

双层探测器光谱 CT 在肿瘤疾病的临床应用进展

崔百强, 马娅琼, 王文娜, 柏启州, 苟云久

【摘要】 双层探测器光谱 CT 基于能谱 CT 探测器, 采用立体结构式设计, 上下两层分布有不同的晶体闪烁物质, 可根据不同组织对光子能量吸收系数的差异来区分组织, 在图像窗宽与窗位不变的情况下, 无需增加辐射剂量便可获得虚拟单能量图像(VMI), 且低能 VMI 可以有效的提高对比剂的对比度, 这对区分肿瘤与正常组织有重要价值。因此, 本文就光谱 CT 成像在肿瘤分期、鉴别诊断、热消融等方面的应用进行综述, 旨在为光谱 CT 临床应用及研究提供新思路。

【关键词】 双层光谱探测器; 体层摄影术, X 线计算机; 肿瘤

【中图分类号】 R814.42; R730.4 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2022)07-0904-06

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2022.07.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



70 年代至今, 计算机断层扫描(CT)技术迭代更新, 从传统 CT 发展到如今的光谱 CT, 实现了从单纯解剖成像到功能成像的转变^[1]。传统 CT 成像基于组织衰减系数来区分密度差异, 但对软组织分辨力较差, 有时难以鉴别肿瘤浸润和纤维增生反应。随后出现的双源 CT 和快速管电压切换的能谱 CT, 实现了物质整合与分离, 提高了成像质量, 但由于投影数据域解析存在时间或空间上不完全匹配的问题, 无法消除原始数据域的反相关噪声^[2]。新兴的光谱 CT 技术是基于双层能谱探测器, 具有多参数成像能谱 CT 的特点(如单能量成像、物质分离、能谱曲线、提高软组织对比度等)^[3], 其在扫描前不用预判是否需要双能量扫描, 没有器官和扫描视野的限制, 而且高、低能两套数据集在空间和时间上完全配准, 有助于大幅度降低能谱图像的噪声^[4-6]。目前, 光谱 CT 在人体肿瘤的诊疗中均有广泛的应用, 且相关研究日渐成熟, 本文就光谱 CT 成像在肿瘤分期、鉴别诊断、热消融等方面的应用进行系统介绍。

成像原理及技术应用

光谱 CT 采用立体结构式设计, 上下两层分布有不同的晶体闪烁物质。上层探测器采用纳米钽金属为基质的闪烁晶体, 接收低能光子, 而下层采用稀土陶瓷材质感光材料和高分子氧化钨, 接收高能光子。为避

免上下层串扰^[7], 高能和低能光子分别通过侧置的光电二极管, 并行传输光子信息, 光子信息转化为电信号后通过数据处理软件再转化为原始数字信号数据, 原始数据在投影数据域内时间和空间上完全匹配并解析重建为全息光谱图像基图^[4-6, 8-9], 不仅可生成混合能量的传统图像(conventional image, CI), 还可生成光谱图像, 其包括动脉期和静脉期的 40~200 keV 虚拟单能量图像(virtual monoenergetic image, VMI)和物质分离图像(碘密度图、尿酸图、虚拟平扫图、有效原子序数图等), 从而为肿瘤疾病的诊断提供更多参考信息^[5, 10]。

能谱 CT 的低能 VMI 虽然可以提高对比剂的对比度, 强化肿瘤组织与正常组织的差异, 但同时也增加了图像噪声。而新兴的光谱 CT 由于获取的高、低能两套数据集在空间和时间上完全配准, 大幅度降低图像的噪声, 避免了能谱 CT 经常需要二次检查的弊端^[11], 理论上可在更短的时间内获得更加清晰的成像图像, 有利于提高病灶的检出率^[5, 12-14], 尤其对于富血供病灶, 由于更多的碘对比剂流入, 组织碘密度增加, 与周围正常组织的强化对比会更加显著。因此, 光谱 CT 在不增加图像噪声的情况下, 提高了图像分辨率, 可为疾病诊断与治疗提供相应的依据, 具有一定的研究价值与应用前景。

光谱 CT 成像在肿瘤分期中的应用

1. 口腔癌和咽喉癌

口腔癌和咽喉癌的诊断需要具有较高敏感度和特异度的成像设备, 还需足够的空间分辨率来评估肿瘤边缘以及邻近结构的关系^[15-16]。MRI 是头颈部肿瘤诊断的金标准, 但对于吞咽困难或者正常解剖结构改变的患者来说, 难以保持长时间姿势不变, 降低了

作者单位: 730000 兰州, 甘肃中医药大学第一临床医学院(崔百强); 730000 兰州, 甘肃省人民医院胸外一科(崔百强、柏启州、苟云久), 放射科(马娅琼、王文娜)

作者简介: 崔百强(1994-), 男, 硕士研究生, 住院医师, 黑龙江齐齐哈尔甘南县人, 主要从事胸部肿瘤基础研究。

通讯作者: 苟云久, E-mail: gouyunjiu@163.com

基金项目: 国家卫健委胃肠肿瘤诊治重点实验室(NLDTG2020023); 甘肃省卫生健康行业科研管理项目(GSWSKY2020-50); 甘肃省自然科学基金(20JR10RA388); 甘肃省人民医院国家级科研项目培育计划(19SYPYB-28); 兰州市城关区科技计划人才创新创业项目(2020RCCX0010)

MRI 的诊断效能。传统 CT 具有摄片过程快速、成本相对较低的优势而被广泛使用,但对组织间的分辨力有限。而光谱 CT 可以根据不同组织对光子能量吸收系数的差异来区分组织。Fabian 等^[17]证实,光谱 CT 40 keV VMI 相对于 CI 具有更高的组织对比度,可量化肿瘤碘摄取值,提高原发性和复发性头颈部位肿瘤诊断及分期的准确性。

2. 食管癌

食管癌的总生存率约为 12%~20%,是全球癌症相关死亡重要原因之一^[18]。而明确治疗前分期对确定食管癌的治疗方案至关重要,早期进行食管切除手术可显著改善患者预后^[19-20]。超声内镜是食管肿瘤分期的重要参考标准,传统 CT 则为术前评估的重要组成部分,主要用于评估肿瘤转移灶以及周围器官的毗邻情况,但对于局部肿瘤的成像显影并不清晰。多项研究^[21-23]发现,VMI 和碘密度图在各种恶性疾病的分期中具有额外的诊断价值。Zopfs 等^[24]研究发现,在食管原发肿瘤评估方面,碘密度图评分最高,而血管描绘上更倾向采用 40 keV VMI。虽然光谱 CT 多参数成像在区分肿瘤浸润方面有限,但其低能 VMI 结合碘密度图的方式提高了治疗前食管原发肿瘤、动静脉血管及周围淋巴结图像的分辨率。

3. 胰腺导管腺癌

胰腺导管腺癌(pancreatic ductal adenocarcinoma, PDAC)是一种全身恶性肿瘤,恶性程度高^[25],而典型的 PDAC 在传统 CT 影像上表现为血管化程度较低的低密度影,与邻近的胰腺实质之间密度差异很小,约有 14% 的 PDAC 传统 CT 难以鉴别^[26-27],但光谱 CT 能够获取相同时间及空间分辨率图像,并在投影数据域采用反相关噪声算法进行图像处理,从而减少光谱 CT 整个能量谱中的噪声^[28-29]。Nagayama 等^[30]发现,光谱 CT 可以改善 PDAC 成像质量,尤其是静脉期肿瘤 40 keV VMI 在评估胰腺周围静脉和肝转移方面效果最佳,并且噪声的可感知性较低,有助于提高胰腺肿瘤分期的准确性。

4. 直肠癌

直肠癌是临床上常见的恶性肿瘤之一^[31,32],与结肠癌相比,年轻患者的五年总体生存率为 66.5%,近十年来发病率和死亡率明显上升^[33-34]。目前临床上多采用 MRI 与 MSCT 进行直肠癌术前分期。但肿瘤周围伴有炎性反应区时,其影像表现与肿瘤侵犯相似,MRI 和 MSCT 较难甄别肿瘤边缘异常信号来源,因此可能导致肿瘤过度分期^[35-36]。谭晶文等^[37]研究发现,40 keV VMI 质量最好,对直肠癌 T 分期的符合率约为 67.4% ($P < 0.05$),术前诊断局部进展(T3、T4)的诊断率约为 83.7%,特异度约为 58.8% ($P < 0.05$)。新

型光谱 CT 可提高术前直肠癌 T 分期的符合率,结合光谱 CT VMI 在一定程度上可以弥补传统 MRI 和 MSCT 对直肠肿瘤过度分期的不足,进而提高直肠肿瘤分期的准确性。此外,Sauter 等^[38]首次研究了 MRI 与光谱 CT 成像之间的关系,发现碘浓度值(Iodine concentration, IC)与 MRI 表观扩散系数具有极好相关性($r = 0.73, P = 0.01$)。因此,当存在 MRI 检查禁忌时,光谱 CT 可能成为评估直肠癌分期及疗效的首选成像方式。

光谱 CT 成像在肿瘤鉴别诊断中的应用

1. 肺癌

肿瘤病灶定位判断一般的影像均可较清楚显示,但需注意原发瘤与转移瘤的鉴别^[39]。随着低剂量计算机断层扫描应用于肺癌筛查,孤立性肺结节(solitary pulmonary nodules, SPNs)的检出率明显升高。然而,区分恶性 SPNs 和其他肺部疾病仍然是一个巨大的挑战^[40],传统 CT 诊断 SPNs 主要基于其形态学特征^[41],增强 CT 对显著重叠的良恶性病变的鉴别存在困难。虽然能谱 CT 可通过各种能谱参数来定量评估肺结节^[42-45],但能谱 CT 因设备和研究样本之间的差异会影响到研究的结果和结论^[41,44]。最新的光谱 CT 相对于其它能谱 CT 最大的优势在于无需预先设置双能量协议,并且可获得精确的光谱参数及可重复性的测量数据^[46]。Wen 等^[47]研究表明,在鉴别 SPNs 良恶性时,光谱 CT 的静脉期标准化碘值、HU 曲线斜率和 40 keV VMI 的诊断能力要优于动脉期,静脉期标准化碘值诊断 SPNs 良恶性的效能最高。值得注意的是,在鉴别小细胞肺癌和非小细胞肺癌时,动脉期的光谱参数诊断效能高于静脉期,非小细胞肺癌组测量值(40 keV VMI、标准化碘值、HU 曲线斜率)明显高于小细胞肺癌组($P < 0.05$)。

2. 胸腺瘤

胸腺瘤是前纵膈常见的肿瘤,手术是其治疗的首选方式,完整切除对患者的预后十分重要,传统 CT 是评估胸腺瘤的首选方式^[48],而纵膈淋巴瘤是一种位于前纵膈的淋巴瘤,首选化疗,由于两者在 CT 影像学特征有很大的相似性^[49],传统 CT 很难鉴别两者差异。Xie 等^[50]鉴别纵膈淋巴瘤和胸腺瘤的研究发现,光谱 CT 在静脉期区分纵膈淋巴瘤和胸腺瘤方面具有很高的敏感度和特异度,可通过光谱 CT HU 曲线斜率结合标准化碘值以及图像形态特征的方式对二者加以鉴别。

3. 肝癌

传统 CT 广泛应用于肝脏肿瘤术前分期及治疗后效果评估,与 MRI 相比,对肝内转移的敏感度较低,虽

然通过各种技术改善图像质量(如优化对比剂的注入^[51]、降低管电压^[52]及迭代重建算法^[53]),图像噪声对肝内转移微小灶诊断依旧带来了巨大挑战^[54]。Nagayama 等^[55]研究发现,40~200 keV VMI 的噪声始终低于传统 CT($P<0.01$),40~70 keV VMI 具有更好的客观和主观图像质量。对于大于 1 cm 或对比度较高(约 45 HU)的病灶在传统图像上容易发现,而小于 7 mm 或对比度低的病灶(约 20~25 HU)在传统图像上很难察觉,但在光谱 CT 40 keV VMI 上较易发现。光谱 CT 40~70 keV VMI 在评估肝内转移改善了成像质量,提高了病变的可检测性。

光谱 CT 成像在肿瘤热消融中的应用

热消融技术包括射频消融、微波消融及高强度聚焦超声消融^[56],已被广泛应用于肝癌、肺癌、肾癌、前列腺癌、肾上腺肿瘤等恶性实体肿瘤^[57]。对于肝脏早期肿瘤,指南建议手术切除或肝移植,由于解剖位置或肿瘤多发因素的影响,仅部分患者有机会接受手术治疗或肝移植。实体肿瘤消融手术经过不断改进与完善,由微波刀发展到了影像引导下的微波治疗针式天线^[58]。传统 CT 是热消融手术的引导方式之一,微波射频消融天线定位的准确性很大程度上决定了手术是否成功。但金属微波天线因波束硬化、光子饥饿及散射产生了图像伪影,为其定位辨识带来很大的困扰。多项研究^[59-60]表明,高能 VMI 图像可以减少伪影,提高诊断效能。Yoo 等^[61]对 33 例骨科金属植入物 50~200 keV VMI 进行了研究,结果显示 110~130 keV 为 VMI 最佳能级范围。Wang 等^[62]采用 VX2 兔肿瘤模型研究了光谱 CT VMI 图像,结果显示在 170~200 keV VMI 及 160~200 keV VMI 时观察到金属伪影减少,主观评分上具有良好的一致性($ICC=0.925$),140~200 keV VMI 时,相邻肝组织的诊断效能高于传统 CT,而 170~200 keV VMI 是减少消融区周围金属伪影、降低图像噪声、确保图像对比度及提高主观图像质量的最佳观察能级。

其它

1. 光谱 CT 与肿瘤治疗后评价

近年来研究^[5,12-14,42]发现,肿瘤病灶强化程度与血管密度有着密切联系,组织血管的碘吸收率不同,碘值、CT 值等参数也随之不同。在定量分析上,碘密度图能够反映组织碘浓度的动态变化,可作为一种新的量化指标用于评估肿瘤治疗效果,是能谱 CT 研究的热点之一。如肝肿瘤中标准化碘浓度可用于监测 VEGF 受体激酶抑制剂 AG-013736 的治疗效果^[63],或当肿瘤经过放化疗、射频消融及靶向治疗后,肿瘤大

小、水含量以及碘含量可发生变化^[64-65]。光谱 CT 多参数成像可以监测肿瘤组织灌注情况以及代谢的改变,以此评估肿瘤疗效,可为肿瘤下一步治疗提供更多依据。

2. 光谱 CT 与肿瘤标志物

光谱 CT 获取的多参数成像数据,可对肿瘤进行量化分析。多项研究^[66-68]证实 Ki-67 增殖活性与肺腺癌的患者预后相关。Chen 等^[69]能谱 CT 研究中,肺腺癌结节 Ki-67 肿瘤标志物标记指数与 40 keV VMI 和 70 keV VMI 呈中度正相关,VMI 70 keV 图像参数可以提示肺腺癌的增殖程度。Lin 等^[70]发现,PD-L1 阳性表达组数据显著高于阴性表达组,能谱 CT 成像参数可用于区分肺腺癌 PD-L1 的表达状态。Moon 等^[71]研究发现,延迟期 40 keV VMI 对乳腺癌表现出最大的诊断效能,而动脉期 40 keV VMI 在预测乳腺癌患者的预后方面有额外帮助。

3. 光谱 CT 与人工智能医学影像诊断

大数据背景下,人工智能技术发展迅速,新的算法不断优化完善。临床应用的人工智能软件主要通过卷积神经网络对输入图像特征提取并通过大样本数据进行训练构建预测模型。虽然光谱 CT 多参数成像研究较少,但光谱 CT 成像不仅可以提取 VMI 图像特征,还可结合更多的定量参数。能谱曲线代表不同物质成分的 CT 值随着能级变化,可根据曲线形态及斜率的不同对病灶及正常组织的成分差异进行鉴别,如 AI^[72]等通过能谱曲线获得了多能量纹理特征,采用机器学习,证明了多能量纹理分析比传统 CT 的单能量纹理分析具有更好的诊断效能。徐鹤等^[73]基于能谱 CT 成像提取了 9 个最优影像组学特征,结合能谱成像定量参数构建联合模型,该模型对肺部良恶性病变的鉴别诊断效能明显优于临床模型和能谱 CT 定量参数模型。

优势与局限

相对于能谱 CT,光谱 CT 解决了低能和高能两套数据集在空间和时间上不能完全配准的问题,大幅度提高了成像质量。低能 VMI 在鉴别多种肿瘤分期及肿瘤良恶性上更具优势,而高能 VMI 可抑制金属伪影。此外,光谱 CT 获取的物质分离数据不仅可用于区分肿瘤良恶性,并可提高转移灶与新病灶的鉴别度,还可用于评估人工智能医学影像诊断及肿瘤治疗疗效等。但光谱 CT 同样存在一些不足,目前相关光谱 CT 的研究样本数目相对较少,且不同地域的光谱 CT 成像参数调试存在差异。相对于有创检查,光谱 CT 在评估肿瘤淋巴结转移的特异度及确定肿瘤浸润程度上依旧有限,碘定量诊断肿瘤、治疗效果评估以及患者预

后评估等方面还需待进一步研究。

小结与展望

光谱 CT 基于双层能谱探测器设计,能够并行吸收高、低能光子信息,实现同源、同向、同时及同步能量的分离扫描。在改善肿瘤图像质量、降低图像噪声等方面效果显著,且多种能谱参数数据可用于评估患者术前分期、治疗效果及评估预后。近年来卷积神经网络技术迅速发展,人工智能应用于光谱 CT 多参数成像数据领域,可实现更高精度、更智能化的图像处理,以更好地甄别肿瘤分期、评估治疗效果及预后。

参考文献:

- [1] Megibow AJ, Kambadakone A, Ananthakrishnan L. Dual-energy computed tomography: image acquisition, processing, and workflow[J]. Radiol Clin North America, 2018, 56(4): 507-520.
- [2] Washio H, Ohira S, Karino T, et al. Accuracy of quantification of iodine and hounsfield unit values on virtual monochromatic imaging using dual-energy computed tomography: comparison of dual-layer computed tomography with fast kilovolt-switching computed tomography[J]. J Comput Assist Tomogr, 2018, 42(6): 965-971.
- [3] 范芮, 孙美玉. 双能 CT 在直肠癌的应用进展[J]. 放射学实践, 2019, 34(3): 346-349.
- [4] 中华放射学杂志双层探测器光谱 CT 临床应用协作组. 双层探测器光谱 CT 临床应用中国专家共识(第一版)[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(7): 635-643.
- [5] Rassouli N, Etesami M, Dhanantwari A, et al. Detector-based spectral CT with a novel dual-layer technology: principles and applications[J]. Insights Into Imaging, 2017, 8(6): 589-598.
- [6] Hickethier T, Byrtus J, Hauger M, et al. Utilization of virtual mono-energetic images (MonoE) derived from a dual-layer spectral detector CT (SDCT) for the assessment of abdominal arteries in venous contrast phase scans[J]. Eur J Radiol, 2018, 99: 28-33.
- [7] Shefer E, Altman A, Behling R, et al. State of the art of CT detectors and sources: A literature review[J]. Curr Radiol Rep, 2013, 1(1): 76-91.
- [8] Danad I, Fayad ZA, Willemink MJ, et al. New applications of cardiac computed tomography: dual-energy, spectral, and molecular CT imaging[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2015, 8(6): 710-723.
- [9] Lewis MA, Pascoal A, Keevil SF, et al. Selecting a CT scanner for cardiac imaging: the heart of the matter[J]. Br J Radiol, 2016, 89(1065): 20160376.
- [10] Megibow AJ, Kambadakone A, Ananthakrishnan L. Dual-energy computed tomography: image acquisition, processing, and workflow[J]. Radiol Clin North Am, 2018, 56(4): 507-520.
- [11] Zhuo SQ, Ma HL, Liu LZ, et al. Evaluation of a second-generation monoenergetic reconstruction algorithm for lesion contrast and venous invasion in pancreatic ductal adenocarcinomas[J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2019, 23(21): 9341-9350.
- [12] Martin SS, Wichmann JL, Scholtz JE, et al. Noise-optimized virtual monoenergetic dual-energy CT improves diagnostic accuracy

- for the detection of active arterial bleeding of the abdomen[J]. J Vasc Interv Radiol, 2017, 28(9): 1257-1266.
- [13] Marin D, Boll DT, Mileto A, et al. State of the art: dual-energy CT of the abdomen[J]. Radiology, 2014, 271(2): 327-342.
 - [14] Marin D, Nelson RC, Samei E, et al. Hypervascular liver tumors: low tube voltage, high tube current multidetector CT during late hepatic arterial phase for detection—initial clinical experience[J]. Radiology, 2009, 251(3): 771-779.
 - [15] Hoorweg JJ, Kruijt RH, Heijboer R, et al. Reliability of interpretation of CT examination of the larynx in patients with glottic laryngeal carcinoma[J]. Otolaryngol Head Neck Surg, 2006, 135(1): 129-134.
 - [16] Argiris A, Karamouzis MV, Raben D, et al. Head and neck cancer[J]. Lancet, 2008, 371(9625): 1695-1709.
 - [17] Lohöfer FK, Kaissis GA, Köster FL, et al. Improved detection rates and treatment planning of head and neck cancer using dual-layer spectral CT[J]. Eur Radiol, 2018, 28(12): 4925-4931.
 - [18] Napier KJ, Scheerer M, Misra S. Esophageal cancer: a review of epidemiology, pathogenesis, staging workup and treatment modalities[J]. World J Gastrointest Oncol, 2014, 6(5): 112-120.
 - [19] Shapiro J, Lanschot JV, Hulshof M, et al. Neoadjuvant chemoradiotherapy plus surgery versus surgery alone for oesophageal or junctional cancer (CROSS): long-term results of a randomised controlled trial[J]. Lancet Oncology, 2015, 16(9): 1090-1098.
 - [20] Bartella I, Brinkmann S, Fuchs H, et al. Two-stage hybrid Ivor-lewis esophagectomy as surgical strategy to reduce postoperative morbidity for high-risk patients[J]. Surg Endosc, 2021, 35(3): 1182-1189.
 - [21] Tommaso D, Giuseppe C, Silvio M, et al. Dual energy computed tomography virtual monoenergetic imaging: technique and clinical applications[J]. Br J Radiol, 2019, 92(1098): 20180546.
 - [22] Albrecht MH, Vogl TJ, Martin SS, et al. Review of clinical applications for virtual monoenergetic dual-energy CT[J]. Radiology, 2019, 293(2): 260-271.
 - [23] Große Hokamp N, Hink AJ, Doerner J, et al. Assessment of arterially hyper-enhancing liver lesions using virtual monoenergetic images from spectral detector CT: phantom and patient experience[J]. Abdom Radiol, 2018, 43(8): 2066-2074.
 - [24] Zopf D, Laukamp KR, Pinto Dos Santos D, et al. Low-keV virtual monoenergetic imaging reconstructions of excretory phase spectral dual-energy CT in patients with urothelial carcinoma: A feasibility study[J]. Eur J Radiol, 2019, 116: 135-143.
 - [25] 管莹, 刘白鹭. 能谱 CT 对胰腺疾病的诊断价值[J]. 放射学实践, 2016, 31(1): 93-95.
 - [26] Prokesch RW, Chow LC, Beaulieu CF, et al. Isoattenuating pancreatic adenocarcinoma at multi-detector row CT: secondary signs[J]. Radiology, 2002, 224(3): 764-768.
 - [27] Ishigami K, Yoshimitsu K, Irie H, et al. Diagnostic value of the delayed phase image for iso-attenuating pancreatic carcinomas in the pancreatic parenchymal phase on multidetector computed tomography[J]. Eur J Radiol, 2009, 69(1): 139-146.
 - [28] Brook OR, Gourtsoyianni S, Brook A, et al. Split-bolus spectral multidetector CT of the pancreas: assessment of radiation dose and tumor conspicuity[J]. Radiology, 2013, 269(1): 139-148.
 - [29] Sakabe D, Funama Y, Taguchi K, et al. Image quality characteris-

- tics for virtual monoenergetic images using dual-layer spectral detector CT: comparison with conventional tube-voltage images [J]. *Physica Medica*, 2018, 49: 5-10.
- [30] Nagayama Y, Tanoue S, Inoue T, et al. Dual-layer spectral CT improves image quality of multiphasic pancreas CT in patients with pancreatic ductal adenocarcinoma [J]. *Eur Radiol*, 2019, 30 (1): 394-403.
- [31] Siegel R, Desantis C, Jemal A. Colorectal cancer statistics, 2014 [J]. *CA Cancer J Clin*, 2014, 64(2): 104-117.
- [32] Fazeli MS, Keramati MR. Rectal cancer: a review [J]. *Med J Islam Repub Iran*, 2015, 29: 171.
- [33] Miller KD, Nogueira L, Mariotto AB, et al. Cancer treatment and survivorship statistics, 2019 [J]. *CA Cancer J Clin*, 2019, 69(5): 363-385.
- [34] 蔡国响, 王崑, 李健, 等. 可切除的进展期结直肠癌围手术期治疗专家共识(2019) [J]. *中华胃肠外科杂志*, 2019, 22(8): 701-710.
- [35] Hunter C, Siddiqui M, Delisle TG, et al. CT and 3T MRI accurately identify T3c disease in colon cancer, which strongly predicts disease-free survival [J]. *Clin Radiol*, 2017, 72(4): 307-315.
- [36] Lambregts DMJ, Lahaye MJ, Heijnen LA, et al. MRI and diffusion-weighted MRI to diagnose a local tumour regrowth during long-term follow-up of rectal cancer patients treated with organ preservation after chemoradiotherapy [J]. *Eur Radiol*, 2015, 26 (7): 2118-2125.
- [37] 谭品文, 朱兰, 王兰, 等. 新型双层探测器光谱 CT 在直肠癌术前 T 分期中的价值 [J]. *中华放射学杂志*, 2020, 54(7): 671-676.
- [38] Sauter AP, Kssinger A, Beck S, et al. Dual-energy CT parameters in correlation to MRI-based apparent diffusion coefficient: evaluation in rectal cancer after radiochemotherapy [J]. *Acta Radiol Open*, 2020, 9(9): 205846012094531.
- [39] 王晓霜, 吕艺, 韩芳, 等. 能谱 CT 在肿瘤中的应用研究进展 [J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2020, 26(1): 81-84.
- [40] Gould MK, Tang T, Liu I, et al. Recent trends in the identification of incidental pulmonary nodules [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2015, 192(10): 1208-1214.
- [41] Ying Z, Cheng J, Hua X, et al. Can spectral CT imaging improve the differentiation between malignant and benign solitary pulmonary nodules? [J]. *PloS One*, 2016, 11(2): e0147537.
- [42] Iwano S, Ito R, Umakoshi H, et al. Evaluation of lung cancer by enhanced dual-energy CT: association between three-dimensional iodine concentration and tumour differentiation [J]. *Br J Radiol*, 2015, 8(1055): 20150224.
- [43] Shimamoto H, Iwano S, Umakoshi H, et al. Evaluation of locoregional invasiveness of small-sized non-small cell lung cancers by enhanced dual-energy computed tomography [J]. *Cancer Imaging*, 2016, 16(1): 18.
- [44] Chen ML, Li XT, Wei YY, et al. Can spectral computed tomography imaging improve the differentiation between malignant and benign pulmonary lesions manifesting as solitary pure ground glass, mixed ground glass, and solid nodules? [J]. *Thorac Cancer*, 2019, 10(2): 234-242.
- [45] Zhang Z, Zou H, Yuan A, et al. A single enhanced dual-energy CT scan may distinguish lung squamous cell carcinoma from adenocarcinoma during the venous phase-science direct [J]. *Acad Radiol*, 2020, 27(5): 624-629.
- [46] Duan X, Arbique G, Guild J, et al. Technical note: quantitative accuracy evaluation for spectral images from a detector-based spectral CT scanner using an iodine phantom [J]. *Med Phys*, 2018, 45(5): 2048-2053.
- [47] Wen Q, Yue Y, Shang J, et al. The application of dual-layer spectral detector computed tomography in solitary pulmonary nodule identification [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(2): 521-532.
- [48] Girard N, Mornex F, Houtte PV, et al. Thymoma: a focus on current therapeutic management [J]. *J Thorac Oncol*, 2009, 4(1): 119-126.
- [49] Priola AM, Galetto G, Priola SM. Diagnostic and functional imaging of thymic and mediastinal involvement in lymphoproliferative disorders [J]. *Clin Imaging*, 2014, 38(6): 771-784.
- [50] Xie Y, Zhang S, Liu J, et al. Value of CT spectral imaging in the differential diagnosis of thymoma and mediastinal lymphoma [J]. *Br J Radiol*, 2018, 92(1095): 20180598.
- [51] Awai K, Kanematsu M, Kim T, et al. The optimal body size index with which to determine iodine dose for hepatic dynamic CT: A prospective multicenter study [J]. *Radiology*, 2016, 278(3): 773-781.
- [52] Robinson E, Babb J, Chandarana H, et al. Dual source dual energy MDCT: comparison of 80kVp and weighted average 120kVp data for conspicuity of hypo-vascular liver metastases [J]. *Invest Radiol*, 2010, 45(7): 413-418.
- [53] Chang W, Lee JM, Lee K, et al. Assessment of a model-based, iterative reconstruction algorithm (MBIR) regarding image quality and dose reduction in liver computed tomography [J]. *Invest Radiol*, 2013, 48(8): 598-606.
- [54] Kanal KM, Chung JH, Wang J, et al. Image noise and liver lesion detection with MDCT: a phantom study [J]. *Am J Roentgenol*, 2011, 197(2): 437-441.
- [55] 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.
- [56] Hinshaw JL, Lubner MG, Ziemlewicz TJ, et al. Percutaneous tumor ablation tools: microwave, radiofrequency, or cryoablation—what should you use and why? [J]. *Radiographics*, 2014, 34(5): 1344-1362.
- [57] 张晶, 董宝玮, 梁萍, 等. 原发性肝癌经皮微波凝固治疗前后局部免疫活性细胞功能检测 [J]. *中华医学杂志*, 2001, 81(16): 974-977.
- [58] 梁萍, 董宝玮, 于晓玲, 等. 双电极植入式微波辐射三维热场的研究 [J]. *中华超声影像学杂志*, 1999, 8(4): 255-257.
- [59] Wellenberg RHH, Boomsma MF, Van Osch JAC, et al. Quantifying metal artefact reduction using virtual monochromatic dual-layer detector spectral CT imaging in unilateral and bilateral total hip prostheses [J]. *Eur J Radiol*, 2017, 88: 61-70.
- [60] Kai RL, Zopfs D, Wagner A, et al. CT artifacts from port systems: virtual monoenergetic reconstructions from spectral-detector CT reduce artifacts and improve depiction of surrounding tissue [J]. *Eur J Radiol*, 2019, 121: 108733.
- [61] Yoo HJ, Hong SH, Chung BM, et al. Metal artifact reduction in virtual monoenergetic spectral dual-energy CT of patients with

metallic orthopedic implants in the distal radius[J].Am J Roentgenol,2018,211(5):1083-1091.

[62] Wang G,Gao Q,Wang Z,et al.Reduction of microwave ablation needle related metallic artifacts using virtual monoenergetic images from dual-layer detector spectral CT in a rabbit model with VX2 tumor[J].Sci Rep,2021,11(1):9295.

[63] Lv P,Jie L,Yan X,et al.CT spectral imaging for monitoring the therapeutic efficacy of VEGF receptor kinase inhibitor AG-013736 in rabbit VX2 liver tumours[J].Eur Radiol,2017,27(3):918-926.

[64] Lee SH, Lee JM, Kim KW, et al. Dual-energy computed tomography to assess tumor response to hepatic radiofrequency ablation: potential diagnostic value of virtual noncontrast images and iodine maps[J].Invest Radiol,2011,46(2):77-84.

[65] Liu YS,Lin CY,Ming-Tsung C,et al.Nitroglycerine use in trans-catheter arterial (chemo) embolization in patients with hepatocellular carcinoma: five-year retrospective study [J]. Clin Res Hepatol Gastroenterol,2018,42(6):542-552.

[66] Ciancio N,Galasso MG,Campisi R,et al.Prognostic value of p53 and Ki67 expression in fiberoptic bronchial biopsies of patients with non small cell lung cancer[J].Multidiscip Respir Med,2012,7(1):29.

[67] Xu X, Mei J, Qi W, et al. PBK/TOPK expression in non-small-cell lung cancer; its correlation and prognostic significance with Ki67 and p53 expression[J]. Histopathology, 2013, 63(5): 696-703.

[68] Berghoff AS,Ilhan-Mutlu A,Wöhrer A,et al.Prognostic significance of Ki67 proliferation index, HIF1 alpha index and microvascular density in patients with non-small cell lung cancer brain metastases[J].Strahlenther Onkol,2014,190(7):676-685.

[69] Chen M,Li X,Wei Y,et al.Spectral CT imaging parameters and Ki-67 labeling index in lung adenocarcinoma[J].Chin J Cancer Res,2020,32(1):96-104.

[70] Chen ML,Shi AH,Li XT,et al.Is there any correlation between spectral CT imaging parameters and PD-L1 expression of lung adenocarcinoma? [J].Thorac Cancer,2019,11(2):362-368.

[71] Jin IM,Bo HC,Baek HJ,et al.Comprehensive analyses with radiological and biological markers of breast cancer on contrast-enhanced chest CT: a single center experience using dual-layer spectral detector CT[J].Eur Radiol,2020,30(5):2782-2790.

[72] Al Ajmi E,Forghani B,Reinhold C,et al.Spectral multi-energy CT texture analysis with machine learning for tissue classification: an investigation using classification of benign parotid tumours as a testing paradigm[J].Eur Radiol,2018,28(6):2604-2611.

[73] 徐鹤,王小雷,杨昭,等.能谱 CT 成像及其影像组学在鉴别肺部良恶性病变中的应用研究[J].临床放射学杂志,2021,40(8):1510-1515.

(收稿日期:2021-08-27 修回日期:2021-12-07)

下期要目

集成磁共振联合 3D-pCASL 在颞叶内侧癫痫中 诊断海马硬化的应用研究	腹部放射学会和欧洲泌尿生殖放射学会关于植入性胎盘 谱系疾病 MRI 检查的联合共识声明临床病例解读
MR 在腓绳肌损伤中的应用价值	阿尔茨海默病脑血流灌注改变的性别差异及与认知损害的相关性研究
伴自杀意念抑郁症患者动态低频振幅研究	基于 CT 影像组学特征与深度学习技术预测肺腺癌 EGFR 突变
计算机定量扩张指数对支气管扩张的诊断价值	人工智能 CT 直方图定量参数模型对磨玻璃小结节肺腺癌 侵袭性的预测价
高级建模迭代重建对冠状动脉钙化积分的影响	基于人工智能的辅助运动校正算法对 CCTA 图像质量的 影响
膝内侧半月板后角根部撕裂伴移位的临床影像分析	
MR 超短回波序列对重度肝铁过载定量的动物实验	
早期帕金森病伴抑郁患者脑网络可控性的初步研究	