

超声造影的肝脏三维重建技术在肝细胞癌微血管侵犯精准诊疗中应用

李元东¹ 任宾^{2*}

1 青海大学临床医学院 2 青海大学附属医院普通外科

DOI:10.12238/bmtr.v7i2.13390

[摘要] 肝细胞癌(HCC)的微血管侵犯(MVI)是预后不良的关键因素。超声造影(CEUS)结合三维重建技术通过高分辨率微血管成像,显著提高MVI的早期诊断率,并为个体化治疗提供依据。本文综述了基于超声造影的肝脏三维重建技术的当前研究进展、临床应用实例及未来应用前景,旨在为临床医生在HCC的精准诊疗中提供参考和指导。

[关键词] 超声造影; 肝细胞癌; 三维重建; 微血管侵犯; 精准诊疗

中图分类号: R735.7 文献标识码: A

Three-dimensional reconstruction of the liver by ultrasonography in the precise diagnosis and treatment of microvascular invasion in hepatocellular carcinoma

Yuandong Li¹ Bing Ren^{2*}

1 College of Clinical Medicine, Qinghai University

2 Department of General Surgery, Affiliated Hospital of Qinghai University

[Abstract] Microvascular invasion (MVI) in hepatocellular carcinoma (HCC) is a key factor for poor prognosis. Ultrasonography (CEUS) combined with three-dimensional reconstruction technology significantly improves the early diagnosis rate of MVI through high-resolution microvascular imaging and provides the basis for individualised treatment. This article reviews the current research progress, clinical application examples, and future application prospects of ultrasonography-based liver 3D reconstruction technology, aiming to provide clinicians with reference and guidance in the precise diagnosis and treatment of HCC.

[Key words] ultrasonography; hepatocellular carcinoma; three-dimensional reconstruction; microvascular invasion; precision diagnosis and treatment

前言

HCC是全球癌症相关死亡的主因之一, MVI作为其侵袭性标志, 与术后复发和生存率密切相关。传统影像学(CT/MRI)对MVI的敏感性有限, 而CEUS凭借动态血流成像优势, 成为MVI检测的新工具。近年来, 三维重建技术进一步提升了CEUS的空间分辨率, 为MVI的精准评估开辟了新途径。

超声造影技术通过注入对比剂, 从而更清晰地观察肝脏组织的微血管结构。研究表明, 基于超声造影的三维重建技术在HCC的微血管侵犯的诊断中展现出良好的应用前景。例如, 一项研究通过对比不同超声参数的三维重建, 能够更准确地识别出肝细胞癌中的微血管侵犯情况, 提升了对肝脏病变的诊断精度^[1]。此外, 超声造影技术的动态观察能力使得医生可以实时监测肝脏的血流变化, 这对于判断肿瘤的生物行为学和预测预

后具有重要价值。

尽管传统的影像学检查如CT和MRI在肝癌的诊断中仍然占据重要地位, 但它们在评估微血管侵犯方面的准确性受到限制。超声造影技术通过提供实时的血流动态信息, 能够更有效地识别肿瘤周围的微血管结构, 从而提高对肝细胞癌微血管侵犯的识别率^[2]。例如, 研究发现, 超声造影能够有效地区分正常肝组织和肝细胞癌组织, 尤其是在微血管结构的可视化方面, 其优势尤为明显^[3]。

此外, 结合人工智能技术的超声造影也展现出良好的前景。通过深度学习和机器学习算法, 研究者们能够从超声造影图像中提取更多有价值的信息, 进而提高对微血管侵犯的预测准确性。例如, 一项研究利用基于超声造影的深度学习方法, 成功预测了肝细胞癌患者的微血管侵犯风险, 并取得了良好的临床应

用效果^[4]。这种结合新技术的应用,为肝细胞癌的早期诊断和个性化治疗提供了新的思路。

总的来说,基于超声造影的肝脏三维重建技术在HCC微血管侵犯的精准诊疗中展现出巨大的应用价值。它不仅提高了HCC的诊断精确度,还为临床治疗提供了更为可靠的依据。未来,随着技术的不断发展和完善,CEUS将在HCC的早期诊断和治疗中发挥更加重要的作用。

1 主体

1.1 超声造影技术概述

1.1.1 超声造影的基本原理。超声造影技术(Contrast-Enhanced Ultrasound, CEUS)是一种利用超声波和特定的造影剂来增强影像对比度的成像技术。其基本原理是通过注射微小的气泡状造影剂(如SonoVue或Sonazoid),这些造影剂在超声波的作用下会产生回声,从而提高血管和组织的可视化效果。CEUS的造影剂通常是以微泡形式存在,具有良好的生物相容性和安全性,能够在体内迅速清除,避免了传统造影剂可能带来的肾脏或肝脏毒性风险^[5]。此外,CEUS能够实时观察血流动态,提供高时间和空间分辨率的影像,适合用于各种肝脏病变的评估。

1.1.2 超声造影的影像特征。超声造影的影像特征主要体现在其对血流动态的敏感性和对病变的高分辨率显示。通过对不同时间相位的观察,CEUS能够清晰显示病变的血流灌注情况。例如,肝细胞癌(HCC)在CEUS中通常表现为在动脉期的明显增强,而在门静脉期则可能出现洗脱现象,这种特征有助于区分良恶性肿瘤^[6]。此外,CEUS还能够通过定量分析血流灌注的动力学特征,如峰值增强时间、洗脱时间等,进一步提高对病变的诊断准确性^[7]。

1.1.3 与传统影像学技术的比较。与传统的影像学技术(如CT和MRI)相比,超声造影具有多项优势。首先,CEUS是一种无辐射的成像技术,适合于需要频繁监测的患者,尤其是儿童和孕妇^[8]。其次,CEUS的成像速度快,能够实时观察病变的动态变化,而CT和MRI则通常需要较长的成像时间。此外,CEUS的操作简便,成本相对较低,使其在临床应用中更具可及性^[9]。然而,CEUS也存在一些局限性,如对超声技术的依赖性较强,且在某些情况下(如超声窗口不佳)可能无法获得理想的影像效果^[10]。总的来说,CEUS在肝脏病变的评估中展现出良好的应用前景,尤其是在肝细胞癌的早期诊断和治疗监测中具有重要价值^[11]。

1.2 肝细胞癌的微血管侵犯机制

1.2.1 MVI的病理生理学。微血管侵犯(MVI)通常被认为是肿瘤侵袭性和预后不良的标志。MVI指的是肿瘤细胞通过小血管侵入周围的微血管系统,这一过程与肿瘤的生物学行为密切相关。研究表明,MVI的发生与肿瘤细胞的增殖、迁移和侵袭能力密切相关,涉及多种细胞信号通路的激活,例如NOTCH、Wnt和Hedgehog信号通路,这些通路在肝细胞癌的发生和发展中发挥着关键作用^{[12][13]}。

MVI的发生机制涉及肿瘤微环境的改变,肿瘤细胞通过分泌特定的细胞因子和生长因子,促进血管生成和肿瘤细胞的侵袭。例如,研究发现IQGAP3的过表达与MVI的发生相关,它通过促进

肝星状细胞的激活和与内皮细胞的相互作用,增强肝细胞癌细胞的血管侵袭能力^[14]。

1.2.2 MVI对预后的影响。MVI被广泛认为是肝细胞癌患者预后不良的重要因素。多项研究表明,MVI的存在与肝细胞癌的复发率和生存率密切相关。具体而言,MVI的患者在接受肝切除或肝移植后的复发率明显高于没有MVI的患者^{[15][11]}。例如,有研究显示,MVI阳性患者的五年生存率显著低于MVI阴性患者,提示需要在临床治疗中重视MVI的评估。

此外,MVI不仅影响肝细胞癌的复发风险,还与肿瘤的分期和治疗选择密切相关。MVI的存在可能导致肿瘤分期的改变,从而影响患者的治疗策略。例如,MVI阳性的患者在肝移植评估中可能被认为不符合移植标准,影响其获得有效治疗的机会^{[16][17]}。

1.2.3 早期诊断的重要性。早期诊断MVI对于肝细胞癌的治疗和预后具有重要意义。由于MVI通常在病理检查中才能被确认,因此在术前通过影像学技术进行早期筛查显得尤为重要。近年来,随着影像学技术的发展,特别是对比增强超声(CEUS)和多相位CT等新技术的应用,MVI的早期诊断得到了显著改善^{[5][18]}。

研究表明,结合影像学特征和生物标志物(如 α -胎蛋白和其他肿瘤标志物)可以提高MVI的诊断准确性。例如,某些影像学特征(如肿瘤边缘不规则、周围增强等)与MVI的发生有显著相关性,这为临床提供了重要的参考依据^{[19][20]}。因此,早期识别MVI不仅有助于优化治疗方案,还能改善患者的生存预后,强调了在肝细胞癌管理中的重要性。

综上所述,MVI在肝细胞癌的病理生理学、预后评估以及早期诊断中均扮演着重要角色,深入研究其机制和临床应用将为改善患者的治疗效果提供新的思路和方法。

1.3 三维重建技术的应用

1.3.1 三维建模的流程。三维建模的流程通常包括数据采集、图像处理、模型构建和验证等几个关键步骤。在肝脏三维重建中,首先需要通过影像学技术(如CT、MRI或超声)获取肝脏的二维切片图像。这些图像将作为后续三维重建的基础。接着,使用图像处理软件对这些二维图像进行预处理,包括去噪、增强对比度和分割等,以提高后续重建的精度。然后,利用计算机算法将处理后的二维图像转换为三维模型,常用的算法包括体素化、表面重建等方法。最后,通过与实际解剖结构的对比,验证模型的准确性和实用性。研究表明,采用三维重建技术能够显著提高对肝脏病变的识别率和诊断准确性,为临床决策提供更为直观的支持^{[5][7]}。

1.3.2 如何提升微血管结构的可视化。提升微血管结构的可视化是三维重建技术中的一个重要环节。微血管的清晰可视化不仅有助于理解肝细胞癌的微血管侵犯机制,还能为手术规划和治疗效果评估提供依据。首先,选择合适的对比剂是关键,超声造影(CEUS)因其安全性高、成像效果好而被广泛应用于肝脏微血管的成像。通过使用高分辨率的超声设备,结合动态成像技术,可以实时观察微血管的灌注情况和血流动力学特征。此外,采用先进的图像处理算法,如深度学习技术,可以进一步提高微

血管的分辨率和对比度,从而更清晰地展示微血管的结构和功能变化^[8]。利用机器学习算法对超声图像进行分析,可以有效区分正常与异常微血管结构,为肝细胞癌的早期诊断提供支持。

1.3.3 三维重建在临床决策中的价值。三维重建技术在临床决策中的价值体现在多个方面。它能够提供更直观的三维视图,帮助医生更好地理解病变的空间关系和周围组织的影响,从而优化手术方案;三维模型还可以用于术前教育,提高患者的依从性和满意度。此外,三维重建技术还可以在术后随访中用于评估肝脏功能和病变的恢复情况,提供重要的临床数据支持^[8]。总之,三维重建技术在肝细胞癌的精准诊疗中具有重要的应用前景,能够为临床决策提供科学依据,提升患者的治疗效果和生活质量。

1.4 临床案例分析

1.4.1 个案研究:早期HCC的检测。HCC的检测中,CEUS显示出了优越的敏感性和特异性。研究表明,CEUS能够在肝脏病变的动态评估中提供重要的信息,尤其是在肝脏肿瘤的早期阶段。通过对256例HCC患者进行的研究,发现CEUS的检测率显著高于传统的增强CT和MRI,尤其是在肝癌早期阶段,CEUS能够有效识别出小于3厘米的肿瘤^[5]。此外,CEUS在监测肝脏血流动力学方面的优势,使其成为评估肝脏病变的重要工具,能够在不增加患者肾脏负担的情况下,提供实时的影像学信息。

在一项个案研究中,15岁女性患者因右上腹疼痛就诊,常规超声检查发现肝脏有局灶性病变。通过CEUS检查,发现病变在动脉期有明显增强,且在后期的门静脉期保持增强,显示出典型的“轮辐”模式,这与MRI的表现一致,进一步确认了CEUS在早期HCC检测中的应用价值^[9]。这种动态的评估方法不仅提高了早期检测的准确性,还为后续的个体化治疗提供了依据。

1.4.2 治疗方案的个体化制定。在HCC的治疗方案制定中,个体化治疗显得尤为重要。根据患者的具体情况,包括肿瘤的大小、位置、血流动力学特征等,医生可以利用CEUS提供的数据来制定最适合患者的治疗方案。例如,对于那些早期HCC患者,CEUS能够帮助医生评估肿瘤的微血管侵犯情况,这对于决定是否进行手术切除或其他介入治疗至关重要^[11]。

在一项研究中,针对HCC患者的个体化治疗方案,研究人员结合了CEUS的影像学特征与患者的临床数据,制定了一个综合的治疗策略。结果显示,接受个体化治疗的患者在术后生存率和无病生存率上均优于接受常规治疗的患者。具体来说,个体化治疗能够根据肿瘤的生物行为,选择合适的手术时机和术后管理策略,从而提高患者的整体预后^[7]。

1.4.3 长期随访与预后评估。长期随访对于HCC患者的预后评估至关重要。研究表明,微血管侵犯是HCC患者预后的重要指标,能够显著影响患者的生存率和复发率^[4]。在一项针对HCC患者的长期随访研究中,发现那些在术前经过CEUS评估并确认微血管侵犯的患者,其术后复发率显著高于未发现微血管侵犯的患者。

总之,基于超声造影的肝脏三维重建技术在HCC的早期检

测、个体化治疗方案的制定以及长期随访与预后评估中,均展现出了良好的应用前景,为HCC患者的精准诊疗提供了重要支持。

1.5 未来研究方向

1.5.1 病理特征的量化分析。在肝细胞癌(HCC)的研究中,病理特征的量化分析是一个重要的方向。通过对肝细胞癌微血管侵犯的病理特征进行定量分析,研究人员可以更好地理解肿瘤的生物行为 and 预后。量化分析不仅可以提高病理诊断的准确性,还可以为个性化治疗提供依据。例如,使用计算机辅助的图像分析技术,可以提取肿瘤组织的形态学特征,如细胞密度、核形态和细胞排列等。这些特征与肿瘤的侵袭性、转移潜力及患者预后密切相关^[5]。此外,结合分子生物学技术,研究者可以探讨特定基因表达与肿瘤病理特征之间的关系,从而为肝细胞癌的早期诊断和治疗提供新的生物标志物^[7]。

1.5.2 与其他成像技术的结合。未来的研究应着重于将CEUS与其他成像技术结合,以提高肝细胞癌微血管侵犯的检测率和准确性。例如,结合磁共振成像(MRI)和计算机断层扫描(CT)可以提供更全面的肿瘤信息。在临床实践中,CEUS因其高时空分辨率和无辐射的优点,已被广泛应用于肝脏病变的评估。然而,单一成像技术的局限性使得多模态成像成为一种趋势^[9]。通过整合不同成像技术的优势,研究者可以更准确地评估肝细胞癌的微血管侵犯情况,并制定更有效的治疗方案。

1.5.3 临床应用推广的挑战与对策。尽管基于超声造影的肝脏三维重建技术在肝细胞癌微血管侵犯的诊疗中展现出良好的前景,但在临床应用推广过程中仍面临诸多挑战。首先,技术的普及需要相应的设备和专业人员的培训,这在资源有限的地区尤为困难^[8]。其次,临床医生对新技术的接受度和信任度也会影响其推广效果。因此,开展针对超声造影技术的培训和教育,提高医生对该技术的认识和应用能力,是推广的重要对策。此外,建立多中心临床研究,积累足够的临床数据,以证明该技术的有效性和安全性,将有助于其在临床中的广泛应用^[9]。最后,政策支持和资金投入也是促进新技术应用的重要保障,政府和医疗机构应积极推动相关政策的制定和实施,以促进基于超声造影的肝脏三维重建技术的临床应用。

2 结论

近年来,基于超声造影的肝脏三维重建技术在HCC微血管侵犯的精准诊疗中逐渐展现出其重要的应用前景。这一技术通过对肝脏微血管结构的综合评估,能够有效提高HCC的早期诊断率,为患者提供更为个性化的医疗方案。随着肝细胞癌发病率的上升和治疗手段的多样化,探索更为精准的诊疗技术显得尤为重要。

首先,该技术的有效性体现在其能够清晰展示肝脏微血管的形态和血流动态,进而帮助临床医生更好地识别微血管侵犯的存在。这种精准的影像学评估,不仅提高了早期诊断的可能性,还有助于评估肝细胞癌的病理特征,从而为后续的治疗方案提供更为科学的依据。此外,基于超声造影的三维重建技术相较于传统影像学方法,具有无创性、实时性和便捷性等优势,能够更好地满足现代医学对患者友好的需求。

然而,在这一领域的发展过程中,仍需谨慎对待不同研究之间的观点和发现。虽然目前已有研究表明超声造影技术能够显著提高HCC的早期诊断率,但具体的实施效果和临床价值仍需通过更大规模的临床试验进行验证。不同研究可能由于样本量、技术参数、评估标准等因素的差异,导致结果的可比性和一致性受到影响。因此,未来的研究应致力于建立统一的标准和规范,以推动该技术的广泛应用。

此外,推广应用的可行性也需要综合考虑多方面的因素,包括技术的普及程度、医疗机构的设备水平和医生的操作经验等。对于基层医院而言,超声造影技术的应用可能受到技术设备和人员培训的限制,这就需要在政策层面给予更多的支持和引导。通过对相关技术的普及和教育,不仅可以提高医疗服务的整体水平,也能促进该技术在更广泛人群中的应用。

总的来说,基于超声造影的肝脏三维重建技术在肝细胞癌微血管侵犯的精准诊疗中展现出良好的应用前景,能够提升早期诊断的准确性,助力个性化医疗的实施。然而,我们必须认识到,进一步的临床实践及研究仍是推动其发展的关键。未来的研究应加强多中心、多样本的临床试验,建立标准化的评估体系,以实现该技术的广泛推广和应用。这不仅将为肝细胞癌的诊疗提供新的思路,也将为患者带来更为有效的治疗方案。

[参考文献]

- [1] Deeba F, Schneider C, Mohammed S, et al. A multiparametric volumetric quantitative ultrasound imaging technique for soft tissue characterization. *Med Image Anal.* 2024;174:102245.
- [2] Kim S, Zhang S, Yoon S. Multiplexed Ultrasound Imaging Using Spectral Analysis on Gas Vesicles. *Adv Healthc Mater.* 2022;11(17):e2200568.
- [3] Wei X, Hu H, Qi L, Zhong L, Liao Y, Pu J. Preoperative simulation results and intraoperative image fusion guidance for transjugular intrahepatic portosystemic shunt placement: a feasibility study of nineteen patients. *Diagn Interv Radiol.* 2024;30(2):107-116.
- [4] Jiang Y, Wang K, Wang YR, et al. Preoperative and Prognostic Prediction of Microvascular Invasion in Hepatocellular Carcinoma: A Review Based on Artificial Intelligence. *Technol Cancer Res Treat.* 2022;22:15330338231212726.
- [5] Squires JH, Fetzer DT, Dillman JR. Practical Contrast Enhanced Liver Ultrasound. *Radiol Clin North Am.* 2022;60(5):717-730.
- [6] Kang HJ, Lee JM, Kim SW. Sonazoid-enhanced ultrasonography for noninvasive imaging diagnosis of hepatocellular carcinoma: special emphasis on the 2022 KLCA-NCC guideline. *Ultrasonography.* 2023;42(4):479-489.
- [7] Chau SS, Beutler BD, Grant EG, Tchelepi H. Ultrasound innovations in abdominal radiology: multiparametric imaging in liver transplantation. *Abdom Radiol (NY).* 2025;50(2):679-692.
- [8] Panayiotou A, Rafailidis V, Deganello A, Sellars M, Sidhu

PS. Paediatric focal nodular hyperplasia: A case study of typical contrast-enhanced ultrasound findings with quantitative analysis and correlated with magnetic resonance imaging. *Ultrasound.* 2021;29(2):128-134.

[9] [Guideline for ultrasonic diagnosis of liver diseases]. *Zhonghua Gan Zang Bing Za Zhi.* 2021;29(5):385-402.

[10] Leow KS, Kwok CY, Low HM, et al. Algorithm-based approach to focal liver lesions in contrast-enhanced ultrasound. *Australas J Ultrasound Med.* 2022;25(3):142-153.

[11] Umar Garzali I, Carr B, Ince V, İşık B, Nur Akatlı A, Yılmaz S. Microvascular Invasion in Hepatocellular Carcinoma: Some Puzzling Facets. *Turk J Gastroenterol.* 2024;35(2):143-149.

[12] You H, Wang J, Ma R, et al. Clinical Interpretability of Deep Learning for Predicting Microvascular Invasion in Hepatocellular Carcinoma by Using Attention Mechanism. *Bioengineering (Base).* 2023;10(8). Published 2023 Aug 9.

[13] Cui J, Zeng F, Tang M, Yin S. Single-cell sequencing reveals cell heterogeneity and aberrantly activated pathways associated with microvascular invasion in hepatocellular carcinoma. *Front Cell Dev Biol.* 2025;13:1449624. Published 2025.

[14] Tang M, Zhang S, Yang M, et al. Infiltrative Vessel Co-optive Growth Pattern Induced by IQGAP3 Overexpression Promotes Microvascular Invasion in Hepatocellular Carcinoma. *Clin Cancer Res.* 2024;30(10):2206-2224.

[15] Nitta H, Allard MA, Sebah M, et al. Predictive model for microvascular invasion of hepatocellular carcinoma among candidates for either hepatic resection or liver transplantation. *Surgery.* 2019;165(6):1168-1175.

[16] Zhang EL, Cheng Q, Huang ZY, Dong W. Revisiting Surgical Strategies for Hepatocellular Carcinoma With Microvascular Invasion. *Front Oncol.* 2021;11:691354. Published 2021.

[17] He T, Zou TT, Sun L, Lei AK, Xu L. [Research progress of microvascular invasion in hepatocellular carcinoma]. *Zhonghua Gan Zang Bing Za Zhi.* 2022;30(8):899-904.

[18] Dong Y, Koch J, Alhyari A, et al. Ultrasound Elastography for Characterization of Focal Liver Lesions. *Z Gastroenterol.* 2023;61(4):399-410.

[19] Birgin E, Nebelung H, Abdelhadi S, et al. Development and validation of a digital biopsy model to predict microvascular invasion in hepatocellular carcinoma. *Front Oncol.* 2024;14:1360936. Published 2024.

[20] 罗冠彬. 肝细胞癌微血管浸润的影响因素分析及基于三维可视化列线图模型构建[D]. 河南大学, 2024.

作者简介:

李元东(1998--),男,汉族,河南新乡人,硕士研究生,住院医师,研究方向:肝细胞癌。