

# 运动踏板负荷超声心动图左室应变成像在可疑冠心病患者诊断中的应用\*

高海叶 闫静 彭芮 张艳 张璐 邓爱云

(兰州大学第一医院心内科, 甘肃 兰州 730000)

**【摘要】** 目的 探讨应用超声心动图左室应变技术联合踏板运动负荷试验评估可疑冠心病患者运动负荷前后左室的变化。方法 选取 2023 年 7 月—2024 年 11 月我院收治的可疑冠心病受检者 118 例, 根据冠状动脉影像学检查结果是否有冠状动脉狭窄分为病变组 83 例和对照组 35 例。在一周内, 所有受试者行负荷超声心动图(SE)检查, 对于超声心动图分析, 采用左室整体纵向应变。依据冠状动脉造影结果将病变组分为轻度狭窄组 27 例、中度狭窄组 32 例和重度狭窄组 24 例。评估所有受试者运动踏板负荷前、后左室射血分数(LVEF)的变化, 运动踏板负荷前、后整体纵向应变值的变化, 运动踏板负荷状态整体纵向应变值预测冠脉狭窄的敏感性和特异性。结果 对照组、轻度狭窄组负荷状态下具有一定的收缩储备, LVEF 较静息状态提高( $P < 0.05$ ); 中度、重度狭窄组患者无收缩储备, LVEF 值在负荷状态下较静息状态变化无明显统计学差异( $P > 0.05$ )。静息状态下, 对照组、冠脉轻度狭窄组整体峰值应变值正常, 中度狭窄组、重度狭窄组整体峰值应变值减低; 运动踏板负荷峰值状态下, 中度、重度狭窄患者整体峰值应变值低于静息状态, 差异有统计学意义( $P < 0.05$ ), 对照组、冠脉轻度狭窄组整体峰值应变值均高于基础状态, 差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。左室运动负荷应变值预测冠状动脉狭窄有较高的敏感性和特异性。结论 超声心动图左室应变技术联合踏板运动负荷试验, 对可疑冠心病患者的心肌功能进行定量分析, 可提高超声心动图诊断价值。

**【关键词】** 可疑冠心病; 踏板运动负荷超声心动图; 左室应变技术

**【中图分类号】** R445.1; R541.4 **【文献标志码】** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-3511.2026.03.008

## Application of exercise stress echocardiography and left ventricular strain imaging in evaluating suspected coronary heart disease

GAO Haiye, YAN Jing, PENG Rui, ZHANG Yan, ZHANG Lu, DENG Aiyun

(Department of Cardiology, The First Hospital of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**【Abstract】** **Objective** To evaluate left ventricular functional changes before and after exercise in patients with suspected coronary heart disease (CHD) using echocardiographic left ventricular strain combined with stress echocardiography test. **Methods** A total of 118 subjects with suspected coronary heart disease were enrolled. Based on the results of coronary artery imaging examinations, they were divided into a coronary artery stenosis group (83 cases) and a control group (35 cases). The control group consisted of individuals whose coronary artery imaging results ruled out the presence of coronary artery stenosis. All subjects underwent stress echocardiography (SE) within one week. Echocardiographic analysis involved measuring left ventricular global longitudinal strain (GLS). The Disease group was further subdivided based on coronary angiography findings into mild ( $n=27$ ), moderate ( $n=32$ ), and severe ( $n=24$ ) stenosis groups. The following parameters were assessed: changes in left ventricular ejection fraction (LVEF) and global longitudinal strain from rest to peak exercise, as well as the sensitivity and specificity of exercise global longitudinal strain for predicting coronary stenosis. **Results** The controlled and mild stenosis groups demonstrated contractile reserve, indicated by a statistically significant increase in LVEF during stress compared to rest ( $P < 0.05$ ). In contrast, the moderate and severe stenosis groups showed no contractile reserve, with no significant change in LVEF from rest to stress ( $P > 0.05$ ). At rest,

基金项目: 甘肃省青年科技基金项目(24JRRA320)

通信作者: 张璐, E-mail: zhanglu518@163.com

引用本文: 高海叶, 闫静, 彭芮, 等. 运动踏板负荷超声心动图左室应变成像在可疑冠心病患者诊断中的应用[J]. 西部医学, 2026, 38(3): 364-

369. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3511.2026.03.008

peak global longitudinal strain was normal in the controlled and mild stenosis groups but reduced in the moderate and severe stenosis groups. At peak exercise, global longitudinal strain was significantly lower than resting values in the moderate and severe stenosis groups ( $P < 0.05$ ), whereas it was significantly higher than baseline in the controlled and mild stenosis groups ( $P < 0.05$ ). Exercise global longitudinal strain showed high sensitivity and specificity for predicting coronary stenosis. **Conclusion** Echocardiographic left ventricular strain analysis combined with a stress echocardiography test provides a quantitative assessment of myocardial function in patients with suspected CHD, enhancing the diagnostic value of echocardiography.

**【Key words】** Suspected coronary heart disease; Exercise stress echocardiography; Left ventricular strain technique

冠心病是一类严重危害人类健康的心血管疾病,在世界范围内,冠心病每年的发病率及全因死亡率都在不断攀升,由于我国人口老龄化的国情,冠心病发病率每年都呈现出递增趋势,且患者中有一大部分属于年轻化<sup>[1]</sup>。早期精准、快速诊断心肌缺血区域、程度,精准评估左室心肌,心肌损伤,对患者的治疗及预后具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。心肌变形指标被认为是缺血的敏感标志物,可有助于定量冠状动脉狭窄的血流动力学意义<sup>[4-6]</sup>,对于预测临床预后有良好的意义<sup>[7]</sup>。负荷超声心动图(Stress echocardiography, SE)是一种无创超声心动图检查技术,运动 SE 是将超声心动图、心电图、踏车运动负荷试验相结合的影像技术,将其应用于已确诊冠心病患者及可疑冠心病患者的疾病评估与诊断,依据其结果对患者的下一步诊疗计划给出指导意见,提高诊断的准确性<sup>[8-9]</sup>。对于冠心病及可疑冠心病患者,冠状动脉狭窄的严重程度并不总是与左心室射血分数(Left ventricular ejection fraction, LVEF)相关<sup>[10]</sup>,左室形变较 LVEF 更敏感地发现亚临床心肌损伤。尤其针对可疑冠心病患者,冠状动脉计算机断层扫描血管造影(Computed tomography angiography, CTA)或冠状动脉造影(Coronary angiography, CAG)大于或等于 70% 的狭窄有时可能不会导致心肌血流量限制,且三分之二的中度狭窄不会导致血流量限制<sup>[11]</sup>。对于临床上部分可疑冠心病患者,临床证据不足但又不能完全排除,2019 年欧洲心脏协会指南提出建议首选无创功能性影像学检查或 CTA(I 类推荐, B 级证据),对于验前概率(Pre test probability, PTP) > 15% 的患者应首选非侵入性检查比如功能性成像方式<sup>[12]</sup>。有研究表明<sup>[13]</sup>, CTA 阴性预测价值更高。基于以上研究背景,本研究旨在探讨静息和运动踏车负荷试验状态下评估可疑冠心病患者左室心肌,提升超声心动图对患者左室心肌评估价值,对于图像质量不佳者,在左心室造影模式下进行评估,为患者进一步诊疗提供客观、准确的依据。

## 1 资料与方法

1.1 研究对象 选取 2023 年 7 月—2024 年 11 月兰州大学第一医院心内科就诊的可疑冠心病受检者 118

例,根据冠状动脉影像学检查结果分为两组:病变组 [ $n=83$ , 冠状动脉影像学检查证实存在冠状动脉狭窄(狭窄程度  $\geq 50\%$ ) 的冠心病患者;及排除有临床意义冠状动脉狭窄(狭窄程度  $< 50\%$ ) 的胸痛患者] 和对照组 [ $n=35$ , 无冠脉狭窄]。纳入标准:①病变组符合上述 CAG 确诊冠脉狭窄  $\geq 50\%$  的标准及无临床意义冠脉狭窄  $< 50\%$  的胸痛标准;对照组符合上述 CTA 检查排除冠脉狭窄的标准。②检测时受试者的血压、心绞痛等症状均得到较好的控制。③SE 检查与根据冠状动脉影像学检查间隔时间小于一周, SE 检查前 48 h 内停用  $\beta$  受体阻滞剂及硝酸酯类药物, 24 h 无服用钙通道阻滞, 1 周内无洋地黄类药物用药史。④以上受检者均签署检查知情同意书。排除标准:①严重心血管或瓣膜病史。②超声心动图 LVEF  $< 55\%$ 。③四肢运动障碍。④精神疾病。⑤严重阻塞性肺疾病。⑥严重肾功能损害[估计肾小球滤过率  $\leq 30 \text{ mL}/(\text{min} \cdot 1.73 \text{ m}^2)$ ]。⑦明显心电图异常(无窦性心律、左束支阻滞、病理 Q 波或 T 波)或植入起搏器。所有纳入者均行静息及运动踏车 SE 检查,记录纳入者的基础资料:年龄、收缩压、BMI、吸烟史、饮酒史、N 末端脑钠肽前体(N-terminal pro-brain natriuretic peptide, NT-proBNP)、肌钙蛋白 I(Troponin I, Tni)、肌酸激酶同工酶 MB(Creatine kinase-MB isoenzyme, CK-MB)、血脂、血糖、性别、家族史、饮食。本研究获兰州大学第一医院伦理委员会审批通过(审批号:LDYYLL-2024-449)。

1.2 仪器设备 采用倾斜式功率踏车 ergoselect1200, Philips 的 EPIQ 7C 超声诊断仪, S5-1 相控阵探头, 频率 1~5 MHz, 利用 Qlab 10.8 定量分析软件进行图像后处理分析。辅助检测系统:倾斜式功率踏车 ergoselect1200 配套的可自动定期监测心率、血压变化的监测仪器。配有运动心电检测系统, 监护仪, 抢救药品, 检查过程由一位经验丰富的超声医生、一位具备高级生命维持能力的护士操作。

## 1.3 运动踏车 SE 标准操作流程

1.3.1 检查前准备 仔细询问受检者病史、用药史、过敏史及禁忌症、检查前 3 h 禁食、禁咖啡因及酒精,

着宽松衣物和运动鞋。签署知情同意书,告知患者可能的风险(如心律失常、心肌梗死等)。准备超声心动图仪、踏车设备、心电监护仪、血压计、急救药品(如硝酸甘油、利多卡因)及除颤器等设备。

1.3.2 检查过程 检查过程中患者取仰卧位,从低负荷(25 W 开始),以约 60 转/分的转速行运动踏车试验,约每 2~3 min 增加 25 W,通过依次增加阻力,诱导心肌组织耗氧增加,直到达到目标心率(220-年龄)×85%,运动过程中受检者出现不适或新发、加重室壁运动异常、心律失常、血压异常(血压下降>10 mmHg 或收缩压>210 mmHg)及患者无法耐受及时停止运动,在运动过程中,在每个节段达到峰值时采集图像,采集心尖四腔图、两腔图、三腔图。记录参数:心室大小、室壁厚度、LVEF。持续监测心电图、血压及症状(如胸痛、头晕等)。

1.3.3 注意事项与安全性 备急救预案,高危患者需建立静脉通路。禁忌症:包括急性心肌梗死、严重主动脉瓣狭窄、左主干病变等。

1.3.4 图像采集、分析 在静息和运动踏车负荷状态下,采集并存储心尖两腔、三腔、四腔切面至少 4 个心动周期动态图像,二维超声心动图(Two dimensional echocardiogram,2DE)模式仔细观察心脏结构、室壁节段及心内膜边缘显示情况,通过 aCMQ 分析左心室 18 节段,得到左心室应变牛眼图,记录静息以及负荷状态下左心室心肌应变值(图 1~2),以二维斑点追踪超声心动图心肌纵向应变规范化检查中国专家共识(2023 版)为指导行左室应变检查。对于图像质量较差的患者行左心腔声学(Left ventricular opacification, LVO)造影,检查签署知情同意书,告知患者及其家属造影剂适应症和禁忌症,提前建立静脉输液通道,造影时进行左室造影图像采集:进入 LVO 模式,调节扇区大小和深度,超声造影剂采用 SonoVue(意大利 Bracco 公司),5 mL 生理盐水与六氟化硫冻干粉末配置,经肘静脉团注配置造影剂 1 mL,随后生理盐水冲管。

1.4 冠状动脉影像学检查 病变组 83 例均行有创性 CAG 检查。包括无临床意义冠状动脉狭窄程度<50%的胸痛患者,对照组 35 例行冠状动脉 CTA 检查,无冠脉狭窄。所有 118 例受试者均行静息及负荷左心室应变分析。依据左心室应变牛眼图得出左心室整体应变,对照组:无冠脉狭窄;依据冠脉狭窄程度进行分组,狭窄程度<50%为轻度狭窄组;50%≤狭窄程度<70%为中度狭窄组;狭窄程度≥70%为重度狭窄组,且将所得值与 SE 值比较。

1.5 统计学分析 采用 SPSS 26.0 统计学软件进行

数据处理。符合正态分布的计量资料以均数±标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,不符合正态分布的计量资料以中位数和四分位数表示。计数资料以例数(百分比)表示。组间比较:符合正态分布的计量资料采用独立样本 *t* 检验;不符合正态分布的计量资料采用 Mann-Whitney *U* 检验;计数资料采用  $\chi^2$  检验。组内比较(静息状态与负荷状态):符合正态分布的配对计量资料采用配对样本 *t* 检验。采用受试者工作特征(ROC)曲线分析左室应变参数对冠脉狭窄程度的预测价值。采用 Bland-Altman 分析法进行重复性检验。*P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组基线资料比较 病变组吸烟率、NT-ProBNP 高于对照组,血脂、血糖、家族史、饮食方面差异有统计学意义(*P*<0.05),其余参数比较差异无统计学意义(*P*>0.05)。见表 1。

表 1 两组一般临床资料比较[( $\bar{x} \pm s$ ), *n*, *n*(×10<sup>-2</sup>), *M*(*P*<sub>25</sub>,*P*<sub>75</sub>)]

Table 1 Comparison of general clinical data. Table with 5 columns: Item, Control group (n=35), Disease group (n=83), t/χ²/z, P. Rows include Age, Sex, Blood pressure, BMI, Smoking, Alcohol, High lipid, Diabetes, Family history, Healthy diet, NT-proBNP, Tni, CK-MB.

2.2 左室收缩储备功能的计算 对照组、轻度狭窄组负荷状态下具有一定的收缩储备,LVEF 较静息状态提高(*P*<0.05),中度、重度狭窄组患者无收缩储备,LVEF 值在负荷状态下较静息状态变化无明显统计学差异(*P*>0.05)。见表 2。

表 2 各组患者运动负荷前后 LVEF 的比较( $\bar{x} \pm s$ )

Table 2 Comparison of LVEF before and after exercise load in patients

Table with 6 columns: Group, n, Rest LVEF, Load LVEF, t, P, ΔLVEF. Rows include Control, Mild stenosis, Moderate stenosis, Severe stenosis.

注:ΔLVEF=负荷状态 LVEF(%) - 静息状态 LVEF(%), ΔLVEF>5%,具有收缩储备。

2.3 不同程度冠状动脉狭窄患者与对照组不同状态下整体应变值比较 依据冠状动脉影像学检查结果,将左心室整体应变值进行分组分析,静息状态下 CTA 检查正常的对照组、CAG 检查轻度狭窄组整体峰值应变值正常,中度、重度狭窄组整体峰值应变值降低;运动踏车负荷状态下,中度、重度狭窄组整体峰值应变值低于静息状态,差异有统计学意义( $P < 0.05$ ),对照组及轻度狭窄组的负荷状态整体峰值应变值均高于静息状态,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。见表 3 及图 1~2。

表 3 各组超声整体纵向应变值比较( $\bar{x} \pm s$ )

Table 3 Comparison of global longitudinal strain values

组别	n	静息状态应变值	负荷状态峰值应变值	t	P
对照组	35	22.37±2.84	25.19±1.69	2.15	0.039
轻度狭窄组	27	20.75±2.66	22.75±2.70	4.89	<0.001
中度狭窄组	32	16.87±2.61	14.48±2.34	5.72	<0.001
重度狭窄组	24	12.45±3.22	9.35±2.81	6.24	<0.001

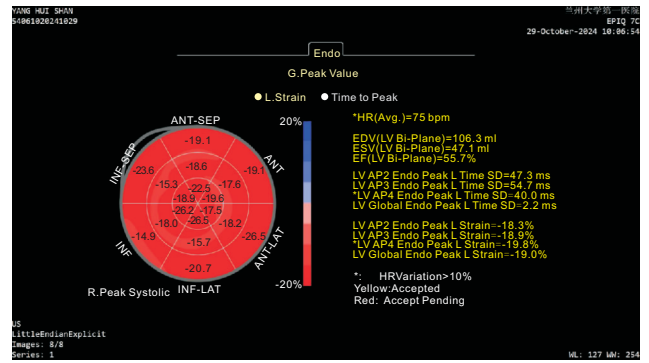


图 2 对照组左室应变牛眼图

Figure 2 The left ventricular strain bulls' eye diagram of the control group

2.4 应变值预测冠状动脉狭窄的敏感性和特异度分析 统计数据,分析得到 ROC 曲线结果:运动踏车负荷状态左室峰值应变值 11.49%为预测重度狭窄发生的最佳截断值,运动踏车负荷状态左室峰值应变值 14.5%为预测冠脉中度狭窄发生的最佳截断值,运动踏车负荷状态应变值 22.97%为最佳预测冠脉轻度狭窄及对对照的指标,参数均具有较高的敏感性和特异性。见表 4 及图 3~5。

表 4 应变参数预测冠脉狭窄的 ROC 曲线分析

Table 4 ROC curve analysis of strain parameter prediction for coronary stenosis

组别	AUC	95%CI	截断值 (%)	灵敏度	特异度	P
对照及轻度狭窄组	0.902	0.870~0.935	22.97	0.81	0.78	<0.001
中度狭窄组	0.802	0.754~0.851	14.50	0.73	0.73	<0.001
重度狭窄组	0.787	0.742~0.833	11.49	0.76	0.76	<0.001

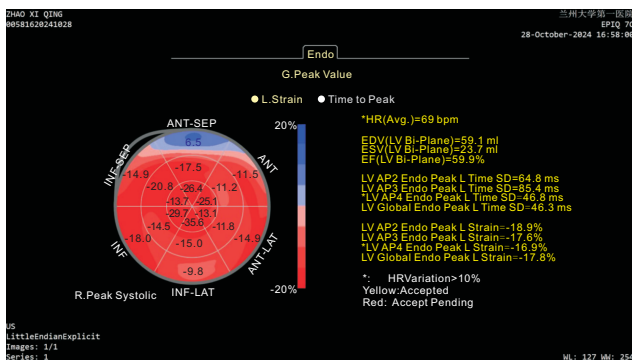


图 1 冠脉狭窄组左室应变牛眼图

Figure 1 The left ventricular strain bulls' eye diagram of the coronary artery stenosis group

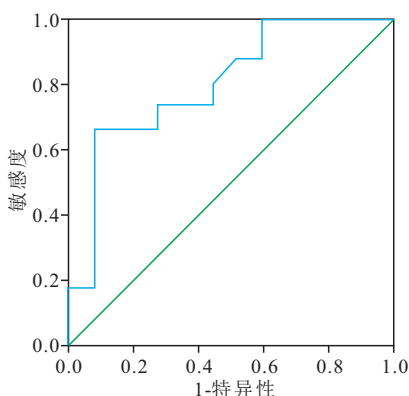


图 3 重度狭窄组:基于应变截断值诊断性能的 ROC 曲线分析

Figure 3 Severe stenosis group: ROC curve analysis of the diagnostic performance at the truncated strain value

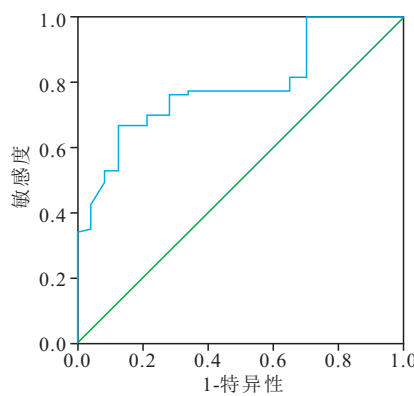


图 4 中度狭窄组:基于应变截断值诊断性能的 ROC 曲线分析

Figure 4 Moderate stenosis group: ROC curve analysis of the diagnostic performance at the truncated strain value

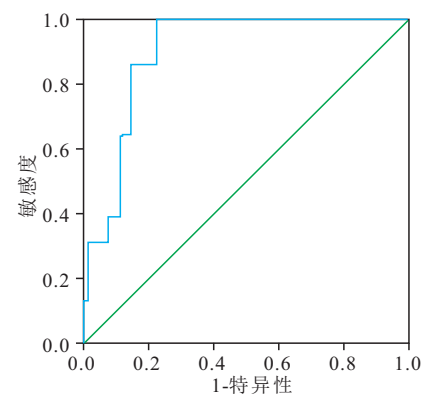


图 5 对照及轻度狭窄组:基于应变截断值诊断性能的 ROC 曲线分析

Figure 5 Control and mild stenosis group: ROC curve analysis of the diagnostic performance at the truncated strain value

### 3 讨论

运动负荷踏车试验通过加快心率和升高血压等生理反应,增加了心肌的氧气消耗,从而可能引起心肌缺血和缺氧,这会导致心肌收缩力异常。运动是调节冠状动脉血流量的关键手段,在运动过程中,它能引起冠状动脉的扩张,进而增加血流量,确保心肌细胞获得充足的血液供应。对于那些在运动状态下冠状动脉扩张能力有限的受检者,心肌细胞的血液供应可能会受到限制。根据在运动负荷峰值状态下心肌细胞受损的不同程度,可以利用超声心动图左心室应变进行分析、评估<sup>[14]</sup>。

根据冠状动脉的工作原理,当三支主要血管中的一支存在狭窄时,通常情况下,在机体静息状态下,如果冠状动脉的狭窄程度小于 80%~90%,冠状动脉能够调节自身的血流量,维持正常的血流以满足心肌的氧气需求,此时病变血管供血区域的心肌血流与正常区域的心肌血流没有显著差异,心肌细胞功能得以保持正常<sup>[15]</sup>。在这种情况下,静息时的心电图或超声心动图结果往往显示为阴性,但心肌可能已经处于潜在的危险状态;当机体处于运动负荷状态时,心脏的工作量增加,耗氧量也随之增加,必须通过正常冠状动脉的充分扩张和局部血流供应的增加(最大可达静息时的 4~5 倍),以保证相应区域心肌的氧气需求。然而,狭窄的冠状动脉扩张能力有限或无法扩张,导致了垂直或水平的“窃血”效应,血流储备难以满足急剧增加的需求,导致相对血流灌注不足的冠状动脉供血区域发生心肌缺血和缺氧<sup>[16]</sup>。纵向应变是心肌缺血的一个非常敏感的指标,以往的药物负荷试验研究表明,特定区域的负荷运动超声心动图纵向应变与相应的病变冠状动脉相关<sup>[17-18]</sup>。

本研究结果显示,对照组、轻度狭窄组受试者负荷状态下具有一定的收缩储备,LVEF 较静息状态提高值 $>5\%$  ( $P<0.05$ ),中度、重度组冠脉狭窄组受试者左心室无收缩储备,LVEF 值在负荷状态下较静息状态变化无明显统计学差异 ( $P>0.05$ )。分析表明,病变组既有单支血管不同程度狭窄的情况,也有合并多支血管不同程度狭窄的情况。因此,在负荷状态下,各心肌节段的运动既有增加也有减弱,但整体上仍是一个协同代偿的整体,整体 LVEF 值与静息状态相比并没有显著变化。对于冠脉血管正常的对照组或轻度狭窄的病变组受试者,在静息及运动负荷状态下,左室纵向应变值均正常,且运动负荷状态下左室纵向应变值大于静息状态 ( $P<0.05$ ),这表明在轻度狭窄状态下,心肌未见明显受损。有研究表明<sup>[19]</sup>,冠脉狭窄时,心内膜最为敏感,轻度狭窄时,心肌中层和

外膜可以发生代偿,心肌灌注并未发生明显变化,心肌代偿功能使得应变值维持正常。对于中度狭窄组,静息状态下的应变值基本接近正常值,但较对照组和轻度狭窄组有所降低,运动负荷状态下左室纵向应变值降低,且较静息状态下的差异具有统计学意义 ( $P<0.05$ );重度狭窄组在静息状态下应变值明显降低,较对照组、轻度和中度狭窄组均有所降低,运动负荷状态下左室纵向应变值较静息状态进一步降低 ( $P<0.05$ )。运动导致心率升高,心肌收缩力增强,代谢需氧量增加,使得狭窄的血管发生水平和垂直的“窃血”效应,血流重新分布,在运动状态下血流受限,诱发了狭窄血管供应区域的心肌缺血,应变值降低。先前的研究表明<sup>[20]</sup>,缺血心肌由于收缩储备较低,适应应激的能力较低。超过 2/3 的冠脉中度狭窄患者血流不受限,微循环正常,所以在静息状态下,冠脉中度狭窄患者的心肌应变处于左心室应变临界低值状态,负荷状态下适应应激的能力较低,左室应变值降低。此外,根据 ISCHEM 等大型研究发现,中度狭窄患者不一定存在心肌缺血情况,因此静息状态下纵向应变值在临界值范围内,SE 联合应变不一定能诱发检测出心肌缺血,这也解释了少部分病变者在静息状态下应变值正常,负荷状态下纵向应变值维持在正常范围内的原因。先前的循证医学分析得出<sup>[21]</sup>,药物负荷试验诊断可疑冠心病的敏感性为 79%,特异性为 85%。本研究中,踏车运动 SE 不仅具有与药物 SE 相似的敏感性和特异性,而且就负荷状态应变值对患者冠脉狭窄程度进行了危险分层,本研究得出的单中心数据表明,在运动踏车负荷试验状态下,轻度狭窄及以下患者的左心室纵向应变截断值为 22.97%,冠脉中度狭窄的应变截断值为 14.5%,冠脉重度狭窄的应变截断值为 11.49%,具有较高的敏感性和特异性,对冠脉狭窄有良好的预测价值。且在 SE 模式下,应用左心室整体纵向应变定量评估可疑冠心病患者左室心肌,得到负荷状态下左心室纵向应变评估冠脉不同狭窄程度的应变值,且具有较高的敏感性和特异性,较以往常规 2DE 显著提高了诊断的准确性,补充了该类患者既往 2DE 评估可疑冠心病患者左室收缩功能的方法。

本研究存在一定的局限性,对照组与病变组采用了不同的影像学检查方法进行分组确认(分别为 CTA 和 CAG),尽管冠脉 CTA 已被证实具有极高的阴性预测值<sup>[13]</sup>,能够可靠地排除有临床意义的冠脉狭窄,但这种设计仍可能引入部分验证偏倚。然而,鉴于对无创检查结果阴性的受试者行有创性 CAG 检查不符合医学伦理,未来的研究希望能采用统一的、更精确的检查手段,如基于 CT 的血流储备分数对所有受试者

进行评估。

#### 4 结论

在可疑冠心病患者中踏车 SE 联合左室心肌应变可以早期发现阳性结果、明确诊断,对患者进行危险度分层,提高了超声心动图诊断可疑冠心病的诊断价值,使患者避免不必要的 CAG 检查,为患者提供经济、安全、便捷的检查方法,提高患者的就医效率,节约患者的就医成本。

#### 【参考文献】

- [1] FAROUX L, GUIMARAES L, WINTZER-WEHEKIND J, *et al.* Coronary artery disease and transcatheter aortic valve replacement: JACC state-of-the-art review[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 74(3): 362-372.
- [2] KRITTANAWONG C, KHAWAJA M, TAMIS-HOLLAND J E, *et al.* Acute myocardial infarction: etiologies and mimickers in young patients [J]. *J Am Heart Assoc*, 2023, 12(18): e029971.
- [3] COLLET J P, THIELE H, BARBATO E, *et al.* 2020 ESC Guidelines for the management of acute coronary syndromes in patients presenting without persistent ST-segment elevation: the Task Force for the management of acute coronary syndromes in patients presenting without persistent ST-segment elevation of the European Society of Cardiology (ESC)[J]. *Eur Heart J*, 2021, 42(14): 1289-1367.
- [4] HAGEMANN R A, HOFFMANN S, BRAININ P, *et al.* Early diastolic strain rate by two-dimensional speckle tracking echocardiography is a predictor of coronary artery disease and cardiovascular events in stable angina pectoris[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2020, 36(7): 1249-1260.
- [5] COSTESCU A, RIENDEAU BEAULAC G, GUENSCH D P, *et al.* Perioperative echocardiographic strain analysis: what anesthesiologists should know[J]. *Can J Anaesth*, 2024, 71(5): 650-670.
- [6] BRAININ P. Myocardial postsystolic shortening and early systolic lengthening: current status and future directions[J]. *Diagnostics*, 2021, 11(8): 1428.
- [7] PICANO E, CIAMPI Q, CITRO R, *et al.* Stress echo 2020: the international stress echo study in ischemic and non-ischemic heart disease[J]. *Cardiovasc Ultrasound*, 2017, 15(1): 3.
- [8] COTRIM C A, CAFÉ H, JOÃO I, *et al.* Exercise stress echocardiography: where are we now? [J]. *World J Cardiol*, 2022, 14(2): 64-82.
- [9] CHAI S C, TEO H K, LEE P S, *et al.* Prognostic impact of stress echocardiography with discordant stress electrocardiography in patients with suspected coronary artery disease[J]. *Singapore Med J*, 2020, 61(3): 142-148.
- [10] 姜静蓉,杨芸,李颖忻,等. 腺苷能负荷超声心动图在慢性冠脉综合征中的应用进展[J]. *中华超声影像学杂志*, 2024, 33(10): 911-915.
- [11] 中国超声心动图学会,中华医学会超声医学分会浅表组织和血管学组,中国医药教育学会超声医学专业委员会,等. 慢性冠状动脉综合征负荷超声心动图检查临床实践指南(2023版)[J]. *中华超声影像学杂志*, 2023, 32(11): 921-945.
- [12] FERRARI R, ROSANO G. 2019 guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes: congratulations and criticism[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Pharmacother*, 2020, 6(5): 331-332.
- [13] ANTONOPOULOS A S, ANGELOPOULOS A, TSIIOUFIS K, *et al.* Cardiovascular risk stratification by coronary computed tomography angiography imaging: current state-of-the-art [J]. *Eur J Prev Cardiol*, 2022, 29(4): 608-624.
- [14] 宋雨微,井玲. 负荷超声心动图在缺血性心脏病中的临床应用进展[J]. *心血管病学进展*, 2021, 42(1): 47-51.
- [15] GAUDRY M, VAIRO D, MARLINGE M, *et al.* Adenosine and its receptors: an expected tool for the diagnosis and treatment of coronary artery and ischemic heart diseases[J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(15): 5321.
- [16] 吴爵非,吕创业,唐颖,等. 腺苷负荷心肌声学造影的临床应用[J/OL]. *中华医学超声杂志(电子版)*, 2019, 16(10): 723-726.
- [17] NISHI T, FUNABASHI N, OZAWA K, *et al.* Regional layer-specific longitudinal peak systolic strain using exercise stress two-dimensional speckle-tracking echocardiography for the detection of functionally significant coronary artery disease[J]. *Heart Vessels*, 2019, 34(8): 1394-1403.
- [18] SHARMA S, LASSEN M C H, NIELSEN A B, *et al.* The clinical application of longitudinal layer specific strain as a diagnostic and prognostic instrument in ischemic heart diseases: a systematic review and meta-analysis[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2023, 10: 980626.
- [19] CHEN Z M, ZHANG S M, FANG A J, *et al.* Early changes in left ventricular myocardial function by 2D speckle tracking layer-specific technique in neonates with hyperbilirubinemia [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2022, 12(1): 796-809.
- [20] XIAO Q Y, ZHAO X, YANG R, *et al.* Assessment of left ventricular energy loss in patients with mild coronary artery stenosis by using vector flow mapping combined with exercise stress echocardiography[J]. *Echocardiography*, 2023, 40(6): 537-549.
- [21] CELENG C, LEINER T, MAUROVICH-HORVAT P, *et al.* Anatomical and functional computed tomography for diagnosing hemodynamically significant coronary artery disease a meta-analysis[J]. *JACC Cardiovasc Imag*, 2019, 12(7): 1316-1325.

(收稿日期:2025-05-28;修回日期:2026-01-05;编辑:刘灵敏)