

• 专题研究:肿瘤 •

PET/CT影像组学:食管癌诊疗的新视角

王宣彦, 顾莹莹, 唐立钧, 李天女*

南京医科大学第一附属医院核医学科, 江苏 南京 210029

[摘要] 食管癌是全球范围内发病率高且预后较差的消化道恶性肿瘤, 其中约40%的病例集中在中国, 5年生存率不足20%。传统影像学方法在精准诊疗中存在明显的局限性, 而PET/CT影像组学通过高通量提取并分析肿瘤的形态学、代谢及纹理特征, 为食管癌的精准分期、治疗反应动态监测及个体化预后预测提供了新视角。文章系统综述了¹⁸F-FDG PET/CT影像组学在食管癌诊疗中的研究进展, 探讨其与基因组学、剂量组学等的交叉融合潜力, 并对未来发展方向进行了展望, 以期临床转化提供更全面的理论支持。

[关键词] PET/CT; 影像组学; 食管癌

[中图分类号] R735.1

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2025)09-1251-07

doi: 10.7655/NYDXBNSN250377

PET/CT radiomics: a new perspective in the diagnosis and treatment of esophageal cancer

WANG Xuanyan, GU Yingying, TANG Lijun, LI Tiannü*

Department of Nuclear Medicine, the First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China

[Abstract] Esophageal cancer is a gastrointestinal malignancy with a high incidence and poor prognosis worldwide, with about 40% of cases concentrated in China, and the 5-year survival rate is less than 20%. Traditional imaging methods exhibit significant limitations in precision diagnosis and treatment. In contrast, PET/CT radiomics-through high-throughput extraction and analysis of tumor morphological, metabolic, and textural features-provides a novel perspective for accurate staging, dynamic therapeutic response monitoring, and individualized prognosis prediction in esophageal cancer. This article systematically reviews the research progress of ¹⁸F-FDG PET/CT radiomics in the diagnosis and treatment of esophageal cancer, discusses its potential-integration with genomics and dosiomics, and looks forward to the future development direction, in order to provide more comprehensive theoretical support for clinical translation.

[Key words] PET/CT; radiomics; esophageal cancer

[J Nanjing Med Univ, 2025, 45(09): 1251-1257]

食管癌(esophageal carcinoma, ECa)是一种全球范围内常见的消化道恶性肿瘤。根据世界卫生组织的统计数据显示^[1], 食管癌在全球癌症发病率中排名第11位, 死亡率排名第7位, 其中超过40%的病例发生在中国, 每年约有19万患者因食管癌而死亡。由于大多数患者确诊时已处于局部晚期或有

[基金项目] 国家卫生健康委核医学重点实验室; 江苏省分子核医学重点实验室(KF202206)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: litiannv@126.com
(ORCID: 0000-0002-3097-0070)

远处转移, 即使接受了手术、放化疗、靶向治疗等综合治疗, 5年生存率仍不足20%^[2]。因此, 临床上对食管癌的早期诊断和精准治疗提出了迫切需求。

传统的影像学方法如CT、MRI和超声内镜在食管癌的诊断和分期中发挥了重要作用, 但这些方法在评估肿瘤异质性、早期微小病灶检出及治疗反应监测方面存在明显局限性。随着医学影像技术的飞速发展, ¹⁸F-脱氧葡萄糖(¹⁸F-fluorodeoxyglucose, ¹⁸F-FDG)正电子发射断层扫描/计算机断层扫描(positron emission tomography/computed tomography,

PET/CT)作为功能代谢与解剖结构融合成像的代表,已成为食管癌诊疗过程中不可或缺的重要工具^[3]。然而,传统PET/CT在临床应用中存在明显局限:一方面,其空间分辨率有限(通常为4~6 mm),难以精确显示微小病灶的代谢特征;另一方面,依赖单一参数如最大标准化摄取值(maximum standardized uptake value, SUV_{max})的分析方法无法全面反映肿瘤异质性^[4]。这些局限性在食管癌这种具有高度空间异质性的恶性肿瘤评估中显得尤为突出^[5]。

影像组学的出现为突破这些技术瓶颈提供了全新思路^[6]。影像组学通过高通量提取和分析医学影像中的上千个定量特征,结合机器学习算法构建预测模型,实现了对肿瘤微环境、治疗敏感性和转移风险的无创评估^[7]。特别值得关注的是,PET/CT影像组学能够同时获取肿瘤的代谢特征(如糖酵解活性)和结构特征(如空间异质性),这种多参数综合分析显著提升了食管癌诊疗评估的精准度^[8]。

文章系统梳理了¹⁸F-FDG PET/CT影像组学在食管癌全周期管理中的应用价值:在诊断阶段,通过纹理分析可提高早期病变检出率;在分期评估中,多参数模型较传统方法能更准确地预测淋巴结转移;在疗效监测方面,治疗前后的特征变化可早期预测病理完全缓解;在预后预测中,结合临床参数的影像组学模型展现出优越的预测性能。此外,文章还探讨了影像组学与基因组学、剂量组学的交叉融合前景,这种多组学整合策略有望为食管癌精准诊疗开辟新途径。

1 PET/CT影像组学的原理与技术

1.1 影像组学基本概念

影像组学是一种基于医学影像的数据分析方法,“组学”的核心是从研究目标整体中挖掘出大量的参数或特征,以进一步丰富可供研究或参考的维度^[9]。这种方法突破了传统影像分析的局限,通过提取大量的影像特征(如形态学特征、一阶统计特征、二阶和高阶纹理特征)来量化组织的潜在病理及生物学特性,构建多维度的肿瘤图谱,在人体病变组织和正常组织中均可应用^[10]。其中,形态学特征包括肿瘤的体积、形状、表面积等几何参数,特别关注肿瘤边界的复杂程度(如分形维度),可反映肿瘤的生长方式和侵袭性。一阶纹理特征基于图像灰度级分布的统计量,量化每个体素与其近邻之间的强度变化,如均值、方差、偏度等;二阶和更高阶的纹理特征则考虑灰度级的相对位置,用于表征肿瘤的空间异质性,如灰度共生矩阵和灰度游程矩阵。

PET/CT影像组学通过整合功能代谢与解剖结构的多维信息,实现了对食管癌生物学特性的全面解析。在代谢层面,¹⁸F-FDG摄取参数,如SUV_{max}可定量评估肿瘤的糖酵解活性,而代谢体积参数,如肿瘤代谢体积(metabolic tumor volume, MTV)和总病变糖酵解(total lesion glycolysis, TLG)则反映了肿瘤的代谢负荷。在纹理特征方面,基于灰度共生矩阵的“熵”值可精确量化代谢分布的空间异质性,其数值升高往往提示肿瘤克隆多样性增加和潜在耐药风险^[11]。同时,通过CT组分提取的形态学特征(如肿瘤长径比、表面不规则度)可有效评估局部浸润程度^[12]。这种多参数融合分析方法不仅提高了诊断准确性,更重要的是实现了对肿瘤微环境(如缺氧区域、免疫细胞浸润)的无创评估,为临床决策提供了传统影像学无法获取的深层生物学信息。值得注意的是,近期研究表明,将动态PET参数与静态纹理特征相结合,可进一步改善对治疗反应的早期预测效能^[13]。这种多参数综合分析方法不仅提高了诊断准确性,更重要的是能够无创评估肿瘤的生物行为,为精准医疗提供重要依据。

1.2 PET/CT影像组学的技术流程

PET/CT影像组学的技术流程分为多个步骤。①图像采集与预处理:在标准化协议下完成PET/CT图像采集,包括患者准备、扫描参数设置及图像重建;随后进行图像预处理,涵盖空间配准、强度归一化、去噪和部分容积效应校正等关键步骤。②肿瘤分割:通过人工勾画、阈值分割或深度学习算法(如U-Net)实现肿瘤区域的精准分割。③特征提取与筛选:利用专业软件提取特征;然后采用特征稳定性分析、信息评估结合机器学习方法(LASSO回归、随机森林)进行特征筛选和降维。④模型构建与验证:构建预测模型并通过交叉验证和独立队列验证评估其性能。

整个流程严格遵循标准化流程,确保特征提取的标准化和可重复性,同时需注意图像采集参数、重建算法等因素对特征稳定性的影响^[14],以实现从影像数据到临床决策的可靠转化。

2 ¹⁸F-FDG PET/CT影像组学在食管癌诊疗中的应用

2.1 食管癌的准确分期

准确的临床分期是ECa管理最重要的预后因素之一,¹⁸F-FDG PET/CT影像组学通过多参数分析显著提升了分期的准确性。对于肿瘤T分期预测,在Jayaprakasam等^[15]研究中,¹⁸F-FDG PET/CT影像组学模型在预测T分期的受试者工作特征(receiver oper-

ating characteristic, ROC) 曲线的曲线下面积 (area under curve, AUC) 达到 0.90, 优于单一模态影像。然而 Lei 等^[16]的研究得出了相反结论, 单纯 CT 影像组学的预测效能 (AUC=0.846) 反而优于融合 PET/CT (AUC=0.665), 提示多模态融合并不总是带来性能提升, 其效果可能受多种因素影响。对于融合 PET/CT 图像中提取的影像组学特征性能偏低, 可能是由于外部软件在融合过程中丢失了一些关键的肿瘤区域信息, 从而影响特征提取的完整性和肿瘤异质性的评估。研究者们通常采用半自动的图像分割技术来定义肿瘤区域, 或结合不同的影像模态 (如 CT、增强 CT、MRI) 来提取互补的肿瘤信息^[17], 但不同模态 (如 PET 与 CT) 的肿瘤边界可能存在差异, 手动或阈值分割可能引入主观偏差, 影响模型的可重复性。同时 PET 和 CT 的特征可能存在冗余或噪声, 若未经过优化筛选, 可能导致模型过拟合或性能下降。未来需优化多模态图像融合算法, 以确保在融合 PET/CT 图像时保留尽可能多的肿瘤区域信息, 并提高深度学习辅助的半自动分割技术, 以提升肿瘤边界识别的准确性。如果能在多中心、大样本研究中验证模型的泛化能力, 可进一步探索影像组学与临床病理因素的联合预测价值。

在食管癌淋巴结转移的诊断中, 传统影像学方法如 CT 和 MRI 各有优势, 但也存在局限性。CT 在区分肿瘤引起的淋巴结肿大和炎症或反应性增生方面存在挑战, 而 MRI 虽然在软组织分辨率上更优, 但在检测小淋巴结和判断淋巴结转移方面仍有困难^[18]。相比之下, ¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学通过分析肿瘤的代谢参数和纹理特征, 如 SUV_{max}、平均标准化摄取值 (mean standardized uptake value, SUV_{mean})、MTV 和 TLG, 有助于更准确评估肿瘤的侵袭性和淋巴结转移情况^[19]。Lei 等^[16]研究表明, 联合 PET 和 CT 影像组学特征在预测淋巴结转移和远处转移方面表现最佳, AUC 值分别为 0.824 和 0.837。Yuan 等^[20]则将临床变量与 PET 影像组学相结合, 提高了食管腺癌患者淋巴结转移的区分能力, 但其结果并未通过外部验证。总的来说, PET 图像的空间分辨率限制了其在影像组学分析中的应用, 且由于纹理参数涉及的体素数较少, 对小病灶的分析并不可靠。有研究认为, 高阶影像组学变量实际上是 MTV 等 PET 代谢参数的替代变量, 在复杂的影像组学特征选择过程中, MTV 和 TLG 等简单的 PET 指标可能被视为潜在的混杂因素而被排除, 导致预测结果出现偏差^[21]。使用特征选择和降维技

术来识别和保留最具代表性和预测价值的特征, 有助于减少因信息丢失而导致的偏差, 并提高模型的泛化能力。Meta 分析结果显示, 尽管有全面的临床数据和影像学数据, 影像组学特征在预测食管癌淋巴结转移方面并未显著优于传统的临床淋巴结分期或临床参数多变量模型^[22], 这表明需要更新的技术来提高淋巴结转移诊断的准确性。

2.2 治疗反应及并发症的评估

食管癌的常见治疗方式包括早期手术治疗、根治性放化疗、新辅助放化疗 (preoperative neoadjuvant chemoradiotherapy, NCRT) 等^[23]。NCRT 被认为是局部晚期食管癌患者的标准治疗方法, 能显著提升根治性切除率、无进展生存期和总生存期 (overall survival, OS)^[24-25]。PET/CT 影像组学通过监测肿瘤代谢活性变化, 有效评估食管癌患者的治疗反应, 其特征变化与病理完全缓解密切相关^[26]。

Simoni 等^[27]回顾了 54 例食管癌患者接受 NCRT 的情况, 采用肿瘤退缩分级 (tumor regression grade, TRG) 对病理反应程度进行分级, TRG 分级越高表示治疗效果越差。结果显示, 75.9% 的患者达到了主要病理反应 (TRG1~2), 而 24.1% 的患者无反应 (TRG3~4), 最终从治疗前 PET 图像中提取的 3 个独立影像组学特征表现出与主要病理反应呈显著相关 ($P < 0.0002$), 这一定程度上表明 ¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学特征可以预测 NCRT 的食管癌患者的病理反应。这一发现与 Li 等^[28]的研究相似, 提示这些特征能够有效区分患者群体, 且与治疗反应显著相关, 从而可能会从 NCRT 治疗方案中受益。这表明, ¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学特征结合临床变量可以预测食管癌患者对新辅助治疗的反应^[29], 为个体化治疗提供了潜在工具。Mishra 等^[30]研究发现了从 PET/CT 图像提取的 10 个纹理参数在识别无反应患者方面优于传统 PET 参数。Beukinga 等^[31]进一步将临床参数与纹理参数相结合, 构建出的模型预测治疗反应性的价值得到提升。接着, Beukinga 等^[32]通过对 43 例患者进行人类表皮生长因子受体 2 (human epidermal growth factor receptor 2, HER2) 相关生物肿瘤标志物的免疫组化检测, 发现将 HER2 和分化簇 44 (cluster of differentiation 44, CD44) 纳入参考模型可以提高整体预测性能。这些肿瘤生物标志物在治疗反应评估中表现良好, 因此, 结合分子生物学和影像组学的方法可能有助于更好地反映肿瘤的异质性和治疗反应。

放射性肺炎 (radiation pneumonitis, RP) 是指由

于肺部受到放射治疗剂量的损伤而引起的炎症反应, Anthony等^[33]收集了96例患者的数据, 发现临床参数(如平均肺剂量、吸烟史、肿瘤位置)与RP无显著关联, 但放射治疗前的PET扫描中的SUV和CT的纹理特征与RP显著相关, 尤其是SUV标准差。同时, Hou等^[34]研究表明, 单纯测量感兴趣区域内的放射性浓度与整个肺的放射性浓度的标准化摄取值比率(standardized uptake value ratio, SUVr), 并不能有效预测RP。然而, 当特别关注接受到20 Gy和27 Gy辐射剂量的肺组织区域的SUVr变化时, 这些区域的SUVr增加被证明是急慢性RP的强预测因子, 这与Wang等^[35]发现相似。这些发现有助于建立一个独特的生物物理预测模型, 以降低食管癌患者接受NCRT时发生RP的风险。

2.3 预后预测

¹⁸F-FDG PET/CT技术通过提供肿瘤的代谢信息, 有助于构建基于影像组学特征的预后模型, 从而预测患者的生存情况, 并增强基线临床参数的预测能力^[36], 为临床个体化治疗提供依据。Qi等^[11]对74例接受放化疗的Eca患者进行回顾性研究, 发现¹⁸F-FDG PET/CT影像组学预测总生存期的准确率达62.1%, 显著高于单一CT(51.7%)或PET(55.2%)的预测效能。Takahashi等^[37]通过分析130例患者的860个影像组学参数, 构建的Rad-score模型能有效区分无进展生存期差异(训练集 $P=0.019$, 验证集 $P=0.040$)。Chen等^[38]则开发出基于治疗前后SUVmax变化率和肿瘤编码相似性的评分系统, 其预测准确性超越传统TNM分期和手术病理模型。这些研究共同表明, ¹⁸F-FDG PET/CT影像组学通过多参数定量分析, 不仅能更精准地评估肿瘤异质性, 还可为个体化治疗决策提供客观依据, 展现出重要的临床应用价值^[39]。

近年来, 多模态整合模型在食管癌预后评估中展现出显著优势, 通过结合影像组学特征、传统PET参数及临床指标, 可实现对患者的精准分层和个体化治疗决策。多项研究表明, 这种综合分析方法较单一参数具有更高的预测效能。Hinzpeter等^[40]对243例胃食管癌患者的研究证实, 整合¹⁸F-FDG PET/CT影像组学特征、临床资料及基于CT的骨骼肌指数(skeletal muscle index, SMI)评估的肌少症评分的联合模型, 在预测转移性疾病和总生存期方面表现最优(准确率80%, AUC=88%)。在Anconina等^[41]的多变量分析进一步显示, 肌少症评分的加入显著提升了仅含临床特征模型($P=0.030$)和CT特征模型($P=0.004$)的预测性

能, 且肌少症评分($P=0.051$)、CT特征($P=0.042$)和PET特征($P=0.011$)均对无复发生存具有独立预测价值。这些发现提示, 将影像组学参数与机体代谢状态(如肌少症)及临床特征相结合, 不仅能更全面反映肿瘤生物学特性和宿主微环境, 还可为预后评估提供新的生物标志物, Iyer等^[42]关于术前CT人体成分特征预测食管切除术后生存的研究也佐证了这一观点。这种多维度整合策略为优化临床决策提供了新思路, 有望推动精准医疗在食管癌治疗中的应用。

3 影像组学拓展

3.1 影像基因组学

影像基因组学作为新兴交叉学科, 通过整合影像组学特征与基因组学数据, 为疾病的无创诊断和预后评估提供了创新方法。该技术利用影像特征作为基因组变异的可视化标记, 在多项肿瘤研究中展现出重要价值^[43]。Iv等^[44]对儿童髓母细胞瘤的初步研究表明, 基于MR图像的影像组学特征可有效区分需要不同治疗方案的基因组亚型。Kirienko等^[45]针对非小细胞肺癌的研究进一步显示, ¹⁸F-FDG PET/CT影像组学联合基因组学数据构建的最佳预测模型AUC达0.87, 显著提升了组织学分类和预后评估的准确性。这些发现对难以获取病理的晚期食管癌患者具有重要启示意义^[46]。理论上, ¹⁸F-FDG PET/CT影像基因组学可作为一种无创替代方案, 但实际临床应用仍面临挑战: 首先需要建立大规模多中心数据库, 通过深度学习等方法系统挖掘影像特征与基因组变异的关联规律; 其次需开发标准化的特征提取和分析流程, 确保模型的可重复性和泛化能力。未来随着人工智能技术的进步和多组学数据的积累, 影像基因组学有望成为精准医疗时代的重要辅助决策工具。

3.2 剂量组学

剂量组学作为放射肿瘤学领域的新兴研究方向, 通过从放疗剂量分布中提取和分析高通量特征, 探索这些特征与肿瘤控制率和并发症之间的关系, 剂量组学更侧重于全面分析和理解剂量分布的模式。Kawahara等^[47]结合治疗前CT、PET影像组学和剂量组学特征, 构建的预测模型在外部验证队列中对食管鳞癌患者OS的预测表现出卓越性能(C-index=0.92)。该研究不仅证实了剂量分布模式与临床结局的相关性, 更揭示出剂量均匀性和中位剂量水平是影响预后的关键因素——剂量分布越均匀、中位剂量越理想, 患者的生存获益越显著。这个发现具有重要的临床转化价值, 为优化放疗计

划提供了量化指标, 强调在保证靶区覆盖的同时需注重剂量分布的均质性, 并开创了“影像-剂量-预后”多参数评估新模式, 通过剂量组学特征反馈可动态调整治疗方案。该研究为建立基于人工智能的个性化放疗决策系统奠定了理论基础, 未来通过大规模数据验证有望实现临床常规应用。剂量组学与影像组学的深度融合, 标志着肿瘤放射治疗正从经验医学向精准定量医学转变。

3.3 活检指标

最新研究进展表明, 将影像组学特征与循环肿瘤DNA(circulating tumor DNA, ctDNA)等液体活检指标相结合, 可进一步提高预测准确性。Duffles等^[48]通过对18例患者的动态监测, 证实ctDNA水平与¹⁸F-FDG PET/CT参数显著相关, 包括总代谢肿瘤体积($r=0.51$, $P=0.014$)和总病灶糖酵解($r=0.47$, $P=0.024$), 并发现治疗后的ctDNA清除率与影像学完全缓解高度一致, 但值得注意的是, 部分驱动基因突变在影像缓解后仍持续存在, 提示需要多模态监测以避免假阴性; Gill等^[49]研究表明, CT影像的放射组学特征能够独立预测转移性黑色素瘤患者的ctDNA水平, 为肿瘤监测提供了新的互补性生物标志物。Yousefi等^[50]通过整合影像组学、液体活检和临床数据, 提高对靶向治疗疗效的预测能力, AUC从0.73提升至0.77。这种多组学整合策略为食管癌个体化治疗决策提供了新思路, 但其临床应用仍需更大样本和更全面的基因分析进一步验证。

4 结论与展望

综上所述, ¹⁸F-FDG PET/CT影像组学在食管癌的精准确分期、治疗反应评估和预后预测中展现出巨大的应用潜力, 但仍面临一些挑战, 包括标准化的图像采集、分割及特征提取流程需统一。未来研究需要进一步验证影像组学模型的临床有效性, 并联合基因、放疗剂量等学科交叉, 探索其在食管癌个体化治疗策略中的应用, 构建“影像-基因-临床”全景图谱。随着人工智能和机器学习技术的发展, 同时加强对新型显像剂的开发及研究, PET/CT有望进一步推动食管癌诊疗进入精准医学新时代。

利益冲突声明:

所有作者均声明不存在利益冲突。

Conflict of Interests:

All authors declare no conflict of interests.

作者贡献声明:

王宣彦参与论文设计、数据处理、论文撰写; 顾莹莹和唐立钧参与文章修改和润色; 李天女负责选题、论文修改、经费

支持。

Author's Contributions:

WANG Xuanyan was involved in research design, data processing, and manuscript writing; Tang Lijun were involved in article revision and polishing; LI Tiannü was responsible for topic selection, thesis revision, and financial support.

[参考文献]

- [1] BRAY F, LAVERSANNE M, SUNG H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA Cancer J Clin, 2024, 74(3): 229-263
- [2] GHALY G, KAMEL M, NASAR A, et al. Locally advanced esophageal cancer: what becomes of 5-year survivors? [J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2016, 151(3): 726-731
- [3] GOPAL A, XI Y, SUBRAMANIAM R M, et al. Intratumoral metabolic heterogeneity and other quantitative ¹⁸F-FDG PET/CT parameters for prognosis prediction in esophageal cancer[J]. Radiol Imaging Cancer, 2020, 3(1): e200022
- [4] AMRANE K, THUILLIER P, BOURHIS D, et al. Prognostic value of pre-therapeutic FDG-PET radiomic analysis in gastro-esophageal junction cancer[J]. Sci Rep, 2023; 13(1): 5789
- [5] GOEL R, SUBRAMANIAM R M, WACHSMANN J W. PET/Computed tomography scanning and precision medicine: esophageal cancer[J]. PET Clin, 2017, 12(4): 373-391
- [6] YANG Z, GUAN F, BRONK L, et al. Multi-omics approaches for biomarker discovery in predicting the response of esophageal cancer to neoadjuvant therapy: a multidimensional perspective[J]. Pharmacol Ther, 2024, 254: 108591
- [7] MENON N, GUIDOZZI N, CHIDAMBARAM S, et al. Performance of radiomics-based artificial intelligence systems in the diagnosis and prediction of treatment response and survival in esophageal cancer: a systematic review and meta-analysis of diagnostic accuracy[J]. Dis Esophagus, 2023; 36(6): doad034
- [8] NAKAJO M, JINGUJI M, NAKABEPPU Y, et al. Texture analysis of ¹⁸F-FDG PET/CT to predict tumour response and prognosis of patients with esophageal cancer treated by chemoradiotherapy[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2017, 44(2): 206-214
- [9] 隋赫, 莫展豪, 孙旭, 等. 影像组学的图像分析及模型构建[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(4): 25-28
SUI H, MO Z H, SUN X, et al. Image analysis and model construction of radiomics[J]. China Medical Equipment, 2019, 34(4): 25-28

- [10] ZWANENBURG A, VALLIÈRES M, ABDALAH M A, et al. The image biomarker standardization initiative: standardized quantitative radiomics for high-throughput image-based phenotyping[J]. *Radiology*, 2020, 295(2):328–338
- [11] QI W X, LI S, XIAO J, et al. A machine learning approach using ¹⁸F-FDG PET and enhanced CT scan-based radiomics combined with clinical model to predict pathological complete response in ESCC patients after neoadjuvant chemoradiotherapy and anti-PD-1 inhibitors[J]. *Front Immunol*, 2024, 15: 1351750
- [12] RISHI A, ZHANG G G, YUAN Z, et al. Pretreatment CT and ¹⁸F-FDG PET-based radiomic model predicting pathological complete response and loco-regional control following neoadjuvant chemoradiation in oesophageal cancer[J]. *J Med Imaging Radiat Oncol*, 2021, 65(1): 102–111
- [13] WANG D, ZHANG X, LIU H, et al. Assessing dynamic metabolic heterogeneity in non-small cell lung cancer patients *via* ultra-high sensitivity total-body ¹⁸F-FDG PET/CT imaging: quantitative analysis of ¹⁸F-FDG uptake in primary tumors and metastatic lymph nodes[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 49(13): 4692–4704
- [14] VAN VELDEN F H P, KRAMER G M, FRINGS V, et al. Repeatability of radiomic features in non-small-cell lung cancer ¹⁸F-FDG-PET/CT studies: impact of reconstruction and delineation[J]. *Mol Imaging Biol*, 2016, 18(5): 788–795
- [15] JAYAPRAKASAM V S, GIBBS P, GANGAI N, et al. Can ¹⁸F-FDG PET/CT radiomics features predict clinical outcomes in patients with locally advanced esophageal squamous cell carcinoma? [J]. *Cancers*, 2022, 14(12): 3035
- [16] LEI X, CAO Z, WU Y, et al. Preoperative prediction of clinical and pathological stages for patients with esophageal cancer using PET/CT radiomics [J]. *Insights Imaging*, 2023, 14(1): 174
- [17] O' SHEA R J, ROOKYARD C, WITHEY S, et al. Radiomic assessment of oesophageal adenocarcinoma: a critical review of ¹⁸F-FDG PET/CT, PET/MRI and CT[J]. *Insights Imaging*, 2022, 13(1): 104
- [18] TANAKA K, FUJITA T, NAKAJIMA Y, et al. Validation of the cutoff values for the number of metastatic lymph nodes for esophageal cancer staging: a multi-institutional analysis of 655 patients in Japan[J]. *Esophagus*. 2024, 21(4): 464–471
- [19] WANG D, LIU X, WANG W, et al. The role of the metabolic parameters of ¹⁸F-FDG pet/ct in patients with locally advanced cervical cancer [J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 698744
- [20] YUAN P, HUANG Z H, YANG Y H, et al. A ¹⁸F-FDG PET/CT-based deep learning-radiomics-clinical model for prediction of cervical lymph node metastasis in esophageal squamous cell carcinoma[J]. *Cancer Imaging*, 2024, 24(1): 153
- [21] ZHANG C, SHI Z, KALENDRALIS P, et al. Prediction of lymph node metastases using pre-treatment PET radiomics of the primary tumour in esophageal adenocarcinoma: an external validation study[J]. *Br J Radiol*, 2021, 94(1118): 20201042
- [22] JIANG C, CHEN Y, ZHU Y, et al. Systematic review and meta-analysis of the accuracy of ¹⁸F-FDG PET/CT for detection of regional lymph node metastasis in esophageal squamous cell carcinoma [J]. *J Thorac Dis*, 2018, 10(11): 6066–6076
- [23] REN S, BEECHE C A, IYER K, et al. Graphical modeling of causal factors associated with the postoperative survival of esophageal cancer subjects[J]. *Med Phys*, 2024, 51(3): 1997–2006
- [24] EYCK B M, VAN LANSCHOT J J B, HULSHOF M C C M, et al. Ten-year outcome of neoadjuvant chemoradiotherapy plus surgery for esophageal cancer: the randomized controlled CROSS trial [J]. *J Clin Oncol*, 2021, 39(18): 1995–2004
- [25] LI B, CHEN H. The best surgery should be applied for locally advanced esophageal cancer[J]. *J Clin Oncol*, 2021, 39(28): 3189–3190
- [26] DEANTONIO L, GARO M L, PAONE G, et al. ¹⁸F-FDG PET radiomics as predictor of treatment response in esophageal cancer: a systematic review and meta-analysis [J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 861638
- [27] SIMONI N, ROSSI G, BENETTI G, et al. ¹⁸F-FDG PET/CT metrics are correlated to the pathological response in esophageal cancer patients treated with induction chemotherapy followed by neoadjuvant chemo-radiotherapy [J]. *Front Oncol*, 2020, 10: 599907
- [28] LI Y, BECK M, PÄBLER T, et al. A FDG-PET radiomics signature detects esophageal squamous cell carcinoma patients who do not benefit from chemoradiation [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 17671
- [29] EIFER M, PETERS-FOUNSHTEIN G, YOEL L C, et al. The role of FDG PET/CT radiomics in the prediction of pathological response to neoadjuvant treatment in patients with esophageal cancer[J]. *Rep Pract Oncol Radiother*, 2024; 29(2): 211–218
- [30] MISHRA A, RAVINA M, KOTE R, et al. Role of textural analysis of pretreatment ¹⁸F fluorodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography in response prediction in esophageal carcinoma patients [J]. *Indian J Nucl Med*, 2023, 38(3): 255–263
- [31] BEUKINGA R J, HULSHOFF J B, DIJK L V VAN, et al.

- Predicting response to neoadjuvant chemoradiotherapy in esophageal cancer with textural features derived from pre-treatment ¹⁸F-FDG PET/CT imaging [J]. *J Nucl Med*, 2017, 58(5): 723-729
- [32] BEUKINGA R J, WANG D, KARRENBELD A, et al. Addition of HER2 and CD44 to ¹⁸F-FDG PET-based clinico-radiomic models enhances prediction of neoadjuvant chemoradiotherapy response in esophageal cancer [J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(5): 3306-3314
- [33] ANTHONY G J, CUNLIFFE A, CASTILLO R, et al. Incorporation of pre-therapy ¹⁸F-FDG uptake data with CT texture features into a radiomics model for radiation pneumonitis diagnosis [J]. *Med phys*, 2017, 44(7): 3686-3694
- [34] HOU T C, DAI K Y, WU M C, et al. Bio-physic constraint model using spatial registration of delta ¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography images for predicting radiation pneumonitis in esophageal squamous cell carcinoma patients receiving neoadjuvant chemoradiation [J]. *Onco Targets ther*, 2019, 12: 6439-6451
- [35] WANG C, ZHAO K, HU S, et al. The PET-derived tumor-to-liver standard uptake ratio (SUV TLR) is superior to tumor SUV max in predicting tumor response and survival after chemoradiotherapy in patients with locally advanced esophageal cancer [J]. *Front Oncol*, 2020, 10: 1630
- [36] XIA L, LI X, ZHU J, et al. Prognostic value of baseline ¹⁸F-FDG PET/CT in patients with esophageal squamous cell carcinoma treated with definitive (chemo)radiotherapy [J]. *Radiat Oncol*, 2023, 18(1): 41
- [37] TAKAHASHI N, TANAKA S, UMEZAWA R, et al. Development and validation of an ¹⁸F-FDG-PET/CT radiomic model for predicting progression-free survival for patients with stage II-III thoracic esophageal squamous cell carcinoma who are treated with definitive chemoradiotherapy [J]. *Acta Oncol*, 2023, 62(2): 159-165
- [38] CHEN Y H, LUE K H, CHU S C, et al. Combining the radiomic features and traditional parameters of ¹⁸F-FDG PET with clinical profiles to improve prognostic stratification in patients with esophageal squamous cell carcinoma treated with neoadjuvant chemoradiotherapy and surgery [J]. *Ann Nucl Med*, 2019, 33(9): 657-670
- [39] HUANG J, LI T, TANG L, et al. Development and validation of an ¹⁸F-FDG PET/CT-based radiomics nomogram for predicting the prognosis of patients with esophageal squamous cell carcinoma [J]. *Acad Radiol*. 2024, 31(12): 5066-5077
- [40] HINZPETER R, MIRSHAHVALAD S A, KULANTHAIVELU R, et al. Gastro-esophageal cancer: can radiomic parameters from baseline ¹⁸F-FDG-PET/CT predict the development of distant metastatic disease? [J]. *Diagnostics*, 2024, 14(11): 1205
- [41] ANCONINA R, ORTEGA C, METSER U, et al. Combined ¹⁸F-FDG PET/CT radiomics and sarcopenia score in predicting relapse-free survival and overall survival in patients with esophagogastric cancer [J]. *Clin Nucl Med*, 2022, 47(8): 684-691
- [42] IYER K, BEECHE C A, GEZER N S, et al. CT-derived body composition is a predictor of survival after esophagectomy [J]. *J Clin Med*, 2023, 12(6): 2106
- [43] 谭俊, 袁少勋, 明文龙, 等. 影像基因组学分析方法研究进展 [J]. *生物技术进展*, 2018, 8(4): 277-283
- TAN J, YUAN S X, MING W L, et al. Research progress on methods of image genomics analysis [J]. *Advances in Biotechnology*, 2018, 8(4): 277-283
- [44] IV M, ZHOU M, SHPANSKAYA K, et al. MR imaging-based radiomic signatures of distinct molecular subgroups of medulloblastoma [J]. *Am J Neuroradiol*, 2019, 40(1): 154-161
- [45] KIRIENKO M, SOLLINI M, CORBETTA M, et al. Radiomics and gene expression profile to characterise the disease and predict outcome in patients with lung cancer [J]. *European J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(11): 3643-3655
- [46] DE BARI B, LEFEVRE L, HENRIQUES J, et al. Could ¹⁸F-FDG PET-CT radiomic features predict the locoregional progression-free survival in inoperable or unresectable oesophageal cancer? [J]. *Cancers (Basel)*. 2022, 14(16): 4043
- [47] KAWAHARA D, NISHIOKA R, MURAKAMI Y, et al. A nomogram based on pretreatment radiomics and dosimetrics features for predicting overall survival associated with esophageal squamous cell cancer [J]. *Eur J Surg Oncol*, 2024, 50(7): 108450
- [48] DUFFLES G, MAUÉS J H D S, LUPINACCI F, et al. Circulating tumor DNA in diffuse large B-cell lymphoma: analysis of response assessment, correlation with PET/CT and clone evolution [J]. *Hematol Transfus Cell Ther*, 2024, 46: S241-S249
- [49] GILL A B, RUNDO L, WAN J C M, et al. Correlating radiomic features of heterogeneity on CT with circulating tumor DNA in metastatic melanoma [J]. *Cancers*, 2020, 12(12): 3493
- [50] YOUSEFI B, LARIVIERE M J, COHEN E A, et al. Combining radiomic phenotypes of non-small cell lung cancer with liquid biopsy data may improve prediction of response to EGFR inhibitors [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 9984

[收稿日期] 2025-03-30

(本文编辑: 唐震)