

·临床核医学·

^{123}I -间碘苄胍心脏神经显像的临床应用进展

周伟娜 王雪梅

【摘要】 心脏神经分布在心脏的功能中起决定性作用,很多心脏疾患常常会引起心脏自主神经功能的损害。 ^{123}I -间碘苄胍心脏神经显像是评定心脏自主神经功能的一种方法,它不仅评价各种心脏疾病状态下交感神经的损伤程度,决定是否植入机械装置、进行心脏移植或指导药物治疗等,而且可以在分子水平可视化及定量分析心肌的基本病变。

【关键词】 3-碘苄胍;碘放射性同位素;心脏病;交感神经系统

The clinical application of ^{123}I -metaiodobenzylguanidine cardiac neural imaging ZHOU Wei-na, WANG Xue-mei. Department of Nuclear Medicine, The Affiliated of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010050, China

Corresponding author: WANG Xue-mei, Email: wangxuemei2260@yahoo.com.cn

【Abstract】 Cardiac neural plays a crucial role in cardiac function. Cardiac diseases usually cause damage to cardiac autonomic function. ^{123}I -metaiodobenzyl-guanidine imaging is an ideal evaluation method of cardiac autonomic function. It evaluates the damage to the sympathetic nerve of various cardiac patients, guides pharmacologic therapy, and determines the necessity of mechanical devices and cardiac transplant. The radiotracer imaging allows visualization and quantitative measurements of the cardiac lesion.

【Key words】 3-Iodobenzylguanidine; Iodine radioisotopes; Heart diseases; Sympathetic nervous system

1 心脏神经分布在心脏功能中的作用

支配心脏的交感神经系统由交感神经和副交感神经组成,通过分泌不同的神经递质——去甲肾上腺素和乙酰胆碱来完成对心脏的兴奋和抑制性调节。自主神经系统的调节中枢位于中脑、下丘脑、脑桥以及延髓,它们接受并整合大脑的其他部分以及体内传入的信号,顺着从大脑中传出的信号下行至脊髓和突触节前纤维,在 T1-L3 水平离开脊髓,到达脊柱旁的星状神经节。左侧星状节后纤维神经支配右心室,而右侧节后纤维神经支配左室的前壁及侧壁。

心肌的交感神经与心内膜下的冠状动脉伴行并且穿透心肌膜,主要的交感神经功能介质是去甲肾上腺素。交感神经兴奋性增强时,供应心脏血液的冠状动脉扩张,心脏收缩力增强,心跳加速。

副交感神经纤维少于交感神经纤维,它起源于髓质并与迷走神经伴行。在心肌中,它起始于心外膜,穿过房室沟,穿透心肌膜,最后位于心内膜下。副交感神经传出信号控制窦房结和房室结的功能。副交感神经大部分神经支配心房,在心室(下壁密集)中分布稀少。副交感神经功能的神经介质是乙酰胆碱。副交感神经兴奋性增强时,冠状动脉收缩,心脏收缩力减弱,心跳减缓。

2 图像的判读

现阶段所有的心肌神经放射性示踪剂主要用于研究心脏神经功能,其中应用最多的是 ^{123}I -间碘苄胍(^{123}I -metaiodobenzylguanidine, ^{123}I -MIBG),它是去甲肾上腺素类似物的假神经递质。早在 20 世纪 70 年代后期, MIBG 就被放射性碘标记,且应用于探测神经鞘瘤、成神经细胞瘤和嗜铬细胞瘤。由于 ^{123}I 发射高能(365 keV) γ 射线以及 β 射线,并有长达 8.02 d 的半衰期,而 ^{123}I 发射能量仅有 159 keV 及半衰期仅为 13.2 h 的 γ 光子,所以现在主要用于心肌神经放射性示踪剂标记的是 ^{123}I 。

^{123}I -MIBG 图像的判读方法很多,利用心肌平

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2011.05.001

基金项目:国家自然科学基金(81060019)

作者单位:010050 呼和浩特,内蒙古医学院附属医院 PET-

CT 中心

通信作者:王雪梅(E-mail: wangxuemei2260@yahoo.com.cn)

面显像勾画心脏和纵隔的 ^{123}I -MIBG 感兴趣区可得到心脏/纵隔比值(heart mediastinal ratio, HMR), HMR 正常值范围为 1.9~2.8, 平均值为 2.2。也可从 SPECT 平面图像中得到另一个定量值: 洗脱率, 它可以反映交感神经传递中儿茶酚胺的循环, 正常对照组的洗脱率为 $9.6\% \pm 8.5\%$ 。

Gill 等^[11]通过对 ^{123}I -MIBG 图像分析研究证实, 正常人心肌间隔和下壁对 ^{123}I -MIBG 的摄取($12\% \sim 18\%$)少于前壁和侧壁, 从而说明心肌局部的自主神经分布是不同的。他们指出, 这些局部摄取的变化是前壁迷走神经张力增高的结果。Estorch 等^[12]的研究显示, 具有窦性心动过缓的运动员, 其心肌前壁对 ^{123}I -MIBG 的摄取低于正常人。

3 临床应用

3.1 评价充血性心力衰竭(congestive heart failure, CHF)患者的神经功能

Ogita 等^[13]应用心肌 ^{123}I -MIBG 显像所计算出的洗脱率对 79 例 CHF 患者进行研究, 左室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF) $<40\%$ 的患者, 洗脱率 $\geq 27\%$, 这些患者 52 月的病死率为 35%, 而那些低洗脱率患者的病死率为 0; 高洗脱率组 CHF 患者的病死率是低洗脱率组患者的 3 倍。此组数据证明, ^{123}I -MIBG 心肌显像所计算出的洗脱率在评价 CHF 预后方面扮演着重要角色。

很多研究结果提示, 低 HMR 进展期心力衰竭患者的预后较差。Merlet 等^[14]对 90 例中重度 CHF 且 LVEF $<45\%$ (平均 22%)的患者进行研究, HMR <1.2 者的 6 个月和 12 个月生存率分别为 60%和 40%, 而高 HMR 患者的 12 个月生存率为 100%, HMR 比 LVEF 能更好的预测病死率。

3.2 指导心力衰竭患者的治疗

^{123}I -MIBG 显像可以监测心力衰竭患者不同治疗方法的效果。Merlet 等^[15]对 18 例患有先天性肥厚性心肌病的患者研究显示, 应用 β 受体阻断剂可改善 ^{123}I -MIBG 的摄取: 应用 6 个月的美托洛尔后, 随着纽约心脏病协会心功能分级的增高以及 LVEF 的增加, ^{123}I -MIBG 的摄取会增高; 在随后的多中心双盲法研究中, 设立对照组与治疗组, 64 例 CHF 患者经过 6 个月的美托洛尔或安慰剂治疗, 美托洛尔治疗组在心肌平面显像中 ^{123}I -MIBG 摄取增高、心腔缩小、LVEF 升高, 而安慰剂治疗组则

恰好相反。应用影响肾素-血管紧张素系统的药物同样会提高心肌对 ^{123}I -MIBG 的摄取。Takeishi 等^[16]研究发现, 19 例纽约心脏病协会心功能分级为 II-III 级的患者经过依那普利治疗, HMR 升高, 而 ^{123}I -MIBG 的洗脱率降低。

自主神经功能显像不仅可以用来筛选适合应用 β 受体阻滞剂治疗的 CHF 患者, 也可估测联合用药治疗的受益和风险比, 例如应用 ^{123}I -MIBG 显像指导联合应用美托洛尔和血管紧张素转化酶抑制剂进行治疗。Matsui 等^[17]对 85 例 LVEF $<45\%$ 的扩张性心肌病患者研究显示, 经脑利钠肽优化治疗 6 个月后, 其中 19 例患者的临床症状及血清学检查等均无变化, 但 HMR 逐渐降低; HMR 具有较好的对心脏性猝死的预测价值, 灵敏度为 92%, 特异度为 73%; 治疗后 HMR 逐渐降低的患者需更换药物交替治疗, 这样会提高患者的预后。

很多 CHF 患者当病情恶化时, 心脏移植是其惟一的选择, 但这种方法受多种因素的影响, 最主要的就是供体心脏的活性。尽管测定运动高峰时氧的需求量是评价供体心脏的关键指标, 但 Merlet 等^[18]对 112 例患有先天性扩张性心肌病的患者研究发现, HMR 比运动高峰时氧的需求量对先天性扩张性心肌病导致 CHF 的危险度分层有更好的评价价值, 所以 ^{123}I -MIBG 显像是理想的评价供体心脏的方法。

3.3 评价除颤器植入术

CHF 患者心肌收缩功能衰竭是其致死的原因, 50%的患者是突发性死亡, 普遍表现为室性心动过速或室颤。为降低 CHF 患者心脏性猝死率、提高生存率, 最好的治疗方法就是进行植入式复律除颤器(implantable cardioverter-defibrillator, ICD)的手术^[9]。对心力衰竭导致突发性心脏事件的研究表明, 纽约心脏病协会心功能分级为 II-III 级并 LVEF $<35\%$ 的心力衰竭患者应用 ICD 后, 5 年病死率可降至 23%^[10]。

Arora 等^[11]对 17 例已经植入 ICD 的进展期 CHF 患者进行 ^{123}I -MIBG 心肌显像发现, 晚期 HMR 的降低与 ICD 发射频率的增高有关, 其阳性预测值为 71%, 阴性预测值为 17%; 而用 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -sestamibi 心肌自主神经功能显像, 3 例同时具有高 HMR 以及 ICD 频繁发射的病例, 其 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -sestamibi 心肌自主神经功能显像显示无功能, 而 4 例同时具有低

HMR 以及低 ICD 发射频率的病例用 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -sestamibi 心肌自主神经功能显像却显示有功能, 有 ICD 装置的患者在 SPECT 图像上存在 ^{123}I -MIBG 与 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -sestamibi 不匹配的情况。

Nagahara 等^[12]对 54 例准备装 ICD 的患者进行研究显示, 病死率与延迟期的 HMR (危险率 = 0.141, $P < 0.01$) 及 LVEF 等有关, 将 HMR 与 LVEF 值和脑利钠肽结合分析, 可以较好的预测患者的预后。Kioka 等^[13]报道, ^{123}I -MIBG 高洗脱率与病死率有一定的关联性。

总之, 对于 CHF 患者来说, ^{123}I -MIBG 心肌神经显像比普遍公认的标准 LVEF 值能更好的预测病死率; 阴性预测值可以有效的筛选出低风险患者, 例如具有高 LVEF 值的 CHF 患者。

3.4 在缺血性心肌病中的应用

冠心病引起的心肌缺血或心肌梗死从几个方面影响心肌自主神经功能: 首先, 缺血心肌局部通过机械敏感和化学敏感感觉神经反射刺激心脏发生了反馈反应, 例如下后壁的局部心肌缺血或梗死最终会导致窦性心动过缓或低血压, 而前壁局部心肌缺血或梗死最终会导致窦性心动过速或高血压; 其次, 在心肌局部缺血或梗死区产生的效应通过交感神经主干在穿透心肌前沿着冠状动脉传导: 心肌局部缺血或梗死破坏交感神经的传导, 累及远端心肌或损伤位置的心肌, 结果以上部位灌注虽然正常, 但神经超敏感而极易发生心律失常^[14]。Dae 等^[15]在对犬缺血模型的 ^{123}I -MIBG 显像研究中发现, 心肌摄取 ^{123}I -MIBG 缺损取决于哪种类型的梗死, 透壁性心肌梗死导致远端的 ^{123}I -MIBG 摄取缺损, 非透壁性梗死的 ^{123}I -MIBG 摄取缺损集中在局部的梗死区域, 可能穿透的是心内膜下的交感神经纤维而不是心外膜下的神经干。

在研究急性心肌梗死时发现, 交感神经去神经区域比心肌坏死的区域大, 虽然这些区域有心肌存活, 但均有发生室性心律失常的倾向。Simões 等^[16]对 67 例发生心肌梗死后 14 d 的患者分别行 ^{123}I -MIBG 和 ^{201}Tl 显像后发现: 90% 患者的 ^{123}I -MIBG 和 ^{201}Tl 显像不匹配, 心电图上都出现有效不应期的延长及去极化的延迟, 而这二种情况均提示会发生心律失常; 但经过 3~4 年的随访, 由于事件的发生率太低 (2 例死亡), 对预后判断无任何意义。为研究心肌梗死后期心肌的病理生理变化, Sasano 等^[17]

对 6 只施行了冠状动脉左前降支心肌梗死的猪进行研究发现, 心肌电位的降低或持续增加可诱发心动过速区域存在更大范围的灌注与神经分布的不匹配, 推测 ^{123}I -MIBG 心肌神经显像可以帮助鉴别心肌梗死后期的患者是否存在严重的室性心律失常, 并评价是否需要 ICD 的治疗。

^{123}I -MIBG 心肌神经显像的另一项优势是帮助冠状动脉疾病的患者判断心肌急性缺血损伤后的神经功能恢复状况。Tomoda 等^[18]的研究发现, 在心肌缺血发作后 (24 ± 12) d, 8 例没有 Q 波的心肌梗死患者中, ^{123}I -MIBG 显像全部缺损, 而 ^{201}Tl 显像仅 4 例患者为灌注缺损; 尽管 12 例不稳定性心绞痛患者中无一例有 ^{201}Tl 的缺损, 但其中 7 例有 ^{123}I -MIBG 的缺损。

^{123}I -MIBG 显像的另一个应用就是检测出亚临床期的冠状动脉疾病。Simula 等^[19]做了一个有趣的研究: 给予有冠状动脉疾病家族史的 30 名志愿者行冠状动脉造影以及静息 ^{123}I -MIBG 显像, 结果有 3 名受检者冠状动脉狭窄程度 $< 30\%$, 6 名受检者狭窄程度 $> 50\%$; 冠状动脉左前降支狭窄的程度 (范围在 $0\% \sim 54\%$) 与 ^{123}I -MIBG 的延迟摄取呈正相关, 与 ^{123}I -MIBG 的洗脱率呈负相关, 尤其是在前间隔, 与冠状动脉疾病早期交感神经活性增强是一致的。

综上所述, 局部心肌缺血在交感神经去神经方面产生的影响可以通过放射性示踪剂显像来反映, 显像结果可以为临床有效治疗提供更好的指导。

3.5 在糖尿病患者中的应用

自主神经病变是糖尿病常见的并发症, 现今它的发生率为 $20\% \sim 35\%$, 并且与患者的预后直接的关系。糖尿病自主神经病变常规由临床症状及心电图诊断, 而放射性示踪剂显像更容易在出现临床症状之前发现神经功能的异常。Hattori 等^[20]发现, 31 例 II 型糖尿病患者中, 60% 患者的 ^{123}I -MIBG SPECT 呈放射性分布缺损, 且没有出现临床神经病变的患者同样有异常; 有轻微或严重临床神经病变者的病变最早出现在前壁, 随后蔓延至邻近的节段, 在延迟图像上 HMR 是降低的。

Nagamachi^[21]对 144 例无器质性心脏病的 II 型糖尿病患者随访 7.2 年后证实, 利用心肌自主神经功能 ^{123}I -MIBG 显像可以鉴别糖尿病患者的危险性。综合分析表明, 延迟图像中 HMR 的减低可以单独预测心脏事件的发生。

3.6 在早期心律失常患者中的应用

尽管致命性或可能致命性的心律失常多是器质性心脏疾病的结果,但是有5%的心律失常患者早期都会有电生理的异常,心电图表现有时明显有时不明显。Gill等^[2]发现,15例有心动过速的患者中,有7例患者心肌摄取¹²³I-MIBG不对称,并且他们具有所谓“临床正常”的心脏,尤其是在运动诱发的心动过速的患者中居多。

在心律失常早期,心脏对示踪剂的摄取就会出现异常,Brugada综合征对示踪剂的摄取尤其特别,¹²³I-MIBG缺损似乎只局限在前壁和前间隔,这提示在以上局部区域的副交感神经支配占主导地位,且与这些患者的心律失常有关。

3.7 监测药物对心脏的损害

心肌神经损伤后会增加交感神经的敏感性,¹²³I-MIBG显像可以评价心肌对治疗药物的敏感性。Wakasugi等^[23]研究发现,对心肌病鼠模型给予多柔比星后,心肌对于¹²⁵I-MIBG的摄取会降低,而且表现在LVEF降低之前。Carrió等^[24]研究发现,多柔比星累积剂量达到240~300 mg/m²时,心肌摄取¹²³I-MIBG的异常与¹¹¹In-抗肌球蛋白抗体相关;但是此项研究发现,¹²³I-MIBG摄取的降低与左室功能异常的严重程度无明确的关系。

¹²³I-MIBG显像在监测化疗药物治疗后心脏的情况很有潜力,但仍需要更多的调查研究来证实,特别是确定如何使目前的监测技术得到补充。

参 考 文 献

- [1] Gill JS, Hunter GJ, Gane G, et al. Heterogeneity of the human myocardial sympathetic innervation: in vivo demonstration by iodine 123-labeled meta-iodobenzylguanidine scintigraphy. *Am Heart J*, 1993, 126(2): 390-398.
- [2] Estorch M, Serra-Grima R, Flotats A, et al. Myocardial sympathetic innervation in the athlete's sinus bradycardia: is there selective inferior myocardial wall denervation?. *J Nucl Cardiol*, 2000, 7(4): 354-358.
- [3] Ogita H, Shimonagata T, Fukunami M, et al. Prognostic significance of cardiac ¹²³I metaiodobenzylguanidine imaging for mortality and morbidity in patients with chronic heart failure: a prospective study. *Heart*, 2001, 86(6): 656-660.
- [4] Merlet P, Valette H, Dubois-Randé JL, et al. Prognostic value of cardiac metaiodobenzylguanidine imaging in patients with heart failure. *J Nucl Med*, 1992, 33(4): 471-477.
- [5] Merlet P, Pouillart F, Dubois-Randé JL, et al. Sympathetic nerve alterations assessed with ¹²³I-MIBG in the failing human heart. *J Nucl Med*, 1999, 40(2): 224-231.
- [6] Takeishi Y, Atsumi H, Fujiwara S, et al. ACE inhibition reduces cardiac iodine-123-MIBG release in heart failure. *J Nucl Med*, 1997, 38(7): 1085-1089.
- [7] Matsui T, Tsutamoto T, Maeda K, et al. Prognostic value of repeated ¹²³I-metaiodobenzylguanidine imaging in patients with dilated cardiomyopathy with congestive heart failure before and after optimized treatments-comparison with neurohumoral factors. *Circ J*, 2002, 66(6): 537-543.
- [8] Merlet P, Benvenuti C, Moyse D, et al. Prognostic value of MIBG imaging in idiopathic dilated cardiomyopathy. *J Nucl Med*, 1999, 40(6): 917-923.
- [9] Zipes DP, Camm AJ, Borggrefe M, et al. ACC/AHA/ESC 2006 guidelines for management of patients with ventricular arrhythmias and the prevention of sudden cardiac death: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force and the European Society of Cardiology Committee for Practice Guidelines (Writing Committee to Develop Guidelines for Management of Patients With Ventricular Arrhythmias and the Prevention of Sudden Cardiac Death). *J Am Coll Cardiol*, 2006, 48(5): e247-e346.
- [10] Bardy GH, Lee KL, Mark DB, et al. Amiodarone or an implantable defibrillator for congestive heart failure. *N Engl J Med*, 2005, 352(3): 225-237.
- [11] Arora R, Ferrick KJ, Nakata T, et al. I-123 MIBG imaging and heart rate variability analysis to predict the need for an implantable cardioverter defibrillator. *J Nucl Cardiol*, 2003, 10(2): 121-131.
- [12] Nagahara D, Nakata T, Hashimoto A, et al. Predicting the need for an implantable cardioverter defibrillator using cardiac metaiodobenzylguanidine activity together with plasma natriuretic peptide concentration or left ventricular function. *J Nucl Med*, 2008, 49(2): 225-233.
- [13] Kioka H, Yamada T, Mine T, et al. Prediction of sudden death in patients with mild-to-moderate chronic heart failure by using cardiac iodine-123 metaiodobenzylguanidine imaging. *Heart*, 2007, 93(10): 1213-1218.
- [14] Zipes DP. Influence of myocardial ischemia and infarction on autonomic innervation of heart. *Circulation*, 1990, 82(4): 1095-1105.
- [15] Dae MW, Herre JM, O'Connell JW, et al. Scintigraphic assessment of sympathetic innervation after transmural versus nontransmural myocardial infarction. *J Am Coll Cardiol*, 1991, 17(6): 1416-1423.
- [16] Simões MV, Barthel P, Matsunari I, et al. Presence of sympathetically denervated but viable myocardium and its electrophysiologic correlates after early revascularised, acute myocardial infarction. *Eur Heart J*, 2004, 25(7): 551-557.
- [17] Sasano T, Abraham R, Chang KC, et al. Abnormal sympathetic innervation of viable myocardium and the substrate of ventricular tachycardia after myocardial infarction. *J Am Coll Cardiol*, 2008, 51(23): 2266-2275.
- [18] Tomoda H, Yoshioka K, Shiina Y, et al. Regional sympathetic denervation detected by iodine 123 metaiodobenzylguanidine in non-Q-

- wave myocardial infarction and unstable angina. Am Heart J, 1994, 128(3): 452-458.
- [19] Simula S, Vanninen E, Viitanen L, et al. Cardiac adrenergic innervation is affected in asymptomatic subjects with very early stage of coronary disease. J Nucl Med, 2002, 43(1): 1-7.
- [20] Hattori N, Tamaki N, Hayashi T, et al. Regional abnormality of iodine-123-MIBG in diabetic hearts. J Nucl Med, 1996, 37(12): 1985-1990.
- [21] Nagamachi S, Fujita S, Nishii R, et al. Prognostic value of cardiac I-123 metaiodobenzylguanidine imaging in patients with non-insulin-dependent diabetes mellitus. J Nucl Cardiol, 2006, 13(1): 34-42.
- [22] Gill JS, Hunter GJ, Gane J, et al. Asymmetry of cardiac [123 I] metaiodobenzylguanidine scans in patients with ventricular tachycardia and a "clinically normal" heart. Br Heart J, 1993, 69(1): 6-13.
- [23] Wakasugi S, Fischman AJ, Babich JW, et al. Metaiodobenzylguanidine: evaluation of its potential as a tracer for monitoring doxorubicin cardiomyopathy. J Nucl Med, 1993, 34(8): 1283-1286.
- [24] Carrió I, Estorch M, Berná L, et al. Indium-111-antimyosin and iodine-123-MIBG studies in early assessment of doxorubicin cardiotoxicity. J Nucl Med, 1995, 36(11): 2044-2049.

(收稿日期: 2011-05-09)

PET-MRI 和多模式肿瘤显像

汪太松 赵晋华 宋建华

【摘要】多模式融合显像已成为临床应用的发展趋势,特别是 PET-CT 的出现,为临床影像引入了新的观点。事实证明, PET-CT 无论在临床诊断还是实验研究中都极具价值,但 PET-CT 也存在一些不足,主要表现为 CT 显示软组织的对比度低及对患者会产生一定的辐射剂量,而 MRI 可以克服 CT 的这些缺点,其拥有完美的软组织对比度,时间、空间分辨率高,没有辐射危害, MRI 本身还可以提供功能信息,因此相信, PET-MRI 会在一定程度上替代 PET-CT 成为多模式肿瘤显像新的发展方向。

【关键词】肿瘤;磁共振成像;正电子发射断层显像术;体层摄影术, X 线计算机;图像融合

PET-MRI and multimodal cancer imaging WANG Tai-song, ZHAO Jin-hua, SONG Jian-hua. Department of Nuclear Medicine, the First People's Hospital, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200080, China

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

【Abstract】Multimodality imaging, specifically PET-CT, brought a new perspective into the fields of clinical imaging. Clinical cases have shown that PET-CT has great value in clinical diagnosis and experimental research. But PET-CT still bears some limitations. A major drawback is that CT provides only limited soft tissue contrast and exposes the patient to a significant radiation dose. MRI overcome these limitations, it has excellent soft tissue contrast, high temporal and spatial resolution and no radiation damage. Additionally, since MRI provides also functional information, PET-MRI will show a new direction of multimodality imaging in the future.

【Key words】Neoplasms; Magnetic resonance imaging; Positron-emission tomography; Tomography, X-ray computed; Imaging fusion

在 PET-CT 引领下, PET-MRI 的出现成为高敏感性和特异性的生物医学影像技术领域的又一个里程碑。尽管 PET-CT 在临床实践中已经得到了广泛

应用,但与 PET-MRI 相比,存在两个缺点:① PET-CT 没有实现真正的同步数据采集,患者的医疗照射剂量较高,而 PET-MRI 能够实现同步数据采集,同时免除了 CT 部分的辐射剂量;② MRI 可以得到高分辨率 and 对比度的软组织图像,以及进行波谱分析和功能显像,而 CT 不行。所以, PET-