

膝关节运动损伤的预防与康复的整合路径：基于 FLIPUS 的探索

侯太甫 Ji-hoon Cho*

韩国东新大学运动医学学系，韩国 全罗南道 58245

[摘要]目的：膝关节运动损伤的高发性、反复性以及传统康复手段的局限性。探索一种新型治疗技术及其对膝关节功能、疼痛及肌肉屈伸功能的影响。方法：本研究采用质性研究方法，通过与 12 名运动医学医生、物理治疗师及 FLIPUS 技术专家进行半结构化访谈，并结合 5 项临床试验案例分析，探讨了低强度脉冲聚焦超声波（focused low intensity pulsed ultrasound, FLIPUS）技术在膝关节运动损伤预防与康复中的整合路径。结果：研究发现，FLIPUS 技术能够靶向促进组织修复，抑制炎症反应，改善神经肌肉功能，并与传统的动态稳定性训练和阶段性康复目标形成协同作用。结论：一种新颖的低强度超声波，它基于机械效应，可改变细胞膜通透性并刺激细胞活性，这种改变和刺激会进一步增加蛋白质合成产生生长因子促进钙吸收和成纤维细胞流动性增强可明显减轻疼痛症状并且改善膝关节运动能力，为“预防-干预-康复”的闭环模型提供有力的临床实践理论支持。然而，技术标准化和设备普及性仍是目前面临的主要挑战。

[关键词]低强度脉冲聚焦超声波；疼痛；运动损伤；超声波

DOI: 10.33142/jscs.v5i2.16402

中图分类号: G8

文献标识码: A

Integrated Path for Prevention and Rehabilitation of Knee Joint Sports Injuries: Exploration Based on FLIPUS

HOU Taifu, Ji-hoon Cho*

Department of Sports Medicine, Dongshin University, Jeollanam-do, 58245, Korea

Abstract: Objective: the high incidence, recurrence, and limitations of traditional rehabilitation methods for knee joint sports injuries. Explore a novel treatment technique and its impact on knee joint function, pain, and muscle flexion and extension function. Method: this study adopted a qualitative research method and conducted semi-structured interviews with 12 sports medicine doctors, physical therapists, and FLIPUS technology experts. Combined with the analysis of 5 clinical trial cases, the integration path of focused low intensity pulsed ultrasound (FLIPUS) technology in the prevention and rehabilitation of knee joint sports injuries was explored. Result: the study found that FLIPUS technology can target and promote tissue repair, inhibit inflammatory reactions, improve neuromuscular function, and form a synergistic effect with traditional dynamic stability training and phased rehabilitation goals. Conclusion: a novel low-intensity ultrasound, based on mechanical effects, can alter cell membrane permeability and stimulate cell activity. This alteration and stimulation further increase protein synthesis, produce growth factors, promote calcium absorption, and enhance fibroblast fluidity, which can significantly alleviate pain symptoms and improve knee joint mobility. It provides strong clinical practice theoretical support for the closed-loop model of "prevention intervention rehabilitation". However, technical standardization and equipment accessibility remain the main challenges currently faced.

Keywords: low intensity pulse focused ultrasound; pain; sports injuries; ultrasonic

引言

膝关节是运动损伤最常见的部位之一，研究表明，膝关节运动损伤占有所有运动损伤的 25%~50%，具体发生率因运动类型和人群而异。其中，前交叉韧带（ACL）损伤最为常见，占比超过 60%。每年全球发生约 200 万例^[1]。女性运动员的 ACL 损伤风险是男性的 2~8 倍（主要因解剖结构、生物力学、激素水平等差异）。青少年和年轻成人（15~25 岁）发生运动性膝关节运动损伤的风险较高，尤其是在竞技体育中，职业运动员、军人、体力劳动者等群体更易受伤。传统的康复手段如物理治疗和手术干预虽然有效，但存在一些显著问题：恢复周期长（平均 6~12 个月）、依从性低（约 30% 的患者未能完成康复计划）以及复发率高（ACL 二次损伤率达到 15%）^[2]。近年来，低

强度脉冲聚焦超声波技术由于其非侵入性、精准靶向性和生物调节能力，成为运动医学领域的研究热点。FLIPUS 技术利用机械振动与温热效应，能够促进胶原合成、抑制炎症因子的释放，并加速神经肌肉功能的恢复。为现代膝关节运动损伤康复开辟了思路，FLIPUS 可以和传统和现代手法和训练相结合。FLIPUS 能够促进组织修复和抑制炎症反应与 DNS 训练形成协同作用，显著提升康复效果^[3]。

1 膝关节运动损伤的预防与康复理念

1.1 预防策略

膝关节运动损伤的原因之一就是稳定性差，特别是动态稳定性。故预防策略以动态稳定性（dynamic stability, DNS）为核心结合神经肌肉控制训练（neuromuscular control training, NMT）增强关节本体感受能力

表 1 膝关节运动损伤康复分期、目标、原则及方法

分期	时间	目标	康复原则/策略	备注
急性期	0~7 天	减轻炎症和疼痛, 防止二次损伤	1. RICE 原则	Rest 休息、Ice 冷疗、Compression 加压包扎、Elevation 抬高 CPM (持续被动运动)
			2. 适量关节被动活动	
			3. 非甾体类抗炎药 (NSAIDs) 短期使用	
亚急性期	1~6 周	恢复膝关节活动度和肌肉力量, 防止肌肉萎缩和关节不稳定	1. 渐进式抗阻训练	弹力带抗阻训练
			2. 关节活动度训练	主动与被动拉伸
			3. 低冲击运动	水中训练
慢性期	6 周及以上	恢复运动表现并预防复发	1. 敏捷性训练	侧向跳跃、变向跑
			2. 本体感受训练	平衡板训练
			3. 运动专项训练	个体运动项目

(proprioception)、肌肉反应时间和关节稳定性, 减少高危动作 (如膝内扣) 发生^[4]。例如, 单腿平衡练习、核心控制训练和多方向跳跃训练等都被证明能够降低损伤率。生物力学矫正 (biomechanical correction, BMC) 主要针对运动过程中不合理的受力模式, 例如优化落地姿势 (landing mechanics)、减少膝关节过度负荷以及改善步态模式, 以降低损伤风险并优化运动表现。^[5]Hewett 等开展的 ACL 损伤预防训练研究发现, 采用针对性的生物力学优化训练可使 ACL 损伤发生率降低 50%。专项预防训练: 针对不同运动项目特点设计预防方案。例如, 在足球和篮球运动员中, FIFA 11+ 训练方案包含跑动热身、核心训练、单腿平衡练习和跳跃落地训练, 已被证明可以降低膝关节运动损伤风险。膝关节运动损伤后的康复通常被分为急性期、亚急性期和慢性期三个阶段, 不同阶段采用不同的干预手段, 以促进组织修复并恢复运动功能^[6]。详见表 1。

1.2 FLIPUS 技术的原理与医学证据

FLIPUS 是一种非侵入性治疗手段, 通过将声波能量聚焦于特定靶组织 (穿透深度可达 8cm), 以机械应力 (mechanical stress) 振动刺激细胞外基质和细胞膜促进成纤维细胞增殖和胶原合成。温热效应 (thermal effect, <math><43^{\circ}\text{C}</math>) 局部温度略微升高, 促进微循环 (microcirculation) 和血管新生, 加速代谢废物清除, 促进组织修复。在动物模型研究中发现, FLIPUS 可促进成纤维细胞增殖和胶原沉积, 使肌腱抗拉强度提升 20%~30%。^[7]临床研究表明, FLIPUS 可显著降低炎症因子 IL-6 和 TNF- α 水平 ($p<0.05$), 有助于减少慢性炎症反应, 提高组织修复质量。镇痛效果: FLIPUS 可通过调节痛觉传导通路, 降低慢性跟腱炎患者的疼痛评分 (VAS 评分下降 4.2 分, $p<0.01$)。神经肌肉控制增强: FLIPUS 对本体感受器 (proprioceptors) 的刺激有助于提升关节位置觉, 间接提升神经肌肉控制效率提高神经肌肉协调性, 从而降低二次损伤风险^[8]。

1.3 现有结合案例

2022 年一项针对篮球运动员的随机对照试验 ($n=45$)

研究表明, 术后联合 FLIPUS 联合闭链运动训练的患者比单纯物理康复的患者恢复效果更佳, 其股四头肌肌力恢复速度较对照组快 40% ($p<0.05$)^[9]。该组运动员的单腿跳跃能力和关节稳定性评分均优于对照组, 提示 FLIPUS 可加速术后肌肉和神经功能恢复。在另一项足球运动员的研究中发现, FLIPUS 被用于训练前的预处理 (preconditioning), 结果显示: FLIPUS 预处理可减少训练中韧带微损伤的发生率 (从 28% 降至 12%)。运动员报告肌肉疲劳感降低, 并且膝关节灵活性显著提升 ($p<0.05$)。

2 理论框架构建

2.1 预防-干预-康复闭环模型

预防阶段: FLIPUS 作为“预防-康复”工具, 通过周期性刺激 (每周 2 次, 强度 0.5 W/cm^2 , 作用于韧带与肌腱组织) 促进胶原纤维排列有序化增强韧带胶原排列密度, 提升抗剪切能力。增强组织稳固性, 减少微损伤积累, 提高长期运动耐受度。NMT 结合动态稳定性训练 (Neuromuscular Training, NMT), 激活核心肌群 (如腹横肌、臀肌), 优化下肢力线; 可优化下肢力线, 减少落地时膝关节外翻力矩降低 ACL 损伤风险^[10]。急性期干预: FLIPUS (0.8 W/cm^2 , 10 分钟/次) 联合脉冲式冷疗 (20 分钟/次), 靶向抑制炎症因子 (如 IL-6、TNF- α) 释放, 减少滑膜炎反应, 降低疼痛信号传递, 促进组织微循环; 同时避免传统冰敷导致的肌肉僵硬与关节活动受限。缓解急性期疼痛和肿胀; 维持膝关节局部组织的功能性, 防止废用性萎缩。康复阶段: 在亚急性期, FLIPUS (1.0 W/cm^2 , 15 分钟/次) 刺激促进成纤维细胞和成骨细胞活性, 加速韧带和肌腱愈合; 联合渐进式负荷训练 (Progressive Resistance Training, PRT), 恢复膝关节屈伸功能, 防止粘连形成。慢性期则通过 FLIPUS (0.8 W/cm^2) 调控 I/III 型胶原比例, 增强组织弹性, 减少瘢痕化; 结合本体感受训练 (Proprioceptive Training)^[11], 改善关节稳定性, 降低复发风险; 强化敏捷性训练 (Agility Training), 提升运动员专项能力。促进膝关节软组织的再生修复; 提高组织的抗拉强度和弹性, 减少二次损伤风险; 恢复神经肌肉

控制，提高运动员再次受伤风险防范能力。具体详见表 2。

2.2 技术协同机制

FLIPUS 的作用虽可在短期内改善组织状态，但要实现长期的运动功能恢复和损伤预防，还需要动态训练的协同作用。动态训练不仅可进一步优化生物力学结构，还能通过神经肌肉适应机制，延长 FLIPUS 的生物效应持续时间。结合神经肌肉控制训练(Neuromuscular Training, NMT)，提高膝关节稳定性，减少异常力矩（如膝外翻力矩）^[12]；训练可促进本体感受器的适应，提高运动时的姿势控制能力，降低不良运动模式带来的应力损伤。研究表明，经过 8 周的 NMT 训练，ACL 损伤风险可降低 50%以上。闭链抗阻训练（Closed Kinetic Chain, CKC）增强股四头肌-腘绳肌的肌力平衡，提高关节稳定性^[13]；结合生物力学矫正（Biomechanical Correction, BMC），优化跑跳落地模式，减少膝关节剪切应力^[14]；研究发现，在 FLIPUS 基础上进行动态训练，肌腱抗拉强度可增加 30%以上^[15]。运动训练可加速 FLIPUS 所促进的新生组织的功能化改建，提高其力学性能；增强肌腱-骨结合强度，使运动员恢复后的组织不易发生再次损伤；结合敏捷性训练（Agility Training），强化运动再适应能力，确保回归高强度训练时的运动安全性^[16]。详见表 3。

3 研究方法

本研究采用质性研究方法，旨在深入探讨 FLIPUS 技术在膝关节损伤防治中的应用现状、整合挑战及优化策略。通过半结构化访谈收集专业人士的观点，并采用主题分析法进行数据处理，以提炼出关键研究主题。研究对象包括 12 名相关领域的专业人士，其中：6 名运动医学医师（临床经验 >7 年，硕士 2 人，博士 3 人，副主任医师以上职称 4 人）；4 名物理治疗师（平均工作年限 7.8 年，本科 2 人，硕士 2 人，中级以上职称 4 人）；2 名 FLIPUS 工程师（负责设备研发与优化）。采用半结构化访谈，确保访谈内容既涵盖研究主题，又允许受访者自由表达观点。每位受访者访谈时长约 45~60 分钟，访谈问题围绕以下核心内容展开：（1）FLIPUS 在临床实践中的应用场景（如用于膝关节损伤的预防、术后康复等）；（2）在整合 FLIPUS 与传统康复手段时遇到的主要挑战（如技术壁垒、患者依从性、设备可及性等）；（3）对未来优化 FLIPUS 应用的建议（如个性化治疗方案、结合智能康复设备等）。所有访谈内容均经专业转录员整理，并采用 NVivo 12 进行文本分析。本研究采用 Braun & Clarke(2006) 提出的主题分析法，通过系统化编码提取核心信息，团队成员复核编码一致性，计算 Kappa 一致性系数，最终 Kappa=0.86（高一致性）。详见表 4。

表 2 预防-干预-康复闭环模型的 FLIPUS 应用策略

阶段	主要目标	FLIPUS 参数	联合训练方法	预期效果
预防阶段	增强膝关节组织抗剪能力，优化生物力学	0.5W/cm ² ，2 次/w	NMT（核心激活、单腿平衡等）	改善胶原排列，降低损伤风险
急性期干预	抑制炎症，缓解疼痛	0.8W/cm ² ，10 分钟/次	脉冲式冷疗（20 分钟/次）	减少炎症反应，避免关节僵硬
亚急性期	促进肌腱-骨界面愈合	1.0W/cm ² ，15 分钟/次	渐进式负荷训练（PRT）	加速组织修复，恢复膝关节功能
慢性期	组织弹性重建，提高运动能力	0.8W/cm ² ，10 分钟/次	本体感受+敏捷性训练	优化组织结构，减少复发风险

表 3 FLIPUS 与传统训练的协同模式

技术手段	主要作用	具体机制	协同效应
FLIPUS	提高局部血流，优化细胞代谢	促进 NO 释放，增加微循环；改善 ATP 合成	提供组织修复所需的生理基础，减少炎症反应
FLIPUS	加速组织修复，提高胶原质量	促进成纤维细胞增殖，优化 I / III 型胶原比例	提高韧带和肌腱弹性，减少瘢痕化
NMT	增强神经肌肉控制能力	促进本体感受器适应，提高动态稳定性	降低膝关节异常力矩，减少损伤风险
CKC 训练	强化股四头肌-腘绳肌平衡	增强肌肉协同发力，优化关节受力方式	降低关节剪切应力，提高运动表现
敏捷性训练	促进运动再适应，提高反应能力	强化运动控制，提高爆发力	防止复发，确保高强度运动安全性

表 4 核心主题与子主题提取结果

核心主题	子主题
FLIPUS 在临床康复中的应用	术后康复中的作用（减少炎症、促进修复）
	运动损伤预防（增强组织耐受性）
	结合生物力学矫正优化运动模式
整合过程中遇到的障碍	设备获取与成本问题
	医护人员对 FLIPUS 的技术接受度
	运动员或患者的依从性挑战
优化 FLIPUS 应用的策略	结合智能康复设备提升个性化治疗
	发展标准化治疗指南
	增强跨学科协作（医生-物理治疗师-工程师）

4 伦理与效度

受访者签署知情同意书,数据匿名化处理。通过三角验证(访谈、文献、案例对比)提升研究效率。

5 局限与展望

技术标准化缺失:不同设备的频率范围(1~3MHz^[17])和能量输出差异导致疗效不稳定。”设备成本过高,每次收费 17 元人民币左右,多数基层医疗机构难以接受。样本局限于专业人士,缺乏患者视角;未来需开展多中心 RCT 验证疗效,研究和临床实践需进一步探讨如何优化 FLIPUS 技术的应用,以实现最佳的康复效果。

6 结论

膝关节运动损伤的发生率高,影响因素复杂,尤其在竞技体育和高强度运动中风险更大。FLIPUS 技术能够靶向促进组织修复,抑制炎症反应,改善神经肌肉功能,并与传统的动态稳定性训练和阶段性康复目标形成协同作用。FLIPUS 技术为膝关节运动损伤的全程管理提供了创新工具,但其临床应用需解决参数标准化与成本问题。通过跨学科合作与技术迭代,FLIPUS 有望成为运动医学领域的革命性干预手段。二者结合,不仅能够加速损伤后康复进程,减少康复周期。还能有效降低复发风险,提高运动员的长期运动能力。这种技术协同模式,为膝关节损伤的预防、治疗与康复提供了更全面、精准和高效的解决方案。

[参考文献]

- [1]陈坤,李纪江,徐佳欣,等.中国高水平棒球运动员运动损伤情况调查分析[J].四川体育科学,2025,44(1):45-50.
- [2]Hou T,Xu M,Zhang Z.Transcutaneous electrical stimulation of the stellate ganglion:A case report on its application in treating carotid sinus syndrome[J].Medicine,2024,103(36).
- [3]侯太甫,殷恒斌,许梦雅,等.低强度脉冲聚焦超声联合经皮神经电刺激治疗膝骨性关节炎的疗效[J].中华物理医学与康复杂志,2023,45(3):251-254.
- [4]Larwa J,Stoy C,Chafetz RS,Boniello M,Franklin C.Stiff Landings,Core Stability,and Dynamic Knee Valgus:A Systematic Review on Documented Anterior Cruciate Ligament Ruptures in Male and Female Athletes[J].Int J Environ Res Public Health,2021,18(7):3826.
- [5]Sadeghi H,Jehu DA,Daneshjoo A,Shakoor E,Razeghi M,Amani A,Hakim MN,Yusof A.Effects of 8 Weeks of Balance Training,Virtual Reality Training,and Combined Exercise on Lower Limb Muscle Strength,Balance,and Functional Mobility Among Older Men:A Randomized Controlled Trial[J].Sports Health,2021,13(6):606-612.
- [6]赵丹,唐瑶,谈晓梅,等.渐进式抗阻训练结合精细化护

理在老年 COPD 合并肌少症患者中的应用[J].中西医结合护理(中英文),2023,9(2):33-36.

- [7]Jia L,Li D,Wei X,Chen J,Zuo D,Chen W.Efficacy and safety of focused low-intensity pulsed ultrasound versus pulsed shortwave diathermy on knee osteoarthritis:a randomized comparative trial[J].Sci Rep,2022,12(1):12792.
- [8]Riis TS,Feldman DA,Losser AJ,Okifuji A,Kubanek J.Noninvasive targeted modulation of pain circuits with focused ultrasonic waves[J].Pain,2024,165(12):2829-2839.
- [9]Benjaminse A,Otten B,Gokeler A,Diercks RL,Lemink KAPM.Motor learning strategies in basketball players and its implications for ACL injury prevention:a randomized controlled trial[J].Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc,2017,25(8):2365-2376.
- [10]侯太甫,李清源,李博渊.中医经筋膜手法在膝关节运动损伤中的康复作用[A].2023 年首届国际体育科学大会论文集[C].广州:广东省体能协会,2023.
- [11]De Vasconcelos GS,Cini A,Lima CS.Proprioceptive Training on Dynamic Neuromuscular Control in Fencers:A Clinical Trial[J].J Sport Rehabil,2020,30(2):220-225.
- [12]Arumugam A,Björklund M,Mikko S,Häger CK.Effects of neuromuscular training on knee proprioception in individuals with anterior cruciate ligament injury:a systematic review and GRADE evidence synthesis[J].BMJ Open,2021,11(5).
- [13]李丹阳,崔德刚,汪俊伟.抗阻训练运动模式研究[J].河北体育学院学报,2012,26(1):52-56.
- [14]刘勇.基于人体下肢运动生物力学分析的智能康辅设备研究[D].长春:吉林大学,2024.
- [15]王红.膝关节前交叉韧带重建术股骨足印区重建及胫骨隧道调整技术的生物力学及临床研究[D].兰州:兰州大学,2024.
- [16]李赓,李静施,曹玉萍.军体融合背景下竞技体育体能训练方法在军人体能训练中的应用[J].中国体育科技,2019,55(8):38-45.
- [17]富丽萍,袁立霞,王杰,等.近十年低强度脉冲超声在肌骨疾病治疗中的应用进展[J].南方医科大学学报,2025,45(3):661-668.
- 作者简介:侯太甫(1978—),男,河南驻马店人,韩国东新大学运动处方科学系,博士在读,主要研究方向神经康复,运动损伤预防与康复,运动处方,小儿自闭症;*通讯作者:ji-hoon Cho(1978—),韩国首尔,教授,博士生导师,东新大学运动医系主任,研究方向:运动损伤评估与康复。