

基于人工智能的无心电门控左心室心肌应变成像技术临床应用初步研究

刘芯艺^{1,2,3}, 尹立雪^{1,2,3}, 刘秦嘉⁴, 冯 洁⁵

1. 四川省医学科学院·四川省人民医院(电子科技大学附属医院)心血管超声及心功能科, 四川 成都 610072; 2. 超声医学与计算心脏病学四川省重点实验室, 四川省心血管病临床医学研究中心, 国家心血管病临床医学研究中心分中心, 四川 成都 610072; 3. 电子科技大学医学院, 四川 成都 611731; 4. 成都市妇女儿童中心医院(电子科技大学医学院附属医院)超声医学科, 四川 成都 610073; 5. 四川省绵阳四〇四医院(绵阳市第一人民医院)超声科, 四川 绵阳 621000

【摘要】 目的 评估基于人工智能的无心电门控左心室整体纵向应变(non-electrocardiogram-gated global longitudinal strain, Non-ECG GLS)识别左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)异常的能力,并探讨其在不同心血管疾病负荷人群中的变化特征。**方法** 前瞻性纳入 2025 年 3~11 月在四川省人民医院接受经胸超声心动图检查的 181 例患者。所有受试者均完成常规超声心动图及无心电门控左心室应变分析。以 LVEF 作为左心室收缩功能状态的参考标准,比较射血分数正常组(LVEF $\geq 54\%$)及射血分数异常组(LVEF $< 54\%$)Non-ECG GLS 差异。采用受试者工作特征(ROC)曲线分析 Non-ECG GLS 识别 LVEF 异常的效能。根据探索性心血管疾病负荷评分将患者分为低负荷组(0~2 分)、中负荷组(3~5 分)和高负荷组(6~9 分),比较不同负荷组间 Non-ECG GLS 的差异,并进行趋势性检验。随机选取 30 例受试者,由两名操作者分别测量 Non-ECG GLS,采用 Bland-Altman 分析评估操作者间重复性。**结果** 181 例患者中, LVEF 正常 123 例, LVEF 异常 58 例。LVEF 异常组 Non-ECG GLS 绝对值显著低于 LVEF 正常组($P < 0.001$)。在不同性别组、不同年龄组间基线 Non-ECG GLS 比较,差异均无统计学意义($P > 0.05$)。ROC 曲线分析显示, Non-ECG GLS 识别 LVEF 异常的曲线下面积为 0.93 (95%CI: 0.89~0.96, $P < 0.001$), 最佳截断值为 16.2% (按绝对值计), 敏感性为 89.7%, 特异性为 84.6%。不同心血管疾病负荷组间 Non-ECG GLS 差异有统计学意义($F = 47.97, P < 0.001$), 低、中、高负荷组随疾病负荷增加呈下降趋势($P < 0.001$)。Bland-Altman 分析显示, 两名操作者测量结果的平均差值为 -0.19%, 95% 一致性界限为 -2.99%~2.62%。**结论** 基于 AI 的 Non-ECG GLS 对识别 LVEF 异常具有较好的区分能力, 并显示出较好的操作者间重复性。其在不同心血管疾病负荷人群中呈梯度变化, 提示 Non-ECG GLS 可能作为左心室收缩功能评估的辅助影像学参数。

【关键词】 人工智能; 斑点追踪超声; 整体纵向应变; 左心室收缩功能; 无心电门控; 超声心动图

【中图分类号】 R540.4⁺5

【文献标志码】 A

【文章编号】 1672-6170(2026)04-0035-07

- [9] Smistad E, Ostvik A, Salte IM, et al. Real-time automatic ejection fraction and foreshortening detection using deep learning[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2020, 67(12): 2595-2604.
- [10] Maani F, Ukaye A, Saadi N, et al. SimLVSeg: simplifying left ventricular segmentation in 2-D+Time echocardiograms with self- and weakly supervised learning[J]. Ultrasound Med Biol, 2024, 50(12): 1945-1954.
- [11] Huttin O, Petit MA, Bozec E, et al. Assessment of left ventricular ejection fraction calculation on long-axis views from cardiac magnetic resonance imaging in patients with acute myocardial infarction[J]. Medicine, 2015, 94(43): e1856.
- [12] Hergan K, Schuster A, Frühwald J, et al. Comparison of left and right ventricular volume measurement using the Simpson's method and the area length method[J]. Eur J Radiol, 2008, 65(2): 270-278.
- [13] Wandelt LK, Kowallick JT, Schuster A, et al. Quantification of left atrial volume and phasic function using cardiovascular magnetic resonance imaging-comparison of biplane area-length method and Simpson's method[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2017, 33(11): 1761-1769.
- [14] Nolan MT, Thavendiranathan P. Automated quantification in echocardiography[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2019, 12(6): 1073-1092.
- [15] He B, Kwan AC, Cho JH, et al. Blinded, randomized trial of sonographer versus AI cardiac function assessment[J]. Nature, 2023, 616(7957): 520-524.
- [16] Akan T, Alp S, Bhuiyan MS, et al. ViViEchoformer: deep video regressor predicting ejection fraction[J]. J Imaging Inform Med, 2025, 38(4): 2041-2052.
- [17] Ali W, Alsabban W, Shahbaz M, et al. EFNet: estimation of left ventricular ejection fraction from cardiac ultrasound videos using deep learning[J]. PeerJ Comput Sci, 2025, 11: e2506.
- [18] Asch FM, Poilvert N, Abraham T, et al. Automated echocardiographic quantification of left ventricular ejection fraction without volume measurements using a machine learning algorithm mimicking a human expert[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2019, 12(9): e009303.
- [19] Sziártó Á, Merkely B, Kovács A, et al. Deep learning-enabled echocardiographic assessment of biventricular ejection fractions: the dual-task QUEST-EF model[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2025, 26(8): 1402-1405.
- [20] Vukadinovic M, Chiu IM, Tang X, et al. Comprehensive echocardiogram evaluation with view primed vision language AI[J]. Nature, 2026, 650(8103): 970-977.

(收稿日期: 2026-05-02; 修回日期: 2026-05-11)

(本文编辑: 侯晓林)

Preliminary clinical application study of artificial intelligence-based non-electrocardiogram-gated le

LIU Xin-yi^{1,2,3}, YIN Li-xue^{1,2,3}, LIU Qin-jia⁴, FENG Jie⁵ 1. Department of Cardiovascular Ultrasound & Noninvasive Cardiology, Sichuan Academy of Medical Sciences & Sichuan Provincial People's Hospital(Affiliated Hospital of University of Electronic Science and Technology of China), Chengdu 610072, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Ultrasound Medicine and Computational Cardiology, Sichuan Provincial Clinical Research Center for Cardiovascular Diseases, Branch Center of the National Clinical Research Center for Cardiovascular Diseases, Chengdu 610072, China; 3. School of Medicine, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 4. Department of Ultrasound Medicine, Chengdu Women and Children's Central Hospital(Affiliated Hospital of School of Medicine, University of Electronic Science and Technology of China), Chengdu 610073, China; 5. Department of Ultrasound, Mianyang 404 Hospital /Mianyang First People's Hospital, Mianyang 621000, China

【Corresponding author】 YIN Li-xue

【Abstract】 **Objective** To evaluate the ability of artificial intelligence-based non-electrocardiogram-gated global longitudinal strain (Non-ECG GLS) to identify the abnormalities of left ventricular ejection fraction (LVEF) and to explore its changing characteristics in populations with different cardiovascular disease burden. **Methods** A total of 181 patients who underwent transthoracic echocardiography in our hospital from March to November 2025 were prospectively enrolled. All subjects completed routine echocardiography and non-ECG GLS analysis. Using LVEF as the reference standard for left ventricular systolic function, Non-ECG GLS was compared between the preserved EF group (LVEF $\geq 54\%$) and the abnormal EF group (LVEF $< 54\%$). Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis was performed to evaluate the efficacy of Non-ECG GLS in identifying LVEF abnormalities. Based on an exploratory cardiovascular disease burden score, patients were divided into a low-burden (0~2 points) group, a moderate-burden (3~5 points) group and a high-burden (6~9 points) group. Differences in the Non-ECG GLS among the three groups were compared. A trend test was also conducted. Thirty subjects were randomly selected, and Non-ECG GLS was measured by two independent operators. Inter-operator reproducibility was assessed using Bland-Altman analysis. **Results** Among the 181 patients, 123 had normal LVEF and 58 had abnormal LVEF. The absolute value of Non-ECG GLS in the abnormal LVEF group was significantly lower than that in the normal LVEF group ($P < 0.001$). There were no statistically significant differences in baseline Non-ECG GLS between different gender groups and different age groups. ROC curve analysis showed that the area under the curve for Non-ECG GLS in identifying LVEF abnormalities was 0.93 (95% CI: 0.89~0.96, $P < 0.001$). The optimal cutoff value was 16.2% based on absolute value. The sensitivity was 89.7%. The specificity was 84.6%. There was a statistically significant difference in Non-ECG GLS among the different cardiovascular disease burden groups ($F = 47.97$, $P < 0.001$). A decreasing trend in Non-ECG GLS was observed with increasing disease burden from the low-to the high-burden group ($P < 0.001$). Bland-Altman analysis revealed a mean difference of -0.19% between the two operators. The 95% consensus threshold was -2.99% to 2.62%. **Conclusions** AI-based Non-ECG GLS demonstrates good discriminatory ability for identifying LVEF abnormalities. It also shows favorable inter-operator reproducibility. Its gradient variation across different cardiovascular disease burden populations suggests that Non-ECG GLS may serve as an auxiliary imaging parameter for assessing left ventricular systolic function.

【Key words】 Artificial intelligence; Speckle tracking echocardiography; Global longitudinal strain; Left ventricular systolic function; Non-electrocardiogram-gated; Echocardiography

近年来,心肌应变成像已成为评价左心室收缩功能的重要影像学工具。基于斑点追踪超声心动图(speckle tracking echocardiography,STE)的整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)能够反映心内膜下纵向纤维的收缩功能,被认为较传统左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)更敏感地反映早期心肌功能损伤^[1]。目前,多项研究已将GLS作为心肌病、缺血性心脏病及肿瘤相关心脏毒性监测的重要指标之一^[2,3]。

【基金项目】国家科技重大专项资助项目(编号:2024ZD0527200)

【通讯作者简介】尹立雪,男,主任医师,教授,博士研究生导师。国家杰出医师,国务院政府特殊津贴专家,卫生部有突出贡献中青年专家,四川省学术技术带头人,中华医学会理事,亚太超声心动图协会副主席,中华医学会超声医学分会第七、八和九届副主任委员,中国医师协会超声医师分会第一、二届副会长。主要研究方向:心血管超声。

传统左心室整体纵向应变测量通常依赖心电图(electrocardiogram, ECG)门控进行心动周期标记,通过R波定位收缩起始时间。然而,在实际临床工作中,心电门控质量可能受到导联接触状态、信号噪声、体动伪差及心律不齐等多种因素影响,从而增加心动周期时相标记误差,进而影响应变分析的准确性^[4]。此外,心脏电活动与机械收缩之间并不存在绝对同步关系,二者之间存在一定的电-机械耦合延迟^[5]。不同设备及制造商在ECG信号采集方式和同步算法方面亦存在差异,这些因素均可能引入一定程度的系统性误差,从而影响不同中心之间数据的可比性^[6]。与此同时,在临床超声检查量较大的工作环境中,ECG导联连接及同步过程也在一定程度上增加了检查流程的复杂性,并可能延长图像采集时间^[7]。因此,探索一种不依赖心电门控即可完成左心室应变分析的方法,具有一定的临床

意义。

随着图像处理算法的发展,一些新的应变分析方法开始尝试通过心肌机械运动特征自动识别心动周期,从而实现无需心电信号参与的应变测量。基于 AI 的无心电时相标记技术(Non-ECG strain analysis)在理论上能够简化检查流程,并提高在复杂临床环境中的可操作性。然而,目前关于无心电门控左心室整体纵向应变(Non-ECG GLS)临床应用价值的研究仍较为有限,其在识别左心室收缩功能异常方面的诊断效能尚缺乏系统评价。

基于此,本研究以前瞻性收集的临床超声心动图数据为基础,初步评估基于 AI 的 Non-ECG GLS 在识别左心室收缩功能异常中的应用价值,并进一步分析其测量重复性及在不同疾病负荷人群中的表现,以期为基于 AI 的无心电门控左心室应变分析技术的临床应用提供初步依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 纳入 2025 年 3~11 月在四川省人民医院心内科就诊并接受经胸超声心动图检查的成年患者 181 例。纳入标准:年龄 ≥ 18 岁;在四川省人民医院心内科就诊并接受经胸超声心动图检查;能够获得标准左心室心尖四腔心、二腔心及三腔心动态图像;可完成 Non-ECG GLS 分析。排除标准:合并心房颤动、频繁室性早搏或其他明显影响心动周期稳定性的心律失常者;心尖切面图像质量不佳、心内膜边界显示不清或存在明显心尖缩短,无法完成应变分析者;既往接受左心室辅助装置植入、心脏移植或存在明显影响左心室几何结构评价的特殊情况者;临床资料不完整者。其中男 99 例(55%),女 82 例(45%)。患者年龄分布以 46~65 岁为主(54%),LVEF 范围为 25.43%~78.65%。本研究遵循《赫尔辛基宣言》的原则,经四川省人民医院医学伦理委员会审查批准[批准号:伦审(研)2025-120]。

1.2 方法

1.2.1 常规超声心动图检查及无心电门控左心室心肌应变检查方法 采用迈瑞 Recho R9 彩色多普勒超声诊断系统(Mindray, China),配备 SPM6-1U 相控阵探头,探头频率范围 1.5~4.5 MHz。所有受试者均使用同一型号超声设备进行检查,获取标准左心室四腔心、二腔心及三腔心切面动态图像。图像采集时尽量避免心尖缩短,并获得清晰显示左心室内膜边界的标准心尖四腔心、二腔心及三腔心动态图像。每个切面至少保存连续 3 个心动周期动态图像。所有图像均于超声设备内置的斑点追踪分析软件进行应变分析。分析过程中由经过培训

的超声医师检查自动追踪结果,必要时对心内膜边界进行手动校正;若任一关键切面追踪质量不佳且经校正后仍无法满足分析要求,则排除该病例。基于 AI 的无心电应变技术通过图像序列中左心室心肌运动特征自动识别心动周期特定时相,无需同步心电信号即可完成特定时相和空间位置的心肌超声斑点追踪,从而获得 Non-ECG GLS 参数。以常规超声心动图参数作为临床参考标准,其中 LVEF 作为左心室收缩功能状态的主要判定指标。考虑到本研究以筛查 LVEF 降低为目的,并参考根据既往研究及临床共识^[8],本研究采用 LVEF $<54\%$ 作为 LVEF 降低的判定标准,将 LVEF $\geq 54\%$ 定义为 LVEF 正常,据此分为射血分数正常组($n=123$)、射血分数异常组($n=58$)。通过 ROC 分析确定 Non-ECG GLS 识别 LVEF 异常的最佳截断值。依据此截断值分为 Non-ECG GLS 异常组和正常组。所有分组信息均由两名心血管医师进行独立核对。

1.2.2 探索性心血管疾病负荷评分 为探索 Non-ECG GLS 区分不同心血管疾病负荷人群的能力,本研究基于《中国心力衰竭诊断和治疗指南》及《ESC 慢性冠脉综合征指南》^[9~11]等相关指南/共识,构建了探索性心血管疾病负荷评分进行疾病负荷分层。若同一患者同时存在多种疾病或危险因素,则按相应条目累加计分;对于冠心病患者,若已存在明确心肌梗死病史,则按心肌梗死条目计分,不再重复计入“冠心病(未心肌梗死)”条目。该评分为机制驱动型探索性评分,各因素依据病理生理机制对 GLS 的预期影响进行等权重主观赋分(见表 1)。该评分未经大样本统计校准及信效度检验,故主要用于样本内分层描述与假设生成,不用于个体化风险预测或直接临床决策。根据疾病负荷评分系统,计算每例患者的疾病负荷总分;本研究样本中实际观察到的评分范围为 0~9 分。基于评分的分布特征及临床意义,又将 181 例患者分为三个负荷亚组:低负荷组:0~2 分($n=46$),定义为无明显心肌损伤或仅有危险因素。中负荷组:3~5 分($n=90$),定义为存在明确心肌损伤或多种危险因素。高负荷组:6~9 分($n=45$),定义为存在严重心肌损伤或多病共存。

1.2.3 可重复性检验 为评估 AI Non-ECG GLS 技术的可重复性,随机选取 30 例受试者,包括 15 例 LVEF 正常者和 15 例 LVEF 降低者,由两名操作者在间隔约 1 小时的条件下分别完成图像采集及 Non-ECG GLS 分析,以模拟不同时间、不同操作者条件下的临床测量情境。采用 Bland-Altman 分析法评估两位医师测量结果的一致性。所有统计

学检验均为双尾检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

表 1 探索性心血管疾病负荷评分系统构建依据及赋分标准

疾病/因素	赋分	病理生理机制
心肌梗死 ^[9]	3 分	节段性心肌坏死、纤维化, 直接导致应变异常
心力衰竭病史 ^[10,11]	3 分	心脏重构、心肌功能障碍, 直接影响 GLS
心肌病 ^[12,13]	3 分	原发性心肌病变, 显著影响应变
冠心病(未心梗) ^[14,15]	2 分	心肌缺血、冬眠心肌、可逆性应变异常
中重度瓣膜病 ^[16,17]	2 分	容量/压力负荷过重, 继发性心肌损伤
高血压 ^[18,19]	1 分	压力负荷增加, 左室肥厚, 早期应变改变
糖尿病 ^[20]	1 分	糖尿病心肌病、微血管病变、纤维化
慢性肾病 ^[21,22]	1 分	尿毒症心肌病、容量负荷、钙磷代谢紊乱
慢性阻塞性肺病 ^[23]	1 分	右心负荷、低氧血症、全身炎症
年龄 ≥ 65 岁 ^[24]	1 分	心肌老化、弹性减退

1.3 统计学方法 采用 SPSS 21.0 统计软件进行数据分析。计量资料以均数 $\pm$ 标准差表示, 计数资料以例数(百分比)表示。考虑到本研究主要评价 Non-ECG GLS 对 LVEF 降低的筛查性识别能力, 并为便于 ROC 分析及统一分组, 本研究采用 LVEF $<54\%$ 作为 LVEF 降低的定义(该阈值主要用于本研究样本内分析, 并不等同于所有人群的唯一临床诊断标准)。采用受试者工作特征(ROC)曲线分析评估 Non-ECG GLS 识别 LVEF 降低(LVEF $<54\%$)的诊断效能, 计算曲线下面积及其 95% 置信区间, 以约登指数最大值确定最佳诊断截断值。采用单因素方差分析比较不同负荷亚组间 Non-ECG GLS 的差异, 两组间差异采用最小显著性差

异法(LSD 法); 同时采用线性趋势检验分析 Non-ECG GLS 与疾病负荷评分之间的剂量-反应关系。采用 Bland-Altman 分析评估两名操作者测量结果的一致性, 报告平均差值及 95% 一致性界限。所有统计学检验均为双尾检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 不同人群基线 Non-ECG GLS 比较 不同年龄组间 Non-ECG GLS 差异无统计学意义($P=0.83$); 男性和女性总体 Non-ECG GLS 差异亦无统计学意义($P=0.30$)。在不同年龄层内, 男女性 Non-ECG GLS 比较差异均无统计学意义($P>0.05$)。见表 2。

表 2 基线 Non-ECG GLS 及不同性别与年龄组的比较

性别	18~45 岁		46~65 岁		≥ 66 岁		共计	
	<i>n</i>	Non-ECG GLS	<i>n</i>	Non-ECG GLS	<i>n</i>	Non-ECG GLS	<i>n</i>	Non-ECG GLS
总体	36	-17.26 $\pm$ 4.26	97	-17.40 $\pm$ 3.92	48	-16.98 $\pm$ 3.69	181	-17.26 $\pm$ 3.92
男性	22	-16.67 $\pm$ 4.36	54	-17.75 $\pm$ 3.97	23	-17.85 $\pm$ 3.62	99	-17.53 $\pm$ 3.97
女性	14	-18.17 $\pm$ 4.07	43	-16.96 $\pm$ 3.88	25	-16.18 $\pm$ 3.65	82	-16.93 $\pm$ 3.85
<i>t</i>		1.04		1.03		0.99		1.59
<i>P</i>		0.30		0.31		0.32		0.12

2.2 Non-ECG GLS 诊断效能分析与最佳截断值研究 ROC 曲线分析结果显示, 在全人群中, Non-ECG GLS 识别 LVEF 降低的最佳截断值为 -16.2%, 对应的曲线下面积(AUC)约为 0.93(95%CI: 0.89~0.96, $P<0.001$), 敏感性为 89.7%, 特异性为 84.6%(图 1)。以该截断值 -16.2% 为界, 将 Non-ECG GLS 绝对值 $<16.2\%$ 定义为 Non-ECG GLS 异常; 将 Non-ECG GLS 绝对值 $\geq 16.2\%$ 定义为 Non-ECG GLS 正常。

2.3 基于本研究 ROC 截断值的 Non-ECG GLS 分类结果 Non-ECG GLS 分组与 LVEF 分组的总一致率为 156/181 (86.2%)。射血分数正常的 123 例

患者中, Non-ECG GLS 正常者占比较高(84.6%); 而在射血分数异常的 58 例患者中, Non-ECG GLS 异常者占比较高(89.7%)(见表 3)。射血分数异常组的 Non-ECG GLS 绝对值(-13.27% $\pm$ 3.92%)显著低于正常组的(-19.14% $\pm$ 2.07%), 差异有统计学意义($t=10.85, P<0.0001$)。

表 3 基于 ROC 最佳截断值的 Non-ECG GLS 样本内分类结果 [*n*(%)]

亚组	Non-ECG GLS 正常	Non-ECG GLS 异常	合计
LVEF $\geq 54\%$	104(84.6)	19(15.4)	123
LVEF $<54\%$	6(10.3)	52(89.7)	58
合计	110	71	181

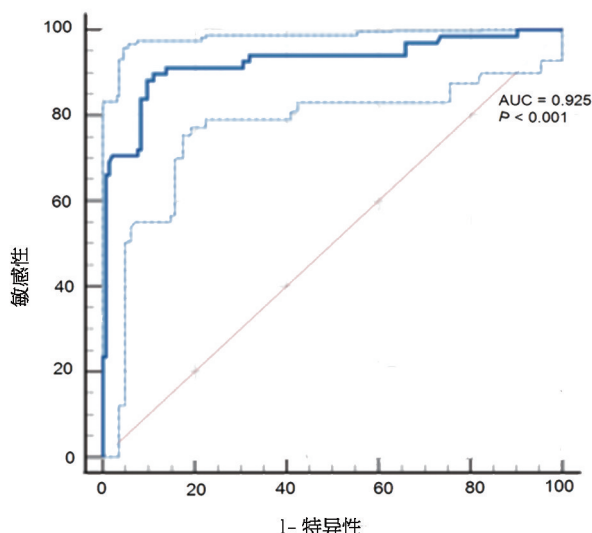


图1 全人群患者中 Non-ECG GLS 识别 LVEF 降低的 ROC 曲线

2.4 不同临床心脏疾病负荷评分患者的亚组分析 单因素方差分析显示,不同心血管疾病负荷组间 Non-ECG GLS 差异具有统计学意义 ($F = 47.97, P < 0.0001$)。低负荷组 Non-ECG GLS 为 $(-19.93\% \pm 1.97\%)$,中负荷组为 $(-17.75\% \pm 3.18\%)$,高负荷组为 $(-13.56\% \pm 4.05\%)$,随着疾病负荷评分的增加,Non-ECG GLS 绝对值呈逐渐降低。

2.5 Non-ECG GLS 测量的可重复性检验 为评估无心电应变技术的可重复性,随机选取 30 例受试者(包括 15 例左心室心肌功能正常者和 15 例功能受损者),由两名操作者(A 和 B)在间隔 1 小时的条件下分别进行测量。采用 Bland-Altman 分析法评估两次测量结果的一致性。Bland-Altman 结果显示两名操作者测量结果的平均差值为 -0.19% ,差值的标准差为 1.43% 。95% 一致性界限为 $-2.99\% \sim 2.62\%$ 。Bland-Altman 散点图显示,医师 A 和医师 B 的两次测量具有良好的可重复性。见图 2。

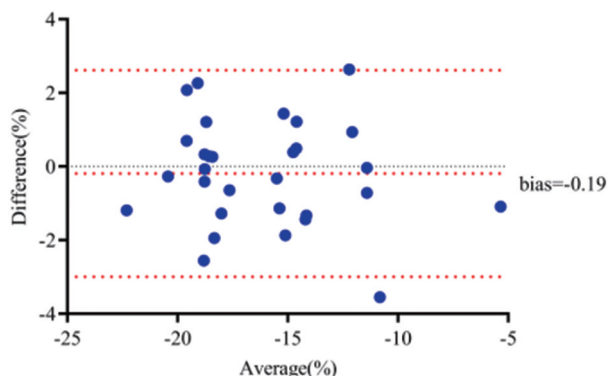


图2 两名操作者测量 Non-ECG GLS 的 Bland-Altman 图

3 讨论

本研究基于前瞻性收集的临床超声心动图资

料,初步评估了 AI 辅助 Non-ECG GLS 在识别 LVEF 异常中的应用价值。结果显示,Non-ECG GLS 在全人群中识别 LVEF 异常的 AUC 为 0.93,敏感性和特异性分别为 89.7% 和 84.6%,提示其在本研究队列中对左心室收缩功能异常具有较好的区分能力。GLS 作为反映心肌纵向收缩功能的定量指标,已被广泛用于心肌病、缺血性心脏病及肿瘤相关心脏毒性监测等领域^[25~27]。本研究结果进一步提示,在不依赖同步心电信号的条件下,基于图像序列完成的 GLS 分析仍可提供有价值的左心室收缩功能信息,为急诊、床旁检查及高工作负荷超声场景中的心肌功能定量评估提供了新的思路。

无心电门控应变分析的核心在于摆脱对心电 R 波的时相依赖,转而依据连续超声图像中心肌边界、心腔形态及心肌运动轨迹等机械运动信息识别心动周期关键时相。传统应变分析通常依赖心电信号进行心动周期标记,当导联接触不良、信号噪声较大或心律不齐时,心电同步质量下降可能影响应变分析的稳定性。相比之下,Non-ECG GLS 通过图像序列本身提供的机械运动信息完成时相识别和斑点追踪,在理论上可减少心电信号质量对分析流程的影响,并简化检查操作。然而,当前不同厂家平台的无心电门控算法实现方式尚未完全公开和统一,其跨设备、跨中心的一致性仍需进一步验证。因此,本研究结果更适合作为该技术临床应用可行性的初步证据,而不宜直接外推为普遍适用的诊断标准。

值得注意的是,在 LVEF 正常的 123 例患者中,仍有 19 例(15.4%)表现为 Non-ECG GLS 绝对值低于本研究 ROC 曲线确定的最佳截断值(16.2%)。这一结果可能提示,部分患者在 LVEF 尚处于正常范围时已存在一定程度的纵向心肌收缩功能受损。其可能机制在于,GLS 主要反映心内膜下纵向纤维的收缩功能,而该层心肌对缺血、压力负荷、代谢异常及微血管损伤等因素较为敏感,因此可能早于 LVEF 出现改变^[28]。类似现象在射血分数保留型心力衰竭等疾病中已有报道,即部分患者可在 LVEF 保持正常的情况下出现 GLS 下降^[29]。但需要强调的是,本研究中 Non-ECG GLS 异常的判定阈值来源于同一研究队列,且未结合心脏磁共振、血清生物标志物或长期预后终点进行验证,因此这部分病例尚不能直接等同于“早期心肌损伤”,更适宜理解为提示可能存在潜在心肌功能异常的影像学线索。

从临床应用角度来看,在射血分数正常的人群中,Non-ECG GLS 更适合作为一种早期筛查或辅助评估指标,而不宜完全替代常规超声心动图的综合判断。对于此类患者,单一参数往往难以完整反映心肌力学状态,未来可考虑将 Non-ECG GLS 与其他

功能指标进行联合评估。例如,左心室分层应变可分别评估心内膜下与心外膜下心肌功能,在 Non-ECG GLS 尚正常的早期阶段可能更敏感地检出心内膜下心肌受累^[30,31];左心室扭转及解旋参数则可提供心肌在三维空间中的运动信息,对 Non-ECG GLS 形成补充^[32]。此外,结合无创左室压力构建的心肌做功指数,亦可在不额外增加操作的情况下,评估心肌的能量利用效率,为临床提供更全面的心功能评估视角^[33]。

相反,在 LVEF 异常的 58 例患者中,仍有 6 例 (10.3%) Non-ECG GLS 处于正常范围。该现象提示 LVEF 与 GLS 虽然均可反映左心室收缩功能,但二者评价的力学维度并不完全相同。LVEF 主要反映左心室整体容量变化,受前负荷、后负荷、心室几何构型及径向/圆周方向收缩共同影响;而 GLS 主要反映纵向心肌纤维的缩短功能。部分心肌疾病可能主要累及中层圆周纤维或影响左心室扭转运动,从而出现 LVEF 下降而 GLS 相对保留的情况^[34]。此外,LVEF 本身也存在一定测量变异性,尤其在心内膜显示不清、心室形态不规则或节段性室壁运动异常时,二维超声测得的 LVEF 可能受到影响。因此,Non-ECG GLS 与 LVEF 不完全一致并不必然代表某一指标错误,而是提示二者应作为互补参数共同解读。既往研究表明,当左心室收缩功能明显下降时,GLS 往往与 LVEF 之间呈现较为稳定的线性关系,并可用于进一步评估心肌功能损伤的严重程度^[35]。

本研究进一步采用探索性心血管疾病负荷评分对患者进行分层,结果显示低、中、高负荷组 Non-ECG GLS 绝对值依次降低,且组间差异具有统计学意义。这一结果提示,在本研究样本中,Non-ECG GLS 与心血管疾病负荷增加所伴随的心肌功能受损程度可能存在一定关联。从病理生理角度看,心肌梗死、心力衰竭、心肌病、冠心病、瓣膜病、高血压和糖尿病等因素均可通过心肌缺血、纤维化、压力或容量负荷增加、代谢紊乱及微血管损伤等机制影响心肌纵向收缩功能。因此,随着疾病因素的累积,GLS 绝对值下降具有一定合理性。需要指出的是,本研究所采用的疾病负荷评分为基于指南和病理生理机制构建的探索性评分,尚未经过大样本统计建模、权重校准及信效度检验,因此其结果主要用于描述 Non-ECG GLS 在不同临床复杂程度人群中的分布特征,而不能直接作为个体化风险预测或临床决策依据。未来仍需结合多变量模型、预后终点及外部验证队列,进一步明确 Non-ECG GLS 在疾病负荷评估中的独立价值。

本研究还对 Non-ECG GLS 的操作者间重复性

进行了初步评估。Bland-Altman 分析显示,两名操作者测量结果的平均差值为 -0.19% ,95%一致性界限为 $-2.99\% \sim 2.62\%$,提示该方法在本研究条件下具有较好的操作者间一致性。由于应变分析仍需操作者对心内膜边界进行必要校正,测量结果可能受到图像质量、切面标准化程度及操作者经验的影响。因此,较好的重复性结果提示 Non-ECG GLS 具备一定临床推广基础,但仍需在更大样本、不同设备平台及不同操作者经验水平下进一步验证其稳定性。

本研究仍存在一定局限性。首先,本研究为单中心研究,样本量相对有限,尤其是 LVEF 异常组仅纳入 58 例患者,可能影响 ROC 截断值的稳定性。其次,本研究以二维超声测得的 LVEF 作为左心室收缩功能状态的参考标准,而未采用心脏磁共振或长期心血管事件作为独立参照,因此尚不能直接评价 Non-ECG GLS 对心肌结构损伤或临床预后的预测价值。第三,本研究所得 Non-ECG GLS 最佳截断值来源于同一研究队列,尚缺乏独立验证集或外部队列验证,因此该截断值更适合作为本研究样本内的参考结果,而不宜直接作为普遍适用的临床诊断阈值。第四,本研究采用的心血管疾病负荷评分为探索性评分,尚未进行大样本权重校准、信度和效度检验,也未进一步开展多变量调整分析,因此疾病负荷分层结果主要用于描述性分析和假设生成。年龄 ≥ 65 岁作为反映心血管疾病易感性及心肌老化相关因素的探索性条目纳入评分,但其权重设置具有主观性,后续仍需进一步验证。第五,本研究排除了心房颤动、频繁早搏及图像质量较差者,而这些人恰恰是无心电门控技术未来可能具有应用价值的临床场景,因此后续研究应进一步评价该技术在节律不齐、床旁检查及图像质量受限场景中的适用性。最后,本研究基于单一设备和分析平台完成,尚不能说明该技术在不同厂商设备及不同软件算法之间的一致性。未来需通过多中心、大样本、跨平台研究,并结合长期随访结局,进一步验证 Non-ECG GLS 的临床应用价值。

【参考文献】

- [1] Smiseth OA, Torp H, Opdahl A, et al. Myocardial strain imaging: how useful is it in clinical decision making? [J]. Eur Heart J, 2016, 37(15): 1196-1207.
- [2] Sławiński G, Hawryszko M, Liżewska-Springer A, et al. Global longitudinal strain in cardio-oncology: a review[J]. Cancers, 2023, 15(3): 986.
- [3] Park JJ, Park JB, Park JH, et al. Global longitudinal strain to predict mortality in patients with acute heart failure[J]. J Am Coll Cardiol, 2018, 71(18): 1947-1957.
- [4] Shingu Y, Kubota S, Wakasa S, et al. Left-ventricular electromechanical delay is prolonged in patients with postoperative atrial fibril-

- lation[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2011, 39(5): 684-688.
- [5] Demir M, Demir C. Assessment of atrial electromechanical coupling characteristics and P-wave dispersion in patients with atrial septal aneurysm[J]. *South Med J*, 2011, 104(6): 385-388.
 - [6] Balinisteanu A, Duchenne J, Puvrez A, et al. Vendor differences in 2D-speckle tracking global longitudinal strain: an update on a 10-year standardization effort [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2025, 26(8): 1360-1373.
 - [7] Badran HM, El Etriby A, Elfeky A, et al. Unified adult transthoracic echocardiographic report: an expert consensus document of the Egyptian Working Group of Echocardiography [J]. *Egypt Heart J*, 2024, 76(1): 88.
 - [8] Asch FM, Miyoshi T, Addetia K, et al. Similarities and differences in left ventricular size and function among races and nationalities: results of the world alliance societies of echocardiography normal values study[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2019, 32(11): 1396-1406. e2.
 - [9] Voigt JU, Pedrizzetti G, Lysyansky P, et al. Definitions for a common standard for 2D speckle tracking echocardiography: consensus document of the EACVI/ASE/industry task force to standardize deformation imaging[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2015, 28(2): 183-193.
 - [10] 田庄, 张抒扬. 《中国心力衰竭诊断和治疗指南 2024》要点解读[J]. *协和医学杂志*, 2024, 15(4): 801-806.
 - [11] McDonagh TA, Metra M, Adamo M, et al. 2023 Focused Update of the 2021 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure[J]. *Eur Heart J*, 2023, 44(37): 3627-3639.
 - [12] 中华医学会罕见病分会, 中国医师协会心血管内科医师分会 心血管精准医学与罕见病学组. 成人心肌梗死无创影像技术临床诊断指南(2024 版)[J]. *中华医学杂志*, 2024, 104(44): 4038-4056.
 - [13] Elena A, Alexandros P, Gimeno Juan R, et al. 2023 ESC guidelines for the management of cardiomyopathies[J]. *Eur Heart J*, 2023, 44(37): 3503-3626.
 - [14] Vrints C, Andreotti F, Koskinas KC, et al. 2024 ESC Guidelines for the management of chronic coronary syndromes[J]. *Eur Heart J*, 2024, 45(36): 3415-3537.
 - [15] Yang X, Li J, Hu D, et al. Predicting the 10-year risks of atherosclerotic cardiovascular disease in Chinese population: the China-PAR project (prediction for ASCVD risk in China) [J]. *Circulation*, 2016, 134(19): 1430-1440.
 - [16] Praz F, Borger MA, Lanz J, et al. 2025 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease[J]. *Eur Heart J*, 2025, 46(44): 4635-4736.
 - [17] Yeo KK, Tan JWC, Muller DW, et al. Asian Pacific society of cardiology consensus recommendations on the use of MitraClip for mitral regurgitation[J]. *Eur Cardiol*, 2021, 16: e25.
 - [18] Chinese Society of Cardiology, Chinese Medical Association. Clinical practice guideline for the management of hypertension in China [J]. *Chin Med J*, 2024, 137(24): 2907-2952.
 - [19] McEvoy JW, McCarthy CP, Bruno RM, et al. 2024 ESC Guidelines for the management of elevated blood pressure and hypertension[J]. *Eur Heart J*, 2024; 45(38): 3912-4018.
 - [20] Schütt K, Federici M, Verket M, et al. The ‘10 commandments’ for the 2023 ESC Guidelines for the management of cardiovascular disease in patients with diabetes[J]. *Eur Heart J*, 2024, 45(15): 1298-1300.
 - [21] Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) CKD Work Group. KDIGO 2024 Clinical practice guideline for the evaluation and management of chronic kidney disease[J]. *Kidney Int*, 2024, 105(4S): S117-S314
 - [22] Mullens W, Martens P, Testani JM, et al. Renal effects of guideline-directed medical therapies in heart failure: a consensus document from the Heart Failure Association of the European Society of Cardiology[J]. *Eur J Heart Fail*, 2022, 24(4): 603-619.
 - [23] Rhee CK, Ko FWS, Giap VV, et al. Management of COPD with cardiovascular risk in Asia: a review by the Asian Pacific society of respiratory COPD assembly[J]. *Respirology*, 2025, 30(9): 817-830.
 - [24] Zhang Y, Deng Q, Hu P, et al. Burden and risk factors of cardiovascular diseases in Asia, 1990-2021: an analysis for GBD 2021 [J]. *JACC Asia*, 2025: S2772-S3747(25)00518-6.
 - [25] Lyon Alexander R, Teresa L, Couch Liam S, et al. 2022 ESC Guidelines on cardio-oncology developed in collaboration with the European Hematology Association (EHA), the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology (ESTRO) and the International Cardio-Oncology Society (IC-OS) [J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(41): 4229-4361.
 - [26] 刘永铭, 杨京港, 薛丽丽, 等. 射血分数保留的心力衰竭患者心脏结构及功能的动态演变及其影响因素分析[J]. *中国循环杂志*, 2023, 38(2): 182-188.
 - [27] Potter E, Marwick TH. Assessment of left ventricular function by echocardiography the case for routinely adding global longitudinal strain to ejection fraction[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(2): 260-274.
 - [28] 谢林, 吴凌恒, 陈建雄, 等. 左心室心肌应变参数预测初诊及未经治疗高血压患者射血分数保留性心力衰竭[J]. *中国医学影像技术*, 2023, 39(10): 1502-1507.
 - [29] Shah AM, Claggett B, Sweitzer NK, et al. Prognostic importance of impaired systolic function in heart failure with preserved ejection fraction and the impact of spironolactone[J]. *Circulation*, 2015, 132(5): 402-414.
 - [30] 杜景昊, 宋桂芳, 姜述怡, 等. 应用分层应变联合压力应变环技术评价先兆子痫患者左心室心肌功能[J]. *中国超声医学杂志*, 2023, 39(10): 1126-1129.
 - [31] Akiya A, Takahashi K, Akimoto S, et al. Novel findings of early cardiac dysfunction in patients with childhood-onset inflammatory bowel disease using layer-specific strain analysis[J]. *Inflamm Bowel Dis*, 2023, 29(10): 1546-1554.
 - [32] Mora V, Geraldo J, Roldán I, et al. A new coding system for the identification of left ventricular rotation patterns and their relevance to myocardial function[J]. *Ann Biomed Eng*, 2024, 52(9): 2509-2520.
 - [33] Camilli M, Ballacci F, Lamendola P, et al. Strain-derived myocardial work indices in adult cancer survivors: results from an observational study and comparison with available reference ranges[J]. *Cardiooncology*, 2025, 11(1): 78.
 - [34] Taylor RJ, Umar F, Lin EL, et al. Mechanical effects of left ventricular midwall fibrosis in non-ischemic cardiomyopathy [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2016, 18: 1.
 - [35] Deharo F, Grapsa J. Global longitudinal strain as a predictor of risk in patients with heart failure with preserved ejection fraction: a deserved role? [J]. *Eur J Heart Fail*, 2024, 26(4): 882-884.

(收稿日期:2026-05-08;修回日期:2026-05-20)

(本文编辑:侯晓林)