

⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像在原发性醛固酮增多症患者分型诊断及疗效评估中的价值

林凯贤¹ 陈珍英² 方周菲³ 黄超¹ 蔡瀚⁴ 缪蔚冰¹

¹福建医科大学附属第一医院滨海院区国家区域医疗中心核医学科、福建省临床重点专科核医学科,福州 350212;²福建医科大学附属第一医院核医学科,福州 350005;³福建医科大学附属第一医院干部病房,福州 350005;⁴福建医科大学附属第一医院心血管内科,福州 350005

通信作者:缪蔚冰, Email: miaoweibing@126.com

【摘要】 目的 探讨⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 在原发性醛固酮增多症(PA)患者分型诊断及疗效评估中的价值。方法 该回顾性队列研究纳入 2022 年 1 月至 2024 年 1 月间在福建医科大学附属第一医院行⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 检查的 62 例 PA 患者[男 32 例,年龄(51.8±12.3)岁;女 30 例,年龄(46.9±9.6)岁],其中 25 例行肾上腺静脉采血(AVS),38 例行肾上腺切除手术治疗,12 例行超选择肾上腺动脉栓塞术(SAAE)。根据 AVS、病理及随访结果等分为单侧 PA(UPA)组和双侧 PA(BPA)组,采用 ROC 曲线分析 PET/CT 定量参数对 UPA 的诊断效能。评估手术及 SAAE 治疗患者的疗效,并比较 SAAE 治疗前后 PET/CT 显像变化,不同疗效组间参数差异采用 Mann-Whitney *U* 检验。结果 62 例 PA 患者中 UPA 组 39 例,BPA 组 23 例。PET/CT 定性诊断 UPA 患者的灵敏度、特异度、准确性分别为 84.6%(33/39)、73.9%(17/23)和 80.6%(50/62)。UPA 组中共检出 44 个病灶,其中 42 个有最终诊断(37 个 UPA,5 个非 UPA);PET/CT 诊断 UPA 病灶的灵敏度为 100%(37/37),有 5 个假阴性。ROC 曲线分析显示,SUV_{max}、病灶/对侧肾上腺比值(LCR)、病灶/肝脏比值(LLR)诊断 UPA 病灶的 AUC 分别为 0.893(95% CI:0.809~0.976)、0.877(95% CI:0.789~0.964)和 0.923(95% CI:0.850~0.996),其中 LLR 最佳诊断界值为 6.05 时,灵敏度为 94.6%(35/37)、特异度为 4/5。AVS 与 PET/CT 对 BPA 优势侧的判断一致性为 10/11。38 例手术患者中,有效 35 例(治愈 33 例、部分好转 2 例)、无改善 3 例,治疗有效率 92.1%(35/38);治愈组病灶 SUV_{max} 和 LLR 明显高于部分好转及无改善组(*Z* 值:-2.01、-3.05,均 *P*<0.05)。12 例 SAAE 治疗患者中,有效 9 例(治愈 4 例、部分好转 5 例)、无改善 3 例;PET/CT 显像摄取减低 8 例,无减低 4 例。PET/CT 显像变化与临床疗效评价符合率为 9/12,其中 2 例治疗后病灶显像剂摄取较高,后续再次行手术治疗,改变了临床决策。结论 ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 对 PA 分型具有较高准确性,对优势侧判断与 AVS 一致性高,在 SAAE 疗效评估中具有潜在价值。

【关键词】 醛固酮增多症;肽类;环;正电子发射断层显像术;体层摄影术,X 线计算机;⁶⁸Ga-Pentixafor

基金项目:国家自然科学基金(82472012);福建省临床重点专科建设项目(2023SZDZK-HYXK);福建省自然科学基金(2024J01558,2024J01516);福建省科技创新联合基金项目(2023Y9067,2024Y9177);福建医科大学启航基金(2021QH1063)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20250619-00206

Value of ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT in subtyping diagnosis and treatment response evaluation in patients with primary aldosteronism

Lin Kaixian¹, Chen Zhenying², Fang Zhoufei³, Huang Chao¹, Cai Han⁴, Miao Weibing¹

¹Department of Nuclear Medicine, National Regional Medical Center, Binhai Campus of the First Affiliated Hospital of Fujian Medical University; Provincial Clinical Key Specialty of Fujian, Fuzhou 350212, China;

²Department of Nuclear Medicine, the First Affiliated Hospital of Fujian Medical University, Fuzhou 350005, China; ³Department of Cardre Ward, the First Affiliated Hospital of Fujian Medical University, Fuzhou 350005, China; ⁴Department of Cardiology, the First Affiliated Hospital of Fujian Medical University, Fuzhou 350005, China

Corresponding author: Miao Weibing, Email: miaoweibing@126.com

【Abstract】 Objective To investigate the value of ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT for subtyping diagnosis and treatment response evaluation in patients with primary aldosteronism (PA). **Methods** A retrospective

and treatment response evaluation in patients with primary aldosteronism (PA). **Methods** A retrospective

cohort study was conducted on 62 PA patients, including 32 males with age of (51.8±12.3) years and 30 females with age of (46.9±9.6) years. All patients underwent ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT in the First Affiliated Hospital of Fujian Medical University between January 2022 and January 2024. Among them, 25 underwent adrenal venous sampling (AVS), 38 underwent adrenalectomy, and 12 were treated with superselective adrenal arterial embolization (SAAE). Patients were classified into unilateral PA (UPA) and bilateral PA (BPA) groups based on AVS, histopathology, and clinical follow-up. ROC curve analysis was used to determine the diagnostic efficacy of PET/CT quantitative parameters for UPA. Treatment response was assessed for patients who underwent adrenalectomy and SAAE. The Mann-Whitney *U* test was used for data analysis. Changes in PET/CT findings before and after treatment were compared in the 12 patients who underwent SAAE. **Results** Of the 62 patients, 39 were diagnosed with UPA and 23 with BPA. The sensitivity, specificity, and accuracy of visual assessment on PET/CT for diagnosing patients with UPA were 84.6% (33/39), 73.9% (17/23) and 80.6% (50/62) respectively. Forty-four lesions were detected in patients with UPA, and 42 had final diagnosis (37 UPA, 5 non-UPA). The diagnostic sensitivity of PET/CT for UPA lesions was 100% (37/37), with 5 false-positive lesions. ROC analysis showed that AUCs of SUV_{max}, lesion-to-contralateral adrenal ratio (LCR), and lesion-to-liver ratio (LLR) in diagnosing UPA lesions were 0.893 (95% CI: 0.809–0.976), 0.877 (95% CI: 0.789–0.964), and 0.923 (95% CI: 0.850–0.996), respectively. An LLR cut-off value of 6.05 yielded a sensitivity of 94.6% (35/37) and a specificity of 4/5. The consistency of AVS and PET/CT in determining the dominant side of BPA was 10/11. Among the 38 patients who underwent adrenalectomy, 35 were effectively treated (33 were cured, 2 were partially improved) and 3 showed no improvement, yielding an efficacy rate of 92.1% (35/38). The cured group had significantly higher baseline SUV_{max} and LLR than the non-cured/improved group (*Z* values: -2.01, -3.05, both *P*<0.05). Of the 12 patients treated with SAAE, 9 were effective (4 cured, 5 partially improved) and 3 showed no improvement. Post-SAAE PET/CT showed decreased radiotracer uptake in 8 patients and no decrease in 4. Imaging findings were concordant with clinical response in 9 of 12 patients. In 2 patients with persistent high uptake post-SAAE, subsequent adrenalectomy was performed, altering clinical management. **Conclusions** ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT demonstrates high accuracy for subtyping PA and high consistency compared with the AVS in identifying the dominant side. It shows potential value in assessing SAAE treatment response.

【Key words】 Hyperaldosteronism; Peptides, cyclic; Positron-emission tomography; Tomography, X-ray computed; ⁶⁸Ga-Pentixafor

Fund program: National Natural Science Foundation of China (82472012); Fujian Provincial Clinical Key Specialty Construction Project (2023SZDZK-HYXK); Natural Science Foundation of Fujian Province (2024J01558, 2024J01516); Fujian Province Science and Technology Innovation Joint Funding Project (2023Y9067, 2024Y9177); Startup Fund for Scientific Research of Fujian Medical University (2021QH1063) DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20250619-00206

原发性醛固酮增多症 (primary aldosteronism, PA) 是继发性高血压最常见的病因之一, 分为单侧 PA (unilateral PA, UPA) 和双侧 PA (bilateral PA, BPA), 前者可通过手术切除治愈, 而后者通常使用药物长期治疗, 因此, PA 的准确分型直接影响患者治疗决策^[1]。以趋化因子 CXC 亚家族受体 4 (CXC subfamily receptor 4, CXCR4) 为靶点的 ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像在 PA 亚型诊断和病灶定位中有重要价值^[2-3], 部分研究表明其对 PA 优势侧判断的准确性高于肾上腺静脉采血 (adrenal venous sampling, AVS)^[4]。超选择肾上腺动脉栓塞术 (superselective adrenal arterial embolization, SAAE) 是一种新的 PA 治疗方式, 较传统手术具有侵入性较小、并发症发生率较低的优势, 在降低醛固酮水平和控制血压方面显示出潜力^[5-6]。然而, 一些接受 SAAE 的患者在术后可能达不到临床或生化缓解, 或初始缓解后复发。由于临床或生化评估的影响因素多, 评估疗效有一定的局限性, 需要更客观的影像学证据支持^[7]。⁶⁸Ga-Pentixafor 在 PA 疗效评估中的研究较

少。因此, 本研究对 ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 在 PA 患者分型诊断及评估 SAAE 疗效中的临床应用价值进行探讨。

资料与方法

1. 研究对象。本研究为回顾性队列研究。收集 2022 年 1 月至 2024 年 1 月在福建医科大学附属第一医院被诊断为 PA 且均完成 ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像的患者, PA 诊断标准参考文献^[7]。排除标准: (1) 没有完整临床或随访资料; (2) PET/CT 图像存在严重运动伪影或图像质量不佳。最终纳入患者 62 例, 其中男 32 例, 年龄 (51.8±12.3) 岁; 女 30 例, 年龄 (46.9±9.6) 岁。本研究经福建医科大学附属第一医院医学伦理委员会批准, 批件号: 闽医大附一伦理医研[2022]398 号。患者均签署知情同意书。

2. ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像。(1) 显像方法。注射 ⁶⁸Ga-Pentixafor (由本科室自行制备, 放化纯>95%; 74~111 MBq) 后 40~60 min 行 PET/CT 显像 (Discovery Max, 美国 GE 公司), 患者取仰卧位,

双手置于头顶,采集部位以肾上腺区为中心,单床位采集 10 min^[8]。

(2)图像分析。PET/CT 图像由 2 名经验丰富的核医学医师结合临床实验室检查结果进行解读。视觉分析;PET 阳性病变定义为病灶摄取高于对侧和邻近正常肾上腺,考虑为 UPA;若摄取相当,CT 提示肾上腺皮质增生性病变,则定义为阴性,考虑为 BPA。定量分析指标包括肾上腺病灶 SUV_{max}、病灶/对侧肾上腺比值(lesion-to-contralateral adrenal radio, LCR;即病灶 SUV_{max}/对侧肾上腺 SUV_{mean})及病灶/肝脏比值(lesion-to-liver ratio, LLR;即病灶 SUV_{max}/肝脏 SUV_{mean});治疗前减去治疗后的定量参数变化记为 Δ SUV_{max}、 Δ LCR、 Δ LLR。

3. 治疗选择。根据⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 和 AVS 结果制定治疗策略。单侧阳性病灶者行肾上腺切除或 SAAE 治疗;双侧阳性病灶者手术切除阳性程度更显著一侧(即优势侧;AVS 检查一侧肾上腺与对侧肾上腺醛固酮分泌比值 ≥ 4 ^[9] 或⁶⁸Ga-Pentixafor 显像一侧肾上腺 SUV_{max} 较对侧增高,若 2 种检查均没有显示优势侧,则予药物治疗^[7])。另外,满足以下条件的 BPA 患者接受 SAAE 治疗:(1)经 ≥ 2 种醛固酮受体拮抗剂治疗 6 个月血压和(或)血钾未达标;(2)药物不耐受(如高钾血症、肾功能恶化)^[10]。

4. 诊断标准及随访。最终诊断由手术病理或随访结果确定;UPA,病理显示为肾上腺皮质腺瘤,随访生化和临床均治愈或改善;BPA,病理或 CT 提示肾上腺皮质增生性病变,随访生化或临床部分改善或无改善。

随访时间为术后 3、6、12 个月,随访检测指标包括血钾、血浆醛固酮、血浆醛固酮/肾素活性比值(aldoosterone-to-renin ratio, ARR)、血压等,随访终点为更改治疗方案或治疗后 12 个月的随访结果。临床疗效根据 PA 手术预后(PA surgical outcome, PASO)标准分为治愈组、部分好转组以及无改善组^[11]。另外,接受 SAAE 治疗的患者在治疗后 3 个月再次行⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像,依据 SAAE 治疗前后 PET/CT 视觉及定量参数变化分为摄取减低组及无减低组(显像疗效评价)。

5. 统计学分析。采用 IBM SPSS Statistics 23.0 软件进行数据处理,不符合正态分布的定量资料以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,组间差异采用 Mann-Whitney U 检验进行比较;符合正态分布的定量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间差异采用两独立样本 t 检验进行比较。定性资

料以频数(百分比)表示,组间比较行 χ^2 检验。构建 ROC 曲线,分析⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 定量参数诊断 UPA 的诊断准确性和最佳界值,AUC 组间比较行 Delong 检验。 $P < 0.05$ (双侧检验)为差异有统计学意义。

结 果

1. PA 分型及组间比较。62 例 PA 患者中,25 例行 AVS,38 例行肾上腺切除手术治疗,12 例行 SAAE 治疗;最终诊断 UPA 39 例,BPA 23 例。UPA 和 BPA 组间性别差异有统计学意义($\chi^2 = 4.74, P = 0.029$);与 BPA 组相比,UPA 组血钾水平较低、病程较短、舒张压较高、病灶最大径较大(t 值: $-3.48 \sim 2.53$, 均 $P < 0.05$),而年龄、体质指数、收缩压、病灶 CT 值、醛固酮、ARR 等指标的组间差异均无统计学意义(t 值: $-1.53 \sim 1.25$, Z 值: $-0.72, -0.98$, 均 $P > 0.05$),具体见表 1。

2. PET/CT 诊断。⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 定性诊断 UPA 患者的灵敏度、特异度和准确性分别为 84.6%(33/39)、73.9%(17/23)和 80.6%(50/62)。39 例 UPA 患者中共检出 44 个病灶,其中 42 个有最终诊断(37 个 UPA,5 个非 UPA);PET/CT 诊断 UPA 病灶的灵敏度为 100%(37/37),有 5 个病灶为假阳性。典型病例见图 1。UPA 组和 BPA 组病灶 SUV_{max} 分别为 12.99 ± 5.27 和 3.80 ± 1.43 ($t = 8.16, P < 0.001$),LCR 分别为 4.42 ± 2.81 和 1.24 ± 0.51 ,LLR 分别为 10.29 ± 5.21 和 3.37 ± 1.51 ,组间差异也有统计学意义(t 值: 5.10、6.20, 均 $P < 0.05$)。ROC 曲线(图 2)分析显示,SUV_{max}、LCR 及 LLR 诊断 UPA 病灶的 AUC 分别为 0.893(95% CI:0.809~0.976)、0.877(95% CI:0.789~0.964)和 0.923(95% CI:0.850~0.996);SUV_{max} 与 LLR 的 AUC 差异有统计学意义($Z = 2.02, P = 0.043$),而 SUV_{max} 与 LCR($Z = 1.43, P = 0.154$)、LCR 与 LLR($Z = 0.95, P = 0.342$)的 AUC 差异无统计学意义;其中 LLR 诊断 UPA 的最佳诊断界值为 6.05,此时灵敏度和特异度分别为 94.6%(35/37)、4/5。

3. AVS 与⁶⁸Ga-Pentixafor PET 诊断对比。25 例患者同时进行了 AVS 与⁶⁸Ga-Pentixafor PET 检查,总的诊断一致性为 96%(24/25),其中 UPA 14 例,病变侧判断全部一致;BPA 11 例,优势侧判断一致性为 10/11。仅 1 例 BPA 优势侧判断不一致,表现为在 AVS 中右侧优势,⁶⁸Ga-Pentixafor PET 示左侧肾上腺摄取高于右侧肾上腺结节(左侧肾上腺 SUV_{max} 为 7.5,右肾上腺结节 SUV_{max} 为 4.1),患者最后根据

表 1 62 例 PA 患者的基线资料及组间比较

组别	例数	性别 [男(例)/女(例)]	年龄 (岁; $\bar{x}\pm s$)	体质指数 (kg/m^2 ; $\bar{x}\pm s$)	病程 (个月; $\bar{x}\pm s$)	收缩压 (mmHg ; $\bar{x}\pm s$)
UPA	39	16/23	47.77 \pm 10.38	24.58 \pm 3.85	4.37 \pm 3.95	152.41 \pm 23.17
BPA	23	16/7	52.26 \pm 12.34	25.16 \pm 2.94	9.75 \pm 7.93	144.95 \pm 22.83
检验值		4.74 ^a	-1.53 ^b	-0.62 ^b	-2.86 ^b	1.15 ^b
P 值		0.029	0.130	0.538	0.009	0.257

组别	舒张压 (mmHg ; $\bar{x}\pm s$)	病灶最大径 (mm ; $\bar{x}\pm s$)	病灶 CT 值 [HU; $M(Q_1, Q_3)$]	血钾 (mmol/L ; $\bar{x}\pm s$)	醛固酮 (ng/dl ; $\bar{x}\pm s$)	ARR [$M(Q_1, Q_3)$]
UPA	91.97 \pm 12.49	15.72 \pm 7.26	5.00(2.88, 16.50)	3.23 \pm 0.76	22.48 \pm 18.00	2.78(0.88, 11.26)
BPA	83.42 \pm 10.83	11.44 \pm 4.04	9.30(-4.25, 24.25)	3.83 \pm 0.46	16.73 \pm 9.91	2.44(0.53, 7.48)
检验值	2.53 ^b	2.28 ^b	-0.72 ^c	-3.48 ^b	1.25 ^b	-0.98 ^c
P 值	0.014	0.030	0.474	0.001	0.217	0.327

注:1 mmHg=0.133 kPa;PA 为原发性醛固酮增多症,UPA 为单侧 PA,BPA 为双侧 PA,ARR 为血浆醛固酮($\text{ng}\cdot\text{dl}^{-1}$)/肾素活性($\text{ng}\cdot\text{ml}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) 比值;^a为 χ^2 值,^b为 *t* 值,^c为 *Z* 值

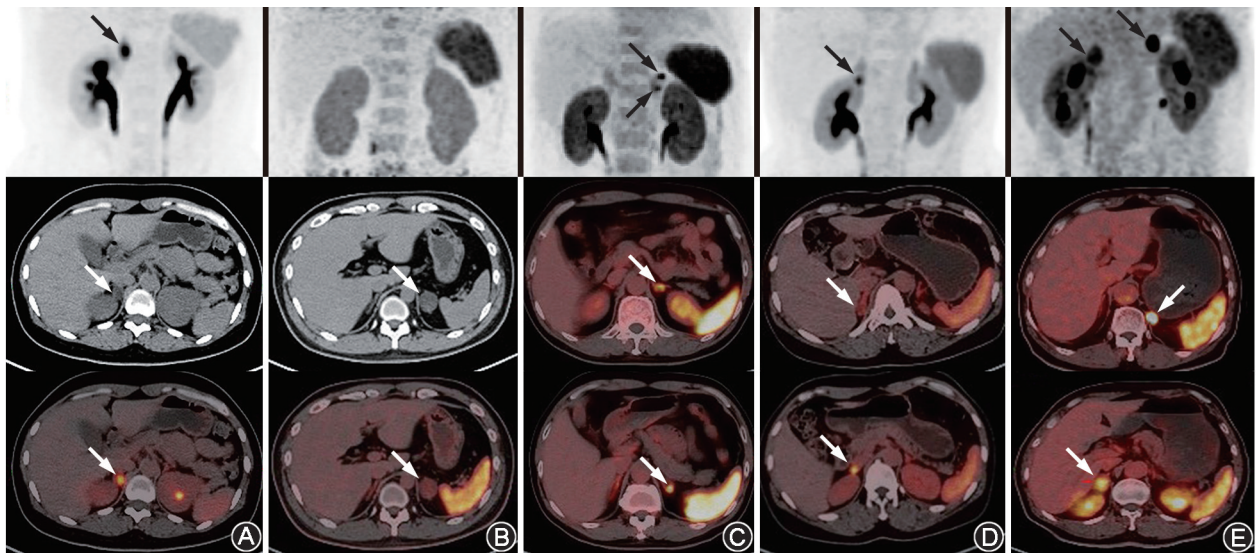


图 1 原发性醛固酮增多症 (PA) 患者⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像图(上:PET 最大密度投影图,中:横断面 CT 或 PET/CT 图,下:横断面 PET/CT 图;箭头示病变) A.女性,35 岁,右侧肾上腺单发结节阳性,考虑单侧 PA(UPA),行超选择肾上腺动脉栓塞术(SAAE)治疗,最终诊断 UPA;B.男性,30 岁,左侧肾上腺单发结节阴性,考虑无功能腺瘤(NFA),行左侧肾上腺切除术,最终诊断双侧 PA(BPA);C.男性,40 岁,左侧肾上腺双结节均阳性,考虑 UPA,行左侧肾上腺切除术,最终诊断 UPA;D.女性,48 岁,右侧肾上腺双结节,1 个结节阳性另 1 结节阴性,考虑 UPA 及 NFA,行右侧肾上腺切除术,最终诊断 UPA;E.男性,64 岁,双侧肾上腺结节均阳性(左侧 $\text{SUV}_{\text{max}}=17$,右侧结节 $\text{SUV}_{\text{max}}=6.2$),考虑均为醛固酮腺瘤(APA),行左侧肾上腺切除术,术后患者临床指标及血压随访均正常,最终诊断 UPA

AVS 结果行右肾上腺 SAAE 治疗,临床疗效为无改善。

4. 肾上腺切除患者显像与预后。38 例接受单侧肾上腺切除的患者中,33 例治愈,2 例部分好转,3 例无改善,治疗有效(治愈及好转)率为 92.1% (35/38)。治愈组肾上腺病灶 SUV_{max} 和 LLR 明显高于好转及无改善的患者[SUV_{max} :11.40(5.90, 14.25)与 7.60(2.05, 10.50), $Z=-2.01, P=0.045$; LLR:9.84 \pm 4.80 与 4.78(1.60, 5.23), $Z=-3.05, P=0.002$]; 而 LCR 组间差异无统计学意义[4.35 \pm 2.91 与 2.00(0.83, 3.17), $Z=-1.88, P=0.060$]。

5. SAAE 治疗前后显像与疗效评价。12 例接受

SAAE 治疗的患者中,UPA 和 BPA 分别有 6 例;其中 4 例治愈、5 例部分好转、3 例无改善。临床疗效评价:6 例 UPA 患者中治愈 2 例、部分好转 2 例、无改善 2 例;6 例 BPA 患者中治愈 2 例、部分好转 3 例、无改善 1 例。显像疗效评价:⁶⁸Ga-Pentixafor 摄取减低 8 例、未减低 4 例。PET/CT 显像评估 SAAE 疗效与临床疗效符合率为 9/12;其中 2 例 UPA 患者治疗后 PET/CT 显像病灶仍高摄取,临床评价为无改善后选择行肾上腺切除术治疗,改变了临床决策。典型病例治疗前后⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像见图 3。SAAE 治疗有效(治愈及好转)组治疗后病灶定量参

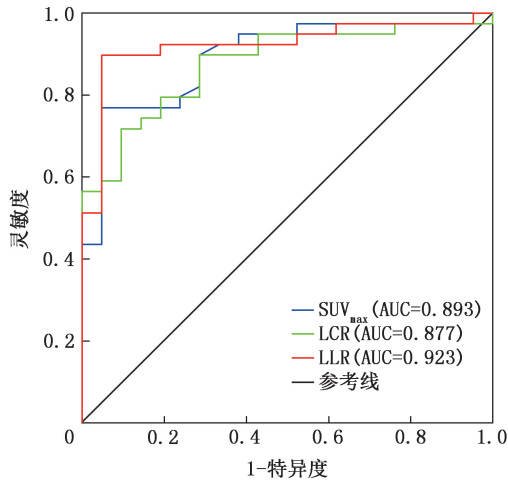


图 2 ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像定量参数在 62 例原发性醛固酮增多症 (PA) 患者中诊断单侧 PA (UPA) 的 ROC 曲线 LCR 为病灶/对侧肾上腺比值, LLR 为病灶/肝脏比值

数 (SUV_{max}、LCR、LLR) 减低, 无改善组则部分数值增高 (表 2)。

讨 论

本研究分析了 62 例 PA 患者的⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像数据, 结果表明该显像方法对 PA 分型断具有高准确性 [对 UPA 患者的诊断灵敏度、特异度和准确性分别为 84.6% (33/39)、73.9% (17/

23)、80.6% (50/62), 对 UPA 病灶的灵敏度为 100% (37/37)]; 对优势侧判断与 AVS 结果一致性高 (10/11)。本研究 ROC 曲线分析示定量参数对分型诊断同样具有较高的准确性, 其中 LLR 诊断 UPA 的最佳诊断界值为 6.05, 此时灵敏度和特异度为 94.6% (35/37)、4/5。肾上腺病灶的 SUV_{max} (在 UPA 病灶为 12.99±5.27) 在患者之间差异很大, 这可能与个体间 CXCR4 表达水平不同有关, 与既往研究一致^[2-3]。既往文献报道的 LLR 最佳诊断界值有一些差异, 在 Ding 等^[12] 和尹璇等^[3] 的研究中分别为 6.89 和 3.1, 本研究的界值为 6.05, 结果的不同可能与研究的人群、设备以及样本量等差异有关。本研究 38 例接受单侧肾上腺切除手术的患者中, 达到治愈的患者肾上腺病灶 SUV_{max} 和 LLR 高于术后部分好转的患者, 与既往研究一致^[12], 考虑⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 定量参数对 UPA 手术患者预后具有预测价值。

常用的 PA 治疗后随访指标 ARR 受药物、人群特征和采样过程的影响^[13]。Lu 等^[14] 提出 ¹¹C-美托咪酯 (metomidate, MTO) PET/CT 有评估 PA 患者治疗结果的潜力, 但 ¹¹C-MTO 的短半衰期和治疗前对地塞米松的要求限制了其临床应用。相比之下, ⁶⁸Ga-Pentixafor 不需要特殊准备, 可以直接反映病灶的功

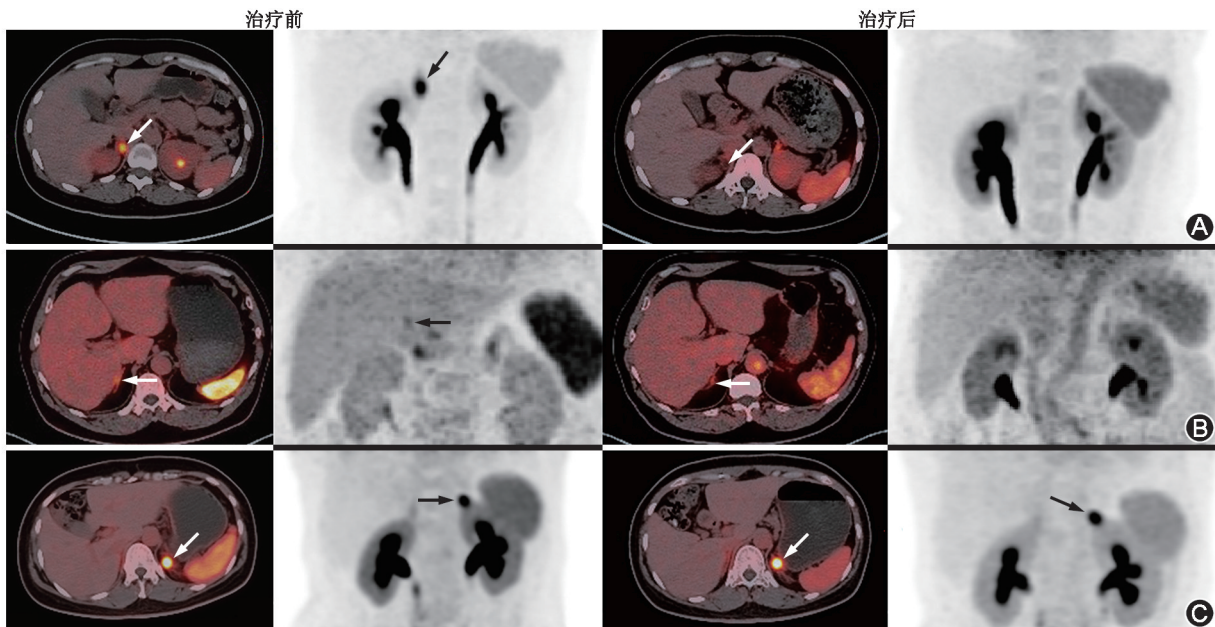


图 3 超选择肾上腺动脉栓塞术 (SAAE) 治疗前后 PA 患者⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像图 (第 1,3 列为横断面 PET/CT 图, 第 2,4 列为 PET 最大密度投影图; 箭头示病变) A. 女性, 35 岁, 治疗前 PET/CT 示右侧肾上腺 UPA (SUV_{max} = 15.7), 行右侧 SAAE 治疗, 治疗后 PET/CT 示病灶未见摄取, 临床疗效为治愈; B. 女性, 56 岁, 治疗前 PET/CT 示右侧肾上腺摄取高于左侧 (SUV_{max} = 5.2), 行右侧 SAAE 治疗, 治疗后 PET/CT 示摄取减低 (SUV_{max} = 3.2), 临床疗效为部分好转; C. 女性, 47 岁, 治疗前 PET/CT 示左侧肾上腺 UPA (SUV_{max} = 20.1), 行左侧 SAAE 治疗, 治疗后 PET/CT 示病灶仍高摄取 (SUV_{max} = 20.0), 临床疗效为无改善, 患者再次行左侧肾上腺切除手术, 病理示肾上腺皮质腺瘤

表 2 PA 患者 SAAE 治疗有效组与无改善组病灶的治疗前后定量参数变化

组别	例数	SUV _{max}			LCR			LLR		
		治疗前	治疗后	Δ	治疗前	治疗后	Δ	治疗前	治疗后	Δ
有效	9	7.9 (4.9,16.8)	3.6 (3.0,4.4)	2.7 (1.2,11.2)	4.9 (2.5,7.8)	1.4 (1.1,3.9)	3.9 (0.9,6.0)	8.8 (4.2,14.3)	2.1 (1.9,2.8)	6.0 (1.7,8.7)
无改善	3	4.1, 10.3,20.1	4.2, 12.4,20.0	-0.1, -2.1,0.1	0.4, 4.5,4.9	0.5, 4.3,4.4	-0.1, 0.2,0.5	2.6, 10.3,25.1	2.3, 10.2,14.3	0.3, 0.1,10.8

注:PA 为原发性醛固酮增多症,SAAE 为超选择肾上腺动脉栓塞术,LCR 为病灶/对侧肾上腺比值,LLR 为病灶/肝脏比值;Δ=治疗前-治疗后;有效组数据为 $M(Q_1, Q_3)$

能,提高患者检查的便利性^[2-3,15]。本研究对比了接受新兴治疗方式 SAAE 的 12 例患者的⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像疗效评价和临床疗效评价,结果显示,大多数患者从 SAAE 治疗中受益(9/12),治疗前后⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 显像(定量参数)变化可有效反映临床随访结果,并成功确定了 2 例治疗不成功的病例,患者后续选择肾上腺切除术。SAAE 治疗有效(治愈及好转)组治疗后病灶定量参数(SUV_{max}、LCR、LLR)减低,无改善组则部分数值增高,有效组定量参数变化有大于无改善组的趋势,提示 PET/CT 定量参数似乎可以作为量化治疗前后病灶功能相对变化的指标,但由于病例数少,需要扩大样本量进一步验证。Li 等^[10]的研究发现,⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 可以有效评估 SAAE 治疗后病灶摄取的变化;对于特发性醛固酮增多症患者,PET/CT 定量参数比视觉分析更有效,但是其 PET/CT 显像时间为治疗后 1 周。鉴于 SAAE 治疗可能在初始缓解后复发,而且治疗后炎性反应或栓塞后再通等可能影响其判断的准确性^[16],PASO 建议随访时间为 3、6、12 个月^[11],本研究选取复查时间为 3 个月。

本研究存在以下不足:首先,本研究为单中心研究,纳入对象选择方面存在固有偏倚,例如 UPA 占比高于 BPA(症状更严重患者更可能被转送到本院是原因之一),对于显像双侧阳性患者,仅对手术切除侧的病灶分析;其次,SAAE 组样本量小(12 例)导致亚组分析效力不足(BPA 仅 6 例);第三,由于随访时间不够长,无法跟踪患者最终发生心血管事件的概率。在未来的工作中,笔者计划扩大样本量以进一步验证和扩展本研究的结论。

综上,本研究表明⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 对 PA 分型判断具有高准确性,对优势侧判断与 AVS 结果一致性高,初步证实其在 SAAE 疗效评估中的潜在价值。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 林凯贤:研究设计与实施,数据整理,论文撰写;陈珍英:研究指导与设计,统计学分析;方周菲、黄超:数据采集与分析;蔡瀚、

缪蔚冰:研究指导、论文修改

参 考 文 献

- [1] Turcu AF, Yang J, Vaidya A. Primary aldosteronism—a multidimensional syndrome [J]. Nat Rev Endocrinol, 2022, 18(11): 665-682. DOI:10.1038/s41574-022-00730-2.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Li M, Guan L, Yang L, et al. ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT for the assessment of therapeutic outcomes following superselective adrenal arterial embolization in patients with primary aldosteronism [J]. EJNMMI Res, 2025, 15(1): 5. DOI: 10.1186/s13550-024-01194-3.
- [6] Hokotate H, Inoue H, Baba Y, et al. Aldosteronomas: experience with superselective adrenal arterial embolization in 33 cases [J]. Radiology, 2003, 227(2): 401-406. DOI: 10.1148/radiol.2272011798.
- [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] 中国医师协会泌尿外科医师分会肾上腺性高血压外科协作组,中华医学会内分泌学分会肾上腺学组,中华医学会核医学分会 PET 学组.原发性醛固酮增多症诊断中 CXCR4 受体显像的临床应用专家共识(2022)[J].协和医学杂志, 2022, 13(6):

- 986-991. DOI:10.12290/xhyxzz.2022-0584.
Chinese Urological Doctor Association Adrenal Hypertension Surgery Collaborative Organization, Chinese Society of Endocrinology Adrenal Group, Chinese Society of Nuclear Medicine PET Group. Consensus on clinical application of the CXCR4-targeted imaging in the diagnosis of primary aldosteronism(2022)[J]. Med J Peking Union Med Coll Hosp, 2022, 13(6): 986-991. DOI:10.12290/xhyxzz.2022-0584.
- [9] Funder JW, Carey RM, Mantero F, et al. The management of primary aldosteronism; case detection, diagnosis, and treatment; an Endocrine Society clinical practice guideline [J]. J Clin Endocrinol Metab, 2016, 101(5): 1889-1916. DOI:10.1210/jc.2015-4061.
- [10] Li X, Feng R, Xiang R, et al. Bilateral superselective adrenal artery embolization for bilateral primary aldosteronism; a novel approach in an efficacy and safety proof-of-principle trial [J]. Hypertens Res, 2025, 48(1): 189-199. DOI:10.1038/s41440-024-01881-7.
- [11] Williams TA, Lenders JWM, Mulatero P, et al. Outcomes after adrenalectomy for unilateral primary aldosteronism; an international consensus on outcome measures and analysis of remission rates in an international cohort [J]. Lancet Diabetes Endocrinol, 2017, 5(9): 689-699. DOI:10.1016/S2213-8587(17)30135-3.
- [12] Ding J, Li X, Liu S, et al. Clinical value of ⁶⁸Ga-pentixafor PET/CT in subtype diagnosis of primary aldosteronism patients with adrenal micronodules [J]. J Nucl Med, 2024, 65(1): 117-124. DOI: 10.2967/jnumed.123.266061.
- [13] O'Shea PM, Griffin TP, Denieffe S, et al. The aldosterone to renin ratio in the diagnosis of primary aldosteronism; promises and challenges [J]. Int J Clin Pract, 2019, 73(7): e13353. DOI: 10.1111/ijcp.13353.
- [14] Lu CC, Chen CJ, Peng KY, et al. Predicting treatment response in primary aldosteronism using ¹¹C-metomidate positron emission tomography [J]. Clin Nucl Med, 2022, 47(11): 936-942. DOI: 10.1097/RLU.0000000000004369.
- [15] 刘声焱, 郑国洋, 高寅洁, 等. ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT 与肾上腺静脉采血指导原发性醛固酮增多症手术治疗的比较 [J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(9): 513-518. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20240813-00292.
Liu SY, Zheng GY, Gao YJ, et al. Comparative study of ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT and adrenal venous sampling in guiding surgical treatment of primary aldosteronism [J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 45(9): 513-518. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20240813-00292.
- [16] 董一飞, 张英, 董徽, 等. 经皮选择性肾上腺动脉栓塞治疗原发性醛固酮增多症——现状与展望 [J]. 中华循环杂志, 2023, 38(8): 794-798. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3614.2023.08.002.
Dong YF, Zhang Y, Dong H, et al. Superselective adrenal arterial embolization for primary aldosteronism: current status and future perspectives [J]. Chin Circ J, 2023, 38(8): 794-798. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3614.2023.08.002.

(收稿日期:2025-06-19)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

2026 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