

淋巴瘤¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学的应用及研究进展

刘护丽 周鹏 张礼荣

江苏大学附属医院影像科, 镇江 212001

通信作者: 张礼荣, Email: tianchen861@sina.com

【摘要】 ¹⁸F-FDG PET/CT 是诊断淋巴瘤最重要的检查方法之一, 其在淋巴瘤的诊断分期、疗效评估、预后预测及临床决策等方面发挥着重要作用。影像组学是一种利用复杂的生物信息学方法从医学图像中提取定量信息来表征肿瘤异质性的技术。¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学方法已应用于量化肿瘤内异质性, 在淋巴瘤的研究颇具潜力和价值。该文就¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学在淋巴瘤的应用及研究进展进行综述。

【关键词】 淋巴瘤; 影像组学; 正电子发射断层显像术; 体层摄影术, X 线计算机; 发展趋势

基金项目: 江苏省医学会伦琴影像科研专项资金项目 (SYH-3201150-0023)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20221212-00370

Research progress and application of ¹⁸F-FDG PET/CT radiomics in lymphoma

Liu Huli, Zhou Peng, Zhang Lirong

Department of Radiology, Affiliated Hospital of Jiangsu University, Zhenjiang 212001, China

Corresponding author: Zhang Lirong, Email: tianchen861@sina.com

【Abstract】 ¹⁸F-FDG PET/CT is one of the most advanced diagnostic methods for lymphoma, which plays an important role in the diagnosis, efficacy evaluation, prognosis prediction and clinical decision-making of lymphoma. Radiomics, which uses complex bioinformatics methods to extract quantitative information from medical images to characterize tumor heterogeneity, has blossomed over the past decade. Radiomics has been applied to ¹⁸F-FDG PET/CT to quantify the heterogeneity within tumors, which has great potential and value in the study of lymphoma. This article reviews the research progress and application of ¹⁸F-FDG PET/CT radiomics in lymphoma.

【Key words】 Lymphoma; Radiomics; Positron-emission tomography; Tomography, X-ray computed; Trends

Fund program: Roentgen Image Research Special Foundation of Jiangsu Medical Association (SYH-3201150-0023)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20221212-00370

淋巴瘤是一组起源于淋巴造血系统并广泛累及淋巴结和结外组织的恶性肿瘤, 发病率逐年升高, 且患者年龄分布广^[1]。淋巴瘤病理分型复杂, 具有高度异质性,¹⁸F-FDG PET/CT 可早期显示病灶的代谢变化, 适用于评估高代谢淋巴瘤, 在霍奇金淋巴瘤 (Hodgkin's lymphoma, HL) 以及多数非 HL (non-HL, NHL) 患者的初始分期、再分期、疗效及预后评估中有重要意义^[2]。然而,¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学在淋巴瘤的研究尚处于起步阶段。本文就¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学在淋巴瘤的鉴别诊断、疗效及预后评估等方面的应用及研究进展进行综述。

一、¹⁸F-FDG PET/CT 在淋巴瘤中的作用

不同于 CT 或 MRI 主要反映病灶的解剖和组织信息,¹⁸F-FDG PET/CT 显像从分子水平显示组织和肿瘤的代谢情况, 可检出部分 CT 扫描无法显示的病灶, 尤其对 CT 上无或仅有轻微解剖异常的淋巴瘤累及 (如正常大小淋巴结、脾脏及胃肠道受累等) 的检出, PET/CT 具有明显优势^[2]。¹⁸F-FDG PET/CT 同时融合了解剖-功能显像, 可反映组织葡萄糖的代谢率^[3], 从而定量反映肿瘤代谢活性。¹⁸F-FDG PET/CT 对淋

巴瘤骨髓浸润的灵敏度和特异性均较高, 可替代 HL 及部分弥漫性大 B 细胞淋巴瘤 (diffuse large B-cell lymphoma, DLBCL) 的骨髓活组织检查 (简称活检)^[4]。2022 年美国国立综合癌症网络 (National Comprehensive Cancer Network, NCCN) 公布的 B 细胞淋巴瘤临床实践指南 (2022 年第 5 版) 指出, 基线¹⁸F-FDG PET/CT 显像是 HL 及多数 NHL 治疗前评估的一部分, 且对于 DLBCL 患者¹⁸F-FDG PET/CT 显像骨髓阴性则无需骨髓活检^[5]。¹⁸F-FDG PET/CT 在淋巴瘤患者的疗效评价和预后方面具有重要作用, 目前临床使用的疗效评价标准有多维尔 (Deauville) 评分^[6] [即 5 分量表评分法 (5-point scale, 5-PS)] 和 Lugano 分类^[7]。因代谢改变早于解剖形态的改变,¹⁸F-FDG PET/CT 在淋巴瘤的分期方面优于传统影像学检查, 能更早期、准确地评估疗效, 对淋巴瘤治疗后的残留病灶的性质进行判断^[8]。

此外, 近来研究已证实治疗中期¹⁸F-FDG PET/CT 显像在 HL 和 DLBCL、外周 T 细胞淋巴瘤、结外自然杀伤/T 细胞淋巴瘤 (extranodal natural killer/T-cell lymphoma, ENKTL) 中具有预后价值,¹⁸F-FDG PET/CT 中期结果和总生存 (overall

survival, OS) 及无进展生存 (progression-free survival, PFS) 结局相关,但目前 DLBCL 中期¹⁸F-FDG PET/CT 检查的最佳时间点尚未完全明确^[9]。大多数研究证实,治疗结束后¹⁸F-FDG PET/CT 结果阴性者具有较高的 OS 和 PFS^[10-11]。

二、¹⁸F-FDG PET/CT 的影像组学流程

淋巴瘤是一组高度异质性的恶性肿瘤,影像数据的高维分析可以表征肿瘤的异质性,实现淋巴瘤的无创、实时及动态可重复监测^[12]。¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学流程包括:(1) 图像采集和分割;(2) 数据筛选;(3) 特征提取;(4) 模型构建。通过提取¹⁸F-FDG PET/CT 图像特征,高通量地挖掘图像定量特征来表征病灶内相关信息^[13-15]。由于淋巴瘤病灶的高异质性和多灶性,其影像组学研究的难点之一在于病灶的识别和勾画。对于¹⁸F-FDG PET/CT 图像,目前常用的分割肿瘤病灶的方法有:手动法、阈值法[包括固定和(或)自适应阈值]、自动和(或)半自动分割法以及基于人工智能(artificial intelligence, AI)的梯度学习、区域生长方法、深度卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)的自动分割等^[16]。目前淋巴瘤研究中最常提取的¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学特征有一阶特征、二阶特征和高阶特征。一阶特征包括 SUV 相关参数,肿瘤代谢体积(metabolic tumor volume, MTV)和病灶糖酵解总量(total lesion glycolysis, TLG);二阶纹理特征如灰度共生矩阵(grey level co-occurrence matrix, GLCM)、灰度游程矩阵(grey level run length matrix, GLRLM)、灰度区域矩阵(grey-level zone-length matrix, GLZLM);高阶特征如分型分析(fractal analysis)、小波(wavelets)等。在对影像组学特征进行选择及降维后,通过统计学方法来构建临床预测模型,以解决不同临床问题。

三、¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学在淋巴瘤中的研究现状与进展

1. 诊断及鉴别诊断。目前,¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学在淋巴瘤诊断和鉴别诊断方面得到广泛关注。de Jesus 等^[17]评估了基线¹⁸F-FDG PET/CT 影像学特征,通过机器学习算法来区分滤泡性淋巴瘤(follicular lymphoma, FL)和 DLBCL,分别提取了基于 SUV 参数的 79 个影像组学特征和基于 CT 的 51 个特征以及 6 个形状特征,结果示使用机器学习分类器梯度增强算法对 136 个影像组学特征的识别效果最好(AUC 为 0.86,准确性为 80%)。Ou 等^[18]利用机器学习的方法基于¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学特征构建模型来区分乳腺癌和乳腺淋巴瘤,结果表明临床特征、SUV 指标和¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学的联合模型在训练组和验证组的分化能力最强(AUCs 分别为 0.867 和 0.806)。¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学的方法在区分原发性中枢神经系统淋巴瘤和胶质瘤方面已显示出巨大的潜力^[19-20]。

2. 疗效预测。纹理分析是从图像中量化肿瘤异质性经典的方法之一^[21],其在 CT、MRI 影像组学中的应用由来已久^[22-23],纹理分析及影像组学在¹⁸F-FDG PET/CT 中的研究起步较晚但潜力巨大,不同于传统的基于视觉评估的 Deauville 标准,¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学特征可反映肿瘤局部代谢差异,已成为患者疗效评估的新工具。Coskun 等^[24]回顾性分析了 45 例接受(利妥昔单抗克隆抗体+环磷酰胺+阿霉素+长春新碱+泼尼松)方案治疗的 DLBCL 患者,从预处理后的

PET/CT 图像中筛选出 14 个纹理特征,多因素分析结果示, SUV_{max} [比值比(odds ratio, OR) = 1.652, 95% CI: 1.186 ~ 2.303, $P = 0.003$] 和 GLCM (OR = 1.683, 95% CI: 1.234 ~ 2.173, $P = 0.001$) 是治疗后部分缓解的独立预测因素。Sun 等^[25]回顾性分析 30 例原发性胃肠道 DLBCL 患者治疗前的基线¹⁸F-FDG PET/CT 图像,收集化疗 3~4 个周期后的中期疗效评价,比较完全代谢缓解(complete response, CR)组与非 CR 组在 SUV_{max} 、MTV 和纹理特征方面的差异,结果表明纹理分析可提高基线¹⁸F-FDG PET/CT 在预测原发性胃肠道 DLBCL 中期疗效的价值。近来研究还发现,HL、NHL、DLBCL 和 FL 患者的影像组学特征与治疗反应有良好的相关性^[26]。与传统的临床指标相比,¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学特征结合临床参数可显著改善模型性能,对淋巴瘤的疗效评估及复发高危患者的预测具有较好的应用潜力。

3. 预后评估。Mayerhoefer 等^[13]利用 107 例套细胞淋巴瘤(mantle cell lymphoma, MCL) 患者的¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学特征预测预后,发现结合临床、实验室和生物学参数的联合模型预测 2 年 PFS 的效能最优。Cottreau 等^[27]提出淋巴瘤播散特征在 DLBCL 患者的预后预测中可作为有前景的新参数,他们定义的淋巴瘤播散特征是基于病灶之间的距离测量,反映了全身淋巴瘤病灶的空间分布。该研究纳入 95 例晚期 DLBCL 患者,将 MTV 与基线¹⁸F-FDG PET/CT 图像中计算得到的淋巴瘤播散特征参数相结合,研究发现高 MTV 和高播散特征是 PFS ($P = 0.027$ 和 $P = 0.0003$) 和 OS ($P = 0.0007$ 和 $P = 0.0095$) 的不良预后因素,结合播散特征可进一步优化 DLBCL 患者的风险分层。Eertink 等^[28]的一项多中心研究也得到了类似结果,他们发现在 MTV 中添加淋巴瘤播散特征可以显著提高模型性能,结合影像组学和淋巴瘤播散特征($D_{maxbulk}$, 即最大病灶与其他病灶之间的最远距离)以及患者临床相关参数的组合模型表现最佳(AUC = 0.79)。Capobianco 等^[29]利用深度学习技术在¹⁸F-FDG PET/CT 上自动识别淋巴瘤病灶,通过神经网络学习病灶的主要显像特征,使用深度学习对高摄取区进行分类的同时去除生理性摄取,简化了总 MTV (total MTV, TMTV) 的评估并自动提取肿瘤特征。用 AI 方法生成的 TMTV 与参考 TMTV 区域相比,分类准确性为 85%,灵敏度为 80%,特异性为 88%,研究证实基线¹⁸F-FDG PET/CT 计算出的 TMTV 是 DLBCL 预后的独立危险因素。TMTV 的测量需要对全身淋巴瘤病灶进行勾画分割^[30],而目前对于 MTV/TMTV 分割的最准确方法还没有指南共识,需要有经验的影像医师手工勾画。Eertink 等^[28]回顾分析了 317 例 DLBCL 患者提取出 490 个影像组学特征,通过 logistic 回归和反向特征选择来预测患者 2 年肿瘤进展时间(time-to-progression, TTP),结果显示结合影像组学、临床特征以及 PET 相关参数(MTV、SUV 峰值和 $D_{maxbulk}$) 的效果最好(AUC 为 0.79),优于传统的国际预后指数(international prognostic index, IPI)模型(AUC 为 0.68),表明¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学特征与临床评分相结合有助于提高淋巴瘤疗效评估的准确性,从而完善患者的风险分层。基于淋巴瘤代谢体积(如 MTV、TLG)等多种¹⁸F-FDG PET/CT 参数的多参数影像组学可能会成为淋巴瘤疗效评估和预后判断的重要参考指标。

4. 其他。¹⁸F-FDG PET/CT 的影像组学特征与淋巴瘤组织

病理亚型相关,但关于其作为预测参数的证据仍然有限。影像组学通过对肿瘤遗传进展的非侵入性、实时和可重复监测,使用定量参数来表征淋巴瘤的异质性^[12]。应用¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学可预测不同淋巴瘤的分型,诊断效能优于仅根据临床信息进行诊断的效能。近来的一些研究揭示了影像基因组学在鉴别肿瘤的分子表达方面有潜在效用。影像基因组学旨在分析造成表型差异的基因组与对应的影像特征之间的联系,¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学联合影像基因组学可以更好地表征肿瘤基因表达和代谢的变化,这方面相关的研究已在乳腺癌等见诸报道^[31],但尚缺乏关于淋巴瘤分子分型的影像组学研究。最近发现的循环肿瘤 DNA(circulating tumor DNA, ctDNA)有望成为淋巴瘤治疗中期应答情况评估工具^[32]。血浆游离 DNA(cell-free circulating DNA, cfDNA)及 ctDNA 为淋巴瘤的治疗提供了重要的新策略,现已在肺癌^[33]、黑色素瘤^[34]中展开了初步探索,而在淋巴瘤中的相关研究尚少。Lafata 等^[33]的一项纳入 24 例接受化疗的晚期肺癌患者的前瞻性研究显示,影像基因组学表达模式(结合 CT 影像组学特征和 cfDNA 和 ctDNA)与总存活率相关。液体活检技术可实时地监测治疗反应相关或耐药性相关的基因突变的出现。如能联合液体活检与影像组学,有望实现实时、非侵入性的特征提取,从而更准确地评估疗效及预后,最终改善淋巴瘤的治疗决策。

四、局限性及挑战

¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学在淋巴瘤的相关研究已初步证明了肿瘤内异质性的临床意义,但目前仍然存在许多技术挑战和不足。首先,淋巴瘤病灶分割方法及图像重建、注射 FDG 后采集时间、治疗中期评估时间点、最佳勾画方法等问题需要进一步明确;其次,目前淋巴瘤的¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学研究缺乏统一标准化和数据共享平台,且大多为单中心、回顾性研究,亦存在样本量不足及缺乏外部验证等问题,这些都阻碍了¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学的临床应用。最近,一些指南和标准相继被提出,如影像组学质量评分(radiomics quality score, RQS)、图像生物标志物标准化倡议(image biomarker standardization initiative, IBSI)、AI 在医学影像中的列表(checklist for AI in medical imaging, CLAIM)^[35-37]、定量成像生物标志物联盟(quantitative imaging biomarkers alliance, QIBM)等,这些指南和标准为未来构建统一的图像采集协议及标准化方法铺平了道路。

五、小结与展望

¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学在淋巴瘤中的研究尚处于起步阶段,面临诸多挑战,随着大数据的完善和深度学习技术的突破、算法的优化等,在淋巴瘤多学科诊疗(multi-disciplinary team, MDT)模式的引导下^[38],AI 驱动的¹⁸F-FDG PET/CT 影像组学将在淋巴瘤的鉴别诊断、疗效评估及预后评价中提供更有效的定量指标,有望在推动和构建淋巴瘤的精准医学和个体化治疗中发挥更大作用,最终使患者获益。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 刘护丽:研究实施、论文撰写;周鹏:论文撰写;张礼荣:研究指导、论文修改、经费支持

参 考 文 献

[1] 任怡璇,柳江燕,甄东户.¹⁸F-FDG PET/CT 在淋巴瘤诊治中的

研究进展[J].国际医学放射学杂志,2019,42(6):707-711. DOI:10.19300/j.2019.Z7104.

Ren YX, Liu JY, Zhen DH. Research progress of ¹⁸F-FDG PET/CT in diagnosis and treatments of lymphoma[J]. Inter J Med Radiol, 2019, 42(6): 707-711. DOI:10.19300/j.2019.Z7104.

[2] 中华医学会核医学分会.淋巴瘤¹⁸F-FDG PET/CT 及 PET/MR 显像临床应用指南(2021 版)[J].中华核医学与分子影像杂志,2021,41(3):161-169. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20210129-00018.

Chinese Society of Nuclear Medicine. Clinical practice guideline of ¹⁸F-FDG PET/CT and PET/MR in lymphoma (2021 edition) [J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 41(3): 161-169. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20210129-00018.

[3] Hirata K, Tamaki N. Quantitative FDG PET assessment for oncology therapy[J]. Cancers (Basel), 2021, 13(4): 869. DOI:10.3390/cancers13040869.

[4] Adams HJ, Kwee TC, de Keizer B, et al. Systematic review and meta-analysis on the diagnostic performance of FDG-PET/CT in detecting bone marrow involvement in newly diagnosed Hodgkin lymphoma: is bone marrow biopsy still necessary? [J]. Ann Oncol, 2014, 25(5): 921-927. DOI:10.1093/annonc/mdt533.

[5] National Comprehensive Cancer Network. NCCN clinical practice guidelines in oncology: B-cell lymphomas (V.5.2022) [R/OL]. (2022-07-12) [2022-10-10]. https://www.nccn.org/professionals/physician_gls/pdf/b-cell.pdf.

[6] Cheson BD, Fisher RI, Barrington SF, et al. Recommendations for initial evaluation, staging, and response assessment of Hodgkin and non-Hodgkin lymphoma: the Lugano classification[J]. J Clin Oncol, 2014, 32(27): 3059-3068. DOI:10.1200/JCO.2013.54.8800.

[7] Cheson BD, Ansell S, Schwartz L, et al. Refinement of the Lugano classification lymphoma response criteria in the era of immunomodulatory therapy[J]. Blood, 2016, 128(21): 2489-2496. DOI:10.1182/blood-2016-05-718528.

[8] 周夜夜,邓胜明,章斌,等.¹⁸F-FDG PET/CT 在儿童及青少年淋巴瘤诊治中的应用价值[J].国际放射医学核医学杂志,2018,42(6):535-540. DOI:10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.06.011.

Zhou YY, Deng SM, Zhang B, et al. Value of ¹⁸F-FDG PET/CT for diagnosing and treating childhood and adolescent lymphoma[J]. Inter J Radiat Med Nucl Med, 2018, 42(6): 535-540. DOI:10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.06.011.

[9] Sehn LH, Salles G. Diffuse large B-cell lymphoma[J]. N Engl J Med, 2021, 384(9): 842-858. DOI:10.1056/NEJMra2027612.

[10] Bakhshi S, Bhethanabhotla S, Kumar R, et al. Posttreatment PET/CT rather than interim PET/CT using Deauville criteria predicts outcome in pediatric Hodgkin lymphoma: a prospective study comparing PET/CT with conventional imaging[J]. J Nucl Med, 2017, 58(4): 577-583. DOI:10.2967/jnumed.116.176511.

[11] Thanarajasingam G, Bennani-Baiti N, Thompson CA. PET-CT in staging, response evaluation, and surveillance of lymphoma[J]. Curr Treat Options Oncol, 2016, 17(5): 24. DOI:10.1007/s11864-016-0399-z.

[12] Khan S, Naim S, Bilwani R, et al. Radiogenomics and its role in lymphoma[J]. Curr Hematol Malig Rep, 2020, 15(3): 211-224. DOI:10.1007/s11899-020-00577-2.

[13] Mayerhoefer ME, Riedl CC, Kumar A, et al. Radiomic features of glucose metabolism enable prediction of outcome in mantle cell lymphoma[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2019, 46(13): 2760-

2769. DOI:10.1007/s00259-019-04420-6.
- [14] Tatsumi M, Isohashi K, Matsunaga K, et al. Volumetric and texture analysis on FDG PET in evaluating and predicting treatment response and recurrence after chemotherapy in follicular lymphoma [J]. *Int J Clin Oncol*, 2019, 24(10): 1292-1300. DOI:10.1007/s10147-019-01482-2.
- [15] 高超, 孙莹莹, 孙夕林. 影像组学在¹⁸F-FDG PET/CT 研究进展及临床应用[J]. *中国医学影像技术*, 2020, 36(8): 1239-1242. DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2020.08.028.
Gao C, Sun YY, Sun XL. Research progresses and clinical application of radiomics in ¹⁸F-FDG PET/CT [J]. *Chin J Med Imaging Technol*, 2020, 36(8): 1239-1242. DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2020.08.028.
- [16] Jaudet C, Weyts K, Lechery A, et al. The impact of artificial intelligence CNN based denoising on FDG PET radiomics [J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 692973. DOI:10.3389/fonc.2021.692973.
- [17] de Jesus FM, Yin Y, Mantzorou-Kyriaki E, et al. Machine learning in the differentiation of follicular lymphoma from diffuse large B-cell lymphoma with radiomic [¹⁸F] FDG PET/CT features [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 49(5): 1535-1543. DOI:10.1007/s00259-021-05626-3.
- [18] Ou X, Zhang J, Wang J, et al. Radiomics based on ¹⁸F-FDG PET/CT could differentiate breast carcinoma from breast lymphoma using machine-learning approach: a preliminary study [J]. *Cancer Med*, 2020, 9(2): 496-506. DOI:10.1002/cam4.2711.
- [19] Kong Z, Jiang C, Zhu R, et al. ¹⁸F-FDG-PET-based radiomics features to distinguish primary central nervous system lymphoma from glioblastoma [J]. *Neuroimage Clin*, 2019, 23: 101912. DOI:10.1016/j.nicl.2019.101912.
- [20] Zou Y, Tong J, Leng H, et al. Diagnostic value of using ¹⁸F-FDG PET and PET/CT in immunocompetent patients with primary central nervous system lymphoma: a systematic review and meta-analysis [J]. *Oncotarget*, 2017, 8(25): 41518-41528. DOI:10.18632/oncotarget.17456.
- [21] Ha S, Choi H, Paeng JC, et al. Radiomics in oncological PET/CT: a methodological overview [J]. *Nucl Med Mol Imaging*, 2019, 53(1): 14-29. DOI:10.1007/s13139-019-00571-4.
- [22] Lubner MG, Smith AD, Sandrasegaran K, et al. CT texture analysis: definitions, applications, biologic correlates, and challenges [J]. *Radiographics*, 2017, 37(5): 1483-1503. DOI:10.1148/rg.2017170056.
- [23] Kim JH, Ko ES, Lim Y, et al. Breast cancer heterogeneity: MR imaging texture analysis and survival outcomes [J]. *Radiology*, 2017, 282(3): 665-675. DOI:10.1148/radiol.2016160261.
- [24] Coskun N, Okudan B, Uncu D, et al. Baseline ¹⁸F-FDG PET textural features as predictors of response to chemotherapy in diffuse large B-cell lymphoma [J]. *Nucl Med Commun*, 2021, 42(11): 1227-1232. DOI:10.1097/MNM.0000000000001447.
- [25] Sun Y, Qiao X, Jiang C, et al. Texture analysis improves the value of pretreatment ¹⁸F-FDG PET/CT in predicting interim response of primary gastrointestinal diffuse large B-cell lymphoma [J]. *Contrast Media Mol Imaging*, 2020, 2020: 2981585. DOI:10.1155/2020/2981585.
- [26] Wang H, Zhou Y, Li L, et al. Current status and quality of radiomics studies in lymphoma: a systematic review [J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(11): 6228-6240. DOI:10.1007/s00330-020-06927-1.
- [27] Cottreau AS, Nioche C, Dirand AS, et al. ¹⁸F-FDG PET dissemination features in diffuse large B-cell lymphoma are predictive of outcome [J]. *J Nucl Med*, 2020, 61(1): 40-45. DOI:10.2967/jnumed.119.229450.
- [28] Eertink JJ, van de Brug T, Wieggers SE, et al. ¹⁸F-FDG PET baseline radiomics features improve the prediction of treatment outcome in diffuse large B-cell lymphoma [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 49(3): 932-942. DOI:10.1007/s00259-021-05480-3.
- [29] Capobianco N, Meignan M, Cottreau AS, et al. Deep-learning ¹⁸F-FDG uptake classification enables total metabolic tumor volume estimation in diffuse large B-cell lymphoma [J]. *J Nucl Med*, 2021, 62(1): 30-36. DOI:10.2967/jnumed.120.242412.
- [30] Vercellino L, Cottreau AS, Casasnovas O, et al. High total metabolic tumor volume at baseline predicts survival independent of response to therapy [J]. *Blood*, 2020, 135(16): 1396-1405. DOI:10.1182/blood.2019003526.
- [31] Bismeyer T, van der Velden B, Canisius S, et al. Radiogenomic analysis of breast cancer by linking MRI phenotypes with tumor gene expression [J]. *Radiology*, 2020, 296(2): 277-287. DOI:10.1148/radiol.2020191453.
- [32] Kurtz DM, Scherer F, Jin MC, et al. Circulating tumor DNA measurements as early outcome predictors in diffuse large B-cell lymphoma [J]. *J Clin Oncol*, 2018, 36(28): 2845-2853. DOI:10.1200/JCO.2018.78.5246.
- [33] Lafata KJ, Corradetti MN, Gao J, et al. Radiogenomic analysis of locally advanced lung cancer based on CT imaging and intratreatment changes in cell-free DNA [J]. *Radiol Imaging Cancer*, 2021, 3(4): e200157. DOI:10.1148/rycan.2021200157.
- [34] Gill AB, Rundo L, Wan J, et al. Correlating radiomic features of heterogeneity on CT with circulating tumor DNA in metastatic melanoma [J]. *Cancers (Basel)*, 2020, 12(12): 3493. DOI:10.3390/cancers12123493.
- [35] Zwanenburg A. Radiomics in nuclear medicine: robustness, reproducibility, standardization, and how to avoid data analysis traps and replication crisis [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2019, 46(13): 2638-2655. DOI:10.1007/s00259-019-04391-8.
- [36] Zwanenburg A, Vallières M, Abdalah MA, et al. The image biomarker standardization initiative: standardized quantitative radiomics for high-throughput image-based phenotyping [J]. *Radiology*, 2020, 295(2): 328-338. DOI:10.1148/radiol.2020191145.
- [37] Mongan J, Moy L, Kahn CE Jr. Checklist for artificial intelligence in medical imaging (CLAIM): a guide for authors and reviewers [J]. *Radiol Artif Intell*, 2020, 2(2): e200029. DOI:10.1148/ryai.2020200029.
- [38] 萧毅, 刘士远. 医学影像人工智能产业化的现状及面临的挑战 [J]. *肿瘤影像学*, 2019, 28(3): 129-133. DOI:10.19732/j.cnki.2096-6210.2019.03.001.
Xiao Y, Liu SY. Current status and challenges of artificial intelligence industrialization in medical imaging [J]. *Oncoradiology*, 2019, 28(3): 129-133. DOI:10.19732/j.cnki.2096-6210.2019.03.001.

(收稿日期:2022-12-12)