

论 著

能谱CT多参数定量评估肝癌微血管侵犯的临床价值*

史佳丽^{1,2,3,4} 郭 钰^{1,2,3,4} 杨新梅^{1,2,3,4}
徐 媛^{1,2,3,4} 刘建莉^{1,3,4,*}

1.兰州大学第二医院放射科
2.兰州大学第二临床医学院
3.甘肃省医学影像重点实验室
4.医学影像人工智能甘肃省国际科技
合作基地 (甘肃兰州 730030)

【摘要】目的 研究能谱CT多参数定量评估肝癌微血管侵犯的临床应用价值。方法 本研究回顾性分析了2020年1月到2023年6月期间,在兰州大学第二医院接受能谱CT腹部平扫及三期动态增强扫描,且经手术病理确诊的52例肝细胞癌患者。根据病理结果,患者分为微血管侵犯阳性组(25例)和阴性组(27例)。分别测量了肝癌病灶及同层面腹主动脉动脉期、门静脉期的碘浓度和有效原子序数,计算标准化碘浓度、标准化有效原子序数,以及静脉期碘摄取降低率(RICAP-VP: 动脉期与门静脉期的IC差异比值, $RICAP-VP = (ICAP - ICVP) / ICAP$)。同时,测量肿瘤在动脉期和门静脉期的40Kev、70Kev及90Kev单能量CT值,计算能谱曲线斜率。根据病理结果判断肿瘤是否存在微血管侵犯,并比较两组在各期增强扫描中的各项参数差异,绘制受试者工作特征曲线(ROC)分析诊断效能,并计算相应的诊断阈值。结果 微血管侵犯阳性组病灶动脉期碘浓度(25.14 ± 10.72 vs. 16.59 ± 6.77)、动脉期标准化碘浓度(0.31 ± 0.22 vs. 0.14 ± 0.07)、动脉期有效原子序数[$8.467(7.8, 8.6)$ vs. $6.637(6.0, 8.3)$]、动脉期标准化有效原子序数[$0.675(0.6, 0.7)$ vs. $0.533(0.5, 0.7)$]、静脉期碘摄取降低率[$0.296(-0.1, 0.5)$ vs. $-0.253(-0.7, 0.3)$]均高于微血管侵犯阴性组,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。动脉期有效原子序数、标准化有效原子序数以及静脉期碘摄取降低率的曲线下面积较大,联合参数的曲线下面积最大,动脉期有效原子序数、动脉期标准化有效原子序数、静脉期碘摄取降低率以及多个参数联合诊断肝癌微血管侵犯的曲线下面积分别为0.766、0.763、0.702、0.853。结论 运用多参数联合分析,包括CT动脉期碘浓度、有效原子序数、标准化有效原子序数和静脉期碘摄取降低率,有助于准确评估肝癌微血管侵犯情况,在临床上具有一定的应用前景。

【关键词】微血管侵犯; 肝细胞癌; 能谱CT; 术前评估; 多参数定量
【中图分类号】R575
【文献标识码】A
【基金项目】甘肃省卫生行业科研计划优秀青年人才和骨干人才项目(GSWSQN2023-04); 兰州大学第二医院"萃英研究生导师"培养计划项目(CYDSPY202003)
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.01.038

The Clinical Significance of Multi-parameter Quantitative Assessment of Microvascular Invasion of Hepatocellular Carcinoma by Energy Spectrum CT*

SHI Jia-li^{1,2,3,4}, GUO Yu^{1,2,3,4}, YANG Xin-mei^{1,2,3,4}, XU Yuan^{1,2,3,4}, LIU Jian-li^{1,3,4,*}.
1.Department of Radiology, The Second Hospital of Lanzhou University, Lanzhou 730030, Gansu Province, China
2.The Second Clinical College of Medicine, Lanzhou University, Lanzhou 730030, Gansu Province, China
3.Gansu Provincial Key Laboratory of Medical Imaging, Lanzhou 730030, Gansu Province, China
4.Gansu International Science and Technology Cooperation Base of Medical Image Artificial Intelligence, Lanzhou 730030, Gansu Province, China

ABSTRACT
Objective To evaluate the clinical value of multi-parameter quantitative analysis in assessing microvascular invasion in liver cancer using spectral CT. **Methods** Fifty-two cases of hepatocellular carcinoma confirmed by surgery and pathology, who underwent abdominal plain scan and three-phase dynamic enhanced scan of dual-layer detector spectral CT at the Second Hospital of Lanzhou University from January 2020 to June 2023, were retrospectively collected. Based on the pathological results, they were divided into 25 cases of positive microvascular invasion and 27 cases of negative microvascular invasion. The iodine concentration and effective atomic number value of the liver cancer lesion and the abdominal aorta at the same layer in the arterial phase and portal venous phase were measured, and the standardized iodine concentration, standardized effective atomic number, and iodine uptake reduction rate in the venous phase (the ratio of the difference in IC between the arterial phase and the portal venous phase [$RICAP-VP = (ICAP - ICVP) / ICAP$]) were calculated. The single-energy CT values of the tumor at 40 Kev, 70 Kev, and 90 Kev in the arterial phase and portal venous phase were respectively measured, and the slope of the energy spectrum curve was calculated. According to the pathological results, it was determined whether the tumor had microvascular invasion or not. The differences of various parameters between the two groups in each enhanced phase were compared, and the receiver operating characteristic curve was drawn for the parameters with statistical significance to evaluate the diagnostic efficacy and calculate the corresponding threshold. **Results** The iodine concentration in the arterial phase of the lesion (25.14 ± 10.72 vs. 16.59 ± 6.77), the standardized iodine concentration in the arterial phase (0.31 ± 0.22 vs. 0.14 ± 0.07), the effective atomic number in the arterial phase [$8.467(7.8, 8.6)$ vs. $6.637(6.0, 8.3)$], the standardized effective atomic number in the arterial phase [$0.675(0.6, 0.7)$ vs. $0.533(0.5, 0.7)$], and the iodine uptake reduction rate in the venous phase [$0.296(-0.1, 0.5)$ vs. $-0.253(-0.7, 0.3)$] in the positive microvascular invasion group were all higher than those in the negative microvascular invasion group, and the differences were all statistically significant (all $P < 0.05$). The area under the curve of the effective atomic number in the arterial phase, the standardized effective atomic number, and the iodine uptake reduction rate in the venous phase was larger, and the area under the curve of the combined parameters was the largest. The area under the curve of the effective atomic number in the arterial phase, the standardized effective atomic number in the arterial phase, the iodine uptake reduction rate in the venous phase, and the combination of multiple parameters for the diagnosis of microvascular invasion of liver cancer was 0.766, 0.763, 0.702, and 0.853, respectively. **Conclusion** The multi-parameter combination of iodine concentration, effective atomic number, standardized effective atomic number in the arterial phase, and iodine uptake reduction rate in the venous phase of spectral CT is beneficial for the precise assessment of microvascular invasion of liver cancer before surgery and has certain clinical application value.

Keywords: Microvascular Invasion; Hepatocellular Carcinoma; Energy Spectrum CT; Preoperative Evaluation; Multi-parameter Quantification

根据国家癌症中心数据,2022年全国新发原发性肝癌病例达到36.77万,且其发病率一直在不断增加,位列癌症新发病例的第四位(仅次于肺癌、结直肠癌和甲状腺癌),发病率排名第五(仅次于肺癌、女性乳腺癌、甲状腺癌和结直肠癌)。在中国,肝癌的高危人群主要包括:乙型肝炎病毒(HBV)或丙型肝炎病毒(HCV)感染者、长期酗酒者、患有脂肪肝变性或代谢性肝病的人群、长期受到黄曲霉毒素B1侵害的个体、因其他原因导致的肝硬化患者^[1]。尽管有可能治愈的治疗方法(肝移植、手术切除、热消融),但长期结局仍受到高复发率的影响(治疗5年后高达70%的病例)^[2]。大量研究表明,微血管侵犯(MVI)是HCC术后复发的主要决定因素,并与其高侵袭性密切相关^[3-7],这大大降低了HCC患者治疗的有效性,影响患者长期生存。因此,术前有效的评估HCC微血管侵犯为临床选择合理的治疗方式、实施积极的术后复发监测以及术后是否需要辅助治疗提供关键的参考点。

目前,由于缺乏高敏感性和高特异性的非侵入性检测方法, MVI的诊断仍依赖于肝切

【第一作者】史佳丽,女,住院医师,主要研究方向:腹部影像学。E-mail: 2414866177@qq.com
【通讯作者】刘建莉,女,主任技师,主要研究方向:医学影像新技术。E-mail: liujl_1219@163.com

除或肝移植标本的病理检查，其通常是在术后进行，因此无法为术前治疗决策提供指导。常规CT可以有效展示肝癌病灶的大小、形态及强化特征，但仅凭形态学评估肝癌微血管侵犯的准确性和可靠性较为有限。能谱CT是一种具有多参数定量评估能力的新型影像学技术，在优化图像质量、物质定量分析等方面均有重大优势^[8-9]，该技术能够在术前通过无创定量分析病变特征，为肝癌微血管侵犯的诊断提供更为精确和有价值的信息。因此，本研究旨在评估双能谱CT定量分析原发性肝癌微血管浸润的临床价值。

1 资料与方法

1.1 资料收集 本研究回顾性收集了兰州大学第二医院2020年1月至2023年6月期间具有完整临床及影像学资料且经手术病理确诊的52例肝癌患者信息，男性41例，女性11例，年龄范围为32至74岁，平均年龄为(55.16±9.38)岁。38例有肝硬化史。

纳入标准：术前能谱CT检查与手术相隔不超过两周；临床资料 and 手术病理资料完整；多发肿瘤个数不超过2个，无明显转移征象；肿瘤完整切除，切缘阴性，术后1个月随访无转移；术前无其他抗肿瘤治疗。排除标准：图像伪影严重影响诊断的准确性；排除病理诊断为肝内胆管癌(intrahepatic bile duct carcinoma, ICC)、混合型肝细胞-胆管癌(combined hepatocellular carcinoma, cHCC-CA)及转移性肝癌的病例。

检索电子病历系统收集患者的基本信息，包括年龄、性别，以及血清肿瘤标志物数据：癌胚抗原(carcinoembryonic antigen, CEA)、糖类抗原199(carbohydrate antigen 199, CA199)、糖类抗原125(carbohydrate antigen 125, CA125)和甲胎蛋白(alpha-fetoprotein, AFP)；生化指标：总胆红素，凝血酶原活动度(PT%)。血常规：中性粒细胞数/淋巴细胞数(neutrophil-to-lymphocyte ratio, NLR)，血小板数/淋巴细胞数(platelet-to-lymphocyte ratio, PLR)。肝炎、肝硬化情况，肿瘤大小等；患者信息汇总在表1中。

1.2 方法 本研究使用Revolution CT(GE Healthcare)进行腹部平扫及三期动态增强扫描。患者在检查前3天避免使用含重金属成分的药物，禁食6至8小时，并在检查前15至30分钟饮水800至1000mL，进行呼吸屏气训练。扫描范围从膈顶至耻骨联合，扫描参数如下：平扫管电压120 kVp，管电流自动调节；增强扫描使用能谱成像模式(GSI)，管电压在80/140 kVp之间快速切换，管电流600mA，螺旋扫描速度0.6s/r，螺距1.375，准直器宽度0.625mm×64mm，重建层厚和层间距均为1.25mm。增强扫描使用碘海醇(300mg/mL)，剂量为80至120mL(1.0mL/kg体重)，注射流率3.5至4.0mL/s。扫描时，动脉期(8秒)在膈肌水平腹主动脉达到100 Hu时触发，随后分别在动脉期后25秒和120秒进行门静脉期和延迟期扫描。扫描结束后，用40mL生理盐水冲洗注射器。

1.3 图像分析 所有原始数据传输至工作站(GE ADW4.7, GE Healthcare, Milwaukee, WI, USA)，基于能谱CT动脉期及门静脉期的原始数据，使用GSI Volume Viewer软件进行分析处理，重建碘密度图、有效原子序数图及能谱曲线图。两名具有10年以上经验的放射科医师与本文作者采用盲法，在后处理工作站上测量病灶在动脉期及门静脉期的有效原子序数和碘浓度。在测量时，尽量避开血管、钙化及液化坏死区域，选择动脉期与门静脉期强化最明显的病灶部位，并在肿瘤上绘制直径约为肿瘤尺寸一半的感兴趣区(ROI)。在同一层面腹主动脉处，绘制面积为10±1mm²的ROI，确保其在各期的大小、位置及形态一致，并在每个层面选择3个不同ROI进行平均值计算。此外，测量病灶在动脉期与门静脉期的40-90 keV单能量CT值，进而计算能谱曲线斜率。标准化碘浓度为病灶碘浓度与同层面腹主动脉碘浓度的比值，标准化有效原子序数为病灶有效原子序数与同层面腹主动脉有效原子序数的比值。同时，计算门静脉期病灶的碘摄取降低率(ICrr)，其计算公式为：ICrr = (IC_{动脉期} - IC_{门静脉期}) / IC_{动脉期}。

1.4 分组 根据2024版《原发性肝癌诊疗规范》中的“7点基线取材法”，从肿瘤及邻近肝组织分别采样，样本尺寸约为(1.5-2)×1×0.2 cm³。由两名资深病理科医师在显微镜下评估病灶是否存在微血管侵犯(MVI)，即观察血管腔内衬覆内皮细胞是否出现

癌细胞团。若两位医师对MVI的评判存在异议，则通过讨论达成一致意见，并作为后续分析的依据。根据术后病理结果，MVI阳性(MVI+)组为25例，MVI阴性(MVI-)组为27例。

1.5 统计学方法 采用SPSS 26.0软件，对有微血管侵犯(MVI+)和无微血管侵犯(MVI-)的患者，对临床和能谱CT定量数据分别进行正态分布检验和方差齐性检验。对于符合正态分布的计量数据，采用均值±标准差($\bar{x} \pm s$)表示；若方差齐，则进行独立样本t检验；若方差不齐，则采用Mann-Whitney U检验。计数数据以频数表示。组间比较筛选出具有统计学差异(P<0.05)的参数，并绘制ROC曲线。通过计算曲线下的面积(AUC)，并以约登指数最大为原则，确定诊断阈值、敏感度及特异度，从而评估上述参数在肝癌微血管侵犯诊断中的应用效能。P<0.05被认为具有统计学意义。

2 结果

2.1 患者临床基线特征 对两组患者的临床基线特征进行统计学分析发现，统计学分析发现，肝细胞癌微血管侵犯合并肝炎或肝硬化与无微血管侵犯组间差异显著(P<0.05)，且微血管侵犯组合并肝炎和肝硬化的患者比例高于无微血管侵犯组。(见表1)

2.2 两分组DECT参数比较 对增强扫描两期患者的能谱定量参数进行统计学分析，结果显示，阳性组在动脉期的碘浓度(IC)(P=0.001)、标准化碘浓度(NIC)(P=0.001)、有效原子序数(P=0.002)、标准化有效原子序数(P=0.001)以及静脉期的碘摄取降低率(ICrr)(P=0.012)均显著高于阴性组(P<0.05)，具体数据见表2、图1及图2。

表1 MVI(+)和MVI(-)患者的临床资料基线特征

临床基线特征	微血管侵犯		$\chi^2/t/z$	P
	MVI(-) (n=27)	MVI(+)(n=25)		
性别 ^b 男(n=41)	20/41	21/41	0.767	0.381
女(n=11)	7/11	4/11		
年龄(岁) ^a	52.56±9.42	57.76±9.33	-2.000	0.051
肝硬化 ^b 无	11/14	3/14	5.450	0.020
有	16/38	22/38		
肝炎 ^b 无	12/16	4/16	4.930	0.026
有	15/36	21/36		
肿瘤直径c(cm)	3.500(2.0,5.5)	3.200(2.6,5.8)	-0.405	0.686
AFP ^c (ng/mL)	22.200(4.0,450.1)	17.700(3.4,155.8)	-0.431	0.667
总胆红素水平 ^c	18.200(15.2,23.3)	18.600(13.8,24.8)	-0.128	0.898
NLR ^c	4.190(2.1,7.8)	2.960(2.0,4.6)	-1.310	0.190
PT ^c	83.000(71.0,90.0)	79.000(74.0,85.0)	-1.137	0.256
PLR ^c	158.780(79.1,205.4)	100.000(81.1,142.5)	-1.145	0.252
CEA ^c (ng/mL)	1.610(1.1,2.9)	2.480(1.0,4.0)	-1.722	0.085
CA199 ^c (ng/mL)	14.400(8.3,23.0)	13.500(9.2,42.6)	-0.284	0.776
CA125 ^c (ng/mL)	15.100(8.3,35.7)	13.500(9.5,28.4)	-0.568	0.570

注：MVI，微血管侵犯；AFP，甲胎蛋白；CEA，癌胚抗原；CA-199，糖类抗原199；CA-125，糖类抗原125。NLR，中性粒细胞淋巴细胞比值；PLR，血小板淋巴细胞比值；PT，凝血酶原活动度。a：数据分析采用独立样本t检验；b：数据分析采用 χ^2 检验。c：数据分析采用Mann-WhitneyU检验。

表2 MVI(+)和MVI(-)患者的能谱CT定量参数基线特征

基线特征	MVI(-)(n=27)	MVI(+)(n=25)	t/z	P值
动脉期碘浓度 ^a	16.59±6.77	25.14±10.72	-3.465	0.001
动脉期标准化碘浓度 ^a	0.14±0.07	0.31±0.22	-3.655	0.001
动脉期有效原子序数 ^c	6.637(6.0,8.3)	8.467(7.8,8.6)	-3.141	0.002
动脉期能谱曲线斜率 ^c	1.581(0.9,2.5)	1.999(1.3,2.4)	-0.430	0.667
动脉期标准化有效原子序数 ^c	0.533(0.5,0.7)	0.675(0.6,0.7)	-3.251	0.001
静脉期碘浓度 ^a	18.98±6.24	19.17±8.18	-0.099	0.922
静脉期标准化碘浓度 ^a	0.45±0.13	0.47±0.18	-0.565	0.574
静脉期有效原子序数 ^a	8.69±0.33	8.70±0.42	-0.092	0.927
静脉期碘摄取降低率 ^c	-0.253(-0.7,0.3)	0.296(-0.1,0.5)	-2.500	0.012
静脉期能谱曲线斜率 ^c	2.550(2.2,3.0)	2.568(2.0,3.1)	-0.101	0.920
静脉期标准化有效原子序数 ^c	0.893(0.9,0.9)	0.899(0.9,0.9)	-0.394	0.694

注：MVI，微血管侵犯。a：数据分析采用独立样本t检验；c：数据分析采用Mann-WhitneyU检验。

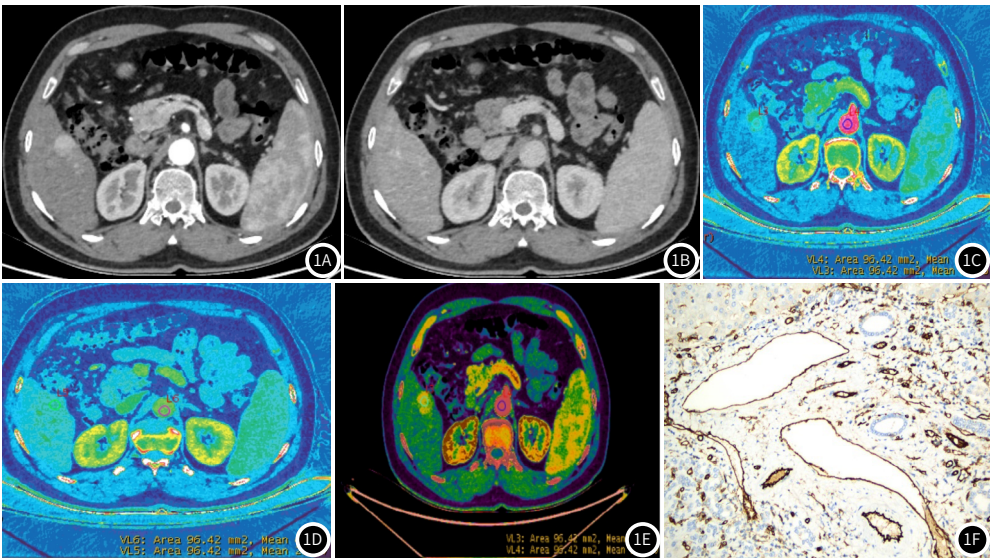


图1A-1F 男，37岁，肝癌微血管侵犯阴性。1A：动脉期轴位CT图，肝脏SVII段明显异常强化影。1B：静脉期轴位CT图，病灶周围可见线状强化，强化程度明显减低。1C：动脉期IC，病灶IC为22.25mg/mL，NIC为0.20。1D：静脉期IC，病灶IC为23.47mg/mL，标准化碘浓度为0.59。1E：动脉期Zeff，病灶内Zeff为110.12，标准化Zeff为0.36。1F：免疫组化显示微血管侵犯阴性，血管内皮下未见癌巢。

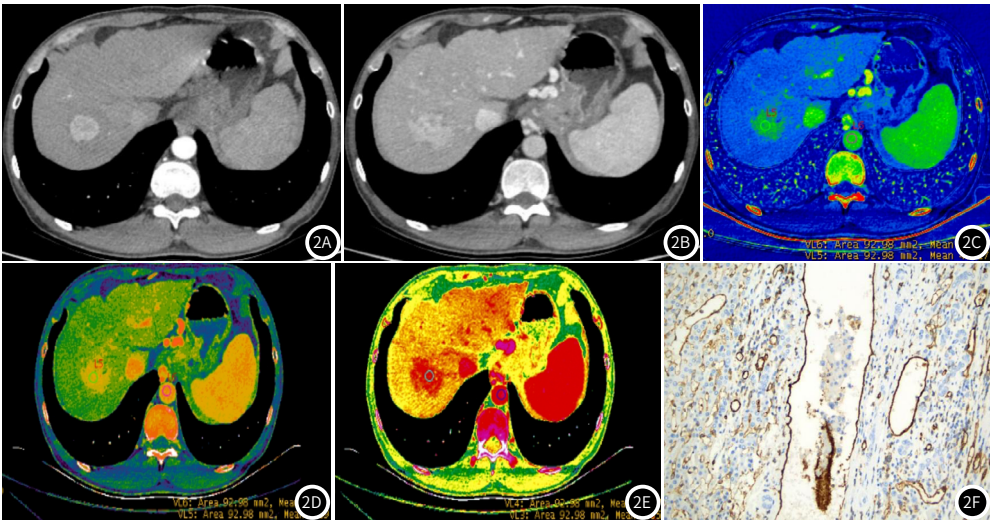


图2A-2F 男，53岁，肝癌微血管侵犯阳性。2A：动脉期轴位CT图，肝脏SVIII段明显异常强化影。2B：静脉期轴位CT图，病灶强化程度减低。2C：动脉期IC，病灶IC为40.27mg/mL，NIC为0.81。2D：静脉期IC，病灶碘浓度为9.69mg/mL，NIC为0.96。2E：动脉期Zeff，病灶Zeff为9.65，标准化Zeff为0.95。2F：免疫组化显示微血管侵犯阳性，血管内皮下可见癌巢。

2.3 DECT参数对HCC-MVI状态的诊断效能 对能谱CT的特异性参数，包括碘浓度(IC)、标准化碘浓度(NIC)、有效原子序数、标准化有效原子序数和碘摄取降低率(ICrr)，绘制了受试者工作特征曲线(ROC曲线，见图3)。根据约登指数最大为原则，确定了各参数的诊断阈值及曲线下的面积(AUC，见表3)。在动脉期的有效原子序数和标准化有效原子序数中，动脉期有效原子序数的AUC值最高，达0.766，以7.630作为诊断截断值时，灵敏度为84.0%，

特异性为70.4%，具有较好的诊断效能，适用于区分肝癌是否存在微血管侵犯。对于碘浓度及标准化碘浓度，AUC均低于0.6，诊断效能较差。碘摄取降低率(ICrr)和动脉期标准化有效原子序数的诊断效能较好，AUC分别为0.702和0.763。通过联合使用多个能谱参数进行HCC-MVI诊断，诊断效能显著提高，AUC为0.853，特异性为88.9%，灵敏度为68%(见表3)。

表3 动脉期碘浓度、标准化碘浓度、有效原子序数、标准化有效原子序数、静脉期碘摄取降低率以及联合诊断的AUC、截断值、敏感度、特异度

检验变量	AUC	截断值	95%置信区间	灵敏度	特异度
动脉期碘浓度(IC)	0.500	21.740	0.340~0.660	0.640	0.519
动脉期标准化碘浓度(NIC)	0.538	1.170	0.379~0.697	0.560	0.630
		mg/mL			
动脉期有效原子序数	0.766	7.630	0.635~0.897	0.840	0.704
动脉期标准化有效原子序数	0.763	0.579	0.631~0.895	0.840	0.704
静脉期碘摄取降低率(ICrr)	0.702	-0.062	0.558~0.846	0.760	0.630
联合诊断	0.853	0.586	0.754~0.953	0.680	0.889

3 讨论

现有研究表明，动态增强CT和MRI扫描通过获取肝细胞癌(HCC)的形态学特征，已成为评估肝癌微血管侵犯(HCC-MVI)的有效影像学工具^[10-14]。然而，在HCC-MVI评估中，常规影像特征仍然存在一些主观性，而且大多数研究都是单中心回顾性研究，样本量较少。因此，急需更多先进的影像学技术和数据处理方法，结合多中心大样本的验证，以提供更可靠的影像学依据。

DECT常通过碘浓度变化来研究肝癌微血管侵犯(HCC-MVI)的诊断价值^[15]。碘浓度变化能够敏感地检测肿瘤内血液供应的变化，间接反映肿瘤微循环，而肿瘤微循环与血管浸润密切相关。在双能CT的基础上，DECT还提供了有效原子序数这一重要

参数。有效原子序数是指某元素的吸收系数与其他物质相同的情况下,通过其原子序数对物质进行定量分析。通过利用有效原子序数,我们可以区分那些密度相似但原子序数却不同的物质。过去,其主要用于鉴别泌尿系结石的成分,近年来研究显示,DECT的有效原子序数与胃癌的分化程度呈负相关,低分化胃癌的有效原子序数明显高于中高分化组,并且有效原子序数在诊断胃癌分化程度方面的AUC优于静脉期碘浓度^[16]。此外,有效原子序数已被证实能区分结肠直肠癌转移性淋巴结和非转移性淋巴结方面具有显著效果,其诊断效能胜过形态学标准和淋巴结短径^[17]。有效原子序数还用于区分鼻咽癌与淋巴样增生^[18],以及侵袭性胸膜上皮肿瘤与纵隔型肺癌^[19]。以往研究主要集中于碘浓度,鲜有研究探讨DECT有效原子序数在肝癌微血管侵犯中的应用,且其衍生参数如标准化有效原子序数在该领域尚无相关研究。

我们的研究发现,有微血管侵犯的病灶较无微血管侵犯病灶动脉期碘浓度、动脉期标准化碘浓度、动脉期有效原子序数及标准化有效原子序数均大于无微血管侵犯组。毛细血管的密度和毛细血管通透性通常通过动脉期碘浓度来反映,而门静脉期碘浓度则可以反映造影剂的清除和保留^[20]。既往研究^[21]发现肿瘤对营养素的摄取主要是通过肿瘤血管生成和肿瘤转移的宿主血管。肿瘤血管生成的丰富程度与肿瘤恶性程度呈正相关^[22]。且因肿瘤血管具有不完全的内皮细胞结构,导致血管通透性增加,因此碘浓度增加。在Yang等^[15]的关于能谱CT对小肝癌MVI的研究中表明,MVI阳性和MVI阴性之间的动脉期碘浓度,标准化碘浓度以及静脉期碘摄取降低率均存在显著差异($P < 0.05$)。本研究与既往研究一致,有微血管侵犯的病灶内碘浓度大于无微血管侵犯组。肝细胞癌主要由肝动脉供血,随着癌细胞的增殖,癌细胞浸润周围基质和血管内皮,形成微小的癌栓,癌细胞通过门静脉系统转移,以上过程与病理结果比较一致。癌细胞的异型性、排列方式、聚集程度、肿瘤包膜完整性以及瘤内坏死成分的比例等因素,均对病灶的有效原子序数产生影响。理论上,肿瘤病灶的实性程度与细胞增殖与分裂的速度呈正相关,实性成分越多,有效原子序数的值也越大^[23]。Zhu等^[24]采用DECT研究发现在预测AFP阴性的HCC-MVI状态中,动脉期有效原子序数具有较好的预测能力(AUC为0.792)。本研究表明,动脉期有效原子序数在7.630时,评估肝癌微血管侵犯的敏感度为84%,特异度为70.4%;此外,本研究显示动脉期标准化有效原子序数以及静脉期碘浓度降低率诊断肝癌微血管侵犯也有良好的性能,AUC值分别为0.763、0.702。因此,DECT动脉期有效原子序数、标准化有效原子序数以及静脉期碘摄取降低率,能够为术前定量评估肝癌微血管侵犯提供更为有效的参考依据。

既往研究表明,双能CT动脉期标准化碘浓度在诊断肝癌微血管侵犯方面的AUC为0.875^[25],但本研究发现,DECT动脉期标准化碘浓度的诊断效能较差(AUC为0.538)。相较之下,动脉期有效原子序数在评估肝癌微血管侵犯时,表现出更高的AUC、敏感度和特异度。本研究通过病灶ROI和同层腹主动脉的碘浓度与有效原子序数进行标准化,分析了增强各期标准化碘浓度及有效原子序数对肝癌微血管侵犯的诊断效能。结果显示,标准化前后的碘浓度和有效原子序数在AUC方面差异不大,但特异度有所提高。动脉期标准化有效原子序数的临界值为0.579,诊断敏感度为84%;静脉期碘摄取降低率的临界值为-0.06,敏感度为76%。此外,与单一参数相比,能谱联合参数的诊断效能显著提高,AUC提升至0.853,敏感度为68%,特异度达到88.9%。因此,本研究推荐采用能谱联合参数来评估肝癌微血管侵犯的状态。

本研究的局限性:(1)本研究仅涉及肝细胞癌(HCC),排除了病理诊断为肝内胆管癌(ICC)、混合型肝细胞-胆管癌(cHCC-CAA)及转移性肝癌的患者,因此在诊断其他类型肝癌微血管侵犯时,结果可能具有一定局限性。(2)由于本研究是在特定的肝癌患者群体中进行,研究结论在推广到其他具有相似增强模式的肝脏病变时可能存在一定限制。(3)对于少数早期肿瘤病灶较小的病例,ROI的勾画受到一定限制,因此测量结果可能存在一定偏差。

总之,DECT增强扫描中的动脉期有效原子序数、标准化有效原子序数及静脉期碘摄取降低率对于术前评估肝癌微血管侵犯具有

一定的临床价值,其中动脉期标准化有效原子序数可作为新的术前评估指标。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家卫生健康委员会医政司.原发性肝癌诊疗指南(2024年版)[J].协和医学杂志,2024,15(3):532-559.
- [2] 夏勇,杨田,王葵.肝细胞癌肝切除术后复发预防和治疗中国专家共识(2020版)[J].中国实用外科杂志,2021,41(1):20-30.
- [3] Esnaola NF,Lauwers GY,Mirza NQ,et al.Predictors of microvascular invasion in patients with hepatocellular carcinoma who are candidates for orthotopic liver transplantation[J].J Gastrointest Surg,2002,6(2):224-232.
- [4] Onaca N,Davis GL,Jennings LW,et al.Improved results of transplantation for hepatocellular carcinoma:a report from the International Registry of Hepatic Tumors in Liver Transplantation[J].Liver Transpl,2009,15(6):574-580.
- [5] Lim KC,Chow PK,Allen JC,et al.Microvascular invasion is a better predictor of tumor recurrence and overall survival following surgical resection for hepatocellular carcinoma compared to the Milan criteria[J].Ann Surg,2011,254(1):108-113.
- [6] Ryu T,Takami Y,Wada Y,et al.A Clinical scoring system for predicting microvascular invasion in patients with hepatocellular carcinoma within the milan criteria[J].J Gastrointest Surg,2019,23(4):779-787.
- [7] Bai S,Yang P,Xie Z,et al.Preoperative estimated risk of microvascular invasion is associated with prognostic differences following liver resection versus radiofrequency ablation for early hepatitis B virus-related hepatocellular carcinoma[J].Ann Surg Oncol,2021,28(13):8174-8185.
- [8] Holmes DR 3rd,Fletcher JG,Apel A,et al.Evaluation of non-linear blending in dual-energy computed tomography[J].Eur J Radiol,2008,68(3):409-413.
- [9] Graser A,Johnson TR,Hecht EM,et al.Dual-energy CT in patients suspected of having renal masses:can virtual nonenhanced images replace true nonenhanced images?[J].Radiology,2009,252(2):433-440.
- [10] Xiao Q,Zhu W,Tang H,et al.Ultrasound radiomics in the prediction of microvascular invasion in hepatocellular carcinoma:a systematic review and meta-analysis[J].Heliyon,2023,9(6):e16997.
- [11] Long Y,Lv Z,Wang S,et al.Comparison of preoperative ultrasound and MRI in the diagnosis of microvascular invasion in hepatocellular carcinoma[J].Funct Integr Genomics,2023,23(2):100.
- [12] Tian Y,Hua H,Peng Q,et al.Preoperative evaluation of Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI radiomics-based nomogram in small solitary hepatocellular carcinoma (<3cm) with microvascular invasion:a two-center study[J].J Magn Reson Imaging,2022,56(5):1459-1472.
- [13] 符菁泓,张胜,王斌.Gd-EOB-DTPA MR动态增强对老年小肝癌MVI的预测价值[J].中国老年学杂志,2023,43(12):2859-2862.
- [14] 张继云,张学琴,张涛,等.基于钆塞酸二钠增强MRI联合微血管侵犯预测HBV相关HCC患者术后早期复发的价值[J].临床放射学杂志,2023,42(1):66-71.
- [15] Yang CB,Zhang S,Jia YJ,et al.Dual energy spectral CT imaging for the evaluation of small hepatocellular carcinoma microvascular invasion[J].Eur J Radiol,2017,95:222-227.
- [16] 潘馨梦,付蓝琦,胡娟,等.双层探测器光谱CT有效原子序数及碘浓度定量评估胃癌分化程度[J].中国医学影像学杂志,2023,31(3):248-252.
- [17] Yang Z,Zhang X,Fang M,et al.Preoperative diagnosis of regional lymph node metastasis of colorectal cancer with quantitative parameters from dual-energy CT[J].Am J Roentgenol,2019,213(1):W17-W25.
- [18] Wang P,Xiao Z,Tang Z,et al.Dual-energy CT in the differentiation of stage T1 nasopharyngeal carcinoma and lymphoid hyperplasia[J].Eur J Radiol,2020,124:108824.
- [19] Deng L,Yang J,Jing M,et al.Differentiating invasive thymic epithelial tumors from mediastinal lung cancer using spectral CT parameters[J].Jpn J Radiol,2023,41(9):973-982.
- [20] Johnson TR,Krauss B,Sedlmair M,et al.Material differentiation by dual energy CT:initial experience[J].Eur Radiol,2007,17(6):1510-1517.
- [21] Iannaccone R,Laghi A,Passariello R.Multislice CT angiography of mesenteric vessels[J].Abdom Imaging,2004,29(2):146-152.
- [22] Du JR,Jiang Y,Zhang YM,et al.Vascular endothelial growth factor and microvascular density in esophageal and gastric carcinomas[J].World J Gastroenterol,2003,9(7):1604-1606.
- [23] 冯坤鹏,孙冰.能谱CT增强扫描物质分离技术在小肝癌术前定量评估中的应用[J].中国CT和MRI杂志,2020,18(8):90-92.
- [24] Zhu Y,Feng B,Cai W,et al.Prediction of microvascular invasion in solitary AFP-negative hepatocellular carcinoma <5cm using a combination of imaging features and quantitative dual-layer spectral-detector CT parameters[J].Acad Radiol,2023,30 Suppl 1:S104-S116.
- [25] Li YX,Li WJ,Xu YS,et al.Clinical application of dual-layer spectral CT multi-parameter feature to predict microvascular invasion in hepatocellular carcinoma[J].Clin Hemorheol Microcirc.Published online May 31,2024.

(收稿日期:2024-09-18)

(校对编辑:江丽华)