

· 专题研究:肝脏疾病 ·

肝转移瘤¹⁸F-FDG PET/CT研究进展与展望

孙庆, 梁迪, 何健*

南京医科大学鼓楼临床医学院核医学科, 江苏 南京 210008

[摘要] 肝脏是肿瘤转移的常见部位,肝转移瘤常继发于结直肠癌、胰腺癌、黑色素瘤、肺癌和乳腺癌等。在所有恶性肿瘤转移中,肝转移占比近25%,肝转移患者的1年生存率为15.1%。肝转移瘤的早期诊断和精准治疗对改善患者预后至关重要。¹⁸氟-2-脱氧葡萄糖(¹⁸F-fluoro-deoxy-D-glucose, ¹⁸F-FDG) PET/CT作为一种功能代谢与解剖结构相结合的影像学检查技术,在肝转移瘤的诊断、分期、治疗方案制定等方面发挥着越来越重要的作用。文章综述了近年来¹⁸F-FDG PET/CT在肝转移瘤研究中的进展,包括在肝转移瘤诊断、鉴别诊断、治疗前评估、疗效评估、预后预测等方面的应用,与其他影像学方法比较的优劣势,在延迟成像、图像优化等技术方面的新进展,在诊断某些疾病时的陷阱,在引导放疗时的作用等。最后,总结了人工智能技术在肝转移瘤诊疗中的应用,并对¹⁸F-FDG PET/CT应用于肝转移瘤的发展方向进行了展望。

[关键词] ¹⁸氟-2-脱氧葡萄糖;肝转移瘤;PET/CT;人工智能

[中图分类号] R735.7;R730.44

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2026)06-799-10

doi: 10.7655/NYDXBNSN251477

Progress and prospects of ¹⁸F-FDG PET/CT in liver metastases

SUN Qing, LIANG Di, HE Jian*

Department of Nuclear Medicine, Drum Tower Clinical Medical College, Nanjing Medical University, Nanjing 210008, China

[Abstract] The liver is a common site for tumor metastases. Liver metastases often occur secondary to malignancies including colorectal cancer, pancreatic cancer, melanoma, lung cancer, and breast cancer, accounting for nearly 25% of all cancer metastases, and the 1-year survival rate for all patients with liver metastases is 15.1%. Early diagnosis and precise treatment are crucial for improving patient prognosis. As an imaging technique that combines functional metabolism with anatomical structure, ¹⁸F-fluoro-deoxy-D-glucose (¹⁸F-FDG) PET/CT plays an increasingly important role in the diagnosis, staging, and treatment planning of liver metastases. This article reviews recent advances in ¹⁸F-FDG PET/CT research on liver metastases, including its applications in diagnosis, differential diagnosis, pre-treatment evaluation, efficacy assessment, and prognosis prediction; its advantages and disadvantages in comparative imaging; new technological developments such as delayed imaging and image optimization; diagnostic pitfalls in certain diseases; and its role in guiding radiotherapy. Finally, it summarizes the application of artificial intelligence technology in the diagnosis and treatment of liver metastases and provides prospects on the future development directions of ¹⁸F-FDG PET/CT in this field.

[Key words] ¹⁸F-fluoro-deoxy-D-glucose; liver metastases; PET/CT; artificial intelligence

[J Nanjing Med Univ, 2026, 46(06): 799-808]

肝脏是常见的肿瘤转移靶器官,肝转移瘤比肝原发性肿瘤更多见,肝脏独特的细胞和结构组成是其适合肿瘤细胞形成转移灶的主要原因^[1]。腺癌是大多数转移性肿瘤的病理类型,还有鳞状细胞癌、神经内

[基金项目] 国家重点研发计划(2020YFA0713800)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: hjxueren@126.com
(ORCID: 0000-0001-8140-4610)

分泌癌及其他不太常见的亚型^[2]。一项涵盖2010—2015年针对肝转移瘤的流行病学调查显示,在240万癌症患者中,5.14%在诊断时已出现肝转移,从原发灶看,中青年(20~50岁)女性以乳腺癌最常见,男性以结直肠癌最常见,老年患者除肺癌、胰腺癌和结直肠癌这些常见原发癌外,食管、胃、小肠、黑色素和膀胱来源肿瘤的比例增加。生存分析显示,肝转移瘤患

者的1年生存率仅为15.1%^[3]。由此可见,肝转移瘤不仅发生率高、原发灶来源广泛、累及各年龄段人群,而且严重影响患者的总体生存。早期筛查和干预是积极治疗和提高患者生活质量的必经之路。

目前,用于肝转移瘤的影像学检查方法主要包括计算机断层扫描(computed tomography, CT)、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)和正电子发射断层扫描/计算机断层扫描(positron emission tomography/computed tomography, PET/CT)。PET/CT结合了功能成像和解剖成像的优势,能够在明确病灶细胞代谢和解剖结构的情况下较为精准地为诊断提供有价值的信息^[4]。目前应用最广泛的PET放射性示踪剂是¹⁸F-2-脱氧葡萄糖(¹⁸F-fluoro-deoxy-D-glucose, ¹⁸F-FDG)。该示踪剂可通过与葡萄糖相同的转运蛋白进入细胞,并被己糖激酶磷酸化为¹⁸F-FDG-6-磷酸,后因无法进一步代谢而滞留在细胞内。又由于肿瘤细胞Warburg效应而表现出更高的葡萄糖摄取和代谢速率,最终通过PET检测其放射性信号进而定位高代谢病灶^[5-6]。

多项研究已表明,¹⁸F-FDG PET/CT在肝转移瘤的多项评估方面有诸多价值。有研究认为其在不明原发灶肝转移瘤中有着较高灵敏度(88.78%),尤其适用于最大标准化摄取值(standardized uptake value maximum, SUVmax)>4.7的肝转移病例^[7]。也有研究表明¹⁸F-FDG PET/CT可能是评估肿瘤活力的有效方法,并可能为治疗方案提供适当的有用信息^[8]。还有研究提到¹⁸F-FDG PET/CT的SUVmax与程序性死亡配体1(programmed death-ligand 1, PD-L1)表达有着显著的相关性($P < 0.05$)^[9]。然而,许多文献也提到,¹⁸F-FDG PET/CT对小的肝转移灶(≤ 1 cm)诊断灵敏度较低,因此在肝内病灶精准评估中,钆塞酸增强MRI+弥散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)可能仍是较好选择^[4]。这表明联合多种影像学检查方法全面评估肝转移瘤是必要的。文章重点对¹⁸F-FDG PET/CT在肝转移瘤中的相关研究进展进行了回顾和总结,同时,人工智能(artificial intelligence, AI)技术的兴起也对此产生了很多影响,所以在展望方面,文章着重结合AI相关成果,分析今后¹⁸F-FDG PET/CT在肝转移瘤中的研究方向。

1 治疗相关评估与预测

1.1 治疗前评估

由于目前结直肠癌肝转移(colorectal liver metastases, CRLM)在中青年男性中最为常见^[3],故针对

肝转移瘤的研究也大多与结直肠原发灶的病例相关。而对于CRLM的治疗,很多研究认为肝切除术是已被接受的标准且有可能治愈的疗法。而成功实施该治疗依赖完善的治疗前评估,通过明确是否存在肝外转移决定有无影响后续治疗的再分期。¹⁸F-FDG PET/CT正是一种广泛用于癌症患者分期和随访的诊断工具^[10]。Akhurst等^[10]研究显示,¹⁸F-FDG PET/CT在检测肝外疾病方面表现优异,灵敏度为80%~90%,显著影响31%计划手术切除患者的治疗决策,尤其是对高临床风险评分(clinical risk score, CRS)患者。一项纳入了220例可切除CRLM患者的回顾性研究结果显示,术前¹⁸F-FDG PET/CT检查可使10.6%患者的治疗方案发生改变,约半数归因于术前未知肝外转移灶的检出^[11]。射频消融术(radio-frequency ablation, RFA)同样是一种治疗肝转移瘤的有效手段,一项纳入16例适合RFA的CRLM患者的研究中,¹⁸F-FDG PET/CT在25%的患者中检测到肝外病灶,最后改变了患者的治疗方案^[12]。一项评估接受¹⁸F-FDG PET/CT检查的CRLM肝外转移患者手术管理和长期生存率的研究结果显示,¹⁸F-FDG PET/CT使14%的患者避免了不必要的肝切除,但并不能改善同时存在肝外疾病患者的长期预后,指出¹⁸F-FDG PET/CT的价值更倾向于精准分期而非生存获益^[13]。另一项研究结合了¹⁸F-FDG PET/CT和¹⁸F-FDG PET/MRI对CRLM患者进行评估,结果联合检查改变了25%患者的治疗决策,包括避免不必要的手术或调整手术范围,可见联合检查可能更有助于优化治疗前的评估^[14]。

1.2 疗效评估

文献表明,与传统影像学检查相比,¹⁸F-FDG PET/CT在评估介入治疗的反应、消融治疗后的疾病进展、靶向治疗和放疗后的肿瘤反应方面有不错的表现^[15-18]。目前CRLM的治疗方法包括手术切除、热消融、放射栓塞、新辅助化疗和姑息化疗等。不同于传统影像学检查,¹⁸F-FDG PET/CT在检查局部根治性治疗(手术和/或热消融)后组织的形态学变化和残留肿瘤组织、评估新辅助化疗期间或之后的病理反应等方面有一定价值^[19]。1例评估CRLM患者伊立替康载药微球经肝动脉栓塞化疗疗效的病例报告中,患者接受了MRI和¹⁸F-FDG PET/CT检查,结果显示¹⁸F-FDG PET/CT的实体瘤反应标准(PET response criteria in solid tumors, PERCIST)提示部分代谢反应,而MRI相关的实体瘤反应评价标准(response evaluation criteria in solid tumors, RECIST)

却提示病情稳定,最终认为在不可切除的CRLM中,PERCIST在载药微球经肝动脉栓塞化疗疗效的早期评估中可能具有优势^[20]。Bijlstra等^[19]系统回顾了¹⁸F-FDG PET/CT应用于CRLM疗效评估的相关研究,发现¹⁸F-FDG PET/CT在热消融后检测残余肿瘤和局部复发方面优于传统影像学检查,且在评估姑息化疗和放射栓塞的疗效及预测生存期方面也显示出显著优势。

1.3 预后预测

1.3.1 复发预测

当前,CRLM患者通常接受手术治疗。然而,仍有70%的患者可能复发^[21]。研究表明,¹⁸F-FDG PET/CT可能是评估肿瘤复发的首选检查^[22]。Lee等^[21]基于术前¹⁸F-FDG PET/CT转移灶与原发灶的摄取比(M/P比值)等预测因子开发了一个CRLM根治性手术后复发的术前和术后模型。经验证,该模型能够显著提高预测准确性,从而可用于患者的风险分层,最终有助于决定治疗决策。对于很多不可切除的CRLM患者,肝移植也是一种选择,而评估患者是否能够进行肝移植是必须考虑的问题,它往往与复发风险的评估相关。Wehrle等^[23]基于移植前¹⁸F-FDG PET/CT代谢肿瘤体积(metabolic tumor volume, MTV)对26例肝移植患者进行了复发预测,结果显示MTV ≥ 70 cm³组的年复发率为35%,显著高于年复发率为10%的MTV < 70 cm³组($P < 0.001$),表明对于MTV ≥ 70 cm³的患者,因较高的复发率应谨慎考虑肝移植,可能需要更积极的辅助治疗或探索替代治疗方案。

1.3.2 生存期预测

¹⁸F-FDG PET/CT应用于肝转移瘤患者的生存期预测是目前的研究热点之一,大多数研究以¹⁸F-FDG PET/CT的诸多代谢参数或提取的纹理参数为预测因子。Karaoglan等^[24]在一项回顾性研究中,从66例CRLM患者的¹⁸F-FDG PET/CT图像提取了若干代谢参数以进行预后预测,结果显示在多变量分析中,原发肿瘤代谢肿瘤体积(primary metabolic tumor volume, PMTV)有较好的预测效果($P=0.022$),是评估CRLM初治患者生存的独立预后因素。另一项研究中,研究者发现术前CRLM患者总代谢肿瘤体积(total metabolic tumor volume, TMTV)和总病变糖酵解(total lesion glycolysis, TLG)的低值与5年肝脏无复发生存期(liver recurrence-free survival, LRFS)和癌症特异性生存期(cancer-specific survival, CSS)的改善显著相关,可见TMTV和TLG对预测预后也有一

定作用^[25]。Nemeth等^[26]采用基线及治疗早期(2个周期后)的代谢参数对CRLM患者无进展生存期(progression free survival, PFS)和总生存期(overall survival, OS)进行预测,结果显示治疗2个周期后的标准化附加代谢活性(standardized added metabolic activity, SAM)和归一化标准化附加代谢活性(normalized SAM, NSAM)可分别预测OS和PFS,在效果方面优于传统参数(如SUVmax),表明SAM和NSAM具有良好的预后预测价值。Duran等^[27]在CRLM传统的CRS基础上结合肿瘤SUVmax/正常肝脏平均标准化摄取值(standardized uptake value mean, SUVmean)的代谢参数提出代谢临床风险评分(metabolic CRS, mCRS)预测模型,旨在预测CRLM患者术后复发情况。测试结果显示早期复发(early relapse, ER)组的肿瘤SUVmax/正常肝脏SUVmean值显著大于长期生存组(long-term survival, LTS)组(4.2 vs. 2.8, $P=0.008$)。利用基于此建立的mCRS进行了预后预测,即61%的LTS者为低风险mCRS,73%的ER者为高风险mCRS($P=0.023$),可见该模型在CRS的基础上对肝转移瘤患者预后有很好的预测效果,继而可能优化手术决策。肝移植作为不可切除CRLM患者可选的治疗方法,其预后预测决定了患者有无手术的必要性。对此,3项研究在同样提取了术前多项代谢参数和/或纹理参数的基础上对肝移植术后的预后进行了评估,结果显示3项研究均支持MTV具有更优的预测价值,可见肝移植术前应首先考虑MTV的高低后再作决定^[28-30]。对一些特殊来源的肝转移瘤,¹⁸F-FDG PET/CT同样有预测预后的作用。如Del Carpio等^[31]对葡萄膜黑色素瘤(uveal melanoma, UM)肝转移预后进行了研究,经多变量分析,发现UM肝转移灶的SUVmax是转移性UM的独立预后因素。

2 诊断陷阱

¹⁸F-FDG PET/CT在诊断一些特殊原发灶来源的肝转移瘤时存在一些诊断陷阱。一项病例报告介绍了1例嫌色肾细胞癌(chromophobe renal cell carcinoma, chRCC)肝转移的诊疗经过。患者体检发现肝肾占位性病变,增强CT显示病灶强化,而¹⁸F-FDG PET/CT却未见明显摄取。随后的肝脏病灶穿刺病理(共9次)均未发现非典型细胞。最终,对手术切除的肝段进行病理检查,发现了具有嗜酸性粒细胞性质的非典型细胞,确诊为chRCC的嗜酸性粒细胞变异伴肝转移^[32]。另一个病例报告中,患者既往有肺癌病史,

增强CT和MRI见肝脏多发结节,均呈薄边缘强化,¹⁸F-FDG PET/CT见病变处代谢轻度升高,怀疑肝转移瘤。术后病理却提示肝脏孤立性坏死结节。既往研究认为坏死的程度不同,FDG摄取的程度不同,这使其在¹⁸F-FDG PET/CT上与肝转移瘤的鉴别存在难度,因此应该关注这一病变的特征^[33]。一项回顾性研究纳入了55例经病理或影像学证实的胃肠道间质瘤(gastrointestinal stromal tumor, GIST)肝转移患者,他们接受¹⁸F-FDG PET/CT($n=29$)、MRI($n=22$)或二者兼有($n=4$)的检查,结果提示接受¹⁸F-FDG PET/CT检查的患者中38.9%、23.9%和37.2%的病灶分别表现出代谢显著升高、略高、等于或低于肝脏,且肝转移瘤的直径与SUVmax呈弱相关($r=0.370, P < 0.001$),肝转移瘤与原发肿瘤的SUVmax呈中等相关($r=0.492, P < 0.001$);而接受MRI检查的患者中,90.8%动脉期不均匀强化、74.3%病灶边缘与瘤内强化模式不同;另外,部分小病灶(尤其低代谢或脂肪肝背景下)在¹⁸F-FDG PET/CT中易漏诊,但MRI可检出(如1例1.3 cm病灶在¹⁸F-FDG PET/CT中漏诊, MRI显示边缘强化)。研究者认为GIST肝转移在¹⁸F-FDG PET/CT中可表现为高、中、低代谢,且代谢活性与病灶大小无强关联,因此对疑似GIST肝转移患者,建议联合两种检查以提高检出率^[34]。一项评估¹⁸F-FDG PET/CT对结肠直肠癌黏液性肝转移(colorectal mucinous liver metastases, mucCRLM)患者诊断性能的研究中,58例mucCRLM患者符合纳入标准,研究发现,¹⁸F-FDG PET/CT在病灶层面的灵敏度较低(仅60.7%),这一情况在病灶肿瘤细胞生存比例低($\leq 25\%$)和无微血管侵犯时尤其明显。因此研究者认为对于化疗后肿瘤细胞残留率低的mucCRLM患者在出现¹⁸F-FDG PET/CT阴性表现时应结合其他检查结果再作诊断^[35]。总之,对于某些特殊病理类型的肝转移瘤,¹⁸F-FDG PET/CT存在较高的假阴性率,可能导致误诊、漏诊。因此,需综合临床信息和其他影像学检查结果进行判断。

3 鉴别诊断

¹⁸F-FDG PET/CT在确定肝脏中是否存在转移以及肝原发肿瘤有无肝外扩散方面具有重要作用。这些信息往往决定了肝内病灶进一步处理的方案^[36]。因此,如何应用¹⁸F-FDG PET/CT鉴别肝内病灶的性质也许是一项重要研究。首先是肝肿瘤与肝正常组织的鉴别。Ayaz等^[37]回顾性分析了32例结肠腺癌肝转移患者¹⁸F-FDG PET/CT图像,结果显示SUVmax与亨

氏单位(Hounsfield unit, HU)比值显著高于正常肝组织($P < 0.05$),认为该比值是一种可靠的半定量参数,可辅助鉴别结肠腺癌肝转移灶与正常肝组织,优化结肠癌分期。由于恶性肿瘤与正常组织表现出不同的空间异质性,故纹理参数成为目前许多研究的选择^[38]。在一项分别纳入80例肝转移瘤患者和80例健康对照者¹⁸F-FDG PET/CT腹部图像的研究中,研究者通过勾画、提取、分析纹理参数,发现所提取的28个纹理参数能够区分正常和病理组织($P < 0.05$)。由此可见通过纹理分析技术,有望实现对正常肝组织和肝恶性病变的鉴别^[39]。同样使用纹理分析技术,Mishra等^[40]对30例肝肿瘤,包含15例肝细胞癌(hepatocellular carcinoma, HCC)和15例不同原发部位的肝转移瘤进行了纹理特征的提取,旨在鉴别肝转移瘤和HCC,结果发现¹⁸F-FDG PET/CT 7个纹理分析参数在区分HCC和肝转移瘤方面具有显著意义。

4 比较影像学

4.1 与传统影像学检查比较

4.1.1 与多种传统影像学检查比较

¹⁸F-FDG PET/CT作为一种可以提供肿瘤代谢数据与解剖信息的检查方法,能够在全身范围内评估患者的肿瘤受累情况。在识别不同来源的肝转移方面表现出较高的准确性和灵敏度^[41]。在当前肝转移瘤的诊疗中,¹⁸F-FDG PET/CT并非唯一检查,目前,关于¹⁸F-FDG PET/CT的比较影像学研究已经获得了一些成果,这些成果有助于重新评估¹⁸F-FDG PET/CT的诊断价值。一项纳入32项研究的Meta分析比较了不同影像学方法对新诊断的疑似CRLM患者的诊断效能。结果显示,¹⁸F-FDG PET/CT的灵敏度(94.4%)、特异度(97.9%)均优于其他检查;MRI的灵敏度92.9%、特异度94.4%;超声造影的灵敏度86.1%、特异度96.1%;增强CT的灵敏度84.6%、特异度94.3%^[42]。

4.1.2 与MRI比较

MRI在肝转移瘤方面同样有着较好的诊断效能,因而越来越多的研究着眼于与MRI的比较。一项回顾性研究纳入了42例原发胃肠或肝胆系统恶性肿瘤的肝转移患者。研究者发现MRI和¹⁸F-FDG PET/CT在检测转移灶数量方面差异无统计学意义($P=0.11$)。但另外发现 < 10 mm的转移灶大多在MRI上可见而¹⁸F-FDG PET/CT未见($n=10, 23.8\%$)^[43]。针对类似问题,Oh等^[44]进行了相关研究,该研究涉

及41例患者的131个转移性结节(平均大小1.6 cm),结果显示肝脏¹⁸F-FDG PET/CT和钆塞酸增强MRI对每个 ≥ 2 cm结节的灵敏度均为100%,但对于 < 2 cm的结节,二者差异显著(59.8% vs. 95.1%, $P < 0.001$)。研究者认为钆塞酸增强MRI相比¹⁸F-FDG PET/CT在肝转移小结节(< 2 cm)的检测方面更有优势。同样与MRI比较,1篇病例报告中,研究者比较MRI的DWI序列(b值为1 000)与¹⁸F-FDG PET/CT对肝转移瘤的诊断效能。结果显示前者发现并确定了后者及MRI T2序列未能发现的肝转移,最终改变了患者治疗方案。研究者认为,高b值DWI的MRI可以成功检测到¹⁸F-FDG PET/CT无法检测到的肝脏小转移病灶^[45]。

4.2 与¹⁸F-FDG PET/MRI比较

目前许多研究表明,MRI在检测肝脏小病变方面显示出更高的灵敏度和准确性,成为CT的有效替代方案。关于PET和MRI数据融合(称为¹⁸F-FDG PET/MRI)的一系列研究结果显示,这样的混合成像确实可以在一些病变诊断中起到与¹⁸F-FDG PET/CT相差不大甚至更好的效果^[46]。一项涉及32例肝转移患者的试验发现,¹⁸F-FDG PET/CT的准确性为82.4%,而¹⁸F-FDG PET/MRI为96.1%;而二者的灵敏度分别为67.8%和92.2%,阴性预测值分别为82.0%和95.1%^[47]。在一项荟萃研究中,最终得出二者检测肝转移瘤的灵敏度分别为91.1%~98.0%、42.3%~71.1%,特异度分别为100.0%、83.3%~98.6%,准确率分别为96.5%~98.2%、44.7%~86.7%^[48]。Cohen等^[49]在一项¹⁸F-FDG PET/MRI评估肝转移瘤的前瞻性研究中发现,在97例肝转移瘤患者中,¹⁸F-FDG PET/MRI在37例中发现78个恶性病灶,而¹⁸F-FDG PET/CT未发现,其中19个病灶(11例)在¹⁸F-FDG PET/MRI的PET上发现,但在¹⁸F-FDG PET/CT的PET上未发现,37个病灶(14例)较小(≤ 0.8 cm),仅在MRI上发现;22个病灶(12例) > 0.8 cm,低/无¹⁸F-FDG摄取,但根据MRI表现仍可诊断为恶性。由此认为¹⁸F-FDG PET/MRI的PET(与¹⁸F-FDG PET/CT的PET相比)能检测到更多恶性病变,同时MRI也能通过提供更高空间分辨率以及改进的多参数评估最终增加诊断的准确率。另一项研究中,Akkus等^[50]将78例结直肠癌患者的¹⁸F-FDG PET/CT、¹⁸F-FDG PET/MRI、MRI肝转移检测结果进行比较,得出三者灵敏度分别为55.6%、97.2%和100%,特异度分别为98.5%、100%和80.5%,准确率分别为70.7%、98.2%和93.1%。而后续随访也得知,与

¹⁸F-FDG PET/CT或单独的肝脏MRI相比,18%的患者治疗方案因¹⁸F-FDG PET/MRI的检查结果而改变。一项涉及70例可疑肝转移瘤患者的延迟¹⁸F-FDG-PET/MRI(¹⁸F-FDG PET/CT后)研究中,29例患者(41.4%)的治疗方案在结合延迟¹⁸F-FDG PET/MRI结果后需要改变,原因包括新转移灶、新受累肝叶和假阳性^[51]。综上,尽管¹⁸F-FDG PET/CT在全身评估的效率和成本上占优,¹⁸F-FDG PET/MRI对肝转移瘤小病灶和复杂病灶的检出仍有着不可替代的优势,或可作为精细评估肝内情况的补充或优化手段。

5 图像相关技术进展

5.1 延迟成像

¹⁸F-FDG PET/CT在肝转移瘤的分期和反应评估等方面有着广泛应用。然而,值得注意的是,许多良性病变也可导致病灶的摄取增加,这给良恶性鉴别带来了困难。多项研究表明,¹⁸F-FDG PET/CT的延迟成像技术可能有助于区分良恶性肿瘤^[52]。Boanova等^[53]在一项涉及124例可疑CRLM患者的研究中发现,与早期成像相比,¹⁸F-FDG PET/CT延迟成像的灵敏度(100% vs. 87.7%)和特异度(91.0% vs. 94.0%)显著增加($P=0.04$)。一项研究对108例术前接受了双时间点¹⁸F-FDG PET/CT扫描的CRLM患者进行了分析,结果显示,对于CRLM ≤ 10 mm的小病灶,延迟成像的灵敏度显著高于早期成像(47.17% vs. 26.42%, $P < 0.001$)。而对于CRLM > 10 mm的病灶,二者灵敏度差异无统计学意义(92.73% vs. 95.15%, $P=0.125$)。研究者认为,¹⁸F-FDG PET/CT延迟成像有助于检测到更多的CRLM病灶,特别是小病灶(< 10 mm)^[54]。

5.2 呼吸门控(respiratory-gated, RG)

RG是一项应用于¹⁸F-FDG PET/CT、通过减少呼吸运动伪影以更准确识别肝转移瘤的技术^[55],Watanabe等^[56]在一项研究中纳入了19例接受了¹⁸F-FDG PET/CT早期成像和结合延迟RG成像的肝转移瘤患者。旨在分析结合RG延迟成像的价值。结果显示延迟RG图像的肿瘤-肝脏摄取比(tumor-to-liver uptake ratio, TLR)显著高于早期非RG和延迟非RG图像($P < 0.01$)。在延迟RG图像中, ≤ 10 mm病灶的TLR改善差异比 > 10 mm的病灶高15%。由此研究表明,与早期非RG和延迟非RG成像相比,延迟RG成像可改善TLR,对于小病灶改善更加显著。结合RG的¹⁸F-FDG PET/CT延迟扫描可能是一种评估肝转移瘤的良好选择。

5.3 图像优化

^{18}F -FDG PET/CT 图像的质量取决于采集的光子数量。后者主要受示踪剂剂量和扫描时间影响。然而,注射的放射性示踪剂(例如 ^{18}F -FDG)会引起辐射暴露风险的担忧。减少示踪剂注射剂量、缩短扫描时间可以减少这种风险。但考虑到图像质量问题,前者每个窗位需要更长的扫描时间,可能导致不适和运动伪影,缩短扫描时间会减少光子采集,从而降低图像质量并影响诊断^[57]。因此,从低剂量(或低计数)图像重建标准剂量 PET 图像以减少辐射暴露并优化图像质量很有研究前景。目前基于深度学习(deep learning, DL)的图像优化已取得了一些进展。Liu 等^[57]在纳入 34 例 CRLM 患者的研究中,分别用 Gaussian smoothing filter 和新开发的 DL image filter 在不同时间采集图像,并以 Gaussian smoothing filter 进行完整扫描获得的图像为标准,通过肝脏-纵隔血池信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)对比不同采集时间的图像质量。最终发现 DL image filter 可显著提高 SNR 和视觉图像质量评分($P < 0.01$),且早期 DL image filter 图像与标准图像的质量没有差异。可见 DL image filter 可以在超快采集的基础上,基于 DL 的图像过滤以减少噪声,继而优化图像。另一项研究中,Wang 等^[58]基于 DL 的 M³S-Net 模型,从 10 s 低剂量 ^{18}F -FDG PET/CT 中生成与 60 s PET 兼容的高质量图像,且该模型在肝脏肿瘤重建和边缘保持方面展现了良好的性能。优化后的图像质量评估同样重要,Qi 等^[59]开发了一种用于图像质量评估的卷积神经网络,已被证明具有与人工相当的性能,且其评估速度比人工快 200 倍。

6 引导放疗

6.1 引导立体定向放射治疗(stereotactic body radiation therapy, SBRT)

放疗是大多数癌症的治疗方法,它依靠电离辐射来杀死肿瘤细胞,同时最大限度地减少对正常组织的影响^[60]。肝转移瘤是癌症管理中的一个重大临床挑战,而 SBRT 是目前治疗这些转移瘤的一种有前景的方式,在不良反应少的同时有较高的局部控制和生存率^[61-62]。研究证明 SBRT 在完全缓解、异时寡转移、组织学良好且无治疗中断的患者中获得最好的结果^[63]。 ^{18}F -FDG PET/CT 作为一种功能显像检查可以更好地对疾病进行分期,而其相关代谢参数也可以用作预测治疗反应的生物标志物,从而利于减少肿瘤靶区描绘的不确定性和可变性,最后达到协

助放疗的效果^[64]。一项关于肝转移瘤 SBRT 的研究指出, ^{18}F -FDG PET/CT 在放疗中具有双重价值。首先,它可通过发现肝外转移灶修正整体诊疗方案;其次,在靶区勾画阶段,PET 图像上的高摄取区域有助于更准确地界定肿瘤的真实边界,从而避免靶区遗漏或对正常组织的过度照射^[65]。

6.2 生物引导放疗(biology-guided radiotherapy, BgRT)

BgRT 是另一种新颖的外照射放疗技术,其作用方式是将 ^{18}F -FDG PET/CT 与直线加速器相结合,利用来自肿瘤组织中示踪剂的 PET 信号进行引导放疗^[66]。但这也意味着如果不能较好地地区分肿瘤和正常组织的 SUV 可能会导致靶区界定不准确。对此,Chau 等^[67]提出通过肿瘤 SUV_{max}/背景 SUV_{mean},即归一化标准化摄取值(normalized SUV, NSUV)来验证 BgRT 治疗肝转移瘤的可行性。结果显示 FDG 高摄取的肝转移瘤具有足够的 NSUV(>1.45),能够进行 BgRT。该研究为实现肝转移瘤的超精准自适应放疗提供了基础,也表明了 ^{18}F -FDG PET/CT 在引导放疗方面的重要作用。

7 应用展望——AI

7.1 肝转移瘤 ^{18}F -FDG PET/CT AI 领域现状

利用 AI 可将人类执行的智力任务进行自动化处理,而机器学习(machine learning, ML)和 DL 则是主要方法^[68]。ML 因其高性能和构建复杂预测模型的卓越能力在医学图像的相关研究中取得了许多令人满意的结果^[69]。DL 作为 ML 算法的子集,能够从原始输入数据中学习多层次表征,从而消除传统 ML 中手工设计特征的必要性^[70],这一特点使得 DL 相比 ML 有更高的效率,从而有更多的应用。如今肝转移瘤已成为近年来 AI 相关肝脏影像学研究中的热点,相关临床应用已较为广泛^[71]。相关研究总结显示不同 AI 模型在 CT 和 MRI 上对 CRLM 的病灶检测、疗效评估、预后预测方面都有较好的表现^[72]。另外也有一些研究关注肝转移原发灶的问题,Chen 等^[73]通过将病理切片的手工特征(hand crafted, HC)和 DL 结合来识别肝转移瘤的原发肿瘤部位,并发现结合 HC 和 DL 特征的模型在预测肝转移瘤来源方面有优异表现。还有一些研究提到 AI 在图像重建方面的作用,Lyu 等^[74]将开发的深度学习图像重建(deep learning image reconstruction, DLIR)算法与低剂量双能量 CT(dual-energy CT, DECT)结合,发现该成像方法可以在保持与标准剂量单能量 CT(single-

energy, SECT)相当的图像质量和病变检测能力的同时,显著降低辐射剂量。以上总结的AI在肝转移瘤医学影像中的应用包含了CT、MRI和病理切片,而AI在¹⁸F-FDG PET/CT中有着不少相似的应用。¹⁸F-FDG PET/CT的AI模型在勾画肺癌和头颈癌的肿瘤范围及预测非小细胞肺癌疗效等方面有良好表现^[75]。但肝转移瘤¹⁸F-FDG PET/CT相关AI研究有限,这表明该领域的AI应用尚处起步阶段,且研究主要聚焦于通用性任务,比如Luo等^[76]构建的¹⁸F-FDG PET/CT检测肝脏局灶性病变(focal liver lesions, FLL)并区分良恶性的DL模型,Lam等^[77]基于DL开发的预测CRLM切除术后预后的模型,还包括前文所提到的基于DL优化的CRLM¹⁸F-FDG PET/CT图像的模型,但目前仍缺乏深度探索肝转移瘤特性的专用模型。

7.2 肝转移瘤¹⁸F-FDG PET/CT的AI领域展望

考虑到目前¹⁸F-FDG PET/CT在其他肿瘤中的AI研究已较为广泛,针对肝转移瘤,可以借鉴其他肿瘤的研究开展。包括自动化与精准分割:首要任务是开发AI驱动的全自动肝转移病灶分割技术,以减少对人工标注的依赖,提高分割效率与一致性。进而可结合图像优化算法构建能精准识别更小、多发病灶的分割模型;多模态融合与原发灶预测:在自动分割的基础上整合多模态影像数据(如代谢、解剖、纹理特征)与临床信息(如血清标志物、基因表达),通过DL算法实现对原发灶的预测;克服示踪剂局限性:针对¹⁸F-FDG在低代谢肿瘤中应用的局限,探索AI模型迁移学习技术,使其快速适配不同示踪剂的成像特征,从而扩展该技术对不同类型肿瘤的覆盖能力。总之,AI与多模态影像的深度融合,有望突破当前¹⁸F-FDG PET/CT在肝转移瘤诊疗中的瓶颈,从而推动精准化和个体化医疗的发展。

8 小结

肝转移瘤作为常见且预后较差的疾病,其早期诊断与治疗方案的精准制定对改善患者生存情况至关重要。¹⁸F-FDG PET/CT凭借功能代谢与解剖结构融合的优势,在诊断、鉴别诊断、分期、治疗计划制定、引导放疗、疗效评估及预后预测等方面发挥核心作用。但其仍存在一定局限性,如对小病灶(尤其 ≤ 1 cm)检出率相对较低、对低代谢肿瘤(如黏液癌、部分肾癌等)存在假阴性风险,这些均为临床应用中需注意的问题。如今相关技术持续发展,延迟成像、RG可提高诊断能力,DL驱动图像优化同

时减少剂量。而比较影像学方面,¹⁸F-FDG PET/CT在诊断效率和全身评估上具有优势,MRI(尤其DWI)在小病灶诊断方面存在优势,而¹⁸F-FDG PET/MRI在肝转移灶评估的综合性能上更具优势,因此,合理的影像学检查组合能更准确地指导部分患者治疗方案的制定。虽然目前AI在¹⁸F-FDG PET/CT肝转移瘤领域研究尚处早期阶段,但其在解决核心问题(小病灶、多病灶、低代谢)、挖掘深层信息(影像组学等预测)、驱动多模态融合等方面潜力巨大,是未来重要的突破方向。总之,通过持续的技术创新和多学科合作,¹⁸F-FDG PET/CT在肝转移瘤的精准诊疗中将发挥更深远的影响。

利益冲突声明:

所有作者声明无利益冲突。

Conflict of Interests:

The authors have no conflict of interests to declare.

作者贡献声明:

孙庆阅读相关文献,撰写文章初稿。梁迪协助查阅相关文献和参与论文修改。何健对文章进行审阅,提出相关修改意见。

Author's Contributions:

SUN Qing read relevant literature and wrote the first draft of the article. LIANG Di assisted in consulting relevant literature and took part in revision of the article. HE Jian reviewed the article and put forward relevant revision suggestions.

参考文献

- [1] CLARK A M, MA B, TAYLOR D L, et al. Liver metastases: microenvironments and *ex-vivo* models[J]. *Exp Biol Med*, 2016, 241(15): 1639-1652
- [2] DE RIDDER J, DE WILT J H, SIMMER F, et al. Incidence and origin of histologically confirmed liver metastases: an explorative case-study of 23, 154 patients[J]. *Oncotarget*, 2016, 7(34): 55368-55376
- [3] HORN S R, STOLTZFUS K C, LEHRER E J, et al. Epidemiology of liver metastases[J]. *Cancer Epidemiol*, 2020, 67: 101760
- [4] RENZULLI M, CLEMENTE A, IERARDI A M, et al. Imaging of colorectal liver metastases: new developments and pending issues[J]. *Cancers*, 2020, 12(1): 151
- [5] PAPANEPHYTOU C. The Warburg effect: is it always an enemy?[J]. *Front Biosci*, 2024, 29(12): 402
- [6] ZIRAKCHIAN Z M. PET/CT in assessment of colorectal liver metastases: a comprehensive review with emphasis on (18)F-FDG[J]. *Clin Exp Metastasis*, 2023, 40(6): 465-491
- [7] LI Y K, LI F C, LI X, et al. Value of ¹⁸F-FDG PET/CT in patients with hepatic metastatic carcinoma of unknown

- primary[J]. *Medicine*, 2020, 99(50): e23210
- [8] WATANABE A, HARIMOTO N, YOKOBORI T, et al. FDG-PET reflects tumor viability on SUV in colorectal cancer liver metastasis[J]. *Int J Clin Oncol*, 2020, 25(2): 322-329
- [9] QIAO Y, LI X M, HU Y Q, et al. Relationship between SUVmax on ¹⁸F-FDG PET and PD-L1 expression in liver metastasis lesions after colon radical operation[J]. *BMC Cancer*, 2023, 23(1): 535
- [10] AKHURST T, GÖNEN M, BASER R E, et al. Prospective evaluation of ¹⁸F-FDG positron emission tomography in the preoperative staging of patients with hepatic colorectal metastases[J]. *Hepatobiliary Surg Nutr*, 2022, 11(4): 539-554
- [11] JONSSON J, HEMMINGSSON O, STRENGBOM R, et al. Does ¹⁸F-FDG PET/CT change the surgical management of potentially resectable colorectal liver metastases? [J]. *Scand J Surg*, 2022, 111: 14574969221083144
- [12] GEORGAKOPOULOS A, PIANOU N, KELEKIS N, et al. Impact of ¹⁸F-FDG PET/CT on therapeutic decisions in patients with colorectal cancer and liver metastases[J]. *Clin Imaging*, 2013, 37(3): 536-541
- [13] SERRANO P E, GU C S, MOULTON C A, et al. Positron emission tomography combined with computed tomography vs. no positron emission tomography combined with computed tomography for the management of patients with resectable colorectal cancer liver metastases and synchronous extrahepatic disease[J]. *Am Surg*, 2021, 87(9): 1431-1437
- [14] ZHOU N N, GUO X Y, SUN H W, et al. The value of ¹⁸F-FDG PET/CT and abdominal PET/MRI as a one-stop protocol in patients with potentially resectable colorectal liver metastases [J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 714948
- [15] SAMIM M, MOLENAAR I Q, SEESING M F J, et al. The diagnostic performance of ¹⁸F-FDG PET/CT, CT and MRI in the treatment evaluation of ablation therapy for colorectal liver metastases: a systematic review and meta-analysis [J]. *Surg Oncol*, 2017, 26(1): 37-45
- [16] LI X F, LI M D, SHEN H, et al. Evaluation of therapeutic effect of tumor-targeted therapy [J]. *Onco Targets Ther*, 2012, 5: 191-198
- [17] FINESSI M, BELLÒ M, GIUNTA F P, et al. Interventional locoregional treatment and metabolic response: advantages of using PET/CT in the evaluation of response to treatment [J]. *J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 62(2): 165-184
- [18] DECAZES P, THUREAU S, MODZELEWSKI R, et al. Benefits of positron emission tomography scans for the evaluation of radiotherapy [J]. *Cancer Radiother*, 2020, 24(5): 388-397
- [19] BIJLSTRA O D, BOREEL M M E, VAN MOSSEL S, et al. The value of ¹⁸F-FDG-PET-CT imaging in treatment evaluation of colorectal liver metastases: a systematic review[J]. *Diagnostics*, 2022, 12(3): 715
- [20] JIN L, HU W Y, LI T, et al. Case report and literature review: PET/CT in the evaluation of response to treatment of liver metastasis from colorectal cancer with DEBIRI-TACE [J]. *Front Oncol*, 2023, 13: 1015976
- [21] LEE H S, KWON H W, LIM S B, et al. FDG metabolic parameter-based models for predicting recurrence after upfront surgery in synchronous colorectal cancer liver metastasis [J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(3): 1746-1756
- [22] MAAS M, RUTTEN I J G, NELEMANS P J, et al. What is the most accurate whole-body imaging modality for assessment of local and distant recurrent disease in colorectal cancer? A meta-analysis: imaging for recurrent colorectal cancer [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2011, 38(8): 1560-1571
- [23] WEHRLE C J, CHÁVEZ-VILLA M, BYRNE M, et al. Pre-transplant metabolic tumor volume predicts recurrence following liver transplantation for colorectal metastasis: a multicenter study [J]. *Liver Transpl*, 2025, 31(3): 298-310
- [24] KARAOĞLAN H, KEPENEK F, KÖMEK H, et al. The prognostic role of whole-body volumetric positron emission tomography/computed tomography parameters in treatment naive colorectal cancer patients with liver metastases [J]. *Nucl Med Commun*, 2025, 46(1): 55-59
- [25] GRUT H, STERN N M, DUELAND S, et al. Preoperative ¹⁸F-FDG PET/computed tomography predicts survival following resection for colorectal liver metastases [J]. *Nucl Med Commun*, 2020, 41(9): 916-923
- [26] NEMETH Z, WIJKER W, LENGYEL Z, et al. Metabolic parameters as predictors for progression free and overall survival of patients with metastatic colorectal cancer [J]. *Pathol Oncol Res*, 2020, 26(4): 2683-2691
- [27] DURAN DERIJCKERE I, LEVILLAIN H, BOHLOK A, et al. The metabolic clinical risk score as a new prognostic model for surgical decision-making in patients with colorectal liver metastases [J]. *J Surg Oncol*, 2020, 121(2): 350-356
- [28] GRUT H, LINE P D, LABORI K J, et al. Survival after liver resection and liver transplantation for colorectal liver metastases: a comparative analysis stratified by metabolic tumor volume assessed by ¹⁸F-FDG PET/CT [J]. *HPB*, 2022, 24(7): 1055-1062
- [29] GRUT H, LINE P D, SYVERSVEEN T, et al. Metabolic

- tumor volume from ¹⁸F-FDG PET/CT in combination with radiologic measurements to predict long-term survival following transplantation for colorectal liver metastases [J]. *Cancers*, 2024, 16(1): 19
- [30] STERN N M, MIKALSEN L T G, DUELAND S, et al. The prognostic value of ¹⁸F FDG PET/CT texture analysis prior to transplantation for unresectable colorectal liver metastases [J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2025, 45(1): e12908
- [31] DEL CARPIO L P, ALGARRA M A, SABATÉ-LLOBERA A, et al. Differences in glucose metabolic activity in liver metastasis separates two groups of metastatic uveal melanoma patients with different prognosis [J]. *Cancer Med*, 2023, 12(13): 14062-14071
- [32] INOUE D, OURA S. Eosinophilic variant of chromophobe renal cell carcinoma metastasizing to the liver: diagnostic pitfall [J]. *Radiol Case Rep*, 2023, 18(10): 3504-3508
- [33] HWANG J Y, LEE J E, JUNG M J. A challenging case of solitary necrotic nodules of the liver mimicking hepatic metastases: CT, MRI, and PET-CT findings [J]. *J Belg Soc Radiol*, 2020, 104(1): 16
- [34] LYU Q H, LIN D Y, TANG M D, et al. ¹⁸F-FDG PET/CT and MR imaging features of liver metastases in gastrointestinal stromal tumors: a cross-sectional analysis [J]. *Ann Transl Med*, 2022, 10(22): 1220
- [35] BORELLO A, RUSSOLILLO N, LO TESORIERE R, et al. Diagnostic performance of the FDG-PET/CT in patients with resected mucinous colorectal liver metastases [J]. *Surgeon*, 2021, 19(5): e140-e145
- [36] TSURUSAKI M, OKADA M, KURODA H, et al. Clinical application of ¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography for assessment and evaluation after therapy for malignant hepatic tumor [J]. *J Gastroenterol*, 2014, 49(1): 46-56
- [37] AYAZ U Y, AYAZ S. SUVmax-to-HU ratio in diagnosis of hepatic metastases of colon cancer on FDG PET/CT. A new semiquantitative parameter [J]. *Ann Ital Chir*, 2023, 94: 27-35
- [38] CHICKLORE S, GOH V, SIDDIQUE M, et al. Quantifying tumour heterogeneity in ¹⁸F-FDG PET/CT imaging by texture analysis [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2013, 40(1): 133-140
- [39] HARTMANN L, BUNDSCHUH L, ZSÓTÉR N, et al. Tumor heterogeneity for differentiation between liver tumors and normal liver tissue in ¹⁸F-FDG PET/CT [J]. *Nuklearmedizin*, 2021, 60(1): 25-32
- [40] MISHRA A, RAVINA M, KOTE R, et al. Role of textural analysis parameters derived from FDG PET/CT in differentiating hepatocellular carcinoma and hepatic metastases [J]. *Nucl Med Commun*, 2023, 44(5): 381-389
- [41] HAZHIRKARZAR B, KHOSHPOURI P, SHAGHAGHI M, et al. Current state of the art imaging approaches for colorectal liver metastasis [J]. *Hepatobiliary Surg Nutr*, 2020, 9(1): 35-48
- [42] LUND M, BJERRE T A, GRØNBÆK H, et al. CEUS compared with CECT, MRI, and FDG-PET/CT for diagnosing CRC liver metastases: a diagnostic test accuracy systematic review and meta-analysis [J]. *Expert Rev Gastroenterol Hepatol*, 2024, 18(9): 541-549
- [43] TAHTABASI M, ERTURK S M, BASAK M. Comparison of MRI and ¹⁸F-FDG PET/CT in the liver metastases of gastrointestinal and pancreaticobiliary tumors [J]. *Sisli Etfal Hastan Tip Bul*, 2021, 55(1): 12-17
- [44] OH J W, OH S N, CHOI J I, et al. Does the gadoteric acid-enhanced liver MRI impact on the treatment of patients with colorectal cancer? Comparison study with ¹⁸F-FDG PET/CT [J]. *Biomed Res Int*, 2016, 2016: 8412071
- [45] FÜLÖP A C, SERAC G, GURZU S. Detection of hepatic metastasis in colorectal cancer: a comparative case report of ¹⁸F-FDG PET-CT and diffusion-weighted MRI with a b value of 1000 [J]. *J Belg Soc Radiol*, 2023, 107(1): 52
- [46] SHI Y G, YU H X, ZHANG X Y, et al. ¹⁸F-FDG PET/CT versus ¹⁸F-FDG PET/MRI in the evaluation of liver metastasis in patients with primary cancer: a head-to-head comparative meta-analysis [J]. *Clin Imaging*, 2024, 112: 110209
- [47] BEIDERWELLEN K, GERALDO L, RUHLMANN V, et al. Accuracy of ¹⁸F FDG PET/MRI for the detection of liver metastases [J]. *PLoS One*, 2015, 10(9): e0137285
- [48] SINGNURKAR A, POON R, METSER U. Head-to-head comparison of the diagnostic performance of FDG PET/CT and FDG PET/MRI in patients with cancer: a systematic review and meta-analysis [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2024, 223(3): e2431519
- [49] COHEN D, KESLER M, MUCHNIK KURASH M, et al. A lesson in humility: the added values of PET-MRI over PET-CT in detecting malignant hepatic lesions [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2023, 50(5): 1423-1433
- [50] AKKUS GUNDUZ P, OZKAN E, KURU OZ D, et al. Clinical value of fluorine-18-fluorodeoxyglucose PET/MRI for liver metastasis in colorectal cancer: a prospective study [J]. *Nucl Med Commun*, 2023, 44(2): 150-160
- [51] ZHOU N N, MENG X X, ZHANG Y, et al. Diagnostic value of delayed PET/MR in liver metastasis in comparison with PET/CT [J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 717687
- [52] CHENG G, TORIGIAN D A, ZHUANG H M, et al. When should we recommend use of dual time-point and delayed time-point imaging techniques in FDG PET? [J]. *Eur J*

- Nucl Med Mol Imaging, 2013, 40(5): 779–787
- [53] BOANOVA L G, ALTMAYER S, WATTE G, et al. Detection of liver lesions in colorectal cancer patients using ¹⁸F-FDG PET/CT dual-time-point scan imaging[J]. *Cancers*, 2023, 15(22): 5403
- [54] MAO W J, ZHOU J, QIU L, et al. The added value of dual-time-point ¹⁸F-FDG PET/CT imaging in the diagnosis of colorectal cancer liver metastases [J]. *Abdom Radiol*, 2020, 45(4): 1075–1081
- [55] SUENAGA Y, KITAJIMA K, AOKI H, et al. Respiratory-gated ¹⁸F-FDG PET/CT for the diagnosis of liver metastasis [J]. *Eur J Radiol*, 2013, 82(10): 1696–1701
- [56] WATANABE S, HANAOKA K, KAIDA H, et al. Usefulness of respiratory-gated PET acquisition during delayed ¹⁸F-FDG PET/CT scanning for patients with liver metastases [J]. *Asia Ocean J Nucl Med Biol*, 2021, 9(2): 142–149
- [57] LIU E T, LYU Z J, YANG Y L, et al. Sub-minute acquisition with deep learning-based image filter in the diagnosis of colorectal cancers using total-body ¹⁸F-FDG PET/CT [J]. *EJNMMI Res*, 2023, 13(1): 66
- [58] WANG D, JIANG C, HE J, et al. M³S-Net: multi-modality multi-branch multi-self-attention network with structure-promoting loss for low-dose PET/CT enhancement [J]. *Phys Med Biol*, 2024, 69(2): 025001
- [59] QI C, WANG S, YU H J, et al. An artificial intelligence-driven image quality assessment system for whole-body ¹⁸F-FDG PET/CT [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2023, 50(5): 1318–1328
- [60] WANG L L, LYNCH C, PITRODA S P, et al. Radiotherapy and immunology [J]. *J Exp Med*, 2024, 221(7): e20232101
- [61] FRANZESE C, LOUIE A V, KOTECHA R, et al. Stereotactic body radiation therapy for liver metastases: systematic review and meta-analysis with international stereotactic radiosurgery society (ISRS) practice guidelines [J]. *Pract Radiat Oncol*, 2025, 15(2): e172–e188
- [62] RODRÍGUEZ M R, XIN C Z, HERNANDO O, et al. SBRT-SG-01: final results of a prospective multicenter study on stereotactic body radiotherapy for liver metastases [J]. *Clin Transl Oncol*, 2024, 26(7): 1790–1797
- [63] PEZZULLA D, CHILOIRO G, LIMA E M, et al. Stereotactic radiotherapy for liver oligometastases: a pooled analysis following the ESTRO/ESRT consensus recommendations [J]. *Clin Exp Metastasis*, 2024, 41(5): 667–678
- [64] LUCIA F, WITHOFS N, LOVINFORSE P, et al. PET/CT in radiotherapy: indications and potential applications [J]. *Rev Med Liege*, 2024, 79(S1): 84–99
- [65] MENICHELLI C, CASAMASSIMA F, ARISTEI C, et al. Stereotactic radiotherapy for liver oligometastases [J]. *Rep Pract Oncol Radiother*, 2022, 27(1): 32–39
- [66] YANG X, ZHAO W, TIAN X Z, et al. Application of PET-LINAC in biology-guided radiotherapy [J]. *Chin J Med Instrum*, 2023, 47(3): 237–241
- [67] CHAU B, ABUALI T, SHIRVANI S M, et al. Feasibility of biology-guided radiotherapy (BgRT) targeting fluorodeoxyglucose (FDG) avid liver metastases [J]. *Radiat Oncol*, 2024, 19(1): 124
- [68] CHOI R Y, COYNER A S, KALPATHY-CRAMER J, et al. Introduction to machine learning, neural networks, and deep learning [J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2020, 9(2): 14
- [69] RADIYA K, JOAKIMSEN H L, MIKALSEN K Ø, et al. Performance and clinical applicability of machine learning in liver computed tomography imaging: a systematic review [J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(10): 6689–6717
- [70] CUI S N, TSENG H H, PAKELA J, et al. Introduction to machine and deep learning for medical physicists [J]. *Med Phys*, 2020, 47(5): 127–147
- [71] YAMADA A, KAMAGATA K, HIRATA K, et al. Clinical applications of artificial intelligence in liver imaging [J]. *Radiol Med*, 2023, 128(6): 655–667
- [72] ROMPIANESI G, PEGORARO F, CERESA C D, et al. Artificial intelligence in the diagnosis and management of colorectal cancer liver metastases [J]. *World J Gastroenterol*, 2022, 28(1): 108–122
- [73] CHEN C H, LU C, VISWANATHAN V, et al. Identifying primary tumor site of origin for liver metastases *via* a combination of handcrafted and deep learning features [J]. *J Pathol Clin Res*, 2024, 10(1): e344
- [74] LYU P J, LI Z, CHEN Y, et al. Deep learning reconstruction CT for liver metastases: low-dose dual-energy *vs.* standard-dose single-energy [J]. *Eur Radiol*, 2024, 34(1): 28–38
- [75] WEI L S, EL NAQA I. Artificial intelligence for response evaluation with PET/CT [J]. *Semin Nucl Med*, 2021, 51(2): 157–169
- [76] LUO Y Q, YANG Q Q, HU J L, et al. Preliminary study on detection and diagnosis of focal liver lesions based on a deep learning model using multimodal PET/CT images [J]. *Eur J Radiol Open*, 2024, 14: 100624
- [77] LAM C S N, BHARWANI A A, CHAN E H Y, et al. A machine learning model for colorectal liver metastasis post-hepatectomy prognostications [J]. *Hepatobiliary Surg Nutr*, 2023, 12(4): 495–506

(收稿: 2025-12-27; 修回: 2026-02-06; 录用: 2026-03-05)

(本文编辑: 陈汐敏)