

斑点追踪技术评估射血分数中间值心力衰竭患者左室心肌功能的临床价值

傅叶叶¹, 刘雪玲¹, 连溯¹, 王金花¹, 苏虹月¹, 谭炜²

摘要 **目的** 探讨斑点追踪技术(STI)评估射血分数中间值心力衰竭(HFmrEF)患者左室心肌功能的临床价值。**方法** 选取我院心血管内科慢性心力衰竭患者195例,根据左室射血分数(LVEF)分为射血分数减低心力衰竭(HFrEF)组(LVEF<40%)、HFmrEF组(40%≤LVEF≤49%)及射血分数保留心力衰竭(HFpEF)组(LVEF≥50%),应用STI检测左室心肌功能参数,包括整体纵向应变(GLS)、峰值应变离散度(PSD)、整体做功指数(GWI)、整体做功效率(GWE),比较各组上述参数的差异。分析STI参数与LVEF的相关性。绘制受试者工作特征(ROC)曲线分析STI参数鉴别HFmrEF与HFrEF、HFmrEF与HFpEF的诊断效能。**结果** HFpEF组、HFmrEF组、HFrEF组GLS、GWl、GWE均依次降低,组间两两比较差异均有统计学意义(均 $P<0.05$);HFrEF组PSD明显增大,与HFmrEF组和HFpEF组比较差异均有统计学意义(均 $P<0.05$);HFmrEF组与HFpEF组PSD比较差异无统计学意义。相关性分析显示,GLS、GWl、GWE均与LVEF呈正相关($r=0.85, 0.74, 0.72$, 均 $P<0.001$),PSD与LVEF呈负相关($r=-0.30, P<0.001$)。ROC曲线分析显示,GLS、PSD、GWl及GWE截断值分别为-10.55%、60.50 ms、1051.5 mmHg%、83.50%时鉴别HFmrEF与HFrEF的曲线下面积为0.938、0.676、0.890、0.885;GLS、GWl及GWE截断值分别为-11.35%、1428.5 mmHg%、87.50%时鉴别HFmrEF与HFpEF的曲线下面积为0.929、0.877、0.866。**结论** STI可精准评估HFmrEF患者左室心肌功能,为其独立分型管理提供影像学依据。

关键词 斑点追踪技术;射血分数中间值心力衰竭;心肌功能,左室

[中图分类号]R540.45;R541.6

[文献标识码]A

Clinical value of speckle tracking imaging in assessing left ventricular myocardial function in patients with heart failure with mid-range ejection fraction

FU Yeye¹, LIU Xueling¹, LIAN Su¹, WANG Jinhua¹, SU Hongyue¹, TAN Wei²

1.Department of Ultrasound, 2.Department of Cardiology, the First Affiliated Hospital of Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530023, China

ABSTRACT **Objective** To investigate the clinical value of speckle tracking imaging(STI) in assessing left ventricular myocardial function in patients with heart failure with mid-range ejection fraction(HFmrEF). **Methods** A total of 195 patients with chronic heart failure from department of cardiology in our hospital were enrolled. Based on left ventricular ejection fraction(LVEF), patients were divided into three groups: heart failure with reduced ejection fraction(HFrEF) group(LVEF<40%), HFmrEF group(40%≤LVEF≤49%), and heart failure with preserved ejection fraction(HFpEF) group(LVEF≥50%). STI was used to measure left ventricular myocardial function parameters, including global longitudinal strain(GLS), peak strain dispersion(PSD), global work index(GWI), and global work efficiency(GWE). The differences in above parameters among the three groups were compared. The correlations between STI parameters and LVEF were analyzed. Receiver operating characteristic(ROC) curve was drawn to analyze the diagnostic efficacy of STI parameters for differentiating HFmrEF from HFrEF and HFmrEF from HFpEF. **Results** GLS, GWI, and GWE progressively decreased in the HFpEF, HFmrEF, and HFrEF groups, with statistically significant differences in pairwise comparisons(all $P<0.05$). PSD in the HFrEF group was significantly higher than

基金项目:国家自然科学基金地区科学基金项目(82060846);广西卫健委自筹经费科研课题(Z-A20240775)

作者单位:1.广西中医药大学第一附属医院超声科,2.心内科,广西壮族自治区 南宁 530023

通讯作者:谭炜, Email:tanwei82@126.com

that in the HFmrEF and HFpEF groups, with significant differences (both $P < 0.05$). There was no significant difference in PSD between the HFmrEF group and the HFpEF group. Correlation analysis showed that GLS, GWI, and GWE were positively correlated with LVEF ($r = 0.85, 0.74, 0.72$, all $P < 0.001$), while PSD was negatively correlated with LVEF ($r = -0.30, P < 0.001$). ROC curve analysis showed that when the cutoff values for GLS, PSD, GWI, and GWE were -10.55% , 60.50 ms , $1051.5\text{ mmHg\%}$, and 83.50% , respectively, the area under the curve (AUC) for differentiating HFmrEF from HFpEF were $0.938, 0.676, 0.890$, and 0.885 . When the cutoff values for GLS, GWI, and GWE were -11.35% , $1428.5\text{ mmHg\%}$, and 87.50% , respectively, the AUC for differentiating HFmrEF from HFpEF were $0.929, 0.877$, and 0.866 . **Conclusion** STI provides precise assessment of left ventricular myocardial function in patients with HFmrEF, offering valuable imaging evidence for its independent phenotyping and management.

KEY WORDS Speckle tracking imaging; Heart failure with mid-range ejection fraction; Myocardial function, left ventricle

2016 年欧洲心脏病学会发布的急慢性心力衰竭诊疗指南^[1]首次提出射血分数中间值心力衰竭 (heart failure with mid-range ejection fraction, HFmrEF) 的概念,即将左室射血分数 (LVEF) 介于 $40\% \sim 49\%$ 的心力衰竭确立为独立亚型。HFmrEF 临床特征和预后转归表现出明显的异质性,该人群在住院风险、缺血性心脏病发病率及对药物治疗反应等方面更接近射血分数减低心力衰竭 (heart failure with reduced ejection fraction, HFrEF),亦有研究^[2-3]证实其临床表现、并发症谱及长期预后与射血分数保留心力衰竭 (heart failure with preserved ejection fraction, HFpEF) 具有高度相似性。目前关于 HFmrEF 的发病机制、心室重构特征、血流动力学改变及心肌能量代谢异常等关键问题尚未完全阐明^[4-5],尤其在长期预后评估和个体化治疗策略选择方面亟需更多依据。常规超声心动图在检测局部心肌运动异常方面存在灵敏度低的局限,斑点追踪技术 (speckle tracking imaging, STI) 通过定量分析心肌应变参数,为精准评估心肌功能提供了依据。本研究应用 STI 评估 HFmrEF 患者左室心肌功能,并探讨其在心力衰竭鉴别诊断及风险分层中的临床价值。

资料与方法

一、研究对象

选取 2022 年 6 月至 2024 年 6 月我院心血管内科诊断为慢性心力衰竭患者 195 例,男 144 例,女 51 例,年龄 $23 \sim 92$ 岁,平均 (63 ± 14) 岁。根据 LVEF^[1]将其分为 HFrEF 组 73 例 ($\text{LVEF} < 40\%$)、HFmrEF 组 56 例 ($40\% \leq \text{LVEF} \leq 49\%$) 及 HFpEF 组 ($\text{LVEF} \geq 50\%$) 66 例。纳入标准:①慢性心力衰竭诊断参考欧洲心脏病学会急慢性心力衰竭诊疗指南^[6];②患者伴有不同程度呼吸困难、气喘等心力衰竭症状;③临床及超声资料均完整。排

除标准:图像质量差、严重瓣膜病及临床资料不完整者。本研究经我院医学伦理委员会批准 (批准号: Z-A2024-022),受检者均知情同意。

二、仪器与方法

1. 超声心动图检查:使用 GE Vivid E95 彩色多普勒超声诊断仪,二维 M5Sc 探头,频率 $1.7 \sim 3.3\text{ MHz}$; 4V 探头,频率 $1.5 \sim 4.0\text{ MHz}$; 配置 EchoPAC 203 图像分析软件。受检者取左侧卧位,同步连接心电图,按照美国超声心动图学会/欧洲心血管影像学学会相关指南^[7-8]推荐采集胸骨旁左室长轴切面及心尖四腔心、两腔心、三腔心、五腔心切面图像,连续采集帧频 $> 40\text{ 帧/s}$ 3 个心动周期的动态图像。采用双平面 Simpsons 法测量 LVEF。将 DICOM 格式动态图像导入 EchoPAC 203 图像分析软件,使用 Q-Analysis 的 2D Strain 功能依次分析心尖三腔心切面 (识别主动脉瓣关闭时间)、四腔心、两腔心切面图像,自动追踪左室心肌,得到 17 节段纵向应变曲线及牛眼图,获取整体纵向应变 (GLS, 取绝对值进行后续分析) 和峰值应变离散指数 (PSD)。输入患者肱动脉血压,得到左室压力-应变环及 17 节段做功牛眼图,获取整体做功指数 (GWI) 和整体做功效率 (GWE)。以上操作均由 2 名具有 5 年以上工作经验的超声医师完成,所有参数均重复测量 3 次取平均值。

2. 基线资料获取:收集患者性别、年龄、体表面积、血压及心率。

三、统计学处理

应用 SPSS 25.0 统计软件进行数据分析。计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,多组比较采用单因素方差分析,组间两两比较采用 LSD- t 检验。计数资料以频数或率表示,组间比较采用 χ^2 检验。相关性分析采用 Pearson 相关性分析法。绘制受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线分析 STI 参数鉴别 HFmrEF 与

HFrEF、HFmrEF 与 HFpEF 的诊断效能。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、各组基线资料比较

各组性别比、年龄、心率、体表面积、收缩压、舒张压比较差异均无统计学意义。见表1。

表1 各组基线资料比较

组别	男/女(例)	年龄(岁)	心率(次/min)	体表面积(m^2)	收缩压(mmHg)	舒张压(mmHg)
HFrEF组(73)	55/18	62±12	86±17	1.66±0.18	130±23	82±13
HFmrEF组(56)	45/11	59±14	81±16	1.69±0.18	135±24	82±16
HFpEF组(66)	44/22	65±15	80±16	1.64±0.16	136±24	80±19
χ^2/F 值	2.828	9.120	1.145	1.072	1.243	0.197
P 值	0.246	0.647	0.405	0.344	0.291	0.821

1 mmHg=0.133 kPa

三、相关性分析

GLS、GWI、GWE 均与 LVEF 呈正相关($r=0.85$ 、 0.74 、 0.72 , 均 $P<0.001$); PSD 与 LVEF 呈负相关($r=-0.30$, $P<0.001$)。见图4。

四、ROC 曲线分析

STI 参数鉴别 HFmrEF 与 HFrEF、HFmrEF 与 HFpEF 的诊断效能见图5、6和表3。

1. GLS、PSD、GWI 及 GWE 截断值分别为-10.55%、60.50 ms、1051.5 mmHg%、83.50% 时鉴别 HFmrEF 与

二、各组 STI 参数比较

HFpEF 组、HFmrEF 组、HFrEF 组 GLS、GWI、GWE 均依次降低, 组间两两比较差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)。HFrEF 组 PSD 较 HFmrEF 组和 HFpEF 组增大, 差异均有统计学意义(均 $P<0.05$); HFmrEF 组与 HFpEF 组 PSD 比较差异无统计学意义。见表2和图1~3。

表2 各组 STI 参数比较($\bar{x}\pm s$)

组别	GLS(%)	PSD(ms)	GWI(mmHg%)	GWE(%)
HFrEF组	7.9±2.9	71.5±26.9	743±400	74.1±11.2
HFmrEF组	11.7±2.5*#	60.2±25.9*	1242±347*#	86.1±6.1*#
HFpEF组	16.6±3.8*	56.9±19.3*	1780±552*	91.3±5.5*
F 值	161.643	6.352	99.778	79.869
P 值	<0.001	0.002	<0.001	<0.001

与 HFrEF 组比较, * $P<0.05$; 与 HFpEF 组比较, # $P<0.05$ 。GLS: 整体纵向应变; PSD: 峰值应变离散指数; GWI: 整体做功指数; GWE: 整体做功效率

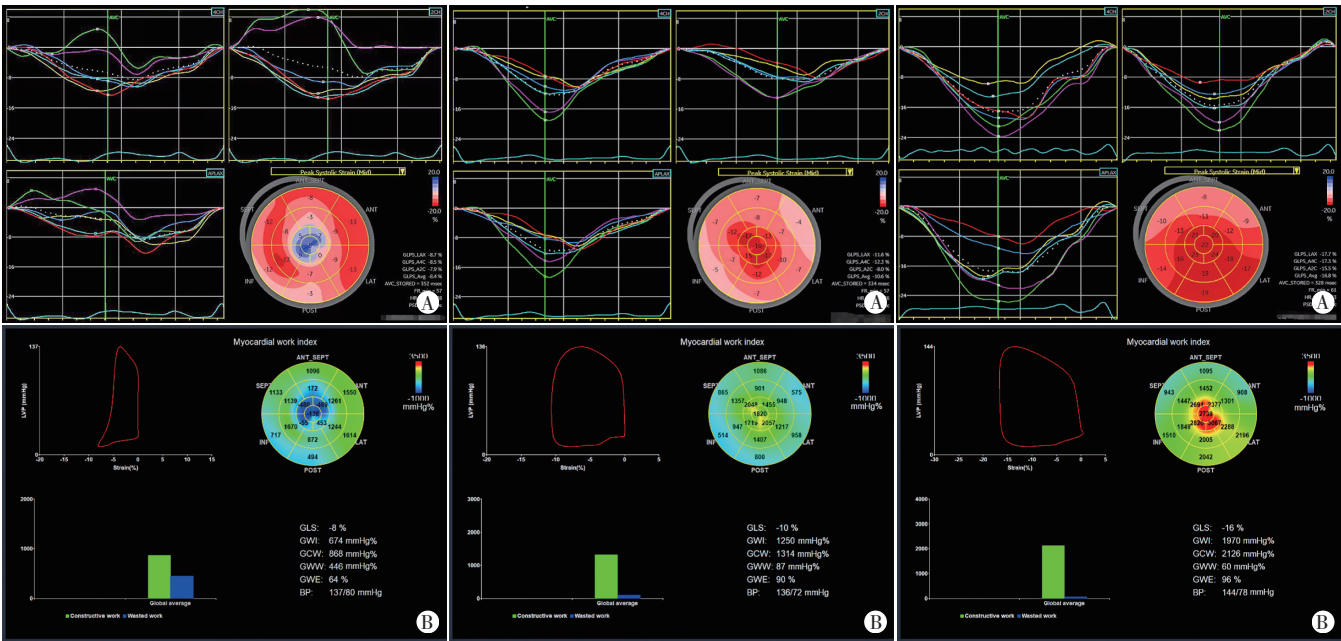


图1 HFrEF组一患者(男,63岁)STI图

图2 HFmrEF组一患者(男,58岁)STI图

图3 HFpEF组一患者(女,67岁)STI图

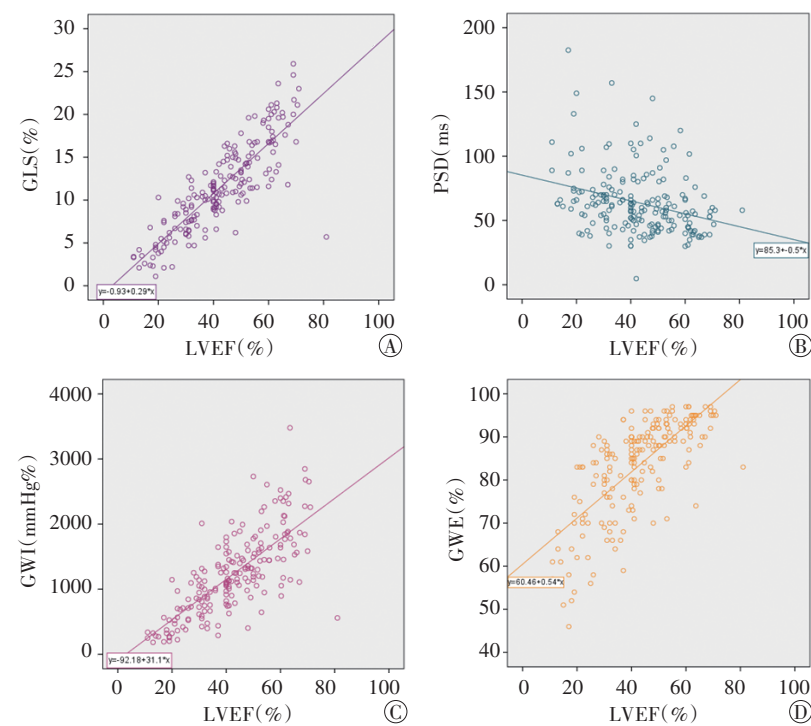


图 4 GLS、PSD、GWI、GWE 与 LVEF 的相关性分析散点图

表 3 STI 参数鉴别 HFmrEF 与 HFrEF、HFmrEF 与 HFpEF 的诊断效能

参数	鉴别 HFmrEF 与 HFrEF 的诊断效能					鉴别 HFmrEF 与 HFpEF 的诊断效能				
	AUC	截断值	灵敏度	特异度	P 值	AUC	截断值	灵敏度	特异度	P 值
GLS	0.938	10.55%	0.836	0.890	<0.001	0.929	11.35%	0.955	0.752	<0.001
PSD	0.676	60.50 ms	0.656	0.712	<0.001	—	—	—	—	—
GWI	0.890	1051.5 mmHg%	0.861	0.795	<0.001	0.877	1428.5 mmHg%	0.773	0.860	<0.001
GWE	0.885	83.50%	0.828	0.781	<0.001	0.866	87.50%	0.864	0.736	<0.001

AUC:曲线下面积;HFmrEF:射血分数中间值心力衰竭;HFrEF:射血分数减低心力衰竭;HFpEF:射血分数保留心力衰竭
HFrEF 的曲线下面积 (AUC) 为 0.938、0.676、0.890、0.885。

2. GLS、GWI 及 GWE 截断值分别为 -11.35%、1428.5 mmHg%、87.50% 时鉴别 HFmrEF 与 HFpEF 的 AUC 为 0.929、0.877、0.866。

讨 论

自 2016 年欧洲心脏病学会首次提出 HFmrEF 以来,其临床意义及病理生理本质始终是学术界争论的焦点。目前主要存在 2 种学术观点:一种基于病理生理机制认为 HFmrEF 与 HFpEF 属于同一疾病谱系的不同临床表现^[2,9];而另一种则通过临床证据强调 HFmrEF 作为独立亚型的重要价值,指出其在病因学特征和治疗反应性方面更倾向于 HFrEF,而预后特征则与 HFpEF 相似^[3,10]。随着循证医学证据的积累,最

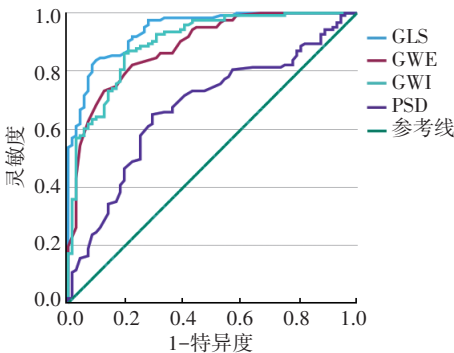


图 5 GLS、PSD、GWI 及 GWE 鉴别 HFmrEF 与 HFrEF 的 ROC 曲线图

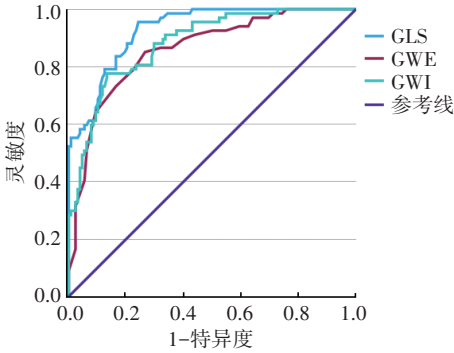


图 6 GLS、GWI 及 GWE 鉴别 HFmrEF 与 HFpEF 的 ROC 曲线图

新国际指南^[6-7]基于 HFmrEF 患者可能从 HFrEF 导向的治疗方案中获益的临床发现,建议将其重新命名为“射血分数轻度减低心力衰竭”。然而目前国内外关于 HFmrEF 的基础及临床研究仍存在较大的知识缺口,特别是在心脏形态结构重构特征、血流动力学变化规律、能量代谢异常模式等方面,这使得 HFmrEF 成为心力衰竭研究领域中亟待解决的关键问题。《2020 中国心力衰竭医疗质量控制报告》^[8]指出, HFmrEF 在心力衰竭人群中的占比高达 21.8%,这更加凸显了深化该领域研究的紧迫性和临床价值。通过先进影像学技术系统解析 HFmrEF 的特征,将为建立精准诊疗体系和改善患者预后提供重要的理论依据。
在心力衰竭评估技术方面,常规超声心动图以 LVEF 评估左室收缩功能,该方法存在操作者依赖性,且难以敏感检测局部心肌运动异常等局限。STI 通过

追踪心肌的“斑点”定量分析心肌形变,无角度依赖性、重复性好,显著降低了主观误差,可精准评估左室17节段心肌应变、运动同步性及心肌做功情况。其中GLS已被证实是继LVEF后最具临床价值的心肌纵向收缩功能评价参数^[11];PSD能定量反映左室壁运动同步性,可作为筛选心脏再同步化治疗(cardiac resynchronization therapy, CRT)患者的补充参数^[12]。而基于左室压力-应变环获取的GWI和GWE均可反映心肌耗氧量,无创评估心肌代谢及心肌储备能力,是心功能评估的重要参数^[13]。基于上述研究背景,本研究应用STI评估HFmrEF患者左室心肌功能,并探讨其在心力衰竭鉴别诊断和风险分层中的临床价值。本研究结果显示, HFpEF组、HFmrEF组、HFrEF组GLS、GWI、GWE均依次降低,且组间两两比较差异均有统计学意义(均 $P<0.05$),与Li等^[14]研究结果一致,提示HFmrEF心肌收缩功能和能量代谢效率处于HFpEF与HFrEF之间的过渡状态。组织病理学研究^[4]显示,这种状态可能与HFmrEF特有的心肌形态结构重构特征有关。从病理生理机制角度分析,不同类型心力衰竭呈现出特征性的血流动力学代偿模式:HFrEF患者由于左室收缩功能显著受损,主要通过Frank-Starling机制增加前负荷来维持心输出量,这一代偿过程导致室壁张力增加和心肌氧耗上升;同时,收缩力减弱导致机械做功效率降低,进一步加剧心肌氧供需失衡。相比之下, HFpEF患者主要表现为左室舒张功能异常和心肌僵硬增加,其代偿机制涉及收缩力增强和心率增快,同样导致心肌氧耗增加^[15]。而HFmrEF可能同时兼具上述两种病理生理特征,既存在类似HFrEF的收缩功能受损(导致单位氧耗效率降低),又表现出类似HFpEF的舒张功能异常(增加无效机械做功)。在心室机械同步性方面,本研究结果显示HFrEF组PSD较HFmrEF组和HFpEF组增大,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$);HFmrEF组与HFpEF组PSD比较差异无统计学意义,提示HFmrEF患者保持了相对完整的心室电机械同步性,可能与其相对完好的心脏传导系统、存活心肌的较好灌注状态^[4],以及更为均匀的心肌纤维化分布模式有关。这一发现具有重要的临床意义:①该结果为解释不同心力衰竭亚型的预后差异提供了依据^[16-17];②对当前将HFmrEF简单归类为“射血分数轻度减低心力衰竭”的命名提议提出了质疑,提示需更全面地考量其独特的病理生理特征。

本研究相关性分析显示, GLS、GWI、GWE均与LVEF呈正相关($r=0.85、0.74、0.72$, 均 $P<0.001$); PSD

与LVEF为负相关($r=-0.30, P<0.001$);其中GLS与LVEF的相关性最强,进一步验证了GLS作为评估心肌纵向收缩功能敏感参数的临床价值。GWI和GWE是基于左室压力-应变环计算的心肌做功参数,其优势在于能够整合心肌收缩功能与后负荷因素(如动脉血压)。然而,这些参数的准确计算高度依赖于血压测量的精确性和时效性(如诊室血压与实时血压测量之间的差异),且显著受血流动力学负荷状态波动的影响,导致其测量变异度相对高于GLS。这种较高的测量变异度可以解释为何GWI、GWE与LVEF的相关性显著弱于GLS与LVEF的相关性,进一步证实GLS在临床实践和科学研究中具有更高的可靠性和稳定性。PSD与LVEF仅呈现较弱的线性负相关,提示在心力衰竭的发生发展过程中,心室收缩不同步虽然是一个重要因素,但在疾病早期阶段可能还涉及更为复杂的病理生理机制,包括但不限于心脏自我调节的Frank-Starling机制、神经内分泌系统的激活与调节等多重因素共同作用。

本研究ROC曲线分析显示, GLS、PSD、GWI及GWE截断值分别为 $-10.55\%、60.50\text{ ms}、1051.5\text{ mmHg}\%$ 、 83.50% 时鉴别HFmrEF与HFrEF的AUC为 $0.938、0.676、0.890、0.885$; GLS、GWI及GWE截断值分别为 $-11.35\%、1428.5\text{ mmHg}\%、87.50\%$ 时鉴别HFmrEF与HFpEF的AUC为 $0.929、0.877、0.866$ 。其中GLS在鉴别HFmrEF与HFrEF、HFmrEF与HFpEF的AUC均最高,提示可将GLS作为预测心力衰竭分层的重要参数;本研究中PSD截断值(60.50 ms)与既往研究^[18]提出的CRT获益截断值(60 ms)高度一致,提示PSD或可作为HFmrEF患者(尤其是QRS波未增宽者)CRT适应证的潜在补充筛选参数。本研究中GWI和GWE的截断值与既往研究^[14,19-20]结果相近,为评估HFmrEF患者的心肌能量代谢效率提供了量化依据。但本研究观察到GWI和GWE数据的离散度均较大,分析原因为:①合并症的影响。本研究纳入患者的高血压占比较高,而高血压介导的左室向心性重构可能通过增加室壁张力,导致心肌氧耗上升^[21];②多因素相互作用。左心室肥厚、心肌纤维化、炎症反应、冠状动脉微血管功能障碍、血管僵硬增加及心室-血管耦联受损^[22]等机制可能共同影响心肌代谢效率,进而导致GWI、GWE测量的变异性增加。可见,尽管GWI和GWE在评估心肌做功方面具有一定价值,但其测量稳定性仍受血流动力学及合并症影响,而GLS因其较高的可重复性和诊断效能,可能更适合作为早期识别HFmrEF的参数。

本研究的局限性:①为横断面、单中心研究,存在选择偏倚风险;②样本量有限,未针对不同病因(如缺血性/非缺血性)或合并症(如高血压、糖尿病)进行亚组分析,可能影响结果的普适性;③STI 参数尤其是 GWI、GWE 易受图像质量、后负荷及测量方法影响,需进一步标准化。今后需扩大样本量,通过多中心、前瞻性研究进一步探讨。

综上所述,STI 可精准评估 HFmrEF 患者左室心肌功能,为其独立分型管理提供了重要的影像学依据;其中 GLS 展现出最优的诊断效能,可作为早期识别和干预 HFmrEF 的可靠参数;而 PSD 可能对筛选潜在 CRT 获益患者具有一定参考价值。

参考文献

- [1] Ponikowski P, Voors AA, Anker SD, et al. 2016 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure: the Task Force for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure of the European Society of Cardiology (ESC) Developed with the special contribution of the Heart Failure Association (HFA) of the ESC[J]. *Eur Heart J*, 2016, 37(27): 2129–2200.
- [2] Palazzuoli A, Beltrami M. Are HFpEF and HFmrEF so different? The need to understand distinct phenotypes[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: 676658.
- [3] Savarese G, Stolfo D, Sinagra G, et al. Heart failure with mid-range or mildly reduced ejection fraction[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2022, 19(2): 100–116.
- [4] Lange T, Backhaus SJ, Schulz A, et al. CMR-based cardiac phenotyping in different forms of heart failure[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2024, 40(7): 1585–1596.
- [5] Lund LH, Crespo-Leiro MG, Laroche C, et al. Heart failure in Europe: guideline-directed medical therapy use and decision making in chronic and acute, pre-existing and de novo, heart failure with reduced, mildly reduced, and preserved ejection fraction—the ESC EORP Heart Failure III Registry[J]. *Eur J Heart Failure*, 2024, 26(12): 2487–2501.
- [6] McDonagh TA, Metra M, Adamo M, et al. 2021 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure[J]. *Eur Heart J*, 2021, 42(36): 3599–3726.
- [7] 中华医学会, 中华医学杂志社, 中华医学会全科医学分会, 等. 中国心力衰竭基层诊疗和管理指南 2024[J]. *中华全科医师杂志*, 2024, 23(6): 549–577.
- [8] 国家心血管病医疗质量控制中心专家委员会心力衰竭专家工作组, 张健, 张宇辉. 2020 中国心力衰竭医疗质量控制报告[J]. *中国循环杂志*, 2021, 36(3): 221–238.
- [9] Martínez-Sellés M, Xu D, Zhang J, et al. Editorial: HFpEF and HFmrEF: different sides of the same coin?[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 916534.
- [10] Li P, Zhao H, Zhang J, et al. Similarities and differences between HFmrEF and HFpEF[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: 678614.
- [11] Smiseth OA, Rider O, Cvijic M, et al. Myocardial strain imaging: theory, current practice, and the future[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2025, 18(3): 340–381.
- [12] Dutta A, Alqabbani RRM, Hagendorff A, et al. Understanding the application of mechanical dyssynchrony in patients with heart failure considered for CRT[J]. *J Cardiovasc Dev Dis*, 2024, 11(2): 64.
- [13] Truong VT, Vo HQ, Ngo TNM, et al. Normal ranges of global left ventricular myocardial work indices in adults: a Meta-analysis[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2022, 35(4): 369–377.e8.
- [14] Li Y, Zheng Q, Cui C, et al. Application value of myocardial work technology by non-invasive echocardiography in evaluating left ventricular function in patients with chronic heart failure[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2022, 12(1): 244–256.
- [15] Przewlocka-Kosmala M, Marwick TH, Mysiak A, et al. Usefulness of myocardial work measurement in the assessment of left ventricular systolic reserve response to spironolactone in heart failure with preserved ejection fraction[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(10): 1138–1146.
- [16] Zhu T, Lei M, Wang Z, et al. A comparative study of systolic and diastolic mechanical synchrony in canine, primate, and healthy and failing human hearts[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: 750067.
- [17] Su X, Guan L, Wu Z, et al. Association between ultrasound-quantified cardiac mechanical dyssynchrony and left heart function and remodeling[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2025, 15(5): 4454–4469.
- [18] Sperlongano S, Benfari G, Ilardi F, et al. Role of speckle tracking echocardiography beyond current guidelines in cardiac resynchronization therapy[J]. *Int J Cardiol*, 2024, 402: 131885.
- [19] Manganaro R, Marchetta S, Dulgheru R, et al. Echocardiographic reference ranges for normal non-invasive myocardial work indices: results from the EACVI NORRE study[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(5): 582–590.
- [20] Tomoaia R, Beyer RS, Zdrengea D, et al. Global work index by non-invasive pressure-strain loops: a novel parameter to assess left ventricular performance in the early stages of heart failure with preserved or mid-range ejection fraction after acute myocardial infarction[J]. *Med Ultrason*, 2021, 23(1): 62–69.
- [21] Sahiti F, Morbach C, Cejka V, et al. Left ventricular remodeling and myocardial work: results from the population-based STAAB cohort study[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: 669335.
- [22] Rosano GMC, Vitale C, Spoletini I. Precision cardiology: phenotype-targeted therapies for HFmrEF and HFpEF[J]. *Int J Heart Fail*, 2024, 6(2): 47–55.

(收稿日期: 2025-02-21)