

- [2] Garlick PB, Marsden PK, Cave AC, et al. PET and NMR dual acquisition (PANDA): applications to isolated, perfused rat hearts. *NMR Biomed*, 1997, 10(3): 138-142.
- [3] Shao Y, Cherry SR, Farahani K, et al. Simultaneous PET and MR imaging. *Phys Med Biol*, 1997, 42(10): 1965-1970.
- [4] Mackewn JE, Strul D, Hallett WA, et al. Design and development of an MR-compatible PET scanner for imaging small animals. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2005, 52(5): 1376-1380.
- [5] Pichler B, Lorenz E, Mirzoyan R, et al. Performance test of a LSO-APD PET module in a 9.4 Tesla magnet [C/OL] // 1997 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, Albuquerque, NM, USA, 1997 [2011-02-20]. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=670533](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=670533).
- [6] Pichler BJ, Pimpl W, Buttler W, et al. Integrated low-noise low-power fast charge-sensitive preamplifier for avalanche photodiodes in JFET-CMOS technology. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2001, 48(6): 2370-2374.
- [7] Pichler BJ, Judenhofer MS, Catana C, et al. Performance test of an LSO-APD detector in a 7-T MRI scanner for simultaneous PET/MRI. *J Nucl Med*, 2006, 47(4): 639-647.
- [8] Judenhofer MS, Catana C, Swann BK, et al. PET/MR images acquired with a compact MR-compatible PET detector in a 7-T magnet. *Radiology*, 2007, 244(3): 807-814.
- [9] Grazioso R, Zhang N, Corbeil J, et al. APD-based PET detector for simultaneous PET/MR imaging. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A - Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2006, 569(2): 301-305.
- [10] Schlemmer HP, Pichler BJ, Schmand M, et al. Simultaneous MR/PET imaging of the human brain: feasibility study. *Radiology*, 2008, 248(3): 1028-1035.
- [11] Boss A, Bisdas S, Kolb A, et al. Hybrid PET/MRI of intracranial masses: initial experiences and comparison to PET/CT. *J Nucl Med*, 2010, 51(8): 1198-1205.
- [12] Boss A, Stegger L, Bisdas S, et al. Feasibility of simultaneous PET/MR imaging in the head and upper neck area. *Eur Radiol*, 2011, 21(7): 1439-1446.
- [13] Catana C, Wu Y, Judenhofer MS, et al. Simultaneous acquisition of multislice PET and MR images: initial results with a MR-compatible PET scanner. *J Nucl Med*, 2006, 47(12): 1968-1976.
- [14] 罗述谦, 李响. 基于最大互信息的多模医学图像配准. *中国图象图形学报*, 2000, 5A(7): 551-558.
- [15] Ruf J, Lopez Hänninen E, Böhmig M, et al. Impact of FDG-PET/MRI image fusion on the detection of pancreatic cancer. *Pancreatology*, 2006, 6(6): 512-519.
- [16] Wong TZ, Turkington TG, Hawk TC, et al. PET and brain tumor image fusion. *Cancer J*, 2004, 10(4): 234-242.
- [17] Seemann MD, Meisetschlaeger G, Gaa J, et al. Assessment of the extent of metastases of gastrointestinal carcinoid tumors using whole-body PET, CT, MRI, PET/CT and PET/MRI. *Eur J Med Res*, 2006, 11(2): 58-65.

(收稿日期: 2011-03-23)

## PET-MRI 图像融合技术的发展及临床应用

宋建华 赵晋华 乔文礼

**【摘要】** PET-CT 的出现和逐渐普及使大家认识到了其对恶性肿瘤的诊断、分期、疗效评价和判断预后等方面的优势, 由于 MRI 的无辐射性及其在软组织分辨率方面的优势, 在 PET-MRI 机型逐渐成熟后将再引发 PET-MRI 的装机热潮。该文主要就图像融合技术的发展历程以及目前部分学者在 PET-MRI 临床应用方面的研究做些归纳, 以帮助人们了解此新仪器的功用, 认识其广泛的应用前景。而在 PET-MRI 普及之前, 仍可依据现有设备进行相关图像融合及临床应用研究。

**【关键词】** 正电子发射断层显像术; 磁共振成像; 体层摄影术, X 线计算机; 图像处理, 计算机辅助

**Development and application of PET-MRI image fusion technology** SONG Jian-hua, ZHAO Jin-hua, QIAO Wen-li. *Department of Nuclear Medicine, the First People's Hospital, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200080, China*

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2011.03.002

基金项目: 上海交大医工(理)交叉研究基金(YG2010MS74)

作者单位: 200080, 上海交通大学附属第一人民医院核医学科

通信作者: 赵晋华 (Email: zjh1963@gmail.com)

Corresponding author: ZHAO Jin-hua, Email: zjh1963@gmail.com

**【Abstract】** The emerging and growing in popularity of PET-CT scanner brings us the convenience and cognizes the advantages such as diagnosis, staging, curative effect evaluation and prognosis for malignant tumor. And the PET-MRI installing maybe a new upsurge when the machine gradually mature, because of the MRI examination without the radiation exposure and with the higher soft tissue resolution. This paper summarized the developing course of image fusion technology and some researches of clinical application about PET-MRI at present, in order to help people to understand the functions and know its wide application of the upcoming new instrument, mainly focuses the applications on the central nervous system and some soft tissue lesions. And before PET-MRI popularization, people can still carry out some researches of various image fusion and clinical application on the current equipment.

**【Key words】** Positron-emission tomography; Magnetic resonance imaging; Tomography, X-ray computed; Image processing, computer-assisted

图像融合技术的产生首先促进了PET-CT仪的出现,这是医学影像仪器发展史上的一大突破,先进的检查方式及良好的应用前景使得在国内得以迅速普及,并相继促成了SPECT-CT及PET-MRI仪的研制。虽然目前PET-MRI仪在全球装机数量甚少,仪器尚处于进一步成熟阶段,但由于MRI相对于CT在软组织图像分辨力方面具有明显优势以及临床对分子影像与功能影像的追求<sup>[1]</sup>,可以预见PET-MRI的普及并不会太迟。本文就PET-MRI图像融合技术的发展及其临床应用研究做一综述,并期盼更多研究成果能够应用于临床。

## 1 PET-MRI 图像融合技术的发展

现代医学的进步很大程度上依赖于医疗仪器的发展,超声、CT、MRI、SPECT、PET等不同的断层成像仪器的出现为临床诊疗及研究带来了极大的便利。为了诊断的准确性,影像科及临床科室医师常常需要将不同仪器的影像胶片摆在一起进行对比分析,形成了最初的视觉图像融合方法,即不依赖仪器,仅靠人眼观察对比某脏器的不同影像图像,由人脑分析进行图像配准和病变定位,这也是最简单、最经济并一直在临床应用的图像分析方法。视觉图像融合方法使用简便,但是其图像配准与定位依赖于观察者的经验技术,由于SPECT和PET图像在显示脏器解剖结构方面的劣势,使得许多病变难以准确定位,临床的定位需求促成了计算机图像融合技术的发展<sup>[2-3]</sup>。

随着计算机硬件及软件技术的发展,人们能够将同一部位的不同显像模式的图像经过一定处理后进行融合叠加显示。这些图像可以是直接来自显像

仪器存储的DICOM(一种医疗数字和通信格式)图像,也可以是通过胶片扫描获得的图像<sup>[4]</sup>。图像融合前需先进行预处理及配准,配准是通过选定解剖标志或成像前体外预先放置的标志进行重合匹配<sup>[5]</sup>。计算机融合的算法主要有2类,一是基于像素的灰度加权求和逐点处理法,二是基于图像特征的方法,前者相对简单,后者的原理较复杂,但效果较好,比如小波变换法、多分辨率形态滤波法等;融合图像的显示主要有伪彩显示法,并使用三维数据进行体层显示和三维显示。这种异机图像融合技术相对于视觉融合明显提高了图像融合和病变定位的准确性,对多模式影像的发展是个有力的促进因素,很早之前,众多学者就开始借助一定的图像融合软件并利用MRI对软组织的分辨优势,进行了较为广泛的解剖与功能对照研究<sup>[2-5]</sup>。

同机图像融合技术是异机图像融合技术在影像仪器硬件发展上的一个飞跃,其最直接的表现即是PET-CT仪的出现,PET-CT在临床上的成功又加速了SPECT-CT和PET-MRI的发展。来自同一台仪器的多模式检查能够保证患者体位的一致性和检查时间上的近似性,从而使图像融合配准更加简单、定位更加准确可靠。但由于MRI磁场的特殊性,PET和MRI组件在成像上存在互相干扰,使得PET-MRI在硬件发展上存在一定的滞后,并出现了不同的设计模式,主体机架有分体式和一体式之分。分体式是将PET机架和MRI机架分开一定距离或分别放置于不同的房间,使之不会互相干扰成像,而患者在检查床上由机器自动传送至不同的机架上进行成像;一体式则是将PET和MRI成像系统组装机架内,当然其组件材质需使其互相影响降到最

低,并可同步进行 PET 及 MRI。两种模式虽各有优缺点,但两种机架模式都能保证患者在同一部位成像,达到了图像融合的准确性。而且,一体式 PET-MRI 的两个成像组件更是可以做到同步成像,从生理角度来考虑,使得解剖显像和功能显像获得更为有效的统一。

当然,由于 PET-MRI 仪较 PET-CT 仪更为复杂,从硬件及软件各方面都有待于进一步完善和成熟<sup>[6-8]</sup>,距离临床普及应用尚有一定时日,但其临床应用研究早已展开,并展现出了广泛的应用前景。

## 2 PET-MRI 临床应用研究

### 2.1 PET-MRI 在神经系统中的应用

神经系统 MRI 不存在颅骨及脊椎骨骼伪影的干扰,能够清楚显示神经系统结构及信号改变,从形态学角度来说,是目前诊断神经系统病变的最佳手段;PET 则能够显示各部位神经组织的代谢水平,体现的是神经组织的功能状态,两者的结合明显优于 PET-CT 组合。

癫痫是一种常见的慢性神经系统病变, PET-MRI 图像融合技术使得癫痫病灶更易观察,因为致痫灶局部 FDG 代谢会减低,即使常规序列 MRI 对部分轻微病变显示欠佳,扩散张量成像也会有助于致痫灶的显示,可看到表观弥散系数增加<sup>[9-10]</sup>。Lee 和 Salamon<sup>[11]</sup>对难治性癫痫患者进行了 PET-MRI 研究,结果发现,部分难治性癫痫患者 MRI 显示完全正常,而 PET 能够在癫痫间期观察到代谢减低, PET-MRI 组合能够更好的检出和定位病灶,帮助外科医师完善手术计划。

阿尔茨海默病(Alzheimer's disease, AD)是一种认知障碍性疾病,以脑萎缩并伴有  $\beta$  淀粉样蛋白的沉积为特征, MRI 和 PET 能够显示患者头部的萎缩及代谢特征<sup>[12]</sup>。Mosconi 等<sup>[13]</sup>通过对早发性常染色体显性遗传 AD 家庭的个体(他们携带家族性早衰蛋白 1 号基因突变)进行研究发现,家族性的 AD 在发病前其代谢减低会早于脑萎缩的出现,从而可以在发病前得到预测。而融合图像的出现对 AD 的研究更为有利,形态和功能得以统一。

脑血管性病变引起脑出血或梗死,必然导致受累区域的代谢异常, PET-MRI 可分析局部代谢与细微结构的异常改变。在缺血性中风患者,弥散加权成像和灌注加权成像之间的不匹配区是临床的治

疗目标区, Sobesky 等<sup>[14]</sup>用 PET 来观察此脑组织区间的新陈代谢方式,并比较 MRI 所见不匹配区及 PET 确定的半影区的容积,对比研究证实了当前病理假设中弥散加权成像病灶和血流减低区域的存在,然而发现不匹配区域没有可靠地反映血氧摄取分数的升高,而且高估了 PET 的半影区范围。此研究为 PET 与 MRI 的对比,但在将来的临床检查中, PET 与 MRI 的检查将同机同步进行,对脑血流、代谢、功能的研究将更为准确可靠。

PET-MRI 对颅脑肿瘤的清晰显示是 PET-CT 所不能及的。Provenzale 等<sup>[15]</sup>较早地进行过颅内肿瘤的 PET-MRI 研究,回顾性对比分析神经节神经胶质瘤患者的 PET、MRI 图像及 PET-MRI 融合图像发现,神经节神经胶质瘤的 FDG 代谢并非一致性地增高,而融合图像利于确定肿瘤边界及代谢活性,为手术计划及疗效判断提供依据。Boss 等<sup>[16]</sup>用头部专用一体式 PET-MRI 对头部肿瘤的常规扫描及扩散张量成像均可获得优质的图像,虽然与 PET 同时采集时所得的扩散张量成像图像中存在边缘增强伪影(表明有很高的涡流效应),但是扩散张量成像能够额外提供非常重要的形态及功能信息。

由于 PET-MRI 综合了 PET 和 MRI 两者的优势,其在确定肿瘤大小、形态、边界等方面将比单一的 PET 或 MRI 和 CT 更可靠,对放疗病灶靶区的规划也很有帮助。Thorwarth 等<sup>[17]</sup>通过评估脑膜瘤同步 PET-MRI 图像用于调强放疗计划,对比了 CT、MRI、<sup>68</sup>Ga-奥曲肽 PET-CT 和同步采集的 <sup>68</sup>Ga-奥曲肽 PET-MRI,结果表明,基于同步 PET-MRI 的计划靶区与基于 MRI+PET-CT 的计划靶区具有显著的一致性。

观察周围神经组织的病变是 PET-CT 的弱项, CT 图像上这些病变往往被邻近的肌肉、血管组织所掩盖,难以分辨,而 MRI 则常被用来观察颈丛、腰丛神经等神经病变的细节表现。Dong 等<sup>[18]</sup>报道,1 例骶神经根神经淋巴瘤患者因伴有严重的神经性右大腿放射痛而检查腰椎平片和 MRI,但均没有找到疼痛原因,<sup>18</sup>F-FDG PET-CT 发现了右侧骶 2 神经根的 <sup>18</sup>F-FDG 摄取增高,再对照之前的腰椎 MRI 可见右骶 2 神经有异常强化, PET 所见的 <sup>18</sup>F-FDG 摄取增高和 MRI 所见的异常强化两个征象互相映衬,从而得以更有把握地解释患者病因,可见 PET 与 MRI 的组合利于减少漏诊、误诊。当然,不止

是神经淋巴瘤,其他的周围神经损害,比如炎症、外伤等均可能检出代谢异常,并可借助 MRI 定位和清晰显示。

## 2.2 PET-MRI 在其他脏器中的应用

对腹部实质性脏器的影像诊断, MRI 凭借其多种成像序列的应用使之在该领域一直占据优势地位, PET-MRI 则是在此优势之上添加 PET 的功能显像,将使该优势更加稳固。Donati 等<sup>[19]</sup>对比了 37 例疑似肝转移患者的 PET-CT、钆增强 MRI 和回顾性 PET-MRI 融合图像,结果发现 PET-CT 和 MRI 对肝病灶的检出率分别为 64% 和 85%;对肝转移灶的灵敏度分别为 76% 和 91%,而 PET-MRI 的灵敏度为 93%,钆增强 MRI 和 PET-MRI 明显高于 PET-CT;对于直径大于 1cm 的病灶, PET-MRI 的诊断可信度明显高于 PET-CT,三者准确率分别为 85%、94%、92% 和 96% (两名读片者),而钆增强 MRI 和 PET-MRI 之间在灵敏度和诊断可信度方面无统计学差异。

Ruf 等<sup>[20]</sup>对 32 例疑似胰腺癌患者的 PET、MRI 以及 PET-MRI 图像进行了对比分析,结果发现,<sup>18</sup>F-FDG PET 从视觉上判别的灵敏度和特异度分别为 93% 和 41%,而从半定量角度分析则分别为 86% 和 58%;MRI 的灵敏度和特异度分别达到 100% 和 76%;PET-MRI 融合图像有利于解释 <sup>18</sup>F-FDG 浓聚灶在解剖上的分布,在治疗评价上对多发灶和无法切除病灶的患者更为有益。Malesci 等<sup>[21]</sup>观察 1 例疑似胰腺癌患者,CT 仅发现了胰腺体尾部胰管扩张,磁共振胆管胰管造影术和 T<sub>2</sub> 加权成像可见胰颈部胰管的高度狭窄和狭窄前的串珠状扩张,即使钆增强扫描后仍然没有发现胰腺肿块,而 PET 发现中腹区局灶性 <sup>18</sup>F-FDG 摄取增高区, PET-MRI 融合图像显示 <sup>18</sup>F-FDG 摄取增高区正好位于扩张胰管的近端,手术病理证实病灶为胰腺导管腺癌。可见,当 MRI 仅有胰管的扩张和狭窄而不见胰腺肿块时, PET-MRI 融合图像有助于发现病灶,而且比 PET-CT 定位更准确。

PET-MRI 作为全身一站式影像检查仪器,除腹部实质脏器检查外,还需要对全身脏器进行评估,虽然 MRI 对肺部及腹部空腔脏器检查存在一定的劣势,但不妨碍对其他脏器的观察。Seemann 等<sup>[22]</sup>在对比全身 PET、CT、MRI、PET-CT 和 PET-MRI 对胃肠道类癌的全身转移灶的检出能力后发

现, MRI 和 PET-MRI 对肝转移病灶的检出率明显占优势,分别为 98.2% 和 100%;对淋巴结的检出率, MRI 稍差,为 64.9%, PET-MRI 与 PET-CT 的检出率最高,分别为 100% 和 97.3%;对骨转移灶的检出率, PET、PET-CT 和 PET-MRI 均明显高于单纯的 CT 及 MRI,均为 100%,而 CT 为 8.3%, MRI 为 66.7%。由此可见, PET-MRI 是一项非常有前途的肿瘤影像检查项目。

利用 MRI 对软组织观察的优势,还可开展更多的工作,比如软组织肉瘤的诊断、心血管研究、血栓的研究等。Uppal 等<sup>[23]</sup>应用同步采集的 PET-MRI 图像进行了血栓成像研究:采用大鼠动脉血栓模型, PET-MRI 双模式探针是纤维蛋白靶向探针 EP-2104R 中的钆用 <sup>64</sup>Cu 取代之后合成的,往大鼠的右颈内动脉注入预先准备好的血栓,在注射双模式探针之前、后均进行了 PET-MRI 的同时采集显像,并比较血栓侧及健侧血管的信号强度比,结果表明,注射双模式探针能够显著提高患侧与健侧的信号强度比值,有利于 PET-MRI 对血栓性病变的诊断。Büscher 等<sup>[24]</sup>对比了小动物 PET-MRI 和单独的高分辨 PET 系统后认为, PET-MRI 能够成功地用于小鼠心肌梗死模型的研究,对于人类心肌梗死患者的 PET-MRI 检查也将获得比以往更优的诊断资料。

## 3 小结

由于 MRI 的无辐射性和对软组织分辨率的独特优势,使得 PET-MRI 能够比 PET-CT 具有更优越的临床应用前景, PET-MRI 的组合和由此组合而带来的分子、形态、功能等多方面信息,对医学影像学的发展将是个极大的推动,且有助于临床更好地理解发病前及发病中的生理和病理机制,能够更好地推动临床与基础研究的发展<sup>[25-26]</sup>。

目前, PET-MRI 仪的研制尚处于逐渐成熟阶段,前面所论及众多研究中,除少部分学者使用的是同机同步采集的 PET-MRI 仪外,大多数都是将异机的 PET 图像与 MRI 图像通过软件重新配准融合进行分析,虽然其与同步成像的图像尚有差距,但是仍不失为一种权宜的取代方式,鉴于此,我们也可以开展更多的研究工作,比如利用类似的图像融合软件进行一定的研究。就目前的临床应用来看,部分患者有金属植入物而不宜行 PET-MRI 检

查, 以及 PET-MRI 对肺部及肠道的弱势, 可见 PET-MRI 的通用性比 PET-CT 稍有不足, 因而许多单位可能在安装 PET-CT 仪之后, 短期内不会再考虑 PET-MRI 仪的购置, 或者在 PET-MRI 仪普及之前也可依据目前的 PET-CT 加局部的 MRI 检查来弥补 PET-CT 的不足。毫无疑问, PET-MRI 的普及将为现代医学带来新的发展方向, 为医学影像及临床诊疗的发展发挥重要的促进作用, 但这并不是惟一的选择, 因时、因地制宜将能获取更大的效益, 更有利于医学研究的健康发展。

### 参 考 文 献

- [1] Gallagher FA. An introduction to functional and molecular imaging with MRI. *Clin Radiol*, 2010, 65(7): 557-566.
- [2] Holman BL, Zimmerman RE, Johnson KA, et al. Computer-assisted superimposition of magnetic resonance and high-resolution technetium-99m-HMPAO and thallium-201 SPECT images of the brain. *J Nucl Med*, 1990, 32(8):1478-1484.
- [3] Turkington TG, Pelizzari CA, Jaszcak RJ, et al. Accuracy of registration of PET, SPECT, and MR images of a brain phantom. *J Nucl Med*, 1993, 34(9): 1587-1594.
- [4] 朱朝晖, 周前, 崔瑞雪. PET 图像与 CT、MRI 图像比较与融合的研究. *中华核医学杂志*, 2001, 21(5): 261-262.
- [5] Turkington TG, Hoffman JM, Jaszcak RI, et al. Accuracy of surface fit registration for PET and MR brain images using full and incomplete brain surfaces. *J Comput Assist Tomogr*, 1995, 19(1): 117-124.
- [6] Schulz V, Torres-Espallardo I, Renisch S, et al. Automatic, three-segment, MR-based attenuation correction for whole-body PET/MR data. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2011, 38(1): 138-152.
- [7] Poole M, Bowtell R, Green D, et al. Split gradient coils for simultaneous PET-MRI. *Magn Reson Med*, 2009, 62(5): 1106-1111.
- [8] Ha S, Hamamura MJ, Roock WW, et al. Development of a new RF coil and gamma-ray radiation shielding assembly for improved MR image quality in SPECT/MRI. *Phys Med Biol*, 2010, 55(9): 2495-2504.
- [9] Chandra PS, Salamon N, Huang J, et al.  $^{18}\text{F}$ -FDG-PET/MRI coregistration and diffusion-tensor imaging distinguish epileptogenic tubers and cortex in patients with tuberous sclerosis complex: a preliminary report. *Epilepsia*, 2006, 47(9): 1543-1549.
- [10] Salamon N, Kung J, Shaw SJ, et al. FDG-PET/MRI coregistration improves detection of cortical dysplasia in patients with epilepsy. *Neurology*, 2008, 71(20): 1594-1601.
- [11] Lee KK, Salamon N. [ $^{18}\text{F}$ ] fluorodeoxyglucose-positron-emission tomography and MR imaging coregistration for presurgical evaluation of medically refractory epilepsy. *Am J Neuroradiol*, 2009, 30(10): 1811-1816.
- [12] Walhovd KB, Fjell AM, Brewer J, et al. Combining MR imaging, positron-emission tomography, and CSF biomarkers in the diagnosis and prognosis of Alzheimer disease. *Am J Neuroradiol*, 2010, 31(2):347-354.
- [13] Mosconi L, Sorbi S, de Leon MJ, et al. Hypometabolism exceeds atrophy in presymptomatic early-onset familial Alzheimer's disease. *J Nucl Med*, 2006, 47(11): 1778-1786.
- [14] Sobesky J, Zaro Weber O, Lehnhardt FG, et al. Does the mismatch match the penumbra?. Magnetic resonance imaging and positron emission tomography in early ischemic stroke. *Stroke*, 2005, 36(5): 980-985.
- [15] Provenzale JM, Arata MA, Turkington TG, et al. Gangliogliomas: characterization by registered positron emission tomography-MR images. *Am J Roentgenol*, 1999, 172(4): 1103-1107.
- [16] Boss A, Kolb A, Hofmann M, et al. Diffusion tensor imaging in a human PET/MR hybrid system. *Invest Radiol*, 2010, 45(5): 270-274.
- [17] Thorwarth D, Henke G, Müller AC, et al. Simultaneous ( $^{68}\text{Ga}$ )-DOTATOC-PET/MRI for IMRT treatment planning for meningioma: first experience. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2011, 81(1): 277-283.
- [18] Dong Q, Wong KK, Avram AM. Sacral nerve root neurolymphomatosis diagnosed on FDG-PET/CT and magnetic resonance imaging. *Clin Nucl Med*, 2008, 33(1): 30-31.
- [19] Donati OF, Hany TF, Reiner CS, et al. Value of retrospective fusion of PET and MR images in detection of hepatic metastases: comparison with  $^{18}\text{F}$ -FDG PET/CT and Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI. *J Nucl Med*, 2010, 51(5): 692-699.
- [20] Ruf J, Lopez Hanninen E, Bohmig M, et al. Impact of FDG-PET/MRI image fusion on the detection of pancreatic cancer. *Pancreatology*, 2006, 6(6): 512-519.
- [21] Malesci A, Balzarini L, Chiti A, et al. Pancreatic cancer or chronic pancreatitis?. An answer from PET/MRI image fusion. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2004, 31(9): 1352.
- [22] Seemann MD, Meisetschlaeger G, Gaa J, et al. Assessment of the extent of metastases of gastrointestinal carcinoid tumors using whole-body PET, CT, MRI, PET/CT and PET/MRI. *Eur J Med Res*, 2006, 11(2): 58-65.
- [23] Uppal R, Catana C, Ay I, et al. Bimodal thrombus imaging: simultaneous PET/MR imaging with a fibrin-targeted dual PET/MR probe-feasibility study in rat model. *Radiology*, 2011, 258(3): 812-820.
- [24] Büscher K, Judenhofer MS, Kuhlmann MT, et al. Isochronous assessment of cardiac metabolism and function in mice using hybrid PET/MRI. *J Nucl Med*, 2010, 51(8): 1277-1284.
- [25] Seemann MD. Whole-body PET/MRI: the future in oncological imaging. *Technol Cancer Res Treat*, 2005, 4(5): 577-582.
- [26] Sauter AW, Wehr HF, Kolb A, et al. Combined PET/MRI: one step further in multimodality imaging. *Trends Mol Med*, 2010, 16(11): 508-515.