



· 综述 ·

# 一体化PET/MR技术的发展及临床应用

曾天翼<sup>1, 2</sup>, 宋少莉<sup>3</sup>, 吕力琅<sup>3</sup>

1. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210 ;
2. 中国科学院大学, 北京 100049 ;
3. 复旦大学附属肿瘤医院, 复旦大学上海医学院肿瘤学系, 上海 200032

[摘要] 一体化PET/MR是将PET和MR有机整合到一体的新型多模态影像系统, 在反映解剖学结构和生理学功能上有独特优势。该研究总结了一体化PET/MR技术的现状、趋势及其在恶性肿瘤、神经系统及心血管系统疾病诊断中的应用。

[关键词] 一体化PET/MR; 多模态影像系统; 兼容性技术; 衰减校正; 运动校正

DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2019.04.013

中图分类号: R445.6 文献标志码: A 文章编号: 2096-6210(2019)04-0276-07

**Technical progress and clinical application of integrated PET/MR** ZENG Tianyi<sup>1, 2</sup>, SONG Shaoli<sup>3</sup>, LÜ Lilang<sup>3</sup>

(1. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Fudan University Shanghai Cancer Center; Department of Oncology, Shanghai Medical College, Fudan University, Shanghai 200032, China)

Correspondence to: LÜ Lilang E-mail: lvlanglang@hotmail.com

[Abstract] Integrated PET/MR is a multimodal imaging system which can acquire PET and MR images at the same time. It has unique advantages in reflecting anatomy structure and physiological function. This paper summarized the development of integrated PET/MR technology, the latest technological progress, and its clinical application in tumor, nervous system and cardiovascular system diseases.

[Key words] Integrated PET/MR; Multimodal imaging system; Compatibility technology; Attenuation correction; Motion correction

## 1 一体化PET/MR简介

一体化PET/MR是将PET和MR有机整合成一体的新型多模态影像系统。它实现了两种不同设备在相同空间内对各自数据的同时采集, 又兼具各设备的独立功能, 既结合了MR系统的软组织高分辨率与多参数多功能成像特性, 又结合了PET系统的放射性示踪剂代谢高灵敏度以及数据量化特性<sup>[1]</sup>。PET/MR现已用于脑神经疾病诊断、心肌疾病诊断及全身肿瘤诊断等多领域。PET/MR在反映解剖学结构形态和生理学功能信息方面具有独特优势, 尤其是在软组织病变的诊断方面<sup>[2]</sup>。并且MR没有辐射, 对儿童而言更加安全。

一体化PET/MR融合技术存在许多难点, 包括实现在强磁场环境中PET探测器的电磁兼容性、克服PET系统对磁共振的射频干扰和主磁场不均匀性的影响、PET重建中基于MR图像的衰减校正问题, 以及如何利用MR图像提供的信息校正PET系统在长时间采集过程中产生的胸部和腹部运动伪影等。

## 2 一体化PET/MR技术发展现状

### 2.1 兼容性技术发展现状

为了实现一体化的PET/MR, 必须先解决PET和MR之间相互干扰的问题, 而其中一个重要的技术问题是研制能够在MR强磁场环境下探测高能光子的PET探测器。研究发现, PET/MR

基金项目: 上海市科学技术委员会基金项目 (16DZ0503700)。

通信作者: 吕力琅 E-mail: lvlanglang@hotmail.com

中使用的闪烁晶体必须具有与人体相近的磁兼容性，而传统的闪烁晶体如硅酸镓钷、硅酸钷的磁兼容性与人体相差甚远，影响了MR磁场的均匀性，会导致伪影产生，因此不能用于一体化PET/MR<sup>[3]</sup>。随着LSO、LYSO新型晶体的应用与临床推广，磁兼容性问题得到了解决<sup>[4]</sup>，同时新型晶体拥有更好的光敏感性和能量分辨率，能够提升图像质量。

探测器中重要的部件——光电倍增管（photomultiplier tube, PMT）极易受到强磁场的影响，这与其运行原理有关，其工作原理是在阴极将闪烁晶体探测到的光信号转换为电子，经过多级电场加速放大后，在阳极转换为电信号，而MR的主磁场会改变电子运行轨迹导致到达阳极的电子减少，电信号减弱，因此传统PMT无法在MR环境中工作<sup>[5]</sup>。

雪崩光电二极管（avalanche photodiode, APD）被证明对磁场不敏感，可直接或通过极短的光纤与PET晶体连接。2006年Catana等<sup>[6]</sup>用短

光纤将LSO闪烁晶体与APD相连，制作了可灵活嵌入MR的相容型PET insert，PET和MR两个子系统同时成像时，没有明显的负干扰，成功获得了PET/MR融合图像。而Biograph mMR使用APD阵列与LSO闪烁晶体耦合，并用放大电路对APD阵列输出信号增幅。尽管APD技术已经比较成熟，但它仍然有信号放大增益低（ $10^2\sim 10^3$ ）、输出信号慢和时间分辨率差的缺点。近年来学者开始研究基于硅光电倍增管（silicon photomultiplier, SiPM）的改良探测器。GE Signa PET/MR是第1台将SiPM投入临床使用的一体化PET/MR设备，与APD相比，SiPM具有与PMT相同的、高于APD的放大增益和时间分辨率，并具有一致性好、尺寸小、工作电压低和结构紧凑等优点<sup>[7]</sup>。上海联影医疗科技有限公司的uPMR 790一体化PET/MR使用了全数字SiPM技术，且在高效率冷却专利的基础上，解决了MR内SiPM性能的稳定性问题（图1~2）。



图1 3种临床一体化PET/MR机器实物图

A: SIEMENS Biograph mMR; B: GE Signa PET/MR; C: 上海联影医疗科技有限公司uPMR 790

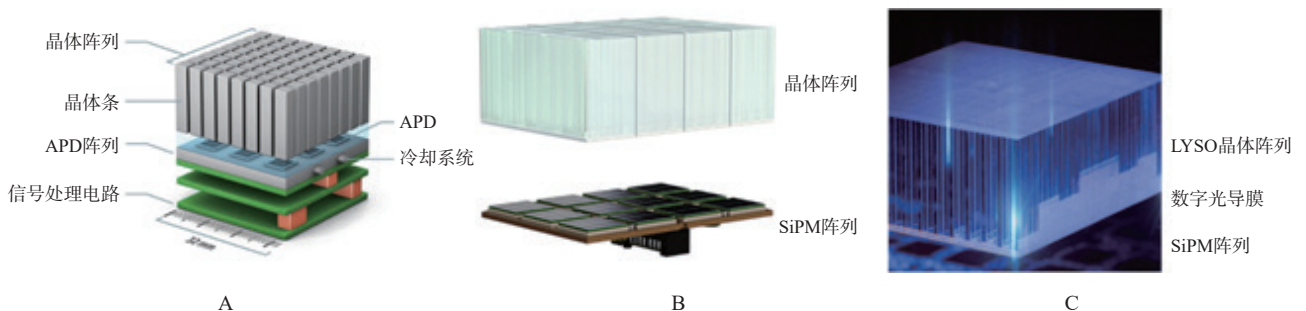


图2 APD阵列和SiPM阵列示意图

A: APD阵列; B: GE SiPM阵列; C: 上海联影医疗科技有限公司全数字SiPM阵列

## 2.2 射频干扰和主磁场不均匀性问题的克服

一体化PET与MR不容忽视的另一个问题是射频干扰。将任何电子器件放入MR成像孔径内, 都会显著干扰磁共振信号的探测。PET的电子器件对射频非常敏感, 强射频对PET采集有不利影响。为了消除这种影响通常使用屏蔽壳, 然而屏蔽壳降低射频干扰的同时, 又引入了新的负相互作用。比如, MR的RF线圈为了与人体相容被设计成了特定形式, 如果附近存在一个金属屏蔽壳则会改变线圈的相容性。引入屏蔽壳最大的影响是会破坏MR主磁场的均匀性, 铜屏蔽壳将直接影响主磁场, 进而直接影响MR的全局成像性能。另外, 梯度磁场会使导电屏蔽壳的表面产生涡流, 从而使得PET探测器温度过热。为了减小涡流并最小化射频干扰, 许多研究团队设计了多种微米厚度的铜屏蔽<sup>[8]</sup>, 其可有效减少涡流造成的伪影, 目前临床一体化PET/MR均使用该技术。最近, 有研究提出用碳纤维材料制造屏蔽壳, 因其电阻率高于金属材料, 在保持导电性的同时产生较小涡流, 不会影响到MR成像<sup>[9]</sup>。

## 2.3 衰减校正技术发展现状

PET探测的511 KeV高能光子在人体内会产生康普顿效应, 这一过程中高能光子会衰减或者被散射, 估算每条响应线的衰减和散射比例的算法称作校正算法。MR图像只能提供质子密度和弛豫时间的信息, 无法用来获得衰减分布图。目前, 主流的一体化PET/MR衰减校正算法是基于MR图像分割方法, 该方法利用快速三维Dixon VIBE序列和Dixon水脂分离算法, 将MR图像分割成衰减系数不同的4个区域(空气、脂肪、肺和软组织)<sup>[10]</sup>。但该方法无法从MR图像中得到致密骨组织的信号, 而骨组织对PET信号衰减最为严重, 因此该方法导致PET图像的标准摄入量(standardized uptake value, SUV)普遍偏低。其另一个缺点是MR视野受限造成umap截断效应<sup>[11]</sup>, 比如手臂往往在MR视野范围之外。针对上述两个缺点, SIEMENS在其PET/MR上开发了拥有骨图谱和HUGE校正的新特征AC算法, 具体操作为使用软件工具对骨图谱和截断效应进行校正, 使用的骨图谱分割算法, 能在

Dixon AC四分类的umap基础上加入骨位置<sup>[12]</sup>。该系统使用了Blumhagen等<sup>[13]</sup>提出的HUGE(B0 homogenization using gradient enhancement)技术。该技术通过梯度增强的方法补偿B0场的不均匀性以及梯度的非线性, 减少了图像失真, 通过基于自旋回波的MR序列延伸了视野, 是完全基于MR的外周体区截断校正。AC算法在临床试验结果中, 未引入伪影, 骨分割结果准确可靠, 患者肿瘤区域的SUV最大值平均增加了4.4%, 证明该方法能提升PET/MR的图像质量<sup>[14]</sup>。然而, 对于头颈部的AC算法, 传统基于磁共振的图像方法无法分离骨和空气, 上海联影医疗科技有限公司一体化PET/MR中使用超短回波时间(ultrashort echo time, UTE)序列, 在骨中有微弱信号<sup>[15]</sup>。在此基础上, 改进了区域分割中可能出现的错误, 得到了连续骨密度的umap, 研发出专用于临床一体化PET/MR头颈部的AC算法。GE Signa PET/MR使用不同于UTE序列的零回波时间(zero echo time, ZTE)序列与Dixon序列相结合的方法, 在盆腔扫描中获得了良好效果, 同时也可以计算出骨密度连续的umap<sup>[16]</sup>。最近, Gong等<sup>[17]</sup>提出使用MR图像为输入的基于深度神经网络模型的头部衰减校正算法, 该算法基于GE Signa PET/MR的Dixon和ZTE序列图像作为GroupU-net的输入, 随后直接由训练的卷积神经网络输出伪CT图像。其不再把人体组织简单地分成水、脂肪及骨骼等几大类, 而是直接分出每个器官, 进而对每个器官赋予各自的衰减系数, 获得了值连续的衰减umap。目前该算法还未进入产品应用, 未来随着深度神经网络技术的成熟发展, 可望有较好的应用前景。

## 2.4 运动校正技术发展现状

运动伪影会显著降低PET系统的有效分辨率, 导致图像信噪比和对比度下降, 从而使得微小病灶的边界判别不清、定量分析困难<sup>[18]</sup>。在PET/MR扫描中, 主要有头部、呼吸和心脏运动伪影, 其中呼吸和心脏的运动伪影影响较大。运动伪影校正通过采集运动信息进行运动校正, 运动信息的采集有多种方式, 既可以通过PET数据本身, 例如PET自适应方法, 即通过对连续采集

的多帧PET重建图像与参考位置图像进行配准来获取各帧图像之间的运动,这种方法无需额外设备,但实时性不高;也可以采用一些外部手段,例如基于高速摄像设备和呼吸绑带等监控腹部起伏运动的外设和基于心电图的心脏运动监控设备。谢魏玮等<sup>[19]</sup>利用头部MR图像获取高精度的头部运动信息,证明了基于响应线的PET头部运动校正算法在上海联影医疗科技有限公司uPMR 790上有较好的补偿效果。在腹部扫描中,uPMR 790可以使用呼吸绑带或者基于磁共振导航门控的方法监控呼吸运动信息。GE为其Signa PET/MR研发了多种基于磁共振获取运动信息的校正算法:①前瞻性运动校正(prospective motion correction, PROMO)方法;②围绕K空间原点旋转的同心矩形条带采样的PROPELLER运动校正方法;③二维条形束激发磁共振导航序列的方法,该运动校正方法采用磁共振导航序列获取膈肌运动信息,触发腹部磁共振成像序列和PET同步采集。上述方法有效地减轻了运动伪影及模糊,且不需要增加外设的成本,可以用于头部、心脏和腹部<sup>[20]</sup>。SIEMENS的一体化PET/MR则利用同时采集的MR和PET信号优势,用MR现有的呼吸运动相位对PET数据进行门控分割,将得到的门控PET数据与获得的呼吸运动数据输入到4维含有PET运动补偿的图像重建算法中,在临床<sup>90</sup>Y图谱分析中证明能够减少呼吸运动引入的模糊效应。

### 3 一体化PET/MR临床应用

一体化PET/MR兼具MR良好的空间和软组织分辨率以及PET高敏感度功能性成像的特点。大量研究表明一体化PET/MR在临床上有广阔的应用前景。另外,MR相比CT存在软组织对比、多平面成像、功能成像及无电离辐射等优势,PET/MR中PET图像可以基于MR图像进行校正,有助于对PET高摄取区域的定位。目前一体化PET/MR在肿瘤学、神经学、心脏扫描及腹部扫描等临床检查上的应用日趋发展成熟。

#### 3.1 中枢神经系统疾病应用

MR是目前诊断大多数神经系统疾病的主要影像学方法,PET可以提供脑代谢显像、脑受体

显像和大脑血流动力学信息<sup>[21]</sup>,也在临床广泛应用。一体化PET/MR在单独模态成像基础上,有效弥补了PET空间分辨能力有限的问题,获得更精准的PET信号,可以进一步将多模态信息进行整合来诊断中枢神经疾病。脑退行性病变与正常老化的鉴别存在困难,虽然大多数神经退行性疾病有特异性组织学标志,但一般认为临床症状并不是由异常组织学改变引起,而是主要与神经元、树突和突触间的连接减少有关。MR结构图像可以检测神经元丢失,同时,通过<sup>18</sup>F-FDG PET图像检测神经元功能的丧失,利用血氧水平依赖(blood oxygen level dependent, BOLD)、扩散张量成像(diffusion tensor image, DTI)、波谱成像等功能磁共振图像对脑血流、脑神经纤维走向等进行科学研究和分析,在神经退行性疾病诊断上很有临床价值。另外,利用新的PET放射药物可以探测到淀粉样蛋白的沉积,该沉积与神经元退行性病变相关,多项研究结果显示一体化PET/MR,利用<sup>18</sup>F标记示踪剂可以诊断和鉴别阿尔茨海默病<sup>[22]</sup>。癫痫是常见的神经系统疾病,利用影像学手段检测癫痫病灶对手术能否进行至关重要,而一体化PET/MR增加了潜在检测到癫痫病变的可能性<sup>[23]</sup>,图3是uPMR 790提供的有癫痫病史的患者图像。SIEMENS公开资料显示,Zwanger-Pesiri Radiology的Anthony Pavone利用Biograph mMR在神经退行性疾病和心理障碍疾病的诊断上进行研究,包括阿尔茨海默病、痴呆症等,证明一体化PET/MR在临床上具有更大价值。1项最新研究显示,Wang等<sup>[24]</sup>利用一体化PET/MR上对12名颞叶内侧癫痫患者同时进行磁共振动脉自旋标记技术成像和PET成像,评估两者的相关性,将诊断结果与作为金标准的立体脑电扫描技术对比,结果显示与金标准强相关,PET/MR能够提供临床术前评估的重要图像信息。

#### 3.2 心脏疾病应用

多模态影像设备一直是心脏形态学和生理学的重要评估工具,目前一体化PET/MR在临床上已经用于冠心病、心肌炎和结节病性心脏病的诊断,其在心脏疾病中应用的可靠性和鲁棒性已

经被证明<sup>[25]</sup>。冠心病是由冠脉病变引起心肌缺血缺氧所导致。冠心病的诊断除了评价冠脉病变外,关键是评价冠脉病变所导致的心肌供血和冠脉功能的改变。MR的高空间分辨率和软组织对比度使其可以清晰地显示炎性改变,目前临床一体化PET/MR均利用心脏磁共振成像技术在临床心肌炎性反应诊断的基础上<sup>[26]</sup>,加入FDG-PET图像进行联合诊断。结节病性心脏病一直是较难确诊的肉芽肿炎性反应性疾病,有复杂的病因,其表现往往伴随心律失常与心力衰竭。CMR和FDG-PET都是临床上用于评估该病的常用手段,已经有研究表明两个模态联合会提高诊断效能,

原因是他们的图像病理学表现不同,MR提供的结构和功能信息可对结节性心肌病进行全面准确的评估,PET心肌灌注和代谢分析可以提供对比分析<sup>[27]</sup>。White等<sup>[28]</sup>在Biograph mMR上对51名患者进行了PET/MR心脏扫描,与单独PET和MR成像结果进行比较,证明了PET/MR对活动性心脏结节病诊断的可行性和准确性。一体化PET/MR在急性心肌梗死、心力衰竭和心脏肿瘤的诊断中有良好的应用前景,图4是uPMR 790上获取的诊断为心肌梗死的患者心脏图像。另外,新型放射性药物的研究如<sup>18</sup>F-AV-133和新MR序列会在未来带来更多的可能性。

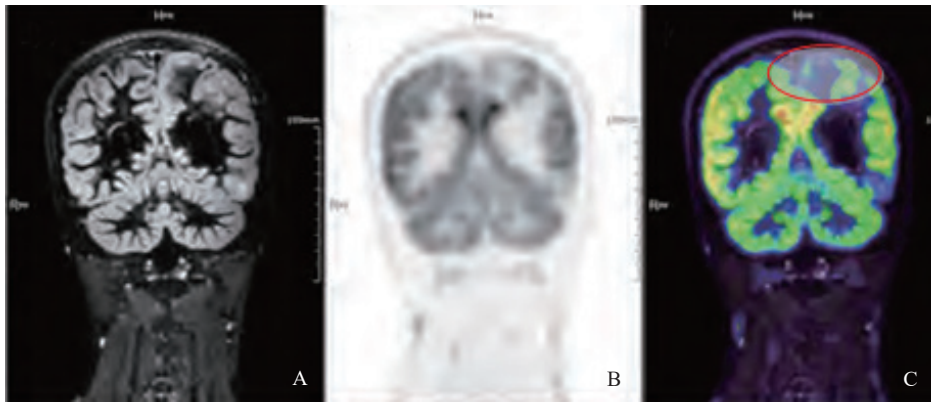


图3 癫痫患者脑部PET/MR图像

A: MR图像显示大脑左侧有不正常白质; B: PET图像显示大脑左侧顶部FDG摄取减少,对应该区域白质不正常; C: PET/MR融合图像能清晰反映不正常脑部位在左侧顶部

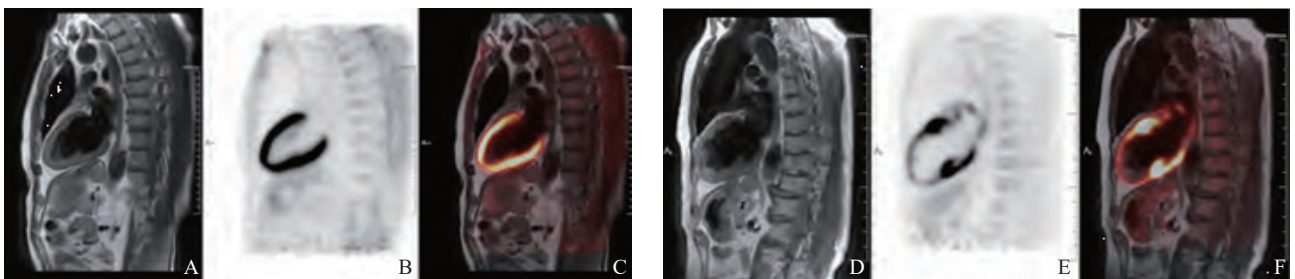


图4 一体化PET/MR心脏成像

A~C: 正常心脏图像; D~F: 心肌梗死患者心脏图像。A、D: MR图像; B、E: PET图像; C、F: 融合图像

### 3.3 肿瘤疾病应用

在传统PET/CT临床应用中,肿瘤方面的应用最为重要,其灵敏度高,但特异度低。此外还有例如<sup>11</sup>C-醋酸盐、<sup>11</sup>C-胆碱及<sup>18</sup>F-FET等诸多显影剂可用于特定恶性肿瘤检测。一体化PET/MR

在肿瘤检查中的应用往往与同是多模态影像设备的PET/CT结果进行对比。

在头颈部和胸部肿瘤检查中,因为MR良好的软组织对比特性,能更好地区分舌下腺、颌下腺和动静脉等结构,定位更精准。PET/MR动态

增强技术可以获得 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 高分辨率的乳腺癌图像，兼具MR的高灵敏度和PET的高特异度，使乳腺癌的检出率明显提高。同时，一体化PET/MR在肝癌、前列腺癌中也有很大优势，图5显示一体化PET/MR在腹部扫描中与PET/CT相比有优势。Beiderwellen等<sup>[29]</sup>对70个肿瘤患者（其中36个肝脏肿瘤区域）进行了研究，结果显示，一体化PET/MR与PET/CT识别的病变区域相同，且PET/MR能更清晰地发现肿瘤；另外，在神经内分泌肿瘤的检查上，Sawicki等<sup>[30]</sup>使用<sup>68</sup>Ga-DOTATOC造影剂的PET/MR与相同造影剂的PET/CT进行对比，前者有着对神经内分泌肿瘤更高的检出比例和肿瘤区域显著性。这意味

着对神经内分泌肿瘤患者而言，一体化PET/MR有更好的分期检查前景和更早期的诊断条件，因此可以对患者进行精准治疗。同时，一体化PET/MR在肝门胆管恶性肿瘤、胰腺癌及子宫内膜癌等癌症中比PET/CT更有优势。在前列腺肿瘤的诊断上，一体化PET/MR更高的空间配准精度，比PET/CT有更佳的临床表现和临床上的应用前景<sup>[31]</sup>。<sup>68</sup>Ga-PSMA应用在一体化PET/MR上，能更容易地检测到转移性前列腺肿瘤，且精度更好。另外，在骨转移瘤、头颈部肿瘤及宫颈癌检查等方面，一体化PET/MR也有广泛的应用前景。

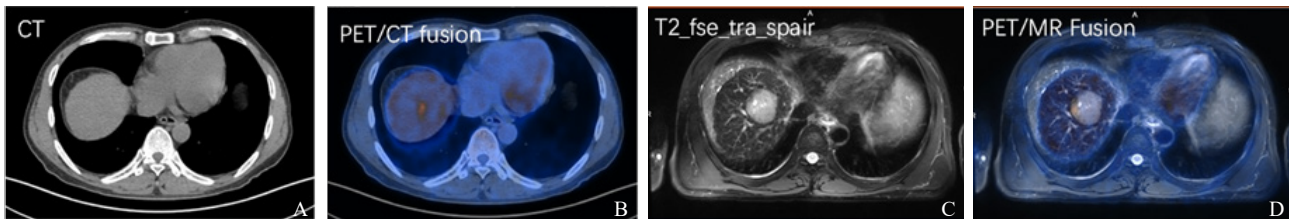


图5 uPMR 790 PET/MR与PET/CT融合对比图

B: PET/CT图像；D: PET/MR图像。对于同一个肝癌患者肿瘤区域，PET/CT表现出高摄取，但是不能显示病灶边界

#### 4 总 结

总之，与PET/CT相比，一体化PET/MR表现出更高的灵敏度与特异度，对于恶性肿瘤、神经系统病变和心血管系统疾病，均具有良好的检出和鉴别能力。对于临床全身性的肿瘤转移，局部淋巴结转移和肿瘤分期方面发挥着越来越重要的作用。此外，一体化PET/MR能够为肿瘤的疗效评估以及复发监测提供更为敏感、精确的分子与功能信息。未来的一体化PET/MR将从目前的结构一体化朝着功能一体化、快速扫描、高度同步、高空间和高时间分辨率以及高融合精度方向发展。随着PET探测器小型化技术的快速发展，将来也许无需对MR硬件系统进行改进即可实现嵌入式PET/MR采集，从而减轻更换硬件设备的繁琐性，并在更多疾病上探索诊断的可行性和特异性。

#### [参 考 文 献]

- [1] QUICK H H. Integrated PET/MR [J]. J Magn Reson Imaging, 2014, 39(2): 243-258.
- [2] GLAUDEMANS A W, QUINTERO A M, SIGNORE A. PET/MRI in infectious and inflammatory diseases: will it be a useful improvement? [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2012, 39(5): 745-749.
- [3] ZHOU Z H, ZHANG H, JAKANA J, et al. Cytoplasmic polyhedrosis virus structure at 8 Å by electron cryomicroscopy: structural basis of capsid stability and mRNA processing regulation [J]. Structure, 2003, 11(6): 651-663.
- [4] MELCHER C L, SCHWEITZER J S. Cerium-doped lutetium oxyorthosilicate: a fast, efficient new scintillator [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1992, 39(4): 502-505.
- [5] CATTANEO P W, DE GERONE M, GATTI F, et al. Development of high precision timing counter based on plastic scintillator with SiPM readout [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2014, 61(5): 2657-2666.
- [6] CATANA C, WU Y, JUDENHOFER M S, et al. Simultaneous acquisition of multislice PET and MR images: initial results with a MR-compatible PET scanner [J]. J Nucl Med, 2006, 47(12): 1968-1976.

- [ 7 ] RONCALI E, CHERRY S R. Application of silicon photomultipliers to positron emission tomography [ J ] . *Ann Biomed Eng*, 2011, 39(4): 1358–1377.
- [ 8 ] MARAMRAJU S H, SCHLYER D, MARAMRAJU S H, et al. Electromagnetic interactions in a shielded PET/MRI system for simultaneous PET/MR imaging in 9.4 T: evaluation and results [ J ] . *IEEE Trans Nucl Sci*, 2012, 59(5): 1892–1899.
- [ 9 ] CHUNG D D L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials [ J ] . *Carbon*, 2001, 39(2): 279–285.
- [ 10 ] SCHULZ V, TORRES-ESPALLARDO I, RENISCH S, et al. Automatic, three-segment, MR-based attenuation correction for whole-body PET/MR data [ J ] . *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2011, 38(1): 138–152.
- [ 11 ] BOELLAARD R, QUICK H H. Current image acquisition options in PET/MR [ J ] . *Semin Nucl Med*, 2015, 45(3): 192–200.
- [ 12 ] KOESTERS T, FRIEDMAN K P, FENCHEL M, et al. Dixon sequence with superimposed model-based bone compartment provides highly accurate PET/MR attenuation correction of the brain [ J ] . *J Nucl Med*, 2016, 57(6): 918–924.
- [ 13 ] BLUMHAGEN J O, LADEBECK R, FENCHEL M, et al. MR-based field-of-view extension in MR/PET: B0 homogenization using gradient enhancement (HUGE) [ J ] . *Magn Reson Med*, 2013, 70(4): 1047–1057.
- [ 14 ] OEHMIGEN M, LINDEMANN M E, GRATZ M, et al. Impact of improved attenuation correction featuring a bone atlas and truncation correction on PET quantification in whole-body PET/MR [ J ] . *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 45(4): 642–653.
- [ 15 ] KEEREMAN V, FIERENS Y, BROUX T, et al. MRI-based attenuation correction for PET/MRI using ultrashort echo time sequences [ J ] . *J Nucl Med*, 2010, 51(5): 812–818.
- [ 16 ] LEYNES A P, YANG J, SHANBHAG D D, et al. Hybrid ZTE/Dixon MR-based attenuation correction for quantitative uptake estimation of pelvic lesions in PET/MRI [ J ] . *Med Phys*, 2017, 44(3): 902–913.
- [ 17 ] GONG K, YANG J, KIM K, et al. Attenuation correction for brain PET imaging using deep neural network based on Dixon and ZTE MR images [ J ] . *Phys Med Biol*, 2018, 63(12): 125011.
- [ 18 ] OUYANG J, LI Q, EL FAKHRI G. Magnetic resonance-based motion correction for positron emission tomography imaging [ J ] . *Semin Nucl Med*, 2013, 43(1): 60–67.
- [ 19 ] 谢魏玮, 胡凌志, 曹学香, 等. 一体化PET/MRI头部运动两种校正方法的对比 [ J ] . *核技术*, 2017, 40(4): 15–22.
- [ 20 ] WHITE N, RODDEY C, SHANKARANARAYANAN A, et al. PROMO: real-time prospective motion correction in MRI using image-based tracking [ J ] . *Magn Reson Med*, 2010, 63(1): 91–105.
- [ 21 ] 潘中允. PET诊断学 [ M ] . 北京: 人民卫生出版社, 2005.
- [ 22 ] ROCCHI L, NICCOLINI F, POLITIS M. Recent imaging advances in neurology [ J ] . *J Neurol*, 2015, 262(9): 2182–2194.
- [ 23 ] SHIN H W, JEWELLS V, SHEIKH A, et al. Initial experience in hybrid PET-MRI for evaluation of refractory focal onset epilepsy [ J ] . *Seizure*, 2015, 31(2): 1–4.
- [ 24 ] WANG Y H, AN Y, FAN X T, et al. Comparison between simultaneously acquired arterial spin labeling and <sup>18</sup>F-FDG PET in mesial temporal lobe epilepsy assisted by a PET/MR system and SEEG [ J ] . *Neuroimage Clin*, 2018, 19: 824–830.
- [ 25 ] BERGQUIST P J, CHUNG M S, JONES A, et al. Cardiac applications of PET/MR [ J ] . *Curr Cardiol Rep*, 2017, 19(5): 42.
- [ 26 ] LURZ P, LUECKE C, EITEL I, et al. Comprehensive cardiac magnetic resonance imaging in patients with suspected myocarditis: the myoracer-trial [ J ] . *J Am Coll Cardiol*, 2016, 67(15): 1800–1811.
- [ 27 ] PHAM N, ZAITOUN H, MOHAMMED T L, et al. Complications of aortic valve surgery: manifestations at CT and MR imaging [ J ] . *Radiographics*, 2012, 32(7): 1873–1892.
- [ 28 ] WHITE J A, RAJCHL M, BUTLER J, et al. Active cardiac sarcoidosis: first clinical experience of simultaneous positron emission tomography-magnetic resonance imaging for the diagnosis of cardiac disease [ J ] . *Circulation*, 2013, 127(22): e639–e641.
- [ 29 ] BEIDERWELLEN K, GERALDO L, RUHLMANN V, et al. Accuracy of <sup>18</sup>F-FDG PET/MRI for the detection of liver metastases [ J ] . *PLoS One*, 2015, 10(9): e0137285.
- [ 30 ] SAWICKI L M, DEUSCHL C, BEIDERWELLEN K, et al. Evaluation of <sup>68</sup>Ga-DOTATOC PET/MRI for whole-body staging of neuroendocrine tumours in comparison with <sup>68</sup>Ga-DOTATOC PET/CT [ J ] . *Eur Radiol*, 2017, 27(10): 4091–4099.
- [ 31 ] HENNINGER M, MAURER T, HACKER C, et al. <sup>68</sup>Ga-PSMA PET/MR showing intense PSMA uptake in nodular fasc II tis mimicking prostate cancer metastasis [ J ] . *Clin Nucl Med*, 2016, 41(10): e443–e444.

(收稿日期: 2019-03-20 修回日期: 2019-04-30)