

能谱CT在结直肠癌诊疗中的研究进展

张晓健¹, 田志勇^{2*}

¹承德医学院研究生学院, 河北 承德

²邯郸市第一医院放射科, 河北 邯郸

收稿日期: 2026年7月13日; 录用日期: 2026年8月6日; 发布日期: 2026年8月17日

摘要

目的: 综述能谱CT在结直肠癌(colorectal cancer, CRC)诊疗中的研究进展, 特别是CRC诊断与分期、淋巴结转移(lymph node metastasis, LNM)、分子标志物预测还有治疗反应评估等方面。方法: 通过对相关文献的检索, 对能谱CT在结直肠癌诊疗中的临床应用价值进行分析与总结。结果: 能谱CT通过双能量采集的方式, 实现物质分离, 从而提供碘浓度(IC)、虚拟单能量图像(VMI)、有效原子序数(Z_{eff})及能谱曲线斜率(λ HU)等多个定量参数。在原发灶检测与T分期方面, 可明显提升结直肠癌的诊断效能与T分期的准确性; 在淋巴结转移评估方面, 碘浓度、Z_{eff}等参数与影像组学模型相联合后的诊断效能远优于传统形态学标准; 在分子标志物预测方面, 能谱参数与KRAS突变及微卫星不稳定性(MSI)状态具有相关性; 在治疗反应评估方面, 基线能谱CT参数能在早期预测化疗疗效及患者预后。结论: 能谱CT在结直肠癌精准诊疗当中具有重要的临床应用价值。

关键词

能谱CT, 双能量CT, 结直肠癌, 诊断, 淋巴结转移, 治疗反应

Research Progress of Spectral CT in the Diagnosis and Treatment of Colorectal Cancer

Xiaojian Zhang¹, Zhiyong Tian^{2*}

¹Graduate School of Chengde Medical University, Chengde Hebei

²Department of Radiology, Handan First Hospital, Handan Hebei

Received: July 13, 2026; accepted: August 6, 2026; published: August 17, 2026

Abstract

Objective: To review the research progress of spectral CT in the diagnosis and treatment of

*通讯作者。

文章引用: 张晓健, 田志勇. 能谱 CT 在结直肠癌诊疗中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(8): 1174-1182.
DOI: 10.12677/acm.2026.1682892

colorectal cancer (CRC), particularly in terms of CRC diagnosis and staging, lymph node metastasis (LNM), prediction of molecular biomarkers, and assessment of treatment response. **Methods:** By retrieving relevant literature, the clinical application value of spectral CT in the diagnosis and treatment of colorectal cancer was analyzed and summarized. **Results:** Spectral CT, through dual-energy acquisition, enables material decomposition and provides multiple quantitative parameters, including iodine concentration (IC), virtual monoenergetic images (VMI), effective atomic number (Zeff), and spectral curve slope (λ HU). In primary tumor detection and T staging, it can significantly improve the diagnostic efficacy and the accuracy of T staging. In the assessment of lymph node metastasis, the diagnostic performance of combining parameters such as IC and Zeff with radiomics models is far superior to that of conventional morphological criteria. In predicting molecular biomarkers, spectral parameters are correlated with KRAS mutations and microsatellite instability (MSI) status. In treatment response assessment, baseline spectral CT parameters can predict chemotherapy efficacy and patient prognosis at an early stage. **Conclusions:** Spectral CT has important clinical application value in the precision diagnosis and treatment of colorectal cancer.

Keywords

Spectral CT, Dual-Energy CT, Colorectal Cancer, Diagnosis, Lymph Node Metastasis, Therapeutic Response

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癌症,发病率和死亡率均位居前列,据统计,2020 年全球新发 CRC 病例约 193 万例,死亡约 94 万例[1]。精准的术前分期对制定个体化治疗方案是非常关键的,可传统 CT 只能获得单一的 X 线衰减相关数据,在肿瘤检测、淋巴结评估还有治疗反应预测等方面存在局限性。

能谱 CT 通过在两个不同能量水平(通常为 80 kVp 和 140 kVp)下同时或快速切换采集 X 线数据,实现了物质分离与定量分析[2]。相对于传统 CT,能谱 CT 可以获得多个定量参数:碘浓度(iodine concentration, IC)反映组织血供与灌注;虚拟单能量图像(virtual monochromatic images, VMI)可优化对比度噪声比;有效原子序数(effective atomic number, Zeff)能够用来鉴别组织成分;能谱曲线斜率(λ HU)反映组织对 X 线能量的依赖特性[3]。这些参数为 CRC 的精准诊疗提供了新的无创评估方法。本文旨在全面阐述能谱 CT 在 CRC 诊疗中的研究进展与临床应用价值。

2. 能谱 CT 基本原理与技术优势

2.1. 技术原理

能谱 CT 的核心原理基于物质在不同 X 线下的衰减差异,当 X 线能量接近物质的 K 边缘时,光电吸收效应显著增强,不同物质表现出独特的能量依赖性衰减特征[2]。目前临床应用的能谱 CT 设备主要有三种类型:双源双能量 CT (dual-source DECT),通过两套独立的探测器系统同时采集不同能量的数据;快速管电压切换 CT (rapid kVp-switching DECT),在单个球管上快速切换高低电压;双层探测器 CT (dual-layer spectral detector CT, DLSCT),通过上下两层探测器分别吸收低能和高能光子[3]。

2.2. 关键定量参数

能谱 CT 提供的定量参数主要包括:碘浓度(IC):在碘基物质分离图像上直接测量,能够反映组织血

供; 标准化碘浓度(normalized IC, NIC): 将病灶 IC 标准化至主动脉或腰大肌, 减少个体循环差异; 虚拟单能量图像(VMI): 在 40~200 keV 范围内重建, 低 keV 提高对比度, 高 keV 降低噪声; 有效原子序数(Zeff): 能够量化物质的化学组成, 区分密度相近但原子序数不同的物质; 能谱曲线斜率(λ HU): 由不同 keV 下的 CT 值计算得出, λ HU = (CT 40 keV~CT 100 keV)/60; 细胞外容积分数(ECV): 基于延迟期碘浓度与血细胞比容计算, 可反映组织间质成分[2][3]。但是, 不同厂商的能谱 CT 扫描方式及后处理路径存在差异, 缺乏定量成像生物标志物标准。

2.3. 技术优势

能谱 CT 与传统 CT 相比, 具有以下优势: 物质分离能力, 可定量评估组织碘含量, 反映灌注状态; 提升图像质量, 低 keV VMI 提高对比噪声比, 从而提高小病灶的检出率; 减少辐射剂量, 单次双能量扫描可以替代传统多期扫描方案; 多参数定量分析, 为组织定性提供更多信息[3]。Grange 等指出, 能谱 CT 有望通过提供定量、可预测的影像学生物标志物, 在 CRC 评估中发挥更加重要的作用[4]。

3. 能谱 CT 在结直肠癌诊断与分期中的应用

3.1. 肿瘤检测与 T 分期

精准 T 分期对 CRC 治疗方案选择至关重要, 传统 CT 主要依据肿瘤浸润深度进行 T 分期, 早期肿瘤与进展期肿瘤的鉴别存在困难。能谱 CT 中的 VMI 技术可显著提高 CRC 的检出率与 T 分期准确性。Aricò 等[5]人发现 40 keV VMI 的信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR)显著高于传统 CT 图像($P < 0.05$)。将 VMI40 添加至传统 CT 图像后, 放射科医师诊断 CRC 的 AUC 从 0.875 提高至 0.943 ($P < 0.05$), 对经验较少的医师提升更加明显。Chen 等[6]的研究进一步证实, 40~50 keV VMI 联合多平面重建(MPR)可将 CRC T 分期准确性提高至 94.27%, 显著优于传统轴位 CT (70.7%)。

ECV 可以反映肿瘤间质成分的增加, 与肿瘤侵袭性密切相关。Sun 等[7]创新性地 将细胞外容积分数 (ECV)用于 CRC T 分期, 发现 ECV 与 pT 分期呈显著正相关($r = 0.637$), 对 pT 分期的诊断效能优异(AUC = 0.919)。Chen 等[8]则采用碘叠加技术与虚拟平扫图像进行 T 分期, 单次双能量扫描即可获得与传统双期扫描相当的分期准确性(90.3% vs 87.4%), 同时辐射剂量降低约 57%。

值得注意的是, 有研究直接比较能谱 CT 与磁共振成像(MRI)这一传统金标准在直肠癌早期 T 分期中的表现[9], 对比双层探测器能谱 CT 虚拟单能量图像与高分辨率 MRI 对 T 分期的诊断结果, 可以发现 40 keV VMI 的图像质量与肿瘤可见度评分要优于常规图像, 能谱 CT 和 MRI 的 T 分期总体准确性分别是 65.67%和 71.64%, 但两者差异无统计学意义($P > 0.05$), 提示能谱 CT 有成为直肠癌 T 分期的补充手段的可能。

3.2. 肿瘤病理分级与分子标志物预测

肿瘤病理分级和分子标志物状态对于 CRC 预后评估和治疗方案选择至关重要。能谱 CT 参数与肿瘤分化程度之间具有相关性, Gong 等[10]研究发现, 不论动脉期还是静脉期, 碘密度(ID)和标准化碘密度(NID)在高分化组与低分化组之间存在显著差异($P < 0.001$), 该研究证明 ID 可以用于术前评估肿瘤分级。

在分子标志物预测方面, Cao 等[11]开发了基于能谱 CT 的列线图用于术前鉴别 KRAS 突变状态。该研究发现动脉期能谱曲线斜率、有效原子序数、静脉期 NIC、肿瘤长径比及肠周脂肪侵犯是预测 KRAS 突变的独立因素。列线图预测 KRAS 突变的 AUC 达 0.848, 校准曲线和决策曲线分析也表明其具备良好的临床实用性, 为 CRC 患者的靶向治疗选择提供了新的无创评估方法。Chen [12]等在一项多中心研究中探讨了能谱 CT 碘图在预测微卫星不稳定性(MSI)中的价值。该研究发现微卫星稳定(MSS)患者的动脉期

IC 和静脉期 NIC 显著高于 MSI-H 患者($P < 0.05$), 基于碘图的临床-影像组学模型显著优于单纯临床模型。SHAP 分析发现小波特征和病灶的形态特征为关键指标, 为 CRC 患者的免疫治疗决策提供了新的参考指标。

除 KRAS 与 MSI 外, 肿瘤增殖活性及预后相关分子标志物与能谱 CT 定量参数的关系同样受到关注。Chen 等[13]分析了双层探测器能谱 CT 参数与 Ki-67 及 HER2 表达状态的相关性, 研究结果表明 Ki-67 高表达组的静脉期 40 keV CT 值、有效原子序数、碘浓度及能谱曲线斜率均高于低表达组(P 均 < 0.05), 其中 40 keV CT 值的诊断效能最佳($AUC = 0.639$); 但与 HER2 表达状态都没有相关性。该结果提示能谱 CT 对评估肿瘤增殖活性具有一定价值, 但对 HER2 状态的预测能力有限。

4. 能谱 CT 在淋巴结转移评估中的应用

淋巴结转移(lymph node metastasis, LNM)直接影响 CRC 患者的预后, 准确评估淋巴结状态对个体化治疗和预后判断至关重要。传统 CT 依靠淋巴结短径、形态、大小判断转移的可能性, 准确性有限。能谱 CT 通过定量参数和影像组学显著提高了 LNM 的诊断效能。

4.1. 传统定量参数评估

多项研究证明, 转移性淋巴结与非转移性淋巴结的能谱 CT 定量参数存在显著差异。Kato 等[14]发现, 转移性淋巴结的静脉期碘浓度显著低于非转移性淋巴结(1.60 mg/ml vs 3.25 mg/ml , $P < 0.001$), 以 2.1 mg/ml 为截断值诊断 LNM 的 AUC 达 0.932, 准确性 87.9%, 碘浓度可以对常规 CT 难以判断的淋巴结进行鉴别。Yang 等[15]在研究中发现, 标准化有效原子序数(nZ_{eff})是鉴别转移性淋巴结的最佳参数, 显著优于形态学标准和短径。联合动脉期标准化碘浓度与静脉期 nZ_{eff} 后, 诊断准确性进一步提高。Tang 等[16]系统评估了双层探测器能谱 CT 多参数对 LNM 的诊断价值。该研究发现, 转移性淋巴结动脉期 IC 和 NIC 降低, 而静脉期 Z_{eff} 和 nZ_{eff} 升高, 双期 λHU 值均升高。多参数模型鉴别 LNM 的 AUC 达 0.901, 显著优于形态学特征模型($AUC = 0.695$, $P < 0.05$)。

Liu 等[17]和 Al-Najami 等[18] [19]的研究也证实了能谱 CT 定量参数在直肠癌 LNM 评估中的价值。Liu 等发现, 结合静脉期 nIC 与短径可将 LNM 诊断准确性提高至 82.9%。Al-Najami 等[18]通过离体标本扫描发现, 双能 CT 能够为临床活体患者的淋巴结影像评估提供对照参考, Al-Najami 等[19]又进一步验证了能谱 CT 定量参数可以区分淋巴结的良恶性。另一项针对 pT1-2 期直肠癌的回顾性研究发现有效原子序数联合淋巴结短径可获得最佳诊断效能[20], 提示能谱 CT 定量参数同样对早期病变的 LNM 具有较好的诊断能力。Sato 等[21]验证了能谱 CT 对特殊部位淋巴结转移的诊断效能, 研究表明 NIC 对直肠癌侧方淋巴结转移具有预测价值。

4.2. 影像组学与机器学习模型

近年来, 越来越多的研究证明了影像组学与机器学习模型在 CRC 患者淋巴结评估中的价值。Wang 等[22]构建了基于直肠癌患者能谱 CT 图像的影像组学模型, 测试组的 120 kVp-like 图像的影像组学特征对 LNM 的诊断效能显著高于传统形态学指标和单独的 DECT 定量参数。Yang 等[23]建立了基于能谱 CT 多参数的预测模型, 训练集 AUC 达 0.925, 显著优于血清肿瘤标志物模型($AUC = 0.542$)、常规 CT 模型($AUC = 0.800$)和 Node-RADS 评分($AUC = 0.812$) (P 均 < 0.0001)。将能谱 CT 模型与 Node-RADS 评分整合后, AUC 进一步提高至 0.961。

Liu 等[24]将基于能谱 CT 碘图的影像组学特征用于预测直肠癌淋巴结转移, 静脉-临床联合模型在验证组中 AUC 达 0.780。Chen 等[25]构建了基于双层探测器能谱 CT 的 40 keV VMI 和碘图构建的列线

图, 在预测区域 LNM 方面更加出色。He 等[26]则探索了能谱 CT 参数联合临床特征预测结肠癌病理 N 分期的价值, 联合模型在训练集和测试集的 AUC 分别为 0.845 和 0.849。Cao 等[27]构建了整合临床因素与能谱 CT 参数的列线图模型, 纳入 CEA、CA19-9、肠周脂肪侵犯、IC 和 Zeff 等指标, 研究表明该模型的诊断效能显著优于单纯临床模型。同时, Li 等[28]将影像组学特征与临床因素进一步结合, 基于多参数能谱 CT 图像构建的列线图预测 LNM 的 AUC 达 0.879。

能谱 CT 在 CRC 淋巴结转移评估中的价值已经被充分证实, 因转移性淋巴结微血管破坏及细胞密度差异, 碘浓度、Zeff 等定量参数可以有效区分转移性与非转移性淋巴结; 由多参数构成的模型的诊断效能显著优于单一参数和传统形态学标准; 但影像组学模型较为复杂, 可将其简化为包含关键临床指标和核心能谱定量参数的列线图, 便于常规应用; 将 LNM 预测结果用于 CRC 患者术前讨论, 指导治疗方案选择。

5. 能谱 CT 在治疗反应评估中的应用

5.1. 新辅助治疗评估

新辅助放化疗(neoadjuvant chemoradiotherapy, nCRT)是局部进展期直肠癌的标准治疗方案, 准确评估 nCRT 反应对后续手术决策和预后判断至关重要, 借助能谱 CT 定量参数可早期预测治疗反应。

Liu 等[29]探索了能谱 CT VMI 在直肠癌放疗靶区勾画中的价值。研究发现 40 keV VMI 的图像质量主观评分与 MRI 相当($P = 0.449$), MRI 与依靠 VMI 定义的大体肿瘤体积(GTV)之间的一致性显著优于传统 CT ($P < 0.0001$)。研究表明 VMI 可用于直肠癌放疗靶区的术前定位工作。Grange 等[30]在一项前瞻性研究中验证了能谱 CT 对结直肠癌腹膜转移新辅助化疗后病理反应的预测价值。该研究发现治疗反应良好组(PRGs 1/2)的 40 keV VMI、碘浓度、nIC、ECV 等参数均显著低于反应不良组(PRGs 3/4) ($P < 0.05$)。该研究表明能谱 CT 参数可以对新辅助治疗反应进行评估。

5.2. 化疗反应预测

早期预测转移性 CRC 的化疗反应有助于及时调整治疗方案。多项研究表明, 能谱 CT 参数可用来对结直肠癌肝转移(CRLM)患者的化疗反应进行预测。Li 等[31]对能谱 CT 预测化疗联合贝伐珠单抗对 CRLM 患者治疗价值的价值进行了探究。该研究发现, 化疗 2 个月后的碘浓度是总生存期(OS)的独立预测因素, 基线碘浓度对化疗反应的预测也具有重要价值。与此同时, Li 等[32]进一步将研究拓展至细胞外容积分数这一参数, 通过分析 CRLM 病灶化疗前后 ECV 分数的变化, 发现化疗 2 个周期后 ECV 分数的下降幅度是预测后续疗效及无进展生存期、总生存期的独立因素。Ning 等[33]回顾性分析了 CRLM 患者的宝石能谱成像(GSI)数据, 发现 68 keV VMI 的 CT 值和碘浓度是化疗反应的独立预测因素。门静脉期碘浓度对化疗反应的预测价值尤为明显($OR = 1.952$, $P = 0.039$)。基线能谱 CT 参数可有效预测结直肠癌新辅助治疗的反应, 其核心在于肿瘤微环境的差异, 比如 IC 反映肿瘤血供, 早期快速下降提示坏死与微血管损伤; ECV 可反映肿瘤退缩及间质纤维化。确定扫描时机(治疗前及治疗后 2~4 周期)和核心参数, 通过多中心研究确定预测治疗良好或不良的最佳截断值, 根据参数预示, 有望指导临床治疗方案选择。

6. 能谱 CT 在其他方面的应用

6.1. 肿瘤沉积物预测

肿瘤沉积物是 CRC 分期和预后的重要因素, 能谱 CT 的无创评估有助于指导个体化治疗。Feng 等[34]基于双层探测器能谱 CT 碘图构建了预测 CRC 肿瘤沉积物(tumor deposits, TDs)的影像组学模型。研究结果显示, 联合模型在训练集、测试集和外部验证集的 AUC 分别达到 0.926、0.881 和 0.887, 明显高

于单纯临床模型和影像组学模型。

6.2. 脉管侵犯与神经侵犯评估

脉管侵犯(LVI)、神经侵犯(PNI)是肿瘤进展的重要特征之一,影响着患者的预后。Chen 等[35]从常规能谱参数角度进行分析,发现静脉期能谱参数可用于判别脉管侵犯状态。Yuan 等[36]发现能谱 CT 标准化碘浓度(NIC)可预测 CRC 患者脉管癌栓的存在,其有助于术前风险分层。Wang 等[37]进一步研究了能谱 CT 衍生参数 ECV 对淋巴结转移、神经侵犯和脉管侵犯的预测价值。结果证明,延迟期 ECV 对 LNM (AUC = 0.735)、PNI (AUC = 0.723)和 LVI (AUC = 0.705)均具有良好的预测效能,ECV 可以作为结肠癌的术前风险分层的影像学生物标志物。

6.3. 远处转移评估

结直肠癌发生远处转移是导致患者死亡的主要原因,评估远处转移是制定个体化方案和判断预后的关键。Yang 等[38]基于能谱 CT 影像、CEA 和 CA19-9 构建了 CRC 术后肝转移预测模型。该研究将传统血清标志物与能谱 CT 定量参数相结合,可评估 CRC 患者术后出现肝转移的发生概率,为术后随访策略提供了参考。Peng 等[39]探索了能谱 CT 参数对术后极早期远处转移(VEDM)的预测价值。研究发现,静脉增强分数(VEF)、静脉期能谱曲线斜率(λ -V)和 $1/\text{NIC-V}$ 对 VEDM 具有显著预测价值。

在 CRC 肝转移灶的鉴别中,能谱 CT 也具有重要价值。D'Angelo 等[40]研究了 223 个病变(147 个转移灶和 76 个囊肿),发现脂肪分数(FF)的诊断效能最高(AUC = 0.97)。该研究为 CRC 患者肝病变的鉴别提供了可靠的影像学方法。

7. 局限性与未来展望

尽管能谱 CT 在 CRC 诊疗中展现出广阔前景,但仍存在以下局限性:不同厂商的能谱 CT 参数和后处理方法存在差异,缺乏统一的扫描方案和参数测量标准;多数为单中心回顾性研究,样本量有限;影像组学研究中感兴趣区(ROI)的勾画费时费力,且观察者间一致性有待提高;能谱 CT 设备和后处理软件的成本较高,限制了基层医院的普及[4]。Hong 等指出,能谱 CT 在胃肠道肿瘤中的应用仍面临标准化和时间成本的挑战,图像分割的人工耗时是限制其广泛应用的主要因素之一[41]。

国际上,RSNA 发起的 QIBA 联盟,在 CT 领域,已建立肺结节体积测量等标准,并正在拓展至双能量 CT 灌注分析;IEC 正在制定能谱成像性能评价标准;国内也已发表《能量 CT 临床应用中国专家共识》和《双层探测器光谱 CT 临床应用中国专家共识》等,这些努力将推动定量成像生物标志物标准化。开展多中心、大样本前瞻性研究;结合人工智能算法实现自动化 ROI 分割和一键提取能谱定量指标;纳入更丰富的预测变量,构建更精准的预测模型;扩大研究范围,评估肺、腹膜等其他部位远处转移,关注患者长期预后[4]。能谱 CT 与人工智能的整合,特别是深度学习和自动化分割技术,将推动其在 CRC 评估中的研究和临床应用。

光子计数 CT (photon-counting CT, PCCT)是当前最先进的医疗设备,具有高空间分辨率、能谱分离与高剂量效率三大核心优势。Surov 等[42]将这一技术初步应用在直肠癌。该研究发现由 PCCT 测得的标准化碘浓度(NIC)可有效预测新辅助放化疗治疗反应不佳(退缩分级 2~4 级),这一结果初步验证了光子计数 CT 在结直肠癌精准诊疗中的实用价值,也为后续个体化治疗的探索提供了方向。

8. 结论

能谱 CT 作为常规 CT 的进阶和补充,它提供的多维度定量参数,在 CRC 诊疗中展现出重要价值,有助于制定个体化治疗方案和判断预后。在原发灶检测与 T 分期方面,可明显提升结直肠癌的诊断效能

与 T 分期的准确性; 在淋巴结转移评估方面, 碘浓度、Zeff 等参数与影像组学模型相联合后的诊断效能远优于传统形态学标准; 在分子标志物预测方面, 能谱参数与 KRAS 突变及微卫星不稳定性(MSI)状态具有相关性; 在治疗反应评估方面, 基线能谱 CT 参数能在早期预测化疗疗效及患者预后; 能谱 CT 为肿瘤沉积物的预测、脉管及神经侵犯的评估、远处转移的评估提供了重要的影像学依据。然而, 目前多数仍为单中心回顾性研究, 缺乏统一的扫描方案和诊断标准, 未来需要多中心前瞻性研究进一步验证能谱 CT 的临床价值, 并结合人工智能推动其在 CRC 精准诊疗中的应用。

参考文献

- [1] Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R.L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., *et al.* (2021) Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, **71**, 209-249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
- [2] McCollough, C.H., Leng, S., Yu, L. and Fletcher, J.G. (2015) Dual- and Multi-Energy CT: Principles, Technical Approaches, and Clinical Applications. *Radiology*, **276**, 637-653. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015142631>
- [3] Johnson, T.R.C., Krauß, B., Sedlmair, M., Grasruck, M., Bruder, H., Morhard, D., *et al.* (2007) Material Differentiation by Dual Energy CT: Initial Experience. *European Radiology*, **17**, 1510-1517. <https://doi.org/10.1007/s00330-006-0517-6>
- [4] Grange, R., Wagner, M., Benzerdjeb, N., Glehen, O., Kepenekian, V., Si-Mohamed, S., *et al.* (2026) Spectral CT Imaging in Colorectal Cancer: Current Applications, Limitations, and Future Perspectives. *Insights into Imaging*, **17**, Article No. 39. <https://doi.org/10.1186/s13244-026-02212-9>
- [5] Aricò, F.M., Trimarchi, R., Portaluri, A., *et al.* (2023) Virtual Monoenergetic Dual-Layer Dual-Energy CT Images in Colorectal Cancer: CT Diagnosis Could Be Improved? *La Radiologia Medica*, **128**, 891-899. <https://doi.org/10.1007/s11547-023-01663-0>
- [6] Chen, F.X., Jiang, K.K., Zhu, J.F., *et al.* (2025) Diagnostic Accuracy of Dual-Layer Spectral Computed Tomography Virtual Monoenergetic Imaging with Multiplanar Reformation for T-Staging of Colorectal Cancer. *World Journal of Gastroenterology*, **31**, Article 110573. <https://doi.org/10.3748/wjg.v31.i32.110573>
- [7] Sun, Q., Bian, X., Sun, D., Wang, M., Dong, H., Dai, X., *et al.* (2024) The Value of Preoperative Diagnosis of Colorectal Adenocarcinoma Pathological T Staging Based on Dual-Layer Spectral-Detector Computed Tomography Extracellular Volume Fraction: A Preliminary Study. *Japanese Journal of Radiology*, **42**, 612-621. <https://doi.org/10.1007/s11604-024-01537-z>
- [8] Chen, C.Y., Hsu, J.S., Jaw, T.S., *et al.* (2014) Utility of the Iodine Overlay Technique and Virtual Nonenhanced Images for the Preoperative T Staging of Colorectal Cancer by Dual-Energy CT with Tin Filter Technology. *PLOS ONE*, **9**, e113589. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113589>
- [9] Jia, Z., Guo, L., Yuan, W., Dai, J., Lu, J., Li, Z., *et al.* (2024) Performance of Dual-Layer Spectrum CT Virtual Monoenergetic Images to Assess Early Rectal Adenocarcinoma T-Stage: Comparison with MR. *Insights into Imaging*, **15**, Article No. 11. <https://doi.org/10.1186/s13244-023-01593-5>
- [10] Gong, H.X., Zhang, K.B., Wu, L.M., *et al.* (2016) Dual Energy Spectral CT Imaging for Colorectal Cancer Grading: A Preliminary Study. *PLOS ONE*, **11**, e0147756. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147756>
- [11] Cao, Y., Zhang, G., Bao, H., Zhang, S., Zhang, J., Zhao, Z., *et al.* (2021) Development of a Dual-Energy Spectral CT Based Nomogram for the Preoperative Discrimination of Mutated and Wild-Type KRAS in Patients with Colorectal Cancer. *Clinical Imaging*, **69**, 205-212. <https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2020.08.023>
- [12] Chen, W., Jia, Z., Wan, L., Yuan, W., Xu, J., Du, X., *et al.* (2025) Interpretable Radiomics Model Based on Dual-Layer Spectral CT Iodine Maps for Predicting Microsatellite Instability in Colorectal Cancer: A Two-Center Study. *European Journal of Radiology*, **192**, Article 112357. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2025.112357>
- [13] Chen, J., Tang, L., Xie, P., Qian, T., Huang, J. and Liu, K. (2024) Quantitative Parameters of Dual-Layer Spectral Detector Computed Tomography for Evaluating Ki-67 and Human Epidermal Growth Factor Receptor 2 Expression in Colorectal Adenocarcinoma. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 789-799. <https://doi.org/10.21037/qims-23-1054>
- [14] Kato, T., Uehara, K., Ishigaki, S., Nishashi, T., Arimoto, A., Nakamura, H., *et al.* (2015) Clinical Significance of Dual-Energy CT-Derived Iodine Quantification in the Diagnosis of Metastatic LN in Colorectal Cancer. *European Journal of Surgical Oncology (EJSO)*, **41**, 1464-1470. <https://doi.org/10.1016/j.ejso.2015.08.154>
- [15] Yang, Z., Zhang, X., Fang, M., Li, G., Duan, X., Mao, J., *et al.* (2019) Preoperative Diagnosis of Regional Lymph Node Metastasis of Colorectal Cancer with Quantitative Parameters from Dual-Energy CT. *American Journal of Roentgenology*,

- 213, W17-W25. <https://doi.org/10.2214/ajr.18.20843>
- [16] Tang, L., Liu, G., Lv, X., Chen, W. and Liu, X. (2026) Quantitative Parameters of Dual-Layer Spectral CT for Differentiating Metastatic and Non-Metastatic Lymph Nodes in Colorectal Cancer. *Cancer Imaging*, **26**, Article No. 56. <https://doi.org/10.1186/s40644-026-01019-7>
- [17] Liu, H., Yan, F., Pan, Z., Lin, X., Luo, X., Shi, C., *et al.* (2015) Evaluation of Dual Energy Spectral CT in Differentiating Metastatic from Non-Metastatic Lymph Nodes in Rectal Cancer: Initial Experience. *European Journal of Radiology*, **84**, 228-234. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2014.11.016>
- [18] Al-Najami, I., Beets-Tan, R.G.H., Madsen, G. and Baatrup, G. (2016) Dual-Energy CT of Rectal Cancer Specimens. *Diseases of the Colon & Rectum*, **59**, 640-647. <https://doi.org/10.1097/dcr.0000000000000601>
- [19] Al-Najami, I., Lahaye, M.J., Beets-Tan, R.G.H. and Baatrup, G. (2017) Dual-Energy CT Can Detect Malignant Lymph Nodes in Rectal Cancer. *European Journal of Radiology*, **90**, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2017.02.005>
- [20] Liu, J., Pan, H., Lin, Q., Chen, X., Huang, Z., Huang, X., *et al.* (2023) Added Value of Spectral Parameters in Diagnosing Metastatic Lymph Nodes of pT1-2 Rectal Cancer. *Abdominal Radiology*, **48**, 1260-1267. <https://doi.org/10.1007/s00261-023-03854-9>
- [21] Sato, K., Morohashi, H., Tsushima, F., Sakamoto, Y., Miura, T., Fujita, H., *et al.* (2019) Dual Energy CT Is Useful for the Prediction of Mesenteric and Lateral Pelvic Lymph Node Metastasis in Rectal Cancer. *Molecular and Clinical Oncology*, **10**, 583-588. <https://doi.org/10.3892/mco.2019.1834>
- [22] Wang, D., Zhuang, Z., Wu, S., Chen, J., Fan, X., Liu, M., *et al.* (2022) A Dual-Energy CT Radiomics of the Regional Largest Short-Axis Lymph Node Can Improve the Prediction of Lymph Node Metastasis in Patients with Rectal Cancer. *Frontiers in Oncology*, **12**, Article 846840. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.846840>
- [23] Yang, H., Chen, B., Jiang, L., Yang, Y., Zheng, S., Jiang, D., *et al.* (2026) Spectral CT-Based Multiparametric Model for Preoperative Lymph Node Metastasis Prediction in Colorectal Cancer. *European Journal of Radiology*, **200**, Article 112854. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2026.112854>
- [24] Liu, X., Yuan, Y., Chen, X., Fang, Z., Liu, S., Pu, H., *et al.* (2025) Radiomics from Dual-Energy CT-Derived Iodine Maps for Predicting Lymph Node Metastases in Patients with Resectable Rectal Cancer. *Journal of X-Ray Science and Technology*, **33**, 553-564. <https://doi.org/10.1177/08953996241313322>
- [25] Chen, Y., Xu, Y., Cai, W. and Chen, G. (2026) A Nomogram Based on Dual-Layer Spectral Detector CT-Derived 40-Kev Virtual Monoenergetic Images and Iodine Maps for Preoperative Prediction of Regional Lymph Node Metastasis in Colorectal Cancer. *BMC Medical Imaging*, **26**, Article No. 238. <https://doi.org/10.1186/s12880-026-02300-8>
- [26] He, C., Lin, L., Yang, A., Shao, C., Wang, J., He, Y., *et al.* (2026) Preoperative Colon Cancer Nodal Staging Using Dual-Energy CT and Clinically Derived Features. *European Radiology*, **36**, 4582-4591. <https://doi.org/10.1007/s00330-025-12294-6>
- [27] Cao, Y., Zhang, J., Bao, H., Zhang, G., Yan, X., Wang, Z., *et al.* (2021) Development of a Nomogram Combining Clinical Risk Factors and Dual-Energy Spectral CT Parameters for the Preoperative Prediction of Lymph Node Metastasis in Patients with Colorectal Cancer. *Frontiers in Oncology*, **11**, Article 689176. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.689176>
- [28] Li, Q., Hong, R., Zhang, P., Hou, L., Bao, H., Bai, L., *et al.* (2024) A Clinical-Radiomics Nomogram Based on Spectral CT Multi-Parameter Images for Preoperative Prediction of Lymph Node Metastasis in Colorectal Cancer. *Clinical & Experimental Metastasis*, **41**, 639-653. <https://doi.org/10.1007/s10585-024-10293-3>
- [29] Liu, K., Wang, W., Wang, P., Qi, X., Zhou, Y., Liu, D., *et al.* (2026) Evaluation of Dual-Energy CT Virtual Monoenergetic Imaging for Target Delineation in Rectal Cancer Radiotherapy. *Radiotherapy and Oncology*, **219**, Article 111488. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2026.111488>
- [30] Grange, R., Benzerdjeb, N., Si-Mohamed, S., Gavrel, M., Galan, A., Villeneuve, L., *et al.* (2026) Multiparametric Assessment of Tumor Pathological Regression Grade of Peritoneal Metastases from Non-Mucinous Colorectal Cancer during Neoadjuvant Chemotherapy Using Dual-Energy CT. *Diagnostic and Interventional Imaging*, **107**, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2025.10.007>
- [31] Li, S., Yuan, L., Yue, M., Xu, Y., Liu, S., Wang, F., *et al.* (2023) Early Evaluation of Liver Metastasis Using Spectral CT to Predict Outcome in Patients with Colorectal Cancer Treated with FOLFOXIRI and Bevacizumab. *Cancer Imaging*, **23**, Article No. 30. <https://doi.org/10.1186/s40644-023-00547-w>
- [32] Li, S., Yang, X., Lu, T., Yuan, L., Zhang, Y., Zhao, J., *et al.* (2024) Extracellular Volume Fraction Can Predict the Treatment Response and Survival Outcome of Colorectal Cancer Liver Metastases. *European Journal of Radiology*, **175**, Article 111444. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2024.111444>
- [33] Ning, H.F., Qin, Y.L., Yue, K.T., *et al.* (2024) Predictive Value of Gemstone Spectral Imaging for Chemotherapy Response in Colorectal Cancer Liver Metastases: A Retrospective Study. *Journal of Research in Medical Sciences*, **29**, 1-7. https://doi.org/10.4103/jrms.jrms_630_23

- [34] Feng, F.W., Jiang, F.Y., Liu, Y.Q., *et al.* (2025) Radiomics Analysis of Dual-Layer Spectral-Detector CT-Derived Iodine Maps for Predicting Tumor Deposits in Colorectal Cancer. *European Radiology*, **35**, 105-116. <https://doi.org/10.1007/s00330-024-10918-x>
- [35] Chen, J., Ni, L., Gong, J., Wu, J., Qian, T., Wang, M., *et al.* (2024) Quantitative Parameters of Dual-Layer Spectral Detector Computed Tomography for Evaluating Differentiation Grade and Lymphovascular and Perineural Invasion in Colorectal Adenocarcinoma. *European Journal of Radiology*, **178**, Article 111594. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2024.111594>
- [36] Yuan, X., Quan, X., Che, X., Xu, L., Yang, C., Zhang, X., *et al.* (2023) Preoperative Prediction of the Lymphovascular Tumor Thrombus of Colorectal Cancer with the Iodine Concentrations from Dual-Energy Spectral CT. *BMC Medical Imaging*, **23**, Article No. 103. <https://doi.org/10.1186/s12880-023-01060-z>
- [37] Wang, Y., Lu, J., Li, Y., Yang, Y., Yu, Y., Sun, Z., *et al.* (2026) The Value of Extracellular Volume Based on Spectral CT in Lymph Node Metastasis, Perineural Invasion, and Lymphovascular Invasion of Colon Cancer. *Abdominal Radiology*, **51**, 3456-3467. <https://doi.org/10.1007/s00261-026-05572-4>
- [38] Yang, Q., Bai, C., Xu, Y., Sun, Y., Tsilimigras, D.I. and Lu, Y. (2025) Construction of a Postoperative Liver Metastasis Prediction Model for Colorectal Cancer Based on Spectral CT Imaging, CEA, and Ca19-9. *Translational Cancer Research*, **14**, 2113-2124. <https://doi.org/10.21037/tcr-2025-570>
- [39] Peng, W., Wan, L., Zhao, R., Chen, S., Dong, S., Li, L., *et al.* (2024) Novel Biomarkers Based on Dual-Energy Computed Tomography for Risk Stratification of Very Early Distant Metastasis in Colorectal Cancer after Surgery. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 618-632. <https://doi.org/10.21037/qims-23-861>
- [40] D'Angelo, T., Lanzafame, L.R.M., Steinert, T., Mazziotti, S., França, M., Othman, A.E., *et al.* (2025) Diagnostic Accuracy of Dual-Energy CT Parameters for Discrimination of Hypodense Liver Lesions in Patients Affected by Colorectal Cancer. *Journal of Clinical Medicine*, **14**, Article 5929. <https://doi.org/10.3390/jcm14175929>
- [41] Hong, Y., Zhong, L., Lv, X., Liu, Q., Fu, L., Zhou, D., *et al.* (2023) Application of Spectral CT in Diagnosis, Classification and Prognostic Monitoring of Gastrointestinal Cancers: Progress, Limitations and Prospects. *Frontiers in Molecular Biosciences*, **10**, Article 1284549. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2023.1284549>
- [42] Surov, A., Diallo-Danebrock, R., Radi, A., Kröger, J.R., Niehoff, J.H., Michael, A.E., *et al.* (2024) Photon Counting Computed Tomography in Rectal Cancer: Associations between Iodine Concentration, Histopathology and Treatment Response: A Pilot Study. *Academic Radiology*, **31**, 3620-3626. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2024.02.006>