

核素心肌灌注/代谢显像与心脏 MR 成像评价心肌活力的研究现状及进展

宋书扬 汪蕾 方纬

北京协和医学院、中国医学科学院阜外医院核医学科,北京 100037

通信作者:汪蕾, Email: leiwangfw@126.com

【摘要】 核素心肌灌注/代谢显像与心脏 MR 成像均是评价缺血性心脏病患者心肌活力的重要的无创性影像学技术。由于成像原理不同,2 种技术对不同性质的心肌损伤和心肌活力鉴别具有各自的优势。该文综述了 2 种技术在心肌活力评价方面的比较研究,系统总结、分析了 2 种技术评价心肌活力的一致性和差异,并探讨了两者相结合的意义,从而为冠状动脉血运重建治疗决策提供更全面、精准的诊断依据。

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

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230106-00003

Comparison of radionuclide myocardial perfusion/metabolic imaging with cardiac magnetic resonance for assessment of myocardial viability: current status and progress

Song Shuyang, Wang Lei, Fang Wei

Department of Nuclear Medicine, Fuwai Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100037, China

Corresponding author: Wang Lei, Email: leiwangfw@126.com

【Abstract】 Radionuclide myocardial perfusion/metabolic imaging and cardiac MR play critical roles in assessing myocardial viability of patients with ischemic heart disease as noninvasive modalities. Given the technical difference between two imaging modalities, each of them has its unique strength to ascertain what causes the injured myocardium and differentiate the viable myocardium from the scarred myocardium. The purpose of this review is to compare the capability of two methods in assessment of myocardial viability, including summarize their consistency and discrepancy, as well as to explore the clinical significance to combine them serving as an essential tool to assist decision making for coronary revascularization comprehensively and accurately.

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

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230106-00003

是否存在存活心肌以及存活心肌的数量对于缺血性心脏病患者临床治疗决策具有重要的指导价值^[1-2]。在多种鉴别存活心肌的影像学方法中,核素心肌灌注/代谢显像(与心肌灌注显像相结合的¹⁸F-FDG PET 心肌葡萄糖代谢显像,以下简称¹⁸F-FDG PET)一致被公认为是“金标准”^[3]。但近年来心脏 MR(cardiac MR, CMR)成像技术在鉴别心肌活力方面的应用越来越受到重视,其利用延迟成像中钆对比剂在纤维瘢痕组织中的异常聚集而使瘢痕组织(梗死心肌)与正常心肌在 T₁ 加权成像上呈现不同的信号(瘢痕组织呈现延迟强化特征),从而区分梗死心肌与存活心肌^[4]。由于¹⁸F-FDG PET 与 CMR 鉴别心肌活力的原理有所不同,两者在图像特点和鉴别结果等方面存在着不同程度的一致性 or 差异。如何理解两者在鉴别心肌活力方面的异同并正确运用这 2 种影像学技术具有重要的临床意义。本文综述了目前国内外有关¹⁸F-FDG PET 与 CMR 在鉴别缺血性心脏病患者心肌活力方面的比较研究,并对这一问题进行系统地总结和分析。

一、¹⁸F-FDG PET 和 CMR 成像评价心肌活力的一致性

已有不少研究观察了¹⁸F-FDG PET 与 CMR 鉴别存活心肌的一致性。Kühl 等^[5]的研究发现:¹⁸F-FDG PET 诊断为心肌灌注-代谢正常(正常心肌)、灌注-代谢不匹配(冬眠心肌)和灌注-代谢匹配(梗死心肌)3 种情况,所对应的 CMR 延迟强化的透壁程度依次增加。在¹⁸F-FDG PET 诊断为正常心肌的节段中,CMR 延迟强化的透壁程度极小,仅有少部分节段出现少许心内膜下强化;在¹⁸F-FDG PET 诊断为梗死心肌的节段中,CMR 延迟强化的透壁程度基本超过 50%;而¹⁸F-FDG PET 诊断为冬眠心肌的节段中,CMR 的延迟强化程度较为分散,从无强化到透壁强化均存在。如果以¹⁸F-FDG PET 的诊断“金标准”,应用 ROC 曲线分析 CMR 鉴别存活心肌的能力,AUC(95% CI)为 0.95(0.93~0.97),区分存活心肌与梗死心肌的延迟强化程度最佳界值为 37%,此时 CMR 鉴别存活心肌的灵敏度为 96%,特异性为 84%^[5]。Li 等^[6]的研究也发现¹⁸F-FDG PET 判断的心肌活性与 CMR 延迟强化的透

壁程度呈明显负相关,ROC 曲线分析 AUC 为 0.91,但这项研究中 CMR 区分存活心肌与梗死心肌的最佳延迟强化程度界值为 50%,灵敏度为 95.3%,特异性为 87.5%。

虽然以上研究认为¹⁸F-FDG PET 和 CMR 在鉴别存活心肌与梗死心肌方面一致性较高,但各个研究中 CMR 判定存活心肌的延迟强化程度最佳界值却明显不同,这可能是由于研究人群和样本量不同。最佳界值的上调可以提高 CMR 鉴别存活心肌的特异性,减少对存活心肌的遗漏,尤其是¹⁸F-FDG PET 表现为灌注-代谢不匹配的冬眠心肌节段,在 CMR 判断是否为存活心肌时,受界值选取的影响较为明显。值得注意的是,¹⁸F-FDG PET 显示的冬眠心肌在 CMR 的延迟强化程度分布差异较大,提示了心肌活性从正常到缺血损伤再到梗死是一个动态的过程,简单地按照存活和梗死将心肌活性一分为二,难以全面反映真实的病理生理过程。因此,虽然¹⁸F-FDG PET 与 CMR 用存活/梗死二分法的诊断一致性较高,但不能说明两者之间可以互相取代,仍需关注两者的差异之处。

二、¹⁸F-FDG PET 和 CMR 成像评价心肌活力的差异

1. CMR 成像在发现心肌瘢痕方面的优势。¹⁸F-FDG PET 和 CMR 均能够识别瘢痕组织,但不少研究发现:与¹⁸F-FDG PET 相比,CMR 常常能够显示更多的瘢痕,特别是心内膜下瘢痕。Klein 等^[7]的研究发现:就患者个体水平而言,¹⁸F-FDG PET 和 CMR 显示的瘢痕总评分及瘢痕总量一致性较好,¹⁸F-FDG PET 显示瘢痕总评分为(44.3±9.1)分,瘢痕组织占左室心肌总量的(20±18)%;而 CMR 的瘢痕总评分为(47.6±11.1)分,占左室心肌总量的(18±16)%,两者的相关系数分别为 0.91 与 0.81(均 $P < 0.001$)。然而按节段水平分析则发现¹⁸F-FDG PET 和 CMR 诊断瘢痕的符合程度明显降低。在 CMR 发现透壁梗死的 178 个心肌节段中,有 21%的节段¹⁸F-FDG PET 显示完全正常;而在 CMR 发现心内膜下梗死的 93 个节段中,则有多达 55%的节段¹⁸F-FDG PET 未发现异常^[7]。CMR 比¹⁸F-FDG PET 发现更多的瘢痕,可能是由于与 CMR 相比,PET 的空间分辨率相对较低,范围较小的瘢痕,特别是心内膜下瘢痕容易被忽略^[8];由于部分容积效应的影响,心外膜下存活心肌摄取的¹⁸F-FDG 信号有可能掩盖同一心肌节段心内膜下梗死区域,对于变薄的室壁节段尤为显著^[7-9]。此外,¹⁸F-FDG PET 心肌代谢显像需要与心肌灌注显像相结合,两者之间的图像匹配对定位的准确性有可能会产生一定的影响,而 CMR 图像更加直观,定位更为明确^[7-8,10]。

Hunold 等^[10]按照左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF) <30%、30%~50%和 >50%分组,发现在 LVEF 降低(<50%)的患者中,CMR 比¹⁸F-FDG PET 能检测到更多瘢痕,且在 LVEF <30%的患者中这一现象更加明显,这是由于心室重构越明显,变薄的室壁节段越多,CMR 具有较高的空间分辨率的优势越显著。Beitzke 等^[11]的研究发现,虽然¹⁸F-FDG PET 和 CMR 诊断瘢痕的一致性较好,但当 CMR 发现的心肌瘢痕小于节段内心肌总量的 10%,即在显示为较轻的瘢痕中,¹⁸F-FDG PET 和 CMR 的相关性较差($r = -0.03, P = 0.9$),反映了¹⁸F-FDG PET 在检测较小瘢痕方面具有一定的局限性。

2. ¹⁸F-FDG PET 在检测存活心肌及鉴别存活心肌性质方面的优势。多项研究结果表明:与 CMR 相比,¹⁸F-FDG

PET 对存活心肌的检测更加灵敏,能够检测出更多的存活心肌^[7-12]。Wang 等^[13]的研究发现:即使在 CMR 上显示透壁梗死的节段中,仍有 30.4% 在¹⁸F-FDG PET 显示为冬眠心肌。Kazakauskaitė 等^[14]的研究也证实,在 148 个 CMR 显示透壁梗死的节段中,有 52.7%的节段被¹⁸F-FDG PET 检测出不同程度的代谢活性。可能的原因是:在 CMR 诊断为透壁梗死的节段中,存活心肌与非存活心肌掺杂存在,¹⁸F-FDG PET 灵敏度较高,能够识别出掺杂在其中的冬眠心肌。因此,CMR 有可能高估其显示透壁梗死节段的梗死程度。

另一方面,CMR 虽然可以精准识别瘢痕,却无法判断无瘢痕区域的心肌到底是正常心肌、顿抑心肌还是冬眠心肌。心肌反复受到缺血损伤直至最终梗死是一个动态的过程,因为缺血损伤的程度不同、持续时间不同,心肌的功能、血流灌注和代谢状态也不同。核素显像结合了心肌血流灌注和心肌代谢的评价,能够进一步区分未梗死的心肌是正常心肌、顿抑心肌还是冬眠心肌,这是 CMR 不易实现的。Knuesel 等^[15]的研究发现:在所有室壁运动异常的心肌节段中,CMR 显示存活的节段在¹⁸F-FDG PET 显像中呈现血流灌注和代谢不同的表现,据此可以进一步划分为顿抑心肌与冬眠心肌。Roes 等^[16]分析了 208 个功能不全但 CMR 未发现瘢痕的节段,结果发现:91%的节段¹⁸F-FDG PET 也未发现瘢痕,但其中 74%的节段灌注和代谢均正常,为顿抑心肌,另 26%的节段为灌注-代谢不匹配的冬眠心肌。顿抑心肌和冬眠心肌常同时存在^[17],顿抑心肌血流灌注正常,理论上不需要进行血运重建,但对于冬眠心肌而言,其后续的转归会受到血运重建的影响,有研究证实冬眠心肌的数目是影响患者是否能从血运重建中获益的重要因素^[18-19],因此进一步鉴别冬眠心肌十分必要。

虽然 CMR 无法直接识别冬眠心肌^[11],但仍有研究探讨了 CMR 所显示的瘢痕心肌的数量是否对¹⁸F-FDG PET 中所显示的冬眠心肌的数量有提示作用。Roes 等^[16]发现在 CMR 未发现瘢痕、心内膜下梗死、透壁梗死的节段中都存在冬眠心肌。Wang 等^[13]进一步探讨了¹⁸F-FDG PET 所显示的冬眠心肌和 CMR 显示的瘢痕心肌分布的相关性,发现在单个血管支配区域,冬眠心肌数量和瘢痕总负荷量并没有线性关系。Beitzke 等^[11]的研究也证实了¹⁸F-FDG PET 上冬眠心肌的节段数与 CMR 上透壁梗死的节段数之间没有明确的统计学关系。以上研究表明,CMR 通过梗死心肌的数量间接推断冬眠心肌的数量难以实现。此外,还有研究提出用 CMR 首过灌注结合 CMR 延迟强化的透壁程度判断心肌的活性,发现与¹⁸F-FDG PET 相比,两者的一致性仅为 78.5%,且对于 CMR 心内膜下梗死并出现灌注缺损的节段,单凭 CMR 无法判断具体的心肌活性状态,仍需参考¹⁸F-FDG PET 的结果^[20]。综上,¹⁸F-FDG PET 在判断心肌活性,尤其是鉴别冬眠心肌方面具有独特的优势。

3. 影响存活心肌检测的其他因素。有研究认为,对于部分慢性缺血性心脏病患者,可能存在部分心肌损伤已经出现代谢方式或超微结构的改变,但细胞膜尚完整,因而 CMR 未显示延迟强化的情况^[4,15,21-22]。因此,CMR 未显示延迟强化的区域不一定是存活心肌^[8]。此外,很多其他病理生理过程也可以出现 CMR 延迟强化,如水肿、炎性病变等^[23]。炎

性病变等因素同样可以影响 FDG 摄取和¹⁸F-FDG PET 对存活心肌的评价。炎性病变组织常常高度摄取¹⁸F-FDG,因此对于急性心肌梗死患者,在急性期或亚急性期进行心肌活力的评价往往受到限制^[24]。

三、¹⁸F-FDG PET 和 CMR 成像预测血运重建术后室壁运动恢复的比较

心肌缺血损伤后,无论是顿抑心肌、冬眠心肌还是梗死心肌都会出现收缩功能的异常。对于功能异常但存活的心肌,血运重建术后其功能有可能得到恢复。因此,应用影像学方法鉴别存活心肌能够用于预测术后心室功能的恢复。

Kiko 等^[23]对 38 例冠状动脉慢性完全闭塞病变(chronic total occlusion, CTO)患者进行了经皮冠状动脉介入治疗(percutaneous coronary intervention, PCI)术后 6 个月的随访,在 152 个功能异常的心肌节段中,¹⁸F-FDG PET 与 CMR 都显示为存活的节段室壁运动功能恢复程度最为显著,2 种方法都显示为梗死的节段室壁运动功能恢复最差,而¹⁸F-FDG PET 和 CMR 结果不一致的节段,室壁运动功能恢复程度介于两者之间。Wu 等^[25]对 27 例患者在血运重建后随访 1 个月,分析了¹⁸F-FDG PET 和 CMR 预测心肌节段室壁运动恢复的能力,发现¹⁸F-FDG PET 显示透壁梗死的节段血运重建术后功能恢复可能性很低,61 个中仅有 2 个节段功能恢复;而 CMR 显示透壁梗死的 56 个节段中却有 21% 有功能恢复。Vitadello 等^[26]对 49 例冠状动脉 CTO 患者在血运重建后进行 6 个月的随访,发现 21 个¹⁸F-FDG PET 显示存活而 CMR 显示梗死的心肌节段普遍出现明显的室壁运动改善。上述结果表明,由于¹⁸F-FDG PET 在鉴别存活心肌方面具有更高的灵敏度,因此在预测室壁运动恢复方面有更好的价值。但对于室壁显著变薄的心肌节段,由于前已述及的¹⁸F-FDG PET 的局限性,在预测室壁运动恢复时,仍需要进一步应用 CMR。Kühl 等^[9]探讨了 29 例患者中¹⁸F-FDG PET 和 CMR 显示不一致的心肌节段,发现血运重建 6 个月后,在 26 个 CMR 显示存活而¹⁸F-FDG PET 显示梗死的节段中,有 11 个节段功能明显恢复,这 11 个节段室壁均明显变薄。

此外,对于非透壁心肌梗死,CMR 检测的非梗死部分的实际厚度对于预测术后室壁运动的恢复也有一定的参考价值。Knuesel 等^[15]对 19 例缺血性心脏病患者血运重建后随访 1 年左右,发现所有功能恢复的节段中有 93% 的节段不但在¹⁸F-FDG PET 显像中显示为存活心肌,而且 CMR 测得的无延迟强化的心肌厚度超过了 4.5 mm,但¹⁸F-FDG PET 显示存活而 CMR 无延迟强化的厚度未达到 4.5 mm 的心肌节段中却有 2/3 没有室壁运动的恢复。上述结果表明,存活心肌的数量是室壁运动恢复的重要保证,结合¹⁸F-FDG PET 与 CMR 能够更全面地对存活心肌的实际数量进行评估,从而更准确地预测室壁运动的恢复。Vitadello 等^[26]运用 ROC 曲线分析了¹⁸F-FDG PET 和 CMR 对血运重建后室壁运动恢复的预测能力,并用二元 logistic 回归将各心肌节段¹⁸F-FDG 摄取程度和 CMR 延迟强化的范围相结合构建了线性预测模型,证实¹⁸F-FDG PET 与 CMR 联合可以明显提高预测的准确性。

四、PET/MR 融合显像评价心肌活力的研究进展

近年来,随着 PET/MR 一体机的问世,PET/MR 融合显像技术已进入临床,其在心血管领域的应用也逐步扩大。已

有研究成功应用 PET/MR 一体机进行心肌活力的评价,证实了 PET/MR 融合显像可以结合 CMR 对于瘢痕诊断的优势以及¹⁸F-FDG PET 对于存活心肌诊断的优势,并有效减少左心室重构患者因节段配准问题造成的¹⁸F-FDG PET 与 CMR 诊断不一致^[11,20],同时通过 CMR 提供 LVEF、左心室容积、局部室壁运动等重要功能信息,预测节段室壁运动恢复情况^[23-24,26],但 PET/MR 同时采集的优势仍未充分发挥。Barton 等^[27]在实验猪身上通过持续泵入 FDG 实现了对于心肌葡萄糖代谢的动态评估,将¹⁸F-FDG PET 提供的心肌代谢情况与 CMR 提供的功能信息进行实时结合,发现低氧负荷状态下左心收缩功能增加,心肌 FDG 摄取也增加,发挥了 PET/MR 同时采集的优势,进一步拓宽了 PET/MR 在心肌活力领域的应用。尽管如此,目前 PET/MR 一体机在心肌活力评价上的研究证据仍有限,其广阔的应用前景仍需进一步的研究^[28-29]。

五、总结和展望

¹⁸F-FDG PET 和 CMR 都是鉴别心肌活性的重要的无创性影像学技术,两者各具优势。CMR 分辨率较高,有利于识别更多程度较轻的心内膜下瘢痕组织;而¹⁸F-FDG PET 对于心肌葡萄糖代谢信号灵敏度高,能够发现更多梗死区内的存活心肌,并能够准确鉴别顿抑心肌和冬眠心肌等不同性质的存活心肌。¹⁸F-FDG PET 和 CMR 2 种技术相结合更有利于对缺血性心脏病患者心肌活性的全面和精准的评估,为血运重建治疗提供可靠依据。目前,¹⁸F-FDG PET 与 CMR 在心肌活性评价方面如何结合应用还缺乏大病例组的临床研究,随着 PET/MR 等最先进的影像设备开始进入临床应用,技术更加成熟,这一领域的研究将会取得更多的进展。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 宋书扬:文献检索、论文撰写;汪蕾、方纬:论文修改

参 考 文 献

- [1] Neumann FJ, Sousa-Uva M, Ahlsson A, et al. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization[J]. Eur Heart J, 2019, 40(2): 87-165. DOI:10.1093/eurheartj/ehy394.
- [2] Knuuti J, Wijns W, Saraste A, et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes[J]. Eur Heart J, 2020, 41(3): 407-477. DOI:10.1093/eurheartj/ehz425.
- [3] Khalaf S, Chamsi-Pasha M, Al-Mallah MH. Assessment of myocardial viability by PET[J]. Curr Opin Cardiol, 2019, 34(5): 466-472. DOI:10.1097/HCO.0000000000000652.
- [4] Jackson E, Bellenger N, Seddon M, et al. Ischaemic and non-ischaemic cardiomyopathies—cardiac MRI appearances with delayed enhancement[J]. Clin Radiol, 2007, 62(5): 395-403. DOI:10.1016/j.crad.2006.11.013.
- [5] Kühl HP, Beek AM, van der Weerd AP, et al. Myocardial viability in chronic ischemic heart disease; comparison of contrast-enhanced magnetic resonance imaging with ¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography[J]. J Am Coll Cardiol, 2003, 41(8): 1341-1348. DOI:10.1016/s0735-1097(03)00158-x.
- [6] Li JN, He Y, Dong W, et al. Comparison of cardiac MRI with PET for assessment of myocardial viability in patients with coronary chronic total occlusion[J]. Clin Radiol, 2019, 74(5): 410.e1-e9. DOI:10.1016/j.crad.2019.01.021.
- [7] Klein C, Nekolla SG, Bengel FM, et al. Assessment of myocardial

- viability with contrast-enhanced magnetic resonance imaging: comparison with positron emission tomography[J]. *Circulation*, 2002, 105(2): 162-167. DOI:10.1161/hc0202.102123.
- [8] Liu Q, Zhao S, Yan C, et al. Myocardial viability in chronic ischemic heart disease: comparison of delayed-enhancement magnetic resonance imaging with ^{99m}Tc-sestamibi and ¹⁸F-fluorodeoxyglucose single-photon emission computed tomography[J]. *Nucl Med Commun*, 2009, 30(8): 610-616. DOI:10.1097/MNM.0b013e32832b529e.
- [9] Kühl HP, Lipke CS, Krombach GA, et al. Assessment of reversible myocardial dysfunction in chronic ischaemic heart disease: comparison of contrast-enhanced cardiovascular magnetic resonance and a combined positron emission tomography-single photon emission computed tomography imaging protocol [J]. *Eur Heart J*, 2006, 27(7): 846-853. DOI:10.1093/eurheartj/ehi747.
- [10] Hunold P, Jakob H, Erbel R, et al. Accuracy of myocardial viability imaging by cardiac MRI and PET depending on left ventricular function [J]. *World J Cardiol*, 2018, 10(9): 110-118. DOI:10.4330/wjc.v10.i9.110.
- [11] 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.
- [12] Wu YW, Tadamura E, Kanao S, et al. Myocardial viability by contrast-enhanced cardiovascular magnetic resonance in patients with coronary artery disease: comparison with gated single-photon emission tomography and FDG position emission tomography [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2007, 23(6): 757-765. DOI: 10.1007/s10554-007-9215-y.
- [13] Wang L, Lu MJ, Feng L, et al. Relationship of myocardial hibernation, scar, and angiographic collateral flow in ischemic cardiomyopathy with coronary chronic total occlusion [J]. *J Nucl Cardiol*, 2019, 26(5): 1720-1730. DOI:10.1007/s12350-018-1241-8.
- [14] Kazakauskaitė E, Vajauskas D, Unikaite R, et al. Comparative analysis of myocardial viability multimodality imaging in patients with previous myocardial infarction and symptomatic heart failure [J]. *Medicina (Kaunas)*, 2022, 58(3): 368. DOI:10.3390/medicina58030368.
- [15] Knuesel PR, Nanz D, Wyss C, et al. Characterization of dysfunctional myocardium by positron emission tomography and magnetic resonance: relation to functional outcome after revascularization[J]. *Circulation*, 2003, 108(9): 1095-1100. DOI:10.1161/01.CIR.0000085993.93936.BA.
- [16] Roes SD, Kaandorp TA, Marsan NA, et al. Agreement and disagreement between contrast-enhanced magnetic resonance imaging and nuclear imaging for assessment of myocardial viability[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2009, 36(4): 594-601. DOI:10.1007/s00259-008-1001-0.
- [17] Shah BN, Khattar RS, Senior R. The hibernating myocardium: current concepts, diagnostic dilemmas, and clinical challenges in the post-STICH era [J]. *Eur Heart J*, 2013, 34(18): 1323-1336. DOI:10.1093/eurheartj/ehi018.
- [18] D'Egidio G, Nichol G, Williams KA, et al. Increasing benefit from revascularization is associated with increasing amounts of myocardial hibernation: a substudy of the PARR-2 trial[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2009, 2(9): 1060-1068. DOI:10.1016/j.jcmg.2009.02.017.
- [19] Ling LF, Marwick TH, Flores DR, et al. Identification of therapeutic benefit from revascularization in patients with left ventricular systolic dysfunction: inducible ischemia versus hibernating myocardium [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2013, 6(3): 363-372. DOI:10.1161/CIRCIMAGING.112.000138.
- [20] 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.
- [21] Pagano D, Townend JN, Parums DV, et al. Hibernating myocardium: morphological correlates of inotropic stimulation and glucose uptake [J]. *Heart*, 2000, 83(4): 456-461. DOI:10.1136/heart.83.4.456.
- [22] Gunning MG, Kaprielian RR, Pepper J, et al. The histology of viable and hibernating myocardium in relation to imaging characteristics[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2002, 39(3): 428-435. DOI:10.1016/s0735-1097(01)01766-1.
- [23] Kiko T, Yokokawa T, Misaka T, et al. Myocardial viability with chronic total occlusion assessed by hybrid positron emission tomography/magnetic resonance imaging[J]. *J Nucl Cardiol*, 2021, 28(5): 2335-2342. DOI:10.1007/s12350-020-02041-3.
- [24] 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.
- [25] Wu YW, Tadamura E, Yamamuro M, et al. Comparison of contrast-enhanced MRI with ¹⁸F-FDG PET/²⁰¹Tl SPECT in dysfunctional myocardium: relation to early functional outcome after surgical revascularization in chronic ischemic heart disease [J]. *J Nucl Med*, 2007, 48(7): 1096-1103. DOI:10.2967/jnumed.106.038596.
- [26] 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.
- [27] Barton GP, Vildberg L, Goss K, et al. Simultaneous determination of dynamic cardiac metabolism and function using PET/MRI [J]. *J Nucl Cardiol*, 2019, 26(6): 1946-1957. DOI:10.1007/s12350-018-1287-7.
- [28] 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.
- [29] 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.

(收稿日期:2023-01-06)