

^{18}F -FDG PET/MRI在存活心肌诊断中的研究进展

Application Progress of ^{18}F -FDG PET/MRI in the diagnosis of viable myocardium

Zhang Zheng, Hu Chenxi, Zhao Jun

引用本文:

张政, 胡晨曦, 赵军. ^{18}F -FDG PET/MRI在存活心肌诊断中的研究进展[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2023, 47(9): 568-572. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202302015-00342

Zhang Zheng, Hu Chenxi, Zhao Jun. Application Progress of ^{18}F -FDG PET/MRI in the diagnosis of viable myocardium[J]. International Journal of Radiation Medicine and Nuclear Medicine, 2023, 47(9): 568-572. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202302015-00342

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202302015-00342>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[\$^{18}\text{F}\$ -FDG PET/CT与 \$^{18}\text{F}\$ -FDG PET/MRI在卵巢癌临床应用中的进展](#)

Advances in clinical application of ^{18}F -FDG PET/CT and ^{18}F -FDG PET/MRI in ovarian cancer

国际放射医学核医学杂志. 2018, 42(5): 441-446 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.05.010>

[\$^{18}\text{F}\$ -FDG PET/CT在脊柱感染诊治中的应用及与MRI的比较](#)

Application of ^{18}F -FDG PET/CT in the diagnosis and treatment of spinal infection and comparison with MRI

国际放射医学核医学杂志. 2021, 45(10): 659-662 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202012008-00101>

[\$^{18}\text{F}\$ -FDG PET/CT心肌代谢显像图像质量影响因素的研究进展](#)

Current status of studies on factors affecting myocardial metabolism imaging quality of ^{18}F -FDG PET/CT

国际放射医学核医学杂志. 2020, 44(2): 114-118 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2020.02.008>

[\$^{18}\text{F}\$ -FDG PET在原发性乳腺淋巴瘤诊疗中的应用进展](#)

Application progress of ^{18}F -FDG PET in the diagnosis and treatment of primary breast lymphoma

国际放射医学核医学杂志. 2021, 45(5): 313-318 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202004037-00033>

[\$^{18}\text{F}\$ -FDG PET/CT与PET/MRI在结直肠癌肝转移诊断中的比较分析](#)

Comparative analysis of ^{18}F -FDG PET/CT and PET/MRI in the diagnosis of colorectal cancer liver metastases

国际放射医学核医学杂志. 2021, 45(2): 75-82 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202003009-00013>

[\$^{18}\text{F}\$ -FDG PET/CT在心包炎诊断中的应用价值研究进展](#)

Research progress on the application value of ^{18}F -FDG PET/CT in the diagnosis of pericarditis

国际放射医学核医学杂志. 2021, 45(10): 654-658 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202011011-00104>

^{18}F -FDG PET/MRI 在存活心肌诊断中的研究进展

张政¹ 胡晨曦¹ 赵军²

¹上海交通大学生物医学工程学院, 上海 200030; ²上海市东方医院核医学科, 上海 200120

通信作者: 赵军, Email: petcenter@126.com

【摘要】 ^{18}F -氟脱氧葡萄糖(FDG)PET/MRI 存活心肌显像一直受到临床特别是心内科医师的关注, PET 和 MRI 均可在缺血性心肌病的诊断和预后评估中发挥独特价值, 一体化 PET/MRI 设备为探索其整合价值提供了新平台。笔者通过回顾缺血性心肌病的病理生理学、PET 心肌显像的特点和 MRI 的临床应用情况, 梳理近 10 年来相关领域的研究进展, 对 PET/MRI 存活心肌显像的特点及其临床价值进行综述, 为 PET/MRI 存活心肌显像临床科研工作的开展提供参考。

【关键词】 正电子发射断层显像术; 磁共振成像; 氟脱氧葡萄糖 F18; 心肌

基金项目: 上海市科学技术委员会“探索者计划”(22TS1400200); 上海市东方医院临床研究重点项目(DFLC2022009); 浦东新区卫生系统学科建设重点学科(PWZxk2022-12)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202302015-00342](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202302015-00342)

Application Progress of ^{18}F -FDG PET/MRI in the diagnosis of viable myocardium

Zhang Zheng¹, Hu Chenxi¹, Zhao Jun²

¹School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

²Department of Nuclear Medicine, Shanghai East Hospital, Shanghai 200120, China

Corresponding author: Zhao Jun, Email: petcenter@126.com

【Abstract】 ^{18}F -fluorodeoxyglucose (FDG) PET/MRI imaging of viable myocardium has always been concerned by clinicians, especially cardiologists. Both PET and MRI can play a unique value in the diagnosis and prognosis of ischemic cardiomyopathy. Integrated PET/MRI equipment provides a new platform for exploring its integrated value. By reviewing the pathophysiology of ischemic cardiomyopathy, the characteristics of PET myocardial imaging and the clinical application of MRI, and combing the research progress in related fields in the past ten years, the author reviews the characteristics and clinical value of PET/MRI viable myocardial imaging, so as to provide reference for the clinical scientific research of PET/MRI viable myocardial imaging.

【Key words】 Positron-emission tomography; Magnetic resonance imaging; Fluorodeoxyglucose F18; Myocardium

Fund programs: Shanghai Municipal Science and Technology Commission "Explorer Program" (22TS1400200); Key Project of Clinical Research of Shanghai East Hospital (DFLC2022009); Key Discipline Construction of Health System in Pudong New Area (PWZxk2022-12)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202302015-00342](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202302015-00342)

随着一体化 PET/MRI 的发展, PET/MRI 心肌显像受到越来越多的关注^[1]。赵军和刘中民^[2]综述了 PET/MRI 一体机在心血管疾病中的应用进展, 认为 PET 与 MRI 互补可以精确地判断存活心肌和心脏功能, 准确评估心脏冠状动脉

硬化的程度和心肌纤维化程度, 但目前 PET/MRI 在心血管疾病中的研究较少, 亟需大样本前瞻性单中心或多中心研究。覃春霞等^[3]对一体化 PET/MRI 在心脏显像中的技术问题及其在缺血性心脏病中的临床应用现状及前景进行了综

述,认为近年来一些小样本研究结果展现了 PET/MRI 在缺血性心脏病中的初步应用价值,但未能充分利用其可同时采集的优势,衰减校正方法和运动校正方法等仍需进一步改进。我们从¹⁸F-FDG PET/MRI 存活心肌显像的摄取机制着手,分析 PET 和 MRI 信息的互补性,结合近 10 年来的研究进展,对¹⁸F-FDG PET/MRI 存活心肌显像的临床价值进行综述。

1 ¹⁸F-FDG PET 存活心肌显像

¹⁸F-FDG PET 存活心肌显像被认为是诊断存活心肌(包括顿抑心肌、冬眠心肌等)的“金标准”^[4]。然而正常心肌也存在¹⁸F-FDG 摄取减少或不摄取的情况, Sarikaya 等^[5]对 71 例缺血性心脏病(ischemic heart disease, IHD)患者的研究结果显示,46.4% 患者的一个或多个正常心肌节段的¹⁸F-FDG 摄取减少;糖尿病患者比非糖尿病患者正常心肌的¹⁸F-FDG 摄取减少更严重。心肌¹⁸F-FDG 的摄取受多种因素干扰,如空腹时间、检查前的饮食、血糖水平、胰岛素水平、是否糖尿病等,且心肌缺血、心肌坏死、心肌肥厚以及心肌炎症等不同病变的摄取水平不同,这对¹⁸F-FDG PET 显像的解读造成了困扰。认识心肌葡萄糖转运蛋白(glucose transporters, GLUT)的转录和易位过程或有助于¹⁸F-FDG PET 存活心肌显像的解读。

在糖负荷条件下,细胞内的葡萄糖被己糖激酶快速磷酸化并代谢,从而产生向内的跨膜浓度梯度,高血糖浓度诱导胰岛素分泌增加,促使 GLUT4 易位,大幅提高了心肌细胞对葡萄糖的摄取,增加了心肌细胞内葡萄糖的浓度,因而正常心肌会表现为较高的¹⁸F-FDG 浓聚。心肌缺血会刺激 GLUT4 和 GLUT1 易位,其对 GLUT4 易位的诱导通路不同于胰岛素刺激,心肌缺血所诱导的 GLUT4 易位使得缺血心肌对¹⁸F-FDG 的摄取增加;炎症反应诱导的心肌¹⁸F-FDG 高摄取主要通过毛细血管内的 GLUT1 直接转运,而非心肌细胞质膜内的 GLUT4 通路。因此在糖负荷条件下,正常心肌、缺血和(或)冬眠心肌、心肌炎症和(或)肉芽肿均可表现为¹⁸F-FDG 高摄取,正常心肌的¹⁸F-FDG 摄取主要由胰岛素水平诱导的 GLUT4 转运,缺血和(或)冬眠心肌的¹⁸F-FDG 摄取主要由缺血诱导的 GLUT4 转运,心肌炎症和(或)肉芽肿的¹⁸F-FDG 摄取主要由 GLUT1 转运。因此,经典的“灌注-代谢不匹配”模型可能会因为心肌炎症引起的¹⁸F-FDG 高摄取导致对存活心肌范围的错误评估^[6]。

2 MRI 存活心肌显像

心脏 MRI 是¹⁸F-FDG PET 存活心肌显像的有益补充^[7]。心脏 MRI 中的心脏电影成像及基于此的心脏 MRI 特征追踪技术^[8]可观察到心肌“舒张-收缩”时厚度的改变,因而在心

肌缺血发生早期即可观察到心脏功能的改变。缺血状态稳定时顿抑心肌转化为冬眠心肌,此时部分心肌细胞发生凋亡,细胞数目减少约 30%,心肌处于适应性改变阶段^[9],心肌细胞坏死引发的炎症反应在 MRI T2 加权图像上表现为高信号的心肌水肿。随着心肌冬眠时间的增加,心肌纤维化面积逐步增大,心肌纤维化大面积地发生则意味着发生了结构上的不可逆退行性改变。心肌细胞坏死导致细胞外间隙扩大,经静脉注射的 MRI 钆造影剂会在细胞外沉积,如心肌纤维化改变会有明显的细胞外容积增加现象,心血管 MRI 可以通过 T1 加权延迟(late gadolinium enhancement, LGE)显像检测到增加的细胞外空间,从而实现了对心肌纤维化的准确评估^[10-11]。

借助心脏电影成像、T2 加权成像、静息和负荷心肌灌注以及心肌瘢痕 LGE 显像,心脏 MRI 可提供丰富的心脏解剖和生理功能信息^[12]。在存活心肌评价中,LGE 显像是目前最精确且可无创评价心肌瘢痕的技术,可以准确反映梗死灶的大小和形态。Kim 和 Shah^[13]对 566 例心肌梗死患者进行的临床试验中,LGE 显像鉴别急性和慢性心肌梗死的灵敏度为 99%,特异度为 94%,值得一提的是,造影剂注射早期(5 min 内)的 LGE 显像还可显示微血管栓塞,这是其他无创显像方法无法取代的。LGE 显像提供的瘢痕透壁率可以预测心功能的恢复情况,如透壁率<25% 的心肌节段中,88% 的心肌可以改善收缩功能,但透壁率>50% 的心肌节段中,仅 4% 的心肌可改善收缩功能^[14]。

3 ¹⁸F-FDG PET/MRI 存活心肌显像的技术挑战

¹⁸F-FDG PET/MRI 在心血管疾病方面的价值一直备受关注^[1,15],然而心脏运动导致的图像质量下降及图像错配限制了其临床应用。近年来,研究者致力于解决此类问题,以使 PET 定量更准确,使心脏 MRI 和 PET 图像匹配更精准。Munoz 等^[16]验证了 MRI 引导的 PET 运动校正方法,可以实现 PET 和心脏 MRI 冠状动脉图像的同步运动校正,校正后 PET 和 MRI 冠状动脉图像质量均得到了提高并准确匹配。Lassen 等^[17]对心脏基于核磁共振的衰减校正(magnetic resonance-based attenuation correction, MRAC)图像的质量问题进行了总结,发现 90% 患者的 PET 和 MRAC 图像间存在(7±4) mm 的错配,50% 患者的 MRAC 图像存在磁化率伪影,他们认为在进行心脏¹⁸F-FDG PET/MRI 检查时应应对 MRAC 的图像质量进行仔细检查,避免 MRAC 的伪影对诊断产生误导。Munoz 等^[18]在心脏 MRI 中提取运动场并用于 PET 图像的运动校正,改善了 PET 图像的部分容积效应,增加了图像的清晰度。随着研究的深入,基于呼吸门控的高分辨率 MRAC 图像进行心脏衰减校正的方法逐步得到认可,通过心脏 MRI 提取运动场并用于 PET 图像的运动

校正的方法也得以应用到临床,改善了 ^{18}F -FDG PET/MRI对存活心肌的临床诊断效能^[19-20]。

4 ^{18}F -FDG PET 和 MRI-LGE 的对比研究

早期对 ^{18}F -FDG PET/MRI 存活心肌显像的探索试图回答其设备本身的临床适用性,并对 ^{18}F -FDG PET 和 MRI-LGE 在心肌活性判断上的一致性进行初步评估。由于 PET 显像可能来自 PET/MRI 或 PET/CT,因此首先需要知道这两个设备的 PET 是否一致,在此基础上再来回答 PET 和 MRI-LGE 的异同。Carballo 等^[21]探索了分体式 ^{18}F -FDG PET/MRI 存活心肌显像的价值,该研究纳入 6 例心肌低灌注患者和 5 名健康志愿者, ^{18}F -FDG PET/MRI 检查结束后 30 min 内行 ^{18}F -FDG PET/CT 检查,结果显示,PET/MRI 和 PET/CT 代谢评估准确性一致,在 ^{18}F -FDG PET 和 MRI-LGE 存活心肌评估中,4 例患者的研究结果一致,2 例不一致。他们认为 ^{18}F -FDG PET/CT 和 ^{18}F -FDG PET/MRI 中 PET 显像的诊断效能相当,与 PET 同步采集的 MRI 对存活心肌的诊断提供了附加价值。Nensa 等^[22]的研究中,对 20 例心肌梗死患者行 PET/MRI 存活心肌显像,其中 10 例患者同时行 PET/CT 显像,采用 ^{18}F -FDG PET/MRI 中的 ^{18}F -FDG PET 显像、 ^{18}F -FDG PET/CT 中的 ^{18}F -FDG PET 显像、MRI-LGE、心脏电影成像 4 种方法分别独立评估存活心肌,对评估结果进行组间一致性分析,结果显示,心脏 PET/MRI 和 PET/CT 显像质量一致,在存活心肌的诊断上, ^{18}F -FDG PET 和 MRI-LGE 无明显差异。

近年来, ^{18}F -FDG PET/MRI 存活心肌显像的临床研究越来越多。Beitzke 等^[23]的研究结果显示, ^{18}F -FDG PET 显像和 MRI-LGE 对坏死心肌的诊断有较好的一致性,冬眠心肌与心肌透壁率不存在相关性;MRI-LGE 可提供心肌瘢痕透壁率的信息,PET 可提供冬眠心肌的信息,PET/MRI 对 MRI 和 PET 的整合可以全面地评估存活心肌。Barrio 等^[24]的研究结果显示,相较于单一心脏 MRI 或 PET,PET/MRI 改变了 42.1% 的冠心病患者和 88.9% 的非冠心病患者的初始诊断,增加了 87.5% 的冠心病患者和 70% 非冠心病患者的诊断信心。

5 ^{18}F -FDG PET/MRI 存活心肌显像的临床应用

5.1 ^{18}F -FDG PET/MRI 对血运重建策略的影响

心肌灌注情况对治疗决策有重要意义,心脏 MRI 与 SPECT 均可提供心肌灌注信息。Priamo 等^[25]探索了 ^{18}F -FDG PET/MRI 显像对心肌硬化患者治疗决策的影响,研究纳入 12 例 SPECT 心肌静息灌注显像异常的患者,所有患者均行 ^{18}F -FDG PET/MRI 存活心肌显像,比较 ^{18}F -FDG PET、MRI 和 ^{18}F -FDG PET/MRI 3 种方法对血运重建策略的影响,结果

显示,MRI 与 SPECT 的评估结果差异显著,相较于单一 MRI 评估(MRI 灌注+MRI-LGE),PET/MRI 对 19.2% 的存活心肌进行了重新判定,3 种方法所建议的血运重建血管数目分别是 4、10、11,MRI 和 PET/MRI 结果更为接近。值得一提的是随着心脏 MRI 技术的发展,覆盖全心脏的 MRI 灌注成为可能^[26],PET/MRI 中一次检查可得到 MRI 灌注和 PET 存活心肌的信息,可一站式完成冬眠心肌的评估。

5.2 ^{18}F -FDG PET/MRI 对急性心肌梗死可挽救心肌的评估

急性心肌梗死时,在 T2 加权成像上表现为明显高信号的水肿心肌被定义为风险心肌,风险心肌的范围提示了可挽救心肌的面积。Nensa 等^[27]的研究结果显示,PET 和 MRI 提示的风险心肌面积有良好的相关性, ^{18}F -FDG 摄取减少的面积大于 MRI-LGE 的瘢痕面积和风险心肌面积,相较于 MRI, ^{18}F -FDG PET 未能提供更多关于可挽救心肌的信息。Bulluck 等^[28]研究了急性心肌梗死经皮冠状动脉介入治疗后 ^{18}F -FDG 摄取与风险心肌间的关系,研究纳入 21 例急性心肌梗死经皮冠状动脉介入治疗(percutaneous coronary intervention, PCI)术后 5 d 左右的患者行 ^{18}F -FDG PET/MRI 存活心肌显像,12 个月后,对其中 12 例患者再次行 ^{18}F -FDG PET/MRI 显像。急性心梗 ^{18}F -FDG PET 显像中,心肌 ^{18}F -FDG 低摄取的范围明显大于 MRI-LGE 的瘢痕面积, ^{18}F -FDG PET 与 T2 Mapping 图像得到的风险心肌面积近似。随访 ^{18}F -FDG PET/MRI 显像中,心肌 ^{18}F -FDG 低摄取范围显著减小,且低摄取区与 MRI-LGE 的梗死区一致。因此 MRI T2 或 T2 Mapping 图像所显示的风险心肌范围与 ^{18}F -FDG PET 存活心肌显像或炎症显像的范围近似,PET 显像未能提供更多有关风险心肌的信息。

5.3 ^{18}F -FDG PET/MRI 对急性心肌梗死 PCI 的预后评估

Rischpler 等^[29]比较了 PET 和 MRI 对心肌梗死患者 PCI 预后评估的价值,28 例急性心肌梗死患者 PCI 术后 5~7 d 内行 PET/MRI 显像,并在 6 个月后行 MRI 心脏电影成像回访,结果显示,18% 的心肌节段的存活评估存在差异,“PET 存活+MRI 存活”的心肌预后表现最好,但“PET 不存活+MRI 不存活”与“PET 不存活+MRI 存活”间的预后差异不明显,这提示 PET 对预测心肌 PCI 恢复更好。然而,Vitadello 等^[30]探索了 PET/MRI 对冠状动脉慢性完全闭塞患者预后评估的价值,49 例冠状动脉慢性完全闭塞患者在术前接受了 PET/MRI 存活心肌评估,术后 3~6 个月进行了心脏 MRI 随访,结果显示,68% 的心肌节段心脏 MRI 和 PET 均提示存活,30% 的节段评估结果不一致,ROC 曲线分析结果表明,PET/MRI 预后评估准确性最高(AUC=0.72),优于心脏 MRI(AUC=0.66)和 PET(AUC=0.58)。这两项研究结果不同,前者认为心脏 MRI 对预后评估价值有限,后者认为 PET 和心脏 MRI 的整合可以更准确地进行预后评估。

6 小结与展望

^{18}F -FDG PET/MRI 存活心肌评估的临床研究经历了早期临床验证、 ^{18}F -FDG PET 和 MRI-LGE 的对比研究、 ^{18}F -FDG PET 与 MRI-LGE 的互补优势、 ^{18}F -FDG PET/MRI 对血运重建策略的影响、 ^{18}F -FDG PET/MRI 对急性心肌梗死风险的评估、PCI 术后的预后评估等阶段。虽然相关的临床研究并不充分,但可以得到一些初步的结论:(1) ^{18}F -FDG PET/MRI 可提供与 ^{18}F -FDG PET/CT 一致的 PET 图像质量,满足常规诊断需求;(2) ^{18}F -FDG PET 和 MRI-LGE 对坏死心肌的判断总体上是一致的;(3) ^{18}F -FDG PET 和 MRI-LGE 的整合可以增加医师诊断冠心病的信心,给出更准确的诊断结论;(4)急性心肌梗死患者 MRI T2 图像所显示的风险心肌范围与 ^{18}F -FDG PET 存活心肌显像或炎症显像的范围相近;(5) ^{18}F -FDG PET 和 MRI-LGE 的整合或可更准确地进行 PCI 的预后评估。

随着一体化 ^{18}F -FDG PET/MRI 在国内装机量的快速增加, ^{18}F -FDG PET/MRI 心肌显像技术得到了越来越多的关注,然而心脏 MRI 流程复杂、要求患者配合度高、成像时间长、图像质量不稳定等问题限制了其在临床上的广泛应用,但心脏 MRI 和 ^{18}F -FDG PET/MRI 心肌显像技术的进展日新月异,最新的技术也正逐步从研究机构走向临床,促进心脏核医学的进步。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 张政负责综述的撰写;胡晨曦负责综述的修改、经费的支持;赵军负责综述的指导与最终版本的修订、经费的支持

参 考 文 献

- [1] Broski SM, Goenka AH, Kemp BJ, et al. Clinical PET/MRI: 2018 update[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2018, 211(2): 295–313. DOI: 10.2214/AJR.18.20001.
- [2] 赵军, 刘中民. PET/MR 一体机在心血管疾病中的应用进展[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2020, 40(8): 494–500. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20200218-00049. Zhao J, Liu ZM. Application advances of simultaneous PET/MR imaging in cardiovascular disease[J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2020, 40(8): 494–500. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20200218-00049.
- [3] 覃春霞, 张永学, 汪朝晖, 等. 一体化 PET/MR 用于缺血性心脏病进展[J]. *中国医学影像技术*, 2021, 37(5): 768–771. DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2021.05.034. Qin CX, Zhang YX, Wang ZH, et al. Application progress of hybrid PET/MR in ischemic heart diseases[J]. *Chin J Med Imaging Technol*, 2021, 37(5): 768–771. DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2021.05.034.
- [4] Wijns W, Vatner SF, Camici PG. Hibernating myocardium[J]. *N Engl J Med*, 1998, 339(3): 173–181. DOI: 10.1056/nejm199807163390307.
- [5] Sarikaya I, Elgazzar AH, Alfeeli MA, et al. Status of F-18 fluorodeoxyglucose uptake in normal and hibernating myocardium after glucose and insulin loading[J]. *J Saudi Heart Assoc*, 2018, 30(2): 75–85. DOI: 10.1016/j.jsha.2017.07.001.
- [6] Manabe O, Oyama-Manabe N, Naya M, et al. Pitfalls of ^{18}F -FDG PET for evaluating myocardial viability[J]. *J Nucl Cardiol*, 2017, 24(3): 1110–1113. DOI: 10.1007/s12350-016-0572-6.
- [7] Nekolla SG, Martinez-Moeller A, Saraste A. PET and MRI in cardiac imaging: from validation studies to integrated applications[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2009, 36(Suppl 1): S121–130. DOI: 10.1007/s00259-008-0980-1.
- [8] 李坤成, 张振. 心脏 MR 特征追踪技术进展及其临床应用[J]. *中国医学影像技术*, 2022, 38(1): 1–5. DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2022.01.001. Li KC, Zhang Z. Progresses of cardiac MR feature tracking technology and clinical applications[J]. *Chin J Med Imaging Technol*, 2022, 38(1): 1–5. DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2022.01.001.
- [9] Libby P, Bonow R, Zipes D, et al. Braunwald's heart disease: a textbook of cardiovascular medicine[M]. 8th ed. Philadelphia: Saunders, 2007.
- [10] Soares ROS, Losada DM, Jordani MC, et al. Ischemia/reperfusion injury revisited: an overview of the latest pharmacological strategies[J/OL]. *Int J Mol Sci*, 2019, 20(20): 5034[2023-02-11]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6834141>. DOI: 10.3390/ijms20205034.
- [11] Kloner RA. Stunned and hibernating myocardium: where are we nearly 4 decades later?[J/OL]. *J Am Heart Assoc*, 2020, 9(3): e015502[2023-02-11]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7033879>. DOI: 10.1161/JAHA.119.015502.
- [12] Buffà V, Di Renzi P. CMR in the diagnosis of ischemic heart disease[J]. *Radiol Med*, 2020, 125(11): 1114–1123. DOI: 10.1007/s11547-020-01278-9.
- [13] Kim RJ, Shah DJ. Fundamental concepts in myocardial viability assessment revisited: when knowing how much is "alive" is not enough[J]. *Heart*, 2004, 90(2): 137–140. DOI: 10.1136/hrt.2003.023101.
- [14] Kim RJ, Albert TSE, Wible JH, et al. Performance of delayed-enhancement magnetic resonance imaging with gadoversetamide contrast for the detection and assessment of myocardial infarction: an international, multicenter, double-blinded, randomized trial[J]. *Circulation*, 2008, 117(5): 629–637. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.723262.
- [15] Hope TA, Fayad ZA, Fowler KJ, et al. Summary of the first ISMRM-SNMMI workshop on PET/MRI: applications and limitations[J]. *J Nucl Med*, 2019, 60(10): 1340–1346. DOI: 10.2967/jnumed.119.227231.

- [16] Munoz C, Kunze KP, Neji R, et al. Motion-corrected whole-heart PET-MR for the simultaneous visualisation of coronary artery integrity and myocardial viability: an initial clinical validation [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 45(11): 1975–1986. DOI: 10.1007/s00259-018-4047-7.
- [17] Lassen ML, Rasul S, Beitzke D, et al. Assessment of attenuation correction for myocardial PET imaging using combined PET/MRI [J]. *J Nucl Cardiol*, 2019, 26(4): 1107–1118. DOI: 10.1007/s12350-017-1118-2.
- [18] Munoz C, Ellis S, Nekolla SG, et al. MR-guided motion-corrected PET image reconstruction for cardiac PET-MR[J]. *J Nucl Med*, 2021, 62(12): 1768–1774. DOI: 10.2967/jnumed.120.254235.
- [19] Zhang Z, Chen X, Wan Q, et al. A two-stage cardiac PET and late gadolinium enhancement MRI co-registration method for improved assessment of non-ischemic cardiomyopathies using integrated PET/MR[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 49(7): 2199–2208. DOI: 10.1007/s00259-022-05681-4.
- [20] Von Felten E, Benetos G, Patriki D, et al. Myocardial creep-induced misalignment artifacts in PET/MR myocardial perfusion imaging[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(2): 406–413. DOI: 10.1007/s00259-020-04956-y.
- [21] Carballo D, Nkoulou R, Vincenti G, et al. Value of a hybrid PET/MRI in the assessment of cardiac viability[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2012, 14(Suppl 1): SP80. DOI: 10.1186/1532-429X-14-S1-P80.
- [22] Nensa F, Poeppel TD, Beiderwellen K, et al. Hybrid PET/MR imaging of the heart: feasibility and initial results[J]. *Radiology*, 2013, 268(2): 366–373. DOI: 10.1148/radiol.13130231.
- [23] Beitzke D, Rasul S, Lassen ML, et al. Assessment of myocardial viability in ischemic heart disease by PET/MRI: comparison of left ventricular perfusion, hibernation, and scar burden[J]. *Acad Radiol*, 2020, 27(2): 188–197. DOI: 10.1016/j.acra.2019.03.021.
- [24] Barrio P, López-Melgar B, Fidalgo A, et al. Additional value of hybrid PET/MR imaging versus MR or PET performed separately to assess cardiovascular disease[J/OL]. *Rev Esp Cardiol (Engl Ed)*, 2021, 74(4): 303–311[2023-02-11]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S188558572030373X>. DOI: 10.1016/j.rec.2020.06.034.
- [25] Priamo J, Adamopoulos D, Rager O, et al. Downstream indication to revascularization following hybrid cardiac PET/MRI: preliminary results[J]. *Nucl Med Commun*, 2017, 38(6): 515–522. DOI: 10.1097/MNM.0000000000000680.
- [26] Wech T, Kunze KP, Rischpler C, et al. A compressed sensing accelerated radial MS-CAIPIRINHA technique for extended anatomical coverage in myocardial perfusion studies on PET/MR systems[J]. *Phys Med*, 2019, 64: 157–165. DOI: 10.1016/j.ejpm.2019.06.010.
- [27] Nensa F, Poeppel T, Tezgah E, et al. Integrated FDG PET/MR imaging for the assessment of myocardial salvage in reperfused acute myocardial infarction[J]. *Radiology*, 2015, 276(2): 400–407. DOI: 10.1148/radiol.2015140564.
- [28] Bulluck H, White SK, Fröhlich GM, et al. Quantifying the area at risk in reperfused ST-segment-elevation myocardial infarction patients using hybrid cardiac positron emission tomography-magnetic resonance imaging[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(3): e003900. DOI: 10.1161/circimaging.115.003900.
- [29] Rischpler C, Langwieser N, Souvatzoglou M, et al. PET/MRI early after myocardial infarction: evaluation of viability with late gadolinium enhancement transmural vs. ¹⁸F-FDG uptake[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2015, 16(6): 661–669. DOI: 10.1093/ehjci/jeu317.
- [30] Vitadello T, Kunze KP, Nekolla SG, et al. Hybrid PET/MR imaging for the prediction of left ventricular recovery after percutaneous revascularisation of coronary chronic total occlusions[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2020, 47(13): 3074–3083. DOI: 10.1007/s00259-020-04877-w.

(收稿日期: 2023-02-12)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

关于投稿中化学元素与核素符号的书写要求

1. 化学元素符号应当用罗马(正)体书写,首字母大写,在符号后不加圆点。
2. 核素的核子数(质量数)标注在元素符号的左上角。例如: ¹⁴C, ⁶⁰Co, 不写成¹⁴氮或N¹⁴, ⁶⁰钴或Co⁶⁰。
3. 分子中核素的原子数标注在核素符号的右下角。例如: ¹⁴N₂。
4. 质子数(原子序数)标注在元素符号的左下角。例如: ₈₂Pb, ₂₆Fe。
5. 离子价和表明阴、阳离子的符号“+”或“-”标注于元素符号的右上角,离子价数写在符号前。例如: 正2价的镁离子,应写成Mg²⁺,不宜写成Mg⁺⁺。
6. 激发态标注在元素符号的右上角。例如: ^{99m}Tc^m, 不写成^{99m}钼、Tc^{99m}或^{99m}Tc。

本刊编辑部