

PSMA PET 影像组学在前列腺癌中的研究进展

淳于航行 胡佳佳 李彪

上海交通大学医学院附属瑞金医院核医学科, 上海 200025

通信作者: 李彪, Email: lb10363@rjh.com.cn

【摘要】 前列腺特异膜抗原 (PSMA) PET 在前列腺癌的诊疗中提供了优于其他显像模式的准确性。然而, 在主客观阅片过程中仍存在假阳性和假阴性判读, 导致漏诊或误诊, 从而降低诊断效能, 影响术前分级及危险度分层, 干扰临床决策。随着医学影像技术和人工智能的进步, 影像组学的作用逐渐凸显。基于提取的图像特征进行定量分析, 以 PSMA PET 图像为基础的影像组学有望提高对前列腺癌的诊断、分级及危险度分层、疗效预测的能力。该文旨在综述 PSMA PET 影像组学在前列腺癌临床诊疗的研究进展。

【关键词】 前列腺肿瘤; 影像组学; 前列腺特异膜抗原; 正电子发射断层显像术; 发展趋势

基金项目: 国家自然科学基金 (82171976); 上海市“医苑新星”医学影像项目青年人才 (2021 年); 上海浦江人才计划 (21PJD042); 上海市级医院诊疗技术推广及优化管理项目 (SHDC22023201)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20240222-00062

Advancements in the research of PSMA PET radiomics in prostate cancer

Chunyu Hangxing, Hu Jiajia, Li Biao

Department of Nuclear Medicine, Ruijin Hospital Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China

Corresponding author: Li Biao, Email: lb10363@rjh.com.cn

【Abstract】 Prostate specific membrane antigen (PSMA) PET demonstrates superior accuracy compared to alternative imaging modalities in the diagnosis and treatment of prostate cancer. Nonetheless, subjective interpretation processes still result in false positives and false negatives, leading to erroneous or missed diagnoses, thereby compromising diagnostic efficacy, influencing preoperative grading and risk stratification, and interfering with clinical decision-making. With the rapid advancement of medical imaging technology and artificial intelligence, the role of radiomics is gaining prominence. By leveraging extracted image features and employing quantitative analysis, radiomics based on PSMA PET images holds great potential to enhance the capabilities of diagnosing, grading, quantifying risk, and predicting treatment efficacy in prostate cancer. This article aims to comprehensively review the research progress of PSMA PET radiomics in the clinical diagnosis and treatment of prostate cancer.

【Key words】 Prostatic neoplasms; Radiomics; Prostate specific membrane antigen; Positron-emission tomography; Trends

Fund program: National Natural Science Foundation of China (82171976); Shanghai "New Star of Medical Field" for Youth Medical Talents (2021); Shanghai Pujiang Program (21PJD042); Shanghai Hospital Development Center Foundation (SHDC22023201)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20240222-00062

前列腺癌 (prostate cancer, PCa) 是男性最常见的恶性肿瘤之一, 也是男性癌症死亡的主要原因之一^[1]。前列腺特异膜抗原 (prostate specific membrane antigen, PSMA) 是一种在 PCa 上皮细胞明显高表达的跨膜糖蛋白^[2]。放射性核素⁶⁸Ga 或¹⁸F 标记的 PSMA 抑制剂可用于 PCa 原发灶及转移灶的特异性显像。PSMA PET/CT 或 PET/MR 显像不仅能显示 PSMA 表达部位, 还能半定量分析其表达程度, 显著提升 PCa 的早期诊断效能, 成为 PCa 早期风险性评估和疗效评估的重要影像学技术^[3]。PSMA PET/CT 或 PET/MR 具有高灵敏度和高特异性的优势, 相较于 MRI、CT 和骨扫描, 能检测到传统影像学诊断手段无法发现的淋巴结和远处转移病灶, 从而更好地指导临床治疗^[4]。但 PSMA PET 影像诊断原发灶的视觉评估存在一些假阳性 (新生血管丰富的实体瘤或良

性病变也可高表达 PSMA) 和假阴性 (被掩盖在高摄取背景下的隐匿病灶及摄取较低接近本底的病灶) 的情况^[5]。有研究对 PSMA PET 和 MRI 在诊断临床显著 PCa (clinically significant PCa, csPCa) 时产生的假阴性率比较显示, 17% 的 csPCa 在 MRI 上呈假阴性, 10% 在 PSMA PET 上呈假阴性, 而两者的灵敏度和特异性相似^[6]。在预测 PCa 组织病理分级方面, SUV_{max}、PSMA 受体表达体积 (PSMA receptor expressing tumor volume, PSMA-TV)、整体 PCa 病灶 PSMA 受体表达量 (total lesion PSMA receptor expression, TL-PSMA) 等勾画参数与 Gleason 评分相关, 但作为预测分级的最佳参数尚缺乏统一标准^[7]。此外, PSMA PET 对最大径 < 5 mm 的阳性淋巴结检测率低, 可能会导致错误的初始分期^[8]。预测治疗疗效有助于治疗前制定最佳的个体化治疗方案, ¹⁷⁷Lu-PSMA-617 对

转移性去势抵抗性 PCa (metastatic castration-resistant PCa, mCRPC) 显示出了良好的治疗效果,但研究显示 SUV_{max} 及 SUV_{mean} 等参数难以预测其疗效^[9]。经典的雄激素剥夺治疗 (androgen deprivation therapy, ADT) 方案由于受限于肿瘤异质性也难以通过人工评估预测其疗效^[10]。随着医学影像技术的持续进步,影像组学迎来了显著发展,其旨在通过对肿瘤表型的形态学、统计学和纹理特征进行定量描述,以同时兼备定量性和客观性而弥补了人工可视判读的不足^[11-12]。当前,PCa 影像组学聚焦于原发灶诊断、临床分级及危险度分层以及预测预后等方面,在 PCa 诊疗中的重要性逐渐凸显。本文拟对治疗前 PSMA PET 影像组学 (PET/CT 及 PET/MR) 在 PCa 诊疗中的研究进展进行综述。

1. PSMA PET 影像组学诊断原发性 PCa。组织病理学检查是诊断 PCa 的标准方法,然而通过穿刺活组织检查 (简称活检) 取得的组织标本对 PCa 的漏诊率高达 40%,并且穿刺活检可能会引发出血、疼痛、感染等风险^[13]。利用 PSMA PET 诊断 PCa 具有高灵敏度、高特异性以及非侵入性等优势。然而 PSMA PET 人工可视判读可能会漏诊隐匿原发病变^[14]。PSMA PET 影像组学以其定量性和客观性,能在一定程度上弥补影像直观判读时漏诊的问题,有望实现非侵入、高精度诊断 PCa,在帮助患者避免不必要的活检和过度治疗方面具有巨大前景^[15]。Zamboglou 等^[16]的研究发现人工判读 PSMA PET 图像在训练队列的 60% (12/20) 的患者中遗漏了 134 个前列腺内病变,而 2 种影像组学特征在发现视觉遗漏的病灶中表现出色 ($AUC \geq 0.93$),从而证实影像组学特征的应用可以准确发现在 PSMA PET 影像人工判读中可能会被忽视的具有临床意义的 PCa 原发病灶。在前列腺灶良恶性鉴别方面,罗量等^[17]创建的 PET 和 PET/CT 影像组学模型在鉴别 PCa 和前列腺增生的测试集中的准确性、灵敏度、特异性分别为 86.36% (19/22)、13/15、6/7 和 90.91% (20/22)、15/15、5/7,显著优于临床指标和 PET 常规参数的诊断效能。Zang 等^[15]构建的影像组学模型在鉴别前列腺内病变良恶性的测试集中表现优于人工评估 [$AUC: 0.85$ (95% $CI: 0.73 \sim 0.97$) 和 0.63 (95% $CI: 0.47 \sim 0.79$); $P = 0.036$], 为诊断 PCa 患者的前列腺内病变提供了一种无创、定量的方法。此外,Chan 等^[18]的研究发现,PSMA PET 和多参数 MRI (multiparametric MRI, mpMRI) 的联合影像组学特征比单独使用任一组特征都能更好地发现前列腺内病变 (灵敏度、特异性和 AUC 分别为 0.842、0.804 和 0.890),表明 PSMA PET 联合 mpMRI 影像组学研究模式或可提供更高的诊断价值。

2. PSMA PET 影像组学在术前预测 PCa 临床病理分级及对危险度分层的应用。术前 PCa 的精准临床分级对指导治疗极为重要。Gleason 评分系统是应用最广泛的 PCa 分级方法。国际泌尿病理学会 (International Society of Urological Pathology, ISUP) 基于 Gleason 总评分将 PCa 分为 5 个不同的组别 (即 ISUP 分级),以提示肿瘤危险度,助力临床决策^[19]。然而,ISUP 分级是基于穿刺生物样本的测量,受抽样误差和肿瘤异质性的影响可能会导致分级误判^[20]。PSMA PET 的多个半定量参数与组织病理学分级虽然相关,但其缺乏准确和稳定的量化措施,可能会导致预测临床病理学效果欠佳^[21]。影像组学以其高通量的影像数据处理特点,可能

会在一定程度上弥补穿刺检查的缺陷。Ghezzi 等^[22]的研究结果支持⁶⁸Ga-PSMA-11 PET 影像组学在准确、无创预测 PCa ISUP 分级中的作用,通过将影像组学模型与穿刺活检比较发现,影像组学模型预测 ISUP 分级的平衡准确性 (balanced accuracy, bACC)、灵敏度和阴性预测值更高,分别为 87.6%、88.6% 和 82.5%,而穿刺活检分别为 85.9%、71.9% 和 62.5%。Solari 等^[23]提取了⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/MR 图像的影像组学特征,训练了 4 个单模态影像组学模型 [PET、 T_1 加权成像 (weighted imaging, WI)、 T_2 WI、表观弥散系数 (apparent diffusion coefficient, ADC)]; 3 个 PET+MRI 双模态模型 (PET+ T_1 WI、PET+ T_2 WI、PET+ADC) 以及临床参数模型和影像参数模型用于比较预测 Gleason 评分分级的能力,结果显示所有单模态模型的预测性能 [T_1 WI、 T_2 WI、ADC、PET 的 bACC 分别为 (72±3)%、(73±2)%、(76±6)%、(75±5)%] 均明显优于患者临床参数 [bACC: (58±5)%] 和影像参数模型 [bACC: (65±7)%], 而使用 PSMA PET 和 MRI ADC 影像组学的组合特征训练的双模态模型产生了最高的 bACC [(82±5)%], 证实了 PSMA PET 影像组学特征和 MRI ADC 影像组学特征具有互补价值,肯定了影像组学模型在预测 Gleason 评分方面的潜力。Wang 等^[24]的研究提示¹⁸F-PSMA-1007 PET/CT 影像组学模型对于术前个体化预测 Gleason 分级具有明确意义,其开发的影像组学列线图模型成功地区分了高 Gleason 评分与低 Gleason 评分人群 ($AUC = 0.719$)。Feliciani 等^[25]开发的⁶⁸Ga-PSMA-11 PET 联合 MRI ADC 影像组学模型在区分低 ISUP 级别组患者和高 ISUP 级别组患者中具有明确意义 ($AUC = 0.93$),显示了联合模型在 ISUP 分级预测中的互补性。

PCa 的危险度分层有助于临床决策及预测复发,危险度分层在临床上主要基于前列腺特异抗原 (prostate specific antigen, PSA) 水平、穿刺活检标本的 Gleason 评分以及 TNM 分期。已有研究证实了 PSMA PET 对危险度分层的价值: Papp 等^[26]开发的 PET/MR 影像组学模型在预测 PCa 患者生化复发和总风险 (overall patient risk, OPR) 的准确性分别为 89% 和 91%,而基于 PSA、活检 Gleason 评分和 TNM 分期的临床病理模型预测 BCR 和 OPR 的准确性分别为 69% 和 70%; Leung 等^[27]开发的影像组学模型提供了病灶级别的 PSMA-报告和数据库 (reporting and data system, RADS) 和 PCa 危险度分类以辅助临床决策; Yao 等^[28]发现在 40% ~ 50% SUV_{max} 阈值下提取的¹⁸F-PSMA-1007 PET 影像组学特征对多种 PCa 生物学行为具有较好的预测评估性能,且较 PSA 生化模型具有更好的性能。这些研究证实 PSMA PET 影像组学在预测患者的生化和局部复发、全身进展风险以及肿瘤特异性和总体生存率等危险度分层方面具有重要价值,在完善 PCa 患者的个体化治疗决策方面具有广阔的应用前景。

3. PSMA PET 影像组学在预测 PCa 疗效中的作用。ADT 治疗仍然扮演着关键的角色,然而在治疗开始前预测治疗反应仍缺乏有效手段。不同病灶的异质性导致其对 PSMA 摄取的程度不同,使得 PSMA PET 的定量参数对其预测效果尚未明确,影像组学或可克服这些局限性。Tran 等^[10]依据 SUV_{max} 阈值将前列腺划分为 3 个影像组学区域 (1 区为代谢肿瘤区,2 区为近端外周肿瘤区,3 区为延伸外周肿瘤区),并证实对前列腺内不同影像组学区域的特征分析有助于在

ADT 启动前区分有反应者和无反应者。Grahovac 等^[29]提出了模糊影像组学(fuzzy radiomics)的处理方式,其在图像数据处理中对体素特征贡献进行加权,而不是用传统二元决策来包括病变体素;从 PCa 原发灶的⁶⁸Ga-PSMA-11 PET 图像中提取特征分析后,与传统二进制影像组学相比,模糊影像组学模型在预测 PCa 的 ADT 后生存期方面具有更高的 AUC(0.86)。

尽管近年来新的治疗药物不断出现,mCRPC 的治疗仍然是临床肿瘤学的一个挑战^[30]。利用¹⁷⁷Lu-PSMA-617 的放射配体靶向治疗的效果已在 mCRPC 患者 III 期临床试验中得到肯定。既往研究也提示其良好的耐受性^[31-32]。因放射性药物制备的特殊性及患者辐射安全方面的考虑,治疗前预测药物疗效至关重要。Assadi 等^[33]从⁶⁸Ga-PSMA-11 PET 图像中提取了前列腺内原发病灶体积参数和影像组学特征,其中灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix, GLCM)这一影像组学特征显示出对¹⁷⁷Lu-PSMA-617 治疗后阳性生化应答最高的预测性能(AUC = 0.719, 灵敏度 82%, 特异性 73%),因此建立了一种基于病灶预测¹⁷⁷Lu-PSMA-617 治疗的模型。Roll 等^[34]从 21 例接受¹⁷⁷Lu-PSMA-617 治疗的晚期 PCa 患者前列腺内原发病灶 PSMA PET/MR 图像中找到了 10 个独立的影像组学特征,创建的 logistic 回归模型成功地预测了患者治疗后的整体生化应答(AUC = 0.83)。Moazemi 等^[35]的研究提取了治疗前原发灶的⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT 影像组学特征,通过生存分析发现基于影像组学特征划分的 2 组患者各自的总生存期具有明显差异($P < 0.05$)。综上,基于 PSMA PET 的影像组学模型有潜力成为预测 PCa 疗效的工具。

4. PSMA PET 影像组学与人工判读多角度比较。在 PCa 病灶诊断包括隐匿原发灶的检出及前列腺结节良恶性鉴别等方面,PSMA PET 影像组学的灵敏度及准确性优于 PSMA PET 融合影像的人工判读^[15]。在预测 PCa 临床分级方面,PSMA PET 影像组学预测模型的 bACC 超过 80%,且预测性能相比 PSMA PET 融合影像参数具有更佳的表现^[22]。此外,PSMA PET 融合影像定量参数虽具有 PCa 危险度分层的价值,但是受限于人工测量误差以及设备间的不一致性,其预测能力缺乏稳健性和泛化性,而影像组学模型在一定程度上校正了这些问题^[36-38]。在预测疗效方面,PSMA PET 融合影像定量参数在预测 PCa 疗效方面并不出色^[9,39],但基于 PSMA PET 图像建立的影像组学模型在预测 PCa 疗效方面被证实具有较好的预测价值^[33],如 Roll 等^[34]创建的影像组学模型预测接受¹⁷⁷Lu-PSMA-617 治疗的晚期 PCa 患者的整体生化应答达到了较高的预测性能(AUC = 0.83)。综上,影像组学通过机器学习提取 PSMA PET 图像中病灶的高通量图像特征,克服了人工测量产生人为误差的局限性,同时针对不同区域进行分类分析,减少了肿瘤异质性带来的图像解读误差,提升了 PSMA PET 融合图像人工判读的准确性,在病灶诊断、分级、危险度分层、疗效预测方面具有较高的辅助价值。

5. 展望与挑战。越来越多的研究肯定了 PSMA PET 影像组学在 PCa 诊断、分级及疗效预测中的价值。目前大多数研究仅停留在对影像组学数据的单一研究,探索影像组学结合临床参数的组合模型或成为将来的研究方向之一。¹⁸F-PSMA-

1007 PET 显像存在骨非特异性摄取,可能影响 PCa 的临床分期,干扰临床决策,利用影像组学模型鉴别非特异性骨摄取灶良恶性的可行性有待进一步明确。也有研究表明,联合¹⁸F-FDG PET/MR 显像,可帮助¹⁸F-PSMA PET/MR 或 PET/CT 优化其诊断效能^[40-41],提示双核素联合的影像组学在未来或成为研究的热点。此外,PSMA PET 影像基因组学领域也缺乏相关的探索,若能构建可预测基因特征的影像组学模型,将在一定程度上替代穿刺活检,并从更深层面揭示 PCa 生物学行为和影像组学特征的关系。

目前,PSMA PET 影像组学研究多基于单中心、小样本、回顾性的研究,尚需要进行多中心、大样本、随机临床对照的前瞻性研究进行验证。此外,影像组学在一定程度上受到样本收集过程中的人群选择偏倚的限制^[22,34,42],有待进一步完善。总之,PSMA PET 影像组学在 PCa 诊疗领域仍处于试验阶段,尚未广泛应用于临床工作。随着影像技术的进步和机器学习方法的提升,其将持续成为 PCa 诊疗领域研究的热点,具有广阔的研究前景。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 淳于航行: 论文撰写; 胡佳佳: 论文修改; 李彪: 研究指导

参 考 文 献

- [1] Siegel RL, Miller KD, Fuchs HE, et al. Cancer statistics, 2022 [J]. CA Cancer J Clin, 2022, 72(1): 7-33. DOI:10.3322/caac.21708.
- [2] Paschalis A, Sheehan B, Riisnaes R, et al. Prostate-specific membrane antigen heterogeneity and DNA repair defects in prostate cancer [J]. Eur Urol, 2019, 76(4): 469-478. DOI:10.1016/j.eururo.2019.06.030.
- [3] 陈若华, 黄钢, 刘建军. PSMA 诊疗一体化技术助力前列腺癌进入精准诊疗时代 [J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2024, 44(9): 513-515. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240702-00241. Chen RH, Huang G, Liu JJ. PSMA-based theranostic technology advances prostate cancer management towards a new era of precision diagnosis and treatment [J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 44(9): 513-515. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20240702-00241.
- [4] 顾伟杰, 朱耀. 2022 版《CSCO 前列腺癌诊疗指南》更新要点解读 [J]. 中国肿瘤外科杂志, 2022, 14(3): 224-232. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4136.2022.03.004. Gu WJ, Zhu Y. Update and interpretation of the 2022 guidelines for the diagnosis and treatment of prostate cancer by Chinese Society of Clinical Oncology (CSCO) [J]. Chin J Surg Oncol, 2022, 14(3): 224-232. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4136.2022.03.004.
- [5] 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. DOI: 10.1016/j.eururo.2021.08.002.
- [6] Panagiotidis E, Paschali A, Xourgia X, et al. False-positive ¹⁸F-PSMA-1007 and true-negative ¹⁸F-fluorocholine PET/CT splenic hemangioma [J]. Clin Nucl Med, 2020, 45(12): 960-961. DOI: 10.1097/RLU.0000000000003310.
- [7] Niu XB, Li YP, Wang J, et al. Diagnostic value of ¹⁸F-PSMA-

- 1007 PET/CT for predicting the pathological grade of prostate cancer [J]. *Cancer Biol Ther*, 2024, 25(1): 2287120. DOI:10.1080/15384047.2023.2287120.
- [8] Sprute K, Kramer V, Koerber SA, et al. Diagnostic accuracy of ^{18}F -PSMA-1007 PET/CT imaging for lymph node staging of prostate carcinoma in primary and biochemical recurrence[J]. *J Nucl Med*, 2021, 62(2): 208-213. DOI:10.2967/jnumed.120.246363.
- [9] Manafi-Farid R, Harsini S, Saidi B, et al. Factors predicting biochemical response and survival benefits following radioligand therapy with [^{177}Lu]Lu-PSMA in metastatic castrate-resistant prostate cancer: a review [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(12): 4028-4041. DOI:10.1007/s00259-021-05237-y.
- [10] Tran VT, Tu SJ, Tseng JR. ^{68}Ga -PSMA-11 PET/CT features extracted from different radiomic zones predict response to androgen deprivation therapy in patients with advanced prostate cancer [J]. *Cancers (Basel)*, 2022, 14(19): 4838. DOI:10.3390/cancers14194838.
- [11] Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, et al. Introduction to radiomics [J]. *J Nucl Med*, 2020, 61(4): 488-495. DOI:10.2967/jnumed.118.222893.
- [12] 牟玮,田捷. PET/CT、SPECT/CT 影像组学:沟通宏观影像和微观分子的桥梁 [J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2024, 44(2): 65-67. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20231212-00134. Mu W, Tian J. Radiomics in PET/CT and SPECT/CT: the bridge between macroscopic images and microscopic molecules [J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2024, 44(2): 65-67. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20231212-00134.
- [13] Eklund M, Jäderling F, Discacciati A, et al. MRI-targeted or standard biopsy in prostate cancer screening [J]. *N Engl J Med*, 2021, 385(10): 908-920. DOI:10.1056/NEJMoa2100852.
- [14] Donato P, Morton A, Yaxley J, et al. ^{68}Ga -PSMA PET/CT better characterises localised prostate cancer after MRI and transperineal prostate biopsy: is ^{68}Ga -PSMA PET/CT guided biopsy the future? [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2020, 47(8): 1843-1851. DOI:10.1007/s00259-019-04620-0.
- [15] Zang S, Ai S, Yang R, et al. Development and validation of ^{68}Ga -PSMA-11 PET/CT-based radiomics model to detect primary prostate cancer [J]. *EJNMMI Res*, 2022, 12(1): 63. DOI:10.1186/s13550-022-00936-5.
- [16] Zamboglou C, Bettermann AS, Gratzke C, et al. Uncovering the invisible-prevalence, characteristics, and radiomics feature-based detection of visually undetectable intraprostatic tumor lesions in ^{68}Ga -PSMA-11 PET images of patients with primary prostate cancer [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(6): 1987-1997. DOI:10.1007/s00259-020-05111-3.
- [17] 罗量,常儒玺,李运轩,等.基于 ^{18}F -PSMA-1007 PET/CT 影像组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. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20231115-00107. Luo L, Chang RX, Li YX, et al. Value of ^{18}F -PSMA-1007 PET/CT-based radiomics model for differential diagnosis between prostate cancer and benign prostatic hyperplasia [J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2024, 44(2): 80-85. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20231115-00107.
- [18] Chan TH, Haworth A, Wang A, et al. Detecting localised prostate cancer using radiomic features in PSMA PET and multiparametric MRI for biologically targeted radiation therapy [J]. *EJNMMI Res*, 2023, 13(1): 34. DOI:10.1186/s13550-023-00984-5.
- [19] van den Bergh RCN, O'Hanlon S, Cornford P, et al. Reply to Michael Froehner, Rainer Koch, and Markus Graefen's Letter to the Editor re: Nicolas Mottet, Roderick C.N. van den Bergh, Erik Briers, et al. EAU-EANM-ESTRO-ESUR-SIOG Guidelines on Prostate Cancer-2020 Update. Part 1: Screening, Diagnosis, and Local Treatment with Curative Intent. *Eur Urol* 2021;79:243-62. Comorbidity Measurement in Patients with Prostate Cancer [J]. *Eur Urol*, 2021, 79(5): e139-e140. DOI:10.1016/j.eururo.2021.02.006.
- [20] Srigley JR, Delahunt B, Samarasinghe H, et al. Controversial issues in Gleason and International Society of Urological Pathology (ISUP) prostate cancer grading: proposed recommendations for international implementation [J]. *Pathology*, 2019, 51(5): 463-473. DOI:10.1016/j.pathol.2019.05.001.
- [21] Liu C, Liu T, Zhang N, et al. ^{68}Ga -PSMA-617 PET/CT: a promising new technique for predicting risk stratification and metastatic risk of prostate cancer patients [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 45(11): 1852-1861. DOI:10.1007/s00259-018-4037-9.
- [22] Ghezzi S, Mapelli P, Bezzi C, et al. Role of [^{68}Ga]Ga-PSMA-11 PET radiomics to predict post-surgical ISUP grade in primary prostate cancer [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2023, 50(8): 2548-2560. DOI:10.1007/s00259-023-06187-3.
- [23] Solari EL, Gafita A, Schachoff S, et al. The added value of PSMA PET/MR radiomics for prostate cancer staging [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 49(2): 527-538. DOI:10.1007/s00259-021-05430-z.
- [24] Wang Z, Li Y, Zheng A, et al. Evaluation of a radiomics nomogram derived from Fluoride-18 PSMA-1007 PET/CT for risk stratification in newly diagnosed prostate cancer [J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 1018833. DOI:10.3389/fonc.2022.1018833.
- [25] Feliciani G, Celli M, Ferroni F, et al. Radiomics analysis on [^{68}Ga]Ga-PSMA-11 PET and MRI-ADC for the prediction of prostate cancer ISUP grades: preliminary results of the BIOPSTAGE trial [J]. *Cancers (Basel)*, 2022, 14(8): 1888. DOI:10.3390/cancers14081888.
- [26] Papp L, Spielvogel CP, Grubmüller B, et al. Supervised machine learning enables non-invasive lesion characterization in primary prostate cancer with [^{68}Ga]Ga-PSMA-11 PET/MRI [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(6): 1795-1805. DOI:10.1007/s00259-020-05140-y.
- [27] Leung KH, Rowe SP, Leal JP, et al. Deep learning and radiomics framework for PSMA-RADS classification of prostate cancer on PSMA PET [J]. *EJNMMI Res*, 2022, 12(1): 76. DOI:10.1186/s13550-022-00948-1.
- [28] Yao F, Bian S, Zhu D, et al. Machine learning-based radiomics for multiple primary prostate cancer biological characteristics prediction with ^{18}F -PSMA-1007 PET: comparison among different volume segmentation thresholds [J]. *Radiol Med*, 2022, 127(10): 1170-1178. DOI:10.1007/s11547-022-01541-1.
- [29] Grahovac M, Spielvogel CP, Krajnc D, et al. Machine learning predictive performance evaluation of conventional and fuzzy radiomics in clinical cancer imaging cohorts [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2023, 50(6): 1607-1620. DOI:10.1007/s00259-023-06127-1.
- [30] Sartor O, de Bono JS. Metastatic prostate cancer [J]. *N Engl J Med*, 2018, 378(7): 645-657. DOI:10.1056/NEJMra1701695.
- [31] Seifert R, Kessel K, Schlack K, et al. Radioligand therapy using [^{177}Lu]Lu-PSMA-617 in mCRPC: a pre-VISION single-center analysis [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2020, 47(9): 2106-2112.

- DOI:10.1007/s00259-020-04703-3.
- [32] Hofman MS, Emmett L, Violet J, et al. TheraP: a randomized phase 2 trial of ^{177}Lu -PSMA-617 theranostic treatment vs cabazitaxel in progressive metastatic castration-resistant prostate cancer (Clinical Trial Protocol ANZUP 1603) [J]. *BJU Int*, 2019, 124 (Suppl 1): 5-13. DOI:10.1111/bju.14876.
- [33] Assadi M, Manafi-Farid R, Jafari E, et al. Predictive and prognostic potential of pretreatment ^{68}Ga -PSMA PET tumor heterogeneity index in patients with metastatic castration-resistant prostate cancer treated with ^{177}Lu -PSMA [J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 1066926. DOI:10.3389/fonc.2022.1066926.
- [34] Roll W, Schindler P, Masthoff M, et al. Evaluation of ^{68}Ga -PSMA-11 PET-MRI in patients with advanced prostate cancer receiving ^{177}Lu -PSMA-617 therapy: a radiomics analysis [J]. *Cancers (Basel)*, 2021, 13(15): 3849. DOI:10.3390/cancers13153849.
- [35] Moazemi S, Erle A, Lütje S, et al. Estimating the potential of radiomics features and radiomics signature from pretherapeutic PSMA-PET-CT scans and clinical data for prediction of overall survival when treated with ^{177}Lu -PSMA [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11(2): 186. DOI:10.3390/diagnostics11020186.
- [36] Schmuck S, von Klot CA, Henkenberens C, et al. Initial experience with volumetric ^{68}Ga -PSMA I&T PET/CT for assessment of whole-body tumor burden as a quantitative imaging biomarker in patients with prostate cancer [J]. *J Nucl Med*, 2017, 58(12): 1962-1968. DOI:10.2967/jnumed.117.193581.
- [37] Rahbar K, Weckesser M, Huss S, et al. Correlation of intraprostatic tumor extent with ^{68}Ga -PSMA distribution in patients with prostate cancer [J]. *J Nucl Med*, 2016, 57(4): 563-567. DOI:10.2967/jnumed.115.169243.
- [38] Perner S, Hofer MD, Kim R, et al. Prostate-specific membrane antigen expression as a predictor of prostate cancer progression [J]. *Hum Pathol*, 2007, 38(5): 696-701. DOI:10.1016/j.humphath.2006.11.012.
- [39] Tseng JR, Chang SH, Wu YY, et al. Impact of three-month androgen deprivation therapy on [^{68}Ga]Ga-PSMA-11 PET/CT indices in men with advanced prostate cancer—results from a pilot prospective study [J]. *Cancers (Basel)*, 2022, 14(5): 1329. DOI:10.3390/cancers14051329.
- [40] 陈肖玥, 戴军, 程然, 等. ^{18}F -PSMA 联合 ^{18}F -FDG 双核素 PET/MR 显像对前列腺癌术前评估的临床价值 [J]. *中国临床医学影像杂志*, 2021, 32(12): 876-883. DOI:10.12117/jccmi.2021.12.011.
- Chen XY, Dai J, Cheng R, et al. Clinical value of ^{18}F -PSMA and ^{18}F -FDG dual-nuclide PET/MR imaging in preoperative evaluation of prostate cancer [J]. *J Chin Clin Med Imaging*, 2021, 32(12): 876-883. DOI:10.12117/jccmi.2021.12.011.
- [41] 姜一逸, 刘芙岑, 李波良, 等. ^{18}F -PSMA-1007 与 ^{18}F -FDG PET/CT 及多参数 MRI 在前列腺癌诊断中的对比研究 [J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2024, 44(3): 147-152. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230320-00069.
- Jiang YY, Liu FC, Li BL, et al. Comparative study of ^{18}F -PSMA-1007, ^{18}F -FDG PET/CT and mpMRI in the diagnosis of prostate cancer [J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2024, 44(3): 147-152. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230320-00069.
- [42] Spohn S, Schmidt-Hegemann NS, Ruf J, et al. Development of PSMA-PET-guided CT-based radiomic signature to predict biochemical recurrence after salvage radiotherapy [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2023, 50(8): 2537-2547. DOI:10.1007/s00259-023-06195-3.

(收稿日期:2024-02-22)

更 正

本刊 2020 年第 40 卷第 11 期第 699 页图 1 中 α 粒子辐射的“能量:5~9 keV, 射程:40~100 mm”应改为“能量:5~9 MeV, 射程:40~100 μm ”;俄歇电子辐射的“射程:2~500 mm”应改为“射程:2~500 nm”。

· 读者 · 作者 · 编者 ·

本刊有关文章涉及课题基金项目的标注要求

论文所涉及的课题如取得国家或部、省级以上基金或属攻关项目,应列出(双语著录),如“基金项目:国家自然科学基金(30271269,81273264);国家重点研发计划(2020YFC2008200)”及“Fund program: National Natural Science Foundation of China (39570835)”。中英文基金项目分别置于中文关键词、英文 Key words 下方。获得基金资助产出的文章作者需提供印有基金项目名称和项目编号的证明类文件复印件。

本刊编辑部