

· PET/MR 临床应用 ·

^{18}F -PSMA-1007 PET/MR 与扩散峰度成像在前列腺癌及前列腺增生诊断中的价值

张宇 黄新韵 傅璠 林晓珠 王瑾 李彪 张森 孟宏平

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: 孟宏平, Email: mhp40756@rjh.com.cn

【摘要】 目的 探讨 PET/MR 检查中运用扩散峰度成像(DKI)与 ^{18}F -前列腺特异膜抗原(PSMA)-1007 在鉴别诊断前列腺癌(PCa)和良性前列腺增生(BPH)中的价值。**方法** 回顾性分析 2019 年 6 月至 2022 年 12 月于上海交通大学医学院附属瑞金医院行 ^{18}F -PSMA-1007 PET/MR 全身检查,并且 1 个月内前列腺特异抗原(PSA)水平连续升高至 $>4\text{ }\mu\text{g/L}$ 且还未接受治疗的前列腺疾病患者共 134 例[年龄 (65.5 ± 10.0) 岁],并将患者分为 $\text{PSA}<10\text{ }\mu\text{g/L}$ 组和 $\text{PSA}\geq 10\text{ }\mu\text{g/L}$ 组。PET/MR 检查包含高 b 值弥散成像并由专业影像科医师选取前列腺弥散加权成像(DWI)高信号、表观弥散系数(ADC)低信号区勾画 ROI 获得 $\text{SUV}_{\max}$ 、平均峰度系数(MK)和平均弥散率(MD)。采用 Spearman 秩相关分析相关性,采用 ROC 曲线分析诊断效能。**结果** 134 例患者中, $\text{PSA}<10\text{ }\mu\text{g/L}$ 有 72 例, $\text{PSA}\geq 10\text{ }\mu\text{g/L}$ 有 62 例;有 68 例患者获得穿刺结果,其中 BPH 37 例,PCa 31 例。在 $\text{PSA}<10\text{ }\mu\text{g/L}$ 组中,MK 和 $\text{SUV}_{\max}$ 、MK 和 PSA 均无相关性(r_s 值:0.22、0.06, P 值:0.065、0.603);在 $\text{PSA}\geq 10\text{ }\mu\text{g/L}$ 组中,MK 和 $\text{SUV}_{\max}$ 、MK 和 PSA 均呈正相关(r_s 值:0.52、0.40, P 值:0.008、0.005)。在 $\text{PSA}<10\text{ }\mu\text{g/L}$ 组中, $\text{SUV}_{\max}$ 、MK、MD 无诊断价值(AUCs:0.44~0.67,均 $P>0.05$),三者联合诊断的 AUC 为 0.78($P=0.008$);在 $\text{PSA}\geq 10\text{ }\mu\text{g/L}$ 组中, $\text{SUV}_{\max}$ 、MK 和 MD 的 AUC 分别为 0.81($P=0.001$)、0.84($P<0.001$)和 0.72($P=0.023$),三者联合诊断的 AUC 为 0.91($P<0.001$)。**结论** 在 PET/MR 检查中,MK、MD 联合 $\text{SUV}_{\max}$ 提高了 PCa 诊断效能。

【关键词】 前列腺肿瘤;前列腺增生;前列腺特异膜抗原;氟放射性同位素;正电子发射断层显像术;磁共振成像;PSMA-1007

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20241017-00352

Value of ^{18}F -PSMA-1007 PET/MR and diffusion kurtosis imaging in the diagnosis of prostate cancer and prostatic hyperplasia

Zhang Yu, Huang Xinyun, Fu Fan, Lin Xiaozhu, Wang Jin, Li Biao, Zhang Miao, Meng Hongping
Department of Nuclear Medicine, Ruijin Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China

Corresponding author: Meng Hongping, Email: mhp40756@rjh.com.cn

【Abstract】 Objective To investigate the value of diffusion kurtosis imaging (DKI) and ^{18}F -prostate specific membrane antigen (PSMA)-1007 in the differential diagnosis of prostate cancer (PCa) and benign prostatic hyperplasia (BPH) by using PET/MR imaging. **Methods** From June 2019 to December 2022, a retrospective analysis was conducted on 134 patients ((65.5 ± 10.0) years) with prostate diseases who underwent ^{18}F -PSMA-1007 PET/MR whole-body examination at Ruijin Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, with the prostate specific antigen (PSA) level continuously rising to $>4\text{ }\mu\text{g/L}$ within 1 month and not yet receiving treatment. Patients were divided into 2 groups ($\text{PSA}<10\text{ }\mu\text{g/L}$ and $\text{PSA}\geq 10\text{ }\mu\text{g/L}$). The PET/MR examination included high b -value diffusion imaging, and the ROI was delineated based on the prostate diffusion weighted imaging (DWI) high-signal area and apparent diffusion coefficient (ADC) low-signal area by the professional radiology physician. The $\text{SUV}_{\max}$, mean kurtosis (MK), and mean diffusivity (MD) were obtained. Spearman rank correlation analysis was performed, and ROC curve was used to analyze the diagnostic efficacy. **Results** Of 134 patients, 72 were with $\text{PSA}<10\text{ }\mu\text{g/L}$ and 62 were with $\text{PSA}\geq 10\text{ }\mu\text{g/L}$. There were 68 patients who obtained biopsy results, including 37 cases of BPH and 31 cases of PCa. In $\text{PSA}<10\text{ }\mu\text{g/L}$ group, there were no significant correlations between MK and $\text{SUV}_{\max}$, MK and PSA (r_s values: 0.22, 0.06, P values: 0.065, 0.603). In the $\text{PSA}\geq 10\text{ }\mu\text{g/L}$ group, there were positive correlations between MK and $\text{SUV}_{\max}$, MK and PSA (r_s values: 0.52, 0.40, P values: 0.008, 0.005). In the $\text{PSA}<10\text{ }\mu\text{g/L}$ group, $\text{SUV}_{\max}$, MK, and MD showed no diagnostic value (AUCs: 0.44–0.67, all $P>0.05$), while the AUC for combined diagnosis using these three parameters was 0.78($P=0.008$). In the $\text{PSA}\geq 10\text{ }\mu\text{g/L}$ group, the AUCs of $\text{SUV}_{\max}$, MK, and MD were 0.81($P=0.001$), 0.84($P<0.001$) and 0.72($P=0.023$) respectively, and the AUC for combined diagnosis using these three parameters was 0.91($P<0.001$).

ters was 0.91 ($P < 0.001$). **Conclusion** The combination of MK, MD and SUV_{max} improves the diagnostic efficacy of PCa in PET/MR examination.

【Key words】 Prostatic neoplasms; Prostatic hyperplasia; Prostate-specific membrane antigen; Fluorine radioisotopes; Positron-emission tomography; Magnetic resonance imaging; PSMA-1007

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20241017-00352

目前,前列腺癌在全球男性恶性肿瘤发病率中居第二位,居男性癌症死因的第五位^[1]。临床通常选用血清前列腺特异抗原(prostate specific antigen, PSA)检测来鉴别前列腺癌和良性前列腺增生(benign prostatic hyperplasia, BPH),但血清 PSA 的升高有时源于炎症反应的侵袭性(炎症反应引起的上皮破坏),从而产生假阳性^[2]。MRI 是一种无创的影像学检查方法,被广泛应用于前列腺临床实践中,其中扩散峰度成像(diffusion kurtosis imaging, DKI)已成为国内外研究的热点^[3]。¹⁸F-前列腺特异膜抗原(prostate specific membrane antigen, PSMA)-1007 是一种新型放射性药物,可经加速器大量产生;和⁶⁸Ga-PSMA-11 相比,其通过肝胆途径代谢可减少膀胱的放射性干扰,且¹⁸F 半衰期(110 min)较⁶⁸Ga(68 min)也更长,因而更便于临床应用^[4]。本研究探讨 PET/MR 检查中运用 DKI 技术与¹⁸F-PSMA-1007 能否提高对前列腺癌的诊断价值,为筛选前列腺癌和 BPH 提供新的方向。

资料与方法

1. 研究对象与分组。本研究为单中心回顾性研究,经上海交通大学医学院附属瑞金医院伦理委员会批准[编号:(2016)临伦审第(128)号]。收集 2019 年 6 月至 2022 年 12 月间于本院行¹⁸F-PSMA-1007 PET/MR 全身检查的前列腺疾病患者。纳入标准:(1) 1 个月内 PSA 水平连续升高至 $>4 \mu\text{g/L}$ 且未接受治疗;(2) PET/MR 检查包含 DKI 高 b 值弥散成像。排除标准:患者耐受较差, PET/MR 检查失败。最终纳入患者 134 例,年龄 (65.5 ± 10.0) 岁,将患者分为 $\text{PSA} < 10 \mu\text{g/L}$ 组和 $\text{PSA} \geq 10 \mu\text{g/L}$ 组。入组患者均签署知情同意书。

2. PET/MR 检查。所有患者接受全身¹⁸F-PSMA-1007 PET/MR 成像(Biograph mMR, 德国 Siemens 公司),采用体相控阵接收线圈(18 通道设计,18 个集成前置放大器;3 排,每排 6 个元件)和体表集成 32 通道脊柱阵列接收线圈,头颈联合集成 16 通道线圈。获得以下序列:轴向弥散加权 DKI 序列,采集时间 6 min 35 s,重复时间(repetition time, TR)4 030 ms,回波时间(echo time, TE)68 ms, 93 ms,层厚 3.5 mm,采集矩阵 118×118 ,采集视野 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,二

维采集,像素大小 $1.67 \text{ mm} \times 1.69 \text{ mm} \times 3.50 \text{ mm}$, b 值为 0、1 000、1 500、2 000 s/mm^2 ,重复次数 2 次,弥散方式为 3 次扫描示踪; T_2 -可变反转角快速自旋回波(sampling perfection with application optimized contrasts using different flip angle evolutions, SPACE)轴向采集,采集时间 7 min 37 s, TR = 1 700 ms, TE = 104 ms,层厚 1.00 mm,采集矩阵 291×320 ,采集视野 $230 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$,三维采集,像素大小 $0.72 \text{ mm} \times 0.72 \text{ mm} \times 1.00 \text{ mm}$,重复次数 1.4 次。

检查前患者无需空腹,根据患者体质量静脉注射¹⁸F-PSMA-1007 2~4 MBq/kg(¹⁸F-PSMA 由上海原子科兴药业有限公司提供,放化纯 $>95\%$)。注射后 1 h 行 PET 局部采集 15 min,采集模式为高清 PET,迭代 2 次,21 个子集,矩阵 172×172 ,采用高斯滤波进行后处理重建。

3. 图像分析。(1) MR 图像分析。DKI 数据来自于第三方免费软件(FireVoxel, build 429, <https://firevoxel.org>),由 1 位从事 10 年以上临床工作且具有放射专业资质的核医学医师选取前列腺弥散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)高信号,表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)低信号区勾画 ROI,获得平均峰度系数(mean kurtosis, MK);采用多个 b 值且方向相同的梯度方向上的平均值和平均弥散率(mean diffusivity, MD)。

(2) PET 图像分析。由 1 位从事 10 年以上核医学经验的医师对重建 PET 图像进行定量评估并选取 ROI 范围,测定 SUV_{max} 。

4. 统计学处理。采用 SPSSAU 软件(北京青丝科技有限公司)分析数据,符合正态分布的定量资料用 $\bar{x} \pm s$ 表示,不符合正态分布的定量资料用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,2 组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。采用 Spearman 秩相关分析不同参数间的相关性。以穿刺结果为“金标准”,采用 ROC 曲线分析 MK、MD、 SUV_{max} 的诊断效能。 $P < 0.05$ 为差异或相关性有统计学意义。

结 果

1. 一般资料。134 例患者参考 PET/MR 融合图像获得 PET 和 DWI 异常区域并勾画 ROI 范围(图 1)。134 例患者分为 $\text{PSA} < 10 \mu\text{g/L}$ 组($n = 72$)和 $\text{PSA} \geq$

10 $\mu\text{g/L}$ 组($n=62$), 2 组年龄、 SUV_{max} 、MK 及 MD 差异均具有统计学意义(Z 值: $-5.29 \sim -2.11$, 均 $P < 0.05$; 表 1)。

134 例患者中, 有 68 例获得穿刺结果, 其中 BPH 37 例、前列腺癌 31 例。在 $\text{PSA} < 10 \mu\text{g/L}$ 组中, BPH 和前列腺癌患者的 SUV_{max} 、MK、MD 差异均无统计学意义(Z 值: $-1.58 \sim -0.53$, 均 $P > 0.05$); 在

$\text{PSA} \geq 10 \mu\text{g/L}$ 组中, 两者的 SUV_{max} 、MK、MD 差异均有统计学意义(Z 值: $-3.50 \sim -2.27$, 均 $P < 0.05$; 表 2)。

2. 相关性分析结果。在 $\text{PSA} < 10 \mu\text{g/L}$ 组中, MK 和 SUV_{max} 的相关性无统计学意义($r_s = 0.22, P = 0.065$), MK 和 PSA 水平的相关性亦无统计学意义($r_s = 0.06, P = 0.603$)。在 $\text{PSA} \geq 10 \mu\text{g/L}$ 组中, MK 和 SUV_{max} 、

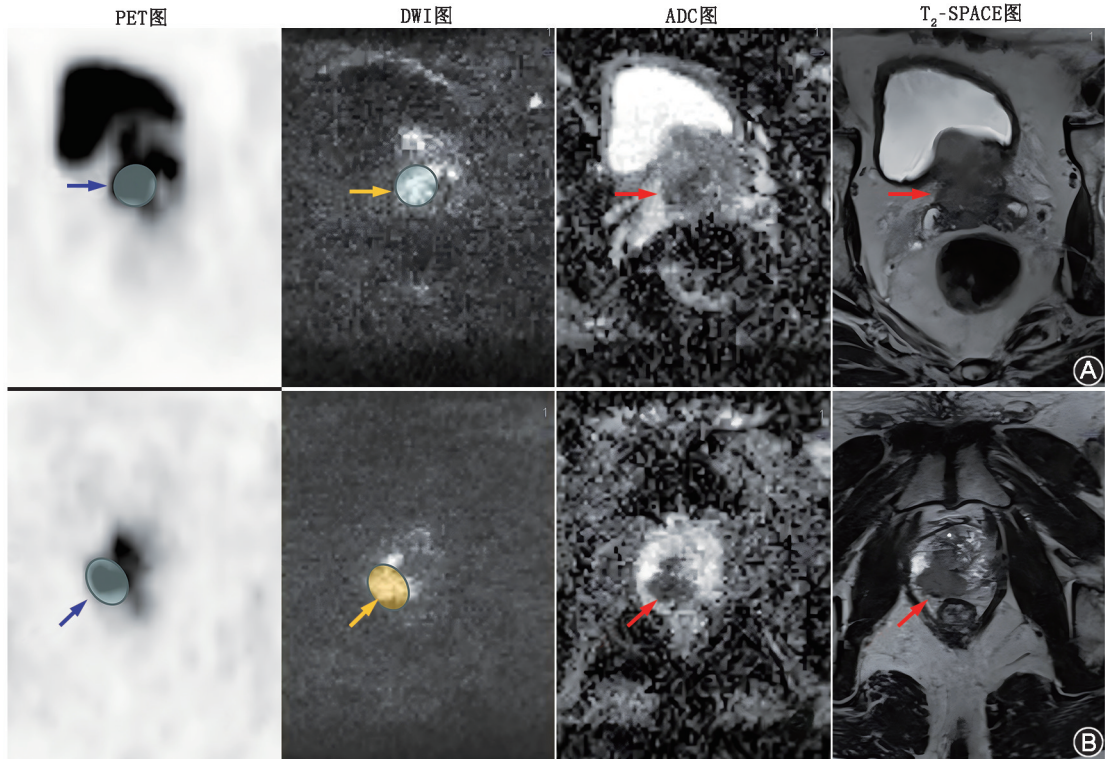


图 1 前列腺癌患者 ^{18}F -前列腺特异膜抗原(PSMA)-1007 PET/MR 成像图。A. 患者 76 岁, 前列腺特异抗原(PSA)为 $6.47 \mu\text{g/L}$, 自诉腹胀不适; B. 患者 59 岁, PSA 为 $9.52 \mu\text{g/L}$, 外院 ^{18}F -FDG PET/CT 显像示双肺散在实性小结节疑似转移灶, 前列腺内局限性 FDG 异常高代谢灶, CT 平扫未见明确异常。该 2 例患者最终病理结果均为前列腺腺泡腺癌。圆圈表示由 PET 图像和弥散加权成像(DWI)图像通过 PET/MR 一体的融合参考来准确勾画的 ROI, 箭头示肿瘤 PSMA 高代谢灶和在 MR 上相同部位的信号异常区域。ADC 为表观弥散系数, SPACE 为可变反转角快速自旋回波

表 1 不同组别前列腺病变患者临床资料比较[$M(Q_1, Q_3)$]

组别	例数	年龄(岁)	SUV_{max}	MK	$\text{MD}(\times 10^{-3})$
$\text{PSA} < 10 \mu\text{g/L}$	72	63.0(58.0, 69.8)	5.8(2.6, 8.7)	1.0(0.9, 1.2)	3.5(2.9, 4.1)
$\text{PSA} \geq 10 \mu\text{g/L}$	62	67.0(59.0, 76.0)	14.6(7.0, 26.1)	1.1(1.0, 1.4)	3.0(2.3, 3.7)
Z 值		-2.11	-5.29	-3.21	-3.24
P 值		0.035	<0.001	0.001	0.001

注: PSA 为前列腺特异抗原, MK 为平均峰度系数, MD 为平均弥散率

表 2 不同组别中前列腺癌(PCa)与良性前列腺增生(BPH)患者临床资料比较[$M(Q_1, Q_3)$]

组别	$\text{PSA} < 10 \mu\text{g/L} (n=32)$				$\text{PSA} \geq 10 \mu\text{g/L} (n=36)$			
	例数	SUV_{max}	MK	$\text{MD}(\times 10^{-3})$	例数	SUV_{max}	MK	$\text{MD}(\times 10^{-3})$
BPH	18	6.4(1.6, 8.9)	1.0(0.9, 1.1)	3.5(3.3, 3.7)	19	9.3(5.8, 14.7)	1.0(0.8, 1.2)	3.2(2.8, 3.9)
PCa	14	8.2(5.6, 20.3)	1.0(0.8, 1.4)	3.9(2.5, 7.3)	17	21.7(14.4, 35.4)	1.5(1.2, 1.7)	2.3(2.0, 3.1)
Z 值		-1.58	-0.76	-0.53		-3.19	-3.50	-2.27
P 值		0.115	0.447	0.595		0.001	0.001	0.023

MK 和 PSA 水平均呈正相关(r_s 值:0.52、0.40, P 值:0.008、0.005)。

3. ROC 曲线分析结果。在 $PSA < 10 \mu\text{g/L}$ 组中, $SUV_{\max}$ 、MK、MD 无诊断价值(界值分别为 12.5、1.1、 2.8×10^{-3} ;AUC 分别为 0.67、0.58、0.44,均 $P > 0.05$);三者联合诊断(当 $SUV_{\max}$ 、MK 均大于其界值且 MD 小于其界值时判断为恶性)的 AUC 为 0.78($P = 0.008$),灵敏度为 10/14,特异性为 17/18,准确性为 84.4%(27/32)。在 $PSA \geq 10 \mu\text{g/L}$ 组中, $SUV_{\max}$ 、MK 和 MD 的界值分别为 11.3、1.0、 2.8×10^{-3} ,AUC 分别为 0.81($P = 0.001$)、0.84($P < 0.001$)和 0.72($P = 0.023$);三者联合诊断的 AUC 为 0.91($P < 0.001$),灵敏度为 16/17,特异性为 5/19,准确性为 86.1%(31/36)。

讨 论

有研究显示,MRI 对前列腺癌的阳性预测值仅为 34%~68%,而 PSMA 与 MRI 的联合检测可降低前列腺癌检出的假阴性率^[5],但该研究仅采用单独的 PET 与 MR 设备,且仅联合常规 MRI 序列成像。有 PET/MR 的报道示,DKI 和 PET 在肺癌中有良好的应用价值^[6],但在 DKI 与 PSMA PET 对前列腺癌的诊断价值鲜有报道。本研究纳入 134 例患者,分析 DKI 与 ^{18}F -PSMA-1007 PET 的联合诊断与相关性情况,发现 PET/MR 中 DKI 的 MK 与 $SUV_{\max}$ 对不同程度风险前列腺癌有较大诊断价值,尤其是在低水平 PSA 患者中,联合诊断可以有效提高诊断效能,从而有可能减少前列腺癌的活组织检查(简称活检)次数。

在既往的研究中, ^{18}F -PSMA-1007 PET 对前列腺恶性肿瘤的诊断具有很高的灵敏度和准确性^[7-8],在复发病例中即使 PSA 水平较低,其检出率也明显较高^[9-10]。 ^{18}F -PSMA-1007 PET 的 $SUV_{\max}$ 与组织病理学分级密切相关^[11]。本研究中,PSA 水平较低时, $SUV_{\max}$ 中位数仅为 5.8,同水平的 MK 中位数为 1.0;在高水平 PSA 组中, $SUV_{\max}$ 则升高至 14.6, MK 的中位数达 1.1,2 组 $SUV_{\max}$ 与 MK 差异均有统计学意义。但其相关性表现则不同,在 $PSA < 10 \mu\text{g/L}$ 组中, $SUV_{\max}$ 和 MK 无相关性,且无诊断价值(AUC 分别为 0.67 和 0.58),但二者联合 MD 后诊断有较大提升,AUC 提高至 0.78。在 $SUV_{\max} < 7$ 的病灶中,会出现大量的假阳性,在局部病变中也与增生等良性病灶很难区分^[12]。而这种假阳性更多会出现在摄取升高不明显的病例中,随着 $SUV_{\max}$ 的线性上升,高摄取病灶依然能很好地提示前列腺癌的可能,

但并不能排除因 BPH、急性前列腺炎和穿刺造成的摄取增高的可能,尤其是在 PSA 水平小于 $10 \mu\text{g/L}$ 时,除参考 $SUV_{\max}$ 外建议参考其他的影像临床信息,以提高准确性。而对于前列腺中危到高危的患者,在癌与增生的良恶性鉴别与预后方面, $SUV_{\max}$ 都能逐渐体现出其价值^[13-14],其灵敏度(0.65~0.92)和特异性(0.84~0.97)均较高^[15],而在本研究 $PSA \geq 10 \mu\text{g/L}$ 组中的 $SUV_{\max}$ 与 MK 呈正相关,且 AUC 均大于 0.7(分别为 0.81 和 0.84),而两者联合 MD 后诊断的 AUC 则提高至 0.91。

一般来说,DWI 可通过单指数模型进行量化(即 ADC),前列腺癌性病变通常表现为较高的水分限制,即 ADC 较低。但传统的单指数 ADC 是基于理想状态下的自由水扩散,且只显示扩散率的汇总统计,因此不能代表体素内肿瘤的异质性^[16]。而在真实的生物组织中,扩散受到多种限制,因此单指数 ADC 可能不足以精确划分肿瘤的微观结构或异质性。为了便于成功捕获非高斯行为,DKI 在 b 值为 1000 s/mm^2 基础上需增加更多更高的 b 值,如果最大 b 值不高,则信号轻度衰减图的曲率偏离,高斯扩散行为将无法被捕获,并且序列测量非高斯扩散行为的能力将大大降低,因此 DKI 更能够评估肿瘤的异质性。高级别前列腺癌因为细胞密度增加会导致细胞内结合水分子数量增加,然而这会被正常细胞外基质的破坏所抵消,使水分子的扩散率不变;但异质性的增加会导致肿瘤的扩散峰值升高,导致 K 值异常。这些相互竞争的过程可能为肿瘤中 DWI 和 DKI 的差异提供了解释,也有望能更准确地反映人体组织微观结构的复杂性^[17]。某些研究发现,当 PSA 的界值为 $18.96 \mu\text{g/L}$ 时,DKI 的特异性为 1,灵敏度为 0.435,表明 DKI 与血清指标联合可提高前列腺癌的诊断准确性,减少不必要的活检^[18]。因此,通过 MK 的分析能更好地区别 BPH 与前列腺癌;而 PSMA 则相对依赖糖蛋白的表达,在 BPH 等良性病变中会有假阳性的表现,在低 PSA 水平可能更需要 MK 和 $SUV_{\max}$ 的联合诊断。

本研究存在一定的局限性。穿刺病例有限;对低发病率人群中前列腺 PSMA 水平的评估与确定,目前文献中也较少有相关支持。本研究的目的之一也是为了补充这一不足,并在之后的研究进一步收集数据,验证其临床价值。

综上所述, ^{18}F -PSMA-1007 PET/MR 作为一站式的前列腺影像学检查方法,其 DKI 联合 PSMA 的新检查方式提高了前列腺癌诊断效能,尤其在 $PSA <$

10 $\mu\text{g/L}$ 的病例中,其单一指标对前列腺癌诊断证据不足,需要联合诊断以提高诊断效能,为低水平 PSA 的假阳性病例提供鉴别诊断的可能。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 张宇:研究实施、论文撰写、统计学分析;黄新韵、傅璠、林晓珠:研究设计与实施;王瑾:技术和材料支持;李彪、张森、孟宏平:论文修改

参 考 文 献

- [1] Zheng Z, Zhou Z, Yan W, et al. Tumor characteristics, treatments, and survival outcomes in prostate cancer patients with a PSA level<4 ng/ml: a population-based study[J]. BMC Cancer, 2020, 20(1): 340. DOI:10.1186/s12885-020-06827-z.
- [2] Schatteman PH, Hoekx L, Wyndaele JJ, et al. Inflammation in prostate biopsies of men without prostatic malignancy or clinical prostatitis: correlation with total serum PSA and PSA density[J]. Eur Urol, 2000, 37(4): 404-412. DOI:10.1159/000020161.
- [3] Malagi AV, Netaji A, Kumar V, et al. IVIM-DKI for differentiation between prostate cancer and benign prostatic hyperplasia: comparison of 1.5 T vs. 3 T MRI[J]. MAGMA, 2022, 35(4): 609-620. DOI:10.1007/s10334-021-00932-1.
- [4] Kuten J, Fahoum I, Savin Z, et al. Head-to-head comparison of ^{68}Ga -PSMA-11 with ^{18}F -PSMA-1007 PET/CT in staging prostate cancer using histopathology and immunohistochemical analysis as a reference standard[J]. J Nucl Med, 2020, 61(4): 527-532. DOI:10.2967/jnumed.119.234187.
- [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] Li Z, Luo Y, Jiang H, et al. The value of diffusion kurtosis imaging, diffusion weighted imaging and ^{18}F -FDG PET for differentiating benign and malignant solitary pulmonary lesions and predicting pathological grading[J]. Front Oncol, 2022, 12: 873669. DOI: 10.3389/fonc.2022.873669.
- [7] Ye Z, Kou Y, Shen J, et al. A comparative study of ^{18}F -PSMA-1007 PET/CT and pelvic MRI in newly diagnosed prostate cancer [J]. BMC Med Imaging, 2024, 24(1): 192. DOI: 10.1186/s12880-024-01376-4.
- [8] 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.
- [9] Abramczyk E, Nisar MU, Nguyen JK, et al. The role of prostate-specific membrane antigen-radioligand and magnetic resonance imaging in patients with prostate cancer biochemical recurrence[J]. Semin Ultrasound CT MR, 2025, 46(1): 71-82. DOI:10.1053/j.sult.2024.11.005.
- [10] 田蓉蓉,赵铭,周洁,等. ^{18}F -PSMA-1007 PET/CT 对低 PSA 水平前列腺癌复发的检测价值[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2020, 40(10): 589-594. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20190930-00215.
Tian RR, Zhao M, Zhou J, et al. Detection value of ^{18}F -PSMA-1007 PET/CT in the recurrence of prostate cancer at low serum prostate specific antigen level[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2020, 40(10): 589-594. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20190930-00215.
- [11] Roberts MJ, Morton A, Donato P, et al. ^{68}Ga -PSMA PET/CT tumour intensity pre-operatively predicts adverse pathological outcomes and progression-free survival in localised prostate cancer[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 48(2): 477-482. DOI:10.1007/s00259-020-04944-2.
- [12] Orevi M, Ben-Haim S, Abourbeh G, et al. False positive findings of [^{18}F]PSMA-1007 PET/CT in patients after radical prostatectomy with undetectable serum PSA levels[J]. Front Surg, 2022, 9: 943760. DOI:10.3389/fsurg.2022.943760.
- [13] Tragardh E, Simoulis A, Bjartell A, et al. Tumor detection of ^{18}F -PSMA-1007 in the prostate gland in patients with prostate cancer using prostatectomy specimens as reference method[J]. J Nucl Med, 2021, 62(12): 1735-1740. DOI:10.2967/jnumed.121.261993.
- [14] 郑安琪,王卓楠,李运轩,等. ^{18}F -PSMA-1007 PET/CT 对前列腺癌精囊腺侵犯的诊断价值[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2023, 43(9): 523-527. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20220505-00140.
Zheng AQ, Wang ZN, Li YX, et al. Diagnostic value of ^{18}F -PSMA-1007 PET/CT in seminal vesicle invasion of prostate cancer[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2023, 43(9): 523-527. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20220505-00140.
- [15] Hu X, Wu Y, Yang P, et al. Performance of ^{68}Ga -labeled prostate-specific membrane antigen ligand positron emission tomography/computed tomography in the diagnosis of primary prostate cancer: a systematic review and meta-analysis[J]. Int Braz J Urol, 2022, 48(6): 891-902. DOI: 10.1590/S1677-5538.IBJU.2020.0986.
- [16] 李娟,高雪梅,程敬亮.扩散峰度成像定量参数与直肠肿瘤病理类型和预后相关因素的关系[J]. 中华肿瘤杂志, 2022, 44(11): 1208-1213. DOI: 10.3760/cma.j.cn112152-20201019-00913.
Li J, Gao XM, Cheng JL. Relationship of diffusion kurtosis imaging parameters with the pathologic type and prognosis of rectal tumors[J]. Chin J Oncol, 2022, 44(11): 1208-1213. DOI:10.3760/cma.j.cn112152-20201019-00913.
- [17] Park H, Kim SH, Lee Y, et al. Comparison of diagnostic performance between diffusion kurtosis imaging parameters and mono-exponential ADC for determination of clinically significant cancer in patients with prostate cancer[J]. Abdom Radiol (NY), 2020, 45(12): 4235-4243. DOI:10.1007/s00261-020-02776-0.
- [18] Yao W, Zheng J, Han C, et al. Integration of quantitative diffusion kurtosis imaging and prostate specific antigen in differential diagnostic of prostate cancer[J]. Medicine (Baltimore), 2021, 100(35): e27144. DOI:10.1097/MD.00000000000027144.

(收稿日期:2024-10-17)