

髌膝协同训练在髌股关节病康复中的应用价值与作用机制研究进展

胡忠政¹, 吴巧²

¹成都体育学院运动医学与健康学院, 四川 成都

²成都中医药大学针灸推拿学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年2月6日; 录用日期: 2026年2月28日; 发布日期: 2026年3月11日

摘要

髌股关节病是导致膝前部疼痛的常见疾病, 其康复理念正从传统的局部膝关节训练向整体下肢生物力学干预转变。髌膝协同训练作为一种新兴的康复方法, 其核心理念在于通过增强髌关节周围肌肉群来优化髌股关节的运动学和动力学环境, 从而减轻疼痛并改善膝关节功能。目前, 尽管已有研究证实了其临床有效性, 但在最佳训练方案、长期效果及个体化应用等方面仍需进一步探讨。本文旨在系统综述髌膝协同训练在髌股关节病康复中的具体应用方法、临床疗效证据, 并深入考察其背后涉及的神经肌肉控制和生物力学调节机制, 以期为临床康复实践提供理论依据和改进方向。

关键词

髌股关节病, 髌膝协同, 康复训练, 生物力学, 神经肌肉控制, 运动疗法

Research Progress on the Application Value and Mechanism of Hip-Knee Coordinated Training in the Rehabilitation of Patellofemoral Joint Disease

Zhongzheng Hu¹, Qiao Wu²

¹School of Sports Medicine and Health, Chengdu Sport University, Chengdu Sichuan

²College of Acupuncture and Massage, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu Sichuan

Received: February 6, 2026; accepted: February 28, 2026; published: March 11, 2026

文章引用: 胡忠政, 吴巧. 髌膝协同训练在髌股关节病康复中的应用价值与作用机制研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 1760-1769. DOI: 10.12677/acm.2026.163962

Abstract

Patellofemoral joint disease is a common condition that leads to anterior knee pain, and its rehabilitation approach is shifting from traditional localized knee joint training to comprehensive lower limb biomechanical interventions. Hip-knee coordinated training, as an emerging rehabilitation method, is based on the core concept of optimizing the kinematic and dynamic environment of the patellofemoral joint by enhancing the surrounding muscle groups of the hip joint, thereby alleviating pain and improving knee joint function. Currently, although studies have confirmed its clinical effectiveness, further exploration is needed regarding the optimal training protocols, long-term effects, and individualized applications. This article aims to systematically review the specific application methods and clinical efficacy evidence of hip-knee coordinated training in the rehabilitation of patellofemoral joint disease, while also examining the underlying neuromuscular control and biomechanical regulatory mechanisms, with the goal of providing a theoretical basis and direction for improvement in clinical rehabilitation practice.

Keywords

Patellofemoral Joint Disease, Hip-Knee Coordination, Rehabilitation Training, Biomechanics, Neuromuscular Control, Exercise Therapy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

髌股关节病是一种以髌骨后或周围疼痛为主要特征的常见膝关节疾病,其发病机制复杂,与髌股关节负荷异常、动态对线不良以及神经肌肉控制缺陷密切相关[1],传统康复策略多聚焦于股四头肌的强化,这基于大量证据,这些证据表明股四头肌力量与膝关节功能及疼痛显著相关[2][3],例如,在膝关节骨关节炎患者中,股四头肌离心扭矩与疼痛和躯体功能呈负相关[4],而在内侧半月板后根撕裂修复术后,患侧肢体的股四头肌力量与术后内侧关节间隙变窄的进展呈负相关[2]。然而,越来越多的研究揭示,单纯强化股四头肌可能不足以全面解决髌股关节病的病理力学问题。髌关节外展、外旋肌群的薄弱会导致股骨内收内旋,从而增加髌股关节外侧压力,被认为是致病的关键环节[5],这种下肢力线的异常改变了髌股关节的接触力学,可能通过增加髌股关节接触压力而导致疼痛和退变[6][7]。

因此,现代康复理念已从局部肌肉强化演变为关注整个下肢运动链的“髌膝协同”模式。这一模式强调髌关节与膝关节在运动中的协调作用,旨在通过针对性训练髌关节肌群,改善下肢力线,优化髌骨轨迹,从而减轻疼痛、改善功能[8][9]。研究表明,在膝关节骨关节炎或全膝关节置换术后患者的康复中,增加髌部肌群(特别是外展肌和内收肌)的强化训练,相较于传统的仅强化股四头肌的方案,能更有效地改善疼痛、身体功能和步态[8][9],例如,一项随机对照试验发现,为期12周的髌部肌群强化运动能显著改善全膝关节置换术后老年患者的疼痛、身体功能和步态参数[8]。另一项研究则表明,在膝骨关节炎患者的常规康复治疗中加入髌部外展和内收肌强化,能在第6周时带来更优的肌肉力量、症状和日常活动表现[9]这些发现支持了髌膝协同训练的应用价值。

髌膝协同训练的作用机制涉及多个层面。首先,强化髌关节外展和外旋肌群可以对抗股骨的内收内旋趋势,从而在动态活动中维持更佳的下肢对线,减少作用于髌股关节的异常应力[10]。其次,改善的

髌关节控制可能优化整个运动链的神经肌肉协调性。研究通过分析髌-膝、膝-踝等关节间的协调模式及其变异性, 揭示了关节协调与膝关节负荷、疼痛之间的关联[11] [12], 例如, 在膝骨关节炎患者中, 髌-膝协调变异性与疼痛严重程度和膝关节负荷相关[11]。髌膝协同训练可能通过促进更高效、更可变(即适应性更强)的关节间协调模式, 来分散关节负荷并减轻疼痛[13]。此外, 这种训练还可能通过改善姿势稳定性和动态平衡来发挥作用[14]。本文将围绕髌膝协同训练在髌股关节病康复中的应用实践与内在机制进行深入探讨。

2. 髌膝协同训练的理论基础与评估方法

2.1. 髌股关节病的病理生物力学与髌关节的作用

髌股关节疼痛综合征(PFPS)的核心病理生物力学机制是“动态对线不良”, 即在功能性动作中, 近端髌关节的控制异常导致远端膝关节的异常负荷[15]。在诸如下蹲、上下楼梯等动作中, 髌关节的过度内收和内旋会导致股骨相对于胫骨发生内旋, 从而增加髌骨向外侧半脱位的倾向, 并显著增大髌股关节面的接触压力[16]。这种对线不良与髌关节外展肌(特别是臀中肌)和外旋肌(臀大肌、深层外旋肌群)的力量不足或激活延迟密切相关[10]。这些近端肌肉的功能障碍会直接影响膝关节在动态活动中的外翻力矩, 进而改变髌股关节的应力分布。研究表明, 股骨前倾角增加可能并不直接导致髌外展肌无力, 但会引发骨盆旋转和髌内旋的代偿性步态模式, 这同样会影响下肢力线[17]。此外, 近端(髌、躯干)控制与远端(足、踝)代偿之间存在复杂的相互作用。例如, 髌股关节不稳患者的股骨过度前倾, 即使进行了内侧髌股韧带(MPFL)重建, 也可能在深屈膝角度导致内侧髌股关节面压力过高, 这凸显了孤立处理膝关节问题的局限性[18]。因此, 康复评估与干预必须将髌关节纳入整体考量, 以纠正动态对线不良, 优化髌股关节力学环境。

2.2. 髌膝功能协同性的临床评估手段

评估髌膝功能协同性的临床工具与方法多样, 旨在从定性和定量角度全面分析运动模式。定性观察主要包括单腿蹲试验和台阶下试验, 临床医生通过视觉评估受试者在执行这些动作时是否出现骨盆下降(即 Trendelenburg 征)或膝关节内扣(动态膝外翻)等异常模式[10]。这些观察是初步筛查髌关节控制不足和膝关节对线不良的有效手段。为了进行更精确的定量评估, 二维或三维运动分析系统被广泛应用。这些系统可以精确测量在功能性任务中髌、膝、踝关节的角度、角速度和力矩, 从而量化动态对线不良的程度[19], 例如, 通过分析髌-膝协调图(cyclograms)的周长、面积等参数, 可以揭示膝骨关节炎(KOA)或全膝关节置换术(TKA)后患者与健康人群在关节协调模式上的差异[20]。表面肌电图(sEMG)是评估髌关节与膝关节周围肌肉激活时序和强度协同性的关键工具。通过比较在步态支撑中期臀中肌与股外侧肌的激活模式, 可以识别是否存在近端肌肉激活延迟或抑制, 这对于理解髌膝协同失调的神经肌肉机制至关重要[21]。此外, 等速肌力测试和手持式测力仪是量化髌关节外展、外旋肌群绝对力量及耐力的金标准[22]。研究证实, 将髌关节外展肌和内收肌的强化训练加入到常规康复中, 能显著改善膝骨关节炎患者的膝关节伸展力量和髌外展力量, 并与患者的功能评分(如五次坐起试验、计时起立行走测试时间)改善显著相关[9]。这些评估手段的结合使用, 能够将客观的肌力数据与患者的主观症状和功能表现进行关联分析, 为制定个体化的髌膝协同康复方案提供坚实依据。

3. 髌膝协同训练的具体应用方案与临床疗效

3.1. 以髌关节为主导的神经肌肉控制训练

以髌关节为主导的神经肌肉控制训练是髌膝协同康复方案的核心组成部分, 旨在通过激活和强化髌关节周围肌肉, 特别是臀肌, 来改善下肢力线, 减轻髌股关节的异常应力。在闭链运动中, 强调髌关节主导

的训练至关重要。例如,使用弹力带进行抗阻侧向行走、蚌式开合以及单腿桥式等动作,其技术要点在于训练过程中始终保持膝关节对准第二脚趾,并严格控制骨盆的稳定性[17]。这种精确的动作控制能够针对性激活臀中肌等髋外展肌群,从而在动态活动中有效控制股骨内旋和内收,减少膝关节外翻力矩,为髌骨提供更稳定的运动轨迹[10]。开链运动的应用则为训练提供了更多维度的进阶可能。例如,侧卧髋外展和俯卧髋后伸等动作可以通过增加不稳定平面(如使用平衡垫)或结合视觉生物反馈进行进阶,以进一步挑战神经肌肉控制系统[14]。更重要的是,将这些孤立训练与功能性任务相结合,例如指导患者在从坐姿站起时主动启动臀肌并控制膝关节朝向,能够促进训练成果向日常生活转移,重建正确的运动模式[19]。

神经肌肉电刺激和生物反馈技术作为辅助手段,在帮助患者重新建立正确的髋关节肌肉募集模式方面显示出应用价值。例如,一项针对前交叉韧带重建术后患者的研究表明,在标准康复方案基础上增加肌电生物反馈,能更有效地促进股四头肌力量恢复和膝关节功能改善[23]。生物反馈技术通过提供实时的肌肉活动信息,帮助患者识别并纠正错误的肌肉激活顺序或不足的肌肉收缩,从而优化运动控制。虽然直接针对髋关节肌肉的神经肌肉电刺激在髌股关节病康复中的短期疗效数据在现有文献中有限,但基于其在其他膝关节疾病康复中改善肌肉激活和力量的效果,可以合理推断其在辅助髋关节主导训练、克服肌肉抑制方面具有潜在价值[24]。这些技术的整合应用,旨在短期内改善肌肉激活模式,为长期的功能性训练奠定神经控制基础。

3.2. 整合性功能训练与运动模式再教育

整合性功能训练与运动模式再教育旨在将髋关节的局部强化成果无缝融入复杂的全身性动作中,纠正代偿性运动模式,最终实现高效、无痛的功能性活动。该过程的核心在于将髋关节稳定性的要求贯穿于基础动作模式的教学与纠正中。例如,在指导患者进行下蹲时,需强调“髋部后坐”以优先启动髋关节铰链,同时要求“膝盖对齐脚尖”,以控制膝关节在矢状面和额状面的运动[10]。利用镜子或实时视频反馈可以为患者提供外部视觉参照,使其能够直观地识别并纠正骨盆侧倾、膝内扣等错误姿势,从而强化正确的本体感觉和运动模式[14]。这种聚焦于动作质量的再教育,是预防错误模式固化、降低再损伤风险的关键。

针对跑、跳等具有冲击性的活动,则需要设计渐进性的训练方案。方案应从低冲击的落地策略训练开始,例如教导患者进行“软着陆”练习,强调在落地时通过增加髋、膝、踝关节的屈曲来延长缓冲时间,分散冲击力,并在此过程中始终保持髋关节的稳定控制[25]。随后,可逐步过渡到高冲击的增强式训练,如跳箱、连续跳跃等。在整个进阶过程中,髋关节稳定性应作为一项贯穿始终的要求,确保患者在产生和吸收更大力量时,下肢力线仍能得到有效维持,避免将过度的应力集中于髌股关节[21]。这种循序渐进的方案有助于患者安全地重建对冲击性活动的控制能力。

近期的高级别证据有力地支持了髋膝协同训练相较于单纯膝部训练的优越性。随机对照试验和系统评价表明,在减轻疼痛、改善功能及提高重返运动效率方面,整合髋关节训练的方案更具优势。一项针对内侧间室膝骨关节炎患者的随机对照试验发现,在常规股四头肌强化基础上增加髋外展肌和内收肌强化训练的患者,在6周后表现出更显著的膝关节伸展力量、髋外展力量以及五次坐起、计时起立行走测试的功能改善[9]。另一项针对全膝关节置换术后老年患者的随机对照试验显示,进行为期12周髋周肌群强化训练的患者,在交替踏步测试、单腿站立测试中的表现以及步态分析中的单腿支撑期占比等方面,均比仅进行股四头肌强化或主动关节活动度训练的组别改善更为显著[8]。这些研究采用视觉模拟评分、Kujala评分等功能量表,提供了具体的疗效数据支持。一项荟萃分析也指出,在全膝关节置换术后康复中加入髋部强化练习,能更好地改善单腿站立能力[26]。这些证据共同表明,针对髋关节的神经肌肉控制与力量训练,能够从生物力学根源上缓解髌股关节应力,从而在疼痛缓解和功能恢复上取得更优的临床结局。

4. 髌膝协同训练的作用机制探究

4.1. 生物力学机制：改善下肢动力学与髌骨轨迹

髌膝协同训练通过增强髌关节外展与外旋肌群的力量, 直接改善了下肢的动力学链, 从而优化髌股关节的生物力学环境。研究表明, 强化髌关节外展肌(如臀中肌)和外旋肌可以有效降低膝关节在动态活动中的外翻力矩和内收力矩[9], 这种力矩的减少对于减轻髌股关节的异常应力至关重要。有限元分析等生物力学研究量化了这种改变对髌股关节接触压力的影响。例如, 在髌股关节不稳的模型中, 异常的髌关节力学(如股骨前倾角增加)会导致髌骨外侧移位增加和髌股关节接触压力分布异常[18]。髌膝协同训练通过纠正近端(髌-骨盆复合体)的发力模式, 能够间接调整髌骨在股骨滑车沟内的运动轨迹, 减少外侧支持带的过度张力, 从而优化髌股关节的接触压力和分布[16]。此外, 训练还影响整个运动链的协调性。例如, 在站立-坐下等日常活动中, 平滑、协调的动作需要髌关节和膝关节的协同工作, 增加髌关节的参与度有助于更好地控制身体下降的动量, 从而减少膝关节的局部负荷[19]。这种对整个足踝-髌-骨盆复合体协调性的改善, 改变了运动链的发力序列, 使得负荷在多个关节间更合理地分布, 而非过度集中于膝关节[10]。

髌膝协同训练对髌骨轨迹的静态和动态影像学指标具有积极影响。研究证实, 通过改善软组织平衡, 特别是降低外侧支持带的张力, 可以优化髌骨轨迹。例如, 在治疗髌股关节不稳时, 过度紧张的外侧支持带可能导致髌骨外侧倾斜和移位[16]。髌关节肌力的增强有助于在动态活动中维持骨盆稳定和股骨外旋, 从而减少导致髌骨外移的“膝关节内扣”趋势, 这直接改善了髌骨的动态对位[10]。影像学分析, 如动态MRI研究, 可以观察到训练后髌骨倾斜角和外侧移位等指标的改善[27]。这些改变源于髌关节外展/外旋肌群激活后对股骨旋转的控制, 使得股四头肌的拉力线更为生理, 髌骨得以在滑车沟内进行更中央化的滑动[18]。因此, 髌膝协同训练不仅作用于局部膝关节, 更通过调整近端髌关节的力学状态, 为髌骨创造了更稳定的运动轨道。

髌膝协同训练对足踝-髌-骨盆复合体协调性的影响是其核心作用机制之一。下肢是一个联动的运动链, 任何环节的异常都会影响整体功能。髌关节外展肌力不足可能导致对侧骨盆下降和同侧髌关节内收, 即Trendelenburg步态, 这会增加膝关节外翻力矩和髌股关节应力[10]。协同训练通过强化髌关节肌群, 提升了骨盆在步态中的稳定性。研究表明, 在膝骨关节炎患者中, 增加髌部外展和内收肌群的训练, 不仅能增强髌部力量, 还能显著改善功能性表现, 如计时起立-行走测试和五次坐立测试的时间[9]。这种改善源于训练优化了整个运动链的发力序列和协调模式。例如, 在从坐到站的任务中, 中风患者表现出与健康人不同的髌-膝协调模式, 且运动持续时间影响关节协调性[28]。髌膝协同训练旨在重建这种高效、低耗的协调模式, 使髌、膝、踝关节在承重和推进阶段能够有序、协同地工作, 从而将原本可能集中于膝关节的负荷分散至更强壮的髌关节和更灵活的踝关节, 最终减少膝关节的局部过度负荷和磨损风险[29]。

4.2. 神经肌肉机制：优化肌肉激活模式与运动控制

髌膝协同训练通过重塑下肢的神经肌肉控制模式, 在改善髌股关节病症状中发挥关键作用。训练能有效降低髌关节关键肌群, 特别是臀中肌和臀大肌的激活阈值, 并使其在动作中更早被激活[9]。这种提前且充分的髌部肌肉激活, 对于抑制股四头肌外侧头的过度激活、并促进内侧头(尤其是股内侧斜肌)的激活具有重要的交互抑制作用。当髌关节外展和外旋肌群能够有效稳定骨盆和股骨时, 股骨内旋和膝关节外翻的趋势得到控制, 从而减少了股四头肌外侧头为对抗这种异常力线而产生的代偿性过度激活。同时, 更佳的髌骨轨迹为股内侧斜肌创造了有利的力学环境, 使其能够更有效地参与膝关节伸展末端的锁定动作, 增强髌骨的动态稳定性[5]。这种肌肉激活模式的优化, 打破了髌股关节疼痛中常见的股四头肌内外侧头失衡的恶性循环。

髌膝协同训练能显著改善感觉运动整合能力, 包括提升髌、膝关节的本体感觉和优化运动程序。本体感觉是关节位置觉和运动觉的基础, 对于维持动态稳定至关重要。髌股关节疼痛患者常伴有膝关节甚至髌关节的本体感觉缺陷[30]。通过包含闭链、负重及不稳定平面的协同训练, 可以不断向中枢神经系统提供来自关节、肌肉和皮肤的传入反馈, 从而增强本体感觉的敏锐度[14]。运动程序的优化则体现在对“膝关节内扣”这一错误运动模式的纠正上。该模式是髌关节内收内旋、股骨内旋和胫骨外旋的组合, 是导致髌股关节应力增加的高风险动作[10]。训练通过强化正确的髌关节主导的运动模式(如髌关节铰链), 并在各种动态和不稳定环境下进行练习, 增强了中枢神经系统对下肢姿态的控制能力, 使个体能够在跑步、下蹲、上下楼梯等活动中自动采用更优化的发力序列, 减少错误模式的出现[31]。

长期进行髌膝协同训练可能诱导皮质脊髓通路发生适应性改变, 这对运动学习与模式固化具有重要意义。重复性的、目标明确的训练可以促进大脑运动皮层的重组和神经效率的提升。虽然直接引用经颅磁刺激研究髌膝训练的文献有限, 但神经肌肉电刺激结合生物反馈(EMG-BF)的研究为此提供了间接证据。例如, 在前交叉韧带重建术后康复中, 辅助使用 EMG-BF 进行股四头肌等长强化, 能显著增加股四头肌肌力并改善膝关节功能, 这表明通过增强运动皮层的输出和对肌肉收缩的精确控制, 可以优化神经肌肉功能[23]。髌膝协同训练作为一种复杂、需要多关节协调的任务, 其长期练习很可能通过类似的机制, 强化了从皮层到髌、膝肌群的高效神经驱动, 使优化后的肌肉激活模式和运动控制策略得以固化和自动化。这种神经可塑性改变意味着, 即使停止训练后, 患者仍能更持久地保持正确的运动模式, 从而获得长期的康复效益, 并降低复发风险[32]。

5. 个性化应用、挑战与未来研究方向

5.1. 基于亚分型的个性化训练策略

髌膝协同训练在髌股关节病康复中的应用价值日益凸显, 其核心在于根据患者不同的临床表现进行精准的亚分型, 并制定针对性的训练重点。例如, 对于股四头肌无力型患者, 强化股四头肌力量是康复的基石。研究表明, 股四头肌力量与膝关节功能及疼痛缓解密切相关[4]。针对此类患者, 训练初期可重点采用等速或等张训练模式以恢复伸膝力矩[22]。对于髌关节控制不足型患者, 其问题根源常在于臀中肌等髌外展肌群的力量薄弱。研究证实, 在膝关节骨关节炎患者的常规康复中加入髌外展肌与内收肌的强化训练, 能更显著地改善下肢肌力、症状及日常活动表现[9]。因此, 对此类患者的髌膝协同训练应着重于臀肌的激活与耐力训练, 以改善髌关节的动态控制。而对于全身松弛型或过度活动型患者, 其核心问题在于神经肌肉控制不足与动态稳定性差。此时, 训练的重点应从单纯的肌力强化转向更复杂的闭链运动、平衡训练以及核心稳定性练习[33]。例如, 结合闭链运动(如下蹲)的离心等长训练被证明能增强功能转移, 改善髌股疼痛综合征患者的功能表现[15], 通过这种基于亚分型的精准策略, 髌膝协同训练能够更有效地针对病因, 优化康复效果。

实现康复方案的真正个体化, 还需紧密结合患者的运动目标来调整训练的强度、复杂性和特异性。对于以恢复日常生活能力为目标的中老年患者, 训练方案可能更侧重于改善步态、上下楼梯及从坐到站等功能性任务。有研究显示, 针对老年全膝关节置换术患者, 为期 12 周的髌周肌肉强化训练能有效改善其身体功能、步态及疼痛[8], 而对于目标是重返跑步或竞技体育的年轻患者, 训练则需要更高的强度、更复杂的动作模式以及更强的特异性。例如, 针对运动员的髌腱病, 康复计划不仅要缓解疼痛, 还需通过抗阻训练强化股四头肌, 以改善姿势稳定性, 避免继发性损伤[30]。训练内容需模拟运动专项动作, 如针对足球运动员的侧向移动、跳跃落地控制等, 以重建运动所需的神经肌肉协调模式[34]。这种根据运动目标进行的动态调整, 确保了训练方案不仅解决病理问题, 更能支持患者重返其期望的活动水平。

在临床实践中, 髌股关节病患者常合并其他部位疾病, 如髌关节撞击综合征或足弓塌陷, 这要求康复师必须审慎调整髌膝协同训练方案, 以避免加重其他部位症状。当患者合并髌关节撞击综合征时, 过度的髌关节深屈曲或内旋训练可能诱发髌部疼痛。此时, 训练应避免可能造成股骨颈与髌白孟缘撞击的姿势, 转而采用更中立的髌关节位置进行臀肌等长收缩或小范围的力量训练。对于合并足弓塌陷(过度旋前)的患者, 足踝力线的异常会连锁影响膝关节乃至髌关节的生物力学。研究表明, 足部形态会影响下肢关节间的协调模式[35]。在这种情况下, 单纯的髌膝训练可能效果有限, 甚至因代偿而加重膝部症状。康复方案需进行整合, 在强化髌膝协同控制的同时, 结合足踝矫形器或足内在肌训练以改善足弓支撑, 从而在整体下肢力线优化的基础上实施髌膝训练, 确保干预措施的安全性与协同性。

5.2. 当前应用的局限性与未来展望

尽管髌膝协同训练展现出潜力, 但其当前应用仍存在显著局限性。首要问题是训练方案缺乏高度标准化, 不同研究的干预时长、频率、强度差异巨大, 导致疗效难以进行直接比较和荟萃分析[26], 例如, 在全膝关节置换术后康复中, 包含髌部强化训练的方案其具体内容、周期和效果结论仍存在矛盾[26]。这种异质性使得难以形成统一的、基于强证据的临床实践指南。其次, 现有研究大多关注短期疗效, 缺乏长期随访数据, 对于训练效果能否长期维持、能否延缓关节退变进程知之甚少。一项关于内侧半月板后根撕裂修补术后的研究提示, 术前及术后的股四头肌力量与术后内侧关节间隙狭窄的进展呈负相关, 强调了长期强化训练的重要性[2], 但这仍需更多长期研究证实。这些局限性阻碍了髌膝协同训练在临床中的广泛、规范应用。

在家庭康复环境中, 如何保证患者动作执行的质量和依从性是另一大挑战。缺乏监督可能导致训练动作错误, 不仅疗效不佳, 甚至可能增加损伤风险。远程监控技术与可穿戴传感器在此领域展现出巨大应用潜力。例如, 基于机器视觉的 RGB-D 摄像头系统可以便捷地测量患者下肢关节活动范围, 为人机交互提供反馈[36]。可穿戴惯性测量单元可用于分析步态和关节协调性[37]。未来, 这些技术有望集成到家庭康复平台中, 实时监测患者动作的准确性、对称性和完成度, 并通过应用程序提供即时纠正反馈和依从性激励。然而, 其挑战在于技术的成本、易用性、数据处理的准确性以及如何将复杂的生物力学数据转化为患者和治疗师可理解的简单指导。解决这些挑战将极大推动个性化、家庭化康复的发展。

未来的研究方向应聚焦于利用先进技术深化对训练机制的理解并优化方案。首先, 利用人工智能和机器学习分析复杂的运动模式数据, 有望识别出预测训练反应和康复进程的生物标志物, 从而实现真正的预后预测和个性化方案动态调整[32]。其次, 探索结合非侵入性脑刺激(如经颅磁刺激)等技术, 以调节皮层兴奋性, 加速运动学习过程, 可能为神经肌肉控制障碍的患者提供新的康复加速器。最后, 至关重要的是开展多中心、大样本的长期疗效研究, 比较不同标准化髌膝协同训练协议的效果。例如, 网络荟萃分析表明, 在膝关节骨关节炎的各种抗阻训练中, 等速肌力强化在疼痛缓解、功能改善和伸膝力矩提升方面表现最优[38]。未来研究应在此基础上, 建立基于循证、针对不同亚分型和运动目标的临床实践指南, 并明确最佳训练参数(如模式、强度、频率), 以指导临床决策, 最终提升髌股关节病康复的整体水平。

6. 结论

髌膝协同训练在髌股关节病康复中具有重要价值, 系统性重构下肢动力链的功能平衡。针对不同年龄和病理亚群, 训练方案应有所区分。对于年轻人的髌股疼痛综合征(PFPS), 通过调整髌关节肌群力量, 纠正不良生物力学, 减轻髌股关节异常应力, 同时促进神经肌肉系统适应性重塑, 改善整体运动控制, 效果显著。而对于老年人的髌股骨关节炎(PFOA)及全膝关节置换术(TKA)患者, 髌膝协同训练更多侧重于恢复关节功能和增强肌力, 配合疼痛管理和功能性任务训练, 以适应其特殊的病理和生理状态。

整合相关研究时需注意临床疗效的异质性, 理想康复方案应基于精准功能评估, 结合力量训练、神经肌肉控制与功能性任务模拟, 且明确区分适用的患者亚群。未来发展将趋向精准化与整合化, 推动训练方案标准化与参数化研究, 并结合新兴技术提升训练依从性与效果。髌膝协同训练将从经验干预演进为融合生物力学、神经科学及数字科技的精准康复范式, 针对不同年龄和病理类型的患者制定个性化方案。

参考文献

- [1] Voordeckers, A., Avram, G., Mengis, N., Toth, L., Koch, M., Hirschmann, M.T., *et al.* (2025) Gelenkersatz bei isolierter patellofemoraler Arthrose. *Die Orthopädie*, **54**, 466-472. <https://doi.org/10.1007/s00132-025-04654-3>
- [2] Kawada, K., Fukuba, M., Okazaki, Y., Tamura, M., Yokoyama, Y., Ozaki, T., *et al.* (2024) Quadriceps Muscle Strength of the Affected Limb in Medial Meniscus Posterior Root Tears Is Negatively Correlated with the Progression of Postoperative Medial Joint Space Narrowing. *Journal of Experimental Orthopaedics*, **11**, e70057. <https://doi.org/10.1002/jeo2.70057>
- [3] Paravlic, A.H., Meulenberg, C.J. and Drole, K. (2022) The Time Course of Quadriceps Strength Recovery after Total Knee Arthroplasty Is Influenced by Body Mass Index, Sex, and Age of Patients: Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Medicine*, **9**, Article 865412. <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.865412>
- [4] Arab, F., Quddus, N., Khan, S.A., Alghadir, A.H. and Khan, M. (2022) Association of Eccentric Quadriceps Torque with Pain, Physical Function, and Extension Lag in Women with Grade \leq II Knee Osteoarthritis: An Observational Study. *Medicine*, **101**, e29923. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000029923>
- [5] Srivastava, N., Meena, N.K., Modi, A., Saharan, A., Mahajan, S. and Chhonker, K. (2025) Effectiveness of Muscle Energy Technique, Strengthening, and Patellar Mobilization in the Physiotherapeutic Management of Patellofemoral Osteoarthritis. *Journal of Orthopaedic Case Reports*, **15**, 376-381. <https://doi.org/10.13107/jocr.2025.v15.i09.6130>
- [6] Yoo, Y., Lee, S. and Jeong, S. (2020) Effects of Quadriceps Angle on Patellofemoral Contact Pressure. *Journal of Veterinary Science*, **21**, e69. <https://doi.org/10.4142/jvs.2020.21.e69>
- [7] Park, D., Kang, J., Kim, N. and Heo, S. (2020) Patellofemoral Contact Mechanics after Transposition of Tibial Tuberosity in Dogs. *Journal of Veterinary Science*, **21**, e67. <https://doi.org/10.4142/jvs.2020.21.e67>
- [8] Do, K. and Yim, J. (2020) Effects of Muscle Strengthening around the Hip on Pain, Physical Function, and Gait in Elderly Patients with Total Knee Arthroplasty: A Randomized Controlled Trial. *Healthcare*, **8**, Article 489. <https://doi.org/10.3390/healthcare8040489>
- [9] Qiu, J., Zhou, T., Jin, H., Pan, Y., Qian, T., Xue, C., *et al.* (2023) Effect of Adding Hip Exercises to General Rehabilitation Treatment of Knee Osteoarthritis on Patients' Physical Functions: A Randomized Clinical Trial. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, **15**, Article No. 158. <https://doi.org/10.1186/s13102-023-00772-7>
- [10] Sahabuddin, F.N.A., Jamaludin, N.I., Amir, N.H. and Shaharudin, S. (2021) The Effects of Hip- and Ankle-Focused Exercise Intervention on Dynamic Knee Valgus: A Systematic Review. *PeerJ*, **9**, e11731. <https://doi.org/10.7717/peerj.11731>
- [11] Huang, C., James, K., Lanois, C., Corrigan, P., Yen, S. and Stefanik, J. (2023) Inter-Joint Coordination Variability Is Associated with Pain Severity and Joint Loading in Persons with Knee Osteoarthritis. *Journal of Orthopaedic Research*, **41**, 2610-2616. <https://doi.org/10.1002/jor.25592>
- [12] Pelegrinelli, A.R.M., Kowalski, E., Ryan, N.S., Moura, F.A. and Lamontagne, M. (2022) Lower Limb Inter-Joint Coordination in Individuals with Osteoarthritis before and after a Total Knee Arthroplasty. *Clinical Biomechanics*, **100**, Article ID: 105806. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2022.105806>
- [13] Waite, L., Stewart, M., Sackiriyas, K.S.B., Jayawickrema, J. and Almonroeder, T.G. (2022) Female Athletes Exhibit Greater Trial-to-Trial Coordination Variability When Provided with Instructions Promoting an External Focus. *Journal of Motor Behavior*, **54**, 686-693. <https://doi.org/10.1080/00222895.2022.2067517>
- [14] Kang, J., Lee, J.Y. and Park, I.B. (2025) Open versus Closed Kinetic Chain: Exercise Effects on Center of Pressure and Y-Balance in Middle-Aged Women with Knee Osteoarthritis—A Randomized Controlled Trial. *Healthcare*, **13**, Article 2173. <https://doi.org/10.3390/healthcare13172173>
- [15] Noumairi, M., Slama, M., Bouzaïen, J., Kalai, A., El Anbari, Y. and El Oumri, A.A. (2025) Efficacy of Isokinetic in the Management of Patellofemoral Pain Syndrome: A Narrative Review. *Annals of Medicine & Surgery*, **87**, 5792-5797. <https://doi.org/10.1097/ms9.0000000000003626>
- [16] Berton, A., Salvatore, G., Orsi, A., Egan, J., DeAngelis, J., Ramappa, A., *et al.* (2022) Lateral Retinacular Release in Concordance with Medial Patellofemoral Ligament Reconstruction in Patients with Recurrent Patellar Instability: A

- Computational Model. *The Knee*, **39**, 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2022.10.006>
- [17] Aпти, A. and Akalan, N.E. (2023) Does Increased Femoral Anteversion Can Cause Hip Abductor Muscle Weakness? *Children*, **10**, Article 782. <https://doi.org/10.3390/children10050782>
- [18] Park, J., Piao, Z., Shin, S., Kim, T.W., Chang, M.J., D’Lima, D.D., *et al.* (2025) Isolated Medial Patellofemoral Ligament Reconstruction under Increased Femoral Anteversion Is Associated with Increased Contact Pressure of Medial Patellofemoral Facet at Deep Flexion Angle: A Cadaveric Study. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, **41**, 4115-4125. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2025.03.040>
- [19] Jeon, W., Dong, X.N., Dalby, A. and Goh, C. (2024) The Influence of Smoothness and Speed of Stand-to-Sit Movement on Joint Kinematics, Kinetics, and Muscle Activation Patterns. *Frontiers in Human Neuroscience*, **18**, Article 1399179. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1399179>
- [20] Park, J.H., Lee, H., Cho, J., Kim, I., Lee, J. and Jang, S.H. (2021) Effects of Knee Osteoarthritis Severity on Inter-Joint Coordination and Gait Variability as Measured by Hip-Knee Cyclograms. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 1789. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80237-w>
- [21] Wu, Q., Liu, Y. and Zhao, B. (2025) Electromyographic Analysis of Fatigue and Synergistic Activation in Striking and Supporting Legs during Continuous Side-Kicks in Elite Sanda Athletes. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 44924. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-29199-5>
- [22] Nikolić, S., Obradović, B., Dimitrijević, V., Rašković, B. and Dragičević-Cvjetković, D. (2024) Isokinetic Quadriceps Physiotherapy after Knee Surgery: A Retrospective Study. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, **5**, Article 1336847. <https://doi.org/10.3389/fre.2024.1336847>
- [23] Norozian, B., Arabi, S., Marashipour, S.M., Khademi Kalantari, K., Akbarzadeh Baghban, A., Kazemi, S.M., *et al.* (2023) Recovery of Quadriceps Strength and Knee Function Using Adjuvant EMG-BF after Primary ACL Reconstruction. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, **14**, e6. <https://doi.org/10.34172/jlms.2023.06>
- [24] Péran, L., Beaumont, M., Le Ber, C., Le Mevel, P., Berriet, A.C., Nowak, E., *et al.* (2022) Effect of Neuromuscular Electrical Stimulation on Exercise Capacity in Patients with Severe Chronic Obstructive Pulmonary Disease: A Randomised Controlled Trial. *Clinical Rehabilitation*, **36**, 1072-1082. <https://doi.org/10.1177/02692155221091802>
- [25] Dennis, J.D., Choe, K.H., Montgomery, M.M., Lynn, S.K., Crews, B.M. and Pamukoff, D.N. (2024) Lower Extremity and Trunk Sagittal Plane Coordination Strategies and Kinetic Distribution during Landing in Males and Females. *Journal of Sports Sciences*, **42**, 169-178. <https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2323857>
- [26] Daher, M., Estephan, M., Ghouli, A., *et al.* (2024) Hip Strengthening after Total Knee Arthroplasty: A Meta-Analysis and Systematic Review. *The Archives of Bone and Joint Surgery*, **12**, 373-379.
- [27] Siegel, M., Maier, P., Taghizadeh, E., Fuchs, A., Yilmaz, T., Meine, H., *et al.* (2023) Change in Descriptive Kinematic Parameters of Patients with Patellofemoral Instability When Compared to Individuals with Healthy Knees—A 3D MRI *In Vivo* Analysis. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, 1917. <https://doi.org/10.3390/jcm12051917>
- [28] He, J., Liu, D., Hou, M., Luo, A., Wang, S. and Ma, Y. (2023) Analysis of Inter-Joint Coordination during the Sit-To-Stand and Stand-to-Sit Tasks in Stroke Patients with Hemiplegia. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, **15**, Article No. 104. <https://doi.org/10.1186/s13102-023-00716-1>
- [29] Zhong, L., Wu, J., Li, J., Sidarta, A., Zhang, J.J. and Kwong, P.W. (2025) Distinct Hip-Knee Coordination Patterns in Individuals with Hip Osteoarthritis as Measured by Cyclograms. *Gait & Posture*, **121**, 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2025.06.004>
- [30] Fendri, T., Beaune, B., Kasmi, S., Chaari, F., Sahli, S. and Boyas, S. (2024) Relationship between Postural Stability and Proprioception, Pain, Quadriceps Strength, and Muscle Tightness in Athletes with Patellar Tendinopathy. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, **16**, 991-999. <https://doi.org/10.1177/19417381241231617>
- [31] Briani, R.V., Cannon, J., Ducatti, M.H.M., Priore, L.B.D., Botta, A.F.B., Magalhães, F.H., *et al.* (2022) Exacerbating Patellofemoral Pain Alters Trunk and Lower Limb Coordination Patterns and Hip-Knee Mechanics. *Journal of Biomechanics*, **141**, Article ID: 111215. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2022.111215>
- [32] Kim, J., Yi, H., Hwang, D., Jung, J., Lee, H.J., Cho, J.H., *et al.* (2025) Prolonged Adaptation to a Robotic Prosthesis Enhances Gait Symmetry: A Case Study in a Transtibial Amputee. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, **68**, Article ID: 101981. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2025.101981>
- [33] Zuk, E.F., Kim, G., Rodriguez, J., Hallaway, B., Kuczo, A., Deluca, S., *et al.* (2021) The Utilization of Core Exercises in Patients with Patellofemoral Pain: A Critically Appraised Topic. *Journal of Sport Rehabilitation*, **30**, 1094-1097. <https://doi.org/10.1123/jsr.2020-0350>
- [34] Yaserifar, M., Fallah Mohammadi, Z., Hosseinienejad, S.E., Paeen Afrakoti, I.E., Meijer, K. and Boonstra, T.W. (2023) Coordination Variability Reduced for Soccer Players Compared to Non-Athletes during the Stance Phase of Gait. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, **63**, 630-638. <https://doi.org/10.23736/s0022-4707.22.13964-2>
- [35] Khorramroo, F., Hijmans, J.M. and Mousavi, S.H. (2025) The Impact of Wide Step Width on Lower Limb Coordination

-
- and Its Variability in Individuals with Flat Feet. *PLOS One*, **20**, e0321901. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321901>
- [36] Wang, X., Liu, G., Feng, Y., Li, W., Niu, J. and Gan, Z. (2021) Measurement Method of Human Lower Limb Joint Range of Motion through Human-Machine Interaction Based on Machine Vision. *Frontiers in Neurorobotics*, **15**, Article 753924. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2021.753924>
- [37] Matsushima, A., Maruyama, Y., Mizukami, N., Tetsuya, M., Hashimoto, M. and Yoshida, K. (2021) Gait Training with a Wearable Curara® Robot for Cerebellar Ataxia: A Single-Arm Study. *BioMedical Engineering OnLine*, **20**, Article No. 90. <https://doi.org/10.1186/s12938-021-00929-w>
- [38] Jiang, Y., Tan, Y., Cheng, L. and Wang, J. (2024) Effects of Three Types of Resistance Training on Knee Osteoarthritis: A Systematic Review and Network Meta-Analysis. *PLOS ONE*, **19**, e0309950. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309950>