

【DOI】 10.3969 / j.issn.1671-6450.2026.07.021

综 述

乳腺癌化疗后右心室功能评估: 三维斑点追踪成像技术的研究进展

巢娅妮, 汪文炳综述 吴茂林审校

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(21JR7RE901)

作者单位: 741000 兰州, 甘肃中医药大学第一临床医学院(巢娅妮、汪文炳); 741000 甘肃天水, 天水市第一人民医院超声科(吴茂林)

通信作者: 吴茂林, E-mail: wumaolin09@ 126.com



【摘 要】 乳腺癌是全球女性高发恶性肿瘤, 蒽环类药物化疗提高乳腺癌患者生存率的同时, 也带来了潜在的心脏毒性, 尤其对右心室功能的影响日益受到关注。三维斑点追踪超声心动图(3D-STE) 作为一种无创、客观且敏感的影像学技术, 为评估乳腺癌化疗后右心室心肌力学特性提供了新的视角。文章旨在分析 3D-STE 在乳腺癌患者蒽环类药物化疗后右心室功能评估中的应用进展, 并明确当前研究的局限性, 以期临床实践提供更精准的指导, 优化乳腺癌患者的治疗管理。

【关键词】 乳腺癌; 三维斑点追踪成像技术; 右心室功能; 蒽环类药物; 化疗

【中图分类号】 R730.7; R445.1

【文献标识码】 A

Evaluation of right ventricular function after breast cancer chemotherapy: research progress of three-dimensional speckle tracking technology Chao Yan^{*}, Wang Wenbing, Wu Maolin.^{*} First Clinical School of Gansu University of Traditional Chinese Medicine, Gansu, Lanzhou 741000, China

Funding program: Gansu Provincial Natural Science Foundation (21JR7RE901)

Corresponding author: Wu Maolin, E-mail: wumaolin09@ 126.com

【Abstract】 Breast cancer is one of the most prevalent malignant tumors in women worldwide. Anthracycline-based chemotherapy improves the survival rate of breast cancer patients, yet it also causes potential cardiotoxicity, and its impact on right ventricular function has attracted increasing attention. Three-dimensional speckle tracking echocardiography (3D-STE), a non-invasive, objective and sensitive imaging modality, provides a novel approach for evaluating right ventricular myocardial mechanics after chemotherapy for breast cancer. This review summarizes the application of 3D-STE in assessing right cardiac function in breast cancer patients receiving anthracycline chemotherapy, and discusses the limitations of current studies, aiming to offer more precise guidance for clinical practice and optimize the treatment and management of breast cancer patients.

【Key words】 Breast cancer; Three-dimensional speckle-tracking echocardiography; Right ventricular function; Anthracyclines; Chemotherapy

乳腺癌是全球女性最致命的一种恶性肿瘤, 2022 年中国女性乳腺癌新发病例数达 35.72 万, 死亡人数达 7.50 万, 乳腺癌粗发病率和粗病死率分别为 51.71/10 万和 10.86/10 万, 其治疗面临巨大挑战^[1-3]。蒽环类药物是乳腺癌化疗的核心药物, 但其固有的心脏毒性可诱发心肌损伤与心力衰竭, 严重影响患者长期预后^[3-4]。传统以左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF) 监测化疗相关心脏毒性, 然而 LVEF 下降多为心肌损伤的晚期表现, 此时心肌功能常已发生不可逆损害, 亟需更敏感的早期检测手段^[7-8]。三维斑点追踪超声心动图(three-dimensional speckle tracking echocardiography, 3D-STE) 作为新兴无创影像技术, 可通过追踪心肌声学斑点的三维运动, 量化心

肌多方向应变参数, 全面评估心肌变形能力^[9]; 尤其针对解剖结构复杂的右心室, 能提供更精准的功能参数, 在亚临床心肌损伤检测中敏感性更高^[10-12]。现就右心室功能评估的挑战、3D-STE 的技术优势、蒽环类药物化疗对右心室功能的影响、3D-STE 在检测这些变化中的应用及 3D-STE 与其他评估方法的优劣进行综述, 并总结当前研究的主要发现, 指出存在的局限性, 展望未来的研究方向, 以期乳腺癌化疗患者的心脏毒性监测和管理提供更科学的依据。

1 右心室功能评估的挑战及三维斑点追踪成像技术的应用

1.1 右心室解剖与生理特点及其功能评估的复杂性

右心室(right ventricle, RV) 在心血管系统中扮演着至关重要的角色,

其功能状态直接影响患者的运动耐量和长期预后。一方面, RV 壁相对较薄, 对后负荷的变化高度敏感, 其功能受肺循环阻力、左心室功能及心室间相互作用的显著影响; 另一方面, 左心室呈相对规则的椭球形结构, 而 RV 由流入道、心尖部和流出道三部分组成, 呈现出新月形或不规则的三角形结构, 这种复杂的几何形状导致 RV 收缩时呈现多种运动模式, 包括纵向缩短、径向增厚和环向扭转, 而非单一的泵血机制^[1,13]。这使得 RV 在功能和结构上具有特异性, 对其评估面临着巨大挑战。

传统的二维超声心动图技术在评估右心室功能时面临诸多局限。右心室射血分数 (right ventricular ejection fraction, RVEF) 是衡量右心室整体收缩功能的金标准, 但由于 RV 不规则的几何形状, 通过二维超声进行 RVEF 的准确测量往往依赖于几何假设, 容易受到操作者经验和图像质量的影响, 且重复性较差^[1]。其他常用的二维超声参数, 如三尖瓣环收缩期位移 (tricuspid annular plane systolic excursion, TAPSE) 和右心室面积变化分数 (right ventricular fractional area change, RVFAC), 虽然操作简便, 但 TAPSE 主要反映右心室游离壁基底段的纵向运动, 无法全面反映整个右心室的整体功能, 且存在角度依赖性; 右心室面积变化分数则受限二维切面, 无法捕捉右心室在三维空间中的复杂变形^[5,14]。这些局限性使得传统超声心动图在早期、敏感地检测右心室亚临床功能障碍方面显得略有不足, 尤其是在肿瘤治疗相关心脏毒性的背景下, 需要更先进的影像技术来提供更全面、客观的评估。

1.2 蒽环类药物化疗对右心室功能的影响 蒽环类药物在乳腺癌治疗中发挥着不可替代的作用, 但其心脏毒性是限制其临床应用的主要不良反应之一。这种心脏毒性表现为剂量依赖性, 可导致心肌细胞损伤、心功能不全, 甚至进展为充血性心力衰竭。有研究指出, 蒽环类药物联合曲妥单抗化疗后, 患者的 RVEF、RVFAC 和右心室游离壁纵向应变 (right ventricular free wall longitudinal strain, RVFWLS) 在随访期间均显著降低, 同时 LVEF 也出现显著下降, 这表明蒽环类药物对左右心室均有毒性作用^[1]。另有研究也进一步证实了蒽环类药物化疗后右心室功能显著下降, 其中右心室整体纵向应变 (right ventricular global longitudinal strain, RVGLS) 和 RVFWLS 均有显著降低^[1]。

蒽环类药物心脏毒性的机制复杂, 主要涉及氧化应激、铁代谢紊乱、拓扑异构酶 II β 抑制及炎症反应和纤维化等多个方面^[13]。这些机制共同导致心肌细胞凋亡和坏死, 最终损害心肌的收缩和舒张功能。临床上, 蒽环类药物心脏毒性可表现为急性、亚急性或慢性作用。值得注意的是, 早期心肌损伤往往是亚临床的, 即患者可能没有明显症状, 传统的心功能指标如 LVEF 可能仍在正常范围内^[7-9]。Boczar 等^[1]的研究发现, 乳腺癌患者在接受蒽环类药物化疗后, 右心房面积增加, 右心室面积变化分数和纵向应变均从基线水平下降, 这提示右心室功能在化疗后出现不良影响, 且这些变化可能作为早期心脏毒性的标志物。因此, 开发敏感的早期检测方法对于及时干预、预防不可逆的心脏损伤至关重要。

随着对肿瘤心脏病学认识的深入, 越来越多的证据表明,

右心室功能障碍可能在左心室功能受损之前或与之并行发生, 成为蒽环类药物心脏毒性的早期标志^[4,14]。Rossetto 等^[1]进行的一项前瞻性研究对 83 例接受蒽环类药物治疗的乳腺癌患者进行了随访, 结果显示, 化疗后左心室和右心室功能均显著下降, 且左心室和右心室的变化是同时发生的; 值得注意的是, 该研究还指出没有右心室超声心动图参数能够预测左心室化疗相关心脏功能障碍 (cancer therapy-related cardiac dysfunction, CTRCD) 的发生, 这提示右心室功能障碍可能具有一定的独立性。有研究也支持了这一观点, 指出化疗后 LVEF、左心室整体纵向应变下降程度与 RV 应变改变无相关性, 提示右心室功能障碍可能并非单纯由左心室受损引起, 而是蒽环类药物对右心室的直接毒性作用^[1]。这些研究共同挑战了传统观念, 强调了独立评估右心室功能的重要性。

1.3 3D-STE 发展、优势及应用范围 3D-STE 是一种无创、非侵入性的影像技术, 其基本原理是利用超声图像中自然存在的“斑点”作为心肌运动的示踪剂。这些斑点是由超声波与心肌组织微结构相互作用形成的独特声学特征。3D-STE 软件通过连续追踪这些斑点在心动周期中三维空间内的位移, 并应用复杂的算法, 计算出心肌在纵向、环向和径向 3 个方向上的应变和应变率参数。应变反映了心肌变形的程度, 而应变率则表示心肌变形的速度^[10]。

相较于传统的二维斑点追踪技术, 3D-STE 具有显著的优势。Saidova 等^[1]的研究强调, 3D-STE 能够一次性获取整个右心室的三维容积数据, 避免了二维斑点追踪技术因切面选择和跨平面斑点丢失带来的误差, 从而提供更准确、可重复的右心室容积和射血分数测量。尽管 Saidova 等^[1]主要关注左心室, 但其结论中提及 3D-STE 在 LVEF 评估和左心室变形分析方面优于二维斑点追踪超声心动图 (two-dimensional speckle tracking echocardiography, 2D-STE), 且这一原理同样适用于右心室。其次, 3D-STE 能够提供更全面的心肌变形信息, 包括 RVGLS、右心室整体面积应变 (right ventricular global area strain, RVGAS) 及 RVFWLS 等参数。这些参数能够更敏感地反映心肌的亚临床损伤, 甚至在传统指标 LVEF 下降之前就能检测到心肌功能的变化^[10-11]。

蒽环类药物化疗后, 乳腺癌患者右心室心肌应变参数普遍显著下降, 提示心肌收缩功能受损。万雅婷^[11]利用 3D-STE 技术研究发现, 化疗后患者 RVGLS、RVGAS 均显著降低, 且损害程度与药物累积剂量呈正相关; 朱小凤等^[12]对 46 例接受蒽环类药物化疗的乳腺癌患者行 3D-STE 检查, 结果显示化疗后 RVGLS、RVGAS 显著降低, 与化疗前及化疗 2 周期后数据相比差异显著, 凸显了 3D-STE 在监测化疗过程中右心室功能动态变化的价值。另有对 102 例乳腺癌患者的追踪研究则进一步证实该趋势, 发现化疗第 2、6 周期末, RVGAS、RVGLS 及 RVEF 均呈降低趋势^[13]; 王燕等^[14]在吡柔比星化疗对乳腺癌患者右心室心肌力学特性影响的研究中, 亦观察到化疗第 2、4、6 周期后 RVGLS、RVGAS 降低, 且其变化与药物累积剂量密切相关。彭悦等^[13]的研究进一步表明, 左心室整体纵向应变、RVGLS 及右心室游离壁心尖段纵向应变与药物剂量呈负相关, 且化疗后

LVEF、三维左心室射血分数、三维右心室射血分数、左心室整体纵向应变、RVFWLS 等参数均显著下降,这些研究共同为 3D-STE 量化化疗后右心室心肌应变参数变化的可靠性提供了坚实证据。此外,El-Sherbeny 等^[14]的前瞻性研究评估显示,蒽环类药物化疗后 6、9 个月,心脏毒性患者的 3D 右心室收缩末期容积、舒张末期容积显著增加,同时左心室整体纵向应变及 RVFWLS 显著下降,既提示心肌变形能力减退,也反映右心室容积改变,进一步印证了 3D-STE 在全面评估右心室功能中的优势。

在众多 3D-STE 应变参数中,RVFWLS 因可特异性反映右心室游离壁收缩功能,在蒽环类药物所致亚临床心脏毒性检测中具有独特价值。Xu 等^[15]的研究明确 3D-STE 可识别亚临床右心室功能障碍,且 3D RVFWLS 的变异在早期检测吡柔比星治疗乳腺癌患者的 CTRCD 中表现出优越性,其预测亚临床 CTRCD 的优势比为 1.37,当截断值为 -17.5% 时,预测准确性较高($AUC=0.74$,敏感度 0.805,特异度 0.658),提示 RVFWLS 作为早期生物标志物,可较传统指标更早捕捉心肌微小损伤。El-Sherbeny 等^[14]的研究进一步证实了 RVFWLS 的预测价值,发现其变异可分别以敏感度 0.830 和特异度 0.710 预测心脏毒性发生,这与 Xu 等^[15]研究的结果相互印证;相反,有研究则聚焦低心血管风险患者低剂量蒽环类药物治疗场景^[16],进一步凸显了 RVFWLS 作为早期预警指标的潜力。上述研究共同表明,3D RVFWLS 作为 3D-STE 的关键参数,可敏感、特异地反映蒽环类药物对右心室游离壁的损伤,并在亚临床阶段有效预测心脏毒性的发生,在乳腺癌化疗后右心室功能评估中具有重要临床应用价值。

除可敏感检测蒽环类药物化疗后右心室心肌应变参数的早期变化外,3D-STE 的部分参数还被证实具有预测化疗后右心室功能受损及不良心血管事件的潜力。Piveta 等^[17]的研究发现,3D-STE 可检测到应变参数变化,且该变化早于 LVEF 下降,尤其指出 3D 整体面积应变的早期改变与后续心脏毒性发生密切相关。朱小凤等^[13]对 46 例乳腺癌患者的研究进一步评估了 RVGLS 和 RVGAS 的预测价值,受试者工作特征(ROC)曲线分析显示,二者在预测右心室心肌受损方面具有高效能,其中 RVGLS 的敏感度为 0.731,特异度为 0.962, AUC 为 0.879, RVGAS 的敏感度为 0.900,特异度为 0.650, AUC 为 0.830,提示二者可作为临床早期监测右心室功能改变的重要手段;魏玉秀等^[18]的研究亦支持 RVGAS 和 RVGLS 在预测蒽环类药物诱导心脏毒性风险中的价值,发现化疗第 2 周期末,RVGAS 和 RVGLS 预测蒽环类药物诱导心脏毒性的敏感度、特异度分别为 0.778、0.829($AUC=0.88$)和 0.722、0.882($AUC=0.84$)。更重要的是,Francisco 等^[20]对 75 例接受化疗的乳腺癌患者的回顾性队列研究显示,化疗后 6 个月和 12 个月,患者右心室射血分数及整体纵向应变均存在显著差异,且异常的 RVGLS 与显性心力衰竭、全因死亡率及心血管死亡率增加密切相关,提示 RVGLS 不仅可早期检测心肌损伤,还具有重要预后预测价值,强调超声心动图监测 RVGLS 对指导化疗、改善临床结局及提高生存率至关重要。因此,3D-STE 的应变参数(尤其是

RVGLS、RVGAS 及 RVFWLS),不仅能敏感捕捉蒽环类药物化疗后右心室心肌力学特性的早期改变,在预测后续心脏毒性风险及不良心血管事件方面也具有显著临床价值。

2 三维斑点追踪成像技术的研究动态

2.1 3D-STE 与 2D-STE 的对比优势

2D-STE 是 3D-STE 的前身,在心肌变形分析方面已取得广泛应用。然而,3D 超声心动图在 LVEF 评估方面比 2D 更准确,且 3D-STE 测得的整体纵向应变值低于 2D-STE,并且整体面积应变作为一种新的应变参数,在检测亚临床心脏毒性方面其敏感度为 0.815,特异度为 0.733^[19]。这表明 3D-STE 在 LVEF 评估和左心室变形分析方面优于 2D 模式,其原理同样适用于右心室,能够克服 2D-STE 因切面选择和跨平面斑点丢失带来的误差,提供更全面的容积和变形信息。Zhang 等^[21]进行的一项全球 Meta 分析也评估了 3D-STE 在乳腺癌患者蒽环类药物化疗心脏毒性评估中的价值,发现化疗后 LVEF、整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)、整体环向应变、整体径向应变和整体面积应变均显著下降,这进一步强调了 3D-STE 在非侵入性评估心室功能变化和早期心肌损伤方面的有效性。相反,另有研究则对比了 2D-STE、实时三维超声心动图和组织多普勒成像在评估左心室功能障碍中的应用,提示了不同超声技术在检测心肌损伤方面的互补性^[22]。然而,考虑到右心室复杂的几何形状,3D-STE 在提供更准确容积和全局应变参数方面的优势是 2D-STE 难以比拟的。

2.2 3D-STE 在左右心室功能评估中的独立性与关联性

长期以来,右心室功能障碍常被认为是左心室功能不全的继发表现。然而,越来越多的研究表明,在肿瘤治疗相关心脏毒性中,右心室功能障碍可能具有一定的独立性,甚至可能早于左心室功能下降而出现。Faggiano 等^[23]的 Meta 分析发现,LVEF 与右心室应变变化之间没有显著关系,这提示右心室功能障碍可能并非单纯由左心室受损引起,而是蒽环类药物对右心室的直接毒性作用。有研究也支持了这一观点,发现左心室和右心室功能在化疗后均显著下降,且是同时发生的^[24]。这些发现挑战了传统观念,强调了独立评估右心室功能的重要性。

尽管右心室功能障碍可能具有独立性,但左右心室之间存在密切的解剖和生理联系,其功能相互影响。有研究评估了蒽环类药物化疗后三维左心室力学异常与收缩和舒张功能障碍的关系,发现蒽环类药物导致三维 LVEF、整体周向应变、GLS 和主应变等参数显著异常,且这些三维参数与后续的二维 LVEF 和收缩功能相关^[25]。这表明蒽环类药物对左心室的毒性作用同样显著,且 3D-STE 在评估左心室功能方面也表现出色。Guan 等^[24]的研究也利用 2D 和 3D 超声心动图检测 CTRCD,发现 LVEF、整体心肌做功指数和整体心肌做功效率在化疗 6 周期后显著变化,而 GLS 在化疗 4 周期后即发生显著变化,且 GLS 在预测心脏功能方面优于整体心肌做功指数。此外,还有研究也利用 3D-STE 评估蒽环类药物化疗后乳腺癌患者的左心室功能,发现 3D-STE 参数随蒽环类药物剂量的增加而降低,其中心肌做功指数下降最为显著,并被认为是早期检测左心室功能损害最敏感的指标^[26]。这些研究共同表明,3D-

STE 不仅在评估右心室功能方面具有独特优势,在左心室功能评估中也表现出色。在临床实践中,应同时关注左右心室功能的变化,并利用 3D-STE 提供更全面、更敏感的心肌变形信息,以更好地理解化疗相关心脏毒性的全貌。

2.3 3D-STE 与生物标志物的联合应用 除了影像学技术,生物标志物在早期检测心脏毒性方面也发挥着重要作用。将 3D-STE 与生物标志物联合应用,有望进一步提高心脏毒性检测的敏感度和特异性。Akbalaeva 等^[24]的研究比较了斑点追踪超声心动图和心脏特异性标志物在乳腺癌患者早期心脏毒性检测中的有效性,发现斑点追踪超声心动图(speckle tracking echocardiography, STE)和 N-末端脑钠肽前体均能有效检测早期心脏毒性,且 STE 显示出比心脏特异性标志物更高的敏感度;还指出 N-末端脑钠肽前体水平的升高与化疗后左心室整体纵向应变的变化相关,提示 STE 能够提供有价值的心肌变形信息,特别是 GLS,从而实现早期干预。另有研究进一步发现吡柔比星化疗后 RVGLS 和 RVGAS 降低,且与药物剂量相关;同时,高敏肌钙蛋白 I 水平增高,且 RVGLS、RVGAS 与 RVFAC、TAPSE、S' (表示组织多普勒收缩期峰值速度)等传统指标及高敏肌钙蛋白 I 水平存在相关性^[14]。这些结果表明,将 3D-STE 参数与心脏生物标志物相结合,可以为乳腺癌化疗患者的心脏毒性监测提供更全面、更准确的评估。生物标志物可以作为初步筛查或辅助诊断的工具,而 3D-STE 则能提供更精细的心肌力学信息,两者结合有助于实现更早、更精准的风险评估和干预。

2.4 预防与管理策略及 3D-STE 的指导作用 随着对乳腺癌化疗相关心脏毒性认识的不断深入,其预防与管理策略日趋完善,3D-STE 凭借高敏感性,在心脏毒性早期监测及指导临床策略实施中发挥着日益重要的作用。蒽环类药物心脏毒性防治中,心脏保护剂的应用为关键临床环节,右丙亚胺作为目前唯一获批用于预防该类药物治疗相关心脏毒性的药物,其心肌保护效果可通过 3D-STE 实现精准评估;研究发现,化疗可导致乳腺癌患者右心室心力学特性异常,而右丙亚胺可发挥潜在保护作用^[25];另有研究进一步证实,联用右丙亚胺者 RVGLS、RVGAS 降低程度显著低于对照组,明确其可减轻吡柔比星所致心肌损伤,3D-STE 为早期监测心脏毒性与评估保护剂疗效提供了客观依据^[26]。与此同时,在肿瘤治疗进展与患者生存期延长的背景下,肿瘤心脏病学作为新兴交叉学科逐步形成,核心在于全程关注肿瘤患者治疗相关心血管并发症;2023 版 CSCO 肿瘤心脏病学指南已拓展至肿瘤心脏病学范畴,强调对患者心血管风险实施全程管理,涵盖治疗前心血管风险评估,以及治疗中、治疗后化疗及免疫治疗相关心脏毒性的预防、诊断与干预,其中早期、敏感的心脏毒性监测是全程管理的关键环节^[27]。3D-STE 能够识别亚临床心肌损伤,与指南倡导的早期检测、早期干预理念高度契合,通过建立化疗前基线水平并在治疗中定期监测,可动态捕捉右心室心力学变化,为临床及时调整治疗方案、启动心脏保护措施提供依据,从而降低心脏毒性事件发生率,在优化心脏保护策略、平衡肿瘤治疗疗效与心血管安全、改善患者长期预后方面具有重要临床价值。

3 总结与展望

3D-STE 在乳腺癌化疗后右心室功能评估中仍存在明显的研究缺陷与临床应用局限。目前相关研究多为小样本设计,且研究方案、化疗方案、随访时长及患者基线资料存在明显异质性,导致研究结果可比性与外推性较差。虽已有研究提出 3D-STE 参数评估化疗相关心脏毒性的临界值,但目前尚无国际统一的诊断标准与量化阈值。同时,不同研究的影像采集设备、分析软件及检测方法不统一,难以实现结果标准化。此外,现有研究多聚焦化疗后 6~12 个月的中短期心功能变化,缺乏长期大样本随访数据,尚未明确 3D-STE 参数变化与患者远期心血管事件、远期生存率的关联。且 3D-STE 检出的亚临床右心室功能损伤,其对显性心力衰竭的预测价值及临床干预时机仍有待明确。

针对上述问题,未来研究应从以下方面展开:(1)开展多中心、大样本前瞻性研究,统一检测标准,建立规范化的心脏毒性诊断体系与预测模型;(2)延长随访时间,阐明 3D-STE 参数变化及亚临床心肌损伤对患者远期预后的评估价值;(3)推动 3D-STE 与其他影像学技术、新型心肌生物标志物联合应用,构建精准的评估体系;(4)结合人工智能开发自动化分析系统,降低人为误差,提升技术规范性与普及度;(5)依托 3D-STE 早期筛查优势,探索个体化化疗与心脏保护方案,平衡抗肿瘤疗效与心肌保护效果。通过上述研究可进一步提升 3D-STE 的临床应用价值,为乳腺癌化疗患者心脏毒性的精细化管理、改善远期预后提供参考依据。

参考文献

- [1] 邓曼,彭格红.超声心动图用于蒽环类药物乳腺癌化疗后右心室功能评估的研究进展[J].海南医学,2021,32(4):522-525. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6350.2021.04.031.
- [2] Han BF, Zheng RS, Zeng HM, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2022[J]. J Natl Cancer Cent, 2024, 4(1): 47-53. DOI: 10.1016/j.jncc.2024.01.006.
- [3] Theetha Kariyanna P, Kumar A, Jayarangaiah A, et al. Chemotherapy induced right ventricular cardiomyopathy: A systematic review and meta-analysis[J]. Front Cardiovasc Med, 2023, 10: 1103941. DOI: 10.3389/fcvm.2023.1103941.
- [4] Faggiano A, Gherbesi E, Giordano C, et al. Anthracycline-induced subclinical right ventricular dysfunction in breast cancer patients: A systematic review and meta-analysis[J]. Cancers (Basel), 2024, 16(22): 3883. DOI: 10.3390/cancers16223883.
- [5] Boczar KE, Aseyev O, Sulpher J, et al. Right heart function deteriorates in breast cancer patients undergoing anthracycline-based chemotherapy[J]. Echo Res Pract, 2016, 3(3): 79-84. DOI: 10.1530/erp-16-0020.
- [6] Rossetto L, Di Lisi D, Madaudo C, et al. Right ventricle involvement in patients with breast cancer treated with chemotherapy[J]. Cardiooncology, 2024, 10(1): 24. DOI: 10.1186/s40959-024-00224-2.
- [7] Piveta RB, Rodrigues ACT, Vieira MLC, et al. Early change in area strain detected by 3D speckle tracking is associated with subsequent cardiotoxicity in patients treated with low doses of anthracyclines[J]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9: 842532. DOI: 10.3389/fcvm.

- 2022.842532.
- [8] Saidova MA, Avalyan AA, Oshchepkova EV, et al. Comparative capabilities of the speckle-tracking echocardiography technologies in two-dimensional and three-dimensional modes in the detection of sub-clinical cardiotoxicity in patients with breast cancer [J]. Ter Arkh, 2020, 92 (12): 142-147. DOI: 10. 26442/00403660. 2020. 12.200431.
- [9] 宋红梅, 李华. 三维斑点追踪成像技术评估右心室功能进展 [J]. 中国现代医生, 2025, 63 (7): 120-123. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-9701.2025.07.030.
- [10] Xu H, Mao L, Liu H, et al. Assessment of subclinical deterioration of right ventricular function by three-dimensional speckle tracking echocardiography in breast cancer patients undergoing anthracycline-based chemotherapy [Erratum] [J]. Int J Gen Med, 2021, 14: 885-893. DOI: 10.2147/IJGM.S300257.
- [11] 万雅婷. 三维斑点追踪技术评价蒽环类药物对乳腺癌患者右室心肌损害 [D]. 荆州: 长江大学, 2021.
- [12] 朱小凤, 刘贝, 张金鑫, 等. 三维斑点追踪技术评估蒽环类药物对乳腺癌患者右室心肌功能的影响 [J]. 临床超声医学杂志, 2021, 23 (3): 191-194. DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-6978. 2021. 03.012.
- [13] Sanz J, Sánchez-Quintana D, Bossone E, et al. Anatomy, function, and dysfunction of the right ventricle: JACC state-of-the-art review [J]. J Am Coll Cardiol, 2019, 73 (12): 1463-1482. DOI: 10.1016/j.jacc.2018.12.076.
- [14] 王燕, 张平洋, 刘琨, 等. 三维斑点追踪成像技术评价乳腺癌患者接受吡柔比星化疗后右心室心肌力学特性改变 [J]. 南方医科大学学报, 2018, 38 (9): 1032-1038. DOI: 10.12122/j.issn.1673-4254.2018.09.02.
- [15] 但敏, 姜永生. 蒽环类药物心脏毒性早期检测研究进展 [J]. 华中科技大学学报: 医学版, 2025, 54 (2): 267-274. DOI: 10.3870/j.issn.1672-0741.24.11.005.
- [16] Gorgiladze N, Shavdia M, Gaprindashvili T, et al. Detection of cardiotoxicity using right ventricular free wall longitudinal strain in low cardiovascular risk breast cancer patients receiving low-dose anthracycline treatment [J]. Cureus, 2024, 16 (6): e63138. DOI: 10.7759/cureus.63138.
- [17] 魏玉秀, 张萌, 齐伟. 三维斑点追踪成像 (3D-STI) 在评价乳腺癌患者化疗后早期右室心肌力学特性的临床应用价值 [J]. 川北医学院学报, 2023, 38 (10): 1412-1415. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3697.2023.10.027.
- [18] 彭悦, 谢玉环, 陈桂武, 等. 蒽环类药物治疗乳腺癌患者左右心室心肌纵向力学的变化 [J]. 长春中医药大学学报, 2023, 39 (10): 1142-1145. DOI: 10.13463/j.cnki.czzy.2023.10.017.
- [19] El-Sherbeny WS, Sabry NM, El-Saied SB, et al. Detection of right ventricular dysfunction by three - dimensional echocardiography and two - dimensional speckle tracking in breast cancer patients receiving anthracycline-based chemotherapy [J]. Cardiooncology, 2023, 9 (1): 20. DOI: 10.1186/s40959-023-00169-y.
- [20] Francisco U, Cruz-Tan MK, Cornelio GT. Three dimensional speckle tracking echocardiography in breast cancer patients receiving chemotherapy: Incidence and clinical outcomes of subclinical right ventricular systolic dysfunction [J]. European Heart Journal, 2022, 43 (S2): ehac544.2581. DOI: 10.1093/eurheartj/ehac 544.2581.
- [21] Zhang L, Zhang R, Shuai P, et al. A global case meta-analysis of three-dimensional speckle tracking for evaluating the cardiotoxicity of anthracycline chemotherapy in breast cancer [J]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9: 942620. DOI: 10.3389/fcvm.2022.942620.
- [22] Niu H, Ma Z, Yang S, et al. Two-dimensional speckle tracking imaging and tissue doppler imaging can predict subclinical left ventricular systolic and diastolic dysfunctions after chemotherapy for breast cancer [J]. Am J Transl Res, 2025, 17 (2): 1087-1096. DOI: 10.62347/gwcj 5941.
- [23] Zhang KW, Finkelman BS, Gulati G, et al. Abnormalities in 3-dimensional left ventricular mechanics with anthracycline chemotherapy are associated with systolic and diastolic dysfunction [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2018, 11 (8): 1059-1068. DOI: 10.1016/j.jcmg.2018.01.015.
- [24] Guan J, Bao W, Xu Y, et al. Assessment of myocardial work in cancer therapy-related cardiac dysfunction and analysis of CTRCD prediction by echocardiography [J]. Front Pharmacol, 2021, 12 (11): 770580. DOI: 10.3389/fphar.2021.770580.
- [25] Lu S, Sun Y, Li Q, et al. Three-dimensional speckle-tracking echocardiography to evaluate left ventricular function of patients with breast cancer after anthracycline chemotherapy [J]. Altern Ther Health Med, 2023, 29: 388-393.
- [26] Akbalaeva B, Khan S, Singh P, et al. Comparative analysis of speckle-tracking echocardiography and cardio-specific markers for early detection of cardiotoxicity in patients with breast cancer [J]. J Saudi Heart Assoc, 2025, 37 (2): 13. DOI: 10.37616/2212-5043.1430.
- [27] 王燕. 三维斑点追踪超声成像评价乳腺癌患者蒽环类药物化疗后右心室心肌力学特性及其在右丙亚胺应用后改变 [D]. 南京: 南京医科大学第三临床医学院, 2019.
- [28] Wang Y, Lu C, Li H, et al. 3D-STI evaluation of the effect of dexrazoxane on the mechanical properties of right ventricular myocardium in breast cancer patients treated with pirarubicin [J]. Ann Palliat Med, 2020, 9 (3): 1187-1197. DOI: 10.21037/apm-20-1074.
- [29] 孙涛. 2023 版 CSCO 肿瘤心脏病学指南中化疗及免疫治疗心脏毒性的更新要点解读 [J]. 实用肿瘤学杂志, 2023, 38 (5): 434-439. DOI: 10.13267/j.cnki.syzlzz.2023.068.

(收稿日期: 2026-04-20)