

低强度脉冲超声在肩袖损伤中促进腱骨愈合的研究进展

陈俊宏^{1,2}, 王志强^{1,2*}

¹西南医科大学附属医院骨与关节外科, 四川 泸州

²遂宁市中心医院骨科, 四川 遂宁

收稿日期: 2026年3月14日; 录用日期: 2026年4月8日; 发布日期: 2026年4月20日

摘要

肩袖损伤是临床中最常见的肩关节疾病之一, 可引起肩关节持续性疼痛及活动受限, 严重影响了患者的生活质量。根据损伤严重程度, 治疗方法可分为保守治疗和手术干预。低强度脉冲超声(low-intensity pulsed ultrasound, LIPUS)作为一种非侵入性物理治疗手段, 在促进软组织修复方面展现出潜力。本文旨在综述LIPUS在肩袖损伤中促进腱骨愈合治疗的基础研究、临床应用现状及作用机制, 以期为临床治疗提供参考。

关键词

低强度脉冲超声, 肩袖损伤, 腱骨愈合, 综述

Research Progress on Low-Intensity Pulsed Ultrasound in Promoting Tendon-to-Bone Healing for Rotator Cuff Injuries

Junhong Chen^{1,2}, Zhiqiang Wang^{1,2*}

¹Department of Orthopedics and Joint Surgery, The Affiliated Hospital of Southwest Medical University, Luzhou Sichuan

²Department of Orthopedics, Suining Central Hospital, Suining Sichuan

Received: March 14, 2026; accepted: April 8, 2026; published: April 20, 2026

Abstract

Rotator cuff injury is one of the most common shoulder disorders in clinical practice, often leading

*通讯作者。

文章引用: 陈俊宏, 王志强. 低强度脉冲超声在肩袖损伤中促进腱骨愈合的研究进展[J]. 临床个性化医学, 2026, 5(2): 595-601. DOI: 10.12677/jcpm.2026.52161

to persistent shoulder pain and functional impairment, which significantly affects patients' quality of life. Treatment options, depending on the severity of the injury, range from conservative management to surgical intervention. Low-intensity pulsed ultrasound (LIPUS), a non-invasive physical therapy modality, has shown promise in promoting soft tissue repair. This article aims to review the fundamental research, current clinical applications, and underlying mechanisms of LIPUS in enhancing tendon-to-bone healing for rotator cuff injuries, with the goal of providing a reference for clinical practice.

Keywords

Low-Intensity Pulsed Ultrasound, Rotator Cuff Injury, Tendon-to-Bone Healing, Review

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

肩袖损伤在骨科与运动医学领域尤为常见,通常由肩袖的退行性变化或外力作用导致肌腱撕裂。其发病率在肩关节疾患中占比达 17%~41% [1]。主要症状为慢性肩关节疼痛,功能受限,甚至肩周肌肉萎缩,进而严重影响患者的日常生活活动。目前治疗方法包括手术修复、口服非甾体抗炎药、物理因子治疗、超声下注射生物制剂等,但尚无切实有效的治疗手段[2]。手术修补虽能恢复解剖结构,但术后腱-骨界面愈合常面临愈合延迟、再撕裂风险高等挑战。理想的愈合需经历炎症期、修复期和重塑期,其中修复早期细胞活性与生物力学强度至关重要。LIPUS 是一种成熟、广泛应用且获美国食品药品监督管理局(Food and the Drug Administration, FDA)批准的干预措施,用于促进骨折和不连合的骨骼愈合[3]。LIPUS 作为一种经典的非侵入性生物物理治疗手段,通过发射低强度、脉冲式的高频声压波,穿透皮下软组织并作用于细胞层面,从而发挥生物学效应。近年来,该技术已逐步应用于肌腱损伤、骨折愈合等肌肉骨骼系统疾病的辅助治疗中[4]。它将超声能量传递到受伤部位,刺激组织细胞增殖和血管生成,从而促进组织再生和修复[5]。此外,LIPUS 被认为通过调节疼痛传导通路和减少炎症反应,有效缓解疼痛[6]。本文系统回顾 LIPUS 在肩袖损伤修复中的作用证据与研究进展,着重探讨 LIPUS 治疗肩袖损伤与促进肩袖损伤修复术后康复的有效应用形式,以期为后续临床应用提供参考。

2. LIPUS 的作用机制

低强度脉冲超声频率一般为 1~3 MHz,强度小于 100 mW/cm² [7]。与其他高强度超声相比,低强度脉冲超声降低了热效应对机体带来的危害,将高频声压波和机械应力转变为生物学信号,进一步发挥其各种生物学效应[8]。LIPUS 产生的周期性机械声波能够穿透组织和细胞,引发内部的振动与碰撞[9]。这种微机械刺激可促进细胞间相互作用,不仅有助于缩短愈合时间,还能显著提升组织的生物力学性能。因此,LIPUS 在组织再生、骨愈合、抑制炎症反应及神经调控等临床应用中展现出广泛潜力[10]。LIPUS 主要通过空化效应和机械传导效应发挥作用[11]。超声的空化效应是指 LIPUS 释放的超声波在组织或液体中形成微气核空化泡,这些微气核空化泡能够填充组织或液体间隙,从而产生微气泡动力学变化[12]。LIPUS 的机械效应主要体现在声波和介质的相互作用。周期性声波在目标组织中引起振动和碰撞,导致速度、加速度、声压和声强等力学量变化[13]。机械效应能够将物理刺激转化为细胞所需的化学活动,影响扩散速率、膜通透性、蛋白质合成和细胞分泌过程,例如通过拉伸激活离子通道或机械敏感的黏附结

构[14]。这些变化促进流体流动, 改善营养物质、氧气和信号分子的循环与重新分配, 进而调节局部微环境中生物应激和细胞因子的表达[14]。其通过改变细胞膜的通透性使膜上离子通道发生变化, 细胞膜的内外跨膜电位降低, 钙离子内流, 细胞内钙离子浓度升高, 激活细胞内 PDEF, 成骨细胞从静止状态的 G0/G1 期进入 S 期, 开始有丝分裂[15] [16]。近年来在 LIPUS 已被证实可以加速新鲜骨折愈合, 通过加强软骨干成骨、成骨细胞和纤维母细胞的增殖来治疗骨折延迟愈合及骨不连[17] [18]。

3. LIPUS 促进腱骨愈合的作用机制

3.1. 腱骨界面

腱骨界面是由肌腱、未矿化纤维软骨、矿化纤维软骨及骨组织共同构成的四层结构, 其中未矿化与矿化纤维软骨层共同形成具有特征性过渡功能的纤维软骨带[19]。在两层纤维软骨之间可见一条连续的组织学分界线, 即潮线(tidemark)。这种层次化结构在肌肉收缩过程中能够有效缓冲并传递由肌腱至骨骼的力学负荷, 避免局部应力集中, 从而降低损伤风险[20]。

各层结构在细胞类型与细胞外基质组成上存在显著差异, 承担着不同的力学功能[21]。肌腱层以成纤维细胞为主, 其细胞外基质富含高度有序排列的I型胶原, 沿肌腱长轴分布, 主要承担沿肌腱方向的拉伸负荷。未矿化纤维软骨层主要由纤维软骨细胞构成, 基质中富含II型与III型胶原, 具有良好的抗压与能量耗散能力。矿化纤维软骨层则以肥大样纤维软骨细胞为主, 基质中除II型胶原外尚出现X型胶原, 该层通过矿化过程实现从软组织向硬组织的刚度过渡。骨组织层包含破骨细胞、成骨细胞及骨细胞, 其细胞外基质以矿化的I型胶原为主, 提供坚硬的锚定基础[21] [22]。纤维软骨层的存在使肌腱与骨骼之间形成力学缓冲带, 有效吸收和分散负荷, 减少界面处的机械损伤。

然而, 腱骨结合部血供匮乏, 再生潜能低下, 严重损伤后其精细的层次化结构与生物学特性难以实现完全再生[23]。损伤修复过程中, 愈合区域往往形成以III型胶原为主的瘢痕组织, 无法重建原有的梯度结构及生物力学性能, 导致应力传递障碍及局部应力集中, 显著增加再撕裂风险[24]。鉴于该区域特殊的结构功能特点及其有限的自我修复能力, 探索有效的促进腱骨愈合策略具有重要的临床意义与研究价值。

3.2. 促进成骨与软骨形成

腱骨界面的功能性愈合依赖于纤维软骨样结构的再生, 该过程涉及成骨与软骨形成两个关键过程。LIPUS 能够上调骨髓间充质干细胞(Mesenchymal Stem Cells, MSCs)中成骨相关基因的表达, 包括 Runx2、骨形态发生蛋白-2 (Bone Morphogenetic Protein 2, BMP-2)及骨钙素(Osteocalcin, OCN) [25], 从而诱导其向成骨细胞定向分化; 同时, LIPUS 还可抑制破骨细胞的活性, 调控骨吸收过程。低强度脉冲超声对间充质干细胞的调控作用可促进 II 型胶原蛋白的表达, 从而诱导间充质干细胞定向分化, 加速肌腱-骨骼愈合进程[26]。此外, Korstjens 等[27]的研究进一步证实, LIPUS 可通过诱导成骨细胞分化并促进钙化基质沉积, 增强软骨干成骨过程, 从而有效促进腱骨界面的愈合。Hu 等[28]在兔髌骨部分切除模型中发现, LIPUS 处理可显著增加新骨形成面积与骨矿物质含量, 促进髌骨-髌腱结合处的结构修复, 提示 LIPUS 具有促进骨改建与组织成熟的潜力。Lovric 等[29]首次将 LIPUS 应用于绵羊肩袖损伤模型, 结果显示, 与对照组相比, LIPUS 干预组骨矿化密度显著提高, 同时 RUNX2 及骨形态发生蛋白信号通路下游调控因子 Smad 的蛋白表达水平亦显著上调。Lai 等[30]进一步指出, LIPUS 处理的实验动物在术后早期腱骨界面即可形成类似 Sharpey 纤维的连续性结构, 胶原纤维排列亦更为有序。Khanna 等[31]在兔跟腱腱骨愈合模型中也观察到相似结果, LIPUS 组在修复早期表现出更快的胶原纤维重组和软骨形成趋势, 生物力学测试结果显示, 其拉伸强度与弹性模量均显著优于对照组, 进一步验证了 LIPUS 在促进腱骨界面结构与功能恢复方面的积极作用。

3.3. 调控炎症反应与巨噬细胞极化

炎症反应是腱骨愈合的起始阶段, 然而, 过度或持续的炎症状态则可能诱发纤维化愈合, 最终形成瘢痕组织, 损害界面的结构与功能。近年来研究表明, LIPUS 在调控炎症反应方面具有潜在作用。巨噬细胞作为炎症与组织修复的核心调控细胞, 其功能表型的动态转换在愈合进程中发挥关键作用。M1 型巨噬细胞主要存在于损伤早期, 介导炎症反应并参与坏死组织清除; 而 M2 型巨噬细胞则在修复后期主导组织重塑与炎症消退, 二者的有序转换是促进腱骨界面功能性愈合的重要基础[32][33]。LIPUS 可有效调控巨噬细胞的极化方向, 促进其由促炎的 M1 表型向抗炎并促进修复的 M2 表型转变, 从而有助于缩短炎症期、加速组织进入增殖与重塑阶段, 最终改善腱骨界面的愈合质量。Xu 等[34]在大鼠肩袖撕裂模型中观察到, LIPUS 能调控炎症和巨噬细胞的极化, LIPUS 能够加速 M1 型巨噬细胞向 M2 型的巨噬细胞极化。这一作用有助于缩短炎症期、促进组织进入增殖和重塑阶段, 从而改善腱骨界面的愈合质量。巨噬细胞的极化可能是 LIPUS 治疗肩袖损伤修复术后腱骨界面愈合的潜在机制。

3.4. 促进血管生成与营养供应

充分的血液供应是组织愈合的基础。腱骨界面区域本身血供相对匮乏, 这也是术后愈合困难的重要原因之一[23]。多项动物实验指出, LIPUS 能够改善血管生成。在采用 LIPUS 治疗髌骨-髌腱连接处的研究中, 组织学结果显示, 软骨细胞和成骨细胞中血管内皮生长因子(Vascular Endothelial Growth Factor, VEGF)的表达水平显著高于对照组[35]。这也说明 LIPUS 可促进血管内皮生长因子的表达, 诱导新生血管形成。改善局部血供不仅有利于营养物质的输送, 还可带来更多的干细胞和修复细胞, 从而促进腱骨界面的重建。同时, 在 Wang[36]的研究中也提到 LIPUS 显著提高了人类成骨细胞中一氧化氮(NO)和缺氧诱导因子-1 α 介导的 VEGF-A 表达。

3.5. 调控细胞外基质代谢

腱骨界面的力学性能取决于细胞外基质的组成和排列。LIPUS 可调控基质金属蛋白酶(MMPs)及其抑制剂(TIMPs)的平衡, 减少基质过度降解。同时, LIPUS 可促进I型胶原、III型胶原和蛋白多糖的合成, 改善胶原纤维的排列方向, 从而提高修复组织的力学强度。

4. LIPUS 在肩袖损伤治疗中的临床应用

尽管基础研究证据充分, 但是 LIPUS 在肩袖损伤修复中的临床研究相对较少, 且结果存在一定异质性。LIPUS 的治疗效应与其物理学参数密切相关。在临床研究中, LIPUS 的核心参数包括: 频率通常为 1~3 MHz, 强度为 30~100 mW/cm² (空间平均时间平均强度, SATA), 脉冲重复频率 100 Hz~1 kHz, 占空比 20%~50% [37]。频率越低, 组织穿透深度越大; 强度决定声能输出, 占空比则反映能量输出的时间分布。参数的选择直接影响 LIPUS 的生物效应, 但目前尚缺乏针对肩袖损伤的统一参数标准。早期的临床研究主要关注 LIPUS 对肩袖肌腱炎或部分撕裂的治疗效果。近年来的研究开始将 LIPUS 应用于术后康复。侯太甫等[38]采用筋膜手法联合低强度脉冲聚焦超声治疗肩袖损伤, 结果显示联合治疗组在治疗 2、4、6、8 周后的视觉模拟评分(VAS)和西安大略肩袖疾病评分指数(WORC)均显著优于单纯 LIPUS 治疗组, 治疗 8 周后超声影像显示联合治疗组冈上肌肌腱厚度恢复、回声分级改善及钙化灶缩小的比例均显著优于对照组。这一研究提示 LIPUS 联合其他康复手段可能获得更好的临床疗效。

术后康复是决定肩袖修复远期疗效的关键环节。LIPUS 在术后康复中的应用研究相对更为系统。Xue 等[39]发表的系统评价方案系统梳理了 LIPUS 在肩袖撕裂术后康复中的研究设计。该方案拟纳入随机对照试验, 主要结局指标包括: 通过 MRI 或超声评估的再撕裂率、疼痛视觉模拟评分(VAS)、肩关节活动

度(ROM)、Constant-Murley 评分(CMS)和美国肩肘外科医师协会评分(ASES)。现有临床研究的荟萃分析尚在进行中。初步证据表明, 术后早期应用 LIPUS 可能有助于减轻疼痛、促进早期功能恢复。其理论依据在于: 术后早期是肌腱-骨界面愈合的关键时期, LIPUS 的机械刺激可促进纤维软骨再生, 提高愈合质量, 从而降低远期再撕裂风险[40]。动物实验证实, 术后 2~4 周是 LIPUS 干预的“机会窗口”, 此时治疗可显著改善生物力学特性[37]。

截至目前, LIPUS 在肩袖损伤治疗中的临床研究呈现以下特点: ① 研究数量有限, 多数为小样本探索性研究; ② 干预参数异质性大, 频率、强度、治疗时长缺乏统一标准; ③ 结局指标以功能评分和疼痛评估为主, 影像学愈合质量作为客观指标的研究相对较少; ④ 随访时间普遍较短, 远期疗效证据不足。这种证据现状提示, LIPUS 在肩袖损伤中的应用仍处于探索阶段。系统评价的完成将为临床决策提供更可靠的证据基础。

5. 局限性

尽管低强度脉冲超声在促进肩袖损伤腱骨愈合方面展现出潜在的应用价值, 但目前相关研究仍存在一定局限性。首先, 现有研究多基于体外实验开展, 其条件与复杂的体内微环境存在差异, 且不同研究中的参数设置尚缺乏统一标准, 制约了结果的可比性与可重复性; 同时, 关于其长期疗效与安全性的系统评估仍有待深入。其次, 从动物实验向临床应用的转化尚需大规模、多中心的随机对照试验进一步验证其有效性与可行性。此外, 针对不同损伤类型、损伤部位及患者个体差异, 如何制定个性化的治疗参数方案仍是亟待解决的关键问题。最后, LIPUS 对干细胞命运及免疫细胞行为的精准调控机制尚不完全清楚, 相关基础研究仍需进一步深化, 以期优化治疗策略提供理论依据。

6. 小结

低强度脉冲超声作为一种无创、安全的物理治疗方法, 在促进肩袖损伤腱骨愈合方面具有重要的应用潜力。基础研究已证实 LIPUS 可通过促进成骨和软骨形成、调控炎症反应、促进血管生成、调节细胞外基质代谢等多种机制改善腱骨界面的愈合质量。初步的临床研究也显示 LIPUS 有助于缓解疼痛、改善功能。然而, 从实验室到临床的转化仍面临诸多挑战, 需要更深入的基础研究阐明其作用机制, 更高质量的临床研究验证其疗效, 并在此基础上建立标准化的治疗策略。随着生物材料和再生医学的发展, LIPUS 与其他治疗手段的联合应用将为解决肩袖损伤术后愈合难题提供新的思路。未来研究方向包括: ① 开展多中心、大样本随机对照试验, 用来明确 LIPUS 的临床疗效; ② 探索最佳治疗参数, 建立基于循证的参数标准; ③ 结合新兴技术, 如 LIPUS 联合干细胞/外泌体治疗, 发挥协同效应[40]; ④ 应用功能性 MRI、超声弹性成像等先进影像技术, 客观评估肌腱愈合质量; ⑤ 开展机制导向的临床转化研究, 将基础研究发现转化为个体化治疗策略。

参考文献

- [1] Zong, L.Z., Duan, M.M., Yuan, W.W., *et al.* (2020) Efficacy of Shoulder Arthroscopic Surgery for the Treatment of Rotator Cuff Injury: A Protocol of Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicine*, **99**, e20591. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000020591>
- [2] Dang, A. and Davies, M. (2018) Rotator Cuff Disease: Treatment Options and Considerations. *Sports Medicine and Arthroscopy Review*, **26**, 129-133. <https://doi.org/10.1097/jsa.0000000000000207>
- [3] Angle, S.R., Sena, K., Sumner, D.R. and Virdi, A.S. (2011) Osteogenic Differentiation of Rat Bone Marrow Stromal Cells by Various Intensities of Low-Intensity Pulsed Ultrasound. *Ultrasonics*, **51**, 281-288. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.09.004>
- [4] Qin, L., Lu, H., Fok, P., Cheung, W., Zheng, Y., Lee, K., *et al.* (2006) Low-Intensity Pulsed Ultrasound Accelerates Osteogenesis at Bone-Tendon Healing Junction. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **32**, 1905-1911.

- <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2006.06.028>
- [5] Jiang, X., Savchenko, O., Li, Y., Qi, S., Yang, T., Zhang, W., *et al.* (2019) A Review of Low-Intensity Pulsed Ultrasound for Therapeutic Applications. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **66**, 2704-2718. <https://doi.org/10.1109/tbme.2018.2889669>
- [6] Erden, T., Toker, B., Cengiz, O., Ince, B., Asci, S. and Toprak, A. (2020) Outcome of Corticosteroid Injections, Extracorporeal Shock Wave Therapy, and Radiofrequency Thermal Lesioning for Chronic Plantar Fasciitis. *Foot & Ankle International*, **42**, 69-75. <https://doi.org/10.1177/1071100720949469>
- [7] Yang, T., Liang, C., Chen, L., Li, J. and Geng, W. (2020) Low-Intensity Pulsed Ultrasound Alleviates Hypoxia-Induced Chondrocyte Damage in Temporomandibular Disorders by Modulating the Hypoxia-Inducible Factor Pathway. *Frontiers in Pharmacology*, **11**, Article No. 689. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00689>
- [8] Fu, S.C., Shum, W.T., Hung, L.K., Wong, M.W., Qin, L. and Chan, K. (2008) Low-Intensity Pulsed Ultrasound on Tendon Healing: A Study of the Effect of Treatment Duration and Treatment Initiation. *The American Journal of Sports Medicine*, **36**, 1742-1749. <https://doi.org/10.1177/0363546508318193>
- [9] Doll, J., Moghaddam, A., Daniel, V., Biglari, B., Heller, R., Schmidmaier, G., *et al.* (2020) LIPUS vs. Reaming in Non-Union Treatment: Cytokine Expression Course as a Tool for Evaluation and Differentiation of Non-Union Therapy. *Journal of Orthopaedics*, **17**, 208-214. <https://doi.org/10.1016/j.jor.2019.08.018>
- [10] Yao, H., Zhang, L., Yan, S., He, Y., Zhu, H., Li, Y., *et al.* (2022) Low-Intensity Pulsed Ultrasound/Nanomechanical Force Generators Enhance Osteogenesis of BMSCs through Microfilaments and TRPM7. *Journal of Nanobiotechnology*, **20**, Article No. 378. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01587-3>
- [11] Wang, J., Lai, B., Nanayakkara, G., Yang, Q., Sun, Y., Lu, Y., *et al.* (2019) Experimental Data-Mining Analyses Reveal New Roles of Low-Intensity Ultrasound in Differentiating Cell Death Regulatome in Cancer and Non-Cancer Cells via Potential Modulation of Chromatin Long-Range Interactions. *Frontiers in Oncology*, **9**, Article No. 600. <https://doi.org/10.3389/fonc.2019.00600>
- [12] 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.
- [13] Wang, Y., Li, J., Qiu, Y., Hu, B., Chen, J., Fu, T., *et al.* (2018) Low-Intensity Pulsed Ultrasound Promotes Periodontal Ligament Stem Cell Migration through TWIST1-Mediated SDF-1 Expression. *International Journal of Molecular Medicine*, **42**, 322-330. <https://doi.org/10.3892/ijmm.2018.3592>
- [14] Egge, N., Arneaud, S.L.B., Fonseca, R.S., Zuurbier, K.R., McClendon, J. and Douglas, P.M. (2021) Trauma-Induced Regulation of VHP-1 Modulates the Cellular Response to Mechanical Stress. *Nature Communications*, **12**, Article No. 1484. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21611-8>
- [15] Shi, M.F., Liu, B.Z., Liu, G.H., Wang, P., Yang, M., Li, Y., *et al.* (2016) Low Intensity-Pulsed Ultrasound Induced Apoptosis of Human Hepatocellular Carcinoma Cells *In Vitro*. *Ultrasonics*, **64**, 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.07.011>
- [16] Urita, A., Iwasaki, N., Kondo, M., Nishio, Y., Kamishima, T. and Minami, A. (2013) Effect of Low-Intensity Pulsed Ultrasound on Bone Healing at Osteotomy Sites after Forearm Bone Shortening. *The Journal of Hand Surgery*, **38**, 498-503. <https://doi.org/10.1016/j.jhssa.2012.11.032>
- [17] Bernal, A., Pérez, L.M., De Lucas, B., Martín, N.S., Kadow-Romacker, A., Plaza, G., *et al.* (2015) Low-Intensity Pulsed Ultrasound Improves the Functional Properties of Cardiac Mesoangioblasts. *Stem Cell Reviews and Reports*, **11**, 852-865. <https://doi.org/10.1007/s12015-015-9608-6>
- [18] Biglari, B., Yildirim, T.M., Swing, T., Bruckner, T., Danner, W. and Moghaddam, A. (2016) Failed Treatment of Long Bone Nonunions with Low Intensity Pulsed Ultrasound. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **136**, 1121-1134. <https://doi.org/10.1007/s00402-016-2501-1>
- [19] 吕晶同, 施又兴, 王云蛟, 等. 腱-骨结合部结构界面修复的研究进展[J]. 中国修复重建外科杂志, 2019, 33(9): 1064-1070.
- [20] Lu, H.H. and Thomopoulos, S. (2013) Functional Attachment of Soft Tissues to Bone: Development, Healing, and Tissue Engineering. *Annual Review of Biomedical Engineering*, **15**, 201-226. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071910-124656>
- [21] Liu, Y., Thomopoulos, S., Chen, C., Birman, V., Buehler, M.J. and Genin, G.M. (2014) Modelling the Mechanics of Partially Mineralized Collagen Fibrils, Fibres and Tissue. *Journal of the Royal Society Interface*, **11**, Article ID: 20130835. <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.0835>
- [22] Rossetti, L., Kuntz, L.A., Kunold, E., Schock, J., Müller, K.W., Grabmayr, H., *et al.* (2017) The Microstructure and Micromechanics of the Tendon-Bone Insertion. *Nature Materials*, **16**, 664-670. <https://doi.org/10.1038/nmat4863>
- [23] Lui, P., Zhang, P., Chan, K. and Qin, L. (2010) Biology and Augmentation of Tendon-Bone Insertion Repair. *Journal of*

- Orthopaedic Surgery and Research*, 5, Article No. 59. <https://doi.org/10.1186/1749-799x-5-59>
- [24] Kovacevic, D., Fox, A.J., Bedi, A., Ying, L., Deng, X., Warren, R.F., *et al.* (2011) Calcium-Phosphate Matrix with or without TGF- β 3 Improves Tendon-Bone Healing after Rotator Cuff Repair. *The American Journal of Sports Medicine*, 39, 811-819. <https://doi.org/10.1177/0363546511399378>
- [25] Berber, R., Aziz, S., Simkins, J., Lin, S.S. and Mangwani, J. (2020) Low Intensity Pulsed Ultrasound Therapy (LIPUS): A Review of Evidence and Potential Applications in Diabetics. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 11, S500-S505. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2020.03.009>
- [26] Lee, H.J., Choi, B.H., Min, B., Son, Y.S. and Park, S.R. (2006) Low-Intensity Ultrasound Stimulation Enhances Chondrogenic Differentiation in Alginate Culture of Mesenchymal Stem Cells. *Artificial Organs*, 30, 707-715. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2006.00288.x>
- [27] Korstjens, C.M., Nolte, P.A., Burger, E.H., *et al.* (2004) Stimulation of Bone Cell Differentiation by Low-Intensity Ultrasound? A Histomorphometric *in Vitro* Study. *Journal of Orthopaedic Research*, 22, 495-500. [https://doi.org/10.1016/s0736-0266\(03\)00239-0](https://doi.org/10.1016/s0736-0266(03)00239-0)
- [28] Hu, J., Qu, J., Xu, D., Zhang, T., Qin, L. and Lu, H. (2014) Combined Application of Low-Intensity Pulsed Ultrasound and Functional Electrical Stimulation Accelerates Bone-Tendon Junction Healing in a Rabbit Model. *Journal of Orthopaedic Research*, 32, 204-209. <https://doi.org/10.1002/jor.22505>
- [29] Lovric, V., Ledger, M., Goldberg, J., Harper, W., Bertollo, N., Pelletier, M.H., *et al.* (2012) The Effects of Low-Intensity Pulsed Ultrasound on Tendon-Bone Healing in a Transosseous-Equivalent Sheep Rotator Cuff Model. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 21, 466-475. <https://doi.org/10.1007/s00167-012-1972-z>
- [30] Lai, W.C., Iglesias, B.C., Mark, B.J. and Wang, D. (2021) Low-Intensity Pulsed Ultrasound Augments Tendon, Ligament, and Bone-Soft Tissue Healing in Preclinical Animal Models: A Systematic Review. *Arthroscopy*, 37, Article No. 2318. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2021.02.019>
- [31] Khanna, A., Nelmes, R.T.C., Gougoulas, N., Maffulli, N. and Gray, J. (2008) The Effects of LIPUS on Soft-Tissue Healing: A Review of Literature. *British Medical Bulletin*, 89, 169-182. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldn040>
- [32] Chazaud, B. (2014) Macrophages: Supportive Cells for Tissue Repair and Regeneration. *Immunobiology*, 219, 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.imbio.2013.09.001>
- [33] Gordon, S. and Martinez, F.O. (2010) Alternative Activation of Macrophages: Mechanism and Functions. *Immunity*, 32, 593-604. <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2010.05.007>
- [34] Xu, Z.H., Li, S.C., Wan, L.Y., Hu, J., Lu, H. and Zhang, T. (2023) Role of Low-Intensity Pulsed Ultrasound in Regulating Macrophage Polarization to Accelerate Tendon-Bone Interface Repair. *Journal of Orthopaedic Research*, 41, 919-929. <https://doi.org/10.1002/jor.25454>
- [35] Lu, H., Qin, L., Cheung, W., Lee, K., Wong, W. and Leung, K. (2008) Low-Intensity Pulsed Ultrasound Accelerated Bone-Tendon Junction Healing through Regulation of Vascular Endothelial Growth Factor Expression and Cartilage Formation. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 34, 1248-1260. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2008.01.009>
- [36] Wang, C.J., Ko, J.Y., Chou, W.Y., Hsu, S., Ko, S., Huang, C., *et al.* (2014) Shockwave Therapy Improves Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Journal of Surgical Research*, 188, 110-118. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2014.01.050>
- [37] Fu, L.P., *et al.* (2025) Advances of Low-Intensity Pulsed Ultrasound for Treatment of Musculoskeletal Disorders in the Past Decade. *Journal of Southern Medical University*, 45, 661-668.
- [38] 侯太甫, 殷恒斌, 许梦雅, 等. 筋膜手法联合低强度脉冲聚焦超声治疗肩袖损伤的疗效观察[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2025, 47(7): 638-641.
- [39] Xue, X., Kuati, A., Fu, H., Song, Q., Liu, Q. and Cui, G. (2024) Effect of Low-Intensity Pulsed Ultrasound on Postoperative Rehabilitation of Rotator Cuff Tears: Protocol for a Systematic Review and Meta-Analysis. *PLOS ONE*, 19, e0308354. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308354>
- [40] Wu, B., Zhang, T., Chen, H., Shi, X., Guan, C., Hu, J., *et al.* (2024) Exosomes Derived from Bone Marrow Mesenchymal Stem Cell Preconditioned by Low-Intensity Pulsed Ultrasound Stimulation Promote Bone-Tendon Interface Fibrocartilage Regeneration and Ameliorate Rotator Cuff Fatty Infiltration. *Journal of Orthopaedic Translation*, 48, 89-106. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2024.07.009>