

双能量 CT 成像技术在肺血管疾病中的应用进展

丁兆慧 奚群英

(中国医学科学院阜外医院深圳医院肺血管病房, 广东 深圳 518057)

【摘要】 双能量 CT (DECT) 应用两种能量、两套探测器, 根据不同能量下物质衰减特性的差异进行定性及定量的数据采集。DECT 具有高分辨率、易获得等优势, 通过后处理技术, 从形态学、功能学两方面获取疾病信息。近年来, DECT 在肺血管疾病如肺栓塞、慢性血栓栓塞性肺动脉高压、动脉型肺动脉高压、肺静脉闭塞性疾病/肺毛细血管瘤等诊治中展现出优越的作用。现从 DECT 的技术原理及其在肺血管疾病中的应用进展做一综述。

【关键词】 双能量 CT; 肺灌注成像; 肺栓塞; 慢性血栓栓塞性肺动脉高压; 动脉型肺动脉高压; 肺静脉闭塞性疾病/肺毛细血管瘤

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2024.01.008

Dual-Energy CT Imaging in Pulmonary Vascular Diseases

DING Zhaohui, XI Qunying

(Pulmonary Vascular Diseases Ward, Fuwai Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences, Shenzhen 518057, Guangdong, China)

【Abstract】 Dual-energy CT (DECT) collects qualitative and quantitative data based on the difference in material attenuation characteristics under different energies using two types of energy and two sets of detectors. DECT provides the benefits of easy access and high resolution. Disease information can be obtained from morphology and function using post-processing techniques. DECT has shown superiority in the diagnosis and treatment of pulmonary vascular diseases such as pulmonary embolism, chronic thromboembolic pulmonary hypertension, pulmonary arterial hypertension, and pulmonary venous occlusive disease/pulmonary capillary hemangiomatosis. This article reviews the technical principles of DECT and its application progress in pulmonary vascular diseases.

【Keywords】 Dual-energy CT; Pulmonary perfusion imaging; Pulmonary embolism; Chronic thromboembolic pulmonary hypertension; Pulmonary arterial hypertension; Pulmonary venous occlusive disease/pulmonary capillary hemangiomatosis

双能量 CT (dual-energy CT, DECT) 成像常用技术有双峰值管电压法和单管双层探测器法, 是利用两种不同能量的射线进行同步扫描, 通过探测器接受后对不同能量下所采集的各种密度物质的衰减信息进行分析的一种相对新型的 CT 成像方法, 不受呼吸及运动伪影的影响, 在血管相关性病变中的应用具有一定优势。肺血管疾病是临床常见的一类疾病, 主要包括肺栓塞 (pulmonary embolism, PE)、慢性血栓栓塞性肺动脉高压 (chronic thromboembolic pulmonary hypertension, CTEPH)、动脉型肺动脉高压 (pulmonary arterial hypertension, PAH)、肺静脉闭塞性疾病/肺毛细血管瘤 (pulmonary venous occlusive disease/pulmonary capillary hemangiomatosis, PVOD/PCH) 等。与 CT 肺动脉造影 (computed tomographic pulmonary angiography, CTPA) 相比, DECT 在显示肺动脉解剖信息的同时, 也能显示肺动脉的血流灌注状态, 提高了

亚段 PE 的检出率。许多研究^[1-2]表明 DECT 与肺通气/灌注 (V/Q) 显像在诊断 CTEPH 上具有相近的诊断效能, 进行早期诊断、危险程度分层等对改善患者预后及提高生活质量至关重要。现从 DECT 成像技术的原理及其在肺血管疾病中的应用进展予以综述。

1 DECT 成像技术的原理

DECT 是由两组球管-探测器组成, 一组在高能量 X 射线线下完成图像的扫描与采集, 另一组在低能量 X 射线线下完成图像的扫描与采集, 两组球管独立运行, 具有较高能谱对比度^[3]。DECT 常用的方法有双峰值管电压法和单管双层探测器法, 根据其使用材料不同分为: 碘图和虚拟平扫图; 按照能量选择不同分为: 虚拟单能重建、有效原子序数图和有效电子云密度图^[4]。DECT 通常使用 140 kVp 和 80 kVp 管电压同时采集两组数据, 将得到的数据以碘图和虚拟平扫图等方式, 通过后处理软件得到量化数据。在胸部成像

中,碘图可评估 PE 的灌注缺损,包括急性和慢性的灌注缺损。现重点讨论 DECT 碘图技术在肺血管疾病中的应用进展。

不同能量下的物质衰减速度不同,X射线的衰减主要遵循 Beer-Lambert 定律,低能量 X 射线下碘衰减系数最大,高能量 X 射线下碘衰减系数下降一半,而肺内空气与软组织的衰减系数不受影响^[5]。通过对比两种 CT 能量下肺实质内碘对比剂的分布差异,可反映出肺实质的灌注情况。因此进行一次 DECT 显影可同时获得肺动脉解剖成像及全肺灌注结果^[6]。

DECT 碘图技术通过显示肺中碘分布、比较病变组织与周围组织的相对增强程度,以百分比形式量化表达,可检测肺动脉亚段及以下 PE,同时提供肺血流灌注相关信息^[7]。DECT 三维灌注图在软组织、空气和碘三种材料分解的基础上得出肺组织的碘含量,将获取的数据集载入特定的处理软件计算肺灌注血容量(perfused blood volume, PBV),最终得出量化的灌注指标,用于判断疾病严重程度以及评估预后^[8]。

2 DECT 在 PE 中的应用

PE 是全球第三大最常见的心血管死亡原因,是指由血块、肿瘤、脂肪或空气等造成肺动脉阻塞,诱发多种病理生理紊乱,进而引起一系列临床表现,常危及生命^[9]。准确判断栓塞部位、栓子大小、性质及肺灌注区域面积,对 PE 的诊断、危险分层及治疗具有重要意义。DECT 可显示肺动脉阻塞引起的肺实质灌注缺损,同时应用碘图技术能定量分析肺灌注缺损面积。

常规 CTPA 仅能显示肺血管解剖结构,难以检测出肺微小血栓,对于血栓导致的肺灌注缺损的严重程度无法显示,而 DECT 肺灌注碘图技术可弥补这一缺陷。2018 年一项大规模回顾性研究^[10]纳入 2014 年 1—9 月共 1 035 例确诊 PE 的患者,记录 CTPA 上血栓的位置、水平和类型(闭塞与非闭塞),利用 DECT 碘图技术检测肺灌注缺损。结果显示 DECT 在 1% 的患者中检测到小的(节段性或亚节段性)PE,具有增量效益,证实了 DECT 可发现 PE 中更小部位的栓塞,DECT 碘图技术对 PE 的诊断价值超过了目前常规 CTPA。

多项研究已证实 DECT 在诊断急性肺栓塞(acute pulmonary embolism, APE)中的准确性。一项纳入 17 项研究的荟萃分析^[11]评估了 DECT 后处理技术,包括线性混合、碘图和虚拟单能重建在诊断 APE 中的准确性。该荟萃分析显示,DECT 中单独线性混合诊断 APE 的灵敏度和特异度分别为 87% 和 93%,线性混合联合碘图的灵敏度和特异度分别为 89% 和 90%,碘图联合虚拟单能重建的灵敏度和特异度分别为 90% 和 90%。2021 年发表的一项系统综述^[12]也评估了

DECT 对 APE 的诊断准确度,共纳入 15 篇文章、7 项研究进行荟萃分析,观察到 DECT 诊断 APE 的综合灵敏度为 88.9%,综合特异度为 94.6%。DECT 在 APE 中的诊断价值有充分的证据支持。

DECT 同时有助于评估 PE 的严重程度和预测预后。通过碘图等后处理技术及软件计算出的 PBV 已被证实可反映肺灌注,评估 PE 患者的肺血流情况^[13]。研究显示,在 DECT 上灌注缺损程度更大的 APE 患者中,右心应变率更高,提示 DECT 上灌注缺损的程度与 PE 患者的不良临床结局相关。Sakamoto 等^[14]回顾性分析了 72 例 PE 患者和 168 例非 PE 患者的 DECT 结果,探讨肺 PBV 与临床严重程度之间的相关性,同时评估全肺 PBV 的定量与 CT 图像上右心室-左心室直径比值之间的关系。研究表明在 PE 患者中,全肺 PBV 值与右心室-左心室直径比值呈负相关($r = -0.567, P < 0.001$)。用 DECT 定量计算肺 PBV 有助于评估 PE 的临床严重程度,并可作为右心室功能不全的指标。

使用 DECT 计算的肺灌注缺损评分已被建议作为 PE 患者严重程度评估的一种新的影像学标志物^[15]。一项涉及 60 例 PE 患者的研究报告^[16]显示,DECT 碘图上测量的灌注缺损程度是不良临床结果(60 d 内死亡或重症监护治疗)的预测因子。一项研究^[17]纳入了 2018—2020 年连续接受 DECT 检查的疑似 APE 患者共 136 例,使用 DECT 后处理技术计算肺灌注缺损容积,19 例(14%)在平均住院 7.5 d 期间发生了不良事件(<30 d 住院全因死亡或入住重症监护病房),其中 7 例为 CT 无可见栓子但有灌注缺损的患者。对于疑似 APE 患者,肺灌注缺损容积可能是一种独立的预后标志物,相比传统临床和影像学参数具有增量的鉴别价值,可用于疾病的风险分层,改善患者预后。

3 DECT 在 CTEPH 中的应用

CTEPH 是由慢性血栓机化后形成的肺动脉高压,是肺血栓栓塞症的长期并发症。CTEPH 一般由近端血栓栓塞或远端血管重构导致的肺动脉和肺小动脉阻塞引起,临床表现为右心负荷和肺血管阻力增加。目前研究^[18]认为,CTEPH 的病理机制涉及异常凝血与纤溶机制、炎症机制、遗传易感因素、原位血栓形成、血管重构等方面。有数据^[19]统计,APE 幸存者中 CTEPH 的发生率约为 4%。另一项连续队列研究^[20]显示,中国 APE 患者 CTEPH 的发生率第 1 年为 0.8%,第 2 年为 1.3%,第 3 年为 1.7%。未经及时干预的 CTEPH 预后不佳,其不良结局与平均肺动脉压呈正相关^[21]。

目前 V/Q 扫描仍是诊断 CTEPH 患者血流灌注缺

损的金标准,但未得到充分应用,43%的患者在登记时未接受过 V/Q 扫描^[22],DECT 可弥补这一不足。许多研究表明,DECT 肺灌注与 V/Q 扫描在诊断 CTEPH 方面具有良好的一致性,CTEPH 的影像学标准依赖于 DECT 肺灌注中的至少一个节段性三角形灌注缺损,V/Q 扫描中则显示相应部位的肺组织存在 V/Q 不匹配。

2018 年的一项研究^[1]中,80 例患者同时完成 DECT 及 V/Q 扫描,其中 36 例被诊断为 CTEPH,DECT 组中有 35 例阳性,6 例假阳性,1 例假阴性(灵敏度为 97%,特异度为 86%);在 V/Q 扫描中,有 35 例阳性和 1 例假阴性(灵敏度为 97%,特异度为 100%),结果表明 DECT 肺灌注与 V/Q 扫描对诊断 CTEPH 具有高度一致性($\kappa=0.80$)。另一项前瞻性研究^[2]纳入了 71 例疑似 CTEPH 患者,同时接受 DECT 与 V/Q 扫描,采集 DECT 数据集重建碘图,最终 DECT 可准确筛查出所有 CTEPH 患者,DECT 和 V/Q 扫描在病理节段的分类上有显著的一致性。V/Q 扫描通常被认为辐射更少,但在此研究中,两种检查的辐射剂量无显著差异,且 DECT 扫描时间更短。在 Dournes 等^[23]的研究中,与 V/Q 扫描相比,单独使用 DECT 肺灌注扫描诊断 CTEPH 的灵敏度为 100%,特异度为 92%。这些研究支持 DECT 肺灌注技术可能作为 V/Q 扫描筛查 CTEPH 的潜在替代手段。

DECT 通过肺实质中的碘分布计算肺 PBV 来评估 CTEPH 患者的肺灌注情况^[24],肺灌注不良的程度可反映 CTEPH 的严重程度。2022 年一项研究^[25]回顾了 98 例接受 DECT 检查的患者,分析肺灌注不良程度与血流动力学之间的相关性,血流动力学指标包括平均肺动脉压和肺血管阻力,并得出结论:CTEPH 患者灌注不良的程度与血流动力学异常相关。

目前对于 CTEPH 严重程度的评估并无统一标准,越来越多的研究通过在 CTEPH 患者中使用 DECT 评分系统,将其与功能和血流动力学参数相关联,进行 CTEPH 临床危险分层及预后预测。有研究基于 DECT 的评分分为灌注缺损评分和血栓负荷评分,发现此评分系统与肺动脉压力和肺血管阻力数值呈正相关。2016 年发表的一项研究^[26]通过计算 46 例 CTEPH 患者 DECT 检查的肺 PBV 值,进行肺灌注缺损评分,与右心导管数据及临床血流动力学指标进行对比,发现 DECT 肺灌注缺损评分与肺动脉压、肺血管阻力和右心室压力显著相关。

DECT 对 APE 事件后 CTEPH 的发生具有一定的预测价值。2020 年的一项回顾性研究^[27]发现,APE 事件中闭塞性肺中央或大叶凝块与 CTEPH 的发生有

关,“马赛克”衰减和肺梗死的存在也可预测 CTEPH 的发展。

此外,DECT 及后处理技术也常用于鉴别 PAH 和 CTEPH,二者在肺灌注上具有显著差异。有研究^[28]比较了 DECT 中 PAH 和 CTEPH 的肺灌注情况,其中 PAH 组中 52.6% 的患者 CT 灌注异常,CTEPH 组中 100% 的患者 CT 灌注异常;二者在 DECT 中的肺灌注特征有显著差异,PAH 组中肺灌注损伤相当均匀,96.6% 的异常节段出现斑片状灌注缺损,而 CTEPH 组多为三角形灌注缺损、斑片状灌注缺损和弥漫性低灌注区域,与 CTEPH 患者相比,PAH 患者肺灌注改变更少,且更均匀。

4 DECT 在其他肺血管疾病中的应用

其他肺血管疾病如肺动脉高压、PVOD/PCH 等的 DECT 成像研究并不多。一项纳入 56 例确诊或高度怀疑 PVOD 患者的队列研究^[29],报道了 4 例(7.1%)不匹配灌注缺损,在 70 例特发性或遗传性肺动脉高压患者中有 7 例具有类似的缺损模式。有学者比较了特发性或遗传性肺动脉高压和 PVOD/PCH 的 DECT 肺灌注改变,对 63 例特发性或遗传性肺动脉高压和 PVOD/PCH 患者进行 DECT 成像,重建形态学和灌注图像,肺动脉高压组中有 68.6% 出现灌注异常,以斑片状灌注缺损为主,PVOD/PCH 组中有 50% 出现灌注异常,二者之间的 DECT 灌注异常无统计学差异,同时证实 DECT 在肺动脉高压、PVOD/PCH 中的诊断价值^[30]。

5 小结

DECT 在肺血管疾病中的应用有越来越多证据支持,DECT 具有高分辨率、易获得、广泛普及等优势,相比常规 CTPA 能识别更小部位 PE,具有增量效益,同时通过碘图等后处理技术,呈现真实肺灌注成像,可获取形态和功能学参数。多种证据支持 DECT 肺灌注技术与 V/Q 显像具有较好的一致性。同时,DECT 在肺血管疾病的严重程度、危险分层及预后等方面提供一定的价值。未来需更多的研究细化影像学数据,为临床提供更多直观的量化参数,用于诊断肺血管疾病、评估治疗效果及预测预后。

参考文献

- [1] Masy M, Giordano J, Petyt G, et al. Dual-energy (DECT) lung perfusion in pulmonary hypertension: concordance rate with V/Q scintigraphy in diagnosing chronic thromboembolic pulmonary hypertension (CTEPH) [J]. *Eur Radiol*, 2018, 28(12): 5100-5110.
- [2] Schüller A, Richter M, Tello K, et al. Evaluation of diagnostic accuracy and radiation exposure of dual-energy computed tomography (DECT) in the course of chronic thromboembolic pulmonary hypertension (CTEPH) [J]. *RoFo*, 2021, 193(11): 1318-1326.

- [3] Mileto A, Ananthakrishnan L, Morgan DE, et al. Clinical implementation of dual-energy CT for gastrointestinal imaging [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2021, 217(3):651-663.
- [4] Agostini A, Borgheresi A, Mari A, et al. Dual-energy CT: theoretical principles and clinical applications [J]. *Radiol Med*, 2019, 124(12):1281-1295.
- [5] Lee CW, Seo JB, Song JW, et al. Evaluation of computer-aided detection and dual energy software in detection of peripheral pulmonary embolism on dual-energy pulmonary CT angiography [J]. *Eur Radiol*, 2011, 21(1):54-62.
- [6] Bridgford L. Pulmonary embolism: assessment and imaging [J]. *Aust Fam Physician*, 2014, 43(5):249.
- [7] Celtikci P, Hekimoglu K, Kahraman G, et al. Diagnostic impact of quantitative dual-energy computed tomography perfusion imaging for the assessment of subsegmental pulmonary embolism [J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2021, 45(1):151-156.
- [8] Ozawa Y, Ohno Y, Nagata H, et al. Advances for pulmonary functional imaging: dual-energy computed tomography for pulmonary functional imaging [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(13):2295.
- [9] Essien EO, Rali P, Mathai SC. Pulmonary embolism [J]. *Med Clin North Am*, 2019, 103(3):549-564.
- [10] Weidman EK, Plodkowski AJ, Halpenny DF, et al. Dual-energy CT angiography for detection of pulmonary emboli: incremental benefit of iodine maps [J]. *Radiology*, 2018, 289(2):546-553.
- [11] Monti CB, Zanardo M, Cozzi A, et al. Dual-energy CT performance in acute pulmonary embolism: a meta-analysis [J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(8):6248-6258.
- [12] Abdellatif W, Ebada MA, Alkanj S, et al. Diagnostic accuracy of dual-energy CT in detection of acute pulmonary embolism: a systematic review and meta-analysis [J]. *Can Assoc Radiol J*, 2021, 72(2):285-292.
- [13] Sueyoshi E, Tsutsui S, Hayashida T, et al. Quantification of lung perfusion blood volume (lung PBV) by dual-energy CT in patients with and without pulmonary embolism: preliminary results [J]. *Eur J Radiol*, 2011, 80(3):e505-e509.
- [14] Sakamoto A, Sakamoto I, Nagayama H, et al. Quantification of lung perfusion blood volume with dual-energy CT: assessment of the severity of acute pulmonary thromboembolism [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2014, 203(2):287-291.
- [15] Takx RAP, Henzler T, Schoepf UJ, et al. Predictive value of perfusion defects on dual energy CTA in the absence of thromboembolic clots [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2017, 11(3):183-187.
- [16] Apfalter P, Bachmann V, Meyer M, et al. Prognostic value of perfusion defect volume at dual energy CTA in patients with pulmonary embolism: correlation with CTA obstruction scores, CT parameters of right ventricular dysfunction and adverse clinical outcome [J]. *Eur J Radiol*, 2012, 81(11):3592-3597.
- [17] Foldyna B, Zangeneh FA, Wagner M, et al. Pulmonary perfusion defect volume on dual-energy CT: prognostic marker of adverse events in patients with suspected pulmonary embolism [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2023, 39(7):1333-1341.
- [18] Yan L, Li X, Liu Z, et al. Research progress on the pathogenesis of CTEPH [J]. *Heart Fail Rev*, 2019, 24(6):1031-1040.
- [19] Gall H, Hoepfer MM, Richter MJ, et al. An epidemiological analysis of the burden of chronic thromboembolic pulmonary hypertension in the USA, Europe and Japan [J]. *Eur Respir Rev*, 2017, 26(143):160121.
- [20] Yang S, Yang Y, Zhai Z, et al. Incidence and risk factors of chronic thromboembolic pulmonary hypertension in patients after acute pulmonary embolism [J]. *J Thorac Dis*, 2015, 7(11):1927-1938.
- [21] Lewczuk J, Piszko P, Jagas J, et al. Prognostic factors in medically treated patients with chronic pulmonary embolism [J]. *Chest*, 2001, 119(3):818-823.
- [22] McLaughlin VV, Langer A, Tan M, et al. Contemporary trends in the diagnosis and management of pulmonary arterial hypertension: an initiative to close the care gap [J]. *Chest*, 2013, 143(2):324-332.
- [23] Dourmes G, Verdier D, Montaudon M, et al. Dual-energy CT perfusion and angiography in chronic thromboembolic pulmonary hypertension: diagnostic accuracy and concordance with radionuclide scintigraphy [J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(1):42-51.
- [24] Renard B, Remy-Jardin M, Santangelo T, et al. Dual-energy CT angiography of chronic thromboembolic disease: can it help recognize links between the severity of pulmonary arterial obstruction and perfusion defects? [J]. *Eur J Radiol*, 2011, 79(3):467-472.
- [25] Abozeed M, Conic S, Bullen J, et al. Dual energy CT based scoring in chronic thromboembolic pulmonary hypertension and correlation with clinical and hemodynamic parameters: a retrospective cross-sectional study [J]. *Cardiovasc Diagn Ther*, 2022, 12(3):305-313.
- [26] Takagi H, Ota H, Sugimura K, et al. Dual-energy CT to estimate clinical severity of chronic thromboembolic pulmonary hypertension: comparison with invasive right heart catheterization [J]. *Eur J Radiol*, 2016, 85(9):1574-1580.
- [27] Lorenz G, Saeedan MB, Bullen J, et al. CT-based biomarkers for prediction of chronic thromboembolic pulmonary hypertension after an acute pulmonary embolic event [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2020, 215(4):800-806.
- [28] Giordano J, Khung S, Duhamel A, et al. Lung perfusion characteristics in pulmonary arterial hypertension (PAH) and peripheral forms of chronic thromboembolic pulmonary hypertension (pCTEPH): dual-energy CT experience in 31 patients [J]. *Eur Radiol*, 2017, 27(4):1631-1639.
- [29] Seferian A, Helal B, Jais X, et al. Ventilation/perfusion lung scan in pulmonary veno-occlusive disease [J]. *Eur Respir J*, 2012, 40(1):75-83.
- [30] Lefebvre B, Kyheng M, Giordano J, et al. Dual-energy CT lung perfusion characteristics in pulmonary arterial hypertension (PAH) and pulmonary veno-occlusive disease and/or pulmonary capillary hemangiomatosis (PVOD/PCH): preliminary experience in 63 patients [J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(7):4574-4586.

收稿日期:2023-12-16