

膝关节炎康复治疗进展：从循证实践到智能融合

吴金芳 董蒋 苏欢 周建军 郑应刚 刘志伦 罗鹏 肖欢

(毕节市中医医院 贵州毕节 551700)

【摘要】膝骨关节炎(KOA)作为一种以关节疼痛、僵硬及功能受限为特征的慢性退行性疾病,其高发率与老龄化趋势密切相关,给患者身心健康及社会医疗体系都带来了沉重负担。鉴于该病目前尚无根治手段,临床治疗重心正逐步前移至早期干预。虽然非甾体抗炎药(NSAIDs)及物理康复在缓解症状方面疗效确切,但针对晚期病变,全膝关节置换术(TKA)仍是主要的外科解决方案,其高昂的经济成本亦不容忽视。随着社会结构变迁与工作形态的多样化,传统康复模式已难以满足现代患者对便捷性与连续性的需求。本文系统梳理了近年来KOA康复领域的最新进展,指出未来康复策略将突破单一疗法的局限,转向“以患者为中心”的多模态融合路径。通过深度整合数字化与智能化技术,构建个性化、连续性的闭环管理体系,不仅能显著改善患者预后,更为慢性病的长期管理提供了创新范式。

【关键词】膝关节炎;康复治疗;运动疗法;人工智能;远程康复;中医康复

Advances in Rehabilitation Therapy for Knee Osteoarthritis: From Evidence-Based Practice to Intelligent Integration by

Wu Jinfang Dong Jiang Su Huan Zhou Jianjun Zheng Yinggang Liu Zhilun Luo Peng Xiao Huan

(Bijie Hospital of Traditional Chinese Medicine, Bijie, Guizhou 551700)

[Abstract] Knee osteoarthritis (KOA), a chronic degenerative disease characterized by joint pain, stiffness, and functional limitations, is closely associated with the aging population and imposes a significant burden on both patients' physical and mental health and the social healthcare system. Given the lack of a definitive cure for this condition, the focus of clinical treatment is increasingly shifting toward early intervention. Although nonsteroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) and physical rehabilitation have proven effective in symptom relief, total knee arthroplasty (TKA) remains the primary surgical solution for advanced cases, with its substantial economic cost being a notable consideration. With societal structural changes and diversification of work patterns, traditional rehabilitation models can no longer meet modern patients' demands for convenience and continuity. This article systematically reviews recent advancements in KOA rehabilitation, highlighting that future strategies will transcend the limitations of single therapies and adopt a "patient-centered" multimodal integration approach. By deeply integrating digital and intelligent technologies, a personalized and continuous closed-loop management system can be established, which not only significantly improves patient outcomes but also provides an innovative paradigm for long-term chronic disease management.

[Key words] knee osteoarthritis; rehabilitation therapy; exercise therapy; artificial intelligence; tele-rehabilitation; traditional Chinese medicine rehabilitation

骨关节炎(osteoarthritis, OA)作为一种以关节软骨渐进性损伤为典型表现的慢性关节退行性疾病,其发生与关节长期机械磨损密切相关。在临床实践中,膝骨关节炎(KOA)常表现为膝关节疼痛、肿胀、活动受限、僵硬及功能下降^[1]。该疾病已成为全球范围内位列前五的致残因素之一,构成重大的公共卫生挑战^[2]。目前KOA的确切发病机制尚未完全阐明,研究显示肌力下降与其症状及功能状态具有显著相关性^[3]。此外,KOA在肥胖人群(BMI $\geq 30\text{kg/m}^2$)中的发病率明

显高于非肥胖人群,这可能与体重增加导致关节负荷加重、从而加速关节退行性改变有关^[4]。流行病学调查表明,KOA的放射学诊断率在男性中约为10%,在女性中达13%^[5]。较高的患病率不仅严重影响患者的生活质量,也带来了沉重的医疗与社会经济负担。

现阶段KOA尚无法彻底治愈,临床干预主要以缓解症状和改善关节功能为目标。在常规药物治疗中,非甾体抗炎药(NSAIDs)常用于早期KOA的疼痛控制,但长期口服可

能引起肾功能损害、胃肠道病变及心血管风险等不良反应。为降低相关并发症，临床常联合使用外用中药或西药制剂。虽然外用药物在一定程度上减少了全身性用药风险，但仍可能引发局部或全身过敏反应，轻症患者停药后可缓解，重症患者则需进行抗过敏治疗。随着康复医学的进步，以运动疗法和物理因子治疗为代表的康复手段逐渐得到广泛应用，因其副作用少、疗效确切且患者依从性较高，正在逐步改变传统的治疗模式。

然而，在社会快速发展与生活节奏加速的背景下，传统康复模式已难以完全适应现代人群的健康需求。为应对这一挑战，康复医学正朝着个性化、多模式、智能化及远程化的方向演进。近年来，人工智能、大数据分析及生物力学等科技的融入，正在推动康复评估与治疗向精准化、系统化转型，有望引领康复实践进入新的发展阶段。本文系统综述相关领域的最新进展，以期临床工作者提供前沿的学术参考与实践思路。

1 运动疗法

运动疗法在膝骨关节炎 (KOA) 的临床康复管理中具有重要地位，该疗法通过系统性运动干预，有助于减轻膝关节局部炎症、增强下肢肌力、提升关节稳定性，并最终改善患者的整体功能与生活质量。其主要实施形式包括肌力训练与有氧运动两大类。研究表明，炎症反应是 KOA 发生发展的关键病理机制之一。在疾病过程中，炎性细胞浸润及炎症介质释放可加速关节软骨破坏，进而促使关节退变。因此，有效抑制炎症活动对于保护软骨结构与缓解临床症状具有重要意义^[6]。

1.1 肌力训练

KOA 患者常伴有膝关节周围肌肉萎缩与肌力下降，导致关节力学稳定性降低。针对股四头肌、腘绳肌及髌外展肌等关键肌群进行专项肌力训练，可增强肌肉力量，优化关节负荷分布，减少关节面异常摩擦，从而缓解疼痛并延缓疾病进展。例如，强化股四头肌有助于降低膝关节内侧间室的压力，改善关节功能与活动范围。结合关节活动度训练，能进一步缓解关节僵硬，提升步行、上下楼梯等日常活动能力。从生理机制看，肌肉收缩可促进关节周围血液循环与淋巴回流，有利于积液吸收和炎症介质清除，同时为软骨提供营养，支持其修复。此外，规律的肌力训练也能增强患者的自我效

能感，缓解疼痛与功能受限带来的心理负担，促进身心整体健康。在分子机制层面，已有研究指出，中等强度运动可通过提高脂氧素 A4 (LXA4) 的生成，激活 ESR2/LPAR3/Nrf2 信号轴，抑制成纤维样滑膜细胞铁死亡，进而改善软骨微环境，缓解 KOA 疼痛与病理进程^[7]。Thudium 等将 KOA 患者分为高强度、低强度抗阻训练组及无训练对照组，进行为期 3-6 个月的干预，结果发现高强度训练虽可增加 Aggrecan 重塑，但可能加剧软骨退变，因此不建议 KOA 患者进行高强度抗阻训练^[8]。

1.2 有氧运动

膝关节软骨退变与年龄增长、力学异常及代谢失衡等多因素相关，常表现为软骨基质合成减少、分解加剧，进而引发关节疼痛与功能障碍。关节内磨损碎屑可激活炎症反应，刺激神经末梢，加重疼痛症状。有氧运动如游泳、骑自行车等，因具备低冲击特性，可显著降低关节负荷，减轻磨损与疼痛；而散步、慢跑等则有助于提升心肺功能，改善全身循环，为关节修复创造有利条件。有氧运动还能维持关节灵活性，缓解僵硬感，并通过锻炼股四头肌、腘绳肌等肌群，增强关节稳定性。肌肉力量的提升有助于分担关节压力，延缓退变进程。此外，运动可促进内啡肽等物质释放，缓解焦虑、抑郁情绪，增强康复信心，整体改善生活质量。一项系统评价指出，固定自行车运动能在一定程度上缓解 KOA 疼痛并改善运动功能，但对关节僵硬、日常活动能力及生活质量方面的改善作用尚不明确^[9]。另有研究证实，肌力结合有氧运动可显著改善患者步行、爬楼梯等功能性活动中的疼痛与残疾状况^[10]。动物实验亦表明，补充益生元纤维联合有氧运动可降低炎症水平，缓解大鼠 KOA 进展^[11]。

2 物理因子疗法

物理因子疗法作为膝骨关节炎 (KOA) 综合管理的重要组成部分，在缓解临床症状、改善关节功能及提高生活质量方面具有明确作用。目前临床常用的物理因子治疗手段主要包括体外冲击波疗法、超声波疗法、激光疗法及电刺激疗法等。

2.1 体外冲击波疗法 (ESWT)

ESWT 目前已广泛应用于肌腱病、肱骨外上髁炎、钙化性肌腱炎、骨折延迟愈合及股骨头缺血性坏死等肌肉骨骼疾病的治疗，并取得可靠疗效^[12, 13]。近年该技术被引入骨关节

炎治疗领域, 研究显示其可改善关节软骨及软骨下骨的病理状态。作用机制可能涉及促进局部微循环、诱导新生血管形成, 从而为软骨修复提供必要的血供支持^[14]。Kim 等^[15]报告 r-ESW 能促进半月板撕裂与肌肉组织修复, 并表现出软骨保护效应。Cheng 等^[16]研究进一步表明, ESWT 可加速退变半月板的愈合过程, 通过促进半月板细胞增殖及上调 CCN2、SOX9、aggrecan、Col2a1 等软骨修复相关因子, 增加软骨特异性细胞外基质的合成。Hashimoto 等^[17]在大鼠模型中也证实 ESWT 对无血管区半月板撕裂具有促进愈合作用。娄路馨等^[18]对 62 例 KOA 患者行 ESWT 干预后, MRI 评估显示治疗组关节积液及骨髓水肿较前减轻, 膝关节临床症状同步改善。

2.2 超声波疗法 (US)

超声波治疗通过其热效应与空化效应, 可减少炎症因子释放、抑制软骨细胞死亡并延缓软骨退变进程^[19]。动物实验表明, US 能改变 KOA 模型关节液中蛋白质组的表达, 如下调载脂蛋白 A-I (Apo A-I) 与脂肪酸结合蛋白 4 (FABP4)^[20, 21], 二者均参与过氧化物酶体增殖物激活受体 (PPARs) 信号通路^[22]。PPARs 包括 α 、 β/δ 及 γ 亚型, 在调控炎症、脂质代谢、细胞增殖等方面具有重要作用^[23]。研究提示 PPARs 可通过多条信号途径影响关节软骨稳态与炎症反应^[24-26]。例如, PPAR α 水平降低会加剧软骨炎症与破坏性反应, 其缺失可导致 MMP-13 表达上调, 并伴随血脂异常, 从而加速关节退变^[27, 28]。同样, PPAR γ 减少或缺失也会促进 KOA 进展, 而其激活则能通过 Fas 及 NF- κ B 通路抑制软骨细胞凋亡与滑膜炎^[29, 30]。综上所述, US 疗法可能通过调节 PPARs 相关通路, 在动物及细胞层面抑制软骨降解, 为 KOA 治疗提供新思路^[31]。

2.3 激光疗法

激光治疗可通过促进外周伤害性感受器释放内源性阿片类药物, 竞争性占据疼痛信号结合位点, 从而发挥镇痛作用^[32]。其次, 激光能抑制背根神经节神经元的 ATP 生成与钙离子内流, 增加细胞内活性氧水平, 干扰疼痛动作电位传导。此外, 闸门控制理论与促进神经纤维再生也是其镇痛机制的重要组成部分。激光的光化学与光热效应还可刺激局部血流与细胞代谢, 促进施万细胞增殖与神经修复, 并减少 IL-1、IL-6、前列腺素、CRP、TNF- α 等炎症介质释放。近年来, 高强度激光治疗 (HILT) 已逐步应用于多种肌肉骨骼疾病

的临床管理^[33]。Siriratna 等^[34]一项随机临床试验表明, HILT 能有效减轻 KOA 患者的疼痛并改善其关节功能。

2.4 电刺激疗法 (ES)

骨关节炎的炎症过程常始于滑膜, 伴随免疫系统激活及多种细胞与体液介质参与。在此过程中, 由细胞外基质降解所产生的“损伤相关分子模式” (DAMPs) 可刺激滑膜成纤维细胞与巨噬细胞释放趋化因子及细胞因子, 进而通过影响背根神经节及中枢疼痛通路, 导致疼痛中枢敏化^[35]。电刺激可通过降低滑膜细胞因子水平, 减轻关节疼痛与炎症反应。Elsehrawy 等^[36]对 34 例 KOA 患者施行经皮迷走神经耳支电刺激 (tVNS), 每天 1 次, 每周 3 天, 持续 12 周, 结果提示该疗法能缓解伤害性及神经病理性疼痛, 改善躯体功能并调节中枢敏化状态。

3 全身振动训练

全身振动训练 (whole-body vibration training, WBVT) 作为一种新兴的神经肌肉干预技术, 其治疗基础在于通过振动平台产生的机械振动刺激, 提升目标肌群的生物活性。该疗法借助生物力学及生理学效应, 促进神经肌肉系统的适应性改变, 从而实现康复治疗目的。在膝骨关节炎 (KOA) 患者中, 疼痛常导致肌肉激活不足。WBVT 可能通过刺激皮肤与肌肉中的感受器, 引发神经激活, 促进内源性镇痛物质 (如内啡肽与血清素) 释放, 从而减轻疼痛感知。此外, 研究显示 WBVT 具有一定的免疫调节作用, 可下调炎症因子表达^[37], 进而调节痛觉传导, 缓解疼痛与功能障碍, 改善整体身体机能^[38]。同时, 振动刺激能上调生肌调节因子的表达, 促进肌细胞增殖、迁移与成熟, 有助于肌肉肥大及横截面积增加, 从而实现肌力增强^[39]。WBVT 还对骨骼系统产生了积极作用, 可改善骨密度与骨形态, 这主要得益于振动刺激提高成骨细胞活性及增加骨矿物质含量。Zhang 等^[40]的研究进一步指出, WBVT 通过激活肌肉本体感受器并增加肌细胞内蛋白合成, 可有效增强肌肉力量与本体感觉功能。

4 血流限制训练

血流限制训练 (Blood Flow Restriction Training, BFRT), 亦称 Kaatsu 训练, 是指在肢体近端使用充气袖带等方式施加外部压力, 在维持部分动脉供血的同时限制静脉回流, 从

而在目标肌肉组织内营造低氧环境。该训练通常与低负荷抗阻运动结合,能有效促进肌肉肥大,其机制主要涉及代谢压力升高及Ⅱ型肌纤维募集增加。研究表明,BFR联合低负荷抗阻训练(LLRT)对肌肉增长的诱导作用可与高负荷抗阻训练(HLRT)相当^[41]。根据血流限制模式的不同,BFR可分为间歇性血流限制(iBFR)与持续性血流限制(cBFR)。以往针对膝骨关节炎(KOA)患者的BFR研究多采用cBFR模式,但有报道指出该方式可能引发膝关节疼痛或不适感^[42]。因此,有学者提出在组间休息期间间歇性释放袖带压力(即iBFR),或可减轻训练过程中的疼痛及主观疲劳感受。相较于iBFR,cBFR可引起更显著的代谢应激积累,表现为多次训练后无机磷酸盐升高及肌内pH下降。这一差异可能与iBFR间歇性减压、缓解代谢产物堆积有关。然而,近期观点认为BFR训练中的合成代谢效应可能主要源于运动单位募集增强,而非单纯依赖代谢压力^[43]。因此,过度追求代谢应激若超出高阈值运动单位募集所需,其额外收益可能有限。长期训练数据显示,iBFR在增加大腿肌肉横截面积及改善下肢瘦体重方面效果与cBFR相当,且在提升等长及等速肌力方面亦表现出类似效能^[44]。另一方面,代谢压力升高可激活Ⅲ/Ⅳ类传入纤维,这可能是BFR训练引发疼痛的原因之一,也可解释cBFR相较于iBFR更易引起不适感的临床观察。

5 心理意象康复训练

心理意象作为一种跨感觉通道形成并操作内部表征的认知过程,在记忆、学习及空间推理等多种认知功能中起到关键作用,并与情绪调节及决策行为存在复杂关联。尽管其内部表征的生动性与可控性存在个体差异,并受专业知识水平影响,但心理意象作为一种独特的知觉表征形式,在临床神经科学与社会认知等领域具有重要研究价值^[45]。基于心理意象内在视觉加工的理解,可衍生出幻想性错觉现象,即个体倾向于从随机刺激中感知有意义的模式。例如,面对具有类面部特征的虚幻刺激时,个体可借助对真实面部的先验知识进行自上而下的加工,从而将这些错觉解读为真实面孔。在康复医学中,运动想象作为一种无需实际动作执行的运动的认知模拟,已被证实可促进运动学习与功能恢复。神经影像学研究显示,想象与实际运动执行过程中存在脑区激活模式的重叠。枕颞区及初级视皮层在视觉信息感知中起关键

作用,主要参与自下而上的加工;而额叶皮层则涉及推理等高级认知功能,与自上而下的调控密切相关^[46]。在临床实践中,引导性想象已应用于疼痛管理与情绪调节。Aydin等^[47]对30例下肢术后患者的研究表明,引导想象干预能显著降低患者的疼痛程度。Biéchy等^[48]则发现,将深呼吸与心理表象相结合的恢复方案,有助于40名飞行员在高强度体力活动后提升心血管恢复效率。上述结果提示,心理意象疗法可改善疼痛感知、情绪状态、患者动机及整体康复体验。Akdeniz等^[49]进一步指出,心理意象可作为疼痛管理与认知促进的替代策略,并可能通过影响面部模式识别中的自上而下机制发挥作用。因此,将心理意象整合于疼痛相关疾病的治疗体系,有助于推动个性化康复方案的创新与发展。

6 人工智能驱动的个性化处方

目前膝骨关节炎(KOA)虽仍无法根治,但规范的治疗与管理可有效缓解症状、延缓病情进展并改善患者预后。在KOA的整体管理中,患者教育与自我管理指导具有重要作用^[50-51]。通过向患者系统介绍疾病知识、危险因素、治疗方案及自我管理策略,并提供个性化指导,可增强患者对疾病的认知与自我效能,进而能提高治疗依从性,改善健康结局^[52]。然而,临床实践中常因医患比例失衡、时间与资源有限等因素,制约患者教育的深度与广度。医务人员往往难以对每位患者进行全面、个体化的指导,导致教育内容趋于泛化、质量参差不齐^[53]。这一问题在KOA管理中尤为突出,因该病程长、患者异质性强,其在疾病严重程度、症状表现、合并症、生活方式及健康素养等方面差异显著,更需要针对性的个体指导。但现实中,多数KOA患者所接受的教育仍停留在标准化、浅表化层面^[54],亟需构建既能减轻临床负担又可提升指导质量的新型教育模式。近年来,人工智能(AI)技术尤其是自然语言处理领域的突破,为解决上述问题提供了可能。大型语言模型通过对海量文本数据进行训练,可具备类似人类的语言理解与生成能力,在医学文献分析、临床决策支持、信息提取与疾病辅助诊断等任务中展现出良好性能,有助于提升医疗服务的效率与准确性^[55]。例如,Kai等^[56]利用GPT-4生成针对KOA的个性化自我管理建议,其在效率、准确性、个性化程度、全面性及安全性方面均优于临床医生手工编写的内容。对老年患者而言,个性化干预尤为重要。随着年龄增长,骨关节炎发病率上升,关节活动度下降

可导致体力活动减少,进而引发肌肉流失,形成“肌少症-骨关节炎”恶性循环,严重影响生活质量。据统计,约9.1%的老年人同时罹患这两种疾病^[57]。为改善此类患者的生活质量,You等^[58]结合ChatGPT-4与可穿戴设备构建个性化康复方案生成系统,显著提升了康复服务的可及性与执行效率,从而优化了肌少症合并骨关节炎患者的治疗效果。

7 远程家庭康复

随着社会高速发展、工作节奏加快以及人口老龄化进程的推进,远程医疗服务已成为医疗体系的重要补充。世界卫生组织将远程医疗定义为“跨越地理距离,通过信息通信技术提供医疗服务,涵盖疾病与损伤的诊断治疗、医学研究评估以及卫生专业人员的继续教育”。相关调查显示,在新型冠状病毒肺炎(COVID-19)疫情之前,仅有少数物理治疗师开展过远程医疗服务,反映出该领域在专业内尚未形成普遍经验。远程物理治疗的开展,要求治疗师掌握新的技术与临床技能,以适应非接触式诊疗模式,为远程患者提供有效干预。COVID-19的全球流行进一步凸显了远程医疗的必要性,期间为降低病毒传播风险,基于自动短信机器人的序化对话被用于向患者传递疫情信息与健康指导,客观上推动了远程医疗的普及与发展。在膝骨关节炎(KOA)的管理中,远程医疗已展现出其应用价值。例如,Sameer等^[59]通过短视频指导患者掌握疼痛自我管理技能,有效缓解了其出院后的膝关节症状。此外,研究证实基于互联网提供的个性化运动方案,能够显著提升KOA患者的身体活动水平^[60]。长期推行远程康复服务,不仅有助于提高患者对治疗的接受度,也能促进治疗师相关技能的提升与服务质量的统一^[61]。

8 中医康复治疗

中医康复在膝骨关节炎(KOA)管理中具有重要地位,其中艾灸、推拿与针灸等传统疗法因疗效明确、接受度高而被广泛应用。以下就这几类方法在KOA康复中的作用进行具体分析。

8.1 艾灸

艾灸疗法通过温热刺激作用于局部,可改善微循环、促进组织血液灌注,从而有助于肌肉功能恢复。该疗法在气血瘀滞型及风寒湿痹型KOA中显示出较好疗效,常用形式包

括雷火灸、温针灸及热敏灸等。李亚楠等^[62]采用雷火灸治疗30例KOA患者,其症状改善程度优于外用双氯芬酸钠凝胶的对照组。温针灸结合针刺与艾灸,能进一步促进膝关节周围血液循环,缓解经络不通所致疼痛;其温热效应还可增强骨细胞活性、抑制破骨细胞功能、调节钙磷代谢,从而降低骨质疏松及胫骨平台塌陷的风险^[63]。鲍亮等^[64]应用热敏灸刺激足三阳经郄穴,亦取得良好镇痛效果,并能改善关节功能与生活质量。

8.2 推拿

推拿手法可缓解肌肉疲劳,调节肌骨系统生理平衡,同时发挥舒筋通络之效,达到“通则不痛”的目的,进而改善膝关节疼痛与功能。研究表明,理筋手法可抑制Wnt/ β -catenin信号通路,下调MMP-13表达,减少IL-1 β 、TNF- α 等炎症因子释放,从而减轻关节炎症^[65]。程露露等^[66]通过理筋正骨手法调节髌骨活动度与软组织张力之间的动态平衡,有效提升了患者膝关节功能与生活质量,体现了中医“筋骨共治”的诊疗理念。

8.3 针灸

针灸基于辨证论治原则选经取穴,具有疏通经络、调和气血、平衡阴阳的作用,能有效缓解KOA症状、改善关节功能。该方法兼具经济、安全、副作用少等特点,临床接受度较高。研究显示,针刺刺激可促进血清素、内源性阿片肽及去甲肾上腺素等物质释放;此外,穴位区域皮肤感受器、肌梭与腱器官分布密集,针刺深入肌层后可同时抑制肌肉与皮肤中的TRPV通道,从而调节外周及中枢敏化,减轻炎症反应与疼痛。张金焕等^[67]比较普通针刺与毫火针治疗KOA的效果,发现后者在VAS、WOMAC等指标上改善更为显著。临床实践中,针灸常与热、电、光等物理因子联用,以增强疗效。

9 总结与展望

随着我国社会老龄化进程的深入推进,膝骨关节炎的患病率呈现出显著上升趋势,由此带来的康复需求日益迫切。传统单一、标准化的康复干预模式已难以适应当前患者群体多样化、复杂化的功能恢复需求,康复医学正逐步从“以疾病为中心”转向“以患者为中心”,呈现多元化、精准化、个体化的发展态势。未来膝骨关节炎的有效康复策略应建构于多维度整合干预模式之上,以循证医学支持的运动疗法与

物理治疗为核心基石，以数字技术、智能传感与人工智能算法为关键赋能工具，以远程康复与家庭康复为重要延伸场景，并有机融合中医传统康复手段与西医现代康复技术的各自优势，形成贯通评估、治疗、管理与随访的全程康复闭环。在这一转型与升级过程中，康复医师的角色定位亟待深化与拓展，需从既往相对被动的治疗方案执行者，积极转变为康复全程的“系统架构师”与“跨领域协调者”，负责制定个

性化康复路径、整合多学科资源并动态调控康复进程。进一步加强康复医学、骨科学、运动医学、工程学及信息技术等多学科的深度协作，加速推进智能康复技术、远程监控系统的临床转化与落地应用，积极开展基于卫生经济学评价的康复模式优化研究。通过体系化、创新化的康复服务能力建设，最终让更多膝关节炎患者获得高效、可持续的康复支持，提升其功能水平与生活质量。

参考文献:

- [1]Du X, Liu ZY, Tao XX, et al. Research Progress on the Pathogenesis of Knee Osteoarthritis[J].Orthopaedic surgery, 2023, 15 (9): 2213-2224.
- [2]Primorac D, Molnar V, Rod E, et al. Knee Osteoarthritis: A Review of Pathogenesis and State-Of-The-Art Non-Operative Therapeutic Considerations[J].Genes, 2020, 11 (8): 854.
- [3]Holm PM, Kemnitz J, Bandholm T, et al. Muscle Function Tests as Supportive Outcome Measures for Performance-Based and Self-Reported Physical Function in Patients With Knee Osteoarthritis: Exploratory Analysis of Baseline Data From a Randomized Trial[J].Journal of strength and conditioning research, 2022, 36 (9): 2635-2642.
- [4]Spech C, Paponetti M, Mansfield C, et al. Biomechanical variations in children who are overweight and obese during high-impact activities: A systematic review and meta-analysis[J].Obesity reviews: an official journal of the International Association for the Study of Obesity, 2022, 23 (6): e13431.
- [5]Lorbeer N, Knoll N, Keller J, et al. Enhancing physical activity and reducing symptoms of patients with osteoarthritis of the knee: a randomized controlled trial of the PrevOP-Psychological Adherence Program[J].BMC musculoskeletal disorders, 2023, 24 (1): 550.
- [6]武俊鹏, 张一民, 贾潇.运动干预治疗膝关节炎的研究现状分析[C]//中国体育科学学会.第十三届全国体育科学大会论文摘要集——墙报交流(体质与健康分会)(三).北京体育大学; 运动与体质健康教育部重点实验室, 2023: 37.
- [7]Hu Z, Chen L, Zhao J, et al. Lipoxin A₄ ameliorates knee osteoarthritis progression in rats by antagonizing ferroptosis through activation of the ESR2/LPAR3/Nrf2 axis in synovial fibroblast-like synoviocytes[J].Redox biology, 2024, 73: 103143.
- [8]Thudium CS, Engström A, Bay-Jensen AC, et al. Cartilage tissue turnover increases with high- compared to low-intensity resistance training in patients with knee OA[J].Arthritis research & therapy, 2023, 25 (1): 22.
- [9]Luan L, Bousie J, Pranata A, et al. Stationary cycling exercise for knee osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis[J].Clinical rehabilitation, 2021, 35 (4): 522-533.
- [10]Yan L, Li D, Xing D, et al. Comparative efficacy and safety of exercise modalities in knee osteoarthritis: systematic review and network meta-analysis[J].BMJ (Clinical research ed.), 2025, 391: e085242.
- [11]Rios JL, Bomhof MR, Reimer RA, et al. Protective effect of prebiotic and exercise intervention on knee health in a rat model of diet-induced obesity[J].Scientific reports, 2019, 9 (1): 3893.
- [12]Tan H, Tang P, Chai H, et al. Extracorporeal shock wave therapy with imaging examination for early osteonecrosis of the femoral head: a systematic review[J].International journal of surgery (London, England), 2025, 111 (1): 1144-1153.
- [13]Bi J, Zhou W, Zhang H, et al. Clinical Application of Shock Wave in the Treatment of Avascular Necrosis of the Femoral Head in the Early and Middle Stages[J].Contrast media & molecular imaging, 2022, 2022: 3832670.

- [14]Li J, Ma Q, Hou J, et al. The Efficacy of Microfracture Combined with Extracorporeal Shock Wave Therapy for Treating Osteochondral Lesion of the Talus and the Quality of Regenerated Cartilage : A Retrospective Cohort Study and MRI Assessment[J].Journal of clinical medicine, 2023, 12 (8): 2966.
- [15]Kim YH, Bang JI, Son HJ, et al. Protective effects of extracorporeal shockwave on rat chondrocytes and temporomandibular joint osteoarthritis;preclinical evaluation with in vivo ^{99m}Tc-HDP SPECT and ex vivo micro-CT[J].Osteoarthritis and Cartilage, 2019, 27(11): 1692–1701.
- [16]Chou WY, Cheng JH, Wang CJ, et al. Shockwave Targeting on Subchondral Bone Is More Suitable than Articular Cartilage for Knee Osteoarthritis[J].International journal of medical sciences, 2019, 16 (1): 156–166.
- [17]Hashimoto S, Ichinose T, Ohsawa T, et al. Extracorporeal Shockwave Therapy Accelerates the Healing of a Meniscal Tear in the Avascular Region in a Rat Model[J].The American journal of sports medicine, 2019, 47 (12): 2937–2944.
- [18]娄路馨, 顾建明, 梁伟, 等.MRI 对体外冲击波联合康复运动治疗膝关节骨性关节炎短期疗效的评估[J].临床放射学杂志, 2024, 43 (10): 1767–1771.
- [19]Chen T, Zeng W, Tie C, et al. Engineered gold/black phosphorus nanoplatfoms with remodeling tumor microenvironment for sonoactivated catalytic tumor theranostics[J].Bioactive materials, 2022, 10: 515–525.
- [20]Wang X, Wang D, Xia P, et al. Ultrasound–targeted simvastatin–loaded microbubble destruction promotes OA cartilage repair by modulating the cholesterol efflux pathway mediated by PPAR γ in rabbits[J].Bone & joint research, 2021, 10 (10): 693–703.
- [21]Luo Q, Ji S, Li Z, et al. Effects of ultrasound therapy on the synovial fluid proteome in a rabbit surgery–induced model of knee osteoarthritis[J].Biomedical engineering online, 2019, 18 (1): 18.
- [22]Sun C, Song B, Sheng W, et al. Fenofibrate Attenuates Radiation–Induced Oxidative Damage to the Skin through Fatty Acid Binding Protein 4 (FABP4) [J].Frontiers in bioscience (Landmark edition), 2022, 27 (7): 214.
- [23]Sheng W, Wang Q, Qin H, et al. Osteoarthritis: Role of Peroxisome Proliferator–Activated Receptors[J].International journal of molecular sciences, 2023, 24 (17): 13137.
- [24]Huang G, Jiang W, Xie W, et al. Role of peroxisome proliferator–activated receptors in osteoarthritis(Review) [J].Molecular medicine reports, 2021, 23 (2): 159.
- [25]Abshirini M, Ilesanmi–Oyelere BL, Kruger MC. Potential modulatory mechanisms of action by long–chain polyunsaturated fatty acids on bone cell and chondrocyte metabolism[J].Progress in lipid research, 2021, 83: 101113.
- [26]Qiu YY, Zhang J, Zeng FY, et al. Roles of the peroxisome proliferator–activated receptors (PPARs) in the pathogenesis of nonalcoholic fatty liver disease (NAFLD) [J].Pharmacological research, 2023, 192: 106786–106786.
- [27]Park S, Baek IJ, Ryu JH, et al. PPAR α –ACOT12 axis is responsible for maintaining cartilage homeostasis through modulating de novo lipogenesis[J].Nature communications, 2022, 13 (1): 3.
- [28]Li Z, Xie L, Zeng H, et al. PDK4 inhibits osteoarthritis progression by activating the PPAR pathway[J].Journal of orthopaedic surgery and research, 2024, 19 (1): 109.
- [29]Feng Z, Huang Q, Zhang X, et al. PPAR– γ Activation Alleviates Osteoarthritis through Both the Nrf2/NLRP3 and PGC–1 α / $\Delta \psi_m$ Pathways by Inhibiting Pyroptosis[J].PPAR research, 2023, 2023: 2523536–2523536.
- [30]Wu D, Shen Z, Gou Y, et al. PPAR γ activation in chondrocytes alleviates glucocorticoid–induced oxidative stress, mitochondrial impairment, and pyroptosis via autophagic flow enhancement[J].Chemico–biological interactions, 2024, 390: 110877.
- [31]Luo Q, Zhang R, Liang Z, et al. Ultrasound therapy inhibits knee osteoarthritis progression in rabbits by activating the PPARs pathway: a pilot study[J].Annals of medicine, 2025, 57 (1): 2537348.

- [32]DE Oliveira MF, Johnson DS, Demchak T, et al. Low-intensity LASER and LED (photobiomodulation therapy) for pain control of the most common musculoskeletal conditions[J].European journal of physical and rehabilitation medicine, 2022, 58 (2): 282–289.
- [33]Ezzati K, Laakso EL, Salari A, et al. The Beneficial Effects of High-Intensity Laser Therapy and Co-Interventions on Musculoskeletal Pain Management: A Systematic Review[J].Journal of lasers in medical sciences, 2020, 11 (1): 81–90.
- [34]Siriratna P, Ratanasutiranon C, Manissorn T, et al. Short-Term Efficacy of High-Intensity Laser Therapy in Alleviating Pain in Patients with Knee Osteoarthritis: A Single-Blind Randomised Controlled Trial[J].Pain research & management, 2022, 2022: 1319165.
- [35]Lambert C, Zappia J, Sanchez C, et al. The Damage-Associated Molecular Patterns (DAMPs) as Potential Targets to Treat Osteoarthritis: Perspectives From a Review of the Literature[J].Frontiers in medicine, 2020, 7: 607186.
- [36]Elsehrawy GG, Ibrahim ME, A Moneim NH, et al. Transcutaneous vagus nerve stimulation as a pain modulator in knee osteoarthritis: a randomized controlled clinical trial[J].BMC musculoskeletal disorders, 2025, 26 (1): 68.
- [37]Tim ó n R, Gonz á lez-Custodio A, Gusi N, et al. Effects of intermittent hypoxia and whole-body vibration training on health-related outcomes in older adults[J].Aging clinical and experimental research, 2024, 36 (1): 6.
- [38]Zafar T, Zaki S, Alam MF, et al. Effect of Whole-Body Vibration Exercise on Pain, Disability, Balance, Proprioception, Functional Performance and Quality of Life in People with Non-Specific Chronic Low Back Pain : A Systematic Review and Meta-Analysis[J].Journal of clinical medicine, 2024, 13 (6): 1639.
- [39]Sato S, Hanai T, Kanamoto T, et al. Vibration acceleration enhances proliferation, migration, and maturation of C2C12 cells and promotes regeneration of muscle injury in male rats[J].Physiological reports, 2024, 12 (4): e15905.
- [40]Lai Z, Lee S, Chen Y, et al. Comparison of whole-body vibration training and quadriceps strength training on physical function and neuromuscular function of individuals with knee osteoarthritis: A randomised clinical trial[J].Journal of exercise science and fitness, 2021, 19 (3): 150–157.
- [41]Hong QM, Wang HN, Liu XH, et al. Intermittent blood flow restriction with low-load resistance training for older adults with knee osteoarthritis: a randomized, controlled, non-inferiority trial protocol[J].Trials, 2024, 25 (1): 352.
- [42]Harper SA, Roberts LM, Layne AS, et al. Blood-Flow Restriction Resistance Exercise for Older Adults with Knee Osteoarthritis: A Pilot Randomized Clinical Trial[J].Journal of clinical medicine, 2019, 8 (2): 265.
- [43]Wernbom M, Aagaard P. Muscle fibre activation and fatigue with low-load blood flow restricted resistance exercise—An integrative physiology review[J].Acta physiologica (Oxford, England), 2020, 228 (1): e13302.
- [44]Davids CJ, Raastad T, James LP, et al. Similar Morphological and Functional Training Adaptations Occur Between Continuous and Intermittent Blood Flow Restriction[J].Journal of strength and conditioning research, 2021, 35 (7): 1784–1793.
- [45]Nilsson AM, Waern M, Ehnvall A, et al. The Meaning of Mental Imagery in Acute Suicidal Episodes: A Qualitative Exploration of Lived Experiences[J].Omega, 2023: 302228231218562.
- [46]McCarthy B, Datta S, Sesa-Ashton G, et al. Top-down control of vestibular inputs by the dorsolateral prefrontal cortex[J].Experimental brain research, 2023, 241 (11–12): 2845–2853.
- [47]Zengin A, Aydın L, Doğan A. The Effect of Guided Imagery on Postoperative Pain Management in Patients Undergoing Lower Extremity Surgical Operations: A Randomized Controlled Trial[J].Orthopaedic nursing, 2023, 42 (2): 105–112.
- [48]Bi é chy JP, Charissou C, Gobert S, et al. The combination of deep breathing and mental imagery promotes cardiovascular recovery in firefighters[J].Ergonomics, 2021, 64 (10): 1231–1242.
- [49]Akdeniz G, Tıǧlı K, Akıncı NE, et al. Mental Imagery Enhances Pain Reduction and Visual Processing in Knee Osteoarthritis Patients: A Comparative Study[J].Pain research & management, 2025, 2025: 5576698.

- [50]Goff AJ, De Oliveira Silva D, Merolli M, et al. Patient education improves pain and function in people with knee osteoarthritis with better effects when combined with exercise therapy: a systematic review[J].*Journal of physiotherapy*, 2021, 67 (3): 177–189.
- [51]Duong V, Oo WM, Ding C, et al. Evaluation and Treatment of Knee Pain: A Review[J].*JAMA*, 2023, 330 (16): 1568–1580.
- [52]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].*Annals of the rheumatic diseases*, 2024, 83 (6): 730–740.
- [53]Oosterhaven J, Pell CD, Schröder CD, et al. Health literacy and pain neuroscience education in an interdisciplinary pain management programme: a qualitative study of patient perspectives[J].*PAIN Reports*, 2023, 8 (6): e1093.
- [54]Salazar–M é ndez J, Cuyul–V á squez I, Ponce–Fuentes F, et al. Pain neuroscience education for patients with chronic pain: A scoping review from teaching–learning strategies, educational level, and cultural perspective[J].*Patient education and counseling*, 2024, 123: 108201.
- [55]Ruiz Sarrias O, Mart í nez Del Prado MP, Sala Gonzalez M Á, et al. Leveraging Large Language Models for Precision Monitoring of Chemotherapy–Induced Toxicities: A Pilot Study with Expert Comparisons and Future Directions[J].*Cancers*, 2024, 16 (16): 2830.
- [56]Du K, Li A, Zuo QH, et al. Comparing Artificial Intelligence–Generated and Clinician–Created Personalized Self–Management Guidance for Patients With Knee Osteoarthritis: Blinded Observational Study[J].*Journal of medical Internet research*, 2025, 27: e67830.
- [57]Veronese N, Punzi L, Sieber C, et al. Sarcopenic osteoarthritis: a new entity in geriatric medicine?[J].*European geriatric medicine*, 2018, 9 (2): 141–148.
- [58]You M, Chen X, Liu D, et al. ChatGPT–4 and wearable device assisted Intelligent Exercise Therapy for co–existing Sarcopenia and Osteoarthritis (GAISO): a feasibility study and design for a randomized controlled PROBE non–inferiority trial[J].*Journal of orthopaedic surgery and research*, 2024, 19 (1): 635.
- [59]Gohir SA, Eek F, Kelly A, et al. Effectiveness of Internet–Based Exercises Aimed at Treating Knee Osteoarthritis: The iBEAT–OA Randomized Clinical Trial[J].*JAMA network open*, 2021, 4 (2): e210012.
- [60]Xie SH, Wang Q, Wang LQ, et al. The feasibility and effectiveness of internet–based rehabilitation for patients with knee osteoarthritis: A study protocol of randomized controlled trial in the community setting[J].*Medicine*, 2020, 99 (44): e22961.
- [61]Jones SE, Campbell PK, Kimp AJ, et al. Evaluation of a Novel e–Learning Program for Physiotherapists to Manage Knee Osteoarthritis via Telehealth: Qualitative Study Nested in the PEAK (Physiotherapy Exercise and Physical Activity for Knee Osteoarthritis) Randomized Controlled Trial[J].*Journal of medical Internet research*, 2021, 23 (4): e25872.
- [62]李亚楠, 唐晓伟, 周娴, 等.雷火灸治疗高龄老人膝骨关节炎的疗效观察[J].*上海针灸杂志*, 2022, 41 (10): 1006–1010.
- [63]王薇, 王大利, 王珂, 等.膝三针温针灸治疗膝骨关节炎的疗效及对血清 EZH2 和 CS846 的影响[J].*时珍国医国药*, 2025, 36 (16): 3105–3109.
- [64]鲍亮, 李飞, 李春宁, 等.足三阳经排刺联合热敏灸郄穴对膝关节骨性关节炎即时镇痛效应的疗效研究[J].*时珍国医国药*, 2025, 36 (16): 3175–3179.
- [65]李鑫, 汪宗保, 唐巍, 等.理筋手法对膝骨关节炎兔软骨 Wnt/ β -catenin 信号通路的影响[J].*安徽中医药大学学报*, 2023, 42 (2): 74–77.
- [66]程露露, 扈盛, 陈朝晖, 等.理筋正骨手法重建膝骨关节炎患者股四头肌–髌韧带生物力学稳态及功能: 一项随机对照试验[J].*南京中医药大学学报*, 2025, 41 (10): 1365–1372.
- [67]张金焕, 陈伊谔, 兰凯, 等.火针、温针及电针疗法治疗膝骨关节炎有效性的网状 Meta 分析[J].*中国组织工程研究*, 2020, 24 (18): 2945–2952.