



· 综述 ·

一体化PET/MRI在乳腺癌诊治中的应用进展

杨俊杰^{1, 2}, 白俊文²

1. 内蒙古医科大学研究生学院, 内蒙古自治区 呼和浩特 010110;
2. 内蒙古医科大学附属医院甲状腺乳腺外科, 内蒙古自治区 呼和浩特 010010

[摘要] 乳腺癌已成为全球第一大癌症, 严重危害女性健康, 早期诊断与治疗十分重要。一体化正电子发射体层成像 (positron emission tomography, PET)/磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 作为一种极具潜力的新型多模态成像工具已逐步进入临床。其不仅可以提供基于PET的代谢信息, 还能获得基于MRI的高分辨率形态学数据以及进行多序列功能成像, 可以在低辐射剂量的条件下更准确地判断淋巴结、骨、肝转移以及评估新辅助化疗效果, 有望在乳腺癌领域展现其独特优势。本文综述了一体化PET/MRI在乳腺癌诊治中的应用现状, 并评价其优势及不足。

[关键词] 乳腺癌; 正电子发射体层成像; 磁共振成像

中图分类号: R737.9; R445.6 文献标志码: A DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2023.03.014

Application progress of integrated PET/MRI in the diagnosis and treatment of breast cancer YANG Junjie^{1, 2}, BAI Junwen² (1. Graduate School of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, Inner Mongolia Autonomous Region, China; 2. Department of Thyroid and Breast Surgery, The Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Correspondence to: BAI Junwen E-mail: baijunwen2001@163.com

[Abstract] Breast cancer has become the world's largest cancer, seriously endangering women's health, which also indicates the importance of early diagnosis and treatment. Integrated positron emission tomography (PET)/magnetic resonance imaging (MRI), as a new multi-modal imaging tool with great potential, has gradually entered clinical practice. It can not only provide metabolic information based on PET, but also obtain high-resolution morphological data based on MRI and perform multi-sequence functional imaging. It can more accurately judge lymph node, bone, liver metastasis and evaluate the efficacy of neoadjuvant chemotherapy under the condition of low radiation dose, and is expected to show its unique advantages in the field of breast cancer. This article reviewed the application of integrated PET/MRI in the diagnosis and treatment of breast cancer, and evaluated its strengths and weaknesses.

[Key words] Breast cancer; Positron emission tomography; Magnetic resonance imaging

乳腺癌作为女性好发的一类癌症, 其发病率已超过男女总数为基数的肺癌, 成为全球第一大癌症, 可见其对女性健康的危害性, 也由此提示乳腺癌早期诊断与治疗的重要性^[1]。随着设备兼容、衰减校正、伪影校正、协同采集、图像重建等一系列问题得到初步解决, 一体化正电子发射体层成像 (positron emission tomography, PET)/磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 开始进入临床。一体化PET/MRI是将MRI的高分辨率以及多序列成像优势与PET的功能代谢成像、多种显像剂特点相结合的一体

化设备, 其不仅能够提供乳腺局部清晰的解剖图像以及病灶的功能代谢信息, 全身扫描还能准确地发现转移病灶, 是一种极具潜力的新型多模态成像工具, 有望在乳腺癌领域展现其独特优势。本文就一体化PET/MRI在乳腺癌诊治中的应用进展综述如下。

1 一体化PET/MRI采集方案及技术优势

一体化PET/MRI可根据扫描目的和范围分为全身扫描和乳腺局部扫描。全身扫描时使用体线圈, 受检者取仰卧位; 局部扫描时使用乳腺专用的多通道射频线圈, 受检者取使乳房自然下垂的

俯卧位。对于乳腺癌原发灶的评估，局部扫描比全身扫描更敏感，不能被全身扫描替代^[2]。

与过去的异机融合、分体式PET/MRI不同，一体化PET/MRI真正实现了PET与MRI图像的等中心同时采集，大大减少了配准误差及采集时间。虽然一体化PET/MRI和PET/计算机断层成像（computed tomography, CT）在数据采集、图像重建等技术上存在诸多差异，但两者PET的最大标准化摄取值（maximum standard uptake value, SUV_{max} ）高度相关，提示一体化PET/MRI对乳腺癌癌灶的半定量分析具有较好的准确性和稳定性^[3-4]。另外，Melsaether等^[5]的研究发现，行该检查时患者所接受的辐射剂量（平均为9.3 mSv）约为PET/CT的一半（平均为17.6 mSv），可以降低癌症诱发风险。

2 一体化PET/MRI用于乳腺癌诊断

目前临床多采用体格检查、乳腺X线摄影及超声对可疑病变进行筛查，影像引导下的组织学活检进行诊断。乳腺X线摄影可以较好地显示乳腺癌灶以及其中的微小钙化，但其检出能力随着乳腺密度增加而下降。超声受乳腺密度影响较小，可作为乳腺X线摄影的有效补充。当以上两种方法不能定性时，可考虑采用MRI进一步检查^[6]。MRI因其高分辨率及高软组织对比度，对乳腺癌灶的检出更敏感，但其假阳性率也较高。

有研究^[7]证实，将异机扫描获得的PET/CT和MRI结合可以提高诊断乳腺癌的准确度和特异度，降低假阳性率，从而避免不必要的活检。人们期望在一体化PET/MRI上看到相同的结果，但遗憾的是，目前的证据尚不足以表明一体化PET/MRI在乳腺癌诊断方面优于MRI。一项纳入49例乳腺癌患者总计61个癌灶的研究^[8]中，乳腺PET/MRI发现57个（93.4%）癌灶，PET/CT发现52个（85.2%），乳腺PET/MRI比PET/CT多识别出了3例多灶或多中心肿瘤患者。但仅依靠MRI图像及参数就能够对乳腺病灶的良恶性进行判断，结合PET后并没有增加鉴别能力。Romeo等^[9]从一体化PET/MRI图像提取定量参数和影像学特征，并引入机器学习，建立了基于人工

智能（artificial intelligence, AI）的鉴别诊断模型。这种模型可以准确地区分乳腺的良恶性病变（最高为94.8%），与影像学专家的判读能力无异。

基于设备可及性差以及证据缺乏等问题，目前不建议一体化PET/MRI用于乳腺癌的筛查与诊断。

3 一体化PET/MRI用于乳腺癌分期

准确分期对于原发性乳腺癌患者的临床决策和管理十分重要。在进行分期时，大多数学者青睐联合行全身及乳腺局部扫描^[10-15]，而不是仅进行全身扫描^[5, 16]。这是因为俯卧位及专用的乳腺线圈可以减少乳房变形及乳腺实质压迫问题，相较取仰卧位的全身扫描可以更好地发现小癌灶（5~13 mm）以及多灶和多中心肿瘤，更全面地提供病灶的解剖、功能和代谢信息^[11]。

3.1 T分期

目前乳腺癌原发灶常规使用乳腺X线摄影及超声进行评估。乳腺PET/MRI对于T分期的准确度优于超声、乳腺X线摄影及PET/CT，与MRI表现相当^[8, 12, 17]。Goorts等^[17]对40例拟行新辅助化疗（neoadjuvant chemotherapy, NAC）的乳腺癌患者进行原发灶评估，发现常规影像学方法测得的肿瘤平均直径为33 mm，只识别出了1例多灶性肿瘤患者；而MRI和乳腺PET/MRI测得的平均直径为37 mm，识别出了4例多灶性肿瘤患者（均经病理学检查证实）。这表明一体化PET/MRI基于MRI测得的原发灶大小，以及联合MRI和PET测得的病灶数量与单独MRI没有区别。Grueneisen等^[8]也发现乳腺PET/MRI和MRI评估T分期的准确度相同（82%），明显高于PET/CT（68%）。上述结果强调了MRI对乳腺癌原发灶分期的重要性。阳依宏等^[14]将12例乳腺癌患者的术前乳腺PET/MRI图像与术后病理学检查进行对比发现，仅有1例患者癌灶的影像学大小（1.9 cm×1.5 cm）与病理学检查（2.3 cm×2.0 cm）不符，分期由I A期升为II A期，并得出结论：一体化PET/MRI影像学分期与病理学分期的一致性较高（Kappa值=0.892）。此外，乳腺PET/MRI与MRI同样有助于发现隐匿性、多灶及多中

心肿瘤, 评价肿瘤与周围组织的浸润情况, 可用于保乳患者术前影像学评估^[8, 17]。

3.2 N分期

淋巴结是乳腺癌的主要转移途径, 转移区域主要包括腋窝、内乳、锁骨下、锁骨上以及胸肌间淋巴结。超声检查虽然对评估淋巴结转移有很高的价值, 但其结果受操作者主观因素、医师临床经验影响较大。

Taneja等^[15]初步探索认为, 与单独PET或MRI相比, 一体化PET/MRI进行N分期具有更高的置信度。Bruckmann等^[13, 18]在两项研究中分别将全身PET/MRI与MRI、胸腹部增强CT进行比较, 发现一体化PET/MRI (75.5%~82.1%) 在N分期方面比MRI (62.3%)^[13]、胸腹部增强CT (61.5%)^[18]灵敏度高。Morawitz等^[19]对112例乳腺癌患者进行N分期评估, 发现全身PET/MRI的准确度明显高于乳腺MRI、胸部MRI和超声 (受试者工作特征曲线的曲线下面积分别为0.892、0.782、0.814、0.834); 由于PET/MRI的阴性预测值最高 (89%), 作者还强调了其在排除淋巴结转移方面具有高可靠性^[19]。

但也有一些研究^[8, 12]否认一体化PET/MRI在N分期方面的优势。Grueneisen等^[8]的研究发现, 乳腺PET/MRI评估N分期的灵敏度为78%, 特异度为90%, 准确度为86%, 这与PET/CT (分别为78%、94%、88%) 和MRI (分别为67%、87%、80%) 相比差异无统计学意义。这可能是因为乳腺专用线圈的使用使一体化PET/MRI视野受限, 无法对腋窝等区域进行完整评估。有学者^[20]利用体线圈设计了一个腋窝专用PET/MRI扫描方案, 并对12例伴有淋巴结转移的乳腺癌患者进行试验。这种新的方案修正了40%的超声、75%的MRI以及22%的PET/CT的N分期, 从而提升了一体化PET/MRI在N分期方面的价值。

除了明确淋巴结病理学状态, 评估肿瘤负荷也很重要。腋窝、内乳、锁骨上下等区域淋巴结转移数量是设计放疗方案和评估复发风险的重要影响因素^[6]。一体化PET/MRI的多模态成像对于评估肿瘤负荷具有一定优势。Goorts等^[17]结合PET图像的热点数量和位置信息以及MRI

图像的形态学信息, 纠正了6例患者的常规影像学方法N分期, 其中4例发现内乳淋巴结受累, 2例腋窝淋巴结转移数量发生变化, 最终改变治疗方案。一项纳入73例伴有淋巴结转移的乳腺癌患者的研究^[21]显示, 全身PET/MRI的灵敏度最高, 检测到了60例患者的193枚转移淋巴结, 其中腋窝I区102枚, 腋窝II区61枚, 腋窝III区13枚, 锁骨上淋巴结1枚, 内乳淋巴结16枚; MRI检测到56例患者的123枚转移淋巴结, 而CT仅检测到50例患者的104枚转移淋巴结, 差异有统计学意义。亚组分析研究发现, 全身PET/MRI在各个区域检测到的转移淋巴结数量也明显多于MRI和CT, 并且还发现了唯一的1枚锁骨上转移淋巴结。

与常规影像学方法相比, 一体化PET/MRI可以更好地判断淋巴结是否受累。但由于一些小的转移灶在一体化PET/MRI图像上并不总是可见, 所以其不可能替代病理学检查^[12, 18]。不过因其灵敏度高, 一体化PET/MRI可以预选淋巴结阳性患者, 减少腋窝淋巴结清扫 (axillary lymph node dissection, ALND) 之前不必要的活检, 减轻患者心理及经济负担^[13]。放疗科也可以根据一体化PET/MRI图像更准确地为乳腺癌患者制订放疗方案。

3.3 M分期

乳腺癌远处转移部位主要包括骨、肺、肝等。早期准确的M分期有助于确定治疗原则及综合治疗方案。在晚期乳腺癌中, 骨转移的发生率为65%~75%^[6]。骨放射性核素显像 (emission computed tomography, ECT) 和PET/CT是评估骨转移最常用的手段。一体化PET/MRI在评估骨转移方面表现较优。Bruckmann等^[22]在一项双中心前瞻性研究中发现, 全身PET/MRI诊断骨转移的灵敏度 (100.0%) 优于CT (71.4%) 和ECT (28.6%), 特异度 (100.0%) 也较CT (98.6%) 高; 全身PET/MRI发现了全部 (41个) 的骨转移灶, 而CT发现了23个, ECT仅发现了15个。Catalano等^[10]的研究结果显示, 全身PET/MRI (96.3%) 在诊断骨转移方面比PET/CT (85.2%) 更灵敏。但全身PET/MRI与

MRI相比差异无统计学意义^[16, 22]，有学者^[13]还认为两者均有高估M分期的风险。

一体化PET/MRI（80%~100%）对于肝转移也较PET/CT（70%~75%）灵敏^[5]。但是对于肺转移，一体化PET/MRI（74%~87%）相较PET/CT（96%~100%）并没有展现出优势^[5]，这可能是因为它对肺部小结节（2~7 mm）的检出能力有限^[23]。尽管大多数（78.6%）漏诊的小结节经随访证实是良性的，也应慎选一体化PET/MRI评估肺转移^[5, 23]。另有文献^[24]报道，一体化PET/MRI在评估乳腺癌臂丛神经转移方面具有独特优势。

3.4 乳腺癌复发分期

对于乳腺癌术后复发患者必须明确是否合并远处转移^[6]。Sawicki等^[25]的研究发现，一体化PET/MRI对乳腺癌复发分期的效能最高，可以检测到所有的转移灶，而PET/CT、MRI和CT的检出率分别为97.0%、96.2%和74.6%；一体化PET/MRI鉴别良恶性病变的准确度最高（98.5%），PET/CT、MRI和CT分别为94.8%、88.1%和57.5%。阳依宏等^[14]利用一体化PET/MRI发现了17例乳腺癌术后患者中所有（4例）的复发转移患者，但误诊了1例经病理学检查证实的乳腺癌伴瘢痕增生患者，其在PET/MRI上表现为放射性摄取轻度增高的异常信号影。

3.5 临床决策和管理改变

一体化PET/MRI在分期上的优势最终会影响部分（10%~33%）乳腺癌患者的临床决策和管理^[12, 15, 17]。Goorts等^[17]利用乳腺PET/MRI发现了常规影像学方法未检测到的淋巴结和远处转移，从而优化了4例（10%）患者的放疗方案；还为另外4例（10%）疑似乳腺癌的患者提供了诊断依据。Kirchner等^[12]利用全身及乳腺PET/MRI对56例高转移风险患者进行分期，优化了8例（14.3%）患者的治疗方案。其中1例患者经常规影像工具分为T₂期，建议行保乳手术；但乳腺PET/MRI发现该肿瘤侵及皮肤，没有保乳治疗适应证，最终病理学检查证实了PET/MRI的结论。另一项纳入36例乳腺癌患者的研究^[15]中，一体化PET/MRI优化了12例（33.3%）患者的治疗方案。

4 一体化PET/MRI预测乳腺癌分子分型

乳腺癌作为一种异质性肿瘤可分为3种亚型：Luminal型、人表皮生长因子受体2（human epidermal growth factor receptor 2, HER2）阳性型以及三阴性乳腺癌（triple-negative breast cancer, TNBC）。不同分子分型的临床决策及预后相差甚远，因此准确分型意义重大。

不少学者利用一体化PET/MRI获得的代谢参数SUV结合弥散加权成像（diffusion-weighted imaging, DWI）MRI的表观弥散系数（apparent diffusion coefficient, ADC）进行分子分型预测。SUV可以反映肿瘤的恶性程度以及肿瘤细胞的数量，与DWI MRI的ADC具有负相关关系^[26]。不同亚型乳腺癌对显像剂FDG的摄取存在较大差异，TNBC的SUV_{max}最高，其次是HER2阳性型，Luminal型最低^[27]。基于一体化PET/MRI的研究^[2, 28]也印证了这一点：SUV_{max}与肿瘤大小、细胞核分级、Ki-67增殖指数、HER2表达水平呈正相关，三阴性分型的SUV_{max}最高。ADC可以反映病灶内水分子弥散运动的受限程度，其在生长活跃、细胞密度高的组织中较低。研究^[2, 26]发现，ADC值与细胞核分级、Ki-67增殖指数以及HER2表达水平呈负相关。另有学者^[29]结合动态对比增强MRI的药代动力学参数，如容量转移常数（K^{trans}）、血管外细胞外间隙容积分数（V_e）、回流速率常数（K_{ep}）预测分子分型。Incoronato等^[29]设计了一个包含K^{trans}和SUV_{max}在内的多变量模型，该模型成功预测了77.6%（38/49）乳腺癌患者的分子分型，其中对Luminal B型的预测更准确（86.2%）。此外，基于一体化PET/MRI的影像组学高通量提取影像学特征，从而更加客观地反映肿瘤的异质性^[30]。

虽然影像学对分子分型的预测不可能替代有创活检，但它可以为患者的临床决策和预后提供补充信息。

5 一体化PET/MRI评估NAC效果

NAC可以提供肿瘤的药物敏感性信息，使肿瘤降期降级，增加保乳和保腋窝机会，减少手术创伤，最终达到改善患者预后的目的^[6]。对

NAC效果进行评估,可以及时调整无效方案,选择受益人群,避免药物不良反应。NAC达到病理学完全缓解(pathological complete response, pCR)可给患者带来明显的生存获益。但目前还未能形成一个公认的评估方式,并且影像学判断完全缓解尚无统一标准。

由于NAC时肿瘤的代谢变化早于形态学变化,所以利用PET的代谢参数能够及早地观察到肿瘤对药物的反应。Cho等^[31]联合病灶糖酵解总量(total lesion glycolysis, TLG)及信号增强比率(signal enhancement ratio, SER)在NAC前及第1周期后进行评估,其预测未达到pCR的灵敏度为100.0%(19/19),特异度为71.4%(5/7)。Sekine等^[32]将评判标准定义为病灶无FDG摄取且动态对比增强MRI无强化,预测pCR的灵敏度为72.2%,特异度为78.6%。

一体化PET/MRI可以在NAC期间利用多种参数评估肿瘤对药物的反应,监测肿瘤生物学行为的变化,优于单独行PET或者MRI检查。

6 总结

一体化PET/MRI作为一种新型多模态成像工具,可以在低辐射剂量的条件下更准确地判断淋巴结、骨、肝转移以及评估NAC效果,并对部分(10%~33%)乳腺癌患者的临床决策和管理产生影响。尽管前景广阔,但一体化PET/MRI也存在着价格昂贵、技术复杂、可及性差等问题,并且现有研究普遍样本量小并且多数来自单中心,仍需要大型的多中心随机对照试验进一步评估。相信随着显像剂的研发和成像技术的进步,以及与影像组学、AI的结合,一体化PET/MRI可以在乳腺癌领域发挥更大的作用^[33]。

[参 考 文 献]

- [1] SUNG H, FERLAY J, SIEGEL R L, et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. *CA Cancer J Clin*, 2021, 71(3): 209–249.
- [2] SASAKI M, TOZAKI M, KUBOTA K, et al. Simultaneous whole-body and breast ¹⁸F-FDG PET/MRI examinations in patients with breast cancer: a comparison of apparent diffusion coefficients and maximum standardized uptake values [J]. *Jpn J Radiol*, 2018, 36(2): 122–133.
- [3] FOWLER A M, KUMAR M, BANCROFT L H, et al. Measuring glucose uptake in primary invasive breast cancer using simultaneous time-of-flight breast PET/MRI: a method comparison study with prone PET/CT [J]. *Radiol Imaging Cancer*, 2021, 3(1): e200091.
- [4] 孙洪赞, 杜思瑶, 辛 军, 等. PET/CT与PET/MR诊断恶性肿瘤的临床对照研究 [J]. *中国临床医学影像杂志*, 2018, 29(9): 655–659.
- [5] MELSAETHER A N, RAAD R A, PUJARA A C, et al. Comparison of whole-body ¹⁸F FDG PET/MR imaging and whole-body ¹⁸F FDG PET/CT in terms of lesion detection and radiation dose in patients with breast cancer [J]. *Radiology*, 2016, 281(1): 193–202.
- [6] 中国抗癌协会乳腺癌专业委员会. 中国抗癌协会乳腺癌诊治指南与规范(2021年版) [J]. *中国癌症杂志*, 2021, 31(10): 954–1040.
- [7] BOTSİKAS D, KALOVIDOURI A, BECKER M, et al. Clinical utility of ¹⁸F-FDG-PET/MR for preoperative breast cancer staging [J]. *Eur Radiol*, 2016, 26(7): 2297–2307.
- [8] GRUENEISEN J, NAGARAJAH J, BUCHBENDER C, et al. Positron emission tomography/magnetic resonance imaging for local tumor staging in patients with primary breast cancer: a comparison with positron emission tomography/computed tomography and magnetic resonance imaging [J]. *Invest Radiol*, 2015, 50(8): 505–513.
- [9] ROMEO V, CLAUSER P, RASUL S, et al. AI-enhanced simultaneous multiparametric ¹⁸F-FDG PET/MRI for accurate breast cancer diagnosis [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 49(2): 596–608.
- [10] CATALANO O A, NICOLAI E, ROSEN B R, et al. Comparison of CE-FDG-PET/CT with CE-FDG-PET/MR in the evaluation of osseous metastases in breast cancer patients [J]. *Br J Cancer*, 2015, 112(9): 1452–1460.
- [11] KIRCHNER J, GRUENEISEN J, MARTIN O, et al. Local and whole-body staging in patients with primary breast cancer: a comparison of one-step to two-step staging utilizing ¹⁸F-FDG-PET/MRI [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 45(13): 2328–2337.
- [12] KIRCHNER J, MARTIN O, UMUTLU L, et al. Impact of ¹⁸F-FDG PET/MR on therapeutic management in high risk primary breast cancer patients – a prospective evaluation of staging algorithms [J]. *Eur J Radiol*, 2020, 128: 108975.
- [13] BRUCKMANN N M, SAWICKI L M, KIRCHNER J, et al. Prospective evaluation of whole-body MRI and ¹⁸F-FDG PET/MRI in N and M staging of primary breast cancer patients [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2020, 47(12): 2816–2825.
- [14] 阳依宏, 王海岩, 祁 纳, 等. ¹⁸F-FDG PET/MR在乳腺癌分期及复发检测中的临床应用研究 [J]. *中国临床医学影像杂志*, 2021, 32(12): 853–856.
- [15] TANEJA S, JENA A, GOEL R, et al. Simultaneous whole-body ¹⁸F-FDG PET-MRI in primary staging of breast cancer: a pilot study [J]. *Eur J Radiol*, 2014, 83(12): 2231–2239.

- [16] CATALANO O A, DAYE D, SIGNORE A, et al. Staging performance of whole-body DWI, PET/CT and PET/MRI in invasive ductal carcinoma of the breast [J] . *Int J Oncol*, 2017, 51(1): 281–288.
- [17] GOORTS B, VÖÖ S, VAN NIJNATTEN T J A, et al. Hybrid ^{18}F -FDG PET/MRI might improve locoregional staging of breast cancer patients prior to neoadjuvant chemotherapy [J] . *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2017, 44(11): 1796–1805.
- [18] BRUCKMANN N M, KIRCHNER J, MORAWITZ J, et al. Prospective comparison of CT and ^{18}F -FDG PET/MRI in N and M staging of primary breast cancer patients: initial results [J] . *PLoS One*, 2021, 16(12): e0260804.
- [19] MORAWITZ J, BRUCKMANN N M, DIETZEL F, et al. Determining the axillary nodal status with four current imaging modalities including ^{18}F -FDG PET/MRI in newly diagnosed breast cancer: a comparative study using histopathology as reference standard [J] . *J Nucl Med*, 2021, 62(12): 1677–1683.
- [20] VAN NIJNATTEN T J A, GOORTS B, VÖÖ S, et al. Added value of dedicated axillary hybrid ^{18}F -FDG PET/MRI for improved axillary nodal staging in clinically node-positive breast cancer patients: a feasibility study [J] . *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 45(2): 179–186.
- [21] MORAWITZ J, BRUCKMANN N M, DIETZEL F, et al. Comparison of nodal staging between CT, MRI, and ^{18}F -FDG PET/MRI in patients with newly diagnosed breast cancer [J] . *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 49(3): 992–1001.
- [22] BRUCKMANN N M, KIRCHNER J, UMUTLU L, et al. Prospective comparison of the diagnostic accuracy of ^{18}F -FDG PET/MRI, MRI, CT, and bone scintigraphy for the detection of bone metastases in the initial staging of primary breast cancer patients [J] . *Eur Radiol*, 2021, 31(11): 8714–8724.
- [23] SAWICKI L M, GRUENEISEN J, BUCHBENDER C, et al. Evaluation of the outcome of lung nodules missed on ^{18}F -FDG PET/MRI compared with ^{18}F -FDG PET/CT in patients with known malignancies [J] . *J Nucl Med*, 2016, 57(1): 15–20.
- [24] JACK M M, SMITH B W, CAPEK S, et al. The spectrum of brachial plexopathy from perineural spread of breast cancer [J] . *J Neurosurg*, 2022: 1–10.
- [25] SAWICKI L M, GRUENEISEN J, SCHAARSCHMIDT B M, et al. Evaluation of ^{18}F -FDG PET/MRI, ^{18}F -FDG PET/CT, MRI, and CT in whole-body staging of recurrent breast cancer [J] . *Eur J Radiol*, 2016, 85(2): 459–465.
- [26] MORAWITZ J, KIRCHNER J, MARTIN O, et al. Prospective correlation of prognostic immunohistochemical markers with SUV and ADC derived from dedicated hybrid breast ^{18}F -FDG PET/MRI in women with newly diagnosed breast cancer [J] . *Clin Nucl Med*, 2021, 46(3): 201–205.
- [27] HUMBERT O, LASSERRE M, BERTAUT A, et al. Breast cancer blood flow and metabolism on dual-acquisition ^{18}F -FDG PET: correlation with tumor phenotype and neoadjuvant chemotherapy response [J] . *J Nucl Med*, 2018, 59(7): 1035–1041.
- [28] JENA A, TANEJA S, SINGH A, et al. Reliability of ^{18}F -FDG PET metabolic parameters derived using simultaneous PET/MRI and correlation with prognostic factors of invasive ductal carcinoma: a feasibility study [J] . *AJR Am J Roentgenol*, 2017, 209(3): 662–670.
- [29] INCORONATO M, GRIMALDI A M, CAVALIERE C, et al. Relationship between functional imaging and immunohistochemical markers and prediction of breast cancer subtype: a PET/MRI study [J] . *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 45(10): 1680–1693.
- [30] UMUTLU L, KIRCHNER J, BRUCKMANN N M, et al. Multiparametric integrated ^{18}F -FDG PET/MRI-based radiomics for breast cancer phenotyping and tumor decoding [J] . *Cancers (Basel)*, 2021, 13(12): 2928.
- [31] CHO N, IM S A, CHEON G J, et al. Integrated ^{18}F -FDG PET/MRI in breast cancer: early prediction of response to neoadjuvant chemotherapy [J] . *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 45(3): 328–339.
- [32] SEKINE C, UCHIYAMA N, WATASE C, et al. Preliminary experiences of PET/MRI in predicting complete response in patients with breast cancer treated with neoadjuvant chemotherapy [J] . *Mol Clin Oncol*, 2022, 16(2): 50.
- [33] 刘进, 张惟元, 张智猗, 等. PET影像组学在乳腺癌中的研究进展 [J] . *肿瘤影像学*, 2022, 31(4): 449–454.

(收稿日期: 2023-01-14 修回日期: 2023-02-27)