

直肠癌影像学精准评估的进展、瓶颈与展望

黄燕琪, 刘再毅

【关键词】 直肠癌; 磁共振成像; 人工智能; 影像组学; 精准评估

【中图分类号】 R735.3; R445.2 【文献标志码】 D 【文章编号】 1000-0313(2026)09-0981-02

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.09.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



直肠癌是全球最常见的消化系统恶性肿瘤之一,过去二十年间其诊疗模式已从单一手术发展新辅助放化疗联合全直肠系膜切除的综合治疗,并进一步向全程新辅助治疗和器官保留策略持续演进^[1]。伴随这一变革,直肠癌影像学评估亦正经历从形态学描述向量化、智能化的深刻转型。本期直肠癌影像学专题汇集了多篇具有代表性的研究成果,正是这一学术发展轨迹的缩影。

MRI 在直肠癌诊疗中的重要价值

高分辨率 MRI 已被国内外指南一致推荐为直肠癌局部分期的金标准^[2]。其核心价值在于精准评估肿瘤 T 分期、淋巴结状态、环周切缘(circumferential resection margin, CRM)及壁外血管侵犯(extramural venous invasion, EMVI),这些信息直接决定了治疗策略的选择。然而,传统 MRI 评估主要依赖放射科医师的视觉判读,存在固有的局限性:观察者间变异较大、对早期病变和微小转移灶的识别能力有限、难以捕捉肿瘤的生物学异质性。

近年来,功能 MRI 技术的进步在一定程度上弥补了这些不足。扩散加权成像(DWI)可反映肿瘤细胞密度,动态对比增强 MRI 可评估微循环灌注,而扩散峰度成像(DKI)和酰胺质子转移加权成像(APTWI)等新技术则提供了更丰富的微观功能信息。然而,正如本期专题中综述所指出,综合治疗后存活肿瘤细胞与黏液、纤维化及炎性细胞在影像上的鉴别,始终是大体影像诊断难以逾越的瓶颈^[3]。传统 MRI 虽可显示肿瘤退缩后纤维瘢痕与黏液湖的形成,但当治疗后表现为混合性退缩模式时,残存肿瘤的识别——与黏液变性或纤维化背景中隐匿的肿瘤残留之间的区分,仍然高度依赖阅片者的经验判断。这一瓶颈正是人工智能

进入该领域的直接驱动力:从大体影像的视觉判读,走向融合潜在组织学特征的多模态生物学表型辅助决策。

治疗反应评估:从大体形态到微观征象

新辅助治疗后疗效的准确评估是直肠癌影像学最具挑战性的课题之一^[4]。对于达到病理完全缓解(pathological complete response, pCR)的患者,器官保留(“等待-观察”)策略已成为一种可行的选择。然而,如何在术前准确识别 pCR 患者,始终是临床实践的痛点。

传统的 MRI 评估主要依赖肿瘤体积缩小和 T₂WI 信号改变,其准确性远未达到临床需求。为此,研究者们不断探索新的影像标志物。本期专题中,《裂隙瘢痕评分方法评估局部进展期直肠癌肿瘤退缩分级的价值》一文中提出了一种基于 MRI 的裂隙瘢痕征评分(mrSSS 评分)方法^[5]。这一研究的价值在于:它并非简单地依赖肿瘤大小或信号强度的变化,而是从组织学转归的视角,即肿瘤退缩后形成的裂隙样纤维瘢痕,来重新定义影像学评估的终点。这种“病理导向”的影像评估思路,为临床疗效评估提供了新的参考。

与此同时,《直肠癌盆腔放疗后闭孔内肌面积时序演变》一文则将目光投向了肿瘤之外的正常组织^[6]。该研究揭示了放疗后闭孔内肌(OI)面积呈现“早期增大-中期回落-晚期萎缩”的时序演变模式,且这一模式在不同放疗模式(姑息性、术前、术后)中具有共性。这一发现另辟蹊径,为量化评估放疗相关骨骼肌损伤提供了一个客观的影像学指标,也为放疗计划的个体化优化提供了潜在的生物标志物。

人工智能与影像组学:开启精准决策的新纪元

如果说传统影像评估是对图像的“阅读”,那么影像组学和基于深度学习的人工智能(AI)技术则可进一步实现对图像的“挖掘”。影像组学通过高通量提取医学影像中的定量特征,将影像转化为可挖掘的数据;深度学习则通过端到端的学习,自动发现人类视觉难以捕捉的影像模式^[7]。过去 5 年间,基于 MRI 的影像

作者单位:510080 广州,南方医科大学附属广东省人民医院(广东省医学科学院)放射科,广东省医学影像智能分析与应用重点实验室

作者简介:黄燕琪(1991-),女,广东湛江人,硕士,副主任医师,主要从事腹部影像诊断及医学图像人工智能研究工作。

通信作者:刘再毅, E-mail:liuzaiyi@gdph.org.cn

基金项目:国家自然科学基金资助项目(基金编号:82572310)

组学和深度学习模型在直肠癌诊疗中取得了令人瞩目的进展^[8]。本期专题综述对此进行了系统梳理^[3],从中可以提炼出几个值得关注的趋势:在模型设计层面,研究正从依赖治疗前单时间点影像的静态预测,转向利用治疗前后纵向对比学习的动态评估思路,后者更贴近放射科医师通过对比前后影像判断疗效变化的真实阅片逻辑;在任务目标层面,研究正从单纯的 pCR 预测,拓展至免疫治疗反应评估、远处转移和生存预后预测等更广泛的临床场景;在数据融合层面,多模态信息的整合正在成为提升模型性能的有效路径,影像组学、病理组学与临床指标的融合能够更全面地刻画肿瘤的生物学异质性。本期专题中,《基于增强 CT 影像组学结合机器学习预测结直肠癌肿瘤出芽等级的价值》一文展示了 AI 技术在另一临床场景中的应用^[9]。肿瘤出芽(tumor budding, TB)是反映肿瘤侵袭潜能的重要病理指标,但常规影像学难以在术前进行评估。该研究尝试通过影像组学特征构建影像替代生物标志物,实现对这一病理学指标的间接量化,为术前无创评估肿瘤侵袭性提供了新的思路。

少见病变的影像鉴别:回归基本功

在新技术层出不穷的今天,我们不能忽视一个基本事实——影像诊断的根基仍然是对疾病影像学表现的深刻理解和准确鉴别。本期专题中,《直肠少见环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变的 MRI 影像诊断与鉴别》一文正是这一理念的体现^[10]。该研究系统分析了直肠粘液腺癌、印戒细胞癌、淋巴瘤、孤立性直肠溃疡综合征和海绵状血管瘤五类以肠壁环周增厚为表现的少见病变,提炼出各自的 MRI 特征性征象:T₂WI 粘液样高信号和不均匀强化指向粘液腺癌;直肠系膜蜂窝状血管和钙化灶指向海绵状血管瘤;分层样强化伴直肠系膜污垢样改变指向印戒细胞癌;明显弥散受限和均匀强化指向淋巴瘤。这类基于经典影像征象的鉴别诊断研究仍然具有不可替代的价值,它不仅为临床实践提供了直接的诊断参考,更为重要的是——它提醒我们,任何 AI 模型的有效性都建立在对基础影像学知识的深刻理解之上。AI 可作为辅助工具,而非替代医师的观察和判断。

展望及结语

展望未来,直肠癌影像学的发展将更加注重纵向动态评估、多模态数据融合以及智能辅助决策工具的临床转化。通过整合治疗前、中、后的时序影像信息,

结合多组学数据,有望构建更精准的个体化疗效预测体系;而人工智能模型的实用性与可解释性也将在多中心前瞻性实践中不断优化,最终服务于临床决策与患者获益。

本期直肠癌影像学专题汇集的文章从不同角度展现了直肠癌影像学的现状与前沿,这些研究既有对基础影像征象的精细刻画,也有对前沿技术的积极探索;既有对常见临床问题的回应,也有对少见病变的深入剖析。它们共同勾勒出直肠癌影像学正在经历的范式转型:从形态描述走向定量分析,从视觉判读走向智能决策,从单一时间点评估走向动态全程管理。作为放射科医师,我们既是这一变革的见证者,更是这一变革的推动者。唯有夯实基本功、拥抱新技术、直面临临床真问题,才能在精准医疗的时代浪潮中,真正发挥影像学的核心价值。

参考文献:

- [1] Sung H, Filho AM, Laversanne M, et al. Global cancer statistics 2024: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 34 cancers in 186 countries[J]. CA Cancer J Clin, 2026, 76(4): e70090.
- [2] Hofheinz RD, Fokas E, Benhaim L, et al. Localised rectal cancer: ESMO Clinical Practice Guideline for diagnosis, treatment and follow-up[J]. Ann Oncol, 2025, 36(9): 1007-1024.
- [3] 陈浩权, 王屹. 直肠癌新辅助治疗效果评价——从大体影像到 AI 辅助评价体系建立[J]. 放射学实践, 2026, 41(9): 1013-1018.
- [4] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 中华医学会肿瘤学分会. 中国结直肠癌诊疗规范(2023 年版)[J]. 中华外科杂志, 2023, 61(8): 617-644.
- [5] 袁渊, 马晓璐, 陆建平, 等. 裂隙瘢痕评分方法评估局部进展期直肠癌肿瘤退缩分级的价值[J]. 放射学实践, 2026, 41(9): 983-991.
- [6] 张静, 罗彦, 熊子曼, 等. 直肠癌盆腔放疗后闭孔内肌面积时序演变[J]. 放射学实践, 2026, 41(9): 992-997.
- [7] Marra A, Morganti S, Pareja F, et al. Artificial intelligence entering the pathology arena in oncology: current applications and future perspectives[J]. Ann Oncol, 2025, 36(7): 712-725.
- [8] Feng L, Liu Z, Li C, et al. Development and validation of a radiopathomics model to predict pathological complete response to neoadjuvant chemoradiotherapy in locally advanced rectal cancer: a multicentre observational study[J]. Lancet Digit Health, 2022, 4(1): e8-e17.
- [9] 孙世超, 索龙龙, 张伍杰, 等. 基于增强 CT 影像组学结合机器学习预测结直肠癌肿瘤出芽等级的价值[J]. 放射学实践, 2026, 41(9): 1006-1012.
- [10] 刘伟森, 熊诚博, 张仪, 等. 直肠少见环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变的 MRI 影像诊断与鉴别[J]. 放射学实践, 2026, 41(9): 998-1005.

(收稿日期: 2026-08-14 修回日期: 2026-08-31)

· 直肠癌影像学专题 ·

裂隙瘢痕评分方法评估局部进展期直肠癌肿瘤退缩分级的价值

袁渊, 马晓璐, 陆建平, 邵成伟, 沈浮

【摘要】 目的:探讨基于裂隙瘢痕征(SSS)和 DWI 的裂隙瘢痕征评分(mrSSS 评分)对于诊断局部进展期直肠癌(LARC)患者新辅助放化疗(nCRT)后病理肿瘤退缩分级(TRG)的价值,并与其他常用诊断方法(内镜、mrTRG 以及 mrSSS 方法)进行对比。**方法:**回顾性连续收集 2017 年 8 月至 2022 年 7 月我院放射诊断科行高分辨率直肠 MRI 检查的 LARC 患者。根据病理 TRG 结果分为 pCR 组与非 pCR 组以及病理良好反应组与病理反应不良组。由两位放射科医师共同决定 mrSSS 评分。内镜结果分为瘢痕和非瘢痕两类。使用加权 kappa 检验计算 mrSSS 评分与病理 TRG 的一致性。计算 mrTRG、内镜、mrSSS 与 mrSSS 评分四种方法诊断 pCR 与病理良好反应的曲线下面积(AUC)等诊断参数。不同 ROC 间使用 delong 检验进行两两比较。**结果:**共有 201 例患者纳入本研究。mrSSS 评分与病理 TRG 的一致性良好,加权 kappa 值为 0.671(95%CI:0.592~0.750)。mrTRG 1、内镜、mrSSS 和 mrSSS 评分 0 分诊断 pCR 的 AUC 分别为 0.572(95%CI:0.501~0.642)、0.634(95%CI:0.563~0.700)、0.794(95%CI:0.731~0.847)和 0.834(95%CI:0.776~0.883);mrSSS 评分 0 分诊断 pCR 的 AUC 显著高于 mrTRG 1、内镜和 mrSSS(P 值分别为 <0.0001 、0.0001 和 0.0096)。mrTRG 1、内镜、mrSSS、mrSSS 评分 0~1 分诊断病理良好反应的 AUC 分别为 0.576(95%CI:0.504~0.645)、0.590(95%CI:0.519~0.659)、0.701(95%CI:0.632~0.763)和 0.866(95%CI:0.811~0.910);mrSSS 评分 0~1 分诊断病理良好反应的 AUC 显著高于 mrTRG 1、内镜和 mrSSS(P 值均 <0.0001)。**结论:**裂隙瘢痕评分(mrSSS 评分)方法与病理肿瘤退缩分级的一致性较好。mrSSS 评分诊断 pCR 以及病理良好反应的效能较高,且优于单独使用内镜、mrSSS 和 mrTRG,有利于临床治疗决策的制定。

【关键词】 直肠癌;磁共振成像;裂隙瘢痕征评分;新辅助放化疗;肿瘤退缩分级;治疗反应

【中图分类号】 R735.3; R445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2026)09-0983-09

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.09.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The value of modified MRI-based split scar sign score in evaluating tumor regression grade of locally advanced rectal cancer

YUAN Yuan, MA Xiao-lu, LU Jian-ping, et al. Department of Diagnostic Radiology, the First Affiliated Hospital of PLA Naval Medical University, Shanghai 200433, China

【Abstract】 Objective: To investigate the diagnostic performance of MRI split scar sign-based score (mrSSS score) in evaluating pathological tumor regression grade (TRG) for locally advanced rectal cancer (LARC) after neoadjuvant chemoradiotherapy (nCRT), and compare it with endoscopy, mrTRG and mrSSS. **Methods:** A retrospective continuous collection of patients with LARC who underwent high-resolution rectal MRI examination in the Department of Diagnostic Radiology of our hospital from August 2017 to July 2022 was conducted. According to pathological TRG, we divided all cases into two kinds of groups, one was grouped as pathological complete response (pCR) and non-pathological complete response, the other was grouped as pathological good response (TRG 0~1) and pathological poor response (TRG 2~3). Two radiologists jointly reviewed mrSSS scores. The results of endoscopy were divided into two sets including flat scar set and non-flat scar set. The consistency between mrSSS score and pathological TRG was calculated using Cohen's kappa test. Diagnostic parameters (for example, AUC) were calculated to assess the performance of mrTRG, endoscopy, mrSSS, mrSSS score in evaluating pCR and pathological good response. Delong tests were used to compare the ROCs. **Results:** A total of 201 patients were included in this study. The agreement between mrSSS and pathological TRG was substantial, with a weighted kappa value of 0.671 (95%CI:0.592~0.750). The AUCs of mrTRG 1, endoscopy, mrSSS and mrSSS score 0 in evaluating pCR were 0.572 (95%CI:0.501~0.642), 0.634 (95%CI:0.563~0.700), 0.794 (95%CI:0.731~0.847) and 0.834 (95%CI:0.776~0.883), respectively. The AUC of mrSSS score 0 in evaluating pCR was significantly higher than those of mrTRG 1, endoscopy and mrSSS, with P values <0.0001 , 0.0001 and 0.0096, respectively. The AUCs of mrTRG 1, endoscopy, mrSSS and mrSSS score 0~1 in evaluating pathological good response were 0.576 (95%CI:0.504~0.645), 0.590 (95%CI:0.519~0.659), 0.701 (95%CI:0.632~0.763) and 0.866 (95%CI:0.811~0.910), respectively. The AUC of mrSSS score 0~1 in evaluating pathological good response was significantly higher than those of mrTRG 1, endoscopy and mrSSS, with all P val-

作者单位:200433 上海,海军军医大学第一附属医院放射诊断科

作者简介:袁渊(1987-),男,江苏海门人,博士,副主任医师,主要从事胃肠道肿瘤影像诊断工作。

通信作者:沈浮, Email: ssff_53@163.com

ues <0.0001 . **Conclusion:** mrSSS score shows good consistency in evaluating pathological TRG, and provides better diagnostic performance in evaluating pCR and pathological good response, superior to endoscopy, mrSSS and mrTRG. It is beneficial for treatment decision in clinical practice.

【Key words】 Rectal cancer; Magnetic resonance imaging; Split scar sign-based score; Neoadjuvant chemoradiotherapy; Tumor regression grade; Treatment response

局部进展期直肠癌 (locally advanced rectal cancer, LARC) 临床上通常使用新辅助放化疗 (neoadjuvant chemoradiotherapy, nCRT) 和全直肠系膜切除 (total mesorectal resection, TME) 联合的方法进行综合治疗^[1,2]。而 nCRT 后的治疗反应对 LARC 患者的治疗策略以及预后评估起着至关重要的作用^[3-6]。伴随 nCRT 的广泛应用, 约 15%~27% 的 LARC 患者可以达到病理完全缓解 (pathological complete response, pCR), pCR 相较于非 pCR 的 LARC 患者具有更好的生存结局, 可以明显提升总生存时间和无病生存期, 同时减少局部复发率^[3,5,7]。相应地, 临床诊断完全缓解的患者甚至可以采用非手术治疗策略 (non-operative management, NOM)^[3,4,6], 因此, 在 nCRT 后如何准确选择继续行 TME 手术还是采取 NOM 策略, 这是目前 LARC 治疗中一个关键且尚未解决的临床决策难题, 因为对于患者而言, 合适的选择可以免于手术同时拥有良好预后, 反之, 可能会造成患者病情进展从而失去根治手术的机会。

如今临床上常用于评估 LARC 新辅助放化疗后疗效的手段有直肠指诊、癌胚抗原 (carcinoma embryonic antigen, CEA) 检查、内镜检查、MRI 等。但是, 现有方法无法可靠模拟病理肿瘤退缩分级 (tumor regression grade, TRG)。有研究显示, nCRT 前较低水平的 CEA 更多地出现在 pCR 患者中, 但是其诊断效能不确切^[3,5]。虽然内镜检查对于 pCR 的判断显示出较好的诊断价值, 判断完全反应的准确率达到 89% (95%CI: 78%~100%)^[3,6], AUC 达到 0.80 (95%CI: 0.73~0.87)~0.84 (95%CI: 0.78~0.91), 同时准确率达 73%~80%, 但这是一种侵入性检查, 且无法评估黏膜面以下的情况^[3,7]。MRI 是一种指南推荐的基线以及疗效评估方式, 可全面观察病灶以及病灶周围情况; 而 mrTRG (MRI-based tumor regression grade) 是临床常用的一种基于 MRI 的 TRG 分级方法, 但其与病理 TRG 的一致性不佳, 特异度较高, 敏感度较低^[3,8-13]。Santiago 等于 2019 年提出了一个基于 MRI-T₂WI 序列的重要影像学征象: 裂隙瘢痕征 (MRI-based split scar sign, mrSSS), 该征象可以用于预测 LARC 患者持续性完全缓解 (sustained complete response, SCR), 特异度高达 97%^[3,14]。同时, DWI 是一种可以在体检测体内水分子运动特性的功能性磁共

振检查, 其已被证实可以辅助直肠癌新辅助治疗后的疗效评价^[15-19]。mrSSS 这个重要的影像学征象为临床评估 nCRT 后 LARC 患者的治疗疗效提供了一个很有前景的新方法, 但该征象是基于单一序列的二分类征象, 且尚未形成分级体系; 目前已有研究发现增加 DWI 序列的联合诊断可以展示出更高的诊断效能^[20]。由此, 笔者尝试联合 T₂WI、DWI 的不同表现进行评分, 以精准评估 LARC 新辅助放化疗疗效。因此, 结合 DWI 的 mrSSS 评分是否可以进一步提高诊断效能, 需要进一步研究。本研究通过综合 nCRT 后的 LARC 在 T₂WI 和 DWI 上不同的表现使用一种评分方法探讨其在评估新辅助放化疗疗效中的价值, 同时与其他常用诊断方法进行对比。

材料与方法

1. 病例资料

回顾性连续性收集海军军医大学第一附属医院肛肠外科 2017 年 8 月至 2022 年 7 月经肠镜活检确诊直肠癌且在我院放射诊断科行高分辨率直肠 MRI 检查的患者。病例纳入、排除标准见图 1。

2. 治疗方案

入组患者均在术前完成全程同步放化疗方案, 总剂量 45~50 Gy, 分 25~28 次并于 5~5 周半完成, 同时给予化疗 (静脉滴注 5-氟尿嘧啶, 1200 mg/m²/天或口服卡培他滨 1000 mg/m²)。手术治疗: nCRT 后, 采用全直肠系膜切除手术的根治性手术方案。

3. MRI 检查方法

高分辨率直肠 MRI 使用 4 台 MRI 仪器进行扫描, 并使用腹部相控阵线圈。所有患者在检查前常规

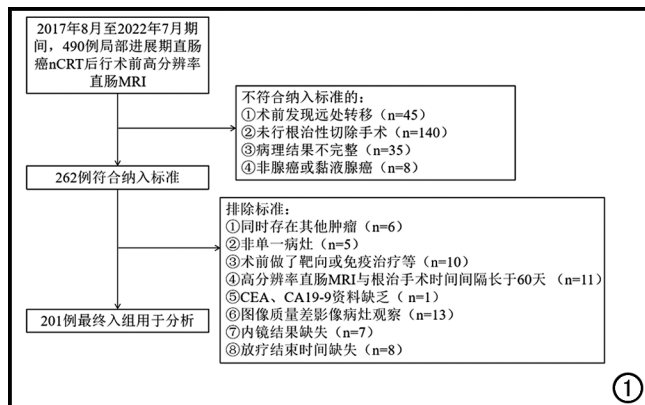


图 1 研究流程图。

使用一支开塞露(20 mL 甘油)清洁肠道。高分辨率直肠 MRI 检查序列包括矢状面 T₂WI 及横轴面 T₁WI、高分辨率 T₂WI、扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)及对比增强 T₁WI。高分辨率 T₂WI 为斜横轴面,扫描线垂直于病变段肠管的长轴,扫描参数见表 1。

4.图像分析

所有图像均在图像存档和通信系统工作站(GE PACS RA1000)上进行判读。所有放射科医师对所有病例的临床、病理结果均不知晓。首先由两位放射诊断科医师(医师 1 和医师 2,分别有 10 年和 14 年放射诊断经验)独立进行阅片并记录基于 T₂WI 和 DWI 的评分结果以及总分,这是为了评估不同评分的两位观察者间一致性;然后由另外两位医师(医师 3 和医师 4,分别有 14 年和 16 年放射诊断经验)以讨论达成一致的方式给出最终影像评估结果(结果用于最终的统计分析),包括 T₂WI 评分、DWI 评分、mrSSS 评分、mrTRG。所有参与评估的放射科医师对 mrSSS 评分的定义均进行了充分的学习。

裂隙瘢痕评分(mrSSS 评分):笔者在工作中发现 LARC 患者 nCRT 后,基于 T₂WI 的表现主要分三种:裂隙瘢痕征阳性、全病灶纤维化和混杂信号。因此,基于 T₂WI 的评分分为 0 分(裂隙瘢痕征阳性, mrSSS +, 表现为病灶治疗区域内层和外层的低信号,中间层的中等信号或高信号,图 2a)^[14]、1 分(全纤维化,表现为病灶治疗后区域的弥漫低信号,图 2b)和 2 分(有肿瘤信号,表现为病灶治疗区域的混杂信号,图 2c)。基

于 DWI 的评分分为 0 分(扩散不受限,提示原发肿瘤区域无肿瘤残余,图 3a)和 1 分(扩散受限,提示原发肿瘤区域有肿瘤残余,图 3b)。mrSSS 评分总分=基于 T₂WI 的评分+基于 DWI 的评分,总分最低为 0 分,最高为 3 分。

mrSSS、mrTRG:mrSSS 为基于 T₂WI 的征象二分类,分为 mrSSS(+)和 mrSSS(-),分别对应上述的 T₂WI 评分 0 分和 1~2 分。基于 MRI 的 mrTRG 诊断标准^[3,8]使用的是 T₂WI 单序列,通过分析肿瘤和纤维化组织成分的比重来判断不同的分级。

5.内镜结果分析

内镜为 nCRT 之后、手术之前进行的检查。结合检查时的内镜报告,所有内镜图片由 3 位有经验的结肠镜医生进行回顾性分析,3 位专家对患者的术后病理资料均不知情,专家 1 有 28 年内镜检查经验,专家 2 有 14 年内镜检查经验,当两位专家意见不一致时,由另一位专家 3(有 35 年内镜检查经验)给出最终结果。内镜结果分为三类:①平坦瘢痕;②平坦溃疡;③残余肿块。统计采用二分类分析,瘢痕归为一类,溃疡和残余肿块归为另一类^[21]。

6.病理分析

肿瘤退缩分级是基于美国癌症联合委员会(American joint committee on cancer, AJCC)癌症分期手册第八版的肿瘤退缩分级系统。为了对多种方法(mrSSS 评分、内镜和 mrTRG)进行详细的诊断价值对比,本研究使用两种两分类的分组方法。一种分为病理完全缓解和非病理完全缓解,即pCR与非pCR;

表 1 高分辨率直肠 MRI 检查的 T₂WI 序列具体扫描参数

检查设备	GE Discovery 750w	GE Signa HDX	SIEMENS MAGNETOM Skyra	SIEMENS MAGNETOM Avanto
场强	3.0T	3.0T	3.0T	1.5T
斜轴面 T ₂ WI				
回波链长度	32	14	16	15
视野 (mm)	200×200	180×180	180×180	180×180
层厚 (mm)	4	3	3	3
矩阵	352×352	288×288	320×320	320×320
重复时间/回波时间 (ms)	6538/116	4000/113	4000/108	4000/90
带宽 (kHz)	62.5	83.3	108/Pixel	182/Pixel
翻转角 (°)	110	90	160	150
横轴面对比增强 T ₁ WI				
视野 (mm)	340×340	330×330	300×243.9	380×308.9
层厚 (mm)	4	5	4.5	3
矩阵	256×224	320×256	288×201.6	320×217.6
重复时间/回波时间 (ms)	4/最小	1/最小	5.9/2.5	4.7/2.8
带宽 (kHz)	142.9	166.7	390/pixel	400/pixel
翻转角 (°)	12	12	9	10
横轴面 DWI				
视野 (mm)	320×256	350×350	380×380	380×285
层厚 (mm)	6	6	5	6
矩阵	128×128	130×96	150×150	128×128
重复时间/回波时间 (ms)	2840/最小	4500/最小	6300/89	4000/75
b 值 (s/mm ²)	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000

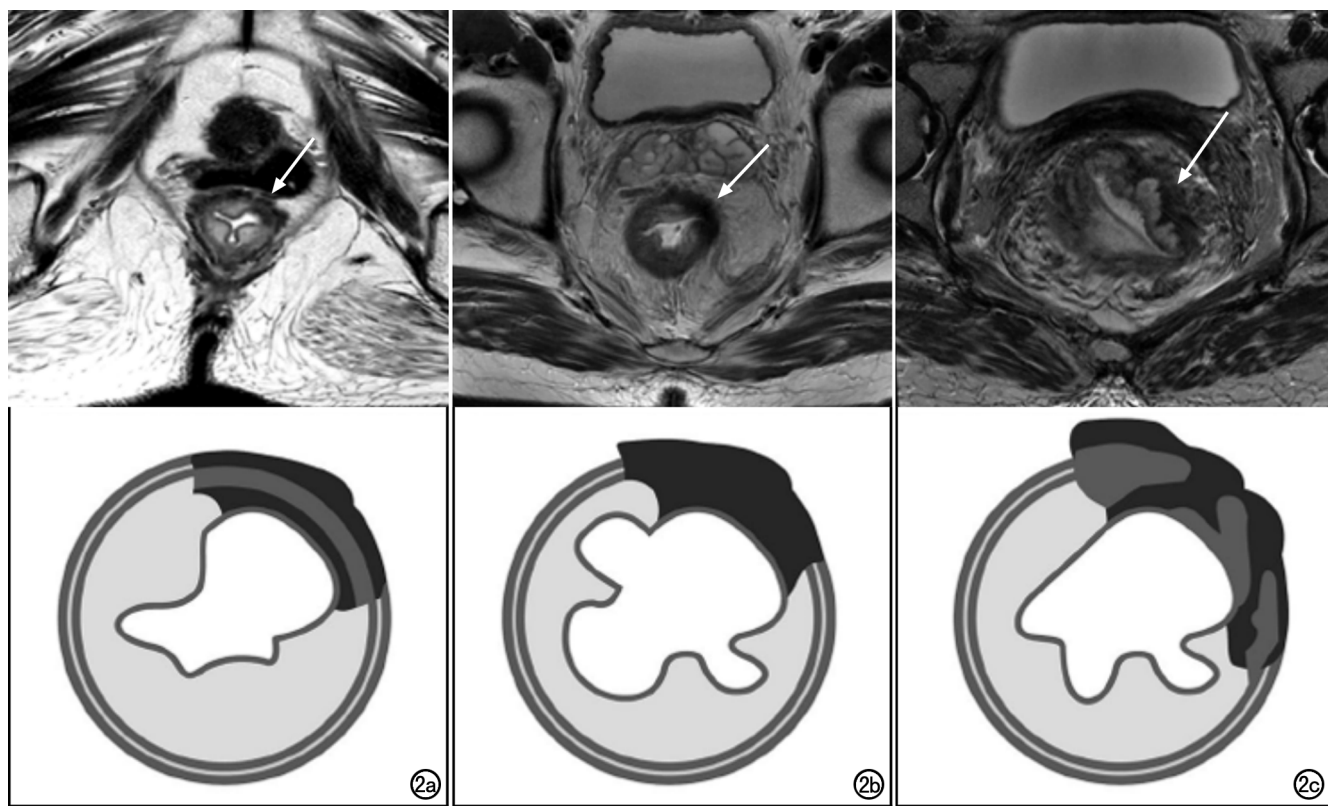


图2 不同 T₂WI 表现对应的评分。a) 箭所示为 mrSSS(+), 表现为肿瘤区域内层呈明显规则的低信号(对应的是纤维化的黏膜下层, 表面覆盖正常黏膜或由于溃疡的存在无黏膜组织), 中间层为中等信号或高信号(对应的是明显增厚的部分纤维化的固有肌层或黏液变的固有肌层), 最外层为不同形态、不同厚度的 T₂WI 低信号, T₂WI 评分为 0 分; b) 原发肿瘤部位(箭)在 T₂WI 上呈弥漫低信号, T₂WI 评分为 1 分; c) 原发肿瘤部位(箭)在 T₂WI 上呈低信号与中等信号混合, T₂WI 评分为 2 分。

病理完全缓解(pathological complete response, pCR)是指 TRG 0 级, 非病理完全缓解指 TRG 1~3 级, 研究终点为多种方法诊断 pCR 的效能。另一种两分类方法分为病理良好反应和病理反应不良, 病理良好反应包括 TRG 0 级和 TRG 1 级; 病理反应不良包括 TRG 2 级和 TRG 3 级, 研究终点为多种方法诊断病理良好反应的效能。病理肿瘤退缩分级标准如下: 0 级(完全反应), 无可见的癌细胞; 1 级(中度反应), 仅小簇或单个癌细胞残留; 2 级(轻度反应), 有癌细胞残留, 但是以纤维化为主; 3 级(反应不良), 仅消灭少量癌细胞或未杀死任何癌细胞, 大量癌细胞残留^[3,4]。

7. 统计学分析

采用 Medcalc(v13.0, 比利时)进行统计学分析。分类变量以频数和百分比表示。使用 Kolmogorov-Sminov 检验分析连续性变量是否符合正态分布, 连续性变量以中位数(四分位间距)或平均值±标准差表示。Cohen's kappa (k) 检验用于不同观察者间一致性的评价和影像结果与病理结果的一致性检验(kappa 值 0~0.2 为一致性差, 0.2~0.4 为一致性一般, 0.4~0.6 为一致性中等, 0.6~0.8 为一致性良好, 0.8~1.0 为一致性极好)。mrSSS 评分为四分类结果, 用于与病理 TRG 的加权 kappa 一致性分析。

计算诊断效能时, 基于统计学考虑对 mrSSS 评分进行二分类转换。对所有诊断方法绘制受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线并计算曲线下面积(area under curve, AUC), Delong 检验用于不同 ROC 曲线的 AUC 比较。决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)、校正曲线用于诊断效能

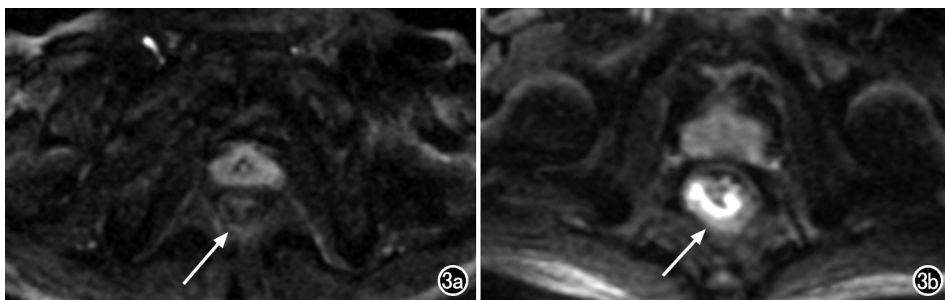


图3 不同 DWI 表现对应的评分。a) DWI 扩散不受限, 评分为 0 分, 原发肿瘤部位与正常肠壁相比没有任何的高信号(箭); b) DWI 扩散受限, 评分为 1 分, 在原发肿瘤部位残余高信号(箭)。

评估。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1.临床资料

本研究共纳入 201 例 LARC 患者,这些患者均在行长程 nCRT 后复查了高分辨率直肠 MRI 以评估治疗疗效,201 例患者的临床病理特征见表 2,其中男性共 139 例(69.2%),女性 62 例(30.8%),年龄中位数 58.0 岁(年龄范围为 22.0~78.0 岁)。

表 2 201 例 LARC 患者的临床特征

临床特征	总数(n=201)
性别	
男性	139(69.2%)
女性	62(30.8%)
年龄(岁)	
中位数 58.0	
(IQR:49.0,67.0,范围 22.0~78.0)	
BMI(kg/m ²)	
平均值 24.09±2.85	
(范围 16.56~31.51)	
检查与手术时间间隔(天)	
8.0(IQR:4.0,16.0,范围 0~54)	
放疗结束与手术时间间隔(天)	
75.0(IQR:65.0,93.5,范围 8~525)	
病理类型(黏液腺癌/腺癌)	
癌	185(92.0%)
黏液腺癌	16(8.0%)
CEA (ng/mL)	
阴性	160(79.6%)
阳性	41(20.4%)
CA19-9(U/mL)	
阴性	192(95.5%)
阳性	9(4.5%)
ypT	
ypT0	40(19.9%)
ypT1	11(5.5%)
ypT2	59(29.3%)
ypT3	89(44.3%)
ypT4	2(1.0%)
ypN	
ypN0	147(73.1%)
ypN1	45(22.4%)
ypN2	9(4.5%)
病理 TRG	
病理 TRG 0	39(19.4%)
病理 TRG 1	47(23.4%)
病理 TRG 2	83(41.3%)
病理 TRG 3	32(15.9%)

2.mrSSS 评分与病理 TRG 的一致性

mrSSS 评分(四分类)与病理 TRG(四分类)的一致性良好,加权 kappa 值为 0.671(95%CI: 0.592~0.750)。mrSSS 评分与病理 TRG 一致的共 141 例(图 4、5),不一致的共 60 例(表 3)。mrSSS 评分诊断病理 TRG 的正确率、高估率、低估率见表 4。高估指的是 mrSSS 评分值高于病理 TRG 值,也就是可能会导致高估病情,从而采用更为激进的治疗方式,增加不必要的负担;低估指的是 mrSSS 评分值低于病理 TRG 值,

可能会导致低估病情,导致病情进展延误治疗。

表 3 mrSSS 评分与病理 TRG 的一致性 (例)

mrSSS 评分	病理 TRG			
	0	1	2	3
0	28	3	5	0
1	8	34	9	1
2	1	7	52	4
3	2	3	17	27

表 4 mrSSS 评分诊断病理 TRG 的正确率、高估率、低估率

mrSSS 评分	正确率 (%)	高估率 (%)	低估率 (%)
0 分	77.78 (28/36)	0 (0/36)	22.22 (8/36)
1 分	65.38 (34/52)	15.38 (8/52)	19.23 (10/52)
2 分	81.25 (52/64)	12.50 (8/64)	6.25 (4/64)
3 分	55.10 (27/49)	44.90 (22/49)	0 (0/49)
总体	70.15(141/201)	18.90(38/201)	10.95(22/201)

3.不同观察者间的一致性

医师 1 与医师 2 的 T₂WI 评分、DWI 评分、mrSSS 一致性均为中等,加权 kappa 值分别为 0.541 (95%CI:0.449~0.634)、0.584 (95%CI: 0.473~0.695)、0.558 (95%CI:0.484~0.631)。

4.mrTRG、内镜、mrSSS、mrSSS 评分四种方法诊断 pCR 以及病理良好反应的效能

mrSSS 评分 0 分是指评分为 0 分与 1~3 分的两分类结果,这种分类方法是为了更好地展示这个评分诊断 pCR 的效能,进一步指导临床进行 NOM 还是 TME。而 mrSSS 评分 0~1 分是指评分为 0~1 分与 2~3 分的两分类结果,这种分类方法是为了更好地展示这个评分诊断病理良好反应的效能,提示患者相对良好的预后。mrTRG 1(将 mrTRG 分为 mrTRG 1 与 mrTRG 2~5 的二分类方法)与内镜诊断 pCR 的 AUC 差异无统计学意义($P=0.2081$);mrSSS 诊断 pCR 的 AUC 显著高于 mrTRG 1($P=0.0001$);mrSSS 诊断 pCR 的 AUC 显著高于内镜($P=0.0037$);mrSSS 评分 0 分诊断 pCR 的 AUC 显著高于 mrTRG 1、内镜和 mrSSS(P 值分别为 <0.0001 、 0.0001 和 0.0096 ,表 5、图 6a)。mrTRG 1 与内镜诊断病理良好反应的 AUC 差异无统计学意义($P=0.6330$);mrSSS 诊断病理良好反应的 AUC 显著高于 mrTRG 1($P=0.0004$);mrSSS 诊断病理良好反应的 AUC 显著高于内镜($P=0.0031$);mrSSS 评分 0~1 分诊断病理良好反应的 AUC 显著高于 mrTRG 1、内镜和 mrSSS(P 值均 <0.0001 ,表 6、图 6b)。Delong 检验多重比较采用 Bonferroni 方法进行校正,经校正后 P 值仍 <0.05 。

讨 论

LARC 患者 nCRT 后疗效的判断是决定下一步

表 5 四种方法诊断 pCR 的效能对比

诊断方法	mrTRG 1	内镜	mrSSS	mrSSS 评分 0 分
AUC	0.572	0.634	0.794	0.834
95%CI	0.501~0.642	0.563~0.700	0.731~0.847	0.776~0.883
敏感度(%)	23.08	38.46	69.23	71.79
特异度(%)	91.36	88.27	89.51	95.06
正确率(%)	78.11	78.61	85.57	90.55
PPV(%)	39.13	44.12	61.36	77.78
NPV(%)	83.15	85.63	92.36	93.33
PLR	2.67	3.28	6.60	14.54
NLR	0.84	0.70	0.34	0.30
P 值	<0.0001 ^{*1}	0.0001 ^{*2}	0.0096 ^{*3}	

注:内镜:为瘢痕与非瘢痕表现的两分类结果。mrSSS 评分 0 分指评分为 0 分与 1~3 分的两分类结果。PPV:阳性预测值;NPV:阴性预测值;PLR:阳性似然比(positive likelihood ratio, PLR);NLR:阴性似然比(negative likelihood ratio, PLR);Delong 检验结果:^{*1} mrSSS 评分 0 分与 mrTRG 1; ^{*2} mrSSS 评分 0 分与内镜; ^{*3} mrSSS 评分 0 分与 mrSSS。

表 6 四种方法诊断病理良好反应的效能对比

诊断方法	mrTRG 1	内镜	mrSSS	mrSSS 评分 0~1 分
AUC	0.576	0.590	0.701	0.866
95%CI	0.504~0.645	0.519~0.659	0.632~0.763	0.811~0.910
敏感度(%)	20.24	27.38	45.24	86.90
特异度(%)	94.87	90.60	94.87	86.32
正确率(%)	63.68	64.18	74.13	86.57
PPV(%)	73.91	67.65	86.36	82.02
NPV(%)	62.36	63.47	70.70	90.18
PLR	3.95	2.91	8.82	6.35
NLR	0.84	0.80	0.58	0.15
P 值	<0.0001 ^{*1}	<0.0001 ^{*2}	<0.0001 ^{*3}	

注:内镜:为瘢痕与非瘢痕表现的两分类结果。mrSSS 评分 0~1 分是指评分为 0~1 分与 2~3 分的两分类结果。Delong 检验结果:^{*1} mrSSS 评分 0~1 分与 mrTRG 1; ^{*2} mrSSS 评分 0~1 分与内镜; ^{*3} mrSSS 评分 0~1 分与 mrSSS。

治疗策略的关键一步,尤其是患者是否能达到 pCR,这直接决定了患者是否可以采用观察与等待策略,从而避免了手术及由于手术引发的相关并发症。本研究结果显示,基于 mrSSS 和 DWI 的评分系统与病理 TRG 的一致性较好(kappa 值 0.671,95%CI:0.592~0.750)。同时无论是诊断 pCR 或者病理良好反应,mrSSS 评分系统均优于 mrTRG、内镜、mrSSS 三种方法。

病理 TRG 有多种分类方法,比较常用的是 AJCC 和 NCCN 的分类方法,这两种均是四分类的方法,不同等级的退缩分级对应的是不同的预后和不一样的治疗策略^[3,22-29]。mrTRG 与病理 TRG 的一致性较差,实用性不佳^[3,30-31],而且 mrTRG 同时存在观察者间一致性不佳的问题^[3,10,30,32-33]。因此急需一种可以与病理 TRG 一一对应的、便于临床理解和使用的术前评估评分系统。本研究中的 mrSSS 评分系统可以较好地解决这个问题,其与 NCCN 的病理 TRG 四分类可以较好地对应,一致度也较好,同时不同观察者间一致性尚可。虽然 mrSSS 评分总体拥有 70.15%的正确率,但不可忽视的是,其同时有一定的高估率和低估率。高估多见的有三种情况,占了总体高估病例的 84.2%:第一种情况是 mrSSS 评分为 1 分,实际为病理 TRG 0 级,这种情况可能是由于纤维化比较完全所

导致;第二种情况是 mrSSS 评分为 2 分,实际为病理 TRG 1 级,这种情况是由于在瘢痕里发现了不均质的高信号,实际情况可能是我们所能发现的高信号均为黏液湖信号,而看不到真正残留的小簇肿瘤组织;第三种情况是 mrSSS 评分为 3 分,实际为病理 TRG 2 级,这种情况比较多见,因为毕竟本研究的评分系统(只涉及癌细胞残留的定性诊断,而没有涉及是否以纤维化为主)与病理判断的标准(有纤维化为主的癌细胞残留)有所差异。低估最多见的一种情况是 mrSSS 评分为 1 分,实际为病理 TRG 2 级,本研究中一共有 9 例,占有低估病例的 40.91%,这可能是由于在 T₂WI 图像中病灶区域肿瘤组织被裂隙瘢痕征象掩盖导致评分低估了实际情况。以上可能性均为笔者的推测,并无金标准病理的对照研究证实,未来需要进行影像与病理的对照研究。

mrTRG 1~2 级与病理 TRG 0~1 级的定义是一致的,因此文献中也经常使用 mrTRG 1~2 来诊断 pCR^[3,34-35]。本研究使用 mrTRG 1 诊断 pCR 的 AUC 仅为 0.572(95%CI:0.501~0.642),虽然 mrTRG 1 具有较高的特异度,但其敏感度很低,这是导致其整体诊断效能不高的原因。虽然 mrSSS 评分 0 分的特异度相较 mrTRG 1 提升不多,但在敏感度方面有了明显提升,这就使得 mrTRG 1 诊断 pCR 的效能比不上

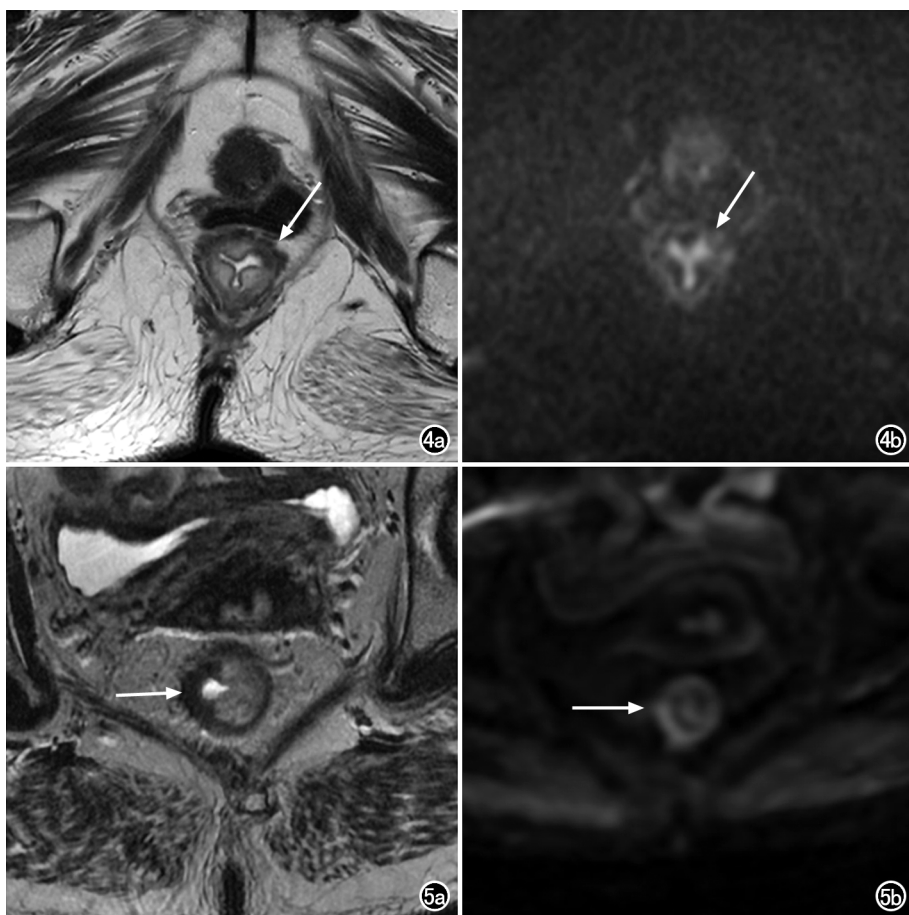


图4 nCRT后LARC患者,女,59岁,mrSSS评分0分病理TRG0级(pCR)。a)原发肿瘤部位(箭)在 T_2 WI上表现为内层、外层的低信号和中间层的中等信号,提示mrSSS(+),根据预设评分标准判定为 T_2 WI0分;b)原发肿瘤部位(箭)在DWI上表现为扩散不受限,根据预设评分标准判定为DWI0分。图5 nCRT后LARC患者,女,66岁,mrSSS评分1分,病理TRG1级。a)原发肿瘤部位(箭)在 T_2 WI上表现为弥漫低信号,提示全纤维化,根据预设评分标准判定为 T_2 WI1分;b)原发肿瘤部位(箭)在DWI上表现为扩散不受限,根据预设评分标准判定为DWI0分。

mrSSS评分系统。内镜表现也可用于诊断pCR,Felder等^[36]发现相较于内镜下的其他征象,白色平坦瘢痕这个征象与临床完全缓解这个结局关联性最强,

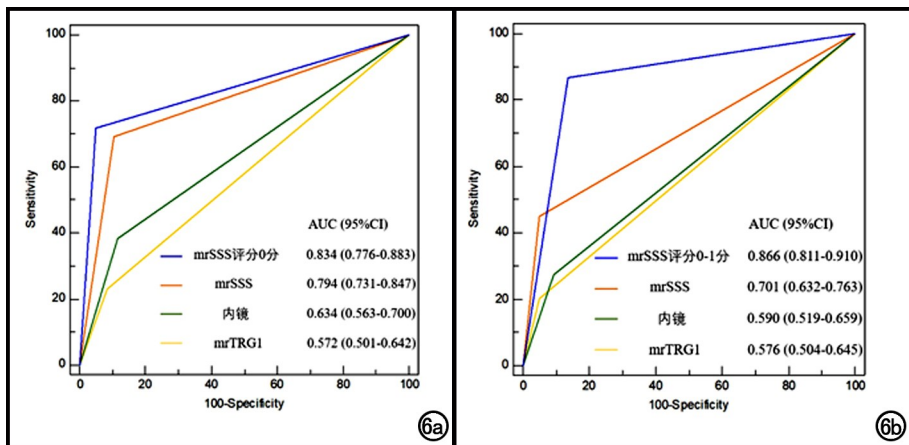


图6 a)mrTRG1、内镜、mrSSS、mrSSS评分0分诊断pCR的ROC曲线;b)mrTRG1、内镜、mrSSS、mrSSS评分0~1分诊断病理良好反应的ROC曲线。

优势比(odds ratio,OR)值为3.92($P < 0.0001$)。van der Sande等^[37]也认为平坦的瘢痕是诊断完全反应最有价值的一种内镜表现。本研究中内镜结果诊断pCR的AUC为0.590(95%CI:0.519~0.659),其诊断效能低于mrSSS评分0分。在评估整体病灶的时候,内镜由于其局限性只能观察到黏膜面的肿瘤残余情况,不能看到黏膜面下的肿瘤残留情况;而mrSSS评分不仅能使用 T_2 WI序列观察原发病灶部位与周边器官组织,还能使用DWI序列从另一个维度进一步判断原发病灶部位的肿瘤残存情况,这是mrSSS评分可以更好地评估pCR的直接原因。mrSSS评分不仅可以诊断pCR,还能很好地评估病理良好反应,笔者发现使用mrSSS评分0~1分诊断病理良好反应的效能也优于mrTRG和内镜。因此,mrSSS评分系统对pCR及病理良好反应具有良好的诊断能力。

虽然mrSSS单一征象诊断pCR及病理良好反应均有较好的效能,但DWI序列的优势并没有被充分发挥,本研究中有9例病例 T_2 WI评分为0分,但DWI发现了异常高信号,从而总评分为1分,有35例 T_2 WI评分为1分的病例中发现了隐藏在纤维化组织中的DWI高信号(可能为肿瘤残余组织),从而减少了低估与误判。因此,mrSSS评分系统在结合了DWI序列后,由于其高敏感度可以更好地发现纤维化病灶中的肿瘤组织,减少 T_2 WI单序列局限性导致的低估,同时增加了肿瘤评估的一个维度,从而进一步提高了mrSSS评分与病理TRG的一致性。

本研究存在以下局限性:首先,这是一项单中心、回顾性研究,黏液腺癌和高位直肠癌病例数较少,有选择偏倚存在的可能,因此有需要联合其他多个医疗中心并进行前瞻性研究的必要,以进一步

验证其诊断效能及泛化性;其次,没有对所有病例进行病理大切片的详细对照研究,以进一步探讨影像表现与病理表现之间的关联。

综上所述,裂隙瘢痕评分方法(mrSSS 评分)与病理肿瘤退缩分级的一致性较好。mrSSS 评分对 LARC 患者 nCRT 后新辅助放化疗疗效的诊断效能较高,方法简便易操作,且优于单独使用内镜、mrSSS 和 mrTRG,有利于临床优化治疗决策。

参考文献:

- [1] van Gijn W, Marijnen CA, Nagtegaal ID, et al. Preoperative radiotherapy combined with total mesorectal excision for resectable rectal cancer: 12-year follow-up of the multicentre, randomised controlled TME trial[J]. *Lancet Oncol*, 2011, 12(6): 575-582.
- [2] Oronskey B, Reid T, Larson C, et al. Locally advanced rectal cancer: the past, present, and future[J]. *Semin Oncol*, 2020, 47(1): 85-92.
- [3] 梁玉汶, 杜小波. 局部晚期直肠癌新辅助治疗反应评估及预测研究进展[J]. *华西医学*, 2024, 39(5): 825-832.
- [4] Benson AB, Venook AP, Adam M, et al. NCCN Guidelines® Insights: Rectal Cancer, Version 3. 2024 [J]. *J Natl Compr Canc Netw*, 2024, 22(6): 366-375.
- [5] Maas M, Nelemans PJ, Valentini V, et al. Long-term outcome in patients with a pathological complete response after chemoradiation for rectal cancer: a pooled analysis of individual patient data [J]. *Lancet Oncol*, 2010, 11(9): 835-844.
- [6] Martin ST, Heneghan HM, Winter DC. Systematic review and meta-analysis of outcomes following pathological complete response to neoadjuvant chemoradiotherapy for rectal cancer[J]. *Br J Surg*, 2012, 99(7): 918-928.
- [7] Yang J, Wang W, Luo Y, et al. Effect of pathological complete response after neoadjuvant chemoradiotherapy on postoperative complications of rectal cancer: a systematic review and meta-analysis[J]. *Tech Coloproctol*, 2022, 26(3): 163-174.
- [8] Patel UB, Taylor F, Blomqvist L, et al. Magnetic resonance imaging-detected tumor response for locally advanced rectal cancer predicts survival outcomes: MERCURY experience[J]. *J Clin Oncol*, 2011, 29(28): 3753-3760.
- [9] Dworak O, Keilholz L, Hoffmann A. Pathological features of rectal cancer after preoperative radiochemotherapy[J]. *Int J Colorectal Dis*, 1997, 12(1): 19-23.
- [10] Sclafani F, Brown G, Cunningham D, et al. Comparison between MRI and pathology in the assessment of tumour regression grade in rectal cancer[J]. *Br J Cancer*, 2017, 117(10): 1478-1485.
- [11] Jang JK, Choi SH, Park SH, et al. MR tumor regression grade for pathological complete response in rectal cancer post neoadjuvant chemoradiotherapy: a systematic review and meta-analysis for accuracy[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(4): 2312-2323.
- [12] Habr-Gama A, Perez RO, Nadalin W, et al. Operative versus non-operative treatment for stage 0 distal rectal cancer following chemoradiation therapy: long-term results[J]. *Ann Surg*, 2004, 240(4): 711-717.
- [13] Kimura C, Crowder SE, Kin C. Is it really gone? assessing response to neoadjuvant therapy in rectal cancer[J]. *J Gastrointest Cancer*, 2023, 54(3): 703-711.
- [14] Santiago I, Barata M, Figueiredo N, et al. The split scar sign as an indicator of sustained complete response after neoadjuvant therapy in rectal cancer[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(1): 224-238.
- [15] 张晓燕, 李晓婷, 史燕杰, 等. 高分辨率 MR T₂WI 联合 DWI 评价直肠癌新辅助治疗后病理学完全缓解[J]. *中国介入影像与治疗学*, 2017, 14(3): 164-168.
- [16] 刘雅胜, 郑志坚, 龙曦, 等. 磁共振扩散加权成像对直肠癌新辅助放化疗后病理完全缓解的预测价值[J]. *现代医院*, 2020, 20(5): 775-778.
- [17] 董龙春, 李一鸣, 孙超, 等. 局部进展期直肠癌新辅助放化疗后肿瘤退缩分级: MRI 与病理对照研究[J]. *磁共振成像*, 2022, 13(9): 91-94, 103.
- [18] 宋天彬, 卢洁. 磁共振扩散加权成像在直肠癌新辅助放化疗中的应用价值[J]. *协和医学杂志*, 2017, 8(Z1): 100-105.
- [19] 刘文娟, 王振常, 李玉意, 等. 直肠癌新辅助治疗后再分期的影像学评估及进展[J]. *放射学实践*, 2022, 37(7): 899-903.
- [20] 李戟毗, 毛蕾, 周雪婷, 等. MRI 评估直肠癌新辅助治疗完全缓解的 Meta 分析[J]. *磁共振成像*, 2020, 11(11): 1010-1018.
- [21] Yuan Y, Zheng K, Zhou L, et al. Predictive value of modified MRI-based split scar sign (mrSSS) score for pathological complete response after neoadjuvant chemoradiotherapy for patients with rectal cancer[J]. *Int J Colorectal Dis*, 2023, 38(1): 40.
- [22] 谭伊诺, 陈海燕, 丁克峰. 肿瘤退缩分级标准的对比及其在直肠癌诊治中的应用进展[J]. *中华结直肠疾病电子杂志*, 2016, 5(6): 458-462.
- [23] 钮东峰, 薛卫成. 直肠癌新辅助治疗后病理评估[J]. *中华胃肠外科杂志*, 2018, 21(6): 632-636.
- [24] Trakarnsanga A, Gönen M, Shia J, et al. Comparison of tumor regression grade systems for locally advanced rectal cancer after multimodality treatment[J]. *J Natl Cancer Inst*, 2014, 106(10): dju248 [pii].
- [25] Dhadda AS, Dickinson P, Zaitoun AM, et al. Prognostic importance of Mandard tumour regression grade following pre-operative chemo/radiotherapy for locally advanced rectal cancer[J]. *Eur J Cancer*, 2011, 47(8): 1138-1145.
- [26] Mancini R, Pattaro G, Diodoro MG, et al. Tumor regression grade after neoadjuvant chemoradiation and surgery for low rectal cancer evaluated by multiple correspondence analysis: ten years as minimum follow-up[J]. *Clin Colorectal Cancer*, 2018, 17(1): e13-e19.
- [27] Ulusoy C, Kamali GH, Nikolovski A. Analysis of survival in complete pathological response after long-course chemoradiotherapy in patients with advanced rectal cancer[J]. *Curr Oncol*, 2023, 30(1): 1054-1064.
- [28] Kong JC, Guerra GR, Warriar SK, et al. Prognostic value of tumour regression grade in locally advanced rectal cancer: a systematic review and meta-analysis [J]. *Colorectal Dis*, 2018, 20(7): 574-585.
- [29] McCoy MJ, Hemmings C, Hillery S, et al. Neoadjuvant chemoradiotherapy for rectal cancer: how important is tumour regression [J]. *ANZ J Surg*, 2017, 87(12): E233-E239.
- [30] Yoen H, Park HE, Kim SH, et al. Prognostic value of tumor regression grade on MR in rectal cancer: a large-scale, single-center experience[J]. *Korean J Radiol*, 2020, 21(9): 1065-1076.

[31] Niu S,Chen Y,Peng F,et al.The role of MRI after neochemora-
diotherapy in predicting pathological tumor regression grade and
clinical outcome in patients with locally advanced rectal adeno-
carcinoma[J].Front Oncol,2023,13:1118518.

[32] Achilli P,Magistro C,Abd El Aziz MA,et al.Modest agreement
between magnetic resonance and pathological tumor regression
after neoadjuvant therapy for rectal cancer in the real world[J].
Int J Cancer,2022,151(1):120-127.

[33] Aker M,Boone D,Chandramohan A,et al.Diagnostic accuracy of
MRI in assessing tumor regression and identifying complete re-
sponse in patients with locally advanced rectal cancer after neo-
adjuvant treatment[J].Abdom Radiol (NY),2018,43(12):3213-
3219.

[34] Qin S,Chen Y,Liu K,et al.Predicting the response to neoadju-
vant chemoradiation for rectal cancer using nomograms based on

MRI tumour regression grade[J].Cancer Radiother, 2024, 28
(4):341-353.

[35] Wan L,Zhang C,Zhao Q,et al.Developing a prediction model
based on MRI for pathological complete response after neoadju-
vant chemoradiotherapy in locally advanced rectal cancer[J].Ab-
dom Radiol (NY),2019,44(9):2978-2987.

[36] Felder SI,Patil S,Kennedy E,et al.Endoscopic feature and re-
sponse reproducibility in tumor assessment after neoadjuvant
therapy for rectal adenocarcinoma[J].Ann Surg Oncol,2021,28
(9):5205-5223.

[37] van der Sande ME,Maas M,Melenhorst J,et al.Predictive value
of endoscopic features for a complete response after chemoradio-
therapy for rectal cancer[J].Ann Surg,2021,274(6):e541-e547.

(收稿日期:2025-11-28 修回日期:2026-02-01)

《放射学实践》第九届编委会成员名单

(按姓氏笔划排序)

顾问	祁吉	冯晓源	郭启勇	徐克	胡国栋	高培毅	李坤成	周义成		
名誉主编	滕皋军	王振常	郑海荣	金征宇	刘士远	陈敏	张惠茅	梁长虹		
主编	朱文珍	胡道予	夏黎明							
常务副主编	李小明									
副主编	赵世华	卢光明	宋彬	洪楠	卢洁	居胜红	鲜军舫	萧毅	汪登斌	
常务编委	王锡明	王梅云	王培军	吕粟	吕滨	刘玉林	刘再毅	孙应实	严福华	李欣
	杨旗	邱建星	沈文	张龙江	张明	张瑞平	陈峰	邵成伟	邵剑波	周俊林
	郑敏文	赵心明	胡春洪	查云飞	侯阳	姜慧杰	娄昕	袁慧书	徐海波	容鹏飞
	陶晓峰	曹代荣	龚启勇	彭卫军	程晓光	曾蒙苏	廖伟华			
编委	于爱红	于韬	于德新	万兵	马静	王云玲	王仁法	王光彬	王苇	王怡宁
	王荣品	王翔	王霄英	韦炜	牛金亮	尹喜	邓又斌	龙莉玲	史大鹏	史河水
	印弘	印隆林	冯仕庭	冯逢	宁刚	邢伟	朱力	朱小华	全冠民	刘于宝
	刘亚欧	刘兆会	刘军	刘爱连	刘鸿圣	关丽明	关键	许茂盛	孙浩然	严志汉
	杜祥颖	李小虎	李飞宇	李东	李宏军	李咏梅	李春平	李春媚	李勇刚	李振辉
	李真林	李家平	李跃华	李锋	杨正汉	杨本涛	杨军乐	杨运俊	杨时骐	杨超
	肖文波	肖江喜	肖喜刚	吴飞云	吴文泽	吴光耀	何波	余建明	沈君	张小明
	张文斌	张同	张志强	张丽	张体江	张佳胤	张勇	张晓凡	张雪君	张维升
	张敬	张景峰	陆勇	陆敏杰	陈文	陈正光	陈光祥	陈伟	陈军	陈旺生
	陈爽	武柏林	范丽	范国光	欧阳汉	季倩	周正荣	郑传胜	郑建军	郎宁
	赵阳	郝大鹏	胡红杰	柳林	姜蕾	姚伟武	贺光军	耿左军	贾宁阳	夏军
	徐晓俊	高阳	高剑波	高燕莉	郭大静	黄子星	黄飏	龚良庚	崔新伍	彭飞
	彭鹏	董素贞	童彤	曾自三	曾洪武	曾献军	谢元亮	谢传森	蒲红	楼海燕
	雷平贵	雷军强	谭伟	潘初	薛华丹	薛蕴菁				

· 直肠癌影像学专题 ·

直肠癌盆腔放疗后闭孔内肌面积时序演变

张静, 罗彦, 熊子曼, 杨晓楠, 沈亚琪

【摘要】 目的:探讨直肠癌盆腔放疗后闭孔内肌(OI)面积时序演变规律及临床适用性。**方法:**回顾性纳入 326 例直肠癌患者,分为姑息性放疗组、根治术前新辅助放疗组及术后辅助放疗组。于耻骨联合最前缘轴位 CT/MRI 图像上勾画并测量放疗前基线、放疗后 2~8 周、6 个月及 1 年的 OI 面积。采用线性混合效应模型及重复测量方差分析评估时间趋势,事后比较经 Bonferroni 法校正。**结果:**辅助放疗组时间主效应显著,呈“早期增大-中期回落-晚期萎缩”演变模式,事后比较均显著($P < 0.001$)。三组均表现为早期 OI 面积显著增加,且组间面积变化幅度及方向均无显著差异。早期 OI 面积变化与基线面积呈弱相关,与年龄、肿瘤部位、放疗模式及放疗后随访时间无显著关联。**结论:**直肠癌盆腔辅助放疗后 OI 面积存在时序演变规律,早期变化具有跨放疗模式一致性,可作为放疗后局部影像效应的潜在客观指标。

【关键词】 直肠癌;盆腔放疗;闭孔内肌;体层摄影术,X 线计算机;磁共振成像;时序分析

【中图分类号】 R735.3;R445.2;R814.42 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2026)09-0992-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.09.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Temporal evolution of obturator internus muscle area after pelvic radiotherapy for rectal cancer ZHANG Jing, LUO Yan, XIONG ZI-MAN, et al. Department of Radiology, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China

【Abstract】 Objective: To investigate the temporal evolution of obturator internus (OI) muscle area after pelvic radiotherapy for rectal cancer (RC). **Methods:** A total of 326 RC patients were retrospectively enrolled and stratified into palliative radiotherapy, pre-radical surgery neoadjuvant radiotherapy, and post-radical adjuvant radiotherapy groups. OI areas were delineated and measured on axial CT/MRI at the anterior margin of the pubic symphysis at baseline, 2~8 weeks, 6 months, and 1 year after radiotherapy. Linear mixed-effects models and repeated-measures analysis of variance (rm-ANOVA) were used to evaluate temporal trends. Post-hoc comparisons were conducted after Bonferroni correction. **Results:** The adjuvant radiotherapy group exhibited a significant time main effect: "enlargement-regression-atrophy" temporal pattern. And post-hoc comparisons were significant ($P < 0.001$). All three groups showed a significant enlargement in early OI area, and there were no significant differences in the magnitude or direction of the area changes among the groups. Early OI area changes were weakly correlated with baseline OI area, but were not associated with age, tumor location, radiotherapy modality, or follow-up time after radiotherapy. **Conclusion:** OI area demonstrates a classic temporal evolution following pelvic adjuvant radiotherapy for RC. The early-phase area changes show consistency across radiotherapy regimens, and can serve as a potential objective indicator for the local imaging effects after radiotherapy.

【Key words】 Rectal cancer; Pelvic radiotherapy; Obturator internus; Tomography, X-ray computed; Magnetic resonance imaging; Temporal analysis

《中国结直肠癌诊疗规范(2025 版)》明确将盆腔放疗列为直肠癌综合治疗的核心手段^[1]。然而,放疗不可避免损伤照射野内正常组织,如骨骼肌^[2]。肿瘤治疗相关肌少症与术后并发症及生存率降低相关^[3-6]。目前,CT/MRI 测量第三腰椎(L3)层面骨骼肌面积及指数是评估全身肌量的金标准^[7-10]。然而,放疗模拟定位、盆腔 MRI 通常不包含 L3 层面^[11,12],因此常规肌量评估在盆腔放疗场景下难以开展。本团队前期

前列腺癌研究结果表明,闭孔内肌(obturator internus, OI)面积可反映全身骨骼肌量^[13],且毗邻直肠癌放疗临床靶区(clinical target volume, CTV)而位于照射野内^[1,14,15]。目前尚无研究描述直肠癌盆腔放疗后 OI 面积时序演变规律,本研究旨在描述 OI 面积时序演变规律及影响因素,并比较不同放疗模式下的差异。

材料与方法

1. 研究对象

搜集 2014 年 5 月至 2026 年 1 月期间经病理确诊为直肠癌并接受盆腔放疗的患者,排除临床信息不完整、盆腔复发或转移灶放疗、放疗医嘱未执行者后,将剩余患者按放疗模式分为三组:姑息性放疗组、术前新

作者单位:430030 武汉,华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科

作者简介:张静(1999—),女,湖北荆州人,博士研究生,主要从事消化系统肿瘤影像学研究工作。

通信作者:沈亚琪, E-mail: yqshen@hust.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(项目编号:82471969)

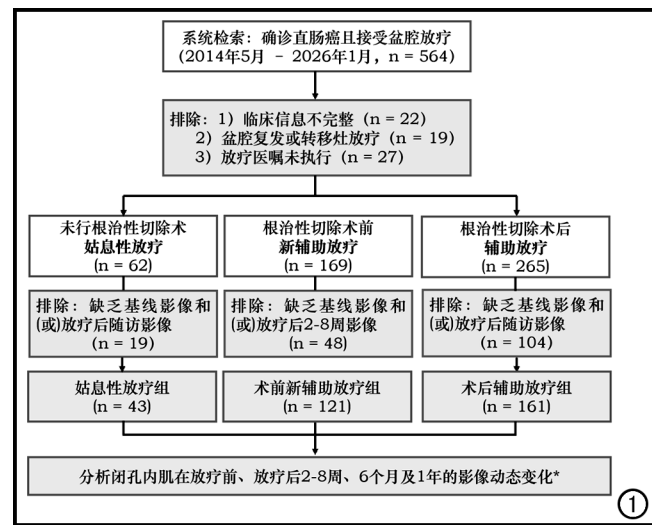


图1 研究对象筛选流程图。

辅助放疗组及术后辅助放疗组。再经影像随访和图像质量筛选后,最终纳入研究(图1)。本回顾性研究经同济医院伦理委员会批准(TJ-IRB202512247),豁免知情同意。

2. 影像采集勾画

CT扫描采用多排螺旋CT设备,包括东软 NeuViz Epoch、Philips Incisive CT 等,扫描参数:管电压 100~120 kV,管电流依设备自动调制,层厚 1.00~1.25 mm。扫描范围自膈顶至坐骨结节水平。MRI扫描采用 1.5/3.0T 设备,包括 GE BRIVO MR355、联影 uMR 790 和西门子 Aera/Skyra 等,扫描序列包括盆

腔轴位 T_1 WI (TR/TE $\approx$ 487/6.8 ms)、轴位 T_2 WI (TR/TE $\approx$ 2800~3189ms/82~97 ms,层厚 5.0~5.5 mm,层间距 5.5~6.6 mm,空间分辨率 0.47~0.63 mm)和矢状位 T_2 WI (TR/TE $\approx$ 2800~3189 ms/82~97 ms,层厚 5.0~6.0 mm,层间距 5.5~7.2 mm,空间分辨率 0.47~0.63 mm)。按照采集时间分为:放疗前基线(t_0)、放疗后 2~8 周(t_1)、6 个月(t_2)和 1 年(t_3),同一患者各时点影像模态一致。采用 3D Slicer 5.8.1 在矢状位的耻骨联合最前缘所在的轴位 CT/MRI 图像上,通过阈值分割和手动调整勾画 OI^[16](图 2,3)。为避免时间顺序偏倚,由一位未参与勾画的研究者将各时间点匿名化影像重编码,确保测量者无法识别随访的时间顺序。由一位低年资放射科医师(测量者 1)完成全部病例的 OI 勾画与面积初次测量,并在 4 周后复测。另随机抽取 25%(82 例)病例,由另一位高年资放射科医师在独立盲法下完成测量。

3. 临床资料采集

通过电子病历系统提取以下临床资料:年龄、性别、身高、体重、体重指数(body mass index, BMI)、合并症、肿瘤原发部位及临床 TNM 分期^[17]、放疗方案(总剂量、次数、短程/长程)以及同步化疗情况。根据《中国结直肠癌诊疗规范(2025 版)》^[1]及实际放疗方案,分为姑息性放疗、新辅助放疗及辅助放疗。其中短程方案包含标准术前短程放疗(5 Gy $\times$ 5 次)及姑息性短程放疗方案(20~30 Gy/5~10 次);长程方案包含标准放疗(45.0~50.4 Gy/25~28 次,单次 1.8~

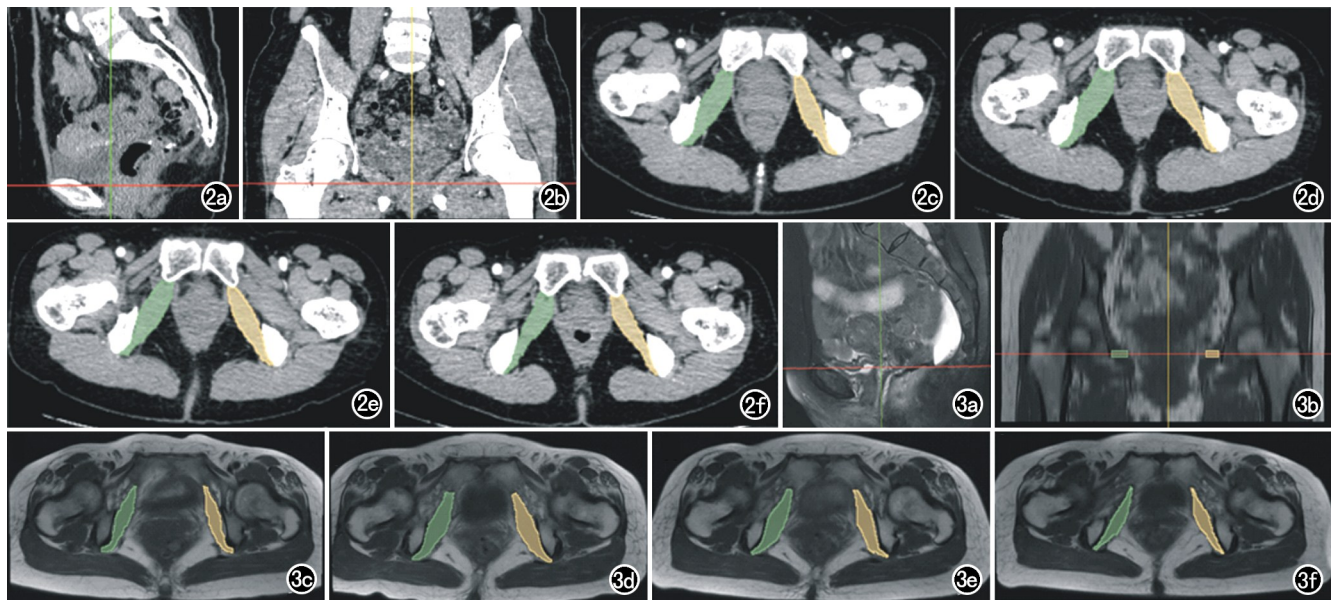


图2 患者1(女,39岁)闭孔内肌层面定位与勾画。a)矢状位图像,红线示耻骨联合最前缘所在轴位层面;b)冠状位图像;c)放疗前基线盆腔CT轴位图像,黄色和绿色示左/右侧闭孔内肌;d)放疗后2~8周盆腔CT轴位图像;e)放疗后6个月盆腔CT轴位图像;f)放疗后1年盆腔CT轴位图像。图3 患者2(男,55岁)闭孔内肌层面定位与勾画。a)矢状位图像,红线示耻骨联合最前缘所在轴位层面;b)冠状位图像;c)放疗前基线盆腔CT轴位图像,黄色和绿色示左/右侧闭孔内肌;d)放疗后2~8周盆腔CT轴位图像;e)放疗后6个月盆腔CT轴位图像;f)放疗后1年盆腔CT轴位图像。

2.0 Gy)及术后加速分割放疗(45 Gy/15 次)。

4.统计学分析

采用 Python 3.13 及 SPSS 27.0 软件进行统计学分析。呈正态分布的定量资料以均数±标准差描述,组间比较采用单因素方差分析;非正态分布的定量资料以中位数[四分位数间距(interquartile range, IQR)]描述,组间比较采用 Kruskal-Wallis *H* 检验。定性资料以频数(百分比)描述,组间比较采用 χ^2 检验或 Fisher 精确检验。姑息组和新辅助放疗组采用配对 *t* 检验比较各时点 OI 面积差异,辅助放疗组采用线性混合效应模型(linear mixed effects model, LMM)分析 OI 面积时序变化,以时间点为固定效应、患者编号为随机截距构建模型,采用限制性最大似然估计模型参数,时间主效应整体显著性通过似然比检验(likelihood ratio test, LRT)评价,固定效应参数采用 *t* 检验。完整随访数据者采用重复测量方差分析(repeated-measures analysis of variance, rm-ANOVA)评估各时点差异,事后比较经 Bonferroni 校正(α' = 0.0083)。正态性检验采用 Shapiro-Wilk 检验。球形假设采用 Mauchly 球形检验,不满足时采用 Green-

house-Geisser 法校正。采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)及 95% 置信区间(confidence interval, CI)评价观察者内及观察者间一致性。以 *P* < 0.05 为差异有统计学意义。

结 果

1.人口统计学

本研究共纳入 326 例患者,其中姑息性放疗组 43 例,新辅助放疗组 121 例,辅助放疗组 162 例。三组在年龄、性别、BMI、糖尿病及放疗次数上差异无统计学意义(*P* > 0.05,表 1),而临床分期、放疗方案、同步化疗及影像模态分布上差异有统计学意义(*P* < 0.05)。尽管三组间放疗剂量分布差异有统计学意义(*P* < 0.001),但中位剂量均为 50.0 Gy,且均以长程放疗为主。姑息组高血压及 cM1 期比例最高,同步化疗比例最低,新辅助放疗组 cN+ 比例最高,辅助放疗组长程放疗、同步化疗及 CT 模态比例均高于其余两组。

2.OI 面积时序变化

OI 面积观察者内及观察者间 ICC 分别为 0.969 (95%CI:0.964~0.974)和 0.950(95%CI:0.934~

表 1 不同治疗模式患者基线临床病理特征比较 [n(%)]

指标	总体 (n=326)	姑息组 (n=43)	新辅助组 (n=121)	辅助组 (n=162)	统计量	<i>P</i> 值
年龄(岁)	56.0 (49.8~62.3)	57.0 (49.0~66.0)	56.0 (49.5~61.0)	55.50 (49.8~63.0)	2.256	0.324
身高(cm)	165.0(160.0~170.0)	164.0(159.0~170.0)	165.0(160.0~170.0)	165.0(160.0~170.0)	0.643	0.725
体重(kg)	62.0(55.0~70.0)	60.0(52.2~67.0)	62.0(55.0~69.0)	63.0(56.0~70.0)	2.618	0.270
BMI(kg/m ²)	23.0±3.1	22.4±3.0	23.0±3.3	23.2±3.0	1.102	0.333
放疗剂量(Gy)	50.0 (45.0~50.4)	50.0 (50.0~54.0)	50.0 (50.0~50.2)	50.0 (45.0~50.0)	26.249	<0.001*
放疗次数(次)	25 (25~25)	25 (25~28)	25 (25~25)	25 (25~25)	3.43	0.180
女性患者	116 (35.6)	17 (39.5)	34 (28.1)	65 (40.1)	4.707	0.095
高血压	61 (18.7)	14 (32.6)	21 (17.4)	26 (16.0)	6.321	0.042*
糖尿病	24 (7.4)	6 (14.0)	7 (5.8)	11 (6.8)	3.258	0.196
肿瘤部位					21.585	<0.001*
上段	69 (21.2)	5 (11.6)	17 (14.0)	47 (29.0)		
下段	131 (40.2)	17 (39.5)	65 (53.7)	49 (30.2)		
中段	126 (38.7)	21 (48.8)	39 (32.2)	66 (40.7)		
同步化疗	211 (64.7)	18 (41.9)	68 (56.2)	125 (77.2)	24.671	<0.001*
放疗方案					15.401	<.001*
短程	15 (4.6)	6 (14.0)	8 (6.6)	1 (0.6)		
长程	311 (95.4)	37 (86.0)	113 (93.4)	161 (99.4)		
cT 分期					22.766	<0.001*
T1-2	11 (3.4)	0 (0.0)	9 (7.4)	2 (1.2)		
T3-4	306 (93.9)	37 (86.0)	110 (90.9)	159 (98.1)		
Tx/未知	9 (2.8)	6 (14.0)	2 (1.7)	1 (0.6)		
cN 分期					16.436	0.002*
N+	78 (23.9)	11 (25.6)	43 (35.5)	24 (14.8)		
N0	25 (7.7)	3 (7.0)	8 (6.6)	14 (8.6)		
Nx/未知	223 (68.4)	29 (67.4)	70 (57.9)	124 (76.5)		
cM 分期					102.442	<0.001*
M0	256 (78.5)	12 (27.9)	100 (82.6)	144 (88.9)		
M1	46 (14.1)	27 (62.8)	13 (10.7)	6 (3.7)		
Mx/未知	24 (7.4)	4 (9.3)	8 (6.6)	12 (7.4)		
影像检查模态					6.809	0.033*
CT	243 (74.5)	29 (67.4)	83 (68.6)	131 (80.9)		
MRI	83 (25.5)	14 (32.6)	38 (31.4)	31 (19.1)		

表 2 三组各时点影像可评估病例数及早期 OI 面积变化

分组	各时点可评估病例数					早期(t1) OI 面积		
	t0	t1	t2	t3	完整时点	绝对变化值 (mm ²)	相对变化率 (%)	增大比例 [n(%)]
总体	326	317	148	122	99	146.71±197.53	7.42±10.03	242 (76.3)
姑息性放疗组	43	42	24	14	11	103.18±234.64	5.63±11.32	28 (66.7)
新辅助放疗组	121	121	—	—	—	147.29±201.39	7.67±10.57	92 (76.0)
辅助放疗组	162	154	124	108	88	158.12±182.68	7.70±9.20	122 (79.2)

0.962)。基于一致性结果良好,后续分析采用测量者 1 的首次测量数据。各时点可评估 OI 面积病例数见表 2。姑息性放疗组 t1 较 t0 面积显著增加($t=2.850$, $P=0.0068$,图 4)。新辅助放疗组 t1 较 t0 显著增加($t=8.045$, $P<0.001$)。辅助放疗组呈“早期增大-中期回落-晚期萎缩”的时序演变,LMM 示时间主效应显著($\chi^2=171.21$, $P<0.001$);t1 较 t0 增大162.4 mm² ($t=9.73$, $P<0.001$);t2 较 t0 增加 70.9 mm² ($t=3.92$, $P<0.001$);t3 较 t0 降低 105.0 mm² ($t=-5.52$, $P<0.001$)。分层分析结果显示,CT 与 MRI 亚组时序趋势相似:t1 较 t0,CT 组增大 146.33 mm² ($t=7.198$, $P<0.001$),MRI 组增大 170.94 mm² ($t=3.763$, $P=<0.001$);t3 较 t0,CT 组降低 105.22 mm² ($t=-4.605$, $P<0.001$),MRI 组降低 121.15 mm² ($t=-2.351$, $P=0.022$)。t2 较 t0,CT 组增加 59.48 mm² ($t=2.765$, $P=0.006$),MRI 组方向一致但未达统计学意义($t=1.002$, $P=0.321$)。88 例完整数据的 rm-ANOVA 验证上述趋势 (Mauchly $W=0.838$, $P=0.001$;Greenhouse-Geisser 法校正后时间主效应 $P<0.001$),事后 Bonferroni 校正比较均显著 ($P<0.0083$)。

3.早期 OI 面积变化及关联因素

317 例患者 t1 中位随访检查时间为 29 天(IQR: 23~43),且组间 t1 时间分布差异无统计学意义($H=$

0.816, $P=0.665$),表明组间早期 OI 面积变化具有可比性。面积绝对变化量范围为 $-449.89 \sim 696.87$ mm²,76.3%(242/317)增大(图 5a)。三组早期 OI 面积呈增大趋势,且组间绝对变化量及相对变化率($F=1.28/0.77$, $P>0.05$)差异均无统计学意义(表 2,图 5b),提示早期变化具有跨放疗模式共性。辅助放疗组增大比例最高,新辅助放疗组次之,姑息组最低,差异无统计学意义($\chi^2=2.89$, $P=0.236$)。早期 OI 面积绝对变化量/相对变化率与基线面积呈弱负相关($r=-0.112/-0.254$, $P=0.046/<0.001$),与年龄、肿瘤部位、放疗模式、随访时间等因素均无显著关联($P>0.05$)。

讨 论

本研究系统描述了直肠癌盆腔放疗后 OI 面积的时序演变规律。核心发现为:术后辅助放疗组呈“早期增大-中期回落-晚期萎缩”的动态演变模式;术后辅助放疗组、术前新辅助放疗组和姑息性放疗组均表现为早期面积显著增加,且变化幅度及方向无显著差异。早期面积变化与基线面积呈弱相关,与年龄、肿瘤部位、放疗模式及随访时间无显著关联,中长期演变规律基于辅助放疗组建立,需在其他放疗模式中进一步验证。

辅助组 OI 面积三阶段时序演变可能与骨骼肌从

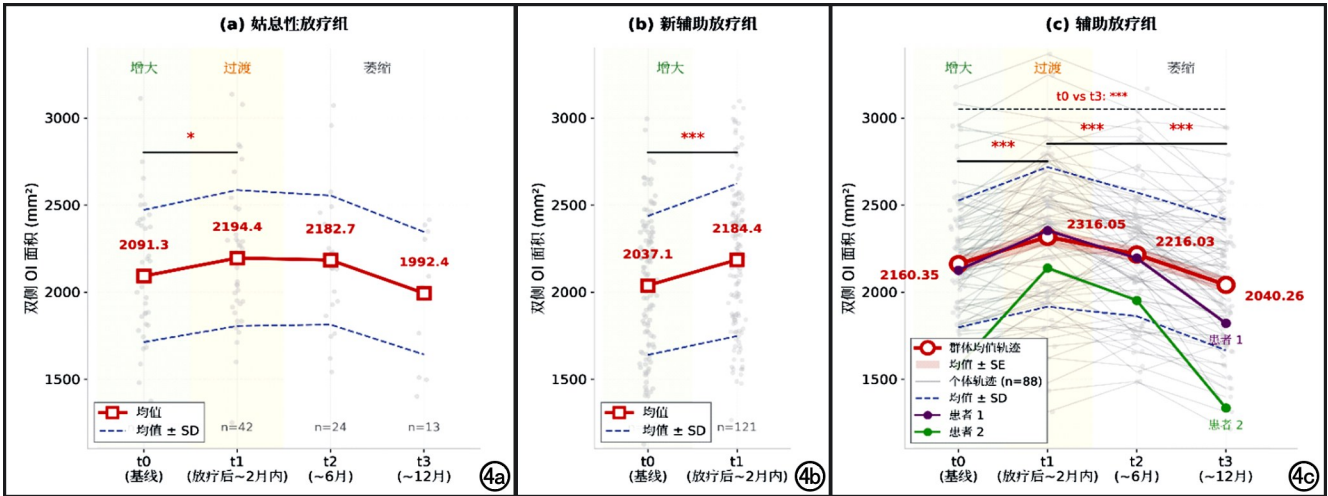


图 4 不同放疗模式下闭孔内肌(OI)面积时序变化。a)姑息组 t1 为 42 例,t2/t3 为 24/13 例仅作描述性呈现;b)新辅助放疗组 t1 为 121 例;c)辅助放疗组完整四时点数据为 88 例,灰线及红线分别表示个体、群体轨迹,紫及绿线分别表示两例代表性患者轨迹。* $P<0.05$,** $P<0.001$ 。

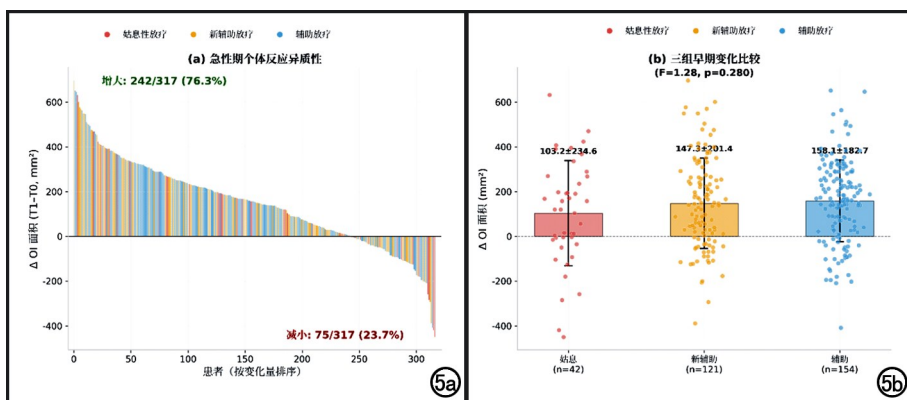


图 5 早期 OI 面积变化及影响因素。a) 317 例患者按面积绝对变化量降序排列, 正值示增大, 负值示减小; b) 三组早期面积绝对变化量组间比较, 柱形及误差线示均值和标准差。

急性放射性损伤向慢性纤维化演进相关, 但本研究未进行病理验证, 机制仅为推测性解释。早期增大可能与放疗诱导组织损伤、炎症水肿有关; 中期回落但仍高于基线, 可能提示间质水肿吸收、纤维化启动; 晚期“净萎缩”可能与肌纤维损伤、神经损伤、恶病质及放射性肠炎等因素相关^[18-21]。相关病理研究表明, 长程放疗后 5~6 周, 盆腔骨骼肌出现核固缩/溶解、间质水肿和淋巴管扩张; 放疗后 1 年, 骨骼肌及神经被致密胶原纤维包裹^[22]。大鼠模型显示放疗后纤维化因子早期上调, 且卫星细胞再生不足以对抗纤维化, 可能参与中后期肌萎缩^[23]。病理及在体研究均观察到盆腔放疗后骨骼肌慢性萎缩^[22, 24], 此种纤维化改变是低位前切除综合征的重要病理基础^[25, 26]。类似时序演变模式在乳腺癌^[27]及鼻咽癌^[28]放疗中亦有报道: 乳腺癌照射野内胸大肌在放疗后 2 个月增大, 4 年内持续萎缩, 而照射野外肩胛肌群无变化; 鼻咽癌照射野内胸锁乳突肌在放疗后 1~3 年持续萎缩, 提示骨骼肌时序演变可能具有普适性。

本研究结果显示, 年龄、肿瘤部位、放疗模式及随访时间均与早期 OI 面积变化无显著关联。尽管年龄与基线面积呈弱负相关($r = -0.170, P = 0.002$), 但与早期变化无相关。这可能因本队列年龄跨度有限, 中老年肌卫星细胞储备处于减退阶段^[29, 30]。早期面积变化与原发肿瘤位置无显著关联, 可从国内外直肠癌 CTV 勾画共识解释: 不同部位肿瘤的 CTV 侧方边界均以 OI 为解剖参照^[14, 15, 31, 32], OI 始终紧邻 CTV 侧方边界, 加之本队列以局部晚期为主、长程方案占主导 (95.4%, 311/326), 造成 OI 受照剂量的同质性。不同放疗模式对早期面积变化无显著影响, 潜在差异可能被长程方案的主导地位所稀释。随访时间与早期面积变化无显著关联, 可能源于时间窗设置和个体差异, 需结合剂量学参数进一步研究。基线面积较大者增幅更

小, 可能因肌肉质量较高者对急性损伤耐受性更好, 亦不能排除分母效应影响。

本研究面积测量依赖单一层面, 所示面积变化可能部分源于各时点层间差异。此外, CT 与 MRI 在层厚和软组织分辨率的固有差异可能导致测量系统性偏倚。但辅助放疗组分层分析结果显示, CT 与 MRI 亚组时序趋势一致, 既往研究也证实 CT 与 MRI 在腹部骨骼肌面积测量上高度一致^[16], 提示跨模态评估可行。OI 面积测量操作便利, 可重复性强, 无需特

定软件, 契合基层医疗需求, 具备多中心推广可行性。OI 面积有望作为盆腔放疗后局部骨骼肌影像变化的时序参考指标, 为进一步开展剂量-效应关系研究及临床功能评价提供客观依据。

本研究存在以下局限性: 首先, 单中心回顾性设计可能存在选择偏倚, 影像采集、重建差异及层面选择漂移对面积测量产生细微影响, 后续将开发三维自动分割和体积测量工具; 其次, 姑息性放疗组和新辅助放疗组中长期随访数据不完整, 限制长期效应的跨模态比较; 最后, 本研究仅描述了直肠癌放疗后 OI 面积的时序演变规律, 尚未建立 OI 受照剂量与面积变化的直接剂量-效应关系, 亦未与盆底功能障碍临床症状或生活质量评分进行直接关联。未来研究应整合剂量学参数、盆底功能评估与生存结局, 以明确 OI 临床价值。

综上所述, 本研究系统揭示了直肠癌盆腔放疗后 OI 面积的纵向时序演变规律。辅助放疗组呈现“早期增大-中期回落-晚期萎缩”的动态变化, 早期 OI 面积变化在不同放疗模式间具有一致性, 而中长期模式仍需进一步验证。OI 面积有望作为评价盆腔放疗后局部骨骼肌影像学变化的客观定量指标。

参考文献:

- [1] 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]. 中华外科杂志, 2026, 64(2): 89-95.
- [2] Collao N, D'Souza D, Messeiller L, et al. Radiation induces long-term muscle fibrosis and promotes a fibrotic phenotype in fibro-adipogenic progenitors[J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle, 2023, 14(5): 2335-2349.
- [3] Liu J, Yu X, Huang X, et al. Associations of muscle and adipose tissue parameters with long-term outcomes in middle and low rectal cancer: a retrospective cohort study[J]. Cancer Imaging, 2023, 23(1): 5.
- [4] Kurk S, Peeters P, Stellato R, et al. Skeletal muscle mass loss and dose-limiting toxicities in metastatic colorectal cancer patients[J].

- J Cachexia Sarcopenia Muscle, 2019, 10(4):803-813.
- [5] Jochum SB, Kistner M, Wood EH, et al. Is sarcopenia a better predictor of complications than body mass index? Sarcopenia and surgical outcomes in patients with rectal cancer[J]. *Colorectal Dis*, 2019, 21(12):1372-1378.
 - [6] 刘佶阳, 余雄峰, 黄雪清, 等. 术前 CT 测量的肌肉质量减少与肌肉脂肪含量增多在预测中低位直肠癌术后远期结局的价值[J]. *放射学实践*, 2023, 38(6):756-762.
 - [7] 中华医学会老年医学分会, 湘雅医院国家老年疾病临床医学研究中心, 中国肌肉减少症诊疗指南(2024 版)[J]. *中华医学杂志*, 2025, 105(3):181-203.
 - [8] Xiong Z, Wang Y, Jiang Y, et al. Imbalance between skeletal muscle and intermuscular fat predicts treatment failure in Crohn's disease: an imaging biomarker for risk stratification[J]. *Ann Med*, 2025, 57(1):2536756.
 - [9] Kong M, Geng N, Zhou Y, et al. Defining reference values for low skeletal muscle index at the L3 vertebra level based on computed tomography in healthy adults: A multicentre study[J]. *Clin Nutr*, 2022, 41(2):396-404.
 - [10] 闫东, 程晓光. 体质成分的研究现状和影像学评估[J]. *放射学实践*, 2022, 37(10):1197-1199.
 - [11] Wu Z, Deng L, Wu W, et al. A novel skeletal muscle quantitative method and deep learning-based sarcopenia diagnosis for cervical cancer patients treated with radiotherapy[J]. *Med Phys*, 2025, 52(5):2887-2897.
 - [12] Paramasivam S, Proietto A, Puvaneswary M. Pelvic anatomy and MRI[J]. *Best Pract Res Clin Obstet Gynaecol*, 2006, 20(1):3-22.
 - [13] Yan J, Jiang N, Wu S, et al. MRI evaluation of obturator internus muscle; its relationship with body composition and prognostic implications in prostate cancer patients undergoing ADT[J]. *Eur Radiol*, 2026, 36(5):3928-3938.
 - [14] 中国医师协会结直肠肿瘤专委会放疗专委会, 中华医学会放射肿瘤治疗学分会, 唐源, 等. 直肠癌术前/术后适形/调强放疗靶区勾画共识与图谱[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2018, 27(3):227-234.
 - [15] Roels S, Duthoy W, Haustermans K, et al. Definition and delineation of the clinical target volume for rectal cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2006, 65(4):1129-1142.
 - [16] Sinelnikov A, Qu C, Fetzer DT, et al. Measurement of skeletal muscle area: comparison of CT and MR imaging[J]. *Eur J Radiol*, 2016, 85(10):1716-1721.
 - [17] Weiser MR. AJCC 8th Edition: Colorectal Cancer[J]. *Ann Surg Oncol*, 2018, 25(6):1454-1455.
 - [18] Cemazar M, Jurdana M. Radiation-induced impairment of skeletal muscle regeneration[J]. *Radiat Oncol*, 2025, 59(3):293-300.
 - [19] Gillette EL, Mahler PA, Powers BE, et al. Late radiation injury to muscle and peripheral nerves[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1995, 31(5):1309-1318.
 - [20] Lee J, Lin J, Wu M, et al. Association of bowel radiation dose-volume with skeletal muscle loss during pelvic intensity-modulated radiotherapy in cervical cancer[J]. *Support Care Cancer*, 2021, 29(9):5497-5505.
 - [21] Kasprzak A. The role of tumor microenvironment cells in colorectal cancer (CRC) cachexia[J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(4):1565.
 - [22] Reggiani Bonetti L, Manenti A, Gallo G, et al. Rectal-cancer radiotherapy damages the perineal muscle floor[J]. *Gastroenterol Rep (Oxf)*, 2020, 8(4):331-332.
 - [23] Zhou Y, Sheng X, Deng F, et al. Radiation-induced muscle fibrosis rat model: establishment and valuation[J]. *Radiat Oncol*, 2018, 13(1):160.
 - [24] Tartar L, Sabbagh C, Chivot C, et al. Does radiotherapy have an impact on the thickness of the puborectal muscle? [J]. *Colorectal Dis*, 2015, 17(6):542-543.
 - [25] Sun R, Dai Z, Zhang Y, et al. The incidence and risk factors of low anterior resection syndrome (LARS) after sphincter-preserving surgery of rectal cancer: a systematic review and meta-analysis [J]. *Support Care Cancer*, 2021, 29(12):7249-7258.
 - [26] Muro S, Nimura A, Ibara T, et al. Anatomical basis for contribution of hip joint motion by the obturator internus to defaecation/urinary functions by the levator ani via the obturator fascia[J]. *J Anat*, 2023, 242(4):657-665.
 - [27] Seo A, Hwang J, Lee J, et al. Changes in pectoral muscle volume during subacute period after radiation therapy for breast cancer: a retrospective up to 4-year follow-up study[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1):7038.
 - [28] Zhang L, Mao Y, Zhou G, et al. The evolution of and risk factors for neck muscle atrophy and weakness in nasopharyngeal carcinoma treated with intensity-modulated radiotherapy: a retrospective study in an endemic area[J]. *Medicine*, 2015, 94(31):e1294.
 - [29] Verdijk LB, Koopman R, Schaart G, et al. Satellite cell content is specifically reduced in type II skeletal muscle fibers in the elderly [J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2007, 292(1):E151-E157.
 - [30] Lai Y, Ramírez-Pardo I, Isern J, et al. Multimodal cell atlas of the ageing human skeletal muscle[J]. *Nature*, 2024, 629(8010):154-164.
 - [31] Myerson RJ, Garofalo MC, El Naqa I, et al. Elective clinical target volumes for conformal therapy in anorectal cancer: a radiation therapy oncology group consensus panel contouring atlas[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2009, 74(3):824-830.
 - [32] Ng M, Leong T, Chander S, et al. Australasian gastrointestinal trials group (AGITG) contouring atlas and planning guidelines for intensity-modulated radiotherapy in anal cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 83(5):1455-1462.

(收稿日期:2026-05-18 修回日期:2026-08-10)

• 直肠癌影像学专题 •

直肠少见环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变的 MRI 影像诊断与鉴别

刘炜森,熊诚博,张仪,孙艺

【摘要】 目的:总结分析直肠少见环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变的 MRI 诊断与鉴别诊断要点。**方法:**回顾性收集 2013 年 1 月至 2025 年 11 月接受 MRI 检查的患者中以直肠肠壁环周增厚为主要表现的病例,包括 29 例黏液腺癌(MAC)、25 例印戒细胞癌(SRCC)、11 例淋巴瘤、13 例孤立性直肠溃疡综合征(SRUS)以及 23 例海绵状血管瘤(CH),分析并对比上述病变的 MRI 影像学征象。**结果:**与 SRUS 相比, T_2WI 粘液样/水样高信号、不均匀强化(96.6 % vs. 0 %, 89.7 % vs. 7.7 %, $P<0.001$)更倾向于直肠 MAC 的诊断。直肠 MAC(96.6%)与海绵状血管瘤(100%)均以 T_2WI 粘液样/水样高信号为典型征象,但不均匀强化多提示直肠 MAC(89.7 % vs. 13.0 %, $P<0.001$),直肠系膜内蜂窝状血管增多、直肠壁或肠旁钙化灶以及较长的病变肠管长度[95.7 % vs. 3.4 %, 78.3 % vs. 0 %, (132.26 ± 43.50) mm vs. (55.38 ± 22.09) mm, $P<0.001$]多提示直肠 CH。直肠 SRCC(72%、92%)、SRUS(92.3%、100%)和 CH(87%、100%)均以分层样强化、DWI 轻度或无弥散受限为主要表现,但直肠系膜污垢样改变高度提示直肠 SRCC(64%),而 SRUS 和 CH 均未见此征象,差异具有统计学意义($P<0.001$)。相较于 SRUS 和 CH,直肠淋巴瘤更倾向表现为明显弥散受限(分别为 90.9%、0%、0%)以及均匀强化(分别为 63.6%、0%、0%),上述征象差异均具有统计学意义($P<0.001$),且直肠淋巴瘤的病变肠壁厚度明显大于 SRUS[(23.09 ± 8.32) mm vs. (13.54 ± 2.60) mm, $P=0.003$]。**结论:**MRI 影像学征象对直肠少见环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变的诊断及鉴别诊断具有重要价值。

【关键词】 直肠肿瘤;直肠肿瘤样病变;环周增厚;磁共振成像;诊断;鉴别

【中图分类号】 R735.3; R445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2026)09-0998-08

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.09.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



MRI diagnosis and differential diagnosis of rare circumferential thickening-type tumors and tumor-like lesions of the rectum

LIU Wei-sen, XIONG Cheng-bo, ZHANG Yi, et al. Department of Radiology, The Sixth Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University; Guangdong Provincial Key Laboratory of Colorectal and Pelvic Floor Diseases, The Sixth Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University; Biomedical Innovation Center, The Sixth Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510655, China

【Abstract】 Objective: To explore the magnetic resonance imaging (MRI) diagnostic and differential diagnostic points of rare circumferential thickening-type tumors and tumor-like lesions of the rectum. **Methods:** The patients presenting with circumferential thickening of the rectal wall in MRI examinations from January 2013 to November 2025 were retrospectively collected. The cohort consisted of 29 cases of rectal mucinous adenocarcinoma (MAC), 25 cases of rectal signet ring cell carcinoma (SRCC), 11 cases of rectal lymphoma, 13 cases of solitary rectal ulcer syndrome (SRUS), and 23 cases of rectal cavernous hemangioma (CH). The MRI features of these diseases were analyzed and compared. **Results:** Compared with SRUS, the presence of mucinous/water-like hyperintensity on T_2WI and heterogeneous enhancement (96.6 % vs. 0 %, 89.7 % vs. 7.7 %, respectively, $P<0.001$) favored the diagnosis of rectal MAC. Both rectal MAC (96.6 %) and rectal CH (100 %) exhibited mucinous/water-like hyperintensity on T_2WI . However, heterogeneous enhancement was more suggestive of rectal MAC (89.7 % vs. 13.0 %, $P<0.001$); honeycomb-like vascular proliferation in the mesorectum, calcifications in the rectal wall or perirectal tissues, and a longer involved bowel segment (95.7 % vs. 3.4 %, 78.3 % vs. 0 %, 132.26 ± 43.50 mm vs. 55.38 ± 22.09 mm, respectively; all $P<0.001$) were highly indicative of rectal CH. Layered enhancement and mild or absent diffusion restriction on diffusion-weighted imaging (DWI) were common findings in rectal SRCC (72 %, 92 %), SRUS (92.3 %, 100 %), and CH (87 %, 100 %). Nevertheless, mesorectal dirty appearance was highly suggestive of rectal SRCC (64 %), whereas this finding was absent in both SRUS and CH, and the difference was statistically significant ($P<0.001$). Compared with SRUS and CH, rectal lymphoma more frequently demonstrated marked diffusion restriction on DWI (90.9 %, 0 %, and 0 %, respectively) and homogeneous enhancement (63.6 %, 0 %, and 0 %, respectively), with all these differences being statistically significant ($P<0.001$). Moreover, the bowel wall thickness of rectal lymphoma was signifi-

作者单位: 510655 广州, 中山大学附属第六医院放射诊断科, 广东省结直肠盆底疾病研究重点实验室, 广州市黄埔区中六生物医学创新研究院

作者简介: 刘炜森(1999—), 男, 广东汕头人, 硕士研究生, 主要从事胃肠道功能磁共振成像及临床-影像数据模型研究工作。

通信作者: 孙艺, E-mail: suny359@mail.sysu.edu.cn

cantly greater than that of SRUS ($23.09 \pm 8.32\text{mm}$ vs. $13.54 \pm 2.60\text{mm}$, $P=0.003$). **Conclusion:** MRI imaging features provide valuable information for the diagnosis and differential diagnosis of rare circumferential thickening-type tumors and tumor-like lesions of the rectum.

【Key words】 Rectal neoplasms; Rectal tumor-like lesions; Circumferential thickening; Magnetic resonance imaging; Diagnosis, differential

除直肠腺癌外,多种肿瘤及肿瘤样病变,如黏液腺癌(mucinous adenocarcinoma, MAC)、印戒细胞癌(signet ring cell carcinoma, SRCC)、淋巴瘤、海绵状血管瘤(cavernous hemangioma, CH)、孤立性直肠溃疡综合征(solitary rectal ulcer syndrome, SRUS)等,均可以肠壁环周增厚为主要表现,正确诊断对指导治疗方案决策至关重要。尽管基于肠镜活检的病理组织学结果仍是诊断直肠疾病的金标准,但受肿瘤异质性、取材部位及深浅等因素的影响,基于活检的漏诊或误诊并不罕见,比较常见的包括:因取材至粘液湖、未检出肿瘤细胞而漏诊直肠 MAC^[1,2];因 SRCC 具有黏膜下浸润倾向,取材过浅或未能在肿瘤部位取材均可导致 SRCC 漏诊^[3];取材过浅也是 SRUS 漏诊的重要原因。影像学在上述疾病诊断中发挥重要作用。

MRI 具有软组织分辨率高、多参数成像等优势,能清晰、全面地显示直肠壁层次及直肠系膜、淋巴结等肠周结构,是诊断直肠病变的重要影像学方法。正确认识直肠肿瘤与肿瘤样病变的 MRI 表现,有助于提高放射科医生对直肠病变的影像学诊断能力,并提醒临床医生对 MRI 检查怀疑为恶性病变的患者进行肠镜下多点取材或深挖活检。然而,由于少见直肠肿瘤或肿瘤样病变发病率低,且不同疾病的临床症状和影像学征象存在重叠,上述疾病的 MRI 诊断仍存在较高的漏诊和误诊率。本研究通过回顾性分析并对比本院以直肠肠壁环周增厚为主要表现的肿瘤(直肠 MAC、SRCC、淋巴瘤)及肿瘤样病变(SRUS、直肠 CH)的 MRI 征象,旨在为上述疾病的 MRI 诊断及鉴别诊断提供参考。

材料与方法

1. 研究对象

回顾性收集 2013 年 1 月至 2025 年 11 月在中山大学附属第六医院接受 MRI 检查并以直肠肠壁环周增厚为主要表现的病例。病例纳入标准:①肠镜活检或术后病理确诊为直肠 MAC、SRCC、淋巴瘤、SRUS 或 CH;②接受盆腔增强 MRI 检查。病例排除标准:①盆腔增强 MRI 检查前接受过直肠手术、抗肿瘤治疗的患者;②MRI 图像质量差。本研究最终共纳入 29 例直肠 MAC、25 例直肠 SRCC、11 例直肠淋巴瘤、13 例 SRUS 以及 23 例直肠 CH。收集患者的临床、病理

及 MRI 增强影像学资料。本研究经中山大学附属第六医院伦理委员会批准,并豁免了患者知情同意。

2. MRI 检查方法

所有患者均接受了治疗前盆腔 MRI 增强检查,检查设备为 GE Discovery MR 750w 3.0T、Optima MR360 1.5T 或联影 uMR 570 1.5T。扫描序列包括斜轴面(垂直于直肠病变的长轴)、矢状面和冠状面 T₂WI、斜轴位 DWI(b 值取 0、400、800 或 1200 s/mm²)、斜轴面钆增强 T₁WI。增强扫描采用 LAVA 序列,先采集平扫 T₁WI 作为参考,再经高压注射器静脉推注钆对比剂,并连续采集 4 期动态增强图像。所有患者均取仰卧位,并使用腹部相控阵线圈。

3. MRI 影像学特征评价

由两位分别具有 4 年和 7 年腹部影像学诊断经验的放射科医生在对患者临床资料和组织病理学结果不知情的情况下共同评估所有患者的影像学图像,两者有分歧时经协商达成一致。

评估的 MRI 影像学特征包括:①病变远端距离肛缘的距离:分为下段直肠(<5 cm)、中段直肠(5~10 cm)和上段直肠(10~15 cm);②病变肠管长度(mm);③病变肠管厚度(mm);④是否存在 T₂WI 粘液样/水样高信号;⑤DWI 弥散受限程度:分为明显弥散受限、轻度或无弥散受限;考虑到 MAC 与 SRCC 肿瘤异质性高,粘液成分与肿瘤实性成分的 DWI 弥散受限程度不同,因此当肿瘤中出现 T₂WI 粘液样/水样高信号时,本研究仅记录此区域的弥散受限特点;⑥强化方式:分层样强化、均匀强化和不均匀强化;⑦异常粗大的黏膜皱襞:表现为黏膜增厚,形成粗大黏膜皱襞,可呈息肉样突向肠腔;⑧直肠系膜污垢样改变:表现为直肠系膜内 T₂WI 絮片状低信号;⑨直肠系膜内蜂窝状增多血管;⑩直肠壁或肠旁钙化灶:表现为各序列结节状低信号影。

4. 统计学分析

采用 SPSS 25.0 软件进行统计学分析。符合正态分布的连续变量以平均值±标准差表示,非正态分布的连续变量以中位数(四分位间距)表示。分类变量以频数和频率表示。连续变量的组间比较采用 *t* 检验或 Mann-Whitney *U* 检验,分类变量采用卡方检验或 Fisher 精确检验来比较两种疾病之间的 MRI 影像学征象。本研究进行了多重比较,采用 Bonferroni 检验

校正调整显著性水平,当双侧 $P<\alpha/6(\alpha=0.05)$,即双侧 $P<0.008$ 时,认为差异具有统计学意义。

结 果

1.临床特征

直肠环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变的临床特征见表 1。本研究结果显示,直肠 CH 好发于年轻患者,患者平均年龄为(31.09±10.83)岁,直肠 MAC、SRCC 及淋巴瘤好发于男性(男性占比均在 60%及以上)。直肠 MAC(86.2%)、SRCC(68%)、SRUS(76.9%)和 CH(100%)均以血便为主要临床症状,而直肠淋巴瘤(90.9%)以腹泻为主要临床症状。绝大多数直肠淋巴瘤、SRUS 和 CH 患者 CEA 和 CA199 为阴性,而直肠 MAC 和 SRCC 患者出现 CEA 和 CA199 阳性的概率更高。

2.直肠环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变的 MRI 影像学征象比较

直肠 MAC 与 SRUS、直肠 CH 的 MRI 影像征象比较:与 SRUS 相比,直肠 MAC 更常见 T₂WI 粘液样/水样高信号(96.6% vs. 0%, $P<0.001$)、不均匀强化(89.7% vs. 7.7%, $P<0.001$);而分层样强化(92.3% vs. 10.3%, $P<0.001$)、粗大黏膜皱褶(76.9% vs. 0%, $P<0.001$)以及更长的病变肠管长度[(84.38±33.96) mm vs. (55.38±22.09) mm, $P=0.002$]则更多见于 SRUS。直肠 MAC(89.7%)与 SRUS(100%)于 DWI 上多呈轻度或无弥散受限。

直肠 MAC 与 CH 均以 T₂WI 粘液样/水样高信号、DWI 轻度或无弥散受限为主要表现,但前者更常见不均匀强化(89.7% vs. 13.0%, $P<0.001$),后者更常见分层样强化(87.0% vs. 10.3%, $P<0.001$)、肠系膜蜂窝状血管增多(95.7% vs. 3.4%, $P<0.001$)、肠壁或肠旁钙化灶(78.3% vs. 0%, $P<0.001$)以及病变远端位于下段直肠(100% vs. 48.3%, $P<0.001$)伴较长的病变肠管长度[(132.26±43.50) mm vs. (55.38±22.09) mm, $P<0.001$]。

直肠 SRCC 与 SRUS、直肠 CH 的 MRI 影像征象比较:直肠 SRCC 与 SRUS、CH 均多表现为分层样强化、轻度或无弥散受限。但与 SRUS 相比,SRCC 多见 T₂WI 粘液样/水样高信号(64% vs. 0%, $P<0.001$)、肠系膜污垢样改变(64% vs. 0%, $P<0.001$),而粗大黏膜皱褶明显多见于 SRUS(76.9% vs. 0%, $P<0.001$)。

相较于直肠 CH,SRCC 出现肠系膜污垢样改变(64% vs. 0%, $P<0.001$)的比例明显更高,而 T₂WI 粘液样/水样高信号(100% vs. 64%, $P=0.002$)、直肠系膜蜂窝状血管增多(95.7% vs. 4.0%, $P<0.001$)、肠壁及肠旁钙化灶(78.3% vs. 0%, $P<0.001$)以及更长的病变肠管长度[(132.26±43.50) mm vs. (78.28±28.06) mm, $P<0.001$]则显著多见于 CH。

直肠淋巴瘤与 SRUS、直肠 CH 的 MRI 影像征象比较:与 SRUS 相比,直肠淋巴瘤的病变肠管厚度更厚[(23.09±8.32) mm vs. (13.54±2.60) mm, $P=$

表 1 直肠环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变的临床特征

临床特征	MAC (n=29)	SRCC (n=25)	淋巴瘤 (n=11)	SRUS (n=13)	CH (n=23)
年龄(岁)	54.00±14.70	45.48±16.55	55.36±16.85	47.92±17.93	31.09±10.83
性别					
男	18/29(62.1%)	15/25(60%)	7/11(63.6%)	6/13(46.2%)	12/23(52.2%)
女	11/29(37.9%)	10/25(40%)	4/11(36.4%)	7/13(53.8%)	11/23(47.8%)
腹痛					
有	1/29(3.4%)	2/25(8%)	4/11(36.4%)	2/13(15.4%)	1/23(4.3%)
无	28/29(96.6%)	23/25(92%)	7/11(63.6%)	11/13(84.6%)	22/23(95.7%)
腹泻					
有	12/29(41.4%)	9/25(36%)	10/11(90.9%)	5/13(38.5%)	0/23(0%)
无	17/29(58.6%)	16/25(64%)	1/11(9.1%)	8/13(61.5%)	23/23(100%)
血便					
有	25/29(86.2%)	17/25(68%)	5/11(45.5%)	10/13(76.9%)	23/23(100%)
无	4/29(13.8%)	8/25(32%)	6/11(54.5%)	3/13(23.1%)	0/23(0%)
体重减轻					
有	7/29(24.1%)	6/25(24%)	4/11(36.4%)	3/13(23.1%)	3/23(13.0%)
无	22/29(75.9%)	19/25(76%)	7/11(63.6%)	10/13(76.9%)	20/23(87.0%)
CEA					
阳性	10/29(34.5%)	14/25(56%)	1/11(9.1%)	1/10(10.0%) ^a	0/14(0%) ^b
阴性	19/29(65.5%)	11/25(44%)	10/11(90.9%)	9/10(90.0%) ^a	14/14(100%) ^b
CA199					
阳性	12/29(41.4%)	9/25(36%)	1/11(9.1%)	0/10(0%) ^a	0/14(0%) ^b
阴性	17/29(58.6%)	16/25(64%)	10/11(90.9%)	10/10(100%) ^a	14/14(100%) ^b

注:^a SRUS 有 3 例患者未行 CEA 与 CA199 检查;^b直肠 CH 有 9 例患者未行 CEA 与 CA199 检查。

表 2 直肠 MAC、SRCC、淋巴瘤与 SRUS、CH 的影像学征象比较

影像学征象	MAC (n=29)	SRCC (n=25)	淋巴瘤 (n=11)	SRUS (n=13)	CH (n=23)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
病变远端距肛缘距离						0.084	<0.001	0.834	0.037	1.000	0.098
下段直肠	14/29 (48.3%)	19/25 (76%)	9/11 (81.8%)	11/13 (84.6%)	23/23 (100%)						
中段直肠	10/29 (34.5%)	4/25 (16%)	1/11 (9.1%)	1/13 (7.7%)	0/23 (0%)						
上段直肠	5/29 (17.2%)	2/25 (8%)	1/11 (9.1%)	1/13 (7.7%)	0/23 (0%)						
病变肠管长度(mm)	55.38±22.09	78.28±28.06	73.00±30.31	84.38±33.96	132.26±43.50	0.002	<0.001	0.397	<0.001	0.400	<0.001
病变肠管厚度(mm)	18.66±9.38	17.16±5.15	23.09±8.32	13.54±2.60	17.43±6.34	0.031	0.904	0.023	0.869	0.003	0.035
粗大黏膜皱褶						<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—
是	0/29 (0%)	0/25 (0%)	0/11 (0%)	10/13 (76.9%)	0/23 (0%)						
否	29/29 (100%)	25/25 (100%)	11/11 (100%)	3/13 (23.1%)	23/23 (100%)						
是否存在 T ₂ WI 粘液样/水样高信号						<0.001	1.000	<0.001	0.002	—	<0.001
是	28/29 (96.6%)	16/25 (64%)	0/11 (0%)	0/13 (0%)	23/23 (100%)						
否	1/29 (3.4%)	9/25 (36%)	11/11 (100%)	13/13 (100%)	0/23 (0%)						
DWI						0.540	0.245	0.538	0.490	<0.001	<0.001
明显弥散受限	3/29 (10.3%)	2/25 (8%)	10/11 (90.9%)	0/13 (0%)	0/23 (0%)						
轻度/无弥散受限	26/29 (89.7%)	23/25 (92%)	1/11 (9.1%)	13/13 (100%)	23/23 (100%)						
强化方式						<0.001	<0.001	0.222	0.292	<0.001	<0.001
分层样强化	3/29 (10.3%)	18/25 (72%)	0/11 (0%)	12/13 (92.3%)	20/23 (87.0%)						
均匀强化	0/29 (0%)	0/25 (0%)	7/11 (63.6%)	0/13 (0%)	0/23 (0%)						
不均匀强化	26/29 (89.7%)	7/25 (28%)	4/11 (36.4%)	1/13 (7.7%)	3/23 (13.0%)						
肠系膜污垢样改变						1.000	0.497	<0.001	<0.001	0.199	0.098
是	2/29 (6.9%)	16/25 (64%)	2/11 (18.2%)	0/13 (0%)	0/23 (0%)						
否	27/29 (93.1%)	9/25 (36%)	9/11 (81.8%)	13/13 (100%)	23/23 (100%)						
肠系膜内蜂窝状血管增多						0.222	<0.001	0.265	<0.001	0.482	<0.001
是	1/29 (3.4%)	1/25 (4%)	0/11 (0%)	2/13 (15.4%)	22/23 (95.7%)						
否	28/29 (96.6%)	24/25 (96%)	11/11 (100%)	11/13 (84.6%)	1/23 (4.3%)						
肠壁及肠旁钙化灶						—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001
是	0/29 (0%)	0/25 (0%)	0/11 (0%)	0/13 (0%)	18/23 (78.3%)						
否	29/29 (100%)	25/25 (100%)	11/11 (100%)	13/13 (100%)	5/23 (21.7%)						

注:多重比较采用 Bonferroni 检验校正, $P<0.008$ 差异具有统计学意义。P1 表示 MAC 与 SRUS 的对比;P2 表示 MAC 与 CH 的对比;P3 表示 SRCC 与 SRUS 的对比;P4 表示 SRCC 与 CH 的对比;P5 表示淋巴瘤与 SRUS 的对比;P6 表示淋巴瘤与 CH 的对比。

0.003]、DWI 明显弥散受限 (90.9% vs. 0%, $P<0.001$) 及均匀强化 (63.6% vs. 0%, $P<0.001$) 比例更

高,而粗大黏膜皱褶 (76.9% vs. 0%, $P<0.001$)、分层样强化 (92.3% vs. 0%, $P<0.001$) 明显多见于 SRUS。

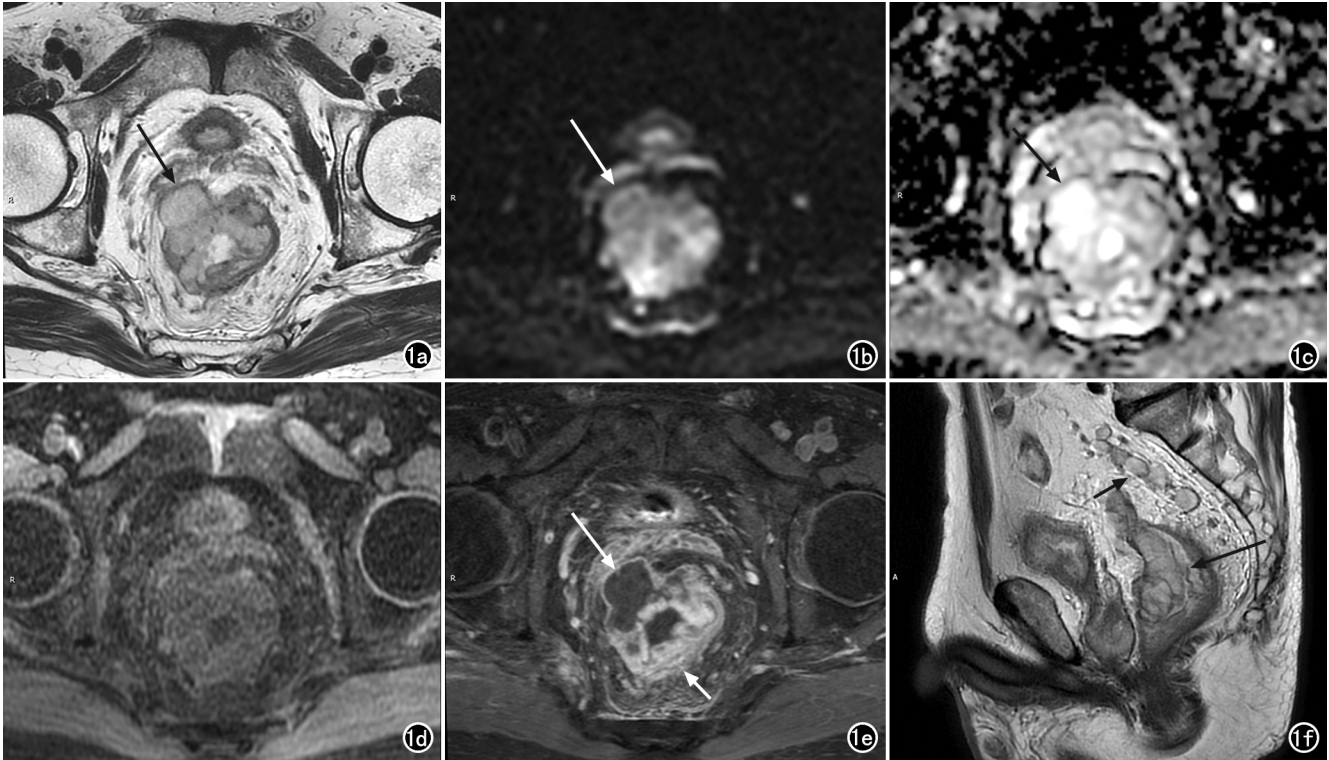


图 1 患者,男,68 岁,反复便血 6 月余,肠镜病理确诊为直肠 MAC。a)斜轴面 T₂WI 示直肠壁不均匀环周增厚,大部分呈粘液样/水样高信号(箭);b)斜轴面 DWI 示病灶呈稍高信号(箭);c)ADC 图示病灶呈高信号(箭),提示肿瘤粘液成分无明显弥散受限;d)斜轴面 T₁WI 抑脂平扫序列示肿瘤呈稍低信号;e)T₁WI 增强示肿瘤呈不均匀强化,粘液成分无强化(长箭),肿瘤实性成分呈较明显强化(短箭);f)矢状面 T₂WI 示肿瘤位于直肠中段(长箭),直肠系膜内多发富含粘液肿大淋巴结(短箭),提示淋巴结转移。

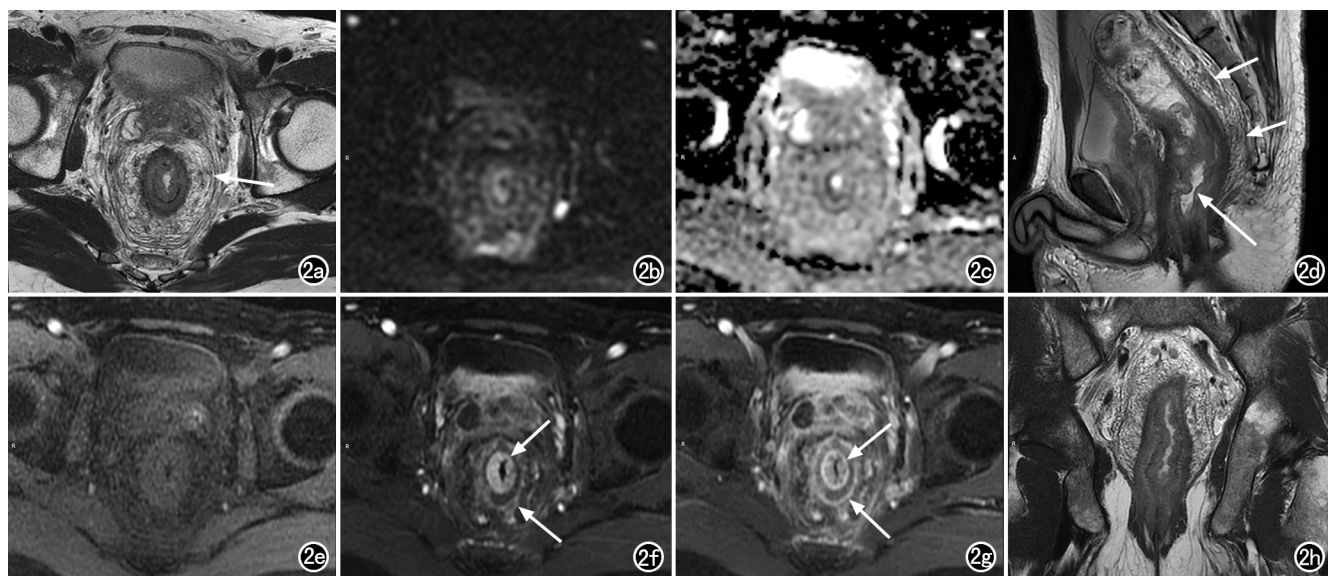


图2 患者,男,44岁,肛周疼痛伴黑便1月余,手术病理确诊为直肠SRCC。a)斜轴面 T_2 WI 示直肠壁环周增厚,呈不均匀稍高信号,直肠系膜内多发絮片状低信号影,呈“污垢样”改变(箭),提示肿瘤细胞浸润直肠系膜;b)斜轴面 DWI 示病灶呈稍高信号;c)ADC 图示病灶大部分呈高信号,提示肿瘤无或轻度弥散受限;d)矢状面 T_2 WI 示肿瘤位于直肠中下段,可见低信号黏膜线残留(长箭)及直肠系膜“污垢”(短箭);e)斜轴面 T_1 WI 抑脂平扫示肿瘤呈等信号;f)增强早期肿瘤呈分层样强化(箭);g)增强扫描随时间延长呈延迟性、分层样强化,表现为“恶性靶征”(箭);h)冠状面 T_2 WI 示直肠中下段肠壁增厚伴系膜“污垢”。

与直肠CH相比,DWI明显弥散受限(90.9% vs. 0%, $P<0.001$)、均匀强化(63.6% vs. 0%, $P<0.001$)更常见于直肠淋巴瘤,而更长的病变肠管长度

$[(132.26 \pm 43.50) \text{ mm vs. } (73.00 \pm 30.31) \text{ mm}, P<0.001]$ 、 T_2 WI 粘液样/水样高信号(100% vs. 0%, $P<0.001$)、分层样强化(87.0% vs. 0%, $P<0.001$)、

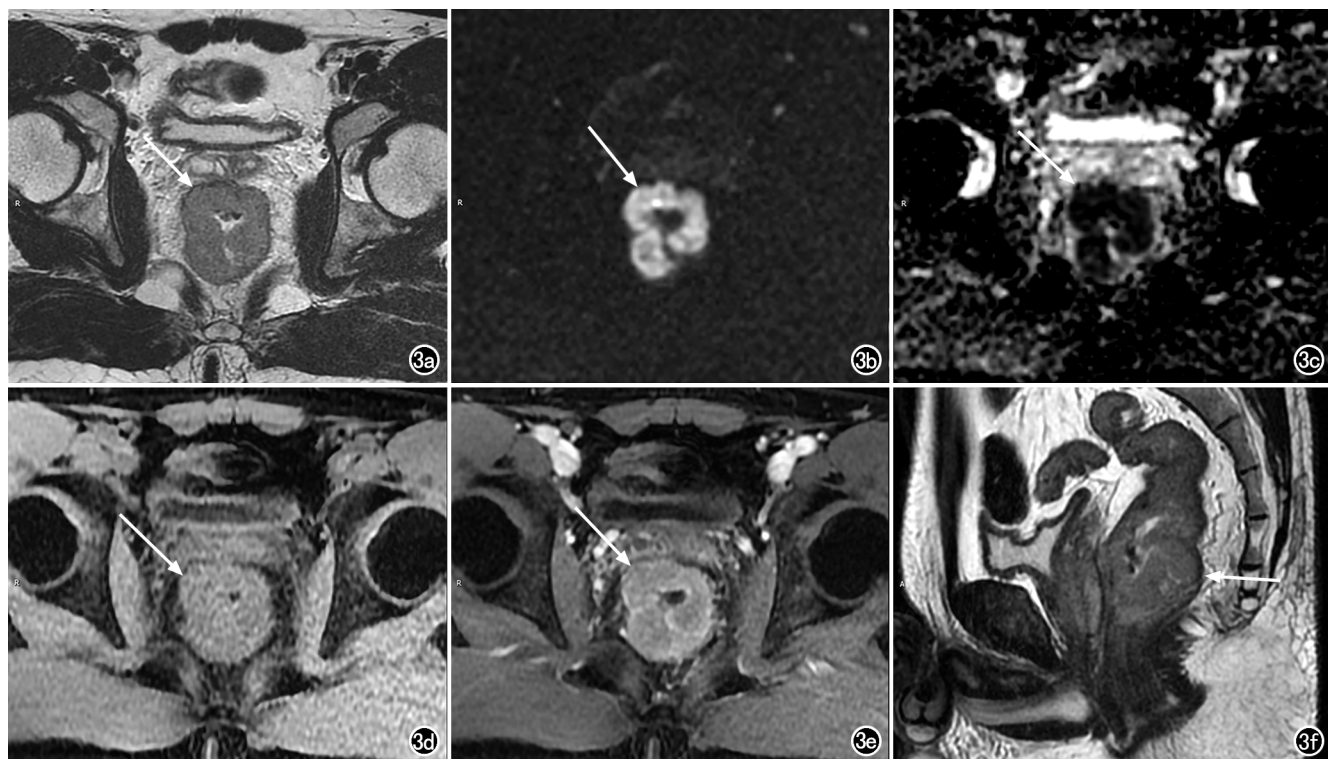


图3 患者,男,35岁,大便性状改变2月余,肠镜病理提示直肠弥漫大B细胞淋巴瘤。a)斜轴面 T_2 WI 示直肠壁环周增厚,呈均匀稍高信号(箭);b)斜轴面 DWI 示病灶呈明显高信号(箭);c)ADC 图示病灶呈明显低信号(箭),提示肿瘤显著弥散受限;d)斜轴面 T_1 WI 抑脂平扫示肿瘤呈等信号(箭);e) T_1 WI 增强示肿瘤呈轻度均匀强化(箭);f)矢状面 T_2 WI 示肿瘤位于直肠中下段(箭)。

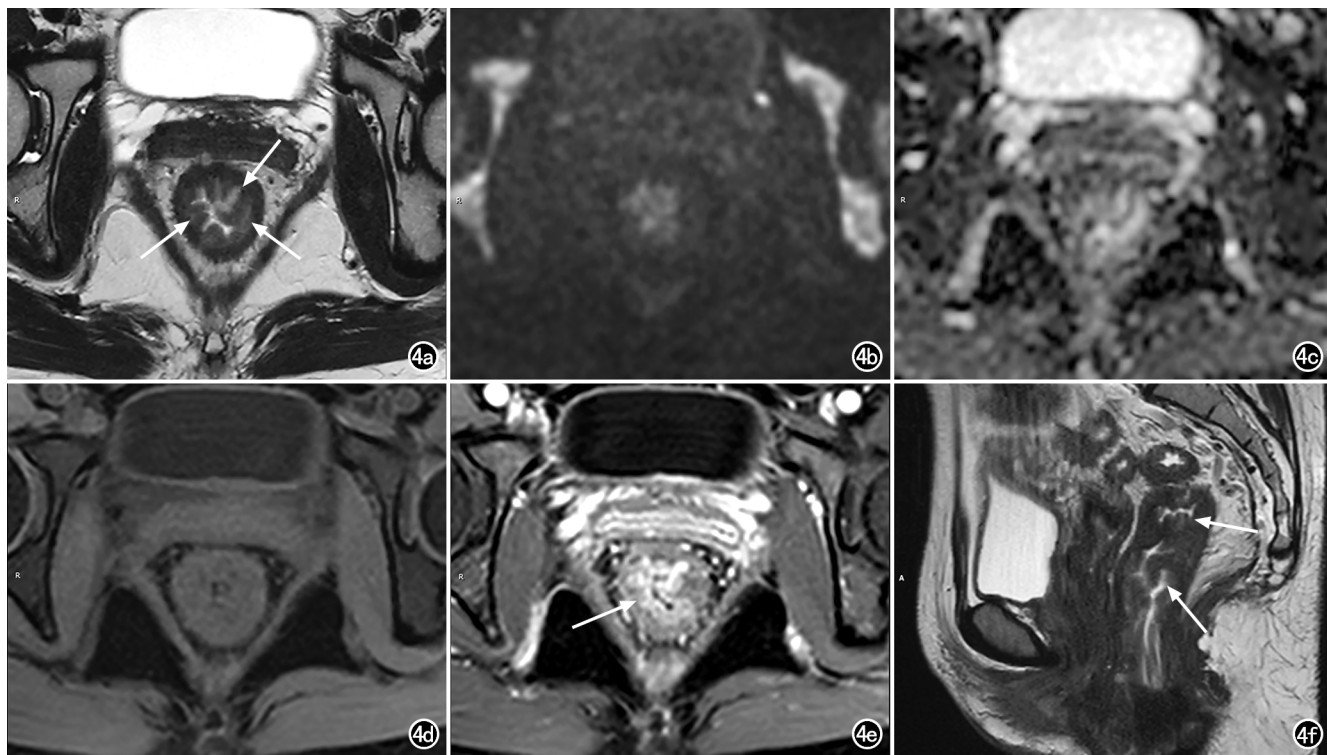


图4 患者,女,33岁,反复排便不畅1年余,便血半年,肠镜病理考虑SRUS。a)斜轴面 T_2 WI 示直肠壁环周增厚,呈等信号,直肠黏膜皱襞粗大,表现为息肉样突向肠腔(箭);b)斜轴面 DWI 示病变肠壁呈等信号;c)ADC 图示病灶呈等及稍高混杂信号,提示病变无弥散受限;d)斜轴面 T_1 WI 抑脂平扫示病灶呈等信号;e) T_1 WI 增强示病变肠壁分层样强化,以黏膜面为著(箭);f)矢状面 T_2 WI 示病变位于直肠中下段,呈较长节段肠壁受累伴黏膜皱襞粗大(箭)。

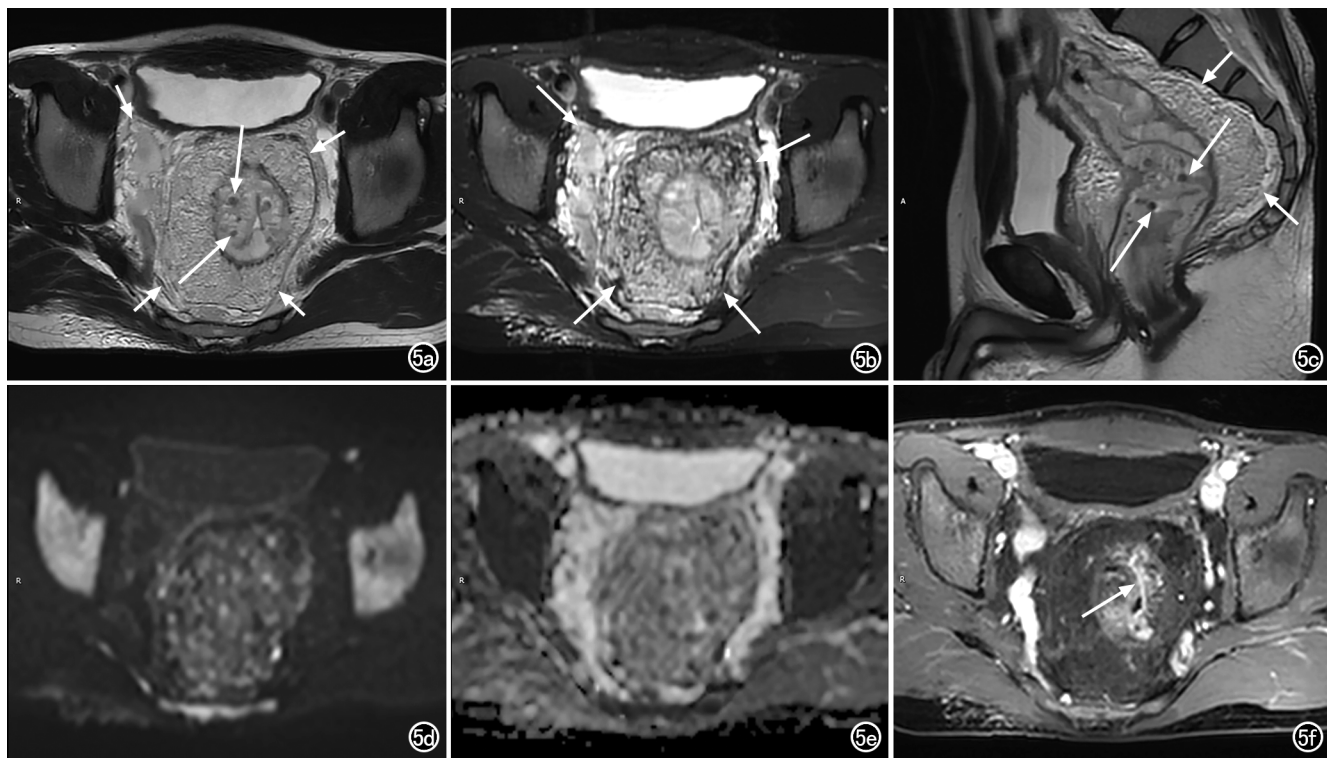


图5 患者,男,25岁,反复便血22年余,手术病理提示直肠CH。a)斜轴面 T_2 WI 示直肠壁环周增厚,呈粘液样/水样高信号,肠壁内多发小结节状低信号影(长箭),提示静脉石;直肠系膜内、双侧闭孔区多发高信号蜂窝状增多血管(短箭);b)斜轴面 T_2 WI 脂肪抑制序列可见病灶仍呈显著高信号,且病灶边界更为清晰(箭);c)矢状面 T_2 WI 示直肠壁弥漫性、长节段增厚伴肠壁内静脉石(长箭),直肠系膜内蜂窝状增多血管(短箭);d)斜轴面 DWI 示病灶呈高信号;e)ADC 图示病灶呈高信号,提示病变无明显弥散受限;f)斜轴面 T_1 WI 增强示直肠黏膜线样明显强化(箭)。

肠系膜蜂窝状血管增多(95.7% vs. 0%, $P<0.001$)、肠壁及肠旁钙化灶(78.3% vs. 0%, $P<0.001$)更常见于直肠 CH(表 2)。

直肠 MAC、SRCC、淋巴瘤、SRUS 和 CH 的典型 MRI 影像学征象分别见图 1~5。MRI 影像诊断流程图详见图 6。

讨 论

直肠环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变患者的临床及影像学征象存在较多重叠,放射科医生对其认识不足可能导致术前误诊,从而影响临床治疗决策。本研究回顾性比较了本院少见类型的直肠环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变的 MRI 征象,包括 MAC、SRCC、淋巴瘤、SRUS 以及 CH,进一步明确了上述疾病的 MRI 诊断和鉴别诊断要点,以期提高放射科医生对此类疾病的诊断及鉴别诊断能力。

与既往研究类似^[4,5],本研究中直肠 MAC 的典型征象为 T₂WI 粘液样/水样高信号且粘液成分呈 DWI 轻度或无弥散受限,这与 MAC 富含细胞外粘液、粘液内肿瘤细胞密度较低相符。值得注意的是,在临床工作中,直肠 MAC 常易被误诊为脓肿;当 MRI 表现为 DWI 等或稍高信号、ADC 图高信号(无明显弥散受限)以及肠周缺乏炎症反应时,应高度怀疑 MAC 的可能。此外,直肠 MAC 大部分呈不均匀强化,这与既往研究一致^[6,7],这可能与肿瘤细胞成分的不均匀分布有关(T₂WI 表现为高信号粘液湖内斑片状、网格状或蜂窝状低信号影)。与直肠 MAC 类似,直肠 CH 常呈 T₂WI 粘液样/水样高信号,这可能导致与 MAC 混淆,但更长病变肠管节段、黏膜层留存伴分层样强化、肠系膜蜂窝状血管增多、肠壁及肠旁多发钙化灶高度提示直肠 CH。

本研究中,大部分直肠 SRCC 呈较长节段、肠壁环周增厚的 T₂WI 稍高信号影(伴或不伴有 T₂WI 粘液样/水样高信号),并常见 DWI 轻度弥散受限及肠壁分层样强化,此种影像学征象容易误诊为慢性炎症。既往研究表明,SRCC 的肿瘤细胞内富含粘液且常在黏膜下浸润生长,肿瘤的浸润与促纤维增生反应可导致肠壁向心性增厚、僵硬,从而可在增强扫描表现分层样“恶性靶征”^[8-11]。此外,本研究中超过一半的 SRCC 患者出现肠系膜污垢样改变,这可能与 SRCC 的肿瘤细胞易从原发灶脱落并侵犯肠周组织有关^[12],T₂WI 表现为直肠系膜多发絮片状低信号影。“恶性靶征”和直肠系膜污垢样改变的 MRI 影像征象高度提示 SRCC,是其与慢性炎症鉴别的重要依据。

在本研究中,直肠淋巴瘤的病变肠壁厚度更厚、均匀强化及 DWI 弥散受限更显著,这应与淋巴瘤细胞弥

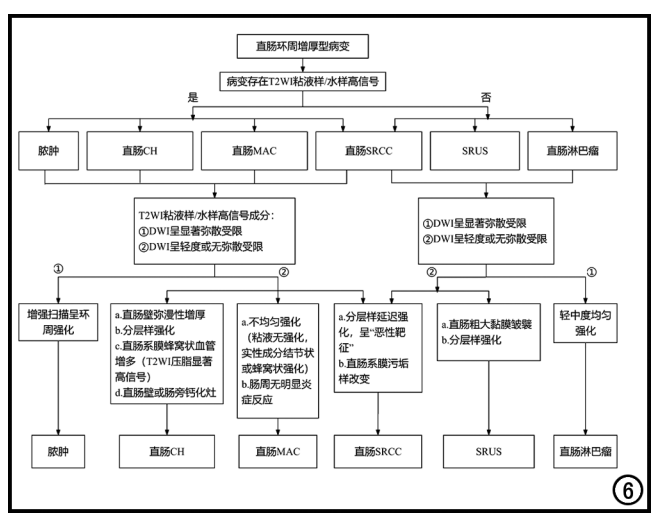


图 6 直肠少见环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变影像诊断流程图(MAC:黏液腺癌;SRCC:印戒细胞癌;SRUS:孤立性直肠溃疡综合征;CH:海绵状血管瘤)。

漫性生长、细胞密度高密切相关^[13-15]。

SRUS以直肠黏膜增厚、出现粗大皱褶及分层样强化为主要影像学特征,其机制可能与反复的黏膜损伤、修复导致病变肠壁黏膜固有层弥漫性胶原沉积,平滑肌纤维显著增生有关,严重者可累及黏膜下层及固有肌层^[16]。直肠 CH 的典型征象为长节段、肠壁环周增厚的 T₂WI 粘液样/水样高信号,伴直肠系膜蜂窝状血管增多及多发钙化灶,这与既往报道一致^[17-19]。组织病理学上,直肠 CH 内的血管异常扩张、血流缓慢,是受累肠壁呈现 T₂WI 显著高信号的重要原因;病变常突破肠壁累及肠周系膜,在直肠系膜内形成迂曲增多的蜂窝状血管结构;异常血管内血流缓慢易形成血栓,血栓钙化形成静脉石^[17]。

本研究存在以下局限性:首先,本研究为回顾性、单中心研究,样本量较小,这是本研究的重要局限,后续将开展多中心合作,扩大病例数量有助于更加深入地分析上述疾病表现;其次,不同类型的淋巴瘤病理学差异较大,可能出现不同类型的影像学表现,本研究由于样本量有限未进一步区分淋巴瘤亚型,未来值得进一步深入研究。本研究仅评估了五种少见直肠环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变的 MRI 征象,其他更加罕见的类型有待进一步分析。

综上所述,MRI 影像学征象在直肠少见环周增厚型肿瘤与肿瘤样病变的诊断及鉴别诊断中具有重要价值,可为临床诊疗决策提供有力支持。

参考文献:

[1] Miyakita H, Sadahiro S, Ogimi T, et al. Mucinous components assessed by magnetic resonance imaging in primary rectal cancer tissue before and after chemoradiotherapy and tumor response[J]. Int J Colorectal Dis, 2018, 33(8): 1135-1138.

[2] 陈照宏,高玉颖,李晓哈,等.磁共振成像在直肠腺癌及粘液腺癌诊断中的应用研究[J].医学影像学杂志,2023,33(1):75-78.

[3] Horvat N, Hope TA, Pickhardt PJ, et al. Mucinous rectal cancer: concepts and imaging challenges[J]. Abdom Radiol (NY), 2019, 44(11):3569-3580.

[4] Yu SK, Chand M, Tait DM, et al. Magnetic resonance imaging defined mucinous rectal carcinoma is an independent imaging biomarker for poor prognosis and poor response to preoperative chemoradiotherapy[J]. Eur J Cancer, 2014, 50(5):920-927.

[5] Nasu K, Kuroki Y, Minami M. Diffusion-weighted imaging findings of mucinous carcinoma arising in the ano-rectal region: comparison of apparent diffusion coefficient with that of tubular adenocarcinoma[J]. Jpn J Radiol, 2012, 30(2):120-127.

[6] Hussain SM, Outwater EK, Siegelman ES. Mucinous versus non-mucinous rectal carcinomas: differentiation with MR imaging[J]. Radiology, 1999, 213(1):79-85.

[7] Hama Y, Makita K, Yamana T, et al. Mucinous adenocarcinoma arising from fistula in ano: MRI findings[J]. AJR Am J Roentgenol, 2006, 187(2):517-521.

[8] Li ZH, You DY, Gao DP, et al. Role of CT scan in differentiating the type of colorectal cancer[J]. Onco Targets Ther, 2017, 10: 2297-2303.

[9] Rudralingam V, Dobson MJ, Pitt M, et al. MR imaging of linitis plastica of the rectum[J]. AJR Am J Roentgenol, 2003, 181(2): 428-430.

[10] Boustani J, Kim S, Lescut N, et al. Primary linitis plastica of the

rectum; focus on magnetic resonance imaging patterns and treatment options[J]. Am J Case Rep, 2015, 16:581-585.

[11] Wnorowski AM, Menias CO, Pickhardt PJ, et al. Mucin-containing rectal carcinomas: overview of unique clinical and imaging features[J]. AJR Am J Roentgenol, 2019, 213(1):26-34.

[12] Liang Z, Yan D, Li G, et al. Clinical analysis of primary colorectal signet-ring cell carcinoma[J]. Clin Colorectal Cancer, 2018, 17(1):e39-e44.

[13] 程卫玲,杨晓棠.胃肠道淋巴瘤的影像诊断新进展[J].国际医学放射学杂志,2013,36(6):541-544.

[14] Sun Y, Liu H, Xie P, et al. The CT findings of extranodal natural killer/T-cell lymphoma, nasal type involving the gastrointestinal tract[J]. Eur Radiol, 2025, 35(8):4932-4944.

[15] Bates DDB, de Paula MCF, Horvat N, et al. Beyond adenocarcinoma: MRI of uncommon rectal neoplasms and mimickers[J]. Abdom Radiol (NY), 2019, 44(11):3581-3594.

[16] Zhu QC, Shen RR, Qin HL, et al. Solitary rectal ulcer syndrome: clinical features, pathophysiology, diagnosis and treatment strategies[J]. World J Gastroenterol, 2014, 20(3):738-744.

[17] 杨秀娟,罗江平,周智洋. MRI 对直肠海绵状血管瘤的临床应用价值[J].放射学实践,2021,36(1):94-97.

[18] 廖海.肠海绵状血管瘤影像表现[J].影像研究与医学应用,2019, 3(20):60-61.

[19] 陈雀芦,马小龙,胡文超.乙状结肠-直肠弥漫性海绵状血管瘤影像学特征[J].实用放射学杂志,2018,34(8):1210-1212.

(收稿日期:2026-06-03 修回日期:2026-08-07)

下期要目

基于手术病理验证的胃癌卵巢转移影像学分型
基于多参数 MRI 影像组学预测直肠癌术后早期
复发风险
基于深度学习的心肌氧合 MR 成像在扩张型
心肌病中的应用
细胞外容积联合 CT 影像特征评估胃间质瘤危险度
分级的应用
人工智能辅助压缩感知(ACS)技术单次屏气心脏
短轴面黑血 T₂WI 成像的应用

基于深度学习重建的薄层 VIBE 序列与常规 VIBE 序列
在肝细胞癌及胆管细胞癌 MRI 图像质量对比研究
基于功能性肝脏影像评分和 mDixon-Quant 成像预测
进展期慢性肝病患者的无移植生存
基于超声、临床特征及实验室指标的联合预测模型在儿童
膀胱输尿管反流诊断中的应用
CT 影像组学联合免疫炎症指标构建集成学习模型在
胃淋巴瘤与 Borrmann IV 型胃癌鉴别中的价值:
一项双中心研究

• 直肠癌影像学专题 •

基于增强 CT 影像组学结合机器学习预测结直肠癌肿瘤出芽等级的价值

孙世超, 索龙龙, 张伍杰, 许永杰, 谢亚玓

【摘要】 目的:探讨基于增强 CT 影像组学结合机器学习对结直肠癌肿瘤出芽(TB)等级的预测价值。**方法:**回顾性收集两个中心术后病理证实的结直肠癌患者。中心 1 纳入 467 例患者,按 7:3 随机分为训练集(327 例)和内部验证集(140 例);中心 2 纳入 209 例患者,均用作外部验证集。根据术后病理结果分为中低 TB 组和高 TB 组。在增强三期图像上逐层勾画肿瘤轮廓,并提取其影像组学特征。使用多层感知器、支持向量机(SVM)、逻辑回归和朴素贝叶斯构建预测模型。同时,利用单因素和多因素 Logistic 回归分析选取临床影像学特征中的独立预测因素,并作为额外的特征输入至最优影像组学模型中构建列线图模型。**结果:**SVM 表现出良好的预测性能,在训练集、内部验证集和外部验证集的 AUC 分别为 0.918、0.863、0.835。分化程度、强化方式和 CT-N 分期是结直肠癌 TB 等级的独立预测因素,将其输入至 SVM 模型中构建的列线图模型具有最高的预测性能,在训练集、内部验证集和外部验证集中的 AUC 分别为 0.951、0.904、0.858。**结论:**基于增强 CT 影像组学和机器学习的预测模型可在术前较好地预测结直肠癌 TB 等级,纳入临床影像学特征构建的列线图模型可进一步提升性能。

【关键词】 结直肠癌;肿瘤出芽;体层摄影术,X 线计算机;影像组学;列线图

【中图分类号】 R735.3;R814.42 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2026)09-1006-07

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.09.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Preoperative prediction of tumor budding grade in colorectal cancer based on enhanced CT radiomics combined with machine learning SUN Shi-chao, SUO Long-long, ZHANG Wu-jie, et al. Second Department of Hepatobiliary Surgery, Handan First Hospital, Hebei 056000, China

【Abstract】 Objective: To explore the predictive value of enhanced CT-based radiomics combined with machine learning for the grade of tumor budding (TB) in colorectal cancer. **Methods:** Retrospective collection of colorectal cancer patients confirmed by postoperative pathology from two centers was conducted. A total of 467 patients were enrolled from Center 1, who were randomly divided into a training cohort ($n=327$) and an internal validation cohort ($n=140$) in a 7:3 ratio. Center 2 contributed 209 patients, all of whom were assigned to the external validation cohort. Based on postoperative pathological assessment, patients were categorized into either a low-to-moderate tumor budding (TB) group or a high TB group. The tumor contours were outlined layer by layer on the three-phase contrast-enhanced CT images, and their radiomics features were extracted. Prediction models were built using multi-layer perceptron, support vector machine (SVM), logistic regression, and naive Bayes. At the same time, univariate and multivariate logistic regression analyses were used to select independent predictive factors from clinical imaging features, and these factors were input as additional features into the optimal radiomics model to construct a nomogram model. **Results:** Robust predictive performance was observed with the SVM model, as evidenced by AUCs of 0.918 in the training cohort, 0.863 in the internal validation cohort, and 0.835 in the external validation cohort, respectively. In colorectal cancer, the differentiation degree, enhancement mode, and CT-N staging were identified as independent predictors of TB grade. When these variables were incorporated into a SVM-based nomogram, the model demonstrated superior predictive accuracy. The model achieved AUC values of 0.951 in the training cohort, 0.904 in the internal validation cohort, and 0.858 in the external validation cohort, respectively. **Conclusion:** The predictive model based on enhanced CT radiomics and machine learning can better predict the TB grade of colorectal cancer before surgery, and the nomogram model established by incorporating clinical imaging features can further improve performance.

【Key words】 Colorectal cancer; Tumor budding; Tomography, X-ray computer; Radiomics; Nomogram

结直肠癌是消化系统最常见的恶性肿瘤之一,严

重威胁人类健康。2024 年癌症报告显示,中国结直肠癌的年新发病例和死亡病例分别为 57.8 万和 24 万,其发病率和死亡率在全部恶性肿瘤中分别居第 2 和第 4 位^[1]。肿瘤出芽(tumor budding, TB)是实体瘤特有的病理特征,在肿瘤的侵袭和转移过程中发挥着重要

作者单位: 056000 河北,邯郸市第一医院肝胆外科(孙世超、张伍杰、谢亚玓),CT 室(许永杰);056000 河北,邯郸市中心医院普外七科(索龙龙)

作者简介: 孙世超(1987—),男,河北邯郸市人,硕士,主治医师,主要从事普通外科工作。

通信作者: 谢亚玓, E-mail: 13171861606@163.com

作用^[2]。相关研究表明, TB 是导致结直肠癌患者预后不良的独立危险因素之一^[3-5]。此外, TB 等级较高的患者可能无法从新辅助治疗中获益^[6-8]。然而, 目前 TB 等级的判断主要基于术后切除标本的病理学检查^[9], 存在有创、诊断延迟等局限, 难以满足术前精准分层管理的需求。因此, 亟需探索一种安全、有效且无创的术前评估手段, 以实现 TB 等级的准确预测。增强 CT 是结直肠癌术前诊断与分期的重要影像学检查, 并已广泛用于临床。然而, 传统的评估方式主要提供病变的定性诊断, 且在很大程度上依赖于影像科医师的主观经验。影像组学通过提取医学图像中肉眼无法识别的潜在定量特征, 并结合机器学习方法构建相关的预测模型, 能够有效指导临床决策^[10]。近年来, 增强 CT 影像组学在结直肠癌中的应用不断拓展^[11], 但有关 TB 等级的相关研究仍较为匮乏。此外, 国内外尚无学者将增强 CT 影像组学和机器学习方法相结合用于评估结直肠癌的 TB 等级。本研究旨在探讨增强 CT 影像组学结合机器学习术前预测结直肠癌 TB 等级的价值。

材料与方法

1. 病例资料

回顾性收集 2017 年 1 月至 2025 年 2 月于邯郸市第一医院(中心 1)和 2019 年 1 月至 2025 年 2 月于邯郸市中心医院(中心 2)接受手术治疗的结直肠癌患者。病例纳入标准: ①经术后病理证实的结肠或直肠癌患者, 并有明确的 TB 信息; ②术前 2 周内完成全腹部增强 CT 扫描。病例排除标准: ①CT 检查前接受任何抗肿瘤治疗; ②临床资料缺失; ③图像存在伪影或病灶显示不清。最终中心 1 纳入 467 例患者, 按 7:3 随机分为训练集(327 例)和内部验证集(140 例)。中心 2 纳入 209 例患者, 均用作外部验证集。

2. 检查方法

采用 GE Revolution CT 或 Aquilion ONE 扫描仪行全腹部增强 CT 检查。扫描参数: 管电压 120 kV, 管电流 200~500 mA, 层厚 1.00~1.25 mm, 旋转时间 0.5 s/r, 螺距 0.800~0.984。增强扫描经肘静脉注射碘对比剂(浓度 350 mg I/mL), 注射流率 2.5~3.0 mL/s, 剂量 80 mL, 注射后分别延迟 30 s、70 s 及 120 s 采集动脉期、静脉期和延迟期图像。

3. 临床、影像学特征收集及评估

收集患者的临床资料, 包括年龄、性别、吸烟史、饮酒史、糖尿病、高血压、肿瘤家族史、癌胚抗原、糖类抗原 125、糖类抗原 199 和分化程度(基于术前穿刺获取)。由两位有 10 年以上腹部影像诊断经验的放射科医师独立评估肿瘤的影像学特征, 包括肿瘤最长径、边

界、形态、强化方式、坏死、位置、CT-T 分期和 CT-N 分期。当两位医师意见出现分歧时, 通过协商达成一致。

4. 病理学评估

首先, 在低倍镜下全面观察 HE 切片, 选取肿瘤出芽最为密集的区域。随后, 在高倍镜下挑选 10 个代表性视野, 对出芽情况进行详细计数分析。根据国际肿瘤出芽共识会议提出的标准化方法^[5], 分为 TB 1(0~4 个芽)、TB 2(5~9 个芽)、TB 3(≥ 10 个芽)。参考既往文献^[12-13], 将患者分为两组, 即中低 TB 组(TB 1+TB 2)和高 TB 组(TB 3)。

5. 图像预处理和肿瘤分割

将所有图像导入 ITK-SNAP(<http://www.itk-snap.org>)软件。首先, 对图像进行重采样及 Z-score 标准化, 以减少不同设备的固有差异。随后, 由上述两位放射科医师在动脉期、静脉期和延迟期图像上分别沿肿瘤边缘逐层勾画 ROI, 并生成感兴趣区容积(图 1)。勾画时尽量避开肠道内容物、空气及正常组织等。两位医师均对患者分组情况不知情。

6. 影像组学特征提取和筛选

根据影像生物标志物标准化倡议, 使用 pyradiomics3.0.1 工具包从动脉期、静脉期和延迟期图像中分别提取 1746 个影像组学特征, 类型包括形状、一阶、纹理和小波特征。在训练集中筛选特征, 具体步骤如下: ①对两位医师提取的影像组学特征进行组内相关系数(intra class correlation coefficient, ICC)检验, 保留一致性较高($ICC \geq 0.75$)的特征; ②根据 Pearson 相关系数剔除系数绝对值 > 0.8 的特征; ③使用最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)结合十折交叉验证进一步筛选, 以获得最佳特征子集。

7. 模型构建

采用 4 种机器学习方法, 包括多层感知机(multi-layer perceptron, MLP)、支持向量机(support vector machines, SVM)、逻辑回归(logistic regression, LR)和朴素贝叶斯(naive bayes, NB)基于影像组学特征构建预测模型。同时, 利用单因素和多因素 Logistic 回归分析选取临床影像学特征中的独立预测因素, 用于构建临床模型。最后, 将独立预测因素作为额外的输入特征连接到最优影像组学模型中构建联合模型, 并绘制列线图进行可视化。

8. 统计学分析

采用 SPSS 26.0 软件进行统计学分析。定量数据以均值士标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 采用独立样本 t 检验比较两组间差异。定性数据以频数(百分比)表示, 采用 χ^2 检验比较两组间差异。使用 Kappa 系数评估两位

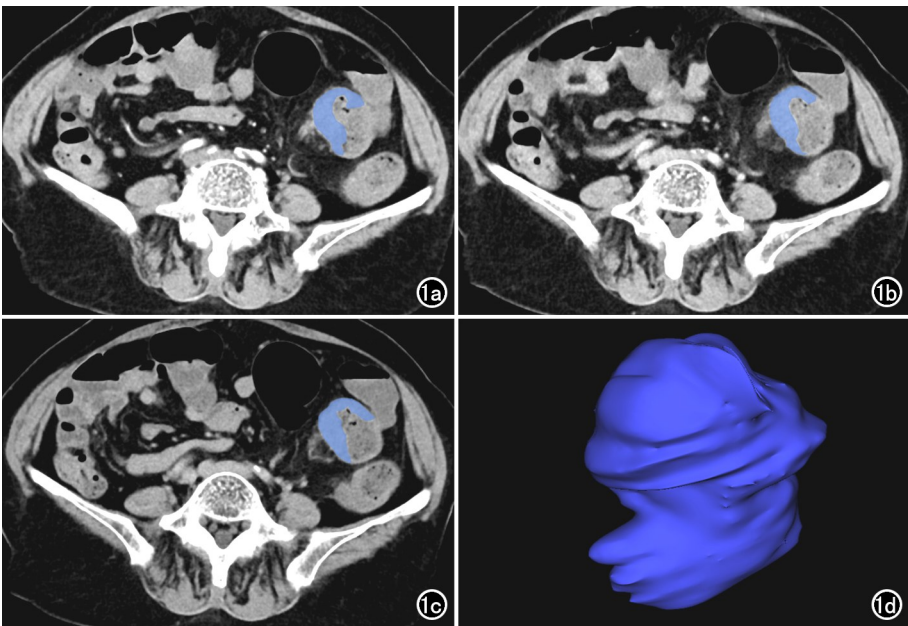


图1 肿瘤勾画示意图。a) 动脉期勾画图像;b) 静脉期勾画图像;c) 延迟期勾画图像;d) 肿瘤感兴趣体积。

放射科医师对 CT-T 分期和 CT-N 分期的一致性。采用受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线评估模型的预测性能。校正曲线和决策曲线分别用于评价校准度、临床净获益。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1.临床及影像学特征比较

在训练集中,中低 TB 组与高 TB 组患者在分化程度、强化方式、CT-T 分期和 CT-N 分期之间差异均有统计学意义 (P 均 <0.05);在内部验证集和外部验证集中,仅分化程度、强化方式和 CT-N 分期在两组之间差异有统计学意义 (P 均 <0.05 ,表 1、2)。一致性分析结果显示,两位医师在评估 CT-T 分期和 CT-N 分期时,评估结果之间具有较高的一致性 (Kappa 值 = 0.857、0.891, $P<0.001$)。多因素 Logistic 回归分析结果显示,分化程度 ($OR=3.345$, $P<0.001$)、强化方式 ($OR=1.958$, $P=0.015$) 和 CT-N 分期 ($OR=2.533$, $P<0.001$) 是结直肠癌 TB 等级的独立预测因素,构建

的临床模型在训练集、内部验证集和外部验证集的 AUC 分别为 0.722、0.694、0.661。

2.特征筛选和机器学习

每例患者提取 5238 个影像组学特征。首先,筛选出 $ICC\geq 0.75$ 的特征共 4839 个;其次,经 Pearson 相关分析保留 725 个特征;最终,利用 LASSO 结合十折交叉验证筛选出 11 个最佳特征。其中,动脉期有 2 个

表1 两组患者的临床特征比较 [n(%)]

特征	训练集 (n=327)		统计值	P 值	内部验证集 (n=140)		统计值	P 值	外部验证集 (n=209)		统计值	P 值
	中低 TB 组 (n=185)	高 TB 组 (n=142)			中低 TB 组 (n=79)	高 TB 组 (n=61)			中低 TB 组 (n=127)	高 TB 组 (n=82)		
年龄 (岁)	64.41±10.62	64.28±8.57	-0.122	0.903	65.10±9.76	66.16±10.23	0.626	0.533	64.87±10.34	67.11±9.30	1.592	0.113
性别			1.112	0.292			2.305	0.129			0.975	0.323
男	116 (62.7)	97 (68.3)			53 (67.1)	48 (78.7)			75 (59.1)	54 (65.9)		
女	69 (37.3)	45 (31.7)			26 (32.9)	13 (21.3)			52 (40.9)	28 (34.1)		
吸烟史			2.605	0.106			0.121	0.728			2.203	0.138
是	31 (16.8)	34 (23.9)			12 (15.2)	8 (13.1)			14 (11.0)	15 (18.3)		
否	154 (83.2)	108 (76.1)			67 (84.8)	53 (86.9)			113 (89.0)	67 (81.7)		
饮酒史			1.653	0.199			0.271	0.603			0.037	0.848
是	39 (21.1)	22 (15.5)			10 (12.7)	6 (9.8)			23 (18.1)	14 (17.1)		
否	146 (78.9)	120 (84.5)			69 (87.3)	55 (90.2)			104 (81.9)	68 (82.9)		
糖尿病			1.283	0.257			0.043	0.836			0.050	0.823
有	13 (7.0)	15 (10.6)			14 (17.7)	10 (16.4)			7 (5.5)	12 (14.6)		
无	172 (93.0)	127 (89.4)			65 (82.3)	51 (83.6)			75 (94.5)	115 (85.4)		
高血压			1.766	0.184			1.292	0.256			1.414	0.234
有	84 (45.4)	75 (52.8)			30 (38.0)	29 (47.5)			68 (53.5)	37 (45.1)		
无	101 (54.6)	67 (47.2)			49 (62.0)	32 (52.5)			59 (46.5)	45 (54.9)		
肿瘤家族史			0.022	0.883			0.027	0.869			0.417	0.519
有	11 (5.9)	9 (6.3)			3 (3.8)	2 (3.3)			9 (7.1)	4 (4.9)		
无	174 (94.1)	133 (93.7)			76 (96.2)	59 (96.7)			118 (92.9)	78 (95.1)		
癌胚抗原 (ng/mL)			1.930	0.165			2.975	0.085			0.996	0.318
≤5	122 (65.9)	83 (58.5)			61 (77.2)	39 (63.9)			86 (67.7)	50 (61.0)		
>5	63 (34.1)	59 (41.5)			18 (22.8)	22 (36.1)			41 (32.3)	32 (39.0)		
糖类抗原 125 (U/mL)			1.320	0.251			0.129	0.720			0.121	0.728
≤35	171 (92.4)	126 (88.7)			69 (87.3)	52 (85.2)			116 (91.3)	76 (92.7)		
>35	14 (7.6)	16 (11.3)			10 (12.7)	9 (14.8)			11 (8.7)	6 (7.3)		
糖类抗原 199 (U/mL)			0.100	0.752			0.376	0.540			0.406	0.524
≤30	146 (78.9)	110 (77.5)			63 (79.7)	46 (75.4)			108 (85.0)	67 (81.7)		
>30	39 (21.1)	32 (22.5)			16 (20.3)	15 (24.6)			19 (15.0)	15 (18.3)		
分化程度			32.644	<0.001			14.476	<0.001			15.168	<0.001
中高分化	149 (80.5)	72 (50.7)			67 (84.8)	34 (55.7)			98 (77.2)	42 (51.2)		
低分化	36 (19.5)	70 (49.3)			12 (15.2)	27 (44.3)			29 (22.8)	40 (48.8)		

表 2 两组患者的影像学特征比较 [n(%)]

特征	训练集(n=327)		统计值	P 值	内部验证集(n=140)		统计值	P 值	外部验证集(n=209)		统计值	P 值
	中低 TB 组 (n=185)	高 TB 组 (n=142)			中低 TB 组 (n=79)	高 TB 组 (n=61)			中低 TB 组 (n=127)	高 TB 组 (n=82)		
肿瘤最长径(cm)	4.16±1.17	4.36±1.19	1.551	0.122	4.43±1.29	4.65±1.33	0.995	0.322	4.27±1.23	4.49±1.24	1.247	0.214
边界			1.972	0.160			0.879	0.349			0.276	0.599
清晰	82(44.3)	52(36.6)			32(40.5)	20(32.8)			45(35.4)	32(39.0)		
模糊	103(55.7)	90(63.4)			47(59.5)	41(67.2)			82(64.6)	50(61.0)		
形态			2.044	0.153			0.710	0.400			3.228	0.072
规则	49(26.5)	28(19.7)			16(20.3)	9(14.8)			46(36.2)	20(24.4)		
不规则	136(73.5)	114(80.3)			63(79.7)	52(85.2)			81(63.8)	62(75.6)		
强化方式			7.059	0.008			3.971	0.046			5.881	0.015
均匀	141(76.2)	89(62.7)			58(73.4)	35(57.4)			96(75.6)	49(59.8)		
不均匀	44(23.8)	53(37.3)			21(26.6)	26(42.6)			31(24.4)	33(40.2)		
坏死			1.053	0.305			0.087	0.768			0.690	0.406
有	54(29.2)	49(34.5)			19(24.1)	16(26.2)			22(17.3)	18(22.0)		
无	131(70.8)	93(65.5)			60(75.9)	45(73.8)			105(82.7)	64(78.0)		
位置			3.255	0.196			1.040	0.595			1.550	0.461
右侧结肠	61(33.0)	41(28.9)			27(34.2)	16(26.2)			32(25.2)	27(32.9)		
左侧结肠	33(17.8)	37(26.0)			18(22.8)	15(24.6)			28(22.0)	15(18.3)		
直肠	91(49.2)	64(45.1)			34(43.0)	30(49.2)			67(52.8)	40(48.8)		
CT-T 分期			4.114	0.043			1.302	0.254			2.002	0.157
T1~T2	62(33.5)	33(23.2)			32(40.5)	19(31.1)			46(36.2)	22(26.8)		
T3~T4	123(66.5)	109(76.8)			47(59.5)	42(68.9)			81(63.8)	60(73.2)		
CT-N 分期			36.610	<0.001			7.151	0.007			11.110	0.001
N0	131(70.8)	53(37.3)			54(68.4)	28(45.9)			95(74.8)	43(52.4)		
N1~N2	54(29.2)	89(62.7)			25(31.6)	33(54.1)			32(25.2)	39(47.6)		

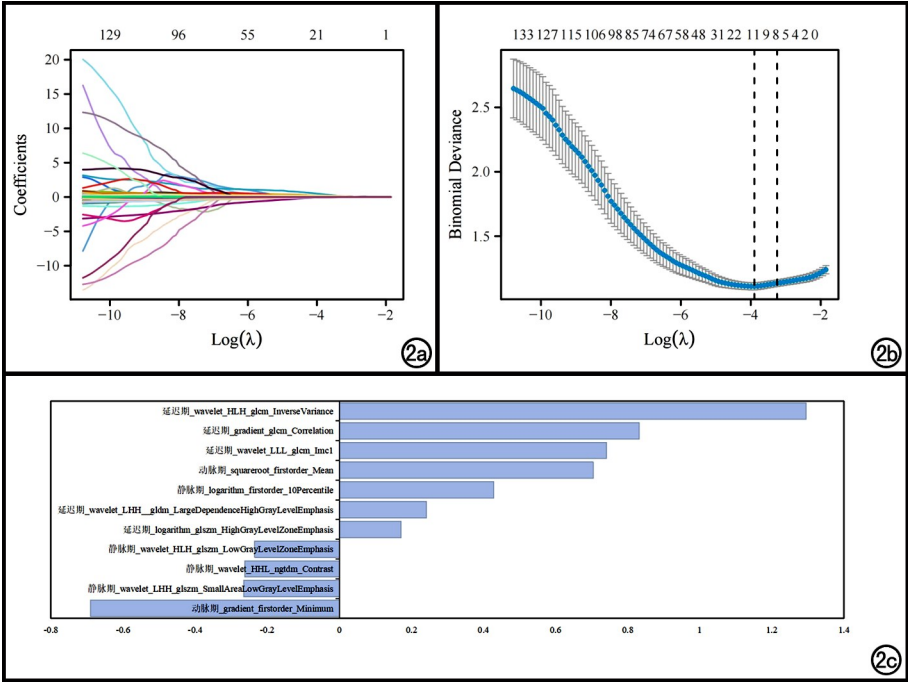


图 2 LASSO 回归筛选特征过程。a) 均方误差图;b) 回归系数图;c) 最佳特征子集。

特征,均为一阶特征;静脉期有 4 个特征,包括 1 个一阶特征和 3 个小波特征;延迟期有 5 个特征,包括 2 个纹理特征和 3 个小波特征(图 2)。将上述特征与 4 种机器学习方法结合构建影像组学模型,通过比较认为 SVM 模型的性能最优,其在训练集、内部验证集和外部验证集的 AUC 均为最高,分别为 0.918、0.863、0.835。

3.联合模型构建与评价

将分化程度、强化方式和 CT-N 分期作为额外的特征输入 SVM 模型中构建列线图模型(图 3)。通过 ROC 曲线及多项指标评价各个模型的性能(表 3、图

4)。其中,列线图模型的预测性能优于其他模型(训练集 AUC: 0.947;内部验证集 AUC:0.897;外部验证集 AUC:0.846)。DeLong 检验结果显示,在训练集、内部验证集和外部验证集中,列线图模型的 AUC 显著高于临床模型($Z = 4.327、3.541、3.282, P$ 均 <0.05)。校准曲线显示,列线图模型具有较好的拟合效果(图 5)。决策曲线显示,列线图模型在临床上的净获益更高(图 6)。

讨 论

早期识别结直肠癌的 TB 等级对于临床决策和预后改善具有重要的临床意义,然而目前尚无有效的术前评估方法获取 TB 等级信息。鉴于此,本研究提取并筛选

了结直肠癌患者术前增强 CT 的多期影像组学特征,采用多种常见的机器学习方法来构建模型并进行比较;然后将最优影像组学评分与临床影像学特征相结合构建结直肠癌术前 TB 等级的预测模型,并以列线图的形式展示。本研究结果显示,列线图显示出优异的预测性能(训练集 AUC:0.951;内部验证集 AUC: 0.904;外部验证集 AUC:0.858)。临床医师在进行决策时可参考列线图模型的预测结果,从而制定出更适合患者的治疗方案。

本研究结果显示,分化程度、强化方式和 CT-N 分期是结直肠癌 TB 等级的独立预测因素,这与此前多

表 3 不同模型的预测效能比较

模型	AUC(95% CD)	灵敏度 (%)	特异度 (%)	准确度 (%)
训练集				
MLP	0.826 (0.780~0.873)	78.87	81.08	80.12
SVM	0.918 (0.888~0.948)	90.85	86.49	88.38
LR	0.855 (0.815~0.895)	85.92	75.14	79.82
NB	0.872 (0.833~0.912)	84.51	82.16	83.18
临床模型	0.722 (0.665~0.780)	63.38	81.62	73.70
列线图模型	0.951 (0.928~0.973)	92.25	88.65	90.21
内部验证集				
MLP	0.679 (0.588~0.770)	73.77	65.82	69.29
SVM	0.863 (0.802~0.924)	86.89	83.54	85.00
LR	0.784 (0.702~0.866)	80.33	77.22	78.57
NB	0.795 (0.716~0.873)	85.25	79.75	82.14
临床模型	0.694 (0.608~0.781)	70.49	65.82	67.86
列线图模型	0.904 (0.855~0.952)	88.52	82.28	85.00
外部验证集				
MLP	0.706 (0.632~0.780)	63.41	77.17	71.77
SVM	0.835 (0.776~0.894)	81.71	83.46	82.78
LR	0.751 (0.681~0.820)	71.95	70.87	71.29
NB	0.683 (0.606~0.760)	64.63	67.72	66.51
临床模型	0.661 (0.592~0.731)	60.98	70.87	66.99
列线图模型	0.858 (0.799~0.917)	86.59	84.25	85.17

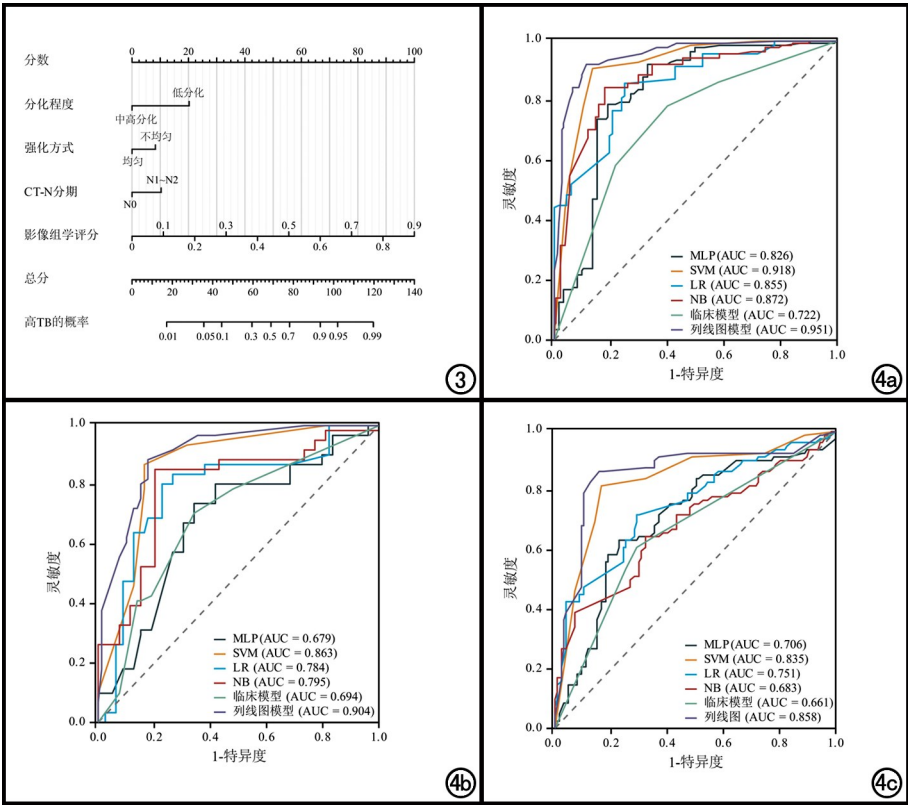


图 3 基于分化程度、强化方式、CT-N 分期及影像组学评分构建的列线图。

图 4 不同模型的 ROC 曲线。a) 训练集; b) 内部验证集; c) 外部验证集。

项研究^[14-16]结论相仿。在本研究中,高 TB 组肿瘤低分化的比例(70/142, 49.3%)高于中低 TB 组(36/185, 19.5%),提示较高的 TB 等级可能与更具侵袭性的病理学特征有关^[15]。同时,高 TB 组肿瘤更常表现为不均匀强化,可能反映了肿瘤内部血供分布不均及组织异质性增加,这些影像学表现往往与肿瘤侵袭性

增强相关。此外,与中低 TB 组相比,高 TB 组的 CT-N 分期更高。TB 是恶性肿瘤发生浸润转移的一个先兆,具体作用机制可能与上皮-间充质转化、逃避缺氧和炎症浸润有关^[17]。然而,CT 对 N 分期的判断主要依据淋巴结的增强和边缘状态等指标,具有一定的主观依赖性。进一步基于这两个因素建立的临床模型仅取得了较低的预测性能,在训练集、内部验证集和外部验证集中的 AUC 分别为 0.722、0.694、0.661。因此,仅依靠常规特征可能难以准确评估 TB 等级,对病变微观结构或内部特征进行分析,或许可以提供更加全面的信息。

影像组学通过将医学图像转化为可量化的特征,并借助机器学习提取其中关键信息,可为临床决策提供重要支持^[18]。本研究应用了包括 MLP、SVM、LR 和 NB 在内的 4 种机器学习方法,并通过内

部和外部数据集的双重验证,旨在更准确地评估模型的稳定性和泛化能力。本研究结果显示,SVM 模型对结直肠癌 TB 等级的预测性能最好,内部验证集和外部验证集的 AUC 分别为 0.863、0.835。SVM 是一种基于统计学习理论的分类算法,其通过寻找最优的超

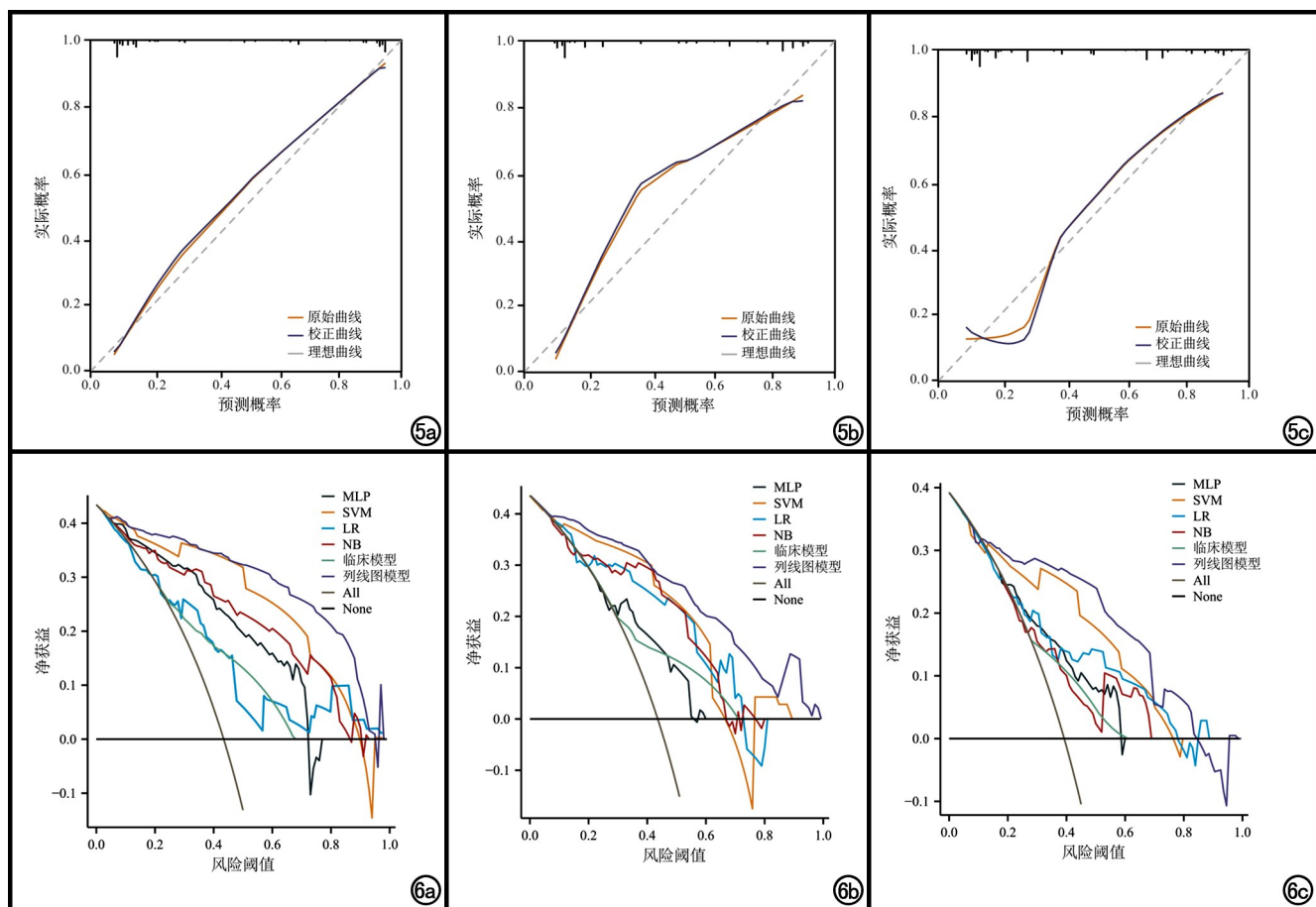


图 5 列线图模型的校准曲线。a) 训练集; b) 内部验证集; c) 外部验证集。图 6 不同模型的决策曲线。a) 训练集; b) 内部验证集; c) 外部验证集。

平面可最大化类别间的间隔。此外, SVM 在处理小样本、高维特征的情况下表现出色, 尤其在边界清晰的分类问题中具有较强的鲁棒性^[19]。此前 Feng 等^[20]利用 SVM 构建了用于预测结直肠癌肿瘤沉积风险的模型, 结果也表明该方法具有良好的预测性能。

在筛选出的 11 个最佳特征中, 包括了 3 个一阶特征、2 个纹理特征和 6 个小波特征。一阶特征通过对图像中每个像素灰度值的直接分析, 反映了图像的整体亮度和对比度, 主要捕捉像素灰度的基本统计量, 如均值、方差、偏度和峰度。纹理特征则着重分析像素之间的空间关系, 通过量化不同位置上灰度值的相对分布及变化, 揭示了组织结构的复杂性及不均匀性。小波变换可将图像信息分解为多个尺度与方向的组成部分, 进而在时间域与频率域中提供联合信息支持, 从而有助于从分子层面对肿瘤免疫微环境进行表征^[21]。然而, 小波特征与肿瘤异质性之间的相关性及其生物学可解释性仍缺乏充分证据, 尚需进一步研究加以验证。

本研究存在以下局限性: ①采用回顾性队列, 在患者入组时可能存在偏倚, 未来应计划收集前瞻性队列, 以验证模型性能; ②采用手动勾画 ROI 的方法, 过程

耗时且易受人为因素影响, 未来将尝试应用自动分割技术以减少主观因素带来的误差。

综上所述, 基于增强 CT 影像组学和机器学习的预测模型可在术前较好地预测结直肠癌 TB 等级, 纳入临床影像学特征建立的列线图模型可进一步提升性能。

参考文献:

- [1] Filho AM, Laversanne M, Ferlay J, et al. The GLOBOCAN 2022 cancer estimates: Data sources, methods, and a snapshot of the cancer burden worldwide[J]. *Int J Cancer*, 2025, 156 (7): 1336-1346.
- [2] Lugli A, Zlobec I, Berger MD, et al. Tumour budding in solid cancers[J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2021, 18(2): 101-115.
- [3] Van Wyk HC, Park J, Roxburgh C, et al. The role of tumour budding in predicting survival in patients with primary operable colorectal cancer: a systematic review[J]. *Cancer Treat Rev*, 2015, 41 (2): 151-159.
- [4] Rogers AC, Winter DC, Heeney A, et al. Systematic review and meta-analysis of the impact of tumour budding in colorectal cancer[J]. *Br J Cancer*, 2016, 115(7): 831-840.
- [5] Lugli A, Kirsch R, Ajioka Y, et al. Recommendations for reporting tumor budding in colorectal cancer based on the International Tumor Budding Consensus Conference (ITBCC) 2016[J]. *Mod*

- Pathol, 2017, 30(9):1299-1311.
- [6] Trotsyuk I, Sparschuh H, Müller AJ, et al. Tumor budding outperforms ypT and ypN classification in predicting outcome of rectal cancer after neoadjuvant chemoradiotherapy [J]. BMC Cancer, 2019, 19(1):1033.
- [7] Kim S, Huh JW, Lee WY, et al. Prognostic impact of lymphatic invasion, venous invasion, perineural invasion, and tumor budding in rectal cancer treated with neoadjuvant chemoradiotherapy followed by total mesorectal excision [J]. Dis Colon Rectum, 2023, 66(7):905-913.
- [8] Jäger T, Neureiter D, Fallaha M, et al. The potential predictive value of tumor budding for neoadjuvant chemoradiotherapy response in locally advanced rectal cancer [J]. Strahlenther Onkol, 2018, 194(11):991-1006.
- [9] 周振, 沈浮, 陆海迪, 等. 动态增强磁共振成像术前评估直肠癌肿瘤出芽等级的价值 [J]. 中国医学计算机成像杂志, 2022, 28(4):379-384.
- [10] 郭建峰, 宋鑫洋, 沈天赐, 等. 基于多模态影像组学联合机器学习模型预测甲状腺乳头状癌颈部淋巴结转移的价值 [J]. 放射学实践, 2024, 39(9):1152-1157.
- [11] 曹云太, 周俊林. 影像组学在结直肠癌诊断、疗效评估及预后预测中的研究进展 [J]. 实用放射学杂志, 2024, 40(4):663-665, 688.
- [12] Xie P, Huang Q, Zheng L, et al. Sub-region based histogram analysis of amide proton transfer-weighted MRI for predicting tumor budding grade in rectal adenocarcinoma: a prospective study [J]. Eur Radiol, 2025, 35(3):1382-1393.
- [13] 杜云霞, 徐文翔, 何雨琪, 等. 酰胺质子转移加权成像与扩散加权成像评价直肠癌肿瘤出芽等级的价值 [J]. 磁共振成像, 2025, 16(1):42-47, 73.
- [14] Gao Z, Cao H, Xu X, et al. Prognostic value of lymphovascular invasion in stage II colorectal cancer patients with an inadequate examination of lymph nodes [J]. World J Surg Oncol, 2021, 19(1):125.
- [15] Deb B, Jacob SE. Predictive power of tumour budding for lymph node metastasis in colorectal carcinomas: A retrospective study [J]. Indian J Med Res, 2019, 150(6):635-639.
- [16] Mitrovic B, Handley K, Assarzagdegan N, et al. Prognostic and predictive value of tumor budding in colorectal cancer [J]. Clin Colorectal Cancer, 2021, 20(3):256-264.
- [17] Marx AH, Mickler C, Sauter G, et al. High-grade intratumoral tumor budding is a predictor for lymphovascular invasion and adverse outcome in stage II colorectal cancer [J]. Int J Colorectal Dis, 2020, 35(2):259-268.
- [18] Dercle L, Henry T, Carré A, et al. Reinventing radiation therapy with machine learning and imaging bio-markers (radiomics): State-of-the-art, challenges and perspectives [J]. Methods, 2021, 188:44-60.
- [19] 周澜, 郭建峰, 陈进兰, 等. 基于增强 CT 影像组学联合机器学习模型术前预测甲状腺乳头状癌 BRAFV600E 基因突变的价值 [J]. 放射学实践, 2025, 40(11):1396-1402.
- [20] Feng FW, Jiang FY, Liu YQ, et al. Radiomics analysis of dual-layer spectral-detector CT-derived iodine maps for predicting tumor deposits in colorectal cancer [J]. Eur Radiol, 2025, 35(1):105-116.
- [21] Moon SH, Kim J, Joung JG, et al. Correlations between metabolic texture features, genetic heterogeneity, and mutation burden in patients with lung cancer [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2019, 46(2):446-454.

(收稿日期:2025-11-17 修回日期:2026-01-28)

· 直肠癌影像学专题 ·

直肠癌新辅助治疗效果评价——从大体影像到 AI 辅助评价体系建立

陈浩权, 王屹

【摘要】 直肠癌新辅助治疗后疗效评价直接影响等待观察、手术及后续综合治疗决策。传统 MRI 可显示肿瘤退缩和纤维、黏液改变,但在残存肿瘤识别、生物学异质性刻画、远处转移和预后预测方面仍有局限。本文系统综述传统影像学、深度学习、多模态 AI 及大语言模型辅助决策在临床完全缓解/病理完全缓解判断、免疫治疗反应、远处转移及生存预测中的研究进展,并讨论其临床转化挑战与发展方向。

【关键词】 直肠癌;新辅助治疗;磁共振成像;人工智能;影像学;深度学习;治疗反应

【中图分类号】 R735.3; R445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2026)09-1013-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.09.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



直肠癌相关死亡率位居癌症相关死亡率的第二位^[1]。基于高分辨率磁共振影像的形态学风险分层体系为直肠癌治疗提供了明确的决策路径^[2]。影像风险因素可联合或独立于肿瘤 TNM 分期共同用于新辅助治疗方案选择、手术策略制定和随访管理^[3]。术前新辅助放化疗(neoadjuvant chemoradiotherapy, nCRT)后直肠癌临床完全缓解(clinical complete response, cCR),可实施等待观察策略以满足保留器官迫切需求^[4]。尽管对于患者远处转移、生存预后以及基因免疫相关问题大体影像有提示作用,但尚不足以准确预测。因此,如何获得传统体系外肿瘤诊断及风险差异标志物是影像模型研发的核心目标。

人工智能(artificial intelligence, AI)深入挖掘影像中难以被肉眼识别的高维特征并结合人类先验知识判断治疗效果有望成为具有突破性的评价工具,推动直肠癌疗效评价从大体影像判断走向多模态生物学表型辅助决策。

影像 AI 模型判断直肠癌新辅助治疗效果

准确判断直肠癌 nCRT 后 cCR 是实施等待观察策略的关键。当前用于判断 cCR 的检查方法包括高分辨率 MRI、肛门指诊、肠镜检查及活检,必要时 PET-CT 辅助诊断。影像上,当原肿瘤区域扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)信号与周围相邻正常肠壁接近或一致,且 T₂WI 表现为正常肠壁结构或仅见 1~2 mm 低信号纤维组织时,可提示接近或达到 cCR(图 1);但当治疗后表现为纤维化、黏液变性或混合退缩时,残存肿瘤识别仍是临床难点,成为当前迫切需要解决的问题。

近年来,基于 AI 构建综合模型判断直肠癌 nCRT 效果,特别是预测病理完全缓解(pathological complete response, pCR)和辅助判断 cCR 成为研究热点。从技术路线看,现有 AI 研究大致可分为传统影像学、深度学习、多模态联合模型等(表 1)。传统影像学通过人工勾画感兴趣区并提取纹理、形态及灰度等定量特征,具有样本需求较低和便于解释的优势,但受分割方式、扫描参数和特征筛选流程影响较大,模型稳定性和跨中心泛化能力有限;深度学习模型可自动学习高维影像特征,并可结合纵向 MRI 或多任务网络同时完成分割与疗效预测,更符合治疗前后动态评价的临床逻辑,但通常依赖较大样本量,且存在黑箱性和可解释性不足的问题;多模态融合模型进一步整合影像、病理、临床及分子信息,有助于刻画肿瘤生物学异质性并提高预测性能,但不同模态数据获取难度、缺失情况和标准化差异限制了其推广应用。

1. 评价直肠癌新辅助治疗效果的荟萃分析

2025 年发表的一项荟萃分析结果提示基于 MRI 构建预测直肠癌 nCRT 后 pCR 的 AI 模型,其联合 T₂WI 和 DWI 较单一序列准确性高^[5];这一结果既与临床工作流程吻合,也显示多参数信息有助于提升模型稳定性。既往 Shen 等^[6]发表的荟萃分析结果提示,AI 模型预测 pCR 的汇集敏感度、特异度和受试者工作特征曲线下面积(area under curve, AUC)值分别达到了 82%、84% 和 90%;但研究间存在显著异质性,其中亚洲地区、低风险偏倚和深度学习的模型特异性显著高于其它;Rai 等^[7]围绕 MRI 影像学预测局部进展期直肠癌 nCRT 后 pCR 进行荟萃分析,结果提示 MRI 影像学在 pCR 预测中具有较好的诊断潜力。其中,Shin 等^[8]基于治疗后 MRI 构建 T₂WI、表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)以及融合影像学模型,并与影像医师基于 MRI 肿瘤退缩分级

作者单位:100044 北京,北京大学人民医院放射科

作者简介:陈浩权(1999-),男,广东揭阳人,博士研究生,主要从事肿瘤影像诊断工作。

通信作者:王屹, E-mail: wang_yi@hsc.pku.edu.cn

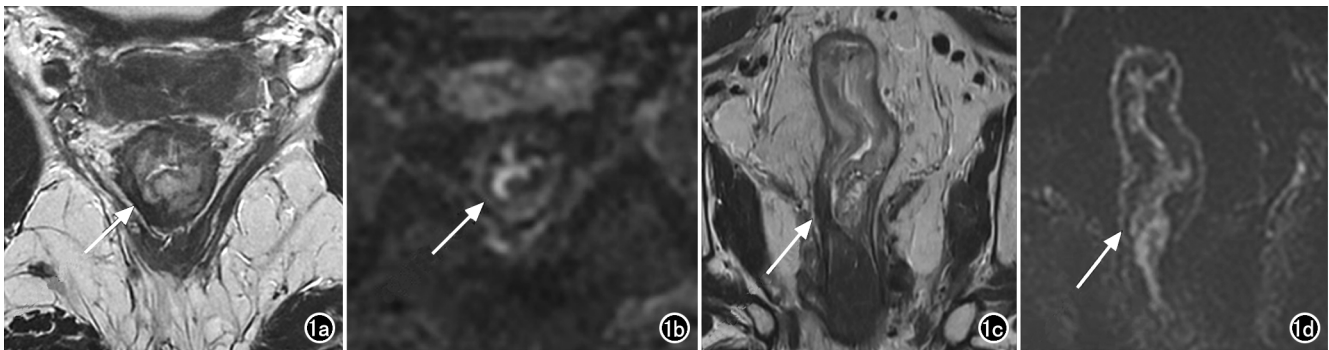


图1 直肠癌治疗后影像学疗效评价示例图。a)高分辨率 T₂WI 轴面图像,箭头示治疗后低信号瘢痕组织;b)高分辨率 DWI 轴面图像,原病灶区未见明显异常信号,箭头示黏膜、黏膜下层和固有肌层,未见异常信号改变;c)高分辨率 T₂WI 冠状面图像,箭头示治疗后低信号瘢痕组织;d)高分辨率 DWI 冠状面图像,箭头示黏膜、黏膜下层及固有肌层未见明显异常信号。

表1 直肠癌新辅助治疗疗效预测代表性 AI 模型比较

技术路线/研究者	数据来源	样本量	输入模态	主要性能指标	临床局限与数据偏倚
传统影像组学/Shin 等 ^[8]	韩国单中心	898 例(训练集 592, 测试集 306)	治疗后多参数 MRI	预测 pCR; T ₂ WI 模型 AUC 0.82; ADC 模型 AUC 0.79; 融合模型 AUC 0.82	单中心回顾性设计;分割偏倚;设备偏倚;临床局限;模型特异度(68.4%)较低,假阳性率高,直接用于临床“等待观察”决策需谨慎。
免疫表型引导的可解释影像组学/Zhang 等 ^[16]	中国多中心	149 例(免疫分型 108,训练集 19,验证集 22)	治疗前静脉期增强 CT 图像	预测新辅助抗 PD-1 治疗 pCR;训练集 AUC 0.965;独立验证集 AUC 0.904	样本量较小,泛化能力不足;设备存在选择偏倚;回顾性设计存在选择偏倚;生物学机制仍需多组学进一步验证。
纵向多任务深度学习/Jin 等 ^[10]	中国双中心	622 例(训练集 321, 验证集 301)	治疗前后配对多参数 MRI+CEA	预测 pCR;训练集 AUC 0.95;验证集 AUC 0.92;联合 CEA 后 AUC 达 0.97	依赖精准图像配对,病灶自动分割成本高;PPV 尚不足以直接支持“等待观察”。
纵向深度学习联合单细胞组学/Cao 等 ^[12]	中国多中心	1026 例(训练集 633,验证集 212,外部测试集 181)	治疗前后配对 T ₂ WI	预测 pCR;训练集 AUC 0.93;验证集 AUC 0.88;外部测试集 AUC 0.90	回顾性设计存在选择偏倚;scRNA-seq 样本量较小(n=26);未整合多参数 MRI 信息;依赖手动 ROI 勾画。
多模态联合模型/Feng 等 ^[25]	中国多中心	1033 例(训练集 303 十四例验证 630,前瞻验证 100)	治疗前多参数 MRI +HE 活检病理全切片图像	预测 pCR;训练集 AUC 0.868;回顾验证集 AUC 0.860;前瞻验证集 AUC 0.812	pCR 与非 pCR 样本比例不均衡,依赖手动感兴趣区勾画

注:ADC 为表观扩散系数;HE 为苏木精-伊红染色;CEA 为癌胚抗原;pCR 为病理完全缓解;nCRT 为新辅助放化疗;PD-1 为程序性细胞死亡蛋白-1;scRNA-seq 为单细胞 RNA 测序;AUC 为受试者工作特征曲线下面积;PPV 为阳性预测值。

的视觉评估进行比较;测试集中,T₂WI、ADC 和融合模型的 AUC 分别为 0.82、0.79 和 0.82。周晓俞等^[9]进一步采用多方位 MRI 影像组学并联合癌胚抗原(carcinoembryonic antigen,CEA)、壁外血管侵犯(extramuralvascular invasion,EMVI)等临床及常规影像指标预测 nCRT 疗效。上述研究提示定量纹理特征能够在一定程度上弥补常规视觉判断在残存肿瘤识别中的不足,但现有研究仍存在样本量偏小、单中心比例高、外部验证不足、扫描协议差异大和肿瘤分割成本高等问题。

2. 纵向 MRI 及多时间点深度学习的核心逻辑

当研究者假设肿瘤初始状态与治疗效果密切相关时,即基于 nCRT 前影像搭建 AI 预测模型。然而,影像医师需通过识别原发灶、淋巴结、系膜侵犯、EMVI、肿瘤沉积(tumor deposit,TD)等治疗前后纵向变化综合判断治疗效果。因此,直肠癌疗效评价不应仅依赖治疗前单一时间点影像,将纵向影像变化纳入深度学习模型更符合真实阅片逻辑。深度学习将预测 nCRT 效果推向端到端、多任务、多时间点的方向,即以时间为轴的纵向分析更有益于准确判断 cCR。Jin 等^[10]设计 3D RP-Net 多任务深度学习模型完成肿瘤自动分割与效果预测双任务,利用治疗前后成对的纵向 MRI

数据对比学习,在两个独立训练队列和外部验证队列中取得 AUC 分别为 0.95 与 0.92 的高预测性能。当整合血清 CEA 等临床指标后 AUC 值提升至 0.97;随后,Ke 等^[11]在此基础上进一步构建并验证 DeepRP-RC 系统,基于治疗前后配对 MRI 预测直肠癌治疗后 pCR,并在大样本多中心队列中进行内部和外部验证,进一步强化了纵向 MRI 深度学习模型在临床推广中的证据基础。近年来,Cao 等^[12]提出的 MR-DELTA-net 模型利用纵向 MRI 构建的 Transformer 模型进一步将动态影像特征与单细胞转录组学相结合,尝试解释模型预测结果背后的免疫微环境差异。这提示未来模型不仅需要提高预测准确性,还应从单纯影像分类走向纵向影像变化与组织微环境关联,使其具备生物可解释性。

3. 免疫治疗反应的影像-病理-基因联合预测

随着错配修复功能缺陷(deficient mismatch repair,dMMR)/微卫星高度不稳定(microsatellite instability-high,MSI-H)直肠癌免疫治疗被推荐为一线方案,如何评价其治疗效果成为另一个迫切需要解决的临床问题。前期研究提示,靶向程序性细胞死亡蛋白-1(programmed cell death protein-1,PD-1)/程序性死亡配体-1(programmed cell death ligand 1,PD-L1)

途径的免疫检查点抑制剂(immune checkpoint inhibitors, ICIs)在 d-MMR/MSI-H 结直肠癌中的 pCR 率范围约 60%~100%^[13,14]。然而,免疫治疗后可能出现假进展、超进展或混合进展,大体影像评价局限更为突出。Yang 等^[15]基于多维 MRI 特征构建三级淋巴结构预测模型,用于无创评估直肠癌肿瘤免疫微环境,并进一步验证其对免疫治疗 pCR 和预后的预测价值,提示 MRI 影像 AI 有望从单纯形态学评价拓展至免疫表型识别。Zhang 等^[16]基于 CT 影像、RNA 测序以及免疫组化染色三个维度,提取与免疫浸润最为相关的影像组学特征,构建可解释的决策树模型用于预测 PD-1 治疗后 pCR。在独立验证集中,模型预测 AUC 达到 0.904,显著优于临床或 CT 评估。影像组学特征与免疫细胞浸润程度的高度相关,实现“影像-免疫表型-临床结局”的逻辑闭环。

当前构建影像-病理-基因联合的多模态联合模型正在成为直肠癌疗效预测的重要发展方向。单模态 MRI 或 CT 影像主要反映肿瘤形态、信号和空间异质性,而病理图像、免疫组化、基因突变和转录组信息能够提供肿瘤细胞组成、免疫浸润状态和分子通路活性等更深层生物学信息。将这些信息与影像特征联合建模,有助于从影像表型进一步追溯至组织表型和分子表型,从而提高 pCR、免疫治疗反应和远处转移风险预测的可解释性,推动影像向融合基因、组织细胞和大体影像标志的生物特征驱动的诊断新范式发展。

影像 AI 模型辅助直肠癌风险分层

远处转移是直肠癌治疗失败和肿瘤相关死亡的独立性相关因素,如何在治疗前识别出高危转移人群是临床挑战之一^[17]。MRI 所示肿瘤位置和浸润深度、EMVI、癌结节和淋巴结转移与肿瘤转移复发存在显著关联,但传统阅片主要依赖主观定性观察,难以量化肿瘤微观异质性。影像组学标签可定量反映直肠癌潜在侵袭性,并用于预测远处转移风险及辅助化疗获益,体现其在治疗前风险分层中的价值^[18,19]。进一步,Zhao 等^[20]整合基线多参数 MRI 影像组学、HE 活检病理组学及 CD3+/CD8+活检免疫评分,构建用于预测局部进展期直肠癌 nCRT 后远处转移风险的列线图,提示宏观影像表型与微观病理-免疫特征融合有助于提升治疗前高危转移患者的识别能力。另有研究揭示了影像组学特征与肿瘤增殖通路、免疫浸润通路之间的深层关联,且与肿瘤分子病理通路高度一致,为未来影像替代组织分子检测提供可能^[21,22]。

深度学习可以从更宏观的空间模式中学习肿瘤生物学特征,其将不再局限于局部纹理或结构,而是从更高维度探究影像数据信息与肿瘤生物特征的复杂关

联。因此,不断有研究应用深度学习网络探索影像或病理与患者生存内在关联关系,以直接预测远处转移和总生存期。Liu 等^[23]基于 MRI 多参数组学标签和临床病理因素构建迁移学习模型,将患者分为高危和低危组;结果显示高危亚组获益于辅助治疗且远处转移风险显著下降,而低危组无明显受益,C-index 约 0.75~0.78。另有相关研究整合 T₂WI、ADC、DKI 和临床多模态信息构建深度学习端到端、多任务网络,实现自动分割、预测复发风险与无疾病进展生存,在外部验证中 C-index 超过 0.80,预测 3 年复发的 AUC 高达 0.97^[24]。总体而言,AI 已经初步展示出预测无病生存和总生存超越传统临床分期和病理指标的潜力,其性能甚至可以达到临床可用于个体化随访和治疗强化决策的水平。

基于大体 MRI 影像的形态学风险分层体系为直肠癌治疗提供了明确的决策路径。影像风险信息联合或独立于肿瘤 TNM 分期共同用于新辅助治疗方案选择、手术策略制定和随访管理,并实现肿瘤转移和患者生存的预测。与传统影像风险分层相比,影像人工智能有望进一步挖掘肉眼难以识别的潜在肿瘤生物学特征,并将影像信息转化为可量化的治疗反应或预后预测指标。Feng 等^[25]融合影像组学和活检病理组学特征构建了放射病理组学综合系统(radiopathomics integrated prediction system, RAPIDS)标签以预测直肠癌 nCRT 后 pCR,并尝试应用 RAPIDS 在预测结果为 pCR 后给予患者巩固化疗,如预测结果为非 pCR 则进行根治性手术,期望融合标签具备治疗决策能力。Huang 等^[26]基于多中心大样本 II 期结直肠癌 CT 影像,端到端深度神经网络提取多平面 CT 图像信息构建 STAR-CRC 模型,将 II 期结直肠癌患者分为低风险、高风险和不确定风险;STAR-CRC 融合术后病理标志物构建 IRIS-CRC 模型再次进行风险分层。IRIS-CRC 模型多中心外部验证集中表现稳定,其预测 3 年无病生存风险的 AUC 和 C-index 均显著高于现有指南的风险标准,同时能够在不同临床亚组中维持一致的区分度。IRIS-CRC 不仅是风险预测模型,还是一个参与治疗决策的有效工具。然而,上述研究基础是否能够成为下一步随机对照试验的依据,还需进一步探讨及验证;相关模型能否作为后续随机对照试验或真实世界应用的依据,仍需进一步验证;其可解释性、错误输出风险、人机交互方式和临床部署路径也仍需持续完善。

影像 AI 模型辅助预测直肠癌患者生存期

总生存期是肿瘤治疗的最关键结局指标。围绕这一结局,AI 研究尝试从术前影像、病理图像及临床资

表 2 直肠癌及相关结直肠癌远处转移、复发及生存风险预测代表性 AI 模型比较

技术路线/研究者	数据来源	样本量	输入模态	主要性能指标	临床局限与数据偏倚
多模态联合模型/Zhao 等 ^[20]	中国单中心	201 例(训练集 140, 测试集 61)	多参数 MRI + HE 活检切片 + 免疫组化	预测 5 年 DMFS; 训练集 C-index 0.902, 测试集 0.848; 5 年 AUC; 训练集 0.950, 测试 0.872。	单中心回顾性设计存在选择偏倚, 泛化能力不足; 依赖手动感兴趣区勾画; 活检样本存在组织异质性与取样偏倚。
多模态多任务深度学习/Liu 等 ^[24]	中国多中心	445 例(训练集 261, 验证集 37, 内部测试集 75, 外部测试集 72)	多参数 MRI + 治疗前临床指标 + 术后病理指标	预测 DFS 与 3 年 RM; 内部测试集 C-index 0.92, 3 年 RM 分类 AUC 0.97; 外部测试集 C-index 0.81; 实现端到端自动预测	回顾性设计存在选择偏倚; DK1 序列临床普及度有限; 样本量仍有限, 部分外部测试亚组区分度不足; 终点主要为 DFS/RM, 未分析 OS
多模态基础模型/Qu 等 ^[33]	中国多中心 + 公共数据集 TCGA	1679 例(训练集/内部验证集 839, 外部验证集 840)	CT 图像 + 病理 HE 全切片图像 + 临床文本报告	预测 OS 和 PFS; 训练集 OS C-index 0.812, PFS 0.901; 外验证集 OS C-index 0.730 ~ 0.790, PFS 0.725 ~ 0.829。	回顾性设计存在选择偏倚; 队列间治疗模式差异致潜在分布偏倚; 缺乏原始基因组测序数据
多模态临床决策辅助模型/Huang 等 ^[26]	中国多中心	2992 例(训练集 1110, 内部验证集 477, 外部验证集 1405)	多平面 CT 图像 + 临床病理因素	预测 DFS; 外部验证 C-index 0.686, 优于指南风险标准, 辅助治疗升降阶决策	回顾性设计存在选择偏倚; 未纳入 MSI 等分子标志物; 临床决策价值仍需前瞻性验证; 未分析 OS

注: HE 为苏木精-伊红染色; TCGA 为癌症基因组图谱; MSI 为微卫星不稳定; DMFS 为远处转移无生存期; DFS 为无病生存期; RM 为复发/转移; OS 为总生存期; PFS 为无进展生存期; AUC 为受试者工作特征曲线下面积; C-index 为一致性指数。

料中提取传统分期体系之外的预后表型,以提高患者生存风险分层能力。Jiang 等^[27]基于术前 MRI 影像数据以及 Vision Transformer 构建总生存模型,在验证集中的 C-index 为 0.82;当进一步融合治疗前癌胚抗原水平后,多模态模型在验证集中的 C-index 提高至 0.86。另有研究基于 4515 例结直肠癌患者的 HE 病理切片,提取超过 1200 万个图像块构建生存预测深度学习模型,并在独立验证队列中评估其对患者结局的预测价值,提示常规病理图像中蕴含可用于预后分层的深层形态学信息^[28]。同时,该研究的数据来源于临床研究,数据严谨完整,模型在训练集和外部验证集中取得相似结果。需要注意的是,总生存期受到肿瘤生物学特征、治疗决策、治疗执行情况、不良反应、患者全身状态、基础疾病以及经济、心理和家庭支持等多重因素共同影响,单一影像特征仅能反映部分因素。因此,如何从临床资料、影像和病理图像中提取更稳定、更综合的预后标志物,是直肠癌预后模型研究的重要方向。

表 2 总结了直肠癌及相关结直肠癌远处转移、复发及生存风险预测代表性模型比较。总体而言,肿瘤临床治疗到达了全面综合诊治的时代,患者总生存期不断延长,单纯预测总生存期已难以满足精准管理需求。临床实践与研究的目标逐渐转向更为精准化治疗和延长无进展生存期等更贴近临床决策的问题,并通过多模态数据融合和前瞻性验证推动预后模型向真实世界应用转化。

现存局限与未来展望

尽管直肠癌影像 AI 研究近年来持续取得突破,但其进入真实临床诊疗决策流程仍面临多维度障碍,主要包括数据和方法学偏倚与受限、临床效益验证不足、算法架构演进与可解释性、真实世界部署挑战等方面。

1. 数据和方法学层面的偏倚与局限

模型准确性不足与泛化能力受限是制约 AI 进入临床的首要障碍,其根源多与数据来源、研究设计、图

像采集、病灶标注和终点定义等因素有关。现有 AI 模型多基于小样本及回顾性设计构建,既往荟萃分析提示研究样本量约为 43~1201 例^[11,29],且部分研究缺乏充分外部验证。尽管 Hu 等^[30]与 Pang 等^[31]率先开展了前瞻性队列验证,但针对特定临床问题,尤其是“等待观察”策略获益评估等的前瞻性随机对照试验仍罕见。与此同时,临床中真正实施该策略的患者比例有限,阳性样本稀少且组间异质性较大,进一步增加了模型过拟合风险和临床推广难度。

在数据层面, MRI 设备场强、厂商及扫描参数差异可引起影像特征漂移。既往荟萃分析提示,模型性可能存在显著的地域与种族局限,这种数据分布偏倚与图像采集协议的异质性密切相关^[6]。在病灶标注方面,既往研究多集中于原发灶或相邻肠壁,较少系统纳入直肠系膜内淋巴结、TD、EMVI 以及侧方及腹股沟淋巴结等关键区域。局部分割可能导致空间信息丢失,影响模型对肿瘤整体风险的表征能力。此外,基于内镜活检标本获取的病理组学特征或免疫评分容易受到组织异质性和取样偏倚影响,单点活检难以完全代表整个肿瘤的微观结构和免疫微环境状态。进一步地,在真实世界中,多模态数据往往并不完整,治疗方案差异、治疗前后特征演变及随访时间不一致等混杂因素也会影响模型表现。Chen 等^[32]在多中心和 27433 例真实世界数据中验证 COCA 模型,提示大规模真实世界验证对于评估模型稳定性具有重要意义,但也说明随着任务复杂度和模态数量增加,数据缺失与混杂偏倚会更加突出。因此,如何在真实场景中利用不完整多模态数据,并维持模型外部验证稳定性,是当前重要技术瓶颈之一。

2. 临床效益验证的缺失与不足

目前大多数研究仍以 AUC 等区分度指标作为主要终点,但仅凭此类指标难以判断模型能否安全指导临床决策。对于直肠癌疗效评价和风险分层模型而言,除区分度外,还应关注预测概率与实际发生概率的

一致性,即模型校准度,并报告校准曲线、Brier 分数等指标,以判断模型输出风险是否可靠。只有当模型预测风险与真实风险较好匹配时,其结果才可能用于支持等待观察、追加治疗或强化随访等临床决策。

此外,模型不仅需具备预测能力,还应通过决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)证明其在不同阈值概率下可带来临床净获益。Liu 等^[19]与 Zhao 等^[22]通过 DCA 评估多模态联合模型的潜在临床价值;Huang 等^[26]进一步分析 IRIS-CRC 系统在治疗升降阶决策中的应用价值,该系统可帮助部分高危患者降阶以避免不必要治疗,也可提示部分低危患者需加强治疗。此类评估较单纯 AUC 更接近真实临床决策,但 DCA 仍属于模型层面的决策模拟,其对临床结局的真实改善仍需前瞻性研究进一步证实。

3. 算法架构演进与可解释性

未来直肠癌影像 AI 的发展,一方面依赖于算法架构的演进,另一方面也取决于其能否适应真实临床工作流程并满足监管要求。首先,直肠癌疗效评价具有高度复杂性,仅依赖单一高分辨率 MRI 难以全面刻画肿瘤异质性,未来模型需进一步融合影像、病理、临床检验、分子检测和基因组学等多模态信息。针对多模态数据常缺失的问题,可引入弱监督、半监督学习及缺失模态补偿策略。Qu 等^[33]开发的 FLARE 模型即为处理不完整模态提供了新的思路,有望提高模型在非标准化真实场景中的可用性和鲁棒性。这提示医学基础模型和医学大模型在解决小样本、跨中心泛化和多模态融合方面具有潜力。

现有深度学习模型多聚焦于 pCR 预测、远处转移或生存分析等单一终点,而真实临床决策通常包括病灶识别、疗效评估、风险分层、预后判断和治疗获益评估等连续环节。因此,未来模型应向多任务联合建模发展,提高对复杂临床问题的综合表征能力。与此同时,当前 AI 模型的可解释性仍多停留于像素级可视化层面,如 Grad-CAM 热力图可提示模型关注区域^[34],但仍难以回答“为何这些影像表型与疗效或预后相关”的核心临床问题。更高层次的可解释性应进一步揭示影像特征背后的分子、细胞和组织机制。Cao 等^[12]将 MRI 深度学习特征与单细胞 RNA 测序相映射,提示模型预测的非 pCR 倾向可能与髓系细胞富集和免疫抑制微环境相关,为验证模型预测的生物学合理性提供代表性思路。未来,影像 AI 解释应逐步构建“影像-病理-基因-微环境”的跨模态推理逻辑,使模型真正成为人类专家可理解、可信任的诊疗延伸。

4. 真实世界部署与法规审批挑战

影像 AI 从实验室验证走向临床部署,还需解决工程自动化、人机交互和法规审批等问题。AI 工具不

应以替代医师为目标,而需证明其作为辅助工具的临床赋能价值。Pang 等^[31]的人机交互研究提示,AI 可辅助医师识别关键信息并改善诊断表现;Liu 等^[24]构建的 MultiRecNet 则展示了从原始图像输入、病灶自动分割、特征提取到结局预测的端到端流程。这种工程自动化能将医生从繁琐的像素级标注中解放出来,使 AI 模型真正成为实用的临床工具。

作为可能影响治疗决策的医疗器械软件,AI 模型需满足监管机构对透明度、鲁棒性和可追溯性的要求。AI 模型的“黑箱”属性仍是其审批和推广的重要障碍。SHAP 分析(shapley additive explanations, SHAP)^[35]等方法有助于量化特征贡献并增强医师信任,但仅靠算法解释仍不足以完成临床转化。Rai 等^[7]的荟萃分析提示,尽管 MRI 影像组学模型总体具有较好的诊断性能,但相关研究普遍缺乏前瞻性验证、预设截断值分析和成本效益分析,方法学标准化和临床转化证据仍显不足。未来应建立标准化、自动化、可追溯的全流程质量控制体系,推动影像 AI 向合规化临床应用转化。

综上所述,当前直肠癌影像 AI 正处于向临床应用与真实世界部署过渡的临界点,但与临床落地实施间仍存鸿沟。未来需致力于建立高质量多中心数据集以验证泛化能力,推动多模态与多任务算法进阶,并实现人类专家先验知识与 AI 算法的深度融合改造。只有在数据、算法、医学知识和临床流程之间形成有效闭环,影像 AI 才能真正成为辅助医师进行直肠癌精准诊疗的可靠利器。

参考文献:

- [1] GBD 2023 Cancer Collaborators. The global, regional, and national burden of cancer, 1990–2023, with forecasts to 2050: A systematic analysis for the global burden of disease study 2023[J]. *Lancet*, 2025, 406(10512): 1565–1586.
- [2] Glynne-Jones R, Wyrwicz L, Tiret E, et al. Rectal cancer: ESMO clinical practice guidelines for diagnosis, treatment and follow-up[J]. *Ann Oncol*, 2017, 28(suppl_4): iv22–iv40.
- [3] Wang F, Chen G, Zhang Z, et al. The Chinese society of clinical oncology (CSCO): Clinical guidelines for the diagnosis and treatment of colorectal cancer, 2024 update[J]. *Cancer Commun (Lond)*, 2025, 45(3): 332–379.
- [4] Beets-Tan RG, Lambregts DM, Maas M, et al. Magnetic resonance imaging for the clinical management of rectal cancer patients: Recommendations from the 2012 european society of gastrointestinal and abdominal radiology (ESGAR) consensus meeting[J]. *Eur Radiol*, 2013, 23(9): 2522–2531.
- [5] Jong BK, Yu ZH, Hsu YJ, et al. Deep learning algorithms for predicting pathological complete response in MRI of rectal cancer patients undergoing neoadjuvant chemoradiotherapy: A systematic review[J]. *Int J Colorectal Dis*, 2025, 40(1): 19.
- [6] Shen H, Jin Z, Chen Q, et al. Image-based artificial intelligence for

- the prediction of pathological complete response to neoadjuvant chemoradiotherapy in patients with rectal cancer: A systematic review and meta-analysis[J]. *Radiol Med*, 2024, 129(4): 598-614.
- [7] Rai J, Mai DV, Dami I, et al. MRI radiomics prediction modelling for pathological complete response to neoadjuvant chemoradiotherapy in locally advanced rectal cancer: A systematic review and meta-analysis[J]. *Abdom Radiol*, 2025, 50(11): 5103-5123.
 - [8] Shin J, Seo N, Baek SE, et al. MRI radiomics model predicts pathologic complete response of rectal cancer following chemoradiotherapy[J]. *Radiology*, 2022, 303(2): 351-358.
 - [9] 周晓俞, 杨筠, 刘学焕, 等. 多方位 MRI 影像学预测局部进展期直肠癌新辅助放化疗疗效[J]. *放射学实践*, 2024, 39(2): 218-226.
 - [10] Jin C, Yu H, Ke J, et al. Predicting treatment response from longitudinal images using multi-task deep learning[J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 1851.
 - [11] Ke J, Jin C, Tang J, et al. A longitudinal MRI-based artificial intelligence system to predict pathological complete response after neoadjuvant therapy in rectal cancer: A multicenter validation study[J]. *Dis Colon Rectum*, 2023, 66(12): e1195-e1206.
 - [12] Cao W, Chen H, Li J, et al. MR-DELTAnet: A longitudinal MRI-transformer model predicting pathological complete response and revealing immune microenvironment via scRNA-seq in locally advanced rectal cancer[J]. *Adv Sci*, 2026, 13(11): e17721.
 - [13] Cercek A, Lumish M, Sinopoli J, et al. PD-1 blockade in mismatch repair-deficient, locally advanced rectal cancer[J]. *N Engl J Med*, 2022, 386(25): 2363-2376.
 - [14] Williams CJM, Peddle AM, Kasi PM, et al. Neoadjuvant immunotherapy for dMMR and pMMR colorectal cancers: Therapeutic strategies and putative biomarkers of response[J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2024, 21(12): 839-851.
 - [15] Yang H, Wong C, Liang W, et al. A noninvasive AI model based on multi-dimensional MRI features for predicting tertiary lymphoid structures, immunotherapy response, and prognosis in rectal cancer[J]. *Int J Surg*, 2026, 112(2): 4317-4328.
 - [16] Zhang Y, Zhang X, Zhong X, et al. Immunophenotype-guided interpretable radiomics model for predicting neoadjuvant anti-PD-1 response in stage III-IV dMMR/MSI-H colorectal cancer[J]. *J Immunother Cancer*, 2025, 13(8): e011569.
 - [17] Hofheinz RD, Fokas E, Benhaim L, et al. Localised rectal cancer: ESMO clinical practice guideline for diagnosis, treatment and follow-up[J]. *Ann Oncol*, 2025, 36(9): 1007-1024.
 - [18] Meng X, Xia W, Xie P, et al. Preoperative radiomic signature based on multiparametric magnetic resonance imaging for noninvasive evaluation of biological characteristics in rectal cancer[J]. *Eur Radiol*, 2019, 29(6): 3200-3209.
 - [19] Liu Z, Meng X, Zhang H, et al. Predicting distant metastasis and chemotherapy benefit in locally advanced rectal cancer[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 4308.
 - [20] Zhao R, Shen W, Zhao W, et al. Integrating radiomics, pathomics, and biopsy-adapted immunoscore for predicting distant metastasis in locally advanced rectal cancer[J]. *ESMO open*, 2025, 10(3): 104102.
 - [21] Chen X, Huang Y, Wee L, et al. Integrated analysis of radiomics, RNA, and clinicopathologic phenotype reveals biological basis of prognostic risk stratification in colorectal cancer[J]. *Sci Bull* (Beijing), 2024, 69(23): 3666-3671.
 - [22] Zhao Q, Zhong H, Guan X, et al. Role of microenvironment characteristics and MRI radiomics in the risk stratification of distant metastases in rectal cancer: A diagnostic study[J]. *Int J Surg*, 2025, 111(1): 200-209.
 - [23] Liu X, Zhang D, Liu Z, et al. Deep learning radiomics-based prediction of distant metastasis in patients with locally advanced rectal cancer after neoadjuvant chemoradiotherapy: A multicentre study[J]. *EBioMedicine*, 2021, 69: 103442.
 - [24] Liu Z, Meng R, Ma Q, et al. Predicting recurrence in locally advanced rectal cancer using multitask deep learning and multimodal MRI[J]. *Radiol Imaging Cancer*, 2025, 7(3): e240359.
 - [25] Feng L, Liu Z, Li C, et al. Development and validation of a radiopathomics model to predict pathological complete response to neoadjuvant chemoradiotherapy in locally advanced rectal cancer: A multicentre observational study[J]. *Lancet Digit Health*, 2022, 4(1): e8-e17.
 - [26] Huang YQ, Chen XB, Cui YF, et al. Enhanced risk stratification for stage II colorectal cancer using deep learning-based CT classifier and pathological markers to optimize adjuvant therapy decision[J]. *Ann Oncol*, 2025, 36(10): 1178-1189.
 - [27] Jiang X, Zhao H, Saldanha OL, et al. An MRI deep learning model predicts outcome in rectal cancer[J]. *Radiology*, 2023, 307(5): e222223.
 - [28] Skrede OJ, DE Raedts, Kleppe A, et al. Deep learning for prediction of colorectal cancer outcome: A discovery and validation study[J]. *Lancet*, 2020, 395(10221): 350-360.
 - [29] FU J, Zhong X, Li N, et al. Deep learning-based radiomic features for improving neoadjuvant chemoradiation response prediction in locally advanced rectal cancer[J]. *Phys Med Biol*, 2020, 65(7): 075001.
 - [30] Hu T, Gong J, Sun Y, et al. Magnetic resonance imaging-based radiomics analysis for prediction of treatment response to neoadjuvant chemoradiotherapy and clinical outcome in patients with locally advanced rectal cancer: A large multicentric and validated study[J]. *MedComm*, 2024, 5(7): e609.
 - [31] Pang X, Chen X, Zeng G, et al. Interpretable artificial intelligence in assisting treatment response prediction for locally advanced rectal cancer after neoadjuvant chemoradiotherapy: A prospective, multicenter, human-model interaction study[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2026, 125(3): 939-948.
 - [32] Chen X, Qiu M Y, Zhang JP, et al. Colorectal cancer detection using noncontrast CT and deep learning: A multicenter and international cohort study[J]. *Ann Oncol*, 2026, 37(8): 1144-1156.
 - [33] Qu L, Zhang C, Hou Y, et al. Foundation model-enabled multimodal deep learning for prognostic prediction in colorectal cancer with incomplete modalities: A multi-institutional retrospective study[J]. *Adv Sci*, 2026, 13(17): e10931.
 - [34] Selvaraju RR, Cogswell M, Das A, et al. Grad-CAM: visual explanations from deep Networks via gradient-based localization[J]. *Int J Comput Vis*, 2017: 618-626.
 - [35] Nohara Y, Matsumoto K, Soejima H, et al. Explanation of machine learning models using shapley additive explanation and application for real data in hospital[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2022, 214: 106584.