

多模态直肠腔内超声在直肠癌分期中的应用进展

施欣彤^{1,2} 陈煜^{1,2} 盛常睿^{▲2}

1.浙江中医药大学联合培养基地，浙江宁波 315000；2.宁波市第二医院超声科，浙江宁波 315000

[摘要] 直肠癌是全球常见的消化道恶性肿瘤之一，其发病率与死亡率在我国恶性肿瘤中均位居前列。准确的术前分期是直肠癌个体化、精准化治疗的基础，而计算机断层扫描（computed tomography, CT）、磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）等常规影像学方法在直肠癌早期诊断与分期、T1期与T2期的鉴别及N分期等方面存在一定不足。经直肠腔内超声（endorectal ultrasound, ERUS）凭借实时、可重复性高、无辐射等优势，在直肠癌分期中受到广泛关注，近年来更通过与超声造影（contrast-enhanced ultrasound, CEUS）、超声弹性成像（ultrasound elastography, UE）及超微血流成像（superb microvascular imaging, SMI）等技术的联合应用，并借助三维直肠腔内超声（three-dimensional endorectal ultrasound, 3D-ERUS）等新模式，逐步发展为多模态、多参数的评估体系。本文从ERUS在T分期与N分期中的应用、多模态超声技术的应用及联合价值，以及人工智能与影像组学等新技术的结合等方面，介绍多模态直肠腔内超声在直肠癌分期中的应用进展，以期对直肠癌的精准分期与临床诊疗提供参考。

[关键词] 直肠癌；腔内超声；多模态超声；弹性成像；肿瘤分期

[中图分类号] R749.62

直肠癌是消化系统常见的恶性肿瘤之一，全球疾病负担仍较重，部分国家和地区发病率呈上升趋势。据最新的癌症统计数据显示^{Error: Reference source not found}，2022年我国结直肠癌的发病率在所有恶性肿瘤中位居第2位，死亡率位居第4位；其中，直肠癌发病率虽低于结肠癌，但死亡率略高于结肠癌。国内外指南均强调^{Error: Reference source not found}，直肠癌的治疗策略应以分期为基础，向个体化制定深入发展。因此，准确分期在直肠癌的诊疗中至关重要。

目前，用于直肠癌分期的影像学检查主要包括计算机断层扫描（computed tomography, CT）与磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）。CT对直肠癌局部T分期的软组织分辨率较低，且存在一定辐射；MRI在显示肿瘤与周围组织的关系方面具有优势，但其对早期直肠癌分期的能力相对局限。而结肠镜作为内镜检查，主要用于病变检出与病理诊断，无法评估肿瘤浸润深度。经直肠腔内超声（endorectal ultrasound, ERUS）凭借实时、无辐射、操作可重复性高及影像的高分辨率等优势，在直肠癌分期中受到临床重点关注。近年来，随着超声造影（contrast-enhanced ultrasound, CEUS）、超声弹性成像（ultrasound elastography, UE）、三维直肠腔内超声（three-dimensional endorectal ultrasound, 3D-ERUS）及超微血流成像（superb microvascular imaging, SMI）等多模态技术的发展，ERUS正从单一的结构成像逐渐转向多参数综合评估。

1 ERUS在直肠癌分期中的基础作用

ERUS系将高频超声探头经肛门置入直肠腔内，通过探头与直肠黏膜面的紧密贴附，从而构建良好的声学透声窗。正常直肠壁在声像图上可清晰显示由内向外的五层结构：即探头与直肠黏膜表浅交界面、黏膜层、黏膜下层、固有肌层以及直肠外膜与周围脂肪组织之间的交界面。基于此，ERUS可准确评估肿瘤的浸润深度与破坏程度，对术前分期具有重要价值。

1.1 ERUS在T分期中的临床诊断效能

目前ERUS多沿用1985年提出的Hildebrandt分期标准^{Error: Reference source not found}：uT1期指病变浸润黏膜层或黏膜下层；uT2期指病变已浸润至固有肌层但未突破外缘强回声带；uT3期指病变突破固有肌层，浸润至直肠周围脂肪组织，表现为肌层回声中断，周围脂肪组织出现低回声浸润影；uT4期指病变侵犯邻近器官，如膀胱、前列腺、子宫或盆壁肌群等。有研究报道，ERUS对直肠癌T分期的诊断准确率为MRI相当，而在局部分期中，除T4期病变外，ERUS的敏感度均高于MRI^{Error: Reference source not found}。目前有学者提出，利用MRI进行分期时，T3期以5 mm为界可进一步细分为T3a与T3b，这对改善患者预后具有重要价值。相关研究显示，ERUS测量肿瘤浸润深度与病理结果之间的一致性良好，观察者间重复性较高；在T3期直肠癌的分期及亚分期方面，其诊断准确性与MRI相当；

基金项目：浙江省卫生健康行业科技计划项目(2025HY0989)

通讯作者：盛常睿，电子邮箱：yy338826@163.com

ERUS 可以作为 MRI 对 T3 期直肠癌进行亚分期的有效辅助工具，用于选择合适的直肠癌治疗方案^{Error: Reference source not found}。需要指出的是，目前指南认可的 5mm 界值主要基于 MRI 对肿瘤壁外侵犯深度的研究结果，而 ERUS 采用该标准进行 T3 期亚分期的相关证据仍相对有限。因此，ERUS 在 T3 期直肠癌分层评估中的应用价值尚需进一步探索，其亚分期标准仍有待更多前瞻性研究和多中心数据验证。

近年来，新辅助放化疗（neoadjuvant chemoradiotherapy, nCRT）已成为局部晚期直肠癌的标准治疗模式。因此，准确评估 nCRT 后肿瘤的浸润深度及再分期对于确定手术时机与调整治疗方案至关重要。一项国内研究通过对 86 例病例进行回顾性分析发现，ERUS 对接受 nCRT 后的直肠癌患者肿瘤浸润深度进行再次评估的总体诊断准确率仅为 67.4%^{Error: Reference source not found}，显著低于未经 nCRT 的患者，主要原因可能与放化疗后肿瘤消退、纤维化与炎性反应导致的超声图像分层不清有关。同时，ERUS 难以准确评估肿瘤完全缓解或预测病理完全缓解，且易出现过度分期^{Error: Reference source not found}。

1.2 ERUS 在 N 分期中的固有局限性

尽管 ERUS 在 T 分期评估中优势明显，但其对区域淋巴结（N 分期）的诊断效能仍然有限。目前，高分辨率 MRI 是诊断直肠癌侧方淋巴结转移首选的影像学诊断工具，淋巴结短轴直径被视为判断侧方淋巴结转移的最主要参数，但阈值的设定至今缺乏统一标准，而其他恶性影像学特征，如淋巴结呈圆形、边缘不规则及信号不均匀等，被视作诊断的独立危险因素^{Error: Reference source not found}。然而，早期发现隐匿性淋巴结转移难度较大。Gao 等^{Error: Reference source not found}荟萃分析指出，MRI、ERUS 和 CT 预测直肠癌淋巴结转移的灵敏度分别为 0.69、0.57 和 0.63，其中 MRI 的灵敏度高于 ERUS 和 CT，但三种方法在预测淋巴结转移方面仍不具有充分可行性。

2 ERUS 衍生超声技术的应用

2.1 超声造影

CEUS 是指经静脉注射微泡超声对比剂后，在低机械指数成像模式下对组织或病灶的微血流灌注及其时相性动力学特征进行实时、动态显示的影像学技术^{Error: Reference source not found}。欧洲生物医学超声学会联盟（European Federation of Societies for Ultrasound in Medicine and Biology, EFSUMB）在 2019 年胃肠超声检查建议中提及 CEUS 在肠道病变中的应用，其可提供有关肿瘤血管生成的相关信息，可能对直肠癌患者的预后和治疗产生影响^{Error: Reference source not found}。临床上常使用超声双重造影（dual contrast-enhanced ultrasound, DCEUS），即在静脉微泡造影基础上同时或序贯应用腔内造影，以提高病变检出率。有研究报道，DCEUS 对直肠癌 T 分期的总符合率为 73.6%~82.9%，该准确率虽未显著优于传统 ERUS 的最高值，但在区分 T3 期与 T4 期等关键节点上，DCEUS 提供的肿瘤-肠壁边界微灌注信息具有独特价值，且与病理结果具有中度一致性^{Error: Reference source not found}^{Error: Reference source not found}。

2.2 超声弹性成像

UE 作为一种已逐步成熟的定量成像技术，主要分为应变式弹性成像（strain elastography, SE）与剪切波弹性成像（shear wave elastography, SWE）两大类，已广泛应用于甲状腺、乳腺及肝脏等器官，而在直肠癌分期等肛肠疾病诊断方面 SWE 的应用较少。Fan 等^{Error: Reference source not found}研究发现，随着肿瘤浸润深度的增加，其平均硬度和最大硬度值均会升高，不同 T 分期之间的硬度值存在差异，并且若以一定阈值（65.0kPa 和 90.7kPa）判断 T1 期、T2 期以及局部晚期直肠癌，其分期符合率可达 85.5%。国内研究亦得出类似结论，ERUS 联合 SWE 诊断直肠癌 T 分期的准确率可达 86.79%，与单纯 ERUS 的分期准确率约 71.70% 相比显著提高；且原发灶平均杨氏模量值与淋巴结转移呈正相关，可为术前评估淋巴结转移风险提供参考^{Error: Reference source not found}。得益于 SWE 更好的可重复性及较低的操作者依赖性，多数研究将其选作主要探索方向。Loft 等^{Error: Reference source not found}通过临床实操和离线影像分析两种方式，证实该技术在不同经验水平的医生之间对直肠癌分期的诊断一致性依然较高；同时，SWE 的评估结果并不受制于操作者的专业资历，初学者与资深专家均能获得良好至优秀的重复性。这一特性为多中心推广和基层应用提供了关键依据，并支持 SWE 作为 ERUS 的重要补充手段。

2.3 三维直肠腔内超声

3D-ERUS 通过多维或矩阵阵列探头采集连续容积数据，并由计算机重建为多平面立体图像，因其具有的高分辨率及多平面重建能力，在直肠疾病评估中显示出一定应用价值相较于传统 ERUS，3D-ERUS 采用自动容积扫描方式获取三维数据集，减少了人为差异，提升了检查的客观性与可重复性；并支持离线分析和重复观察，有助于缩短检查时间并减

少患者不适。多项研究显示，3D-ERUS在评估中下段直肠肿瘤侵袭深度方面具有明显优势，术前T分期准确率可达81.91%，在N分期中也展现了较高的诊断性能，尤其对淋巴结转移的识别表现出更高的敏感性与排除能力，但上述优势尚待大样本量研究进一步验证。研究证实，3D-ERUS在评估肿瘤浸润深度及直肠系膜筋膜受累方面与MRI的一致性较高，明显优于二维ERUS；并且，3D-ERUS在判断直肠系膜筋膜受累时表现出较高的诊断效能，敏感性和阴性预测值均可超过90%，提示其在识别环周切缘可疑阳性方面可靠性较高。Liu等根据肿瘤突破固有肌层后侵入直肠系膜脂肪的深度，将其分为T3a（<5 mm）、T3b（5~10 mm）和T3c（>10 mm）。研究结果显示，3D-ERUS对不同T3亚组的诊断准确率分别为88.0%、86.8%和76.2%，且不同亚组患者5年无病生存率存在显著差异（ $P=0.014$ ）。可见，T3期的精细分层不仅有助于提高术前分期的准确性，也对预后评估及个体化治疗决策具有重要的指导价值。针对前文所述ERUS在直肠癌nCRT后再分期中对肿瘤完全缓解状态评估准确性不足的问题，3D-ERUS为提升疗效评估效能提供了新的辅助方法。有研究显示，3D-ERUS在识别直肠癌ypT0期（病理完全缓解）方面的敏感度仅为25.0%，但特异度可达92.11%，总体准确率为72.22%。上述结果提示，3D-ERUS在排除残余肿瘤方面具有一定的临床应用价值，但由于其对完全缓解病例的检出能力有限，漏诊风险较高，故单独应用3D-ERUS判断病理完全缓解状态尚存在一定局限性。

2.4 超微血流成像

SMI是一种新型多普勒超声衍生技术。相比传统彩色多普勒血流成像，SMI无需注射外源性对比剂即可实现对低速微小血管的高敏感性、高分辨率显像。在一项利用超声评估直肠癌nCRT疗效及再分期的研究中，研究者用SMI获取图像后依据Adler半定量分级法将血流情况分为0-3级，发现SMI在直肠癌接受nCRT后的疗效评估中存在一定评估价值。由于肿瘤可能导致的相关炎症反应，或nCRT后所致的水肿、炎症或纤维化等，均可影响血流灌注状态，因此，仅凭SMI评估肿瘤血流灌注以进行直肠癌的术前分期或nCRT后的再分期，仍存在一定局限性。

3 多模态超声技术在直肠癌精准分期中的应用

多模态超声将传统灰阶超声提供的解剖学信息，与CEUS、UE、SMI等技术获取的生物力学、微循环灌注及血流动力学等功能学参数相结合，是一种整合结构与功能的多参数成像体系。

CEUS是目前应用较为广泛的超声成像技术之一。如前文所述，ERUS在N分期及预测淋巴结转移方面存在一定局限性，而Huang等研究证实，基于术前ERUS联合CEUS定量参数建立的预测模型，在整合癌胚抗原及糖类抗原19-9等临床变量后，能够对淋巴结转移进行良好预测，可作为一种可量化的术前评估工具应用于临床决策。但需注意的是，上述预测模型均为回顾性研究，其临床应用尚需前瞻性研究进一步佐证。

鉴于SWE具有较高的可重复性，研究者较多采用SWE与ERUS相结合开展多模态超声研究。Dong等研究证实，ERUS联合SWE能有效提升直肠癌分期的诊断准确性；传统ERUS结合定量评估的瘤周脂肪最大弹性值后，诊断准确率从62.5%提升至87.5%，显著增强了术前鉴别T2期与T3期的能力。

SMI则依托其对微小血管的高敏感性，且无需注射造影剂，为相关研究提供了进一步的技术选择与方法学基础。有研究将SMI运用于直肠癌的术前T分期，通过对90例患者的随机对照试验发现，联合SMI的试验组在判断T分期时的准确率由67%显著提升至84%，且与病理结果的一致性更强（ κ 值=0.779）。但将SMI应用于直肠癌术前分期整体上仍处于探索阶段，利用SMI辅助ERUS诊断直肠癌N分期或将成为一个新的研究方向。

目前多数研究仅聚焦于两种超声技术的联合应用，整合多种超声技术的研究较少。有研究显示，双平面直肠腔内超声结合CEUS和UE可准确判断直肠癌患者在接受nCRT后的术前分期，通过比较nCRT前后病灶对肠壁浸润深度的变化，有助于评估nCRT疗效，避免过度治疗。然而，该研究样本量较小，因而存在一定局限性。值得注意的是，既往多数学者在联合两种超声技术的基础上进一步结合CT、MRI或应用影像组学分析，而3D-ERUS多直接与机器学习算法相结合构建模型，以对直肠癌行精准分期或评价直肠癌nCRT后的疗效及再分期；相较之下，单纯整合多种超声技术用于直肠癌分期的研究仍较为匮乏。

4 多模态直肠腔内超声与人工智能及影像组学相结合的应用发展

近年来，影像组学与人工智能（artificial intelligence, AI）技术为直肠癌的识别诊断、精准分期与诊疗评估提供了数字化决策支持。现有研究不仅成功将基于ERUS的影像组学模型应用于治疗前预测肿瘤沉积、肝转移情况及基因突变状态等，还将其拓展至术中肿瘤边缘的精准评估及新辅助治疗反应的预测领域。在T分期评估方面，有研究提出了一种可解释型神经网络IPNet，该网络借助渐进式损失函数辅助结直肠癌的整体诊断，同时设计了Grad-CAM工具以帮助理解IPNet的分类机制。实验结果表明，IPNet的性能优于现有其他先进算法，对直肠肿瘤T分期的诊断准确率可达89.62%（基于超声内镜图像），尤其在T2期与T3期的区分上表现出显著优势。在N分期及侧方淋巴结转移预测方面，ERUS影像组学突破了传统ERUS在淋巴结评估的固有局限。研究者通过提取ERUS图像中的二阶纹理特征及高阶统计学特征，构建了能够量化评估肿瘤异质性的预测模型，该模型对术前脉管侵犯及侧方淋巴结转移均展现了良好的预测效能。此外，多模态超声技术与机器学习算法的融合，同样构成提升分期精度与预测治疗反应的重要途径。Liu等开发了一种计算机辅助诊断工具，通过处理3D-ERUS容积影像数据以实现自动识别，该工具对T1期肿瘤的诊断效能最佳（AUC=0.85），可显著提高放射科医师的诊断一致性，其中对初级医师的提升作用尤为明显，其诊断一致性κ值由使用该工具前的0.31提高至使用后的0.64。多数研究则将3D-ERUS或CEUS与机器学习算法相结合以预测淋巴结转移，进一步提高直肠癌术前分期的准确性，为临床制定精准化治疗方案提供了客观、高效的决策支持。

综上所述，AI与影像组学的深度结合，有望推动多模态直肠腔内超声从单纯形态观察向生物学特性评估转变。通过整合ERUS高分辨率显示的解剖细节、CEUS和SMI显示的细微血流动力学特征及UE显示的肿瘤弹性特征，AI算法与影像组学不仅显著提升了直肠癌术前T、N分期的精准度，而且在预测脉管侵犯及基因突变状态等方向也展现出了独特优势。多模态融合模式突破了传统肉眼判读的界限，为临床制定个体化治疗方案奠定了更科学、更精准的决策基础。

5 小结与展望

多模态直肠腔内超声作为传统超声技术的重要拓展，已逐步成为直肠癌术前分期与疗效评估中不可或缺的影像学手段。通过整合CEUS、UE、3D-ERUS及SMI等多种技术，其在肿瘤浸润深度的判定、T分期的精细化评估及nCRT后再分期等方面，展现出优于传统ERUS的诊断效能。然而，上述技术在临床应用中仍面临若干难题，如研究间结果异质性较大、标准化程度不足，以及对设备与操作经验存在一定依赖等问题。

随着影像组学与人工智能技术的快速发展，多模态直肠腔内超声正由单一影像判读朝着多参数融合与智能化分析的方向转型，在提高分期准确性和预测转移风险方面展现出良好应用前景。需要指出的是，多模态直肠腔内超声与高分辨率MRI并非替代关系，而是一种互补关系。MRI在评估直肠系膜筋膜、侧方淋巴结转移及远处转移方面仍不可替代，多模态直肠腔内超声则在早期癌、T3亚分期、腔内操作引导及疗效动态监测方面具有独特优势。联合应用可能是未来新兴研究方向之一。为进一步推动多模态直肠腔内超声的临床转化与规范应用，亟需开展多中心、大样本研究，以验证不同技术组合的真实效能；建立统一的检查流程与评价标准，提升结果的可重复性；推动影像、临床及分子生物学信息的深度融合，构建综合预测模型。随着相关技术的不断发展与完善，多模态直肠腔内超声有望在直肠癌精准分期及个体化治疗决策中发挥更为重要的作用，为临床提供更为客观、精准的影像学依据。

【参考文献】

- [1] 李荔, 郑荣寿, 王少明, 等. 中国结直肠癌流行现状及2000-2019年趋势变化[J]. 中华肿瘤杂志, 2026, 48(1): 130-136.
- [2] Benson A B, Venook A P, Al-Hawary M M, et al. Rectal cancer, version 2.2022, NCCN clinical practice guidelines in oncology[J]. J Natl Compr Canc Netw, 2022, 20(10): 1139-1167.

- [3] 中华人民共和国国家卫生健康委员会医政司, 中华医学会肿瘤学分会. 国家卫生健康委员会中国结直肠癌诊疗规范(2025版)(精简版)[J]. 中华转移性肿瘤杂志, 2026, 9(2): 101-108.
- [4] Hildebrandt U, Feifel G. Preoperative staging of rectal cancer by intrarectal ultrasound[J]. Dis Colon Rectum, 1985, 28(1): 42-46.
- [5] Luglio G, Pagano G, Tropeano F, et al. Endorectal ultrasonography and pelvic magnetic resonance imaging show similar diagnostic accuracy in local staging of rectal cancer: An update systematic review and Meta-analysis[J]. Diagnostics (Basel), 2021, 12(1): 5.
- [6] Zhong G, Xiao Y, Zhou W, et al. Value of endorectal ultrasonography in measuring the extent of mesorectal invasion and substaging of T3 stage rectal cancer[J]. Oncol Lett, 2017, 14(5): 5657-5663.
- [7] 黄伟钦, 唐丽娜, 沈友洪, 等. 直肠腔内超声在直肠癌新辅助治疗后 T 再分期的应用及影响因素[J]. 中华医学杂志, 2019, 99(30): 2344-2347.
- [8] Liu S, Zhong G X, Zhou W X, et al. Can endorectal ultrasound, MRI, and mucosa integrity accurately predict the complete response for mid-low rectal cancer after preoperative chemoradiation? A prospective observational study from a single medical center[J]. Dis Colon Rectum, 2018, 61(8): 903-910.
- [9] 中国医师协会内镜医师分会腹腔镜外科专业委员会, 中国医师协会结直肠肿瘤专业委员会腹腔镜专业委员会, 中华医学会外科学分会结直肠外科学组, 等. 中国直肠癌侧方淋巴结转移诊疗专家共识(2024版)[J]. 中华胃肠外科杂志, 2024, 27(1): 1-14.
- [10] Gao Y, Li J, Ma X, et al. The value of four imaging modalities in diagnosing lymph node involvement in rectal cancer: An overview and adjusted indirect comparison[J]. Clin Exp Med, 2019, 19(2): 225-234.
- [11] Rafailidis V, Huang D Y, Yusuf G T, et al. General principles and overview of vascular contrast-enhanced ultrasonography[J]. Ultrasonography, 2020, 39(1): 22-42.
- [12] Nuernberg D, Saftoiu A, Barreiros A, et al. EFSUMB recommendations for gastrointestinal ultrasound part 3: Endorectal, endoanal and perineal ultrasound[J]. Ultrasound Int Open, 2019, 5(1): E34-E51.
- [13] 邓小红, 唐丽娜, 沈友洪, 等. 超声双重造影对直肠癌术前 T 分期的诊断价值[J]. 中华医学杂志, 2017, 97(9): 684-686.
- [14] 陈双喜, 范小明, 王力, 等. 超声双重造影与增强 MRI 在直肠癌局部分期中的对比研究[J]. 临床超声医学杂志, 2015, 17(8): 542-544.
- [15] 余丽惠, 黄伟俊, 简国亮, 等. 超声双重造影在结直肠癌术前 T3 与 T4 分期诊断中的应用价值[J]. 中国超声医学杂志, 2023, 39(1): 70-73.
- [16] Fan Z, Cong Y, Zhang Z, et al. Shear wave elastography in rectal cancer staging, compared with endorectal ultrasonography and magnetic resonance imaging[J]. Ultrasound Med Biol, 2019, 45(7): 1586-1593.

- [17] 肖冰心, 吴国柱. 腔内剪切波成像诊断直肠癌 T 分期及其与区域淋巴结转移的相关性分析[J]. 中国现代医学杂志, 2024, 34(5): 13-18.
- [18] Loft M K, Pedersen M R V, Grimm P, et al. Intra- and interobserver variability of shear wave elastography in rectal cancer[J]. *Cancers (Basel)*, 2022, 14(11): 2633.
- [19] 陈东, 李支尧, 陈海涛, 等. 直肠腔内三维超声和 MRI 检测对中下段直肠癌患者术前 T 分期和环周切缘的诊断价值[J]. 吉林大学学报(医学版), 2021, 47(3): 753-760.
- [20] Liu M, Yin S, Li Q, et al. Evaluation of the extent of mesorectal invasion and mesorectal fascia involvement in patients with T3 rectal cancer with 2-D and 3-D transrectal ultrasound: A pilot comparison study with magnetic resonance imaging findings[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2020, 46(11): 3008-3016.
- [21] Liu Q, Zang Y, Zhou D, et al. The importance of preoperative T3 stage substaging by 3D endorectal ultrasonography for the prognosis of middle and low rectal cancer[J]. *J Clin Ultrasound*, 2024, 52(3): 249-254.
- [22] Chen L, Liu X, Zhang W, et al. The predictive value of tumor volume reduction ratio on three-dimensional endorectal ultrasound for tumor response to chemoradiotherapy for locally advanced rectal cancer[J]. *Ann Transl Med*, 2022, 10(12): 666.
- [23] Fu Z, Zhang J, Lu Y, et al. Clinical applications of superb microvascular imaging in the superficial tissues and organs: A systematic review[J]. *Acad Radiol*, 2021, 28(5): 694-703.
- [24] 夏琴, 任安平, 程伟, 等. 经直肠双平面超声评估直肠癌新辅助放化疗疗效及再分期的临床价值[J]. 临床超声医学杂志, 2024, 26(12): 969-974.
- [25] Huang Q, Zhuang H, Luo Y, et al. Prediction of regional lymph node metastasis in rectal cancer: A novel model based on transrectal contrast-enhanced ultrasound[J]. *Discov Oncol*, 2025, 16(1): 2145.
- [26] Dong X Y, Li Q M, Xue W L, et al. Diagnostic performance of endorectal ultrasound combined with shear wave elastography for rectal tumors staging[J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2023, 84(4): 399-411.
- [27] 程伟, 夏琴, 任安平, 等. 双平面经直肠腔内超声联合超微血流成像在中低位直肠癌术前 T 分期中的应用价值[J]. 中华普通外科杂志, 2023, 38(9): 662-668.
- [28] Xiao Y, Xu D, Ju H, et al. Application value of biplane transrectal ultrasonography plus ultrasonic elastosonography and contrast-enhanced ultrasonography in preoperative T staging after neoadjuvant chemoradiotherapy for rectal cancer[J]. *Eur J Radiol*, 2018, 104: 20-25.
- [29] Carter D, Bykhovsky D, Hasky A, et al. Convolutional neural network deep learning model accurately detects rectal cancer in endoanal ultrasounds[J]. *Tech Coloproctol*, 2024, 28(1): 44.
- [30] Geldof F, Pruijssers C W A, Jong L J S, et al. Tumor segmentation in colorectal ultrasound images using an ensemble transfer learning model: Towards intra-operative margin assessment[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(23): 3595.

- [31] Mou M, Gao R, Wu Y, et al. Endoscopic rectal ultrasound-based radiomics analysis for the prediction of synchronous liver metastasis in patients with primary rectal cancer[J]. *J Ultrasound Med*, 2024, 43(2): 361-373.
- [32] Gan Y, Hu Q, Shen Q, et al. Utilizing intratumoral and peritumoral ultrasound radiomics for predicting KRAS gene mutation status in rectal cancer patients[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2025, 26(7): e70153.
- [33] Chen L D, Li W, Xian M F, et al. Preoperative prediction of tumour deposits in rectal cancer by an artificial neural network-based US radiomics model[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(4): 1969-1979.
- [34] Fu J, Chen K, Dou Q, et al. IPNet: An interpretable network with progressive loss for whole-stage colorectal disease diagnosis[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2025, 44(2): 789-800.
- [35] Wu Y Q, Gao R Z, Lin P, et al. An endorectal ultrasound-based radiomics signature for preoperative prediction of lymphovascular invasion of rectal cancer[J]. *BMC Med Imaging*, 2022, 22(1): 84.
- [36] Yan L, Weifeng Z, Qin W, et al. A model based on endorectal ultrasonography predicts lateral lymph node metastasis in low and middle rectal cancer[J]. *J Clin Ultrasound*, 2022, 50(5): 705-712.
- [37] Liu X, Zhang R, Chen J, et al. Computer-aided diagnosis tool utilizing a deep learning model for preoperative T-staging of rectal cancer based on three-dimensional endorectal ultrasound[J]. *Abdom Radiol (NY)*, 2025, 50(11): 5124-5134.
- [38] Huang X, Yang Z, Qin W, et al. Construction of machine learning models based on transrectal ultrasound combined with contrast-enhanced ultrasound to predict preoperative regional lymph node metastasis of rectal cancer[J]. *Heliyon*, 2024, 10(4): e26433.
- [39] Huang W, Lin R, Ke X, et al. Utility of machine learning algorithms in predicting preoperative lymph node metastasis in patients with rectal cancer based on three-dimensional endorectal ultrasound and clinical and laboratory data[J]. *J Ultrasound Med*, 2023, 42(11): 2615-2627.
- [40] Li J, Chen S N, Lin Y Y, et al. Development and validation of a radiomics model based on 3-dimensional endoanal rectal ultrasound of rectal cancer for predicting lymph node metastasis[J]. *Turk J Gastroenterol*, 2023, 34(5): 542-551.