

磁共振成像及影像组学在直肠癌淋巴血管浸润中的应用

宋 健, 谢宗源

华北理工大学附属医院医学影像中心, 河北 唐山

收稿日期: 2026年5月12日; 录用日期: 2026年7月2日; 发布日期: 2026年7月14日

摘 要

直肠癌(Rectal Cancer, RC)常见的消化系统恶性肿瘤, 发病率持续上升且呈年轻化趋势, 淋巴血管浸润(Lymphovascular Invasion, LVI)作为其关键不良预后因素, 与肿瘤转移、复发密切相关, 术前精准评估LVI对临床诊疗意义重大。当前LVI诊断依赖术后病理, 存在有创、滞后等局限, 而磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)与影像组学为无创术前预测提供了新方向。常规MRI可通过肿瘤形态学特征辅助评估, 基于T₂WI的影像组学模型展现出高效预测效能。扩散加权成像(DWI)和体素内不相干运动成像(IVIM), 能从分子层面反映肿瘤异质性, 与LVI状态显著相关; 动态对比增强MRI (DCE-MRI)的定量参数及时间-信号强度曲线, 可量化肿瘤血供与血管通透性, 助力LVI评估; 新兴的mDixon-Quant技术通过定量参数反映肿瘤代谢与脂质变化, 具备潜在预测价值。影像组学通过从多参数MRI图像中高通量提取定量特征, 结合机器学习构建预测模型, 能够有效量化肿瘤异质性, 提升LVI的术前无创预测准确性。基于T₂WI、DWI、IVIM、DCE-MRI等的单模态或多模态影像组学模型具有良好的诊断效能, 有望无创、精准预测直肠癌LVI, 为术前分期、治疗方案制定及预后评估提供重要参考, 未来需扩大样本量、开展多中心研究, 进一步提升模型泛化性与临床应用价值。

关键词

直肠癌, 磁共振成像, 影像组学, 淋巴血管浸润

Application of Magnetic Resonance Imaging and Radiomics in Lymphovascular Invasion of Rectal Cancer

Jian Song, Zongyuan Xie

Medical Imaging Center, Affiliated Hospital of North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: May 12, 2026; accepted: July 2, 2026; published: July 14, 2026

文章引用: 宋健, 谢宗源. 磁共振成像及影像组学在直肠癌淋巴血管浸润中的应用[J]. 生物医学, 2026, 16(4): 693-700.
DOI: 10.12677/hjbm.2026.164071

Abstract

Rectal cancer (RC) is one of the most common malignant tumors of the digestive system, with a continuously increasing incidence rate and a tendency toward younger onset. Lymphovascular invasion (LVI) serves as a crucial adverse prognostic factor for rectal cancer and is closely correlated with tumor metastasis and recurrence. Preoperative accurate evaluation of LVI is of great significance for clinical diagnosis and treatment. At present, the diagnosis of LVI relies on postoperative pathological examination, which is limited by invasiveness and hysteresis. Magnetic resonance imaging (MRI) and radiomics have provided a novel direction for non-invasive preoperative prediction of LVI. Conventional MRI can assist in the evaluation of LVI through tumor morphological features, and radiomics models based on T₂-weighted imaging (T₂WI) have demonstrated favorable predictive efficacy. Diffusion-weighted imaging (DWI) and intravoxel incoherent motion (IVIM) imaging can reflect tumor heterogeneity at the molecular level and are significantly correlated with LVI status. Quantitative parameters and time-signal intensity curves derived from dynamic contrast-enhanced MRI (DCE-MRI) can quantify tumor blood supply and vascular permeability, facilitating the evaluation of LVI. The emerging mDixon-Quant technique can reflect tumor metabolism and lipid changes via quantitative parameters, showing potential predictive value for LVI. Radiomics enables high-throughput extraction of quantitative features from multiparametric MRI images and constructs predictive models combined with machine learning algorithms, which can effectively quantify tumor heterogeneity and improve the accuracy of non-invasive preoperative prediction of rectal cancer LVI. Single-modal and multimodal radiomics models based on T₂WI, DWI, IVIM, DCE-MRI and other sequences possess satisfactory diagnostic performance. Such models are expected to realize non-invasive and accurate prediction of LVI in rectal cancer, providing an important reference for preoperative staging, therapeutic regimen formulation and prognostic evaluation. Future multicenter studies with enlarged sample sizes are required to further improve the generalization ability and clinical application value of the models.

Keywords

Rectal Cancer, Magnetic Resonance Imaging, Radiomics, Lymphovascular Invasion

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

结直肠癌是常见的消化系统恶性肿瘤,在全球癌症发病率中居第三位,在死亡率中居第二位,其中直肠癌占三分之一[1]。近年来,中国人口生活方式不断改变,并伴随着老龄化的加速,中国直肠癌患者越来越多并且逐渐年轻化,危害着居民的健康[2]。由于早期症状不典型,很多患者确诊时已处于中晚期,预后往往不理想,因此准确诊断和评估直肠癌至关重要。尽管目前有标准的治疗手段,包括手术及放疗,但由于存在众多不良预后因素,如淋巴结转移,淋巴血管浸润和神经浸润等,很多患者仍然面临复发的风险。淋巴血管浸润(Lymphovascular Invasion, LVI)提示癌细胞侵犯脉管系统,意味着癌症发生转移的风险较高,与直肠癌预后不良密切相关,直肠癌 LVI 的术前评估,对于预测直肠癌的术后复发、转移和无瘤生存具有非常重要的临床意义[3]。目前,直肠癌淋巴血管浸润的诊断主要依赖于术后病理检查,但这种方法有创且具有滞后性,因此,寻找能够在术前无创地预测 LVI 的方法是目前的一个研究热点[4]。

在过去的几十年里, 直肠癌的诊断性影像学有了很大的改善。磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)因为具有极好的软组织分辨率等特点, 是直肠癌分期的首选方法, 在治疗及预后评估中也有着重要的作用[5]。其中常规 MRI 可以通过形态学对直肠癌进行评估, 而功能性 MRI 可通过定量参数在分子水平上对直肠癌进行评估。影像组学可从 MRI 图像中高通量地提取影像特征进行定量分析, 进而量化肿瘤异质性, 对肿瘤病灶整体进行评估, MRI 影像组学也在迅速发展, 具有较好的前景[6]。

2. 淋巴血管浸润在直肠癌中的表达意义

淋巴血管浸润(Lymphovascular Invasion, LVI)是指肿瘤细胞进入淋巴管或血管等脉管系统的过程, 包括血管浸润和淋巴管浸润, 前者又分为壁内血管浸润(Intramural Vascular Invasion, IMVI)和壁外血管浸润(Extramural Vascular Invasion, EMVI) [7], 在肿瘤细胞扩散至远处器官及区域淋巴结转移中起重要作用已被广泛认为是多种癌症的不良预后因素, 例如乳腺癌、胃癌和直肠癌[8]。癌症的主要定义特征之一是转移, 在癌细胞转移到继发部位之前, 它们必须首先转移并扩散到整个脉管系统。因此, 淋巴血管浸润是全身性转移的生物学先决条件之一[9], 被视为转移潜力的指标, 与许多实体瘤的不良预后密切相关[10]。Kataoka 等人建立了淋巴浸润与淋巴结转移和静脉浸润与远处转移的关联[11], 淋巴血管浸润是实体瘤浸润和转移的关键因素, 与患者生存和预后密切相关[12]。越来越多的研究强调了脉管浸润在确定手术干预、为新辅助治疗提供重要指导以及建议最佳切除切缘方面的重要性, 如有无脉管浸润决定着 I 期结直肠癌患者经肛门切除术后是否需要辅助放化疗[13]。目前, 直肠癌的脉管浸润状态需要做术后病理才能了解, 但这种检查是有创的且具有滞后性, 不利于临床治疗方案选择及预后预测。因此, 利用无创的影像学检查在术前预测直肠癌 LVI 状态, 是当前一个重要的研究方向。

3. MRI 和影像组学的应用与前景

MRI 较其他影像学检查方式图像采集更快、空间分辨率更高并且其信噪比也更高, 并且有着较高的敏感性和特异性, 是一种无创的直肠癌检查方法[14]。目前研究表明, 直肠 MRI 图像可显示肿瘤位置和形态, 提供其 TNM 分期, 还可确定其与周围结构的关系[15]。在诊断方面, 有助于判断肿瘤的分期; 在治疗方面, 可以根据 MRI 影像来确定手术切除的范围, 并且在直肠癌的新辅助治疗中, 能够评估肿瘤对治疗的反应, 从而帮助医生调整治疗方案; 在预后方面, MRI 有助于监测直肠癌的复发或者是否侵犯周围组织。因此, MRI 广泛应用于直肠癌的诊断和分期, 并可检测包括脉管浸润在内的多个预后因素[5]。同时, 各种新的磁共振成像技术也在开发并广泛应用于临床, 各种常规及功能性 MRI 正在逐步应用于直肠癌淋巴血管侵犯术前预测的研究。影像组学是新兴的影像评估方法之一, 借助高通量计算将数字医学图像转换为可挖掘的高维数据, 应用高通量特征提取算法, 然后使用机器学习对这些特征进行建模, 来揭示影像学图像包含的潜在病理生理学的信息, 挖掘肉眼无法看到的图像定量信息。影像组学可以用于多种疾病, 其中最为成熟的就是在肿瘤学中的发展, 在肿瘤学决策支持方面的潜力越来越大, 在癌症检测及诊断、预测对治疗的反映和监测疾病状态中至关重要。影像组学是推进直肠癌影像学评估的一种很有前途的方法, 有助于为直肠癌的临床决策提供有价值的信息, 有可能改善诊断、预后和治疗计划, 有很大的发展前景影像组学作为改善直肠癌影像学评估的有力工具, 其潜在益处不应低估[16]-[18]。

3.1. 常规 MRI 序列

常规 MRI 主要包括 T₁WI、T₂WI, T₁WI 可以清晰地显示解剖结构, 可以显示肿瘤的形态、大小和位置等信息; T₂WI 对发现病变敏感, 可以显示肿瘤组织结构、水分含量和血供情况等信息[19]。有研究发现[20] [21] LVI 的发生可能与较大的肿瘤直径相关。肿瘤直径较大意味着肿瘤生长时间可能较长或者肿

瘤细胞增殖活跃, 其侵袭力变得更强, 可能会突破邻近脉管的基底膜, 进入脉管系统, 继而引起肿瘤的淋巴结转移或血行转移。T₂WI 有着能清晰显示病变的优势, 袁权等[22]基于横轴位高分辨率 T₂WI 深度迁移学习影像组学技术术前预测直肠癌患者淋巴血管浸润, 6 种机器学习算法基于组合特征的 AUC 在训练组分别为 0.956、0.802、0.879、0.966、0.973、0.944, 验证组分别为 0.924、0.868、0.901、0.892、0.817、0.905, 提示模型在预测直肠癌 LVI 状态方面具有高效能, 可辅助术前个体化预测。

3.2. 扩散加权成像(Diffusion Weighted Imaging, DWI)

扩散加权成像 DWI 通常用来表示组织内水分子弥散受限的程度, 它的一个重要定量参数是表观弥散系数(Apparent Diffusion Coefficient, ADC)。肿瘤组织细胞密度高, 细胞外间隙窄, 水分子扩散受限, ADC 值低[23]。李萍等[24]分析了 85 例直肠癌患者的 DWI 参数, 结果显示 LVI 阳性组 ADC 值显著低于 LVI 阴性组。Zhu 等[25]应用脂肪抑制 T₂ 加权成像、扩散加权成像和 T1 加权增强成像, 分别构建了单模态模型、多模态放射学模型、临床模型和临床 - 放射学联合模型, 单模态模型的曲线下面积(AUC)为 0.708~0.775, 多模态放射学模型的 AUC 为 0.835, 临床模型为 0.782, 综合模型表现最佳(AUC = 0.867, 灵敏度 = 0.840, 特异度 = 0.806)。总的来说, DWI 广泛应用于直肠癌的诊断, 并对 LVI 状态的预测有一定意义。

3.3. 体素内不相干运动成像(Intravoxel Incoherent Motion, IVIM)

体素内不相干运动成像(IVIM)是在 DWI 基础上发展起来的一种成像方法, 其能准确区分病灶内的扩散和灌注情况。使用这种方法, 可以计算更多的成像参数, 除了 ADC 值外, 还能得到扩散系数(D)、灌注系数(D*)和灌注分数(f)三个定量参数, 扩散系数 D 反映真实扩散情况。灌注系数 D*反映的是微循环灌注情况。灌注分数 f 是灌注分数反映微循环灌注占总体的比例[26]。这些参数可以更好地描述包括直肠癌在内的几种肿瘤实体的肿瘤学特征[27]。蒋雯丽等[28]探讨直肠腺癌患者 IVIM 全肿瘤体积参数与 LVI 状态的相关性, 结果显示 LVI 阴性组的 f 值 0.172 (0.158, 0.193)显著低于阳性组 0.188 (0.168, 0.237), IVIM 的全体积定量参数在一定程度上可以反映直肠腺癌的 LVI 状态。一项针对 83 例直肠癌患者的研究[29]表明, 结合 T₂WI、IVIM 序列及影像组学方法构建的集成模型, 可精准实现直肠癌 LVI 的无创预测将 IVIM 参数与影像组学技术结合, 可以更高效地预测直肠癌 LVI。

3.4. 动态对比增强磁共振成像(Dynamic Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Imaging, DCE-MRI)

DCE-MRI 是用于疾病诊断的几个标准 MRI 方案中的序列之一, DCE-MRI 数据采集通常是连续和重复采集 T₁WI 一段时间内的加权图像, 可以反映组织血流动力学改变和病变组织的强化特征, 进而对肿瘤的生物行为学和肿瘤对周围组织的侵犯进行定量评估[30]。该技术可以通过监测对比剂在病灶内的分布和清除速度, 可以直观地展示直肠肿瘤的血供情况, 还可以间接反映肿瘤内微血管分布情况和直肠肿瘤血管属性[31]。DCE-MRI 的 K^{trans} 值受血流量和渗透性的影响。LVI 的存在会刺激肿瘤细胞产生更多的血管生成因子, 形成丰富的未成熟微血管, 由于肿瘤新生血管增殖迅速, 结构和功能往往不完善, 故渗透性增加, K^{trans} 值也越大[32]。此外, DCE-MRI 技术还可以得到半定量参数时间 - 信号强度曲线(time-intensity curve, TIC)。TIC 曲线可分为三型, I 型信号强度随着时间的推移持续增加, 多提示正常或良性病变; II 型信号强度在延迟期初始增加后不随时间变化, 多提示为良性病变或恶性病变; III 型在延迟期达到初始最高点后, 信号强度降低, 多提示恶性病变[33]。有研究显示[34], 具有 II 型曲线和 III 型曲线的病灶 LVI 阳性率显著升高。赵闽宁[35]分析 49 例直肠癌患者 DCE-MRI 定量参数和 mrEMVI 的关系,

还发现 K^{trans} 值在 mrEMVI 阳性组中明显高于 mrEMVI 阴性组, 说明诊断意义。Chen 等[36]分析 124 名直肠癌患者的 DCE-MRI 图像也得出了 EMVI 阳性组 K^{trans} 值显著高于 EMVI 阴性组的结果。谢玉莹等[37]基于高分辨率 T_2 加权像(T_2 WI)、弥散加权成像(DWI)及增强 T_1 加权像(cT1WI)提取和筛选影像组学特征, 分别构建基于 T_2 WI、ADC、cT1WI 单一序列和联合序列的影像组学模型及纳入临床病理特征后的融合模型并制作列线图, 融合模型训练集和验证集的 AUC 分别为 0.899、0.876, 预测效能最佳。因此, DCE-MRI 的影像特征有助于对 LVI 状态的评估。

3.5. MR 多回波 Dixon 定量成像技术(mDixon-Quant)

mDixon-Quant 是一种非侵入性三维(3D)多回波梯度回波 GRE 序列, 可生成水、脂肪、水脂肪同相、水脂肪反相以及横向弛豫速率 R_2^* 和脂肪分数 FF 图像, 可以评估组织脂肪含量及顺磁性物质的含量, 过程无创且快速, 已应用于肝脏和骨骼系统等的脂肪定量研究。 R_2^* 与脱氧血红蛋白含量成正比, 通过间接反映局部组织中的氧分压, 可反映组织成分的变化。肿瘤的生长代谢很旺盛, 会使组织耗氧量增加, 导致缺氧状态, 需要更多的营养物质, 顺磁性物质浓度增加, 使 R_2^* 值升高。FF 值可以定量评估脂肪含量。FF 值作为脂肪含量的定量指标, 已经被证实了对测定甘油三酯含量敏感[38]-[40]。据研究显示[41], 肿瘤细胞中的脂质代谢会发生高度变化, 其新生脂肪的生成会增多, 有助于细胞膜和信号分子的生成, 这将为癌细胞提供脂质成分及必要能量来源以供其生长需要, 从而导致 FF 值升高。目前国内针对 mDixon-Quant 预测直肠癌 LVI 的研究仍处于起步阶段, 赵雅迪等[42]的研究虽验证了 R_2^* 、FF 等参数的预测价值, 但样本量较小($n = 62$), 且未结合影像组学特征构建更全面的预测模型。此外, 该研究仅纳入了单一中心数据, 结果的外部验证不足。未来可进一步扩大样本量, 结合多中心数据及影像组学方法, 构建包含 mDixon-Quant 功能参数、临床炎症指标及影像组学特征的多维度预测模型, 以提高直肠癌 LVI 术前评估的精准度与泛化性。

4. 总结与展望

LVI 是直肠癌重要的不良预后因素, 与肿瘤转移、复发及患者远期生存密切相关, 对临床分期、治疗决策及预后评估具有重要指导意义。当前 LVI 诊断主要依赖术后病理检查, 存在有创性、结果滞后及取样偏差等局限, 难以满足术前精准诊疗需求。因此, 开发无创、准确的术前 LVI 预测方法, 已成为直肠癌个体化精准治疗的核心研究方向之一。MRI 凭借优异的软组织分辨率, 已成为直肠癌术前评估的首选影像学手段。影像组学可从多参数 MRI 图像中高通量提取肉眼不可见的定量特征, 有效量化肿瘤异质性, 为 LVI 无创预测提供技术支撑。现有研究证实, 常规 T_2 WI、扩散加权成像(DWI)、体素内不相干运动成像(IVIM)、动态对比增强 MRI (DCE-MRI) 及新兴 mDixon-Quant 技术的形态学与定量参数, 均与直肠癌 LVI 状态显著相关; 基于上述序列构建的单模态及多模态影像组学模型展现出良好诊断效能, 为术前 LVI 评估提供了可靠的影像学依据。

尽管现有研究已取得阶段性进展, 但仍存在样本量较小、以单中心研究为主、模型泛化能力不足及临床转化受限等问题。结合研究前沿与临床需求, 未来可从以下方向开展深入研究: ① 影像组学-基因组学关联研究: 深入探究 MRI 影像组学特征与 LVI 相关基因表达谱及突变状态的关联, 筛选反映 LVI 分子特征的影像标志物, 实现从“影像表型”到“分子机制”的精准溯源, 为 LVI 分子分型提供影像学依据。② 构建 LVI 亚型特异性预测模型: 当前研究多聚焦于整体 LVI 预测, 未来需开发能够精准区分淋巴管浸润、壁内血管浸润(IMVI)及壁外血管浸润(EMVI)的多维度影像学模型, 明确各亚型影像特征差异, 助力临床分层诊疗。③ 融合多源生物标志物构建整合模型: 突破单一影像数据局限, 将多参数 MRI 影像组学特征与液体活检(如循环肿瘤细胞、外泌体、循环肿瘤 DNA)、临床病理指标及炎症标志物等多源

数据融合, 构建“影像-临床-分子”多模态整合预测模型, 进一步提升 LVI 术前预测的准确性与稳定性。④ 推进前瞻性临床验证研究: 开展大样本、多中心、前瞻性临床试验, 系统评估基于术前 MRI 影像组学预测的 LVI 状态对直肠癌新辅助治疗疗效、手术方案选择及患者长期预后(无病生存期、总生存期)的实际指导价值, 推动模型从科研向临床转化。⑤ 优化新技术联合应用与模型标准化: 扩大 mDixon-Quant 等新兴技术的样本量, 结合影像组学构建功能参数联合模型; 同时统一 MRI 扫描参数、图像分割标准、特征筛选流程及模型构建算法, 建立标准化的 LVI 预测体系, 为临床推广提供规范依据。

基于现有研究证据, 本文提出初步临床建议: 疑似直肠癌患者术前 MRI 评估 LVI 风险时, 推荐采用高分辨率 T₂WI 联合 DWI/ADC 作为基础方案, 必要时补充 DCE-MRI; 综合肿瘤形态、ADC 值、血管通透性参数, 对 LVI 进行低/中/高风险分层, 用于指导新辅助治疗决策及手术规划。现阶段 MRI 用于 LVI 术前风险评估而非确诊, 最终诊断仍需术后病理确认。未来需进一步统一扫描与判读标准, 推动形成可推广的临床指南。

综上所述, 多参数 MRI 联合影像组学技术在直肠癌 LVI 术前无创预测领域具有巨大潜力。未来通过跨学科融合、多中心协作及前瞻性验证, 有望突破现有研究瓶颈, 实现 LVI 的精准、早期、无创评估, 最终为改善直肠癌患者临床预后提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] Keller, D.S., Berho, M., Perez, R.O., Wexner, S.D. and Chand, M. (2020) The Multidisciplinary Management of Rectal Cancer. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, **17**, 414-429. <https://doi.org/10.1038/s41575-020-0275-y>
- [2] Yang, Y., Wang, H., Chen, Y., Chen, J., Song, C. and Gu, J. (2020) Current Status of Surgical Treatment of Rectal Cancer in China. *Chinese Medical Journal*, **133**, 2703-2711. <https://doi.org/10.1097/cm9.0000000000001076>
- [3] Tong, P., Sun, D., Chen, G., Ni, J. and Li, Y. (2023) Biparametric Magnetic Resonance Imaging-Based Radiomics Features for Prediction of Lymphovascular Invasion in Rectal Cancer. *BMC Cancer*, **23**, Article No. 61. <https://doi.org/10.1186/s12885-023-10534-w>
- [4] 田士峰, 刘爱连, 孟醒, 等. 酰胺质子转移、T₂ mapping 成像鉴别 I 期子宫内膜癌与子宫内膜息肉[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(9): 1832-1835.
- [5] Fernandes, M.C., Gollub, M.J. and Brown, G. (2022) The Importance of MRI for Rectal Cancer Evaluation. *Surgical Oncology*, **43**, Article 101739. <https://doi.org/10.1016/j.suronc.2022.101739>
- [6] Schurink, N.W., van Kranen, S.R., van Griethuysen, J.J.M., Roberti, S., Snaebjornsson, P., Bakers, F.C.H., *et al.* (2023) Development and Multicenter Validation of a Multiparametric Imaging Model to Predict Treatment Response in Rectal Cancer. *European Radiology*, **33**, 8889-8898. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-09920-6>
- [7] Kikuchi, E., Margulis, V., Karakiewicz, P.I., Roscigno, M., Mikami, S., Lotan, Y., *et al.* (2009) Lymphovascular Invasion Predicts Clinical Outcomes in Patients with Node-Negative Upper Tract Urothelial Carcinoma. *Journal of Clinical Oncology*, **27**, 612-618. <https://doi.org/10.1200/jco.2008.17.2361>
- [8] Lai, T., Chen, X., Yang, Z., Huang, R., Liao, Y., Chen, X., *et al.* (2022) Quantitative Parameters of Dynamic Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Imaging to Predict Lymphovascular Invasion and Survival Outcome in Breast Cancer. *Cancer Imaging*, **22**, Article No. 61. <https://doi.org/10.1186/s40644-022-00499-7>
- [9] Kuhn, E., Gambini, D., Despini, L., Asnaghi, D., Runza, L. and Ferrero, S. (2023) Updates on Lymphovascular Invasion in Breast Cancer. *Biomedicines*, **11**, Article 968. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11030968>
- [10] Aleskandarany, M.A., Sonbul, S.N., Mukherjee, A. and Rakha, E.A. (2015) Molecular Mechanisms Underlying Lymphovascular Invasion in Invasive Breast Cancer. *Pathobiology*, **82**, 113-123. <https://doi.org/10.1159/000433583>
- [11] Kataoka, M., Hirano, Y., Ishii, T., Kondo, H., Asari, M., Ishikawa, S., *et al.* (2021) Impact of Lymphovascular Invasion in Patients with Stage II Colorectal Cancer: A Propensity Score-Matched Study. *In Vivo*, **35**, 525-531. <https://doi.org/10.21873/in vivo.12287>
- [12] Zhang, Y., Tan, H., Huang, B., Guo, X. and Cao, Y. (2024) Application of a Combined Clinical Prediction Model Based on Enhanced T1-Weighted Image(T1WI) Full Volume Histogram in Peripheral Nerve Invasion (PNI) and Lymphatic Vessel Invasion (LVI) in Rectal Cancer. *Abdominal Radiology*, **50**, 1069-1078. <https://doi.org/10.1007/s00261-024-04556-6>
- [13] 中国结直肠癌诊疗规范(2020 年版) [J]. 中国实用外科杂志, 2020, 40(6): 601-625.

- [14] Jhaveri, K.S. and Hosseini-Nik, H. (2015) MRI of Rectal Cancer: An Overview and Update on Recent Advances. *American Journal of Roentgenology*, **205**, W42-W55. <https://doi.org/10.2214/ajr.14.14201>
- [15] Horvat, N., Carlos Tavares Rocha, C., Clemente Oliveira, B., Petkovska, I. and Gollub, M.J. (2019) MRI of Rectal Cancer: Tumor Staging, Imaging Techniques, and Management. *Radio Graphics*, **39**, 367-387. <https://doi.org/10.1148/rg.2019180114>
- [16] Qin, Y., Zhu, L., Zhao, W., Wang, J. and Wang, H. (2022) Review of Radiomics- and Dosiomics-Based Predicting Models for Rectal Cancer. *Frontiers in Oncology*, **12**, Article 913683. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.913683>
- [17] Gillies, R.J., Kinahan, P.E. and Hricak, H. (2016) Radiomics: Images Are More than Pictures, They Are Data. *Radiology*, **278**, 563-577. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015151169>
- [18] Miranda, J., Horvat, N., Araujo-Filho, J.A.B., Albuquerque, K.S., Charbel, C., Trindade, B.M.C., et al. (2023) The Role of Radiomics in Rectal Cancer. *Journal of Gastrointestinal Cancer*, **54**, 1158-1180. <https://doi.org/10.1007/s12029-022-00909-w>
- [19] 张首宁, 张孝先, 张宏凯, 等. 常规 MRI 检查以及扩散加权成像用于直肠癌术前分期的应用价值[J]. 实用癌症杂志, 2024, 39(8): 1315-1317+1329.
- [20] Ayhan, A., Şahin, H., Sari, M.E., Yalçın, I., Haberal, A. and Meydanli, M.M. (2019) Prognostic Significance of Lymphovascular Space Invasion in Low-Risk Endometrial Cancer. *International Journal of Gynecological Cancer*, **29**, 505-512. <https://doi.org/10.1136/ijgc-2018-000069>
- [21] Oliver-Perez, M.R., Padilla-Iserte, P., Arencibia-Sanchez, O., Martin-Arriscado, C., Muruzabal, J.C., Diaz-Feijóo, B., et al. (2023) Lymphovascular Space Invasion in Early-Stage Endometrial Cancer (LySEC): Patterns of Recurrence and Predictors. A Multicentre Retrospective Cohort Study of the Spain Gynecologic Oncology Group. *Cancers*, **15**, Article No. 2612. <https://doi.org/10.3390/cancers15092612>
- [22] 袁权, 吴树剑, 范莉莉, 等. 基于 MRI 深度迁移学习影像组学术前预测直肠癌脉管浸润的研究[J]. 磁共振成像, 2025, 16(1): 54-60.
- [23] 杨澳, 周鹏. 功能MRI定量评估局部进展期直肠癌新辅助放化疗后病理完全缓解研究进展[J]. 磁共振成像, 2024, 15(7): 210-215.
- [24] 李萍, 洪中华, 蔡铷云, 等. MR 扩散加权成像及动态增强诊断直肠癌分化程度及神经管侵犯的价值[J]. 医学影像学杂志, 2024, 34(1): 78-81.
- [25] Zhu, Z.H., Liang, Y. and Shi M. (2026) Prediction of Lymphovascular Invasion in Rectal Cancer Based on Multimodal Magnetic Resonance Imaging Radiomics Model. *World Journal of Gastrointestinal Surgery*, **18**, Article 113021. <https://doi.org/10.4240/wjgs.v18.i2.113021>
- [26] 赵佳, 李华兵. 磁共振体素内不相干运动成像在直肠癌临床诊疗中的应用进展[J]. 磁共振成像, 2021, 12(12): 108-111.
- [27] Meyer, H.J., Höhn, A.K., Woidacki, K., et al. (2021) Associations between IVIM Histogram Parameters and Histopathology in Rectal Cancer. *Magnetic Resonance Imaging*, **77**, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2020.12.008>
- [28] 蒋雯丽, 蒋伟, 韦鑫, 等. IVIM 全容积定量参数与直肠腺癌神经管侵犯、MSI 状态及 Ki-67 指数的相关性研究[J]. 磁共振成像, 2024, 15(9): 80-85+93.
- [29] Wong, C., Liu, T., Zhang, C., Li, M., Zhang, H., Wang, Q., et al. (2023) Preoperative Detection of Lymphovascular Invasion in Rectal Cancer Using Intravoxel Incoherent Motion Imaging Based on Radiomics. *Medical Physics*, **51**, 179-191. <https://doi.org/10.1002/mp.16821>
- [30] Li, X., Huang, W. and Holmes, J.H. (2024) Dynamic Contrast-Enhanced (DCE) MRI. *Magnetic Resonance Imaging Clinics of North America*, **32**, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.mric.2023.09.001>
- [31] Dijkhoff, R.A.P., Beets-Tan, R.G.H., Lambregts, D.M.J., Beets, G.L. and Maas, M. (2017) Value of DCE-MRI for Staging and Response Evaluation in Rectal Cancer: A Systematic Review. *European Journal of Radiology*, **95**, 155-168. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2017.08.009>
- [32] 韩赢, 孙美玉. 子宫内膜癌淋巴管间隙浸润的 MRI 研究进展[J]. 磁共振成像, 2024, 15(7): 216-220+234.
- [33] Yin, J., Yang, J., Han, L., Guo, Q. and Zhang, W. (2015) Quantitative Discrimination between Invasive Ductal Carcinomas and Benign Lesions Based on Semi-Automatic Analysis of Time Intensity Curves from Breast Dynamic Contrast Enhanced MRI. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research*, **34**, 1-10. <https://doi.org/10.1186/s13046-015-0140-y>
- [34] Coşkun Bilge, A., Yaltırık Bilgin, E., Bulut, Z.M., Esen Bostancı, I. and Bilgin, E. (2023) Preoperative Dynamic Contrast-Enhanced and Diffusion-Weighted Breast Magnetic Resonance Imaging Findings for Prediction of Lymphovascular Invasion of the Lesions in Node-Negative Invasive Breast Cancer. *Canadian Association of Radiologists Journal*, **75**, 386-396. <https://doi.org/10.1177/08465371231212893>

- [35] 赵闰宁. 直肠癌壁外血管侵犯与肿瘤微循环功能磁共振定量参数的关系探讨[D]: [硕士学位论文]. 广州: 南方医科大学, 2020.
- [36] Chen, Z., Hu, D., Ye, G. and Xu, D. (2022) Quantitative Evaluation of Extramural Vascular Invasion of Rectal Cancer by Dynamic Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Imaging. *Contrast Media & Molecular Imaging*, **2022**, Article 3038308. <https://doi.org/10.1155/2022/3038308>
- [37] 谢玉莹, 崔艳芬, 杨晓棠, 等. 基于多参数 MRI 的影像组学融合模型对直肠癌脉管侵袭的术前预测价值[J]. 中华解剖与临床杂志, 2024, 29(2): 97-104.
- [38] Wang, Y., Ju, Y., An, Q., *et al.* (2023) mDIXON-Quant for Differentiation of Renal Damage Degree in Patients with Chronic Kidney Disease. *Frontiers in Endocrinology*, **14**, Article 1187042. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1267914>
- [39] Meng, X., Tian, S., Ma, C., *et al.* (2023) APTw Combined with mDixon—Quant Imaging to Distinguish the Differentiation Degree of Cervical Squamous Carcinoma. *Frontiers in Oncology*, **13**, Article 1105867. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1105867>
- [40] Chu, C., Feng, Q., Zhang, H., Zhao, S., Chen, W., He, J., *et al.* (2020) Evaluation of Salivary Gland Fat Fraction Values in Patients with Primary Sjögren’s Syndrome by mDIXON Quant Imaging: Initial Findings. *European Journal of Radiology*, **123**, Article 108776. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2019.108776>
- [41] Salvador, M.M., de Cedrón, M.G., Rubio, J.M., *et al.* (2017) Lipid Metabolism and Lung Cancer. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, **112**, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.critrevonc.2017.02.001>
- [42] 赵雅迪, 杨杰, 薛慧, 等. 基于 mDixon-Quant 联合血细胞参数预测直肠癌脉管侵犯及淋巴结转移的研究[J]. 中国肿瘤临床, 2024, 51(21): 1092-1097.