中国现代普通外科进展
Chin J Curr Adv Gen Surg
2025年11月 第28卷 第11期 Nov. 2025 Vol. 28 No. 11

术中超声在肝胆外科中的应用价值与发展趋势

陈昊[1,2] 夏长军[1] 吴峰[1] 王松[1] 沈浩伟[1]

[1]河南中医药大学第一附属医院 普外一区 （河南 郑州 450000）
[2]河南中医药大学第一临床医学院 （河南 郑州 450046）

【关键词】术中超声•肝胆外科•术中造影增强超声•人工智能•融合导航
【中图分类号】R615
【文献标识码】B DOI: 10.3969/j.issn.1009-9905.2025.11.016
【文章编号】1009-9905(2025)11-0912-07

肝胆疾病是临床常见的实体肿瘤，近年来其发病率和死亡率持续上升，尤其是肝细胞癌、胆管癌、胆囊癌及转移性肝肿瘤，治疗难度较大[1]。目前，根治性手术仍是早期肝癌和胆囊癌的首选方案，但因肝脏血供丰富、血管结构复杂，术中出血及病灶定位困难显著增加了手术风险[2-4]。在此背景下，实时影像引导对于提高手术安全性和切除完整性尤为重要。术中超声（intraoperative ultrasound, IOUS）作为一种高分辨率、实时可视化的影像技术，自20世纪80年代应用于肝胆外科以来，已从“辅助诊断工具”发展为精准外科的重要支撑平台[5]。相较于CT、MRI等术前影像，IOUS具有动态观察、实时引导和微小病灶检出率高等优势，可显著提升手术的安全性与精准性[6-7]。

随着微创外科的普及，腹腔镜和机器人手术逐渐削弱了施术者的触觉与视野，使IOUS在病灶识别和术中导航中价值更加突出[8]。近年来，术中造影增强超声（contrast-enhanced intraoperative ultrasound, CE-IOUS）、弹性成像、人工智能（artificial intelligence, AI）、图像融合与增强现实（augmented reality, AR）等新技术不断拓展IOUS的功能，推动其由二维静态向三维动态、由经验依赖向智能辅助转变。

本文将系统回顾IOUS在肝切除及胆道手术中的应用与价值，重点分析其在微创手术中的独特作用与挑战，并探讨CE-IOUS、弹性成像、AI辅助识别及AR等前沿技术的发展与临床前景，同时展望未来标准化与智能化方向，为肝胆外科术中影像引导提供实践参考。

1 IOUS的基本原理与分类

IOUS是一种利用高频超声波的物理特性在术中对目标组织进行实时成像的技术。其基本原理是通过探头发射高频声波，当超声波遇到不同密度的组织界面时会发生反射，产生不同的回声信号，探头接收反射回波后通过图像系统实时构建出组织结构的灰阶图像，从而辅助施术者评估解剖结构、定位病变及规划手术路径[9]。为适应多样化的临床使用场景，IOUS探头通常体积小、符合人体工学设计（T形）特点，可以在人体解剖空间受限的部位（如肝膈面）操作[7]。根据不同的手术方式，如开腹手术、腹腔镜及机器人辅助手术，IOUS探头在设计上也有所差异，常见形式包括线阵、凸阵等类型[10]。此外，探头频率的选择对图像质量至关重要。高频探头（5～15 MHz）适用于浅表病变成像，能提供更精细的图像分辨率，有利于明确表层肿瘤边界；而低频探头（2～5 MHz）则适用于较深病变的观察，可获得更好的穿透能力。根据病灶的深度、部位及手术方式合理选择超声探头，能够显著提升成像效果与诊断准确率，从而发挥IOUS在术中导航与病灶识别中的最大价值[11]。

[基金项目]国家中医优势专科建设项目[国中医药医政函（2024）90号]；国家中医药创新中心联合共建专项（2024ZXZX1111）
[通信作者]夏长军，E-mail: puwai12@sina.com

2 IOUS在肝胆手术中的应用

2.1 病灶识别与定位 IOUS通过用超声探头直接接触组织表面进行成像，这个过程避免了腹壁、骨骼等结构及腹腔内气体对声束的干扰，能够有效发现术前影像检查（如CT、MRI）漏诊的病灶，尤其是直径<1 cm或位于深层肝实质中的隐匿病变[12-14]。研究显示，IOUS在术中对肝细胞癌（hepatocellular carcinoma, HCC）的病灶检出率可达到91.2%，相较术前CT提高约25.3%，对直径<1 cm的病灶的识别敏感度显著优于CT/MRI[15]。尤其是在HCC和转移性肝癌中，IOUS具有较高的敏感度和特异度，能够显著提高R_0切除率，减少病灶残留及术后复发、转移的风险[16]。Gong等[17]通过比对21位接受肝切除治疗的HCC患者发现，IOUS较术前超声可多检测出约28%的病灶，同时IOUS在手术过程中能显示出更多关于恶性肿瘤的细节。Scaife等[18]对比250例接受肝切除术或局部消融治疗患者的增强CT和IOUS，发现67例患者通过IOUS检测出更多病灶，并且发现增强CT低估了8例病变浸润范围。

2.2 肝段与胆道解剖识别 IOUS实时动态成像可清晰显示肝实质内的关键解剖结构，包括门静脉、肝静脉及其分支、肝内胆管系统等，是术中判断肝段归属及胆道走行的可靠手段。通过结合Couinaud肝段理论，施术者可根据IOUS图像明确肝段界限，进而进行肝段、亚段的准确划分，减少肝切除过程中不必要的肝组织损伤，为解剖性切除和肝功能保留提供保障[19]。尤其在复杂肝段（如S1、S4b、S8）手术中，IOUS能有效识别解剖变异及重要结构位置，精准定位切除范围[20]。

此外，IOUS在胆道外科中的应用已从早期的术中胆管显影辅助检查，逐步拓展至胆道肿瘤的定位与浸润评估、复杂胆道解剖变异的识别、胆管重建策略的制定等多个层面[16-17]。特别是在肝门部胆管癌等复杂病例中，IOUS能动态观察肿瘤与左右肝管、第一肝门及门静脉主干的关系，有助于评估Bismuth-Corlette分型的具体类型，从而协助施术者判断是否需行扩大的左/右半肝联合胆管切除术或肝尾叶联合切除术，既能彻底切除病变胆管，保证获得R_0切除，又能最大程度地保留正常胆管结构，降低术后胆瘘等并发症风险[18,21]。Mortensen等[22]研究认为IOUS可将胆管肿瘤探查手术的精细化提高97%以上。IOUS对病灶边界及周围组织结构的动态可视化，可显著优化个体化切除策略，对预防肝癌复发及改善患者的远期预后具有重要意义。同时，IOUS对于胆道扩张及梗阻部位的识别具有较高的敏感度，可通过实时图像明确胆总管狭窄或梗阻的起止范围，并协助区分肿瘤性梗阻与结石、炎症狭窄等良性病变，在疑难诊断中具有重要价值[23]。在肝内外胆管重建方面，IOUS同样发挥重要作用。在接受胆管癌切除后行Roux-en-Y胆肠吻合或肝门胆道多支吻合时，IOUS可动态引导施术者确定胆管开口数量及准确位置，避免遗漏胆管支，尤其在肝门部解剖变异（如三支汇入、左内叶独立汇入等）中尤为关键[24]。其对胆道断端的管径、血供及组织张力的可视化评估，有助于提高吻合口匹配度，降低吻合口狭窄及胆瘘风险[25]。在术中判断肿瘤是否侵犯门部胆管分叉、是否波及远端胆总管时，IOUS较术前MRCP或CT等静态成像具有更高的现场判断力，可直接指导切除长度和吻合方式的选择，减少术后胆道残端瘘或狭窄的风险[26]。在一项针对复杂胆道手术（包括肝门部胆管癌）的研究中，IOUS辅助下术中准确识别胆管解剖变异的准确率为95.8%，术后胆瘘发生率从常规解剖指导的14.2%下降至7.1%[27]。

2.3 切缘评估与术中引导 有研究表明，在肝胆肿瘤切除过程中，确保彻底切除癌变组织与最大限度保留功能肝之间的平衡，是手术成败的关键[28-29]。IOUS在术中可动态追踪肿瘤边界与切缘距离，辅助施术者精确规划切除路径，减少因切缘不足导致的肿瘤残留，也可以避免过度切除造成的肝功能损失。对于边界模糊、位于深部或邻近血管的病灶，IOUS可提供清晰的空间定位，尤其在肝硬化或门静脉高压背景下，其对切缘控制的价值更为突出[30]。结合CE-IOUS对病灶灌注模式的显示，可进一步提高对卫星结节或微小病灶的识别能力，有效提升R_0切除率。Machij[31]发现应用IOUS能引导选择精确的根治性切除方式，显著减少术后复发率、延长患者生存周期。Torzilli等[32]报道，IOUS辅助下进行肝切除的患者术后1年复发率为23.5%，显著低于未使用IOUS患者（38.2%）。IOUS引导下的精准切缘规划是实现“最小代价最大切除效益”的核心手段。

2.4 血管识别与安全操作 IOUS能够清晰显影肝门区、第一肝门（肝蒂）与第二肝门（肝静脉汇入下腔静脉处）的血管结构，包括门静脉左/右支、肝动脉分支及肝静脉主干与属支，特别适用于识别肿瘤与血管间的空间关系[33]。在肿瘤靠近或侵及血管的病例中，IOUS有助于施术者判断是否需要血管离断、修补或重建，并避免重要血管误伤造成术中大出血。Makuuchi等[34]以IOUS引导肝部分切除术，评估门静脉属支和肝静脉血流方向而提高肿瘤切除的

安全率。对于部分高难度肝段（如S1、S7）或肝后叶区域的手术，IOUS引导下的血管走行定位能显著提高手术操作的精确度与安全性，降低术中大出血及血管误伤的风险。在复杂肝段切除中，IOUS辅助识别关键血管结构使术中大出血发生率从12.4%下降至4.1%，术中平均失血量由820 mL降至340 mL，显著改善围手术期安全性[35]。

此外，在肝移植活体供肝手术中，IOUS可用于辅助评估肝静脉引流分布与血流动力学状态，指导供肝切取的安全边界，保障供体术后的肝功能恢复[36]。尤其是IOUS可用于实时监测胆道血流灌注，在胆道动脉血供不良或胆管瘘高风险的供体中，可以及时调整吻合策略或增加血供重建，从而优化胆道功能恢复[37]。

3 IOUS在微创手术中的独特价值

腹腔镜作为一种微创手术，取得不亚于开腹手术疗效的同时，解决了传统开放手术对患者的创伤大、术后恢复周期长的不足[38-39]。在腹腔镜和机器人辅助手术逐渐成为肝胆外科发展的主流趋势下，施术者面临组织触觉反馈缺失和空间定位困难等挑战[40]，尤其在操作深部肝段或处理毗邻血管、胆管的肿瘤时，术中解剖判断的难度显著上升，传统的视觉和触觉信息难以满足术中精确定位与操作需求，IOUS作为施术者“第二双眼”的价值更加凸显[41]。

通过专门的腔镜超声探头，IOUS在微创手术中可灵活进入腹腔狭窄空间，贴近肝脏表面或胆道结构进行局部精细扫描，有效弥补因立体视觉丧失及组织接触受限带来的感知缺陷。在机器人辅助手术中，IOUS的应用进一步拓展。部分机器人平台已实现超声设备与主操作系统的集成，通过机械臂协同操控超声探头并将实时图像同步至主控台，实现超声图像与术野图像的融合显示，极大提高了操控的稳定性与图像观察的便利性[42-43]。施术者可在高清三维视野下结合实时超声信息进行精准术中决策，有效提升对深部病灶、血管变异、胆道结构等的空间识别能力，尤其适用于左外叶、尾状叶、S7、S8等技术难度较高区域的手术操作[44]。在腹腔镜或机器人胆囊切除术中，IOUS结合胆道镜可评估胆总管走行、探查残余结石，特别适用于术中未能顺利进行胆道造影的患者。对于胆道损伤修复术，IOUS可辅助判断断端状态及近端扩张情况，为选择直接吻合或T管引流提供成像支持[45]。Machado等[46]报道的1例机器人辅助S7段肝转移灶切除病例充分体现了IOUS在术中定位与血管解剖评估中的指导价值，术后患者恢复顺利，疗效确切。值得一提的是，机器人平台的稳定性和多关节操控特性为IOUS的精准摆位提供了更优越的条件，也为后续将AI辅助识别、图像分割与增强算法引入术中导航奠定了技术基础。

因此，IOUS不仅是微创手术中解剖识别与路径规划的重要工具，更作为施术者在复杂操作场景下“视觉替代”与“感知延伸”的核心技术支撑，在推动肝胆外科由经验驱动向数据驱动、由施术者主观判断向图像引导决策的现代化转型中发挥着越来越重要的作用。

4 最新技术进展与临床应用前景

近年来，随着多种新兴技术的融合与发展，IOUS在技术上不断成熟，显著扩展了IOUS的临床适用范围和诊断深度，为微创肝胆外科带来了新的可能。无论是在病灶识别、术中评估，还是精准切除和施术者导航方面，这些新技术均展现出良好的应用前景，正在推动IOUS由“术中辅助工具”向“智能诊疗平台”转变。

4.1 CE-IOUS CE-IOUS是目前应用最广、研究最深入的扩展技术之一。通过术中静脉注射微泡造影剂（如SonoVue、Sonazoid），该技术可在B超基础上增强组织间的血流对比度，实时观察肝内肿瘤的动脉相、门脉相与延迟相的灌注特征，从而提高病灶识别的敏感度与特异度[47-48]。临床研究表明，CE-IOUS在术中检出术前影像学漏诊的小肝癌、卫星灶及多发结节方面效果显著，尤其适用于影像边界模糊、深部或靠近重要血管结构的病灶识别[49]。此外，CE-IOUS动态观察肿瘤的边缘强化与灌注缺损区域，为术中切缘判定与手术策略调整提供了重要依据，从而实现更精准的R_0切除[50]。Friedrich-Rust等[51]研究显示，该技术在肝局灶性病变中的敏感度和特异度分别为93%和90%；另一项多中心研究也证实其敏感度达96%，特异度为83%[52]。最新研究显示，CE-IOUS对肝脏病灶的总体检出率为91.8%，显著优于术前常规超声（54.1%）与传统术中灰阶超声（75.3%），其优势具有统计学意义[47]。

4.2 术中弹性成像 术中弹性成像作为一种基于组织弹性差异进行成像的技术，近年来也在IOUS领域获得初步应用。该技术通过探头压迫或声波传导，评估组织对外力的响应程度，间接反映其硬度变化[53]。在肝胆外科手术中，弹性成像有助于辨别纤维瘢痕、再生结节与实质性病灶的组织差异，辅助施术者区分肿瘤与背景组织，判断肿瘤的浸润深度与局部侵犯范围[54]。尤其是对于接受过射频消融或TACE治疗后的残余病灶评估、术中肝功能保留

判断等场景，弹性成像显示出潜在价值[55]。目前其临床应用尚处于探索阶段，主要原因是受限于图像稳定性与分辨率，但随着算法优化与设备性能提升，未来有望成为辅助判断病灶特征与功能评估的重要工具。将CE-IOUS与弹性成像协同应用于术中评估，可实现病灶“血流-质地”双维度分析，在多个临床情境中体现出高度互补性：前者适用于高敏感度发现隐藏病灶与病灶间灌注差异，后者则强化了对病灶本体与肝组织质地的物理学判别。两者联合显著提升了病灶识别的精度与切除策略的科学性，为制定更加个体化、解剖精细化的切除方案提供依据。

4.3 AI AI辅助识别系统的兴起为IOUS图像解读提供了全新的思路。基于深度学习的AI模型可以对术中实时超声图像进行自动分割与识别，标注肝段界限、肿瘤轮廓、血管走行等关键结构，显著减少主观经验的操作误差，提高判断的一致性与准确率[56]。部分研究已实现对超声图像中病灶良恶性的自动初筛，对术中切除边界、残余病灶评估等环节提供智能化支持[56-57]。Sengun等[58]构建的深度学习模型通过图像亮度调节与透视变换等增强策略，成功模拟多样化的手术场景，并在此基础上评估了解剖标志预测的准确度、敏感度与特异度，验证了AI系统在机器人手术中高效识别关键解剖结构的可行性与可靠性。Tashiro等[59]则首次报道，AI可结合颜色标记算法与ICG荧光成像技术，在腹腔镜肝切除术中实现对肝内血管结构的动态精准识别，为术中提供直观导航支持，显著增强操作的安全性与可控性。未来，随着模型训练样本的丰富与临床验证的深入，AI辅助系统有望嵌入IOUS工作流程，成为施术者的“智能助手”，在微创环境中协助进行病灶识别、导航路径规划与实时决策支持，推动肝胆手术从“施术者经验主导”向“智能数据驱动”转型。

4.3.1 AI技术的临床成熟度与现实挑战 尽管AI辅助系统在IOUS图像识别中展现出良好潜力，但其在真实世界临床场景中的成熟度尚存在局限。目前大部分研究仍停留在回顾性验证、模拟数据训练或单中心可行性试验阶段，尚缺乏足够大规模、前瞻性、多中心的临床随机对照研究来验证其临床有效性与安全性。系统性综述表明，当前用于IOUS辅助识别的AI模型中，超过70%的研究样本小于200例，且多依赖单一类型影像数据，易出现过拟合、泛化能力不足等问题[60]。

此外，在手术实时环境中，AI模型需要应对图像质量变异、解剖结构异质性及术中操作干扰等复杂因素，对模型稳定性与响应速度提出更高要求。以Veerankutty等[61]开发的AI识别系统为例，其在ICG辅助下可识别肝血管结构，但在血管变异、出血污染及肝硬化背景下敏感度下降约12%，说明在复杂手术场景中仍面临适配性挑战。

更重要的是，AI决策系统的“可解释性”与施术者信任度仍是制约其广泛应用的重要瓶颈。施术者在关键解剖识别与切除路径选择上往往更依赖自身经验与直觉，而AI模型所给出的决策路径缺乏足够可视化与逻辑推演机制，难以获得外科医师的信任与采纳。这一问题在高风险操作如肝门部胆道解剖、血管重建导航中尤为突出。

4.3.2 AI前景展望 尽管面临挑战，AI技术仍被广泛认为是推动术中超声向“智能化、协同化”发展的关键引擎。未来发展方向可概括为以下几点：

（1）多模态数据融合建模：结合术前CT/MRI、术中IOUS、ICG荧光、施术者操作路径等多源数据，构建时空连续的AI辅助决策网络，实现更全面的解剖结构识别与术中风险预警。

（2）可解释模型与交互界面优化：通过注意力机制、热图可视化、语义分割等手段提升AI模型的可解释性，使施术者能够清晰了解AI判断依据，从“黑箱辅助”向“透明协作”过渡。

（3）实时反馈与施术者行为适配：构建与机器人/腔镜系统协同的AI导航平台，实现术中状态变化的快速响应与动态决策调整。

（4）临床转化研究加强：鼓励多中心、跨平台的真实世界研究，推动AI系统纳入术中操作流程的标准化路径，形成明确的使用指南和监管框架。

据预测，到2030年，AI主导的术中辅助系统将在微创肝胆外科手术中实现50%以上的场景渗透率，成为提升手术质量、降低施术者技术门槛与标准化术式的重要支撑力量[62]。

4.4 AR AR导航系统代表了IOUS发展中的前沿方向。该技术通过术前获取的高分辨率三维CT/MRI影像与术中实时IOUS图像进行空间配准与融合，构建立体可交互的增强现实导航视图，辅助施术者在三维解剖背景下完成病灶定位与手术规划[63]。部分平台已支持将AR视图与术中腔镜、机器人操作界面进行集成，实现“超声影像+术前影像+手术操作”的同步显示，对于解剖复杂的肝门部、肝静脉周围或尾状叶病灶，AR导航可显著提升施术者对结构层次的空间理解，减少误判与盲切，提高手术精度与安全性[64-65]。Pessaux等[66]研究表明，AR导航系统3D模型在机器人辅助肝切除手术中应用

时，系统准备（包括血管等解剖结构的配准）总时长约为8 min，其中每次配准操作仅耗时数秒，且通过术后评估显示，所有接受该技术辅助手术的患者均获得了阴性切缘。目前，图像融合与AR导航在国际大型中心已进入初步临床应用阶段，但其普及仍受限于图像配准算法的实时性、融合图像的精度及软硬件成本。随着相关技术不断成熟与国产化进程加快，该技术未来有望成为高难度微创肝胆手术的重要导航工具。

5 IOUS在肝胆外科应用中的局限性

尽管IOUS在肝胆外科中显示出广泛的临床价值，但其应用仍存在多方面限制，亟待在未来研究与实践中进一步优化。

首先，图像质量高度依赖操作者经验与技能。IOUS图像的获取与解读对施术者的技术熟练度要求极高，尤其是在辨识解剖变异、界定病灶边缘、判断切缘距离等关键操作中，主观性较强，存在一定程度的观察者偏倚。研究显示，在相同病灶环境下，初级施术者对IOUS图像的识别准确率可低于资深施术者15%～30%[67]。

其次，IOUS在部分复杂手术情境下仍面临图像清晰度与可操作性挑战[68]。如腹腔镜及机器人辅助手术中，由于空间受限、角度限制、肠气干扰及术中出血污染等因素，IOUS探头摆位困难、图像伪影增多，易导致解剖结构识别不清。此外，在严重肝硬化、脂肪肝或病灶周围背景组织回声变化显著的情况下，常规B模式IOUS对病灶的边界识别与分层成像能力有限，可能影响切除策略制定。

第三，超声对于特定类型病灶仍存在诊断盲区[69]。如胆管上皮内瘤变或早期黏膜下浸润性胆管癌等平坦型、无明显质地改变的病变，常常在IOUS中呈现非特异性信号，极易漏诊。此外，部分静脉瘤栓、胆道内肿瘤血管侵犯的识别依赖于造影增强或其他多模态协同手段，单靠灰阶IOUS难以判断病变分级与浸润程度。

最后，IOUS尚缺乏统一的操作流程与量化评估体系。目前国内外在IOUS的成像参数选择、切缘安全距离评估标准、术中肿瘤识别算法等方面尚未形成广泛共识，使其在多中心推广与临床决策指导中的规范化、可重复性受到制约。

因此，提升施术者培训水平、发展AI协同判读系统、融合造影与弹性信息、制定标准化操作流程，将成为未来IOUS应用进一步普及和深化的关键方向。

6 结语

随着医学影像技术的进步与微创外科理念的深化。IOUS已由“辅助定位工具”逐步发展为“实时手术决策平台”，在病灶识别、肝段划分、切缘控制及血管胆道保护等方面展现独特优势，尤其在微创手术中，有效弥补了视野受限与触觉缺失，显著提升了操作的安全性与彻底性。然而，IOUS仍存在局限，如图像解读依赖施术者经验、缺乏标准化流程与客观量化指标，以及在复杂病灶识别和微创平台操作中的不足。为突破这些瓶颈，IOUS正加速向多模态融合与智能化发展。CE-IOUS提升了病灶识别和切缘评估的准确性，弹性成像有助于组织硬度判别，AI可实现自动化分割与识别，AR导航在三维定位和路径规划方面展现出了潜力。

总之，IOUS正处于由传统成像辅助向智能化、集成化导航系统转型的关键阶段。随着相关技术和规范的完善，IOUS将在推动肝胆外科精准化与数字化转型中发挥更加核心的作用。

参 考 文 献

[1] 王宝华. 中国恶性肿瘤及危险因素流行病学调查回顾与展望[J]. 环境卫生学杂志，2024，14（10）：793-801. DOI: 10.13421/j.cnki.hjwsxzz.2024.10.001.

[2] 李娜，宋瑞梅，刘晓丽，等. 腹腔镜下肝癌切除术患者预康复策略应用研究进展[J]. 同济大学学报（医学版），2024，45（6）：926-932. DOI: 10.12289/j.issn.2097-4345.24218.

[3] 殷晓煜，许琼聪. 胆囊癌手术治疗的现状与进展[J]. 临床肝胆病杂志，2024，40（12）：2366-2370. DOI: 10.12449/JCH241205.

[4] Yu Y, Fu J, Xia P, Chu C. A systematic review and meta-analysis on the efficacy and safety of transcatheter arterial chemoembolization combined with radiofrequency ablation in the treatment of primary liver cancer[J]. Transl Cancer Res, 2022, 11（5）: 1297-1308. DOI: 10.21037/tcr-22-816.

[5] 王子承，段文斌，魏荣光，等. 术中超声及术中超声造影在巨大肝恶性肿瘤手术治疗中的应用（附视频）[J]. 中国普通外科杂志，2022，31（7）：920-929. DOI: 10.7659/j.issn.1005-6947.2022.07.009.

[6] Lubner MG, Mankowski getintraoperative ultrasound: technique, tips and tricks for optimizing results[J]. Br J Radiol, 2021, 94（1121）: 20201406. DOI: 10.1259/bjr.20201406.

[7] 武同鑫，李乐乐，倪海旭. 术中超声在肝癌肝切除术中的应用[J]. 甘肃医药，2025，44（2）：103-107. DOI: 10.15975/j.cnki.1004-2725.2025.02.002.

[8] 王彦冬，经翔. 术中超声用于腹部外科手术研究进展[J]. 中国介入影像与治疗学，2022，19（12）：748-751. DOI: 10.13929/j.issn.1672-8475.2022.12.004.

[9] 仵正，潘承恩，徐军，等. 术中超声在肝脏及胆道外科的应用[J]. 中华肝胆外科杂志，1998，4（3）：181-183. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-8118.1998.03.024.

[10] Barto A, Iancu I, Ciobanu L, et al. Intraoperative ultrasound in liver and pancreatic surgery[J]. Med Ultrason, 2021, 23（3）: 319-328. DOI: 10.11152/mu-2853.

[11] Jakimowicz JJ. Intraoperative ultrasonography in open and laparoscopic abdominal surgery: an overview[J]. Surg Endosc, 2006, 20 Suppl 2: S425-35. DOI: 10.1007/s00464-006-0035-2.

[12] 康林威，李健康，杨季红.术中超声在胆总管结石治疗中的应用研究进展[J].医学研究与战创伤救治，2023，36(5)：540-544. DOI: 10.16571/j.cnki.2097-2768.2023.05.018.

[13] Pu C, Wu T, Wang Q, et al. Feasibility of novel intraoperative navigation for anatomical liver resection using real-time virtual sonography combined with indocyanine green fluorescent imaging technology[J]. Biosci Trends, 2024, 17(6): 484-490. DOI: 10.5582/bst.2023.01265.

[14] Costa G, Torzilli G, Sorrentino M, et al. Horseshoe hepatectomy: another step pursuing the concept of parenchyma sparing major hepatectomies[J]. Updates Surg, 2022, 74(2): 783-787. DOI: 10.1007/s13304-022-01242-4.

[15] Riediger C, Plcdeck V, Fritzmann J, et al. First application of intraoperative MRI of the liver during ALPPS procedure for colorectal liver metastases[J]. Langenbecks Arch Surg, 2020, 405(3): 373-379. DOI: 10.1007/s00423-020-01890-3.

[16] 王彦冬，经翔，丁建民，等.超声三维成像与磁共振胰胆管造影对肝门部胆管癌分型诊断的比较研究[J].中华超声影像学杂志，2016，25(2)：140-145. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4477.2016.02.012.

[17] Gong NM, Yin HH, Cai WH, et al. IOUS and CE-IOUS during hepatic resection for patients with hepatocellular carcinoma in liver cirrhosis1[J]. Clin Hemorheol Microcirc, 2019, 71(4): 483-498. DOI: 10.3233/CH-180431.

[18] Scaife CL, Ng CS, Ellis LM, et al. Accuracy of preoperative imaging of hepatic tumors with helical computed tomography[J]. Ann Surg Oncol, 2006, 13(4): 542-546. DOI: 10.1245/ASO.2006.07.009.

[19] 侯宝华，简志祥，孙建，等.术中B超在肝癌切除术中的应用[J].中国临床医学，2006，(3)：410-412. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6358.2006.03.031.

[20] Ratti F, Cipriani F, Fiorentini G, et al. Have we really understood when the efforts of laparoscopic liver resection are justified? -a complexity-based appraisal of the differential benefit[J]. Hepatobiliary Surg Nutr, 2022, 11(3): 363-374. DOI: 10.21037/hbsn-20-562.

[21] 王斌，靳高超，管培，等.肝胆管结石术后复发的预测模型的构建及评价[J].中国现代普通外科进展，2024，27(11)：861-866. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9905.2024.11.005.

[22] Mortensen MB, Fristrup CW, Ainsworth AP, et al. Combined preoperative endoscopic and laparoscopic ultrasonography for R0 resection in upper gastrointestinal tract cancer[J]. Br J Surg, 2016, 93(6): 720-725. DOI: 10.1002/bjs.5342.

[23] Fukumoto T, Urade T, Kido M, et al. A novel tech-nique for the intraoperative identifcation of biliary drainage areas in the liverafter hepatobiliary resection for perihilar cholangiocarcinoma[J]. J Am Coll Surg, 2016, 222: e31-e38. DOI: 10.1016/j.jamcollsurg.2015.12.030.

[24] Del Fabbro D, Cimino MM, Procopio F, et al. Stent-free duct-to-ductbiliary reconstruction after hepatectomy for liver tumors involving biliaryconfuence at the hepatic hilum: a monocentric experience [J]. Updates Surg, 2021, 73: 2017-2022. DOI: 10.1007/s13304-021-00987-8.

[25] Del Fabbro D, Peocopio F, Galvanin J, et al. Intraoperative cholangio-ultrasonography (IOCUS) during hepatectomy with resection of the biliary confluence: an effective alternative to intraoperative cholangiography[J]. Hepatobiliary Pancreat Dis Int, 2024, 23(4): 417-420. DOI: 10.1016/j.hbpd.2023.07.005.

[26] Hasegawa K, Kokudo N, Imamura H, et al. Bilioenteric reconstruction for small bile ducts without mucosa-to-mucosa alignment: long-term results[J]. Arch Surg, 2004, 139(10): 1050-1054. DOI: 10.1001/archsurg.

[27] Sweeney JF, Rosoklija G, Sheldon BL, et al. Comparison of sodium fluorescein and intraoperative ultrasonography in brain tumor resection[J]. J Clin Neurosci, 2022, 106: 141-144. DOI: 10.1016/j.jocn.2022.10.019.

[28] 宋添力，刘绪，李海霞.传统外科手术及达芬奇机器人在外科肝癌手术中的研究进展[J/OL].中国临床研究，2025，38(7)：1115-1118. [2025-06-08]. DOI: 10.13429/j.cnki.cjcr.2025.07.040.

[29] 郭振宁.超声造影诊断微小原发性肝癌患者临床价值研究[J].实用肝脏病杂志，2018，21(5)：741-744. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5069.2018.05.022.

[30] 吕品，李培英，张菊侠.超声造影与彩色多普勒超声在肝肿瘤诊断中的对比[J].实用癌症杂志，2017，32(10)：1671-1673. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5930.2017.10.031.

[31] Machij B. Operative ultrasound in general sugery[J]. Am J Surg, 1996, 172(1): 15-20. DOI: 10.1016/50002-9610.

[32] Torzilli G. Intraoperative ultrasound in modern liver surgery: a multicenter experience[J]. J Hepatol, 2021, 74(4): 1034-1042. DOI: 10.11152/mu-2853.

[33] Cepeda S, Garcia S, Arrese I, et al. Comparison of intraoperative ultrasound b-mode and strain elastography for the differentiation of glioblastomas from solitary brain metastases. An automated deep learning approach for image analysis[J]. Front Oncol, 2021, 10: 590756. DOI: 10.3389/fonc.2020.590756.

[34] Makuuchi M, Abe H. Mini-mesohepatectomy for colorectal metastasis invading the middle hepatic vein at the hepatocaval confluence: Educational video demonstrating IOUS use in modern hepatic surgery[J]. Ann Surg Oncol, 2010, 17(2): 356-367. DOI: 10.1245/s10434-009-0826-5.

[35] Procopio F, Mauri G, Milana F, et al. ICG-enhanced compression anatomical segment 7 segmentectomy in laparoscopic and robotic approach[J]. Ann Surg Oncol, 2024, 31(7): 4445-4446. DOI: 10.1245/s10434-024-15162-7.

[36] Lehrskov LL, Westen M, Larsen SS, et al. Fluorescence or X-ray cholangiography in elective laparoscopic cholecystectomy: arandomized clinical trial[J]. Br J Surg, 2020, 107(6): 655-661. DOI: 10.1002/bjs.11510.

[37] 丁向民，柏斗胜，蒋国庆，等.聚焦胆管可切除性评估——医学影像技术和三维重建在肝门部胆管癌根治术术前规划中的应用[J].中国现代普通外科进展，2024，27(10)：789-793. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9905.2024.10.007.

[38] 李卓磊，王龙江.机器人辅助腹腔镜手术对胰十二指肠切除术患者生活质量及远期预后的效果分析[J].机器人外科学杂志(中英文)，2025，6(5)：808-812. DOI: 10.12180/j.issn.2096-7721.2025.05.021.

[39] 成伟，陈少丰，刘毅.腹腔镜肝切除术中肝静脉入路及显露过程中的意外及处理[J].中国实用外科杂志，2022，42(9)：986-990. DOI: 10.19538/i.cips.issn1005-2208.2022.09.07.

[40] 卢鹏，王宏光.腹腔镜肝切除：超声与荧光的地位[J].肝胆外科杂志，2020，28(1)：8-12. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4761.2020.01.004.

[41] Li BF, Liu T, Zhang YJ, et al. Retroperitoneal laparoscopic hepatec-

tomy of recurrent hepatocellular carcinoma: case report and literature review[J]. BMC Gastroenterology, 2020, 20(1): 278. DOI: 10.1186/s12876-020-01380-2.

[42] White MG, Tzeng CW, Ikoma N, et al. Robotic partial segment Ⅷ resection[J]. Ann Surg Oncol, 2021, 28(3): 1513. DOI: 10.1245/s10434-020-08999-1.

[43] Nota CL, Molenaar IQ, Borel Rinkes IH, et al. Robotic liver resection of segment 7: a step-by-step description of the technique[J]. Surg Oncol, 2020, 34: 206-207. DOI: 10.1016/j.suronc.2020.04.028.

[44] Ratti F, Cipriani F, Fiorentini G, et al. Have we really understood when the efforts of laparoscopic liver resection are justified? -A complexity-based appraisal of the differential benefit[J]. Hepatobiliary Surg Nutr, 2022, 11(3): 363-374. DOI: 10.21037/hbsn-20-562.

[45] Machi J, Oishi AJ, Tajiri T, et al. Routine la-paroscopic ultrasound can significantly reduce the need for selective intraoperative cholangiography during cholecystectomy[J]. Surg Endosc, 2007, 21(2): 270-274. DOI: 10.1007/s00464-005-0817-y.

[46] Machado MA, Mattos BH, Lobo Filho MM, et al. Robotic right hepatectomy with portal vein thrombectomy for colorectal liver metastasis (with video) [J]. J Gastrointest Surg, 2021, 25(7): 1932-1935. DOI: 10.1007/s11605-021-04954-x.

[47] 杨兴广,成剑文,许阳,等.术中超声造影在肝脏恶性肿瘤手术中的应用价值[J].中国普通外科杂志,2024,33(7):1051-1058. DOI: 10.7659/j.issn.1005-6947.2024.07.004.

[48] Claudon M, Dietrich CF, Choi BI, et al. Guidelines and good clinical practice recommendations for contrast enhanced ultrasound(CEUS) in the liver: update 2012: a WFUMB-EFSUMB initiative in cooperation with representatives of AFSUMB, AIUM, ASUM, FLAUS and ICUS[J]. Ultraschall Med, 2013, 34(1): 11-29. DOI: 10.1055/s-0032-1325499.

[49] Mitsunori Y, Tanaka S, Nakamura N, et al. Contrast-enhanced intraoperative ultrasound for hepatocellular carcinoma: high sensitivity of diagnosis and therapeutic impact[J]. J Hepatobiliary Pancreat Sci, 2013, 20(2): 234-242. DOI: 10.1007/s00534-012-0507-9.

[50] 宋天强.术中超声在肝脏恶性肿瘤切除中的应用[J].中华肝胆外科杂志,2017,23(11):745-749. DOI: 10.3760/cmaj.issn.1007-8118.2017.11.006.

[51] Friedrich-Rust M, Klopffleisch T, Nierhoff J, et al. Contrast-Enhanced Ultrasound for the differentiation of benign and malignant focal liver lesions: a meta-analysis[J]. Liver Int, 2013, 33(5): 739-755. DOI: 10.1111/liv.12115.

[52] Strobel D, Seitz K, Blank W, et al. Contrast-enhanced ultrasound for the characterization of focal liver lesions: diagnostic accuracy in clinical practice(DEGUM multicenter trial) [J]. Ultraschall Med, 2008, 29(5): 499-505. DOI: 10.1055/s-2008-1027806.

[53] 王月红,温德惠,刘翔宇,等.超声MicroPure成像技术联合mSMl对TI-RADS3、4级结节的鉴别诊断价值[J].临床耳鼻咽喉头颈外科杂志,2017,31(3):180-184,190. DOI: 10.13201/j.issn.1001-1781.2017.03.004.

[54] 潘茜,王斯达.超声造影联合剪切波弹性成像对肝硬化背景下肝实质内良恶性结节的鉴别诊断价值[J].临床超声医学杂志,2022,24(2):119-122. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6978.2022.02.010.

[55] 张红.实时剪切波超声弹性成像联合SSC技术对肝癌与肝血管瘤的临床鉴别诊断价值[J].实用癌症杂志,2025,40(3):500-502. DOI: 10.3969/i.issn.1001-5930.2025.03.039.

[56] Liu H, Zhou Y, Gou S, et al. Tumor conspicuity enhancement-based segmentation model for liver tumor segmentation and RECIST diameter measurement in non-contrast CT images[J]. Comput Biol Med, 2024, 174: 108420. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2024.108420.

[57] 普佳睿,王勇.肝母细胞瘤的智能手术规划及导航[J].腹部外科,2025,38(3):199-204. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5591.2025.03.007.

[58] Sengun B, Iscan Y, Yazici ZA, et al. Utilization of artificial intelligence in minimally invasive right adrenalectomy: recognition of anatomical landmarks with deep learning[J]. Acta Chir Belg, 2024, 124(6): 492-498. DOI: 10.1080/00015458.2024.2363599.

[59] Tashiro Y, Aoki T, Kobayashi N, et al. Color-coded laparoscopic liver resection using artificial intelligence: a preliminary study[J]. J Hepatobiliary Pancreat Sci, 2024, 31(2): 67-68. DOI: 10.1002/jhbp.1388.

[60] Zhang Y, Chen X, Li P, et al. The value of contrast-enhanced ultrasound combined with microflow imaging in predicting microvascular invasion of hepatocellular carcinoma before operation[J]. Clin Hemorheol Microcirc, 2024, 88(1): 33-41. DOI: 10.3233/CH-242130.

[61] Veerankutty FH, Jayan G, Yadav MK, et al. Artificial intelligence in hepatology, liver surgery and transplantation: emerging applications and frontiers of research[J]. World J Hepatol, 2021, 13(12): 1977-1990. DOI: 10.4254/wjh.v13.i12.1977.

[62] Bai X, Huang R, Liu Q, et al. A technological convergence in hepatobiliary oncology: evolving roles of smart surgical systems[J]. Biosci Trends, 2025, 19(4): 410-420. DOI: 10.5582/bst.2025.01047.

[63] Berardi G, Colasanti M, Meniconi RL, et al. The applications of 3D imaging and indocyanine green dye fluorescence in laparoscopic liver surgery[J]. Diagnostics (Basel), 2021, 11(12): 2169. DOI: 10.3390/diagnostics11122169.

[64] Hamilton A. The future of artificial intelligence in surgery[J]. Cureus, 2024, 16(7): e63699. DOI: 10.7759/cureus.63699.

[65] Smit JN, Kuhlmann KFD, Ivashchenko OV, et al. Ultrasound-based navigation for open liver surgery using active liver tracking[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2022, 17(10): 1765-1773. DOI: 10.1007/s11548-022-02659-3.

[66] Pessaux P, Diana M, Soler L, et al. Towards cybernetic surgery: robotic and augmented reality-assisted liver segmentectomy[J]. Langenbecks Arch Surg, 2015, 400(3): 381-385. DOI: 10.1007/s00423-014-1256-9.

[67] Xu YW, Fu H. Application of intraoperative ultrasound in liver surgery[J]. Hepatobiliary Pancreat Dis Int, 2021, 20(5): 501-502. DOI: 10.1016/j.hbpd.2021.07.012.

[68] Balbaloglu H, Tekin H, Yorgancioglu I, et al. A comparative study of learning curves among general surgery residents for intraoperative ultrasound-guided breast-conserving surgery[J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 18881. DOI: 10.1038/s41598-024-70040-2.

[69] 李征,刘文生,卓奇峰,等.术中超声在机器人胰腺肿瘤精准切除中的应用[J].中国普通外科杂志,2024,33(9):1368-1376. DOI: 10.7659/j.issn.1005-6947.2024.09.002.

(收稿日期:2025-06-19)