

双层探测器光谱CT多参数成像鉴别局限性结直肠壁增厚良恶性的临床价值

左秀琦¹, 王礼同^{2*}

¹扬州大学医学院, 江苏 扬州

²扬州大学附属医院影像科, 江苏 扬州

收稿日期: 2024年11月27日; 录用日期: 2024年12月21日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

目的: 探讨双层探测器光谱CT动、静脉期定量参数对鉴别局限性结直肠壁增厚良恶性的临床价值。方法: 回顾性分析2024年1月至2024年7月在扬州大学附属医院接受光谱CT腹部增强扫描的“局限性结直肠壁增厚(厚度 $> 5\text{ mm}$, 长度 $< 5\text{ mm}$)”患者, 并在1个月内接受了肠镜检查的65例患者。根据肠镜检查结果分为恶性组($n = 42$)及良性组($n = 23$)。纳入分析的临床特征包括年龄、性别和症状。常规CT特征包括病灶位置及肠壁厚度。测量并计算光谱CT动脉期(AP)和静脉期(VP)的碘浓度(IC)、标准化IC(NIC)、有效原子序数(Z_{eff})、标准化 Z_{eff} (NZ_{eff})、动脉增强分数(AEF)和40~100 keV光谱曲线斜率(λ_{HU})。采用SPSS 27.0软件进行统计学分析。符合正态分布的计量资料采用独立样本t检验比较组间差异, 不符合正态分布的计量资料采用Mann-Whitney U检验比较组间差异。采用 χ^2 检验比较组间各计数资料差异。采用受试者操作特征(ROC)曲线计算各参数评估局限性肠壁增厚良恶性的效能。选择曲线下面积(AUC) > 0.75 的参数采用二元logistic回归建立联合参数, 并评价其效能。结果: 恶性组年龄、AP和VP的IC、NIC、 Z_{eff} 、 NZ_{eff} 及 λ_{vp} 均显著高于良性组, 差异有统计学意义(p 均 < 0.05), 良性组AEF高于恶性组, 差异有统计学意义($p < 0.05$)。其余参数差异无统计学意义(p 均 > 0.05)。ROC曲线显示, VP中的IC、NIC、 Z_{eff} 、 NZ_{eff} 和 λ_{HU} 表现出较高的诊断性能, ROC曲线下面积(AUC)值分别为0.764、0.812、0.757、0.761和0.761。将AUC > 0.75 的5个参数组成联合参数, 其AUC值为0.867, 灵敏度为88.10%, 特异度为78.26%。结论: 双层探测器光谱CT定量参数在区分良性和恶性局限性结直肠肠壁增厚方面有较好的应用价值, 多参数联合可提高诊断效能。

关键词

光谱CT, 结直肠壁增厚, 鉴别诊断

Clinical Value of Dual-Layer Spectral Detector CT Multi-Parameter Imaging in Differentiating Benign and Malignant Localized Colorectal Wall Thickening

*通讯作者。

文章引用: 左秀琦, 王礼同. 双层探测器光谱 CT 多参数成像鉴别局限性结直肠壁增厚良恶性的临床价值[J]. 临床医学进展, 2024, 14(12): 1530-1538. DOI: 10.12677/acm.2024.14123250

Xiuqi Zuo¹, Litong Wang^{2*}¹Medical College of Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu²Department of Imaging, Affiliated Hospital of Yangzhou University, Yangzhou JiangsuReceived: Nov. 27th, 2024; accepted: Dec. 21st, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

Objective: To investigate the clinical value of quantitative parameters of dual-layer spectral detector CT in differential diagnosis of benign and malignant localized colorectal wall thickening. **Methods:** A retrospective analysis of 65 patients with “localized colorectal wall thickening (thickness > 5 mm, length < 5 mm)” who received spectral CT enhanced abdominal scanning in the Affiliated Hospital of Yangzhou University from January 2024 to July 2024 and underwent colonoscopy within 1 month was performed. According to the results of colonoscopy, they were divided into malignant group ($n = 42$) and benign group ($n = 23$). Clinical characteristics included in the analysis included age, sex, and symptoms. Conventional CT features included lesion location and intestinal wall thickness. Iodine concentration (IC), standardized IC (NIC), effective atomic number (Z_{eff}), standardized Z_{eff} (NZ_{eff}), arterial enhancement fraction (AEF), and slope of 40 to 100 keV spectral curve (λ_{HU}) were measured and calculated for the arterial phase (AP) and venous phase (VP) of spectral CT. SPSS 27.0 software was used for statistical analysis. Independent sample t test was used to compare the differences between groups for measurement data conforming to normal distribution, and Mann-Whitney U test was used to compare the differences between groups for measurement data not conforming to normal distribution. χ^2 test was used to compare the difference of counting data between groups. The receiver operating characteristic (ROC) curve was used to calculate the parameters to evaluate the efficacy of local intestinal wall thickening. Parameters with area under the curve (AUC) > 0.75 were selected to establish joint parameters by binary logistic regression, and their efficiency was evaluated. **Results:** The IC, NIC, Z_{eff} , NZ_{eff} and λ_{vp} of AP and VP in malignant group were significantly higher than those in benign group ($p < 0.05$), and the AEF in benign group was higher than that in malignant group ($p < 0.05$). There was no significant difference in other parameters (all $p > 0.05$). ROC curve showed that IC, NIC, Z_{eff} , NZ_{eff} and λ_{HU} in VP showed high diagnostic performance, with area under ROC curve (AUC) values of 0.764, 0.812, 0.757, 0.761 and 0.761, respectively. The 5 parameters with AUC > 0.75 were combined with the AUC value of 0.867, the sensitivity of 88.10%, and the specificity of 78.26%. **Conclusion:** The quantitative parameters of dual-layer spectral detector CT have good application value in distinguishing benign and malignant localized colorectal wall thickening, and the combination of multiple parameters can improve the diagnostic efficiency.

Keywords

Spectral CT, Thickening of the Colorectal Wall, Differential Diagnosis

Copyright © 2024 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

肠壁增厚(bowel wall thickening, BWT)是腹部电子计算机断层扫描(computed tomography, CT)检查中常见的结论之一, 其可能是由于炎症性肠病(inflammatory bowel disease, IBD)、缺血或肿瘤等因素所致,

亦或仅仅是结肠未扩张和塌陷[1][2]。如果患者有其他可能导致潜在水肿的疾病,包括肝硬化、心力衰竭、肾病综合征和低蛋白血症,也可能发生与水肿相关的壁厚增加[3]。在结直肠壁增厚的情况下,患者可能需要接受消化道内镜进一步检查。然而,由于其侵入性一些有严重基础疾病的患者无法耐受内镜检查,此外,内镜检查也无法评估肠壁浸润深度和远处转移[4]。

双层探测器光谱 CT (dual-layer spectral detector computed tomography, DLSCT)是一种新型双能量 CT (DECT)技术,它使用双层探测器接收高能量和低能量数据并生成多个光谱图像,与传统螺旋 CT 相比,DLSCT 结合碘密度值及有效原子序数值等定量分析,可以反映不同组织的摄取,改善病变可视化,同时显示更少的伪影,更低的辐射剂量[5]。DLSCT 在结直肠癌分期和淋巴结转移方面具有重要价值[6]-[8]。然而很少有研究利用光谱 CT 对局限性肠壁增厚的良恶性进行客观定量评估。本研究的目的是利用双层探测器光谱 CT 的相关参数对鉴别局限性肠壁增厚良、恶性的价值。

2. 资料与方法

2.1. 患者资料

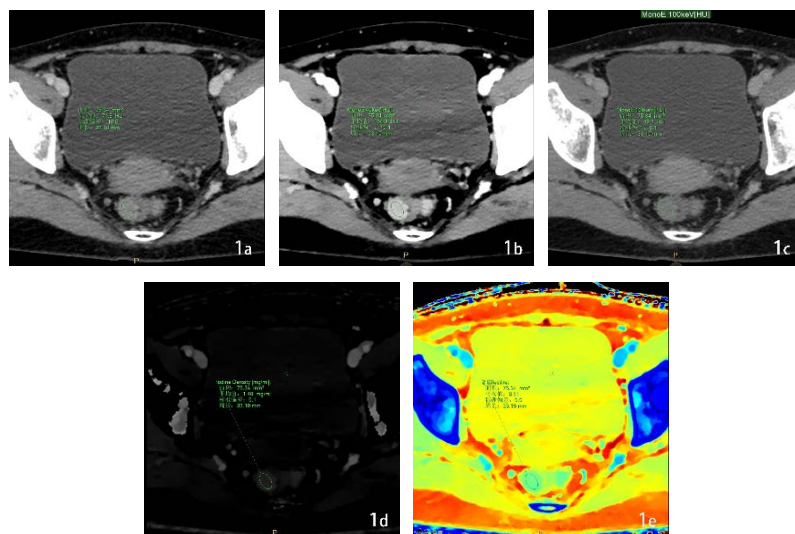
回顾性分析 2024 年 1 月至 2024 年 7 月在扬州大学附属医院双层探测器光谱 CT 上进行了腹部增强扫描发现有结直肠壁增厚的患者的临床资料。纳入标准:① 年龄 > 18 岁;② DLSCT 扫描前后 1 个月内行结直肠镜检查。排除标准:① DLSCT 扫描前接受手术;② 合并其他恶性肿瘤;③ CT 图像质量不佳或临床资料不完整;④ 结肠壁厚度 < 5 mm 或长度 > 5 cm;最终 65 例“局限性结直肠壁增厚”患者最终符合入选标准。所有患者根据结肠镜或手术病理分为良性组($n = 23$)和恶性组($n = 42$)。本研究方案经扬州大学附属医院伦理委员会批准,伦理审批号:2024-YKL09-(K07)。

2.2. CT 检查方法

应用荷兰 Philips 皓克 Spectral CT 对患者进行多期增强扫描,扫描前患者禁食 4~6 h,所有患者均取仰卧位扫描,扫描范围自膈肌至双侧耻骨联合下缘水平。扫描参数:管电压 120 kV,采用自动管电流控制技术,螺距 0.828:1 ($P = 53$),矩阵 512×512 ,扫描层厚 5 mm,重建层厚 1.5mm,球管旋转一周约 0.5 s。对比剂采用碘海醇注射液(江苏扬子江医药股份有限公司,浓度 350 mg/mL),剂量 1.5 mL/kg,注射流率 3.0 mL/s,随后以相同速率注入 50 ml 生理盐水。注射对比剂后 30 s、90 s 分别采集动脉期及静脉期图像。

2.3. 图像后处理及数据测量

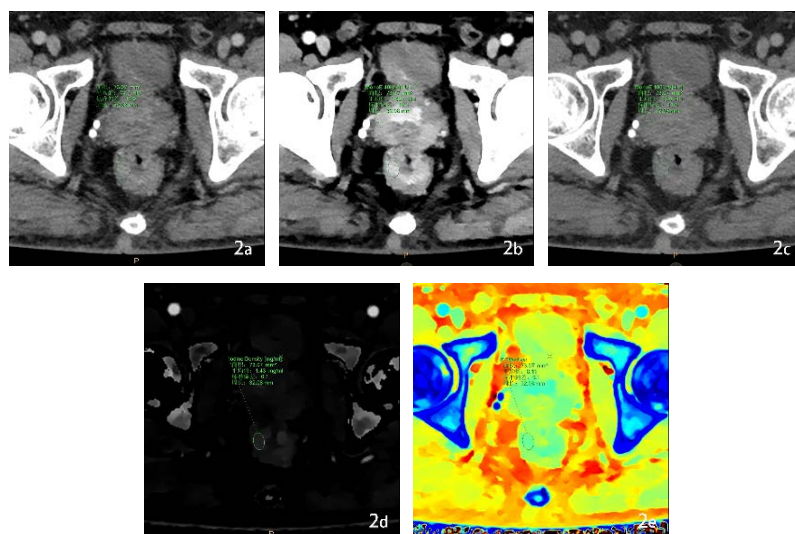
将患者光谱 CT 增强扫描动脉期、静脉期重建后图像光谱基数据(spectral base images, SBI)传输至 Philips IntelliSpace Portal 7.0 工作站进行后处理,得到相应的碘浓度(iodine concentration, IC)图及有效原子序数(Z-effective atomic number, Z_{eff})图。选择病变最大横截面及上下相邻平面,在 3 个层面放置椭圆形 ROI,取 3 个 ROI 的平均值,ROI 面积约 60~80 mm²,在原发性病变最显著增强的实性部分(避免囊性坏死、大血管和钙化区域)放置 ROI。通过复制粘贴保证所有 ROI 大小和位置在动脉期和静脉期一致。此外,为了消除个体差异,在同一感兴趣层面的腹主动脉或髂外动脉放置 ROI,ROI 面积为 20~40 mm²。测量重复三次,并记录平均值。常规 CT 特征:a 肠壁增厚位置(右半结肠、左半结肠和直肠);b 结肠壁厚度(轴向视图中垂直于长轴的最大直径)。光谱参数测量:动、静脉期病灶碘浓度、有效原子序数,计算病灶动静脉期标准化碘浓度(normalizing iodine concentration, NIC)值, $\text{NIC} = \text{病灶碘含量} / \text{动脉碘含量}$, 标准化有效原子序数(normalizing Z-effective atomic number, NZ_{eff}), $\text{NZ}_{\text{eff}} = Z_{\text{eff 病灶}} / Z_{\text{eff 主动脉}}$, 动脉增强分数(Arterial enhancement fraction, AEF)和 40~100 keV 光谱曲线斜率(λ), $\lambda = (\text{CT}_{40\text{keV}} - \text{CT}_{100\text{keV}}) / 60$ (图 1, 图 2)。



(a) 静脉期常规混合能量图像、(b) 40 keV 虚拟单能量图像、(c) 100 keV 虚拟单能量图像、(d) 碘密度图、(e) 有效原子序数图。

Figure 1. Dual-layer spectral detector CT images of a 62-year-old woman with ulcerative colitis (rectal type)

图 1. 62 岁女性溃疡性结肠炎(直肠型)双层探测器光谱 CT 图像



(a) 静脉期常规混合能量图像、(b) 40 keV 虚拟单能量图像、(c) 100 keV 虚拟单能量图像、(d) 碘密度图、(e) 有效原子序数图。

Figure 2. Dual-layer spectral detector CT images of a 54-year-old male rectal adenocarcinoma

图 2. 54 岁男性直肠腺癌双层探测器光谱 CT 图像

2.4. 统计学分析

采用 SPSS 27.0 软件进行统计学分析。符合正态分布的计量资料以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 采用独立样本 t 检验比较组间差异。不符合正态分布的计量资料采用 Mann-Whitney U 检验比较组间差异。计数资料以频数(n)、百分率(%)表示, 采用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法比较组间差异。对差异具有统计学意义的定量参数绘制受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线, 计算各参数评估局限性肠壁增厚良恶性的效能。选择曲线下面积(AUC) > 0.75 的参数采用二元 logistic 回归建立联合参数, 并评价其效能。

3. 结果

3.1. 患者临床病理资料

在排除不符合要求的患者后, 共有 65 例增强 DLSCT 显示“局限性结直肠壁增厚”的患者纳入本研究。其中恶性肠壁增厚 42 例, 良性肠壁增厚 23 例(溃疡性结肠炎 11 例, 缺血性肠病 5 例, 克罗恩病 7 例)。表 1 提供了良性和恶性组所有患者的基本临床资料和常规 CT 特征的概述。分析显示, 两组之间的性别、症状、病变部位及肠壁厚度无显著差异($p > 0.05$)。而年龄差异有显著性($p < 0.05$)。见表 1。

Table 1. Comparison of clinical data and conventional CT features between patients with localized benign and malignant colorectal wall thickening

表 1. 良性组和恶性组局限性结直肠壁增厚患者临床资料和常规 CT 特征比较

指标	良性组($n = 23$)	恶性组($n = 42$)	统计值	p 值
年龄(岁, $\bar{x} \pm s$)	54 ± 16	69 ± 10	-4.115^a	<0.001
性别(例)			2.042^b	0.153
男	10	26		
女	13	16		
部位			0.060^b	0.970
右半结肠	9	16		
左半结肠	7	14		
直肠	7	12		
症状			6.273^c	0.086
腹痛腹泻	16	17		
消化道出血	5	13		
体重减轻	1	2		
其他症状	1	10		
肠壁厚度(mm)	13.50 ± 3.75	14.90 ± 4.13	-1.352^a	0.181

注: ^a表示统计值为 t 值, ^b为 χ^2 值, ^c为 Fisher 精确检验。

3.2. 光谱 CT 定量参数的组间比较

恶性肠壁增厚患者 AP 和 VP 的 IC、NIC、 Z_{eff} 、 NZ_{eff} 及 λ_{vp} 均高于良性肠壁增厚组, 良性组 AEF 高于恶性组, 差异有统计学意义(p 均 < 0.05), 其余参数差异无统计学意义(p 均 > 0.05), 见表 2。

3.3. 光谱 CT 定量参数的诊断效能

ROC 曲线结果显示, 2 组间差异有统计学意义的参数评估恶性局限性结直肠壁增厚的效能见表 3, 图 3。其中 VP 中的 IC、NIC、 Z_{eff} 、 NZ_{eff} 和 λ_{HU} 表现出较高的诊断性能, ROC 曲线下面积(AUC)值分别为 0.764、0.812、0.757、0.761 和 0.761。将 AUC > 0.75 的 5 个参数组成联合参数, 其 AUC 值为 0.867, 灵敏度为 88.10%, 特异度为 78.26%。联合参数的 AUC 高于 VP 中 NZ_{eff} 的 AUC, 差异有统计学意义($Z = -2.197, p = 0.028$)。联合参数的 AUC 与 VP 中 IC、NIC、 Z_{eff} 和 λ_{HU} 的 AUC 差异无统计学意义($Z = -1.807$ 、

-1.587、-1.908、-1.851, $p = 0.071$ 、0.112、0.056、0.064)。

Table 2. Comparison of spectral CT quantitative parameters between patients with localized rectal or colon wall thickening in the benign group and the malignant group

表 2. 良性组与恶性组局限性结直肠壁增厚患者光谱 CT 定量参数比较

CT 参数	良性组($n = 23$)	恶性组($n = 42$)	统计值	p 值
动脉期				
IC (mg/ml)	1.29 (1.19, 1.52)	1.48 (1.31, 1.61)	-2.306 ^a	0.021
NIC	0.13 (0.11, 0.15)	0.16 (0.14, 0.19)	-3.244 ^a	0.001
Z_{eff}	8.06 (8.01, 8.16)	8.14 (8.06, 8.20)	-2.267 ^a	0.023
NZ_{eff}	0.73 (0.71, 0.76)	0.74 (0.73, 0.77)	-2.461 ^a	0.014
CT _{40kev} (HU)	145.91 $\pm$ 17.97	163.84 $\pm$ 21.21	-3.434 ^b	0.001
CT _{100kev} (HU)	46.00 (42.90, 50.20)	53.50 (50.18, 58.53)	-3.951 ^a	<0.001
λ_{HU}	1.61 (1.45, 1.88)	1.80 (1.58, 2.00)	-1.938 ^a	0.053
静脉期				
IC (mg/ml)	1.52 (1.35, 1.72)	1.87 (1.70, 2.02)	-3.506 ^a	<0.001
NIC	0.37 $\pm$ 0.07	0.46 $\pm$ 0.08	-4.769 ^b	<0.001
Z_{eff}	8.15 (8.09, 8.25)	8.32 (8.24, 8.38)	-2.874 ^a	0.004
NZ_{eff}	0.88 $\pm$ 0.02	0.90 $\pm$ 0.23	-3.669 ^b	<0.001
CT _{40kev} (HU)	160.00 (143.40, 179.20)	191.70 (181.68, 209.85)	-3.636 ^a	<0.001
CT _{100kev} (HU)	48.88 $\pm$ 9.34	57.06 $\pm$ 5.69	-3.830 ^b	<0.001
λ_{HU}	1.88 (1.68, 2.13)	2.32 (2.10, 2.51)	-3.457 ^a	<0.001
AEF	41.20 (38.10, 49.90)	37.35 (30.53, 43.48)	-2.874 ^a	0.004

注: IC 为碘浓度; NIC 为标准化碘浓度; Z_{eff} 为有效原子序数; NZ_{eff} 为标准化有效原子序数; λ_{HU} 为能谱曲线斜率; AEF 为动脉增强分数; ^a 表示统计值为 Z 值; ^b 表示统计值为 t 值。

Table 3. The performance of spectral CT quantitative parameters in predicting the malignancy of localized rectal or colonic wall thickening

表 3. 光谱 CT 各定量参数预测局限性结直肠壁增厚良恶性的效能

参数	AUC (95% CI)	约登指数	最佳阈值	敏感度(%)	特异度(%)
动脉期					
IC (mg/ml)	0.674 (0.535~0.813)	0.347	1.34	73.81	60.87
NIC	0.744 (0.616~0.873)	0.458	0.14	76.19	69.57
Z_{eff}	0.671 (0.531~0.811)	0.323	8.08	71.43	60.87
NZ_{eff}	0.685 (0.547~0.824)	0.375	0.73	80.95	56.52
CT _{40kev} (HU)	0.745 (0.618~0.872)	0.470	139.30	90.48	56.52
CT _{100kev} (HU)	0.798 (0.676~0.920)	0.557	48.95	90.48	65.22

续表

静脉期					
IC (mg/ml)	0.764 (0.630~0.899)	0.540	1.74	71.43	82.61
NIC	0.812 (0.705~0.918)	0.493	0.43	66.67	82.61
Z _{eff}	0.757 (0.621~0.892)	0.540	8.26	71.43	82.61
NZ _{eff}	0.761 (0.646~0.876)	0.476	0.91	47.62	100.00
CT _{40kev} (HU)	0.774 (0.640~0.909)	0.588	181.90	76.19	82.61
CT _{100kev} (HU)	0.789 (0.659~0.920)	0.581	49.85	92.86	65.22
λ _{HU}	0.761 (0.626~0.896)	0.564	2.15	73.81	82.61
AEF	0.717 (0.594~0.840)	0.500	36.70	100.00	50.00

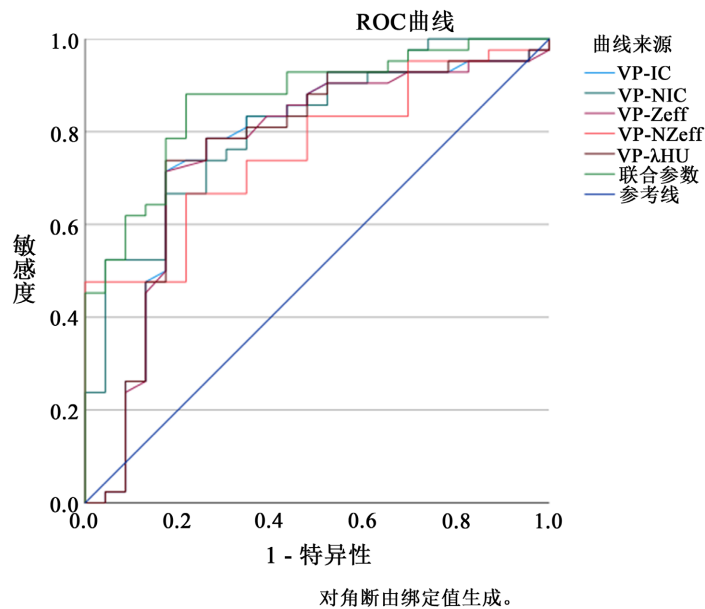


Figure 3. ROC curves of VP-IC, VP-NIC, VP-Z_{eff}, VP-NZ_{eff}, VP-λ_{HU} and combined parameters predicting benign and malignant local colorectal wall thickening

图 3. VP-IC、VP-NIC、VP-Z_{eff}、VP-NZ_{eff}、VP-λ_{HU} 和联合参数预测局限性结直肠壁增厚良恶性的 ROC 曲线

4. 讨论

CT 上结肠肿瘤性和非肿瘤性病变都是肠壁增厚, 这是非特异性的特征, 对于有经验的放射科医师来说, 区分癌症与炎症并不是很困难, 但对于经验较少的放射科医生或住院医师来说, 仍然存在一些挑战。因此提高 CT 图像检测和鉴别癌症的灵敏度和特异性非常重要。本研究基于光谱 CT 定量参数构建模型鉴别良性和恶性的局限性结直肠壁增厚, 研究发现, 构建的联合模型预测恶性局限性肠壁增厚的 AUC 为 0.867, 灵敏度为 88.10%, 表明光谱 CT 定量参数成像鉴别局限性肠壁增厚的良恶性具有较好的临床应用价值。

在比较两期扫描中, 我们发现 VP 图像比 AP 图像能更好地分局限性结直肠壁增厚的良恶性。这些结果可能是由于不同的组织学成分和良恶性肠壁的不同强化模式。因为造影剂在动脉期可能无法有效分散在病变的组织间隙中, 而静脉期肿瘤增强的更充分、更稳定[9]。

在 DLSCT 多参数中, 光谱 CT 定量参数 IC 可定量反映病灶内的碘含量, 间接反映病灶的强化程度 and 血供情况[10] [11]。本研究结果表明, 无论在 AP 还是 VP 中, 恶性组肠壁增厚的 IC 均显著高于良性组。恶性组中 IC 值的增加可能表明肿瘤发展中血管生成的增加, 因为血管生成是肿瘤发展的基本过程[12], 因此这种生长形成也决定了其在 CT 中的强化。尽管所有患者的扫描参数一致, 但简单的 IC 测量可能会受到患者身高、体重、心输出量和中心血容量变化的影响, 因此我们还计算了 NIC, 用主动脉 IC 作为参考参数, 最大限度地减少患者的差异[13] [14]。一些研究已经证明了碘图在评估结直肠癌中的价值。Feng 等[15]人研究讨论了碘图的放射组学分析在术前预测结直肠癌的肿瘤沉积具有良好的临床价值。Wang 等[16]人研究发现 IC 和 NIC 鉴别良恶性肠壁增厚的敏感性分别为 91.5%和 85.1%。与 Wang 等人的研究不同, 我们不仅研究了 IC 还研究了 Z_{eff} 等相关参数。

有效原子序数图像是基于组织的有效原子序数进行颜色编码。其基本原理是将各体素所对应的有效原子系数用色彩量化形成伪彩图, 原子序数不同于 CT 值的特点在于它为每个像素加入了物质成分的信息[17]。有效原子序数图在视觉上增强了组织之间的差异, 提供了比传统 CT 中 HU 衰减更高的区分度, 因为它可以很好地反映组织的物质成分[18]。在我们的研究中, 无论是 AP 还是 VP, 恶性肠壁增厚有效原子序数均高于良性肠壁增厚。此外, 我们还研究了基于腹主动脉的标准化 Z_{eff} (NZ_{eff}), 这可以减少不同患者中循环差异的影响。

本研究存在以下局限性: 1) 本研究为单中心回顾性研究, 缺乏外部验证, 未来需通过多中心研究验证我们的结果; 2) 良性局限性肠壁增厚的病例较少, 这一结果有待于大规模的临床研究来验证; 3) 我们仅研究了动脉期和静脉期的参数, 在未来的研究中应进行延迟期的研究。

综上所述, DLSCT 参数对鉴别良恶性肠壁增厚具有应用价值。良恶性肠壁增厚患者 DLSCT 参数差异有统计学意义。这些发现有助于结直肠恶性肿瘤的早期发现和治疗。

参考文献

- [1] Daniel, F., Alsheikh, M., Ghieh, D., Hosni, M., Tayara, Z., Tamim, H., *et al.* (2020) Bowel Wall Thickening on Computed Tomography Scan: Inter-Observer Agreement and Correlation with Endoscopic Findings. *Arab Journal of Gastroenterology*, **21**, 219-223. <https://doi.org/10.1016/j.ajg.2020.04.012>
- [2] 王雪莹, 刘庭玮, 徐森, 等. 肠壁增厚 CT 影像学评估及其临床意义研究进展[J]. 临床军医杂志, 2022, 50(12): 1223-1225, 1229.
- [3] Ormeci Bas, B. (2020) Endoscopic Evaluation of Patients with Colonic Wall Thickening Detected on Computed Tomography. *Acta Clinica Croatica*, **59**, 463-468. <https://doi.org/10.20471/acc.2020.59.03.10>
- [4] Chandrapalan, S., Tahir, F., Sinha, R. and Arasaradnam, R. (2016) Colonic Thickening on Computed Tomography—Does It Correlate with Endoscopic Findings? A Protocol for Systematic Review. *Systematic Reviews*, **5**, 213-216. <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0381-7>
- [5] Franco, P.N., Spasiano, C.M., Maino, C., De Ponti, E., Ragusi, M., Giandola, T., *et al.* (2023) Principles and Applications of Dual-Layer Spectral CT in Gastrointestinal Imaging. *Diagnostics*, **13**, 1740-1752. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13101740>
- [6] 陈琰, 文自强, 马钰茹, 等. 双层探测器光谱 CT 诊断结直肠癌区域转移淋巴结的价值[J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(12): 1253-1258.
- [7] 刘思佳, 赵卫, 胡继红, 等. 光谱 CT 多参数成像术前预测结肠癌神经及脉管侵犯状态的价值[J]. 放射学实践, 2024, 39(1): 83-89.
- [8] 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>
- [9] Wang, Q., Shi, G., Qi, X., Fan, X. and Wang, L. (2014) Quantitative Analysis of the Dual-Energy CT Virtual Spectral Curve for Focal Liver Lesions Characterization. *European Journal of Radiology*, **83**, 1759-1764. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2014.07.009>
- [10] Xu, X.Q., Zhou, Y., Su, G.Y., Tao, X., Ge, Y., Si, Y., *et al.* (2022) Iodine Maps from Dual-Energy CT to Predict

- Extrathyroidal Extension and Recurrence in Papillary Thyroid Cancer Based on a Radiomics Approach. *American Journal of Neuroradiology*, **43**, 748-755. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a7484>
- [11] Pelgrim, G.J., van Hamersvelt, R.W., Willemink, M.J., Schmidt, B.T., Flohr, T., Schilham, A., *et al.* (2017) Accuracy of Iodine Quantification Using Dual Energy CT in Latest Generation Dual Source and Dual Layer CT. *European Radiology*, **27**, 3904-3912. <https://doi.org/10.1007/s00330-017-4752-9>
- [12] Zhang, R., Yao, Y., Gao, H. and Hu, X. (2024) Mechanisms of Angiogenesis in Tumour. *Frontiers in Oncology*, **14**, Article 1359069. <https://doi.org/10.3389/fonc.2024.1359069>
- [13] 贾萍, 郑阳, 王晓明. 光谱 CT 碘浓度值相关参数诊断胃腺癌区域淋巴结转移的效能[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(12): 1326-1331.
- [14] Li, R., Li, J., Wang, X., Liang, P. and Gao, J. (2018) Detection of Gastric Cancer and Its Histological Type Based on Iodine Concentration in Spectral CT. *Cancer Imaging*, **18**, Article No. 42. <https://doi.org/10.1186/s40644-018-0176-2>
- [15] Feng, F., Jiang, F., Liu, Y., Sun, Q., Hong, R., Hu, C., *et al.* (2024) 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>
- [16] Wang, G., Fang, Y., Wang, Z. and Jin, Z. (2021) Quantitative Assessment of Radiologically Indeterminate Local Colonic Wall Thickening on Iodine Density Images Using Dual-Layer Spectral Detector Ct. *Academic Radiology*, **28**, 1368-1374. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2020.06.012>
- [17] 严福华, 金征宇. 开辟双能量 CT 临床应用的新时代[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(6): 505-507.
- [18] Rassouli, N., Etesami, M., Dhanantwari, A. and Rajiah, P. (2017) Detector-Based Spectral CT with a Novel Dual-Layer Technology: Principles and Applications. *Insights into Imaging*, **8**, 589-598. <https://doi.org/10.1007/s13244-017-0571-4>