

多参数 MRI 联合人工智能评估直肠癌脉管及神经侵犯的研究进展

王琦¹，崔丽华²▲，叶超²，姜正彬²，孙新然¹，赵传旭²

1. 牡丹江医科大学医学影像学院，黑龙江 牡丹江 157011；

2. 齐齐哈尔市第一医院影像科，黑龙江 齐齐哈尔 161005

中图分类号：R735.3+7；R445.2 文献标识码：A

摘要：直肠癌脉管及神经侵犯是其局部侵袭性的重要表现，与患者淋巴结转移、治疗方案选择及预后有关。二者主要依赖术后病理判断，术前常规磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）直接识别仍存在一定困难。随着 MRI 技术的发展，扩散、灌注、弛豫、代谢及水脂成像等多参数 MRI 可从不同角度反映肿瘤组织特征。影像组学及以传统机器学习、深度学习为代表的人工智能方法也逐渐用于 MRI 图像分析，为直肠癌脉管及神经侵犯的术前评估提供更多参考。本文就多参数 MRI 联合人工智能术前评估直肠癌脉管及神经侵犯的研究进展作一综述。

关键词：直肠癌；磁共振成像；脉管侵犯；神经侵犯；人工智能

1 引言

直肠癌是消化系统常见恶性肿瘤之一，其治疗方式的选择与术前分期及高危因素判断密切相关^[1]。目前，直肠癌治疗需结合影像学评估、病理结果及患者全身情况进行综合判断，其中肿瘤局部侵犯范围、淋巴结状态及侵袭性特征是制定治疗方案的重要依据^[2]。磁共振成像

（magnetic resonance imaging, MRI）具有较高软组织分辨率，是直肠癌术前局部分期、环周切缘判断及治疗决策中的重要影像学方法^[3]。相关共识也指出，规范的 MRI 评估有助于提高直肠癌术前影像信息的临床应用价值^[4]。

脉管侵犯（lymphovascular invasion, LVI）和神经侵犯（perineural invasion, PNI）均与直肠癌局部进展和预后有关。LVI 是指肿瘤细胞侵犯淋巴管或血管腔，与淋巴结转移及局部进展风险有关，在 T2 期直肠癌中也被认为是淋巴结转移的重要危险因素^[5]。PNI 是指肿瘤细胞侵犯神经或神经周围间隙，阳性患者往往提示肿瘤侵袭性较强，临床结局相对较差^[6]。但 LVI 和 PNI 多为显微镜下观察到的病理改变，主要依赖术后病理证实，常规 MRI 缺乏稳定、直接的影像征象，单纯依据形态学表现进行判断仍存在一定困难。

近年来，多参数 MRI 和人工智能相关研究逐渐增多。扩散、灌注、弛豫、代谢及水脂成像等技术可从不同角度反映直肠癌组织结构和微环境变化，为 LVI 和 PNI 术前评估提供更多影像信息。影像组学及以传统机器学习、深度学习为代表的人工智能方法可用于 MRI 图像分析，并结合临床资料进行综合判断。上述研究为直肠癌 LVI 和 PNI 的术前无创评估提供了新的思路。本文就多参数 MRI 联合人工智能术前评估直肠癌脉管及神经侵犯的研究进展作一综述。

2 多参数 MRI 在直肠癌脉管及神经侵犯术前评估中的应用

常规 MRI 主要依据肿瘤形态、信号特点、肠壁受累程度及周围结构关系进行判断，对直肠癌局部分期具有重要价值。但 LVI 和 PNI 多为显微镜下病理改变，仅依靠常规形态学征象难以

直接判断。近年来，扩散、灌注、弛豫、代谢及水脂成像等多参数 MRI 技术逐渐用于直肠癌术前评估，可从不同角度反映肿瘤细胞密度、血流灌注、组织异质性及微环境变化，为 LVI 和 PNI 的术前判断提供补充信息。

2.1 扩散及灌注成像

扩散加权成像（diffusion-weighted imaging, DWI）是直肠癌 MRI 检查中的常用功能序列，可通过水分子扩散受限程度反映肿瘤细胞密度和组织结构复杂性^[7]。表观扩散系数（apparent diffusion coefficient, ADC）值可对扩散受限程度进行定量评价，但易受肿瘤坏死、黏液成分及感兴趣区勾画方式影响。体素内不相干运动（intravoxel incoherent motion, IVIM）和扩散峰度成像（diffusion kurtosis imaging, DKI）可在 DWI 基础上进一步反映真实扩散、微循环灌注及非高斯扩散特征，相关参数已被用于直肠癌病理高危因素评估^[8]。

扩散及灌注参数可从细胞密度、微循环状态和组织异质性等方面反映肿瘤局部侵袭特征。Lu 等^[9]基于时间依赖扩散 MRI 微结构参数预测直肠癌 LVI，结果显示联合模型的曲线下面积（area under the curve, AUC）为 0.860，高于单一 ADC 参数。Fan 等^[10]采用基于黄金角径向稀疏并行采集（golden-angle radial sparse parallel, GRASP）的动态增强灌注 MRI 评估直肠癌 LVI，结果显示 ADC 联合容量转运常数（ K^{trans} ）预测 LVI 的 AUC 为 0.91，高于单独 ADC，说明灌注信息可补充扩散成像对 LVI 的判断。增强 T1 加权成像（T1-weighted imaging, T1WI）全容积直方图分析可反映肿瘤强化程度及内部差异，Zhang 等^[11]将其与临床资料结合用于 LVI 和 PNI 预测，提示增强 MRI 定量分析可为二者的术前评估提供参考。

PNI 多表现为肿瘤沿神经及其周围间隙浸润，常规 MRI 术前判断较为困难。He 等^[12]纳入 175 例直肠癌患者，基于 IVIM-DWI 全肿瘤直方图特征评估 PNI 状态，结果显示联合模型预测 PNI 的 AUC 为 0.807。聚焦激发平面回波 DWI 直方图分析可用于 PNI 预测，相关研究认为高分辨率扩散成像有助于观察肿瘤内部异质性^[13]。IVIM 直方图指标与临床特征结合后，也可为 PNI 状态判断提供参考^[14]。综上，扩散及灌注成像可在常规 MRI 形态学观察基础上提供定量信息，但不同研究的扫描参数、图像质量及后处理方法尚不完全一致，相关结果仍需进一步积累。

2.2 弛豫、代谢及水脂成像

除扩散及灌注成像外，T1 定量成像（T1 mapping）、T2 定量成像（T2 mapping）、酰胺质子转移成像（amide proton transfer, APT）及多回波 Dixon 定量成像（mDixon-Quant）等技术也逐渐用于直肠癌侵袭性评估。T1 mapping 可定量反映组织纵向弛豫时间及细胞外间隙变化，肿瘤细胞密度、胶原纤维含量及间质成分改变均可影响相关参数。Yuan 等^[15]研究发现，基于 T1 mapping 获得的细胞外容积分数可反映直肠癌细胞和胶原纤维成分，为观察肿瘤组织组成提供了影像学依据。

T2 mapping 可通过 T2 值反映组织横向弛豫时间及水分子状态，在直肠癌 LVI 评估中已有初步应用。李茜玮等^[16]利用 T2 mapping 预测直肠癌 LVI，结果显示 T2 值联合 ADC 值的预测效能

高于单一参数，提示弛豫参数与扩散参数结合可提高对 LVI 的术前判断能力。该类研究从组织水分含量及微观结构变化角度补充常规 MRI 信息，但目前样本量仍有限，相关结果仍需进一步积累。

APT 成像是一种基于内源性移动蛋白和肽类酰胺质子交换效应的分子成像方法，可从代谢水平反映肿瘤组织状态。Zhang 等^[17]开展前瞻性研究发现，PNI 阳性直肠腺癌的 APT 加权（amide proton transfer-weighted, APTw）信号强度高于 PNI 阴性者，说明 APT 成像在 PNI 术前判断中具有一定参考意义。mDixon-Quant 可获得脂肪分数、R2*等定量参数，用于反映肿瘤组织脂质成分及局部微环境变化。赵雅迪等^[18]基于 mDixon-Quant 联合血细胞参数预测直肠癌 LVI 及淋巴结转移，认为水脂定量参数与外周血炎症指标结合可为直肠癌侵袭性评估提供补充信息。综上，弛豫、代谢及水脂成像可为直肠癌 LVI 和 PNI 术前评估提供补充信息，但目前相关研究仍较少，参数阈值及临床适用性尚需进一步明确。

3 影像组学与人工智能在直肠癌脉管及神经侵犯术前预测中的应用

影像组学最早由 Lambin 等^[19]提出，其可从医学图像中提取肉眼不易识别的灰度、形态及纹理特征，并常结合传统机器学习进行特征筛选和模型构建。深度学习作为另一类机器学习方法，可直接从图像中学习影像特征。近年来，上述方法逐渐用于直肠癌 LVI 和 PNI 术前预测，为治疗前风险评估提供了新的研究手段。

3.1 影像组学在脉管侵犯预测中的应用

LVI 与直肠癌淋巴结转移及疾病进展密切相关，术前准确判断有助于识别高风险患者。MRI 影像组学可从 T2WI、DWI、增强 T1WI 等序列中提取肿瘤内部及周围区域特征，分析常规阅片中不易发现的异质性改变。Wong 等^[20]采用 IVIM 成像开展影像组学分析，用于术前检测直肠癌 LVI，认为 IVIM 相关影像特征可为 LVI 判断提供参考。Ning 等^[21]建立基于 MRI 的影像组学模型预测直肠癌 LVI，也提示 MRI 影像组学在 LVI 术前评估中具有应用潜力。

近年来，瘤内和瘤周区域在 LVI 预测中的作用逐渐受到关注。Xu 等^[22]将临床特征与瘤内、瘤周 MRI 影像组学特征结合构建列线图，用于术前预测可切除直肠癌 LVI 状态。Chen 等^[23]进一步整合多区域 MRI 影像组学特征和临床资料建立预测模型，结果显示该模型在外部测试集中的 AUC 为 0.889。上述结果表明，LVI 相关影像特征不仅存在于肿瘤内部，瘤周区域同样具有一定的预测价值。

多模态 MRI 和可解释模型也逐渐用于 LVI 预测。陶响等^[24]利用 T2WI 和增强 T1WI 建立多模态 MRI 影像组学模型，并结合 MR 壁外血管侵犯构建联合模型，训练集和测试集 AUC 分别为 0.924 和 0.899；沙普利加性解释（SHapley additive explanations, SHAP）分析显示，不同影像及临床变量对模型预测结果的贡献存在差异。总体来看，MRI 影像组学可从多序列、多区域角度评估直肠癌 LVI，但不同研究在图像分割、特征筛选和模型建立方面尚不统一，相关模型的可靠性仍需通过外部验证进一步评价。

3.2 影像组学在神经侵犯预测中的应用

PNI 是直肠癌局部浸润性较强的表现之一，但神经及神经周围间隙较细小，术前常规 MRI 难以直接显示。影像组学可通过分析肿瘤形态、信号及纹理差异，提取常规阅片中不易发现的信息，因而逐渐用于 PNI 术前预测。Yang 等^[25]基于高分辨率 MRI 建立影像组学列线图预测直肠癌 PNI，结果显示该模型在训练集和验证集中的 AUC 分别为 0.81 和 0.75，说明 MRI 影像组学可为 PNI 术前判断提供参考。

多参数 MRI 可从不同序列反映肿瘤组织结构和异质性变化。Zhang 等^[26]基于 T1WI、T2WI、ADC 图及增强 T1WI 建立影像组学模型，并结合临床及影像学因素构建列线图，结果显示融合多序列特征的模型较单一序列模型具有更好的预测表现。Liu 等^[27]开展双中心研究，建立 MRI 影像组学模型预测直肠癌 PNI，为评价模型在不同中心数据中的稳定性提供了依据。近年来相关研究进一步关注模型的临床适用性。Wang 等^[28]采用多参数 MRI 影像组学方法建立 PNI 预测模型，提示该类模型可辅助术前识别 PNI 高风险患者。总体来看，MRI 影像组学可从肿瘤形态、信号及纹理差异中提取 PNI 相关信息，但对神经周围微小浸润的判断仍主要依赖间接影像学特征。

3.3 机器学习与联合模型的应用

在传统机器学习方面，Zhong 等^[29]整合多参数 MRI 瘤内、瘤周及生境影像组学特征建立 PNI 预测模型，结果显示，不同区域影像特征的联合应用可为 PNI 术前评估提供更多信息。深度学习可直接从 MRI 图像中学习影像特征，近年来逐渐用于直肠癌的术前风险评估。Shi 等^[30]基于 T2WI、DWI 及临床因素建立多参数 MRI 深度学习模型评估直肠癌 LVI 状态，结果显示联合模型在外部测试集中的 AUC 为 0.899，高于单一序列模型，提示多序列 MRI 与临床因素联合分析可提高 LVI 术前预测效能。三维（three-dimensional, 3D）深度学习模型可利用肿瘤整体空间信息，减少单层图像分析造成的信息遗漏。Wang 等^[31]建立基于 MRI 的 3D 深度学习模型预测直肠癌 LVI，提示三维图像信息在 LVI 评估中具有一定应用价值。Huang 等^[32]进一步融合多参数 MRI 子区域影像组学特征与深度学习特征，建立可解释模型预测直肠癌 LVI，结果表明，子区域分析能够反映肿瘤内部的异质性。相关研究正由单一序列分析逐步转向多序列、多区域及多类型特征的联合模型构建。

4 小结与展望

LVI 和 PNI 是直肠癌局部侵袭性的重要表现，二者多依赖术后病理判断，术前识别仍有一定难度。多参数 MRI 可在常规形态学观察基础上，从肿瘤组织结构、血供特点及内部异质性等方面提供更多信息。现有研究显示，扩散、灌注、弛豫、代谢及水脂相关 MRI 参数在 LVI 和 PNI 术前评估中均有一定应用价值，但不同技术所反映的病理基础并不完全相同，单一参数仍难以全面反映肿瘤侵袭行为。

现有影像组学和机器学习研究主要通过分析 MRI 图像中的定量信息，对 LVI 和 PNI 进行术前预测。相关研究多采用多序列 MRI，并分析瘤内及瘤周特征，部分研究进一步构建联合模型，在 LVI 和 PNI 预测中取得一定进展。但目前多数研究仍为回顾性设计，样本量相对有限，不同中心在扫描方案、图像分割和模型建立方面存在差异，部分结果尚缺乏充分的外部验证。

未来研究应进一步扩大样本来源，开展多中心、前瞻性研究，并推进 MRI 检查流程、病理评价标准及模型构建方法的标准化。多参数 MRI 联合人工智能有望作为直肠癌 LVI 和 PNI 术前风险评估的辅助方法，为治疗前风险分层和个体化治疗方案制定提供参考。

参考文献

- [1] Bray F, Laversanne M, Sung H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA Cancer J Clin, 2024, 74(3): 229-263.
- [2] 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（2023 版）[J]. 中华胃肠外科杂志, 2023, 26(6): 505-528.
- [3] ESGAR Rectal Imaging Guideline Group. MRI to guide clinical management of rectal cancer: updated consensus recommendations from the European Society of Gastrointestinal and Abdominal Radiology (ESGAR)-Part I primary staging[J]. Eur Radiol, 2026, 36(6): 4592-4607.
- [4] Lee S, Kassam Z, Baheti AD, et al. Rectal cancer lexicon 2023 revised and updated consensus statement from the Society of Abdominal Radiology Colorectal and Anal Cancer Disease-Focused Panel[J]. Abdom Radiol (NY), 2023, 48(9): 2792-2806.
- [5] Medic S, Nilsson E, Rönnow CF, et al. Lymphovascular invasion is a dominant risk factor for lymph node metastasis in T2 rectal cancer[J]. Endosc Int Open, 2024, 12(9): E1056-E1062.
- [6] Chen T, Zheng B, Yang P, et al. The incidence and prognosis value of perineural invasion in rectal carcinoma: from meta-analyses and real-world clinical pathological features[J]. Clin Oncol (R Coll Radiol), 2023, 35(10): e611-e621.
- [7] Schurink NW, Lambregts DMJ, Beets-Tan RGH. Diffusion-weighted imaging in rectal cancer: current applications and future perspectives[J]. Br J Radiol, 2019, 92(1096): 20180655.
- [8] Zhou M, Chen M, Luo M, et al. Pathological prognostic factors of rectal cancer based on diffusion-weighted imaging, intravoxel incoherent motion, and diffusion kurtosis imaging[J]. Eur Radiol, 2025, 35(2): 979-988.
- [9] Lu F, Li Y, Wu R, et al. Microstructural mapping of time-dependent diffusion MRI for predicting lymphovascular invasion in rectal cancer: a proof-of-concept investigation[J]. Insights Imaging, 2026, 17: 127.
- [10] Fan Y, Chen M, Huang H, et al. Predicting lymphovascular invasion in rectal cancer: evaluating the performance of golden-angle radial sparse parallel MRI for rectal perfusion assessment[J]. Sci Rep, 2023, 13: 8453.
- [11] Zhang Y, Tan H, Huang B, et al. 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[J]. Abdom Radiol (NY), 2025, 50(3): 1069-1078.
- [12] He R, Song G, Fu J, et al. Histogram analysis based on intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging for determining the perineural invasion status of rectal cancer[J]. Quant Imaging Med Surg, 2024, 14(8): 5358-5372.

- [13] Wan LJ, Peng WJ, Zou SM, et al. Predicting perineural invasion using histogram analysis of zoomed EPI diffusion-weighted imaging in rectal cancer[J]. *Abdom Radiol (NY)*, 2022, 47(10): 3353-3363.
- [14] Yang A, Xu H, Zhang X, et al. Pretreatment intravoxel incoherent motion histogram metrics and clinical characteristics for prediction of perineural invasion status and survival in patients with rectal cancer[J]. *Insights Imaging*, 2025, 16: 199.
- [15] Yuan J, Wen Q, Wang H, et al. The use of quantitative T1-mapping to identify cells and collagen fibers in rectal cancer[J]. *Front Oncol*, 2023, 13: 1189334.
- [16] 李茜玮, 刘爱连, 陈安良, 等. T2 mapping 预测直肠癌脉管侵犯的初步研究[J]. *磁共振成像*, 2022, 13(6): 23-27.
- [17] Zhang C, Chen J, Liu Y, et al. Amide proton transfer-weighted MRI for assessing rectal adenocarcinoma T-staging and perineural invasion: a prospective study[J]. *Eur Radiol*, 2025, 35(2): 968-978.
- [18] 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.
- [19] Lambin P, Rios-Velazquez E, Leijenaar R, et al. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis[J]. *Eur J Cancer*, 2012, 48(4): 441-446.
- [20] Wong C, Liu T, Zhang C, et al. Preoperative detection of lymphovascular invasion in rectal cancer using intravoxel incoherent motion imaging based on radiomics[J]. *Med Phys*, 2024, 51(1): 179-191.
- [21] Ning X, Yang D, Ao W, et al. A novel MRI-based radiomics for preoperative prediction of lymphovascular invasion in rectal cancer[J]. *Abdom Radiol (NY)*, 2025, 50(8): 3377-3390.
- [22] Xu F, Hong J, Wu X, et al. An integrative clinical and intra- and peritumoral MRI radiomics nomogram for the preoperative prediction of lymphovascular invasion in rectal cancer[J]. *Acad Radiol*, 2025, 32(7): 3989-4001.
- [23] Chen T, Yi R, Liu Z, et al. Integrative multi-region MRI radiomics and clinical nomogram for preoperative lymphovascular invasion prediction in rectal cancer: a multicenter validation[J]. *BMC Med Imaging*, 2026, 26: 48.
- [24] 陶响, 刘梦玥, 陈芳, 等. 基于多模态 MRI 影像组学及 SHAP 分析预测直肠癌脉管侵犯[J]. *中国医学影像技术*, 2026, 42(3): 372-378.
- [25] Yang YS, Qiu YJ, Zheng GH, et al. High resolution MRI-based radiomic nomogram in predicting perineural invasion in rectal cancer[J]. *Cancer Imaging*, 2021, 21(1): 40.
- [26] Zhang Y, Peng J, Liu J, et al. Preoperative prediction of perineural invasion status of rectal cancer based on radiomics nomogram of multiparametric magnetic resonance imaging[J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 828904.
- [27] Liu Y, Sun BJT, Zhang C, et al. Preoperative prediction of perineural invasion of rectal cancer based on a magnetic resonance imaging radiomics model: a dual-center study[J]. *World J Gastroenterol*, 2024, 30(16): 2233-2248.
- [28] Wang J, Yang T, Gong W, et al. Novel magnetic resonance imaging (MRI)-based radiomics for predicting perineural invasion in rectal cancer: a two-centre study[J]. *Clin Radiol*, 2026, 92: 107182.
- [29] Zhong J, Huang T, Jiang R, et al. MRI-based habitat, intra-, and peritumoral machine learning model for perineural invasion prediction in rectal cancer[J]. *Abdom Radiol (NY)*, 2026, 51(2): 545-557.
- [30] Shi S, Singh A, Ma J, et al. Development and validation of a multi-parametric MRI deep-learning model for preoperative lymphovascular invasion evaluation in rectal cancer[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2025, 15(1): 427-439.

- [31] Wang T, Chen C, Liu C, et al. A 3D deep learning model based on MRI for predicting lymphovascular invasion in rectal cancer[J]. Med Phys, 2025, 52(7): e17882.
- [32] Huang T, Zeng Y, Jiang R, et al. Interpretable MRI subregional radiomics-deep learning model for preoperative lymphovascular invasion prediction in rectal cancer: a dual-center study[J]. J Imaging Inform Med, 2026, 39(2): 1371-1382.