

磁共振弹性成像在肝纤维化中的应用进展： 技术创新与临床实践

杨友芬, 刘 曦*, 袁意淋, 周宝林, 谌 浩

重庆医科大学附属第二医院放射科, 重庆

收稿日期: 2025年4月12日; 录用日期: 2025年5月5日; 发布日期: 2025年5月14日

摘 要

磁共振弹性成像(magnetic resonance elastography, MRE)作为一种非侵入性的医学影像技术, 近年来在肝纤维化的检测中展现了重要的应用价值。与传统活检方法相比, MRE不仅避免了取样误差和潜在并发症的风险, 而且能够提供整个肝脏的全面信息, 实现了从局部到整体的诊断转变。在临床实践中, MRE已被广泛应用于监测肝纤维化患者的病情进展、指导个性化治疗方案的选择, 并在预测肝硬化及其并发症方面显示出巨大潜力。本文综述了MRE在肝纤维化中的应用进展, 包括其技术原理、临床应用、局限及未来发展方向, 特别关注其在肝纤维化监测中的创新应用。通过结合最新的研究成果和临床实践, 本文旨在为临床医生和研究人员提供一个全面的视角, 以更好地理解和应用这一技术。

关键词

磁共振弹性成像, 肝纤维化, 应用进展

Advances in the Application of Magnetic Resonance Elastography in Liver Fibrosis: Technological Innovation and Clinical Practice

Youfen Yang, Xi Liu*, Yilin Yuan, Baolin Zhou, Hao Chen

Department of Radiology, The Second Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Apr. 12th, 2025; accepted: May 5th, 2025; published: May 14th, 2025

Abstract

Magnetic resonance elastography (MRE), as a non-invasive medical imaging technique, has

*通讯作者。

文章引用: 杨友芬, 刘曦, 袁意淋, 周宝林, 谌浩. 磁共振弹性成像在肝纤维化中的应用进展: 技术创新与临床实践[J]. 临床医学进展, 2025, 15(5): 479-484. DOI: 10.12677/acm.2025.1551396

demonstrated profound application value in the detection of liver fibrosis in recent years. Compared to traditional biopsy methods, MRE not only avoids the risks of sampling errors and potential complications but also provides comprehensive information about the entire liver, achieving a diagnostic shift from local to global assessment. In clinical practice, MRE has been widely used to monitor the progression of liver fibrosis patients, guide the selection of personalized treatment plans, and has shown great potential in predicting liver cirrhosis and its complications. This article reviews the progress of MRE application in liver fibrosis, including its technical principles, clinical applications, limitations, and future development directions, with particular focus on its innovative application in liver fibrosis monitoring. By combining the latest research findings and clinical practices, this article aims to provide clinicians and researchers with a comprehensive perspective to better understand and apply this technology.

Keywords

Magnetic Resonance Elastography, Liver Fibrosis, Advances in Application

Copyright © 2025 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

慢性肝病是全球性的公共卫生问题，其早期主要病理改变是肝纤维化，若不加以干预，肝纤维化会进一步发展为肝硬化，甚至肝癌，给患者带来严重的健康威胁。因此，准确诊断肝纤维化分期对慢性肝病的治疗、监测及预后具有非常重要的临床价值，及时发现肝纤维化并进行干预治疗，有效逆转肝纤维化，对于改善慢性肝病患者的预后具有至关重要的意义。在这一背景下，磁共振弹性成像(magnetic resonance elastography, MRE)诊断成为研究热点，MRE 作为一种新兴的影像学技术，近年来在肝纤维化的检测中展现出了巨大的潜力[1]-[3]。MRE 通过向活体组织施加低频机械波，并利用相位对比磁共振成像技术检测波在组织中的传播特性，从而实现组织弹性模量的定量测量。该技术的独特成像机制不仅可精确量化肝脏硬度值，还能有效区分肝纤维化的不同病理分期。研究[4] [5]表明，MRE 测量的肝脏硬度值与肝纤维化分级呈正相关，即肝脏平均硬度随着肝纤维化程度的增加而增加，这使得 MRE 成为一种可靠的评估肝纤维化分期的方法，为临床实践提供了重要的理论基础和技术支持。

2. MRE 技术原理

MRE 依赖外部机械波发生器产生振动，利用动态机械刺激产生剪切波，剪切波在组织内引起质点位移，根据质点位移数据计算剪切波传播速度，通过磁共振成像技术捕捉这些波的传播特性，从而量化肝脏的弹性模量，通过拟合反演算法得出弹性图，其测量的肝脏硬度值与肝纤维化程度密切相关，从而反映肝脏的病理状态[6] [7]。

MRE 能够在不同磁场强度下进行，且在同一频率下的机械波传输独立于场强及其它扫描参数，确保了测量结果的良好重现性和观察者间的一致性。MRE 的后处理方法主要可分为二维(2D)和三维(3D)，常用的 MRE 序列包括梯度回波序列(gradient echo, GRE)、自旋回波序列(spin echo, SE)、自旋回波 - 平面回波序列(spin echo-echo planar imaging, SE-EPI)及平衡稳态自由进动序列。Choi 等人采用 GRE 和 SE-EPI 序列进行 MRE 评估慢性肝病的研究表明，SE-EPI 序列的技术成功率显著优于 GRE 序列(98.1% vs. 80.7%, $p < 0.0001$) [8]。此外，有研究也证实了 2D SE-EPI-MRE 在铁过载肝脏组织的硬度测量中具有显著优势，

可为肝纤维化的诊断提供可靠依据[9]。

3. MRE 在肝纤维化诊断中的应用

3.1. 与传统方法的比较

在肝纤维化的诊断领域,传统方法如肝活检和血清学标志物检测曾长期占据主导地位,但 MRE 技术的快速发展已显著改变了这一格局,MRE 凭借其独特的诊断优势,不仅克服了传统方法的局限性,更为肝纤维化的精准诊断提供了新的技术路径。

肝活检作为肝纤维化诊断的“金标准”,能够直接观察肝脏组织的病理变化,为疾病的分期和分级提供准确依据。然而,肝活检是一种侵入性操作,存在出血、感染等并发症风险,且取样过程可能导致样本偏差,影响诊断结果的准确性。此外,肝活检的重复性较差,对于肝纤维化的动态监测存在局限性[10]。另外,天冬氨酸氨基转移酶-血小板比值指数(aspartate aminotransferase-to-platelet ratio Index, APRI)、肝纤维化-4 指数(fibrosis-4, FIB-4)、肝纤维化评分(the hepamet fibrosis score, HFS)和非酒精性脂肪性肝病纤维化评分(the metabolic dysfunction-associated steatotic liver diseasescore, NFS)等血清标志物检测系统综合了多种血清学指标和临床参数,具有无创性、重复检测、便于对患者进行长期随访监测等优点,在评估代谢功能障碍相关脂肪性肝病患者肝纤维化程度方面具有临床价值[11],可为临床提供一定的诊断参考。血清学检测方法虽然在肝纤维化评估中具有一定价值,但其固有的局限性不容忽视。这类检测仅能反映血液生化指标的改变,无法直观呈现肝脏实质的病理学特征。在诊断效能方面,现有血清标志物对纤维化分期的鉴别能力有待提高,特别是 APRI 和 FIB-4 等指标在识别早期纤维化时敏感性明显不足。值得注意的是,多种生理和病理因素,包括受检者的基础代谢特征和合并症情况,都可能干扰检测结果的可靠性,进而影响诊断的精确度。

相比之下,MRE 作为一种新兴的非侵入性成像技术,具有无创、重复性好等优势[12] [13]。同时,MRE 的成像范围广,能够全面评估肝脏的弹性变化,减少了取样偏差,提高了诊断的准确性。此外,随着 MRE 技术的持续优化,有研究[14] [15]将 MRE 与质子密度脂肪分数测量、双能量 CT 增强等影像学技术联合。在临床实践中,将 MRE 与质子密度脂肪定量技术相结合,能够同步检测肝脏纤维化程度和脂肪沉积情况,这对非酒精性脂肪肝的诊疗决策具有重要指导意义。同时,MRE 与双能 CT 的联合使用展现出独特优势,前者可获取组织力学特性数据,后者则能提供精细的解剖结构和血流动力学信息,二者的优势互补为肝脏疾病的综合评估开辟了新途径。这种多模态融合,为肝纤维化的综合评估提供了更丰富的信息。

3.2. MRE 技术在不同阶段肝纤维化中的应用

MRE 在不同阶段的肝纤维化检测中展现出广泛的应用价值,从早期病变到晚期肝硬化的各个阶段,MRE 都提供了独特而重要的信息。

在早期肝纤维化阶段,肝脏的病理变化较为轻微,传统影像学检查往往难以捕捉到这些微小的结构改变。MRE 通过精确测量肝脏硬度,能够敏感地检测到早期纤维化迹象,为临床医生提供早期干预的机会。Yuanzi 等[16]对 910 例非酒精性脂肪肝患者进行的荟萃分析表明,MRE 对轻度肝纤维化(F1 期)的诊断灵敏度为 0.77,对显著肝纤维化($\geq$ F2 期)的诊断灵敏度达 0.87,ROC 曲线分析显示,MRE 对 F1~F4 期肝纤维化均具有显著的诊断效能。Thierrye 等[17]采用磁 MRE 技术对 100 例慢性肝病患者进行评估,通过与组织病理学结果对比,证实 MRE 可有效鉴别显著纤维化($\geq$ F2 期)、晚期纤维化($\geq$ F3 期)及肝硬化(F4 期)。在肝纤维化进展至肝硬化阶段时,肝脏结构发生显著改变,传统影像学方法难以准确评估其硬度及相关并发症[18]。MRE 在此阶段具有独特的诊断价值,其不仅能清晰显示肝硬化的特征性形态学改变,

还可通过定量测量肝脏硬度来预测并发症风险,研究表明,MRE 对门静脉高压的评估具有重要临床意义,而门静脉高压是导致食管静脉曲张破裂出血[19]-[21]等严重并发症的关键病理生理机制。MRE 还可以用于评估肝移植候选者的肝脏状况,帮助选择最适合的供体和手术时机,从而提高移植成功率[22] [23]。

MRE 凭借其非侵入性、高精度和全面评估的优势,已成为肝脏疾病诊疗全流程中的重要工具。从早期病变的敏感检测到晚期复杂病情的综合评估,MRE 不仅为临床诊断提供了可靠依据,还可支持个体化治疗方案的制定和长期疗效监测。随着技术的持续革新,MRE 的应用范畴将进一步拓展,为肝脏疾病的预防、诊断和治疗提供新的解决方案。

3.3. MRE 在肝纤维化治疗监测中的应用

MRE 不仅用于肝纤维化的诊断,还可以用于监测治疗效果[24] [25]。其非侵入性特征允许定期重复检查,通过动态评估肝脏硬度变化来客观评价治疗效果,为慢性肝病的长期管理提供关键依据。MRE 检查结果可显著影响临床决策:当检测到治疗效果不佳时,临床医生可及时调整治疗方案,避免治疗延误。这种动态监测能力使 MRE 成为优化慢性肝病患者个体化治疗策略的重要辅助手段。

4. MRE 技术的挑战与局限性

MRE 技术在肝纤维化的检测中展现出了巨大的潜力,通过非侵入性的方式评估肝脏硬度,为肝病的诊断提供了新的视角。然而,尽管其在临床应用中取得了显著进展,MRE 仍面临一系列挑战与局限性。

目前,MRE 在肝纤维化诊断中的应用尚未形成统一的诊断标准和规范,不同的研究机构和临床实践可能会采用不同的成像参数、数据处理方法以及诊断阈值,这使得不同研究之间的结果难以进行比较和验证,也给临床医生在实际应用中带来了困惑。其次,MRE 设备检查费用相对昂贵,部分患者可能因检查费用或对新技术不了解而影响依从性。最后,并非所有患者都适合进行 MRE 检查,如内植入金属植入物(如心脏起搏器、人工关节或其他金属器械)的患者,可能会因为磁场干扰而无法接受 MRE 检查。另外,肝脏组织弹性特性的改变受多种病理生理因素影响,而非仅由纤维化程度决定。研究表明,肝脏炎症活动、脂肪变性、充血状态以及胆汁淤积等病理改变均可显著影响 MRE 检测结果的准确性。在肝脏炎症活动期间,肝细胞的炎症反应会改变肝组织的结构和功能,可能导致 MRE 测量的肝脏硬度值假性升高[26]-[28],此外,肥胖患者腹壁脂肪层增厚可能阻碍机械波的传播,进而影响测量准确性[29]。这些技术局限性限制了 MRE 在特定患者群体中的应用。值得关注的是,多频振动弹性成像技术的应用能够有效鉴别非酒精性脂肪肝早期阶段的组织力学特性改变,实现炎症反应与纤维化程度的准确区分。随着影像采集方法和数据分析模型的持续改进,特别是针对体质量指数较高人群的适应性优化,这一无创诊断技术的适用范围将得到进一步扩展,其临床实用价值也将显著提升。

5. MRE 技术的未来发展方向

MRE 作为一项前沿的医学影像技术,已经在肝纤维化的检测中展现出其独特价值。展望未来,MRE 的发展将主要集中在技术创新、成像序列优化、加速成像技术发展、反演算法改进、临床应用拓展以及规范化和标准化的推进,旨在提高诊断精度、改善患者体验,并推动个性化医疗的发展。

近期研究表明[30],基于矩阵阵列的三维剪切波绝对振动弹性成像可作为体积弹性成像的有效替代方案,其以更高的便捷性和成本效益提供了与 MRE 相当的肝纤维化评估能力。未来研究应着重优化 MRE 技术,重点提升成像速度、空间分辨率,同时降低设备成本和操作复杂度。通过整合多种技术的优势,有望实现更全面、准确的肝脏病变评估,从而提升肝纤维化诊断效能,为临床决策提供更可靠的支持。随着持续的技术创新和跨学科协作,磁共振弹性成像有望成为肝脏疾病诊疗体系中的重要组成部分,推

动精准医疗的发展。

6. 结论与展望

MRE 作为一种非侵入性诊断技术, 在肝纤维化评估中展现出显著优势, 可有效替代传统肝活检。通过量化肝脏硬度评估纤维化程度, MRE 不仅避免了组织取样误差和相关并发症风险, 还能提供全肝范围的定量信息。其高空间分辨率和优化的图像质量可清晰显示微小病变, 显著提升诊断的敏感性和特异性。未来, 通过持续的技术创新, 包括成像序列优化、快速成像技术开发、反演算法改进以及操作流程的标准化, 有望进一步克服现有技术局限, 充分发挥 MRE 的临床价值, 为肝纤维化的诊断、治疗监测和预后评估提供可靠依据, 从而推动肝脏疾病诊疗水平的整体提升。

基金项目

重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ MSX0846); 重庆医科大学附属第二医院“宽仁英才”项目(kryc gg-2104)。

参考文献

- [1] Rojo, D.A., Taouli, B., Leung, H.D., *et al.* (2024) Imaging-Based Non-Invasive Liver Disease Assessment for Staging Liver Fibrosis in Chronic Liver Disease: A Systematic Review Supporting the AASLD Practice Guideline. *Hepatology*, **81**, 725-748.
- [2] Ananchuensook, P., Moonlisarn, K., Boonkaew, B., Bunchorntavakul, C. and Tangkijvanich, P. (2025) Diagnostic Performance of Serum Mac-2-Binding Protein Glycosylation Isomer as a Fibrosis Biomarker in Non-Obese and Obese Patients with MASLD. *Biomedicines*, **13**, Article 415. <https://doi.org/10.3390/biomedicines13020415>
- [3] Ali, R., Li, H., Zhang, H., Pan, W., Reeder, S.B., Harris, D., *et al.* (2025) Multi-Site, Multi-Vendor Development and Validation of a Deep Learning Model for Liver Stiffness Prediction Using Abdominal Biparametric MRI. *European Radiology*. <https://doi.org/10.1007/s00330-024-11312-3>
- [4] Hennemig, T.P., Wang, G., Leung, F.P., Alsaif, H.S., Teo, L.L., Lim, S.G., *et al.* (2017) Magnetic Resonance Elastography and Diffusion Weighted Imaging in the Evaluation of Hepatic Fibrosis in Chronic Hepatitis B. *Gut and Liver*, **11**, 401-408. <https://doi.org/10.5009/gnl16079>
- [5] 彭令荣, 孟占鳌, 王劲, 等. 磁共振弹力成像与扩散加权成像诊断慢性乙型病毒性肝炎纤维化程度分级的对比[J]. 实用医学杂志, 2017, 33(17): 2930-2933.
- [6] Ehman, R.L. (2022) Magnetic Resonance Elastography: From Invention to Standard of Care. *Abdominal Radiology*, **47**, 3028-3036. <https://doi.org/10.1007/s00261-022-03597-z>
- [7] Feuille, C., Kari, S., Patel, R., Oberoi, R., Liu, J., Ohliger, M., *et al.* (2024) Utility and Impact of Magnetic Resonance Elastography in the Clinical Course and Management of Chronic Liver Disease. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 1765. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51295-1>
- [8] Choi, S.L., Lee, E.S., Ko, A., Park, H.J., Park, S.B., Choi, B.I., *et al.* (2019) Technical Success Rates and Reliability of Spin-Echo Echo-Planar Imaging (SE-EPI) MR Elastography in Patients with Chronic Liver Disease or Liver Cirrhosis. *European Radiology*, **30**, 1730-1737. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06496-y>
- [9] Serai, S.D. and Trout, A.T. (2018) Can MR Elastography Be Used to Measure Liver Stiffness in Patients with Iron Overload? *Abdominal Radiology*, **44**, 104-109. <https://doi.org/10.1007/s00261-018-1723-9>
- [10] 李哲成, 黄云, 张泽宇, 等. 肝纤维化严重程度预测指标分析与预测模型构建[J]. 中国普通外科杂志, 2020, 29(11): 1364-1369.
- [11] Priego-Parra, B.A., Triana-Romero, A., Bernal-Reyes, R., Icaza-Chávez, M.E., Martínez-Vázquez, S.E., Amieva-Balmori, M., *et al.* (2024) Comparative Evaluation of APRI, FIB-4, HFS, and NFS: Scoring Tools for Liver Fibrosis in a Mexican Population with MASLD. *Revista de Gastroenterología de México (English Edition)*, **89**, 498-505. <https://doi.org/10.1016/j.rgmxen.2024.09.002>
- [12] Hoffman, D.H., Ayoola, A., Nickel, D., Han, F., Chandarana, H. and Shanbhogue, K.P. (2019) T1 Mapping, T2 Mapping and MR Elastography of the Liver for Detection and Staging of Liver Fibrosis. *Abdominal Radiology*, **45**, 692-700. <https://doi.org/10.1007/s00261-019-02382-9>
- [13] Idilman, I.S., Li, J., Yin, M. and Venkatesh, S.K. (2020) MR Elastography of Liver: Current Status and Future

- Perspectives. *Abdominal Radiology*, **45**, 3444-3462. <https://doi.org/10.1007/s00261-020-02656-7>
- [14] 古晓利, 潘秋合, 陈建波, 等. 双能量CT增强与磁共振弹性成像联合诊断慢性乙型肝炎肝纤维化的临床价值[J]. 新发传染病电子杂志, 2024, 9(3): 56-60.
- [15] Alsaqal, S., Hockings, P., Ahlström, H., Gummesson, A., Hedström, A., Hulthe, J., *et al.* (2021) The Combination of MR Elastography and Proton Density Fat Fraction Improves Diagnosis of Nonalcoholic Steatohepatitis. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **56**, 368-379. <https://doi.org/10.1002/jmri.28040>
- [16] Liang, Y. and Li, D. (2020) Magnetic Resonance Elastography in Staging Liver Fibrosis in Non-Alcoholic Fatty Liver Disease: A Pooled Analysis of the Diagnostic Accuracy. *BMC Gastroenterology*, **20**, Article No. 89. <https://doi.org/10.1186/s12876-020-01234-x>
- [17] Lefebvre, T., Wartelle-Bladou, C., Wong, P., Sebastiani, G., Giard, J., Castel, H., *et al.* (2019) Prospective Comparison of Transient, Point Shear Wave, and Magnetic Resonance Elastography for Staging Liver Fibrosis. *European Radiology*, **29**, 6477-6488. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06331-4>
- [18] Roy, A., Verma, N., Jajodia, S., Goenka, U., Tiwari, A., Sonthalia, N., *et al.* (2024) Magnetic Resonance Elastography (MRE) Outperforms Acoustic Force Radiation Impulse (ARFI) in Predicting Oesophageal Varices in Obese NAFLD Cirrhosis. *Abdominal Radiology*, **49**, 3088-3095. <https://doi.org/10.1007/s00261-024-04309-5>
- [19] 王晓培, 韩昕君, 王宇, 等. 磁共振弹性成像测得肝弹力值、脾弹力值对门静脉高压的诊断效能[J]. 中国医学影像学杂志, 2022, 30(12): 1252-1257, 1262.
- [20] Alsaied, T., Possner, M., Lubert, A.M., Trout, A.T., Szugye, C., Palermo, J.J., *et al.* (2019) Relation of Magnetic Resonance Elastography to Fontan Failure and Portal Hypertension. *The American Journal of Cardiology*, **124**, 1454-1459. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2019.07.052>
- [21] 刘盼盼, 胡春峰, 严金明, 等. 磁共振弹性成像在布加综合征患者介入治疗效果评估中的应用价值[J]. 临床放射学杂志, 2019, 38(2): 342-345.
- [22] Melekoglu Ellik, Z., Idilman, I.S., Kartal, A., Balaban, Y., Elhan, A.H., Karcaaltincaba, M., *et al.* (2022) Evaluation of Magnetic Resonance Elastography and Transient Elastography for Liver Fibrosis and Steatosis Assessments in the Liver Transplant Setting. *The Turkish Journal of Gastroenterology*, **33**, 153-160. <https://doi.org/10.5152/tjg.2022.21705>
- [23] Gidener, T., Yin, M., Dierkhising, R., Allen, A.M., Ehman, R.L. and Venkatesh, S.K. (2021) 582 Magnetic Resonance Elastography for Prediction of Long-Term Progression and Outcome in Chronic Liver Disease. *Gastroenterology*, **160**, S-787. [https://doi.org/10.1016/s0016-5085\(21\)02596-8](https://doi.org/10.1016/s0016-5085(21)02596-8)
- [24] 顾天翊, 陆伦根. 非酒精性脂肪性肝病患者肝纤维化预后的决定性因素[J]. 肝脏, 2018, 23(5): 375-377.
- [25] 赵媛, 曹耀章, 李小鹏. 富马酸丙酚替诺福韦联合肝爽颗粒治疗慢性乙型肝炎肝纤维化的疗效及对患者免疫功能和炎症状态的影响[J]. 海南医学, 2023, 34(10): 1383-1387.
- [26] 周家豪, 李若坤, 严福华. 磁共振弹性成像在慢性肝病中的应用[J]. 肝脏, 2021, 26(2): 112-114.
- [27] Allen, A.M., Shah, V.H., Therneau, T.M., Venkatesh, S.K., Mounajjed, T., Larson, J.J., *et al.* (2019) The Role of Three-dimensional Magnetic Resonance Elastography in the Diagnosis of Nonalcoholic Steatohepatitis in Obese Patients Undergoing Bariatric Surgery. *Hepatology*, **71**, 510-521. <https://doi.org/10.1002/hep.30483>
- [28] Koch, V., Gotta, J., Chernyak, V., Cengiz, D., Torgashov, K., Eichler, K., *et al.* (2024) Biomechanical Assessment of Liver Integrity: Prospective Evaluation of Mechanical versus Acoustic MR Elastography. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **61**, 1890-1904. <https://doi.org/10.1002/jmri.29560>
- [29] Yin, M., Glaser, K.J., Talwalkar, J.A., Chen, J., Manduca, A. and Ehman, R.L. (2016) Hepatic MR Elastography: Clinical Performance in a Series of 1377 Consecutive Examinations. *Radiology*, **278**, 114-124. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015142141>
- [30] Zeng, Q., Mohammed, S.K., Aleef, T.A., Honarvar, M., Schneider, C., Pang, E.H.T., *et al.* (2025) Validation of Volumetric Multifrequency Shear Wave Vibro-Elastography with Matrix Array Transducer for the *in Vivo* Liver. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **72**, 178-190. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2024.3519192>