

双能CT定量参数在胰腺疾病中的应用

刘皓天, 李咏梅*

重庆医科大学附属第一医院放射科, 重庆

收稿日期: 2026年3月15日; 录用日期: 2026年4月9日; 发布日期: 2026年4月15日

摘要

双能CT (Dual-energy computed tomography, DECT)的应用日趋广泛, 该技术基于不同能量条件下物质X线衰减值的差异, 可有效区分并量化组织成分, 同时能获得多种定量参数辅助进行疾病的诊断、鉴别诊断、无创地进行病理预测、术前评估、预后预测等。DECT在胰腺疾病中已有许多应用, 如急性胰腺炎的严重性评估, 胰腺导管腺癌与胰腺囊性病灶或慢性胰腺炎的鉴别等, 本文对双能CT定量参数在胰腺疾病上的应用进行综述。

关键词

双能CT, 胰腺成像, 定量分析

Application of Dual-Energy CT Quantitative Parameters in Pancreatic Diseases

Haotian Liu, Yongmei Li*

Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: March 15, 2026; accepted: April 9, 2026; published: April 15, 2026

Abstract

The application of dual-energy computed tomography (DECT) has become increasingly widespread. This technique, based on differences in X-ray attenuation values of substances under different energy conditions, can effectively differentiate and quantify tissue components, while also providing a variety of quantitative parameters to assist in disease diagnosis, differential diagnosis, non-invasive pathological prediction, preoperative evaluation, and prognostic assessment. DECT has been widely applied in pancreatic diseases, such as assessing the severity of acute pancreatitis and

*通讯作者。

differentiating pancreatic ductal adenocarcinoma from pancreatic cystic lesions or chronic pancreatitis. This article reviews the application of quantitative parameters derived from dual-energy CT in pancreatic diseases.

Keywords

Dual-Energy CT, Pancreatic Imaging, Quantitative Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前 CT 仍是胰腺疾病最主要的检测手段,但传统的 CT 多提供定性或半定量信息,并受观察者经验影响大,难以提供更多客观的定量参数对疾病进行评估。双能 CT 利用不同物质在不同能量下衰减特性对物质进行分离及定量[1]。与常规 CT 比较,双能 CT 具有降低扫描时间、降低辐射剂量等优点[2],还可以通过后处理软件可以生成一系列衍生图像,并获得相应定量参数,如碘浓度(Iodine Concentration, IC)、归一化碘浓度(Normalized Iodine Concentration, NIC)、光谱衰减曲线斜率(Slope Rate of the Spectral Attenuation Curve, λ)、电子云密度/有效原子序数(Electron Density/Effective Atomic Number, Rho/Zeff)、脂肪分数(Fat Fraction, FF)等,辅助疾病的诊断及治疗。本文就双能 CT 在胰腺疾病中的应用作一综述。

2. DECT 多参数在胰腺炎中的应用

2.1. DECT 在急性胰腺炎(Acute Pancreatitis, AP)中的应用

AP 是胰腺常见的急症,以病程进展迅速、并发症多为特点,轻时可自限,重时可以快速发展至危及生命的程度。胰腺炎传统的影像学评估使用影像学征象对其进行分类及严重性分层,例如 CT 严重指数评分及改良的 CT 严重指数评分[3] [4],这不可避免地依赖于医生的个人经验,可能产生主观分歧。而 DECT 则可以通过定量参数提供客观的、可视化的信息来辅助早期诊断、评估胰腺炎严重程度。

碘浓度(IC)、归一化碘浓度(NIC)与脂肪分数(FF)是最常见的与 AP 相关的 DECT 定量参数。Hu 等人[5]通过测量胰腺实质 IC 和 NIC 评估急性胰腺炎的严重程度,结果表明 IC、NIC 都随 AP 严重程度的增加而降低,推测其原因可能与胰腺炎性微环境破坏导致组织缺血有关。同时 IC 和 FF 也可以用来预测 AP 的严重程度:坏死性胰腺炎因灌注减低表现为 IC 降低,而水肿型胰腺炎则表现为 IC 升高,且 IC 的变化独立于 CT 值或与 CT 值相关的 FF [6]。Mahmoudi 等[7]的研究指出门脉期 IC 可以作为预测 AP 严重程度的影像学标志物,并且 IC 及 NIC 与改良的 CT 严重指数之间呈中度负相关(IC: $r = -0.65, p < 0.001$; NIC: $r = -0.50, p < 0.001$)。Martin [8]评估了 DECT 定量参数对早期 AP 的诊断价值,结果显示正常胰腺实质与炎性胰腺实质的 IC 有显著性差异($p \leq 0.01$),且基于最佳截断值的 IC 诊断 AP 的效能(AUC: 0.86; 敏感性 96%; 特异性 77%)及敏感性比传统的影像特征更强(AUC: 0.80; 敏感性 78%; 特异性 82%)。

上述研究体现了 DECT 定量参数在 AP 诊断及评估上的优势。严重的 AP 容易产生如器官衰竭的并发症,而双能参数有助于早期诊断 AP 并评估风险,预防严重并发症。目前 AP 的研究结果多集中于 IC,且大多都是较小样本的回顾性分析,未来还可进行更大样本的研究进一步探讨分级的阈值及方法,以及探究其他参数的应用潜力。

2.2. DECT 在慢性胰腺炎(Chronic Pancreatitis, CP)中的应用

肿块型慢性胰腺炎与胰腺导管腺癌(Pancreatic Ductal Adenocarcinoma, PDAC)在常规影像学上常表现相似, 鉴别诊断较为困难, 然而两者的治疗策略及预后存在显著差异[9]。虽然穿刺活检可提供病理诊断, 但其假阴性率较高, 且存在一定的并发症风险[10][11]。DECT 可通过定量参数为二者的鉴别提供新的影像学依据。Yin 等[12]对比分析了 MFCP 与可切除 PDAC 患者在动脉期及胰腺实质期的 DECT 定量参数, 结果显示肿块型慢性胰腺炎病灶在双期的 NIC 及能谱曲线斜率均显著高于可切除 PDAC 患者, 其中以胰腺实质期的 NIC 鉴别效能最佳(敏感性为 93.3%, 特异性为 89.5%)。研究者推测, 这一差异可能与 MFCP 病灶内含有相对丰富的幼稚毛细血管, 因而利于对比剂扩散有关, 亦可能与二者病灶纤维化程度的不同有关。除此之外, 双能参数与 CP 预后、并发症之间的关系等还有待进一步探索。

3. DECT 多参数在胰腺肿瘤中的应用

3.1. DECT 多参数在胰腺导管腺癌(Pancreatic Ductal Adenocarcinoma, PDAC)中的应用

PDAC 是胰腺最常见的恶性肿瘤。美国癌症协会 2024 年发布的数据显示, PDAC 的五年生存率在所有癌症中仍居低位, 且发病呈年轻化趋势[13]。目前, 根治性手术切除是 PDAC 唯一的治愈性手段, 但由于早期缺乏特异性临床症状, 加之常规 CT 软组织分辨率有限且易受射线硬化伪影影响, 导致小病灶检出率较低, 约 85% 的患者在确诊时已失去手术机会[14]-[16]。DECT 通过双能量采集增强组织对比度、减少硬化伪影, 有助于提高病变检出能力, 其在 PDAC 的诊断、鉴别诊断及预后评估中的价值日益受到关注。

3.1.1. 诊断与鉴别诊断

基于 DECT 重建的单能量图像(Monoenergetic Image, MEI)已被证实可显著改善组织及血管对比度[17][18], 从而提升 PDAC 的诊断效能。Beer 等[17]对 45 例 PDAC 患者的研究发现, 40 keV MEI 相较于 50~80 keV MEI 可更显著地提高病灶显著性及胰周血管显示质量, 且不伴图像噪声的明显增加。Noda 等[19]通过分析胰腺实质期 40~75 keV 范围内虚拟单能量图像的定量指标发现, 能级越低, 病灶 CT 值、信噪比(SNR)及对比噪声比(CNR)越高, 而长径与短径的测量误差则越小。该结果提示, 低能级虚拟单能图(VMI)有助于更清晰地呈现病灶轮廓, 并提高测量准确性。Nagayama 等[20]将研究能级扩展至 100 keV, 对比胰腺实质期与门静脉期的 VMI 图像, 同样证实低能级 VMI 可显著提高病灶的 CNR。然而, 关于 VMI 显示 PDAC 的最佳期相及能级, 目前尚未形成统一标准, 相关结论仍需更多研究加以验证与统一。

此外, DECT 定量参数在胰腺良恶性病变鉴别中的应用亦显示出潜力。Ebrahimian 等[21]基于动脉期虚拟平扫(VNC)及碘图构建的定量参数模型与影像组学模型在胰腺良恶性疾病鉴别中具有相近的准确性(AUC 分别为 0.900 和 0.940), 提示 DECT 定量参数可作为一种更为简便的替代方法辅助临床鉴别。但该研究仅对病变进行良恶性定性, 未进一步区分具体病理类型, 后续研究可在此基础上深入探索。

3.1.2. 淋巴结转移的评估

淋巴结转移是影响胰腺癌患者预后的独立危险因素之一。研究表明, 合并淋巴结转移的 PDAC 患者五年生存率显著降低至 4% 左右, 因此, 术前准确评估淋巴结状态对于制定个体化治疗方案及判断预后具有重要意义[22]。Le 等[22]对短径 > 0.5 cm 的淋巴结进行 DECT 定量分析, 并与术后病理结果对照, 发现胰腺实质期淋巴结的归一化碘浓度(NIC)在预测淋巴结转移方面优于常规影像特征(如大小、形态等), 但其诊断效能仍有限(AUC = 0.67; 敏感性 78%; 特异性 58%)。Elsherif 等[23]基于 54 例新辅助化治疗的 PDAC 患者原发灶胰腺实质期虚拟平扫及碘图提取影像组学特征, 结果显示 70 keV 时胰腺实质期图像积分总量(即平均 CT 值与肿瘤体积的乘积)与 N 分期呈负相关, 敏感性高达 96%, 但特异性仅 34%。An

等[24]从术前双能 CT 的 100 keV 及 150 keV 虚拟单能图像中提取影像组学特征, 并联合临床特征构筑淋巴结转移预测模型, AUC 达 0.92 (敏感度为 76%; 特异度为 83%), 且该模型预测高危组患者总生存期显著低于低危组($p=0.012$)。Wen 等[25]对 163 例患者(转移组 58 例, 非转移组 105 例)分组比较, 发现转移淋巴结在动脉期 NIC 及能谱曲线斜率均显著低于非转移淋巴结(AUC=0.852), 推测其机制可能与转移淋巴结内肿瘤细胞替代 T、B 淋巴细胞及免疫细胞, 导致碘摄取能力下降有关。基于此, 该团队提出将动脉期 NIC 与淋巴结长短径比值(L/S)相结合的联合模型(AUC0.878; 敏感度 70.7%; 特异度 88.6%), 可为 PDAC 区域性淋巴结转移的术前无创评估提供有效工具, 有助于个体化治疗决策。

传统 CT 多依赖淋巴结尺寸判断是否转移, 准确性较低, 因实际较小的淋巴结也可能已经转移, 而增大的淋巴结也可能是反应性增生, 而能谱的参数可以定量地提供淋巴结转移与否的依据, 提高诊断的信心, 辅助临床决策。但需要指出的是, 部分研究纳入术前化疗的患者, 可能影响淋巴结的状态, 而化疗前后淋巴结 DE 参数的变化目前暂未阐明。同时部分研究的患者病例数较少、纳入的双能参数单一, 或应用的设备厂商较单一, 结果的可推广性还需要更大样本、多中心的研究验证, 并可探索更多的 DE 参数。

3.1.3. 放化疗疗效评估

对于边界性可切除、局部晚期不可切除或转移性 PDAC 患者, 全身化疗是常用的治疗手段, 而 CT 检查则是评估治疗反应的常规影像学工具[26]。近年来, DECT 碘图在疗效评估中的价值日益受到关注, 其定量参数有望成为反映肿瘤生物学行为及治疗响应的生物标志物[26]。Noda 等[27]通过测量胰腺实质期及平衡期的 IC 及 CT 值, 分析其与化疗反应的关系, 发现 IC 在反应组(部分缓解或疾病稳定)与非反应组(疾病进展)之间存在显著差异, 提示 IC 可作为 PDAC 化疗患者的潜在疗效预测指标。Ohira 等[28]进一步将接受术前放化疗的 40 例患者分为有反应组与无反应组, 比较两组间 CT 值、IC 值及胰腺实质与肿瘤间的差值(ΔHU 、 ΔIC), 结果显示上述参数均是预测放化疗组织病理学反应的重要因素。

PDAC 的间质纤维化是其区别于其他肿瘤的重要病理特征, 亦被认为是导致化疗药物递送效率低下的关键因素之一。细胞外容积(Extracellular volume, ECV)作为一种无创性定量评估细胞外基质的影像生物标志物, 可间接反映组织纤维化程度及肿瘤微环境状态。基于平衡期碘图测得的碘密度值, 刻有 DECT 图像计算 ECV 值, 为疾病的早期评估及疗效监测提供依据。Noi 等[29]基于动脉晚期肿瘤 IC 计算 ECV, 并分析其与 CA19-9 的关系, 发现 ECV 的变化与 CA19-9 的变化呈线性相关, 提示 DECT 碘图来源的 ECV 可用于预测 PDAC 患者新辅助放化疗后的治疗反应。Fukukura 等[30]对远处转移的 IV 期 PDAC 患者进行前瞻性分析, 发现 ECV 是无进展生存期及总生存期的独立预测因素。Fujita 等[31]进一步将平衡期 DECT-ECV 与术后病理对照, 结果显示新辅助化疗(Neoadjuvant Chemotherapy, NAC)反应组的 DECT-ECV 显著低于非反应组, 采用最佳截断值(DECT-ECV < 26.0%)预测 NAC 反应的敏感性为 71.4%, 特异性为 85.0%, 准确性达 83.6%。上述研究共同提示, DECT-ECV 可作为预测 PDAC 患者治疗反应的有效生物标志物, 低 ECV 值往往预示着更好的疗效。

这些结果说明了 DE 参数在放化疗疗效评估上的潜力, 但仍有一些问题有待探索。PDAC 放化疗方案各中心不尽相同, DE 参数与放化疗关系的研究仍处于初步探索阶段, 缺乏对治疗方案的亚组分析, 而不同的放化疗方案, 如联合放化疗, 或仅术前新辅助化疗等, 可能对研究的结果存在影响。在探究 ECV 的作用时, 不同研究所选择的增强扫描期相, 以及同样期相的具体扫描时间和方案都有所差异, 也可能对结果有一定的影响。

3.1.4. 术后复发预测

术后复发是影响胰腺癌患者长期生存的重要因素。据统计, 约 35%至 50%的胰腺癌患者在术后 1 至

3年内出现复发[32]。然而,在影像学上区分肿瘤复发与非特异性术后软组织改变仍具有一定困难,因其都表现为软组织密度影并可伴强化,难以仅凭常规CT征象早期识别高复发风险人群。Mathy等[33]评估了常规CT值及基于120 keV等效图像的IC在鉴别局限性胰腺癌复发与该非特异性软组织中的价值,结果显示,尽管复发灶与PSF在IC上存在一定差异,但IC的诊断效能并未优于传统CT值,提示DECT定量参数IC在此类鉴别任务中尚未体现出显著优势。

3.2. DECT 多参数在胰腺神经内分泌肿瘤(Neuroendocrine Neoplasm, NEN)中的运用

胰腺NEN是相对少见的胰腺恶性肿瘤,根据WHO分类可分为神经内分泌瘤(Neuroendocrine Tumor, NET)和神经内分泌癌(Neuroendocrine Carcinoma, NEC)。在常规CT上,多数NEN于动脉期及门脉期表现为明显均匀强化,较易与PDAC相鉴别。然而,部分NEN呈非富血供表现,其影像特征与PDAC重叠,鉴别诊断仍具挑战性。Hu等[34]基于DECT定量参数构建鉴别模型,发现基于动脉期及门脉期NIC的模型AUC高达0.918,显著优于传统CT定性模型(AUC = 0.782)及传统CT定量模型(AUC = 0.665),提示DECT定量参数可作为区分非富血供NEN与PDAC的有效影像生物标志物。

在肿瘤分级评估方面,Li等[35]回顾性分析了DECT鉴别非低级别PNET与低级别PNET的价值,该研究纳入54例PNENs患者(低级别G1组40例,非低级别G2/G3组14例),发现非低级别PNENs的肿瘤直径更大,动脉期标准化有效原子序数与NIC均显著低于低级别组,与定性参数(肿瘤大小)联合后区分两类肿瘤的效能最佳(AUC = 0.952; 敏感度100%; 特异度83.8%)。Wang等[36]纳入104例胰腺神经内分泌肿瘤患者(89例NET, 15例NEC)进一步证实了DECT在鉴别NET与NEC中的价值,并发现门脉期IC及Zeff均为鉴别两者的独立预测因素,两者联合诊断的AUC达0.921(敏感度93.33%; 特异度80.90%),高于单一CT值。

对于功能性PNET,张静等[37]对43例胰岛素瘤患者进行了MRI及能谱CT对照研究,结果显示能谱CT定量参数联合应用可提高胰岛素瘤的检出率,且能谱CT与MRI的诊断效能相当,两者联合可进一步优化检出效果。综上所述,DECT在PNET的诊断、鉴别诊断及无创性分级评估中具有重要价值,可为临床决策提供多维度影像学依据。

3.3. DECT 多参数胰腺囊性肿瘤中的应用

胰腺囊性肿瘤临床相对少见[38],主要包括浆液性囊腺瘤(Serous Cystadenoma, SCA)、黏液性囊性肿瘤(Mucinous Cystic Neoplasm, MCN)、实性假乳头状瘤及导管内乳头状黏液性肿瘤等,其中以SCA与MCN较为常见。寡囊性SCA与MCN在常规CT影像上常表现相似,但两者治疗策略存在显著差异,因此准确鉴别具有重要临床意义。Lin等[39]通过分析44例患者(24例SCA, 20例MCN)的形态学特征及DECT定量参数(40~70 keV CT值、IC、Zeff),发现定量参数可提供额外的鉴别信息,但未能显著提升整体诊断效能。目前的研究表明[39][40],在SCA与MCN的鉴别诊断中,形态学特征仍是核心依据,DECT定量参数可作为辅助手段进一步优化诊断准确性。

4. DECT 多参数在脂肪胰中的应用

胰腺内脂肪异常堆积的命名尚未统一,目前临床上常以“胰腺脂肪浸润”(Fatty Infiltration of the Pancreas)、“胰腺内脂肪沉积”(Intra-Pancreatic Fat Deposition)及“脂肪胰”(Fatty Pancreas)等术语泛指这一现象,其总体患病率约为16% [41][42]。既往研究表明,脂肪胰与多种胰腺疾病密切相关,包括2型糖尿病(Type 2 Diabetes Mellitus, T2DM) [43]、胰腺癌[44]-[46]、胰腺内外分泌功能不全[47]以及急性慢性胰腺炎[43][48]等。因此,对胰腺脂肪含量进行无创、准确地定量评估具有重要的临床价值,可能减少潜在疾病的发生。传统CT多依赖胰腺实质CT值或胰腺与脾脏CT比值进行半定量判断,而定量分析主要依

赖于 MRI。DECT 的出现为胰腺脂肪定量提供了新的技术手段, 其通过物质分离算法可直接生成脂肪分数图, 实现脂肪含量的可视化与定量评估。Kameda 等[49]研究证实, DECT 测得的脂肪分数(FF)值与基于 MRI 水脂分离技术测得的 FF 值高度相关, 且在脂肪定量方面优于传统 CT 值, 展现出良好的应用前景。但目前只有西门子医疗的设备可通过后处理工作站直接获得 FF 值, 其结果的可推广性、临床应用潜力还有待进一步探索。

5. DECT 多参数在 2 型糖尿病(T2DM)中的应用

T2DM 的发生发展与胰腺纤维化、脂肪沉积等病理改变密切相关, 这些因素可导致胰岛细胞功能障碍及糖耐量受损。Huang 等[50]基于光谱 CT 测量了胰腺头、体、尾部的 FF 值及 CT 值, 发现 T2DM 组与对照组在各部位的 FF 值及 CT 值之间均存在显著差异, 其中胰尾部 FF 值诊断糖耐量异常的效能最高 (AUC = 0.716)。该研究提示, 光谱 CT 可敏感地识别 T2DM 患者胰腺实质的脂肪浸润程度。除脂肪定量外, 细胞外容积(ECV)亦可用于评估胰腺纤维化程度。蔡晓艺等[51]研究显示, T2DM 患者胰腺 ECV 显著升高, 且 ECV 越高, 胰腺纤维化程度越重, 胰岛细胞损伤亦越明显, 提示 ECV 可作为评估与胰腺纤维化有关的糖耐量受损的影像学生物标志物。而其他更多 DE 参数与糖尿病的风险分层、疗效、预后等的关系, 还留待进一步探究。

6. 总结

总体而言, DECT 通过提供多维度、量化的影像信息, 正在推动胰腺疾病从形态学描述向功能成像与精准诊疗的转变。尽管目前部分应用仍处于探索阶段, 相关参数的最佳阈值及标准化检测流程有待进一步统一, 但随着技术的不断进步与临床研究的深入, DECT 有望在胰腺疾病的个体化诊疗中发挥越来越重要的作用。未来, 结合深度学习与影像组学方法, DECT 的多参数数据有望进一步释放其潜在的临床价值, 为胰腺疾病的早期诊断、精准分型及疗效监测提供更加可靠的影像学支撑。

参考文献

- [1] Greffier, J., Villani, N., Defez, D., Dabli, D. and Si-Mohamed, S. (2023) Spectral CT Imaging: Technical Principles of Dual-Energy CT and Multi-Energy Photon-Counting CT. *Diagnostic and Interventional Imaging*, **104**, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2022.11.003>
- [2] Patino, M., Prochowski, A., Agrawal, M.D., Simeone, F.J., Gupta, R., Hahn, P.F., et al. (2016) Material Separation Using Dual-Energy CT: Current and Emerging Applications. *RadioGraphics*, **36**, 1087-1105. <https://doi.org/10.1148/rg.2016150220>
- [3] Balthazar, E.J., Ranson, J.H., Naidich, D.P., Megibow, A.J., Caccavale, R. and Cooper, M.M. (1985) Acute Pancreatitis: Prognostic Value of CT. *Radiology*, **156**, 767-772. <https://doi.org/10.1148/radiology.156.3.4023241>
- [4] Mortelet, K.J., Wiesner, W., Intriore, L., Shankar, S., Zou, K.H., Kalantari, B.N., et al. (2004) A Modified CT Severity Index for Evaluating Acute Pancreatitis: Improved Correlation with Patient Outcome. *American Journal of Roentgenology*, **183**, 1261-1265. <https://doi.org/10.2214/ajr.183.5.1831261>
- [5] Hu, X., Wei, W. and Zhang, L. (2021) The Value of a Dual-Energy Spectral CT Quantitative Analysis Technique in Acute Pancreatitis. *Clinical Radiology*, **76**, 551.e11-551.e15. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2021.02.025>
- [6] Matana Kaštelan, Z., Brumini, I., Poropat, G., Tkalčić, L., Grubešić, T. and Miletić, D. (2024) Pancreatic Iodine Density and Fat Fraction on Dual-Energy Computed Tomography in Acute Pancreatitis. *Diagnostics*, **14**, Article 955. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14090955>
- [7] Mahmoudi, S., Martin, S., Koch, V., Gruenewald, L.D., Bernatz, S., D'Angelo, T., et al. (2022) Value of Dual-Energy CT Perfusion Analysis in Patients with Acute Pancreatitis: Correlation and Discriminative Diagnostic Accuracy with Varying Disease Severity. *Diagnostics*, **12**, Article 2601. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12112601>
- [8] Martin, S.S., Trapp, F., Wichmann, J.L., Albrecht, M.H., Lenga, L., Durden, J., et al. (2019) Dual-Energy CT in Early Acute Pancreatitis: Improved Detection Using Iodine Quantification. *European Radiology*, **29**, 2226-2232. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5844-x>

- [9] Beyer, G., Habtezion, A., Werner, J., Lerch, M.M. and Mayerle, J. (2020) Chronic Pancreatitis. *The Lancet*, **396**, 499-512. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(20\)31318-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(20)31318-0)
- [10] Iglesias-Garcia, J., Dominguez-Munoz, E., Lozano-Leon, A., *et al.* (2007) Impact of Endoscopic Ultrasound-Guided Fine Needle Biopsy for Diagnosis of Pancreatic Masses. *World Journal of Gastroenterology*, **13**, 289-293. <https://doi.org/10.3748/wjg.v13.i2.289>
- [11] Yoshinaga, S., Suzuki, H., Oda, I. and Saito, Y. (2011) Role of Endoscopic Ultrasound-Guided Fine Needle Aspiration (EUS-FNA) For Diagnosis of Solid Pancreatic Masses. *Digestive Endoscopy*, **23**, 29-33. <https://doi.org/10.1111/j.1443-1661.2011.01112.x>
- [12] Yin, Q., Zou, X., Zai, X., Wu, Z., Wu, Q., Jiang, X., *et al.* (2015) Pancreatic Ductal Adenocarcinoma and Chronic Mass-Forming Pancreatitis: Differentiation with Dual-Energy MDCT in Spectral Imaging Mode. *European Journal of Radiology*, **84**, 2470-2476. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2015.09.023>
- [13] Siegel, R.L., Giaquinto, A.N. and Jemal, A. (2024) Cancer Statistics, 2024. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, **74**, 12-49. <https://doi.org/10.3322/caac.21820>
- [14] Xie, T., Wang, X., Li, M., Tong, T., Yu, X. and Zhou, Z. (2020) Pancreatic Ductal Adenocarcinoma: A Radiomics Nomogram Outperforms Clinical Model and TNM Staging for Survival Estimation after Curative Resection. *European Radiology*, **30**, 2513-2524. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06600-2>
- [15] Khorana, A.A., Mangu, P.B., Berlin, J., Engebretson, A., Hong, T.S., Maitra, A., *et al.* (2016) Potentially Curable Pancreatic Cancer: American Society of Clinical Oncology Clinical Practice Guideline. *Journal of Clinical Oncology*, **34**, 2541-2556. <https://doi.org/10.1200/jco.2016.67.5553>
- [16] Groot, V.P., Rezaee, N., Wu, W., Cameron, J.L., Fishman, E.K., Hruban, R.H., *et al.* (2018) Patterns, Timing, and Predictors of Recurrence Following Pancreatectomy for Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *Annals of Surgery*, **267**, 936-945. <https://doi.org/10.1097/sla.0000000000002234>
- [17] Beer, L., Toepker, M., Ba-Ssalamah, A., Schestak, C., Dutschke, A., Schindl, M., *et al.* (2019) Objective and Subjective Comparison of Virtual Monoenergetic Vs. Polychromatic Images in Patients with Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *European Radiology*, **29**, 3617-3625. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06116-9>
- [18] Adam, S.Z., Rabinowich, A., Kessner, R. and Blachar, A. (2021) Spectral CT of the Abdomen: Where Are We Now? *Insights into Imaging*, **12**, Article No. 138. <https://doi.org/10.1186/s13244-021-01082-7>
- [19] Noda, Y., Goshima, S., Kaga, T., Ando, T., Miyoshi, T., Kawai, N., *et al.* (2020) Virtual Monochromatic Image at Lower Energy Level for Assessing Pancreatic Ductal Adenocarcinoma in Fast KV-Switching Dual-Energy Ct. *Clinical Radiology*, **75**, 320.e17-320.e23. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2019.11.012>
- [20] Nagayama, Y., Tanoue, S., Inoue, T., Oda, S., Nakaura, T., Utsunomiya, D., *et al.* (2020) Dual-Layer Spectral CT Improves Image Quality of Multiphase Pancreas CT in Patients with Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *European Radiology*, **30**, 394-403. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06337-y>
- [21] Ebrahimian, S., Singh, R., Netaji, A., Madhusudhan, K.S., Homayounieh, F., Primak, A., *et al.* (2022) Characterization of Benign and Malignant Pancreatic Lesions with DECT Quantitative Metrics and Radiomics. *Academic Radiology*, **29**, 705-713. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2021.07.008>
- [22] Le, O., Javadi, S., Bhosale, P.R., Koay, E.J., Katz, M.H., Sun, J., *et al.* (2021) CT Features Predictive of Nodal Positivity at Surgery in Pancreatic Cancer Patients Following Neoadjuvant Therapy in the Setting of Dual Energy Ct. *Abdominal Radiology*, **46**, 2620-2627. <https://doi.org/10.1007/s00261-020-02917-5>
- [23] Elsherif, S.B., Javadi, S., Le, O., Lamba, N., Katz, M.H.G., Tamm, E.P., *et al.* (2022) Baseline CT-Based Radiomic Features Aid Prediction of Nodal Positivity after Neoadjuvant Therapy in Pancreatic Cancer. *Radiology: Imaging Cancer*, **4**, e210068. <https://doi.org/10.1148/rycan.210068>
- [24] An, C., Li, D., Li, S., Li, W., Tong, T., Liu, L., *et al.* (2022) Deep Learning Radiomics of Dual-Energy Computed Tomography for Predicting Lymph Node Metastases of Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **49**, 1187-1199. <https://doi.org/10.1007/s00259-021-05573-z>
- [25] Wen, Y., Song, Z., Li, Q., Zhang, D., Li, X., Liu, Q., *et al.* (2024) A Nomogram Based on Dual-Layer Detector Spectral Computed Tomography Quantitative Parameters and Morphological Quantitative Indicator for Distinguishing Metastatic and Nonmetastatic Regional Lymph Nodes in Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 4376-4387. <https://doi.org/10.21037/qims-23-1624>
- [26] Kawamoto, S., Fuld, M.K., Laheru, D., Huang, P. and Fishman, E.K. (2018) Assessment of Iodine Uptake by Pancreatic Cancer Following Chemotherapy Using Dual-Energy Ct. *Abdominal Radiology*, **43**, 445-456. <https://doi.org/10.1007/s00261-017-1338-6>
- [27] Noda, Y., Goshima, S., Miyoshi, T., Kawada, H., Kawai, N., Tanahashi, Y., *et al.* (2018) Assessing Chemotherapeutic Response in Pancreatic Ductal Adenocarcinoma: Histogram Analysis of Iodine Concentration and CT Number in Single-Source Dual-Energy CT. *American Journal of Roentgenology*, **211**, 1221-1226. <https://doi.org/10.2214/ajr.18.19791>

- [28] Ohira, S., Ikawa, T., Kanayama, N., Minamitani, M., Kihara, S., Inui, S., *et al.* (2023) Dual-Energy Computed Tomography-Based Iodine Concentration as a Predictor of Histopathological Response to Preoperative Chemoradiotherapy for Pancreatic Cancer. *Journal of Radiation Research*, **64**, 940-947. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrad076>
- [29] Noid, G., Godfrey, G., Hall, W., Shah, J., Paulson, E., Knechtges, P., *et al.* (2023) Predicting Treatment Response from Extracellular Volume Fraction for Chemoradiation Therapy of Pancreatic Cancer. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, **115**, 803-808. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2022.09.084>
- [30] Fukukura, Y., Kumagae, Y., Higashi, R., Hakamada, H., Nakajo, M., Maemura, K., *et al.* (2020) Extracellular Volume Fraction Determined by Equilibrium Contrast-Enhanced Dual-Energy CT as a Prognostic Factor in Patients with Stage IV Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *European Radiology*, **30**, 1679-1689. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06517-w>
- [31] Fujita, N., Ushijima, Y., Itoyama, M., Okamoto, D., Ishimatsu, K., Wada, N., *et al.* (2023) Extracellular Volume Fraction Determined by Dual-Layer Spectral Detector CT: Possible Role in Predicting the Efficacy of Preoperative Neoadjuvant Chemotherapy in Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *European Journal of Radiology*, **162**, Article ID: 110756. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2023.110756>
- [32] Groot, V.P., Gemenetzis, G., Blair, A.B., Rivero-Soto, R.J., Yu, J., Javed, A.A., *et al.* (2019) Defining and Predicting Early Recurrence in 957 Patients with Resected Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *Annals of Surgery*, **269**, 1154-1162. <https://doi.org/10.1097/sla.0000000000002734>
- [33] Mathy, R.M., Fritz, F., Mayer, P., Klauss, M., Grenacher, L., Stiller, W., *et al.* (2021) Iodine Concentration and Tissue Attenuation in Dual-Energy Contrast-Enhanced CT as a Potential Quantitative Parameter in Early Detection of Local Pancreatic Carcinoma Recurrence after Surgical Resection. *European Journal of Radiology*, **143**, Article ID: 109944. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109944>
- [34] Hu, X., Shi, S., Wang, Y., Yuan, J., Chen, M., Wei, L., *et al.* (2024) Dual-Energy CT Improves Differentiation of Non-Hypervascular Pancreatic Neuroendocrine Neoplasms from CA 19-9-Negative Pancreatic Ductal Adenocarcinomas. *La radiologia Medica*, **129**, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11547-023-01733-3>
- [35] Li, W., Miao, F., Xu, X., Zhang, J., Wu, Z., Chen, K., *et al.* (2021) Pancreatic Neuroendocrine Neoplasms: CT Spectral Imaging in Grading. *Academic Radiology*, **28**, 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2020.01.033>
- [36] Wang, Y., Hu, X., Shi, S., Song, C., Wang, L., Yuan, J., *et al.* (2022) Utility of Quantitative Metrics from Dual-Layer Spectral-Detector CT for Differentiation of Pancreatic Neuroendocrine Tumor and Neuroendocrine Carcinoma. *American Journal of Roentgenology*, **218**, 999-1009. <https://doi.org/10.2214/ajr.21.27017>
- [37] 张静, 林晓珠, 陈克敏, 等. MRI 和能谱 CT 成像在胰岛素瘤诊断中的初步研究[J]. 临床放射学杂志, 2014, 33(3): 368-372.
- [38] Berman, L., Mitchell, K.A., Israel, G. and Salem, R.R. (2010) Serous Cystadenoma in Communication with the Pancreatic Duct: An Unusual Radiologic and Pathologic Entity. *Journal of Clinical Gastroenterology*, **44**, e133-e135. <https://doi.org/10.1097/mcg.0b013e3181d3458d>
- [39] Lin, X.Z., Wu, Z.Y., Li, W.X., Zhang, J., Xu, X.Q., Chen, K.M., *et al.* (2014) Differential Diagnosis of Pancreatic Serous Oligocystic Adenoma and Mucinous Cystic Neoplasm with Spectral CT Imaging: Initial Results. *Clinical Radiology*, **69**, 1004-1010. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2014.05.003>
- [40] Laukamp, K.R., Tirumani, S.H., Lennartz, S., Hokamp, N.G., Gupta, A., Pennig, L., *et al.* (2021) Evaluation of Equivocal Small Cystic Pancreatic Lesions with Spectral-Detector Computed Tomography. *Acta Radiologica*, **62**, 172-181. <https://doi.org/10.1177/0284185120917119>
- [41] Ogilvie, R.F. (1933) The Islands of Langerhans in 19 Cases of Obesity. *The Journal of Pathology and Bacteriology*, **37**, 473-481. <https://doi.org/10.1002/path.1700370314>
- [42] Barre, D., Mizier-Barre, K., Griscti, O. and Hafez, K. (2016) Flaxseed Oil Supplementation Manipulates Correlations between Serum Individual Mol % Free Fatty Acid Levels and Insulin Resistance in Type 2 Diabetics. Insulin Resistance and Percent Remaining Pancreatic β -Cell Function Are Unaffected. *Endocrine Regulations*, **50**, 183-193. <https://doi.org/10.1515/enr-2016-0020>
- [43] Tushuizen, M.E., Bunck, M.C., Pouwels, P.J., Bontemps, S., van Waesberghe, J.H.T., Schindhelm, R.K., *et al.* (2007) Pancreatic Fat Content and β -Cell Function in Men with and without Type 2 Diabetes. *Diabetes Care*, **30**, 2916-2921. <https://doi.org/10.2337/dc07-0326>
- [44] Truong, E., Pandol, S. and Jeon, C. (2022) Uniting Epidemiology and Experimental Models: Pancreatic Steatosis and Pancreatic Cancer. *eBioMedicine*, **79**, Article ID: 103996. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2022.103996>
- [45] Lammert, E., Cleaver, O. and Melton, D. (2003) Role of Endothelial Cells in Early Pancreas and Liver Development. *Mechanisms of Development*, **120**, 59-64. [https://doi.org/10.1016/s0925-4773\(02\)00332-5](https://doi.org/10.1016/s0925-4773(02)00332-5)
- [46] Kreier, F., Kap, Y.S., Mettenleiter, T.C., van Heijningen, C., van der Vliet, J., Kalsbeek, A., *et al.* (2006) Tracing from Fat Tissue, Liver, and Pancreas: A Neuroanatomical Framework for the Role of the Brain in Type 2 Diabetes. *Endocrinology*,

- 147, 1140-1147. <https://doi.org/10.1210/en.2005-0667>
- [47] Tanaka, N., Horiuchi, A., Yokoyama, T., Kaneko, G., Horigome, N., Yamaura, T., *et al.* (2011) Clinical Characteristics of De Novo Nonalcoholic Fatty Liver Disease Following Pancreaticoduodenectomy. *Journal of Gastroenterology*, **46**, 758-768. <https://doi.org/10.1007/s00535-011-0370-5>
- [48] Xie, J., Xu, L., Pan, Y., Li, P., Liu, Y., Pan, Y., *et al.* (2019) Nonalcoholic Fatty Pancreas Disease Is Related Independently to the Severity of Acute Pancreatitis. *European Journal of Gastroenterology & Hepatology*, **31**, 973-978. <https://doi.org/10.1097/meg.0000000000001477>
- [49] Kameda, F., Tanabe, M., Onoda, H., Higashi, M., Ariyoshi, S., Ihara, K., *et al.* (2020) Quantification of Pancreas Fat on Dual-Energy Computed Tomography: Comparison with Six-Point Dixon Magnetic Resonance Imaging. *Abdominal Radiology*, **45**, 2779-2785. <https://doi.org/10.1007/s00261-020-02583-7>
- [50] Huang, S., Liang, Y., Zhong, X., Luo, Q., Yao, X., Nong, Z., *et al.* (2023) Pancreatic Fat Fraction in Dual-Energy Computed Tomography as a Potential Quantitative Parameter in the Detection of Type 2 Diabetes Mellitus. *European Journal of Radiology*, **159**, Article ID: 110668. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2022.110668>
- [51] 蔡晓艺, 季昉, 王国华, 等. 双能量 CT 测量胰腺细胞外体积分数及标准化碘浓度评估 2 型糖尿病[J]. 中国医学影像技术, 2023, 39(3): 385-388.