

人工智能在疾病诊疗中的应用专题 II

综述

基于PSMA PET的人工智能在前列腺癌诊治中的应用进展

彭岱云, 付静瑜, 杨帆, 柳江燕*

兰州大学第二医院核医学科, 甘肃兰州 730030

[中图分类号] R737; R445 [文献标志码] A [DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.2024.1213

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 彭岱云, 付静瑜, 杨帆, 等. 基于PSMA PET的人工智能在前列腺癌诊治中的应用进展[J]. 解放军医学杂志, 2025, 50(10): 1250-1255.

[收稿日期] 2024-04-11 [录用日期] 2024-06-10 [上线日期] 2024-12-13

[摘要] 前列腺特异性膜抗原(PSMA)的正电子发射断层成像(PET)是针对前列腺癌(PCa)的精准诊断影像技术。人工智能(AI)技术,特别是机器学习和深度学习算法,结合PSMA PET在PCa诊治中展现了广泛的应用前景,包括原发肿瘤的诊断与鉴别诊断、分期、复发检测以及治疗方案的制订等。目前,少数PCa相关的AI模型已获得临床应用批准。本文综述近年来AI结合PSMA PET在PCa诊治中的应用进展,探讨当前AI应用的局限性,旨在为AI结合PSMA PET用于PCa诊治的相关研究提供参考。

[关键词] 前列腺癌; 人工智能; 前列腺特异性膜抗原; 正电子发射断层成像

Artificial intelligence in the diagnosis and treatment of prostate cancer based on PSMA PET

Peng Dai-Yun, Fu Jing-Yu, Yang Fan, Liu Jiang-Yan*

Department of Nuclear Medicine, the Second Hospital of Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730030, China

*Corresponding author, E-mail: ery_liujy@lzu.edu.cn

This work was supported by the Second Hospital of Lanzhou University "Cuiying Graduate Advisor" Training Program (CYDSPY202001)

[Abstract] Prostate-specific membrane antigen (PSMA) positron emission tomography (PET) is currently a precise diagnostic imaging technology for prostate cancer (PCa). Artificial intelligence (AI) technologies, particularly machine learning and deep learning algorithms, when combined with PSMA PET, showed extensive potential applications in various aspects of PCa management. These include the diagnosis and differential diagnosis of primary tumors, staging, recurrence detection, and treatment planning for PCa. At present, a few AI models have received clinical approval. This paper reviews the application progress of AI combined with PSMA PET in the diagnosis and treatment of PCa, explores the current limitations of AI technologies in clinical practice, and aim to provide references to future diagnosis and treatment studies for PCa.

[Key words] prostate cancer; artificial intelligence; prostate-specific membrane antigen; positron emission tomography

前列腺癌(prostate cancer, PCa)是全球仅次于肺癌的男性第二常见癌症^[1],居男性癌症相关死亡原因的第5位。2022年全球新增PCa约150万例^[2]。前列腺特异性膜抗原(prostate specific membrane antigen, PSMA)是一种存在于前列腺上皮细胞的II型跨膜糖蛋白,具有细胞外结合位点。PSMA与PCa细胞的增殖和生长密切相关,被称为特异性膜蛋白。PSMA蛋白可分为三部分——细胞内、跨膜和细胞外部分,其中细胞外部分占PSMA的95%,是成像和治疗中使

用的小分子以及基于抗体的药物的可触及靶标^[3]。在PCa细胞膜上PSMA的表达明显上调,与PCa的分期和肿瘤分级明显相关^[4],也是PCa诊断与治疗的潜在靶点^[5]。相较传统的影像学方法,PSMA正电子发射计算机断层显像(positron emission computed tomography, PET)具有较高的准确度、特异度和敏感度,可提供更多功能和分子水平的信息^[6-7]。PSMA PET/CT、PET/MR在PCa的诊断、鉴别诊断、分期、复发检测、疗效评估及预后判断中发挥重要

[基金项目] 兰州大学第二医院“萃英研究生指导教师”培育计划(CYDSPY202001)

[作者简介] 彭岱云, 硕士研究生, 主要从事前列腺癌方面的研究

[通信作者] 柳江燕, E-mail: ery_liujy@lzu.edu.cn

作用^[8-11]。目前常用于标记 PSMA 配体的放射性核素包括⁶⁸Ga、¹¹C、¹⁸F、¹⁷⁷Lu、^{99m}Tc 等，其中⁶⁸Ga-PSMA-11 和¹⁸F-DCFPyL 已获得美国食品药品监督管理局(FDA)批准^[12-13]。

近年来，人工智能(artificial intelligence, AI)在 PSMA PET 中的开发和应用取得重大进展。2021 年用于 PSMA PET/CT 自动图像分析的 AI 深度学习(deep learning, DL)软件 aPROMISE 获得美国 FDA 批准。aPROMISE 合并 CT 解剖信息，并量化示踪剂的摄取生成分子成像(molecular imaging, mi)PSMA 评分。Johnsson 等^[14]报道，与经验丰富的核医学医师手工分割相比，aPROMISE 可在 PET/CT 图像上更准确地分割病灶，并可自动按 miPSMA 评分定量评估前列腺内病灶；该 DL 软件对识别隐匿性 PCa 病灶具有较高的敏感度。基于影像的癌症诊断和治疗正在发生革命性的变化。AI 在医学影像学中的应用可提高诊断的准确度和效率，促进治疗方案和预后评估的改进^[15]。本文综述近年来 AI 结合 PSMA PET 在 PCa 诊治中的应用进展，分析部分 AI 算法的优势与不足，并探讨 AI 技术在临床实践中的应用前景，旨在为 AI 结合 PSMA PET 用于 PCa 诊治提供参考。

1 AI 概要

AI 涵盖机器学习(machine learning, ML)等多个子领域^[16]。ML 包括多种算法，如逻辑回归(logistic regression, LR)、决策树(decision tree, DT)、随机森林(random forest, RF)、支持向量机(support vector machine, SVM)等；这些算法通常用于多种数据分析任务，包括图像分析，指导计算机解析数据并从中学习，基于所学习的知识进一步对新数据集进行有效预测等^[17]。影像组学与 ML 结合，可从 PET、CT、MRI 等图像中挖掘有价值的特征，如大小、形状、体积、纹理和强度特征等，实现通过影像特征对疾病进行更有价值的诊断和更有意义的临床决策^[18]。然而与 ML 结合的影像组学图像特征提取过程依赖于手动勾画，易受主观影响。

DL 是 ML 的一个子领域，可利用深度神经网络(deep neural network, DNN)实现更高层次的数据处理和模式识别。经典的 DL 模型包括递归神经网络(recurrent neural network, RNN)、卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)、DNN 等^[19]。CNN 是处理视觉数据的特殊 DL 模型，对图像及矩阵类数据具有高度适用性，因此在自动图像分割、模型构建及数据分析等领域有较高的应用潜能，已广泛应用于影像组学。影像组学与 DL 的结合在癌症检测、诊断等领域表现出色，如通过分析 PET/CT、MRI 等影像构建 DL 模型，可用于图像自动化分割、

病灶检测、图像增强和预测分析等。

2 AI 结合 PSMA PET 用于 PCa 的诊断与评估

2.1 PCa 诊断 经直肠超声(transrectal of ultrasound, TRUS)引导的前列腺活检是 PCa 临床诊断的金标准，活检得到的术前 Gleason 评分对于治疗决策至关重要，但该检查为有创检查，具有较高的并发症发生风险以及临床显著性 PCa(clinically significant prostate cancer, csPCa)漏诊风险^[20]。洪文威等^[21]在 MRI T₂ 加权成像(T₂-weighted imaging, T₂WI)、弥散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)、表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)和 PET 的 4 种模态图像中采用一种基于 DL 的级联网络方法，用于在 PSMA PET/MRI 图像上定位前列腺并识别和精细分割 PCa 病灶，通过戴斯相似性系数(Dice similarity coefficient, DSC)等指标评估模型的性能，结果显示，级联网络的 DSC(0.76)高于基础网络(0.73)和 MRI 网络(0.62)。这一结果提示，级联网络方法能更精确地分割⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/MRI 图像中的 PCa 病灶，可为临床提供更可靠的肿瘤定位和形态信息，有助于提高 PCa 诊断的准确度。与常规成像方式比较，PSMA PET 在 PCa 原发灶的检出率方面具有较大优势^[22-23]，尤其是在检测 csPCa 方面。PRIMARY 研究结果显示，PSMA PET 中显像剂浓聚处 SUV_{max}≥12 时，对 csPCa 检测的特异度为 100%^[24]。然而，对于 TRUS 引导的前列腺活检 Gleason 评分为 1 分且原发病灶最大标准化摄取值(maximum standardized uptake value, SUV_{max})<12 的患者，PSMA PET 诊断的准确度存在不足^[25]。Zhang 等^[26]将 DL 用于组织切片图像的识别、分类和分析，以提高对 PCa 病理特征识别和诊断的准确度；将 56 例患者的⁶⁸Ga-PSMA PET/CT 图像与组织切片图像进行匹配，建立 PRIMARY 评分与 SUV_{max}结合的综合诊断模型对 csPCa 进行预测，结果显示综合模型的预测效能[ROC 曲线下面积(AUC)=0.8359]优于仅使用 SUV_{max}(AUC=0.7353)或 PRIMARY 评分(AUC=0.7257)的模型。上述结果表明，AI 模型有助于提高 csPCa 的识别率，减少不必要的临床活检，提高 PSMA 低表达或无表达患者的初级肿瘤检出率。

2.2 PCa 鉴别诊断 结合 AI 技术，可更好地发挥 PSMA PET 在鉴别诊断方面的优势，提高 PCa 诊断的准确度和可靠性。罗量等^[27]比较了 PSMA PET/CT 影像组学模型与常规影像参数模型对 PCa 和良性前列腺增生(benign prostatic hyperplasia, BPH)的鉴别诊断效能，结果显示前者在鉴别诊断方面的表现(AUC=0.965)优于后者(AUC=0.941)。Zang 等^[28]纳入 86 例 PCa 和 39 例 BPH 患者，按 7:3 的比例随机分为

训练集和测试集,采用最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)算法结合十折交叉验证筛选了9个影像组学特征构建放射组学模型,并计算每例患者的模型评分,在训练集和测试集中,PCa和BPH的模型评分均有明显差异;在测试集中,放射组学模型的诊断效能(AUC=0.85)明显高于放射科医师的视觉评估结果(AUC=0.63),且模型的敏感度(0.84 vs. 0.74, $P=0.002$)优于放射科医师的视觉评估。以上研究表明,PSMA PET结合AI可为PCa的非侵入性诊断提供新的选择,通过自动化图像处理和分析,能减少主观因素误差,提高诊断的准确度、敏感度和可靠性,推动PCa诊断和管理的进步,促进精准个性化医疗的发展。

2.3 PCa分期 准确的分期对于制订PCa的治疗方案至关重要。PSMA PET因具有较高的敏感度和准确度,已成为PCa分期的重要工具。AI可根据PSMA PET图像自动检测和分割初始肿瘤、局部复发和转移病灶,更全面地评估肿瘤的侵袭程度和范围,降低核医学医师与放射医师对影像解读的变异性,提高分期的准确度与一致性。Zhao等^[29]开发了基于⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT的2.5维U形网络(2.5 dimensional U-shaped network, 2.5D U-Net)模型,该模型从轴向、冠状和矢状3个平面同时提取PET和CT影像的特征(包括空间特征等),检出骨病灶的敏感度达99%,检出淋巴结的敏感度为90%。Trägårdh等^[30]纳入660例疑似PCa患者的¹⁸F-PSMA-1007 PET/CT图像,开发了一种基于U-Net 3D CNN的模型自动检测和分割病灶;该AI模型检测PCa复发、淋巴结转移和骨转移灶的敏感度分别为79%、79%和62%,与核医学医师的敏感度(分别为78%、78%和59%)相当;DNN方法在PCa病灶的自动检测和分割中表现出色,可显著提高影像解读的效率和准确度。Capobianco等^[31]利用⁶⁸Ga-PSMA-11和¹⁸F-FDG PET/CT多模态数据进行双重示踪学习,开发了一种基于DL的多任务CNN;该模型能够根据PROMISE miTNM标准自动识别并分类区域淋巴结(N分期)的转移情况^[13];在测试集中,该模型对N、M分期的预测结果与专家评估的一致性分别为81%、77%,显示出较高的准确度。PCa的准确分期对于治疗决策至关重要,但手动测量大量可疑病灶具有挑战性,目前已有多种PSMA PET/CT影像评估的标准化框架和影像衍生参数可用于辅助PCa分期,结合AI可提高PCa分期的自动化和准确度,临床应用潜力较大。

2.4 PCa复发检测

2.4.1 复发风险评估 在原发性PCa中,风险分层

对于预测预后和制定治疗策略至关重要。综合血清前列腺特异性抗原(prostate-specific antigen, PSA)水平、Gleason评分和临床T分期等参数的D'Amico分层系统是目前PCa风险评估中使用较多的方法,然而该方法依赖于侵入性活检^[32]。PSMA PET可通过无创的方式定量分析PSMA的表达水平,具有作为非侵入性生物标志物的潜在价值。采用AI分析PSMA PET影像并结合患者的临床数据建立预测模型,可进行个性化的风险评估,准确预测患者的风险级别。Cysouw等^[33]纳入76例中高风险PCa患者的¹⁸F-DCFPyL-PET/CT图像,提取出480个放射组学特征训练RF模型,并用于评估PCa患者的复发风险;该模型在预测淋巴结受累(AUC=0.86±0.15)、转移(AUC=0.86±0.14)、Gleason评分≥8分(AUC=0.81±0.16)和囊外扩展(AUC=0.76±0.12)方面的表现均明显优于标准PET特征模型。Papp等^[34]纳入52例接受多参数双示踪剂¹⁸F-FMC和⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/MRI扫描的PCa患者,对每例患者的⁶⁸Ga-PSMA-11 PET、ADC和T₂WI图像进行放射组学特征提取,共提取了446个特征,包括SUV_{max}、峰值标准化摄取值(peak standardized uptake value, SUV_{peak})、平均标准化摄取值(mean standardized uptake value, SUV_{mean})和病灶糖酵解总摄取值(standardized uptake value of total lesion glycolysis, SUV_{TLG})等,采用混合集成学习方法构建RF模型,用于预测低-高风险病灶、生化复发和总体患者风险;该模型预测低-高风险病灶的AUC为0.86,预测生化复发和总体患者风险的AUC分别为0.90和0.94,明显高于常规临床风险评估方法。上述研究为非侵入性评估PCa的复发风险提供了新途径,可对PCa患者进行非侵入性的病灶特征量化和风险评估,避免不必要的侵入性检查如扩大盆腔淋巴结切除术(extended pelvic lymph node dissection, ePLND),临床应用前景较好。Voter^[35]在2023年北美放射学年会中报道了一种基于¹⁸F-DCFPyL PSMA-PET/CT影像的多模态融合3D CNN模型;该模型在鉴别进展性与非进展性PCa影像方面的准确率为82%,AUC为0.615,且每个病灶的阳性预测值达83%;此外,该模型分类为进展性PCa的图像与高风险患者相关,此类患者的中位生存期为26.1个月,明显短于低中风险患者(57.4个月)。

2.4.2 早期复发检测 PCa根治性治疗后,27%~53%的患者出现生化复发,常规成像方式对复发部位的定位准确度不高,特别是对于PSA水平较低的患者,难以识别体积非常小的淋巴结或转移性病灶。PSMA PET在定位PCa复发部位方面具有优势,是检测生化复发较敏感的影像学工具,可精确定位复发部位,进而指导补救性手术、放射治疗等不同治疗

方案的实施；因此，对肿瘤复发病灶位置的准确评估具有重要临床意义^[36]。PCa病灶的外观、形状和位置具有复杂、多变性，因此，依赖视觉判断转移病灶的主观性较强^[37]。Huang等^[38]采用3D CNN模型对PCa复发患者的全身病灶进行自动检测与分割，可避免传统手工分割方法耗时且易出错的不足；该研究分析了从两个中心收集的116例PCa复发患者的⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT图像，通过3D U-Net网络联合输入PET和CT数据，实现全身PCa病灶的分割和检测，并使用DSC、召回率、精度和F1评分等指标评估性能；内部测试集的DSC、精度、召回率和F1评分分别为0.631、0.961、0.721和0.824分，外部测试集分别为0.596、0.888、0.792和0.837分。这项研究通过DL技术提高了PCa复发检测的自动化程度和准确度，为未来的临床应用及进一步研究奠定了基础。上述研究提示，AI可提高PSMA PET监测PCa生化复发的敏感度，有利于早期检测到微小复发病灶，以及时调整治疗策略。

3 AI结合PSMA PET用于PCa治疗计划及疗效、预后评估

3.1 优化放射治疗计划 通过AI分析PSMA PET影像，可精确勾画放射治疗的靶区，在确保治疗靶区覆盖病灶的同时，最大限度地保护正常组织。Holzschuh等^[39]利用¹⁸F-PSMA-1007 PET/CT建立深度CNN模型；该模型能够准确并迅速地识别肿瘤区域，用于分割初诊PCa患者的前列腺内肿瘤体积(gross tumor volumes, GTVs)，辅助放疗靶区的勾画；该研究还采用其他几种PSMA示踪剂进行外部验证，结果显示，该模型具有良好的泛化能力。

3.2 疗效评估 PCa的高度异质性使其治疗面临挑战。转移性去势抵抗性前列腺癌(metastatic castration-resistant prostate cancer, mCRPC)患者的预后通常较差。根据欧洲泌尿外科学会(European Association of Urology, EAU)2022版指南^[32]，¹⁷⁷Lu-PSMA-617是一种对mCRPC有价值的治疗方法。标准的生化反应指标(biochemical recurrence, BCR)定义为血清PSA水平降低 $\geq 50\%$ ，可用于评估¹⁷⁷Lu-PSMA-617治疗PCa的疗效^[40]。AI结合PSMA PET在PCa疗效评估中的应用显示，其在提高PCa治疗精度、优化临床决策和促进个性化医疗方面具有巨大潜力；通过分析治疗前PSMA PET图像的放射组学特征，可识别有可能从该治疗中受益的患者，有利于减少无效治疗及其相关的并发症。Assadi等^[41]纳入接受¹⁷⁷Lu-PSMA-617治疗的33例mCRPC患者治疗前的⁶⁸Ga-PSMA PET/CT图像，从PET图像中提取了65个放射组学特征，结果显示，灰度共生矩阵(gray-level co-occurrence

matrix, GLCM)熵单独显示出对BCR的较高预测性能，AUC为0.76，敏感度和特异度分别为0.82和0.73；使用GLCM熵与年龄、治疗周期和给药剂量构建SVM模型，该模型的AUC为0.64~0.76，预测效能较高。该研究表明放射组学特征在个性化治疗规划中具有潜力和应用价值。Moazemi等^[42]报道，基于⁶⁸Ga-PSMA PET/CT的放射组学特征结合ML算法，可用于预测PCa患者接受¹⁷⁷Lu-PSMA-617治疗后的反应；该研究通过分析83例PCa患者的临床参数与⁶⁸Ga-PSMA PET/CT图像中2070个显像剂摄取增高区的放射组学特征，使用线性回归分析确定与治疗前后PSA水平变化具有显著相关性的影像组学特征(PET_Min、PET_Correlation、CT_Min、CT_Busyness和CT_Coarseness)，这些特征可作为预测治疗反应的有效指标；使用SVM模型进行治疗反应预测，模型在测试数据集的预测准确度较高，AUC达0.80，敏感度和特异度均为0.75。该研究表明基于放射组学特征和ML算法的模型能够有效区分对治疗有无反应的患者。

3.3 预后预测 基于PSMA PET影像和AI分析模型，可预测PCa患者的预后情况，为长期管理提供依据^[43]。Kendrick等^[44]开发了一种基于DL的自动分割框架，用于识别全身⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT图像中的转移性PCa病变；Kaplan-Meier分析结果显示，自动分割得到的总病灶体积(total lesion volume, TLV)和总病灶摄取(total lesion uptake, TLU)与患者的总生存期(overall survival, OS)明显相关($P < 0.005$)，提示这两个指标具有重要的临床价值，可用于评估患者的长期生存前景，帮助临床医师制订更为有效的治疗策略。量化转移性PCa的治疗反应是一个挑战，基于肿瘤扩散范围的预后风险评分可提高对PCa患者的管理水平。Seifert等^[45]回顾性分析1348例PCa患者，采用神经网络自动识别⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT中显像剂摄取增加的焦点，并判断每个焦点是否为恶性，同时自动定位每个焦点的解剖位置，对被判定为转移病灶的区域进行分割，计算出各器官中的肿瘤体积，将神经网络提取的肿瘤体积数据结合体重纳入模型选择；该研究采用C指数评估预后风险评分模型的预测能力，结果显示其在内部和外部验证队列的C指数分别为0.82、0.74，均表现出良好的预测性能；且该模型在去势抵抗性疾病(C指数0.75)和激素敏感性疾病(C指数0.68)患者中均具有较好的预测能力。

4 总结与展望

AI结合PSMA PET可在PCa的诊断、分期、复发检测、疗效评估等多个方面提供帮助，推动PCa个

性化和精准治疗的发展。通过自动化影像分析工具(如 aPROMISE 等)迅速处理大量 PSMA PET 影像数据,能更准确地识别和分割病灶,减少误诊和漏诊,提高诊断和分期的准确度。在复发检测方面,AI 可通过影像数据的对比分析,通过无创的方式早期发现复发迹象,为及时干预提供可能。此外,AI 技术能够精确量化 PSMA PET 影像中的示踪剂摄取情况,为疗效评估和预后判断提供可靠的数据支持,跟踪治疗过程中的病灶变化,为调整治疗方案提供依据。但将 AI 应用于 PCa 的临床诊治仍存在不足和挑战。首先,通过大量数据训练的 AI 模型通常具有更好的稳定性与泛化性,而目前关于 AI 在 PCa 中的研究大部分为单中心、小样本研究,未来可通过数据共享、数据增强技术以及应用迁移学习等策略在 PET 数据较少的情况下优化模型的性能;其次,由于 PET 图像采集缺乏标准化流程,在不同中心由于图像采集设置、重建算法以及图像处理的不同,影像衍生的指标也不同,使得收集到的参数难以统一,未来需开展多中心、大样本的前瞻性研究,以提高 AI 模型的泛化力及在 PSMA PET 中的临床应用潜力;第三,目前 AI 在临床应用中的规范和标准尚未完全建立,不同机构和地区的应用标准不统一,影响了 AI 技术的推广和应用。未来需制定并推广 AI 在 PCa 诊治中的标准化工作和分析流程,提高 AI 应用的可靠性和规范性。AI 结合 PSMA PET 技术有望在 PCa 的诊治中发挥更大的作用,进一步推动个性化和精准治疗的发展。

【参考文献】

- [1] 罗凌坚,陈薇,胡见见.根治性前列腺切除术、外照射、前列腺近距离放射治疗对前列腺癌患者性功能的影响[J].解放军医学杂志,2024,49(11):1289-1294.
- [2] 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.
- [3] Klingenberg S, Jochumsen MR, Ulhoi BP, *et al*. ^{68}Ga -PSMA PET/CT for primary lymph node and distant metastasis nmstaging of high-risk prostate cancer[J]. *J Nucl Med*, 2021, 62(2): 214-220.
- [4] Ristau BT, O'Keefe DS, Bacich DJ. The prostate-specific membrane antigen: lessons and current clinical implications from 20 years of research[J]. *Urol Oncol*, 2014, 32(3): 272-279.
- [5] Kaewput C, Vinjamuri S. Update of PSMA theranostics in prostate cancer: current applications and future trends[J]. *J Clin Med*, 2022, 11(10): 2738.
- [6] Matushita CS, da Silva AMM, Schuck PN, *et al*. ^{68}Ga -Prostate-specific membrane antigen (PSMA) positron emission tomography (PET) in prostate cancer: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int Braz J Urol*, 2021, 47(4): 705-729.
- [7] 王瑞民.重视 PET 成像在核医学快速发展时期临床及科研应用[J]. *临床军医杂志*, 2024, 52(3): 221-222, 226.
- [8] Huang YT, Tseng NC, Chen YK, *et al*. The detection performance of ^{18}F -prostate-specific membrane antigen-1007 PET/CT in primary prostate cancer: a systemic review and meta-analysis[J]. *Clin Nucl Med*, 2022, 47(9): 755-762.
- [9] Sartor O, de Bono J, Chi KN, *et al*. Lutetium-177-PSMA-617 for metastatic castration-resistant prostate cancer[J]. *N Engl J Med*, 2021, 385(12): 1091-1103.
- [10] Kimura S, Abufaraj M, Janisch F, *et al*. Performance of ^{68}Ga Ga-PSMA 11 PET for detecting prostate cancer in the lymph nodes before salvage lymph node dissection: a systematic review and meta-analysis[J]. *Prostate Cancer Prostatic Dis*, 2020, 23(1): 1-10.
- [11] Tu X, Zhang C, Liu Z, *et al*. The role of ^{68}Ga -PSMA positron emission tomography/computerized tomography for preoperative lymph node staging in intermediate/high risk patients with prostate cancer: a diagnostic meta-analysis[J]. *Front Oncol*, 2020, 10: 1365.
- [12] U. S. Food and Drug Administration. FDA approves first PSMA-targeted pet imaging drug for men with prostate cancer[EB/OL]. [2020-12-01]. <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-first-psma-targeted-pet-imaging-drug-men-prostate-cancer>.
- [13] U. S. Food and Drug Administration. FDA approves second PSMA-targeted PET imaging drug for men with prostate cancer[EB/OL]. [2021-05-27]. <https://www.fda.gov/drugs/news-events-human-drugs/fda-approves-second-psma-targeted-pet-imaging-drug-men-prostate-cancer>.
- [14] Johansson K, Brynolfsson J, Sahlstedt H, *et al*. Analytical performance of aPROMISE: automated anatomic contextualization, detection, and quantification of ^{18}F -DCFPyL (PSMA) imaging for standardized reporting[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 49(3): 1041-1051.
- [15] Eiber M, Herrmann K, Calais J, *et al*. Prostate cancer molecular imaging standardized evaluation (PROMISE): proposed miTNM classification for the interpretation of PSMA-ligand PET/CT[J]. *J Nucl Med*, 2018, 59(3): 469-478.
- [16] Malik PA, Pathania M, Rathaur VK. Overview of artificial intelligence in medicine[J]. *J Family Med Prim Care*, 2019, 8(7): 2328-2331.
- [17] Baştanlar Y, Ozuysal M. Introduction to machine learning[J]. *Methods Mol Biol*, 2014, 1107: 105-128.
- [18] Lambin P, Rios-Velazquez E, Leijenaar R, *et al*. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis[J]. *Eur J Cancer*, 2012, 48(4): 441-446.
- [19] Barat M, Gaillard M, Cottareau AS, *et al*. Artificial intelligence in adrenal imaging: a critical review of current applications[J]. *Diagn Interv Imaging*, 2023, 104(1): 37-42.
- [20] Ahmed HU, El-Shater Bosaily A, Brown LC, *et al*. Diagnostic accuracy of multi-parametric MRI and TRUS biopsy in prostate cancer (PROMIS): a paired validating confirmatory study[J]. *Lancet*, 2017, 389(10071): 815-822.
- [21] 洪文威,徐磊,李如帅,等.基于深度学习的级联网络在 PET/MR 图像中前列腺癌自动检测与分割[J]. *中国医学装备*, 2023, 20(6): 18-22.
- [22] Wu H, Xu T, Wang X, *et al*. Diagnostic performance of ^{68}Ga Gallium labelled prostate-specific membrane antigen positron emission tomography/computed tomography and magnetic resonance imaging for staging the prostate cancer with intermediate or high

- risk prior to radical prostatectomy: a systematic review and meta-analysis[J]. *World J Mens Health*, 2020, 38(2): 208-219.
- [23] Hofman MS, Lawrentschuk N, Francis RJ, *et al.* Prostate-specific membrane antigen PET-CT in patients with high-risk prostate cancer before curative-intent surgery or radiotherapy (proPSMA): a prospective, randomised, multicentre study[J]. *Lancet*, 2020, 395(10231): 1208-1216.
- [24] Emmett L, Buteau J, Papa N, *et al.* The additive diagnostic value of prostate-specific membrane antigen positron emission tomography computed tomography to multiparametric magnetic resonance imaging triage in the diagnosis of prostate cancer (PRIMARY): a prospective multicentre study[J]. *Eur Urol*, 2021, 80(6): 682-689.
- [25] Emmett L, Papa N, Buteau J, *et al.* The primary score: using intraprostatic ⁶⁸Ga-PSMA PET/CT patterns to optimize prostate cancer diagnosis[J]. *J Nucl Med*, 2022, 63(11): 1644-1650.
- [26] Zhang JL, Kang F, Gao J, *et al.* A prostate-specific membrane antigen PET-Based approach for improved diagnosis of prostate cancer in gleason grade group 1: a multicenter retrospective study [J]. *J Nucl Med*, 2023, 64(11): 1750-1757.
- [27] 罗量, 常儒玺, 李运轩, 等. 基于 18F-PSMA-1007 PET/CT 影像学模型在前列腺癌与前列腺增生鉴别诊断中的价值[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2024, 44(2): 80-85.
- [28] Zang S, Ai S, Yang R, *et al.* Development and validation of ⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT-based radiomics model to detect primary prostate cancer[J]. *EJNMMI Res*, 2022, 12(1): 63.
- [29] Zhao Y, Gafita A, Vollnberg B, *et al.* Deep neural network for automatic characterization of lesions on ⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2020, 47(3): 603-613.
- [30] Trägårdh E, Enqvist O, Ulén J, *et al.* Freely available, fully automated ai-based analysis of primary tumour and metastases of prostate cancer in whole-body ¹⁸F-PSMA-1007 PET-CT[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2022, 12(9): 2101.
- [31] Capobianco N, Sibille L, Chantadisai M, *et al.* Whole-body uptake classification and prostate cancer staging in ⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT using dual-tracer learning[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 49(2): 517-526.
- [32] Mottet N, van den Bergh RCN, Briers E, *et al.* EAU-EANM-ESTRO-ESUR-SIOG Guidelines on Prostate Cancer-2020 update. Part 1: screening, diagnosis, and local treatment with curative intent [J]. *Eur Urol*, 2021, 79(2): 243-262.
- [33] Cysouw MCF, Jansen BHE, van de Brug T, *et al.* Machine learning-based analysis of [¹⁸F]DCFPyL PET radiomics for risk stratification in primary prostate cancer[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(2): 340-349.
- [34] Papp L, Spielvogel CP, Grubmüller B, *et al.* Supervised machine learning enables non-invasive lesion characterization in primary prostate cancer with [⁶⁸Ga]Ga-PSMA-11 PET/MRI[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(6): 1795-1805.
- [35] Voter T. Feasibility of a multimodal fusion 3D CNN to predict progression risk in prostate cancer patients based on baseline PSMA-PET/CT imaging[EB/OL]. [2023-11-26]. <https://www.auntminnie.com/clinical-news/molecular-imaging/article/15659938/ai-predicts-responses-in-patients-with-prostate-cancer>.
- [36] Sartor O, de Bono JS. Metastatic prostate cancer[J]. *N Engl J Med*, 2018, 378(7): 645-657.
- [37] Montagne S, Hamzaoui D, Allera A, *et al.* Challenge of prostate MRI segmentation on T₂-weighted images: inter-observer variability and impact of prostate morphology[J]. *Insights Imaging*, 2021, 12(1): 71.
- [38] Huang B, Yang Q, Li X, *et al.* Deep learning-based whole-body characterization of prostate cancer lesions on ⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT in patients with post-prostatectomy recurrence[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2024, 51(4): 1173-1184.
- [39] Holzschuh J C, Mix M, Ruf J, *et al.* Deep learning based automated delineation of the intraprostatic gross tumour volume in PSMA-PET for patients with primary prostate cancer[J]. *Radiother Oncol*, 2023, 188: 109774.
- [40] Almuradova E, Seyyar M, Arak H, *et al.* The real-world outcomes of Lutetium-177 PSMA-617 radioligand therapy in metastatic castration-resistant prostate cancer: Turkish Oncology Group multicenter study[J]. *Int J Cancer*, 2024, 154(4): 692-700.
- [41] Assadi M, Manafi-Farid R, Jafari E, *et al.* Predictive and prognostic potential of pretreatment ⁶⁸Ga-PSMA PET tumor heterogeneity index in patients with metastatic castration-resistant prostate cancer treated with ¹⁷⁷Lu-PSMA[J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 1066926.
- [42] Moazemi S, Erle A, Khurshid Z, *et al.* Decision-support for treatment with ¹⁷⁷Lu-PSMA: machine learning predicts response with high accuracy based on PSMA-PET/CT and clinical parameters[J]. *Ann Transl Med*, 2021, 9(9): 818.
- [43] Lawal IO, Ndlovu H, Kgate M, *et al.* Prognostic value of PSMA PET/CT in prostate cancer[J]. *Semin Nucl Med*, 2024, 54(1): 46-59.
- [44] Kendrick J, Francis RJ, Hassan GM, *et al.* Fully automatic prognostic biomarker extraction from metastatic prostate lesion segmentations in whole-body ⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT images[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 50(1): 67-79.
- [45] Seifert R, Rasul S, Seitzer K, *et al.* A prognostic risk score for prostate cancer based on PSMA PET-derived organ-specific tumor volumes[J]. *Radiology*, 2023, 307(4): e222010.

(责任编辑: 蒋铭敏)