DOI:10.13210/j.cnki.jhmu.20250715.002
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/46.1049.R.20250715.1531.004

双层探测器光谱CT在肝细胞癌病灶检出及血供监测中的应用研究

林秀艳,于丽娟✉,王玉君,龚 伟
(海南省肿瘤医院核医学科,海南 海口 570311)

[摘要] **目的**:探讨双层探测器光谱CT多参数图像在肝细胞癌病灶检出及血供监测中的价值。**方法**:收集2023年8月~2024年12月在海南省肿瘤医院行光谱CT检查的80例肝细胞癌患者的影像和临床资料。采用客观评价指标,包括信噪比(signal-to-noise ratio,SNR)、对比噪声比(contrast-to-noise ratio,CNR)及主观评分法,对常规CT和40~120 keV虚拟单能级图的图像质量进行差异性分析,以MRI作为金标准,对常规CT、光谱多参数CT的病灶检出数量进行多元线性回归分析;分别计算常规CT和光谱多参数CT在血供判断中的敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值和准确率。**结果**:常规CT组与虚拟单能级组(40、50、60、70、120 keV)的SNR值、CNR值、主观评分存在明显差异($P<0.001$),其中以40 keV和50 keV显著性较高,随着能级的升高,SNR值、CNR值、主观评分随之下降。40 keV和50 keV单能量图像是肝癌病灶检出的重要因子($P<0.001$)。碘浓度测量判断肝癌病灶血供的敏感度为98.68%、阳性预测值为97.40%,准确率为96.25%。**结论**:40 keV和50 keV单能级图的图像质量明显高于常规CT,有较高的病灶检出能力;相较于视觉判断和CT值测量,碘浓度测量在血供监测中的具有较高的诊断效能。

[关键词] 肝细胞癌;光谱CT;体层摄影术;图像质量
[中图分类号] R735.7;R730.44 [文献标志码] A [文章编号] 2097-5953(2026)20-1585-06

Research on the application of double-layer detector spectral CT in the detection of hepatocellular carcinoma lesions and blood supply monitoring

LIN Xiuyan, YU Lijuan✉, WANG Yujun, GONG Wei
(*Department of Nuclear Medicine, Hainan Cancer Hospital, Haikou* 570311, *China*)

[*Foundation Project*]: *This study was supported by the Health Industry Research Project of Hainan Province* (*22A*200294); *Project of Hainan Clinical Medical Research Center* (*LCYX*202403)

[*Author*]:*LIN Xiuyan, Associate Chief Physician, E-mail*: 763032836@*qq.com*.
[*Correspondence to*]:*YU Lijuan, Ph.D., Chief Physician, E-mail*: *yulijuan*2003@126.*com*.

Received: 2025-04-17 *Revised*: 2025-07-11 *JHMU*, 2026;32(20):1585-1590

View from specialist: It is creative, and of certain scientific and educational value.

[Abstract] **Objective**: To investigate the value of multi-parameter CT images of double-layer detector spectroscopy in the detection of hepatocellular carcinoma lesions and blood supply monitoring. **Methods**: The imaging and clinical data of 80 patients with hepatocellular carcinoma who underwent spectral CT examination in Hainan Cancer Hospital from August 2023 to December 2024 were collected. Objective evaluation indexes, including signal-to-noise ratio (SNR), contrast-to-noise ratio (CNR), and subjective scoring method, were used to analyze the differences in image quality between conventional CT and 40-120 keV virtual single-level map. Using MRI as the golden standard, multiple linear regression analysis was performed on the number of lesions detected by conventional CT and spectral multiparametric CT. The sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value, and accuracy of conventional CT and spectral multiparametric CT in the judgment of blood supply were calculated and statistically compared. **Results**: There were significant differences in SNR value, CNR value, and subjective score between the conventional CT group and the virtual single-level group (40, 50, 60, 70, and 120 keV) ($P<0.001$), among which 40 keV and 50 keV were significantly higher. As the energy level increased, SNR, CNR, and subjective scores decreased accordingly. The

[基金项目]海南省卫生健康行业科研项目(22A200294);海南省临床医学研究中心项目(LCYX202403)
[作者简介]林秀艳,副主任医师,Email:763032836@qq.com。
[通讯作者]于丽娟,博士,主任医师,Email:yulijuan2003@126.com。
[收稿日期]2025-04-17 [修回日期]2025-07-11 网络出版时间:2025-07-15 18:28:36

single-energy images of 40 keV and 50 keV were important factors for the detection of liver cancer lesions ($P<0.001$). The sensitivity of iodine concentration measurement in determining blood supply to liver cancer lesions was 98.68%, the positive predictive value was 97.40%, and the accuracy was 96.25%. **Conclusion**: The image quality of 40 keV and 50 keV single-level maps is significantly higher than that of conventional CT, and it has a higher ability to detect lesions. Compared to visual judgment and CT measurement, iodine concentration measurement has a higher diagnostic efficacy in blood supply monitoring.

[**Key words**] Hepatocellular carcinoma; Spectral CT; Tomography; Image quality

原发性肝癌在全球癌症发病率中排在第七位，也是第二大癌症死亡原因，其中75%～85%病例均为肝细胞癌（hepatocellular carcinoma，HCC）[1,2]。有研究表明，预计在2020～2040年期间，肝癌每年新发病例数将增加55.0%，到2040年，将有130万人死于肝癌（比2020年增加56.4%）[3]。而我国肝癌的疾病负担尤为严重，2022年中国癌症统计报告显示，我国新发肝癌病例为36.77万例，死亡病例为31.65万例[4]。由此可见，肝癌已经成为严重危害人类健康的主要疾病之一。如何减轻肝癌疾病负担是当前亟须解决的临床问题之一。CT和MRI在肝癌诊疗及随访监测中发挥了重要作用，是肝癌治疗后主要的影像学评价指标[4]。双层探测器光谱CT在无需预判的情况下通过常规扫描可同时得到常规图像和多参数光谱图像，包括常规CT图像、单能级图像、碘密度图、原子序数图、虚拟平扫图像、能谱曲线等，实现了“同源、同时、同向”的能量成像要求，比常规CT能提供了更多有用的诊断信息。本研究将探讨光谱多参数CT在肝癌诊断及血供监测中的应用价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象

收集2023年8月～2024年12月期间在海南省肿瘤医院行光谱CT检查的80例HCC患者的影像和临床资料，其中男性66例，女性14例，平均年龄（59.10±8.54）岁，未接受过治疗患者66例，治疗后复查监测者14例。入组标准：经病理或影像学明确诊断的HCC患者，包括未治疗或已经治疗的患者。排除标准：（1）碘对比剂过敏的受检者；（2）严重心、肝、肾功能不全的受检者；（3）有凝血功能障碍、出血倾向的受检者；（4）发热、感染的受检者；（5）肿瘤全身广泛转移，预计生存期<3个月患者。本研究通过海南省肿瘤医院伦理委员会审批[批件号1：2022年（科研）第（26）号、批件号2：EC-2024-016-01]。

1.2 研究方法

1.2.1 光谱CT扫描技术 使用飞利浦IQon双层探测器光谱CT扫描仪，扫描时勾选光谱CT扫描模式。患者空腹5～6 h，检查前口服500 mL纯净水，静脉留置针置于右肘桡静脉，训练患者做好呼吸配合，取仰卧位进行检查。扫描参数：管电压120 kVp，自动管电流（80～150 mAs），螺距1.015，探测器宽度64 mm×0.625 mm，X线管旋转速度0.27 s/周，FOV为512×512。使用经验法进行增强扫描，以3.0 mL/s注射速率注射非离子型碘对比剂碘海醇（欧乃派克）注射液（350 mg/mL），剂量为1.5 mL/kg，而后以相同注射速率注射30 mL 0.9%氯化钠溶液，注射完成后45、75、140 s后行动脉期、门脉期、延时期扫描。扫描完成后自动获得光谱图像基数据包。重建层厚均为1 mm，层间距0.8 mm。

1.2.2 光谱CT后处理方法 所有后处理在飞利浦星云工作站上进行，将动脉期的能谱图像重建出常规图像、虚拟单能级图像（40、50、60、70、120 keV）、碘密度图、原子序数图，同一患者在各组图像中应保持感兴趣区ROI位置、面积相同，感兴趣区ROI应避开门静脉血管壁。在动脉期增强图上测量CT值、图像病灶噪声（standard deviation，SD）值，计算信噪比（signal-to-noise ratio，SNR）值和对比噪声比（contrast-to-noise ratio，CNR）值，在增强动脉期碘密度图上测量病灶的碘浓度，分别取3个层面手动勾画，取平均值。计算公式：

SNR值＝（病灶CT值－肝实质CT值）/肝实质SD值

CNR值＝病灶CT值/病灶SD值

1.2.3 MRI扫描技术 使用GE 1.5T Signa HDi扫描仪。分别采集轴位T1双回波序列、T2序列、T2fs序列、DWIb＝600、冠状位T2序列、屏气LAVA蒙片、屏气横断面LAVA三期动态增强（动脉期、门脉期、延迟期），屏气冠状面LAVA增强。先进行肝脏平扫，注射对比剂钆喷酸葡胺注射液，然后加注20～30 mL生理盐水，流速2 mL/s，用量0.1 mmol/kg扫描。完成后重建ADC图、三期动脉增强与蒙片的减影图。

1.2.4 评估标准 将图像上传到后处理工作站，由2名高年资影像诊断医师共同阅片，逐一观察常规CT、40、50、60、70、120 keV、碘密度图、有效原子序数图像，记录肝癌病灶位置、大小、数目、血供情况，按5分法对图像质量进行主观评分，通过勾画感兴趣区测量得到CT值、SD值和碘浓度值，计算得出

SNR值和CNR值。磁共振图像上传到后处理工作站和PACS系统进行阅片，观察病灶数量和血供情况，当病灶T1WI表现为高信号时，使用减影技术进行血供判断。

主观评分法：5分：噪声小，解剖结构显示清晰可见，图像对比度优；4分：噪声较小，解剖结构清晰可见，图像对比度良好；3分：噪声较大，解剖结构部分模糊，部分清晰可见，图像对比度中等；2分：噪声大，结构结构模糊，图像对比度较差；1分：噪声非常大，结构显示不清，图像对比度非常差。

1.3 统计学处理

使用IBM SPSS 25.0进行统计学分析。对计量资料先采用Kolmogorov-Smirnov检验进行正态性检验，对于符合正态分布的计量资料使用$\bar{x}\pm s$表示，计数资料以n（%）表示。当2组数据经Kolmogorov-Smirnov检验符合正态分布，且方差相等时，使用单因素方差分析进行差异性分析；当2组数据不符合正态分布或方差不等时，使用Mann-Whitney U检验。以MRI病灶检出数量为金标准作为因变量的线性回归，对常规CT、光谱多参数CT的病灶检出数量进行多元线性回归分析，分别计算常规CT和光谱多参数CT在血供判断中的敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值和准确率。$P<0.05$为差异具有统计学意义。

2 结果

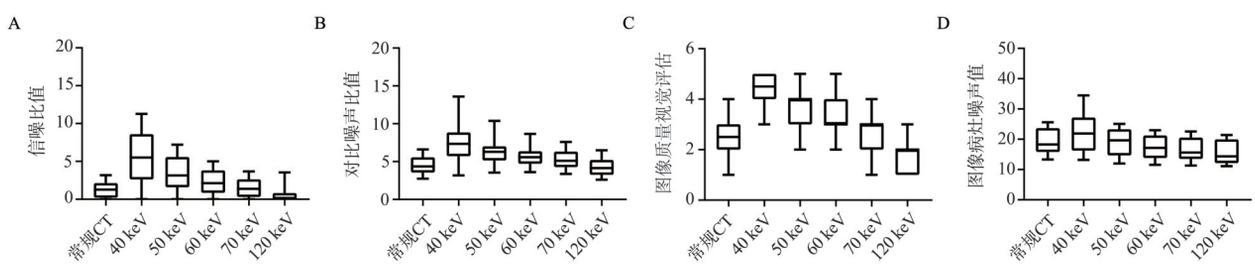
2.1 光谱CT各单能级图与常规CT图的图像质量评价

在80例HCC患者中，常规CT组与虚拟单能级组（40、50、60、70、120 keV）的SNR值、CNR值、SD值、主观评分差异具有统计学意义（$P<0.001$）；随着能级的升高，SNR值、CNR值、SD值随之下降；40 keV组的视觉主观评分最高（4.39±0.68），其次为50 keV组（3.89±0.73）和60 keV组（3.25±0.70），70 keV组（2.63±0.66）与常规CT组（2.49±0.62）评分相近，而120 keV组评分最低（1.85±0.68），见表1、图1。

表1 各组图像质量指标和病灶检出量的差异性分析（$\bar{x}\pm s$）

Tab 1 Differential analysis of image quality indexes and lesion detection in each group（$\bar{x}\pm s$）

项目	信噪比值	对比噪声比值	图像质量视觉评估	图像病灶噪声值
常规CT	1.28±2.25	4.49±1.25	2.49±0.62	20.73±10.81
40 keV	6.07±7.68	7.47±2.71	4.39±0.68	25.18±27.73
50 keV	3.74±5.04	6.42±1.89	3.89±0.73	21.14±17.53
60 keV	2.36±3.41	5.70±1.51	3.25±0.70	18.87±11.71
70 keV	1.49±2.47	5.26±1.34	2.63±0.66	17.49±8.43
12 0keV	0.12±1.30	4.30±1.29	1.85±0.68	15.76±4.46
F	19.857	38.236	154.564	3.655
P	<0.001	<0.001	<0.001	0.003



A～D：不同能量（常规CT、40、50、6、70、120 keV）下信噪比值、对比噪声比值、图像质量视觉评估、图像病灶噪声值的分布箱线图

图1 常规CT与各单能级光谱CT各图像质量指标的比较

Fig 1 Comparison of image quality indexes between conventional CT and various single level spectral CT

2.2 光谱CT各参数与常规CT图像在病灶检出性能的比较

比较标准化回归系数，各组图像对病灶的检出性能排序为：40 keV图像（$\beta=1.103$）>50 keV图像（$\beta=0.912$）>60 keV图像（$\beta=0.169$）>有效原子序数图（$\beta=0.048$）>碘密度图（$\beta=0.044$）>70 keV图像（$\beta=0.030$）>120 keV图像（$\beta=0.008$）>常规CT（$\beta=-0.216$）。上述结果表明，低keV（40 keV、50 keV）单能量图像，在病灶检出方面与MRI金标准具有良好的一致性。值得注意的是，虽然常规CT（$P=$

0.009)与60 keV(P=0.006)也达到统计学显著水平(P<0.05),但60keV的标准化回归系数较小(β=0.169),其临床增益不及40 keV与50 keV;而常规CT的标准化回归系数为负值(β=−0.216),提示其病灶检出性能显著劣于其他组别及金标准。因此,本研究认为相比其他组别图像,40 keV与50 keV图像在临床病灶检出中具有最高的应用价值,见表2。

表2 各组图像在病灶检出量的差异性分析

Tab 2 Differential analysis of the detection of lesions in images of each group

项目	B	β	Sb	t	P	95% CI
常规CT	−0.275	−0.216	0.102	−2.699	0.009	−0.479～−0.072
40 keV	1.122	1.103	0.033	33.934	<0.001	1.057～1.188
50 keV	0.928	0.912	0.060	15.350	<0.001	0.808～1.049
60 keV	0.190	0.169	0.067	2.822	0.006	0.056～0.324
70 keV	0.038	0.030	0.104	0.369	0.713	−0.168～0.245
120 keV	0.011	0.008	0.032	0.326	0.745	−0.054～0.075
碘密度图	0.050	0.044	0.055	0.903	0.369	−0.060～0.160
有效原子序数图	0.054	0.048	0.082	0.649	0.518	−0.111～0.218

2.3 光谱CT碘密度图在肝癌病灶血供监测中的价值

经测量碘浓度值判断血供的敏感度最高,达到98.68%(75/76),CT值测量判断血供方法的敏感度为88.16%(67/76),视觉判断血供方法的敏感度最低,为75.00%(57/76)。视觉判断血供方法的特异度最高,达到100.00%(4/4),经测量CT值判断血供和经测量碘浓度判断血供方法的特异度均为50.00%(2/4)。三种方法的阳性预测值均较高。经测量碘浓度判断血供方法的阴性预测值最高,为66.67%(2/3)。碘浓度测量判断血供方法的准确率最高,达到96.25%(77/80),整体诊断性能优异。CT值测量判断血供方法的准确率为86.25%(69/80),处于中等水平。视觉判断血供方法的准确率最低,为76.25%(61/80),整体诊断性能相对较差,见表3。

表3 几种方法在肝细胞癌病灶血供判断中的差异性分析(%, n)

Tab 3 Differential analysis of several methods in assessing the blood supply of hepatocellular carcinoma lesions (%, n)

项目	视觉判断血供	CT值测量判断血供	碘浓度值测量判断血供
敏感度	75.00 (57/76)	88.16 (67/76)	98.68 (75/76)
特异度	100.00 (4/4)	50.00 (2/4)	50.00 (2/4)
阳性预测值	100.00 (57/57)	97.10 (67/69)	97.40 (75/77)
阴性预测值	17.39 (4/23)	18.18 (2/11)	66.67 (2/3)
准确率	76.25 (61/80)	86.25 (69/80)	96.25 (77/80)

3 讨论

光谱CT可以分离和测量不同能量下的X射线衰减,实现40～200 keV范围内任意虚拟单能量成像(virtual monochromatic image, VMI),低能级VMI可以增加组织间的对比度,特别是对乏血供的病变或是在低浓度对比剂用量下的血管性病变的显示,因此,它可以更好的将肝脏病变显示出来[5,6]。既往研究表明[7-12],与常规增强CT图像比较,光谱CT增强的40～70 keV VMI可以明显提高图像对比度和CNR值,而40 keV的VMI具有更好的病变检测能力,70 keV的VMI与传统的混合能量CT图像最相近。本研究以80例HCC患者的光谱CT结果做为研究对象,从客观、主观角度对比分析光谱CT各参数图像和常规CT图像所显示的图像质量和肝癌病灶检出情况。结果显示,常规CT组与虚拟单能级组(40、50、60、70、120 keV)的SNR值、CNR值、主观评分存在明显差异(P<0.001),其中以40 keV和50 keV显著性较高,随着能级的升高,SNR值、CNR值、主观评分随之下降。40 keV和50 keV单能量图像是肝癌病灶检出的重要因子(P<0.001)。虽然低能级的SD值相对较高,但综合较高的SNR值和CNR值,图像中病灶的可识别度仍较高,低能级图像更有利于病灶检出。以上研究结果表明,40 keV和50 keV单能级图的图像质量明显高于常规CT,其对肝癌病灶的检出能力较强。

肝癌细胞主要由肝动脉供血,碘对比剂增强CT检查是临床判断肝癌病灶血供的重要依据,传统诊断方法中主要通过视觉判断或测量CT值来间

接评估病变是否存在血供,可靠性相对较差。光谱CT碘密度图通过感兴趣区的勾画就能对组织中的碘浓度进行测量,碘浓度的测定能够敏感地反映肿瘤内血液供应的变化,多项研究已证实碘量化的准确性[13,14]。多项研究显示[15-19],微血管侵犯的HCC病灶动脉期碘浓度及标准化碘浓度明显高于非微血管侵犯组,动脉期碘浓度能有效预测HCC微血管侵犯,提示术前光谱CT碘浓度的测量为临床术前风险评估、治疗方式的选择及预后提供了关键依据。Reimer等[20]的研究也表明光谱CT的碘浓度测定对HCC微波消融术后充血边缘和残留肿瘤的鉴别具有一定价值。本研究对比分析了通过视觉、CT值测量和碘浓度测量3种方式判断肝癌病灶的血供情况,结果显示,碘浓度测量判断肝癌病灶血供的敏感度最高,为98.68%(75/76),CT值测量次之,为88.16%(67/76),视觉判断血供方法的敏感度最低,为75.00%(57/76)。3种方法的阳性预测值均较高。经测量碘浓度判断血供方法的阴性预测值最高,为66.67%(2/3);碘浓度测量判断血供方法的准确率最高,达到96.25%(77/80),整体诊断性能优异;CT值测量判断血供方法的准确率为86.25%(69/80),处于中等水平,视觉判断血供方法的准确率最低。相较于视觉和CT值测量,碘浓度测量在血供监测中的具有较高的诊断效能,本研究结果进一步验证了碘浓度测量的诊断效能。另外,国内有研究表明[21],光谱CT在辐射剂量>5 mGy的条件下对碘浓度及CT值的测量稳定性均较高,而日常扫描条件与该条件相符,进一步说明了碘浓度测量的可靠性。

本研究存在以下不足:(1)本研究纳入的样本量相对有限,研究结果可能存在偏倚,后期研究将扩大样本量进一步验证研究结果的稳定性和普适性;(2)感兴趣区域的勾画主观性较强,可能影响结果的准确性;(3)本研究主要关注了光谱CT在病灶检出和血供监测中的即时效果,但缺乏长期采用光谱CT进行随访监测的数据,尚不能客观评价其预后影响及长期价值,后期有条件方可展开此方面的研究;(4)光谱CT高能级图像在抑制金属伪影方面有一定优势,对碘125粒子植入后的图像可能有一定的改善作用,本研究未对此类情况进行分析研究,后期可纳入研究。

未来,通过借助多模态成像技术,结合深度学习与人工智能,光谱CT多参数成像会发挥更大的价值,为肝癌的精准诊断提供更全面的信息。

作者贡献度说明:

林秀艳:研究实施、论文撰写;于丽娟:研究指导、论文修改;王玉君:图像解析、论文指导;龚伟:数据解析。

所有作者声明不存在利益冲突关系。

致谢:

衷心感谢我的指导老师于丽娟教授,在研究的设计和论文撰写中给予我很大的帮助和鼓励,感谢我的研究团队,感谢你们的辛苦付出和大力支持,感谢单位给我提供良好的科研平台,感谢所有在研究过程中给予我帮助的人。

参考文献

1 McGlynn KA, Petrick JL, El-Serag HB. Epidemiology of hepatocellular carcinoma[J]. Hepatology, 2021, 73(Suppl 1): 4-13.

2 Rumgay H, Arnold M, Ferlay J, et al. Global burden of primary liver cancer in 2020 and predictions to 2040[J]. J Hepatol, 2022, 77(6): 1598-1606.

3 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.

4 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.
Department of Medical Administration, National Health Commission of the People's Republic of China. Clinical practice guideline for primary liver cancer (2024 Edition)[J]. Med J Peking Union Med Coll Hosp, 2024, 15(3): 532-559.

5 Große Hokamp N, Gilkeson R, Jordan MK, et al. Virtual monoenergetic images from spectral detector CT as a surrogate for conventional CT images: Unaltered attenuation characteristics with reduced image noise[J]. Eur J Radiol, 2019, 117: 49-55.

6 Majeed NF, Braschi Amirfarzan M, Wald C, et al. Spectral detector CT applications in advanced liver imaging[J]. Br J Radiol, 2021, 94(1123): 20201290.

7 Higashigaito K, Euler A, Eberhard M, et al. Contrast-enhanced abdominal CT with clinical photon-counting detector CT: Assessment of image quality and comparison with energy-integrating detector CT[J]. Acad Radiol, 2022, 29(5): 689-697.

8 Nagayama Y, Iyama A, Oda S, et al. Dual-layer dual-energy computed tomography for the assessment of hypovascular hepatic metastases: Impact of closing k-edge on image quality and lesion detectability[J]. Eur Radiol, 2019, 29(6): 2837-2847.

9 Sakabe D, Funama Y, Taguchi K, et al. Image quality characteristics for virtual monoenergetic images using

dual-layer spectral detector CT: Comparison with conventional tube-voltage images[J]. Phys Med, 2018, 49: 5-10.

10 Lv P, Lin X, Chen K, et al. Spectral CT in patients with small HCC: Investigation of image quality and diagnostic accuracy[J]. Eur Radiol, 2012, 22(10): 2117-2124.

11 陈勉, 吴方明, 王劲, 等. 双层探测器光谱CT在肝细胞癌评估中的应用[J]. 临床研究, 2024, 32(12): 145-148.
Chen M, Wu FM, Wang J, et al. Dual-layer detector spectral CT in the evaluation of hepatocellular carcinoma[J]. Clin Res, 2024, 32(12):145-148.

12 欧阳佳裕, 罗娜, 李刚. IQon双层探测器光谱CT虚拟45 keV单能量增强图像在肝细胞癌中的应用价值[J]. 影像研究与医学应用, 2021, 5(24): 16-18.
Ouyang JY, Luo N, Li G. The application value of IQon dual-detector spectral CT virtual 45 keV single energy enhanced image in hepatocellular carcinoma[J]. J Imag Res Med App, 2021, 5(24): 16-18.

13 Meyer S, Liu LP, Litt HI, et al. Phantom-based quantification of the spectral accuracy in dual-layer spectral CT for pediatric imaging at 100 kVp[J]. Quant Imaging Med Surg, 2023, 13(2): 924-934.

14 Ehn S, Sellerer T, Muenzel D, et al. Assessment of quantification accuracy and image quality of a full-body dual-layer spectral CT system[J]. J Appl Clin Med Phys, 2018, 19(1): 204-217.

15 Yang C, Zhang S, Jia Y, 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 Lv J, Li X, Mu R, et al. Comparison of the diagnostic efficacy between imaging features and iodine density values for predicting microvascular invasion in hepatocellular carcinoma[J]. Front Oncol, 2024, 14: 1437347.

17 吴瑞, 顾金凤, 陈芳云, 等. 术前AFP联合能谱CT对肝细胞癌微血管侵犯的预测价值[J]. 医学影像学杂志, 2023, 33(11): 2020-2025.
Wu R, Gu JF, Chen FY, et al. Analysis of preoperative AFP combined with energy spectrum CT in predicting microvascular invasion of hepatocellular carcinoma[J]. J Med Imag, 2023, 33(11): 2020-2025.

18 史佳丽, 郭钰, 杨新梅, 等. 能谱CT多参数定量评估肝癌微血管侵犯的临床价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2025, 23(1): 112-115.
Shi JL, Guo Y, Yang XM, et al. The clinical significance of multi-parameter quantitative assessment of microvascular invasion of hepatocellular carcinoma by energy spectrum CT[J]. Chin J CT MRI, 2025, 23(1): 112-115.

19 徐华, 杨中杰. 能谱CT增强扫描参数与肝癌介入术后微血管侵犯的关系[J]. 临床医学工程, 2025, 2025(6): 643-646.
Xu H, Yang ZJ. The relationship between energy spectrum CT enhanced scanning parameters and microvascular invasion after liver cancer intervention[J]. Clin Med Eng, 2025, 2025(6): 643-646.

20 Reimer RP, Hokamp NG, Niehoff J, et al. Value of spectral detector computed tomography for the early assessment of technique efficacy after microwave ablation of hepatocellular carcinoma[J]. PLoS One, 2021, 16(6): e0252678.

21 吴巧玲, 田均平, 张大明, 等. 辐射剂量对第二代双层探测器光谱CT碘定量和单能量图像CT值准确性的影响[J]. 基础医学与临床, 2023, 43(12): 1866-1870.
Wu QL, Tian JP, Zhang DM, et al. Effects of different radiation doses on the accuracy of quantitative iodine concentration and CT value of virtual monochromatic image in second-generation dual-layer detector spectral CT[J]. Basic Clin Med, 2023, 43(12): 1866-1870.

[本文编辑] 陈思润