1005-9202.2021.08.055](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9202.2021.08.055).
- 46 宿旺, 张孝权, 吴春春, 等. 速肌力训练治疗膝骨关节炎随机试验的 Meta 分析 [J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35(7): 858–863. [Su W, Zhang XQ, Wu CC. Meta-analysis of randomized trial of isokinetic muscle strength training in treatment of knee osteoarthritis[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2020, 35(7): 858–863.] DOI: [10.3969/j.issn.1001-1242.2020.07.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1242.2020.07.018).
- 47 Yokoyama M, Iijima H, Kubota K, et al. Exploring the modification factors of exercise therapy on biomechanical load in patients with knee osteoarthritis: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Clin Rheumatol*, 2023, 42(7): 1737–1752. DOI: [10.1007/s10067-023-06553-4](https://doi.org/10.1007/s10067-023-06553-4).
- 48 Hislop AC, Collins NJ, Tucker K, et al. Does adding hip exercises to quadriceps exercises result in superior outcomes in pain, function and quality of life for people with knee osteoarthritis? A systematic review and Meta-analysis[J]. *Br J Sports Med*, 2020, 54(5): 263–271. DOI: [10.1136/bjsports-2018-099683](https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099683).
- 49 马健文, 岳虹妤, 谢超群, 等. 传统功法干预膝骨关节炎的临床应用及效应机制研究进展 [J]. *上海中医药杂志*, 2023, 57(12): 96–100. [Ma JW, Yue HY, Xie CQ, et al. Research progress on the clinical application and effect mechanism of traditional exercises in the intervention of knee osteoarthritis[J]. *Shanghai Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2023, 57(12): 96–100.] DOI: [10.16305/j.1007-1334.2023.2302043](https://doi.org/10.16305/j.1007-1334.2023.2302043).
- 50 秦凯华, 郭语艳, 杨慎峭, 等. 八段锦改善中老年人膝骨关节炎的机理浅析 [J]. *成都中医药大学学报*, 2019, 42(3): 9–11. [Qin KH, Guo YY, Yang SQ, et al. Analysis on mechanism of Baduanjin in improving knee osteoarthritis in middle-aged and old people[J]. *Journal of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine*, 2019, 42(3): 9–11.] DOI: [10.13593/j.cnki.51-1501/r.2019.03.009](https://doi.org/10.13593/j.cnki.51-1501/r.2019.03.009).
- 51 Xiao CM, Li JJ, Kang Y, et al. Follow-up of a Wuqinx exercise at home programme to reduce pain and improve function for knee osteoarthritis in older people: a randomised controlled trial[J]. *Age Ageing*, 2021, 50(2): 570–575. DOI: [10.1093/ageing/afaa179](https://doi.org/10.1093/ageing/afaa179).
- 52 王强, 杨立群. 不同养生功法在膝骨关节炎患者中的对比研究 [J]. *成都体育学院学报*, 2021, 47(4): 107–111. [Wang Q, Yang LQ. Comparative study of different health exercises in patients with knee osteoarthritis[J]. *Journal of Chengdu Sport University*, 2021, 47(4): 107–111.] DOI: [10.15942/j.jcsu.2021.04.017](https://doi.org/10.15942/j.jcsu.2021.04.017).

收稿日期: 2024 年 06 月 28 日 修回日期: 2024 年 08 月 01 日  
 本文编辑: 李绪辉 曹越

引用本文: 邵云博, 郭珈宜, 李峰, 等. 膝骨关节炎患者下肢表面肌电信号特征及其运动康复的研究进展[J]. *医学新知*, 2024, 34(8): 927–935. DOI: [10.12173/j.issn.1004-5511.202406111](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-5511.202406111)  
 Shao YB, Guo JY, Li F, et al. Characteristics of lower limb surface electromyography in patients with knee osteoarthritis and progress in their exercise rehabilitation[J]. *Yixue Xinzhi Zazhi*, 2024, 34(8): 927–935. DOI: [10.12173/j.issn.1004-5511.202406111](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-5511.202406111)