

## • 综 述 General review •

锥形束 CT 成像技术在肝恶性肿瘤血管介入治疗中的应用  
及其研究进展

汤铭杰, 张 磊, 王 勇, 朱海东

**【摘要】** 血管介入治疗是局部治疗肝恶性肿瘤的常见方法,对于术中图像的获取、识别和处理等有较高要求。锥形束 CT(cone-beam computed tomography,CBCT)成像是一种容积成像模式,可提供病灶及肿瘤供血动脉的额外信息,目前已逐渐用于肝恶性肿瘤介入术中并仍在不断更新和发展,被国内外多项共识、指南推荐。近年来,单期 CBCT 成像技术已发展成熟并广泛应用于临床,多项新的 CBCT 成像技术提高了 CBCT 成像质量、拓展了 CBCT 成像技术应用范围。该文介绍了单期 CBCT 成像技术及其临床优势、部分新开发的 CBCT 成像技术进展,总结了目前 CBCT 成像技术在肝恶性肿瘤血管介入中的综合应用及应用中暴露的不足和局限性。

**【关键词】** 肝恶性肿瘤;锥形束 CT;介入放射学

中图分类号:R735.7 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2024)-12-1360-07

**Cone-beam CT technique: its application in endovascular interventional treatment of hepatic malignancy and its research progress** TANG Mingjie, ZHANG Lei, WANG Yong, ZHU Haidong. Medical College of Southeast University, Nanjing, Jiangsu Province 210009, China

Corresponding author: ZHU Haidong, E-mail: zhuhaidong9509@163.com

**【Abstract】** Endovascular interventional therapy is a common local treatment for hepatic malignancies, which requires high performance of the acquisition, recognition, and processing of intraoperative images. Cone-beam computed tomography (CBCT) is a volumetric imaging technique, it can provide additional information about the lesions and the tumor-feeding arteries. At present, CBCT has been gradually employed in interventional treatment of liver malignancy, meanwhile its technique has been constantly innovated and developed. CBCT technology has already been recommended by a number of consensus and guidelines both at home and abroad. For recent years, single-stage CBCT imaging technology has been matured and it has been widely used in clinical practice, besides, a number of novel CBCT imaging techniques improve the imaging quality of CBCT and expands the application scope of CBCT imaging technology. This paper aims to introduce the single-stage CBCT imaging technique with its clinical advantages, to illustrate some newly-developed CBCT imaging techniques, to summarize the present comprehensive utilization of CBCT imaging technology in endovascular interventional therapy of hepatic malignancy, and to discuss the shortcomings and limitations of CBCT in the clinical application.

**【Key words】** hepatic malignancy; cone-beam CT; interventional radiology

肝脏恶性肿瘤包括原发性肝癌(肝细胞癌、肝内胆管癌、混合型肝细胞癌-胆管癌)及继发性肝癌<sup>[1]</sup>,其临床治疗方案因病理类型、肿瘤分期、患者一般情况等有所不同。血管介入治疗,如经动

脉化疗栓塞(TACE)、经动脉栓塞(TAE)、选择性内放射治疗等是常见的肝恶性肿瘤的局部治疗方法<sup>[2-5]</sup>。为了精准控制肿瘤生长并减少并发症的发生,治疗时需要精准识别肿瘤供血动脉的位置、

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2024.12.018

基金项目:国家自然科学基金(82372067,82302330)

作者单位:210009 江苏南京 东南大学医学院(汤铭杰);东南大学附属中大医院介入与血管外科,教育部医药基础研究创新中心(张 磊、朱海东);珠海市人民医院(暨南大学附属珠海医院)介入医学科(王 勇)

通信作者:朱海东 E-mail:zhuhaidong9509@163.com

走行、交通等,将治疗性药械精准分布于靶病灶,减少其在正常肝组织或其他器官中的分布,因此对于术中图像的获取和识别、处理等提出了较高的要求。

锥形束 CT (cone-beam computed tomography, CBCT) 成像是一种容积成像模式,其最早应用于核医学及工业测试领域<sup>[6]</sup>。2002 年, Jaffray 等<sup>[7]</sup>首次报道将其用于临床引导放射治疗,并证实了其优异的空间分辨率。CBCT 可实时采集并生成多方位类 CT 图像,较常规二维数字减影血管造影(DSA),其可提供病灶及肿瘤供血动脉的信息,已逐步应用于口腔、颌面外科、神经及肝脏等多个临床学科,并被国内外多项共识、指南推荐<sup>[8-12]</sup>。但在临床实践中, CBCT 成像技术需要考虑到影像设备、软件功能、技术人员水平、手术医师要求等诸多因素,国内完成 CBCT 成像技术引导的肝脏恶性肿瘤血管介入治疗的数量和质量还有待提升。现对 CBCT 成像技术进展及其在肝脏恶性肿瘤血管介入治疗中的应用进行综述。

## 1 单期 CBCT 成像技术

CBCT 的基本组成元件由安装在 C 型臂两端的 X 射线源和平板探测器组成,后者是成像的关键,由射线接收器、命令处理器及电源组成。射线接收器内的闪烁晶体屏、大面积非晶硅传感器阵列及读出电路可完成将 X 线信息转换为可见光、电信号及数字信号的过程<sup>[13]</sup>。CBCT 通过 C 型臂围绕患者进行旋转,直接获取二维投影图像,其后在专用工作站对采集的图像进行重建及后处理,最终生成三维类 CT 图像。不同于传统多排螺旋 CT 使用的多个一维探测器, CBCT 使用高分辨率的单个高分辨率二维平板探测器采集图像,并使用锥形束专用算法重建图像<sup>[14]</sup>。常规 CBCT 所使用的平板探测器面积可达 30 cm × 40 cm, 各向同性分辨率最高可达 0.2 mm<sup>[15]</sup>。在采集图像前向导管内注射对比剂,可通过调整对比剂的体积、稀释度、注射速率和图像采集的延长时间等来提高正常肝实质与肿瘤组织的对比度<sup>[16]</sup>。目前,商业化 CBCT 技术包括: XperCT/Philips、InnovaCT/GE、DynaCT/Siemens 和 Lci/Toshiba。在肝脏恶性肿瘤血管介入术中主要用于探测肿瘤病灶及滋养动脉,引导医师进行操作。

单期 CBCT 成像可较常规 DSA 提高小或乏血

供病灶的检出率<sup>[17]</sup>。Pung 等<sup>[18]</sup>研究发现, CBCT 成像的肿瘤综合检出率均高于常规 DSA, 为 90% (95% CI: 82% ~ 95%) 比 67% (95% CI: 51% ~ 80%)。另一项研究发现, CBCT 成像较常规 DSA 显示出更多术前已通过增强 CT 或 MRI 确认的乏血供肿瘤 (70.1% 比 31.2%)<sup>[19]</sup>。此外, CBCT 成像与常规 DSA 相比,可提高肿瘤血管识别能力,包括腹腔动脉分支结构、肿瘤滋养动脉走行和异常肝动脉起源<sup>[20]</sup>。在对肿瘤滋养动脉的诊断性能方面, CBCT 成像的灵敏度、特异度和准确度均优于常规 DSA, 分别为 96.9% 比 77.2%、97.0% 比 73.0%、96.9% 比 75.4%<sup>[21]</sup>。BannangKoon 等<sup>[22]</sup>回顾分析了 5 年内接受传统 TACE (cTACE) 的不可切除 HCC 患者的预后,发现 CBCT-cTACE 组 (196 例) 患者术后 1 个月达到完全缓解 (complete response, CR)、部分缓解 (partial response, PR)、疾病稳定 (stable disease, SD)、疾病进展 (progressive disease, PD) 的比例分别为 67%、28%、4%、1%, 优于 DSA-cTACE 组 (141 例) 的 22%、48%、9%、21%; 中位无进展生存期 (progression-free survival, PFS) 亦远超 DSA-cTACE 组 (467 d 比 33 d); 在 1、3、5 年总生存率的对比中, CBCT-cTACE 组也高于 DSA-cTACE 组 (87% 比 54%, 44% 比 15%, 34% 比 7%); CBCT-cTACE 组的中位总生存期 (overall survival time, OS) 为 32.1 个月 (95% CI: 29.5 ~ 46.4), 显著长于 DSA-cTACE 组的 13.1 个月 (95% CI: 11.4 ~ 16.8)。Iwazawa 等<sup>[23]</sup>的研究发现, CBCT-cTACE 组 1、2、3 年的总生存率均高于 DSA-cTACE 组 (94% 比 79%, 81% 比 65%, 71% 比 44%); CBCT-cTACE 组 1、2、3 年的局部无进展生存 (local PFS, LPFS) 率也显著高于 DSA-cTACE 组 (43% 比 27%, 31% 比 10%, 26% 比 5%)。Lee 等<sup>[24]</sup>的研究发现, CBCT-cTACE 组的治疗区域局部肿瘤复发率更低, LPFS 较 DSA-cTACE 组显著延长, 其结果与 Miyayama 等<sup>[25]</sup>研究结论一致。此外, 单期 CBCT 成像较常规 DSA 提高了手术安全性, 避免多次调整造影角度以及多次造影, 减少 X 线暴露时间和对比剂使用量<sup>[26-28]</sup>。尽管患者吸收剂量面积乘积 (dose area product, DAP) 略有增加, 但相较于 DSA 成像的静态透视, CBCT 扫描期间 X 射线源会围绕患者旋转, 患者所受辐射会分散, 大大减少了峰值剂量。有经验的医师较新手医师在进行 CBCT 引导的 TACE 术时, 可使患者所受的 DAP 减少 50%<sup>[29]</sup>, 甚至 CBCT 成像较常规 DSA 可能减

少栓塞后综合征的发生<sup>[24]</sup>。

## 2 双期 CBCT (dual-phase CBCT, DP-CBCT) 成像技术

随着 CBCT 成像设备的不断发展以及重建算法的不断优化, DP-CBCT 应运而生, 其支持在一次对比剂注射过程中获得两个不同期相的序列, 其成像策略可根据术中使用的 CBCT 成像系统、对比剂及导管的不同而进行调整。目前常规推荐按 1:1~3 比例用 0.9% NaCl 溶液稀释注射碘造影剂, 流速为 1.5~4 mL/s, 经 3~15 s 延迟后采集动脉期图像, 第二期相可选择经 28 s 左右延迟后采集实质期图像或经 40~47 s 延迟后采集延迟期图像<sup>[15,30-32]</sup>。相比于单期 CBCT 的动脉期图像, DP-CBCT 的实质期图像可以更清楚地显示肿瘤边界, 有助于测量肿瘤体积<sup>[15,33]</sup>, 延迟期图像则可清晰显示 HCC 的廓清及特征性晕状增强, 有利于鉴别小病变与动脉分流<sup>[32,34]</sup>。

大量临床研究证明了 DP-CBCT 成像技术在小肿瘤检出方面的优势。Cho 等<sup>[32]</sup>在 HCC 患者 TACE 术中应用 DP-CBCT, 总体敏感度及对亚厘米级病灶敏感度均优于单期 CBCT (94.7% 比 89.0%, 91.5% 比 80.3%), 且 DP-CBCT 能发现部分术前增强 MRI 未显示的病灶。Wang 等<sup>[34]</sup>回顾性分析了 22 例患者共计 70 个直径 < 3 cm 的 HCC 病灶, DP-CBCT 检测病灶的灵敏度为 95.7%, 高于 DSA 的 65.7% 和术前增强 CT/MR 的 71.4%。随着检测目标体积缩小并局限于亚厘米级时, DSA 及术前增强 CT/MR 的灵敏度分别降至 51.4% 和 57.1%, 而 DP-CBCT 的灵敏度仍高达 94.3%, 且 68.6% 的病灶在 DP-CBCT 延迟期图像显示出特征性晕状增强。此外, DP-CBCT 对胆管细胞癌、结直肠癌/肉瘤肝转移等乏血供病灶的完整显示率也显著提高<sup>[35]</sup>。

## 3 自动血管探测 (automatic feeder detection, AFD) 成像技术

AFD 可根据 DP-CBCT 图像自动识别分割肿瘤病灶, 识别标记滋养动脉, 并以 3D 图像呈现, 帮助医师获取肿瘤供血动脉及其具体解剖走行。医师可通过手动调整标记, 将 3D 图像叠加于实时荧光透视图像上, 生成三维血管路线图, 指导血管超选<sup>[28]</sup>。自 Pichon 等<sup>[36]</sup>率先报道自研 AFD 软件以

来, Emboguide/Philips、FlightPlan for Liver/GE、Syngo Embolization Systems/Siemens 等 AFD 软件已成熟应用于临床<sup>[37]</sup>。

AFD 软件结合 DP-CBCT 辅助经血管介入的有效性已得到临床证实。Yao 等<sup>[28]</sup>研究发现, 结合 AFD 软件的 CBCT 组图像滋养动脉可视度等级被评为良好、一般和较差的比例分别为 84%、14% 和 2%, 优于 DSA 组的 35%、42% 和 23% ( $P < 0.001$ )。Cui 等<sup>[37]</sup>分析了 14 篇关于 AFD 软件应用于 TACE 或 TAE 的临床研究, 结果显示 AFD 软件对肿瘤供血动脉的报道灵敏度范围为 86%~97.1%, 平均 92.3%。与之相对, 在其中 6 项与 DSA 灵敏度比较中, DSA 对肿瘤供血动脉的报道灵敏度范围为 38.0%~85.3%, 筛选后加权平均为 60.5%; 在另 6 项与单纯 CBCT 灵敏度比较中, 单纯 CBCT 对肿瘤供血动脉的报道灵敏度范围为 68.0%~82.1%, 筛选后加权平均值为 75.7%。Chiaradia 等<sup>[38]</sup>研究发现, 在确定的 147 条肿瘤供血动脉中, 仅使用 CBCT 图像时, 3 位审查者能确认 ( $100.0 \pm 3.5$ ) 条, 灵敏度为 70%, 审查者间一致性为 68.6%。当使用结合 AFD 软件的 CBCT 图像时, 能确认的供血动脉增加到 ( $127.0 \pm 0.6$ ) 条, 灵敏度为 86%, 审查者间一致性达 99.7% ( $P = 0.008$ ), 同时假阴性结果从  $47.0 \pm 3.5$  减少至  $20.0 \pm 0.6$  ( $P = 0.008$ )。AFD 软件对肝恶性肿瘤的肝外供血动脉也具有良好的诊断性能。AFD 软件对肝恶性肿瘤肝外滋养动脉的识别率显著优于 DSA (95.7% 比 56.5%,  $P < 0.001$ )<sup>[39]</sup>, 且能成功识别出所有起源于胆囊动脉、右肾动脉及胃左动脉的肝外滋养动脉。

## 4 虚拟实质灌注 (virtual parenchymal perfusion, VPP) 成像技术

AFD 软件结合 CBCT 成像能清晰显示肿瘤病灶及滋养动脉, 但术中仍需要介入医师根据经验选择导管位置。VPP 软件可在 AFD 软件结合 CBCT 成像的基础上, 根据医师选择的导管位置模拟预期栓塞区域, 并将计算出的虚拟栓塞区域 (virtual embolized area, VEA) 显示在 CBCT 图像上, 辅助医师定位最佳导管放置位置, 其模拟的 VEA 与实际栓塞区域 (real embolized area, REA) 一致性较好<sup>[40-43]</sup>。Derbel 等<sup>[41]</sup>对 15 例肝恶性肿瘤患者术中应用 VPP 软件得到的 VEA 与 REA 进行了定性及定量分析, 结果显示 VEA 与 REA 重合度均超过 90%, 且审查者间一致性良好 ( $\kappa = 0.73$ ), VEA 与

REA 在各项空间重叠指标具有极好的相关性( $R^2 = 0.99$ )且差异无统计学意义( $P = 0.65$ )。另一项前瞻性研究纳入 56 例患者,计算获得的 VEA 与 REA 同样居于良好的空间重叠相似性,平均骰子相似系数达 0.78<sup>[40]</sup>。

## 5 实质血容量 CBCT (parenchymal blood volume CBCT, PBV-CBCT) 成像技术

PBV-CBCT 成像技术是一种全新的 CBCT 成像后处理技术,其通过对无对比掩模 CBCT 图像和对比剂填充图像进行减影,并应用一系列算法(如血流量检测、非刚性配准算法及自动缩放算法等)进行后处理重建,最终得到肝脏灌注图像,以不同颜色标注不同血流灌注区域,并提供具体血流灌注参数,辅助介入医师分辨在常规灰度 CBCT 图像上较难区分的碘油沉积与残余肿瘤活性区域,对介入手术前后的肝脏血流灌注进行定性和定量分析<sup>[44]</sup>。有两项研究均证实 TACE 术后 HCC 病灶的平均 PBV (113.09 比 7.02, 119.99 比 19.63) ml/L 及最大 PBV (195.32 比 57.27, 272.40 比 71.89) ml/L 都有显著下降( $P < 0.001$ ),提示介入术后肿瘤残余高灌注区域很有可能为残余活性成分<sup>[44-45]</sup>。

部分研究已证明 PBV-CBCT 图像可帮助介入医师在术中即时判断是否已对富血供病灶进行完全栓塞,诊断残余肿瘤活性部分。一项回顾性研究对比了 35 例 HCC 患者的无增强 CBCT、对比增强 CBCT 和 PBV-CBCT 图像,由 3 位审查者分别对 TACE 术后的残余肿瘤活性成分进行评估,结果显示 3 位审查者中使用 PBV-CBCT 图像的诊断准确性均超过 80%,高于其余两组图像,且使用 PBV-CBCT 图像进行评估的审查者间一致性也超过其余两组图像 CBCT( $\kappa = 0.77$ )<sup>[44]</sup>。另一项 PBV-CBCT 用于预测 TACE 术后治疗反应的前瞻性研究结果显示, PBV-CBCT 图像在对残余活性肿瘤具有良好的诊断性能,3 位审查者使用 PBV-CBCT 图像的诊断准确性分别可达到 88.14%、91.53% 及 93.22%,且审查者间一致性依然良好( $\kappa = 0.72$ )<sup>[45]</sup>。介入医师可根据 PBV-CBCT 图像实时调整手术策略,对仍具有活性的病灶进行补充治疗<sup>[46]</sup>。

## 6 CBCT 成像技术在肝恶性肿瘤血管介入治疗中的综合应用

CBCT 成像技术经过多年发展及临床实践,已

被综合运用于肝恶性肿瘤血管介入治疗的各个阶段,介入医师可根据临床需求灵活使用 CBCT 成像技术,实施肝恶性肿瘤的介入诊疗。

在血管介入术中,介入医师可使用 CBCT 对肝脏进行三维成像定位病灶及确定血供,有条件的医师可使用 DP-CBCT 成像更准确地识别病灶。CBCT 扫描时通常将导管置于肝总动脉或肝固有动脉以获得完整图像,当患者存在肝外供血动脉或肝动脉解剖变异情况,如替代肝动脉及副肝动脉时,可通过 CBCT 成像与常规 DSA 造影共同确认<sup>[20]</sup>。对获得的 CBCT 图像,可使用 AFD 软件进行后处理生成三维血管路线图,高亮显示导管头端至肿瘤的血管路径,并随机架移动实时调整,有效指导血管超选<sup>[28]</sup>。在栓塞时,VPP 软件可通过模拟栓塞区域辅助介入医师选择最佳导管位置,既做到对病灶完全栓塞,又减少对正常肝组织损伤<sup>[40]</sup>。

在 TACE 术中,实时 CBCT 成像可辅助医师判断栓塞终点。在 cTACE 中 CBCT 图像可清晰显示病灶中碘油沉积,有研究表明,碘油沉积程度是术后肿瘤反应的预测因素之一,若 CBCT 图像显示碘油在病灶中沉积不完全,可在术中补充栓塞或寻找其余潜在供血动脉进行栓塞<sup>[47]</sup>。在载药微球 TACE 中,由于临床常规使用的载药微球不显影,CBCT 成像无法实时显示肿瘤中微球分布,但可以观察到病灶内对比剂滞留。CBCT 图像上清晰并具有完整边缘的高密度对比剂残留也被认为与术后良好的肿瘤反应相关<sup>[48]</sup>。另外,PBV-CBCT 成像技术获得的血流灌注图像可辅助介入医师在术中即时判断是否已对富血供肿瘤进行完全栓塞<sup>[44]</sup>。

在钇-90 微球选择性内放射治疗中,精确计算微球剂量是治疗效果和安全性的关键,这取决于靶肝和肝肿瘤体积。CBCT 图像可用于测量靶肝和肝肿瘤体积,其较常规使用 CT 及 MR 图像测量更为精确<sup>[49-50]</sup>。

## 7 现有 CBCT 成像技术的不足及局限性

一方面,CBCT 成像视野有限。虽然目前常规 CBCT 成像视野已能够满足大多数患者需求,但对部分患者,尤其是腹围较大的肥胖患者,CBCT 有限的成像视野可能漏检病灶或最后图像仅显示出病灶的局部,此时需要进行多次扫描及图像拼接<sup>[51-52]</sup>。另一方面,因 CBCT 成像单次扫描时间超过多排螺旋 CT,所以图像易受到噪声及伪影影响,尤其是运动伪影影响。特别是高龄或存在腹水、胸腔积液及

肺部疾病的患者,在扫描过程中屏气困难,导致图像出现严重运动伪影,成像质量下降。同时,心脏运动也会产生运动伪影,影响肝脏左叶成像<sup>[53-54]</sup>。

## 8 总结与展望

综上所述,CBCT 成像技术已逐渐用于肝恶性肿瘤介入术中并仍在不断地更新和发展,具有广阔的应用前景,其在显示肿瘤病灶及滋养动脉、辅助医师即时调整手术策略,提高手术成功率和安全性,控制肿瘤、延长患者生存等方面发挥着重要的作用。但其仍有不足之处,如:成像视野较小、易受伪影影响等。此外,随着 TACE 等血管介入治疗手术规范和精细要求的提高<sup>[11,55]</sup>,在 CBCT 成像的重建算法、扫描轨迹、组件工艺等方面仍需不断完善,也需要更多高质量的基础研究和不断研发新的 CBCT 成像技术和设备并验证其在肝恶性肿瘤血管内介入术中的疗效和安全性。

## 【参考文献】

- [1] Zheng RS, Zhang SW, Zeng HM, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2016[J]. J Natl Cancer Cent 2022, 2:1-9.
- [2] Forner A, Reig M, Bruix J. Hepatocellular carcinoma [J]. Lancet, 2018, 391:1301-1314.
- [3] Zhu HD, Li HL, Huang MS, et al. Transarterial chemoembolization with PD-(L)1 inhibitors plus molecular targeted therapies for hepatocellular carcinoma (CHANCE001) [J]. Signal Transduct Target Ther, 2023, 8:58.
- [4] Aliseda D, Marti-Cruchaga P, Zozaya G, et al. Liver resection and transplantation following yttrium-90 radioembolization for primary malignant liver tumors: a 15-year single-center experience[J]. Cancers (Basel), 2023, 15:733.
- [5] Alsultan AA, Braat AJAT, Smits MLJ, et al. Current status and future direction of hepatic radioembolisation[J]. Clin Oncol (R Coll Radiol), 2021, 33:106-116.
- [6] Orth RC, Wallace MJ, Kuo MD, et al. C-arm cone-beam CT: general principles and technical considerations for use in interventional radiology[J]. J Vasc Interv Radiol, 2009, 20: S538-S544.
- [7] Jaffray DA, Siewerdsen JH, Wong JW, et al. Flat-panel cone-beam computed tomography for image-guided radiation therapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2002, 53:1337-1349.
- [8] 傅开元, 张万林, 柳登高, 等. 应用锥形束 CT 诊断颞下颌关节骨关节病的探讨[J]. 中华口腔医学杂志, 2007, 42:417-420.
- [9] 杨凯, 张学贤, 李自恒, 等. C 臂 CT 在颅内动脉瘤诊疗中研究进展[J]. 介入放射学杂志, 2022, 31:109-112.
- [10] Li TF, Ma J, Han XW, et al. Application of high-resolution C-arm CT combined with streak metal artifact removal technology for the stent-assisted embolization of intracranial aneurysms[J]. Am J Neuroradiol, 2019, 40:1752-1758.
- [11] 中国医师协会介入医师分会临床诊疗指南专委会. 中国肝细胞癌经动脉化疗栓塞(TACE)治疗临床实践指南(2023 年版) [J]. 中华医学杂志, 2023, 103:2674-2694.
- [12] Lu J, Zhao M, Arai Y, et al. Clinical practice of transarterial chemoembolization for hepatocellular carcinoma: consensus statement from an international expert panel of International Society of Multidisciplinary Interventional Oncology (ISMIO) [J]. Hepatobiliary Surg Nutr, 2021, 10:661-671.
- [13] 王为. 锥形束 CT 在放射治疗中的应用[J]. 中国医学影像技术, 2011, 27:1074-1077.
- [14] Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW. Practical cone-beam algorithm[J]. J Opt Soc Am A, 1984, 1:612.
- [15] Tacher V, Radaelli A, Lin M, et al. How I do it: cone-beam CT during transarterial chemoembolization for liver cancer [J]. Radiology, 2015, 274:320-334.
- [16] Koelblinger C, Schima W, Berger-Kulemann V, et al. C-arm CT during hepatic arteriography tumour-to-liver contrast: intraindividual comparison of three different contrast media application protocols[J]. Eur Radiol, 2013, 23:938-942.
- [17] 孔铭新, 于曰俊, 马飞飞, 等. 锥形束 CT 双期扫描在肝恶性肿瘤介入治疗中的应用[J]. 介入放射学杂志, 2019, 28:38-41.
- [18] Pung L, Ahmad M, Mueller K, et al. The role of cone-beam CT in transcatheter arterial chemoembolization for hepatocellular carcinoma: a systematic review and meta-analysis[J]. J Vasc Interv Radiol, 2017, 28:334-341.
- [19] Jonczyk M, Colletini F, Schnapauff D, et al. Visibility of hypovascularized liver tumors during intra-arterial therapy using split-bolus single-phase cone beam CT [J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2019, 42:260-267.
- [20] Wang C, Wang Q, Chen W, et al. DYNA CT arteriographic evaluation of hepatocellular carcinoma for treatment by transcatheter arterial chemoembolization[J]. Int J Clin Exp Med, 2015, 8:20548-20555.
- [21] Iwazawa J, Ohue S, Mitani T, et al. Identifying feeding arteries during TACE of hepatic tumors: comparison of C-arm CT and digital subtraction angiography [J]. Am J Roentgenol, 2009, 192:1057-1063.
- [22] Bannangkoon K, Hongsakul K, Tubtawee T. Impact of cone-beam computed tomography with automated feeder detection software on the survival outcome of patients with hepatocellular carcinoma during treatment with conventional transarterial chemoembolization[J]. BMC Gastroenterol, 2021, 21:419.
- [23] Iwazawa J, Ohue S, Hashimoto N, et al. Survival after C-arm CT-assisted chemoembolization of unresectable hepatocellular carcinoma[J]. Eur J Radiol, 2012, 81:3985-3992.
- [24] Lee JH, Lee IJ, Kim HB, et al. Efficacy and safety of transarterial chemoembolisation with cone-beam CT in patients with hepatocellular carcinoma within the Milan criteria: a retrospective cohort study[J]. Clin Radiol, 2019, 74:

407. e19-407. e28.
- [25] Miyayama S, Yamashiro M, Hashimoto M, et al. Comparison of local control in transcatheter arterial chemoembolization of hepatocellular carcinoma  $\leq 6$  cm with or without intraprocedural monitoring of the embolized area using cone-beam computed tomography[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2014, 37:388-395.
- [26] Wong SY, Foley S, Cantwell CP, et al. The effects of cone-beam computed tomography imaging guidance on patient radiation exposures in trans-arterial chemoembolisation for hepatocellular carcinoma [J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2022, 198:441-447.
- [27] Hidajat N, Wust P, Felix R, et al. Radiation exposure to patient and staff in hepatic chemoembolization: risk estimation of cancer and deterministic effects [J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2006, 29:791-796.
- [28] Yao X, Yan D, Jiang X, et al. Dual-phase cone-beam CT-based navigation imaging significantly enhances tumor detectability and aids superselective transarterial chemoembolization of liver cancer[J]. *Acad Radiol*, 2018, 25:1031-1037.
- [29] Kothary N, Abdelmaksoud MH, Tognolini A, et al. Imaging guidance with C-arm CT: prospective evaluation of its impact on patient radiation exposure during transhepatic arterial chemoembolization[J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2011, 22:1535-1543.
- [30] Lucatelli P, De Rubeis G, Basilio F, et al. Sequential dual-phase cone-beam CT is able to intra-procedurally predict the one-month treatment outcome of multi-focal HCC, in course of degradable starch microsphere TACE[J]. *Radiol Med*, 2019, 124:1212-1219.
- [31] Lucatelli P, De Rubeis G, Ginnani Corradini L, et al. Intra-procedural dual phase cone beam computed tomography has a better diagnostic accuracy over pre-procedural MRI and MDCT in detection and characterization of HCC in cirrhotic patients undergoing TACE procedure[J]. *Eur J Radiol*, 2020, 124:108806.
- [32] Cho Y, Lee S, Park SJ. Effectiveness of intraprocedural dual-phase cone-beam computed tomography in detecting hepatocellular carcinoma and improving treatment outcomes following conventional transarterial chemoembolization [J]. *PLoS One*, 2021, 16:e0245911.
- [33] Tacher V, Lin MD, Chao M, et al. Semiautomatic volumetric tumor segmentation for hepatocellular carcinoma: comparison between C-arm cone beam computed tomography and MRI [J]. *Acad Radiol*, 2013, 20:446-452.
- [34] Wang X, Yarmohammadi H, Cao G, et al. Dual phase cone-beam computed tomography in detecting  $< 3$  cm hepatocellular carcinomas during transarterial chemoembolization[J]. *J Cancer Res Ther*, 2017, 13:38-43.
- [35] Scherthaner RE, Haroun RR, Duran R, et al. Improved visibility of metastatic disease in the liver during intra-arterial therapy using delayed arterial phase cone-beam CT[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2016, 39:1429-1437.
- [36] Pichon E, Bekes G, Deschamps F, et al. Development and preliminary evaluation of software for planning selective liver embolizations from three-dimensional rotational fluoroscopy imaging[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2008, 3:405-412.
- [37] Cui Z, Shukla PA, Habibollahi P, et al. A systematic review of automated feeder detection software for locoregional treatment of hepatic tumors[J]. *Diagn Interv Imaging*, 2020, 101:439-449.
- [38] Chiaradia M, Izamis ML, Radaelli A, et al. Sensitivity and reproducibility of automated feeding artery detection software during transarterial chemoembolization of hepatocellular carcinoma[J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2018, 29:425-431.
- [39] Miyayama S, Yamashiro M, Nagai K, et al. Efficacy of automated tumor-feeder detection software using cone-beam computed tomography technology in transarterial embolization through extrahepatic collateral vessels for malignant hepatic tumors[J]. *Hepatol Res*, 2016, 46:166-173.
- [40] Miyayama S, Yamashiro M, Ikeda R, et al. Usefulness of virtual parenchymal perfusion software visualizing embolized areas to determine optimal catheter position in superselective conventional transarterial chemoembolization for hepatocellular carcinoma[J]. *Hepatol Res*, 2021, 51:313-322.
- [41] Derbel H, Kobeiter H, Pizaine G, et al. Accuracy of a cone-beam CT virtual parenchymal perfusion algorithm for liver cancer targeting during intra-arterial therapy[J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2018, 29:254-261. e2.
- [42] Miyayama S, Yamashiro M, Nagai K, et al. Performance of novel virtual parenchymal perfusion software visualizing embolized areas of transcatheter arterial chemoembolization for hepatocellular carcinoma[J]. *Hepatol Res*, 2017, 47:446-454.
- [43] Kinoshita M, Takechi K, Arai Y, et al. Utility of the virtual liver parenchymal perfusion area using a commercially available workstation in transarterial chemoembolization for hepatocellular carcinoma[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2019, 42:69-77.
- [44] Kim KA, Choi SY, Kim MU, et al. The efficacy of cone-beam CT-based liver perfusion mapping to predict initial response of hepatocellular carcinoma to transarterial chemoembolization[J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2019, 30:358-369.
- [45] Choi SY, Kim KA, Choi W, et al. Usefulness of cone-beam CT-based liver perfusion mapping for evaluating the response of hepatocellular carcinoma to conventional transarterial chemoembolization[J]. *J Clin Med*, 2021, 10:713.
- [46] Li Z, Jiao D, Si G, et al. Making timely remedial measures after TACE based on the results of cone-beam CT liver perfusion [J]. *Int J Hyperthermia*, 2021, 38:428-436.
- [47] Tsai YC, Shih JH, Hwang HE, et al. Early prediction of 1-year tumor response of hepatocellular carcinoma with lipiodol deposition pattern through post-embolization cone-beam

- computed tomography during conventional transarterial chemoembolization[J]. Eur Radiol, 2021, 31: 7464-7475.
- [48] Fronda M, Mistretta F, Calandri M, et al. The role of immediate post-procedural cone-beam computed tomography (CBCT) in predicting the early radiologic response of hepatocellular carcinoma (HCC) nodules to drug-eluting bead transarterial chemoembolization (DEB-TACE)[J]. J Clin Med, 2022, 11: 7089.
- [49] Stein SI, Soliman M, Sparapani J, et al. Conventional hepatic volumetry May Lead to inaccurate segmental yttrium-90 radiation dosimetry[J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2021, 44: 1973-1985.
- [50] O'Connor PJ, Pasik SD, van der Bom IM, et al. Feasibility of yttrium-90 radioembolization dose calculation utilizing intra-procedural open trajectory cone beam CT[J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2020, 43: 295-301.
- [51] Scherthaner RE, Chapiro J, Sahu S, et al. Feasibility of a modified cone-beam CT rotation trajectory to improve liver periphery visualization during transarterial chemoembolization [J]. Radiology, 2015, 277: 833-841.
- [52] Hatamikia S, Biguri A, Herl G, et al. Source-detector trajectory optimization in cone-beam computed tomography: a comprehensive review on Today's state-of-the-art[J]. Phys Med Biol, 2022, 67: 16TR03.
- [53] Kwon LM, Hwang JS, Lee YS, et al. A motion artifact correction algorithm for cone-beam CT in patients with hepatic malignancies treated with transarterial chemoembolization[J]. J Vasc Interv Radiol, 2022, 33: 1367-1374.
- [54] Becker LS, Dewald CLA, von Falck C, et al. Effectuality study of a 3D motion correction algorithm in C-arm CTs of severely impaired image quality during transarterial chemoembolization [J]. Cancer Imaging, 2022, 22: 37.
- [55] de Baere T, Ronot M, Chung JW, et al. Initiative on superselective conventional transarterial chemoembolization results (INSPIRE)[J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2022, 45: 1430-1440.

(收稿日期: 2023-12-24)

(本文编辑: 新 宇)

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告  
《Journal of Interventional Radiology》  
网址: [www.cjir.cn](http://www.cjir.cn)  
邮箱: [jrfsxzz@vip.163.com](mailto:jrfsxzz@vip.163.com)