·综　述·

超声衰减成像在评估代谢相关脂肪性肝病中的应用与进展

胡金娇，马苏亚

【摘要】 代谢相关脂肪性肝病（MAFLD）已成为全球最常见的慢性肝病之一，其发病率与肥胖和糖尿病等代谢综合征密切相关，传统诊断方法如肝活检及血清学检查存在一定局限性，无创影像技术的发展在客观评估中显示出其重要性。超声衰减成像作为一种定量超声技术，通过声波衰减系数客观评估肝脏脂肪变性程度，近年来在MAFLD的早期识别、分级和动态监测中展现出重要的价值。

【关键词】 超声衰减成像；代谢相关脂肪性肝病；超声；脂肪变性
DOI:10.3969/j.issn.1671-0800.2026.07.026
【中图分类号】 R445.1；R575.5　【文献标志码】 C　【文章编号】 1671-0800(2026)07-0807-04

代谢相关脂肪性肝病（metabolic associated fatty liver disease，MAFLD）作为当前全球慢性肝病的首位病因，其病理演进中包含肝脂肪化、炎症纤维化以及肝硬化。如何做到早期准确识别且连续性监测就显得相当关键。传统诊断以肝活检作为“金标准”，但存在出血危险和取样误差，不太适合临床普遍使用。常规超声没有创伤，但受主观定性评估限制，对于轻度脂肪变（肝细胞脂肪含量少于30%）的敏感度较低，且不能量化脂肪沉积量。超声衰减成像（attenuation imaging，ATI）根据声波在肝组织中传播时能量衰减的特点，通过计算衰减系数（attenuation coefficient，AC）对脂肪变性进行客观定量。其技术核心是对脂肪细胞与正常肝组织之间声阻抗的差别以及声波传播的变化进行解析。近年来，ATI凭借无创、可重复性强以及设备兼容性好等优点，在MAFLD筛查及分级中发挥其独特的作用，特别是在肥胖、糖尿病等代谢综合征人群中，ATI显得尤为重要。本文就ATI的技术原理，临床应用现状，发展和未来的发展方向做一系统综述。

1　MAFLD的流行病学与诊断挑战

1.1　流行病学　MAFLD是常见的慢性肝病，随着肥胖、糖尿病等代谢综合征发生率的增高，该病患病率也快速增长。MAFLD以肝细胞脂肪沉积为主要病理特点，可进展为肝纤维化、肝硬化，甚至肝癌。MAFLD的全球患病率呈增长趋势，且存在地区差异，其中美洲和东南亚地区的患病率超过40%[1]。中国成人MAFLD患病率高达29.2%（男性32.0%，女性25.4%），并且农村地区增速显著[2]。基于九国的Markov模型测算显示，MAFLD患病率与晚期病变比例将持续上升，直接医疗成本将翻倍以上（如美国年直接费用从349.7亿美元增至785.9亿美元），同时多数国家工作生产力损失同步倍增，健康相关生活质量小幅下降。若无干预，MAFLD的临床、经济与生活质量负担将在全球多数地区显著加重，亟需国家及全球层面防控策略[3]。

1.2　诊断挑战　MAFLD患者常常在出现肝功能异常或者肝纤维化（F2及以上）之后才被发现，导致错过了干预时机[4]。目前无统一的国际MAFLD高危人群筛查指南，基层医疗机构对肥胖和糖尿病患者肝脏检查率＜30%[5]。肝活检是诊断MAFLD的“金标准”，但由于操作风险、抽样误差、患者依从性差等缺点，无法普及。丙氨酸氨基转移酶（alanine aminotransferase，ALT）等血清学指标，对于早期脂肪变性和轻度炎症的敏感度不足，分别为60%和45%[6]。常规超声对肝脂肪含量低于20%的轻度脂肪变检出敏感度为55%～65%，检查结果高度依赖操作者的经验[7]。瞬时弹性成像受控衰减参数（controlled attenu-

基金项目：宁波市科技计划项目（2024S157）
作者单位：315100 宁波，宁波大学医学部（胡金娇）；宁波市中西医结合医院（马苏亚）
通信作者：马苏亚，Email：masuyasunjian@163.com

ation parameter，CAP）对肥胖患者［体质量指数（BMI）≥30 kg/m²］的测量失败率达 15%～ 20%[8]。磁共振质子密度脂肪分数（magnetic resonance imaging proton density fat fraction，MRI-PDFF）虽为无创定量，但成本高、设备普及率低，难以用于大规模筛查。

2020 年国际专家共识提出用“代谢功能障碍”作为 MAFLD 的诊断标准，代替以前的“非酒精性脂肪性肝病”。新标准要求满足下面任意一项即可：（1）超重/肥胖（BMI≥25 kg/m²或亚洲人群 BMI≥23 kg/m²）；（2）2 型糖尿病；（3）3 项代谢异常指标中具有≥2 项异常（血压、血脂、血糖、胰岛素抵抗）。这样改变使得诊断更简单，但可能扩大疾病范围，存在过度诊断[9]。

2　ATI 的技术原理分析

ATI 作为一种新的定量诊断技术，其物理基础是生物组织对超声波传播时能量的衰减作用。通过测量一个频率下超声波在组织中的 AC，来精准量化脂肪沉积对声波传播的影响。其原理主要是由于脂肪细胞本身特有的脂滴结构使声波在该处发生反射和散射，与正常肝组织存在差别。技术实施包括三个关键模块，即宽频脉冲发出加回波收集、依靠频域解析创建衰减模型、多种参数量化计算加成图，从而优化脂肪性肝病之类病理状态诊断的客观性和成果的可复现性。这项技术已应用在飞利浦 EPIQ、佳能 Aplio 等主要临床超声台上，其量值效果优于常规超声。

2.1　技术优化　近年来，关于 ATI 对 MAFLD 的诊断研究重点放在如何将感兴趣区（region of interest，ROI）定位标准化。Bi 等[10]研究发现，ROI 区域的选择避开肝内血管、纤维化病灶区域，在肝右叶深部进行多点测量取均值，可降低个体测量差异。林颖鑫团队[11]为 MAFLD 提出标准化 ROI 定位方式，只测量肝包膜下 1.5 ～ 2.0 cm 均匀实质区，操作者之间一致性系数（ICC）从 0.78 上升到 0.93，给临床操作规范化提供循证基础。

2.2　算法革新　Rafati 等[12]设计的局部衰减系数斜率成像（LAC-SI）算法克服了传统线性模型的局限，利用持续跟踪频率依赖的衰减特性，使肝结节辨别的敏感度从 74%提升到 89%，适合于肝脂肪浸润或早期纤维化的诊断。朱桂新团队[13]对非酒精性脂肪性肝病的定量需要，创新性改善了线性回归模型的频段挑选策略，把工作频率局限在 1.5 ～ 4.0 MHz，AC 同病理脂肪含量（S≥1）的相关系数达到 0.91。张姝嫔等[14]对 103 例非酒精性脂肪性肝病患者研究发现，ATI 在诊断中、重度脂肪肝患者的 ROC 曲线下面积（*AUC*）达到 0.92（95%*CI*：0.86 ～ 0.97），与 PDFF 测量结果间存在正相关（r=0.87，P ＜ 0.05）。这些研究数据给 ATI 技术的临床应用提供了强有力的循证医学证据。

3　ATI 在 MAFLD 中的临床应用

3.1　ATI 在 MAFLD 评估中的独特价值　相比于 CAP 等技术，ATI 除了可以定量肝脏的脂肪含量外，还可以得到组织的弹性信息，并且具有实时 B 超图像引导定位功能，避开肋骨、血管等结构的干扰，提高测量准确性、可重复性[15]。多参数、可视化的特点使 ATI 具有区分不同程度肝脏疾病的潜力，给临床医生提供更加全面的信息[16]。

ATI 由于无创、方便、可重复性好的特点，非常适于 MAFLD 的大规模筛查、病程动态观察和治疗效果的评估。李雪齐等[17]认为多参数超声的 ATI+联合剪切波弹性成像（shear wave elasto-graphy，SWE）模式对高危脂肪性肝炎的鉴别有较好临床应用价值，其准确率高于单一参数。这使 ATI 有可能成为常规超声检查与 MRI-PDFF 之间的一个重要桥梁。对于需长期随访的 MAFLD 患者来说，ATI 是一种更经济、更方便的精准量化工具，可以早期发现疾病，并进行个体化干预管理，改善临床诊疗途径。

3.2　ATI 评估 MAFLD 的诊断效能挑战与优化路径　肥胖、肝脏深部位置、操作者的经验等都会影响测量结果。孟健等[18]认为重度肥胖患者超声波能量衰减增大，会增加 ATI 对于深层肝组织脂肪变性判断的误差。若不能很好认识并控制这些局限性，就会直接影响到其诊断准确率。

严格规范操作流程是减少误差的关键，如要求患者空腹检查，在肝右叶包膜下 1.5 ～ 2.0 cm、避开大血管、均匀的区域进行测量，多次测量取平均数等。Liu 等[19]认为，重视标准化操作流程可提高 ATI 诊断的一致性。研制适合肥胖人群使用的专用探头、改进信号处理算法以提高深部组织的信噪比等是今后研究方向。Ma 等[20]认为建立 ATI 联合 SWE 的综

合诊断模型，可提高对 MAFLD 尤其是脂肪性肝炎的诊断准确率。

3.3　ATI 在 MAFLD 管理中的意义　Patterson 等[21]比较了 ATI 与 MRI-PDFF 检测和分级肝脏脂肪变性的效能，得出 ATI 具有很好的诊断效能，两者相关系数（*r* 值）大于 0.85。高度相关性的存在使 ATI 成为无创定量评估肝脂肪变性的可靠工具，在不能普及 MRI-PDFF 的临床环境中，它成为一种非常有效的替代或者补充手段，对于 MAFLD 的精准诊断和分级具有重大的意义。

Cannella 等[22]研究发现，在标准化操作规范下，ATI 的重复性较好，组内 ICC 也满意。此特点对于 MAFLD 的长期管理而言十分重要，医生可依靠稳定的、可比的定量数据来客观评价疾病进展或者判断药物、生活方式干预的效果。这使它在 MAFLD 精准医学管理策略中有着重要的应用地位。

4　未来发展

4.1　多模态影像融合　多模态影像融合技术利用 ATI 和其他影像模态的多种信息，为 MAFLD 病理特点剖析提供整体评判。利用 ATI 对脂肪变性进行定量检测，再借助超声弹性成像来评判肝纤维化程度，联用 MRI-PDFF 技术来确定脂肪含量。三种模态通过参数的互补达到技术协同的作用，极大提高了对 MAFLD 病理分期诊断准确率。杨孺牛团队[23]创建的“脂肪-纤维化双参数模型”第一次把 ATI 与 SWE 定量联系起来，联合诊断模型对 MAFLD 的鉴别能力较好（*AUC*=0.93，95%*CI*：0.89 ～ 0.97），优于单独 ATI（*AUC*=0.81）和 SWE（A*UC*=0.78），这说明多模态融合可以打破单参数模型病理表征的限制。韩凯婷等[24]研究发现，ATI 对于轻度脂肪变（肝脂肪含量 5%～ 10%）诊断和 MRI-PDFF 的一致性只有中等（Cohen’s κ=0.62），但是加入 SWE 参数后，一致性达到 0.79。这种参数互补现象为早期准确识别 MAFLD 赋予了新途径，它们结合起来的诊断敏感度达 92.3%（95%*CI*：86.7%～ 96.1%）。因此，构建多模态超声诊断体系成为改善 MAFLD 临床诊疗流程的重要发展方向，为个性化治疗计划制订提供可信赖的影像学证据。

4.2　人工智能（AI）辅助诊断　创建端到端的智能分析架构，可以实现从数据采集、图像预处理到诊断决策的全流程自动化。核心算法模块集成 ROI 智能分割功能，探测深度不超过 8 cm 时，分割误差可控制在 5%以内。该模块完成深度依赖性衰减校正和脂肪变性进展风险预测，风险预测模型 *AUC* 达 0.92。AI 系统明显提高了诊断一致性，ICC 由人工操作的 0.78 提高到 0.93，对 S1 期轻度脂肪变的检出敏感度达到 95%，特异度超 89%。Sato 团队[25]用 1 024 例接受多中心 ATI 检查的患者数据来创建一个使用迁移学习优化的卷积神经网络智能 ROI 定位模型，该模型的定位成功率达 98.5%，比人工干预的 92.3%高，而且单次测量耗时由原来的（3.2±0.8） min 缩短到（0.9±0.3）min。Honni 等[26]提出的深度衰减校正算法，首次将生成对抗网络和虚拟声场模拟技术结合起来，使深度超过 8 cm 肝组织的 AC 测量偏差从 18.3%降到 5.7%。在肥胖患者中，经该校正算法处理后的 AC 与 MRI-PDFF 的相关系数由未校正的 0.76 提高到 0.91。配套研发的动态运动补偿模块可以实时识别呼吸相位，使运动伪影干扰下的有效测量率由 68%提高到 94%，为床旁即时诊断提供技术支撑。

4.3　标准化与规范化　当前 ATI 技术在设备参数校准、操作过程是否规范、数据分析处理方法等方面依然存在很大差异。不同厂家的设备其声场输出特性存在 15%的差别，而操作者在选取 ROI 时所产生的主观偏差也会导致 AC 的测量值波动超过 20%。这些都会造成系统性偏差，不但减弱了多中心研究数据的横向比较性，而且限制了临床诊断阈值的标准化。创建包含设备性能检测、标准化操作规范和主要算法改良的全链条质控系统，可以提高 ATI 技术的测量可信度以及临床实用价值[27]。值得指出的是，多模态技术融合为设备参数校准体系的改良提供了新思路。Vasconcelos 团队[28]研发的基于声辐射力脉冲标准化参数的声衰减多参数 SWE 技术，可以同时定量 AC 和弹性模量，声辐射力脉冲采用 2.5 MHZ、300 μs 的标准化参数。该技术用聚丙烯酰胺仿体作为标准参考物，建立设备间校准转换方程，把跨品牌设备的 AC 测量偏差由±0.25 $dB \cdot cm^{-1} \cdot MHz^{-1}$ 降低到±0.08 $dB \cdot cm^{-1} \cdot MHz^{-1}$。相比传统 ATI，该技术在肝移植术后急性细胞排斥反应诊断中的特异度由原来的 76%提高到现在的 93%，给多模态参数融

合、跨平台数据整合提供了一个实践范例。随着国际验证标准的不断完善以及多中心诊断阈值的逐步一致，ATI 同肝脏影像报告和数据系统（LI-RADS 系统）等现有医学影像评价体系的深度融合将具备实施基础。

5　结论

ATI 依靠无创性、定量化评价和临床易获取性等特性，已成为 MAFLD 治疗中必不可少的评价手段。在多模态成像融合、AI 辅助分析、便携设备创新的不断推动下，ATI 正在深入疾病的早期诊断、纤维化的精准分期、制定个性化的干预方法等临床环节。在这样的背景下，有待对其临床转化价值进行全面检验，并亟待构建起一套标准的成像协议。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

参　考　文　献

[1] Teng M L, Ng C H, Huang D Q, et al. Global incidence and prevalence of nonalcoholic fatty liver disease[J]. Clin Mol Hepatol, 2023, 29: S32-S42.

[2] Zhou J, Zhou F, Wang H. Epidemiological features of metabolic-associated fatty liver disease in China: a population-based cross-sectional study[J]. Journal of Hepatology, 2022, 76(4): 823-832.

[3] Younossi Z M, Paik J M, Lazarus J V, et al. Projected global clinical, humanistic, and economic impact of metabolic dysfunction-associated steatohepatitis (MASH): The cost of inaction based on data from nine countries[J]. Clin Gastroenterol Hepatol, 2026, 24(4): 1016-1034.

[4] 魏文敏.肝功能检验在肝炎后肝硬化诊断中的应用价值分析[J].中外医药研究,2024,3(16):153-155.

[5] 张淮,郑明华.MAFLD 高危人群的筛查和分层管理[J].实用肝脏病杂志,2023,26(4):463-466.

[6] 李彦,郭睿.超声造影在微小肝细胞癌中的诊断价值及影像特征分析[J].实用癌症杂志,2023,38(9):1507-1509,1514.

[7] 高松林,韦柳婷,管晓,等.基于生物信息学分析非酒精性脂肪性肝病的线粒体自噬相关基因及防治中药筛选[J].中草药,2024,55(19):6655-6665.

[8] 黄嘉伟,纪雅丽,周玲,等.代谢相关脂肪性肝病患者 SAF 评分和脂肪肝进展抑制算法应用研究[J].实用肝脏病杂志,2025,28(1):48-51.

[9] Eslam M, Sanyal A J, George J, et al. MAFLD: A consensus-driven proposed nomenclature for metabolic associated fatty liver disease[J]. Gastroenterology, 2020, 158(7): 1999-2014.e1.

[10] Bi M S, Liu F Y, Yu J, et al. Preliminary study on determining the optimal position of region of interest for evaluating hepatic steatosis using ultrasound Attenuation imaging[J]. Abdom Radiol, 2025, 50(9): 4380-4388.

[11] 林颖鑫,孟健,冯蕾,等.声衰减成像在代谢相关脂肪性肝病分级诊断中的应用[J].中国医学影像学杂志,2023,31(10):1080-1084,1102.

[12] Rafati I, Destrempes F, Yazdani L, et al. Enhancing liver nodule visibility and diagnostic classification using ultrasound local attenuation coefficient slope imaging[J]. Ultrasound Med Biol, 2025, 51(5): 807-814.

[13] 朱桂新,梁永超,武爽.超声声衰减成像技术在评估非酒精性脂肪性肝病的初步探讨[J].中国超声医学杂志,2021,37(2):170-173.

[14] 张姝嫔,程成,祝怡婕,等.超声衰减成像定量诊断非酒精性脂肪肝的应用价值初探讨[J].中国超声医学杂志,2021,37(1):66-69.

[15] 王丹,龙富立,连溯,等.超声声衰减成像对代谢相关性脂肪肝的临床诊断价值及影响因素分析[J].临床超声医学杂志,2023,25(1):8-12.

[16] Sreekumar S, Soni A K, George A M, et al. Intra-observer variability in liver stiffness and ultrasound attenuation parameter measurement using vibration-controlled transient elastography in patients with metabolic dysfunction-associated steatotic liver disease[J]. J Clin Exp Hepatol, 2024, 14: 102259.

[17] 李雪齐,程广文,乔晓慧,等.多参数超声定量评估高风险脂肪性肝炎的临床价值[J].中华肝脏病杂志,2024,32(9):820-827.

[18] 孟健,张曼,王艺桦,等.超声衰减系数成像评估单纯代谢相关脂肪性肝病脂肪变性程度的价值分析[J].华北理工大学学报(医学版),2024,26(3):189-194.

[19] Liu F Y, Bi M S, Jing X, et al. Multiparametric US for identifying metabolic dysfunction-associated steatohepatitis: A prospective multicenter study[J]. Radiology, 2024, 310(3): e232416.

[20] Ma Q F, Gong L F, Ma L Y, et al. Application of ultrasound attenuation imaging and shear wave elastography in the diagnosis of metabolic fatty liver disease[J]. Biotechnol Genet Eng Rev, 2024, 40(3): 2830-2841.

[21] Patterson A, Apostolov R, Wong D, et al. WED-299 Utility of ultrasound attenuation imaging in the detection and grading of hepatic steatosis severity as compared to magnetic resonance imaging proton density fat fraction[J]. J Hepatol, 2024, 80: S547.

[22] Cannella R, Agnello F, Porrello G, et al. Performance of ultrasound-guided attenuation parameter and 2D shear wave elastography in patients with metabolic dysfunction-associated steatotic liver disease[J]. Eur Radiol, 2025, 35(4): 2339-2350.

[23] 杨孺牛,符进,王德琴.多模态影像技术联合超声剪切波弹性成像对代谢相关性脂肪性肝病的诊断价值[J].肝脏,2023,28(9):1101-1104.

[24] 韩凯婷,甘洁.多模态 MRI 技术在代谢相关性脂肪性肝病分级评估中的研究进展[J].实用放射学杂志,2024,40(8):1375-1378.

[25] Sato S, Kawai H, Genda T. FRI-272 Steatotic liver disease with normal liver enzyme: Clinical use of ultrasound attenuation method and share wave elastography[J]. J Hepatol, 2024, 80: S490-S491.

[26] Honni O, Ruby L, Paverd C, et al. Comparison of ultrasound attenuation imaging using a linear versus a conventional convex probe: A volunteer study[J]. Diagnostics (Basel), 2024, 14(9): 886.

[27] Namakchian M, Rabizadeh S, Seifouri S, et al. Fibrosis score 4 index has an independent relationship with coronary artery diseases in patients with metabolic-associated fatty liver disease[J]. Diabetol Metab Syndr, 2023, 15(1): 57.

[28] Vasconcelos L, Grady J, Aristizabal S, et al. Attenuation measuring ultrasound shearwave elastography (AMUSE) as noninvasive imaging biomarker for liver acute cellular rejection[J]. Ultrasound Med Biol, 2025, 51(1): 149-158.

收稿日期：2025-10-09

（本文编辑：孙海儿）