

多模态超声在胆管细胞癌中的应用研究

兰景云¹, 王天娇², 郑 瑜^{2*}

¹延安大学医学院, 陕西 延安

²西安交通大学附属西安市中心医院超声医学科, 陕西 西安

收稿日期: 2026年2月25日; 录用日期: 2026年3月19日; 发布日期: 2026年4月3日

摘 要

胆管细胞癌(cholangiocarcinoma)是一种来源于胆管上皮的恶性肿瘤, 居原发性肝癌的第二位, 预后极差。其早期常无明显临床症状, 确诊多在中晚期, 严重影响患者生存。超声检查作为无创、实时、方便的首选成像手段, 对于胆道疾病的早期筛查有重要价值。近年来, 多维度和多模态超声技术(包括二维、三维/四维、多普勒、弹性成像及超声造影等)在胆管癌诊断和分型方面取得了重大进展。同时, 人工智能和辐射组学的快速发展为超声图像分析带来了新思路。本文综述了多模态超声在胆管细胞癌中的应用进展, 重点介绍了人工智能辅助诊断和多模态超声融合在胆管癌早期识别、病理分型、治疗指导及预后评估中的研究成果与临床前景。

关键词

胆管细胞癌, 超声检查, 多模态超声, 人工智能, 超声造影, 弹性成像

Research Progress of Multimodal Ultrasound in Cholangiocarcinoma

Jingyun Lan¹, Tianjiao Wang², Yu Zheng^{2*}

¹College of Medical, Yan'an University, Yan'an Shaanxi

²Department of Ultrasound Medicine, Xi'an Central Hospital Affiliated to Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

Received: February 25, 2026; accepted: March 19, 2026; published: April 3, 2026

Abstract

Cholangiocarcinoma is a malignant tumor arising from the biliary epithelium and the second most common primary liver cancer, with extremely poor prognosis. Because of its insidious onset, most

*通讯作者。

文章引用: 兰景云, 王天娇, 郑瑜. 多模态超声在胆管细胞癌中的应用研究[J]. 临床个性化医学, 2026, 5(2): 216-225.
DOI: 10.12677/jcpm.2026.52121

cases are diagnosed at advanced stages, missing optimal treatment opportunities. Ultrasound, as a noninvasive and convenient first-line imaging modality, plays a key role in initial detection of biliary tract lesions. In recent years, multidimensional ultrasound techniques (including 2D, 3D/4D, Doppler, elastography, and contrast-enhanced ultrasound) and artificial intelligence (AI) have significantly advanced the early detection and characterization of cholangiocarcinoma. This review summarizes the progress of multimodal ultrasound and AI-assisted diagnosis in cholangiocarcinoma, highlighting their applications in early identification, subtype classification, treatment planning, and prognostic evaluation.

Keywords

Cholangiocarcinoma, Ultrasonography, Multimodal Ultrasound, Artificial Intelligence, Contrast-Enhanced Ultrasound, Elastography

Copyright © 2026 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

胆管细胞癌是起源于胆道上皮的恶性肿瘤，是肝脏第二大原发性恶性肿瘤，占肝脏原发性恶性肿瘤的 10%~15%。根据解剖位置，胆管细胞癌可分为肝内胆管细胞癌(Intrahepatic Cholangiocarcinoma, ICC)、肝门部胆管细胞癌(Perihilar Cholangiocarcinoma, pCCA)和远端胆管细胞癌(Distal Cholangiocarcinoma, dCCA)该病多由长期慢性胆道炎症(如原发性硬化性胆管炎、肝吸虫感染)所致，预后极差，五年生存率往往不足 10% [1][2]。由于早期症状不明显，临床多在病情进展后才被发现，常失去根治机会。因此，实现胆管癌的早期诊断、精准分型并指导治疗成为临床亟待解决的问题。超声检查因其无创、无辐射、实时动态显示病变及可重复检查的优势，通常作为胆道疾病的首选筛查方法[3]。传统二维灰阶超声可发现胆管癌引起的胆管扩张、肝脏占位等表现，但对早期或小病灶的敏感性有限，需要配合血管超声和造影进一步评估。近年来，多维度超声(包括二维、三维/四维、多普勒、弹性成像、超声造影等)和人工智能技术在超声影像诊断领域的应用，大大拓展了超声对胆管癌诊疗的能力。多模态超声技术(包括常规二维超声、弹性超声、超声造影等)可以获得多种超声数据，可提供丰富的肿瘤特征信息，有助于动态评估癌症过程，并判断疗效[4]本文将从超声诊断技术进展和预后评估应用两个方面，对多模态超声在胆管细胞癌中的研究进展进行系统综述，重点讨论人工智能辅助诊断与多模态融合技术的应用价值与未来发展。

2. 超声诊断技术的应用进展

2.1. 二维超声

二维灰阶超声是超声诊断的基础。常规超声作为胆管细胞癌筛查的首选方法，具有无创、便捷、经济、可重复性强等显著优势。通过高频探头和多普勒技术，常规超声能够提供肿瘤的基本形态学信息和血流动力学特征[5]。根据肿瘤的生长方式和病理特征，胆管细胞癌在常规超声上主要表现以下特征：

1) 肿块型胆管细胞癌(最常见，占 60%~70%)：肝内实性占位病变，多呈类圆形或不规则形，边界不清，可见浸润性生长边缘。内部回声多为低回声或等回声，回声不均匀，后方回声可有轻度增强或衰减。内部血流信号不丰富，可见少量点状或条状血流。

2) 管周浸润型胆管细胞癌：胆管壁不规则增厚，管腔狭窄或闭塞，可见肝内胆管扩张，呈“树枝状”

改变, 周围肝实质可见浸润性病变, 可伴有肝门部淋巴结。

3) 管内生长型胆管细胞癌: 胆管内可见乳头状或结节状突起, 病变近端胆管明显扩张, 基底较宽, 与胆管壁分界不清, 内部可见较丰富的血流信号[6] [7]。

常规超声检查可探查到肝内肿块等病变, 但是对于弥漫型无肿块型肝内胆管细胞癌及周围动脉、病灶内血流显示不清晰者, 诊断鉴别难度较大, 同时诊断准确性受操作者经验影响较大, 对于深部或位置特殊的病灶显示能力有限, 血流评估不足, 对肿瘤微血供的评估能力有限, 与其他肝脏占位性病变的鉴别存在一定困难[8]。

2.2. 弹性成像

超声弹性成像(如剪切波弹性成像)是一种无创评估组织硬度的超声技术, 利用声辐射力脉冲在组织中产生剪切波, 通过超高速成像系统追踪剪切波的传播, 根据剪切波速度计算组织的杨氏模量($E = 3\rho v^2$, 其中 ρ 为组织密度, v 为剪切波速度) [9]。超声弹性成像近年来发展迅速, 实时 SWE 作为目前最先进的弹性成像技术之一, 可在二维超声的基础上进行肝脏实时弹性成像, 并可避开管壁结构测量组织弹性值, 获得组织的绝对硬度数值, 在测量中不受腹腔积液及气体的影响, 并实时彩色编码显示弹性结果, 应用前景广泛。SWE 测量的杨氏模量数值越大, 提示组织越硬; 数值越小, 提示组织越软, 通过测量组织硬度, 为肿瘤组织性质提供信息[10]。由于胆管癌通常纤维化显著, 弹性成像可表现为肿瘤区域硬度明显增加。这有助于区分恶性占位与炎性或良性结节, 并可能提示肿瘤的浸润程度[11]。在众多肿瘤中, 恶性病变由于细胞排列紧密、间质增生等因素通常比良性病变更硬。因此, 弹性成像能够为肿瘤的良好鉴别提供重要的物理参数。该技术主要包括应变弹性成像(Strain Elastography, SE)和剪切波弹性成像(Shear Wave Elastography, SWE)两大类。SE 主要提供定性或半定量的硬度分布图, 而 SWE 则能定量测量组织的弹性模量, 单位通常为千帕斯卡(kPa)或米每秒(m/s), 结果更为客观[12]。在肝脏纤维化的无创评估中, 弹性成像已成为金标准之一。瞬时弹性成像(Transient Elastography, TE)和剪切波弹性成像(SWE)在诊断中重度肝纤维化和肝硬化方面与肝活检有高度一致性[13]。SWE 通过定量评估提供客观的硬度数值, 可在一定程度上减少主观性, 并实时观察组织的硬度分布, 其具有无创安全、可重复检查、检查时间短, 患者配合度要求低等技术特点, 欧洲肝脏研究学会(EASL)和美国肝脏病研究协会(AASLD)等权威组织的指南均推荐将 LSM (TE 或 SWE 测得的肝硬度值)作为评估肝纤维化分期和预后的主要无创工具。例如, EASL 指南建议, TE 值小于 8 kPa 可用于排除非酒精性脂肪性肝病(NAFLD)患者的晚期纤维化。同时, 肝硬度值还与肝静脉压力梯度(HVPG)呈强相关, 可用于预测门脉高压及其并发症的风险[14]。最新的肝脏多参数超声指南甚至提出了具体的截断值, 如 TE > 20 25 kPa 可用于诊断临床显著性门脉高压(CSPH) [15], 然而, 目前针对胆管癌的弹性成像研究较少, 其临床应用价值仍需更多临床研究和病例验证。

2.3. 超声造影

超声造影(Contrast-Enhanced Ultrasound, CEUS)可谓是多年来超声诊断领域的一次重大进展, 在相当程度上拓展了超声诊断的应用范围, 也被誉为超声影像诊断发展历程上的“第 2 次革命”, 其基本原理是通过静脉注射含微气泡的造影剂, 主要使用造影剂 SonoVue (Bracco Spa, Milano, Italy) [16]。它由包裹在磷脂膜外壳中的六氟化硫气泡组成利用微气泡对声波的强大散射反射特性, 显著增强了血流信号的显示能力, 将超声的诊断维度从形态学拓展到了功能学和血管学层面。这些微气泡直径通常在 1~4 微米之间, 能安全地通过肺循环进入体循环, 经肺部呼出, 无需肾功能排泄, 因此具有无肾毒性、无电离辐射、安全性高的优点, 使其成为肾脏疾病患者和儿童的理想选择[17]。因其成本低、实时性好, 且诊断精度可与 CT 和 MRI 相媲美, 已被广泛应用于肝局灶性病变的诊断[18]。CEUS 能够探测到直径小至 40 μm 的

微小血管,远优于传统彩色多普勒所能显示的 $\geq 100\mu\text{m}$ 血管,这使得对肿瘤新生血管、斑块内微血管和器官灌注的评估达到了前所未有的精细程度,CEUS 可以通过病灶内部微血流灌注情况准确区分病灶内部肿瘤区域与坏死区域,提高穿刺成功率,减少穿刺取材不满意发生概率,从而减少患者不必要的穿刺次数,具有重要的临床意义。与传统超声相比,超声造影在胆管癌的定性诊断中具有更高的敏感性和特异性。在动脉相,ICC 可表现为环状动脉相高增强(arterial phase hyperenhancement, APHE)或均匀/不均匀的非环状 APHE。在伴有肝硬化或慢性肝炎的 ICC 中,非环状 APHE 更为常见,而在无慢性肝病患者中环状 APHE 更为常见;同时,非环状 APHE 还受到肿瘤大小的影响,在小肿瘤中更为常见。在门脉相,ICC 一般表现为早期消退,即在 APHE 达峰后,病灶的强化程度迅速减弱,进入门脉相时肿瘤明显低于周围正常肝组织。在延迟相,ICC 多表现为显著消退。ICC 在 CEUS 中的表现与 HCC 存在一定的差异,这些差异可以作为鉴别诊断的要点。与 ICC 相比,HCC 在动脉相通常表现为均匀/不均匀的非环状 APHE;在门脉相通常表现为等增强的无消退;在延迟相通常表现为晚期且轻度消退通常[19],肝内胆管癌动脉期呈现不规则的周边强化(“边缘环状增强”),在门静脉期或延迟期出现明显的快速清除(低强化)。这种强化动态与肿瘤内丰富的纤维结缔组织密切相关:增强明显的区域往往对应癌细胞密集区,而快速清除的区域提示纤维化基质区域。因此,超声造影不仅提高了胆管癌病灶的检出率,还为评估肿瘤恶性程度提供了依据。值得注意的是,造影结果受操作者技术影响较大,人工智能辅助分析可有效提高诊断一致性和客观性。然而,CEUS 仍存在局限性,其对于深部病灶的显示能力有限,且受患者呼吸运动、心脏搏动等因素影响对于微小病灶的检出率仍有待提高,此外操作者经验对诊断结果也有一定影响。

总体而言,CEUS 作为一种无创、实时、高分辨率的血管成像技术,正凭借其独特的价值,在肿瘤血管学和功能成像领域发挥着越来越关键的作用,其临床应用前景十分广阔。未来,CEUS 在 CCA 等肝脏疾病诊疗中的发展将呈现多维度融合与智能化升级的趋势。多模态 AI 模型有望突破传统影像的局限,通过整合 CEUS 视频动态特征、影像组学定量参数及液体活检标志物,构建新的联合诊断体系,实现对 CCA 及转移性病灶的准确诊断[17]。

3. 预后评估中的应用

3.1. 分型相关性

胆管癌的影像学表现与其形态学分型和肿瘤生物学行为密切相关。胆管癌可分为包块型、周围浸润型和管内生长型三种生长模式[20]在超声上,包块型常表现为肝实质内的实性占位病灶并伴有局部肝实质压迫,浸润型多呈胆管壁弥漫性增厚或紧密粘连,而管内型主要表现为胆管内异常占位导致胆管扩张。如二维超声所见,包块型胆管癌可见明显低回声实性肿块,周围伴有胆管扩张;浸润型可表现为可疑胆管壁层次紊乱;管内型则是管腔内可见肿块。影像学分型不仅有助于疾病的定性诊断,还与预后相关:一般认为管内生长型恶性程度相对较低,预后较好,而浸润型易伴随血管和神经浸润,预后相对较差。因此,超声对形态学分型的提示对于制定治疗策略和预后判断具有重要意义[21]。

3.2. 胆管癌病理亚型与超声造影增强模式的生物学机制

胆管癌(CCA)是一组具有高度异质性的恶性肿瘤,其不同的病理亚型展现出独特的生长方式和组织学特征,这些内在的生物学特性直接决定了其在影像学检查中的宏观表现[22],超声造影(CEUS)作为一种无创、实时的功能成像技术,能够动态观察病灶的血流灌注过程,其呈现的增强模式并非随机现象,而是肿瘤内部结构与功能状态的直接反映[23]。深入解析肿块型与浸润型 CCA 的病理特征与其 CEUS 增强模式之间的生物学联系,对于实现精准诊断和评估肿瘤生物学行为至关重要。这种联系主要由三个核心的组织学因素决定:癌细胞密度、纤维化程度以及血管生成特征[24]。

肿块型 ICC 以其膨胀性生长为主要特征,在肝脏内形成一个界限相对清晰的团块。这类病变的 CEUS 表现呈现出多样性,其中“快进快出”是较为典型的一种模式。这一增强模式的背后,其生物学基础在于肿瘤具有较高的肿瘤细胞密度和丰富的新生微血管网络[24]。一项由 Yuan M 等人进行的研究明确指出,CEUS 上呈现高增强的区域与肿瘤组织中更多的肿瘤细胞数量直接相关[24][25]。这意味着,在肿瘤早期或生长活跃的区域,癌细胞高度密集,占据了大部分肿瘤体积,而间质成分较少。当静脉注射的造影剂微泡进入这些富含肿瘤细胞的区域时,由于血供丰富且毛细血管通透性增加,造影剂迅速灌注(快进)。同时,由于缺乏有效的静脉回流通道和间质压力较低,造影剂也迅速流出(快出),从而形成典型的“快进快出”时间-强度曲线[24]。值得注意的是,虽然“快进快出”模式更常与肝细胞癌(HCC)相关联,但在某些分化较好、细胞密集的 ICC 中亦可观察到。因此,在临床实践中,若肿块型 ICC 呈现此模式,可能预示着其具有更高的增殖活性和侵袭潜力,需要引起高度重视。

与“快进快出”相反,“延迟强化”或持续性增强则更多地与浸润型 ICC 及部分分化较差的肿块型 ICC 相关,这种增强模式反映了肿瘤内部复杂的基质环境,其生物学基础主要是致密的纤维化背景和相对较低的细胞密度。随着肿瘤体积的增大,癌细胞虽然仍在增殖,但间质反应(尤其是纤维化)也显著增强。大量增生的成纤维细胞和沉积的胶原纤维形成了致密的基质,如同一道屏障,物理性地阻碍了血液的正常灌注和流出,导致造影剂到达病灶的时间延迟,且在病灶内滞留时间延长[26]。此外,部分肿瘤区域可能发生坏死,进一步改变了局部血流动力学,使得整个肿瘤的增强模式表现为缓慢、持续的“延迟强化”。这种模式不仅是一个重要的诊断线索,也可能与肿瘤的生物行为和治疗反应密切相关。例如,致密的纤维化屏障可能会阻碍化疗药物的渗透,从而导致肿瘤对治疗产生耐药性[27]。浸润型 ICC 没有清晰的包膜,其肿瘤细胞像树根一样向周围肝实质内呈扇形或条索状伸展,这种独特的生长方式决定了其特殊的 CEUS 表现。其中,“周边环状强化”是一个极具特征性的表现。一项针对 21 例 ICC 的研究发现,66.7%的病灶在门脉期表现出“环征”,即中央区域洗脱较快,而边缘区域保持增强[7]。这一现象的病理基础在于,肿瘤的外围是活跃的浸润前沿,这里有大量的新生血管供应,表现为环状增强;而中央区域由于血供相对匮乏,且常伴有更严重的纤维化和坏死,因此表现为低增强或无增强。“环征”直观地展示了肿瘤“侵蚀”而非“膨胀”的生长特性,是识别浸润型 ICC 的一个重要影像标志。另一些浸润型 ICC 或小于 3 cm 的小病灶,由于细胞密度更低、纤维化比例更高,可能不表现出典型的“快进快出”模式,反而呈现“无明显强化”或“渐进性增强”。综上所述,CCA 的 CEUS 增强模式是一个由肿瘤内部结构决定的“指纹”。通过系统性地分析这些模式,我们可以间接推断出肿瘤的细胞构成、纤维化水平和血管分布情况。这种病理-影像的紧密联系,使得 CEUS 不仅仅是一种定性工具,更成为一种评估肿瘤微观生物学特性的无创探针,为后续的个体化治疗和预后判断提供了宝贵的影像生物标志物信息。此外,针对疑似胆管癌病灶进行超声引导穿刺活检,可以获取组织学依据,结合影像特征和临床资料,对肿瘤病理类型及分级做出综合判断,提供精准的诊断和预后评估[8][28]。

3.3. 人工智能辅助诊断

超声是肝脏疾病最常用、最易操作的影像学检查方法。其具有方便、低成本、实时等优点,因此被广泛应用于肝胆疾病的筛查,但其对 CCA 的诊断能力并不理想。MRI 被普遍认为是诊断 CCA 的最佳影像学检查,其诊断效能仅次于病理学。但其成本高、部署难度大、患者配合要求高,在一定程度上影响了其适用性[29]。超声造影(contrast-enhanced ultrasound, CEUS)可将常规超声检查从“筛查”转变为“诊断”,在 CCA 诊断中发挥重要作用。它具有较高的时间分辨率,能够连贯地记录 CCA 的血管灌注、血流动力学特征和血管分布模式,为多分类提供关键信息[10]。然而,CEUS 仍然不可避免地存在一些共同的困境,包括对经验的高度依赖和因医生疲劳而降低的诊断能力。此外,CEUS 因其高时间分辨率而面临

独特的挑战。一个典型的 CEUS 视频包含数千帧，远远超过其他肝脏影像学检查。丰富的信息使 CEUS 在诊断能力方面具有巨大的潜力，但如何准确、全面地捕获与多类型分类相关的关键动态特征成为超声放射科医生能力之外的困境[30]。近年来，深度学习和辐射组学技术在肝脏超声图像分析中得到广泛应用，人工智能(artificial intelligence, AI)技术的发展为解决这一难题带来了新的机遇，尤其是 AI 领域中的影像组学和深度学习(deep learning, DL)在疾病的诊断及预后方面具有突出贡献，一般来说，人工智能可以被认为是使用任何设备来模仿人类的认知过程，涉及学习、应用和解决复杂问题。如今，被称为“第四次工业革命”的人工智能正在极大地改变我们整个生活的面貌[5]。Chaiteerakij 等采用 YOLOv5 深度学习模型对包含胆管癌在内的超声图像进行训练，其系统对胆管癌病灶的检测准确率达到 92.2%，敏感度和特异度近 90%以上[16]。另有研究由 Ding 等开发基于超声造影视频的多模态 AI 模型，用于区分肝内胆管癌、肝细胞癌等多种肝脏占位病变，该模型在多中心测试中准确率达 0.85 以上，诊断表现与资深医生相当[30]。这些成果表明，AI 辅助超声诊断能显著提高诊断客观性和效率，尤其可帮助基层或经验不足的医师达成专家级诊断水平。未来，集成多模态影像特征和临床数据的 AI 模型有望用于胆管癌预后预测和个体化治疗决策。

尽管人工智能(AI)在医学影像分析领域展现出巨大的潜力，能够有效辅助医生进行疾病诊断和预后预测[31]，但其在胆管癌(CCA)这一特定领域的临床落地仍面临着严峻挑战。当前的核心障碍并非算法本身的优劣，而是围绕数据和流程的系统性问题，其中最突出的便是小样本数据问题及其引发的模型泛化能力差。这种数据规模的局限性直接导致了模型容易发生过拟合，即模型过度学习了训练数据中的噪声和特定病例的特征，从而丧失了对新数据的泛化能力。大多数 AI 研究依赖于单中心的小规模数据集，其样本量通常在 200 例左右[32]-[35]，单纯的技术优化无法从根本上打破这一困局。真正的突破口在于数据层面的革新。模仿一项成功的研究案例，该研究汇集了来自全国 51 家医院的大量病例，建立了世界最大的 iCCA CEUS 数据集，直接从源头上解决了数据量不足的问题[36]。这种方法论启示我们，必须改变以往单打独斗的模式，转向开放合作的数据共建生态。然而，构建大规模数据集本身就是一个复杂的过程，涉及数据质量控制、标注一致性、以及伦理审查等诸多环节，需要投入巨大的人力和财力资源。

除了数据量的不足，另一个深层次的瓶颈是数据标准的缺失。即使是在多中心研究中获取的数据，如果来源机构的设备型号、扫描参数、图像后处理方式、病理染色和阅片标准各不相同，那么这些数据也无法被有效整合，因为它们本质上是不可比的。这种数据层面的异质性是导致模型泛化失败的根本原因之一[24][37][38]。因此，仅仅扩大数据规模是不够的，还必须建立一套行之有效的标准化体系，确保数据的质量和可比性。这需要行业内的专家、厂商、医疗机构共同参与，制定并推广统一的数据采集、处理和标注标准，这是实现 AI 模型真正临床可用的前提。

为了从根本上解决 AI 模型在胆管癌诊断中面临的泛化能力差和数据异质性问题，必须建立一套涵盖数据采集、处理、共享和使用的全链条标准化框架。这一框架的核心目标是确保数据的高质量、可比性和可用性，同时兼顾患者隐私和数据安全。借鉴病理学领域(Pathomics)在应对类似挑战时所积累的经验，我们可以提出一个系统性的解决方案。病理学领域同样面临全切片图像(WSI)因扫描仪、染色方法和分辨率不同而导致的异质性问题，并为此提出了一个包含六个步骤的路线图，其理念完全适用于医学影像领域[38]，第一步是建立国际性的数据标注与共享联盟。这需要由行业协会、顶尖研究机构牵头，联合全球范围内的多家医院和研究中心，共同致力于创建一个大型、公开或半公开的胆管癌多模态影像数据库。这个联盟的首要任务是制定并强制执行严格的数据采集协议。例如，可以参考 ACR CEUS LI-RADS v2017 等权威指南，明确规定 CEUS 检查的各项参数，包括造影剂的类型、剂量、注射速度、扫描角度，以及关键的增强阶段(如动脉期、门脉期、延迟期)的触发时间点[36][39]这种标准化的采集流程能够最大限度地减少因操作不当引入的变异，为后续的模型训练提供一致的基础数据。第二步是推行严格的元数据规

范和图像预处理标准。每一份上传至数据库的影像数据，都必须附带详尽的元数据，记录设备品牌、型号、探头类型、扫描深度、增益设置、图像分辨率等所有可能影响图像质量的信息[37]。此外，还需要开发并提供开源的标准化预处理脚本，涵盖颜色归一化、去噪、伪影去除等步骤，以确保不同来源的图像在进入模型训练前处于统一的“语言”环境中，从而消除图像层面的异质性。第三步则是推动病理-影像多模态数据的整合。除了影像数据，还应详细记录患者的临床信息、实验室检查结果以及最终的病理诊断报告(包括肿瘤大小、组织学分型、分化程度、微血管侵犯、神经侵犯、纤维化比例等)。这种精细化的标注为训练能够预测预后、指导治疗的高级 AI 模型奠定了坚实基础[40]。通过实施上述策略，我们可以逐步建立起一个良性循环的数据生态系统。一个高质量、标准化的公共数据集不仅能加速 AI 模型的研发和验证，还能降低单个研究团队的数据收集成本和时间。而一个经过充分验证的高性能模型，则能反过来激励更多医疗机构愿意参与到数据贡献中来，因为这意味着他们的数据能够创造出更大的价值。最终，这种开放、协作、标准化的框架将成为推动 AI 技术在胆管癌乃至其他癌症领域实现临床转化的强大引擎。

4. 临床应用价值与未来发展

多模态超声成像技术(Multimodal ultrasound imaging technology, MUIT)利用多种超声成像模式采集全面的图像信息。常用的成像模式包括 B 超成像、彩色多普勒成像、组织弹性成像等。每种成像模式通过不同的探头和扫描技术产生特定的超声图像。通过将这些不同模态的图像进行叠加或融合，可以提高医学影像的准确性和可靠性，从而为医生提供更清晰的诊断和治疗方案。MUIT 成像技术在医学领域有着广泛的应用[41]。例如，用于预测 TI-RADS 4 甲状腺结节的恶性程度。结果表明，该模式在测试集和外部验证集的 auc 分别达到 0.856 和 0.779，具有优异的诊断性能和良好的泛化能力。更重要的是，该方法在多模态数据融合与处理中具有广泛的应用潜力，并有望在未来扩展到传感器数据处理的其他领域(如多源数据融合和提高诊断的准确性和效率)。此外，使用 SHAPheatmaps 可以对各种放射学特征对模型预测的影响进行可视化分析，帮助放射科医生更好地理解模型的决策过程[42]。多模态超声技术在癌症筛查、诊断、治疗决策和随访管理中具有重要临床价值。在早期筛查中，常规灰阶和多普勒超声可发现胆管扩张等间接征象，结合超声造影可明显提高微小病灶的检出率；弹性成像为判断肿瘤硬度和浸润深度提供参考。人工智能的引入使超声诊断更加标准化和智能化，部分研究已在缺乏 MRI 等高级影像条件的地区证明，基于超声造影的 AI 模型可帮助进行准确诊断[28]。未来研究需要进一步解决图像采集和分析的标准化问题，包括制定统一的超声检查协议和造影剂使用标准、建立大规模多中心数据库，并融合影像学、临床及病理组学数据。随着超声成像设备、造影剂和计算机算法的持续进步，预期多模态超声与 AI 结合将为胆管癌的早期识别、精准分型和个性化治疗提供更加可靠的支持。

5. 结论

多模态超声技术凭借其无创、实时、可重复的特点，在胆管细胞癌的诊断和预后评估方面展现出越来越重要的价值。二维超声和多普勒仍是基础筛查手段，超声造影和弹性成像能提供更多的定性和功能信息，人工智能技术则进一步提升了诊断准确率和一致性。融合人工智能的超声诊疗有望显著提高基层医院的诊断水平，实现胆管癌的早发现、早诊断和精准分型。多模态超声技术在肿瘤诊疗中的应用正处在一个快速发展的黄金时期，其未来的发展将由技术创新、临床需求和系统性挑战共同塑造。展望未来，我们可以预见几个关键的发展方向。首先，技术创新将持续深化诊断的深度和广度。当前，AI 与多模态成像的结合是最大的技术亮点。未来的 AI 将不仅仅是辅助诊断，而是成为智能的“第二双眼睛”，能够进行全自动的病灶检测、分割、量化分析和生成报告。随着联合学习、迁移学习等技术的发展，有望开

发出更具普适性的 AI 模型。其次,硬件和成像技术本身也在不断突破。更高频率的微弹性成像(>20 MHz)有望揭示更细微的组织结构变化。三维(3D)弹性成像能够提供更立体的硬度信息,已被用于乳腺肿瘤体积评估、肝脏消融后评估,在肝脏检查中,MUIT 成像技术可以整合多普勒成像和弹性成像模式来评估肝纤维化和肝脏肿瘤的程度[41][43]。目前相关研究多为样本有限的回顾性分析,未来需要开展大样本、多中心的前瞻性研究来验证多模态超声及 AI 辅助诊断的临床效益,为胆管癌的早期检测和精准治疗提供更坚实的循证医学依据。最后,临床应用将更加聚焦于改善患者结局和优化医疗资源配置。未来的研究重点将不再仅仅是追求更高的诊断准确率,而是转向评估这些技术在真实世界中对患者预后的影响。总之,多模态超声技术的未来发展,必然是一个技术、临床和政策相互促进、协同进化的过程。只有解决了这些深层次的挑战,才能真正让这项革命性的技术惠及最广泛的患者群体。

参考文献

- [1] Razumilava, N. and Gores, G.J. (2014) Cholangiocarcinoma. *The Lancet*, **383**, 2168-2179. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(13\)61903-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(13)61903-0)
- [2] Elias, C., Rahman, A., Mial-Anthony, J., Packiaraj, G., Crane, A., Alshamery, S., et al. (2024) Advancements in Cholangiocarcinoma: Evolving Strategies for Diagnosis, Treatment, and Palliation over Three Decades. *Chinese Clinical Oncology*, **13**, 70-70. <https://doi.org/10.21037/cco-23-144>
- [3] Thinkhamrop, K., Khuntikeo, N., Chamadol, N., Suwannatrai, A.T., Phimha, S. and Kelly, M. (2022) Associations between Ultrasound Screening Findings and Cholangiocarcinoma Diagnosis in an At-Risk Population. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 13513. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17794-9>
- [4] 范琳琳, 李雨涵, 尹明. 多模态超声预测浸润性乳腺癌新辅助化疗疗效的价值研究[J]. 兰州大学学报(医学版), 2025, 51(10): 26-32.
- [5] Hu, J., Zhou, Z.Y., Ran, H.L., et al. (2020) Diagnosis of Liver Tumors by Multimodal Ultrasound Imaging. *Medicine*, **99**, e21652. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000021652>
- [6] Wa, Z.C., Du, T., Li, X.F., et al. (2020) Differential Diagnosis between Hepatic Alveolar Echinococcosis and Intrahepatic Cholangiocarcinoma with Conventional Ultrasound and Contrast-Enhanced Ultrasound. *BMC Medical Imaging*, **20**, Article No. 101. <https://doi.org/10.1186/s12880-020-00499-8>
- [7] Chen, T., Chang, X., Lv, K., Wang, Y., Fu, X., Tan, L., et al. (2019) Contrast-Enhanced Ultrasound Features of Intrahepatic Cholangiocarcinoma: A New Perspective. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 19363. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55857-6>
- [8] Guedj, N. (2022) Pathology of Cholangiocarcinomas. *Current Oncology*, **30**, 370-380. <https://doi.org/10.3390/curroncol30010030>
- [9] Sigrist, R.M.S., Liau, J., Kaffas, A.E., Chammas, M.C. and Willmann, J.K. (2017) Ultrasound Elastography: Review of Techniques and Clinical Applications. *Theranostics*, **7**, 1303-1329. <https://doi.org/10.7150/thno.18650>
- [10] 卢春雨, 唐少珊. CEUS 及剪切波弹性成像诊断周围型胆管细胞癌研究进展[J]. 中国介入影像与治疗学, 2018, 15(8): 513-516.
- [11] 陈鹏, 唐少珊. 二维剪切波弹性成像在原发性肝癌应用中的研究[J]. 生物医学工程与临床, 2025, 29(2): 213-219.
- [12] Mohebbi, A., Mohammadzadeh, S., Mohebbi, S., Mohammadi, A. and Tavangar, S.M. (2025) Diagnostic Performance of Ultrasound Elastography in Differentiating Hepatocellular Carcinoma and Intrahepatic Cholangiocarcinoma: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Abdominal Radiology*, **50**, 633-645. <https://doi.org/10.1007/s00261-024-04502-6>
- [13] Bednář, O. and Dvořák, K. (2022) Elastografie Jater. *Spring*, **161**, 61-64.
- [14] Bosch, J., Abraldes, J.G., Berzigotti, A. and García-Pagan, J.C. (2009) The Clinical Use of HVPG Measurements in Chronic Liver Disease. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, **6**, 573-582. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2009.149>
- [15] Ferraioli, G., Barr, R.G., Berzigotti, A., Sporea, I., Wong, V.W., Reiberger, T., et al. (2024) WFUMB Guideline/Guidance on Liver Multiparametric Ultrasound: Part 1. Update to 2018 Guidelines on Liver Ultrasound Elastography. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **50**, 1071-1087. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2024.03.013>
- [16] Cokkinos, D.D., Antypa, E.G., Tsolaki, S., Skylakaki, M., Skoura, A., Mellou, V., et al. (2018) Contrast-Enhanced Ultrasound Examination of the Gallbladder and Bile Ducts: A Pictorial Essay. *Journal of Clinical Ultrasound*, **46**, 48-61. <https://doi.org/10.1002/jcu.22537>
- [17] 汪思睿, 沈玉婷, 周泊阳, 等. 肝内胆管癌超声造影诊断的争议、焦点与最新进展[J]. 肿瘤影像学, 2025, 34(2):

118-128.

- [18] Guo, H.L., Zheng, X., Cheng, M.Q., *et al.* (2022) Contrast-Enhanced Ultrasound for Differentiation between Poorly Differentiated Hepatocellular Carcinoma and Intrahepatic Cholangiocarcinoma. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **41**, 1213-1225. <https://doi.org/10.1002/jum.15812>
- [19] 李昱, 周建华. 肝内胆管细胞癌的超声造影诊断进展[J]. 肿瘤影像学, 2025, 34(2): 110-117
- [20] 马世辉, 崔云甫. 肝内胆管癌的分型及综合治疗现状[J]. 腹部外科, 2024, 37(3): 161-168.
- [21] Mantripragada, S. and Chawla, A. (2022) Cholangiocarcinoma: Part 1, Pathological and Morphological Subtypes, Spectrum of Imaging Appearances, Prognostic Factors and Staging. *Current Problems in Diagnostic Radiology*, **51**, 351-361. <https://doi.org/10.1067/j.cpradiol.2021.03.008>
- [22] Hu, R., Li, H., Horng, H., Thomasian, N.M., Jiao, Z., Zhu, C., *et al.* (2022) Automated Machine Learning for Differentiation of Hepatocellular Carcinoma from Intrahepatic Cholangiocarcinoma on Multiphasic MRI. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 7924. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11997-w>
- [23] Velardi, G.G., Lico, M., Teti, A., *et al.* (2024) Diagnosis of Intrahepatic Cholangiocarcinoma with CEUS. *Journal of Ultrasonography*, **24**, Article 20240005.
- [24] Qiao, L., Luo, Y., Wang, Q., Yuan, T., Xu, M., Xiong, G., *et al.* (2025) Artificial Intelligence in the Diagnosis and Prognosis of Intrahepatic Cholangiocarcinoma: Applications and Challenges. *World Journal of Gastrointestinal Oncology*, **17**, Article 111367. <https://doi.org/10.4251/wjgo.v17.i10.111367>
- [25] Xu, H.X., Chen, L.D., Liu, L.N., *et al.* (2012) Contrast-Enhanced Ultrasound of Intrahepatic Cholangiocarcinoma: Correlation with Pathological Examination. *The British Journal of Radiology*, **85**, 1029-1037. <https://doi.org/10.1259/bjr/21653786>
- [26] Hui, X., Tian, X., Ding, S., Sun, A., Zhao, T. and Wang, H. (2025) Reprogramming the Tumor Microenvironment to Overcome Immunotherapy Resistance in Pancreatic Cancer. *Frontiers in Immunology*, **16**, Article 1717062. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1717062>
- [27] Ye, Q., Liu, K., Shen, Q., Li, Q., Hao, J., Han, F., *et al.* (2019) Reversal of Multidrug Resistance in Cancer by Multifunctional Flavonoids. *Frontiers in Oncology*, **9**, Article 487. <https://doi.org/10.3389/fonc.2019.00487>
- [28] Yuan, M., Li, R., Zhang, Y., Yang, L., Zhang, X., Tang, C., *et al.* (2018) Enhancement Patterns of Intrahepatic Cholangiocarcinoma on Contrast-Enhanced Ultrasound: Correlation with Clinicopathologic Findings and Prognosis. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **45**, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2018.08.014>
- [29] Joo, I., Lee, J.M. and Yoon, J.H. (2018) Imaging Diagnosis of Intrahepatic and Perihilar Cholangiocarcinoma: Recent Advances and Challenges. *Radiology*, **288**, 7-13. <https://doi.org/10.1148/radiol.2018171187>
- [30] Ding, W., Meng, Y., Ma, J., Pang, C., Wu, J., Tian, J., *et al.* (2025) Contrast-Enhanced Ultrasound-Based AI Model for Multi-Classification of Focal Liver Lesions. *Journal of Hepatology*, **83**, 426-439. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2025.01.011>
- [31] Njei, B., Kanmounye, U.S., Seto, N., McCarty, T.R., Mohan, B.P., Fozo, L., *et al.* (2023) Artificial Intelligence in Medical Imaging for Cholangiocarcinoma Diagnosis: A Systematic Review with Scientometric Analysis. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, **38**, 874-882. <https://doi.org/10.1111/jgh.16180>
- [32] Eskandar, K. (2025) Artificial Intelligence in Hepatology: A Comprehensive Scoping Review of Clinical Applications, Challenges, and Future Directions. *iLIVER*, **4**, Article 100205. <https://doi.org/10.1016/j.iliver.2025.100205>
- [33] Mavroei, I.A., Burghofer, J., Kalbourtzis, S., Taghizadeh, H., Webersinke, G., Piringer, G., *et al.* (2024) Understanding Homologous Recombination Repair Deficiency in Biliary Tract Cancers: Clinical Implications and Correlation with Platinum Sensitivity. *ESMO Open*, **9**, Article 103630. <https://doi.org/10.1016/j.esmoop.2024.103630>
- [34] Song, C., Park, H., Lee, H.Y., Lee, S., Ahn, J.H. and Lee, S. (2021) Evaluation of Response to Immune Checkpoint Inhibitors Using a Radiomics, Lesion-Level Approach. *Cancers*, **13**, Article No. 6050. <https://doi.org/10.3390/cancers13236050>
- [35] Lang, S.Q., Kong, J.J., Li, G.B., *et al.* (2025) Prognostic Value of CRP-Albumin-Lymphocyte Index in Patients with Intrahepatic Cholangiocarcinoma after Radical Resection. *Frontiers in Medicine*, **12**, Article 1543665. <https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1543665>
- [36] Ding, W.Z., Li, B., Zhao, L., *et al.* (2025) Improving Detection of Intrahepatic Cholangiocarcinoma with a Contrast-Enhanced US-Based Deep Learning Model. *Radiology: Imaging Cancer*, **7**, e250078. <https://doi.org/10.1148/rycan.250078>
- [37] Guo, H., Li, C.Y., Wang, Y., *et al.* (2026) A Multitask Framework for Automated Interpretation of Multi-Frame Right Upper Quadrant Ultrasound in Clinical Decision Support.
- [38] Ding, W., Zhang, J., Jin, Z., Hua, H., Zu, Q., Yang, S., *et al.* (2025) Artificial Intelligence-Driven Pathomics in Hepatocellular Carcinoma: Current Developments, Challenges and Perspectives. *Discover Oncology*, **16**, Article No. 1424.

-
- <https://doi.org/10.1007/s12672-025-03254-z>
- [39] Huang, Z., Zhou, P.P., Li, S.S., *et al.* (2021) MR versus CEUS LI-RADS for Distinguishing Hepatocellular Carcinoma from Other Hepatic Malignancies in High-Risk Patients. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **47**, 1244-1252. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2021.01.020>
- [40] Ye, X.J., Hu, L., He, N.A., *et al.* (2019) Value of Conventional Ultrasonography and Contrast-Enhanced Ultrasound in the Differential Diagnosis of Intrahepatic Cholangiocellular Carcinoma and Hepatocellular Carcinoma: An Analysis Based on the Logistic Regression Model. *Journal of Clinical Hepatology*, **35**, 2502-2507.
- [41] Wang, D., Wang, W., Xiang, S., Xia, C., Zhang, Y. and Zhang, L. (2025) The Application Value of Multimodal Ultrasound Imaging Technology in the Prediction of Early-Stage Type 2 Diabetic Kidney Disease. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 12520. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97151-8>
- [42] Wang, L., Wang, C., Deng, X., Li, Y., Zhou, W., Huang, Y., *et al.* (2024) Multimodal Ultrasound Radiomic Technology for Diagnosing Benign and Malignant Thyroid Nodules of Ti-Rads 4-5: A Multicenter Study. *Sensors*, **24**, Article 6203. <https://doi.org/10.3390/s24196203>
- [43] 胡紫玥, 卢漫. 三维剪切波弹性成像的临床应用及展望[J]. 中华医学超声杂志(电子版), 2019, 16(8): 568-570.