

负荷超声心动图在冠心病诊疗中的应用和相关研究进展

郭雨欣¹, 王 震¹, 李 飞^{2*}

¹延安大学医学院, 陕西 延安

²延安大学附属医院冠心病一病区, 陕西 延安

收稿日期: 2025年5月5日; 录用日期: 2025年5月27日; 发布日期: 2025年6月6日

摘 要

冠状动脉硬化性心脏病(CHD)指冠状动脉发生粥样硬化引起管腔狭窄或闭塞, 导致心肌缺血缺氧或坏死而引起的心脏病, 简称冠心病。如今, 冠心病患病率逐年上升, 能够早期识别、尽早干预对于减轻并发症、改善预后至关重要。负荷超声心动图(SE)是一种通过在药物或运动负荷下激发心血管系统反应, 来观察室壁运动、血流动力学变化的检查方法。相比较其他的检查方法, 负荷超声心动图是一种无创、安全、可靠、可重复的检查, 随着超声诊疗新技术的发展, 有望作为进一步定量、定位评估早期心肌缺血以及冠心病患者预后的检查手段。本文旨在探讨负荷超声心动图在冠心病诊疗中的应用和相关研究进展, 为进一步将负荷超声心动图应用于临床中提供参考。

关键词

负荷超声心动图, 冠心病, 心肌声学造影

The Application and Research Progress of Stress Echocardiography in the Diagnosis and Treatment of Coronary Heart Disease

Yuxin Guo¹, Zhen Wang¹, Fei Li^{2*}

¹School of Medicine, Yan'an University, Yan'an Shaanxi

²Coronary Heart Disease Ward 1, Yan'an University Affiliated Hospital, Yan'an Shaanxi

Received: May 5th, 2025; accepted: May 27th, 2025; published: Jun. 6th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 郭雨欣, 王震, 李飞. 负荷超声心动图在冠心病诊疗中的应用和相关研究进展[J]. 临床个性化医学, 2025, 4(3): 266-274. DOI: 10.12677/jcpm.2025.43342

Abstract

Coronary atherosclerotic heart disease (CHD), also known as coronary heart disease (CHD), refers to a condition where atherosclerosis in the coronary arteries leads to lumen stenosis or occlusion, resulting in myocardial ischemia, hypoxia or necrosis. Currently, the prevalence of CHD is increasing year by year. Early identification and timely intervention are crucial for reducing complications and improving prognosis. Stress echocardiography (SE) is a non-invasive, safe, reliable and repeatable examination method that observes wall motion and hemodynamic changes by stimulating cardiovascular system responses under drug or exercise stress. With the development of new ultrasound diagnostic and therapeutic technologies, SE is expected to serve as a means for further quantitative and locational assessment of early myocardial ischemia and prognosis in CHD patients. This article aims to explore the application and research progress of SE in the diagnosis and treatment of CHD, providing a reference for its further clinical application.

Keywords

Stress Echocardiography, Coronary Heart Disease, Myocardial Contrast Echocardiography

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

冠心病(CHD)是近年来临床上发病率逐年上升的心血管疾病,致死率高,所以早预防、早发现、早诊断对冠心病的及早治疗、控制病情及改善预后有重要意义[1]。目前,冠心病的检查手段有限,冠状动脉造影作为一项有创检查,是诊断冠状动脉解剖狭窄的金标准,但是随着在临床实践中不断发现,冠脉造影阴性的患者有着典型的临床症状,这有可能与患者心脏早期的代偿或心血管功能改变有关。放射性核素检查可以显示心肌的灌注情况,但是其具有一定放射性而一般不被人们所接受和使用。常规超声心动图用于评估心脏形态和功能,可以作为冠心病诊断和判断预后的一个检查手段,但是常规超声心动图难以发现微小病变及室壁运动异常。负荷超声心动图即在药物或运动负荷状态下,诱发心肌缺血,观察心脏室壁运动和血流动力学改变,从而发现早期的心脏功能的改变。随着新技术的更新和发展,对冠心病的早期诊断的敏感性和特异性都在提高,同时有研究指出负荷超声心动图可以对冠心病预后有评估价值。

2. 负荷超声的主要步骤

在准备好超声设备、心电图、血压计以及急救药物的情况下,需要有一位资深的超声科医生,评估适合患者的负荷方法如常用负荷方法有运动或者腺苷、多巴酚丁胺、瑞加诺生等药物负荷。首先采集静息状态下患者心脏的运动图像,然后负荷图像可在跑步机运动后、自行车运动期间或药物应激高峰期立即获得,在规定时间内不断提高负荷量,直到达目标心率、血压。在此期间密切观察患者的血压、心电图变化,若出现终止指证需及时终止实验。负荷超声心动图获得的视图包括胸骨旁长轴和短轴、根尖四腔和根尖两腔视图,主要观察负荷前、负荷中和负荷后心脏的室壁运动。比较获得的压力和静息超声心动图图像,以评估在压力期间出现的新的或恶化的室壁运动异常的发展,表明冠状动脉缺血。室壁运动异常分为运动功能减退、运动障碍等[2]。

3. 负荷方式

负荷超声心动图可以通过运动或药物达到应激状态。运动负荷是指通过直立、仰卧运动或跑步机运动增加心肌血流负荷，诱发心肌缺血，通过超声心动图观察心脏室壁运动改变、血流动力学改变和心血管症状。药物负荷超声心动图一般是通过腺苷、多巴酚丁胺、瑞加诺生、异丙肾上腺素、双嘧达莫进行逐剂量注射后，达到目标心率或血压。运动是首选的应激方法，因为它提供了有价值的预后信息。药物负荷超声心动图常用于不适合通过运动负荷激发或者负荷测试适应症需要药物治疗的患者。

3.1. 药物负荷超声心动图

3.1.1. 腺苷、双嘧达莫等血管扩张剂

腺苷(Ado)作为一种嘌呤核苷，目前已知有 A1、A2a、A2b、A3 受体。其中 A1 受体主要分布于心房肌、窦房结、房室结，心室肌少见，作用于 A1 受体时激活外向钾电流，延长动作电位时程和静息膜电位的时间，使窦性心律减慢以及房室结传导阻滞[3]；与 A2a、A2b 结合，可以扩张冠脉血管，改善微循环障碍[4]；与 A3 受体结合，可激活心肌细胞膜钾离子 ATP 通道，发挥心肌保护作用[5]。腺苷主要是通过作用于 A2a、A2b 受体，扩张冠脉血管，增加冠脉血流，结合超声心动图诊断冠脉疾病。双嘧达莫是一种磷酸二酯酶和腺苷脱氢酶抑制剂，既可作为抗血小板剂，又可作为冠状动脉血管舒张剂[6][7]。通过抑制腺苷的分解，使腺苷的内在水平增加，并以非选择性的方式与腺苷受体相互作用[8]。靶向受体是 A2a 受体，它导致冠状动脉血管舒张和冠状动脉流量增加。Regadenoson 是一种选择性 A2a 受体激动剂，与 A1 和 A2b 受体的反应性降低[9]。

使用腺苷作为药物负荷，扩张冠脉血管，增加心肌耗氧量，因其半衰期短，所以具有良好的安全性。血管扩张药双嘧达莫和腺苷是评估 CFVR 的首选方法，在评价 CMVD 中发挥重要作用。

3.1.2. 多巴酚丁胺

多巴酚丁胺作为一种肾上腺素受体激动剂，主要选择性地作用于 β_1 和 β_2 受体，可以产生心肌收缩力增强和降低全身血管阻力的正性效应[10]。使用多巴酚丁胺时起始剂量为 5 或 10 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ ，每 3 分钟增加一次，直到达最大剂量 40 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ 。若达到最大剂量时未达到目标心率，则每隔 1 分钟给予阿托品 0.25 mg (最多 1~2 mg)。在低剂量时，多巴酚丁胺主要产生正性肌力作用，而高剂量下，还表现出正性时相作用。多巴酚丁胺正是通过产生心脏正性肌力作用，增加心肌供血需求，再结合超声心动图，去早期识别心脏冠脉疾病。负荷的终点包括达到目标心率、新出现或加重的中度程度以上的心肌运动异常、显著的心律失常和难以忍受的心绞痛症状[8]。

在负荷药物中，多巴酚丁胺引起的主要并发症风险最高，是由于多巴酚丁胺产生的儿茶酚胺效应，最常见的致命并发症是室性心律失常和急性心肌梗死[8]，故多巴酚丁胺常不作为首选的药物负荷。正性肌力药多用于评估存活心肌，心肌收缩功能储备以及诊断冠状动脉粥样硬化心脏病。

3.2. 运动负荷超声心动图

运动负荷试验作为最符合生理特性的负荷方式是患者能够完成运动时的首选方法，是美国超声心动图学会 I 级推荐，证据等级 A [11]。通过运动，可以评估机体的功能状态，保持心脏电机械反应，并症状或无症状与活动联系起来[12]，运动时的正常生理反应是全身氧气需求的增加，导致心输出量增加，从而使心率升高、心肌供血供氧需求增加，达到负荷目标。

同时，运动负荷超声心动图的严重并发症发生的风险极低。Albert varga 等学者向全球已知进行应激超声心动图的超声心动图实验室发放了一份简单的书面问卷，基于对运动方案并发症的风险调查。这项研究调查了来自 17 个国家的 71 个中心，发现总共 26295 名进行运动负荷超声心动图检查的患者中，仅

有1名患者(1/6574, 0.015%)发生了危及生命的事件,共报告了4例危及生命的并发症(1例急性心肌梗死, 2例持续性室性心动过速, 1例心脏破裂)[13]。足以说明运动负荷超声检查的安全性, 低风险的并发症促使运动负荷超声逐渐应用于临床当中。

4. 负荷超声心动图的应用

4.1. 心肌声学造影和负荷超声心动图的结合对冠心病早期诊断

有创冠状动脉造影从解剖上评估心脏缺血的部位和范围, 是诊断心外膜冠状动脉狭窄的标准。但是其作为一项有创检查、费用昂贵、结果受多重因素的影响, 且血管的阻塞性病变相较于心肌缺血的室壁运动能力下降和心脏功能的改变更晚。负荷超声心动图作为一种无创心脏成像方式也可以从解剖学上描绘或功能评估明显的冠状动脉狭窄, 以及检测心肌梗死(MI)的存在。冠状动脉有血管内或血管外狭窄或阻塞, 心肌首先会出现节段室壁运动及心肌灌注异常, 这些改变早于症状或者心电图改变, 因此负荷超声心动图联合心肌声学造影可以作为敏感性高特异性强的先行诊断方法识别早期的心肌缺血[14]。

欧洲心脏学会指出对冠脉阻塞性疾病的诊断中, 无创功能成像和解剖成像同等重要。既往的研究当中, 我们已经了解到负荷超声心动图可以作为一种非侵入性的影像检查用于诊断冠心病。William Woodward等学者对真实世界对负荷超声心动图的应用数据进行了一项前瞻性、多中心、观察性的研究, 在这项研究中, 分析了全英国28家机构的稳定性冠心病的负荷超声心动图的数据, 有5313名患者被纳入此项研究中, 通过分析后负荷超声心动图已经有了广泛的实施, 对稳定性冠脉疾病诊断有较高的准确性[15]。

目前由于部分有明显症状的患者冠脉造影检查呈现阴性结果, 我们对冠脉综合征的关注点已经从冠脉血管的狭窄转移到冠状动脉的微循环解剖和功能异常。而心肌对比超声心动图(MCE)能够检测冠脉灌注异常和量化心肌血流, 是一种床旁且相对低成本的检测心肌灌注异常以及量化区域和全局冠状动脉血流量的工具[16]。有不少研究证明MCE和DSE的结合可以提高冠脉疾病的诊断的敏感性和特异性。Li Ping Gao等学者将心肌对比超声心动图(MCE)与多巴胺负荷超声心动图(DSE)相结合对评估冠心病患者的心肌灌注, 并了解不同冠状动脉阻塞程度下微循环的变化变化的研究中, 将冠脉造影结果作为金标准, 对患者进行分组研究, 评估两者联合对冠脉的诊断的敏感性和特异性如何。得出结论为将心肌对比超声心动图(MCE)与多巴酚丁胺应激超声心动图(DSE)相结合在诊断阻塞性冠状动脉病变方面有高的敏感性和准确性[17]。因此, 我们需要负荷超声心动图及心肌声学造影为心肌缺血的诊断及微循环的灌注提供临床决策, 并且在两者的联合中能提高对冠脉疾病诊断的性能。

4.2. 检测存活心肌

长期以来, 非功能性心肌与心肌梗死同义。然而, 研究表明与疤痕心肌区域相比, 在非功能性节段存在可存活心肌细胞的组织学证据, 以及再血管化后左心室(LV)功能的临床改善, 为通过存活评估进行心肌挽救开辟了道路[18]。存活心肌是指慢性缺血或心肌梗死后仍存活的心肌, 前者为冬眠心肌, 后者为顿抑心肌, 两者都具有代谢和收缩储备, 当血流恢复或使用正性肌力药物后出现收缩功能[19]。目前有几种成像技术被用于存活心肌的评估, 即超声心动图、心脏磁共振成像、单光子发射计算机断层扫描的核成像和正电子发射断层扫描成像。使用¹⁸F-氟代脱氧葡萄糖(FDP)的正电子发射断层扫描(PET)通过观察心肌的能量代谢是存活心肌检测的金标准, 但是其费用昂贵、操作复杂、影响因素多使得其在临床中的使用率低。

在临床中, 负荷超声心动图评估存活心肌得到逐渐推广, 不仅如此, 负荷超声联合一些新技术可以进一步提高存活心肌判断的准确性, 为进一步的临床决策提供可靠的证据。朱佳等人一项对小剂量多巴酚丁胺负荷超声心动图联合心肌多层纵向应变评估陈旧性心肌梗死患者存活心肌的价值研究中纳入了

38 名陈旧性心肌梗死的患者, 在经皮冠脉介入治疗前进行检查, 共收集运动异常节段 273 个, 通过数据分析, 发现存活心肌节段内膜、中层、外膜的应变(LS)绝对值均明显高于非存活心肌节段, 并发现内膜 LS、中层 LS、外膜 LS 检测存活心肌的截断值, AUC, 灵敏度, 特异度的绝对值优于负荷超声心动图。结果表明 LDDSE 联合心肌分层纵向应变可以提高检测存活心肌的灵敏度和特异度[20]。

裴如弟学者在心肌声学造影(MCE)结合腺苷负荷检测冠心病心肌梗死患者存活心肌的临床价值研究中。对 45 例心肌梗死并拟接受冠脉血运重建的冠心病患者进行常规超声和负荷 MCE 检查, 并在术后复查心脏超声。将术后超声心肌运动改善大于等于 1 分视为存活心肌。回顾分析显示: 负荷 MCE 评价存活心肌的敏感性、特异性及准确率均优于静息状态 MCE, 提示腺苷负荷下的 MCE 能较准确、便捷并可视化评价存活心肌, 这对冠心病患者临床治疗方案的确立以及冠状动脉血运重建后的疗效观察等都有十分重要的协助和指导价值[21]。

总的来说, 负荷超声心动图在对于心肌梗死患者存活心肌的检测以及冠脉血运重建后心肌血运的改善情况有较好的敏感性和特异性, 这对于心肌梗死患者的血运重建的指导、预后风险分层以及评估冠脉血运重建的疗效等方面有一定的意义。

4.3. 早期识别非阻塞性冠状动脉疾病

全球大约有 1.12 亿人患有心脏绞痛, 但是有近一半的患者在行冠脉造影检查后并没有发现明显的冠脉狭窄, 这部分人群被称为非阻塞性冠脉心绞痛(ANOCA) [22]。最近的相关调查表明, 约有三分之二的 ANOCA 患者的症状与冠脉微血管功能障碍(CMD)有关[23]。而 CMD 被认为与主要不良相关心血管事件的风险增加密切相关。一项涉及 6631 例 ANOCA 患者的荟萃分析显示, 与无 CMD 的患者相比, 有 CMD 的患者心血管发生率更高[24]。因此, 检测 CMD 及其对心脏功能影响的早期识别至关重要, 目前对微循环的评估包括侵入性和非侵入性的方法。前者为有创冠状动脉造影需要血流储备分数(FFR)测量, 有创检查不作为首选的推荐和使用, 后者为使用常规超声心动图测量冠脉血流储备, 这是较为常用的方法。但是常规超声心动图无法识别心脏收缩功能的早期变化, 因此迫切需要更敏感的指标来早期检测 CMD 患者的心脏功能变化, 提高 ANOCA 患者的远期获益。

当前负荷超声心动图结合斑点追踪技术可以通过纵向应变和动脉血压来计算心肌工作指数(MW), 判断早期心脏功能异常。QuanDe Lou 等学者进行了一项研究, 这项研究中招募了 78 名 ANOCA 患者, 对所有患者行常规超声心动图检查、腺苷负荷超声心动图以及通过经胸超声心动图检查冠状动脉血流储备(CFR)。根据 CFR 结果, 将患者分为 CMD 组($CFR < 2.5$)和非 CMD 组($CFR \geq 2.5$)。比较两组在静息和负荷状态下的人口统计学数据、常规超声心动图参数、二维斑点追踪超声心动图(2D-STE)参数和心肌做功(MW)参数。结果发现在负荷状态下, 冠状动脉微血管疾病(CMD)组的全局工作指数(GWI)、全局收缩功(GCW)和全局工作效能(GWE)均低于非 CMD 组, 但全局无效做功(GWW)和峰值应变离散度(PSD)较高(均为 $p < 0.001$)。在多变量回归分析中, 我们发现 ΔGWW (腺苷负荷前后 GWW 的差异)和 ΔPSD (腺苷负荷前后 PSD 的差异)在腺苷应激后是 CMD 的独立相关因素。ROC 曲线显示, 由 ΔGWW 和 ΔPSD 组成的复合预测模型对 CMD 具有优异的诊断价值。在这项研究中, 我们发现腺苷负荷超声下冠脉微血管疾病(CMD)使 ANOCA 患者出现心脏收缩功能恶化, 出现的主要变化是心脏收缩不同步和无效做功。提示早期可以通过负荷超声技术识别非阻塞性冠脉微血管疾病, 通过早干预来改善患者心血管不良事件发生情况[25]。

Li Zhao 等学者在对使用腺苷负荷超声联合心肌声学造影(ASMCE)在非阻塞冠脉血管疾病的价值研究中发现对于非阻塞性冠状动脉缺血(INOCA)患者中的冠脉微血管疾病患者, ASMCE 使用对比剂可以提高获得冠脉血流储备(CFVR)的满意度, 是一种临床可行的非侵入性检测 CFVR 的方法。在评估 INOCA

患者的左心室功能时, 不仅应关注心肌变形, 还应全面评估心肌收缩功能的微妙变化, 尤其是在无明显心内膜下心肌缺血的情况下, 峰值充血时收缩储备和心肌灌注的动态变化[26]。综上, 负荷超声心动图通过早期发现心肌变形以及心肌收缩功能的微妙变化识别非阻塞性冠脉疾病, 降低临床事件的发生风险和改善患者的预后。

4.4. 评估缺血性心脏病患者的临床预后

目前关于负荷超声心动图对于冠心病的诊断价值和微循环的研究较多, 而关于缺血性心脏病患者预后的研究较少。在既往的研究中, 我们探讨负荷超声心动图是否可以作为缺血性心脏病的无创诊断方法, 因此, 需要进一步的研究其对缺血性心脏病的预后的价值。彭冠华等学者探讨了负荷超声心动图联合心肌声学造影评估疑似或确诊冠心病患者发生心血管不良事件的价值。选择了行 MCSE 的已知或可疑的缺血性心脏病患者 361 例, 根据 MCSE 的结果分为正常组和异常组(负荷后至少出现 1 个节段室壁运动不均匀或 2 个节段心肌灌注异常或 2 个节段心肌灌注缺损, 判定为结果异常), 通过电话及病例系统随访临床心血管事件的发生, 包括主要终点事件和次要终点事件。结果证实 MCSE 可以作为预测可疑或已知缺血性心脏病患者预后的工具[27]。

ugochukwu ihekwa 等学者在通过多个电子数据库检索评估疑似冠状动脉疾病患者应激超声心动图长期预后(>12 个月)的研究中, 对 16,581 名接受药物或跑步机负荷超声心动图检查的受试者进行分析, 结果显示中位随访时间为 31 个月(范围 21~101 个月), 复合 MACE 的年事件发生率为 1.76%, 全因死亡率为 1.35%。与阴性负荷超声心动图相比, 阳性负荷超声心动图与 MACE 和全因死亡率的风险增加相关, 年事件发生率分别为 1.99%比 1.54% (OR 2.04, 95% CI 1.79 至 2.33)和 1.68%比 1.02% (OR 2.06, 95% CI 1.80 至 2.35), 结论为阳性应激超声心动图结果与较差的长期 MACE 和全因死亡率相关。负荷超声心动图结果可能为疑似冠状动脉疾病患者的强化预防治疗提供有用的长期指导[28]。在多项研究中表明, 负荷超声心动图对于冠脉疾病的风险分层以及预后有较好的指导意义, 在未来有期望可用于指导临床, 对患者制定个性化的治疗方案。

5. 相关研究进展

5.1. 新 ABCDE 方案

负荷超声心动图是基于二维、黑白成像, 用于检测已知或疑似冠状动脉疾病患者的区域性室壁运动异常(RWMA)。但是, 冠状动脉疾病患者不仅仅是使用冠脉解剖成像来诊断心肌血管的狭窄, 结合冠脉疾病的病理生理机制, 目前很多研究表明 RWMA 本身不足以分层患者风险和指导治疗。冠心病患者还可能存在其他易损性, 基于二维超声心动图的 SE 方法现在已与肺超声(B 线的第 B 步)整合, 与容积超声心动图(第 C 步)、彩色多普勒和脉冲多普勒(第 D 步)以及基于非成像心电图的心率评估(第 E 步)相结合[29]。

新 ABCDE 方案主要包括 5 个步骤, 步骤 A 用于评估不协调和区域性室壁运动异常, 步骤 B 用于评估 B 线, 步骤 C 用于评估左心室收缩储备, 步骤 D 用于评估基于多普勒的冠状动脉血流储备(CFVR), 步骤 E 用于基于心电图的心率储备[30]。步骤 A 包括评估室壁运动异常, 在基线和峰值负荷时, 对每个患者的壁运动评分指数(WMSI)进行计算, 在左心室 17 节段模型中, 评分范围为 1 (正常)到 4 (不协调), 在负荷时至少 2 个相邻节段显示出至少 1 分的评分增加[31]。当至少 2 个相邻节段显示出至少 1 分的评分增加时, A 标准被认为在应激诱导的 RWMA(室壁运动评分应激 > 休息)时为阳性[31]。方案步骤 B 包括使用肺超声评估 B 线[32]。B 标准在存在负荷或休息时 B 线 ≥ 2 U [33]被认为是阳性。方案 C 包括基于压力的左心室收缩储备(LVCR)评估, 作为压力负荷/休息比, 计算为收缩压/射血末期容积[34]。基于压力的 LVCR 的负荷特异性异常截止值: 运动和多巴酚丁胺 ≤ 2.0 , 双嘧达莫和阿托品 ≤ 1.1 [35]。CFVR

(步骤 D)在标准 SE 检查期间通过间歇性成像壁运动和左房内径进行评估[36]。CFVR 定义为充血峰值与基础峰值舒张期冠状动脉血流速度之比。根据先前定义的诊断和预后截止值, CFVR 值 ≤ 2.0 被认为是异常[35]。ABCDE 的方案实施的进一步数据的收集以及它对心血管疾病的诊断、预后的提示的能力还有待我们去研究。

5.2. 二维斑点追踪技术

既往的负荷超声心动图, 通过观察心脏室壁运动检测心肌缺血, 但是负荷超声从视觉上对室壁运动的评分可能与实际有一些偏差。斑点追踪超声心动图(STE)是一种广泛可用的无创工具, 它能够在超声心动图的基础上轻松快速地提供附加信息, 因为它能够识别微妙的心肌损伤并根据冠状动脉病变定位缺血区域, 通过“极坐标图”获得清晰的视觉[37]。

斑点追踪分析能够通过多个参数评估典型的缺血性心内膜下损伤, 而纵向应变(LS), 这是最常用的 STE 参数, 用于评估所有心脏室壁心内膜下纤维的早期损伤, 并且根据冠状动脉血管分布区域对缺血性损伤进行区域评估, 以及通过三层分析对心内膜壁变形特性进行具体分析[38]。将 STE 在应激超声心动图(SE)图像上执行, 可用于在 ACS 不确定病例中的诊断, 还可以评估可疑应激测试结果或评估心肌存活性的微小心肌损伤[39]。Park 等人发现, 多巴胺负荷超声心动图检查期间的层特异性应变分析是可行的; 恢复期内的内膜全局纵向应变(GLS)是对显著冠脉疾病(CAD)识别的敏感参数, 与多巴胺负荷超声心动图的视觉评估相比, 对内膜全局纵向应变(GLS)的进一步评估提高了多巴胺负荷超声心动图的诊断准确性[40]。

STE 同时还可以为急性冠脉综合征和慢性冠脉综合征提供有用的预后信息。在一项针对近期急性心肌梗死(AMI)患者的大型研究中, 左室全局应变和应变率与全因死亡率、再发心肌梗死、血运重建和心力衰竭住院在 3 年随访期间显著且独立相关, 且在多变量分析后, 左室全局应变优于左室射血分数(LVEF)和室壁运动评分(WMSI) [37] [41]。在一项 137 例稳定性冠脉疾病的前瞻性研究中, 发现 STE 明显提高了心脏事件的预测能力[42]。

6. 未来和展望

目前负荷超声心动图还存在一些不足之处, 由于是通过不同的负荷方式来评估心肌供血、心脏功能等, 负荷超声声窗小, 对技术人员要求较高, 且图像质量要求高且判读困难, 个体差异大, 需要对技术人员进行培训。在既往研究中, 发现负荷超声心动图对诊断单根血管的灵敏度低。前两点可以通过对超声科医生进行统一的图像选取和判读的培训, 减少医生之间的个体差异性, 若出现不同的判读结果, 则需要两个及两个以上的超声科医生给出最终的意见和结论。在未来, 将能够执行负荷后图像定量评估的人工智能工具(AI)纳入临床当中, 这些障碍可能被克服[15]。负荷超声心动图对单根血管病变难以明确诊断, 若患者有明显的症状和体征, 高度怀疑冠状动脉粥样硬化性心脏病, 建议可以通过同时行其它血管的相关解剖和功能的检查, 同时参考负荷超声的检查结果, 对患者进一步诊断。

参考文献

- [1] 郝骥, 祁春梅, 武维恒, 等. 实时心肌声学造影定量与半定量图像分析方法检测存活心肌价值的对比研究[J]. 中华医学超声杂志(电子版), 2011, 8(6): 1325-1331.
- [2] Mastouri, R., Sawada, S.G. and Mahenthiran, J. (2010) Current Noninvasive Imaging Techniques for Detection of Coronary Artery Disease. *Expert Review of Cardiovascular Therapy*, 8, 77-91. <https://doi.org/10.1586/erc.09.164>
- [3] 张林潮, 韦红卫, 胡世红, 等. 腺苷对正常人房室结的影响[J]. 中国冶金工业医学杂志, 2002(3): 28-29.
- [4] Crea, F., Pupita, G., Galassi, A.R., el-Tamimi, H., Kaski, J.C., Davies, G., *et al.* (1990) Role of Adenosine in Pathogenesis

- of Anginal Pain. *Circulation*, **81**, 164-172. <https://doi.org/10.1161/01.cir.81.1.164>
- [5] 李旭光, 田立强, 康少平, 等. 腺苷受体对缺血/再灌注心脏保护作用的研究进展[J]. 心脏杂志, 2010, 22(2): 278-281.
 - [6] Harker, L.A. and Kadatz, R.A. (1983) Mechanism of Action of Dipyridamole. *Thrombosis Research*, **29**, 39-46. [https://doi.org/10.1016/0049-3848\(83\)90356-0](https://doi.org/10.1016/0049-3848(83)90356-0)
 - [7] Kim, H. and Liao, J.K. (2008) Translational Therapeutics of Dipyridamole. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, **28**, s39-s42. <https://doi.org/10.1161/atvbaha.107.160226>
 - [8] Lee, C., Dow, S., Shah, K., Henkin, S. and Taub, C. (2023) Complications of Exercise and Pharmacologic Stress Echocardiography. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **10**, Article ID: 1228613. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1228613>
 - [9] Al Jaroudi, W. and Iskandrian, A.E. (2009) Regadenoson: A New Myocardial Stress Agent. *Journal of the American College of Cardiology*, **54**, 1123-1130. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2009.04.089>
 - [10] Tuttle, R.R. and Mills, J. (1975) Dobutamine: Development of a New Catecholamine to Selectively Increase Cardiac Contractility. *Circulation Research*, **36**, 185-196. <https://doi.org/10.1161/01.res.36.1.185>
 - [11] Pellikka, P.A., Arruda-Olson, A., Chaudhry, F.A., Chen, M.H., Marshall, J.E., Porter, T.R., *et al.* (2020) Guidelines for Performance, Interpretation, and Application of Stress Echocardiography in Ischemic Heart Disease: From the American Society of Echocardiography. *Journal of the American Society of Echocardiography*, **33**, 1-41.e8. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2019.07.001>
 - [12] Cotrim, C.A., Café, H., João, I., Cotrim, N., Guardado, J., Cotrim, H., *et al.* (2022) Exercise Stress Echocardiography: Where Are We Now? *World Journal of Cardiology*, **14**, 64-82. <https://doi.org/10.4330/wjc.v14.i2.64>
 - [13] Varga, A., Garcia, M.A.R. and Picano, E. (2006) Safety of Stress Echocardiography (from the International Stress Echo Complication Registry). *The American Journal of Cardiology*, **98**, 541-543. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2006.02.064>
 - [14] 吴爵非, 彭冠华, 张建琴, 等. 左心室和心肌声学造影的仪器设置与方法学[J]. 中华超声杂志(电子版), 2019, 16(10): 727-730.
 - [15] Woodward, W., Dockerill, C., McCourt, A., Upton, R., O'Driscoll, J., Balkhausen, K., *et al.* (2021) Real-World Performance and Accuracy of Stress Echocardiography: The EVAREST Observational Multi-Centre Study. *European Heart Journal-Cardiovascular Imaging*, **23**, 689-698. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeab092>
 - [16] Barletta, G. (2015) Myocardial Perfusion Echocardiography and Coronary Microvascular Dysfunction. *World Journal of Cardiology*, **7**, 861-874. <https://doi.org/10.4330/wjc.v7.i12.861>
 - [17] Guo, L., Zhang, Y., Wen, J. and Chen, J. (2024) Quantitative Evaluation of Myocardial Perfusion in Coronary Heart Disease by Myocardial Contrast and Dobutamine Stress Echocardiography. *Journal of Clinical Ultrasound*, **53**, 234-241. <https://doi.org/10.1002/jcu.23809>
 - [18] Jha, D.K., Mahato, A., Jain, A., Bohra, V. and Tiwari, A. (2023) A Prospective Comparative Study between 99mTc MIBI Myocardial Perfusion Single-Photon Emission Computed Tomography and Dobutamine Stress Echocardiography to Detect Viable Myocardium in Patients with Coronary Artery Disease. *Indian Journal of Nuclear Medicine*, **38**, 224-230. https://doi.org/10.4103/ijnm.ijnm_91_22
 - [19] 吴志霞, 李春梅, 苏叶. 心肌声学造影与心肌造影负荷超声心动图在冠心病中的临床应用进展[J]. 心血管病学进展, 2019, 40(2): 252-256.
 - [20] 朱佳, 杨性安, 杨志伟. 小剂量多巴酚丁胺负荷超声心动图联合心肌多层纵向应变评估陈旧性心肌梗死患者存活心肌的价值[J]. 心电与循环, 2021, 40(3): 258-261+344.
 - [21] 裴如弟. 腺苷负荷下心肌声学造影显像评价冠心病心肌梗死患者存活心肌的临床研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京医科大学, 2019.
 - [22] GBD 2015 Mortality and Causes of Death Collaborators (2016) Global, Regional, and National Life Expectancy, All-Cause Mortality, and Cause-Specific Mortality for 249 Causes of Death, 1980-2015: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *The Lancet*, **388**, 1459-1544.
 - [23] Jespersen, L., Hvelplund, A., Abildstrom, S.Z., Pedersen, F., Galatius, S., Madsen, J.K., *et al.* (2011) Stable Angina Pectoris with No Obstructive Coronary Artery Disease Is Associated with Increased Risks of Major Adverse Cardiovascular Events. *European Heart Journal*, **33**, 734-744. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehr331>
 - [24] Gdowski, M.A., Murthy, V.L., Doering, M., Monroy-Gonzalez, A.G., Slart, R. and Brown, D.L. (2020) Association of Isolated Coronary Microvascular Dysfunction with Mortality and Major Adverse Cardiac Events: A Systematic Review and Meta-Analysis of Aggregate Data. *Journal of the American Heart Association*, **9**, e014954. <https://doi.org/10.1161/jaha.119.014954>
 - [25] Liu, Q., Li, Q., Wan, X., Xu, M., Pan, J., Zhang, Y., *et al.* (2023) The Value of Myocardial Work in the Estimation of

- Left Ventricular Systolic Function in Patients with Coronary Microvascular Disease: A Study Based on Adenosine Stress Echocardiography. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **10**, Article ID: 1119785. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1119785>
- [26] Zhao, L., Wang, Q., Xu, P., Su, X., Luo, Q. and Ding, Y. (2022) Evaluation of Left Ventricular Function in Ischemia with Non-Obstructive Coronary Arteries: A Research Based on Adenosine Stress Myocardial Contrast Echocardiography. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, **39**, 349-357. <https://doi.org/10.1007/s10554-022-02740-7>
- [27] 彭冠华. 负荷超声心动图联合心肌声学造影评估缺血性心脏病患者临床预后的价值[D]: [硕士学位论文]. 广州: 南方医科大学, 2023.
- [28] Ihekweba, U., Johnson, N., Choi, J.S., Savarese, G., Orsini, N., Khoo, J., *et al.* (2024) Long-Term Prognostic Value of Contemporary Stress Echocardiography in Patients with Suspected or Known Coronary Artery Disease: Systematic Review and Meta-Analysis. *Heart*, **110**, 1349-1356. <https://doi.org/10.1136/heartjnl-2024-324534>
- [29] Picano, E., Pierard, L., Peteiro, J., Djordjevic-Dikic, A., Sade, L.E., Cortigiani, L., *et al.* (2023) The Clinical Use of Stress Echocardiography in Chronic Coronary Syndromes and Beyond Coronary Artery Disease: A Clinical Consensus Statement from the European Association of Cardiovascular Imaging of the Esc. *European Heart Journal-Cardiovascular Imaging*, **25**, e65-e90. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jead250>
- [30] Picano, E., Ciampi, Q., Wierzbowska-Drabik, K., Urluescu, M., Morrone, D. and Carpeggiani, C. (2018) The New Clinical Standard of Integrated Quadruple Stress Echocardiography with ABCD Protocol. *Cardiovascular Ultrasound*, **16**, Article No. 22. <https://doi.org/10.1186/s12947-018-0141-z>
- [31] Ciampi, Q., Picano, E. and Paterni, M. (2017) Quality Control of Regional Wall Motion Analysis in Stress Echo 2020. *International Journal of Cardiology*, **249**, 479-485.
- [32] Scali, M.C., Zagatina, A., Simova, I., Zhuravskaya, N., Ciampi, Q., Paterni, M., *et al.* (2017) B-Lines with Lung Ultrasound: The Optimal Scan Technique at Rest and during Stress. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **43**, 2558-2566. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2017.07.007>
- [33] Scali, M.C., Zagatina, A., Ciampi, Q., Cortigiani, L., D'Andrea, A., Djordjevic-Dikic, A., *et al.* (2019) The Functional Meaning of B-Profile during Stress Lung Ultrasound. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **12**, 928-930. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2018.10.017>
- [34] Cortigiani, L., Huqi, A., Ciampi, Q., Bombardini, T., Bovenzi, F. and Picano, E. (2018) Integration of Wall Motion, Coronary Flow Velocity, and Left Ventricular Contractile Reserve in a Single Test: Prognostic Value of Vasodilator Stress Echocardiography in Patients with Diabetes. *Journal of the American Society of Echocardiography*, **31**, 692-701. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2017.11.019>
- [35] Ciampi, Q., Zagatina, A., Cortigiani, L. and Stress Echo 2020 Study Group of the Italian Society of Echocardiography and Cardiovascular Imaging (2019) Functional, Anatomical, and Prognostic Correlates of Coronary Flow Velocity Reserve during Stress Echocardiography. *Journal of the American College of Cardiology*, **74**, 2278-2291.
- [36] Miglioranza, M.H., Gargani, L., Sant'Anna, R.T., Rover, M.M., Martins, V.M., Mantovani, A., *et al.* (2013) Lung Ultrasound for the Evaluation of Pulmonary Congestion in Outpatients: A Comparison with Clinical Assessment, Natriuretic Peptides, and Echocardiography. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **6**, 1141-1151. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2013.08.004>
- [37] Pastore, M.C., Mandoli, G.E., Contorni, F., Cavigli, L., Focardi, M., D'Ascenzi, F., *et al.* (2021) Speckle Tracking Echocardiography: Early Predictor of Diagnosis and Prognosis in Coronary Artery Disease. *BioMed Research International*, **2021**, Article ID: 6685378. <https://doi.org/10.1155/2021/6685378>
- [38] Cameli, M., Mandoli, G.E., Sciacaluga, C. and Mondillo, S. (2019) More than 10 Years of Speckle Tracking Echocardiography: Still a Novel Technique or a Definite Tool for Clinical Practice? *Echocardiography*, **36**, 958-970. <https://doi.org/10.1111/echo.14339>
- [39] Mandoli, G.E., Pastore, M.C., Vasilijevaite, K., Cameli, P., D'Ascenzi, F., Focardi, M., *et al.* (2020) Speckle Tracking Stress Echocardiography: A Valuable Diagnostic Technique or a Burden for Everyday Practice? *Echocardiography*, **37**, 2123-2129. <https://doi.org/10.1111/echo.14894>
- [40] Park, J.H., Woo, J.S., Ju, S., Jung, S.W., Lee, I., Kim, J.B., *et al.* (2016) Layer-Specific Analysis of Dobutamine Stress Echocardiography for the Evaluation of Coronary Artery Disease. *Medicine*, **95**, e4549. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000004549>
- [41] Antoni, M.L., Mollema, S.A., Delgado, V., Atary, J.Z., Borleffs, C.J.W., Boersma, E., *et al.* (2010) Prognostic Importance of Strain and Strain Rate after Acute Myocardial Infarction. *European Heart Journal*, **31**, 1640-1647. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehq105>
- [42] Scharrenbroich, J., Hamada, S., Keszei, A., Schröder, J., Napp, A., Almalla, M., *et al.* (2018) Use of Two-Dimensional Speckle Tracking Echocardiography to Predict Cardiac Events: Comparison of Patients with Acute Myocardial Infarction and Chronic Coronary Artery Disease. *Clinical Cardiology*, **41**, 111-118. <https://doi.org/10.1002/clc.22860>