

· 综述 ·

多模态CT在结直肠癌淋巴结转移评估中的研究进展

王 晗^{1, 2}, 郝粉娥¹

1. 内蒙古医科大学附属医院影像诊断科, 内蒙古 呼和浩特 010050;

2. 内蒙古医科大学第一临床医学院, 内蒙古 呼和浩特 010059

[摘要] 结直肠癌 (colorectal cancer, CRC) 发病率近年来逐步升高。评估CRC患者淋巴结转移 (lymph node metastasis, LNM) 是疾病分期的关键, 直接影响治疗选择和患者预后评估。随着医学影像学技术的发展, 计算机断层成像 (computed tomography, CT) 作为临床常规检查手段, 在LNM评估中至关重要。从传统形态学评估逐步向量化、功能化及智能化方向演变。常规CT通过淋巴结短径、形态、边界及强化模式等特征评估转移, 灵敏度和特异度受限。双能量CT (dual-energy CT, DECT) 等功能成像技术的出现, 为淋巴结内部成分变化、血供特征及微观结构异质性的无创评估提供了新思路。近些年研究已证实碘浓度 (iodine concentration, IC)、标准化碘浓度 (normalized iodine concentration, NIC)、有效原子序数 (effective atomic number, Z_{eff}) 和能谱曲线斜率等参数, 可以有效地提高术前LNM的预测准确度。人工智能 (artificial intelligence, AI) 的应用进一步丰富了诊断参数, 推动淋巴结研究发展。新兴的AI技术在淋巴结自动检测、特征自动提取和精准预测方面表现出良好潜力。本文旨在综述CT技术及AI在CRC患者LNM评估中的优势与不足, 为临床诊疗与后续研究提供参考指导, 旨在实现更高效、精准的淋巴结评估和个体化治疗决策。

[关键词] 结直肠癌; 淋巴结转移; 计算机断层成像; 功能成像; 人工智能

中图分类号: R735.3; R445.3 文献标志码: A

DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2026.02.012

Advances in multimodal CT for assessing lymph node metastasis in colorectal cancer WANG Han^{1, 2}, HAO Fen'e¹ (1. Department of Imaging Diagnosis, The Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010050, Inner Mongolia Autonomous Region, China; 2. First Clinical Medical College, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010059, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Correspondence to: HAO Fene E-mail: hfe1022@163.com

[Abstract] The incidence of colorectal cancer (CRC) has been gradually increasing in recent years. Assessing lymph node metastasis (LNM) in CRC patients is critical for disease staging, directly influencing treatment selection and prognosis evaluation. With advances in medical imaging technology, computed tomography (CT) has become a routine clinical examination method, playing a vital role in LNM assessment. The approach has evolved from traditional morphological assessment toward quantification, functional analysis, and intelligent evaluation. Conventional CT assesses metastasis based on features such as lymph node short axis diameter, morphology, margins, and enhancement patterns, but its sensitivity and specificity remain limited. The emergence of functional imaging techniques like dual-energy CT (DECT) offers new avenues for non-invasive evaluation of internal lymph node composition changes, blood supply characteristics, and microstructural heterogeneity. Recent studies have confirmed that parameters

基金项目: 内蒙古自治区医师协会临床医学研究和临床新技术推广项目 (YSXH 2024KYF042); 内蒙古医科大学创新创业项目 (S20241013201, 202410132014)。

利益冲突: 作者声明无利益冲突。

伦理批件: 不需要。

知情同意: 不需要。

引用本文: 王 晗, 郝粉娥. 多模态CT在结直肠癌淋巴结转移评估中的研究进展[J]. 肿瘤影像学, 2026, 35(2): 319-325.

Funding: Clinical Medical Research and Clinical New Technology Promotion Program of the Inner Mongolia Autonomous Region Physicians' Association (YSXH2024KYF042); Inner Mongolia Medical University Innovation and Entrepreneurship Training Program (S202410132010, S202410132014).

Conflicts of interest: authors declare no conflicts of interest.

Ethical approval: not required.

Informed consent: not required.

Cite this article: WANG H, HAO F E. Advances in multimodal CT for assessing lymph node metastasis in colorectal cancer [J]. Oncoradiology, 2026, 35(2): 319-325.

such as iodine concentration (IC), normalized iodine concentration (NIC), effective atomic number (Z_{eff}), and energy spectrum curve slope can significantly enhance the accuracy of preoperative LNM prediction. The application of artificial intelligence (AI) has further enriched diagnostic parameters and propelled lymph node research. Emerging AI technologies demonstrate promising potential in automated lymph node detection, feature extraction, and precise prediction. This review aimed to summarize the advantages and limitations of CT imaging techniques and AI in assessing LNM in CRC patients, providing reference guidance for clinical practice and future research to achieve more efficient, accurate lymph node evaluation and personalized treatment decisions.

[Key words] Colorectal cancer; Lymph node metastasis; Computed tomography; Functional imaging; Artificial intelligence

结直肠癌是常见的消化系统恶性肿瘤之一。2022年全球癌症统计数据^[1]显示,结直肠癌发病率和死亡率分别占全部恶性肿瘤的第3位和第2位。自2000年以来,中国结直肠癌发病率持续上升,发病人群趋于年轻化,40~49岁年龄组发病率年均增长率为3.9%,造成明显的社会与经济负担^[2]。

淋巴结转移 (lymph node metastasis, LNM) 是结直肠癌重要的转移途径,是影响复发与患者预后的危险因素,并与临床路径密切相关^[3-5]。《中国临床肿瘤学会 (CSCO) 结直肠癌诊疗指南 (2024版)》明确指出,对于治疗前已存在LNM的患者,推荐采用新辅助放化疗旨在提高根治性切除率^[4]。研究^[5]表明,结直肠癌无LNM者5年总生存率为80%~90%,而存在LNM者为60%~68%,且局部复发率也明显高于无LNM者。因此,术前准确评估淋巴结状态对结直肠癌患者的治疗决策和预后评估至关重要。

计算机体层成像 (computed tomography, CT) 作为评估结直肠癌LNM的一线检查,已广泛应用于临床实践^[6]。CT不仅能从淋巴结的大小、形状、密度和血供情况等传统影像学特征进行分析,还可通过功能成像技术实现对淋巴结微观结构的深入观察和异质性的定量评估^[7-8]。人工智能 (artificial intelligence, AI) 通过深度解析CT图像中淋巴结的细微特征 (如纹理异质性和代谢特征),构建高精度预测模型,在无创评估结直肠癌LNM的研究中已取得初步成果^[9],推动着精准医疗向智能化发展。

本文旨在对CT应用于结直肠癌LNM评估的价值与限度进行综述,拟为临床实践提供思路与方法依据。

1 常规CT

近年来,术前利用CT评估结直肠癌LNM已成为常规方法,其影像学特征包括淋巴结短径增加、脂肪门消失、淋巴结边缘模糊、内部密度不均匀,出现钙化、囊变、坏死、结外侵犯或不均质强化等信息均可作为LNM的诊断依据^[10-11]。

常规CT诊断结直肠癌LNM主要依赖淋巴结短轴直径的测量。美国国立综合癌症网络 (National Comprehensive Cancer Network, NCCN) 结直肠癌指南 (2024版) 将短径 ≥ 10 mm作为LNM的可疑阈值,而临床实践中更常采用5 mm作为诊断阈值。《中国直肠癌侧方淋巴结转移诊疗专家共识 (2024版)》将初诊时淋巴结短径 > 7 mm作为直肠癌侧方转移的主要临床诊断依据,但需结合其他影像学恶性特征及临床病理高危因素^[10]。可见,以大小为基准的诊断标准尚未达成共识。吴俊华等^[12]在常规CT中测量了转移淋巴结的最大长轴直径 (maximum long axis diameter, MLAD) 和最大短轴直径 (maximum short shaft diameter, MSAD) 并计算其直径比,以 $MSAD \geq 6$ mm并结合直径比 (0.9) 鉴别淋巴结性质,特异度为78.9%。正常淋巴结通常具有较大的脂肪门,在CT图像上呈现中央脂肪凹陷的菜豆状特征,转移性淋巴结可发生明显的形态学改变^[13]。张瑜等^[14]探讨结直肠癌周围淋巴结形态学特征在预测LNM中的价值并与传统CT标准进行比较,其中强化不均匀、边界不规则的形态学特征预测准确度为78.4%~74.6%,短径 > 10 mm、淋巴回流区域存在 ≥ 3 个簇状淋巴结的传统标准准确度为64.8%~65.3%,总体形态学标准的受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线的曲线下面积 (area under the curve, AUC) 为0.713~0.716,显著高于传统标准 (AUC=0.644~0.649)。因此,常规CT基本形态学特征评估淋巴结性质具

有一定临床价值，但准确度尚不理想。

2 双能量CT

双能量CT (dual-energy CT, DECT) 利用两种不同能量水平的X射线对组织进行扫描，能够实现单物质分离和定量分析^[15]。双能量成像方式主要包括双源双能、双层探测器双能、快速kVp切换3种模式。双源CT (dual-source CT, DSCT) 通过双球管双能量扫描技术，利用病灶对不同能量X射线衰减值的差异进行成像，能够精准反映病灶的密度特征与化学成分信息^[16]。双层探测器光谱CT (dual layer detector spectral CT, DLCT) 是一种基于探测器的新型能谱成像技术，在一次扫描中能够同步获取接近真实平扫的图像和光谱图像^[17]。快速管电压切换 (kV switching) 技术是通过快速且频繁地切换管电压实现双能扫描，可以有效区分不同物质的能谱曲线^[18]，并实现包括虚拟单能成像 (virtual monoenergetic imaging, VMI)、物质分解 (material decomposition, MD) 图像 (如碘图、有效原子序数图、电子密度图)、虚拟平扫图像 (virtual non-contrast, VNC) 等能量技术，从而获得碘浓度 (iodine concentration, IC)、标准化IC (normalized IC, NIC)、能谱曲线斜率 (spectral attenuation curve, λ)、有效原子序数 (effective atomic number, Z_{eff})、电子云密度 (electron density, ED) 等重要能量技术参数用于评估淋巴结性质^[7]。

研究^[19]表明，双能量CT参数在结直肠癌术前N分期评价中具有很高的临床价值。IC因其能够分析淋巴结内部的微血管密度变化和碘摄取情况，实现更灵敏的淋巴结性质判定。Cao等^[20]的研究证明，动脉期IC、静脉期IC是预测模型中的独立预测因子，转移性淋巴结因血供丰富，参数值均显著高于非转移组 (均 $P<0.05$)，在训练集和验证集中模型预测LNM的AUC分别为0.876和0.852，使其在鉴别淋巴结性质方面具有重要作用。Yang等^[21]的研究发现，静脉期 Z_{eff} 是预测LNM的最佳参数 (AUC=0.871)，显著优于传统形态学特征 (AUC=0.505~0.624) 和淋巴结短径 (AUC=0.647)。也有研究^[3]认为， Z_{eff} 鉴

别淋巴结性质价值有限，这可能与扫描设备差异或成像方案不一致有关。值得注意的是，参数与形态学特征融合可显著提升诊断效能。Liu等^[22]将静脉期NIC与淋巴结短径相结合，诊断准确度可提升至82.9%。Qiu等^[3]证实动脉期和静脉期转移性淋巴结的 λ 值显著高于非转移性淋巴结 ($P<0.01$)，而万幸等^[23]发现转移性淋巴结的动脉期IC、静脉期IC、 Z_{eff} 及 λ 均低于非转移性淋巴结 ($P<0.05$)。卓水清等^[24]对73例结直肠癌患者进行回顾性分析，研究结果发现双能量CT参数，包括70 keV、IC、 Z_{eff} 和 λ 在定量分析淋巴结内部微环境变化、反映肿瘤代谢特征方面表现尤为突出 ($P<0.001$)。

这说明，双能量CT凭借其独特的物质识别与定量分析功能，在预测结直肠癌LNM方面的效果明显优于传统参数模型，但也反映出技术方案不同将导致研究结果的偏差。此外，技术标准化、购置成本、支付意愿等因素也限制了其推广应用。因此，随着技术的不断进步，未来应进一步探索多参数融合的应用，以提高双能量CT在结直肠癌LNM早期诊断和分期评估中的准确度和普及性。

3 CT灌注成像

CT灌注成像 (CT perfusion, CTP) 是一种无创功能成像技术，通过快速注射造影剂和连续扫描获取时间-密度曲线 (time-attenuation curve, TAC)，计算血流量 (blood flow, BF)、血容量 (blood volume, BV)、平均通过时间 (mean transit time, MTT) 和血管通透性-表面积乘积 (permeability surface-area product, PS) 等多种灌注参数，实现肿瘤血管生成的术前定量评估^[25]。Hayano等^[26]回顾并研究44例直肠癌患者术前CTP参数对临床病理学特征的预测价值，低BF、低BV和长MTT的肿瘤有明显的LNM倾向 (P 值分别为0.000 5、0.02、0.001)，BF鉴别淋巴结的AUC为81.5%，准确度为75%。Zhao等^[27]发现，低BF和高达峰时间 (time to peak, TTP) 在鉴别淋巴结及远处转移方面差异有统计学意义 (P 值分别为0.045、0.002)，BV差异无统计学意义 ($P=0.134$)，表明CTP参数与结直肠癌TNM

分期具有良好的相关性。CTP技术通过获取肿瘤组织的微血管动力学信息,能够间接评估肿瘤细胞进入血管和淋巴管的风险,在结直肠癌LNM的评估中展现出独特优势,但是存在一些局限性,如高成本、辐射剂量较高等问题。未来,急需深入探讨如何优化CTP技术,进一步提升其对结直肠癌LNM的早期预测能力和精准诊断水平,为临床诊疗提供更丰富的影像学手段。

4 CT衍生定量增强参数

近年来部分研究聚焦于基于CT的新兴衍生定量增强参数评估淋巴结,如动脉增强分数(arterial enhancement fraction, AEF)和细胞外体积分数(extracellular volume, ECV)。AEF通过计算动静脉供血比例反映肿瘤内部血供,间接反映组织血管化^[28], ECV代表血管外体积和血管内空间的总和,可以反映肿瘤细胞外基质与微环境状态^[29]。目前已初步尝试用于鉴别恶性肿瘤淋巴结。Zhou等^[28-29]的研究表明,双能量CT衍生的AEF和ECV在诊断甲状腺乳头状癌患者颈部转移淋巴结方面优于传统单能CT参数(AEF AUC: 0.867 vs 0.852; ECV AUC: 0.813 vs 0.793),进而有助于鉴别颈部淋巴结性质。另有研究^[30]得出,AEF诊断肺癌转移性淋巴结的AUC为0.885。胡飞龙等^[31]发现,AEF、IC、ECV及三者联合诊断的AUC分别为0.806、0.797、0.671和0.842。定量增强参数较常规CT提供更多的功能学信息,具有反映淋巴结微环境变化的能力,可为临床诊断提供更客观的依据。然而,CT衍生定量增强参数的临床证据仍然偏少,并且对设备附件要求较高,限制了其广泛应用。

5 AI在评估结直肠癌淋巴结转移中的应用

AI算法的优化与影像标注和分析能力的提升,使AI在癌症研究领域展现出巨大潜力。AI不仅能够有效规避人为判读的主观性,还能深度挖掘肉眼无法识别的定量特征,为评估结直肠癌淋巴结状态提供一种客观的、非侵入性的医疗辅助诊断工具。

影像组学是一门融合医学影像与数据图像处理的新兴交叉学科,通过提取医学图像中的定量

特征,挖掘难以通过肉眼识别的深层影像学信息,将医学图像转化为可分析的数据。影像组学的主要流程包括图像采集与分割、特征提取、特征筛选、模型构建与验证^[32-34]。影像组学是AI在医学影像领域的重要应用方向之一。温德英等^[35]分析结肠癌原发灶及单个淋巴结的CT纹理特征与LNM的相关性,筛选出原发灶纹理参数中体素值总和(voxel value sum)差异有统计学意义($P<0.05$),同时非转移组的体素值总和高于转移组(AUC=0.658)。Wang等^[36]运用双能量CT技术在120 kVp静脉期图像中选取病灶区域内最大淋巴结,并基于此构建了影像组学模型。120 kVp图像和碘图的影像组学特征在预测LNM方面表现出独特优势,其中120 kVp影像组学特征显示出最高的临床效益。Li等^[37]通过常规增强CT结合临床危险因素和影像组学特征构建临床—原发病灶—周围淋巴结联合预测模型,联合模型在训练集和验证集均表现出良好的区分性能和校准度(AUC=0.760),决策分析曲线(decision curve analysis, DCA)在临床环境中表现出优越的预测性能。一项基于36篇影像组学相关文献的meta分析^[38]发现,基于CT的影像组学模型预测淋巴结转移的AUC为0.814(95% CI 0.78~0.85),灵敏度和特异度分别为0.77、0.73。在亚组分析中,基于CT的模型与MRI模型在AUC上表现相近,均优于放射科医师的诊断(AUC=0.659, $P<0.01$)。

机器学习(machine learning, ML)作为AI的子领域侧重于通过数据驱动的方式构建模型,而深度学习(deep learning, DL)作为ML的重要分支,通过多层神经网络结构处理高维数据,在图像识别中表现突出^[39],其中卷积神经网络(convolution neural network, CNN)已应用于医学影像诊断^[9],旨在提高疾病早期诊断率并制订优化的个体治疗方案。Wang等^[40]通过CNN对CT图像进行特征提取和分类,构建一种自动诊断直肠癌LNM的模型,诊断准确率为91.6%,AUC为0.912,灵敏度和特异度分别为88.9、93.5。Glaser等^[41]利用CT影像数据通过半监督、多领域、多任务的方法预测结肠癌LNM。通过

多个数据集的验证, 显示出该方法在有限标注数据下优于传统监督学习和单任务/单领域模型, 尤其在跨领域场景中表现出更高的灵敏度和特异度, 减少了标注依赖性并增强了模型的临床适用性。一项纳入 17 项相关研究 (其中 12 项放射组学模型, 5 项深度学习模型) 的 meta 分析^[9] 显示, 深度学习模型优于放射组学模型和传统机器学习模型 (AUC=0.917, 灵敏度和特异度分别为 0.889、0.935)。

总之, 基于 AI 的影像分析方法可以通过挖掘大量影像学特征、快速自动化处理分析复杂数据, 进一步提高结直肠癌 LNM 的诊断准确度。然而, 当前仍面临技术复杂度高、特征标准化不足、模型泛化能力有限及缺乏大规模临床验证等挑战。未来研究应致力于提升模型的临床适用性, 推动多模态影像融合与算法优化, 旨在构建更可靠、可解释预测模型, 从而优化临床诊疗决策。

6 总结

综上所述, CT 作为评估结直肠癌 LNM 的基础工具, 目前已广泛应用于临床诊断与评估。常规 CT 根据淋巴结形态学特征进行临床初筛, 难以有效识别微转移淋巴结。功能 CT 通过量化淋巴结内部微观特征, 显著提升诊断特异度和微转移的检测能力。未来, 结合 AI 技术有望进一步挖掘定量增强参数在预测结直肠癌 LNM 中的潜在价值, 从而推动精准医疗的发展。随着计算机技术的快速发展, AI 进一步突破了形态学的局限, 通过深度学习算法挖掘隐匿的纹理及空间异质性特征, 展现出较高的诊断效能, 成为新兴的辅助诊疗手段。然而, 当前技术仍存在一些局限性, 如扫描协议标准化不足、数据异质性问题。未来研究需聚焦于多模态融合、可解释模型以及自动化分割技术, 以提升模型的泛化能力, 并通过前瞻性多中心研究构建更完善的预测模型, 通过临床转化进一步提升精准诊断与治疗水平。

第一作者:

王 晗 (ORCID:0009-0004-6918-8782), 硕士研究生在读, 医师。

通信作者:

郝粉娥 (ORCID:0000-0002-3139-3463), 硕士, 主任医师, 腹盆组组长, E-mail:hfe1022@163.com。

作者贡献声明:

王晗: 资料收集与文章撰写; 郝粉娥: 选题指导与论文审阅与修订。

[参 考 文 献]

- [1] BRAY F, LAVERSANNE M, SUNG H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. *CA Cancer J Clin*, 2024, 74(3): 229-263.
- [2] XIA C F, DONG X S, LI H, et al. Cancer statistics in China and United States, 2022: profiles, trends, and determinants [J]. *Chin Med J*, 2022, 135(5): 584-590.
- [3] QIU L, HU J J, WENG Z P, et al. A prospective study of dual-energy computed tomography for differentiating metastatic and non-metastatic lymph nodes of colorectal cancer [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(8): 3448-3459.
- [4] 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*, 2025, 45(3): 332-379.
- [5] SUN Q, BIAN X L, SUN D Q, et al. 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 [J]. *Jpn J Radiol*, 2024, 42(6): 612-621.
- [6] 崔逐云, 卫佳佳, 田 艳, 等. CT、MRI 检查评估直肠癌淋巴结转移的临床价值研究 [J]. *罕少疾病杂志*, 2022, 29(9): 73-74.
CUI Z Y, WEI J J, TIAN Y, et al. Clinical value of CT and MRI in the evaluation of lymph node metastasis of rectal cancer [J]. *J Rare Uncommon Dis*, 2022, 29(9): 73-74.
- [7] CHEN M T, JIANG Y D, ZHOU X H, et al. Dual-energy computed tomography in detecting and predicting lymph node metastasis in malignant tumor patients: A comprehensive review [J]. *Diagnostics*, 2024, 14(4): 377.
- [8] 黄 健, 盛二燕, 黄 芳, 等. 双层探测器光谱 CT 定量参数对结直肠癌变的诊断价值初步探讨 [J]. *中国医疗器械信息*, 2023, 29(15): 61-63.
HUANG J, SHENG E Y, HUANG F, et al. A preliminary study on diagnostic value of quantitative parameters of dual-layer detector spectral CT in colorectal lesions [J]. *China Med Device Inf*, 2023, 29(15): 61-63.
- [9] BEDRIKOVETSKI S, DUDI-VENKATA N N, KROON H M, et al. Artificial intelligence for pre-operative lymph node staging in colorectal cancer: a systematic review and meta-analysis [J]. *BMC Cancer*, 2021, 21(1): 1058.
- [10] 中国医师协会内镜医师分会腹腔镜外科专业委员会, 中国医师协会结直肠肿瘤专业委员会腹腔镜专业委员会, 中华医学会外科学分会结直肠外科学组, 等. 中国直肠癌侧方淋巴结转移诊疗专家共识 (2024 版) [J]. *消化肿瘤杂志 (电子版)*,

- 2024, 16(1): 1-16.
- Laparoscopic Surgery Committee of the Endoscopist Branch in the Chinese Medical Doctor Association, Laparoscopic Surgery Committee of Colorectal Cancer Committee of Chinese Medical Doctor Association, Colorectal, Surgery Group of the Surgery Branch in the Chinese Medical Association (CMA), et al. Chinese expert consensus on the diagnosis and treatment for lateral lymph node metastasis of rectal cancer (2024 edition)[J]. *J Dig Oncol Electron Version*, 2024, 16(1): 1-16.
- [11] 国家卫生健康委员会医政司, 中华医学会肿瘤学分会. 国家卫健委中国结直肠癌诊疗规范(2023版)[J]. *中国实用外科杂志*, 2023, 43(6): 602-630.
- Hospital Authority of National Health Commission of the People's Republic of China, Chinese Society of Oncology, Chinese Medical Association. Chinese protocol of diagnosis and treatment of colorectal cancer of the National Health Commission (2023 edition)[J]. *Chin J Pract Surg*, 2023, 43(6): 602-630.
- [12] 吴俊华, 欧阳书睿, 汪晓东, 等. 结直肠癌转移性淋巴结形态学标准的研究[J]. *实用放射学杂志*, 2010, 26(5): 681-684, 698.
- WU J H, OUYANG S R, WANG X D, et al. The morphological criteria for metastatic lymph nodes preoperatively diagnosed by multi-slice spiral CT in colorectal cancer [J]. *J Pract Radiol*, 2010, 26(5): 681-684, 698.
- [13] SUN X Y, NIWA T, OZAWA S, et al. Detecting lymph node metastasis of esophageal cancer on dual-energy computed tomography[J]. *Acta Radiol*, 2022, 63(1): 3-10.
- [14] 张 瑜, 侯炜寰, 张广文, 等. 增强CT的形态学特征在预测结直肠癌淋巴结转移中的价值研究[J]. *临床放射学杂志*, 2020, 39(10): 2018-2022.
- ZHANG Y, HOU W H, ZHANG G W, et al. To study the value of morphologic features in the prediction of lymph node metastasis of colonrectal cancer base on enhancement CT[J]. *J Clin Radiol*, 2020, 39(10): 2018-2022.
- [15] SODICKSON A D, KERALIYA A, CZAKOWSKI B, et al. Dual energy CT in clinical routine: how it works and how it adds value [J]. *Emerg Radiol*, 2021, 28(1): 103-117.
- [16] 吴冬梅, 梁腾飞, 赵合保, 等. 双源CT双能量多参数成像对肺癌病理学类型诊断价值[J]. *医学影像学杂志*, 2022, 32(9): 1502-1506.
- WU D M, LIANG T F, ZHAO H B, et al. Value of dual-source CT dual-energy multi-parameter imaging in the diagnosis of pathological types of lung cancer[J]. *J Med Imag*, 2022, 32(9): 1502-1506.
- [17] 李鹏强, 刘念军, 张艳利, 等. 双层探测器光谱CT术前评估结直肠癌研究进展[J]. *中国医学影像技术*, 2024, 40(8): 1262-1265.
- LI P Q, LIU N J, ZHANG Y L, et al. Research progresses of dual-layer spectral detector CT for preoperative evaluation on colorectal cancer [J]. *Chin J Med Imag Technol*, 2024, 40(8): 1262-1265.
- [18] 张唯唯, 张 华. 双能成像技术的最新进展[J]. *中国医疗设备*, 2012, 27(9): 8-12.
- ZHANG W W, ZHANG H. Latest development of dual energy imaging technology[J]. *China Med Devices*, 2012, 27(9): 8-12.
- [19] 杨雪君, 赵 卫, 郑凌琳, 等. 双能量CT对结直肠癌区域淋巴结性质判定的临床研究[J]. *放射学实践*, 2016, 31(10): 957-960.
- YANG X J, ZHAO W, ZHENG L L, et al. Clinical research of dual-energy CT diagnosis of the regional lymph nodes in colorectal cancer[J]. *Radiol Pract*, 2016, 31(10): 957-960.
- [20] CAO Y T, ZHANG J, BAO H H, et al. 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 [J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 689176.
- [21] YANG Z H, ZHANG X, FANG M J, et al. Preoperative diagnosis of regional lymph node metastasis of colorectal cancer with quantitative parameters from dual-energy CT [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2019, 213(1): W17-W25.
- [22] LIU H H, YAN F H, PAN Z L, et al. Evaluation of dual energy spectral CT in differentiating metastatic from non-metastatic lymph nodes in rectal cancer: Initial experience [J]. *Eur J Radiol*, 2015, 84(2): 228-234.
- [23] 万 幸, 赵心竹, 罗 敏, 等. 结直肠癌双层探测器光谱CT成像: 转移性与非转移性淋巴结的对照研究[J]. *放射学实践*, 2021, 36(12): 1543-1547.
- WAN X, ZHAO X Z, LUO M, et al. Dual-layer detector spectral CT imaging technology in differential diagnosis of the metastatic and non-metastatic lymph nodes in patients with colorectal cancer[J]. *Radiol Pract*, 2021, 36(12): 1543-1547.
- [24] 卓水清, 刘雅丹, 江琳玲, 等. 光谱CT预测结直肠癌区域淋巴结转移[J]. *中国医学影像技术*, 2024, 40(9): 1366-1370.
- ZHUO S Q, LIU Y D, JIANG L L, et al. Spectral CT for predicting regional lymph node metastasis of colorectal cancer [J]. *Chin J Med Imag Technol*, 2024, 40(9): 1366-1370.
- [25] MAINENTI P P, STANZIONE A, GUARINO S, et al. Colorectal cancer: parametric evaluation of morphological, functional and molecular tomographic imaging[J]. *World J Gastroenterol*, 2019, 25(35): 5233-5256.
- [26] HAYANO K, SHUTO K, KODA K, et al. Quantitative measurement of blood flow using perfusion CT for assessing clinicopathologic features and prognosis in patients with rectal cancer[J]. *Dis Colon Rectum*, 2009, 52(9): 1624-1629.
- [27] ZHAO L, ZHOU W, FU Y, et al. Diagnostic value of one-stop CT energy spectrum and perfusion for angiogenesis in colon and rectum cancer[J]. *BMC Med Imaging*, 2024, 24(1): 116.
- [28] ZHOU Y, XU Y K, GENG D, et al. Added value of arterial enhancement fraction derived from dual-energy computed tomography for preoperative diagnosis of cervical lymph node metastasis in papillary thyroid cancer: initial results [J]. *Eur Radiol*, 2024, 34(2): 1292-1301.
- [29] ZHOU Y, GENG D, SU G Y, et al. Extracellular volume fraction derived from dual-layer spectral detector computed tomography

- for diagnosing cervical lymph nodes metastasis in patients with papillary thyroid cancer: a preliminary study [J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 851244.
- [30] GAO L, LU X M, WEN Q Y, et al. Added value of spectral parameters for the assessment of lymph node metastasis of lung cancer with dual-layer spectral detector computed tomography [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(6): 2622-2633.
- [31] 胡飞龙, 赵术强, 李鑫, 等. 光谱CT定量动脉增强分数及细胞外容积多参数定量评估对结直肠癌诊断的价值[J]. *分子影像学杂志*, 2023, 46(5): 889-894.
- HU F L, ZHAO S Q, LI X, et al. Value of quantitative multi-parameter assessment of arterial enhancement fraction and extracellular volume based on the iodine maps on spectral CT in the diagnosis of colorectal cancer [J]. *J Mol Imag*, 2023, 46(5): 889-894.
- [32] 赵媛, 王洪峰, 赵林, 等. 能谱CT影像组学非小细胞肺癌淋巴结转移的预测模型构建[J]. *中国临床医学影像杂志*, 2024, 35(9): 628-632.
- ZHAO Y, WANG H F, ZHAO L, et al. Construction of a predictive model for lymph node metastasis in non-small cell lung cancer based on spectral CT radiomics [J]. *J China Clin Med Imag*, 2024, 35(9): 628-632.
- [33] 乔健一, 李雅迪, 王鹏远, 等. 影像组学与机器学习在非小细胞肺癌淋巴结分期中的应用[J]. *放射学实践*, 2024, 39(3): 421-426.
- QIAO J Y, LI Y D, WANG P Y, et al. Application of imageology and machine learning in lymph node staging of non-small cell lung cancer [J]. *Radiol Pract*, 2024, 39(3): 421-426.
- [34] 谢玉海, 周运锋, 韩剑剑, 等. 影像组学在乳腺癌腋窝淋巴结转移评估中的研究进展[J]. *放射学实践*, 2023, 38(1): 117-120.
- XIE Y H, ZHOU Y F, HAN J J, et al. Research progress of imaging in axillary lymph node metastasis evaluation of breast cancer [J]. *Radiol Pract*, 2023, 38(1): 117-120.
- [35] 温德英, 丁静静, 杨烈, 等. 探讨CT纹理分析在结肠癌术前评估中的价值[J]. *肿瘤影像学*, 2021, 30(1): 23-29.
- WEN D Y, DING J J, YANG L, et al. The value of CT texture analysis in preoperative evaluation of colon cancer [J]. *Oncoradiology*, 2021, 30(1): 23-29.
- [36] WANG D Q, ZHUANG Z J, WU S T, et al. 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 [J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 846840.
- [37] LI M L, ZHANG J, DAN Y B, et al. A clinical-radiomics nomogram for the preoperative prediction of lymph node metastasis in colorectal cancer [J]. *J Transl Med*, 2020, 18(1): 46.
- [38] ABBASPOUR E, KARIMZADHAGH S, MONSEF A, et al. Application of radiomics for preoperative prediction of lymph node metastasis in colorectal cancer: a systematic review and meta-analysis [J]. *Int J Surg*, 2024, 110(6): 3795-3813.
- [39] 杨心悦, 温志波. 直肠癌淋巴结转移MRI人工智能研究进展[J]. *磁共振成像*, 2024, 15(10): 205-210.
- YANG X Y, WEN Z B. MRI-based artificial intelligence in lymph node metastasis of rectal cancer [J]. *Chin J Magn Reson Imag*, 2024, 15(10): 205-210.
- [40] WANG H Y, WANG H Y, SONG L M, et al. Automatic diagnosis of rectal cancer based on CT images by deep learning method [C]//2019 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). October 19-21, 2019, Suzhou, China. IEEE, 2020: 1-5.
- [41] GLASER S, MAICAS G, BEDRIKOVETSKI S, et al. Semi-supervised multi-domain multi-task training for metastatic colon lymph node diagnosis from abdominal CT [C]//2020 IEEE 17th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI). April 3-7, 2020. Iowa City, IA, USA. IEEE, 2020: 1478-1481.

(收稿日期: 2025-09-01 修回日期: 2025-11-16)