

多模态影像评估左室逆重构的研究进展

方淇民, 张鑫, 熊亮霞, 阙傲, 杨培, 龚良庚

【摘要】 左心室逆重构反映了心室重构患者治疗效果及预后情况, 对于干预患者病程进展具有重要意义。影像技术仍是评价心脏结构及功能的首选方法, 不同影像技术在评估左心室逆重构中各具优缺点。多模态影像克服了单一成像技术的局限性, 整合不同模态成像信息, 能够更加全面地评估心脏形态及功能的改变, 为及时评估和精准预测左心室逆重构的发生提供更好的方法。现就多模态影像在评估左心室逆重构中的作用展开综述, 旨在为临床诊疗提供系统全面的影像循证依据。

【关键词】 左心室; 逆重构; 心力衰竭; 磁共振成像; 超声心动图; 多模态成像

【中图分类号】 R445.2; R541.6 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2024)04-0558-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.04.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



心脏重构(cardiac remodeling)是指左心室形态及功能随着心力衰竭(heart failure, HF)的发展而逐渐恶化^[1]。根据中国最新的心血管病研究指南, 在 35 岁以上人群中, HF 的患病率为 1.3%, HF 住院患者的病死率为 4.1%^[2]。近年来, 随着医疗水平的提高, HF 患者的死亡率明显减低, 同时伴有左心室形态及功能的恢复, 称为左心室逆重构(left ventricular reverse remodeling, LVRR)。LVRR 与心衰患者良好预后密切相关, 成为当今治疗的新目标^[3]。因此, 基于多模态影像综合评估甚至预测 LVRR 具有重要意义, 现以此为中心展开综合论述。

左心室逆重构的定义及临床意义

LVRR 是指发生心室重构的心脏在经过临床药物、机械或手术治疗后, 心功能和心室结构部分或完全恢复正常^[4]。当前对 LVRR 的诊断尚未标准化。以往的研究指出, 美国纽约心脏病协会(New York Heart Association, NYHA)分级改善、B 型钠尿肽前体(pro-brain natriuretic peptide, pro-BNP)降低和可溶性生长刺激表达基因 2(soluble growth stimulation expressed gene 2, sST2) < 48 ng/mL 对 LVRR 的发生具有提示意义, 但均缺乏特异性。在最新的指南中, 研究人员对近几年的 LVRR 诊断标准进行回顾分析, 发现当前对 LVRR 的诊断标准中均包括左心室内径或左心室体积的变化^[5]。其中 Kubanek 等^[6]对 LVRR 的诊断标准为, 与基线数据比较, 左心室舒张

末期内径(left ventricular end-diastolic dimension, LVEDd)减少率 $\geq 10\%$, 同时左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)增加率 $> 10\%$ 或 LVEF $> 35\%$ 。

临床上, LVRR 常用于心脏疾病疗效和预后评估。以往的多项研究表明, 合并有左束支传导阻滞的心衰患者, 经心脏再同步治疗(cardiac resynchronization therapy, CRT)后发生 LVRR 者死亡率明显减低^[3,7]。在心梗患者的预后观察中, 6 个月内发生 LVRR 的患者死亡率明显减低, 并且发生心衰再入院、心脏骤停等复合终点事件的概率要明显低于未发生 LVRR 的患者^[8]。因此, 通过影像学检查精确预测及评估 LVRR 的发生, 对于患者治疗方案的选择及风险分层具有十分重要的作用。

LVRR 的病理生理改变

LVRR 是心室重构的逆向过程, 其病理生理改变主要包括左心室形态结构及功能的转变。

LVRR 左心室形态结构的改变包含宏观及微观变化: ①心室形态改变, 心室体积减小为 LVRR 的主要特征, 同时心室形态更趋向于圆锥形^[9]; ②心肌细胞形态改变, 心肌细胞在异常胚胎基因程序逆转、细胞骨架基因的恢复、 β -肾上腺素能信号基因及兴奋-收缩偶联基因的上调等改变下, 细胞体积变小、收缩力增加^[9,10]; ③细胞外基质改变, 心肌细胞间纤维成分可通过药物等治疗手段部分逆转恢复为原本的胶原蛋白, 减少交联, 从而增加心肌弹性、降低左心室质量^[10]。

LVRR 左心室心功能的改变建立在心肌细胞形态结构改善的基础上, 表现为射血分数增加, 血流动力学趋于正常^[9]。此外, LVRR 发生过程中心肌微血管数量明显增加, 提示心肌微循环也同步改善^[10]。

作者单位: 330000 江西南昌, 南昌大学第二附属医院影像中心

作者简介: 方淇民(1998—), 男, 江西彭泽人, 硕士研究生, 主要从事心血管系统磁共振成像研究工作。

通讯作者: 龚良庚, E-mail: gong111999@126.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(82260342, 81860316); 江西省教育厅重点项目(GJJ210113)

多模态影像在评估 LVRR 中的作用

1. 超声心动图

心脏形态的评估: 超声心动图基于超声反射对心脏结构进行显像, 具有快捷、灵活等优势, 常用于心脏病患者的随访。在一项探究基线左室容积与经 CRT 治疗后 LVRR 发生率关系的研究中, Galloo 等^[11]发现 LVRR 的发生率随基线左室容积的增加而增加, 在达到峰值后随左室容积的增加而降低。因此, 我们可早期通过超声获取左室容积, 从而判断 LVRR 的发生概率, 指导后续治疗。

心室功能的评估: 除了对心脏形态的评估, 超声心动图还可通过 Simpson 法及斑点追踪成像 (speckle-tracking imaging, STI) 技术获取 LVEF 和相关应力参数。有研究表明, 发生 LVRR 的心衰患者 LVEF 得到明显改善 (基线 LVEF = 26% vs. CRT 治疗后 LVEF 为 39%), 而且在 LVEF 增加率 > 10% 的人群中无事件生存率 (event free survival, EFS) 要明显高于 LVEF 增加率 < 10% 的人群^[12]。心肌应变可直接定量评估心肌 (节段或整体) 的收缩能力, 弥补了 LVEF 无法识别节段心肌异常的局限性, 在心衰预防、早期检测和预后预测等方面具有重要价值^[13]。一项针对功能性二尖瓣关闭不全 (function mitral regurgitation, FMR) 患者预后方面的研究中, 发现应变参数整体有效功 (global constructed work, GCW) 及整体纵向应变 (global longitudinal strain, GLS) 是经导管二尖瓣钳夹术 (mitra clip) 治疗后发生 LVRR 的预测因子, 并且可提示预后改善^[14]。四维斑点追踪成像 (four-dimensional-STI, 4D-STI) 是超声医学领域最新技术进展, 相比于二维斑点追踪, 4D-STI 可利用心肌内回声斑点的四维轨迹来计算局部区域的心肌应变^[15]。在以往的研究中, 尚未有直接证据证明 4D-STI 技术在评估 LVRR 中的作用。但是在心梗患者再灌注治疗的预后研究中, 预后不良患者的区域应变 (area strain, AS) 及三个方向整体应力的绝对值均低于预后良好患者, 且基于 4D-STI 建立的风险评分模型优于传统心肌梗死溶栓治疗 (the thrombolysis in myocardial infarction, TIMI) 评分系统^[15]。而另一项动物实验则证明了基于 4D-STI 的 AS 可早期提示小鼠代谢性心肌病的进展^[16]。

超声心动图的最大优势在于简便快捷且对于患者配合度的要求低, 是评估心室形态及心功能的首选检查。但其对于检查医师的检查手法和技术的要求较高, 且不适用于部分肥胖或合并肺部疾病的患者。

2. 心脏 MRI

心脏 MRI 具有多参数、多序列成像的特点, 可同

时对心脏的解剖结构、运动功能、心肌血流灌注及组织特征等进行“一站式”评估, 目前心脏 MRI 已成为无创性评估心脏结构和功能的金标准。

心脏形态的评估: 在形态学参数方面, Rank 等^[17]将行主动脉瓣置换术 (aortic valve replacement, AVR) 的主动脉瓣狭窄 (aortic stenosis, AS) 和主动脉瓣关闭不全 (aortic insufficiency, AI) 患者的 1、5、10 年的影像及临床参数进行对照研究, 结果显示术后左心室舒张末期容积指数 (left ventricular end-diastolic volume index, LVEDVI) 值和左心室收缩末期容积指数 (left ventricular end-systolic volume index, LVES-VI) 值较术前均明显减小, 提示 AVR 手术是诱导 AS 及 AI 患者发生 LVRR 的有效措施, 同时反映了心脏 MRI 在评估术后心脏结构恢复中的价值。

心肌应变分析: 在应变参数方面, 基于心脏 MRI 的组织追踪技术 (feature tracking, FT) 通过追踪心肌组织每个体素的运动轨迹来评估心肌形变, 相比 STI 摆脱了回声的干扰, 是分析心肌形变的金标准^[18,19]。在行经皮冠状动脉介入治疗的心梗患者的预后研究中, Cui 等^[20]发现术后 LVRR 者心肌梗死节段周向应变 (circumferential strains, CS) 较基线升高, 且明显高于未发生 LVRR 者, 提示 FT 在 LVRR 机制探究及预测中的重要作用。

心肌纤维化的评估: 心肌纤维化是心肌细胞被纤维细胞及胶原蛋白替代的过程, 心肌纤维化范围越大, 发生 LVRR 所需要的时间就越久, 发生终点事件的概率就越大^[21]。心脏 MRI 延迟增强 (late gadolinium enhancement, LGE) 序列利用钆对比剂在不同组织中廓清速度的不同对心肌瘢痕组织进行成像。一项 meta 分析结果表明基线 LGE 阳性患者的心血管死亡率、室性心律失常事件和心脏再住院率明显增高, 而基线无 LGE 是发生 LVRR 的独立预测因子^[22]。此外, 在 3 组 (无 LGE、肌壁间 LGE 和多灶性 LGE) 非缺血性心肌病患者的预后观察中, 多灶性 LGE 组的 LVRR 发生率较低, 提示预后不佳^[21]。

细胞外基质成像: 基于对比剂注射前、后心肌纵向弛豫时间定量成像 (T_1 -mapping) 及血细胞比容可获取细胞外容积 (extracellular volume, ECV) 参数, 其可较准确地反映胞外基质内胶原增生程度^[23,24]。心室重构患者由于细胞外胶原增生, ECV 往往高于健康人群。在一项对行 AVR 的 AS 患者的预后观察中, 发现 LVRR 患者 LGE 无明显变化, 但 ECV 减少, 提示在 LVRR 人群中细胞外弥漫性纤维化得到了逆转^[25]。同时, Chen 等^[26]也发现经 CRT 治疗后发生 LVRR 的患者中 ECV 分数明显低于未发生 LVRR 者 (0.30 vs. 0.34, $P = 0.043$)。此外, ECV 还可预测扩张

型心肌病(dilated cardiomyopathy, DCM)患者的长期预后。有研究表明,基线 $ECV_{mean} > 25.9\%$ 的 DCM 患者生存时间明显缩短且更易发生终点事件^[24]。

心肌微观结构的评估:除上述序列外,DTI 序列通过水分子扩散的各向异性对心肌微观结构进行成像,其测量的主要参数包括平均扩散系数(mean diffusivity, MD)和各向异性分数(fractional anisotropy, FA)。有研究表明,AS 患者在行 AVR 术后心肌的 MD 值(术前 $1.56 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ vs. 术后 $1.52 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$, $P=0.014$)和 FA 值(术前 0.28 vs. 术后 0.31, $P=0.011$)都趋向正常,提示 DTI 相关参数可用于预测术后心肌恢复情况,同时表明 DTI 在预测 LVRR 中具有潜在价值^[27]。

血流动力学参数的测量:四维血流(four-dimensional flow, 4D flow)心脏 MRI 采用 3D 梯度回波序列结合 3 个方向的流速编码,可定量评估心动周期内心腔及大血管的血流动力学改变^[28]。目前关于 4D flow 在 LVRR 中的应用较少,但其在预测心梗患者心室重构中发挥重要价值。Das 等^[29]研究发现心梗再灌注治疗后发生左室不良重构患者直接血流比例显著降低,连续 2 个心动周期后残余容积比例显著增加,且发生不良终点事件的风险较高。4D flow 技术在评估心室重构中的价值仍需要进一步探索。

心脏 MRI 可对心脏进行客观全面系统地评估,是帮助医师直观了解心脏信息的最佳检查技术。但同时其也具有扫描时间过长、需要患者配合以及对患者心率有一定要求等局限性,使其无法成为患者随访的首选检查方法^[30]。

3. SPECT 及 PET

心肌灌注:目前 SPECT 扫描为临床中最常用的心肌灌注检查方式。在一项基于 SPECT 对 HF 患者的预后观察中,Patel 等^[31]发现经 CRT 治疗各心肌节段灌注水平发生不同程度的改变,其中发生 LVRR 者室间隔心肌灌注明显上升,这提示室间隔心肌灌注可作为评估 LVRR 发生的指标。此外,Lu 等^[32]发现,基线冬眠心肌(hibernating myocardium, HM)占心肌总灌注受损范围(total perfusion defect, TPD)的比例(HM/TPD)是心衰患者冠状动脉旁路移植术后发生 LVRR 的独立预测因子,且 $HM/TPD \geq 38.3\%$ 可较准确地预测 LVRR 的发生。

心肌代谢:PET 利用 ^{18}F 标记的氟脱氧葡萄糖(^{18}F -fluorodeoxyglucose, ^{18}F -FDG)对心肌进行代谢显像,是核素评估心肌活力的“金标准”^[33]。有研究表明,发生 LVRR 者的心肌葡萄糖氧化供能较未发生者增多^[9]。Degtiarova 等^[34]基于 PET 对 CRT 治疗前、后心肌代谢情况进行对比分析,发现发生

LVRR 者的室间隔及侧壁的平均 FDG 摄取率的比值(septal to lateral wall ratio, SLR)较未发生 LVRR 者明显减小(0.6 ± 0.2 vs. 0.8 ± 0.3),是 LVRR 的独立预测因子。

基于 SPECT 的心肌灌注成像及 ^{18}F -FDG PET-CT 的心肌代谢显像可从分子水平特异性地反映心脏血流、功能和心肌代谢情况,可早期准确识别心肌缺血、微循环及代谢障碍,两者结合有助于多角度的探索 LVRR 的发生机制及准确预测^[35]。但由于 SPECT 检查具有放射性,一般不作为首选检查,且该检查不适用于高危不稳定性心绞痛、急性心肌梗死($<4 \text{ d}$)以及失代偿性或未充分控制的充血性心力衰竭患者。 ^{18}F -FDG PET-CT 心肌代谢显像受血糖调节影响,需要禁食来调整血糖,因此在糖尿病患者中,图像质量往往会受到影响。

4. CT

目前尚未有明确证据证实 CT 在预测 LVRR 方面的作用。但有研究指出基于心脏 CT 的心外膜脂肪组织(epicardial adipose tissue, EAT)体积与 LVRR 的发生具有相关性。EAT 位于心肌表面和心包脏层之间,具有保护心肌的作用,同时可分泌脂联素来减少血管氧化应激反应,从而减少冠状动脉的损伤^[36]。基于心脏 CT 的心外膜脂肪半自动定量技术可对 EAT 体积进行定量评估。在对非缺血性心肌病患者的预后观察中,Yamaguchi 等^[37]发现 LVRR 组的 EAT 体积要明显高于非 LVRR 组(135.2 cm^3 vs. 88.9 cm^3 , $P=0.040$),同时多因素 logistic 回归分析结果显示 EAT 是 LVRR 的独立预测因子。

5. 机器学习及影像组学

多模态影像评估常采用机器学习及影像组学方法,将形态学、功能学及组织学等多种参数作为特征变量,通过筛选建立预测模型。Liu 等^[38]通过机器学习方法,基于 XGBoost、随机森林和 logistic 回归三大模型构建方法,综合人口学特征、病程、生化数据、超声心动图和药物治疗等特征建立 LVRR 的预测模型。结果显示,基于右室直径及左房直径等 6 个特征建立的预测模型中,XGBoost 性能最高($AUC=0.97$)。Shun 等^[39]则基于 T_1 -mapping 图像获取 14 个 ECV 的纹理特征,然后分别采用 5 种机器学习和交叉验证等方式建立 LVRR 预测模型,结果显示基于支持向量机算法建立的模型具有较好的预测性能($AUC=0.85$),且要高于预测因素延迟强化率的预测性能($AUC=0.78$)。此外,基于临床、LGE 及注射对比剂前 T_1 -mapping 影像组学数据建立的综合模型在预测 LVRR 的性能方面也要高于基于临床、LGE 建立的预测模型($AUC: 0.811$ vs. 0.716),这提示影像组学显著提高了 LVRR

的预测效能^[40]。

结 语

当前,对于 LVRR 的影像评估还存在不少局限性,如缺乏标准化的检测方法、T₁-mapping 检测仅限于单层心肌、研究队列的单一化以及对于高危患者的检测存在困难等。

随着治疗技术及手段的进步, LVRR 的发生率在不断提高,对于 LVRR 的检出也应该更加精准、更加及时。多模态影像评估整合多种影像参数,摆脱单一影像技术的局限性,在一定程度上提高了 LVRR 的预测性能。但随着影像技术的更新,四维超声应变、4D Flow 等一批新方法和新技术的应用逐渐增多,评价 LVRR 的方式将会趋于多元化。因此,尚需要整合更多参数,通过大数据制订统一的定量标准,为患者的预后及治疗提供更多的循证依据。

参考文献:

- [1] González A, Richards AM, De boer RA, et al. Cardiac remodelling-Part 1: From cells and tissues to circulating biomarkers. A review from the Study Group on Biomarkers of the Heart Failure Association of the European Society of Cardiology [J]. *Eur J Heart Fail*, 2022, 24(6): 927-943.
- [2] 中国心血管健康与疾病报告 2021 概要 [J]. *中国循环杂志*, 2022, 37(6): 553-578.
- [3] Naqvi SY, Jawaid A, Vermilye K, et al. Left ventricular reverse remodeling in cardiac resynchronization therapy and long-term outcomes [J]. *JACC Clin Electrophysiol*, 2019, 5(9): 1001-1010.
- [4] 杨梅, 何荣梅, 富路. 心力衰竭患者左室逆重构的临床研究进展 [J]. *临床与病理杂志*, 2021, 41(2): 479-483.
- [5] Aimo A, Vergaro G, González A, et al. Cardiac remodelling-Part 2: Clinical, imaging and laboratory findings. A review from the Study Group on Biomarkers of the Heart Failure Association of the European Society of Cardiology [J]. *Eur J Heart Fail*, 2022, 24(6): 944-958.
- [6] Kubanek M, Sramko M, Maluskova J, et al. Novel predictors of left ventricular reverse remodeling in individuals with recent-onset dilated cardiomyopathy [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2013, 61(1): 54-63.
- [7] Gold MR, Rickard J, Daubert JC, et al. Redefining the classifications of response to cardiac resynchronization therapy: results from the REVERSE study [J]. *JACC Clin Electrophysiol*, 2021, 7(7): 871-880.
- [8] Bulluck H, Carberry J, Carrick D, et al. Redefining adverse and reverse left ventricular remodeling by cardiovascular magnetic resonance following ST-segment-elevation myocardial infarction and their implications on long-term prognosis [J/OL]. *Circulation Cardiovascular Imaging*, 2020, 13(7): e009937 [2020 Jul 21]. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.119.009937.
- [9] Kim GH, Uriel N, Burkhoff D. Reverse remodelling and myocardial recovery in heart failure [J]. *Nat Rev Cardiol*, 2018, 15(2): 83-96.
- [10] Burkhoff D, Topkara VK, Sayer G, et al. Reverse remodeling with left ventricular assist devices [J]. *Circ Res*, 2021, 128(10): 1594-1612.
- [11] Galloo X, Stassen J, Hirasawa K, et al. Impact of baseline left ventricular volume on left ventricular reverse remodeling after cardiac resynchronization therapy [J]. *Heart Rhythm*, 2022, 19(6): 927-936.
- [12] Menet A, Guyomar Y, Ennezat PV, et al. Prognostic value of left ventricular reverse remodeling and performance improvement after cardiac resynchronization therapy: a prospective study [J/OL]. *Int J Cardiol*, 2016, 204: 6-11 [2015 Nov 18]. DOI: 10.1016/j.ijcard.2015.11.091.
- [13] 林静茹, 吴伟春, 王浩. 超声心肌应变在射血分数保留型心力衰竭中的应用进展 [J]. *中华超声影像学杂志*, 2021, 30(12): 1096-1099.
- [14] Papadopolulos AK, Ikonomidis I, Chrissoheris M, et al. Mitra-clip and left ventricular reverse remodelling: a strain imaging study [J]. *ESC Heart Fail*, 2020, 7(4): 1409-1418.
- [15] Wang Y, Xu R, Yin X, et al. Comparison of the predictive value of four-dimensional speckle tracking imaging risk classification and the TIMI system after STEMI reperfusion therapy [J]. *Exp Ther Med*, 2018, 16(5): 4129-4135.
- [16] Damen FW, Salvas JP, Pereyra AS, et al. Improving characterization of hypertrophy-induced murine cardiac dysfunction using four-dimensional ultrasound-derived strain mapping [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2021, 321(1): 197-207.
- [17] Rank N, Stoiber L, Nasser M, et al. Assessment of 10-year left-ventricular-remodeling by CMR in patients following aortic valve replacement [J/OL]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: e645693 [2021 Mar 22]. DOI: 10.3389/fcvm.2021.645693.
- [18] Kadappu KK, Thomas L. Tissue doppler imaging in echocardiography: value and limitations [J]. *Heart Lung Circ*, 2015, 24(3): 224-233.
- [19] 李舒曼, 程敬亮, 张勇, 等. 磁共振心肌组织追踪技术定量评估扩张型心肌病左心室心肌应变力的价值 [J]. *放射学实践*, 2020, 35(11): 1429-1433.
- [20] Cui J, Zhao Y, Qian G, et al. Cardiac magnetic resonance for the early prediction of reverse left ventricular remodeling in patients with ST-segment elevation myocardial infarction [J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(12): 8501-8512.
- [21] Ota S, Orii M, Nishiguchi T, et al. Implications of multiple late gadolinium enhancement lesions on the frequency of left ventricular reverse remodeling and prognosis in patients with non-ischemic cardiomyopathy [J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2021, 23(1): e32 [2021 Mar 25]. DOI: 10.1186/s12968-021-00734-3.
- [22] Becker MAJ, Cornel JH, van de Ven PM, et al. The prognostic value of late gadolinium-enhanced cardiac magnetic resonance imaging in nonischemic dilated cardiomyopathy: a review and meta-analysis [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(9): 1274-1284.
- [23] Kolentinis M, Carerj LM, Vidalakis E, et al. Determination of scar area using native and post-contrast T1 mapping: agreement with late gadolinium enhancement [J/OL]. *Eur J Radiol*, 2022, 150: e110242 [2022 Mar 9]. DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110242.
- [24] Li S, Zhou D, Sirajuddin A, et al. T₁-mapping and extracellular

- volume fraction in dilated cardiomyopathy: a prognosis study[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2022, 15(4): 578-590.
- [25] Treibel TA, Kozor R, Schofield R, et al. Reverse myocardial remodeling following valve replacement in patients with aortic stenosis[J]. J Am Coll Cardiol, 2018, 71(8): 860-871.
- [26] Chen Z, Sohal M, Sammut E, et al. Focal but not diffuse myocardial fibrosis burden quantification using cardiac magnetic resonance imaging predicts left ventricular reverse remodeling following cardiac resynchronization therapy[J]. J Cardiovasc Electrophysiol, 2016, 27(2): 203-209.
- [27] Gotschy A, von Deuster C, Weber L, et al. CMR diffusion tensor imaging provides novel imaging markers of adverse myocardial remodeling in aortic stenosis [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2021, 14(7): 1472-1474.
- [28] Ashkir Z, Myerson S, Neubauer S, et al. Four-dimensional flow cardiac magnetic resonance assessment of left ventricular diastolic function[J/OL]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9: e866131 [2022 Jul 22]. DOI: 10.3389/fcvm.2022.866131.
- [29] Das A, Kelly C, Ben-Arzi H, et al. Acute intra-cavity 4D flow cardiovascular magnetic resonance predicts long-term adverse remodelling following ST-elevation myocardial infarction[J/OL]. J Cardiovasc Magn Reson, 2022, 24(1): e641 [2022 Nov 21]. DOI: 10.1186/s12968-022-00889-7.
- [30] 朱乐怡, 王艺宁, 赵世华, 等. 2021 心血管磁共振研究进展[J]. 放射学实践, 2023, 38(5): 656-661.
- [31] Patel C, Kalaivani M, Karthikeyan G, et al. Effect of cardiac resynchronization therapy on septal perfusion and septal thickening: association with left ventricular function, reverse remodeling and dyssynchrony[J]. J Nucl Cardiol, 2020, 27(4): 1274-1284.
- [32] Lu Y, Cao J, Zhu E J, et al. Predictive value of the proportion of hibernating myocardium in total perfusion defect on reverse remodeling in patients with HFrEF underwent coronary artery bypass graft[J]. Zhonghua xin xue guan bing za zhi, 2023, 51(4): 384-392.
- [33] Manabe O, Oyama-Manabe N, Tamaki N. Positron emission tomography/MRI for cardiac diseases assessment[J/OL]. Br J Radiol, 2020, 93(1113): e20190836 [2020 Feb 14]. DOI: 10.1259/bjr.20190836.
- [34] Degtiarova G, Claus P, Duchenne J, et al. Left ventricular regional glucose metabolism in combination with septal scar extent identifies CRT responders [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 48(8): 2437-2746.
- [35] Dewey M, Siebes M, Kachelrie M, et al. Clinical quantitative cardiac imaging for the assessment of myocardial ischaemia[J]. Nat Rev Cardiol, 2020, 17(7): 427-450.
- [36] Konwerski M, Gasecka A, Opolski G, et al. Role of epicardial adipose tissue in cardiovascular diseases: a review[J]. Biology, 2022, 11(3): 355.
- [37] Yamaguchi Y, Shibata A, Yoshida T, et al. Epicardial adipose tissue volume is an independent predictor of left ventricular reverse remodeling in patients with non-ischemic cardiomyopathy[J]. Int J Cardiol, 2022, 356: e60-e65. [2022 Mar 28]. DOI: 10.1016/j.ijcard.2022.03.051.
- [38] Liu L, Qiao C, Zha JR, et al. Early prediction of clinical scores for left ventricular reverse remodeling using extreme gradient random forest, boosting, and logistic regression algorithm representations[J/OL]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9: e864312. [2022 Aug 17]. DOI: 10.3389/fcvm.2022.864312.
- [39] Suyama S, Kato S, Nakaura T, et al. Machine learning to predict left ventricular reverse remodeling by guideline-directed medical therapy by utilizing texture feature of extracellular volume fraction in patients with non-ischemic dilated cardiomyopathy[J]. Heart Vessels, 2023, 38(3): 361-370.
- [40] Chang S, Han K, Kwon Y, et al. T₁ map-based radiomics for prediction of left ventricular reverse remodeling in patients with nonischemic dilated cardiomyopathy[J]. Korean J Radiol, 2023, 24(5): 395-405.

(收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2023-08-17)