

基于 PET/MRI 影像联合脑功能分析在检出癫痫患者致痫灶中的价值探讨

何伟 李云波 高刘艳 魏光明 魏熠鑫 郭智瑞

(空军军医大学第二附属医院, 陕西 西安 710038)

【摘要】 目的 探讨基于 PET/MRI 影像联合脑功能分析在检出癫痫患者致痫灶中的价值。方法 选取本院 2017 年 10 月—2020 年 10 月收治的 110 例癫痫患者, 均进行头颅正电子发射计算机断层显像 (PET)/磁共振成像 (MRI) 检查, 检查前注射脱氧葡萄糖 (FDG) 休息 30 min 后行 PET, 再行 MRI, 并进行视频脑电图 (VEEG) 检查。对 PET/MRI 影像结果采用视觉分析、半定量分析及脑功能分析判断可能病灶, 以术后病理结果作为金标准, 分析 PET/MRI 影像及脑功能分析在检出癫痫患者致痫灶的诊断价值。结果 以术后病理结果作为“金标准”, 结果显示, 110 例癫痫患者病理结果为脑皮质发育不良 60.00% (66/110)、海马硬化 34.55% (38/110)、节细胞胶质瘤 5.45% (6/110)。致痫灶定位于额叶 8.18% (9/110)、枕叶 9.09% (10/110)、颞叶 82.73% (91/110)。110 例癫痫患者 PET/MRI 显像视觉分析与软件定量分析结果显示, 69 例 (62.73%) 患者 PET/MRI 视觉分析与软件定量分析结果一致; 31 例 (28.18%) 患者 PET/MRI 显像结果为阴性, 其中包括疑似病灶 9 例 (8.18%)。软件分析显示, 病灶位置定位于顶叶 6 例 (5.45%), 颞叶 25 例 (22.73%), PET 显像显示癫痫灶或位于双侧颞叶 6 例 (5.45%); 脑功能分析结果显示, 阳性 34 例 (30.91%), 阴性 76 例 (69.09%), 其中单侧病变 30 例 (27.27%), 双侧病变 4 例 (3.64%)。MIMneuro 软件分析, PET/MRI 对诊断单侧病变具有统计学意义, 与脑电图结果一致。PET/MRI 影像及脑功能联合对检出癫痫患者致痫灶诊断的灵敏度显著高于单一 PET/MRI 成像像 ($t=26.564, P<0.05$), 高于单一脑功能分析 ($t=7.875, P=0.004$), 差异有统计学意义 ($P<0.05$)。当 $Z\text{-score}=-1.81$ 时, 预测术后癫痫灶复发的灵敏度和特异度为 81.46%、77.23%。结论 PET/MRI 影像联合脑功能分析可显著提高癫痫患者致痫灶定位的准确性, 为手术切除提高可靠指导, 进而有效控制癫痫发作, 具有较高临床应用价值。

【关键词】 PET/MRI; 脑功能; 癫痫患者; 致痫灶; 诊断价值

【中图分类号】 R742.1; R445.5 **【文献标志码】** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-3511.2023.04.021

The value of PET/MRI imaging and brain function analysis in the detection of epileptogenic foci in epilepsy patients

HE Wei, LI Yunbo, GAO Liuyan, WEI Guangming, WEI Yixin, GUO Zhirui

(The Second Affiliated Hospital of Air Force Medical University, Xi'an 710038, China)

【Abstract】 **Objective** To explore the value of PET/MRI imaging and brain function analysis in detecting epileptogenic foci in epilepsy patients. **Methods** A total of 110 patients with epilepsy who were admitted to our hospital from October 2017 to October 2020 were selected and underwent cranial PET/MRI examination. Deoxyglucose (FDG) was injected before the examination, and then PET (positron emission tomography) was performed after a 30-min rest., followed by magnetic resonance imaging (MRI) and video electroencephalography (VEEG). Visual analysis, semi-quantitative analysis and brain function analysis were used for PET/MRI image results to determine possible lesions, and postoperative pathological results were used as the gold standard to analyze the diagnostic value of PET/MRI images and brain function analysis in detecting epileptogenic foci in epilepsy patients. **Result** Taking postoperative pathological

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2020JM-333)

通讯作者: 李云波, 副主任医师, E-mail: di70650@163.com

引用本文: 何伟, 李云波, 高刘艳, 等. 基于 PET/MRI 影像联合脑功能分析在检出癫痫患者致痫灶中的价值探讨[J]. 西部医学, 2023, 35(4): 573-578. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3511.2023.04.021

results as the "gold standard", the results showed that the pathological results of 110 epilepsy patients were 60.00% (66/110) cerebral cortical dysplasia, 34.55% (38/110) hippocampal sclerosis, and 5.45% (6/110) ganglioglioma. The epileptogenic foci were located in 8.18% (9/110) of the frontal lobe, 9.09% (10/110) of the epileptogenic foci were located in the occipital lobe, and 82.73% (91/110) were located in the temporal lobe. The results of PET/MRI visual analysis and software quantitative analysis of 110 epilepsy patients showed that 69 (62.73%) patients had consistent PET/MRI visual analysis and software quantitative analysis results; 31 (28.18%) patients had PET/MRI imaging results were negative, including 9 cases (8.18%) of suspected lesions. Software analysis showed that the lesions were located in the parietal lobe in 6 cases (5.45%), and in 25 cases (22.73%) in the temporal lobe. PET imaging showed that the epilepsy focus was located in the bilateral temporal lobe in 6 cases (5.45%). The results of brain function analysis shown that 34 cases (30.91%) were positive and 76 cases (69.09%) were negative, including 30 cases (27.27%) with unilateral lesions and 4 cases (3.64%) with bilateral lesions. MIMneuro software analysis showed that PET/MRI had statistical significance in the diagnosis of unilateral lesions, which was consistent with the EEG results. The combined sensitivity of PET/MRI imaging and brain function in detecting epileptogenic foci in epilepsy patients was significantly higher than that of single PET/MRI imaging ($t=26.564$, $P=0.000$), and higher than that of single brain function analysis ($t=7.875$, $P=0.004$), the difference was statistically significant ($P<0.05$). When $Z\text{-score}=-1.81$, the sensitivity and specificity of predicting postoperative epilepsy foci recurrence were 81.46% and 77.23%. **Conclusion** PET/MRI images and brain function analysis can significantly improve the accuracy of epileptogenic foci location in epilepsy patients, provide reliable guidance for surgical resection, and effectively control epileptic seizures, which has high clinical application value.

【Key words】 PET/MRI; Brain function; Epilepsy patients; Epileptogenic foci; Diagnostic value

癫痫发病机制较为复杂,主要与神经递质及神经胶质细胞改变导致中枢神经系统兴奋与抑制失衡有关,进而导致癫痫发作^[1-2]。临床通常可予以抗癫痫药物进行控制,但仍有约 20% 的患者治疗效果欠佳,无法有效控制癫痫发作,需予以手术治疗,改善患者预后^[3-4]。术前准确定位癫痫灶是手术治疗的重要前提,有助完整切除或破坏致痫灶,实现治疗目的;目前临床主要使用 MRI、CT、视频脑电图 (Video-electroencephalography, VEEG) 等方法进行术前定位,但对于微小病变、双侧病变定位存在不足^[5-6]。随着 PET 技术发展,18F-FDG PET 显像对致痫灶定位具有较好敏感性,但却采用视觉分析判断葡萄糖代谢异常,具有较强主观性可能导致误判^[7-8]。基于此,研究以 18F-FDG PET/MRI 图像结合 MIMneuro 定量分析软件对我院 110 例癫痫进行致痫灶定位诊断,并于术后病理进行对比,分析为对癫痫患者致痫灶定位的诊断价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取本院 2017 年 10 月—2020 年 10 月收治的 110 例癫痫患者作为观察组,其中男性 62 例,女性 48 例;年龄 21~35 岁,平均 (24.12 ± 3.25) 岁;病程 4~21 年,平均 (5.24 ± 1.13) 年。纳入标准:①临床确诊为原发性癫痫,病史 3 年以上。②使用 2 种以上一线抗癫痫药物正规治疗 2 年以上,效果欠佳导致癫痫控制不佳而发作。③ PET/MRI、VEEG 影像资料完整。④患者或家属知情且签署知情同意书。排除标准:①因各种原因无法手术或未进行手术者。

②临床资料不完整。③依从性差,不配合检查各治疗者。研究获得我院伦理委员会批准。

1.2 方法

1.2.1 PET/MRI 影像检查及脑功能分析 所有患者均在癫痫发作期或发作间期进行头颅 PET/MRI 显像,¹⁸F-FDG (中国江源安迪科公司),放化纯度 > 95%。使用德国西门子公司 Biograph m MR PET/MR 仪进行数据采集。检查前禁食 6 h,按 3.7MBq/kg 静脉注射¹⁸F-FDG,休息 30 min 后进行 PET 和 MRI 同步扫描。扫描范围:自枕骨大孔至颅顶部,容积扫描,覆盖全脑,床位中心线与颅脑中心位置一致,衰减校正 MRAC,散射校正 Scatter,静态采集扫描图像。PET 采集 1 个床位,采集 8 min。同时进行 MRI 图像采集,采集 8 min,MR 序列在 PET 采集时同步进行,采集横断及冠状 T2 加权液体衰减反转恢复序列 (transverse and coronal T2 fluid-attenuated inversion recovery, T2-FLAIR), T1 加权三维磁化强度预备梯度回波序列 (T1 weighted imaging-three dimensional magnetization prepared rapid acquisition gradient echo, T1WI-3D-MPRAGE) 及 DWI 序列。由两名经验丰富的核医学科医师进行视觉分析,根据图像特点用肉眼进行判断,以患者健侧或正常人相同部位的放射性摄取为标准, PET 葡萄糖代谢异常和 MRI 信号异常情况,连续在两个层面上出现明确¹⁸F-FDG 高或低代谢区为异常,两侧相应区域对比放射性活度降低或升高 15% 为致痫灶^[9], MRI 显示病变的脑部区域,并用脑部图谱进行标注,获得致痫灶定位。

1.2.2 脑电图检查 采用国际 10-20 系统连接发作期患者头皮脑电入监护,采用单极和双极导联描记。由脑电图医师采用半定量分析脑电图,并分析患者临床发作表现,出现局限性慢波或痫样放电(棘波、尖波、棘慢波、尖慢波)为致痫灶放电,这些局灶区域定为致痫灶^[10]。

1.3 观察指标

1.3.1 术后病理结果 根据术后病理结果,统计 110 例癫痫患者脑皮质发育不良、海马硬化、节细胞胶质瘤和致痫灶定位于额叶、枕叶、颞叶等分布情况。

1.3.2 PET/MRI 影像结果 根据 PET/MRI 影像结果进行致痫灶定位阳性、阴性判定,并对结果进行分析。

1.3.3 脑功能分析结果 根据脑功能结果进行致痫灶定位阳性、阴性判定,并对结果分析比较。

1.3.4 PET/MRI 影像及脑功能分析对检出癫痫患

者致痫灶诊断效能分析 对 PET/MRI 影像及脑功能分析致痫灶于术后病理结果进行对比,分析其对检出癫痫患者致痫灶诊断效能,联合检测中有一项结果为阳性,即表示阳性。

1.4 统计学分析 应用 SPSS 19.0 对数据进行统计学分析,计量资料采用 $(\bar{x} \pm s)$ 表示,采用 t 检验进行比较;计数资料用 $[n(\%)]$ 表示,采取 χ^2 检验进行比较。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者影像学资料 女性,20 岁,癫痫病史 10 余年,口服药物治疗效果欠佳,每月发作 1~2 次,以大发作、失神发作为主。PET/MRI 头部显像示,右侧顶叶放射性分布较对侧减低,边界欠清楚,皮质较对侧略缩小;双侧海马体积略小,放射性分布对称,见图 1、2。结合 MIM Neuro 分析结果,右侧缘上回 $Z\text{-score} = -2.79$,左侧缘上回 $Z\text{-score} = -0.82$,见图 3。

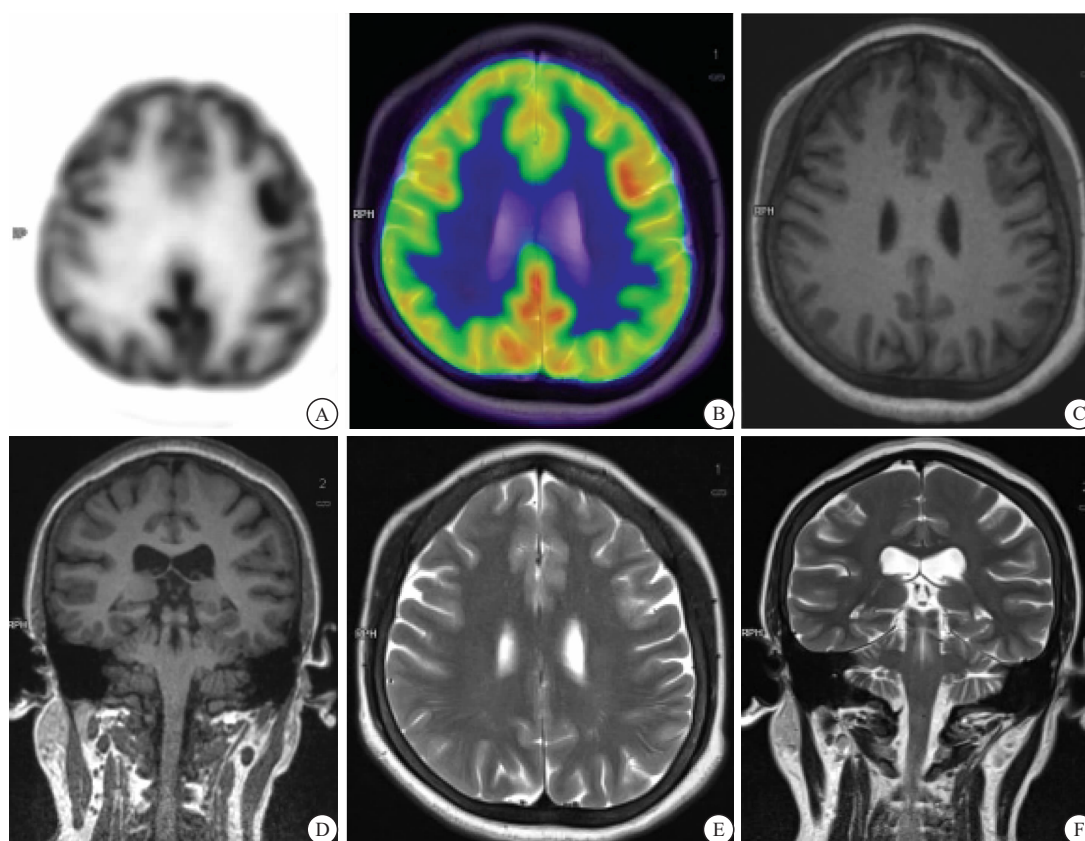


图 1 头部影像图

Figure 1 Head image

注:A. PET;B. PET 与 T2WI 融合图;C. T1 mprage 轴位;D. T1 mprage 冠状位;E. T2WI 轴位;F. T2WI 冠状位。

2.2 术后病理结果 以术后病理结果作为“金标准”,结果显示,110 例癫痫患者病理结果为脑皮质发育不良 60.00% (66/110)、海马硬化 34.55% (38/110)、节细胞胶质瘤 5.45% (6/110)。致痫灶定位于额叶 8.18% (9/110)、枕叶 9.09% (10/110)、颞叶

82.73% (91/110)。

2.3 PET/MRI 影像结果 110 例癫痫患者 PET/MRI 显像视觉分析与软件定量分析结果显示,69 例 (62.73%) 患者 PET/MRI 视觉分析与软件定量分析结果一致;31 例 (28.18%) 患者 PET/MRI 显像结果

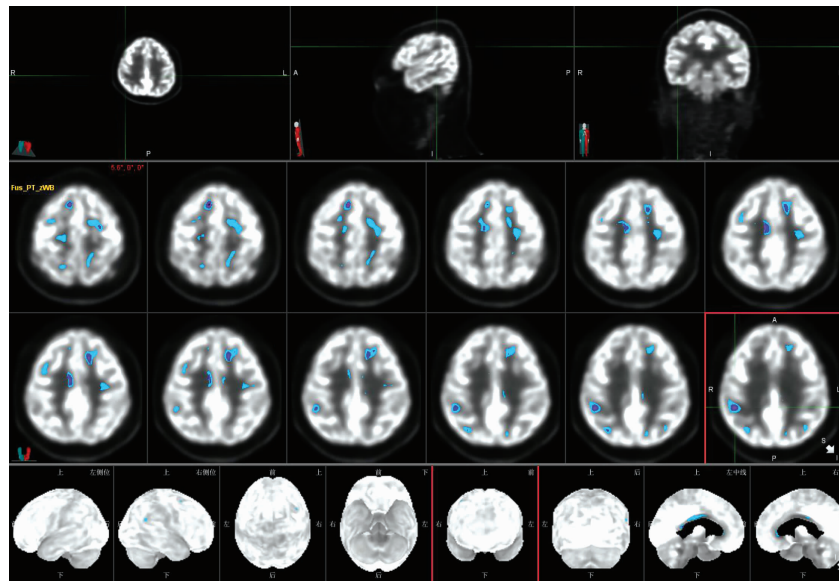


图 2 神经功能分析后玻璃脑图

Figure 2 The vitreous brain map after neurological function analysis

注:蓝色区域表示致病灶位置。

结构	Z 分值	左 Z 分值	右 Z 分值	左右差别百分比	L-R Z 分值差异
Supra Margial	-2.38	-0.82	-0.279	9.33	2.63
cereblum10	-2.03	-0.245	-2.45	-12.73	-2.17
Rolandic Opercium	-1.82	-1.53	-1.53	3.29	0.67
Antsrior Cingulare Gyrus	-1.44	-1.10	-1.10	9.08	2.14

图 3 MIM Neuro 分析结果

Figure 3 MIM Neuro analysis results

为阴性,其中包括疑似病灶 9 例(8.18%)。软件分析显示病灶位置定位于顶叶 6 例(5.45%),定位于颞叶 25 例(22.73%),PET 显像显示癫痫灶或位于双侧颞叶 6 例(5.45%),脑功能分析结果显示,阳性 34 例(30.91%),阴性 76 例(69.09%),其中单侧病变 30 例(27.27%),双侧病变 4 例(3.64%)。MIMneuro 软件分析,PET/MRI 对诊断单侧病变具有统计学意义,与脑电图结果一致(图 1~3)。

2.4 PET/MRI 影像及脑功能分析 对检出癫痫患者致痫灶诊断效能分析 PET/MRI 影像及脑功能联合对检出癫痫患者致痫灶诊断的灵敏度显著高于单一 PET/MRI 成像像($t=26.564, P=0.000$)、高于单一脑功能分析($t=7.875, P=0.004$),差异有统计学意义($P<0.05$),见表 1。

2.5 PET/MRI 影像及脑功能分析对检出癫痫患者致痫灶的价值 当 $Z\text{-score}=-1.81$ 时,预测术后癫痫灶复发的灵敏度和特异度为 81.46%、77.23%。

3 讨论

癫痫是大脑神经元突发性异常放电导致短暂的大脑功能障碍的一种慢性疾病,脑电图是癫痫诊断的重要方式,有助于癫痫分类及治疗,但其对致痫灶定

表 1 PET/MRI 影像及脑功能分析对检出癫痫患者致痫灶诊断效能分析($\times 10^{-2}$)

Table 1 Analysis of the diagnostic efficacy of PET/MRI images and brain function analysis in the detection of epileptogenic foci in epilepsy patients

方法	灵敏度	特异度	准确度
PET/MRI	47.22(34/72)	71.05(27/38)	55.45(61/110)
脑功能	68.06(49/72)	78.94(30/38)	71.82(79/110)
联合检测	87.50(63/72)	76.32(29/38)	83.64(92/110)

位的准确性不高^[10-11]。PET 虽然可反应癫痫灶代谢活动情况,但显像分辨率较低;MRI 显像清晰,细节分辨率高,但无法发现微小病变。PET/MRI 是将 PET 与 MRI 结束进行融合,不仅可有效发现解剖结构的异常,还能发现代谢及功能异常,对检出致痫灶提供了重要依据^[12-13]。本研究发现,PET/MRI 影像及脑功能分析对检出癫痫患者致痫灶具有较好的诊断价值,有助于提高致痫灶定位准确性,能为手术完整切除癫痫灶提供指导依据,有效控制癫痫发作。

本研究对我院 110 例癫痫患者术后病理结果显示,脑皮质发育不良 60.00%(66/110)、海马硬化 34.55%(38/110)、节细胞胶质瘤 5.45%(6/110)。致痫灶定位于额叶 8.18%(9/110)、致痫灶定位于枕叶

9.09% (10/110)、致痫灶定位于颞叶 82.73% (91/110)。其中 1 例女性癫痫患者, 右侧颞叶代谢减低, 边界欠清楚, 皮质较对侧略缩小, MRI 图像显示右侧海马体积缩小, 放射性分布对称, 结构改变, 可见信号异常, 是海马硬化表现; 对侧无结构、信号异常, PET 显示低代谢区范围较广, 可能与癫痫灶泛化引起代谢减低有关, 也可能是 PET 对于癫痫灶显像较大的缘故。提示, PET 对病灶定位具有重要提示作用, 结合 MRI 及脑功能可通过解构和脑功能改变获得致痫灶准确定位, 进而指导治疗^[14-15]。

PET/MRI 检查联合脑功能分析, 结果显示, 69 例 (62.73%) 患者 PET/MRI 视觉分析与软件定量分析结果一致; 31 例 (28.18%) 患者 PET/MRI 显像结果为阴性, 其中包括疑似病灶 9 例 (8.18%)。软件分析显示病灶位置定位于顶叶 6 例 (5.45%), 定位于颞叶 25 例 (22.73%), PET 显像显示癫痫灶或位于双侧颞叶 6 例 (5.45%); 脑功能分析结果显示, 阳性 34 例 (30.91%), 阴性 76 例 (69.09%), 其中单侧病变 30 例 (27.27%), 双侧病变 4 例 (3.64%)。MIMneuro 软件分析, PET/MRI 对诊断单侧病变具有统计学意义, 与脑电图结果一致。说明 PET/MRI 影像联合脑功能分析可对检出癫痫患者致痫灶提供重要指导依据, 其对致痫灶定位准确性更高。究其原因, 神经元微环境的电解质平衡是维持神经元正常兴奋性的基础, 当兴奋性神经递质过多或抑制性递质过少, 都能使兴奋与抑制间失衡, 使膜不稳定并产生癫痫性放电^[16-17]。发作间期 PET/MRI 的主要表现为致痫灶葡萄糖代谢减低, 主要与神经元缺失, 神经功能失调, 突触密度减低或过度抑制等有关^[18-19]。PET/MRI 可同时获得 PET 与 MRI 图像, 及时发现大脑功能、代谢及解剖结构异常, 对肿瘤和常见的心脑疾病早期发现、早期诊断具有重要价值; 其还可发现解剖结构和代谢情况进而了解脑细胞功能, 有助于早期发现致痫灶^[20-21]。因此, 临床可使用 MRI 初步寻找致痫灶, 若未发现明显结构异常可观察一下脑电图放电情况, 再使用 PET/MRI 进一步明确致痫灶, 进而为手术提供提供精准定位, 提高手术效果。

另外, PET/MRI 影像联合脑功能对检出癫痫患者致痫灶诊断的灵敏度显著高于单一检测方法, 证实联合检测可有效提高检出癫痫患者致痫灶定位的准确度, 提高术前致痫灶精准定位, 灵敏度高, 可靠性好。这可能是因为 PET/MRI 融合了 PET 对病灶的敏感性优势和 MRI 的多序列成像优势, 能为致痫灶定位提供可靠指导^[22-23]。且当 $Z\text{-score} = -1.81$ 时, 预测术后癫痫灶复发的灵敏度和特异度为 81.46%、

77.23%。以 MIMneuro 软件为依托, 进行定量分析可快速对病变脑区进行定位, 获得更客观、简便的诊断, 且软件自动分析弥补了判断致痫灶的主观性和重复率低的确定, 降低误差, 提高了对致痫灶定位的敏感性^[24-25]。但由于 MIMneuro 软件数据库内数据存在一定局限性, 且脑葡萄糖代谢可能受到年龄、性别等因素差异的影响, 进而对结果造成偏倚。因此, 还需进行更多相关中心研究, 扩充数据库, 为临床应用提供可靠依据。

4 结论

PET/MRI 影像联合脑功能分析有助于提高癫痫患者致痫灶定位的准确性, 为手术完整切除癫痫灶提供指导依据, 改善患者预后, 具有较高临床应用价值。

【参考文献】

- [1] 孟淑淑, 孔庆霞. 局灶性皮质发育不良合并难治性癫痫患者头部 MRI 融合 PET-CT 进行术前评估的价值[J]. 中风与神经疾病杂志, 2019, 36(3):237-241.
- [2] TÓTH M, BARSÍ P, TÓTH Z, *et al.* The role of hybrid FDG-PET/MRI on decision-making in presurgical evaluation of drug-resistant epilepsy[J]. BMC Neurol, 2021, 21(1):363.
- [3] 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.
- [4] 张森, 黄鹏, 占世坤, 等. 一体化¹⁸F-FDG PET/MRI 多模态分子影像在癫痫精准定位中的应用价值[J]. 诊断学理论与实践, 2019, 18(3):271-277.
- [5] GUO K, CUI B, SHANG K, *et al.* Assessment of localization accuracy and postsurgical prediction of simultaneous 18 F-FDG PET/MRI in refractory epilepsy patients[J]. Eur Radiol, 2021, 31(9):6974-6982.
- [6] LIU F, RUAN W, DENG X, *et al.* Efficacy of delayed 18 F-FDG hybrid PET/MRI for epileptic focus identification: a prospective cohort study[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 48(1):293-301.
- [7] POIRIER S E, KWAN BYM, JURKIEWICZ M T, *et al.* 18 F-FDG PET-guided diffusion tractography reveals white matter abnormalities around the epileptic focus in medically refractory epilepsy: implications for epilepsy surgical evaluation[J]. Eur J Hybrid Imaging, 2020, 4(1):10.
- [8] 张亚超, 乔辉, 李泽, 等. 脑电图、磁共振和 PET-CT 对继发性癫痫患者致痫灶的诊断价值[J]. 放射学实践, 2019, 34(12):1390-1393.
- [9] KUCHENBUCH M, BENQUET P, KAMINSKA A, *et al.* Quantitative analysis and EEG markers of KCNT1 epilepsy of infancy with migrating focal seizures[J]. Epilepsia, 2019, 60(1):20-32.
- [10] CORREA D J, MILANO L, KWON C S, *et al.* Quantitative readability analysis of websites providing information on traumatic brain injury and epilepsy: A need for clear communication

- [J]. *Epilepsia*, 2020, 61(3):528-538.
- [11] GUO Q, WEI Z, FAN Z, *et al.* Quantitative analysis of cerebellar lobule morphology and clinical cognitive correlates in refractory temporal lobe epilepsy patients[J]. *Epilepsy Behav*, 2021, 114(Pt A):107553.
- [12] 张微, 魏熠鑫, 何伟, 等. 18F-2-氟代脱氧葡萄糖 PET/MRI 显像结合神经功能定量分析在癫痫术前定位中的应用价值研究[J]. *临床神经病学杂志*, 2019, 32(6):439-442.
- [13] ZIBRANDTSEN I C, NIELSEN J M, KJAER T W. Quantitative characteristics of spike-wave paroxysms in genetic generalized epilepsy[J]. *Clin Neurophysiol*, 2020, 131(6):1230-1240.
- [14] SATHYANARAYANA A, EL ATRACHE R, JACKSON M, *et al.* Nonlinear Analysis of Visually Normal EEGs to Differentiate Benign Childhood Epilepsy with Centrottemporal Spikes (BECTS)[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1):8419.
- [15] AVENDAÑO-ESTRADA A, VELASCO F, VELASCO A L, *et al.* Quantitative Analysis of [18F]FFMZ and [18F]FDG PET Studies in the Localization of Seizure Onset Zone in Drug-Resistant Temporal Lobe Epilepsy[J]. *Stereotact Funct Neurosurg*, 2019, 97(4):232-240.
- [16] 张森, 李彪, 刘伟, 等. 一体化 18F-FDG PET/MRI 多模态分子影像在癫痫精准定位中的应用价值[J]. *诊断学理论与实践*, 2019, 18(3):271-277.
- [17] GUO K, YUAN M, WEI L, *et al.* Epileptogenic zone localization using a new automatic quantitative analysis based on normal brain glucose metabolism database[J]. *Int J Neurosci*, 2021, 131(2):128-134.
- [18] ZAMAN T, HELBIG KL, CLATOT J, *et al.* SCN3A-Related Neurodevelopmental Disorder: A Spectrum of Epilepsy and Brain Malformation[J]. *Ann Neurol*, 2020, 88(2):348-362.
- [19] HUANG J, ZHU Q, WANG M, *et al.* Coherent Pattern in Multi-Layer Brain Networks: Application to Epilepsy Identification[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2020, 24(9):2609-2620.
- [20] 张思雨, 张乐, 孙洪赞. PET/MRI 在癫痫中的应用进展[J]. *磁共振成像*, 2019, 10(2):153-156.
- [21] 邱锐琴. 视频脑电图监测在癫痫患儿诊断及定位中的作用初探[J]. *中国实验诊断学*, 2020, 24(2):205-207.
- [22] ABDUL AZIZ A F, MOHAMED A R, MURUGESU S, *et al.* 18 F-FDG PET/CT for the pre-surgical localization of epileptogenic focus among paediatric patients with drug resistant epilepsy in Malaysia: perspective of a nuclear medicine physician[J]. *Med J Malaysia*, 2021, 76(4):502-509.
- [23] KOWALCZYK M A, OMIDVARNIA A, ABBOTT D F, *et al.* Clinical benefit of presurgical EEG-fMRI in difficult-to-localize focal epilepsy: A single-institution retrospective review[J]. *Epilepsia*, 2020, 61(1):49-60.
- [24] PLUMMER C, VOGRIN S J, WOODS W P, *et al.* Interictal and ictal source localization for epilepsy surgery using high-density EEG with MEG: a prospective long-term study[J]. *Brain*, 2019, 142(4):932-951.
- [25] URGUN K, CHAN A, SAHYOUNI R, *et al.* Application of Responsive Neurostimulation as both a Diagnostic Tool for Seizure Localization and a Supplementary Tool for Surgical Management in Patients with Multiple Epileptogenic Foci: A Case Series[J]. *Turk Neurosurg*, 2022, 32(1):112-121.

(收稿日期:2022-06-14;修回日期:2022-08-16;编辑:黎仕娟)