

超声心动图在HFpEF患者心室结构和功能中的应用进展

姚 森, 敖 梦*

重庆医科大学附属第二医院超声科, 重庆

收稿日期: 2025年11月23日; 录用日期: 2025年12月18日; 发布日期: 2025年12月24日

摘 要

随着我国老龄化社会进程的加剧, 心力衰竭的发病率日益上升。与其他类型的心力衰竭相比, 射血分数保留型心力衰竭(HFpEF)的预后更为复杂且具有不确定性。实时三维超声心动图与斑点追踪成像的问世, 大大提升了超声诊断在HFpEF患者中的应用价值。基于此, 本文就超声心动图评估HFpEF患者心室结构和功能中的应用展开综述, 旨在为HFpEF患者心脏评估提供理论指导。

关键词

HFpEF, 实时三维超声心动图, 斑点追踪成像, 心室结构和功能

The Application Progress of Echocardiography in the Ventricular Structure and Function of Patients with HFpEF

Sen Yao, Meng Ao*

Department of Ultrasound, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: November 23, 2025; accepted: December 18, 2025; published: December 24, 2025

Abstract

With the intensification of the aging society in our country, the incidence of heart failure is

*通讯作者。

文章引用: 姚森, 敖梦. 超声心动图在 HFpEF 患者心室结构和功能中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(12): 2496-2504. DOI: 10.12677/acm.2025.15123682

increasing. The prognosis for ejection fraction-preserved heart failure (HFpEF) is more complex and uncertain than other types of heart failure. The advent of real-time 3D echocardiography and spot tracking imaging has greatly improved the application value of ultrasound diagnosis in HFpEF patients. Based on this, this article reviews the application of echocardiography in the evaluation of ventricular structure and function in HFpEF patients, aiming to provide theoretical guidance for the cardiac evaluation of HFpEF patients.

Keywords

HFpEF, Real-Time 3D Echocardiography, Spot Tracking Imaging, Ventricular Structure and Function

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

欧洲心脏病学会(European Society of Cardiology, ESC) [1]提出射血分数保留型心力衰竭(heart failure with preserved ejection fraction, HFpEF)是指当前或既往存在心力衰竭的症状和(或)体征, 并且左心室射血分数(LVEF) $\geq 50\%$, 具有与左心室舒张功能障碍/左心室充盈压升高一致的心脏结构和/或功能异常的客观证据, 包括利钠肽水平升高。HFpEF 正在成为最常见的心力衰竭类型, 流行病学研究[2] [3]显示 HFpEF 占所有心力衰竭病例近 50%, 其患病率以每年 1% 的速度增加。虽然其预后随着时间推移在改善, 但死亡率、住院率和再住院率仍在提高[4]。在先前研究报道中 HFpEF 患者 RVD 的患病率从 4% 到 48% 不等, 且 HFpEF 患者出现右心室功能障碍(RVD)与更高的发病率和死亡率相关[5], 加之 HFpEF 临床症状相对较轻, 容易被患者忽略延误治疗时机, 这也就需要早期识别出双心室结构功能变化。因此临床工作中需要利用好各类超声技术完善双心室结构与功能的精准评估。

2. HFpEF 核心病理生理机制及病因分型

HFpEF 现被广泛认为是一种高度异质性的临床综合征。现代超声心动图技术, 能够深入可视化和量化 HFpEF 核心病理生理机制。目前核心病理生理机制包括: ① 慢性低度炎症, 可通过高分辨率超声血管成像检测 HFpEF 患者血管舒张功能值显著降低、心肌超声造影(CEUS)量化心肌微血管血流灌注的参数升高以及斑点追踪成像纵向应变降低反应炎症的发生; ② 心肌纤维化, 利用剪切波弹性成像、实时三维超声参数如左心室质量指数及左心房容积指数以及斑点追踪成像圆周应变直接量化心肌硬度; ③ 心肌代谢异常, CEUS 的心肌血容量评估底物灌注、实时心肌应变率成像的收缩期峰值应变率反映能量依赖功能以及三维斑点追踪成像的整体做功指数计算能量消耗; ④ 微血管内皮功能障碍, 使用负荷超声心肌血流储备直接评估微血管舒张储备, 高分辨率超声肱动脉血流介导的内皮依赖性舒张与硝酸甘油介导的非内皮依赖性舒张联合检测呈现内皮特异性功能受损[6]。

基于上述机制, 共识[7]根据不同病因将 HFpEF 分为 5 种类型: ① 血管疾病相关 HFpEF, CEUS 示心肌微血管血流速度降低, 负荷超声心肌血流储备降低; ② 心肌病相关 HFpEF, 心肌不对称肥厚(肥厚型)或“毛玻璃样”改变(浸润型)以及心肌结构与硬度异常; ③ 右心和肺动脉疾病相关 HFpEF, 三尖瓣反流峰值流速 > 2.8 m/s, 右室扩大, 室间隔矛盾运动, 肺动脉高压及右心负荷增加; ④ 瓣膜性心脏病和心律失常相关 HFpEF, 瓣膜结构异常(狭窄/反流), 房颤时舒张晚期二尖瓣前向血流峰值流速(A 峰)消失, 机械负荷异常和电机失同步; ⑤ 心脏外疾病相关 HFpEF, 心肌回声增强, 舒张功能不全, 代谢指标异常[8] [9]。

3. 心室的结构和功能

3.1. 心室的解剖结构与功能

心室属于心脏泵血的重要结构。研究[10]-[12]发现肌肉的结构符合一些恒定的肌肉模式。左心室由3层不同排列方式的心肌细胞组成。浅层肌纤维以斜行纵向排列为主, 部分延伸至心底部形成螺旋结构, 参与调节心室的扭转和解旋运动, 对舒张功能尤为重要。中层肌纤维呈环形排列, 环绕心室形成“螺旋状”结构, 为左室壁的主要力学支撑层, 该层通过环形收缩促进射血, 在维持室壁张力和环周应变(Circumferential Strain, CS)中起核心作用。深层肌纤维紧贴心内膜纵向排列, 与心腔长轴方向平行, 负责心脏纵向缩短, 对整体纵向应变(GLS)贡献最大。对缺血敏感, 易在冠心病早期出现功能异常。

而右心室心肌分层结构与左心室存在显著差异, 在右心室中无法合适地定义中间“层”。浅层以纵向排列为主, 主导右心室的纵向收缩, 推动血液进入肺动脉。深层肌纤维以环形或斜行排列为主, 通过环形收缩增加右心室内压力辅助射血, 并对抗肺循环的低阻力环境。

3.2. HFpEF 患者心室间结构功能的相互依赖性

双心室共用一个室间隔、心外膜以及心包腔构成了双心室收缩和舒张相互依赖的解剖学基础[13]。在此基础上二者存在动态关联, 任一方变化另一方即产生微幅响应。约30%-40%的左室舒张压与右心压力和心包约束等外在压力相关[14]。既往有研究[5]表明 HFpEF 患者常伴随右心室后负荷增加及心肌重构等亚临床损伤。此外有研究[15]发现尽管 HFpEF 的射血分数维持在正常范围之内, 但存在左室收缩功能受损的情况(即纵向应变和圆周应变降低), 双心室通过室间隔密切相关, 共享心外膜和心包间隙, 约20%~40%的右室收缩力来源于左室收缩力, 可能致使右室收缩功能降低。因此, 双心室功能相互依赖性构成 HFpEF 病情进展的重要病理生理机制, 并可能成为潜在的干预靶点。

3.3. 超声心动图评估心室结构与功能

一个完整的超声心动图检查包括对心脏结构、功能及血流动力学的评估。常规超声可以测量心脏各腔室的大小, 评估室壁的厚度, 观察心脏瓣膜活动以及心包情况, 量化左室的整体收缩功能。利用多普勒技术可以探测心腔和各大血管的血流速度、方向, 评估心脏舒张功能以及瓣膜狭窄或反流的严重程度, 估算心腔内压力(如肺动脉压)等。随着技术的发展, 新型超声技术的出现协助医生得到更多心脏结构与功能信息, 发现亚临床损害, 尽早进行干预治疗。通过这种多层次、多维度的综合分析, 超声心动逐渐成为诊断和随访心血管疾病不可或缺的工具。

4. 实时三维超声心动图(RT-3DE)

4.1. 双心室功能评估的临床应用

评估 HFpEF 患者心脏重要的形态学指标包括左心房容积指数(LAVI)、左心室质量指数(LVMI)、室壁厚度、相对室壁厚度(RWT)。目前常利用二维超声进行测量计算, 但其会存在主观误差。RT-3DE 通过全矩阵阵列换能器、高通量数据处理系统以及三维空间定位系统, 无需几何假设就能获取心脏三维容积信息, 能够对左心室容积和射血分数进行准确、可重复测量。左室舒张末期容积(LVEDV)、左室收缩末期容积(LVESV)和左室射血分数(LVEF)预测心功能分级具有显著的应用价值, Miao Y [16]等使用 RT-3DE 检测患者的左室功能, 可准确检测 LVESV、LVEDV 和 LVEF, 相较于常规 2DE, RT-3DE 能够更好反映心衰患者左室结构与功能。

RT-3DE 不仅可以直观显示心室形态, 还可以量化左心室各阶段心肌收缩的协调性, 来评估心脏同步

性。有研究[17]证实左室机械性失同步与许多心血管疾病的不良结局密切相关。冒惠等[18]发现与正常对照组相比 HFpEF 患者左室舒张末期内径(LVEDD)与 LVEF 均无显著差异, 但三维左室收缩失同步指数(3D-SDI) (Tmsv16-SD%、Tmsv12-SD%、Tmsv6-SD%、Tmsv16-Dif%、Tmsv12-Dif%、Tmsv6-Dif%)均高于正常对照组且低于 HFrEF 组(P 均 <0.001), 提示 HFpEF 患者左心室收缩失同步可能参与疾病进展。揭示 Tmsv16-SD%是 HFpEF 发生的独立危险因素。

而准确、可重复和定量评估右心室功能和大小对于 HFpEF 的治疗和预后预测至关重要。杨晓青等[19]利用 RT-3DE 测得的双心室各项参数评估心衰患者心脏, 发现心功能越差, 其收缩功能指标(三尖瓣环收缩期位移 TAPSE、右室射血分数 RVEF、右室每搏量 RVSV)越低。当病情持续恶化、心功能分级增高时, 容积参数(RVEDV、RVESV)明显增高, 舒张功能指标(舒张早期与晚期峰值速度比值 Em/Am)下降, 表明运用上述参数可早期发现右心结构重塑, 心功能失代偿。右室储备耗竭是疾病进展至失代偿期的关键点, 通过 RT-3DE 可以有效检测右室储备耗竭。Baratto C 等[20]发现 60% HFpEF 患者存在右室储备耗竭。运动峰值时 RVEDV、RVESV 升高、LVEF 下降, 通过心室间相互作用影响左心充盈, 其右心室-肺动脉耦合指数 SV/RVESV 降低提示泵血效率下降, 与内在右室功能障碍相关, 建议将右室功能评估纳入 HFpEF 常规临床评估, 而其长期预后预测价值需进一步研究。除了常用参数, 在临床中还需要更多简单客观的参数指导实践。Wang W 等[21]提出一种基于三维超声心动图新指标 SVI/S', 即体表面积标准化的每搏输出量 SVI/组织多普勒二尖瓣瓣环收缩期峰值速度 S', 通过收缩功能相关参数的比值间接反映舒张功能障碍, 提高 HFpEF 舒张功能障碍诊断敏感性, 助力预后判断。

4.2. RT-3DE 核心优势与劣势

RT-3DE 核心优势在于突破传统超声的几何假设局限, 实现双心室结构与功能的“可视化 + 量化”评估, 且相关指标与心脏磁共振(CMR)高度一致, 能够发现心脏细微的功能改变, 同步呈现双心室形态与心室壁运动协调性; 量化左室失同步、储备功能等传统超声难以捕捉的参数, 在 HFpEF 患者的心室结构和功能评估中展现出独特优势, 能够协助临床早期发现 HFpEF 患者心室功能的损伤。但该技术对超声图像质量要求高, 受肺气干扰或肥胖因素影响大; 操作复杂度高于二维超声, 对超声医师技术熟练度要求高; 运动状态下参数测量精度可能下降。

5. 斑点追踪技术

STI 技术利用心肌组织自身产生的天然超声斑点作为内在标记物, 通过复杂的计算机算法无创地、高精度地追踪这些斑点在二维或三维空间中的运动轨迹, 从而量化心肌形变能力, 无创地评估心肌整体及局部功能, 为评价心脏功能提供了一个前所未有的强大工具。STI 分为二维斑点追踪成像(2D-STI)及三维斑点追踪成像(3D-STI)。

5.1. 二维斑点追踪成像(2D-STI)在双心室功能评估的临床应用

在 HFpEF 患者中, 尽管 LVEF 正常, 2D-STI 仍可通过测量左心室整体纵向应变(GLS)、整体圆周应变(GCS)、整体径向应变(GRS)等参数无创、定量评估心肌应变能力, 敏感捕捉因心肌纤维化及微循环障碍引发的早期亚临床心肌功能障碍。

与 LVEF 及其他应变参数相比, GLS 在预测 HFpEF 患者再住院率和死亡率方面具有更高的敏感性和特异性, 是早期风险分层的重要工具。齐治等[22]发现, HFpEF 患者轻症组(NYHA I~II 级)与重症组(NYHA III~IV 级) GLS 值($-16.7\% \pm 4.7\%$ 、 $-16.3\% \pm 5.3\%$)普遍低于正常成人(男性 $< -17\%$, 女性 $< -18\%$), 提示患者左室整体收缩功能存在亚临床受损。重症组左室节段应变达峰时间变异程度的(Dispersion)显著延

长, 与心功能受损程度相关, 其 ROC 曲线确定的临界值 58 ms ($AUC = 0.69$, 灵敏度 51%, 特异度 80%) 可作为传统超声评价的补充, 为 HFpEF 患者心功能评估提供新方向。在此基础上, 左室压力-应变环 (PSL) 也具备评估潜力, 孙世杰等[23]研究显示, PSL 的参数与心肌收缩舒张功能、传统超声指标及临床预后均有良好相关性, 可作为左室收缩功能评估指标。

二维应变指标可突破利钠肽(NP)的评估局限, Sorimachi H 等[24]以左心室收缩功能障碍(左室整体纵向应变 LVGLS $< 16\%$), 左房功能障碍(左房储备期应变 LAS_D $< 26\%$), 右心室收缩功能障碍(右室游离壁应变 RVFWS $< 20\%$)为标准评估心脏功能变化, 对经有创检查证实的 HFpEF 患者与健康对照进行随访, 发现无论利钠肽(NP)水平正常与否, 患者心功能均随时间恶化, LVGLS、LAS_D 及 RVFWS 均呈下降趋势。因此即使 NP 正常, 应变指标仍有助于早期识别心衰风险, 指导干预改善临床结局。

右室功能的评估亦为 HFpEF 研究热点。指南[25]推荐以 1 个或多个参数评估右室收缩功能。Lu H 等[26]研究显示单一参数异常(三尖瓣环收缩期平面位移 TAPSE < 1.7 cm、右室面积变化分数 FAC $< 35\%$, 右室游离壁纵向应变 RVFWLS $< 20\%$)可以反映局部或轻度功能异常, 但易低估右室功能障碍(RVD)负担。而多参数模型(≥ 2 个参数异常)在预测复合终点方面表现更优($C\text{-index} = 0.71$), 可精准识别 HFpEF 高危人群, 应综合多维度超声指标评估 HFpEF 患者 RV 功能以优化 HFpEF 风险分层。加之二维斑点追踪超声的右室纵向应变已经被认为是 HFpEF 患者预后的独立预测因子[27]。且有研究[28]结果显示 2D-STI 右室纵向应变对全因及心血管死亡的预测价值优于 CMR-RVEF、CMR 特征追踪应变(FT-RVGLS)、TAPSE 和面积变化分数(FAC), 其风险比为最高($HR = 2.5$), 支持其在临床风险分层中的应用。

Bosch L 等[29]发现从对照组到 HFpEF、HFrEF 组, RVLS 和 TAPSE 逐渐降低, 肺动脉收缩压(PASP)逐渐升高(P 均 < 0.001), 提示右室收缩功能随左室功能下降而减低。控制 PASP 后三组间 RVLS/PASP 与 TAPSE/PASP 比值均降低, 表明存在右室-肺动脉耦合异常, 而二者与全因死亡和心衰住院复合终点独立相关($HR = 0.33$ 和 3.09)。而 Hubesch G 等[30]在动物模型中发现, HFpEF 大鼠 RV 扩大、收缩功能下降及右室-肺动脉耦合异常早于肺血管重构, 且与右室凋亡率负相关, 提示右室功能障碍在 HFpEF 早期可独立于后负荷发生。因此临床上右室-肺动脉耦合异常可作为心衰患者不良预后的独立预测因素。目前 2D-STI 评估 HFpEF 患者双心室功能相关性的研究较少, 常需结合其他参数。临床中对双心室功能评估的进一步探索, 或将为 HFpEF 的诊疗提供更多新方向。以上研究证明 2D-STI 可以早期、准确评估心室功能, 在预测心衰患者发生不良心血管事件方面具有一定价值。

5.2. 三维斑点追踪成像(3D-STI)在双心室功能评估的临床应用

三维斑点追踪成像技术(3D-STI)基于实时三维超声心动图(RT-3DE)的容积成像, 通过追踪心肌组织在三维空间内的运动轨迹, 可同步获取左、右心室在纵向、径向、圆周及面积应变(GAS)等多维力学参数。在左心室功能评估方面, 3D-STI 展现出高敏感性。Wu, Ting 等[31]针对无任何心脏症状的糖尿病患者研究中发现左心室收缩应变降低。3D-STI 的应变参数(GLS、GCS、GAS、GRS)在识别早期功能障碍的曲线下面积(AUC)均优于对应的 2D-STI 参数, 且从对照组、糖尿病前期到糖尿病患者, GAS 呈现显著的阶梯式下降($P < 0.001$), 是检测亚临床左心室功能障碍的敏感指标, 为左心室早期功能异常的筛查提供有力依据。

在结构复杂的右心室评估中, 3D-STI 的全容积成像特性使其优势更为凸显。Meng Y 等[32]通过 3D-STI 获取的 RVFWLS 与 RVEF 的相关性高达 0.69 ($P < 0.001$), 显著优于 2D-STI。同时, 研究确定了 3D-RVFWLS (临界值 -22%)、RVEF (临界值 46%), 2D-RVFWLS (临界值 -20%)均为不良结局的独立预测因子, 提示 3D-STI 可用于 HFpEF 患者的风险分层。Li Y 等[33]进一步证实, 3D-STI 对比心脏磁共振(CMR)在评估右室功能时相关性更强、一致性更好, 且在不同 RVEF 组中表现稳定, 可作为 CMR 的可靠替代方案评估右心室功能。在应变基础上, Lakatos BK 等[34]引入负荷非依赖性整体心肌做功指数(GMWI)通

过压力-应变环整合负荷与形变信息, 与 Ees (右心室收缩力的负荷独立标记, 收缩末期弹性)呈强相关, 可独立反映右心室收缩力, 可作为右心室功能障碍风险分层和随访的有效工具。

3D-STI 的独特价值还在于其能同步评估双心室功能及其协同作用。Tolvaj M 等[35]研究证实左心室整体圆周应变与右心室整体圆周应变受损均与全因死亡率增加独立相关(HR = 1.056 和 1.115, $P < 0.001$), 其中双心室功能均受损患者死亡风险是功能正常者的 5 倍以上, 研究还发现 RVGCS 具有重要临床价值, 是左心疾病患者死亡风险的独立预测因子(HR = 1.091, $P = 0.002$)。综上, 3D-STI 在 HFpEF 患者心功能评估中具有良好的应用价值。

5.3. STI 核心优势与劣势

传统二维超声心动图存在依赖几何假设的局限性, 2D-STI 与 3D-STI 分别针对单平面与全容积心肌运动分析, 不仅能有效地分析左心室整体及局部的心肌形变能力, 还可定量分析心肌节段性室壁运动的异常, 敏感捕捉亚临床心肌功能障碍, 精准评估心肌应变能力。2D-STI 适用于常规临床筛查, 3D-STI 更适合精准评估与风险分层, 二者互补可全面覆盖 HFpEF 双心室功能评估需求, 这一优势使其在 HFpEF 患者心功能评估中具有独特价值。临床可通过 STI 的预测对潜在继发性心力衰竭患者进行提前干预。但二者存在共性缺点, 受呼吸、心率波动影响, 心肌梗死等局部病变可能干扰斑点追踪精度。

6. 人工智能深度学习

人工智能技术的突破性成就, 标志着超声医学已步入智能化发展的新阶段。基于大数据训练的深度学习算法, 可自动化完成超声图像质量评估、切面分类、参数量化等流程。

6.1. 临床应用场景

图像质量控制: Li X 等[36]基于 170,311 张二维超声心动图, 调整图像整体轮廓、关键解剖结构细节、标准视图显示、图像显示参数这四个属性, 自动为超声心动图图像进行质量评分(准确率 97.8%), 为后续分析提供质量保障。

结构识别与病变诊断: 郭马特等[37]建立切面分类和反流识别模型, 结果显示切面识别准确度高, 反流诊断敏感度、特异度等较好。Kusunose K 等[38]用卷积神经网络(CNN)模型对心脏 5 种标准超声视图分类, 最佳模型准确率达 98.1%, 为超声心动图的自动化分析提供了可行的技术路径。

功能参数量化: 赫兰等[39]基于 1902 例成人多切面超声心动图数据构建深度学习模型, 自动分割左心室并计算 LVEF, 分割性能良好(Dice ≥ 0.90)。即使训练数据含少量错误标记, 仍能保证预测可靠性($r = 0.80$), 但该模型尚需进一步优化算法, 提高模型泛化性。

6.2. 人工智能深度学习核心优势及劣势

人工智能深度学习的核心优势在于其自动化程度高, 对心衰患者进行心功能评估的时间大幅度缩短, 可提升诊断效率; 缩短新手学习周期, 助力超声诊断标准化; 减少人为主观误差, 结果更客观; 并且可快速处理海量数据, 尤其适用于大规模临床研究与参数标准化测量。推动超声评估的自动化与标准化, 解决传统超声主观性强、效率低的痛点, 提升研究效率与数据一致性, 是未来 HFpEF 超声评估的重要发展方向。但其依赖高质量、大样本数据, 泛化性受数据多样性影响, 目前仅能辅助量化参数, 无法替代医师对复杂病理状态的综合判断。

7. 总结

超声心动图是评估 HFpEF 患者心脏结构与功能的核心工具, 各项技术的联合应用有利于全面了解患

者的心脏状况。然而 HFpEF 是一种复杂的临床综合征, 当前领域仍存在知识空白与技术瓶颈。首先 HFpEF 具有高度异质性, 不同表型的特异性超声特征及预后关联尚不完全明确, 缺乏统一的表型鉴别标准, 其次, 超声评价参数碎片化, 尚未建立核心参数集, 虽然一些超声参数与不良预后相关, 但多数证据来源于单中心研究, 导致其在个体化预后判断和指导治疗中的标准化与临床价值有限。再者, 面对海量、多模态的影像数据, 传统分析方法已难以充分挖掘其深层信息, 亟需更强大的工具来实现数据的融合与智能解读。

因此未来研究应优先聚焦于以下方向: 其一, 开展多中心大规模前瞻性研究, 明确不同 HFpEF 表型的超声特征, 验证其对不良预后的预测价值, 建立基于超声参数的 HFpEF 风险分层体系, 为个性化治疗提供坚实证据。其二, 构建 HFpEF 核心参数集, 规范 STI、RT-3DE 等关键超声参数的测量标准及阈值。开发并验证可解释性人工智能模型, 整合 HFpEF 超声特征, 实现 HFpEF 自动分型, 并明确告知决策所依据的超声特征。其三, 推动多模态影像与生物标志物深度融合, 致力于将超声、核磁参数与血清生物标志物数据进行整合, 建立复合型诊断与分型模型, 更全面地揭示 HFpEF 的全身性病理生理机制。其四, 探索超声在 HFpEF 治疗效果动态监测与方案调整中的指导作用。

展望未来, 超声心动图必将超越其传统“诊断工具”的角色, 通过与人工智能、多组学数据的深度融合, 为 HFpEF 临床表型划分提供关键影像学依据, 成为风险预警及治疗导航的基石, 最终为攻克这一心血管疾病的“难治之症”贡献重要力量。

参考文献

- [1] McDonagh, T.A., Metra, M., Adamo, M., Gardner, R.S., Baumbach, A., Böhm, M., *et al.* (2023) 2023 Focused Update of the 2021 ESC Guidelines for the Diagnosis and Treatment of Acute and Chronic Heart Failure. *European Heart Journal*, **44**, 3627-3639. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehad195>
- [2] Owan, T.E., Hodge, D.O., Herges, R.M., Jacobsen, S.J., Roger, V.L. and Redfield, M.M. (2006) Trends in Prevalence and Outcome of Heart Failure with Preserved Ejection Fraction. *New England Journal of Medicine*, **355**, 251-259. <https://doi.org/10.1056/nejmoa052256>
- [3] Campbell, P., Rutten, F.H., Lee, M.M., Hawkins, N.M. and Petrie, M.C. (2024) Heart Failure with Preserved Ejection Fraction: Everything the Clinician Needs to Know. *The Lancet*, **403**, 1083-1092. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(23\)02756-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(23)02756-3)
- [4] Shah, K.S., Xu, H., Matsouaka, R.A., Bhatt, D.L., Heidenreich, P.A., Hernandez, A.F., *et al.* (2017) Heart Failure with Preserved, Borderline, and Reduced Ejection Fraction: 5-Year Outcomes. *Journal of the American College of Cardiology*, **70**, 2476-2486. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.08.074>
- [5] Greenberg, B. (2017) Jumping down the Rabbit Hole: Unravelling the Right Ventricle in Heart Failure. *European Journal of Heart Failure*, **19**, 1672-1674. <https://doi.org/10.1002/ejhf.985>
- [6] Omote, K., Verbrugge, F.H. and Borlaug, B.A. (2022) Heart Failure with Preserved Ejection Fraction: Mechanisms and Treatment Strategies. *Annual Review of Medicine*, **73**, 321-337. <https://doi.org/10.1146/annurev-med-042220-022745>
- [7] 周京敏, 王华, 黎励文. 射血分数保留的心力衰竭诊断与治疗中国专家共识 2023 [J]. 中国循环杂志, 2023, 38(4): 375-393.
- [8] Anker, S.D., Usman, M.S., Anker, M.S., Butler, J., Böhm, M., Abraham, W.T., *et al.* (2023) Patient Phenotype Profiling in Heart Failure with Preserved Ejection Fraction to Guide Therapeutic Decision Making. a Scientific Statement of the Heart Failure Association, the European Heart Rhythm Association of the European Society of Cardiology, and the European Society of Hypertension. *European Journal of Heart Failure*, **25**, 936-955. <https://doi.org/10.1002/ejhf.2894>
- [9] Palazzuoli, A., Tramonte, F. and Beltrami, M. (2023) Laboratory and Metabolomic Fingerprint in Heart Failure with Preserved Ejection Fraction: From Clinical Classification to Biomarker Signature. *Biomolecules*, **13**, Article 173. <https://doi.org/10.3390/biom13010173>
- [10] Sanz, J., Sánchez-Quintana, D., Bossone, E., Bogaard, H.J. and Naeije, R. (2019) Anatomy, Function, and Dysfunction of the Right Ventricle: JACC State-of-the-Art Review. *Journal of the American College of Cardiology*, **73**, 1463-1482. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.12.076>
- [11] Hahn, R.T., Lerakis, S., Delgado, V., Addetia, K., Burkhoff, D., Muraru, D., *et al.* (2023) Multimodality Imaging of Right Heart Function: JACC Scientific Statement. *Journal of the American College of Cardiology*, **81**, 1954-1973.

- <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2023.03.392>
- [12] Torrent-Guasp, F., Kocica, M.J., Corno, A.F., Komeda, M., Carreras-Costa, F., Flotats, A., *et al.* (2005) Towards New Understanding of the Heart Structure and Function. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, **27**, 191-201. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2004.11.026>
 - [13] Naeije, R. and Badagliacca, R. (2017) The Overloaded Right Heart and Ventricular Interdependence. *Cardiovascular Research*, **113**, 1474-1485. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvx160>
 - [14] Gorter, T.M., van Veldhuisen, D.J., Bauersachs, J., Borlaug, B.A., Celutkiene, J., Coats, A.J.S., *et al.* (2017) Right Heart Dysfunction and Failure in Heart Failure with Preserved Ejection Fraction: Mechanisms and Management. Position Statement on Behalf of the Heart Failure Association of the European Society of Cardiology. *European Journal of Heart Failure*, **20**, 16-37. <https://doi.org/10.1002/ehf.1029>
 - [15] Kraigher-Krainer, E., Shah, A.M., Gupta, D.K., Santos, A., Claggett, B., Pieske, B., *et al.* (2014) Impaired Systolic Function by Strain Imaging in Heart Failure with Preserved Ejection Fraction. *Journal of the American College of Cardiology*, **63**, 447-456. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2013.09.052>
 - [16] Miao, Y. and Kang, X. (2021) Evaluation of Left Ventricular Function in Patients with Heart Failure after Myocardial Infarction by Real-Time Three-Dimensional Transesophageal Echocardiography. *American Journal of Translational Research*, **13**, 10380-10387.
 - [17] Fudim, M., Fathallah, M., Shaw, L.K., Liu, P.R., James, O., Samad, Z., *et al.* (2019) The Prognostic Value of Diastolic and Systolic Mechanical Left Ventricular Dyssynchrony among Patients with Coronary Heart Disease. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **12**, 1215-1226. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2018.05.018>
 - [18] 冒惠, 崔磊, 周仲胤. 三维超声心动图评估左心室收缩失同步在射血分数保留心衰中的应用研究[J]. 中国超声医学杂志, 2024, 40(3): 293-296.
 - [19] 杨晓青, 王立美, 王紫韞, 等. 实时三维超声心动图联合三维斑点追踪技术对心肌梗死后心力衰竭患者右心功能的评估价值[J]. 中国医刊, 2022, 57(12): 1321-1325.
 - [20] Baratto, C., Dewachter, C., Forton, K., Muraru, D., Gagliardi, M.F., Tomaselli, M., *et al.* (2025) Right Ventricular Reserve in Cardiopulmonary Disease: A Simultaneous Hemodynamic and Three-Dimensional Echocardiographic Study. *The Journal of Heart and Lung Transplantation*, **44**, 916-926. <https://doi.org/10.1016/j.healun.2024.12.022>
 - [21] Wang, W., Mu, G., Liu, C., Xie, J., Zhang, H., Zhang, X., *et al.* (2022) A Novel Three-Dimensional and Tissue Doppler Echocardiographic Index for Diagnosing and Prognosticating Heart Failure with Preserved Ejection Fraction. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **9**, Article 822314. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.822314>
 - [22] 齐治, 蔺祥伟, 杨林静, 等. 左室射血分数保留的心力衰竭患者左室节段性运动变异程度研究[J]. 中国超声医学杂志, 2022, 38(9): 1008-1011.
 - [23] 孙世杰, 刘冲, 田家玮. 左室压力-应变环评价心肌做功在射血分数保留型心衰中的应用价值[J]. 中国超声医学杂志, 2022, 38(7): 779-782.
 - [24] Sorimachi, H., Verbrugge, F.H., Omote, K., Omar, M., Obokata, M., Reddy, Y.N.V., *et al.* (2022) Longitudinal Evolution of Cardiac Dysfunction in Heart Failure and Preserved Ejection Fraction with Normal Natriuretic Peptide Levels. *Circulation*, **146**, 500-502. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.121.058592>
 - [25] Lang, R.M., Badano, L.P., Mor-Avi, V., Afzal, J., Armstrong, A., Ernande, L., *et al.* (2015) Recommendations for Cardiac Chamber Quantification by Echocardiography in Adults: An Update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *Journal of the American Society of Echocardiography*, **28**, 1-39.e14. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2014.10.003>
 - [26] Lu, H., Inciardi, R.M., Abanda, M., Shah, A.M., Cikes, M., Claggett, B.L., *et al.* (2025) Multiparametric Assessment of Right Ventricular Dysfunction in Heart Failure: An Analysis from Paragon-HF. *Journal of the American Heart Association*, **14**, e037380. <https://doi.org/10.1161/jaha.124.037380>
 - [27] Lejeune, S., Roy, C., Ciocea, V., Slimani, A., de Meester, C., Amzulescu, M., *et al.* (2020) Right Ventricular Global Longitudinal Strain and Outcomes in Heart Failure with Preserved Ejection Fraction. *Journal of the American Society of Echocardiography*, **33**, 973-984.e2. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2020.02.016>
 - [28] Houard, L., Benaets, M., de Meester de Ravenstein, C., Rousseau, M.F., Ahn, S.A., Amzulescu, M., *et al.* (2019) Additional Prognostic Value of 2D Right Ventricular Speckle-Tracking Strain for Prediction of Survival in Heart Failure and Reduced Ejection Fraction: A Comparative Study with Cardiac Magnetic Resonance. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **12**, 2373-2385. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2018.11.028>
 - [29] Bosch, L., Lam, C.S.P., Gong, L., Chan, S.P., Sim, D., Yeo, D., *et al.* (2017) Right Ventricular Dysfunction in Left-Sided Heart Failure with Preserved versus Reduced Ejection Fraction. *European Journal of Heart Failure*, **19**, 1664-1671. <https://doi.org/10.1002/ehf.873>
 - [30] Hubesch, G., Dewachter, C., Chomette, L., Hupkens, E., Jespers, P., Vegh, G., *et al.* (2024) Early Alteration of Right

- Ventricle-Pulmonary Artery Coupling in Experimental Heart Failure with Preserved Ejection Fraction. *Journal of the American Heart Association*, **13**, e032201. <https://doi.org/10.1161/jaha.123.032201>
- [31] Wu, T., Gong, L., Zhang, C., Zhang, D. and Li, X. (2023) Three-Dimensional Echocardiography and Strain Cardiac Imaging in Patients with Prediabetes and Type 2 Diabetes Mellitus. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **13**, 7753-7764. <https://doi.org/10.21037/qims-23-560>
- [32] Meng, Y., Zhu, S., Xie, Y., Zhang, Y., Qian, M., Gao, L., *et al.* (2021) Prognostic Value of Right Ventricular 3D Speckle-Tracking Strain and Ejection Fraction in Patients with HFpEF. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **8**, Article 694365. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.694365>
- [33] Li, Y., Wan, X., Xiao, Q., Zhang, Y., Sun, W., Xie, Y., *et al.* (2020) Value of 3D versus 2D Speckle-Tracking Echocardiography for RV Strain Measurement: Validation with Cardiac Magnetic Resonance. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **13**, 2056-2058. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2020.04.016>
- [34] Lakatos, B.K., Rako, Z., Szijártó, Á., da Rocha, B.R.B., Richter, M.J., Fábíán, A., *et al.* (2024) Right Ventricular Pressure-Strain Relationship-Derived Myocardial Work Reflects Contractility: Validation with Invasive Pressure-Volume Analysis. *The Journal of Heart and Lung Transplantation*, **43**, 1183-1187. <https://doi.org/10.1016/j.healun.2024.03.007>
- [35] Tolvaj, M., Fábíán, A., Tokodi, M., Lakatos, B., Assabiny, A., Ladányi, Z., *et al.* (2023) There Is More than Just Longitudinal Strain: Prognostic Significance of Biventricular Circumferential Mechanics. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **10**, Article 1082725. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1082725>
- [36] Li, X., Zhang, H., Yue, J., Yin, L., Li, W., Ding, G., *et al.* (2024) A Multi-Task Deep Learning Approach for Real-Time View Classification and Quality Assessment of Echocardiographic Images. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 20484. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71530-z>
- [37] 郭马特, 宋艳杰, 石婵, 等. 基于深度学习的超声心动图自动识别瓣膜反流[J]. 中国医学影像学杂志, 2025, 33(2): 147-151.
- [38] Kusunose, K., Haga, A., Inoue, M., Fukuda, D., Yamada, H. and Sata, M. (2020) Clinically Feasible and Accurate View Classification of Echocardiographic Images Using Deep Learning. *Biomolecules*, **10**, Article 665. <https://doi.org/10.3390/biom10050665>
- [39] 赫兰, 路洋, 夏志刚, 等. 基于深度学习的人工智能模型自动量化超声心动图左心室射血分数初步探索[J]. 实用临床医药杂志, 2024, 28(9): 9-14.