

· 影像新技术与癫痫治疗 ·

脑¹⁸F-FDG PET/CT 对 MRI 阴性难治性癫痫患者术前致痫灶定位的价值

曾春媛¹ 周海玲² 谭志强¹ 汤桂贤¹ 吴环华¹

吴彪¹ 唐勇进¹ 凌雪英¹ 郭强³ 徐浩¹

¹暨南大学附属第一医院核医学科, 广州 510630; ²湛江中心人民医院放射科, 湛江 524045; ³广东三九脑科医院癫痫中心, 广州 510510

通信作者: 徐浩, Email: txh@jnu.edu.cn

【摘要】目的 探讨脑¹⁸F-FDG PET/CT 对 MRI 阴性难治性癫痫患者术前致痫灶定位的价值。**方法** 回顾性分析 2014 年 1 月至 2020 年 6 月间于暨南大学附属第一医院接受术前脑¹⁸F-FDG PET/CT-MRI 检查的 55 例[男 38 例、女 17 例, 年龄(20.0±8.1)岁]MRI 阴性癫痫患者的临床资料(550 个脑叶)。以立体定向脑电图(SEEG)及术后随访至少 1 年的结果作为参考标准, 分别计算¹⁸F-FDG PET/CT、视频脑电图(VEEG)、PET/CT+VEEG 及 PET/CT-VEEG 对致痫灶定位的灵敏度、特异性、准确性、阳性预测值(PPV)及阴性预测值(NPV)。使用 χ^2 检验对单脑叶、多脑叶及全部患者不同检查方式的效能进行比较。**结果** PET/CT 对致痫灶的正确定侧率为 92.6%(25/27)。PET/CT 对致痫灶定位的灵敏度、特异性、准确性、PPV 及 NPV 分别为 65.1%(54/83)、77.9%(364/467)、76.0%(418/550)、34.4%(54/157)及 92.6%(364/393)。PET/CT-VEEG 对全部及多脑叶癫痫患者致痫灶定位的灵敏度高于单独的 VEEG[75.9%(63/83)和 45.8%(38/83)、68.6%(35/51)和 31.4%(16/51)]; χ^2 值: 15.80、14.16, 均 $P < 0.001$], PET/CT+VEEG 对全部及单脑叶癫痫患者致痫灶定位的特异性高于单独的 VEEG[97.6%(456/467)和 94.6%(442/467)、97.9%(282/288)和 94.1%(271/288)]; χ^2 值: 5.66、5.48, P 值: 0.017、0.019]。PET/CT-VEEG(PET/CT 与 VEEG 一致)对致痫灶定位的灵敏度高于 PET/CT+VEEG(PET/CT 与 VEEG 不一致)[8/9 和 28.4%(21/74)]; $\chi^2 = 10.40, P = 0.001$], 其特异性及准确性高于 PET/CT-VEEG(PET/CT 与 VEEG 不一致)[93.4%(57/61)和 71.7%(291/406)、92.9%(65/70)和 72.1%(346/480)]; χ^2 值: 13.23、13.96, 均 $P < 0.001$]。**结论** ¹⁸F-FDG PET/CT 能定位定侧 MRI 阴性癫痫患者的致痫灶。¹⁸F-FDG PET/CT 与 VEEG 的联合应用能提高致痫灶检出的灵敏度、特异性及准确性。¹⁸F-FDG PET/CT 与 VEEG 一致时对致痫灶检出的准确性较高。

【关键词】 耐药性癫痫; 正电子发射断层显像术; 氟脱氧葡萄糖 F18; 脑电描记术

基金项目: 国家自然科学基金(82371998); 广州市科技计划项目(2023A03J1035); 广州市科技计划项目-市校联合资助项目(SL2022A03J01222)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20231230-00151

Value of brain ¹⁸F-FDG PET/CT in the preoperative localization of epileptogenic foci in refractory epilepsy patients with negative MRI

Zeng Chunyuan¹, Zhou Hailing², Tan Zhiqiang¹, Tang Guixian¹, Wu Huanhua¹, Wu Biao¹, Tang Yongjin¹, Ling Xueying¹, Guo Qiang³, Xu Hao¹

¹Department of Nuclear Medicine, the First Affiliated Hospital of Jinan University, Guangzhou 510630, China; ²Department of Radiology, Central People's Hospital of Zhanjiang, Zhanjiang 524045, China; ³Epilepsy Center, Guangdong 999 Brain Hospital, Guangzhou 510510, China

Corresponding author: Xu Hao, Email: txh@jnu.edu.cn

【Abstract】Objective To evaluate the value of ¹⁸F-FDG PET/CT for preoperative localization of epileptogenic foci in refractory epilepsy patients with negative MRI. **Methods** Clinical data (550 lobes) of 55 epilepsy patients (38 males, 17 females, age (20.0±8.1) years) with negative MRI who underwent preoperative ¹⁸F-FDG PET/CT-MRI between January 2014 and June 2020 at the First Affiliated Hospital of Jinan University were retrospectively analyzed. The sensitivity, specificity, accuracy, positive predictive value (PPV) and negative predictive value (NPV) of ¹⁸F-FDG PET/CT, video electroencephalogram (VEEG), PET/CT+VEEG and PET/CT-VEEG for localizing epileptogenic foci were calculated using stereoelectroencephalography (SEEG) and the outcomes of at least 1 year of postoperative follow-up as reference standards. χ^2 test was used to compare the efficiencies of different examination modalities for unilobar, multilobar and

all patients. **Results** The correct lateralization rate of epileptogenic foci was 92.6% (25/27) using PET/CT. The sensitivity, specificity, accuracy, PPV and NPV of PET/CT for localization of epileptogenic foci were 65.1% (54/83), 77.9% (364/467), 76.0% (418/550), 34.4% (54/157) and 92.6% (364/393), respectively. The sensitivities of PET/CT-VEEG for localization of epileptogenic foci in all patients and patients with multilobar epilepsy were higher than those of VEEG alone (75.9% (63/83) vs 45.8% (38/83), 68.6% (35/51) vs 31.4% (16/51); χ^2 values: 15.80, 14.16, both $P < 0.001$). The specificities of PET/CT+VEEG for localization of epileptogenic foci in all patients and patients with unilobar epilepsy were higher than those of VEEG alone (97.6% (456/467) vs 94.6% (442/467), 97.9% (282/288) vs 94.1% (271/288); χ^2 values: 5.66, 5.48; P values: 0.017, 0.019). The sensitivity of PET/CT-VEEG (PET/CT and VEEG concordance) for localization of epileptogenic foci was higher than that of PET/CT+VEEG (PET/CT and VEEG discordance) (8/9 vs 28.4% (21/74); $\chi^2 = 10.40$, $P = 0.001$), and its specificity and accuracy were higher than those of PET/CT-VEEG (PET/CT and VEEG discordance) (93.4% (57/61) vs 71.7% (291/406), 92.9% (65/70) vs 72.1% (346/480); χ^2 values: 13.23, 13.96; both $P < 0.001$). **Conclusions** ^{18}F -FDG PET/CT can localize and lateralize epileptogenic foci in patients with negative MRI. The combination of ^{18}F -FDG PET/CT and VEEG improves the sensitivity, specificity, and accuracy for epileptogenic foci detection. ^{18}F -FDG PET/CT is more accurate in detecting epileptogenic foci when it is concordant with VEEG.

【Key words】 Drug resistant epilepsy; Positron-emission tomography; Fluorodeoxyglucose F18; Electroencephalography

Fund program: National Natural Science Foundation of China (82371998); Guangzhou Science and Technology Program (2023A03J1035); Guangzhou Science and Technology Program-City School Joint Funding Project (SL2022A03J01222)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20231230-00151

全世界有超过 7 000 万癫痫患者,其中约 30% 为药物难治性癫痫^[1]。手术是难治性癫痫患者的有效治疗方法,手术成功的关键取决于术前对致痫灶的准确定位。MRI 是癫痫患者术前定位致痫灶的首选检查方式,然而约 30% 的癫痫患者 MRI 呈阴性^[2]。 ^{18}F -FDG PET/CT 广泛用于药物难治性癫痫患者术前致痫灶的定位或定侧,尤其是 MRI 阴性或 MRI 与视频脑电图 (video electroencephalogram, VEEG) 不一致的患者。在常规 MRI 阴性的患者中, ^{18}F -FDG PET 与高分辨率 MRI 联合配准可提高对致痫灶的检出率,从而指导手术,改善癫痫患者预后^[3]。部分研究以术前无创评估结果假定的致痫灶为参考标准来证实 ^{18}F -FDG PET/MR 对致痫灶定位的应用价值^[4-5],且在患者纳入时未考虑术后随访结果,缺乏一定的说服力。Guo 等^[6]的研究探讨了 ^{18}F -FDG PET/MR 一体机对 MRI 阴性癫痫患者术前致痫灶的定位价值,但未分析 ^{18}F -FDG PET 的定侧价值及 ^{18}F -FDG PET 联合应用 VEEG 的价值。本研究以立体定向脑电图 (stereoencephalography, SEEG) 及术后随访至少 1 年的结果作为参考标准,分析 ^{18}F -FDG PET/CT 与 VEEG 的联合应用价值,并与单独 VEEG 进行比较,旨在评估 ^{18}F -FDG PET/CT 对 MRI 阴性难治性癫痫患者致痫灶定位定侧的价值。

资料与方法

1. 研究对象。回顾性分析 2014 年 1 月至 2020 年

6 月间在暨南大学附属第一医院核医学科接受脑 ^{18}F -FDG PET/CT-MRI 三模态显像的癫痫患者。纳入标准:(1)临床诊断为药物难治性癫痫并在术前接受 ^{18}F -FDG PET/CT-MRI 三模态显像;(2)接受切除性手术,术后随访至少 1 年且达到 Engel I 级^[7];(3)MRI 呈阴性;(4)术前接受 SEEG 检查。排除标准:(1)SEEG 无法定位者;(2)临床资料不完整。最终纳入 55 例患者,其中男 38 例、女 17 例,年龄(20.0±8.1)岁。本研究经本院伦理委员会批准(批件号:KYk-2021-004)。

2. 脑 ^{18}F -FDG PET/CT-MRI 三模态显像及图像分析。使用 3.0 T MRI 扫描仪(美国 GE Discovery 750)行以下序列的扫描。(1)轴向三维颅脑容积 T_1 加权成像:重复时间(repetition time, TR)/回波时间(echo time, TE)=8.2 ms/3.2 ms,矩阵 256×256,层厚 1.0 mm;(2)轴向 T_2 加权成像:TR/TE=12 001 ms/91.1 ms,矩阵 512×512,层厚 1.0 mm;(3)三维容积 T_2 液体衰减反转恢复序列:TR/TE=5 000 ms/127 ms,反转时间 1 610 ms,矩阵 256×256,层厚 1.0 mm。

所有患者在禁食至少 6 h 后行发作间期 ^{18}F -FDG PET/CT (美国 GE Discovery 690)扫描。患者注射 ^{18}F -FDG(广州原子高科同位素医药有限公司;放化纯>95%;按体质量 3.7~4.4 MBq/kg)后于光线暗淡、安静的房间休息,约 60 min 后行脑 ^{18}F -FDG PET/CT 图像采集。先行 CT 采集,用于 PET 图像的衰减校正,矩阵 512×512,层厚 3.75 mm;再行 PET 采集,矩阵 192×192,层厚 3.27 mm。将 ^{18}F -FDG PET

和 MRI 图像在计算机工作站(美国 GE 公司 AW 工作站 4.6, PET/CT-MRI 三模态图像融合专用软件)融合得到脑 PET-MRI 图像。

脑¹⁸F-FDG PET/CT 及 PET-MRI 图像由 2 位经验丰富的核医学医师进行盲法视觉分析,若有分歧则讨论得出一致结论。

3. VEEG 检查。VEEG(日本光电工业株式会社产品)采用 256 通道、10 000 Hz 采样频率,基于国际 10-20 系统安放 64 导联头皮电极,并附加颞下颞迹电极。记录每例患者的临床发作症状、发作间期和发作期头皮脑电图,并在监测期间至少回顾 3 次习惯性癫痫发作。VEEG 结果由 2 位有经验的神经电生理医师进行评估,若有分歧则讨论得出一致结论。

4. SEEG 检查。使用机器人立体定向辅助(robot of stereotactic assistant, ROSA)系统(法国 Medtech 公司)在相关区域植入电极(北京华科恒生医疗科技有限公司/美国 PMT 公司产品;10~15 个触点,长度 2 mm,直径 0.8 mm,间隔 1.5 mm)。置入电极后使用 CT 确认每个记录导线的位置并验证无出血,随后进行长期 VEEG 监测。在 ROSA 操作系统中进行图像重建,沿着每个电极轨迹解剖定位每个接触点。

5. 相关定义及结果分析。本研究以 SEEG 及术后随访至少 1 年无癫痫发作为参考标准。将视觉评估判断的¹⁸F-FDG PET/CT 低代谢区域分为左侧、右侧及双侧,若低代谢灶仅位于一侧大脑半球认为¹⁸F-FDG PET/CT 能定侧。将¹⁸F-FDG PET/CT 图像的异常定位分为左侧及右侧额、顶、颞、岛及枕叶共 10 个脑区,在连续 2 个或以上层面出现代谢减低时认为该脑区代谢异常。对于多发的低代谢灶,需同时结合患者的临床症状、VEEG 及 SEEG 检查结果,进行多学科会诊以确定最终的手术切除部位。

无创检查(PET/CT 或 VEEG)单独分析时,将真阳性(true positive, TP)定义为无创检查结果呈阳性且与 SEEG 阳性脑区一致;假阳性(false positive, FP)定义为在 SEEG 阴性的脑区中无创检查结果呈阳性;真阴性(true negative, TN)定义为在 SEEG 阴性的脑区中无创检查结果呈阴性;假阴性(false negative, FN)定义为在 SEEG 阳性的脑区中无创检查结果呈阴性。将 PET/CT+VEEG 的 TP 定义为 PET/CT 及 VEEG 2 项检查均呈阳性且与 SEEG 阳性脑区一致,若 SEEG 阳性脑区中至少 1 项检查呈阴性则为 FN;在 SEEG 阴性的脑区中, PET/CT 及 VEEG 均呈阳性则为 FP,若至少 1 项检查呈阴性则为 TN。将 PET/CT-VEEG 的 TP 定义为 PET/CT 或

VEEG 至少 1 项检查呈阳性且与 SEEG 阳性脑区一致,若 2 项检查均未检出 SEEG 阳性脑区则为 FN;在 SEEG 阴性的脑区中,至少 1 项检查结果呈阳性为 FP,若 2 种检查结果均为阴性则为 TN。分别计算 PET/CT、PET/CT+VEEG 及 PET/CT-VEEG 定位致痫灶的灵敏度、特异性、准确性、阳性预测值(positive predictive value, PPV)及阴性预测值(negative predictive value, NPV)。

同时,探讨 PET/CT 与 VEEG 的一致性对致痫灶定位诊断效能的影响。本研究中, PET/CT 与 VEEG 的一致性指两者定位到相同脑叶或 VEEG 定位到脑叶, PET/CT 局限性低代谢灶累及相邻脑叶(如 VEEG 颞叶, PET 颞岛叶)。

6. 统计学处理。采用 IBM SPSS 27.0 软件进行统计学分析。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。定性资料采用例数和(或)百分比表示,比较采用 χ^2 检验或连续校正 χ^2 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1. 患者基本情况。纳入的 55 例癫痫患者共计脑叶 550 个,患者首次癫痫发作年龄为 8.0(5.0, 15.0)岁,癫痫发作持续时间为 10.0(4.0, 14.0)年,手术年龄为 4~38(20.0±8.1)岁。SEEG 证实的致痫灶起源于额叶、顶叶、颞叶、枕叶、岛叶及多脑叶者分别占 27.3%(15/55)、5.5%(3/55)、20.0%(11/55)、1.8%(1/55)、3.6%(2/55)及 41.8%(23/55)。

2. 脑¹⁸F-FDG PET/CT 显像的定侧价值。所有患者 CT 图像均呈阴性。¹⁸F-FDG PET/CT 能定侧 49.1%(27/55)的患者,其中低代谢灶位于左侧、右侧者分别占 29.1%(16/55)、20.0%(11/55);无法定侧者占 50.9%(28/55)。VEEG 异常放电部位位于左侧、右侧者分别占 43.6%(24/55)、47.3%(26/55);无法定侧者占 9.1%(5/55)。¹⁸F-FDG PET/CT 能正确定侧 92.6%(25/27)的患者,这与 VEEG 的定侧正确率[96.0%(48/50)]相当,两者差异无统计学意义($\chi^2 = 0.01, P = 0.917$)。¹⁸F-FDG PET/CT 能正确定侧全部 11 例颞叶癫痫患者。

3. 脑¹⁸F-FDG PET/CT 显像对致痫灶定位的诊断效能(表 1)。全部及多脑叶癫痫患者 PET/CT-VEEG 对致痫灶定位的灵敏度高于单独的 VEEG(χ^2 值:15.80、14.16,均 $P < 0.001$),全部及单脑叶癫痫患者 PET/CT+VEEG 对致痫灶定位的特异性高于单独

的 VEEG (χ^2 值: 5.66、5.48, P 值: 0.017、0.019)。全部患者 PET/CT-VEEG 对致痫灶定位的 NPV 高于单独的 VEEG ($\chi^2 = 4.32, P = 0.038$)。

在不同类型癫痫患者中, PET/CT、PET/CT-VEEG 对多脑叶癫痫患者致痫灶定位的 PPV 高于单脑叶癫痫患者 (χ^2 值: 8.69、8.86, P 值: 0.003、0.003), 而两者对单脑叶癫痫患者致痫灶定位的 NPV 高于多脑叶癫痫患者 (χ^2 值: 9.36、12.25, P 值: 0.002、 <0.001)。PET/CT+VEEG 对单脑叶癫痫患者致痫灶定位的灵敏度、准确性及 NPV 明显高于多脑叶癫痫患者 (χ^2 值: 10.06、22.59、25.16, P 值: 0.002、 <0.001 、 <0.001)。如图 1 示, ^{18}F -FDG PET-MRI 可准确定位单脑叶癫痫患者致痫灶。

4. ^{18}F -FDG PET/CT 与 VEEG 的一致性对不同方式致痫灶定位诊断效能的影响 (表 2)。7 例患者 PET/CT 与 VEEG 脑叶定位一致。PET/CT+VEEG (PET/CT 与 VEEG 一致) 对致痫灶定位的特异性及准确性高于 PET/CT-VEEG (PET/CT 与 VEEG 不一致) (χ^2 值: 15.39、12.05, 均 $P < 0.001$)。PET/CT-VEEG (PET/CT 与 VEEG 一致) 对致痫灶定位的灵

敏度高于 PET/CT+VEEG (PET/CT 与 VEEG 不一致) ($\chi^2 = 10.40, P = 0.001$), 其特异性、准确性及 PPV 高于 PET/CT-VEEG (PET/CT 与 VEEG 不一致) (χ^2 值: 13.23、13.96、4.41, P 值: <0.001 、 <0.001 、0.036)。

讨 论

癫痫患者接受手术治疗后, 术后 2 年无癫痫发作的比例约为 50.0% ~ 77.5%^[8]。临床上对癫痫患者的术前评估通常使用临床症状学评估、神经心理学测试、电生理学评估、结构影像学及代谢影像学评估等非侵入性评估方法^[9]。结构 MRI 被认为是癫痫患者术前评估的必要手段^[10], MRI 阴性患者需接受 ^{18}F -FDG PET/CT 等辅助检查。国内相关研究表明, 对于 MRI 阴性癫痫患者, ^{18}F -FDG PET/CT 及一体化 ^{18}F -FDG PET/MR 对致痫灶的定位具有较高的灵敏度^[11-13], 但上述研究均未探讨 ^{18}F -FDG PET/CT 对 MRI 阴性患者的定侧价值及其与 VEEG 联合应用的定位价值, 且存在一定不足, 如纳入术后随访 1 年仍有癫痫发作的患者^[11], 仅部分患者接受手术治

表 1 不同检查方式对 55 例 MRI 阴性癫痫患者 (550 个脑叶) 致痫灶定位的诊断效能

分类	检查方式	灵敏度	特异性	准确性	阳性预测值	阴性预测值
全部 (单脑叶+多脑叶)	PET/CT	65.1% (54/83)	77.9% (364/467)	76.0% (418/550)	34.4% (54/157)	92.6% (364/393)
	VEEG	45.8% (38/83)	94.6% (442/467)	87.3% (480/550)	60.3% (38/63)	90.8% (442/487)
	PET/CT+VEEG	32.5% (27/83)	97.6% (456/467)	87.8% (483/550)	71.1% (27/38)	89.1% (456/512)
	PET/CT-VEEG	75.9% (63/83)	74.5% (348/467)	74.7% (411/550)	34.6% (63/182)	94.6% (348/368)
单脑叶	PET/CT	71.9% (23/32)	76.0% (219/288)	75.6% (242/320)	25.0% (23/92)	96.1% (219/228)
	VEEG	68.8% (22/32)	94.1% (271/288)	91.6% (293/320)	56.4% (22/39)	96.4% (271/281)
	PET/CT+VEEG	53.1% (17/32)	97.9% (282/288)	93.4% (299/320)	73.9% (17/23)	94.9% (282/297)
	PET/CT-VEEG	87.5% (28/32)	72.2% (208/288)	73.8% (236/320)	25.9% (28/108)	98.1% (208/212)
多脑叶	PET/CT	60.8% (31/51)	81.0% (145/179)	76.5% (176/230)	47.7% (31/65)	87.9% (145/165)
	VEEG	31.4% (16/51)	95.5% (171/179)	81.3% (187/230)	66.7% (16/24)	83.0% (171/206)
	PET/CT+VEEG	19.6% (10/51)	97.2% (174/179)	80.0% (184/230)	10/15	80.9% (174/215)
	PET/CT-VEEG	68.6% (35/51)	78.2% (140/179)	76.1% (175/230)	47.3% (35/74)	89.7% (140/156)

注: VEEG 为视频脑电图; 括号内为例数比

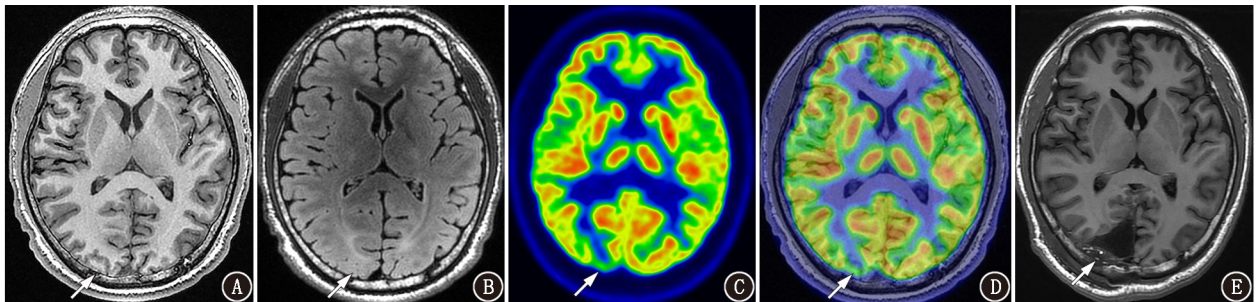


图 1 癫痫患者 (男, 16 岁) ^{18}F -FDG PET-MRI 融合显像图。A, B. 术前 T_1 加权成像 (WI) 及 T_2 液体衰减反转恢复未见异常 (箭头示右侧枕叶低代谢灶对应的 MRI 结构); C, D. 术前 ^{18}F -FDG PET 及 ^{18}F -FDG PET-MRI 融合图像提示仅右侧枕叶局灶性低代谢灶 (箭头示), 视频脑电图 (VEEG) 提示右侧枕叶放电; E. 术后 T_1 WI 显示右侧枕叶局部切除改变 (箭头示手术切除部位)

表 2 ^{18}F -FDG PET/CT 与 VEEG 一致/不一致时两者组合对 55 例 MRI 阴性癫痫患者 (550 个脑叶) 致痫灶定位的诊断效能

分类	检查方式	灵敏度	特异性	准确性	阳性预测值	阴性预测值
PET/CT 与 VEEG 一致	PET/CT+VEEG	6/9	95.1% (58/61)	91.4% (64/70)	6/9	95.1% (58/61)
	PET/CT-VEEG	8/9	93.4% (57/61)	92.9% (65/70)	8/12	98.3% (57/58)
PET/CT 与 VEEG 不一致	PET/CT+VEEG	28.4% (21/74)	98.0% (398/406)	87.3% (419/480)	72.4% (21/29)	88.2% (398/451)
	PET/CT-VEEG	74.3% (55/74)	71.7% (291/406)	72.1% (346/480)	32.4% (55/170)	93.9% (291/310)

注:VEEG 为视频脑电图;括号内为例数比

疗^[12],术后随访时间不足 1 年^[13]。本研究纳入患者均为术后随访 1 年无癫痫发作的患者,主要探讨 ^{18}F -FDG PET/CT 对 MRI 阴性癫痫患者致痫灶的定侧定位价值,以及 ^{18}F -FDG PET/CT 联合 VEEG 对致痫灶的定位价值。

在 MRI 阴性癫痫患者中, ^{18}F -FDG PET/CT 能提供定侧价值。有研究表明, ^{18}F -FDG PET 能定侧 84% 的 MRI 阴性颞叶癫痫患者^[14],使用机器学习的方法能对高达 96.43% 的 MRI 阴性颞叶癫痫患者进行定侧^[15]。本研究显示, ^{18}F -FDG PET/CT 仅能对 49.1% (27/55) 的患者定侧,这可能是因为本研究纳入了多种类型的癫痫患者。本研究中, ^{18}F -FDG PET/CT 能正确定侧全部 11 例颞叶癫痫患者,比上述研究更高,这也可能与本研究颞叶癫痫患者较少有关。本研究示,在 ^{18}F -FDG PET/CT 能定侧的患者中,其定侧的正确率与 VEEG 相当,表明 ^{18}F -FDG PET/CT 在 MRI 阴性癫痫患者中具有良好的定侧价值。因此,在 MRI 阴性的癫痫患者中, ^{18}F -FDG PET/CT 提供的定侧信息可进一步指导 SEEG 电极的植入,减少植入电极数量,降低医疗成本。

^{18}F -FDG PET/CT 在 MRI 阴性癫痫患者术前致痫灶的定位中具有重要作用。传统的 VEEG 对 MRI 阴性患者致痫灶定位具有重要的参考价值,本研究中 ^{18}F -FDG PET/CT 与 VEEG 的联合应用对致痫灶定位的灵敏度及特异性明显高于单独 VEEG,表明 ^{18}F -FDG PET/CT 对致痫灶定位具有增益价值。相关研究显示,MRI 阴性癫痫患者 ^{18}F -FDG PET 对致痫灶定位的灵敏度、特异性、PPV 及 NPV 分别为 65.0%~73.3%、65.4%~94.4%、68.4%~78.6% 和 58.6~93.6%^[6,16],本研究 ^{18}F -FDG PET/CT 的灵敏度、特异性及 NPV 与上述研究类似,但 PPV 明显较低。本研究中, ^{18}F -FDG PET/CT+VEEG 能明显提高致痫灶定位的特异性,PPV 较低可能是因为 ^{18}F -FDG PET/CT 低代谢区域广泛,大多数表现为多灶性,而视觉评估异常的部位并非都是致痫灶。同时,上述研究纳入的患者多数为单脑叶癫痫患者,而本研究纳入了 41.8% (23/55) 的多脑叶癫痫患者,这也可能是引起差异的原

因。部分研究表明, ^{18}F -FDG PET/MR 对致痫灶定位的灵敏度为 77.4%~95.3%^[17-18],高于本研究,这可能是因为上述研究同时纳入了 MRI 阳性和 MRI 阴性的患者,但本研究在单脑叶癫痫患者中 ^{18}F -FDG PET/CT-VEEG 的灵敏度可达 87.5% (28/32),提示 ^{18}F -FDG PET/CT 与 VEEG 的联合模式在临床上对致痫灶的定位具有重要意义。

本研究当 ^{18}F -FDG PET/CT 与 VEEG 一致时,两者联合对致痫灶检出的特异性及准确性高于两者不一致时的结果。在 MRI 阴性的新皮质癫痫患者中,2 项或多项无创检查结果一致是癫痫手术的良好候选者^[19]。另一项研究显示,MRI 阴性 ^{18}F -FDG PET 与发作期 VEEG 一致的癫痫患者手术结局与 MRI 阳性的患者相当^[20]。以上表明,当无创检查结果一致时,患者更有可能获得良好的手术结局。当 ^{18}F -FDG PET/CT 与 VEEG 不一致时, ^{18}F -FDG PET/CT-VEEG 能提高致痫灶定位的灵敏度,而 ^{18}F -FDG PET/CT+VEEG 能提高对致痫灶定位的特异性、准确性及 PPV。

本研究存在一定的局限性。(1) 回顾性研究可能存在选择性偏倚,另外仅纳入了单中心患者。(2) 图像不是来自一体化 PET/MR,而是 PET/CT-MRI 三模态显像,在工作站对 PET 和 MRI 图像融合获得,不同患者图像融合可能存在误差,对结果产生偏倚。(3) ^{18}F -FDG PET/CT 的图像分析采用视觉评估,有一定的主观性,但视觉评估是临床常用的图像分析方法,更贴近临床实践。

综上,本研究表明, ^{18}F -FDG PET/CT 对 MRI 阴性药物难治性癫痫患者能起到定位定侧的作用。同时, ^{18}F -FDG PET/CT 与 VEEG 的联合应用在某些情况下能提高致痫灶检出的灵敏度、特异性及准确性。 ^{18}F -FDG PET/CT 与 VEEG 一致时对致痫灶检出的准确性较高。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 曾春媛:研究实施、论文撰写;周海玲、谭志强、汤桂贤:研究实施;吴环华、吴彪:统计学分析;唐勇进、凌雪英:研究指导、数据分析;郭强、徐浩:论文修改、经费支持

参 考 文 献

- [1] Thijs RD, Surges R, O'Brien TJ, et al. Epilepsy in adults[J]. *Lancet*, 2019, 393(10172): 689-701. DOI:10.1016/S0140-6736(18)32596-0.
- [2] Muhlhofer W, Tan YL, Mueller SG, et al. MRI-negative temporal lobe epilepsy—what do we know? [J]. *Epilepsia*, 2017, 58(5): 727-742. DOI:10.1111/epi.13699.
- [3] Ding Y, Zhu Y, Jiang B, et al. ¹⁸F-FDG PET and high-resolution MRI co-registration for pre-surgical evaluation of patients with conventional MRI-negative refractory extra-temporal lobe epilepsy[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 45(9): 1567-1572. DOI:10.1007/s00259-018-4017-0.
- [4] Rubí S, Setoain X, Donaire A, et al. Validation of FDG-PET/MRI coregistration in nonlesional refractory childhood epilepsy[J]. *Epilepsia*, 2011, 52(12): 2216-2224. DOI:10.1111/j.1528-1167.2011.03295.x.
- [5] Alis C, Alis D, Uslu Besli L, et al. The analysis of ¹⁸F-FDG PET/MRI, electroencephalography, and semiology in patients with gray matter heterotopia: a pilot study[J]. *Acta Neurol Scand*, 2022, 146(5): 662-670. DOI:10.1111/ane.13705.
- [6] Guo K, Wang J, Wang Z, et al. Morphometric analysis program and quantitative positron emission tomography in presurgical localization in MRI-negative epilepsies: a simultaneous PET/MRI study [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 49(6): 1930-1938. DOI:10.1007/s00259-021-05657-w.
- [7] Spencer S, Huh L. Outcomes of epilepsy surgery in adults and children[J]. *Lancet Neurol*, 2008, 7(6): 525-537. DOI:10.1016/S1474-4422(08)70109-1.
- [8] Lamberink HJ, Otte WM, Blümcke I, et al. Seizure outcome and use of antiepileptic drugs after epilepsy surgery according to histopathological diagnosis: a retrospective multicentre cohort study [J]. *Lancet Neurol*, 2020, 19(9): 748-757. DOI:10.1016/S1474-4422(20)30220-9.
- [9] Zijlmans M, Zweiphenning W, van Klink N. Changing concepts in presurgical assessment for epilepsy surgery[J]. *Nat Rev Neurol*, 2019, 15(10): 594-606. DOI:10.1038/s41582-019-0224-y.
- [10] Jayakar P, Gaillard WD, Tripathi M, et al. Diagnostic test utilization in evaluation for resective epilepsy surgery in children[J]. *Epilepsia*, 2014, 55(4): 507-518. DOI:10.1111/epi.12544.
- [11] 郭坤,尚琨,崔碧霄,等. ¹⁸F-FDG PET/MR 对 MRI 阴性药物难治性癫痫患者致痫灶的定位价值[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2021, 41(7): 410-414. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20200302-00083.
- Guo K, Shang K, Cui BX, et al. Preoperative localization of ¹⁸F-FDG PET/MR in refractory epilepsy patients with negative MRI [J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 41(7): 410-414. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20200302-00083.
- [12] 邵明岩,骆拓璞,徐荣,等. ¹⁸F-FDG PET/CT 在 MRI 阴性癫痫中的诊断价值[J]. *江西医药*, 2018, 53(9): 919-921. DOI:10.3969/j.issn.1006-2238.2018.9.005.
- Shao MY, Luo ZH, Xu R, et al. Diagnostic value of ¹⁸F-FDG PET/CT in MRI negative epilepsy[J]. *Jiangxi Med J*, 2018, 53(9): 919-921. DOI:10.3969/j.issn.1006-2238.2018.9.005.
- [13] 王慧,胡海萍,余玲,等. ¹⁸F-FDG PET/CT 与 MRI 异机融合在 MRI 阴性难治性癫痫术前定位中的应用[J]. *海南医学*, 2022, 33(22): 2944-2948. DOI:10.3969/j.issn.1003-6350.2022.22.023.
- Wang H, Hu HP, Yu L, et al. Application of image fusion between ¹⁸F-FDG PET/CT and MRI in preoperative localization of the MRI-negative refractory epilepsy[J]. *Hainan Med J*, 2022, 33(22): 2944-2948. DOI:10.3969/j.issn.1003-6350.2022.22.023.
- [14] Gok B, Jallo G, Hayeri R, et al. The evaluation of FDG-PET imaging for epileptogenic focus localization in patients with MRI positive and MRI negative temporal lobe epilepsy[J]. *Neuroradiology*, 2013, 55(5): 541-550. DOI:10.1007/s00234-012-1121-x.
- [15] Beheshti I, Sone D, Maikusa N, et al. Pattern analysis of glucose metabolic brain data for lateralization of MRI-negative temporal lobe epilepsy[J]. *Epilepsy Res*, 2020, 167: 106474. DOI:10.1016/j.epilepsyres.2020.106474.
- [16] Widjaja E, Shamma A, Vali R, et al. FDG-PET and magnetoencephalography in presurgical workup of children with localization-related nonlesional epilepsy[J]. *Epilepsia*, 2013, 54(4): 691-699. DOI:10.1111/epi.12114.
- [17] Guo K, Cui B, Shang K, et al. Assessment of localization accuracy and postsurgical prediction of simultaneous ¹⁸F-FDG PET/MRI in refractory epilepsy patients[J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(9): 6974-6982. DOI:10.1007/s00330-021-07738-8.
- [18] Kikuchi K, Togao O, Yamashita K, et al. Diagnostic accuracy for the epileptogenic zone detection in focal epilepsy could be higher in FDG-PET/MRI than in FDG-PET/CT[J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(5): 2915-2922. DOI:10.1007/s00330-020-07389-1.
- [19] Moon HJ, Kim DW, Chung CK, et al. Change of patient selection strategy and improved surgical outcome in MRI-negative neocortical epilepsy[J]. *J Epilepsy Res*, 2016, 6(2): 66-74. DOI:10.14581/jer.16013.
- [20] Steinbrenner M, Duncan JS, Dickson J, et al. Utility of ¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography in presurgical evaluation of patients with epilepsy: a multicenter study [J]. *Epilepsia*, 2022, 63(5): 1238-1252. DOI:10.1111/epi.17194.

(收稿日期:2023-12-30)