

膝关节超声对运动性软骨微损伤的早期识别价值研究

赵银霞

银川市第二人民医院 宁夏 银川 750000

摘要：运动性软骨微损伤隐匿性强、进展快，若不及时干预易发展为不可逆退变或骨关节炎，早期精准识别至关重要。MRI虽是金标准，但成本高、可及性差。近年来，高频超声（HFUS）和剪切波弹性成像（SWE）等超声新技术在膝关节软骨评估中展现出巨大潜力。本文系统阐述该类微损伤的定义与机制，分析膝关节超声的技术原理与进展，并论证其在早期识别中的优势：高分辨率、动态实时、无辐射、低成本及可量化生物力学特性。研究表明，膝关节超声有望成为运动医学中筛查与监测软骨微损伤的核心工具，为预防、早期干预和预后评估提供有力支持。

关键词：膝关节；超声检查；运动性软骨微损伤；早期识别

引言

膝关节软骨因无血管、神经和淋巴，自我修复能力极弱，一旦受损易进行性退变。高强度运动常致“运动性软骨微损伤”——一种初期无症状、X线无法检出但可触发软骨退变级联反应的微观结构破坏，最终可能发展为骨关节炎。因此，在“窗口期”实现精准、早期识别至关重要。MRI（如T2-mapping）虽能反映早期退变，但成本高、可及性差，限制了筛查与随访应用。近年来，高频超声凭借高分辨率、无创、实时、低成本等优势，结合新兴弹性成像技术可量化软骨生物力学特性——其变化恰是微损伤最早期标志。本文系统探讨膝关节超声在运动性软骨微损伤早期识别中的综合价值，展现其在运动医学中作为高效筛查与监测工具的巨大潜力。

1 运动性软骨微损伤的病理基础与早期识别挑战

1.1 定义与病理机制

运动性软骨微损伤是由过度机械负荷引发的复杂病理过程，核心在于软骨微观结构完整性被破坏。当应力超过软骨屈服强度时，表层胶原纤维断裂，表面光滑度下降；应力向深层传导，致基质变形并激活软骨细胞应激通路，触发炎症级联反应。受损细胞释放IL-1 β 、TNF- α 等炎症因子及MMPs、ADAMTS等基质降解酶，加速蛋白聚糖流失与胶原网络崩解，形成恶性循环。同时，软骨下骨可因异常应力出现微骨折与重塑，加剧关节不稳和磨损^[1]。该损伤本质是力学-生物学耦合失衡，早期表现为微观结构紊乱、生化成分改变和生物力学性能下降，而非宏观缺损。

1.2 早期识别的难点

运动性软骨微损伤的早期诊断之所以困难，源于其“三无”特性：无特异性症状、无宏观形态改变、无常规影像学表现。患者往往在损伤发生数周甚至数月后，

因疼痛加剧或关节功能受限才就医，此时软骨损伤可能已进入中晚期。现有的诊断手段存在明显短板：（1）体格检查：依赖于医生的经验，主观性强，对微小损伤不敏感。（2）X线平片：只能显示晚期的关节间隙狭窄和骨赘形成，对早期软骨病变毫无价值。（3）MRI：虽为金标准，但成本效益比不高，难以作为一线筛查工具。这种诊断上的滞后性，使得宝贵的早期干预时机白白流失，最终导致治疗难度增加、预后不佳。因此，开发一种能够在亚临床阶段即能捕捉到软骨微结构变化的影像技术，已成为运动医学领域的迫切需求。

2 膝关节超声成像的技术原理与进展

2.1 基本原理与技术优势

超声成像的基本原理是利用压电换能器向人体组织发射高频声波（通常 > 7.5MHz用于肌骨成像），并接收从不同声阻抗界面反射回来的回声信号。通过分析回声的强度、时间和方向，计算机可以重建出组织内部的二维或三维图像。在膝关节检查中，致密的骨皮质呈现为明亮的强回声带，其后方伴有声影；关节腔内的滑液则表现为无回声区；而介于两者之间的关节软骨，则显示为一层均匀、光滑、低回声的带状结构。膝关节超声相较于其他影像学技术，拥有多项无可比拟的优势：（1）无创无辐射：安全性极高，可反复多次检查，尤其适用于需要长期随访的运动员。（2）实时动态成像：可在膝关节主动或被动活动过程中进行扫描，直观显示软骨与周围组织在运动状态下的相互关系，这是静态成像技术（如MRI、CT）无法实现的。（3）高空间分辨率：现代高频线阵探头（频率可达18MHz甚至更高）的轴向分辨率可达70 μ m以下，足以清晰分辨软骨的厚度、表面轮廓及内部细微回声变化^[2]。（4）成本效益高：设备购置和检查费用远低于MRI，便于在各级医疗机构乃至运动队驻

地推广使用。(5)操作便捷灵活:检查过程快速,可针对特定区域进行重点扫查,并可即时引导关节腔穿刺或药物注射等介入操作。

2.2 关键技术进展

近年来,膝关节超声技术的发展日新月异,其中两项突破性进展极大地拓展了其在软骨评估中的应用边界:

2.2.1 高频超声(High-Frequency Ultrasound, HFUS)

HFUS通过使用更高频率的探头(通常 $>10\text{MHz}$),显著提升了图像的空间分辨率。这使得医生能够精确测量软骨各部位的厚度,并敏锐地捕捉到早期微损伤所导致的细微改变,如软骨表面的轻度粗糙、局部回声增强(提示纤维化)或减低(提示水肿)、以及软骨-骨界面的模糊不清。研究表明,HFUS测量的软骨厚度与关节镜下直视测量及组织病理学结果具有高度一致性。

2.2.2 剪切波弹性成像(Shear Wave Elastography, SWE)

这是超声技术革命性的飞跃。SWE通过探头发射聚焦的“推力脉冲”,在组织内产生横向传播的剪切波,并利用超高速成像技术追踪剪切波的传播速度。根据物理学原理,剪切波速度(SWS)的平方与组织的杨氏模量(E)成正比,而杨氏模量正是衡量组织硬度或刚度的直接指标。对于关节软骨而言,其正常的生物力学性能依赖于完整的胶原网络和充足的蛋白聚糖含量。一旦发生微损伤,基质结构破坏会导致软骨硬度下降(即杨氏模量降低)。SWE技术能够以彩色编码图的形式直观显示软骨硬度的分布,并提供精确的定量数值(单位 kPa 或 m/s),从而实现了对于软骨生物力学功能的无创、客观、定量评估。这为早期识别尚无形态学改变的软骨微损伤提供了前所未有的可能性。

3 膝关节超声在早期识别运动性软骨微损伤中的诊断价值

3.1 形态学评估价值

HFUS能够对膝关节各关键负重区(如股骨内/外侧髁、胫骨内/外侧平台、髌骨关节面)的软骨进行系统性扫查。在标准切面下,正常的关节软骨表现为一条连续、光滑、均匀的低回声带,与下方高回声的骨皮质分界清晰。在运动性软骨微损伤的早期,HFUS可发现以下细微征象:(1)软骨表面改变:原本光滑的表面可能出现轻微的毛糙、不规则或局灶性凹陷。(2)内部回声异常:软骨内部回声可能变得不均匀,出现点状或片状的高回声区(可能代表早期纤维化或钙化)或低回声区(可能代表局部水肿或基质稀疏)^[3]。(3)软骨厚度变化:虽然早期微损伤不一定伴随明显的厚度减薄,但在

某些高应力区域,可能会出现局灶性的、不对称的厚度变薄。(4)软骨-骨界面模糊:正常情况下,软骨与骨皮质之间的界面锐利清晰。微损伤可能导致该界面变得模糊不清。这些形态学上的细微改变,往往是临床症状出现前的最早影像学信号,为早期干预赢得了宝贵时间。

3.2 生物力学功能评估价值

如果说HFUS是从“形态”上洞察软骨的早期病变,那么SWE则是从“功能”上揭示其内在的病理变化。大量研究表明,软骨的生物力学性能(硬度)是其健康状态最敏感的指标之一,其改变早于形态学的可见损伤。在运动性微损伤模型中,即使软骨外观完好无损,其内部的胶原网络已开始松散,导致整体硬度下降。SWE通过定量测量软骨的杨氏模量或剪切波速度,能够客观地反映出这种硬度的变化。患有早期骨关节炎或存在运动性损伤风险的个体,其受累区域的软骨SWE值显著低于健康对照组。更重要的是,SWE值的变化与疾病的严重程度和进展情况密切相关,使其成为监测疾病进展和评估治疗效果的理想工具。例如,在运动员康复训练过程中,定期进行SWE检查可以动态观察软骨硬度的恢复情况,从而科学地指导训练强度的调整,避免二次损伤。

3.3 与其他影像学技术的比较

为了客观评价膝关节超声的诊断效能,有必要将其与MRI这一参照标准进行比较。多项研究对比了HFUS/MRI与关节镜(金标准)在诊断膝关节软骨损伤方面的表现。结果显示,HFUS在检测软骨损伤方面的敏感性约为72%-95%,特异性约为74%-98%,总体准确率与MRI相当,尤其是在评估软骨表面形态和厚度方面。虽然MRI在显示深层软骨和骨髓病变方面更具优势,但HFUS在浅表软骨的分辨率上甚至可能优于常规MRI^[4]。更为关键的是,超声在生物力学功能评估方面具有MRI无法比拟的独特优势。尽管MRI的T2-mapping等技术也能间接反映胶原网络的状态,但其与软骨硬度的直接关联不如SWE明确和直观。此外,超声在成本、可及性和动态成像方面的优势,使其在特定应用场景(如大规模筛查、床旁检查、动态功能评估)中更具实用价值。因此,膝关节超声并非要取代MRI,而是作为其有力的补充,共同构建一个多维度、全方位的软骨评估体系。

4 膝关节超声检查的标准化与操作规范

为了确保检查结果的可靠性、可重复性和可比性,建立一套标准化的操作流程至关重要。一个规范的膝关节超声检查应包括以下几个方面:

4.1 设备与探头选择

应选用配备高频线阵探头(建议频率 $\geq 10\text{MHz}$)的

彩色多普勒超声诊断仪。探头频率越高，分辨率越好，但穿透力会相应减弱，需根据患者体型和检查部位进行权衡。

4.2 患者体位与关节摆放

患者通常取仰卧位。检查股骨髁和髌骨时，膝关节应轻度屈曲（约 15° - 30° ）；检查胫骨平台时，膝关节可伸直或轻度屈曲。良好的关节放松和稳定是获取清晰图像的前提。

4.3 标准化扫查切面

应系统性地对膝关节前、内、外、后四个区域进行扫查。针对软骨评估，关键切面包括：股骨髁长轴切面（评估股骨髁前后径的软骨）、股骨髁短轴切面（评估股骨髁内外侧及滑车沟的软骨）、胫骨平台长轴切面（评估胫骨平台前后径的软骨）、髌骨长轴及短轴切面（评估髌骨关节面的软骨）。

4.4 图像采集与存档

每个关键区域均需保存至少一个长轴和一个短轴的标准切面图像。对于SWE检查，应在软骨区域内放置足够大的感兴趣区（ROI），避开骨皮质和关节液，并确保剪切波传播稳定后再冻结图像。

4.5 测量与报告

报告应详细记录软骨的形态学特征（厚度、表面光滑度、内部回声、与骨界面）和SWE定量值（杨氏模量或剪切波速度）。测量数据应与健侧膝关节或正常参考值进行对比分析。

5 局限性与未来展望

膝关节超声虽具潜力，但仍受限于骨遮挡区域成像困难、操作者依赖性强，以及剪切波弹性成像（SWE）缺乏标准化和长期预后数据。未来发展方向包括：（1）AI赋能，提升图像自动分析与诊断一致性；（2）三维超

声实现软骨立体定量评估；（3）多模态融合，结合MRI优势构建综合评估平台；（4）发展便携式及可穿戴设备，推动日常化、动态化软骨健康监测。

6 结语

综上所述，运动性软骨微损伤的早期识别是预防关节退变、保障运动生涯的关键。膝关节超声，特别是结合了高频超声和剪切波弹性成像的新一代技术，凭借其无创、实时、高分辨、可量化生物力学特性及高成本效益等综合优势，已在该领域展现出卓越的应用价值。它不仅能从形态学上捕捉软骨的细微结构改变，更能从功能上揭示其最早的生物力学性能衰退，为临床提供了一种超越传统影像学的全新视角。尽管存在一定的局限性，但随着标准化流程的完善、人工智能等前沿技术的深度融合以及多模态成像的发展，膝关节超声必将在运动性软骨微损伤的早期筛查、风险预警、个体化干预和疗效监测中扮演越来越核心的角色，为推动运动医学的精准化发展做出重要贡献。

参考文献

- [1]李艳江,徐丽娟.高频超声参数联合BGP和MMP-1对运动后膝关节软骨组织损伤的诊断分析[J].影像科学与光化学,2022,40(04):981-985.
- [2]王志利,徐丹凤,李楠,等.动态超声联合高场强MR诊断髌内侧膝关节滑膜皱襞及评估分型、软骨损伤分级的价值[J].中国超声医学杂志,2024,40(10):1146-1151.
- [3]杨洪敏,董华,翟廷贵,等.高频超声与MRI用于膝关节软骨退变诊断中的临床意义[J].医疗装备,2022,35(14):15-17.
- [4]刘长坯,韩文朝,陈修磊,等.肌骨超声在诊断踝、膝关节软组织损伤中的临床应用[J].医药论坛杂志,2024,45(23):2573-2576.