·专家论坛·

DOI：10.12449/JCH260706

超声在肝细胞癌消融疗效评估中的应用与进展

李清心，李　杰，张德智

吉林大学第一医院超声诊断中心腹部超声科，长春 130021

通信作者：张德智，dezhi@jlu.edu.cn（ORCID：0000-0002-4331-008X）

摘要：肝细胞癌（HCC）局部消融治疗后的准确疗效评价对于识别残余活性肿瘤、判断消融边界及指导后续随访与监测具有重要意义。增强计算机体层成像和磁共振成像是目前主要评价手段，但在实时动态观察、术中应用及重复性方面存在一定局限性。超声，尤其是超声造影（CEUS）凭借实时显示微循环灌注、无电离辐射和可重复等优势，可贯穿HCC消融治疗全过程，在残余肿瘤识别、即时疗效判断及随访管理中发挥重要作用。本文围绕HCC热消融疗效评价的病理学基础、主要评价终点、超声技术及CEUS肝脏影像报告与数据系统治疗反应评估算法的应用进展进行综述，并探讨多模态融合、定量分析及标准化评价的发展方向，为进一步优化HCC消融疗效评估体系提供参考。

关键词：癌，肝细胞；消融技术；超声疗法

Application and progress of ultrasound in treatment response assessment after ablation for hepatocellular carcinoma

Li Qingxin, *Li Jie*, *Zhang Dezhi*

Department of Abdominal Ultrasound, *Diagnostic Ultrasound Center*, *The First Hospital of Jilin University*, *Changchun 130021*, *China*

Corresponding author: *Zhang Dezhi*, *dezhi@jlu.edu.cn* (*ORCID*: *0000-0002-4331-008X*)

Abstract: Accurate assessment of treatment response after local ablation is of great importance for detecting residual viable tumor, evaluating ablative margins, and guiding subsequent follow-up and monitoring in patients with hepatocellular carcinoma (HCC). Contrast-enhanced computed tomography and magnetic resonance imaging are currently the main imaging modalities for post-ablation evaluation, but have certain limitations in real-time imaging, intraoperative application, and repeatability. Ultrasound, especially contrast-enhanced ultrasound (CEUS), can be used throughout the entire process of ablation therapy for HCC due to its advantages of real-time visualization of microvascular perfusion, no ionizing radiation, and repeatability, thereby playing an important role in detecting residual viable tumor, assessing immediate treatment response, and monitoring patients during follow-up. This article reviews the pathological basis and major endpoints of treatment response assessment after thermal ablation for HCC, with a focus on the clinical application of ultrasound techniques and the Contrast-Enhanced Ultrasound Liver Imaging Reporting and Data System Treatment Response Algorithm. In addition, it discusses the future development directions of multimodal imaging, quantitative assessment, and standardized evaluation, in order to provide a reference for further optimizing the treatment response assessment system for HCC after ablation.

Key words: Carcinoma, Hepatocellular; Ablation Techniques; Ultrasonic Therapy

肝细胞癌（hepatocellular carcinoma，HCC）是当前全球重大公共卫生负担[1]。热消融技术（thermal ablation，TA），包括射频消融（radiofrequency ablation，RFA）和微波消融（microwave ablation，MWA），是小肝癌及无法接受手术切除的HCC患者的重要治疗手段[2]，兼具安全性与成本效益[3-4]。消融预后高度依赖于技术性完全消融，消融质量直接关联患者的无复发生存期与总生存期[5]。因此，建立精准、及时、覆盖围手术期全过程的消

融疗效评估体系，已成为提高HCC消融治疗成功率、改善患者长期预后的关键环节。

目前，增强计算机体层成像（computed tomography，CT）及钆塞酸二钠增强磁共振成像（magnetic resonance imaging，MRI）被公认为HCC消融术后疗效评估的金标准[6]。美国放射学会肝脏影像报告与数据系统（liver imaging reporting and data system，LI-RADS）不仅规范了HCC的影像采集与报告词汇，还通过治疗反应评估（treatment response assessment，TRA）为CT及MRI的疗效评价提供了标准化框架[7]。然而，CT和MRI在消融疗效评估中仍存在无法实现术中实时监测、电离辐射及造影剂限制特殊人群应用、术后早期的炎性改变易造成假阳性等局限[8]，亟需可覆盖消融全过程的动态评估工具[9]。

超声造影（contrast-enhanced ultrasound，CEUS）具备实时成像能力，可敏感反映肿瘤微循环灌注变化，同时具有无电离辐射、无肾毒性、可重复检查及较高患者耐受性等特点[7,10]。相较于增强CT或MRI，CEUS能够在更短时间内、以更低成本实现对肿瘤残余活性及治疗反应的评估[11]，并可通过延迟期或后血管期再注射造影剂，提高对残余或复发病灶的检出能力。在消融治疗过程中，CEUS可于术后即刻评估消融效果，及时发现残余未灭活肿瘤并指导再次治疗，从而显著降低不完全消融率[12]。此外，对于常规超声难以显示的隐匿病灶，超声融合导航技术可将术前CT/MRI信息实时配准至超声影像，从而弥补单一超声视野不足的局限[13]。然而，超声在HCC消融疗效评估中的标准化应用仍面临挑战。尽管CEUS LI-RADS治疗反应评估体系已被提出并逐步推广[7]，但其在不同中心的可重复性、定量参数的标准化程度，以及其能否替代CT/MRI成为主要随访影像手段，仍存在一定争议[14-15]。

本文拟围绕肿瘤活性、消融边界、长期结局等3个维度，系统综述常规超声、CEUS、多模态融合成像及超声新技术在HCC消融全过程疗效评估中的应用进展，并探讨当前标准化应用中的问题及未来发展方向。

1 HCC消融疗效评价的病理学基础与核心指标

消融术后的影像学评估以组织病理学改变为基础，消融区域随时间推移会发生凝固性坏死、炎性反应、肉芽组织增生及纤维化等一系列特征性变化[16]。同时，规范统一的疗效评价终点术语是临床诊疗与科研标准化的重要基础。本节将分别阐述消融后病灶的组织学变化，并梳理当前国际通用指南中消融疗效评价的核心终点术语及其判定标准。

1.1 消融后组织学改变

HCC热消融后的组织学改变以凝固性坏死为核心，并伴随周边区域由急性炎症反应向纤维化修复的逐步演变[3,17]。消融中心区域因高温致蛋白质变性、细胞坏死，形成凝固性坏死灶；外周早期可见充血水肿带，表现为动脉期环形或周边强化，是消融后影像判读假阳性的主要影响因素。术后1～2周，炎症逐渐消退，强化环变薄或消失；若强化环持续增厚或出现结节样强化，则高度提示肿瘤残留或复发[7,18-21]。随修复进程，消融区逐渐被纤维化瘢痕包绕，体积逐渐缩小，是长期随访中稳定病灶形成的病理基础[15,22]。

1.2 疗效评价的主要终点

HCC消融治疗后的疗效评价需基于统一的肿瘤学终点体系，以实现影像学结果与临床预后的可比性与可解释性。根据美国介入放射学会2016年发布的消融术语标准化共识，技术性相关指标分为“技术成功（technical success）”与“技术疗效（technical efficacy）”[23]。技术成功指消融操作按照术前既定方案顺利完成，术中或术后即刻影像确认肿瘤已被完全覆盖，主要反映操作过程是否达到预期目的。技术疗效指首次随访影像学检查（通常于术后约1个月进行）证实治疗区内不存在残余强化或其他存活肿瘤征象，反映消融治疗是否真正达到预期疗效。该类指标更强调短期治疗的完整性，是评价消融操作质量的重要依据。

完全消融（complete ablation）与残余活性肿瘤（residual viable tumor）是基于改良实体瘤疗效评价标准与LI-RADS TRA建立的早期消融疗效判定指标[7,24-26]。完全消融定义为动脉期影像上，消融区域及周边安全边界内未出现异常强化灶，在病理学上对应肿瘤的全面凝固性坏死[27]。残余活性肿瘤则指消融灶边缘或内部出现结节状、偏心性或不对称的动脉期高强化，并于门静脉期或延迟期呈现“快进快出”的廓清表现[28]，提示消融范围不足，肿瘤细胞仍具有活性。近年来，无论是改良实体瘤疗效评价标准还是LI-RADS TRA，均强调应依据病灶内是否存在动脉期强化等反映肿瘤活性的影像学表现进行疗效判断，而非单纯依赖病灶大小变化。该理念体现了HCC局部治疗反应评价已由传统的形态学测量逐步转向以肿瘤活性为核心的生物学评价。

从长期肿瘤学结局来看，局部肿瘤进展（local tumor progression，LTP）及肝内远处复发（intrahepatic distant recurrence，IDR）是评价消融治疗长期有效性的关键终点[29]。LTP定义为既往完全消融区域边缘或内部出现新的动脉期高强化灶，通常提示残余微小肿瘤或消融边

界不足[30]。IDR则指远离原消融区域的新发肿瘤灶，更多反映基础肝病背景、肿瘤多中心发生及潜在微转移等生物学行为[31]。残余活性肿瘤代表本次治疗不充分，而LTP须在首次确认完全消融后方可定义，体现的是长期局部控制情况，二者在临床意义上存在本质区别。

2 超声技术在消融疗效评估中的应用

2.1 *常规超声与多普勒超声* 常规二维超声是消融术后最基础的影像学评估手段。消融后病灶可表现为回声增强、回声不均、边界模糊或声像图范围增大，上述改变与凝固性坏死、局部水肿、炎症反应、出血及气体产生等因素有关[32]。常规超声可大致评估消融灶的大小、形态及回声演变趋势，亦可用于发现消融相关并发症，如肝包膜下血肿、积液、胆管扩张及邻近脏器损伤等[33]。彩色及能量多普勒超声可进一步评估消融区及邻近重要血管的血流情况。对于病灶邻近胆管、胆囊及膈肌等重要解剖结构的患者，多普勒超声有助于术后安全性评估。然而，常规超声及多普勒超声主要反映组织形态及宏观血流变化，对于消融边缘微小残余病灶及低速微循环灌注的敏感性有限[34]。尤其在肝硬化背景下，术后炎症、水肿及回声改变使残余肿瘤与正常肝实质难以区分，易导致漏诊。因此，常规超声及多普勒超声不能单独作为判断肿瘤活性及消融是否完全的主要依据，仅可作为初步筛查及长期随访的辅助工具。

2.2 CEUS CEUS通过静脉注射纯血池微泡造影剂，能够实时、动态地显示病灶的微循环灌注情况，是目前术中及术后超声评估消融疗效的重要技术[35]。与CT和MRI相比，CEUS可实时观察病灶的强化过程，且无肾毒性及电离辐射，尤其适用于肾功能不全患者及短期内的密切随访[36]。CEUS在鉴别消融后“肿瘤性强化”与“反应性强化”方面具有关键作用。在动脉期（通常为注药后10～30 s），活性肿瘤组织表现为快速的高增强。若消融灶边缘或内部出现局灶性、结节状或不对称的异常强化，且该强化区域在门静脉期或延迟期呈现“快进快出”的廓清特征，则高度提示残余活性肿瘤。消融术后，坏死组织周边的炎症反应带在动脉期亦可表现为环形强化，但其形态通常菲薄、均匀且光滑，且在门静脉期及延迟期多呈等增强或持续增强，无廓清现象[7]。CEUS的判读不应简单以“有无周边强化”为标准，而应结合强化形态、动态增强模式、治疗前病灶位置及其他影像结果进行综合分析。对于术中发现的残余强化灶，可在同一治疗过程中立即追加消融，从而减少二次住院及重复治疗，提高技术性完全消融率[37]。研究显示，采用术中CEUS即刻评估并即时追加消融的策略，可显著降低不完全消融的发生率[11,38]。

CEUS亦存在一定局限性，其成像质量受声窗、病灶位置、患者体型及肠气干扰等因素影响，对于膈顶部、肝脏深部及多发病灶的评估相对困难[35]。此外，CEUS对全肝复发筛查及复杂背景肝硬化结节的整体评价能力有限，对操作者经验的依赖性较高，仍存在一定的观察者间差异[39]。因此，目前CEUS更多作为增强CT和MRI的重要补充手段，而非完全替代。

2.3 *融合成像、三维超声和定量分析* 近年来，多模态融合成像、三维超声及定量分析技术的发展进一步拓展了超声在HCC消融疗效评估中的应用[37]。超声-CT/MRI融合成像通过将术前CT或MRI图像与实时超声或CEUS图像进行空间配准，实现了原发肿瘤、消融区及周围重要解剖结构的同步显示，尤其适用于常规超声显示困难或边界不清的病灶[40]。一项针对295例常规超声完全不可见或CEUS显示不佳的肝肿瘤（包括162个HCC和133个转移瘤）的研究表明[41]，应用超声-CT/MRI融合引导的实时虚拟导航系统进行消融治疗，其中282/295（95.6%）例病灶被正确靶向，266/295（90.2%）例病灶成功消融。该结果不仅证实融合成像系统能够精准定位并成功消融单用超声无法检测的目标肿瘤，还进一步扩大了超声引导消融手术的受益人群。这种多模态融合不仅显著提高了病灶的显示度，还能更为准确地评估消融范围并测量最小消融边界[42]。研究显示，CEUS-CT/MRI图像融合在检测残留活性肿瘤的消融边缘方面具有较高的敏感度、特异度和准确度[43]。在术后即刻将实际消融范围与术前计划的最小消融边界进行比对，可直观判断消融边缘是否充分。

三维超声通过对二维图像进行容积重建，能够直观显示消融灶的立体形态及其与原肿瘤的空间关系。三维CEUS进一步整合血流灌注信息，可从多角度观察消融灶边缘是否存在不规则强化灶。与二维超声相比，三维CEUS更有助于评价消融灶形态是否规则以及消融范围是否充分[42]。Xu等[44]的研究应用三维CEUS评估肝癌（n=107）局部治疗后的疗效，结果表明，相较于二维CEUS，三维CEUS对残余肿瘤的检测效果更优。另有研究[45]评估了消融区内部或边缘是否存在结节状动脉期增强区域或残余活性肿瘤。结果显示，三维CEUS的敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值及准确度分别为91.7%［95%置信区间（95%*CI*）：0.760～1.073］、90.9%（95%*CI*：0.739～1.079）、91.7%、90.9%和91.3%。

基于时间-强度曲线的CEUS定量分析可获取一系列灌注参数，包括达峰时间、峰值强度、曲线下面积、上升斜率等，从而客观反映消融区及周边的微循环变化[46]。研究结果显示，热消融前CEUS的定量参数结合血液化验指标，为预测HCC患者术后复发和生存率提供了潜在的临床价值[47]。该技术有助于减少主观判读的差异，然而，相关参数受造影剂剂量、注射速度、机械指数、感兴趣区选择、呼吸运动及循环状态等因素影响，目前尚缺乏统一的阈值和标准化的分析流程。

融合成像、三维超声及CEUS定量分析等技术拓展了超声在消融疗效评估中的应用能力，尤其为消融边界的量化评估及复杂病灶的定位提供了新的解决路径。然而，上述技术在不同设备间的重复性、定量参数的标准化阈值以及大规模临床获益方面，仍有待进一步开展大规模多中心研究予以验证[48-49]。

3 基于CEUS LI-RADS的标准化疗效评价

美国放射学会LI-RADS最初为CT/MRI建立了标准化框架，涵盖HCC的筛查、诊断及治疗反应评估[50]。2024年，美国放射学会正式将CEUS非放射TRA纳入LI-RADS体系，从而为消融等非放射局部治疗后的CEUS评估提供了统一的分类标准[7]（图1）。

3.1 CEUS LI-RADS TRA的主要类别及判定逻辑

CEUS LI-RADS TRA主要适用于经RFA、MWA等非放射性局部治疗后的疗效评价，其核心理念与CT/MRI LI-RADS TRA一致，即以肿瘤活性而非病灶大小作为评价重点。CEUS LI-RADS TRA的基本评价类别包括非活性（LR-TR Nonviable）、可疑（LR-TR Equivocal）和活性（LR-TR Viable）[7]。其中，“非活性”定义为瘤内及瘤周均无明确肿瘤活性证据，影像学表现为消融区及周边安全边界内无动脉期强化，或仅见薄而均匀的反应性周边强化且无廓清。该类别提示消融治疗充分，按常规随访计划复查即可。“活性”定义为存在明确的肿瘤活性证据，影像学表现为瘤内或瘤周出现明确的动脉期强化，并伴随门静脉期或延迟期的廓清，符合活性肿瘤的特征。该类别提示消融不彻底或局部复发。“可疑”则指瘤内或瘤周的肿瘤活性判定存在不确定性，包括强化程度不典型、廓清特征不明确、或术后早期炎性反应与微小残余肿瘤难以区分等情况。

消融区内强化与消融区周边强化的区分，是CEUS LI-RADS TRA的重要特征。任何明确的瘤内动脉期强化均被视为可疑或活性证据。对于瘤周肿瘤活性的判

【步骤1】：使用CEUS影像标准评估瘤内和瘤周肿瘤活性。若不可评估，则归为LR-TR不可评估，并进入步骤4。

肿瘤内部活性	CEUS影像判定标准
无（Absent）	无瘤内增强
不确定（Uncertain）	动脉期低增强（伴或不伴廓清）
存在（Present）	脉期高增强（伴或不伴廓清）或动脉期等增强（伴或不伴廓清）

肿瘤内部活性	CEUS影像判定标准
无（Absent）	增强与周围肝实质相同
不确定（Uncertain）	动脉期高增强不伴廓清或动脉期等增强伴廓清或动脉期低增强
存在（Present）	动脉期高增强伴后续廓清

【步骤2】：当内部、周边两处评估结果出现难以定论的冲突情况时，启用官方的冲突判定规则进行修正评判，减少判读争议。

【步骤3】：综合瘤内和瘤周肿瘤活性评估，赋予单一治疗反应评估（TRA）类别。

		肿瘤内部活性		
		无	不确定	存在
肿瘤周边活性	无	LR-TR非活性	LR-TR可疑	LR-TR活性
	不确定	LR-TR可疑	LR-TR可疑	LR-TR活性
	存在	LR-TR活性	LR-TR活性	LR-TR活性

【步骤4】：回看前面三步的分级结果，判断最终定级是否契合影像全貌。如果判定合理，完成本次病灶评估，如果还有其他治疗过的病灶，继续重复上述步骤逐一判级；若判定不合理，重新回溯前面步骤进行再评估。

注：LI-RADS，肝脏影像报告与数据系统；CEUS，超声造影；LR-TR，肝脏影像报告与数据系统治疗反应评估。

图1 2024年版LI-RADS CEUS非放射治疗反应评估流程图

Figure 1 Flowchart of CEUS LI-RADS TRA（non-radiation treatment response assessment），2024 edition

读，则采用更为严格的标准，不仅要求存在动脉期强化，还需结合廓清特征及形态学细节进行综合判断。典型残余肿瘤的CEUS表现为消融灶内部或边缘出现结节状、偏心性或不规则的动脉期高强化，并伴随门静脉期及延迟期的造影剂廓清。反应性强化在CEUS上多表现为薄而均匀的环形强化，完整围绕消融灶1周，且在延迟期不出现廓清。该反应性强化于术后1～2周内逐渐减退，至术后1个月左右基本消失。

对于可疑病灶的管理，指南建议采取以下管理策略：由多学科团队结合临床背景、治疗时间及既往影像学资料进行综合评估；如条件允许，可于短期（4～8周）内复查CEUS或改用CT/MRI进一步明确；若临床高度怀疑残余肿瘤，可直接考虑诊断性穿刺活组织检查或经验性补充消融。在一项针对消融后LTP与术后炎症反应鉴别的大样本研究中[51]，研究者从2 745例HCC、经过5 612次消融治疗的患者中筛选出212个符合LTP与炎症反应鉴别条件的CEUS病例进行观察。其中，170/212（80%）依据CEUS LI-RADS TRA分类标准归为“非活性”，42/212（20%）归为“可疑”。该结果既表明CEUS LI-RADS TRA对典型LTP具有较高的识别敏感性，也提示“可疑”分类在消融后周边强化鉴别中的临床占比不低，需进一步实施临床管理。

3.2 与CT/MRI LI-RADS TRA的异同 CEUS LI-RADS TRA与CT/MRI LI-RADS TRA均建立在“肿瘤活性优先于病灶大小”的评价理念基础之上，均采用非活性、活性、可疑三级分类体系，最终目标均为识别残余活性肿瘤并指导后续临床治疗[7]。二者的差异主要体现为成像机制与临床适用场景的区别。CEUS依托微泡造影剂实现对血流灌注的实时显示，可实时连续观测动脉期、门静脉期、延迟期全程微循环动态，且可于术中或术后即刻开展检查，更适用于围手术期即时疗效评估及补充消融决策。增强CT/MRI依托横断面成像与单时间点增强扫描，对全肝具备良好的全局显示能力，更适合术后阶段性疗效评价、IDR筛查、多发病灶评估及复杂解剖区域观察。因此，CEUS更侧重目标病灶的实时灌注评价，CT/MRI更侧重全肝评估与多期影像综合分析。近年来，多项研究显示[52-54]，CEUS LI-RADS TRA在识别残余活性肿瘤方面，与增强CT及MRI具有较高的一致性。一项纳入244例HCC消融患者、共389个消融后病灶的研究表明[55]，CEUS TRA与CT/MRI LI-RADS TRA在预测肿瘤活性方面具备相近的诊断效能，可作为CT/MRI检查的有效补充方案。

3.3 适用范围与局限性 最新版CT/MRI LI-RADS TRA（2024版）已完成进一步细化，该版本依据非放射性治疗（如RFA、MWA）与放射性治疗（如经导管动脉化疗栓塞术、经导管动脉放射栓塞术、体部立体定向放射治疗）的不同作用机制，分别设置了差异化的评价路径[7]。放射性治疗后病灶出现持续强化，可能反映迟发性细胞死亡，并不一定提示存在残余活性肿瘤；与之相对，热消融治疗后理论上应形成完全无灌注的凝固性坏死，因此病灶出现持续强化时，更需警惕残余肿瘤的存在。热消融术后炎性强化多为一过性，短期随访过程中自行消退，若直接套用放疗的评价标准，将大幅提升假阳性判读的概率。由于两类治疗的组织学病理基础存在差异，因此不宜将放射治疗后的影像解读结论直接套用于热消融疗效评价。从适用范围来看，CEUS LI-RADS TRA更适用于超声下可清晰显示的目标治疗病灶，尤其适合RFA、MWA等热消融术后的局部肿瘤活性判断。其优势应用场景包括：术中或术后早期识别残余强化病灶、指导即时补充消融、评估增强CT/MRI无法定性的局部强化灶，以及为肾功能不全、碘对比剂禁忌或MRI检查禁忌的患者提供补充评估。针对单个或少数目标病灶，CEUS可提供连续动脉期动态观察，有助于提升对微小残余病灶的识别能力。

但CEUS LI-RADS TRA同样具有一定局限性。首先，该体系依赖治疗灶在B型超声上的可见性，若消融区显示不清，则无法可靠评价灶内和灶周活性[15]。其次，CEUS受声窗、病灶深度、膈肌遮挡、肺气或肠气干扰、患者体型及操作者经验影响明显。膈顶部、肝脏深部、尾状叶及多发病灶的评价准确性可能下降[39]。此外，消融后短期气体、声影和反应性充血可影响判读，既可能造成假阳性，也可能掩盖小范围残余病灶。对于治疗后早期的周边异常强化，应结合治疗时间和强化形态谨慎解释，必要时短期复查或联合CT/MRI。

4 小结与展望

消融后疗效评价已成为影响再次治疗决策和长期预后的重要环节，增强CT/MRI作为金标准仍存在实时性不足等局限。CEUS凭借其实时、动态、可重复等优势，可贯穿消融全流程，在识别残余活性肿瘤、指导补充消融和监测LTP方面具有重要价值。近年来，HCC消融疗效评价理念已逐步转向以肿瘤活性、消融边界完整性及长期肿瘤学结局为核心的综合评价。CEUS LI-RADS TRA体系为治疗反应的标准化报告提供了统一框架。融合成像、三维超声、定量CEUS及人工智能等新技术的发展，进一步推动了疗效评价向精准决策转变。然而，

不同超声技术在检查流程、定量参数、重复性及评价阈值方面尚未完全统一，其不同设备、不同中心应用的稳定性仍需更多高质量研究验证。未来，HCC消融疗效评价的发展方向并非以单一影像技术替代其他方法，而是在标准化评价体系的基础上，充分发挥超声、CT和MRI等多模态影像的互补优势。结合定量影像、生物标志物及人工智能算法，构建覆盖围手术期全过程的精准疗效评价和风险分层体系，为患者提供更加精准和个体化的治疗管理策略。

利益冲突声明：本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明：李清心负责撰写文章初稿；李杰负责整理参考文献，协助完善文章内容；张德智负责指导文章思路架构并审定终稿。

参考文献：

[1] European Association for the Study of the Liver. EASL clinical practice guidelines on the management of hepatocellular carcinoma[J]. J Hepatol, 2025, 82(2): 315-374. DOI: 10.1016/j.jhep.2024.08.028.

[2] Ceppa E P, Collings A T, Abdalla M, et al. SAGES/AHPBA guidelines for the use of microwave and radiofrequency liver ablation for the surgical treatment of hepatocellular carcinoma or colorectal liver metastases less than 5 cm[J]. Surg Endosc, 2023, 37(12): 8991-9000. DOI: 10.1007/s00464-023-10468-1.

[3] Crocetti L, Scalise P, Bozzi E, et al. Thermal ablation of hepatocellular carcinoma[J]. J Med Imaging Radiat Oncol, 2023, 67(8): 817-831. DOI: 10.1111/1754-9485.13613.

[4] Omata M, Cheng A L, Kokudo N, et al. Asia-Pacific clinical practice guidelines on the management of hepatocellular carcinoma: A 2017 update[J]. Hepatol Int, 2017, 11(4): 317-370. DOI: 10.1007/s12072-017-9799-9.

[5] Gupta P, Maralakunte M, Kumar-M P, et al. Overall survival and local recurrence following RFA, MWA, and cryoablation of very early and early HCC: A systematic review and Bayesian network meta-analysis[J]. Eur Radiol, 2021, 31(7): 5400-5408. DOI: 10.1007/s00330-020-07610-1.

[6] Voizard N, Cerny M, Assad A, et al. Assessment of hepatocellular carcinoma treatment response with LI-RADS: A pictorial review[J]. Insights Imaging, 2019, 10(1): 121. DOI: 10.1186/s13244-019-0801-z.

[7] Lyshchik A, Fetzer D T, Kono Y, et al. Liver imaging reporting and data system contrast-enhanced US nonradiation treatment response assessment version 2024[J]. Radiology, 2024, 311(2): e232369. DOI: 10.1148/radiol.232369.

[8] Granata V, Petrillo M, Fusco R, et al. Surveillance of HCC patients after liver RFA: Role of MRI with hepatospecific contrast versus three-phase CT scan-experience of high volume oncologic institute[J]. Gastroenterol Res Pract, 2013, 2013: 469097. DOI: 10.1155/2013/469097.

[9] Aslam A, Chernyak V, Tang A, et al. CT/MRI LI-RADS 2024 update: Treatment response assessment[J]. Radiology, 2024, 313(2): e232408. DOI: 10.1148/radiol.232408.

[10] Meloni M F, Francica G, Chiang J, et al. Use of contrast-enhanced ultrasound in ablation therapy of HCC: Planning, guiding, and assessing treatment response[J]. J Ultrasound Med, 2021, 40(5): 879-894. DOI: 10.1002/jum.15471.

[11] Kelekis A, Filippiadis D. Computed tomography and ultrasounds for the follow-up of hepatocellular carcinoma ablation: What you need to know[J]. Diagnostics, 2016, 6(1): 9. DOI: 10.3390/diagnostics6010009.

[12] Chen M H, Yang W, Yan K, et al. Large liver tumors: Protocol for radiofrequency ablation and its clinical application in 110 patients: Mathematic model, overlapping mode, and electrode placement process[J]. Radiology, 2004, 232(1): 260-271. DOI: 10.1148/radiol.2321030821.

[13] Lu Y B, Huang Y N, Weng Y C, et al. Contrast-enhanced ultrasonography guidance avoids US-CT/MR fusion error for percutaneous radiofrequency ablation of hepatocellular carcinoma[J]. BMC Med Imaging, 2024, 24(1): 323. DOI: 10.1186/s12880-024-01508-w.

[14] Schellhaas B, Hammon M, Strobel D, et al. Interobserver and intermodality agreement of standardized algorithms for non-invasive diagnosis of hepatocellular carcinoma in high-risk patients: CEUS-LI-RADS versus MRI-LI-RADS[J]. Eur Radiol, 2018, 28(10): 4254-4264. DOI: 10.1007/s00330-018-5379-1.

[15] Fetzer D T, Kono Y, Piscaglia F, et al. Contrast-enhanced ultrasound LI-RADS nonradiation treatment response assessment: Applications, challenges, and future directions[J]. Abdom Radiol (NY), 2026. DOI: 10.1007/s00261-026-05469-2.

[16] Goldberg S N, Gazelle G S, Mueller P R. Thermal ablation therapy for focal malignancy: A unified approach to underlying principles, techniques, and diagnostic imaging guidance[J]. AJR Am J Roentgenol, 2000, 174(2): 323-331. DOI: 10.2214/ajr.174.2.1740323.

[17] Abu Zahra S, Nadeem A, Kundu A, et al. Recent advances in ablative therapies for hepatocellular carcinoma[J]. Cancers, 2025, 17(19): 3251. DOI: 10.3390/cancers17193251.

[18] Yamashiki N, Kato T, Bejarano P A, et al. Histopathological changes after microwave coagulation therapy for patients with hepatocellular carcinoma: Review of 15 explanted livers[J]. Am J Gastroenterol, 2003, 98(9): 2052-2059. DOI: 10.1111/j.1572-0241.2003.07642.x.

[19] Gravante G, Ong S L, Metcalfe M S, et al. The effects of radiofrequency ablation on the hepatic parenchyma: Histological bases for tumor recurrences[J]. Surg Oncol, 2011, 20(4): 237-245. DOI: 10.1016/j.suronc.2010.01.005.

[20] Lee J M, Kim Y K, Lee Y H, et al. Percutaneous radiofrequency thermal ablation with hypertonic saline injection: in vivo study in a rabbit liver model[J]. Korean J Radiol, 2003, 4(1): 27-34. DOI: 10.3348/kjr.2003.4.1.27.

[21] Solbiati L, Ierace T, Goldberg S N, et al. Percutaneous US-guided radio-frequency tissue ablation of liver metastases: Treatment and follow-up in 16 patients[J]. Radiology, 1997, 202(1): 195-203. DOI: 10.1148/radiology.202.1.8988211.

[22] Habibollahi P, Sheth R A, Cressman E N K. Histological correlation for radiofrequency and microwave ablation in the local control of hepatocellular carcinoma (HCC) before liver transplantation: A comprehensive review[J]. Cancers, 2020, 13(1): 104. DOI: 10.3390/cancers13010104.

[23] Ahmed M, Solbiati L, Brace CL, et al. Image-guided tumor ablation: standardization of terminology and reporting criteria--a 10-year update[J]. Radiology, 2014, 273(1): 241-260. DOI: 10.1148/radiol.14132958.

[24] Lencioni R, Llovet J M. Modified RECIST (mRECIST) assessment for hepatocellular carcinoma[J]. Semin Liver Dis, 2010, 30(1): 52-60. DOI: 10.1055/s-0030-1247132.

[25] Yu H L, Bai Y P, Xie X Y, et al. RECIST 1.1 versus mRECIST for assessment of tumour response to molecular targeted therapies and disease outcomes in patients with hepatocellular carcinoma: A systematic review and meta-analysis[J]. BMJ Open, 2022, 12(6): e052294. DOI: 10.1136/bmjopen-2021-052294.

[26] Llovet J M, Lencioni R. mRECIST for HCC: Performance and novel refinements[J]. J Hepatol, 2020, 72(2): 288-306. DOI: 10.1016/j.jhep.2019.09.026.

[27] Crocetti L, de Baere T, Lencioni R. Quality improvement guidelines for radiofrequency ablation of liver tumours[J]. Cardiovasc Inter-

vent Radiol, 2010, 33(1): 11-17. DOI: 10.1007/s00270-009-9736-y.
[28] Serra C, Cucchetti A, Felicani C, et al. Assessment of radiofrequency ablation efficacy for hepatocellular carcinoma by histology and pretransplant radiology[J]. Liver Transpl, 2019, 25(1): 88-97. DOI: 10.1002/lt.25381.
[29] Chaudhry M, McGinty K A, Mervak B, et al. The LI-RADS version 2018 MRI treatment response algorithm: Evaluation of ablated hepatocellular carcinoma[J]. Radiology, 2020, 294(2): 320-326. DOI: 10.1148/radiol.2019191581.
[30] Bansal S, Gui J, Merrill C, et al. Contrast-enhanced US in local ablative therapy and secondary surveillance for hepatocellular carcinoma[J]. Radiographics, 2019, 39(5): 1302-1322. DOI: 10.1148/rg.2019180205.
[31] Shi W X, He Y, Ding W B, et al. Contrast-enhanced ultrasonography used for post-treatment responses evaluation of radiofrequency ablations for hepatocellular carcinoma: A meta-analysis[J]. Br J Radiol, 2016, 89(1064): 20150973. DOI: 10.1259/bjr.20150973.
[32] Kim S K, Lim H K, Kim Y H, et al. Hepatocellular carcinoma treated with radio-frequency ablation: Spectrum of imaging findings[J]. Radiographics, 2003, 23(1): 107-121. DOI: 10.1148/rg.231025055.
[33] de Muzio F, Cutolo C, Dell'Aversana F, et al. Complications after thermal ablation of hepatocellular carcinoma and liver metastases: Imaging findings[J]. Diagnostics (Basel), 2022, 12(5): 1151. DOI: 10.3390/diagnostics12051151.
[34] Kang H J, Lee J M, Jeon S K, et al. Microvascular flow imaging of residual or recurrent hepatocellular carcinoma after transarterial chemoembolization: Comparison with color/power Doppler imaging[J]. Korean J Radiol, 2019, 20(7): 1114-1123. DOI: 10.3348/kjr.2018.0932.
[35] Dietrich C F, Nolsøe C P, Barr R G, et al. Guidelines and good clinical practice recommendations for contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in the liver-update 2020 WFUMB in cooperation with EFSUMB, AFSUMB, AIUM, and FLAUS[J]. Ultrasound Med Biol, 2020, 46(10): 2579-2604. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2020.04.030.
[36] Jang J Y, Kim M Y, Jeong S W, et al. Current consensus and guidelines of contrast enhanced ultrasound for the characterization of focal liver lesions[J]. Clin Mol Hepatol, 2013, 19(1): 1-16. DOI: 10.3350/cmh.2013.19.1.1.
[37] Inzerillo A, Meloni M F, Taibbi A, et al. Loco-regional treatment of hepatocellular carcinoma: Role of contrast-enhanced ultrasonography[J]. World J Hepatol, 2022, 14(5): 911-922. DOI: 10.4254/wjh.v14.i5.911.
[38] Mauri G, Porazzi E, Cova L, et al. Intraprocedural contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in liver percutaneous radiofrequency ablation: Clinical impact and health technology assessment[J]. Insights Imaging, 2014, 5(2): 209-216. DOI: 10.1007/s13244-014-0315-7.
[39] Eisenbrey J R, Gabriel H, Savsani E, et al. Contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in HCC diagnosis and assessment of tumor response to locoregional therapies[J]. Abdom Radiol, 2021, 46(8): 3579-3595. DOI: 10.1007/s00261-021-03059-y.
[40] Dong Y, Wang W P, Mao F, et al. Application of imaging fusion combining contrast-enhanced ultrasound and magnetic resonance imaging in detection of hepatic cellular carcinomas undetectable by conventional ultrasound[J]. J Gastroenterol Hepatol, 2016, 31(4): 822-828. DOI: 10.1111/jgh.13202.
[41] Mauri G, Cova L, De Beni S, et al. Real-time US-CT/MRI image fusion for guidance of thermal ablation of liver tumors undetectable with US: Results in 295 cases[J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2015, 38(1): 143-151. DOI: 10.1007/s00270-014-0897-y.
[42] Long H Y, Zhou X Y, Zhang X E, et al. 3D fusion is superior to 2D point-to-point contrast-enhanced US to evaluate the ablative margin after RFA for hepatocellular carcinoma[J]. Eur Radiol, 2024, 34(2): 1247-1257. DOI: 10.1007/s00330-023-10023-5.
[43] Li K, Su Z Z, Xu E J, et al. Evaluation of the ablation margin of hepatocellular carcinoma using CEUS-CT/MR image fusion in a phantom model and in patients[J]. BMC Cancer, 2017, 17(1): 61. DOI: 10.1186/s12885-017-3061-7.
[44] Xu H X, Lu M D, Xie X H, et al. Treatment response evaluation with three-dimensional contrast-enhanced ultrasound for liver cancer after local therapies[J]. Eur J Radiol, 2010, 76(1): 81-88. DOI: 10.1016/j.ejrad.2009.05.006.
[45] Bartolotta T V, Taibbi A, Matranga D, et al. 3D versus 2D contrast-enhanced sonography in the evaluation of therapeutic response of hepatocellular carcinoma after locoregional therapies: Preliminary findings[J]. La Radiologia Med, 2015, 120(8): 695-704. DOI: 10.1007/s11547-015-0514-4.
[46] Cerrito L, Ainora M E, Cuccia G, et al. Dynamic contrast-enhanced ultrasound in the prediction of advanced hepatocellular carcinoma response to systemic and locoregional therapies[J]. Cancers, 2024, 16(3): 551. DOI: 10.3390/cancers16030551.
[47] Gu D Y, Zhang Y, Hu J X, et al. The value of contrast-enhanced ultrasound quantitative parameters in the prognosis prediction of hepatocellular carcinoma after thermal ablation: A retrospective cohort study[J]. J Gastrointest Oncol, 2022, 13(5): 2522-2531. DOI: 10.21037/jgo-22-919.
[48] Tao J, Feng G Y, Tang G, et al. Efficacy and safety of fusion imaging in radiofrequency ablation of hepatocellular carcinoma compared to ultrasound: A meta-analysis[J]. Front Surg, 2021, 8: 728098. DOI: 10.3389/fsurg.2021.728098.
[49] Calandri M, Mauri G, Yevich S, et al. Fusion imaging and virtual navigation to guide percutaneous thermal ablation of hepatocellular carcinoma: A review of the literature[J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2019, 42(5): 639-647. DOI: 10.1007/s00270-019-02167-z.
[50] Kim T K, Noh S Y, Wilson S R, et al. Contrast-enhanced ultrasound (CEUS) liver imaging reporting and data system (LI-RADS) 2017—a review of important differences compared to the CT/MRI system[J]. Clin Mol Hepatol, 2017, 23(4): 280-289. DOI: 10.3350/cmh.2017.0037.
[51] Yao J Q, Guo H L, Zhang X E, et al. Local tumor progression after hepatocellular carcinoma ablation: CEUS LI-RADS nonradiation TRA version 2024 versus a modified algorithm[J]. Ultrasound Med Biol, 2026, 52(6): 1116-1124. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2026.02.012.
[52] Cao J Y, Dong Y, Xu X L, et al. LI-RADS CEUS nonradiation TRA version 2024: Application on HCC patients treated with ablation treatment[J]. Ultrasound Med Biol, 2025, 51(8): 1308-1315. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2025.04.018.
[53] Kuon Yeng Escalante C M, Siu Xiao T, Kono Y, et al. Inter-reader agreement for contrast-enhanced ultrasound liver imaging reporting and data system major features and final categorization: A subanalysis from a prospective multicenter study[J]. J Ultrasound Med, 2025, 44(2): 349-357. DOI: 10.1002/jum.16608.
[54] Shenoy-Bhangle A S, Malik M S, Ali A, et al. Accuracy of cross-sectional imaging in predicting tumor viability using the LI-RADS treatment response algorithm after image-guided percutaneous ablation with radiologic-pathologic explant correlation[J]. Cancer Imaging, 2025, 25(1): 65. DOI: 10.1186/s40644-025-00884-y.
[55] Ruan S M, Cheng M Q, Huang H, et al. Application of the CT/MRI LI-RADS treatment response algorithm to contrast-enhanced ultrasound: A feasibility study[J]. J Hepatocell Carcinoma, 2022, 9: 437-451. DOI: 10.2147/JHC.S353914.

收稿日期：2026-07-15；**录用日期：**2026-07-31
本文编辑：王亚南

引证本文：李清心, 李杰, 张德智. 超声在肝细胞癌消融疗效评估中的应用与进展[J]. 临床肝胆病杂志, 2026, 42(7): 1519-1525.
Li Qingxin, Li Jie, Zhang Dezhi. Application and progress of ultrasound in treatment response assessment after ablation for hepatocellular carcinoma[J]. J Clin Hepatol, 2026, 42(7): 1519-1525.