

· PSMA PET 显像与前列腺癌治疗策略 ·

多参数 MRI 深度学习人工智能分析联合⁶⁸Ga-PSMA PET 对前列腺癌的诊断价值

覃春霞 吕玉虎 代志博 魏思齐 阮伟伟 盖永康 兰晓莉

华中科技大学同济医学院附属协和医院核医学科、分子影像湖北省重点实验室, 武汉 430022

通信作者: 兰晓莉, Email: hzslxl@163.com

【摘要】 目的 评估多参数 MRI (mpMRI) 深度学习人工智能 (AI) 分析系统联合⁶⁸Ga-前列腺特异膜抗原 (PSMA) PET 对前列腺癌的诊断效能。方法 回顾性收集 2018 年 5 月至 2023 年 10 月间因怀疑或确诊前列腺癌在华中科技大学同济医学院附属协和医院行⁶⁸Ga-PSMA PET/MR 检查的 103 例患者, 年龄 45~85 岁, 勾画 ROI 测量病灶/前列腺 SUV_{max}, 应用前列腺深度学习 AI 系统对 MR 图像进行分析, 获得前列腺及原发灶参数。以病理结果为“金标准”, 分析 T₂ 加权成像 (WI)、弥散 WI (DWI)、mpMRI、PET SUV_{max} 及 PET/MR 对前列腺癌的诊断效能。结果 103 例患者中, 82 例 (79.61%) 为前列腺癌。PET 单模态表现出最佳的特异性 [100% (21/21)]、阳性预测值 [100% (58/58)] 和 AUC (0.860, 95% CI: 0.777~0.920)。mpMRI AI 分析可提供快速的诊断结果, 其联合 PET 可提高诊断灵敏度和准确性 [PET、mpMRI、两者联合的灵敏度分别为: 70.73% (58/82)、86.59% (71/82)、92.68% (76/82); 准确性分别为 76.70% (79/103)、81.55% (84/103)、86.41% (89/103)]; 在 PET 阴性的 44 例患者中, 加入 mpMRI AI 分析结果后, 30 例获得准确诊断。结论 ⁶⁸Ga-PSMA PET 对前列腺癌具有很好的特异性, mpMRI AI 分析省时, 两者联合可提高诊断灵敏度和准确性, 为⁶⁸Ga-PSMA PET/MR 图像分析提供有价值的工具。

【关键词】 前列腺肿瘤; 前列腺特异膜抗原; 同位素标记; 镓放射性同位素; 正电子发射断层显像术; 多参数磁共振成像; 深度学习

基金项目: 湖北省科技创新团队 ([2022] 72)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20240628-00233

Diagnostic value of multiparametric MRI deep learning artificial intelligence analysis combined with⁶⁸Ga-PSMA PET for prostate cancer

Qin Chunxia, Lyu Yuhu, Dai Zhibo, Wei Siqi, Ruan Weiwei, Gai Yongkang, Lan Xiaoli

Department of Nuclear Medicine, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology; Hubei Province Key Laboratory of Molecular Imaging, Wuhan 430022, China

Corresponding author: Lan Xiaoli, Email: hzslxl@163.com

【Abstract】 Objective To evaluate the diagnostic efficacy of the multiparametric MRI (mpMRI) deep learning artificial intelligence (AI) analysis system combined with⁶⁸Ga-prostate specific membrane antigen (PSMA) PET for prostate cancer. **Methods** Data of 103 patients (age: 45–85 years) who underwent⁶⁸Ga-PSMA PET/MR at Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology from May 2018 to October 2023 for suspected or confirmed prostate cancer were retrospectively collected. ROI was delineated to measure SUV_{max} of primary tumor or prostate, and a deep learning AI system was applied to analyze MR images of the prostate. The diagnostic efficacies of T₂ weighted imaging (WI), diffusion WI (DWI), mpMRI, PET SUV_{max}, and PET/MR for prostate cancer were assessed, with using the pathological results as the gold standard. **Results** Among 103 patients, 82 cases (79.61%) were with prostate cancer. PET unimodality demonstrated the best specificity (100%, 21/21), positive predictive value (100%, 58/58), and AUC (0.860, 95% CI: 0.777–0.920). The mpMRI AI analysis provided rapid diagnostic results and the sensitivity and accuracy were improved by combining with PET (sensitivities of PET, mpMRI and the combination of the two were 70.73% (58/82), 86.59% (71/82), and 92.68% (76/82), respectively; the accuracies were 76.70% (79/103), 81.55% (84/103) and 86.41% (89/103), respectively). Among 44 patients with negative PET, 30 patients received an accurate diagnosis when the results of mpMRI AI analysis were added. **Conclusions** ⁶⁸Ga-PSMA PET demonstrates good specificity for prostate cancer and mpMRI AI analysis is time-saving. The combined application improves the diagnostic sensitivity and accuracy, which provides a valuable tool for⁶⁸Ga-PSMA PET/MR image analysis.

【Key words】 Prostatic neoplasms; Prostate-specific membrane antigen; Isotope labeling; Gallium radioisotopes; Positron-emission tomography; Multiparametric magnetic resonance imaging; Deep learning

Fund program: Hubei Provincial Science and Technology Innovation Team ([2022]72)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20240628-00233

前列腺癌严重危害老年男性健康,占男性癌症发病第 2 位、死亡第 5 位^[1]。核医学在前列腺癌分期、分级、转移复发中的应用及转移性去势抵抗性前列腺癌治疗中的作用越来越大^[2]。前列腺特异膜抗原(prostate specific membrane antigen, PSMA)在大多数前列腺癌上皮细胞过表达,PSMA 靶向 PET 显像对前列腺癌的检出优于传统影像^[3-4],但仍有多达 20% 的患者呈现假阴性结果^[5]。多参数 MRI(multiparametric MRI, mpMRI)灵敏度高,在前列腺癌的诊疗中发挥着重要作用;前列腺影像报告和数据库系统(prostate imaging reporting and data system, PI-RADS)被临床广泛应用^[6],但其特异性较低,导致较多假阳性结果和不必要的活组织检查(简称活检)^[7];此外,图像评估费时,诊断准确性与医师经验有关。近年来,基于深度学习人工智能(artificial intelligence, AI)的前列腺癌计算机辅助诊断展示出较大潜力^[8],可以提高放射科医师对前列腺癌的诊断准确性^[9]。PSMA PET/MR 结合了 2 种显像模态的优势^[10],已成为前列腺癌的重要成像技术。本研究旨在评估 MR 前列腺癌智能分析系统联合 PET 参数对前列腺癌的诊断价值。

资料与方法

1. 研究对象。本研究是对 1 项临床研究[[ClinicalTrials.gov\(NCT03756077\)](https://clinicaltrials.gov/ct2/show/study/NCT03756077)]患者进行的回顾性分析,获本院机构伦理委员会的批准[2018 伦审字(S325 号)]。纳入病例时间为 2018 年 5 月至 2023 年 10 月。纳入标准:(1) 确诊或怀疑患有前列腺癌;(2) 行⁶⁸Ga-PSMA 全身 PET/CT 或 PET/MR 检查,并加扫盆腔 PET/MR;(3) 行前列腺穿刺活检或手术获得病理结果。排除标准:(1) 同期患有其他恶性肿瘤;(2) 曾接受过前列腺癌治疗;(3) 影像资料不完整或图像质量不佳影响分析。

共纳入 103 例患者,年龄 45~85(66.3±8.0)岁。所有患者的前列腺病灶经活检或手术病理诊断,精囊腺侵犯、淋巴结转移经病理或临床及影像学随访证实,远处转移经临床及影像学随访证实,收集患者基本信息、临床、病理及影像学检查结果等信息。

2. ⁶⁸Ga-PSMA PET 显像。⁶⁸Ga-PSMA 符合药物生产质量管理规范标准,前体购自江苏华益科技有

限公司(常熟),⁶⁸Ga 通过⁶⁸Ge/⁶⁸Ga 发生器(ITG GmBH,德国慕尼黑)产生,参考文献[11]方法合成⁶⁸Ga-PSMA-617,放射性纯>95%。所有患者根据体质量静脉注射显像剂 1.85~3.70 MBq/kg,扫描前排空膀胱,注射后约 30~60 min,患者取仰卧位行 PET/CT(Discovery VCT,美国 GE Healthcare)或 PET/MR(SIGNA PET/MR;美国 GE Healthcare)扫描,并加扫盆腔 PET/MR。

PET/CT 扫描参数:CT 管电压 120 kV,电流 110 mA,厚度 3.75 mm,PET 为三维采集,每个床位采集 3 min,共采集 6~7 个床位,经 CT 衰减校正后行有序子集最大期望值迭代法重建。PET/MR 在获取定位图像后使用零回波时间(zero echo time, ZTE)技术获取 MR 衰减图像,PET 以三维模式采集 5 个床位,每个床位采集 3 min。MR 与 PET 扫描同时进行,序列包括高分辨率轴位肝脏快速容积采集(liver acquisition with volume acceleration, LAVA)-Flex 序列、T₂ 加权成像(weighted imaging, WI)和冠状位 T₂ 加权快速恢复快速自旋回波(fast recovery fast spin echo, FRFSE)序列。盆腔局部 PET/MR 的 MR 序列包括轴位、冠状位和矢状位 T₂WI、弥散 WI(diffusion WI, DWI);b 值:0、1 000、1 400 s/mm²,PET 每个床位采集 10 min。PET 数据均使用飞行时间(time of flight, TOF)信息,采用有序子集最大期望值迭代法重建(2 次迭代和 28 个子集)。

3. 图像分析。由经验丰富的核医学医师在 AW 工作站(美国 GE Healthcare)勾画 ROI,测量前列腺癌病灶或前列腺区(无局限性摄取增高)SUV_{max},高于截断值认为 PET 阳性。前列腺 MR 图像使用前列腺癌智能分析系统(上海联影智能医疗科技有限公司)进行分析,腺体和癌灶采用深度学习分割,获得 T₂WI、DWI、mpMRI 的 PI-RADS 评分、前列腺三径线体积、前列腺分割体积、病灶最大径、病灶体积、三径线占比、体积占比,评分≥4 分为前列腺癌,其余为非前列腺癌。当有多个病灶时,选取最明显的病灶进行分析。PET 和 MR 联合诊断模型中,PET 或 MR 任 1 个阳性即认为是阳性。

4. 统计学处理。数据处理采用 IBM SPSS 22.0 及 MedCalc 20.0 软件。符合正态分布的定量资料用 $\bar{x} \pm s$ 表示,不符合正态分布者用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,定

性资料用频数(百分数)表示。定量资料的组间比较采用两独立样本 *t* 检验或 Mann-Whitney *U* 检验,定性资料的比较采用 χ^2 检验。以病理结果为“金标准”,利用 ROC 曲线确定最佳截断值,分析诊断效能。采用 Spearman 秩相关分析评估 AI 获得的前列腺及病灶大小参数与 SUV_{max}、前列腺特异抗原(prostate specific antigen, PSA)水平、病理参数的相关性。*P*<0.05 为差异或相关性有统计学意义。

结 果

1.患者基本情况(表 1)。103 例患者中,82 例为前列腺癌(占 79.61%),21 例为非前列腺癌(良性前列腺增生 14 例,前列腺增生伴炎性反应 5 例,前列腺炎 2 例)。53 例有精囊腺侵犯(14 例经术后病理证实),52 例有盆腔淋巴结转移,35 例有骨转移。

82 例前列腺癌患者的病理类型分别为腺泡腺癌 75 例、导管腺癌 1 例、腺泡腺癌合并导管内癌 6 例;前列腺癌 Gleason 评分 6~10 分分别有 6、17、16、40 和

3 例;国际泌尿病理学会(International Society of Urological Pathology, ISUP)分级 1~5 级分别有 6、8、8、15 和 45 例;MRI AI PI-RADS 评分 ≤ 3 分或无、4、5 分者分别有 11、3 和 68 例。

2.不同参数对前列腺癌的诊断效能。依据 ROC 曲线分析 PSA 水平、⁶⁸Ga-PSMA PET SUV_{max} 对前列腺癌的诊断效能,最佳截断值见表 2。PSA 水平、MR、⁶⁸Ga-PSMA PET、PET/MR 联合模型对前列腺癌的诊断效能参数见表 2。典型病例图像见图 1。

根据 SUV_{max} 截断值 7.50 进行诊断,PET 阳性 59 例(均为前列腺癌),阴性 44 例(前列腺癌 23 例,非前列腺癌 21 例)。

在 82 例前列腺癌患者中,依据 SUV_{max} 截断值(7.50)进行诊断,59 例 PET 阳性(54 例 mpMRI 阳性,5 例假阴性),23 例 PET 阴性(17 例 mpMRI 阳性,6 例假阴性);依据 mpMRI(PI-RADS 评分 ≥ 4 分)进行诊断,71 例 mpMRI 阳性(54 例 PET 阳性,17 例假阴性),11 例 mpMRI 假阴性(5 例 PET 阳性,6 例假

表 1 前列腺良恶性疾病患者基本特征及比较 [$\bar{x} \pm s$ 或 $M(Q_1, Q_3)$]

组别	例数	年龄(岁)	PSA 水平($\mu\text{g/L}$)					MR 阳性(PI-RADS 评分 ≥ 4 分)	SUV _{max}	
			<4	≥ 4 且 <10	≥ 10 且 <20	≥ 20 且 <30	≥ 30 且 <40			≥ 40
前列腺癌	82	66.8 \pm 8.3	4	9	9	8	6	46	71	12.25(7.20,25.90)
非前列腺癌	21	64.5 \pm 6.1	2	6	9	2	2	0	8	4.60(3.68,5.33)
合计	103	66.3 \pm 8.0	6	15	18	10	8	46	79	9.10(4.60,22.25)
检验值		1.21 ^a			25.78 ^b				21.78 ^b	-4.96 ^c
<i>P</i> 值		0.231			<0.001				<0.001	<0.001

注:^a为 *t* 值,^b为 χ^2 值,^c为 *z* 值;PI-RADS 为前列腺影像报告和数据系统,PSA 为前列腺特异抗原

表 2 不同参数对前列腺癌的诊断效能

参数	例数	截断值	灵敏度	特异性	准确性
tPSA($\mu\text{g/L}$) ^a	81	21.00	61.67%(37/60)	90.48%(19/21)	69.14%(56/81)
fPSA($\mu\text{g/L}$) ^b	88	2.45	69.12%(47/68)	75.00%(15/20)	70.45%(62/88)
fPSA/tPSA ^c	80	0.18	74.58%(44/59)	52.38%(11/21)	68.75%(55/80)
T ₂ WI	103	-	87.80%(72/82)	61.90%(13/21)	82.52%(85/103)
DWI+ADC	103	-	86.59%(71/82)	61.90%(13/21)	81.55%(84/103)
mpMRI	103	-	86.59%(71/82)	61.90%(13/21)	81.55%(84/103)
PET SUV _{max}	103	7.50	70.73%(58/82)	100%(21/21)	76.70%(79/103)
PET、mpMRI 联合诊断模型	103	-	92.68%(76/82)	61.90%(13/21)	86.41%(89/103)

参数	例数	阳性预测值	阴性预测值	AUC(95% CI)	<i>z</i> 值	<i>P</i> 值
tPSA($\mu\text{g/L}$) ^a	81	94.87%(37/39)	45.24%(19/42)	0.760(0.655~0.850)	5.06	<0.001
fPSA($\mu\text{g/L}$) ^b	88	90.38%(47/52)	41.67%(15/36)	0.680(0.572~0.775)	2.72	0.007
fPSA/tPSA ^c	80	81.48%(44/54)	42.31%(11/26)	0.626(0.511~0.732)	1.65	0.096
T ₂ WI	103	90.00%(72/80)	56.52%(13/23)	0.749(0.653~0.829)	-	-
DWI+ADC	103	89.87%(71/79)	54.17%(13/24)	0.742(0.647~0.824)	-	-
mpMRI	103	89.87%(71/79)	54.17%(13/24)	0.742(0.647~0.824)	-	-
PET SUV _{max}	103	100%(58/58)	46.67%(21/45)	0.860(0.777~0.920)	9.70	<0.001
PET、mpMRI 联合诊断模型	103	90.48%(76/84)	13/19	0.773(0.680~0.850)	-	-

注:^a22 例患者 PSA>100 $\mu\text{g/L}$,^b15 例游离 PSA(fPSA)>30 $\mu\text{g/L}$,因具体数值不详未纳入分析;^c23 例因缺失确切数据未纳入分析;ADC 为表观弥散系数,DWI 为弥散加权成像,mpMRI 为多参数 MRI,tPSA 为总 PSA,WI 为加权成像;-为分类变量,无截断值及相关检验结果

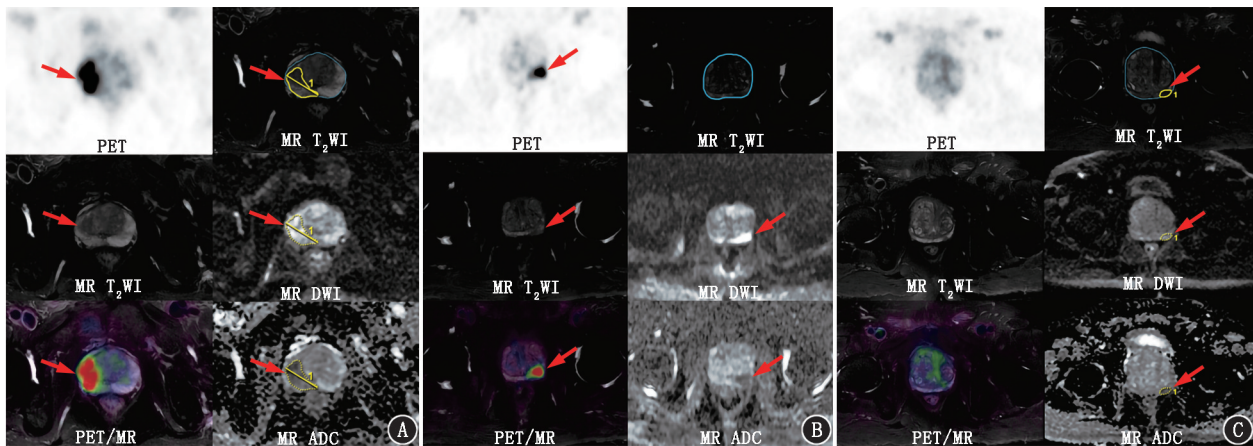


图 1 前列腺癌患者影像学检查图。A.患者 70 岁,前列腺特异抗原(PSA)水平升高[总 PSA (tPSA) 32.00 $\mu\text{g/L}$,游离 PSA (fPSA) 3.89 $\mu\text{g/L}$],穿刺活组织检查(简称活检)病理提示前列腺癌。 ^{68}Ga -前列腺特异膜抗原(PSMA) PET/MR 示右侧外周带约 2.8 cm \times 2.2 cm 短 T₂ 信号结节, ^{68}Ga -PSMA SUV_{max} 23.10(箭头示);多参数 MRI (mpMRI) 人工智能(AI)示右侧中部外周区病灶,最大径 3.34 cm,前列腺影像报告和数据库系统(PI-RADS)评分 5 分[T₂ 加权成像(WI)5 分,弥散加权成像(DWI)5 分;箭头示],术后病理证实前列腺腺泡腺癌(Gleason 评分:4+3=7 分,分级分组:3/5 组);B.患者 85 岁,尿急尿频、排尿困难加重 2 个月余,临床诊断前列腺增生,tPSA 7.73 $\mu\text{g/L}$,fPSA 1.41 $\mu\text{g/L}$ 。 ^{68}Ga -PSMA PET/MR 示左侧外周带后部 T₂ 信号减低伴弥散受限,大小约 1.3 cm \times 0.6 cm, ^{68}Ga -PSMA SUV_{max} 9.70(箭头示);mpMRI AI 分析未提示异常病灶;活检病理提示前列腺左侧外周带腺泡腺癌(Gleason 评分:4+4=8 分;分级分组:4/5 组);C.患者 73 岁,体检发现 PSA 升高 2 年余,伴尿频尿痛,排尿困难,tPSA 9.68 $\mu\text{g/L}$,fPSA 2.31 $\mu\text{g/L}$ 。 ^{68}Ga -PSMA PET/MR 示前列腺增生伴多发增生结节,前列腺区 ^{68}Ga -PSMA 弥散浓聚,SUV_{max} 4.50(<7.50),mpMRI AI 分析提示左侧中部外周区病灶,最大径 1.57 cm,PI-RADS 评分 4 分(T₂WI 4 分,DWI 4 分;箭头示),活检病理示腺泡腺癌(Gleason 评分:3+4=7 分,分级分组:2/5 组)。ADC 为表观弥散系数

阴性)。

在 44 例 PET 阴性的患者中,23 例为前列腺癌(17 例 mpMRI 阳性,6 例假阴性),21 例为非前列腺癌(8 例 mpMRI 假阳性,13 例阴性)。因此,加入 mpMRI AI 分析后,30 例获得准确诊断,改善了 PET 阴性患者的诊断,但需注意假阳性。

3. 定量参数的组间比较及相关性分析。前列腺癌组前列腺三径线体积及前列腺分割体积分别为 52.20(39.18, 67.58) 和 50.80(38.48, 64.20) cm³,均小于非前列腺癌组[80.20(56.00, 91.50) 和 76.50(51.70, 83.25) cm³;z 值:3.11 和 3.12, P 值:0.002 和 0.002]。

在 MR AI 系统正确识别的 71 例前列腺癌患者中,PSA 水平与 SUV_{max}、前列腺分割体积、病灶最大径、病灶体积、三径线占比、体积占比均呈弱相关(r_s 值:0.238~0.291, P 值:0.014~0.046);SUV_{max} 与分级分组呈弱相关($r_s = 0.250, P = 0.036$);余各参数间相关性均无统计学意义(r_s 值:-0.106~0.165, 均 $P > 0.05$)。

另外,发生精囊腺侵犯、盆腔淋巴结转移及骨转移组的患者的病灶最大径、病灶体积、三径线占比、体积占比均高于未发生组,除有无淋巴结转移组的病灶最大径外,余组间差异均具有统计学意义(z 值:-4.16~4.09, 均 $P < 0.05$;表 3)。

讨 论

本研究应用 MR 前列腺癌智能分析系统联合 PET 参数对 ^{68}Ga -PSMA PET/MR 图像进行分析,明确了各模态图像及 PET 和 mpMRI 联合对前列腺癌的诊断效能。PET 单模态的特异性、阳性预测值和 AUC 均优于其他模态,展现出最佳诊断效能;当加入 mpMRI AI 分析结果后,可改善诊断灵敏度和准确性,提高对 PET 阴性患者的诊断信心。

PSMA PET/MR 已成为前列腺癌的重要成像技术,对于缺乏经验的初级医师来说,如何区分 PSMA 的正常和异常摄取及解读 mpMRI 图像存在一定困难,且不同医师间的图像解读也存在差异。AI 技术包括传统的机器学习和深度学习算法,为图像解读提供了有效方案^[12],可自动识别和标记出图像中的病灶区域,提供快速且较准确的诊断结果。同时,精准医疗需要精确的定量数据,常规的 MR 报告靠人工分割肿瘤和测量病灶大小,耗时且难以提供准确的体积信息。本研究从选择数据到自动生成 MR 报告,每例患者所需时间不到 1 min,明显提高工作效率,实现大量图像数据的快速处理,还可减少读片者之间的分歧,定量数据还有助于精准指导活检和制定治疗方案,避免无效穿刺给患者带来的负担。本

表 3 不同征象组间人工智能 (AI) 获得的 71 例前列腺癌患者前列腺病灶大小参数的比较 [$M(Q_1, Q_3)$]

征象	有无	例数	病灶最大径 (cm)	病灶体积 (cm^3)	三径线占比 (%)	体积占比 (%)
精囊腺侵犯	有	46	4.58(3.75, 5.11)	38.27(17.85, 60.80)	79.08(33.86, 104.06)	78.37(34.04, 117.84)
	无	25	3.60(3.09, 4.56)	13.82(6.79, 26.72)	24.12(12.39, 51.32)	24.49(12.59, 54.41)
淋巴结转移	有	49	4.46(3.71, 5.09)	35.23(17.49, 58.68)	73.88(33.91, 103.39)	76.83(34.30, 115.20)
	无	22	3.68(2.83, 4.85)	12.10(3.82, 25.35)	22.75(9.80, 51.12)	21.60(10.33, 46.99)
骨转移	有	31	4.70(4.15, 5.10)	42.02(22.18, 60.10)	83.10(51.92, 116.57)	87.18(55.94, 119.52)
	无	40	3.72(2.86, 4.71)	15.77(5.55, 27.97)	24.42(13.24, 58.14)	25.58(13.65, 58.75)
$z1/z2/z3$ 值			2.44, 1.94, 3.15	-2.93, -3.07, -3.86	3.37, 3.72, 4.09	-3.43, -3.79, -4.16
$P1/P2/P3$ 值			0.015, 0.052, 0.002	0.003, 0.002, <0.001	均 $P<0.001$	均 $P<0.001$

注: $z1/z2/z3$ 、 $P1/P2/P3$ 值分别对应有无精囊腺侵犯、有无淋巴结转移、有无远处转移组间的统计学比较

组患者应用 mpMRI AI 分析系统获得的前列腺癌诊断的 AUC 为 0.740, 略低于文献报道的 659 例患者测试集的 0.871 和 80 例患者验证集的 0.797^[9], 可能与本研究使用的设备为 PET/MR、患者选择偏倚及样本量有限有关。本研究还表明, 前列腺癌组前列腺的体积明显小于非前列腺癌组, 主要是由于非前列腺癌组以前列腺增生为主, 其体积明显增大; 发生精囊腺侵犯、淋巴结转移及远处转移组 MR AI 系统获得的定量参数均高于未发生组, 提示前列腺 MR 定量参数较高的患者, 有必要进一步行⁶⁸Ga-PSMA PET 扫描明确有无淋巴结及骨转移。

PSMA PET 显像在前列腺癌诊疗中的应用越来越多。本研究显示, PSMA PET 对前列腺癌具有高特异性和阳性预测值(均为 100%), 但仍存在较多的假阴性。82 例前列腺癌患者中, 23 例(28.05%) SUV_{\max} 低于截断值, 其中 17 例 mpMRI AI 分析结果为阳性; 而在 21 例非前列腺癌患者中, 8 例(38.10%) mpMRI AI 分析结果为假阳性, 二者联合将前列腺癌诊断灵敏度和准确性分别提升至 92.68%(76/82) 和 86.41%(89/103)。上述提示, 应充分利用 PET 和 MR 的互补信息对前列腺癌进行精准诊断。孟小丽等^[13]也报道了 PSMA PET 和 MR 互补可提高对前列腺癌的检测能力。

当前 PSMA PET 图像的 AI 分析也得到广泛关注, PSMA PET/CT AI 已应用到前列腺癌原发肿瘤、局部复发和转移灶的检测、病灶分类、肿瘤量化和预测预后等多个方面^[12]。但目前仅有基于机器学习的自动前列腺癌分子成像标准化评估 (automated Prostate Cancer Molecular Imaging Standardized Evaluation, aPROMISE) 1 种产品通过了美国食品与药品监督管理局认证, 批准用于 PSMA PET/CT 自动图像分析, 给出定量分析结果和标准化报告。本研究仅分析了手动勾画测量的前列腺病灶 SUV_{\max} , 下一步将进行 AI 分析和深入研究。

本研究仍存在一些局限性: 单中心回顾性研究, 患者选择可能存在一定偏倚; 纳入患者数量相对较少; 部分患者 PSA 结果没有确切数值; 尚未对 PET 数据进行 AI 分析。以上拟在后期进一步完善。

综上, ⁶⁸Ga-PSMA PET 对前列腺癌具有很好的特异性, mpMRI AI 分析省时、且提高了 PET 阴性患者的诊断灵敏度和准确性, 联合应用为⁶⁸Ga-PSMA PET/MR 图像分析提供了有价值的工具。未来值得进一步研发⁶⁸Ga-PSMA 一体化 PET/MR 的 AI 分析软件。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 覃春霞: 研究实施、数据采集、论文撰写; 吕玉虎: 数据采集、统计学分析; 代志博、魏思齐、阮伟伟、盖永康: 数据采集; 兰晓莉: 研究指导、论文修改、经费支持

志谢 上海联影智能医疗科技有限公司对本研究提供软件支持、指导和建

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. DOI:10.3322/caac.21834.
- [2] 邓嘉, 杨健, 陈跃. 从欧洲前列腺癌诊疗指南看核医学在其中的作用[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2023, 43(9): 549-553. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20220426-00128.
Deng J, Yang J, Chen Y. Role of nuclear medicine in the European guidelines for prostate cancer[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2023, 43(9): 549-553. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20220426-00128.
- [3] 刘炜, 刘畅, 许晓平, 等. ⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT 在初诊前列腺癌患者中的应用价值[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2023, 43(2): 97-101. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20210804-00264.
Liu W, Liu C, Xu XP, et al. Application value of ⁶⁸Ga-PSMA-11 PET/CT in newly diagnosed prostatic cancer patients[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2023, 43(2): 97-101. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20210804-00264.
- [4] 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. DOI:10.1016/S0140-6736(20)30314-7.

- [5] Cytawa W, Kircher S, Kübler H, et al. Diverse PSMA expression in primary prostate cancer: reason for negative [^{68}Ga] Ga-PSMA PET/CT scans? Immunohistochemical validation in 40 surgical specimens[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2022, 49(11): 3938-3949. DOI:10.1007/s00259-022-05831-8.
- [6] Weinreb JC, Barentsz JO, Choyke PL, et al. PI-RADS prostate imaging-reporting and data system; 2015, version 2[J]. Eur Urol, 2016, 69(1): 16-40. DOI:10.1016/j.eururo.2015.08.052.
- [7] Kasisvisvanathan V, Rannikko AS, Borghi M, et al. MRI-targeted or standard biopsy for prostate-cancer diagnosis[J]. N Engl J Med, 2018, 378(19): 1767-1777. DOI:10.1056/NEJMoa1801993.
- [8] Yang H, Wu G, Shen D, et al. Automatic prostate cancer detection on multi-parametric MRI with hierarchical weakly supervised learning[C]//2021 IEEE 18th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), Nice, France, 2021: 316-319. DOI:10.1109/ISBI48211.2021.9434108.
- [9] Li D, Han X, Gao J, et al. Deep learning in prostate cancer diagnosis using multiparametric magnetic resonance imaging with whole-mount histopathology referenced delineations[J]. Front Med (Lausanne), 2021, 8: 810995. DOI:10.3389/fmed.2021.810995.
- [10] Margel D, Bernstine H, Groshar D, et al. Diagnostic performance of ^{68}Ga prostate-specific membrane antigen PET/MRI compared with multiparametric MRI for detecting clinically significant prostate cancer[J]. Radiology, 2021, 301(2): 379-386. DOI:10.1148/radiol.2021204093.
- [11] Nanabala R, Anees MK, Sasikumar A, et al. Preparation of [^{68}Ga] PSMA-11 for PET-CT imaging using a manual synthesis module and organic matrix based $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ generator[J]. Nucl Med Biol, 2016, 43(8): 463-469. DOI:10.1016/j.nucmedbio.2016.05.006.
- [12] Lindgren Belal S, Frantz S, Minarik D, et al. Applications of artificial intelligence in PSMA PET/CT for prostate cancer imaging[J]. Semin Nucl Med, 2024, 54(1): 141-149. DOI:10.1053/j.semnuclmed.2023.06.001.
- [13] 孟小丽, 康飞, 全志永, 等. 多参数 MRI 联合 ^{68}Ga -PSMA PET/CT 诊断临床显著性前列腺癌[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2024, 44(1): 25-29. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230126-00015.
- Meng XL, Kang F, Quan ZY, et al. Multi-parametric MRI combined with ^{68}Ga -PSMA PET/CT for the diagnosis of clinically significant prostate cancer[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 44(1): 25-29. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230126-00015.

(收稿日期:2024-06-28)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

2024 年本刊可直接用缩写的常用词汇

ATP(adenosine-triphosphate), 三磷酸腺苷

AUC(area under curve), 曲线下面积

CI(confidence interval), 可信区间

CT(computed tomography), 计算机断层摄影术

CV(coefficient of variation), 变异系数

DNA(deoxyribonucleic acid), 脱氧核糖核酸

FDG(fluorodeoxyglucose), 脱氧葡萄糖

HAV(hepatitis A virus), 甲型肝炎病毒

Hb(hemoglobin), 血红蛋白

HBsAg(hepatitis B surface antigen), 乙型肝炎表面抗原

HBV(hepatitis B virus), 乙型肝炎病毒

HCV(hepatitis C virus), 丙型肝炎病毒

MRI(magnetic resonance imaging), 磁共振成像

PBS(phosphate buffered solution), 磷酸盐缓冲液

PCR(polymerase chain reaction), 聚合酶链反应

PET(positron emission tomography), 正电子发射断层摄影术

PLT(platelet count), 血小板计数

RBC(red blood cells), 红细胞

RNA(ribonucleic acid), 核糖核酸

ROC(receiver operating characteristic), 受试者工作特征

ROI(region of interest), 感兴趣区

SPECT(single photon emission computed tomography), 单光子发射计算机断层摄影术

SUV(standardized uptake value), 标准摄取值

SUV_{max}(maximum standardized uptake value), 最大标准摄取值SUV_{mean}(mean standardized uptake value), 平均标准摄取值

WBC(white blood cells), 白细胞

WHO(World Health Organization), 世界卫生组织

本刊编辑部