

基于¹⁸F-FDG PET/CT影像组学预测结直肠癌微卫星不稳定状态的研究进展

夏振涛¹, 李丁源¹, 谭宇扬¹, 张雅萍^{2*}

¹绍兴大学医学院, 浙江 绍兴

²绍兴市人民医院核医学科, 浙江 绍兴

收稿日期: 2026年7月6日; 录用日期: 2026年7月29日; 发布日期: 2026年8月12日

摘要

结直肠癌是全球高发恶性肿瘤, 其发生发展与多种基因改变密切相关。微卫星不稳定状态, 尤其是高度微卫星不稳定性, 已成为指导结直肠癌免疫治疗、化疗及预后评估的重要标志物。目前, 临床常用的MSI检测方法包括免疫组织化学和聚合酶链反应, 均依赖术后组织样本, 存在有创性、采样主观、无法动态监测等不足, 也难以全面反映肿瘤内部的异质性。因此, 术前无创、精准预测MSI状态具有重要临床意义。¹⁸F-FDG PET/CT作为功能成像技术, 可定量评估肿瘤葡萄糖代谢活性, 其代谢参数如肿瘤代谢体积、病灶糖酵解总量及异质性指数等, 已被初步证实与结直肠癌MSI状态及HER2表达存在关联。近年来, 影像组学通过高通量提取PET/CT图像中的定量特征, 进一步揭示了肿瘤的微观异质性, 为术前无创预测MSI状态提供了新工具。本文系统回顾¹⁸F-FDG PET/CT代谢参数及影像组学方法在预测结直肠癌MSI状态中的研究进展, 分析其临床价值、面临挑战及未来发展方向, 为结直肠癌个体化治疗决策提供理论依据。

关键词

结直肠癌, 微卫星不稳定, 正电子发射断层显像, 影像组学, ¹⁸F-FDG

Research Progress on Radiomics Based on ¹⁸F-FDG PET/CT for Predicting Microsatellite Instability Status in Colorectal Cancer

Zhentaο Xia¹, Dingyuan Li¹, Yuyang Tan¹, Yaping Zhang^{2*}

¹School of Medicine, Shaoxing University, Shaoxing Zhejiang

²Department of Nuclear Medicine, Shaoxing People's Hospital, Shaoxing Zhejiang

*通讯作者。

文章引用: 夏振涛, 李丁源, 谭宇扬, 张雅萍. 基于 ¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学预测结直肠癌微卫星不稳定状态的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(8): 756-762. DOI: 10.12677/acm.2026.1682848

Abstract

Colorectal cancer is a highly prevalent malignancy worldwide, and its development and progression are closely associated with multiple genetic alterations. Microsatellite instability (MSI) status, particularly high-level microsatellite instability, has become an important biomarker for guiding immunotherapy, chemotherapy, and prognostic assessment in colorectal cancer. Currently, commonly used clinical methods for MSI detection include immunohistochemistry and polymerase chain reaction, both of which rely on postoperative tissue samples. These approaches are invasive, subject to sampling bias, and incapable of dynamic monitoring, and they also fail to comprehensively reflect intratumoral heterogeneity. Therefore, preoperative noninvasive and accurate prediction of MSI status holds significant clinical importance. As a functional imaging technique, ^{18}F -FDG PET/CT enables quantitative assessment of tumor glucose metabolic activity. Its metabolic parameters, such as metabolic tumor volume, total lesion glycolysis, and heterogeneity indices, have been preliminarily shown to be associated with MSI status and HER2 expression in colorectal cancer. In recent years, radiomics has further revealed the microscopic heterogeneity of tumors by extracting high-throughput quantitative features from PET/CT images, offering a novel tool for the preoperative noninvasive prediction of MSI status. This article systematically reviews the research progress of ^{18}F -FDG PET/CT metabolic parameters and radiomics approaches in predicting MSI status in colorectal cancer, analyzes their clinical value, current challenges, and future development directions, and aims to provide a theoretical basis for individualized treatment decision-making in colorectal cancer.

Keywords

Colorectal Cancer, Microsatellite Instability, Positron Emission Tomography, Tomography Radiomics, ^{18}F -FDG

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

结直肠癌是全球第三大常见恶性肿瘤，也是癌症相关死亡的第二大原因。在中国，结直肠癌的发病率和死亡率均呈上升趋势，2022年新发病例约 59.2 万，死亡病例约 30.9 万[1]，严重威胁公共健康。精准医学的推进使肿瘤分子分型在结直肠癌治疗中的地位日益突出。其中，微卫星不稳定状态，尤其是高度微卫星不稳定性，因其在免疫治疗疗效预测、预后判断及化疗敏感性评估中的价值而备受关注[2]。

MSI 状态通常由 DNA 错配修复系统功能缺陷导致，表现为基因组中微卫星序列长度改变。临床上主要依靠免疫组织化学检测错配修复蛋白，或聚合酶链反应检测微卫星位点。但这些传统方法存在明显局限：IHC 判读有一定主观性，PCR 成本较高且对样本质量要求高；两者均需术后或活检组织，无法在治疗前无创获取信息，也难以反映肿瘤整体的空间异质性。研究显示，MSI-H 结直肠癌常表现出显著的瘤内形态学和代谢异质性[3]，单一活检点可能无法代表整个肿瘤的 MSI 状态。因此，建立术前、无创、可重复的 MSI 状态预测方法十分必要。

^{18}F -FDG PET/CT 融合了功能与解剖成像，已广泛用于结直肠癌的早期诊断、分期和疗效评估。肿瘤细胞对 FDG 的高摄取反映了其糖代谢活跃程度，相关定量参数如最大标准化摄取值、肿瘤代谢体积、病

灶糖酵解总量等,可间接揭示肿瘤的生物学行为[4]。近年来,学者开始探索 PET 代谢参数与 MSI 状态之间的关联。已有研究表明,MSI-H 结直肠癌患者的 MTV 和 TLG 显著高于微卫星稳定/低度不稳定患者,提示 MSI-H 肿瘤具有更高的代谢负荷。此外,肿瘤内代谢异质性参数如异质性指数和变异系数,在 HER2 表达状态预测中也展现出潜力[5]。

传统 PET 代谢参数虽有一定预测价值,但其分析过程依赖人工设定阈值,信息挖掘能力有限。影像组学的兴起为克服这一局限提供了新思路。影像组学可从医学图像中高通量提取大量定量特征,包括强度、形状、纹理和小波特征等,能够更全面地刻画肿瘤内部的异质性[5]。

综上, ^{18}F -FDG PET/CT 影像组学作为一种无创、可重复、能反映肿瘤整体代谢异质性的方法,有望成为术前预测结直肠癌 MSI 状态的有效工具。本文将从 PET 代谢参数、影像组学建模及其与 MSI 状态的关系等方面,系统综述该领域的研究进展,分析现有挑战,并展望未来发展方向,以期对结直肠癌精准治疗提供新思路。

2. MSI 状态的概念、检测方法及临床意义

2.1. MSI 状态定义及检测方法

微卫星不稳定状态(microsatellite instability, MSI)是指由于 DNA 错配修复系统功能缺陷,导致基因组中微卫星序列(短串联重复序列)在复制过程中发生长度改变的一种分子表型[6]。正常情况下,MMR 蛋白(包括 MLH1、MSH2、MSH6、PMS2 等)形成异二聚体,能够识别并修复 DNA 复制时出现的碱基错配或插入/缺失错误。当 MMR 基因发生胚系突变(如林奇综合征)或表观遗传沉默(如 MLH1 启动子高甲基化)时,系统功能缺陷,微卫星区域错误累积,等位基因长度改变,即产生 MSI [6]。

目前临床上检测 MSI 状态最常用的方法有两种。一是免疫组织化学法,通过检测肿瘤细胞核中四种 MMR 蛋白的表达情况来判断:任一蛋白表达缺失判读为错配修复缺陷(dMMR),相当于高度微卫星不稳定(MSI-H);四种蛋白均完整表达则为错配修复完整(pMMR),对应微卫星稳定或低度不稳定(MSS/MSI-L) [7]。二是聚合酶链反应法,采用荧光标记引物扩增多个单核苷酸重复位点(如 BAT-25、BAT-26、NR-21、NR-24、MONO-27),对比肿瘤组织与正常对照的扩增片段长度。判读标准为: ≥ 2 个位点出现 ≥ 3 个核苷酸的显著移位为 MSI-H, 1 个位点改变为 MSI-L, 无位点改变为 MSS [8] [9]。IHC 操作简便、成本较低,但存在主观性;PCR 客观敏感,但需高质量 DNA。两者互补使用可提高检测准确性。

2.2. MSI 检测的临床意义

MSI 状态在结直肠癌的诊疗中具有多重临床意义。首先,MSI-H 是独立的预后良好标志物,此类患者术后复发风险较低、总生存期更长,且淋巴结转移和远处转移的发生率较低。其次,MSI-H 对以 5-氟尿嘧啶为基础的辅助化疗不敏感甚至存在耐药[4],因此患者治疗时应避免使用含 5-FU 的方案。第三,MSI-H 是免疫检查点抑制剂治疗的有效预测标志物。多项临床研究证实[10],PD-1 单抗(如帕博利珠单抗、纳武利尤单抗等)在晚期及新辅助治疗中可使 dMMR/MSI-H 结直肠癌患者获得显著疗效,甚至达到病理学完全缓解。目前国内外的临床指南均推荐对所有结直肠癌患者进行 MSI 状态检测,以指导个体化辅助化疗决策、筛选免疫治疗获益人群以及筛查林奇综合征。

3. PET/CT 影像组学概念及基本流程

影像组学是指通过自动或半自动软件,从医学图像中高通量地提取和分析大量定量成像特征,构建组学模型,从而深入解析临床信息的技术。其理论基础在于,医学图像不仅是用于视觉评估的图片,更是可深入挖掘的定量数据[11]。PET/CT 影像组学在多模态融合图像已有的形态特征、一阶特征、二阶特

征和高阶特征基础上,进一步结合 PET 特有的标准化摄取值、肿瘤代谢体积、病灶糖酵解总量等代谢参数,能够更全面地反映肿瘤内部的空间结构信息及代谢异质性,为无创预测分子和遗传特征、评估治疗反应及预后提供可能[11]。PET/CT 影像组学的基本流程可概括为 4 个步骤:(1) 图像采集与重建;(2) 图像分割;(3) 特征提取及筛选;(4) 模型建立与性能验证。

4. ^{18}F -FDG PET/CT 影像组学在定量预测结直肠癌 MSI 状态中的应用

4.1. CT、MRI 影像组学应用

CT、MRI 影像组学在结直肠癌及其他消化道肿瘤的分子分型和生物学行为预测中已显示出重要价值。尽管直接基于 CT 或 MRI 预测结直肠癌 MSI 状态的研究相对有限,但大量相关研究为该方法学提供了坚实背景支持。

在 CT 影像组学方面,Cao 等[12]通过多中心大样本(502 例)研究证实,增强 CT 不同期相的影像组学特征对结直肠癌 MSI 状态具有预测价值,其中延迟期模型最优,联合临床因素构建的列线图 AUC 达 0.964,验证了多期相特征融合的策略可行性。Pei 等[13]进一步以 PCR 为金标准,在 762 例患者中构建 CT 影像组学列线图,AUC 为 0.74~0.77,并指出加入病理特征未能显著提升效能,提示影像组学的独立价值。Ma 等[14]则创新性地比较了肿瘤内部与边缘区域的组学特征,发现向内收缩 3 mm 的内部区域模型预测 MSI 的 AUC 高达 0.908,优于边缘区域,说明肿瘤核心区域更能稳定反映与 MSI 相关的异质性特征。此外,Hoshino 等[15]基于 CT 影像组学预测结直肠癌原发灶与肝转移灶之间肿瘤突变负荷(TMB)的不一致性(达 29.2%),展示了影像组学捕捉肿瘤时空异质性的能力,这为理解 MSI 状态在原发灶与转移灶间的潜在差异提供了方法学参考。

在 MRI 影像组学方面,尽管直接预测结直肠癌 MSI 的研究较少,但相关技术在其他癌种和任务中的成功应用值得借鉴。例如,Song 等[16]在胃癌中利用多参数 MRI 亚区影像组学预测淋巴血管侵犯,证实了亚区(subregion)分析相比于全肿瘤分析的优势,该方法可迁移至结直肠癌 MSI 预测。Chen 等[17]通过多区域 MRI 影像组学联合临床因素预测直肠癌淋巴血管侵犯,展示了多中心验证的流程与模型可解释性(SHAP 分析)。此外,Bass 等[18]基于 H&E 组织切片利用深度学习预测 MSI/MMR 状态,在 3576 例多中心数据中总体一致率达 93.83%,虽然采用的是病理图像而非 CT/MRI,但其 AI 模型的构建、验证及可解释性方法(如注意力热图、嵌入空间可视化)对影像组学研究具有重要参考价值。

综上,CT、MRI 影像组学在预测结直肠癌及其他肿瘤的分子标志物、生物学行为方面已积累了丰富的方法学经验,包括多期相特征融合、亚区分割、多中心验证、模型可解释性等。这些研究为将影像组学技术应用于结直肠癌 MSI 状态的术前无创预测奠定了坚实基础。

4.2. ^{18}F -FDG PET/CT 影像组学应用

影像组学可从医学图像中高通量提取大量定量特征,通过机器学习构建预测模型,将影像表型与潜在的分子和遗传特征联系起来。近年来,基于 ^{18}F -FDG PET/CT 影像组学预测结直肠癌 MSI 状态的研究取得了初步进展。Li 等[19]回顾性分析了 173 例结直肠癌患者的术前 ^{18}F -FDG PET/CT 图像,通过随机森林和多变量相关性检验筛选出 2 个影像组学特征,并基于自适应提升分类器构建了平衡自助聚合模型用于识别 MSI 状态。结果显示,该模型预测 MSI 的 AUC 为 0.828,敏感度 83.3%,特异度 76.3%。值得注意的是,传统的 PET 代谢参数(SUV_{max}、MTV、TLG)在单因素分析中未显示与 MSI 状态显著相关。该研究还发现,所选的 2 个影像组学特征与性别、CEA 水平及多个 PET 代谢参数显著相关,提示影像组学特征能够反映潜在的生物学信息。在代谢参数方面,Liu 等[20]分析了 44 例结直肠癌患者的术前 ^{18}F -FDG PET/CT 图像,发现 MSI-H 组的 MTV 和 TLG (尤其是百分比阈值下的参数)显著高于 MSS 组,其中

MTV50%预测 MSI 的 AUC 为 0.805, 敏感度 92.9%, 特异度 66.7%。该研究同时发现年龄和 MTV50%是 MSI 的独立预测因素, 而 SUVmax 等单点代谢参数在两组间无显著差异。这一结果提示, 基于体积的代谢参数优于单一 SUV 值, 但影像组学方法通过挖掘纹理和小波特征, 可能提供比传统体积参数更全面的肿瘤异质性信息。此外, 多项 PET/CT 影像组学研究在其他分子标志物预测中的成功经验为 MSI 预测提供了方法学参考。Zhang 等[21]在非小细胞肺癌中利用 LASSO 回归筛选 10 个影像组学特征(5 个 PET、5 个 CT), 预测 EGFR 突变的 AUC 达 0.85, 并构建了可视化的列线图。Giannini 等[22]在局部进展期直肠癌中联合 PET 和 MRI 纹理特征预测新辅助治疗病理完全缓解, 多参数模型 AUC 达 0.86, 证明多模态影像组学的叠加价值。Zhao 等[23]采用栖息地分析方法将肿瘤划分为不同代谢亚区, 基于支持向量机构建模型预测 KRAS/NRAS/BRAF 突变, AUC 为 0.759, 展示了亚区分析优于全肿瘤分析的潜力。Hoshino 等[15]利用 CT 影像组学预测结直肠癌原发灶与肝转移灶之间肿瘤突变负荷的不一致性(达 29.2%), 进一步证实影像组学捕捉肿瘤时空异质性的能力。Chen 等[24]则发现传统 PET 代谢参数(SUVmax、TW40%)预测 KRAS 突变的 AUC 仅约 0.65, 凸显了影像组学相对于单一参数的优势。

综上, ^{18}F -FDG PET/CT 影像组学可有效预测结直肠癌 MSI 状态, 其预测效能优于传统单一代谢参数, 为术前无创评估 MSI 状态提供了新的技术手段。目前相关研究仍较少, 且多为单中心小样本回顾性研究, 未来需要多中心、大样本的前瞻性研究进一步验证其临床价值[19][20]。此外, 栖息地分析、多模态融合及深度学习等方法的引入有望进一步提升预测性能。

5. 小结与展望

从核医学临床视角看, ^{18}F -FDG PET/CT 影像组学为结直肠癌 MSI 状态的术前无创评估提供了新思路。现有证据显示, 基于治疗前 PET/CT 的影像组学模型, 其预测效能已优于传统代谢参数, 能够更精细地刻画肿瘤内部异质性, 对无法获取组织或需动态评估免疫治疗适应症的患者具有实际价值。

然而, 该技术距离临床常规应用仍有差距。目前多为单中心、小样本回顾性研究, MSI-H 病例占比较低, 模型过拟合风险不容忽视。更关键的是, 多中心间图像采集与重建参数的差异导致影像组学特征的可重复性不足, 成为制约其临床转化的核心瓶颈。尽管国际生物影像标志物标准化倡议(IBSI)已发布了针对图像生物标志物的标准化处理流程, 提出了图像重采样、灰度离散化、滤波器设置等关键环节的参考标准, 但目前不同研究在 PET 图像的重建算法、像素尺寸重采样及病灶分割阈值(如 40% SUVmax 固定阈值法与自适应阈值法)的选择上仍缺乏统一规范, 严重影响了跨中心模型的泛化能力。

展望未来, 为实现该技术的临床落地, 需从以下几方面协同发力。首先, 也是当前最为迫切的任务, 是推动制定标准化的 PET/CT 图像采集与重建方案, 并鼓励多中心前瞻性研究对现有模型进行外部验证, 借助 ComBat 等协调算法消除设备间差异。其次, 在模型构建层面, 应将深度学习与传统影像组学深度融合, 利用神经网络的强大特征提取能力提升模型的稳定性和可解释性。第三, 应积极探索多模态联合模型, 整合 PET 代谢异质性、MRI 高分辨率解剖信息及关键临床病理指标, 构建更为全面的预测体系。第四, 应加强模型的可解释性研究。例如, 可借鉴 Bass 等利用注意力热图可视化深度模型决策依据的方法, 或将 SHAP (SHapley Additive exPlanations)值分析应用于影像组学模型, 通过展示每个组学特征对个体预测结果的贡献度, 使临床医师不仅能获得预测结果, 更能理解模型“为何如此判断”, 从而建立临床信任。

此外, 未来的研究应着力于更具临床转化价值的亚组分析。一方面, MSI-H 结直肠癌包含林奇综合征相关和散发性(多由 MLH1 启动子甲基化导致)两种不同病因学亚型, 其预后和对免疫治疗的反应可能存在差异, 开发能够无创区分这两种亚型的影像组学模型将有助于实现更精细的风险分层与遗传咨询。另一方面, 尽管 MSI-H 患者是免疫检查点抑制剂治疗的优选人群, 但仍有部分患者出现原发耐药, 甚至

发生超进展或假性进展。探索利用基线 PET/CT 影像组学特征预测这些特殊反应模式,将有助于筛选真正获益人群,避免不必要的治疗延误和不良反应。最后,应持续推动影像组学特征与 MSI 相关肿瘤微环境病理形态(如 CD8⁺T 细胞浸润密度、PD-L1 表达空间分布)的关联分析,建立影像表型与免疫微环境之间的桥梁,为无创“虚拟活检”奠定坚实的生物学基础。

总之, PET/CT 影像组学有望成为 MSI 无创预测的有效工具,但只有在技术标准化、多中心验证及生物学可解释性不断完善的背景下,才能真正从研究走向临床实践,最终服务于结直肠癌的个体化精准诊疗。

参考文献

- [1] Xia, C., Dong, X., Li, H., Cao, M., Sun, D., He, S., *et al.* (2022) Cancer Statistics in China and United States, 2022: Profiles, Trends, and Determinants. *Chinese Medical Journal*, **135**, 584-590. <https://doi.org/10.1097/cm9.0000000000002108>
- [2] Cercek, A., Dos Santos Fernandes, G., Roxburgh, C.S., Ganesh, K., Ng, S., Sanchez-Vega, F., *et al.* (2020) Mismatch Repair-Deficient Rectal Cancer and Resistance to Neoadjuvant Chemotherapy. *Clinical Cancer Research*, **26**, 3271-3279. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.ccr-19-3728>
- [3] De Smedt, L., Lemahieu, J., Palmans, S., Govaere, O., Tousseyn, T., Van Cutsem, E., *et al.* (2015) Microsatellite Instable vs Stable Colon Carcinomas: Analysis of Tumour Heterogeneity, Inflammation and Angiogenesis. *British Journal of Cancer*, **113**, 500-509. <https://doi.org/10.1038/bjc.2015.213>
- [4] 陈桥梁, 李响, 来瑞鹤, 等. ¹⁸F-FDGPET 相关代谢参数预测结直肠癌微卫星高度不稳定性及 HER2 表达[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(1): 7-12.
- [5] 彭乐平, 张秀玲, 施柳言, 等. CT 和 MRI 及影像组学预测结直肠癌微卫星不稳定状态研究进展[J]. 磁共振成像, 2024, 15(6): 218-223.
- [6] Sinicrope, F.A. and Sargent, D.J. (2012) Molecular Pathways: Microsatellite Instability in Colorectal Cancer: Prognostic, Predictive, and Therapeutic Implications. *Clinical Cancer Research*, **18**, 1506-1512. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.ccr-11-1469>
- [7] 梁丽, 李鑫, 农琳, 等. 子宫内膜癌微卫星不稳定性分析: 微小微卫星变换的意义[J]. 北京大学学报(医学版), 2023, 55(2): 254-261.
- [8] 王申博, 康飞, 汪静. 多中心/多设备间 PET 影像组学特征可重复性的研究进展[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(4): 246-249.
- [9] 张宇, 王城, 常培叶. PET 影像组学在结直肠癌诊疗中的应用进展[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2025, 49(3): 191-196.
- [10] Mi, M., Weng, S., Xu, Z., Hu, H., Wang, Y. and Yuan, Y. (2023) CSCO Guidelines for Colorectal Cancer Version 2023: Updates and Insights. *Chinese Journal of Cancer Research*, **35**, 233-238. <https://doi.org/10.21147/j.issn.1000-9604.2023.03.02>
- [11] 周志鹏, 赵春雷. PET 影像组学临床应用进展[J]. 中国医学影像学杂志, 2023, 31(4): 424-428.
- [12] Cao, Y., Zhang, G., Zhang, J., Yang, Y., Ren, J., Yan, X., *et al.* (2021) Predicting Microsatellite Instability Status in Colorectal Cancer Based on Triphasic Enhanced Computed Tomography Radiomics Signatures: A Multicenter Study. *Frontiers in Oncology*, **11**, Article 687771. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.687771>
- [13] Pei, Q., Yi, X., Chen, C., Pang, P., Fu, Y., Lei, G., *et al.* (2022) Pre-Treatment CT-Based Radiomics Nomogram for Predicting Microsatellite Instability Status in Colorectal Cancer. *European Radiology*, **32**, 714-724. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-08167-3>
- [14] Ma, Y., Lin, C., Liu, S., Wei, Y., Ji, C., Shi, F., *et al.* (2022) Radiomics Features Based on Internal and Marginal Areas of the Tumor for the Preoperative Prediction of Microsatellite Instability Status in Colorectal Cancer. *Frontiers in Oncology*, **12**, Article 1020349. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.1020349>
- [15] Hoshino, I., Yokota, H., Iwatate, Y., Mori, Y., Kuwayama, N., Ishige, F., *et al.* (2025) Prediction of the Differences in Tumor Mutation Burden between Primary and Metastatic Lesions by Radiogenomics. *Cancer Science*, **113**, 229-239. <https://doi.org/10.1111/cas.15173>
- [16] Song, R., Feng, Q., Pei, E., Li, Z., Yuan, X., Huo, Y., *et al.* (2026) Subregional Radiomics Analysis on Multiparametric MRI for Evaluating Lymphovascular Invasion and Survival in Gastric Cancer: A Multicenter Study. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **63**, 1466-1479. <https://doi.org/10.1002/jmri.70236>

-
- [17] Chen, T., Yi, R., Liu, Z., Chen, Q., Yuan, W. and Zhou, Q. (2025) Integrative Multi-Region MRI Radiomics and Clinical Nomogram for Preoperative Lymphovascular Invasion Prediction in Rectal Cancer: A Multicenter Validation. *BMC Medical Imaging*, **26**, Article No. 48. <https://doi.org/10.1186/s12880-025-02105-1>
- [18] Bass, C., Ntelemis, F., Schmidt, J., Wolf, S., Geraldles, A., Mehrotra, D., *et al.* (2025) H&E-Based MSI/MMR Testing with AI in Colorectal Cancer: A Multi-Centred Blinded Evaluation. *npj Digital Medicine*, **9**, Article No. 44. <https://doi.org/10.1038/s41746-025-02218-5>
- [19] Li, J., Yang, Z., Xin, B., Hao, Y., Wang, L., Song, S., *et al.* (2021) Quantitative Prediction of Microsatellite Instability in Colorectal Cancer with Preoperative PET/CT-Based Radiomics. *Frontiers in Oncology*, **11**, Article 702055. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.702055>
- [20] Liu, H., Ye, Z., Yang, T., Xie, H., Duan, T., Li, M., *et al.* (2021) Predictive Value of Metabolic Parameters Derived from ¹⁸F-FDG PET/CT for Microsatellite Instability in Patients with Colorectal Carcinoma. *Frontiers in Immunology*, **12**, Article 724464. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.724464>
- [21] Zhang, J., Zhao, X., Zhao, Y., Zhang, J., Zhang, Z., Wang, J., *et al.* (2020) Value of Pre-Therapy ¹⁸F-FDG PET/CT Radiomics in Predicting EGFR Mutation Status in Patients with Non-Small Cell Lung Cancer. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **47**, 1137-1146. <https://doi.org/10.1007/s00259-019-04592-1>
- [22] Giannini, V., Mazzetti, S., Bertotto, I., Chiarenza, C., Cauda, S., Delmastro, E., *et al.* (2019) Predicting Locally Advanced Rectal Cancer Response to Neoadjuvant Therapy with ¹⁸F-FDG PET and MRI Radiomics Features. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **46**, 878-888. <https://doi.org/10.1007/s00259-018-4250-6>
- [23] Zhao, H., Su, Y., Wang, Y., Lyu, Z., Xu, P., Gu, W., *et al.* (2024) Using Tumor Habitat-Derived Radiomic Analysis during Pretreatment ¹⁸F-FDG PET for Predicting KRAS/NRAS/BRAF Mutations in Colorectal Cancer. *Cancer Imaging*, **24**, Article No. 26. <https://doi.org/10.1186/s40644-024-00670-2>
- [24] Chen, S., Chiang, H., Chen, W.T., Hsieh, T., Yen, K., Chiang, S., *et al.* (2014) Correlation between PET/CT Parameters and KRAS Expression in Colorectal Cancer. *Clinical Nuclear Medicine*, **39**, 685-689. <https://doi.org/10.1097/rlu.0000000000000481>