

原发性醛固酮增多症功能性腺瘤⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR 多参数显像方案优化与初步应用

刘淼 孟小丽 李桂玉 汪俊伶 马涛奇 柴宁宁 全志永 王云雅 康飞 汪静
空军军医大学第一附属医院核医学科, 西安 710043
通信作者: 汪静, Email: 13909245902@163.com

【摘要】 目的 建立一种原发性醛固酮增多症(PA)功能性腺瘤⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR 多参数显像方案,以发挥 PET/MR 多模态显像在功能定性和病灶定位方面的优势。方法 该研究为前瞻性队列研究。纳入 2022 年 8 月至 2023 年 8 月于空军军医大学第一附属医院拟行手术的 26 例临床疑似 PA 患者[男 10 例,女 16 例,年龄(49.3±12.2)岁]。患者均行⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR 检查,PET 采集条件为单床位 10 min 三维采集,MRI 采集序列包括衰减校正序列、呼吸触发冠状位单次激发快速自旋回波 T₂ 加权成像(RTr Cor T₂ SSFSE)序列等 6 种。以术后病理结果作为结节功能性判定的“金标准”,基于半定量分析对功能性结节与非功能性结节或健侧组织的组间比较行两独立样本 *t* 检验或 Mann-Whitney *U* 检验,筛选出在功能定性和病灶定位方面具有临床价值的模态/序列形成显像方案,并统计该方案下视觉分析的诊断效能。结果 26 例患者中,病理确诊 PA 功能性腺瘤 15 例(功能性结节 15 个),无功能性肾上腺瘤(NFA)11 例(非功能性结节 13 个)。PET 显像参数在功能性结节组与非功能性结节组间的差异均有统计学意义[SUV_{max}:15.26±8.94 与 5.15±1.40;SUV_{mean}:9.41±4.69 与 3.92±1.15;肾上腺病灶/肝脏比值(LLR):10.79±5.96 与 3.36±0.91;*t* 值:4.03、4.11、4.44,均 *P*<0.001];功能性结节与健侧组织间 SUV_{max}、SUV_{mean} 也有明显差异(*t* 值:4.45、4.68,均 *P*<0.001)。MRI 参数反相位/同相位信号值(Outphase/Inphase)比值、平均表观弥散系数值(ADC_{mean})、平均 T₂ 值(T_{2mean})在功能性结节组与非功能性结节组间差异均无统计学意义(*t* 值:-1.29、-0.62,*Z*=-1.04,均 *P*>0.05);ADC_{mean}、T_{2mean} 在功能性结节组及健侧组织间差异均无统计学意义(*t*=-0.18,*Z*=-1.39,均 *P*>0.05),而 Outphase/Inphase 比值在功能性结节组与健侧组织间差异有统计学意义(0.47±0.13 与 0.80±0.10;*t*=-7.76,*P*<0.001)。基于上述结果得到的优化显像方案为 PET 模态及 MRI 模态中的 RTr Cor T₂ SSFSE、横断位快速恢复快速自旋回波脂肪抑制 T₂ 加权成像(Ax T₂ FRFSE FS)、屏气横断位肝脏容积加速采集(BH Ax LAVA-Flex)序列,该方案下视觉分析诊断功能性结节的灵敏度和特异度可达到 14/15 和 13/13。结论 建立的 PA 功能性腺瘤⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR 多参数显像方案可有效实现 PA 患者可疑功能性腺瘤的功能定性和病灶定位。

【关键词】 醛固酮增多症;肾上腺皮质腺瘤;肽类,环;同位素标记;镓放射性同位素;正电子发射断层显像术;磁共振成像

基金项目:国家自然科学基金(92259304, 91959208, 82122033);空军军医大学第一附属医院医务人员培养助推项目(XJZT24LZ03, XJZT25QN10);空军军医大学第一附属医院医务人员技术提升项目(2024XJSM04)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20250220-00045

Optimization and preliminary application of multiparametric imaging protocol for functional adenoma in primary aldosteronism using ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR

Liu Miao, Meng Xiaoli, Li Guiyu, Wang Junling, Ma Taoqi, Chai Ningning, Quan Zhiyong, Wang Yunya, Kang Fei, Wang Jing

Department of Nuclear Medicine, the First Affiliated Hospital of Air Force Medical University, Xi'an 710043, China

Corresponding author: Wang Jing, Email: 13909245902@163.com

【Abstract】 Objective To establish a multiparametric imaging protocol for detecting functional adenomas of primary aldosteronism (PA) using ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR, in order to leverage the advantages of PET/MR multimodal imaging in both functional characterization and lesion localization. **Methods** This

was a prospective cohort study. Twenty-six patients with clinically suspected PA (10 males, 16 females; age: 49.3 ± 12.2) years, scheduled for surgery at the First Affiliated Hospital of Air Force Medical University between August 2022 and August 2023, were prospectively enrolled. All patients underwent ^{68}Ga -Pentixafor PET/MR examination. PET acquisition was performed with a 10-minute single-bed-position (three-dimensional scan). MR acquisition sequences included attenuation correction sequence and five others, such as respiratory-triggered coronal single-shot fast spin echo T_2 -weighted imaging (RTr Cor T_2 SSFSE) sequence. Postoperative pathological results were taken as the gold standard. Based on semi-quantitative analysis, the independent-sample t test or Mann-Whitney U test was conducted for intergroup comparisons between functional nodules and non-functional nodules or contralateral tissues. Modalities/sequences with clinical value for functional characterization and lesion localization were screened to form an optimized imaging acquisition protocol, and diagnostic performance of visual analysis under this protocol was assessed. **Results** Pathological results confirmed 15 cases of PA functional adenomas (15 functional nodules) and 11 cases of non-functional adrenal adenomas (NFAs; 13 non-functional nodules). PET imaging parameters showed significant differences between functional and non-functional nodules (SUV_{\max} : 15.26 ± 8.94 vs 5.15 ± 1.40 ; SUV_{mean} : 9.41 ± 4.69 vs 3.92 ± 1.15 ; adrenal lesion-to-liver ratio (LLR): 10.79 ± 5.96 vs 3.36 ± 0.91 ; t values: 4.03, 4.11, 4.44, all $P < 0.001$). Significant differences in SUV_{\max} and SUV_{mean} were also observed between functional nodules and contralateral tissues (t values: 4.45, 4.68, both $P < 0.001$). MRI parameters (Outphase/Inphase ratio, mean of apparent diffusion coefficient (ADC_{mean}), mean of T_2 ($T_{2\text{mean}}$)) showed no significant differences between functional and non-functional nodules (t values: -1.29, -0.62, $Z = -1.04$, all $P > 0.05$). ADC_{mean} and $T_{2\text{mean}}$ were not significantly different between functional nodules and contralateral tissues ($t = -0.18$, $Z = -1.39$, both $P > 0.05$), whereas the Outphase/Inphase ratio showed significant difference between functional nodules and contralateral tissues (0.47 ± 0.13 vs 0.80 ± 0.10 ; $t = -7.76$, $P < 0.001$). Based on these results, the optimized imaging protocol includes the PET modality and the following MRI sequences: RTr Cor T_2 SSFSE, axial T_2 fast recovery fast spin echo fat suppression (Ax T_2 FRFSE FS), and breath-hold axial liver acquisition with volume acceleration flexible (BH Ax LAVA-Flex). Under this protocol, the sensitivity and specificity of visual analysis for diagnosing PA functional nodules reached 14/15 and 13/13, respectively. **Conclusion** The ^{68}Ga -Pentixafor PET/MR multiparametric imaging protocol established in this study can effectively achieve both functional characterization and lesion localization of suspected functional adenomas in patients with PA.

【Key words】 Hyperaldosteronism; Adrenocortical adenoma; Peptides, cyclic; Isotope labeling; Gallium radioisotopes; Positron-emission tomography; Magnetic resonance imaging

Fund program: National Natural Science Foundation of China (92259304, 91959208, 82122033); Medical Personnel Training and Promotion Program of the First Affiliated Hospital of Air Force Medical University (XJZT24LZ03, XJZT25QN10); Medical Personnel Technology Promotion Program of the First Affiliated Hospital of Air Force Medical University (2024XJSM04)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20250220-00045

原发性醛固酮增多症 (primary aldosteronism, PA) 是继发性高血压的重要原因, PA 在高血压人群中的发生率为 3%~32%^[1], 其临床表现主要为高血压、低钾血症、高醛固酮水平、低肾素水平等, 患者发生心脑血管意外事件风险较高。无功能性肾上腺瘤 (non-functional adrenal adenoma, NFA) 常与 PA 中的功能性肾上腺瘤, 即醛固酮腺瘤 (aldosterone-producing adenoma, APA) 混淆^[2], 因此, 判别 PA 患者肾上腺结节的分泌功能有助于确定合理的药物治疗手段或指导手术的进行。研究表明, ^{68}Ga -Pentixafor PET/CT 显像在肾上腺皮质来源结节的鉴别诊断中表现出良好的效能, 其对皮质腺瘤尤其是 PA 功能性腺瘤的定位诊断具有特异性^[3-6]。由于 MR 不同于 CT 的仪器特性, 一体化 PET/MR 有望在 PA 结节功能定性和病灶定位两方面取得更优的效果, 然而, 其中 MR 序列的选择对采集耗时、病灶定位、诊断准确性均有重要影响。目前鲜有研究报道 PA 功能性

腺瘤 ^{68}Ga -Pentixafor PET/MR 多参数显像方案, 本研究拟建立此类方案并进行初步临床验证。

资料与方法

1. 研究对象。本研究为前瞻性队列研究。纳入 2022 年 8 月至 2023 年 8 月于空军军医大学第一附属医院拟行手术治疗的 34 例临床疑似 PA 患者, PA 诊断基于中华医学会内分泌学分会制定的专家共识^[7]。纳入标准: (1) 经 CT 扫描发现单侧或双侧肾上腺结节或增生; (2) 持续性高血压 [血压 $> 150/100$ mmHg (1 mmHg = 0.133 kPa)] 或难治性高血压 [联合使用 3 种降压药物 (包括利尿剂) 后血压 $> 140/90$ mmHg] 并伴有低钾血症; (3) 血浆醛固酮 ($\text{ng} \cdot \text{dl}^{-1}$)/肾素活性 ($\text{ng} \cdot \text{ml}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 比值 (aldosterone-to-renin ratio, ARR) ≥ 30 , 或对于 CT 显示边界清晰的单侧或双侧肾上腺结节, 但血钾正常且 ARR < 30 的患者; (4) 接受 ^{68}Ga -Pentixafor PET/MR 肾上腺显像以及术后病理和免疫组织化学检查。排

除标准:(1)患者配合不良;(2)高度怀疑库欣综合征、嗜铬细胞瘤患者。最终共纳入 26 例患者[男 10 例,女 16 例,年龄(49.3±12.2)岁]。本研究经空军军医大学第一附属医院伦理委员会批准(批件号:KY20222211-F-1),所有患者签署了知情同意书。

2. PET/MR 显像。(1)图像采集前准备。Pentixafor 前体(德国 Advanced Biochemical Compounds 公司)符合药物生产质量管理规范标准,显像剂⁶⁸Ga-Pentixafor 由 iQS[®]⁶⁸Ga 半自动化标记模块(德国 Isotopen Technologien München 公司)合成,放化纯>95%。显像仪器为 SIGNA™ PET/MR(美国 GE 公司)。按照患者体质量静脉注射⁶⁸Ga-Pentixafor 1.85 MBq/kg,注射后 40~60 min 进行肾上腺局部 PET/MR 显像。显像时患者取仰卧位,足先进扫描方向,呼吸门控需绑腹带于患者剑突下缘对应体表处,对患者进行短暂呼吸和屏气训练。线圈中心对准患者剑突与肚脐连线中点,肾上腺位于线圈中心。

(2) PET 扫描及图像重建。使用 1 个 PET 扫描床位,采集时长 10 min,采集模式为三维静态采集。利用 MR 三平面定位像确定 PET 扫描范围,在横断位或冠状位上找到肾上腺显示最好的层面,将 PET 床位中心置于肾上腺中心,范围包全肾上腺。PET 图像重建采用有序子集最大期望值迭代法(迭代 2 次、子集数为 28),采用飞行时间(time-of-flight, TOF)以及点扩散函数(point spread function, PSF)技术,重建层厚 2.78 mm、矩阵 192×192。

(3) MR 扫描及图像重建。参照既往研究[8-9]设计 MR 扫描序列,具体见表 1。除衰减校正序列外,共纳入 5 种候选序列:呼吸触发冠状位单次激发快速自旋回波 T₂ 加权成像(respiratory-triggered coronal single-shot fast spin echo T₂-weighted imaging, RTr Cor T₂ SSFSE)序列、横断位快速恢复快速自旋

回波脂肪抑制 T₂ 加权成像(axial T₂ fast recovery fast spin echo fat suppression, Ax T₂ FRFSE FS)序列、呼吸触发横断位弥散加权成像(respiratory-triggered axial diffusion weighted imaging, RTr Ax DWI)序列、屏气横断位(breath-hold axial, BH Ax)肝脏容积加速采集(liver acquisition with volume acceleration flexible, LAVA-Flex)序列、屏气冠状位(breath-hold coronal, BH Cor) LAVA-Flex 序列。其中, LAVA-Flex 序列最初设计用于肝脏的容积加速采集,后也被用于其他部位的三维快速采集;RTr Ax DWI 序列中的 b 值设定为 800 s/mm²[10]。MR 序列皆与 PET 同步采集,扫描定位及范围:在横断位或冠状位上找到显示肾上腺最好的层面,调整层数及前后左右方向使肾上腺位于扫描范围中心,范围包全肾上腺。扫描具体参数设置如表 1 所示。

3. 半定量分析及图像视觉诊断。(1)半定量分析:勾画腺瘤部位 ROI, 计算 ROI 内 SUV_{max}、SUV_{mean}、反相位/同相位信号值(Outphase/Inphase)比值、平均表观弥散系数(ADC)值(mean of apparent diffusion coefficient, ADC_{mean})、平均 T₂ 值(mean of T₂, T₂mean)。此外,需在正常肝脏组织中勾画直径为 20 mm 的 ROI^[11], 获取其 SUV_{mean}, 进而计算肾上腺病灶/肝脏比值(lesion-to-liver ratio, LLR; 即病灶 SUV_{max}/肝脏 SUV_{mean}); 在肾上腺病灶对侧正常肾上腺组织中勾画直径为 6 mm 的 ROI^[12], 进而获得健侧肾上腺组织 SUV_{max}、SUV_{mean}, 计算腺瘤灶侧与健侧的 SUV_{max} 比值。

(2)基于半定量参数的组间比较结果得到优化的 PET/MR 显像方案,对该方案下图像视觉分析的诊断效能进行评价(以术后病理诊断为“金标准”)。PET/MR 图像由 2 名具有副高级及以上职称的核医学医师单独进行判定,评估肾上腺病变情况,意见不

表 1 本研究选取的 MR 扫描序列参数

序列	参数											
	TR (ms)	TE (ms)	翻转角	视野 (mm ²)	矩阵	层厚 (mm)	层间隔 (mm)	带宽 (kHz)	加速 方法	加速 因子	激励 次数	耗时 ^a (s)
RTr Cor T ₂ SSFSE	2 857	71.5	130°	420×420	320×288	4.0	0.5	62.5	ARC	2.0	1	83
Ax T ₂ FRFSE FS	8 571	85	111°	420×336	320×256	3.0	1.0	41.67	ARC	2.0	2	153
RTr Ax DWI	7 500	62.4	90°	420×420	128×128	3.6	0.4	250.0	ASSET	2.0	8	90
BH Ax LAVA-Flex	4.2	1.1/2.2	15°	420×336	256×200	3.0	-	142.86	ARC	2.0	1	73
BH Cor LAVA-Flex	4.0	1.1/2.2	12°	440×484	256×180	3.0	-	142.86	ARC	2.0	1	15

注:RTr Cor T₂ SSFSE 为呼吸触发冠状位单次激发快速自旋回波 T₂ 加权成像, Ax T₂ FRFSE FS 为横断位快速恢复快速自旋回波脂肪抑制 T₂ 加权成像, RTr Ax DWI 为呼吸触发横断位弥散加权成像, BH Ax LAVA-Flex 为屏气横断位肝脏容积加速采集, BH Cor LAVA-Flex 为屏气冠状位肝脏容积加速采集, TR 为重复时间, TE 为回波时间, ARC 为笛卡尔自动校准重建技术, ASSET 为阵列空间敏感度编码技术; ^a 为默认扫描层数及主要影响参数固定情况下的预估时间; - 表示无层间隔

一致时经共同协商达成一致。在 MR 图像中,肾上腺腺瘤多呈等/稍低 T_1 信号、等/稍低 T_2 信号;腺瘤因富含胞质内脂质,LAVA-Flex 序列生成的同反相位图像是鉴别腺瘤与非腺瘤的关键依据,腺瘤在反相位图像上常出现明显信号衰减;对于 PA 患者,当发现肾上腺单一结节,且同侧的其余部分及对侧肾上腺呈光滑且无增大显像时,MR 才可诊断 PA 功能性腺瘤^[13]。PET 图像中肾上腺结节的摄取高于同侧和对侧正常肾上腺组织,为 PET 阳性。本研究中,当 PET 或 MR 诊断为功能性腺瘤时,视为 PET/MR 阳性。

4. 统计学分析。采用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件对数据进行分析。符合正态分布的定量资料用 $\bar{x} \pm s$ 表示,2 组间差异比较行两独立样本 t 检验;不符合正态分布的定量资料用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,2 组间比较行 Mann-Whitney U 检验。以术后病理诊断为“金标准”,采用 ROC 曲线分析腺瘤灶侧与健侧的 SUV_{max} 比值判定功能性结节的效能。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义(双侧检验)。

结 果

1. 一般临床资料。26 例患者中,共检测到肾上腺结节 28 个,术后病理证实其中功能性结节 15 个(15 例 PA 功能性腺瘤患者),非功能性结节 13 个(11 例 NFA 患者,其中 2 例患者分别检测到 2 个结

节)。功能性结节和非功能性结节的长径分别为 0.80 (0.60, 1.50) cm 和 (1.81 ± 0.76) cm。功能性结节患者 ARR 为 60.00 (24.51, 726.00),血钾水平为 2.81 (2.68, 3.43) mmol/L;非功能性结节患者 ARR 为 16.32 ± 13.74,血钾水平为 (4.00 ± 0.89) mmol/L。

2. 显像参数组间比较。(1)功能性结节与非功能性结节组间比较。典型病例 PET/MR 显像表现见图 1。由表 2 可知,2 组间 PET 参数差异均有统计学意义(t 值:4.03、4.11、4.44,均 $P < 0.001$);MR 参数差异均无统计学意义(t 值:-1.29、-0.62, $Z = -1.04$,均 $P > 0.05$)。

(2)功能性结节与健侧对比组织组间比较。2 组间 PET 参数差异均有统计学意义(t 值:4.45、4.68,均 $P < 0.001$);MR 参数中, ADC_{mean} 、 T_2_{mean} 的组间差异均无统计学意义($t = -0.18, Z = -1.39$,均 $P > 0.05$),而 Outphase/Inphase 比值的组间差异有统计学意义($t = -7.76, P < 0.001$),详见表 2。

3. 优化 PET/MR 显像方案。上述组间比较结果表明,⁶⁸Ga-Pentixafor 的 PET 模态可区分功能性与非功能性结节,LAVA-Flex 序列生成的 Outphase/Inphase 比值尽管在功能性结节及非功能性结节的区分上不具有统计学意义($t = -1.29, P = 0.210$),但是在有功能性结节及健侧正常组织中具有差异性表现。DWI 序列作为一种功能序列,在有功能性结节与非功能性

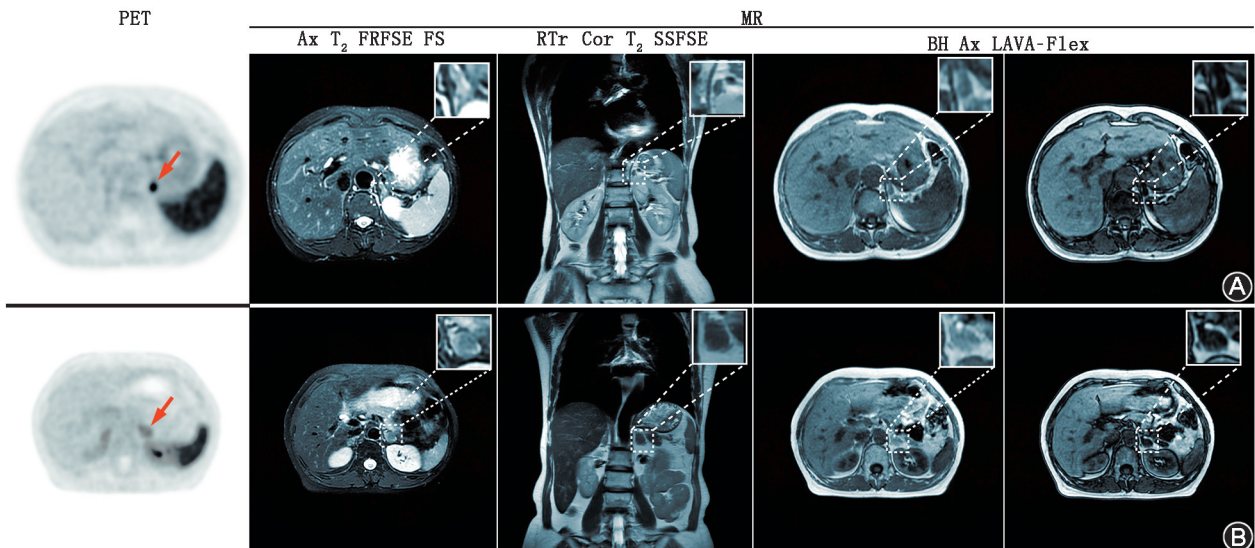


图 1 疑诊原发性醛固酮增多症(PA)患者⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR 显像图 A. PA 功能性腺瘤患者,性别女,年龄 52 岁,血浆醛固酮($ng \cdot dl^{-1}$)/肾素活性($ng \cdot ml^{-1} \cdot h^{-1}$)比值(ARR)为 24.51;B. 无功能性肾上腺瘤(NFA)患者,性别女,年龄 58 岁,ARR 为 14.56。对比非功能性结节,功能性结节 PET 显示出相较于对侧更明显的摄取,病灶 SUV_{max} 分别为 4.94 和 7.95(箭头示病变)。MR 图像中,2 类结节影像表现差别不大,均表现出 T_2 等信号,反相位低信号(即“失信号”)现象,表明 MR 在功能性结节成像中多体现定位功能。Ax T_2 FRFSE FS 为横断位快速恢复快速自旋回波脂肪抑制 T_2 加权成像,RTr Cor T_2 SSFSE 为呼吸触发冠状位单次激发快速自旋回波 T_2 加权成像,BH Ax LAVA-Flex 为屏气横断位肝脏容积加速采集

表 2 26 例疑诊 PA 患者功能性结节与非功能性结节、健侧对比组织组间 PET/MR 参数比较

组别	个数	PET 参数			MR 参数		
		SUV _{max} ($\bar{x}\pm s$)	SUV _{mean} ($\bar{x}\pm s$)	LLR ($\bar{x}\pm s$)	Outphase/Inphase 比值($\bar{x}\pm s$)	ADC _{mean} (mm ² /s; $\bar{x}\pm s$)	T _{2mean} [M(Q ₁ , Q ₃)]
功能性结节	15	15.26±8.94	9.41±4.69	10.79±5.96	0.47±0.13	0.002±0.001	693.08(627.86, 741.21)
非功能性结节	13	5.15±1.40	3.92±1.15	3.36±0.91	0.55±0.19	0.002±0.000	714.56(611.38, 871.13)
健侧对比组织	15	4.86±1.49	3.60±1.05	-	0.80±0.10	0.002±0.000	752.49(648.59, 835.29)
检验值		4.03 ^a , 4.45 ^b	4.11 ^a , 4.68 ^b	4.44 ^a	-1.29 ^a , -7.76 ^b	-0.62 ^a , -0.18 ^b	-1.04 ^{a,c} , -1.39 ^{b,c}
P 值		<0.001 ^{a,b}	<0.001 ^{a,b}	<0.001	0.210 ^a , <0.001 ^b	0.541 ^a , 0.859 ^b	0.300 ^a , 0.165 ^b

注:PA 为原发性醛固酮增多病,LLR 为肾上腺病灶/肝脏比值,Outphase/Inphase 为反相位/同相位信号值,ADC_{mean} 为平均表观弥散系数值,T_{2mean} 为平均 T₂ 值;^a 为功能性结节与非功能性结节组间比较,^b 为功能性结节与健侧对比组织组间比较,^c 为 Z 值,余检验值为 t 值;-表示无数据

结节及健侧对比组中表现均无明显差异。因此,本研究确定的最终 PET/MR 显像方案如下:PET 模态以及 MR 模态中的 RTr Cor T₂ SSFSE、Ax T₂ FRFSE FS、BH Ax LAVA-Flex 序列。

4. 诊断效能。ROC 曲线分析示,腺瘤灶侧与健侧的 SUV_{max} 比值诊断疑诊 PA 患者功能性结节的 AUC 为 0.933(95% CI:0.845~1.000),约登指数最大值为 0.8,对应截断阈值为 1.563,灵敏度为 80%,特异度为 100%。另外,视觉分析对前述优化 PET/MR 采集方案下图像的功能性结节的判定灵敏度为 14/15、特异度为 13/13。

讨 论

已有多项研究证实⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 在 PA 诊断及分型中的价值^[14-15]。本研究则探讨了⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR 在 PA 功能性腺瘤中的应用,并建立了优化的 PET/MR 多参数显像方案。

PET/MR 相较于 PET/CT 具有以下技术优势:(1) MR 因具有更优的软组织分辨率和固有的组织表征能力,可更好地对肾上腺进行显像;(2) MR 可进行多参数多序列成像,如本研究中的 Ax LAVA-Flex 序列可通过化学位移成像(chemical shift imaging, CSI)精准识别肾上腺腺瘤中的微量脂肪成分(在影像中的表现为反相位中的“失信号”^[16])。

本研究对 PET 半定量参数的分析结果显示,⁶⁸Ga-Pentixafor PET 在有功能性结节与非功能性结节及健侧正常组织中均具有差异性表现,表明该显像方法在功能性腺瘤定性及定侧上是有价值的。MR 参数组间对比分析则显示,Outphase/Inphase 比值、T_{2mean}、ADC_{mean} 在有功能性结节与非功能性结节中均未表现出差异性,即这些参数在肾上腺腺瘤的有无功能性区分上表现较弱;但是,Ax LAVA-Flex 序列生成的 Outphase/Inphase 比值在功能性结节与结节健侧

组织间的差异具有统计学意义($t = -7.76, P < 0.001$),表明 Ax LAVA-Flex 序列有助于肾上腺腺瘤的定位。ROC 曲线分析示,腺瘤灶侧与健侧的 SUV_{max} 比值诊断功能性结节的效能较高(AUC 为 0.933);基于本研究得到的优化⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR 显像方案的图像视觉分析,也对功能性结节有良好的诊断效能(灵敏度为 14/15、特异度为 13/13)。因此,本研究建立的⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR 多参数显像方案(PET 模态以及 MR 模态中的 RTr Cor T₂ SSFSE、Ax T₂ FRFSE FS、BH Ax LAVA-Flex 序列)可有效实现 PA 患者功能性结节和非功能性结节的定位及定性。

本研究在 PA 功能性腺瘤⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR 多参数显像方面取得了初步的成果,尚需在以下方面进行进一步完善:(1) 增大患者入组数,获得更稳定的定性和定量结果;(2) 开展多中心研究工作,获得更广泛的专家共识;(3) 继续挖掘 MR 多参数的技术优势,建立更优的⁶⁸Ga-Pentixafor PET/MR 多参数显像方案。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 刘森:研究实施、论文撰写;孟小丽、李桂玉、王云雅:显像方案讨论及确定;汪俊伶、马涛奇、柴宁宇:数据采集及分析;全志永、康飞:影像阅片;康飞、汪静:研究指导、论文审阅

参 考 文 献

- [1] 吴锡,赵炼玲,任艳,等. 降压药对原发性醛固酮增多症筛查试验影响的真实世界研究[J]. 华西医学, 2025, 40(5): 755-760. DOI: 10.7507/1002-0179.202310038.
Wu X, Zhao LL, Ren Y, et al. A real-world study on the impact of antihypertensive drugs on screening tests for primary aldosteronism [J]. West China Med J, 2025, 40(5): 755-760. DOI: 10.7507/1002-0179.202310038.
- [2] Ding J, Zhang Y, Wen J, et al. Imaging CXCR4 expression in patients with suspected primary hyperaldosteronism [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2020, 47(11): 2656-2665. DOI: 10.1007/s00259-020-04722-0.
- [3] Ding J, Tong A, Zhang Y, et al. Functional characterization of adrenocortical masses in nononcologic patients using ⁶⁸Ga-pentixafor

- [J]. J Nucl Med, 2022, 63(3): 368-375. DOI:10.2967/jnumed.121.261964.
- [4] Calderoni L, Giovannella L, Fanti S. Endocrinology application of molecular imaging: current role of PET/CT[J]. J Endocrinol Invest, 2024, 47(10): 2383-2396. DOI:10.1007/s40618-024-02400-8.
- [5] Heinze B, Fuss CT, Mulatero P, et al. Targeting CXCR4 (CXC chemokine receptor type 4) for molecular imaging of aldosterone-producing adenoma[J]. Hypertension, 2018, 71(2): 317-325. DOI:10.1161/HYPERTENSIONAHA.117.09975.
- [6] Kaemmerer D, Sanger J, Arsenic R, et al. Evaluation of somatostatin, CXCR4 chemokine and endothelin a receptor expression in a large set of paragangliomas[J]. Oncotarget, 2017, 8(52): 89958-89969. DOI:10.18632/oncotarget.21194.
- [7] 中华医学会内分泌学分会.原发性醛固酮增多症诊断治疗的专家共识(2024 版)[J].中华内分泌代谢杂志, 2025, 41(1): 12-24. DOI:10.3760/cma.j.cn311282-20241115-00546. Chinese Society of Endocrinology. Expert consensus on the diagnosis and treatment of primary aldosteronism (2024) [J]. Chin J Endocrinol Metab, 2025, 41(1): 12-24. DOI:10.3760/cma.j.cn311282-20241115-00546.
- [8] 中华医学会影像技术分会,中华医学会放射学分会. MRI 检查技术专家共识[J].中华放射学杂志, 2016, 50(10): 724-739. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2016.10.002. Imaging Technology Branch of Chinese Medical Association, Radiology Branch of Chinese Medical Association. Expert consensus on MRI technology [J]. Chin J Radiol, 2016, 50(10): 724-739. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2016.10.002.
- [9] 王颖奕,梁辰,孙涛,等.原发性肾上腺皮质瘤的临床特征及 CT、MRI 影像学表现[J].中国 CT 和 MRI 杂志, 2024, 22(12): 128-131. DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.12.040. Wang YY, Liang C, Sun T, et al. Clinical features and CT/MRI imaging of primary adrenocortical carcinoma[J]. Chin J CT MRI, 2024, 22(12): 128-131. DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.12.040.
- [10] 邹飞,胡利平,方常练,等.磁共振扩散加权成像对肾上腺良恶性病变的鉴别诊断价值[J].实用癌症杂志, 2017, 32(12): 2002-2005. DOI:10.3969/j.issn.1001-5930.2017.12.027. Zou F, Hu LP, Fang CL, et al. Value of diffusion-weighted imaging in the diagnosis of benign and malignant adrenal lesions[J]. Pract J Cancer, 2017, 32(12): 2002-2005. DOI:10.3969/j.issn.1001-5930.2017.12.027.
- [11] Gao Y, Ding J, Cui Y, et al. Functional nodules in primary aldosteronism: identification of CXCR4 expression with ⁶⁸Ga-pentixafor PET/CT[J]. Eur Radiol, 2023, 33(2): 996-1003. DOI:10.1007/s00330-022-09058-x.
- [12] 高寅洁,丁洁,崔云英,等.⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 鉴别肾上腺醛固酮产生腺瘤和无功能瘤的价值初探[J].中华内科杂志, 2023, 62(3): 267-271. DOI:10.3760/cma.j.cn112138-20220609-00440. Gao YJ, Ding J, Cui YY, et al. Preliminary study on the ability of ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT to differentiate between adrenal aldosterone-producing adenoma and nonfunctional adenoma [J]. Chin J Intern Med, 2023, 62(3): 267-271. DOI:10.3760/cma.j.cn112138-20220609-00440.
- [13] Sohaib SA, Peppercorn PD, Allan C, et al. Primary hyperaldosteronism (Conn syndrome): MR imaging findings[J]. Radiology, 2000, 214(2): 527-531. DOI:10.1148/radiology.214.2.r00fe09527.
- [14] 张娜,谢阳,陈跃.⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 在原发性醛固酮增多症分型中的临床价值[J].中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(3): 185-188. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240314-00099. Zhang N, Xie Y, Chen Y, et al. Clinical value of ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT in classification of subtypes of primary aldosteronism [J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 45(3): 185-188. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240314-00099.
- [15] 尹璇,马晓伟,董楚宁,等.靶向 CXCR4 PET/CT 显像用于原发性醛固酮增多症分型与病灶精准定位[J].中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(2): 76-81. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240516-00171. Yin X, Ma XW, Dong CN, et al. Application of CXCR4-targeted PET/CT imaging in the classification and precise localization of primary aldosteronism [J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 45(2): 76-81. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240516-00171.
- [16] Reginelli A, Vacca G, Belfiore M, et al. Pitfalls and differential diagnosis on adrenal lesions: current concepts in CT/MR imaging: a narrative review [J]. Gland Surg, 2020, 9(6): 2331-2342. DOI:10.21037/gs-20-559.

(收稿日期:2025-02-20)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

关于参考文献

请按 GB/T 7714—2015《信息与文献 参考文献著录规则》,采用顺序编码制著录。依照文献在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字标出,并将序号置于方括号中,排列于文后。同一文献作者不超过 3 人全部著录;超过 3 人只著录前 3 人,后依文种加表示“等”的文字。作者姓名一律姓氏在前、名字在后,外国人的名字采用首字母缩写形式,缩写名后不加缩写点;不同作者姓名之间用“,”隔开,不用“和”“and”等连词。题名后标注文献类型和载体类型标识代码,文献类型和电子文献载体标识代码参照 GB/T 7714—2015《信息与文献参考文献著录规则》之《文献类型和文献载体标识代码》。中文期刊用全名;外文期刊名称用缩写,以美国国立医学图书馆编辑出版的医学索引(Index Medicus)中的格式为准;Index Medicus 未收录者,依次选用文献自身对刊名的缩写、期刊全称。每条参考文献著录起止页码。文献 DOI 号著录在该条文献最后,并需列出中文参考文献的英文表述(双语著录)。作者必须将参考文献与其原文核对无误。

本刊编辑部