

彭佳璇, 江广斌, 姜伦. 能谱 CT 在肝脏富血供病变中的应用和研究进展[J]. CT 理论与应用研究, 2021, 30(2): 253-262. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.13.  
PENG J X, JIANG G B, JIANG L. Application and research progress of spectral CT in hypervascular hepatic lesions[J]. CT Theory and Applications, 2021, 30(2): 253-262. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.13. (in Chinese).

# 能谱 CT 在肝脏富血供病变中的应用和研究进展

彭佳璇, 江广斌<sup>✉</sup>, 姜伦

(湖北医药学院附属随州医院医学影像科, 湖北 随州 441300)

**摘要:** 肝脏病变是临床工作中的一类常见疾病, 早期发现和准确诊断对于临床治疗决策和改善患者预后十分重要, 能谱 CT 作为一种新成像技术, 能够提供单能量成像及多种能谱参数对肝脏病变进行定量及定性评估, 尤其对突出显示肝脏病变的血供特点有独特的优势, 有助于病灶的早期检出、鉴别诊断和预后评估。本文针对能谱 CT 在肝脏常见富血供病变中的应用和研究进展进行综述。

**关键词:** 能谱 CT; 富血供肝脏病变; 体层摄影术

DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.13 中图分类号: R 814 文献标志码: A

能谱 CT 是近年来兴起的新型成像技术, 区别于混合能量成像的传统 CT 成像模式, 能谱 CT 采用单源双能量快速切换技术, 可重建出 40~140 keV 间的单能量图像, 有效提高了图像质量和对比噪声比。

能谱 CT 不仅可以良好显示肝脏病变的形态学改变, 同时对评估病变的血流动力学改变也有独特优势。通过能谱曲线、基物质分离技术及有效原子序数等能谱工具可定量分析和鉴别肿瘤的病理类型和血供差异, 为病灶的准确诊断、手术方案决策和术后随访提供重要的影像学支持。

## 1 能谱 CT 成像原理及特点

能谱 CT 采用 80 kVp 和 140 kVp 快速切换技术, 在 0.5 ms 的时间内几乎同时同角度获取高、低两组能量投影数据并重建出 40~140 keV 内的 101 种单能量图像, 经后处理校正后的单能量图像避免了射束硬化伪影, 并获得稳定、准确的 CT 值。能谱 CT 的瞬时变能高压发生器和宝石探测器是 X 射线束快速切换和数据采集的重要硬件基础, 其独特的自适应迭代重建技术能够在较低剂量扫描时重建出高质量图像用于临床诊断<sup>[1-2]</sup>。此外, 能谱 CT 强大的后处理技术不仅可清晰显示病变的形态学信息, 还可提供有效原子序数、能谱曲线、基物质分离和定量等多种能谱参数用于功能评估, 实现多参数定量成像<sup>[3]</sup>。

### 1.1 单能量成像

X 射线束穿过物质后发生不同程度的衰减而生成相应的 CT 图像。低能量的 X 射线束穿透能力较弱, 导致不同组织间衰减差异较大, 提高图像对比度的同时也增加了图像噪声;

而高能量水平的图像中正常组织和病灶间对比度较弱,相应的图像噪声和射束硬化伪影也减低,选择最佳对比噪声比的单能量图像有利于病灶的检出和显示<sup>[4]</sup>。

研究发现在 70 keV 水平下获得的单能量图像明显提高了肝脏肿瘤的检出率<sup>[5-7]</sup>,也有研究发现 50 keV 水平下单能量图像优化了肝脏动脉期富血供病灶的显示<sup>[8]</sup>,因碘对比剂在低能量 X 线水平下衰减明显增加,因此在低能量图像上可以更突出和清晰地显示肝脏血管和富血供病变,对小于 1 cm 的乏血供肝转移瘤检出同样十分敏感<sup>[9]</sup>,优化了肝脏局灶病变的检出和诊断<sup>[10-11]</sup>。Yoon 等<sup>[12]</sup>对低体重指数 (body mass index, BMI) 患者研究发现在降低了辐射剂量和对比剂浓度后重建出的 50 keV 单能图像对肝脏病灶的显示仍优于传统混合能量图像。

## 1.2 能谱曲线

能谱曲线是通过获取物质在 40~140 keV 单能量水平下的 X 线衰减系数 (即 CT 值) 而形成的,反映了物质在不同 keV 下其 CT 值的特征性变化规律。不同病理类型的肿瘤常表现出能谱曲线形态的差异,如血管平滑肌脂肪瘤因其含有脂肪而表现出弓背抬高的特性能谱曲线<sup>[13]</sup>,能谱曲线相同或相似的走形趋势可提示肿瘤原发灶及其转移灶具有相同的组织学来源<sup>[14]</sup>。平扫时能谱曲线可用于鉴别肝脏良、恶性病变组织学类型<sup>[15-17]</sup>。在增强扫描时,根据病灶碘摄取量的差异会生成不同形态的能谱曲线,可间接反映病灶内血供差异<sup>[18]</sup>。能谱曲线对于病变病理类型、同源性及血供差异的评估中都有一定的临床价值。

## 1.3 物质分离和定量

任何物质都可以由另外两种已知的基物质替代产生相同的衰减效应,从而进行物质分离和定量,其中以碘和水基物质对应用最为广泛。通过物质分离技术在增强图像中分离出碘对比剂可得到模拟真实平扫的水基图,避免了常规平扫中的辐射剂量影响同时图像质量可满足临床诊断<sup>[19-20]</sup>。

将碘对比剂作为基物质而生成的碘基图,可清晰显示出图像中碘对比剂的分布情况并获得定量参数碘浓度,间接反映出病灶间的血供差异<sup>[21-22]</sup>。Muenzel 等<sup>[23]</sup>研究发现和 65 keV 的单能量图像相比较,使用碘图优化了富血供肝脏病灶的检出率和诊断准确性。

## 1.4 有效原子序数

如果某种元素对 X 线的吸收衰减系数与某物质的吸收衰减系数一致,则可认为两者的有效原子序数也相同<sup>[24]</sup>。根据各类元素在病灶内的比例和各组成元素的原子序数不同,用以对病灶内物质成份进行定量分析和鉴别诊断。

目前有效原子序数多用于肾结石的成分分析和鉴别<sup>[25]</sup>,同时也有研究发现有效原子序数对肝脏良、恶性病变的鉴别也有着一定的参考价值<sup>[16,26]</sup>。

## 2 能谱 CT 在肝脏富血供病变中的应用

肝脏是由肝动脉和门静脉双重供血器官,根据组织学类型不同,肝脏病变表现出不同的血供特点和强化模式,能谱参数可以定量地分析病灶的组织学类型差异和灌注特点。Mulé 等<sup>[27]</sup>对肝细胞癌的研究发现,在动脉晚期能谱参数碘浓度和动脉期血流量、血容量等灌注参数具有明显相关性;在门脉期,碘浓度主要反映出病灶的血容量,根据碘浓度可间

接计算出病灶的动脉期和门脉期血供特点。能谱 CT 的多参数成像对于肝脏富血供病变的影像学诊断及治疗指导十分重要。

## 2.1 肝血管瘤

肝血管瘤 (hepatic hemangioma, HH) 主要由扩张的薄壁血管和囊状扩张的血窦形成, 典型的强化模式是由病灶边缘向中心逐渐填充的渐进性明显强化, 但部分小血管瘤因瘤内血栓、钙化、出血和纤维化等因素, 导致其强化方式不典型, 与肝脏其他肿瘤鉴别诊断有一定的难度。张晨彩等<sup>[15]</sup>研究发现能谱 CT 平扫对鉴别原发性肝癌和肝血管瘤有一定价值, 在 40~60 keV 单能量水平下血管瘤组的 CT 值均低于肝癌组; 而 110~140 keV 单能量水平下血管瘤组的 CT 值均高于肝癌组, 肝血管瘤组能谱曲线斜率及有效原子序数均低于肝癌组, 差异均有统计学意义。

因血管瘤内血供丰富, 其脂 (水) 浓度及血 (碘) 浓度均高于肝癌组, 具有一定的鉴别价值。贺太平等<sup>[13]</sup>研究发现肝血管瘤的动脉期及门脉期碘浓度均高于小肝癌、肝脓肿及肝脏小转移瘤, 差异均具有统计学意义。郁义星等<sup>[28]</sup>基于动脉期及门脉期能谱扫描发现动脉期 40~120 keV 单能量下 CT 值小血管瘤组均高于小肝癌组, 而门脉期 100~140 keV 小肝癌组均高于小血管瘤组, 小肝癌在动脉期和门脉期的标准化碘浓度 (normalized iodine concentration, NIC)、病灶和正常肝组织碘浓度比值 (lesion-to-normal hepatic tissue ratio, LNR) 均明显低于小血管瘤, 这可能与大部分小血管瘤血供丰富, 对比剂快速进入病灶并且能够充分地填充有关。

小肝癌组的钙 (脂肪) 浓度和脂肪 (钙) 浓度均高于小血管瘤组, 可能因小肝癌更易发生脂肪变性。Lv 等<sup>[29]</sup>对伴有肝硬化和不伴有肝硬化的小肝癌组和小血管瘤组对比发现, 在动脉期和门静脉期小血管瘤组的 NIC 和 LNR 明显高于小肝癌组, 动脉期和门脉期的碘浓度差值 (iodine concentration difference, ICD) 同样高于小肝癌组, 联合使用 NIC 和 LNR 诊断要优于使用单种能谱参数, 提高了诊断的灵敏度和特异度。李卫侠等<sup>[30]</sup>运用多种能谱参数对肝血管瘤组和肝癌组定量分析发现, 在动脉期 50 keV 的平均 CT 值是鉴别两者的最佳能谱参数, 阈值为 106.87 HU, 鉴别两者的敏感度和特异度分别为 90.3% 和 82.4%, 其次为碘浓度比 (iodine concentration ratio, ICR), 阈值为 0.61, 鉴别两者的敏感度和特异度分别为 87.1% 和 82.4%。该研究中动脉期和门脉期肝癌组 CT 值均高于肝血管瘤组, 与其他研究结果不同, 考虑是因该研究为分析两组病灶内不均质性差异而选择 ROI 包绕整个病灶, 导致病灶内未强化和强化不充分区域被纳入, 引起相应的测量数据差异。

李晓光等<sup>[31]</sup>应用能谱 CT 鉴别肝血管瘤和肝转移瘤研究发现, 肝血管瘤组动脉期 40~110 keV 各单能量下 CT 值均低于肝转移瘤组, 而门脉期 40~140 keV 及延迟期 40~120 keV 单能量下 CT 值均高于肝脏转移瘤组, 同时肝血管瘤组水-碘、水-钙、碘-钙基物质含量均高于肝脏转移瘤组, 两组间的增强三期能谱曲线斜率差异均有统计学意义。

能谱 CT 可提供单能量 CT 值、能谱曲线及碘浓度等多种能谱参数反映病灶的组织学和血供差异, 对鉴别肝血管瘤及肝其他恶性肿瘤均有较高的诊断效能, 但因部分研究间存在感兴趣区的测量差异, 仍需要更多的数据纳入和分析。

## 2.2 肝局灶性结节增生

肝脏局灶性结节增生 (focal nodular hyperplasia, FNH) 是肝脏常见的良性病变之

一, FNH 并非肿瘤, 而是与先天性血管畸形相关的中央星状纤维化区域周围的肝实质结节性增生所致<sup>[32]</sup>。大部分 FNH 病灶中央可见特征性纤维瘢痕, 但在有些小于 3 cm 的病灶中纤维瘢痕较为少见, FNH 与肝腺瘤、肝癌等富血供肿瘤在临床处理上有很大的区别, 因此病变间的准确诊断就显得尤为重要。Yu 等<sup>[33]</sup>研究发现 NIC 和 LNR 在鉴别肝细胞癌 (hepatocellular carcinoma, HCC) 和 FNH 具有较高的特异性, FNH 患者的 LNR 和 NIC 在动脉期和门脉期均明显高于 HCC 患者, 考虑因 FNH 有丰富供血动脉以及扩大的引流静脉和血窦所致, 而肝癌的血供类型和分化程度有关。当动脉期的 LNR 阈值为 4.33 时, 鉴别两者的诊断效能最佳, 分别具有 100% 的灵敏度和特异性。HCC 患者的脂肪 (钙) 浓度高于 FNH 患者, 可能与小肝癌更常发生脂肪变性有关。

李飞飞等<sup>[34]</sup>同样发现肝癌动脉期和门静脉期的 NIC、LNR 均低于 FNH, 具有较高的诊断效能。李卫侠等<sup>[35]</sup>纳入多个能谱参数分析发现鉴别 HCC 与 FNH 的最佳能谱定量参数为门静脉期 100 keV 的单能量平均 CT 值, 阈值为 77.38 HU 时, 鉴别两者的敏感度与特异度分别为 100% 和 90.3%, 其次为病灶动脉期 INR 鉴别两者的敏感度与特异度分别为 100% 和 71%。使用能谱参数联合血清学指标 AFP 能够提高肝癌和肝 FNH 鉴别诊断的灵敏度 (98.1%) 和准确性 (89.1%)<sup>[36]</sup>。

肝脏局灶性结节增生和肝腺瘤 (hepatocellular adenoma, HCA) 都是由肝动脉供血为主的富血供肿瘤, 其强化方式类似, 总体表现为“快进慢出”的强化特点, 但目前尚无能谱 CT 针对 FNH 和 HCA 的鉴别研究, 有待在日后的研究和临床应用中进一步补充和完善。

### 2.3 肝脓肿

肝脓肿 (hepatic abscess, HA) 是细菌、真菌或寄生虫等导致的肝脏感染性病变, 在脓肿形成早期或转入慢性阶段时不典型表现的肝脓肿可能与肝癌、肝转移瘤及胆管细胞癌等恶性肿瘤影像表现相似, 增加了鉴别诊断的难度<sup>[37]</sup>。Yu 等<sup>[38]</sup>研究发现基于能谱 CT 图像分析较常规 CT 相比提高了鉴别肝脓肿和肝细胞癌的灵敏度和特异性, 坏死性肝细胞癌实性成分的动脉期 LNR 高于肝脓肿, 而门脉期肝细胞癌的 NIC 和 LNR 低于肝脓肿壁; 肝细胞癌病灶内液性成分的动脉期 LNR、动脉期和门脉期的水 (碘) 浓度明显高于肝脓肿病灶, 差异均具有统计学意义, 这与肝细胞癌快进快出的强化特点及病灶内部的液化坏死成分有关, 相比于肝脓肿内部的脓液, 肝细胞癌内部以液化坏死为主而具有较高的水 (碘) 浓度。动脉期 LNR 的阈值为 1.52 时鉴别两者的诊断效能最高, 敏感性和特异性分别为 100% 和 91.7%。

Wang 等<sup>[26]</sup>对肝脓肿和肝转移瘤研究发现肝脓肿组的平扫 40~110 keV 下单能量 CT 值、能谱曲线斜率, 有效原子序数, 血 (水) 浓度值、脂 (水) 浓度值均小于肝转移瘤组, 而门脉期和延迟期肝脓肿组的 NIC 均大于肝转移瘤组 ( $P < 0.05$ )。平扫 40 keV 的 CT 值和延迟期的 NIC 对两者的鉴别诊断价值较高, 两者联合的敏感度和特异度最高分别为 89.3% 和 93.3%。使用能谱 CT 定量参数有助于准确鉴别肝脓肿与肝脏其他恶性肿瘤, 为临床早期诊断及治疗提供帮助。

### 2.4 肝细胞癌

肝细胞癌 (hepatocellular carcinoma, HCC) 是肝脏最常见的恶性肿瘤之一, 居于全球癌症相关死亡率第 3 位<sup>[39]</sup>。典型的影像学表现为动脉期明显强化和门脉期或延迟期的洗脱。能谱 CT 后处理形成的单能量图像和碘图提高了肿瘤和周围肝组织的对比度, 可以更清

晰地显示肿瘤边界和肿瘤血管，能谱参数碘浓度对于显示肝癌的血流动力学改变和新生血管形成有独特优势<sup>[40]</sup>。目前能谱 CT 在肝癌患者术前分期、治疗方案的选择以及预后评估都具有重要价值。

Pfeiffer 等<sup>[41]</sup>发现碘图在显示 HCC 的动脉期明显强化和门脉期的洗脱过程提供了更好的对比度，不仅优化了肝癌影像学特征的显示，同时还提供了定量参数碘浓度，更好地量化了肝癌诊断的影像学特征。Lv 等<sup>[42]</sup>发现 40~70 keV 的单能图像提高了小肝癌检出的灵敏度，并提高了图像质量，有利于小肝癌的诊断。Zhang 等<sup>[43]</sup>使用肝癌兔模型研究发现碘图中测得的碘浓度与毛细血管表面通透性，肝血流量和血容量呈正相关。在肝癌的逐步发展过程中，由于肿瘤血管生成而导致的异常动脉在肝高度异型增生结节中发展，并且在分化 HCC 中的数量明显增加<sup>[44]</sup>。能谱 CT 碘浓度能够敏感地反映病灶的血供变化，Gao 等<sup>[45]</sup>研究发现使用 1.99 作为动脉期 LNR 的诊断阈值鉴别肝癌性结节和肝硬化结节时诊断效能最佳，获得了 95.65% 的灵敏度和 91.30% 的特异度。

碘浓度还能够根据动脉血流量情况对肝癌经导管动脉化疗栓塞 (TACE) 进行术前预测<sup>[46]</sup>和术后评估碘油的沉积情况<sup>[47]</sup>。TACE 术是通过栓塞肿瘤的供血动脉使肿瘤部分或完全坏死从而达到治疗 HCC 的目的，通过测量碘摄入量间接反映病灶内的血供情况，可用于评估 TACE 术后的治疗反应<sup>[48]</sup>，Thaiss 等<sup>[49]</sup>发现碘浓度可作为监测 HCC 局部治疗反应有效的灌注标志物，拥有不逊于灌注 CT 的诊断效能同时明显降低了辐射剂量。Wang 等<sup>[50]</sup>也发现动脉期 NIC 对预测碘油沉积较好的肿瘤与无碘油沉积肿瘤具有很高的敏感性和特异性，TACE 术前病灶的动脉期 NIC 值  $\geq 0.18$  的患者生存率高于 TACE 术前动脉期 NIC 值  $< 0.18$  的患者 ( $P=0.028$ )。Liu 等<sup>[51]</sup>使用能谱 CT 最佳单能量图像、碘基图以及能谱 CT 特异性参数对 TACE 术后病灶检出的敏感度和特异度分别为 97% 和 94.4%，对小病灶的检出率和诊断效能明显优于常规 CT。周西等<sup>[52]</sup>同样发现使用 GSI 扫描模式检测 TACE 术后肿瘤复发或转移灶的灵敏度高 (70.10%) 且漏诊率 (11.34%) 低，同时对肿瘤包膜的检出率优于 MRI 检查。

肝癌的微血管侵犯是预后不良的重要危险因素之一，增加了肿瘤复发和转移的风险<sup>[53-54]</sup>。研究发现发生微血管侵犯的小肝癌组碘浓度、标准化碘浓度和能谱曲线斜率均明显高于未发生微血管侵犯组，使用 0.188 作为 NIC 的阈值，对于区分有无微血管侵犯的肿瘤，灵敏度为 81.3%，特异性为 79.6%<sup>[55]</sup>。当能谱曲线斜率阈值为 2.691 时，相应的灵敏度和特异度分别为 93.8% 和 79.6%。杨创勃等<sup>[56]</sup>同样发现动脉期 NIC 及能谱曲线斜率对于是否发生微血管侵犯的鉴别诊断价值优于其他能谱参数。病变的动脉期碘浓度和能谱曲线斜率反映了小肝癌发生微血管侵犯时肿瘤微血管的数量和微血管通透性增加，提高了诊断的准确性。Luo 等<sup>[57]</sup>研究发现动脉期 NIC 与肝癌病灶的微血管密度呈正相关，动脉期 NIC 值高于阈值的患者早期复发率明显高于阈值以下的患者，动脉期 NIC 可以作为肝癌术后早期复发的潜在预测生物标志物。Kim 等<sup>[58]</sup>发现在微血管侵犯组的 HCC 病灶周边 2 mm、4 mm 及病灶包含周边的容积 ROI 测得 NIC 值显著高于无微血管侵犯组，其中以病灶周边 2 mm 的 NIC 诊断效能最高，通过分析肿瘤内和肿瘤周围区域的 NIC 可以用于预测肝癌微血管侵犯。

## 2.5 肝转移瘤

肝脏因其解剖结构和双重血供特点是恶性肿瘤的常见转移器官之一。不同病变特征性的能谱曲线和碘浓度差异在肝转移瘤 (hepatic metastasis, HM) 和其他肿瘤的鉴别诊断

中有着重要价值, 不仅可反映肿瘤病灶之间的组织学类型同源性和差异性, 还可以定量分析病灶间的血供差异。

岳倩倩等<sup>[59]</sup>研究发现门静脉期时富血供肝转移瘤 (hypervascular hepatic metastasis, HVHM) 组的能谱参数 NIC、LNR 及能谱曲线斜率均高于肝细胞癌组, 门静脉期能谱曲线斜率对两者的鉴别诊断效能最高, 当能谱曲线斜率大于 1.42 时, 鉴别两组的敏感度、特异度分别为 90% 和 88.9%。甘郑宁等<sup>[60]</sup>也同样发现在门脉期上述参数鉴别富血供肝转移瘤和肝细胞癌的诊断效能较好, 考虑因肝癌表现为肝动脉供血为主而门静脉血供减少的快进快出特点, 而肝转移瘤因病灶边缘的炎性细胞浸润或血管内皮因子释放增加呈持续性强化, 廓清速度相对较慢, 在门静脉期两者的血供差异被放大, 富血供肝转移瘤的 NIC 和 LNR 明显高于肝细胞癌。同时有研究对富血供的神经内分泌肿瘤肝转移和肝细胞癌比较发现<sup>[61]</sup>, 肝细胞癌在动脉期的动脉衰减、碘摄取、NIU 和病灶与正常肝组织碘浓度比值 (lesion-to-liver-parenchyma ratio, LPR) 均高于肝转移瘤组, 其中 NIU 对鉴别两者具有约 100% 的敏感性和 90% 的特异性, 具有较高的参考价值。

杨传红等<sup>[14]</sup>对不同类型的肝转移瘤和肝细胞癌研究发现, HCC 在门脉期 50~70 keV 下 CT 值、碘浓度及有效原子序数均高于肝转移瘤组, 差异具有统计学意义。该研究进一步对尺寸相近的肝癌肝内转移灶组与肝外来源转移瘤组对比分析发现, 肝细胞癌转移灶组在动脉期和门脉期 50~70 keV 下的 CT 值、碘(水)浓度、铁(水)浓度、有效原子序数及标化后上述参数均高于肝转移瘤组。门脉期能谱参数差异间接反映出肝癌具有部分门静脉血供特点, 有助于肝癌和其他类型肝转移瘤之间的鉴别, 但该研究未针对病灶大小和转移瘤血供特点进行相应的分类研究。不同来源的肝转移瘤之间血供差异较大, 因此有必要进一步探索能谱 CT 对不同类型肝转移瘤的鉴别诊断和前瞻性用于鉴别肝转移瘤来源的价值。

### 3 小结和展望

目前能谱 CT 已经在肝脏肿瘤的鉴别诊断和疗效评估中得到了广泛的临床应用, 提高了肝脏病灶的检出率及诊断准确性。能谱 CT 具有高分辨率和多种定量参数等优势, 拥有不逊于 MRI 的图像质量和诊断性能, 但能谱 CT 对肝脏富血供病变的研究仍存在一些有待探索的方向, 如目前尚无能谱 CT 针对 FNH 和 HCA 两者鉴别诊断的研究。

能谱参数在临床诊断和治疗中应用广泛, 但因不同类型机器和扫描参数的差异, 不同能谱参数对病变的诊断阈值和临床价值仍需要多中心、大样本数据的纳入和准确的病理学支持。随着能谱 CT 成像技术地不断更新和发展, 能谱 CT 有望在日后的研究中为临床提供更精确的影像信息和数据支持。

### 参考文献

- [1] MARIN D, NELSON R C, SCHINDERA S T, et al. Low-tube-voltage, high-tube-current multidetector abdominal CT: Improved image quality and decreased radiation dose with adaptive statistical iterative reconstruction algorithm—initial clinical experience[J]. *Radiology*, 2010, 254(1): 145-153.
- [2] MARIN D, CHOUDHURY K R, GUPTA R T, et al. Clinical impact of an adaptive statistical iterative reconstruction algorithm for detection of hypervascular liver tumors using a low tube voltage, high tube current MDCT technique[J]. *European Radiology*, 2013, 23(12): 3325-3335.
- [3] SILVA A C, MORSE B G, HARA A K, et al. Dual-energy (spectral) CT: Applications in abdominal imaging[J]. *Radiographics*, 2011, 31(4): 1031-1046.

- [4] ALTENBERND J, HEUSNER T A, RINGELSTEIN A, et al. Dual-energy-CT of hypervascular liver lesions in patients with HCC: Investigation of image quality and sensitivity[J]. *European Radiology*, 2011, 21(4): 738-743.
- [5] 叶晓华, 周诚, 吴国庚, 等. CT 能谱单能量成像对不同肝脏肿瘤检出影响的初步探讨[J]. *中华放射学杂志*, 2011, 45(8): 718-722.  
YE X H, ZHOU C, WU G G, et al. Primary study on the detection of hepatic tumors with spectral CT monochromatic imaging[J]. *Chinese Journal of Radiology*, 2011, 45(8): 718-722. (in Chinese).
- [6] MATSUMOTO K, JINZAKI M, TANAMI Y, et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilovoltage switching: Improved image quality as compared with that obtained with conventional 120-kVp CT[J]. *Radiology*, 2011, 259(1): 257-262.
- [7] SHUMAN W P, GREEN D E, BUSEY J M, et al. Dual-energy liver CT: Effect of monochromatic imaging on lesion detection, conspicuity, and contrast-to-noise ratio of hypervascular lesions on late arterial phase[J]. *American Journal of Roentgenology*, 2014, 203(3): 601-606.
- [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]. *European Radiology*, 2019, 29(6): 2837-2847.
- [9] 古丽米拉·巴巴什, 周永, 文智, 等. 宝石能谱 CT 单能量成像对乏血供肝脏小转移瘤的应用价值[J]. *实用放射学杂志*, 2020, 36(12): 1952-1956.  
GULIMILA B, ZHOU Y, WEN Z, et al. The value of monochromatic reconstruction of gemstone spectral CT in the evaluation of hypovascular small metastases of liver[J]. *Journal of Practical Radiology*, 2020, 36(12): 1952-1956. (in Chinese).
- [10] GROSSE HOKAMP N, HOINK A J, DOERNER J, et al. Assessment of arterially hyper-enhancing liver lesions using virtual monoenergetic images from spectral detector CT: Phantom and patient experience[J]. *Abdominal Radiology*, 2018, 43(8): 2066-2074.
- [11] BONING G, FELDHAUS F, ADEL T S, et al. Clinical routine use of virtual monochromatic datasets based on spectral CT in patients with hypervascularized abdominal tumors-evaluation of effectiveness and efficiency[J]. *Acta Radiologica*, 2019, 60(4): 425-432.
- [12] YOON J H, CHANG W, LEE E S, et al. Double low-dose dual-energy liver CT in patients at high-risk of HCC: A prospective, randomized, single-center study[J]. *Investigative Radiology*, 2020, 55(6): 340-348.
- [13] 贺太平, 于勇, 段海峰, 等. CT 能谱成像对肝脏局灶性病变更鉴别诊断价值的初步研究[J]. *实用放射学杂志*, 2014, 30(9): 1506-1509.  
HE T P, YU Y, DUAN H F, et al. Diagnostic value of spectral CT imaging in the differentiation of focal liver disease: A preliminary study[J]. *Journal of Practical Radiology*, 2014, 30(9): 1506-1509. (in Chinese).
- [14] 杨传红, 于德新, 王琳琳, 等. CT 能谱成像在肝细胞癌与肝转移瘤鉴别中的价值[J]. *医学影像学杂志*, 2014, 24(11): 1931-1935.  
YANG C H, YU D X, WANG L L, et al. Values of spectral CT imaging in differential diagnosis of hepatic carcinoma and liver metastasis[J]. *Journal of Medical Imaging*, 2014, 24(11): 1931-1935. (in Chinese).
- [15] 张晨彩, 王新文, 范凯, 等. 能谱 CT 平扫对原发性肝癌及肝血管瘤鉴别诊断的价值[J]. *实用放射学杂志*, 2020, 36(9): 1426-1429.  
ZHANG C C, WANG X W, FAN K, et al. The value of energy spectrum CT in differential diagnosis of primary hepatic carcinoma and hepatic hemangioma[J]. *Journal of Practical Radiology*, 2020, 36(9): 1426-1429. (in Chinese).
- [16] 王楠, 刘爱连, 陈安良, 等. 双能 CT 平扫 GSI 综合分析对肝脓肿与肝转移瘤的鉴别诊断价值[J]. *放射学实践*, 2018, 33(7): 704-707.  
WANG N, LIU A L, CHEN A L, et al. Comprehensive analysis of unenhanced dual-energy CT GSI in the differential diagnosis of abscess and metastases of liver[J]. *Radiologic Practice*, 2018, 33(7): 704-707. (in Chinese).
- [17] 徐明哲, 刘爱连, 孙美玉, 等. 单源双能 CT 平扫能谱曲线对不典型小肝癌与异常灌注灶鉴别的价值[J]. *中国临床医学影像杂志*, 2017, 28(1): 44-48.  
XU M Z, LIU A L, SUN M Y, et al. Value of spectrum curve from single-source dual-energy noncontrast CT imaging for identifying atypical small hepatocellular carcinoma from hepatic perfusion disorders[J]. *Journal of China Clinic Medical Imaging*, 2017, 28(1): 44-48. (in Chinese).
- [18] WANG Q, SHI G, QI X, et al. Quantitative analysis of the dual-energy CT virtual spectral curve for focal liver lesions characterization[J]. *European Journal of Radiology*, 2014, 83(10): 1759-1764.

- [19] LAUKAMP K R, HO V, OBMANN V C, et al. Virtual non-contrast for evaluation of liver parenchyma and vessels: Results from 25 patients using multi-phase spectral-detector CT[J]. *Acta Radiologica*, 2020, 61(8): 1143-1152.
- [20] TIAN S F, LIU A L, LIU J H, et al. Application of computed tomography virtual noncontrast spectral imaging in evaluation of hepatic metastases: a preliminary study[J]. *Chinese Medical Journal (English)*, 2015, 128(5): 610-614.
- [21] HEYE T, NELSON R C, HO L M, et al. Dual-energy CT applications in the abdomen[J]. *American Journal of Roentgenology*, 2012, 199(S5): S64-70.
- [22] PATINO M, PROCHOWSKI A, AGRAWAL M D, et al. Material separation using dual-energy CT: Current and emerging applications[J]. *Radiographics*, 2016, 36(4): 1087-105.
- [23] MUENZEL D, LO G C, YU H S, et al. Material density iodine images in dual-energy CT: Detection and characterization of hypervascular liver lesions compared to magnetic resonance imaging[J]. *European Journal of Radiology*, 2017, 95(95): 300-306.
- [24] FORNARO J, LESCHKA S, HIBBELN D, et al. Dual- and multi-energy CT: Approach to functional imaging[J]. *Insights into Imaging*, 2011, 2(2): 149-159.
- [25] 李小虎, 余永强, 王万勤, 等. CT 能谱成像对肾结石成分分析的初步研究[J]. *中华放射学杂志*, 2011, 45(12): 1216-1219.
- LI X H, YU Y Q, WANG W Q, et al. Spectral CT imaging in the evaluation of composition of kidney stones[J]. *Chinese Journal of Radiology*, 2011, 45(12): 1216-1219. (in Chinese).
- [26] WANG N, JU Y, WU J, et al. Differentiation of liver abscess from liver metastasis using dual-energy spectral CT quantitative parameters[J]. *European Journal of Radiology*, 2019, 113: 204-208.
- [27] MULÉ S, PIGNEUR F, QUELEVER R, et al. Can dual-energy CT replace perfusion CT for the functional evaluation of advanced hepatocellular carcinoma?[J]. *European Radiology*, 2018, 28(5): 1977-1985.
- [28] 郁义星, 林晓珠, 陈克敏, 等. CT 能谱成像在鉴别小肝癌和小血管瘤中的价值[J]. *实用放射学杂志*, 2012, 28(11): 1702-1706.
- YU Y X, LIN X Z, CHEN K M, et al. The value of spectral CT imaging in differential diagnosis of small hepatocellular carcinoma and small hepatic hemangioma[J]. *Journal of Practical Radiology*, 2012, 28(11): 1702-1706. (in Chinese).
- [29] LVP, LIN X Z, LI J, et al. Differentiation of small hepatic hemangioma from small hepatocellular carcinoma: Recently introduced spectral CT method[J]. *Radiology*, 2011, 259(3): 720-729.
- [30] 李卫侠, 林晓珠, 张静, 等. CT 能谱成像在肝细胞肝癌与肝血管瘤鉴别诊断中的价值[J]. *放射学实践*, 2018, 33(9): 882-887.
- LI W X, LIN X Z, ZHANG J, et al. Study of CT spectral imaging in the differentiation of hepatocellular carcinoma and hepatic hemangioma[J]. *Radiologic Practice*, 2018, 33(9): 882-887. (in Chinese).
- [31] 李晓光, 孙吉林. 宝石能谱 CT 在鉴别肝脏血管瘤与转移瘤中的应用价值[J]. *临床合理用药杂志*, 2018, 11(14): 10-12, 17.
- LI X G, SUN J L. The application value of gemstone spectral CT in the differential diagnosis of liver hemangioma and metastases[J]. *Chinese Journal of Clinical Rational Drug Use*, 2018, 11(14): 10-12, 17. (in Chinese).
- [32] DIOGUARDI BURGIO M, RNOT M, SALVAGGIO G, et al. Imaging of hepatic focal nodular hyperplasia: pictorial review and diagnostic strategy[J]. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*, 2016, 37(6): 511-524.
- [33] YU Y, LIN X, CHEN K, et al. Hepatocellular carcinoma and focal nodular hyperplasia of the liver: Differentiation with CT spectral imaging[J]. *European Radiology*, 23(6): 1660-1668.
- [34] 李飞飞, 沈加林. 能谱 CT 在诊断鉴别肝癌与 FNH 中的应用价值[J]. *中华普外科手术学杂志(电子版)*, 2017, 11(5): 387-389.
- LI F F, SHEN J L. Clinical value of energy spectrum CT in the differential diagnosis of liver cancer and FNH[J]. *Chinese Journal of Operative Procedures of General Surgery (Electronic Version)*, 2017, 11(5): 387-389. (in Chinese).
- [35] 李卫侠, 林晓珠, 郁义星, 等. CT 能谱成像在肝细胞肝癌与局灶性结节增生鉴别诊断中的应用研究[J]. *临床放射学杂志*, 2019, 38(3): 452-457.
- LI W X, LIN X Z, YU Y X, et al. Differentiation of hepatocellular carcinoma from focal nodular hyperplasia with CT spectral imaging[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2019, 38(3): 452-457. (in Chinese).
- [36] XU R, WANG J, HUANG X, et al. Clinical value of spectral CT imaging combined with AFP in identifying liver cancer and hepatic focal nodular hyperplasia[J]. *Journal of the Balkan Union of Oncology*, 2019, 24(4): 1429-1434.



- [37] 李炳荣, 肖扬锐, 罗项超, 等. 肝内胆管细胞癌与不典型肝脓肿的 MRI 鉴别诊断[J]. 中华放射学杂志, 2019, 53(5): 370-374.  
LI B R, XIAO Y R, LUO X C, et al. Comparison and differentiation between intrahepatic cholangiocarcinoma and atypical liver abscess in MRI[J]. Chinese Journal of Radiology, 2019, 53(5): 370-374. (in Chinese).
- [38] YU Y, GUO L, HU C, et al. Spectral CT imaging in the differential diagnosis of necrotic hepatocellular carcinoma and hepatic abscess[J]. Clinical Radiology, 2014, 69(12): e517-524.
- [39] CHOO S P, TAN W L, GOH B K P, et al. Comparison of hepatocellular carcinoma in Eastern versus Western populations[J]. Cancer, 2016, 122(22): 3430-3446.
- [40] ZHOU Y, GAO J B, XU H, et al. Evaluation of neovascularization with spectral computed tomography in a rabbit VX2 liver model: A comparison with real-time contrast-enhanced ultrasound and molecular biological findings[J]. The British Journal of Radiology, 2015, 88(1055): 20140548.
- [41] PFEIFFER D, PARAKH A, PATINO M, et al. Iodine material density images in dual-energy CT: Quantification of contrast uptake and washout in HCC[J]. Abdominal radiology (New York), 2018, 43(12): 3317-3323.
- [42] LV P, LIN X Z, CHEN K, et al. Spectral CT in patients with small HCC: Investigation of image quality and diagnostic accuracy[J]. European Radiology, 2012, 22(10): 2117-2124.
- [43] ZHANG L J, WU S, WANG M, et al. Quantitative dual energy CT measurements in rabbit VX2 liver tumors: Comparison to perfusion CT measurements and histopathological findings[J]. European Journal of Radiology, 2012, 81(8): 1766-1775.
- [44] MATSUI O, KOBAYASHI S, SANADA J, et al. Hepatocellular nodules in liver cirrhosis: Hemodynamic evaluation (angiography-assisted CT) with special reference to multi-step hepatocarcinogenesis[J]. Abdominal Radiology, 2011, 36(3): 264-272.
- [45] GAO L, LV Y, JIN Y, et al. Differential diagnosis of hepatic cancerous nodules and cirrhosis nodules by spectral CT imaging: A feasibility study[J]. Acta Radiologica, 2019, 60(12): 1602-1608.
- [46] 王军, 沈加林. 能谱 CT 预测肝癌 TACE 术后碘油沉积情况的初步研究[J]. 临床放射学杂志, 2017, 36(7): 1029-1032.  
WANG J, SHEN J L. The value of energy spectral CT in predicting lipiodol accumulation of hepatocellular carcinoma after TACE[J]. Journal of Clinical Radiology, 2017, 36(7): 1029-1032. (in Chinese).
- [47] 邢古生, 王爽, 李忱瑞, 等. 宝石能谱 CT 成像碘含量测定法在肝细胞癌患者经动脉化疗栓塞术后随访中的应用[J]. 中华肿瘤杂志, 2015, 37(3): 208-212.  
XING G S, WANG S, LI C R, et al. Value of quantitative iodine-based material decomposition images with gemstone spectral CT imaging in the follow-up of patients with hepatocellular carcinoma after TACE treatment[J]. Chinese Journal of Oncology, 2015, 37(3): 208-212. (in Chinese).
- [48] ALTENBERND J, WETTER A, FORSTING M, et al. Treatment response after radioembolisation in patients with hepatocellular carcinoma—an evaluation with dual energy computed-tomography[J]. European Journal of Radiology Open, 2016, (3): 230-235.
- [49] THAISS W M, HABERLAND U, KAUFMANN S, et al. Dose optimization of perfusion-derived response assessment in hepatocellular carcinoma treated with transarterial chemoembolization: Comparison of volume perfusion CT and iodine concentration[J]. Academic Radiology, 2019, 26(9): 1154-1163.
- [50] WANG J, SHEN J L. Spectral CT in evaluating the therapeutic effect of transarterial chemoembolization for hepatocellular carcinoma: A retrospective study[J]. Medicine (Baltimore), 2017, 96(52): e9236.
- [51] LIU Q Y, HE C D, ZHOU Y, et al. Application of gemstone spectral imaging for efficacy evaluation in hepatocellular carcinoma after transarterial chemoembolization[J]. World Journal of Gastroenterology, 2016, 22(11): 3242-3251.
- [52] 周西, 刘启榆, 杨伟, 等. CT 能谱成像与 MRI 在肝细胞癌 TACE 术后疗效评估中的对比研究[J]. 肝脏, 2020, 25(4): 409-412.
- [53] DU M, CHEN L, ZHAO J, et al. Microvascular invasion (MVI) is a poorer prognostic predictor for small hepatocellular carcinoma[J]. BioMed Central Cancer, 2014, 14(1): 38-44.
- [54] LIM K C, CHOW P K, ALLEN J C, 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]. Annals of Surgery, 2011, 254(1): 108-113.
- [55] YANG C B, ZHANG S, JIA Y J, et al. Dual energy spectral CT imaging for the evaluation of small hepatocellular carcinoma microvascular invasion[J]. European Journal of Radiology, 2017, 95: 222-227.

- [56] 杨创勃, 王军, 段海峰, 等. 宝石能谱CT定量评估小肝癌微血管侵犯的临床研究[J]. 实用放射学杂志, 2016, 32(6): 879-883.  
YANG C B, WANG J, DUAN H F, et al. Quantitative assessment of microvascular invasion of small hepatocellular carcinoma using gemstone spectral CT[J]. Journal of Practical Radiology, 2016, 32(6): 879-883. (in Chinese).
- [57] LUO N, LI W, XIE J, et al. Preoperative normalized iodine concentration derived from spectral CT is correlated with early recurrence of hepatocellular carcinoma after curative resection[J]. European Radiology, 2021, 31: 1872-1882.
- [58] KIM T M, LEE J M, YOON J H, et al. Prediction of microvascular invasion of hepatocellular carcinoma: Value of volumetric iodine quantification using preoperative dual-energy computed tomography[J]. Cancer Imaging, 2020, 20(1): 60-70.
- [59] 岳倩倩, 王新怡, 杨志强, 等. 富血供肝脏转移瘤与肝细胞肝癌的能谱CT成像定量分析[J]. 山东大学学报(医学版), 2016, 54(7): 50-55.  
YUE Q Q, WANG X Y, YANG Z Q, et al. quantitative analysis of spectral CT imaging on hypervascular hepatic metastasis and hepatocellular carcinoma[J]. Journal of Shandong University (Health Sciences), 2016, 54(7): 50-55. (in Chinese).
- [60] 甘郑宁, 马梦雪, 严小娟. 能谱CT成像碘物质定量分析在肝细胞癌鉴别诊断中的应用价值[J]. 肝脏, 2020, 25(7): 695-698.  
GAN Z N, MA M X, YAN X J. Application value of quantitative assessment of iodine concentration by CT energy spectral imaging in differential diagnosis of hepatocellular carcinoma[J]. Chinese Hepatology, 2020, 25(7): 695-698. (in Chinese).
- [61] KALTENBACH B, WICHMANN J L, PFEIFER S, et al. Iodine quantification to distinguish hepatic neuroendocrine tumor metastasis from hepatocellular carcinoma at dual-source dual-energy liver CT[J]. European Journal of Radiology, 2018, 105: 20-24.

## Application and Research Progress of Spectral CT in Hypervascular Hepatic Lesions

PENG Jiaxuan, JIANG Guangbing<sup>✉</sup>, JIANG Lun

(Department of radiology, Suizhou Hospital, Hubei University of Medicine, Suizhou 441300, China)

**Abstract:** Liver lesions are a common disease in our clinical work. Early intervention and accurate diagnosis are very important for treatment selection and improving the survival of patients. Spectrum CT, as new imaging technology, can provide single-energy imaging and multiple energy spectrum parameters for quantitative and qualitative evaluation of liver diseases, especially for highlighting the blood supply characteristics of liver diseases, which are contributed to the early detection, diagnosis and postoperative evaluation. This article reviews the application and research progress of spectral CT in those hypervascular liver lesions.

**Keywords:** spectral imaging; hypervascular liver lesions; tomography



**作者简介:** 彭佳璇(1995—),女,湖北医药学院影像医学与核医学专业在读硕士研究生,主要从事腹部肿瘤影像诊断工作, Tel: 15571774756, E-mail: 641995441@qq.com; 江广斌<sup>✉</sup>(1976—),男,湖北医药学院附属随州医院放射科主任医师、副教授、硕士研究生导师,主要从事腹部肿瘤及血管疾病的影像诊断与微创治疗工作, Tel: 17720270721, E-mail: jgb126@126.com。