

· 述评 ·

拓展多参数 PET/MR 成像技术的应用，充分发挥其优势和潜力

王瑞民

解放军总医院第一医学中心核医学科, 北京 100853

Email: wrm@yeah.net

基金项目: 国家自然科学基金 (82371999)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20250522-00158

Expand the application of multi-parameter PET/MR imaging technology, and realize its advantages and potential

Wang Ruimin

Department of Nuclear Medicine, the First Medical Centre, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Email: wrm@yeah.net

Fund program: National Natural Science Foundation of China (82371999)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20250522-00158

核医学诊疗强调“所见即所得”, 而核医学显像设备是保证“眼见为实”的重要环节。随着诊疗一体化时代的来临, 融合影像通过代谢功能显像与解剖结构成像的深度协同, 实现了从病灶筛查到精准分级的全流程优化, 成为疾病早期诊断与疗效评估的核心技术支撑。在临床需求与技术应用的共同驱动下, 核医学显像设备经历了三维断层扫描、多模态功能-解剖融合及一体化系统集成等技术跨越, 直到 2010 年, 备受期待的商业 PET/MR 一体化设备进入临床应用^[1-2]。

PET/MR 设备是把 PET 探测器嵌入到 MRI 机架内的射频线圈与梯度线圈之间, 在保留 PET 高灵敏度代谢示踪能力与 MRI 的多序列、多参数及高软组织对比度特性的基础上, 实现了分子功能显像与高分辨率解剖结构的同步采集, 在核医学传统诊断应用方面 (如肿瘤、神经及心血管系统疾病等) 具有显著优势; 且相对 PET/CT 来说, PET/MR 无 X 线辐射, 尤其适合儿童患者。然而, 自首台 PET/MR 设备商业化以来, 其面临诸多挑战, 如 PET 与 MRI 设备间的相互干扰、技术标准化以及临床优势的证据不充分等问题, 这使 PET/MR 设备的发展较其他核医学显像设备发展较为缓慢。近年来, 通过硬件架构革新与图像重建、衰减校正及运动补偿等算法的协同优化, PET/MR 已逐步突破技术瓶颈, 逐渐实现从“科研利器”向“临床常规”的实质性跨越^[3]。因此, 探索 PET/MR 技术在临床应用中的独特优势显得尤为关键。

2023 年 3 月, 国家卫生健康委员会发布的《大型医用设备配置许可管理目录 (2023 年)》(国卫财务发[2023]7 号) 中规定了 PET/MR 为乙类大型医用设备; 且在《国家卫生健康委关于发布“十四五”大型医用设备配置规划的通知》(国卫财务发[2023]18 号) 中 PET/MR 规划总数达到了 210 台^[4]。然而根据 2024 年全国核医学现状普查结果简报, 不包含部分民营医疗机构情况下, 2023 年底我国共安装使用的 PET/MR 设备为 51 台, 远滞后于“十四五”期间 PET/MR 规划总数^[5]。对此, 还需要广大核医学工作者在实际工作中, 面向临床需要, 立足传统应用的同时, 积极拓展 PET/MR 技术应用的“绝招”, 推动 PET/MR 技术在诊疗一体化时代中寻找一席之地。本期重点号选登了 5 篇论著, 分别从不同临床应用方面, 展示了业内对多参数 PET/MR 成像技术的应用评价, 值得读者们参考借鉴。

韩婷婷等^[6]对 14 例初诊甲状腺乳头状癌患者术前行¹⁸F-FDG PET/MR 与超声检查的对比研究显示, 基于 PET/MR 的“双阈值”标准可显著提高淋巴结转移诊断效能, 其 AUC 和约登指数分别达到 0.909 和 0.818, 优于单一影像学方法; 区域分析结果表明, PET/MR“双阈值”诊断淋巴结转移的灵敏度、特异性和准确性分别为 13/15、5/6 和 85.7% (18/21), 均高于超声和 MRI; 多因素 logistic 回归分析显示, SUV_{max} 和 MRI 短径是甲状腺癌淋巴结转移的独立预测因子。该研究为头颈部肿瘤, 尤其是甲状腺癌的术前分期诊断提供了新的思路。

徐媛媛等^[7]对 34 例疑诊脑肿瘤患者进行了¹¹C-蛋氨酸(methyl-*L*-methionine, MET)PET/MR 成像研究,结果显示该方法在鉴别脑肿瘤与非肿瘤性病变中具有显著优势。以手术病理或长期临床随访结果为“金标准”,¹¹C-MET PET/MR 的灵敏度、特异性和准确性分别为 91.3% (21/23)、12/12、94.3% (33/35),优于增强 MRI。定量参数分析表明,最大靶本底比值(maximum target to background ratio, TBR_{max})是诊断效能最高的单参数(AUC = 0.877);联合 TBR_{max}、最小表观弥散系数、相对脑血流量及胆碱/*N*-乙酰天门冬氨酸比值后,AUC 提升至 0.918。尽管多参数联合未明显提高诊断效能,但该方法在临床实践中可提高临床医师对脑占位性病变鉴别诊断的信心。

张宇等^[8]对 134 例前列腺特异抗原(prostate specific antigen, PSA)持续升高至 >4 μg/L 且未接受治疗的患者进行了回顾性研究,通过 PET/MR 检查结合扩散峰度成像(diffusion kurtosis imaging, DKI)和¹⁸F-前列腺特异膜抗原(prostate specific membrane antigen, PSMA)-1007 显像,探讨其在鉴别前列腺癌与良性前列腺增生中的价值。该研究表明,MRI 参数平均峰度系数(mean kurtosis, MK)及平均弥散率(mean diffusivity, MD)与 PET 参数 SUV_{max}的联合应用可显著提高前列腺癌的诊断效能,尤其对于 PSA<10 μg/L 的患者。PSMA PET/MR 成像目前在前列腺癌诊断中作用显著,可较 PSMA PET/CT 提供更多有临床价值的证据,也是未来多参数 PET/MR 成像重点应用的方面。

刘琴琴等^[9]对 40 例疑诊膀胱癌患者行¹⁸F-FDG PET/MR 检查,评估其对膀胱癌诊断及分期的效能。结果显示,PET/MR 鉴别肌层浸润性膀胱癌的灵敏度、特异性及准确性分别为 96.9% (31/32)、7/8 和 95.0% (38/40);相比于 MRI,¹⁸F-FDG PET/MR 鉴别肌层浸润性的 AUC 更高(0.500 和 0.796)。该研究还展示了联合参数(包括肿瘤最大径、平均表观弥散系数及 SUV_{mean})在 T 分期评估中的重要性。既往膀胱肿瘤 PET/MR 文献相对较少,该研究提供了一定的使用经验及参考数据,但也需注意操作规程,如饮水限制和膀胱冲洗等需要标准化流程处理。

除了在肿瘤方面的应用外,张思琪等^[10]探讨了 PET/MR 成像技术对药物难治性癫痫致病灶的定位价值。该研究纳入了 24 例手术治疗的癫痫患者,术前发作间期均行¹⁸F-*N,N*-二乙基-2-(2-(4-(2-氟乙氧基)-苯基)-5,7-二甲基-吡唑[1,5-*a*]嘧啶-3-基)-

乙酰胺(*N,N*-diethyl-2-(2-(4-(2-fluoroethoxy)-phenyl)-5,7-dimethyl-pyrazolo[1,5-*a*]pyrimidin-3-yl)-acetamide, DPA-714)PET/MR 成像,通过与手术病理及立体定向脑电图的“金标准”进行对比发现,PET/MR 成像对致病灶的检出率(87.5%, 21/24)高于 MRI 单一模态(54.2%, 13/24),证实了 PET/MR 对癫痫致病灶的检出优势。

当前,我国是装机使用 PET/MR 设备数量较多的国家之一。PET/MR 作为新兴技术力量的代表,我国在该领域相比欧美等国家的研究成果近年来已呈现出显著的追赶态势。但仍需清醒地认识到,该技术的临床推广应用仍面临技术优势不足、卫生经济学效益待验证等现实挑战,特别是在创新性的临床应用方面,PET/MR 成像技术的临床独特优势尚未完全展示,如“低辐射”的独特价值未在临床中被最大化利用、标准化的多参数的分析流程还待挖掘、尚需通过大规模多中心的循证医学证据来确立 PET/MR 在特定疾病诊疗路径中的核心地位,以及明确其优于 PET/CT 或单独 MRI 的价值研究也需推动。因此,这就需要核医学从业者在既往传统的应用领域中延伸拓展 PET/MR 技术应用场景,如基于人工智能方法来辅助图像重建及挖掘多参数数据中的深层关联,构建更复杂的诊断、预后和疗效评估模型,开展多中心研究来确立 PET/MR 成像技术在脊柱关节炎等风湿免疫系统疾病^[11]、自身免疫性脑炎^[12]、心肌纤维化等心血管系统疾病^[13]中的独特价值等。只有不断开辟创新领域应用,同时注重多中心合作及影像数据规范化处理,才能进一步推进多参数 PET/MR 关键问题的突破性进展,发挥其优势和潜力。

利益冲突 作者声明无利益冲突

作者贡献声明 王瑞民:论文撰写与修改

参 考 文 献

- [1] 徐白萱,田嘉禾.一体化 PET/MR 在临床中的应用及进展[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2021, 41(7): 385-387. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20210525-00175.
Xu BX, Tian JH. Application and progress of PET/MR in clinic [J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 41(7): 385-387. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20210525-00175.
- [2] Delso G, Fürst S, Jakoby B, et al. Performance measurements of the Siemens mMR integrated whole-body PET/MR scanner[J]. J Nucl Med, 2011, 52(12): 1914-1922. DOI:10.2967/jnumed.111.092726.
- [3] Hu X, Peng J, Huang M, et al. Mapping the knowledge landscape of the PET/MR domain: a multidimensional bibliometric analysis [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 52(5): 1805-1821. DOI:10.1007/s00259-024-07043-8.

- [4] 耿建华, 陈英茂, 田嘉禾, 等. 国家十四五规划期间 PET/CT、PET/MR 设备的配置和选型[J]. 中国医学装备, 2023, 20(12): 143-149. DOI:10.3969/J.ISSN.1672-8270.2023.12.030. Geng JH, Chen YM, Tian JH, et al. Configuration and type-selection of PET/CT and PET/MR equipment during the period of National 14th Five-Year Plan[J]. China Medical Equipment, 2023, 20(12): 143-149. DOI:10.3969/J.ISSN.1672-8270.2023.12.030.
- [5] 中华医学会核医学分会. 2024 年全国核医学现状普查结果简报[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2024, 44(10): 617-618. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240920-00327. Chinese Society of Nuclear Medicine. A brief report on the results of the national survey of nuclear medicine in 2024[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 44(10): 617-618. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240920-00327.
- [6] 韩婷婷, 康飞, 全志永, 等. 甲状腺乳头状癌淋巴结转移¹⁸F-FDG PET/MR“双阈值”定量诊断标准的建立[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(7): 388-393. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240607-00200. Han TT, Kang F, Quan ZY, et al. Establishment of ¹⁸F-FDG PET/MR "dual threshold" quantitative diagnostic criteria for identifying lymph node metastasis in patients with papillary thyroid cancer[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 45(7): 388-393. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240607-00200.
- [7] 徐媛媛, 李春艳, 刘芳, 等. ¹¹C-MET PET/MR 对脑肿瘤与非肿瘤性病变的鉴别诊断价值[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(7): 394-399. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240720-00268. Xu YY, Li CY, Liu F, et al. Value of ¹¹C-MET PET/MR imaging for the differential diagnosis between neoplastic and non-neoplastic brain lesions[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 45(7): 394-399. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20240720-00268.
- [8] 张宇, 黄新韵, 傅璠, 等. ¹⁸F-PSMA-1007 PET/MR 与扩散峰度成像在前列腺癌及前列腺增生诊断中的价值[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(7): 400-404. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20241017-00352. Zhang Y, Huang XY, Fu F, et al. Value of ¹⁸F-PSMA-1007 PET/MR and diffusion kurtosis imaging in the diagnosis of prostate cancer and prostatic hyperplasia[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 45(7): 400-404. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20241017-00352.
- [9] 尤琴琴, 俞飞, 李如帅, 等. ¹⁸F-FDG PET/MR 及其衍生参数在膀胱癌诊断与分期中的应用[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(7): 405-410. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20250204-00027. You QQ, Yu F, Li RS, et al. Application of ¹⁸F-FDG PET/MR and its derived parameters in the diagnosis and staging of bladder cancer[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 45(7): 405-410. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20250204-00027.
- [10] 张思琪, 胡杰, 崔碧霄, 等. ¹⁸F-DPA-714 PET/MR 成像对药物难治性癫痫致痫灶的定位价值[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(7): 411-415. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20241028-00369. Zhang SQ, Hu J, Cui BX, et al. Clinical value of ¹⁸F-DPA-714 PET/MR imaging in localization of epileptogenic zone in refractory epilepsy[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 45(7): 411-415. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20241028-00369.
- [11] Bruckmann NM, Rischpler C, Tsiami S, et al. Effects of anti-tumor necrosis factor therapy on osteoblastic activity at sites of inflammatory and structural lesions in radiographic axial spondyloarthritis: a prospective proof-of-concept study using positron emission tomography/magnetic resonance imaging of the sacroiliac joints and spine[J]. Arthritis Rheumatol, 2022, 74(9): 1497-1505. DOI:10.1002/art.42149.
- [12] 张敏, 李彪. 关注 PET/MR 成像在自身免疫性脑炎诊断中的价值[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(4): 193-195. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20250224-00051. Zhang M, Li B. Focus on the value of PET/MR imaging in the diagnosis of autoimmune encephalitis[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 45(4): 193-195. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20250224-00051.
- [13] Barton AK, Craig NJ, Loganath K, et al. Myocardial fibroblast activation after acute myocardial infarction: a positron emission tomography and magnetic resonance study[J]. J Am Coll Cardiol, 2025, 85(6): 578-591. DOI:10.1016/j.jacc.2024.10.103. (收稿日期:2025-05-22)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

关于稿件中标注临床试验注册号的通告

根据中华医学会杂志社的相关规定, 临床试验研究须标注临床试验注册号。临床试验注册号是从 WHO 认证的一级临床试验注册中心获得的全球唯一注册号。临床试验注册在基金项目下另起一行排, 以“临床试验注册”(Trial registration)为标题, 写出注册机构名称, 在名称后圆括号内注明注册号。

本刊编辑部