

肿瘤¹⁸F-FDG PET/MRI 全身显像专家共识(德国)

王洋洋 杨光杰(译) 王振光(审校)

青岛大学附属医院核医学科 PET/CT 中心 266100

通信作者:王振光, Email: wangzhenguang@aliyun.com

本文首次发表在 *Nuklearmedizin*, 2019, 58(2): 68-76

Whole-body [¹⁸F]-FDG-PET/MRI for oncology: a consensus recommendation

Lale Umutlu¹, Thomas Beyer², Johannes Stefan Grueneisen¹, Christoph Rischpler³, Harald H Quick⁴, Patrick Veit-Haibach⁵, Matthias Eiber⁶, Sandra Purz⁷, Gerald Antoch⁸, Sergios Gatidis⁹, Konstantin Nikolaou⁹, Jürgen F Schaefer⁹, Ivo Rausch², Ken Herrmann³, Vorstand der Interdisziplinären AG für Hybride Bildgebung in alphabetischer Reihenfolge: K. Herrmann³, B.J. Krause¹⁰, S.O. Schoenberg¹¹, L. Umutlu¹, Vorstand der Deutschen Röntgengesellschaft (DRG) und der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin (DGN) in alphabetischer Reihenfolge: F. Anton¹², G. Antoch⁸, M. Hacker¹³, B.J. Krause¹⁰, M. Luster¹⁴, S. Neumann¹², S.O. Schoenberg¹¹, D. Vorwerk¹⁵

¹Department of Diagnostic and Interventional Radiology and Neuroradiology, University-Hospital Essen, Germany;

²QIMP Group, Centre for Medical Imaging and Biomedical Engineering, Medical University of Vienna, Austria;

³Department of Nuclear Medicine, University-Hospital Essen, Germany; ⁴High-Field- and Hybrid-MR-Imaging, University-Hospital Essen, Germany; ⁵Joint Department of Medical Imaging, University of Toronto, Canada; ⁶Department of Nuclear Medicine, Klinikum rechts der Isar, Technical University of Munich, Germany;

⁷Department of Nuclear Medicine, University of Leipzig, Germany; ⁸Department of Diagnostic and Interventional Radiology, University Düsseldorf, Medical Faculty, Düsseldorf, Germany; ⁹Department of Diagnostic and Interventional Radiology, University-Hospital Tübingen, Germany; ¹⁰Department of Nuclear Medicine, University Medical Center Rostock, Germany; ¹¹Department of Clinical Radiology and Nuclear Medicine, University Medical Center Mannheim, Germany; ¹²Deutsche Röntgengesellschaft, Berlin, Germany; ¹³Division of Nuclear Medicine, Department of Biomedical Imaging and Image-guided Therapy, Medical University Vienna, Austria; ¹⁴Department of Nuclear Medicine, University Hospital Marburg, Germany; ¹⁵Department of Radiology, Klinikum Ingolstadt, Germany

Corresponding author: Lale Umutlu, Email: lale.umutlu@uk-essen.de
原文 DOI: 10.1055/a-0830-4453

【摘要】 PET/MRI 一体机在 2006 年被首次提出可应用于临床;2010 年,首台临床型 PET/MRI 一体机诞生。在 20 世纪早期,PET/CT 和 SPECT/CT 一体机的广泛应用体现了融合显像的优势,为 PET/MRI 一体机的产生奠定了基础。目前,全球大约有 150 台全身 PET/MRI 一体机投入了临床应用,其中肿瘤显像是 PET/MRI 的主要应用领域之一。迄今为止,尽管 PET/MRI 临床应用在增加,但标准化的 PET/MRI 扫描方案还很少。因此,有必要制定患者检查和多中心研究都可遵循的标准化且一致性好的显像方案。该文总结了¹⁸F-脱氧葡萄糖(FDG)PET/MRI 全身显像的患者就诊、检查准备、工作流程、显像方案以及报告书写等主要方面的专家共识,由长期使用 PET、MRI 和较早使用 PET/MRI 的相关资深专家制定。

【关键词】 PET/MRI;肿瘤;全身显像;专家共识

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20200308-00092

制定该共识的目的是为医疗保健专家和临床医师提供 PET/MRI 在肿瘤全身显像中的适应证、具体操作和影像判读等方面的指导^[1]。

PET 是一种无创的显像技术,可提供放射性核素标记的生物分子(显像剂)在组织中三维分布的定量信息。¹⁸F-脱氧葡萄糖(fluorodeoxyglucose, FDG)是一种放射性核素标记的葡萄糖,是肿瘤显像最常用的显像剂^[2]。对于大多数肿瘤,恶性肿瘤细胞糖酵解功能增强,葡萄糖转运蛋白表达和己糖激酶活性增强,导致葡萄糖利用率增加^[3-4],代谢活跃的肿瘤细胞比周围正常组织摄取更多的¹⁸F-FDG。目前,¹⁸F-FDG

PET 是公认的灵敏且成熟的显像模式,可用于实体肿瘤的诊断、分期和再分期及疗效评价^[5-6]。

MRI 也是一种无创性成像技术,在外部磁场激发下,提供基于自旋共振频率的相对差异而产生的高空间分辨率的组织解剖结构三维影像^[7]。此外,MRI 采用多序列成像并结合良好的软组织对比,可在功能方面和细胞水平评价组织和器官^[8]。与基于电离辐射组织衰减而进行投射扫描的 CT 相比,MRI 则是以外加磁场激发和磁共振信号检测为成像基础,因而 MRI 无电离辐射,PET/MRI 所产生的辐射仅来自于 PET 部分,较 PET/CT 显像明显降低^[9]。

衰减校正正是 PET/CT 显像的优势,而 PET/MRI 的衰减校正仍然是其技术难点(请参阅“衰减校正”部分)。PET 探测器能被 MR 所兼容,为 PET 和 MRI 整合成一体机打下基础^[10-11]。小动物成像仪的研发^[12]让人们认识到半导体二极管代替光电倍增管能不受磁场影响而放大闪烁晶体中的闪烁信号^[13]。目前,临床应用的 PET/MRI 一体机配置场强 3.0 T 的 MR^[14],研发的 MRI 序列能够可靠地校正 PET 衰减伪影,可与 PET/CT 影像投射扫描图衰减校正质量相媲美(也请参阅“衰减校正”部分)。

目前,有关 PET/MRI 临床研究不断增加。最近的研究比较了全身 PET/MRI 与 PET/CT 的诊断准确性,证实二者在同一显像剂的诊断准确性相同^[15-16]。但是 MRI 的软组织对比度高,能够提高肿瘤性病变的显示,因而 PET/MRI 的潜在优势已经突显出来^[17-20]。这些研究有利于克服 PET/MRI 应用过程中面对不同的诊断问题而产生的差异^[21],因此该共识必须执行,进而通过一致性和标准化的方法来减少这些差异的产生。

一、定义

与已制定的 PET/CT 显像方案专家共识^[6,22-23]一样,为了便于理解,我们将通过以下几方面对 PET/MRI 一体机进行定义。

1. PET/MRI 一体机将 PET 和 MRI 集于一体,在同一患者 1 次采集过程中可同时生成 PET 和 MRI 数据,而不需要重新摆位或定位。

2. 完全集成的 PET/MRI 一体机是指 2 种显像系统的硬件组合,需要使用 MRI 兼容的 PET 探测器,同时获得 PET 和 MRI 数据。

3. PET/MRI 和 MRI/PET 可以互换使用。PET-MRI 和 MRI-PET 也可互换。

4. PET/MRI 显像的图像信息与多种因素有关,包括显像剂的选择、发射数据的获取方式(静态或动态模式)以及 MR 成像模式 $[T_1$ 加权、 T_2 加权、动态增强序列、质子密度、弥散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)、动脉自旋标记、表观弥散系数等]。

5. 在临床常规中, PET/MRI 检查不包括信号测量,因此对 PET 数据需采取其他方法来获得衰减校正因子(attenuation correction factors, ACF),以定量分子信息^[24]。

6. 伪影包括各种 PET 和 MR 图像失真,也包括解剖和功能上的典型表现的观察偏差,这些偏差可能导致或不导致定量误差(如病灶大小、显像剂浓度等)。这些伪影可能不是产生于疾病自身,而是来自方法缺陷或系统故障^[25]。

二、PET/MRI 适应证/应用范围

¹⁸F-FDG PET/MRI 全身显像在肿瘤显像中的适应证/应用范围包括已知肿瘤的分期和再分期;检测/排除肿瘤复发;疗效监测;寻找原发灶;进一步鉴别在常规影像中不能定性的影像表现;指导放疗计划或选择活组织检查(简称活检)方案。

三、PET/MRI 检查

1. 患者的必要信息。(1)在准备¹⁸F-FDG PET/MRI 检查时,应采集患者的以下信息:病史(侧重于恶性肿瘤的类型和部位);最初确诊日期;确诊方法;PET/MRI 扫描前的处置与治疗(如活检日期和结果、组织学、手术、放疗、化疗);检查期

间服用的药物;之前所有检查资料,特别是影像学检查。

(2)糖尿病史,饮食情况,感染和近期感冒情况。

(3)患者在扫描过程中需保持静止不动,一般要 30~60 min。

(4)幽闭恐惧症,即患者在检查期间能够停留在 PET/MRI 机器中的能力。

(5)患者知情同意的能力。

2. 患者准备。患者准备的主要目的是减少正常组织(如心脏、骨骼肌)显像剂摄取,同时保留靶器官或靶组织(肿瘤组织)的显像剂摄取。以下是常规使用的方案。

(1)检查前。建议患者在注射¹⁸F-FDG 前 4~6 h 内不要进食任何食物(不包括水),以降低生理性血糖水平,并确保较低的血清胰岛素水平;建议充足饮水。在注射放射性显像剂前 4~6 h,也必须停止肠外营养或含葡萄糖的静脉输液。

如果计划使用 MR 对比剂,则必须考虑相应的禁忌证和制约因素(如对钆对比剂过敏、肾脏疾病或肾功能不全)。当肌酐水平升高或肾小球滤过率降低,提示肾功能不全的情况下,需谨慎^[26-27]。

患者在进入 PET/MRI 检查室前,必须摘除所有金属物品(如戒指、饰品、药物泵等)。对于植入的铁磁装置[如起搏器、植入型心律转复除颤器(implantable cardioverter defibrillator, ICD)、左心室辅助装置(left ventricular assist device, LVAD)、事件记录器(event recorders)、支架、矫形外科植入的金属板等]或金属碎片/弹片,应在放射科医师或 MR 专家确认后,按照 MR 安全指南进行^[28](请参阅“MRI 安全”部分)。

(2)显像剂(¹⁸F-FDG)的应用。在注射¹⁸F-FDG 前应测定血糖水平。在高血糖的情况下,肿瘤对¹⁸F-FDG 的摄取可能减少。因此,当血糖水平高于 8.3~11.1 mmol/L 时,应重新安排检查时间,或考虑应用胰岛素(需同时监测血糖以确保降到合适的水平)^[6]。

患者应静卧在躺椅或床上休息。显像剂注射后,患者不应说话或从事体力活动。

关于应用¹⁸F-FDG 的一般注意事项,请参阅《核医学成像指南》[科学医学会工作组(Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften, AWMF)指南第 031/030 条]^[29]。

在进行检查前,患者应排尿。

3. MRI 的安全性。在 PET/MRI 检查过程中,与 MRI 安全相关的有以下几点。

(1)所有患者都应常规安全核查,并用标准化的筛查表核查可能的 MR 禁忌证(如妊娠、既往对比剂反应、导管、端口、金属植入物、血管支架、活性植入物、心脏起搏器等)^[30]。

(2)应取下患者身上所有金属物品(如假牙、带拉链和纽扣的衣服),并提供不含金属物的棉质衣服。

(3)患者体内如有植入物,需确定植入物的种类、位置 and 材料性质。通过植入物的识别码或制造商(如网站)评估其 MR 兼容性和安全性。必须遵守下列安全条例:“MR 不安全”为绝对禁忌;“MR 有条件性”为相对禁忌,一定条件下适用;“MR 安全”为无禁忌。如果是相对禁忌的植入物,必须审查制造商或网站上提供的所有条件[如最大场强、射频能量吸收率(specific absorption rate, SAR)限制等]都达标后才能进行 MRI(PET/MRI)检查。如果是“MR 不安全”的植入

物,需选择其他影像学检查。

(4)除了安全方面的原因外,植入物可能会在 MR 成像中造成伪影、大量无效信号和几何变形,妨碍图像解读。

4.衰减校正。与 PET/CT 基于 CT 的衰减校正不同^[31],PET/MRI 的组织衰减特性不能直接从同机 MR 图像中获得,从而提出了基于 MR 衰减校正的不同理念^[24]。最常用的是基于两点式 Dixon 技术,该技术以 4 室模型衰减图(μ -map)来识别空气、肺组织、脂肪和软组织^[32-34]。根据不同组织类型的 MR 图像分割,每个部分赋予不同的预设的线性衰减系数以对应相应的组织^[33,35-36]。

目前,仍有许多技术难点,如基于 MR 衰减校正后的 PET 定量偏低(系统误差),特别是骨组织不灵敏和截断伪影^[36-37](更多信息请参阅“伪影”部分)。为了解决骨组织误分类为软组织的问题,提出颅脑显像和全身显像采用不同的补偿处理方法^[38-39]。利用基于 CT 的三维骨模型作为 MR 衰减校正的辅助手段,全身显像的图像质量明显改善^[34,40-42]。

5.伪影。随着 PET/MRI 一体机的临床应用,已经报道了一些与 PET、MRI 或 PET/MRI 相关的伪影。下面将讨论最常见的伪影和可行的解决方案^[25]。

最明显的伪影与基于 MR 衰减校正有关,与 PET/CT 相比,该伪影会导致系统性低估 PET 定量^[43-44]。除了骨组织的错误分类(请参阅“衰减校正”部分),截断伪影是 PET/MRI 的主要问题。由于 MR 成像的轴向和横向往视野(field of view, FOV)有限,直径约为 50 cm,超过这个尺寸的结构显示几何失真和无效信号,导致患者上肢周围出现截断伪影和 PET 错误定量^[25,45]。用基于 PET 的衰减和活性最大似然估值(maximum likelihood estimation of attenuation and activity, MLAA)算法可从 PET 数据中获取患者的外周轮廓^[46-47]。除此之外,Blumhagen 等^[48-49]还提出一种全新的单纯基于 MR 的截断校正方法,这种方法也被称为 B0 均质化梯度增强法(HUGE 法),通过增加 MR 成像的横向 FOV(超过常规直径 50 cm),MR 衰减校正时可有效消除患者上肢周围的截断伪影^[48,50]。

在 PET/CT 显像中,患者和器官不自主运动可导致光子发射和衰减数据的偏移,而 PET/MR 显像时间更长,该方面的问题更加突出。由于 PET 和 MR 同时进行数据采集,PET/MRI 可用 MR 对 PET 数据进行运动校正。当前已经提出了不同的运动校正方法,如呼吸运动伪影,采用包括实时 MRI 和呼吸运动的四维 MR 数据或自由呼吸 MRI 来进行回顾性地运动校正^[51-53]。

在 PET/MRI 中,以下几点与 MR 衰减校正和伪影有关。

(1)在 PET/MRI 中,衰减校正是以 MRI 为基础的,MR 衰减校正中的伪影对 PET 定量有直接影响。因此,MR 衰减校正需要准确且无伪影以提供精准的 PET 定量。在 PET/MR 图像读取过程中,应常规检查 MR 衰减校正图像的伪影、稳定性和可信性。典型的伪影是由空气、软组织、脂肪、骨的错误分割和假牙、金属植入物(如支架和手术夹等)形成的金属伪影而产生的。伪影可显示为无效信号,超出金属植入物的真实尺寸。因此,伪影在 MR 衰减校正中很容易被检测到,可存在于 PET 定量不准的区域^[45,54]。

(2)虽然用于改进 MR 衰减校正的新序列在不断开发并

应用到 PET/MRI 临床商用软件中,包括用于 PET/MRI 衰减校正中的高分辨率 Dixon 衰减校正、超短回波时间(ultrashort echo time, UTE)、零回波时间(zero echo time, ZTE)序列和(或)用于骨检测的骨模型^[17,34,40-41],但用户仍需持续关注在标准摄取值(standardized uptake value, SUV)定量中 MR 衰减校正相关的局限性和伪影。

(3)MR 衰减校正时患者上肢的截断伪影也影响 PET 定量。在所有临床应用的 PET/MRI,用于截断校正的标准方法是基于 PET 的 MLAA 算法^[46]。HUGE 法是目前较新的用于改进在 MR 衰减校正时 MR 截断校正方法^[41,48,50]。

(4)最好是采用 PET/MRI 一体机专用射频线圈。在 PET/MRI 衰减校正中不可使用标有仅供 MR 应用的标准射频线圈,这可导致 PET 定量不准和产生伪影^[32,55]。

6.质量控制。PET 显像剂的质量控制由《放射性药物指南草案》管理^[56]。MR 对比剂的质量控制和临床应用可参照欧洲泌尿生殖系统放射学会的指南^[26]。PET 和 MRI 各自的质量控制操作规程应根据已公布的指南来执行^[57-58],至少应遵循设备生产商的建议。此外,必须确保 PET 系统与相应剂量的校准源进行交叉校准。在日常操作中,患者扫描之前应进行每日质量控制扫描(使用专用体模),以确保准确无误的 PET 采集和定量。

7.工作流程。根据不同临床指征,显像工作流程可不同。与 PET/CT 肿瘤显像一样,PET/MRI 也能进行全身显像,即多个连续床位扫描,以覆盖更大的显像范围。在相同的显像范围内,由于 MR 成像方案和序列多样复杂,全身 PET/MRI 检查比 PET/CT 检查耗时更长。因此,迫切要求优化和标准化 PET/MR 显像工作流程。在过去几年中,已经发表了一些建议^[59-60]。该文旨在描述肿瘤患者全身¹⁸F-FDG PET/MRI 所适用的显像条件和方案,但具体的显像方案和 MR 序列可根据使用者、产品商和检查指征有所变化。

与 PET/CT 显像一样,下面提到的工作流程中“全身”的覆盖范围都是指从颅底到大腿中段。根据患者身高,这一覆盖范围通常需要 4~5 个床位。可根据需要组合使用头、颈专用(衰减校正)射频线圈和不同数量的相控阵体表线圈^[32]。由于膀胱内尿液¹⁸F-FDG 活性不断增加,通常采用仰卧位,自大腿中段开始到颅底方向进行显像,以确保膀胱周围病变的信号损失最小。

MRI 定位扫描确定轴向检查范围。对每个床位进行衰减校正序列后,进行匀场预扫描和磁场调整(有关基于 MR 衰减校正的详细信息请参阅“衰减校正”部分)。

(1)工作流程 1:超快速 PET/MRI。该工作流程以 2 min/床位进行采集,可在 20 min 内实现超快速的“类似 PET/CT”的全身显像^[61]。该特定的算法是为了实现超快速全身显像,如依从性差的患者(老年人、儿童)或作为局部专用显像的辅助全身显像(如头颈癌或软组织肉瘤的局部专用肿瘤显像+全身超快速显像)。

这种超快速工作流程的应用指征包括全身显像,如淋巴瘤评价或肿瘤分期和判断复发。

2 min 的 PET 采集,MR 可采用的序列包括快速 T₂ 加权自旋回波序列[如半傅里叶单次激发快速自旋回波(half-Fourier acquisition single-shot turbo spin-echo, HASTE)],非

增强快速饱和脂肪 T_1 加权梯度回波序列[如三维容积式内插值法屏气检查(volumetric interpolated breath-hold examination, VIBE)]。在非增强序列之后,可注射对比剂以及增强后行快速 T_1 加权饱和脂肪成像。易发生实质性器官转移的原发性肿瘤(如恶性黑色素瘤、神经内分泌肿瘤),可增加上腹部动态增强成像(如 VIBE)。上述序列组合可综合评估潜在病变的 T_2 、非增强和对比增强特征(图 1)。

(2) 工作流程 2: 快速 PET/MRI。该工作流程是以 4 min/床位进行采集,除了超快速算法中列出的上述序列外,还包括 DWI(图 2)^[62-63]。增加 DWI 是为 PET 补充一些组织信息,并且 DWI 序列检测小病灶尤其灵敏(如肝转移瘤,可能因为太小造成 PET 漏检),可作为一个“检测或筛查”序列使用。上述超快速序列、DWI 及有可能增加对比剂增强后 T_1 加权梯度回波序列,这种“快速 PET/MRI”算法要求扫描时间应少于 30 min,具体取决于总床位数和匀场持续时间等(图 3)。

(3) 工作流程 3: 专用局部和全身 PET/MRI。这个工作

流程包括肿瘤局部(如头颈部、宫颈癌、四肢软组织肉瘤)的专用局部 PET/MRI 和覆盖全身的快速序列。这个工作流程的目的是为了便于在一次检查中进行原发性肿瘤的诊断和肿瘤分期。应根据原发肿瘤和指南建议选择专用局部 PET/MRI 的 MR 扫描方案(如宫颈癌^[64])。依据患者的依从性、DWI 的应用价值和要求的检查时长,可选择性应用上述超快速或快速算法进行全身显像(图 4,5)。

四、阅片和报告

以下关于阅片和报告的建议旨在帮助 PET/MRI 初学者,并有助于阅片和报告的规范化。高质量的 PET/MRI 阅片和报告是以 PET 和 MRI 的专业知识为基础^[65]。因此, PET/MRI 阅片应该由放射科医师和核医学医师联合进行,或者由经过充分培训的双认证医师(核医学和放射学专业)完成。

评估 MRI 和 PET 原始数据以及融合影像质量至关重要。PET/MRI 报告可与 PET/CT 报告类似,但 MRI 和 CT 阅片所耗时长和所需专业知识截然不同。在报告检查目的、临

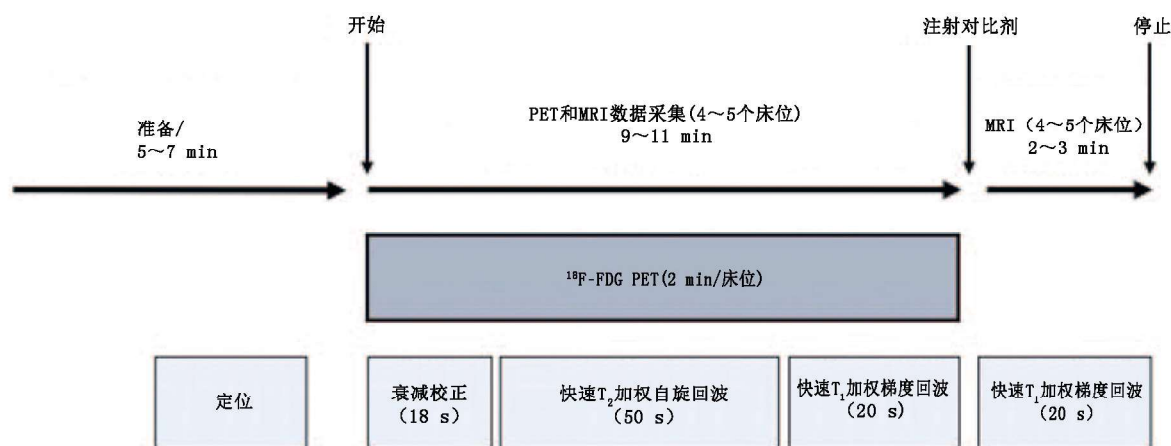


图 1 超快速全身 ^{18}F -脱氧葡萄糖(FDG)PET/MRI 工作流程图

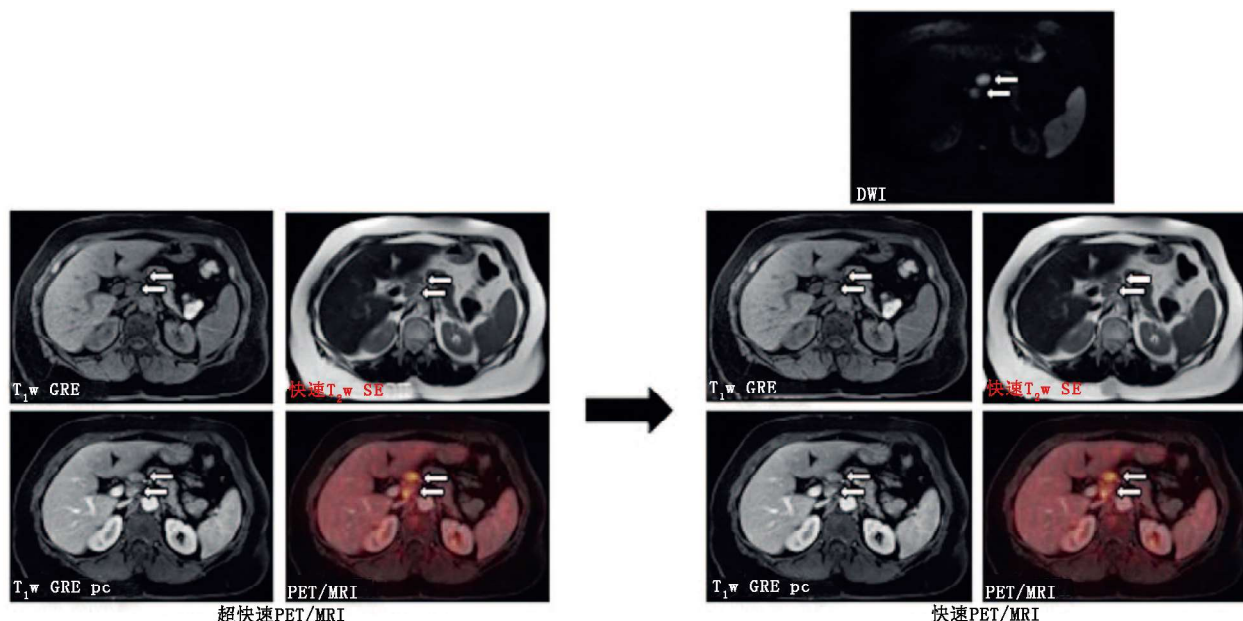


图 2 腹腔淋巴结转移(箭头示)患者(男,45岁)的超快速和快速 ^{18}F -FDG PET/MRI 显像图。DWI 为弥散加权成像,GRE 为梯度回波,pc 为相位对比法,SE 为自旋回波, $T_1\text{w}$ 为 T_1 加权, $T_2\text{w}$ 为 T_2 加权

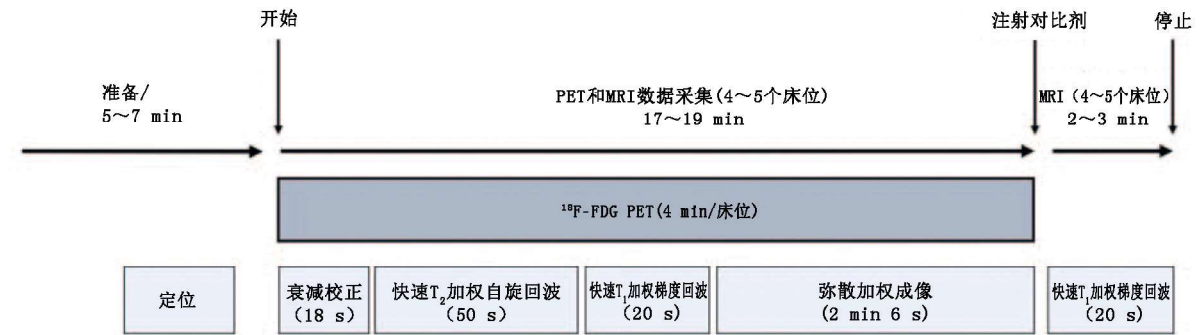


图3 快速全身¹⁸F-脱氧葡萄糖(FDG)PET/MRI 工作流程图

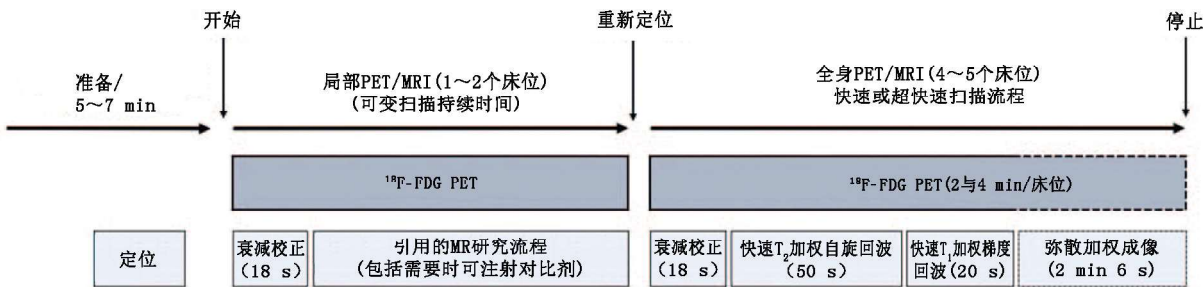


图4 专用局部和全身¹⁸F-FDG PET/MRI 工作流程图

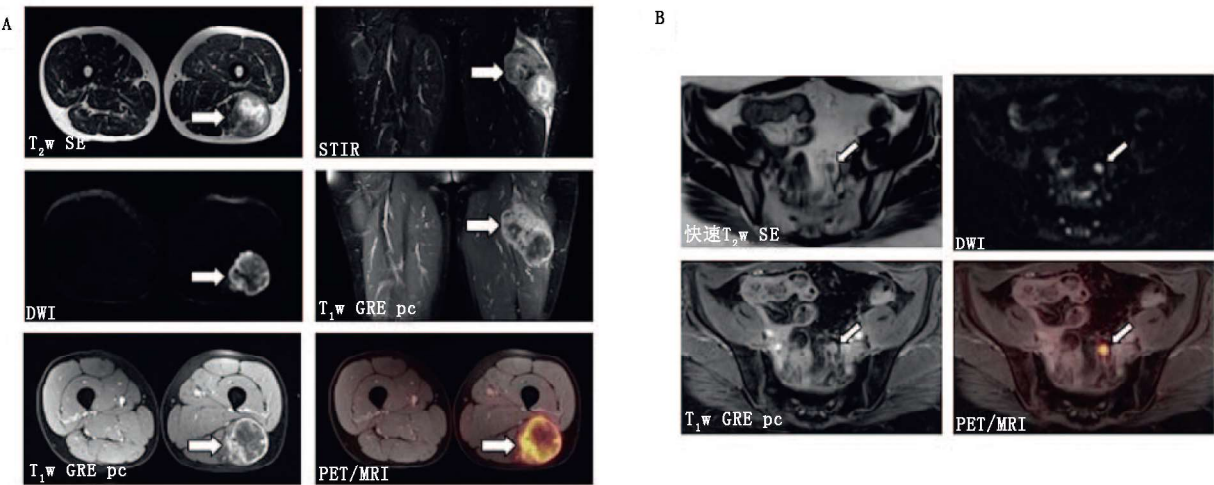


图5 左下肢软组织肉瘤患者(男,52岁)¹⁸F-FDG PET/MRI 显像图。A.局部 PET/MRI 扫描用于原发肿瘤评价,箭头示肿瘤;B.快速扫描用于肿瘤分期,显示左半骨盆淋巴结转移(箭头示)。DWI 为弥散加权成像,GRE 为梯度回波,pc 为相位对比法,SE 为自旋回波,STIR 为短时间反转恢复序列,T_{1w} 为 T₁ 加权,T_{2w} 为 T₂ 加权

床信息、检查方案和关键参数(包括实际使用放射性活度、摄取时间和对比剂用量)之后,依据影像学表现及其代表的病理生理意义,可写成1个综合性报告(联合描述和评价 MRI 和 PET 表现)或1个内容独立的报告(独立描述 MRI 和 PET 各自表现并联合评价)。

五、结论

全身 PET/MRI 自 2010 年推出以来已经在科研和临床上获得广泛认可。然而,一些基础、方法和专业方面的困难限制了 PET/MRI 在肿瘤方面的推广应用,此外 PET/MRI 也不能代替 PET/CT。大量的不一致的扫描方案使 PET/MRI 沦为一种与临床使用功能不兼容的研究工具,且检查费用昂贵。因此,本文提出了工作流程的推荐建议,提供了高效且

快速的显像方案,以适用于不同的检查目的。以上 3 类显像方案有助于 PET/MRI 显像的标准化和一致性,这是多中心研究和大型患者队列研究的先决条件,可促进 PET/MRI 在临床常规显像中的应用和保险机构赔付时的认可。

参考文献

[1] Beyer T, Freudenberg LS, Czernin J et al. The future of hybrid imaging—part 3: PET/MR, small-animal imaging and beyond. Insights Imaging 2011; 2: 235-246. DOI:10.1007/s13244-011-0085-4.
[2] Gambhir SS, Czernin J, Schwimmer J et al. A tabulated summary of the FDG PET literature. J Nucl Med 2001; 42: 1S-93S.
[3] Smith TA. FDG uptake, tumour characteristics and response to ther-

- apy; a review. Nucl Med Commun 1998; 19: 97-105.
- [4] Kapoor V, McCook BM, Torok FS. An introduction to PET-CT imaging. Radiographics 2004; 24: 523-543. DOI: 10.1148/rg.242025724.
- [5] Petersen H, Holdgaard PC, Madsen PH et al. FDG PET/CT in cancer; comparison of actual use with literature-based recommendations. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2016; 43: 695-706. DOI: 10.1007/s00259-015-3217-0.
- [6] Boellaard R, Delgado-Bolton R, Oyen WJ et al. FDG PET/CT: EANM procedure guidelines for tumour imaging; version 2.0. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2015; 42: 328-354. DOI: 10.1007/s00259-014-2961-x.
- [7] Pooley RA. AAPM/RSNA physics tutorial for residents; fundamental physics of MR imaging. Radiographics 2005; 25: 1087-1099. DOI: 10.1148/rg.254055027.
- [8] Kuhl CK, Gieseke J, von Falkenhausen M et al. Sensitivity encoding for diffusion-weighted MR imaging at 3.0 T: intraindividual comparative study. Radiology 2005; 234: 517-526. DOI: 10.1148/radiol.2342031626.
- [9] Nensa F, Beiderwellen K, Heusch P et al. Clinical applications of PET/MRI; current status and future perspectives. Diagn Interv Radiol 2014; 20: 438-447. DOI: 10.5152/dir.2014.14008.
- [10] Pichler BJ, Kolb A, Nagele T et al. PET/MRI; paving the way for the next generation of clinical multimodality imaging applications. J Nucl Med 2010; 51: 333-336. DOI: 10.2967/jnumed.109.061853.
- [11] Wehrl HF, Sauter AW, Divine MR et al. Combined PET/MR; a technology becomes mature. J Nucl Med 2015; 56: 165-168. DOI: 10.2967/jnumed.114.150318.
- [12] Wehrl HF, Wiehr S, Divine MR et al. Preclinical and translational PET/MR Imaging. J Nucl Med 2014; 55: 11S-18S. DOI: 10.2967/jnumed.113.129221.
- [13] Ziegler SI, Pichler BJ, Boening G et al. A prototype high-resolution animal positron tomograph with avalanche photodiode arrays and LSO crystals. Eur J Nucl Med 2001; 28: 136-143.
- [14] Schlemmer HP, Pichler BJ, Schmand M et al. Simultaneous MR/PET imaging of the human brain: feasibility study. Radiology 2008; 248: 1028-1035. DOI: 10.1148/radiol.2483071927.
- [15] Spick C, Herrmann K, Czernin J. ¹⁸F-FDG PET/CT and PET/MRI perform equally well in cancer; evidence from studies on more than 2,300 patients. J Nucl Med 2016; 57: 420-430. DOI: 10.2967/jnumed.115.158808.
- [16] Czernin J, Ta L, Herrmann K. Does PET/MR imaging improve cancer assessments? Literature evidence from more than 900 patients. J Nucl Med 2014; 55: 59S-62S. DOI: 10.2967/jnumed.114.141838.
- [17] Bailey DL, Pichler BJ, Guckel B et al. Combined PET/MRI: global warming-summary report of the 6th international workshop on PET/MRI, March 27-29, 2017, Tübingen, Germany. Mol Imaging Biol 2018; 20: 4-20. DOI: 10.1007/s11307-017-1123-5.
- [18] Sawicki LM, Grueneisen J, Schaarschmidt BM et al. Evaluation of ¹⁸F-FDG PET/MRI, ¹⁸F-FDG PET/CT, MRI, and CT in whole-body staging of recurrent breast cancer. Eur J Radiol 2016; 85: 459-465. DOI: 10.1016/j.ejrad.2015.12.010.
- [19] Schaarschmidt BM, Grueneisen J, Heusch P et al. Does ¹⁸F-FDG PET/MRI reduce the number of indeterminate abdominal incidentalomas compared with ¹⁸F-FDG PET/CT? Nucl Med Commun 2015; 36: 588-595. DOI: 10.1097/MNM.0000000000000298.
- [20] Queiroz MA, Kubik-Huch RA, Hauser N et al. PET/MRI and PET/CT in advanced gynaecological tumours; initial experience and comparison. Eur Radiol 2015; 25: 2222-2230. DOI: 10.1007/s00330-015-3657-8.
- [21] Fendler WP, Czernin J, Herrmann K et al. Variations in PET/MRI operations; results from an international survey among 39 active sites. J Nucl Med 2016; 57: 2016-2021. DOI: 10.2967/jnumed.116.174169.
- [22] Krause BJ, Beyer T, Bockisch A et al. FDG-PET/CT in oncology. German guideline. Nuklearmedizin 2007; 46: 291-301.
- [23] Delbeke D, Coleman RE, Guiberteau MJ et al. Procedure guideline for tumor imaging with ¹⁸F-FDG PET/CT 1.0. J Nucl Med 2006; 47: 885-895.
- [24] Wagenknecht G, Kaiser HJ, Mottaghy FM et al. MRI for attenuation correction in PET; methods and challenges. MAGMA 2013; 26: 99-113. DOI: 10.1007/s10334-012-0353-4.
- [25] Keller SH, Holm S, Hansen AE et al. Image artifacts from MR-based attenuation correction in clinical, whole-body PET/MRI. MAGMA 2013; 26: 173-181. DOI: 10.1007/s10334-012-0345-4.
- [26] European Society of Urogenital Radiology (ESUR). ESUR Guidelines; 10.0 contrast media safety guidelines. 2018. Available from: <http://www.esur.org/esur-guidelines/>.
- [27] European Medicines Agency (EMA). Gadolinium containing contrast agents-Assessment report-EMEA/H/A-31/1437. 2017. Available from: https://www.ema.europa.eu/documents/referral/gadolinium-article-31-referral-assessment-report_en.pdf.
- [28] Sammet S. Magnetic resonance safety. Abdom Radiol (NY) 2016; 41: 444-451. DOI: 10.1007/s00261-016-0680-4.
- [29] Leitlinienreport zur DGN-Handlungsempfehlung (S1-Leitlinie). Nuklearmedizinische Bildgebung. Stand: 01/2015-AWMF-Register-nummer: 031-030. Available from: <https://www.awmf.org/leitlinien/detail/II/031-030.html>.
- [30] Sherlock FG. Reference manual for magnetic resonance safety, implants and devices 2018. Sherlock R & D Services 2018.
- [31] Kinahan PE, Townsend DW, Beyer T et al. Attenuation correction for a combined 3D PET/CT scanner. Med Phys 1998; 25: 2046-2053. DOI: 10.1118/1.598392.
- [32] Quick HH. Integrated PET/MR. J Magn Reson Imaging 2014; 39: 243-258. DOI: 10.1002/jmri.24523.
- [33] Martinez-Moller A, Souvatzoglou M, Delso G et al. Tissue classification as a potential approach for attenuation correction in whole-body PET/MRI; evaluation with PET/CT data. J Nucl Med 2009; 50: 520-526. DOI: 10.2967/jnumed.108.054726.
- [34] Paulus DH, Quick HH, Geppert C et al. Whole-body PET/MR imaging; quantitative evaluation of a novel model-based MR attenuation correction method including bone. J Nucl Med 2015; 56: 1061-1066. DOI: 10.2967/jnumed.115.156000.
- [35] 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: 138-152. DOI: 10.1007/s00259-010-1603-1.
- [36] Beyer T, Lassen ML, Boellaard R et al. Investigating the state-of-the-art in whole-body MR-based attenuation correction; an intra-individual, inter-system, inventory study on three clinical PET/MR systems. MAGMA 2016; 29: 75-87. DOI: 10.1007/s10334-015-0505-4.
- [37] Samarin A, Burger C, Wollenweber SD et al. PET/MR imaging of

- bone lesions—implications for PET quantification from imperfect attenuation correction. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2012; 39: 1154-1160. DOI:10.1007/s00259-012-2113-0.
- [38] Yang J, Jian Y, Jenkins N et al. Quantitative evaluation of atlas-based attenuation correction for brain PET in an integrated time-of-flight PET/MR imaging system. *Radiology* 2017; 284: 169-179. DOI:10.1148/radiol.2017161603.
- [39] Yang J, Wiesinger F, Kaushik S et al. Evaluation of sinus/edge-corrected zero-echo-time-based attenuation correction in brain PET/MRI. *J Nucl Med* 2017; 58: 1873-1879. DOI:10.2967/jnumed.116.188268.
- [40] Koesters T, Friedman KP, Fenchel M et al. Dixon sequence with super-imposed model-based bone compartment provides highly accurate PET/MR attenuation correction of the brain. *J Nucl Med* 2016; 57:918-924. DOI:10.2967/jnumed.115.166967.
- [41] Oehmigen M, Lindemann ME, Gratz M et al. Impact of improved attenuation correction featuring a bone atlas and truncation correction on PET quantification in whole-body PET/MR. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2018; 45: 642-653. DOI:10.1007/s00259-017-3864-4.
- [42] Elschot M, Selnaes KM, Johansen H et al. The effect of including bone in DIXON-based attenuation correction for ¹⁸F-fluciclovine PET/MRI of prostate cancer. *J Nucl Med* 2018. DOI:10.2967/jnumed.118.208868.
- [43] Drzezga A, Souvatzoglou M, Eiber M et al. First clinical experience with integrated whole-body PET/MR; comparison to PET/CT in patients with oncologic diagnoses. *J Nucl Med* 2012; 53: 845-855. DOI:10.2967/jnumed.111.098608.
- [44] Boellaard R, Quick HH. Current image acquisition options in PET/MR. *Semin Nucl Med* 2015; 45: 192-200. DOI:10.1053/j.semnucmed.2014.12.001.
- [45] Brendle C, Schmidt H, Oergel A et al. Segmentation-based attenuation correction in positron emission tomography/magnetic resonance; erroneous tissue identification and its impact on positron emission tomography interpretation. *Invest Radiol* 2015; 50: 339-346. DOI:10.1097/RLI.0000000000000131.
- [46] Nuyts J, Bal G, Kehren F et al. Completion of a truncated attenuation image from the attenuated PET emission data. *IEEE Trans Med Imaging* 2013; 32: 237-246. DOI:10.1109/TMI.2012.2220376.
- [47] Nuyts J, Dupont P, Stroobants S et al. Simultaneous maximum a posteriori reconstruction of attenuation and activity distributions from emission sinograms. *IEEE Trans Med Imaging* 1999; 18: 393-403. DOI:10.1109/42.774167.
- [48] Blumhagen JO, Braun H, Ladebeck R et al. Field of view extension and truncation correction for MR-based human attenuation correction in simultaneous MR/PET imaging. *Med Phys* 2014; 41: 022303. DOI: 10.1118/1.4861097.
- [49] Blumhagen JO, Ladebeck R, Fenchel M et al. MR-based field-of-view extension in MR/PET: B0 homogenization using gradient enhancement (HUGE). *Magn Reson Med* 2013; 70: 1047-1057. DOI:10.1002/mrm.24555.
- [50] Lindemann ME, Oehmigen M, Blumhagen JO et al. MR-based truncation and attenuation correction in integrated PET/MR hybrid imaging using HUGE with continuous table motion. *Med Phys* 2017; 44: 4559-4572. DOI:10.1002/mp.12449.
- [51] Catana C. Motion correction options in PET/MRI. *Semin Nucl Med* 2015; 45: 212-223. DOI:10.1053/j.semnucmed.2015.01.001.
- [52] Catalano OA, Umutlu L, Fuin N et al. Comparison of the clinical performance of upper abdominal PET/DCE-MRI with and without concurrent respiratory motion correction (MoCo). *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2018. DOI:10.1007/s00259-018-4084-2.
- [53] Gratz M, Ruhlmann V, Umutlu L, Fenchel M, Quick HH. Impact of MR-based motion correction on clinical PET/MR data of patients with thoracic pathologies. In proc. ISMRM 2017, Apr 21-27; Honolulu, HI, USA. 2017 p. 3899.
- [54] Fuin N, Pedemonte S, Catalano OA et al. PET/MRI in the presence of metal implants; completion of the attenuation map from PET emission Data. *J Nucl Med* 2017; 58: 840-845. DOI:10.2967/jnumed.116.183343.
- [55] Paulus DH, Quick HH. Hybrid Positron Emission tomography/magnetic resonance imaging: challenges, methods, and state of the art of hardware component attenuation correction. *Invest Radiol* 2016; 51: 624-634. DOI:10.1097/RLI.0000000000000289.
- [56] Eanm. Draft guidelines for radiopharmacy. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2003; 30: BP63-72.
- [57] Committee EP, Busemann Sokole E, Plachcinska A et al. Routine quality control recommendations for nuclear medicine instrumentation. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2010; 37: 662-671. DOI:10.1007/s00259-009-1347-y.
- [58] International Atomic Energy Agency (IAEA). Quality assurance for PET and PET/CT systems. 2009 Available from: <https://www-pub.iaea.org/books/iaeabooks/8002/Quality-Assurance-for-PET-and-PET-CT-Systems>.
- [59] Martinez-Moller A, Eiber M, Nekolla SG et al. Workflow and scan protocol considerations for integrated whole-body PET/MRI in oncology. *J Nucl Med* 2012; 53: 1415-1426. DOI:10.2967/jnumed.112.109348.
- [60] von Schulthess GK, Veit-Haibach P. Workflow considerations in PET/MR imaging. *J Nucl Med* 2014; 55: 19S-24S. DOI:10.2967/jnumed.113.129239.
- [61] Kirchner J, Sawicki LM, Suntharalingam S et al. Whole-body staging of female patients with recurrent pelvic malignancies; ultra-fast ¹⁸F-FDGPET/MRI compared to ¹⁸F-FDG PET/CT and CT. *PLoS One* 2017; 12:e0172553. DOI:10.1371/journal.pone.0172553.
- [62] Grueneisen J, Schaarschmidt BM, Heubner M et al. Implementation of FAST-PET/MRI for whole-body staging of female patients with recurrent pelvic malignancies; a comparison to PET/CT. *Eur J Radiol* 2015; 84: 2097-2102. DOI:10.1016/j.ejrad.2015.08.010.
- [63] Grueneisen J, Sawicki LM, Schaarschmidt BM et al. Evaluation of a fast protocol for staging lymphoma patients with integrated PET/MRI. *PLoS One* 2016; 11: e0157880. DOI:10.1371/journal.pone.0157880.
- [64] Marth C, Landoni F, Mahner S et al. Cervical cancer; ESMO Clinical Practice Guidelines for diagnosis, treatment and follow-up. *Ann Oncol* 2017; 28: iv72-iv83. DOI:10.1093/annonc/mdx220.
- [65] Stegger L, Schafers M, Weckesser M et al. EANM-ESR white paper on multimodality imaging. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2008; 35: 677-680. DOI:10.1007/s00259-008-0724-2.

(收稿日期:2020-03-08)