

· 专家述评 ·



薛华丹，医学博士，主任医师、教授、博士研究生导师，中国医学科学院北京协和医院放射科副主任兼西院放射科主任、西院总支临床医技支部书记。国家级放射影像专业医疗质量控制中心专家委员会副主任委员，中华医学会放射学分会全国委员兼副秘书长、腹部学组副组长，北京医学会放射学分会常务委员兼秘书长，中国医学装备协会磁共振应用专业委员会常务委员兼秘书长，国际放射学战略研究协会（IS3R）委员，北美放射学会（RSNA）亚太地区委员会委员，*Chinese Journal of Academic Radiology* 副主编，*Radiology*、*Academic Radiology*、《中华放射学杂志》编委。荣获国家卫健委医学高层次优秀人才优秀青年医师、北京市高等学校青年教学名师、北京优秀医师、北京市科技新星等荣誉称号，并牵头获北京市科学技术奖及北京医学科技奖二等奖，并获国家科技进步

二等奖、中华医学科技一等奖等各类科技奖励21项，包括国家级、省部级奖项10项。以第一及通信作者在SCI收录期刊上发表论著101篇，累计被引超过1400次。作为课题负责人主持国家级、省部级等基金30项。担任《全身弥散加权成像肿瘤学临床应用图谱：中英文双语版》《多层螺旋CT影像诊断学》《医学影像学》《中华影像医学泌尿生殖卷》（第3版）等著作主编或副主编，参编国内外专家共识及指南22项，获得国家发明专利12项。

定量影像标志物在胰腺癌非手术治疗效果评估及患者预后预测中的应用价值

陈荷冰，薛华丹

中国医学科学院北京协和医学院，北京协和医院放射科，北京100730

[摘要] 胰腺癌具有高度异质性和纤维化环境，导致传统影像学评估手段具有滞后性。当前，定量影像标志物通过提取肿瘤的功能、代谢及微观结构信息，正逐步成为早期识别治疗反应、实现个体化治疗决策的关键突破口。因此，本文创新性地述评了不同影像学技术的定量参数以及影像组学和深度学习在胰腺癌疗效评估及预后预测中的应用价值，从而为下一步研究的改进提供参考，以期推动不同定量成像技术在胰腺癌精准诊疗中的转化应用，最终提升患者的生存质量和延长生存期。

[关键词] 胰腺癌；定量影像标志物；疗效评估；预后预测

中图分类号：R735.9；R445 文献标志码：A

DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2026.02.002

The application value of quantitative imaging markers in treatment response evaluation and prognosis prediction of non-surgical therapies for pancreatic cancer CHEN Hebing, XUE Huadan (1. Department of Radiology, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of

基金项目：国家自然科学基金面上项目(82372051)；北京协和医院中央高水平医院临床科研专项(2025-PUMCH-D-002)；国家重点研发计划“诊疗装备与生物医用材料”重点专项(2024YFC2419300)。

利益冲突：作者声明无利益冲突。

伦理批件：不需要。

知情同意：不需要。

引用本文：陈荷冰，薛华丹. 定量影像标志物在胰腺癌非手术治疗效果评估及患者预后预测中的应用价值[J]. 肿瘤影像学, 2026, 35(2): 220-229.

Funding: National Natural Science Foundation of China (82372051), National High Level Hospital Clinical Research Funding (2025-PUMCH-D-002), National Key R&D Program of China-Key Special Project on Diagnostic Equipment and Biomedical Materials (2024YFC2419300).

Conflicts of interest: authors declare no conflicts of interest.

Ethical approval: not required.

Informed consent: exemption.

Cite this article: CHEN H B, XUE H D. The application value of quantitative imaging markers in treatment response evaluation and prognosis prediction of non-surgical therapies for pancreatic cancer [J]. *Oncoradiology*, 2026, 35 (2): 220-229.

Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100730, China)

Correspondence to: XUE Huadan Email: bjdanna95@163.com

[**Abstract**] Pancreatic cancer is characterized by high heterogeneity and a fibrotic microenvironment, which lead to a lag in the assessment efficacy of conventional imaging modalities. Currently, quantitative imaging markers, by extracting information on tumor function, metabolism, and microstructural characteristics, are gradually becoming a key breakthrough for early identification of treatment response and the realization of individualized treatment decisions. Therefore, this article innovatively reviewed the quantitative parameters of different imaging techniques, as well as the application value of radiomics and deep learning in the evaluation of treatment efficacy and prognosis prediction of pancreatic cancer. This review aimed to provide references for future research improvements, promote the translational application of various quantitative imaging techniques in precision diagnosis and treatment of pancreatic cancer, and ultimately improve patients' quality of life and prolong their survival.

[**Key words**] Pancreatic cancer; Quantitative imaging marker; Treatment response evaluation; Prognosis prediction

胰腺癌是极其致命的癌症之一，患者中位生存期仅约4个月，尽管随着医疗水平的提高，患者的5年生存率有所提升，但也仅为13%^[1]。由于胰腺癌早期诊断困难，仅少数胰腺癌患者适合接受根治性手术。对于不可手术的局部晚期或转移性胰腺癌患者，其治疗主要依靠化疗、靶向治疗、免疫治疗及放疗等全身性或局部性非手术手段。在此背景下，如何实现对非手术治疗效果的早期精准评估，已成为提高患者生存获益、优化个体化治疗方案的关键环节。尽管新兴的分子检测技术（如液体活检技术）为无创精准评估带来了希望，但这项技术仍因样本不足导致灵敏度下降、标准化程度有限、检测费用高昂等局限性制约了临床的普及。面对这一评估困境，利用影像学检查无创、可重复、能全景式反映肿瘤解剖与功能信息等独特优势，探索能够无创、定量反映肿瘤微环境变化的影像学生物标志物，实现对治疗反应的动态、客观评估，已成为优化临床决策的迫切需求。因此，本文就定量影像标志物在胰腺癌非手术治疗效果评估及患者预后预测方面的应用价值展开述评。

1 传统影像学疗效评价手段的局限性

实体肿瘤临床疗效评价标准（response evaluation criteria in solid tumors, RECIST）1.1版是目前临床最常用的评价手段，它通常将疗效分为完全缓解（complete response, CR）、部分缓解（partial response, PR）、疾病稳定（stable disease, SD）以及疾病进展（progressive disease, PD）^[2]。但该标准主要依靠计算机体层

成像（computed tomography, CT）或磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）上肿瘤的大小变化来衡量治疗效果，无法真正反映肿瘤的代谢、血流灌注以及细胞活性等情况，例如对于非典型的治疗反应如免疫治疗的假性进展可能会被误诊为疾病进展，同时肿瘤大小的测量主要由影像科医师进行测量，存在观察者之间的异质性。因此，需要探索其他先进的影像学手段辅助该标准对肿瘤的治疗效果进行更精准、更及时的判断。

2 CT定量参数

2.1 CT能量成像

能量成像的形式包括基于X射线球管的能量CT技术和基于探测器的能量CT技术。能量CT技术的核心优势在于物质分离技术，已显著超越了常规CT仅提供解剖学信息的局限，可通过不同的后处理技术实现组织成分定量分析，如虚拟单能量图像、碘图、钙图、有效原子序数图等，从而为胰腺癌患者疗效评估提供新的维度。其中，碘浓度（iodine concentration, IC）是颇具价值的定量参数之一，能够直接反映肿瘤的血流灌注与血管生成状态。多项研究初步证实了其在疗效评估中的潜力：一项小样本（ $n=18$ ）探索性研究^[3]发现，在晚期胰腺癌患者中，即便肿瘤体积变化不显著，经主动脉IC值校正后原发灶的IC值在化疗后出现下降的趋势，提示其或可比形态学测量更敏感地反映早期治疗效应，但该趋势并非在所有患者中一致，仍需在统一的治疗方案与观察周期的更大规模人群中展开验证。Noda

等^[4]展开的另一项研究前瞻性地收集了60例正在进行一线化疗且没有接受过放疗的晚期胰腺癌患者,并在化疗后对研究对象进行双期(胰腺实质期、平衡期)扫描,分析双期碘图与65 keV单能量图像的直方图参数以及双期 Δ IC值与 Δ CT值对胰腺癌治疗效果的鉴别效能,结果显示碘图中的峰值与 Δ IC值通过logistic回归得到的IC诊断因子判别性能最高,其灵敏度、特异度以及曲线下面积(area under curve, AUC)分别为97.7%、70.6%和0.889,提示IC值动态变化可作为反应评估标志物。

此外,由碘图衍生的细胞外容积分数(extracellular volume, ECV)也被证实是无进展生存期(progression free survival, PFS, $P=0.018$)和总生存期(overall survival, OS, $P=0.022$)的独立预测因子^[5]。ECV在预测新辅助化疗(白蛋白结合型紫杉醇联合吉西他滨、FOLFIRINOX、吉西他滨联合替吉奥方案)后的病理学反应方面也展现出潜力,其与Evans分级结果具有相关性,当以 $ECV=26\%$ 作为阈值时,其预测病理学反应的灵敏度、特异度、准确度、阳性预测值和阴性预测值分别为71.4%、85.0%、83.6%、35.7%和96.2%^[6]。

上述研究展现了CT能量参数的应用潜能,但不同厂商对于双能的实现方式(如双源、单源快速电压切换、双层探测器等)对于IC的测量性能存在一定程度的差异,而对于临床实际患者中的极低IC(0.5 mg/mL)的定量测量均有挑战性^[7]。此外,IC的绝对值受对比剂注射方案(剂量、流速、生理盐水冲管)、扫描时相(如胰腺实质期、门静脉期)及患者心排量等多重因素影响,因此应推进多中心扫描协议的标准化,并通过主动脉、门静脉等参照物进行归一化。同时,应推动固定阈值、半自动分割等方式进行感兴趣区的勾画,进一步减少测量差异^[8-9]。

目前,光子计数CT(photon counting CT, PCCT)作为能量CT的新一代技术,在进一步提升图像质量、降低辐射剂量的同时,在胰腺肿瘤的血管侵犯评估及转移灶检出等方面已显现优势^[10-12]。Shou等^[13]首次聚焦于PCCT多功能参

数在胰腺癌新辅助治疗病理学缓解评估中的应用,前瞻性纳入21例接受新辅助化疗的胰腺癌患者,以术后病理学缓解为金标准,发现病理学缓解者的肿瘤IC值(1.20 mg/mL)显著高于无缓解者(0.47 mg/mL)。进一步分析显示,当将IC值的阈值设置为0.65 mg/mL时,在区分治疗反应时展现出良好的鉴别效能,AUC为0.86,特异度为88%,且观察者间一致性极佳。尽管PCCT在胰腺癌疗效评估中的临床研究尚在起步阶段,但其独特的成像优势使其成为该领域极具潜力的重要发展方向。

2.2 CT灌注成像

对于行化疗或放疗的胰腺癌患者,治疗过程中肿瘤血流特性会发生改变,并且这种变化可能先于形态学上的变化,因此通过CT灌注成像定量参数可以敏感地捕捉到血流特性的细微改变,有望成为早期的疗效评估工具。Park等^[14]的研究发现,治疗有效的患者基线容量转移常数(volume transfer constant, K^{trans})值显著高于治疗无效的患者, K^{trans} 值[阈值: $31.8 \text{ mL} \cdot (100 \text{ mL})^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$]用于区分治疗有效与无效患者的灵敏度为75%,特异度为90%。对于接受新辅助治疗的患者,尤其是放疗,可能诱导胰腺组织纤维化,传统成像方式如CT、MRI因纤维组织与肿瘤具有相似的影像学表现,往往难以明确区分。而CT灌注成像能够识别治疗后纤维化区域与肿瘤组织之间的血流动力学差异,从而为临床提供更准确的评估结果。具体而言,治疗有效患者的基线血流量显著高于治疗无效患者,且治疗后血流量明显增加,而治疗无效患者则无显著变化^[14]。这种新辅助治疗前后灌注参数的定量变化与美国病理学家学会(College of American Pathologists, CAP)分级一致,并能早于肿瘤大小的变化判断治疗反应^[15]。此外,不同间质靶向疗法可能对肿瘤血流动力学产生不同程度的影响,例如抗血管生成药物、白蛋白结合型紫杉醇纳米制剂以及Hedgehog信号转导通路抑制剂可通过各自机制改善肿瘤间质环境,减少异常血管生成,从而增强肿瘤对药物的反应,提高临床治疗效果^[16-17]。CT灌注成像对血流动力学变化灵敏度极高,但测量结果受数学模型选择(如Patlak模型、去卷积模型、最大斜率法等)

与采集方案的影响十分显著，因此标准化采集方式与统一重建参数是保障不同研究间灌注参数可互换的前提^[18]。此外，目前虽缺乏不同疗法间CT灌注成像应用效果的横向比较研究，作为一种具备潜力的无创疗效评估工具，仍值得开展进一步探索。

2.3 基于CT的身体成分定量分析

前述不同成像参数主要反映原发灶的内生特性，但宿主的身体成分（骨骼肌含量、肌间脂肪含量、内脏脂肪含量、皮下脂肪含量等）反映了患者的营养情况以及全身炎症水平，是评估患者放化疗耐受性的重要指标。在可切除/临界可切除胰腺癌患者中，身体成分与手术机会密切相关。Sandini等^[19]对193例接受新辅助治疗的胰腺癌患者身体成分进行分析，研究发现治疗期间患者的脂肪组织显著减少，但骨骼肌面积总体保持稳定。并且在最终获得手术切除机会的患者中，其骨骼肌面积在中位6个月的治疗期内平均增加了5.9%，而未切除者则下降了1.7%。另一项研究^[20]纳入了119例新辅助治疗后接受根治性手术切除的患者，并在第三腰椎水平测量新辅助治疗前后患者CT图像上的身体成分，最终根据测量得到的骨骼肌和脂肪面积分为3种表型：肌肉与脂肪同时消耗（muscle and fat wasting, MFW）型，脂肪消耗（fast-only wasting, FW）型以及无消耗（no wasting, NW）型。结果表明，NW型患者的治疗有效率显著高于MFW型和FW型的患者（ $P=0.007$ ）。MFW表型是无病生存期（disease-free survival, DFS）、OS缩短的独立危险因素。在转移性胰腺癌中，身体成分变化更为迅速且呈现性别特异性差异。Lee等^[21]采用深度学习对456例行姑息化疗的转移性胰腺癌患者的CT身体成分进行全自动分割，单一时间点分析结果显示基线骨骼肌CT值越高，OS越长，并且基线的皮下脂肪指数在女性中是保护因素。纵向分析结果显示，骨骼肌指数、内脏脂肪指数以及皮下脂肪指数在2个月内显著下降，骨骼肌CT值在2~6个月内下降，皮下脂肪指数的变化仅与男性患者OS显著相关。综上所述，将身体成分评估整合到胰腺癌患者放化疗的全程管理中，有助于早期识别高危患者，为调整营养支

持、治疗方案提供依据，从而实现更加个体化的治疗。

3 MRI定量参数

3.1 动态对比增强MRI（dynamic contrast-enhanced MRI, DCE-MRI）

在定量MRI精准评估胰腺癌治疗反应的探索中，DCE-MRI显示出独特的潜力。Tang等^[22]对40例组织学确诊的局部进展期以及转移性胰腺癌患者进行了回顾性研究，探讨了定量DCE-MRI参数在预测以吉西他滨为基础化疗反应中的作用。根据连续的疗效评估分为治疗有效组（PR-PR-PR、SD-PR-PR和SD-SD-PR）和治疗无效组（SD-SD-SD、SD-SD-PD、PR-PD-PD和PD-PD-PD），结果显示，与治疗无效组相比，治疗有效组的肿瘤在治疗前表现出显著更高的 K^{trans} 和血管外细胞外间隙容积比（extravascular extracellular interstitial volume ratio, V_e ）。当 K^{trans} 的截断值为 0.18 min^{-1} 时，其预测灵敏度为81.8%，特异度为88.9%，曲线下面积（area under the curve, AUC）为0.906。另一项前瞻性的研究^[23]探索性地引入便携式灌注体模作为内部参照，显著提升了参数 K^{trans} 测量的可重复性与准确度。该研究结果表明，各灌注参数的变异程度在校正后显著减少，对化疗有反应的胰腺癌在治疗8周后 K^{trans} 值显著增加（ $73\% \pm 6\%$ ），且与无反应组（ $-0\% \pm 5\%$ ）区分度极高（ $P < 0.0001$ ），其效能甚至优于单纯的肿瘤大小测量，为早期疗效预测提供了更敏感的影像学生物标志物，该结果也进一步验证了治疗早期肿瘤灌注的改变可能先于形态学变化。在放疗效果评估中，DCE-MRI参数同样也能反映肿瘤微循环的改变。在评估胰腺癌对立体定向体部放疗的反应方面，Do等^[24]在治疗前、首次放疗后及6周后对患者进行系列扫描，结果表明 K^{trans} 显著下降，这揭示了治疗后肿瘤微血管渗透性受损的过程。尽管样本量较小（ $n=10$ ），但组间比较显示，治疗前 K^{trans} 的直方图特征（如峰度、偏度）在局部控制与早期失败患者间差异有统计学意义。尽管DCE-MRI参数可提示肿瘤微血管的灌注和通透性，但其应用仍有局限性，例如在不同药代动力学模型（Tofts模型、扩展

Tofts模型、双房室交换模型等)中可能会影响结果的可比性,以及对扫描时间分辨率要求高等因素可能会限制该技术的应用。

进一步的研究拓展了DCE-MRI的应用场景与参数范围。值得注意的是,除了 K^{trans} ,反映细胞外空间分布的容积参数也受到关注。Fukukura等^[25]在进行DCE-MRI扫描的同时,还根据注射对比剂约5 min后的平衡期和平扫期计算了治疗前的ECV,发现其在预测患者接受特定化疗方案(吉西他滨联合替吉奥或白蛋白结合型紫杉醇联合吉西他滨)3个周期后的疗效方面相较其他灌注参数表现出最佳性能,AUC为0.918。尽管ECV与从Tofts模型拟合得到的 V_e 在生理意义上相近,但其操作更为简便,为临床提供了一个极具前景的替代性定量评估工具。

3.2 弥散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)

DWI是胰腺常规MRI扫描中重要的序列,其核心参数为表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC),能够提供肿瘤区域水分子弥散的定量信息,通过ADC值的改变能够反映肿瘤治疗前后细胞密度的变化。在胰腺癌新辅助治疗中,ADC是极有潜力的疗效预测因子。一项针对25例接受新辅助放化疗的胰腺癌患者的回顾性研究^[26]首次证实治疗后肿瘤的平均ADC值 $[(1.667\pm 0.161)\times 10^{-3}\text{ mm}^2/\text{s}]$ 显著高于治疗前 $[(1.395\pm 0.136)\times 10^{-3}\text{ mm}^2/\text{s}]$,并且治疗后的ADC值与病理学反应评分(CAP分级)呈中度负相关($r=-0.52$)。此外,Hussien等^[27]的研究表明ADC值在预测肿瘤退缩方面显著优于RECIST 1.1版标准,在30例被诊断为临界可切除的胰腺癌患者中,依据新辅助化疗前后ADC平均值的变化被评估为治疗有效的12例患者,有11例经过多学科评估的患者成功接受R0手术切除。另一项研究^[28]更进一步探索了不同测量方式对于手术结局的预测价值,最终结果显示治疗后全肿瘤的ADC值(阈值: $1.40\times 10^{-3}\text{ mm}^2/\text{s}$)可有效区分肿瘤细胞破坏率 $>50\%$ 与 $\leq 50\%$ 的病理学反应,灵敏度达100%,特异度为81%,准确度达89%。尽管ADC值测

量简便,但其可重复性仍然是值得进一步探索的问题,一项meta分析^[29]显示新辅助治疗有效和无效患者在不同研究中的差异较大,因此在后续的研究中采用标准的采集方式、运动鲁棒技术以及后处理和校正技术,可有效减少ADC值的测量差异。

上述研究主要是基于传统单指数模型,目前已有许多研究采用更复杂的数学模型进行后处理,旨在提供更多比ADC丰富、特异、精准的参数。Qu等^[30]采用体素内非相干运动(intravoxel incoherent motion, IVIM)扫描技术得到纯弥散系数 D 值和灌注分数 f 值,尽管 ΔADC 值仍然是预测临界可切除胰腺癌病理学反应最重要的独立因素(AUC为0.936),但 ΔD 值和 Δf 值的AUC也可达0.836和0.780,同时 $\Delta\text{ADC}\geq 0$ 组、 $\Delta D\geq 0$ 组、 $\Delta f<0$ 组(即治疗后ADC/ D 值升高, f 值降低)也与显著更好的预后相关,亚组分析进一步提示基于多参数DWI可以识别最能从新辅助治疗中获益的患者。弥散峰度成像(diffusion kurtosis imaging, DKI)可用于反映水分子的非高斯分布特性,与真实情境下人体微环境不均质性导致的水分子的自由运动更加接近。Zhang等^[31]回顾并分析了21例接受姑息化疗的不可切除胰腺癌患者,在化疗前后进行了多 b 值DWI扫描,并计算了ADC、平均弥散系数(mean diffusion coefficient, MD)与平均峰度(mean kurtosis coefficient, MK)等参数。统计结果表明,化疗后,治疗有效组(PR组)的 ΔADC 与 ΔMD 均显著高于无效组(非PR组), ΔMD 在预测化疗反应方面优于 ΔADC ,其AUC更高(ΔMD : AUC=0.898; ΔADC : AUC=0.806)。

3.3 弛豫定量成像

弛豫定量成像涉及的T1和T2弛豫时间测量可无创反映组织特性。其中,平扫期与平衡期纵向弛豫率的变化($\Delta R1$)与ECV具有相关性,能够反映肿瘤间质纤维化程度,而纤维化程度的加重也显著影响化疗药物递送的效率。横向磁化率值 $R2^*$ ($1/T2^*$)对顺磁性物质(如脱氧血红蛋白)所引起的磁场不均匀性高度敏感,可作为组织缺氧的间接影像学生物标志物,这为无创评估

肿瘤微环境提供了独特视角,并被证实具有良好的测量可重复性^[32]。因此, Kang等^[33]的研究比较了不同MRI定量参数在FOLFIRINOX方案治疗临界可切除或局部晚期胰腺癌新辅助治疗反应中的预测价值。研究表明,基线 $\Delta R1$ 是肿瘤治疗反应的最佳预测因子,同时也是PFS的独立预测因子,使用 $\Delta R1 \geq 1.31 \text{ s}^{-1}$ 可实现预后分层。尽管目前相关的研究较少,并且该成像技术需要使用专用的脉冲序列,扫描后的不同数学模型的选择也对该技术的实施产生了一定的约束,但在未来的研究当中,更加规范化的扫描流程、校准流程以及更稳健的拟合模型将会被进一步探索。

4 正电子发射断层成像 (positron emission tomography, PET) /MRI

PET/CT是目前临床应用最多的功能-结构融合成像技术,其中氟代脱氧葡萄糖(¹⁸F-FDG)仍然是胰腺癌诊断、分期、疗效评估和复发监测最常用的一线示踪剂。在一项非随机、单中心、前瞻性的II期临床研究^[34]中比较了¹⁸F-FDG PET/CT参数与ADC值在评估新辅助放疗后的肿瘤反应的价值,PET/CT以最大标准摄取值(maximum standard uptake value, SUV_{max})的下降为标准进行评估,缓解率达到85%,最终纳入研究的25例患者中有16例患者接受手术治疗,其中有12例患者成功接受手术切除,而ADC值以及肿瘤大小在新辅助放疗前后差异无统计学意义。Yun等^[35]则根据术前化疗患者肿瘤的代谢反应分为3类:代谢反应型($\Delta SUV_{max}\% > 75\%$)、代谢稳定型($\Delta 15\% < SUV_{max}\% \leq 75\%$)和代谢无反应型($\Delta SUV_{max}\% \leq 15\%$),代谢反应型是术后低复发率以及病理学完全缓解的独立预测因素,同时该类型患者的中位生存期显著长于其他两种类型患者。但是当遇到炎症等情况时,¹⁸F-FDG的非肿瘤原因性摄取可能会干扰临床医师对胰腺癌病情的评估,因此需要更特异的示踪剂来提高准确度。同时对于SUV的测量,该领域已呼吁使用瘦体重标准化摄取值公式而非体重校正公式,另外PET重建需要遵循EARL指南的要求,确保来自不同厂商的设备所测得的SUV具有可比性,并且在临床实践中还需关注不同示踪剂的使用对

于测量结果的影响^[36-37]。

鉴于癌症相关成纤维细胞(cancer associated fibroblasts, CAF)可以在肿瘤细胞表面表达成纤维细胞活化蛋白(fibroblast activation protein, FAP),已有多项研究探索了不同放射性同位素标记的FAP抑制剂(FAP inhibitor, FAPI)的应用价值,如¹⁸F、⁶⁸Ga等。Li等^[38]的研究探讨了¹⁸F FAPI-04 PET/CT在评估胰腺癌全身治疗效果中的作用。除了常用的 SUV_{max} 等代谢参数,该研究还通过 SUV_{mean} 和代谢肿瘤体积(metabolic tumor volume, MTV)计算了总病灶FAP表达(total lesion FAP expression, TLF),虽不似 SUV_{max} 在治疗前后有显著的下降,但同样也观察到了下降的趋势。Esfahani等^[39]则开发了一种⁶⁸Ga标记的I型胶原蛋白靶向PET探针(⁶⁸Ga-collagen binding probe #8, ⁶⁸Ga-CBP8),在FOLFIRINOX敏感和耐药小鼠模型上验证了该探针的特异性,并成功转化到人体新辅助治疗效果评估过程中,5例临界可切除或局部晚期胰腺癌男性患者在接受了标准的新辅助放疗后进行了手术切除,结果提示手术样本测定的肿瘤与胰腺的胶原含量与 SUV_{mean} 呈中度正相关($r=0.54$)。综上,从反映肿瘤糖代谢的¹⁸F-FDG,到靶向肿瘤间质中活化CAF的FAPI,再到直接定量核心基质成分I型胶原的CBP8,PET分子影像技术的演进正推动胰腺癌疗效评估从宏观形态向更特异、更精准的肿瘤微环境分子表型转变。

5 超声定量成像

目前用于胰腺癌疗效评估的超声定量技术主要包括超声弹性成像以及超声造影(contrast-enhanced ultrasound, CEUS)。其中,剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)是弹性成像的一种,它通过测量剪切波在组织中的传播速度(shear wave velocity, SWV)来定量评估组织的杨氏模量,从而提供客观的硬度值。虽然已有研究^[40]证实通过SWE测定的肿瘤硬度与术后病理分析得到的基质比有显著相关性,但Takishin等^[41]的研究发现剪切波弹性以及分散斜率在化疗前后并无显著改变,因此关于SWE的临床实践价值还需要进行前瞻性验证。

CEUS定量参数增强峰值强度(peak

intensity, PI)、达峰时间 (time to peak, TTP) 和时间-强度曲线的 AUC, 可以反映肿瘤的血流动力学变化。Lu 等^[42]探索了 CEUS 时间-强度曲线的定量参数在局部进展期胰腺癌患者放化疗效果预测中的应用价值, 结果表明, TTP 在应答组显著延长, 流入期及流出期 AUC、总 AUC 在应答组显著降低, 并且上述参数治疗前后比值均与糖类抗原 19-9 (carbohydrate antigen, CA19-9) 下降显著相关。Yan 等^[43]基于新辅助治疗的常规超声和 CEUS 构建了预测治疗后临床反应 (RECIST 1.1 版结合治疗前后 CA19-9 水平变化) 的列线图模型, 研究结果表明, TTP 以及肿瘤与正常组织的峰值比是独立的疗效预测因子。综上, 超声定量成像为胰腺癌疗效评估提供了新的功能学视角, 弹性参数反映肿瘤基质硬度, 而基于时间-强度曲线获得的参数则刻画其血流特征, 其在临床上的转化, 还需要大样本、前瞻性、多中心的研究进一步确定其增量价值。

6 影像组学与深度学习相关的研究

6.1 影像组学

胰腺癌纤维间质丰富的特性使得治疗有效时肿瘤尺寸可能无明显缩小, 而近年来多项研究发现基于 CT 的纹理分析可捕捉肿瘤内部组织学改变, 实现无尺寸变化时的疗效评估。Ciaravino 等^[44]的研究结果发现, 对于化疗后肿瘤已降期的患者, 尽管肿瘤大小在影像上未发生明显改变, 但 CT 直方图参数中的峰度在已接受手术切除的患者新辅助治疗前后出现显著差异, 而病情进展组无此改变。Borhani 等^[45]进一步采用多尺度纹理过滤技术, 证实治疗前平均阳性像素值及峰度对病理学反应的预测效能良好 (AUC 为 0.74~0.77), 且治疗前后偏度、峰度的变化与 CA19-9 生化反应显著相关。这些研究提示, 纹理参数可作为胰腺癌纤维化改变的影像替代标志物, 弥补传统形态学评估的不足。然而传统影像组学仅依赖单时间点静态特征, 难以捕捉治疗动态响应。近年来通过量化 delta 影像组学特征 (delta radiomics features, DRF) 在治疗前后的变化, 显著提升了疗效预测的能力, Chen 等^[46]首先发现放疗患者每日 CT 图像的直方图特征 (CT

值、体积、偏度及峰度) 在治疗第 2 周发生显著改变; Nasief 等^[47]利用患者放疗期间每日获取的平扫 CT 图像, 从中提取了高时间分辨率的 DRF, 并发现部分特征如熵、簇倾向性与 Δ CA19-9 具有相关性, 且两者联合可显著提升疗效预测效能 (C-index 从 0.57 提升至 0.87), 多变量分析证实两者均为 OS 的独立预测因子 (Δ CA19-9: $P=0.031$; DRF: $P=0.001$)。但由于该数据采集方式难以在临床实践中普及, Wang 等^[48]计算了新辅助治疗前后两次的 DRF, 并结合 Δ CA19-9 与可切除状态评估, 在预测 OS、DFS 以及手术切缘状态的性能方面要优于其他模型。

在不可切除的胰腺癌疗效评估和预后预测方面, 影像组学同样表现出色。Lu 等^[49]探索了影像组学在预测胰腺癌肝转移患者化疗联合免疫治疗效果中的应用价值, 该研究通过整合治疗前多序列 MRI 的影像组学特征与临床数据, 构建并验证了列线图用于预测 PFS、OS 及客观缓解率 (objective response rate, ORR) 的价值。结果表明, 该模型在训练集、验证集和测试集中均表现出良好的预测效能, 其中预测 6 个月 PFS 的 AUC 分别达到 0.847、0.786 与 0.864, 预测 1 年 OS 的 AUC 分别为 0.770、0.743 与 0.818。值得注意的是, 该研究发现研究对象的 ORR 与 PFS 和 OS 并无显著相关性, 强调了超越传统疗效指标、直接构建生存预测模型的临床必要性, 可作为治疗前风险评估与预后分层的有效工具。类似地, 在立体定向体部放疗后的预后预测中, 基于治疗前增强 CT 构建的与 OS 和局部区域复发分别相关的影像组学预测模型均优于临床模型 (AUC: 0.66 vs 0.54; AUC: 0.78 vs 0.66)^[50]。综上, 影像组学通过捕获肿瘤表型的细微变化, 能够有效预测不同治疗模式下的病理学反应和生存结局, 其与临床生物标志物的结合进一步提升了预测效能, 为治疗前风险分层和治疗中动态监控提供了有力工具。

6.2 深度学习

深度学习通过卷积神经网络自动学习影像中的深层复杂特征, 为患者预后预测开辟了新途

径。其价值不仅在于替代传统特征，更在于实现多维度信息的深度融合。Shao等^[51]首次探索了基于治疗前CEUS视频的深度学习模型预测胰腺癌新辅助化疗疗效反应的可行性，通过分析38例患者的CEUS动态影像所构建的卷积神经网络模型展现出优异的预测效能，AUC达0.908，准确度为86.4%，且能识别出肉眼难以判别的潜在治疗反应模式，为无创智能化疗效预测提供了新思路。这项研究也进一步证实结合影像的微观深层特征能够更全面地刻画肿瘤异质性，是迈向精准预后预测的关键一步。但是，基于深度学习的预测模型也存在局限性。首先，模型的“黑箱”特性使临床医师难以理解其决策逻辑，使得临床推广有阻碍，其次，模型训练的效果依赖于海量数据，数据的标注工作、数据的质量等原因往往使得模型在不同医院之间的泛化效果较差。

综上，影像组学与深度学习正逐步改变胰腺癌的疗效评估范式。未来，两者进一步结合、在前瞻性大样本队列中进行验证并探索其生物学基础，将是推动其向临床实践转化的关键。

7 不同技术临床转化前景与挑战

从临床转化角度而言，现有定量影像学技术在不同治疗场景下各有侧重。针对细胞毒性药物，DWI/ADC值可敏感反映肿瘤细胞密度的变化，且该改变常先于形态学退缩。针对间质靶向治疗，CT灌注成像、DCE-MRI及CEUS能够捕捉治疗诱导的血流动力学演变；而ECV、SWE及FAPI PET/CT则更多反映肿瘤纤维化程度的改变。在肿瘤微环境与代谢活性评估方面，FAPI PET/CT相较于传统¹⁸F-FDG PET/CT具有更高的肿瘤-背景对比度，且不易受治疗相关炎症的干扰。此外，人工智能技术的融入有望推动上述技术的智能化、标准化与操作简便化。

然而，目前多数研究为回顾性设计，且局限于单一时间点的单技术验证，缺乏贯穿治疗全程的纵向多技术联合队列研究。这使得不同技术在不同治疗阶段的决策权重难以直接比较。尽管已有少数研究进行了部分技术之间的对比，但“何时使用何种技术”这一核心临床问题，仍然被锁定在碎片化的探索之中，尚未形成可指导临床决

策的连贯评估体系。未来急需开展前瞻性、多时间点、多技术并行的多中心队列研究，以明确各定量技术在治疗时序中的独立贡献与信息冗余，最终构建出可操作的临床影像路径。

8 总结与展望

在胰腺癌治疗日益精准化的时代，定量影像标志物正逐渐转变为评估非手术治疗效果、预测患者预后的重要桥梁，但距离成为胰腺癌诊疗路径中的常规决策工具，仍面临若干核心挑战。胰腺癌本身的生物学特性，例如间质纤维化不仅限制了药物递送效率，同时也降低了相关影像标志物的灵敏度。未来需加强靶向间质组分的特异性探针的临床转化，或结合影像标志物与液体活检技术，从分子层面和宏观影像两个维度突破现有局限。此外，胰腺癌的高度异质性使得基于二维层面的图像分析信息有限，全肿瘤容积分析才能真正反映肿瘤全貌，但同时也需要付出更高的时间成本。因此，人工智能驱动的自动分割与全肿瘤高维特征分析是必然方向。当前人工智能模型的“黑箱”特性导致临床医师难以接纳其决策，未来应着力于可解释性人工智能技术，使模型的决策依据映射回原始图像，从而提高模型的可信度。如上文各节所述，所有定量技术的应用及后续图像处理均需进行严格的标准化与质量控制，这需要学界、业界及监管机构从扫描协议共识的制定到影像学报告的规范化，进行全链条的共同努力。尽管面临的挑战巨大，但经过长期的探索，定量影像标志物必将为改善胰腺癌患者预后注入核心动力。

第一作者：

陈荷冰 (ORCID: 00009-0000-9032-6642)，博士研究生在读。

通信作者：

薛华丹 (ORCID: 0000-0002-4278-2165)，博士研究生导师，主任医师，E-mail: bjdanna95@163.com。

作者贡献声明：

陈荷冰：文献调研与论文撰写；薛华丹：修订论文、审核论文。

[参考文献]

- [1] STOOP T F, JAVED A A, OBA A, et al. Pancreatic cancer[J]. *Lancet*, 2025, 405(10485): 1182-1202.
- [2] EISENHAEUER E A, THERASSE P, BOGAERTS J, et al. New

- response evaluation criteria in solid tumors: revised RECIST guideline (version 1.1)[J]. *Eur J Cancer*, 2009, 45(2): 228–247.
- [3] KAWAMOTO S, FULD M K, LAHERU D, et al. Assessment of iodine uptake by pancreatic cancer following chemotherapy using dual-energy CT[J]. *Abdom Radiol*, 2018, 43(2): 445–456.
- [4] NODA Y, GOSHIMA S, MIYOSHI T, et al. Assessing chemotherapeutic response in pancreatic ductal adenocarcinoma: histogram analysis of iodine concentration and CT number in single-source dual-energy CT[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2018, 211(6): 1221–1226.
- [5] FUKUKURA Y, KUMAGAE Y, HIGASHI R, et al. Extracellular volume fraction determined by equilibrium contrast-enhanced dual-energy CT as a prognostic factor in patients with stage IV pancreatic ductal adenocarcinoma[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(3): 1679–1689.
- [6] FUJITA N, USHIJIMA Y, ITOYAMA M, et al. Extracellular volume fraction determined by dual-layer spectral detector CT: possible role in predicting the efficacy of preoperative neoadjuvant chemotherapy in pancreatic ductal adenocarcinoma[J]. *Eur J Radiol*, 2023, 162: 110756.
- [7] JACOBSEN M C, CRESSMAN E N K, TAMM E P, et al. Dual-energy CT: lower limits of iodine detection and quantification[J]. *Radiology*, 2019, 292(2): 414–419.
- [8] YEL I, BOOZ C, D'ANGELO T, et al. Standardization of dual-energy CT iodine uptake of the abdomen and pelvis: defining reference values in a big data cohort[J]. *Diagnostics*, 2024, 14(18): 2051.
- [9] CHEN Y, ZHONG J Y, WANG L, et al. Robustness of CT radiomics features: consistency within and between single-energy CT and dual-energy CT[J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(8): 5480–5490.
- [10] WOELTJEN M M, NIEHOFF J H, ROGEL R, et al. Pancreatic cancer in photon-counting CT: low keV virtual monoenergetic images improve tumor conspicuity[J]. *Eur J Radiol*, 2024, 173: 111374.
- [11] KIM J, MABUD T, HUANG C C, et al. Inter-reader agreement of pancreatic adenocarcinoma resectability assessment with photon counting versus energy integrating detector CT[J]. *Abdom Radiol*, 2024, 49(9): 3149–3157.
- [12] DECKER J A, BECKER J, HÄRTING M, et al. Optimal conspicuity of pancreatic ductal adenocarcinoma in virtual monochromatic imaging reconstructions on a photon-counting detector CT: comparison to conventional MDCT[J]. *Abdom Radiol*, 2024, 49(1): 103–116.
- [13] SHOU A, BAGGA B, HAJDU C, et al. A pilot study to assess pancreatic adenocarcinoma treatment response with iodine density from photon counting CT[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2026, 50(1): 13–19.
- [14] PARK M S, KLOTZ E, KIM M J, et al. Perfusion CT: noninvasive surrogate marker for stratification of pancreatic cancer response to concurrent chemo- and radiation therapy[J]. *Radiology*, 2009, 250(1): 110–117.
- [15] HAMDY A, ICHIKAWA Y, TOYOMASU Y, et al. Perfusion CT to assess response to neoadjuvant chemotherapy and radiation therapy in pancreatic ductal adenocarcinoma: initial experience[J]. *Radiology*, 2019, 292(3): 628–635.
- [16] HUANG Z Q, SALUJA A K, DUDEJA V, et al. Molecular targeted approaches for treatment of pancreatic cancer[J]. *Curr Pharm Des*, 2011, 17(21): 2221–2238.
- [17] PERIK T, ALVES N, HERMANS J J, et al. Automated quantitative analysis of CT perfusion to classify vascular phenotypes of pancreatic ductal adenocarcinoma[J]. *Cancers*, 2024, 16(3): 577.
- [18] PERIK T H, VAN GENUGTEN E A J, AARNTZEN E H J G, et al. Quantitative CT perfusion imaging in patients with pancreatic cancer: a systematic review[J]. *Abdom Radiol*, 2022, 47(9): 3101–3117.
- [19] SANDINI M, PATINO M, FERRONE C R, et al. Association between changes in body composition and neoadjuvant treatment for pancreatic cancer[J]. *JAMA Surg*, 2018, 153(9): 809–815.
- [20] JIN K Z, TANG Y, WANG A Q, et al. Body composition and response and outcome of neoadjuvant treatment for pancreatic cancer[J]. *Nutr Cancer*, 2022, 74(1): 100–109.
- [21] LEE M W, JEON S K, PAIK W H, et al. Prognostic value of initial and longitudinal changes in body composition in metastatic pancreatic cancer[J]. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*, 2024, 15(2): 735–745.
- [22] TANG W, LIU W, LI H M, et al. Quantitative dynamic contrast-enhanced MR imaging for the preliminary prediction of the response to gemcitabine-based chemotherapy in advanced pancreatic ductal carcinoma[J]. *Eur J Radiol*, 2019, 121: 108734.
- [23] KIM H, MORGAN D E, SCHEXNAILDER P, et al. Accurate therapeutic response assessment of pancreatic ductal adenocarcinoma using quantitative dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging with a point-of-care perfusion phantom: a pilot study[J]. *Invest Radiol*, 2019, 54(1): 16–22.
- [24] DO R K, REYNGOLD M, PAUDYAL R, et al. Diffusion-weighted and dynamic contrast-enhanced MRI derived imaging metrics for stereotactic body radiotherapy of pancreatic ductal adenocarcinoma: preliminary findings[J]. *Tomography*, 2020, 6(2): 261–271.
- [25] FUKUKURA Y, KUMAGAE Y, FUJISAKI Y, et al. Extracellular volume fraction with MRI: as an alternative predictive biomarker to dynamic contrast-enhanced MRI for chemotherapy response of pancreatic ductal adenocarcinoma[J]. *Eur J Radiol*, 2021, 145: 110036.
- [26] DALAH E, ERICKSON B, OSHIMA K, et al. Correlation of ADC with pathological treatment response for radiation therapy of pancreatic cancer[J]. *Transl Oncol*, 2018, 11(2): 391–398.
- [27] HUSSIEN N, HUSSIEN R S, SAAD D H A, et al. The role of MRI pancreatic protocol in assessing response to neoadjuvant therapy for patients with borderline resectable pancreatic cancer[J]. *Front Oncol*, 2022, 11: 796317.

- [28] OKADA K I, KAWAI M, HIRONO S, et al. Diffusion-weighted MRI predicts the histologic response for neoadjuvant therapy in patients with pancreatic cancer: a prospective study (DIFFERENT trial)[J]. *Langenbecks Arch Surg*, 2020, 405(1): 23–33.
- [29] BILREIRO C, ANDRADE L, MARQUES R M, et al. Diffusion-weighted imaging for determining response to neoadjuvant therapy in pancreatic cancer: a systematic review and meta-analysis[J]. *Eur Radiol*, 2024, 34(5): 3238–3248.
- [30] QU C, ZENG P E, HU W Y, et al. Multiparametric quantitative diffusion weighted magnetic resonance imaging can effectively predict the response to neoadjuvant therapy in borderline resectable pancreatic ductal adenocarcinoma [J]. *Eur J Radiol*, 2025, 183: 111893.
- [31] ZHANG Z H, ZHANG Y Q, HU F X, et al. Value of diffusion kurtosis MR imaging and conventional diffusion weighed imaging for evaluating response to first-line chemotherapy in unresectable pancreatic cancer [J]. *Cancer Imaging*, 2024, 24(1): 29.
- [32] KLAASSEN R, GURNEY-CHAMPION O J, WILMINK J W, et al. Repeatability and correlations of dynamic contrast enhanced and T2* MRI in patients with advanced pancreatic ductal adenocarcinoma[J]. *Magn Reson Imag*, 2018, 50: 1–9.
- [33] KANG J H, LEE S S, KIM J H, et al. Multiparametric MRI for prediction of treatment response to neoadjuvant FOLFIRINOX therapy in borderline resectable or locally advanced pancreatic cancer[J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(2): 864–874.
- [34] ZIMMERMANN C, DISTLER M, JENTSCH C, et al. Evaluation of response using FDG-PET/CT and diffusion weighted MRI after radiochemotherapy of pancreatic cancer: a non-randomized, monocentric phase II clinical trial-PaCa-DD-041 (Eudra-CT 2009-011968-11) [J]. *Strahlenther Onkol*, 2021, 197(1): 19–26.
- [35] YUN W G, KIM T Y, PARK S, et al. Metabolic response during preoperative chemotherapy can predict prognosis in pancreatic cancer[J]. *J Hepato Biliary Pancreat Sci*, 2025, 32(5): 393–403.
- [36] DE KEIZER B, BRAAT A J A T, LAM M G E H, et al. Considerations for SUV measurement in PSMA PET/CT reporting: a call for standardisation and best practices [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2025, 52(2): 386–387.
- [37] BOELLAARD R, DELGADO-BOLTON R, OYEN W J G, et al. FDG PET/CT: EANM procedure guidelines for tumour imaging: version 2.0[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imag*, 2015, 42(2): 328–354.
- [38] LI X, LU N, SUN K, et al. ¹⁸F FAPI-04 PET/CT for pathologic response assessment in pancreatic cancer patients with systemic treatment [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imag*, 2025, 52(11): 3938–3950.
- [39] ESFAHANI S A, MA H, KRISHNA S, et al. Collagen type I PET/MRI enables evaluation of treatment response in pancreatic cancer in pre-clinical and first-in-human translational studies [J]. *Theranostics*, 2024, 14(15): 5745–5761.
- [40] DUAN K L, ZHOU H H, XU W N, et al. Evaluation of tumor fibrosis in pancreatic ductal adenocarcinoma by 2-D shear wave elastography: a pilot study [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2023, 49(9): 2119–2125.
- [41] TAKISHIN Y, KUWATANI M, NISHIDA M, et al. Clinical significance of dispersion imaging by shear wave elastography in the treatment and diagnosis of pancreatic cancer [J]. *J Gastroenterol Hepatol*, 2023, 38(4): 656–663.
- [42] LU X Y, GUO X, ZHANG Q, et al. Early assessment of chemoradiotherapy response for locally advanced pancreatic ductal adenocarcinoma by dynamic contrast-enhanced ultrasound[J]. *Diagnostics*, 2022, 12(11): 2662.
- [43] YAN X Y, FU X S, GUI Y, et al. Development and validation of a nomogram model based on pretreatment ultrasound and contrast-enhanced ultrasound to predict the efficacy of neoadjuvant chemotherapy in patients with borderline resectable or locally advanced pancreatic cancer[J]. *Cancer Imag*, 2024, 24(1): 13.
- [44] CIARAVINO V, CARDOBI N, DE ROBERTIS R, et al. CT texture analysis of ductal adenocarcinoma downstaged after chemotherapy[J]. *Anticancer Res*, 2018, 38(8): 4889–4895.
- [45] BORHANI A A, DEWAN R, FURLAN A, et al. Assessment of response to neoadjuvant therapy using CT texture analysis in patients with resectable and borderline resectable pancreatic ductal adenocarcinoma[J]. *Am J Roentgenol*, 2020, 214(2): 362–369.
- [46] CHEN X J, OSHIMA K, SCHOTT D, et al. Assessment of treatment response during chemoradiation therapy for pancreatic cancer based on quantitative radiomic analysis of daily CTs: an exploratory study[J]. *PLoS One*, 2017, 12(6): e0178961.
- [47] NASIEF H, HALL W, ZHENG C, et al. Improving treatment response prediction for chemoradiation therapy of pancreatic cancer using a combination of delta-radiomics and the clinical biomarker CA19-9[J]. *Front Oncol*, 2020, 9: 1464.
- [48] WANG K, KARALIS J D, ELAMIR A, et al. Delta radiomic features predict resection margin status and overall survival in neoadjuvant-treated pancreatic cancer patients [J]. *Ann Surg Oncol*, 2024, 31(4): 2608–2620.
- [49] LU W X, WU G Y, MIAO X Y, et al. Correction to: the radiomics nomogram predicts the prognosis of pancreatic cancer patients with hepatic metastasis after chemoimmunotherapy [J]. *Cancer Immunol Immunother*, 2024, 73(9): 183.
- [50] PARR E, DU Q, ZHANG C, et al. Radiomics-based outcome prediction for pancreatic cancer following stereotactic body radiotherapy[J]. *Cancers*, 2020, 12(4): 1051.
- [51] SHAO Y M, DANG Y N, CHENG Y J, et al. Predicting the efficacy of neoadjuvant chemotherapy for pancreatic cancer using deep learning of contrast-enhanced ultrasound videos [J]. *Diagnostics*, 2023, 13(13): 2183.