

Al¹⁸F-NOTA-Pentixafor PET/CT 和肾上腺静脉采血识别原发性醛固酮增多症患者偏侧性的比较

解逸辰¹ 阎歆淳¹ 郑国洋² 任超¹ 黄政海³ 刘声焱¹ 张玉石² 童安莉⁴ 霍力¹

¹中国医学科学院、北京协和医学院北京协和医院核医学科, 疑难重症及罕见病国家重点实验室, 罕见病研究中心, 北京 100730; ²中国医学科学院、北京协和医学院北京协和医院泌尿外科, 北京 100730; ³中国医学科学院、北京协和医学院北京协和医院, 临床医学研究所, 转化医学国家重大科技基础设施, 诊疗新技术研发平台, 北京 100730; ⁴中国医学科学院、北京协和医学院北京协和医院内分泌科, 北京 100730

通信作者: 霍力, Email: huoli@pumch.cn

【摘要】 目的 评估 Al¹⁸F-1,4,7-三氮杂环壬烷-1,4,7-三乙酸(NOTA)-Pentixafor PET/CT 在原发性醛固酮增多症(PA)分型中的诊断效能,并与肾上腺静脉采血(AVS)比较,探究其识别 PA 功能偏侧性及指导临床决策的价值。方法 前瞻性队列研究。连续纳入 2024 年 1 月 1 日至 2025 年 4 月 1 日在北京协和医院确诊 PA 且诊断近 1 个月内完成 AVS 的 34 例患者[男 24 例、女 10 例,年龄(51±10)岁]。所有患者行 Al¹⁸F-NOTA-Pentixafor PET/CT 显像,通过半定量分析计算偏侧指数(LI)、病灶/肾上腺比值(LAR)及病灶/肝脏比值(LLR)。以 AVS 结果为参照,采用 ROC 曲线评估各参数诊断效能;同时评价接受单侧肾上腺切除术患者的术后临床及生化转归。结果 34 例患者中,AVS 提示 10 例无优势分泌侧,13 例为左侧优势,11 例为右侧优势。Al¹⁸F-NOTA-Pentixafor PET/CT 参数中,LI 诊断效能最佳, AUC 为 0.722,诊断单侧病变的准确性为 73.5%(25/34),特异度为 10/13;LAR 的灵敏度最高(81.0%,17/21),但特异度较低(8/13);LLR 的诊断效能相对较弱(AUC=0.641)。在 10 例接受手术的患者中,3 例 AVS 结果未提示明确优势侧,但 Al¹⁸F-NOTA-Pentixafor PET/CT 显示明确的单侧高摄取灶,依据 PET/CT 结果行手术,术后病理均证实为肾上腺皮质腺瘤,6 个月随访时均获得完全缓解。结论 Al¹⁸F-NOTA-Pentixafor PET/CT 在 PA 分型中显示出良好的诊断潜力,有望成为 AVS 的重要无创补充,特别是在 AVS 结果阴性时可为临床决策提供关键依据。

【关键词】 醛固酮增多症;肽类,环;同位素标记;氟放射性同位素;导管插入术,外周;肾上腺;正电子发射断层显像术;体层摄影术,X 线计算机

基金项目:国家自然科学基金(U24A20758)

临床试验注册: ClinicalTrials.gov, NCT06773663

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20251130-00437

Comparison of Al¹⁸F-NOTA-Pentixafor PET/CT and adrenal venous sampling for identifying lateralization in patients with primary aldosteronism

Xie Yichen¹, Yan Xinchun¹, Zheng Guoyang², Ren Chao¹, Huang Zhenghai³, Liu Shengyan¹, Zhang Yushi², Tong Anli⁴, Huo Li¹

¹Department of Nuclear Medicine, State Key Laboratory of Complex, Severe, and Rare Diseases, Center for Rare Diseases Research, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100730, China; ²Department of Urology, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100730, China; ³Theranostics and Translational Research Center, National Infrastructures for Translational Medicine, Institute of Clinical Medicine, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100730, China; ⁴Department of Endocrinology, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100730, China
Corresponding author: Huo Li, Email: huoli@pumch.cn

【Abstract】 **Objective** To evaluate the diagnostic efficacy of Al¹⁸F-1,4,7-triazacyclononane-1,4,7-triacetic acid (NOTA)-Pentixafor PET/CT in the subtyping of primary aldosteronism (PA), compare it with adrenal venous sampling (AVS), and explore its value in identifying functional laterality and guiding

clinical decision-making. **Methods** This was a prospective cohort study. From January 1, 2024 to April 1, 2025, 34 patients (24 males, 10 females; age (51 ± 10) years) diagnosed with PA at Peking Union Medical College Hospital, who underwent AVS within one month of diagnosis were consecutively enrolled. All patients underwent $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT imaging. Semi-quantitative parameters, including the lateralization index (LI), lesion-to-adrenal ratio (LAR), and lesion-to-liver ratio (LLR), were calculated. Using AVS results as the reference standard, ROC curves were plotted to evaluate the diagnostic efficacy of each parameter. Postoperative clinical and biochemical outcomes were evaluated in patients who underwent unilateral adrenalectomy. **Results** Among 34 patients, AVS indicated no dominant side in 10 cases, left dominance in 13 cases, and right dominance in 11 cases. In parameters of $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT, LI demonstrated the best diagnostic efficacy, with the AUC of 0.722, the accuracy of 73.5% (25/34) and the specificity of 10/13; LAR exhibited the highest sensitivity (81.0%, 17/21) but lower specificity (8/13), while LLR showed relatively weaker diagnostic efficacy (AUC = 0.641). Among the 10 patients who underwent surgery, 3 presented with no lateralization on AVS but showed distinct unilateral uptake on $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT. These patients underwent surgery based on PET/CT localization and were all pathologically confirmed as adrenocortical adenoma, and achieved complete remission during the 6-month follow-up. **Conclusion** $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT demonstrates good diagnostic potential in subtyping of PA, which holds promise as an important non-invasive supplement to AVS, thus providing critical evidence for clinical decision-making, particularly in cases with negative AVS results.

【Key words】 Hyperaldosteronism; Peptides, cyclic; Isotope labeling; Fluorine radioisotopes; Catheterization, peripheral; Adrenal glands; Positron-emission tomography; Tomography, X-ray computed

Fund program: National Natural Science Foundation of China (U24A20758)

Trial Registration: ClinicalTrials.gov, NCT06773663

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20251130-00437

原发性醛固酮增多症 (primary aldosteronism, PA) 是指肾上腺皮质自主分泌过量醛固酮的一组临床综合征, 是继发性高血压最常见的病因^[1-2], 准确鉴别单侧优势分泌病灶是决定患者能否通过手术获益的关键^[3-4]。CT 是目前 PA 首选的影像学检查, 但仅能提供解剖信息, 其功能分型准确性不足^[5]。而作为分型“金标准”的肾上腺静脉采血 (adrenal venous sampling, AVS) 为有创操作, 技术门槛高、费用昂贵, 且伴有出血等并发症风险, 限制了其在临床实践中的普及与应用^[6]。

近期, 靶向趋化因子 CXC 亚家族受体 4 (CXC subfamily receptor 4, CXCR4) 的功能成像为 PA 的分型诊断提供了新视角, 在多项研究中展现出良好的诊断效能^[7-13]。但既往研究多基于⁶⁸Ga 标记探针, 其固有的短半衰期及低产率难以满足大规模临床筛查的需要。本研究旨在前瞻性评估新型探针 $Al^{18}F$ -1,4,7-三氮杂环壬烷-1,4,7-三乙酸 (1,4,7-triazacyclononane-1,4,7-triacetic acid, NOTA)-Pentixafor PET/CT 识别 PA 患者功能偏侧性的效能, 并与 AVS 进行比较, 以验证该技术在 PA 分型诊断及临床决策中的潜在价值。

资料与方法

1. 研究对象。本研究为前瞻性、单中心队列研究, 连续纳入 2024 年 1 月 1 日至 2025 年 4 月 1 日在北京协和医院确诊为 PA 的患者。纳入标准: (1) 年龄 18~80 岁; (2) 依据 PA 诊断的专家共识^[3], 确

诊为 PA 患者; (3) 同意并完成 $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 显像; (4) 在 PET/CT 检查前 1 个月内完成 AVS 检查, 且术中 AVS 选择指数 (selectivity index of AVS, SI_{AVS}) 提示双侧插管成功。排除标准: (1) 既往有肾上腺手术史; (2) 妊娠或哺乳期妇女; (3) 伴有其他恶性肿瘤或严重肝肾功能不全; (4) 临床资料缺失。本研究方案已获北京协和医院伦理审查委员会批准 (伦理批件号: I-23PJ2195), 所有受试者签署知情同意书。

最终纳入 34 例受试者, 其中男 24 例、女 10 例, 年龄 (51 ± 10) 岁。收集所有受试者的基线人口学及临床特征, 包括性别、年龄、体质指数、血压控制情况 (最高收缩压/舒张压, 降压药使用情况等)、低钾血症病史及补钾情况。实验室检查指标包括血清钾水平、立位血浆醛固酮水平、血浆肾素活性, 并计算血浆醛固酮/肾素活性比值 (aldosterone-to-renin ratio, ARR)。

2. AVS 检查及结果判读。AVS 操作由经验丰富的介入科医师完成。在非促肾上腺皮质激素刺激状态下, 同步采集双侧肾上腺静脉及下腔静脉血样。结果判读指标包括 SI_{AVS} : 肾上腺静脉与下腔静脉皮质醇浓度的比值, $SI_{AVS} \geq 2.0$ 定义为插管成功^[14]; AVS 偏侧指数 (lateralization index of AVS, LI_{AVS}): 优势侧与非优势侧肾上腺静脉醛固酮与皮质醇浓度的比值之比, $LI_{AVS} \geq 2.0$ 定义为存在偏侧性^[14]。

3. $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 显像与图像分析。受试者在检查前无需禁食, 静脉注射 $Al^{18}F$ -

NOTA-Pentixafor(由北京协和医院核医学科自行合成;185~370 MBq)后 45~75 min,在采用飞行时间技术的 PET/CT 设备(uMI Panorama,上海联影医疗科技股份有限公司)上进行显像。首先进行低剂量 CT 扫描,用于解剖定位及衰减校正,随后使用同一扫描范围进行 PET 图像采集,PET 图像重建范围为肝上缘至髂前上棘连线,单床位采集时间为 5 min。图像重建采用有序子集最大期望值迭代法,3 次迭代,10 个子集,图像矩阵 256×256。

PET/CT 图像由 2 位具有丰富经验的核医学科医师采用盲法独立阅片,当意见不一致时,通过协商达成共识。半定量分析时,医师在肾上腺高摄取病灶处自动勾画感兴趣体积(volume of interest, VOI),测量其 SUV_{max} 。同时,在肝脏右叶邻近右侧肾上腺区域勾画直径 2 cm 的 VOI 测量 SUV_{mean} 作为肝脏本底;在同侧及对侧正常肾上腺组织勾画 VOI 获取背景摄取值 SUV_{mean} 。依据测量数据计算以下参数:(1) 偏侧指数(lateralization index, LI) = 优势侧肾上腺 SUV_{max} /对侧肾上腺 SUV_{max} ; (2) 病灶/肾上腺比值(lesion-to-adrenal ratio, LAR) = 病灶 SUV_{max} /同侧正常肾上腺组织 SUV_{mean} ; (3) 病灶/肝脏比值(lesion-to-liver ratio, LLR) = 病灶 SUV_{max} /肝脏 SUV_{mean} 。

4. 手术与随访结局评估。由于 AVS 无优势侧患者不具备手术指征,无法通过手术获取病理结果,为保持一致性,本研究统一以 AVS 结果作为判断功能偏侧性的参考标准。对于接受了单侧肾上腺切除术的患者,术后标本行 HE 染色,进行组织病理学确诊。术后进行至少 6 个月的随访。依据 PA 手术预后(PA surgical outcome, PASO)标准评估手术疗效,分为完全缓解、部分缓解及无临床/生化缓解^[3],其中完全缓解和部分缓解在本研究中被认为有手术获益。

5. 统计学分析。所有数据分析采用 R(4.5.1 版)进行。符合正态分布的定量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,非正态分布的定量资料以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示;定性资料以频数(百分比)表示。以 AVS 结果为参照,采用 ROC 曲线评估 LI、LAR 及 LLR 对 PA 功能偏侧性的

诊断效能。

结 果

1. 患者基线特征。34 例入组患者表现出 PA 的典型临床特征,包括高血压及低钾血症,最高收缩压和舒张压的分别为 180(170, 190) mmHg 和 110(100, 110) mmHg(1 mmHg = 0.133 kPa),血钾水平为 (2.97 ± 0.63) mmol/L;生化指标提示,血浆醛固酮水平为 21(17, 27) ng/dl,血浆肾素活性为 0.28(0.11, 0.55) $ng \cdot ml^{-1} \cdot h^{-1}$, ARR 为 63(46, 146)。

2. $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 与 AVS 判断功能偏侧性的比较。34 例患者中, AVS 提示 10 例无优势分泌侧, 13 例为左侧优势, 11 例为右侧优势。 $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 的半定量参数中, LI 展现出最佳的诊断效能, AUC 为 0.722, 诊断单侧病变的准确性为 73.5%(25/34), 特异度为 10/13; LAR 灵敏度最高(81.0%, 17/21), 但特异度较低(8/13); LLR 的诊断效能相对较低, AUC 为 0.641, 具体诊断效能见表 1。

3. 手术获益情况。34 例患者中共 10 例接受了单侧肾上腺切除手术, 其中 7 例患者的 PET/CT 功能偏侧性与 AVS 结果一致, 术后病理均为肾上腺皮质腺瘤或结节样增生, 术后均获得临床或生化缓解, 最终 3 例诊断为单侧醛固酮腺瘤(aldoosterone-producing adenoma, APA), 4 例为单侧原发性肾上腺皮质增生(primary adrenocortical hyperplasia, PAH); 另 3 例患者 AVS 结果提示无明确优势侧, 但 PET/CT 显示明确的单侧高摄取灶, 随后患者均接受了优势侧的肾上腺切除术, 术后病理均证实为肾上腺皮质腺瘤, 6 个月随访时 PASO 评效为完全缓解, 证实了功能性腺瘤的诊断。典型病例的 PET/CT 显像图见图 1。

讨 论

PA 的精准分型诊断和优势侧判断是手术决策的前提。目前, AVS 仍是各国指南中 PA 分型的参考标准^[3-4], 然而, 由于 AVS 技术门槛高、有创且插管成功率受解剖变异影响较大, 临床普及度仍受限^[6]。本研究前瞻性评估了新型探针 $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor

表 1 不同 $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 参数对 PA 患者偏侧性的诊断效能

参数	最佳截断值	AUC	灵敏度	特异度	阳性预测值	阴性预测值	准确性
LI	1.68	0.722	71.4%(15/21)	10/13	15/18	10/16	73.5%(25/34)
LAR	2.21	0.714	81.0%(17/21)	8/13	77.3%(17/22)	8/12	73.5%(25/34)
LLR	6.85	0.641	61.9%(13/21)	10/13	13/16	10/18	67.6%(23/34)

注:NOTA 为 1,4,7-三氮杂环壬烷-1,4,7-三乙酸,PA 为原发性醛固酮增多症,LI 为偏侧指数,LAR 为病灶/肾上腺比值,LLR 为病灶/肝脏比值;括号中为例数比

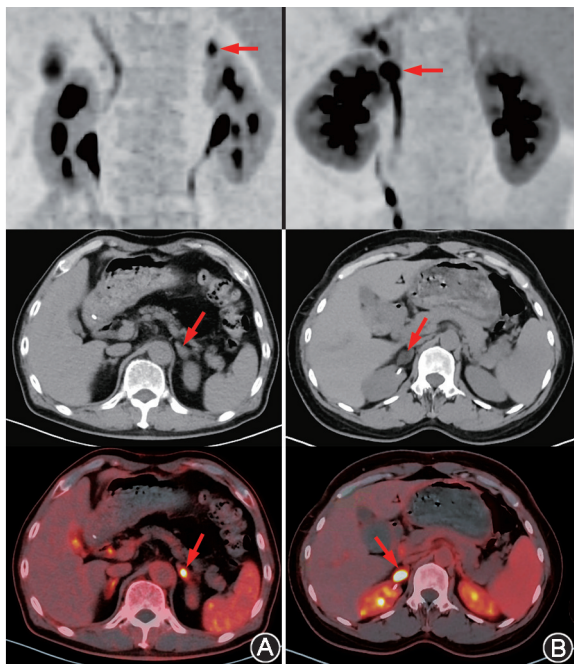


图1 原发性醛固酮增多症(PA)患者肾上腺病灶 $Al^{18}F$ -1,4,7-三氮杂环壬烷-1,4,7-三乙酸(NOTA)-Pentixafor PET/CT 显像图(箭头示肾上腺病灶) A.患者男,61岁,PET/CT 显像可见左侧肾上腺病灶显像剂摄取增高, SUV_{max} 7.1,长径 1.1 cm,肾上腺静脉采血(AVS)提示左侧为优势侧,术后病理为肾上腺皮质腺瘤,术后6个月评价为完全缓解,证实为醛固酮腺瘤(APA);B.患者女,50岁,PET/CT 显像可见右侧肾上腺病灶显像剂摄取增高, SUV_{max} 7.5,长径 2.0 cm,AVS 提示无明确优势侧,术后病理为肾上腺皮质腺瘤,术后6个月评价为完全缓解,证实为 APA

PET/CT 在 PA 功能偏侧性识别中的应用价值,结果表明该技术在本研究队列中显示出良好的诊断潜力,有望成为 AVS 的重要补充。

与既往基于 ^{68}Ga -Pentixafor 的研究相比,本研究采用的 ^{18}F 标记探针在物理特性上具有显著优势。 ^{68}Ga 的高正电子能量导致其正电子游程较长,限制了图像分辨率,且较低的产率限制了其大规模的应用。相比之下, ^{18}F 正电子能量低、游程短,理论上能提供更优的图像分辨率以探测微小腺瘤;此外, ^{18}F 可通过回旋加速器大规模制备且半衰期较长,更适宜在临床常规中推广^[15]。

本研究重点比较了 LI、LAR、LLR 半定量参数对 PA 患者偏侧性的诊断效能。既往关于 ^{68}Ga -Pentixafor 的研究中,不同中心对于最佳参数的推荐存在差异^[8,11,16]。在本研究中,LI 被证实是效能最优的指标 ($AUC=0.722$),这表明利用对侧肾上腺作为本底进行校正,能有效消除个体间本底代谢差异的影响,更准确地反映双侧肾上腺的功能差异。相比之下, LAR 虽然展现了较高的灵敏度 (81.0%, 17/21),但

特异性相对较低 (8/13),这可能是由于 LAR 仅反映腺体内部的摄取差异,而忽略了对侧肾上腺的功能状态。与部分 ^{68}Ga 研究推荐的 LLR 不同^[17],本研究中 LLR 的 AUC 仅为 0.641,诊断效能弱于 LI 和 LAR,这可能是由于肝脏作为主要代谢器官,其生理性摄取在不同个体间差异较大。

本研究中最具临床指导意义的发现在于 $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 对 AVS 的补充价值。在本组进行手术的 10 例患者中,有 3 例 AVS 提示无明确偏侧性,但 $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 均显示出明确的单侧高摄取;依据 PET/CT 的定位结果进行单侧肾上腺切除,术后病理均证实为肾上腺皮质腺瘤,且患者均获得完全缓解。这一结果提示,对于 AVS 结果阴性,而临床与 CT 高度怀疑单侧病变,或拒绝如 AVS 等有创检查的患者, $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 能够提供关键的功能定位信息,帮助部分患者获得手术治愈的机会。与 Peng 等^[18]的研究结果一致,本研究证实了 $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 在 PA 偏侧化识别中的有效性,并进一步揭示该技术可能是 AVS 结果不确定时提供增量信息的关键工具。

本研究为探索性研究,尚存在以下局限性。第一,样本量相对较小,可能导致部分统计学结果产生偏倚,同时限制了更深入的亚组分析;未来需要更大样本量的多中心前瞻性队列研究,以验证 $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 的诊断效能,全面评估该技术的普适性,并确定新探针统一的标记与质量控制流程,制定统一的阅片标准与截断值,以确定各中心图像的可比性。第二,本研究以 AVS 结果而非手术病理作为参考标准,考虑到 AVS 本身存在假阴性的可能,这在一定程度上低估了 PET/CT 的真实效能。第三,本研究未能在切除标本中常规开展 CXCR4 免疫组织化学染色,因此尚缺乏影像摄取与受体表达水平对应关系的直接证据;后续研究中应引入 CXCR4、醛固酮合成酶(CYP11B2)免疫组织化学分析,与影像学结果在分子病理层面进行对照和相关性评估。

综上所述, $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 显像在 PA 分型诊断中具有重要的临床应用价值。通过综合分析半定量参数,尤其是 LI,在识别单侧 APA 或 PAH 中具有较高的潜力。凭借其无创、高分辨率及 ^{18}F 核素易于获取的优势, $Al^{18}F$ -NOTA-Pentixafor PET/CT 有望成为 AVS 的重要补充工具,优化 PA 患者的诊疗流程。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 解逸辰:研究实施、数据分析、论文撰写;阎歆淳:研究实施、数据分析;郑国洋、任超、黄政海、刘声焱:研究实施;张玉石、童安莉:患者招募;霍力:研究指导、论文审阅

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] Brown JM, Siddiqui M, Calhoun DA, et al. The unrecognized prevalence of primary aldosteronism: a cross-sectional study [J]. *Ann Intern Med*, 2020, 173 (1): 10-20. DOI: 10.7326/M20-0065.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Kempers MJ, Lenders JW, van Outhousden L, et al. Systematic review: diagnostic procedures to differentiate unilateral from bilateral adrenal abnormality in primary aldosteronism [J]. *Ann Intern Med*, 2009, 151 (5): 329-337. DOI: 10.7326/0003-4819-151-5-200909010-00007.
- [6] Araujo-Castro M, Ruiz-Sánchez JG, Ramírez PP, et al. Practical consensus for the treatment and follow-up of primary aldosteronism: a multidisciplinary consensus document [J]. *Endocrine*, 2024, 85 (2): 532-544. DOI:10.1007/s12020-024-03773-9.
- [7] Ding J, Tong A, Zhang Y, et al. Intense ⁶⁸Ga-pentixafor activity in aldosterone-producing adrenal adenomas [J]. *Clin Nucl Med*, 2020, 45(4): 336-339. DOI:10.1097/RLU.0000000000002946.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Zheng G, Ding J, Gao Y, et al. ⁶⁸Ga-pentixafor PET/CT in guiding surgical management of primary aldosteronism [J]. *J Clin Transl Endocrinol*, 2025, 39: 100384. DOI: 10.1016/j.jcte.2025.100384.
- [11] Yi T, Lu D, Cui Y, et al. ⁶⁸Ga-pentixafor PET/CT is a supplementary method for primary aldosteronism subtyping compared with adrenal vein sampling [J]. *Mol Imaging Biol*, 2025, 27(1): 142-150. DOI:10.1007/s11307-024-01976-0.
- [12] 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. 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.
- [13] 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.
- [14] 中国医师协会内分泌代谢科医师分会肿瘤内分泌学组,中国内分泌性高血压协作组.肾上腺静脉取血操作规范和结果解读专家共识(2025 年版) [J]. 中华内分泌外科杂志(中英文), 2025, 19(1): 1-7. DOI: 10.3760/cma.j.cn115807-20250103-00003. Tumor Endocrinology Group of Endocrinology and Metabolism Branch of Chinese Medical Doctor Association, Endocrine Hypertension Collaboration in China. Expert consensus on the operation specifications and result interpretation of adrenal vein sampling [J]. *Chin J Endocr Surg*, 2025, 19(1): 1-7. DOI: 10.3760/cma.j.cn115807-20250103-00003.
- [15] Kwon D, Lozada J, Zhang Z, et al. High-contrast CXCR4-targeted ¹⁸F-PET imaging using a potent and selective antagonist [J]. *Mol Pharm*, 2021, 18(1): 187-197. DOI: 10.1021/acs.molpharmaceut.0c00785.
- [16] Zheng Y, Long T, Peng N, et al. The value of targeting CXCR4 with ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT for subtyping primary aldosteronism [J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2023, 109(1): 171-182. DOI:10.1210/clinem/dgad421.
- [17] Yin X, Ai K, Luo J, et al. A comparison of the performance of ⁶⁸Ga-Pentixafor PET/CT *versus* adrenal vein sampling for subtype diagnosis in primary aldosteronism [J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2024, 15: 1291775. DOI:10.3389/fendo.2024.1291775.
- [18] Peng Y, Chen F, Yao R, et al. The value of targeted CXCR4 ¹⁸F-AIF-NOTA-pentixafor PET/CT for subtyping primary aldosteronism [J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2025, 16: 1533295. DOI:10.3389/fendo.2025.1533295.

(收稿日期:2025-11-30)